

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2019-32210

(P2019-32210A)

(43) 公開日 平成31年2月28日(2019.2.28)

(51) Int.Cl.  
G01N 27/90 (2006.01)

F I  
G O I N 27/90

テーマコード (参考)  
2 G O 5 3

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2017-152532 (P2017-152532)  
(22) 出願日 平成29年8月7日 (2017.8.7)

(71) 出願人 000235532  
非破壊検査株式会社  
大阪府大阪市北区天満4丁目16番9号  
(74) 代理人 100102048  
弁理士 北村 光司  
(74) 代理人 100146503  
弁理士 高尾 俊雄  
(74) 代理人 100203068  
弁理士 浅尾 遼  
(72) 発明者 合田 吉克  
大阪市西区北堀江1丁目18番14号 非  
破壊検査株式会社内  
(72) 発明者 豊田 修治  
大阪市西区北堀江1丁目18番14号 非  
破壊検査株式会社内

最終頁に続く

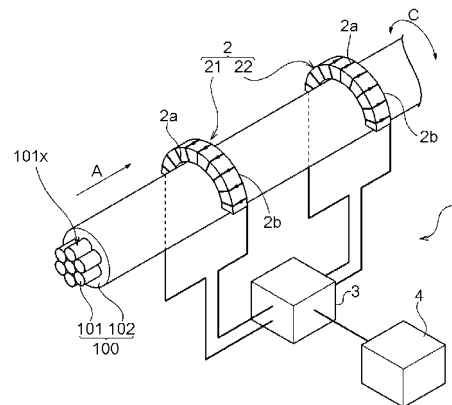
(54) 【発明の名称】 欠陥検査方法及び欠陥検査装置

(57) 【要約】

【課題】 効率よく且つ高精度に検査することの可能な欠陥検査方法及び欠陥検査装置を提供すること。

【解決手段】 検査対象物101は、その軸方向Aに導電性を有する材料よりなる。素線2aは、コイル2の中心軸が検査対象物100の周方向Cに沿うように巻回されている。コイル2は、検査対象物101の外周面101xの一部を覆う扇状を呈する。扇状コイル2を外周面101xに対し所定の間隙をおいて配置した際に、扇状コイル2の一端から検査対象物100を通過して扇状コイル2の他端へ向かう磁束が外周面近傍で密となるように扇状コイル2の中心角を調整する。扇状コイル2を外周面101xに対し所定の間隙をおいて配置し、外周面101xに検査対象物101の軸方向Aに沿う渦電流を生じさせる。渦電流に起因する値を扇状コイル2で測定し、測定結果に基づいて外周面101の欠陥の有無を検査する。

【選択図】 図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法であって、

前記検査対象物は、その軸方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記コイルの中心軸が前記検査対象物の周方向に沿うように巻回されており、

前記コイルは、前記検査対象物の外周面の一部を覆う扇状を呈し、

この扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置した際に、前記扇状コイルの一端から前記検査対象物を通過して前記扇状コイルの他端へ向かう磁束が前記外周面近傍で密となるように前記扇状コイルの中心角を調整し、

前記扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置し、

前記扇状コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記外周面に前記検査対象物の軸方向に沿う渦電流を生じさせ、

前記渦電流に起因する値を前記扇状コイルで測定し、

その測定結果に基づいて前記外周面の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法。

**【請求項 2】**

前記扇状コイルは、磁性材料よりなる扇状のコアに巻回されてある請求項 1 記載の欠陥検査方法。

**【請求項 3】**

前記扇状コイルを前記検査対象物の軸方向に適宜間隔をおいて一対備え、一対の扇状コイルを前記軸方向に相対移動させると共に前記一対の扇状コイルの出力差により前記欠陥の有無を検査する請求項 1 又は 2 記載の欠陥検査方法。

**【請求項 4】**

前記扇状コイルを前記検査対象物の周方向に沿って複数配置してある請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の欠陥検査方法。

**【請求項 5】**

前記検査対象物は、導電性を有する繊維強化複合材よりなる 1 本のストランドである請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の欠陥検査方法。

**【請求項 6】**

前記検査対象物は、導電性を有する繊維強化複合材よりなる複数本のストランドである請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の欠陥検査方法。

**【請求項 7】**

前記 1 本のストランドは被覆材により覆われてなり、前記間隙は前記被覆材の肉厚を含む請求項 5 記載の欠陥検査方法。

**【請求項 8】**

前記複数本のストランドは被覆材により覆われてなり、前記間隙は前記被覆材の肉厚を含む請求項 6 記載の欠陥検査方法。

**【請求項 9】**

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査装置であって、

前記検査対象物は、その軸方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記コイルの中心軸が前記検査対象物の周方向に沿うように巻回されており、

前記コイルは、前記検査対象物の外周面の一部を覆う扇状を呈し、この扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置した際に、前記扇状コイルの一端から前記検査対象物を通過して前記扇状コイルの他端へ向かう磁束が前記外周面近傍で密となるように前記扇状コイルの中心角が調整され、前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置され、

10

20

30

40

50

前記扇状コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記検査対象物の軸方向に沿う渦電流を前記外周面に生じさせる交流印加手段と、  
前記渦電流に起因する値を前記扇状コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記外周面の欠陥の有無を判定する判定手段とを有する欠陥検査装置。

【請求項 10】

前記扇状コイルは、磁性材料よりなる扇状のコアに巻回されてある請求項 9 記載の欠陥検査装置。

【請求項 11】

前記扇状コイルは、前記検査対象物の軸方向に沿って適宜間隔をおいて一対設けられ、前記判定手段は、前記一対の扇状コイルの出力差により前記欠陥の有無を検査する請求項 9 又は 10 記載の欠陥検査装置。

10

【請求項 12】

前記扇状コイルを前記検査対象物の中心に対し所定の位置に保持する治具をさらに備える請求項 9 ~ 11 のいずれかに記載の欠陥検査装置。

【請求項 13】

前記治具は、複数の前記扇状コイルを前記検査対象物の周方向に沿って保持する請求項 12 記載の欠陥検査装置。

【請求項 14】

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法であって、

20

前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており、

前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記コイルを前記表面に対し所定の間隙をおいて配置し、

前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせ、

前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、

30

その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法。

【請求項 15】

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査装置であって、

前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており、

前記コイルは、前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記表面に対し所定の間隙をおいて配置され、

40

前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記一定の方向に渦電流を前記表面に生じさせる交流印加手段と、

前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を判定する判定手段とを有する欠陥検査装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、欠陥検査方法及び欠陥検査装置に関する。さらに詳しくは、素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する

50

値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法及び欠陥検査装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、検査対象物の欠陥の有無を検査する方法として、上述の如き渦電流探傷試験が知られている。この試験では、コイル（プローブ）と検査対象物との距離（リフトオフ）が大きくなると、電磁誘導によって生じる渦電流が小さくなるため、検出感度が著しく低下する。よって、例えば被覆材で覆われた検査対象物の検査等では、欠陥を精度よく検出することは困難である。

【0003】

また、例えば特許文献1に記載の如きケーブルの検査方法が知られている。この検査方法では、隣り合うストランドを組としてストランドに直接交流電圧を印加し、ストランド間の静電容量に関連する値を測定している。そのため、ストランド間に絶縁不良（短絡）があると、ストランド間で静電容量が生じず、検査精度が低下するおそれがあった。また、損傷が大きい場合、その損傷箇所より下流に電流が流れないため、下流側の検査が困難となる場合もあった。さらに、ケーブル全体の損傷結果を得るために、ストランドの組み合わせを変えて何度も測定しなければならず、作業性の向上が望まれていた。しかも、ストランドが被覆されていると、ストランドを露出する作業が必要となり、さらに作業性が低下していた。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2013-167602号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

かかる従来の実情に鑑みて、本発明は、効率よく且つ高精度に検査することの可能な欠陥検査方法及び欠陥検査装置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】

【0006】

上記目的を達成するため、本発明に係る欠陥検査方法の特徴は、素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する構成において、前記検査対象物は、その軸方向に導電性を有する材料よりなり、前記素線は、前記コイルの中心軸が前記検査対象物の周方向に沿うように巻回されており、前記コイルは、前記検査対象物の外周面の一部を覆う扇状を呈し、この扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置した際に、前記扇状コイルの一端から前記検査対象物を通過して前記扇状コイルの他端へ向かう磁束が前記外周面近傍で密となるように前記扇状コイルの中心角を調整し、前記扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置し、前記扇状コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記外周面に前記検査対象物の軸方向に沿う渦電流を生じさせ、前記渦電流に起因する値を前記扇状コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記外周面の欠陥の有無を検査することにある。

【0007】

上記構成によれば、素線をコイルの中心軸が検査対象物の周方向に沿うように巻回してあるので、軸方向に導電性を有する材料よりなる検査対象物に対しその軸方向に沿う渦電流を生じさせることができる。そして、コイルは、検査対象物の外周面の一部を覆う扇状を呈し、この扇状コイルを検査対象物の外周面に対し所定の間隙をおいて配置した際に、扇状コイルの一端から検査対象物を通過して扇状コイルの他端へ向かう磁束が外周面近傍で密となるように扇状コイルの中心角を調整する。これにより、検査対象物の外周面に対し所定の間隙（リフトオフ）をおいても、検査対象となる部位近傍の磁束密度を向上させ

10

20

30

40

50

ることで、検査対象物の外周面にその軸方向に沿う渦電流を増加させて、検出精度を向上させることができる。しかも、検査対象物の外周面に対し所定の間隙（リフトオフ）をおいて渦電流に起因する値を測定するので、高速に検査でき検査効率が高い。

【0008】

上記構成において、前記扇状コイルは、磁性材料よりなる扇状のコアに巻回されてあるとよい。これにより、コイルからの磁束の漏洩を抑制して、扇状コイルの一端から検査対象物を通過して扇状コイルの他端へ向かう磁束を増加（集中）させることができるので、検査部位に生じる渦電流がさらに増加し、検査精度を向上させることができる。

【0009】

また、前記扇状コイルを前記検査対象物の軸方向に適宜間隔をおいて一対備え、一対の扇状コイルを前記軸方向に相対移動させると共に前記一対の扇状コイルの出力差により前記欠陥の有無を検査するとよい。これにより、コイルと検査対象物との間隙（リフトオフ）の変化により発生するノイズ（ガタ雑音）を抑制でき、さらに検査精度を向上させることができる。

10

【0010】

前記扇状コイルを前記検査対象物の周方向に沿って複数配置してあっても構わない。これにより、例えば検査対象物の全周を一度の走査で精度よく検査することが可能となり、さらに検査効率が向上する。

【0011】

上記いずれかの構成において、前記検査対象物は、導電性を有する繊維強化複合材よりなる1本のストランドであってもよく、前記検査対象物は、導電性を有する繊維強化複合材よりなる複数本のストランドで構成されていてもよい。係る場合、前記1本のストランドは被覆材により覆われてなり、前記間隙は前記被覆材の肉厚を含んでいてもよい。また、前記複数のストランドは被覆材により覆われてなり、前記間隙は前記被覆材の肉厚を含んでいてもよい。

20

【0012】

上記目的を達成するため、本発明に係る欠陥検査装置の特徴は、素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する構成において、前記検査対象物は、その軸方向に導電性を有する材料よりなり、前記素線は、前記コイルの中心軸が前記検査対象物の周方向に沿うように巻回されており、前記コイルは、前記検査対象物の外周面の一部を覆う扇状を呈し、この扇状コイルを前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置した際に、前記扇状コイルの一端から前記検査対象物を通過して前記扇状コイルの他端へ向かう磁束が前記外周面近傍で密となるように前記扇状コイルの中心角が調整され、前記外周面に対し所定の間隙をおいて配置され、前記扇状コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記検査対象物の軸方向に沿う渦電流を前記外周面に生じさせる交流印加手段と、前記渦電流に起因する値を前記扇状コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記外周面の欠陥の有無を判定する判定手段とを有することにある。

30

【0013】

上記構成において、前記扇状コイルは、磁性材料よりなる扇状のコアに巻回されてあるとよい。

40

【0014】

また、前記扇状コイルは、前記検査対象物の軸方向に沿って適宜間隔をおいて一対設けられ、前記判定手段は、前記一対の扇状コイルの出力差により前記欠陥の有無を検査するとよい。

【0015】

前記扇状コイルを前記検査対象物の中心に対し所定の位置に保持する治具をさらに備えるとよい。係る場合、前記治具は、複数の前記扇状コイルを前記検査対象物の周方向に沿って保持するようにしてもよい。

【0016】

50

上記目的を達成するため、本発明に係る欠陥検査方法の他の特徴は、素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する方法において、前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており、前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記コイルを前記表面に対し所定の間隙をおいて配置し、前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせ、前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を検査することにある。

10

## 【0017】

上記目的を達成するため、本発明に係る欠陥検査装置の他の特徴は、素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する構成において、前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており、前記コイルは、前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記表面に対し所定の間隙をおいて配置され、前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記一定の方向に渦電流を前記表面に生じさせる交流印加手段と、前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を判定する判定手段とを有することにある。

20

## 【発明の効果】

## 【0018】

上記本発明に係る欠陥検査方法及び欠陥検査装置の特徴によれば、効率よく且つ高精度に検査することが可能となった。

## 【0019】

本発明の他の目的、構成及び効果については、以下の発明の実施の形態の項から明らかになるであろう。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0020】

30

【図1】本発明の第一実施形態に係る欠陥検査方法を示す概略図である。

【図2】第一実施形態における検査対象となる高強度繊維複合材ケーブルの断面図である。

【図3】本発明に係る欠陥検査装置のブロック図である。

【図4】ブリッジ回路図である。

【図5】検査状態を模式的に示すコイル及びケーブルの縦断面図である。

【図6】磁束分布を模式的に示す図である。

【図7】検査方法の一例を説明する図である。

【図8】治具の一例を示す図である。

【図9】コアありのコイルによる磁束分布のシミュレーション結果を示すグラフである。

40

【図10】シミュレーション実験の条件を示す図である。

【図11A】正常品に対応する基準試験体の測定信号の一例を示す図である。

【図11B】損傷品に対応する基準試験体の測定信号の一例を示す図である。

【図12】本発明の第二実施形態におけるコイルの一例を示す図である。

【図13】本発明の第二実施形態における他のコイルの一例を示す図である。

【図14】本発明の他の実施形態におけるコイルの一例を示す図である。

【図15】本発明の他の実施形態におけるコイルの他の一例を示す図である。

【図16】コアなしのコイルによる磁束分布のシミュレーション結果を示す図9相当図である。

【図17A】図11Aに対応するリサージュ波形の一例を示す図である。

50

【図 17B】図 11B に対応するリサージュ波形の一例を示す図である。

【図 18】本発明の他の検査対象物の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

次に、図 1 ~ 11 を参照しながら、本発明の第一実施形態についてさらに詳しく説明する。

本発明の第一実施形態における検査対象は、軸方向に導電性を有する繊維強化複合材よりなるストランド 101 を含んでなる繊維強化複合材ケーブル（以下、単に「ケーブル」と称する。）である。例えば、本実施形態のケーブル 100 は、図 2 に示すように、中心のストランド 101 の周囲に 6 本のストランド 101 を略点对称に配置して撚り合わせて撚り線として構成され、その撚り線の外周を塩化ビニル等の樹脂材料よりなる被覆材 102 で覆ってなる。

10

【0022】

このストランド 101 は、1 本が数  $\mu$  程度のカーボンファイバー 101a を数万本程度まとめて熱可塑性等の樹脂 101b で固めて（含浸させて）構成されている。被覆材 102 の厚み（肉厚）は、例えば外径 8 mm のケーブル 100 で約 1 mm、外径 12 mm のケーブル 100 で約 2 ~ 3 mm としてある。この厚みが、検査対象物としてのストランド 101 の外周面 101x と後述するコイル 2 との間隙 G の一部 G1 となる。また、繊維強化複合材としては、例えば炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が挙げられる。なお、本実施形態において、ケーブルとは、ワイヤーやロープ等の若干の可撓性のあるものを含む。

20

【0023】

本発明の第一実施形態に係るケーブル 100 の欠陥検査装置 1 は、大略、図 1 に示すように、素線 2a を巻回してなるコイル 2 と、コイル 2 に交流電圧を印加して電磁誘導によってストランド 101 の軸方向 A に沿う渦電流 E をその外周面 101x に生じさせる交流印加手段としての発振器 31 を有し、渦電流 E に起因する値をコイル 2 で測定する渦電流探傷装置 3 と、渦電流探傷装置 3 の測定結果に基づいてストランド 101 の折れ等の損傷 D の有無を判定する判定手段としての信号処理装置 4 を備える。

【0024】

図 1 に示すように、コイル 2 は、ケーブル 100 の外周面（複数本のストランド 101 の外周面 101x）の一部を覆う扇状を呈する扇状コイルであり、扇状コイル 2 の中心軸がケーブル 100（複数本のストランド 101）の周方向に沿うように巻回される素線 2a（巻き線）よりなる自己誘導型コイルである。このコイルは、交流により交流磁界（磁場）を発生させる励磁と、渦電流（誘導電流）の変化の検出とを同一のコイルで行う。

30

【0025】

本実施形態における扇状コイル 2 は、ストランド 101（ケーブル 100）の軸方向 A に適宜間隔をおいて配置される一対の第一、第二コイル 21, 22 を備える。この第一、第二コイル 21, 22 に交流電圧を印加すると、図 5 に示す如く、ストランド 101 の外周面 101x に生じる渦電流 E の電流の向きが互いに逆向きとなるように素線 2a を巻回することで、出力差を検出し、その出力差によりストランド 101 の折れ（損傷）D の有無を検査する。このように、対をなす第一、第二コイル 21, 22 を用いる差動方式を採用することで、ストランド 101 の折れ D などの局所的な変化を高精度に検出することができる。しかも、本実施形態の如き撚り線の撚りのような緩やかな変化を相殺することも可能であり、扇状コイル 2 のガタ信号も相殺できるので、さらに検出精度が向上する。

40

【0026】

また、図 1, 5 に示すように、本実施形態において、第一、第二コイル 21, 22 の素線 2a は、例えばフェライト等の磁性材料よりなる扇状（馬蹄形、U 字状とも称する）のコア 2b に巻回されてある。例えば、フェライトコアの場合、その比透磁率（ $\mu_r$ ）は空気（ $\mu_r = 1$ ）と比べ 1000 倍以上と大きいので、コア中間部からの漏洩を抑制し、扇状コイル 2 の一端 2x からストランド 101 を通過して扇状コイル 2 の他端 2y へ向かう

50

磁束を増加（集中）させることができる。また、磁性材料よりなるコア 2 b を用いることで全磁束を増加するので、発生する渦電流も増大して検出信号も大きくなり、検査精度が向上する。なお、本実施形態において、コイル 2（コア 2 b）の中心角は 180° としてある。

【0027】

第一、第二コイル 2 1, 2 2 は、例えば図 7, 8 に示す如き治具 1 0 により、ケーブル 1 0 0 の中心に対し所定の位置に保持される。この治具 1 0 は、第一、第二コイル 2 1, 2 2 が埋め込まれた開閉可能な本体部 1 1 と、この本体部 1 1 中央にケーブル 1 0 0 を嵌入させて保持（挟持）する凹部 1 2 とを有する。これにより、第一、第二コイル 2 1, 2 2 とストランド 1 0 1 とのリフトオフの極端な変動を抑制し、相対位置関係（周方向及び径方向）を一定にする。この治具 1 0 は、第一、第二コイル 2 1, 2 2 をストランド 1 0 1 の軸方向 A にケーブル 1 0 0 に対し相対移動可能に保持する走査手段としても機能する。なお、本実施形態における所定の隙間 G とは、被覆材 1 0 2 の厚み（肉厚）G 1 とコイル 2 とケーブル 1 0 0 との間の隙間 G 2 よりなり、これがリフトオフ距離となる。

10

【0028】

図 3 に示すように、渦電流探傷装置 3 は、大略、交流印加手段としての発振器 3 1、電力増幅器 3 2、ブリッジ回路 3 3、増幅器 3 4、同期検波器 3 5、移相器 3 6 及びフィルタ 3 7 を備える。ブリッジ回路 3 3 は、図 4 に示すように、固定抵抗器 3 3 a（抵抗  $Z_1$ ）、可変抵抗器 3 3 b（抵抗  $Z_2$ ）、第一コイル 2 1（インピーダンス  $Z_3$ ）及び第二コイル 2 3（インピーダンス  $Z_4$ ）により構成される。

20

【0029】

発振器 3 1 からの交流出力は、電力増幅器 3 2 を介してブリッジ回路 3 3 の固定抵抗器 3 3 a、可変抵抗器 3 3 b 及び自己誘導型の第一、第二コイル 2 1, 2 2 に印加される。そして、第一、第二コイル 2 1, 2 2 のインピーダンス差  $Z$ （ $Z_3 - Z_4$ ）を電圧変化  $V$  として出力する。

【0030】

そして、第一、第二コイル 2 1, 2 2 間の不平衡出力は増幅器 3 4 で増幅され、同期検波器 3 5 a, 3 5 b に送られて、移相器 3 6 a, 3 6 b の出力とあいまって検波される。そして、渦電流信号をフィルタ 3 7 a, 3 7 b や図示省略する A/D 変換器を介して信号処理装置 4 に取り込み、測定結果等を表示器 5 に表示する。信号処理装置 4 としては、例えば渦電流探傷装置 3 に接続されたパーソナルコンピューター（PC）で構成される。また、本実施形態では、渦電流探傷装置 3 には、リジェクション手段 6 を介して記録計 7 が接続されている。

30

【0031】

ところで、コイル 2（第一、第二コイル 2 1, 2 2）のインピーダンス  $Z$  は、複素数表示では下記の式で表される。

【0032】

【数 1】

$$\dot{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

40

ここで、 $R$  は巻き線 2 a の直流抵抗、 $\omega L$  はリアクタンス、 $\omega C$  はキャパシタンス（静電容量）を示す。

【0033】

$= 2 f$  のため、周波数  $f$  が高いと  $1/C$  は極めて小さくなり、対象物が金属材料のような導電体の場合には無視できる。ここで、本実施形態の検査対象物であるストランド 1 0 1 を構成するカーボンファイバー 1 0 1 a は、金属に比べ、その素線方向（軸方向）への導電率が  $1/10^4$  と小さいが、電磁誘導現象により軸方向 A に誘導電流（渦電流）が生じる。一方、軸方向 A に直交する方向（周方向 C）の導電率は金属と比べ、 $1/1$

50



$0^8$ と極めて小さく、周方向Cに誘導電流（渦電流）はほとんど流れない。すなわち、ストランド101は、軸方向Aに導電性を有する導体である。従って、本発明において、インピーダンス変化は、上記数1における素線（巻き線）2aの抵抗RとリアクタンスLのみを考慮すればよい。

【0034】

ここで、素線2aは、コイル2（第一、第二コイル21, 22）の中心軸がケーブル100の周方向Cに沿うようにコア2bに巻回されているので、図5, 6に示すように、コア2bに巻回された素線2aのケーブル100側に位置する部分2a1は、ストランド101の軸方向Aに沿って配設される。これにより、渦電流Eをストランド101の外周面101xにその軸方向Aに沿って発生させることができる。

10

【0035】

また、カーボンファイバー101aにより構成されるストランド101を含むケーブル100にコイル2を配置して交流電流を流すと、磁束F（図中、破線で示す）はコア2b（コイル2）の他端2yから一端2xの間（コア中間部）で漏洩せずに、コア2bの内部に集中して流れる。そして、その磁束Fは、コア2bの一端2xから空間へ漏洩するが、コア2bの一端2xから他端2yまでの最短距離の磁路Mに集中する。よって、この磁路Mで磁界が大きくなるが、見かけ上の磁気抵抗が大きくなるので、一部の磁束は湾曲して広がることとなり、ケーブル100の全体に磁束（磁界）が作用する。

【0036】

磁束Fにより発生した渦電流Eは、その磁束Fの変化を打ち消す方向に磁束を発生させる。従って、例えば最短距離の磁路Mがケーブル100の中心のストランド101を通過（横切る）するように位置させたとしても、外周面101xで発生する渦電流Eによって生じた磁束によってケーブル100の中心での磁束（磁界）は打ち消されて小さくなると推測される。

20

【0037】

そこで、発明者らは、コイル2（コア2b）の形状と磁束Fの拡がりとの関係について、磁束密度分布のシミュレーション実験を行った。その結果を図9に示す。なお、このシミュレーションでは、図10に示すように、ケーブル100の直径 $d = 12\text{ mm}$ のものを対象とし、コイル2（コア2b）の軸方向中央部2nを基準としてケーブル100側へ離隔した距離をコイル表面からの距離（mm）とした。

30

【0038】

図9に示すように、コイル2の中心角 $\theta_1 = 180^\circ$ の場合（コア2b1）、磁束密度はコイル表面からの距離Lが約4.9mm（強さ）の地点が大きくなった。また、中心角 $\theta_2 = 120^\circ$ の場合（コア2b2）は同距離Lが約0.9mm（強さ）の地点、中心角 $\theta_3 = 90^\circ$ の場合（コア2b3）は同距離Lが約0mm（強さ）の地点でそれぞれ小さくなった。このように、コイル2の中心角を調整することで、被覆材102の厚み等の間隙G（リフトオフ距離）に応じてコイル2の一端2xからストランド101を通過して他端2yへ向かう磁束Fがストランド101の外周面101x近傍で磁束を密にする（磁界を強くする）ことが可能である。

【0039】

特に、本実施形態の検査対象である繊維強化複合材よりなるストランド101の場合、ストランド101の折れDは、まず、外側に位置するストランド101の外周面101xで発生する。上述したように、ストランド101の外周面101x近傍で磁束を密とする（磁界を強くする）ことができるので、ケーブル径や被覆材102の肉厚等（間隙G）に応じてコイル2の中心角を調整することで、ストランド101の折れDの初期状態を検出できる。しかも、金属と比べて導電率が低いストランド101において、ストランド101の外周面101x近傍の磁束を密とするので、渦電流Eを増大させることができ、検査精度がよい。

40

【0040】

ここで、本発明に係るケーブル100の検査方法について説明する。

50

まず、検査対象のケーブル100の被覆材102の厚み(肉厚)G1及びコイル2とケーブル100との隙間G2(接触状態)を含む間隙Gを考慮し、コイル2の一端2xからストランド101を通過してコイル2の他端2yへ向かう磁束Fがストランド101の外周面101x近傍で密となるようにコイル2(コア2b)の中心角を決定(調整)する。次に、ケーブル100と同種のを基準試験体として正常品(健全部のみ)及び損傷品(損傷部Dあり)を用意し、その基準試験体を用いて試験周波数、位相、ゲイン、フィルタ、探傷速度等の検査条件を決定する。なお、位相については、ガタ信号及びきず信号がX方向又はY方向に表れるように調整する。また、損傷品とは、ケーブル100内のストランド101の一部又は全部が折れたものである。

#### 【0041】

設定した検査条件で基準試験体にて信号を測定し、その測定データから閾値(絶対値又はp-p値)を設定する。例えば、図11Aに例示する正常品の測定データの最大値よりも大で且つ図11Bに例示する損傷品(ストランド101が7本破損)のきず信号より小さい信号レベルを閾値(例えば、1V)として設定する。そして、例えば図7に示すように、第一、第二コイル21, 22を治具10によりストランド101の外周面101xに対し間隙Gをにおいてケーブル100を挿通(挟持)させ、まず健全部で第一、第二コイル21, 22のブリッジバランスをとる。そして、扇状コイル2に交流電圧を印加して電磁誘導によってストランド101の外周面101xにその軸方向Aに沿う渦電流Eを生じさせ、治具10を軸方向Aに移動(走査)させることで信号を測定し、閾値を超えた場合に折れDが存在すると判定する。

#### 【0042】

次に、本発明の第二実施形態について説明する。なお、以下の実施形態において、上記第一実施形態と同様の部材等には同一の符号を付してある。

上記第一実施形態において、コイル2にはストランド101の外周面101x(ケーブル100)の一部を覆う扇状を呈する扇状コイルを用いた。しかし、ストランド101の外周面101x近傍(検査対象物の表面近傍)で磁束Fが密となるようにコイル2を所定の間隙Gをにおいて配置し得る態様であれば、扇状コイルに限られない。

#### 【0043】

図12に示す例では、コア2b'が断面視略コの字状を呈し、端部2x', 2y'がケーブル100側へ突出して対向させてある。素線2aは、ストランド101(検査対象物)の外周面101x(表面)にその軸方向(一定の方向)に沿う渦電流Eを生じさせるために、コイルの一端2x'から他端2y'へ向かう磁束Fがストランド101を通過するように巻回されてある。そして、磁束Fが外周面101x近傍で密となるようにコイル2'をストランド101の外周面101xに対し所定の間隙G(被覆材102の肉厚G1及び空間G3)をにおいて配置する。これにより、コイル2b'に交流電圧を印加することで上記実施形態と同様にストランド101の折れDの検出が可能となる。

#### 【0044】

さらに、断面視略コの字形状に限られず、例えば図13に示す如き、矩形のコイル2'でも同様に検査可能であり、図9に示すシミュレーション結果によればコイル表面からの距離Lが約0mm(強さ)の地点で磁束密度が大きくなった。なお、本第二実施形態によれば、ケーブル100の如き検査対象に限らず、一定の方向に導電性を有する材料よりなる例えば平板状や管状のものでも検査可能である。そして、素線2aは、検査対象物101の外周面101xに一定の方向に沿う渦電流Eを生じさせるために、コイル2の一端2xから他端2yへ向かう磁束Fが検査対象物101を通過するように巻回されているとよい。

#### 【0045】

最後に、本発明のさらに他の実施形態の可能性について言及する。

上記第一実施形態において、コイル2(第一、第二コイル21, 22)は、その中心角が180°の自己誘導型コイルを1つ配置した。しかし、コイル2(第一、第二コイル21, 22)は1つに限られず、2つ以上(複数)用いることも可能である。例えば、図

10

20

30

40

50

14に示すように、その中心角が $180^\circ$ の自己誘導型コイル2, 2をケーブル100に対し隙間を置いて対称に配置してもよい。これにより、各々のコイル2, 2が自身に近接するケーブル100部分(リフトオフが小さい箇所)のストランド101を検査でき、一度の走査でケーブル100全周の検査が可能となり、検査効率が向上する。もちろん、一对の場合に限られず、例えば中心角が $90^\circ$ の自己誘導型コイル2をケーブル100の中心に対し略点对称に4つ配置することも可能である。

#### 【0046】

さらに、図14の例では、同一周方向Cにコイル2を一对配置したが、これに限らず、軸方向Aの異なる位置で周方向位置をずらして各コイル2を配置することも可能である。例えば、図15に示すように、中心角が $120^\circ$ のコイル2をケーブル100の軸方向Aの異なる位置で周方向Cにずらして配置しても構わない。この例においても、3つのコイル2でケーブル100の全周をカバーできるので、一度の走査で各ストランド101の折れDを検出可能となる。

10

#### 【0047】

また、コイル2をケーブル100(ストランド101)の軸方向Aに相対移動可能に保持でき且つコイル2とストランド101とのリフトオフの極端な変動を抑制し得る態様であれば、治具10の態様は上記第一実施形態のものに限られない。上記第一実施形態の治具10であれば、装置にケーブル100が組み込まれているような場合であっても、装置からケーブル100を取り外すことなく測定(保守検査)できる。一方、例えばケーブル100の製造時に検査するのであれば、コイル2(治具10)を固定しケーブル100を挿通させた状態でケーブル100を移動させることも可能であり、例えば、ケーブル100の全周を覆うドーナツ状のコイル2を用いることが考えられる。しかし、ドーナツ状コイルでは、無端ソレノイドとなり磁束Fがコイル外部にほとんど漏洩しないので、渦電流Eが極端に減少し検査が困難となる。すなわち、コイル2には、一端 $2x$ と他端 $2y$ との間に少なくとも隙間(ギャップ)を設ける必要がある。

20

#### 【0048】

上記各実施形態において、コイル2は、フェライトよりなるコア2bに素線2aを巻回して構成した。しかし、コア2bはフェライトコアに限らず他の磁性材料であってもよい。発明者らの実験によれば、コア2bを省略した場合においても、図16に示すように、コイル2の一端 $2x$ からストランド101を通過してコイル2の他端 $2y$ へ向かう磁束Fがストランド101の外周面101x近傍で密となるようにコイル2の中心角を調整すれば、検査可能であることが判明している。しかし、これら結果を比較すると、コア2bを有する方が磁束密度が大きく且つ距離Lが大きくなっても磁束密度の減少がゆるやかである。この点からもコア2bを用いる方が、磁束が増大して渦電流が大きくなるので、精度の点で上記第一実施形態が優れている。

30

#### 【0049】

上記各実施形態において、きず信号とノイズ信号とを分離して(X方向及びY方向)検査した。しかし、ストランド101(検査対象物)の軸方向(一定の方向)に渦電流Eを発生させてあるので、きず信号S1とノイズ信号S2とは方向が異なるので、図17に示す如きリサージュ波形を用いて欠陥の有無を検出(判定)することも可能である。

40

#### 【0050】

上記各実施形態において、ケーブル100は、中心のストランド101の周囲に6本のストランド101を略点对称に配置して撚り合わせて撚り線として構成され、その撚り線の外周を塩化ビニル等の樹脂材料よりなる被覆材102で覆って構成されていた。しかし、検査対象はこれに限られるものではない。例えば、図18(a)(c)に示す如く、1本のストランド101や19本のストランド101よりなるケーブル100であっても検査可能である。

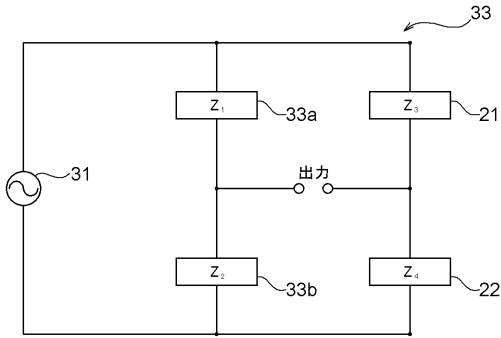
#### 【0051】

また、図18に示すように、被覆材102のないものであってもよい。上述したように、ストランド101の外周面101xとコイル2との間に間隙Gがあれば検査可能である

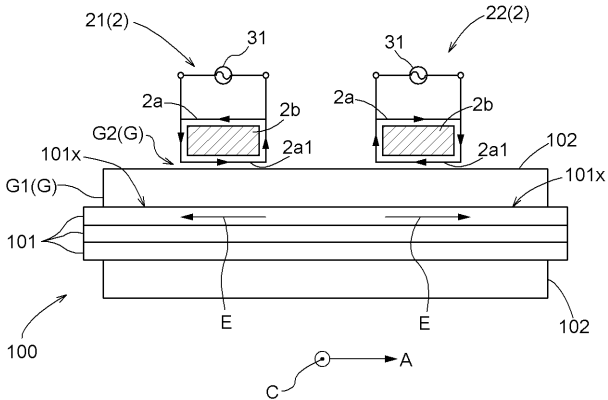
50



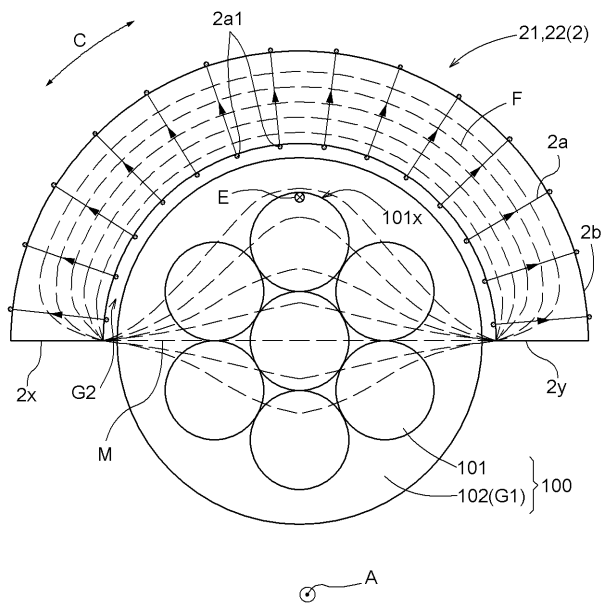
【図4】



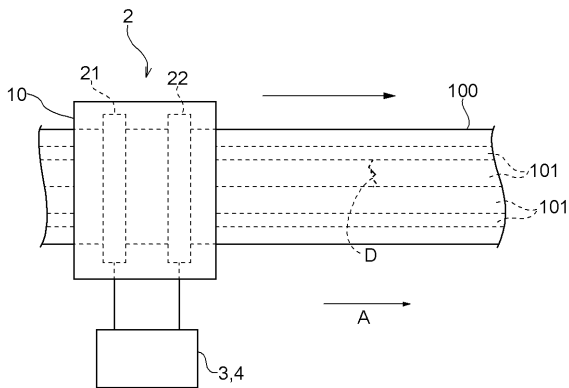
【図5】



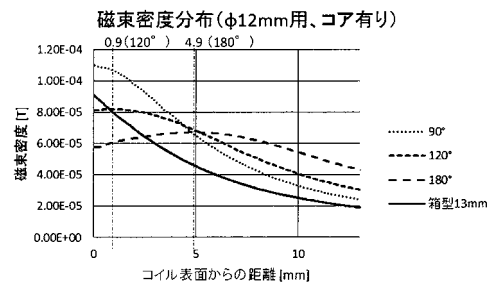
【図6】



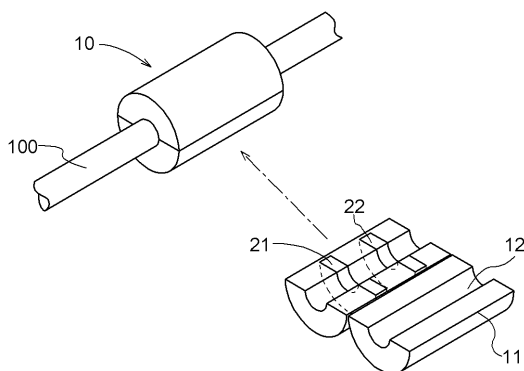
【図7】



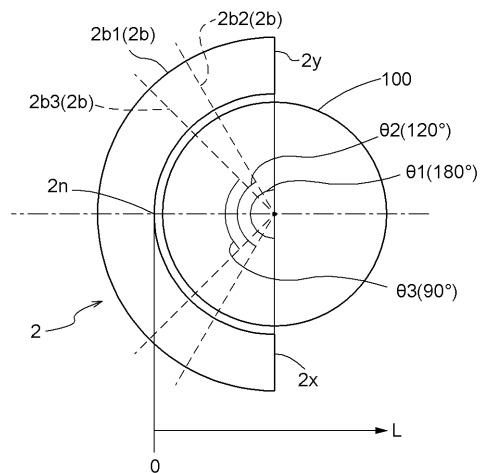
【図9】



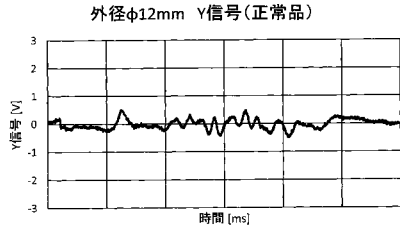
【図8】



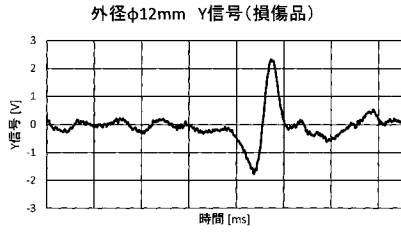
【図10】



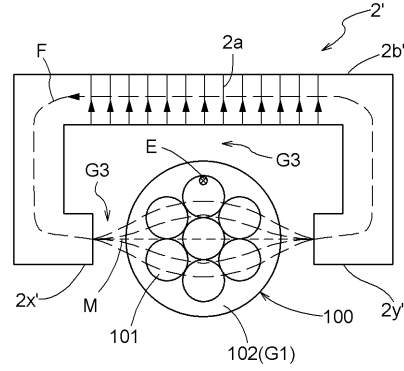
【図11A】



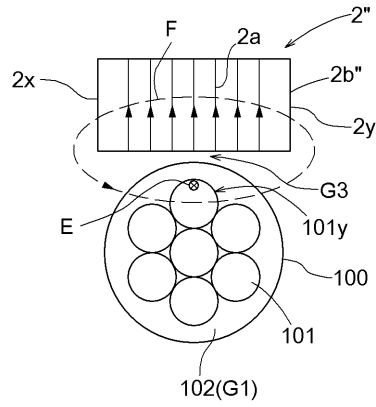
【図11B】



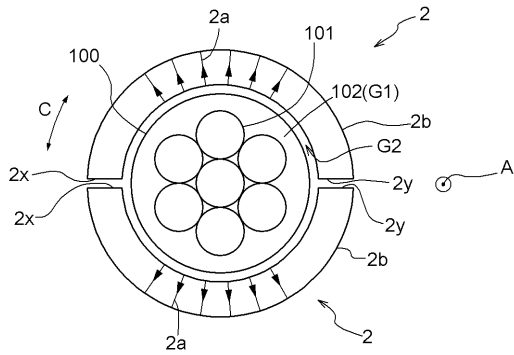
【図12】



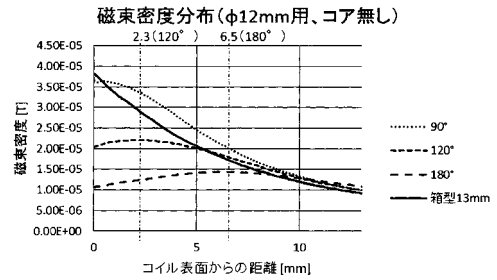
【図13】



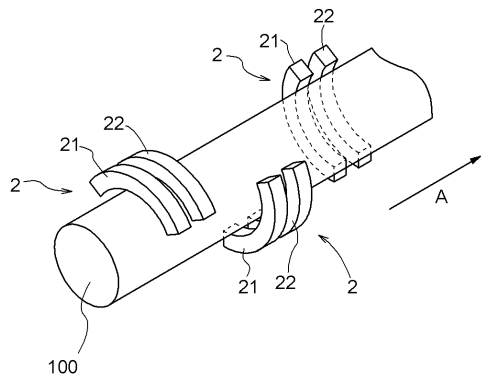
【図14】



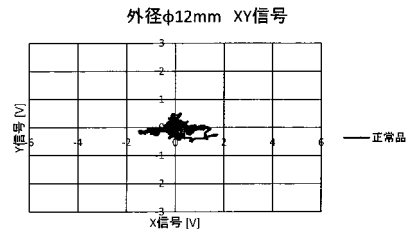
【図16】



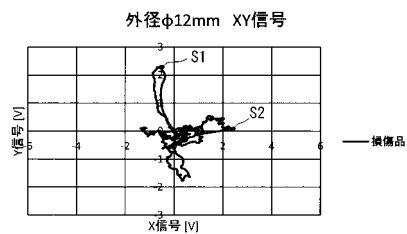
【図15】



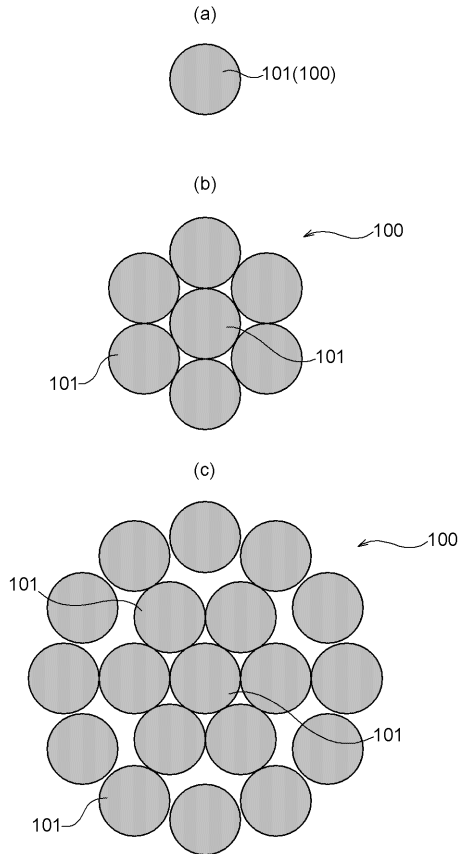
【図17A】



【図17B】



【図 18】



## 【手続補正書】

【提出日】平成29年12月22日(2017.12.22)

## 【手続補正 1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法であって、

前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており

、前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記コイルを前記表面に対し所定の間隙をおいて配置し、

前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせ、

前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、

その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を検査する欠陥検査方法。

【請求項 2】

素線を巻回してなるコイルに交流電圧を印加して電磁誘導によって検査対象物に生じる渦電流に起因する値を測定することで前記検査対象物の欠陥の有無を検査する欠陥検査装置

であって、

前記検査対象物は、一定の方向に導電性を有する材料よりなり、

前記素線は、前記検査対象物の表面に前記一定の方向に沿う渦電流を生じさせるために前記コイルの一端から他端へ向かう磁束が前記検査対象物を通過するように巻回されており

、

前記コイルは、前記磁束が前記表面近傍で密となるように前記表面に対し所定の間隙をおいて配置され、

前記コイルに前記交流電圧を印加して前記電磁誘導によって前記一定の方向に渦電流を前記表面に生じさせる交流印加手段と、

前記渦電流に起因する値を前記コイルで測定し、その測定結果に基づいて前記表面の欠陥の有無を判定する判定手段とを有する欠陥検査装置。



---

フロントページの続き

Fターム(参考) 2G053 AA11 AB21 BA02 BA14 BA19 BC02 BC14 CA03 CA17 CB05  
CB10 CB12 CB16 CB25