

(19)日本国特許庁(JP)

## (12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7387511号  
(P7387511)

(45)発行日 令和5年11月28日(2023.11.28)

(24)登録日 令和5年11月17日(2023.11.17)

(51)国際特許分類 F I  
G 0 1 N 29/032(2006.01) G 0 1 N 29/032

請求項の数 12 (全19頁)

(21)出願番号	特願2020-56962(P2020-56962)	(73)特許権者	000005348 株式会社 S U B A R U 東京都渋谷区恵比寿一丁目 2 0 番 8 号
(22)出願日	令和2年3月27日(2020.3.27)	(74)代理人	100136504 弁理士 山田 毅彦
(65)公開番号	特開2021-156721(P2021-156721 A)	(72)発明者	副島 英樹 東京都渋谷区恵比寿一丁目 2 0 番 8 号 株式会社 S U B A R U 内
(43)公開日	令和3年10月7日(2021.10.7)	(72)発明者	中野 拓也 東京都渋谷区恵比寿一丁目 2 0 番 8 号 株式会社 S U B A R U 内
審査請求日	令和5年2月1日(2023.2.1)	審査官	比嘉 翔一
(出願人による申告)平成28年度、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「次世代構造部材創製・加工技術開発 / 次世代複合材及び軽金属構造部材創製・加工技術開発(第二期)」委託研究、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願			

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 構造健全性診断システム、構造健全性診断方法及び航空機構造体

## (57)【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアと、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアとを有する構造体の構造健全性診断を行う構造健全性診断システムであって、

前記第1の検査エリアに超音波を発振する超音波振動子と、

前記第1の検査エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記第1の検査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の波形を検出する超音波センサと、

前記第2の検査エリアの歪量を検出する歪センサと、

前記超音波センサで検出された前記波形と、前記歪センサで検出された前記歪量とに基づいて、前記第1の検査エリア及び前記第2の検査エリアを含む前記構造体の健全性を表す指標を求める信号処理部と、

を有する構造健全性診断システム。

## 【請求項2】

前記信号処理部は、前記指標として、前記構造体に損傷が生じたか否か、前記構造体に亀裂が生じたか否か、前記構造体を構成する繊維強化プラスチックに剥離が生じたか否か及び前記構造体に生じた欠陥の程度を表す指標の少なくとも1つを求める請求項1記載の構造健全性診断システム。

## 【請求項3】

前記信号処理部は、前記歪センサで検出された前記第2の検査エリアにおける前記歪量

10

20

に基づいて前記第 1 の検査エリアに欠陥が生じた可能性があるか否かを判定する請求項 2 記載の構造健全性診断システム。

【請求項 4】

前記信号処理部は、前記第 2 の検査エリアを複数の領域に分割し、前記複数の領域のうち、前記第 1 の検査エリアに最も近い領域における前記歪量に基づいて前記第 1 の検査エリアに欠陥が生じた可能性があるか否かを判定する請求項 3 記載の構造健全性診断システム。

【請求項 5】

前記信号処理部において、前記歪センサで検出された前記歪量に基づいて前記第 1 の検査エリアに欠陥が生じた可能性があるかと判定された場合には、前記超音波振動子を制御して前記第 1 の検査エリアに超音波を発振させる制御回路を更に有する請求項 3 又は 4 記載の構造健全性診断システム。

10

【請求項 6】

前記信号処理部は、前記超音波センサで検出された前記波形に基づいて前記第 1 の検査エリアに欠陥が生じたかと判定した場合には、前記歪センサで検出された前記歪量に基づいて前記欠陥の発生エリアを推定する請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の構造健全性診断システム。

【請求項 7】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の構造健全性診断システムを取付けた航空機構造体。

20

【請求項 8】

請求項 1 乃至 6 のいずれか 1 項に記載の構造健全性診断システムを用いて前記構造体の構造健全性診断を行う構造健全性診断方法。

【請求項 9】

折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリアと、折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリアとを有する構造体の構造健全性診断を行う構造健全性診断方法であって、

前記第 1 の検査エリアに超音波振動子で超音波を発振するステップと、

前記第 1 の検査エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記第 1 の検査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の波形を超音波センサで検出するステップと、

30

前記第 2 の検査エリアの歪量を歪センサで検出するステップと、

前記超音波センサで検出された前記波形と、前記歪センサで検出された前記歪量とに基づいて、前記第 1 の検査エリア及び前記第 2 の検査エリアを含む前記構造体の健全性を表す指標を求めるステップと、

を有する構造健全性診断方法。

【請求項 10】

ストリング、スパー、リブ及びフレームの少なくとも 1 つからなる補強材をパネルに取付けた航空機構造体の前記補強材に前記歪センサを取付ける一方、前記パネルに前記超音波振動子及び前記超音波センサを取付け、前記第 1 の検査エリアを含む前記パネルと、前記第 2 の検査エリアを含む前記補強材とを有する前記航空機構造体の構造健全性診断を行う請求項 8 又は 9 記載の構造健全性診断方法。

40

【請求項 11】

前記超音波としてラム波を発振する請求項 8 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の構造健全性診断方法。

【請求項 12】

歪量の変化に比べて広い範囲に伝搬する反面、折り曲げられた板状の部分では歪量の変化に比べて振幅の減衰量が大きいというラム波の特性と、ラム波に比べて折り曲げられた板状の部分における振幅の減衰量が小さい反面、ラム波に比べて狭い範囲に伝搬するという歪量の変化の特性に基づいて、前記第 2 の検査エリアよりも広く、かつ折り曲げられた部分が無い板状のエリアを前記第 1 の検査エリアに決定する一方、折り曲げられた板状の

50

部分を含むエリアを前記第 2 の検査エリアに決定する請求項 1 1 記載の構造健全性診断方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、構造健全性診断システム、構造健全性診断方法及び航空機構造体に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、航空機構造体、ビル、風車、橋梁或いはパイプライン等の構造体の健全性を検査する構造健全性診断（SHM：Structural Health Monitoring）技術の 1 つとして、超音波を利用した技術が知られている（例えば特許文献 1、特許文献 2 及び特許文献 3 参照）。超音波を利用した SHM では、超音波を発振するアクチュエータと、超音波の波形を検出する光ファイバ等の超音波センサを構造体に取り付け、超音波の波形変化を解析することによって、構造体に損傷等の欠陥が発生したか否かや、発生した欠陥の進展の程度が診断される。

10

【0003】

一方、SHM 技術の 1 つとして、歪ゲージや光ファイバセンサ等の歪センサで構造体の歪量を検出し、歪量の変化を解析することによって構造体に負荷されている荷重をモニタリングしつつ、構造体に損傷等の欠陥が発生したか否かを診断する技術も知られている（例えば特許文献 4 及び特許文献 5 参照）。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】特開 2016 - 173336 号公報

【文献】特開 2017 - 173191 号公報

【文献】国際公開第 2017 / 013866 号

【文献】国際公開第 2018 / 055827 号

【文献】特開 2018 - 146368 号公報

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

従来の超音波の波形変化に基づく SHM 手法には、超音波を発振しないと構造体の検査を行うことができないという欠点や、超音波が伝搬しない形状を有する構造体の部分については検査を行うことができないという欠点がある。他方、従来の歪量の変化に基づく SHM 手法には、超音波の波形変化に比べて感度が低く、検査領域に歪センサを網羅しなければならないという欠点がある。

【0006】

このため、超音波を利用した SHM 手法を採用する場合及び歪センサを利用した SHM 手法を採用する場合のいずれにおいても、様々な制約が生じる。その結果、検査領域が広範に亘り、かつ複雑な形状を有する航空機構造体等を対象とする SHM 技術の実用化は進んでいない。特に、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）等の繊維強化プラスチック（FRP：Fiber Reinforced Plastics）で構成される航空機構造体の場合には、航空機の飛行中において衝撃による損傷等の異常の検出が望ましいにも関わらず、飛行前後における検査員の目視による検査となっている。

40

【0007】

そこで、本発明は、構造体の SHM における制約を低減し、欠陥の検出精度を向上することを目的とする。

50

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

本発明の実施形態に係る構造健全性診断システムは、折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアと、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアとを有する構造体の構造健全性診断を行う構造健全性診断システムであって、前記第1の検査エリアに超音波を発振する超音波振動子と、前記第1の検査エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記第1の検査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の波形を検出する超音波センサと、前記第2の検査エリアの歪量を検出する歪センサと、前記超音波センサで検出された前記波形と、前記歪センサで検出された前記歪量とに基づいて、前記第1の検査エリア及び前記第2の検査エリアを含む前記構造体の健全性を表す指標を求める信号処理部とを有するものである。

10

## 【0009】

また、本発明の実施形態に係る航空機構造体は、上述した構造健全性診断システムを取付けたものである。

## 【0010】

また、本発明の実施形態に係る構造健全性診断方法は、上述した構造健全性診断システムを用いて前記構造体の構造健全性診断を行うものである。

## 【0011】

また、本発明の実施形態に係る構造健全性診断方法は、折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアと、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアとを有する構造体の構造健全性診断を行う構造健全性診断方法であって、前記第1の検査エリアに超音波振動子で超音波を発振するステップと、前記第1の検査エリアを透過した前記超音波の透過波及び前記第1の検査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の波形を超音波センサで検出するステップと、前記第2の検査エリアの歪量を歪センサで検出するステップと、前記超音波センサで検出された前記波形と、前記歪センサで検出された前記歪量とに基づいて、前記第1の検査エリア及び前記第2の検査エリアを含む前記構造体の健全性を表す指標を求めるステップとを有するものである。

20

## 【図面の簡単な説明】

## 【0012】

【図1】本発明の実施形態に係る構造健全性診断システムの構成図。

30

【図2】図1に示す超音波検査ユニットで第1の検査エリアを透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアで反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子と超音波センサの第1の配置例を示す図。

【図3】図1に示す超音波検査ユニットで第1の検査エリアを透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアで反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子と超音波センサの第2の配置例を示す図。

【図4】図1に示す超音波検査ユニットで第1の検査エリアを透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアで反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子と超音波センサの第3の配置例を示す図。

【図5】光ファイバセンサで測定した物理量を透過光の光信号として出力する場合における光信号回路の一例を示す回路図。

40

【図6】光ファイバセンサで測定した物理量を反射光の光信号として出力する場合における光信号回路の一例を示す回路図。

【図7】航空機構造体に超音波振動子、超音波センサ及び歪センサを取付けた一例を示す斜視図。

【図8】航空機構造体に超音波振動子、超音波センサ及び歪センサを取付けた別の一例を示す上面図。

【図9】図9は図8に示す航空機構造体の側面図。

【図10】図1に示す構造健全性診断システムを用いて構造体のSHMを行う場合の流れの一例を示すフローチャート。

50

## 【発明を実施するための形態】

## 【0013】

本発明の実施形態に係る構造健全性診断システム、構造健全性診断方法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。

## 【0014】

(構造健全性診断システム)

図1は本発明の実施形態に係る構造健全性診断システムの構成図である。

## 【0015】

構造健全性診断システム1は、折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアI1と、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアI2とを有する構造体OのSHMを行うシステムである。第1の検査エリアI1と第2の検査エリアI2は、互いに一部をオーバーラップさせても良いし、互いに完全にオーバーラップしない別々のエリアとしても良い。従って、第1の検査エリアI1と第2の検査エリアI2は、少なくとも折り曲げられた板状の部分を含む一部がオーバーラップしないエリアであると言える。

10

## 【0016】

折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアI1と、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアI2とを有する構造体Oの例としては、ストリング(縦通材)、スパー(桁)、リブ(小骨)及びフレームの少なくとも1つからなる補強材をパネル(外板)に取付けた航空機構造体が挙げられる。このため、構造健全性診断システム1は、パネルを補強材で補強した構造を有する航空機構造体等の構造体Oに取付けられる。

20

## 【0017】

構造健全性診断システム1は、第1の検査エリアI1の超音波検査と、第2の検査エリアI2における歪量の測定を行うことによって、第1の検査エリアI1と第2の検査エリアI2のSHMを行うように構成されている。従って、構造健全性診断システム1は、第1の検査エリアI1の超音波検査を行う超音波検査ユニット2、第2の検査エリアI2の歪量を測定する歪量検出ユニット3及び信号処理部4を有する。

## 【0018】

超音波検査ユニット2は、第1の検査エリアI1に超音波を発振する圧電セラミックス等の超音波振動子5、第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波及び第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波の少なくとも一方の波形を検出する超音波センサ6及び超音波振動子5を制御して第1の検査エリアI1に超音波を発振させるパルサ等の電気回路を含む制御回路7で構成される。他方、歪量検出ユニット3は歪センサ8を有する。

30

## 【0019】

板材の超音波検査を行う場合において信号対雑音比(SNR: signal-to-noise ratio)及び精度を向上させる観点から特に好適な超音波としては、ラム(Lamb)波が挙げられる。従って、超音波検査ユニット2の超音波振動子5からは、超音波としてラム波を発振することが好適である。ラム波は、超音波の波長の半分以下の薄板を伝搬する波であり、かつ対称モードと非対称モードとが混在する波である。

## 【0020】

第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波のみを超音波センサ6で検出する場合には、超音波振動子5から発振され、第1の検査エリアI1を伝搬した超音波が超音波センサ6で受信できるように、超音波振動子5及び超音波センサ6が第1の検査エリアI1を挟んで対向配置される。第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波のみを超音波センサ6で検出する場合には、超音波振動子5から発振され、第1の検査エリアI1で反射した反射超音波が超音波センサ6で受信できるように、例えば、超音波振動子5及び超音波センサ6を互いに近傍となる位置に配置することができる。或いは、超音波振動子5を超音波センサ6としても使用し、超音波振動子5と超音波センサ6を共通の超音波振動子で構成してもよい。

40

## 【0021】

第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアI1で反射した

50

超音波の反射波の双方を検出する場合には、1つの超音波振動子5につき複数の超音波センサ6を配置したり、逆に1つの超音波センサ6につき複数の超音波振動子5を配置したりするようにしても良い。

【0022】

図2は、図1に示す超音波検査ユニット2で第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子5と超音波センサ6の第1の配置例を示す図である。

【0023】

図2に示すように第1の検査エリアI1を挟んで超音波振動子5と第1の超音波センサ6Aを対向配置し、かつ超音波振動子5の近傍に第2の超音波センサ6Bを並列配置すれば、第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波を第1の超音波センサ6Aで検出する一方、第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波を第2の超音波センサ6Bで検出することができる。

10

【0024】

図3は、図1に示す超音波検査ユニット2で第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子5と超音波センサ6の第2の配置例を示す図である。

【0025】

図3に示すように、第1の検査エリアI1を挟んで第1の超音波振動子5Aと超音波センサ6を対向配置し、かつ超音波センサ6の近傍に第2の超音波振動子5Bを並列配置すれば、第1の超音波振動子5Aから発振され、第1の検査エリアI1を透過した超音波を超音波センサ6で検出する一方、第2の超音波振動子5Bから発振され、第1の検査エリアI1で反射した超音波を超音波センサ6で検出することができる。

20

【0026】

図4は、図1に示す超音波検査ユニット2で第1の検査エリアI1を透過した超音波の透過波と、第1の検査エリアI1で反射した超音波の反射波の双方を検出する場合における超音波振動子5と超音波センサ6の第2の配置例を示す図である。

【0027】

図4に示すように、第1の超音波振動子5Aと第2の超音波振動子5Bを、第1の検査エリアI1を挟んで対向配置させることができる。そうすると、第1の超音波振動子5A及び第2の超音波振動子5Bの一方から発振され、第1の検査エリアI1を透過した超音波を、第1の超音波振動子5A及び第2の超音波振動子5Bの他方で検出することができる。すなわち、第1の超音波振動子5A及び第2の超音波振動子5Bの他方を超音波センサ6として使用することができる。

30

【0028】

また、第1の超音波振動子5Aを超音波センサ6としても使用すれば、第1の超音波振動子5Aから発振され、第1の検査エリアI1で反射した超音波を、超音波センサ6としても機能する第1の超音波振動子5Aで検出することができる。同様に、第2の超音波振動子5Bを超音波センサ6としても使用すれば、第2の超音波振動子5Bから発振され、第1の検査エリアI1で反射した超音波を、超音波センサ6としても機能する第2の超音波振動子5Bで検出することができる。

40

【0029】

第1の検査エリアI1が広い場合には、1つの第1の検査エリアI1を複数のサブエリアに分割し、第1の検査エリアI1をカバーできるように、複数の超音波振動子5と、複数の超音波センサ6を配置するようにしても良い。換言すれば、複数の第1の検査エリアI1を互いにオーバーラップさせ、1つの第1の検査エリアI1につき少なくとも1つの超音波振動子5と、少なくとも1つの超音波センサ6を配置するようにしても良い。その場合には、オーバーラップする共通のエリアから取得される複数の超音波の波形に基づいて超音波検査を行うことができる。

【0030】

50

超音波センサ6としては、超音波の送受信が可能な超音波振動子の他、超音波の発振を行わずに超音波の検出のみを行う光ファイバセンサを用いることができる。光ファイバセンサの例としては、FBGセンサや位相シフトFBG(PS-FBG: Phase-shifted FBG)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。

【0031】

超音波センサ6として光ファイバセンサを用いる場合には、光ファイバセンサにレーザ光を入射させる光源や必要な光学素子が光ファイバセンサに接続される。光ファイバセンサで検出される超音波の波形を表す信号は、光ファイバセンサの透過光としても良いし、反射光としても良い。

10

【0032】

図5は、光ファイバセンサ10で測定した物理量を透過光の光信号として出力する場合における光信号回路の一例を示す回路図である。

【0033】

図5に示すようにFBGセンサやPS-FBGセンサ等の光ファイバセンサ10を物体に取付けると、光ファイバセンサからの透過光の波長分布及び反射光の波長分布がそれぞれ物体に生じる変位に応じて変化する。このため、光源11を光ファイバセンサ10の一端に接続し、光検出器12を光ファイバセンサ10の他端に接続すれば、光検出器12で検出される光ファイバセンサ10からの透過光の波長変化量として物体の変位量を検出することができる。すなわち、物体の変位量は、光ファイバセンサ10からの透過光の波長変化量に変換され、光ファイバセンサ10からは波長が変化する透過光として光信号が出力される。

20

【0034】

このため、光ファイバセンサ10を超音波の検出位置に配置すれば、超音波による構造体0の微小な変位の振動が透過光の波長の振動に変換され、光ファイバセンサ10からの透過光の波長振動の波形として超音波波形を検出することが可能となる。もちろん、光信号のノイズを除去するための光学フィルタ等の所望の光学素子を接続することもできる。

【0035】

図6は、光ファイバセンサ10で測定した物理量を反射光の光信号として出力する場合における光信号回路の一例を示す回路図である。

30

【0036】

図6に示すように光ファイバセンサ10の一端に光サーキュレータ13を接続し、光サーキュレータ13の入力ポートに光源11を接続する一方、光サーキュレータ13の出力ポートに光検出器12を接続すれば、光検出器12で光ファイバセンサ10の反射光を検出することができる。このため、光検出器12で検出される光ファイバセンサ10からの反射光の波長変化量として物体の変位量を検出することができる。すなわち、物体の変位量は、光ファイバセンサ10からの反射光の波長変化量に変換され、光ファイバセンサ10からは波長が変化する反射光として光信号が出力される。

【0037】

このため、光ファイバセンサ10を超音波の検出位置に配置すれば、超音波による構造体0の微小な変位の振動が反射光の波長の振動に変換され、光ファイバセンサ10からの反射光の波長振動の波形として超音波波形を検出することが可能となる。もちろん、光信号のノイズを除去するための光学フィルタ等の所望の光学素子を接続することもできる。

40

【0038】

このように超音波検査ユニット2では、光ファイバセンサ10等の超音波センサ6で第1の検査エリアI1における超音波の波形が検出される一方、歪量検出ユニット3では第2の検査エリアI2の歪量が測定される。

【0039】

歪量検出ユニット3は、第2の検査エリアI2の歪量を検出するための歪センサ8と、歪センサ8の種類に応じた必要な回路要素で構成される。歪センサ8としては、歪ゲージ

50

を使用しても良いが、上述した光ファイバセンサ 10 を高感度な歪センサ 8 として使用することができる。

【 0 0 4 0 】

すなわち、光ファイバセンサ 10 を第 2 の検査エリア I 2 に取付ければ、第 2 の検査エリア I 2 における歪量に応じて光ファイバセンサ 10 の光透過特性及び光反射特性が変化するため、第 2 の検査エリア I 2 における歪量を光ファイバセンサ 10 からの透過光又は反射光の光信号として出力することができる。この場合、広帯域のレーザ光の使用、異なる波長帯域で光を透過又は反射させる複数の光ファイバセンサ 10 の直列接続及び複数の光ファイバセンサ 10 から出力される光信号の多重化等の公知の手法を採用すれば、第 2 の検査エリア I 2 において歪が生じた位置と歪量を表す光信号を取得することが可能となる。

10

【 0 0 4 1 】

上述したように超音波検査ユニット 2 では、折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリア I 1 の超音波検査が行われる。従って、超音波検査ユニット 2 の超音波振動子 5 と、超音波センサ 6 は、折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリア I 1 に取付けられる。他方、歪量検出ユニット 3 では、折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリア I 2 における歪量が測定される。従って、歪量検出ユニット 3 の歪センサ 8 は、折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリア I 2 に取付けられる。

【 0 0 4 2 】

折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリア I 1 を対象として超音波検査を行う一方、折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリア I 2 を対象として歪量を測定する理由は、ラム波等の超音波は広い範囲に伝搬するため、歪量検査に比べて広いエリアを対象として検査を行うことができる反面、平坦又は曲率が十分に小さい媒体でなければ超音波が十分な強度で伝搬しないことから複雑な形状を有する部分では十分な精度で検査を行えないという利点と欠点を有する一方、歪センサ 8 は複雑な形状を有する物体の歪量であっても検出できる反面、超音波検査と比べると狭い範囲でしか歪量を検出できないという利点と欠点を有するためである。

20

【 0 0 4 3 】

このため、特に超音波としてラム波を使用する場合には、歪量の変化に比べて広い範囲に伝搬する反面、折り曲げられた板状の部分では歪量の変化に比べて振幅の減衰量が大きいというラム波の特性と、ラム波に比べて折り曲げられた板状の部分における振幅の減衰量が小さい反面、ラム波に比べて狭い範囲に伝搬するという歪量の変化の特性に基づいて、第 2 の検査エリア I 2 よりも広く、かつ折り曲げられた部分が無い板状のエリアを第 1 の検査エリア I 1 に決定する一方、折り曲げられた板状の部分を含むエリアを第 2 の検査エリア I 2 に決定することが、各物理量の特性を活かした合理的な検査エリアの決定方法である。

30

【 0 0 4 4 】

図 7 は航空機構造体 O 1 に超音波振動子 5、超音波センサ 6 及び歪センサ 8 を取付けた一例を示す斜視図である。

【 0 0 4 5 】

図 7 に例示されるように、パネル O 2 を横断面がハット型ストリング O 3 で補強した航空機構造体 O 1 に超音波振動子 5、超音波センサ 6 及び歪センサ 8 を取付けることができる。パネル O 2 は平坦又は曲率が小さな板状の構造を有する。従って、パネル O 2 の第 1 の検査エリア I 1 を対象として超音波検査を行えるように、パネル O 2 には、超音波振動子 5 及び超音波センサ 6 を取付けることができる。他方、ハット型ストリング O 3 は、折り曲げられた板状の部分を含む複雑な形状を有している。従って、ハット型ストリング O 3 の第 2 の検査エリア I 2 を対象として歪量を測定できるように、ハット型ストリング O 3 には、歪センサ 8 を取付けることができる。

40

【 0 0 4 6 】

図 7 に示す例では、パネル O 2 に第 1 の光ファイバセンサ 10 A が超音波センサ 6 とし

50



て取付けられており、パネル〇２に比べて大きい荷重が作用するハット型ストリング〇３に第２の光ファイバセンサ１０Ｂが歪センサ８として取付けられている。また、ハット型ストリング〇３の内側にもパネル〇２の部分が存在するため、超音波検査を行えるように超音波振動子５及び超音波センサ６が配置されている。

【００４７】

もちろん、ハット型ストリング〇３に限らず、Ｉ型ストリングやＴ型ストリング等の様々な形状を有する補強材をパネル〇２に取付けた航空機構造体〇１に超音波振動子５、超音波センサ６及び歪センサ８を取付けて、超音波検査と歪量測定の双方を行うことができる。

【００４８】

図８は航空機構造体〇１に超音波振動子５、超音波センサ６及び歪センサ８を取付けた別の一例を示す上面図であり、図９は図８に示す航空機構造体〇１の側面図である。

【００４９】

典型的な航空機の胴体を構成する航空機構造体〇１は、図８及び図９に例示されるように、パネル〇２に複数のフレーム〇４と複数のストリング〇５を取付けた構造を有する。このため、胴体を構成する航空機構造体〇１には、隣接するフレーム〇４とストリング〇５で囲まれた板状の複数の領域が形成される。

【００５０】

このような胴体を構成する航空機構造体〇１においても、荷重が掛かり、かつ複雑な形状を有する各フレーム〇４と各ストリング〇５に歪センサ８を取付ける一方、フレーム〇４とストリング〇５で囲まれたパネル〇２の部分に超音波振動子５と、超音波センサ６を取付けることができる。

【００５１】

図８に示す例においても、フレーム〇４とストリング〇５で囲まれたパネル〇２の部分に第１の光ファイバセンサ１０Ａが超音波センサ６として取付けられており、フレーム〇４と横断面の形状が逆Ｔ字型のストリング〇５の上面に第２の光ファイバセンサ１０Ｂが歪センサ８として取付けられている。

【００５２】

このように、ストリング、スパー、リブ或いはフレーム等の補強材に歪センサ８を取付ける一方、パネルに超音波振動子５及び超音波センサ６を取付け、第１の検査エリアＩ１を含むパネルの超音波検査と、第２の検査エリアＩ２を含む補強材の歪量測定によって、第１の検査エリアＩ１と第２の検査エリアＩ２を含む航空機構造体〇１のＳＨＭを行うことができる。航空機構造体〇１以外の構造体〇についても同様である。

【００５３】

尚、パネルに補強材を取付けた構造を有する構造体〇のＳＨＭを行う場合には、歪センサ８を、補強材の表面に接着する方法に限らず、例えば、特開２０１７－１７３１９１に記載されているように、補強材に埋め込む方法や、補強材とパネルとの間に挟み込む方法によって、補強材に取付けるようにしても良い。また、補強材とパネルとの間に光ファイバセンサ１０等の歪センサ８を挟み込む場合には、パネル側に歪センサ８を埋め込んで補強材の歪量を測定できるようにしても良い。その場合には、歪センサ８で補強材の一部とパネルの一部の双方の歪量を測定できるため、補強材の一部とパネルの一部を含む領域を第２の検査エリアＩ２に設定することもできる。

【００５４】

構造体〇のＳＨＭは、構造体〇の健全性を表す指標を求めることによって行うことができる。信号処理部４は、超音波センサ６で検出された第１の検査エリアＩ１からの超音波の波形と、歪センサ８で検出された第２の検査エリアＩ２の歪量とに基づいて、第１の検査エリアＩ１及び第２の検査エリアＩ２を含む構造体〇の健全性を表す指標を求める信号処理回路である。

【００５５】

超音波の波形の検出信号は超音波センサ６から電気信号又は光信号として出力される。

10

20

30

40

50

他方、第2の検査エリアI2の歪量の検出信号についても、歪センサ8から電気信号又は光信号として出力される。従って、信号処理部4は、図8及び図9に示すような光信号を電気信号に変換する光検出器12、アナログの電気信号をデジタルの電気信号に変換するA/D(analog-to-digital)変換器及びデジタルの電気信号に対する信号処理を行うコンピュータ等の電気回路で構成することができる。また、光信号に対する信号処理を行う光フィルタ等の光学素子を信号処理部4に設けても良い。

【0056】

構造体OのSHMに有用な健全性を表す指標の具体例としては、構造体Oに損傷が生じたか否か、構造体Oに亀裂が生じたか否か、構造体Oを構成するFRPに剥離が生じたか否か及び構造体Oに生じた欠陥の程度を表す指標等が挙げられる。このため、信号処理部4では、これらの指標の少なくとも1つを求めるようにすることができる。

10

【0057】

信号処理部4では、第1の検査エリアI1から検出された超音波の波形信号及び第2の検査エリアI2の歪量に対する所望の信号処理を行うことによって、健全性を表す指標を含むSHMの検査情報を取得することができる。

【0058】

例えば、第1の検査エリアI1から検出された超音波の波形を解析し、超音波の異常な波形変化を検出すれば、第1の検査エリアI1における損傷、亀裂或いは剥離等の欠陥の有無を検出することができる。より具体的な例として、第1の検査エリアI1から検出された超音波の波形信号にアベレージング(平均化処理)、LPF(Low Pass Filter)やHPF(High Pass Filter)等を用いたノイズ除去のためのフィルタ処理、包絡線検波処理、フーリエ変換処理やウェーブレット変換等の周波数解析処理等の信号処理を行って得られる信号波形と、第1の検査エリアI1に欠陥が存在しない場合における信号波形に相当する基準波形とを比較し、第1の検査エリアI1から検出された信号波形が基準波形から閾値を超えて乖離している場合には、第1の検査エリアI1に欠陥が発生し、発生した欠陥の影響で第1の検査エリアI1を經由した超音波の波形が変化したと判定することができる。

20

【0059】

また、超音波の反射波の波形を第1の検査エリアI1から検出する場合であれば、第1の検査エリアI1に向けて超音波振動子5から超音波を発振した時刻を超音波振動子5の制御回路7から信号処理部4に通知し、超音波振動子5から超音波を発振した時刻から超音波センサ6で検出された反射波のピーク時刻までの経過時間を測定することによって欠陥の位置を推定することもできる。

30

【0060】

構造体Oが航空機構造体O1である場合には、航空機の飛行中には第1の検査エリアI1が空力荷重を受けて振動することになる。航空機の飛行中における第1の検査エリアI1の振動パターンは、時々刻々と変化する航空機の種類や高度等の様々な飛行条件に応じてダイナミックに変化する。

【0061】

そこで、航空機の飛行条件に応じた第1の検査エリアI1の振動を表す特徴量を予め取得しておき、航空機の飛行に伴う第1の検査エリアI1の振動を、超音波の振動からキャンセルする信号処理を行うことによって、航空機の飛行中における超音波検査が可能となる。航空機の飛行条件に応じた振動は、飛行条件ごとに変化するため、シミュレーションや試験に限らず、機械学習法によって統計的に取得するようにしても良い。これは、構造体Oが自動車等の航空機構造体O1以外の移動体である場合においても同様である。

40

【0062】

他方、第2の検査エリアI2の歪量の変化を解析すれば、第2の検査エリアI2における損傷、亀裂或いは剥離等の欠陥の有無を検出することができる。より具体的な例として、第2の検査エリアI2における歪量の測定値を、第2の検査エリアI2に欠陥が存在しない場合における歪量の基準値と比較し、歪量の測定値が歪量の基準値から閾値を超えて

50

乖離している場合には、第2の検査エリアI2に欠陥が発生し、発生した欠陥の影響で第2の検査エリアI2における歪量が増加したと判定することができる。

【0063】

構造体Oが航空機構造体O1である場合には、航空機の飛行中には第2の検査エリアI2が空力荷重を受けて変形し、第2の検査エリアI2の歪量が増加することになる。航空機の飛行中における第2の検査エリアI2の歪量も、第1の検査エリアI1における振動パターンと同様に、時々刻々と変化する航空機の速度や高度等の様々な飛行条件に応じてダイナミックに変化する。

【0064】

そこで、航空機の飛行条件に応じた第2の検査エリアI2における歪量の変化量を予め取得しておき、航空機の飛行に伴う第2の検査エリアI2における歪量の変化量を、歪センサ8で測定された第2の検査エリアI2における歪量からキャンセルする信号処理を行うことによって、航空機の飛行中において欠陥のみに起因する第2の検査エリアI2における歪量を抽出することが可能となる。航空機の飛行条件に応じた第2の検査エリアI2における歪量の変化量は、振動と同様に飛行条件ごとに変化するため、シミュレーションや試験に限らず、機械学習法によって統計的に取得するようにしても良い。これは、構造体Oが自動車等の航空機構造体O1以外の移動体である場合においても同様である。

10

【0065】

歪センサ8が光ファイバセンサ10である場合には、第2の検査エリアI2における歪量の測定値が、光検出器12から出力される光ファイバセンサ10からの透過光又は反射光の波長スペクトルを表す波形信号の解析によって取得される。すなわち、第2の検査エリアI2における歪量の測定値は、光ファイバセンサ10から出力された透過光又は反射光の波長スペクトルを表す信号波形のピーク波長の変化量として表される。このため、超音波の波形信号に対する信号処理と同様な、アベレージング、フィルタ処理、周波数解析処理等の信号処理を光検出器12から出力される信号に対して実行するようにしても良い。

20

【0066】

また、複数の歪ゲージを異なる位置に配置する場合や光ファイバセンサ10で複数の位置における歪量を検出する場合には、第2の検査エリアI2内の複数の位置における歪量が測定されることになる。このため、第2の検査エリアI2の歪量に基づいて、欠陥の有無のみならず欠陥の位置を求めることができる。また、歪量の経時的な変化を測定すれば、欠陥の進展の程度を把握することも可能となる。

30

【0067】

歪量の測定対象となる第2の検査エリアI2が超音波検査の対象となる第1の検査エリアI1に生じた欠陥と十分に近い場合には、第1の検査エリアI1に生じた欠陥の影響によって第2の検査エリアI2における歪量の測定値も僅かに変化する。従って、第2の検査エリアI2における歪量の測定値に基づいて、第2の検査エリアI2における欠陥の有無のみならず、第1の検査エリアI1における欠陥の有無の推定を行うことも可能である。

【0068】

そこで、信号処理部4には、歪センサ8で検出された第2の検査エリアI2における歪量の測定値に基づいて第1の検査エリアI1に欠陥が生じた可能性があるか否かを判定する機能を設けることができる。具体的には、第2の検査エリアI2に欠陥が生じていないと判定される程度の僅かな歪量の変化が閾値処理によって検出された場合には、僅かな歪量の変化が検出された位置に近い第1の検査エリアI1に欠陥が生じた可能性があるかと判定することができる。

40

【0069】

歪センサ8として光ファイバセンサ10を使用する場合には、図7及び図8に例示されるように、より広範囲の第2の検査エリアI2を対象として共通の光ファイバセンサ10で歪量を測定できるように光ファイバセンサ10の長さが長くなり、光ファイバセンサ10の一部のみが第1の検査エリアI1の近傍となる場合や、光ファイバセンサ10の複数の部分が異なる複数の第1の検査エリアI1の近傍となる場合がある。これは、歪センサ

50

8として多数の歪ゲージを異なる位置に配置する場合においても同様である。

【0070】

そこで、第2の検査エリアI2を複数の領域に分割し、複数の領域のうち、第1の検査エリアI1に最も近い領域における歪量に基づいて第1の検査エリアI1に欠陥が生じた可能性があるか否かを判定することができる。

【0071】

具体例として、図7に示すようにハット型ストリングO3の外側における2本の山折り側の稜線と、2本の谷折り側の稜線に沿って1本の共通の光ファイバセンサ10をジグザグに配置する場合であれば、2か所の谷折り側の稜線に沿って配置される光ファイバセンサ10の2か所の部分が、それぞれハット型ストリングO3の両側におけるパネルO2の部分及びハット型ストリングO3の内側におけるパネルO2の部分と隣接することになる。

10

【0072】

このため、第2の検査エリアI2を、ハット型ストリングO3の一方の谷折り側の稜線に沿う第1の領域R1、他方の谷折り側の稜線に沿う第2の領域R2及びその他の領域R3に分割することができる。そして、谷折り側の稜線に沿う第1及び第2の2つの領域R1、R2のいずれかにおける歪量が、第1及び第2の2つの領域R1、R2に欠陥が生じたと判定されない程度に増加した場合には、ハット型ストリングO3の片側における近い方のパネルO2に設定された第1の検査エリアI1及びハット型ストリングO3の内側のパネルO2に設定された第1の検査エリアI1のいずれかに欠陥が生じた可能性があるとして判定することができる。

20

【0073】

別の具体例として、図8に示すように、単一又は複数の光ファイバセンサ10が格子状に配置される場合であれば、複数のフレームO4と複数のストリングO5に設定される第2の検査エリアI2を光ファイバセンサ10同士が交差する位置において複数の領域に分割することができる。そして、第2の検査エリアI2を構成する複数の領域のうちのある領域において、欠陥が生じたと判定されない程度に歪量が増加した場合には、歪量が増加したフレームO4又はストリングO5の両側に形成されるパネルO2の矩形領域に設定された2つの第1の検査エリアI1の少なくとも一方に欠陥が生じた可能性があるとして判定することができる。

【0074】

光ファイバセンサ10による歪量の測定は、光源11から光ファイバセンサ10に光が入射していれば継続的に行うことができる。また、歪量を電気抵抗の変化として検出する電気抵抗式の歪ゲージによる歪量の測定は、電源から歪ゲージに電圧が印加されていれば継続的に行うことができる。このため、第2の検査エリアI2における歪量の測定による第2の検査エリアIの欠陥の検出等の検査と、第1の検査エリアI1において欠陥が生じた可能性があるか否かの判定は、歪センサ8を作動状態とすることによって継続的に行うことができる。

30

【0075】

一方、第1の検査エリアI1の超音波検査を行うためには、超音波振動子5から超音波を発振することが必要である。超音波の発振間隔を短く設定し、一定の間隔で超音波を断続的に発振すれば、超音波検査も断続的に継続することができる。但し、電力の消費を低減するためには、超音波の発振間隔を長く設定することが望ましい。

40

【0076】

そこで、超音波の発振については、超音波振動子5の制御回路7に接続される入力装置7Aの操作によって手動で行うか、電力の消費が低減されるように決定された一定の間隔で自動的に行い、代わりに、第2の検査エリアI2における歪量の測定によって、第1の検査エリアI1に欠陥が生じた可能性があるか否かの判定を継続的に行うようにすることができる。そして、第1の検査エリアI1に欠陥が生じた可能性があるとして判定された場合には、第1の検査エリアI1の超音波検査を行うようにすることができる。これにより、連続的な検査にはエネルギーを要するという超音波検査の欠点を、継続的に行うことが容易

50

な歪量の検査によって補うことができる。

【 0 0 7 7 】

第 2 の検査エリア I 2 における歪量の測定結果に基づく第 1 の検査エリア I 1 における超音波検査は自動的に開始されるようにすることができる。その場合には、信号処理部 4 において、歪センサ 8 で検出された第 2 の検査エリア I 2 の歪量に基づいて第 1 の検査エリア I 1 に欠陥が生じた可能性があるとして判定された場合には、信号処理部 4 から超音波振動子 5 の制御回路 7 に制御信号を出力し、制御回路 7 が超音波振動子 5 を制御して第 1 の検査エリア I 1 に超音波を発振させるようにすればよい。すなわち、第 1 の検査エリア I 1 に欠陥が生じた可能性があるという信号処理部 4 における判定結果をトリガとして、超音波振動子 5 から第 1 の検査エリア I 1 に超音波を発振させることができる。

10

【 0 0 7 8 】

具体例として、図 7 に示すハット型ストリング O 3 の歪量が僅かに増加した場合であれば、両側のパネル O 2 の部分の少なくとも一方に欠陥が生じた疑いがあると判定して、両側のパネル O 2 の部分の一方又は双方の超音波検査を行うことができる。別の具体例として、図 8 に示すフレーム O 4 又はストリング O 5 の歪量が局所的に僅かに増加した場合には、歪量が増加した部分の両側におけるパネル O 2 の矩形部分の少なくとも一方に欠陥が生じた疑いがあると判定して、両側のパネル O 2 の矩形部分における超音波検査を行うことができる。

【 0 0 7 9 】

上述したように第 1 の検査エリア I 1 で反射した超音波反射波に基づく超音波検査の場合には、超音波反射波のピーク時刻と音速等に基づいて第 1 の検査エリア I 1 内における欠陥の位置を算出することができる。これに対して、第 1 の検査エリア I 1 を透過した超音波の波形のみによる超音波検査の場合には、多数の超音波振動子 5 と超音波センサ 6 を密に配置するような場合を除けば、第 1 の検査エリア I 1 内における欠陥の位置を求めることは困難である。

20

【 0 0 8 0 】

但し、上述したように、超音波検査の対象となる第 1 の検査エリア I 1 に生じた欠陥の影響を受けて、第 2 の検査エリア I 2 における歪量が増加する可能性がある。第 2 の検査エリア I 2 において変化した歪量の分布は、第 1 の検査エリア I 1 に生じた欠陥の位置に依存して変化すると考えられる。具体的には、第 1 の検査エリア I 1 に生じた欠陥の位置に第 2 の検査エリア I 2 内の位置に近いほど、歪の変化量が大きくなると考えられる。

30

【 0 0 8 1 】

そこで、第 2 の検査エリア I 2 における歪量に基づいて第 1 の検査エリア I 1 に欠陥が生じた可能性があるとして事前に判定されたか否かを問わず、第 1 の検査エリア I 1 を対象とする超音波検査の結果、信号処理部 4 において、超音波センサ 6 で検出された超音波の波形に基づいて第 1 の検査エリア I 1 に欠陥が生じたとして判定された場合には、歪センサ 8 で検出された第 2 の検査エリア I 2 の歪量の分布に基づいて第 1 の検査エリア I 1 内における欠陥の発生エリアを推定することができる。

【 0 0 8 2 】

歪分布に基づく解析処理が容易な具体例としては、歪量がピークとなった第 2 の検査エリア I 2 の位置が第 2 の検査エリア I 2 内の他の位置と比較して最も近い位置となる、第 1 の検査エリア I 1 内における領域を欠陥の発生エリアに絞る処理が挙げられる。この場合、例えば扇形や扇形の一部を切り取った形状を有する領域が欠陥の発生エリアとして第 1 の検査エリア I 1 から抽出されることになる。

40

【 0 0 8 3 】

歪分布に基づく複雑な解析処理の具体例としては、シミュレーションや試験を繰返して第 1 の検査エリア I 1 内における欠陥の位置と、第 2 の検査エリア I 2 の歪量の分布との関係を求めてテーブルや関数として記憶装置に保存し、記憶装置に保存された参照情報と実際に測定された歪量の分布に基づいて欠陥の発生エリアを推定する処理が挙げられる。この場合には、機械学習法等によって推定精度を向上させることができる。

50

## 【 0 0 8 4 】

( 構造健全性診断方法 )

次に構造健全性診断システム 1 を用いて構造体 O の S H M を行う構造健全性診断方法について説明する。

## 【 0 0 8 5 】

図 1 0 は、図 1 に示す構造健全性診断システム 1 を用いて構造体 O の S H M を行う場合の流れの一例を示すフローチャートである。

## 【 0 0 8 6 】

まずステップ S 1 において、折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリア I 1 における超音波検査と、折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリア I 2 における歪量の測定が実行される。すなわち、図 1 に示す超音波検査ユニット 2 により、第 1 の検査エリア I 1 を透過した超音波の波形及び第 1 の検査エリア I 1 で反射した超音波反射波の波形の少なくとも一方が取得される。他方、歪量検出ユニット 3 により、第 2 の検査エリア I 2 における歪量が測定される。

10

## 【 0 0 8 7 】

より、具体的には、入力装置 7 A の操作によって手動で、或いは、一定の間隔で自動的に、超音波検査ユニット 2 の制御回路 7 から超音波振動子 5 に電気信号が印加される。これにより、例えば、図 7 乃至 9 に例示されるように航空機構造体 O 1 等の構造体 O に配置された超音波振動子 5 から超音波が発振される。発振された超音波は、航空機構造体 O 1 のパネル O 2 のように折り曲げられた部分が無い板状の第 1 の検査エリア I 1 を伝搬し、図 2 乃至図 4 に例示されるように第 1 の検査エリア I 1 を透過した超音波の透過波の波形及び第 1 の検査エリア I 1 で反射した超音波反射波の波形の少なくとも一方が、図 7 又は 8 に示すような第 1 の光ファイバセンサ 1 0 A 等の超音波センサ 6 で検出される。

20

## 【 0 0 8 8 】

超音波センサ 6 が、図 5 又は図 6 に例示されるような光ファイバセンサ 1 0 である場合には、光源 1 1 から光ファイバセンサ 1 0 に広帯域のレーザ光等が出射される。そして、光ファイバセンサ 1 0 から超音波の波形信号が光信号として出力される。一方、超音波センサ 6 が、図 4 に例示されるように超音波振動子である場合には、超音波の波形信号が電気信号として出力される。超音波センサ 6 で検出された超音波の波形信号は、超音波センサ 6 から信号処理部 4 に出力される。

30

## 【 0 0 8 9 】

他方、図 1 に示す歪量検出ユニット 3 の歪センサ 8 によって、第 2 の検査エリア I 2 における歪量が測定される。具体例として、図 7 乃至図 9 に例示されるように航空機構造体 O 1 等の構造体 O に配置された第 2 の光ファイバセンサ 1 0 B 等の歪センサ 8 によって、ハット型ストリング O 3 或いはフレーム O 4 とストリング O 5 のような折り曲げられた板状の部分を含む第 2 の検査エリア I 2 における歪量が測定される。

## 【 0 0 9 0 】

歪センサ 8 が、図 5 又は図 6 に例示されるような光ファイバセンサ 1 0 である場合には、光源 1 1 から光ファイバセンサ 1 0 に広帯域のレーザ光等が出射される。そして、光ファイバセンサ 1 0 から歪量の検出信号が光信号として出力される。一方、歪センサ 8 が、電気抵抗式の歪ゲージである場合には、歪量の検出信号が電気信号として出力される。歪センサ 8 で検出された歪量の検出信号は、歪センサ 8 から信号処理部 4 に出力される。

40

## 【 0 0 9 1 】

そうすると、信号処理部 4 では、超音波センサ 6 で検出された超音波の波形と、歪センサ 8 で検出された第 2 の検査エリア I 2 の歪量とに基づいて、第 1 の検査エリア I 1 及び第 2 の検査エリア I 2 を含む構造体 O の健全性を表す指標が求められる。具体例として、第 1 の検査エリア I 1 及び第 2 の検査エリア I 2 に欠陥が生じたか否かを、健全性を表す指標として求めることができる。

## 【 0 0 9 2 】

そのために、ステップ S 2 において、第 2 の検査エリア I 2 の歪量が、基準となる歪量

50

に対して変化しているか否かが判定される。第2の検査エリアI2の歪量が、基準となる歪量に対して変化していないと判定された場合には、ステップS3において、第1の検査エリアI1から取得された超音波波形が、基準となる超音波波形に対して変化しているか否かが判定される。また、第2の検査エリアI2の歪量が、基準となる歪量に対して変化していると判定された場合においても、ステップS4において、第1の検査エリアI1から取得された超音波波形が、基準となる超音波波形に対して変化しているか否かが判定される。尚、超音波波形の変化の有無の判定と歪量の変化の有無の判定の順序は任意であり、順序を逆にしても良いし、並列処理によって同時に行っても良い。

#### 【0093】

そして、第1の検査エリアI1から取得された超音波波形と、第2の検査エリアI2の歪量のいずれもが、基準となる波形及び基準となる歪量からそれぞれ変化していないと判定された場合には、第1の検査エリアI1及び第2の検査エリアI2の双方に欠陥が無いと判定することができる。また、第1の検査エリアI1から取得された超音波波形が基準となる波形から変化したと判定された場合には、第1の検査エリアI1に欠陥があると判定ことができ、第2の検査エリアI2の歪量が基準となる歪量から変化したと判定された場合には、第2の検査エリアI2に欠陥があると判定することができる。従って、第1の検査エリアI1から取得された超音波波形と、第2の検査エリアI2の歪量のいずれもが、基準となる波形及び基準となる歪量からそれぞれ変化していると判定された場合には、第1の検査エリアI1及び第2の検査エリアI2の双方に欠陥があると判定することができる。

#### 【0094】

(効果)

以上のような構造健全性診断システム1及び構造健全性診断方法は、構造体Oの形状に応じて超音波検査を行う領域と、歪量の測定を行う領域に分類し、超音波の波形変化と歪量の変化の双方に基づいてSHMを行うようにしたものである。

#### 【0095】

このため、構造健全性診断システム1及び構造健全性診断方法によれば、超音波検査のみによってSHMを行う場合や歪量の測定のみによってSHMを行う場合に比べてSHMにおける制約を低減し、検査精度を向上することができる。

#### 【0096】

すなわち、折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアI1については、歪センサ8を網羅的に配置しなくても、超音波検査によってSHMを行うことができる。換言すれば、歪センサ8の配置不足による欠陥の検出漏れを低減することができる。逆に、折り曲げられた板状の部分を含む第2の検査エリアI2については、歪量に基づくSHMを実施することによって、超音波が欠陥の検出に十分な強度で伝搬しないことによる欠陥の検出漏れを低減することができる。

#### 【0097】

つまり、歪量の測定のみによるSHMでは検出できない欠陥や、逆に、超音波検査のみでは検出できない欠陥の検出が可能となり、従来のSHMシステムに存在していた使用制限を削減することができる。

#### 【0098】

また、従来の歪量の測定のみによるSHMと比べれば、折り曲げられた部分が無い板状の第1の検査エリアI1に網羅的に多数の歪センサ8を配置することが不要となるため、歪センサ8の数と、測定される歪量のデータサイズ及び信号処理量を飛躍的に低減することができる。特に、構造体Oが航空機構造体O1であれば、歪センサ8の数や信号処理回路の規模等の低減によって、航空機にとって重要な軽量化を図ることができる。

#### 【0099】

(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

10

20

30

40

50

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。

【符号の説明】

【 0 1 0 0 】

- 1 構造健全性診断システム
- 2 超音波検査ユニット
- 3 歪量検出ユニット
- 4 信号処理部 10
- 5、5 A、5 B 超音波振動子
- 6、6 A、6 B 超音波センサ
- 7 制御回路
- 7 A 入力装置
- 8 歪センサ
- 1 0、1 0 A、1 0 B 光ファイバセンサ
- 1 1 光源
- 1 2 光検出器
- 1 3 光サーキュレータ
- I 1 第 1 の検査エリア 20
- I 2 第 2 の検査エリア
- O 構造体
- O 1 航空機構造体
- O 2 パネル
- O 3 ハット型ストリング
- O 4 フレーム
- O 5 ストリング
- R 1、R 2、R 3 領域

30

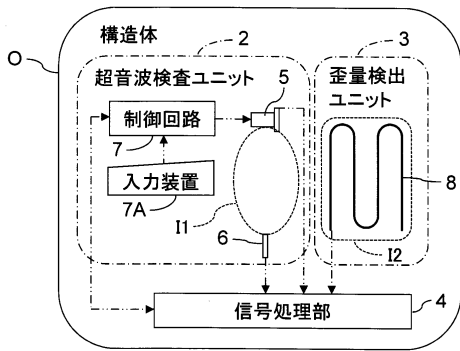
40

50

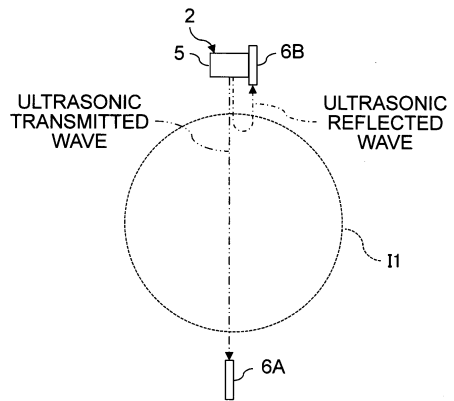


【図面】

【図 1】

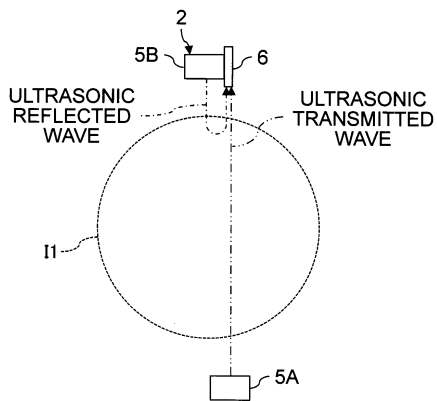


【図 2】

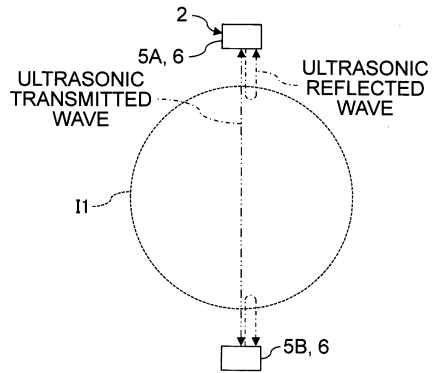


10

【図 3】

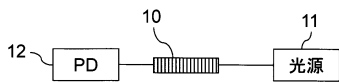


【図 4】

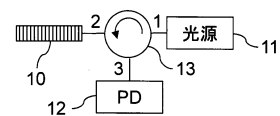


20

【図 5】



【図 6】

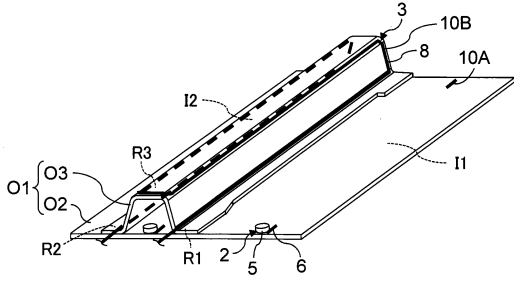


30

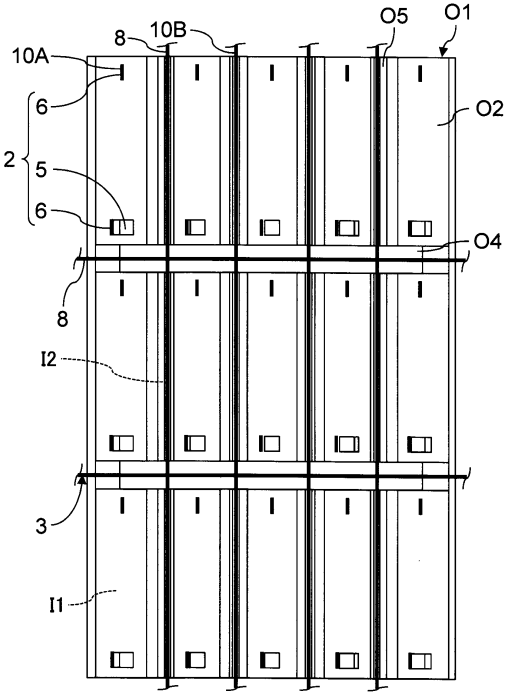
40

50

【図7】



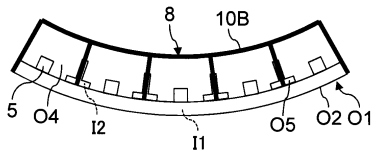
【図8】



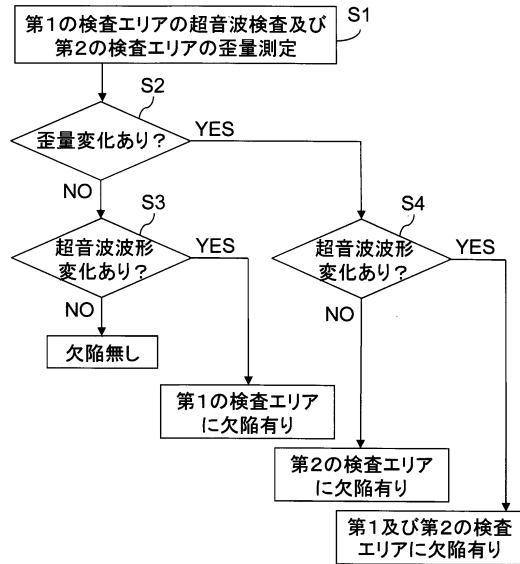
10

20

【図9】



【図10】



30

40

50

---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2017-173191(JP,A)

特許第6374608(JP,B1)

特開2009-268622(JP,A)

特開2019-207200(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

G01B、G01C、G01D、G01F、G01G、G01H、G01J、G01K、

G01L、G01M、G01N、G01P、G01Q、G01R、G01S、G01T、

G01V、G01W

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)