使える 解析テクニック！ 具体例で説明する 電気化学測定法

分極曲線・サイクリックボルタンメトリー (2) 燃料電池 (PEFC)

五百蔵 勉, 安田 和明

1 はじめに

固体高分子形燃料電池 (PEFC) の研究では、分極測定とサイクリックボルタンメトリー (CV) は日常的に使用される解析手法である。しかし、PEFCの研究においては、それらを前回の総論で扱ったような拡散係数や交換電流密度の決定に用いられることはあまりなく、より実用的な側面で利用されることが多い。例えば、分極測定によってカソードの酸素還元活性化支配電流を求め、CV測定から得られた活性表面積の値で除することで比活性 (触媒の単位表面積あたりの電流) を決定し、種々の触媒材料の活性を比活性という基準で比較するといったことが行われる。また、近年PEFCの耐久性を向上させるための劣化要因解析が活発に行われているが、触媒劣化を加速したり、定量的に評価したりするためにも分極測定やCVのテクニックは必須である。

本稿では、発電可能な膜電極接合体 (MEA) を用いた単セル、および回転電極など電解質水溶液を用いたハーフセルを使用した分極測定やCV測定について、データ解析の具体例をいくつか取り上げながら、実用的な解析法について紹介したい。

2 分極測定

2.1 MEA (単セル) を用いた分極測定

MEAでの分極測定を行うためには、単セルを組み発電可能な状態にセットすることが必要になる。Fig. 1にMEAの代表的な構造の模式図を示す。

分極曲線の測定法としては、非常にゆっくりとした走査速度でセル電圧を掃引して測定することもあるが、ある電流密度で一定時間保持して得られるセル電圧を、低電流密度から高電流密度まで順次測定していく定常法が一般的に用いられ

る。これは、電流密度を変更することによりMEA内でガス・水分・電流などの分布が変化し、これらの状態が定常状態に落ち着くまでには5~10分程度かかるためである。

Fig. 2にPEFC単セルの定常分極曲線 (電流-電圧曲線) の概念図を示す。ある負荷電流 i (A) におけるセル電圧 E (V) は下記のように表すことができる。

$$E = E_0 - \eta_a - \eta_c - \eta_{diff} - i \cdot R \quad (1)$$

ここで、 E_0 は理論起電圧、 η_a はアノード活性化分極、 η_c はカソード活性化分極、 η_{diff} は物質移動による濃度分極、 $i \cdot R$ は抵抗分極 (電流とセル内部抵抗の積) である。

PEFCの理論電圧は熱力学データから室温 (25℃) 大気圧下では1.23 Vであるが、通常のセルの開回路電圧 (OCV) は1.0 V前後を示す。

分極測定からはFig. 2の太い実線で示した E と i の関係しか知ることができないため、式 (1) のような分極の収支を明らかにするためには他の測定手法を併用する必要がある。抵抗分極については、電流遮断法や交流インピーダンス法から求めることができる。これらの測定法の原理や詳細は成書を参照いただきたいが^{1,2)}、抵抗分極と活性化分極・濃度分極の時定数が大幅に異なることを利用して分離する手法である。活性化分極・濃度分極のアノード・カソード分割を行うためにはセルに参照極を設置した測定が必要になる。しかし、PEFCのMEAでは電解質膜の厚みが数十 μm と薄いため、アノード・カソードの電極端部がわずかでもずれると膜の電

Fig. 1 MEAの層構造。

Fig. 2 定常分極 (電流-電圧) 曲線の電圧収支。

位分布が大幅に変化する³⁾。したがって、再現性よく安定した参照極を設置することは困難な場合が多い。燃料が純水素でアノードが白金触媒であればアノード活性化分極が非常に小さいため、活性化分極はほぼカソードに起因すると考えてもよい。濃度分極は酸化剤に空気をうい電流密度が大きい領域や、電極濡れが発生して電極内の酸素の拡散が阻害される場合に顕著になってくる。一般に濃度分極の時定数は活性化分極よりも大きいので交流インピーダンス測定から求めることができる。この場合、カソードガス中の酸素分圧を変化させるなどの手法も用いられる。また、電極内の酸素の拡散性は O_2 ゲイン（カソードガスを純酸素および空気で運転したときのセル電圧の差）で評価されることも多い。

このように分極の収支を明らかにすることによって、セル特性を低下させている原因がどの部分にあるのかが明確になり、改善のための指針を得ることができる。

なお、研究でよく用いられる電極面積 25 cm^2 程度のMEAを用いた場合でも、セルの入口付近と出口付近ではガス・水分などの分布が大きく異なり、MEA面内にながりの電流分布が生じる。したがって、MEAを用いた解析では常に電流分布が存在することを念頭に置き、解析を行うことが不可欠である。集電体を分割して部分電流を測定可能な分割セルを用いれば、電流分布を測定することが可能になる。また、電流分布の影響を取り除くためには、できるだけ小さなMEA (1 cm^2 程度)を用い、ガスの利用率を下げた運転する方法が用いられる。

2.2 ハーフセルを用いた分極測定

MEAによる分極測定は実際的な方法であるが、一方で測定準備や手順が煩雑であり、またMEA作製や発電条件など種々のファクターに影響を受ける。例えば触媒材料の評価を意図した場合でも、単純には触媒自身の特性評価となっていないケースも見受けられる。一方、回転電極 (RDE) などのハーフセルを用いた評価では測定が比較的シンプルで再現性も得やすく、触媒活性評価ではよく用いられている手法である。Fig. 3にRDEを用いたハーフセル測定の装置図を示す。また、RDEでは困難な高温や加圧雰囲気での測定では、チャンネルフロー電極を用いる方法なども利用されている⁴⁾。

RDE法の詳細な理論や測定のノウハウについては成書^{1,5)}やこれまでの本誌測定法シリーズ⁶⁾を参照していただきたい。また、本シリーズでも後に取り上げる予定である。Pt/Cなどの実用触媒をRDE法で分極測定する場合は、鏡面研磨したグラッシーカーボン円盤電極上に固定化して使用する^{5,7)}。このとき、触媒の分散度が低いと、利用率が低下し（固定し

た触媒粒子の一部が電気化学的に不活性となる）、正確な活性評価ができないため、触媒をできるだけ高分散にすることがポイントとなる。また、電解液の種類やコンタミ、電極の電気化学的クリーニング、セルの汚れなどについても注意する必要がある⁷⁾。ガラスセルなどは、混酸浸漬、蒸留水中での煮沸（あるいはスチームクリーニング）などの洗浄をすることが好ましい。

Fig. 4 (a) にグラッシーカーボン電極に固定した白金担持カーボン (Pt/C触媒) の酸素還元反応の対流ボルタモグラムを示す。電極電位を下げていくと、 $E < 1\text{ V}$ で酸素還元電流 i が流れ始め、電極回転数に応じた拡散限界電流 i_L に達した後は一定となる。拡散限界電流に達するまでの電流は、対流による拡散と反応活性化の混合支配となっており、次のような関係で表される。

$$1/i = 1/i_k + 1/i_L \quad (2)$$

ここで、 i_k は拡散の影響を除いた活性支配電流である。式(2)を変形すると i_k は次のように表される。

$$i_k = i \cdot i_L / (i_L - i) \quad (3)$$

このように i と i_L より得られる活性支配電流 i_k を用い、電極活性の評価指標として用いられる比活性 i_s (specific activity)、質量活性 i_m (mass activity) は次のように求められる。

Fig. 4 (a) Pt/C触媒の対流ボルタモグラム (0.1 M $HClO_4$, $25^\circ C$, 900 rpm, 5 mV/sec), (b) 対流ボルタモグラム (a) より式 (3) を用いて得られたターフェルプロット (実線)。黒丸は 400 - 3600 rpm の対流ボルタモグラムから Koutecky-Levich プロットにより求めた結果。

Fig. 3 ハーフセルによる触媒の電気化学測定例。

$$i_s (\text{mA}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}) = i_k (\text{mA}) / \text{Ptの活性表面積} (\text{cm}^2_{\text{Pt}}) \quad (4)$$

$$i_m (\text{mA}/\text{mg}_{\text{Pt}}) = i_k (\text{mA}) / \text{Pt担持量} (\text{mg}_{\text{Pt}}) \quad (5)$$

ここで、触媒の活性表面積 (Electrochemically active surface area; ECSA) は後述のCVを用いて決定することができる。

Fig. 4 (a) の対流ボルタモグラムより、式 (3)、(4) を用いて得られる i_s の電位依存性 (ターフェルプロット) を Fig. 4 (b) に示す。式 (3) 用いた手法は簡便であるが、 i_L と i の差をとるため、 i が i_L に近づくとき実験誤差やノイズの影響が大きくなる。また、電極活性が低く拡散支配領域が観察できない (i_L を決定できない) 場合は適用不能となるため、電極回転速度の異なる対流ボルタモグラムをいくつか測定し、Koutecky-Levich プロット (式 (6)) を用いた解析が必要になる。

$$1/i = 1/i_k + 1/(0.62nFACD^{2/3}\nu^{-1/6}\omega^{1/2}) \quad (6)$$

ここで、 n は反応電子数、 F はファラデー定数 (96485 C mol^{-1})、 A は電極の幾何面積 (cm^2)、 C は反応化学種濃度 (mol cm^{-3})、 D は反応化学種の拡散係数 ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)、 ν は溶液の動粘度 ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$)、 ω は電極の回転角速度 (rad s^{-1}) である。Koutecky-Levich プロットは、 $1/i$ を $\omega^{-1/2}$ に対してプロットして得られる直線を $\omega^{-1/2} = 0$ に外挿して $1/i_k$ を求めるので i_L が明確でない場合でも解析が可能となる。解析の詳細は成書などを参照していただきたい^{1,5,6)}。

3 サイクリックボルタンメトリー (CV)

PEFCにおけるCVの主要な用途のひとつに活性表面積 (ECSA) 測定が挙げられる。触媒の活性表面積の大小は電極活性を左右する要因であるので、初期活性・劣化解析のどの場合においても重要な指標となる。また、PEFCの電極では通常、仕込んだすべての触媒が利用できるわけではなく、同じ触媒材料を使っても触媒層の形成法や作動条件によって触媒電極の中での実際に使える白金の割合 (すなわち白金利用率) は変わってくる。CVはハーフセルだけでなく、MEAを用いた測定でも、触媒の活性表面積を簡便に“その場”測定できる解析法である。

白金触媒電極の活性表面積評価では、水素吸脱着波の電気量による方法が用いられることが多い。これは、表面積測定のために特別なガスや装置が不要であること、白金表面の水素吸着がアンダーポテンシャル析出 (UPD) の機構で進行しマルチレイヤー析出などが起こりにくいこと、清浄な電極では明確なピークが得られることなどによる。

3.1 ハーフセルを用いたCV測定

測定は分極測定の場合と同様、触媒をグラッシーカーボン電極に固定化して行う。Fig. 5に0.1 M過塩素酸水溶液中での白金電極の典型的なCVの例を示す (電流の符号は酸化電流をプラスとして表示)。0.4 Vよりも卑な電位領域で水素の吸脱着ピークが現れる。水素吸着の電気量 Q_H は、Fig. 5の斜線で示した電気二重層容量電流 (水平線) と水素発生ピーク立ち上がり点 (垂直線) で囲まれた領域とする。求めた Q_H から、電解液に接している白金の露出表面積は式 (7) によって計算できる。

Fig. 5 0.1 M HClO_4 水溶液中白金黒触媒のCV (25°C, 走査範囲: 0.05 - 1.2 V, 走査速度: 100 mV/sec.)

$$\text{活性表面積} (\text{cm}^2_{\text{Pt}}) = Q_H (\mu\text{C}) / C_{\text{Had}} (\mu\text{C}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}) \quad (7)$$

ここで、 C_{Had} は単位白金表面積あたりの水素吸脱着の電気量であり、一般的に多結晶白金に対しては $210 \mu\text{C}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}$ の値が用いられる^{2,8)}。現在PEFCで用いられるような非常に微細なPt触媒では、個々の粒子はほぼ単結晶であり、特定の基本面が優先的に配向している例も報告されている⁹⁾。このような場合のCV波形は通常が多結晶Ptのピークとは異なり、配向面のピークが強調された形になる。ちなみに、単結晶表面に水素がモノレイヤー吸着した場合の C_{Had} の値は、白金の基本指数面である (100), (110), (111) についてそれぞれ、209, 147, 241 $\mu\text{C}/\text{cm}^2_{\text{Pt}}$ とされている⁸⁾。

純白金以外の、Pt-Ru触媒やPd触媒でも同様に水素のUPDが起こるが、これらの触媒ではPt/Cと同様の方法で活性表面積を見積もることは難しい。これは、Pt-Ruでは触媒表面が完全に水素に被覆されず、またPdではPd金属内に水素が吸蔵されるからである。これらの金属の場合には水素より強く吸着するCOストリッピングボルタンメトリー (後述) やCuのUPDを用いたCuストリッピングボルタンメトリーを用いることが現実的な選択肢となってくる。

なお、水素吸脱着ピークの測定上の注意点として、測定温度や走査速度、低電位側折り返し電位条件などにより Q_H が若干変化することが挙げられる⁷⁾。今後Pt上への水素吸着の詳細な理論的解釈と評価法の統一が望まれる。

3.2 MEA (単セル) を用いたCV測定

単セルでの発電に寄与可能な活性表面積を求めるにはMEAを用いて単セルを組み、CV測定を行う。測定上の注意点は、ハーフセルの場合と同様である。セルを室温付近 (あるいは発電時の温度) に保温し、試験極・対極に加湿窒素ガスを流す。試験セル両極内の空気が完全に置換した後、対極側に加湿水素ガスを流し水素雰囲気とする。

ガス拡散電極を用いるMEAでのCV測定では、水素発生および発生した水素ガスの酸化電流がハーフセルの場合よりもかなり高い電位 ($\sim 0.1 \text{ V}$) から流れ始めることが多く、水素吸脱着波の電流に重なって現れるため、 Q_H 計算の誤差原因になりやすい。このような水素発生の電位シフトは、作用極触媒近傍の水素分圧が低下するために生じると報告されており¹⁰⁾、これを防ぐためにはCV測定時に試験極ページ窒素ガスの流量を絞る、もしくは止めることが有効とされている^{7,10)}。

Fig. 6 電解質膜に接合したPt/C触媒電極のCV (Nafion®112, 40°C, 走査範囲: 0.07 - 1.0 V, 走査速度: 50 mV/sec.).

Fig. 6にPt/C触媒電極のCVを示す。パターン全体が酸化電流側にシフトする点を除けば、基本的に電解質水溶液中で測定した場合と同様のCVが得られる。このCVシフトは、水素ガスクロスオーバーの影響である。特に薄いフッ素系電解質膜の系ではクロスオーバー水素量が多く (～1 mA/cm²の電流に相当)、CVの電流値に重畳するクロスオーバー水素の酸化電流も大きくなる。

このようにMEAで求めた電極の有効活性表面積 (SA_{MEA}) とハーフセル測定などで求めた触媒材料固有の活性表面積 (SA_{cat}) との比より白金利用率 u_{Pt} を決定できる。

$$u_{Pt} = SA_{MEA} / SA_{cat} \quad (8)$$

u_{Pt} を求める手法としては、後述する一酸化炭素 (CO) ストリッピング/CO吸着を利用する手法も提案されている¹¹⁾。

3.3 CVの応用例1 — 触媒加速劣化・解析 —

PEFCの耐久性向上は実用化に向けた重要な課題の1つであり¹²⁾、劣化要因の1つである触媒劣化を抑制することが求められている。通常のPEFCの運転条件では、触媒の劣化現象はゆっくりと進行することが多く、材料やシステムの開発を促進するためには、適切な劣化加速手法とその評価法の確立が重要である。このような目的で、ハーフセルおよびMEAに対して、CVなどの電位サイクルを用いる触媒劣化加速評価法が、燃料電池実用化推進協議会 (FCCJ) から提案されている (ただし、その後の新たな知見を基に評価法は今後改訂される可能性がある)¹³⁾。

Pt/C触媒 (特にカソード) 劣化の主要因は、Pt微粒子の溶解・凝集および触媒担体劣化と考えられている。Pt溶解はPtの酸化・還元を繰り返すことで加速されることが知られているが¹⁴⁾、このような環境はOCVと負荷状態を繰り返す負荷変動時のカソード側の条件によくあてはまる。Fig. 7 (a) にFCCJより提案されているMEAでの負荷変動試験条件を示す。窒素雰囲気下0.6 V/0.9 Vの間で電位サイクルを行うことでPtの酸化還元を繰り返し、Pt溶解が加速される条件下での触媒安定性を評価する試験法である。

一方、カーボンブラックなどの触媒担体の劣化は1 Vを超える高電位で加速されることが知られている¹⁵⁾。通常の状態であれば、燃料電池電極がこのような高い電位にさらされることはないが、例えば起動停止時には逆電流機構とよばれるメカニズムでカソード電位が最大1.5 Vに達することがある¹⁶⁾。

Fig. 7 FCCJ提案のMEA加速耐久試験条件 (a) 負荷変動試験, (b) 起動停止試験。

Fig. 8 Pt/C触媒電極のMEA起動停止試験結果 (a) CV (Nafion®112, 80°C, 走査範囲: 0.1 - 1.0 V, 走査速度: 100 mV/sec.), (b) 活性表面積のサイクル依存性。

Fig. 9 Pt/C触媒のハーフセル起動停止試験結果 (60°C, 0.1 M HClO₄水溶液, 走査速度: 500 mV/sec.).

このような状態を模擬する起動停止試験としてFig. 7 (b) に示すような試験条件が提案されている。窒素雰囲気下0.9 V/1.3 Vの矩形波サイクルを繰り返すことで、起動停止時の異常電位に対する耐性を評価する。

MEAのPt/Cカソード触媒電極にFig. 7 (b) の起動停止試験を2000サイクル実施した例をFig. 8に示す。サイクルを重ねるにつれて水素吸脱着波や酸化物層生成・還元ピークが縮小しており、Ptの溶解・凝集が進行していると考えられる。同時に電気二重層電流も徐々に増加し、0.5 - 0.6 V付近にはカーボン表面の官能基によるレドックスと考えられるピーク対が次第に明確になっていることから、カーボン担体表面の酸化が進行していることも示唆される。CVの水素吸脱着波からECSAを求め、初期値で規格化した値をサイクル数に対してプロットした結果をFig. 8 (b) に示す。なお、Fig. 8の例は80°CでのCV測定であるため、水素被覆率低下や水

素発生の影響が無視できず正確なECSA評価は困難になる。しかし、Fig. 8 (b) のようなサイクルに伴う相対的な変化を議論することは可能である。

ハーフセルを用いる加速劣化試験法については、負荷変動・起動停止試験ともに三角波CVの繰り返しが提案されている¹³⁾。Fig. 9にPt/C触媒のハーフセルによる起動停止試験(CV三角波1.0 V/1.4 V)を10000サイクル実施した例を示す。Fig. 8のMEAの結果と同様にECSAの減少と共に二重層容量の増大が確認できる。

3.4 CVの応用例2 — 吸着一酸化炭素のCVによる解析 —

定置用燃料電池など改質ガスを燃料とするPEFCのアノードには、改質ガスの微量不純物である一酸化炭素(CO)被毒による分極を低減するため耐CO被毒触媒としてPt-Ru合金触媒が用いられる。Pt-Ruの耐CO被毒機構に関する詳細は省くが、バイファンクショナル機構による吸着CO酸化電位の低減や電子的な影響によるCO吸着の緩和などが議論されている¹⁷⁾。Pt, Pt-Ru触媒表面に吸着したCO (CO_{ad})は、貴な方向に電位スイープすることで式(9)のように酸化され、両触媒ともに比較的鋭いCOストリッピングピークを示す。

Fig. 10 0.5 M H_2SO_4 水溶液中Pt/C触媒電極のCOストリッピングボルタモグラム (40°C, CO吸着電位: 100 mV, 走査速度: 20 mV/sec.). 実線 (1サイクル目) は吸着COのストリッピングボルタモグラム, 破線 (2サイクル目) は吸着CO酸化除去後のボルタモグラムを示す。

Fig. 11 Pt/C, Pt-Ru/C触媒電極のCOストリッピングボルタモグラム (Nafion®112, 80°C, CO吸着電位: 100 mV, 走査速度: 50 mV/sec.).

Fig. 10に0.5 M硫酸水溶液中、グラッシカーボン電極に固定化したPt/C触媒のCOストリッピングボルタモグラムの例を示す。COストリッピング測定の詳細については参考文献を参照頂きたい²⁾。1サイクル目 (実線) の750 mV付近に見られる鋭いピークが白金表面に吸着したCOの酸化ピークである。1サイクル目で吸着COが完全に酸化除去されていれば、2サイクル目 (破線) 以降は通常の不活性ガス雰囲気下でのCVと同様となる。ただし、CO酸化ピーク電位は温度に依存するため、高温ではより卑な方向にシフトする。

Fig. 11にMEAにおけるPt/CおよびPt-Ru/C触媒電極のCOストリッピングボルタモグラムを示す。Pt-Ru/C触媒ではCO酸化ピーク電位が大きく低下し、Ruとの合金化によって式(9)の反応が促進されていることがわかる。また、Pt/C, PtRu/Cのボルタモグラムともに酸化電流側にシフトしているのは、Fig. 6の場合と同様にアノード側からのクロスオーバー水素の酸化電流が重畳していることに起因する。

Pt-Ru触媒はPEFCアノード条件下で比較的安定であるが、合金組成や運転条件によってはRu溶出などの脱合金化が進行し、耐CO被毒特性が低下することも知られている¹⁸⁾。電位が高くなるほどこの傾向は顕著になり、Pt-Ru触媒の脱合金化が進行しやすくなる¹⁹⁾。触媒表面がより白金的になれば、COストリッピングピークも次第に白金のピークに類似したものとなるため、COストリッピング測定によってPt-Ru触媒の耐CO被毒特性の劣化を検討することが可能である。

4 おわりに

PEFCにおける分極測定およびCV測定が、電極触媒の開発や評価にどのように使用されるのかについて、具体例を中心に紹介した。これらの手法は、いまやPEFCの触媒開発にとって不可欠な方法となっている。しかし、測定で得られるECSA、比活性、質量活性などのパラメータは、触媒担持量、温度、走査速度、走査電位範囲、酸の種類や濃度などの測定条件に依存するため、報告者の異なるデータを比較する場合には、そのデータが得られた測定条件に注意する必要がある。このため、これらのパラメータの測定条件や加速劣化試験条件など評価法の早急な統一が望まれている。

文 献

- 1) A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods*, Wiley, New York (1980).
- 2) 高須芳雄, 吉武 優, 石原達巳編, 「燃料電池の解析手法」, 化学同人, 京都 (2005).
- 3) Z. Liu, J. S. Wainright, W. Huang, and R. F. Savinell, *Electrochim. Acta*, **49**, 923 (2004).
- 4) N. Wakabayashi, M. Takeichi, M. Itagaki, H. Uchida, and M. Watanabe, *J. Electroanal. Chem.*, **574**, 339 (2005).
- 5) T. J. Schmidt and H. A. Gasteiger, *Handbook of Fuel Cells* (Eds. W. Vielstich, H. A. Gasteiger, and A. Lamm), Vol. 2, p.316, John Wiley, New York (2003).
- 6) 例えば, 渡辺政廣, 内田裕之, *Electrochemistry*, **68**, 816 (2000).
- 7) 内田裕之, 渡辺政廣, *Electrochemistry*, **75**, 489 (2007).
- 8) F. C. Nart and W. Vielstich, *Handbook of Fuel Cells* (Eds. W. Vielstich, H. A. Gasteiger, and A. Lamm), Vol. 2, p.302, John Wiley, New York (2003).

- 9) K. Matsuzawa, T. Fukushima, H. Yamada, and M. Inaba, *ECS Transactions*, **11(1)**, 181 (2007).
- 10) R. N. Carter, S. S. Kocha, F. T. Wagner, M. Fay, and H. A. Gasteiger, *ECS Transactions*, **11(1)**, 403 (2007).
- 11) K. Shinozaki, T. Hatanaka, and Y. Morimoto, *ECS Transactions*, **11(1)**, 497 (2007).
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 「燃料電池・水素技術開発ロードマップ2008」 (<https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/events/FA/nedoeventpage.2008-06-18.1414722325/>)
- 13) 燃料電池実用化推進協議会, 「固体高分子方燃料電池の目標・研究開発課題と評価方法の提案」(2006) (http://fccj.jp/pdf/19_01_kt.pdf)
- 14) R. Borup *et al*, *Chem. Rev.*, **107**, 3904 (2007).
- 15) I. M. Roen, C. H. Paik, T. D. Jarvi, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **7**, A19 (2004).
- 16) C. A. Reiser, L. Bregoli, T. W. Patterson, J. S. Yi, J. D. Yang, M. L. Perry, and T. D. Jarvi, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **8**, A273 (2005).
- 17) T. Tada, Y. Yamamoto, S. Mitsushima, and K. Ota, *Electrochemistry*, **76**, 813 (2008).
- 18) H. Yamada, D. Shimoda, K. Matsuzawa, A. Tasaka, and M. Inaba, *ECS Transactions*, **11(1)**, 325 (2007).
- 19) E. Ticanelli, J. G. Beery, M. T. Paffett, and S. Gottesfeld,

J. Electroanal. Chem., **258**, 61 (1989).

キーワード：サイクリックボルタンメトリー, I-V 曲線, 比活性, 質量活性, 膜電極接合体, 活性表面積, 水素吸着波, 触媒劣化, CO ストリッピング

●著者プロフィール

氏 名：五百蔵 勉 Tustomu IOROI
所 属：産業技術総合研究所ユビキタスエネルギー研究部門次世代燃料電池研究グループ
役 職：主任研究員
連絡先：072-751-9653 / ioroi-t@aist.go.jp

氏 名：安田 和明 Kazuaki YASUDA
所 属：産業技術総合研究所ユビキタスエネルギー研究部門次世代燃料電池研究グループ
役 職：グループリーダー
連絡先：072-751-9653 / k-yasuda@aist.go.jp

~~~~~