

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年1月31日(31.01.2019)



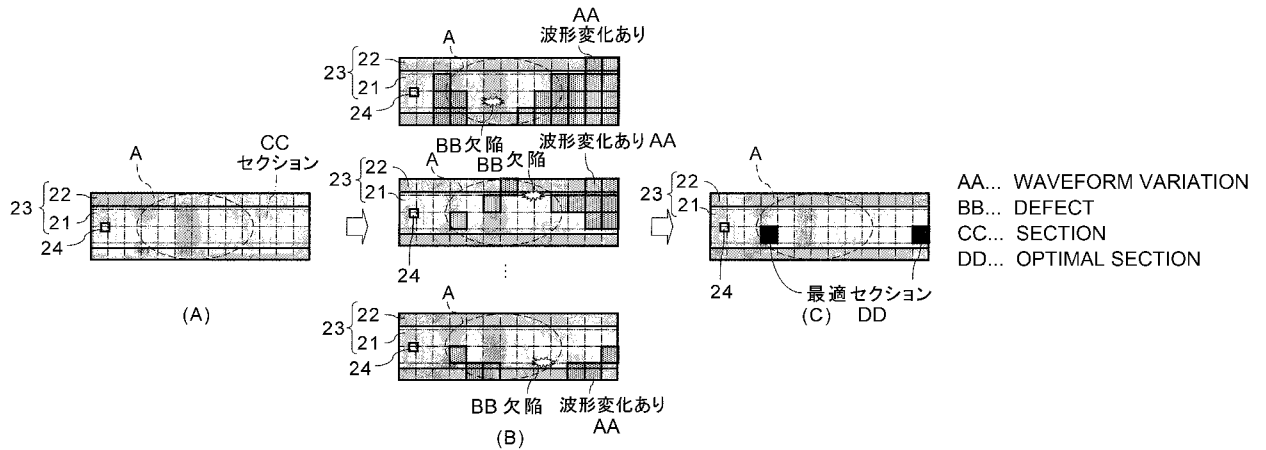
(10) 国際公開番号
WO 2019/021538 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 29/04 (2006.01) B64F 5/10 (2017.01) 葉 公三郎 (AKIBA, Kousaburou); 〒1508554 東京都渋谷区恵比寿一丁目20番8号 株式会社SUBARU内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2018/014307
- (22) 国際出願日: 2018年4月3日(03.04.2018) (74) 代理人: 山田 毅彦 (YAMADA, Takehiko); 〒3210132 栃木県宇都宮市雀の宮4-1-1 雀宮レジデンス201 Tochigi (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2017-145896 2017年7月27日(27.07.2017) JP
- (71) 出願人: 株式会社SUBARU (SUBARU CORPORATION) [JP/JP]; 〒1508554 東京都渋谷区恵比寿一丁目20番8号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 高橋 孝平 (TAKAHASHI, Kohei); 〒1508554 東京都渋谷区恵比寿一丁目20番8号 株式会社SUBARU内 Tokyo (JP). 秋
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: ULTRASONIC-INSPECTION-SYSTEM MANUFACTURING METHOD

(54) 発明の名称: 超音波検査システムの製造方法

[図4]



(57) Abstract: An ultrasonic-inspection-system manufacturing method according to an embodiment comprises a step for creating ultrasonic-inspection-system design information including ultrasonic sensor and ultrasonic transducer counts, positions, and orientations and an ultrasonic frequency by carrying out optimization calculation that uses, as a parameter, at least one from among an ultrasonic sensor count, ultrasonic sensor position, ultrasonic sensor orientation, ultrasonic transducer count, ultrasonic transducer position, ultrasonic transducer orientation, and ultrasonic frequency and includes ultrasonic inspection simulation that uses a model imitating an object subjected to ultrasonic inspection for detecting the presence of a defect using an ultrasonic inspection system comprising at least one ultrasonic sensor and at least one ultrasonic transducer, and a step for assembling an ultrasonic inspection system on the basis of the design information.



WO 2019/021538 A1

SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約: 実施形態に係る超音波検査システムの製造方法は、少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを用いた超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算であって、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波周波数の少なくとも1つをパラメータとする最適化計算を行うことによって、超音波センサ及び超音波振動子の数、位置及び向き並びに超音波周波数を含む超音波検査システムの設計情報を作成するステップと、設計情報に基づいて超音波検査システムを組立てるステップとを有する。

明 細 書

発明の名称：超音波検査システムの製造方法

技術分野

[0001] 本発明の実施形態は、超音波検査システムの製造方法、超音波検査システムの設計システム、超音波検査システムの設計プログラム、航空機構造体の製造方法、超音波検査システム及び航空機構造体に関する。

背景技術

[0002] 従来、物体の欠陥を非破壊で検査する方法として超音波検査法が知られている（例えば特許文献1乃至3参照）。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2011-191230号公報
特許文献2：特開2013-088421号公報
特許文献3：特開2014-194379号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 超音波検査を正確に行うためには、超音波を発振する超音波振動子と、超音波を検出するセンサを、検査領域に応じた適切な位置に配置することが重要である。すなわち、検査領域に超音波が送信され、検査領域を經由した超音波を検出することが可能となる位置に超音波振動子及び超音波センサを配置することが必要である。

[0005] このため、例えば、航空機構造体のように検査領域が広い場合には、検査領域をカバーできるように、複数の超音波振動子及び超音波センサを配置することが必要となる。但し、超音波振動子及び超音波センサの数が増えると、部品の数が増えるため、超音波振動子及び超音波センサの数は少ない方が好ましい。特に、検査対象が航空機である場合には、超音波振動子及び超音波センサの数が増えると、機体の重量増加に繋がる。

[0006] そこで、従来、航空機構造体を模擬した多数の供試体を用いて試行錯誤を繰り返すことによって、超音波振動子及び超音波センサの適切な数及び位置が決定されている。このため、航空機設計における多大な労力の要因となっている。

[0007] 一方、超音波振動子及び超音波センサの位置が不適切であると、検査領域がカバーされず、検出すべき欠陥を検出することができなくなる恐れがある。すなわち、超音波振動子及び超音波センサの不適切な配置は、欠陥の検出精度の劣化に繋がる。従って、検査領域が確実にカバーされるように、適切な位置に超音波振動子及び超音波センサを配置することが重要である。

[0008] そこで、本発明は、より少ない構成要素で、より高精度に超音波検査を行うことができるようにすることを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明の実施形態に係る超音波検査システムの製造方法は、少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算であって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとする前記最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成するステップと、前記設計情報に基づいて前記超音波検査システムを組立てるステップとを有する。

[0010] また、本発明の実施形態に係る超音波検査システムの設計システムは、モデル化部及び設計情報作成部を有する。モデル化部は、少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システム

により欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを作成する。設計情報作成部は、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとして前記モデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成する。

[0011] また、本発明の実施形態に係る超音波検査システムの設計プログラムは、コンピュータに、少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを作成するステップと、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとして前記モデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成するステップとを実行させるものである。

[0012] また、本発明の実施形態に係る航空機構造体の製造方法は、上述した超音波検査システムの製造方法で組立てられる前記超音波検査システムを航空機構造体に組付けるものである。

[0013] また、本発明の実施形態に係る超音波検査システムは、超音波振動子、超音波センサ及び信号処理系を備える。超音波振動子は、超音波検査の対象工

リアに向けて超音波を発振する。超音波センサは、前記対象エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記対象エリアで反射した前記超音波の反射波の少なくとも一方を検出して超音波検出信号を出力する。信号処理系は、前記超音波検出信号の基準波形からの波形変化を検出し、検出した前記波形変化に基づいて前記対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する。前記超音波振動子及び前記超音波センサの少なくとも一方は、前記超音波検査の対象となる物体の表面に仮想的に設けられた複数のセクションのうち、前記対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、前記信号処理系において検出可能な波形変化が前記超音波検出信号に生じる確率が最も高くなるセクション内に配置される。

[0014] また、本発明の実施形態に係る超音波検査システムは、少なくとも1つの超音波振動子、少なくとも1つの超音波センサ及び信号処理系を備える。超音波振動子は、超音波検査の対象エリアであって、ウェブとフランジを有する前記対象エリアに向けて超音波を発振する。超音波センサは、前記対象エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記対象エリアで反射した前記超音波の反射波の少なくとも一方を検出して超音波検出信号を出力する。信号処理系は、前記超音波検出信号の基準波形からの波形変化を検出し、検出した前記波形変化に基づいて前記対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する。前記超音波振動子及び前記超音波センサの数及び位置は、前記対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても前記欠陥によって生じる前記超音波検出信号の波形変化を前記信号処理系で検出することができる数及び位置である。

[0015] また、本発明の実施形態に係る航空機構造体は、上述した超音波検査システムを設けたものである。

図面の簡単な説明

[0016] [図1]本発明の実施形態に係る超音波検査システムの設計システムの機能ブロック図。

[図2]図1に示す設計システムによる設計対象となる超音波検査システム及び超音波検査の対象となる航空機構造体の一例を示す正面図。

[図3]図 2 に示す超音波検査システム及び航空機構造体の下面図。

[図4]図 1 に示す設計システムのモデル化部において作成された F E M モデルを用いた超音波伝搬解析シミュレーションを行うことによって超音波センサの位置を最適化する場合の例を示す図。

[図5]損傷の無い検査領域を透過した超音波検出信号の一例を示すグラフ。

[図6]損傷がある同一の検査領域を透過した超音波検出信号の一例を示すグラフ。

[図7]図 1 に示す超音波検査システムの設計システムにより実行される最適化計算の流れの一例を示すフローチャート。

[図8]図 4 に例示されるように F E M モデルに対して設定された各セクション内において超音波の模擬波形が模擬欠陥によって変化したか否かを判定するためのアルゴリズムの一例を示すフローチャート。

実施形態

[0017] 本発明の実施形態に係る超音波検査システムの製造方法、超音波検査システムの設計システム、超音波検査システムの設計プログラム、航空機構造体の製造方法、超音波検査システム及び航空機構造体について添付図面を参照して説明する。

[0018] (超音波検査システムの設計システムの構成及び機能)

図 1 は本発明の実施形態に係る超音波検査システムの設計システムの機能ブロック図である。

[0019] 超音波検査システムの設計システム 1 は、少なくとも 1 つの超音波センサ及び少なくとも 1 つの超音波振動子を備えた超音波検査システムの最適設計を行うシステムである。具体的には、超音波検査システムの設計システム 1 は、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも 1 つをパラメータとする最適化計算を行うことによって、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き

及び超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む超音波検査システムの設計情報を作成する機能を有している。

[0020] 超音波検査システムの設計システム 1 は、入力装置 2 及び表示装置 3 を備えたコンピュータ 4 に超音波検査システムの設計プログラムを読込ませることによって構築することができる。すなわち、超音波検査システムの設計システム 1 は、情報処理回路類によって構成することができる。

[0021] 超音波検査システムの設計システム 1 は、コンピュータ 4 に超音波検査システムの設計プログラムを読込ませることによって、コンピュータ 4 を、モデル化部 5 及び設計情報作成部 6 として機能させたものとすることができる。

[0022] モデル化部 5 は、超音波検査システムによって欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを作成する機能を有する。一方、設計情報作成部 6 は、モデル化部 5 で作成されたモデルを用いた超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む超音波検査システムの設計情報を作成する機能を有する。

[0023] 従って、超音波検査システムの設計プログラムは、少なくとも、超音波検査の対象を模擬したモデルを作成するステップと、超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、超音波検査システムの設計情報を作成するステップを、コンピュータ 4 に実行させるプログラムである。情報処理回路類にインストールされる超音波検査システムの設計プログラムは、情報記録媒体に記録してプログラムプロダクトとして流通させることもできる。

[0024] 図 2 は、図 1 に示す設計システム 1 による設計対象となる超音波検査システム及び超音波検査の対象となる航空機構造体の一例を示す正面図であり、図 3 は図 2 に示す超音波検査システム及び航空機構造体の下面図である。

[0025] 図 2 及び図 3 に例示されるように、航空機構造体 10 に超音波検査システ

ム 11 を搭載することができる。そして、航空機構造体 10 を、超音波検査システム 11 による超音波検査の対象とすることができる。すなわち、超音波検査システム 11 による超音波検査によって、航空機構造体 10 に生じ得る欠陥を検出することができる。

[0026] 検出対象となる欠陥の例としては、鳥や石の衝突等によって生じる損傷、凹み、複合材を構成する繊維の破断、複合材を構成する繊維強化樹脂層間における剥離の他、雷撃による焦げ、ファスナの脱落や弛みが挙げられる。

[0027] 図 2 及び図 3 に示す例では、航空機構造体 10 が湾曲したパネル 10A に複数のストリング 10B 及び複数のフレーム 10C を取付けた構造を有している。複数のストリング 10B 及び複数のフレーム 10C は、概ね長手方向が互いに直交する向きでパネル 10A に取付けられている。ストリング 10B 同士及びフレーム 10C 同士は、概ね長さ方向が平行となるように配置されているが、ストリング 10B の長さ方向とフレーム 10C の長さ方向が概ね垂直となるように、複数のストリング 10B 及び複数のフレーム 10C が湾曲したパネル 10A に取付けられている。

[0028] その結果、パネル 10A 上には、隣接する 2 つのストリング 10B と、隣接する 2 つのフレーム 10C によってそれぞれ囲まれた多数のエリアが生じる。このような構造を有する航空機構造体 10 は、主として胴体の一部を構成する構造体として採用される。

[0029] そこで、ストリング 10B とフレーム 10C を取付けたパネル 10A のように板状の部材に補強材を取付けた構造体、すなわちウェブとフランジを有する構造体はもちろん、ハニカムサンドイッチ構造体やパネル単体等の所望の構造を有する航空機構造体を超音波検査の対象とすることができる。航空機構造体を構成するパネルに設けられる補強材としては、ストリングの他、スパーやリブが挙げられる。また、航空機構造体に限らず、自動車部品等を超音波検査の対象としてもよい。

[0030] 超音波検査を行うための超音波検査システム 11 は、超音波検査の対象エリアに向けて超音波を発振する超音波アクチュエータ等の少なくとも 1 つの

超音波振動子 11A、対象エリアを透過した超音波の透過波及び対象エリアで反射した超音波の反射波の少なくとも一方を検出して超音波検出信号を出力する少なくとも1つの超音波センサ 11B、対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する信号処理系 11C及び送信信号を生成し、生成した送信信号を超音波振動子 11Aに印加する送信回路 11Dで構成することができる。

[0031] 超音波センサ 11Bの例としては、超音波振動子の他、ファイバ・ブラッグ・グレーティング (FBG: Fiber Bragg Grating) センサや位相シフトFBG (PS-FBG: Phase-shifted FBG) センサ等の光ファイバセンサが挙げられる。尚、PS-FBGは、屈折率の周期的な変動に局所的な位相シフトを導入したFBGである。

[0032] 信号処理系 11Cは、超音波センサ 11Bから出力される超音波検出信号を受信する機能、受信した超音波検出信号の、基準波形からの波形変化を検出する機能及び検出した波形変化に基づいて超音波検査の対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する機能を有している。超音波センサ 11Bで検出された超音波検出信号の波形と比較される基準波形は、予め欠陥が無いことが確認された対象エリアを經由して取得された超音波検出信号の波形である。従って、超音波センサ 11Bで検出された超音波検出信号と、基準波形との比較によって、欠陥による超音波検出信号の波形変化を検出することができる。

[0033] 信号処理系 11Cは、A/D (analog-to-digital) 変換器及びコンピュータ等の回路で構成することができる。超音波センサ 11Bが光ファイバセンサである場合には、超音波センサ 11Bから出力される超音波検出信号を、光信号から電気信号に変換するための光電変換装置が信号処理系 11Cに備えられる。また、必要に応じて、光信号として超音波センサ 11Bから出力される超音波検出信号に対して信号処理を施すための波長フィルタや、光源からレーザ光を光ファイバセンサに向けて伝播させるための光路から光信号の出力経路を分岐させるための光サーキュレータ等の光

学系が信号処理系 11C に備えられる。

[0034] 従って、信号処理系 11C は、少なくとも回路で構成され、超音波センサ 11B が光ファイバセンサである場合には、必要な光学素子を構成要素として用いることができる。

[0035] 図 2 及び図 3 に示すように、超音波検査の対象がパネル 10A に複数のストリング 10B と複数のフレーム 10C を取付けた航空機構造体 10 である場合には、ストリング 10B と、フレーム 10C で囲まれた各エリアに、超音波検査システム 11 の超音波振動子 11A と、超音波センサ 11B を配置することができる。超音波検査の対象エリアは、パネル 10A の表面や内部のみならず、ストリング 10 とパネル 10A との間やフレーム 10C とパネル 10A との間など、超音波を伝搬させることが可能な所望のエリアとすることができる。

[0036] 図 2 及び図 3 に示す例では、超音波検査の対象エリアを透過した超音波を検出できるように超音波センサ 11B が配置されているが、対象エリアに生じた欠陥で反射する反射波を検出できるように超音波センサ 11B を配置することもできる。また、超音波振動子 11A から超音波センサ 11B に向かって直進する超音波のみならず、ストリング 10 やフレーム 10C 等のフランジで反射した超音波も、超音波センサ 11B で検出されることになる。

[0037] 尚、航空機部品、ビル、風車、橋梁、原子力施設、パイプライン等の構造物にセンサを設置し、構造物に設置したセンサで検出した超音波や加速度等の物理量の変化を解析することにより、構造物の劣化や損傷の発生位置或いは度合いを診断する技術は、構造健全性診断 (SHM: Structural Health Monitoring) 技術と呼ばれる。

[0038] 図 2 及び図 3 に示すような航空機構造体 10 はもちろん、様々な構造体の SHM 等のための超音波検査を行う場合には、適切な数の超音波振動子及び超音波センサを適切な位置に配置することが望ましい。すなわち、検査エリア内における欠陥の検出精度が確保されるように、欠陥に起因する超音波の波形変化が確実に検出できるような適切な数の超音波振動子及び超音波セン

サを適切な位置に配置することが重要である。

[0039] また、超音波振動子及び超音波センサの数を低減できれば、超音波検査システムを構成する部品点数を減らすことができる。特に、超音波検査の対象が航空機構造体である場合には、部品点数の減少は、航空機に重要な重量の低減に繋がる。従って、欠陥の検出精度を維持しつつ、必要最小限の超音波振動子及び超音波センサを最適な位置に配置することが望ましい。

[0040] また、超音波振動子及び超音波センサは指向性を有する場合が多い。従って、超音波振動子及び超音波センサの向きについても、必要最小限の超音波振動子及び超音波センサを用いて欠陥の検出精度を維持できるような向きに決定することが望ましい。

[0041] 加えて、損傷等の欠陥に起因する超音波の波形変化は、超音波の周波数にも依存して変化する。従って、超音波振動子から発振される超音波の周波数に依存して欠陥の検知能及び検知範囲が変化することになる。このため、欠陥の検知能及び検知範囲がより向上するように超音波の周波数を決定することが望ましい。

[0042] そこで、超音波検査システムの設計システム1で、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとする最適化計算を行うことによって、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つを最適化することができる。

[0043] 最適化計算のアルゴリズムは、最適化対象となるパラメータ、超音波検査の目的、超音波検査の対象となる物体の構造、超音波検査が行われる環境等に応じて決定することができる。

[0044] 具体例として、超音波センサの数及び超音波振動子の数を一定とし、検査エリア内の不確かな位置で生じる欠陥の検出精度が最大となるように、最適化計算によって超音波センサ及び超音波振動子の少なくとも一方の位置を最

適化することができる。この場合、対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、超音波検出信号に、信号処理系において検出可能な波形変化が生じる確率が最も高くなるときの、超音波センサ及び超音波振動子の少なくとも一方の位置を求める最適化計算を行うことができる。すなわち、超音波センサの位置及び超音波振動子の位置の少なくとも一方をパラメータとして最適化計算を行うことによって、超音波検査の対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、超音波センサで検出される超音波検出信号に波形変化が生じる確率が最も高くなるときのパラメータの値を求めることができる。

[0045] そうすると、一定数の超音波センサと超音波振動子の最適位置を含む超音波検査システムの設計情報を超音波検査システムの設計システム1で作成することができる。このように作成された設計情報に従って超音波検査システムを組立てれば、超音波振動子及び超音波センサの少なくとも一方が対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、信号処理系において検出可能な波形変化が超音波検出信号に生じる確率が最も高くなる位置に配置された超音波検査システムを製作することができる。

[0046] 或いは、超音波振動子及び超音波センサの位置のみならず、超音波振動子及び超音波センサの数並びに超音波の周波数についても最適化計算のパラメータとすることもできる。その場合には、検査エリア内の不確かな位置で生じる欠陥の検出精度が、要求される精度となるような、最小の超音波振動子及び超音波センサの数並びに超音波の周波数を最適化計算によって求めることができる。

[0047] すなわち、超音波検査の対象エリア内におけるどの位置で欠陥が生じても欠陥によって生じる超音波検出信号の波形変化を信号処理系で検出することができる超音波振動子及び超音波センサの数及び位置並びに超音波の周波数を最適化計算によって求めることができる。換言すれば、最適化計算によって、対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても、少なくとも1つの超音波センサで検出される超音波検出信号に、欠陥によって波形変化を生じさせるこ

とができる超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波振動子の数及び超音波振動子の位置並びに超音波の周波数を求めることができる。

[0048] この場合、超音波検査システムの設計システム1で作成された、超音波振動子及び超音波センサの数及び位置を含む設計情報に従って超音波検査システムを組立てれば、超音波振動子及び超音波センサの数及び位置並びに超音波の周波数が、対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても欠陥によって生じる超音波検出信号の波形変化を信号処理系で検出することができる数及び位置並びに超音波の周波数となっている超音波検査システムを製作することができる。

[0049] また、超音波振動子及び超音波センサの配置位置について自由度が低く、1次元の直線又は曲線上に任意数の複数の超音波振動子又は任意数の複数の超音波センサを等間隔で配置するような場合には、超音波振動子及び超音波センサの位置を最適化対象とせず、超音波振動子の数及び超音波センサの数のみを最適化対象とする最適化計算を行うこともできる。この場合には、欠陥の検出精度を制約条件とする最適化計算を行うことができる。これは、格子点間距離を可変することが可能な2次元又は3次元の格子点上に超音波振動子や超音波センサを規則的に配置するような場合においてもあてはまる。

[0050] また、超音波振動子及び超音波センサの数及び超音波の周波数を最適化計算のパラメータとすれば、超音波振動子及び超音波センサの数を最小とするために適切な超音波の周波数を求めることもできる。或いは、超音波の周波数のみを最適化計算のパラメータとしてもよい。その場合には、欠陥の検知能及び検知範囲が最大となる時の超音波の周波数を求めることができる。

[0051] 欠陥の位置が不確定である場合には、最適化計算において欠陥の位置を欠陥が発生し得る範囲内において変化させることができる。これにより、欠陥の位置に依らず超音波の波形変化を生じさせることが可能なパラメータの組み合わせ、すなわち超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超

音波の周波数を求めることができる。

[0052] また、欠陥の位置が同一であっても、超音波が伝搬する物体の温度や超音波が伝搬する物体周辺における湿度が異なれば、超音波の波形が無視できない程度に変化する可能性がある。そこで、欠陥の位置のみならず、超音波が伝搬する物体の温度や超音波が伝搬する物体周辺における湿度等の環境条件を変化させて最適化計算を行うこともできる。これにより、温度や湿度等の環境条件に依らず超音波の波形変化を生じさせることが可能なパラメータの組み合わせを求めることができる。

[0053] 加えて、欠陥の発生確率、欠陥の発生頻度、欠陥の種類又は欠陥の重みを最適化計算における条件とすることもできる。例えば、より回避すべき種類の欠陥や発生確率が高い位置で発生した欠陥が、より高精度に超音波の波形変化として検出できるように、パラメータの組み合わせを求めることもできる。

[0054] 従って、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置、超音波振動子の向き及び超音波の周波数等のパラメータの最適化を行う最適化計算では、欠陥の位置、超音波が伝搬する物体の温度、超音波が伝搬する物体周辺における湿度、欠陥の発生確率、欠陥の発生頻度、欠陥の重み及び欠陥の種類等の欠陥発生条件や超音波の伝搬条件を変化させることができる。

[0055] 最適化計算において必要となる超音波検出信号の波形変化は、超音波波形を模擬するシミュレーションによって求めることができる。超音波波形を模擬するシミュレーションは、有限要素法（FEM: Finite Element Method）によるシミュレーションとすることができる。すなわち、超音波検査の対象を模擬したモデルを複数の要素に分割し、超音波振動子から超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形を求めるFEM解析によるシミュレーションを行うことができる。FEMにより超音波伝搬解析を行うソフトウェアは市販されており、容易にシミュレーションを行うことができる。

- [0056] 図4は、図1に示す設計システム1のモデル化部5において作成されたFEMモデルを用いた超音波伝搬解析シミュレーションを行うことによって超音波センサの位置を最適化する場合の例を示す図である。
- [0057] 図4(A)に例示されるようにウェブ21とフランジ22を有する構造体を模擬した構造体モデル23を作成することができる。構造体モデル23は、超音波伝搬挙動のFEM解析用に多数の要素に分割される。尚、ウェブ2のみならず、フランジ22もFEM解析用の要素に分割することによって、超音波の伝搬挙動をより正確にシミュレートできるようにしつつ、フランジ22も超音波検査の対象エリアAに含めることができる。
- [0058] 構造体モデル23には、超音波振動子モデル24を配置することができる。超音波振動子モデル24の数や位置をパラメータとして変更できるようにしても良いが、まず、単一の超音波振動子モデル24が予め決定された位置に固定されている場合を例に説明する。
- [0059] 超音波振動子モデル24の位置を確定させると、超音波伝搬解析によってFEM解析用の要素単位で超音波の伝搬波形を模擬することができる。すなわち、実際の超音波振動子から超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形を構造体モデル23上において模擬することができる。
- [0060] 一方、FEM解析用の要素とは別に、超音波センサの最適位置を決定するための複数のセクションを構造体モデル23に作成することができる。図4に示す例では、ウェブ21とフランジ22を含む構造体モデル23がメッシュで複数の矩形のセクションに区切られている。
- [0061] 各セクションは、超音波センサの配置位置の候補として作成される。従って、セクションの識別情報は、超音波センサの位置を表すパラメータの値となる。換言すれば、最適化対象となるパラメータの1つである超音波センサの位置を、セクションの位置で表現することができる。そして、複数のセクションから、超音波センサの配置位置として最適なセクションを最適化計算によって特定することができる。
- [0062] 従って、超音波センサの最適位置を決定するためのセクションの大きさは

、超音波センサの大きさに応じた大きさに決定することが適切である。典型的な光ファイバセンサの直径は125 μm から150 μm 程度であり、長さは1.5mmから3mm程度である。このため、例えば、数ミリ四方の矩形枠をセクションとして作成することができる。

[0063] また、光ファイバセンサには受信指向性がある。このため、超音波の伝搬方向が光ファイバセンサの長さ方向となるように光ファイバセンサを配置することが望ましい。そこで、例えば、超音波の進行方向については超音波センサの位置の自由度を小さくしてデータ処理量を低減できるように10mm程度の幅を有するセクションを作成することもできる。

[0064] つまり、セクションのサイズを小さくする程、超音波センサの配置位置についての最適化精度が向上する一方、データ処理量の増加に繋がることになる。このため、超音波センサの配置位置についての必要な最適化精度が確保できるようなサイズを有するセクションを作成することが適切である。

[0065] セクションの位置は、超音波センサの配置位置の候補となり得る場所に作成することが、不要なデータ処理を回避する観点から適切である。例えば、対象エリアAを透過した超音波の透過波のみを超音波センサによる検出対象とする場合には、対象エリアAを透過した超音波の透過波が到達し得ない超音波振動子モデル24の背後のエリアには、データ処理量を低減するためにセクションを作成しないようにしてもよい。

[0066] 逆に、図4に例示されるように、構造体モデル23全体をカバーするようにセクションを隈なく作成すれば、欠陥で反射した超音波の反射波についても超音波センサによる検査対象として最適位置を決定することが可能となる。また、フランジ22で反射した超音波の反射波を超音波センサによる検査対象として最適位置を決定することも可能となる。

[0067] 超音波センサの配置位置の候補となるセクションは、フランジ22間におけるウェブ21上に限らず、図4に例示されるようにフランジ22を含むエリアに作成することができる。特に、超音波センサが光ファイバセンサであれば、フランジ22とパネルの間に光ファイバセンサを埋め込んだり、フラ

ンジ22の側面や上面に光ファイバセンサを取付けることも可能である。このため、フランジ22を含むエリアにセクションを作成することによって、フランジ22とパネルの間或いはフランジ22の側面や上面を超音波センサの配置位置の候補として最適位置を決定することが可能となる。

[0068] 構造体モデル23に複数のセクションを設定すると、セクションごとに超音波の伝搬波形の代表波形を求めることができる。超音波波形の代表波形は、セクション内の中央位置における波形やセクション内の各位置における波形の平均などに決定することができる。各セクションを代表する超音波波形は、それぞれ超音波検査の対象エリアAに欠陥が生じていない場合における超音波の基準波形として用いることができる。

[0069] 図4(A)に示すように超音波振動子モデル24の位置が固定されている場合、超音波センサの最適位置は、超音波検査の対象エリアA内における不確かな位置で欠陥が発生した場合において超音波波形が十分に变化する位置である。

[0070] そこで、図4(B)に示すように、構造体モデル23上における超音波検査の対象エリアAに模擬欠陥を発生させることができる。更に、構造体モデル23上の対象エリアA内における模擬欠陥の位置を順次変化させることができる。

[0071] 構造体モデル23上に導入される模擬欠陥の例としては、超音波センサを用いて実際に検出対象となり得る欠陥の例と同様に、鳥や石の衝突等によって生じる損傷や凹み、複合材を構成する繊維の破断、複合材を構成する繊維強化樹脂層間における剥離の他、雷撃による複合材の焦げ、ファスナの脱落や弛みが挙げられる。

[0072] 実際の構造体が損傷すると損傷を受けた部分の剛性が、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP: Glass fiber reinforced plastics)や炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)等の複合材や金属等の素材に応じた量だけ低下する。

- [0073] 構造体モデル23ではヤング率等の機械的特性を特定するためのパラメータで、素材を表現することができる。従って、構造体モデル23上では、構造体モデル23を構成する特定の要素のヤング率等のパラメータを変更することによって損傷を模擬することができる。複合材の焦げについても同様である。凹みについては、構造体モデル23を構成する要素を変形させることによって模擬することができる。
- [0074] 複合材を構成する繊維の破断、複動材の層間剥離及び亀裂については、構造体モデル23を構成する要素間における応力の伝達条件を変更することによって模擬することができる。すなわち、引張応力やせん断応力が隣接する要素間において全く伝達されないようにしたり、一定の割合だけ伝達されるように構造体モデル23を定義するパラメータを変更することによって、これらの欠陥を模擬することができる。また、ファスナの脱落や弛みについても、ファスナをモデル化すれば、ファスナと他の部品との間における応力の伝達条件を変更することによって模擬することができる。
- [0075] このように、構造体モデル23を構成する複数の要素のうち特定の要素のヤング率の変更、特定の要素間における応力の伝達条件の変更及び特定の要素の形状変形の少なくとも1つによって、構造体モデル23上における超音波検査の対象エリアAに様々な種類の模擬欠陥を発生させることができる。
- [0076] これらの様々な模擬欠陥は、経験的に起こり得るサイズ及び位置で構造体モデル23に導入することができる。このため、欠陥の種類に応じて模擬欠陥を発生させる位置を変えるようにしてもよい。例えば、航空機の主翼前縁には鳥が衝突する可能性があるが、胴体内部には衝突する可能性が無い。また、胴体の下面には石が衝突する可能性があるが、胴体の上面に石が衝突する可能性は無視することができる。従って、欠陥の種類ごとの発生確率に応じて、構造体モデル23に模擬欠陥を導入することが最適化計算の精度向上及び不要な計算の回避によるデータ処理量の低減に繋がる。
- [0077] 尚、上述したように、模擬欠陥の位置の他、模擬欠陥の種類、超音波の波

形を模擬する際の温度、超音波の波形を模擬する際の湿度及び模擬欠陥の発生確率等の欠陥条件や環境条件を変化させるようにしてもよい。

[0078] 様々な条件下において超音波検査の対象エリアAに模擬欠陥を発生させてシミュレーションを行うと、模擬欠陥の発生条件ごとにシミュレーション結果が得られる。すなわち、模擬欠陥の発生条件ごとに超音波の模擬波形をシミュレーションによって求めることができる。図4（B）に示す例では、模擬欠陥の発生位置を変えてシミュレーションが行われている。このため、模擬欠陥の発生位置ごとに超音波の模擬波形が得られる。

[0079] 模擬欠陥を有する構造体モデル23を対象として超音波の模擬波形を取得すると、模擬欠陥による模擬波形の変化量を特定することが可能となる。模擬欠陥による模擬波形の変化量は、セクションごとに特定することができる。

[0080] 図5は、損傷の無い検査領域を透過した超音波検出信号の一例を示すグラフであり、図6は、損傷がある同一の検査領域を透過した超音波検出信号の一例を示すグラフである。

[0081] 図5及び図6において各縦軸は超音波検出信号の相対振幅を示し、各横軸は時間を示す。図5及び図6に示すように、超音波の伝搬経路に損傷が存在すると、損傷を経由した超音波の波形が変化する。このため、超音波の波形変化を捉えることによって損傷等の欠陥の有無を検出することができる。

[0082] 図4に例示されるような構造体モデル23を対象とする超音波伝搬解析においても、模擬欠陥の有無によって超音波の模擬波形を変化させることができる。すなわち、模擬欠陥の影響を受けた超音波の模擬波形を変化させることができる。模擬欠陥の影響を受けた超音波が伝搬するセクションは、模擬欠陥の位置に応じて変化する。従って、超音波の模擬波形が変化するセクションも、模擬欠陥の位置に応じて変化する。

[0083] また、模擬欠陥の位置を変化させれば、模擬欠陥の影響を受けた超音波の伝搬経路とともに、模擬欠陥の影響を受けた超音波が伝搬するセクションも変化する。上述したように、超音波センサの最適位置は、超音波検査の対象

エリアA内における不確かな位置で欠陥が発生した場合において超音波波形が十分に变化する位置である。従って、超音波センサの最適位置は、模擬欠陥の位置に依らず超音波の模擬波形が变化するセクション内と考えることができる。

[0084] そこで、図4（B）に示すように、模擬欠陥の位置を変えて行ったシミュレーションごとに、模擬欠陥の影響を受けて超音波の模擬波形が变化したセクションを記録することができる。超音波の模擬波形が变化したセクションの記録は単純なマーキング、すなわち超音波の模擬波形が变化したか否かを表す情報とするのみならず、模擬波形の变化量に応じた点数化を伴う記録とすることもできる。

[0085] そして、図4（C）に示すように、模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が变化したセクションの記録を、模擬欠陥の位置を変化させて行った複数のシミュレーション間において加算することができる。これによって、模擬欠陥の位置に依らず超音波の模擬波形が变化する可能性が高いセクションを特定することができる。また、模擬波形の变化量を点数化すれば、模擬欠陥の位置に依らず最も模擬波形が变化する可能性が高いセクションを特定することができる。

[0086] 尚、ある位置に模擬欠陥を発生させた場合において模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が变化したセクションが発生しない場合も起こり得る。また、どの位置に模擬欠陥を発生させても、模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が变化するセクションが発生しない場合も起こり得る。このため、図4に示すアルゴリズムで最適なセクションを選択すると、選択されるセクションは、超音波検査の対象エリアA内における不確かな位置で欠陥が生じた場合に、最も超音波の波形が变化する確率が高いセクションとなる。

[0087] 位置を変化させて模擬欠陥を発生させた場合に必ずいずれかのセクションにおける模擬波形が变化する場合には、複数のセクションを最適なセクションとして選択することによって、どの位置で欠陥が発生しても超音波の波形変化を検出することが可能な複数の超音波センサの位置を特定することがで

きる。

- [0088] 但し、多数のセクションが最適解として選択されてしまう可能性もある。そこで、超音波センサの数の増加を抑制することが望ましい場合には、超音波センサの配置位置として選択することが可能なセクション数に上限を設定し、上限を超える数のセクションが選択されるようであれば、超音波振動子モデル24の数を増やすようにしてもよい。具体例として、1つの超音波振動子モデル24に対応して選択することが可能な超音波センサの配置位置の数の上限を1とすれば、複数組の超音波振動子と超音波センサの最適位置を求めることができる。
- [0089] ある位置に模擬欠陥を発生させた場合に模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が変化するセクションが発生しない場合においても、超音波センサモデル24の数を増やして新たな超音波センサモデル24を構造体モデル23の別の位置に配置することによって、模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が変化するセクションが必ず発生するようにすることができる。そうすると、どの位置に欠陥が生じても欠陥の影響による超音波の波形変化を検出することが可能な単一又は複数のセクションを特定することができる。
- [0090] 逆に、模擬欠陥の位置を変えて発生させた場合に全てのセクションで模擬波形が模擬欠陥の影響を受けて変化する場合には、模擬波形の変化量を点数化することによって、最も模擬波形の変化量が大きくなる1つのセクションを特定することができる。
- [0091] 超音波の模擬波形が模擬欠陥の影響を受けて変化したか否かは、模擬欠陥を導入する前のシミュレーションによって取得された超音波の模擬波形を基準模擬波形として、模擬欠陥を導入した後のシミュレーションによって取得された超音波の模擬波形と比較することによってセクションごとに判定することができる。
- [0092] 模擬欠陥導入後における模擬波形と、模擬欠陥導入前における基準模擬波形との比較は、直接波形同士を比較する他、フーリエ解析処理やウェーブレット解析処理等の解析処理を行って比較するなど、所望の処理で行うことが

できる。模擬波形同士を直接比較する場合には、例えば、超音波検出信号の振幅が最大となる時の時間を比較することができる。この場合、ピーク時刻間における時間差が模擬波形の変化量となる。そして、ピーク時刻間における時間差が閾値以上又は閾値を超えた場合に模擬波形が変化すると判定することができる。

[0093] 超音波の模擬波形及び基準模擬波形は、いずれもシミュレーションによって得られた波形であるため、実際の超音波センサで検出される超音波検出信号と異なりノイズが無い。従って、ノイズ低減のためのフィルタ処理やアベレージング処理等の実際の超音波センサから出力される超音波検出信号を対象として実行される信号処理は不要である。逆に、包絡線検波処理等の波形の特徴を抽出する処理については、フーリエ解析処理やウェーブレット解析処理と同様に、超音波の模擬波形及び基準模擬波形を対象として実行するようにしてもよい。

[0094] 尚、模擬欠陥導入前におけるシミュレーションの条件と、模擬欠陥導入後におけるシミュレーションの条件が、模擬欠陥の有無以外にも異なる場合には、全てのセクションにおいて超音波の模擬波形が変化する可能性がある。

[0095] 具体例として、構造体モデル23の温度や構造体モデル23周辺の湿度を変化させればシミュレーションにおける模擬超音波の伝搬条件が変わる。このため、どのセクションにおいても超音波の模擬波形が変化する。逆に、周囲のセクションにおける超音波の模擬波形が温度変化や湿度変化の影響を受けて変化したにも関わらず、超音波の模擬波形が変化していないセクションが存在すれば、模擬欠陥の影響を受けて超音波の模擬波形が変化しなかった可能性がある。

[0096] このような場合において、模擬欠陥導入後における超音波の模擬波形と、模擬欠陥導入前における超音波の基準模擬波形を比較するのみでは、模擬欠陥の影響による模擬波形の変化を求めることができない。

[0097] そこで、超音波の模擬波形の、基準模擬波形からの変化量を、セクション間で比較することができる。例えば、全てのセクション或いは近傍のセクシ

オンにおける超音波の模擬波形の変化量の平均値や中間値等の代表値を求め、求めた代表値と、各セクションにおける超音波の模擬波形の変化量を比較することができる。この場合、模擬欠陥の存在以外の要因に起因する超音波の模擬波形の変化をキャンセルすることができる。このため、模擬欠陥の影響による模擬波形の変化分を抽出することができる。

[0098] 従って、模擬欠陥導入前におけるシミュレーションの条件と、模擬欠陥導入後におけるシミュレーションの条件が、模擬欠陥の有無以外にも異なることに起因して、全てのセクションにおいて超音波の模擬波形が変化した場合であっても、模擬欠陥の影響により模擬波形が変化したセクションを特定することが可能となる。

[0099] そして、同様なセクション間における模擬波形の変化量の比較を、模擬欠陥を変化させて実行されたシミュレーションごとに行うことによって、模擬欠陥の位置に依らず模擬欠陥の影響により模擬波形が変化したセクションを特定することができる。つまり、セクションごとの模擬波形の変化量をセクション間において比較し、比較結果に基づいて超音波センサの最適位置をいずれかのセクション内に決定することができる。

[0100] このように、超音波の模擬波形の変化量をセクション間において比較すれば、模擬欠陥の有無以外の条件が異なるシミュレーションによって取得された基準模擬波形を用いて模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が変化したセクションを特定することが可能となる。従って、温度や湿度ごとの多数のシミュレーション条件に対応する基準模擬波形を取得するための多数のシミュレーションの実行を不要にすることができる。換言すれば、模擬超音波の基準模擬波形を取得するための模擬欠陥導入前におけるシミュレーションの条件と異なる温度や湿度等の条件で模擬欠陥導入後におけるシミュレーションを実行することが可能となる。

[0101] 逆に、模擬欠陥導入前におけるシミュレーションの条件と、模擬欠陥導入後におけるシミュレーションの条件が、模擬欠陥の有無以外同一であれば、いずれのセクションにおいても模擬超音波が模擬欠陥の影響を受けない限り

模擬波形が変化しない。従って、セクション間における超音波の模擬波形の変化量の比較を省略することができる。

[0102] 図4に例示されるように構造体モデル23に複数のセクションを作成し、超音波波形のシミュレーションを含む最適化計算によって超音波センサの配置位置として最適なセクションを決定する処理は、超音波振動子の位置に対しても実行することができる。すなわち、超音波センサモデルをある位置に固定し、模擬超音波の発生位置を含むセクションの変化と、模擬欠陥の位置変化を伴うシミュレーションを行うことができる。

[0103] そうすると、模擬欠陥の位置に依らず、超音波センサモデルが配置された位置において模擬欠陥の影響による模擬波形の変化が生じる確率が最も高くなる時の模擬超音波の発生位置を含むセクションを特定することができる。そして、特定したセクション内を超音波振動子の最適な配置位置として決定することができる。従って、超音波センサ及び超音波振動子の双方の位置についての最適化を行うことも可能である。

[0104] このようにして決定されたセクション内に超音波センサ及び超音波振動子の少なくとも一方を配置することによって超音波検査システムを組立てると、超音波振動子及び超音波センサの少なくとも一方が、超音波検査の対象となる物体の表面に仮想的に設けられた複数のセクションのうち、超音波検査の対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、少なくとも信号処理系において検出可能な波形変化が超音波検出信号に生じる確率が最も高くなるセクション内に配置された超音波検査システムが製作されることになる。

[0105] 特に、模擬欠陥の位置を変化させても模擬欠陥の影響を受けて模擬波形が変化するセクションが必ず発生するように超音波振動子モデルの数を増やす最適化アルゴリズムを採用すれば、超音波振動子及び超音波センサの少なくとも一方が、超音波検査の対象となる物体の表面に仮想的に設けられた複数のセクションのうち、超音波検査の対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても、信号処理系において検出可能な波形変化が超音波検出信号に生じるセクション内に配置された超音波検査システムを製作することができる。

[0106] 図1に示す設計システム1の設計情報作成部6には、上述したような最適化計算のアルゴリズムに応じた所望の機能を設けることができる。図1に示す例では、設計情報作成部6が、超音波検査の対象を模擬したシミュレーション用のFEMモデルに複数のセクションを作成するセクション作成部6A、模擬欠陥を、発生位置、種類、発生確率等の条件を変えてFEMモデルに導入する欠陥条件導入・変更部6B、シミュレーションにおいて温度や湿度等の環境条件を変更する環境条件変更部6C、最適化対象となる超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波センサの向き、超音波振動子の数、超音波振動子の位置及び超音波振動子の向き等のパラメータの初期値の設定と変更を行う最適化パラメータ設定・変更部6D、与えられた模擬欠陥の条件及び環境条件ごとの超音波の波形をFEM解析によって模擬するシミュレーション部6E、模擬欠陥の導入前後における模擬波形の変化量をセクションごとに取得する波形変化取得部6F、模擬欠陥の導入前後における模擬波形の変化量をセクション間で比較することによって模擬欠陥に起因する模擬波形の変化量をセクションごとに特定する波形変化比較部6G及びセクションごとの模擬欠陥に起因する模擬波形の変化量に基づいて超音波センサ及び超音波振動子の位置として最適なセクションを選択することによって、最適化対象となるパラメータの値を決定するパラメータ最適値決定部6Hを有している。

[0107] (超音波検査システム及び航空機構造体の製造方法)

次に、設計システム1による超音波検査システムの設計を含む超音波検査システムの製造方法及び超音波検査システムを設けた航空機構造体の製造方法について説明する。

[0108] 図7は、図1に示す超音波検査システムの設計システム1により実行される最適化計算の流れの一例を示すフローチャートである。

[0109] 図7に示す処理の流れは、超音波センサの位置及び数と、超音波振動子の数を最適化対象とし、模擬欠陥の位置に加えて、温度や湿度等の他の条件についても変化させて超音波の模擬波形をシミュレートすることによって最適

な超音波センサの位置及び数と、超音波振動子の位置及び数を設計情報として取得する場合の例を示す。

- [0110] まずステップS 1において、設計システム1のモデル化部5により超音波検査の対象を模擬したモデルが作成される。例えば、図2に示すようなパネル10Aに複数のストリング10B及び複数のフレーム10Cを取付けた航空機構造体10を模擬したFEMモデルや図4(A)に示すようなウェブ21とフランジ22を有するFEM解析用の構造体モデル23を作成することができる。
- [0111] 作成されたFEMモデルは、モデル化部5から設計情報作成部6に与えられる。これにより、設計情報作成部6において、超音波検査システムの設計情報を作成するための、超音波センサの数、超音波センサの位置及び超音波振動子の数をパラメータとする最適化計算を開始することが可能となる。
- [0112] 次にステップS 2において、セクション作成部6Aにより、超音波センサの配置位置の候補となる複数のセクションがFEMモデルに対して作成される。複数のセクションは、図4(A)に例示されるようにFEMモデルをメッシュで区切ることによって複数の矩形枠として作成することができる。複数のセクションの作成は、最適化対象となるパラメータの1つである超音波センサの配置位置が取り得るの値の設定に相当する。
- [0113] 一方、最適化パラメータ設定・変更部6Dにより、FEMモデルにおいて模擬超音波を発生させる位置が決定される。模擬超音波の発生位置は、例えば、模擬超音波の発生位置が取り得る線状の範囲に模擬超音波の発生位置を等間隔で配置した位置とすることができる。この場合、模擬超音波の発生位置の初期値は1つであるため、模擬超音波の発生位置は、模擬超音波の発生位置が取り得る線状の範囲を2分割する中心位置となる。或いは、ユーザが入力装置2の操作によって最適化パラメータ設定・変更部6Dに模擬超音波の発生位置を指定するための情報を入力し、手動で模擬超音波の発生位置を決定するようにしてもよい。
- [0114] このような、模擬超音波の発生位置の決定は、最適化対象となるパラメー

タの1つである超音波振動子の数の設定と、設定した数の超音波振動子の配置位置の設定に相当する。

[0115] 次に、ステップS3において、シミュレーション部6Eにおいて、FEMモデルを用いた超音波検査のシミュレーションが実行される。すなわち、超音波検査の対象を模擬したFEMモデルを対象として、超音波伝搬挙動の解析シミュレーションが実行される。これにより、超音波振動子からFEMモデル内において定義された超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形をFEMモデル上において模擬することができる。模擬された超音波の波形は、セクションごとに基準模擬波形として波形変化取得部6Fに与えられる。

[0116] 次に、ステップS4において、欠陥条件導入・変更部6Bは、FEMモデル上における超音波検査の対象エリア内の初期位置に模擬欠陥を発生させる。

[0117] 次に、ステップS5において、シミュレーション部6Eにおいて、再びFEMモデルを用いた超音波検査のシミュレーションが実行される。これにより、模擬欠陥を発生させた後における超音波の模擬波形をセクションごとに取得することができる。取得されたセクションごとの超音波の模擬波形は、波形変化取得部6Fに与えられる。

[0118] 次に、ステップS6において、欠陥条件導入・変更部6Bは、模擬欠陥を発生させるべき全ての位置に模擬欠陥を発生させたか否かを判定する。すなわち、模擬欠陥を発生させていない位置がFEMモデル上の検査対象エリア内に残っているか否かが欠陥条件導入・変更部6Bにおいて判定される。

[0119] ステップS6の判定において、全ての位置に模擬欠陥を発生させていないと判定された場合、すなわちNOと判定された場合には、ステップS7において、欠陥条件導入・変更部6BがFEMモデル上の検査対象エリア内において模擬欠陥の位置を変更させる。そして、再びステップS5において、位置を変更して模擬欠陥を発生させた後における超音波の模擬波形がセクションごとに取得される。

- [0120] このステップS 7における模擬欠陥の位置の変更と、ステップS 5における超音波の模擬波形の取得は、ステップS 6の判定において、全ての位置に模擬欠陥を発生させたと判定されるまで、すなわちYESと判定されるまで繰返される。これにより、全ての模擬欠陥の位置に対応する超音波の模擬波形をセクションごとに取得することができる。
- [0121] ステップS 6の判定においてYESと判定されると、ステップS 8において、変更させるべき他のシミュレーション条件があるか否かが判定される。変更させるべきシミュレーション条件の例としては、模擬欠陥の種類その他、FEMモデルにおいて超音波の波形を模擬する際の温度や湿度等の環境条件が挙げられる。
- [0122] このため、例えば、発生させるべき他の種類の模擬欠陥が存在するか否かが欠陥条件導入・変更部6 Bにおいて判定される。一方、変更させるべき温度や湿度等の環境条件が存在するか否かが環境条件変更部6 Cにおいて判定される。
- [0123] ステップS 8の判定において、変更させるべきシミュレーション条件が存在すると判定された場合、すなわちYESと判定された場合には、ステップS 9において、シミュレーション条件が変更される。すなわち、変更させるべきシミュレーション条件が模擬欠陥の種類であれば、欠陥条件導入・変更部6 Bが模擬欠陥の種類を変更する。一方、変更させるべきシミュレーション条件が温度や湿度等の環境条件であれば、環境条件変更部6 Cが温度や湿度等の環境条件を変更する。
- [0124] そして、再びステップS 4からステップS 7までの処理によって、全ての模擬欠陥の位置に対応する超音波の模擬波形がセクションごとに取得される。このステップS 9におけるシミュレーション条件の変更と、ステップS 4からステップS 7までの処理による全ての模擬欠陥の位置に対応する超音波の模擬波形のセクションごとの取得は、ステップS 8の判定において、変更させるべきシミュレーション条件が存在しないと判定されるまで、すなわちNOと判定されるまで繰返される。これにより、全てのシミュレーション条

件及び全ての模擬欠陥の位置に対応する超音波の模擬波形をセクションごとに取得することができる。

[0125] ステップS 8の判定においてNOと判定されると、ステップS 10において、波形変化取得部6 Fが、模擬欠陥の発生前後における超音波の模擬波形の変化量をセクション及びシミュレーション条件ごとに取得する。模擬欠陥の有無以外のシミュレーション条件がステップS 3における基準模擬波形を取得するためのシミュレーション条件から変更されなかった場合であれば、超音波の模擬波形の変化量は、模擬欠陥の影響を受けて生じた変化量となる。

[0126] これに対して、模擬欠陥の有無以外のシミュレーション条件がステップS 3における基準模擬波形を取得するためのシミュレーション条件から変更された場合には、超音波の模擬波形の変化量は、模擬欠陥の影響のみを受けて生じた変化量とは限らない。これは、シミュレーション条件を変更したことによる影響によっても、超音波の模擬波形が基準模擬波形から変化するためである。

[0127] そこで、ステップS 11において、波形変化比較部6 Gが、セクションごとの模擬波形の変化量をセクション間において比較する。これにより、模擬欠陥の有無以外のシミュレーション条件が基準模擬波形を取得するためのシミュレーション条件から変更された場合であっても、各セクション内における超音波の模擬波形の変化量のうち、模擬欠陥によって変化した変化量を抽出することができる。そして、抽出された超音波の模擬波形の変化量に基づいて、各セクション内において超音波の模擬波形が模擬欠陥によって変化したか否かを判定することができる。

[0128] 各セクション内において超音波の模擬波形が模擬欠陥の影響を受けて変化したか否かは、例えば、複数の信号解析手法を組合わせて判定することができる。

[0129] 図8は図4に例示されるようにFEMモデルに対して設定された各セクション内において超音波の模擬波形が模擬欠陥によって変化したか否かを判定

するためのアルゴリズムの一例を示すフローチャートである。

- [0130] まず、ステップS 2 0において、波形変化比較部6 Gは、各セクションにおける模擬欠陥付与前における基準模擬波形と、模擬欠陥付与後における模擬波形とを取得する。
- [0131] 次に、ステップS 2 1において、波形変化比較部6 Gは、各セクションにおける基準模擬波形のピーク時刻と、模擬波形のピーク時刻との差、すなわち模擬波形のピーク時刻の変化量を算出する。尚、各セクションにおける模擬波形のピーク時刻の特定は、模擬超音波の各セクションへの到達時刻を求めることに相当する。
- [0132] そして、波形変化比較部6 Gは、模擬波形が模擬欠陥の影響を受けて変化したか否かの判定対象となるセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量を、他のセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量と比較する。比較対象となるセクションは、全てのセクションとしても良いし、データ処理量を低減させるために判定対象となるセクションの近傍におけるセクションとしても良い。このピーク時刻の変化量の比較処理は、各セクションを判定対象として順次実行される。
- [0133] 次に、ステップS 2 2において、判定対象となるセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量が、他のセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量に対して変化したか否かがセクションごとに判定される。例えば、ピーク時刻の変化量のセクション間における差又は比を経験的に決定した閾値と比較することによって、判定対象となるセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量が、他のセクションにおける模擬波形のピーク時刻の変化量に対して変化したか否かを判定することができる。
- [0134] ステップS 2 2の判定において、ピーク時刻の変化量が他のセクションに対して変化していないと判定されたセクション、すなわちNOと判定されたセクションについては、ステップS 2 3において、波形変化比較部6 Gが、模擬波形と基準模擬波形のフーリエ解析を行う。そして、模擬波形のフーリエ解析によって取得された模擬波形の振幅の周波数スペクトルと、基準模擬

波形のフーリエ解析によって取得された基準模擬波形の振幅の基準周波数スペクトルが比較される。これにより、模擬波形の周波数スペクトルの、基準周波数スペクトルからの変化量が求められる。周波数スペクトル間の変化量は、ピークを呈する周波数の差やピーク値の差など、所望の指標を用いて表すことができる。

[0135] そして、波形変化比較部 6 G は、ステップ S 2 2 の判定において NO と判定されたセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量を、他のセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量と比較する。比較対象となるセクションは、全てのセクションとしても良いし、データ処理量を低減させるために判定対象となるセクションの近傍におけるセクションとしても良い。全てのセクションを比較対象とする場合には、全てのセクションにおける模擬波形と基準模擬波形をフーリエ解析の対象とすることが必要となる。この周波数スペクトルの変化量の比較処理は、ステップ S 2 2 の判定において NO と判定された各セクションを判定対象として順次実行される。

[0136] 次に、ステップ S 2 4 において、ステップ S 2 2 の判定において NO と判定されたセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量が、他のセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量に対して変化したか否かが、セクションごとに判定される。例えば、周波数スペクトルの変化量を表す指標値のセクション間における差又は比を経験的に決定した閾値と比較することによって、判定対象となるセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量が、他のセクションにおける模擬波形の周波数スペクトルの変化量に対して変化したか否かを判定することができる。

[0137] ステップ S 2 4 の判定において、周波数スペクトルの変化量が他のセクションに対して変化していないと判定されたセクション、すなわち NO と判定されたセクションについては、ステップ S 2 5 において、波形変化比較部 6 G が、模擬波形と基準模擬波形のウェーブレット解析を行う。そして、模擬波形のウェーブレット解析によって取得された模擬波形の振幅の時間一周波

数分布と、基準模擬波形のウェーブレット解析によって取得された基準模擬波形の振幅の時間一周波数分布が比較される。これにより、模擬波形の振幅の時間一周波数分布の、基準模擬波形の振幅の時間一周波数分布からの変化量が求められる。振幅の時間一周波数分布間の変化量は、ピークを呈する周波数及び時間の差やピーク値の差など、所望の指標を用いて表すことができる。

[0138] そして、波形変化比較部 6 G は、ステップ S 2 4 の判定において N O と判定されたセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量を、他のセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量と比較する。比較対象となるセクションは、全てのセクションとしても良いし、データ処理量を低減させるために判定対象となるセクションの近傍におけるセクションとしても良い。全てのセクションを比較対象とする場合には、全てのセクションにおける模擬波形と基準模擬波形をウェーブレット解析の対象とすることが必要となる。この振幅の時間一周波数分布の変化量の比較処理は、ステップ S 2 4 の判定において N O と判定された各セクションを判定対象として順次実行される。

[0139] 次に、ステップ S 2 6 において、ステップ S 2 4 の判定において N O と判定されたセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量が、他のセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量に対して変化したか否かが、セクションごとに判定される。例えば、振幅の時間一周波数分布の変化量を表す指標値のセクション間における差又は比を経験的に決定した閾値と比較することによって、判定対象となるセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量が、他のセクションにおける模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量に対して変化したか否かを判定することができる。

[0140] ステップ S 2 6 の判定において、振幅の時間一周波数分布の変化量が他のセクションに対して変化していないと判定されたセクション、すなわち N O と判定されたセクションについては、ステップ S 2 7 において、模擬欠陥の

影響を受けて超音波の模擬波形が変化しなかったセクションであると判定される。

[0141] 一方、ステップS 2 2の判定において、模擬波形のピーク時刻の変化量が他のセクションに対して変化していると判定されたセクション、すなわちYESと判定されたセクション、ステップS 2 4の判定において、模擬波形の周波数スペクトルの変化量が他のセクションに対して変化していると判定されたセクション、すなわちYESと判定されたセクション並びにステップS 2 6の判定において、模擬波形の振幅の時間一周波数分布の変化量が他のセクションに対して変化していると判定されたセクション、すなわちYESと判定されたセクションについては、ステップS 2 8において、いずれも模擬欠陥の影響を受けて超音波の模擬波形が変化したセクションであると判定される。

[0142] 尚、模擬欠陥の影響を受けて超音波の模擬波形が変化したと判定されたセクションについては、模擬波形のピーク時刻の変化量、周波数スペクトルの変化量及び振幅の時間一周波数分布の変化量のいずれが他のセクションに対して検出可能な程度に変化したのかに応じてランク付けすることもできる。すなわち上述したように模擬波形の、基準模擬波形からの変化量に応じた点数化を行うことができる。

[0143] このようにして、波形変化比較部6 Gでは、模擬欠陥による超音波の模擬波形の、基準模擬波形からの変化量をセクションごとに特定することができる。特に、超音波の模擬波形を対象とするピーク時刻解析、フーリエ解析及びウェーブレット解析を併用すれば、各セクション内における模擬波形が模擬欠陥の影響を受けて変化したか否かを程度別に判定することができる。

[0144] 次に、超音波の模擬波形の変化量がセクションごとに特定されると、図7のステップS 1 2において、パラメータ最適値決定部6 Hが、超音波センサの配置位置として最適なセクションが存在するか否かを判定する。具体例として、模擬欠陥の位置に関わらず模擬欠陥の影響で模擬波形が変化したセクションが存在する場合であれば、そのセクションを超音波センサの最適な配

置位置として決定することができる。また、模擬欠陥の位置に依らず模擬欠陥の影響で模擬波形が変化する複数のセクションが存在する場合であれば、点数化によって模擬欠陥による模擬波形の変化量が最も大きくなるセクションを超音波センサの最適な配置位置として決定することができる。

[0145] 一方、模擬欠陥の位置に依らず模擬欠陥の影響で模擬波形が変化するセクションが存在しない場合には、複数のセクションを超音波センサの最適な配置位置として選択すれば、いずれかのセクションにおいて必ず模擬欠陥の影響で模擬波形が変化するようになるのか否かを判定することができる。つまり、複数のセクションを選択すれば、全ての位置に発生させた模擬欠陥を必ず模擬波形の変化として検出できるのか否かを判定することができる。そして、上限を超えない複数のセクションの選択によって、全ての位置に発生させた模擬欠陥をカバーできる場合には、複数のセクションを超音波センサの最適な配置位置として決定することができる。

[0146] 逆に、上限を超える多数のセクションを選択しなければ、全ての位置に発生させた模擬欠陥をカバーできない場合には、多数の超音波センサを配置することが必要となる。極端な例として、全てのセクションに超音波センサを配置することは過剰である。また、いずれのセクションにおいても模擬波形が変化しないような模擬欠陥の位置が存在する場合には、超音波センサをどのセクションに配置しても欠陥を検出できない場合があることになる。

[0147] このような場合には、ステップS 1 2の判定において、超音波センサの配置位置として最適なセクションが存在しないと判定することができる。そして、ステップS 1 3において、最適化パラメータ設定・変更部6 Dが模擬超音波の発生位置を増加させる。そして、再びステップS 2からステップS 1 1までの処理が繰り返される。例えば、上述したように、線状の範囲に等間隔で模擬超音波の発生位置を設定する場合であれば、ステップS 2において、模擬超音波の発生位置が再設定される。また、模擬超音波の発生位置に応じてセクションを変えるようにしてもよい。

[0148] ステップS 2からステップS 1 1までの処理はステップS 1 2の判定にお

いて、超音波センサの配置位置として最適なセクションが存在すると判定されるまで繰返される。ステップS 1 2の判定において、超音波センサの配置位置として最適なセクションが存在すると判定されると、ステップS 1 4において、パラメータ最適値決定部6 Hが超音波センサの最適位置を最適であると判定されたいずれかのセクション内に決定する。

[0149] これにより、より少ない超音波振動子を用いて、検査対象エリア内におけるどの位置に欠陥が生じても超音波センサで検出することが可能な超音波振動子の数及び位置並びに超音波センサの数及び位置を含む設計条件を得ることができる。そして、パラメータ最適値決定部6 Hは、超音波センサの数、超音波センサの位置、超音波振動子の数及び超音波振動子の位置を含む超音波検査システムの設計情報を作成する。作成した超音波検査システムの設計情報は、表示装置3に表示させてユーザに通知することができる。また、超音波検査システムの設計情報を、超音波検査システムの製造事業者や製造部門に情報の生産物として提供することができる。

[0150] 超音波検査システムの設計情報が作成されると、作成された設計情報に基づいて超音波検査システムを組立てることができる。超音波検査システムは、図2及び図3に例示されるような航空機構造体10に組付けることもできる。航空機構造体に超音波検査システムを搭載する場合には、超音波検査システムが航空機構造体の部品となり、超音波検査システムの設計及び製造は、航空機構造体の設計及び製造の一部となる。

[0151] (効果)

以上のような、超音波検査システムの製造方法、超音波検査システムの設計システム1、超音波検査システムの設計プログラムは、超音波検査システムの構成要素となる超音波振動子及び超音波センサの数及び位置を含む設計情報を、超音波伝搬解析シミュレーションを含む最適化計算によって作成するようにしたものである。

[0152] このため、超音波検査システムの製造方法、超音波検査システムの設計システム1、超音波検査システムの設計プログラムによれば、超音波検査によ

って欠陥の有無を必要な精度で検出するための適切な超音波振動子及び超音波センサの設計情報を作成することができる。すなわち、より少ない構成要素で、より高精度に超音波検査を行うことが可能となる。

[0153] (他の実施形態)

以上、特定の実施形態について記載したが、記載された実施形態は一例に過ぎず、発明の範囲を限定するものではない。ここに記載された新規な方法及び装置は、様々な他の様式で具現化することができる。また、ここに記載された方法及び装置の様式において、発明の要旨から逸脱しない範囲で、種々の省略、置換及び変更を行うことができる。添付された請求の範囲及びその均等物は、発明の範囲及び要旨に包含されているものとして、そのような種々の様式及び変形例を含んでいる。

請求の範囲

[請求項1] 少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算であって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとする前記最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成するステップと、

前記設計情報に基づいて前記超音波検査システムを組立てるステップと、

を有する超音波検査システムの製造方法。

[請求項2]

前記最適化計算は、

前記モデルに複数のセクションを作成するステップと、

前記モデル上における前記超音波検査の対象エリアに模擬欠陥を発生させるステップと、

前記超音波振動子から前記超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形を前記モデル上において模擬するステップと、

模擬された前記超音波の波形の前記模擬欠陥による変化量を前記セクションごとに特定するステップと、

特定された前記セクションごとの前記波形の変化量を前記セクション間において比較し、比較結果に基づいて前記超音波センサの最適位置をいずれかのセクション内に決定するステップと、

を有する請求項1記載の超音波検査システムの製造方法。

- [請求項3] 前記最適化計算は、
前記モデル上における前記超音波検査の対象エリアに模擬欠陥を発生させるステップと、
前記超音波振動子から前記超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形を前記モデル上において模擬するステップと、
前記モデル上の前記対象エリア内における前記模擬欠陥の位置、前記超音波の波形を模擬する際の温度、前記超音波の波形を模擬する際の湿度及び前記模擬欠陥の種類の一つを含む模擬条件を変化させるステップと、
を有する請求項1又は2記載の超音波検査システムの製造方法。
- [請求項4] 前記モデルを複数の要素に分割し、前記超音波振動子から前記超音波検査の対象エリアに発振される超音波の波形を求める有限要素法による超音波伝搬解析を前記シミュレーションとして行い、前記シミュレーションにおいて、前記複数の要素のうち特定の要素のヤング率の変更、特定の要素間における応力の伝達条件の変更及び特定の要素の形状変形の一つによって、前記モデル上における前記超音波検査の対象エリアに模擬欠陥を発生させる請求項1乃至3のいずれか1項に記載の超音波検査システムの製造方法。
- [請求項5] 前記最適化計算によって、前記超音波検査の対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても、少なくとも一つの前記超音波センサで検出される超音波検出信号に、前記欠陥によって波形変化を生じさせることができる前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を求める請求項1記載の超音波検査システムの製造方法。
- [請求項6] 前記超音波センサの位置及び前記超音波振動子の位置の少なくとも一方を前記パラメータとして前記最適化計算を行うことによって、前記超音波検査の対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、

前記超音波センサで検出される超音波検出信号に波形変化が生じる確率が最も高くなる時の前記パラメータの値を求める請求項1記載の超音波検査システムの製造方法。

[請求項7]

少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを作成するモデル化部と、

前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとして前記モデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成する設計情報作成部と、
を有する超音波検査システムの設計システム。

[請求項8]

コンピュータに、

少なくとも1つの超音波センサ及び少なくとも1つの超音波振動子を備えた超音波検査システムにより欠陥の有無を検出する超音波検査の対象を模擬したモデルを作成するステップ、及び

前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数の少なくとも1つをパラメータとして前記モデルを用いた前記超音波検査のシミュレーションを含む最適化計算を行うことによって、前記超音波センサの数、前記超音波センサの位置、前記超音波センサの向き、前記超音波振動子の数、前記超音波振動子の位置、前記超音波

振動子の向き及び前記超音波振動子から発振される超音波の周波数を含む前記超音波検査システムの設計情報を作成するステップ、
を実行させる超音波検査システムの設計プログラム。

[請求項9] 請求項1乃至6のいずれか1項に記載の製造方法で組立てられる前記超音波検査システムを航空機構造体に組付ける航空機構造体の製造方法。

[請求項10] 超音波検査の対象エリアに向けて超音波を発振する超音波振動子と、

前記対象エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記対象エリアで反射した前記超音波の反射波の少なくとも一方を検出して超音波検出信号を出力する超音波センサと、

前記超音波検出信号の基準波形からの波形変化を検出し、検出した前記波形変化に基づいて前記対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する信号処理系と、

を備え、

前記超音波振動子及び前記超音波センサの少なくとも一方は、前記超音波検査の対象となる物体の表面に仮想的に設けられた複数のセクションのうち、前記対象エリア内の不確かな位置で生じる欠陥によって、前記信号処理系において検出可能な波形変化が前記超音波検出信号に生じる確率が最も高くなるセクション内に配置される超音波検査システム。

[請求項11] 超音波検査の対象エリアであって、ウェブとフランジを有する前記対象エリアに向けて超音波を発振する少なくとも1つの超音波振動子と、

前記対象エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記対象エリアで反射した前記超音波の反射波の少なくとも一方を検出して超音波検出信号を出力する少なくとも1つの超音波センサと、

前記超音波検出信号の基準波形からの波形変化を検出し、検出した

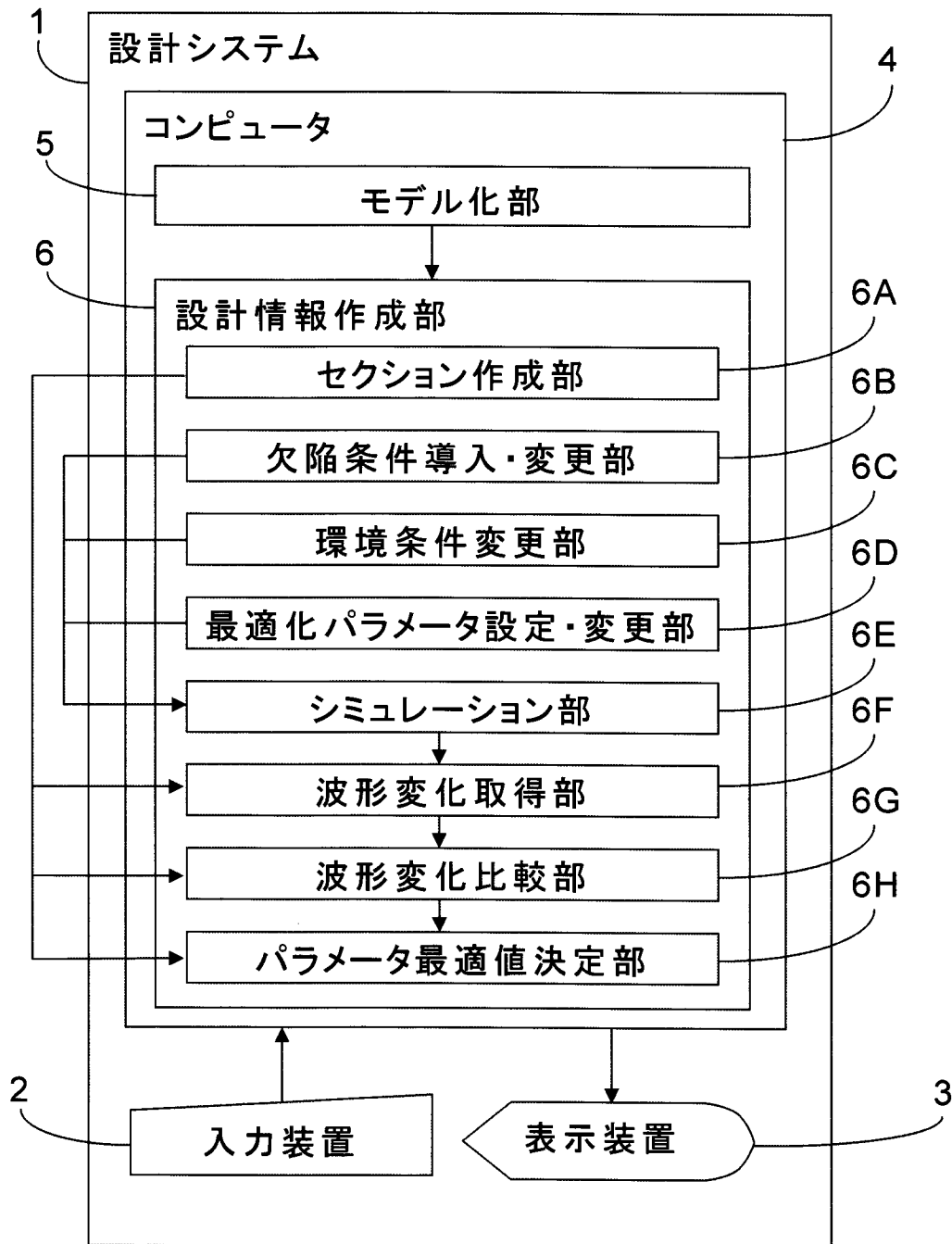
前記波形変化に基づいて前記対象エリア内に欠陥が生じたか否かを検出する信号処理系と、

を備え、

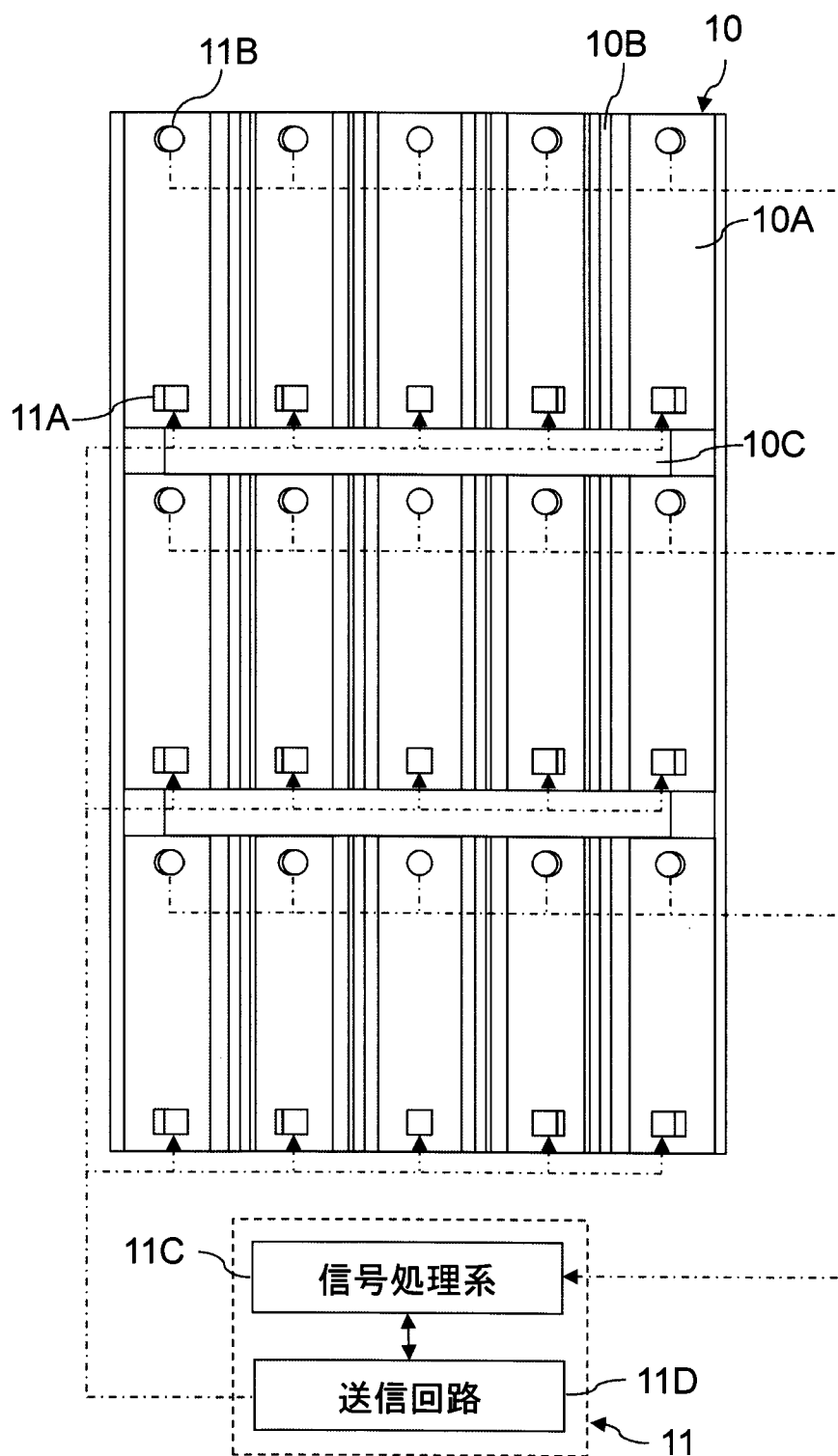
前記超音波振動子及び前記超音波センサの数及び位置は、前記対象エリア内のどの位置で欠陥が生じても前記欠陥によって生じる前記超音波検出信号の波形変化を前記信号処理系で検出することができる数及び位置である超音波検査システム。

[請求項12] 請求項10又は11記載の超音波検査システムを設けた航空機構造体。

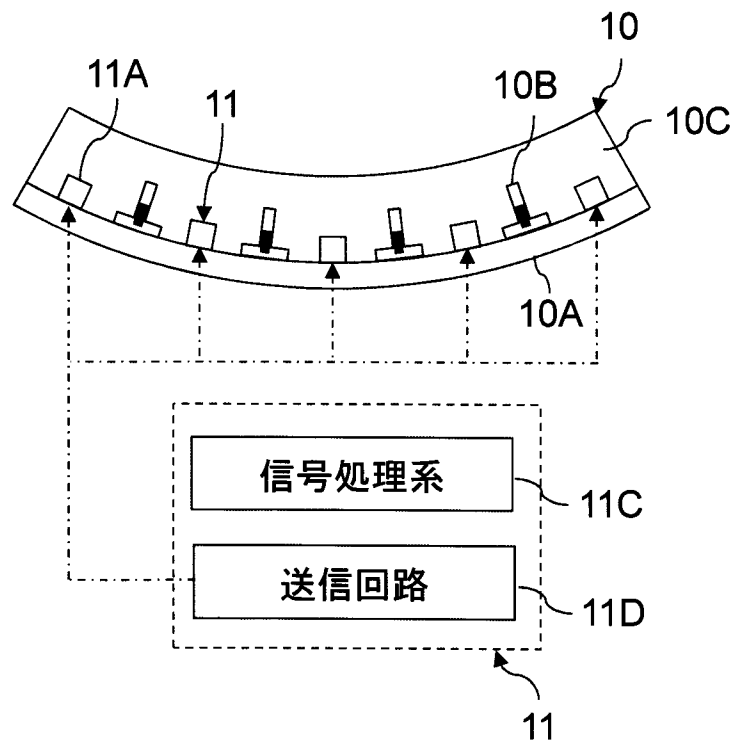
[図1]



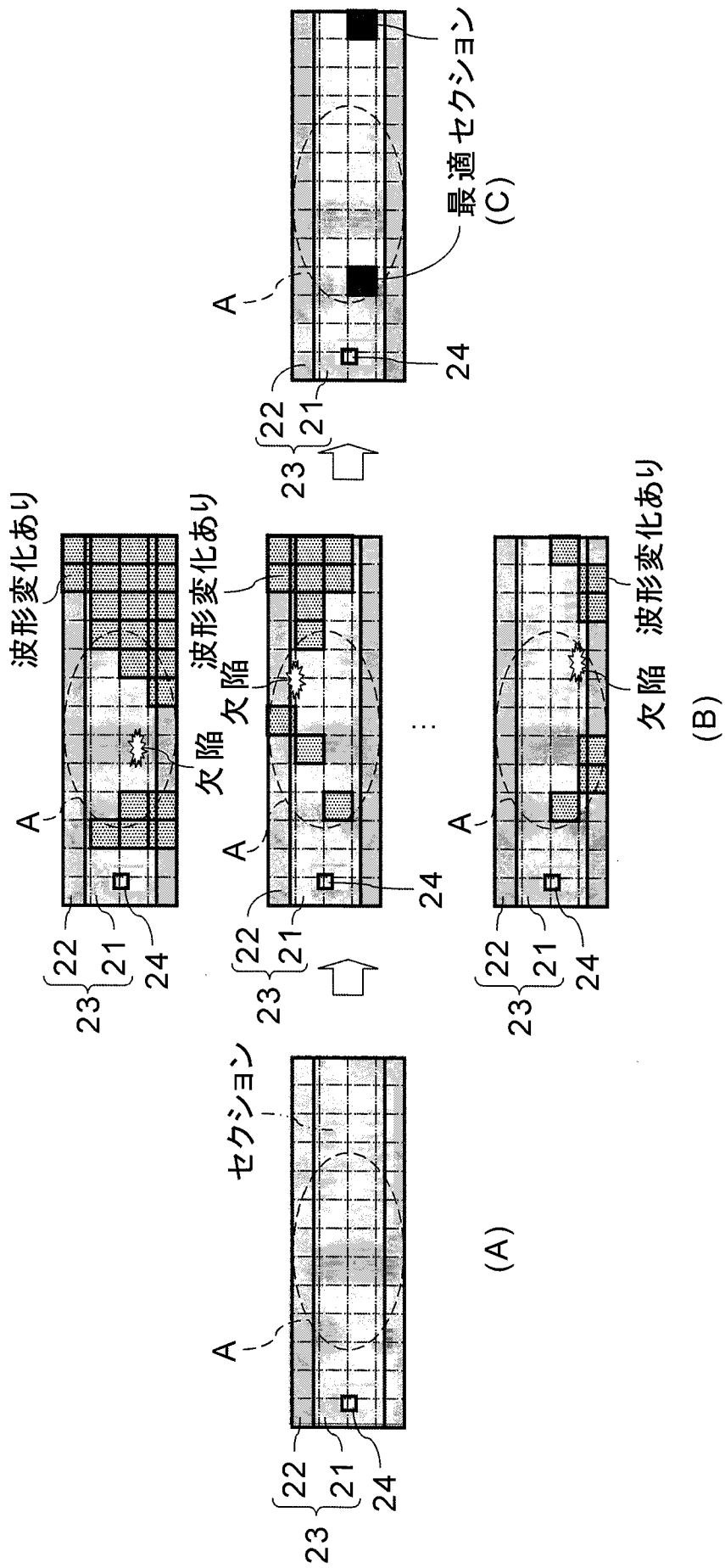
[図2]



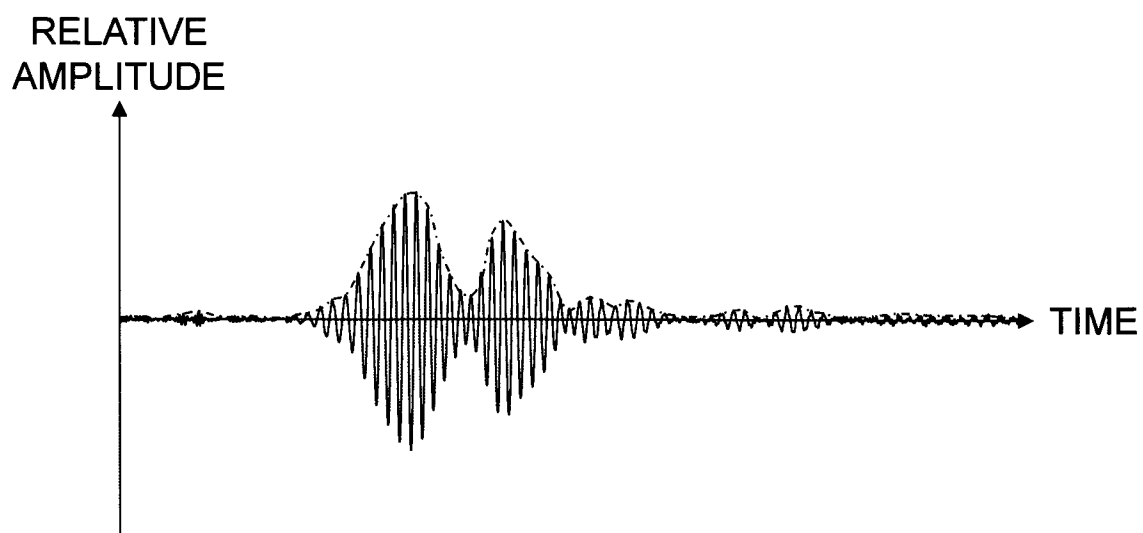
[図3]



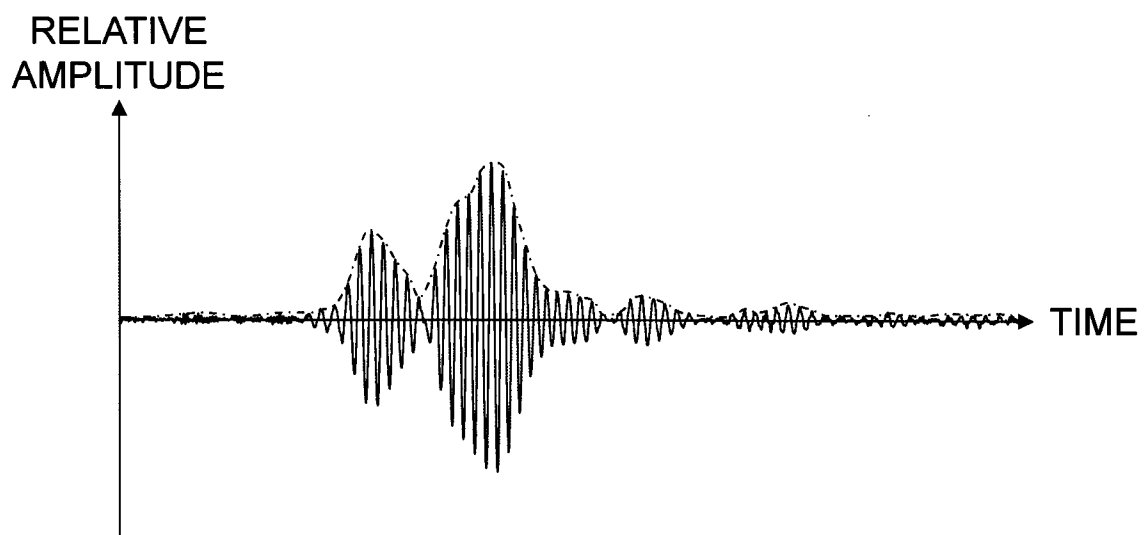
[図4]



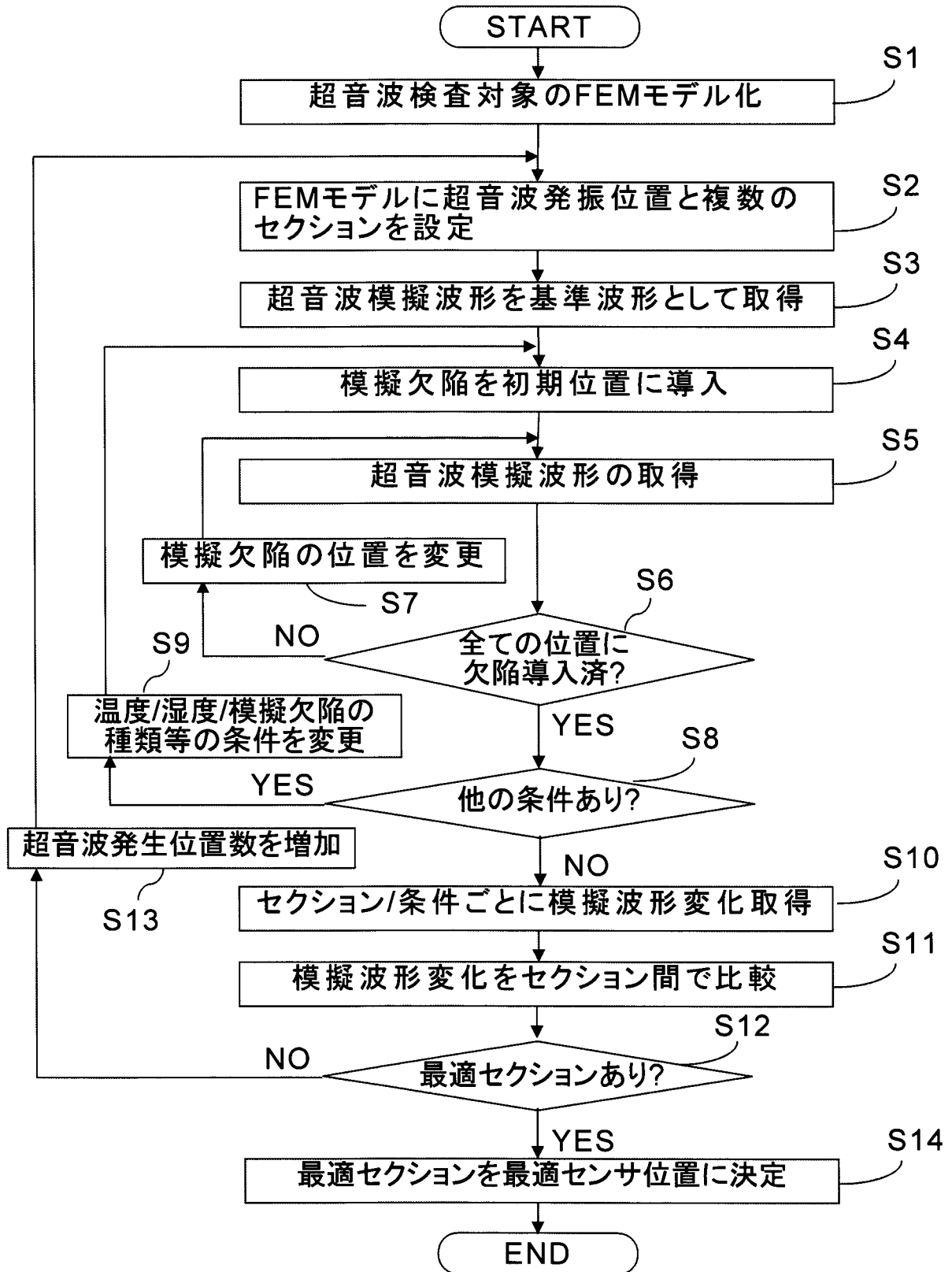
[図5]



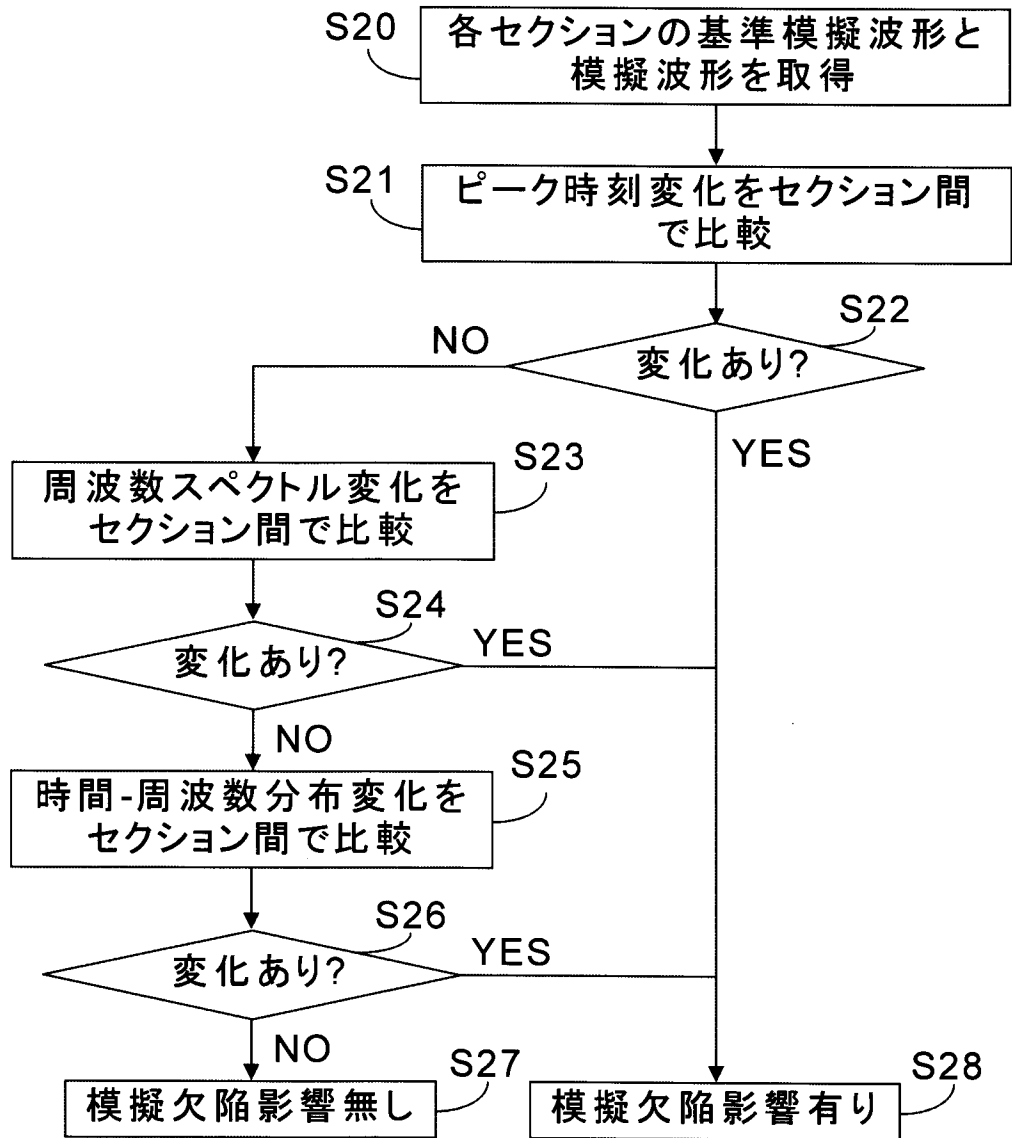
[図6]



[図7]



[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/014307

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. G01N29/04 (2006.01) i, B64F5/10 (2017.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl. G01N29/00-29/52, B64F5/10, G01L1/00-1/26, G01L25/00, G01D5/26-5/38

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2018
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2018
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2018

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	JP 2016-38361 A (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL CORP.) 22 March 2016, paragraphs [0087]-[0103], fig. 3-16 (Family: none)	1-2, 5-8, 10 3-4, 9, 11-12
Y	JP 4-191653 A (THE KANSAI ELECTRIC POWER CO., INC.) 09 July 1992, page 2, upper left column, line 1 to upper right column, line 4 (Family: none)	3-4, 9
Y	JP 2012-112658 A (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.) 14 June 2012, paragraphs [0027]-[0082], fig. 3-9 (Family: none)	3-4, 9

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
19.06.2018

Date of mailing of the international search report
03.07.2018

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2018/014307

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2016-107624 A (THE BOEING CO.) 20 June 2016, paragraphs [0021], [0063]-[0084], fig. 1, 12 & US 2015/0024160 A1, paragraphs [0039], [0081]-[0102], [0115]-[0118], fig. 1, 12A-12D & EP 3006189 A1 & CN 105501428 A	9, 11-12
A	JP 2016-517050 A (GENERAL ELECTRIC CO.) 09 June 2016, & US 2014/0208163 A1 & WO 2014/116406 A2 & DE 112014000505 T & CN 104937554 A	1-12
A	US 2007/0000328 A1 (BUTTRAM J) 04 January 2007, (Family: none)	1-12
A	US 2014/0172399 A1 (GEORGIA TECH RESEARCH CORPORATION) 19 June 2014, & WO 2013/032450 A2 & EP 2751541 A2	1-12
A	US 5031458 A (THE BOEING COMPANY) 16 July 1991, & US 4848159 A	1-12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N29/04(2006.01)i, B64F5/10(2017.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G01N29/00-29/52, B64F5/10, G01L1/00-1/26, G01L25/00, G01D5/26-5/38

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2018年
日本国実用新案登録公報	1996-2018年
日本国登録実用新案公報	1994-2018年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y	JP 2016-38361 A (新日鐵住金株式会社) 2016.03.22, [0087] - [0103]、図3-図16 (ファミリーなし)	1-2, 5-8, 10 3-4, 9, 11-12
Y	JP 4-191653 A (関西電力株式会社) 1992.07.09, 第2頁左上欄第1 行-同頁右上欄第4行 (ファミリーなし)	3-4, 9
Y	JP 2012-112658 A (三菱重工業株式会社) 2012.06.14, [0027] - [0082]、図3-図9 (ファミリーなし)	3-4, 9

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

- 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
- 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
- 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
- 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
- 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

- 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
- 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
- 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
- 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

19.06.2018

国際調査報告の発送日

03.07.2018

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁 (ISA/J P)
郵便番号 100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)
横尾 雅一

2W

3716

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2016-107624 A (ザ・ボーイング・カンパニー) 2016.06.20, [0021]、[0063] - [0084]、図1、図12 & US 2015/0024160 A1, [0039], [0081]-[0102], [0115]-[0118], FIG. 1, FIG. 12A-FIG. 12D & EP 3006189 A1 & CN 105501428 A	9, 11-12
A	JP 2016-517050 A (ゼネラル・エレクトリック・カンパニー) 2016.06.09, & US 2014/0208163 A1 & WO 2014/116406 A2 & DE 112014000505 T & CN 104937554 A	1-12
A	US 2007/0000328 A1 (BUTTRAM J) 2007.01.04, (ファミリーなし)	1-12
A	US 2014/0172399 A1 (GEORGIA TECH RESEARCH CORPORATION) 2014.06.19, & WO 2013/032450 A2 & EP 2751541 A2	1-12
A	US 5031458 A (THE BOEING COMPANY) 1991.07.16, & US 4848159 A	1-12