

(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
2015年9月17日(17.09.2015)



(10) 国際公開番号

WO 2015/136931 A1

- (51) 国際特許分類:
G01N 27/72 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/001344
- (22) 国際出願日: 2015年3月11日(11.03.2015)
- (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 2014-049513 2014年3月12日(12.03.2014) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人神戸大学(NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION KOBE UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒6578501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 Hyogo (JP).
- (72) 発明者: および
- (71) 出願人: 木村 憲明(KIMURA, Noriaki) [JP/JP]; 〒6510056 兵庫県神戸市中央区熊内町6-4-1 熊内山本ハイツ103 Hyogo (JP).
- (72) 発明者: 木村 建次郎(KIMURA, Kenjiro); 〒6578501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1 国立大学法人神戸大学内 Hyogo (JP).
- (74) 代理人: 新居 広守(NII, Hiromori); 〒5320011 大阪府大阪市淀川区西中島5丁目3番10号タナ

カ・イトーピア新大阪ビル6階新居国際特許事務所内 Osaka (JP).

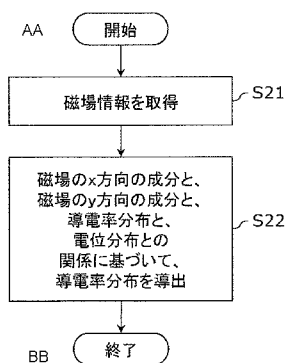
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, 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, 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:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: CONDUCTIVITY DISTRIBUTION DERIVATION METHOD AND CONDUCTIVITY DISTRIBUTION DERIVATION DEVICE

(54) 発明の名称: 導電率分布導出方法および導電率分布導出装置



AA Start
BB End
S21 Acquire magnetic field information
S22 Derive conductivity distribution on basis of relationship between magnetic field x-direction component, magnetic field y-direction component, conductivity distribution, and potential distribution

(57) Abstract: Provided is a conductivity distribution derivation method with which the distribution of conductivity in a battery having a planar electrode plate can be derived, said method including an acquisition step (S21) in which magnetic field information indicating a magnetic field is acquired, and a derivation step (S22) in which a conductivity distribution satisfying a plurality of relational expressions is derived for the magnetic field information on the basis of a plurality of relational expressions that are satisfied by an x-component which is a magnetic field component in an x-direction that is parallel to the electrode plate, a y-component which is a magnetic field component in a y-direction that is parallel to the electrode plate and perpendicular to the x-direction, the conductivity distribution on a two-dimensional plane that is parallel to the electrode plate, and the potential distribution on a two-dimensional plane that is parallel to the electrode plate.

(57) 要約: 導電率分布導出方法は、平面状の電極板を有する電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出方法であって、磁場を示す磁場情報を取得する取得ステップ(S21)と、磁場の成分であり電極板に平行なx方向の成分であるx成分と、磁場の成分であり電極板に平行かつx方向に垂直なy方向の成分であるy成分と、電極板に平行な2次元平面上の導電率分布と、電極板に平行な2次元平面上の電位分布とが満たす複数の関係式に基づいて、磁場情報に対して複数の関係式を満たす導電率分布を導出する導出ステップ(S22)を含む。

WO 2015/136931 A1

明 細 書

発明の名称：導電率分布導出方法および導電率分布導出装置

技術分野

[0001] 本発明は、電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出方法および導電率分布導出装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、リチウム電池において発生するデンドライトは、電池内の短絡、および、電池の爆発等を引き起こす可能性があるため、問題視されている。そのため、このような短絡等を防止するための有効な検査方法が検討されている。これに関し、特許文献1には、X線、可視光線または超音波等を用いて、電池の状態を検査する方法が示されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特表2012-524385号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] しかしながら、可視光およびマイクロ波（MR I）は、電池を覆う金属を透過しにくい。したがって、可視光またはマイクロ波によって、電池の内部の状態を検査することは困難である。

[0005] X線によって電池の内部の状態を検査することは可能であるが、X線によって電池の内部に異物が混入していること等を検査することができるとしても、X線によって電池内の電気的な障害の発生を検査することは困難である。したがって、X線、可視光およびマイクロ波のいずれを用いても、電池内の短絡等を検査することは困難である。

[0006] そこで、本発明は、電池内の短絡等の検査に有効な導電率分布を適切に導出することができる導電率分布導出方法および導電率分布導出装置を提供する。

課題を解決するための手段

- [0007] 例えば、本発明の一態様に係る導電率分布導出方法は、平面状の電極板を有する電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出方法であって、磁場を示す磁場情報を取得する取得ステップと、前記磁場の成分であり前記電極板に平行な x 方向の成分である x 成分と、前記磁場の成分であり前記電極板に平行かつ x 方向に垂直な y 方向の成分である y 成分と、前記電極板に平行な2次元平面上の前記導電率分布と、前記電極板に平行な2次元平面上の電位分布とが満たす複数の関係式に基づいて、前記磁場情報に対して前記複数の関係式を満たす前記導電率分布を導出する導出ステップとを含む。
- [0008] これにより、磁場および導電率分布等の関係に基づいて導電率分布を適切に導出することが可能である。したがって、電池内の短絡等の電氣的な障害の発生を適切に検査することが可能である。
- [0009] 例えば、前記複数の関係式は、(i) 前記磁場の x 成分と、前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第1関係式と、(i i) 前記磁場の y 成分と、前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第2関係式と、(i i i) 前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第3関係式とを含み、前記導出ステップでは、前記第1関係式と前記第2関係式と前記第3関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出してもよい。
- [0010] これにより、磁場および導電率分布等の関係に基づく3つの関係式に基づいて導電率分布を適切に導出することが可能である。
- [0011] 例えば、 x 方向の座標が x で表現され、 y 方向の座標が y で表現され、 x 方向および y 方向に垂直な z 方向の座標が z で表現され、前記電極板の z 方向の座標が z_0 で表現され、前記磁場の x 成分が H_x で表現され、前記磁場の y 成分が H_y で表現され、前記電極板の z 方向の厚さが h で表現され、前記電極板を含む1対の電極板の間の距離が h_T で表現され、前記電極板の導電率が σ_0 で表現され、前記導電率分布が σ で表現され、前記電位分布が
- [数1]

$$\varphi$$

で表現され、デルタ関数が δ で表現され、デルタ関数の微分が δ' で表現され、 x についての偏微分が ∂_x で表現され、 y についての偏微分が ∂_y で表現される場合、前記導出ステップでは、

[数2]

$$\Delta H_x = h_T^{-1} h \partial_y \{ \sigma(x, y) \varphi(x, y) \} \delta(z - z_0) - \sigma_0 h \{ \partial_y \varphi(x, y) \} \delta'(z - z_0)$$

で表現される前記第 1 関係式と、

[数3]

$$\Delta H_y = -h_T^{-1} h \partial_x \{ \sigma(x, y) \varphi(x, y) \} \delta(z - z_0) + \sigma_0 h \{ \partial_x \varphi(x, y) \} \delta'(z - z_0)$$

で表現される前記第 2 関係式と、

[数4]

$$\partial_x^2 \varphi + \partial_y^2 \varphi = (\sigma_0 h h_T)^{-1} \sigma(x, y) \varphi(x, y)$$

で表現される前記第 3 関係式とに基づいて、 σ で表現される前記導電率分布を導出してもよい。

[0012] これにより、数式として具体的に定められている 3 つの関係式に基づいて導電率分布を適切に導出することが可能である。

[0013] 例えば、前記磁場の x 方向の波数が k_x で表現され、前記磁場の y 方向の波数が k_y で表現され、 H_x の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が Q_x で表現され、 H_y の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が Q_y で表現され、

[数5]

$$\varphi$$

の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が

[数6]

$$\tilde{\varphi}$$

で表現される場合、前記導出ステップでは、前記第 1 関係式と前記第 2 関係

式と前記第3関係式とに基づく関係式であり、

[数7]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_y) = \frac{2\{ik_y Q_x(k_x, k_y, z_0) - ik_x Q_y(k_x, k_y, z_0)\}}{hk^2 \sigma_0 (hk - 1)}$$

で表現される関係式である第4関係式と、前記第3関係式に基づく関係式であり、

[数8]

$$\sigma(x, y) = hh_f \sigma_0 \frac{(\partial_x^2 + \partial_y^2) \varphi}{\varphi}$$

で表現される関係式である第5関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出してもよい。

[0014] これにより、予め定められた数式に基づいて、磁場から導電率分布を適切に導出することが可能である。

[0015] 例えば、前記電池の外部のz方向の座標が z_1 で表現され、zについての偏微分が ∂_z で表現される場合、前記導出ステップでは、前記第4関係式と、前記第5関係式と、

[数9]

$$Q_x(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ Q_x(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}$$

で表現される第6関係式と、

[数10]

$$Q_y(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ Q_y(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}$$

で表現される第7関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出してもよい。

- [0016] これにより、予め定められた数式に基づいて、電池外の磁場から電池内の導電率分布を適切に導出することが可能である。
- [0017] 例えば、前記導出ステップでは、前記導電率分布の候補と、前記電位分布の候補と、前記複数の関係式とに基づいて、前記磁場の x 成分と、前記磁場の y 成分とを導出し、導出された前記 x 成分と、導出された前記 y 成分とが、前記磁場情報によって示される前記磁場に適合する場合、前記導電率分布の候補を前記導電率分布と決定することにより、前記導電率分布を導出してもよい。
- [0018] これにより、同種の演算の繰り返しの基づいて、複数の関係式に適合する導電率分布を導出することが可能である。
- [0019] 例えば、前記導出ステップでは、画像処理装置を画像処理とは異なる用途に利用するためのGPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) を利用して、前記導電率分布を導出してもよい。
- [0020] これにより、同種の演算を高速に行うことができるGPGPUに基づいて、導電率分布を高速に導出することが可能である。
- [0021] 例えば、本発明の一態様に係る導電率分布導出装置は、平面状の電極板を有する電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出装置であって、磁場を示す磁場情報を取得する取得部と、前記磁場の成分であり前記電極板に平行な x 方向の成分である x 成分と、前記磁場の成分であり前記電極板に平行かつ x 方向に垂直な y 方向の成分である y 成分と、前記電極板に平行な2次元平面上の前記導電率分布と、前記電極板に平行な2次元平面上の電位分布とが満たす複数の関係式に基づいて、前記磁場情報に対して前記複数の関係式を満たす前記導電率分布を導出する導出部とを備える。
- [0022] これにより、磁場および導電率分布等の関係に基づいて導電率分布を適切に導出することが可能である。したがって、電池内の短絡等の電氣的な障害の発生を適切に検査することが可能である。
- [0023] なお、これらの包括的または具体的な態様は、システム、装置、方法、集

積回路、コンピュータプログラムまたはコンピュータ読み取り可能なＣＤ－ＲＯＭなどの非一時的な記録媒体で実現されてもよく、システム、装置、方法、集積回路、コンピュータプログラムおよび記録媒体の任意な組み合わせで実現されてもよい。

発明の効果

[0024] 本発明に係る導電率分布導出方法および導電率分布導出装置によって、電池内の短絡等の検査に有効な導電率分布を適切に導出することが可能である。

図面の簡単な説明

[0025] [図1]図1は、電池の検査方法の参考例を示す図である。

[図2]図2は、実施の形態に係る電池検査システムを示す構成図である。

[図3]図3は、実施の形態に係る電池検査システムの動作を示すフローチャートである。

[図4]図4は、実施の形態に係る導電率分布導出装置を示す構成図である。

[図5]図5は、実施の形態に係る導電率分布導出装置の動作を示すフローチャートである。

[図6]図6は、実施の形態に係る電池検査システムを示す模式図である。

[図7]図7は、実施の形態に係る電池が検査されている状態を示す図である。

[図8]図8は、実施の形態に係る座標系を示す図である。

[図9]図9は、実施の形態に係る電池検査システムによって利用される磁場と電位分布と導電率分布との関係を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0026] 以下、実施の形態等について、図面を参照しながら具体的に説明する。なお、以下で説明する実施の形態等は、いずれも包括的または具体的な例を示すものである。以下の実施の形態等で示される数値、形状、材料、構成要素、構成要素の配置位置および接続形態、ステップ、ステップの順序などは、一例であり、本発明を限定する主旨ではない。また、以下の実施の形態等における構成要素のうち、最上位概念を示す独立請求項に記載されていない構

成要素については、任意の構成要素として説明される。

[0027] (実施の形態)

図 1 は、電池の検査方法の参考例を示す図である。図 1 に示された電池 11 は、電解質 12、集電体 13、正極活性物質 14、負極活性物質 15、集電体 16、および、メタルパッケージ 17 を含む。電解質 12、集電体 13、正極活性物質 14、負極活性物質 15、および、集電体 16 は、メタルパッケージ 17 で覆われている。

[0028] 非破壊検査に用いられる技術要素として、X線、可視光、電子線、マイクロ波および超音波などがある。このうち、電池 11 に対して可視光、電子線およびマイクロ波の透過率は低いため、これらに基づいて電池 11 を非破壊で検査することは困難である。一方、X線に基づいて電池 11 を非破壊で検査することは可能である。例えば、X線に基づいて電池 11 を非破壊で検査することにより、電池 11 の内部に異物が混入していることなどを検出することが可能である。

[0029] しかし、X線に基づく非破壊検査では、電池 11 の電気的な異常を検出することは困難である。つまり、X線に基づく非破壊検査では、電池 11 の何らかの構造上の異常を検出することが可能であるが、電池 11 の電気的な異常を具体的に把握することは困難である。そこで、本実施の形態に係る電池検査システムは、電池 11 の検査に磁場の情報を用いる。

[0030] 図 2 は、本実施の形態に係る電池検査システムを示す構成図である。図 2 に示された電池検査システム 20 は、磁場測定装置 21、導電率分布導出装置 22、および、画像表示装置 23 を備える。

[0031] 磁場測定装置 21 は、磁場を測定する装置であり、センサ等を備える。具体的には、磁場測定装置 21 は、電池 11 の周辺の磁場を測定する。

[0032] 導電率分布導出装置 22 は、磁場を示す磁場情報を取得し、磁場情報に基づいて電池 11 の内部の導電率分布を導出する装置である。導電率分布導出装置 22 は、電子計算機（コンピュータ）でもよい。導電率分布導出装置 22 が導出する導電率分布は、電池 11 の内部の導電率分布であり、電池 11

に含まれる平面状の電極板に平行な２次元平面上の導電率分布である。

[0033] 画像表示装置２３は、画像を表示する装置であり、ディスプレイ（表示部）を備える。具体的には、画像表示装置２３は、導電率分布導出装置２２で導出された導電率分布を示す画像を表示する。画像表示装置２３が表示する画像は、画像表示装置２３で生成されてもよいし、導電率分布導出装置２２で生成されてもよい。

[0034] 図３は、図２に示された電池検査システム２０の動作を示すフローチャートである。まず、磁場測定装置２１は、磁場を測定する（Ｓ１１）。次に、導電率分布導出装置２２は、磁場情報に基づいて導電率分布を導出する（Ｓ１２）。次に、画像表示装置２３は、導電率分布を示す画像を表示する（Ｓ１３）。

[0035] 電池検査システム２０は、上記の動作に基づいて、電池１１の内部の導電率分布を示す画像を表示することができる。電池１１の電氣的な異常は、導電率分布に現れる。つまり、電池検査システム２０は、導電率分布を示す画像を表示することにより、電池１１の電氣的な異常を示すことができる。

[0036] 導電率分布は、電池１１の電氣的な異常を直接的に示す情報である。電池１１の電氣的な異常の把握に、導電率分布は極めて有効である。次に、このような導電率分布を導出する導電率分布導出装置２２を説明する。

[0037] 図４は、図２に示された導電率分布導出装置２２を示す構成図である。例えば、導電率分布導出装置２２は、図４のように、取得部３１および導出部３２を備える。導電率分布導出装置２２は、さらに、磁場を解析する解析部を備えてもよいし、導電率分布を示す画像を生成する生成部を備えてもよい。これらの構成要素は、それぞれ、専用または汎用の回路によって実装されてもよい。これらは、１つの回路で実装されてもよいし、複数の回路で実装されてもよい。

[0038] 取得部３１は、磁場を示す磁場情報を取得する。例えば、取得部３１は、磁場測定装置２１から磁場情報を取得する。取得部３１は、磁場測定装置２１から取得された磁場情報を解析することで、より詳細な磁場情報を取得し

てもよい。

[0039] 導出部 3 2 は、磁場と導電率分布との関係に基づいて、電池 1 1 の内部の導電率分布を導出する。より具体的には、導出部 3 2 は、磁場の x 方向の成分と、磁場の y 方向の成分と、導電率分布と、電位分布との関係に基づいて、導電率分布を導出する。特に、導出部 3 2 は、磁場のうち、磁場の z 方向の成分を除く、磁場の x 方向の成分、および、磁場の y 方向の成分のみに基づいて、導電率分布を導出する。

[0040] ここで、x 方向および y 方向は、電池 1 1 に含まれる平面状の電極板に平行な 2 つの方向であり、互いに垂直な 2 つの方向である。z 方向は、x 方向および y 方向に垂直な方向である。導電率分布は、電池 1 1 に含まれる平面状の電極板に平行な 2 次元平面上の導電率分布である。電位分布は、電池 1 1 に含まれる平面状の電極板に平行な 2 次元平面上の電位分布である。

[0041] また、磁場の x 方向の成分、磁場の y 方向の成分、および、磁場の z 方向の成分を、それぞれ、磁場の x 成分、磁場の y 成分、および、磁場の z 成分と呼ぶ場合がある。

[0042] 図 5 は、図 4 に示された導電率分布導出装置 2 2 の動作を示すフローチャートである。まず、取得部 3 1 は、磁場情報を取得する (S 2 1)。次に、導出部 3 2 は、磁場の x 方向の成分と、磁場の y 方向の成分と、導電率分布と、電位分布との関係に基づいて、導電率分布を導出する (S 2 2)。導電率分布導出装置 2 2 は、上記の動作に基づいて、導電率分布を導出することができる。

[0043] 次に、電池検査システム 2 0 および導電率分布導出装置 2 2 について、より詳細に説明する。

[0044] 図 6 は、図 2 に示された電池検査システム 2 0 を示す模式図である。図 6 には、磁場測定装置 2 1、導電率分布導出装置 2 2、および、画像表示装置 2 3 を備える電池検査システム 2 0 が示されている。

[0045] 磁場測定装置 2 1 は、磁気センサとして TMR センサ (Tunneling Magneto Resistive Sensor) 4 3 を有する。

なお、TMRセンサ43は、一例であって、他の種類のセンサが用いられてもよい。また、磁場測定装置21は、スライド可能な機構を有する。これにより、磁場測定装置21は、TMRセンサ43を用いて、電池11の付近を走査することができる。

[0046] また、磁場測定装置21は、回転台44を備える。回転台44は、検査対象物（電池11）を載置するための台であり、回転可能な機構を有する。これにより、磁場測定装置21は、様々な回転角度で、電池11の付近を走査することができる。

[0047] 導電率分布導出装置22は、磁場情報を取得し、磁場情報に基づいて電池11の内部の導電率分布を導出する。例えば、導電率分布導出装置22は、図6に示されたような電子計算機（コンピュータ）である。

[0048] 画像表示装置23は、導電率分布を示す画像を表示する。例えば、画像表示装置23は、図6に示されたような画面を有する表示装置である。

[0049] 電池検査システム20によって検査される電池11は、リチウム電池またはリチウムイオン電池等である。電池11は、平面状の1対の電極板を有する。また、電池11は、1対の電極端子41、42を有する。電極端子41、42には導線が接続され、電流が流れている状態で、磁場測定装置21が電池11の周辺の磁場を測定する。

[0050] 図7は、図6に示された電池11が検査されている状態を示す図である。図1と同様、図7に示された電池11は、電解質12、集電体13、正極活性物質14、負極活性物質15、集電体16、および、メタルパッケージ17を含む。電解質12、集電体13、正極活性物質14、負極活性物質15、および、集電体16は、メタルパッケージ17で覆われている。

[0051] 磁場測定装置21は、回転台44に載置された電池11の上方の走査対象面51において、TMRセンサ43を介して、磁場を測定する。例えば、導電率分布導出装置22は、走査対象面51において測定された磁場の情報を磁場測定装置21から取得し、取得された情報を解析することにより、再構成対象面52の磁場の情報を取得してもよい。すなわち、導電率分布導出装

置 2 2 は、走査対象面 5 1 の磁場の情報に基づいて、再構成対象面 5 2 の磁場の情報を取得してもよい。

[0052] 磁場の情報を解析する方法は、国際公開第 2 0 0 8 / 1 2 3 4 3 2 号（以下、特許文献 2）および国際公開第 2 0 1 2 / 1 5 3 4 9 6 号（以下、特許文献 3）等に記載されている。具体的には、特許文献 2 および特許文献 3 には、マクスウェルの方程式を解いて磁場の情報を解析する方法が記載されている。

[0053] 導電率分布導出装置 2 2 は、特許文献 2 または特許文献 3 等に記載の方法を用いてもよい。あるいは、磁場測定装置 2 1 が、特許文献 2 または特許文献 3 等に記載の方法を用いて、再構成対象面 5 2 の磁場の情報を取得してもよい。そして、導電率分布導出装置 2 2 は、再構成対象面 5 2 の磁場の情報を磁場測定装置 2 1 から取得してもよい。

[0054] 導電率分布導出装置 2 2 は、再構成対象面 5 2 の磁場の情報を取得することなく、走査対象面 5 1 の磁場の情報に基づいて、導電率分布を導出してもよい。

[0055] 図 8 は、図 6 に示された電池検査システム 2 0 によって利用される座標系を示す図である。図 8 には、図 6 に示された電池 1 1 と座標系との関係が示されている。x 方向および y 方向は、電池 1 1 に含まれる平面状の電極板に平行な 2 つの方向であり、互いに垂直な 2 つの方向である。z 方向は、x 方向および y 方向に垂直な方向である。

[0056] ここで、x 方向の座標は、x または x 座標と表現される場合がある。また、y 方向の座標は、y または y 座標と表現される場合がある。また、z 方向の座標は、z または z 座標と表現される場合がある。また、x 方向は、x 軸に対応し、x 軸方向とも呼ばれる。同様に、y 方向は、y 軸に対応し、y 軸方向とも呼ばれる。同様に、z 方向は、z 軸に対応し、z 軸方向とも呼ばれる。

[0057] 以下、図 8 に示された座標系に基づいて、磁場の x 方向の成分と、磁場の y 方向の成分と、電極板に平行な 2 次元平面上の導電率分布と、電極板に平

行な 2 次元平面上の電位分布との関係を説明する。

[0058] 図 9 は、図 6 に示された電池検査システム 20 によって利用される磁場と電位分布と導電率分布との関係を説明するための図である。ここで、電池 11 は、1 層のリチウムイオン電池のセルに対応し、平面状の 1 対の電極板 61、62 を有する。電極板 61 は、集電体 13、および、正極活性物質 14 に対応する。電極板 62 は、負極活性物質 15、および、集電体 16 に対応する。1 対の電極板 61、62 の間には、電解質 12 が存在する。

[0059] 電極板 61 の厚みは、 h で表現され、電極板 61、62 の間の距離は、 h_T で表現される。電極板 61 は、電極端子 41 に接続され、電極板 62 は、電極端子 42 に接続される。磁場測定装置 21 は、電流が流れている状態で、電池 11 の上方の走査対象面 51 において TMR センサ 43 を介して磁場を測定する。

[0060] また、電流は j で表現される。特に、 x 方向の電流は j_x で表現され、 y 方向の電流は j_y で表現され、 z 方向の電流は j_z で表現される。

[0061] 通常、1 対の電極板 61、62 の間の導電率分布は一定である。しかし、デンドライト 63 の発生によって、導電率分布が変化する。デンドライト 63 は、電極板 61 または電極板 62 に金属が析出されることによって形成される。デンドライト 63 の導電率は電解質よりも高い。そのため、デンドライト 63 は、短絡の原因になる場合がある。そこで、電池検査システム 20 は、導電率分布を導出し、電池 11 の状態を検査する。

[0062] 以下、図 9 に基づいて、磁場と電位分布と導電率分布との関係を説明する。なお、以下の説明において、導電率分布 $\sigma(x, y)$ は、1 対の電極板 61、62 の間の 2 次元平面上の導電率分布を示す。電位分布

[数11]

$$\varphi(x, y)$$

は、電極板 61 の表面の 2 次元平面上の電位分布を示す。導電率 σ_0 は、電極板 61 の導電率を示す。導電率 σ_0 は、 x 座標または y 座標によらず、電極板 61 において一定である。

[0063] まず、定常状態のマクスウェルの方程式に基づいて、式 1 の関係が成立する。

[0064] [数12]

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\partial_t \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \partial_t \mathbf{D} = \mathbf{j}\end{aligned} \quad \cdot \cdot \cdot (\text{式 1})$$

[0065] ここで、E は電場を示す。B は磁束密度を示す。H は磁場を示す。D は電束密度を示す。t は時間を示す。∂_t は、t についての偏微分を示す。式 1 の第 1 式に基づいて、電場 E は、ポテンシャル（電位）に基づいて、式 2 のように表現される。

[0066] [数13]

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad \cdot \cdot \cdot (\text{式 2})$$

[0067] 電極板 6 1 における電流 j は、電場 E、導電率 σ₀、および、式 2 に基づいて、式 3 のように表現される。

[0068] [数14]

$$\mathbf{j} = \sigma_0 \mathbf{E} = -\sigma_0 \nabla \varphi(x, y) \quad \cdot \cdot \cdot (\text{式 3})$$

[0069] 一方、式 1 の第 2 式に基づいて、式 4 が成立する。

[0070] [数15]

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} &= \nabla(\nabla \cdot \mathbf{H}) - \Delta \mathbf{H} \\ &= -\Delta \mathbf{H} \\ &= \nabla \times \mathbf{j} \\ &= \nabla \times (\sigma \mathbf{E})\end{aligned} \quad \cdot \cdot \cdot (\text{式 4})$$

[0071] ここで、Δ は、ラプラス作用素またはラプラシアンと呼ばれる演算子である。式 3 および式 4 に基づいて、電極板 6 1 の表面では、式 5 が成立する。

[0072]

[数16]

$$\Delta H_z = \nabla \times (\sigma_0 \nabla \varphi) = 0 \quad \dots (式5)$$

[0073] ここで、 H_z は、磁場の z 成分を示す。式5のように、電極板61を流れる電流は、磁場の z 成分 H_z を生成しない。また、1対の電極板61、62の間において z 方向に平行に流れる電流も、磁場の z 成分 H_z を生成しない。これは、電池11の電極板61は、ビアホールを有するプリント基板とは異なり、穴等がなく一定の導電率 σ_0 を有するためである。また、電極板61における電流の連続の式に基づいて、式6が成立する。

[0074] [数17]

$$(\partial_x j_x + \partial_y j_y)h + j_z = 0 \quad \dots (式6)$$

[0075] ここで、 ∂_x は x についての偏微分を示す。 ∂_y は y についての偏微分を示す。式6は、電位分布

[数18]

$$\varphi$$

を用いて、式7のように表現される。

[0076] [数19]

$$-h \partial_x (\sigma_0 \nabla_x \varphi) - h \partial_y (\sigma_0 \nabla_y \varphi) + h_t^{-1} \sigma(x, y) \varphi = 0 \quad \dots (式7)$$

[0077] ここで、 ∇_x は x についての偏微分を示す。 ∇_y は y についての偏微分を示す。したがって、式7は、式8のように表現される。

[0078] [数20]

$$(\partial_x^2 + \partial_y^2) \varphi = \frac{1}{hh_t \sigma_0} \sigma(x, y) \varphi \quad \dots (式8)$$

[0079] 一方、電極板61の中心の z 座標が z_0 で表現される場合、3次元空間における電流は、式9のように表現される。

[0080]

[数21]

$$\mathbf{j} = \{-\sigma_0 \nabla_x \varphi(x, y), -\sigma_0 \nabla_y \varphi(x, y), -h_T^{-1} \sigma(x, y) \varphi(x, y)\} h \delta(z - z_0) \quad \dots (式 9)$$

[0081] ここで、 δ は、デルタ関数を示す。磁場 H と電流 $\mathbf{j}$ との関係は、式 9 に基づいて、式 10 のように表現される。

[0082] [数22]

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{H} &= -\nabla \times \mathbf{j} \\ &= -\nabla \times \{-\sigma_0 \nabla_x \varphi(x, y), -\sigma_0 \nabla_y \varphi(x, y), -h_T^{-1} \sigma(x, y) \varphi(x, y)\} h \delta(z - z_0) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ \partial_x & \partial_y & \partial_z \\ \sigma_0 h \nabla_x \varphi(x, y) \delta(z - z_0) & \sigma_0 h \nabla_y \varphi(x, y) \delta(z - z_0) & h_T^{-1} h \sigma(x, y) \varphi(x, y) \delta(z - z_0) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \partial_y \{h_T^{-1} h \sigma(x, y) \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} - \partial_z \{\sigma_0 h \nabla_y \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} \\ -\partial_x \{h_T^{-1} h \sigma(x, y) \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} + \partial_z \{\sigma_0 h \nabla_x \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} \\ \partial_x \{\sigma_0 h \nabla_y \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} - \partial_y \{\sigma_0 h \nabla_x \varphi(x, y) \delta(z - z_0)\} \end{bmatrix} \\ &\quad \dots (式 10) \end{aligned}$$

[0083] z 成分の第 1 項と第 2 項とは、一致する。すなわち、 z 成分は 0 である。これは、上記に示した通り、電池 11 の電流が磁場の z 成分 H_z を生成しないことを意味する。一方、 x 成分および y 成分は、0 ではない。したがって、式 8 および式 10 に基づいて、磁場の x 成分 H_x と、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布

[数23]

$$\varphi$$

との関係において、式 11 のような連立方程式が成立する。

[0084] [数24]

$$\begin{aligned} \Delta H_x &= h_T^{-1} h \partial_y \{\sigma(x, y) \varphi(x, y)\} \delta(z - z_0) - \sigma_0 h \{\partial_y \varphi(x, y)\} \delta'(z - z_0) \\ \Delta H_y &= -h_T^{-1} h \partial_x \{\sigma(x, y) \varphi(x, y)\} \delta(z - z_0) + \sigma_0 h \{\partial_x \varphi(x, y)\} \delta'(z - z_0) \\ \partial_x^2 \varphi + \partial_y^2 \varphi &= (\sigma_0 h h_T)^{-1} \sigma(x, y) \varphi(x, y) \end{aligned} \quad \dots (式 11)$$

[0085] このように、磁場の x 成分 H_x と、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、

電位分布

[数25]

$$\varphi$$

との関係において、式 1 1 が成立する。式 1 1 の第 1 式は、磁場の x 成分 H_x と、導電率分布 σ と、電位分布

[数26]

$$\varphi$$

との関係を示す関係式である。式 1 1 の第 2 式は、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布

[数27]

$$\varphi$$

との関係を示す関係式である。式 1 1 の第 3 式は、導電率分布 σ と、電位分布

[数28]

$$\varphi$$

との関係を示す関係式である。

[0086] すなわち、式 1 1 は、磁場の x 成分 H_x と、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布

[数29]

$$\varphi$$

とが満たす関係式（複数の関係式）である。式 1 1 の第 1 式は、磁場の x 成分 H_x と、導電率分布 σ と、電位分布

[数30]

$$\varphi$$

とが満たす関係式である。式 1 1 の第 2 式は、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布

[数31]

$$\varphi$$

とが満たす関係式である。式 1 1 の第 3 式は、導電率分布 σ と、電位分布
[数32]

$$\varphi$$

とが満たす関係式である。

[0087] 磁場情報から、磁場の x 成分 H_x 、および、磁場の y 成分 H_y を特定することは可能である。そして、磁場の x 成分 H_x 、および、磁場の y 成分 H_y に基づいて、式 1 1 を満たす導電率分布 σ および電位分布

[数33]

$$\varphi$$

を特定することは可能である。そこで、導電率分布導出装置 2 2 の導出部 3 2 は、磁場の x 成分 H_x と、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布
[数34]

$$\varphi$$

との関係を示す式 1 1 に基づいて、磁場情報から導電率分布 σ を導出する。

[0088] これにより、導電率分布導出装置 2 2 は、導電率分布 σ を適切に導出することができる。そして、導出された導電率分布 σ に基づいて、電氣的な障害の発生を適切に検査することが可能である。

[0089] ここで、式 1 1 に基づいて導電率分布 σ を導出するという表現には、式 1 1 と実質的に等しい式に基づいて導電率分布 σ を導出するという意味が含まれてもよい。例えば、式 1 1 と実質的に等しい式は、式 1 1 を変形して得られる式でもよいし、式 1 1 に類似する式でもよい。

[0090] さらに、導電率分布導出装置 2 2 は、式 1 1 に限らず、磁場の x 成分 H_x と、磁場の y 成分 H_y と、導電率分布 σ と、電位分布

[数35]

$$\varphi$$

との関係を示す他の関係式に基づいて、導電率分布 σ を導出してもよい。例えば、このような関係式は種々の物理的法則に基づいて導出することが可能

である。

[0091] さらに、本実施の形態に対して、任意に適用される複数の拡張例がある。

以下、これらの拡張例について説明する。

[0092] (拡張例 1)

まず、拡張例 1 を説明する。拡張例 1 では、導電率分布導出装置 22 の導出部 32 は、導電率分布 σ のモデルおよび電位分布

[数36]

$$\varphi$$

のモデルを決定し、導電率分布 σ のモデルおよび電位分布

[数37]

$$\varphi$$

のモデルに基づいて、磁場の x 成分 H_x と y 成分 H_y とを導出する。ここで、モデルは、候補とも表現される。導出部 32 は、導出された x 成分 H_x と y 成分 H_y とが、磁場測定装置 21 などを通じて得られる磁場情報に適合する場合、導電率分布 σ のモデルおよび電位分布

[数38]

$$\varphi$$

のモデルをそれぞれ導電率分布 σ および電位分布

[数39]

$$\varphi$$

と決定する。

[0093] より具体的には、まず、導出部 32 は、導電率分布 σ のモデルと電位分布

[数40]

$$\varphi$$

のモデルとが式 11 の第 3 式を満たすように、導電率分布 σ のモデルと、電位分布

[数41]

$$\varphi$$

のモデルとを決定する。最初に決定されるモデルは、初期モデルとも表現される。初期モデルは、予め定められていてもよいし、電池検査システム20のユーザの入力に基づいて決定されてもよい。また、初期モデルは、電池11の特性に基づいて決定されてもよい。

[0094] また、導出部32は、まず、導電率分布 σ のモデルを決定し、次に、式11の第3式に基づいて、電位分布

[数42]

$$\varphi$$

のモデルを決定してもよい。あるいは、導出部32は、まず、電位分布

[数43]

$$\varphi$$

のモデルを決定し、次に、式11の第3式に基づいて、導電率分布 σ のモデルを決定してもよい。

[0095] 次に、導出部32は、導電率分布 σ のモデルと、電位分布

[数44]

$$\varphi$$

のモデルと、式11の第1式とに基づいて、磁場のx成分 H_x を導出する。また、導出部32は、導電率分布 σ のモデルと、電位分布

[数45]

$$\varphi$$

のモデルと、式11の第2式とに基づいて、磁場のy成分 H_y を導出する。

[0096] そして、導出されたx成分 H_x とy成分 H_y とが、取得部31によって取得された磁場情報に適合する場合、導出部32は、導電率分布 σ のモデルを導電率分布 σ と決定する。また、導出部32は、この場合の電位分布

[数46]

$$\varphi$$

のモデルを電位分布

[数47]

$$\varphi$$

と決定する。

[0097] 導出された x 成分 H_x と y 成分 H_y とが、取得部31によって取得された磁場情報に適合しない場合、導出部32は、導電率分布 σ の新たなモデルと、電位分布

[数48]

$$\varphi$$

の新たなモデルとを決定する。導出部32は、導出された x 成分 H_x と、磁場情報によって示される磁場の x 成分 H_x との差、および、導出された y 成分 H_y と、磁場情報によって示される磁場の y 成分 H_y との差に基づいて、これらの新たなモデルを決定してもよい。

[0098] そして、導出部32は、新たに決定されたモデルに基づいて、磁場の x 成分 H_x と y 成分 H_y とを導出する。そして、導出された x 成分 H_x と y 成分 H_y とが磁場情報に適合する場合、導出部32は、これらのモデルを導電率分布 σ および電位分布

[数49]

$$\varphi$$

と決定する。そして、導出された x 成分 H_x と y 成分 H_y とが磁場情報に適合しない場合、導出部32は、再び、新たなモデルを決定する。

[0099] 導出部32は、上記の手順を繰り返すことにより、磁場情報に適合する x 成分 H_x と y 成分 H_y とが導出されるモデルを探索する。すなわち、導出部32は、モデルを変更しながら、磁場の x 成分 H_x と y 成分 H_y とを導出し、導

出された x 成分 H_x と y 成分 H_y とが磁場情報に適合した場合のモデルを導電率分布 σ および電位分布

[数50]

$$\varphi$$

と決定する。このような処理は、複数のモデルから適切なモデルを探索する処理でもある。

[0100] 導出部 32 は、複数のモデルに対して並列処理を行って、適切なモデルを探索してもよい。例えば、この場合、導出部 32 は、複数のモデルに対応する複数の磁場を並列に導出する。そして、導出部 32 は、複数の磁場から、磁場情報に適合する磁場を特定し、特定された磁場の導出に用いられたモデルを特定する。これにより、導出部 32 は、短時間で適切なモデルを探索することができる。

[0101] 導出部 32 は、GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) を利用して、このような並列処理を行ってもよい。GPGPU は、画像処理装置 (画像処理ユニット) を画像処理とは異なる用途に利用するための方式である。GPGPU は、並列処理または繰り返し処理に適している。そのため、導出部 32 は、GPGPU を利用することにより、より短時間で適切なモデルを探索することができる。

[0102] 導出部 32 または導電率分布導出装置 22 は、GPGPU に利用可能な画像処理装置を備えていてもよい。このような画像処理装置は、GPGPU 用の装置でもよい。

[0103] 拡張例 1 により、導電率分布導出装置 22 は、同種の演算の繰り返しの基づいて、関係式に適合する導電率分布を導出することができる。さらに、導電率分布導出装置 22 は、同種の演算を高速に行うことができる GPGPU を利用することにより、導電率分布 σ を高速に導出することができる。

[0104] (拡張例 2)

次に、拡張例 2 を説明する。拡張例 2 では、導電率分布導出装置 2 2 の導出部 3 2 が、磁場情報から直接的に導電率分布 σ を導出することが可能な関係式に基づいて、導電率分布 σ を導出する。磁場情報から直接的に導電率分布 σ を導出することが可能な関係式は、式 1 1 から導出される。以下、式 1 1 から導出される関係式を具体的に説明する。

[0105] まず、式 1 1 の第 1 式および第 2 式の右辺の第 1 項へ、式 1 1 の第 3 式の
[数51]

$$\sigma(x, y)\varphi(x, y)$$

を代入することによって、式 1 2 が導出される。

[0106] [数52]

$$\begin{aligned}\Delta H_x &= h^2 \sigma_0 \partial_y \left\{ \partial_x^2 \varphi + \partial_y^2 \varphi \right\} \delta(z - z_0) - \sigma_0 h \left\{ \partial_y \varphi(x, y) \right\} \delta'(z - z_0) \\ \Delta H_y &= -h^2 \sigma_0 \partial_x \left\{ \partial_x^2 \varphi + \partial_y^2 \varphi \right\} \delta(z - z_0) + \sigma_0 h \left\{ \partial_x \varphi(x, y) \right\} \delta'(z - z_0)\end{aligned} \quad \dots (式 1 2)$$

[0107] 次に、式 1 2 の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換、および、式 1 3 で定義される記号に基づいて、式 1 4 が導出される。なお、式 1 3 の第 1 式は、電位分布

[数53]

$$\varphi$$

の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換像を示す。式 1 3 の第 2 式は、磁場の x 成分 H_x の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換像を示す。式 1 3 の第 3 式は、磁場の y 成分 H_y の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換像を示す。

[0108]

[数54]

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}(k_x, k_y) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x - ik_y y} \varphi(x, y) dx dy \\ Q_x(k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x - ik_y y} H_x(x, y, z) dx dy \quad \cdot \cdot \cdot \text{(式 13)} \\ Q_y(k_x, k_y, z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ik_x x - ik_y y} H_y(x, y, z) dx dy\end{aligned}$$

[0109] [数55]

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2} Q_x - (k_x^2 + k_y^2) Q_x &= -h^2 \sigma_0 (ik_y) (k_x^2 + k_y^2) \tilde{\varphi} \delta(z - z_0) - \sigma_0 h (ik_y) \tilde{\varphi} \delta'(z - z_0) \\ \frac{d^2}{dz^2} Q_y - (k_x^2 + k_y^2) Q_y &= h^2 \sigma_0 (ik_x) (k_x^2 + k_y^2) \tilde{\varphi} \delta(z - z_0) + \sigma_0 h (ik_x) \tilde{\varphi} \delta'(z - z_0) \\ &\cdot \cdot \cdot \text{(式 14)}\end{aligned}$$

[0110] 式 14 の Q_x および Q_y の特別解は、式 15 で定義されるグリーン関数 G_0 (z, z_0, k) を用いて、式 16 のように表現される。

[0111] [数56]

$$\begin{aligned}G_0(z, z_0, k) &= \frac{1}{2k} e^{-k|z - z_0|} \\ k &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad \cdot \cdot \cdot \text{(式 15)} \\ \frac{\partial^2}{\partial z^2} G_0(z, z_0, k) - k^2 G_0(z, z_0, k) &= \delta(z - z_0)\end{aligned}$$

[0112] [数57]

$$\begin{aligned}Q_x(k_x, k_y, z) &= \left\{ -h^2 \sigma_0 (ik_y k^2) G_0(z, z_0, k) - \sigma_0 h (ik_y) \frac{d}{dz} G_0(z, z_0, k) \right\} \tilde{\varphi}(k_x, k_y) \\ Q_y(k_x, k_y, z) &= \left\{ h^2 \sigma_0 (ik_x k^2) G_0(z, z_0, k) + \sigma_0 h (ik_x) \frac{d}{dz} G_0(z, z_0, k) \right\} \tilde{\varphi}(k_x, k_y) \\ &\cdot \cdot \cdot \text{(式 16)}\end{aligned}$$

[0113] 次の式 17 に示される特性を用いて、 z を z_0 に近づけたときの式 16 の極限を導出することによって、式 18 が得られる。

[0114]

[数58]

$$\lim_{z \rightarrow z_0 + 0} G_0(z, z_0, k) = \frac{1}{2k} \quad \dots (式 17)$$

$$\lim_{z \rightarrow z_0 + 0} \frac{d}{dz} G_0(z, z_0, k) = -\frac{1}{2}$$

[0115] [数59]

$$Q_x(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ -h^2 \sigma_0(i k_y k) + \sigma_0 h(i k_y) \right\} \tilde{\varphi}(k_x, k_y) \quad \dots (式 18)$$

$$Q_y(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ h^2 \sigma_0(i k_x k) - \sigma_0 h(i k_x) \right\} \tilde{\varphi}(k_x, k_y)$$

[0116] 式 18 の第 1 式および第 2 式を組み合わせることによって、式 19 が導出される。

[0117] [数60]

$$i k_y Q_x(k_x, k_y, z_0) - i k_x Q_y(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} h k^2 \sigma_0 (h k - 1) \tilde{\varphi}(k_x, k_y) \quad \dots (式 19)$$

[0118] 式 19 に基づいて、電位分布

[数61]

$$\varphi$$

のフーリエ変換像を示す式 20 が得られる。

[0119] [数62]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_y) = \frac{2 \{ i k_y Q_x(k_x, k_y, z_0) - i k_x Q_y(k_x, k_y, z_0) \}}{h k^2 \sigma_0 (h k - 1)} \quad \dots (式 20)$$

[0120] 式 20 は、上記の手順によって式 11 の第 1 式、第 2 式および第 3 式から導出される関係式であり、式 11 の第 1 式、第 2 式および第 3 式に基づく関係式である。式 20 の逆フーリエ変換によって、電位分布

[数63]

$$\varphi$$

が導出される。電位分布

[数64]

$$\varphi$$

から導電率分布 σ を導出する関係式は、式 1 1 の第 3 式に基づいて、式 2 1 のように表現される。

[0121] [数65]

$$\sigma(x, y) = hh_T \sigma_0 \frac{(\partial_x^2 + \partial_y^2) \varphi}{\varphi} \quad \dots (式 2 1)$$

[0122] したがって、導電率分布導出装置 2 2 の導出部 3 2 は、式 2 0 および式 2 1 に基づいて、磁場情報から導電率分布 σ を直接的に導出することができる。つまり、導出部 3 2 は、同種の演算を繰り返すことなく、予め定められた演算式に磁場情報を代入することで導電率分布 σ を導出することができる。

[0123] ここで、式 2 0 で用いられる $Q_x(k_x, k_y, z_0)$ および $Q_y(k_x, k_y, z_0)$ は、電池 1 1 の内部の磁場情報に対応する。そこで、次に、電池 1 1 の外部における走査対象面の磁場情報に対応する $Q_x(k_x, k_y, z_1)$ および $Q_y(k_x, k_y, z_1)$ を用いる演算式を説明する。なお、 z_1 は、走査対象面の z 座標であり、 z_0 よりも大きい。

[0124] まず、式 1 4 に基づいて、 $z > z_0$ では、式 2 2 が成立する。つまり、 z が z_0 よりも大きい領域では、式 2 2 が成立する。

[0125]

[数66]

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{dz^2}Q_x - (k_x^2 + k_y^2)Q_x &= 0 \\ \frac{d^2}{dz^2}Q_y - (k_x^2 + k_y^2)Q_y &= 0\end{aligned}\quad \dots (式 2 2)$$

[0126] 式 2 2 の方程式の Q_x および Q_y についての一般解は、式 2 3 のように表現される。

[0127] [数67]

$$\begin{aligned}Q_x(k_x, k_y, z) &= a_1(k_x, k_y)e^{-(z-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_1(k_x, k_y)e^{(z-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} \\ Q_y(k_x, k_y, z) &= a_2(k_x, k_y)e^{-(z-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_2(k_x, k_y)e^{(z-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}}\end{aligned}\quad \dots (式 2 3)$$

[0128] したがって、 $z = z_1$ ($z_1 > z_0$) では、式 2 4 によって示される代数方程式が成立する。

[0129] [数68]

$$\begin{aligned}Q_x(k_x, k_y, z_1) &= a_1(k_x, k_y)e^{-(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_1(k_x, k_y)e^{(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} \\ \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \left\{ -a_1(k_x, k_y)e^{-(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_1(k_x, k_y)e^{(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} \right\} \\ Q_y(k_x, k_y, z_1) &= a_2(k_x, k_y)e^{-(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_2(k_x, k_y)e^{(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} \\ \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) &= \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \left\{ -a_2(k_x, k_y)e^{-(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} + b_2(k_x, k_y)e^{(z_1-z_0)\sqrt{k_x^2+k_y^2}} \right\}\end{aligned}\quad \dots (式 2 4)$$

[0130] 式 2 4 によって示される代数方程式を a_1 、 b_1 、 a_2 および b_2 について解くことで、式 2 5 が導出される。

[0131]

[数69]

$$\begin{aligned}
a_1(k_x, k_y) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_x(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \\
b_1(k_x, k_y) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_x(k_x, k_y, z_1) + \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{-(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \\
a_2(k_x, k_y) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_y(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \\
b_2(k_x, k_y) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_y(k_x, k_y, z_1) + \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{-(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}
\end{aligned}
\quad \dots (式 25)$$

[0132] 式 15 および式 16 に対する整合性に基づいて、式 23 の b1 および b2 に 0 を設定することにより、ノイズが除去された式 26 が得られる。

[0133] [数70]

$$\begin{aligned}
Q_x(k_x, k_y, z_0) &= a_1(k_x, k_y) \\
Q_y(k_x, k_y, z_0) &= a_2(k_x, k_y)
\end{aligned}
\quad \dots (式 26)$$

[0134] 式 25 および式 26 に基づいて、式 27 が得られる。つまり、電池 11 の内部の磁場の情報である $Q_x(k_x, k_y, z_0)$ および $Q_y(k_x, k_y, z_0)$ は、電池 11 の外部の磁場の情報である $Q_x(k_x, k_y, z_1)$ および $Q_y(k_x, k_y, z_1)$ を用いて、式 27 のように表現される。

[0135] [数71]

$$\begin{aligned}
Q_x(k_x, k_y, z_0) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_x(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \\
Q_y(k_x, k_y, z_0) &= \frac{1}{2} \left\{ Q_y(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}
\end{aligned}
\quad \dots (式 27)$$

[0136] したがって、導電率分布導出装置 22 の導出部 32 は、式 20、式 21 および式 27 に基づいて、電池 11 の外部の磁場情報から導電率分布 σ を直接

的に導出することができる。つまり、導出部 32 は、同種の演算を繰り返すことなく、予め定められた演算式に電池 11 の外部の磁場情報を代入することで導電率分布 σ を導出することができる。

[0137] 以上、本発明に係る電池検査システムおよび導電率分布導出装置について、実施の形態等に基づいて説明したが、本発明は実施の形態に限定されるものではない。実施の形態等に対して当業者が思いつく変形を施して得られる形態、および、実施の形態等における複数の構成要素を任意に組み合わせて実現される別の形態も本発明に含まれる。

[0138] 例えば、特定の処理部が実行する処理を別の処理部が実行してもよい。また、処理を実行する順番が変更されてもよいし、複数の処理が並行して実行されてもよい。また、検査対象の電池は、二次電池でもよいし、一次電池でもよい。

[0139] また、本発明は、電池検査システムまたは導電率分布導出装置として実現できるだけでなく、電池検査システムまたは導電率分布導出装置を構成する処理手段をステップとする方法として実現できる。例えば、それらのステップは、コンピュータによって実行される。そして、本発明は、それらの方法に含まれるステップを、コンピュータに実行させるためのプログラムとして実現できる。さらに、本発明は、そのプログラムを記録した CD-ROM 等の非一時的なコンピュータ読み取り可能な記録媒体として実現できる。

[0140] 例えば、本発明が、プログラム（ソフトウェア）で実現される場合には、コンピュータの CPU、メモリおよび入出力回路等のハードウェア資源を利用してプログラムが実行されることによって、本発明の各機能要素が実現される。つまり、CPU が処理対象のデータをメモリまたは入出力回路等から取得してデータを演算したり、演算結果をメモリまたは入出力回路等に出力したりすることによって、各機能要素が実現される。

[0141] また、電池検査システムまたは導電率分布導出装置に含まれる複数の構成要素は、集積回路である LSI (Large Scale Integration) として実現されてもよい。これらの構成要素は、個別に 1 チップ

化されてもよいし、一部または全てを含むように1チップ化されてもよい。ここでは、LSIとしたが、集積度の違いにより、IC (Integrated Circuit)、システムLSI、スーパーLSIまたはウルトラLSIと呼称されることもある。

[0142] また、集積回路化の手法はLSIに限るものではなく、専用回路または汎用プロセッサで実現してもよい。プログラムすることが可能なFPGA (Field Programmable Gate Array)、または、LSI内部の回路セルの接続および設定を再構成可能なりコンフィギュラブル・プロセッサを利用してもよい。

[0143] さらに、半導体技術の進歩または派生する別技術によりLSIに置き換わる集積回路化の技術が登場すれば、当然、その技術を用いて、電池検査システムまたは導電率分布導出装置に含まれる構成要素の集積回路化を行ってもよい。

産業上の利用可能性

[0144] 本発明に係る導電率分布導出方法および導電率分布導出装置は、電池内の短絡等の検査に利用可能であり、電池の電氣的な障害の発生を検査するための電池検査システム等に利用可能である。

符号の説明

- [0145]
- 1 1 電池
 - 1 2 電解質
 - 1 3、1 6 集電体
 - 1 4 正極活性物質
 - 1 5 負極活性物質
 - 1 7 メタルパッケージ
 - 2 0 電池検査システム
 - 2 1 磁場測定装置
 - 2 2 導電率分布導出装置
 - 2 3 画像表示装置

3 1 取得部

3 2 導出部

4 1、4 2 電極端子

4 3 TMRセンサ (T u n n e l i n g M a g n e t o R e s i
s t i v e S e n s o r)

4 4 回転台

5 1 走査対象面

5 2 再構成対象面

6 1、6 2 電極板

6 3 デンドライト

請求の範囲

- [請求項1] 平面状の電極板を有する電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出方法であって、
- 磁場を示す磁場情報を取得する取得ステップと、
- 前記磁場の成分であり前記電極板に平行な x 方向の成分である x 成分と、前記磁場の成分であり前記電極板に平行かつ x 方向に垂直な y 方向の成分である y 成分と、前記電極板に平行な2次元平面上の前記導電率分布と、前記電極板に平行な2次元平面上の電位分布とが満たす複数の関係式に基づいて、前記磁場情報に対して前記複数の関係式を満たす前記導電率分布を導出する導出ステップとを含む導電率分布導出方法。
- [請求項2] 前記複数の関係式は、(i) 前記磁場の x 成分と、前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第1関係式と、(i i) 前記磁場の y 成分と、前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第2関係式と、(i i i) 前記導電率分布と、前記電位分布との関係を示す第3関係式とを含み、
- 前記導出ステップでは、前記第1関係式と前記第2関係式と前記第3関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出する
- 請求項1に記載の導電率分布導出方法。
- [請求項3] x 方向の座標が x で表現され、 y 方向の座標が y で表現され、 x 方向および y 方向に垂直な z 方向の座標が z で表現され、前記電極板の z 方向の座標が z_0 で表現され、前記磁場の x 成分が H_x で表現され、前記磁場の y 成分が H_y で表現され、前記電極板の z 方向の厚さが h で表現され、前記電極板を含む1対の電極板の間の距離が h_T で表現され、前記電極板の導電率が σ_0 で表現され、前記導電率分布が σ で表現され、前記電位分布が
- [数1]

$$\varphi$$

で表現され、デルタ関数が δ で表現され、デルタ関数の微分が δ' で表現され、 x についての偏微分が ∂_x で表現され、 y についての偏微分が ∂_y で表現される場合、

前記導出ステップでは、

[数2]

$$\Delta H_x = h_T^{-1} h \partial_y \{ \sigma(x, y) \varphi(x, y) \} \delta(z - z_0) - \sigma_0 h \{ \partial_y \varphi(x, y) \} \delta'(z - z_0)$$

で表現される前記第 1 関係式と、

[数3]

$$\Delta H_y = -h_T^{-1} h \partial_x \{ \sigma(x, y) \varphi(x, y) \} \delta(z - z_0) + \sigma_0 h \{ \partial_x \varphi(x, y) \} \delta'(z - z_0)$$

で表現される前記第 2 関係式と、

[数4]

$$\partial_x^2 \varphi + \partial_y^2 \varphi = (\sigma_0 h h_T)^{-1} \sigma(x, y) \varphi(x, y)$$

で表現される前記第 3 関係式とに基づいて、 σ で表現される前記導電率分布を導出する

請求項 2 に記載の導電率分布導出方法。

[請求項 4]

前記磁場の x 方向の波数が k_x で表現され、前記磁場の y 方向の波数が k_y で表現され、 H_x の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が Q_x で表現され、 H_y の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が Q_y で表現され、

[数5]

$$\varphi$$

の x 方向および y 方向についてのフーリエ変換後の関数が

[数6]

$$\tilde{\varphi}$$

で表現される場合、

前記導出ステップでは、前記第 1 関係式と前記第 2 関係式と前記第

3 関係式とに基づく関係式であり、

[数7]

$$\tilde{\varphi}(k_x, k_y) = \frac{2\{ik_y Q_x(k_x, k_y, z_0) - ik_x Q_y(k_x, k_y, z_0)\}}{hk^2 \sigma_0 (hk - 1)}$$

で表現される関係式である第4 関係式と、前記第3 関係式に基づく関係式であり、

[数8]

$$\sigma(x, y) = hh_T \sigma_0 \frac{(\partial_x^2 + \partial_y^2) \varphi}{\varphi}$$

で表現される関係式である第5 関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出する

請求項3 に記載の導電率分布導出方法。

[請求項5]

前記電池の外部の z 方向の座標が z_1 で表現され、z についての偏微分が ∂_z で表現される場合、

前記導出ステップでは、前記第4 関係式と、前記第5 関係式と、

[数9]

$$Q_x(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ Q_x(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_x(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}$$

で表現される第6 関係式と、

[数10]

$$Q_y(k_x, k_y, z_0) = \frac{1}{2} \left\{ Q_y(k_x, k_y, z_1) - \frac{1}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \partial_z Q_y(k_x, k_y, z_1) \right\} e^{(z_1 - z_0) \sqrt{k_x^2 + k_y^2}}$$

で表現される第7 関係式とに基づいて、前記導電率分布を導出する

請求項4 に記載の導電率分布導出方法。

[請求項6]

前記導出ステップでは、

前記導電率分布の候補と、前記電位分布の候補と、前記複数の関係式とに基づいて、前記磁場の x 成分と、前記磁場の y 成分とを導出し

、

導出された前記 x 成分と、導出された前記 y 成分とが、前記磁場情報によって示される前記磁場に適合する場合、前記導電率分布の候補を前記導電率分布と決定することにより、前記導電率分布を導出する請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の導電率分布導出方法。

[請求項7] 前記導出ステップでは、画像処理装置を画像処理とは異なる用途に利用するための G P G P U (G e n e r a l P u r p o s e G r a p h i c s P r o c e s s i n g U n i t) を利用して、前記導電率分布を導出する

請求項 6 に記載の導電率分布導出方法。

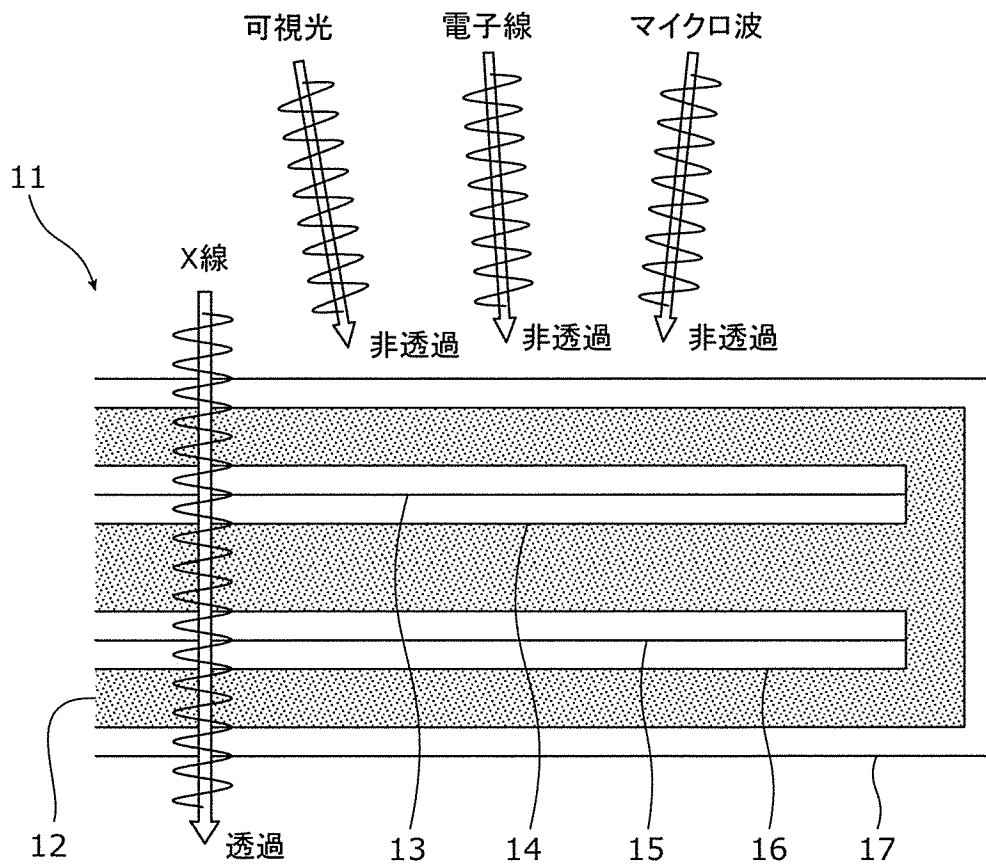
[請求項8] 平面状の電極板を有する電池内の導電率分布を導出する導電率分布導出装置であって、

磁場を示す磁場情報を取得する取得部と、

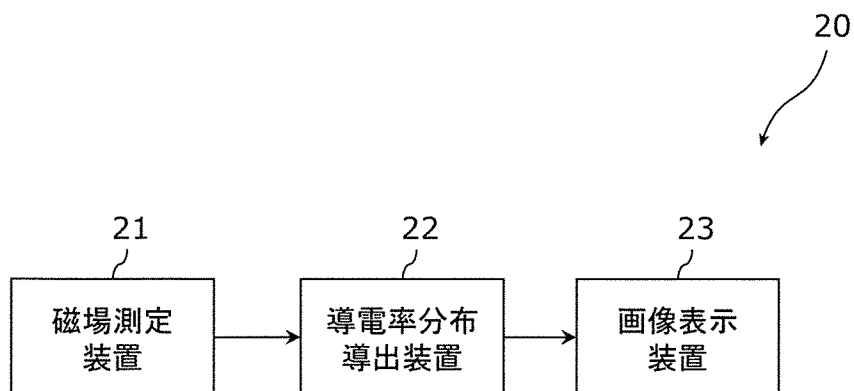
前記磁場の成分であり前記電極板に平行な x 方向の成分である x 成分と、前記磁場の成分であり前記電極板に平行かつ x 方向に垂直な y 方向の成分である y 成分と、前記電極板に平行な 2 次元平面上の前記導電率分布と、前記電極板に平行な 2 次元平面上の電位分布とが満たす複数の関係式に基づいて、前記磁場情報に対して前記複数の関係式を満たす前記導電率分布を導出する導出部とを備える

導電率分布導出装置。

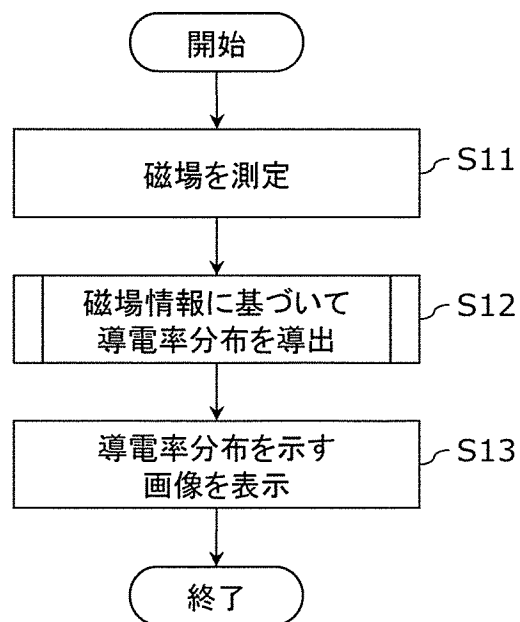
[図1]



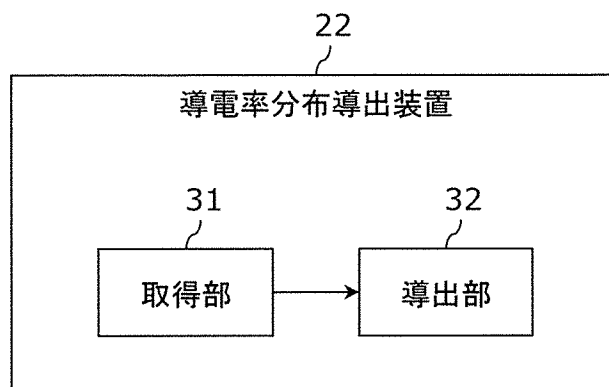
[図2]



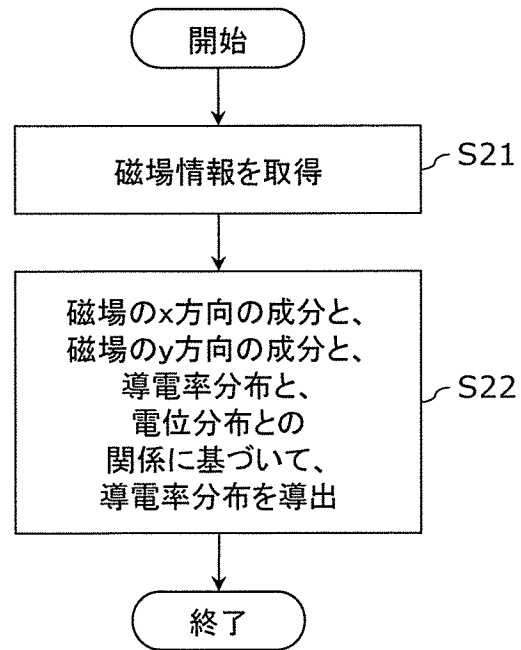
[図3]



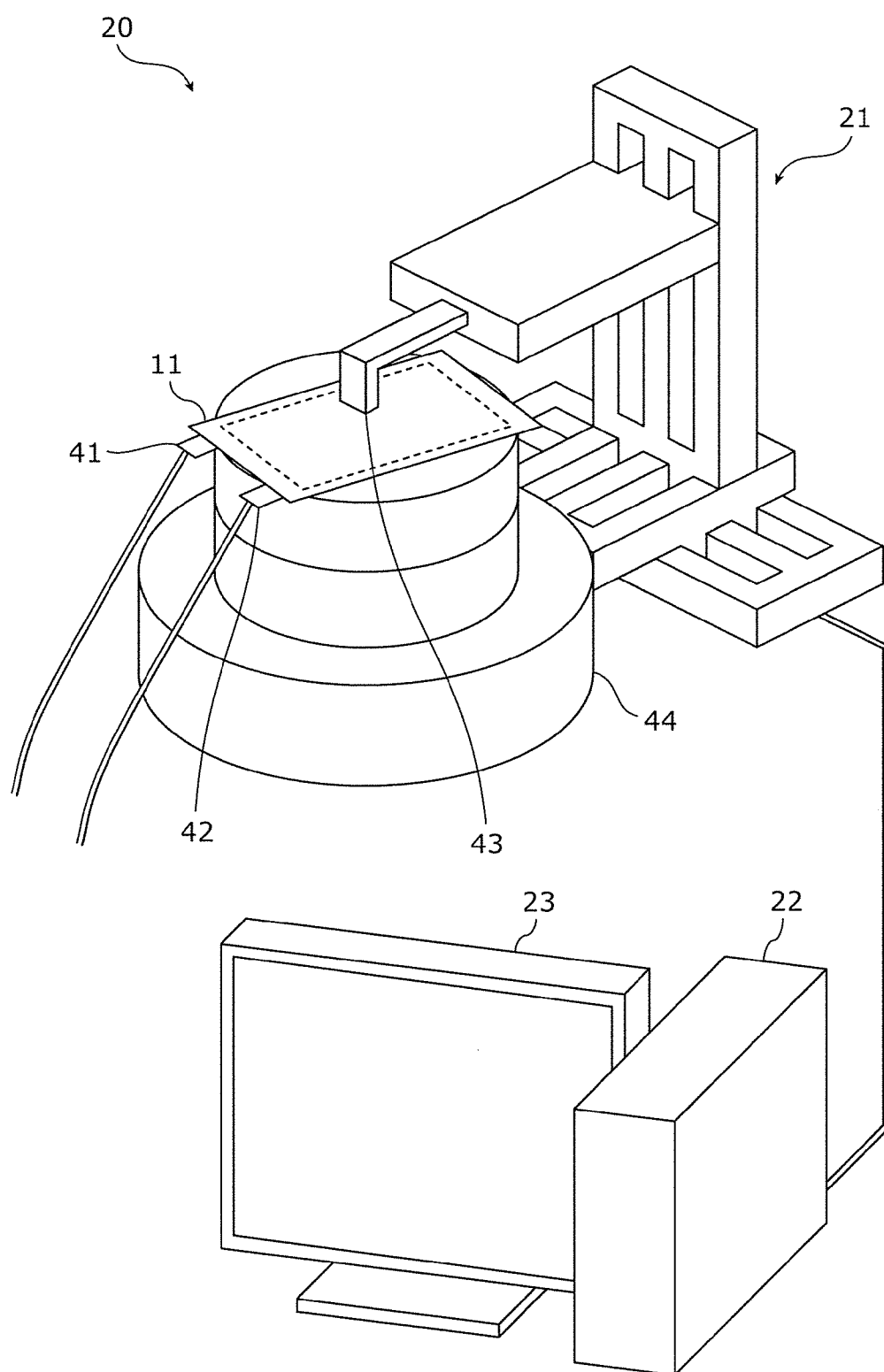
[図4]



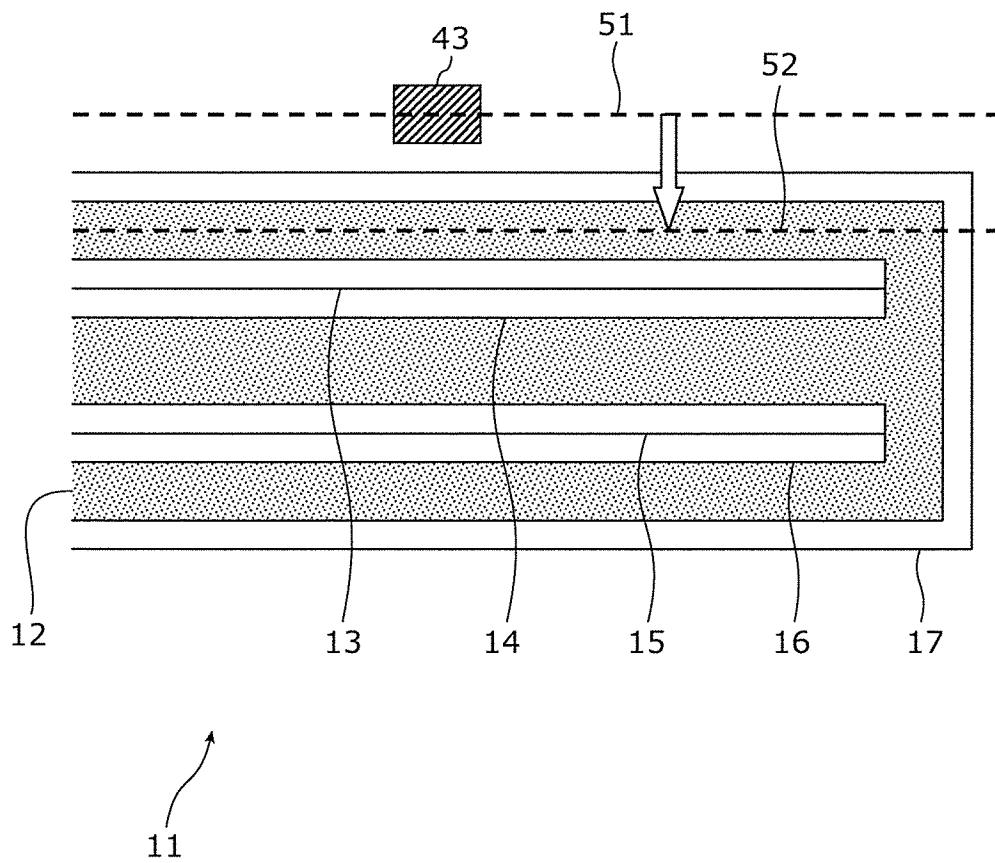
[図5]



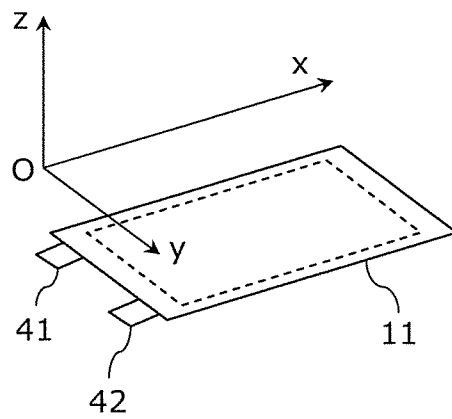
[図6]



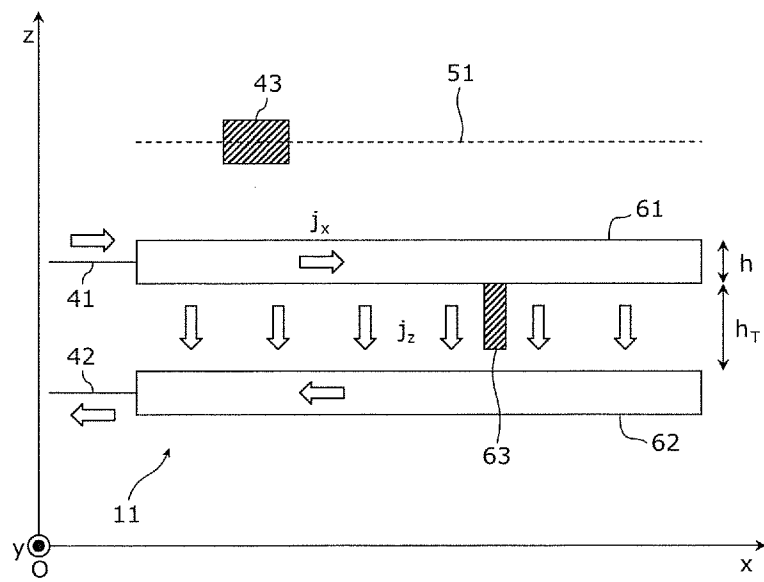
[図7]



[図8]



[図9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/001344

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N27/72(2006.01) 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)

G01N27/72-27/90, G01R27/00-27/32

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2015	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2015

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

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2003-222664 A (Chikayoshi SUMI), 08 August 2003 (08.08.2003), claims 11 to 19; paragraphs [0141] to [0151]; fig. 6 & WO 2003/023424 A1	1, 2, 6-8
Y	JP 2009-229337 A (Hioki E.E. Corp.), 08 October 2009 (08.10.2009), claim 1 (Family: none)	1, 2, 6-8
Y	Yuki MIMA et al., "Denjiba Saikosei Tunnel Jiki Teiko Koka Kenbikyo no Kaihatsu to Denchi Naibu ni Okeru Denka Ido Kashika eno Oyo", Dai 54 Kai Abstracts, Battery Symposium in Japan, 06 October 2013 (06.10.2013), page 423	1, 2, 6-8



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

26 May 2015 (26.05.15)

Date of mailing of the international search report

02 June 2015 (02.06.15)

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/JP2015/001344

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 2009-074953 A (Kyushu University), 09 April 2009 (09.04.2009), claim 1 (Family: none)	6, 7
A	WO 2006/109382 A1 (Okayama University), 19 October 2006 (19.10.2006), entire text; all drawings & JP 3987941 B2 & US 2008/0211492 A1	1-8
A	Kenjiro KIMURA et al., "Denjiba Saikoseiho to Sosagata Tunnel Jiki Teiko Koka Kenbikyo no Kaihatsu", Electronic Packaging Technology, 20 January 2012 (20.01.2012), vol.28, no.2, pages 16 to 20	1-8
A	Chikayoshi Sumi et al., Determination of the spatial distribution of a physical parameter from the distribution of another physical variable- a differential inverse problem, J.Appl.Phys., 1996, Vol.80 No.1, p.1-7	1-8
A	Bradley J. Roth et al., Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, Journal of Applied Physics, 1989, Vol.65, No.1, p.361-372	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. G01N27/72(2006.01)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（I P C）） Int.Cl. G01N27/72-27/90, G01R27/00-27/32			
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 1971-2015年 日本国実用新案登録公報 1996-2015年 日本国登録実用新案公報 1994-2015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） JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamIII)			
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	
Y	JP 2003-222664 A（炭親良） 2003.08.08, 請求項 11-19, 段落 [0141] - [0151], 図 6 & WO 2003/023424 A1	1, 2, 6-8	
Y	JP 2009-229337 A（日置電機株式会社） 2009.10.08, 請求項 1 （ファミリーなし）	1, 2, 6-8	
☒ 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 26.05.2015		国際調査報告の発送日 02.06.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / 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） 蔵田 真彦 電話番号 03-3581-1101 内線 3250	2W 3602

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	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	美馬勇輝他, 電磁場再構成トンネル磁気抵抗効果顕微鏡の開発と電池内部における電荷移動可視化への応用, 第54回電池討論会講演要旨集, 2013.10.06, p. 423	1, 2, 6-8
Y	JP 2009-074953 A (国立大学法人九州大学) 2009.04.09, 請求項1 (ファミリーなし)	6, 7
A	WO 2006/109382 A1 (国立大学法人 岡山大学) 2006.10.19, 全文全図 & JP 3987941 B2 & US 2008/0211492 A1	1-8
A	木村建次郎他, 電磁場再構成法と走査型トンネル磁気抵抗効果顕微鏡の開発, エレクトロニクス実装技術, 2012.01.20, Vol. 28, No. 2, p. 16-20	1-8
A	Chikayoshi Sumi et al., Determination of the spatial distribution of a physical parameter from the distribution of another physical variable- a differential inverse problem, J. Appl. Phys., 1996, Vol. 80 No. 1, p. 1-7	1-8
A	Bradley J. Roth et al., Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution, Journal of Applied Physics, 1989, Vol. 65, No. 1, p. 361-372	1-8