

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04503

研究課題名(和文) 磁界測定による燃料電池内部の電流分布の推定に関する研究

研究課題名(英文) Study on Estimation of Current Distribution in Fuel Cell by Magnetic Field Measurement

研究代表者

泉 政明 (IZUMI, MASAOKI)

北九州市立大学・国際環境工学部・教授

研究者番号：50336939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：発電中の固体高分子形燃料電池(PEFC)周囲の磁界を磁気センサで測定し、その磁界から Sparse Modeling に基づいた逆問題解析によって、電極面内の電流分布を推定した。まず PEFC 内の電流の流れを模倣した模擬 PEFC を用いて、逆問題解析に用いる変数の決定手順を定めた。この手順に従って、面積 25cm² の電極の一部(1cm×1cm)を欠損させた欠陥 PEFC を用いた実験において、全ての欠陥位置の推定電流値は 0.00A、正常位置の推定電流は 0.08 A 以上の値を示した。特に、従来の逆問題解析手法では推定が困難であった電極中央部の欠陥位置でも、その推定電流は 0.00A の結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固体高分子形燃料電池(PEFC)は高い発電効率、CO₂や大気汚染物質等の排出量削減など多くの利点を有し、この PEFC を搭載した装置の普及が国内外で進んでいる。更なる普及拡大には、PEFC の性能・寿命の向上と共に、その品質保証・生産時の歩留り向上も必要である。これら課題解決には PEFC 内部の電流分布の情報は重要であるが、実用的な技術がない。本研究では、発電中の PEFC 周囲の磁界を測定し、その磁界から PEFC 内部の電流分布を推定した。測定した磁界には少なからず誤差が含まれており、通常的手法では精度の高い電流分布を得ることは出来ないため、本研究ではスパースモデリングに基づく逆問題解析法を適用した。

研究成果の概要(英文)：The magnetic flux density generated around the PEFC(Polymer Electrolyte Fuel Cell) during power generation is measured, and then the electric current distribution in the electrodes of the PEFC is estimated from the magnetic flux density through inverse problem analysis using sparse modeling. First, the procedure for determining the variables for the inverse problem analysis was established using a simulated fuel cell that imitated the current flow inside the PEFC. Then, in the experiments using a defective PEFC containing a defect (1cm x 1cm) in the electrode area of 5cm x 5cm, the estimated current values of all defect locations were 0.00 A and the estimated current of normal locations was 0.08 A or higher according to the above determination procedure. In particular, the estimated current of 0.00A was obtained even at the defective position in the central part of the electrode, which was difficult to estimate by conventional inverse problem analysis method.

研究分野：エネルギー変換工学

キーワード：燃料電池 電流分布 磁気センサ 逆問題解析 スパースモデリング 欠陥

1. 研究開始当初の背景

燃料電池、リチウムイオン電池、太陽電池などの電子デバイスが、様々な分野で利用されており、今後その用途・市場は大きく拡大することが予想される。これら電子デバイス内部の電流分布は、性能や寿命の向上だけでなく、品質管理の上でも重要な情報となっている。しかしながら、電子デバイスの内部の電流分布を非侵襲的に計測する手法は確立されていない。この非侵襲的計測法の一つとして、電子デバイス周囲の磁界を用いる方法があるが、磁界から内部の電流分布を求めることは逆問題であり容易に推定することは困難である。また、当然測定された磁界データは誤差やノイズを伴うため、電流と磁界の間を関連づける線形方程式は悪条件方程式となり、その解法をより困難にしている。

2. 研究の目的

本研究では、燃料電池を対象として、発電中の燃料電池周囲の磁界を測定し、燃料電池内部の電流分布を推定する。磁界データを取得する上での、磁気センサの位置、数、感度などを最適化し、測定された磁界信号に含まれるノイズおよび外乱の除去法を確立し、磁界分布から電流分布を推定する最適な逆問題解析法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 燃料電池の構造

本研究で用いたラボサイズの固体高分子形燃料電池 (PEFC) の構造を図 1 に示す。この PEFC は図 2 (a) に示す 1 枚の MEA (外寸 95 mm × 95 mm, 電極 50 mm × 50 mm) の両面をガスケットと厚さ 12mm のカーボン製セパレータ、さらに厚さ 10 mm の金メッキを施した銅製エンドプレートで挟んだ構造である。PEFC 内部の電流の流れは、図 1 (a) 及び (b) 中に示す通り、上部エンドプレートで水平に広がった後、セパレータ内をその厚さ方向に流れ、下部エンドプレートで水平に流れ、電流端子で収束することが、3次元有限要素法を用いた電磁界解析で明らかになっている⁽¹⁾。MEA は Nafion NR-212 製電解質と Pt/C (Pt 0.5 mg/cm²) の空気極と燃料極、更にガス拡散層 (東レ製, TGP-H-060) の 5 層で構成されている。

図 2 (a) 中に示すように MEA の電極部は仮想的に 25 の要素に等分割し、各々の要素に 1~25 の番号を付けた。セパレータはサーペンタイン流路 (幅 0.75 mm × 深さ 1.0 mm × 長さ 88

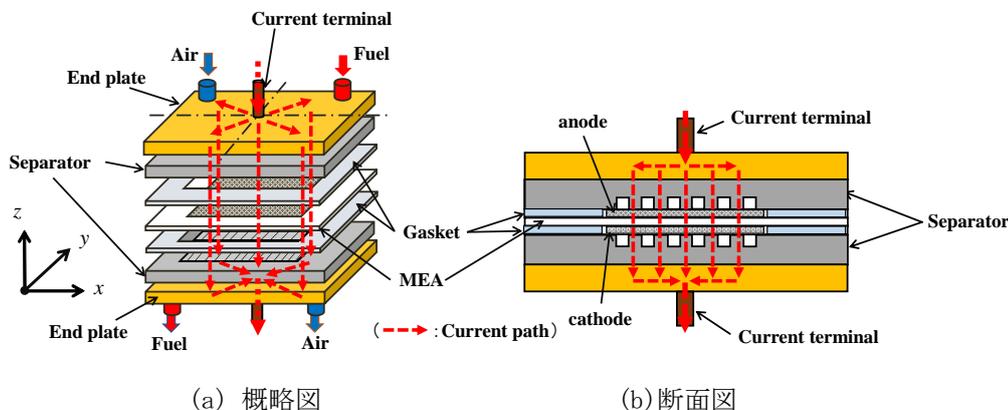


図 1 本研究で用いた燃料電池の概略図と断面図

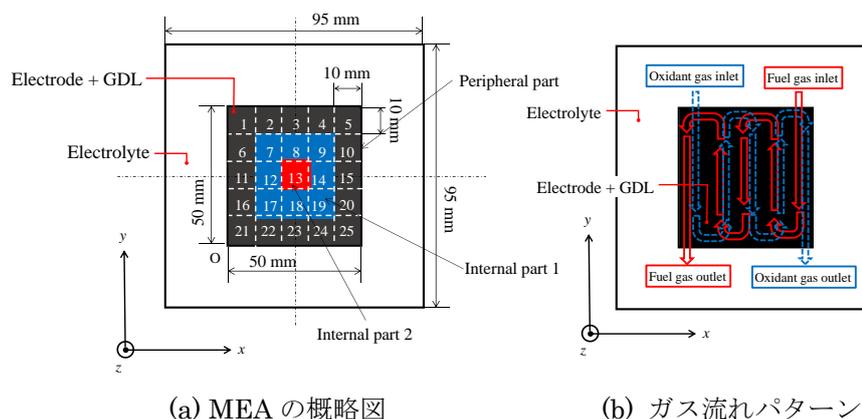


図 2 本研究で用いた MEA の概略図と電極面上のガス流れパターン

mm)を採用した．図2(b)に電極面上の燃料ガスおよび酸化剤ガスの流れを示す．

図3に示すような電極の一部(10 mm × 10 mm)を欠損させたMEA((株)ケミックス製)を使用して実験を行った．このMEAは，図2(a)に示す仮想的に分割したNo. 9の位置の電極を欠損させたMEAの一例である．本研究では図2(a)中に示す電極の外周部(黒色部)のNo. 22の要素を欠損させた場合，電極内部1(青色部)の角に位置するNo. 9の要素を欠損させた場合，および電極中央部(赤色部)のNo. 13の要素を欠損させた三つの特徴的な欠陥位置にて実験を行った．電極が欠損した部分は発電が進行せず，その部分の発電電流はゼロになるため，本手法で推定した欠陥位置の電流値の精度を検証することが可能である．全電極面で出来るだけ一様に発電するように，通常よりも低利用率条件である流量300 ~ 350 ml/minの水素ガスと1000 ~ 1750 ml/minの空気を，12°Cから22°Cの水中をくぐらせることにより加湿したのち21°C~29°Cの燃料電池へ供給した．発電電流5.0 Aあるいは6.0 A時に磁界測定を行った．

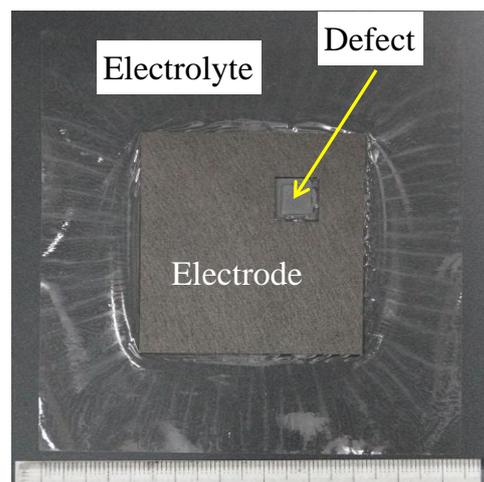


図3 本研究で使したMEAの一例

(2) 解析手法

図2(a)に示すようにMEAの電極面を仮想的に25等分に要素分割し，各要素の中心に各要素の電流が集中すると仮定する．磁界と電流の関係はBiot-Savartの法則を用いる．PEFC周囲の測定位置における磁束密度ベクトル \mathbf{b} は各要素の電流 x_i (i は図2(a)に示すMEA電極面の分割要素番号である)に起因する磁束密度を足し合わせることで求められることができる．従って， \mathbf{b} は次式の線形方程式として表すことができる．

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (1)$$

ここで， \mathbf{x} は x_i を要素に持つベクトル，行列 \mathbf{A} は各要素の電流と磁束密度の各測定位置との幾何学的関係により求まる係数行列である．

本研究では，磁束密度ベクトルの既知量 \mathbf{b} から電流 \mathbf{x} を求めることになる．測定される磁束密度には測定誤差が含まれるため，式(1)を \mathbf{x} について解くと解が安定しない．このような悪条件方程式の解法としてスパースモデリング⁽²⁾を適用した．スパースモデリングの代表的な正則化法であるLASSO(Least absolute shrinkage and selection operator)は次式に示す汎関数 $F(\mathbf{x})$ が最小となるときの \mathbf{x} を解とする手法である⁽²⁾．

$$F(\mathbf{x}) = \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2 + \lambda \|\mathbf{x}\|_1 \quad (2)$$

ここで，右辺第1項は L_2 ノルムで右辺第2項は L_1 ノルムであり，それぞれ $\|\mathbf{z}\|_2 \triangleq \sqrt{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2}$ ， $\|\mathbf{z}\|_1 \triangleq |z_1| + |z_2| + \dots + |z_n|$ で定義される．また， λ は正則化パラメータでその決定手順は後述する．本推定手法の特性として，正則化項(右辺第2項)内のベクトルの成分の多くが0付近の値を持つ場合に有効であることが知られている．本研究で調査するMEAではその要素のほとんどが正常箇所であり，電流ベクトル \mathbf{x} の多くの成分は，MEAが電極全面で発電する合計電流値を全要素数25で割った平均値(aveとする)付近の値となることが予想される．そこで，本研究では最小化すべき評価関数として以下の汎関数 $F_L(\mathbf{x})$ を定めた逆問題解析手法を提案する．

$$F_L(\mathbf{x}) = \|\mathbf{AE}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2 + \lambda \|\mathbf{x} - \mathbf{ave}\|_1 \quad (3)$$

ここで，行列 \mathbf{E} は次式で定義される対角行列であり，電極内部の情報をより強く解に反映させる効果をもつ．

流値に大きな影響を及ぼさないが、大きすぎる値に設定すると、式(3)の右辺第2項の影響が支配的になり平坦な電流分布となるため、この値も最小値が最適と判断した。なお、欠陥が存在しない場合は、 μ_1 値および λ 値の影響はほとんどなく、推定電流値は平均電流値近傍で微増減するだけである。

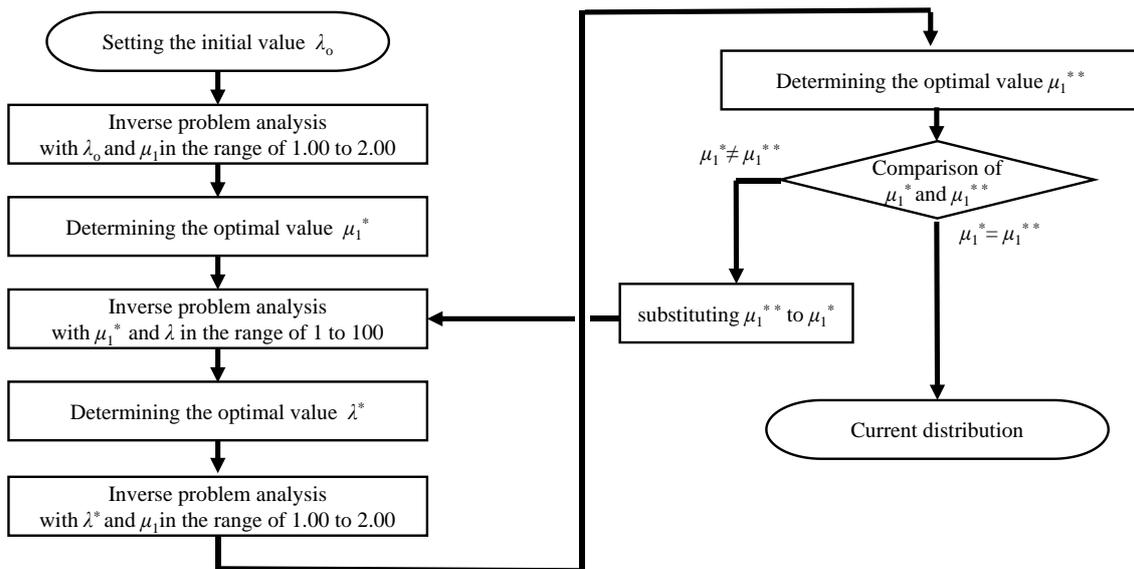


図5 μ_1 and λ の決定手順フローチャート

(2) 単セル燃料電池を用いた実験結果

1枚のMEAを内蔵した燃料電池実機を用いた実験において、Sparse Modelingに基づいて解析した推定電流分布を図6に示す。図中の整数の番号は図2(a)中に示す電極を仮想的に分割した時の要素番号に対応し、その下の3桁の数値は推定電流値である。また、分布図の下に記した平均電流密度は、発電電流を欠損面積を含んだ全電極面積(25 cm²)で除した値である。本研究で実施した実験では、全ての欠陥位置の推定電流値は0.00 Aであるのに対して、その他の位置の推定電流値は0.08 A以上の高い値を示しており、欠陥箇所を明確に特定できる解析結果となった。特にこれまでの研究では困難であった、電極中央部(No.13)の欠陥位置の推定電流値が0.00 Aとなる結果が得られた。また、Ifrekらの研究⁽³⁾では、欠陥面積が電極面積の20%であったのに対して、本手法では電極面積の4%の欠陥を検出することが可能であった。ただし、No. 22 欠陥位置の解析結果では、電極の周辺部に平均電流値に比べて大きく異なる推定電流値を示す部分が散見される。これはスタッキング時の電極とセパレータ間の電気的な接触抵抗の不均一やガス配流の影響などのためと推測されるが、今後、他の電流分布測定法との併用も考慮して、この原因を追究していきたい。

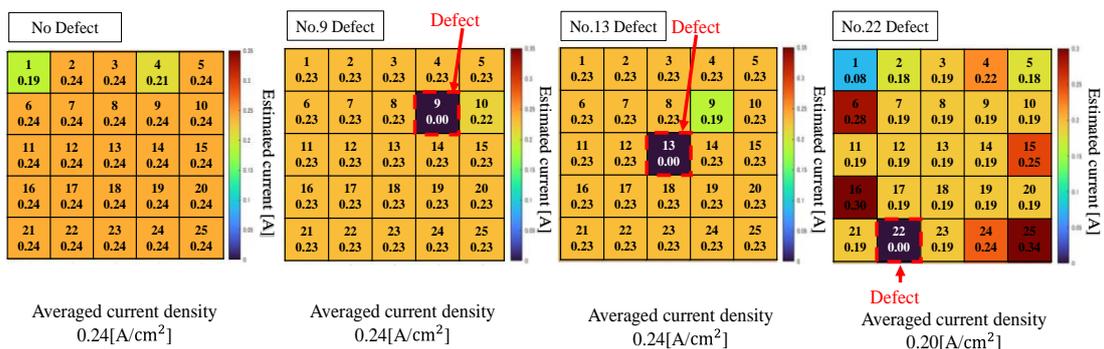


図6 欠陥なしおよびNo. 9, No. 13, No. 22の位置が欠陥の場合のMEA内の電流分布

<引用文献>

- (1) Yamanashi, R., Gotoh, Y., Izumi, M. and Nara, T., Evaluation of generation current inside membrane electrode assembly in polymer electrolyte fuel cell using static magnetic field around fuel cell, ECS Transactions, Vol. 65, No. 1 (2015).
- (2) 永原正章, スパースモデリング—基礎から動的システムへの応用, pp.1-32, コロナ社(2020).
- (3) Ifrek, L., Rosini, S., Cauffet, G., Chadebec, O. and Rouveyre, L., Fault detection for polymer electrolyte membrane fuel cell stack by external magnetic field, Electrochimica Acta Vol. 313, (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 MORITA Haruto, IKEDA Takuya, IZUMI Masaaki, GOTOH Yuji	4. 巻 89
2. 論文標題 Study on non-contacting diagnostic method of PEFC performance using magnetic sensors (Approach using sparse modeling)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 1,12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 泉政明	4. 巻 22
2. 論文標題 磁界測定による固体高分子形燃料電池内部の非接触欠陥検出	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 燃料電池	6. 最初と最後の頁 52,56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 イヨンフン, 池田卓矢, 尋木壮一郎, 泉政明, 後藤雄治
2. 発表標題 磁気センサによるPEFC発電性能の非接触診断法に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会【2021.9.5-8, オンライン】
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尋木壮一郎, 池田卓矢, 上田智哉, イヨンフン, 町頭亮, 後藤雄治, 泉政明
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた固体高分子形燃料電池内部の欠陥検出に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会九州支部第74期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉永翼、根木健志、後藤雄治、泉政明、奈良高明
2. 発表標題 2層スタックでの固体高分子型燃料電池内部の発電電流分布の推定手法の提案
3. 学会等名 第28回燃料電池シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森田 晴斗, イ ヨンフン, 尋木 壮一郎, 池田 卓矢, 泉 政明, 後藤 雄治
2. 発表標題 磁界測定による PEFC 発電性能の非接触診断法に関する研究 (スパースモデリングを用いたアプローチ)
3. 学会等名 日本機械学会 2022 年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森田晴斗, 池田卓矢, 泉政明, 後藤雄治
2. 発表標題 磁界測定によるPEFCの欠陥検出に関する研究
3. 学会等名 第41回計測自動制御学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田航平, 後藤雄治, 泉政明, 奈良高明
2. 発表標題 進化戦略法を用いた逆問題解析による固体高分子形燃料電池内の発電電流分布推定
3. 学会等名 日本非破壊検査協会九州支部
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田航平, 後藤雄治, 泉政明, 奈良高明
2. 発表標題 逆問題解析を用いた固体高分子形燃料電池内の発電電流分布推定
3. 学会等名 実践教育訓練研究学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 イヨンフン, 尋木壮一郎, 寺坂 仁志, 森田 晴斗, 池田卓矢, 泉 政明
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた燃料電池内部の欠陥検出法
3. 学会等名 IIFES2022大学・高専テクニカルアカデミー研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohei Kawada, Yuji Gotoh, Masaaki Izumi, and Takaaki Nara
2. 発表標題 Estimation of Power Generation Current Distribution inside Polymer Electrolyte Fuel Cell by Inverse Problem Analysis using CMA-ES
3. 学会等名 Compumag2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北九州市立大学 国際環境工学部 機械システム工学科 泉研究室
<http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/~izumi01/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	後藤 雄治 (GOTOH Yuji)		
研究協力者	池田 卓矢 (IKEDA Takuya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関