

論文

燃料電池の出力特性の測定と模擬出力制御

西澤 裕輔*¹⁾ 時田 幸一*²⁾ 重松 宏志*²⁾

Measure the output characteristics of the fuel cell, and simulating output control

Yusuke Nishizawa*¹⁾, Kouichi Tokita*²⁾, Hiroshi Shigematsu*²⁾

A fuel cell is a device that continuously generates electricity by reacting oxygen with hydrogen. Some companies have started to launch household and mobile fuel cells, and the market is expected to grow in the future. Although the development of a fuel cell itself requires a large budget and a lot of time and technology, small and medium-sized enterprises can enter the market of application products using a small and inexpensive mobile fuel cell. However, obtaining a mobile fuel cell is difficult because sales are limited and only samples are shipped. Also, developing such products is made harder by the large output fluctuations caused by temperature and humidity variations in the environment. We measured a mobile fuel cell in various hygrothermal environments, and simulated the output of a mobile fuel cell via a DC power supply with the aim of supporting the development of these products.

キーワード：モバイル燃料電池, I-V 特性, 模擬出力

Keywords：Mobile fuel cell, Current-voltage characteristic, Simulated output

1. はじめに

燃料電池は水素などの燃料と酸素などの酸化剤を継続的に供給し反応させることで、継続的に発電できる装置である。国内でも家庭用燃料電池やモバイル燃料電池の発売が既に開始されており、今後の市場拡大が予測されている。燃料電池そのものの開発には多額の予算と時間と技術が必要であり、中小企業が参入可能な市場は燃料電池の中でも小型・安価・小出力なモバイル燃料電池を用いた応用製品であると考えられる。しかし、モバイル燃料電池は限定的な販売やサンプル出荷しかされておらず入手困難である。また、使用環境の温湿度等による出力の変動が大きいいため、応用製品の開発が困難であると考えられる。

本研究では、モバイル燃料電池を対象として様々な温湿度環境下での出力特性を測定し、直流電源を制御して燃料電池の出力を模擬することで、モバイル燃料電池の応用製品開発を支援することを目的とした。

2. 燃料電池セルの測定

2.1 測定系 試験品として使用した燃料電池セルは学習キット用の1層PEFCで、電解質膜の面積はおよそ5.3cm²のものである。燃料極と空気極にそれぞれ水素と空気を供給すると発電し、逆にアノードとカソードに電圧を印加すると電気分解によって水素と酸素を発生する。この燃料電池セルを二つ用意し、一つは電気分解に用い、発生した水

素と酸素を二つ目の測定対象とする燃料電池に供給した。なお、発電に用いた水素は微量のため特にドラフトチャンバー等の排気装置は使用しなかった。測定にはエヌエフ回路設計ブロック製発電特性分析器As-510-Tを使用した。

2.2 電気化学特性測定 発電特性分析器とともにエヌエフ回路設計ブロック製周波数特性分析器FRA5097を使用して測定した結果を図1に示す。100mA 負荷をかけた状態から、振幅25mAの正弦波状に10mHzから100kHzまで負荷を変動させて掃引した。この測定結果をもとに発電特性分析器の等価回路推定ソフトウェアによって推定した。推定した等価回路のブロック図を図2に示す。等価回路の推定には10mHzから1kHzまでの測定結果を用いた。

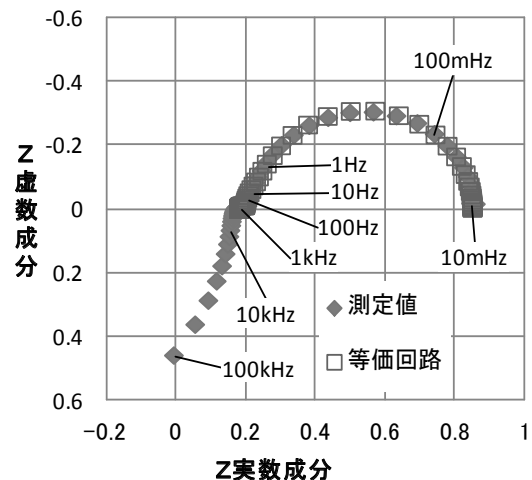


図1. 電気化学特性測定結果と推定した等価回路によるカーブフィッティング

事業名 平成22年度, 23年度 基盤研究

*¹⁾ 開発企画室

*²⁾ 電子半導体技術グループ

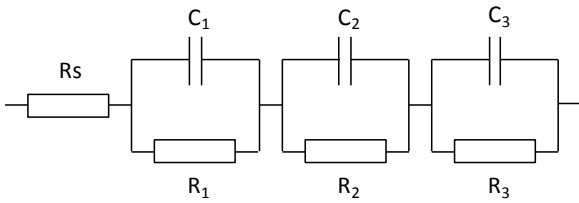


図2. 推定した等価回路のブロック図

$R_s=181.95m\Omega$, $R_1=612.72m\Omega$, $R_2=39.69m\Omega$, $R_3=17.72m\Omega$, $C_1=1.19F$, $C_2=1.66F$, $C_3=66.74F$

また、推定した等価回路から計算したインピーダンスを図1に同時に示す。実験値と計算値は推定に用いた範囲において良く一致した。

2.3 I-V 特性測定 発電特性分析器を使用した結果を図3に示す。測定は無負荷から10mAずつ負荷を増加させて掃引した。測定結果は、PEFCの典型的なI-V特性カーブとなった。

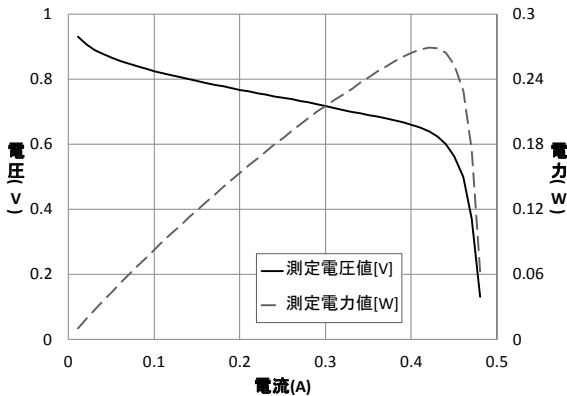


図3. 燃料電池セルのI-V特性測定結果

3. モバイル燃料電池の測定

3.1 試験品 本研究を行った平成22年4月～平成24年3月において国内で発売されているモバイル燃料電池は、T社製モバイル燃料電池及びA社製3W級マルチ電源の2製品である。しかし、前者は平成22年3月に販売終了していたため、後者についてのみ測定を行った。電気特性に関する仕様を表1に示す。

表1. 試験品仕様

本体最大出力	3.5W
本体定格電圧	5.2V
推奨使用温度範囲	15~35℃
燃料カートリッジ出力目安	1W以上×90分(25℃環境下)
燃料カートリッジ出力時間	1個につき約120分
燃料カートリッジ出力容量	1個につき約3Wh

3.2 測定系 試験品は水素化カルシウムを内包した専用の燃料カートリッジを本体に挿入し、付属の水を注水することで発電を開始する。発電が開始すると青色の出力ラ

ンプが点灯する。なお、製品仕様上発生した水素はほぼ全て発電に使用され、周囲に漏れることはないとされているため、特にドラフトチャンバー等の排気装置は使用しなかった。測定は、出力端子のUSB Aメス側コネクタに発電特性分析器を接続して行った。また、温湿度による特性を測定するために、試験品は環境試験器内に設置して測定を行った。

3.3 異なる環境条件におけるI-V特性測定 試験品の温度及び湿度による出力変動幅を確認するために、表2に示す環境下に、環境試験器を使用して本体、燃料カートリッジ及び付属の水を2時間以上さらしたのち、I-V特性の測定を行った。測定は無負荷から10mAずつ負荷を増加させて掃引した。また、条件毎に燃料カートリッジは交換し、測定条件毎に3回以上繰り返し行った。各条件で測定した結果のうち、容量が最大となった結果を代表値とした。この測定結果を図4に示す。測定した結果、試験品は、周囲温度が一定であれば高湿度の方が、高湿度であれば周囲温度が高い方がより容量が大きくなった。

表2. I-V特性測定環境

番号	温度(℃)	湿度(%RH)
①	10	15
②	10	90
③	25	10
④	25	50
⑤	25	98
⑥	40	5
⑦	40	98

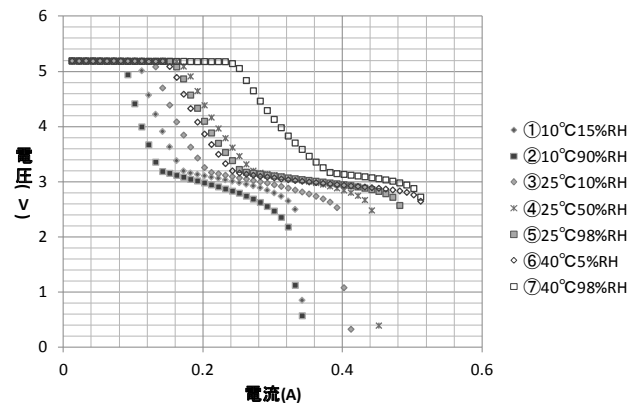


図4. 環境条件毎のI-V特性測定結果

3.4 繰り返しI-V特性測定 燃料カートリッジの仕様出力時間中の出力変動幅を確認するために、環境試験器を使用して表2の④に示す25℃、50%RHの環境下に本体、燃料カートリッジ及び付属の水を2時間以上さらしたのち、表1に示す燃料カートリッジ出力時間の間、繰り返しI-V特性測定を行った。測定は無負荷状態で1分経過後に10mAずつ負荷を増加させて掃引した。測定した結果のうち容量が最大となった結果と最小となった結果を図5に示す。測定し

た結果, 測定回数を重ねるごとに容量が減少していき, 最大容量時では約 0.2A から電圧降下が起きるが, 最小容量時では約 0.1A から電圧降下が起こり, 定格電圧以下となった。

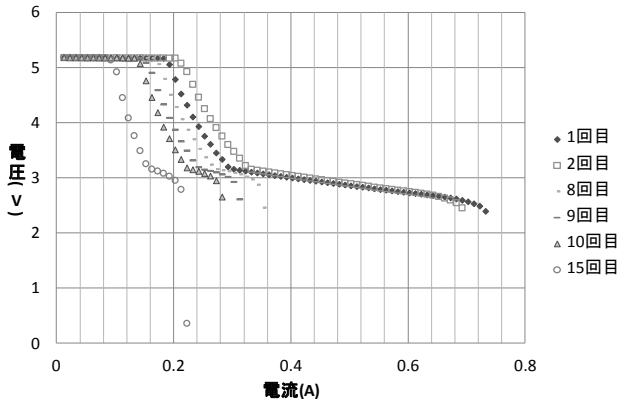


図 5. 繰り返し I-V 特性測定結果

3.5 異なる環境条件における立下り特性測定 試験品の温度及び湿度による立下り応答の変動幅を確認するために, 3.3 と同様の前処理を行い立下り特性の測定を行った。測定は無負荷状態で 1 分経過後に 100mA の負荷をかけた。負荷をかける 10 秒前からの測定結果を図 6 に示す。図 4 の測定結果から, 100mA の負荷をかけた場合, 表 2 の条件①及び②において電圧降下が起きると思われたが, 条件③及び⑥においても電圧降下が起きることを確認した。また, 容量が小さい場合, 無負荷から急激に負荷をかけた場合, I-V 特性測定の結果よりも容量が小さくなった。

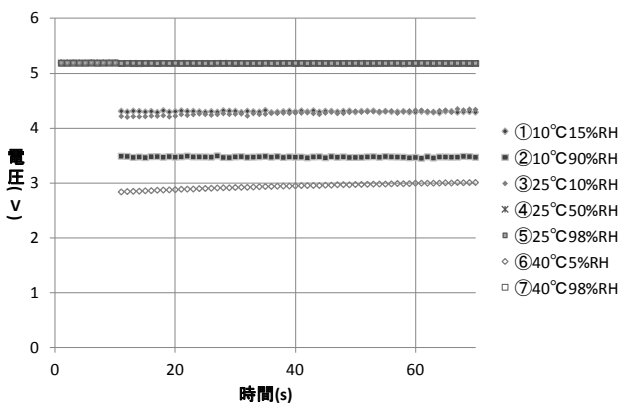


図 6. 立下り特性測定結果

3.6 異なる環境条件における立ち上がり特性測定

3.5 と同様に, 立ち上がり特性の測定を行った。測定は 100mA の負荷をかけた状態で 1 分経過後に無負荷状態とした。測定した結果, 全ての条件で開放電圧=定格電圧となった。I-V 特性測定結果と同様, 定格電圧以上にならないように電圧制限回路が組み込まれていると考えられる。

3.7 電気化学特性測定 2.2 と同様に試験品の電気化学特性測定を試みたが, 測定できなかった。これは, 試験

品に組み込まれた電子回路によるものと思われる。

3.8 連続負荷特性 一定の連続負荷を試験品の出力が終了するまでかけつづけた。試験環境は表 2 の③25°C, 10%RH とし, 負荷は定電流 100mA とした。結果を図 7 に示す。

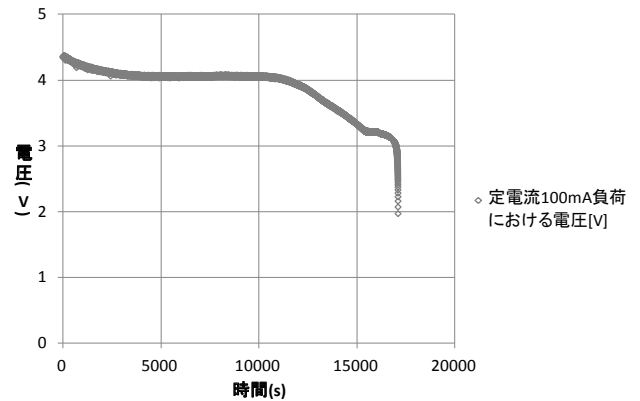


図 7. 定電流 100mA の連続負荷結果

4. モバイル燃料電池の出力模擬

4.1 機器構成 モバイル燃料電池の出力模擬は, エーディーシー製電圧/電流発生器 6244 を使用し, 電圧/電流発生器と PC を GPIB によって接続し, PC から National Instruments 製ソフトウェア LabVIEW 2010 によって制御プログラムを作成して行った。また, 負荷には菊水電子製電子負荷 PLZ164W を使用した。測定には, 横河メータ&インスツルメンツ製デジタルパワーメータ WT230 を使用した。電圧/電流発生器の制御は, 以下の手順で制御した。

- ① 出力模擬対象データの電圧及び電流値を表形式で読み込み
- ② 定格電圧を出力
- ③ 負荷の大きさによって電流値を制限
- ④ 出力電圧を電流値に応じた電圧値に制限
- ⑤ 上記③, ④を繰り返す

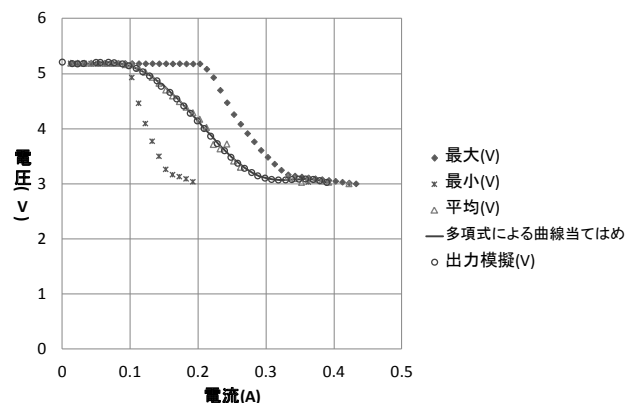


図 8. 多項式による曲線当てはめと出力模擬

4.2 出力模擬対象データ 3.4 繰返し I-V 特性測定の結果から、3V 以上の値についての最大値と最小値の平均を取り、この平均結果について 9 次の多項式による曲線当てはめを行った。平均結果と得られた多項式での誤差は、最大 4%であったが、最小で、0.1%、誤差平均は約 1%であった。

4.3 出力模擬 4.2 で得られた多項式による出力模擬対象データをもとに、電圧/電流発生器と電子負荷を使用して出力を模擬した。この結果を図 8 に示す。出力模擬対象データと模擬出力結果は良く一致しており、その誤差は最大でも 0.2%で、誤差平均は 0.02%であった。

5. 考察

図 2 の推定した等価回路のブロック図の各要素は典型的な燃料電池の簡易モデルとは若干異なり RC 並列回路が多いが、 R_s は電極・集電体抵抗であり、 $R_{1\sim 3}$ と $C_{1\sim 3}$ による並列回路はアノード及びカソードの反応抵抗と電気二重層容量と考えられる。

図 4 の I-V 特性は、温湿度に比例して容量が大きくなっている。一般的な水素-酸素燃料電池の最大エネルギー変換効率は作動温度 80°C前後と言われている。また、プロトンの移動のために電解質膜は適度に加湿されている必要がある。これらの理由により、温湿度の高い方が、出力が大きくなっているものと考えられる。表 2 における①や②と⑦の結果では、定格電圧値で流せる電流量が 2 倍程度異なり、使用する環境によって容量が大きく異なることがわかった。

図 5 の I-V 特性は、測定を繰り返す毎に容量が小さくなっている。これは、水素ガスの圧力低下や、電解質膜の水分量が少ないこと等が理由と考えられる。また、1 回目と 2 回目の容量が逆転しているのは、燃料カートリッジにおける水素の生成が水素発生剤の偏りなどの理由で最大限生成できていなかった、電解質膜での余分な水分による水素ガスの拡散阻害（フラッディング）等の原因が考えられる。

図 6 の立下り特性は、図 4 の I-V 特性と比べて、定電流負荷に対する電圧降下量が大きくなった。これは、スイープに比べ急激に負荷をかけたことにより電極表面での反応物質や生成物の濃度差に起因する濃度損失が理由であると考えられる。

図 7 の定電流連続負荷結果は、容量約 1.9Wh となった。定格にあるとおり、5.2V、1W 以上の出力で 90 分の容量とすると、約 190mA の連続負荷で 90 分出力可能であると思われるが、100mA の連続負荷で約 4V まで電圧が降下し、3 時間程度は出力が安定していた。これは、湿度が低かったことと、繰返し測定を行ったことによって試験品の劣化が理由であると考えられる。

図 8 の平均値についての多項式による曲線当てはめは、誤差平均を見る限りはある程度一致していると思われる。また、出力模擬結果の誤差平均は 0.1%未満と非常に小さい値となった。本研究では、曲線当てはめによる多項式から出力模擬対象データを作成したが、実際の測定結果を用い

ても、誤差の少ない出力模擬ができると思われる。

これらの測定は、全て同一の試験品を使用して行ったが、測定を重ねるたびに容量が徐々に小さくなっていった。燃料カートリッジの使用量は 11 個と少ないが、試験品の想定とは異なる負荷がかかっているため、燃料電池の劣化の進行が速くなっている可能性がある。

6. おわりに

市販のモバイル燃料電池についてその特定を測定し、直流電源を制御して、出力の模擬を行った。燃料電池は今後も様々な形で市場を拡大していくと思われるが、モバイル燃料電池の現在の主な使用方法は 2 次電池への充電であり、2 次電池との併用による運用が主目的である。今後はさらに開発が進み、様々なモバイル燃料電池で登場すると予想されるため、モバイル燃料電池の動向に注目しながら、本研究結果で得られた知見や技術を、中小企業への技術支援に役立てる。

(平成 24 年 5 月 18 日受付, 平成 24 年 7 月 17 日再受付)

文 献

-
- (1)板垣昌幸:「燃料電池におけるインピーダンス解析」, 表面技術, Vol.58, No.3 pp.153-156(2007)
 - (2)板垣昌幸:「電気化学インピーダンス法」, 丸善 pp.59(2008)