(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2007-139788
(P2007-139788A)
(43)公開日　平成19年6月7日(2007.6.7)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
G01N 29/04	(2006.01)	G01N	29/10	506	2G047
G01N 29/12	(2006.01)	G01N	29/12		

審査請求 有　請求項の数 33　書面　（全 177 頁）

(21)出願番号　特願2006-320868 (P2006-320868)
(22)出願日　平成18年10月30日 (2006.10.30)
(62)分割の表示　特願2003-549903 (P2003-549903)の分割
原出願日　平成13年11月30日 (2001.11.30)

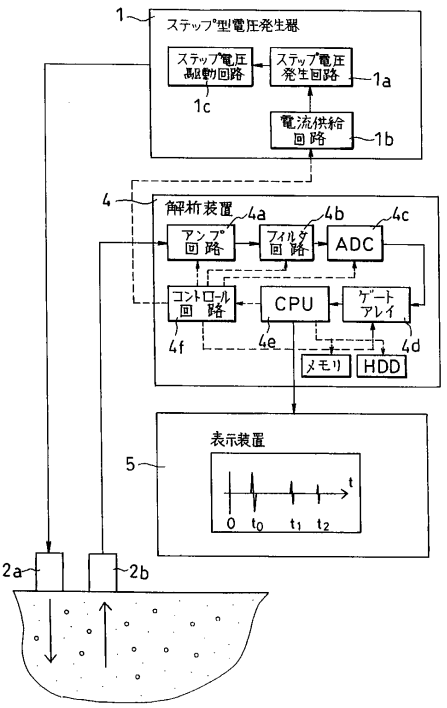
特許法第３０条第１項適用申請有り

(71)出願人　599074866
廣瀬　正行
東京都葛飾区亀有１丁目１０番１３－３０８号
(74)代理人　100090158
弁理士　藤巻　正憲
(72)発明者　廣瀬　正行
東京都葛飾区亀有１丁目１０番１３－３０８号

Ｆターム(参考)　2G047 AA06 AA10 BA04 BC04 CA01 GB03 GG12 GG17 GG38

(54)【発明の名称】超音波探知装置及びそれを使用した超音波探知方法

(57)【要約】
【課題】コンクリート等の内部探知を高精度に行うことができる超音波探知装置及びそれを使用した超音波探知方法を提供する。
【解決手段】発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段が設けられている。また、ｊをｎＡ以下の自然数とし、各加算平均を時間の関数G_j（ｔ）で表現した場合に、その関数G_j（ｔ）に対し所定の時系列フィルタを乗じることにより、所定の数式の演算を行う時系列フィルタリング手段が設けられている。更に、時系列フィルタ手段に含まれる変数毎に表示する表示装置が設けられている。時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝ｔＴ＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数である。
【選択図】図５



【特許請求の範囲】
【請求項１】
発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0 = \alpha \times V / \phi$の演算を行う周波数演算手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1^{n1}(f)$及び$A_2^{n2}(f)$に対して、$A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)$（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、$GA_j(t)$と$GA_{j+1}(t)$との位相差$\Delta t_i$及び外部から与えられた重み係数$\rho_{i+1}$に基づいて数式$GA_0(t) = \dfrac{\left(GA_i(t) + \sum_{i=1,nA}\rho_{i+1}\cdot GA_{i+1}(t+\sum_{i=1,nA}\Delta t_i)\right)}{nA}$の演算を行う平均化手段と、前記平均化手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする超音波探知装置。
【請求項２】
発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記加算平均手段により得られたｎＡ個の加算平均の総加算平均を$G_0(t)$として求める総加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記総加算平均を$G_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_0(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1^{n1}(f)$及び$A_2^{n2}(f)$に対して、$A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_0(f)$（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が予め設定された値となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式$GA_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_0(f)\cdot e^{i\omega t})df$を演算するフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする超音波探知装置。
【請求項３】
前記予め設定された値は、周波数の関数である音速補正係数をγ、前記発信探触子及び受信探触子の間隔の変更量をΔａ、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$\gamma \times V / (2 \times \Delta a)$で与えられることを特徴とする請求項２に記載の超音波探知装置。
【請求項４】
前記表示装置は、ｎＡの値が１だけ異なる２種の$GA_0(t)$を同時に表示することができることを特徴とする請求項１に記載の超音波探知装置。
【請求項５】
前記$GA_0(t)$に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}(t)$（ｎ５は自然数）を乗じる時系列フィルタリング手段と、前記$GA_0(t)$を$FiLT^{n5}(t)\cdot GA_0(t)$に置換する置換手段と、を有することを特徴とする請求項１又は２に記載の超音波探知装置。
【請求項６】

前記GA_j（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じる時系列フィルタリング手段と、前記GA_j（ｔ）を$FiLT^{n5}$（ｔ）・GA_j（ｔ）に置換する置換手段と、を有することを特徴とする請求項１に記載の超音波探知装置。

【請求項７】

前記時系列フィルタは、t_Tを探知目標とする波の起生時刻としたとき、ｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする請求項５又は６に記載の超音波探知装置。

【請求項８】

前記時系列フィルタは、t_Tを探知目標とする波の起生時刻としたとき、ｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０となり、$0 \leqq t \leqq t_T$において単調に増加し、$t > t_T$で単調に減少する関数であることを特徴とする請求項５又は６に記載の超音波探知装置。

【請求項９】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、被探知体における表面波とたて波との音速比をβ_L、前記発信探触子及び受信探触子の間隔の変更量をΔａ、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_{R1} = \beta_L \times V /（2 \times \Delta a）$の演算を行う周波数演算手段と、ｊを１又は２とし、前記各加算平均を

$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1{}^{n1}$（ｆ）及び$A_2{}^{n2}$（ｆ）に対して、$A_1{}^{n1}$（ｆ）・$A_2{}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数がf_{R1}となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式

$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする超音波探知装置。

【請求項１０】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0 = \alpha \times V / \phi$の演算を行う周波数演算手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1{}^{n1}$（ｆ）及び$A_2{}^{n2}$（ｆ）に対して、$A_1{}^{n1}$（ｆ）・$A_2{}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２

に基づいて数式$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段

と、前記GA_j（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を

乗じることにより、数式$GB_j(t) = FiLT^{n5}(t)\cdot GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記${}_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする超音波探知装置。

【請求項１１】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0 = \alpha \times V / \phi$及び数式$f_s = V /（\pi \times \phi）$の演算を行う周波数演算手段と、数式$n \times f_s < f_0$を満たす最大の自然数ｎを決定するｎ値決定手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、

任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1^{n1}（f）$及び$A_2^{n2}（f）$に対して、$A_1^{n1}（f）\cdot A_2^{n2}（f）\cdot F_j（f）$（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0又はf_sとなるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、

決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算

を行うフーリエ変換手段と、前記$GA_j（t）$に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}（t）$（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式

$GB_j(t) = FiLT^{n5}(t)\cdot GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段

と、前記$FiLT^{n5}（t）\cdot GA_j（t）$及び${}_{n5}FA_j（f）$を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、$t = t_T$で最大値１．０、$t = t_T - \Delta t$以前の時刻及び$t = t_T + \Delta t$以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする超音波探知装置。

【請求項１２】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、

前記各加算平均を$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の周波数フィルタ$A_2^{n2}（f）$に対して、ｎ２を１０以下の自然数として、数式

$HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_2^{n2}\cdot\frac{F_j}{F_j}(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、前記$HA_j（t）$に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}（t）$（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式

$HB_j(t) = FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段

と、前記${}_{n5}FA_j（f）$を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、$t = t_T$で最大値１．０、$t = t_T - \Delta t$以前の時刻及び$t = t_T + \Delta t$以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする超音波探知装置。

【請求項１３】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、

前記各加算平均を$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、前記$G_j（t）$に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}（t）$（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式

$GB_j(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left({}_{n5}FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$ の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記${}_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする超音波探知装置。

【請求項１４】

前記表示装置は、前記GB_j（ｔ）を自然数乗したものを表示することができることを特徴とする請求項１０、１１又は１３に記載の超音波探知装置。

【請求項１５】

前記表示装置は、前記HB_j（ｔ）を自然数乗したものを表示することができることを特徴とする請求項１２に記載の超音波探知装置。

【請求項１６】

前記G_j（ｔ）、GA_j（ｔ）及びGB_j（ｔ）からなる群から選択された１の関数をP_j（ｔ）と表現し、ＪＡをｎＡ以下の自然数とし、P_j（ｔ）（１≦ｊ≦ＪＡ）の中で最も大きい振幅の絶対値を$|{}_{max}P|$とし、各P_j（ｔ）の最大の振幅の絶対値を$|{}_{max}P_j|$としたときに、予め定められたβに対して、$|{}_{max}P| \leqq \beta \cdot |{}_{max}P_j|$を満足する$P_j$（ｔ）を$|{}_{max}P| / |{}_{max}P_j| \times P_j$（ｔ）に置換する置換手段を有することを特徴とする請求項１０又は１１に記載の超音波探知装置。

【請求項１７】

前記G_j（ｔ）及びGB_j（ｔ）からなる群から選択された１の関数をP_j（ｔ）と表現し、ＪＡをｎＡ以下の自然数とし、P_j（ｔ）（１≦ｊ≦ＪＡ）の中で最も大きい振幅の絶対値を$|{}_{max}P|$とし、各P_j（ｔ）の最大の振幅の絶対値を$|{}_{max}P_j|$としたときに、予め定められたβに対して、$|{}_{max}P| \leqq \beta \cdot |{}_{max}P_j|$を満足する$P_j$（ｔ）を$|{}_{max}P| / |{}_{max}P_j| \times P_j$（ｔ）に置換する置換手段を有することを特徴とする請求項１３に記載の超音波探知装置。

【請求項１８】

前記G_j（ｔ）、H_j（ｔ）、HA_j（ｔ）及びHB_j（ｔ）からなる群から選択された１の関数をP_j（ｔ）と表現し、ＪＡをｎＡ以下の自然数とし、P_j（ｔ）（１≦ｊ≦ＪＡ）の中で最も大きい振幅の絶対値を$|{}_{max}P|$とし、各P_j（ｔ）の最大の振幅の絶対値を$|{}_{max}P_j|$としたときに、予め定められたβに対して、$|{}_{max}P| \leqq \beta \cdot |{}_{max}P_j|$を満足する$P_j$（ｔ）を$|{}_{max}P| / |{}_{max}P_j| \times P_j$（ｔ）に置換する置換手段を有することを特徴とする請求項１２に記載の超音波探知装置。

【請求項１９】

前記F_j（ｆ）、${A_1}^{n1}$（ｆ）・${A_2}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）及び${}_{n5}FA_j$（ｆ）からなる群から選択された１の関数をPF_j（ｆ）と表現し、ＪＡをｎＡ以下の自然数とし、PF_j（ｆ）（１≦ｊ≦ＪＡ）の中で最も大きいスペクトル値の絶対値を${}_{max}S$とし、各PF_j（ｆ）の最大のスペクトル値の絶対値を${}_{max}S_j$としたときに、予め定められたβに対して、${}_{max}S \leqq \beta \cdot {}_{max}S_j$を満足する$PF_j$（ｆ）を${}_{max}S / {}_{max}S_j \times PF_j$（ｆ）に置換する置換手段を有することを特徴とする請求項１０又は１１に記載の超音波探知装置。

【請求項２０】

前記F_j（ｆ）及び${}_{n5}FA_j$（ｆ）からなる群から選択された１の関数をPF_j（ｆ）と表現し、ＪＡをｎＡ以下の自然数とし、PF_j（ｆ）（１≦ｊ≦ＪＡ）の中で最も大きいスペクトル値の絶対値を${}_{max}S$とし、各PF_j（ｆ）の最大のスペクトル値の絶対値を${}_{max}S_j$としたときに、予め定められたβに対して、${}_{max}S \leqq \beta \cdot {}_{max}S_j$を満足する$PF_j$（ｆ）を${}_{max}S / {}_{max}S_j \times PF_j$（ｆ）に置換する置換手段を有することを特徴とする請求項１２又は１３に記載の超音波探知装置。

【請求項２１】

発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、他の補正係数をα_2、補正係数α２を求めたときの被探知体の音速をV_{ST}、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0=\alpha\times V/\varphi$及び数式$f_D=\alpha_2\times V/V_{ST}$の演算を行う周波数演算手段と、$f_0<f_D$の場合に$(f_0+f_D)/2$で与えられる値を$f_w$とし、$f_0\geqq f_D$の場合に$f_D$を$f_w$とする中心周波数決定手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を

$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_wとなるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式

$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、少なくとも

前記フーリエ変換手段により得られたGA_1（ｔ）及びGA_2（ｔ）を自然数ｎｐ乗することにより、GA_1^{np}（ｔ）及びGA_2^{np}（ｔ）として表示する表示装置と、を有することを特徴とする超音波探知装置。

【請求項２２】

前記GA_j（ｔ）（ｊは１又は２）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じる時系列フィルタリング手段と、前記GA_j（ｔ）を$FiLT^{n5}$（ｔ）・GA_j（ｔ）に置換する置換手段と、を有し、前記時系列フィルタは、被探知体の厚さ又は探知目標物までの距離をｄとしたとき、２×ｄ／Ｖで与えられるt_Tに関し、ｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする請求項２１に記載の超音波探知装置。

【請求項２３】

前記表示装置は、前記GA_1^{np}（ｔ）の最大の振幅の絶対値を$|max\ P_1|$とし、前記GA_2^{np}（ｔ）の最大の振幅の絶対値を$|max\ P_2|$としたとき、$|max\ P_1|\geqq|max\ P_2|$であれば、$GA_1^{np}$（ｔ）／$|max\ P_1|$及び$GA_2^{np}$（ｔ）／$|max\ P_1|$を最大振幅値を１．０に標準化して表示し、$|max\ P_1|<|max\ P_2|$であれば、$GA_1^{np}$（ｔ）／$|max\ P_2|$及び$GA_2^{np}$（ｔ）／$|max\ P_2|$を最大振幅値を１．０に標準化して表示することを特徴とする請求項２１に記載の超音波探知装置。

【請求項２４】

前記表示装置は、GA_1^{np}（ｔ）を画面から消去することを特徴とする請求項２３に記載の超音波探知装置。

【請求項２５】

前記ｔＴの値は、被探知体の厚さ又は探知目標物までの距離をｄとしたとき、２×ｄ／Ｖ又は$(2\times d/V+\beta_2/f_0)$（$0\leqq\beta_2\leqq2$）で与えられることを特徴とする請求項１０乃至１３のいずれか１項に記載の超音波探知装置。

【請求項２６】

前記ｔＴの値は、前記発信探触子から探知目標までの路程をたて波で伝達し前記標知目標から前記受信探触子までの路程をよこ波で伝達する波の受信予測時刻、前記発信探触子から前記探知目標までの路程をよこ波で伝達し前記標知目標から前記受信探触子までの路程をたて波で伝達する波の受信予測時刻、及び前記発信探触子から前記探知目標を経由して前記受信探触子までの路程をよこ波で伝達する波の受信予測時刻からなる群から選択された１の受信予想時刻であることを特徴とする請求項１０又は１３に記載の超音波探知装置。

【請求項２７】

前記t_Tの値は、前記発信探触子と前記受信探触子との間隔をａ、たて波の音速をV_P、表面を伝達する波の音速をV_Lとしたとき、ａ／V_P又は／V_Lで与えられることを特徴とする請求項１０又は１３に記載の超音波探知装置。

【請求項２８】

前記ＦｉＬＴ（ｔ）をｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数に置換するフィルタ置換手段を有することを特徴とする請求項１０乃至１３のいずれか１項に記載の超音波探知装置。

【請求項２９】

前記ＦｉＬＴ（ｔ）をｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、０≦ｔ≦t_Tの範囲で単調に増加し、ｔ＞t_Tの範囲で単調に減少する関数に置換するフィルタ置換手段を有することを特徴とする請求項１０乃至１３のいずれか１項に記載の超音波探知装置。

【請求項３０】

前記F_j（ｆ）に基づいて$H_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{F_j}{F_j}(f)\cdot e^{iwt}\right)df$の演算を行う第２のフーリエ変換手段

と、前記G_j（ｔ）を前記H_j（ｔ）に置換するフーリエスペクトル変換手段と、を有することを特徴とする請求項１、２、９、１０、１１又は１３に記載の超音波探知装置。

【請求項３１】

前記F_j（ｆ）に基づいて$R_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{1}{F_j}(f)\cdot e^{iwt}\right)df$の演算を行う第２のフーリエ変換手段

と、前記G_j（ｔ）を前記H_j（ｔ）に置換するフーリエスペクトル変換手段と、を有することを特徴とする請求項１、２又は９に記載の超音波探知装置。

【請求項３２】

請求項１０に記載の超音波探知装置を使用した超音波探知方法において、コンクリートに互いに平行に埋め込まれた鉄筋のかぶり厚をd_Rとしたとき、前記発信探触子と前記受信探触子との間隔を３×d_R以上とし、１回の加算平均を得るために前記発信探触子と前記受信探触子と結ぶ線分を前記鉄筋の長手方向と平行になるように位置させ、加算平均毎に前記線分を前記鉄筋の長手方向に対して垂直な方向に平行移動させて前記発信探触子及び受信探触子の位置を配置し直す工程と、を有することを特徴とする超音波探知方法。

【請求項３３】

請求項１０に記載の超音波探知装置を使用した超音波探知方法において、コンクリートに埋め込まれた鉄骨のかぶり厚をd_Sとしたとき、前記発信探触子と前記受信探触子との間隔を３×d_S以上とし、１回の加算平均を得るために前記発信探触子と前記受信探触子と結ぶ線分を前記鉄骨上に位置させ、加算平均毎に前記線分上で前記発信探触子及び受信探触子の位置を変更することを特徴とする超音波探知方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、コンクリートに埋め込まれた鉄筋等の埋め込み物を検知するのに好適な超音波探知装置及びそれを使用した超音波探知方法に関し、特に、探知精度の向上を図った超音波探知装置及びそれを使用した超音波探知方法に関する。

【背景技術】

【０００２】

近時、コンクリート構造物の耐震補強方法の１つとして、橋梁の柱及びトンネルの内壁等を鉄皮又はコンクリート製のかた板等で巻き、これと既設コンクリートとの間にモルタル又はコンクリートを抽入する方法がある。この方法で重要なことは、モルタル等が完全に充填されることである。現状では、鉄皮等の表面をハンマー等で打撃し、その打撃音の

変化を工事作業員が確認することで、完全に充填されているか否かの判断がされている。
【０００３】
しかしながら、このような方法では、工事作業員の判断における個人差があるため、正確な充填確認が行われるとはいえない。また、モルタル等の充填度、即ち充填の疎密の判断は打音検査ではほとんど不可能である。
【０００４】
そこで、帯域が広い超音波をモルタル等の被探知体に入力し、その近傍で超音波を得ることにより、充填度等を検知する方法が検討されている。この方法では、超音波を任意の周期で連続して発振し、発振波毎に得る受信波から加算平均波を求めている。この従来の超音波探知方法では、探触子の走査方法、被探知体の音速、使用探触子の直径、探触子が１個であるか２個であるか、及び探知距離の組み合わせに応じて、探知妨害波の強度が最も小さく、かつ探知目標物を経由した波が最も大きく励起する超音波の周波数がある。そして、このような周波数を最適周波数と名付け、これを理論的に特定可能な新たなる探知法が巨視的探知理論として認知され始めている。前記最適周波数を中心にして、前記加算平均波から探知目的に応じて、狭帯域又は広帯域成分波を抽出すれば、探知目標物からの反射波又は回折迂回波を特定できるわけである。
【０００５】
【特許文献１】特開２０００－０８８８１９
【特許文献２】特開平９－２６９２１５号
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【０００６】
しかしながら、探知目標物によっては、上述のような従来の探知方法のみでは、探知することができないか、できたとしても極めて困難になる場合がある。例えば、極めて薄い鉄皮の厚さ並びにこの下に存在する空隙及びモルタルの厚さを同時に測定する際に、上述のような不具合が生じる。また、積層材境界の剥離の有無の探知の際にも、上述のような不具合が生じる。
【０００７】
図１に示すかぶり厚２３ｃｍで径１９ｍｍの鉄筋の探知において振動子径φ＝４０ｍｍ、共振振動数５００ｋＨｚよりなる１対の発信及び受信探触子を用い、２５ｃｍ長さのライン走査を行った結果を図２に示す。探触子間隔を６０ｍｍに保守しながら、鉄筋直上で探触子を鉄筋長手方向に移動させ、この移動の間連続して超音波をコンクリートに入力し、１０００個の受信波を収録し、これら受信波の加算平均波Ｇ（ｔ）より１００ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ（ｔ）を取り出しＧＡ^2（ｔ）表示したものである。なお、発信探触子内の振動子に積荷する電圧はステップ関数型とし、広帯域超音波が出力できる探触子を用いた。
【０００８】
ｃが鉄筋、ｄが厚さに関する反射波である。ａは発信と受信探触子との間でコンクリート表面を伝達するたて波及び、表面波と直接波の重畳波である。ｂはコンクリート内を深くもぐって伝達する直接波である。さて、一般に探知目標波の路程は未知量である。これより、ａ及びｂが妨害波なのか、有意の反射波なのかの判断は不可能ではないが、専門的工学的思考を要する。この判断を容易に行い得る方法が、コンクリートの内部探知を正確に行う上で必要とされている。
【０００９】
本発明はかかる問題点に鑑みなされたものであって、コンクリート等の内部探知を高精度に行うことができる超音波探知装置及びそれを使用した超音波探知方法を提供することを目的とする。
【課題を解決するための手段】
【００１０】
本発明に係る第１の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ

変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0 = \alpha \times V / \phi$の演算を行う周波数演算手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を

$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$ と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式

$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$ の演算を行うフーリエ変換手段と、GA_j（ｔ）とGA_{j+1}（ｔ）との位相差Δt_i及び外部から与えられた重み係数ρ_{i+1}に基づいて数式 $GA_0(t) = \dfrac{\left(GA_i(t) + \sum_{i=1,nA}\rho_{i+1}\cdot GA_{i+1}(t + \sum_{i=1,nA}\Delta t_i)\right)}{nA}$ の演算を行う平均化手段と、前記平均化手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする。

【００１１】

本発明に係る第２の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記加算平均手段により得られたｎＡ個の加算平均の総加算平均をG_0（ｔ）として求める総加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記総加算平均を

$G_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_0(f)\cdot e^{i\omega t})df$ と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_0（ｆ）（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が予め設定された値となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて

数式 $GA_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_0(f)\cdot e^{i\omega t})df$ を演算するフーリエ変換手段と、前記フーリエ変換手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする。

【００１２】

本発明に係る第３の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定量ずつ変更しながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、被探知体における表面波とたて波との音速比をβ_L、前記発信探触子及び受信探触子の間隔の変更量をΔa、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_{R1} = \beta_L \times V / (2 \times \Delta a)$の演算を行う周波数演算手段と、ｊを１又は２とし

、前記各加算平均を $G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$ と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１は２又は４、ｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が

f_{R1}となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基

づいて数式$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、

前記フーリエ変換手段により得られた結果を自然数乗して表示する表示装置と、を有することを特徴とする。

【００１３】

本発明に係る第４の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0=\alpha\times V/\varphi$の演算を行う周波数演算手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を

$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0となるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式

$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、前記$GA_j$（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式$GB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記${}_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする。

【００１４】

本発明に係る第５の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0=\alpha\times V/\varphi$及び数式$f_s=V/(\pi\times\varphi)$の演算を行う周波数演算手段と、数式$n\times f_s<f_0$を満たす最大の自然数ｎを決定するｎ値決定手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を

$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）に対して、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_0又はf_sとなるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及びｎ２に基づいて数式

$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、前記$GA_j$（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式$GB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記$FiLT^{n5}$（ｔ）・$GA_j$（ｔ）及び${}_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎

に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする。

【００１５】

本発明に係る第６の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の周波数フィルタ$A_2{}^{n2}$（ｆ）に対して、ｎ２を１０以下の自然数と

して、数式$HA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_2^{n2}\cdot\frac{F_j}{F_j}(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、前記$HA_j$（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式$HB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記$_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする。

【００１６】

本発明に係る第７の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、前記$G_j$（ｔ）に対し所定の時系列フィルタ$FiLT^{n5}$（ｔ）（ｎ５は自然数）を乗じることにより、数式$GB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left({}_{n5}FA_j(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$の演算を行う時系列フィルタリング手段と、前記$_{n5}FA_j$（ｆ）を前記ｎ５毎に表示する表示装置と、を有し、前記時系列フィルタは、所定値t_T及びΔｔに対し、ｔ＝t_Tで最大値１．０、ｔ＝t_T－Δｔ以前の時刻及びｔ＝t_T＋Δｔ以降の時刻で０となる正弦関数であることを特徴とする。

【００１７】

本発明に係る第８の超音波探知装置は、発信探触子と受信探触子との間隔を一定に保ちながら超音波を受信する毎にそれまでに受信した超音波との加算平均をｎＡ回求める加算平均手段と、前記発信探触子と前記受信探触子との中心を結ぶ線分上における前記発信探触子及び受信探触子の被探知体に接する部位の幅をφ、探触子間距離に依存する補正係数をα、他の補正係数をα_2、補正係数α２を求めたときの被探知体の音速をV_{ST}、被探知体におけるたて波の音速をＶとしたときに、数式$f_0=\alpha\times V/\phi$及び数式$f_D=\alpha_2\times V/V_{ST}$の演算を行う周波数演算手段と、$f_0<f_D$の場合に（$f_0+f_D$）／２で与えられる値を$f_w$とし、$f_0\geqq f_D$の場合に$f_D$を$f_w$とする中心周波数決定手段と、ｊをｎＡ以下の自然数とし、前記各加算平均を$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$と表現した場合に、任意の第１及び第２の周波数フィルタ$A_1{}^{n1}$（ｆ）及び$A_2{}^{n2}$（ｆ）に対して、$A_1{}^{n1}$（ｆ）・$A_2{}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）（ｎ１及びｎ２は０以上の整数）のスペクトルの中心周波数が前記f_wとなるように前記ｎ１及びｎ２の値を決定する乗数決定手段と、決定されたｎ１及

びｎ２に基づいて数式$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$の演算を行うフーリエ変換手段と、少なくとも前記フーリエ変換手段により得られたＧＡ$_1$（ｔ）及びＧＡ$_2$（ｔ）を自然数ｎｐ乗することにより、ＧＡ$_1$^{np}（ｔ）及びＧＡ$_2$^{np}（ｔ）として表示する表示装置と、を有することを特徴とする。

【００１８】

本発明に係る第１の超音波探知方法は、上述の第４の超音波探知装置を使用した超音波探知方法において、コンクリートに互いに平行に埋め込まれた鉄筋のかぶり厚をｄ$_R$としたとき、前記発信探触子と前記受信探触子との間隔を３×ｄ$_R$以上とし、１回の加算平均を得るために前記発信探触子と前記受信探触子と結ぶ線分を前記鉄筋の長手方向と平行になるように位置させ、加算平均毎に前記線分を前記鉄筋の長手方向に対して垂直な方向に平行移動させて前記発信探触子及び受信探触子の位置を配置し直す工程と、を有することを特徴とする。

【００１９】

本発明に係る第２の超音波探知方法は、上述の第４の超音波探知装置を使用した超音波探知方法において、コンクリートに埋め込まれた鉄骨のかぶり厚をｄ$_S$としたとき、前記発信探触子と前記受信探触子との間隔を３×ｄ$_S$以上とし、１回の加算平均を得るために前記発信探触子と前記受信探触子と結ぶ線分を前記鉄骨上に位置させ、加算平均毎に前記線分上で前記発信探触子及び受信探触子の位置を変更することを特徴とする。

【発明の効果】

【００２０】

本発明によれば、コンクリート等の内部探知を高精度に行うことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２１】

以下、本発明の実施例に係る超音波探知方法について、添付の図面を参照して具体的に説明する。

【００２２】

先ず、各実施例で用いる３種の周波数フィルタを定義する。

【００２３】

第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）は、数式１で表される任意の関数Ｐ（ｔ）に対して、数式２で表される関数ＰＡ（ｔ）を作成するためのフィルタであり、図３に示すように、分析周波数の上限をｆｍａｘとする正弦関数である。

【００２４】

【数１】

$$P(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(F(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$$

【００２５】

【数２】

$$PA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^{n1}(f)\cdot F(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$$

ここで、ｎ１は自然数である。

【００２６】

第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）は、数式１で表される任意の関数Ｐ（ｔ）に対して、数式３で表される関数ＰＡ（ｔ）を作成するためのフィルタであり、図３に示すように、分析周波数の上限をｆｍａｘとする余弦関数である。

【００２７】

【数３】

$$PA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_2^{n2}(f)\cdot F(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

ここで、ｎ２は自然数である。

【００２８】

第３の周波数フィルタＡ$_3$（ｆ）は、数式１で表される任意の関数Ｐ（ｔ）に対して、数式４で表される関数ＰＡ（ｔ）を作成するためのフィルタであり、図４に示すように、周波数ｆ$_A$、２ｆ$_A$、３ｆ$_A$、…、ｎｆ$_A$で最大値１．０となる正弦関数の絶対値で表される。

【００２９】

【数４】

$$PA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n3}(f)\cdot F(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

ここで、ｎ３は自然数である。

【００３０】

なお、上述の関数ＰＡ（ｔ）は、次のような演算処理により短時間で求めることができる。

【００３１】

第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）については、Δｔ＝１／（２×ｆｍａｘ）として、数式５乃至数式７から関数Ｐ$_{n1}$（ｔ）を求め、これを関数ＰＡ（ｔ）とすることができる。

【００３２】

【数５】

$$P_1(t)=\frac{1}{2}\left(P(t)-P(t-\Delta t)\right)$$

【００３３】

【数６】

$$P_{n1}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n1-1}(t)-P_{n1-1}(t-\Delta t)\right)$$

【００３４】

【数７】

$$P_{n1}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n1-1}(t)-P_{n1-1}(t+\Delta t)\right)\qquad(\text{ｎ１が偶数})$$

【００３５】

第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）については、Δｔ＝１／（２×ｆｍａｘ）として、数式８乃至数式１０から関数Ｐ$_{n2}$（ｔ）を求め、これを関数ＰＡ（ｔ）とすることができる。

【００３６】

【数８】

$$P_1(t)=\frac{1}{2}\left(P(t)+P(t-\Delta t)\right)$$

【００３７】

【数９】

$$P_{n2}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n2-1}(t)+P_{n2-1}(t-\Delta t)\right) \qquad (n2が奇数)$$

【００３８】

【数１０】

$$P_{n2}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n2-1}(t)+P_{n2-1}(t+\Delta t)\right) \qquad (n2が偶数)$$

【００３９】

第３の周波数フィルタA_3（ｆ）については、Δｔ＝１／（２×f_A）として、数式１１乃至数式１３から関数P_{n3}（ｔ）を求め、これを関数ＰＡ（ｔ）とすることができる。

【００４０】

【数１１】

$$P_1(t)=\frac{1}{2}\left(P(t)-P(t-\Delta t)\right)$$

【００４１】

【数１２】

$$P_{n3}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n3-1}(t)-P_{n3-1}(t-\Delta t)\right) \qquad (n3が奇数)$$

【００４２】

【数１３】

$$P_{n3}(t)=\frac{1}{2}\left(P_{n3-1}(t)-P_{n3-1}(t+\Delta t)\right) \qquad (n3が偶数)$$

【００４３】

次に、本発明の第１の実施例について説明する。図５は本発明の各実施例に使用する超音波探知装置を示すブロック図である。

【００４４】

この超音波探知装置には、ステップ型電圧を外部に印加するステップ型電圧発生器１、このステップ型電圧発生器１から印加されたステップ型電圧を受け被探知材に超音波を発信する発信探触子２ａ、被探知材内部からの反射波等を受信しこれを電気信号に変換する受信探触子２ｂ、この受信探触子２ｂにより得られた電気信号を解析する解析装置４及びこの解析装置４による解析結果及びステップ型電圧発生器１により発生されたステップ型電圧の波形を表示する表示装置５が設けられている。

【００４５】

ステップ型電圧発生器１には、ステップ型電圧を発生するステップ電圧発生回路１ａ、制御された間隔でステップ電圧発生回路１ａに電流を供給する電流供給回路１ｂ及びステップ型電圧をステップ型電圧発生器１の外部に送り出すステップ電圧駆動回路１ｃが設けられている。なお、ステップ型電圧発生回器１からは、例えば５００Ｖのステップ型電圧が発生される。

【００４６】

また、解析装置４には、受信された電気信号を増幅するアンプ回路４ａ、増幅された信号にフィルタをかけるフィルタ回路４ｂ、フィルタをかけられた信号を変換するアナログ／デジタルコンバータ（ＡＤＣ）４ｃ、ゲートアレイ（加算平均器）４ｄ及び中央処理装置（ＣＰＵ）４ｅが設けられている。ゲートアレイ４ｄは受信波の加算平均を受信毎に行

うものである。ＣＰＵ４ｅは、後述の各実施例用のプログラムを実行する。

【００４７】

更に、電流供給回路１ｂの電流供給間隔、アンプ回路４ａのアンプレンジ、フィルタ回路４ｂの動作、ＡＤＣ４ｃの収録インターバル及び収録データ長並びにゲートアレイ４ｄの加算回数の各制御を行うコントロール回路４ｆが解析装置４に設けられている。なお、コントロール回路４ｆはＣＰＵ４ｅ又は外付けのノート型パーソナルコンピュータにより制御される。

【００４８】

なお、図１に示す本実施例に係る超音波探知装置では２探触子法で表現しているが、１探触子法を採用してもよい。この場合には、１個の探触子が発信探触子及び受信探触子として機能する。

【００４９】

また、コンクリート材等の多孔質材の厚さ及び鉄筋等の検知においては、超音波がその内部で大きく減衰し、受信波に含まれる探知目標からの反射波が微弱となりやすい。このため、超音波探知装置は、電気的雑音、特に定常的な雑音が極力混入しない構成となっていることが好ましい。

【００５０】

次に、上述のように構成された超音波探知装置を使用した超音波探知方法について説明する。図６乃至図９は第１の実施例を使用した超音波探知方法を示すフローチャートである。第１の実施例による探知方法は、コンクリート内に埋め込まれた鉄筋の探知において、１対の発信探触子及び受信探触子を結ぶ線分を探知する鉄筋の長手方向とし、前記１対の探触子の距離を一定値Ｌに保持したまま、前記線分上で前記１対の探触子を移動させながら、加算平均波Ｇ（ｔ）を得る計測である。この計測にあたっては、第１０図の探触子間距離ａｊにおいて、a_1及び増分量Δａを設定し、ａ＝a_1の時のＧ（ｔ）をG_1（ｔ）、ａ＝a_1＋Δａの時のＧ（ｔ）をG_2（ｔ）、・・・、ａ＝a_1＋（ｎＡ－１）Δａの時のＧ（ｔ）をG_{nA}（ｔ）とする多点計測波G_j（ｔ）を比較表示することで、探知目標波と妨害波とを識別し、確実に鉄筋と前記線分との最短距離を測定する方法である。

【００５１】

先ず、加算平均波G_j（ｔ）（ｊはｎＡ以下の自然数）を取得する（ステップＳ１－１）。加算平均波G_j（ｔ）は、下記数式１４で表すことができる。

【００５２】

【数１４】

$$G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(F_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【００５３】

次いで、被探知材であるコンクリートの表面が粗いか否かを判断し（ステップＳ１－２）、粗い場合には、F_j（ｔ）を１．０に設定する（ステップＳ１－３）。

【００５４】

次に、G_j（ｔ）において妨害波としての表面波及び直接波等の勢力が最小となる周波数を下記数式１５に基づいて求める（ステップＳ１－４）。

【００５５】

【数１５】

$$f_0=\frac{1}{2}\cdot\alpha(\ell)\frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}\phi}$$

【００５６】

ここで、α（ｌ）は多くの計測実験で得られた補正係数、ｌは探知路程、$_cV_p$はコンクリートのたて波音速値、φは振動子径である。

【００５７】
次に、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、ｎ１及びｎ２を自然数として、下記数式１６の演算を行う（ステップＳ１－５）。このとき、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・F_j（ｆ）の平均的中心周波数がf_0となるように、ｎ１及びｎ２の値を自動的に制御する。
【００５８】
【数１６】

$$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^{n1}(f)\times A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【００５９】
次に、表示装置に、自然数ｎｐについてGA_j^{np}（ｔ）を比較表示する（ステップＳ１－６）。つまり、例えばｊ＝４であれば、４つの波を表示する。
【００６０】
次に、直線的に起生時刻が変化する波が出現したかを確認する（ステップＳ１－７）。
【００６１】
そのような波が出現している場合、表示装置に、自然数ｎｐｐについてｎｐｐ・GA_j^{np}（ｔ）を比較表示する（ステップＳ１－８）。
【００６２】
次に、直線的に起生時刻が変化する波でGA_1（ｔ）波の起生時刻より遅い同一の時刻t_hにおいて、ｎｐｐ・GA_j^{np}（ｔ）波の全てで波の起生があるかを確認する（ステップＳ１－９）。
【００６３】
次に、時刻t_hをt_Tに代入し、t_Tを極大値を与える時刻とする正弦波状のＦｉＬＴ（ｔ）を作成する（ステップＳ１－１０）。
【００６４】
次に、下記数式１７の演算を行う（ステップＳ１－１１）。
【００６５】
【数１７】

$$GB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot GA_j(t)$$

但し、ｎ５は自然数でオペレータにより制御される。
【００６６】
次に、GB_j（ｔ）の最大振幅の絶対値を$|_{max}P_j|$とし、下記数式１８で表される波を表示装置に比較表示する（ステップＳ１－１２）。
【００６７】
【数１８】

$$\left(\frac{1}{|_{max}P_j|}GB_j(t)\right)^{np}$$

【００６８】
また、ステップＳ１－７において、直線的に起生時刻が変化する波が出現していない場合には、表示装置に、自然数ｎｐｐについてｎｐｐ・GA_j（ｔ）を比較表示する（ステップＳ１－１３）。
【００６９】
次に、任意の時刻t_hにおいて、全てのｎｐｐ・GA_j（ｔ）波で波の起生があるかを確認する（ステップＳ１－１４）。
【００７０】

波の起生が確認された場合、ｊの値が大きくなるにつれてｎｐｐ・ＧＡ$_j$（ｔ）波が２又は３の波に分離してくるかを確認する（ステップＳ１－１５）。

【００７１】

そして、波が分離してくる場合には、時刻ｔ$_h$を鉄筋と探触子とを結ぶ線分の最短伝達時刻と特定する。

【００７２】

なお、ステップＳ１－９又はＳ１－１４で波の起生が確認できない場合、及びステップＳ１－１５で波が分離しない場合には、その位置での探知は不能であるとして、１対の探触子を結ぶ線分を鉄筋の長手方向と平行にしたまま探触子の位置を変化させた後、ステップＳ１－１の操作を行う。

【００７３】

次に、第１の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。この探知では、図１に示すかぶり厚が２３ｍｍの直径が１９ｍｍの丸鋼の探知を行う。

【００７４】

表１に、探触子間隔（ａ$_j$）毎に図１０中で示す走査方向におけるライン走査計測で得た１０００回の加算平均波を整理して示す。

【００７５】

【表１】

	探触子間隔ａ$_j$	加算平均波
Ｎｏ．１	６０ｍｍ	Ｇ$_1$（ｔ）
Ｎｏ．２	８０ｍｍ	Ｇ$_2$（ｔ）
Ｎｏ．３	１００ｍｍ	Ｇ$_3$（ｔ）
Ｎｏ．４	１２０ｍｍ	Ｇ$_4$（ｔ）
Ｎｏ．５	６０乃至１２０ｍｍの範囲で連続的に変動	Ｇ$_5$（ｔ）

【００７６】

この探知では、Ｎｏ．１乃至Ｎｏ．４について、数式１９の関係を維持した。

【００７７】

【数１９】

$$a_{j+1} = a_j + \Delta a$$

【００７８】

上記走査で得られるＧ$_j$（ｔ）において妨害波としての表面波及び直接波等の勢力が最小となる周波数は数式２０で表される。

【００７９】

【数２０】

$$f_0 = \frac{1}{2} \cdot \alpha(\ell) \frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}\phi}$$

【００８０】

この数式２０において、α（ｌ）＝１．０、$_c$Ｖ$_p$＝４３００（ｍ／秒）、φ＝４０（ｍｍ）として、ｆ$_0$＝１０７．５ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分で取り出した成分波ＧＡ$_j$（ｔ）から得られた波ＧＡ$_j$^{3}（ｔ）を図１１に示す。

【００８１】

なお、図２に示す成分波ＧＡ$_j$（ｔ）の取り出しにおいては、受信した波Ｇ（ｔ）を数式１のように表し、そのＦ（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を７

００回乗じ、数式２１の演算を行った。

【００８２】

【数２１】

$$GA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^4(f)\times A_2^{700}(f)\cdot F(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【００８３】

一方、図１１に示す成分波ＧＡ$_j$（ｔ）の取り出しにおいては、受信した波Ｇ（ｔ）を数式１のように表し、そのＦ（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を１５４０回乗じ、数式２２の演算を行った。なお、図１１には、ＧＡ$_j$（ｔ）を３乗したものである。

【００８４】

【数２２】

$$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^4(f)\times A_2^{1540}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【００８５】

図１１において，左から並べたＮｏ．１乃至Ｎｏ．４の成分波において、最初の波の起生時刻が直線３０１で示すように、直線的に変化している。一方、Ｎｏ．１乃至Ｎｏ．４の計測では、数式１４のように、探触子間隔を直線的に変化させていた。従って、これらの最初に起生している波はコンクリート表面を伝達する妨害波と判断することができる。

【００８６】

なお、これらの波の起生時刻ｔ$_{h,j}$は、数式２３により求めることができる。

【００８７】

【数２３】

$$t_{h,j}=\frac{C_j}{{}_cV_p}$$

但し、Ｃ$_j$＝ａ$_j$－φ、$_c$Ｖ$_p$＝４３００（ｍ／秒）である。

【００８８】

また、図１１のＮｏ．１乃至Ｎｏ．３の成分波においては、カーソル３０２で示す位置に起生波が確認できる。図１２は図１１における波の振幅を４倍程度に拡大したものである。カーソル位置での波の起生時刻がほとんど同一である。これが図１中のｃの鉄筋からの反射波である。一方、Ｎｏ．５の波では、妨害波が除去されており、カーソル位置に鉄筋からの反射波を確認できる。図１３はこのカーソル位置で最大値１．０となる時系列フィルタ５０１を波ＧＡ$_j$（ｔ）に乗じて得た波を示し、その振幅を各々最大表示している。全ての成分波で鉄筋からの反射波を明りょうに確認することができる。説明するまでもなく、Ｎｏ．１の波の起生時刻が最も高精度に鉄筋かぶり厚を与えることとなる。

【００８９】

なお、図１２のＮｏ．５の成分波によれば、妨害波が除去され、鉄筋及びコンクリート厚に関する反射波が特定されているため、Ｎｏ．１乃至Ｎｏ．４の成分波の比較検討が必要ないとも考えられる。しかしながら、コンクリートの材質は一定でなく、且つ、コンクリートには経年変化が生じる。このため、超音波の透過度が極端に劣悪なコンクリートの存在も稀ではない。このようなコンクリートの場合、妨害波４０１の残存が探知路程の長い目標波（この例では鉄筋かぶり厚に関する反射波）の振幅より相対的に大きくなる場合が多い。この結果、妨害波４０１を有意な反射波と誤認することとなる。

【００９０】

これに対し、Ｎｏ．１乃至Ｎｏ．４の成分波による比較検討を行えば、妨害波を有意の

反射波と誤認することを回避することができ、コンクリート内部の探知が可能となる。なお、この比較検討の対象は４つに限定されるものではなく、より多数であってもよい。

【００９１】

上述の探知方法は、測定対象物の埋め込み位置が深く、かつ反射強度が小さい鉄筋等のかぶり厚の探知を行うものである。次に、鉄筋が浅く埋め込まれている場合の比較計測について説明する。

【００９２】

図１の計測において、コンクリート底部から、鉄筋直下位置より超音波を入力する計測（鉄筋かぶり厚：１０ｍｍ）で、前述と同様の比較測定を行った結果を図１４に示す。

【００９３】

図１４には、最適周波数を前述のｆ$_0$＝１０７．５ｋＨｚ付近として、これを中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ$_j$（ｔ）から得られた波ＧＡ$_j$^{3}（ｔ）を示す。具体的には、受信した波Ｇ$_j$（ｔ）を数式１のように表し、そのＦ$_j$（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を４００回乗じ、数式２４の演算を行った。

【００９４】

【数２４】

$$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^4(f)\times A_2^{400}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【００９５】

図１４においては、Ｎｏ．１では、残存する妨害波の起生の後に大きく励起する波を確認できる。Ｎｏ．２では、妨害波及びこの大きな振幅の波が分離している。更に探触子間隔を広くしたＮｏ．３及びＮｏ．４の成分波では、妨害波が消滅し２つの波が起生している。このような２つの波が生ずるのは、図１０において、探触子間隔ａ$_j$が大きくなると、反射経路７０３のたて波の強度が小さくなるとともに、往路をたて波（よこ波）、復路をよこ波（たて波）とする伝達波７０４が相対的に大きく励起してくるためである。

【００９６】

図１１に示すような成分波が得られる場合、即ち最初の起生波の起生時刻が計測時の探触子間隔距離に比例して変化する場合、この最初の起生波を妨害波と認識する。

【００９７】

一方、図１４に示す如き成分波が得られる場合、即ち最初の振幅の大きい波の起生時刻が図１１の場合に比してＮｏ．１乃至Ｎｏ．４の間でほとんど変化せず、探触子間隔が広くなってくると、最初１つの波だったものが、２つの波の起生に変化してくる場合、これらの波は妨害波でなく、有意の反射波と断定する。鉄筋のかぶり厚が更に浅くなると、３つの波が起生する場合もある。この場合、３番目の波は、往路及び復路ともによこ波で伝達する波である。

【００９８】

以下に、第１の実施例の動作を示す。

【００９９】

先ず、探触子間隔毎に加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）を取得する。例えば、発信探触子から５ｍ秒又は１０ｍ秒間隔で広帯域超音波を発信し、この間、連続して受信探触子で超音波を受信する。そして、これらの受信波の加算平均を求める。この加算平均を行っている間、受信探触子及び発信探触子の中心間距離をａ$_j$に保持したまま、発信探触子及び受信探触子を、図１０で示すように、探知対象物の上方でそれが延びる方向、例えば鉄筋の配筋方向に平行に走査する。このような加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）の取得を複数回（ｎＡ回）行い、表２に示すように、ｎＡ種の加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）を得る。

【０１００】

【表２】

	探触子間隔a_j	加算平均波
Ｎｏ．１	a_1	G_1（ｔ）
Ｎｏ．２	a_2	G_2（ｔ）
・・・・・・	・・・・・・	・・・・・・
Ｎｏ．ｎＡ	a_{nA}	G_{nA}（ｔ）

【０１０１】

このとき、以降の分析を容易にするために、数式４で示すように、探触子間隔a_jは線形的に変化させることが好ましい。

【０１０２】

次に、鉄筋かぶり厚等の探知の場合、数式１５で示す最適周波数を中心周波数とする狭帯域成分波GA_j（ｔ）を加算平均波G_j（ｔ）毎に演算する。これらの成分波GA_j（ｔ）を探触子間距離の短い順に並べて比較すると図１１又は図１４に示すような関係が得られる。そして、図１１に示すような波形が得られた場合には、直線３０１で示すように、直線的にその起生時刻が変化する波は妨害波であると判断し、図１４に示すような波形が得られた場合には、カーソル６０１の位置に生ずる波を探知目標からの反射波と判断する。

【０１０３】

次いで、図１１に示すような波形が得られた場合、GA_j（ｔ）波をオペレータコントロールで増幅表示すると、図１２に示す時系列波が得られる。斜カーソル３０１の後方に起生時刻ｔが同一の波がカーソル３０２に示すように生じてくる。このｔをt_Tとして、ｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数状フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用い、GB_j（ｔ）＝$FiLT^3$（ｔ）・ＧＡ（ｔ）を計算し、GB_j（ｔ）の各々の振幅を表示画面に最大表示したものが図１３である。

【０１０４】

一方、図１４に示すような波形が得られた場合には、Ｎｏ．１の成分波の起生時刻を用いて鉄筋かぶり厚を確定できる。

【０１０５】

このような第１の実施例によれば、起生波が有意の反射波であるか妨害波であるかを認識することができる。また、探知対象が内部割れ、コンクリート厚その他の反射源の場合でも、この方法を同様に適用することができる。第１の実施例は、例えば、内部割れ、ジャンカ及び空胴等の探知にそのまま利用できる。但し、探知目的に対応して最適な探触子走査法を選定する必要がある。コンクリート内部の探知目標と走査法との関係を整理して表３に示す。

【０１０６】

【表３】

走査法	探知対象物	走査領域
ライン領域走査	鉄筋、鉄骨、梁シース管、ひび割れ深さ、内部割れ、版厚	図１０
円領域走査	鉄骨、内部割れ、ジャンカ、空胴、版厚	図１５
短形領域走査	鉄骨、内部割れ、ジャンカ、空胴、版厚、スラブ及び壁内部配管	図１５
楕円領域走査	鉄骨、内部割れ、ジャンカ、空胴、版厚	図１５
曲線領域走査	曲線シース管等	図１０

【０１０７】

次に、第２の実施例について説明する。第１の実施例では、分析にあたって工学的判断が必要とされる。即ち、２３ｃｍのかぶり厚の探知の場合の図１１乃至図１３では、７０ｋＨｚの狭帯域成分波を用いた。一方、１０ｃｍのかぶり厚の探知の場合の図１４では、１１０ｋＨｚの狭帯域成分波を用いた。従って、どのような周波数で取り出せばよいかの判断が必要とされ、この判断をオペレータに依存したのでは、誤計測が生じかねない。第２の実施例は、このような判断を必要としない分析方法及び分析結果の高精度化のための処理を可能にするものである。

【０１０８】

第２の実施例に係る超音波探知装置を使用した探知方法について説明する。第２の実施例は、第１の実施例における波GA_j（ｔ）又はGB_j（ｔ）を用い、所定の数式で算定される重み係数ρ_j及び波GA_j（ｔ）と波GA_{j+1}（ｔ）との時刻ずれΔt_jを用いて、加算平均波GA_0（ｔ）又はGB_0（ｔ）を求め、高い精度で探知目標物を探知する方法である。図１６乃至図１８は第２の実施例に係る超音波探知方法を示すフローチャートである。

【０１０９】

第２の実施例では、第１の実施例におけるステップＳ１－１０の後、数式１６の演算を行う（ステップＳ２－１）。

【０１１０】

次に、GB_j（ｔ）の最大振幅の絶対値を$|_{max}P_j|$とし、下記数式２５で表される波を表示装置に比較表示する（ステップＳ２－２）。

【０１１１】

【数２５】

$$\left(\frac{|_{\max}P_1|}{|_{\max}P_j|}GB_j(t)\right)^{np}$$

【０１１２】

次に、下記数式２６で表される演算を行うことにより、重み付けを行い、その結果として$(GB_0(t))^{np}$を表示装置に表示する（ステップＳ２－３）。

【０１１３】

【数２６】

$$GB_0(t) = \sum_{j=1}^{nA}\left(\frac{\max P_1}{\max P_j} GB_j(t)\right)$$

【０１１４】

また、第１の実施例におけるステップＳ１－７において、直線的に起生時刻が変化する波が出現していない場合には、表示装置に、自然数ｎｐｐについてｎｐｐ・ＧＡ$_j$（ｔ）を比較表示する（ステップＳ２－４）。

【０１１５】

次に、任意の時刻ｔ$_h$において、全てのｎｐｐ・ＧＡ$_j$（ｔ）波で波の起生があるかを確認する（ステップＳ２－５）。

【０１１６】

波の起生が確認された場合、ｊの値が大きくなるにつれてｎｐｐ・ＧＡ$_j$（ｔ）波が２又は３の波に分離してくるかを確認する（ステップＳ２－６）。

【０１１７】

次に、ｎｎｐ・ＧＡ$_1$（ｔ）波に基づき、探知目標波の起生時刻ｔ$_1$を特定する。この特定はオペレータにより行われてもよく、自動処理により行われてもよい。

【０１１８】

次に、探知対象である路程の概略を下記数式２７に基づいて求める（ステップＳ２－８）。

【０１１９】

【数２７】

$$da = \sqrt{\left(\frac{t_1 \cdot {}_cV_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{2}\right)^2}$$

【０１２０】

次に、ｎｐｐ・ＧＡ$_{j+1}$（ｔ）及びｎｐｐ・ＧＡ$_j$（ｔ）から探知目標波の起生時刻の差Δｔ$_j$（＝ｔ$_{j+1}$－ｔ$_j$）を算定する（ステップＳ２－９）。ｔ$_{j+1}$及びｔ$_j$は数式２８及び２９で与えられる。

【０１２１】

【数２８】

$$t_j = 2\sqrt{da^2 + \left(\frac{a_j}{2}\right)^2} \Big/ {}_cV_p$$

【０１２２】

【数２９】

$$t_{j+1} = 2\sqrt{da^2 + \left(\frac{a_j + \Delta a}{2}\right)^2} \Big/ {}_cV_p$$

【０１２３】

次に、ＧＡ$_j$（ｔ）波の加算において、加算するｊの最大値（ｎＢ）を決定する（ステップＳ２－１０）。この決定は、オペレータによる値の入力でもよく、自動計算によるものでもよい。

【０１２４】

次に、ＧＡ$_1$（ｔ）波のｔ$_1$乃至ｔ$_1$＋（２×１０^6／ｆ）の時刻内での波の振幅の最大値の絶対値を｜$_{max}$Ｐ$_1$｜とし、ＧＡ$_j$（ｔ）波の数式３０で表す時刻内での波の振

幅の最大値の絶対値を｜ｍａｘＰ$_j$｜として、数式３１で表される重みを演算する。

【０１２５】

【数３０】

$$t_1 + \sum_{j=1}^{j-1} \Delta t_{j-1} \quad 乃至 \quad t_1 + \sum_{j=1}^{j} \Delta t_j$$

【０１２６】

【数３１】

$$\rho_j = \frac{\left|{}_{\max} P_1\right|}{\left|{}_{\max} P_j\right|}$$

次に、重みを用いて数式３２の演算を行う（ステップＳ２－１２）。

【０１２７】

【数３２】

$$GA_0(t) = GA_1(t) + \sum_{j=1}^{nB-1} \frac{\rho_{j+1} GA_{j+1}(t + \sum_{j=1}^{nB-1} \Delta t_j)}{nB}$$

【０１２８】

次に、自然数ｎｐについて、ＧＡ$_0{}^{np}$（ｔ）を表示装置に最大表示する。

【０１２９】

なお、ステップＳ１－９又はＳ２－５で波の起生が確認できない場合、及びステップＳ２－６で波が分離しない場合には、その位置での探知は不能であるとして、第１の実施例と同様に、１対の探触子を結ぶ線分を鉄筋の長手方向と平行にしたまま探触子の位置を変化させた後、ステップＳ１－１の操作を行う。

【０１３０】

次に、第２の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。先ず、第１の実施例と同様に、探触子間距離毎に加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）を算出する。

【０１３１】

次いで、数式２０に基づいて最適周波数ｆ$_0$を算出し、この最適周波数を中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ$_j$（ｔ）を加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）毎に取り出す。

【０１３２】

図１９は表２においてｎＡを８とし、数式１９においてａ$_j$を６０ｍｍ、Δａを１０ｍｍとしたときの図１１（鉄筋かぶり厚：２３ｃｍ）に対応する加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）を示し、図２０は同様な計測における図１４（鉄筋かぶり厚：１０ｃｍ）に対応する加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）を示す。

【０１３３】

図１９では、図１１の場合で説明したように、数式１８のΔａに応じてその起生時刻が変動する波の起生が直線２１０１で示すように確認できる。この波は探触子間でコンクリート表面を伝達する表面波等である。この波の後方のカーソル位置に探知目標波の起生が確認できる。一方、図２０では、図１４の場合で説明したように、カーソルで示した位置に大きな振幅の探知目標波の起生が確認できる。

【０１３４】

このように、数式２０による最適周波数を用いて取り出した成分波ＧＡ$_j$（ｔ）の変わりに、加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）をそのまま用いても、最初に生ずる振幅の大きい波が妨害波なのか、探知目標波なのかの判断を容易に行うことができる。但し、補正係数α（ｌ）は探知路程によって図２１のように変化する。この補正係数α（ｌ）の値は、数多くの一般的コンクリートを用いた計測により確定したものであり、探知路程ｌの関数である。図１

９のカーソル２１０２、図２０のカーソル１２０２の位置近傍に探知目標があることより、最適周波数f_0の値は次のようにして求めることができる。

【０１３５】

図１９に示すものでは、探知路程が２３乃至２４ｃｍと読みとれるので、図２１より補正係数は０．９となる。従って、数式３３により最適周波数は１００ｋＨｚとなる。

【０１３６】

【数３３】

$$f_0 = \frac{1}{2} \times 0.9 \times \frac{4500}{\frac{1}{2} \times 40} = 100$$

【０１３７】

一方、図２０に示すものでは、探知路程が１０ｃｍ前後と読みとれるので、図２１より補正係数は１．１０となる。従って、数式３４により最適周波数は１２４ｋＨｚとなる。

【０１３８】

【数３４】

$$f_0 = \frac{1}{2} \times 1.10 \times \frac{4500}{\frac{1}{2} \times 40} = 124$$

【０１３９】

図２２は図１９に示す加算平均波G_j（ｔ）から求めた成分波GA_j（ｔ）を示す。具体的には、受信した波G_j（ｔ）を数式１のように表し、そのF_j（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタA_1（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタA_2（ｆ）を７４０回乗じ、数式３５の演算を行った。このとき、$A_1{}^4$（ｆ）・$A_2{}^{740}$（ｆ）・F_j（ｆ）の中心周波数の平均値がf_0＝１００ｋＨｚとなるようにした。

【０１４０】

【数３５】

$$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^4(f) \times A_2^{740}(f) \cdot F_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０１４１】

図２３は図２０に示す加算平均波G_j（ｔ）から求めた成分波GA_j（ｔ）を示す。具体的には、受信した波G_j（ｔ）を数式１のように表し、そのF_j（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタA_1（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタA_2（ｆ）を４８０回乗じ、数式３６の演算を行った。このとき、$A_1{}^4$（ｆ）・$A_2{}^{480}$（ｆ）・F_j（ｆ）の中心周波数の平均値がf_0＝１２４ｋＨｚとなるようにした。

【０１４２】

【数３６】

$$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^4(f) \times A_2^{480}(f) \cdot F_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０１４３】

図１０に示すような鉄筋探知の場合の走査法では、探知路程が短いと、換言すれば鉄筋かぶり厚が浅いと、超音波指向角θが大きくなり、この指向方向の超音波強度が小さくなる。加えて、探触子間距離a_jが大きくなればなるほど、図２３に示すように、鉄筋から

の反射強度が小さくなってくる。

【０１４４】

図２４及び図２５は、夫々図２２、図２３の各成分波GA_j（ｔ）の最大振幅を最大表示したものである。但し、図２４ではt_T＝１０４μ秒付近で図示する時系列フィルタＴ．Ｇ．Ｃを各成分波GA_j（ｔ）に乗じて得たGB_j（ｔ）＝Ｔ．Ｇ．Ｃ．×GA_j（ｔ）をGB_j^2（ｔ）を表示している。また、図２５でも、各成分波に対して波GA_j^3（ｔ）を表示している。Ｔ．Ｇ．Ｃ．の具体的形状は、ｔ＝０で０、ｔ＝t_T＝１０４μ秒で１．０とする直線的増加関数、t_T＝４００μ秒以降の時刻で０、ｔ＝１０４乃至４００μ秒の間を余弦関数状のフィルタとする。

【０１４５】

図２４では、カーソルで示す位置に２３ｃｍの深さの鉄筋からの反射波が成分波GA_j^2（ｔ）の全てで一様に生じている。一方、鉄筋かぶり厚が１０ｃｍと浅い図２５では、図１４を用いて説明したように、測定位置Ｎｏ．４乃至Ｎｏ．８において、鉄筋からの反射波として、たて波とモード変換波とが重畳して生じていることを確認できる。図２５に表示している３本のカーソルのうち最上段のカーソルが、往路復路をたて波で伝達する反射波の起生時刻を示し、その次のカーソルが往路をたて波（よこ波）、復路をよこ波（たて波）とする反射波の起生時刻を示し、その次の３本目のカーソルが往路及び復路ともによこ波とする理論的反射波の起生時刻を示す。なお、図２５では、よこ波とたて波の音速比を０．５９として、３本のカーソルを記載している。

【０１４６】

更に、図２５では、a_jの値の変化に伴って、各波に若干の位相差が生じていることが確認できる。ここで、互いに隣り合う成分波GA_j（ｔ）の位相差について検討する。Ｎｏ．１の波形でその起生時刻をt_1とすれば、成分波GA_j（ｔ）と成分波GA_{j+1}（ｔ）との間の位相差Δt_jは、図２６に示す幾何学的関係より数式３７乃至数式４０により求めることができる。

【０１４７】

つまり、鉄筋のおおよそのかぶり厚ｄａは、数式３７で表される。

【０１４８】

【数３７】

$$da=\sqrt{\left(\frac{t_1\cdot_c V_p}{2}\right)^2-\left(\frac{a_1}{2}\right)^2}$$

【０１４９】

また、成分波GA_j（ｔ）における起生時刻t_jは数式３８で表され、成分波GA_{j+1}（ｔ）における起生時刻t_{j+1}は数式３９で表される。

【０１５０】

【数３８】

$$t_j=2\sqrt{da^2+\left(\frac{a_j}{2}\right)^2}\Big/{}_cV_p$$

【０１５１】

【数３９】

$$t_{j+1}=2\sqrt{da^2+\left(\frac{a_j+\Delta a}{2}\right)^2}\Big/{}_cV_p$$

従って、起生時刻の差Δt_jは数式４０で表される。

【０１５２】

【数４０】

$$\Delta t_j = t_{j+1} - t_j = \frac{2\sqrt{da^2 + (\frac{a_j}{2})^2} - 2\sqrt{da^2 + (\frac{a_j + \Delta a}{2})^2}}{{}_cV_p}$$

【０１５３】

従って、第２の実施例では、超音波探知装置に重み付け手段を設け、この重み付け手段により、次のような重み付けを加味して加算平均波ＧＡ$_0$（ｔ）を得る。

【０１５４】

ｎＡ番目の測定により得られた加算平均波を数式４１で表す。

【０１５５】

【数４１】

$$GA_k(t + \sum_{j=1,k-1} \Delta t_j)$$

次いで、数式４２で表される加算平均波ＧＡ$_0$（ｔ）を算出する。

【０１５６】

【数４２】

$$GA_0(t) \fallingdotseq \frac{(GA_1(t) + \sum_{j=1,nA-1} \rho_{j+1} GA_{j+1}(t + \sum_{j=1,nA-1} \Delta t_j))}{nA}$$

【０１５７】

ここで、ρ$_{j+1}$は（ｋ＋１）番目の測定により得られた加算平均波に対する波の重みであり、次のようにして求めることができる。

【０１５８】

図２５等に示す成分波ＧＡ$_j$（ｔ）は最適周波数値を中心周波数とする狭帯域成分として、受信した波Ｇ$_j$（ｔ）から取り出したものである。この成分波ＧＡ$_j$（ｔ）の１周期は概略10^6／ｆ$_0$μ秒となる。また、成分波ＧＡ$_j$（ｔ）と成分波ＧＡ$_{j+1}$（ｔ）の成分波の時刻ｔ$_1$で示すカーソル位置にある探知目標波の起生時刻差Δｔ$_j$は数式３８乃至数式４０から求めることができるので、これらの目標とする波の初めの第１波及び第２波の起生時刻は数式４３で示す時間帯内にある。

【０１５９】

【数４３】

$$t_1 + \sum \Delta t_{nA-1} \sim t_1 + \sum \Delta t_{nA-1} + \frac{2 \times 10^6}{f_0}$$

【０１６０】

従って、この時間帯での波ＧＡ$_j$（ｔ＋ΣΔｔ$_j$）の最大振幅を｜ｍａｘＰ$_j$｜とすれば、重みρ$_j$は、数式４４で求められる。

【０１６１】

【数４４】

$$\rho_j = \left| \max P_1 \right| \Big/ \left| \max P_j \right|$$

【０１６２】

つまり、重みρ$_j$は波ＧＡ$_j$（ｔ）の探知の目標とする波の振幅を波ＧＡ$_1$（ｔ）のそれと同一とするものである。このようにして得られる加算平均波ＧＡ$_0$（ｔ）では、探知目標とする波の増幅の度合が極端に大きくなり、かつ妨害波が位相差の存在のために更に小さなものとなる。

【０１６３】

これらの処理を行っても、かぶり厚の深い鉄筋の探知等の場合、最初に生じている表面波等のコンクリート表面を探触子間で伝達する妨害波等が残存する場合がある。従って、このような場合には、図２４に示すように、探知目標波の概略起生時刻で、最大値１．０となる時系列フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用いて、数式４５で示す演算を行う。

【０１６４】

【数４５】

$$GB_0(t) = FiLT(t) \times GA_0(t)$$

【０１６５】

このような時系列フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用いた演算を行うことにより、残存する表面波等の妨害波を見かけ上除去することができる。

【０１６６】

また、数式４２に示す加算平均波の演算においては、ｎＡの値が探知精度に大きな影響を与える。図２４のように深いかぶり厚の鉄筋探知の場合には、ｎＡの値を大きくすることが好ましく、図２５のように浅いかぶり厚の鉄筋探知の場合には、ｎＡの値を小さくすることが好ましい。例えば、図２５のような波形が得られた場合には、オペレータの判断で、ｎＡの値を３又は４とすれば、波ＧＡ$_0$（ｔ）又はＧＢ$_0$（ｔ）より、モード変換波が除去される。この結果、たて波反射波が大きく励起した波ＧＡ$_0$（ｔ）又はＧＢ$_0$（ｔ）を得ることができる。

【０１６７】

このような処理では、ｎＡの値の設定をオペレータに依存するが、超音波探知装置にｎＡ値設定手段を設け、このｎＡ値設定手段により、この処理を自動的に行ってもよい。

【０１６８】

なお、オペレータがｎＡの値を設定する場合には、先ず、表３で設定したｎＡの値を用いて、数式４２に基づいて、加算平均を行い、波ＧＡ$_0$（ｔ）又はＧＢ$_0$（ｔ）の起生状況を確認する。

【０１６９】

そして、探知目標とする波（たて波）の後方にモード変換波が生じている場合には、ｎＡの値を１つずつ減じながら波ＧＡ$_0$（ｔ）又はＧＢ$_0$（ｔ）を再演算で求め、視認していく。この経緯の中で、モード変換波が生じなくなった時の波ＧＡ$_0$（ｔ）又はＧＢ$_0$（ｔ）を探知波形とする。

【０１７０】

なお、モード変換波の起生の認識は、よこ波とたて波の音速比をε$_2$＝０．５９として、図２５に示すように、３本のカーソルを表４に示す時刻に表示し、第１カーソルを最初の波の起生時刻に合致させたときに第２及び第３カーソルの位置に大きな振幅の波が生じればこれをモード変換波と断定することができる。

【０１７１】

【表４】

第１カーソル	t_1
第２カーソル	$t_1/2 + t_1/(2 \times \varepsilon_2)$
第３カーソル	t_1/ε_2

【０１７２】

このような自動処理によれば、図２４及び図２５に示すような波ＧＡ$_j$（ｔ）及びＧＢ$_j$（ｔ）の波形を求める必要がない。

【０１７３】
ところで、図１１乃至図１４、図１９及び図２０並びに図２２乃至図２５は加算平均波G_j（ｔ）を用いて所定の中心周波数f_0で狭帯域成分波GA_j（ｔ）又は所定の時系列フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用いてＦｉＬＴ（ｔ）・GA_j（ｔ）を示すものである。これに対し、加算平均波G_j（ｔ）を数式１のように表現し、そのときのF_j（ｔ）に対して、数式４６及び数式４７の演算を行い、その結果得られた波HA_j（ｔ）と波GA_j（ｔ）とを置換しても、図１１乃至図１４、図１９及び図２０並びに図２２乃至図２５と同様の結果が得られる。
【０１７４】
【数４６】

$$H_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{F_j}{F_j}(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０１７５】
【数４７】

$$HA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot\frac{F_j}{F_j}(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０１７６】
図２７に図２５に対応する波HA_j（ｔ）を示す。具体的には、数式４７で分析の上限振動数ｆｍａｘを２５００ｋＨｚ、ｎ１を４、ｎ２を７００として、１２６ｋＨｚを中心周波数とする波HA_j（ｔ）を求め、これに対して波$HA^3{}_j$（ｔ）の各々でその最大振幅を最大表示している。
【０１７７】
次に、第３の実施例について説明する。
【０１７８】
第１及び第２の実施例は、１対の発信探触子及び受信探触子を図１０に示すように、探触子間隔a_jを一定に保ちながら、矢印で示すように、鉄筋配筋方向に平行に走査するものである。しかしながら、一般的コンクリートにおいて、その走査面は粗状態であり、かつ凸凹などが生じている場合が稀ではない。
【０１７９】
このようなコンクリートでは、前記走査の間、超音波発信毎に得る受信波はその強度が大きく変動する。これより、有意の受信波を取得できない場合も生じうる。第３の実施例は、このような場合に対処する測定を可能にするものである。
【０１８０】
第３の実施例は、表面波等の妨害波を除去し、探知目標物を明敏に取り出す探知法として、１対の発信探触子及び受信探触子の中心間距離をａとした加算平均波G_1（ｔ）及び増分量Δａを定義し、前記ａをａ＋Δａとしたときの加算平均波G_2（ｔ）から数式４８で表される振動数又はその近傍の振動数を中心周波数とする狭帯域成分波を夫々GA_1（ｔ）及びGA_2（ｔ）とし、前記GA_j（ｔ）と重み付け加算してGA_0（ｔ）波を求める方法である。なお、ｒ（ｆ）は、例えば図２８に示すグラフから求めることができる。ｒ（ｆ）は多くの計測実験で得た音速補正係数である。
【０１８１】
【数４８】

$$f_R=\frac{1}{2}\cdot\frac{r(f)\cdot{}_CV_p}{\Delta a}$$

【０１８２】
図２９及び図３０は第３の実施例に係る超音波探知方法を示すフローチャートである。第３の実施例では、第１の実施例と同様に、先ず、加算平均波G_j（ｔ）（ｊはｎＡ以下の自然数）を取得する（ステップＳ３－１）。
【０１８３】
次いで、被探知材であるコンクリートの表面が粗いか否かを判断し（ステップＳ３－２）、粗い場合には、F_j（ｔ）を１．０に設定する（ステップＳ３－３）。
【０１８４】
次に、数式４８の演算を行う（ステップＳ３－４）。
【０１８５】
次いで、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、ｎ１及びｎ２を自然数として、数式１６の演算を行う（ステップＳ３－５）。このとき、$A_1{}^{n1}$（ｆ）・$A_2{}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）の平均的中心周波数がf_Rとなるように、ｎ１及びｎ２の値を自動的に制御する。
【０１８６】
次に、表示装置に、自然数ｎｐについて$GA_j{}^{np}$（ｔ）を比較表示する（ステップＳ３－６）。
【０１８７】
次に、妨害波の位相がGA_1（ｔ）とGA_2（ｔ）とで１８０度ずれているか判断する（ステップＳ３－７）。
【０１８８】
位相が１８０度ずれていない場合には、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、オペレータがｎ２の値を増減させながら、妨害波の位相が１８０度ずれるｎ２の値を特定し、そのときの$A_1{}^{n1}$（ｆ）・$A_2{}^{n2}$（ｆ）・F_j（ｆ）の平均的中心周波数をf_Rと特定する（ステップＳ３－８）。
【０１８９】
ステップＳ３－７において位相が１８０度ずれている場合、及びステップＳ３－８で中心周波数f_Rを変更した後、GA_1（ｔ）の最大振幅の絶対値$|{}_{max}P_1|$とGA_2（ｔ）の最大振幅の絶対値$|{}_{max}P_2|$のうち大きい方を$|{}_{max}P|$として、数式４９の演算を行う。
【０１９０】
【数４９】

$$GA_0(t)=\frac{|{}_{max}P|}{|{}_{max}P_1|}GA_1(t)+\frac{|{}_{max}P|}{|{}_{max}P_2|}GA_2(t)$$

【０１９１】
そして、表示装置に、自然数ｎｐについてｎｐ・$GA_0{}^{np}$（ｔ）を表示する（ステップＳ３－１０）。
【０１９２】
次に、第３の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。図３１は図２６に示す鉄筋の測定において、径が１９ｍｍの丸鋼がかぶり厚を１００ｍｍとして埋め込まれている場合の測定結果を示す。細線で示す波は図２６の探触子間距離a_1を８０ｍｍとし、１対の探触子を鉄筋直上に固定配置した計測で、前記広帯域超音波を連続してコンクリート表面より直下に入力して得た３００個の広帯域受信波を加算平均した波G_1（ｔ）より１１０ｋＨｚの狭帯域成分波GA_1（ｔ）を抽出して示したものである。一方、太線で示す波は前記探触子間距離を$a_2=a_1+15ｍｍ=95ｍｍ$として得た加算平均波G_2（ｔ）より、細線で示す波と同様の処理で得た１１０ｋＨｚ狭帯域成分波GA_2（ｔ）である。これらの２つの成分波を比較すると、早い時刻で生ずる図１０に示す７０１、７０２経路の妨害波は半波（１８０度）だけその位相がずれている。また、カーソル位置より、そ

の振幅が大きく励起する波は、殆どその位相が変化していない。これらの２つの波を加算したものを図３２において太線で表示している。図３２中の細線で示す波は図３１の細線で示す波をそのまま表示したものである。なお、図３１中の細線、太線で示す成分波はいずれも、その最大振幅を最大表示したものである。図３２中のカーソル２００１の位置が鉄筋からの反射波の概略起生時刻である。図３１に示す成分波では、成分波の抽出周波数をf_R＝１１０ｋＨｚとしている。これは波の取り出し周波数を５０乃至１５０ｋＨｚの間で徐々に変動させたときに、波の早い時刻に生ずる７０１、７０２の妨害波の重畳波に半波の位相ずれが生じ、かつその後方に生ずる波の中でその位相が殆ど変化せず、かつその振幅が相対的に最も大きくなったと表示装置の波形表示画面で視認した時の周波数が１１０ｋＨｚだったからである。

【０１９３】

ところで、このf_Rの値はコンクリート音速V_p、探触子距離変化量Δａ及び音速補正係数γを用いて数式５０のように表される。

【０１９４】

【数５０】

$$f_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot V_p}{\Delta a}$$

【０１９５】

なお、γは周波数により変化する。多くの測定実験によれば、図２８に示すように、１００ｋＨｚ前後の成分波ではγ＝０．７４、１７５ｋＨｚ前後の成分波ではγ＝０．６３、２５０ｋＨｚ前後の成分波ではγ＝０．５３となる。このように、γの値が周波数に応じて変動するのは、以下の物理的現象による。

【０１９６】

図１０の直接波とよばれる７０２経路の妨害波はたて波、よこ波の混存したものになる。また、７０１経路の妨害波の支配的成分は表面波である。これらの直接波及び表面波の相対強度は周波数で大きく変化する。多くの測定例によれば、低周波になればなるほど探触子間距離が短いことも原因して、前記相対強度は直接波の方が大きくなり、高周波になると、逆に表面波の方が大きくなる。

【０１９７】

従って、表面波及びその表層を浅く又は深く潜って伝達する直接波による合成波がコンクリート表面を伝達するとみなすと、γ×V_pの値はこの場合の等価音速と考えることができる。

【０１９８】

低周波成分波の場合、直接波に含まれる音速の早いたて波成分が増大し、結果として、γの値が大きくなる。一方、高周波になると、直接波成分が相対的に小さくなり、表面波とたて波の音速比をε_1＝０．５３として、γ×V_pが表面波の音速（$\varepsilon_1 \times V_p$）に漸近する。従って、本実施例では、数式５０にΔａ＝１５ｍｍ、V_p＝４５００ｍ／秒及びγの仮定値（例えば０．６）を代入すると、数式５１によりf_Rは９０ｋＨｚとなる。

【０１９９】

【数５１】

$$f_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.6 \times 4500}{0.015} = 90$$

【０２００】

図２８からγの値を読み取ると、γの値は０．７４程度である。これよりf_Rの値を再計算すると、数式５２のようになる。

【０２０１】

【数５２】

$$f_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.74 \times 4500}{0.015} \fallingdotseq 110$$

【０２０２】

このｆ$_R$を中心周波数としてＧ$_1$（ｔ）、Ｇ$_2$（ｔ）波より夫々狭帯域成分波ＧＡ$_1$（ｔ）、ＧＡ$_2$（ｔ）を取り出せば、図３１に示すように、妨害波の位相が半波ずれ、かつ探知目標波（鉄筋からの反射波）においては位相の変動が殆どない相対的に大きく励起した比較波形を得ることができる。具体的には、受信した波Ｇ$_j$（ｔ）（ｊは１又は２）を数式１のように表し、そのＦ$_j$（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を５２０回乗じ、数式５３の演算を行った。

【０２０３】

【数５３】

$$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^4(f) \times A_2^{520}(f) \cdot F_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０２０４】

ＧＡ$_1$（ｔ）及びＧＡ$_2$（ｔ）の加算平均波ＧＡ$_0$（ｔ）であれば、妨害波がその半波の位相ずれのために除去され、探知目標波のみが大きく励起した波となる。図３２の太線で示す波がこの場合のＧＡ$_0$（ｔ）波に相当する。

【０２０５】

次に、第４の実施例について説明する。第４の実施例は、コンクリート内に埋め込まれた鉄筋の径の探知において、１対の発信探触子及び受信探触子を鉄筋の長手方向に平行に、且つ鉄筋の直上のコンクリート表面に配した計測で探触子の中心間距離をΔａずつ変更して得られる加算平均波Ｇ$_1$（ｔ）、Ｇ$_2$（ｔ）、Ｇ$_3$（ｔ）、・・・、Ｇ$_{nA-1}$（ｔ）に対し、更にこれらの加算平均を数式５４のようにして求め、このＧ$_0$（ｔ）波について波形分析することにより、鉄筋の径を求める方法である。

【０２０６】

【数５４】

$$G_0(t) = \sum_{j=1}^{nA} G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(F_0(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０２０７】

図３３及び図３４は第４の実施例に係る超音波探知方法を示すフローチャートである。第４の実施例では、第１の実施例等と同様に、先ず、加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）（ｊはｎＡ以下の自然数）を取得する（ステップＳ４－１）。

【０２０８】

次に、加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）に対して、数式５４の加算平均の演算を行う（ステップＳ４－２）。

【０２０９】

次いで、被探知材であるコンクリートの表面が粗いか否かを判断し（ステップＳ４－３）、粗い場合には、Ｆ$_0$（ｔ）を１．０に設定する（ステップＳ４－４）。

【０２１０】

次に、数式５５の演算を行う（ステップＳ４－５）。

【０２１１】

【数５５】

$$f_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot {}_C V_p}{\Delta a}$$

【０２１２】

次いで、分析の上限振動数をｆ$_{MAX}$とするＡ$_1$（ｆ）及びＡ$_2$（ｆ）を用い、ｎ１及びｎ２を自然数として、数式５６の演算を行う（ステップＳ４－６）。このとき、Ａ$_1$^{n1}（ｆ）・Ａ$_2$^{n2}（ｆ）・Ｆ$_0$（ｆ）の平均的中心周波数がｆ$_R$となるように、ｎ１及びｎ２の値を自動的に制御する。

【０２１３】

【数５６】

$$GA_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \times A_2^{n2}(f) \cdot F_0(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０２１４】

次に、表示装置に、自然数ｎｐについてＧＡ$_0$^{np}（ｔ）を表示し、オペレータが鉄筋上端からの反射波の特定及びその起生時刻ｔ$_{h1}$の特定を行う（ステップＳ４－７）。

【０２１５】

次に、ＧＡ$_0$（ｔ）波に対するＡ$_1$^{n1}（ｆ）・Ａ$_2$^{n2}（ｆ）・Ｆ$_0$（ｆ）のスペクトルの中心周波数を４００乃至８００ｋＨｚの間で、例えば５０ｋＨｚずつ変化させ、その都度ＧＡ$_0$（ｔ）を表示装置に表示させる（ステップＳ４－８）。この結果、図３６乃至図４１に示すように、振幅が大きい３つの波（３３０１，３３０２，３３０３）が表示される。

【０２１６】

そして、数式５７又は５８で示す演算を行うことにより、鉄筋の径φを算定する（ステップＳ４－９）。

【０２１７】

【数５７】

$$\phi = \frac{1}{\pi} \cdot {}_C V_p \cdot \left(t_{h2} - t_{h1} \right)$$

【０２１８】

【数５８】

$$\phi = \frac{1}{\pi} \cdot {}_C V_p \cdot \left(t_{h3} - \frac{t_{h1}}{2} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) \right)$$

【０２１９】

次に、第４の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。第３の実施例は数式５０で示す探触子間隔の変化量Δａを１５ｍｍとしたものであった。Δａの値が大きいため、図３２中のカーソル２００１位置の時刻とコンクリート音速Ｖ$_p$で算定される鉄筋かぶり厚は、その精度が低くなる。第４の実施例では、このかぶり厚及び鉄筋径をより高い精度で測定することができる。

【０２２０】

図３６はａ$_1$＝８０ｍｍ、Δａ＝５ｍｍとして、ａ$_j$＝ａ$_1$＋（ｊ－１）×Δａとし、ｊの値を１乃至４として、各々で１対の発信探触子及び受信探触子を図１０に示すように、鉄筋直上に配し、両探触子を走査せず、その位置を固定したまま３００個の受信波を収録し、これの加算平均波より２３８ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波を抽出することで作成した波である。具体的には、受信した波Ｇ$_j$（ｔ）（ｊは１乃至４）を数式１の

ように表し、そのＦ$_j$（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタＡ$_1$（ｆ）を４回、第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を１２２回乗じ、数式５９の演算を行った。

【０２２１】

【数５９】

$$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^4(f)\times A_2^{122}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０２２２】

図３６中、細線で示す波はａ$_1$＝８０ｍｍの場合の成分波ＧＡ$_1$（ｔ）であり、太線で示す波はａ$_1$乃至ａ$_4$の場合の成分波ＧＡ$_j$（ｔ）を更に加算平均し、数式６０で表される波をＧＡ$_0{}^2$（ｔ）表示したものである。

【０２２３】

【数６０】

$$GA_0(t)=\frac{1}{4}\sum_{j=1,4}GA_j(t)$$

【０２２４】

ＧＡ$_0{}^2$（ｔ）波では、探知妨害波が見かけ上、完璧に除去され、超音波発信後、鉄筋上端からの反射波起生時刻がカーソル位置（４４．５６μ秒）に示すように特定される。

【０２２５】

このコンクリートモデルの音速Ｖ＝４５００ｍ／秒を適用すると、図１０の７０３の伝達距離ｄａが数式６１より、２０．０５ｃｍと求められる。

【０２２６】

【数６１】

$$da=44.56\times10^{-6}\times4500\times10^{2}=20.05$$

【０２２７】

また、かぶり厚ｄは、ａ$_1$＝８０ｍｍ及び探触子径＝４０ｍｍを考慮すると、下記数式６２のように求めることができる。実値は９．９ｃｍである。

【０２２８】

【数６２】

$$d=\sqrt{\left(\frac{20.05}{2}\right)^2-\left(\frac{(8-4)}{2}\right)^2}=9.82$$

【０２２９】

なお、２３８ｋＨｚの周波数は、数式６３に示すように、数式５０から求めた値である。

【０２３０】

【数６３】

$$f_R=\frac{1}{2}\times\frac{0.53\times4500}{0.005}=238.5kHz$$

【０２３１】

図２８においては、２３８ｋＨｚの振動数ｆでγの値が０．５３になっている。

【０２３２】

また、図３６に示す波では、カーソルでその起生位置を示した鉄筋上端からの反射波より後方に、鉄筋の存在に関連して生ずる複数の波が混在している。これらの波には、例え

ば鉄筋下端からの反射波、鉄筋円周上で鉄筋内を迂回する回折波（たて波、よこ波）、鉄筋円周上でコンクリート内を迂回する回折波（たて波、よこ波）及び鉄筋上端からのモード変換波等が含まれている。

【０２３３】

これらの各波の形状は周波数の変化に伴ってその強度が大きく変動する。図３７乃至図４１は、この変動状況を示したものである。夫々Ｇ（ｔ）波より３７０、４４０、５６０、７７０、８１０ｋＨｚの中心周波数をもつ中帯域成分波$ＧＡ_0$（ｔ）を抽出し$ＧＡ_0^3$（ｔ）表示したものである。

具体的には、加算平均波$Ｇ_0$（ｔ）を数式６４のように表し、その$Ｆ_0$（ｆ）に対して、分析の上限振動数をｆｍａｘ＝２５００ｋＨｚとし、第１の周波数フィルタ$Ａ_1$（ｆ）をｎ１回、第２の周波数フィルタ$Ａ_2$（ｆ）をｎ２回乗じ、数式５６の演算を行った。

【０２３４】

【数６４】

$$G_0(t)=\frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4}G_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(F_0(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０２３５】

ｎ１及びｎ２の値は、図３７に示す３７０ｋＨｚ中心周波数の場合ｎ１＝４、ｎ２＝１６とし、図３８に示す４４０ｋＨｚ中心周波数の場合ｎ１＝１０、ｎ２＝６０とし、図３９に示す５６０ｋＨｚ中心周波数の場合ｎ１＝１６、ｎ２＝６０とし、図４０に示す７７０ｋＨｚ中心周波数の場合ｎ１＝１８、ｎ２＝６０とし、図４１に示す８１０ｋＨｚ中心周波数の場合ｎ１＝２０、ｎ２＝６０とした。また、成分波のスペクトルのすそは中心周波数±３００ｋＨｚであった。

【０２３６】

夫々図３７、図３８に示す３７０ｋＨｚ、４４０ｋＨｚの成分波では、鉄筋円周上でコンクリート内を迂回するたて波回折波３３０２が大きく卓越している。波３３０１は鉄筋上端からの反射波であり、波３３０３は波３３０２と同一の伝達経路の波であるが、コンクリート表面から鉄筋上端までの往路をたて波、同復路をよこ波、鉄筋廻りコンクリート内をよこ波で伝達する波である。

【０２３７】

更に高周波方向へ波の取り出しを移行していくと、徐々に鉄筋上端からの反射波が卓越してくる。この状況を示したものが図３９及び図４０の５６０ｋＨｚ及び７７０ｋＨｚの成分波である。

【０２３８】

一方、更に成分波の取り出しを高周波へ移行していくと、図４１に示すように、鉄筋廻りを回折する他のいくつかの波が生じてくる。鉄筋径の測定において、図３９又は図４０の起生波を用いれば、測定処理が繁雑とはならない。

【０２３９】

鉄筋径φの算出は図４０に示す波３３０１のカーソル位置である$ｔ_1$、波３３０２のカーソル位置である$ｔ_2$、波３３０３のカーソル位置である$ｔ_3$、及びコンクリート音速$Ｖ_p$、よこ波とたて波との音速比$ε_2$＝０．５９を数式６５又は数式６６に適用すればよいことが、多くの測定実験で確かめられている。

【０２４０】

【数６５】

$$\phi=\frac{1}{\pi}\times V_P\times(t_2-t_1)$$

【０２４１】

【数６６】

$$\phi = \frac{1}{\pi} \times V_P \times \left(t_3 - \frac{t_1}{2} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) \right)$$

【０２４２】

波３３０１及び３３０２の各起生時刻から鉄筋径を計算すると、実値が１９ｍｍであるのに対し、数式６７に示すように、１８．６ｍｍとなる。

【０２４３】

【数６７】

$$\phi = \frac{1}{\pi} \times 4500 \times 100 \times (58 - 45) \times 10^{-6} = 18.6$$

【０２４４】

また、波３３０１及び３３０３の各起生時刻から鉄筋径を計算すると、数式６８に示すように、１８．９ｍｍとなる。

【０２４５】

【数６８】

$$\phi = \frac{1}{\pi} \times 4500 \times 100 \times \left(83 - \left(\frac{45}{2} + \frac{45}{2} \Big/ \varepsilon_2 \right) \right) \times 10^{-6} = 18.9$$

【０２４６】

数式６４又は６５を用いて鉄筋径を算定する場合、数多くの同種の測定結果によれば、ｎ１を２又は４とした場合で、GA_0（ｔ）波の中心周波数をｎ２の値をコントロールすることで４００乃至８００ｋＨｚとすればよいと判明している。

【０２４７】

次に、第５の実施例について説明する。第５の実施例は、１対の発信探触子及び受信探触子の中心間距離をａとし、両探触子の中心を結ぶ線分を鉄筋の長手方向直上のコンクリート表面に配した計測で、前記探触子を前記線分上で移動させながら得た受信波を移動の都度加算平均して数式６９の波を得る。そして、数式６９中のＦ（ｆ）を１．０又は１／Ｆ（ｆ）に置換した数式７０又は７１に示す波を用いて鉄筋径を測定する方法である。

【０２４８】

【数６９】

$$G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(F(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０２４９】

【数７０】

$$G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} df$$

【０２５０】

【数７１】

$$G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{F(f)} \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０２５１】

先ず、第５の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。この探知例では、浅く

埋め込まれた鉄筋の径の探知で、コンクリート内部に生ずる共振現象を低減又は除去するものであり、図１の下側コンクリート面からの探知で、１０ｃｍの深さに埋め込まれた径が１９ｍｍの鉄筋径の探知を行う。

【０２５２】

鉄筋直下のコンクリート面で２０００ｋＨｚの共振振動数を持つ振動子径４０ｍｍの１対の発信探触子及び受信探触子を、その中心位置を結ぶ線分が配筋方向に平行になるように配した。そして、探触子間隔を６０ｍｍに固定し鉄筋配筋にそって１０ｃｍの移動走査を行いながら１０００回分の加算平均波Ｇ（ｔ）を求め、数式２０を用いて鉄筋かぶり厚等の探知の場合の最適周波数f_0を求める。補正係数α（ｌ）＝１．１、コンクリートの音速４５００ｍ／秒、及び探触子径４０ｍｍを適用すると、最適周波数f_0は１２４ｋＨｚとなる。この１２４ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波を取り出すと、図４２に示すような成分波が得られる。具体的には、ｆｍａｘを２５００ｋＨｚとし、A_1（ｆ）を４回、A_2（ｆ）を４８０回乗じて作成したものである。カーソル２３０１で示す時刻（４５．２１μ秒）を用いると、探知目的とする鉄筋のかぶり厚は、数式７２に示すように、実値が１００ｍｍであるのに対し、１０１．２ｍｍと算定される。

【０２５３】

【数７２】

$$d=\left((\frac{45.21\times 4.5}{2})^2-(\frac{60-40}{2})^2\right)^{1/2}=101.2$$

【０２５４】

径の測定で分析精度を向上のためには、高周波領域の成分波を用いる必要がある。

【０２５５】

図４３乃至図４５に１４００ｋＨｚを中心周波数とする広帯域成分波を示す。加算平均波を数式６９のように表現したとき、このＧ（ｔ）を用いて成分波ＧＡ（ｔ）を取り出したものが図４３である。また、数式７３を用いて成分波ＨＡ（ｔ）を取り出したものが図４４であり、数式７４を用いて成分波ＲＡ（ｔ）を取り出したものが図４５である。

【０２５６】

【数７３】

$$H(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{F}{F}(f)e^{iwt}\right)df$$

【０２５７】

【数７４】

$$R(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\frac{1}{F}(f)e^{iwt}\right)df$$

【０２５８】

具体的には、f_{max}を２５００ｋＨｚとして、成分波ＧＡ（ｔ）については、Ｆ（ｆ）にA_1（ｆ）を１０回、A_2（ｆ）を６回乗じ、成分波ＨＡ（ｔ）については、Ｆ／Ｆ（ｆ）にA_1（ｆ）を８回、A_2（ｆ）を６回乗じ、成分波ＲＡ（ｔ）については、１／Ｆ（ｆ）にA_1（ｆ）を２４回、A_2（ｆ）を１４回乗じることにより、得たものである。

【０２５９】

なお、１４００ｋＨｚの選定は、成分波の取り出しの中心周波数をA_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・Ｆ（ｆ）の計算の経緯の中で、図４５又は後述の図４６の波の起生状況の変化を分析画面で視認し、最も明敏に起生波が得られたと判断することで行った。かぶり

厚に関する反射波の起生時刻の概略は図４２の１２４ｋＨｚ成分波でカーソル２３０１として特定されている。図４３及び図４４に示すａ～ｆのカーソルは、理論的に算定される同一鉄筋からの他の反射波又は迂回波の起生時刻を示すものである。ａは鉄筋上端からの反射波を示し、ｂは鉄筋下端からの反射波を示し、ｃは鉄筋円周上で鉄筋内を伝達する迂回波（たて波）を示し、ｄは鉄筋円周上でコンクリート内を伝達する迂回波（たて波）を示し、ｅは鉄筋円周上で鉄筋内を伝達する迂回波（よこ波）を示し、ｆは鉄筋円周上でコンクリート内を伝達する迂回波（よこ波）を示す。

【０２６０】

上記の波において、図４３乃至図４５の３種の手法で共通に出現している波として、ｆの波が確認できる。しかしながら、数式６９のＧ（ｔ）を用いて取り出した成分波ＧＡ（ｔ）では、鉄筋の存在に関する他の波の起生が確認できない。また、Ｈ（ｔ）を用いて取り出した成分波ＨＡ（ｔ）では不正確であり、若干他の経路波とそれぞれのカーソルが一致しているように見えるが、これらの経路波をカーソルが全て特定しているとはいえない。一方、図４５のＲ（ｔ）波より抽出した成分波ＲＡ（ｔ）はｂのカーソルを除き他の全てのカーソルが各起生波の起生時刻に合致している。図４３は加算平均波Ｇ（ｔ）をそのまま用い成分波ＧＡ（ｔ）を取り出したものであった。コンクリート内で大きく起生する散乱波においても、共振現象が存在する。このため中心周波数１４００ｋＨｚという高周波成分波ＧＡ（ｔ）波では探知目標波と上記共振散乱波とが混在し、探知目標波を認識し難くなる。また、図４４は、位相解析のため、共振波と非共振波とが混在したものとなる。このため、散乱波の共振が低減され、ある程度探知目標波の起生が確認できたわけである。

【０２６１】

一方、図４５は非共振波を用いた解析結果である。この成分波ＲＡ（ｔ）からは散乱現象による共振波が完全に除去されたものとなる。従って、高い精度で鉄筋の存在に起因する波の起生位置と対応するカーソルとが合致している。図４５のＲ（ｔ）波を用いた場合、更に上記の波の起生を特定しやすくなる理由がある。図４３乃至図４５は１４００ｋＨｚを中心周波数とする超広帯域成分波である。このような高周波の場合、コンクリート内を伝達する超音波は大きく減衰することより、微細な電気的雑音も探知結果に多大なる悪影響を与える。図４５の非共振波では、スペクトルの逆スペクトルを用いていることより、この電気的雑音に起因するスペクトルも除去されるという物理現象の存在である。

【０２６２】

図４６は、最も左に位置するカーソルから第４番目のカーソル位置ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝０で０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）と図４５のＲＡ（ｔ）波よりＦｉＬＴ^4（ｔ）・ＲＡ（ｔ）として作成している。t_Tの具体的な決定法は、図４２の鉄筋上端からの反射波の起生時刻t_h＝４５．２μ秒を用い、t_T＝t_hとし、Δｔ＝２μ秒とし、ｊの値を１乃至ＪＡとして、t_T＝t_h＋（ｊ－１）Δｔ毎に（ＦｉＬＴ^4（ｔ）・ＲＡ（ｔ））^{2}波を演算して表示装置で視認し、ＪＡが６となった時のものである。ｂの鉄筋下端からの反射波を除いて、他の起生波が全てカーソル位置と明敏に合致している。なお、各カーソル位置は鉄筋径φを１９ｍｍとして、次のようにして求めた。ａのカーソルは、図４２に示す狭帯域成分波で確定した鉄筋上端からの反射波起生時刻t_h＝４４．３μ秒付近で大きく起生する波の起生時刻t_{ha}に合致させたものである。また、ｂ乃至ｆのカーソルは、夫々数式７５～７９により求めた。

【０２６３】

【数７５】

$$t_{ha}+2\phi/sVp$$

【０２６４】

【数７６】

$$t_{ha}+\pi\phi/sVp$$

【０２６５】
【数７７】

$$t_{ha} + \pi\phi / cVp$$

【０２６６】
【数７８】

$$t_{ha} + \frac{3}{4}\pi\phi / 0.55sVp + \phi(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) / cVp$$

【０２６７】
【数７９】

$$t_{ha} + \frac{3}{4}\pi\phi / 0.59cVp + \phi(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) / cVp$$

【０２６８】
なお、ｓＶｐは鉄筋たて波音速であり、ｃＶｐはコンクリートたて波音速である。
【０２６９】
以上、数式７５乃至７９を用いて鉄筋径を算定する場合、数多くの同種の測定結果によれば、ｎ１を２又は４とした場合で、ＧＡ（ｔ）、ＨＡ（ｔ）又はＲＡ（ｔ）波の中心周波数が１２００乃至１４００ｋＨｚとすればよいと判明している。
【０２７０】
次に、図４７乃至図４９に示すフローチャートに基づいて第５の実施例について説明する。
【０２７１】
先ず、１対の発信探触子及び受信探触子の中心間距離をａとし、両探触子の中心を結ぶ線分を鉄筋の長手方向直上のコンクリート表面に配した計測で、前記探触子を前記線分上で移動させながら、数式６９で示す加算平均波Ｇ（ｔ）を取得する（ステップＳ５－１）。
【０２７２】
次に、第３の実施例等に基づいて鉄筋かぶり厚ｄを測定する（ステップＳ５－２）。
【０２７３】
次いで、分析法を選択し（ステップＳ５－３）、Ｇ（ｔ）波を選択した場合にはＦ（ｆ）をそのままＦ（ｆ）とし（ステップＳ５－４）、Ｈ（ｔ）波を選択した場合にはＦ（ｆ）を１．０とし（ステップＳ５－５）、Ｒ（ｔ）波を選択した場合にはＦ（ｆ）を１／Ｆ（ｆ）とする（ステップＳ５－６）。
【０２７４】
次に、最適周波数f_0を１２００ｋＨｚとする（ステップＳ５－７）。
【０２７５】
次に、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、ｎ１及びｎ２を自然数として、数式８０の演算を行う（ステップＳ５－８）。このとき、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・Ｆ（ｆ）の中心周波数がf_0となるように、ｎ１及びｎ２の値を自動的に制御する。
【０２７６】
【数８０】

$$GA(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \times A_2^{n2}(f) \cdot F(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０２７７】

次に、ｔＴ＝２・ｄ／$_{c}$Ｖ$_{p}$及びｊ＝１と設定する（ステップＳ５－９）。

【０２７８】

次に、数式８１で表される波ＧＢ（ｔ）に対してＧＢ^{np}（ｔ）を表示装置に表示させる（ステップＳ５－１０）。

【０２７９】

【数８１】

$$GB(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot GA(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０２８０】

次に、ｔ$_{T}$よりも後方に大きな振幅の波が生じているか判断し（ステップＳ５－１１）、生じていない場合には、ｊが６以上であるか判断する（ステップＳ５－１２）。そして、ｊが６以上の場合、ｆ$_{0}$が１４００ｋＨｚ以上か判断し（ステップＳ５－１３）、ｆ$_{0}$が１４００ｋＨｚ以上ではない場合、ｔ$_{T}$をｔ$_{T}$＋２（μ秒）、ｊをｊ＋１として、ステップＳ５－１０に戻る。

【０２８１】

ステップＳ５－１３でｆ$_{0}$が１４００ｋＨｚ以上となっている場合、探知は不可能である。また、ステップＳ５－１２でｊが６未満の場合には、中心周波数ｆ$_{0}$を、オペレータによるか、又は自動制御により、ｆ$_{0}$＋Δｆ$_{0}$に変更した上で、ステップＳ５－８に戻る。また、ステップＳ５－１１で振幅が大きな波が生じている場合には、ｊ１を１とし、更に数式８２及び８３の演算を行う（ステップＳ５－１５）。

【０２８２】

【数８２】

$$da = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a - \phi}{2} \right)^2 + d^2}$$

【０２８３】

【数８３】

$$t_{ha} = \frac{da}{cVp}$$

【０２８４】

次に、鉄筋径が設定されたテーブルＢＴ（ｊ）を用い、オペレータ処理で任意のｊに対応する鉄筋径ＢＴ（ｊ）を読み出し、φ－ＢＴ（ｊ）としａのカーソルの位置を前記ｔ$_{ha}$とし、数式７５乃至７９の演算を行うことにより、ｂ乃至ｆのカーソルの位置を特定する（ステップＳ５－１６）。表５にテーブルの内容の例を示す。

【０２８５】

【表５】

ｊ	１	２	３	４	５	６
鉄筋径φ（ＢＴ（ｊ））	９	１３	１６	１９	２２	２５

【０２８６】

次に、ＧＢ^{np}（ｔ）を表示した画面に上述のカーソルを表示させる（ステップＳ５－１７）。

【０２８７】

次に、第６番目のカーソルｆが大きな波の起生と合致しているかをオペレータが判断し（ステップＳ５－１８）、合致している場合には、第２乃至第５番目のカーソルｂ～ｅが他の起生波と概略合致しているかをオペレータが判断する（ステップＳ５－１９）。そして、合致していると判断した場合には、そのときのＢＴ（ｊ）の値が鉄筋径であると特定

する（ステップＳ５－２０）。

【０２８８】

一方、ステップＳ５－１８で合致していないと判断した場合には、テーブルＢＴ（ｊ）のカウントを上げ、他のテーブルを採用した上でステップＳ５－１６に戻る。また、ステップＳ５－１９で合致していないと判断した場合には、Ｒ（ｔ）波を選択しているか判断し（ステップＳ５－２１）、Ｒ（ｔ）波を選択している場合には、測定位置を変更して再度計測を行う（ステップＳ５－２２）。また、Ｒ（ｔ）波を選択していない場合には、Ｒ（ｔ）波の分析に変更し、f_0の値を１２００ｋＨｚに設定した上でステップＳ５－８に戻る。

【０２８９】

次に、第６の実施例について説明する。例えば表面から２０ｃｍ以上の深さに深く埋め込まれた鉄筋の径の探知では、鉄筋の存在に関連して生ずる波はその強度が微弱なものとなり、探知妨害波の中に埋もれてしまう。第６の実施例は、妨害波も共振現象を表すため、この共振現象を低減させ、前記鉄筋の存在に関連する反射波及び回折波を抽出することにより、鉄筋径を測定するものである。

【０２９０】

先ず、第６の実施例に基づく具体的な探知例について説明する。この探知例では、深く埋め込まれた鉄筋径の探知において、共振現象を低減させる。

【０２９１】

図２は図１の２３ｃｍの深さに埋め込まれた径が１９ｍｍの鉄筋のかぶり厚を探知した結果である。１対の探触子に内蔵された振動子の共振振動数は５００ｋＨｚｚ、径は４０ｍｍである。探触子走査法は第５の実施例の１０ｃｍのかぶり厚さの鉄筋径探知の場合と同一である。

【０２９２】

１０００回の加算平均波Ｇ（ｔ）より、数式２０に$_c V_p$＝４５００ｍ／秒、φ＝４０ｍｍ、α＝０．９を適用して得た最適周波数f_0＝１００ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ（ｔ）をGA^2（ｔ）表示したものである。具体的には、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとして、Ｆ（ｆ）にA_1（ｆ）を４回、A_2（ｆ）を７００回乗じて作成したものである。

【０２９３】

第１の実施例で説明したように、図２中のａ、ｂは探知妨害波であり、ｃが鉄筋、ｄがコンクリート厚に関する反射波である。図２の１００ｋＨｚ狭帯域成分波ＧＡ（ｔ）を得た加算平均波Ｇ（ｔ）より数式７３を用いて得るＨ（ｔ）波より、中心周波数１０４９ｋＨｚの広帯域成分波ＨＡ（ｔ）を取り出した後、ＨＡ（ｔ）に図示するＴ．Ｇ．Ｃ処理で後述のＨＢ（ｔ）を作成し、HB^3（ｔ）表示したものが図５０である。具体的には、Ｈ（ｔ）にf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとした$A_1{}^4$（ｆ）及び$A_2{}^6$（ｆ）を乗じ、数式８４の演算を行い、更に後述の時系列フィルタ処理を行った。

【０２９４】

【数８４】

$$HA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot\frac{F}{F}(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０２９５】

理論的には解明できていないが、コンクリートのような多孔質材の音速は、低周波より高周波の場合が若干遅くなり、また、探知路程が長くなればなるほど、上記変動が大きくなる。多くの一般的コンクリートを用いた計測検討によれば、探知路程が２０ｃｍ程度で、１００乃至２００ｋＨｚ前後の音速（$V_{100\sim200}$）と１０００ｋＨｚ前後の音速（V_{1000}）との間には、数式８５のような関係がある。

【０２９６】

【数８５】

$$\beta_g = \frac{V_{1000}}{V_{100\sim200}} = 0.93\sim0.94$$

【０２９７】

図２の１００ｋＨｚ成分波により鉄筋からの反射波の起生時刻が１０２．５μ秒と判断できる。これより、１０００ｋＨｚを中心周波数とする超広帯域成分波の場合の起生時刻は、１０２．５／０．９３＝１１０μ秒付近になるはずである。また、鉄筋径を２０ｍｍ程度と仮定すると、コンクリート内を鉄筋円周上で迂回するたて波の起生が１１０＋２０π／（０．９４×４．５）＝１２５（μ秒）となるはずである。従って、Δt_T＝１００（μ秒）、t_T＝１２５（μ秒）とし$t = t_T - \Delta t_T$以前の時刻で０、$t = t_T$で１．０、$t = t_T + \Delta t_T$以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を用いて、ｎ５＝１０としてＨＢ（ｔ）＝$FiLT^{n5}$（ｔ）・ＨＡ（ｔ）を計算した。

【０２９８】

図５０で径が１９ｍｍの丸鋼の場合を想定した複数のカーソルを発生させている。左からの第１カーソルが鉄筋上端、第２カーソルが下端、第３及び第４カーソルが鉄筋円周上を迂回する波で、前者が鉄筋内を後者がコンクリート内を伝達するたて波である。第５カーソルが鉄筋円周上で鉄筋内を迂回するよこ波、第６カーソルが鉄筋円周上でコンクリート内を迂回するよこ波である。多くの測定実験によれば、本実施例のように深い位置に埋め込まれた鉄筋の探知の場合、１０００ｋＨｚ前後の広帯域成分波でその振幅が大きく卓越する鉄筋経路波は第１、第４及び第５カーソルに対応する波である。カーソルの発生では、第１カーソルを最初の波の起生時刻に合わせた後、９ｍｍ、１３ｍｍ、１６ｍｍ、・・・のように、各々の径の場合で、相当する複数のカーソルを数式７５乃至７９を用いて発生させ、これらのカーソルのうち、第１、第４及び第５カーソルが前述の卓越する起生波の起生時刻と一致する径をさがすという処理を用いた。径が１９ｍｍのときの第１、第４及び第５カーソルが前記起生波の起生時刻と合致していることから、この鉄筋径が１９ｍｍと断定できる。なお、中心周波数１０４９ｋＨｚは、ｎ１及びｎ２の値をコントロールすることで行った。前記中心周波数を低周波から高周波方向へ変化させ、図５０に示すように、第１、第４及び第５カーソル位置に明敏な波が生ずるのを分析画面で視認することでｎ１＝４及びｎ２＝６が特定された。

【０２９９】

次に、図５１及び図５２に示すフローチャートに基づいて第６の実施例について説明する。

【０３００】

先ず、１対の発信探触子及び受信探触子の中心間距離をａとし、両探触子の中心を結ぶ線分を鉄筋の長手方向直上のコンクリート表面に配した計測で、前記探触子を前記線分上で移動させながら、数式６９で示す加算平均波Ｇ（ｔ）を取得する（ステップＳ６－１）。

【０３０１】

次に、第１の実施例等に基づいて深い位置に埋め込まれた鉄筋かぶり厚ｄを測定する（ステップＳ６－２）。

【０３０２】

次に、Ｆ（ｆ）を１．０に変更する（ステップＳ６－３）。

【０３０３】

次に、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、ｎ１を２、３又は４、ｎ２を自然数として、数式８０で表されるＧＡ（ｔ）波の中心周波数が１０００ｋＨｚ前後になるように、ｎ２の値を自動的に制御する（ステップＳ６－４）。

【０３０４】

次に、鉄筋径予測値をϕ_Bとして、数式８６で求められるt_Tに対するＦｉＬＴ（ｔ）を求め、数式８１の演算を行い、ＧＢ（ｔ）波を計算する（ステップＳ６－５）。

【０３０５】
【数８６】

$$t_T = \frac{\dfrac{2\times d + \phi_B \times \pi}{{}_cV_p}}{\beta_g}$$

【０３０６】
次に、数式８１で表される波ＧＢ（ｔ）に対してＧＢ^{np}（ｔ）を表示装置に表示させる（ステップＳ６－６）。
【０３０７】
次に、ａカーソルの位置ｔ$_{ha}$を計算する（ステップＳ６－７）。
【０３０８】
次に、鉄筋径テーブルＢＴ（ｊ）のｊを１とする（ステップＳ６－８）。
【０３０９】
次に、ｂ乃至ｆのカーソル位置を数式７５乃至数式７９を用いて算定する（ステップＳ６－９）。
【０３１０】
次に、ＧＢ^{np}（ｔ）波の上に前記ａ乃至ｆのカーソルを重ね描きする（ステップＳ６－１０）。
【０３１１】
次に、第１、第４及び第５番目のカーソルｂ、ｄ及びｅが大きな振幅の波と合致しているかをオペレータが判断し（ステップＳ６－１１）、合致している場合には、そのときの鉄筋径がそのテーブルのものに一致すると特定する（ステップＳ６－１２）。
【０３１２】
一方、ステップＳ６－１１で合致していないと判断した場合には、テーブルのカウントを上げ他のテーブルを採用した上でステップＳ６－９に戻る。
【０３１３】
次に、第７の実施例について説明する。第７の実施例は、極端に埋め込み深さの浅い鉄筋の径の探知において、共振波を用いるか、又は共振現象を低減若しくは除去する方法である。
【０３１４】
図５３は共振振動数２０００ｋＨｚ、径が４０ｍｍの振動子を内蔵した探触子を用い、径が１９ｍｍの丸鋼がかぶり厚１５．５ｍｍに埋め込まれた場合で、探触子中心間距離を６０ｍｍに固定し鉄筋直上に沿って１０ｃｍ移動させながら、収録した前述探触子走査法による１０００回の加算平均波を示す。かぶり厚が浅いために、コンクリートの表面と鉄筋との間で重複反射が生じ、共振現象を起こしている。
【０３１５】
図５３中のカーソル位置が鉄筋からの反射波の起生時刻を示すが、これを鉄筋からの反射波と断定するのは困難である。このような場合でも、鉄筋のかぶり厚及びその径を容易に探知し得る方法について説明する。図５４は図５３の時系列波に対応するスペクトルである。表示するカーソルは最左のカーソル位置をｆ$_1$とし、順に２ｆ$_1$、３ｆ$_1$、・・・のようになっている。
【０３１６】
そして、最も左側に位置するカーソルから第１、第２及び第３番目のカーソルが大きなスペクトルピークと合致している。これはコンクリートの表面と鉄筋上端との間で重複反射している波の共振スペクトルである。重要なこととして、この波はよこ波である。発信探触子よりコンクリートの表面の直下に入力されたたて波により、よこ波が自然発生する。かぶり厚の浅い鉄筋の探知の場合、発信探触子、鉄筋及び受信探触子の順の伝達経路で前記よこ波の強度が非常に大きくなる。但し、この現象はかぶり厚に比し、径の大きい探

触子を用いた２探触子計測の場合に発生する現象である。測定例として示さないが、小径の探触子を用い同様の計測を行えば、相対的にたて波スペクトルが卓越した結果が得られる。また、１探触子計測であれば、たて波スペクトルの方が大きく卓越してくる。いずれの方法によっても、共振振動数を容易に特定できる。

【０３１７】

振動子径４０ｍｍの発信探触子及び同径の受信探触子を用いた本実施例（図５４）によれば、コンクリートの表面と鉄筋上端との間の反射波の１次共振振動数がf_1＝７３．３ｋＨｚと測定されている。これより、鉄筋かぶり厚ｄは、数式８７で求められる。

【０３１８】

【数８７】

$$d = \frac{1}{2} \times \frac{\varepsilon_2 \cdot {}_cV_p}{f_1}$$

【０３１９】

ε_2はコンクリートのよこ波とたて波の音速比である。このコンクリートモデルの音速${}_cV_p$は３８００ｍ／秒であり、ε_2は０．５９である。従って、数式８８より鉄筋かぶり厚ｄは１５．３ｍｍとなる。実値は１５．５ｍｍであるため、高い精度で探知が行われているといえる。

【０３２０】

【数８８】

$$d = \frac{1}{2} \times \frac{10^6}{73.3 \times 10^3} \times 0.59 \times 3.8 = 15.3$$

次に、この場合の鉄筋径を測定する方法について説明する。

【０３２１】

図５５はＧ（ｔ）波を用いた１２７８ｋＨｚを中心周波数とする広帯域成分波ＧＡ（ｔ）に、図示する最左から第２番目のカーソル位置t_Tで１．０、ｔ＝０で０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を用いてＧＢ（ｔ）＝ＦｉＬＴ（ｔ）×ＧＡ（ｔ）を計算して得たものである。第１カーソルの位置をt_{ha}＝２×ｄ／${}_cV_p$とし、第２及び第３のカーソルを、夫々数式７５及び７６を用い、鉄筋径φが１９ｍｍとして算定して表示すると、第１カーソルの鉄筋上端からの反射波、第３カーソルの鉄筋内をその円周上で迂回するたて波のみが大きく励起している。鉄筋下端からの反射波は、第２カーソル位置にその痕跡を確認できるのみである。一方、数式７３によるＨ（ｔ）波及び数式７４によるＲ（ｔ）波を用いて鉄筋経路波を抽出した結果を、夫々図５６、図５７に示す。図５３に示す時系列波に、夫々Ｔ．Ｇ．Ｃフィルタ ＦｉＬＴ（ｔ）３７０１及び３８０１を乗じ、１１００ｋＨｚ及び１０００ｋＨｚを中心周波数とする広帯域成分波を取り出したものである。１９ｍｍの径に対応して、数式７５乃至７９を用いて算定される５本のカーソルにおいて、最左から３本（ａ、ｂ、ｃ）が夫々大きく起生する波と合致している。これより径が１９ｍｍの鉄筋と特定することができる。なお、探触子間距離ａが鉄筋かぶり厚ｄと比して著しく大きい場合、解析例としては示さないが、t_{ha}の計算式を変更する必要がある。この場合、探触子中心間距離をａ、探触子内振動子径をφとして、t_{ha}＝２×（d^2＋（（ａ－φ）／２）^{2}）$^{1/2}$／${}_cV_p$とすればよい。ところで、図５５、図５６、図５７の波形は各々の成分波をＧＡ（ｔ）、ＨＡ（ｔ）、ＲＡ（ｔ）として、夫々にＦｉＬＴ（ｔ）を乗じ、ＧＢ（ｔ）、ＨＢ（ｔ）、ＲＢ（ｔ）を計算し、GB^3（ｔ）、HB^3（ｔ）、RB^3（ｔ）を表示している。

【０３２２】

ＧＡ（ｔ）、ＧＢ（ｔ）、ＨＡ（ｔ）、ＨＢ（ｔ）、ＲＡ（ｔ）、ＲＢ（ｔ）波は、夫々１２８０ｋＨｚ、１１００ｋＨｚ、１０００ｋＨｚをf_Aとした$A_3{}^{n^3}$（ｆ）を夫々Ｆ（ｆ）、Ｆ／Ｆ（ｆ）、１／Ｆ（ｆ）に乗じて数式８９乃至９４式を用いて得たもので

ある。

【０３２３】

【数８９】

$$GA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n3}(f)\cdot F(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０３２４】

【数９０】

$$GB(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot GA(t)$$

【０３２５】

【数９１】

$$HA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n3}(f)\cdot\frac{F}{F}(f)\cdot e^{i\omega t}\right)df$$

【０３２６】

【数９２】

$$HB(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot HA(t)$$

【０３２７】

【数９３】

$$RA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n3}(f)\cdot\frac{1}{F(f)}\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０３２８】

【数９４】

$$RB(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot RA(t)$$

【０３２９】

ＧＡ（ｔ）の作成ではｎ３＝１６、ＨＡ（ｔ）の作成ではｎ３＝１０、ＲＡ（ｔ）の作成ではｎ３＝８とした。また、ｎ５＝１とし、図５５、図５６、図５７で、夫々t_Tを１５．９、１２．２、１２．２μ秒とした。また、１２８０、１１００、１０００ｋＨｚの周波数はf_Aを７００ｋＨｚから２０ｋｚ間隔で増大させ、その都度得られるGB^3（ｔ）、HB^3（ｔ）、RB^3（ｔ）を視認し、最も明敏に、図５５、又は図５６、又は図５７の起生波が得られたと判断した時の周波数である。

【０３３０】

次に、第８の実施例について説明する。第８の実施例は、数式７３及び７４で示す波を用い、材質が異なる積層材の構造物を用いた場合の実施例である。

【０３３１】

図５８は、既存のコンクリートの表面に厚さが２４ｍｍの鉄皮を置き、この鉄皮とコンクリートとの間に１００ｍｍ厚のモルタルを抽入し硬化させたものである。測点１、２，・・・５の計測で図１５（b_1＝２０（ｍｍ））における矩形の走査領域を設定し、共振振動数５００ｋＨｚｚ、径が４０ｍｍの振動子よりなる１対の発信探触子及び受信探触子を、その間隔を６０ｍｍに固定し、図示するように、前記走査領域内を自在に移動させながら、各測点で１０００回分の加算平均波G_j（ｔ）（ｊ＝１乃至５）を得た。

【０３３２】

第８の実施例は、数式７３に示すＨ（ｔ）波を用い、図５８に示す充填モルタル厚を測

定する方法である。図５９は図５８の測点３の加算平均波Ｇ（ｔ）を数式７３に適用し、８６０ｋＨｚを中心周波数とする広帯域スペクトルを取り出したものである。具体的には、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとしたA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用いて、図５９に示すスペクトルA_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・Ｆ／Ｆ（ｆ）を、ｎ１＝４、ｎ２＝１２として作成したものである。中心周波数は８６０ｋＨｚであった。対応する成分波ＨＡ（ｔ）をHA^3（ｔ）表示して図６０に太線で示す。図６０中の細線は図５８の測点３の加算平均波G_3（ｔ）である。図６０では、波５４０１及び５４０２が大きく励起している。波５４０１は図６１中の経路４２０２の表面波であり、波５４０２は経路４２０４のモルタル底部からの反射波である。経路４２０１の鉄皮上下面で重複反射する波の起生が、図６０のHA^3（ｔ）表示では確認できないが、これは、次の理由による。

【０３３３】

第１に、数式７３のＦ／Ｆ（ｆ）で表されるペクトルは全周波数にわたって共振及び非共振スペクトルを１．０となるスペクトル値としていることにほかならない。このような共振成分波のスペクトル値を相対的に大きく低減させた波では、図６１に示す鉄皮上下面間の重複反射波（４２０１）の強度が、その反射回数が増すに従い縮小していく。即ち伝達経路４２０１の波は指向角θが小さく多数回の重複反射を繰り返し、受信探触子に達する波の強度が大きく縮小していく。また、指向角θは、中心周波数が高周波になればなるほど小さくなるため、ＨＡ（ｔ）波の取り出しを高周波方向へ移行していくと、重複反射波４２０１は消滅していく。

【０３３４】

第２に、図６１の重複反射のない経路４２０４の波は、モルタル内での超音波の散乱減衰があるものの、鉄皮内を多数回重複反射する波と比して相対的に大きく励起する。

【０３３５】

第３に、数多くの計測実験によれば、ＨＡ（ｔ）波を用いた成分波では、探触子間で被探知体表面を伝達する波（図６１中の４２０２及び４２０３）の強度が相対的に大きく卓越してくる。

【０３３６】

これらの物理的現象により、図６０に示す太線の成分波が得られたわけである。従って、広帯域成分波（太線）の波５４０１は探触子間で鉄皮表面を伝達する表面波であり、波５４０２は図６１の経路４２０４のモルタル底部からの１回目の反射波である。図６０で、例えば時刻t_T＝６６．０μ秒で１．０、ｔ＝０で０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数状フィルタＦｉＬＴ（ｔ）をＨＡ（ｔ）に乗じ、ＨＢ（ｔ）＝$FiLT^4$（ｔ）・ＨＡ（ｔ）を作成し、HB^3（ｔ）表示したものが図６２である。

【０３３７】

実際に用いた演算処理は、モルタル厚の概略厚さを１００ｍｍ前後とし、モルタル音速を４３００ｍ／秒とし、モルタル底部からの反射波起生時刻t_Mをt_M＝２×１００／４．３＝４６μ秒付近と予測し、Δt_T＝２μ秒、t_T＝t_Mとしてt_T＝t_T＋（ｋ－１）×Δt_Tでｋの増分の都度得られるt_TでＦｉＬＴ（ｔ）・ＨＡ（ｔ）を演算したものである。図６２はｋ＝１０の時の結果である。

【０３３８】

前記モルタル底部からの１回目の反射波の後方に鉄皮内重複反射に起因する鉄皮下面からモルタル層へ連続して入力する超音波パルスのモルタル底部からの反射波の起生が確認できる。当然、これ等の波の起生時刻間隔は鉄皮厚２４ｍｍ、鉄の音速５９００ｍ／秒として算定されるモルタルへの超音波入力間隔（２×２４（ｍｍ）／５．９（ｍｍ）／μ秒　８．１４μ秒）と等しくなる。なお、８６０ｋＨｚという振動数は、ｎ１及びｎ２の値をコントロールし、ＨＡ（ｔ）波の中心周波数を７００乃至１４００ｋＨｚの範囲で変化させ、図６０中の太線で示す波のように、明敏な起生波が分析画面で得られたとオペレータが判断した時の特定値である。

【０３３９】

次に、第９の実施例について説明する。第９の実施例は、図５８に示す鉄皮下空隙の有

無の探知に関し、第８の実施例をさらに発展させたものである。第９の実施例の分析で用いる演算式を数式９５乃至１００として示す。

【０３４０】

【数９５】

$$G_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(F_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３４１】

【数９６】

$$H_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{F_j}{F_j}(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３４２】

【数９７】

$$HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \cdot A_2^{n2}(f) \cdot A_3^{n3}(f) \cdot \frac{F_j}{F_j}(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３４３】

【数９８】

$$t_T = {2 \times d_s} \Big/ {}_sV$$

【０３４４】

【数９９】

$$HB_j(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA_j(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０３４５】

【数１００】

$$HH_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n11}(f) \cdot A_2^{n21}(f) \cdot A_3^{n31}(f) \cdot FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３４６】

図６３は、図５８の厚さ２４ｍｍの鉄皮の下に１００ｍｍ厚のモルタル層があり、その下側にコンクリートが存在する構造物の測点１乃至５で測定した１０００回分の加算平均波G_j（ｔ）のスペクトルを重ね描きして示したものである。但し、測点２及び測点４に空隙が存在している。このG_j（ｔ）波は第８の実施例と同様の測定条件で収録されたものである。

【０３４７】

図６３に示すカーソル８３０１はG_j（ｔ）波の１次の共振振動数f_1＝１１９．８ｋＨｚである。２次乃至５次のカーソルも表記しているこのスペクトル比較図からは空隙の有無は解らない。

【０３４８】

加算平均波G_j（ｔ）を数式９５のように表現したとき、数式９６を用いてH_j（ｔ）を演算し、数式９７において分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第１の周波数フィルタA_1（ｆ）、２の周波数フィルタA_2（ｆ）及び第３の周波数フィルタA_3（ｆ）を用いて、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・A_3^{n3}（ｆ）・F_j／F_j（ｆ）を求めHA_j（ｔ）を演算し、鉄皮厚d_S＝２４ｍｍと鉄の音速$_SV$＝５９００ｍ／秒

を数式９８式に適用し、数式１０１の演算を行った。

【０３４９】

【数１０１】

$$t_T = 2\times 24/5.9 = 8.14$$

【０３５０】

そして、Δt_T＝１００μ秒として$t_T - \Delta t_T$＝－９１．８６μ秒以前の時刻で０、t_T＝８．１４で最大値１．０、$t_T + \Delta t_T$＝１０８．１４μ秒以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を数式９９に適用し、ｎ５＝１として、数式１０２で表される波を作成し、そのFA_j（ｆ）を比較して表示したスペクトルが図６４である。

【０３５１】

【数１０２】

$$FiLT(t)\cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\left(FA_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０３５２】

但し、ｎ１の値を０、ｎ２の値を６、ｎ３の値を０として演算した結果である。また、ｊａを自然数、Δt_a＝２μ秒としてt_Tを時刻歴後方へ$t_T = t_T + ja\times\Delta t_a$のように、徐々に移動させていく経緯の中で演算されたFA_j（ｆ）の比較図を示したものが夫々図６５及び図６６である。なお、t_Tの値は、図６５では５２．１４μ秒とし、図６６では７８．１４μ秒とした。

【０３５３】

図６５及び図６６においては、カーソル位置８５０１及び８５０２でスペクトルの形に大きな変化が生じているのが確認でき、t_Tが時刻歴後方の図６６で、この変化がより明敏になっている。

【０３５４】

カーソル位置８５０１及び８５０２に生じているスペクトルは、それぞれ鉄皮の表と裏で重複反射するたて波の１次及び２次共振スペクトルである。この共振スペクトルの１次振動数f_1は数式９８を用いると、数式１０３のように表現される。

【０３５５】

【数１０３】

$$f_1 = \frac{1}{t_T} = \frac{{}_sV}{2\cdot d_s}$$

【０３５６】

従って、f_1＝10^3／８．１４＝１２２．８ｋＨｚとなり、カーソル位置の振動数と概略一致している。数式１００を用い、ｎ１１＝０、ｎ２１＝０として、図６６のFA_j（ｆ）に$2f_1$付近のカーソル位置８５０２での振動数をf_Aとする第３の周波数フィルタA_3（ｆ）をｎ３１＝４００回乗じ、$A_3{}^{400}$（ｆ）・FA_j（ｆ）を比較表示したスペクトルが図６７である。図６７では、周波数軸（横軸）を図６４乃至図６６と比して、１／４に縮小表示している。

【０３５７】

図６７ではカーソル位置８５０２以外の位置にもスペクトルが生じている。位置８５０２のスペクトルのみを取り出すために、数式１００を再度用い分析周波数の上限f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第２の周波数フィルタA_2（ｆ）をｎ２１＝１００回、図６７の$A_3{}^{400}$（ｆ）・FA_j（ｆ）に乗じた$A_2{}^{100}$（ｆ）・$A_3{}^{400}$（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルを比較して示したものが図６８である。

【０３５８】

図６７のスペクトルに対応する数式１００で示すＨＨ$_j$（ｔ）波をＨＨ$_j$^{2}（ｔ）で比較表示したものが図６９である。

【０３５９】

図６８のスペクトルに対応する数式１００で示すＨＨ$_j$（ｔ）波をＨＨ$_j$^{2}（ｔ）で比較表示したものが図７０である。

【０３６０】

図７０のＨＨ$_j$^{2}（ｔ）波の比較表示によれば、測点直下に空隙のある測点２及び４で鉄皮の表面と裏面で重複反射する波の起生が明敏に確認できる。

【０３６１】

図６６のスペクトル比較図でカーソル位置８５０１の振動数ｆ$_1$で測点２のスペクトルが大きく生じ、カーソル位置８５０２の振動数２ｆ$_1$で、測点２及び４のスペクトルが大きく生じている。このようにカーソル位置８５０１で測点４のスペクトルが大きく生じないのは、測点２での空隙の平面的広がりが２０ｃｍ×２０ｃｍと広く、測点４での空隙の平面的広がりが１０ｃｍ×１０ｃｍと狭いことより生じた現象である。

【０３６２】

図５８の鉄皮の表面と裏面での重複反射を図７０に示すように取り出した分析法を、鉄皮下側のモルタルとコンクリートとの境界からの反射波を取り出すことに適用すると、次のようになる。モルタルとコンクリートとの境界からの反射波は測点１、３及び５で生じ、測点２及び４では鉄皮下側に空隙が存在するため、ほとんど生じないはずである。境界からの反射波の最初の起生時刻ｔ$_h$は鉄皮厚ｄ$_S$、モルタル厚ｄ$_m$とし、それぞれの音速を$_S$Ｖ、$_m$Ｖとしたとき、ｄ$_S$＝２４ｍｍ、ｄ$_m$＝１００ｍｍ、$_S$Ｖ＝５９００ｍ／秒、$_m$Ｖ＝４０００ｍ／秒を数式１０４に代入し、ｔ$_h$＝８．１４＋５０　５８．０μ秒となる。

【０３６３】

【数１０４】

$$t_h = \frac{2d_S}{{}_SV} + \frac{2d_m}{{}_mV}$$

【０３６４】

一方、鉄皮下面からモルタルへの入力超音波は図４７の鉄皮厚に依存する共振振動数位置を示すカーソル位置８５０１及び８５０２の付近で、その勢力が大きくなっているはずである。そこで、カーソル位置８５０２の付近で、モルタルとコンクリートとの境界からの反射波を抽出することを考える。

【０３６５】

図６５及び６６を求めた数式９７の演算では、ｎ１＝０、ｎ２＝６及びｎ３＝０としたが、カーソル位置８５０２の振動数２ｆ$_1$付近でのスペクトルの変化を見やすくするために、ｎ１＝０、ｎ２＝６及びｎ３＝２として、数式９７を用いた再演算でＨＡ$_j$（ｔ）を作成し、このＨＡ$_j$（ｔ）波に数式９９式の処理を増分量Δｔ$_a$、ｊａを自然数、ｔ$_h$＝５８．０をｔ$_T$の初期値とし、ｔ$_T$＝ｔ$_T$＋ｊａ×Δｔ$_a$のように徐々に変化させながら、ｔ＝ｔ$_T$－１００（μ秒）以前の時刻で０，ｔ＝ｔ$_T$で１．０、ｔ＝ｔ$_T$＋１００（μ秒）以降の時刻で０となる正弦関数状フィルタを作成してＨＢ$_j$（ｔ）を求める演算を繰り返し行い、この繰り返し処理の中で得られたＦＡ$_j$（ｆ）のスペクトルを比較表示したものが図７１である。

【０３６６】

図７１を得た他の処理条件として、数式９８の鉄皮厚に関連する時刻ｔ$_T$＝８．１４μ秒の変わりに、数式１０４の鉄皮とモルタル厚で算定されるｔ$_T$＝５８．０μ秒を用いた。また、ｎ５＝２とし、Δｔ$_a$＝２μ秒としてｔ$_T$をΔｔ$_a$ずつ時間軸後方へ移動させる毎に数式９９式の処理の再計算を繰り返し、ＦＡ$_j$（ｆ）を求めた。この繰り返し演算で求めた図７１以外のＦＡ$_j$（ｆ）を図７２及び図７３に示す。なお、ｔ$_T$の値は、図７１

では７８μ秒、図７２では１０６μ秒、図７３では１６８μ秒である。

【０３６７】

図７１乃至図７３のスペクトル比較図の変化の様相を分析すると、t_Tが時間軸後方へ移動するに従い位置８５０２にある鉄皮厚に関する共振スペクトルが消滅していき、位置８５０２の振動数近傍のカーソル９３０１の振動数f_m＝１９８ｋＨｚに大きなスペクトルが生成してくる。これが、鉄皮の表面及び裏面で重複反射する毎にモルタルに入力する超音波により励起されたモルタル厚に関する共振スペクトルの１つである。

【０３６８】

図７４は数式９９で求めた図７３のスペクトルFA_j（ｆ）に対応する時系列波の比較図である。この時系列波は数式１０５で表される。

【０３６９】

【数１０５】

$$HB_j(t) = FiLT^2(t) \cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３７０】

測点１、３及び５の波が測点２及び４の波より若干その振幅が大きいように判断できる。

【０３７１】

図７５は、図６９を求めた分析法にならい、数式１００を用いて、ｎ２＝０とし、f_m＝１９８ｋＨｚをf_Aとする第３の周波数フィルタA_3（ｆ）をｎ３１＝２００回だけFA_j（ｆ）に乗じ、数式１０６の演算の結果を表示したものである。

【０３７２】

【数１０６】

$$HH_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_3^{200}(f) \cdot FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０３７３】

数式１０６中の$A_3{}^{200}$（ｆ）・FA_j（ｆ）のスペクトルには、図６７中のカーソル８５０３、８５０４で示すような余計なスペクトルも混存している。このような余計なスペクトルを除去するために、分析周波数の上限をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第２の周波数フィルタA_2（ｆ）をｎ２１＝１００として、A_3（ｆ）・FA_j（ｆ）に乗じ、数式１００のHH_j（ｔ）を再演算し、$HH_j{}^2$（ｔ）表示した比較波形が図７６である。測点１、３及び５にモルタルとコンクリートとの境界からの分析処理で改変された反射波が明敏に確認できる。なお、図７６の波形振幅はHH_j（ｔ）において、最も大きい振幅値の絶対値を$|_{max}P|$とし、HH_j（ｔ）の各々の波の最大振幅値の絶対値を$|_{max}P_j|$としたとき、$|_{max}P_j| \geqq |_{max}P| / \beta$を満足する$HH_j$（ｔ）波を表示画面に最大表示している。本実施例の場合、β＝１．５であった。

【０３７４】

次に、第９の実施例について、図７７乃至図８０に示すフローチャートに基づいて説明する。

【０３７５】

先ず、鉄皮厚に関する共振波を取り出すことで鉄皮の下の空隙の有無を確認する方法（図７７及び図７８）について説明する。

【０３７６】

先ず、数式１４で示す加算平均波を取得する（ステップＳ９－１）。

【０３７７】

次に、鉄皮表面が粗いか否かを判断し（ステップＳ９－２）、粗い場合にはF_j（ｆ）を１．０とする（ステップＳ９－３）。

【０３７８】

次に、数式１０７の演算を行う（ステップＳ９－４）。

【０３７９】
【数１０７】

$$H_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(F_j(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０３８０】
次に、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を用い、ｎ１を０、ｎ２を２乃至１０の自然数として、数式１０８の演算を行う（ステップＳ９－５）。
【０３８１】
【数１０８】

$$HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \times A_2^{n2}(f) \cdot F_j(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

次に、$t_T = 2 \cdot d_s / {}_s V$、$f_1 = {}_s V / (2 \cdot d_s)$と設定し（ステップＳ９－６）、ＦｉＬＴ（ｔ）を自動的に作成する（ステップＳ９－７）。
【０３８２】
次に、ｎ５を自然数として、数式１０９の演算を行う（ステップＳ９－８）。
【０３８３】
【数１０９】

$$HB_j(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA_j(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０３８４】
次に、表示装置に、自然数ｊ（ｊ＝１～ｎＡ）についてFA_j（ｔ）を比較表示する（ステップＳ９－９）。
【０３８５】
次に、nf_1の振動数で大きなスペクトル値をもつスペクトルが生じたか否かをオペレータが確認する（ステップＳ９－１０）。
【０３８６】
そして、そのようなスペクトルが生じている場合、$f_A = nf_1$と設定して（ステップＳ９－１１）、数式１１０の演算を行う（ステップＳ９－１２）。
【０３８７】
【数１１０】

$$HH_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n11}(f) \cdot A_2^{n21} \cdot A_3^{n31} \cdot F_j(f) \cdot FA_j(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０３８８】
次に、表示装置に、自然数ｎｐについてHH_j^{np}（ｔ）を比較表示する（ステップＳ９－１３）。
【０３８９】
一方、ステップＳ９－１０において、スペクトルが確認できない場合には、t_Tを$t_T + \Delta t_a$に変更し（ステップＳ９－１４）、t_Tがt_{MAX}以上であるか判断し（ステップＳ９－１５）、t_{MAX}以上の場合には、鉄皮の下に空隙がないと判断する（ステップＳ９－１６）。また、t_{MAX}未満の場合には、ステップＳ９－７に戻る。
【０３９０】
次に、モルタル底部からの反射波を確認することで鉄皮の下の空隙の有無を確認する方法について説明する（図７９及び図８０）。
【０３９１】
先ず、数式１４で示す加算平均波を取得する（ステップＳ９－２１）。
【０３９２】

次に、コンクリートの表面が粗いか否かを判断し（ステップＳ９－２２）、粗い場合にはF_j（ｆ）を１．０とする（ステップＳ９－２３）。

【０３９３】

次に、数式１０７の演算を行う（ステップＳ９－２４）。

【０３９４】

次に、分析の上限振動数をf_{MAX}とするA_1（ｆ）、A_2（ｆ）及びA_3（ｆ）を用い、ｎ１及びｎ３を０、ｎ２を２乃至１０の自然数として、数式１０８の演算を行う（ステップＳ９－２５）。

【０３９５】

次に、$t_T = 2 \cdot d_s / {}_sV + 2 \cdot d_m / {}_mV$、$f_1 = {}_sV / (2 \cdot d_s)$と設定し（ステップＳ９－２６）、ＦｉＬＴ（ｔ）を自動的に作成する（ステップＳ９－２７）。

【０３９６】

次に、数式１０９の演算を行う（ステップＳ９－２８）。

【０３９７】

次に、表示装置に、自然数ｊ（ｊ＝１～ｎＡ）についてＦＡ$_j$（ｔ）を比較表示する（ステップＳ９－２９）。

【０３９８】

次に、ｎｆ$_1$の前後の振動数ｆｗで大きなスペクトル値をもつスペクトルが生じたか否かをオペレータが確認する（ステップＳ９－３０）。

【０３９９】

そして、そのようなスペクトルが生じている場合、数式１１０の演算を行う（ステップＳ９－３１）。

【０４００】

次に、表示装置に、自然数ｎｐについてHH_j^{np}（ｔ）を比較表示する（ステップＳ９－３２）。

【０４０１】

一方、ステップＳ９－３０において、スペクトルが確認できない場合には、t_Tを$t_T + \Delta t_a$に変更し（ステップＳ９－３３）、t_Tがt_{MAX}以上であるか判断し（ステップＳ９－３４）、t_{MAX}以上の場合には、鉄皮の下が全て空隙であると判断する（ステップＳ９－３５）。また、t_{MAX}未満の場合には、ステップＳ９－２７に戻る。

【０４０２】

次に、第１０の実施例について説明する。第１０の実施例１０は、プレストレスコンクリート（ＰＣ）梁又は床版内のシース管内セメントミルクの充填度の探知である。

【０４０３】

ＰＣ橋梁の梁及び床版においては、コンクリート内部に鉄製又はポリエチレン製シース管を配し、その管内にあるＰＣ鋼棒を緊張し、長径間構造物を構成している。既設又は新設の橋梁において、前記ＰＣ鋼棒の緊張後、シース管内にセメントミルクが充填されている。その充填の程度を簡便な測定で把握する方法の確立は、当該建設物の保守保全の観点より最も重要なテーマの１つとなっている。

【０４０４】

このような探知テーマに対しても、所定の探触子移動領域で発受信供用の探触子又は１対の発信探触子及び受信探触子を、固定配置、連続移動走査、又は離散化移動走査する間、超音波を探触子より連続的に発信して受信した加算平均波Ｇ（ｔ）又は数式７３で定義されるＨ（ｔ）波に、前記第１、第２及び第３の周波数フィルタ並びに所定のＴ．Ｇ．Ｃフィルタ（ＦｉＬＴ（ｔ））を組み合わせ適用することで、前記充填度の探知が可能となる。

【０４０５】

図８１は配筋されたＰＣ床版の断面を示すものである。３本のポリエチレン製シース管（細径外径：８０ｍｍ、肉厚：３ｍｍ）がコンクリート面より２７０ｍｍ（シース管中心）位置に埋め込まれている。すべてのシース管内にＰＣ鋼棒が存在するが、セメントミル

クが最右のシース管内に１００％、真中のシース管には５０％充填されている。最左のシース管内にはセメントミルクは充填されていない。

【０４０６】

第５の実施例に基づいて、５００ｋＨｚの共振振動数を持つ振動子径７５ｍｍの１対の発信探触子及び受信探触子をその中心位置を結ぶ線分が図８１のシース管５５０２の直上になるようにし、且つその間隔を９５ｍｍに固定し、前記線分上にそって２００ｍｍの移動走査を行い、１５００回分の加算平均波を求めＧ（ｔ）とする。コンクリート音速$_{c}V_{p}$＝４３５６ｍ／秒として、数式２０の最適周波数を用いて数式１１１で求められた周波数を中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ（ｔ）をＧ（ｔ）から取り出し、GA^{2}（ｔ）を示したものが図８２である。

【０４０７】

【数１１１】

$$f_0 = \frac{1}{2}\alpha(f)\frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}\phi} = \frac{1}{2}\times 1.4\times\frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}\times 75}\approx 80kHz$$

【０４０８】

波５６０１は５１ｍｍのかぶり厚で埋め込まれた径が１３ｍｍの異形鉄筋からの反射波であり、波５６０２はシース管表面からのたて波反射波である。波５６０３はシース管表面からの反射波である往路又は復路をたて波、復路又は往路をよこ波とする波と、シース管回りを回折する波が偶然重畳して生じたものである。また、波５６０４はシース管表面からの反射波である往路、復路共よこ波とする波とＰＣ梁等の厚さに関する反射波とが偶然に重畳して現れたものである。従って、本実施例で用いるコンクリートモデルはその内部探知が比較的困難なものである。一方、図８３は図８１の３本のシース管直上で、図８２の場合と同様に計測した多点計測結果GA_{j}（ｔ）である。但し、探触子中心間距離を９５～１３５ｍｍの間で変動させた計測である点で、図８２の場合異なっている。

【０４０９】

測定位置Ｎｏ．１の波がシース管５５０１直上、測定位置Ｎｏ．２の波がシース管５５０２直上、測定位置Ｎｏ．３の波がシース管５５０３直上での結果である。具体的には、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとして、第１の周波数フィルタF_{1}（ｔ）を４回、第２の周波数フィルタF_{2}（ｔ）を１２００回、G_{j}（ｔ）に乗じ、８０ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波GA_{j}（ｔ）を取り出しGA_{j}^{2}（ｔ）表示したものである。

【０４１０】

各計測波で、波形振幅が大きく変動している。これは探触子走査面におけるコンクリート表面が凸凹していることから生じたものである。一般に、コンクリート表面の粗さ加減が各測点で異なる。この場合、Ｇ（ｔ）波の変わりに数式７３に示すＨ（ｔ）波を用いると、この問題が解決される。数式９７を用いｎ３＝０として、Ｈ（ｔ）波に、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとして、第１の周波数フィルタF_{1}（ｔ）を４回、第２の周波数フィルタF_{2}（ｔ）を１４００回乗じ、８０ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波HA_{j}（ｔ）を取り出し、HA_{j}^{2}（ｔ）表示したものを図８４に示す。

【０４１１】

図８４によれば、探触子直下にシース管と平行に径が１３ｍｍの鉄筋のないHA_{1}（ｔ）、HA_{3}（ｔ）と、鉄筋のあるHA_{2}（ｔ）波を比較すると、カーソル位置５８０１で起生するシース管上端からの反射波の強度が異なっている。

【０４１２】

即ち、HA_{1}（ｔ）、HA_{3}（ｔ）の前記シース管からの反射波の強度は同一であり、HA_{2}（ｔ）の反射波のみがシース管直上にある１３ｍｍの異形鉄筋で超音波が一部遮断されることより、その強度が小さくなっている。以後の分析は図８４のHA_{j}（ｔ）波を用いて行う。もちろん、コンクリート表面が平滑で、図８３に示すGA_{j}（ｔ）波が、図

８４に示すようになる場合、ＨＡ$_j$（ｔ）波でなくＧＡ$_j$（ｔ）波を以後の分析で用いても一向に構わない。

【０４１３】

実際のＰＣ梁及び床版の測定では、その厚さは既知である。もし、不明であるとしても、シース管等がその直下にない位置で計測する加算平均波Ｇ（ｔ）より、図８２を得たと同様の処理により、ＧＡ（ｔ）波を取り出せば、この厚さを測定できる。図８４のカーソル位置５８０２は、数式１１２により以下のように算定したものである。

【０４１４】

【数１１２】

$$t_T = \frac{2 \cdot d}{{}_cV_p} + \beta_2 \cdot \frac{1}{f_0}$$

【０４１５】

この数式１１２に、梁背ｄ＝３７ｃｍ、$_C V_P$＝４３５９ｍ／秒、f_0＝８０ｋＨｚ、β_2＝１．０を適用すると、t_T＝１６９．７６＋１２．５　１８２．３μ秒となる。

【０４１６】

数式９７で求められたＨＡ$_j$（ｔ）波（図８５）に、t_T＝１８２．３μ秒（梁背からの反射波起生時刻）で最大値１．０、t_1＝０で０、t_2＝２×１８２．３＝３４６．６μ秒以降で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）をｎ５＝４として、数式９９を用いて演算したＨＢ$_j$（ｔ）波を図８６に示す。

【０４１７】

図８７の各スペクトル（図８６の波に対応）に図８１の計測図の測定番号に対応した番号を付している。スペクトル６６０１が測点１波のＨＢ$_1$（ｔ）＝ＦｉＬＴ^4（ｔ）・ＨＡ$_1$（ｔ）のスペクトルであり、スペクトル６６０２が測点２波のＨＢ$_2$（ｔ）＝ＦｉＬＴ^4（ｔ）・ＨＡ$_2$（ｔ）のスペクトルであり、スペクトル６６０３が測点３波のＨＢ$_3$（ｔ）＝ＦｉＬＴ^4（ｔ）・ＨＡ$_3$（ｔ）のスペクトルである。

【０４１８】

図８１に示すモデルにおいては、測点１直下のシース管５５０１ではその内部にセメントミルクが充填されていない。測点２直下のシース管５５０２ではその内部にセメントミルクが５０％の比率で、図８１に示すように、管内下部にのみ充填されている。測点３直下のシース管５５０３ではその内部にセメントミルクが１００％充填されている。

【０４１９】

探触子をシース管直上に配置した計測であるため、すべての測点でのＨＢ$_j$（ｔ）波では版厚反射経路の波の伝達が、このシース管の存在により遮断される。しかしながら、シース管内セメントミルクの充填度により、この遮断の程度は変化する。測点１及び２直下のシース管内には空気層があることより、シース管内を透過して、床版底部に達る超音波強度は極めて微弱となる。一方、測点３直下のシース管内にはセメントミルクが１００％充填されているため、シース管の超音波透過量は測点１及び２の場合に比して著しく大きくなる。

【０４２０】

図８６のＨＢ$_j$（ｔ）波に対応する図８７のスペクトルＦＡ$_j$（ｆ）の比較で、測点３のスペクトル値６１０３が測点１のスペクトル値６１０１、及び測点２のスペクトル値６１０２より著しく大きくなる振動数f_Eは、カーソルで示すように、f_E＝７０ｋＨｚ付近と特定できる。

【０４２１】

このf_Eをf_Aとして、数式１００を適用し、図８７のスペクトルに第３の周波数フィルタ$A_3{}^{n3}$（ｆ）を乗じて得たスペクトルが図８８である。ここでｎ２＝０、ｎ３＝２００としている。

【０４２２】

図８８に示すスペクトルは、上述のフィルタリング処理で、図８７のスペクトルより切り出されたものと解することができる。図８８のスペクトルに対応する時系列波HH_j（ｔ）を図８９に示す。

【０４２３】

図８６に示すHB_j（ｔ）＝$FiLT^4$（ｔ）・HA_j（ｔ）波には、シース管を透過して得られる床版底部からの反射波に他の何らかの原因で生ずる波（妨害波）が重畳している。本実施例では、図８６の波形でも、測点３直下のシース管内にセメントミルクが１００％充填されているため、床版底部からの反射波が大きく起生している状態を確認できる。しかしながら、現場計測においては、前記妨害波の強度が大きく起生する場合もある。この場合、測点３の起生波の振幅が測点１及び２における振幅より小さくなることもある。このような場合でも、図８７を用いて説明した同図のカーソル位置（振動数f_E）の特定と、この振動数f_Eでスペクトルを取り出す数式１００を用いた第３のフィルタによる処理によれば、前記妨害波を完璧に除去して、シース管を透過する床版反射波HH_j（ｔ）のみを取り出すことが可能となる。図８９に示す波がこの結果である。

【０４２４】

図８９によれば、測点３直下のシース管にセメントミルクが完全に充填されており、測点１及び２のシース管内はその充填が不完全であると容易に判断できる。ところで、このようなf_Eの値のテーブルを作成しておけば、現場での探知計測でコンクリート音速$_cV_p$、シース管径ϕ_s、梁背又は床版厚を既知として、対応するf_Eの値をそのテーブルにより特定し、$f_E \times {}_cV_p / V_{ST}$を新たな$f_E$とすれば、$f_E$を自動的に特定することができる。この$f_E$の値の付近（$f_{E1}$）で前記$FA_j$（ｆ）のいずれかのスペクトルにおいて大きなスペクトルピークが生じたとき、対応するシース管にセメントミルクが１００％充填されていると判断し、このf_{E1}をf_Aとして前記HH_j（ｔ）を取り出せばよい。しかしながら、測点１及び２のシース管内のセメントミルク充填度は解らない。この充填度の分析法について説明する。

【０４２５】

図９０は加算平均波G_j（ｔ）をG_j^2（ｔ）表示したものである。カーソル位置を図８２で確定したシース管表面からのたて波反射起生時刻に設定している。図８３の場合のGA_j（ｔ）波と同様、測点１の加算平均波G_1（ｔ）は測点２及び３の加算平均波に比し、各測点での超音波の透過度の違いによりその強度が小さくなっている。

【０４２６】

図９１は図９０の各測点でのG_j（ｔ）波を各々その表示画面で最大振幅表示したものである。カーソル位置を、前記管表面からの反射波の下側に生ずる波の起生位置t_T付近に設定している。本測定モデルの場合、この付近の波は、上述のように、シース管表面からの反射波の内、往路（復路）をたて波、復路（往路）をよこ波とするモード変換波とシース管外周廻りのコンクリート内を伝達する回折波が偶然に重畳したものとなっている。

【０４２７】

前記モード変換波と回折波の卓越度は周波数に依存して変動する。図９２は図９１のG_j（ｔ）波より数式９６を用いてH_j（ｔ）波を作成し、次に数式９７を適用して、F_j／F_j（ｆ）に、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとした第１の周波数フィルタA_1^{n1}（ｆ）及びA_2^{n2}（ｆ）を乗じて求めたHA_j（ｔ）に対し、HA_j^2（ｔ）表示したものである。具体的にはｎ１＝４、ｎ２＝２２００、ｎ３＝０とすることで、成分波の中心周波数が７０ｋＨｚとしている。図９２によれば、測点１及び２のHA_j（ｔ）において前記カーソル位置（t_T＝１４４．８３μ秒）に波の起生が確認できる。

【０４２８】

このカーソル位置の波がシース管回りを回折する波である。この回折波にはシース管円周上を回折する波、シース管外側コンクリートを回折する波、シース管内側コンクリートをシース管円周にそって回折する波の３種の波がある。これらの波の相対強度は成分波の振動数で大きく変動する。多くの同種の測定例によれば、５０～７０ｋＨｚの中心周波数を持つ狭帯域成分波では前記３種の回折波のうち、シース管外側コンクリートをシース管

円周にそって伝達する回折波が支配的となる。また、前記シース管外周コンクリート内を伝達する回折波強度はシース管内セメントミルク充填度によっても大きく変化する。シース管内が未充填の場合、その強度が最も大きく、充填が成されるに従い、その強度が徐々に小さくなってくる。更に、シース管内が未充填及び小量充填の場合、シース管円周長を用いて、数式１１３に基づいて算定される振動数ｎ×ｆ$_S$成分が共振現象により相対的に大きく励起してくる。

【０４２９】

【数１１３】

$$n \times f_s = n \times \frac{V_p}{\pi\phi}$$

但し、φはシース管直径、ｎは１以上の整数（自然数）である。

【０４３０】

数式９９を用いて前記ｔ$_T$位置で最大値１．０、ｔ＝０で０、ｔ＝２×ｔ$_T$以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を図９２のＨＡ$_j$（ｔ）波に１００回乗じ、ＨＢ$_j$（ｔ）＝ＦｉＬＴ^{100}（ｔ）×ＨＡ$_j$（ｔ）を作成する。図９３がＨＢ$_j$（ｔ）波である。対応するスペクトルを図９４に示す。スペクトル６８０１は測点１の切り出し波ＨＢ$_1$（ｔ）に対応し、スペクトル６８０２は測点２の切り出し波ＨＢ$_2$（ｔ）に対応し、スペクトル６８０３は測点３の切り出し波ＨＢ$_3$（ｔ）に対応している。

【０４３１】

上述の実験則及び物理現象によれば、数式１１３で算定されるｎ・ｆ$_S$でのスペクトル値の大きさがスペクトル６８０１で最も大きく、次にスペクトル６８０２が大きく、スペクトル６８０３が最も小さくなるはずである。図９４にカーソル６８０４をｎ×ｆ$_S$の位置に示している。但し、ｆｓは数式１１４のようにし、ｎ＝３、ｎ×ｆ$_S$＝５３ｋＨｚとした。

【０４３２】

【数１１４】

$$f_s = \frac{4359^{m/sec} \times 10^3}{3.14 \times 80^{mm}} = 17.35$$

【０４３３】

しかしながら、ｎ×ｆ$_S$におけるスペクトル値は、スペクトル６８０２、スペクトル６８０１、スペクトル６８０３の順に小さくなっており、前記上述のような、スペクトル６８０１、スペクトル６８０２、スペクトル６８０３の順に大きくなるという関係にはなっていない。

【０４３４】

これは、ｔ$_T$付近の時刻の波には、上述のようなシース管表面で反射する往路（復路）をよこ波、復路（往路）をたて波とする伝達波及び他の何らかの原因で生じた妨害波が、シース管外周コンクリートを回折する波に重畳しているためである。

【０４３５】

前記妨害波とシース管外周コンクリートを回折する伝達波の強度比は、数式９９による図９３を求めた処理（ＦｉＬＴ^{100}（ｔ）・ＨＡ$_j$（ｔ））において、カーソル位置ｔ$_T$を時間軸後方に移動していくことで徐々に変化していく。

【０４３６】

図９５乃至図９７は、図９２の時刻ｔ$_T$を１４４．８３μ秒として、夫々ｔ$_T$＝１４４．８＋１０＝１５４．８μ秒、１４４．８＋２０＝１６４．８μ秒、１４４．８＋３０＝１７４．８μ秒としたときのＦｉＬＴ^{100}（ｔ）・ＨＡ$_j$（ｔ）波のスペクトルを比較表示したものである。

【０４３７】
ｎ×ｆ$_S$＝５３ｋＨｚ付近で、スペクトル６８０１、スペクトル６８０２、スペクトル６８０３の順で各スペクトル値が大きくなっている。また、そのスペクトルの形状も似たものとなる時刻ｔ$_T$は、図９６のｔ$_T$＝１６４．８μ秒の場合である。即ち、ｔ$_T$＝１６４．８μ秒付近の波では、シース管外周コンクリート回りを回折する波に比し、前記妨害波の強度が相対的に小さくなっている。
【０４３８】
これより、図９６のカーソル位置で示す振動数ｎ×ｆ$_S$＝３×１７．３５＝５２ｋＨｚをｆ$_A$とする第３の周波数フィルタＡ$_3$（ｆ）を用い、数式１００を適用しｎ１１＝０、ｎ２１＝０として、Ａ$_3$^{31}・ＦＡ$_j$（ｆ）なる演算を行い表示したのが図９８のスペクトルである。ここで、ｎ３１＝２００とした。対応する波形（数式１１５）をＨＨ$_j$^{2}（ｔ）示したものが図９９である。
【０４３９】
【数１１５】

$$HH_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n31}\cdot FA_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０４４０】
探知妨害波（シース管表面からのモード変換波及び他の何らかの原因で発生する波）が除去され、上述の実験則及び物理現象を明解に示す結果となっている。即ち、改変されたシース管外周コンクリートを回折する伝達波がシース管内セメントミルク未充填の測点１の分析波の場合で最も大きく、シース管内セメントミルクが５０％充填の測点２の分析波の場合でその次に大きく、シース管内セメントミルクが１００％充填の測点３の分析波の場合で最も小さくなった。従って、図９９に示す波の比較で、シース管内セメントミルクの充填度が確認できる。
【０４４１】
なお、図９８及び図９９のシース管外周コンクリートを回折する波の取り出しでは、若干の技術的判断が必要とされる。つまり、図９５、図９６、図９７のいずれのスペクトルより図９８のスペクトルを第３の周波数フィルタ処理で取り出すべきかの判断が必要とされる。次に、このような判断を要しない分析について説明する。
【０４４２】
コンクリート内に埋め込まれたシース管において、管内部にセメントミルクが充填されていない場合、シース管自体がシース管に入力する超音波によって共振現象を起す。セメントミルクの充填度によって、この共振現象は大きく変化する。即ち、充填度が高くなるに従い共振は小さなものとなっていく。
【０４４３】
図９２の時刻ｔ$_T$を徐々に大きくし、カーソル位置を時刻軸後方へ移動させながら図９４乃至図９７を取り出す方法を、さらに継続していくと、誤ることなくシース管内セメントミルク充填度を探知できる。
【０４４４】
図１００は、数式９９を用いて図９２のＨＡ$_j$（ｔ）波に、ｔ$_T$＝２５２μ秒で１．０、ｔ＝ｔ$_T$－１００＝１５２μ秒以前の時刻で０、ｔ＝ｔ$_T$＋１００＝３５２μ秒以降の時刻で０とする正弦関数を２０回乗じたスペクトルの比較図である。波７４０１が直下のシース管の充填度が０％の場合の結果を示し、波７４０２が充填度５０％の場合の結果を示し、波７４０３が充填度１００％の場合の結果を示し、夫々測点１、測点２、測点３における測定結果に対応する。波７４０１及び波７４０２のスペクトルがほとんど一致している。更に、時刻ｔ$_T$の値を１．０μ秒ずつ増加させ、図１００を得るときと同様の処理を繰り返すと、スペクトルの比較図が少しずつ変動していく。
【０４４５】
図１０１乃至図１０３は、この変動の比較図（数式９９の右辺ＦＡ$_j$（ｆ））であり、

t_Tは、図１０１では２８１μ秒、図１０２では２９９μ秒、図１０３では３０８μ秒である。

【０４４６】

図１００乃至図１０３の比較図について検討すると、波７４０１のスペクトルの形状はt_Tが増加してもほとんど変化していない。波７４０２のスペクトル形状は、最初波７４０１のスペクトル形状とほとんど同一であるが、t_Tの増加に伴って変化し、且つそのスペクトル値が漸減していく。そして、図１０３では、この波７４０２のスペクトルは、波７４０３のスペクトルとその形状及びスペクトル強度が似たものとなっている。

【０４４７】

また、波７４０１のスペクトルの最大値位置を示す振動数は、前記t_Tの増分の間、ほとんど変化せず一定値となっている。

【０４４８】

前記スペクトル比較図の変化の特徴は、シース管に入力する超音波によって生ずるシース管の振動挙動としての共振現象を端的に示すものである。波７４０１のスペクトルの前記変化の特徴については、測点１のシース管内セメントミルクが０％充填であるため、前記共振波が長時間継続することを示している。波７４０２のスペクトルの変化の特徴については、測点２のシース管内セメントミルクが５０％充填であるため、前記共振波が測点１の場合に比しより早く減衰消滅している。波７４０３のスペクトルの変化の特徴については、測点３のシース管内セメントミルクが１００％充填であるため、波７４０１及び７４０２の場合に比し、前記共振現象が存在しない。上述のような共振現象を端的に示すこと以外に、波７４０２のスペクトルが最初波７４０１のスペクトルとほとんど同一であり、時刻t_Tの値が増加していくと、徐々に波７４０３のスペクトルに漸減していく。

【０４４９】

図１０３のスペクトルに対応する数式９９の$HB_j(t)$波のt_T＝３０８μ秒における切り出し波を図１０４に示す。

【０４５０】

図１０４に示す波では、前記共振波が測点１で大きく生じ、測点２及び３では同程度の波の強度を示すように見える。しかしながら、コンクリートの内部探知では、一般的に、予期し得ぬ探知妨害波が度々生ずる。例えば測点２の切り出し波で、前記探知妨害波が前記がシース管の存在で生ずる共振波と重畳していることも稀ではない。

【０４５１】

図１０４の切り出し波は前記時系列フィルタ$FiLT(t)$を２０回にわたり$HA_j(t)$に乗じ、$FiLT^{20}(t)\cdot HA_j(t)$を示すものである。この$FiLT^{20}(t)\cdot HA_j(t)$の代わりに数式９９による再計算で、ｎ５＝１とした$HB_j(t)=FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t)$の切り出し波を図１０５に示す。図１０５の$FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t)$波に対応するスペクトル$FA_j(f)$を図１０６に示す。$FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t)$においてｎ５＝２０、ｎ５＝１の場合で測点１（ｊ＝１）のシース管内セメントミルク充填度が０％の場合のスペクトルの最大値位置をそれぞれ図１０３のカーソル７７０４、図１０６のカーソル８００４で示している。

【０４５２】

カーソル７７０４及び８００４が示す振動数はそれぞれ４６．６ｋＨｚ、４６．４ｋＨｚとまったく変動していない。図１００乃至図１０３のt_Tの増分毎の$FiLT^{20}(t)\cdot HA_j(t)$波のスペクトルのうち、測点１のシース管が空の場合の$FA_1(f)$スペクトルもこのカーソル位置の振動数はほとんど変化していない。

【０４５３】

これは、これらのカーソル７７０４、８００４の振動数（４６．４ｋＨｚ）が、前記内部にセメントミルクがないコンクリート内に埋め込まれたシース管の共振振動数であることが原因して生じた現象である。$FiLT^{n5}(t)\cdot HA_j(t)$波（ｎ５＝１）に対応するスペクトルを示す図１０６によれば、カーソル位置に大きな振幅のスペクトルが立ち上がっている。これが前記シース管の共振に伴うスペクトルである。カーソル位置より

左側（低周波方向）及び右側（高周波方向）に幾つかのスペクトルの起生が確認できる。これらは何らかの原因で生じた妨害波のスペクトル群である。

【０４５４】

図１０５の数式１１６で表される波に数式１００を適用し、図１０６のカーソル８００４の共振振動数４６．４ｋＨｚをf_Aとする第３の周波数フィルタ$A_3^{n31}(f)$を用い、ｎ２１＝０として、数式１１５を演算し、その右辺に示す（$A_3^{n31}(f)$・$FA_j(f)$）を示したものが図１０７のスペクトルである。ここで、ｎ３１＝４００である。

【０４５５】

【数１１６】

$$HB_j(t) = FiLT(t) \cdot HA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (FA_j(f) \cdot e^{iwt}) df$$

【０４５６】

測点１での成分波８１０１、測点２での成分波のスペクトル８１０２及び測点３での成分波８１０３のスペクトルがそのスペクトル値の大小関係を鮮明にして求められている。

【０４５７】

図１０７のスペクトルに対応する時系列波$HH_j(t)$を示したものが図１０８である。前記$A_3^{n31}(f)$を用いたフィルタリングで改変されたシース管に生ずる共振波が抽出されている。０％充填の測点１で最も大きい共振波が得られ、５０％充填の測点２でその次に大きい共振波が得られている。１００％充填の測点３では測点１及び２の場合に比し、ほとんど前記共振波の起生を確認することができない。

【０４５８】

図８３の$G_j(t)$波においても、図８４のように、$H_j(t)$波の比較図となる場合には、前記分析で用いた$H_j(t)$を$G_j(t)$に置き換えても、同様の分析結果を得ることができる。

【０４５９】

図１０９及び図１１０は第１０の実施例としてシース管の埋め込まれたコンクリート床版においてシース管の真上のコンクリート表面で得た加算平均波を用いて、床版の反射波に注目してシース管内部のセメントミルクの充填度を探知する方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ１０－６における中心周波数は図１１１のように求めることができる。また、中心周波数f_0の値は、１対の発信探触子及び受信探触子の振動子径をφ、コンクリートの音速を$_cV_p$、探触子の中心間距離の変動量をΔ１としたとき、数式１１７で求められる。

【０４６０】

【数１１７】

$$f_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{{}_cV_p}{\frac{1}{2}(\phi + \Delta l)}$$

【０４６１】

また、図１１２乃至図１１４は第１０の実施例としてシース管に埋め込まれたコンクリート床版においてシース管の直上のコンクリート表面で得た加算平均波を用いて、シース管を回るコンクリート内回折波に注目すると共に、シース管の共振特性に注目してシース管内部のセメントミルクの充填度を探知する方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ１０－２５における中心周波数は図１１１のように求めることができる。また、中心周波数f_0の値は５０乃至７０ｋＨｚとする。更に、ステップＳ１０－２８におけるｎ５の値は、自然数とする。更にまた、ステップＳ２９におけるf_Eの値は、自動処理で特定してもよい。なお、f_Eの値は、ＰＣ床版の建設の前に、図８１のような校正供試体

を作成し、この供試体を用いて得たG（ｔ）波にこの探知方法を適用することで予め求めておいてもよい。また、実際の現場計測においては、シース管内部がからのときのG（ｔ）波をG_j（ｔ）の中に校正用の波として$G_j = {}_jB$（ｔ）の中に混在させておくことが好ましい。また、G（ｔ）波の取得は、測定現場でシース管内へのセメントミルクの注入前に計測しておくか、図８１のような校正用の供試体を作成し、この供試体を用いて計測することにより、行うことができる。

【０４６２】

なお、実施例としては示さないが、第９及び第１０の実施例の探知法はジャンカ、内部空洞、剥離等の探知及び材質の異なる多層樹脂材等の剥離探知にも、そのまま適用可能である。

【０４６３】

次に、第１１の実施例について説明する。コンクリートは打設後の養成等によっては、その表面に亀の子状のフェアークラックが多量に生ずる場合がある。超音波を用いてこのようなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の探知を行っても、その平面的位置の確認も不可能となる場合がある。第１１の実施例は、受信及び発信共用の探触子を用いて、このような場合の計測を行う方法である。

【０４６４】

図１１５は、フェアークラックが多量にある場合の鉄筋の探知結果を示す。測点３、測点８及び測点１３の位置にかぶり厚５０ｍｍの深さに径が１９ｍｍの丸鋼が埋め込まれている。これらの鉄筋の配筋ピッチは１５０ｍｍである。互いに隣り合う測点の間隔は３０ｍｍとしている。径が４０ｍｍ、共振振動数が５００ｋＨｚの振動子を内蔵した発信及び受信共用の探触子を用い、探知対象鉄筋の配筋方向に２００ｍｍ移動させながら各々の測点で２０００回の受信波を収録し、前記受信波の加算平均波をｊを測点番号としてG_j（ｔ）を作成し、数式９６を用いて、H_j（ｔ）波を演算し本コンクリートモデルの音速$_CV$＝３９００ｍ／秒、α（ｆ）＝１．０として、数式２０に基づいてf_0＝９７．５ｋＨｚを求め、このf_0値を中心周波数とする狭帯域成分波HA_j（ｔ）を$HA^2{}_j$（ｔ）表示したものである。具体的には、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとするA_1（ｆ）フィルタ及びA_2（ｆ）フィルタを用い、数式９７でｎ１＝４、ｎ２＝８００、ｎ３＝０としてHA_j（ｔ）を計算した。図１１５のHA_j（ｔ）波の比較図によれば、鉄筋が直下にある測点３、８及び１３を探知できていない。これは、上述のような多数の亀の子状のフェアークラックの存在によるものである。

【０４６５】

鉄筋のかぶり厚ｄ＝５０ｍｍ、コンクリート音速$_CV_P$＝３９００ｍ／秒、β_2＝１／２及びf_0＝９７．５ｋＨｚを数式１１２に適用すると、数式１１８のようになる。

【０４６６】

【数１１８】

$$t = 2\times 50/3900\times 10^3 + \frac{1}{2}\times\frac{10^3}{97.5} = 26 \fallingdotseq 30\ \mu\text{秒}$$

【０４６７】

そして、数式９８の代わりに、t_T＝ｔ＝３０μ秒として、ｔ＝t_T－１００以前の時刻で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝t_T＋１００以降の時刻で０となる正弦ｎ関数ＦｉＬＴ（ｔ）をｎ５＝１０として、数式９９の演算を行い、HB_j（ｔ）の比較波形を$HB_j{}^2$（ｔ）表示したものが図１１６である。対応するFA_j（ｆ）スペクトルの比較図を示したものが図１１７である。

【０４６８】

図１１７のスペクトルに対し、数式１００を用い、ｎ３＝０として、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第２の周波数フィルタA_2（ｆ）をFA_j（ｆ）に多数回（ｎ２１）乗じていく経緯の中で、$A_2{}^{n21}$（ｆ）・FA_j（ｆ）のスペクトルの中で、Sin^{nn}（ｆ）状のスペクトルが浮び上ってくる。ｎｎは自然数である。更に、

Sin^{nn}（ｆ）状のスペクトルの最大値位置が同一となってくるｎ２１の値がある。図１１８がこの状況を示したものであり、ｎ２１＝１０００として、（A_2^{n21}（ｆ）・FA_j（ｆ））のスペクトル値を３乗して表示したものである。図１１８中、スペクトル１００３が測点３のA_2^{n21}（ｆ）・FA_3（ｆ）であり、スペクトル１００８が測点８のA_2^{n21}（ｆ）・FA_8（ｆ）であり、スペクトル１０１３が測点１３のA_2^{n21}（ｆ）・FA_{13}（ｆ）スペクトルである。スペクトル値に大小の差はあるが、鉄筋が測点直下にあるｊ＝３、８、１３のスペクトルのみ、Sin^{nn}（ｆ）状にかつその最大値を示す振動数（ｆ＝７５．７ｋＨｚ）が一致している。前記ｆ＝７５．７ｋＨｚを特定する自動化処理は容易である。前記A_2^{n21}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルにおいて、ｎ２１の値を徐々に大きくしていくとき、A_2^{n21}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルの中でｓｉｎ^{nn}（ｆ）状のスペクトル群の出現を自動認識すると共に、前記ｓｉｎ^{nn}（ｆ）状スペクトル群の中心周波数が概略同一となったとき、A_2^{n21}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）の更なる演算を停止すればよい。更に、数式１００を用いて、ｆ＝７５．７ｋＨｚをf_Aとする第３の周波数フィルタA_3（ｆ）をA_2^{n21}（ｆ）・FA_j（ｆ）に２００回乗じて、７５．７ｋＨｚを中心周波数とする超狭帯域成分波を演算し（数式１１９）、ｎ２１＝１０００、ｎ３１＝２００として示したものが図１１９である。

【０４６９】

【数１１９】

$$HH_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_3^{n31}(f)\cdot A_2^{n21}(f)\cdot FA_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０４７０】

対応するHH_j（ｔ）波の中で最も大きい振幅の絶対値を｜P_{max}｜とし、測点毎のHH_j（ｔ）波の最大値の絶対値を｜$_jP_{max}$｜としたとき、｜$_jP_{max}$｜≧｜P_{max}｜／β_aとなるHH_j（ｔ）を（｜P_{max}｜／｜$_jP_{max}$｜）×HH_j（ｔ）と置き換え、HH_j（ｔ）をHH_j^4（ｔ）表示したものが図１２０である。β_2＝１．２とした。図１１５及び図１１６では鉄筋の存在位置を読み取ることはできないが、図１２０のHH_j^4（ｔ）表示した波では、直下に鉄筋が存在する測点３、８及び１３のみで数式９５乃至数式１００の演算で改変された鉄筋からの反射波を明敏に確認できる。

【０４７１】

また、図１２１乃至図１２２は第１１の実施例としてコンクリート表面に微細なフェアークラックが多数存在する場合の鉄筋の探知方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ１１－８におけるｎ５及びステップＳ１１－９におけるｎｐは自然数であり、ステップＳ１１－１０におけるｎｓは１、２又は３である。

【０４７２】

次に、第１２の実施例について説明する。第１乃至第１０の実施例では、数式２０に示す最適周波数f_0又は数式５０に示す周波数f_Rを中心周波数とする成分波GA_j（ｔ）又はHA_j（ｔ）を加算平均波G_j（ｔ）を用いて作成するものである。これらの周波数f_0及びf_Rは探知妨害波の強度が最小になり、相対的に探知目標波が大きくなる周波数を示すものである。つまり、周波数f_0及びf_Rは探知目標波強度を最大とするものではない。探知目標の強度が最も卓越する周波数（f_D）は、標準音速（V_{ST}）、被探知体音速（Ｖ）、探知路程（ｌ）の関数α_2（ｌ）を用いて、数式１２０のように定義できる。

【０４７３】

【数１２０】

$$f_D=\alpha_2(\ell)\cdot\frac{V}{V_{ST}}$$

【０４７４】
α_2（ｌ）はV_{ST}探知対象毎に決まる探知路程の関数である。また、α_2（ｌ）は、被探知体の音速をV_{ST}としてまとめられる実験計測で得る係数である。第１２の実施例では、f_0及びf_Dの値を用いる。
【０４７５】
図１２４は、５０ｍｍのかぶり厚に埋め込まれた径が２０ｍｍの異形鉄筋の探知結果である。図１２４は、次のようにして得たものである。先ず、音速が４４００ｍ／秒のコンクリートの表面に共振振動数５００ｋＨｚ、径が４０ｍｍの振動子を内蔵した１対の発信探触子及び受信探触子を、その中心を結ぶ線分が探知対象鉄筋の長手方向と平行になるように配置し、探触子の中心間距離を７０ｍｍに保持したまま、前記線分上を２００ｍｍの間移動させながら１０００回の受信波を収録し、これらの受信波の加算平均波G_j（ｔ）を取得した。数式１１２にβ_2＝１．５、鉄筋かぶり厚ｄ＝５０ｍｍ、コンクリート音速$_C V_P$＝４４００ｍ／秒及び数式２０で算定される最適周波数を、α（ｌ）＝１．２４として、数式１２１から１３６ｋＨｚとし、t_Tを数式１２２から３３．８μ秒と算定した。
【０４７６】
【数１２１】

$$f_0 = \frac{1}{2} \times 1.24 \times \frac{4400}{\frac{1}{2} \times 40}$$

【０４７７】
【数１２２】

$$t_T = (2 \times 50/4400) \times 10^3 + 1.5 \times \frac{10^6}{136 \times 10^3}$$

【０４７８】
更に、数式１２３を用い、ｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０として、GA_j（ｔ）を演算し、ｔ＝t_T－１００μ秒以前の時刻で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝t_T＋１００μ秒以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を用いて数式１２４の演算を行った。そして、ｎ５＝５７としたＧＢ$_j$（ｔ）波をＧＢ$_j{}^2$（ｔ）表示した。
【０４７９】
【数１２３】

$$GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \cdot A_2^{n2}(f) \cdot A_3^{n3}(f) \cdot F_j(f) \cdot e^{iwt} \cdot \right) df$$

【０４８０】
【数１２４】

$$GB_j(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０４８１】
鉄筋直下５０ｍｍの位置に存在する測点２及び６で大きな振幅の波の起生が確認できる。図１２４のＧＢ$_j$（ｔ）波の比較図に対応するＦＡ$_j$（ｆ）スペクトルをＦＡ$_j{}^2$（ｆ）で比較表示したものが図１２５である。図１２５中のスペクトル１１５２が測点２のＧＢ$_2$（ｔ）波のスペクトルであり、スペクトル１１５６が測点６のＧＢ$_6$（ｔ）波のスペクトルである。

【０４８２】
図１２５のスペクトル１１５２及び１１５６の最大値を示す位置がカーソル１１５１で示すように一致している。このカーソル１１５１が示す振動数９５ｋＨｚが、数式１２０で求められるf_Dの値である。本実施例の場合、標準音速V_{ST}を４４００ｍ／秒としてα_2（ｌ）の値を求めれば、数式１２０よりα_2（ｌ）＝９５となる。なお、探知路程が深くなれば、α_2（ｌ）の値も変化する。音速が４４００ｍ／秒のコンクリートの場合で、厚さ５００ｍｍの版厚探知の場合、f_Dの値は解析例として示さないが、６３ｋＨｚ前後となる。これより、この場合のα_2（ｌ）はα_2（ｌ）＝６３となる。例えば音速が４０００ｍ／秒のコンクリートの場合、厚さ５００ｍｍの版厚探知のf_Dの値は６３×４０００／４４００より５７．３ｋＨｚとなる。

【０４８３】
更に、標準音速が４４００ｍ／秒のコンクリートの場合で、厚さ３００ｍｍの版厚探知の場合、f_Dの値は９３ｋＨｚ前後となる。

【０４８４】
図１２６はG_j（ｔ）波に数式１２３で、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとして、ｎ１＝４、ｎ２＝４２０、ｎ３＝０を適用したときのGA_j（ｔ）を用い、数式１２２で得られるt_Tを鉄筋かぶり厚ｄ＝５０ｍｍとして得たt_T＝３３．８μ秒、ｔ＝t_T－１００以前の時刻で０、ｔ＝t_Tの時刻で１．０、ｔ＝t_T＋１００以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を用い、数式１２４の演算を行い、GB_j（ｔ）＝$FiLT^{100}$（ｔ）・GA_j（ｔ）を求め、対応するスペクトルFA_j（ｆ）を$FA_j{}^2$（ｆ）表示したものである。図１２６中の全てのスペクトルの平均的振動数f_0をカーソル１１６１で示している。カーソル１１６１の位置は数式２０に、α_1（ｌ）＝１．２４、Ｖ＝４４００ｍ／秒、φ＝４０ｍｍを適用して、f_0＝１３６ｋＨｚを求め、ｎ１及びｎ２の値をコントロールして得たものである。カーソル１１６１の位置がf_0＝１３６ｋＨｚになるようにしている。

【０４８５】
図１２６のカーソル１１６２及び１１６６が夫々直下に鉄筋が埋め込まれた測点２及び６のGB_j（ｔ）波のスペクトルFA_2（ｆ）、FA_6（ｆ）である。他のスペクトルは、鉄筋が存在しない他の測点での探知妨害波スペクトルの残存である。図１２６に対応するGB_j（ｔ）の波を示したものが図１２７である。数式２０を用いて得た図１２６のカーソル１１６１の位置で示す最適周波数f_0＝１３６ｋＨｚから数式１２０で算定されるf_D＝９５ｋＨｚへ取り出しスペクトルの中心周波数を変更したものが図１２８である。具体的には、ｎ２１＝１６０、ｎ３＝０として、数式１２５の替わりに数式１２５の下式の演算を行い、$A_2{}^{160}$（ｆ）・FA_j（ｆ）を（$A_2{}^{160}$（ｆ）・FA_j（ｆ））^{2}表示したものである。

【０４８６】
【数１２５】

$$GC_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^{n11}(f)\cdot A_2^{n21}(f)\cdot A_3^{n31}\cdot FA_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

$$GC_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_2^{160}(f)\cdot FA_j(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０４８７】
測点２のスペクトル１１８２及び測点６のスペクトル１１８６について、それらのスペクトル強度は異なるが、その最大値を示す振動数が９５ｋＨｚ（f_D）で完全に一致している。

【０４８８】
図１２８の$A_2{}^{160}$（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルの比較図で鉄筋からの反射波の

f_Dの値が９５ｋＨｚと決定した。$f_A = f_D$とするA_3（ｆ）を用い、数式１２５においてｎ１＝０、ｎ２＝１６０、ｎ３＝２００としたＧＣ$_j$（ｔ）の演算を行い、各ＧＣ$_j$（ｔ）波の中で最も大きい振幅値の絶対値を｜$_j P_{max}$｜とし、｜$_j P_{max}$｜のｊ＝１乃至ｎＡの中で最も大きい振幅値の絶対値を｜P_{max}｜としたとき、｜$_j P_{max}$｜≧｜P_{max}｜／β_aとなるＧＣ$_j$（ｔ）を｜P_{max}｜／｜$_j P_{max}$｜×ＧＣ$_j$（ｔ）と置き換えて比較表示したものを図１２９に示す。なお、図１２９はβ_a＝１．１、ｎｐ＝３として、ＧＣ$_j^{np}$（ｔ）表示したものである。

【０４８９】

数式９６に示すＨ$_j$（ｔ）波を用いた同様の分析でも、分析例として示さないが、第１０の実施例で示したように、同一の効果を得ることができる。

【０４９０】

次に、f_D値の共振振動数をもつ振動子を内蔵した発信及び受信共用の探触子を備え、振動子にパルス型電圧を載荷する超音波装置を用いて得る加算平均波Ｇ$_j$（ｔ）に、同様の処理を行った場合の作用について説明する。

【０４９１】

このような超音波装置を用い、図１２４を得た測定を行う。共振振動数を１００ｋＨｚ、径４０ｍｍの振動子を内蔵した発信及び受信共用の探触子を探知対象鉄筋長手方向に平行に２００ｍｍの間移動走査させながら１０００回分の受信波を収録し、これらの受信波の加算平均波をＧ$_1$（ｔ）とし、探触子位置を３７．５ｍｍずつ前記鉄筋長手方向と直角方向に探触子位置を変更し、前記移動走査を行い、Ｇ$_2$（ｔ）、Ｇ$_3$（ｔ）…Ｇ$_7$（ｔ）を得た。ｊ＝１乃至７としてのＧ$_j$（ｔ）において、図１２４を得たときとと全く同一の処理を行い、数式１２４の演算を行い、ＦＡ$_j$（ｆ）スペクトルを表示したものが図１３０である。測点２及び６直下にかぶり厚５０ｍｍで径１９ｍｍの異形鉄筋が存在している。中心周波数８８ｋＨｚのスペクトル１２０２及び１２０６のが対応する測点２及び測点６のＧＢ$_j$（ｔ）波のスペクトルである。一方、低周波方向にスペクトルの起生がある。探触子が発信及び受信共用であるために、生じた妨害波のスペクトルである。

【０４９２】

図１２４及び図１２５は数式１２３を用いるＧＡ$_j$（ｔ）の算定をｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０として行ったものである。図１３０ではｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０とし、ＧＡ$_j$（ｔ）を算定することで、上述の妨害波のスペクトル１２０３が生じているが、ｎ１、ｎ２、ｎ３の値をコントロールすれば、妨害波のスペクトル１２０３を除去できる。

【０４９３】

ｎ１＝４、ｎ２＝４６、ｎ３＝０として求めたＧＡ$_j$（ｔ）波に、t_T＝３３．８μ秒とするフィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用い、ｎ５＝５７として数式１２４の演算で求めた同式右辺のＦＡ$_j$（ｆ）をＦＡ$_j^2$（ｆ）で表示した図１３１が、妨害波のスペクトル１２０３を除去したものである。なお、図示しないが、図１３０に示すＧＢ$_j$（ｔ）の右辺スペクトルＦＡ$_j$（ｆ）を数式１２５に適用し、ｎ２１＝０、ｎ３１を１以上の整数、f_A＝８８ｋＨｚとして数式１２５の右辺中のA_2^{n21}（ｆ）・A_3^{n31}（ｆ）・ＦＡ$_j$（ｆ）スペクトルを求めても、図１３１のスペクトル図と概略同一となる。また、探知対象であるコンクリートの表面が粗である場合には、前述までの実施例と同様に、Ｆ$_j$（ｆ）＝１．０とした位相解析に前記処理を置き換えても同様の結果を得ることができる。

【０４９４】

また、上述のような超音波探知装置の探触子は、f_Dの共振振動数を備えた振動子を内蔵した１対の発信探触子及び受信探触子を備えたものであっても、特に測定例として示さないが、図１２５又は図１２８に示すスペクトル比較図を得ることができ、結果として、図１２４又は図１２９に示すような探知結果を得ることができる。

【０４９５】

このように、受信探触子と発信探触子とが共用となっている超音波装置を用いても、同様の鉄筋の探知が可能である。探知対象が定まっている供試体内部の健全性チェックの探知のように、f_Dの値が確定している場合、このf_D値を共振振動数とする振動子を内蔵

する探触子を用いた健全性探知専用装置として、超音波探知装置を利用することができる。

【０４９６】

なお、上述の超音波探知装置は発信探触子内の振動子にパルス電圧を印加するものであるが、説明するまでもなく、他の実施例のように、ステップ関数型電圧を印加する場合であっても、前記ｎ１、ｎ２及びｎ３の値をコントロールすることで、図１３１とほぼ同一のスペクトル比較図を得ることができる。

【０４９７】

鋼材の溶接部のキズの探知では、探触子を鋼材表面でその位置を徐々に変化させ、その変化の都度得られる受信波をリアルタイム表示することで、溶接部のキズの有無及びその位置を容易に確認できる。第１２の実施例で説明した探知目標波が最も大きく励起する振動数f_Dを中心周波数とする狭帯域成分波を用いれば、前記溶接部のキズの探知と同様の探触子移動走査によるリアルタイム波形の視認で、コンクリート内部の探知が可能となる。

【０４９８】

図１３２乃至図１３４は第１２の実施例として探知目標波が最も大きく生ずるf_Dの値を利用した探知方法を示すフローチャートである。また、図１３５乃至図１３７は第１２の実施例として探知対象毎に専用化された超音波探知装置においてその探知対象に固有のf_Dの値を共振振動数とする振動子を内蔵した発信及び受信共用の探触子又は１対の発信探触子及び受信探触子をもつ超音波探知装置を用いた探知方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ１２－３５におけるf_Dは探知対象のコンクリート標準音速V_{ST}でのf_Dの値を示し、ステップＳ１２－３６におけるf_Sは振動子の共振振動数を示し、ステップＳ１２－３８におけるｄａは探知目標までの概略路程を示す。

【０４９９】

次に、第１３の実施例について説明する。第１２の実施例で示した鉄筋の探知を探触子移動走査リアルタイム計測で行う。音速が４４００ｍ／秒のコンクリートの表面に共振振動数５００ｋＨｚ、径が４０ｍｍの振動子を内蔵する１対の発信探触子及び受信探触子をその中心を結ぶ線分が探知対象鉄筋の長手方向と平行になるように配し、且つ探触子の中心間距離を７０ｍｍとしたとき、探触子位置を同一とする１００回分の受信波を収録し、その受信波の加算平均波をＧ（ｔ）とする。

【０５００】

図１３８は、１対の発信探触子及び受信探触子が鉄筋直上にある場合の数式１２３に示すＧＡ（ｔ）波である。第１２の実施例で得た５０ｍｍの深さに埋め込まれた鉄筋からの反射波が最も大きく励起する周波数f_D＝９５ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波で示している。具体的には、数式１２３において分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとするA_1（ｆ）フィルタ及びA_2（ｆ）フィルタを用い、ｎ１＝４、ｎ２＝８８０、ｎ３＝０としてA_1（ｆ）・A_2（ｆ）・Ｆ（ｆ）を求めている。リアルタイムでの波形表示であるため、数式１２３の演算は高速処理が要求される。このため、数式１１２の右辺A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・Ｆ（ｆ）の演算の代わりに、これと等価な時系列Ｇ（ｔ）の演算を数式５乃至１０に基づいて行った。

【０５０１】

図１３９及び図１４０中の太線で示す波は、夫々両探触子を結ぶ線分を探知対象鉄筋の長手方向と平行にしたまま、鉄筋と探触子とを結ぶ線分の平面的距離を３７．５ｍｍ及び７５．０ｍｍ（隣り合う探知対象鉄筋の中間位置）としたときに、全く同一の処理で得たＧＡ（ｔ）波をGA^2（ｔ）表示したものである。なお、図１３９及び図１４０中の細線で示す波は鉄筋直上計測で得たGA^2（ｔ）波である。

【０５０２】

図１３８乃至図１４０のGA^2（ｔ）波の比較によれば、図１３８を得た測点位置の直下に鉄筋が存在することを容易に判断できる。実際の計測では、探触子の中心を結ぶ線分を探触対象である鉄筋の長手方向と平行にしたまま、探触子を前記線分と直角方向へ徐々

に移動させながら、図１３８乃至図１４０に示すように、ｎｐを１以上の整数としてＧＡ^{np}（ｔ）波の強度変化の推移を視認すればよい。即ち、図１３８のようなＧＡ^{np}（ｔ）波を得たとき、その測定直下に鉄筋があると判断すればよい。

【０５０３】

図１３９及び図１４０では、細線で示す波が鉄筋直上の計測でのＧＡ$_2{}^2$（ｔ）波であり、太線で示す波が直下に鉄筋のない計測でのＧＡ$_1{}^2$（ｔ）波であるが、鉄筋がある計測点位置の特定を容易にするために、実際の測定では、ＧＡ$_1{}^{np}$（ｔ）波の最大振幅の絶対値を｜$_{max}$Ｐ$_1$｜及びＧＡ$_2{}^{np}$（ｔ）波の最大振幅の絶対値を｜$_{max}$Ｐ$_2$｜としたとき、次のような表示を行うことが好ましい。｜$_{max}$Ｐ$_1$｜≧｜$_{max}$Ｐ$_2$｜の場合、｛１／｜$_{max}$Ｐ$_1$｜｝・ＧＡ$_1{}^{np}$（ｔ）及び｛１／｜$_{max}$Ｐ$_1$｜｝・ＧＡ$_2{}^{np}$（ｔ）を、最大振幅値を１．０とする波形表示画面に波形表示する。一方、｜$_{max}$Ｐ$_1$｜＜｜$_{max}$Ｐ$_2$｜の場合、｛１／｜$_{max}$Ｐ$_2$｜｝・ＧＡ$_1{}^{np}$（ｔ）及び｛１／｜$_{max}$Ｐ$_2$｜｝・ＧＡ$_2{}^{np}$（ｔ）を、最大振幅値を１．０とする波形表示画面に波形表示する。

【０５０４】

探知目標波が最も大きく励起する振動数ｆ$_D$以外の振動数で図１４０を得たときと同一の処理を行ったリアルタイム表示の波ＧＡ^2（ｔ）の一例を図１４１に示す。

【０５０５】

４５ｋＨｚを中心周波数とする波である。細線で示す波が鉄筋直上位置、太線で示す波が隣り合う探知対象である鉄筋の中間位置でのＧＡ^2（ｔ）波である。図１３９及び図１４０のように、鉄筋の存在位置を確認することはできない。測定例として示さないが、ｆ$_D$＝９５ｋＨｚより高周波、例えば１３５ｋＨｚで同一の処理を行っても、図１４１と同様、鉄筋の存在位置を確認することはできない。

【０５０６】

リアルタイム処理で鉄筋存在位置を確認できる他の条件として使用する探触子の径の大きさが重要である。例えば径２０ｍｍの探触子を用いた場合、１対の発信探触子及び受信探触子間でコンクリート表面を伝達する表面波等の妨害波の強度が最小となる振動数は、α（ｌ）＝１．２４のとき、数式２０よりｆ$_0$＝２７０ｋＨｚとなる。この場合、ｆ$_D$の値が９５ｋＨｚであるため、ｆ$_D$＜＜ｆ$_0$となり、ｆ$_D$振動数帯では妨害波の強度が大きくなり、例えｆ$_D$を中心周波数とするＧＡ（ｔ）波を抽出しても、勢力の大きい妨害波と鉄筋からの反射波が重畳し、図１３８乃至図１４１に示すように、鉄筋の存在位置を確認し得なくなる。

【０５０７】

従って、リアルタイム計測による鉄筋探知を可能ならしめる条件として、ｆ$_0$とｆ$_D$の値にあまり差のない探触子径φ又は超音波発信及び受信面の被探知体に接する部位の径φ、又は発信面と受信面の中心を結ぶ線分上の発信及び受信面の幅φを選定すべきである。ｆ$_D$＝９５ｋＨｚの場合、数式２０より、α（ｌ）＝１．０として、φを求めると、φ＝４４００／９５＝４６ｍｍとなる。このため、φ＝４６ｍｍ以上の径又は幅を採用すれば、ｆ$_D$の値を中心周波数とする狭帯域成分波の抽出で誤ることなく、鉄筋の存在位置を確認できる。多くの計測実験によっても数式φ≧$_c$Ｖ$_p$／ｆ$_D$が満足できる数式として確認されている。

【０５０８】

もし、使用する探触子発信又は受信面の径φ等がφ≧ｃＶｐ／ｆ$_D$を満足しない場合は、１対の探触子の距離をａ$_1$乃至ａ$_2$間で変動させる探触子走査計測を行い、数式２０の代わりに数式１２６を採用し、且つα（ｌ）＝１．０として数式１２７となるように、ａ$_1$及びａ$_2$の値を設定すれば、リアルタイム計測が可能である。

【０５０９】

【数１２６】

$$f_0 = \frac{1}{2}\cdot\alpha(\ell)\cdot\frac{{}_CV_P}{\frac{1}{2}\left(\phi+(a_2-a_1)\right)}$$

【０５１０】

【数１２７】

$$\phi+(a_2-a_1)\geq\frac{{}_CV_P}{f_D}$$

【０５１１】

図１４２乃至図１４５は第１３の実施例として広帯域の加算平均受信波Ｇ（ｔ）より、中心周波数ｆ$_e$の狭帯域成分波を抽出し、リアルタイムに被探知体内部の状態を探知する方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ１３－２におけるｌは概略探知路程であり、α$_2$（ｌ）は標準音速Ｖ$_{ST}$に対するｆ$_D$の値であり、ステップＳ１３－３におけるα（ｌ）は補正係数である。また、ステップＳ１３－４におけるＧｊ（ｔ）は１００回程度の加算平均波である。また、ステップＳ１３－１２において時系列フィルタを使用するとした場合、ステップＳ１３－２０における判断が容易となる。

【０５１２】

次に、第１４の実施例について説明する。第１４の実施例では、第１３の実施例を拡張して、コンクリートスラブ内に埋め込まれた配管のリアルタイム測定を行う。コンクリートスラブ厚２００ｍｍ、スラブ上下面よりかぶり厚３０ｍｍで径１０ｍｍの異形鉄筋が井桁状に配筋されている。上段及び下段の井桁に配筋された鉄筋の平面的位置は同一である。また、配管は外径２５ｍｍの塩化ビニル管がかぶり厚１００ｍｍで埋め込まれている。コンクリート音速$_C$Ｖ$_P$は４３１７ｍ／秒である。第１３の実施例と同一の発信探触子及び受信探触子を用いた。

【０５１３】

図１４６は探触子直下に鉄筋も配管もない位置で、１対の探触子位置を固定配置し、その間隔を６０ｍｍとしたときの１０００回の加算平均波Ｇ（ｔ）を示したものである。カーソル１２６１をコンクリートスラブ厚２０ｃｍに相当する時刻より若干後方ｔ$_T$＝１１１μ秒に示している。ｔ＝ｔ$_T$－１００＝１１μ秒以前の時刻で０、ｔ＝ｔ$_T$＝１１１．０μ秒で１．０、ｔ＝ｔ$_T$＋１００＝２１１μ秒以降の時刻で０となる正弦関数状のフィルタＦｉＬＴ（ｔ）と、数式１２３でｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０として得たＧＡ$_{j=1}$（ｔ）を用い、ｎ５＝２４として取り出した数式１２４の右辺のＦＡ$_{j=1}$（ｆ）を示したものが図１４７のスペクトルである。カーソル１２７１で示す振動数８４ｋＨｚが数式１２０に示すｆ$_D$の値である。即ち、探触目標をスラブ厚とした時のｆ$_D$の値である。

【０５１４】

この測定例の場合、探知妨害波の強度が最も小さくなる下限の周波数は、数式２０より、α（ｌ）＝１．０としてｆ$_0$＝１０７．５ｋＨｚとなる。ｆ$_D$＝８４ｋＨｚとｆ$_0$値は若干ずれている。図示しないが、配管からの反射波のｆ$_D$の値は、その路程が版厚の１／２であるため、ｆ$_D$＝８４ｋＨｚより大きくなる。このため、本実施例では、ｆ$_D$の値を数式１２８に基づいて９５ｋＨｚに置き換え、版厚及び配管反射波の双方が比較的大きく励起する周波数を選定して行う。９５ｋＨｚはｆ$_0$＝１０７．５ｋＨｚともあまり差がないため、妨害波の混入も小さなものとなる。

【０５１５】

【数１２８】

$$\frac{f_0 + f_D}{2} = \frac{107.5 + 84}{2} \approx 95$$

【０５１６】

図１４６のＧ（ｔ）波より、ｆ$_D$＝９５ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波ＧＡ$_j$（ｔ）を数式１２３を用いて後述するように抽出したものが図１４８である。一方、図１４９中の太線で示す波は、図１５０（ａ）に示すように、発信探触子の超音波発信面が直下の配管の平面投影面に、探触子径の１／４が重なり、受信探触子の中心と配管中心線の距離を６４ｍｍとしたときに同一の処理で抽出したＧＡ$_j$（ｔ）波である。版厚反射波１２７１以外に、配管からの反射波１２７２が大きく生じている。

【０５１７】

一方、図１５０（ｂ）に示すように、１対の探触子の双方共を配管の直上に配置したときに前記と同一の処理で抽出したｆ$_D$＝９５ＫＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波は次のようになる。

【０５１８】

図１５１が数式１２３の演算により得られたＧＢ（ｔ）波である。超音波が配管で遮断され、版厚反射波が消滅し、配管からの反射波が大きく生じている。

【０５１９】

このように、図１４８、図１４９及び図１５１に示す成分波は、探触子位置を任意に移動させる毎に探触子位置を固定する計測で得られる加算平均波Ｇ（ｔ）を得る毎に、第１３の実施例で示したように、超高速にＧＡ（ｔ）又はＧＢ（ｔ）波を抽出及び表示するというリアルタイム処理で取得することができる。従って、探触子位置直下に配管が有るか無いかを容易に確認可能することができる。

【０５２０】

なお、ＧＡ（ｔ）波の抽出は数式１２３を用いて行われているが、具体的には、ｎ１＝４、ｎ２＝１３００、ｎ３＝０として夫々９５ｋＨｚの狭帯域成分波を求めることで行われたものである。また、抽出したリアルタイム表示波形を見やすくするために、時刻の早い時点で生ずる妨害波等を時系列フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用いて縮小してもよい。つまり、図１４９及び図１５１に示す波は数式１２３を用いて版厚反射波の起生する付近の時刻ｔ$_T$を前記１１１μ秒とし、ｔ＝０μ秒で０、ｔ＝ｔ$_T$＝１１１μ秒で１．０、ｔ＝２×ｔ$_T$以上の時刻で０となる正弦関数状のフィルタＦｉＬＴ（ｔ）をｎ５＝１としてＧＡ（ｔ）に乗じ、ＧＢ^2（ｔ）＝（ＦｉＬＴ（ｔ）・ＧＡ（ｔ））^{2}を示したものである。細線で示す波が直下に配管のない場合のＧＢ$_1$（ｔ）であり、太線で示す波が直下に配管のある場合のＧＢ$_2$（ｔ）である。なお、図１４８に示す波はｎ５＝０としてＧＢ^2（ｔ）（＝ＧＡ^2（ｔ））表示したものである。

【０５２１】

実施例としては示さないが、ＧＡ（ｔ）又はＧＢ（ｔ）波を用いる代わりに、数式９７によるＨＡ（ｔ）波又は数式９９式によるＨＢ（ｔ）波を用いれば、第１０の実施例のように、被探知体であるコンクリートの表面が粗く、コンクリートの表面と発信及び受信探触子面とが具合よく密着しない場合でも、図１４８、図１４９及び図１５１に示すようなリアルタイム探知が可能となる。

【０５２２】

なお、実際の計測現場では各測定位置で超音波の透過度が大きく異なる場合がある。このような問題に対処するためにＧＢ$_1^{np}$（ｔ）及びＧＢ$_2^{np}$（ｔ）、又はＧＡ$_1^{np}$（ｔ）及びＧＡ$_2^{np}$（ｔ）、又はＨＡ$_1^{np}$（ｔ）及びＨＡ$_2^{np}$（ｔ）、又はＨＢ$_1^{np}$（ｔ）及びＨＢ$_2^{np}$（ｔ）のそれぞれの波をＰ$_1^{np}$（ｔ）及びＰ$_2^{np}$（ｔ）と表現し、Ｐ$_1^{np}$（ｔ）及びＰ$_2^{np}$（ｔ）のそれぞれの最大振幅を表示画面に最大表示している。図１４９及び図１５１の比較計測ではｎｐ＝２、ｎ５＝１としてＧＢ$_1^2$（ｔ）（細線）、ＧＢ$_2^2$（ｔ）（太線）を夫々の最大振幅で表示画面に最大表示したもので

ある。

【０５２３】

図１５２乃至図１５５は第１４の実施例として広帯域の加算平均受信波Ｇ（ｔ）より、中心周波数f_eの狭帯域成分波を抽出し、リアルタイムに被探知体内部の状況を探知する方法を示すフローチャートである。

【０５２４】

次に、第１５の実施例について説明する。第１５の実施例は、コンクリート表面に多量のクラックがある場合の内部に埋め込まれた鉄筋の探知を行う。つまり、コンクリート打設後、その養生によってはその表面に亀の子状の微細な割れが多量に生ずる場合があり、このようなコンクリートに埋め込まれた鉄筋の探知を第１、第２又は第１２の実施例で示した方法で行っても、鉄筋の存在を確認できない場合がある。このような場合の探知法として、第１５の実施例では、図１５６に示すように、鉄筋上を臨界屈折波としてｂ、ｃ、ａの順に経路の波を取り出す。

【０５２５】

図１５７はコンクリート表面より５ｃｍの深さに１５ｃｍピッチで径１９ｍｍの丸鋼が配筋された測定波の例である。発信探触子及び受信探触子の中心間隔を２６０ｍｍに固定し両探触子の中心を結ぶ線分が、丸鋼の配筋方向と平行となるようにした１３ヶ所の測定点での測定波を並べて示したものである。隣接する測定の間隔は３０ｍｍとしている。測定波のうち、Ｎｏ．２、Ｎｏ．７、Ｎｏ．１２の波が探触子の中心を結ぶ線分が配筋された丸鋼の直上位置で得たものである。径を４０ｍｍ、共振振動数５００ｋＨｚとする振動子を内蔵する発信探触子及び受信探触子を用い、発信探触子内の振動子に５００Ｖのステップ関数型電圧を１０００回連続して載荷し、この載荷の都度得る受信波を加算平均し、加算平均波G_j（ｔ）を求め、本コンクリートモデルの音速$_C V_P$＝４０００ｍ／秒と、前記振動子径φ＝４０ｍｍ及び補正値α＝１．０を数式２０に適用し、f_0＝１００ｋＨｚを算定し、このf_0を中心周波数とする成分波GA_j（ｔ）を前記G_j（ｔ）より抽出したものが図１５７のｊ＝１乃至１３の波の比較図である。対応するスペクトルとしてｊ＝２の場合のものを図１５８に示す。

【０５２６】

なお、図１５７及び図１５８の抽出の具体的方法は、前記加算平均波を数式１４のように表現し、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第１の周波数フィルタA_1（ｆ）及び第２の周波数フィルタA_2（ｆ）を用い、数式１６の演算に基づいて行った。ｎ１及びｎ２の値は、夫々４、３００とした。また、GA_j（ｔ）（ｊ＝１乃至１３）の波の中での最大振幅を表示画面に最大表示する比較表示とした後、各GA_j（ｔ）波を７倍の振幅で表示している。

【０５２７】

ｊ＝２、７、１２の直下に丸鋼が埋め込まれた測点で、カーソル９０１の位置より比較的振幅の大きい波の起生が確認できる。なお、測定にあたって発信探触子及び受信探触子の中心間距離l_Bの値が短い場合、図１５６のｂ、ｃ、ａの順に伝達する経路の波より、コンクリート表面を伝達する波１２６１の方が早く受信される場合がある。このような場合、l_Bの値を大きくした上でG_j（ｔ）波を再計測して再分析すればよい。

【０５２８】

図１５９はカーソル９０１の時刻（t_T＝５９．１μ秒）で最大値１．０、t_1＝０で０、t_2＝２×t_T以上の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を前記GA_j（ｔ）に乗じ$FiLT^{n5}\cdot GA_j$（ｔ）を表示したものである。ｎ５は２７である。t_Tより若干後方に波の起生を確認できる。この場合のスペクトルの比較図を示したものが図１６０である。ｊ＝２、７、１２に対応するスペクトルのスペクトル値が大きくなっている。

【０５２９】

図１６１は、ＦｉＬＴ（ｔ）におけるt_Tを若干後方（カーソル１３０１）へ移動し、前記$FiLT^{27}$（ｔ）・GA_j（ｔ）を作成し直したものである。対応するスペクトルの比較図を図１６２に示す。

【０５３０】
ＧＢ$_j$（ｔ）を数式１２９のように表現し、分析の上限振動数をｆ$_{MAX}$＝２５００ｋＨｚとする第２の周波数フィルタＡ$_2$（ｆ）を用いて数式１３０の演算を行い、そのスペクトルの比較図を示したものが図１６２及び図１６３である。ｎ２１の値が大きくなるとスペクトルが低周波方向へ移動している。
【０５３１】
【数１２９】

$$GB_j(t) = FiLT^{27}(t) \cdot GA_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０５３２】
【数１３０】

$$GC_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_2^{n21}(f) \cdot FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０５３３】
ｎ２１の値は、図１６２では２００、図１６３では１６００とした。図１６３によれば、ｊ＝２、７及び１２の測点でのスペクトルが大きく生じている。図１６３に対応する成分波の比較図を図１６４に示す。図１６４によれば、ｊ＝２、７及び１２の成分波以外に隣接するｊ＝３、ｊ＝６及びｊ＝１１でも比較的大きい振幅の波が生じている。ｊ＝２、７及び１２の測点直下に鉄筋が埋め込まれた成分波のみ明敏に取り出せれば、誤ることなく鉄筋の存在位置を確認できる。従って、更に分析処理を行う。
【０５３４】
図１６３のスペクトル及び図１６４の成分波を示す数式１３０（ｎ２１＝１６００）において、図１６３のカーソル１６０１で示す振動数ｆ$_{D1}$をｆ$_A$とする第３の周波数フィルタＡ$_3$（ｆ）を用いて数式１３１の演算をｎ３１＝３０として演算したスペクトルの比較を示したものが図１６５だったわけである。
【０５３５】
【数１３１】

$$G_aC_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_3^{n31}(f) \cdot A_2^{1600}(f) \cdot FA_j(f) \cdot e^{iwt} \right) df$$

【０５３６】
測点２、７及び１２の直下に鉄筋がある位置でのスペクトル位置が大きく生じ、隣接する測点３、６及び１１でのスペクトル値が測点２、７及び１２のスペクトル値の約半分になっている。上述のＧ$_a$Ｃ$_j$（ｔ）をＧ$_a$Ｃ$_j$^{3}（ｔ）で表示したものが図１６６である。鉄筋が直下にある測点ｊ＝２、７及び１２の成分波のみが大きく励起している。
【０５３７】
また、上述の解析でｎ１、ｎ２、ｎ２１を０としても、図１６６に示す波とほとんど同一の分析結果を得ることができる。この場合のＧＣ$_j$（ｔ）波のスペクトルＦＡ$_j$（ｆ）を図１６７に示す。
【０５３８】
なお、分析例として示さないが、数式１４で示す加算平均波を数式９６に置き換えても、前記と同一の波形分析で、鉄筋の明敏な探知が図１６６の場合と同様に可能である。
【０５３９】
図１６８乃至図１７０は第１５の実施例としてコンクリート表面に亀の子状のフェアークラックが多量に生じている場合においてその内部にある鉄筋の平面的位置の探知を鉄筋上を伝達する臨界屈折波に注目して行う方法を示すフローチャートである。
【０５４０】
次に、第１６の実施例について説明する。第１６の実施例では、コンクリートに埋め込

まれた鉄骨の破断の有無の探知を行う。図１７１に示すように、１対の発信探触子及び受信探触子をその間隔をＬとして固定配置し、発信探触子よりコンクリート面直下に超音波を入力すると、自然発生する斜方向超音波が鉄骨に達り鉄骨表面上を臨界屈折波として伝達する波が発生する。この臨界屈折波２２１とコンクリート表面を伝達する波２２２の重畳波を受信探触子で受信することとなる。波２２１にはたて波及び表面波があり、波２２２にもたて波及びよこ波がある。コンクリートのたて波音速（$_{c}Ｖ_{p}$）を３６２０ｍ／秒、鉄のたて波音速（$_{s}Ｖ_{p}$）を５９００ｍ／秒としたとき、Ｌの値の変化で、波２２１及び２２２の最も速く伝達するたて波の伝達時刻を数式１３２乃至数式１３４等を用いて算定すると、表６のようになる。

【０５４１】

【数１３２】

$$\frac{\sin\theta}{{}_{c}V_{p}}=\frac{\sin 90^{\circ}}{{}_{s}V_{p}}$$

【０５４２】

【数１３３】

$$t_{T}=2\times\sqrt{l_{1}^{2}+d^{2}}\,/\,{}_{c}V_{p}+(L-2l_{1})/{}_{s}V_{p}$$

【０５４３】

【数１３４】

$$l_{1}=d\times\sqrt{{}_{s}V_{p}/{}_{c}V_{p}-1}$$

【０５４４】

【表６】

	波２２１のたて波起生時刻	波２２２のたて波起生時刻（t_{T}）
L=３００㎜	７１．８μ秒	９２．５μ秒
L=４００㎜	９９．４μ秒	１０９．４μ秒
L=５００㎜	１２７．０μ秒	１２７．０μ秒

【０５４５】

図１７２は、Ｌが４００ｍｍの場合の測定で、３０００回の加算平均波$Ｇ_{j}$（ｔ）を得て、$Ｇ_{j}$（ｔ）より１２０ｋＨｚ付近の狭帯域成分波$ＧＡ_{j}$（ｔ）を抽出し、振幅を１０倍に拡大して示したものである。具体的には、ｎ１＝４、ｎ２＝３２０、ｎ３＝０として、数式１２３を用いて求めている。図１７３は図１７２の$ＧＡ_{j}$（ｔ）波、及びｔ＝０で０、ｔ＝t_{T}で１．０、ｔ＝２t_{T}以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を数式１２４に適用し、ｎ５＝２として得た$ＧＢ_{j}$（ｔ）波を$ＧＢ_{j}^{2}$（ｔ）表示したものである。

【０５４６】

図１７４に示す波はＬ＝５００ｍｍのときの上述の処理によりえら得た$ＧＢ_{j}^{2}$（ｔ）波である。この波に対応するスペクトルを図１７５に示す。測点１及び測点２の鉄骨が破断していない位置でのスペクトルが大きくなっている。カーソル１４３１の位置がこの場合の$ｆ_{Ｄ１}$値（７８ｋＨｚ）を示す。$ｆ_{Ｄ１}$を$ｆ_{Ａ}$とする第３の周波数フィルタ$Ａ_{3}$（ｆ）を用い、ｎ２１＝０、ｎ３１＝１００としたときの$ＧＣ_{j}$（ｔ）を$ＧＣ_{j}^{2}$（ｔ）表示して図１７６に示す。測点１、２に、上述の解析で改変された鉄骨表面を臨界屈折波として伝達する波の起生を確認できるが、鉄骨が破断している測点３及び４では波の起生を確認できない。

【０５４７】

測点ｊ＝１及び２において鉄骨が健全な場合、測点３及び４に鉄骨が破断している場合のものを並べて示している。図示しないが、Ｌ＝３００ｍｍ又は５００ｍｍの場合も全く同一の分析処理で同様の比較波形GC_j^2（ｔ）を得た。カーソル位置と表６のＬ＝４００ｍｍの波２２１のたて波の起生時刻が合致している。

【０５４８】

一方、図１７３、１７４及び１７７は、表６の波２２２のたて波の起生時刻をt_Tとして得たGB_j^2（ｔ）波である。鉄骨が破断していない測点１及び２で波２２２の臨界屈折波が大きく励起している。Ｌの値が５００ｍｍと最も大きい図１７４のGB_j^2（ｔ）波で、速度の遅いよこ波での臨界屈折波の起生が確認できる。同一の測定法で鉄筋の破断測定も可能である。

【０５４９】

なお、図１７３、１７４及び１７７では、測点１及び２で健全部、測点３及び４で鉄骨破断部のGB_j（ｔ）を示しているが、実際の測定では測点ｊ＝１で健全部、ｊ＝２で健全／破断検討部としてもよい。また、探触子の中心間距離を、初期値L_Bに設定し、GB_j^{np}（ｔ）の波が図１７４のｊ＝１又は２のように明敏になるまでL_Bの値を大きくしL_Aに変更していけばよい。

【０５５０】

図１７８乃至図１８１は第１５の実施例としてコンクリートに埋め込まれた鉄筋又は鉄骨の破断の探知を鉄筋又は鉄骨上を臨界屈折波として伝達する波に注目して行う方法を示すフローチャートである。なお、ｊ＝１は鉄骨／鉄筋健全部の測定を示し、ｊ＝２は破断／健全を評価する位置の測定を示す。

【０５５１】

次に、第１７の実施例について説明する。第１７の実施例では、被探知体の内部の劣化程度を定性的に探知する。図１８２は厚さ３０ｃｍ×幅２５ｃｍ×長さ１００ｃｍのコンクリート供試体を用い、発信と受信探触子の間隔ａを６０ｃｍとして配し、発信探触子１４４１から直下にたて波超音波１４４３を発信したときに受信探触子１４４２で受信する波の伝達経路を図示したものである。波１４４４は、コンクリート表面に発生する微弱な強度のたて波である。波１４４５は、コンクリート表面に発生する強度の大きい表面波である。波１４４６は、往路及び復路をたて波とする供試体底部からの反射波である。波１４４７は、往路をたて波、復路をよこ波、又は往路をよこ波、復路をたて波とする供試体底部からの反射波である。波１４４８は、往路及び復路をよこ波とする供試体底部からの反射波である。波１４４９は、直接波である。以下、発信探触子１４４１から超音波発信後、受信探触子１４４２で受信する時刻を、波１４４４の場合L_1、波１４４５の場合L_2、波１４４６の場合M_0、波１４４７の場合M_1、波１４４８の場合M_2、波１４４９の場合Ｓと定義する。

【０５５２】

探触子の発信及び受信子の径を４０ｍｍとして、図１８２の測定で得る受信時刻予測値は、供試体たて波音速４１００ｍ／秒、及びよこ波とたて波の音速比０．５９及び表面波とたて波の音速比０．５３を用いると、上述の各時刻は数式１３５乃至１３９のようになる。

【０５５３】

【数１３５】

$$L_1 = \frac{600 - 40}{4.1} \approx 137$$

【０５５４】

【数１３６】

$$L_2 = \frac{600-40}{0.53\times 4.1} \approx 258$$

【０５５５】

【数１３７】

$$M_0 = \frac{2\times\sqrt{\left(\frac{600-40}{2}\right)^2 + 300^2}}{4.1} = 200$$

【０５５６】

【数１３８】

$$M_1 = \frac{M_0}{2}\times\left(1+\frac{1}{0.59}\right) = 270$$

【０５５７】

【数１３９】

$$M_2 = \frac{M_0}{0.59} = 339$$

【０５５８】

共振振動数５００ｋＨｚ、径４０ｍｍの振動子を内蔵した探触子を用い、振動子に１５０Ｖのステップ関数型電圧を載荷したときの測定波GA_j（ｔ）の１例を図１８３に示す。G_j（ｔ）（ｊ＝１乃至４）に数式１２３を適用し、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとして、ｎ１＝４、ｎ２＝５６００、ｎ３＝０を適用して中心周波数がf_0＝４３ｋＨｚとなるように求めたものである。ｊ＝１乃至４の測定波G_j（ｔ）は図１８２の供試体の裏側の劣化度を変化させて測定している。前記劣化度の１つにコンクリート表面からは目視し得ない裏側のひび割れがある。図１８２の供試体には、図１８４に示すように、幅２ｍｍの割れが形成されている。また、割れの深さｄは、ｊ＝１では０ｍｍ、ｊ＝２では５０ｍｍ、ｊ＝３では１５０ｍｍ、ｊ＝４では２５０ｍｍとしている。

【０５５９】

割れの深さｄが大きくなるに従い、波１４４６、１４４７及び１４４８等における超音波の遮断量が大きくなっていく。

【０５６０】

図１８３では、GA_j（ｔ）波の比較図で４本のカーソルを示している。Ｌ段から時刻L_1、M_0、M_1、M_2を示している。数式１１２に準じて、L_1、M_0、M_1、M_2の時刻をt_hと表示して、f_0の値を５０ｋＨｚ程度と仮定して、f_0にこの５０ｋＨｚを適用し、数式１４０の演算を行い、更にL_1、M_0、M_1、M_2毎に、数式１２４の演算を行って得られるGB_j（ｔ）波又はFA_j（ｆ）スペクトルについて明する。

【０５６１】

【数１４０】

$$t_T = t_h + \beta_2\cdot\frac{1}{f_0} = t_h + 1.0\times\frac{10^3}{50}$$

【０５６２】

但し、数式１２３のＧＡ$_j$（ｔ）の算定においては、特に示す場合を除き、ｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０としている。また、数式１２４のＧＢ$_j$（ｔ）の演算においては、ＦｉＬＴ（ｔ）をｔ＝ｔ$_T$－１００以前の時刻で０、ｔ＝ｔ$_T$で１．０、ｔ＝ｔ$_T$＋１００以降の時刻で０となる正弦関数とした。

【０５６３】

図１８３の数式１２３でｎ１＝４、ｎ２＝５６００、ｎ３＝０として求めた平均的中心周波数が４３ｋＨｚのスペクトルをもつＧＡ$_j$（ｔ）波では第１カーソルのＬ$_1$＝１３７μ秒に波の起生を確認できない。これは、路程１４４４のたて波はその強度が微細なためである。振幅を１０倍に増幅表示した図１４６では、Ｌ$_1$＝１３７μ秒で路程１４４４の波の起生を確認できる。

【０５６４】

このＬ$_1$＝１３７μ秒を数式１４０に適用し、ｔ$_T$＝１７２μ秒と計算し、ｎ５＝５として求めた数式１２４のＧＢ$_j$（ｔ）波を図１８６に示す。対応するスペクトルＦＡ$_j$（ｆ）を示したものが図１８７である。カーソル１４８１及び１４８２の位置にスペクトルの極大値が生じている。ひび割れのないｄ＝０の場合のスペクトルがｊ＝１で、ｄ＝５０ｍｍのスペクトルがｊ＝２で、ｄ＝１５０ｍｍのスペクトルがｊ＝３で、ｄ＝２５０ｍｍのスペクトルがｊ＝４の場合である。

【０５６５】

ｊ＝１及びｊ＝２のスペクトルはｄ＝０及びｄ＝５０ｍｍとひび割れ深さが浅いために生ずる路程１４４９の直接波であり、３５ｋＨｚの振動数の波として求められている。一方、ｊ＝３及びｊ＝４のスペクトルはｄ＝１５０ｍｍ及び２５０ｍｍとひび割れ深さが深いため、前記直接波が遮断され、表面を伝達するたて波成分波がｆ$_D$の値を５９ｋＨｚとしたスペクトルとして求められたと解することができる。

【０５６６】

数式１４０に示すｔ$_T$をＭ$_0$、Ｍ$_1$、Ｍ$_2$について計算すれば、Ｍ$_0$の場合、ｔ$_T$＝２００＋２０＝２２０μ秒、Ｍ$_1$の場合、ｔ$_T$＝２７０＋２０＝２９０μ秒、Ｍ$_2$の場合、ｔ$_T$＝３３９＋２０＝３５９μ秒となる。ＧＡ$_j$（ｔ）をｎ１＝ｎ２＝ｎ３＝０として求め、ｔ$_T$を用い、ｔ＝ｔ$_T$－１００μ秒以前の時刻で０、ｔ＝ｔ$_T$μ秒で１．０、ｔ＝ｔ$_T$＋１００μ秒以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を作成し、ｎ５＝７として、数式１２４の演算を行い、ＦＡ$_j$（ｆ）をＦＡ$_j$^{2}（ｆ）表示したものが図１８８乃至図１９０である。

【０５６７】

図１８８がＭ$_0$の場合の底部たて波反射波である波１４４６のスペクトルである。ｄ＝０のｊ＝１及びｄ＝５０ｍｍのｊ＝２の場合のスペクトルのみ大きく生じている。ｄ＝１５０ｍｍ及び２５０ｍｍと大きいひび割れのｊ＝３及びｊ＝４のスペクトルのスペクトル値は小さなものになっている。これは、深いひび割れの存在で、波１４４６の伝達波が遮断されたためである。ｆ$_D$の値は、ｊ＝１の場合で４２ｋＨｚ、ｊ＝２の場合で３７ｋＨｚ、ｊ＝３の場合で３３ｋＨｚとなっている。劣化度が増すと、つまりｄの値が大きくなると、低周波に移動している。

【０５６８】

図１８９がＭ$_1$の場合の波１４４７のスペクトルである。３３ｋＨｚと４８ｋＨｚにｆ$_D$の値が生じている。３３ｋＨｚスペクトルのスペクトル値はｄ値の大きさに約反比例しており、４８ｋＨｚスペクトルのスペクトル値はｄ＝０で最大値を持ちｄ＝５０ｍｍで約１／２の値である。

【０５６９】

図１９０がＭ$_2$の場合の波１４４８のスペクトルである。ｆ$_D$の値は３３ｋＨｚと読み取れる。ｄ＝０でスペクトル値が最大となり、ｄ＝５０ｍｍで３／４の値である。ｄ＝１５０ｍｍ、２５０ｍｍでは、スペクトル値が微小である。

【０５７０】

このように、第１７の実施例によれば、被探知体内部の劣化度を定性的及び定量的に探

知可能である。即ち、劣化度に伴いf_Dの値が変化し、f_Dの値でのスペクトル値が大きく変動するという現象を利用することにより、劣化度を探知することができる。

【０５７１】

なお、本実施例ではL_2の場合については、時刻L_2と時刻M_1がおおよそ合致したため、測定例として示していないが、探触子間距離ａ＝６００ｍｍを、例えば１０００ｍｍというように変更すれば、L_2の場合でも、図１８８乃至図１９０のように、スペクトルの比較図を得ることができる。

【０５７２】

なお、図１８９及び図１９０はFA_j（ｔ）をFA_j^2（ｔ）表示したものであるが、図１８７及び図１８８では、以下の比較表示を行っている。各FA_j（ｔ）で最も大きいスペクトル値の絶対値を$|{}_jS_{max}|$とし、$|{}_jS_{max}|$のｊ＝１乃至ｎＡの中で最も大きい振幅値を$|S_{max}|$としたとき、$|{}_jS_{max}| \geqq |S_{max}|/\beta_a$となる$FA_j$（ｔ）を$|S_{max}|/|{}_jS_{max}| \times FA_j$（ｔ）と置き換えた重み付け比較で示している。このような重み付け比較で、コンクリート内の劣化度に伴うf_Dの値の変化を容易に確認できる。また、図１８７ではβ_aを１．１としたFA_j（ｔ）を前記の重み付けで表示し、図１８８ではβ_aを１．２としたFA_j^2（ｔ）を前記の重み付けで表示している。

【０５７３】

図１９１乃至図１９３は第１７の実施例として被探知体の内部の劣化度を表面波又は版厚反射波等の振動数の変化及びスペクトル値の増減等により探知する方法を示すフローチャートである。なお、ｊ＝１はコンクリート内部が健全の場合を示し、ｊ＝２乃至ｎＡはコンクリート内部の劣化度を評価する位置の測定を示す。また、ステップＳ１７－２５では、FA_j（ｆ）のFA_1（ｆ）とのスペクトル比較でFA_j（ｆ）のf_Dの値の変化及びf_Dの値に関するスペクトル値の大小を指標にコンクリート内部の劣化度を予測する。

【０５７４】

次に、第１８の実施例について説明する。第１８の実施例は第１２の実施例を拡張した方法である。図１２４乃至図１３１は鉄筋からのたて波反射波を抽出するものであった。つまり、f_Dの値はたて波反射波に対応するものである。具体的には、このf_Dの値にはよこ波反射波に対応するものもある。

【０５７５】

図１９４は図１２４乃至図１３１と同様の計測で、測定間隔を広くし、測点数を少なくしたG_j（ｔ）波である。計測条件として異なる点は、１対の発信探触子及び受信探触子の間隔をａ＝１２０ｍｍとしたことである。測点２及び４にかぶり厚ｄ＝５０ｍｍで径が２０ｍｍの異形鉄筋が埋め込まれている。ａ＞２×ｄ以上になると、鉄筋から受信する反射波は、コンクリート内で自然発生するよこ波成分が卓越してくる。

【０５７６】

図１９４に示すカーソル１１１０１の位置をG_j（ｔ）波の起生の最初の時刻t_T（２７．６μ秒）としてｔ＝０で０、ｔ＝t_Tで１．０、ｔ＝２×t_T以降の時刻で０となる正弦関数状フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を最初のフィルタとして、数式１２３のｎ１、ｎ２、ｎ３を夫々０として、数式１２４でｎ５＝２として演算したGB_j（ｔ）の１部を示したのが図１９５である。Δｔａ＝０．２μ秒として、t_Tの値をΔｔａずつ増分した場合にt_T＝４９．２μ秒となったときのGB_j（ｔ）波である。対応するスペクトルを図１９６に示す。

【０５７７】

スペクトル１１３０１及び１１３０４は測点直下に鉄筋がある場合のものであり、スペクトル１１３０２及び１１３０３は直下に鉄筋のない場合のものである。その極大値を示す振動数が概略全てのスペクトルで一致するカーソル１１３０６のスペクトルが探知妨害波スペクトルであり、また、カーソル１１３０５でスペクトル１１３０１及び１１３０４が極大値となっている。従って、カーソル１１３０５の振動数が、この測定におけるよこ波反射波のf_Dの値と判断でき、f_D＝７０ｋＨｚと特定できる。

【０５７８】
一方、この計測の場合、１対の探触子の間隔が広いため、コンクリート表面を探触子間で伝達する妨害波は表面波が支配的となる。このため、数式２０の$_{c}V_{p}$を表面波音速０．５３$_{c}V_{p}$に変更した数式２０－１を用いて、f_{0}の値を計算すると、α（ｌ）＝１．０として、数式１４１のように５３ｋＨｚとなる。

$$f_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.53 \times {}_{c}V_{p}}{\frac{1}{2}\phi}$$

【０５７９】
【数１４１】

$$f_0 = \frac{0.53 \times 4000}{40} = 53$$

【０５８０】
$f_{0} < f_{D}$となるため、数式１２４及び１２５を用いてf_{D}＝７０ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波GC_{j}（ｔ）をG_{j}（ｔ）波より抽出する。ｎ１１＝４、ｎ２１＝１６００、ｎ３１＝０として演算した７０ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波のスペクトルA_{1}^{n11}（ｆ）・A_{2}^{n21}（ｆ）・A_{3}^{n31}（ｆ）・FA_{j}（ｆ）をスペクトル値の２乗表示で図１９７に示す。
【０５８１】
カーソル１１４０１（７０ｋＨｚ）に大きなスペクトル値を持つ測点１及び２のスペクトルを見ることができる。対応する成分波GC_{j}（ｔ）において、全成分波の最大振幅の絶対値を$|max\ P|$とし、各成分波GC_{j}（ｔ）毎の最大振幅の絶対値を$|max\ P_{j}|$としたとき、$|max\ P| / \beta_{a} \leqq |max\ P_{j}|$を満足する$GC_{j}$（ｔ）波を$GC_{j}^{2}$（ｔ）表示で表示図面に最大表示したものが図１９８である。β_{a}＝１．５として表示している。測点１及び４にのみ大きな振幅の鉄筋からの反射波をカーソル１１５０１の位置に確認できる。カーソル１１５０１の位置のt_{T}を用い、ｔ＝０で０、ｔ＝t_{T}で１．０、ｔ＝２×t_{T}以降の時刻で０とする正弦関数状フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用い、ｎ５＝０として求めた数式１２５のGC_{j}（ｔ）波をGC_{j}^{2}（ｔ）で表示したのが図１９９である。図１９８の表示と同様、β_{a}＝１．５として示している。
【０５８２】
図２００乃至図２０２は第１８の実施例として被探知体にたて波超音波を入力したときに被探知体内で自然発生するよこ波に注目した探知の方法を示すフローチャートである。
【０５８３】
次に、第１９の実施例について説明する。第１９の実施例では、被探知体の音速を高精度に測定する。
【０５８４】
超音波によるコンクリート等の内部探知に必要な基本的データの１つに、そのコンクリートの音速がある。構造物によっては透過法による音速測定が不可能なものもある。例えば、トンネル巻厚の測定等では、その表面に１対の発信探触子及び受信探触子の中心間隔を１として配した図２０３に示す測定で、発信探触子よりその表面直角方向にたて波超音波を発信し、自然発生する微弱なたて波１５８１を受信探触子で受信し（以下、表面配置計測とよぶ）、この受信時刻t_{h}と振動子径φ、補正係数βを用いて、数式１４２のように、たて波音速$_{C}V_{P}$を求めている。
【０５８５】
【数１４２】

$$_{c}V_{p} = (\ell - \beta_{s} \times \phi)/t_{h}$$

【０５８６】
しかし、この方法には２つの問題点がある。第１に、上述のたて波はその強度が微弱であるため、電気的及び機械的な雑音の中に埋もれやすい。第２に、数式１４２で用いる補正係数β_Sを従来確定する方法が未解明である。従来、$\beta_S=0$又は$\beta_S=1.0$として、たて波音速を評価している。
【０５８７】
このような状況の下、従来の表面配置計測では、コンクリート表面を伝達するたて波音速を正確に測定することができず、また、コンクリートの表面を伝達する表面波の音速等の測定はほとんど不可能である。
【０５８８】
第１９の実施例では、表面配置法計測でたて波及び表面波音速を高精度に測定すると共に、数式１４２のβ_Sの値を確定する。また、第１９の実施例を図２０４に示す斜め透過法計測で得られる受信波に適用することにより、コンクリート内を伝達するよこ波の速度を測定することもできる。
【０５８９】
図２０５は厚さ５０ｃｍのコンクリート平板を用い、図２０３に示す表面配置計測で得た受信波の１例である。図２０６は図２０５に対応するスペクトルである。径が４０ｍｍで共振振動数が５００ｋＨｚの振動子が内蔵された外径６０ｍｍの１対の発信探触子及び受信探触子をｌ＝１４０ｍｍで配し、発信探触子内振動子１５８４にステップ関数型の５００Ｖの電圧を載荷し、受信探触子１５８５で得られる受信波を、電圧の載荷の都度、計１００回受信し、加算平均した波Ｇ（ｔ）に数式１２３に示す演算を行った波ＧＡ（ｔ）である。具体的には、加算平均波Ｇ（ｔ）を数式１２３に適用し、ｎ１＝２、ｎ２＝２０、ｎ３＝０として、f_{MAX}＝２５００ｋＨｚとする第１の周波数フィルタA_1（ｆ）及び第２の周波数フィルタA_2（ｆ）を用いて、数式１４３の演算を行ったものである。
【０５９０】
【数１４３】

$$GA(t)=\int_{-\infty}^{\infty}\left(A_1^2(f)\cdot A_2^{20}(f)\cdot F(f)\cdot e^{iwt}\right)df$$

【０５９１】
図２０６は０乃至５００ｋＨｚの広帯域スペクトルとなっている。対応する波ＧＡ（ｔ）を振幅を４倍に増幅して図２０５に表示している。たて波１５８１が超音波発信後に起生するであろう理論的時刻付近にカーソル１６０１を示している。
【０５９２】
しかし、カーソル１６０１の前後に電気的及び機械的な雑音が重畳し、たて波１５８１の起生位置を確認することができない。一方、図２０７は加算回数を徐々に増加させていくことで得た前記ＧＡ（ｔ）波である。加算回数が増していくに従い、カーソル１６０１付近の電気的及び機械的な雑音が消滅している。図２０７の波ＧＡ（ｔ）は３０００回の加算平均波より、数式１２３に示す演算でｎ１＝２、ｎ２＝２０、ｎ３＝０として求めたものである。なお、加算回数の最適値は一義的に決め得るものではない。計測現所の電源及び交通事情からの外乱の受信波への混入程度で、この加算回数の最適値は大きく変動する。このため、図２０５、図２０７、図２０８に至るＧＡ（ｔ）波の変化を加算回数が増すに従い視認でき、かつオペレータの判断で加算回数の増加を装置に指示できる機能を具備させることが好ましい。
【０５９３】
また、ＧＡ（ｔ）波の振幅の増幅表示機能は重要である。図２０８に示すＧＡ（ｔ）波は図２０７のＧＡ（ｔ）波の振幅を２０倍に増幅して表示したものである。カーソル１６３１が経路１５８１のたて波の起生時刻を明敏に特定している。図２０７のＧＡ（ｔ）波は振幅増幅せず、そのまま表示したものである。図２０７では、カーソル１６２１の時刻をたて波１５８１の伝達時間t_hと誤認する虞がある。

【０５９４】
従って、先ず、広帯域超音波装置を用い、図２０３の表面配置計測で指定された回数n_kの受信波を取得し、これらの加算平均波Ｇ（ｔ）を得る機能を設ける必要がある。また、数式１２３を用いてＧ（ｔ）波より図２０６に示すような０乃至５００ｋＨｚ程度の帯域のＧＡ（ｔ）波を演算する機能を設ける必要がある。また、ＧＡ（ｔ）波を増幅表示して、例えば図２０５に示すように、視認させる機能を設ける必要がある。また、オペレータの判断で、加算回数n_kを増加させ得るコントロール処理機能を設ける必要がある。更に、これらの処理を繰り返し行い得る機能を設ける必要がある。なお、前記オペレータの判断には、必ず、例えば図２０８の位置１６３１の波の最初の振幅をP_A、その前方にある雑音の振幅をP_Bとしたとき、しきい値R_Pを用いて、$P_B \leqq P_A / R_P$となったとき、加算平均を終了すればよい。これらの機能を超音波探知装置設けることにより、数式１４２のたて波速度算定式における超音波伝達時間t_kを高精度に特定できる。

【０５９５】
但し、これらの方法では、数式１４２のβ_Sの値を特定することはできない。次に、このβ_S値の特定を必要としない音速の測定方法について説明する。

【０５９６】
図２０９は、図２０３の表面配置計測において、探触子中心間距離ｌをｌずつ変化させて測定した図２０７に対応するGA_j（ｔ）波をそれぞれ後述する演算処理を行い、並べて示したものである。各波に付したＮｏ．は以下のようである。但しΔｌは２０ｍｍとした。Ｎｏ．１では、ｌ＝２００ｍｍ、Ｎｏ．２では、ｌ＝２００－Δｌ（ｍｍ）、Ｎｏ．３では、ｌ＝２００－２×Δｌ（ｍｍ）、・・・、Ｎｏ．６では、ｌ＝２００－５×Δｌ（ｍｍ）。

【０５９７】
演算処理は、図２０９の波形の表示最大スケールを１．０とし、各波GA_j（ｔ）の最大振幅の絶対値$|MAX\ P_j|$を用いて、GA_j（ｔ）／$|MAX\ P_j|$表示した後、図２０５及び図２０７の波の表示と同様に、オペレータの指示により波形振幅を徐々に増幅表示した。

【０５９８】
図２０９ではΔｌが一定値であるため、斜めのカーソル１６４１が各GA_j（ｔ）／$|MAX\ P_j|$波の起生時刻で合致している。このような斜めカーソルの発生はオペレータの指示で行われる。最初、図２０９に対応する分析画面に水平カーソルが自動発生され、本装置をオペレーションすることで、カーソルの回転及び上下方向移動を容易に行えるようにしてある。カーソルは、図２０９のよこ軸をＸ、たて軸をＹと表現すれば、$Y = b_1 X - b_2$となる。

【０５９９】
上述の計測において、径が４０ｍｍの振動子を内蔵した場合と、径が２０ｍｍの振動子を内蔵した場合とでは、b_1及びb_2の値は次のようになった。径が４０ｍｍの振動子では、b_1が０．２２８、b_2が８．０４２、径が２０ｍｍの振動子では、b_1が０．２２９、b_2が４．１２０であった。

【０６００】
b_1の値の逆数は、たて波１５８１の音速と一致する。従って、径が４０ｍｍの振動子を用いた場合には、数式１４４より、音速は４３８６（ｍ／秒）となる。

【０６０１】
【数１４４】

$$V_p = \frac{1}{0.228} \fallingdotseq 4.386^{mm} / \mu \cdot \sec = 4386^{m} / \sec$$

【０６０２】
従って、β_S値を用いないでも、たて波の音速の測定が可能となる。

【０６０３】

なお、上述の$_{c}V_{p}$＝４３８６（ｍ／秒）を用いてたて波音速算定式のβ$_{s}$を容易に求めることができる。数式１４２に$_{c}V_{p}$及び使用した探触子の振動子径φ＝４０ｍｍ及びl_{0}＝２００ｍｍ（G_{1}（ｔ）波）の場合の起生時刻t_{h}＝３７．４６μ秒を適用すれば、４．３８６＝（２００－β$_{s}$×４０）／３７．６４となる。従って、β$_{s}$は０．８７となる。この計算はG_{1}（ｔ）波を用いた場合のものであるが、他の波G_{j}（ｔ）を用いても同様にして、β$_{s}$を求めることができる。また、測定例としては示さないが、振動子径が２０ｍｍの場合、β$_{s}$は若干異なり、０．８９程度となる。

【０６０４】

前述のように、探触子の中心間距離の同一の変化量Δｌ毎に測定したGA_{j}（ｔ）波を用いて音速評価を行う方法は、従来、その測定が不可能であった図２０３の表面波１５８２の音速も、図２０４の斜透過法計測の場合で自然発生するよこ波の音速も極めて高い精度で測定することが可能である。

【０６０５】

図２１０は図２０３の測定でｌ＝３００ｍｍとし、Δｌ＝２０ｍｍとし、ｌ＝２００ｍｍまで変化させたときの表面波１５８２の音速を求めた結果である。図２０９ではGA_{j}（ｔ）波を縦方向に並べていたが、図２１０ではよこ方向に並べている。

【０６０６】

図２０９のたて波音速を求めた処理とは以下の点で異なる。表面波１５８２の振幅はたて波１５８１の振幅に比して極めて大きい。また、この性質は低周波の成分波になればなるほど顕著となる。この性質を利用すると、容易に表面波の音速を測定できる。すなわち、数式１２３においてｎ３＝０とし、ｎ１、ｎ２の値をコントロールし、GA_{j}（ｔ）波を取得し、GA_{j}（ｔ）／｜$_{MAX}P_{j}$｜の代わりに、ｎｐを１以上の整数としてこれをｎｐ乗したもの（（GA_{j}（ｔ）／｜$_{MAX}P_{j}$｜）^{np}）をｊ＝１至６まで並べて表示し、その振幅を徐々に増幅していくことで得たものである。図２１０の比較図ではｎｐ＝３としている。なお、この場合でもf_{D}値が存在する。即ち、表面波の強度が最も大きく卓越する振動数を、図１９９を求めた方法に従って求めると、図示しないが、６０ｋＨｚ前後である。従って、ｎ１＝４、ｎ２＝２４として、中心周波数が６０ｋＨｚとなる狭帯域成分波GA_{j}（ｔ）を求め、図２０９の場合と同様に、自動発生したカーソルをオペレータ指示で回転及び左右方向へ移動させ、カーソルがすべての（GA_{j}（ｔ）／｜$_{MAX}P_{j}$｜）^{np}波の起生位置と合致するようにしたものである。

【０６０７】

Ｎｏ．１の波のカーソル位置$t_{h,1}$は１２３．９μ秒、Ｎｏ．６の波のカーソル位置$t_{h,6}$は８１．９μ秒である。従って、表面音速$_{C}V_{L}$は数式１４５より２３８１（ｍ／秒）となる。

【０６０８】

【数１４５】

$$ {}_{c}V_{L} = \frac{300^{mm} - 200^{mm}}{(123.9 - 81.9)\mu \cdot \sec} = 2{,}381^{mm}/\mu \cdot \sec = 2381^{m}/\sec $$

【０６０９】

表面波とたて波との音速比はε$_{1}$＝$_{c}V_{L}$／$_{c}V_{p}$となる。図２１０のカーソルの傾きb_{1}の逆数１／b_{1}が表面波の音速であることは以下の処理で証明される。図２０３に示したたて波１５８１と表面波１５８２の強度は後者の方が極めて大きい。このため、（GA_{j}（ｔ）／｜$_{MAX}P_{j}$｜）^{np}波ではたて波１５８１は消滅する。また、図２０３に示した直接波１５８３が表面波１５８２より早く受信される可能性は否定できない。しかしながら、もし直接波１５８３が早く受信されたとすれば、直接波の伝達機構上、その伝達距離の変分が直線的とはならないため、カーソルＹ＝b_{1}Ｘ－b_{2}上にすべての（GA_{j}（ｔ）／｜$_{MAX}P_{j}$｜）^{np}波の起生時刻が合致しなくなる。

【０６１０】

図２１１は図２１０の中心周波数を６０ｋＨｚとするＧＡ（ｔ）波に数式１２３を再度適用し、ｎ２の値を２４からさらに増大したときのＧＡ$_{j}$（ｔ）／｜$_{ＭＡＸ}$Ｐ$_{j}$｜波を表示したものである。ｎ２の値を徐々に大きくしていくと、図２１０に示す斜カーソル１６５１の若干後方位置に、各ＧＡ$_{j}$（ｔ）／｜$_{ＭＡＸ}$Ｐ$_{j}$｜波の時間軸と交差する時刻の傾きがカーソル１６５１の傾きと一致してくる中心周波数の狭帯域成分波がある。本実施例の場合、この中心周波数は４３ｋＨｚであった。

【０６１１】

図２１１の斜カーソル１６６１は時間軸の後方位置に図２１０のカーソル１６５１を平行移動したものである。カーソル１６６１と４３ｋＨｚの狭帯域成分波の傾きとがほぼ一致している。これは、このような低周波においては、図２０３１５８に示す伝達波１５８１、１５８２及び１５８３のうち、表面波１５８２の強度が他の波の強度と比して、極めて大きくなるという物理現象より生じたものである。

【０６１２】

図２０４の斜透過法計測においても、同様な現象がある。即ち、低周波成分波になると、図２０４の測定の場合、受信波に含まれるよこ波成分がたて波成分に比し卓越してくる。この現象を利用して、図２０４の斜透過法計測で、コンクリートのよこ波音速を測定する事例について説明する。

【０６１３】

図２１２は図２０４の斜透過法で得た３０００回の受信波を加算平均した波Ｇ$_{j}$（ｔ）より２３８ｋＨｚの狭帯域成分波として数式１６の演算を行い、ＧＡ$_{j}$（ｔ）の各々で最大振幅の絶対値を｜$_{ＭＡＸ}$Ｐ$_{j}$｜とし、ＧＡ$_{j}$（ｔ）／｜$_{ＭＡＸ}$Ｐ$_{j}$｜の振幅値を１７倍に拡大表示したものである。使用した探触子は径が４０ｍｍ、共振振動数が５００ｋＨｚの振動子を内蔵し外径が６０ｍｍのものである。ｊは１～６までとし、図２０４の探触子の受発信面の中心を結ぶ線分長をｌｊ＝１５０＋（ｊ－１）×２０（ｍｍ）とした。なお、ＧＡ$_{j}$（ｔ）の作成にあたっては、分析の上限振動数をｆ$_{ＭＡＸ}$＝２５００ｋＨｚ、ｎ１＝４、ｎ２＝８、ｎ３＝０として演算した。

【０６１４】

図２１２において、表示する斜カーソル１６７１が全てのＧＡ$_{j}$（ｔ）波の起生位置と合致している。このカーソルの傾きを計算すると、１００ｍｍ×１０^{3}／（５０－２６．８６）μ秒＝４３２１（ｍ／秒）となる。図２０４の発信探触子及び受信探触子間を最も早く伝達する波はたて波であるため、たて波音速が$_{Ｃ}$Ｖ$_{Ｐ}$＝４３２１（ｍ／秒）と判断できる。

【０６１５】

また、よこ波音速についても、図２１１の表面配置計測で示した表面波音速を測定する方法を用いて特定することが可能である。

【０６１６】

図２１２を得たＧＡ$_{j}$（ｔ）波を用い数式１２３で表される狭帯域成分波ＧＡ$_{j}$（ｔ）をｆ$_{ＭＡＸ}$＝２５００ｋＨｚ、ｎ１＝４、ｎ２＝１６００、ｎ３＝０として、中心周波数３０ｋＨｚとする狭帯域成分波を抽出したものが図２１３である。

【０６１７】

図２１３は図２１２と比してよこ軸（時間軸）を１／２に縮小表示している。低周波成分波になると、斜透過法においては、よこ波成分がたて波成分より著しく強度が大きくなるため、図２１２のたて波１６７１の起生位置より後方に、振幅が大きく、且つ波形の時間軸と交差する位置がｊ＝１～６の順で直線的に変化する。

【０６１８】

カーソル１６８１で、時間軸と交差する位置を特定している。このカーソル１６８１の傾きは１００ｍｍ×１０^{3}／（１０５－６５．５）μ秒＝２５３２（ｍ／秒）である。従って、よこ波音速$_{Ｃ}$Ｖ$_{Ｓ}$は$_{Ｃ}$Ｖ$_{Ｓ}$＝２５３２（ｍ／秒）となる。このコンクリートモデルのよこ波とたて波の音速比ε$_{2}$は２５３２／４３２１＝０．５８６と特定される。

【０６１９】

以上より、表面を伝達する微細なたて波音速$_{c}V_{p}$等が何らかの原因で精度よく求められない場合であっても、勢力の大きい表面波音速$_{c}V_{L}$及びよこ波音速$_{C}V_{S}$を求め、たて波音速$_{c}V_{p}$を$_{c}V_{p}=_{c}V_{L}/\varepsilon_{1}$又は$_{c}V_{p}=_{c}V_{S}/\varepsilon_{2}$として求めることもできる。

【０６２０】

図２１４乃至図２２２は第１９の実施例として透過法による音速測定が不可能な構造物に対し、１対の発信探触子及び受信探触子を被探知体の表面に両探触子の中心間距離l_{0}で配する表面配置法又は斜透過法計測において超音波の音速を測定する方法を示すフローチャートである。特に、図２１４は使用する振動子の径をφ、超音波の発信後に受信する波の起生時刻をt_{h}として、たて波超音波の音速を数式１４２として測定する方法であって、振動子の径φ毎に決まるβ_{s}の値を用いて、たて波音速を求める方法を示す。図２１５乃至図２１７は探触子の中心間距離をｎＡ回変化させた計測で得るG_{j}（ｔ）の波形を分析して得られる成分波の超音波発信後の起生時刻t_{hj}が直線的に変化する物理現象を利用して、直線的変化の傾きが被探知体のたて波音速$_{c}V_{p}$又は前記たて波音速$_{c}V_{p}$の逆数となることを利用した計測、並びに任意の$G_{j=k}$（ｔ）波とその起生時刻$t_{h、k}$として図２１４に示す方法で用いるβ_{s}の値を求める方法を示す。また、図２１８及び図２１９はＧｊ（ｔ）波を波形分析して、表面波の音速$_{c}V_{L}$を求め、たて波音速を算定する方法を示す。そして、図２２０乃至図２２２は斜透過法として探触子の中心間距離をｎＡ回変化させた計測で得るG_{j}（ｔ）の波形を分析して得られるよこ波の音速$_{c}V_{s}$、を求め、たて波音速を算定する方法を示す。

【０６２１】

次に、第２０の実施例について説明する。第２０の実施例では、探知された対象物が鉄筋又は埋設管の判断、埋設管の場合には、鉄管又は塩化ビニル管の判断を行う。

【０６２２】

図２２３は１０ｃｍのかぶり厚で埋め込まれた径が２５ｍｍの鉄筋の探知結果である。径が４０ｍｍ、共振振動数が５００ｋＨｚの１対の発信探触子及び受信探触子を、その中心間距離を７０ｍｍとして鉄筋直上に配した計測で１０００回の加算平均波Ｇ（ｔ）を作成し、数式１２３で分析の上限をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとし、ｎ１＝５、ｎ２＝８００、ｎ３＝０として数式１６の演算を行い、GA^{2}（ｔ）表示したものである。数式１１２のt_{T}を図２２３のカーソルが示す９７．１７μ秒とし、ｔ＝０で０、ｔ＝t_{T}＝６７．１７で１．０、ｔ＝２t_{T}以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を定義し、数式１２４の右辺で示されるFA_{j}（ｆ）（ｊ＝１のみ）スペクトルを示したものが図２２４である。２つのスペクトルの起生を確認できる。これらのスペクトルの振動数は７０ｋＨｚ、１１２ｋＨｚである。

【０６２３】

図２２５のスペクトル比較図では、ｊ＝１が径２５ｍｍ、かぶり厚１００ｍｍの鉄筋、ｊ＝２が径２５ｍｍかぶり厚１００ｍｍの鉄管、ｊ＝３が径２５ｍｍかぶり厚１００ｍｍの塩化ビニル管の場合でのスペクトルを示す。即ち、分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚとし、ｎ１＝４、ｎ２＝１８００、ｎ３＝０として数式９９の演算を行い、数式９８のt_{T}を若干時刻前方へ移動させ、t_{T}＝５４．２μ秒とし、ＦｉＬＴ（ｔ）をｔ＝t_{T}－１００以前で０、ｔ＝t_{T}で１．０、ｔ＝t_{T}＋１００以降の時刻で０とした。更に、ｎ５＝１１として数式９９の演算を行い、ｊ＝１の鉄筋からの反射波スペクトルFA_{1}（ｆ）、ｊ＝２の鉄管からの反射波スペクトルFA_{2}（ｆ）、ｊ＝３の塩化ビニル管からの反射波スペクトルFA_{3}（ｆ）を比較表示したものが図２２５である。各スペクトルの起生状況は互いに相違している。

【０６２４】

図２２４における鉄筋反射波のf_{D}の値の１つである７０ｋＨｚで、鉄筋、鉄管及び塩化ビニル管からの反射波のスペクトルを比較表示し、図２２５に示したことになる。なお、鉄管及び塩化ビニル管では、その内部は空洞となっている。

【０６２５】

第１０の実施例で説明したように、中空の配管においては、配管の構造に関する共振スペクトルが反射波スペクトルに重畳する。本実施例における鉄筋と埋設管とのＦＡ$_j$（ｔ）スペクトルの比較では、埋設管の場合の方が、鉄筋の場合と比較すると、スペクトルの幅が大きくなり、スペクトルのピークを示す振動数について、鉄筋の場合にはｆ$_D$の値が１つであるが、埋設管の場合には複数になり、特に、鉄管の場合には、塩化ビニル管と比較するとスペクトル強度が大きくなっている。

【０６２６】

図２２５は数式９９のＨＢ$_j$（ｔ）を用いて得たものであるが、数式１２４のＧＢ$_j$（ｔ）を用いた同様の分析によっても、分析結果を特には示さないが、同様のスペクトル比較図を得ることができる。

【０６２７】

このように、ＨＢ$_j$（ｔ）又はＧＢ$_j$（ｔ）のスペクトルを比較することにより、即ち上述のスペクトルの変化の特徴を検討することにより、被探知体が鉄筋、鉄管又は塩化ビニル管のいずれであるかを判断できる。

【０６２８】

但し、このようなスペクトルの比較では、工学的判断が必要とされる場合がある。この判断を自動的に行うには、判断条件が少ないほど好ましい。

【０６２９】

図２２４は図２２３に示すカーソル（ｔ$_T$＝６７．１７μ秒）に基づいてｔ$_T$＝６７．１７とするＦｉＬＴ^{n5}（ｔ）を用いて径２５ｍｍの異形鉄筋からの反射波のスペクトルをｎ５＝１８として取り出したものである。このｔ$_T$を数式１１２を準用して、ｄ＝１０ｃｍ、コンクリートの音速を$_c$Ｖ$_p$＝４３１７ｍ／秒のときの径２５ｍｍ、かぶり厚１０ｃｍの鉄筋のｆ$_D$（１０９ｋＨｚ）を用いて、数式１４６のように、５４．２μ秒と特定した。

【０６３０】

【数１４６】

$$t_T = \frac{2\times d}{{}_cV_p} + \beta_2 \cdot \frac{1}{f_D} = \frac{2\times 100}{4317} + 1.0\times\frac{10^3}{112} = 54.2$$

【０６３１】

そして、数式１２４の演算を行ってもＦＡ（ｆ）スペクトルは図２２４のスペクトルとほぼ同一なものとなる。なお、７０ｋＨｚを中心周波数とするスペクトルは異形鉄筋のリブの存在により、鉄筋に入力するたて波がモード変換を生じ、よこ波に変換されて生じたものである。

【０６３２】

次に、上述の現象を利用した探知方法について説明する。たて波反射波のｆ$_D$とよこ波反射波のｆ$_{DS}$との間に数式１４７の関係が成り立つものとする。

【０６３３】

【数１４７】

$$f_{DS} = \varepsilon_2 \cdot f_D$$

そして、ｆ$_P$＝ｆ$_D$・（１＋ε$_2$）／２を中心周波数とする狭帯域成分波の取り出しについて検討する。

【０６３４】

図２２５に示すスペクトル比較図を得たＨＡ$_j$（ｔ）及びＨＢ$_j$（ｔ）において、ｎ２の値を１８００から順次小さくし、ｎ５＝２７としたときの数式９９のＦＡ$_j$（ｆ）スペクトルの中心周波数がｆ$_p$と等しくなるようにしたスペクトル比較図が図２２６である。ｊ＝１の鉄筋からの反射波スペクトルにたて波及びよこ波の２つの成分が含まれているため、２つのピークが生じている。埋設管の反射波スペクトルにはたて波成分の１つのピー

クのみが含まれている。ｊ＝２及び３の鉄管及び塩化ビニル管のスペクトルの比較では、鉄管の場合の方が広帯域となっている。

【０６３５】

図２２６はHB_j（ｔ）を用いて示したものであるが、GB_j（ｔ）を用いた分析でも、図示しないが、全く同様の比較図を得ることができる。但し、鉄筋及び塩化ビニル管の場合での帯域幅の相違は図２２６ほどは顕著にならない。

【０６３６】

上記の判別法によれば、加算平均波G_j（ｔ）及びH_j（ｔ）を波形分析することで、探知物が鉄筋か埋設管であるかを容易に判断できる。また、埋設管と判断した場合には、それが鉄管なのか塩化ビニル管なのかを同様の波形分析によって判断することが可能である。埋設管はその内部が中空であるため、超音波が入力されると、管のもつ共振特性に基づいて共振現象が生じ、この共振波が反射波に重畳して受信される。このような共振は、鉄管の方が高周波で生じる。

【０６３７】

先ず、塩化ビニル管の探知について説明する。図２２５のスペクトル比較図を得たHA_j（ｔ）及びHB_j（ｔ）において、F_j／F_j（ｆ）をF_j（ｆ）に置き換え、ｎ２の値を徐々に大きくし、ｎ５＝２７としたときの数式１２４におけるFA_j（ｔ）スペクトルの中心周波数が５０ｋＨｚ付近になるようにしたときの比較図が図２２７である。ｊ＝３の塩化ビニル管の場合のFA_3（ｔ）スペクトルが広い帯域のスペクトルとして生じている。ｊ＝１及び２の鉄筋又は鉄管の場合とスペクトルの形状が著しく相違している。ｊ＝３のような正弦関数状の比較的帯域幅が広いスペクトルが得られたときに探知物を塩化ビニル管と断定すればよい。

【０６３８】

但し、注意が必要がこともある。図２２７はF_j（ｆ）を使用したときの解析結果であり、F_j／F_j（ｆ）を使用したときの位相情報のみを用いた同様の分析法によれば、コンクリート表面を探触子間で伝達する表面波が大きな勢力の妨害波として低周波帯域に生じてくる。例えば、５０ｋＨｚから４０ｋＨｚまでFA_j（ｆ）スペクトルの中心周波数を移動させると、ｊ＝１乃至３の場合のスペクトルが概略同一形状の妨害波スペクトルとして現れるようになる。F_j（ｆ）又はF_j／F_j（ｆ）のいずれを採用しても図２２７のような比較図を得るために、５０ｋＨｚが特定されている。

【０６３９】

次に、鉄管の探知について説明する。図２２５のスペクトル比較図を得たHA_j（ｔ）及びHB_j（ｔ）において、F_j／F_j（ｆ）をF_j（ｆ）に置き換え、ｎ２の値を徐々に小さくし、ｎ５＝２７の数式１２４におけるFA_j（ｆ）スペクトルの中心周波数がf_D付近になるようにしたときの比較図が図２２８である。ｊ＝２の鉄管の場合のF_2（ｆ）スペクトルが他のスペクトルと比して、広い帯域を示している。ｊ＝１及び３の鉄筋、塩化ビニル管では、多少帯域幅に相違が見られる程度である。

【０６４０】

これらの３種の判別法を組み合わせることにより、鉄筋、鉄管及び塩化ビニル管の判断を高度な工学的判断を必要とせずに自動的に行うことが可能となる。

【０６４１】

なお、上述の判断では、スペクトル形状及びその帯域の２つのパラメータを基礎としている。スペクトルの強度もパラメータの１つとして考えられるが、コンクリートの表面の粗さ加減等で計測の再現性への影響が極めて大きいため、本実施例ではパラメータに含まれていない。従って、図２２５乃至２２８では、FA_j（ｆ）スペクトルのｊ毎の最大スペクトル値を１．０に標準化している。

【０６４２】

図２２９乃至図２３３は第２０の実施例としてコンクリートに埋め込まれた鉄筋、鉄管、塩化ビニル管の種別を特定の振動数を中心周波数とするスペクトルの形状及び帯域幅の変化で判断する方法を示すフローチャートである。なお、ステップＳ２０－８においては

、ｎ５の値は、ＦＡ（ｆ）スペクトルの変化を視認、しながら、オペレータによる制御で変動させる。また、ステップＳ２０－９においては、１）のようなスペクトルが得られたときに探知物体を鉄筋と判断し、２）のようなスペクトルが得られたときに探知物体を埋設管と判断し、例えばA_1^{n11}（ｆ）・A_2^{n21}（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルは、ｊ毎に最大スペクトル値を１．０に標準化して表示することができる。また、ステップＳ２０－１１においても、例えばA_1^{n11}（ｆ）・A_2^{n21}（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルは、ｊ毎に最大スペクトル値を１．０に標準化して表示することができ、塩化ビニル管の場合、５０ｋＨｚ付近で広帯域スペクトルが出現し、鉄筋の場合、比較的狭帯域のスペクトルが出現する。更に、ステップＳ２０－１３においても、例えばA_1^{n11}（ｆ）・A_2^{n21}（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルは、ｊ毎に最大スペクトル値を１．０に標準化して表示することができ、鉄管の場合、$_jf_D$を中心とするスペクトルが塩化ビニル管及び鉄筋の場合のスペクトルと比して広帯域となる。

【０６４３】

なお、鉄筋が異形鉄筋ではなく丸鋼の場合、振動数$\varepsilon_1 \cdot {}_jf_D$でスペクトルは生じない。このため、上述の方法で鉄筋であるか埋設管であるかを判断することは困難である。しかし、鉄筋、塩化ビニル管及び鉄管の場合には、スペクトルの比較表示に基づいて塩化ビニル管又は鉄管であるかを認識することができれば、その他のものを丸鋼鉄筋と判断することができる。

【０６４４】

次に、第２１の実施例について説明する。第１２、第１３、第１４及び第１８の実施例は、探知目標波が大きく励起する振動数f_Dを用いた分析法である。これに対し、第２１の実施例は、このf_D値を用いた分析法を高度化させたものである。図２３４に示すコンクリートモデルを用いて説明する。このコンクリートモデルは３０ｃｍ×３０ｃｍ×３０ｃｍの立法体でありコンクリート上面及び下面から５ｃｍのかぶり厚で径が１９ｍｍの異形鉄筋をその間隔を１５０ｍｍとして配筋している。また、Ｄ１３鉄筋をピッチ２００ｍｍで井桁状に配筋している。発信探触子よりコンクリートにたて波超音波を入力し、版厚反射波を受信探触子で得る計測である。コンクリートモデルの音速は別途４４００ｍ／秒と計測されている。径４０ｍｍ、共振振動数５００ｋＨｚの１対の発信探触子及び受信探触子をその中心間距離を１２０ｍｍとしてコンクリート面に配置した測定である。１０００回分の加算平均波Ｇ（ｔ）を作成した。本測定におけるf_Dの値は多くの計測実験の結果として約９０ｋＨｚである。この９０ｋＨｚを中心周波数とする狭帯域成分波を抽出するために、数式１２３で分析の上限振動数をf_{MAX}＝２５００ｋＨｚ、ｎ１＝４、ｎ２＝８００、ｎ３＝０として演算を行った後、数式１１２のｄをコンクリート厚３００ｍｍとしてβ_2＝０として求めたt_T＝２×３００／４．４＝１３６μ秒を用いて位置ｔ＝０で０、t_T＝で１．０、ｔ＝２t_T以降の時刻で０となる正弦関数ＦｉＬＴ（ｔ）を定義し、ｎ５＝２とした数式１２４の演算結果を図２３６に示す。図２３６の右下に対応するＦＡ（ｆ）スペクトルの形状を示す。中心周波数が９０ｋＨｚである。カーソル１７７１が版厚反射の理論的起生位置であるが、その前方に大きな振幅の波が生じている。この波は下側鉄筋からのいくつかの反射波が重畳した波である。図２３６の計測においては、１対の発信探触子及び受信探触子をコンクリートト面側に配筋された鉄筋位置とずらして配置した計測で得た加算平均波Ｇ（ｔ）を用いたものである。一般に、コンクリートにはその粒形が１又は２ｃｍから大きいものでは３ｃｍの砕石が多数含まれている。探触子直下にあるこの砕石の状況によっては、図２３５に示すように、この砕石で指向方向が変じた超音波がコンクリート下面側に配筋された井桁状鉄筋に到達し、これらの鉄筋からの多数の反射経路波１７６１が受信子に到達した結果得られた分析波が図２３６である。探知対象をコンクリート厚とする場合、この鉄筋からの反射波１７６１は妨害波である。この妨害波は探触子の配置位置が微小に変化しても、その強度は極端に大きく変化する。図２３７は探触子の中心間距離を１２０ｍｍに固定したまま、その配置位置を若干（２～３ｃｍ）変化させた加算平均波Ｇ（ｔ）より前記と全く同一の分析処理で得た分析波GB^2（ｔ）である。経路１７６１の妨害波が全く消滅し、コンクリート厚に関する反射波１７６２

のみが大きく起生している。対応するスペクトルＦＡ（ｆ）をＦＡ^{2}（ｆ）表示したものを図２３８に示す。カーソル位置の振動数は８４ｋＨｚである。本モデルにおける正確な版厚反射波のｆ$_{D}$値を８４ｋＨｚと特定したことになる。被探知体がコンクリートの場合、材質が部位によって異なるためｆ$_{D}$の値は測定位置の変化で若干異なってくる。図２３８のスペクトルでこの８４ｋＨｚを中心周波数とする更なる狭帯域成分波を数式１２５を用いてｎ１１、ｎ２１を０としてｆ$_{A}$＝ｆ$_{D}$＝８４ｋＨｚとするＡ$_{3}$（ｆ）を用い、ｎ３１＝１０として取り出したＡ$_{3}{}^{10}$（ｆ）・ＦＡ（ｆ）を２乗表示したものが図２３９である。対応するＧＣ（ｔ）を２乗表示した波形が図２４０である。図２３７の反射波に比し、波数が波の前後に増えた波となっている。図２４１はＡ$_{3}{}^{10}$（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルを３乗表示したものである。見かけ上、８４ｋＨｚのスペクトル値のみが大きくなっている。図２４２は対応するＧＣ（ｔ）を３乗表示したものである。図２４１と図２４２との関係を数式で表現すれば、数式１４８のようになる。

【０６４５】

【数１４８】

$$GC^{3}(t) \approx \int_{-\infty}^{\infty}\left(\left(A_{3}^{10}(f)\cdot FA(f)\right)^{3}\cdot e^{i\omega t}\right)df$$

【０６４６】

このようにして、超狭帯域スペクトルからなる概略時系列波を求めることができる。図２３８で得られたｆ$_{D}$（８４ｋＨｚ）の値は唯一のものではない。ｆ$_{D}$の値は複数ある。更に高周波方向のｆ$_{D}$の値を特定するために数式１２５を用い、分析の上限振動数をｆ$_{MAX}$＝２５００ｋＨｚとするＡ$_{1}$（ｆ）フィルタ、Ａ$_{2}$（ｆ）フィルタを用い、ｎ２１＝２、ｎ２２＝１２０、ｎ３１＝０とする演算を行い、Ａ$_{1}{}^{n11}$（ｆ）・Ａ$_{2}{}^{n21}$（ｆ）スペクトルを２乗表示で示したものが図２４３である。カーソル１８４１の位置に大きなスペクトルが生じている。振動数１３３ｋＨｚと読み取れる。この１３３ｋＨｚがもう１つの高周波位置におけるｆ$_{D}$の値である。対応するＧＣ（ｔ）を２乗表示したのが図２４４である。ｆ$_{D}$＝８４ｋＨｚの場合の図２３７では、カーソル１７８１で示す版厚反射の起性時刻を正確に特定できなかったが、ｆ$_{D}$＝１３３ｋＨｚの成分波を示す図２４４では、波形前方に妨害波が生じているが、カーソル１８５１に示すように、高精度にその版厚反射の起性時刻を特定できる。

【０６４７】

なお、ｆ$_{D}$の値は前述のように２つとは限らない。更に高周波方向に多数のｆ$_{D}$の値が存在する。高振動数のｆ$_{D}$の値を用いた分析事例について説明する。

【０６４８】

図２４５は版厚３０ｃｍのコンクリートにかぶり厚２３ｃｍで径１９ｍｍの異形鉄筋をピッチ１５０ｍｍで配筋した場合の測定図である。測点１の位置に１対の発信探触子及び受信探触子をその中心間距離を８０ｍｍに固定して配筋長手方向に平行に配置した場合の加算平均波をＧ$_{1}$（ｔ）とし、測点２の位置に探触子を測点１の計測の場合と同様に配置した場合の加算平均波をＧ$_{2}$（ｔ）とし、Ｇ$_{j}$（ｔ）波よりＧＢ$_{j}$（ｔ）を求め、比較表示した結果を図２４６に示す。ＧＢ$_{j}$（ｔ）の具体的作成法は、２０ｃｍかぶり厚の鉄筋の標準音速時（Ｖ$_{ST}$＝４４００ｍ／秒）でのｆ$_{D}$の値が多くの実験計測で、７８ｋＨｚ前後と測定されているため、Ａ$_{1}{}^{n1}$（ｆ）・Ａ$_{2}{}^{n2}$（ｆ）・Ｆ$_{j}$（ｆ）スペクトルの平均的中心周波数が７８ｋＨｚ前後となるように、分析の上限周波数をｆ$_{MAX}$とするＡ$_{1}$（ｆ）及びＡ$_{2}$（ｆ）を用い、ｎ１＝４、ｎ２＝１４００、ｎ３＝０としてＧＡ$_{j}$（ｔ）を求め、鉄筋かぶり厚ｄ＝２３ｃｍよりｔ$_{T}$＝２×２３０／４．４＝１０４．５μ秒とし、ｔ＝０で０、ｔ＝ｔ$_{T}$で１．０、ｔ＝２ｔ$_{T}$以降の時刻で０となる正弦関数状のフィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用いて、数式１２４（ｎ５＝２）の演算を行った。

【０６４９】

更に、図２４６のＧＢ$_{j}$（ｔ）波の表示法について説明すると、ｊ＝１及び２のＧＢ$_{j}$

（ｔ）の各々で最大振幅を最大表示するとともにＧＢ$^{2}_{j}$（ｔ）表示している。カーソル１８７１の位置から生じる大きな振幅の波は鉄筋からの反射波である。実線で示す波が図２４５の経路１８６１及び１８６２の反射波の重畳波である。破線で示す波が鉄筋直上に探触子を配置した測点２のときの経路１８６３の反射波である。図２４６のＧＢ$_{j}$（ｔ）の比較波を見る限り、鉄筋かぶり厚の概略値はカーソル１８７１が示す時刻で特定可能であるが、鉄筋の平面的位置の特定はできない。

【０６５０】

一方、図２４７はＧＢ$_{j}$（ｔ）の作成においてｎ５＝９として、ＧＢ$_{j}$（ｔ）＝ＦｉＬＴ^{n5}（ｔ）・ＧＡ$_{j}$（ｔ）で演算した波を並列にそのまま何らの重みづけもせず比較表示したものである。このとき、対応するＦＡ$_{j}$（ｔ）スペクトルの比較図を図２４８に測点１の場合を実線、測点２の場合を破線で示している。カーソル位置１８９１の振動数は８９ｋＨｚとなっている。この探知モデルの正確なｆ$_{D}$の値は８９ｋＨｚと特定できる。

【０６５１】

このように、図２４６及び図２４７では鉄筋の平面的位置の特定は不能となり、ｆ$_{D}$は複数あることを前述した。高振動数のｆ$_{D}$の値を利用した分析を行うと、鉄筋の平面的位置が容易に特定可能となる。この方法について説明する。

【０６５２】

図２４５において斜め方向の経路波１８６１及び１８６２はコンクリートの表面の直下に入力する超音波が高周波になればなるほど、超音波入力方向との相対強度が小さくなる。これは、超音波の直進性及び指向性が高くなる現象から生じる物理現象である。この物理現象を利用するためにＧＢ$_{j}$（ｔ）の波を高周波方向へ徐々に移動していくと、例えば図２４９に示すようなスペクトル比較図を得ることができる。図２４９の比較図の取得を具体的に説明すると、分析の上限振動数をｆ$_{MAX}$とするＡ$_{1}$（ｆ）及びＡ$_{2}$（ｆ）を用いて、ｎ１１＝２、ｎ２１＝６、ｎ３１＝０として数式１２５の演算を行った。破線のスペクトルが測点２の探触子が鉄筋直上のある場合のスペクトルであり、実線のスペクトルが探触子が鉄筋と鉄筋の中間にある測点１の場合のスペクトルである。カーソル１９０１の振動数は１３４ｋＨｚである。８９ｋＨｚをｆ$_{D1}$とすれば、この１３４ｋＨｚが第２のｆ$_{D}$であり、ｆ$_{D2}$と特定されたことになる。図２４９のスペクトルに対応する成分波の比較図をなんらの重みづけもせず、ＧＣ$^{3}_{j}$（ｔ）表示したものが図２５０である。

【０６５３】

このように、ｆ$_{D}$は複数存在する。第２０の実施例までで用いたｆ$_{D}$はｆ$_{D1}$であったわけである。本実施例では、超音波の直進性及び指向性が超音波の振動数に関連して変化する現象を利用する探知法としてｆ$_{D2}$又はｆ$_{D3}$等を上述の方法で特定し、探知の分析精度を向上させることができる。更に本実施例では、版厚探知のみならず鉄筋の探知、内部割れ、ジャンカ、その他の探知を行うこともできる。解析例として示さないが、探触子を設置するコンクリート表面が粗い場合、数式１６の加算平均波Ｇ（ｔ）の右辺のＦ（ｆ）を１．０としても、他の実施例と同様に、本実施例が適用可能である。

【０６５４】

また、低周波における数式１２０は多くの計測実験より標準音速値Ｖ$_{ST}$＝４４００ｍ／秒として、図２５１のように、横軸を探知路程として整理される。数式１２０中の係数α$_{2}$（１）は、鉄筋リアルタイム計測、版厚リアルタイム計測の各場合について示している。また、リアルタイム計測における探知路程毎に振動子径４０ｍｍの１対の発信探触子及び受信探触子の中心間距離の推奨値は探知概略路程毎に表７のようになる。

【０６５５】

【表７】

版厚	探触子中心間距離
ｄ＝１０ｃｍ以下	ａ＝６３ｍｍ
ｄ＝１５ｃｍ以下	ａ＝６５ｍｍ
ｄ＝２０ｃｍ以下	ａ＝７０ｍｍ
ｄ＝３０ｃｍ以下	ａ＝９０ｍｍ
ｄ＝５０ｃｍ以下	ａ＝１２０ｍｍ
ｄ＝１００ｃｍ以下	ａ＝１４０ｍｍ
ｄ＝１３０ｃｍ以下	ａ＝１５０ｍｍ

【０６５６】

コンクリートの版厚測定等で内部の微細な割れ及び密に配された鉄筋等からの反射波が探知妨害波として生じ、探知が不可能、又は探知の再現性が低くなる場合がある。図２５２乃至図２５８は第２１の実施例として、このような場合でも、探知対象からの反射波が大きく起生する複数のf_Dを利用して探知を行う方法を示すフローチャートである。特に、図２５２乃至図２５５は鉄筋コンクリートの版厚探知の方法を示し、図２５６乃至図２５８はかぶり厚の深い鉄筋の探知の方法を示す。なお、ステップＳ２１－６及びＳ２１－２７においては、ＧＡ（ｔ）及びＧＢ（ｔ）の算定を数式１４９及び１５０のようにしてもよい。

【０６５７】

【数１４９】

$$GA(t) = FiLT^{n5}(t) \cdot G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(FA(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０６５８】

【数１５０】

$$GB(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_1^{n1}(f) \cdot A_2^{n2}(f) \cdot FA(f) \cdot e^{i\omega t} \right) df$$

【０６５９】

図２５９乃至図２６１は前述の第７の実施例として埋め込み深さが極めて浅い鉄筋のかぶり厚及び径の探知において共振波を用いるか、又は共振現象を低減若しくは除去した方法を示すフローチャートである。

【０６６０】

また、既存のコンクリート構造物の補強方法の１つにそのコンクリートに鉄皮を巻き付け、この鉄皮とコンクリートとの間にモルタル等を挿入する方法がある。図２６２乃至図２６４は前述の第８の実施例として鉄皮の表面に探触子を配した計測で、鉄皮の厚さ及びモルタルの厚さを測定する方法を示すフローチャートである。

【０６６１】

次に、前述の第１３の実施例について、更に説明する。図２６５は鉄筋のリアルタイム測定の比較波形である。図１３８の波形を得たときと同様の計測条件で、鉄筋直上のコンクリート表面に探触子を配置して得た２つの成分波を示している。加算平均波をＧ（ｔ）とし、図２５１より、標準音速V_{ST}＝４４００（ｍ／秒）のときのf_Dの値を鉄筋かぶり厚５０ｍｍと仮定し、１００ｋＨｚと読み取り、このf_D＝１００ｋＨｚを中心周波数とする成分波を取り出したものである。一般に、鉄筋は異形であり、図２６６に示すように、その表面にリブが形成されている。このような鉄筋が任意の角度θでコンクリート内に埋設されている。

【０６６２】

図２６５は図２６６の角度θが異なる鉄筋の直上のコンクリート表面で得た１００ｋＨｚ成分波による鉄筋からの反射波の比較図である。波の強度が大きく相違している。角度

θの変化により、このような強度変化が生じている。図２６５に示す比較図の具体的な抽出方法について説明する。鉄筋かぶり厚の予測値をｄ＝５０ｍｍとし、数式１１２でｄ＝５０ｍｍ、β_2＝１．０、$f_0=f_D$＝１００ｋＨｚ、$_cV_p$＝４４００ｍ／秒として、t_T＝３２．７μ秒を算出した。次いで、ｔ＝０で０、ｔ＝t_T＝３２．７μ秒で１．０、ｔ＝２t_T＝６５．７μ秒以降の時刻で０となる正弦関数状フィルタＦｉＬＴ（ｔ）を用い、ｎ５＝２として数式１４９の演算を行い、更にｎ１及びｎ２を１以上の自然数として、数式１５０の演算を行った。このとき、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルの中心周波数がf_D＝１００ｋＨｚになるようにｎ１及びｎ２の値を自動制御して得たものが図２６５である。この自動制御は、ｎ１を４とし、ｎ２の値を大きくしていくことにより行った。図２６５を得たときのｎ２の値は１４００である。

【０６６３】

図２６７に図２６５の成分波に対応するA_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・FA_j（ｆ）スペクトルを示す。説明を容易にするために、図２６５の鉄筋上の成分波１９５１及び１９５２のスペクトルを同一符号で示している。また、スペクトル１９５３は鉄筋が直下にない位置での上述と同一の処理で得た成分波のスペクトルである。角度θの相違により、鉄筋からの反射波１９５１及び１９５２のスペクトル値も大きく変動している。また、波１９５１及び１９５２のf_Dの値は同一とはなっていない。図２６７のスペクトル比較図に対応する成分波GB_j（ｔ）を図２６８に示す。図２６５、図２６７及び図２６８の比較で対応をとるために、全ての図中に、符号１９５１乃至１９５３を付している。図２６８によれば、成分波１９５１及び１９５２が鉄筋直上の計測で得たものと判断することができる。

【０６６４】

しかし、測定例として示さないが、例えば成分波１９５２において、この位置でのコンクリートに何らかの欠陥があると、例えば微細なフェアークラックがあったり、コンクリートの表面が粗であったりすると、図２６８における成分波１９５２は波１９５３の直下に鉄筋がない場合の成分波と比較してもその相違を見出せない場合がある。

【０６６５】

次に、このような場合でも成分波１９５２が鉄筋直上での測定波であると断定できる分析法について説明する。多くの同種の測定例によれば、角度θの相違があるか、又はコンクリート何らかの欠陥がある場合でも、鉄筋直上計測でのA_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルの中心周波数をf_Dから徐々に低周波側へ移行すると、角度θの相違及びコンクリートの欠陥による成分波強度への影響が緩和されてくる。このような現象を利用すると、容易且つ正確に鉄筋の存在を確認することができる。

【０６６６】

図２６７に示すｎ１＝４、ｎ２＝１４００のA_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）スペクトルにおいて、ｎ２の値を大きくしたときのスペクトル比較図を図２６９及び図２７０に示す。ｎ２の値は、図２６９では１６００、図２７０では１８００である。図２６９によれば、鉄筋が直下にあるスペクトル１９５１及び１９５２がほとんど一致している。これらに対応するＧＢ（ｔ）を図２７１に示す。鉄筋が直下にある成分波１９５１及び１９５２について、同一の強度となり、直下に鉄筋がない成分波１９５３の強度は微弱になっている。

【０６６７】

前記ｎ２の値は容易に自動コントロールできる。即ち、スペクトル形状が略同一となり、且つスペクトル値も略同一になったとき、A_1^{n1}（ｆ）・A_2^{n2}（ｆ）・ＦＡ（ｆ）の演算を停止すればよい。

【０６６８】

このような方法を超音波探知装置に実行させるためには、次のようなソフトウェアが必要である。

【０６６９】

第１に、１対の探触子を鉄筋の長手方向に配した計測で得る加算平均波Ｇ（ｔ）からｆ

$_D$を中心周波数とするＧＢ^{np}（ｔ）をオペレータに視認させ、表示画面に映し出す。

【０６７０】

第２に、探触子を鉄筋の長手方向に対して垂直な方向に移動配置する探触子走査の都度、この場合のＧＢ^{np}（ｔ）と上述のＧＢ（ｔ）とを比較表示する。このような測定の繰り返しで、ＧＢ^{np}（ｔ）の振幅の変化を視認する。ＧＢ^{np}（ｔ）の振幅が最も大きくなったと視認したとき、この時点での探触子配置位置の直下に鉄筋が存在すると判断する。

【０６７１】

第３に、上述の探触子走査で鉄筋の存在する平面的位置が確認された場合、この時点でのＧＢ^{np}（ｔ）波を表示画面上のＧＢ^{np}（ｔ）と置き換える。

【０６７２】

第４に、第２の走査を行い、この移動の度に新たなＧＢ^{np}（ｔ）を作成し、上述の最新のＧＢ^{np}（ｔ）と比較表示する。

【０６７３】

第５に、オペレータの判断により鉄筋の位置を判断する。具体的には、比較表示では、探触子の移動に伴ってＧＢ^{np}（ｔ）波の振幅が最新のＧＢ^{np}（ｔ）波と比較したとき一旦小さくなるが、更に探触子移動を継続していくと再度ＧＢ^{np}（ｔ）波が増幅する。そして、次の２つの判断をオペレータに行わせる。先ず、ＧＢ^{np}（ｔ）波の振幅が最も大きくなると判断できる探触子位置をその位置を僅かに移動させることで確認する。次に、最新のＧＢ^{np}（ｔ）波と映し出されているＧＢ^{np}（ｔ）波とで振幅が異なっていても、その形状が相似であること及び位相が同一であることを確認する。

【０６７４】

第６に、上述のようにして特定された探触子の直下に鉄筋があることを確認するために、オペレータの処理又は自動処理により、最新のＧＢ^{np}（ｔ）波及び現在のＧＢ^{np}（ｔ）波の中心周波数をf_Dから徐々に低周波側へ変化させる。もし、この探触子の位置に鉄筋が存在する場合には、両ＧＢ^{np}（ｔ）波の振幅の相違が緩和される。このような波形の変化を視認することで鉄筋の有無に関する探知での誤計測を回避することができる。

【０６７５】

図２７２乃至図２７６は第１３の実施例として鉄筋のリブ及び鉄筋埋め込み位置コンクリートの劣化が探知結果に及ぼす悪影響を除去したコンクリート内鉄筋の平面的位置をリアルタイム計測で測定する方法を示すフローチャートである。

【０６７６】

なお、これらの実施例においては、t_Tを探知対象路程の概略予想値ｄ等を用いて、例えば数式１１２等の算定式を用いて行っているが、この予測値が大きく異なっている場合でも、分析の波の視認の下で、オペレータによる予測値の変更操作を行えばよい。例えば、第２１の実施例の版厚探知を例としてこの処理方法について説明する。

【０６７７】

図２７７は図２３７を得たときと同様のリアルタイム探知で予測値を４５０ｍｍとしたときのＧＢ^2（ｔ）波である。カーソル１９３１の位置に最初の波の起生が確認できる。オペレータの指示によりt_Tの位置をカーソル１９３１に変更したときのＧＢ^2（ｔ）波を図２７８に示す。図２７８は図２３７と全く同一になっている。このように、予測値が実値と異なっていても、オペレータの判断により高い精度の探知が可能である。

【産業上の利用可能性】

【０６７８】

以上詳述したように、本発明によれば、従来困難とされているコンクリート構造物及びその中に埋め込まれた鉄筋等の検知を容易且つ正確に行うことが可能である。従って、トンネル等の劣化の程度の検知等において本発明を利用することにより、高い効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【０６７９】

【図１】　探知対象物の例を示す模式図である。
【図２】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（従来例）。
【図３】　フィルタA_1（ｆ）及びA_2（ｆ）を示すグラフ図である。
【図４】　フィルタA_3（ｆ）を示すグラフ図である。
【図５】　本発明の実施例で使用する超音波探知装置を示すブロック図である。
【図６】　第１の実施例を示すフローチャートである。
【図７】　第１の実施例を示すフローチャートである。
【図８】　第１の実施例を示すフローチャートである。
【図９】　第１の実施例を示すフローチャートである。
【図１０】　第１の実施例における探知対象を示す模式図である。
【図１１】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１の実施例）。
【図１２】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１の実施例）。
【図１３】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１の実施例）。
【図１４】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１の実施例）。
【図１５】　発信探触子及び受信探触子の移動状況を示す模式図である。
【図１６】　第２の実施例を示すフローチャートである。
【図１７】　第２の実施例を示すフローチャートである。
【図１８】　第２の実施例を示すフローチャートである。
【図１９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２０】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２１】　探知路程と補正係数αとの関係を示すグラフ図である。
【図２２】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２３】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２４】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２５】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２６】　第２の実施例における被探知体に関する幾何学的関係を示す模式図である。
【図２７】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２の実施例）。
【図２８】　振動数とγ（ｆ）との関係を示すグラフ図である。
【図２９】　第３の実施例を示すフローチャートである。
【図３０】　第３の実施例を示すフローチャートである。
【図３１】　時系列波を示すグラフ図である（第３の実施例）。
【図３２】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第３の実施例）。
【図３３】　第４の実施例を示すフローチャートである。
【図３４】　第４の実施例を示すフローチャートである。
【図３５】　t_{h1}、t_{h2}及びt_{h3}を示す図である。
【図３６】　時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図３７】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図３８】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図３９】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４０】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４１】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４２】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４３】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４４】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４５】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４６】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第４の実施例）。
【図４７】　第５の実施例を示すフローチャートである。
【図４８】　第５の実施例を示すフローチャートである。
【図４９】　第５の実施例を示すフローチャートである。
【図５０】　時系列波を示すグラフ図である（第５の実施例）。

【図５１】　第６の実施例を示すフローチャートである。
【図５２】　第６の実施例を示すフローチャートである。
【図５３】　時系列波を示すグラフ図である（第７の実施例）。
【図５４】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第７の実施例）。
【図５５】　時系列波を示すグラフ図である（第７の実施例）。
【図５６】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第７の実施例）。
【図５７】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第７の実施例）。
【図５８】　充填されたモルタルの厚さを示す模式図である。
【図５９】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第８の実施例）。
【図６０】　時系列波を示すグラフ図である（第８の実施例）。
【図６１】　被探知体を示す模式図である。
【図６２】　時系列波を示すグラフ図である（第８の実施例）。
【図６３】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６４】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６５】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６６】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６７】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図６９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７０】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７１】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７２】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７３】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７４】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７５】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７６】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第９の実施例）。
【図７７】　第９の実施例を示すフローチャートである。
【図７８】　第９の実施例を示すフローチャートである。
【図７９】　第９の実施例を示すフローチャートである。
【図８０】　第９の実施例を示すフローチャートである。
【図８１】　セメントミルクの充填度を測定する対象物を示す模式図である。
【図８２】　時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８３】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８４】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８５】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８６】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図８９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９０】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９１】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９２】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９３】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９４】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９５】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９６】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９７】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図９９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１００】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。

【図１０１】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０２】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０３】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０４】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０５】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０６】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０７】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０８】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１０の実施例）。
【図１０９】　第１０の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１１０】　第１０の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１１１】　中心周波数f_0を特定する方法を示すグラフ図である。
【図１１２】　第１０の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図１１３】　第１０の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図１１４】　第１０の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図１１５】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１１６】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１１７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１１８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１１９】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１２０】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１１の実施例）。
【図１２１】　第１１の実施例を示すフローチャートである。
【図１２２】　第１１の実施例を示すフローチャートである。
【図１２３】　第１１の実施例を示すフローチャートである。
【図１２４】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１２５】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１２６】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１２７】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１２８】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１２９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１３０】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１３１】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１２の実施例）。
【図１３２】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３３】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３４】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３５】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３６】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３７】　第１２の実施例を示すフローチャートである。
【図１３８】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図１３９】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図１４０】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図１４１】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図１４２】　第１３の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１４３】　第１３の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１４４】　第１３の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１４５】　第１３の実施例の一例を示すフローチャートである。
【図１４６】　時系列波を示すグラフ図である（第１４の実施例）。
【図１４７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１４の実施例）。
【図１４８】　時系列波を示すグラフ図である（第１４の実施例）。
【図１４９】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１４の実施例）。
【図１５０】　探触子と塩化ビニル管との位置関係を示す模式図である。

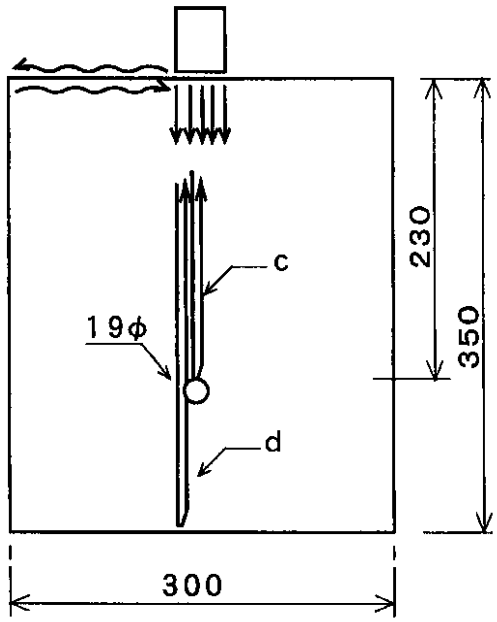
【図１５１】　時系列波を示すグラフ図である（第１４の実施例）。
【図１５２】　第１４の実施例を示すフローチャートである。
【図１５３】　第１４の実施例を示すフローチャートである。
【図１５４】　第１４の実施例を示すフローチャートである。
【図１５５】　第１４の実施例を示すフローチャートである。
【図１５６】　臨界屈折波を利用した探知方法を示す模式図である。
【図１５７】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１５８】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１５９】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６０】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６１】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６２】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６３】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６４】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６５】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６６】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１５の実施例）。
【図１６８】　第１５の実施例を示すフローチャートである。
【図１６９】　第１５の実施例を示すフローチャートである。
【図１７０】　第１５の実施例を示すフローチャートである。
【図１７１】　斜方向超音波を示す模式図である。
【図１７２】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７３】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７４】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７５】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７６】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７７】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１６の実施例）。
【図１７８】　第１６の実施例を示すフローチャートである。
【図１７９】　第１６の実施例を示すフローチャートである。
【図１８０】　第１６の実施例を示すフローチャートである。
【図１８１】　第１６の実施例を示すフローチャートである。
【図１８２】　コンクリート体内を伝達する複数の波を示す模式図である。
【図１８３】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１８４】　ひび割れの深さｄを示す模式図である。
【図１８５】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１８６】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１８７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１８８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１８９】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１９０】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１７の実施例）。
【図１９１】　第１７の実施例を示すフローチャートである。
【図１９２】　第１７の実施例を示すフローチャートである。
【図１９３】　第１７の実施例を示すフローチャートである。
【図１９４】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図１９５】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図１９６】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図１９７】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図１９８】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図１９９】　同じく測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１８の実施例）。
【図２００】　第１８の実施例を示すフローチャートである。

【図２０１】　第１８の実施例を示すフローチャートである。
【図２０２】　第１８の実施例を示すフローチャートである。
【図２０３】　表面波を示す模式図である。
【図２０４】　斜透過法計測を示す模式図である。
【図２０５】　時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２０６】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２０７】　時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２０８】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２０９】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２１０】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２１１】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２１２】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２１３】　同じく時系列波を示すグラフ図である（第１９の実施例）。
【図２１４】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２１５】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２１６】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２１７】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２１８】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２１９】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２２０】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２２１】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２２２】　第１９の実施例を示すフローチャートである。
【図２２３】　時系列波を示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２４】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２５】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２６】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２７】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２０の実施例）。
【図２２９】　第２０の実施例を示すフローチャートである。
【図２３０】　第２０の実施例を示すフローチャートである。
【図２３１】　第２０の実施例を示すフローチャートである。
【図２３２】　第２０の実施例を示すフローチャートである。
【図２３３】　第２０の実施例を示すフローチャートである。
【図２３４】　異形鉄筋が井桁状に設けられたモデルを示す模式図である。
【図２３５】　砕石による反射波を示す模式図である。
【図２３６】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２３７】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２３８】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２３９】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４０】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４１】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４２】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４３】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４４】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４５】　異形鉄筋からの反射波を示す模式図である。
【図２４６】　時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４７】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４８】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２４９】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第２１の実施例）。
【図２５０】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第２１の実施例）。

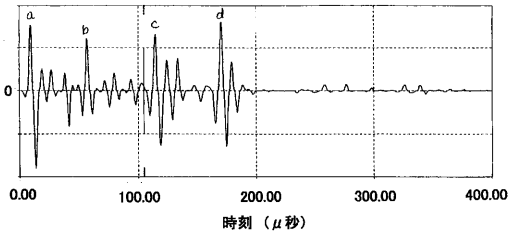
【図２５１】　ひび割れの深さｄと補正係数αとの関係を示すグラフ図である。
【図２５２】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５３】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５４】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５５】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５６】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５７】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５８】　第２１の実施例を示すフローチャートである。
【図２５９】　第７の実施例を示すフローチャートである。
【図２６０】　第７の実施例を示すフローチャートである。
【図２６１】　第７の実施例を示すフローチャートである。
【図２６２】　第８の実施例を示すフローチャートである。
【図２６３】　第８の実施例を示すフローチャートである。
【図２６４】　第８の実施例を示すフローチャートである。
【図２６５】　時系列波を示すグラフ図である（第１３の実施例）
【図２６６】　異形鉄筋の形状を示す模式図である。
【図２６７】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図２６８】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図２６９】　フーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図２７０】　同じくフーリエスペクトルを示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図２７１】　測点毎の時系列波を示すグラフ図である（第１３の実施例）。
【図２７２】　第１３の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図２７３】　第１３の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図２７４】　第１３の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図２７５】　第１３の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図２７６】　第１３の実施例の他の一例を示すフローチャートである。
【図２７７】　時系列波を示すグラフ図である。
【図２７８】　同じく時系列波を示すグラフ図である。
【符号の説明】
【０６８０】
１ａ　ステップ電圧発生回路
１ｂ　電流供給回路
１ｃ　ステップ電圧駆動回路
２ａ　発信探触子
２ｂ　受信探触子
４ａ　アンプ回路
４ｂ　フィルタ回路
４ｃ　ＡＤＣ
４ｄ　ゲートアレイ
４ｅ　ＣＰＵ
４ｆ　コントロール回路
５　表示装置
Ａ１　フィルタ
Ａ２　フィルタ
Ａ３　フィルタ
Ｆ１　フィルタ
Ｆ２　フィルタ
Ｇ１　加算平均波
Ｇ１　平均波
Ｇ２　平均波

Ｇ３　　平均波
２２１　屈折波
２２２　波
２ｆ１　振動数
４０１　妨害波
５０１　フィルタ
６０１　カーソル
７０３　経路
７０４　伝達波
ＧＡ１　成分波
ＧＡ２　成分波
Ｐｎ３　関数
ｆＤ１　振動数

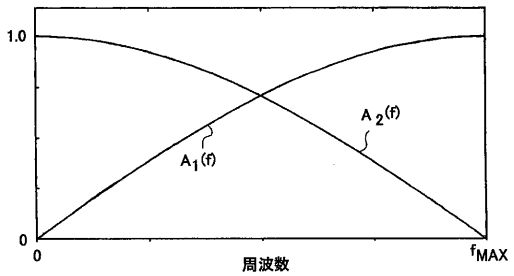
【図１】



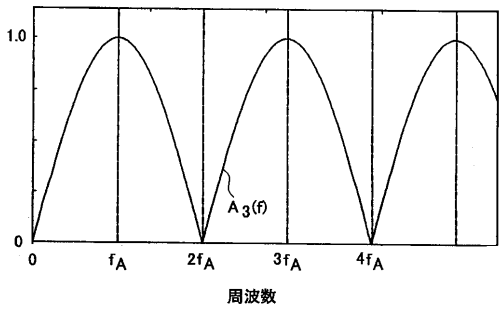
【図２】



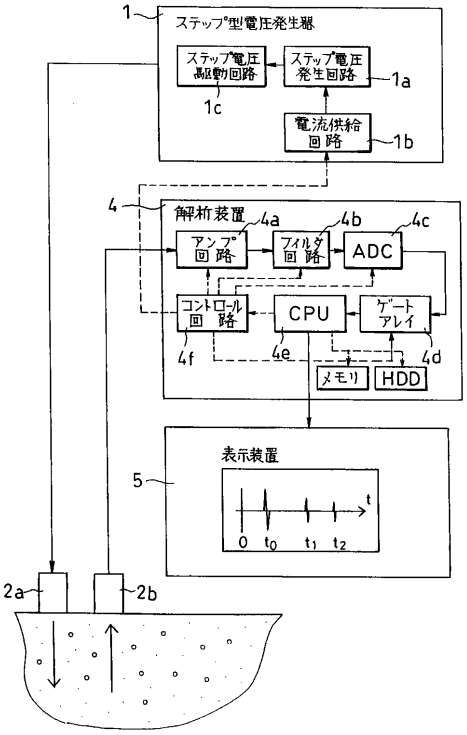
【図３】



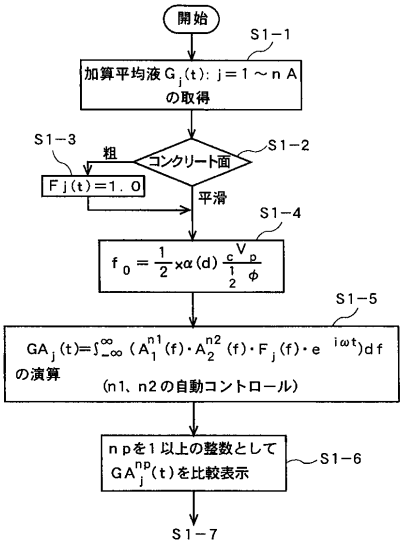
【図４】


1.0
0
$A_3(f)$
0
f_A
$2f_A$
$3f_A$
$4f_A$
周波数

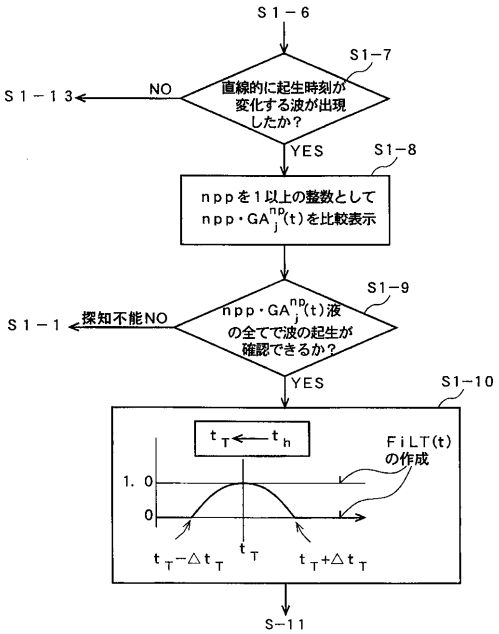
【図５】


1
ステップ型電圧発生器
ステップ電圧駆動回路
ステップ電圧発生回路
1a
1c
電流供給回路
1b
4
解析装置
4a
4b
4c
アンプ回路
フィルタ回路
ADC
コントロール回路
CPU
ゲートアレイ
4f
4e
4d
メモリ
HDD
表示装置
5
0 t_0 t_1 t_2 t
2a
2b

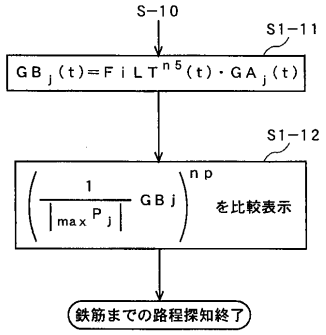
【図６】


開始
S1−1
加算平均波 $G_j(t)$: j＝1～n A の取得
S1−3
粗
コンクリート面
S1−2
Fj(t)＝1.0
平滑
S1−4
$f_0 = \frac{1}{2} x\alpha(d) \frac{c}{\frac{1}{2}} \frac{V_p}{\phi}$
S1−5
$GA_j(t)=\int_{-\infty}^{\infty}(A_1^{n1}(f)\cdot A_2^{n2}(f)\cdot F_j(f)\cdot e^{i\omega t})df$
の演算
(n1、n2の自動コントロール)
npを1以上の整数として
$GA_j^{np}(t)$を比較表示
S1−6
S1−7

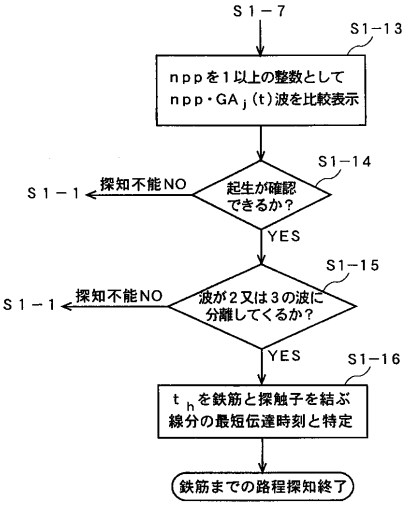
【図７】


S1−6
S1−7
S1−13
NO
直線的に起生時刻が変化する波が出現したか？
YES
S1−8
nppを1以上の整数として
$npp\cdot GA_j^{np}(t)$を比較表示
S1−9
S1−1
探知不能NO
$npp\cdot GA_j^{np}(t)$波の全てで波の起生が確認できるか？
YES
S1−10
$t_T \leftarrow t_h$
FiLT(t)の作成
1.0
0
$t_T-\triangle t_T$
t_T
$t_T+\triangle t_T$
S−11

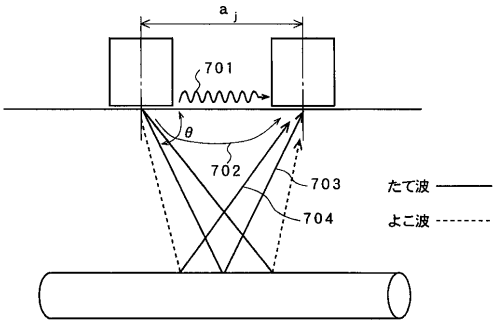
【図８】



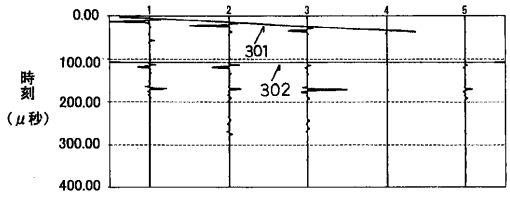
【図９】



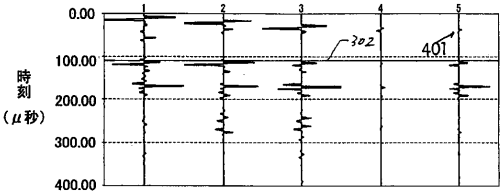
【図１０】



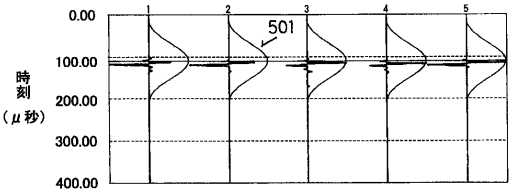
【図１１】



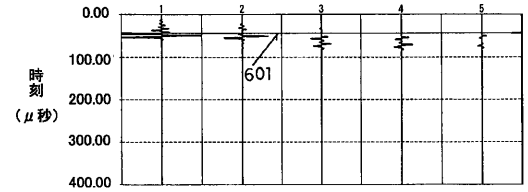
【図１２】



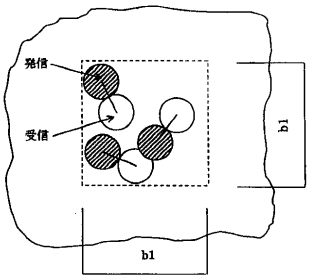
【図１３】



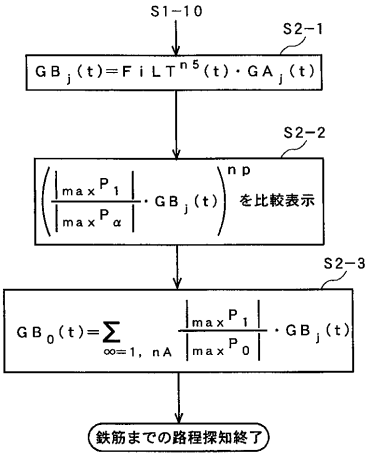
【図１４】



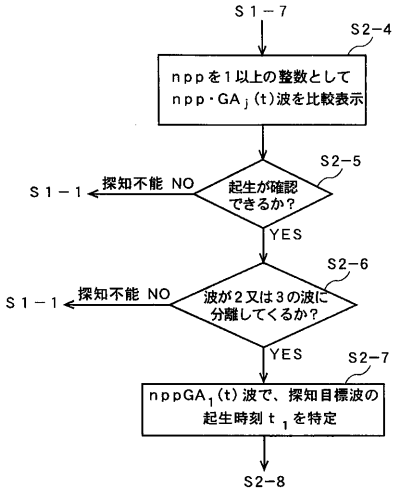
【図１５】



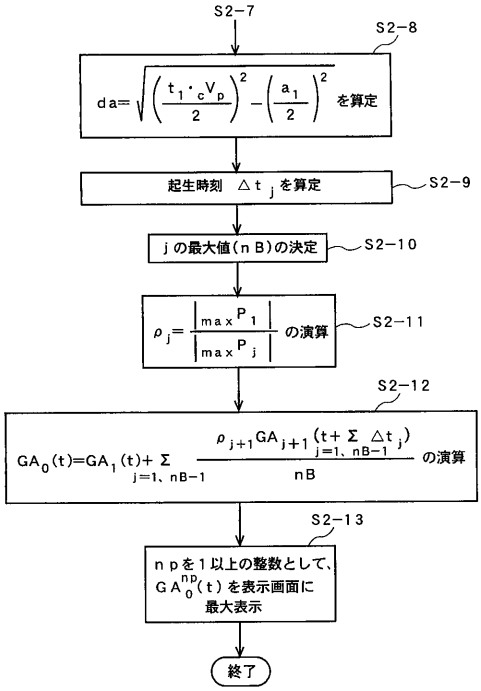
【図１６】



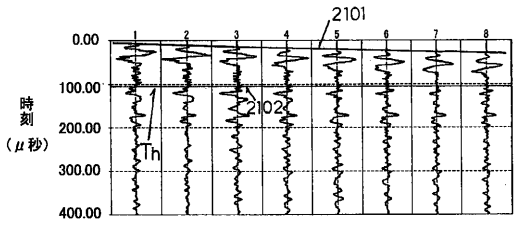
【図１７】



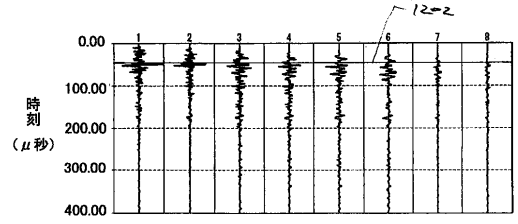
【図１８】



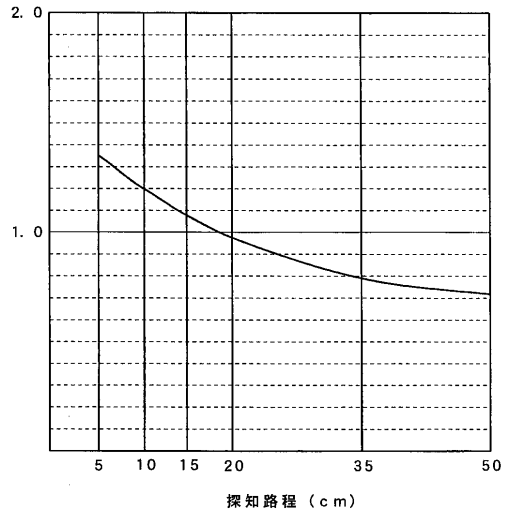
【図１９】



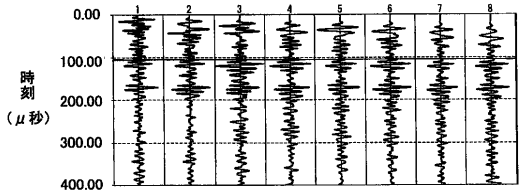
【図２０】



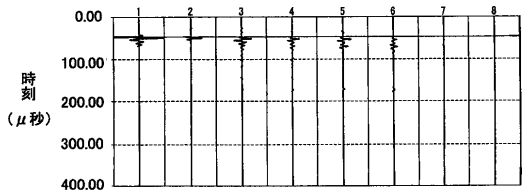
【図２１】



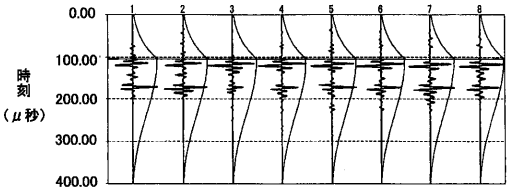
【図２２】



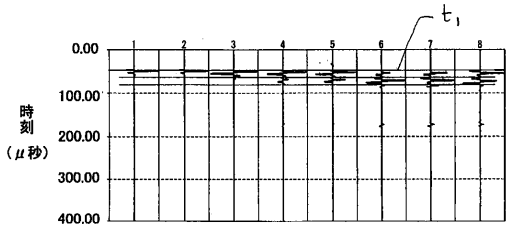
【図２３】



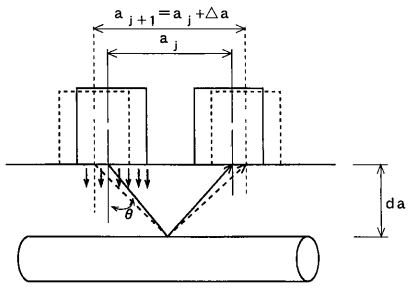
【図２４】



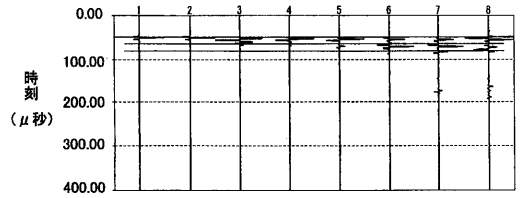
【図２５】



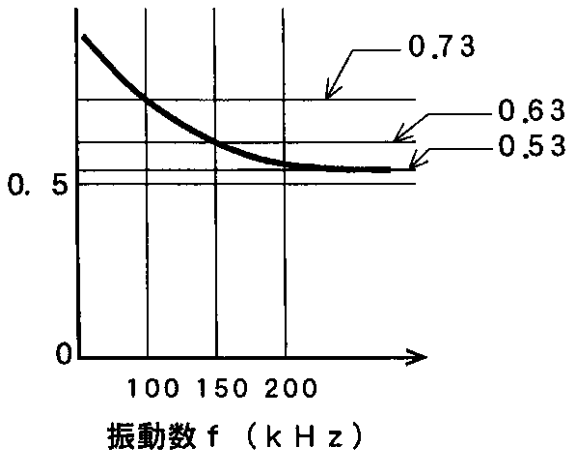
【図２６】



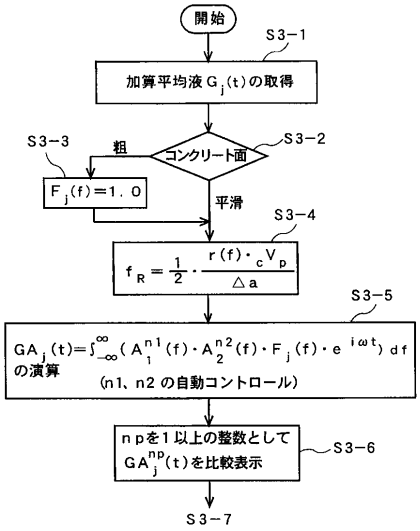
【図２７】



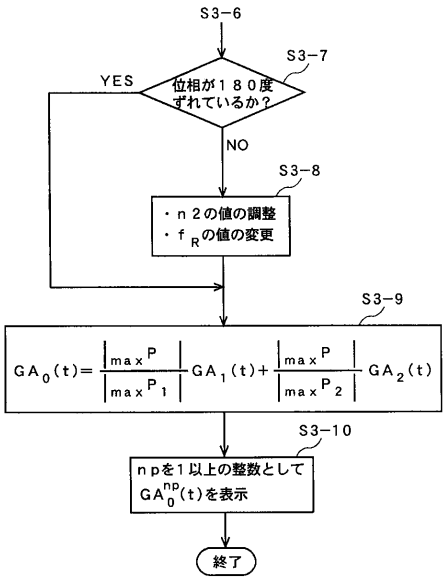
【図２８】



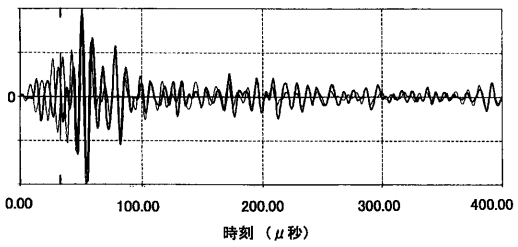
【図２９】



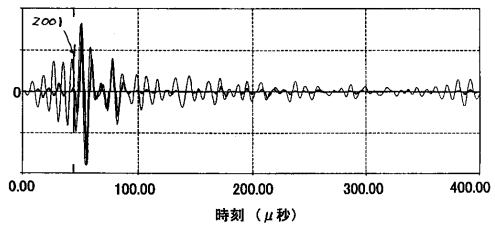
【図３０】



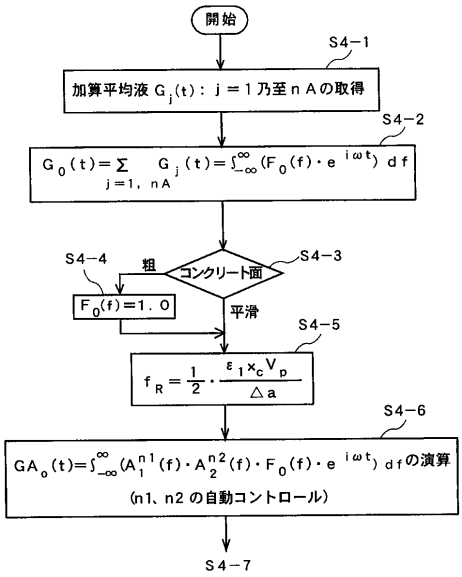
【図３１】



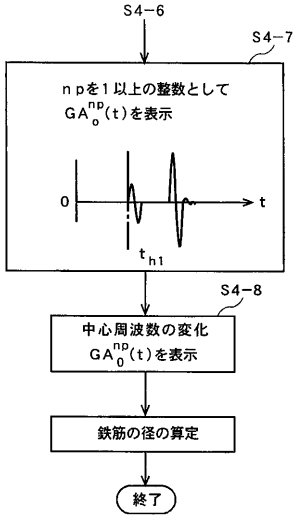
【図３２】



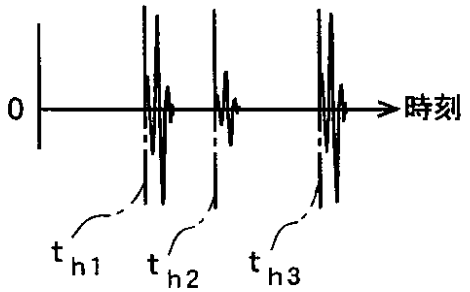
【図３３】



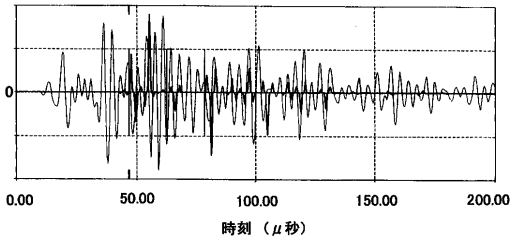
【図３４】



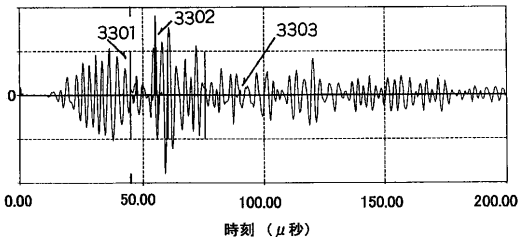
【図３５】



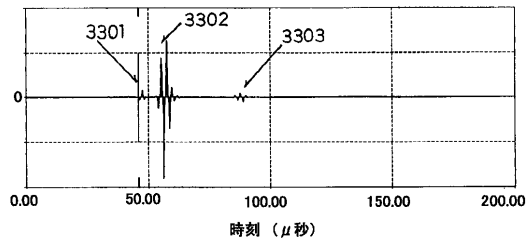
【図３６】



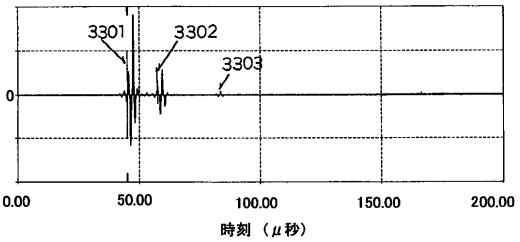
【図３７】



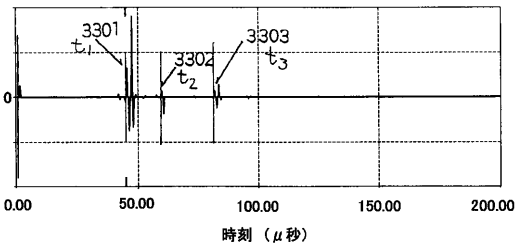
【図３８】



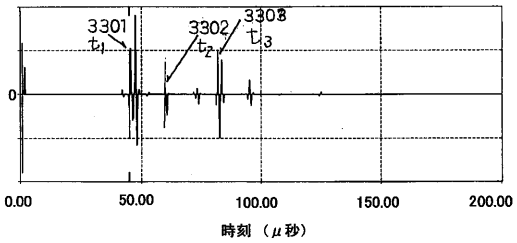
【図３９】



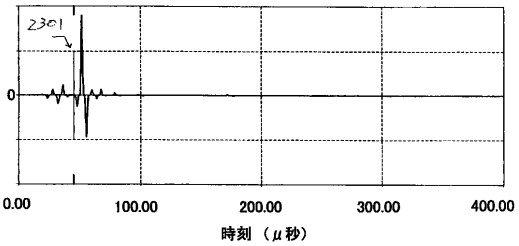
【図４０】



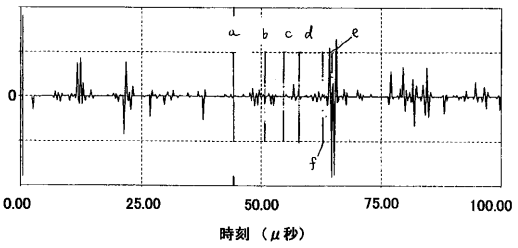
【図４１】



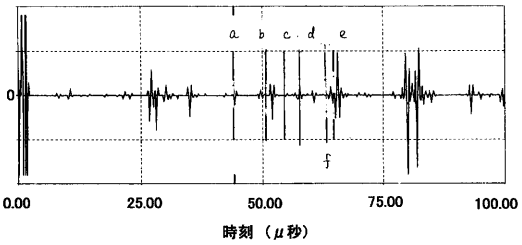
【図４２】



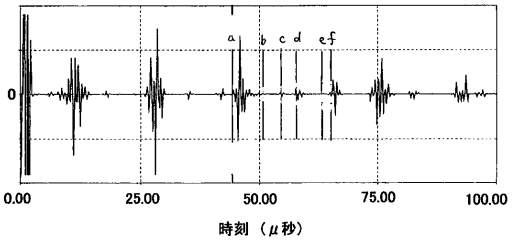
【図４３】



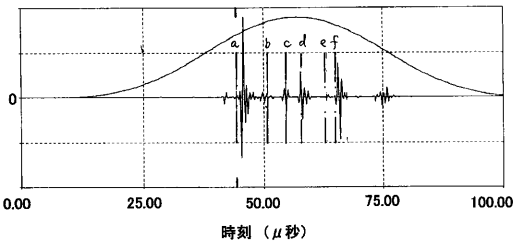
【図４４】



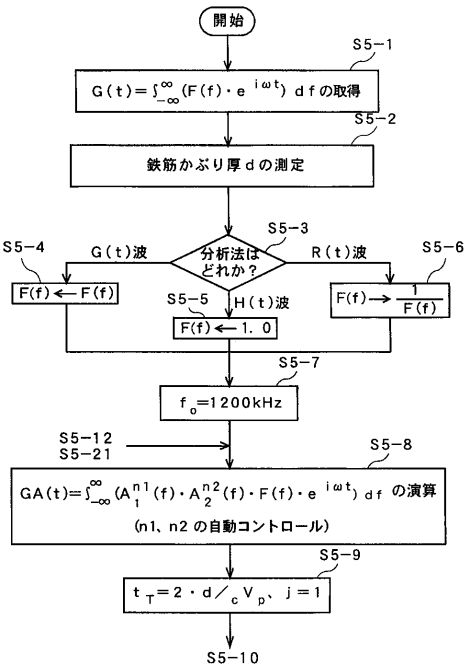
【図４５】



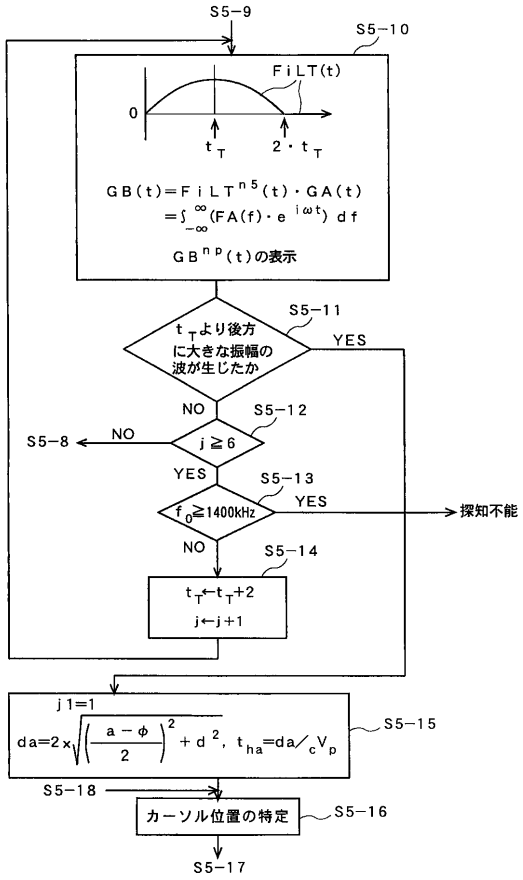
【図４６】



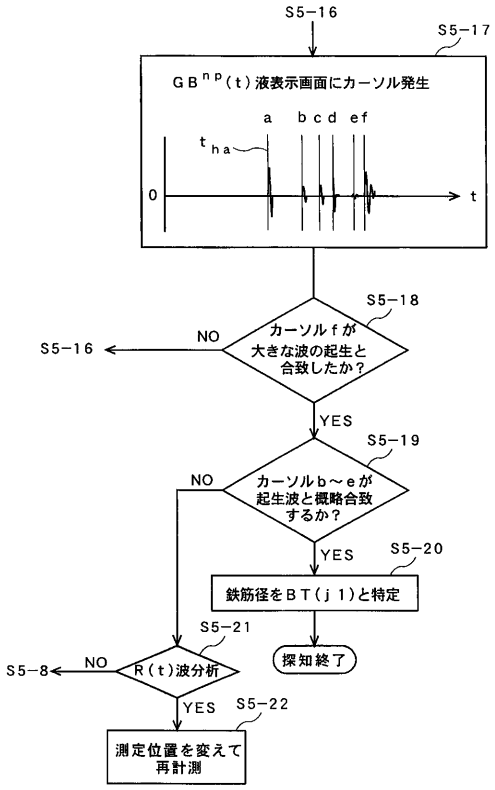
【図４７】



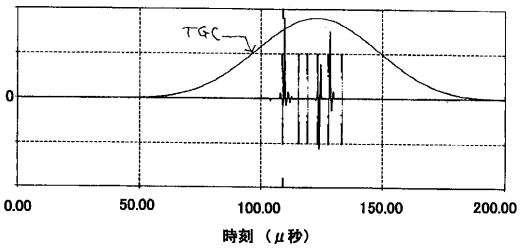
【図４８】



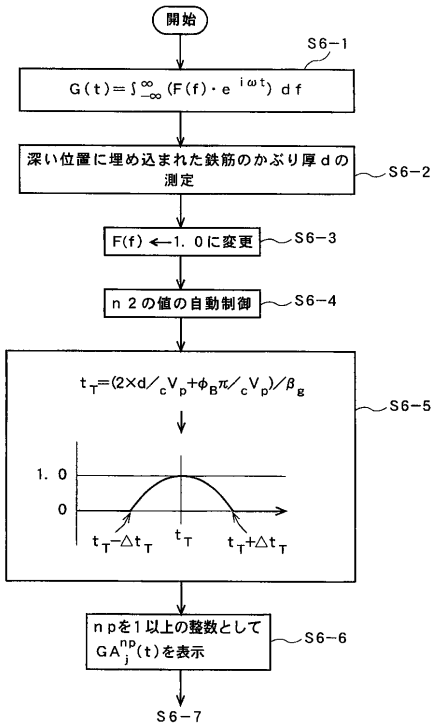
【図４９】



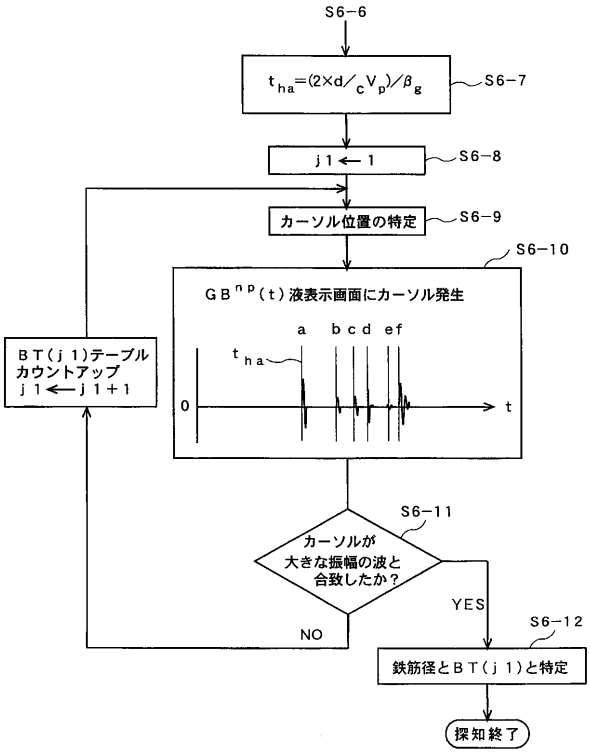
【図５０】



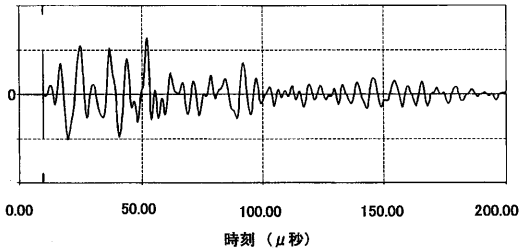
【図５１】



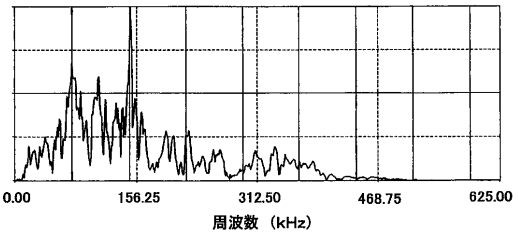
【図５２】



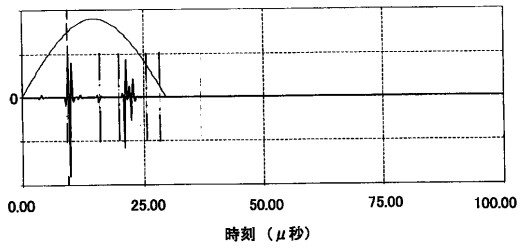
【図５３】



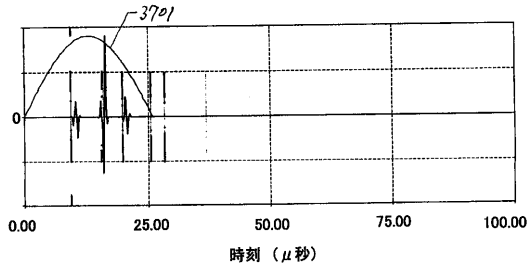
【図５４】



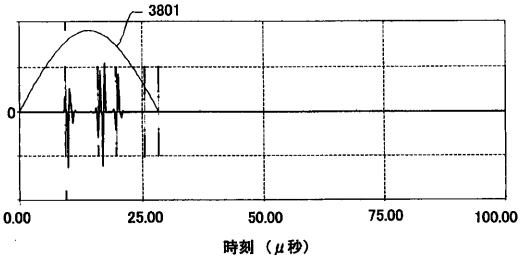
【図５５】



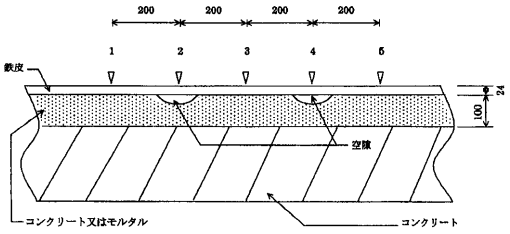
【図５６】



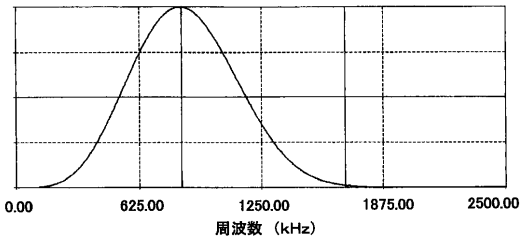
【図５７】



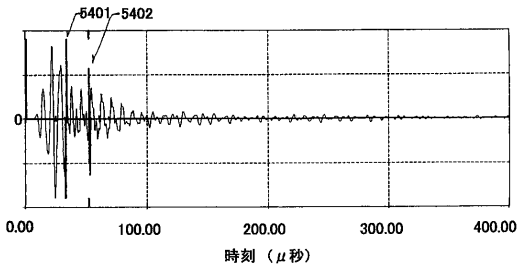
【図５８】



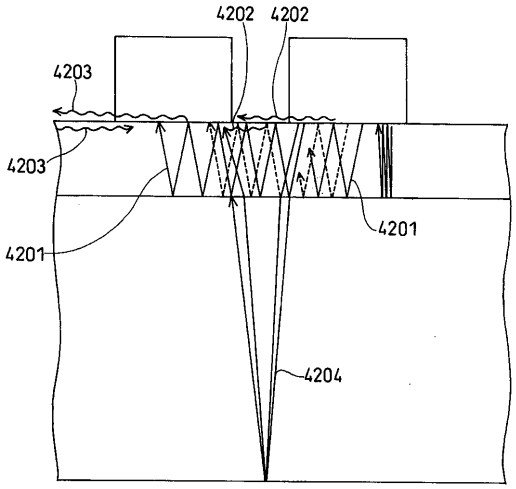
【図５９】



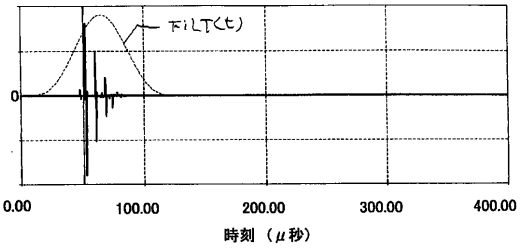
【図６０】



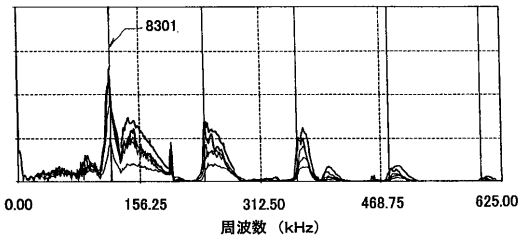
【図６１】



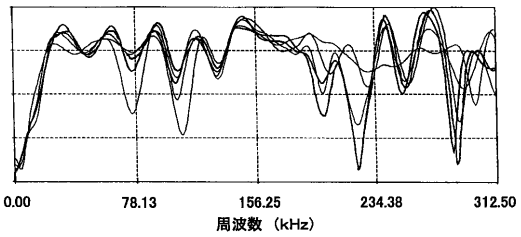
【図６２】



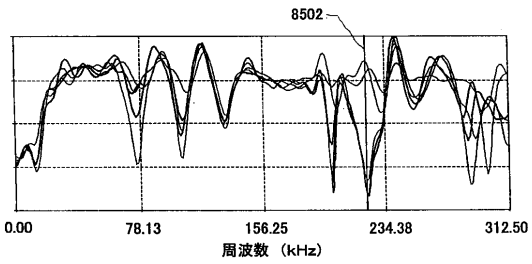
【図６３】



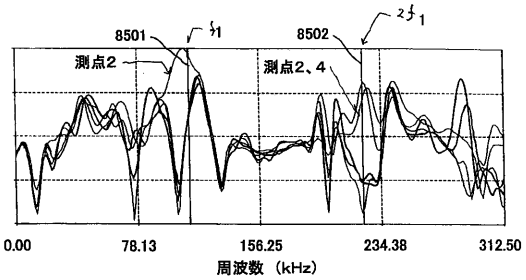
【図６４】



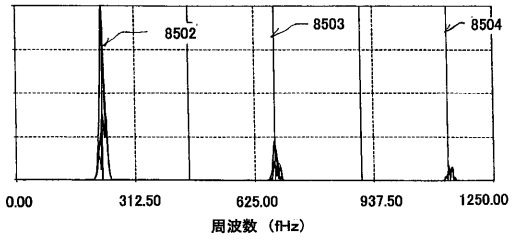
【図６５】



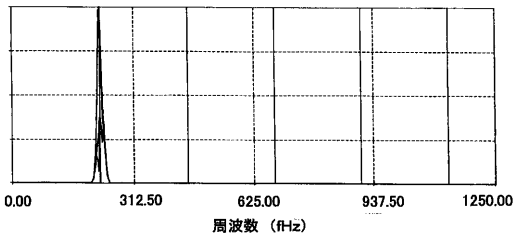
【図６６】



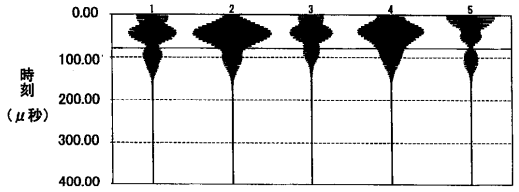
【図６７】



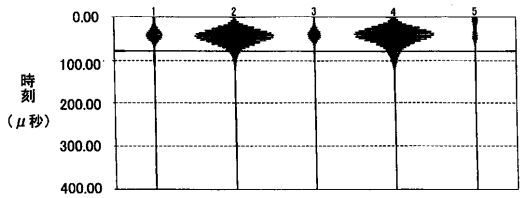
【図６８】



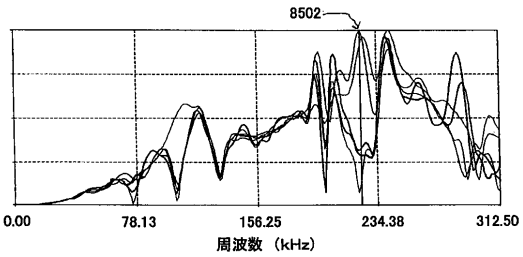
【図６９】



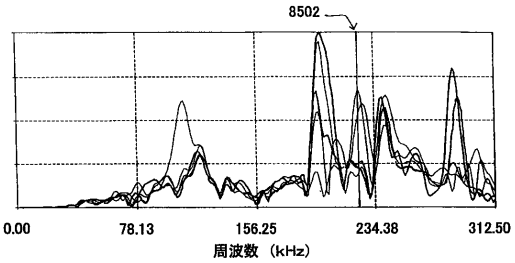
【図７０】



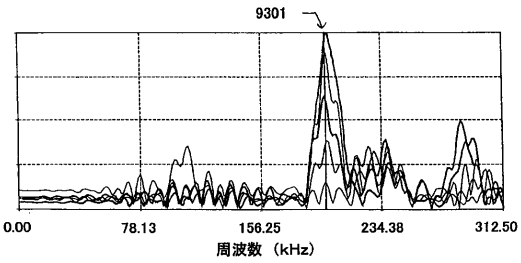
【図７１】



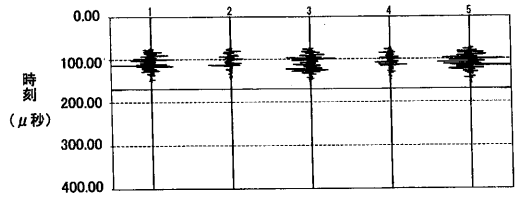
【図７２】



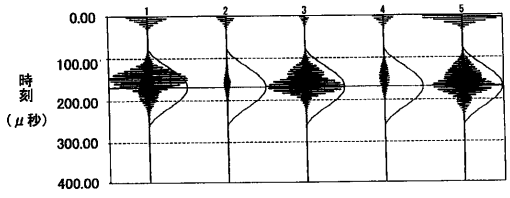
【図７３】



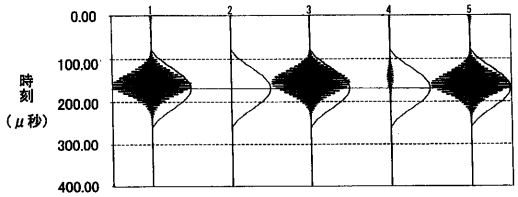
【図７４】



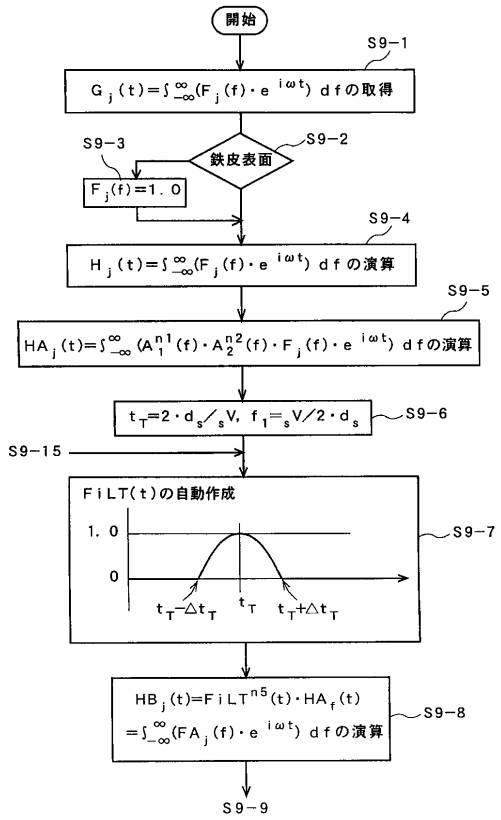
【図７５】



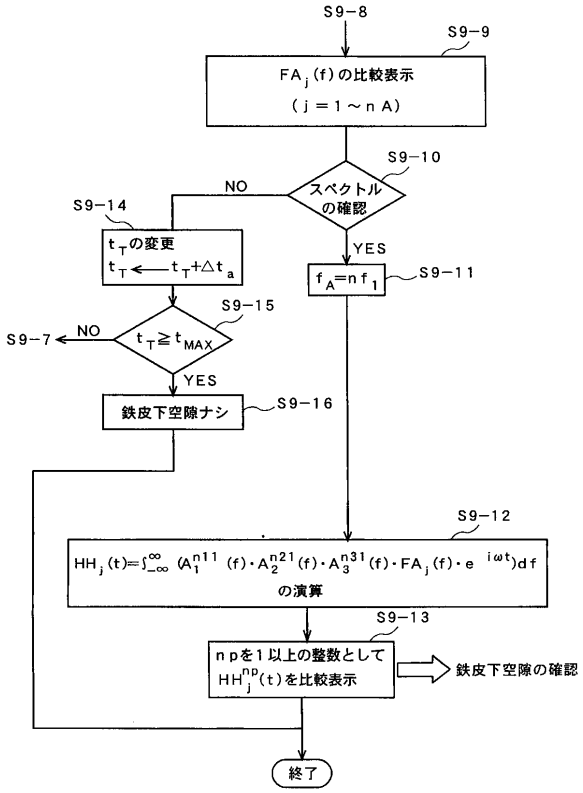
【図７６】



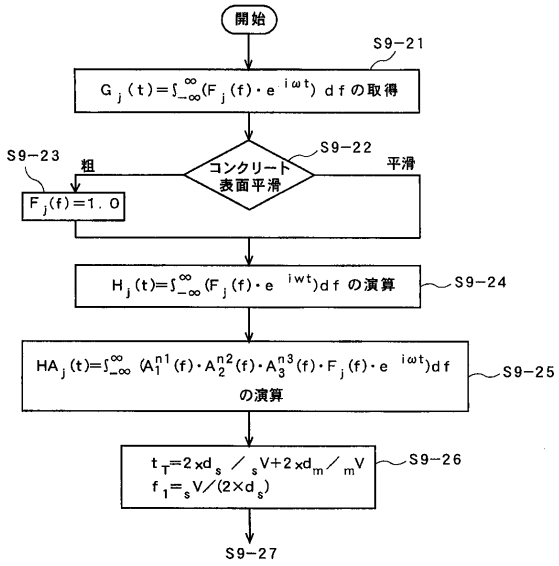
【図７７】



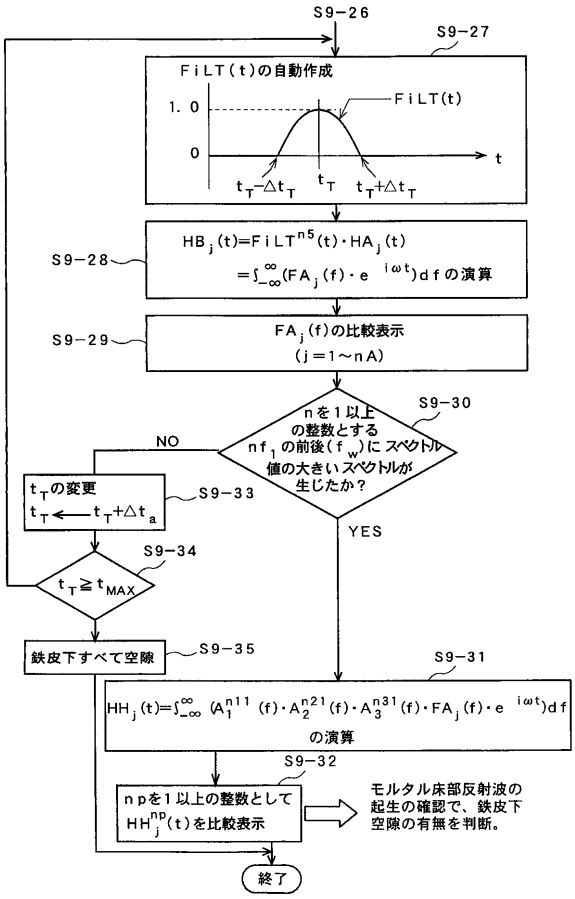
【図７８】



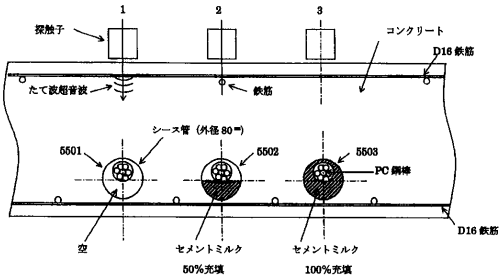
【図７９】



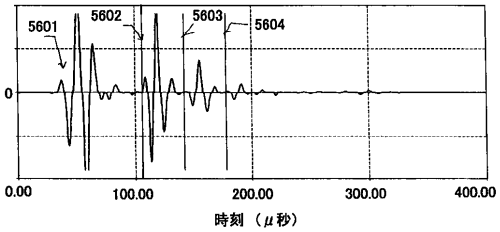
【図８０】



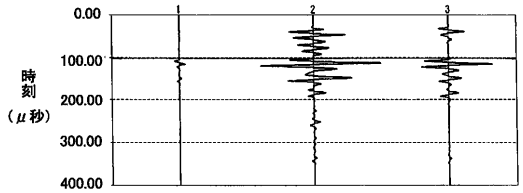
【図８１】



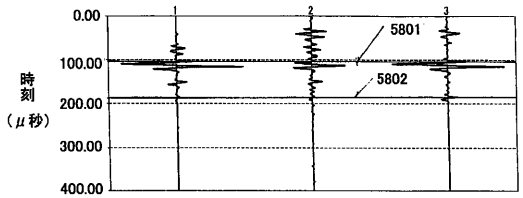
【図８２】



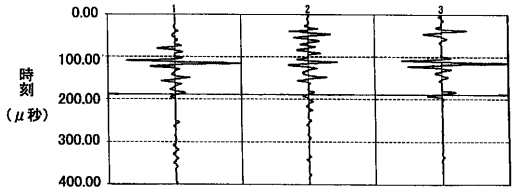
【図８３】



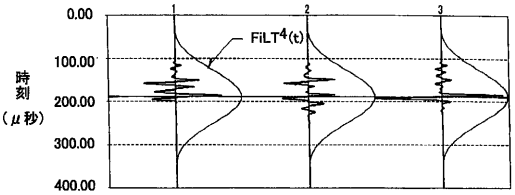
【図８４】



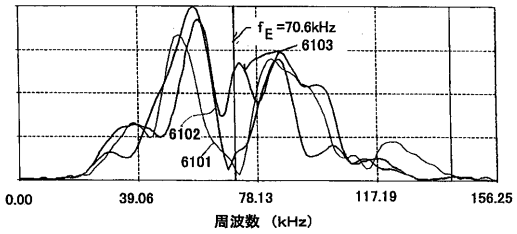
【図８５】



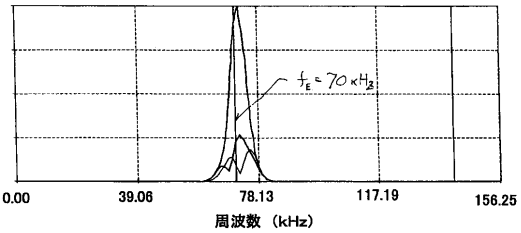
【図８６】



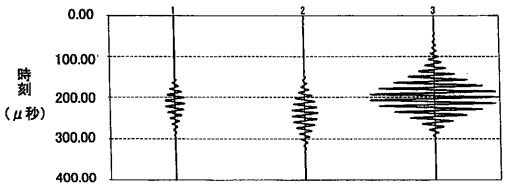
【図８７】



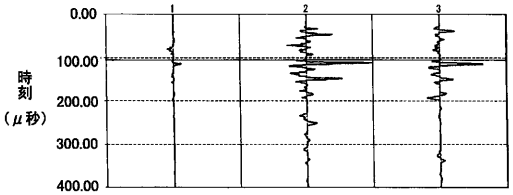
【図８８】



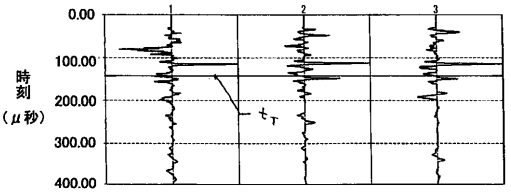
【図８９】



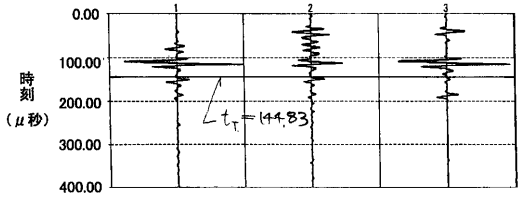
【図９０】



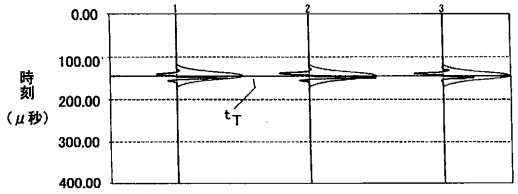
【図９１】



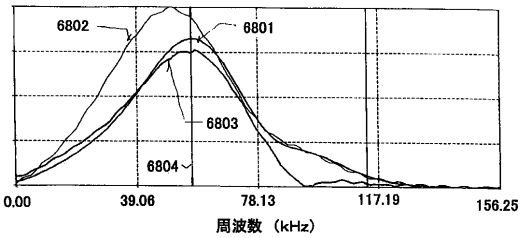
【図９２】



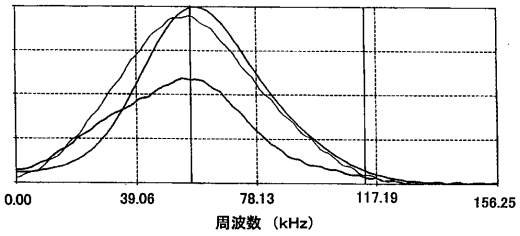
【図９３】



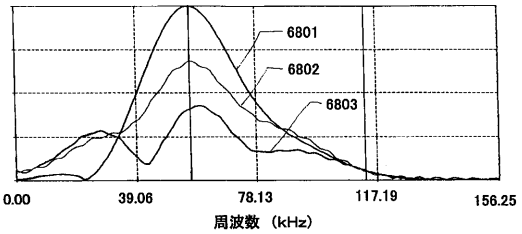
【図９４】



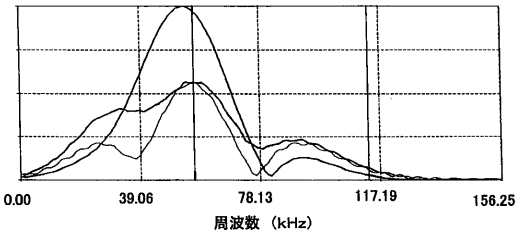
【図９５】



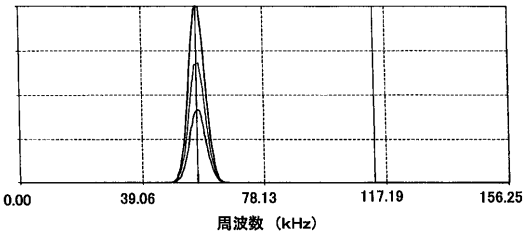
【図９６】



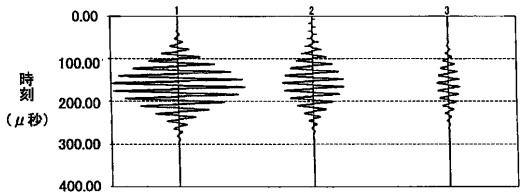
【図９７】



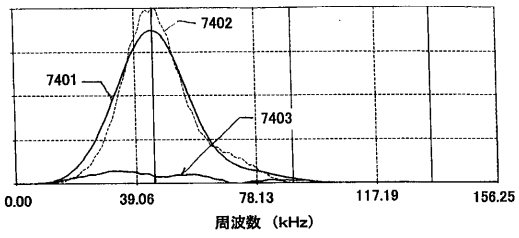
【図９８】



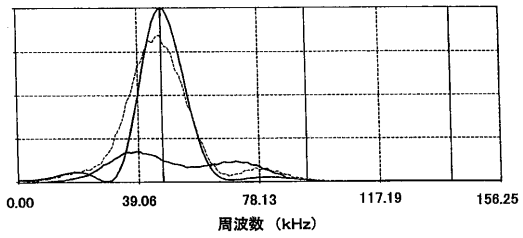
【図９９】



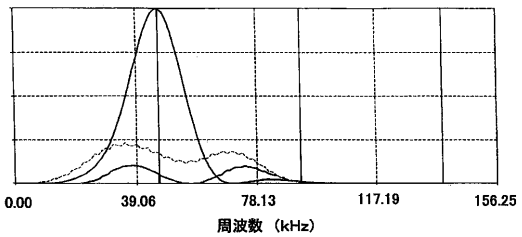
【図１００】



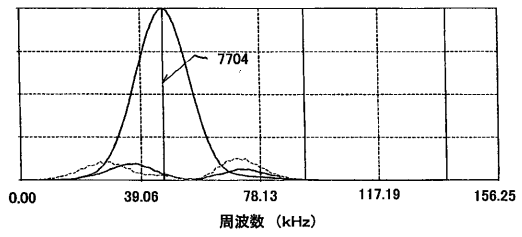
【図１０１】



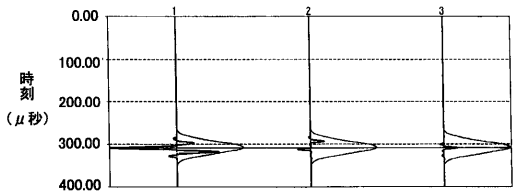
【図１０２】



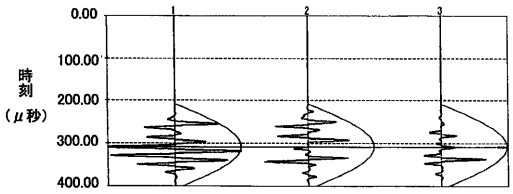
【図１０３】



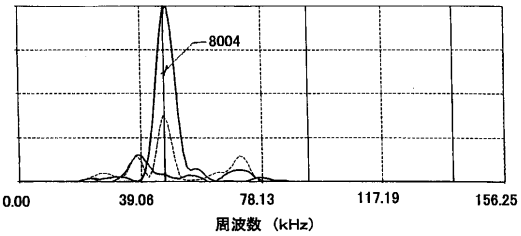
【図１０４】



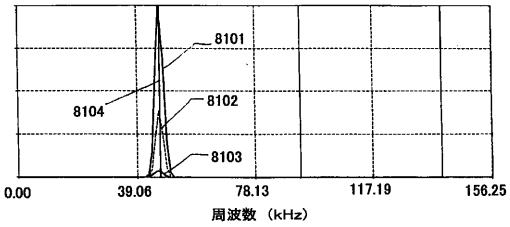
【図１０５】



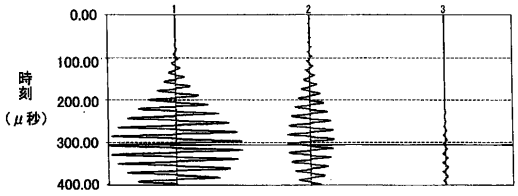
【図１０６】



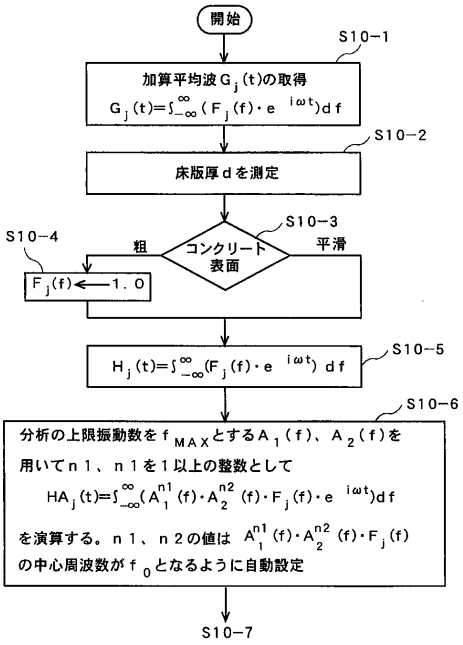
【図１０７】



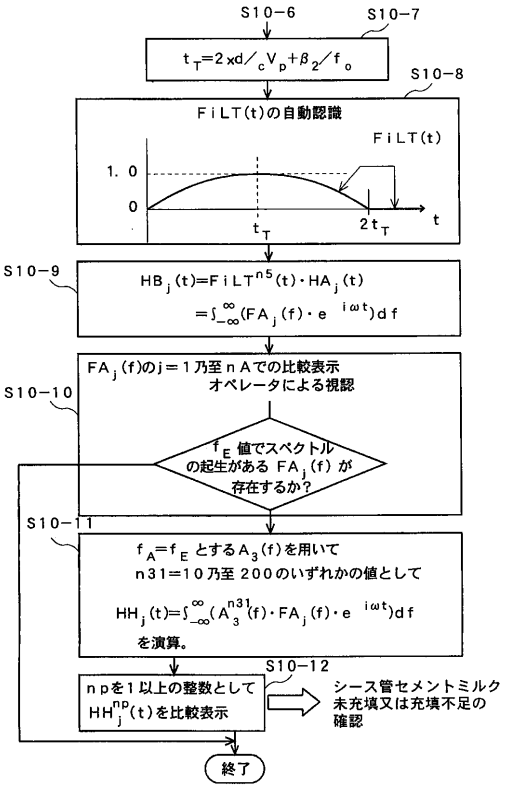
【図１０８】



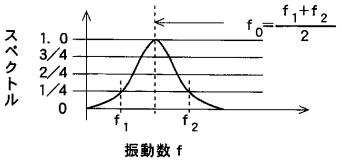
【図１０９】



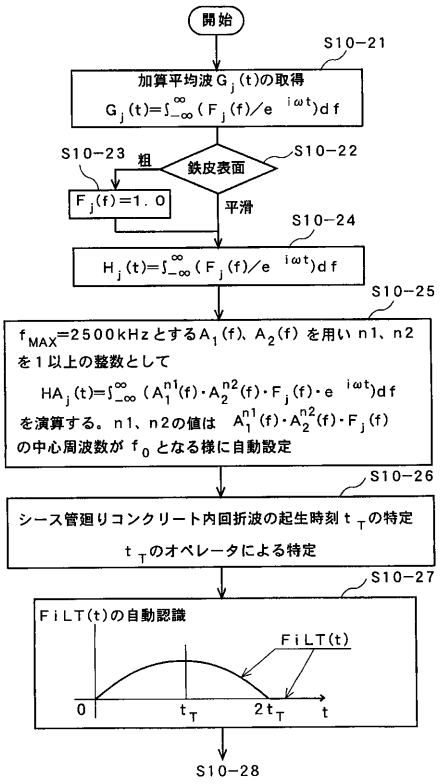
【図１１０】



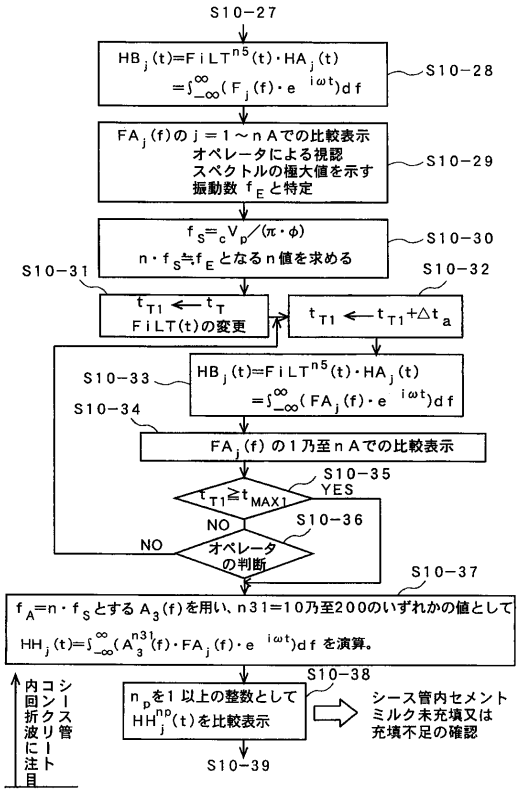
【図１１１】



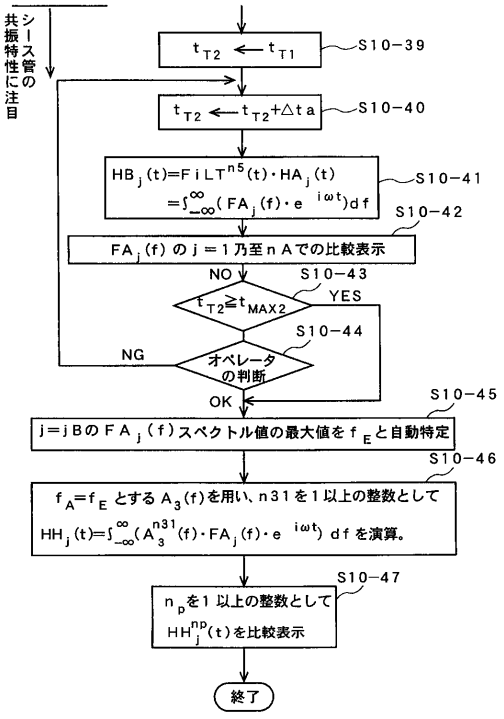
【図１１２】



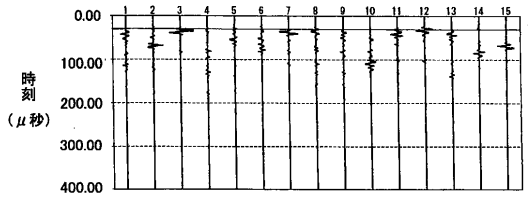
【図１１３】



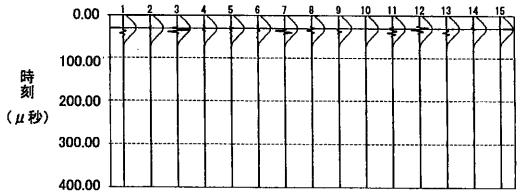
【図１１４】



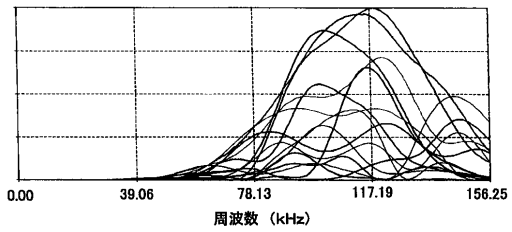
【図１１５】



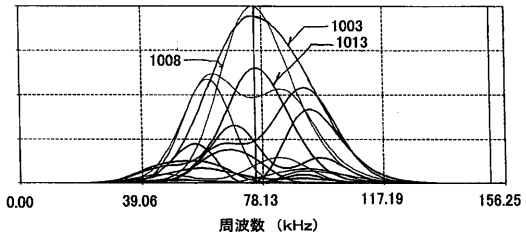
【図１１６】



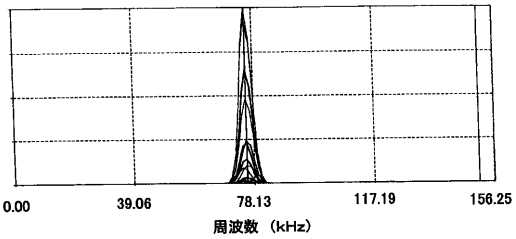
【図１１７】



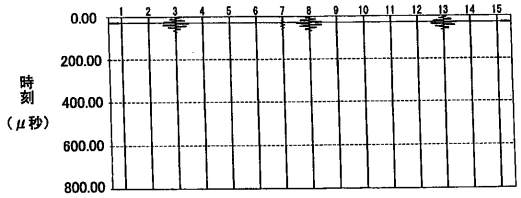
【図１１８】



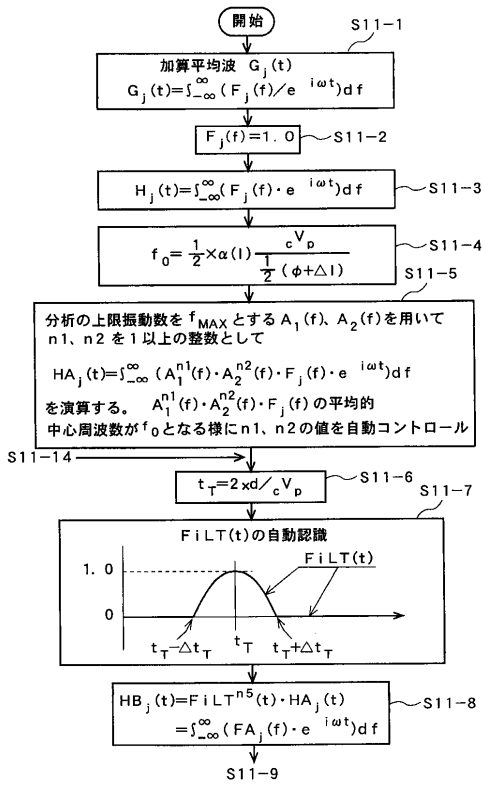
【図１１９】



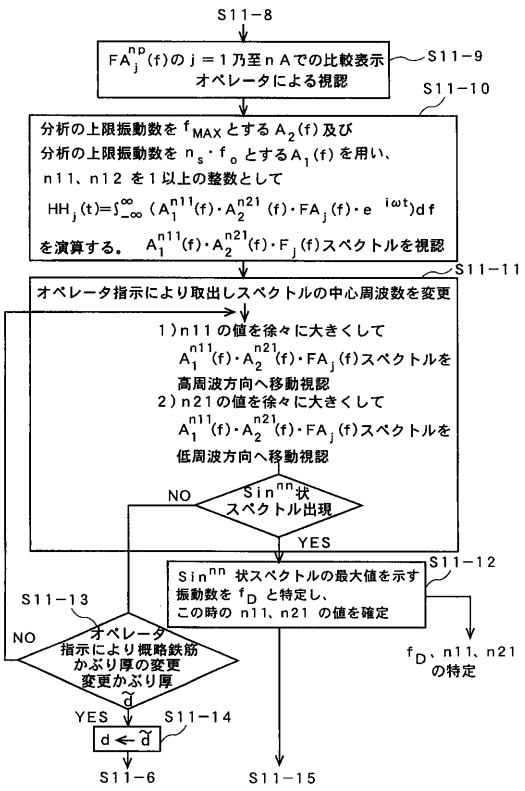
【図１２０】



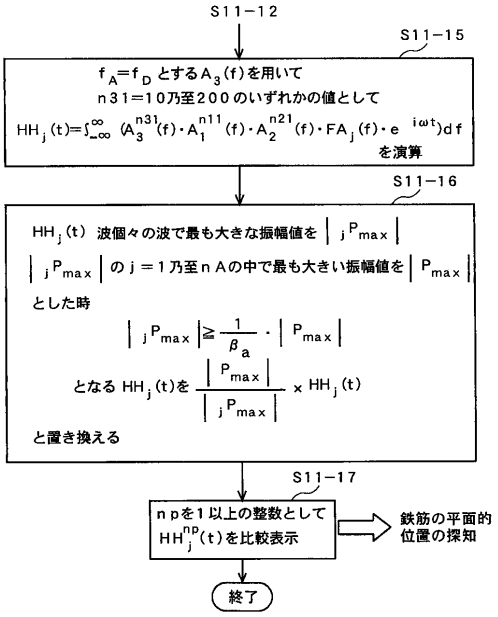
【図１２１】



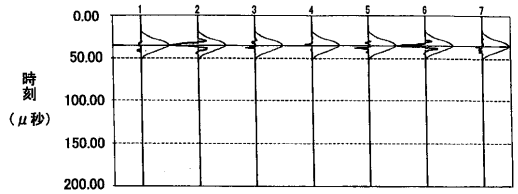
【図１２２】



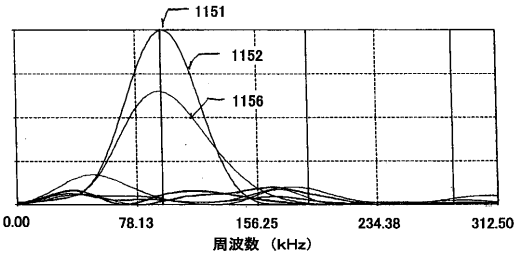
【図１２３】



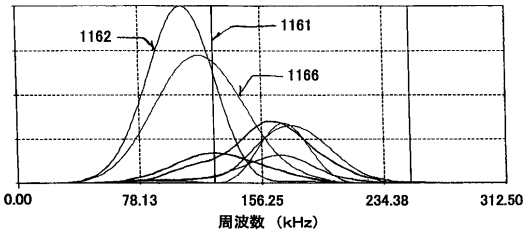
【図１２４】



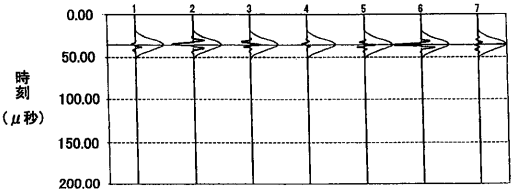
【図１２５】



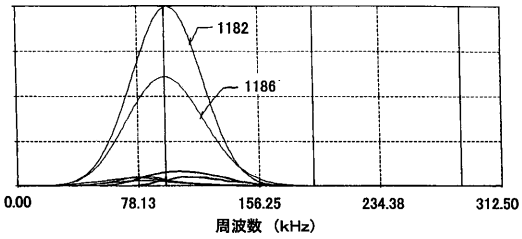
【図１２６】



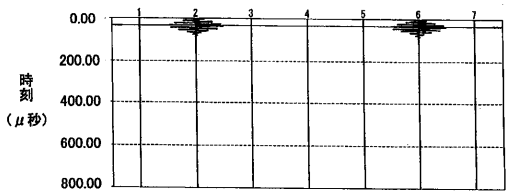
【図１２７】



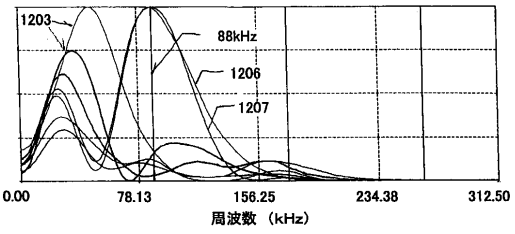
【図１２８】



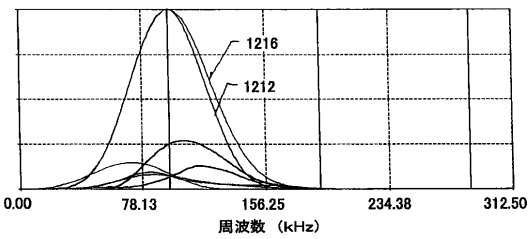
【図１２９】



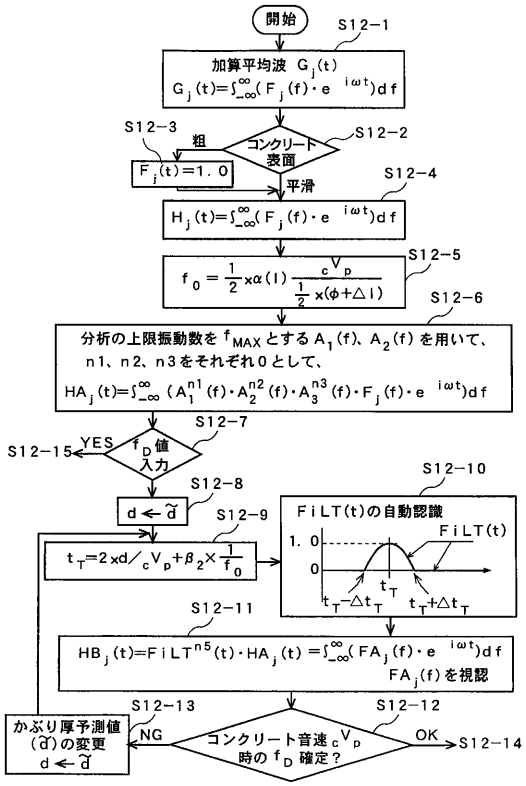
【図１３０】



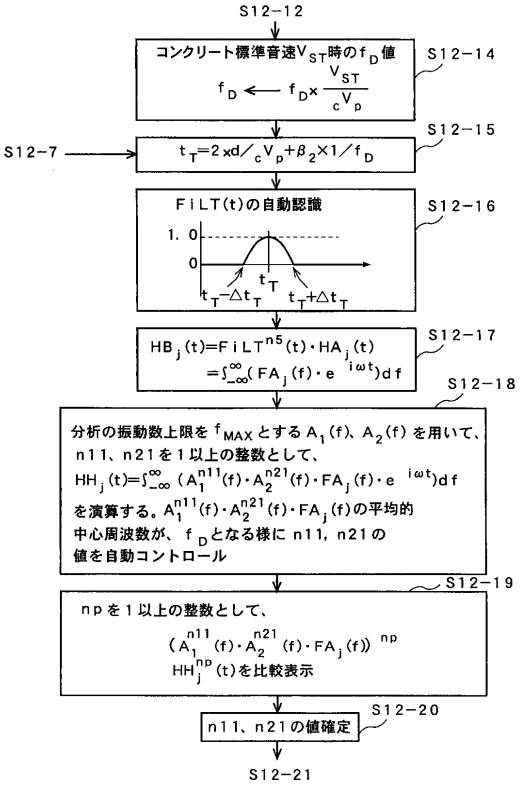
【図１３１】



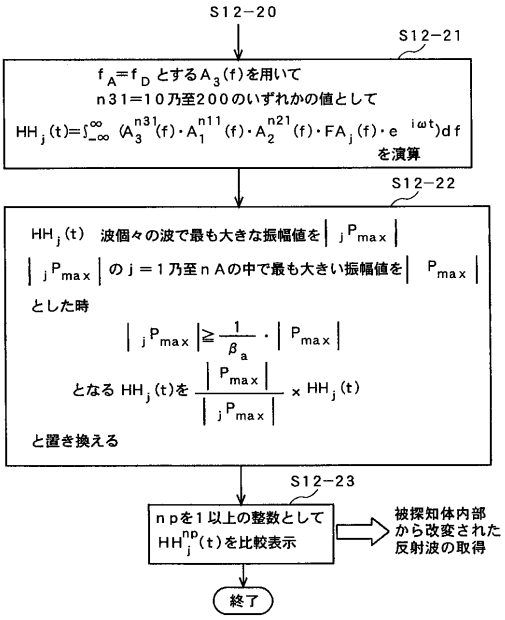
【図１３２】



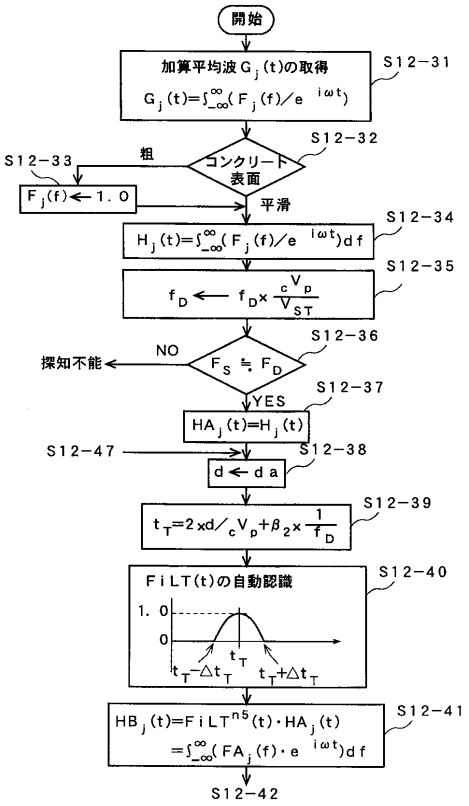
【図１３３】



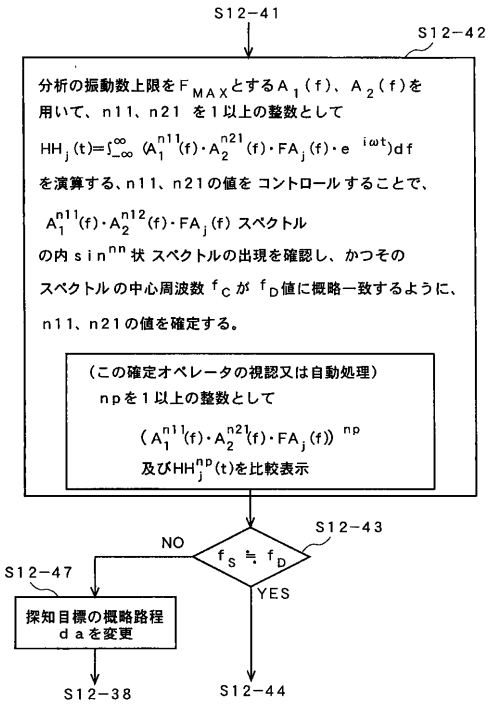
【図１３４】



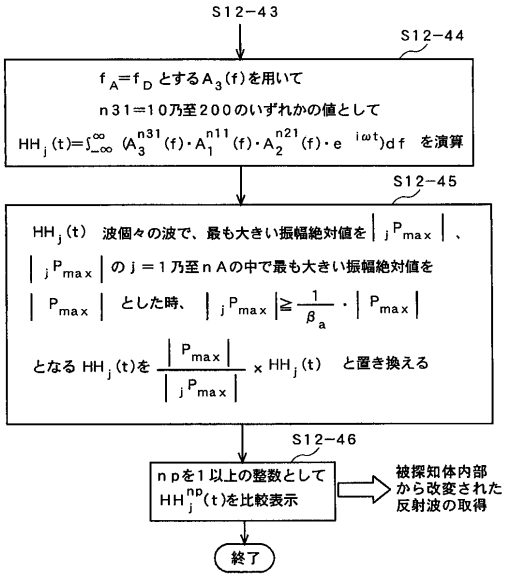
【図１３５】



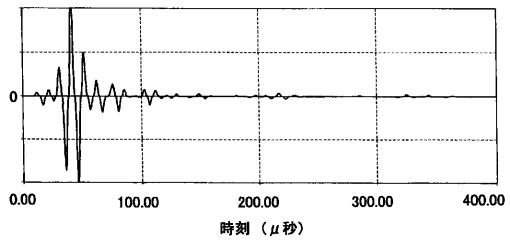
【図１３６】



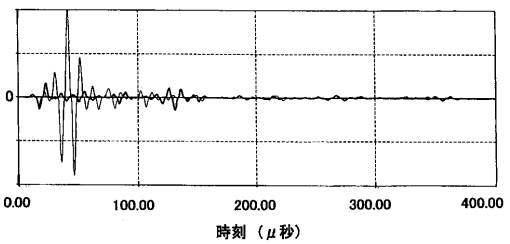
【図１３７】



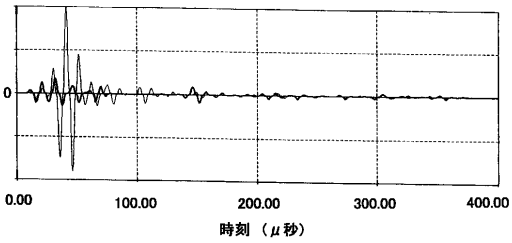
【図１３８】



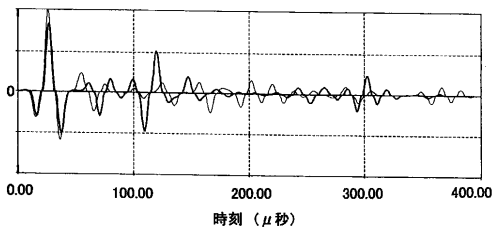
【図１３９】



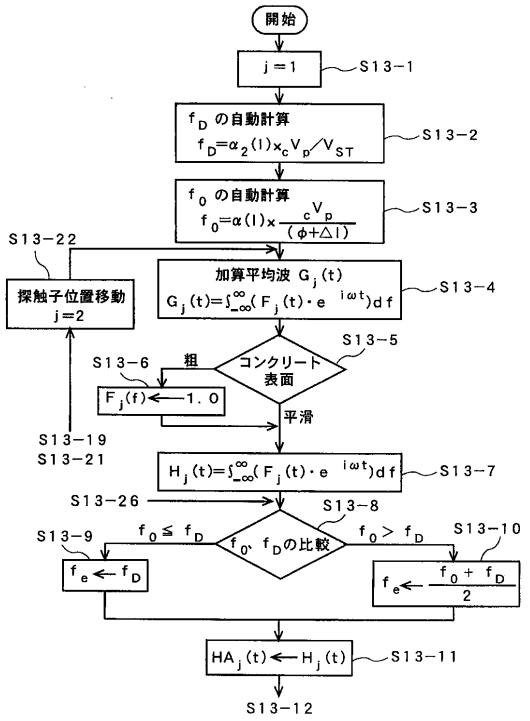
【図１４０】



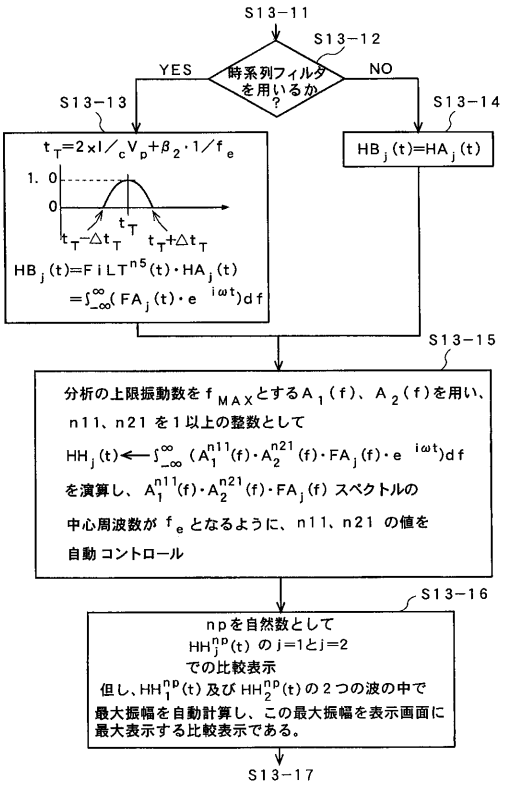
【図１４１】



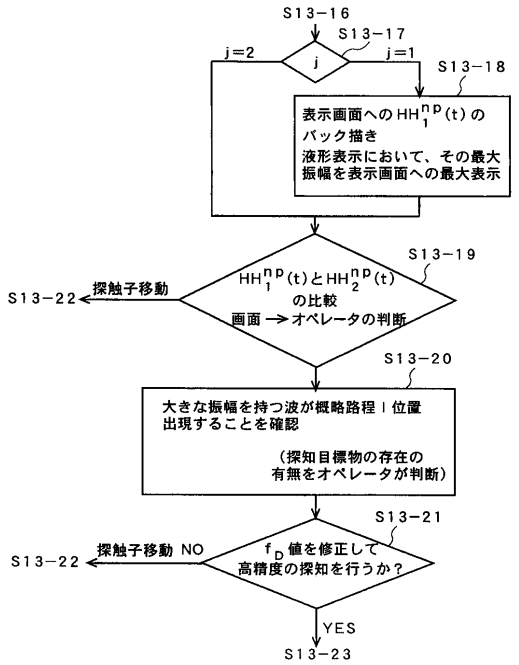
【図１４２】



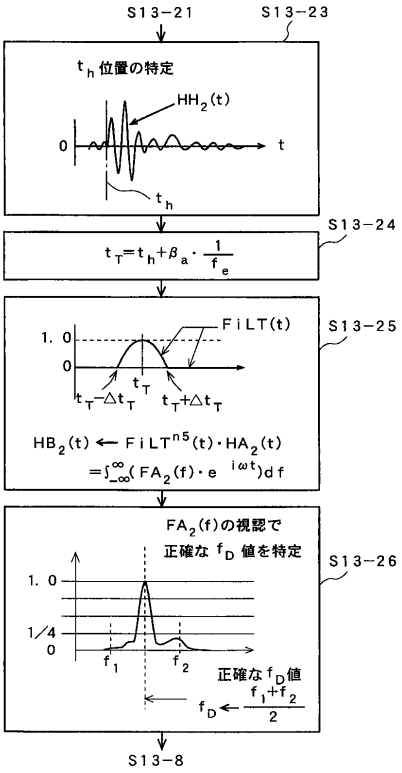
【図１４３】



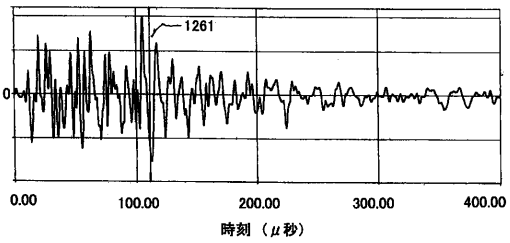
【図１４４】



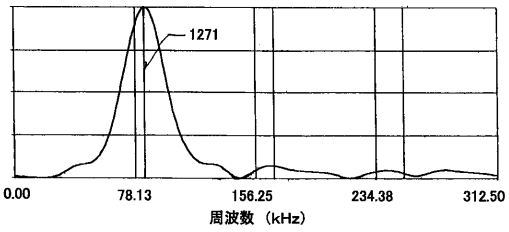
【図１４５】



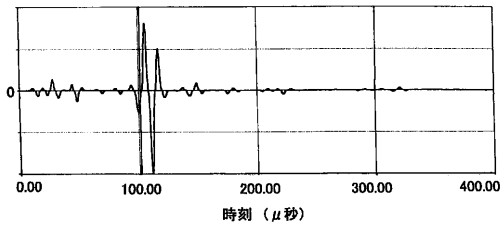
【図１４６】



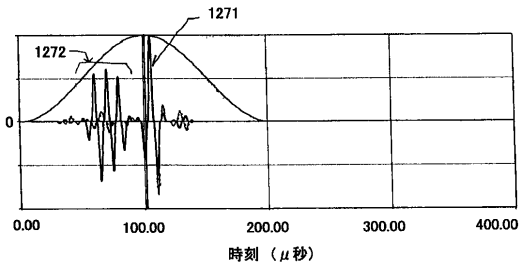
【図１４７】



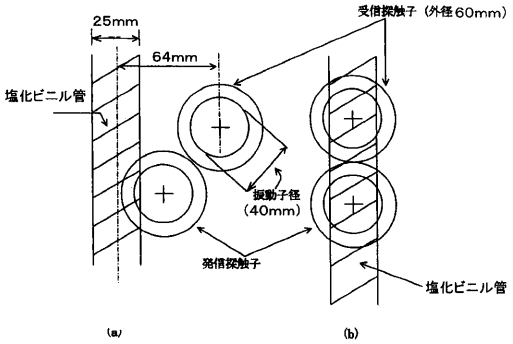
【図１４８】



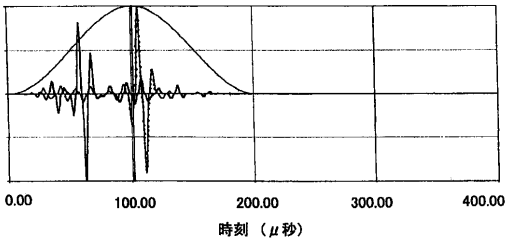
【図１４９】



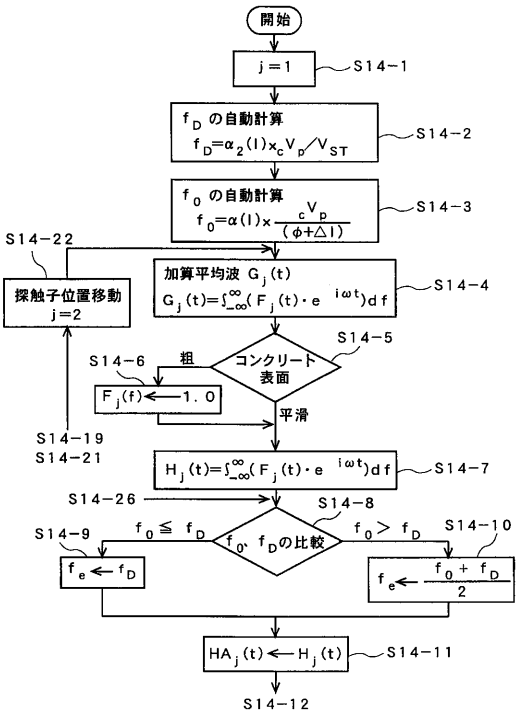
【図１５０】



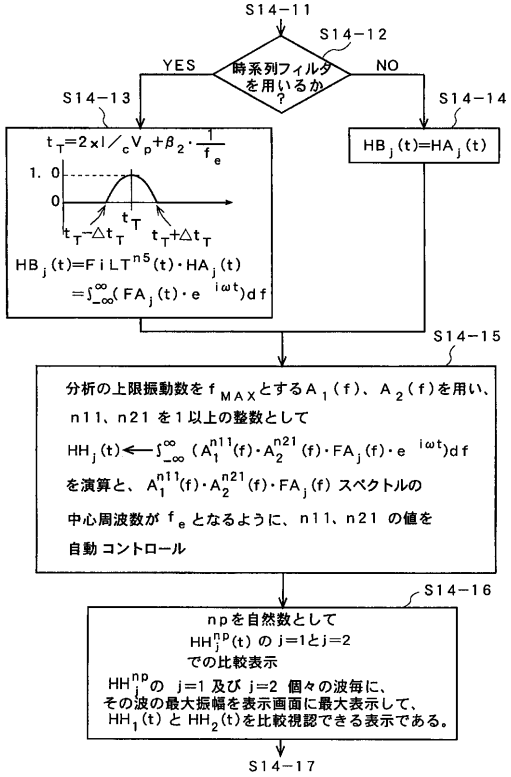
【図１５１】



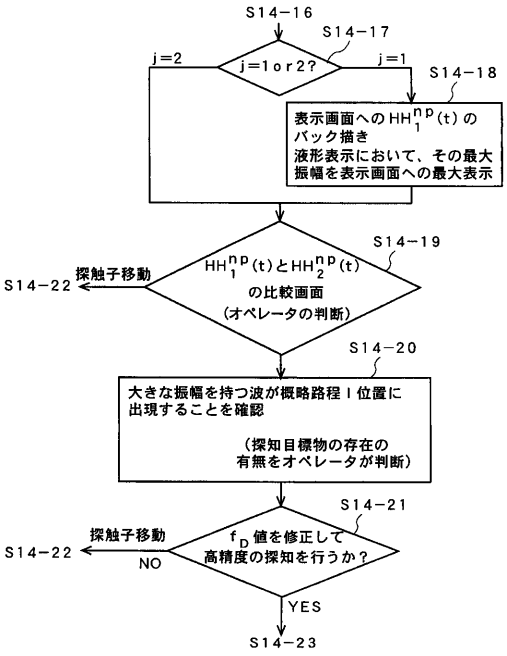
【図１５２】



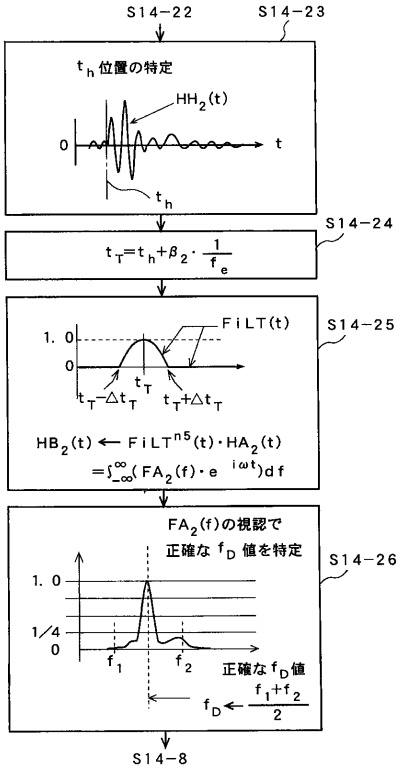
【図１５３】



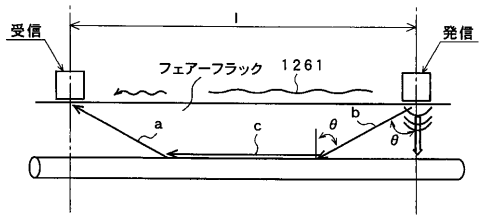
【図１５４】



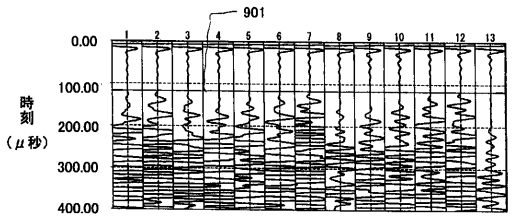
【図１５５】



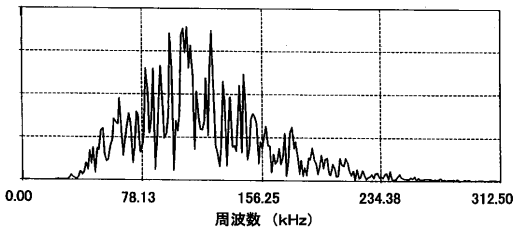
【図１５６】



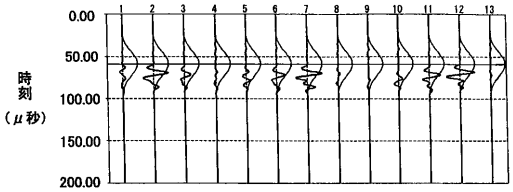
【図１５７】



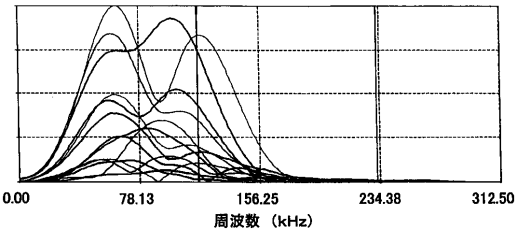
【図１５８】



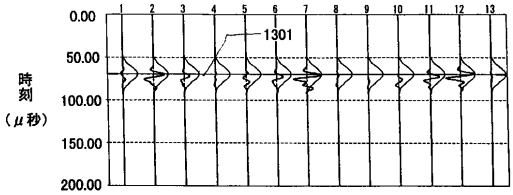
【図１５９】



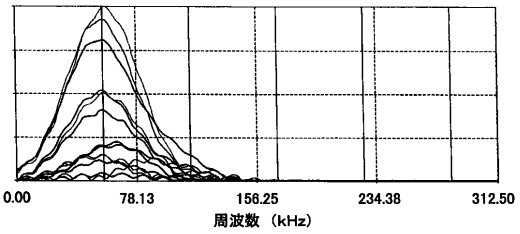
【図１６０】



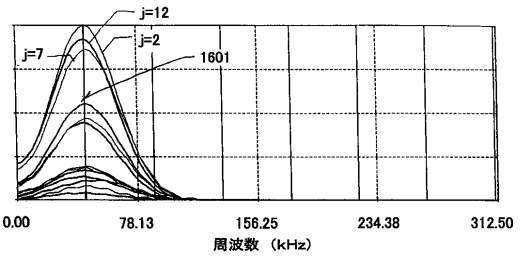
【図１６１】



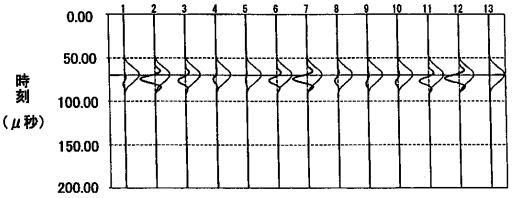
【図１６２】



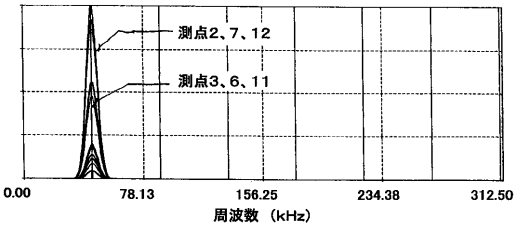
【図１６３】



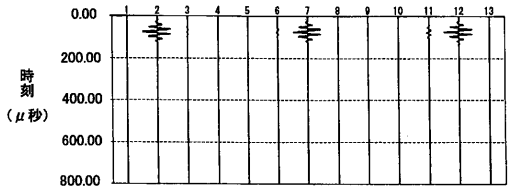
【図１６４】



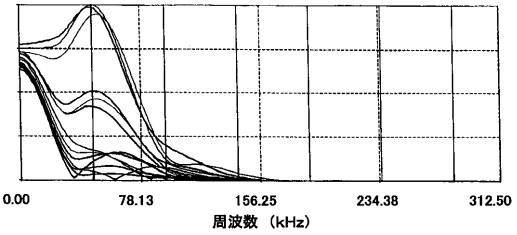
【図１６５】



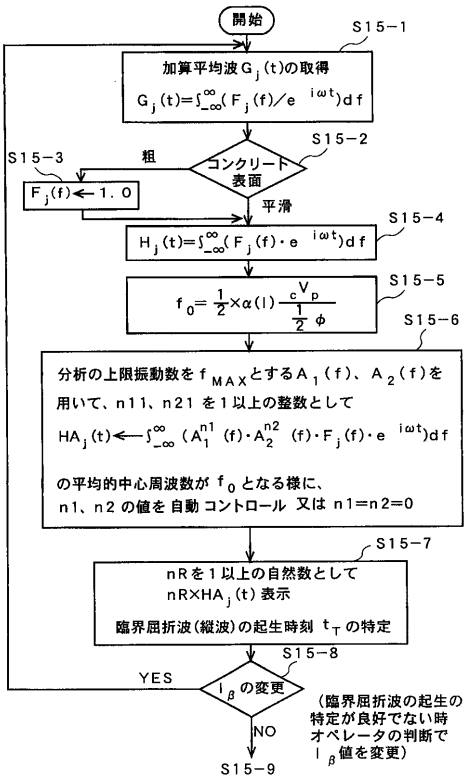
【図１６６】



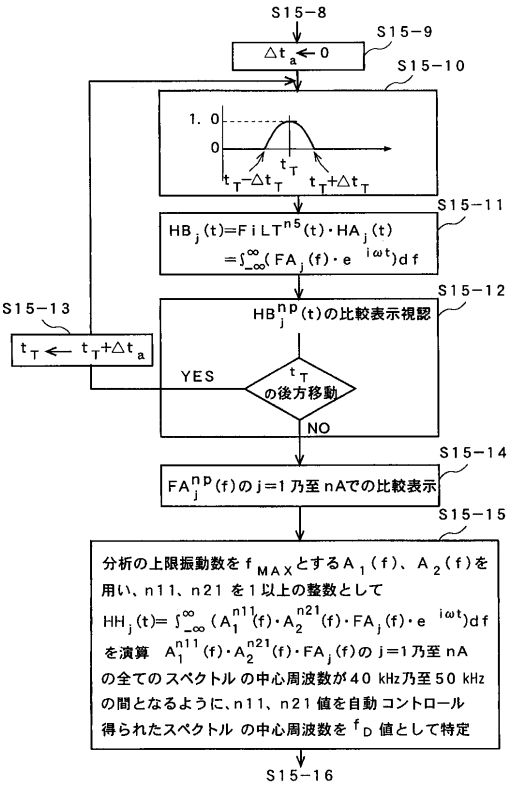
【図１６７】



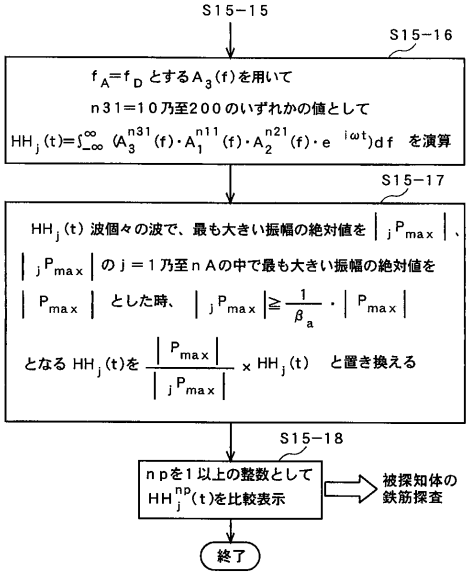
【図１６８】



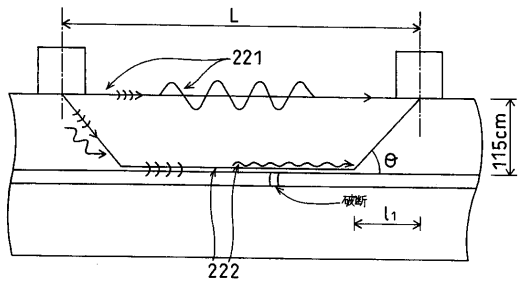
【図１６９】



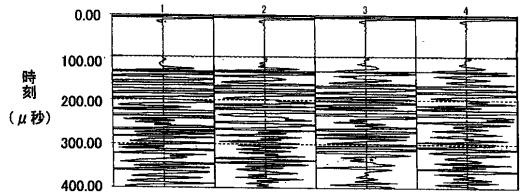
【図１７０】



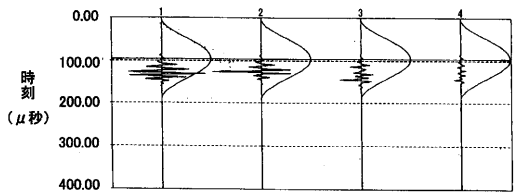
【図１７１】



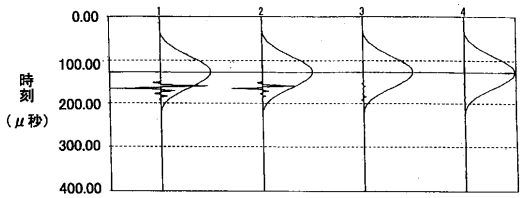
【図１７２】



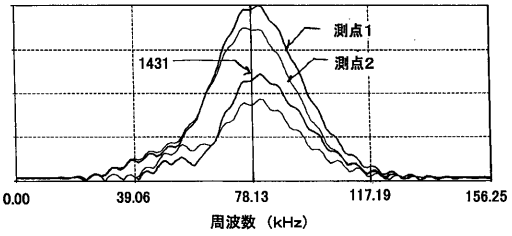
【図１７３】



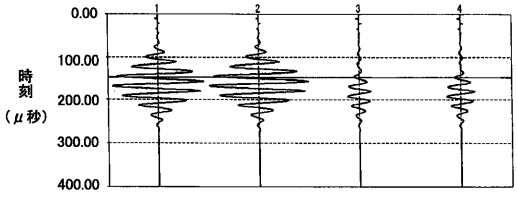
【図１７４】



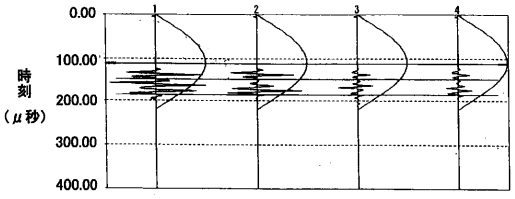
【図１７５】



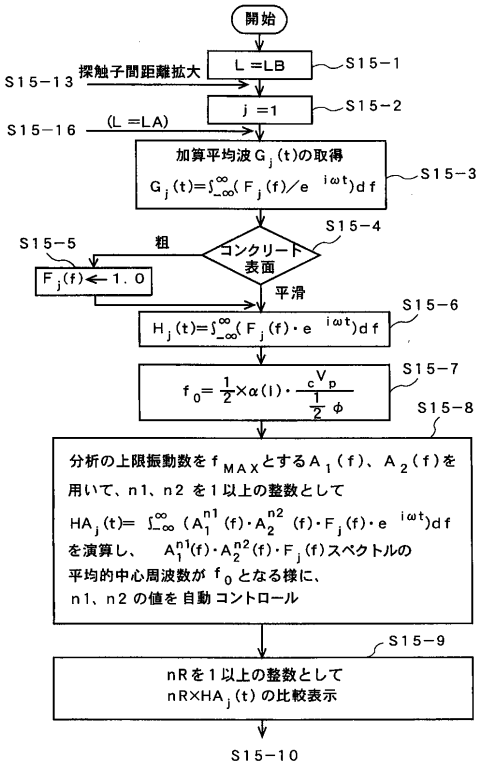
【図１７６】



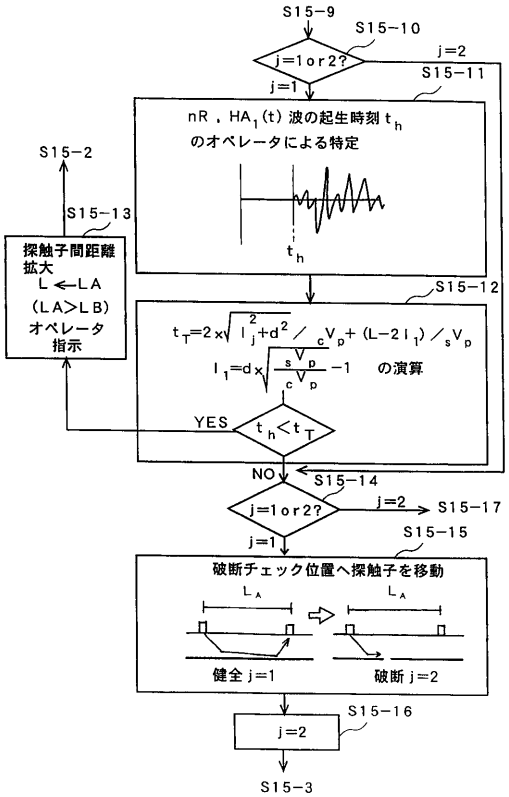
【図１７７】



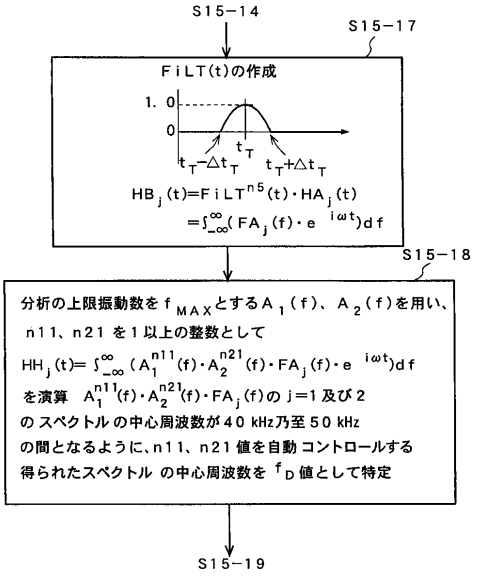
【図１７８】



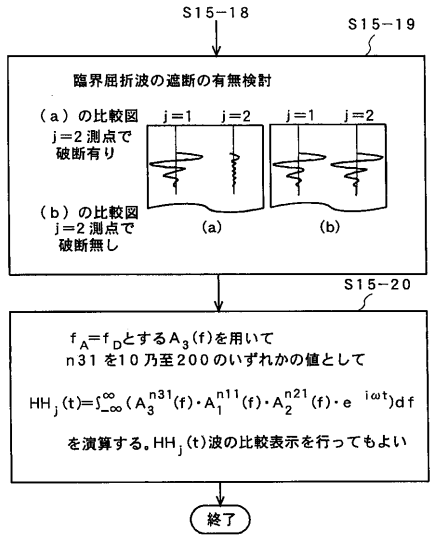
【図１７９】



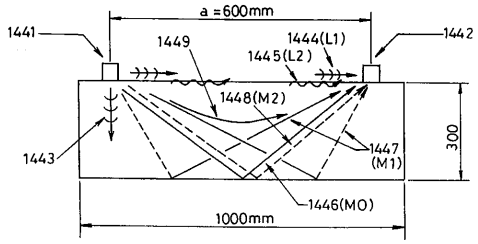
【図１８０】



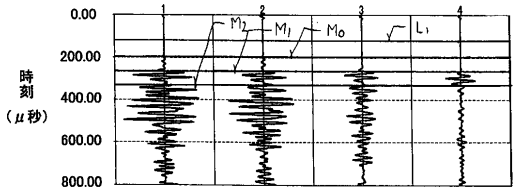
【図１８１】



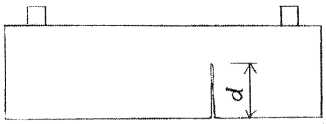
【図１８２】



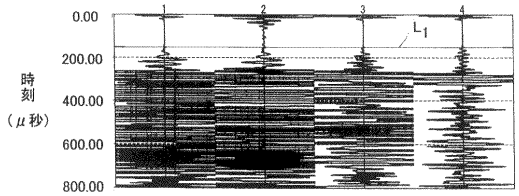
【図１８３】



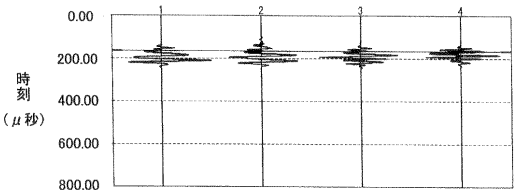
【図１８４】



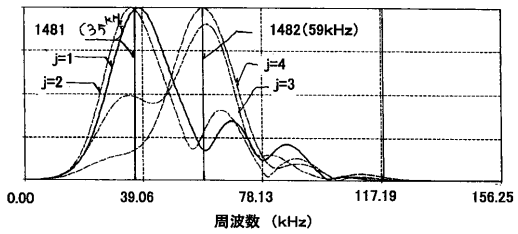
【図１８５】



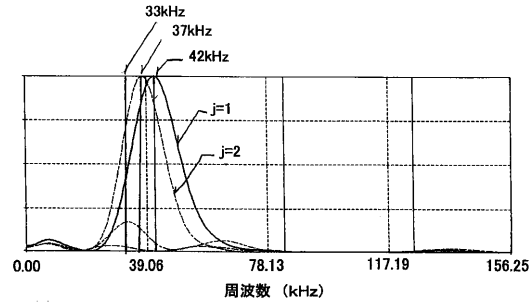
【図１８６】



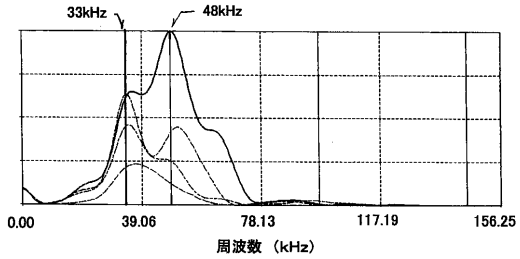
【図１８７】



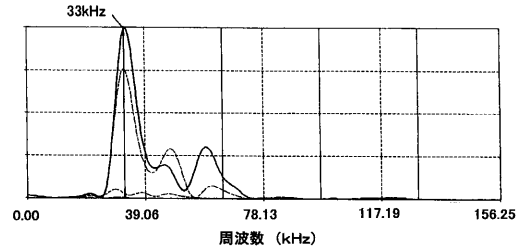
【図１８８】



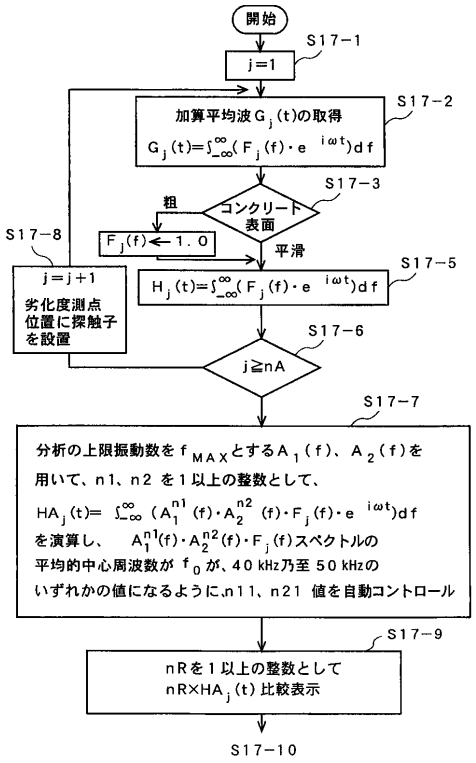
【図１８９】



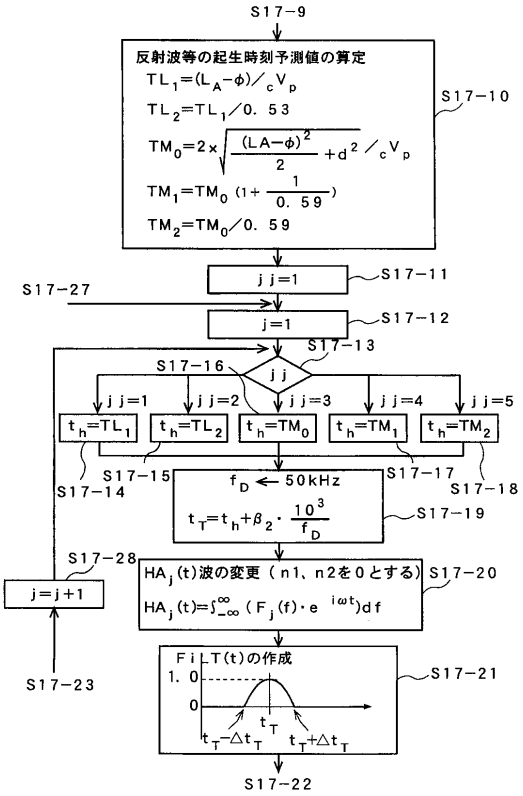
【図１９０】



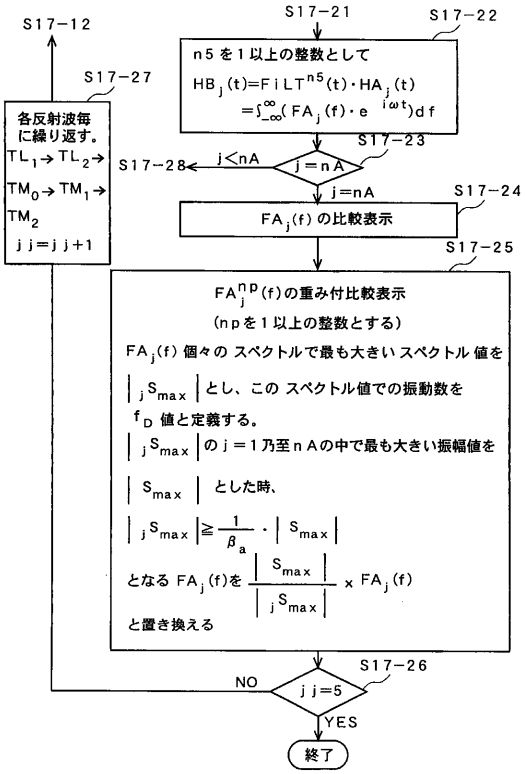
【図１９１】



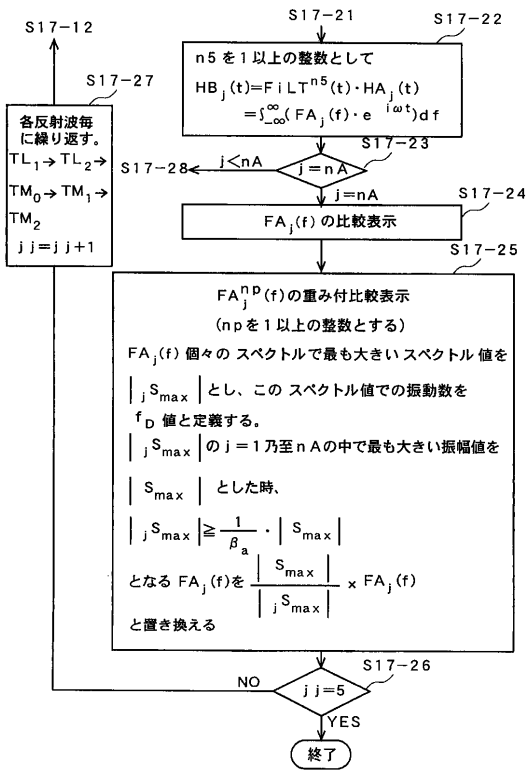
【図１９２】



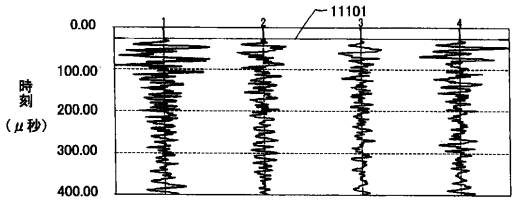
【図１９３】



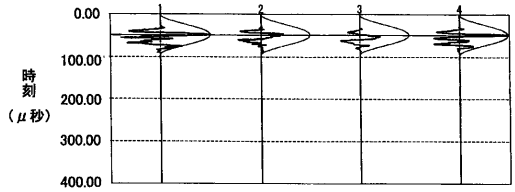
【図１９３】



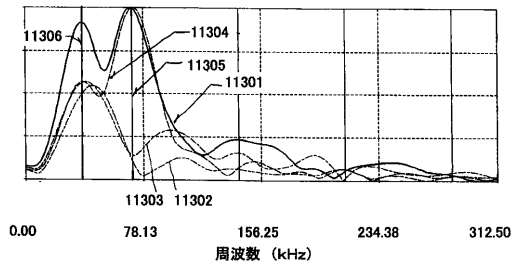
【図１９４】



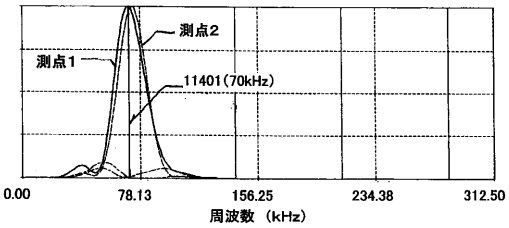
【図１９５】



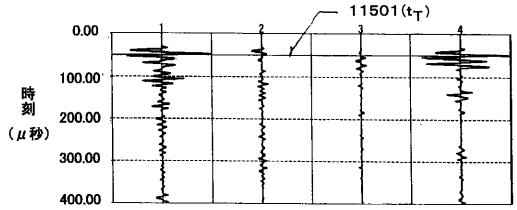
【図１９６】



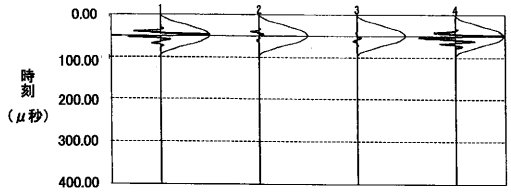
【図１９７】



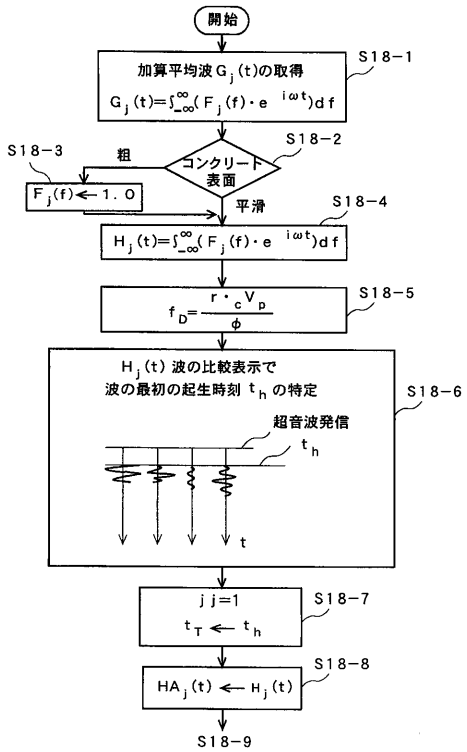
【図１９８】



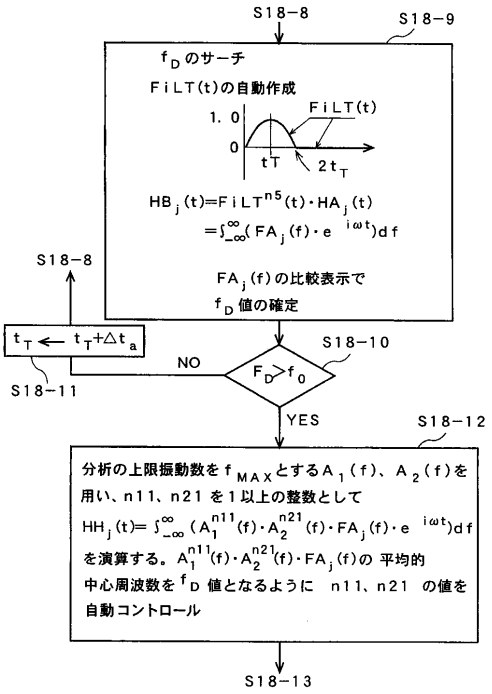
【図１９９】



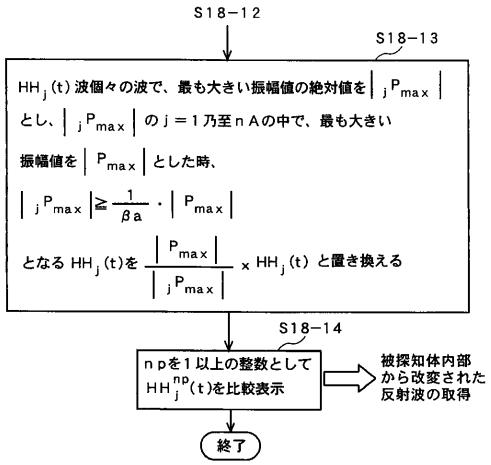
【図２００】



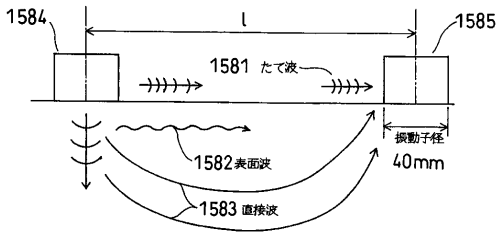
【図２０１】



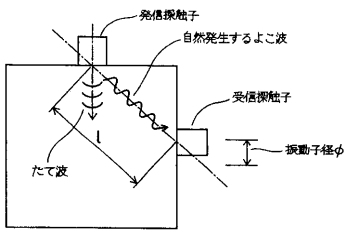
【図２０２】



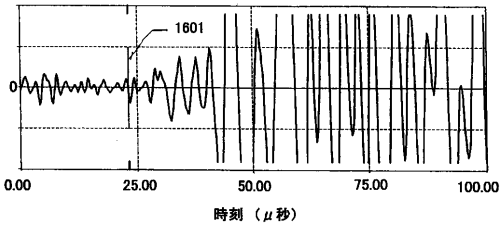
【図２０３】



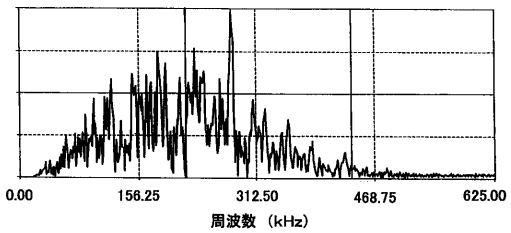
【図２０４】



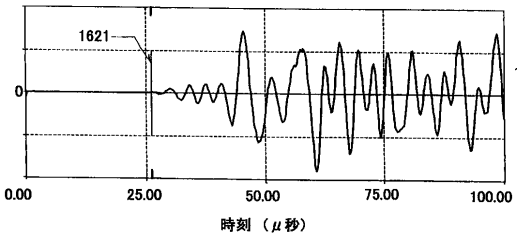
【図２０５】



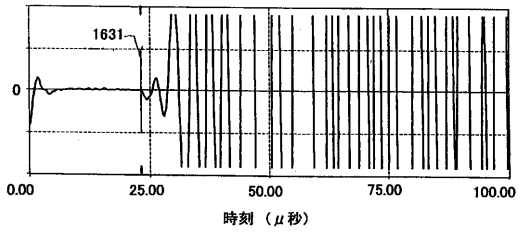
【図２０６】



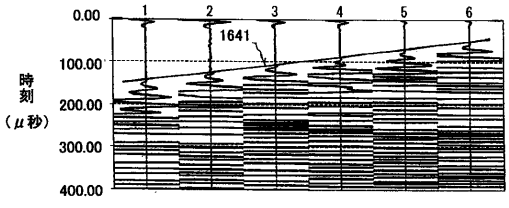
【図２０７】



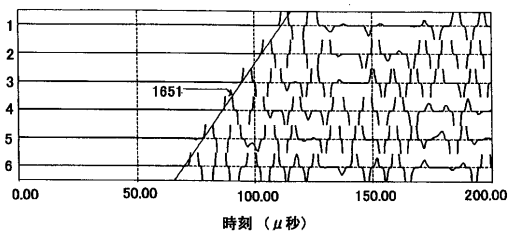
【図２０８】



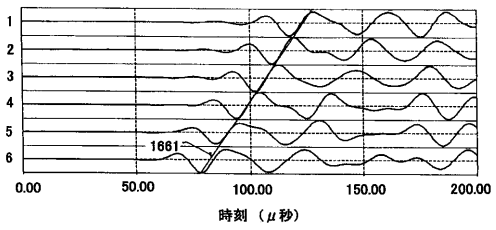
【図２０９】



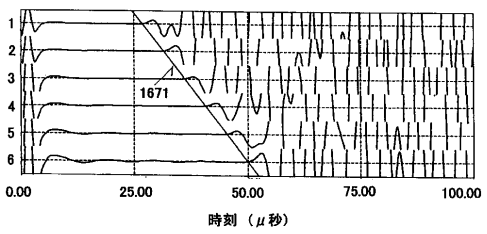
【図２１０】



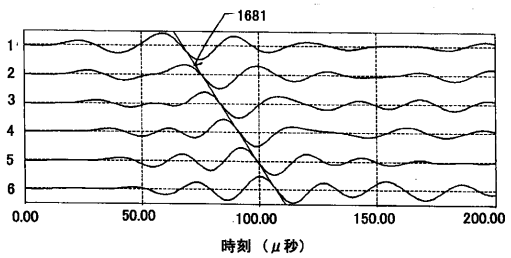
【図２１１】



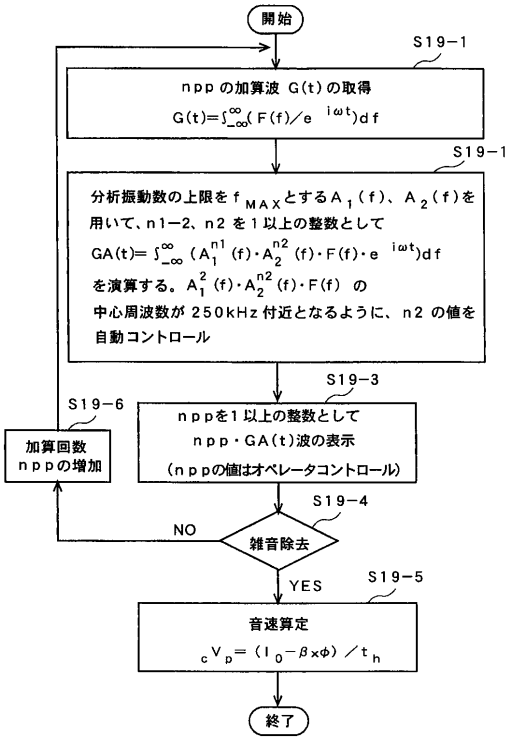
【図２１２】



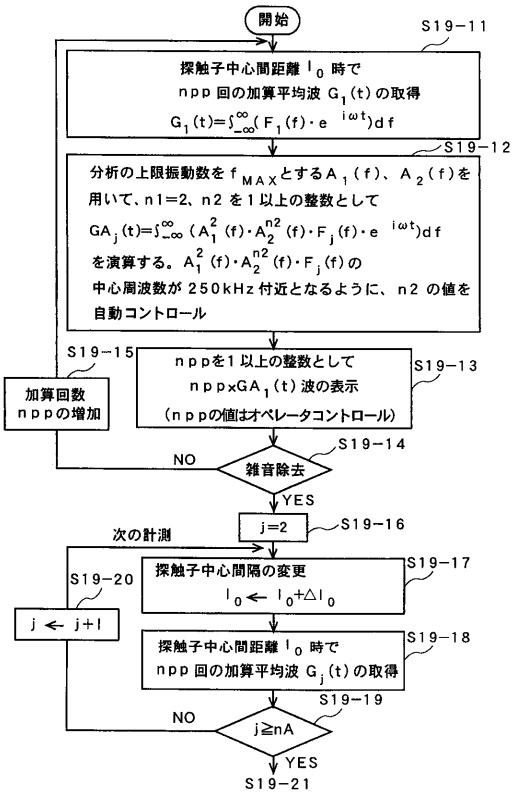
【図２１３】



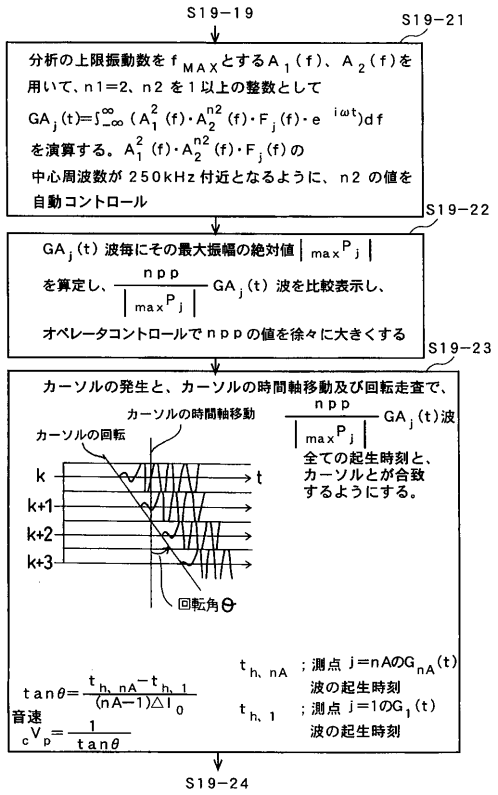
【図２１４】



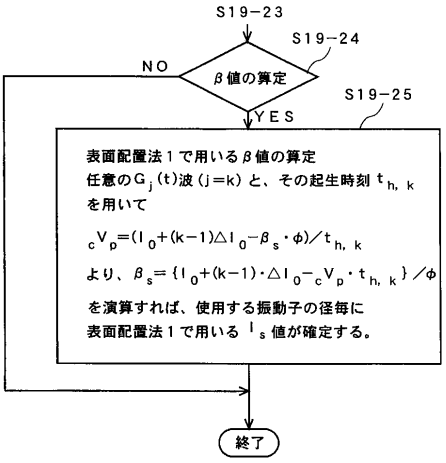
【図２１５】



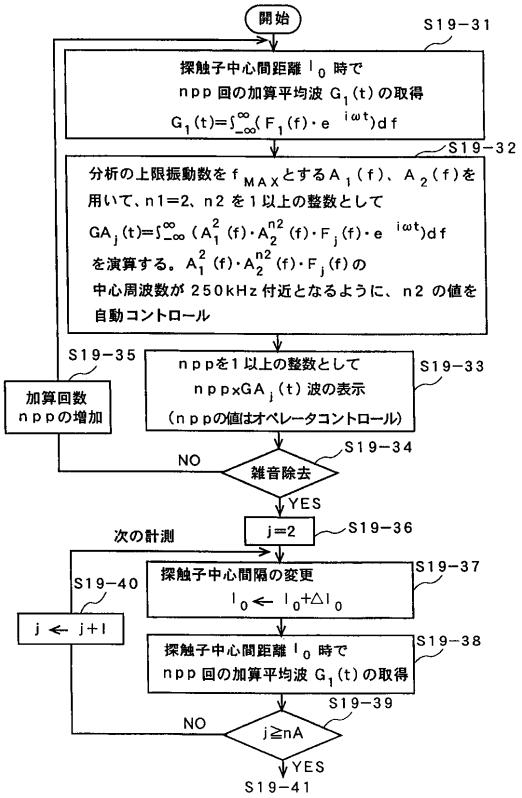
【図２１６】



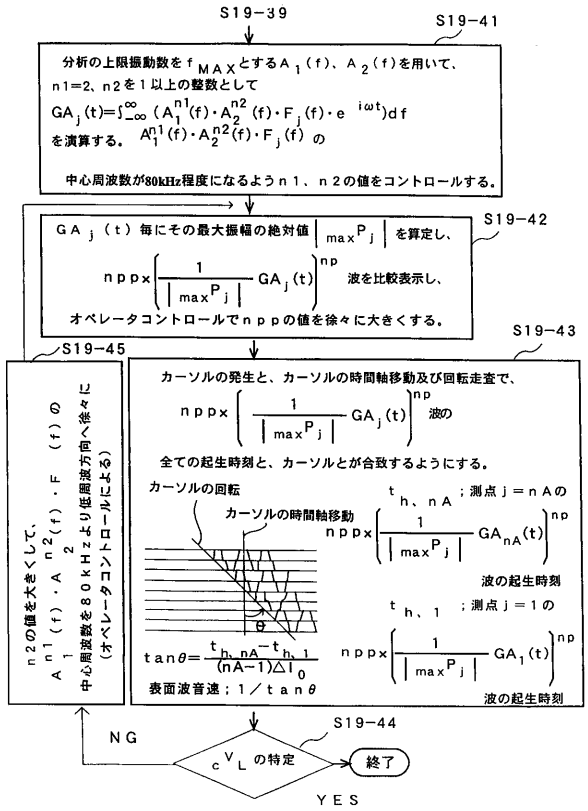
【図２１７】



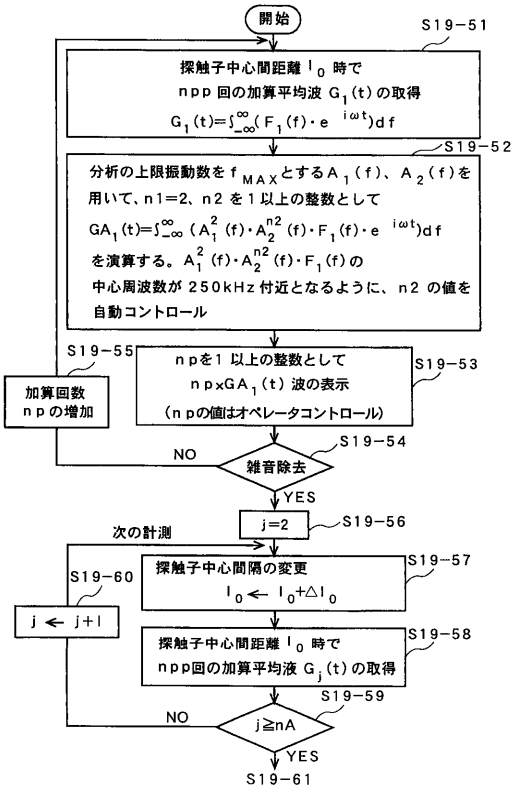
【図２１８】



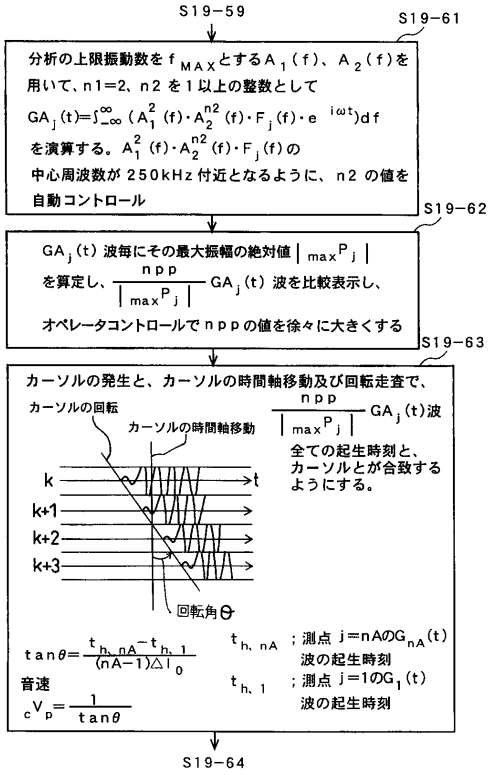
【図２１９】



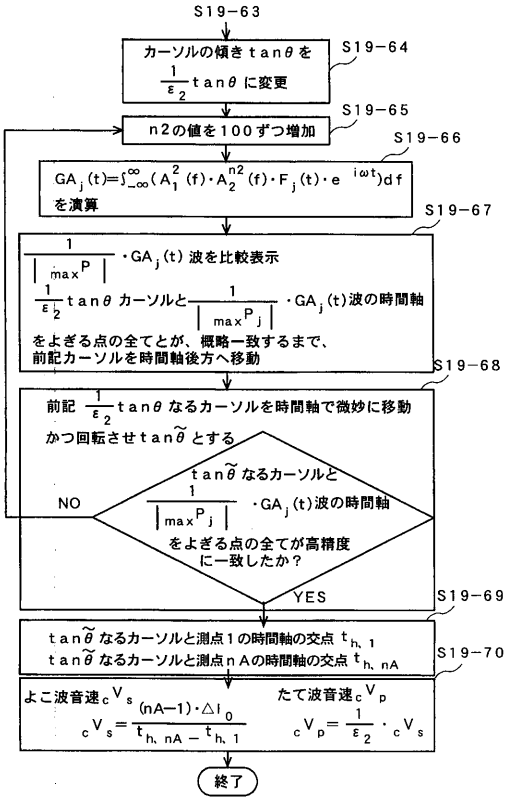
【図２２０】



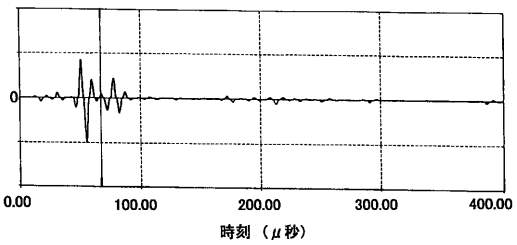
【図２２１】



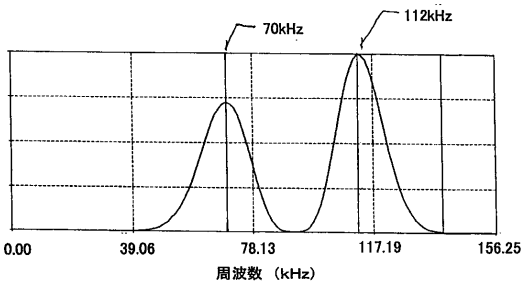
【図２２２】



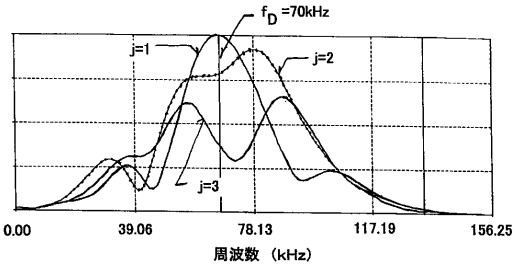
【図２２３】



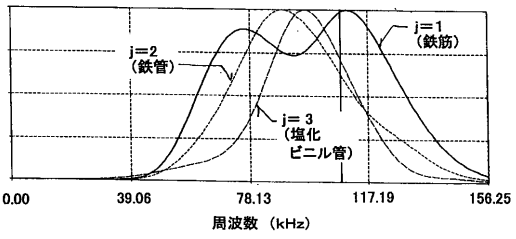
【図２２４】



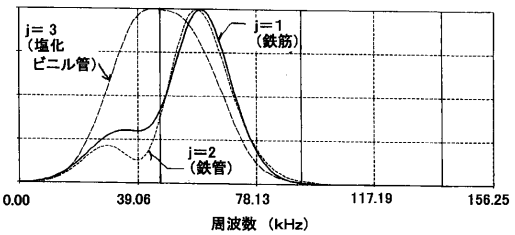
【図２２５】



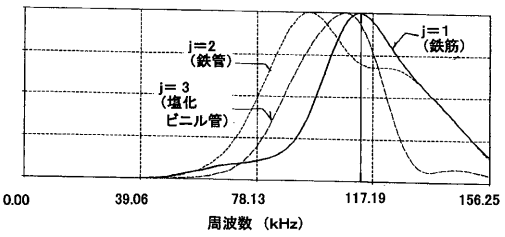
【図２２６】



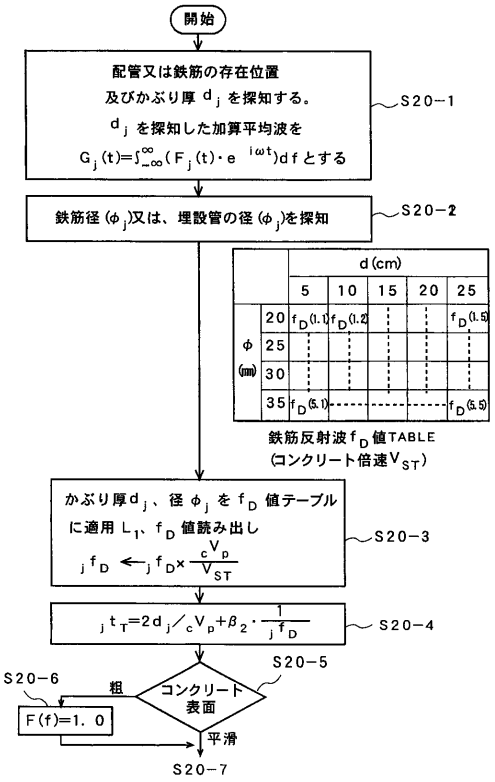
【図２２７】



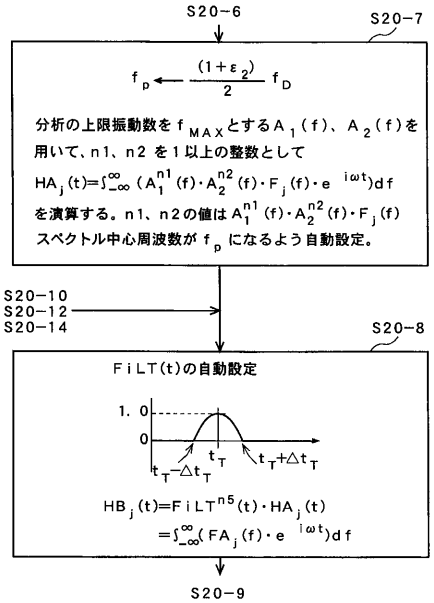
【図２２８】



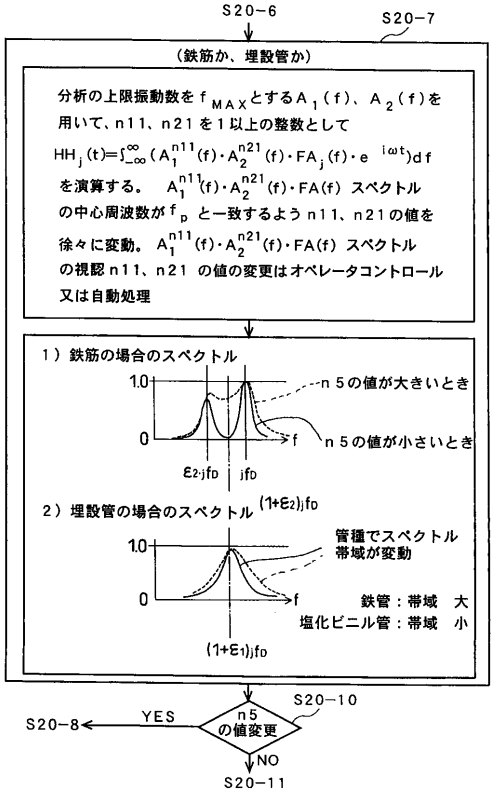
【図２２９】



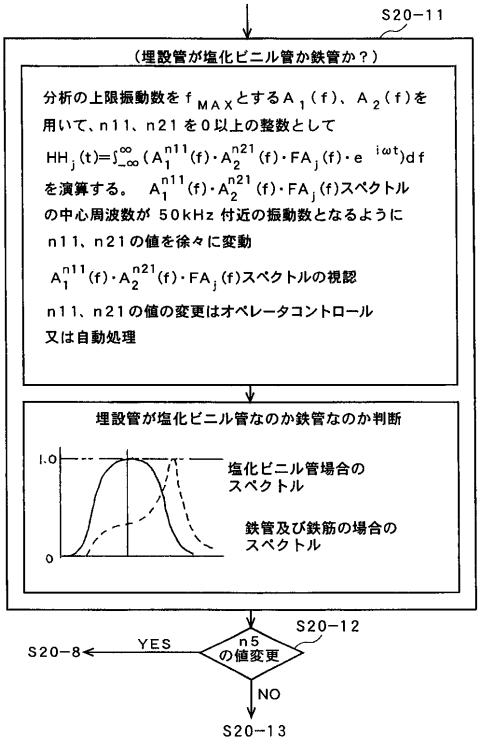
【図２３０】



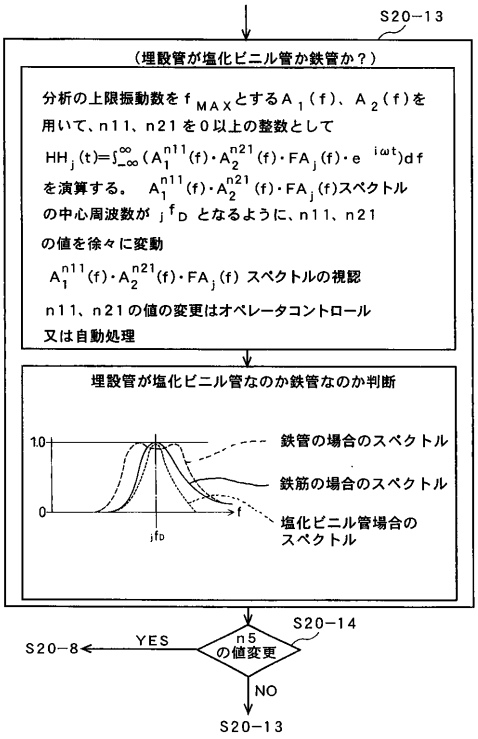
【図２３１】



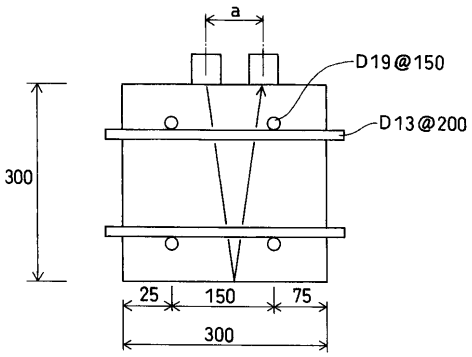
【図２３２】



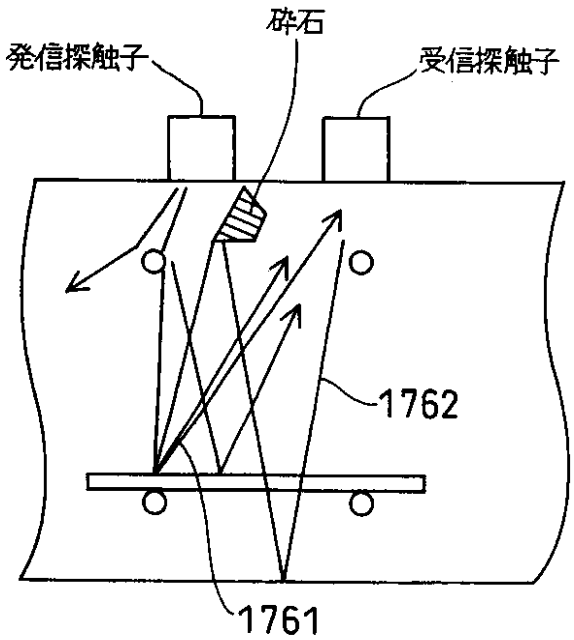
【図２３３】



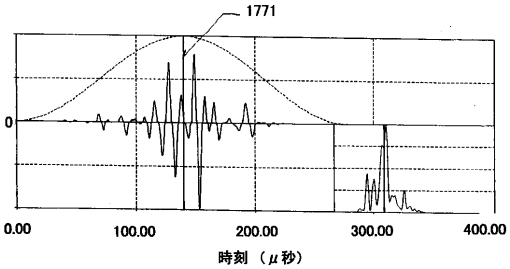
【図２３４】



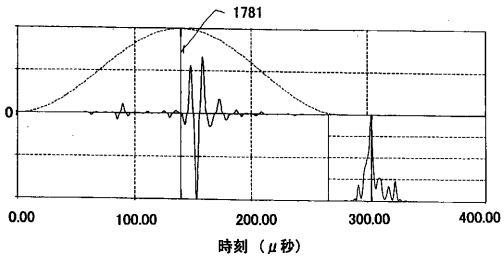
【図２３５】



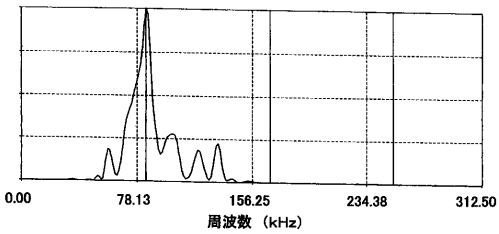
【図２３６】



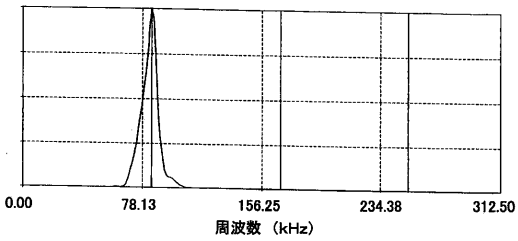
【図２３７】



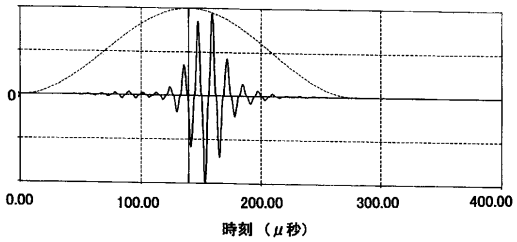
【図２３８】



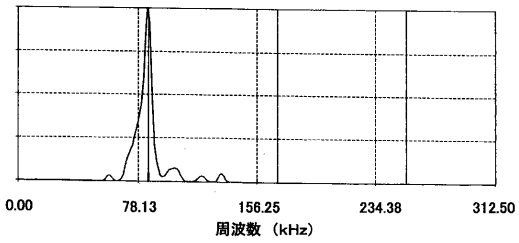
【図２３９】



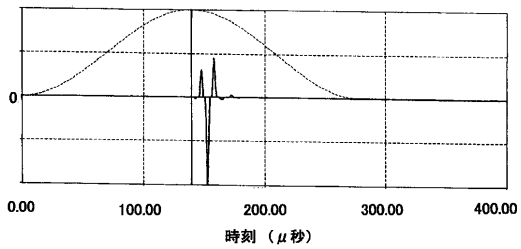
【図２４０】



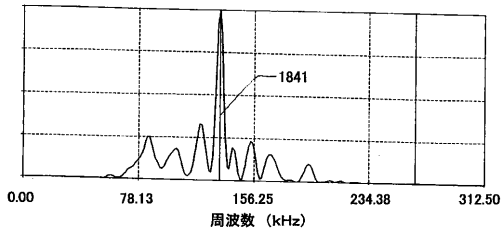
【図２４１】



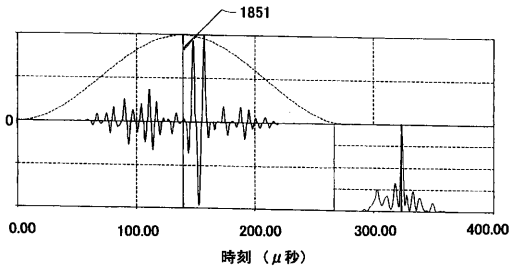
【図２４２】



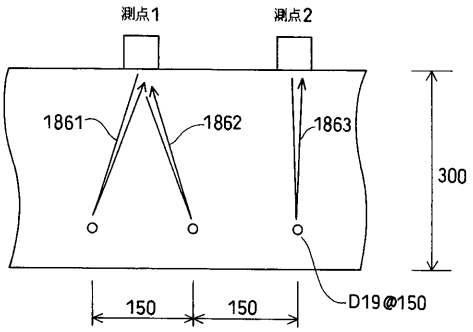
【図２４３】



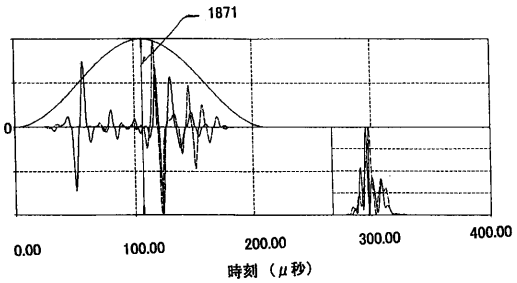
【図２４４】



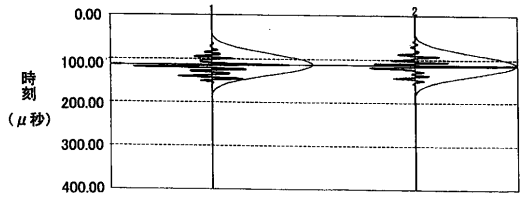
【図２４５】



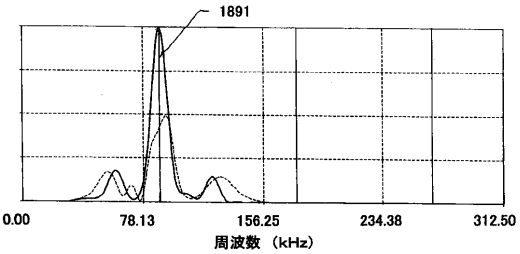
【図２４６】



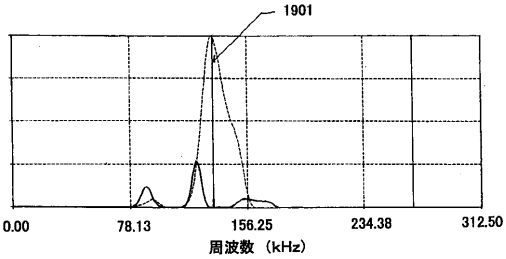
【図２４７】



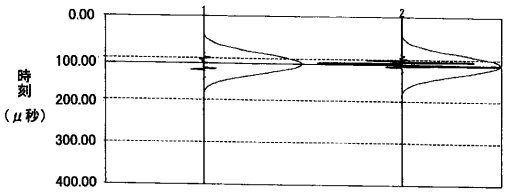
【図２４８】



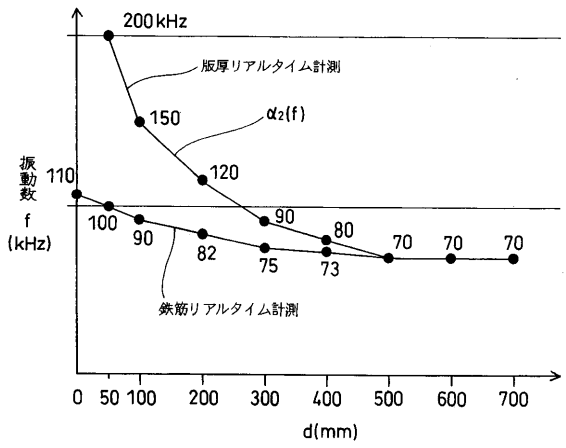
【図２４９】



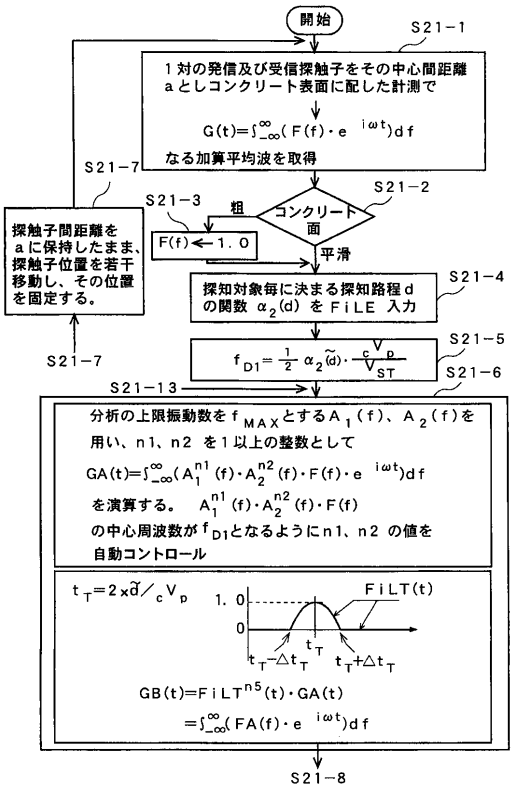
【図２５０】



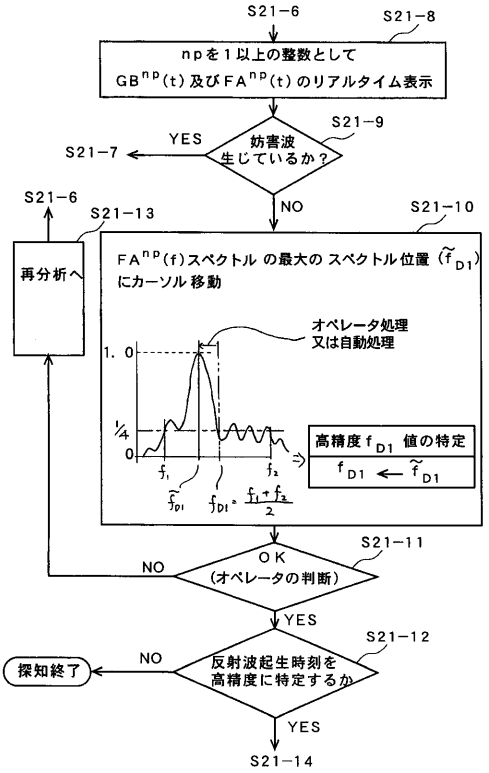
【図２５１】



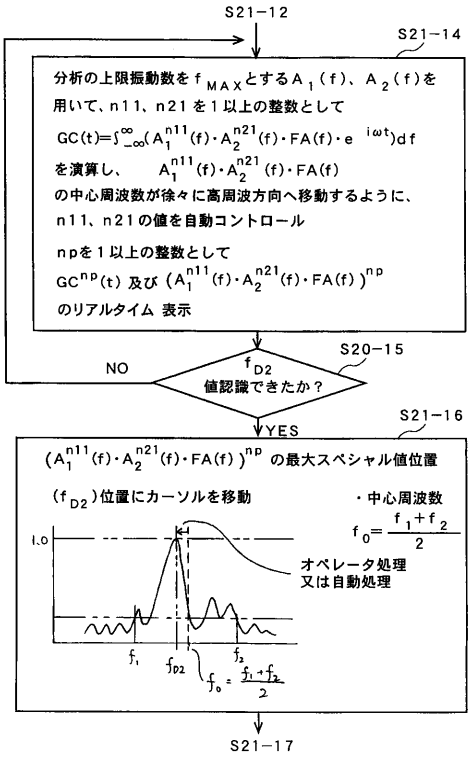
【図２５２】



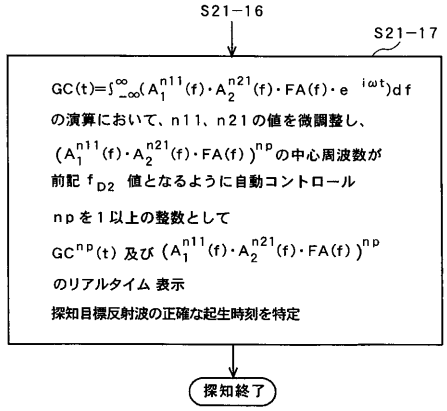
【図２５３】



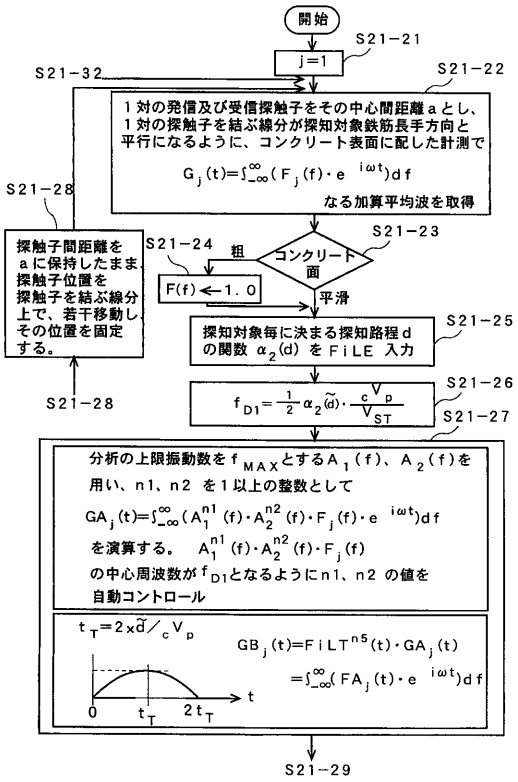
【図２５４】



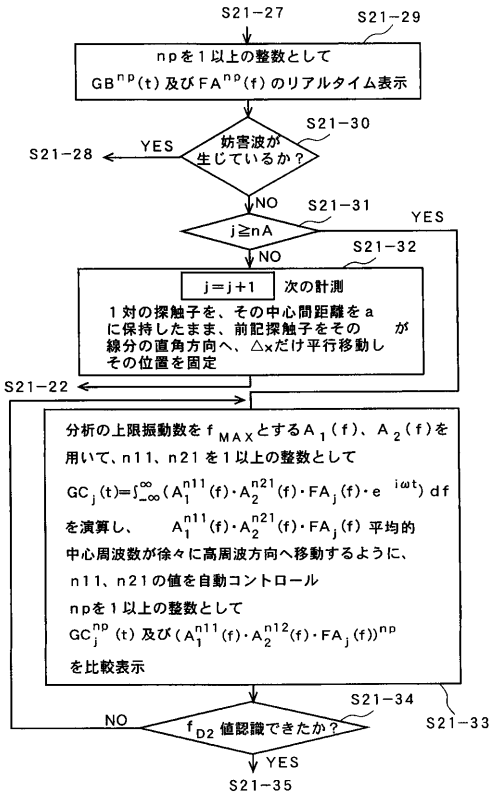
【図２５５】



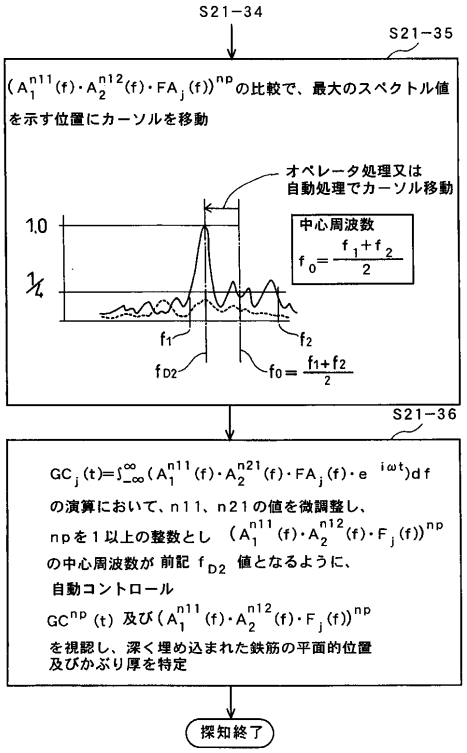
【図２５６】



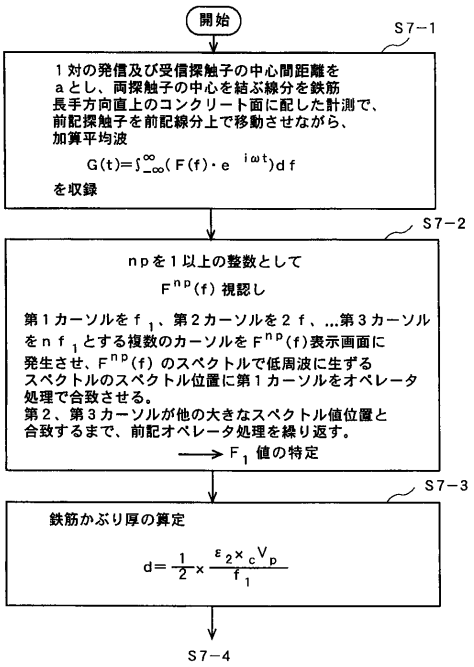
【図２５７】



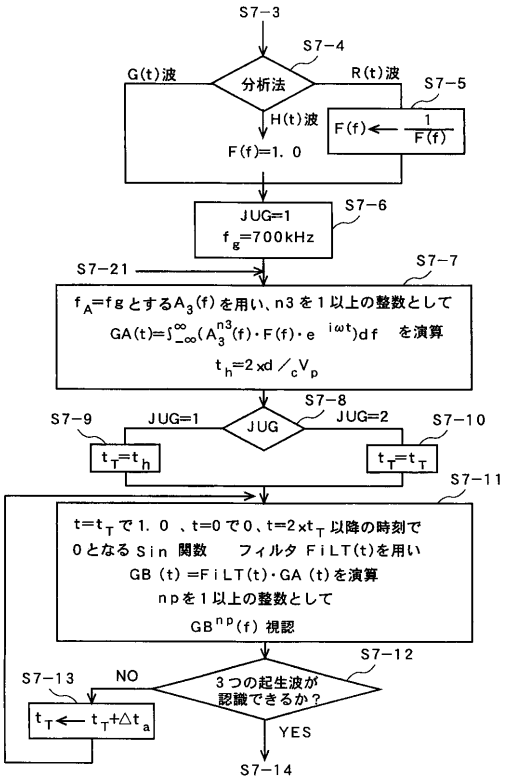
【図２５８】



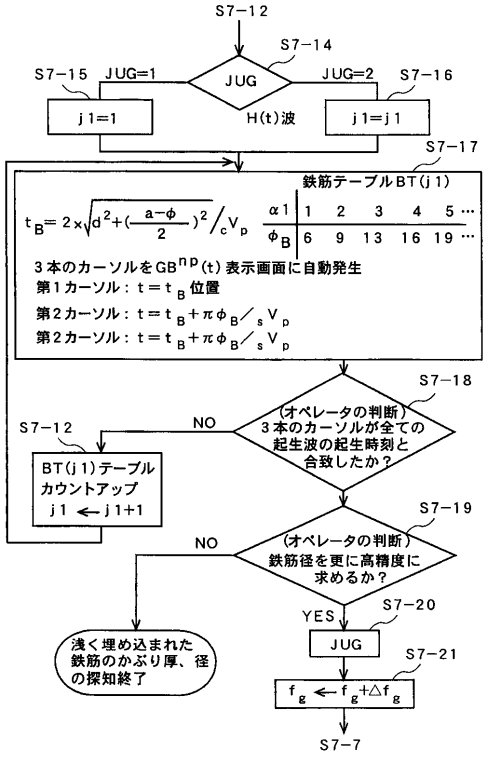
【図２５９】



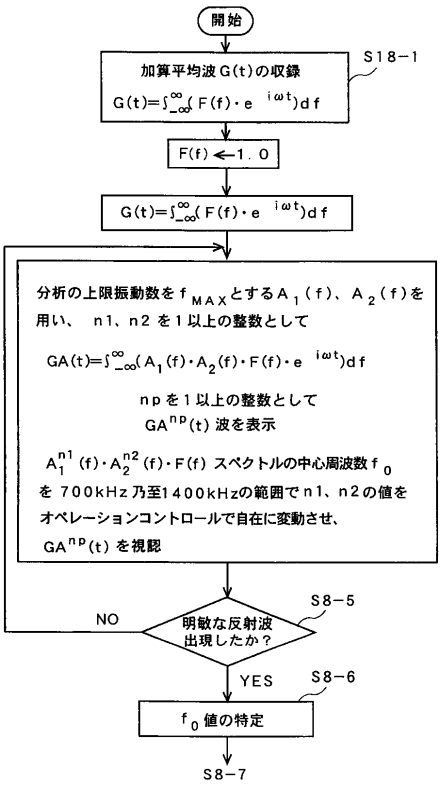
【図２６０】



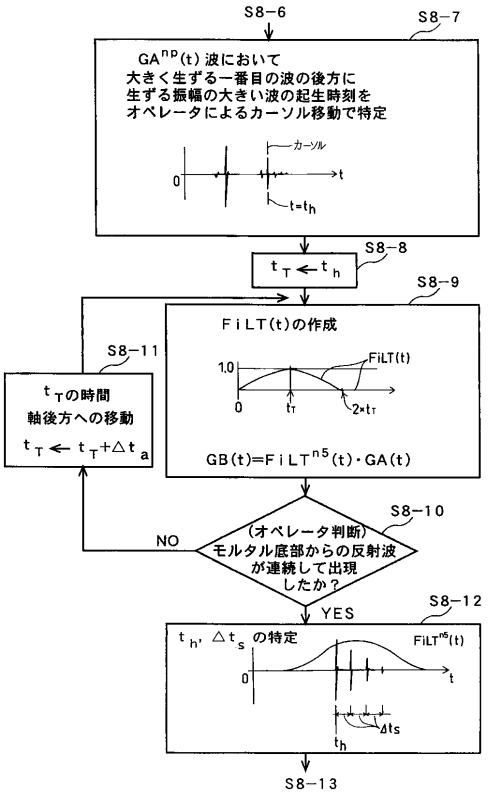
【図２６１】



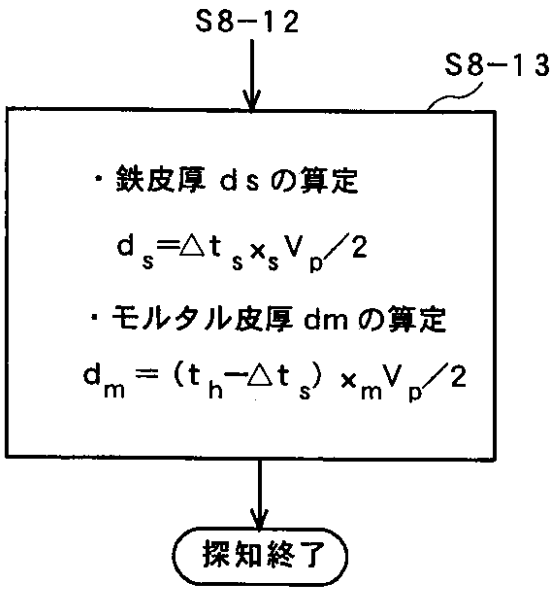
【図２６２】



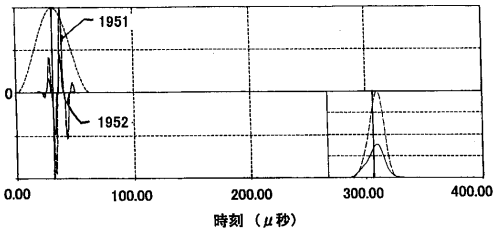
【図２６３】



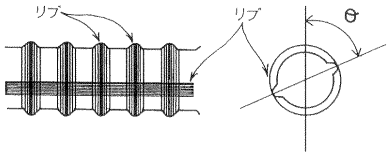
【図２６４】



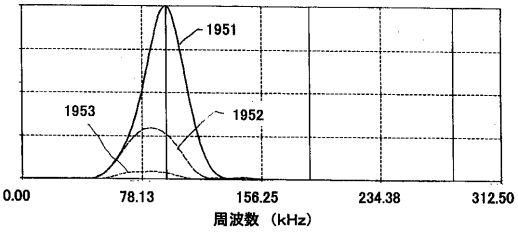
【図２６５】



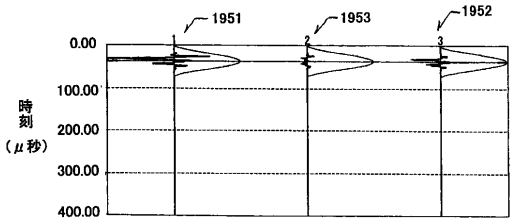
【図２６６】



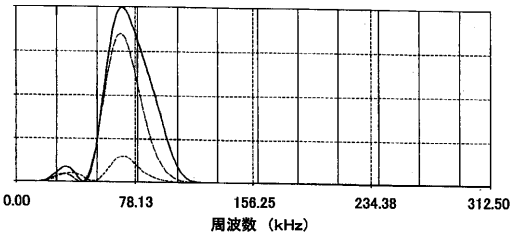
【図２６７】



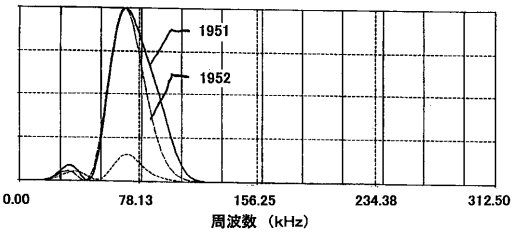
【図２６８】



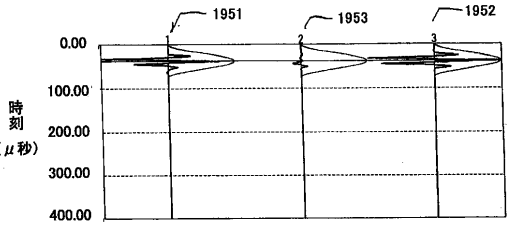
【図２６９】



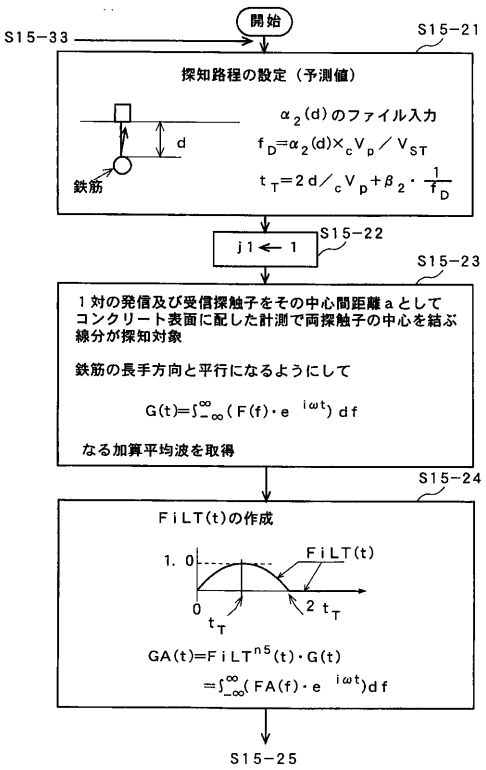
【図２７０】



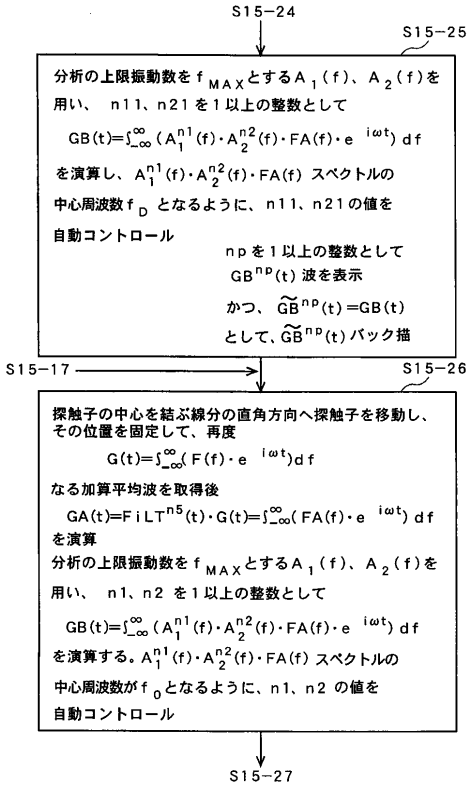
【図２７１】



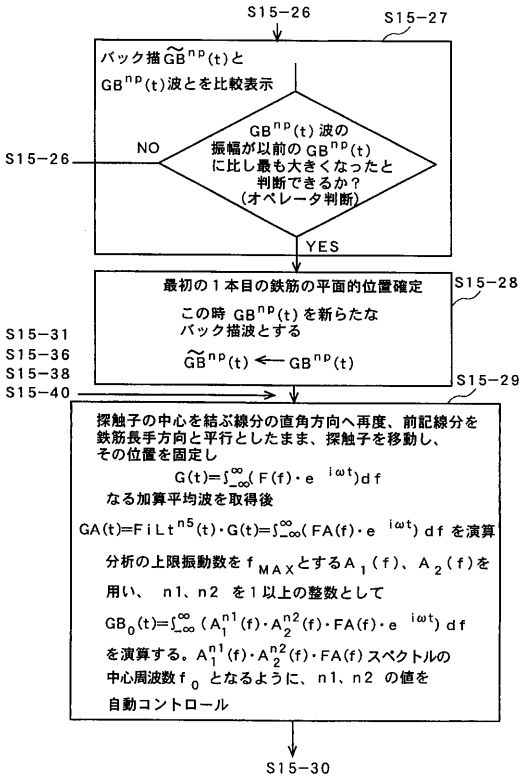
【図２７２】



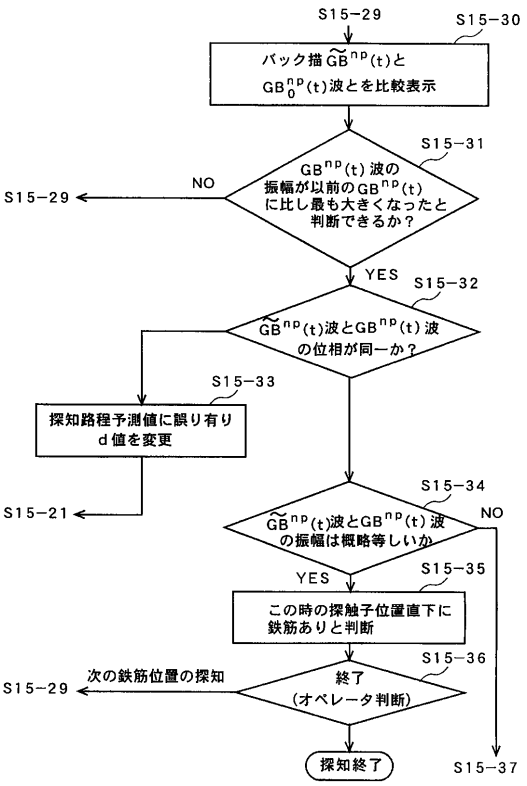
【図２７３】



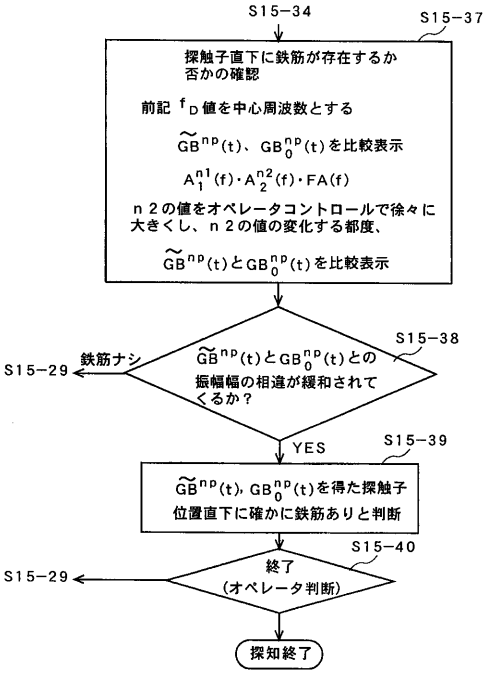
【図２７４】



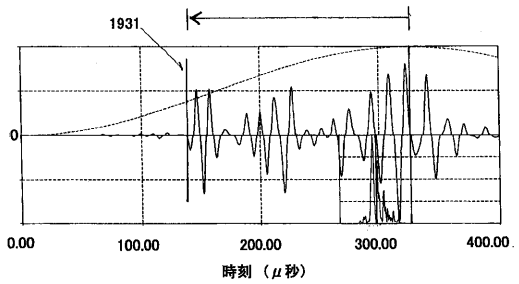
【図２７５】



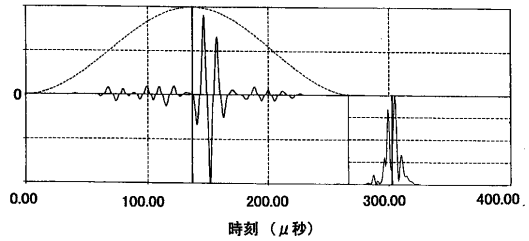
【図２７６】



【図２７７】

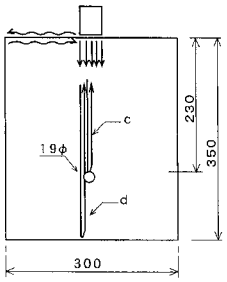


【図２７８】

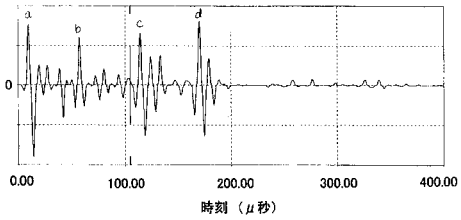


【手続補正書】
【提出日】平成19年4月18日(2007.4.18)
【手続補正１】
【補正対象書類名】図面
【補正対象項目名】全図
【補正方法】変更
【補正の内容】

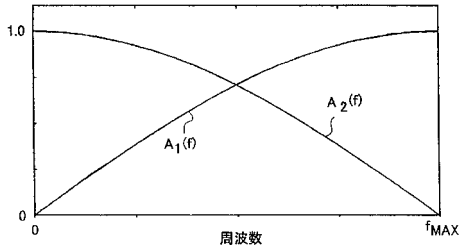
【図１】



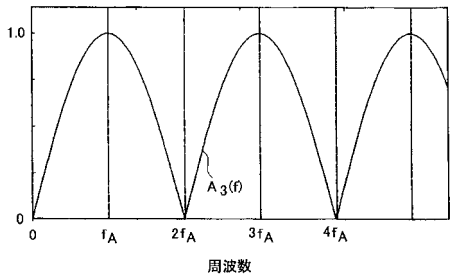
【図２】



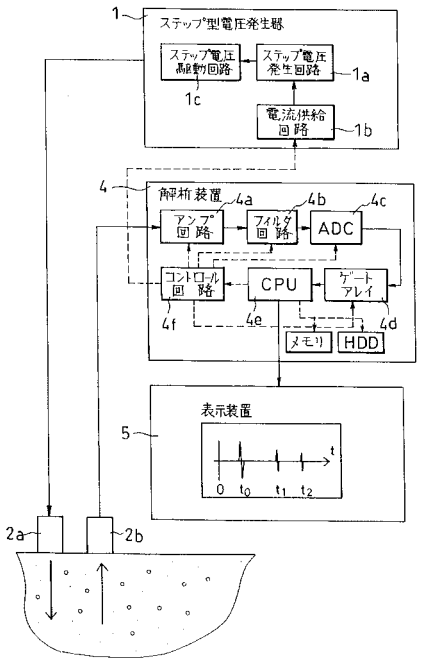
【図３】



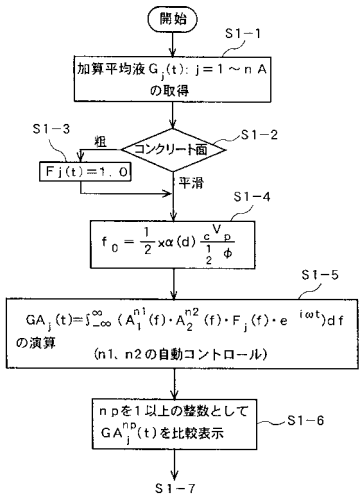
【図４】



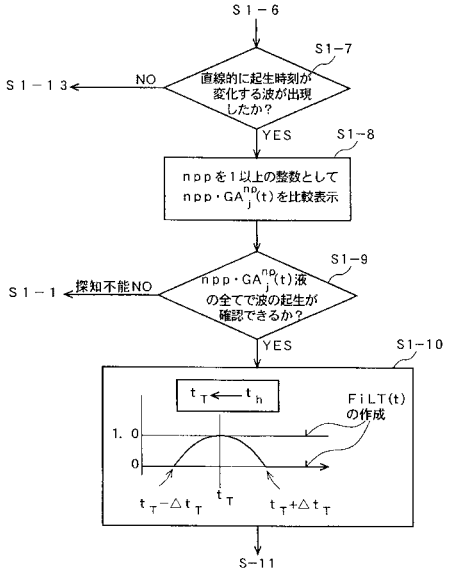
【図５】



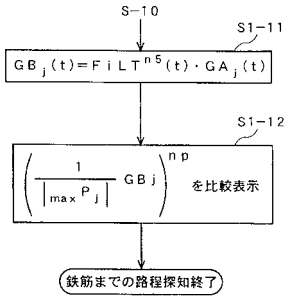
【図６】



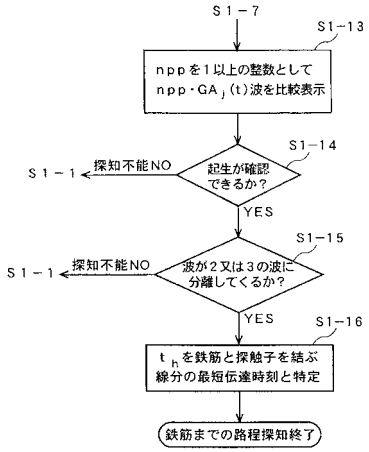
【図７】



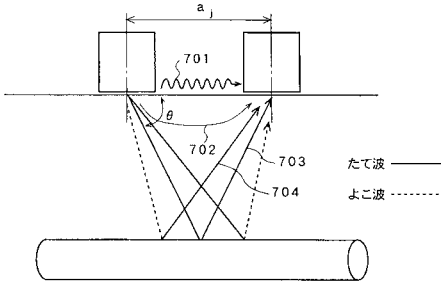
【図８】



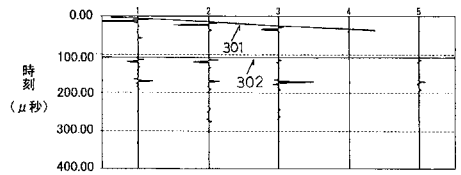
【図９】



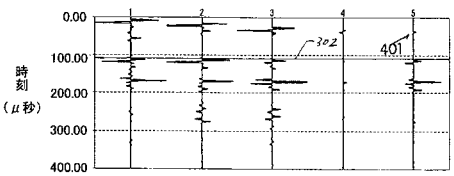
【図１０】



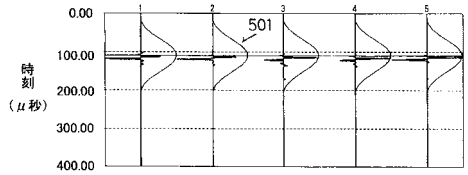
【図１１】



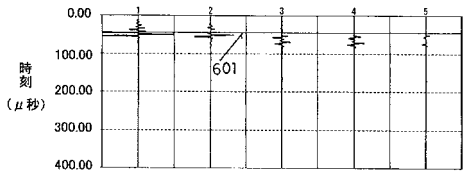
【図１２】



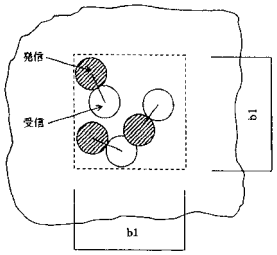
【図１３】



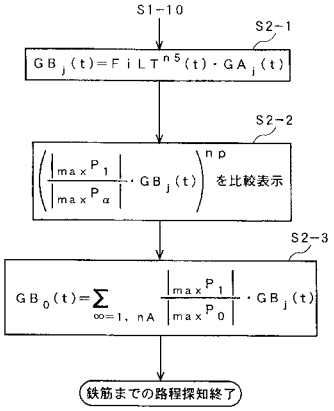
【図１４】



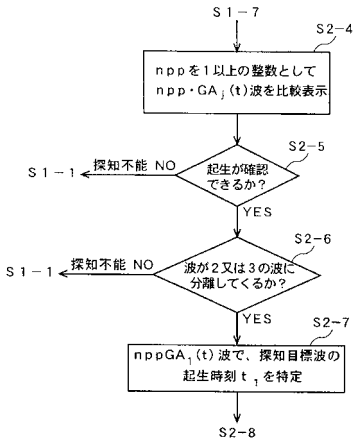
【図１５】



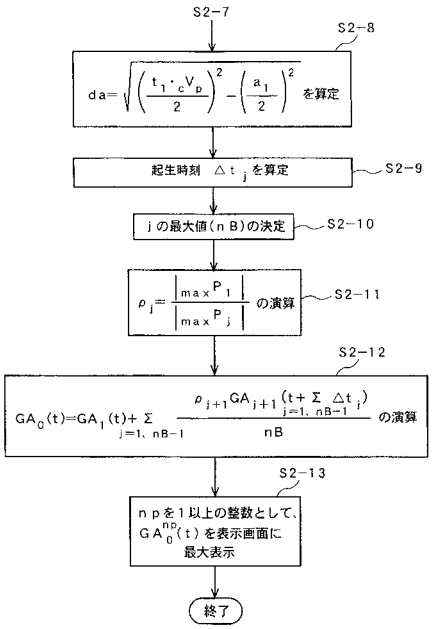
【図１６】



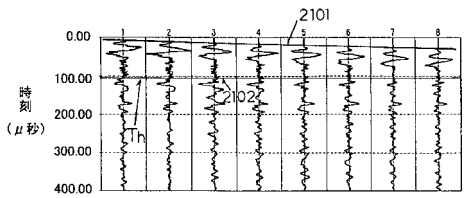
【図１７】



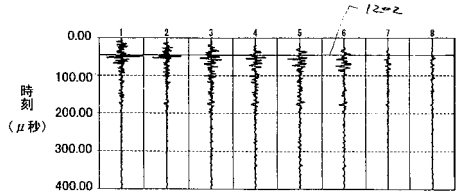
【図１８】



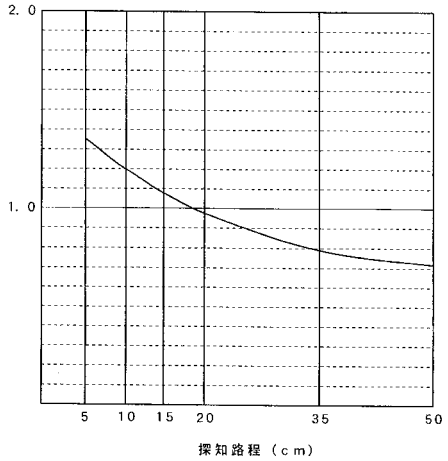
【図１９】



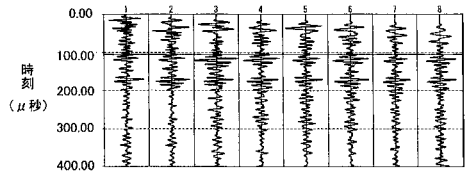
【図２０】



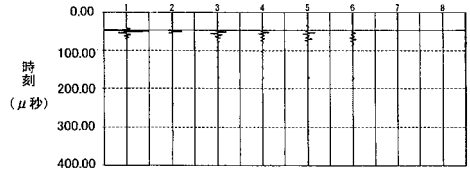
【図２１】



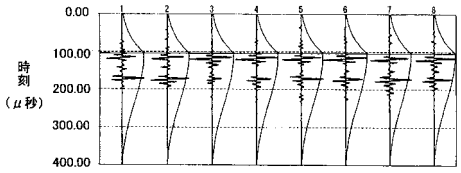
【図２２】



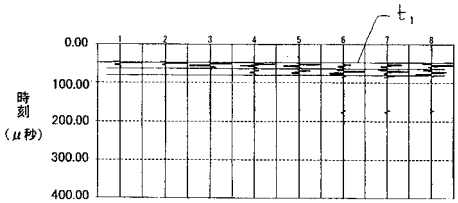
【図２３】



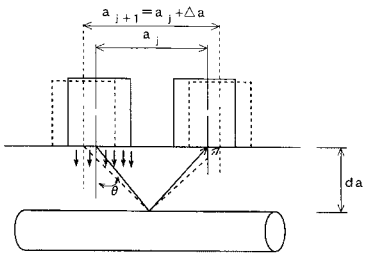
【図２４】



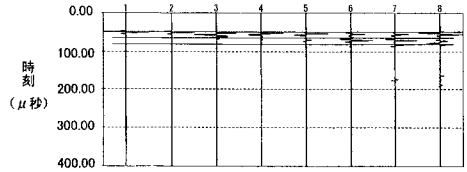
【図２５】



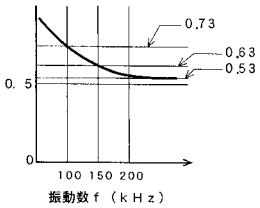
【図２６】



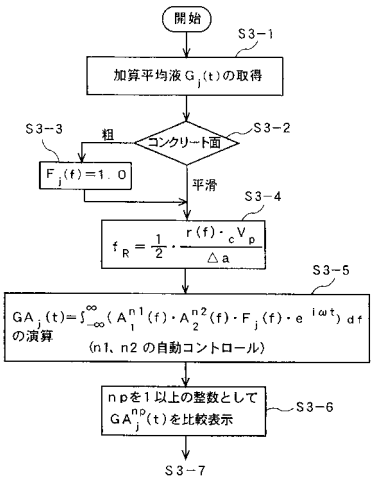
【図２７】



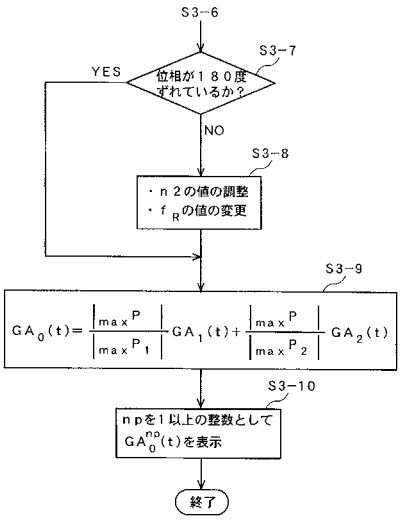
【図２８】



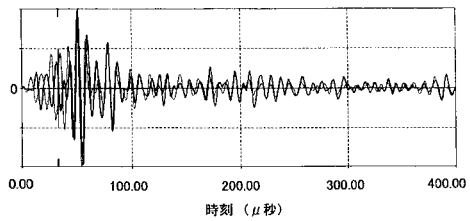
【図２９】



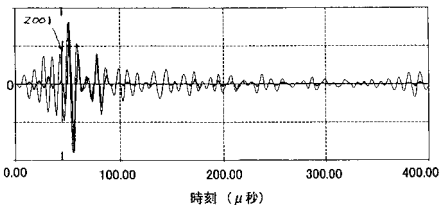
【図３０】



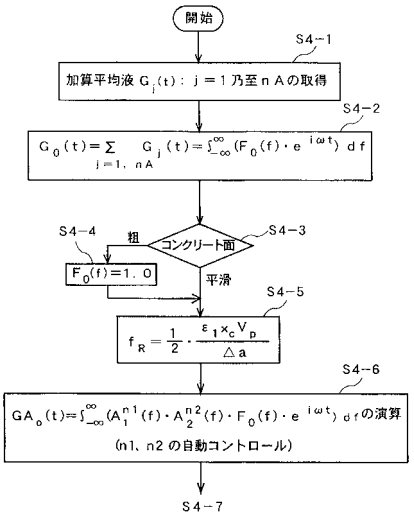
【図３１】



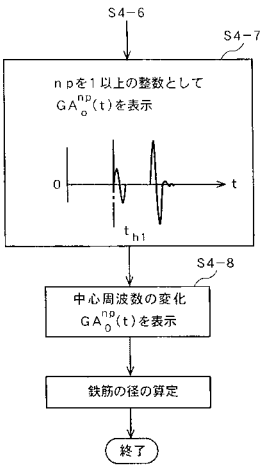
【図３２】



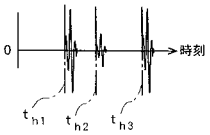
【図３３】



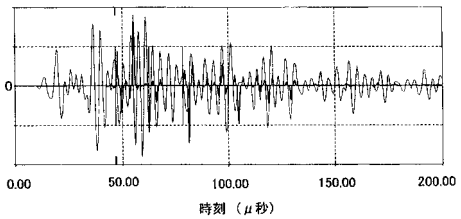
【図３４】



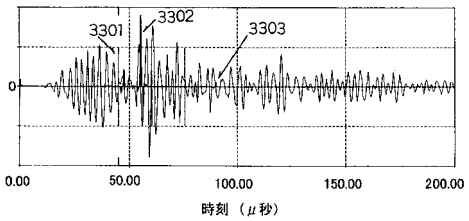
【図３５】



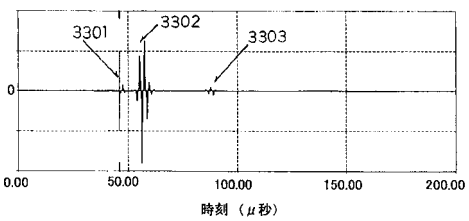
【図３６】



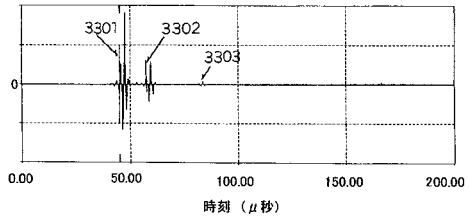
【図３７】



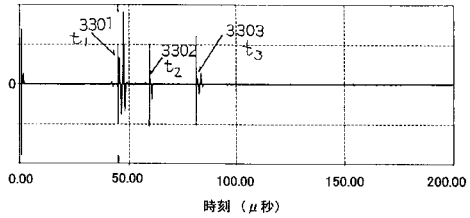
【図３８】



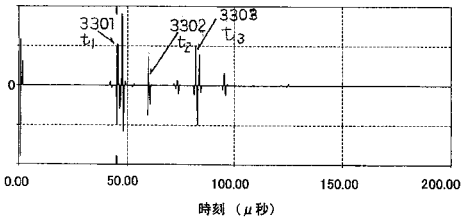
【図３９】



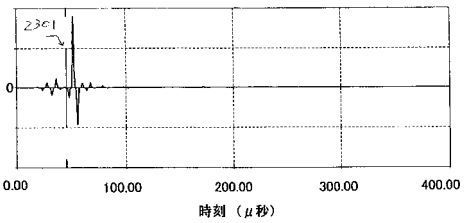
【図４０】



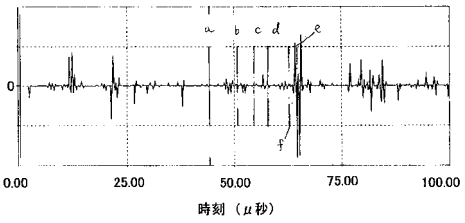
【図４１】



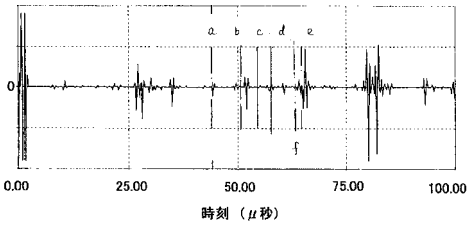
【図４２】



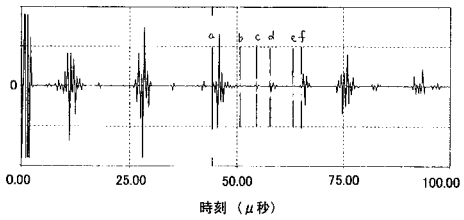
【図４３】



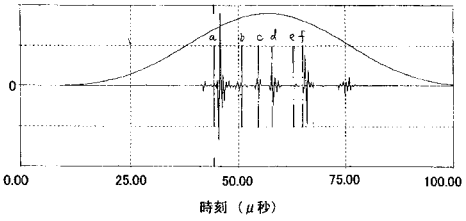
【図４４】



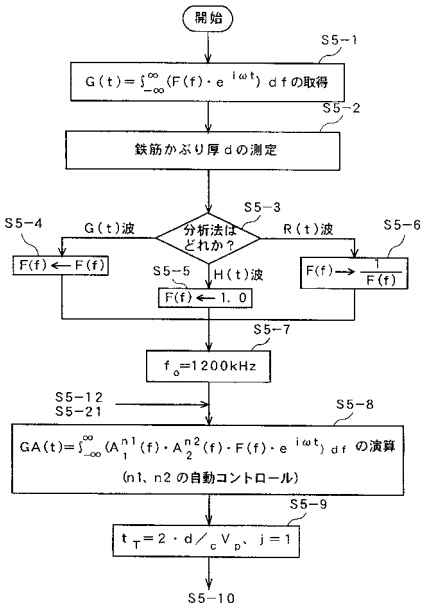
【図４５】



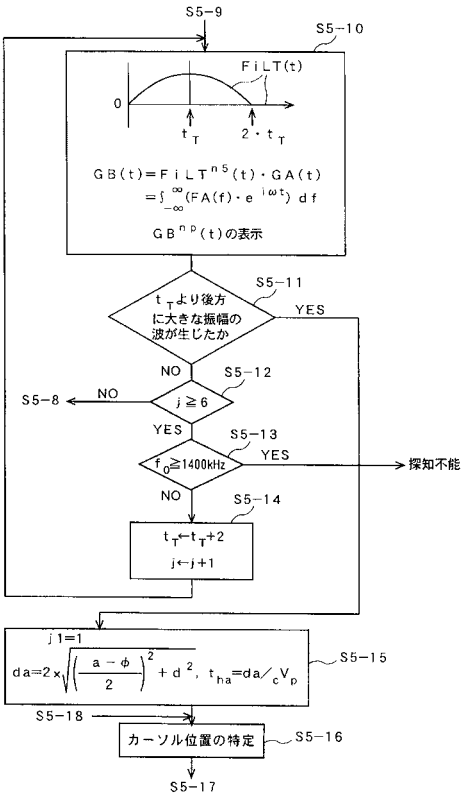
【図４６】



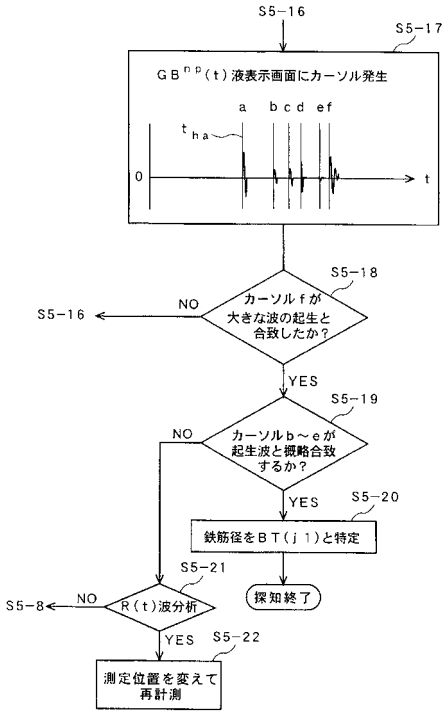
【図４７】



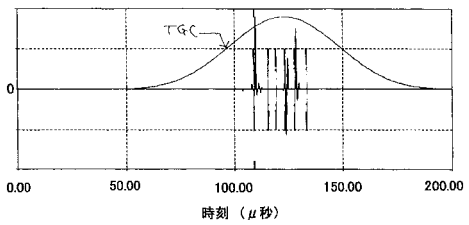
【図４８】



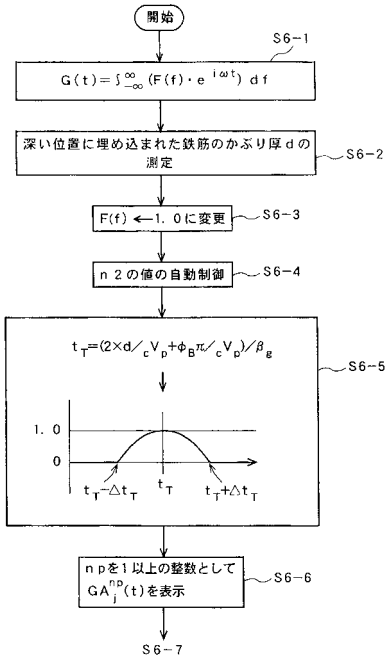
【図４９】



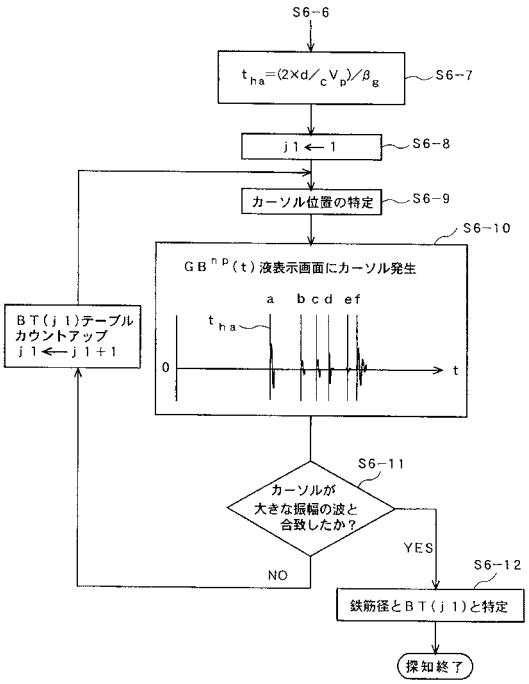
【図５０】



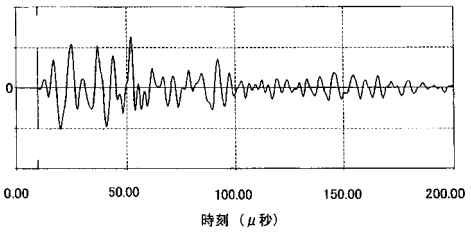
【図５１】



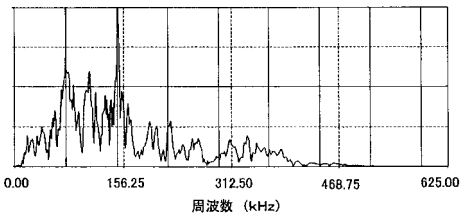
【図５２】



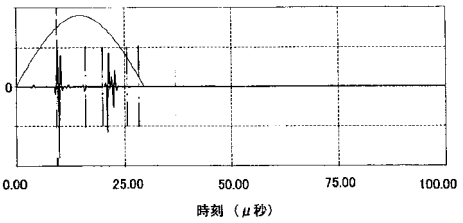
【図５３】



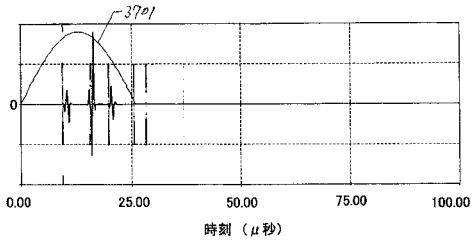
【図５４】



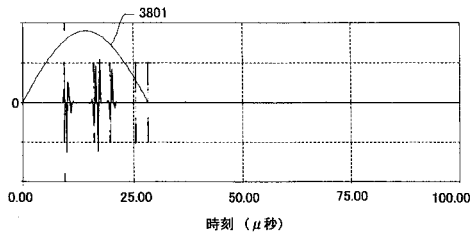
【図５５】



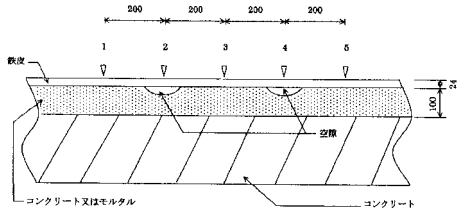
【図５６】



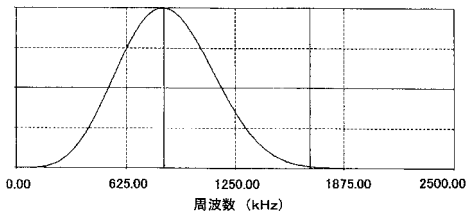
【図５７】



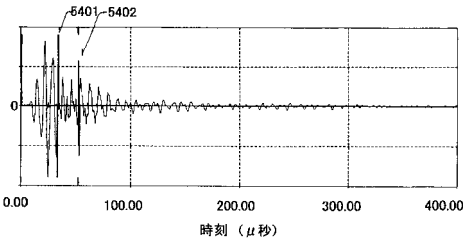
【図５８】



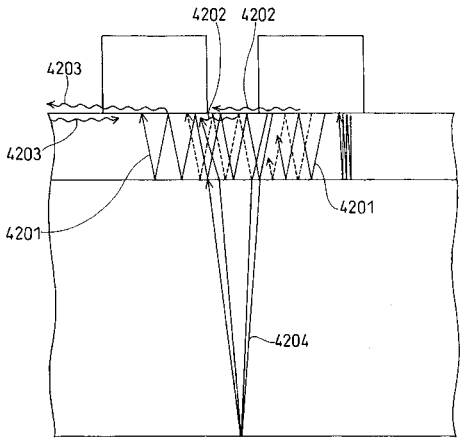
【図５９】



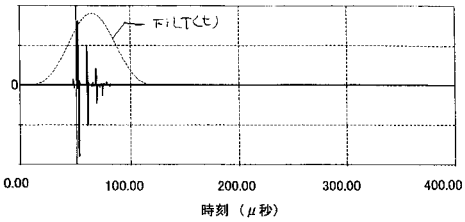
【図６０】



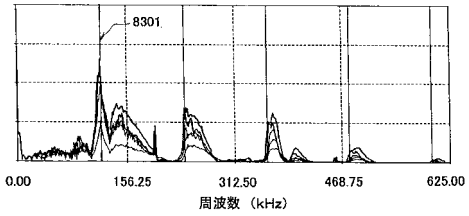
【図６１】



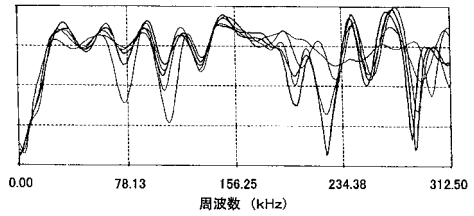
【図６２】



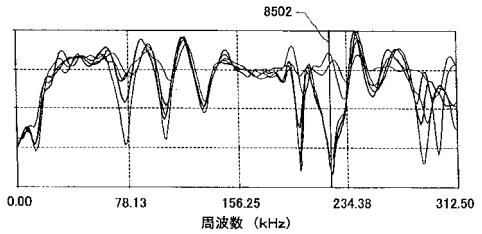
【図６３】



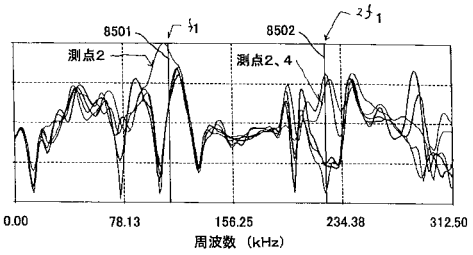
【図６４】



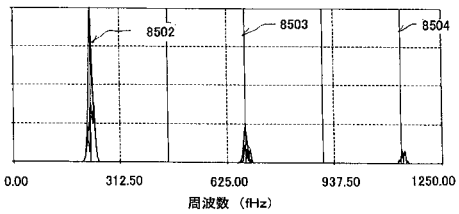
【図６５】



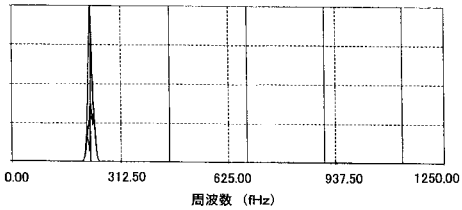
【図６６】



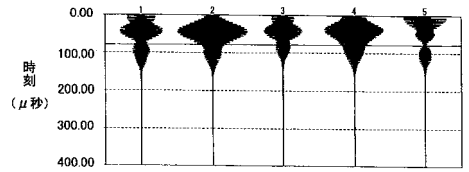
【図６７】



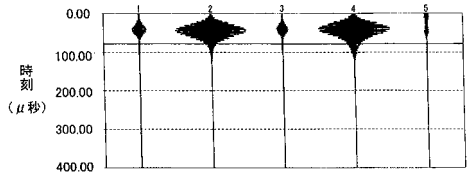
【図６８】



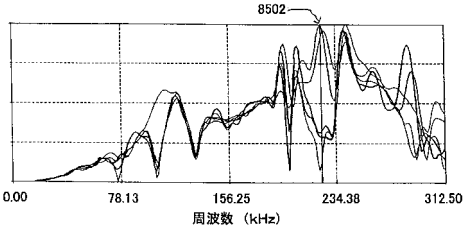
【図６９】



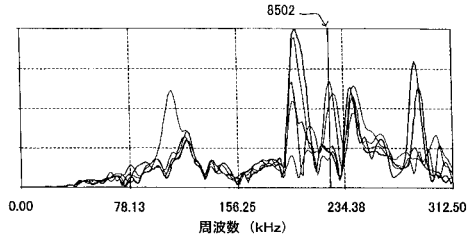
【図７０】



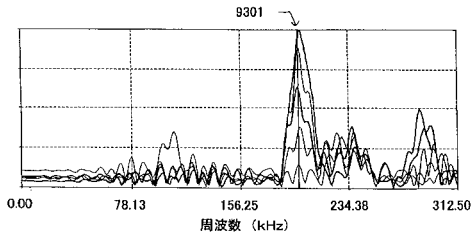
【図７１】



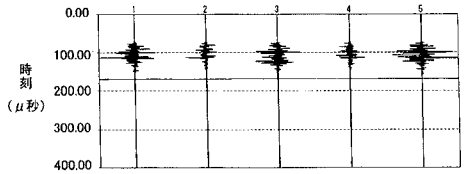
【図７２】



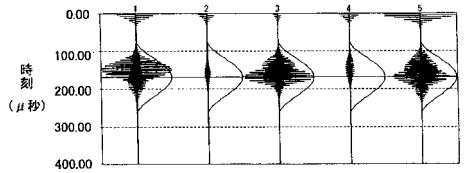
【図７３】



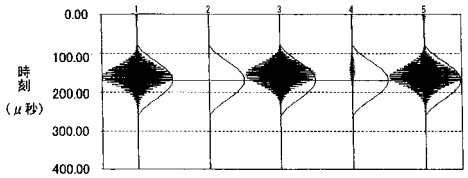
【図７４】



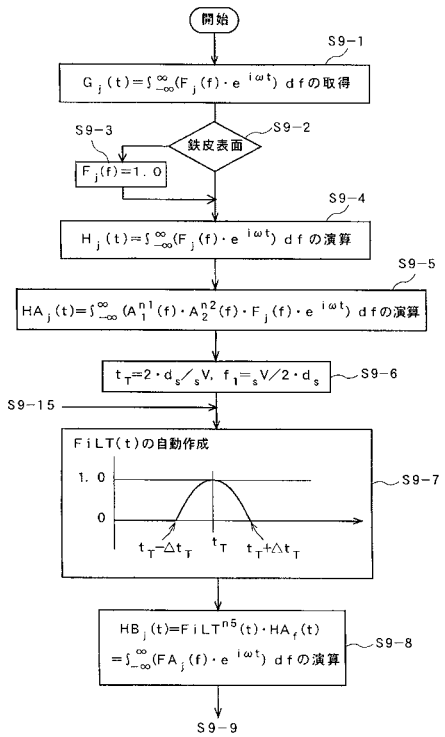
【図７５】



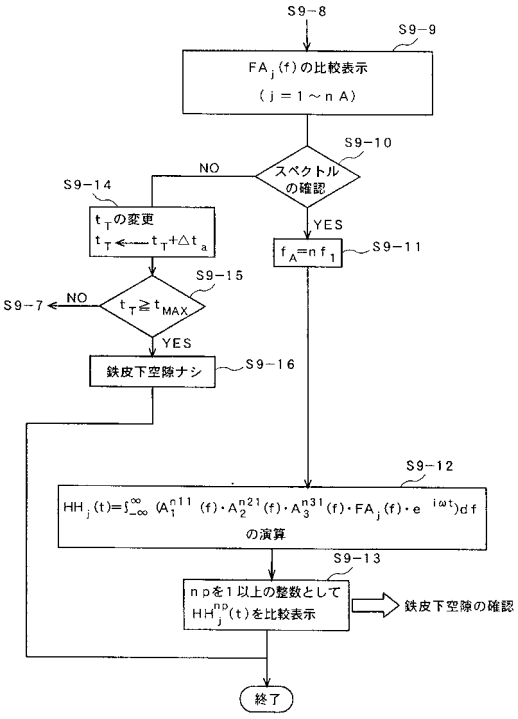
【図７６】



【図７７】

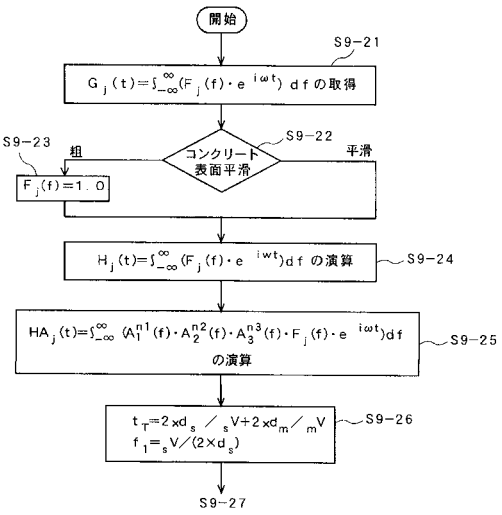


【図７８】

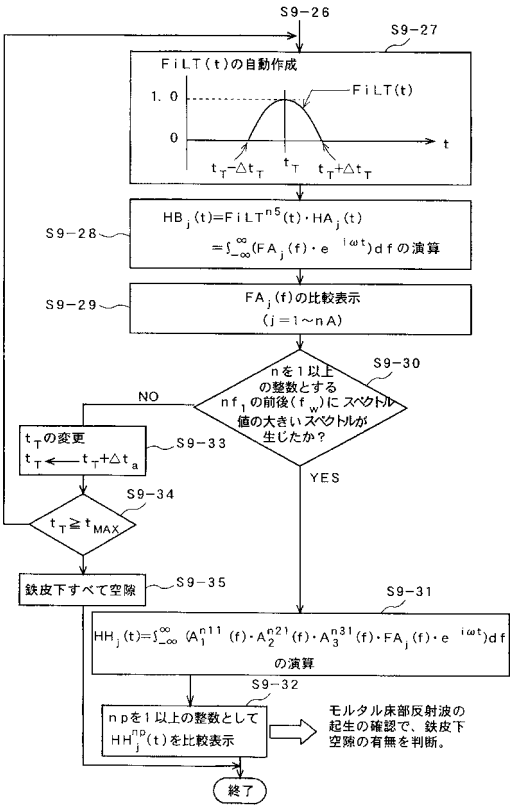


【図７８】

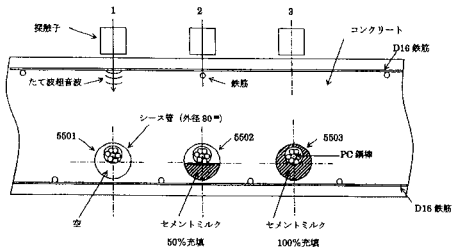
【図７９】



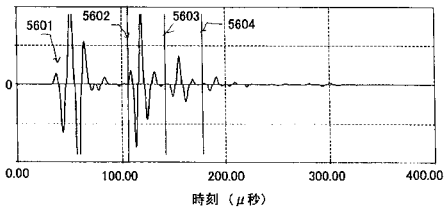
【図８０】



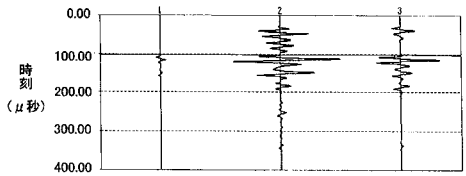
【図８１】



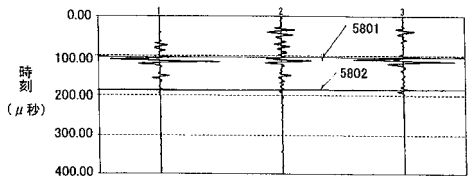
【図８２】



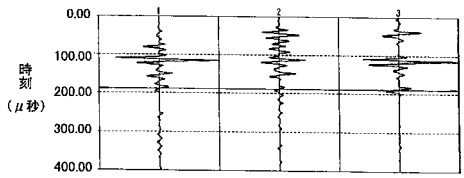
【図８３】



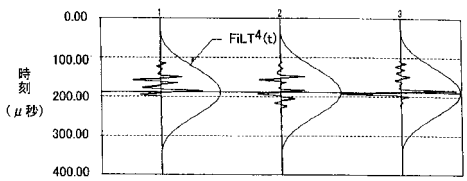
【図８４】



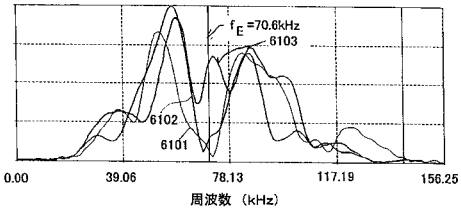
【図８５】



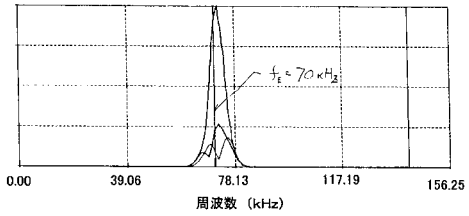
【図８６】



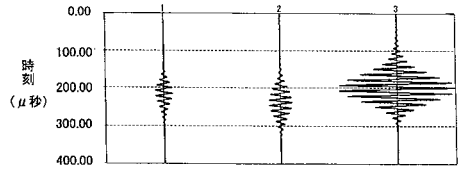
【図８７】



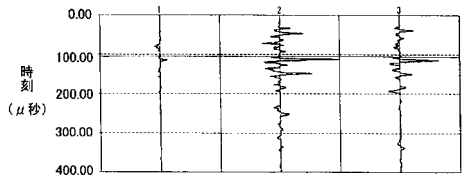
【図８８】



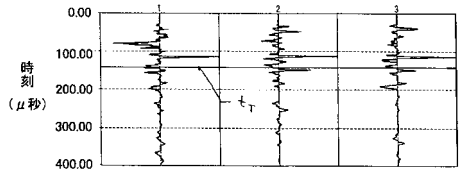
【図８９】



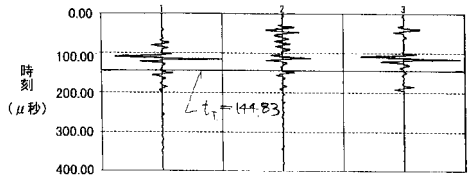
【図９０】



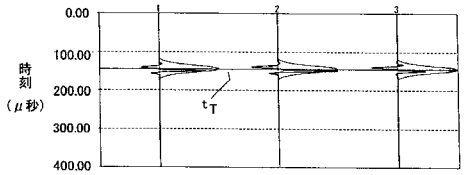
【図９１】



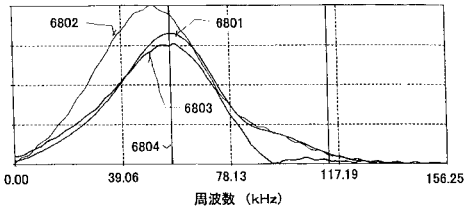
【図９２】



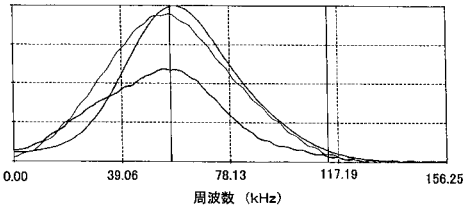
【図９３】



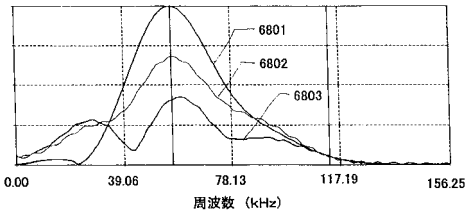
【図９４】



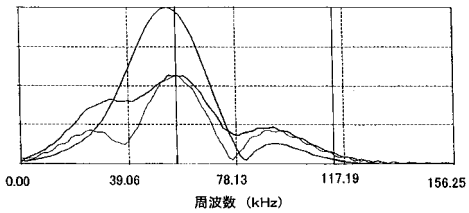
【図９５】



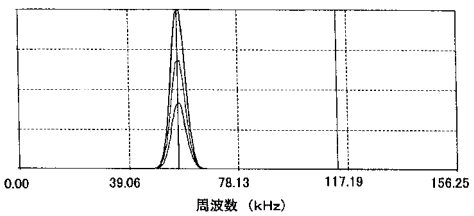
【図９６】



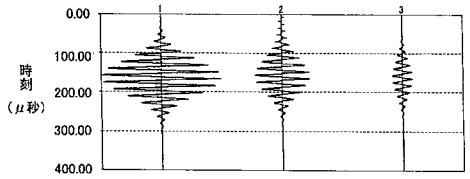
【図９７】



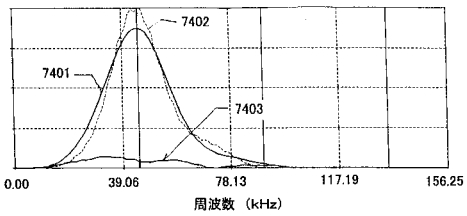
【図９８】



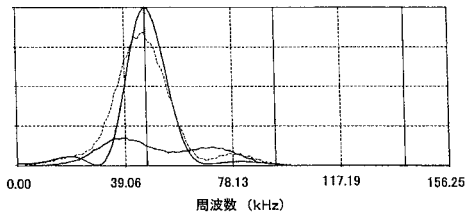
【図９９】



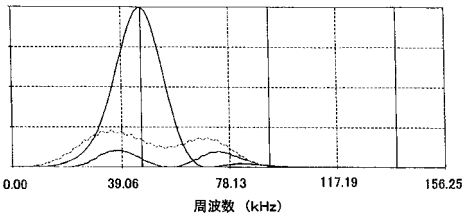
【図１００】



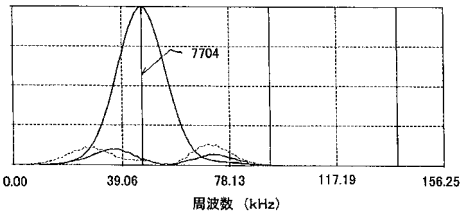
【図１０１】



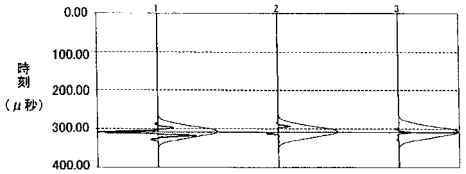
【図１０２】



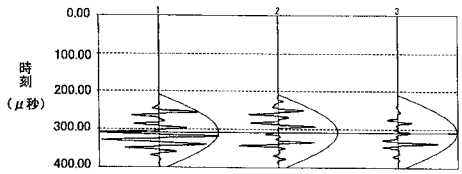
【図１０３】



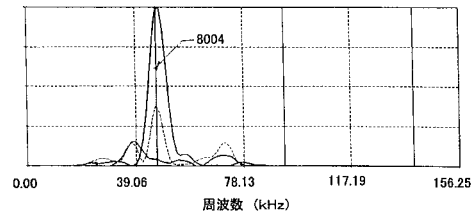
【図１０４】



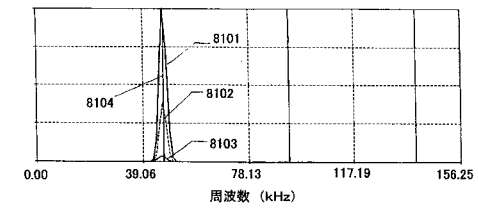
【図１０５】



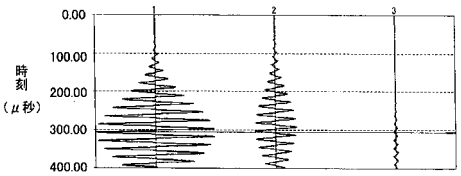
【図１０６】



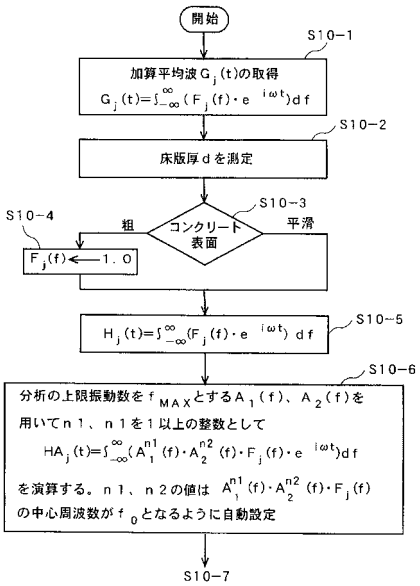
【図１０７】



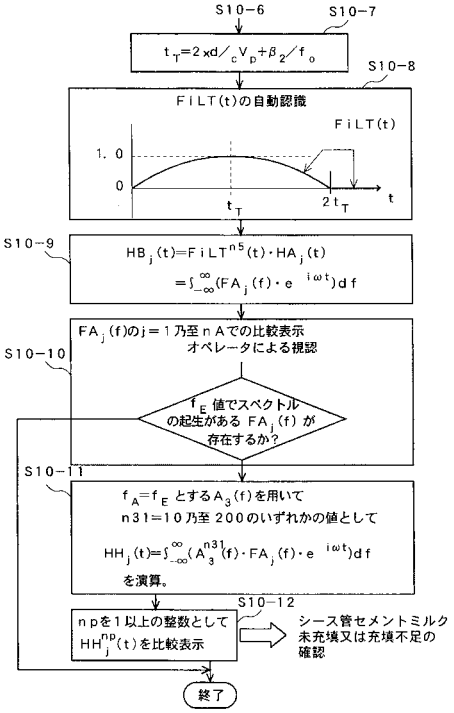
【図１０８】



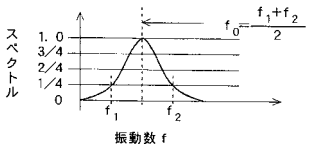
【図１０９】



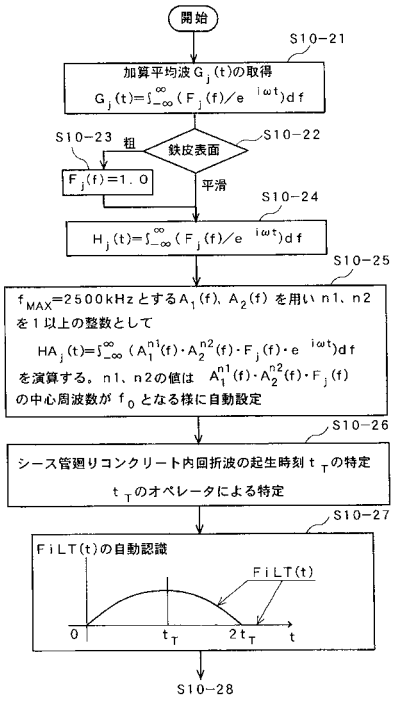
【図１１０】



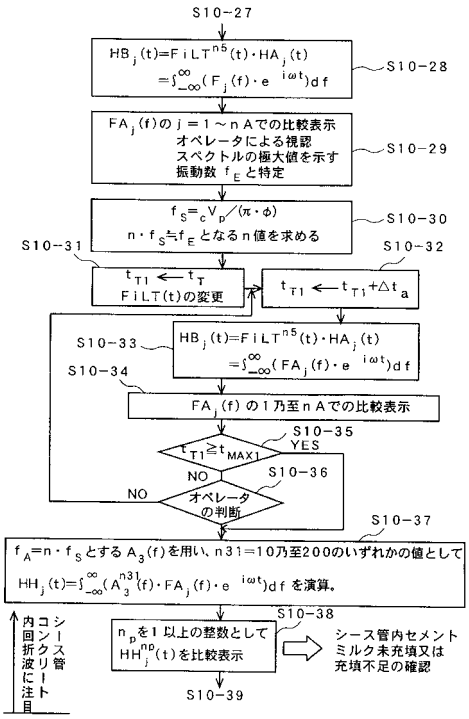
【図１１１】



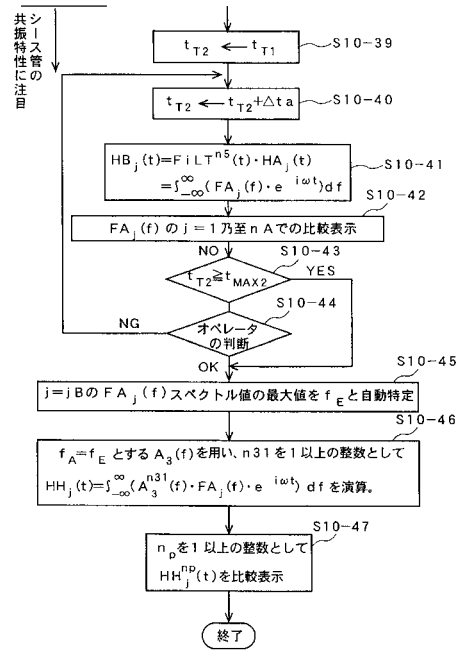
【図１１２】



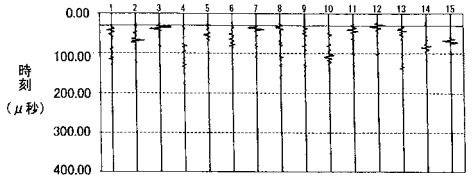
【図１１３】



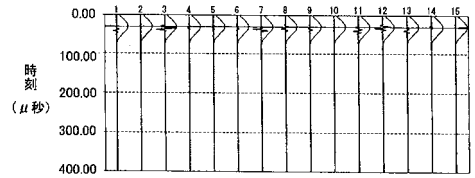
【図１１４】



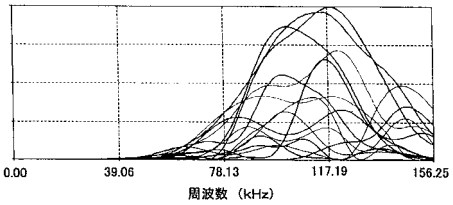
【図１１５】



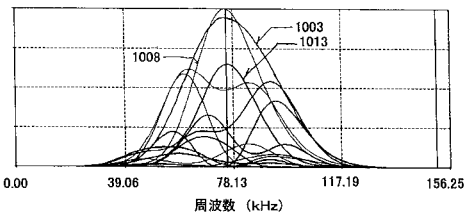
【図１１６】



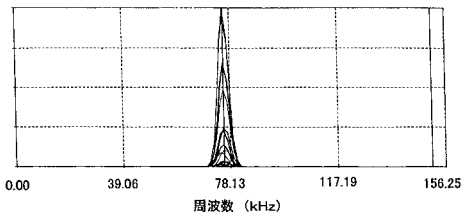
【図１１７】



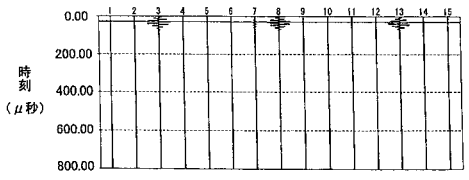
【図１１８】



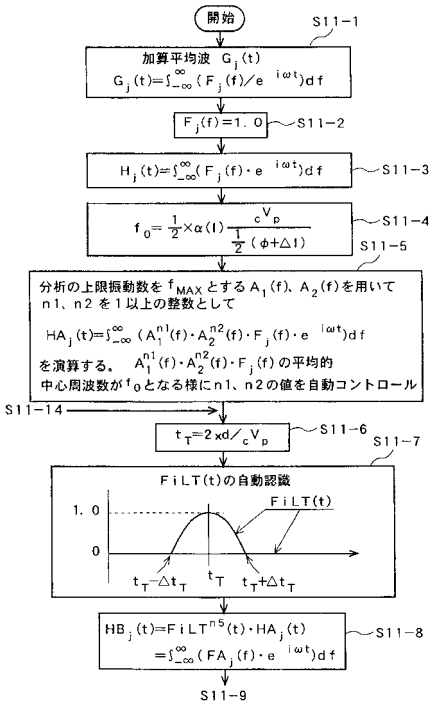
【図１１９】



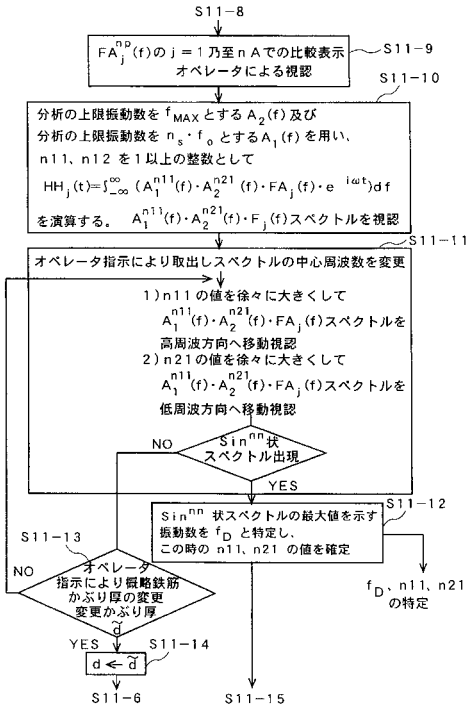
【図１２０】



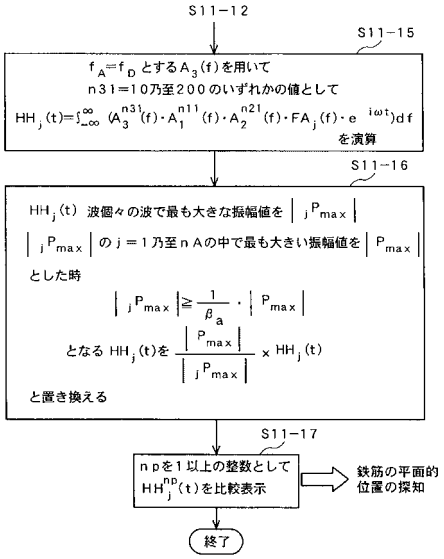
【図１２１】



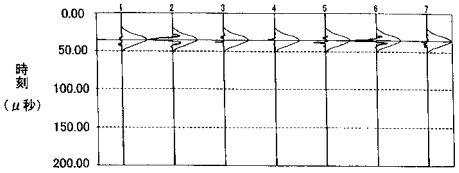
【図１２２】



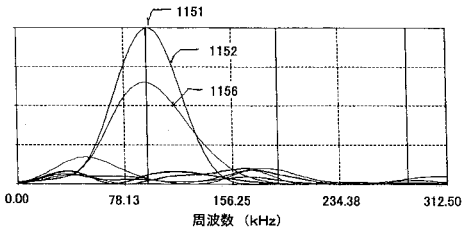
【図１２３】



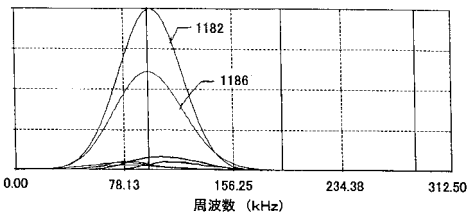
【図１２４】



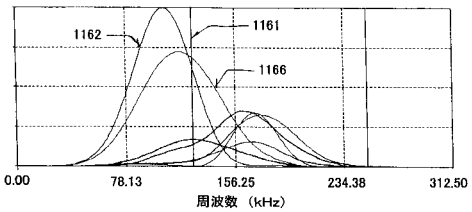
【図１２５】



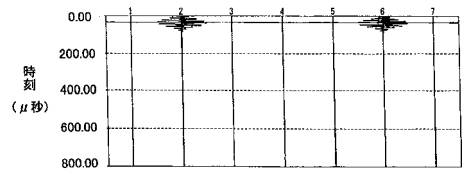
【図１２８】



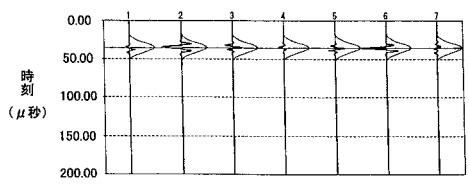
【図１２６】



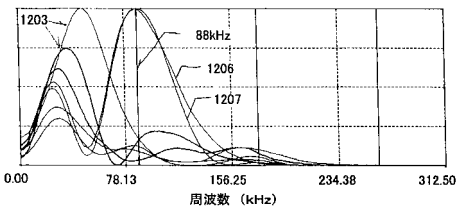
【図１２９】



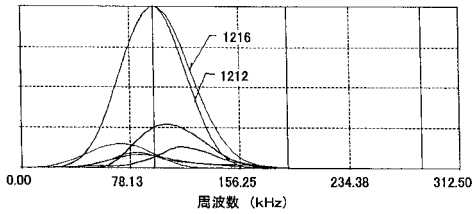
【図１２７】



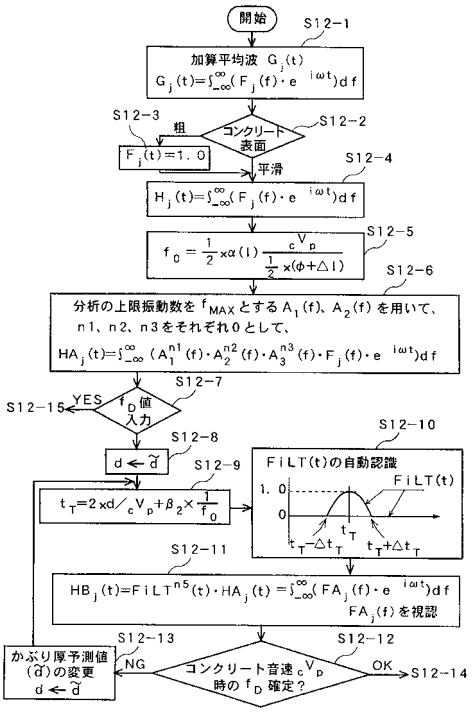
【図１３０】



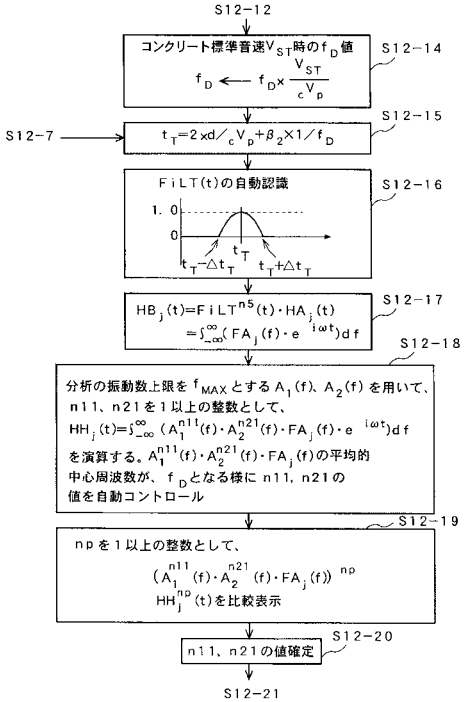
【図１３１】



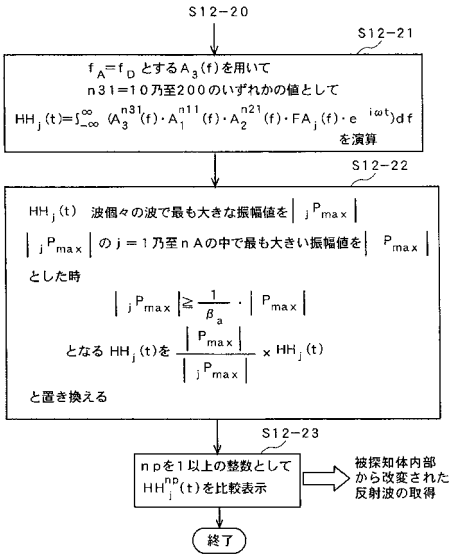
【図１３２】



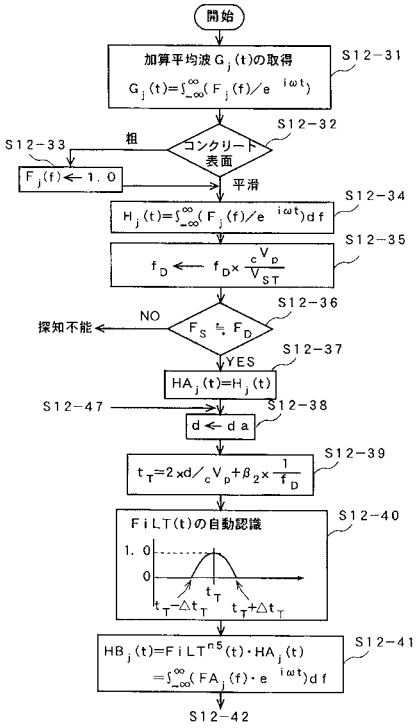
【図１３３】



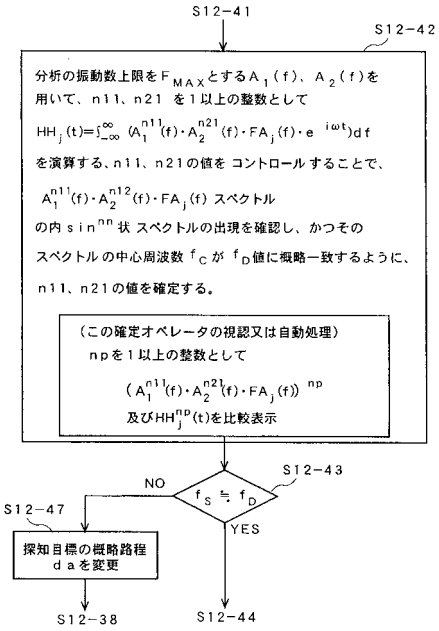
【図１３４】



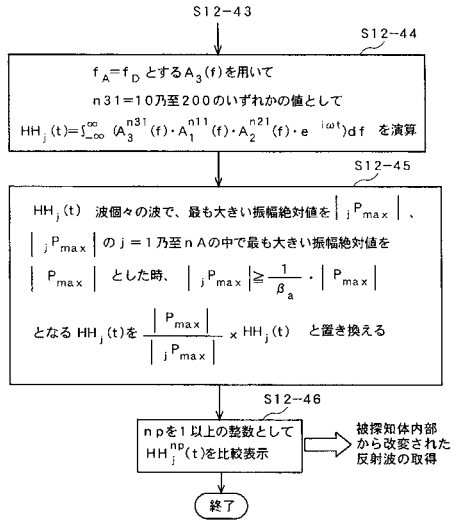
【図１３５】



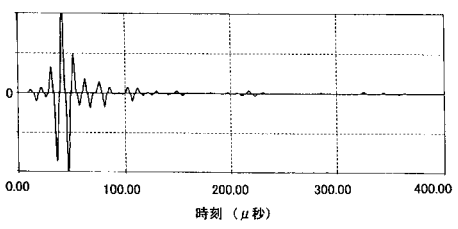
【図１３６】



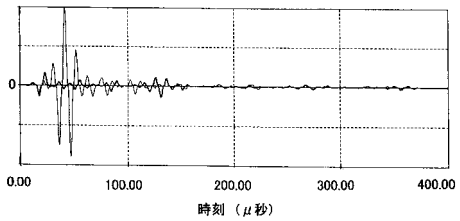
【図１３７】



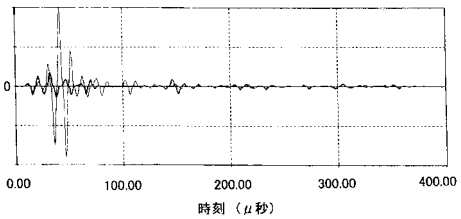
【図１３８】



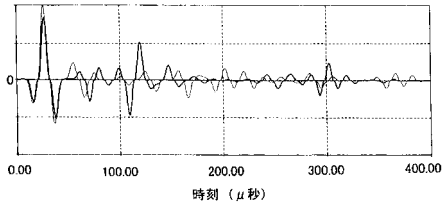
【図１３９】



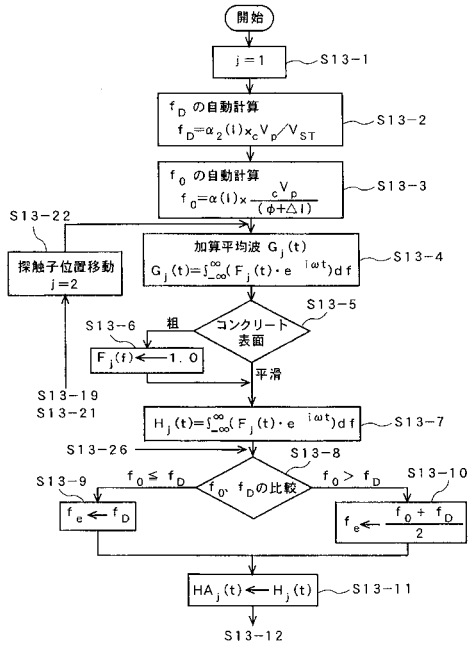
【図１４０】



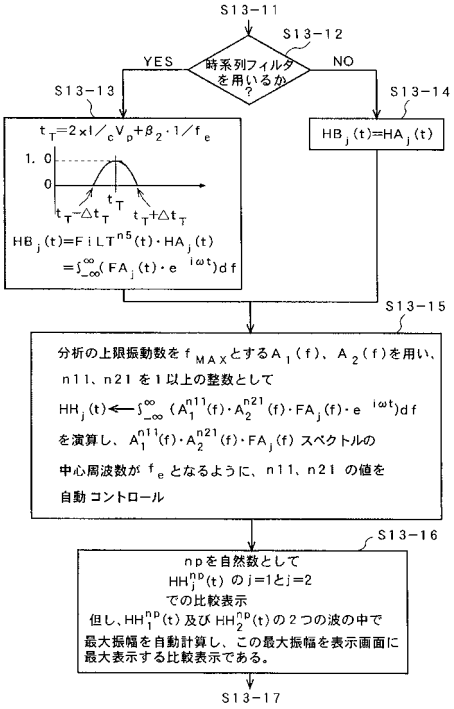
【図１４１】



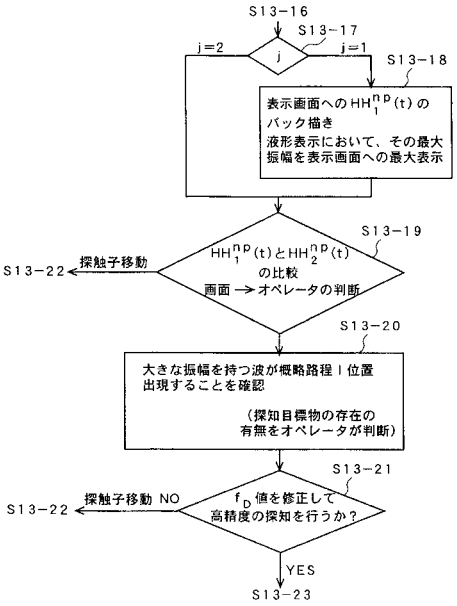
【図１４２】



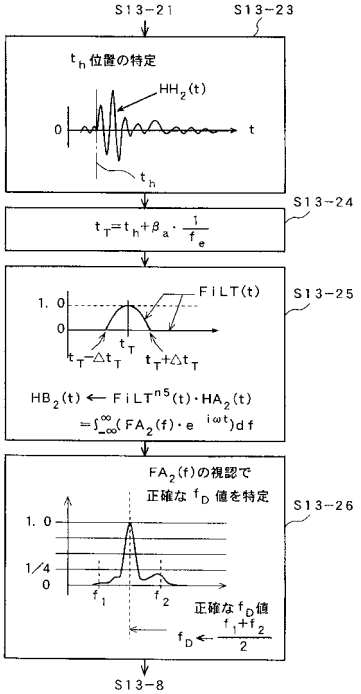
【図１４３】



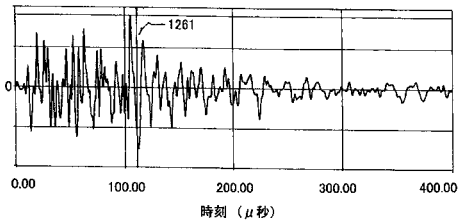
【図１４４】



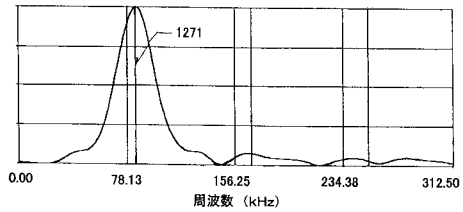
【図１４５】



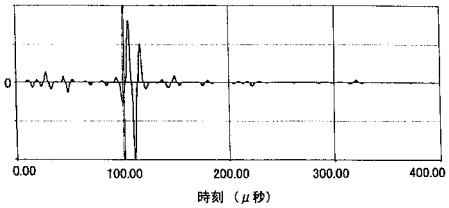
【図１４６】



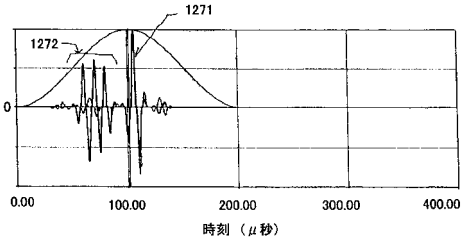
【図１４７】



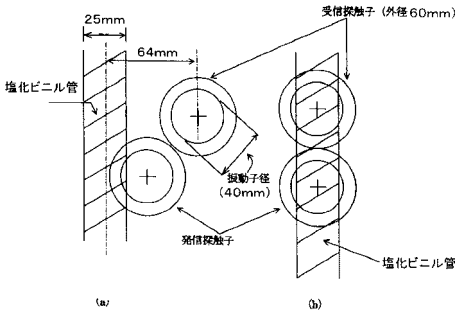
【図１４８】



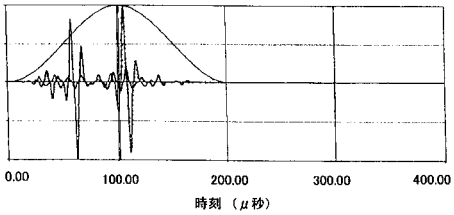
【図１４９】



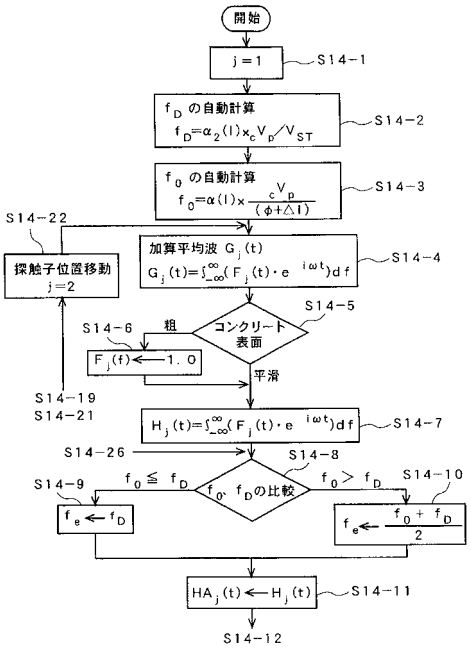
【図１５０】



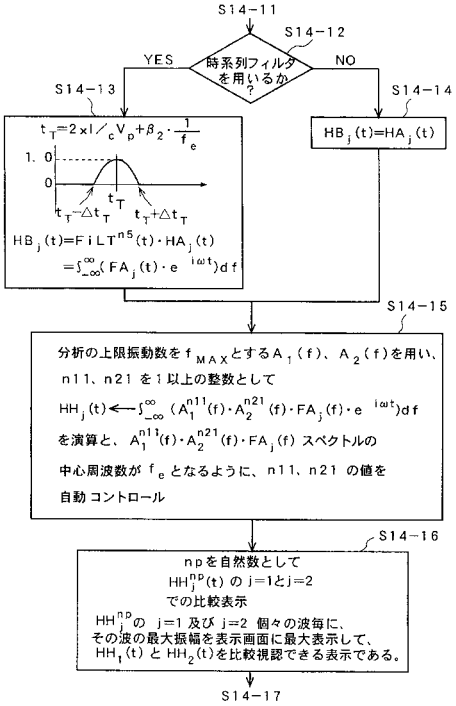
【図１５１】



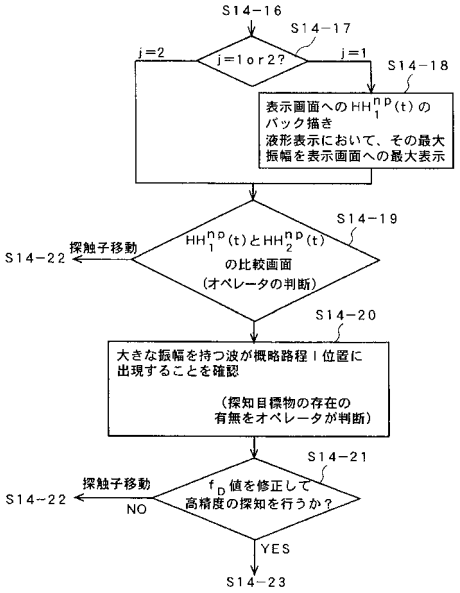
【図１５２】



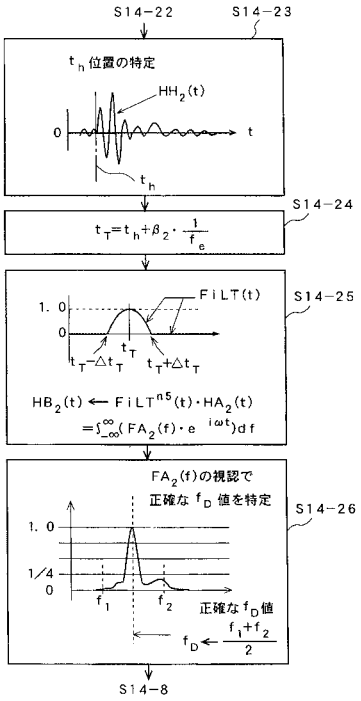
【図１５３】



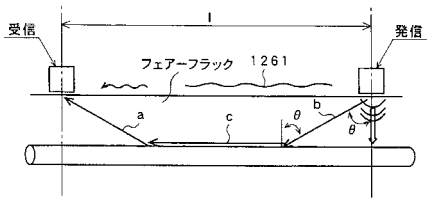
【図１５４】



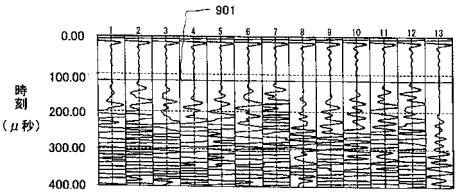
【図１５５】



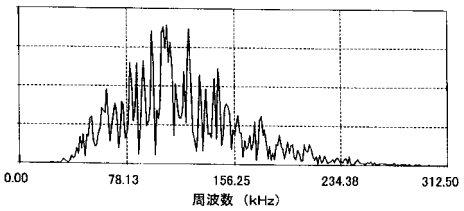
【図１５６】



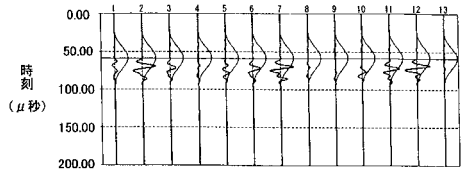
【図１５７】



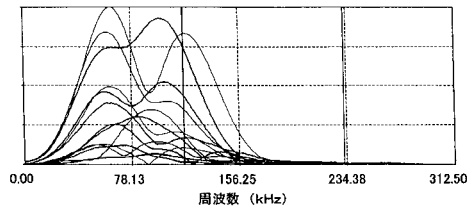
【図１５８】



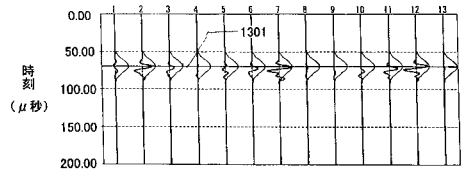
【図１５９】



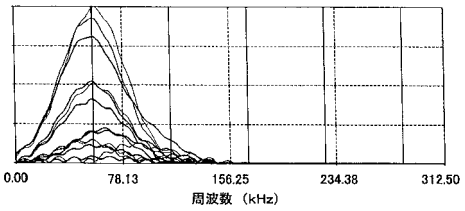
【図１６０】



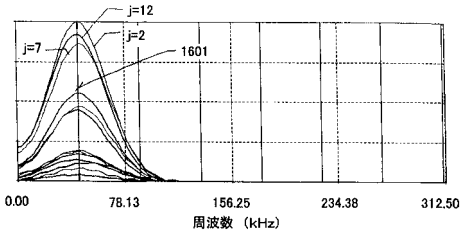
【図１６１】



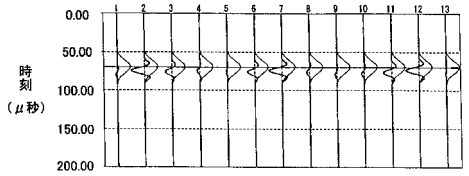
【図１６２】



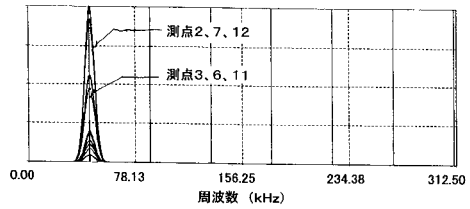
【図１６３】



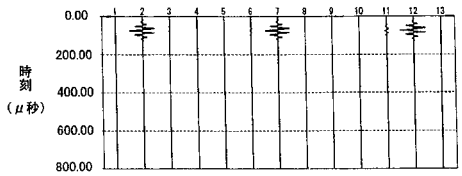
【図１６４】



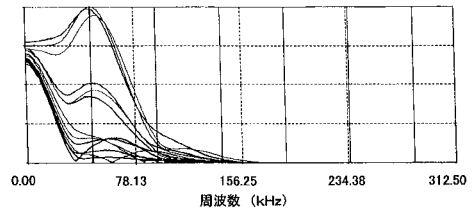
【図１６５】



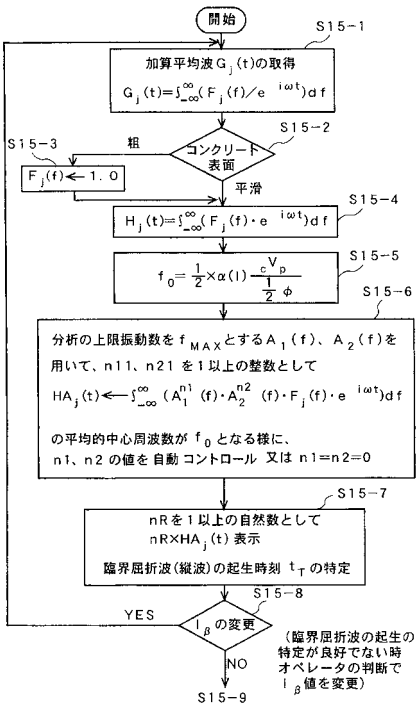
【図１６６】



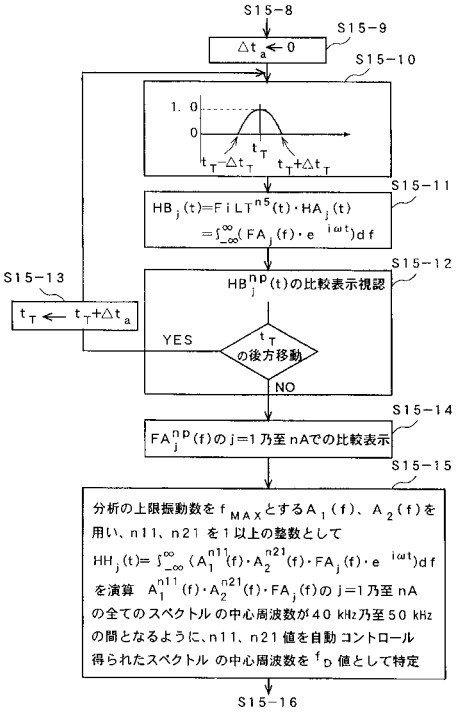
【図１６７】



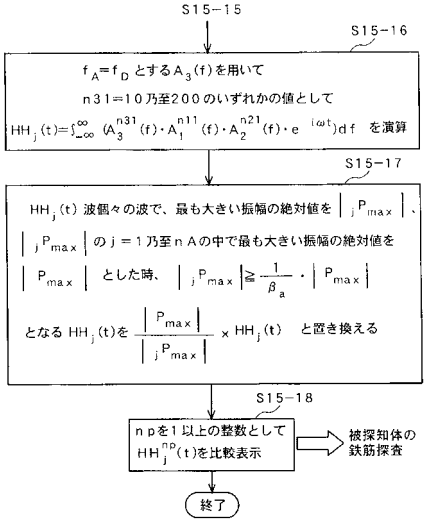
【図１６８】



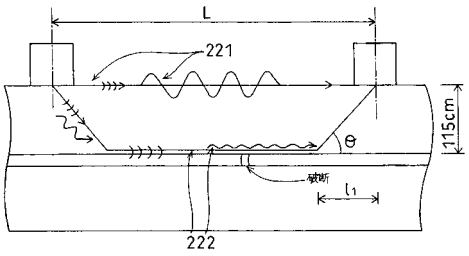
【図１６９】



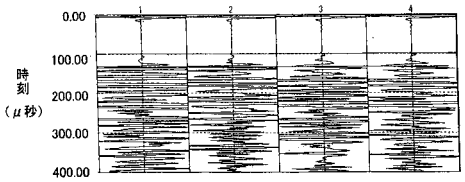
【図１７０】



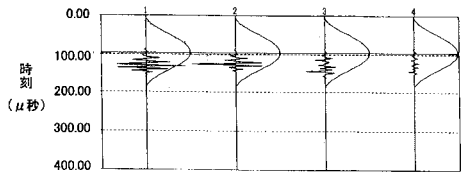
【図１７１】



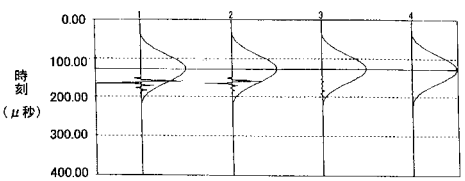
【図１７２】



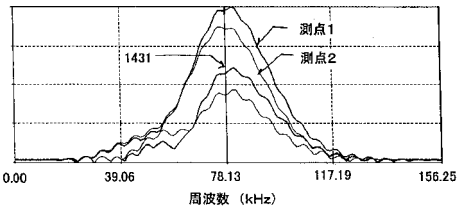
【図１７３】



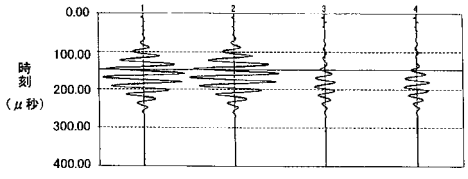
【図１７４】



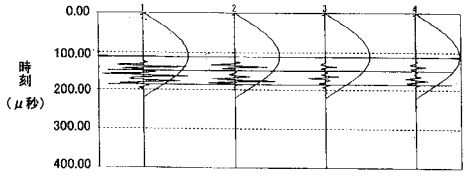
【図１７５】



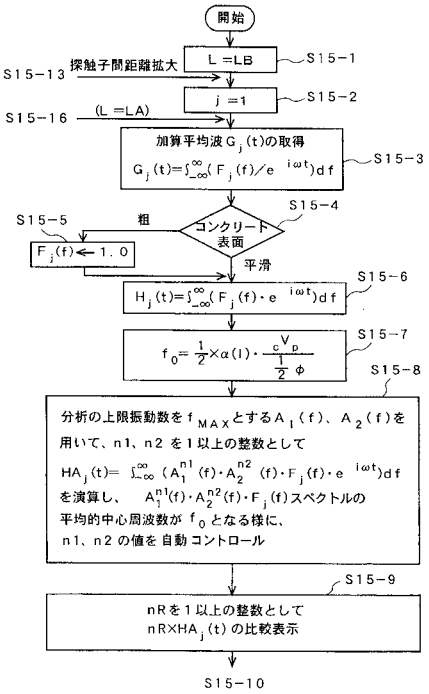
【図１７６】



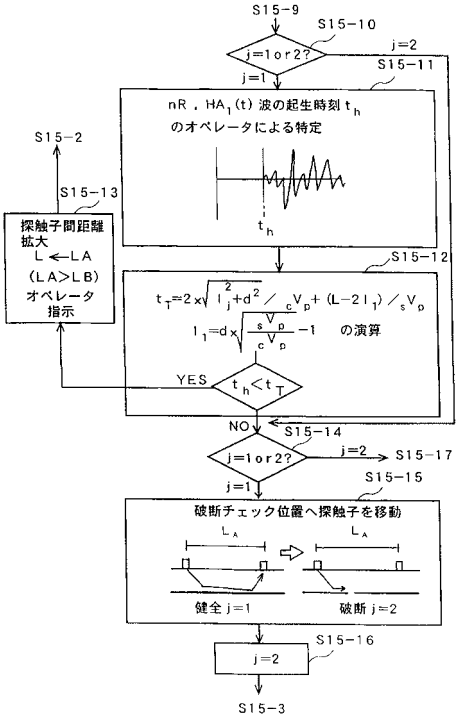
【図１７７】



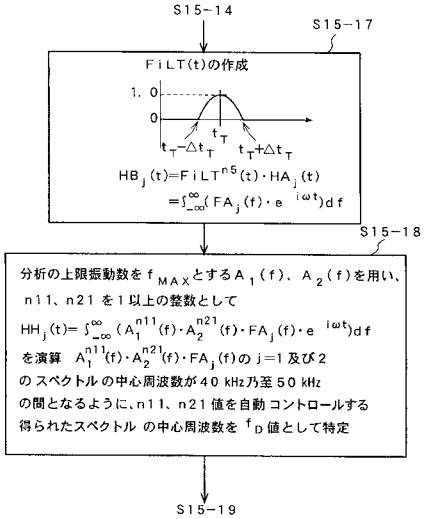
【図１７８】



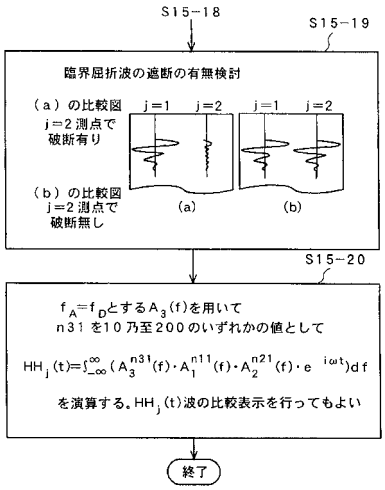
【図１７９】



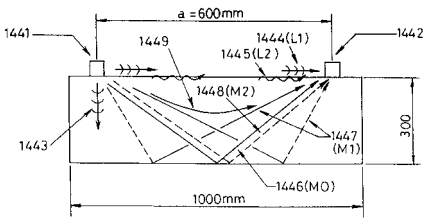
【図１８０】



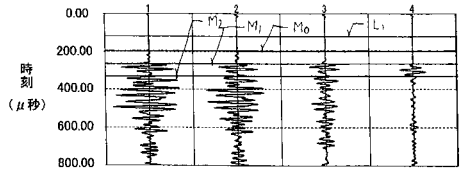
【図１８１】



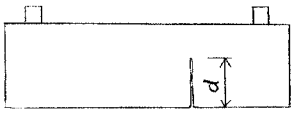
【図１８２】



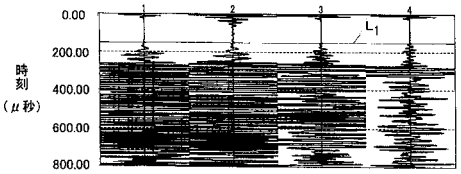
【図１８３】



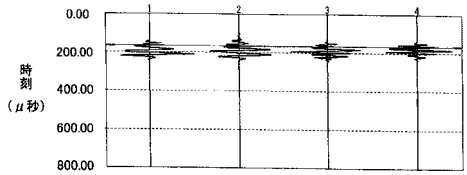
【図１８４】



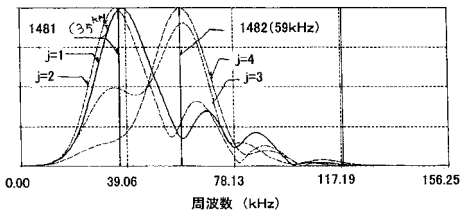
【図１８５】



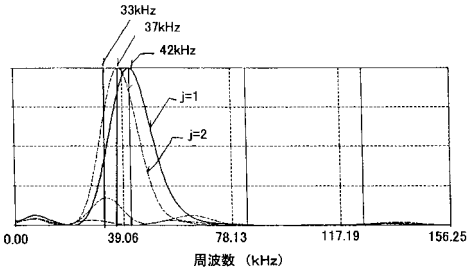
【図１８６】



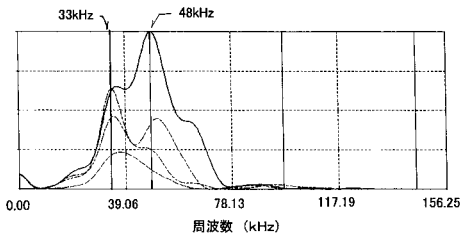
【図１８７】



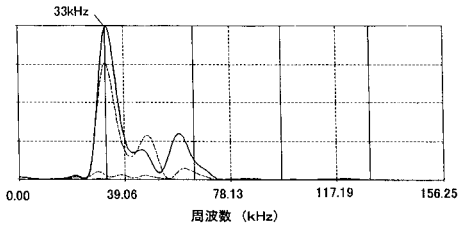
【図１８８】



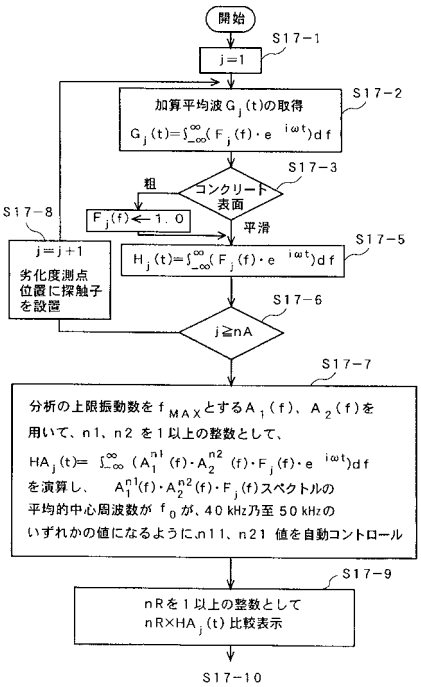
【図１８９】



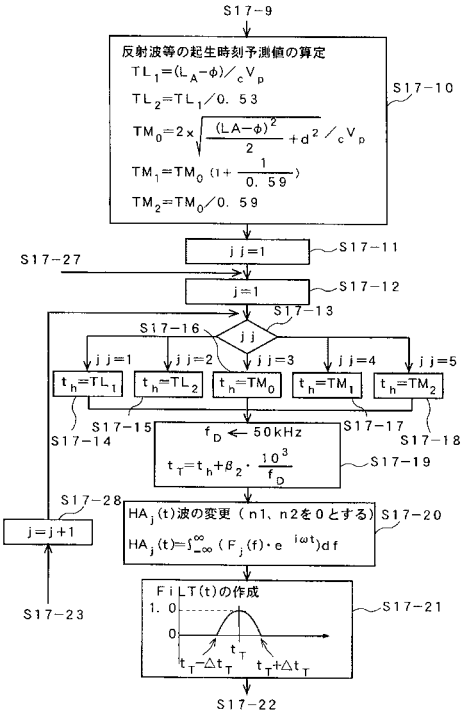
【図１９０】



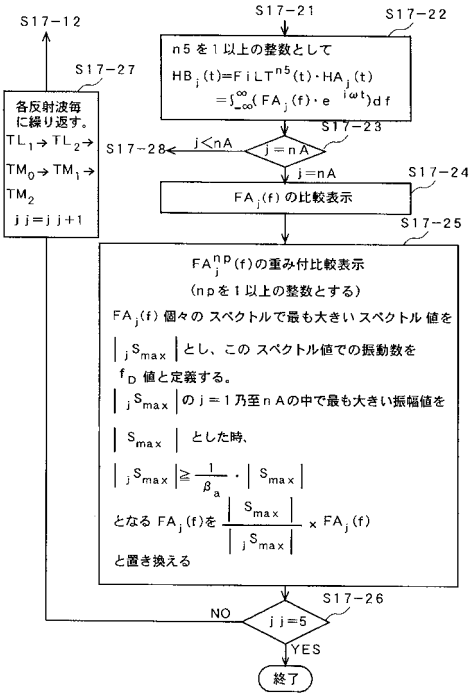
【図１９１】



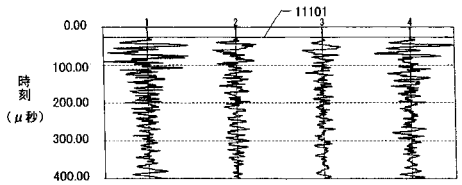
【図１９２】



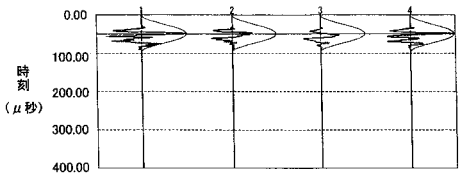
【図１９３】



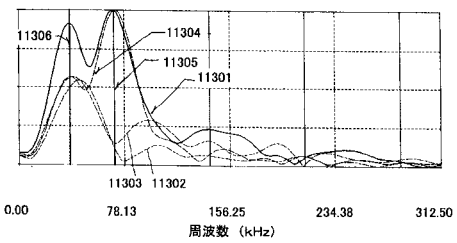
【図１９４】



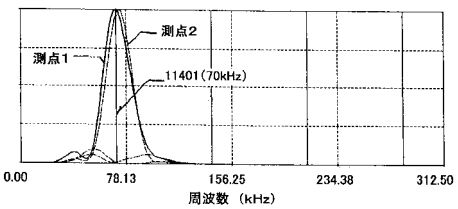
【図１９５】



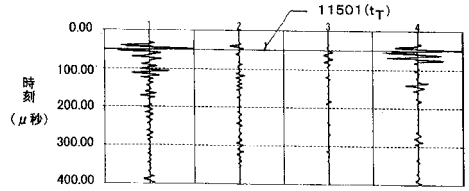
【図１９６】



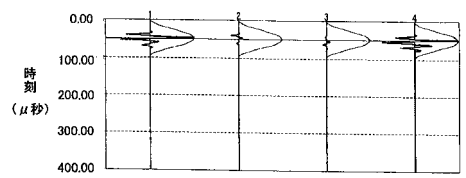
【図１９７】



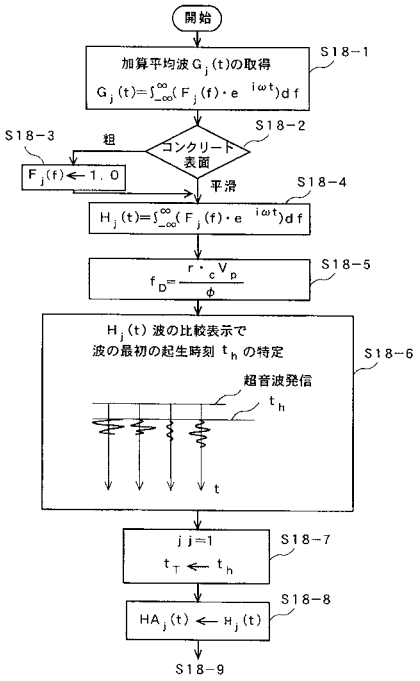
【図１９８】



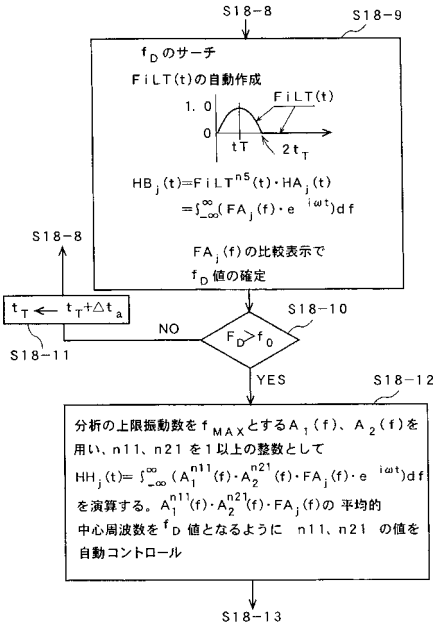
【図１９９】



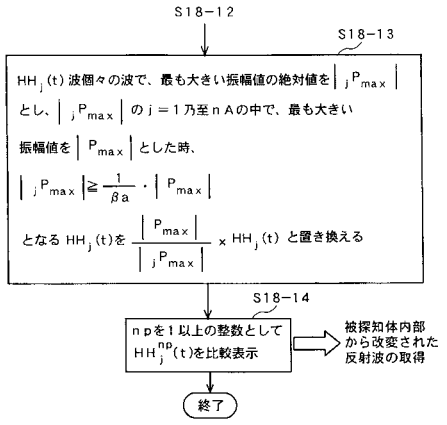
【図２００】



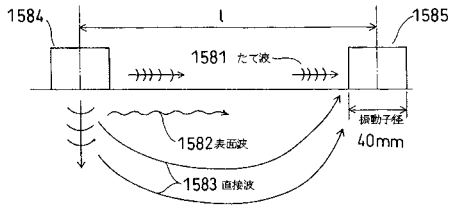
【図２０１】



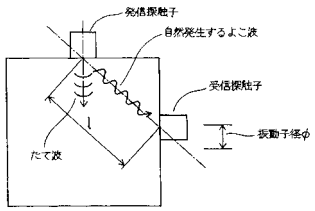
【図２０２】



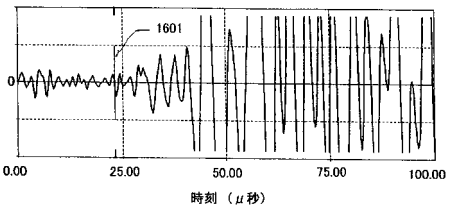
【図２０３】



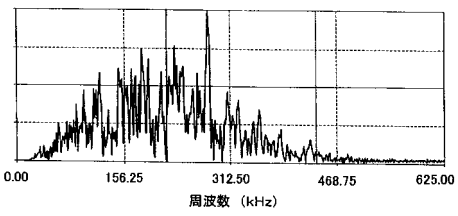
【図２０４】



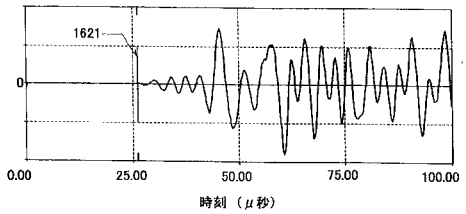
【図２０５】



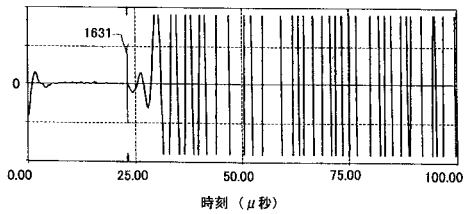
【図２０６】



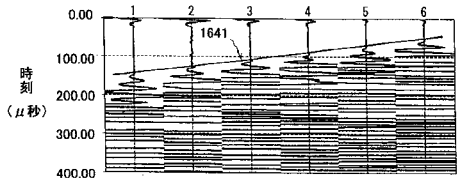
【図２０７】



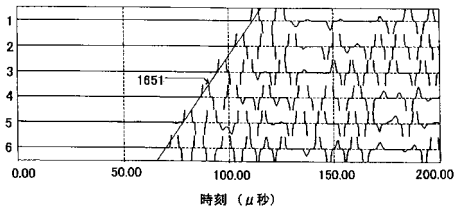
【図２０８】



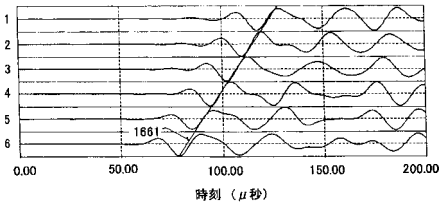
【図２０９】



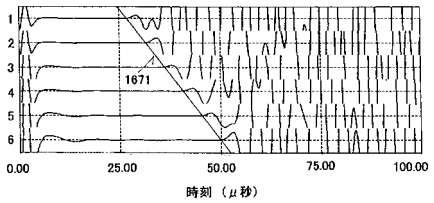
【図２１０】



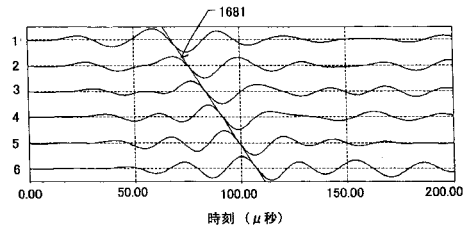
【図２１１】



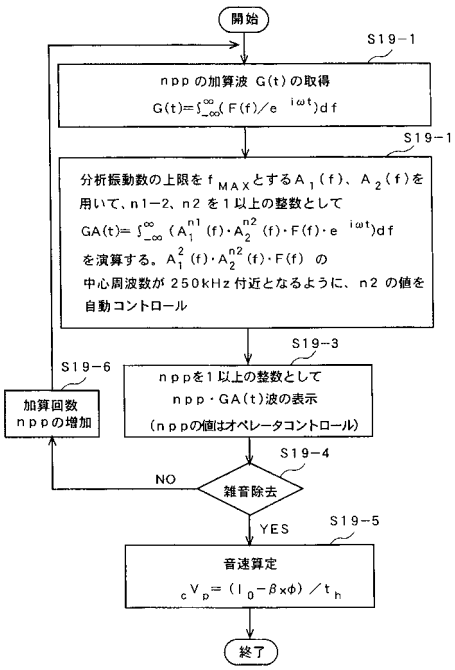
【図２１２】



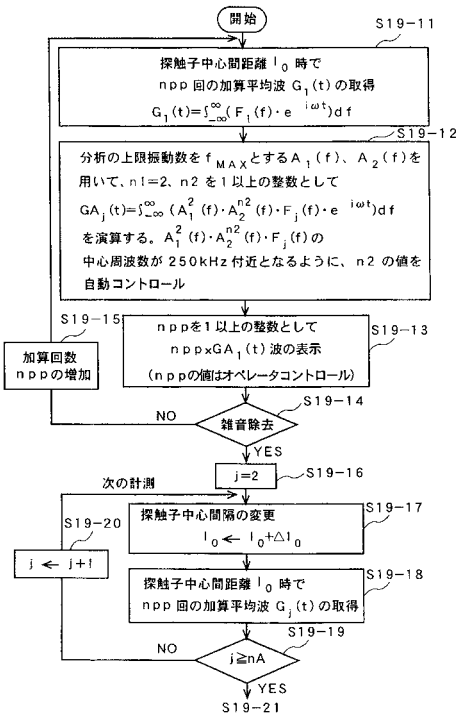
【図２１３】



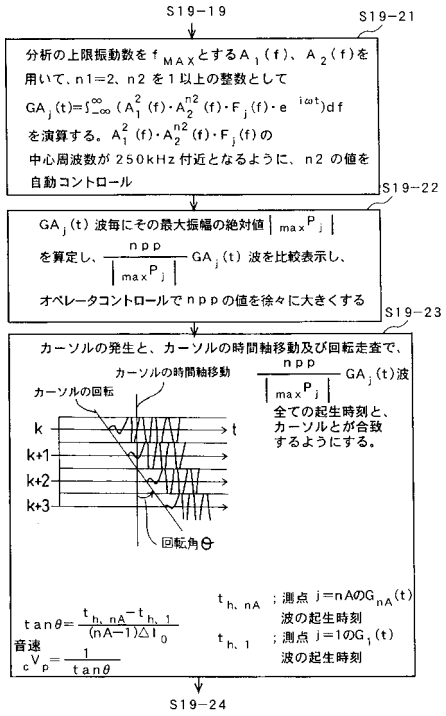
【図２１４】



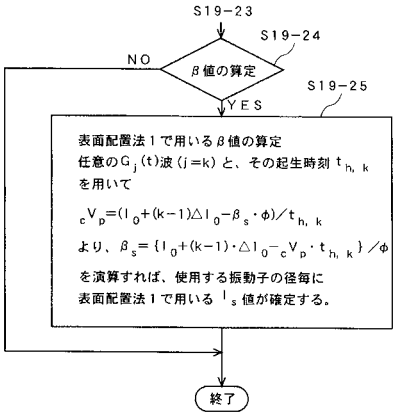
【図２１５】



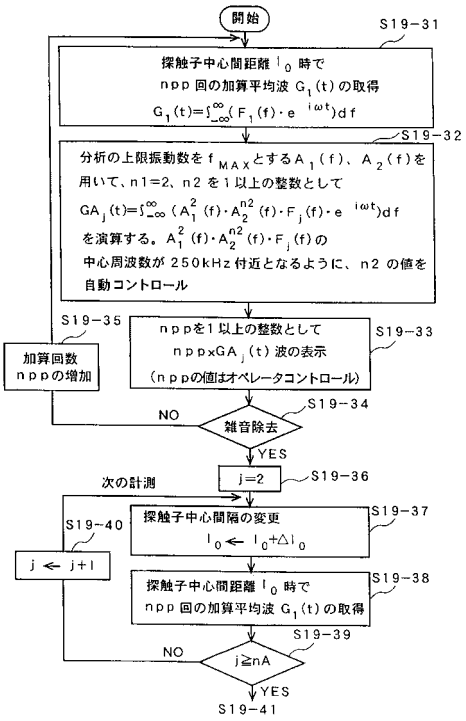
【図２１６】



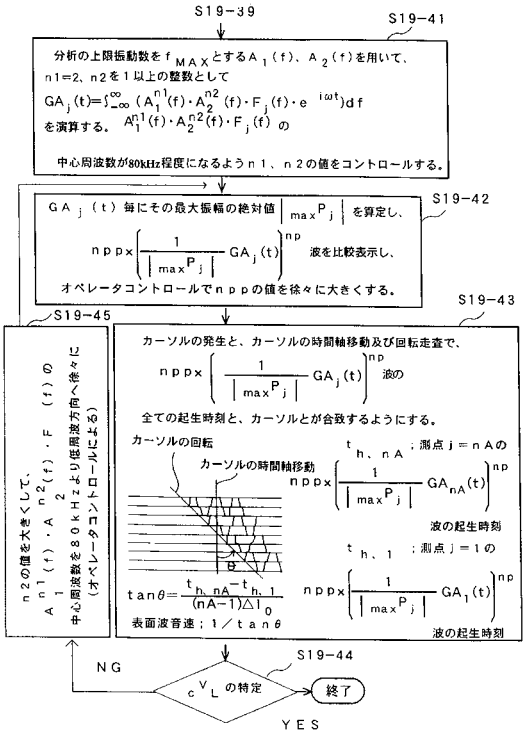
【図２１７】



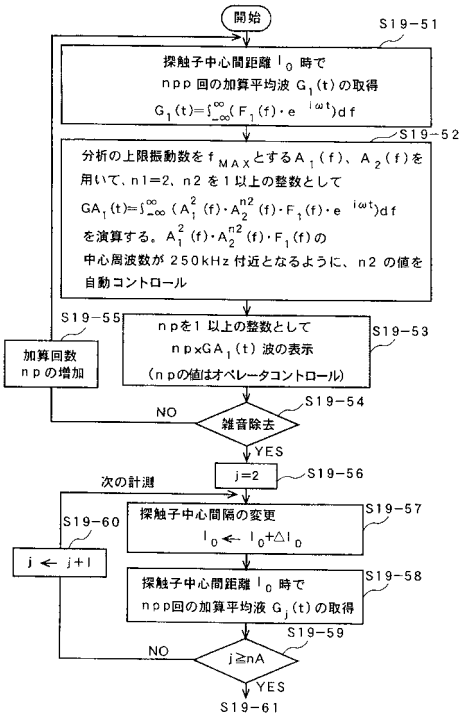
【図２１８】



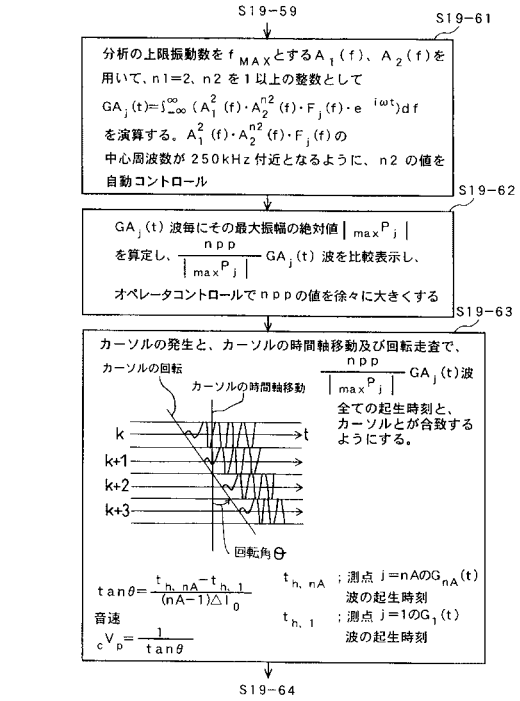
【図２１９】



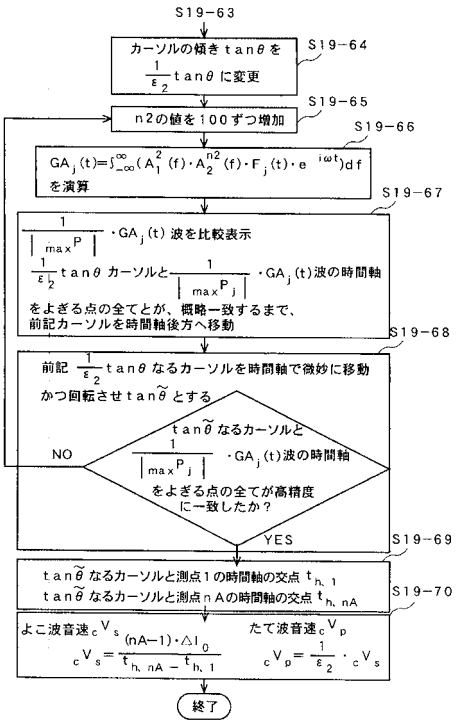
【図２２０】



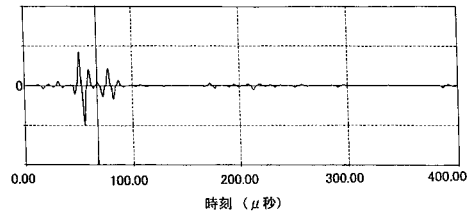
【図２２１】



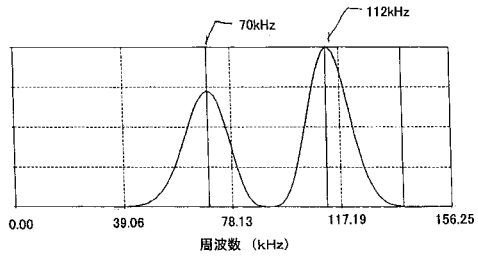
【図２２２】



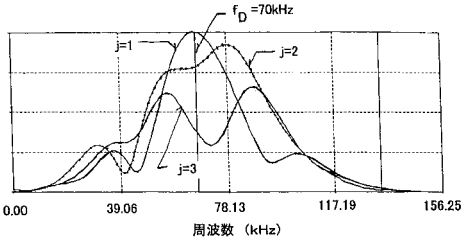
【図２２３】



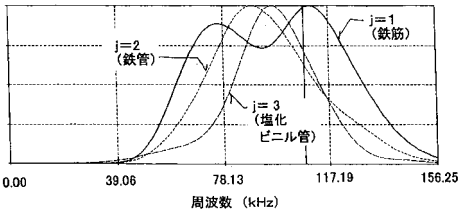
【図２２４】



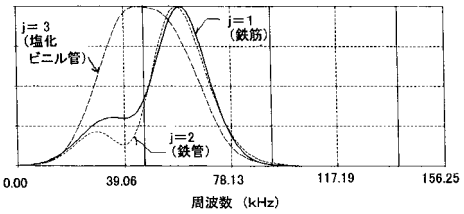
【図２２５】



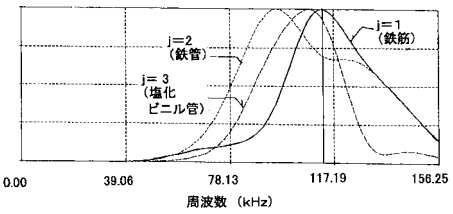
【図２２６】



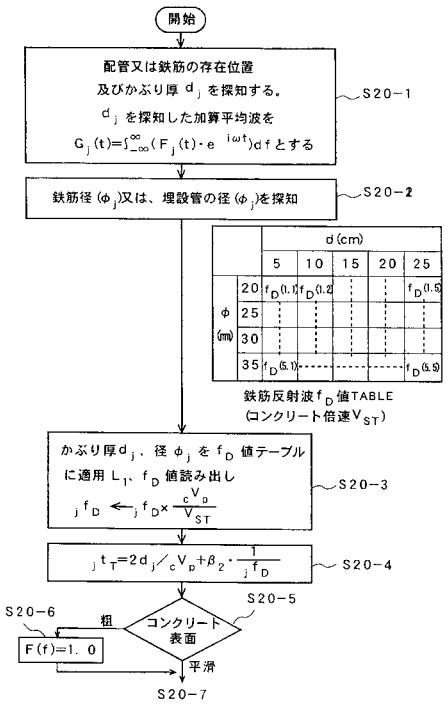
【図２２７】



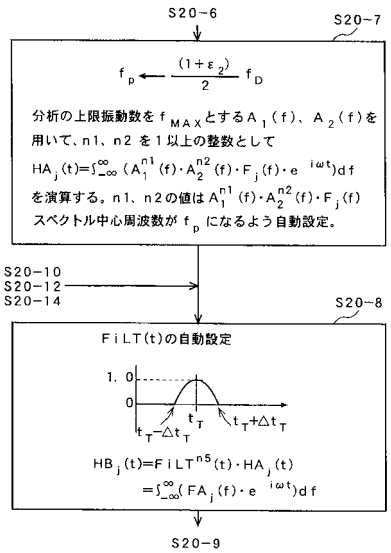
【図２２８】



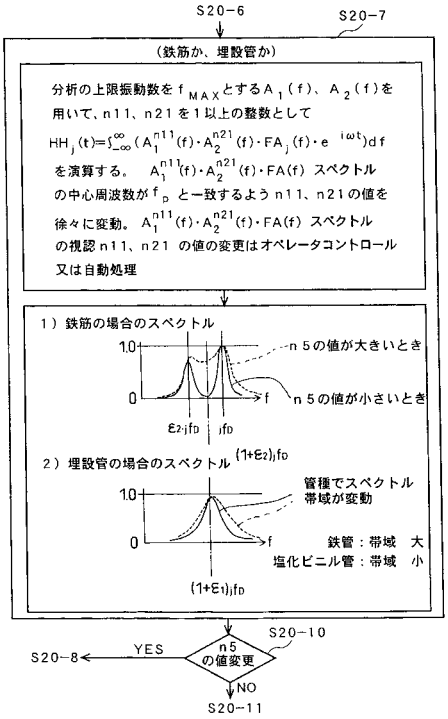
【図２２９】



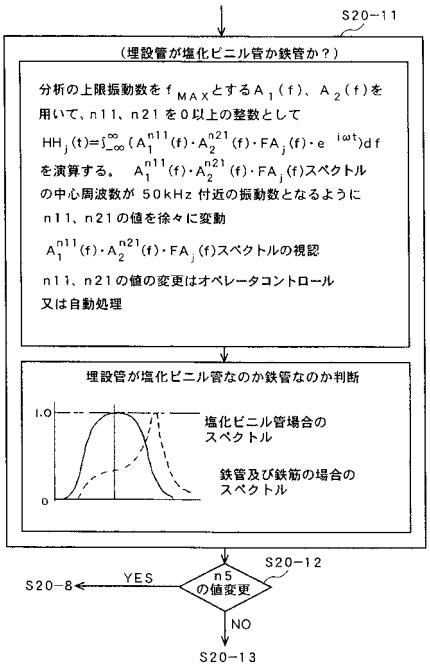
【図２３０】



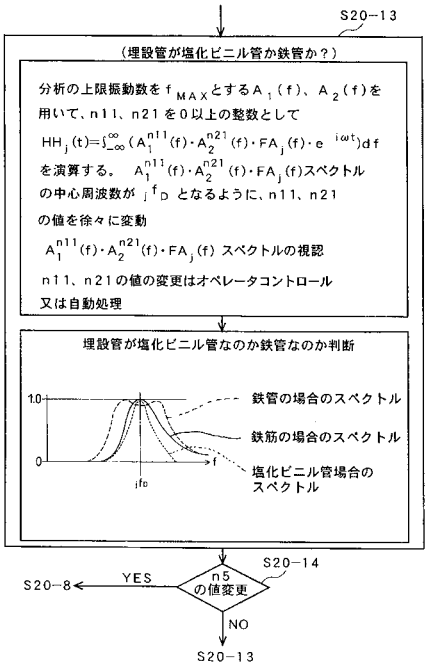
【図２３１】



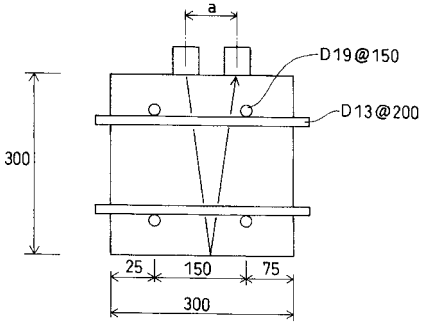
【図２３２】



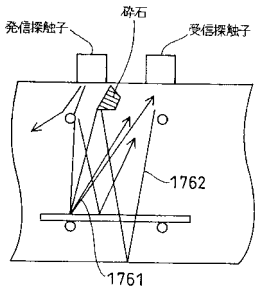
【図２３３】



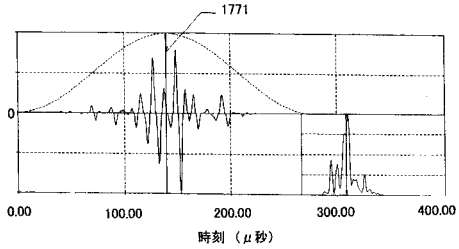
【図２３４】



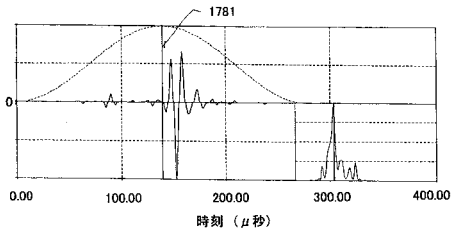
【図２３５】



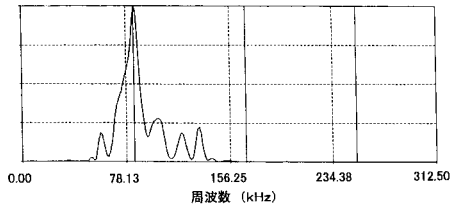
【図２３６】



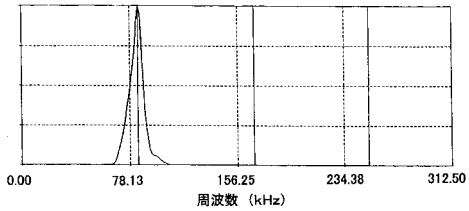
【図２３７】



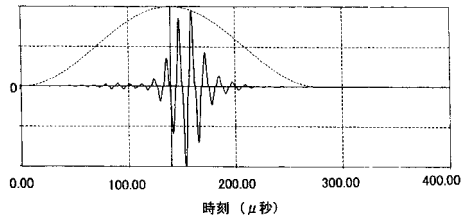
【図２３８】



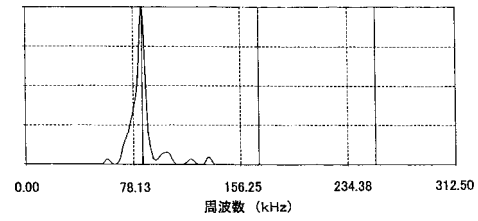
【図２３９】



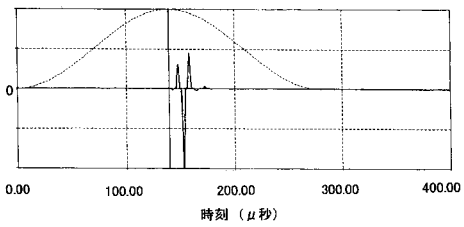
【図２４０】



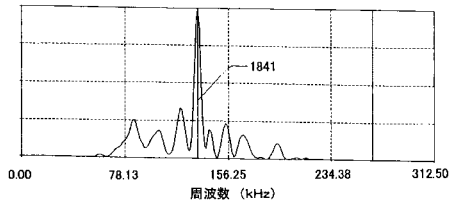
【図２４１】



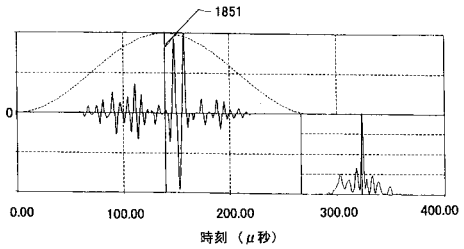
【図２４２】



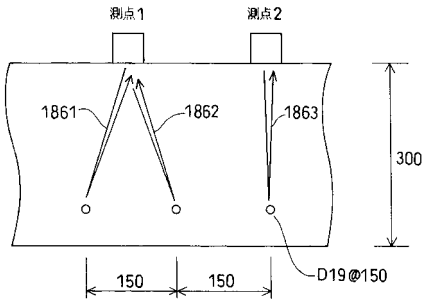
【図２４３】



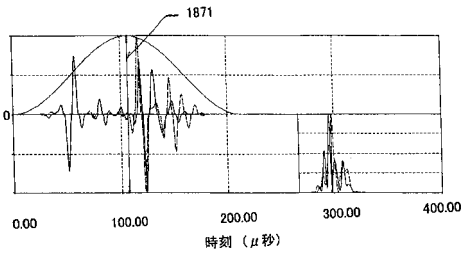
【図２４４】



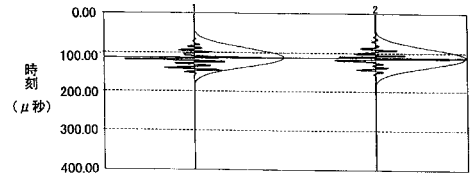
【図２４５】



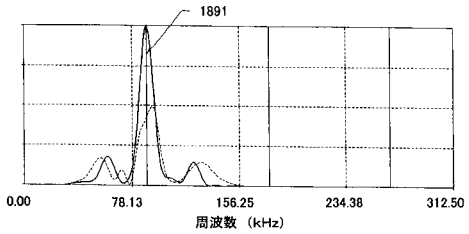
【図２４６】



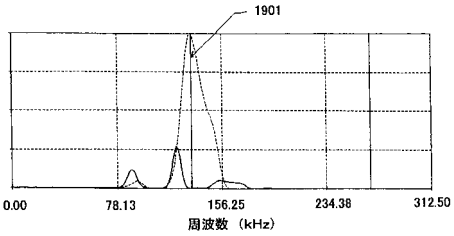
【図２４７】



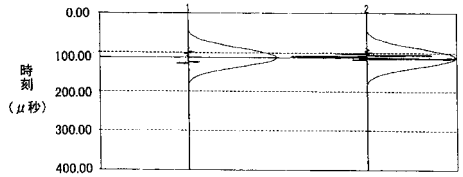
【図２４８】



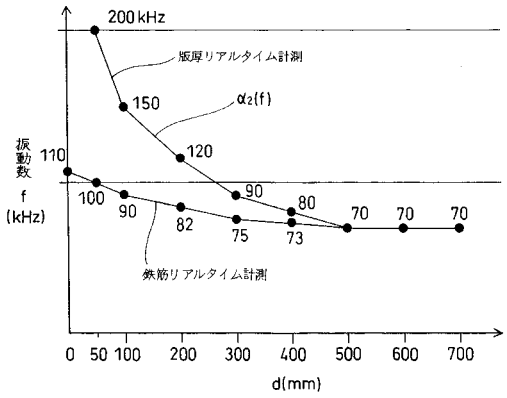
【図２４９】



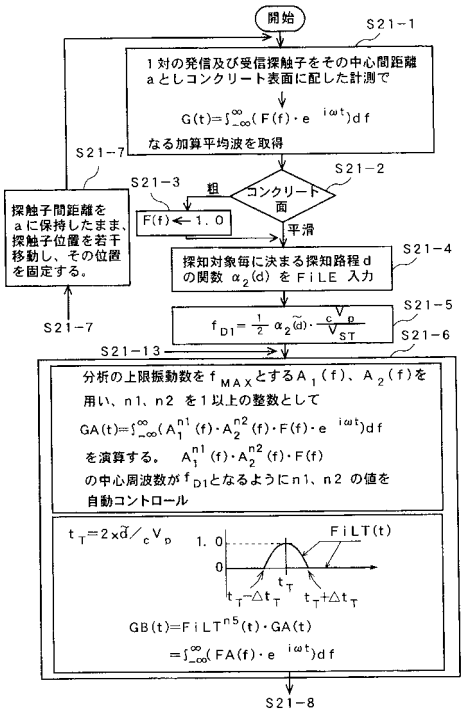
【図２５０】



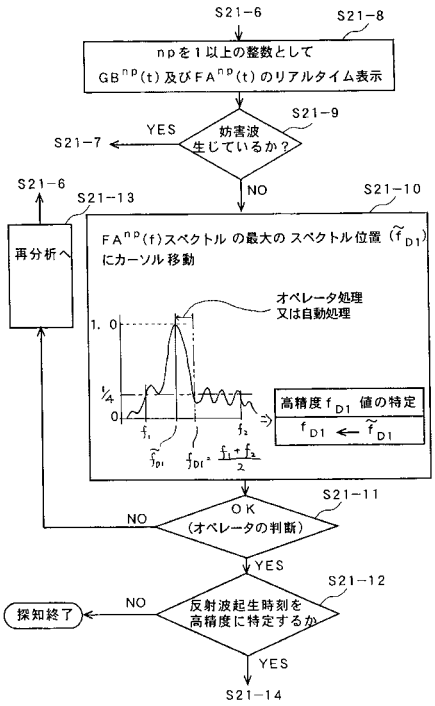
【図２５１】



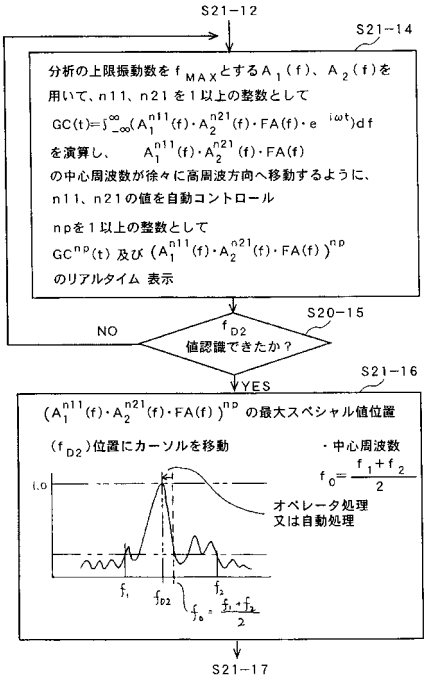
【図２５２】



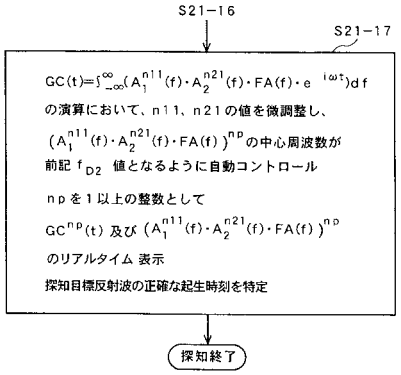
【図２５３】



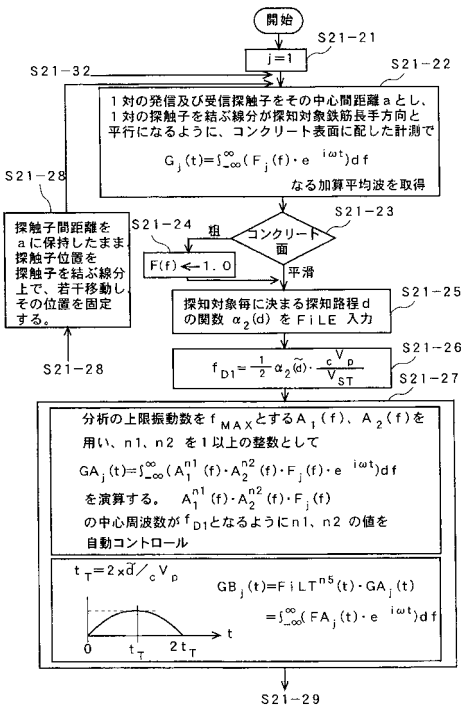
【図２５４】



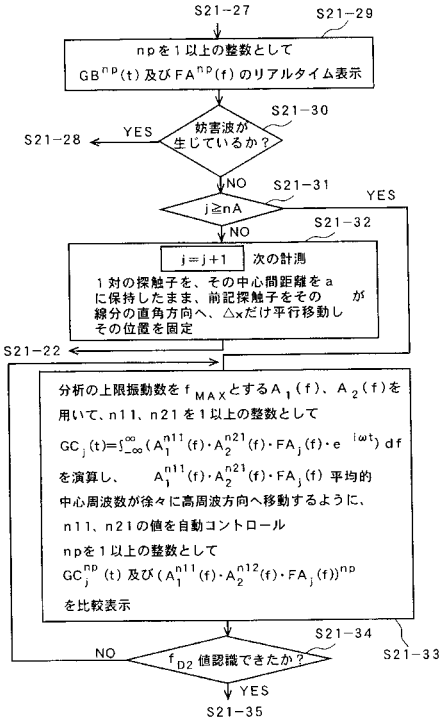
【図２５５】



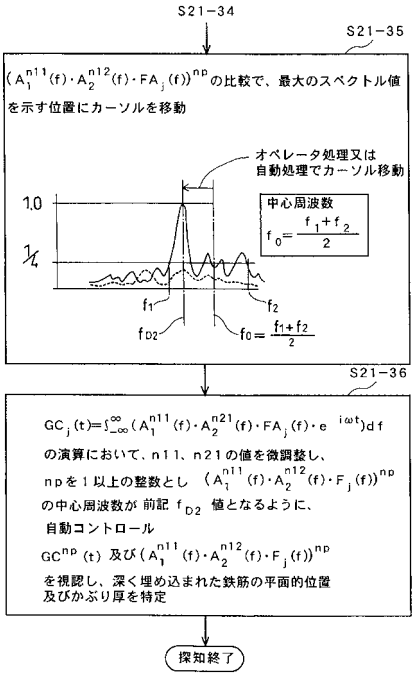
【図２５６】



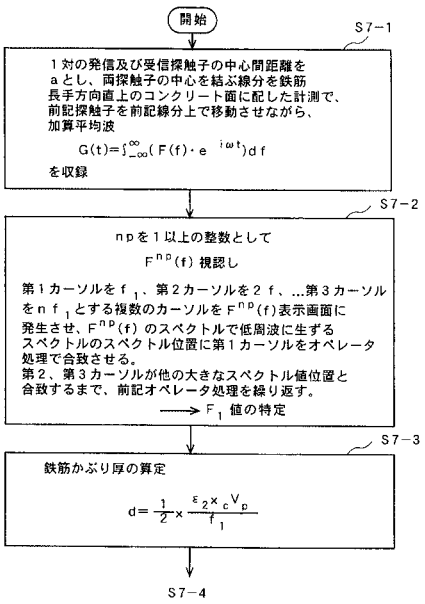
【図２５７】



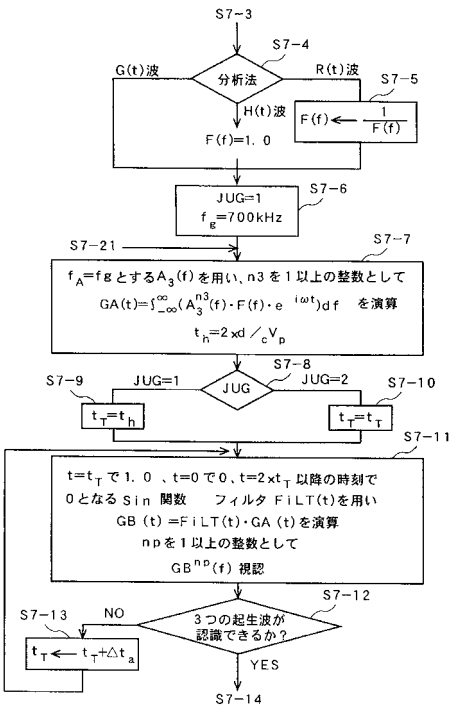
【図２５８】



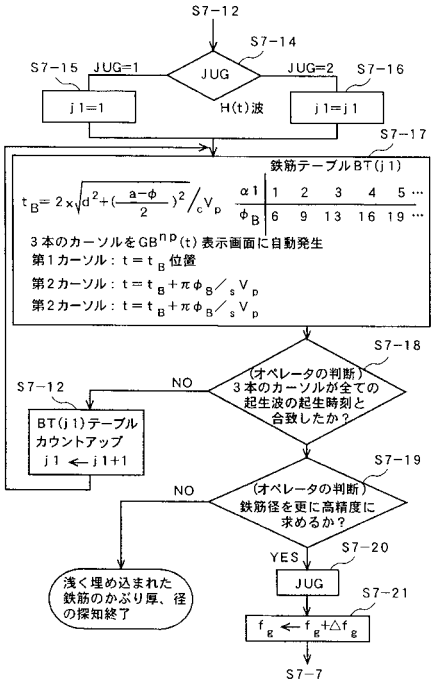
【図２５９】



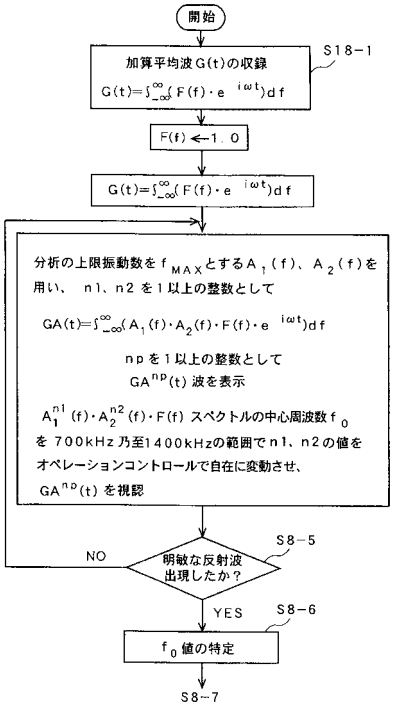
【図２６０】



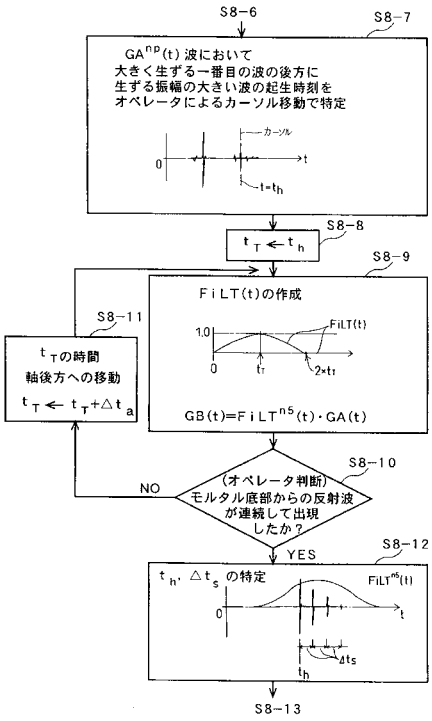
【図２６１】



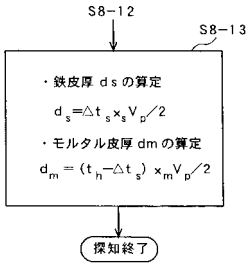
【図２６２】



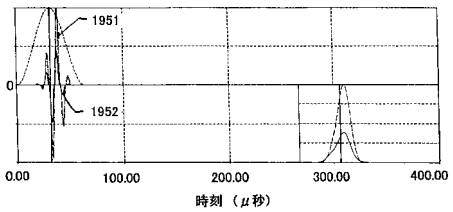
【図２６３】



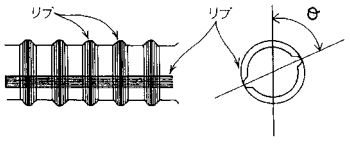
【図２６４】



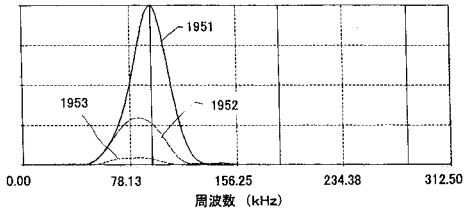
【図２６５】



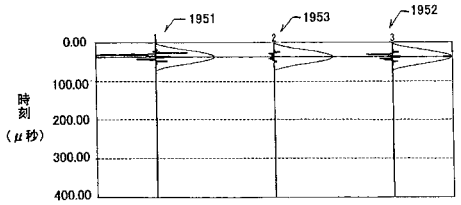
【図２６６】



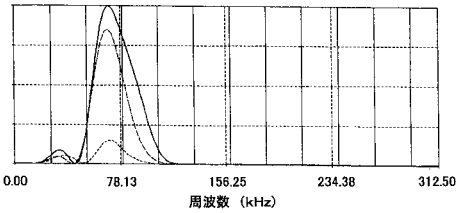
【図２６７】



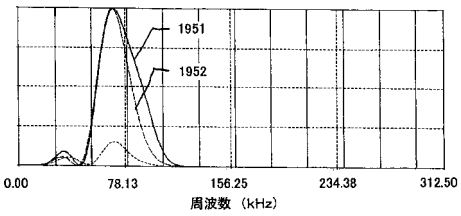
【図２６８】



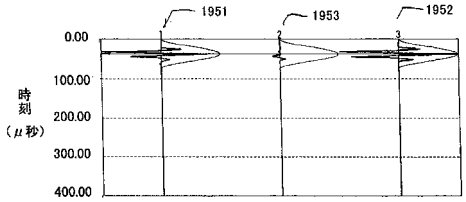
【図２６９】



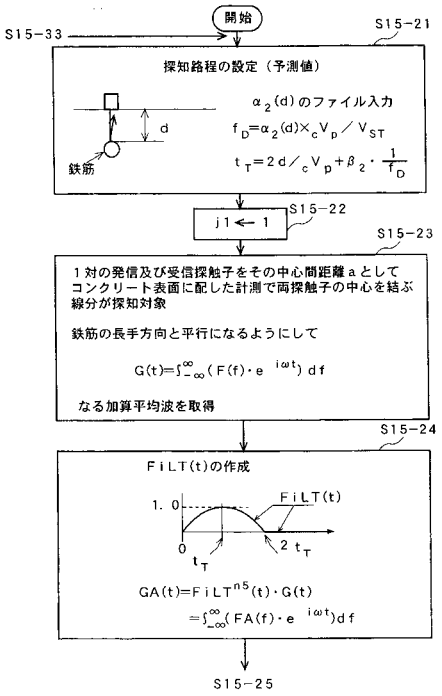
【図２７０】



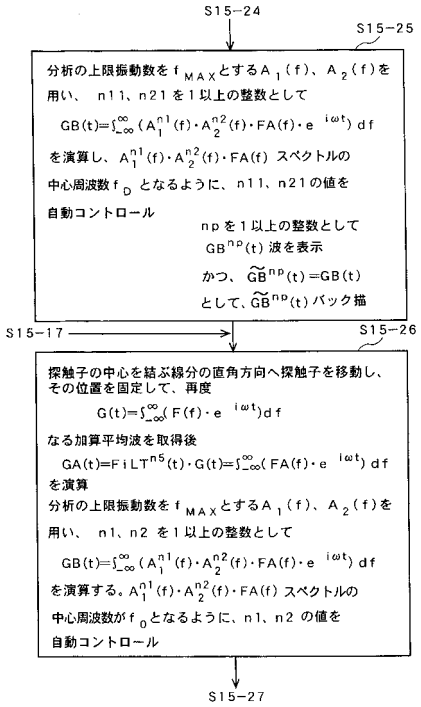
【図２７１】



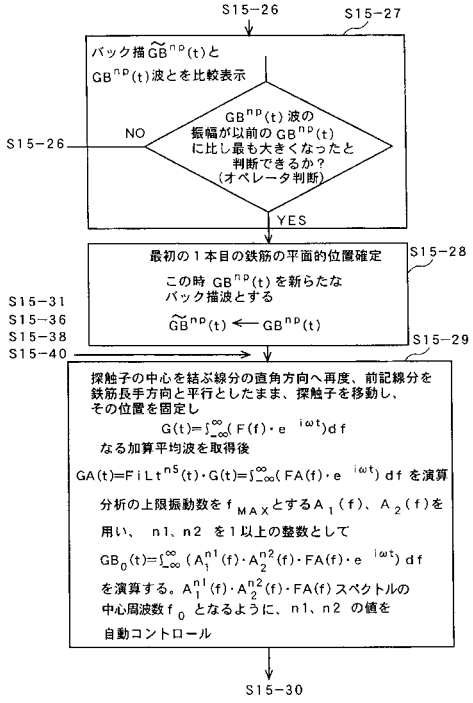
【図２７２】



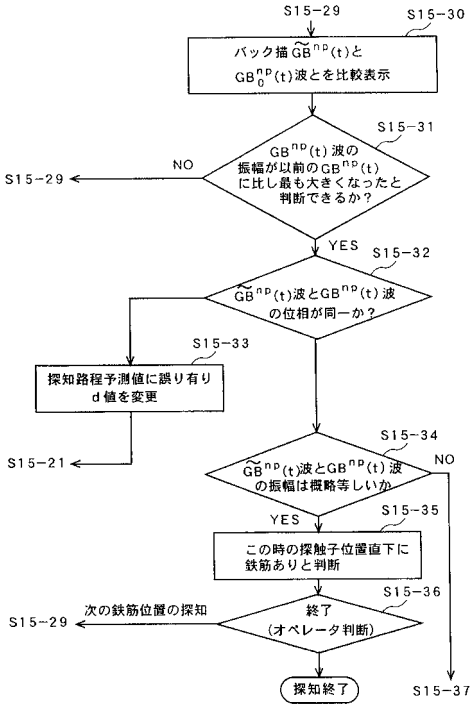
【図２７３】



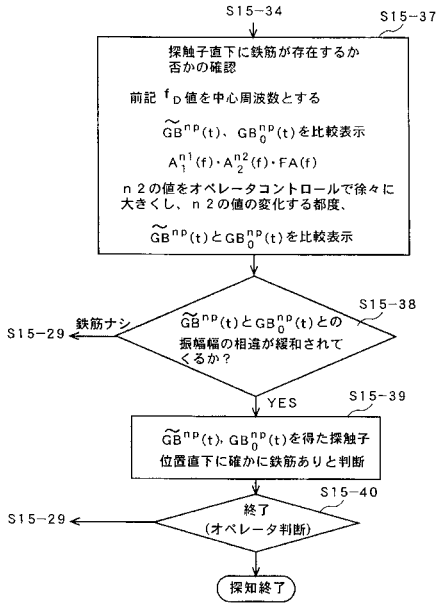
【図２７４】



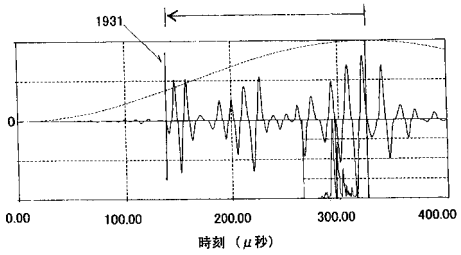
【図２７５】



【図２７６】



【図２７７】



【図２７８】

