

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6347480号
(P6347480)

(45) 発行日 平成30年6月27日 (2018. 6. 27)

(24) 登録日 平成30年6月8日 (2018. 6. 8)

(51) Int. Cl.

G 0 1 V 1/00 (2006.01)

F 1

G 0 1 V 1/00

C

請求項の数 11 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2014-108923 (P2014-108923)
 (22) 出願日 平成26年5月27日 (2014. 5. 27)
 (65) 公開番号 特開2015-224916 (P2015-224916A)
 (43) 公開日 平成27年12月14日 (2015. 12. 14)
 審査請求日 平成29年5月8日 (2017. 5. 8)

(73) 特許権者 504117958
 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源
 機構
 東京都港区虎ノ門二丁目10番1号
 (73) 特許権者 514132464
 笠原 順三
 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台2-4-12
 (74) 代理人 100166006
 弁理士 泉 通博
 (72) 発明者 高梨 将
 東京都港区虎ノ門二丁目10番1号 独立
 行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構
 内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 振動検出システム、信号処理装置及び信号処理方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

所定の周期で繰り返される振動波を発生する震源装置と、地盤を介して伝達された前記振動波に基づく応答波を受信する受振装置と、前記受振装置が受信した応答波に応じた振動信号を処理する信号処理装置と、を備える振動検出システムであって、

前記信号処理装置は、

前記受振装置が受信した振動信号を蓄積する蓄積部と、

蓄積した前記振動信号から前記震源装置が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する分離部と、

分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出する算出部と、

前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成する生成部と、

を備える振動検出システム。

【請求項 2】

前記震源装置は、発生する前記振動波の周波数を、前記周期内で変化させる、

請求項 1 に記載の振動検出システム。

【請求項 3】

前記算出部は、複数の前記個別周期信号を、当該複数の個別周期信号の夫々に含まれるノイズの分散の逆数を重みとして平均化することで、前記標準周期信号を算出する、

請求項 1 又は 2 に記載の振動検出システム。

10

20

【請求項 4】

前記算出部は、複数の前記個別周期信号の中央値を、前記標準周期信号として算出する、

請求項 1 又は 2 に記載の振動検出システム。

【請求項 5】

前記蓄積部は、前記算出部が算出した前記標準周期信号を、環境条件に対応付けて蓄積し、

前記生成部は、前記受振装置が前記振動信号を受信したときの環境条件に対応する前記標準周期信号に基づいて前記差分信号を生成する、

請求項 1 から 4 のいずれかに記載の振動検出システム。

10

【請求項 6】

前記震源装置は、水平方向の振動と鉛直方向の振動とを含む振動波を発生する震源装置であり、第 1 期間に第 1 極性の振動信号を有する第 1 振動波を発生し、前記第 1 期間と同じ長さの第 2 期間に前記第 1 極性を水平方向又は鉛直方向に反転させた第 2 極性の振動信号を有する第 2 振動波を発生する、

請求項 1 から 5 のいずれかに記載の振動検出システム。

【請求項 7】

前記震源装置は、前記第 1 期間と前記第 2 期間との間の反転期間に遷移振動波を発生し、

前記算出部は、複数回の前記反転期間において前記受振装置が受信した前記遷移振動波に基づく振動信号の中央値を、当該反転期間における前記標準周期信号として算出する、
請求項 6 に記載の振動検出システム。

20

【請求項 8】

前記震源装置は、前記第 1 期間と前記第 2 期間との間の反転期間に遷移振動波を発生し、

前記算出部は、前記第 1 期間又は前記第 2 期間に算出した前記地盤の伝達関数と、前記遷移振動波とに基づいて、前記標準周期信号を算出する、

請求項 6 に記載の振動検出システム。

【請求項 9】

発生する振動波の周波数が夫々異なる複数の震源装置を備える、

請求項 1 から 8 のいずれかに記載の振動検出システム。

30

【請求項 10】

受振装置が受信した振動信号から震源装置が発生した振動波に基づく信号を除去する信号処理装置であって、

前記受振装置が受信した振動信号を蓄積する蓄積部と、

蓄積した前記振動信号から前記震源装置が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する分離部と、

分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出する算出部と、

前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成する生成部と、

を備える信号処理装置。

40

【請求項 11】

受振装置が受信した振動信号から震源装置が発生した振動波に基づく信号を除去する信号処理方法であって、

前記受振装置が受信した振動信号を蓄積するステップと、

蓄積した前記振動信号から前記震源装置が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離するステップと、

分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出するステップと、

前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成するステップと、

50

を含む信号処理方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、震源装置から発生した振動波の影響を除去して地中の振動を検出する振動検出システム、信号処理装置及び信号処理方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、人為的に発生した振動波を地下に放射するとともに、地下を伝わった振動を地表付近で受信することで、地下内部の様子を観察する能動的地震探査が知られている。このような能動的地震探査に好適な定常震源として、常設型の震源装置であるACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) が注目されている。ACROSSは、円柱状の偏心錘を回転させることで精密に制御した信号(振動波)を発生させることができ、地下内部の観察に適している。

10

【0003】

特許文献1には、震源装置が発生した信号が岩脈層で反射して生成される反射波のエネルギーを記録することにより、地下内部の様子を観察する方法が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

20

【特許文献1】特開2007-304100号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

ところで、近年、新しい天然ガス資源としてシェールガスが注目されている。シェールガスは、シェールガスを含む頁岩層に水平にパイプを入れ、このパイプから高圧の水を噴射することで人工的に割れ目(フラクチャー)をつくる、所謂、水圧破砕法を用いて採取される。

【0006】

ここで、水圧破砕法による制御には、水圧破砕に伴うマイクロサイズミックの常時観測によるフラクチャー発生域の監視が重要となってくる。この点、上述の能動的地震探査に用いる震源装置を、水圧破砕を行っている地点の近傍で動作させていると、この震源装置から発生した振動波が水圧破砕に伴うマイクロサイズミックのノイズとなってしまう、マイクロサイズミックの正確な観測を行うことができない。

30

そのため、通常、マイクロサイズミック観測時には震源装置の運転を停止し、能動的地震探査をマイクロサイズミック観測時以外に実施することとしている。

【0007】

また、自然地震の予知/予測は、前震やプレスリップを24時間体制で監視することが重要になってくるが、震源装置から発生した振動波は、このような自然地震の監視にとってもノイズとなって現れる。

40

この点、自然地震はいつ発生するかわからないため、自然地震の発生に併せて震源装置の運転を停止することはできず、震源装置を停止することなく監視可能な更なる工夫が求められている。

【0008】

本発明は、このような問題に鑑みてなされたものであり、震源装置から発生した振動波による影響を除去可能な振動検出システム、信号処理装置及び信号処理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】

【0009】

本発明の第1の態様においては、所定の周期で繰り返される振動波を発生する震源装置

50

と、地盤を介して伝達された前記振動波に基づく応答波を受信する受振装置と、前記受振装置が受信した応答波に応じた振動信号を処理する信号処理装置と、を備える振動検出システムを提供する。この振動検出システムにおいて、前記信号処理装置は、前記受振装置が受信した振動信号を蓄積する蓄積部と、蓄積した前記振動信号から前記震源装置が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する分離部と、分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出する算出部と、前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成する生成部と、を備える。

【 0 0 1 0 】

また、前記震源装置は、発生する前記振動波の周波数を、前記周期内で変化させることとしてもよい。

10

【 0 0 1 1 】

また、前記算出部は、複数の前記個別周期信号を、当該複数の個別周期信号の夫々に含まれるノイズの分散の逆数を重みとして平均化することで、前記標準周期信号を算出することとしてもよい。

【 0 0 1 2 】

また、前記算出部は、複数の前記個別周期信号の中央値を、前記標準周期信号として算出することとしてもよい。

【 0 0 1 3 】

また、前記蓄積部は、前記算出部が算出した前記標準周期信号を、環境条件に対応付けて蓄積し、前記生成部は、前記受振装置が前記振動信号を受信したときの環境条件に対応する前記標準周期信号に基づいて前記差分信号を生成することとしてもよい。

20

【 0 0 1 4 】

また、前記震源装置は、水平方向の振動と鉛直方向の振動とを含む振動波を発生する震源装置であり、第 1 期間に第 1 極性の振動信号を有する第 1 振動波を発生し、前記第 1 期間と同じ長さの第 2 期間に前記第 1 極性を水平方向又は鉛直方向に反転させた第 2 極性の振動信号を有する第 2 振動波を発生することとしてもよい。

【 0 0 1 5 】

また、前記震源装置は、前記第 1 期間と前記第 2 期間との間の反転期間に遷移振動波を発生し、前記算出部は、複数回の前記反転期間において前記受振装置が受信した前記遷移振動波に基づく振動信号の中央値を、当該反転期間における前記標準周期信号として算出することとしてもよい。

30

【 0 0 1 6 】

また、前記震源装置は、前記第 1 期間と前記第 2 期間との間の反転期間に遷移振動波を発生し、前記算出部は、前記第 1 期間又は前記第 2 期間に算出した前記地盤の伝達関数と、前記遷移振動波とに基づいて、前記標準周期信号を算出することとしてもよい。

【 0 0 1 7 】

また、発生する振動波の周波数が夫々異なる複数の震源装置を備えることとしてもよい。

【 0 0 1 8 】

本発明の第 2 の態様においては、受振装置が受信した振動信号から震源装置が発生した振動波に基づく信号を除去する信号処理装置を提供する。この信号処理装置は、前記受振装置が受信した振動信号を蓄積する蓄積部と、蓄積した前記振動信号から前記震源装置が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する分離部と、分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出する算出部と、前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成する生成部と、を備える。

40

【 0 0 1 9 】

本発明の第 2 の態様においては、受振装置が受信した振動信号から震源装置が発生した振動波に基づく信号を除去する信号処理方法を提供する。この信号処理方法は、前記受振装置が受信した振動信号を蓄積するステップと、蓄積した前記振動信号から前記震源装置

50

が発生する前記振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離するステップと、分離した前記個別周期信号から標準周期信号を算出するステップと、前記受振装置が受信した前記振動信号と前記標準周期信号との差分を示す差分信号を生成するステップと、を含む。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、震源装置から発生した振動波による影響を除去することができる。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】振動検出システムのシステム構成を示す図である。

10

【図2】震源装置が発生させる振動波を示す図である。

【図3】信号処理装置の機能構成を示すブロック図である。

【図4】信号処理装置の制御部の制御の概要を示す図である。

【図5A】受振装置において受信した測定振動信号の一例を示す図である。

【図5B】測定振動信号の離散フーリエ変換の結果を模式的に示す図である。

【図6】制御部の処理の流れを示すフローチャートである。

【図7】震源装置の構成を示す図である。

【図8】震源装置が発生させる振動波を示す図である。

【図9】受振装置において受信した測定振動信号の一例を示す図である。

【図10】反転期間における標準周期信号の算出方法の一例を示す図である。

20

【図11】震源装置を2台備える振動検出システムのシステム構成を示す図である。

【図12】測定振動信号の離散フーリエ変換の結果を模式的に示す図である。

【図13】震源装置及び受振装置の実験時の設置例を示す図である。

【図14】実験結果の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

〔振動検出システムSの概要〕

初めに、図1を参照して、本発明の振動検出システムSの概要について説明する。図1は、振動検出システムSのシステム構成を模式的に示す図である。

図1に示すように、振動検出システムSは、信号処理装置1と、震源装置50と、複数の受振装置60と、を含んで構成される。なお、信号処理装置1、震源装置50及び受振装置60は、GPSシステム100により同期がとられている。

30

【0023】

震源装置50は、制御された定常の振動波を人為的に発生させ、地下に向かって放射する。ここで、震源装置50が発生させる振動波の概要を、図2に示す。図2に示すように、震源装置50は、所定の周期（例えば、200秒）で繰り返される振動波を発生する。震源装置50から発生する振動波は、所定の周期内で周波数が変化するスイープ波形を有する。具体的には、本実施形態の震源装置50は、200秒周期内で5Hzから50Hzの間で周波数が変化する振動波を発生させる。

【0024】

40

複数の受振装置60は、夫々が異なる地点に設置される3軸（XYZ）の地震計である。夫々の受振装置60は、震源装置50から発生し地盤を介して伝達された振動波（応答波）に基づく振動信号を受信し、設置地点における地中の振動を測定する。

ここで、受振装置60の近傍で水圧破砕を行った場合や、自然地震が発生した場合等は、受振装置60は、震源装置50が発生した振動波に基づく振動信号に加えて、水圧破砕に伴うマイクロサismicに基づく振動信号、及び自然地震に基づく振動信号も併せて受信することになる。なお、以下では、受振装置60が受信した振動信号を測定振動信号と呼ぶ。この測定振動信号の中には、震源装置50から発生した振動波に基づく振動信号に加え、マイクロサismicや自然地震に基づく振動信号が含まれるが、測定振動信号の中のマイクロサismicや自然地震に基づく振動信号を、以下では、差分信号と呼ぶ

50

。

【 0 0 2 5 】

信号処理装置 1 は、複数の受振装置 6 0 の夫々と通信可能に接続され、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号を取得し解析する。具体的には、信号処理装置 1 は、測定振動信号から震源装置 5 0 の振動波に基づく影響を除去して、差分信号を抽出する。なお、信号処理装置 1 は、震源装置 5 0 と通信可能に接続され、震源装置 5 0 から必要に応じて各種情報を取得することとしてもよい。

以下、信号処理装置 1 が差分信号を抽出するための具体的な構成について説明する。

【 0 0 2 6 】

[信号処理装置 1 の構成]

図 3 は、信号処理装置 1 の機能構成を示すブロック図である。図 3 に示すように、信号処理装置 1 は、通信部 2 と、蓄積部 3 と、制御部 4 と、を含んで構成される。

【 0 0 2 7 】

通信部 2 は、有線又は無線の所定の通信回線を介して、震源装置 5 0 及び受振装置 6 0 の夫々との間で各種情報の送受信を行う。一例として、通信部 2 は、受振装置 6 0 の夫々から、夫々の受振装置 6 0 で測定した測定振動信号を受信する。受振装置 6 0 から受信した測定振動信号は、制御部 4 に供給され、制御部 4 において震源装置 5 0 の振動波に基づく影響が除去され、差分信号が抽出される。

また、通信部 2 は、震源装置 5 0 から、震源装置 5 0 の動作のログ情報を受信する。このログ情報を解析することで、信号処理装置 1 は、震源装置 5 0 から発生する振動波を算出することができる。図 2 に示すように、定常運転中において震源装置 5 0 は精密に制御されているため、発生する振動波も予め制御されたものとなる。これに対して、後述する反転期間は、震源装置 5 0 の制御が安定しないため、発生する振動波も安定しない。この点、このような制御が安定しない期間であっても、信号処理装置 1 は、ログ情報を用いて振動波を算出することができる。

【 0 0 2 8 】

図 3 に戻り、蓄積部 3 は、例えば、ROM 及び RAM 等により構成される。蓄積部 3 は、信号処理装置 1 を機能させるための各種プログラムや各種データを蓄積する。また、蓄積部 3 は、通信部 2 を介して震源装置 5 0 及び受振装置 6 0 から受信した各種情報を蓄積する。具体的には、蓄積部 3 は、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号、及び震源装置 5 0 から受信したログ情報等を蓄積する。

【 0 0 2 9 】

なお、地盤の伝達関数は、気象や温度等の環境条件に応じて異なることがあり、環境条件が異なる場合には、震源装置 5 0 から発生した振動波が、受振装置 6 0 において異なる振動信号として受信されることがある。極端な一例としては、冬季において地盤が凍結し、夏季において凍結した地盤が解凍される寒冷地では、冬季の凍結した地盤の伝達関数と、夏季のぬかるんでいる地盤の伝達関数とが異なり、受振装置 6 0 において受信する受振信号も異なる。なお、後述する図 1 4 に示すように、降雨による影響が実際に確認された。そのため、蓄積部 3 は、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号（詳細には、後述の標準周期信号）を、環境条件に対応付けて蓄積することとしてもよい。

【 0 0 3 0 】

制御部 4 は、例えば CPU により構成される。制御部 4 は、蓄積部 3 に蓄積されている各種プログラムを実行することにより、信号処理装置 1 に係る機能を統括的に制御する。具体的には、制御部 4 は、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号から、震源装置 5 0 の振動波に基づく影響を除去した差分信号を抽出する。

【 0 0 3 1 】

ここで、制御部 4 の制御の概要を図 4 に示す。定常運転状態において、震源装置 5 0 から発生する振動波は精密に制御され、周期性を有するスイープ波形を有する（図 2 参照）。そのため、自然地震等の他の振動が発生していない状況では、受振装置 6 0 は、略一定の測定振動信号を周期的に受信することになる。本実施形態では、このような略一定の測

10

20

30

40

50

定振動信号を、標準周期信号として算出する。

【0032】

一方、自然地震等が発生した場合、受振装置60は、震源装置50から発生する振動波と自然地震等に伴う振動波とに基づく測定振動信号を受信することになる。そこで、制御部4は、受振装置60が受信した測定振動信号から、標準周期信号を減算することで、受振装置60による影響を除去し、自然地震等に伴う振動波に基づく差分信号のみを抽出する。より具体的には、測定振動信号を、標準周期信号と同じ長さの個別周期信号に分離し、この個別周期信号から標準周期信号を減算することで、差分信号を抽出する。

以下、制御部4の具体的な構成について説明する。

【0033】

[定常運転中の制御]

初めに、震源装置50が定常運転中に、制御部4が行う制御について説明する。

ここで、人為的に振動波を発生させる震源装置として、鉛直又は水平方向のいずれか一方の振動波のみを発生する震源装置、及び、鉛直及び水平方向の双方の振動波を発生する震源装置が知られている。例えば、地面に対して上下振動を与えることで振動波を発生する震源装置は、鉛直方向の振動波のみを発生する震源装置であり、上述のACROSSのように偏心錘を回転させることで振動波を発生する震源装置は、鉛直及び水平方向の双方の振動波を発生する震源装置である。以下において説明する定常運転中の制御は、これら双方の震源装置において好適に適用することができる。

【0034】

図3に戻り、制御部4は、分離部41と、算出部42と、生成部43と、を含んで構成される。

【0035】

分離部41は、受振装置60が受信した測定振動信号から震源装置50が発生する振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する。ここで、震源装置50が発生する振動波の周期性に応じた周期とは、「震源装置50が発生する振動波の周期×N(N=2以上の整数)」である。本実施形態では、震源装置50が発生する振動波の周期が200秒であるので、分離部41は、測定振動信号から例えば400秒(N=2)毎の個別周期信号を分離する。

【0036】

算出部42は、分離した個別周期信号から標準周期信号を算出する。より具体的には、個別周期信号に対して離散フーリエ変換を行い、個別周期信号のばらつきの影響が抑制された標準周期信号を算出する。算出部42による標準周期信号の算出方法は任意であるが、図5を参照して、算出方法の一例について説明する。

【0037】

図5Aは、一の受振装置60において受信した測定振動信号の一例を示す図である。横軸は秒数を示し、縦軸は時間を示している。横軸が「0秒～3600秒」であるので、図5Aにおける1行は、1時間単位の測定振動信号の受信結果を示し、縦軸が「1時～24時」であるので、図5A全体では、1日単位の測定振動信号の受信結果を示す。

【0038】

上述したように、受振装置60が受信した測定振動信号のうち400秒毎の振動信号が、個別周期信号となる。算出部42は、400秒単位の個別周期信号に対して離散フーリエ変換を行う。図5Bは、離散フーリエ変換の結果を模式的に示す図である。

定常運転の震源装置50は、振動波が200秒周期のスイープ波形となるように精密に制御される。そのため、400秒単位で離散フーリエ変換を行うと、震源装置50から発生した振動波のスペクトルは、周波数 $F = 5.000, 5.005, 5.010, \dots, 49.995, 50.000 \text{ Hz}$ のように $0.005 \text{ Hz} (1/200)$ 毎に現れる。他方、周波数 $F + 0.0025 \text{ Hz} (1/400)$ には、震源装置50の振動波に基づく振動信号のスペクトルは現れず、地動ノイズ等のノイズが現れる。

【0039】

10

20

30

40

50

[定常運転中の標準周期信号の算出方法 1]

算出部 4 2 は、複数の個別周期信号を、複数の個別周期信号の夫々に含まれるノイズの分散の逆数を重みとして平均化することで、標準周期信号を算出する。具体的には、算出部 4 2 は、震源装置 5 0 から発生した振動波が現れる周波数 F に、周波数 $F + 0.0025 \text{ Hz}$ に現れるノイズ成分の分散の逆数を掛けた上で、複数の個別周期信号の平均値をとる。そして、算出した重み付け平均値を逆フーリエ変換し、標準周期信号を算出する。

このようなノイズの分散の逆数を重みとして用いることで、ノイズの影響を $1/M$ (M = 平均値の算出に用いる個別周期信号の数) にすることができる。即ち、個別周期信号の蓄積数を増やすことにより、ノイズの影響が低減する。

【 0 0 4 0 】

10

[定常運転中の標準周期信号の算出方法 2]

また、算出部 4 2 は、複数の個別周期信号の中央値を、標準周期信号として算出することとしてもよい。具体的には、算出部 4 2 は、震源装置 5 0 から発生した振動波が現れる周波数 F の複数の個別周期信号における中央値を取り、逆フーリエ変換することで、標準周期信号を算出する。

【 0 0 4 1 】

このように、ノイズの分散に基づく重み付け平均、又は周波数成分 N_2 の中央値から標準周期信号を算出することで、定常運転中の制御された振動波に基づく標準周期信号を推定することができる。

なお、震源装置 5 0 から発生した振動波の測定結果は、受振装置 6 0 の設置位置により異なる。そのため、算出部 4 2 は、複数の受振装置 6 0 の夫々について、標準周期信号を算出する。また、上述のように、震源装置 5 0 から発生した振動波の測定結果は、気象や温度等の環境条件に応じて異なる。そのため、算出部 4 2 は、環境条件に応じて標準周期信号を算出することが好ましい。

20

【 0 0 4 2 】

図 3 に戻り、生成部 4 3 は、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号から標準周期信号を減算し、測定振動信号と標準周期信号との差分を示す差分信号を生成する。このとき、生成部 4 3 は、受振装置 6 0 が測定振動信号を受信したときの環境条件に対応する標準周期信号に基づいて差分信号を生成することとしてもよい。

【 0 0 4 3 】

30

ここで、測定振動信号にマイクロサismicや自然地震等の他の振動に基づく振動信号が含まれない場合、同期間 (4 0 0 秒) における測定振動信号と標準周期信号とは略一致する。他方、測定振動信号にマイクロサismicや自然地震等の他の振動に基づく振動信号が含まれる場合、同期間の測定振動信号であっても、この振動信号の分だけ標準周期信号と異なる。そのため、生成部 4 3 が生成した差分信号を観察することで、震源装置 5 0 が動作している状況であっても、受振装置 6 0 においてマイクロサismicや自然地震等を検出することができる。

【 0 0 4 4 】

[定常運転中の処理フロー]

図 6 は、震源装置 5 0 が定常運転中の制御部 4 の処理の流れを示すフローチャートである。

40

【 0 0 4 5 】

ステップ S 1 において、通信部 2 が受振装置 6 0 から測定振動信号を受信すると、蓄積部 3 は、受信した測定振動信号を蓄積する。続いて、ステップ S 2 において、分離部 4 1 は、測定振動信号を、震源装置 5 0 が発生する振動波の周期性に応じた周期を有する個別周期信号に分離する。

【 0 0 4 6 】

続いて、ステップ S 3 において、算出部 4 2 は、個別周期信号から標準周期信号を算出する。具体的には、算出部 4 2 は、ノイズに対応する周波数成分 $N_2 + 0.0025 \text{ Hz}$ の分散の逆数を重みとした重み付け平均、又は震源装置 5 0 から発生した振動波が現れる

50

周波数成分 N_2 の中央値に基づいて、標準周期信号を算出する。続いて、ステップ S 4 において、生成部 4 3 は、測定振動信号から標準周期信号を減算し、震源装置 5 0 の影響を除去する。

【 0 0 4 7 】

以上、震源装置 5 0 が定常運転中の制御の詳細について説明した。続いて、震源装置 5 0 が反転運転可能である場合の制御について説明する。

【 0 0 4 8 】

[能動的地震探査の概要]

震源装置 5 0 を用いた能動的地震探査は、大まかに説明すると、震源装置 5 0 から発生した振動波の振動信号と、受振装置 6 0 が受信した測定振動信号とから、地盤の伝達関数を求め、この伝達関数を用いて振幅解析や走時解析を行う。

10

【 0 0 4 9 】

ここで、上述の A C R O S S のような偏心錘を回転させることで振動波を発生させる震源装置では、鉛直及び水平方向の振動波が発生する。図 7 は、このような震源装置 5 0 を模式的に示す図であり、図 7 (A) は、震源装置 5 0 の斜視図を示し、図 7 (B) は、震源装置 5 0 の正面図を示す。

図 7 (A) に示すように、震源装置 5 0 は、回転軸 5 1 に対し偏心した錘 5 2 をサーボモータ 5 3 で精密に制御して回転させることで、振動波を発生させる。

【 0 0 5 0 】

図 7 (B) に示すように、錘 5 2 を正方向に回転させた場合に水平方向「 X 」、鉛直方向「 Z 」の振動波が震源装置 5 0 から発生すると想定すると、錘 5 2 を逆方向に回転させた場合には水平方向「 - X 」、鉛直方向「 Z 」の振動波が震源装置 5 0 から発生することになる。

20

そこで、震源装置 5 0 は、第 1 期間に第 1 極性の振動信号を有する第 1 振動波を発生させ、第 1 期間と同じ長さの第 2 期間に第 1 極性を水平方向又は鉛直方向に反転させた第 2 極性の振動信号を有する第 2 振動波を発生させる。具体的には、震源装置 5 0 は、第 1 期間に錘 5 2 を正方向に回転させて水平方向「 X 」、鉛直方向「 Z 」の振動波を発生させ、第 2 期間に錘 5 2 を逆方向に回転させて水平方向「 - X 」、鉛直方向「 Z 」の振動波を発生させる。

【 0 0 5 1 】

30

ここで、震源装置 5 0 が発生させる振動波の一例を図 8 に示す。図 8 において横軸は時間 (秒) であり、縦軸は振動波のサイン付の周波数である。図 8 (A) は、錘 5 2 を正回転させた場合の 1 時間分の振動波の周波数を示し、図 8 (B) は、図 8 (A) の次の 1 時間において錘 5 2 を逆回転させた場合の 1 時間分の振動波の周波数を示す。

なお、図 8 では、「 0 秒 ~ 2 8 0 0 秒 」の間は、震源装置 5 0 を定常運転 (正回転又は逆回転) しており、「 2 8 0 0 秒 ~ 3 0 0 0 秒 」の間では、震源装置 5 0 を反転制御している。また、「 3 0 0 0 秒 ~ 3 6 0 0 秒 」の間では、次の 1 時間のための慣らし運転 (逆回転又は正回転) を行っている。

【 0 0 5 2 】

正回転時に震源装置 5 0 から発生した振動波と逆回転時に震源装置 5 0 から発生した振動波とを加算すると、振動波の水平方向成分を除去することができ、正回転時に震源装置 5 0 から発生した振動波から逆回転時に震源装置 5 0 から発生した振動波を減算すると、振動波の鉛直方向成分を除去することができる。

40

同様に、正回転時に受振装置 6 0 で受信した測定振動信号と逆回転時に受振装置 6 0 で受信した測定振動信号とを加算すると、測定振動信号の水平方向成分を除去することができ、正回転時に受振装置 6 0 で受信した測定振動信号から逆回転時に受振装置 6 0 で受信した測定振動信号を減算すると、測定振動信号の鉛直方向成分を除去することができる。

【 0 0 5 3 】

このような水平方向成分又は鉛直方向成分を除去した振動波の振動信号や測定振動信号を用いることで、鉛直方向又は水平方向に着目した伝達関数を算出することができ、能動

50

的地震探査を多様な観点から実施することができる。

【 0 0 5 4 】

[反転運転に伴う制御]

ところで、偏心錘を回転させることで振動波を発生させる震源装置 5 0 の場合、偏心錘を一定の態様で回転可能な状況では、発生させる振動波を制御することができ、発生させる振動波の再現性を確保することができる。この偏心錘を一定の態様で回転可能な状況は、例えば、図 8 における定常運転中 (0 秒 ~ 2 8 0 0 秒) 及び慣らし運転中 (3 0 0 0 秒 ~ 3 6 0 0 秒) が該当する。

【 0 0 5 5 】

これに対して、反転運転中 (2 8 0 0 秒 ~ 3 0 0 0 秒) では、偏心錘を減速し、停止させた後に、逆方向へ加速させる必要がある。このように偏心錘を逆回転させる反転運転中は、震源装置 5 0 から発生する振動波を精密に制御することができず、再現性が低くなる。上述した定常運転中の標準周期信号を用いる制御は、震源装置 5 0 から発生する振動波の周期性に着目したものであり、振動波の再現性を確実に確保できない反転運転中に適用することは困難である。

そこで、本発明の振動検出システム S は、以下に示す方法により、震源装置 5 0 の反転運転中であっても、自然地震等の他の振動の検出を可能にしている。

【 0 0 5 6 】

[反転運転中の制御 1]

震源装置 5 0 が偏心錘を正回転させる第 1 期間と逆回転させる第 2 期間との間の反転期間に発生する振動波を、遷移振動波とする。以下に示す制御 1 では、算出部 4 2 は、複数回の反転期間において受振装置 6 0 が受信した遷移振動波に基づく測定振動信号の中央値を、当該反転期間における標準周期信号として算出する。

【 0 0 5 7 】

図 9 は、一の受振装置 6 0 において受信した測定振動信号の一例を示す図である。偏心錘の回転方向を 1 時間毎に反転させる場合、正回転から逆回転に反転する際の測定振動信号、及び逆回転から正回転に反転する際の測定振動信号を、1 日あたり夫々 1 2 データ取得することができる。

算出部 4 2 は、これら複数 (1 2 データ) の測定振動信号の中央値をとり、反転期間における標準周期信号を算出する。具体的には、算出部 4 2 は、反転期間中の任意の時間 T における測定振動信号 A 1 乃至 A 1 2 の中央値を、正回転から逆回転に反転する際の標準周期信号として算出する。また、算出部 4 2 は、反転期間中の任意の時間 T における測定振動信号 B 1 乃至 B 1 2 の中央値を、逆回転から正回転に反転する際の標準周期信号として算出する。

【 0 0 5 8 】

算出した標準周期信号を、反転運転時において受振装置 6 0 が受信した測定振動信号から減算することで、反転運転中であっても、震源装置 5 0 の影響を除去することができる。

本発明者らが制御 1 を用いて反転運転中の振動の検出を行ったところ、震源装置 5 0 の近傍 (1 0 m) の受振装置 6 0 を除き、他の受振装置 6 0 において $50 \mu\text{カイン} (= 5 \times 10^{-7} \text{ m/s})$ の地動データを検出することができた。また、自然地震のような一定の大きさ以上の振動は、全ての受振装置 6 0 において検出することができた。

【 0 0 5 9 】

[反転運転中の制御 2]

また、制御 2 では、算出部 4 2 は、震源装置 5 0 の定常運転中 (第 1 期間中又は第 2 期間中) に震源装置 5 0 から受振装置 6 0 までの地盤の伝達関数を算出しておき、反転運転中の遷移振動波と算出した伝達関数とに基づいて、反転期間における標準周期信号を算出する。

【 0 0 6 0 】

図 1 0 (A) に示すように、震源装置 5 0 から発生する振動波の振動信号を「 f ()

10

20

30

40

50

」、受振装置 60 において受信する測定振動信号を「 $R(\quad)$ 」とすると、震源装置 50 から受振装置 60 までの地盤の伝達関数 $H(\quad)$ は、以下の式により算出することができる。

$$H(\quad) = \frac{1}{f(\quad)} \times R(\quad)$$

【0061】

反転運転時において、震源装置 50 から発生する振動波は制御されておらず予め把握することはできないものの、信号処理装置 1 は、震源装置 50 の動作のログ情報（例えば、偏心錘の位置や速度等）から、震源装置 50 から実際に発生している振動波を算出することができる。そのため、反転運転時であっても、震源装置 50 から発生する振動波の振動信号 $f(\quad)$ を取得することができる。

10

また、震源装置 50 から受振装置 60 までの地盤の伝達関数 $H(\quad)$ は、定常運転時において既に算出しているため、標準周期信号 $R'(\quad)$ は、以下の式により算出することができる。

$$R'(\quad) = H(\quad) \times f(\quad)$$

【0062】

このようにして算出した標準周期信号 $R'(\quad)$ を、反転運転時において受振装置 60 が実際に受信した測定振動信号 $R(\quad)$ から減算することで、精密な制御が困難な反転運転中であっても、震源装置 50 の影響を除去し、自然地震等の他の振動を検出することができる。

【0063】

20

なお、定常運転中に水圧破碎等を行い地盤にフラクチャー（割れ目）を発生させた場合、伝達関数 $H(\quad)$ は、厳密にみると変化している。このような変化は、半年や 1 年等のような時間間隔でみると変化の蓄積により無視することができなくなるものの、単発又は少数回のフラクチャー発生であれば、震源装置 50 の振動波のレベルでみると十分に無視できる。そのため、反転運転の近傍（例えば、直前の 24 時間）の定常運転中に算出した伝達関数 $H(\quad)$ を用いたとしても、震源装置 50 の影響を除去することができ、自然地震等の他の振動を検出することができる。

【0064】

ところで、本実施形態では、震源装置 50 は、正回転の定常運転中に「 $5\text{ Hz} \sim 50\text{ Hz}$ 」の間で変化する振動波を発生させ、逆回転の定常運転中に「 $-5\text{ Hz} \sim -50\text{ Hz}$ 」の間で変化する振動波を発生させる。そのため、定常運転中には、震源装置 50 から「 $\pm 5\text{ Hz} \sim \pm 50\text{ Hz}$ 」の範囲の振動波が発生することになり、この「 $\pm 5\text{ Hz} \sim \pm 50\text{ Hz}$ 」の範囲において、伝達関数 $H(\quad)$ を算出することができる。

30

【0065】

ここで、反転運転中は、振動波の振動信号の極性が反転するため、震源装置 50 から「 $5\text{ Hz} \sim -5\text{ Hz}$ 」の範囲の振動波が発生することになる。この点、「 $5\text{ Hz} \sim -5\text{ Hz}$ 」の範囲の振動波は、定常運転中に発生することがないため、「 $5\text{ Hz} \sim -5\text{ Hz}$ 」の範囲の伝達関数 $H(\quad)$ を算出することはできない。

そのため、制御 2 による方法では、反転運転時の「 $5\text{ Hz} \sim -5\text{ Hz}$ 」の範囲では、標準周期信号 $R'(\quad)$ を算出することができない。

40

【0066】

しかしながら、「 $5\text{ Hz} \sim -5\text{ Hz}$ 」の振動波は十分に小さいため、震源装置 50 の近傍に位置する受振装置 60 以外では概ね無視することができる。実際、本発明者らが制御 2 を用いて反転運転中の振動の検出を行ったところ、震源装置 50 から 70 m 離れた受振装置 60 では、 $50\text{ }\mu\text{カイン} (= 5 \times 10^{-7} \text{ m/s})$ の地動データを検出することができた。

【0067】

また、震源装置 50 から発生させる振動波は制御することができるため、伝達関数 $H(\quad)$ を算出できない範囲があったとしても、震源装置 50 の影響をより軽減することができる。一例として、震源装置 50 から発生させる振動波を、「 $\pm 5\text{ Hz} \sim \pm 50\text{ Hz}$ 」で

50

はなく、「 $\pm 1 \text{ Hz} \sim \pm 50 \text{ Hz}$ 」の範囲とすることで、伝達関数 $H(\quad)$ を算出できない範囲を「 $1 \text{ Hz} \sim -1 \text{ Hz}$ 」に狭めることができ、震源装置 50 の影響を十分に小さくすることができる。

もちろん、定常運転中に算出した「 $\pm 5 \text{ Hz} \sim \pm 50 \text{ Hz}$ 」の範囲の伝達関数 $H(\quad)$ から、伝達関数を算出できない「 $5 \text{ Hz} \sim -5 \text{ Hz}$ 」の範囲の伝達関数を外挿し、用いることとしてもよい。

【0068】

[複数の震源装置 50 を用いる場合の制御]

震源装置 50 を用いた能動的地震探査は、発信元や受信先の数を増やすことで精度を高めることができたため、能動的地震探査では、複数の震源装置 50 を用いることがある。

10

続いて、複数の震源装置 50 を用いる場合の制御について説明する。

【0069】

図 11 に示すように、複数(2台)の震源装置 50A, 50B を用いる場合、受振装置 60 において受信した測定振動信号から、夫々の震源装置 50A, 50B から発生した振動波に基づく振動信号を適切に分離する必要がある。そこで、震源装置 50A, 50B は、夫々異なる周波数の振動波を発生する。

図 11 に示す例では、震源装置 50A から発生させる振動波の周波数を「 $N(5 \text{ Hz} \sim 50 \text{ Hz})$ 」とし、震源装置 50B から発生させる振動波の周波数を「 $N + 0.0025 \text{ Hz}(5.0025 \text{ Hz} \sim 50.0025 \text{ Hz})$ 」としている。震源装置 50A, 50B をこのように制御した場合、200 秒毎に震源装置 50A, 50B の位相が反転し、400 秒毎に震源装置 50A, 50B の位相が一致する。

20

【0070】

そこで、分離部 41 は、受振装置 60 が受信した測定振動信号から、震源装置 50A, 50B が発生する振動波夫々の周期性に応じた周期を有する個別周期信号を分離する。図 11 に示す例では、震源装置 50A, 50B の位相は、400 秒毎に一致するため、分離部 41 は、測定振動信号から、例えば、800 秒毎の個別周期信号を分離する。

【0071】

そして、算出部 42 が、分離した個別周期信号(800 秒)に対して離散フーリエ変換を行うと、図 12 に示すように、震源装置 50A から発生した振動波のスペクトルは、周波数 $N = 5.000, 5.005, 5.010, \dots, 49.995, 50.000 \text{ Hz}$ に現れ、震源装置 50B から発生した振動波のスペクトルは、周波数 $N + 0.0025 = 5.0025, 5.0075, 5.0125, \dots, 49.9975, 50.0025 \text{ Hz}$ に現れる。

30

これにより、震源装置 50A, 50B から発生した振動波に基づく振動信号を適切に分離することができる。

【0072】

なお、以降の制御は、既に説明したのと同様であるため、詳細は省略するが、一例として、周波数 $N + 0.00125$ には、震源装置 50A, 50B の振動波のスペクトルは現れず、地動ノイズ等のノイズが現れるため、例えば、「定常運転中の標準周期信号の算出方法 1」において説明したのと同様に、ノイズの分散の逆数を用いた重み付け平均等により標準周期信号を算出することができる。

40

【0073】

[実験データ]

以上、本発明の振動検出システム S の実施形態について説明した。続いて、本発明者が柏崎テストフィールドにおいて行った実験データの一部を図 13, 14 に示す。

図 13 に示すように、本発明者らはテストフィールドに 2 台の震源装置 50A, 50B と、10 台の受振装置 60A 乃至 60J を設置し、受振装置 60A 乃至 60J において受信した測定振動信号から、震源装置 50A, 50B から発生した振動波による影響を除去する実験を行った。図 14 は、受振装置 60G における測定振動信号の原波形(図 14(A))と、影響除去処理後の差分信号の信号波形(図 14(B))とを示す図である。

50

【 0 0 7 4 】

なお、本発明者らは、本実験において、定常運転中「0秒～2800秒」、及び慣らし運転中「3000秒～3600秒」において、ノイズの分散の逆数を用いた重み付け平均を用いて標準周期信号を算出し、震源装置50A、50Bの振動波の影響を除去した。また、本発明者らは、反転運転中「2800秒～3000秒」において、複数（12データ）の測定振動信号の中央値から標準周期信号を算出し、震源装置50A、50Bの振動波の影響を除去した。

また、24時の「3000秒～3600秒」については、比較のため影響除去処理を行っていない。

【 0 0 7 5 】

図14を参照すると、震源装置50A、50Bの振動波の影響を適切に除去できていることを確認できる。その結果、例えば、符号111の時点において発生した自然地震も受振装置60Gにおいて適切に検出できている。

なお、符号112の時点において処理後の信号波形が若干乱れている。本発明者らが気象データを確認すると、符号112の時点において雨が降っていたことが確認できた。このことから、気象や温度等の環境条件と受振装置60で受信する測定振動信号との間に著しい相関があることが分かった。

【 0 0 7 6 】

[振動検出システムSの効果]

以上説明した本発明の振動検出システムSによれば、以下の効果を期待できる。

【 0 0 7 7 】

振動検出システムSでは、受振装置60が受信した測定振動信号を個別周期信号に分離する。個別周期信号は、震源装置50から発生する振動波の周期性に応じた周期毎に分離されることになるため、測定振動信号に自然地震等の他の振動信号が含まれていたとしても、複数の個別周期信号を比較することで、他の振動信号が含まれていない標準的な周期信号（標準周期信号）を算出することができる。

このように算出した標準周期信号は、自然地震等の他の振動信号の影響が除去され、震源装置50の振動波に基づく振動信号による影響が現れるため、受振装置60が受信した測定振動信号から標準周期信号を減算することで、震源装置50の振動波の影響を除去することができる。これにより、震源装置50の運転中であっても、受振装置60において、自然地震等の他の振動の検出を行うことができる。

【 0 0 7 8 】

なお、震源装置50が周期内で周波数が変化する振動波を発生させることで、様々な地質の地盤を探索することができ、好適である。

【 0 0 7 9 】

また、標準周期信号を、ノイズの分散の逆数を用いた重み付け平均や、震源装置50の振動波が現れる周波数成分の中央値を用いて算出することで、自然地震等の他の振動の影響を適切に除去した標準周期信号を算出することができ、好適である。

【 0 0 8 0 】

また、気象や温度等の環境条件と受振装置60で受信する測定振動信号との間には、著しい相関があるため、標準周期信号を環境条件に対応付けて蓄積することで、雨天等であっても、震源装置50の運転中に自然地震等の他の振動の検出を行うことができ、好適である。

【 0 0 8 1 】

また、振動検出システムSでは、震源装置50から、第1極性の振動信号を有する第1振動波と、第1極性を水平方向又は鉛直方向に反転させた第2極性の振動信号を有する第2振動波と、を発生させ、第1振動波を発生する第1期間と、第2振動波を発生する第2期間とが繰り返されるように、震源装置50を制御する。

振動検出システムSでは、この第1振動波の受信結果である測定振動信号と、第2振動波の受信結果である測定振動信号とを加減算することで、震源装置50から発生した振動

10

20

30

40

50

波の水平方向成分や鉛直方向成分を除去することができる。その結果、振動検出システムSでは、能動的地震探査を多様な観点から実施することができる。

【0082】

なお、震源装置50の定常運転中は発生する振動波を精密に制御することができるものの、極性を反転する反転運転中は、発生する振動波を精密に制御することはできない。この点、振動検出システムSでは、反転運転中の遷移振動波の受信結果である測定振動信号の中央値や、定常運転中に算出しておいた伝達関数H()を用いることで、実用に耐えるレベルの精度で、震源装置50の振動波の影響を除去することができる。そのため、震源装置50の反転運転中であっても、自然地震等の他の振動の検出を行うことができる。

【0083】

また、振動検出システムSでは、震源装置50を複数台設けた場合であっても、夫々の震源装置50の振動波の影響を除去することができるため、能動的地震探査を精度良く行うことができる。

【0084】

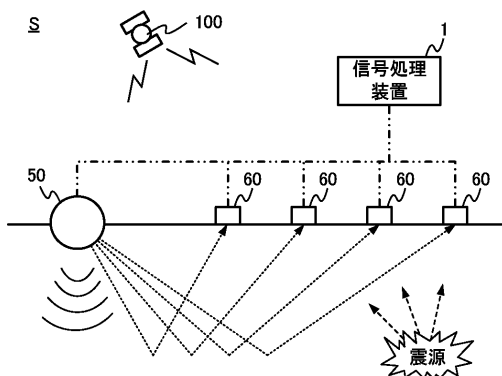
以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更又は改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。そのような変更又は改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、特許請求の範囲の記載から明らかである。

【符号の説明】

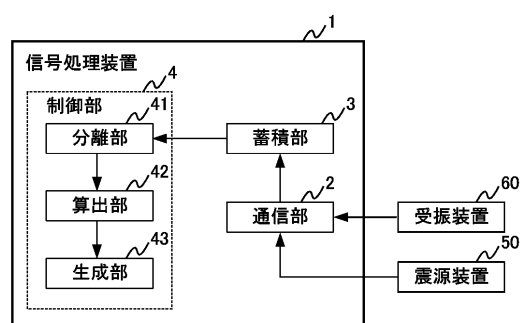
【0085】

1・・・信号処理装置、2・・・通信部、3・・・蓄積部、4・・・制御部、41・・・分離部、42・・・算出部、43・・・生成部、50・・・震源装置、60・・・受振装置、S・・・振動検出システム

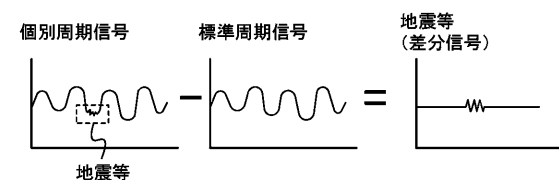
【図1】



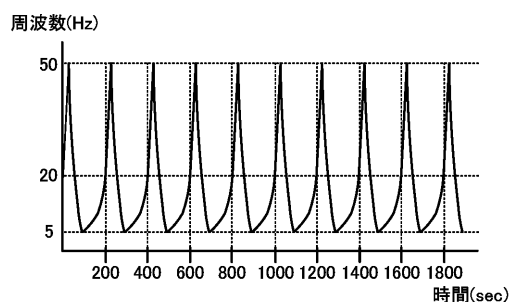
【図3】



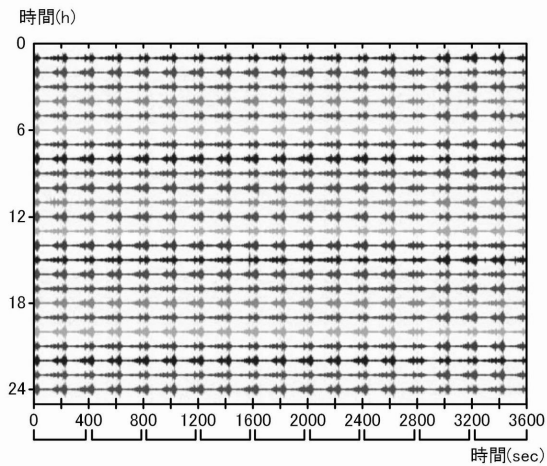
【図4】



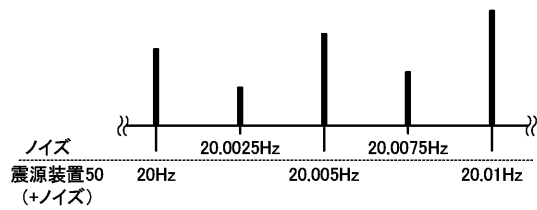
【図2】



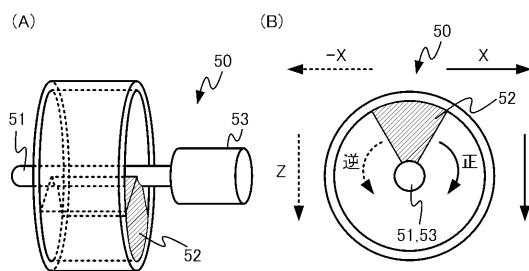
【図 5 A】



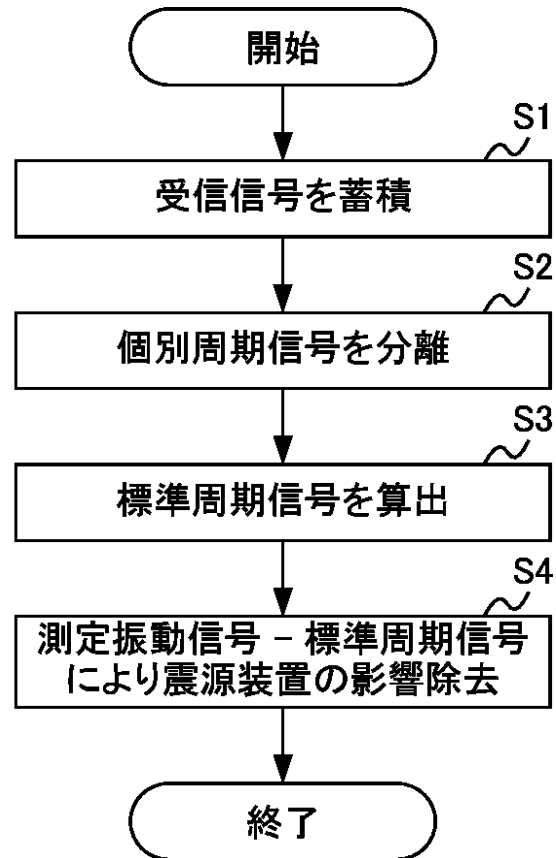
【図 5 B】



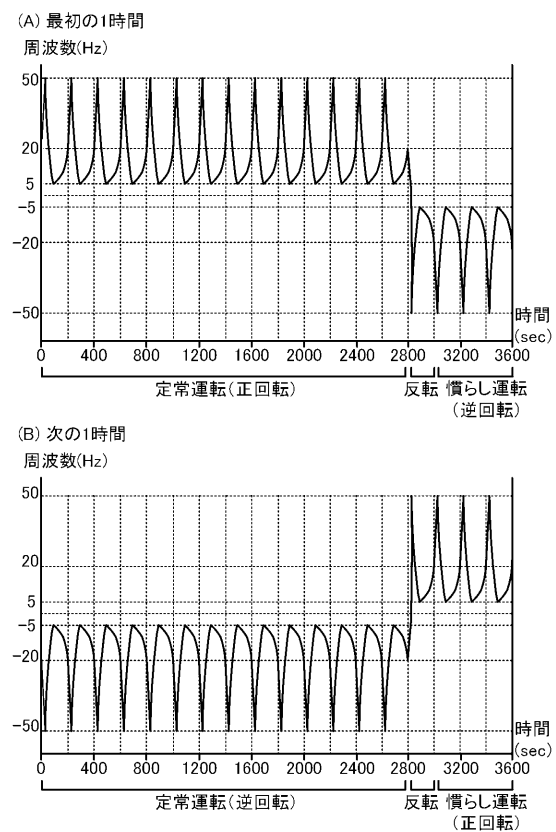
【図 7】



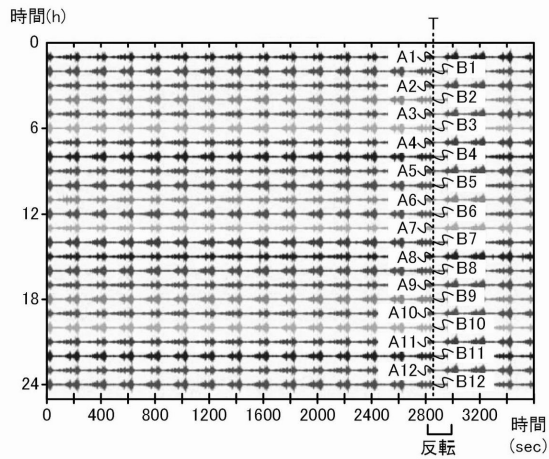
【図 6】



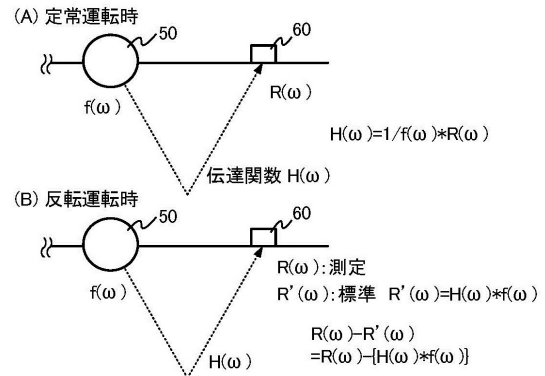
【図 8】



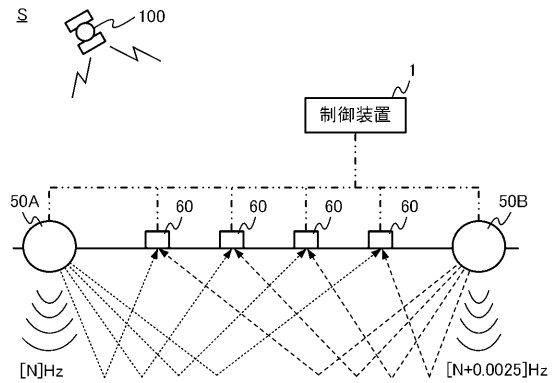
【図 9】



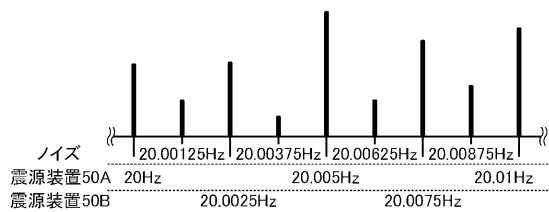
【図 10】



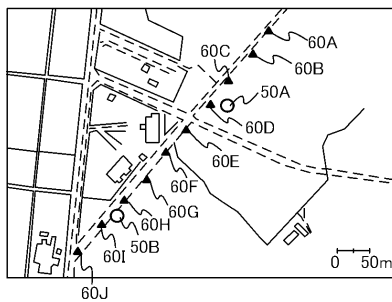
【図 11】



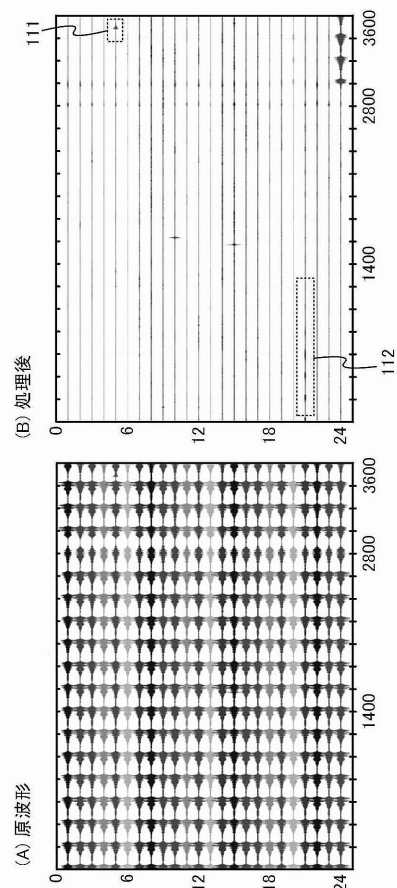
【図 12】



【図 13】



【図 14】



フロントページの続き

- (72)発明者 加藤 文人
東京都港区虎ノ門二丁目10番1号 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構内
- (72)発明者 笠原 順三
埼玉県南埼玉郡宮代町学園台2-4-12
- (72)発明者 羽佐田 葉子
東京都江東区古石場二丁目2番11号 大和探査技術株式会社内

審査官 安田 明央

- (56)参考文献 特開2012-108072(JP, A)
国際公開第2011/007706(WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01V 1/00-15/00