

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：52201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14650

研究課題名(和文)水素社会実現のための固体高分子形燃料電池における非接触磁場計測による制御法の確立

研究課題名(英文) Establishment of a control method for polymer electrolyte fuel cells using in-situ magnetic field measurement for the hydrogen society

研究代表者

秋元 祐太郎 (Akimoto, Yutaro)

小山工業高等専門学校・電気電子創造工学科・助教

研究者番号：30793947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水素社会の根幹を担う固体高分子形燃料電池の安定稼働のために、非破壊・非接触な磁場計測による燃料電池内部状況の再現と不具合回避のための制御方法を確立することを目標にした研究である。研究期間内で面内各部の出力低下要因の評価やシミュレーションによる内部状態の再現、実験結果との比較を行い、磁場指標によって状態を推定することが可能となった。また、実際の燃料電池スタックに対して、磁場指標による制御を行い、不具合回避に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は非破壊、非接触によるスタック計測、制御という特色を有している。他の研究では電流分布計測精度の向上を目指しているため、計算時間が膨大になり時々刻々変化する燃料電池の出力に対応することが難しい。また、燃料電池の実測とシミュレーションを組み合わせることで、セル面各部の磁場計測値という面的情報からない内部現象解明を行い、制御を行うことが実現できる。

本研究手法がPEFCシステムの制御方法として確立することにより、燃料電池システムの稼働時間が飛躍的に向上すると考えられる。そして、不具合に対して対応力のある燃料電池が普及することで、低環境負荷でありエネルギー供給性に優れた水素社会の実現につながる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of study is the stable operation of polymer electrolyte fuel cells, therefore, we established a control method and reproduce the internal conditions of fuel cell using by Non-destructive and non-contact magnetic field measurement. During the period of the research, the factors of the output reduction in fuel cell were evaluated and the internal conditions were reproduced by simulation. The simulation results were compared with the magnetic field measurements. Moreover, the control of the actual fuel cell stack by the magnetic field indexes was successfully carried out to avoid the failures.

研究分野：燃料電池、エネルギーシステム、エネルギー学

キーワード：燃料電池 磁場計測 非破壊診断

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素社会の根幹を担うのは燃料電池のひとつである固体高分子形燃料電池(Polymer Electrolyte Fuel Cell: PEFC)は自動車用や非常用電源など多用途での利用が検討されている。しかし、システムの信頼性に課題があり、診断・解析手法の高度化やシミュレーション技術の向上によりシステム停止要因を明らかにすることが必要不可欠である。このPEFC診断手法の1つに電流分布計測がある。先行研究ではセル面を複数の領域に分割しそれぞれに計測用回路を接続する手法が一般的に行われているが、既存のセルを測定用に改造する必要がある。したがって、システムに搭載するPEFCスタックへ適用した場合、接触抵抗など電気的な影響に加えて高コスト化やスタックの大型化につながる。このことから、システム診断には非破壊・非接触かつスタックに適用可能な手法が必須である。

2. 研究の目的

本研究は、開発済みの磁場計測装置を用い、磁場情報を用いたPEFCの内部状況の再現により不具合回避のための制御方法を確立することである。本研究手法は、計測用の回路を埋め込むなど改造が必要であった従来計測方法と異なり、非破壊・非接触での電流分布計測が可能であるため、内部状況の再現により制御方法の確立につながり水素社会実現の一翼を担うことが期待できる。

3. 研究の方法

これまでに図1に示す3軸磁気センサを搭載したプローブおよび計測システムを開発し、空冷PEFCのセル間に存在する空冷口においてセンサをスweepさせることにより非破壊かつ電氣的に非接触な磁場計測を可能にし、電流分布の算出を行った。磁場のセル面成分は、アンペールの法則により積層方向の電流、つまりマクロ的なPEFCの発電電流を表している。また、磁場のセル直交成分は面方向電流、これは電氣的に積層方向に電流が流れずに迂回した損失電流と考えられる。以下の研究計画に従って行った。

(1). 各PEFC運転条件における磁場分布計測、評価

磁場は、申請者らが開発した磁気センサプローブを空冷口内に挿入し計測を行った。センサは図1のようなプローブ上に設置されている。PEFC運転条件は、実際のPEFCシステムへの搭載を念頭に置き、現実的な範囲および代表的な不具合である生成水滞留状態(フラッディング)と膜乾燥状態(ドライアウト)とした。一般的に、フラッディングは空気流量を減少させることで、ドライアウトは空気流量を上昇させることで模擬できるため、本研究においても空気供給など運転条件により変更する。磁場計測結果は面内各部において分極を評価する。分極評価にはフィッティング手法を用いた。

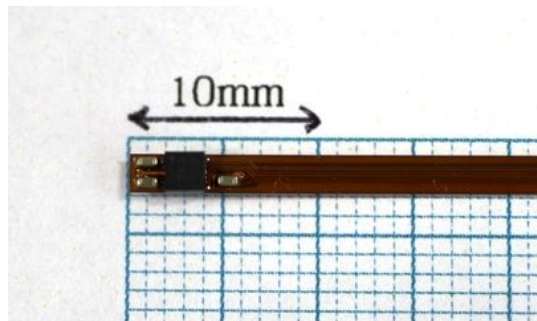


図1 磁気センサプローブ

(2). 磁場計測値に基づく PEFC シミュレーションモデルの構築、内部状況、磁場分布の再現

実験的に最適運転および不具合条件が明確にし、PEFC の内部状況や不具合現象を説明することが制御方法を提案、確立する上で重要である。そこで本研究では 3 次元シミュレーションを用いて PEFC の内部状況を再現した。本研究では空冷、水冷 PEFC スタックを対象とし、3 次元有限要素法モデルの構築を行う。モデル再現範囲としては、分子レベルまでの再現は計算時間の観点から行わず、部品レベルまでとし CAD などを用いて燃料流路や空冷口等の形状を再現する。燃料電池の発電反応に関しては、ソフトウェアに搭載される一般的な反応式を用いて 3 次元電流分布およびその電流により発生する磁場を計算した。この導出された磁場と磁気センサにより実測された磁場の差を目的関数とし、水素、酸素分布、生成水量などを変更することによって目的関数を小さくする最適化計算を行った。

(3). 磁場計測値に基づく PEFC システム制御方法の提案

上記、結果を用いた PEFC 制御方法の提案および検証を行った。システムにおける従来の計測値である電流、電圧、水素・空気流量等のほか、磁場計測値を入力値とした制御を行う。内部状況はシミュレーション結果を用いて想定し、制御を行った。

4 . 研究成果

研究計画に沿って、研究成果を示す。なお、本稿では、研究成果として査読付き国際学術論文、国際学会に発表した内容を中心に成果を示す。

(1) 各 PEFC 運転条件における磁場分布計測、評価

面内分極評価結果

図 2 にセル No.2 の分割面内 I-V 曲線を示す。計測した磁場から電流分布を計算し、セルの面内各部の特性評価を行っている。計測の結果、各部において電流電圧特性は異なった。特に、セル中央部の出力が相対的に低い。これは積層方向ではなく面方向に電流が流れているためであると考えられる。また、セル I-V カーブのように滑らかな曲線を描くことができなかった。特に低電流域とでは歪みが大きく、これは低電流域では電流によって発生する磁場が小さく周囲磁場の変化を受けていることが考えられる。

セル No.2 の電圧は、大電流領域では他のセルに比べて低下していた。この傾向が分割面に現れている。空気入り口付近では、各条件でほぼ同等の I-V 曲線が得られた。一方、空気出口付近では、通常の状態に比べて低い空気流量のため生成水が反応を阻害するため、低電流域では電圧が小さくなっている。各測定セルのフィッティングによる濃度分極評価結果は、72.6, 40.3, 21.6, 14.0, 4.0mV であったことから、セル No. 2 ではフラッディングが起きていると考えられる。

このときの各セルの磁束密度の Z 成分分布はセル No.2 が最大であった。この値はセル表面に対して垂直であり、先行研究ではセル表面に平行な電流を示していた。セル No.2 の空気出口付近では他のセルや測定点に比べて大きな値を示した。この結果は、流路がサーペンタイン流路であることから、生成水がこの場所に滞留していることを示唆している。

また、走査線電子顕微鏡での測定によりフィッティングによる分極評価と PEFC を構成する膜と触媒の劣化が関連していることについても実験的に示した。

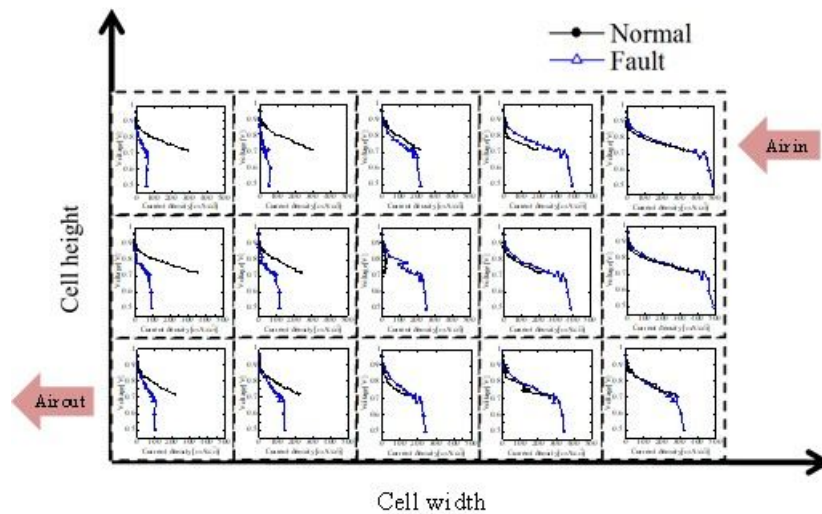


図2 セル2における面内I-V特性曲線

(2) 磁場計測値に基づくPEFCシミュレーションモデルの構築、内部状況、磁場分布の再現

セル平面内にフラッシングなどの断層が発生すると、局所的な電流密度分布が減少することが実験結果より明らかになっている。図3に実験結果とシミュレーション結果の正常条件と故障条件との差の比較を示す。正常条件との最大差は、実験結果では0.0114G、シミュレーション結果では0.0129Gであった。この結果は、磁場と電流密度がアンペールの法則で関係していることを示している。また、他の領域では、磁束密度が変化しているが、その値は不均一磁場の場合の半分以下であった。シミュレーションでは、局所的な電流密度だけでなく、空気出口での局所的な磁束密度分布も減少していることが分かった。

また、実験結果において、スタックの端部端子の影響を受けているため、磁束密度分布はセルの両側に集中する傾向があったため、この結果についてもシミュレーションを行った。MEAでは電流密度分布が一様であったが、両側接続の場合、セル内で磁束密度分布が両側に集中していた。一方、端部端子の片側では、分布は片側のみ集中していた。

さらに、本提案手法は現場での測定が可能な非破壊的な測定であるため、測定自体は数秒で完了するがシミュレーションには9~24時間がかかる。これは先行研究も同様であり、3DFEMシミュレーションでは多数の要素やメッシュの計算が必要となる。

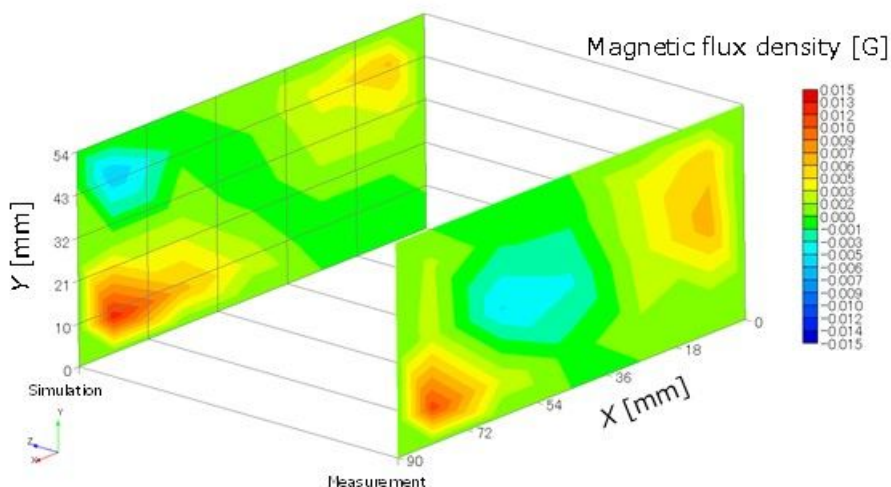


図3 計測結果とシミュレーション結果の正常時と故障時の磁場分布差

(3) 磁場計測値に基づく PEMFC システム制御方法の提案

図 4 よりフラッディング時にはセル 3 とセル 4 の電圧が顕著に低下していることが分かる。この結果を参考に変化の顕著であった各セル電圧と指標として用いた磁場の初期値からの変化との関係を図 5 に示す。

フラッディング時の制御は 1 回目 520 秒、2 回目 1415 秒の合計 2 回行った。制御前後のセル電圧をみると 1 回目と 2 回目のどちらも 0.1[V]以上回復していた。この結果より制御を行った際、PEMFC 内部ではフラッディングが発生しており、その状態予測を磁場の値から行うことができた。

また、フラッディング時では制御開始時にもみ磁場を指標として用いていたが、ドライアウト時では制御開始時だけでなく制御停止時にも磁場を指標として用いていることで、安定稼働を行うことができた。

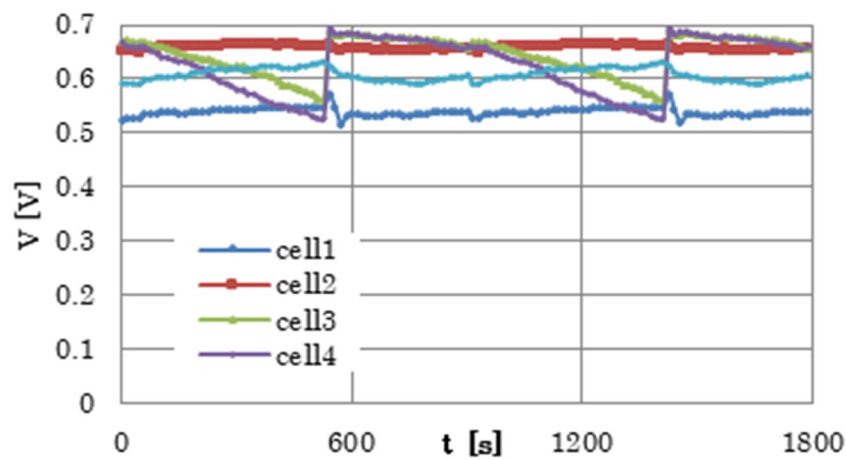


図 4 フラッディング時のセル電圧推移

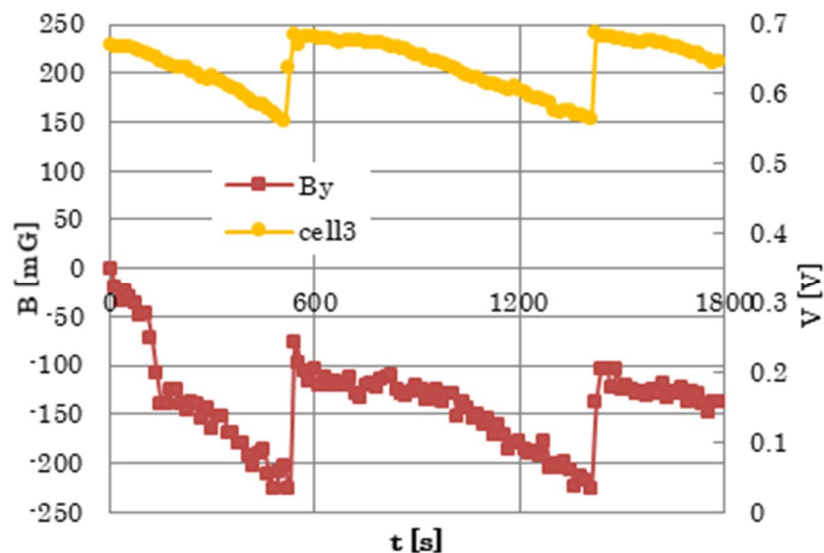


図 5 セル 3 と磁場推移比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yuta Izawa, Yutaro Akimoto, Shin-nosuke Suzuk	4. 巻 90
2. 論文標題 Study of Control Method on PEMFC by In-situ approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE2019)	6. 最初と最後の頁 1-6
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 有
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 -
1. 著者名 Yutaro Akimoto, Yuta Izawa, Shin-nosuke Suzuki	4. 巻 87
2. 論文標題 Study of Magnetic Field Analysis of Water-cooled PEMFC Stacks using 3DFEM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering (ICEE2019)	6. 最初と最後の頁 1-4
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 有
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 -
1. 著者名 Akimoto Yutaro, Suzuki Shin-nosuke	4. 巻 67
2. 論文標題 Overpotential evaluation of PEMFC using semi-empirical equation and SEM	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 E3S Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01015 ~ 01015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186701015	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 Yutaro AKIMOTO, Shin-nosuke SUZUKI, and Yukio KOBAYASHI	4. 巻 G3-0205
2. 論文標題 Evaluation of water-cooled PEMFC stacks using 3DFEM modeling and measurement	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 1378-1381
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 有
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 -

1. 著者名 Akimoto Yutaro, Okajima Keiichi	4. 巻 3
2. 論文標題 In situ approach for characterizing PEMFC using a combination of magnetic sensor probes and 3DFEM simulation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Cogent Chemistry	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/23312009.2017.1379164	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 Akimoto Yutaro, Okajima Keiichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Non-invasive Approach on PEMFC using Magnetic Sensor and Semi-empirical Equation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of ICCE 2017: International Conference and Exhibition on Clean Energy	6. 最初と最後の頁 14-21
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 有
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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Yuta Izawa, Yutaro Akimoto, Shin-nosuke Suzuki
2. 発表標題 Study of Control Method on PEMFC by In-situ approach
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering (ICEE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaro Akimoto, Yuta Izawa, Shin-nosuke Suzuki
2. 発表標題 Study of Magnetic Field Analysis of Water-cooled PEMFC Stacks using 3DFEM
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering (ICEE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaro Akimoto, Shin-nosuke Suzuki
2. 発表標題 Experimental study of failure detection on PEMFC using magnetic sensors
3. 学会等名 International Conference and Exhibition on Clean Energy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊澤優太, 秋元祐太郎, 鈴木真ノ介
2. 発表標題 不具合状態における燃料電池の磁場測定
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊澤優太, 秋元 祐太郎, 鈴木真ノ介
2. 発表標題 磁場指標を用いた燃料電池の制御手法
3. 学会等名 第 10 回 電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaro AKIMOTO
2. 発表標題 Evaluation of water-cooled PEMFC stacks using 3DFEM modeling and measurement
3. 学会等名 International Conference on Electrical Engineering (ICEE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yutaro AKIMOTO
2. 発表標題 Overpotential Evaluation of PEMFC using Semi-Empirical Equation and SEM
3. 学会等名 the 3rd i-TREC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊澤優太, 秋元 祐太郎
2. 発表標題 非破壊診断手法確立のための燃料電池の性能評価
3. 学会等名 第 9 回 電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠崎俊希, 秋元 祐太郎
2. 発表標題 運転中診断に向けた分極手法の検討
3. 学会等名 第 9 回 電気学会東京支部栃木・群馬支所 合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akimoto Yutaro, Okajima Keiichi
2. 発表標題 Non-invasive Approach on PEMFC using Magnetic Sensor and Semi-empirical Equation
3. 学会等名 International Conference and Exhibition on Clean Energy 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

小山高専 秋元研究室 Webページ
<http://www.oyama-ct.ac.jp/EE/akimotoken>
筑波大学 秋元研究室 Webページ
<https://sites.google.com/view/akimotolab-tsukuba>

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	岡島 敬一 (Okajima Keiichi)	筑波大学・システム情報系・教授 (12102)	