

複写可

三重大学大学院工学研究科 修士論文

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講座  
青山 周平

## 目次

1. 緒言 .....	4
1.1. 本研究の背景 .....	4
1.2. 本研究の目的 .....	6
1.3. 本論文の構成 .....	8
2. 燃料電池 .....	9
2.1. 燃料電池 .....	9
2.1.1. 燃料電池の構成 .....	9
2.1.2. 燃料電池の種類 .....	11
2.1.3. 燃料電池の発電原理 .....	13
2.1.4. 燃料電池の長所と問題点 .....	15
2.2. 本研究に用いる供試機 .....	16
2.3. モデリングの概要 .....	16
3. 燃料電池の特性の測定 .....	17
3.1. 実験装置の構成 .....	17
3.2. 定常特性の測定 .....	18
3.2.1. 定常特性 .....	18
3.2.2. 測定結果 .....	19
3.3. 周波数特性の測定 .....	21
3.3.1. 周波数特性 .....	21
3.3.2. 測定結果 .....	23

## 目次

---

4. 燃料電池の等価モデルの構築.....	25
4.1. モデル構築プロセス.....	25
4.2. 定常特性のモデリング.....	26
4.3. 周波数特性のモデリング.....	33
4.4. シミュレーションでの等価モデルの構築.....	43
5. 提案する等価モデルの検証.....	44
5.1. 定常特性の検証.....	44
5.2. 周波数特性の検証.....	46
5.3. 負荷ステップ変化における電圧応答.....	48
5.4. スイッチング回路負荷における電圧応答.....	55
6. 結言.....	61
6.1. 研究の成果.....	61
6.2. 今後の課題.....	62
参考文献.....	63
論文目録.....	64
謝辞.....	65

# 1. 緒言

## 1.1. 本研究の背景

近年、深刻化する環境問題の一つとして地球温暖化が大きく注目されている。地球温暖化の主な要因は化石燃料を消費することにより発生する温室効果ガスである。そのため、地球温暖化の対策として、温室効果ガスの排出を抑制することが求められている。そして、大気中における温室効果ガスの濃度を安定することを目的とし、1997年に第3回気候変動枠組条約締約国会議が開かれた。この会議で議決され、2005年に発効されたいわゆる京都議定書に代表されるように、環境負荷の少ない石油代替エネルギーである新エネルギーの導入が非常に重要なものとなってきている。新エネルギーの中でも、燃料電池(Fuel Cell)は発電時の排出物が水のみと、非常にクリーンなエネルギーである。また、他の新エネルギーである風力発電や太陽光発電による発電電力が風況や日射量といった自然環境によって大きく変動するのに対して、燃料電池は安定して電力を供給することができ、廃熱を利用したコージェネレーションによって総合効率が70%以上と非常に高い。加えて、化学変化を利用しているため低騒音・低振動であること、発電効率が出力の規模に依存せずに高効率を維持するといった特長を有しているため、携帯電話などのモバイル機器から自動車まで幅広い用途での実用化に大きな期待が寄せられ、目標として経済産業省は燃料電池車を2010年までに5万台、2020年までに500万台、定置用燃料電池を2010年までに220万kW、2020年までに1000万kWの導入を目指している。

## 1. 緒言

---

燃料電池を用いたシステムの実際の利用方法は、燃料電池の出力に数十 kHz の高周波でスイッチングを行う電力変換器を接続する場合や、系統に接続した場合の負荷変動など様々である。しかしながら、例えば電力変換器を接続する場合、電力変換器の電源は電気的な制御が可能であり、高速な応答が可能であるため定電圧源として動作させることが可能であるが、化学変化を利用する燃料電池は高速な応答が不可能であるため定電圧源として動作させることができず、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ないため、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。

また、現在の燃料電池製造コストは初期開発費を除いても 70 万円/kW 以上と非常に高価であり、初期開発費を含めるとより大きな予算を必要とする。燃料電池を用いたシステムの研究・開発にはそのように高価な燃料電池を用いているため大きなコストが掛かり、実用化に対する大きな妨げとなっている。それに加えて、燃料電池は劣化速度が速いことや、セル温度、水素・酸素といった入力気体の圧力や湿度によって出力が大きく変化してしまうため、燃料電池を用いたシステムを研究・開発する場合、全く同じ燃料電池を揃えることが現実的には困難であり、結果として、比較実験が非常に困難である。そのため、研究・開発において比較実験を容易に行うこと、より安価に行うことのできる模擬システムが求められている。

## 1. 緒言

---

### 1.2. 本研究の目的

前述のように燃料電池の比較実験を容易かつ安価に実施することは非常に困難である。そのため、燃料電池の試験を行う際には、燃料電池と等価な電氣的出力を得ることのできる模擬装置が非常に有用となる。現在、模擬装置は太陽光発電などにおいては構築され市販化されているが、燃料電池の模擬装置は存在しない。

模擬装置の開発手順として、まず、シミュレーションにおいて等価な出力を得ることができる等価モデルを構築し、それを基にして模擬装置を構築することが考えられる。

現在、燃料電池の定常状態を模擬できる定常モデルは一般的に知られている<sup>(1)</sup>。燃料電池の利用方法の一例としては既述のように、燃料電池の出力に電力変換器を接続することが想定されており、燃料電池の応答速度が遅いことを考慮すると、定常モデルのみでは表現が不十分であると考えられる。現在の段階で実際に運用されている燃料電池システムは燃料電池と電力変換器の間に容量の大きなキャパシタがバッファとして挿入されていることによって、燃料電池側から見た負荷の急峻な変動はキャパシタに吸収されるため、定常モデルのみで十分に模擬可能であった。しかしながら、この大容量キャパシタは電解コンデンサに代表されるように大きな体積を有しており、燃料電池システムの小型化に対して大きな妨げとなり、今後の燃料電池の普及に伴い、キャパシタ容量低減の要望が高まると考えられる。その結果、燃料電池の過渡状態を表現可能な等価モデルが必要となる。過渡状態を表現可能な等価モデルの報告例は少ないが、システム同定を用いた数式モデルなどが報告されている<sup>(4)</sup>。しかしながら、数式モデルを模擬装置に実装することを考えた場合、数十 kHz 以上の高速演算処理の可能な CPU や信号変換装置を必要とするため、現在の技術において構築することは困難である。

## 1. 緒言

---

そのため、本論文では過渡状態を電気回路で表現することによって、実際に模擬装置に実装可能なことを前提とした等価モデルを提案する。そして、提案する等価モデルが有用であるか実機実験結果とシミュレーション結果を比較することによって検証する。

### 1.3. 本論文の構成

本論文は、以下のように構成されている。

2章では一般的な燃料電池の説明と本研究に用いた供試機の説明、等価モデル構築の概要を説明する。

3章では等価モデル構築に用いる燃料電池の特性の説明と測定方法、測定結果を示す。

4章では3章で得られた燃料電池の特性を用い、燃料電池の等価モデル構築方法を説明する。

5章では4章で構築した燃料電池の等価モデルが想定通りの特性を得られているか確認した後、負荷がステップ的に変化した過渡状態における模擬と、実際に負荷に高周波スイッチングを伴う電力変換器を接続した場合の模擬を、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、提案する燃料電池の等価モデルの有用性を検証する。

## 2. 燃料電池

### 2.1. 燃料電池

#### 2.1.1. 燃料電池の構成

燃料電池はセルと呼ばれる動作を司る最小単位の集まりから成り立っている。このセルの構造を図 2.1 に示す。セルはセパレータ、電極、電解質で構成されている。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。電極材料は燃料電池の種類によって異なるが、代表的なものとしては白金が用いられており、水素と酸素の反応を促進させる役割を担う。電解質はイオンを陰極から陽極へと運ぶ役割を担い、一般的に電解質の種類によって燃料電池の種類が分類される。これについては 2.1.2. で詳しく述べる。

セルは理論的な起電力は 1.23V、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。例えば、自動車用燃料電池では数百個のセルを積層したスタックが一般的である。接続方法は一般的にはバイポーラ・プレートを用いており、これによって各セルへの気体の供給、セルの冷却を実現している。

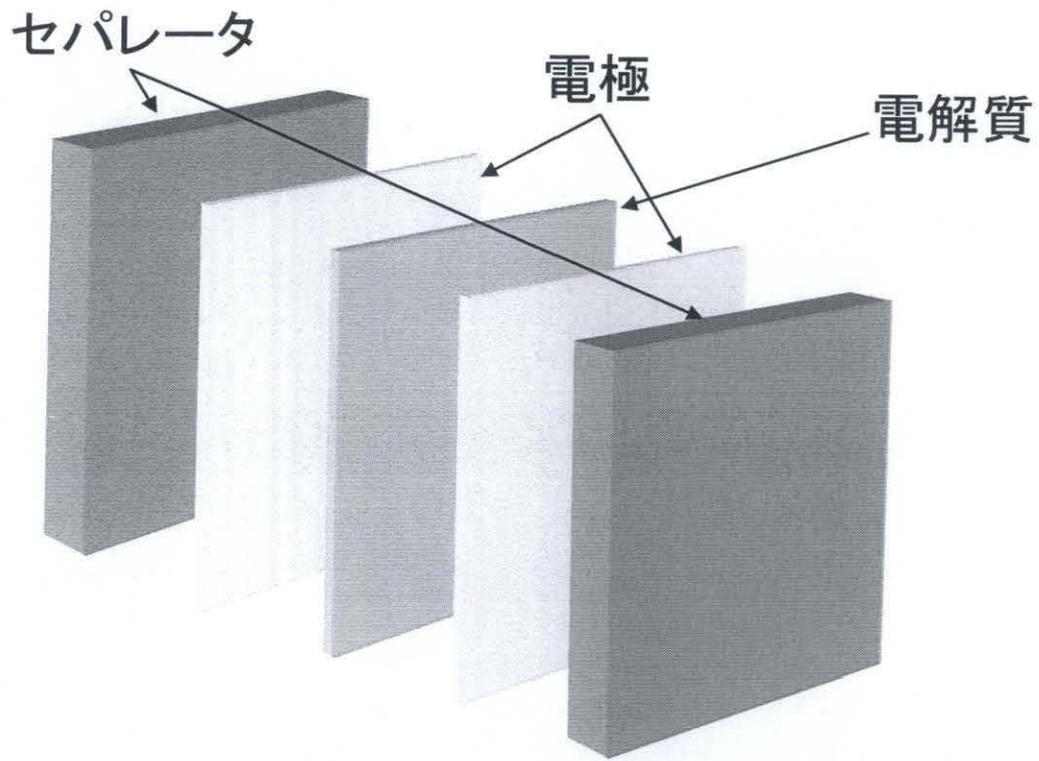


図 2.1 燃料電池セルの構造

## 2. 燃料電池

---

### 2.1.2. 燃料電池の種類

燃料電池は一般的に酸素と水素から、電気化学反応によって直接電力と熱を取り出す方式であることにおいて共通の原理であるが、電解質の種類によって幾つかに分類されている。

それらの中で地上での電源を目的に開発が積極的に進められているのは、リン酸形 (PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell)、固体高分子形 (PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell)、熔融炭酸塩形 (MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)、固体酸化物形 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) である。宇宙用では 1965 年に打ち上げられた人工衛星ジェミニ 5 号で初めて実用化されたアルカリ形 (AFC: Alkaline Fuel Cell) が挙げられる。しかしながら、AFC の電解質として用いられている水酸化カリウムが空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カリウムになる。これにより、電解質を通るイオン濃度が減少し、セル性能が大きく劣化するため地上での利用は考慮されていない。地上利用が目的で開発が進められているものの性質を表 2.1 に示す。ただし、表 2.1 における作動温度とはその温度付近で最も高い性能が持続できる温度を指し、CHP は Combined Heat Power (熱電併給) の略である。

本研究ではこの中でも電解質に導電性高分子膜を用い、作動温度が室温～100℃と常温での利用が可能であり、そして、今後家庭用の小型分散電源やモバイル機器等の小型機器の電源、燃料電池車の駆動電源としての利用が期待されている固体高分子形を用いている。

## 2. 燃料電池

表 2.1 燃料電池の種類

	SOFC	MCFC	PAFC	PEFC
電解質	ジルコニア系 セラミックス	Li-Na/K 系 炭酸塩	リン酸	高分子電解質膜
作動温度	500~1000℃	約 650℃	約 220℃	常温~100℃
発電効率	40~50%	40~50%	36~38%	30~35%
移動イオン	$O^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$H^+$	$H^+$
用途	大規模発電	大規模発電	工業用 CHP	家庭用 CHP
	分散発電	分散発電	業務用 CHP	モバイル機器用

## 2. 燃料電池

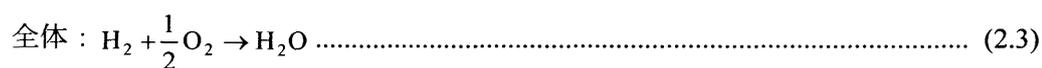
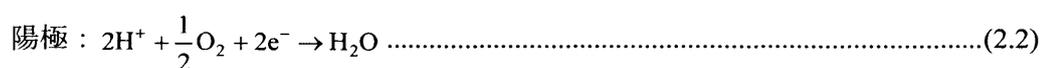
---

### 2.1.3. 燃料電池の発電原理

燃料電池の発電原理を説明するための模式図を図 2.2 に示す。ただし、電解質が酸性の燃料電池とアルカリ性の燃料電池で若干異なるが、一般的にはほとんどが酸性電解質燃料電池であるため、ここでは酸性電解質燃料電池を例に説明する。

燃料電池は水の電気分解の逆の反応であり、水素と酸素の化学反応によって水を生成する過程において発電する。その反応の化学反応式を(2.1)式～(2.3)式に示す。

まず、陰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、電子は陰極から負荷を通り陽極へ流れる。そして、陽極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。



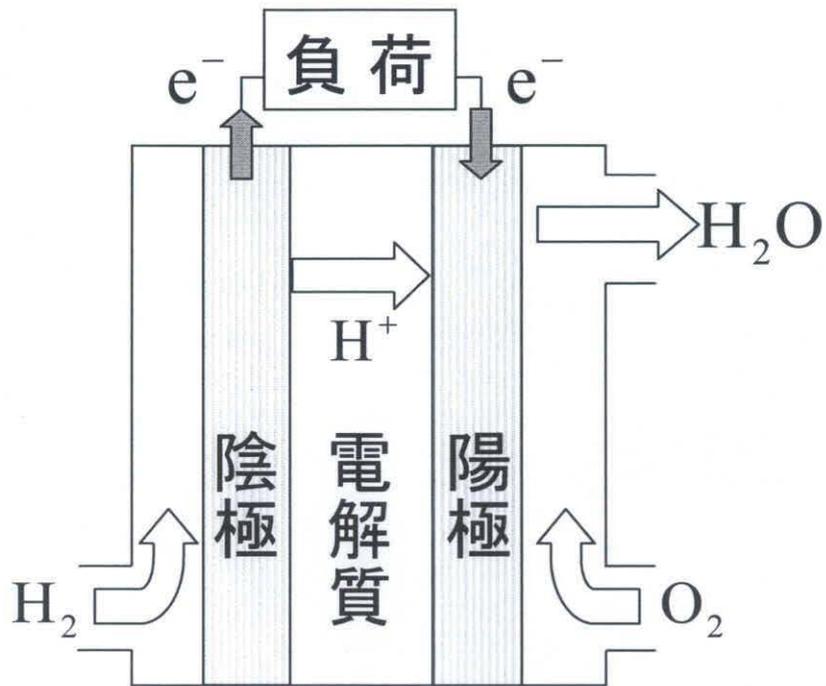


図 2.2 酸性電解質燃料電池の模式図

## 2. 燃料電池

---

### 2.1.4. 燃料電池の長所と問題点

他のクリーンエネルギーに対する燃料電池の長所と問題点について記す。

長所としては、風況や日射量などの自然環境に依存せずに安定した電力を供給することができること、設置場所における制約が少ないこと、発電効率が出力の規模にあまり依存しないこと、発電時に騒音や振動がほとんどないことが挙げられる。

それに対して問題点としては以下のこと等が挙げられる。風力発電用風車の設置価格が約 20 万円/kW であるのに対して、燃料電池は本体価格が約 70 万円/kW と高いこと。風力発電用の風車が 15 年以上の寿命があるのに対して、燃料電池スタックは寿命の長い種類のもので 4 年程度と短いこと。主な燃料である水素の代表的な製造方法である水蒸気改質法では、水素製造過程において二酸化炭素やメタンといった温室効果ガスを排出すること。水素の貯蔵方法として、常圧では大きな体積を占めるが液化する温度が 20K と非常に低いため液体燃料として貯蔵することが難しく、高圧ボンベや水素吸蔵合金などを用いても依然、容器体積あたりに貯蔵できる水素は少ないこと。燃料電池を家庭用として設置する場合において消防法や毒物劇物取扱法などの規制緩和が必要なこと。

### 2.2. 本研究に用いる供試機

本研究で用いる供試機の仕様を表 2.2 に示す。ただし、表 2.2 における定格出力とは、連続使用時において保証されている最低限の出力値を指す。そのため、出力が定格以下となった場合は劣化したものと判断する。

表 2.2 供試機の仕様

種類	固体高分子形
定格出力	50[W]
セル数	20
セル面積	41.25[cm <sup>2</sup> ] (7.5[cm]×5.5[cm])

### 2.3. モデリングの概要

本研究における燃料電池の等価モデルは、燃料電池の電気的特性の実験結果を基にして構築していく。具体的には、定常状態を表現するためのモデル構築に用いる定常特性に加えて、過渡状態を表現するためのモデル構築に用いる周波数特性を基に構築する。ここでの周波数特性とは、周波数を様々に変化させた場合の燃料電池の内部交流インピーダンスの特性と位相特性を指す。

### 3. 燃料電池の特性の測定

#### 3.1. 実験装置の構成

図 3.1 に実験装置の模式図を示す。実験装置はまず、水素吸蔵合金ポンベより純水素を得て、レギュレータによって約 0.07MPa の安定した気圧にされた後、燃料電池に供給される。そして、酸素は大気からの空気を 10 個のファンを用いることによって大気圧で燃料電池に供給されている。図 3.1 における電磁制御弁とは、燃料電池の生成水が電極を覆うことによって燃料電池の出力が低下してしまう現象(フラッディング現象)を抑制する装置であり、弁を開放(パージ)することによって水素の圧力によって電極の水が掃き出される仕組みとなっている。そして、過電流に対する保護回路を介して負荷を接続する。

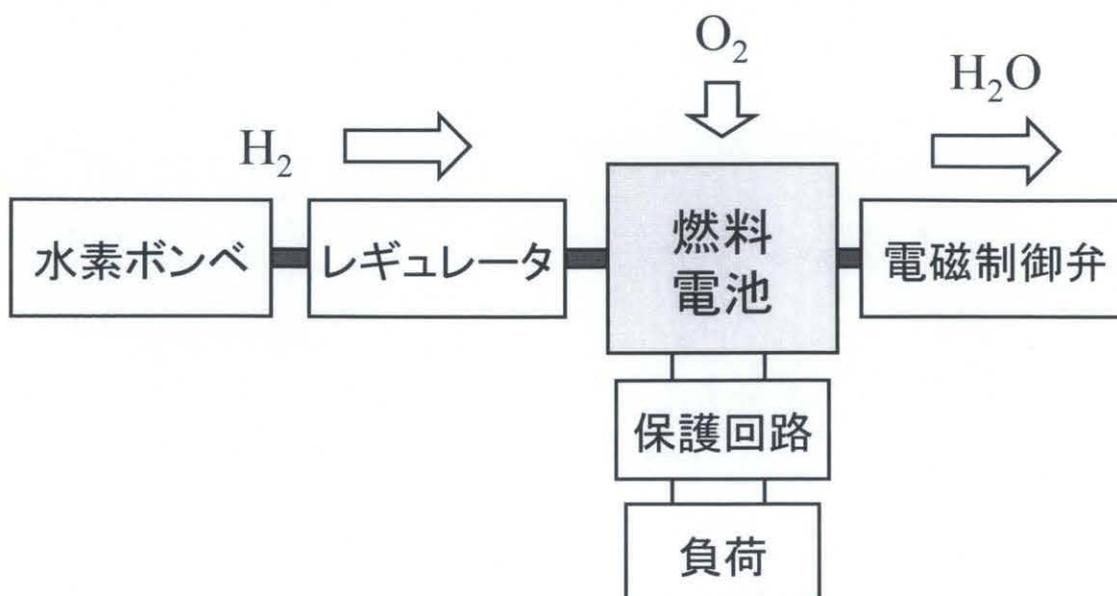


図 3.1 実験装置の模式図

### 3.2 定常特性の測定

#### 3.2.1. 定常特性

定常特性とは図 3.1 の実験装置における負荷に抵抗を用いて、定常状態における燃料電池の出力電流  $I$  と出力電圧  $V$  の関係を調べた特性である。ここでの定常状態とは、測定開始から数十秒経過後、出力電流と出力電圧がほぼ一定値に収束した状態を指す。定常特性の測定回路の模式図を図 3.2 に示す。今回の測定では、負荷には ARRAY 社製直流電子負荷装置を定電流負荷モードで用いる方法とスライド抵抗を用いる方法で測定する。

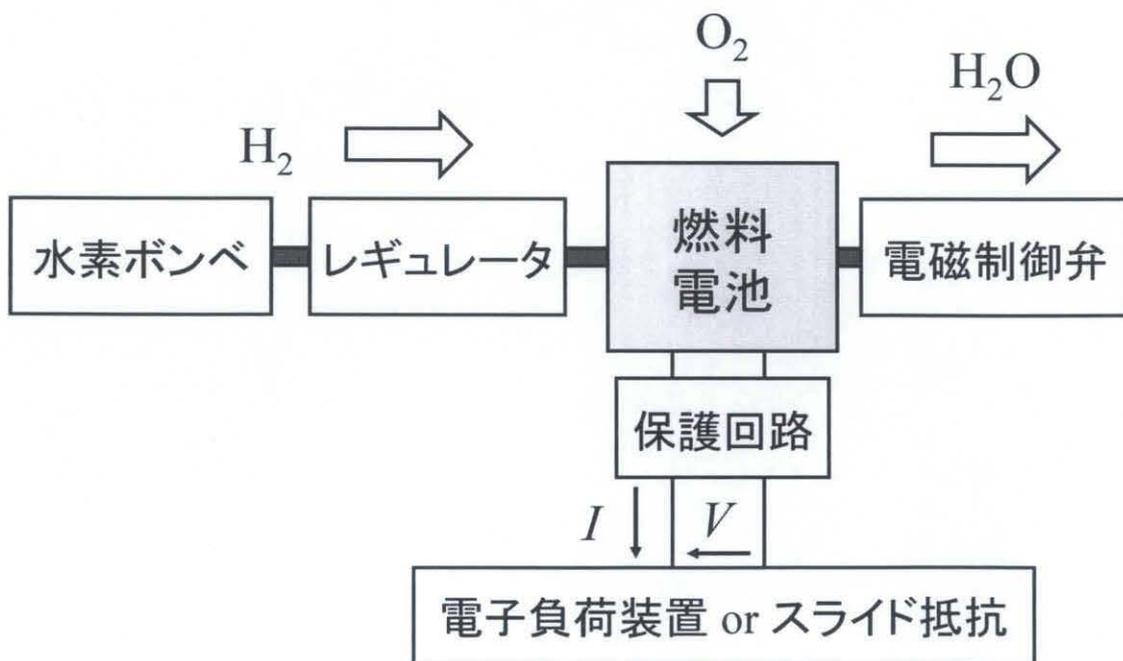


図 3.2 定常特性の測定回路の模式図

#### 3.2.2. 測定結果

前節において述べた測定方法によって定常特性を測定する。測定は測定日を変更して計6度行う。各測定日における測定条件として大気圧, 周囲温度, 湿度を表3.1に示す。ただし, 共通の条件としてレギュレータの気圧が約0.07MPaに設定する。また, 負荷には測定日3のみスライド抵抗を用い, 他の測定日では直流電子負荷装置を用いる。そして, 測定日1から5では低電流における軽負荷から高電流における重負荷へと測定を進めた際の測定結果を示し, 測定日6では重負荷から軽負荷へと測定を進めた際の測定結果を示す。その結果を図3.3に示す。一般的に, 燃料電池の特性を測定する場合, 出力電流[A]の代わりに出力電流をセル面積で除算した出力電流密度[A/cm<sup>2</sup>]で表記する(1A=約0.02424A/cm<sup>2</sup>)。しかしながら, 本研究においては燃料電池を電源として用い, 電力変換器を負荷に接続することを想定しているため, 出力電流密度よりも出力電流の方が扱いやすいという理由から出力電流で表記する。

図3.3より, 測定日6の結果のみ出力電圧が全体的に高くなっていることが確認できる。この原因は, 重負荷において測定を開始したため, 測定開始から燃料電池セルの温度が高くなり, その結果出力が高くなったと考えている。そして, 他の測定日においてはほぼ同値となっているが, 若干のばらつきがあることも確認できる。これは, 実験の際に考慮していない条件の設定が測定日によって異なったためであると考えている。そのため, 定常状態におけるある程度のばらつきは避けられない誤差として考え, 考察の対象には含まないこととする。

### 3. 燃料電池の特性の測定

表 3.1 各測定日での測定条件

	大気圧[hPa]	周囲温度[°C]	湿度[%]
測定日 1	1000	24.9	65
測定日 2	1005	24.9	60
測定日 3	1007	24.1	72
測定日 4	1012	24.5	70
測定日 5	1012	24.3	73
測定日 6	1017	25.3	68

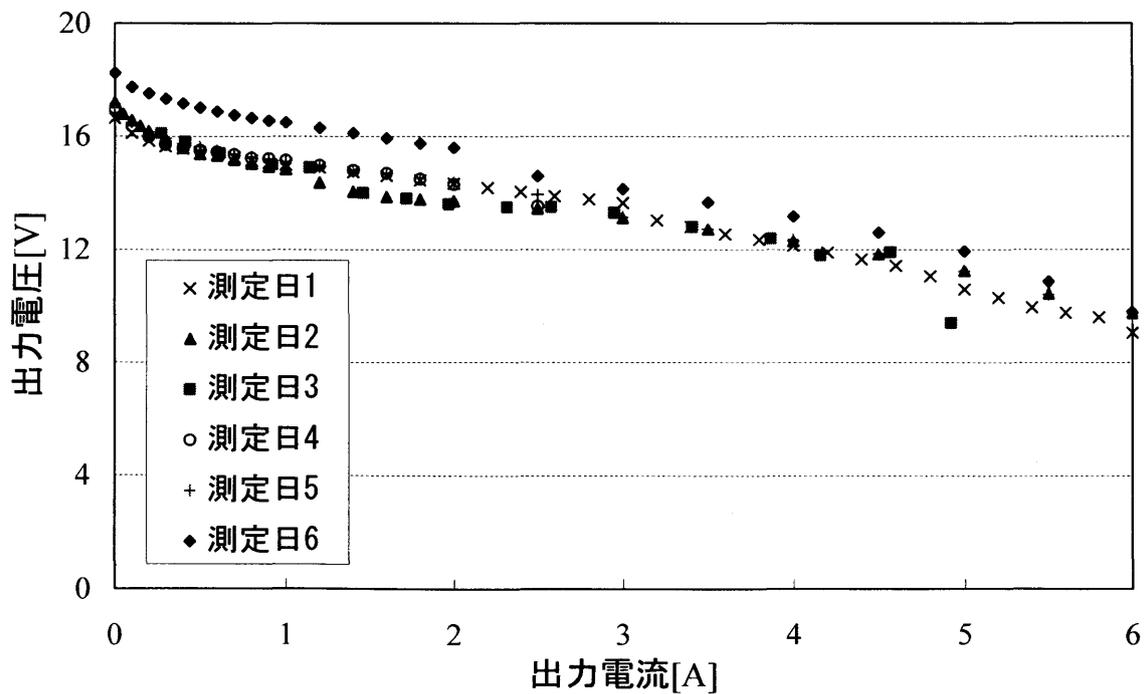


図 3.3 定常特性の測定結果

## 3.3. 周波数特性の測定

### 3.3.1. 周波数特性

周波数特性とは周波数に対する燃料電池の内部交流インピーダンスの特性であり、インピーダンスの大きさと、出力電流に対する出力電圧の位相差の関係である。周波数特性の測定回路を図 3.4 に示す。測定は図 3.1 の実験装置の負荷として図 3.4 の測定回路を接続して行う。

FET に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との間には線形の関係性があることが一般的に知られている。そのため、図 3.4 の測定回路の FET のゲート・ソース間に指令値  $v_1$  をピンチオフ電圧のオフセットを乗せた正弦波として与えることによって、 $R$  に流れる電流が制御され、実質的には燃料電池に電流源負荷を接続して動作させている。ただし、 $R$  は無誘導抵抗を用いているため、 $R$  による周波数特性への影響はない。また、図 3.4 にはバッテリーを接続している。これは、燃料電池の出力電圧におけるオフセット分を省いて観測することによって、測定機器の限られた分解能において脈動分のみを精度良く観測するために用いている。なお、バッテリー電圧はテストによって測定し、12.0V である。

そして、出力電流  $i$  を図 3.5 のように正弦波に制御し、その正弦波の peak to peak にあたる  $I_{p-p}$  を 0.60A 一定とし、オフセットにあたる  $I_{ofs}$  を変化させた場合の特性を測定する。

### 3. 燃料電池の特性の測定

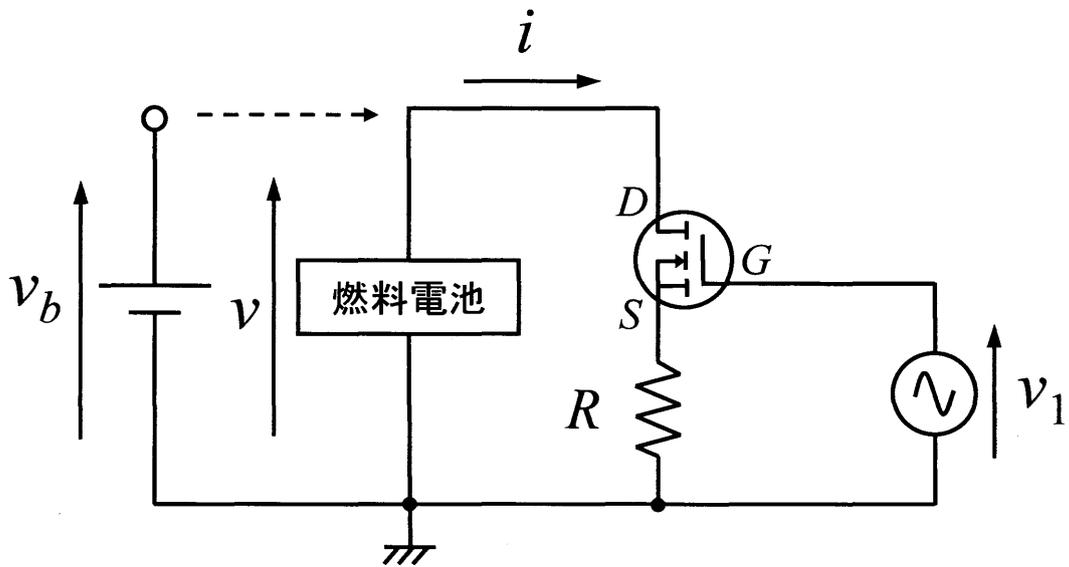


図 3.4 周波数特性の測定回路

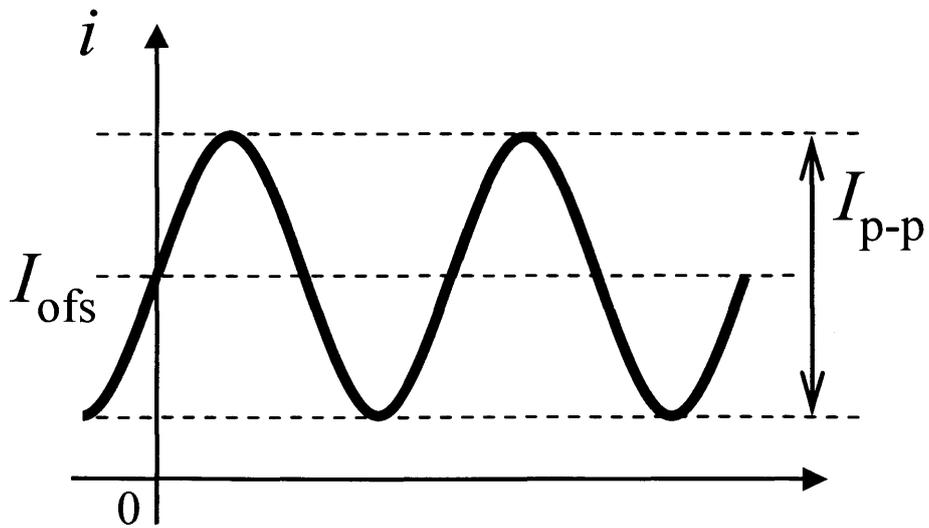


図 3.5 出力電流波形の概念図

### 3.3.2. 測定結果

前節で述べた測定方法によって燃料電池の周波数特性を測定する。交流インピーダンスの大きさ  $Z$  は出力電流と出力電圧それぞれの基本波成分( $i_{\sin}$ ,  $v_{\sin}$ )を FFT 解析することにより抽出し、それらを(3.1)式のように計算することによって求める。位相差  $\phi$  は観測した電流・電圧波形を Excel において、オフセット分を除き、脈動分を除去するための LPF(Low Pass Filter)を通した後、得られる零クロス点の相対時間  $\Delta t$  を用いて(3.2)式のように計算することによって求める。

今回の測定では、 $I_{\text{ofs}}$  が 1.0A, 3.0A, 5.0A の 3 通りの場合を 1mHz~100kHz の周波数帯域において測定する。インピーダンスの大きさを求めたインピーダンス特性の測定結果を図 3.6 に、インピーダンスの位相差を求めた位相特性の測定結果を図 3.7 に示す。

$$Z[\Omega] = \frac{v_{\sin}}{i_{\sin}} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\phi[\text{deg}] = \frac{\Delta t}{T} \times 360 = \Delta t \times f \times 360 \dots\dots\dots (3.2)$$

3. 燃料電池の特性の測定

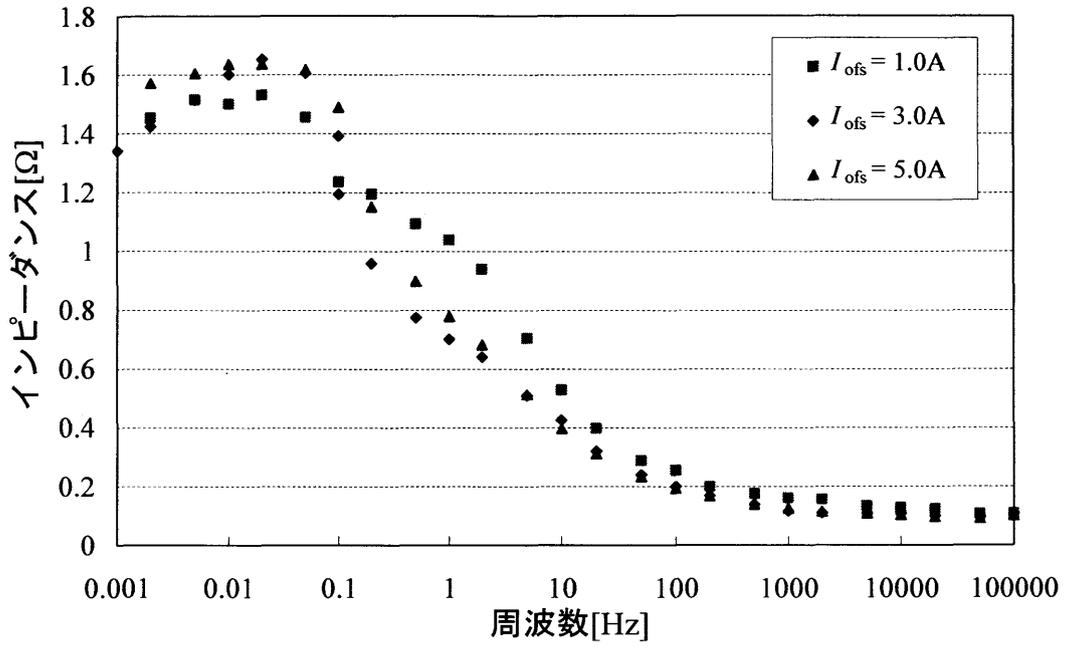


図 3.6 インピーダンス特性

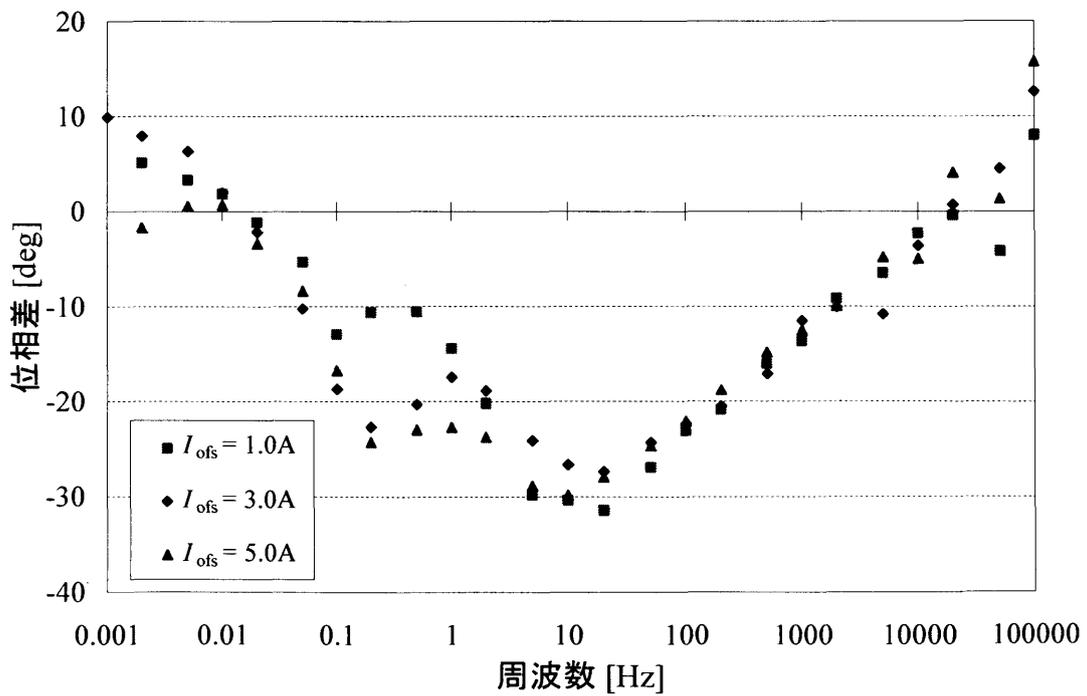


図 3.7 位相特性

## 4. 燃料電池の等価モデルの構築

### 4.1. モデル構築プロセス

2.3.において説明したように、本研究では燃料電池の電気的特性を実験によって求め、その結果を基にして燃料電池の等価モデルを構築する。今回の等価モデルは電気的特性の中でも3.2.と3.3.で求めた定常特性と周波数特性を基にしたモデルを構築する。

構築の手順として、最初に定常特性を基にして定常モデルを数式モデルとして求める。次に、周波数特性を基にして、過渡状態も表現するための等価モデルを受動素子である抵抗( $R$ )、インダクタンス( $L$ )、キャパシタンス( $C$ )を用いた等価電気回路モデルとして求める。等価回路モデルは、先に回路構成を周波数特性が表現できるように試行錯誤的に決定し、その後、等価回路モデルに用いるパラメータを試行錯誤的に求める。最後に、決定した定常モデルと等価回路モデルである過渡モデルとを、シミュレーション回路において構築する。

## 4.2. 定常特性のモデリング

定常特性のモデリングは文献(1)を参考に求める。

燃料電池の定常特性は(4.1)式の形で表現することができる。

$$V = E_0 - ri - A \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0} \right) - \left\{ B \ln \left( 1 - \frac{i}{i_1} \right) \right\} \dots\dots\dots(4.1)$$

(4.1)式において、 $V$ : 燃料電池の出力電圧[V],  $i$ : 出力電流密度[A/cm<sup>2</sup>],  $E_0$ : 開回路電圧[V],  $r$ : 比面積抵抗[Ωcm<sup>2</sup>],  $A$ : Tafel 勾配[V],  $i_n$ : 内部電流密度[A/cm<sup>2</sup>],  $i_0$ : 交換電流密度[A/cm<sup>2</sup>],  $B$ : 定数[V],  $i_1$ : 限界電流密度[A/cm<sup>2</sup>]である。そして、(4.1)式の右辺の第 2, 3, 4 項の電圧降下は燃料電池の内部損失であり、電気化学の分野ではこの損失のことを過電圧と呼ぶ。そして、(4.1)式の第 2 項は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よって発生するため、抵抗過電圧  $\Delta V_{ohm}$  と呼ばれる。第 3 項は電極の表面で起きる反応が遅いことにより生じ、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ため、活性化過電圧  $\Delta V_{act}$  と呼ばれる。第 4 項は水素を消費するときに電極表面で反応物質の濃度が変化して、濃度の減少によって十分な反応物質を電極表面に輸送できないことから生じるため、拡散過電圧  $\Delta V_{trans}$  と呼ばれる。

(4.1)式を用いた定常特性の導出例を図 4.1 に示す。図 4.1 からわかるように、拡散過電圧は燃料電池の出力が低下する領域を表現する項である。しかしながら、燃料電池を利用する場合、この出力が低下する領域においては利用しないことに加えて、反応物質を電極

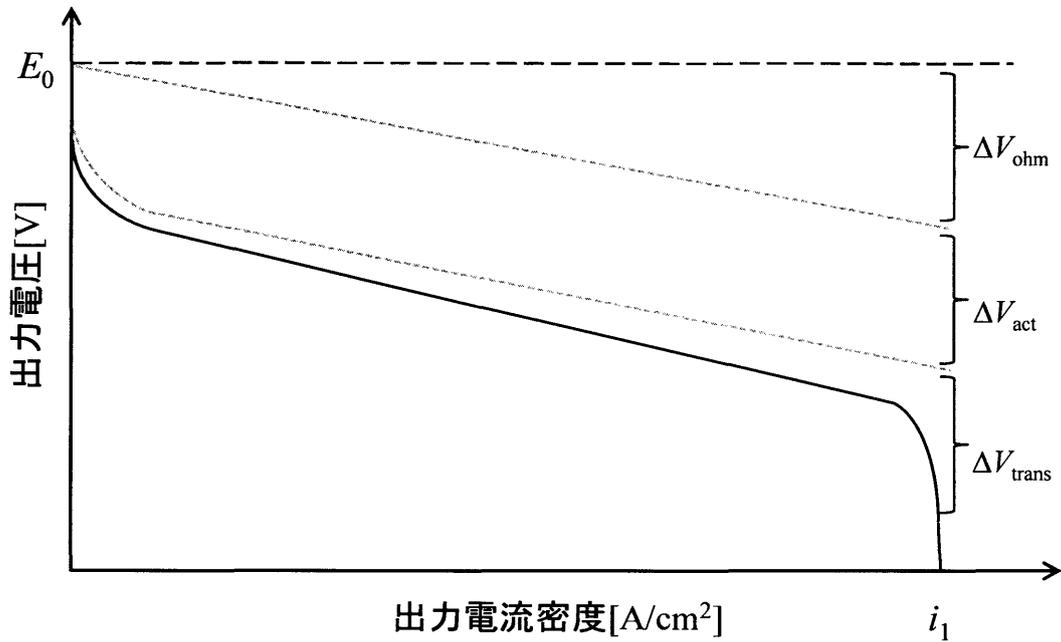


図 4.1 定常特性の導出例

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によって改善することができることから、本研究では拡散過電圧の項を省略する。その結果、(4.1)式を(4.2)式のように変形することができる。

$$V = E_0 - ri - A \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0} \right) \dots\dots\dots (4.2)$$

以下に(4.2)式に用いられているパラメータの導出方法を記す。

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

---

開回路電圧  $E_0$  は, (4.3)式のように定義されている。したがって, (4.3)式に各定数を代入することによって導出する。

$$E_0 = -\frac{\Delta g_f}{2F} \dots\dots\dots(4.3)$$

(4.3)式において,  $\Delta g_f$ : ギブスの自由エネルギー(燃料電池が生成する水の状態によって決まり, 25°Cの液体の場合-237.2[kJ/mol]),  $F$ : ファラデー定数(アボガドロ定数  $N \times$  電子の電荷  $e$ ,  $N$ :  $6.022 \times 10^{23}$ ,  $e$ :  $1.602 \times 10^{-19}$ [C])  $9.647 \times 10^4$ [C]である。以上より, 1セルあたりの開回路電圧  $E_0$  は約 1.2V と導出され, 本研究で用いている供試機のセル数は 20セルであるため, 約 24V と導出される。

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

比面積抵抗  $r$  は、定常特性において線形とみなすことができる領域の勾配に相当する。導出方法は、線形とみなすことができる領域において連続する 4 点から線形近似し、その中から最小値を採用する。ここで最小値を用いるのは、抵抗過電圧は出力電流密度の大きさに比例して大きくなるが、活性化過電圧は出力電流密度が非常に小さい領域でのみ影響が大きいので、低電流領域以外の領域が線形で勾配が一定であると仮定すれば、抵抗過電圧は勾配が最小の領域を表現することができればよいのである。今回は図 3.3 における測定日 6 のデータを基に、線形領域とみなした 19 個の実験結果から 16 個の勾配を得る。その導出方法を図 4.2 に示す。図 4.2 では紙面の都合上求めた勾配の一部を掲載している。そして、それらの中から最小値を採用した結果、比面積抵抗  $r$  は  $35.269\Omega\text{cm}^2$  と導出される。

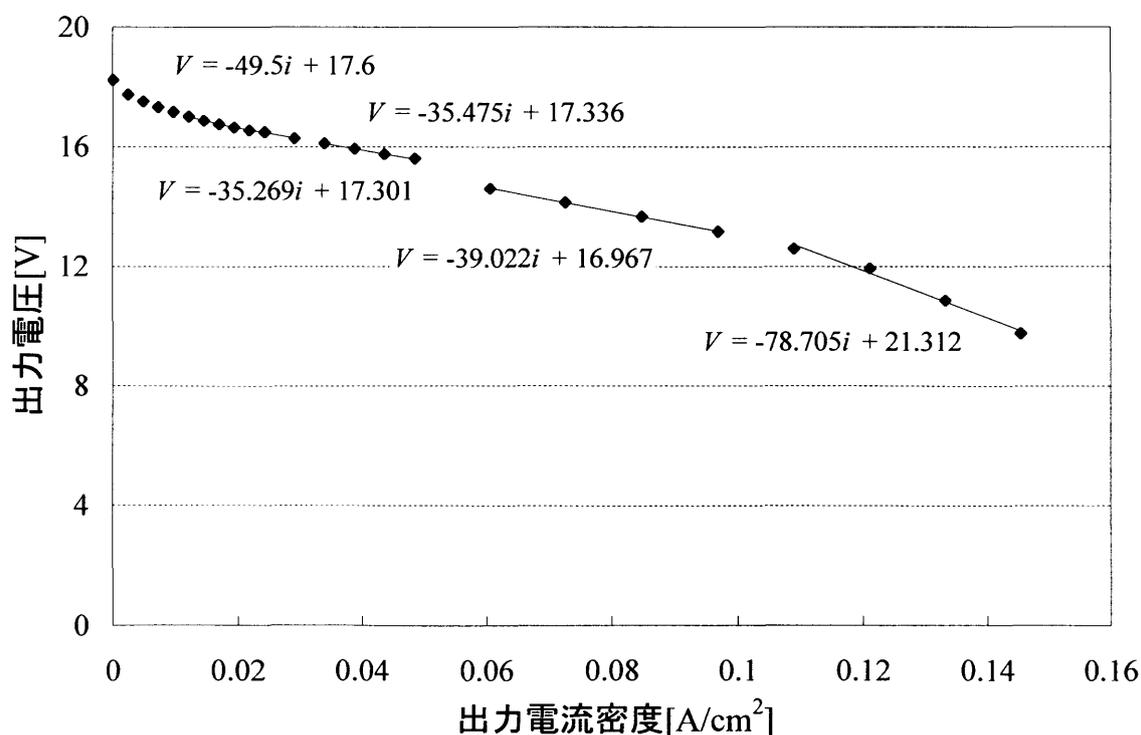


図 4.2 比面積抵抗  $r$  導出

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

---

Tafel 勾配  $A$  は、定常モデルの式を近似することによって導出する。(4.2)式における過電圧  $\eta$  のみ求めたものを(4.4)式に示す。

$$\eta = \Delta V_{ohm} + \Delta V_{act} = ri + A \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0} \right) \dots\dots\dots(4.4)$$

そして、一般的に  $i_n$  は微小であるため  $i=0$  近傍の低電流領域以外において  $\Delta V_{act}$  は(4.5)式のように変形することができる。

$$\Delta V_{act} = A \ln \left( \frac{i + i_n}{i_0} \right) = A \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \dots\dots\dots(4.5)$$

その結果、(4.4)式と(4.5)式より、過電圧には(4.6)式のような関係が成り立つ。

$$\Delta V_{act} = \eta - \Delta V_{ohm} = A \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \dots\dots\dots(4.6)$$

図 3.3 における測定日 6 のデータより、(4.6)式のように過電圧  $\eta$  のみを抽出して、その過電圧から抵抗過電圧  $\Delta V_{ohm}$  を減算することにより近似的に活性化過電圧  $\Delta V_{act}$  を求める。このようにして得た活性化過電圧を図 4.3 に示す。ただし、横軸は出力電流密度[mA/cm<sup>2</sup>]の自然対数とする。一般的にこのグラフを Tafel 曲線と呼ぶ。この Tafel 曲線を線形近似した関数の勾配を求めることにより、Tafel 勾配  $A$  は 0.3629V と導出される。

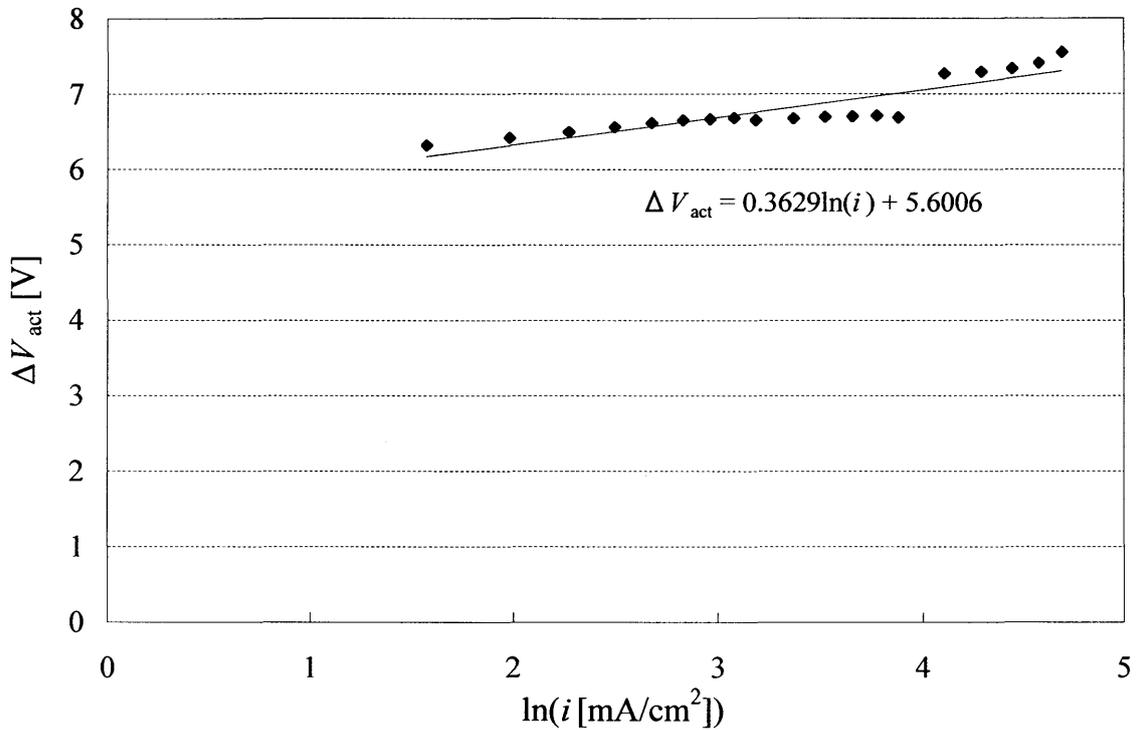


図 4.3 Tafel 曲線

交換電流密度  $i_0$  は、電解質を出入りする両方向への電子の流れであり、(4.5)式と図 4.3 の近似関数から導出する。(4.5)式は(4.7)式のように変形することができる。

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_n}\right) = A \ln(i) - A \ln(i_n) \dots \dots \dots (4.7)$$

(4.7)式に先程求めた Tafel 勾配  $A$  を代入して求めることができる縦軸の切片と、図 4.3 から求めた近似関数の縦軸切片とを比較することにより、交換電流密度  $i_0$  は  $1.984 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$  と導出される。

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

---

内部電流密度  $i_n$  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、(4.5)式の低電流領域も考慮した近似する前の活性化過電圧  $\Delta V_{act}$  の式に  $i=0$  を代入することによって求めることができる。代入して求めた結果、内部電流密度  $i_n$  は  $0.0015.105 \text{ A/cm}^2$  と導出される。

以上のように導出した定常モデルのパラメータを表 4.1 にまとめる。導出したパラメータは全て出力電流密度  $[\text{A/cm}^2]$  を基準としているため、実際に用いる出力電流  $[\text{A}]$  を基準としたパラメータも併せて表 4.1 に示す。そして、定常モデルは等価モデルにおける燃料電池の内部抵抗としてモデルに反映する。

表 4.1 定常モデルパラメータ

	$[\text{A/cm}^2]$ 基準	$[\text{A}]$ 基準
$E_0$	24[V]	24[V]
$r_0$	35.269 $[\Omega\text{cm}^2]$	0.855 $[\Omega]$
$A$	0.3629[V]	0.3629[V]
$i_0$	1.984 $\times 10^{-10}[\text{A/cm}^2]$	8.185 $\times 10^{-9}[\text{A}]$
$i_n$	0.001595 $[\text{A/cm}^2]$	0.06579 $[\text{A}]$

### 4.3. 周波数特性のモデリング

過渡状態を表現することができるような等価モデルを構築するため、図 3.6, 3.7 で示した周波数特性を表現することができる等価回路モデルを構築する。等価回路モデルは受動素子( $R$ ,  $L$ ,  $C$ )のみで構成する。最初に等価回路モデルの回路構成を検討するが、図 3.6, 3.7 のようにインピーダンスの大きさと位相差という極座標系では検討が複雑になるため、簡略化のため、インピーダンスを複素数表示とし、実数部と虚数部に分けて検討する。複素数表示することによって、分布定数回路のパラメータを検討する際には、実数部、虚数部共にインピーダンスの単純な和として考えることができるため検討が容易になる。また、実数部は抵抗  $R$  のパラメータ、虚数部はインダクタンス  $L$  とキャパシタンス  $C$  のパラメータと分けて検討することが可能になることも特長であり、パラメータ導出の際には非常に有益である。そのため、図 3.6, 3.7 を基に、インピーダンスを複素数表示に変換したものを、実数部を図 4.4, 虚数部を図 4.5 に示す。

4. 燃料電池の等価モデルの構築

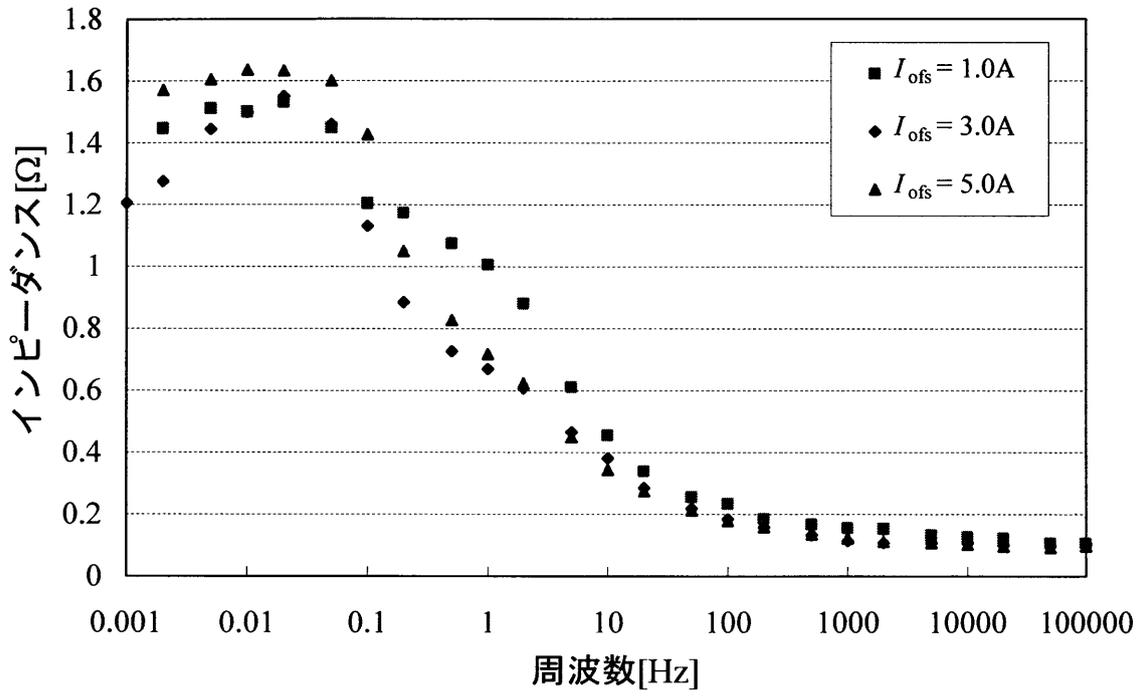


図 4.4 インピーダンス実数部

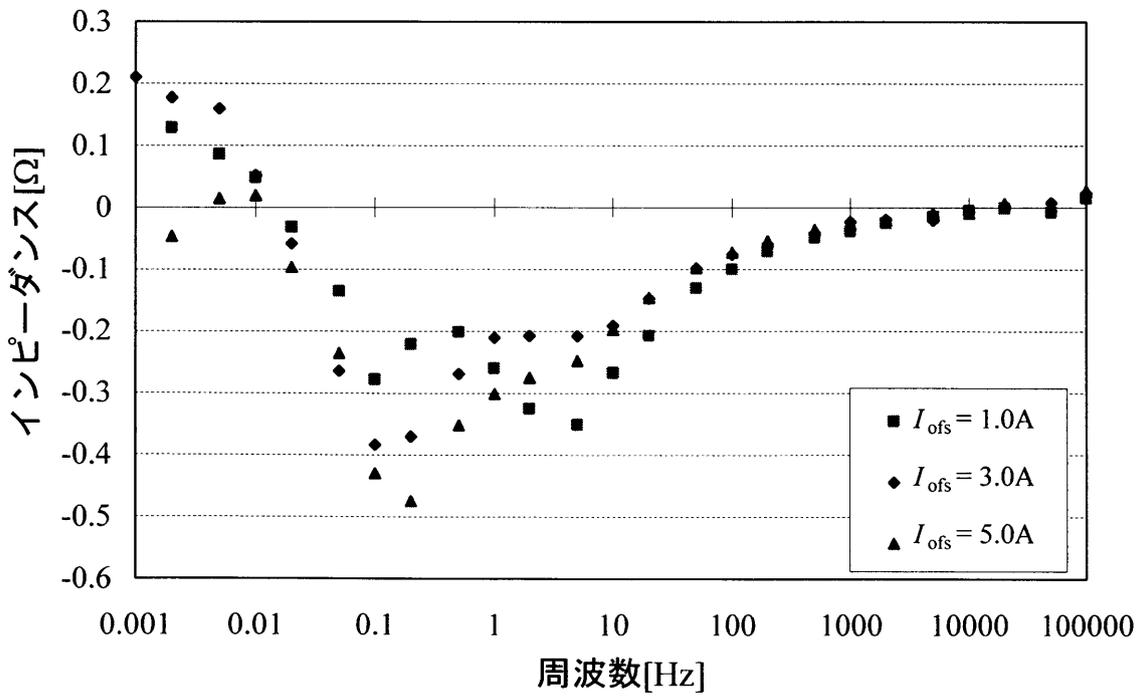


図 4.5 インピーダンス虚数部

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

---

図 4.4, 4.5 より, インピーダンスの実数部, 虚数部共に  $I_{ofs}$  の変化に対して特性に大きな差異がないことがわかる。図 3.3 の定常特性の結果における特性の勾配が定常状態における燃料電池の交流インピーダンスの大きさを表している。図 3.3 より, 出力電流によって勾配に差異があるが, 図 4.4, 4.5 の特性ではその差異が現れていない。この理由としては, 燃料電池の動作が非常に遅いため定常状態に収束する周波数が図 4.4, 4.5 で測定した 1mHz 以下であることが考えられる。そのため, 図 4.4, 4.5 の特性は 1mHz 以下の領域において, 図 3.3 から求められる勾配に対応した値に収束すると仮定してモデルを構築する。

最初に等価回路モデルの回路構成を検討する。図 3.6, 3.7 より, 高周波領域における若干の位相進みを見れば, 周波数が高くなるにつれてインピーダンスが小さくなり, 位相遅れが小さくなっていることがわかる。また, 約 0.02Hz 付近を境に低周波領域では周波数が低くなるにつれてインピーダンスが小さくなり, 位相が進みに変わっていることがわかる。この特性より, 約 0.02Hz 以上の領域は抵抗  $R$  とキャパシタンス  $C$  の並列接続に抵抗  $r$  が直列接続された回路構成で表現できることがわかる。そして, 約 0.02Hz 以下の領域は抵抗  $R$  とインダクタンス  $L$  の並列接続で表現できるが,  $RL$  並列回路では高周波領域においてインピーダンスが  $R$  となり, 0.01Hz 近傍のインピーダンスの増加分との関係から満足に表現することができない。そのため, 高周波においてインピーダンスが  $0\Omega$  となるように, キャパシタンス  $C$  を並列に加えた  $RLC$  並列接続とすることで表現できる。以上のように構築した等価回路モデルを図 4.6 に示す。

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

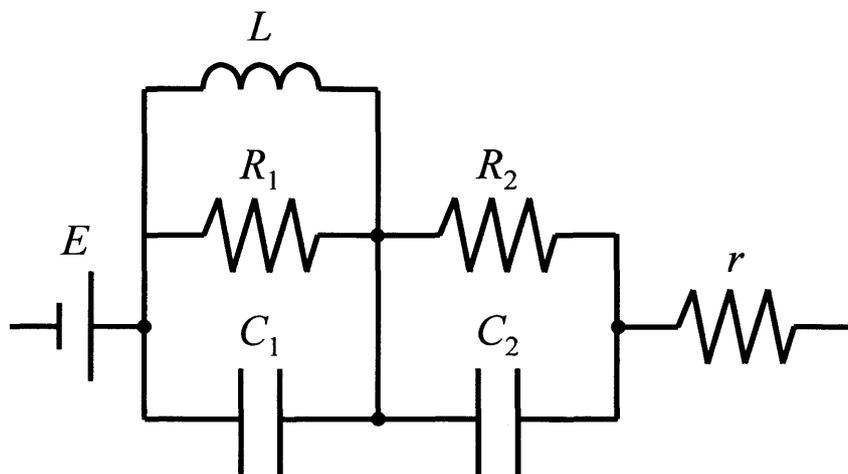


図 4.6 検討する等価回路モデル

図 4.6 のパラメータはインピーダンスが大きく変化する周波数帯域の中心である 1Hz 近傍インダクタンス成分が影響している 1mHz 近傍が一致するように試行錯誤的に求めた。そのときの各パラメータを表 4.2 に、そのパラメータを用いた場合のインピーダンスの実数部を図 4.7、虚数部を図 4.8 に示す。

表 4.2 図 4.6 の各パラメータ

$L$ [H]	30	$R_1$ [ $\Omega$ ]	0.6
$C_1$ [F]	0.6	$R_2$ [ $\Omega$ ]	0.9
$C_2$ [F]	0.6	$r$ [ $\Omega$ ]	0.1

4. 燃料電池の等価モデルの構築

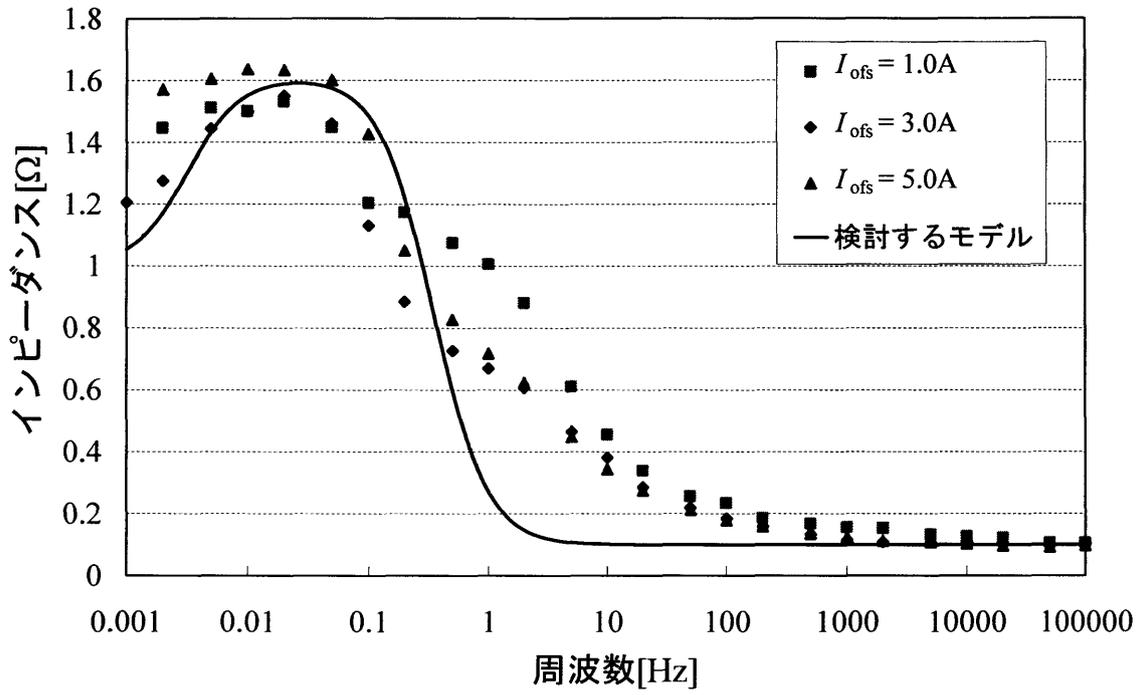


図 4.7 図 4.6 のインピーダンスの実数部特性

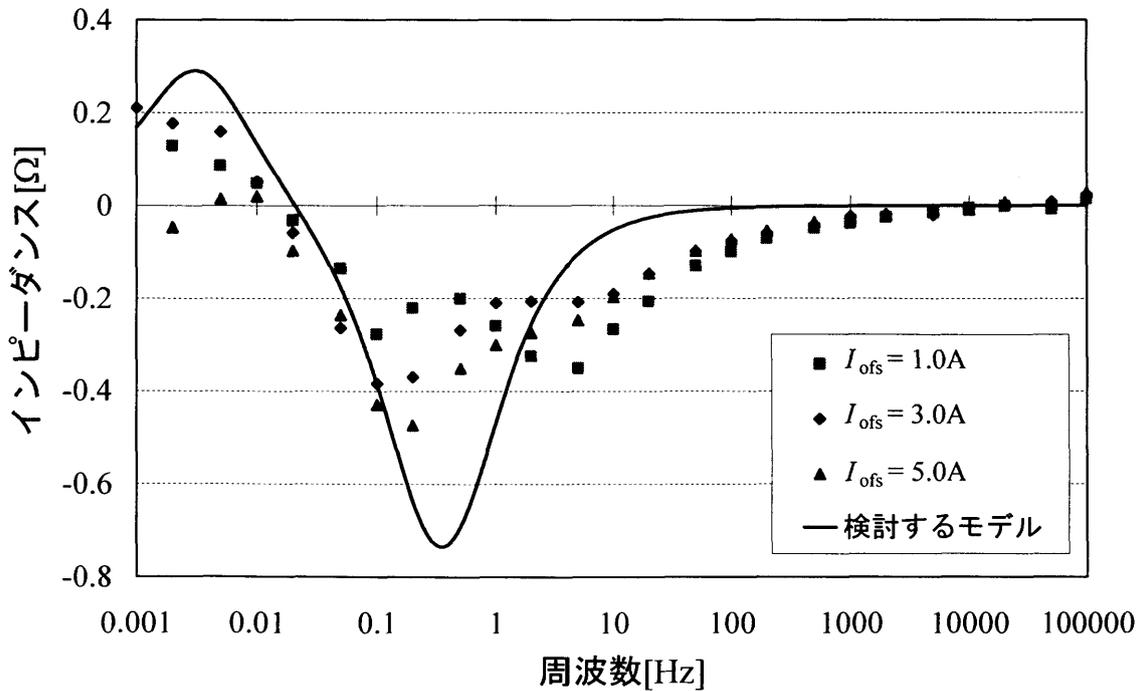


図 4.8 図 4.6 のインピーダンスの虚数部特性

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

---

図 4.7, 4.8 からわかるように、概形は表現できているが、インピーダンスの変化の割合が十分に表現することができていない。これによって、十分に模擬できない周波数帯域が必ず生じてしまい、広帯域の周波数を表現するモデルを構築することができない。そのため、インピーダンスが変化する帯域を分布定数的に捉えて、等価回路モデルにおいては  $RC$  並列、 $RLC$  並列の段数を増やすことで広帯域の周波数を表現することを考える。段数は図 4.4, 4.5 の特性を十分に表現することができるように試行錯誤的に増やす。その結果、図 4.9 のような  $RC$  並列: 6 段、 $RLC$  並列: 1 段、 $r$  を直列接続した等価回路モデルの構成に決定する。そして、図 4.9 の等価回路モデルにおける周波数特性の実数部を図 4.10、虚数部を図 4.11 に示す。

パラメータの導出は高周波領域の特性から求めていく。最初に、図 4.7 より、インピーダンスの実数部は約 10kHz 以上の帯域においては約  $1.0\Omega$  一定であり、図 4.8 から約 10kHz 以上ではインピーダンスの虚数部が  $0\Omega$  であることがわかる。そのため、約 10kHz 以上の帯域を表現するための図 4.9 の  $r$  を  $1.0\Omega$  と求められる。

次に、約 5kHz 近傍における特性を表現する  $R_a C_a$  並列において  $R_a$  は図 4.8 の 5kHz の値である  $0.02\Omega$  と求められる。 $C_a$  は  $R_a$  に合わせて 5kHz 近傍の特性を表現できるように試行錯誤的に求めた結果、 $0.002F$  と求められた。このような手順で、各並列段の和が図 4.7, 4.8 と一致するように試行錯誤的にパラメータを求めていく。その過程を並列段毎の特性と合わせて図 4.12, 4.13 に示す。また、求められた各パラメータを表 4.3 に示す。

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

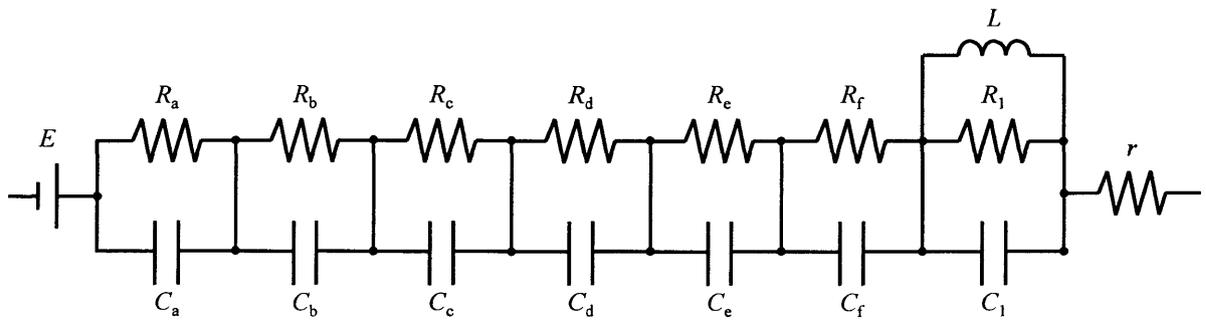


図 4.9 提案する等価回路モデル

4. 燃料電池の等価モデルの構築

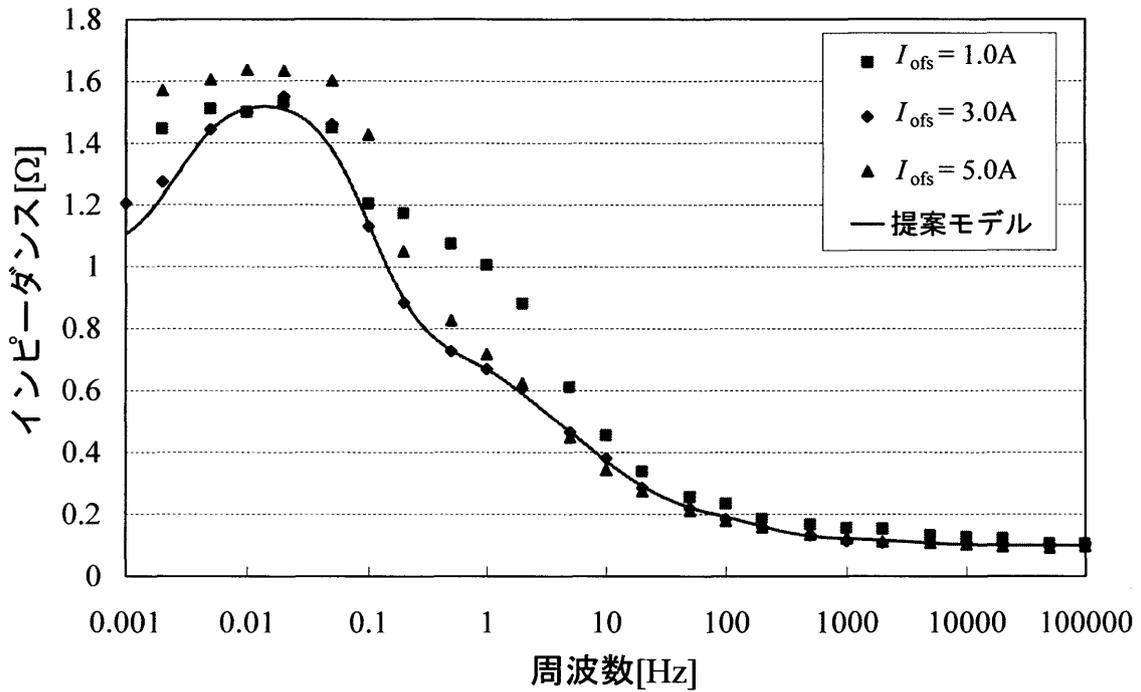


図 4.10 提案する等価回路モデルのインピーダンスの実数部特性

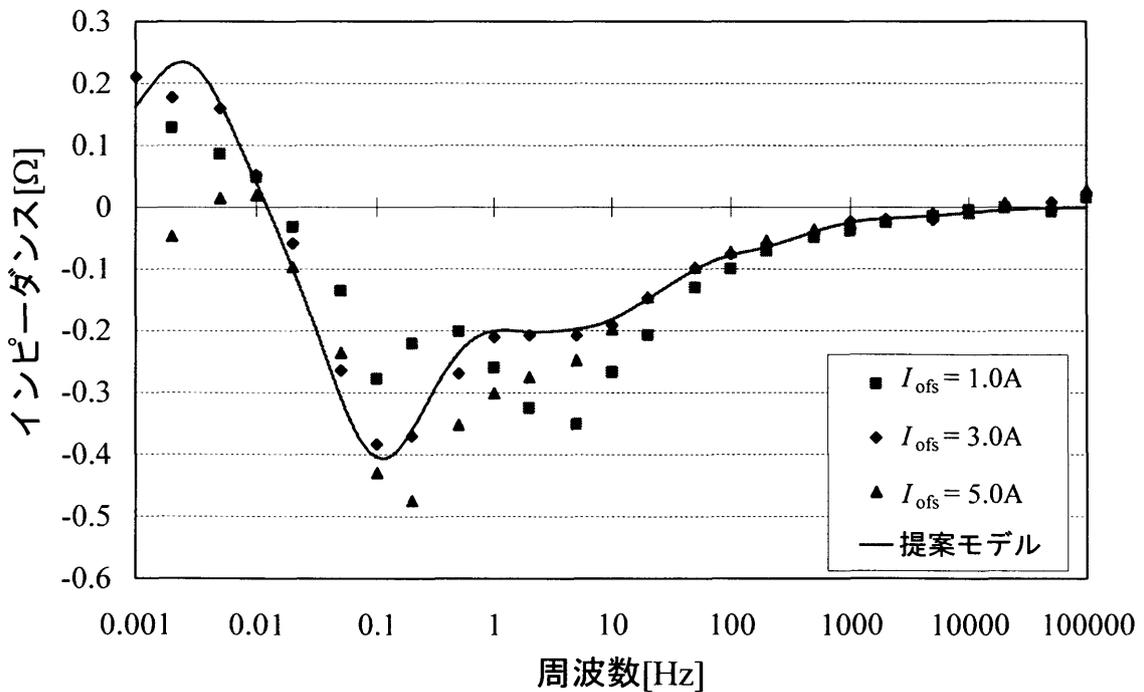


図 4.11 提案する等価回路モデルのインピーダンスの虚数部特性

4. 燃料電池の等価モデルの構築

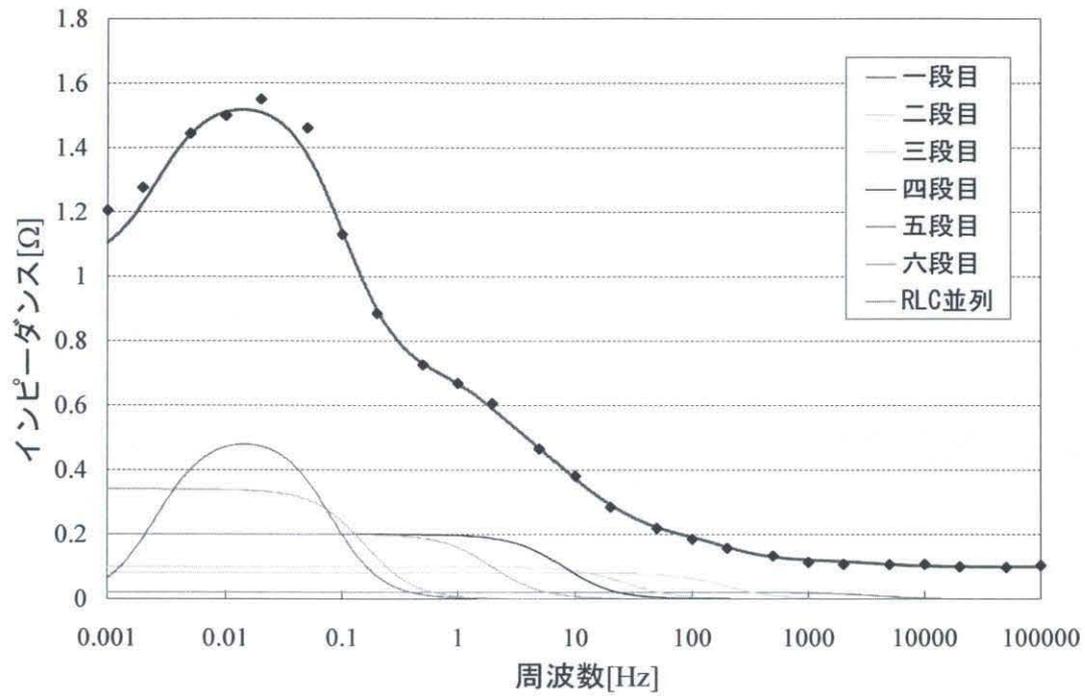


図 4.12 分布定数回路の各並列段の特性（実数部）

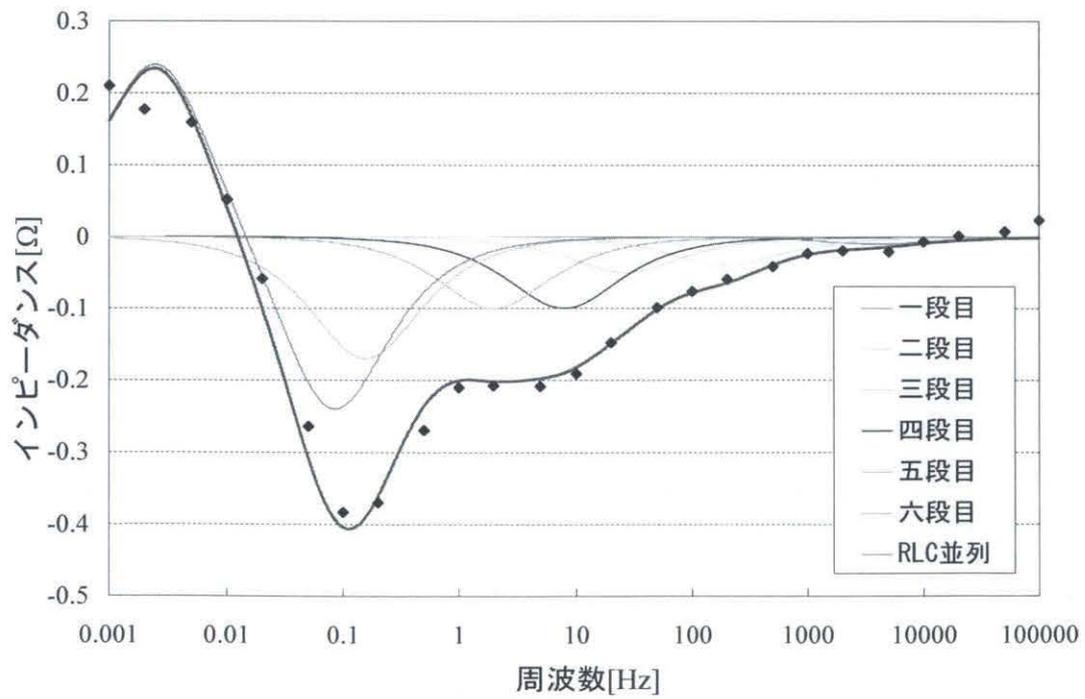


図 4.13 分布定数回路の各並列段の特性（虚数部）

#### 4. 燃料電池の等価モデルの構築

表 4.3 等価回路モデルパラメータ

$R_a[\Omega]$	0.02	$C_a[F]$	0.002
$R_b[\Omega]$	0.08	$C_b[F]$	0.01
$R_c[\Omega]$	0.1	$C_c[F]$	0.06
$R_d[\Omega]$	0.2	$C_d[F]$	0.1
$R_e[\Omega]$	0.2	$C_e[F]$	0.4
$R_f[\Omega]$	0.34	$C_f[F]$	3
$R_l[\Omega]$	0.48	$C_l[F]$	4
$L[H]$	30	$r[\Omega]$	0.1

等価回路モデルで用いているパラメータは、図 4.4, 4.5 においてインピーダンスの実数部、虚数部共に  $I_{ofs}$  の変化に対して特性に大きな差異がないことから、抵抗  $R$ ,  $r$ , インダクタンス  $L$ , キャパシタンス  $C$  全て電流に依存しないと考え、表 4.3 の値の固定値とする。

#### 4.4. シミュレーションでの等価モデルの構築

4.2., 4.3.節において決定したモデルのシミュレーションでの構築方法について検討する。  
シミュレーションソフトはPSIMを用いる。

等価回路モデルはシミュレーションにて回路を構成し、表 4.2 のパラメータを代入すること  
で構築することができる。

定常モデルは、(4.4)式の過電圧が内部抵抗での電圧降下と捉えることができる。しかしな  
がら、等価回路モデルのパラメータは定数としたため、過電圧の電流による変動は起電力  $E$   
の変動で補填することで定常状態を表現する。等価回路モデルの定常状態における合成イ  
ンピーダンスは表 4.2 より  $1.04\Omega$  である。そのため、起電力  $E$  は(4.8)式のように(4.4)式の過  
電圧から等価回路モデルでの電圧降下分を減算したものを開回路電圧から引くことで算出  
する。

$$E = E_0 - \left( ri + A \ln \frac{i + i_n}{i_0} - 1.04 \times i \right) \dots\dots\dots (4.8)$$

## 5. 提案する等価モデルの検証

### 5.1. 定常特性の検証

4章で構築した燃料電池の等価モデルを検証する。まず、定常状態において所望の特性を得ることができるかシミュレーションにて検証する。検証にはシミュレーションソフト PSIM を用いる。定常特性の検証方法は、PSIM 上にて構築した提案する等価モデル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提案する等価モデルの出力電流、出力電圧の関係を測定する。測定した結果を図 5.1 に示す。

## 5. 提案する等価モデルの検証

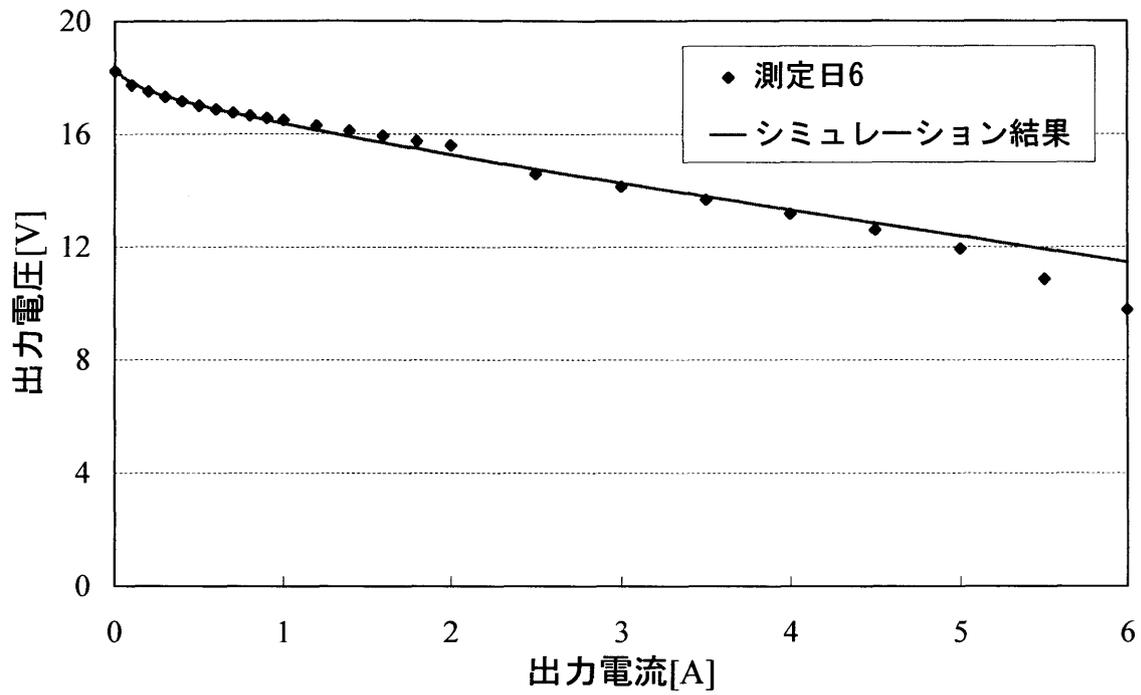


図 5.1 定常特性の検証

図 5.1 より、提案する等価モデルが PSIM 上において、所望の定常特性を得ることができることを確認することができる。

### 5.2. 周波数特性の検証

次に、定常特性同様、周波数特性についても所望の特性を得ることができるかシミュレーションにて検証する。検証には定常特性同様、PSIMを用いる。周波数特性の検証方法は、PSIM上にて構築した提案する等価モデルの負荷に正弦波交流の電流源を接続し、与える電流に対する等価モデルの出力電圧を計測することによって得る。測定結果のインピーダンス特性を図5.2に、位相特性を図5.3に示す。

図5.2, 5.3より、10kHz以上の帯域における位相進み以外は概ね表現することができていることが確認できる。また、図4.9の等価回路モデルの段数を増やすことによって、特性をより細部まで正確に表現することも可能であるが、段数が増えることによって模擬装置構築が複雑化するため、図5.2, 5.3の特性で十分であると判断する。

5. 提案する等価モデルの検証

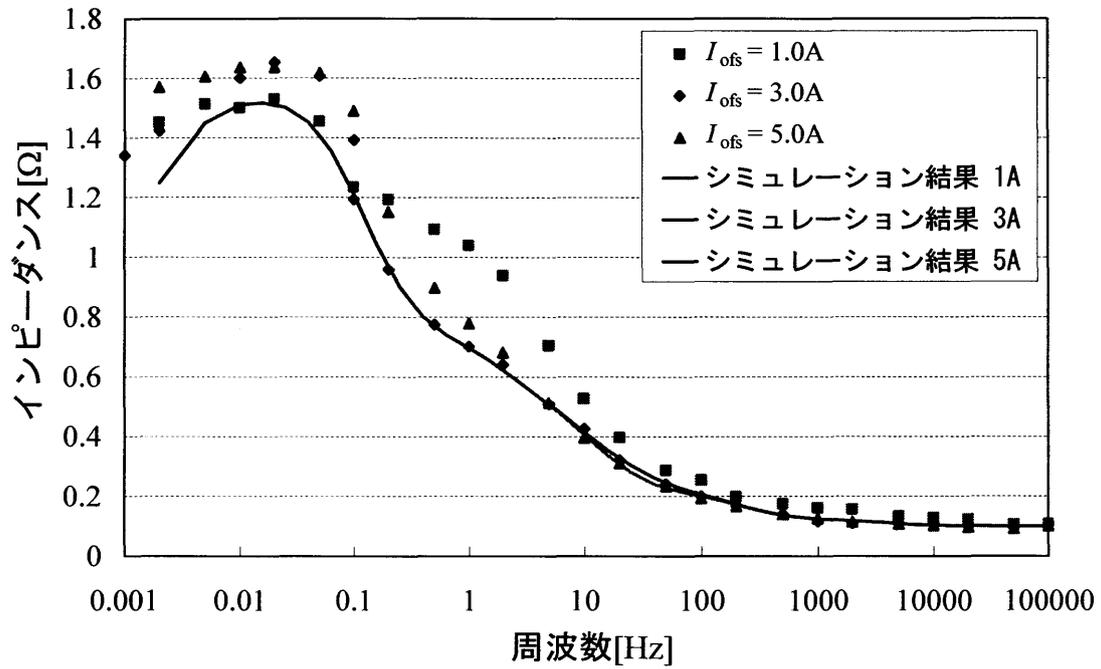


図 5.2 インピーダンス特性の検証

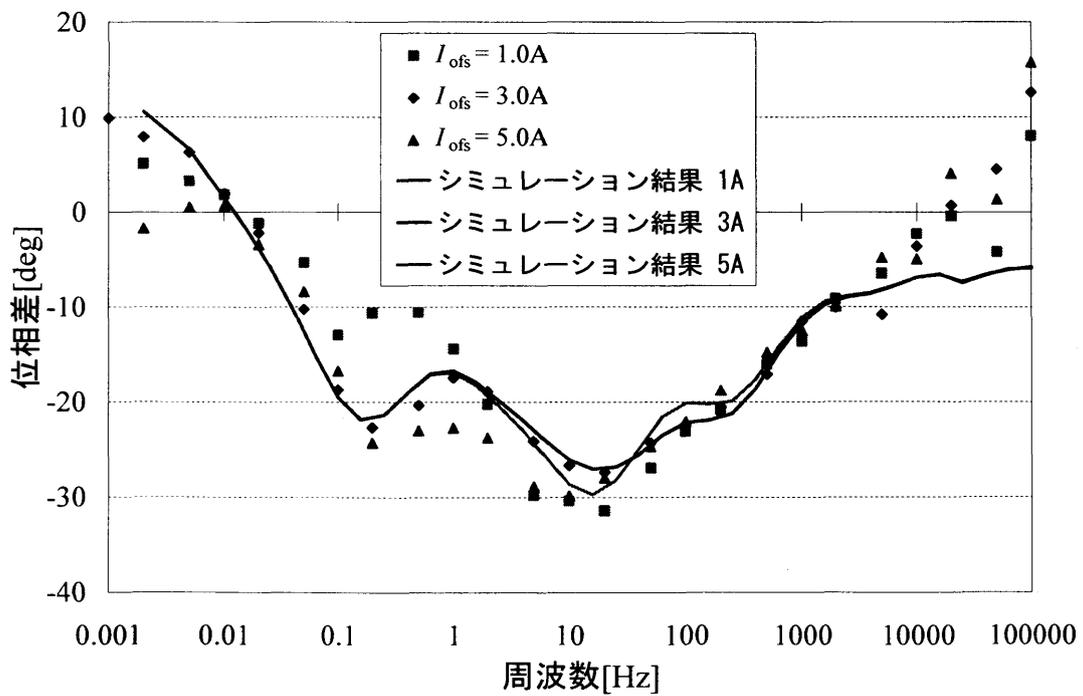


図 5.3 位相特性の検証

### 5.3. 負荷ステップ変化における電圧応答

5.1., 5.2.節において PSIM 上にて構築した提案する等価モデルが所望の特性を得ることができていることを確認した。そのため、次は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の模擬について検証する。

最初に、実機における燃料電池の応答を確認する。測定方法は、燃料電池の負荷に電子負荷装置を接続し、電子負荷装置を電流源モードで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を観測する。電子負荷装置には TEXIO 社製 PEL151-501 を CC(Control Current)放電モードで用いる。そして、今回の測定では電子負荷装置の電流値が 1A から 5A, 5A から 1A, 3A から 4A, 4A から 3A へ変化する場合の計 4 通りを測定する。

次に、シミュレーションにおける等価モデルの応答を確認する。測定方法は PSIM 上で構築した等価モデルの負荷に電流源を接続し、実機実験の場合と同様の条件で測定した際の等価モデルの出力電圧応答を観測する。

また、比較対象として、矢島氏らによって提案されている従来の燃料電池の等価回路モデル<sup>(4)</sup>を用いた場合についても検証する。この従来モデルの構成を図 5.4 に示す。検証方法は図 5.4 の従来モデルを PSIM 上にて構築し、提案する等価モデルと同様の測定を行う。図 5.4 のパラメータ導出方針として、キャパシタ  $C$  はインピーダンスが大きく変化する周波数帯域の中心である 1Hz 近傍が一致するように試行錯誤的に求め、抵抗  $R$ ,  $r$  は定常状態における合成インピーダンスが図 4.9 と表 4.3 に示す提案する等価モデルと等しくなるように求め、そして起電力  $E$  は(4.8)式のように算出する。そのときの各パラメータを表 5.1 に、そのパラメータを用いた場合のインピーダンス特性を図 5.5, 位相特性を図 5.6 に示す。

測定の際には測定環境によって、燃料電池の出力が若干変化するため、過渡的な変化を

## 5. 提案する等価モデルの検証

視覚的に認識し難い。そこで、測定波形からステップ変化前の定常電圧を除くことで、視覚的に認識し易いようにする。そして、1A から 5A に、5A から 1A に、3A から 4A に、4A から 3A にそれぞれ変化させた場合の測定結果を図 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 にそれぞれ実機実験結果と提案する等価モデルのシミュレーション結果、従来モデルのシミュレーション結果を併せて示す。

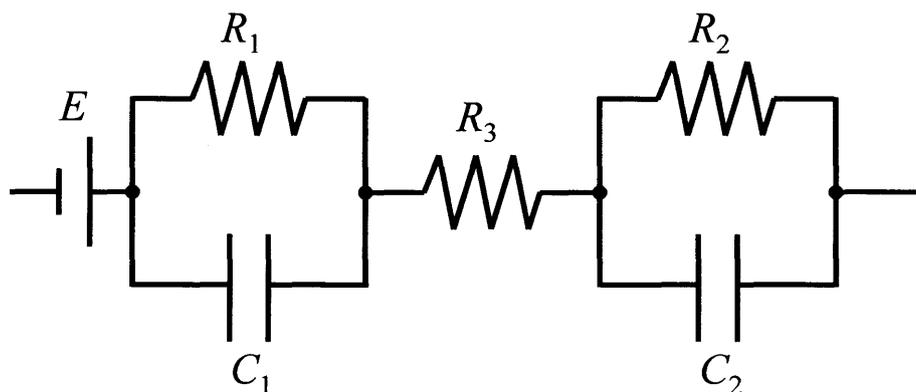


図 5.4 従来モデル

表 5.1 従来モデルの各パラメータ

$R_1[\Omega]$	0.47
$C_1[\text{F}]$	0.6
$R_2[\Omega]$	0.47
$C_2[\text{F}]$	0.6
$R_3[\Omega]$	0.1

5. 提案する等価モデルの検証

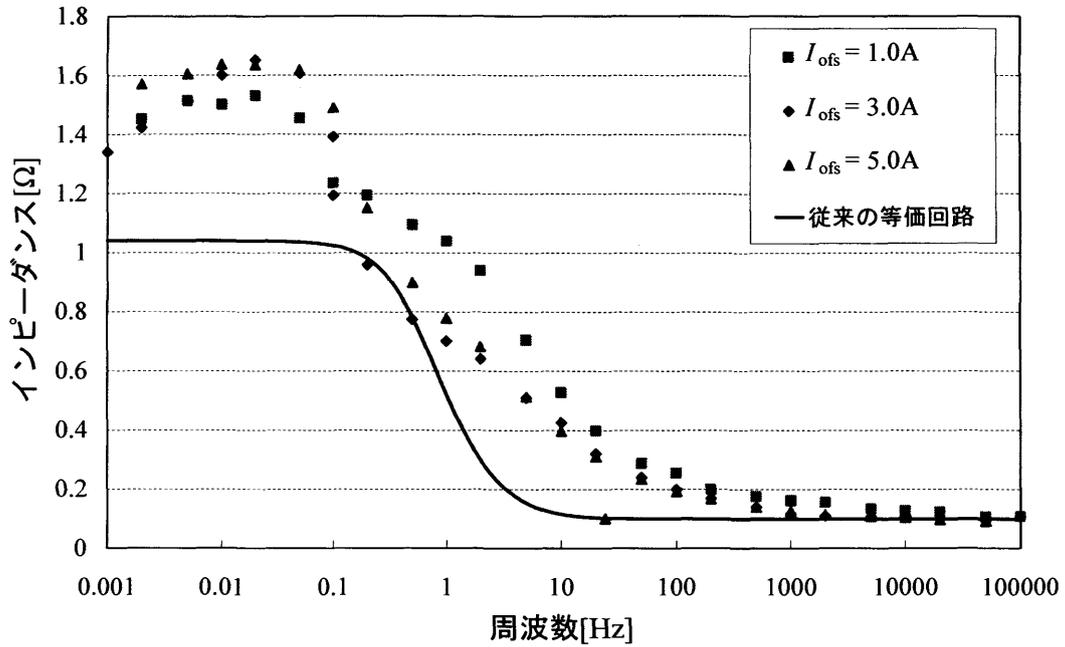


図 5.5 従来モデルのインピーダンス特性

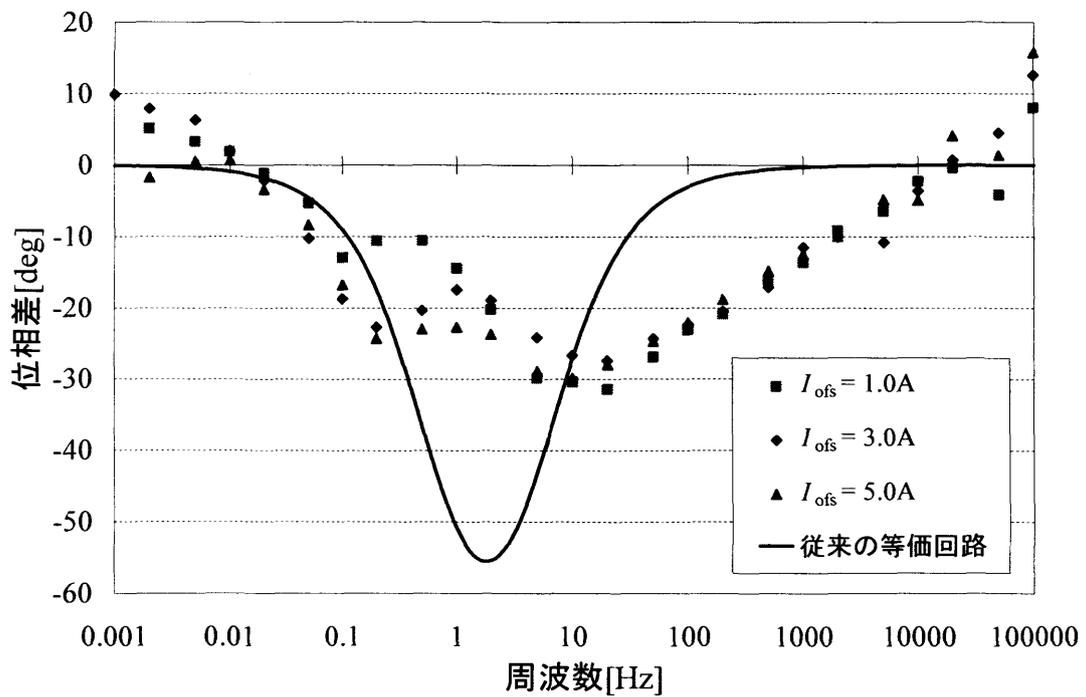


図 5.6 従来モデルの位相特性

5. 提案する等価モデルの検証

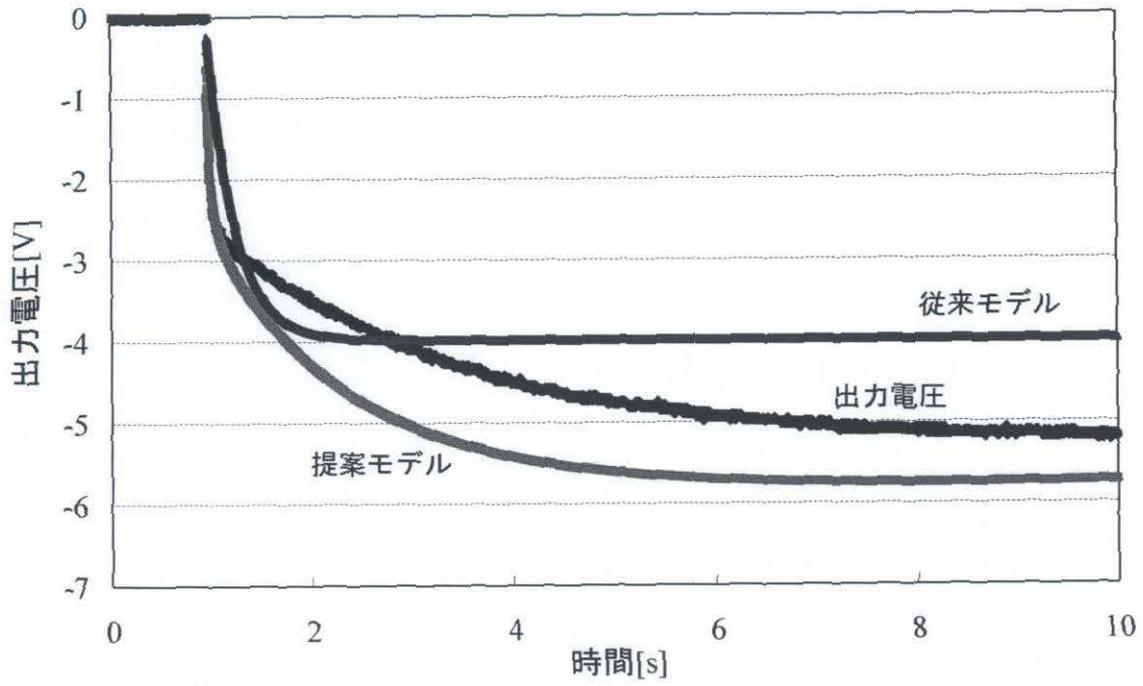


図 5.7 1A から 5A

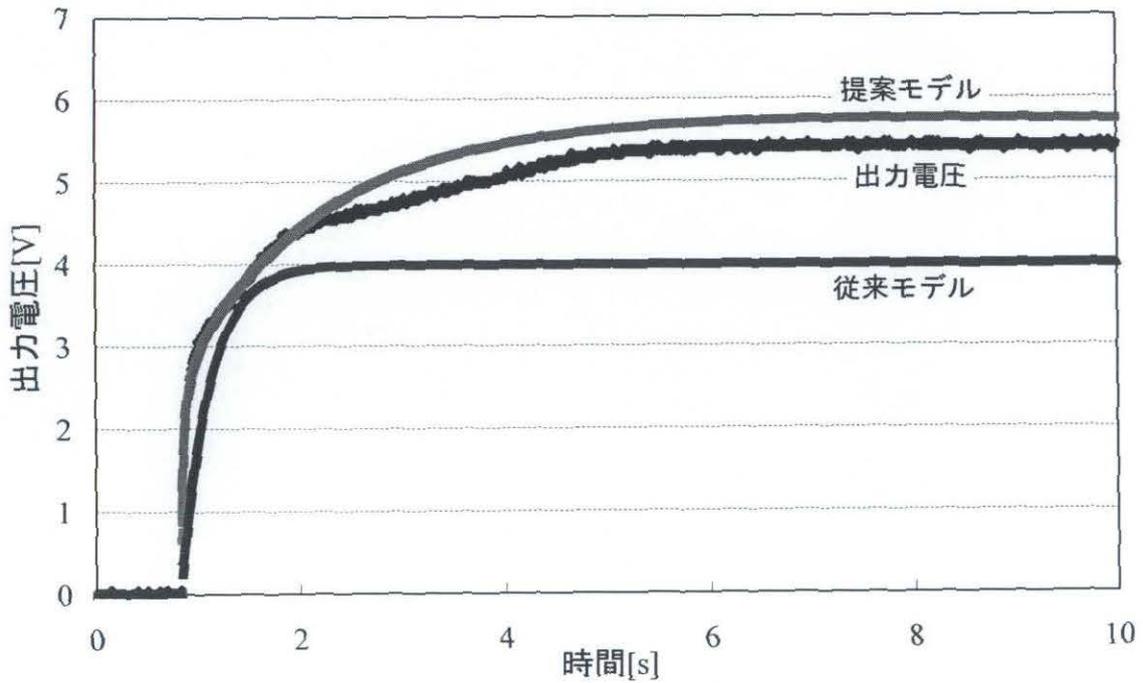


図 5.8 5A から 1A

5. 提案する等価モデルの検証

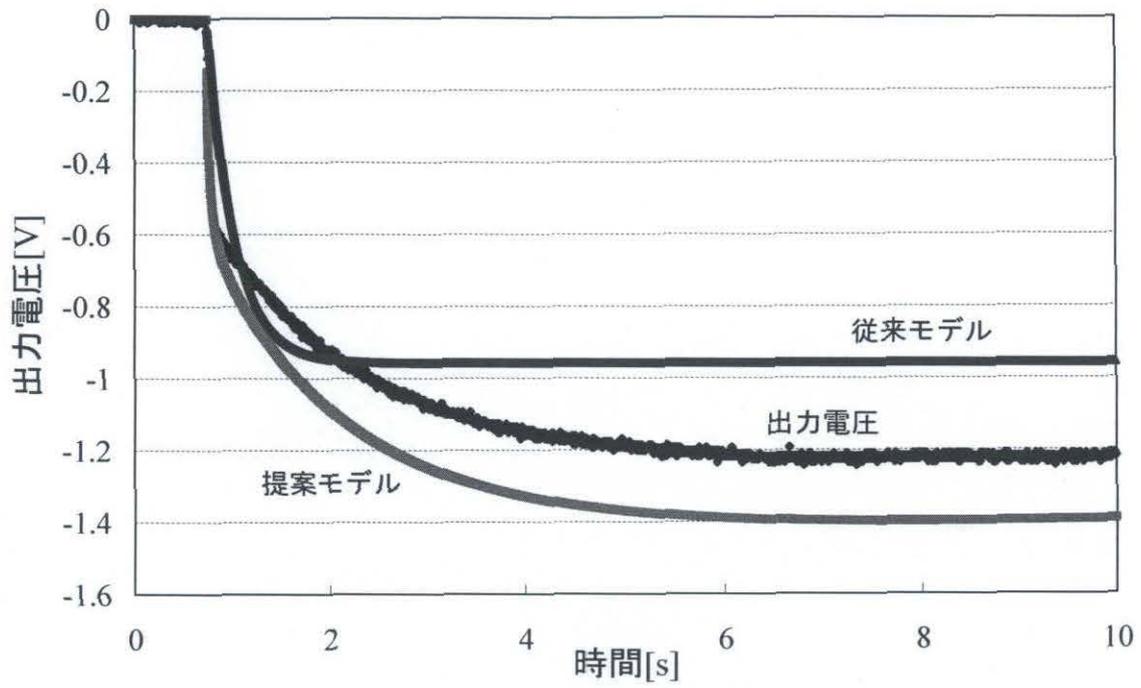


図 5.9 3A から 4A

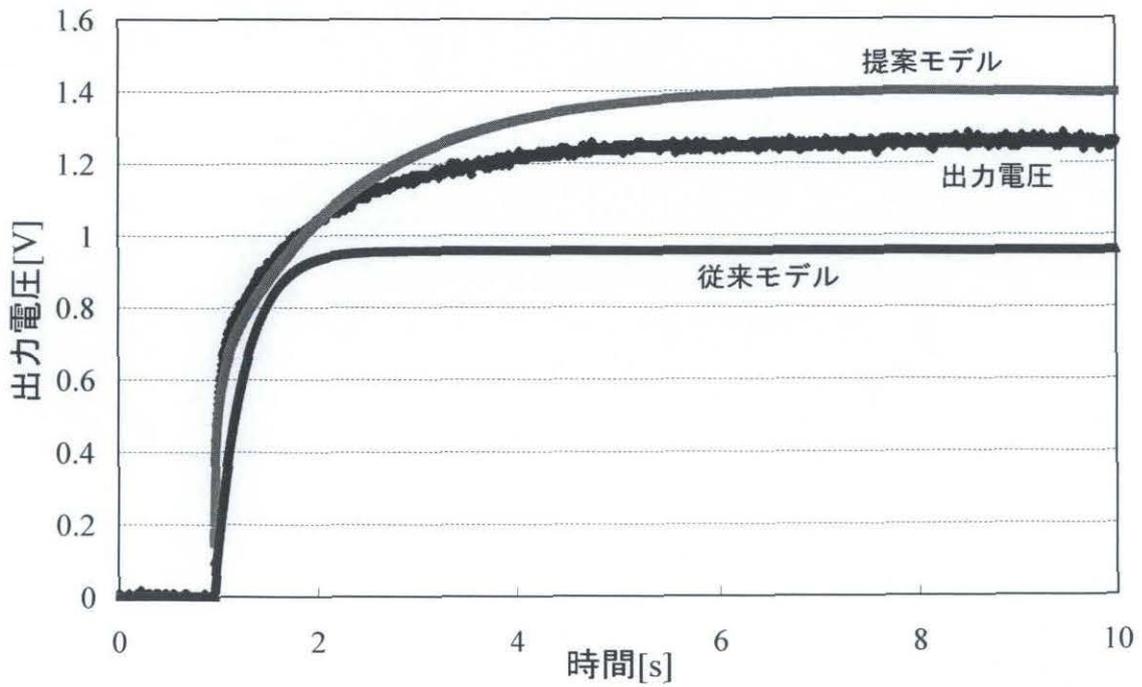


図 5.10 4A から 3A

## 5. 提案する等価モデルの検証

---

図 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 より, 提案モデル, 従来モデル共に燃料電池の出力電圧に似た概形を得ることができていることがわかる。しかしながら, 従来モデルの電圧波形は出力電圧波形に比べて立上り, 立下り時間が短く, 過渡状態を正確に模擬できていないことがわかる。それに対して, 提案する等価モデルの電圧波形は過渡状態においても出力電圧波形と非常に近い応答を示しており, 従来モデルに比べて燃料電池の出力電圧波形を正確に模擬できていることがわかる。

定量的に検証するため, 全ての測定結果から立上り時間, 立下りを算出する。立上り時間, 立下り時間の算出方法は, ステップ応答が最終値の 10%に達してから 90%の値に達するまでの経過時間を示す。また, 出力電圧に対する誤差率を(5.1)式のように算出する。そして, 立上り時間, 立下り時間の測定結果と誤差率を併せて表 5.2 に示す。

$$\text{誤差率}[\%] = \frac{|\text{出力電圧} - \text{提案モデルor従来モデル}|}{\text{出力電圧}} \times 100 \dots\dots\dots(5.1)$$

## 5. 提案する等価モデルの検証

表 5.2 立上り時間, 立下り時間の比較

	出力電圧	提案モデル		従来モデル	
	経過時間[s]	経過時間[s]	誤差率[%]	経過時間[s]	誤差率[%]
1A→5A	3.420	2.302	32.7	0.619	81.9
5A→1A	2.480	2.866	15.6	0.619	75.0
3A→4A	2.555	2.333	8.7	0.619	75.8
4A→3A	2.020	2.338	15.7	0.619	69.4

表 5.2 より, すべての場合において従来モデルに比べて提案モデルの誤差率が大幅に低くなっており, より正確に燃料電池の出力を模擬できていると言える。

以上より, 提案する燃料電池の等価モデルがステップ的な負荷の変動に対する燃料電池の出力の模擬を, より正確に行うことができることを定量的に示した。

### 5.4. スイッチング回路負荷における電圧応答

最後に、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の模擬について検証する。検証方法として実機実験では、燃料電池の負荷に図 5.11 に示す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を観測する。図 5.11 の入力電圧  $v_m$  に燃料電池を接続し、負荷には 12V 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。なお、昇圧チョッパは PWM(Pulse Width Modulation)制御しており、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 一定として動作させている。また、三角波キャリアは約 4kHz、リアクトル  $L$  は 1mH とする。

シミュレーションでは、実機実験において観測した燃料電池の出力電流と同じ電流を等価モデルの負荷に電流源として与え、そのときの等価モデルの出力電圧応答を観測する。

また、比較対象として、(4.2)式で表した定常モデルのみを用いた場合と、図 5.4 に示した従来の等価モデルを用いた場合を検討する。定常モデルには、実機実験において観測した燃料電池の出力電流を(4.2)式の変数の入力として、従来モデルには、提案モデルと同様に行い検証する。ただし、従来モデルのパラメータは表 5.1 の値を用いる。ただし、5.3.同様の理由から各波形におけるオフセット分を除いた波形を示す。

今回の測定では duty が 0.3, 0.5, 0.7 の 3 通りの場合について測定する。測定結果を燃料電池の出力である出力電圧と出力電流の波形と、出力電圧、提案する等価モデルのシミュレーション結果、定常モデルのみの結果、従来モデルの結果を分けて図 5.12~5.17 にそれぞれ示す。

5. 提案する等価モデルの検証

---

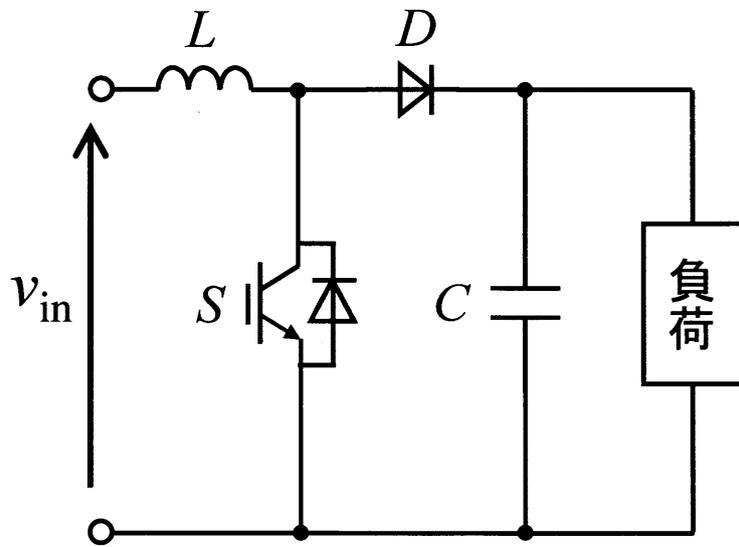


図 5.11 昇圧チョッパ

5. 提案する等価モデルの検証

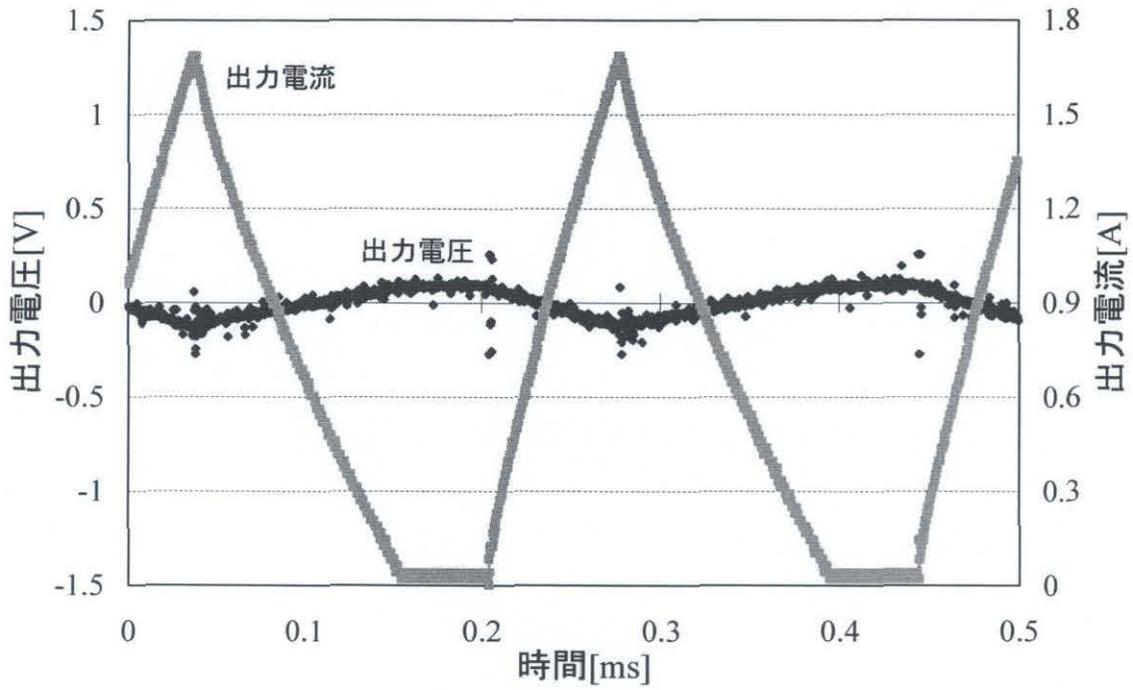


図 5.12 出力波形(duty: 0.3)

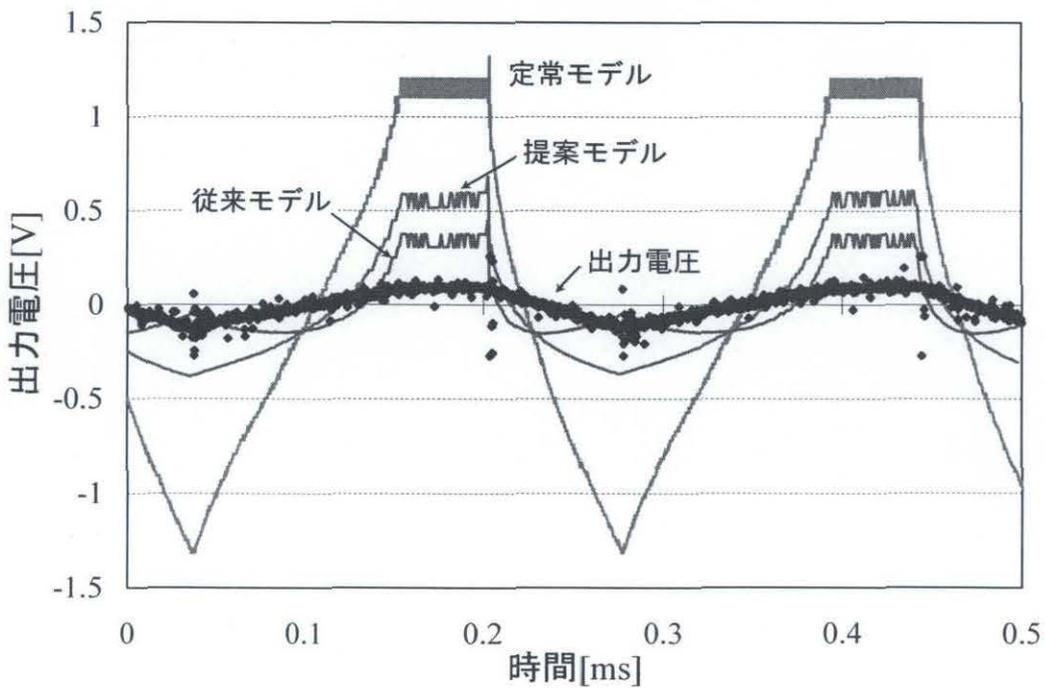


図 5.13 各モデル波形(duty: 0.3)

5. 提案する等価モデルの検証

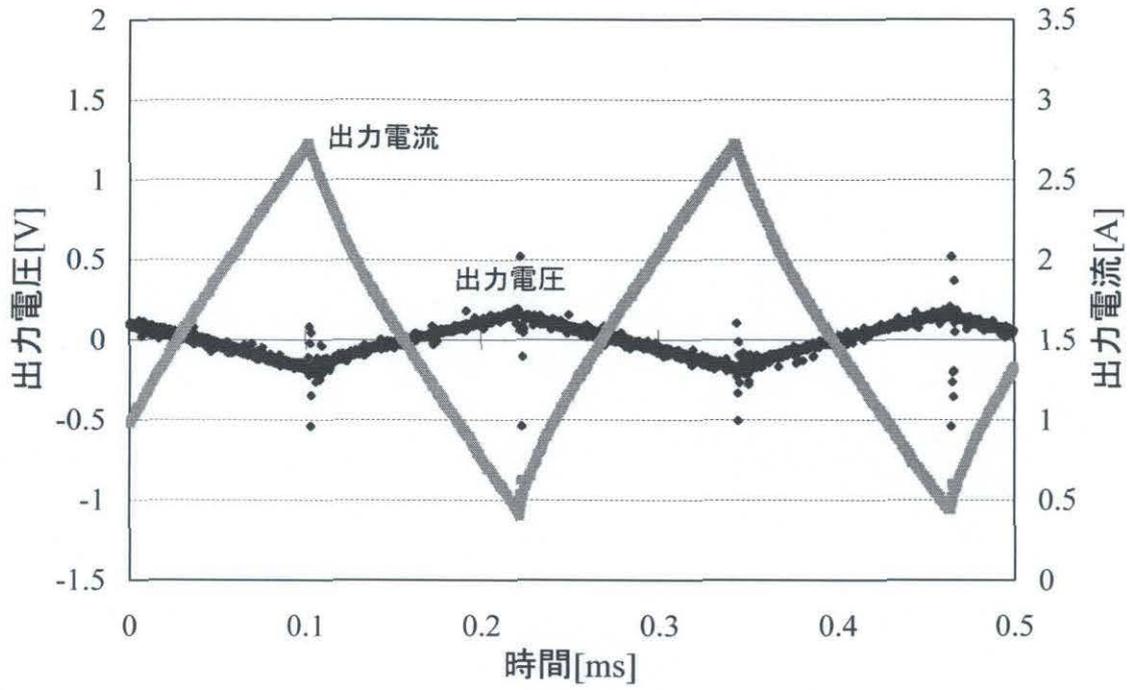


図 5.14 出力波形(duty: 0.5)

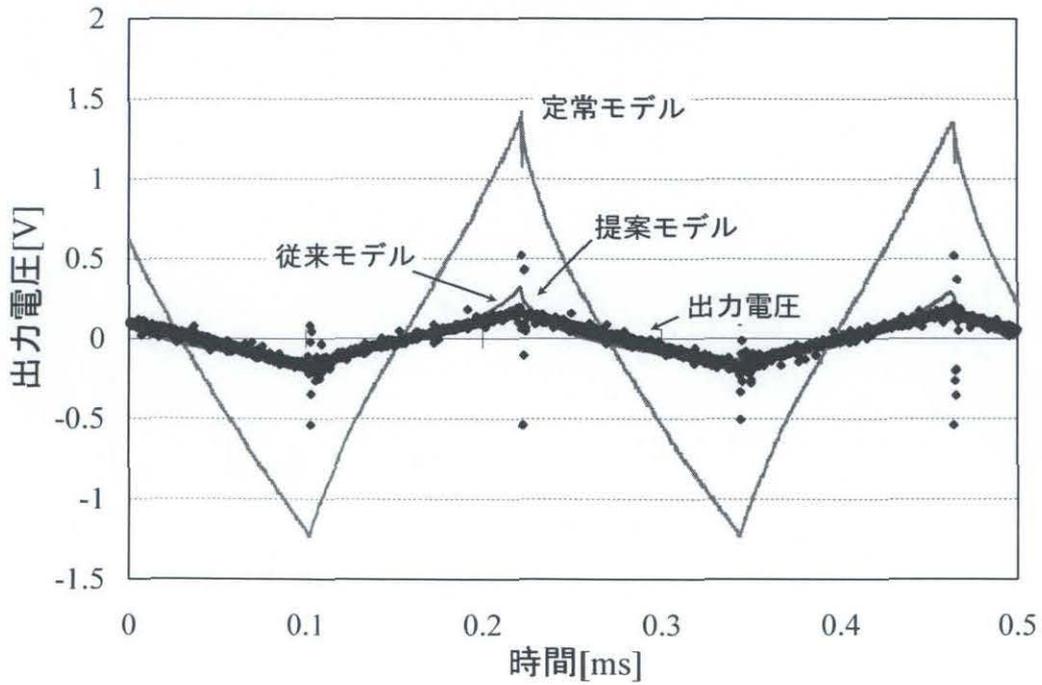


図 5.15 各モデル波形(duty: 0.5)

5. 提案する等価モデルの検証

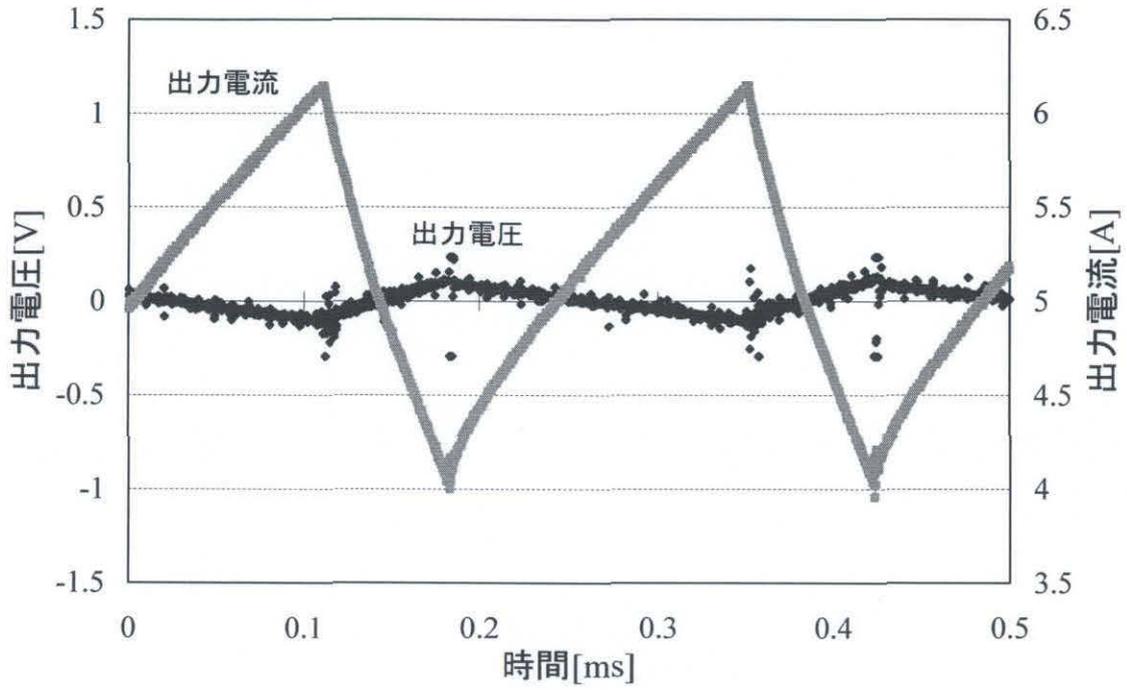


図 5.16 出力波形(duty: 0.7)

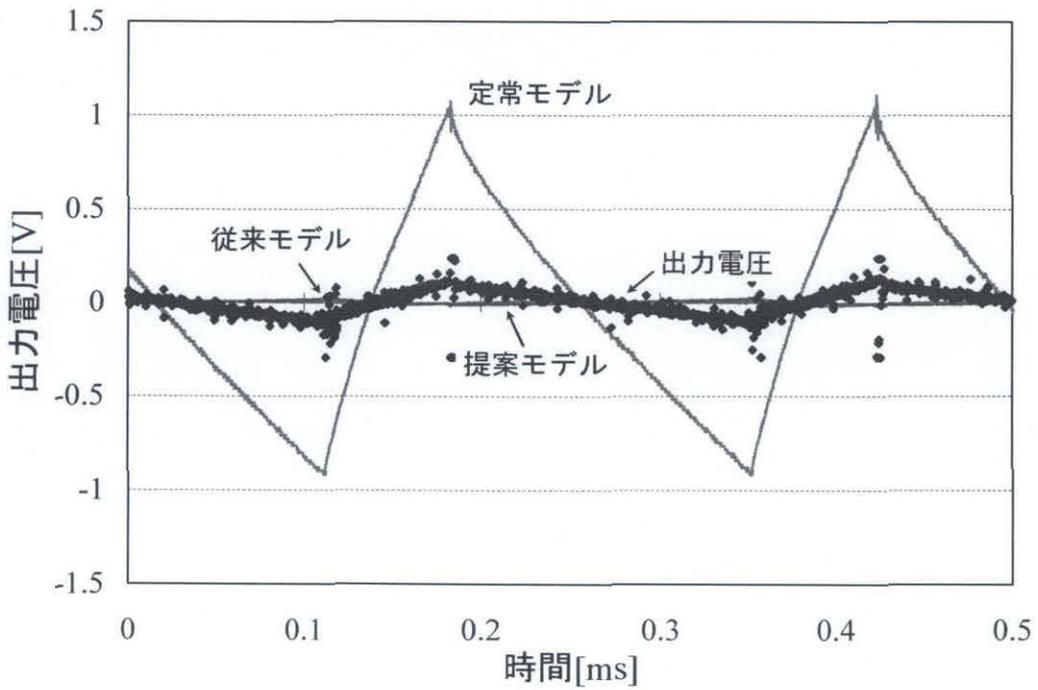


図 5.17 各モデル波形(duty: 0.7)

## 5. 提案する等価モデルの検証

---

図 5.13, 5.15, 5.17 より, 定常モデルのみの波形では出力電圧波形に対して 3 通り全てにおいて大きく変動しており, 定常モデルのみでは燃料電池の出力を十分に模擬できないことがわかる。

次に, 従来モデルと提案モデルの波形は, 図 5.15 の duty: 0.5 の場合において出力電圧に非常に近い波形になっていることがわかる。また, 図 5.13 の duty: 0.3 の場合においては, duty: 0.5 の場合に比べると若干誤差が大きくなるが, 概形は同じ形になっている。電流低下期間において, 提案モデルの電圧が増加し続けるのに対して従来モデルの電圧は減少後に増加しており, 出力電圧の特性と異なっている。そして, 図 5.17 の duty: 0.7 の場合においては, 定常モデルに比べて, 提案モデル, 従来モデル共に特性に近い値を得ることができている。しかしながら, 共に変動が小さくなっており, duty: 0.3 の場合同様, 出力電圧に対して誤差が生じている。これはシミュレーションにおけるモデル構築が適切でないためと考えており, 今後はより適切な設定を行う必要がある。

そして, 3 通り全ての場合において提案モデルと従来モデルはほぼ同じ波形となっていることがわかる。この理由としては, 図 5.5, 5.6 からわかるように, 約 4kHz 以上の帯域での周波数特性は従来モデルにおいても十分に表現することができるため提案モデルと大きな差異が現れなかったものと考えられる。したがって, 従来モデルでは表現できていない周波数帯域を含む周波数での負荷変動では, 従来モデルでは十分に表現できないと推測している。

以上より, 高周波でスイッチングを行う電力変換器を接続した場合においても, 提案する等価モデルが燃料電池の出力を概ね模擬できることを示した。

## 6. 結言

### 6.1. 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等価モデルの構築を目的とし、燃料電池の電気的特性である定常特性を基に定常モデルの構築プロセスを示し、周波数特性を複素数表示にした結果を基に回路モデルの構築プロセスを提案した。

そして、負荷がステップ変化した場合の燃料電池の出力の模擬について、従来モデルと比較することによって提案する燃料電池の等価モデルが、より正確に模擬できることを実機実験結果とシミュレーション結果を比較することにより定量的に示した。

最後に、負荷にスイッチングを伴う電力変換器を接続した場合の燃料電池の出力の模擬について、定常モデルに比べて提案する等価モデルが、より正確に模擬することができることを実機実験結果とシミュレーション結果を比較することにより示し、提案する等価モデルの有用性を示した。

### 6.2. 今後の課題

今後の課題として、5.4.節で検討した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おいて、duty: 0.3 の場合であれば電流減少時の緩やかな電圧変動の模擬、duty: 0.7 の場合であればより大きな電圧変動の模擬が不十分であるので、この原因の考察と対策が必要である。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) James Larminie, Andrew Dicks 共著：「燃料電池システム」 オーム社 (2004)
- (2) 内田裕之 編著：「固体高分子形燃料電池のすべて」 エヌ・ティー・エス (2003)
- (3) 堀孝正 編著：「パワーエレクトロニクス」 オーム社 (2000)
- (4) 矢島, 船渡, 小笠原：「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.7-058(2005)
- (5) 船渡, 柳田, 小笠原, フォライアレキサンドウル：「システム同定を用いたニッケル水素およびニッケルカドミウム電池に残存容量診断」電気学会論文 D, 126 巻 3 号, 平成 18 年

## 論文目録

[1] 青山, 山村, 石田 : 「燃料電池の電氣的等価モデルの構築」平成 19 年電気学会産業応用部門大会論文集 1-51, p.351-354 (2007)

[2] 青山, 山村, 石田 : 「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第 175 回定例研究会講演論文集 JIPE34-19 (2008)

## 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 助教 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 機械工学 准教授 工学博士 丸山 直樹先生に心より御礼申し上げます。

平成 18 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。