

三重大学大学院工学研究科 修士論文

電氣的等価モデルを用いた
燃料電池の模擬装置の構築に関する研究

平成 22 年度

三重大学大学院工学研究科 博士前期課程

電気電子工学専攻 エネルギーシステム研究室

植木 希依

目次

第一章 緒言	3
1.1. 本研究の背景と目的.....	3
1.2. 本論文の概要	4
第二章 燃料電池発電システム.....	5
2.1. 固体高分子形燃料電池.....	5
2.1.1. 燃料電池の分類.....	5
2.1.2. 固体高分子形燃料電池の特徴.....	7
2.1.3. 固体高分子形燃料電池の動作原理.....	8
2.1.4. 固体高分子形燃料電池の基本構成.....	9
2.2. 本研究に用いる燃料電池発電システム.....	11
第三章 燃料電池模擬装置の構築.....	12
3.1. 等価モデル構築の概要.....	12
3.2. 燃料電池の電気的特性の測定.....	14
3.2.1. 定電流負荷特性の測定方法及び測定結果.....	14
3.2.2. 周波数特性の測定方法及び測定結果.....	17
3.3. Model A の決定	20
3.3.1. 定電流負荷特性を模擬する数式の近似方法.....	20
3.3.2. モデルパラメータ算出法.....	22
3.4. Model B の決定	26
3.5. モデルの構築	34
第四章 提案する模擬装置の検証.....	36
4.1. 定電流負荷特性の検証.....	36
4.2. 提案モデル周波数特性の確認.....	38
4.3. スイッチング回路負荷における電圧応答の検証.....	41
4.4. 負荷ステップ変化における電圧応答の検証.....	49

4.5. 提案モデルの応用.....	52
第五章 結言	60
5.1. 研究の成果	60
5.2. 今後の課題	60
参考文献	61
論文目録	61
謝辞	62

第一章 緒言

1.1. 本研究の背景と目的

化石燃料の枯渇、大気汚染や地球温暖化が深刻化する中で、生活レベルを保ちながら“省エネルギー＝クリーンな環境”を実現するには、高効率化によりエネルギー・資源の消費速度を減少させることが最も現実的な手段である。燃料電池は、際立って低い汚染物質排出量を示し、電気エネルギーを効率的に生産することができる。また、燃料電池は、風力発電システムや太陽光発電システムのように風況や日射量といった自然環境に発電電力が依存しないこと、化学変化による発電方式であるため低騒音・低振動であること、廃熱を利用するコジェネレーションにより総合効率が 70%以上と高いことが特長である。そして現在、燃料電池は、電気化学的エネルギーを電気エネルギーに変換するデバイスとして、世界中で一般的になりつつある。

中でも、固体高分子形燃料電池は、イオン交換膜を挟んで正極に酸素を負極に水素を供給することにより発電する方式で、低温動作と小型化が可能であるため、携帯機器や電気自動車などのシステムへの応用が期待されている。燃料電池を用いたシステムの実際の利用方法は、直流電源として直接用いる場合や、出力に数十 kHz の高周波数でスイッチングを行う電力変換器を接続する場合など様々である。特に、燃料電池を定電圧源として使用する場合、化学変化を利用する燃料電池は負荷の変化に対して高速な応答が不可能であるため、電力変換器を接続する必要がある。しかし、既存のシステムの電源としてそのまま燃料電池を置き換えることはできず、燃料電池の出力に応じて改めてシステムを設計・開発する必要がある。

燃料電池の出力に応じてシステムを設計する必要性はあるが、現在の燃料電池の製造コストは 70 万円/kW と高価であり、システムの研究・開発の際にこのような高価な燃料電池を用いることが実用化に対する大きな妨げとなっている。さらに、燃料電池は劣化が速いことや、セル温度、燃料ガスの圧力や湿度によって出力が変化してしまうことから、燃料電池を用いたシステムを研究・開発する際に、まったく同じ出力が得られる燃料電池を揃えることが現実的に不可能であり、システムの評価・比較実験が非常に困難となる。つまり、燃料電池は寿命が短く、環境の変化による化学反応の状態の変化に左右されやすいため、実際の燃料電池を用いた電源システムを低コストで開発することが難しい。そこで、燃料電池を用いるシステムの研究・開発において、比較実験を容易に行うため、設計・開発コストを安価に実現するために燃料電池の模擬装置が必要となる。

模擬装置を構築するためには燃料電池の電気的特性を表現する等価モデルが必要であるが、現在提案されているモデルは、特定の周波数範囲でモデルが決定されている^[1]、もしくは

は、定常状態のみを表現している^[2] など、スイッチング素子を用いた電力変換器などの広い周波数帯域に対応する模擬装置には不十分である。

そこで、本研究の目的は、広い周波数領域で有効な燃料電池の模擬装置を構築することである。

1.2. 本論文の概要

本論文は、以下のように構成される。

第二章では、固体高分子形燃料電池の特徴、動作原理、基本構成について説明し、本研究に用いる燃料電池発電システムの概要を述べる。

第三章では、模擬装置の構築の手順を述べ、構築に必要な燃料電池の電気的特性の測定方法及び測定結果を示す。そして、得られた燃料電池の特性を用いて、燃料電池の等価モデルの構築方法を具体的に説明する。

第四章では、第三章で提案した方法で構築した燃料電池の模擬装置が想定通りの特性を示すことを確認した後、実際に負荷に高周波数スイッチングを伴う電力変換器を接続した場合の出力を、実機実験とシミュレーションの結果を比較することによって検証する。

第二章 燃料電池発電システム

2.1. 固体高分子形燃料電池

2.1.1. 燃料電池の分類

燃料電池は、一般的に酸素と改質ガスから、電気化学反応によって直接電力と熱を取り出す方式において共通の原理であり、構成単位は電解質を 2 枚の電極でサンドイッチした単電池（セル）である。使用する電解質の種類により、表 2.1 のように 4 つに分類され、それぞれ特徴や用途が異なる。

固体高分子形燃料電池（PEFC）は、作動温度が低く装置を小型化できることが特長である。起動に必要な時間が短く、頻繁に運転／停止が行われる用途に適している。ただし、気温が氷点下となる寒冷地では運転停止後に生成した水が燃料電池内部で凍結するので、低温時の始動性が課題である。廃熱温度が 90℃であるとする、この廃熱を家庭用給湯や暖房として使うことができるため、家庭定置用コジェネレーションとしても注目されている。最適な条件に制御できれば総合効率が 70～80%となる。

リン酸形燃料電池（PAFC）は電力事業用やオフィスビル用など、比較的大容量の用途に開発され、種々の燃料電池の中で最も研究が進み、性能的にもほぼ実用化段階に達した。電池廃熱を利用できるホテル、レストランや工場などで 50～200kW クラスのフィールドを経て、現在では、信頼性を求められる病院やコンピュータセンターの電源として導入されている。燃料極側と空気極側を分離できる電解質膜ではないため、小型化・高効率化が難しい。

熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）は火力発電代替の高効率発電として期待され、MW クラスが試験中である。着実に性能向上はしているが、熔融炭酸塩に耐えられる材料が鍵となり低コスト化、信頼性の確保等の課題がある。

固体酸化物形燃料電池（SOFC）はもっとも高い総合変換効率が期待できる。得られる廃熱の温度も高く、タービン発電機などと組み合わせたコジェネレーションシステムの導入でさらに高い発電効率が期待できる。現在、加圧 SOFC（200kW）＋ガスタービン（50kW）複合発電の試験が行われている。一方で、耐久性を上げるために高価な材料を使う必要があり、運転時に温度が上がるまで時間がかかることから運転/停止の少ない長時間運転に適している。

本研究では、この中でも常温での利用が可能であり、電気自動車用の軽量・高性能な駆動電源や家庭定置用コジェネレーション、モバイル機器等の小型機器の電源としての利用が期待されている PEFC を用いる。

表 2.1 燃料電池の分類

	固体高分子形 (PEFC)	リン酸形 (PAFC)	溶融炭酸塩形 (MCFC)	固体酸化物形 (SOFC)
電解質	高分子イオン伝導性膜 (固体)	リン酸水溶液 (液体)	溶融炭酸塩 (液体)	イオン伝導性セラミックス (固体)
作動温度	常温～100℃	150～200℃	650～700℃	700～1000℃
発電効率	30～40%	35～45%	45～65%	45～65%
特徴	低温作動／移動用 高エネルギー密度 起動停止が容易	実用化段階	高発電効率 内部改質が可能	高発電効率 内部改質が可能 高温廃熱の利用
用途	電気自動車 家庭用 携帯機器	オンサイト発電	大規模発電 オンサイト発電	大規模発電 分散設置型発電

2.1.2. 固体高分子形燃料電池の特徴

燃料電池共通の特徴と PEFC の特徴を以下にまとめる。

[燃料電池共通の特徴]

- 燃料と酸化剤を供給するかぎり発電可能であるため充電が不要である。
- 環境汚染物質（NO_x, SO_x, 粉塵）放出量が極めて少ない。（NO_x, SO_xは本体からは排出されず、燃料改質器でわずかに発生）
- 発電規模や負荷率にあまり依存せず発電効率が高い。
- 電気と熱を同時に利用するコジェネレーションシステムが容易に構築できる。
- 本体には機械的可動部分がないため低騒音である。
- 多様な燃料を利用できる。（特に高温作動型）
- モジュール化できるため建設・設置工期が短い。

これらの特徴に加え、PEFC は高分子電解質膜を用い、運転温度が低いことから、次のような特徴を併せもつ。

[PEFC の特徴]

- 小型軽量で高出力密度である。
- 電解質が固体であり、電解液の逸散・保持などの問題がない。
- （空気のみを加圧するような）差圧運転が容易である。
- 保守が容易である。
- 運転温度が低いため起動時間が短い。
- 安価な構成材料が使用できる可能性がある。

これに対する問題点としては、本体価格が高いこと、寿命が短いことが挙げられる。設置価格は、風力発電用風車が約 70 万円/kW であるのに対して燃料電池は約 300 万円/kW であり、寿命は風力発電用風車が 15 年以上であるのに対し燃料電池スタックは長いもので 4 年程度である。また、負荷が変動することにより出力電圧が変動してしまうことや、燃料電池の主な燃料である水素は簡単に入手できる燃料ではないことも問題点である。

2.1.3. 固体高分子形燃料電池の動作原理

図 2.1 に PEFC の発電原理を模式的に示す。プロトン導電性電解質膜 (PEM) を 2 つの多孔質電極で挟んだ形となっている。一般に、燃料には水素、酸化剤に空気中の酸素を供給して発電する。

燃料電池は、水の電気分解の逆の反応である、水素と酸素から水を生成する過程において発電している。その反応の化学反応式を式(2.1)～(2.3)に示す。

まず、アノード（燃料極）において水素分子を水素イオンと電子に分解し、水素イオンは電解質を通り、電子はアノードから負荷を通りカソード（空気極）へ流れる。そして、カソードでは水素イオンと電子と酸素分子が結合して水を生成する。

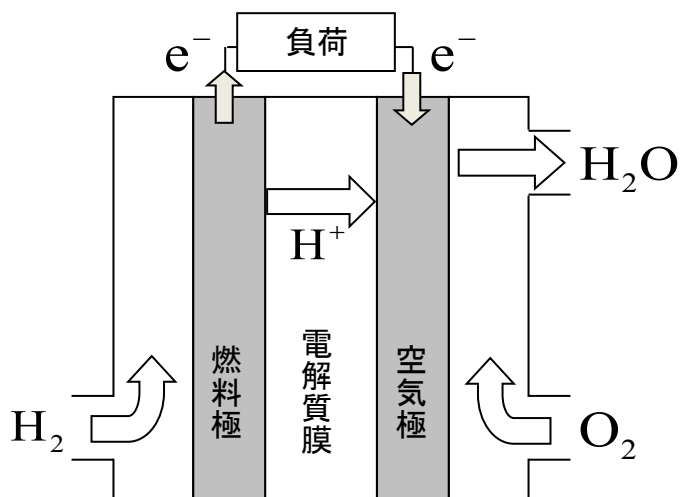
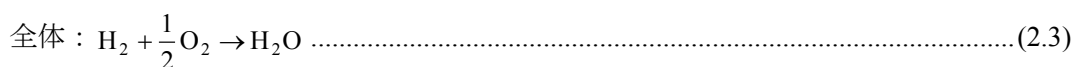
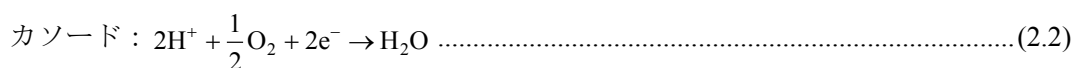
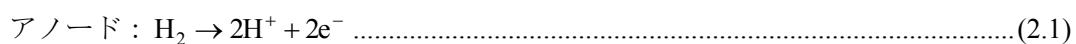


図 2.1 PEFC の模式図

2.1.4. 固体高分子形燃料電池の基本構成

図 2.2 及び図 2.3 に示すように、セルは、薄い電解質を燃料極及び空気極からなる 1 対の電極で挟みつけた膜電極接合体 (MEA) とセパレータによって構成される。燃料極は燃料の酸化反応を担い、空気極は酸素の還元反応を担う。電解質はイオンの通路であり、電子は通過することができないため燃料極から空気極へ外部回路を通して流れる。セパレータは水素や酸素を供給するための流路確保や水素と酸素の混合防止、隣り合うセル間の電氣的接続等の役割を担う。

セルの理論的な起電力は約 1.2V であるが、実際に得られる電圧は約 0.7V と基本的に低電圧の直流電源であるため、実用的な電圧を得るためには多くのセルを直列に接続する必要がある。このような目的で構築されたセルの集合体をスタックと呼ぶ。

PEFC の電解質には高分子のイオン交換膜を利用する。一般にはフッ素系イオン交換膜が使われており、フッ素系イオン交換膜は含水状態で初めて PEFC に適したプロトン伝導性を発現する。発電時にはアノード (燃料極) からカソード (空気極) に向かってプロトンとともに水は移動し、且つカソードでは水が生成するため、アノードは乾き気味に、カソードは水が飽和気味になる。膜や電極層の水分管理を適切に行うため、セルの構造にも工夫がなされており、外部加湿、内部加湿、自己加湿といった方法がある^{[2][3]}。

本研究で用いる燃料電池発電システムは自己加湿という方法で加湿している。自己加湿とは、触媒を膜中に分散させて、両極からクロスリークしてくる水素と酸素を触媒上で反応させて生成する水により加湿する、もしくは、水との親和性の高い高比表面積の無機材料を膜中に分散させる方法である。

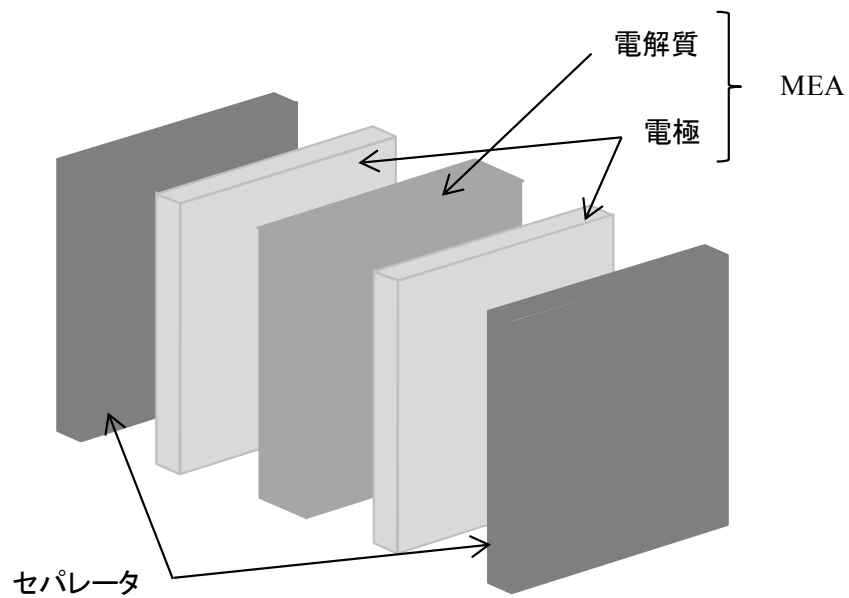


図 2.2 燃料電池セルの構造 (1)

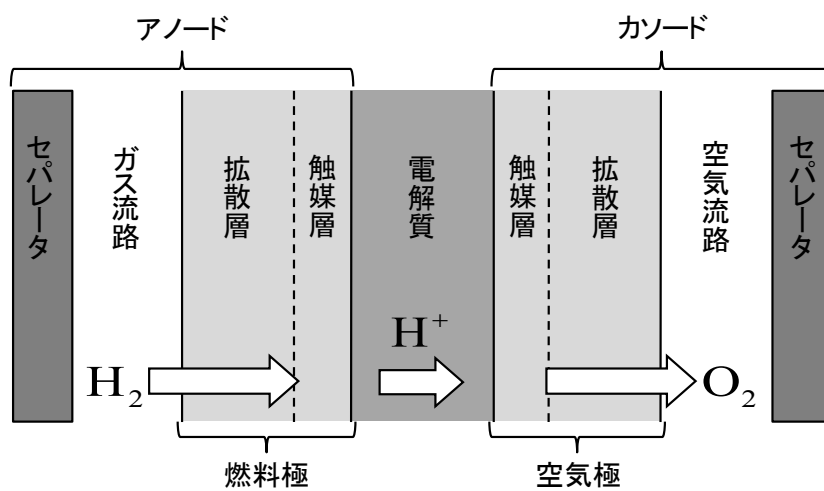


図 2.3 燃料電池セルの構造 (2)

2.2. 本研究に用いる燃料電池発電システム

本研究に用いる PEFC の仕様を表 2.2 に示す。また、実験装置の模式図を図 2.4 に示す。

本実験装置は、水素吸蔵合金ポンプより純水素を 0.07MPa の安定した圧力で燃料電池に供給され、また、酸素は大気より 10 個のファンを用いて大気圧で燃料電池に供給される。発電の際に生成された水のほとんどは水蒸気として空気中に排出される、もしくは、電解質膜の保湿に使われる。しかし、電極付近に残るものもあり、生成された水が排出されずに燃料電池内部に残ると、電極付近に残った水が電極を覆ってしまうため化学反応が起こらなくなり、出力が低下するフラッディング現象が引き起こされる。これを防ぐために電極表面の水を掃き出す操作を、電磁制御弁により定期的に行う。電磁制御弁は弁を開放(ページ)することで水素の圧力により電極の水が掃き出される仕組みとなっている。さらに、燃料電池は、過電流保護のため、保護回路を通して負荷に接続されている。

表 2.2 供試機の仕様

製造元	DAIDO METAL
種類	固体高分子形
定格出力	12V / 5A
セル面積	41.25cm ² (7.5cm×5.6cm)
セル数	20枚

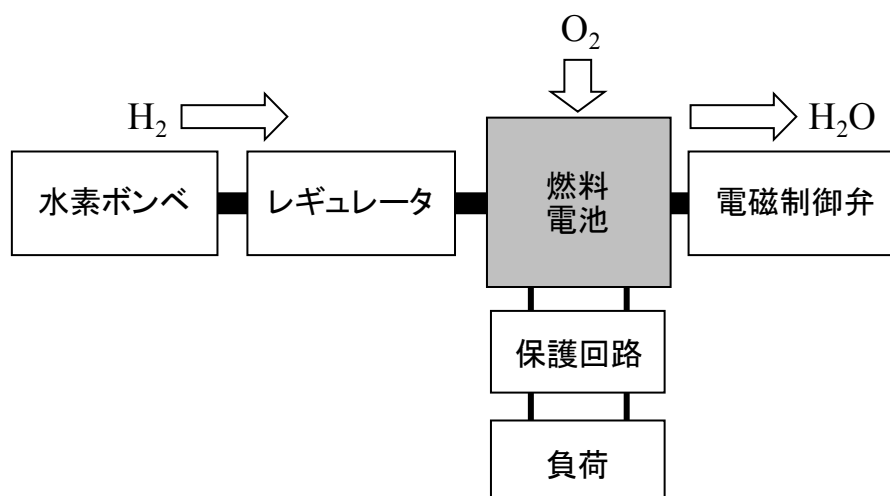


図 2.4 実験装置の模式図

第三章 燃料電池模擬装置の構築

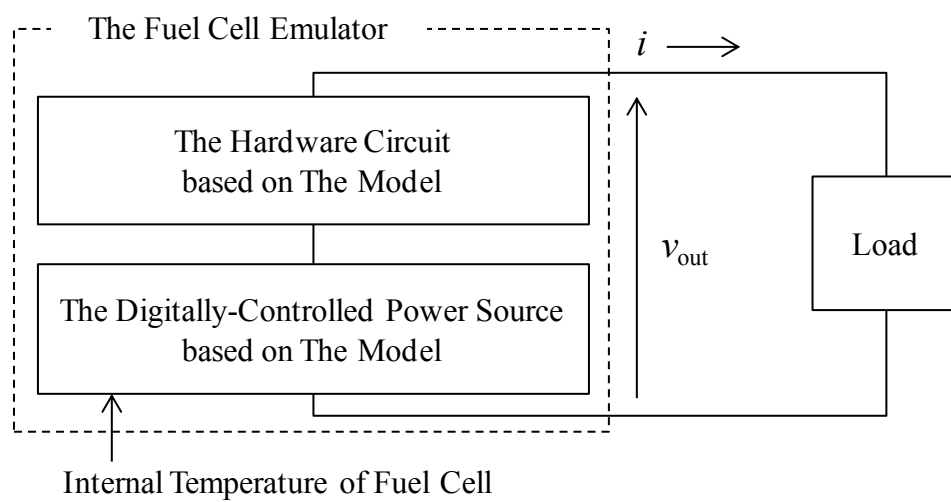
3.1. 等価モデル構築の概要

燃料電池は定常状態で非線形の特性を有する。そのため、ソフトウェアで模擬することを考えるが、ソフトウェアで制御された電源のみでは広い周波数帯域に対応するのが困難である。そこで、本研究では燃料電池の模擬装置の構成を図 3.1(a)のように提案する。

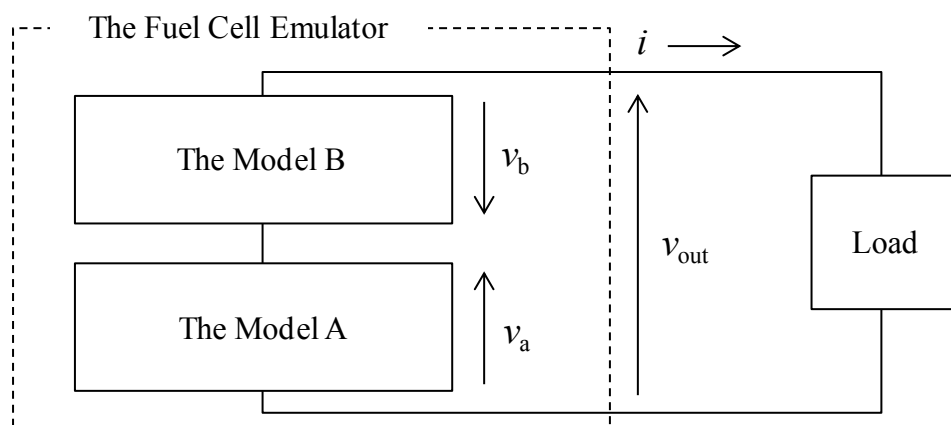
先任者の提案したモデルは、電流をパラメータとする非線形抵抗が含まれており、これを広い周波数帯域で実現するのは困難であった^[4]。これに対し、本論文では、燃料電池の起電力を温度関数としてソフトウェアで模擬し、インピーダンス成分を線形であると近似してハードウェアで模擬する。

それぞれのモデルは燃料電池の電気的特性を基に構成される。定電流負荷特性に基づいて構築されたモデルは **Model A**（数式）と呼ばれ、ある動作点における直流電圧成分を表現している。また、周波数特性に基づいて構築されたモデルは **Model B** と呼ばれ、電流-電圧特性のインピーダンス成分を表現している。

ここで、各モデルの電圧及び電流の方向は図 3.1(b)のように定義する。



(a)



(b)

図 3.1 燃料電池模擬装置の構成

3.2. 燃料電池の電氣的特性の測定

燃料電池の電氣的特性として、定負荷時の出力特性（定電流負荷特性）と負荷変動時の出力特性（周波数特性）を測定する。

3.2.1. 定電流負荷特性の測定方法及び測定結果

Model A の構築のために、燃料電池に定電流負荷を直列に接続し、定常状態における出力電圧 V 及び出力電流 I 、内部温度 T を測定する。ここで、負荷を接続してから 20～30 分経過し、端子電圧が一定且つ内部温度が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲でほぼ一定の状態を定常状態と判断する。

測定回路の模式図を図 3.2 に示す。負荷には ARRAY 社製直流電子負荷装置を接続し、定電流負荷モードもしくは定抵抗負荷モードで用いる。また、必ず重負荷から軽負荷に向かって行う。

本実験では、図 3.3 に示す実験環境の下で、出力電圧は出力端子間電圧を、出力電流は燃料電池の＋端子付近の電流を、内部温度は熱電対を用いて水素入力側のセル温度を測定している。燃料電池の外側から熱電対の先端までの長さは約 1.5cm である。

測定結果を図 3.4 に示す。図の横軸は電流密度とし、出力電流をセル面積で除算する。測定は測定日を変更して計 5 回行った。各測定日の大気圧、周囲温度、湿度を表 3.1 に示す。表 3.1 より、各測定日の大気圧、周囲温度は、それぞれの平均値より $\pm 0.6\%$ 、 $\pm 4.3\%$ の範囲にあり、ほぼ同条件とみなす。湿度は平均値より $\pm 34\%$ の範囲にあるが、前節で述べたように、反応により水が生成されること、電解質膜が高湿度状態にあることなど、燃料電池内部の水管理はシステムが行っているため、外部の湿度変化は本システムにほとんど影響しないと判断する。

表 3.1 各測定日における測定条件

	大気圧[hPa]	周囲温度[$^{\circ}\text{C}$]	湿度[%]
測定日 1	1014	23.2	45
測定日 2	1013	22.5	25
測定日 3	1022	22.7	27
測定日 4	1011	24.5	40
測定日 5	1021	24.4	31

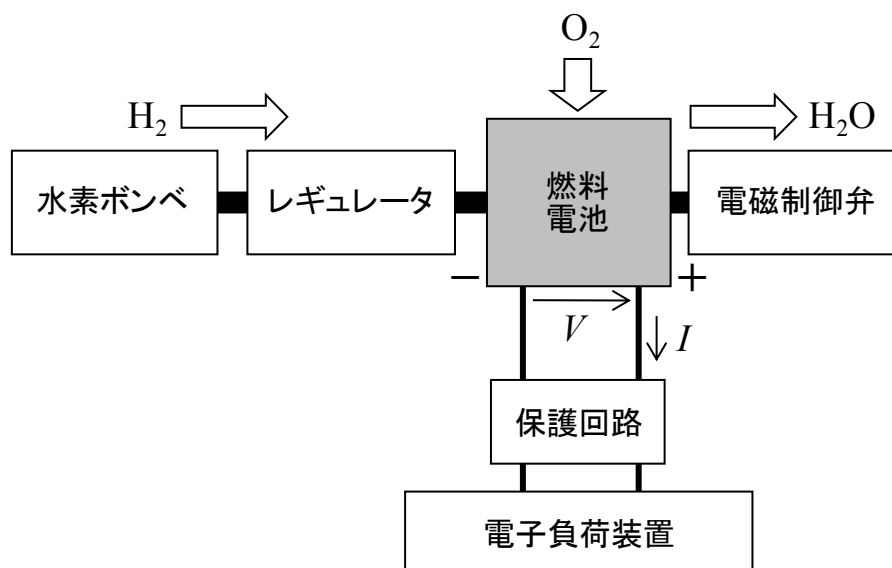


図 3.2 定電流負荷特性の測定回路の模式図

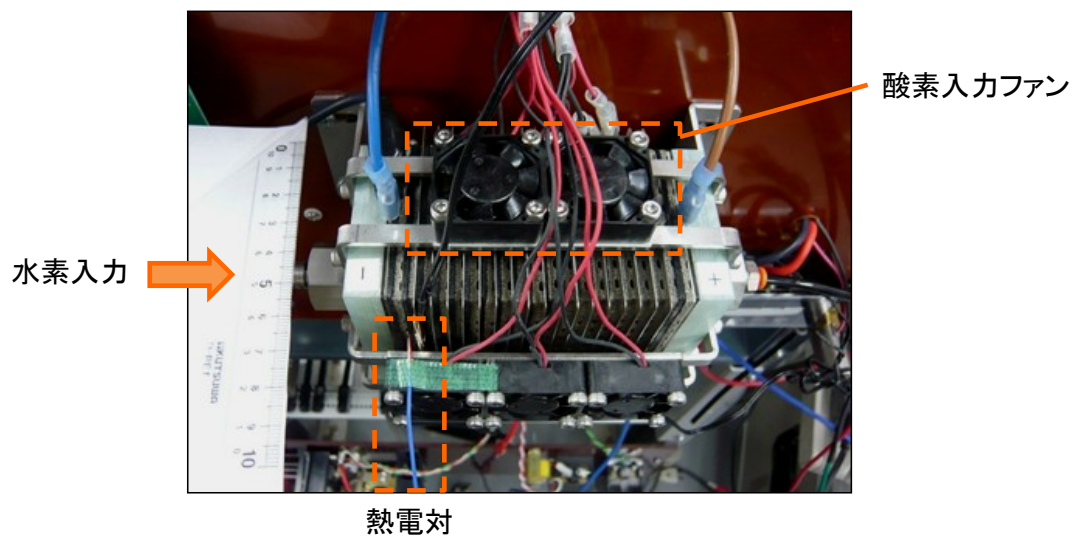
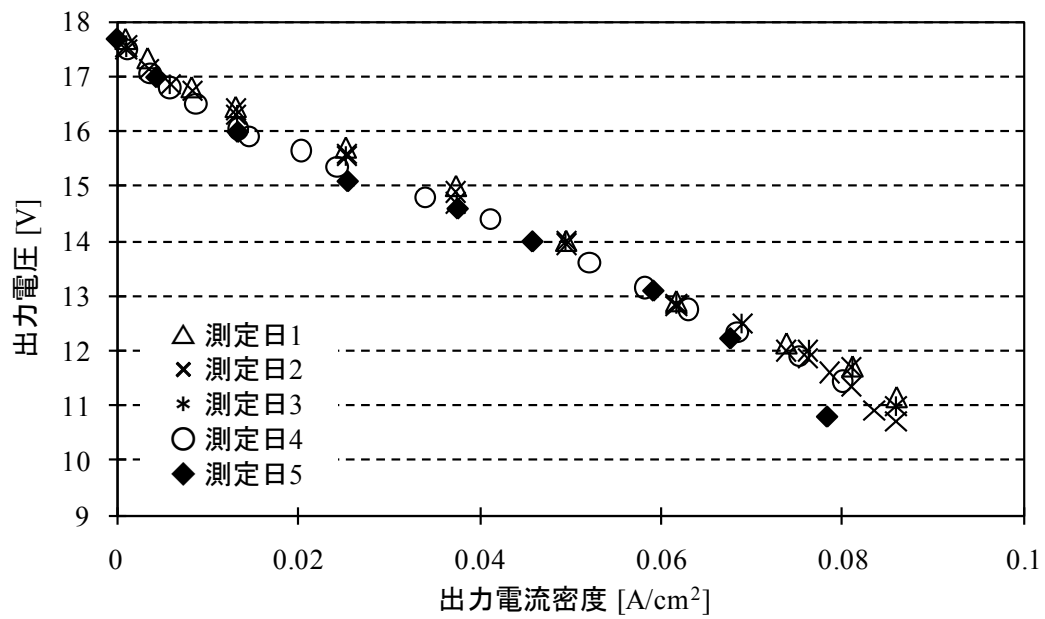
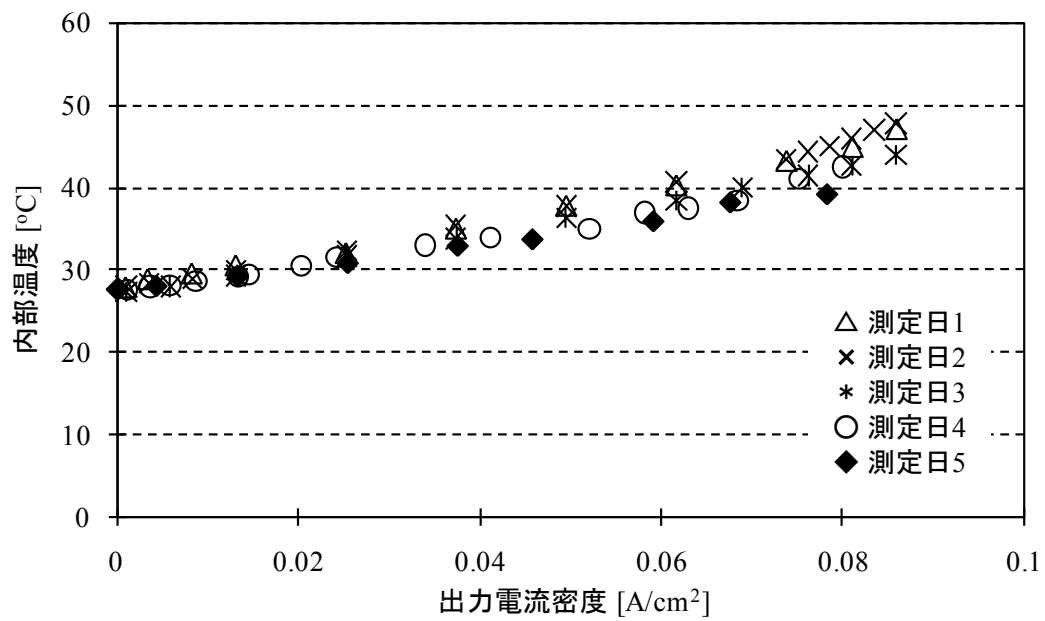


図 3.3 実験環境



(a) 燃料電池出力電流対出力電圧



(b) 燃料電池出力電流対内部温度

図 3.4 定電流負荷特性の測定結果

3.2.2. 周波数特性の測定方法及び測定結果

Model B の構築のために、周波数特性を測定する。燃料電池の出力端子の周波数特性は、その内部インピーダンスを表わす。燃料電池の負荷が変化したときのインピーダンスと位相を、図 3.5 に示す測定回路を用いて測定する。

FET は、ピンチオフ電圧以上の領域においてゲートソース間電圧とドレイン電流の間に線形の関係性を有する。この特性を利用して、図 3.5 の FET のゲートソース間にピンチオフ電圧以上のオフセットを含ませた正弦波状の電圧 v_1 を与えることで抵抗 R に流れる電流が正弦波状に制御され、実質的に燃料電池の出力電流 i を制御することができる。

このように、燃料電池の i を直流オフセットの伴う正弦波状（または方形波状）に制御したときの、定常状態における出力端子電圧 v_{out} を測定する。なお、負荷を接続してから 20 ～30 分経過し、端子電圧が一定且つ内部温度が $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲でほぼ一定の状態を定常状態と判断する。図 3.6 に示すように、正弦波（または方形波の基本波）の直流オフセットと peak-to-peak をそれぞれ I_{ofs} と I_{p-p} とする。様々な I_{ofs} と I_{p-p} 、周波数において v_{out} を測定した。

3.3.節で説明するが、 v_a は i に依存しない電圧である。そのため、 i の変動に起因する電圧の変動成分はすべて v_b として表現する。逆に、 v_b は燃料電池の内部温度 T に依存しない電圧である。そのため、実験で得られる波形をそのまま利用することは出来ず、 T に依存する成分を除く必要がある。そのため、 $v_a - v_{out}$ より v_b を求める。そして、 v_b と燃料電池の入力電流 i のフェーザ表示をそれぞれ、 \dot{V} と \dot{I} とし、インピーダンス Z を以下のように算出する。ここで、高周波数において i の変化に対する T の変化はほとんどないため v_a は一定電圧となる。また、低周波数において i の変化に対する T の変化が顕著な場合は、 v_a は正弦波となる。

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Model B のインピーダンスの大きさ $|Z|$ は、観測した v_b と i を FFT 解析し、それぞれの基本波成分の振幅により算出する。また、 v_b と i の位相差は、MATLAB 上で位相を算出するコマンドを利用し $\pm 180\text{deg}$ の範囲で導出する。

以上で述べた方法によって得られた周波数特性を図 3.7 に示す。さらに、各測定条件を表 3.2 に示す。インピーダンス成分を線形であると近似するために、 I_{ofs} 、 I_{p-p} は定電流負荷特性の線形領域（本実験では 0.5 ～3A の範囲）で決定する。また、フラグディング現象抑制のためのパージバルブ開放の動作を 3 分に 1 回の間隔で行っており、これによる波形ひずみの影響を考慮するため、また、実験の簡単化のために、 i を正弦波状に制御するのみではなく、方形波状に制御して測定した。

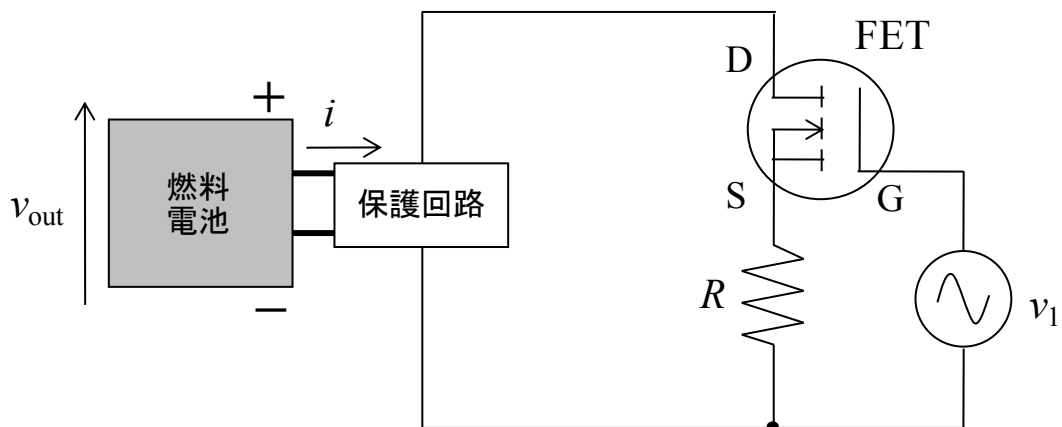


図 3.5 周波数特性の測定回路

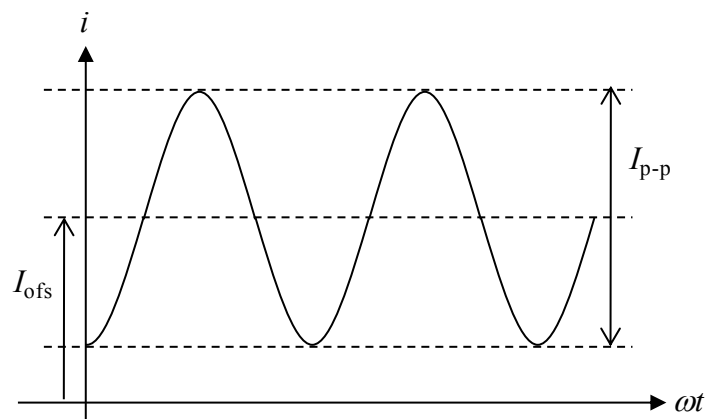
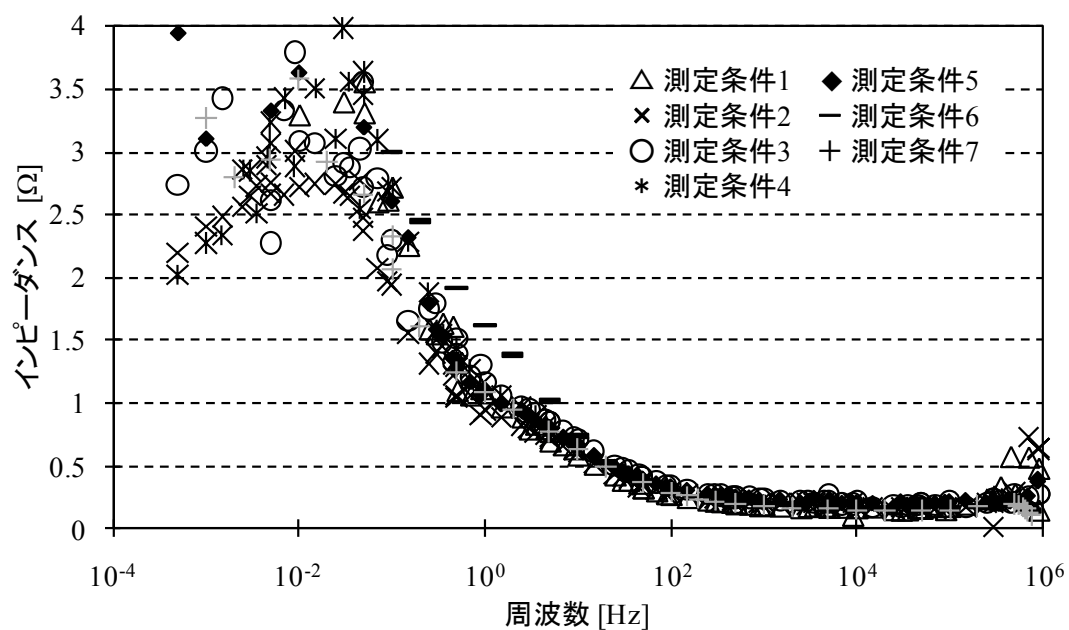


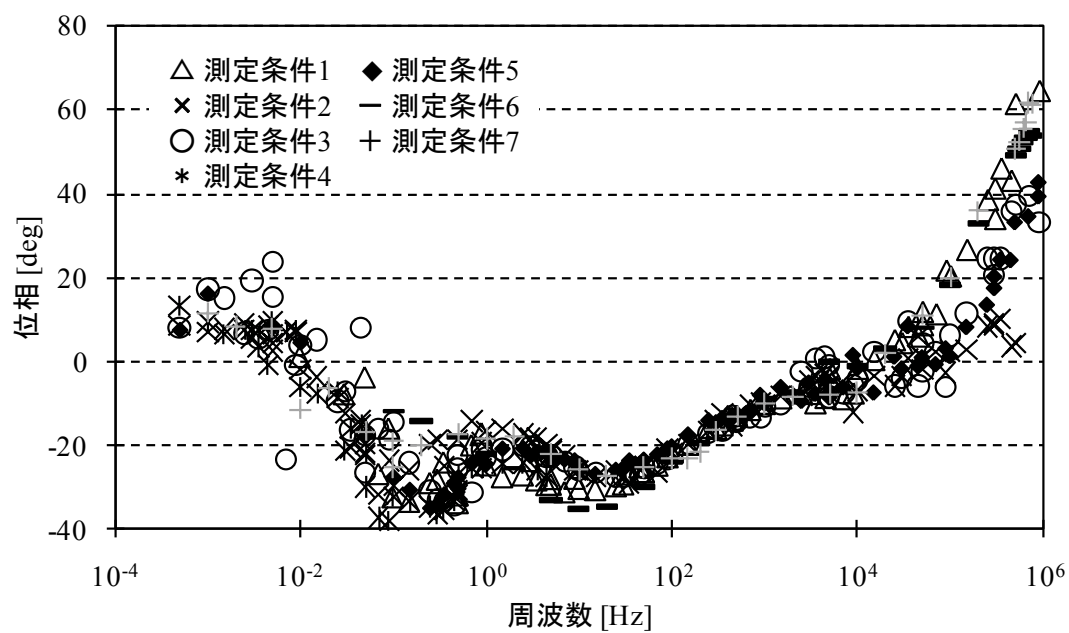
図 3.6 出力電流波形の概略図

表 3.2 測定条件

	I_{ofs} [A]	$I_{\text{p-p}}$ [A]	波形
測定条件 1	2.0	0.4 (基本波成分)	方形波
測定条件 2	2.0	0.4 (基本波成分)	方形波
測定条件 3	2.0	0.2 (基本波成分)	方形波
測定条件 4	2.0	0.2 (基本波成分)	方形波
測定条件 5	2.0	0.2	正弦波
測定条件 6	1.0	0.4	正弦波
測定条件 7	2.0	0.4	正弦波



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 3.7 等価モデル構築に用いる周波数特性

3.3. Model A の決定

3.3.1. 定電流負荷特性を模擬する数式の近似方法

一般的な燃料電池の定電流負荷特性を図 3.8 に示す。燃料電池の定電流特性は出力電流が高くなるにつれて出力電圧が低下する特性を有する。この電圧降下は燃料電池の内部損失であり、電気化学の分野において過電圧と呼ばれる。

そして、定常状態における燃料電池の出力電圧は(3.2)式のように示される^[2]。

$$\begin{aligned}
 V &= E - \Delta V_{\text{ohm}} - \Delta V_{\text{act}} - \Delta V_{\text{trans}} \\
 &= E - ri - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) - \left\{ -B \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \right\} \dots\dots\dots (3.2)
 \end{aligned}$$

ここで、 V は出力電圧[V]、 A は Tafel 勾配[V]、 E は可逆開回路電圧の理論値[V]、 B は定数[V]、 r は比面積抵抗[Ωcm²]、 i は出力電流密度[A/cm²]、 i_0 は交換電流密度[A/cm²]、 i_n は内部電流密度[A/cm²]、 i_l は限界電流密度[A/cm²]である。

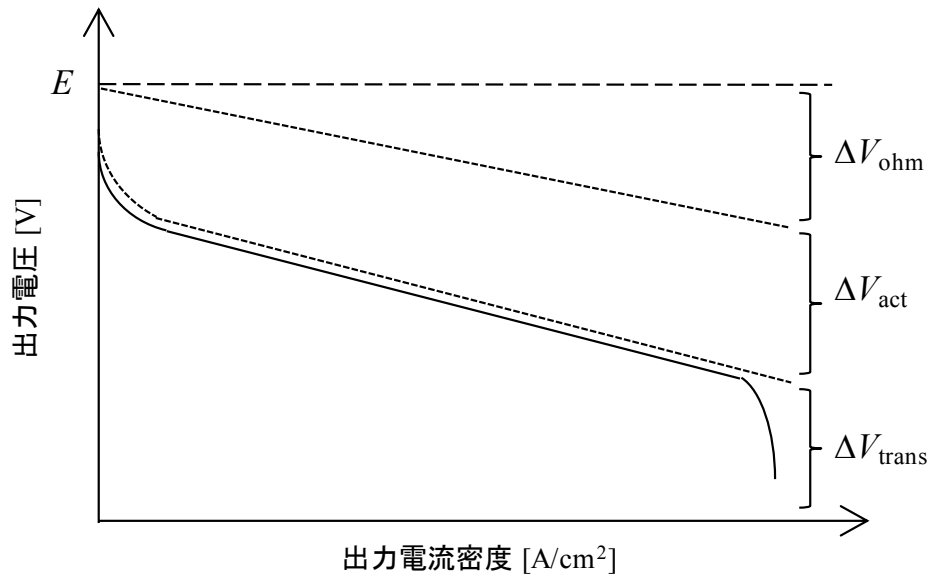


図 3.8 燃料電池の定電流負荷特性

ΔV_{ohm} は抵抗過電圧と呼ばれ、電解質を通してのイオンの流れに対する抵抗や、電極や各種の接続部の材料を通過する電子の流れに対する直接的な抵抗に起因する損失である。電圧降下の大きさは単純に電流に比例し、この抵抗を $r [\Omega\text{cm}^2]$ とすると、出力電流 $i [\text{A}/\text{cm}^2]$ を用いて、電圧降下は (3.3) 式のように表わすことができる。

$$\Delta V_{ohm} = ri \dots\dots\dots (3.3)$$

ΔV_{act} は活性化過電圧と呼ばれ、電極表面で起きる化学反応により生じるエネルギー損失である。生じた電圧の一部が、電極へあるいは電極から電子が移動する化学反応を進めるために失われる。反応速度は温度が高ければ速くなる。つまり、反応量は温度に依存するため、 ΔV_{act} は温度に依存する項である。

ΔV_{trans} は濃度過電圧と呼ばれ、燃料を消費するときに、電極表面で反応物質の濃度が変化するために、電極付近の燃料ガスの圧力が低下し生じる損失であり、図 3.8 において電圧低下の影響が大きい領域を表現する項である。燃料の濃度は電圧に影響するが、燃料電池を利用する際この領域は利用しないことに加えて、化学反応に必要な濃度の燃料を電極表面に十分に輸送できるようにシステムを改良することで ΔV_{trans} による損失は改善できる。そのため、燃料電池のモデル構築の際に考慮する必要はない。そこで、モデル構築の際には、(3.2) 式を以下のように改める。

$$V = E - ri - \Delta V_{act} \dots\dots\dots (3.4)$$

3.3.2. モデルパラメータ算出法

実験結果を基に(3.4)式の各パラメータを決定する。

第1項の E は損失なしの可逆開回路電圧であり、(3.5)式のように定義されている。

$$E = -\frac{\Delta g_f}{2F} \dots\dots\dots (3.5)$$

ここで、 Δg_f はギブスの自由エネルギー[kJ/mol](燃料電池によって生成される水の状態によって決まり、25℃の液体で-237.2kJ/mol)、 F はファラデー定数 964.95C(アボガドロ数 $N_A \times$ 電気素量 e C)である。以上のパラメータ値を用いると、1セル当たりの開回路電圧の理論値は約 1.2V と導出され、本供試機で用いる燃料電池のセル数は 20 枚であるため、約 24V と導出できる。

本来 E は温度依存性を有するが、モデル構築の簡単化のため、以下で述べる温度関数を用いることにより、本論文では 25℃で算出される値である 24V を用いる。

第2項の r は定電流負荷特性において線形とみなすことのできる領域の勾配に相当する。本研究では図 3.4 の出力電流 0.012～0.072A/cm² (0.5～3.0A) の領域において各測定日ごとに線形近似し、その傾きの平均値を求める。今回は $r = 70.1\Omega \text{ cm}^2$ と算出される。

第3項の ΔV_{act} は、(3.6) 式のように表される。

$$\Delta V_{\text{act}} = E - V - ri = A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) \dots\dots\dots (3.6)$$

(3.6)式の各パラメータ (A , i_n , i_0) を求める場合、Tafel 則を用いる。Tafel 則は、電荷移動律速条件下で成立する電位と電流密度の関係を表し、反応の性質を示す。(3.7)式は Tafel 式と呼ばれる。

$$\eta = a + b \ln(i) \dots\dots\dots (3.7)$$

ここで、モル定数 R 、温度 T_0 、電荷移動係数 α 、電子数 n 、ファラデー定数 F を用いて、 $a = (RT_0/\alpha nF) \ln i_0$ 、 $b = (RT_0/\alpha nF)$ となる。 i は電流密度 [mA/cm²]である。

以下に、Tafel 則を用いて、(3.6)式のパラメータを決定する方法を述べる。

図 3.8 に示すように、 $i=0$ 付近の軽負荷領域以外では、 ΔV_{act} の変化は小さい。この ΔV_{act} の変化の小さい領域（線形領域）において、一般的に i_n は i に比べて十分に小さいので、 ΔV_{act} は(3.8)式のように変形できる。

$$\Delta V_{\text{act}} = A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \dots\dots\dots (3.8)$$

さらに、(3.4)及び(3.8)式より(3.9)式のような関係が得られる。

$$\Delta V_{\text{act}} = E - V - ri = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \dots\dots\dots (3.9)$$

(3.9)式を用いて ΔV_{act} と $\ln(i)$ の関係を導く。 ΔV_{act} と $\ln(i)$ の関係を図 3.9 に示す。ただし、横軸を出力電流密度 [mA/cm^2] の自然対数とする。一般的にこのグラフを Tafel 曲線と呼ぶ。ここで、 E 及び r は前述で決定した値を用い、 V 及び i は定電流負荷特性の測定結果を用いる。この Tafel 曲線の直線部分の傾きは Tafel 勾配と呼ばれ、 A に相当する。

i_0 は、Tafel 曲線の直線部分の近似関数より導出する。(3.9)式を(3.10)式のように変形し、 $\Delta V_{\text{act}}=0$ となる点より i_0 が導出される。

$$\Delta V_{\text{act}} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) = A \ln(i) - A \ln(i_0) \dots\dots\dots (3.10)$$

i_n を決定する。 i_n は、理想的には考慮されない電解質を通過するイオン以外の電子の流れであり、 $i=0$ における出力電圧を $V_{i=0}$ としたとき、式(3.6)に $i=0$ を代入して得られた(3.11)式より求めることができる。

$$A \ln \left(\frac{i_n}{i_0} \right) = E - V_{i=0} \dots\dots\dots (3.11)$$

ここで、 A 、 i_0 及び E は前述で決定した値を用いる。 $V_{i=0}$ は、定電流負荷特性において、負荷開放時の出力電圧測定値を用いる。

実際に図 3.4 測定日 1 の測定値を用いて、図 3.10 のように Tafel プロットを作成した。図 3.10 では近似直線を描くことができず、 A 及び i_0 を導出できないことがわかる。これが直線の関係になれば、Tafel 則にしたがってパラメータを決定することができるが、実験結果は必ずしも線形関係にはならない。Tafel 則は温度一定条件の下で測定した場合についてのみ成立する関係であり、本実験環境では温度一定条件の下で測定することが出来ず、燃料電池の内部温度は各測定点で異なっていることが原因であると考えられる。

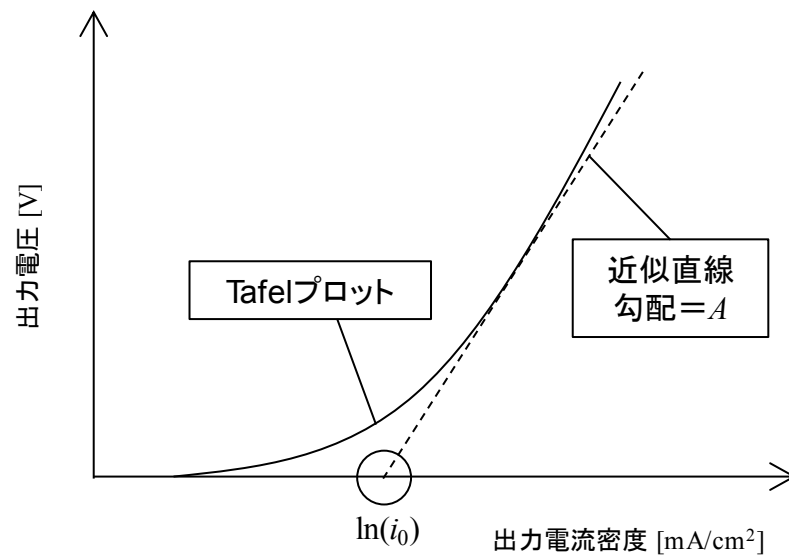


図 3.9 Tafel プロット

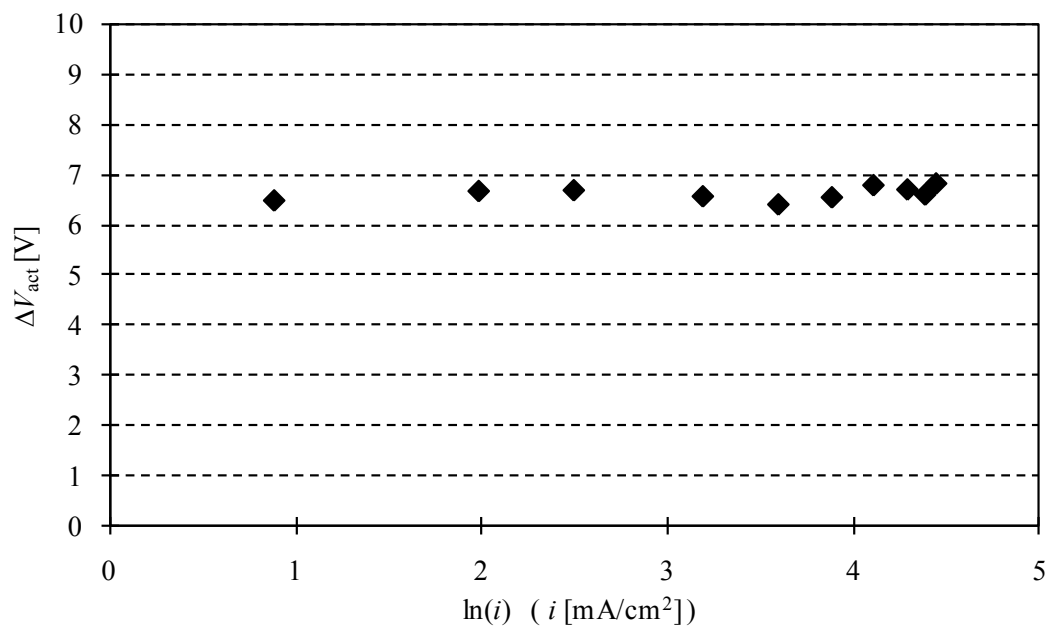


図 3.10 Tafel プロット (測定日 1 の実験結果を用いた場合)

燃料電池の出力電圧は動作時の温度に依存し、その温度依存性は主に可逆開回路電圧 E や活性化過電圧 ΔV_{act} にある。しかし、前述のように、単純に Tafel 則に従って ΔV_{act} を決定できない。そこで、モデル構築の簡単化のために、燃料電池の出力の変化を全て温度依存による損失と仮定し、 E の決定時に模擬できなかった E の温度依存成分及び ΔV_{act} 、その他の温度依存による成分をあわせて新たに ΔV と定義する。そして、これを温度関数とする。

$\Delta V(=V-E-ri)$ と燃料電池の内部温度 T [$^{\circ}\text{C}$] の関係を図 3.11 に示す。図 3.11 を基に、3 次式として ΔV を (3.12) 式のように近似した。低電流負荷特性の線形領域において、近似式の次数はほとんど影響しないが、例えば図 3.8 のように軽負荷時及び重負荷時の電圧降下特性を考慮する場合、3 次近似が最も良く特性を模擬できる。

$$\Delta V = 0.0003520 T^3 - 0.03890 T^2 + 1.4240 T - 10.4943 \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

以上のように、本研究では、定電流負荷特性を (3.13) 式のように定義し、各パラメータを決定した。しかし、(3.13) 式の第 2 項はインピーダンスによる項であるため、Model B としてハードウェア回路で構築する。よって、直流電圧成分を表現する数式 (Model A) は (3.14) 式のように決定される。

$$V = E - ri - \Delta V \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

$$v_a = 24 - (0.0003520 T^3 - 0.03890 T^2 + 1.4240 T - 10.4943) \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

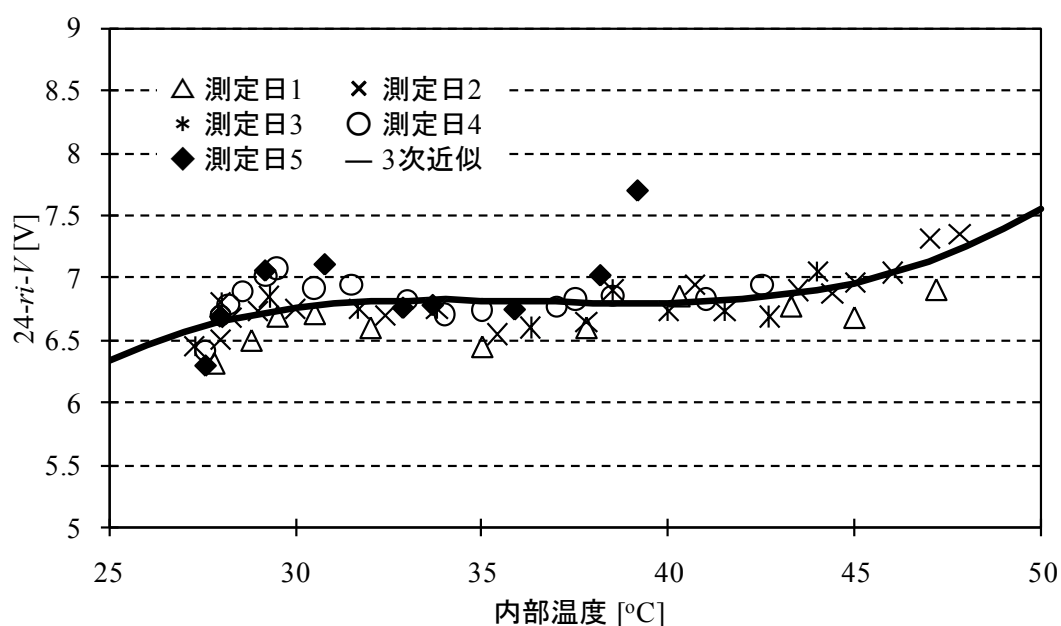


図 3.11 ΔV 対内部温度 T

3.4. Model B の決定

3.2.2.節で導出した周波数特性を模擬するハードウェア回路を構成する。ここで用いる素子は線形素子 (R , C , L) のみである。

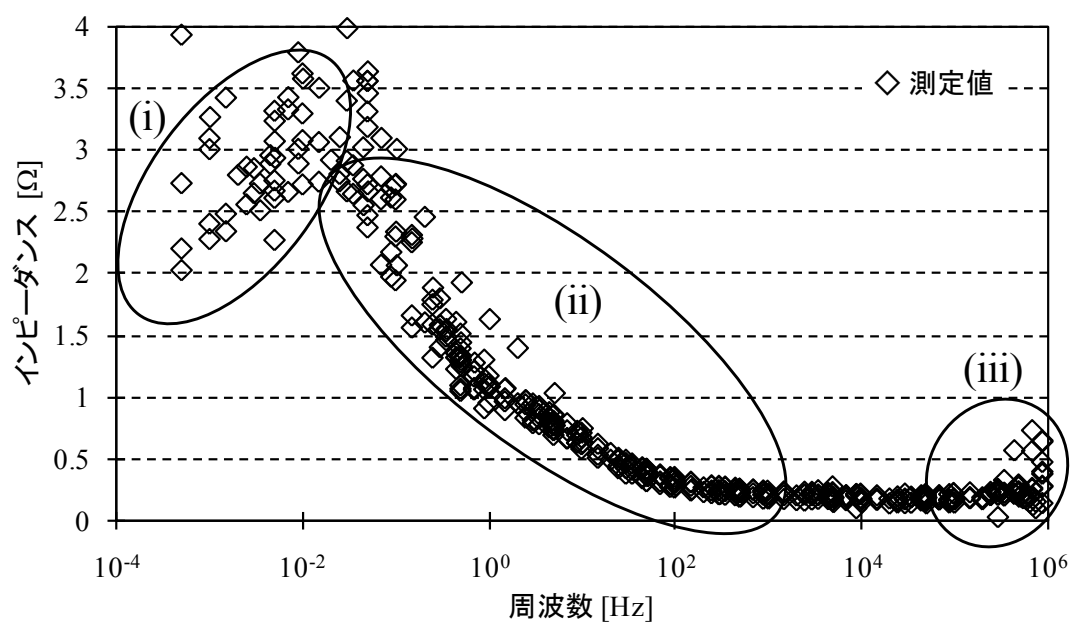
図 3.7 の特性を図 3.12 のように、インピーダンスや位相の特性の変化によって分割する。

まず、中域(ii)のインピーダンス変化と位相特性を表わすため、 RC 並列回路を用いる。

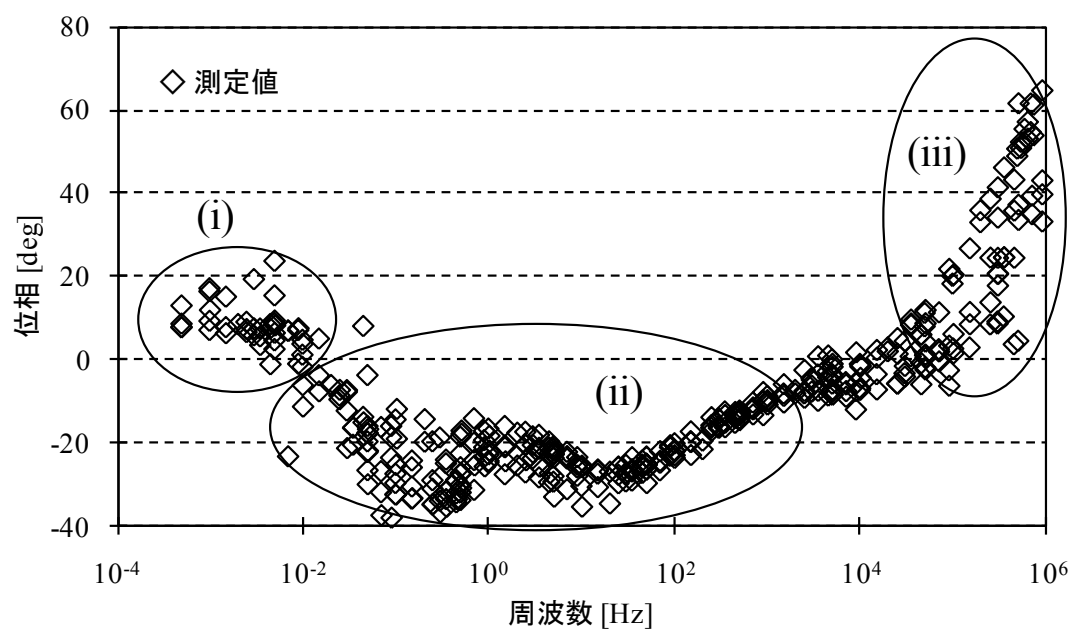
RC 並列が 1 段の場合、遮断周波数の異なる RC 並列が 2 段の場合、同じく 3 段の場合のインピーダンス特性を図 3.13 に示す。このように、遮断周波数の異なる RC 並列の段数を増やしていくことで広い周波数帯域における緩やかなインピーダンスの変化を模擬することができる。

今回は、(ii)の領域において、図 3.14 に示すような RC 並列 5 段回路を用いる。ここで、図 3.12 の約 200~100kHz の領域においてインピーダンスは約 0.2Ω 一定になっていることから、この定抵抗特性を模擬するために R_0 を直列に接続する。

図 3.14 の回路の周波数特性を測定結果と併せて図 3.15 に示す。なお、図 3.14 に示す回路の各パラメータの値は測定結果になるべく近くなるように試行錯誤的に決定した。各パラメータの値を表 3.3 に示す。



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 3.12 Model B の構築に用いる周波数特性

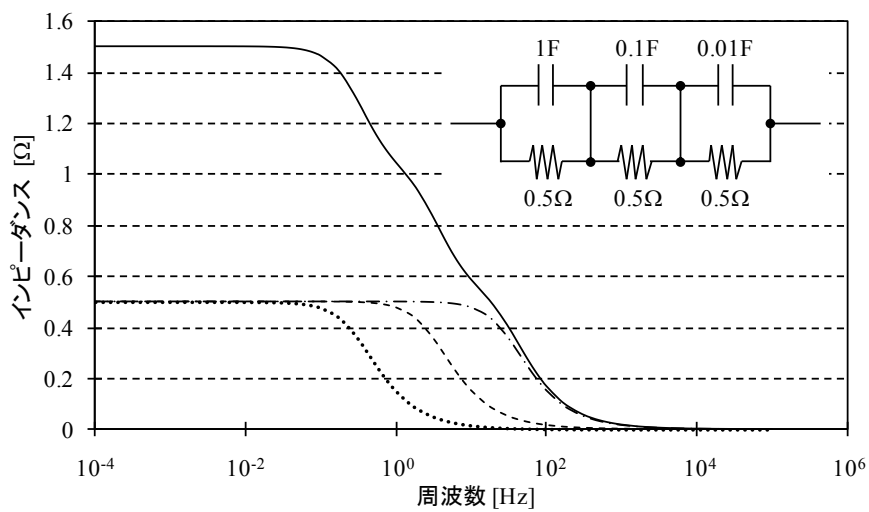
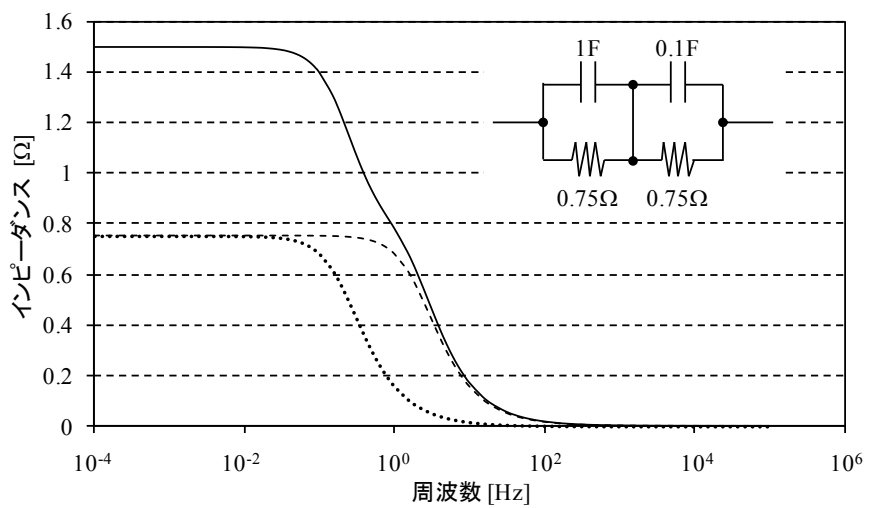
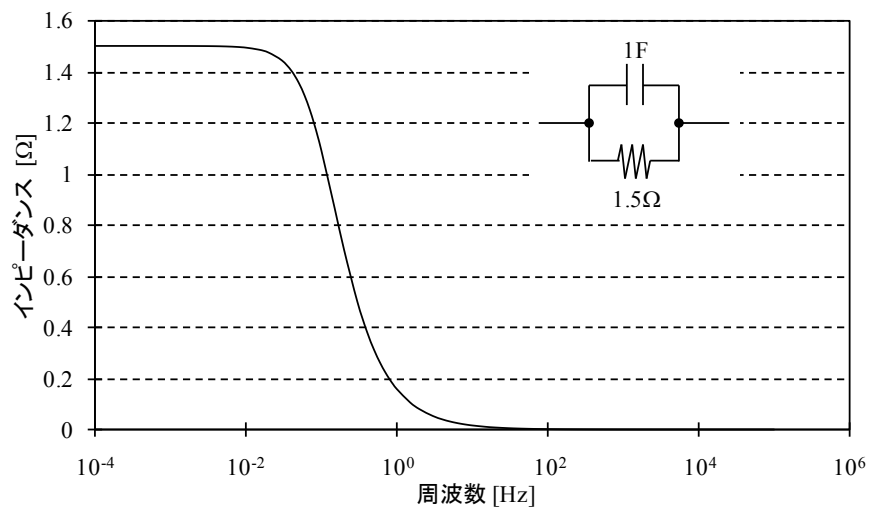


図 3.13 RC 並列回路インピーダンス特性

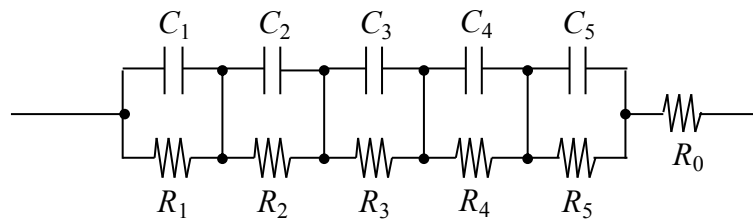
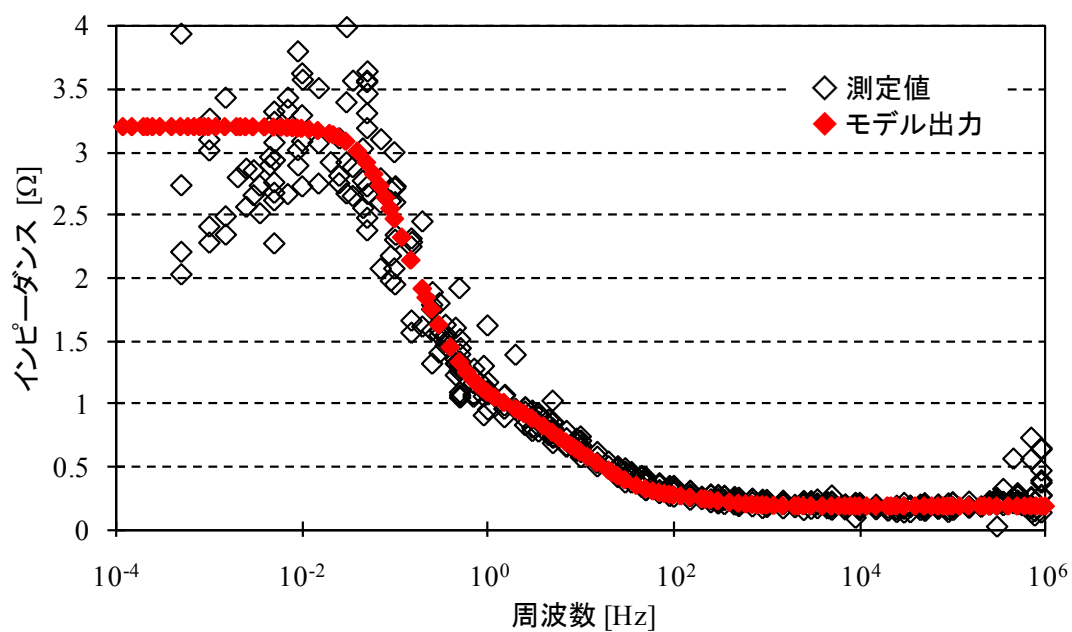


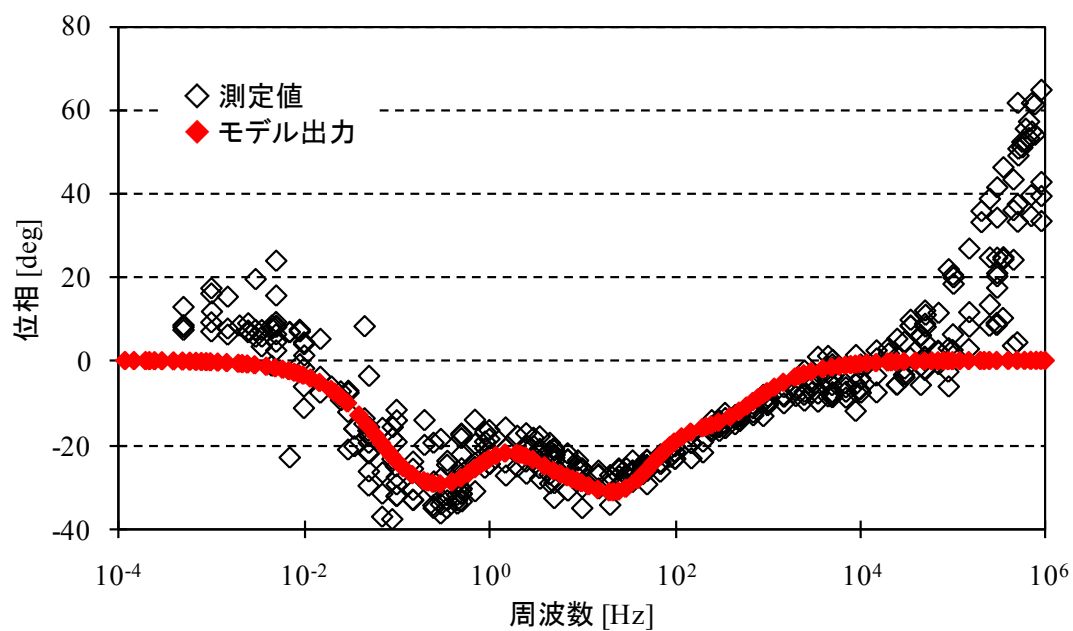
図 3.14 中周波数領域を模擬する回路構成

表 3.3 図 3.14 の各パラメータの値

R_0	0.2Ω		
R_1	1.6Ω	C_1	1.1F
R_2	0.65Ω	C_2	0.8F
R_3	0.4Ω	C_3	0.1F
R_4	0.3Ω	C_4	0.03F
R_5	0.07Ω	C_5	8mF



(a) インピーダンス特性

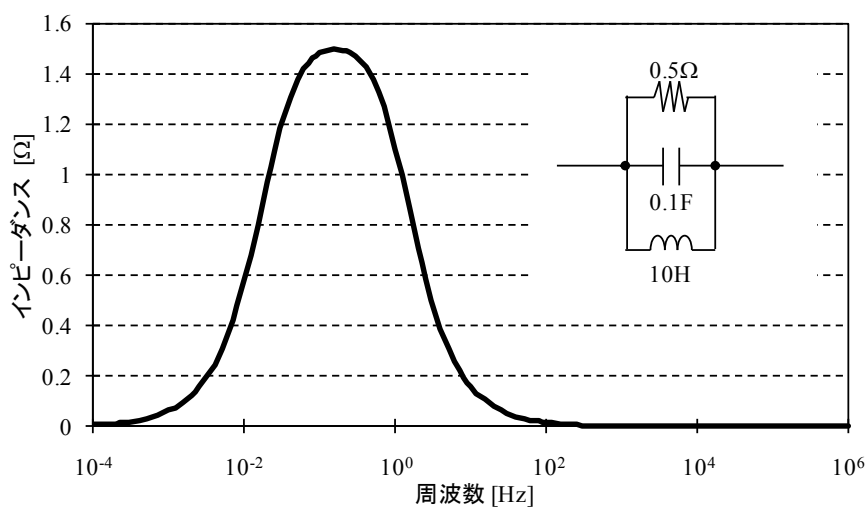


(b) 位相特性

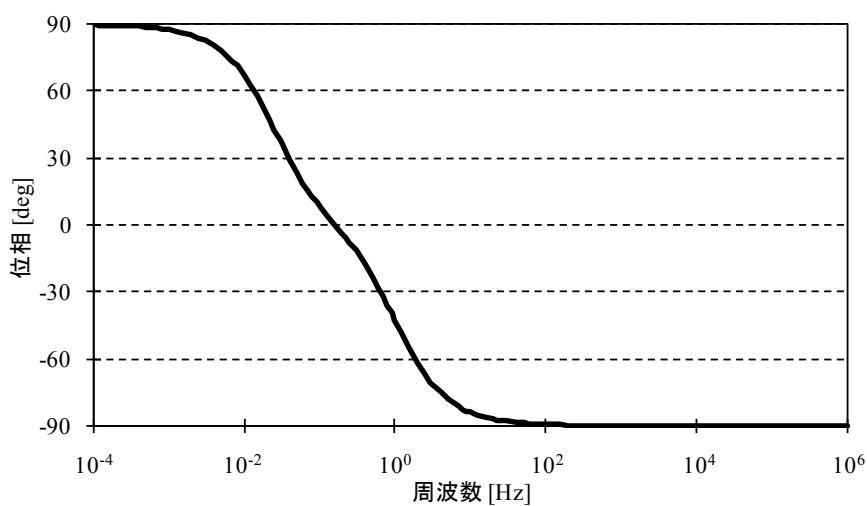
図 3.15 図 3.14 の周波数特性

次に、低域(i)のインピーダンス変化と位相特性を表わすため、 RLC 並列回路を用いる。

RLC 並列が1段の場合の周波数特性を例として図 3.16 に示す。周波数の増加に伴うインピーダンスの増減の変化及び位相の進み遅れの変化が表現できる。そこで、変化を模擬する周波数範囲を考慮して、図 3.14 の RC 並列の一番低い周波数領域で影響する段(R_1C_1)に、 L を並列に接続する。



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 3.16 RLC 並列回路周波数特性

ここで、モデルの低周波数のインピーダンスを 1.70Ω とする。これは、(3.13)式から(3.14)式の変更の過程でハードウェア回路として表現するとされた、定電流負荷特性で得られた燃料電池内部インピーダンスを示す。3.3.2節において $r = 70.1\Omega\text{cm}^2$ と算出されたが、これを燃料電池セル面積 41.25cm^2 で除算し定常状態のインピーダンス 1.70Ω を算出する。これを表現するために、 RCL 並列回路の L に R を直列に接続する。図 3.17 の R_a , L_a に相当する。

最後に、高域(iii)のインピーダンス変化と位相特性を表わすため、 RL 並列回路を用いる。図 3.17 の R_b と L_b の並列回路に相当し、パラメータの値は(iii)の領域での変化を模擬するように試行錯誤的に決定した。

以上のように、周波数特性を模擬する回路構成を図 3.17 のように決定し、回路の各パラメータの値を表 3.3 のように決定した。図 3.17 の回路の周波数特性を測定結果と併せて図 3.18 に示す。

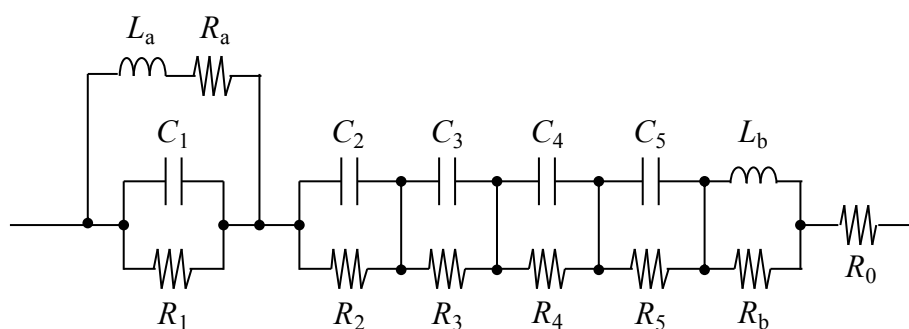
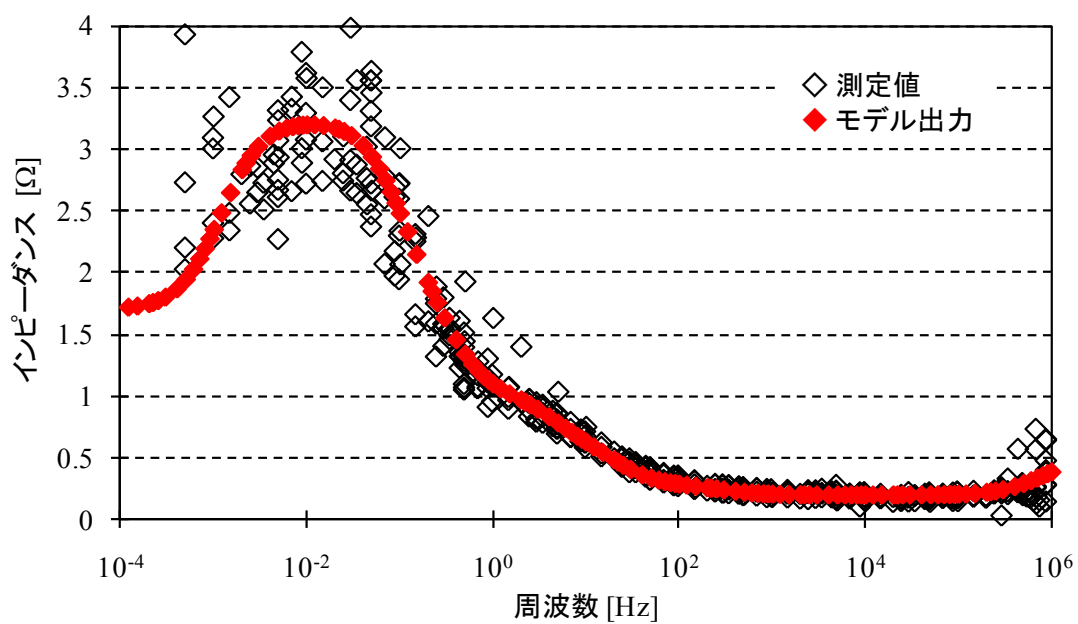


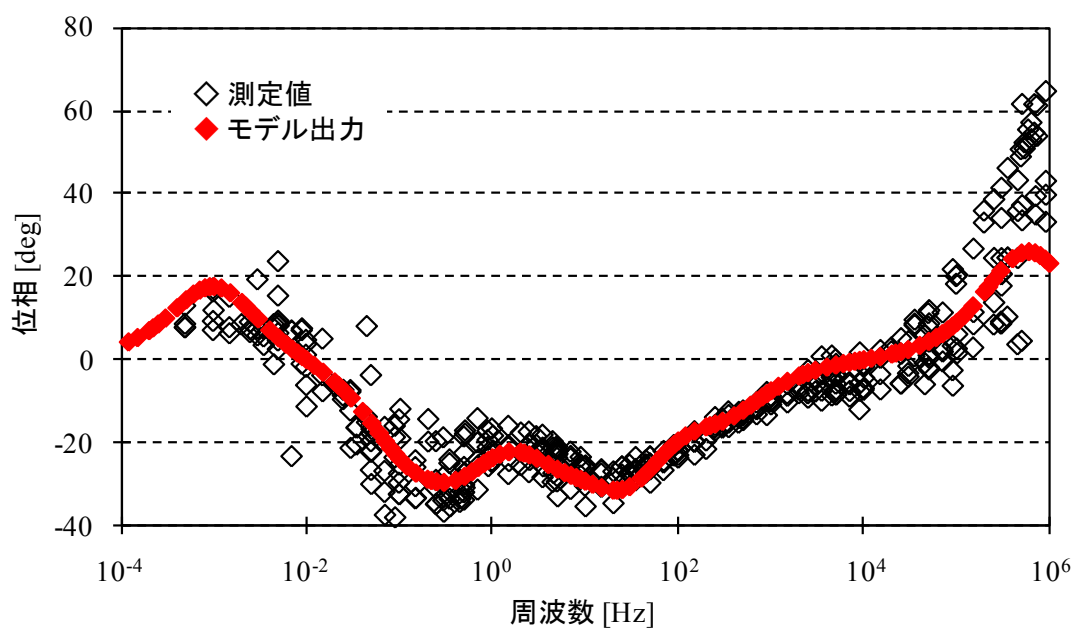
図 3.17 周波数特性を模擬する回路構成

表 3.3 図 3.17 の各パラメータの値

R_0	0.2Ω		
R_1	1.6Ω	C_1	1.1F
R_2	0.65Ω	C_2	0.8F
R_3	0.4Ω	C_3	0.1F
R_4	0.3Ω	C_4	0.03F
R_5	0.07Ω	C_5	8mF
R_a	0.1Ω	L_a	200H
R_b	0.3Ω	L_b	50nH



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 3.18 図 3.17 の周波数特性

3.5. モデルの構築

3.3.節及び3.4.節において、定電流負荷特性を基に数式を(3.14)式のように、また、周波数特性を基に回路構成を図 3.17 のように決定した。これらを用いてモデルを構築していく。

ここではまず、図 3.17 の回路をハードウェア回路として実現可能かを検討する。表 3.3 に示されるパラメータの値について、 C_1 , C_2 , L_a は素子の容量の点から、実際にハードウェア回路として実現することは難しい。これらの素子は約 1Hz 以下の周波数領域で特性を示し、この領域は、デジタル制御電源の応答性が比較的良い領域となる。つまり、ハードウェア回路として実現困難な約 1Hz 以下の領域はソフトウェアとして実現し、デジタル制御電源を駆動させる。そして、それ以外をハードウェア回路として実現する(図 3.19)。

図 3.17 の低周波数領域を模擬する回路を図 3.20 に示す。図 3.20 について、入力を電流、出力を電圧にした時の伝達関数 $H(s)$ を(3.15)式に示す。パラメータには表 3.3 の値を用いる。

$$H(s) = \frac{395.2s^2 + 450.634s + 1.265}{183.04s^3 + 456.092s^2 + 201.06s + 1.7} \dots\dots\dots (3.15)$$

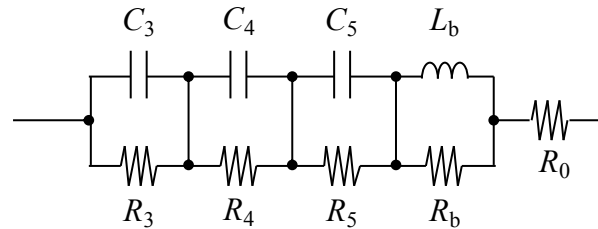


図 3.19 ハードウェア回路

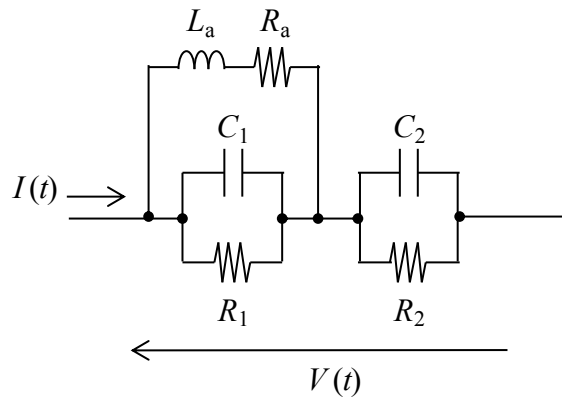


図 3.20 低周波数領域を模擬するモデル

そして、図 3.20 の出力電圧は(3.16)式となり、Model A の出力 v_a から、(3.16)式より算出した電圧を減算して、デジタル制御電源によって実現する。

$$V(t) = \mathcal{L}^{-1}(H(s) \times I(s)) \dots\dots\dots (3.16)$$

以上より、燃料電池の模擬装置を図 3.21 のように構築する。Model B のパラメータには表 3.3 の値を用いる。

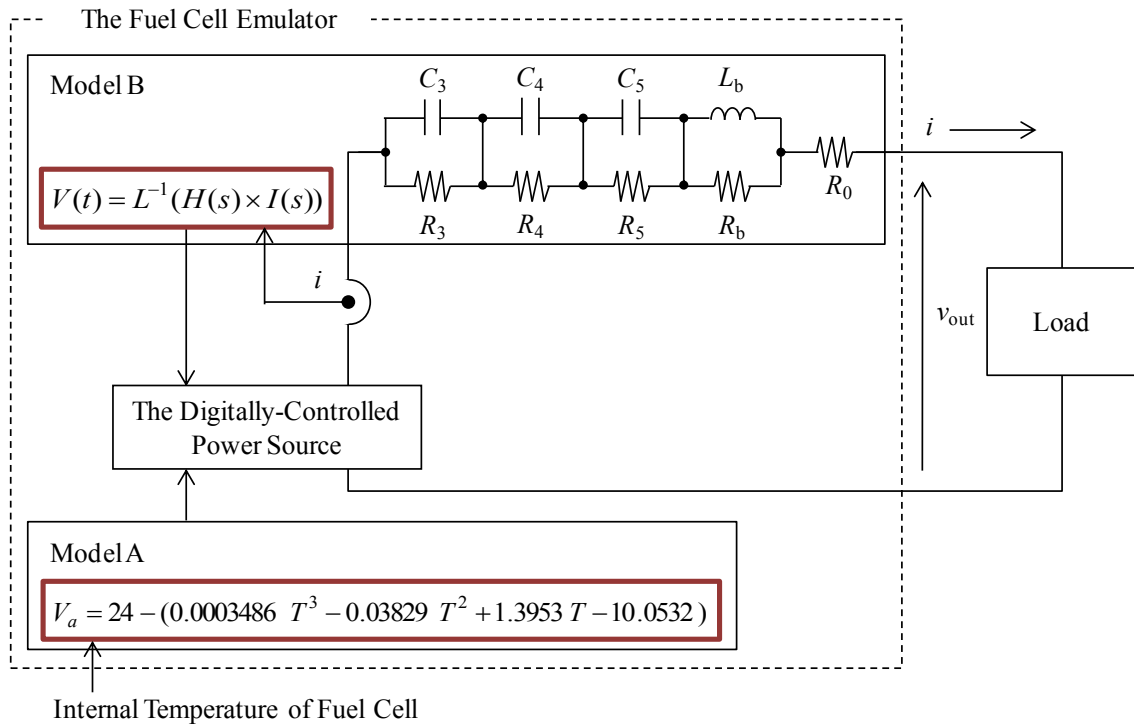


図 3.21 本研究で提案する燃料電池模擬装置の構成

第四章 提案する模擬装置の検証

第三章で提案した燃料電池の模擬装置の妥当性を検証するために、実機における測定結果とシミュレーション結果の出力電圧波形を比較する。検証にはシミュレーションソフト PSIM を用いる。

まず、定常状態において定電流負荷特性が模擬可能かを検証する。

次に、提案モデルの周波数特性を確認する。そして、燃料電池に電力変換器を接続した場合を想定して、電力変換器の一例である昇圧チョッパを接続して動作させた際の燃料電池の出力電圧応答について検証する。

4.1. 定電流負荷特性の検証

提案する模擬装置の定常状態における電流電圧特性を検証する。

まず、実機実験として、3.2.1節に示す方法で定電流負荷特性を測定する。

そして、実験で得られた電流及び温度測定値を適用したときの提案する模擬装置の出力電圧を実験結果と比較する。模擬装置の出力は、PSIM 上にて構築した模擬装置の負荷に電流源を接続し、電流源負荷の電流値を変化させて定常状態に収束した際の出力電流、出力電圧を測定する。

測定結果を図 4.1 に示す。図 4.1 より、シミュレーション結果は実験結果の概形を概ね模擬できる。各測定点において、測定値に対するシミュレーション値の誤差率を図 4.2 に示す。誤差率の計算には(4.1)式を用いる。

$$\text{誤差率}[\%] = \frac{\text{実験値} - \text{シミュレーション値}}{\text{実験値}} \times 100 \dots\dots\dots (4.1)$$

図 4.2 より、今回示した結果では、約 0～4%の範囲で、提案モデルは燃料電池の定電流負荷特性を模擬可能である。

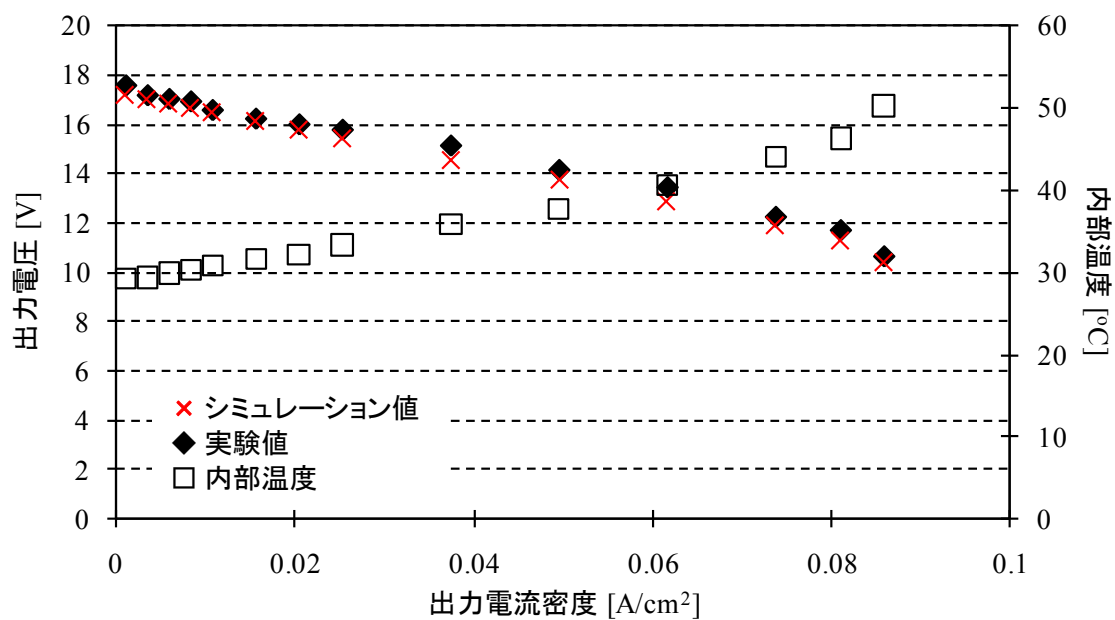


図 4.1 定電流負荷特性の検証

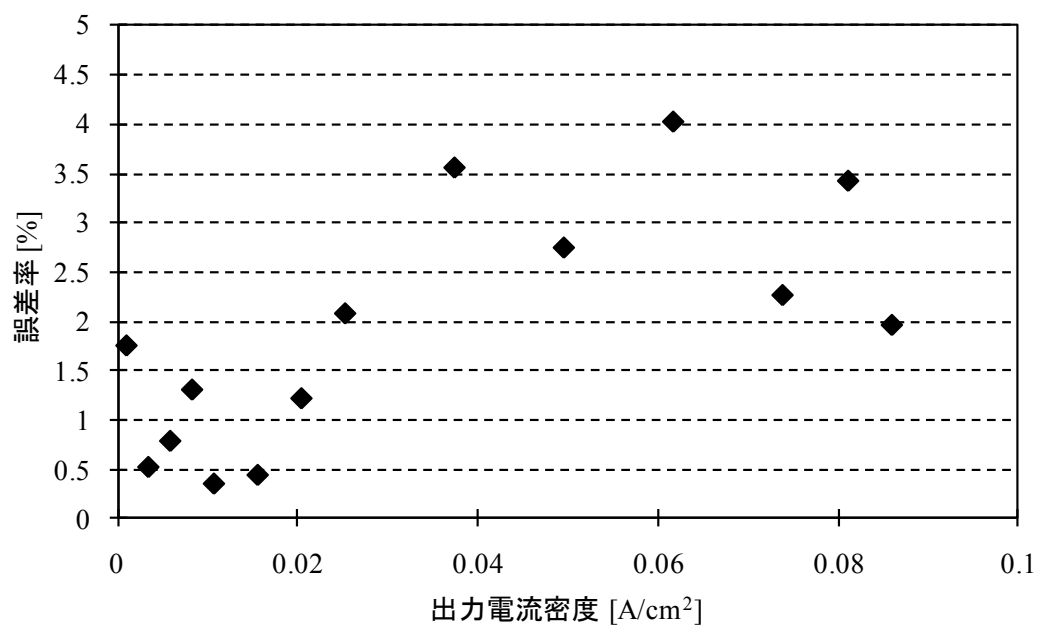


図 4.2 定電流負荷特性の出力電圧の誤差率

4.2. 提案モデル周波数特性の確認

提案する等価モデルが、任意の周波数成分について燃料電池の出力を模擬できるかを確認する。実験には、図 3.5 の周波数特性測定回路を用いる。

初めに、3.2.2.節で説明した方法で図 3.5 の燃料電池の出力電流 i を制御し、その時の出力電圧、出力電流及び内部温度を観測する。今回は、 i の直流オフセットを約 2A とし、0.01Hz、1Hz、100Hz の合成波とした。

次に、実機実験で観測した i と同じ電流を提案する模擬装置の負荷に電流源として与えたときの、模擬装置の出力電圧応答を観測する。ここで、測定中、電流の変化による燃料電池の内部温度の変化は見られなかったため、提案モデルの温度パラメータには測定値の平均値を与える。

実機実験結果とシミュレーション結果を併せて図 4.3～4.5 に示す。図 4.4 及び図 4.5 は、図 4.3 の拡大図となる。また図 4.3 の出力電圧波形を周波数解析し、その解析結果と各成分の誤差率を図 4.6 にまとめた。誤差率の算出には(4.1)式を用いる。

図 4.6 より、直流成分の誤差率は 1.3%であり、4.1.節で示した誤差率 0～4%の範囲内にある。また、各周波数成分は、図 3.7 に示すように、周波数が高くなるほどインピーダンスは小さくなるため、出力電圧の誤差率も大きくなることが予想される。今回示した結果では、誤差率約 14%までの範囲で模擬可能である。

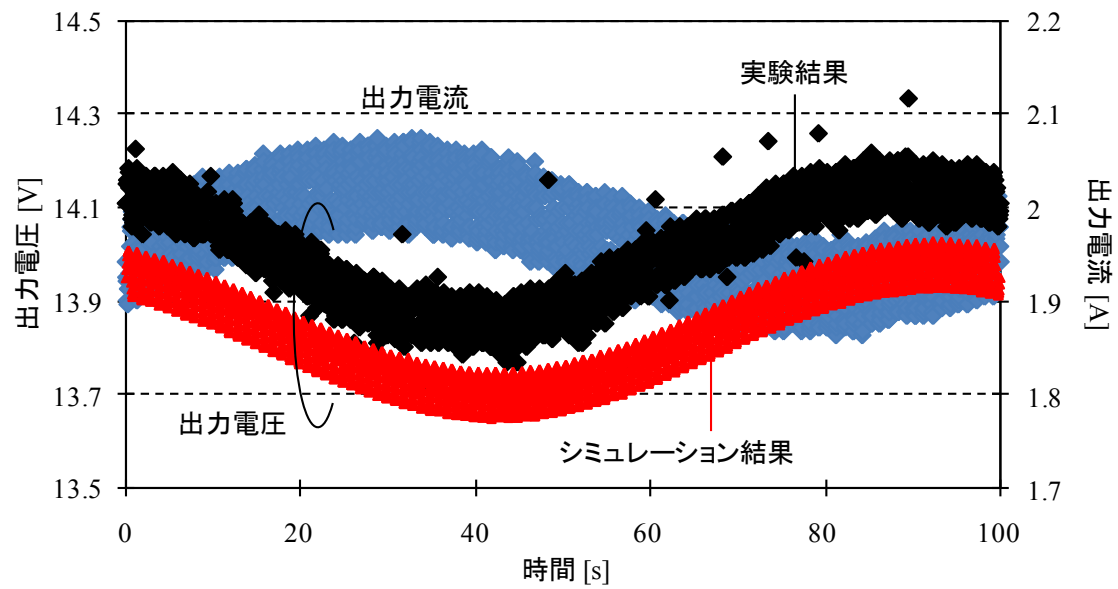


図 4.3 検証結果

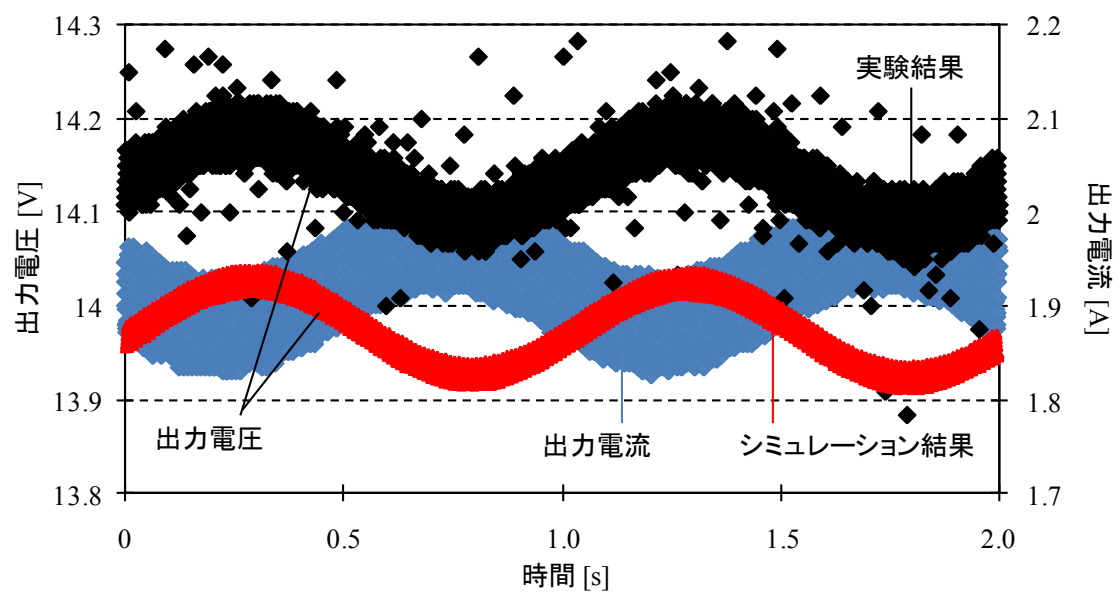


図 4.4 検証結果（図 4.3 の拡大図）①

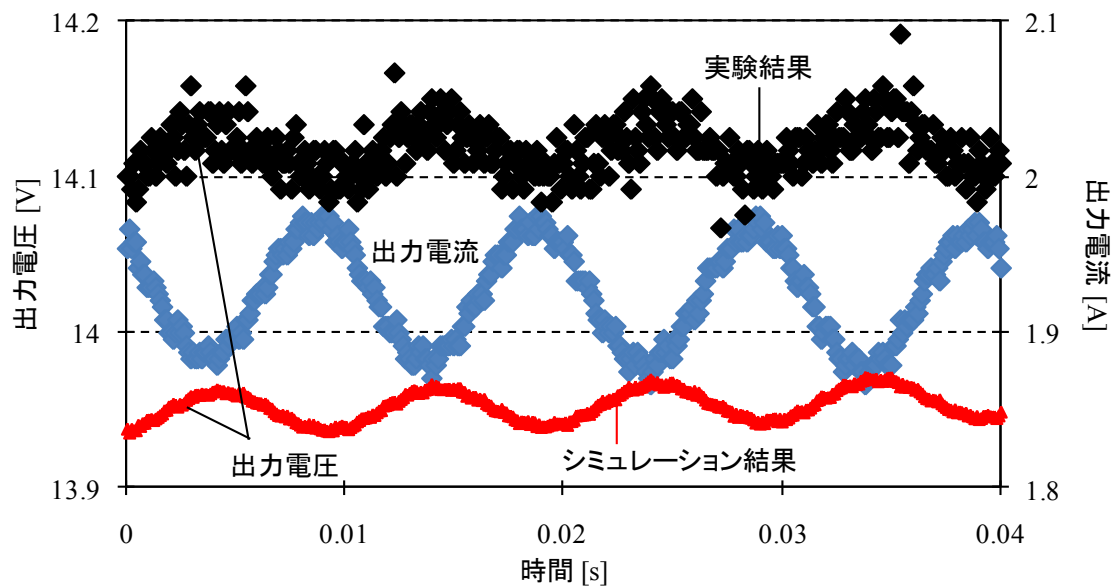


図 4.5 検証結果（図 4.3 の拡大図）②

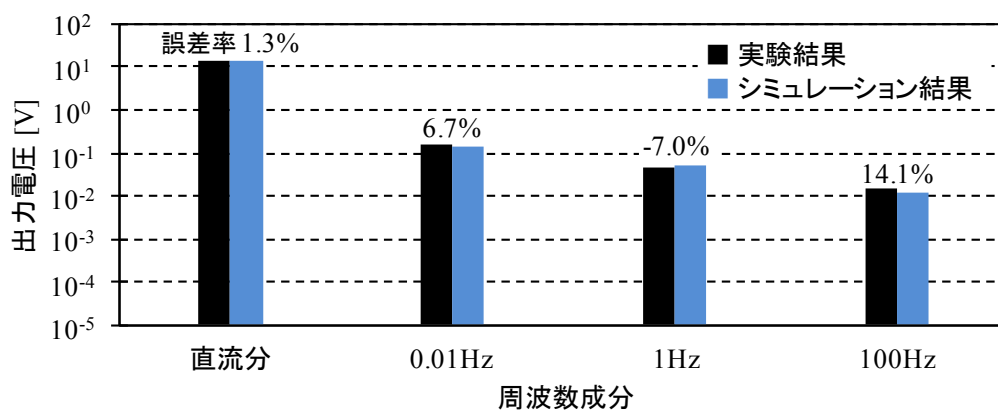


図 4.6 周波数解析結果

4.3. スイッチング回路負荷における電圧応答の検証

提案する模擬装置は電力変換器を接続して用いることを想定しているため、燃料電池の負荷にスイッチングを伴う電力変換器を接続した場合について検証する。今回は、図 4.7 に示すように、燃料電池に昇圧チョップアを接続した場合の電圧応答を観測し、シミュレーション結果と比較する。

初めに、実際の燃料電池に昇圧チョップアを接続し動作させたときの出力電圧波形 v_{out} 及び出力電流 i 、内部温度 T を測定する。昇圧チョップアは PWM(Pulse Width Modulation)制御されており、三角波キャリアに対して指令値を直流で与えることによって duty factor を任意に制御して動作させる。また、キャリア周波数を 10kHz、直流リアクトル L を 1mH、平滑用コンデンサ C を 4700 μ F とする。負荷として 12V のバッテリーを 2 個直列に接続することで、実際の使用条件に近い条件で実験する。

図 4.7 の v_{out} 及び i の波形を観測する。 T は出力変動が高速な場合ではほぼ一定値となる。実験は以下の 2 通りについて行った。また、実験は再現性を得るために、定電流負荷特性と同様に重負荷から測定する。

- [1] 指令値となる電流を一定電流とする場合 (duty factor = 0.7, 0.5, 0.3, 0.1)
- [2] 指令値となる電流を正弦波とする場合 (1Hz の正弦波とし、duty factor を 0.5~0.6 の範囲で変化させる)

次に、提案モデルの出力をシミュレーションする。実機実験で観測した i と同じ電流を提案する模擬装置の負荷に電流源として与えたときの、等価モデルの電圧応答を観測する。このとき、電流の変化による燃料電池の内部温度の変化は見られなかったため、高速スイッチング及び duty factor の変動による温度変化の影響は無いものとし、提案モデルの温度パラメータには測定値の平均値を与える。

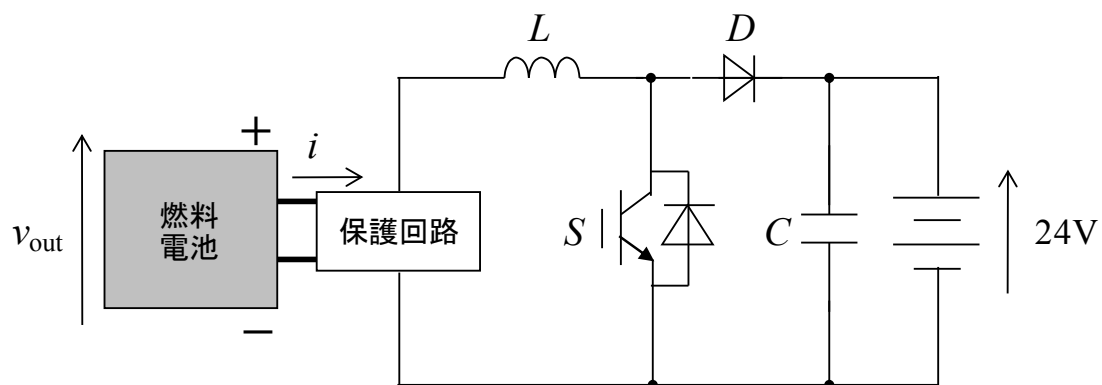


図 4.7 検証実験の測定回路

[1] 指令値となる電流を一定電流とする場合

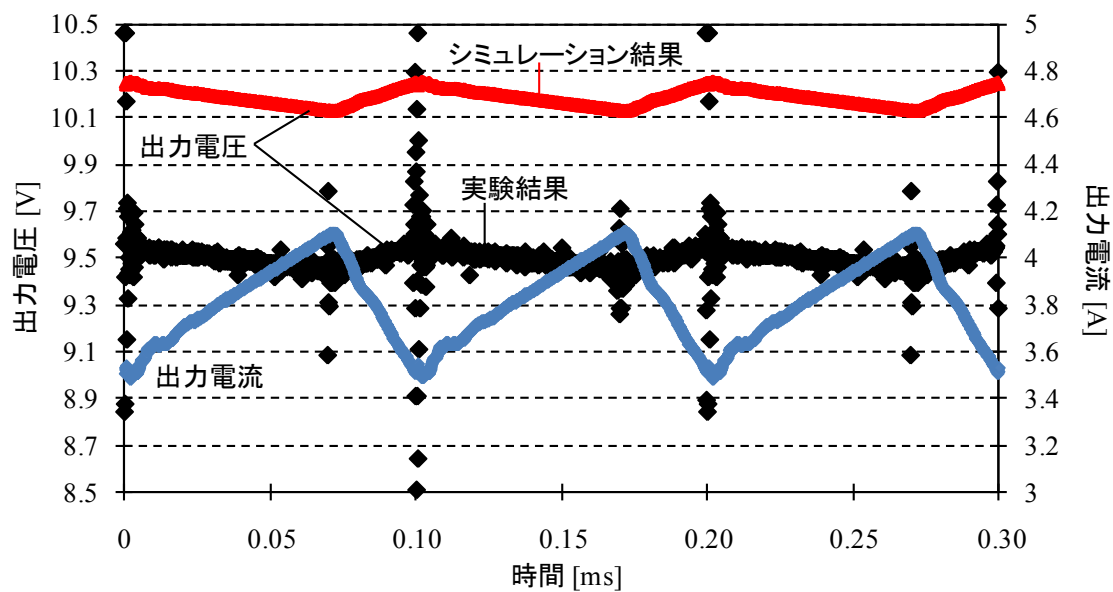
実機実験結果とシミュレーション結果を併せて図 4.8～4.11 に示す。それぞれ (a)観測波形, (b)電圧波形の変動分, (c)観測波形の周波数解析結果及び誤差率を示す。誤差率の算出には(4.1)式を用いる。また, ここでの基本波はキャリア周波数 10kHz 成分とする。

duty factor = 0.7 の場合, 出力電流は, 本研究で対象とする定電流負荷特性の線形領域 (0.5 ～3.0A) の範囲外で動作している。そのため, 図 4.8 (c)より, 直流成分の誤差率は-7.4%と前節までの検証結果と比較して大きい。しかし, 測定日 5 以外の測定結果は, 3.0A 以上の領域でおおよそ線形性を保っているため, 燃料電池の出力が安定して得られる場合, その特性はおおよそ線形であると考えられる。4 次成分までは約 30～40%の誤差率で, 図 4.8(b)のように, 視覚的には概形はおおよそ模擬できる。

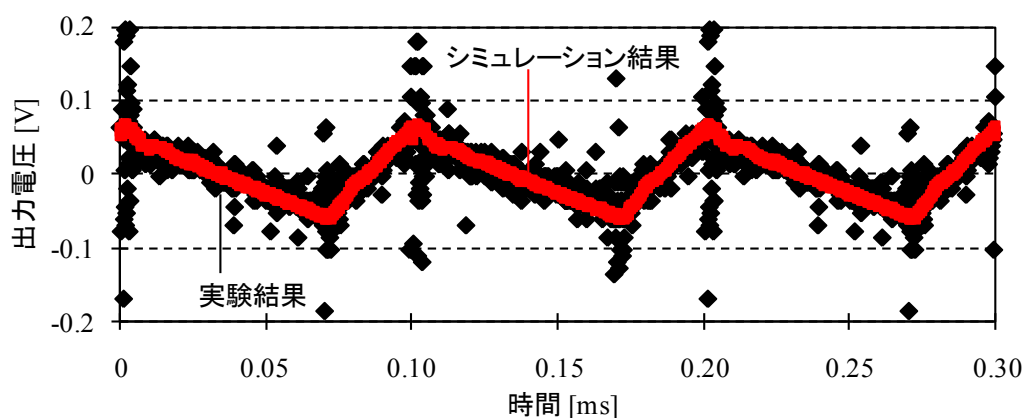
duty factor = 0.5 の場合, 本研究で対象とする定電流負荷特性の線形領域の範囲内で動作している。直流成分の誤差率は 1.2%と良好な結果が得られた。また, 5 次成分までは, 約 40%以内の誤差で模擬でき, duty factor = 0.7 に比べて誤差率も小さい。6 次成分以上は元々小さい成分であるため, 誤差の影響は少ない。

duty factor = 0.3 及び 0.1 の場合, 本研究で対象とする定電流負荷特性の線形領域の範囲外で動作している。しかし, 4.1 節において定電流負荷特性は十分に模擬できる範囲であり, 直流成分誤差率はいずれも-0.7%と良好な結果が得られた。また, 3.3.1.節に示したように, 軽負荷の領域では燃料電池の出力特性は非線形であるため, 提案モデルでは結果に示す程度の模擬ができる。この領域では, 本研究で対象とする線形領域に比べてインピーダンスが大きくなることが分かっている。これに関する簡単な対処方法は後節 4.4.で述べる。

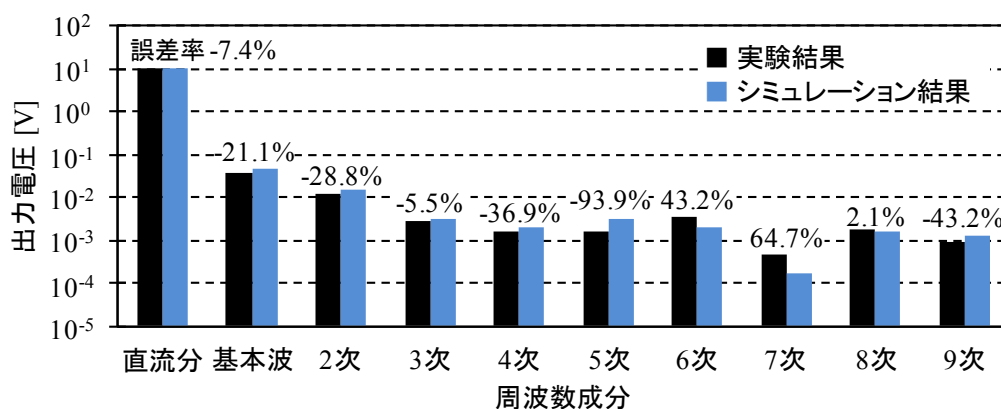
注釈として, duty factor = 0.1 (図 4.11) の場合, 電流不連続モードにはならず, 保護回路の影響で常に 0.043A の電流が流れている。保護回路は過電流保護のために接続されており, 燃料電池の出力電圧を観測して, 電圧が 8V 以下で過電流になると判断し, 燃料電池を外回路の接続を開放する。保護回路動作時は, 燃料電池出力端子と保護回路の間に常に 0.043A の電流が流れる。



(a) 観測波形

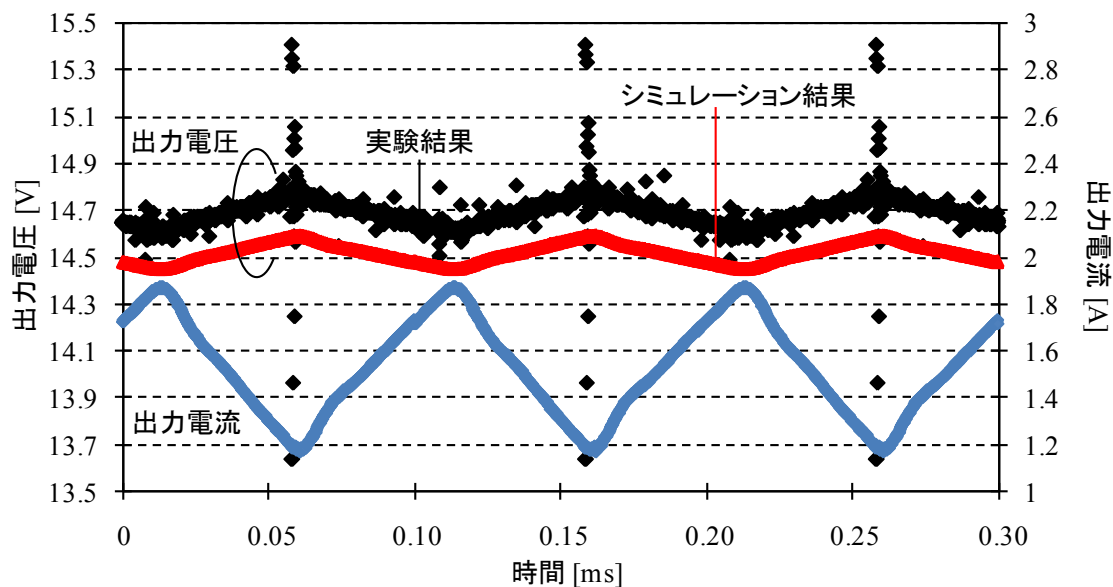


(b) 電圧波形の変動

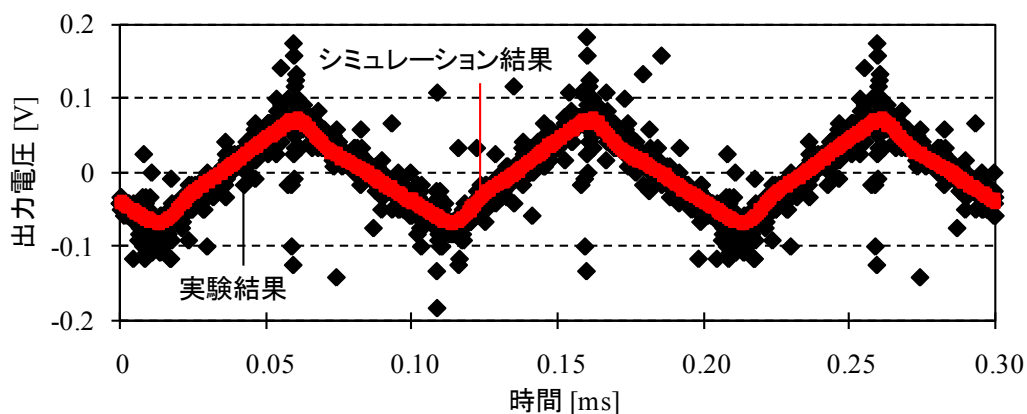


(c) 観測波形の周波数解析結果及び誤差率

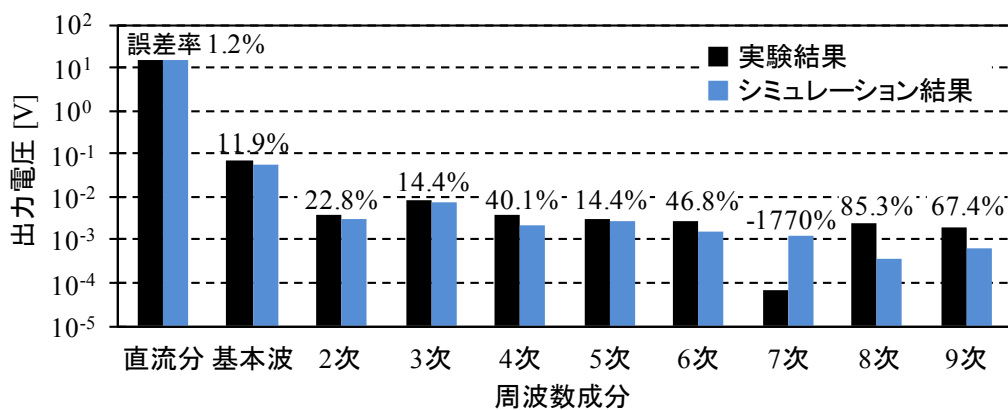
図 4.8 duty factor = 0.7



(a) 観測波形

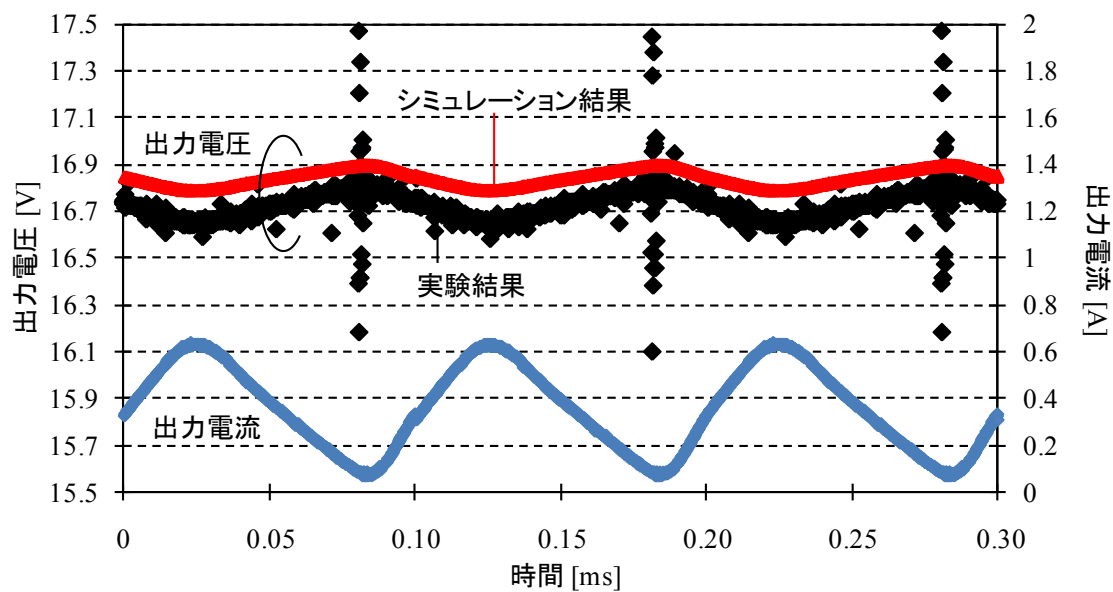


(b) 電圧波形の変動分

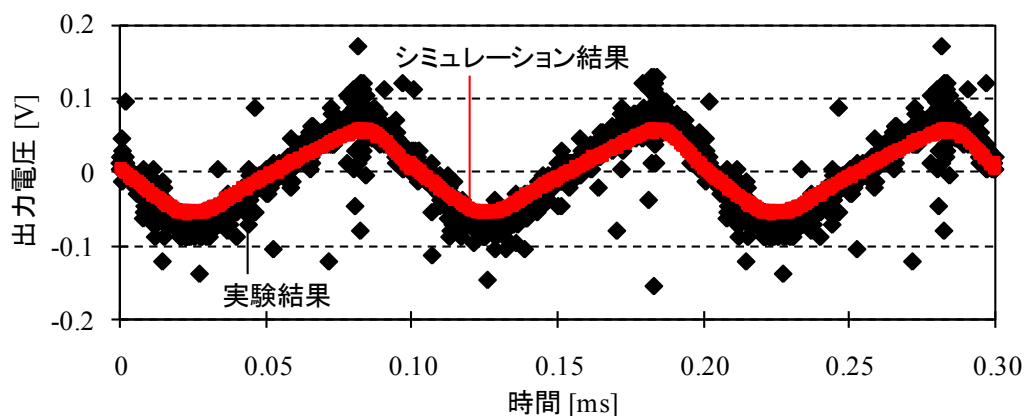


(c) 観測波形の周波数解析結果及び誤差率

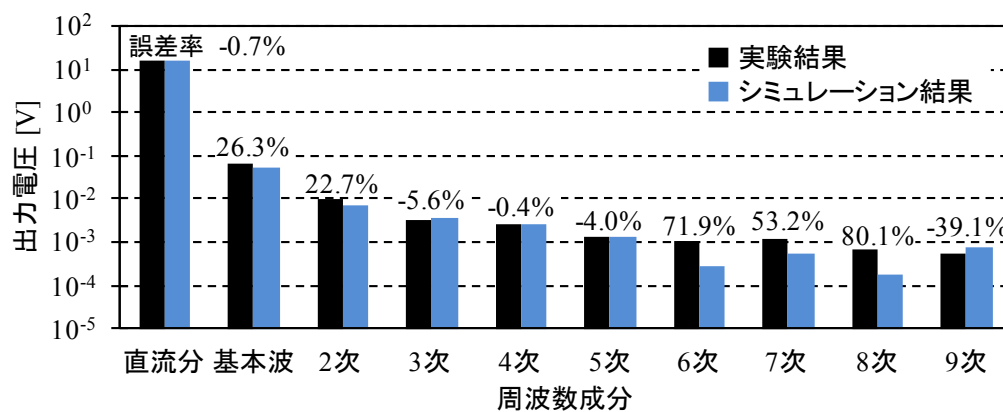
図 4.9 duty factor =0.5



(a) 観測波形

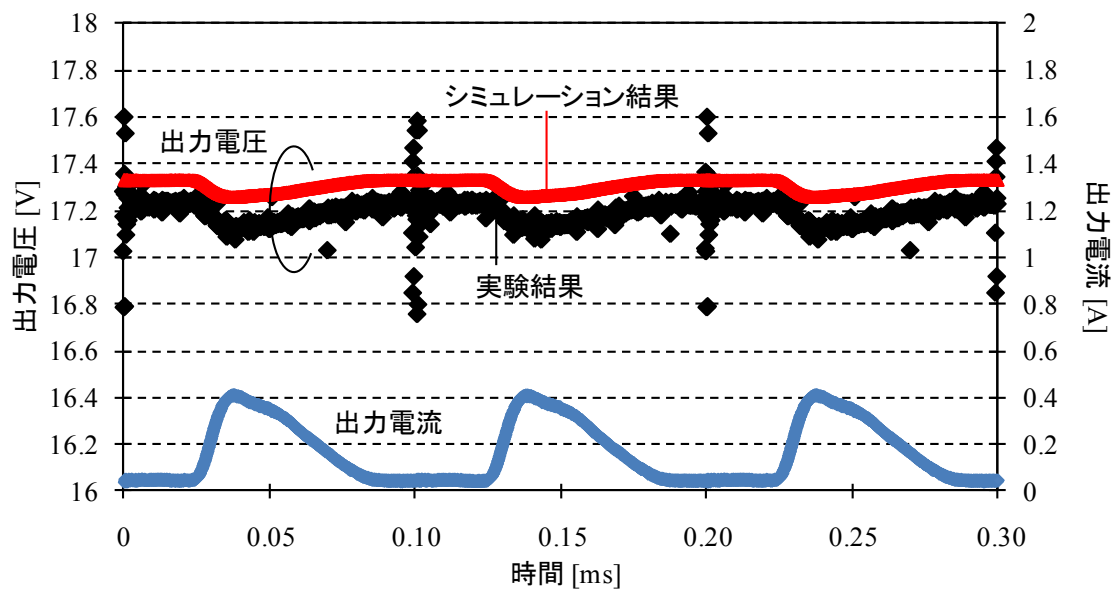


(b) 電圧波形の変動分

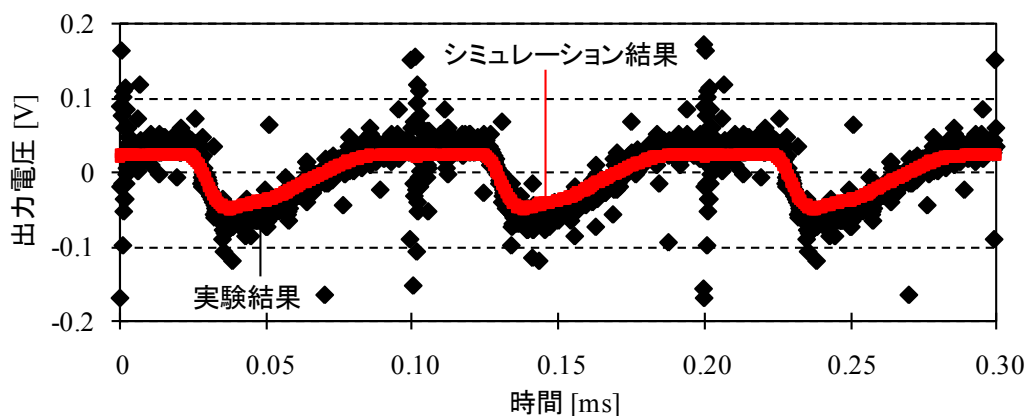


(c) 観測波形の周波数解析結果及び誤差率

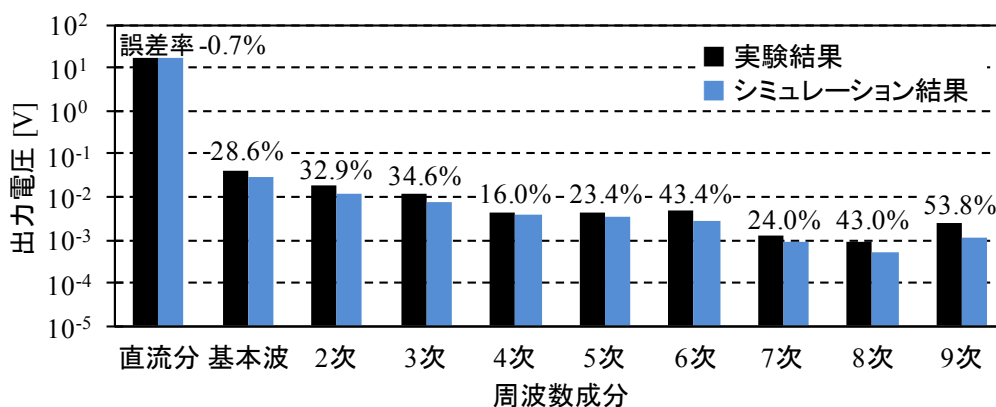
図 4.10 duty factor = 0.3



(a) 観測波形



(b) 電圧波形の変動分



(c) 観測波形の周波数解析結果及び誤差率

図 4.11 duty factor = 0.1

[2] 指令値となる電流を正弦波とする場合

実機実験結果とシミュレーション結果を併せて図 4.12 及び図 4.13 に示す。また、観測波形の周波数解析結果及び誤差率を図 4.14 に示す。誤差率の算出には(4.1)式を用いる。 f は指令値の周波数（1Hz 成分）、 f_c はキャリア周波数（10kHz 成分）とする。

図 4.13 より、 $3f$ 、 $7f$ 、 $8f$ 、 $9f$ 、 $7f_c$ 、 $8f_c$ 成分の誤差率大きい。7 次以上の成分は低次の成分に比べて非常に小さいため、出力波形の模擬に与える影響は少ない。 $3f$ 成分の誤差が大きい。また、 duty factor を 0.5～0.6 の間で連続的に変化させており、周波数解析結果より、側帯波の存在も確認した。しかし、側帯波成分は視覚的に確認不可能なほど小さく、今回は具体的な解析は行わない。

また、 $5f$ 成分までの精度が比較的良好いため、視覚的には、燃料電池の特性をおおよそ模擬できると判断する。

燃料電池が安定した電源として用いられる場合、軽負荷領域ではなく線形領域で用いられる機会が多い。そのため、検証[1][2]の結果より、提案モデルは燃料電池の出力特性を実用上模擬できていると考えられる。

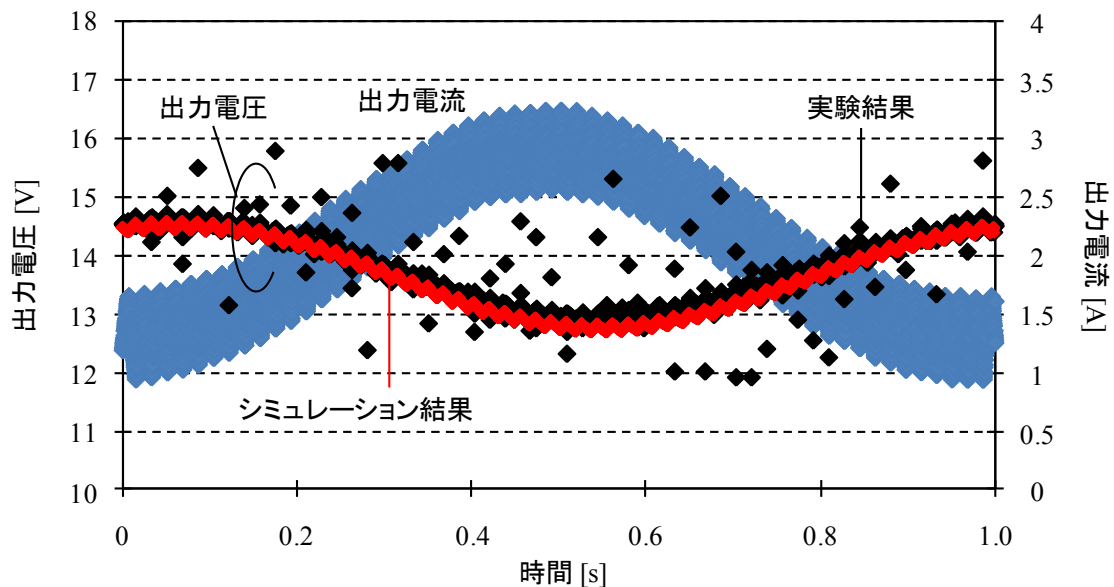


図 4.12 検証結果(2)

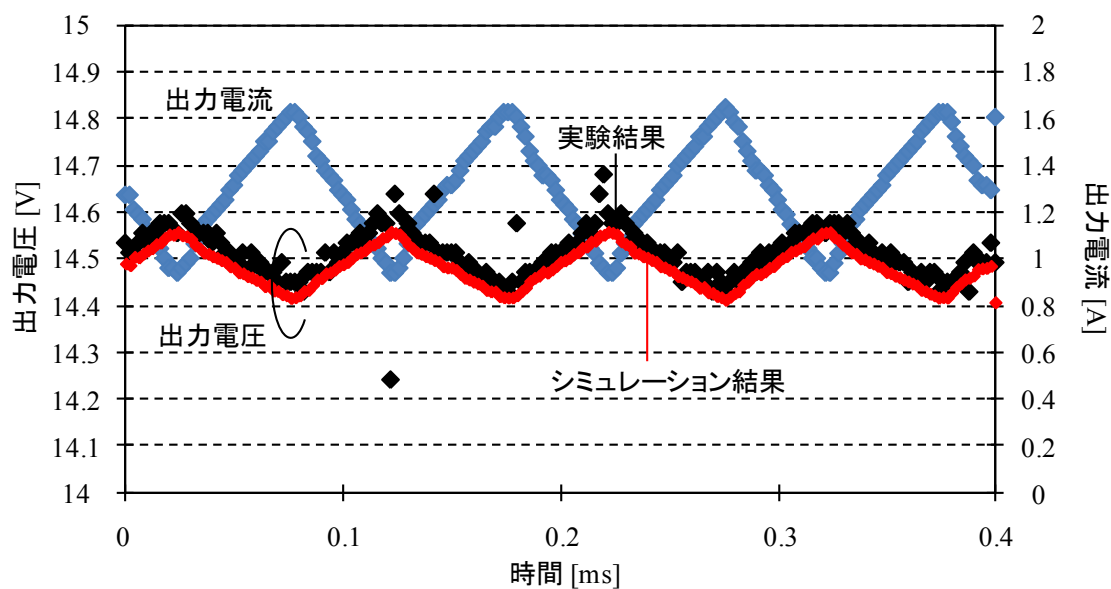


図 4.13 検証結果(2) (図 4.12 の拡大図)

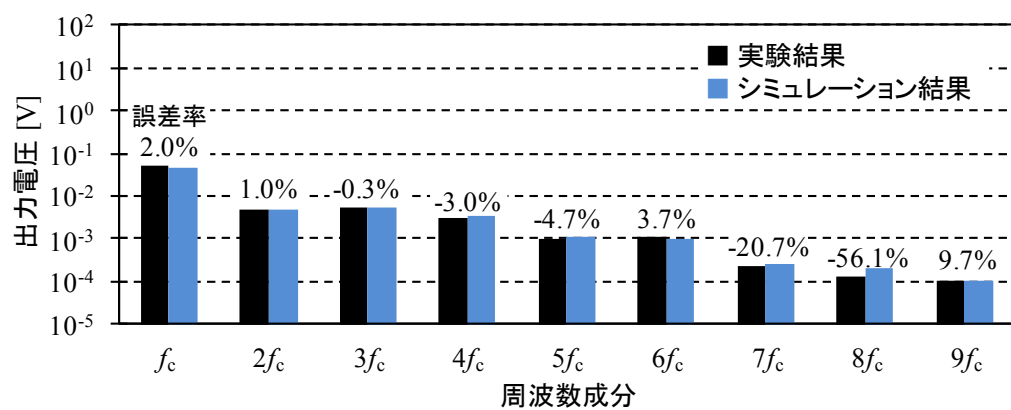
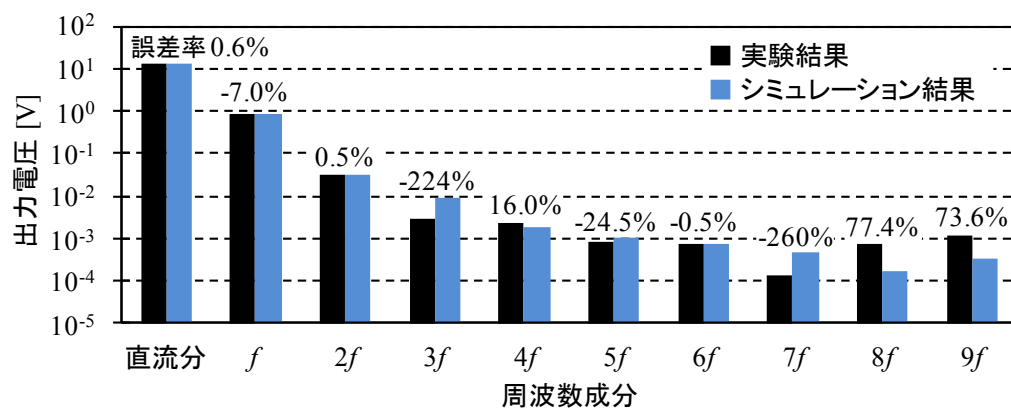


図 4.14 周波数解析結果(2)

4.4. 負荷ステップ変化における電圧応答の検証

4.1.～4.3.節において PSIM 上にて構築した提案する模擬装置が所望の特性を概ね模擬できることを確認した。そこで、負荷がステップ状に変化した場合における燃料電池の出力電圧応答を観測し、シミュレーション結果と比較する。

初めに、図 3.2 に示す実験環境の下で、負荷電流をステップ状に変化させて、その際の燃料電池の出力電圧応答波形及び内部温度変化を観測する。負荷には ARRAY 社製直流電子負荷装置を接続し、定電流負荷モードで用いる。

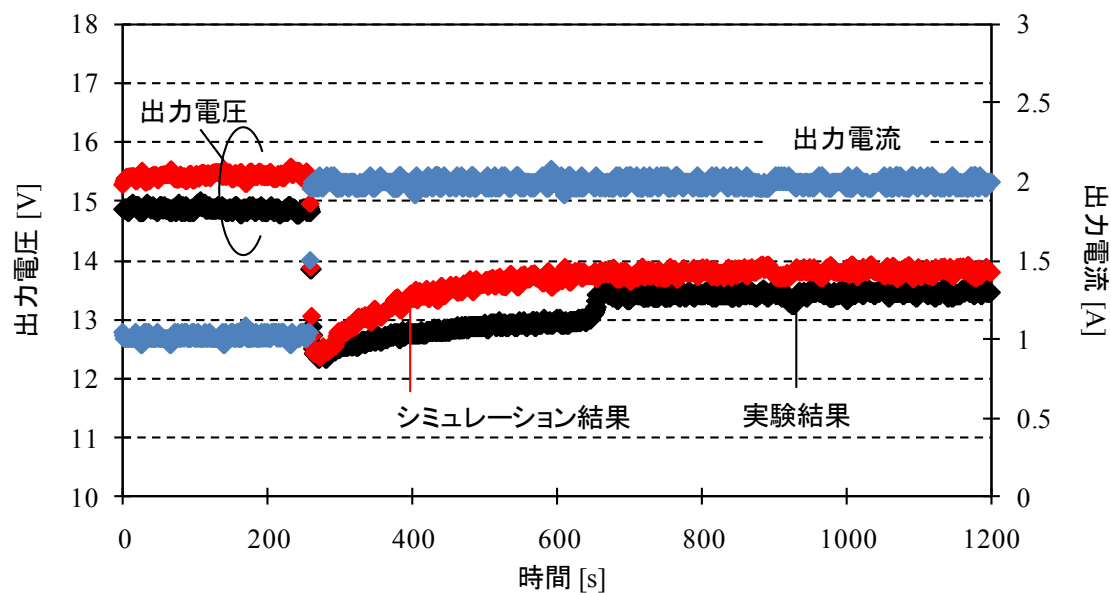
次に、実験で得られた電流及び内部温度を提案モデルに与えた際の出力電圧をシミュレーションし、実機実験結果と比較する。実機実験で観測した i と同じ電流を提案する模擬装置の負荷に電流源として与えたときの、等価モデルの電圧応答を観測する。

今回は、負荷電流を 1A から 2A, 2A から 1A へ変化する場合についての検証結果を図 4.15 及び図 4.16 に示す。

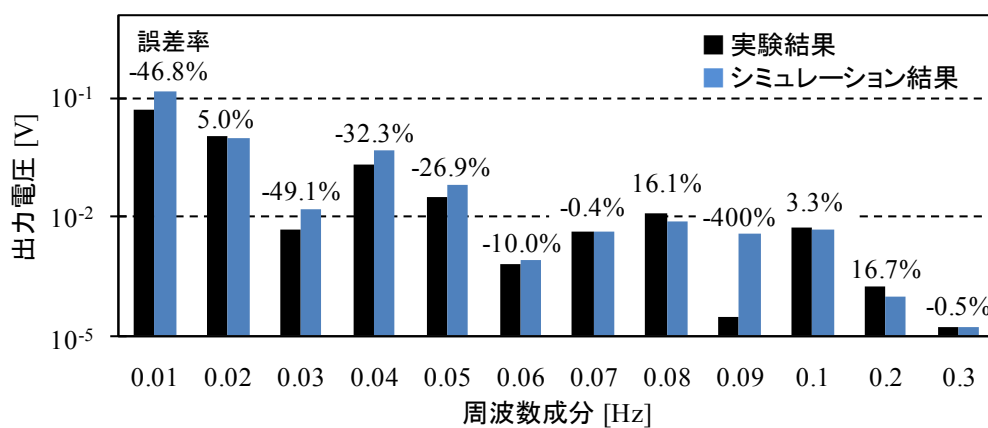
図 4.15 において、約 650 秒の辺りで燃料電池出力電圧（実験結果）は急な変化を見せている。これは燃料電池のセルの状態の変化によるものであると考えられる。定常状態においてシミュレーション結果は実験結果に近い値を示した。

図 4.16 において、シミュレーション結果は実験結果を模擬できていない。しかし、図 4.15 の実験結果より、電流変化が 1A から 2A に対して電圧変化が 15.5V から 13.8V であるのに対し、図 4.16 は電流変化が 2A から 1A に対して電圧変化が 12.2V から 14.3V である。つまり、実験結果に再現性が無い。以上が、シミュレーション結果が実験結果の波形と大きく異なる波形を示す原因であると考えられる。

しかし、図 4.15 及び図 4.16 より、電流の変化幅に対する電圧の変化幅は概ね表現できた。今後も模擬装置の検証内容として、負荷ステップ変化に対する検討が必要であると考えている。

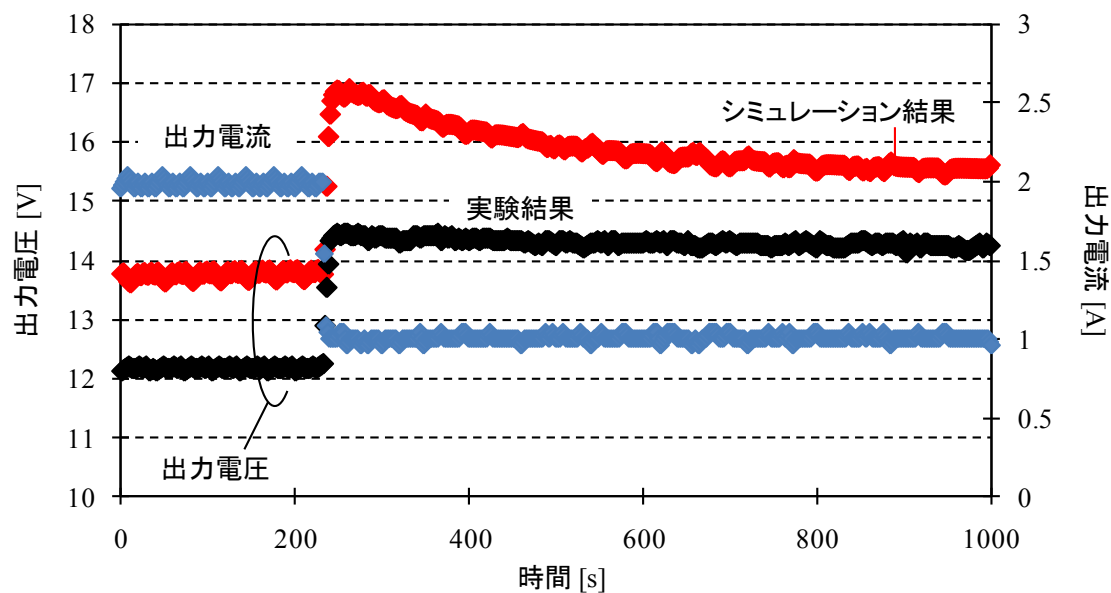


(a) 観測波形

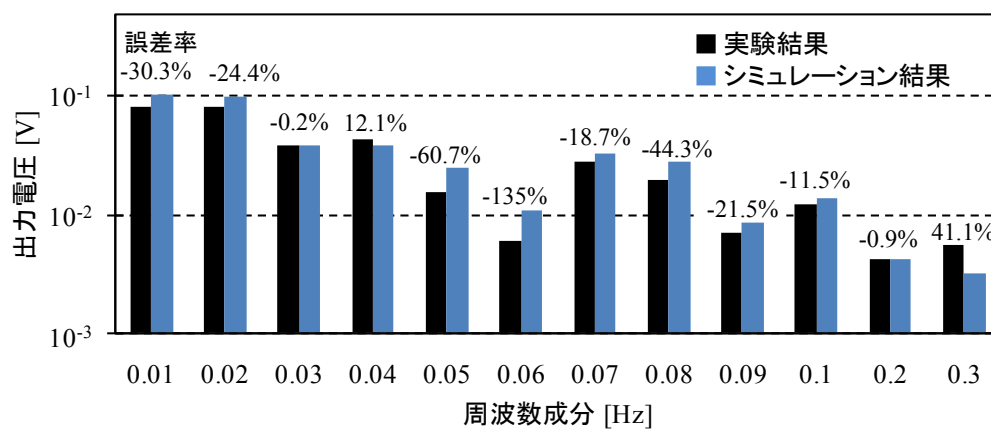


(b) 周波数解析結果

図 4.15 負荷ステップ変化 1A→2A



(a) 観測波形



(b) 周波数解析結果

図 4.16 負荷ステップ変化 1A→2A

4.5. 提案モデルの応用

4.3.節において、定電流負荷特性の軽負荷領域（0～0.5A）で燃料電池を動作させた場合、線形領域（0.5～3.0A）で動作させた場合に比べてインピーダンスが大きくなる傾向があることを述べた。そこで、定電流負荷特性の軽負荷領域において、3.3.2.節で説明した方法で周波数特性を測定した。今回は、 I_{ofs} を 0.3A、 I_{p-p} を 0.2A として測定した結果を、前章で提案したモデル（図 3.17）の周波数特性と併せて図 4.17 に示す。また、測定条件は表 4.1 に示す。

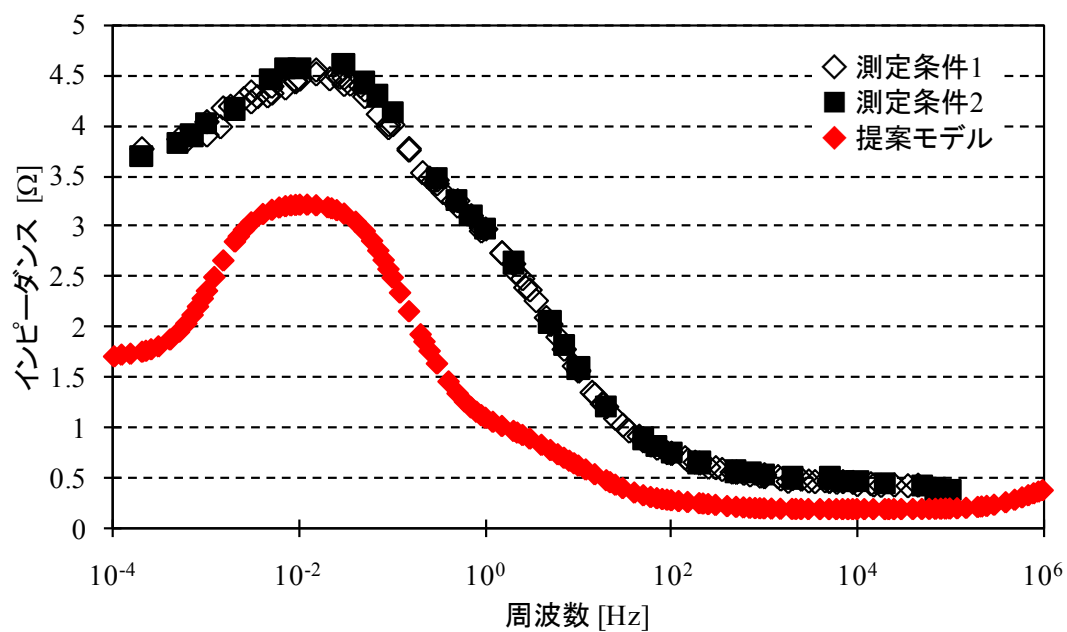
図 4.17 より、新たに測定した周波数特性は、これまでとは大きく異なる特性を示すことが分かった。そこで、本研究で提案したモデルを応用し、電流動作点を判断して回路を付加する方法でモデルを改良する。

前節までに提案したモデルで表現できない特性を図 4.18 のように求め、近似する。ここで、燃料電池の内部インピーダンスは定電流負荷特性の線形領域の傾きとして定義されており、燃料電池の構造上生じる、動作状態等では変化しないインピーダンスとなっている。本論文では 1.70Ω と決定した。また、軽負荷領域で生じる急激な電圧降下はほとんどが活性化過電圧に起因するものであり、温度依存する要素として、温度関数で近似している。そのため、定電流負荷特性について変更するべき点は特には無く、周波数特性を模擬するモデルは低周波数で 0Ω である必要がある。また、 $0.1m\sim 1Hz$ の領域でインピーダンスは約 $1.2\sim 2.0\Omega$ の範囲で大きく変動しているが、図 4.17 に示すように、 $10mHz$ 付近で最大値を迎え、周波数が高くなるとともにインピーダンスが小さくなるような特徴は同じであるため、測定のばらつきを考慮して一定値とする。さらに、 $1Hz$ 以上で模擬特性は測定値にフィットしていないが、これは約 $1\sim 1kHz$ でキャパシタの特性がみられるため、この領域でキャパシタの特性が表れるように位相特性にもフィットするように試行錯誤的に決定した。

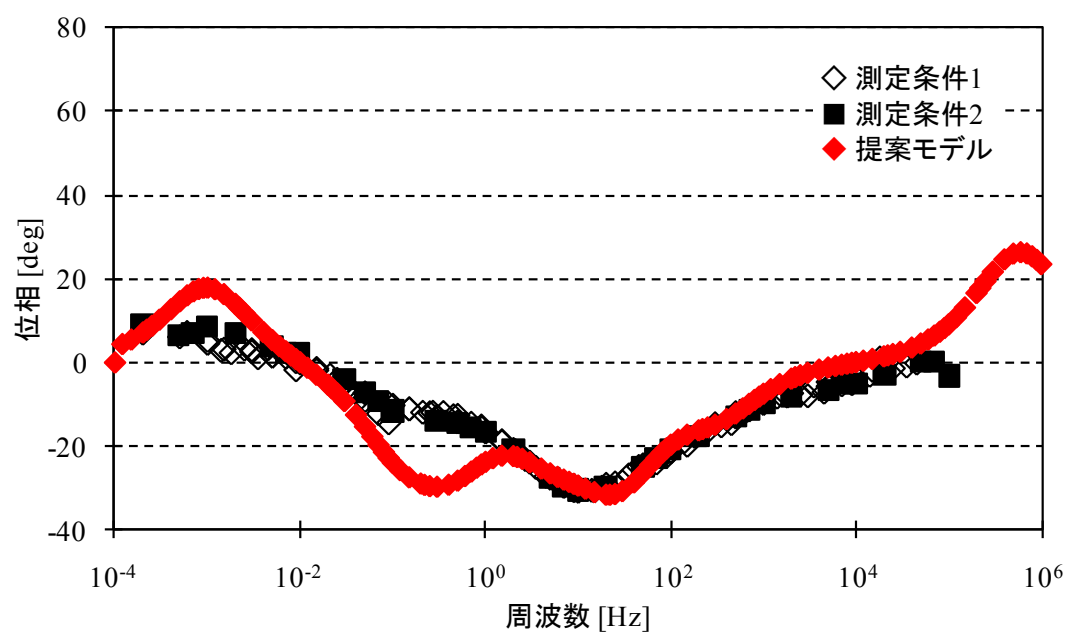
以上のように検討して決定した回路構成を図 4.19 に示す。また、パラメータの値は表 4.2 のように決定した。図 4.19 の回路を図 3.17 の回路に直列に接続した場合の周波数特性を実験結果と共に図 4.20 に示す。

表 4.1 測定条件

	I_{ofs} [A]	I_{p-p} [A]	波形
測定条件 1	0.3	0.2（基本波成分）	方形波
測定条件 2	0.3	0.2	正弦波

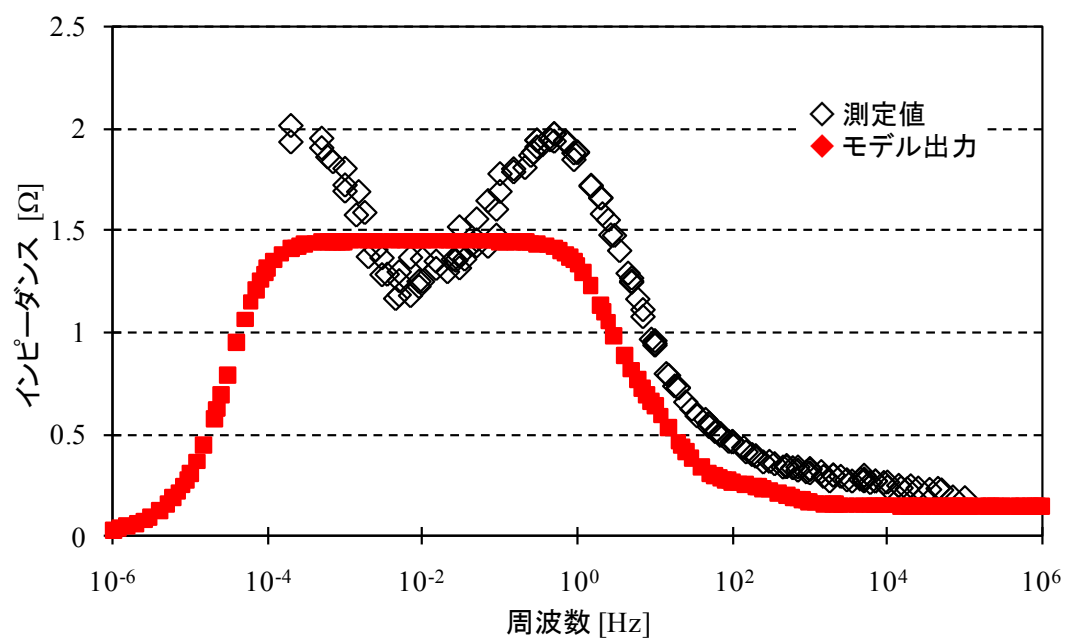


(a) インピーダンス特性

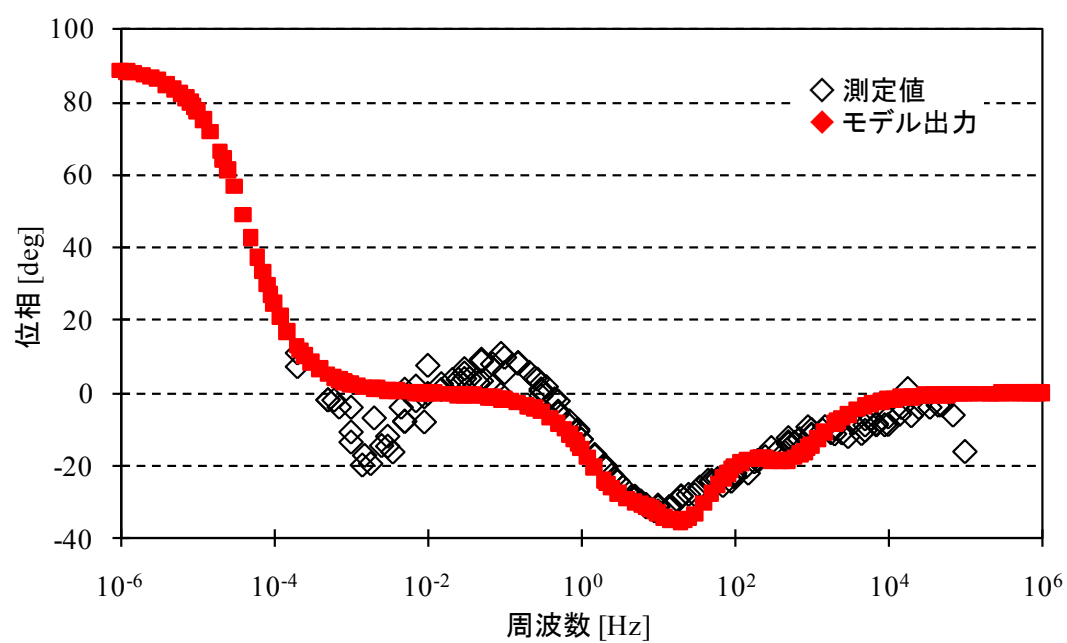


(b) 位相特性

図 4.17 周波数特性（実験結果及び提案モデル）



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 4.18 提案モデルで模擬できない成分

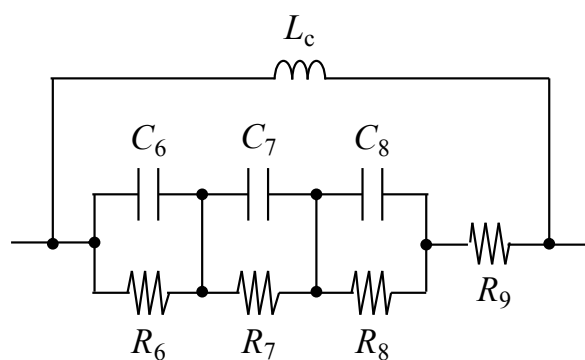
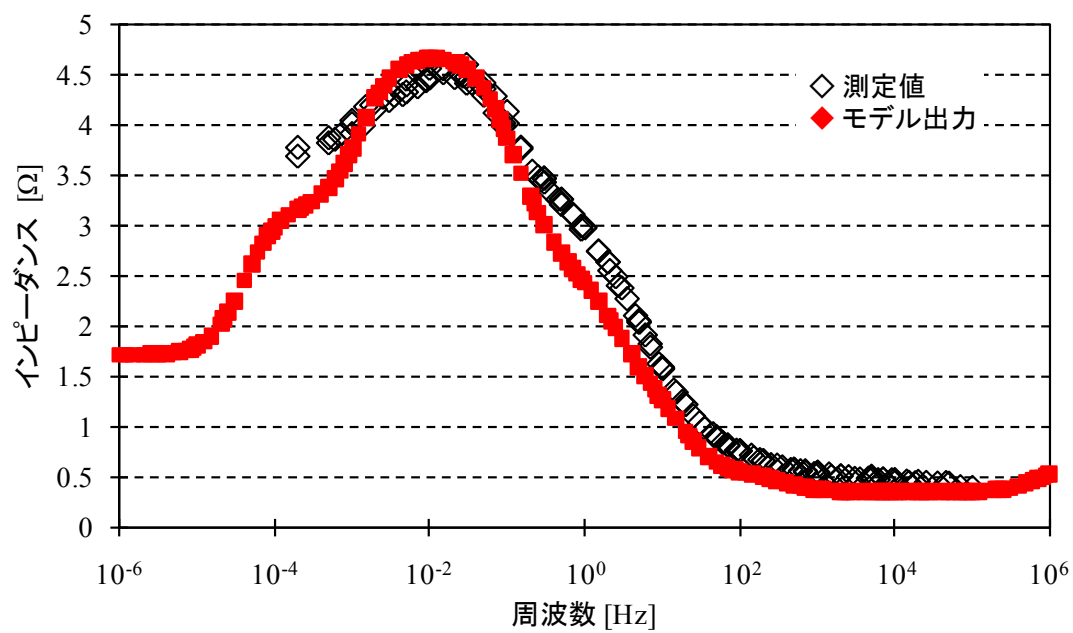


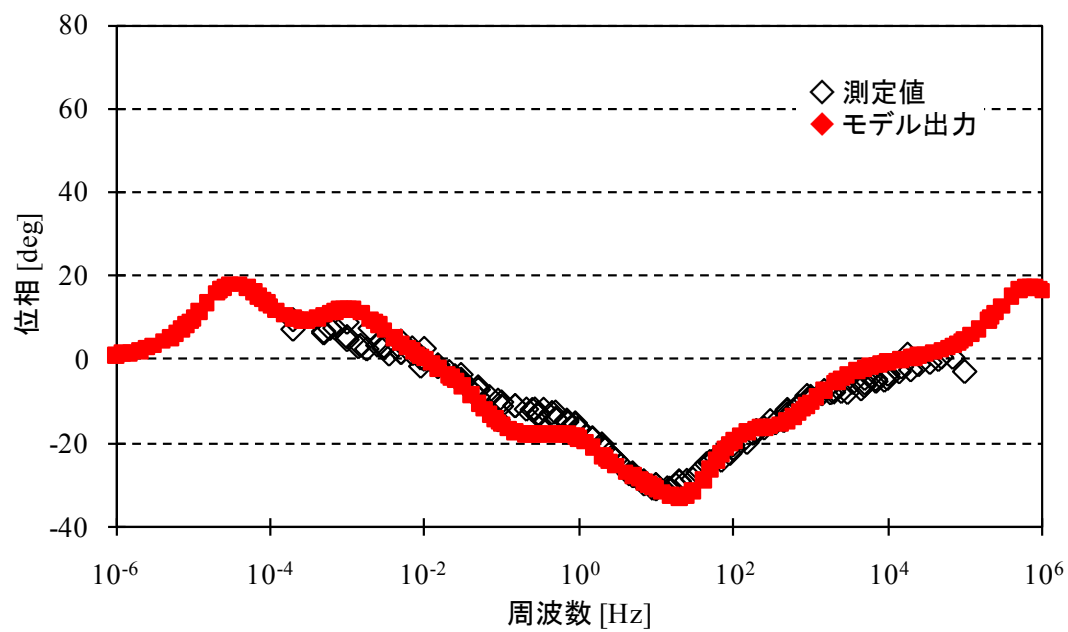
図 4.19 電流動作点によって付加する回路

表 4.2 図 4.17 のパラメータの値

R_6	0.8Ω	C_6	0.1F
R_7	0.4Ω	C_7	0.03F
R_8	0.1Ω	C_8	4mF
R_9	0.15Ω	L_c	5kHz



(a) インピーダンス特性



(b) 位相特性

図 4.20 周波数特性 (改良モデル)

図 3.21 を基に，電流動作点が 0～0.5A の範囲内にある場合のみ図 4.19 の回路を付加するように模擬装置を構築する。その構成を図 4.21 に示す。

4.3.節と同様，燃料電池に昇圧チョップを接続した際の出力電圧について，実験結果とシミュレーション結果を比較する。本節で用いる実験結果は 4.3.節で用いたものと同じである。電流動作点が 0～0.5A の範囲に存在する，duty factor = 0.3 及び 0.1 について，実機実験結果とシミュレーション結果を併せて図 4.22 及び図 4.23 に示す。それぞれ (a)観測波形，(b)電圧波形の変動分，(c)観測波形の周波数解析及び誤差率を示す。誤差率の算出には(4.1)式を用いる。また，基本波はキャリア周波数 10kHz 成分とする。

duty factor = 0.3 の場合は結果的に誤差率が増大した。一方で duty factor = 0.1 の場合は誤差率が低減した成分もある。概形はおおよそ表現できており，前節に比べて振幅が大きくなった。より詳細な検討が必要であるが，以上の様な方法で，軽負荷領域での動作特性も模擬できると考えており，今後の課題とする。

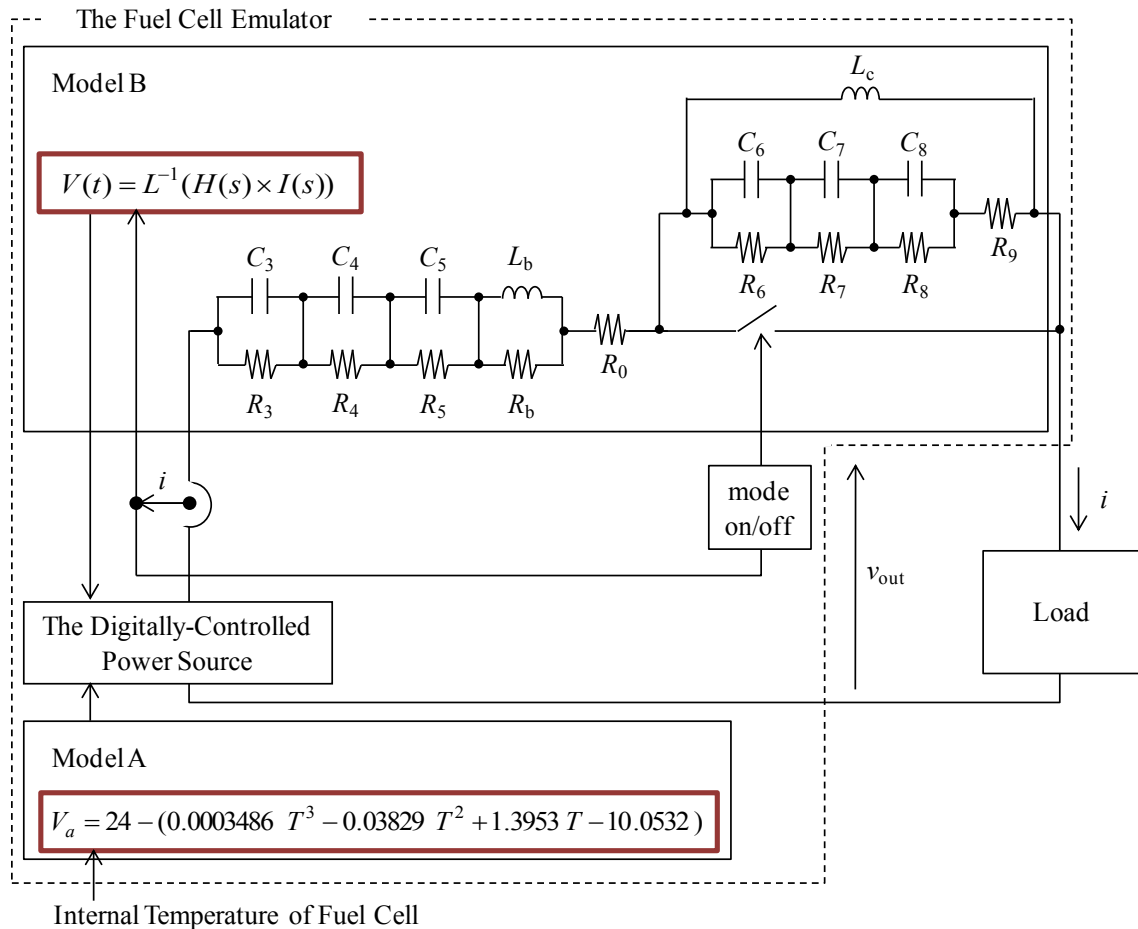
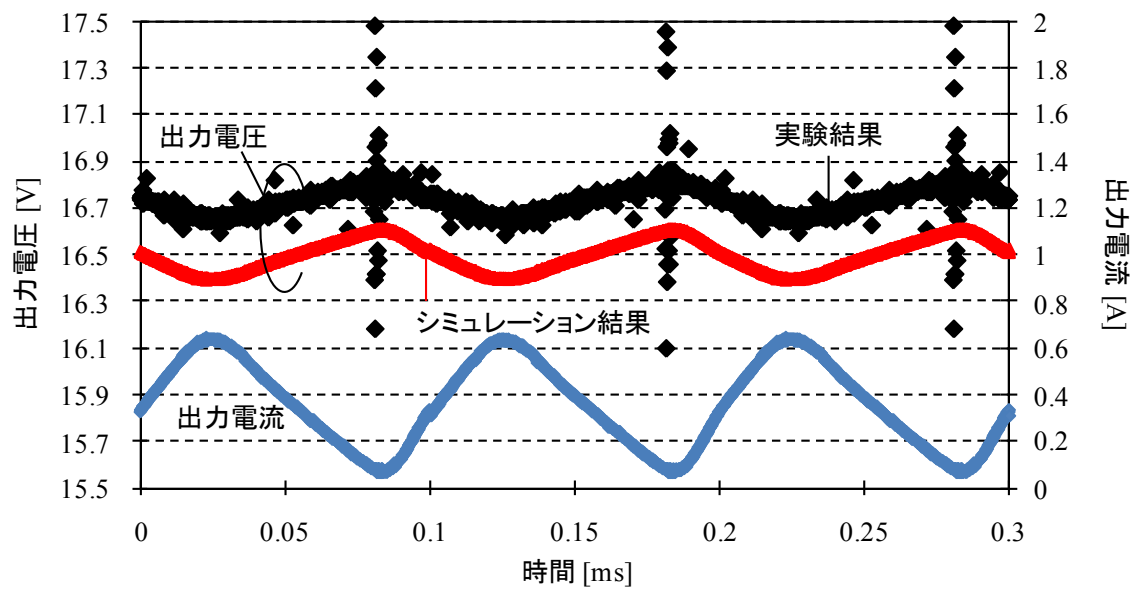
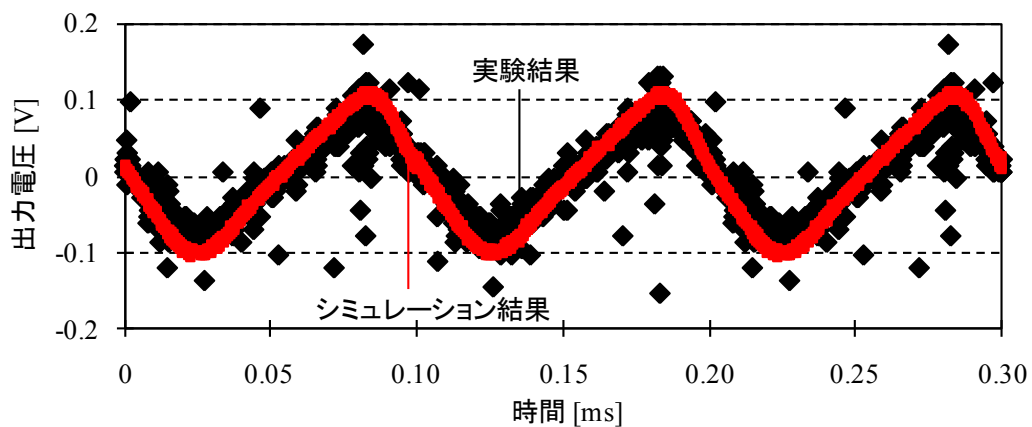


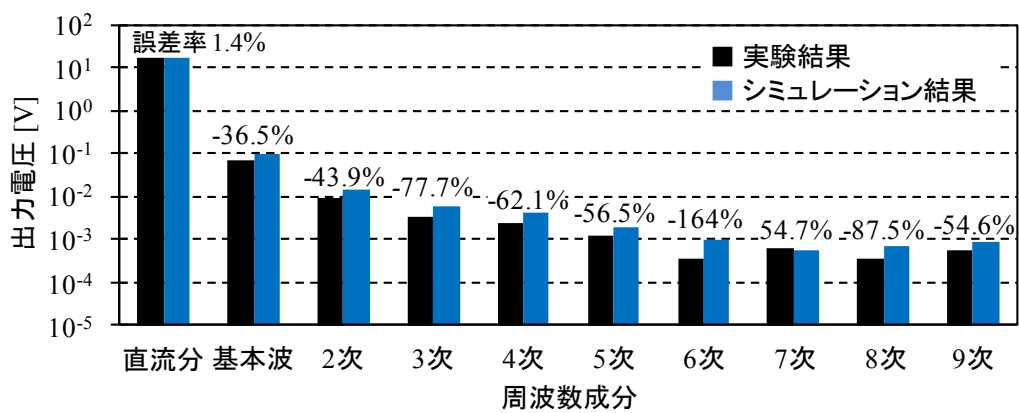
図 4.21 検討する燃料電池模擬装置の構成(2)



(a) 観測波形

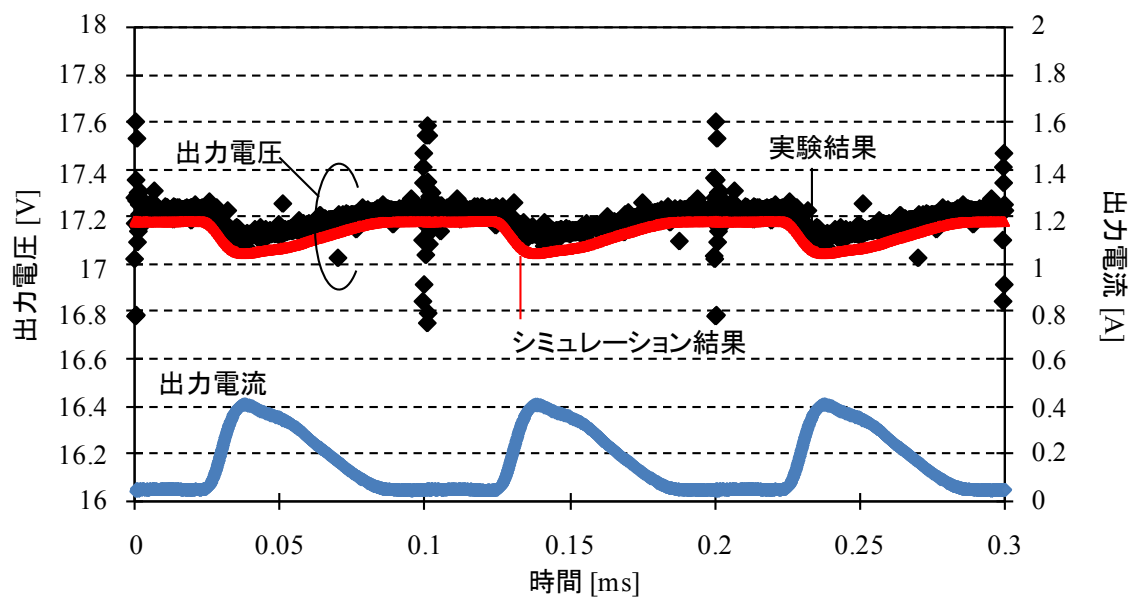


(b) 電圧波形の変動分

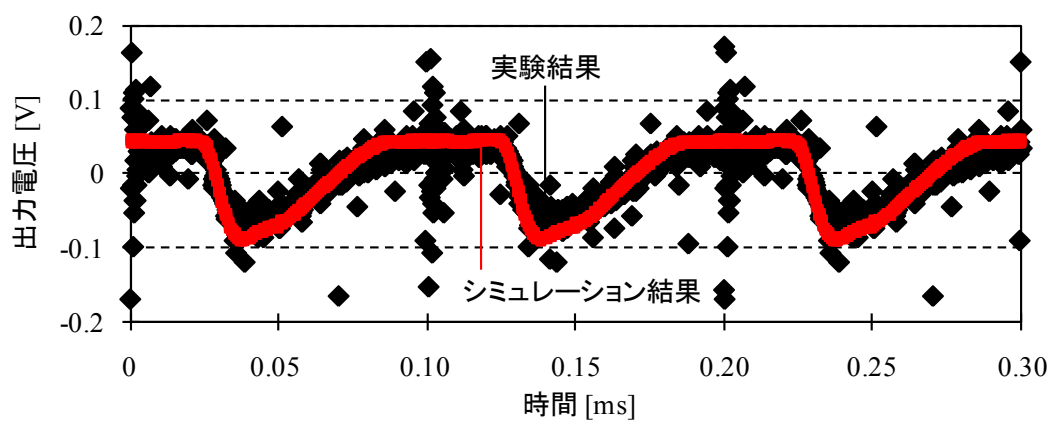


(c) 観測波形の周波数解析及び誤差率

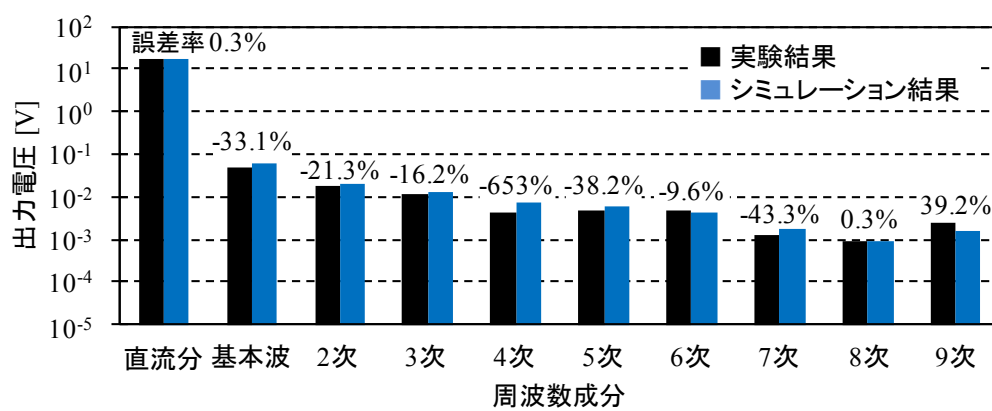
図 4.22 duty factor = 0.3 (改良モデル)



(a) 観測波形



(b) 電圧波形の変動分



(c) 観測波形の周波数解析及び誤差率

図 4.23 duty factor = 0.1 (改良モデル)

第五章 結言

5.1. 研究の成果

本研究では、燃料電池の模擬装置開発に向けた電氣的等価モデルの構築を目的とし、構築手順及び提案モデルの妥当性を示した。

固体高分子形燃料電池を対象として、燃料電池の定電流負荷特性と周波数特性を測定し、その結果を基に特性を模擬する等価モデルの構築プロセスを説明した。そして、提案モデルの定電流負荷特性及び周波数特性の確認をした後、昇圧チョッパを接続した場合の燃料電池の出力の模擬について、実機実験結果とシミュレーション結果を比較した。

以上より、模擬装置開発に向けた燃料電池の電氣的等価モデルとして、一般的に多く用いられる、定電流負荷特性の線形領域において、提案モデルは燃料電池の出力特性を模擬できることを示した。

5.2. 今後の課題

4.4.節で取り上げたように、定電流負荷特性の軽負荷領域では燃料電池の出力特性が、線形領域で動作させた場合と異なることが分かった。この領域における燃料電池の出力を模擬するには、さらに対策が必要である。特性の主な特徴は動作領域に依らず類似しているため、基本的な回路構成及び数式の導出方法は今回提案したものを用いることができると考えている。改善の方針は4.4.節に述べたとおりであり、さらに詳細な検討が必要である。

さらに、4.3.節では触れなかったが、周波数特性の模擬する範囲をさらに高周波数に拡大することで、燃料電池出力波形に見られるサージ電圧についても模擬できる可能性があると考えており、検討していく。

また、Model B の各パラメータの値を、今回は試行錯誤的に決定したが、システムティックな決定方法を検討する必要がある。

そして、最終的には等価モデルを利用して燃料電池の模擬装置を開発することが課題である。

参考文献

- [1] 矢島寛也, 船渡寛人, 小笠原悟司, 「システム同定による固体高分子型燃料電池のモデルの導出」, 平成 17 年電気学会全国大会, No.7-057 pp.83 (2005)
- [2] James Larminie, Andrew Dicks, 「解説 燃料電池システム」, オーム社
- [3] 田村英雄, 高須芳雄, 岩倉千秋, 池田宏之助, 内田裕之「固体高分子形燃料電池の全て」, エヌ・ティー・エス
- [4] 青山周平, 山村直紀, 石田宗秋, 「模擬装置開発に向けた燃料電池の電氣的等価モデルの構築」, 平成 20 年パワーエレクトロニクス学会誌(2008 年度), Vol.34 p.167-172
- [5] 飯田隆夫, 「電気化学の原点」, メタ・ブレーン
- [6] 高須芳雄他, 「燃料電池の解析手法」, 化学同人
- [7] Noriaki Wakabayashi, Masayuki Takeichi, Masayuki Itagaki, Hiroyuki Uchida, and Masahiro Watanabe, “Temperature-dependence of oxygen reduction activity at a platinum electrode in an acidic electrolyte solution investigated with a channel flow double electrode”, Journal of Electroanalytical Chemistry 574 (2005), p.339–346

論文目録

- [1] 植木, 山村, 石田:「電氣的等価モデルを用いた燃料電池の模擬装置の構築に関する考察」
平成21年電気学会産業応用部門大会, 1-89, I-513～516
- [2] 植木, 山村, 石田:「Study on Establishment of Electric Equivalent Model for Development of Fuel Cell Emulator」
International Conference on Electrical Machines and Systems 2009, DS2G5-12
- [3] 植木, 山村, 石田:「Study on Establishment of Electric Equivalent Model for Development of Fuel Cell Emulator」
International Conference on Electrical Machines and Systems 2010, PS-SRE-23
- [4] 今村, 植木, 山村, 石田:「GA を用いた燃料電池の等価回路の構築」
平成 23 年電気学会全国大会(発表予定)

謝辞

本研究の遂行および本論文の作成において、終始丁寧にご指導いただきました三重大学 電気電子工学 教授 工学博士 石田 宗秋先生，同大学 電気電子工学 准教授 工学博士 山村 直紀先生，同大学 電気電子工学 准教授 工学博士 残間 忠直先生，文部科学技官 廣田 栄毅氏に心より御礼申し上げます。

また，貴重な時間をさいて本論文の査読をしていただいた三重大学 電気電子工学 教授 工学博士 平井 淳之先生に心より御礼申し上げます。

平成 20 年 4 月の研究室配属から多くの時間を共に過ごしたエネルギーシステム研究室，制御システム研究室のみなさんに心から感謝いたします。

最後に何不自由なく大学生活を送らせていただいた両親に心から感謝し，厚く御礼申し上げます。