

電池デバイスにおける反応と輸送の場のデザインとものづくり

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻 教授
科学技術振興機構 さきがけ研究者
「エネルギー高効率利用と相界面」研究領域

津 島 将 司

1. はじめに

学生時代に約 10 年間お世話になった大阪大学において、平成 26 年 7 月から教員として教育研究に携わることとなった。慣れ親しんだ吹田キャンパスには、真新しい建物が増え、昔からある建物も大幅な改修が施されている。昨年 9 月に装いも新たとなった M1 棟(図 1)にて、「機械工学専攻 複合メカニクス部門 エネルギー反応輸送学領域」との看板を掲げ、研究室としてのスタートを切った。本稿では、筆者が進めている研究の中から、固体高分子形燃料電池とレドックスフロー電池という電池デバイスに関わる研究について紹介し、これからの取り組みについて記したい。



図 1 改修後の M1 棟 (右手は新 M3 棟)

2. エネルギーデバイスにおける反応と輸送

学生時代から今に至るまで、噴霧燃焼、燃料電池、二次電池、排ガスや排水の浄化、二酸化炭素の貯留といったエネルギー・環境に関わる研究を進めてきた。いずれにおいても、化学反応と熱物質輸送の制御が共通した課題である。エネルギー・環境に関わるデバイスは多岐にわたり、ガソリンエンジンやガスタービンなどに代表される化石燃料から仕事を取り出す熱機関、電力などの外部からの仕事により熱の移動を効率的に行う冷凍空調機器、そして、本稿で着目する燃料電池や二次電池などの電池デバイス、さらにより広義

には洗浄および吸脱着装置など、様々なものが挙げられる。各デバイスにおいて目的とする機能が異なっても、より少ないエネルギー損失、つまりより効率的にデバイスを作動させることが求められるという点では共通しており、そのためには、デバイス内でのエネルギー損失の要因を把握したうえで、目的とする機能を実現する反応と輸送の場をいかにデザインするか、が重要となる。本稿で取り上げる固体高分子形燃料電池とレドックスフロー電池はナノ・マイクロスケールの多孔質電極内で反応と輸送が進行し、後述するように、内部現象の詳細な理解とものづくり(ファブリケーション)技術を進展させていくことで、まだまだ「のびしろ」があるエネルギーデバイスである。

2.1. 固体高分子形燃料電池

固体高分子形燃料電池(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC)はエネルギー変換効率に優れ、運転温度が約 80℃で迅速な起動停止が可能であることから小型分散電源としての利用が期待されている。家庭用燃料電池「エネファーム」の一般ユーザーへの販売が開始されてから約 6 年が経過し、2014 年末には燃料電池自動車の一般ユーザーへの販売も開始された。産官学で構成される燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)は燃料電池自動車と水素ステーションが商業的に自立拡大する時期を 2025 年としている¹⁾。家庭用燃料電池および燃料電池自動車の普及促進のためには、さらなる低コスト化が必須であり、一層の研究開発が求められている。

固体高分子形燃料電池は、図 2 に示すように電解質として固体高分子電解質膜(Polymer Electrolyte Membrane, PEM)を用い、この両面を白金担持カーボン粒子(直径 50nm 程度のカーボン粒子に直径 2~5nm 程度の白金粒子(もしくは白金コバルトなど

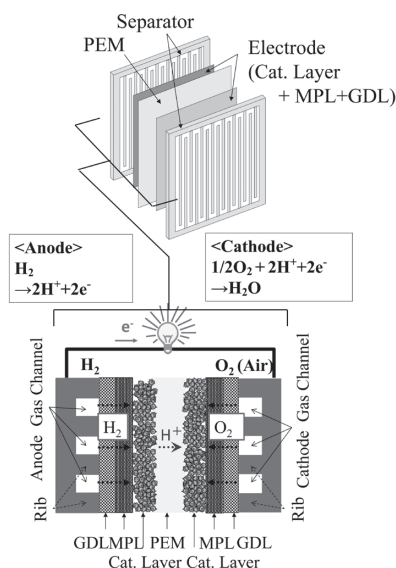


図2 固体高分子形燃料電池の構成

の合金粒子が用いられる)が担持されている)と高分子アイオノマー(電解質膜と同一のものを用いるのが一般的)からなる触媒層(Catalyst Layer, CL)で挟むことで電極を形成し、さらにその両側に反応・生成ガスの輸送パスとなるガス拡散層(Gas Diffusion Layer, GDL)とガス供給用流路を有する構造になっている。触媒層とガス拡散層の間には、微細孔層(Micro Porous Layer, MPL)が挿入される場合が多く、微細孔層はセル内で生成される液体水の輸送制御に加えて、触媒層とガス拡散層間の電気的接触特性の向上などに効果があるとされている。燃料電池の運転時には、電解質膜を挟んだそれぞれの流路に水素と酸素(空気)を供給する。アノード側(水素極)とカソード側(酸素極)で自発的に進行する電気化学反応によって電子が外部負荷を通過し、発電する。ここで、電解質膜として用いられる固体高分子膜は、高含水状態においてのみ高いプロトン(陽イオン)伝導性を示すため、発電中に電解質膜を高含水状態に保つ必要がある。その一方で、酸素極で生成する水分が多孔質電極内で凝縮、滞留すると反応ガスの輸送が阻害されて電池性能が大幅に低下するため、すみやかな生成水の排出が求められる。そのため、発電時のPEFC内の水分輸送現象の基礎的解明と制御手法の確立が強く求められている。このような背景のもと、発電中のPEFC内の水分のin situ(その場)計測²⁾に関する研究を進めてきた。

図3は磁気共鳴イメージング(Magnetic Resonance Imaging, MRI)を用いて、PEFC発電状

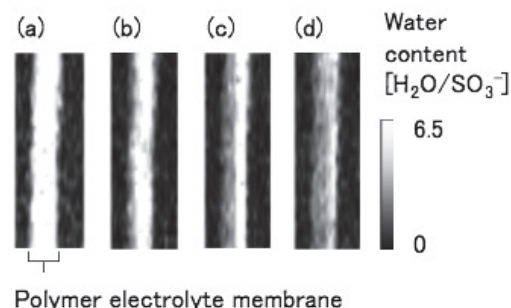


図3 発電中のPEFCにおける電解質膜内水分分布のMRI可視化結果 (a) 0 mA/cm², (b) 89 mA/cm², (c) 178 mA/cm², (d) 267 mA/cm²

態における電解質膜の膜厚方向の水分濃度分布を計測した結果である。MRIは医療用に広く用いられている可視化手法であり、通常は計測領域内で金属などの磁場をゆがめる物質を用いることは困難であるが、燃料電池の構造と計測系を工夫することで、燃料電池発電中での水分の可視化を実現した³⁾。

図中、左側がアノード(水素極)、右側がカソード(酸素極)である。燃料電池出力の増加に伴い(図3(a)から(d))アノード側の水分量が低下していく様子が可視化されている。これは発電量の増加に伴って膜中をアノードからカソードに移動するプロトンの量が増加し、同時に、電気浸透現象によりプロトンに随伴されて移動する水の量も増加したためである。すなわち、電気浸透によるアノードからの水分の持ち去りが電解質膜の局所的な含水量の低下をもたらすことがMRI可視化により明らかになった。このような発電に伴うアノード側電解質膜含水量の低下は、プロトン輸送抵抗の増大をもたらすため燃料電池発電時のエネルギー損失が増大することとなる。さらに、電解質膜のプロトン輸送抵抗は運転条件(温度、電流密度など)と供給ガスの相対湿度に大きく影響を受けることが知られており、これらをパラメータとしたMRI計測を行うことで、電解質膜内の水分輸送が、含水量によって濃度拡散から電気浸透、そして圧力駆動、と支配的な水分輸送過程が変わっていくことも明らかになった⁴⁾。

一連の研究を通じて、電解質膜内を湿潤状態に保つためには、膜表面からの水分流入を考慮し、特に膜両側の電極内における液体水の挙動を詳細に把握することが必要であることが示された。加えて、膜両側の触媒層、微細孔層、拡散層における液体水は反応ガスの供給を阻害するため、高空間かつ高時間分解能での可視化手法の開発が求められた。しかしながら、MRI計測では導電材料である多孔質電極内の液体水を可視

化することができない。そこで、軟 X 線を用いた PEFC 電極内水分可視化手法の開発を行った。

X 線は波長 10 nm から 0.006 nm (エネルギー 120 eV から 225 keV 相当) の電磁波である。一般の X 線撮像システムにおいては 100keV から 225keV のエネルギー領域が用いられているが、PEFC への適用を考えた場合、図 4 に示すように同領域においては白金などの金属の質量吸収係数が液水の質量吸収係数に対して非常に大きく、PEFC 内液水を検出することが困難であることがわかる。しかし、低エネルギー領域(軟 X 線領域)に着目すると、金属と液水の質量吸収係数が近づく。すなわち、X 線波長を制御し、軟 X 線領域での計測を実現することで、PEFC 内液水を検出することが原理的に可能であることがわかる。

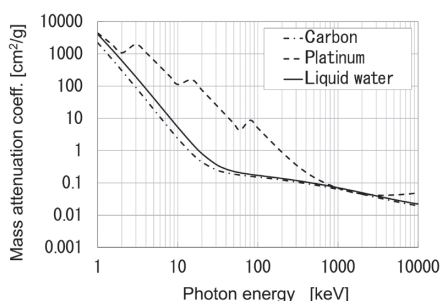


図 4 PEFC 構成材料の質量吸収係数

このような考えのもとで、PEFC 内水分可視化のための軟 X 線を用いた投影型 X 線顕微鏡システムを X 線装置メーカー (マース東研 X 線検査株式会社) と共同して開発を行った。収束電子線を金属薄膜ターゲットに照射して放射状に広がる X 線を生成し、被計測物 (ここでは発電中の燃料電池) を X 線源に近接させることで幾何倍率を稼ぎ、空間分解能 0.5 μ m を達成する軟 X 線顕微鏡システムを構築した⁵⁾。

図 5 は、軟 X 線顕微鏡システム下で発電可能な固体高分子形燃料電池を開発し、電極構成部材として 3 種類の異なるガス拡散層に着目し、燃料電池内断面方向の液体水分分布 (図中の白色で表示) について可視化を行ったものである⁶⁾。実験に用いたガス拡散層は、MPL 無しカーボンペーパー、MPL 付きカーボンペーパー、MPL 付きカーボンクロスである。別途実施した発電性能実験により、供給ガスの相対湿度が高い条件かつ高電流密度域において、図中の不等号の順にセル性能がよくなることを確認している。セル断面方向の液体水分分布をみると、MPL 無しカーボンペーパーにおいて、カソード側ガス拡散層内に液体水が広がって滞留している様子が見て取れる。その一方で、MPL が付くとカーボンペーパーならびにカーボンクロスのいずれにおいても、ガス拡散層内の液水量は少なくなっている。図中、それぞれのガス拡散層断面の電子顕微鏡像を示しているが、カーボンペーパーならびにカーボンクロスの基材部分は数十ミクロン程度の細孔を有するのに対し、MPL はそれよりもはるかに小さいスケールの多孔構造を形成している。本実験で用いた MPL には撥水性樹脂が包含されており、触媒層で生成された液体水が流路側へ排出される際に、MPL において輸送経路が限定される効果をもたらされることを示唆している。さらに、MPL 付きのカーボンペーパーとカーボンクロスの比較を行うと、カーボンクロスにおいて、カーボンファイバー束に沿うように液体水の排出経路が形成されていることがわかった。カーボンクロスにおいては、ファイバー束間に比較的大きな細孔 (隙間) が形成されていることが電子顕微鏡像からも確認される。液体水は、より大きな細孔を選択的に通過するため、カーボンクロスにおいて

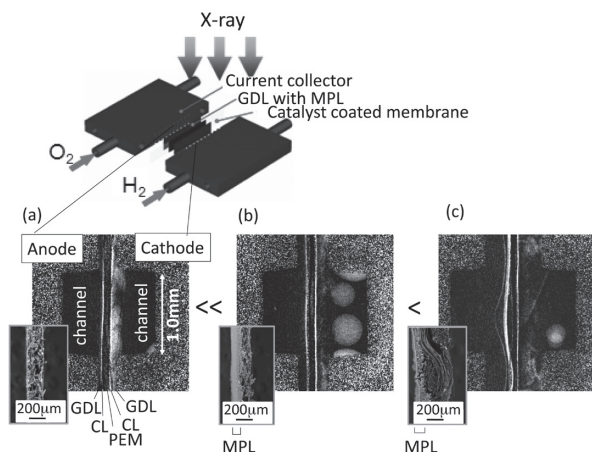


図 5 発電中の PEFC における液体水分分布の軟 X 線可視化結果
(a) MPL 無しカーボンペーパー, (b) MPL 付カーボンペーパー, (c) MPL 付カーボンクロス

は、ガス拡散層内においても液体水の排出経路が空間的に限定され、その分、酸素輸送阻害が抑制されることが明らかとなった。

これらの in situ 可視化結果より、より高効率のPEFCを構築するためには、反応物である酸素と生成物である水の輸送経路を空間的に分離させることができればよいと考えられる。図6は発電中のPEFCを面方向に可視化したものであり、触媒層内の特定の領域に液体水の存在が確認される⁵⁾。この領域は、触媒層内に意図せず形成されたマイクロクラック（微小き裂）の位置と一致している。マイクロクラックには白金粒子が存在しないため、軟X線透過画像（図中左）において軟X線が透過しやすく、発電時の液体水を抽出した液水分布画像（図中右）と一致している箇所が見て取れる。さらに、図7は、MPL内のクラックから液体水が排出される挙動を可視化したものである⁷⁾。従来、PEFCの触媒層やMPLなどは、空間的に均一であるとして多孔質内気液二相流の輸送モデルが構築されてきている。しかしながら、ここで可視化されたようにマイクロクラックは液水輸送経路となり、PEFC内の水分制御における新たな支配因子として考慮すべきであることがわかる。このような観点からPEFCの電極構造を詳細に観察すると、図8のように、触媒層、MPLには多数のクラックが形成されており、

MPLの一部はGDL内部に入り込んでいる。ここで図8は軟X線顕微鏡を用いて傾斜CT計測を行い、各層について断面再構成して取得したものである⁸⁾。各層のマイクロクラックは触媒層、MPLのそれぞれの作製（ファブリケーション）工程で形成されるだけでなく、発電中の電解質膜の乾燥湿潤に伴う膨張収縮などにも影響を受けることが近年の研究から明らかになってきている⁹⁾。図9は、乾燥湿潤サイクルの有無によるPEFC膜電極複合体の断面構造の違いを走査型電子顕微鏡（SEM）観察により調べたものである。乾燥湿潤サイクルを付与した条件において、触媒層と電解質膜の界面の一部に剥離が生じている。この時、セル性能の低下が確認されている。層間界面に形成される空隙は電子輸送抵抗の増大とともに、液体水が空隙に滞留することで酸素輸送阻害をもたらす。

今後、いかにして反応物と生成物の輸送を電極内で分離し、反応と輸送の場をデザイン・構築するのかが鍵である。このような視点から、触媒層、MPLの作製工程の基礎的解明とナノ・マイクロ構造形成技術の確立を目指した研究を開始している。図10は、PEFC触媒層の典型的な作製工程を示しており、触媒層材料を溶媒中で混合分散し、塗工、乾燥した後電解質膜へ熱転写する。それぞれの工程の操作条件の設定により形成される触媒層は異なり、その結果として

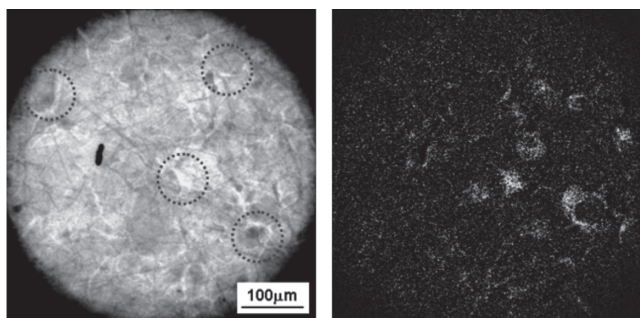


図6 燃料電池発電時の触媒層内クラックに存在する液体水（左：非発電時の面方向透過画像、右：発電時の液水抽出画像（画像処理により白色で表示））

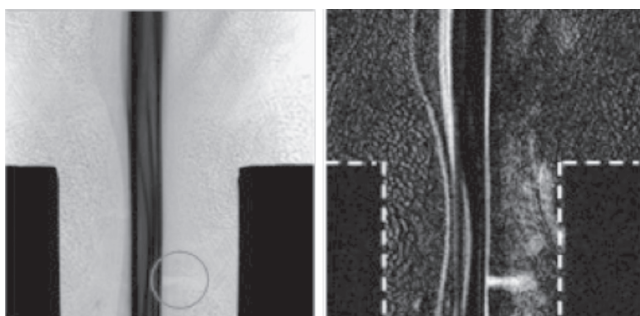


図7 MPL内クラックからの液体水排出

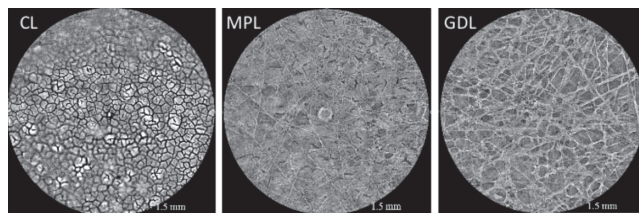


図8 PEFC電極内各層の断面再構成画像

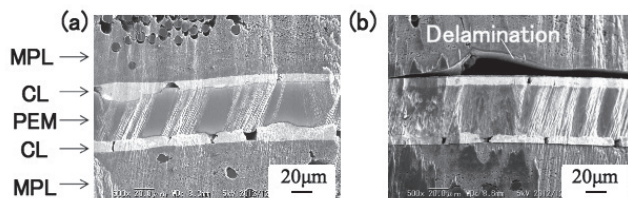


図9 PEFC膜電極複合体の断面SEM像
(a) 乾燥湿潤サイクル運転なし (b) 乾燥湿潤サイクル運転あり

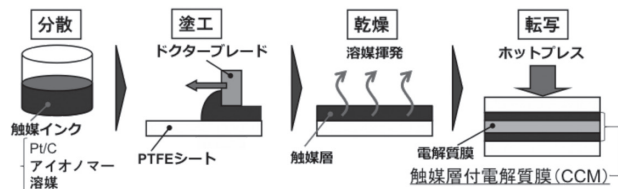


図10 触媒層の作製工程

電池性能が異なってくる。より積極的に電極のナノ・マイクロ構造を作りこむためには、それぞれの工程ごとの物理現象と支配因子を明らかにしていく必要があり、乾燥工程により電極触媒層の構造が異なることが明らかになってきている¹⁰⁾。加えて、従来の作製工程とは異なる新たな手法についても検討を進めている。その一つとしてインクジェット技術に着目している。図11はインクジェットノズルから電極混濁液を吐出し、面方向ならびに厚さ方向に高白金層と低白金層の塗り分けを行った例である。PEFCにおいては図2に示したように流路部とリブ部があり、また、入り口から出口に向かって反応ガス（水素・酸素）と水蒸気分圧ならびに液水量が変化する。そのため局所領域ごとで、親疎水性や多孔質空隙構造など、電極触媒層ならびにMPLに求められる特性が異なってくるはずである。インクジェット技術を用いて面方向の流路部とリブ部で白金量を塗り分けると、リブ部の白金量が多い場合よりも、流路部の白金量が多いほうがセル電圧が高いことが示されている（図12）¹¹⁾。電極触媒層に関して、白金分布だけでなく、高分子アイオノマー分布や空隙率の分布を形成するという試みは始まったばかりであり、MPLも含めて、これらをどのようにデザインするのか、という設計指針自体が明らかではない。また、実現するためのものづくり（ファブリケーション）技術についても確立されていない。

今後、PEFC内部での反応・輸送挙動の詳細な把握と触媒層、MPLを含めた電極形成過程の基礎的解明を進めるとともに、あらたなファブリケーション技術

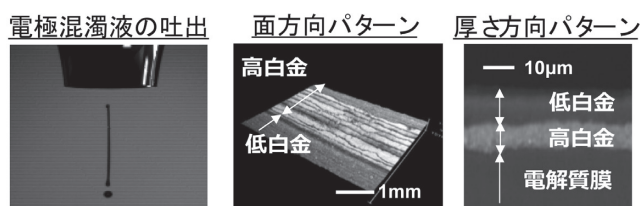


図11 マイクロインクジェット技術を用いた触媒層内白金分布の制御

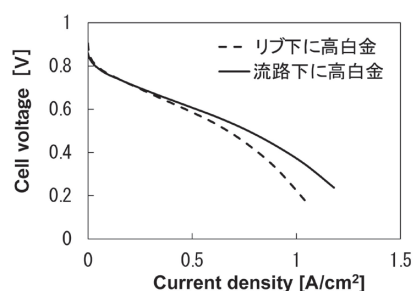


図12 電極触媒層内に白金分布を有するPEFC発電特性

の確立とPEFCにおけるエネルギー損失の低減ならびに低白金化につながる研究を推進していく。

2.2. レドックスフロー電池

レドックスフロー電池 (Redox Flow Battery, RFB) は電解液中のイオンを活物質とし、外部から電解液を電極に供給することで充放電を行う二次電池である。電池容量は外部電解液容量に依存し、電池出力は電極面積によることから、電池容量と電池出力を個別に設計でき、大型から小型まで幅広いニーズに対応することが可能である。さらに、常温作動、充放電管理が簡便、高リサイクル性、省メンテナンス性など多くの特徴を有し、1MW級実証実験も開始されるなど、特に再生可能エネルギーの大量導入に向けた電力系統安定化のための大規模電力貯蔵デバイスとして、国内外で注目が集まっている¹²⁾。図13は活物質としてバナジウムを用いたレドックスフロー電池の模式図である。充電過程では、正極と負極にそれぞれ4価、3価のバナジウム溶液を送液し、正極から負極へ電子移動が生じる。結果、正極及び負極の溶液はそれぞれ5価と2価へと変化する。逆に、放電過程では負極から正極へと電子が移動し、負極溶液は3価に、正極溶液は4価に変化する。電極反応は負極、正極の多孔質炭素電極表面上で進行し、それに伴い、イオン交換膜をプロトンが移動する。ここで、実用化に向けた技術課題の一つとして出力密度の向上が挙げられる。

レドックスフロー電池の研究開発は古くから行われているが、多孔質電極には図14(a)で示すような数mmの厚さを有する多孔質炭素材料が用いられてきた。電池性能の向上という観点からは電極厚さは小さいほうがイオン輸送抵抗の低減につながる。あわせて、電極内に十分な量の活物質イオンを輸送することが重要であり、そのための流路構造については、従来は図14(a)に示すように電極両端から電解液を供給するフロールー構造が採用されてきた。しかしながら、

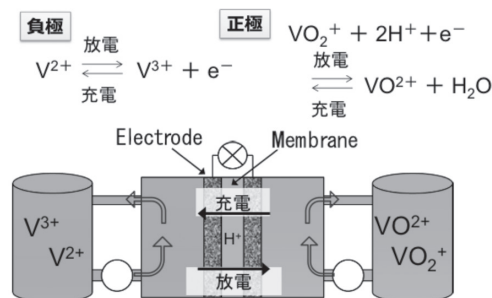


図13 バナジウムレドックスフロー電池

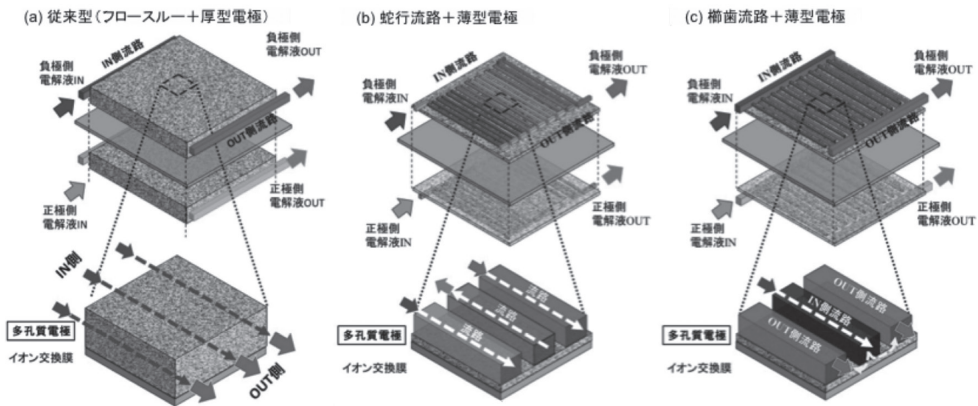


図 14 レドックスフロー電池の構造

多孔質電極をより薄くすることを考えた場合には、この流路構造は圧力損失の著しい増大を招くため現実的ではない。そこで、図 14 (b) のような電極面に蛇行流路を配置する方法、さらには、図 14 (c) のようにより積極的に電極内に活物質を供給する櫛歯構造などが考えられる。我々のグループでは、櫛歯構造流路と薄型電極の採用を提案しており、フロー電池性能について、図 15 に示すように特に高電流密度域において良好な放電特性を示すことを実証している^{13,14)}。このことは、蛇行流路では活物質輸送が濃度拡散によっているため高電流密度域において活物質不足となる一方で、櫛歯流路では流入部と流出部が多孔質電極によって接続されているため、多孔質電極に対して濃度拡散ではなく移流による活物質輸送となり、十分な活物質の供給が実現できていることを示している。

さらに、薄型の多孔質炭素電極については、図 16 のような直径 10mm 程度の炭素ファイバーから構成

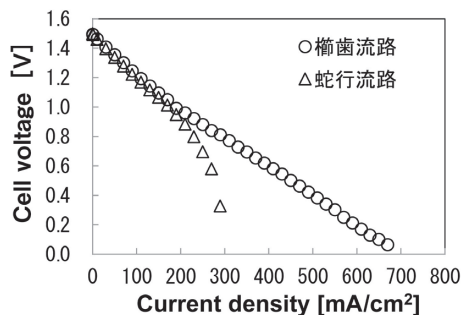


図 15 バナジウムレドックスフロー電池の放電特性

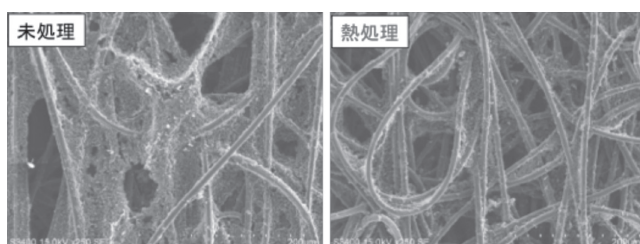


図 16 多孔質炭素電極の熱処理前後の SEM 画像

されており、熱処理を施すことにより電池性能が大幅に向上することを確認している (図 17)^{13,14)}。その要因としては、熱処理による炭素表面触媒活性の向上および多孔質電極内部に存在するバインダー樹脂の消失による反応表面積の増大などが考えられ、基礎的な検討を進めている。図 18 は炭素電極材料に熱処理を施した場合と未処理の場合のサイクリックボルタモグラムである。測定は 2.0M 硫酸水溶液中で VO_2^+ 濃度を 0.5M、掃引速度は 0.05 V/s として行った。酸化還元ピーク電位の差は、未処理電極においては 0.99 V であるのに対して熱処理電極においては 0.77 V である。すなわち、熱処理電極表面において反応活性が大きいことを示している。炭素電極表面構造の違いを検討するために、本学科学機器リノベーション・工作支援センターの支援のもとに、X 線光電子分光分析

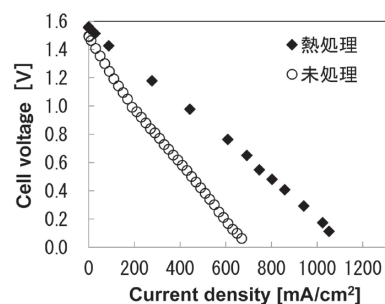


図 17 電極熱処理が放電特性に及ぼす影響

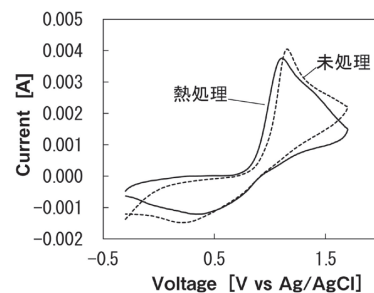


図 18 炭素電極材料のサイクリックボルタモグラム

(XPS)を行った。図19はC1sとO1sのそれぞれのピークについてナローズキャン測定を行ったものである。C1sピークについては熱処理の有無で有意な差が認められないが、O1sピークについてはC=O成分の顕著な増大が認められる。本測定結果のみからC=O成分の増大が熱処理電極の触媒活性向上の要因であるとは直ちには結論付けられないが、今後、バナジウムレドックス反応系と炭素表面構造についての系統的な研究が必要であることを示している。加えて、多孔質炭素電極の反応面積と活物質輸送についても熱処理の効果が考えられる。一つ目は、バインダー樹脂に一部被覆されていた炭素電極面が露出し、これにより実効的な電極表面積が増大することである。電気化学測定により、熱処理前後で多孔質炭素電極の電気二重層容量が増加することを確認している。加えて、バインダー樹脂の消失は多孔質電極内流動を均一化する効果が考えられる。図20は空隙率が80%と60%の多孔質電極を3次元構築した上で電極内流動について数値解析を行ったものである。空隙率が80%の条件において、流動がより均一化している様子が見て取れる。流動の均一化は実効的な反応表面積の増大につながる。反応表面積の増大は炭素電極表面における局所電流密度の減少をもたらし、過電圧低減につながるだけでなく、電極表面における活物質濃度低下を抑制する効果がある。より基礎的な検討を行うために、実験で用いているものと同等の直径10 μ mの炭素ファイバーについて反応流動解析を行った。図21は放電曲線である。単一または複数の炭素ファイバーを電解液流れ方向(図中の下方から上方)に配置した場合の負極側炭素

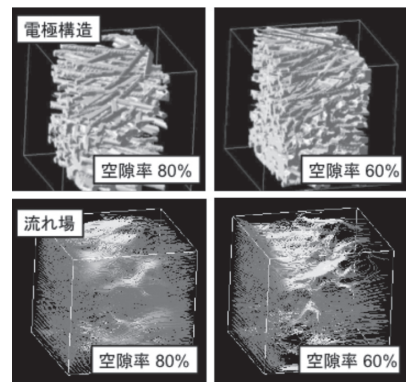


図20 多孔質電極内流動解析

ファイバー周りの活物質濃度分布についてもあわせて示している。負極として複数(ここでは2本)のファイバーを用いることですべての電流密度領域でセル電圧が向上し、限界電流密度も大きく改善されることがわかる。炭素ファイバー間隔をファイバー直径の1.5倍と5倍に設定して解析を行ったところ、ファイバー間隔が近づくとファイバー後流において活物質濃度が減少するため、複数のファイバーによりもたらされる電極表面積の増大効果は限定的となることがわかる。

レドックスフロー電池では、通常の二次電池系とは異なり、多孔質電極内に電解液を移流させることでより高性能化が実現できる。そのため、多孔質電極の構造は反応に伴うエネルギー損失の抑制が求められるだけでなく、流動抵抗の低減も求められる。加えて、実際のシステムにおいては、入り口から出口にわたり電解液中の活物質イオンの濃度分布も形成される複雑な反応流動場となる。電極内反応分布についても、いまだ十分な知見は得られていない。材料開発についてもさらなる進展が期待でき、現在、反応表面積を飛躍的に増大させるためにナノファイバー電極の適用についても検討を開始している。電解液流路構造に関しても、大面積化した場合の最適構造は明らかではない。櫛歯構造流路の優位性を紹介したが、実システムにおいて、より低圧力損失かつ一様な配流を実現する流動系の実現に向けては、ものづくり(ファブリケーション)技

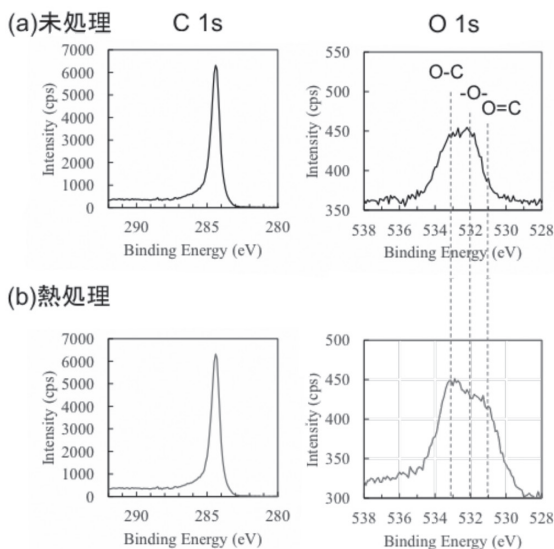


図19 多孔質炭素電極のX線光電子分光測定結果

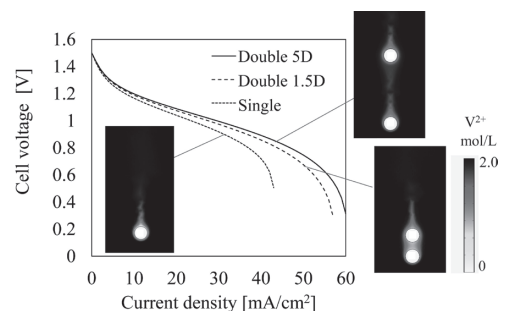


図21 炭素ファイバーの放電特性曲線と活物質濃度分布

術と一体となった研究開発が必要である。

3. おわりに

本稿では、固体高分子形燃料電池とレドックスフロー電池、という2つの電池デバイスについて紹介させていただいた。一方は次世代自動車用として、もう一方は大規模電力貯蔵用として、次のエネルギー社会における基幹デバイスとなるべく、国内外で産官学を問わず精力的に研究開発が進められている。そんな中、機械工学をバックグラウンドとする筆者は、これらのデバイスを研究対象として、いかにしてデバイスとしての性能を限界に近づけるのか、との思いで取り組んできた。ここでいう「限界」とは、究極的には熱力学的限界であり、より現実的には現在の手に入る材料を用いて到達しうる限界である。固体高分子形燃料電池でいえば、電解質膜、触媒粒子、高分子アイオノマー、炭素材料などに代表される多くの材料から構成され、それぞれについて、イオン伝導性、触媒活性、電気伝導性、熱伝導性をはじめとする物性がある。さらに、反応生成物や周囲流体などについても拡散係数、粘性係数、親疎水性などの物性があり、混相流としての挙動ならびに多孔質内では実効的な輸送特性も変化する。これらによりデバイスとしての性能上限が決まる。デバイスとしての性能上限に達するためには、すべての材料が有する特性を十分に引き出すことが求められるが、実デバイスで実現するのは容易ではなく乖離が存在する。例えば、本稿で見たように実際のPEFCでは発電に伴う電解質膜の含水量の低下や多孔質内での液体水滞留による反応ガス輸送性の低下、さらには各層内や層間に形成されるクラックなど、必ずしも材料特性を十分には引き出せていない。すなわち、デバイスとして構築し作動させるがために顕在化する多くのエネルギー損失要因が存在する。このような支配因子のいくつかは、デバイスとして作動させて内部挙動を詳細に観察することを通じて明らかになり、これらを解決する手段が「反応と輸送の場のデザイン」と「ものづくり（ファブリケーション）技術」にあると考えている。デザインには新たな材料や電池構造の提案という挑戦的課題も含まれてくる。すなわち、材料の持つ反応活性や輸送物性自体を向上させる取り組みであり、熱力学的限界に近づけるためのアプローチでもある。これらを実現する鍵は材料合成も含めたものづくり（ファブリケーション）技術であり、以上の視点か

ら、化学反応と輸送現象の基礎的解明を基盤として、エネルギーデバイスにおける「反応と輸送の場のデザイン」と「デザインを実現するものづくり（ファブリケーション）技術」の研究に取り組んでいく。

最後に、本稿で紹介した研究の多くは、筆者が東京工業大学在籍時に大学院理工学研究科機械制御システム専攻平井秀一郎教授の研究室において、研究室のメンバーならびに多くの外部共同研究者の支援のもとに行いました。深く感謝いたします。また、文部科学省科学研究費補助金、JST さきがけ「エネルギー高効率利用と相界面」、NEDO 産業技術研究助成などの支援をいただきました。関係各位に感謝いたします。本学機械工学専攻に学生として在籍した当時、研究者としての道を志すきっかけを与えていただいた指導教員である水谷幸夫先生、香月正司先生はじめ研究室の皆様から感謝いたします。今後は大阪大学の一員として、教育研究に精進して参ります。

<参考文献>

(紙面の関係上、主として筆者らの文献を中心に引用した)

- 1) 燃料電池実用化推進協議会(FCCJ), FCV と水素ステーションの普及に向けたシナリオ, 2010年3月.
- 2) Tsushima, S., Hirai, S., *Prog. Energy Combust. Sci.* **2012**, *37*, 204-220.
- 3) Tsushima, S., Teranishi, K., Hirai, S., *Electrochem. Solid-State Lett.* **2004**, *7*, A269-A272.
- 4) Tsushima, S., Ikeda, T., Koido, T., Hirai, S., *J. Electrochem. Soc.* **2010**, *157*, B1814-B1818.
- 5) Sasabe, T., Tsushima, S., Hirai, S., *Int. J. Hydro. Energy* **2010**, *35*, 11119-11128.
- 6) Sasabe, T., Deevanhxay, P., Tsushima, S., Hirai, S., *J. Power Sources* **2011**, *196*, 8197-8206.
- 7) Sasabe, T., Deevanhxay, P., Tsushima, S., Hirai, S., *Electrochem. Commun.* **2011**, *13*, 638-641.
- 8) Deevanhxay, P., Sasabe, T., Minami, K., Tsushima, S., Hirai, S., *Electrochim. Acta* **2014**, *135*, 68-76.
- 9) Tsushima, S., Hirai, S., *J. Therm. Sci. Tech.* **2015**, *10*, JTST0002, 1-12.
- 10) 松井陽平, 鈴木崇弘, ディーワンサイ・ペンサイ, 津島将司, 平井秀一郎, 第54回電池討論会, **2013**, 524.
- 11) 深井勝行, 津島将司, 平井秀一郎, 第51回伝熱シンポジウム, **2014**, C212.
- 12) 中幡英章ら, SEI テクニカルレビュー **2013**, *182*, 4.
- 13) Tsushima, S., Kondo, F., Sasaki, S., Hirai, S., *Proc. 15th Int. Heat Trans. Conf.* **2014**, IHTC15-9326.
- 14) Tsushima, S., Kondo, F., Hirai, S., *226th meeting Electrochem. Soc.* **2014**, abs.605.

(機械 平成7年卒 8年前期 11年後期)