



あ・なるほど！ナレッジねっと

燃料電池性能試験における電気化学インピーダンス法の利用

Electrochemical Impedance Spectroscopy Used in Performance Evaluation of Fuel Cells

岸 本 将 史*

Masashi Kishimoto

(原稿受付日2011年2月16日, 受理日2011年4月19日)

1. まえがき

近年声高に叫ばれているエネルギー問題や環境問題を受け、高効率かつクリーンな発電が期待できる燃料電池に注目が集まっている。理論的には既存の発電システムをはるかに凌ぐエネルギー効率を達成することができ、かつ温室効果ガスの排出が少ないという大きな特長がある。しかし、実用化を達成するためには依然として多くの問題が残されており、燃料電池の性能や耐久性の向上を目指した研究が精力的に行われている。

燃料電池の性能評価試験を行う際の重要な計測技術として、電気化学インピーダンス法がある。燃料電池の発電プロセスに介在する内部抵抗成分の特定や、性能劣化現象をモニタリングする際に有効であり、燃料電池の研究に携わる技術者・研究者にとっては必須となる手法である。また、電気化学反応が介在する系についての試験に対しても幅広く用いられる手法である。燃料電池の性能評価試験においては必須の手法であるが、電気化学の分野に馴染みのなかった筆者にとっては未知の領域であった。修士課程進学後に関連する図書や論文を読み進める中で得た知識をまとめることで、自分の頭の整理をするとともに、何か少しでも有益な情報が発信できればと思う。参考にした図書については本稿末にまとめて記載した^{1)~5)}。

本稿は基本的には筆者が研究対象としている燃料電池（とくに固体酸化物形燃料電池, Solid Oxide Fuel Cell: SOFC）の研究を通じて得た知識をもとにしているが、できるだけ電気化学インピーダンス法一般に対してあてはまる書き方を心がけた。

2. 電気化学インピーダンス法の原理

2.1 直流法と交流法

燃料電池に限らず、なんらかの系の電気化学特性を測定

しようと考えたとき、まず思いつくのが図1のような直流測定法であろう。単純に系に直流電流を流し、系の前後での電圧降下を測定すれば、オームの法則 $R_{DC} = \Delta V / \Delta I$ から系のオーム抵抗を求めることができる。しかしこの方法では、系の中に存在する様々な抵抗成分を分離することができない。たとえば燃料電池（SOFC）では、電解質中の酸化物イオン伝導抵抗だけでなく、電極-電解質界面の反応抵抗や多孔質体中のガスの濃度差に起因する抵抗など、様々な抵抗成分が存在する。また、それらはキャパシタやインダクタに相当する成分を含むため、直流法では十分な情報を得ることができない。

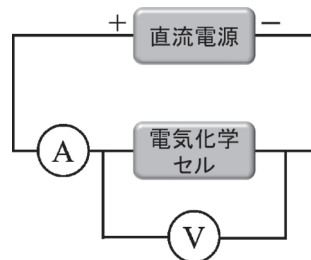


図1 直流法による系の電気化学特性の測定

直流法で系の電気化学特性を測ろうとしても、さまざまな成分が一体不可分な形になったものが得られるだけである。しかし、詳細な系の解析のためにはそれらを分離したいという強い要請がある。それでは、系のオーム抵抗、反応抵抗、拡散抵抗などが依存する別の変数がないかという話になるが、それが「時間」である。時間変化する入力に対し、系がどのような追従を見せるかを調べることで、抵抗成分の分離が可能となる。たとえばオーム抵抗成分であれば、時間的に変動する電流（圧）に対してすぐに応答するだろうし、いっぽうで物質拡散に起因するような抵抗であれば、ある程度の時間遅れが発生することが予想される。

時間変化する入力として、様々な周波数を持つ交流の電流（圧）を印加し、その応答を解析するというのが電気化学インピーダンス法である。また言い換えれば、電極反応に関する時間領域の電気化学信号を、フーリエ変換を用いて周波数領域の信号に変換し、各周波数における系の伝達

*京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻
博士後期課程2年

〒606-8501 京都市左京区吉田本町
E-mail: blauer-vogel@t04.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

関数を求めることで、抵抗成分を分離する手法であるとも言える。このようなアプローチは、古典制御論における線形システムの伝達関数を解析する際に用いられるものと大いに通じるところがある。機械工学をバックグラウンドに持つ筆者にとっては、制御工学の知識が電気化学インピーダンス解析の理解に役立つところも多かった。

2.2 時間領域・周波数領域での解析

図2に示すように、システムに対する非定常解析には時間領域における解析と周波数領域における解析の2種類がある。それらはフーリエ変換、フーリエ逆変換を通じて結び付けることができ、本質的には等価である。しかしながら、周波数領域における解析の方が数学的にも取り扱いやすいという利点がある。時間領域において、電気化学セルへの入力信号を*i(t)*、出力信号を*v(t)* とすると、両者の関係はセルのインパルス応答関数*z(t)* を用いて以下のような畳み込み積分の形で書ける。

$$v(t) = \int_0^t i(\tau)z(t - \tau)d\tau \tag{1}$$

これをフーリエ変換により周波数領域での形に変換すると、関数の積で表すことができ、式(1)よりもずっと簡単になる。

$$V(\omega) = I(\omega)Z(\omega) \tag{2}$$

ここで*Z(ω)* はセルの伝達関数であり、図2のように入力が電流、出力が電圧である場合にはセルのインピーダンスに対応する。

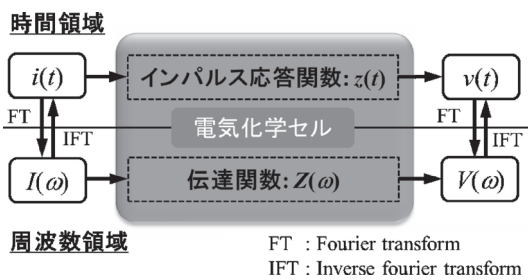


図2 時間領域と周波数領域での伝達関数

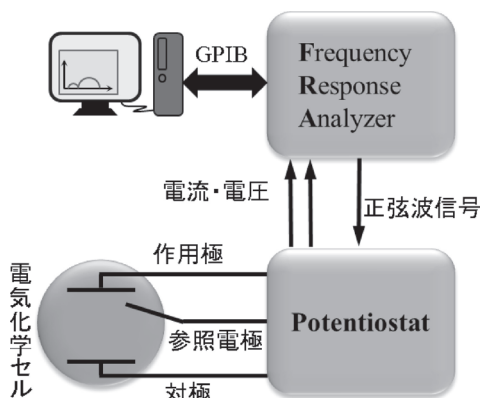


図3 電気化学インピーダンス測定の装置図

2.3 電気化学インピーダンス法の測定装置

電気化学インピーダンスの測定装置は、電子負荷装置 (Potentiostat) と周波数応答解析装置 (Frequency response analyzer: FRA) から構成される (図3)。まず FRAに搭載された正弦波発振回路から正弦波信号が電子負荷装置に入力される。それをもとに電子負荷装置が電気化学セルに対して正弦波電流 (電位) を与え、応答である電位 (電流) を計測する。変調電流 (電位) と応答電位 (電流) はFRAに戻され、フーリエ変換を通じてセルのインピーダンスが決定される。

電気化学セルの測定には、一般に3電極系が用いられる。まず、性能を調べたい電極を作用極 (Working electrode)、反対側の電極を対極 (Counter electrode) と呼ぶ。電流はその2つの電極の間に流れるのだが、電位もその間で計測してしまうと、本来考慮したくない対極における電気化学反応の影響を受けてしまう。そこで、対極は電流の「捨て場」ということにおいて、電位の計測には別の電極を用いる。これが参照電極 (Reference electrode) であり、電位は作用極と参照電極の間で計測される。

2.4 インピーダンスの表記法

式(2) の形で表されるインピーダンスは一般に複素数の形をしているが、その表記法には以下の3つがある。

- (i) 複素平面上で、横軸に実数成分*Z'*、縦軸に虚数成分*-Z''*を示す (Nyquist plot, Cole-cole plot)。
- (ii) 横軸に周波数*f*の対数、縦軸にインピーダンスの絶対値|*Z*|の対数、および位相差*θ*を示す (Bode plot)。
- (iii) 横軸に周波数*f*の対数、縦軸にインピーダンスの実数成分*Z'* と虚数成分*-Z''*を示す。

電気化学の分野では特に(i) と(ii) の表記が大勢を占めているようである。図4に筆者が実際に燃料電池 (SOFC) の性能評価を行った際に得たインピーダンスの計測結果の例を示す。図4(a)のように、インピーダンススペクトルはNyquist線図上で円弧状の軌跡を描くことが多い。これは次節で説明するが、系内のキャパシタ成分の影響であり、RC並列回路によって作られる容量性半円と呼ばれる。グラフ中のひとつの円弧が、系内に存在するひとつの現象と対応している。また円弧の頂点に対応する周波数から現象の時定数を求めることも可能である。いっぽう図4(b)のBode線図のうち、上図に示すインピーダンスの絶対値は、(少々見にくい) 階段状のグラフを描く。高周波領域では系のオーム抵抗のみが表れるが、低周波領域では反応や拡散に起因する抵抗成分が表れるため、値は大きくなる。グラフが平坦になる領域の数が、系内に存在する現象の数と対応している。下図は交流入力に対するインピーダンスの位相遅れを表している。

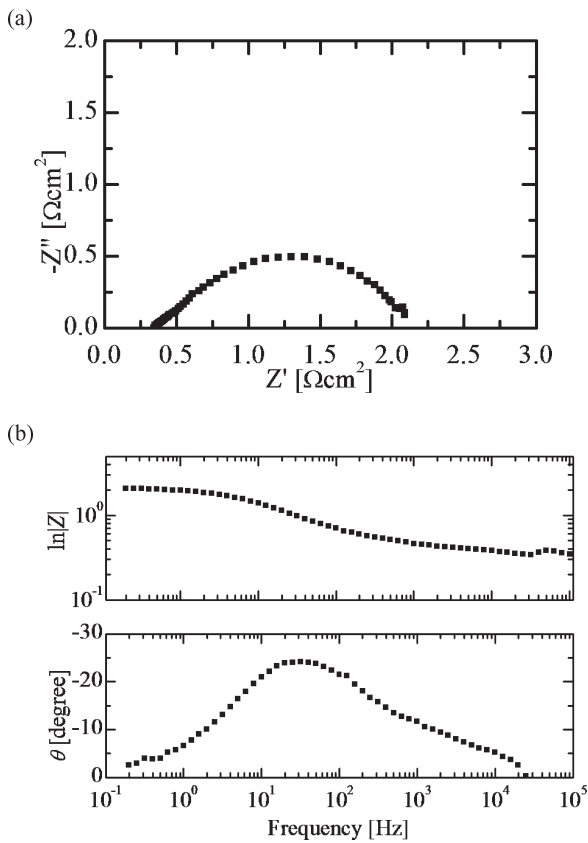


図4 燃料電池 (SOFC) のインピーダンスプロットの例
(a) Nyquist plot (b) Bode plot.

Nyquist線図とBode線図のどちらでも系の周波数応答を見ることができるが、ともに得意・不得意があるため場合に依じて使い分ける必要がある。Nyquist線図ではひとつの現象がひとつの半円として現れるため、抵抗成分を視覚的に分離しやすいが、周波数の情報が軸に残らない。そのため、代表的な点での周波数をグラフ上に付記する必要がある。また複数の現象の時定数が近い場合には、円弧が重なり合っ「つぶれた」円弧が表れることがあり、分離は難しくなる。いっぽうでBode線図では周波数依存性を判別しやすいが、成分の分離のしやすさでは一歩劣る。たとえば大きさの近い抵抗成分が複数存在すると、縦軸である振幅が近くなるため見づらくなる。

3. 等価回路フィッティングによる解釈

3.1 等価回路

測定によって得られたインピーダンスの情報を解析し、電気化学セル内の抵抗成分を分離・評価する必要があるが、図4のようなグラフを眺めるだけでは得られる情報は限られる。今日ではインピーダンス計測自体はほぼソフトウェアによって自動化され、コンピュータの画面上に自動的にグラフを作成してくれるものがほとんどであるため、測定自体はそれほど難しくない。そのため、インピーダンス評価において重要なのはむしろデータの解析・解釈の部

分である。

一般には測定対象に存在する様々な電気化学的素過程を、電気回路素子からなる「等価回路」で表し、そこに測定データをフィッティングすることが行われる。それにより回路の各構成要素の情報を得ることができる。

ここで問題となるのが、どのような等価回路を設定するかということである。系の電気化学的な構造を100%把握し、全ての素過程を等価回路に反映することは現実的に不可能なので、完全に「等価」な回路を設定することはできない。そのため、系内の素過程の中でも支配的な部分に着目したり、時定数の近い現象をまとめてしまったりする簡略化がなされ、「ほぼ等価」な回路の設定が実際では行われている。例として図5に挙げるようなものがある。図5(a)はNest型と呼ばれ、もっとも一般的に用いられる等価回路の一つである。 R_{hf} は高周波におけるオーム抵抗、 C_{dl} は電気二重層容量、 R_{ct} は電荷移動抵抗、 R_{dif} 、 C_{dif} は拡散現象に起因する抵抗および容量を示す。各要素の意味は次節で説明する。図5(b)はSeries型と呼ばれるもので、インピーダンススペクトルを高周波、低周波に完全に分離して直列につなげたものである。場合によってはさらにいくつかのRC並列回路を直列につなげる場合もある。

一見すると、(筆者の勝手な印象ではあるが)図5(b)の方には恣意性のようなものが見え、いっぽうで図5(a)の方が高尚なモデルのように見える。しかし現実の燃料電池の解析の場合には、どちらの等価回路を設定しても大抵の場合うまくフィッティングできる。等価回路はインピーダンススペクトルを解釈するうえでの「ものさし」であると言える。ものさしが違えばもちろん得られる情報は違って見えるため、異なる研究グループ間でデータの比較をする際には注意が必要となるのだが、逆に言えば、皆でものさしを共有してしまえば、等価回路が本当に系の構造と等価なのかという問題はそれほど重要ではなくなってくるように思える。等価回路が本当に等価なのかということを議論するには、電気化学についての相当に深い知見と経験

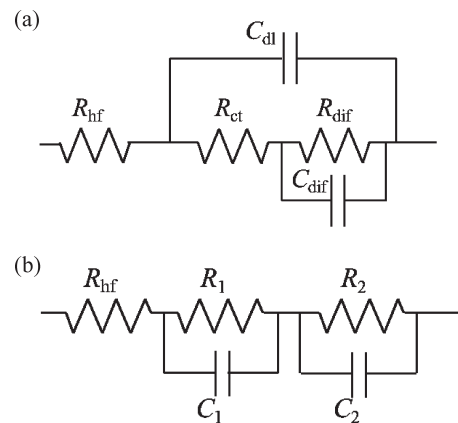


図5 等価回路の例 (a) Nest型 (b) Series型

が必要であり、筆者はとて議論できる域には達していない。とりあえず等価回路の妥当性についての議論は今後の宿題ということにして終わらせていただきたい。次節以降で、等価回路の各要素がどのような物理的意味を「与えられているか」をまとめる。表1に各周波数領域における抵抗成分の解釈と等価回路要素との対応を示すので、適宜参照されたい。

表1 インピーダンスに表れる抵抗成分の例と、対応する周波数帯・等価回路成分

周波数帯	抵抗に関与する物理現象の例	等価回路要素	
		Nest	Series
高周波(1MHz~)	オーム抵抗	R_{hf}	R_{hf}
	電荷移動	R_{ct}, C_{dl}	R_1, C_1
低周波(~100Hz)	物質拡散	R_{dif}, C_{dif}	R_2, C_2

3.2 オーム抵抗

燃料電池電極におけるオーム抵抗 R_{hf} は、バルク電子伝導やバルクイオン伝導に起因する。反応や濃度に起因する抵抗とは異なり、高周波の交流入力に対しても遅れなく追従できるため、Nyquist線図では円弧の実軸切片の中で最も左側に現れるものと対応する。等価回路では容量成分と並列にはならず、単一で存在する。

3.3 電気二重層容量 C_{dl} と電荷移動抵抗 R_{ct}

電気化学セルのインピーダンススペクトルに現れる円弧の中でも高周波側に位置するものは、電気二重層容量 C_{dl} (C_1) と電荷移動抵抗 R_{ct} (R_1) の並列回路として表される。まず電気二重層とは、電位の異なる2つの物質が接する界面において、異種電荷が対をなして層状に並んだものを言う。このような現象はキャパシタ的な振る舞いとして解釈でき、その容量が電気二重層容量である。たとえば図6に示すような、SOFCに用いられる一般的な電極であるNi-YSZ (イットリア安定化ジルコニア) 燃料極においては、電極を構成するNi粒子とYSZ粒子の間に電位差が加えられると、Ni側には電子がわずかに少ない部分、YSZ側には酸化イオンがわずかに多い部分が2相の界面のごく近傍に生じ、電気二重層を形成する。相内における電気ポテンシャルの分布は図6の下部のようになっている。

電極反応は、基本的には電気二重層に蓄えられた異種の電荷が反応する現象として捉えられる。その際の電荷移動に対する抵抗が電荷移動抵抗 R_{ct} (R_1) である。電極反応が単一の化学反応で表せるような場合は、電極電位 E の平衡電位 E_{eq} からのずれ (過電圧) $\eta (=E-E_{eq})$ と、電極に流れる電流の関係は以下のようなButler-Volmer式で表される。

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{\beta nF}{RT} \eta\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta)nF}{RT} \eta\right) \right] \quad (3)$$

ここで I_0 は交換電流、 β は対称因子、 n は電気化学反応に関与する電子の数である。かつこ内第1項が酸化反応による部分電流 (アノード電流)、第2項が還元反応による部分電流 (カソード電流) であり、その和が実際にマクロで見るときに電極に流れている電流となる (図7)。Ni-YSZ燃料極の例では、電極反応 $H_2 + O^{2-} \rightleftharpoons H_2O + 2e^-$ が右に進むときに流れるのがアノード電流、左に進むときに流れるのがカソード電流である。電極が平衡電位 E_{eq} にあるとき、電極内のアノード電流とカソード電流はつりあって打ち消し合い、外部には取り出せない。この見えない電流のことを交換電流と呼び、これが大きいほど電極上での電子のやり取りは活発であると言える。また、電位が平衡からずれたときに取り出せる電流も大きくなる。

電荷移動抵抗 R_{ct} は式(3)を微分することで得られる。

$$\frac{1}{R_{ct}} = \frac{\Delta I}{\Delta \eta} = I_0 \frac{nF}{RT} \left[\beta \exp\left(\frac{\beta nF}{RT} \eta\right) + (1-\beta) \exp\left(-\frac{(1-\beta)nF}{RT} \eta\right) \right] \quad (4)$$

電極電位が平衡電位に近い、すなわち過電圧 η の値が小さいときは以下のようなになる。

$$\frac{1}{R_{ct}} = \frac{\Delta I}{\Delta \eta} \approx \frac{I_0 nF}{RT} \quad (5)$$

つまり、電荷移動抵抗は電極に流れる電流とは関係なく一

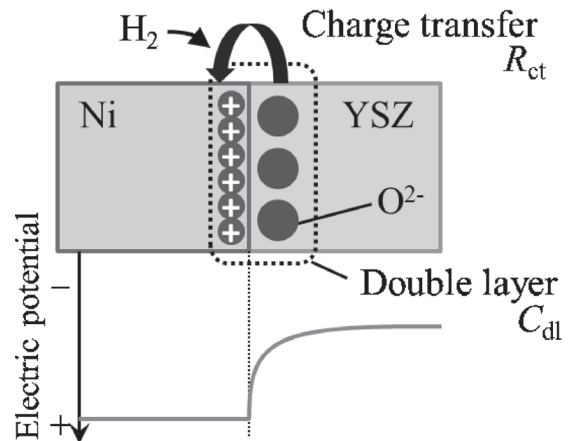


図6 SOFC燃料極における電気二重層と界面電荷移動

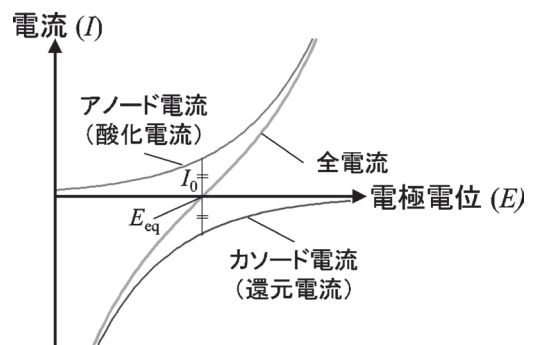


図7 電極電位と電流の関係

定であることがわかる。

いっぽうで電極電位が平衡電位から正の方向に大きくずれたときは、式(3)のかっこ内第2項が無視できるので、電流は以下のように表される。

$$I = I_0 \exp\left(\frac{\beta n F}{RT} \eta\right) \quad (6)$$

電荷移動抵抗 R_{ct} は式(6)を微分することで得られる。

$$\frac{1}{R_{ct}} = \frac{\Delta I}{\Delta \eta} = I_0 \frac{nF}{RT} \beta \exp\left(\frac{\beta n F}{RT} \eta\right) = \frac{\beta n F}{RT} I \quad (7)$$

つまり、電荷移動抵抗は電流と反比例の関係にあることが分かる。電極電位が平衡電位から負の方向に大きくずれたときにも同様のことが言える。

電荷移動抵抗については、式(5)、(7)の話ができればそれなりに説明できたことになる。しかし電荷移動抵抗のみで電極反応全体を説明することはできない。電極における反応量は、電極に加わる過電圧だけではなく、電極近傍に存在する酸化体や還元体の濃度によっても決まる。実はButler-Volmer式にも、交換電流 I_0 にそれらの濃度が含まれている。電荷移動抵抗のみで電極反応が説明できるのは、電極上の反応サイトへの反応物の供給が十分である場合（電荷移動律速）である。電極に加わる過電圧が大きい場合や、電極中の反応サイト近傍の反応物濃度が希薄であるような場合には、反応サイトへの反応物の供給が電極反応の足を引っ張るようになる（物質輸送律速）。このような場合には電荷移動抵抗以外の抵抗成分が現れるのだが、これについては次節で説明する。

3.4 物質輸送抵抗

電極を流れる電流量が多い場合などでは、反応物の拡散、反応サイト近傍での吸着、解離などが電極反応に追いつけなくなり、電極反応の速さを左右することがある。このような場合、インピーダンス曲線には電荷移動抵抗とは別の抵抗成分が表れる。拡散、吸着、解離などの現象は比較的遅い現象であるため、インピーダンス解析では低周波側で影響が現れ、Nyquist線図では電荷移動抵抗 R_{ct} (R_1) と電気二重層容量 C_{dl} (C_1) のつくる容量性半円の右側にもうひとつ円弧などの軌跡を作る。

物質輸送律速の条件では、電極を流れる電流は過電圧のみで表すことができないため、式(3)のようなButler-Volmer型の式ではなく、一般に以下の形で書ける。

$$I = f(\eta, X) \quad (8)$$

ここで X は電極における電気化学反応に影響をおよぼす何らかの物理量であり、たとえば反応サイト付近における吸着体の被覆率や、酸化体・還元体の濃度であったりする。電極反応における抵抗は、式(8)を微分することで得られる。

$$\frac{1}{Z} = \frac{\Delta I}{\Delta \eta} = \left(\frac{\partial f}{\partial \eta}\right)_X + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)_\eta \frac{\Delta X}{\Delta \eta} \quad (9)$$

ここで右辺第1項は、前節で説明した電荷移動抵抗 R_{ct} の逆数に対応する。そのため、問題となるのは第2項中の $\Delta X / \Delta \eta$ の部分である。電極の電位が変化したときに、反応に寄与する物理量がどの程度変化するかを見積もる必要がある。

X についての議論をこれ以上一般的に説明することは難しいので、対象を限定する。本稿では、 X は反応サイト近傍での燃料濃度 c であるとして、反応サイト近傍でのガス拡散の速度がインピーダンスにおよぼす影響について考える。

ここで仮定として、電極反応の速度は反応サイトでの燃料濃度 c_0 に比例するとし、また反応速度定数 k は電極過電圧 η に指数関数型で変化するとする。このとき、電極を流れる電流は以下のように表せ、式(8)に対する具体的な表式を与える。

$$I = nFkc_0, \quad k = k_0 \exp(b\eta) \quad (10)$$

ここで k_0 , b は定数である。式(10)を微分することでインピーダンスを求めると、式(9)に対する具体的な表式を与える。

$$\frac{1}{Z} = \frac{\Delta I}{\Delta \eta} = nFkb_0c_0 + nFk \frac{\Delta c_0}{\Delta \eta} \quad (11)$$

この式における $\Delta c_0 / \Delta \eta$ を具体的に書き表すことができれば拡散のインピーダンスは理解できたことになる。

まず、電極近傍での反応物の濃度 c , および濃度変調 Δc は、ともに拡散方程式にしたがう。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial \Delta c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Delta c}{\partial x^2} \quad (12)$$

電気化学インピーダンス解析で与えられる正弦波状の電位変調により、濃度 c もそれに同調して変化する。セルが線形システムであるとするれば、濃度変調 Δc は以下のように書ける。

$$\Delta c = |c| \exp\{j(\omega t - \phi)\} \quad (13)$$

ここで ϕ は濃度変調と正弦波入力との間の位相差である。これを式(12)に代入し、境界条件 $\Delta c = 0$ ($x = \infty$), $\Delta c = \Delta c_0$ ($x = 0$) のもとで解くと、以下の解を得る。

$$\Delta c = \Delta c_0 \exp\{-(j\omega/D)^{1/2} x\} \quad (14)$$

よって、反応サイトでの拡散フラックスの変調 ΔJ_0 は以下のように表せる。

$$\Delta J_0 = -D \left. \frac{\partial \Delta c}{\partial x} \right|_{x=0} = (j\omega D)^{1/2} \Delta c_0 \quad (15)$$

また、反応サイトにおける拡散のフラックスと、電荷移動

の速度はつりあっているので、以下の式が成り立つ(図8)。

$$kc_0 = -J_0 \tag{16}$$

変調成分を考えると以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 bk_0\Delta\eta + k\Delta c_0 &= -\Delta J_0 \\
 \frac{\Delta c_0}{\Delta\eta} &= \frac{-bk_0}{k + \Delta J_0/\Delta c_0}
 \end{aligned} \tag{17}$$

式(15), (17) から $\Delta c_0/\Delta\eta$ を具体的に得ることができ、拡散の影響を考慮したインピーダンスを求めることができる。

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_{ct}} + nFk \frac{-bk_0}{k + (j\omega D)^{1/2}} \tag{18}$$

上の議論では、濃度変調が反応サイトから無限に遠いところで無視できる、つまり拡散層厚さが無限大だと仮定している。しかし、現実には電極から有限のところバルク流体があるなどして、拡散層厚さが有限であることが多い。この場合は、式(14)に拡散層厚さ δ が含まれるようになり、やや複雑な形にはなるが、基本的には同様の議論を進めれば式(18) のような式を得ることができる。

以上のようにして得られたインピーダンスは、実は図5に示した等価回路の要素とはどれとも対応しない。式(18)のようなインピーダンスは、ひとかたまりでファラデーインピーダンスと呼ばれる。ファラデーインピーダンスを含むような等価回路を図9に示す。電極内の拡散現象を正しく考慮するならば、図9のような等価回路を設定する方が良いように思える。しかし、ファラデーインピーダンスには多くのパラメータが含まれており、それらをすべてフィッティングすることは容易ではない。そのため、より簡単な等価回路として図5で示したものが広く用いられている。とりあえず拡散なり吸着なりの過程を、ある時定数を持った現象だとしてRC並列回路で表してしまっている。やや本来の物理現象から遠のいた気もするが、フィッティングも容易になり、かつ前にも述べたように「ものさし」を共有することができるため、研究者間での情報の共有・比較はしやすくなるだろう。ただし、あくまでも物理現象により近い等価回路は図9に示したものであり、図5に示したものは簡略化したものであるという認識はしっかりと持っておく必要があるのではないと思う。

3.5 その他の要素

等価回路の要素として代表的なものとして、RC並列回路やファラデーインピーダンスを基本としたものを例として挙げたが、それ以外にもインダクタンス成分が存在することがある。これは電気化学セル起因のものに限らず、たとえば測定用の配線によっても生じることがあり、それによりインピーダンススペクトルの形はゆがめられる。その

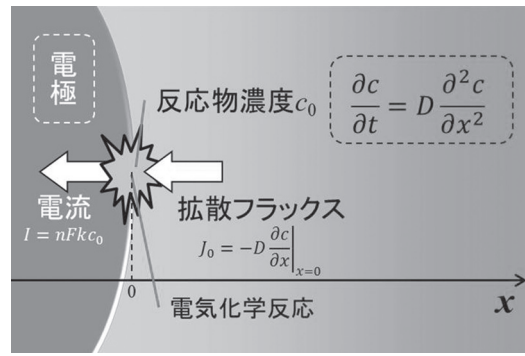


図8 電極反応とガス拡散フラックス

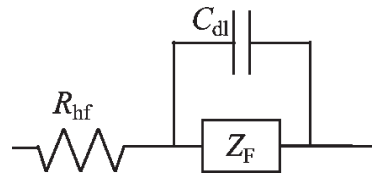


図9 ファラデーインピーダンスを含む等価回路

ような場合には等価回路に直列にインダクタ要素を設け、その影響を考慮することがある。

4. まとめ

本稿では、燃料電池をはじめとするさまざまな電気化学セルの特性評価に用いられる電気化学インピーダンス法について、筆者の知るところをまとめた。電気化学インピーダンス法による測定は、ある程度の測定装置を用いれば比較的容易に行うことができる。しかしそれゆえに大量の測定データに囲まれ、その解釈が追いつかないという状況に陥りがちである。測定の原理から、等価回路を用いた解釈、その裏にある理論的背景を理解することで、インピーダンス測定から得られる情報の質は飛躍的に向上するであろう。今回の執筆は、電気化学インピーダンス法についてより深く知ることができたという意味で、筆者自身にとっても非常によい勉強になった。今後の自らの研究にも生かしていきたいと思う。

参考文献

- 1) 板垣昌幸；電気化学インピーダンス法 原理・測定・解析，(2008)，丸善株式会社。
- 2) 渡辺正，金村聖志，益田秀樹，渡辺正義；電気化学，(2001)，丸善株式会社。
- 3) 渡辺正，中林誠一郎；電子移動の化学 - 電気化学入門 -，(1996)，朝倉書店。
- 4) 電気化学会編；電気化学測定マニュアル 基礎編，(2002)，丸善株式会社。
- 5) 電気化学会編；電気化学測定マニュアル 実践編，(2002)，丸善株式会社。