

わたしたちの研究 (11)熱システム工学研究室



岩井 裕
(H5/1993卒)



岸本将史
(H20/2008卒)

1. 研究室の系譜と教員紹介

機械理工学専攻 流体理工学講座 熱システム工学研究室は現在、教授・岩井 裕、准教授・岸本将史、協力研究員2名、博士課程学生4名（内、社会人博士1名）、修士課程学生8名、学部生5名、事務補佐員1名が所属しています。岩井と岸本は学部の専門教育で熱力学や伝熱工学の講義を担当しています（准教授着任間もない岸本は、来年度から担当します）。当研究室では燃料電池やその逆反応をする電解セルあるいは二次電池といった電気化学デバイスや、燃料改質などを主な対象として、(電気)化学反応をともなう系について熱・物質・電荷の輸送現象を切り口とした研究をしています。

このような研究室紹介の記事を書く機会はありませんので、研究室の系譜を人の繋がりを軸に私（岩井）の経歴に絡めて記したいと思います。私は高校卒業までの人生の大半を、静岡県沼津市で育ちました。1989年に本学機械系学科に入学し、学部4回生で伝熱工学研究室（以下、伝熱研）に配属され博士学位取得まで鈴木健二郎教授（以下、単に鈴木教授と表記しますが、マイクロエンジニアリング専攻の鈴木基史教授と混同されないようご注意願います）にご指導いただきました。配属当時の伝熱研は、鈴木教授と、のちに京都工芸繊維大学、同志社大学にそれぞれ栄転された萩原良道助教授、稲岡恭二助手の3人で運営されていました。留学生が多く、外国人研究者が頻繁に訪問・滞在される国際色豊かな研究室でした。卒業研究では傾斜衝突噴流冷却の実験に、大学院では広がりのあるテーマをということで、はく離再付着流の熱流動数値解析に取り組みました。修士課程の途中で1年間、Concordia大学（カナダ）に留学しました。多くの気づきのある1年でした。実は留学前は博士課程へ進むことは全く考えていませんでしたが、留学中の経験と帰国後の鈴木教授との面談を経て博士進学を決めました。1999年に博士（工学）の学位を期間短縮で取得することができました。短期間の

学術振興会特別研究員PDを経て、同年に伝熱研の助手に採用されました。現在、機械理工学専攻熱材料力学研究室の教授である中部主敬先生が、当時の伝熱研の助教授で、鈴木・中部・岩井という体制でした。現・中部研の巽和也准教授も伝熱研の同門です。2002年に中部助教授が大阪府立大学教授として栄転され、さらに鈴木教授の定年退官後の2003年には、伝熱研の教員が講師（留学生担当）に当時昇進していた私だけという状態になりました。

機械工学専攻熱システム工学研究室には、1999年に東京工業大学から吉田英生教授が齋藤元浩助手とともに着任されていました。後述する科学技術振興機構のCREST（Core Research for Evolutionary Science and Technology、戦略的創造研究推進事業）で一緒させていただいていたこともあり、私としましては気持ちの近い“お隣”の研究室でした。吉田教授にお声をかけていただき、2003年9月に伝熱研所属だった私と学生全員が熱システム工学研へ吸収されるような形で配置換えとなり、熱システム工学研は吉田・岩井・金丸一宏助手・齋藤の4人体制となりました。2005年の改組により同研究室は、航空宇宙工学専攻の所属となり研究室名も熱工学研究室と定められました。いっぽう学部教育においては改組後も変わらず機械システム学コースの担当でしたので、研究室の卒業生は全員京機会会員です。私は2007年2月に准教授となり、2019年8月まで同研究室に所属しました。

2019年9月に私は機械理工学専攻先端イメージング工学研究室の教授に着任し、私、ポスドク、博士学生でわずか3人の研究室が発足しました。研究室の本格的なスタートは学部4回生と修士1回生を迎えた2020年4月です。その後、2021年10月の配置換えと同時に研究室名を熱システム工学研究室と決めました。

時間が前後しますが、本学物理工学科宇宙基礎コースを2008年に卒業した岸本は、その年に始まった修士博士連携教育プログラム（通称5年コース）の一期生として、前述の熱工学研究室に加わりました。燃料電池に関するNEDOプロジェクトで研究が大きく加速した時期でした。2013年に博士（工学）を取得し、日本学術振興会海外特別研究員としてImperial College Londonで2年間、燃料電池のほかリチウムイオン電池など研究の幅を広げました。帰国後は熱工学研究室・熱システム工学研究室にて特定助教として研究・教育活動を展開してきました。2021年12月に准教授として着任したところです。

2. 研究紹介

ちょうど岩井が助手に採用された1999年に、鈴木教授の固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) とマイクロガスタービンのハイブリッドシステムに関する研究がCRESTに採択されました。これが、私がSOFCと関わるきっかけになりました。CRESTでは当初、高温熱交換器の要素研究などを担当していましたが、徐々にSOFCが面白くなり、そのシミュレーションへと手を広げました。マルチフィジックス解析が展開されつつある時期でした。シミュレーションだけではSOFCの心はわからないと思い、熱工学研究室に配置換えとなったタイミングで、新たな挑戦として実験を始めました。今日のように市販セルなどなかったので、化学系の先生に教えてもらいながらセルも測定装置も自作でした。当初は割れる、漏れる、再現性が取れないなど多くの困難がありましたが、数々の失敗が今に繋がっています。特にセルを自作できることは今日の我々の強みの一つになっています。2008年に始まったSOFCの劣化抑制についてのNEDOプロジェクトに参加することとなり、研究が加速しました。その後は関連研究が多岐に広がり、これまでに8名がSOFC関連のテーマで博士学位を取得しています。以下ではこれまでの成果あるいは現在取り組んでいる研究をいくつか簡単に紹介します。

2. 1 SOFCの電極微構造と電極性能の相関

SOFCは、緻密な電解質とその両側にある電極から構成されます。電極は直径が数百nm程度の粒子からなる多孔質体であり、その内部では電子・イオン・ガスの輸送現象と、それらの間の電気化学反応が生じています (図1)。電極の性能を向上するためには、そういった輸送・反応現象が円滑に進むように多孔質構造を改良する必要があります。構造の重要性は当初から言われていましたが、複雑な多孔質構造を観察する術がなかったため、電極開発においては経験則や試行錯誤に頼らざるを得ませんでした。

2000年代になって電子顕微鏡観察技術や微細加工技術が進歩し、革新的な装置が現れました。集束イオンビーム・走査型電子顕微鏡 (Focused Ion Beam – Scanning Electron Microscope: FIB-SEM) と呼ばれるものです。これは、イオンビームによる微細加工技術と、電子顕微鏡による高解像度観察技術を組み合わせたもので、試料の断面出しと観察を交互に繰り返すことで、断面画像を連続的に取得できるという画期的な3次元観察装置です。それが2008年に京都大学にも導

入されました（[図2](#)）。そこからFIB-SEMによる3次元観察を出発点とした研究手法の整備に着手しました。

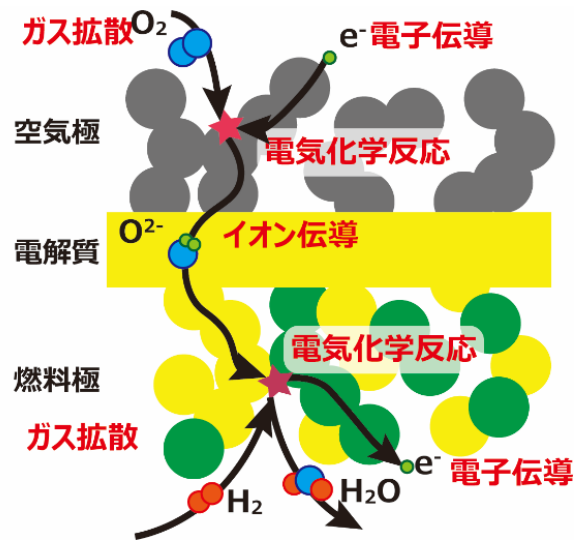


図1 SOFCの電極中の輸送・反応現象の模式図



図2 京大に導入されたFIB-SEM(Nvision 40、Carl Zeiss) 導入以来フル稼働し続け「こんなに長時間使われたFIB-SEMは他に無い」と業者さんに言われたとか

具体的には、「観察」「定量化」「シミュレーション」の3点です。まずひとつ目の観察については、試料の作製や最適な観察条件の特定など、地味な作業をひとつひとつクリアしていきました。高級な測定装置とはいえ全自動ではありません。苦労の末、金属・セラミックス・空隙の3相からなる電極構造が、くっきりと分かれて見えるようになった時は喜びもひとしおでした（[図3\(a\)](#)）。ただし得られた画像はそのままでは定量的な解析には向きません。画像中の画素を電極構成相に割り当てる領域分けの作業が必要で、これも大変厄介です。FIB-SEM画像には加工ムラやノイズが含まれているため、画像の輝度値だけで領域分けしてもうまくいきません。当初は手作業による補正を施していたのですが、数百枚の画像

に対する補正となると大変です。当研究室の卒業生には苦勞した記憶が思い出されるかもしれません。最近は自動化も進んである程度楽になっています。さらに今後は機械学習的手法を導入することで完全自動化も目論んでいるところです。色分けされた画像をもとに、[図3\(b\)](#)に示すような電極の3次元構造をPC上で再構築できます。

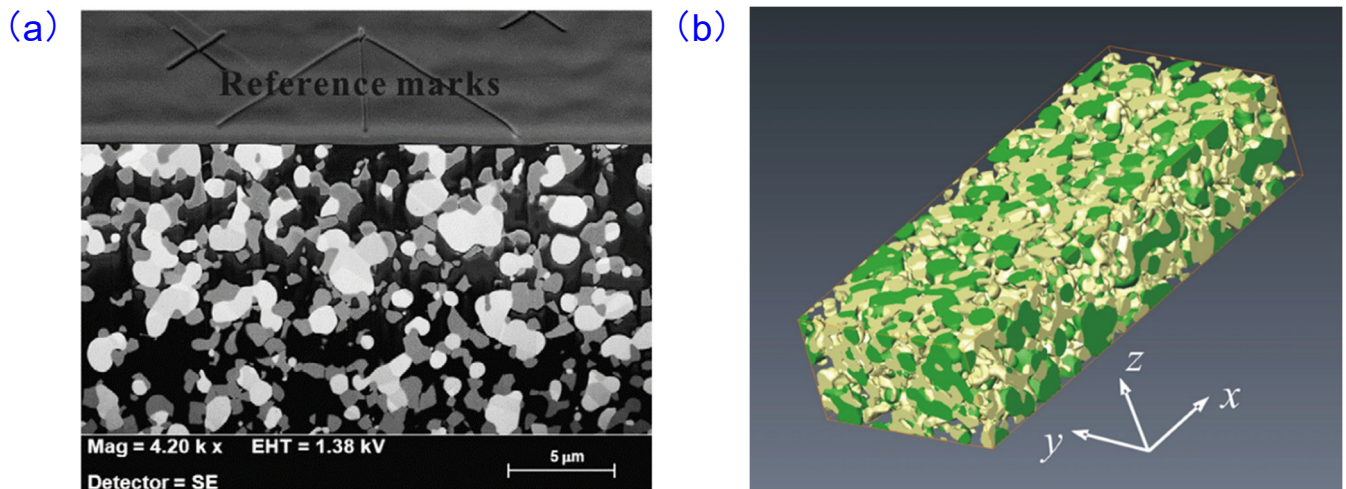


図3 (a)FIB-SEMにより得られた電極の断面画像の例 (b)コンピュータ上で再構築された電極構造 (H. Iwai et al., *Journal of Power Sources* **195**(2020)955)

二つ目は定量化です。得られた3次元構造が、どのような輸送・反応特性を有しているかを理解するため、関連する構造パラメータの定量化手法を整備しました。電極構成相の体積分率といった単純なものから、輸送現象に係る屈曲度ファクタ、反応現象に係る三相界面密度といった、SOFC電極特有の構造パラメータについても抽出できるようになりました。これにより、種々の電極構造を定量的に比較することが可能となりました。

最後は数値シミュレーション技術です。機械系の研究室なので、本来はここが力の見せどころです。3次元構造を計算系とし、内部における電子・イオン・ガスの保存方程式が、電気化学反応により連成されるというのが大枠です。これにより電極内部における化学種の輸送経路や、電気化学反応の分布を明らかにすることができます([図4](#))。またガス輸送については、電極中の空隙スケールは1 μm を下回るため、ガスの稀薄性の影響(Knudsen拡散)も現れ、基礎研究的にも面白い系です。最近では多孔質中のガス輸送のみに着目した研究も進めています。一方で電子やイオンの伝導、および電気化学反応については、材料化学や電気化学の

知見を多分に含むためなかなか一筋縄ではいきませんが、長年協力関係のある化学系の研究室の先生方などからの助言も得ながら改良を進めています。

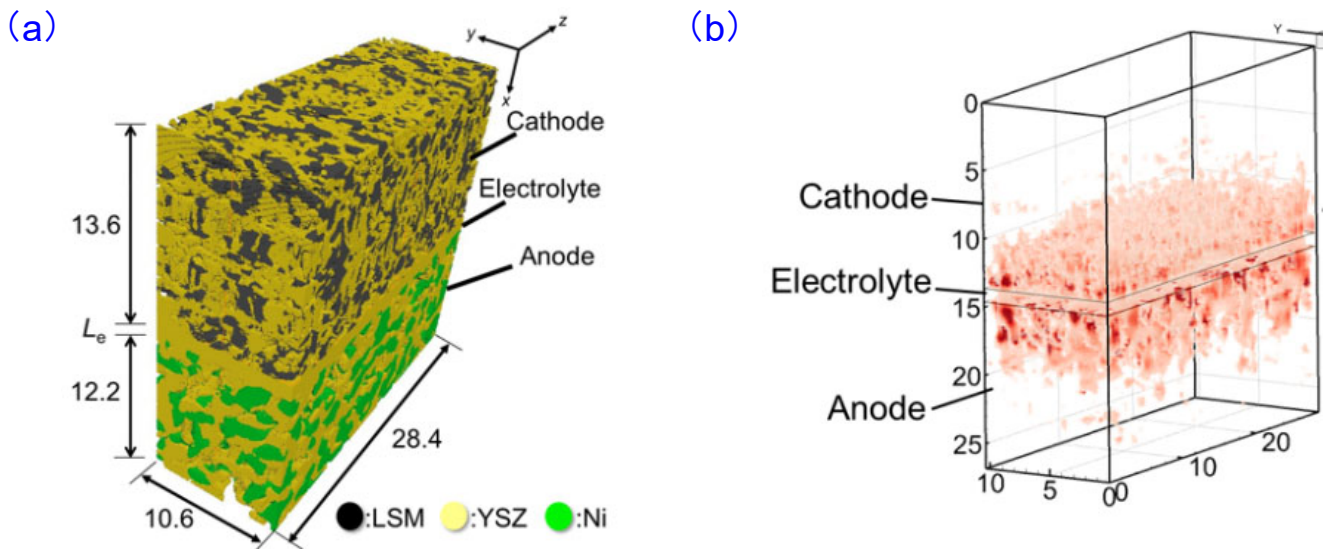


図4 (a)FIB-SEMにより得られた構造から構成した計算系 (b)シミュレーションにより予測された電極内部の電気化学反応量の分布

以上のような技術の整備により、電極構造と性能の相関に対する理解が大きく進みました。最近はそのからさらに一歩進み、輸送・反応現象が円滑に進むような望ましい電極構造を考え、それを実現するための具体的な作製プロセスの提案も行っています。

2. 2 メゾ構造導入による発電密度向上

SOFCの性能向上に向けた当研究室における取組の中でも特徴的なのは、メゾスケール構造の導入です。ここでメゾスケールとは、電極を構成する粒子のスケール(1 μm 程度)と、電極の厚みスケール(500 μm 程度)の間の10~100 μm としています。SOFCの性能向上に向けた取り組みとしては、新規材料開発が表に出ることが多いのですが、当研究室としては「ある材料のもとでどのような構造を作れば性能を最大化できるか」という、機械工学的な目線を重視した研究をしています。具体例を二つ挙げます。

マイクロ押し出し法による電極—電解質界面拡大

SOFC電極中の電気化学反応は、空間的に一様に生じるのではなく、電極—電解質界面近傍の10~20 μm 程度の領域で集中的に生じるとされています。そこで、その界面の面積を拡大することで発電量を増やせないかと考えました。マイクロ

押し出し法という additive manufacturing の一種を利用して電極基板上に幅 200 μm 、高さ30 μm 程度の線を描き、その上に電解質を製膜することで電極—電解質界面に凹凸形状を作ります (図5)。これにより反応領域が拡大することで性能が有意に向上することを実証しました。SOFCの高効率化や低温作動化に有効であり、量産化にも向いている手法なので、今後も界面形状の高精細化や形状予測などの研究を進めていく予定です。

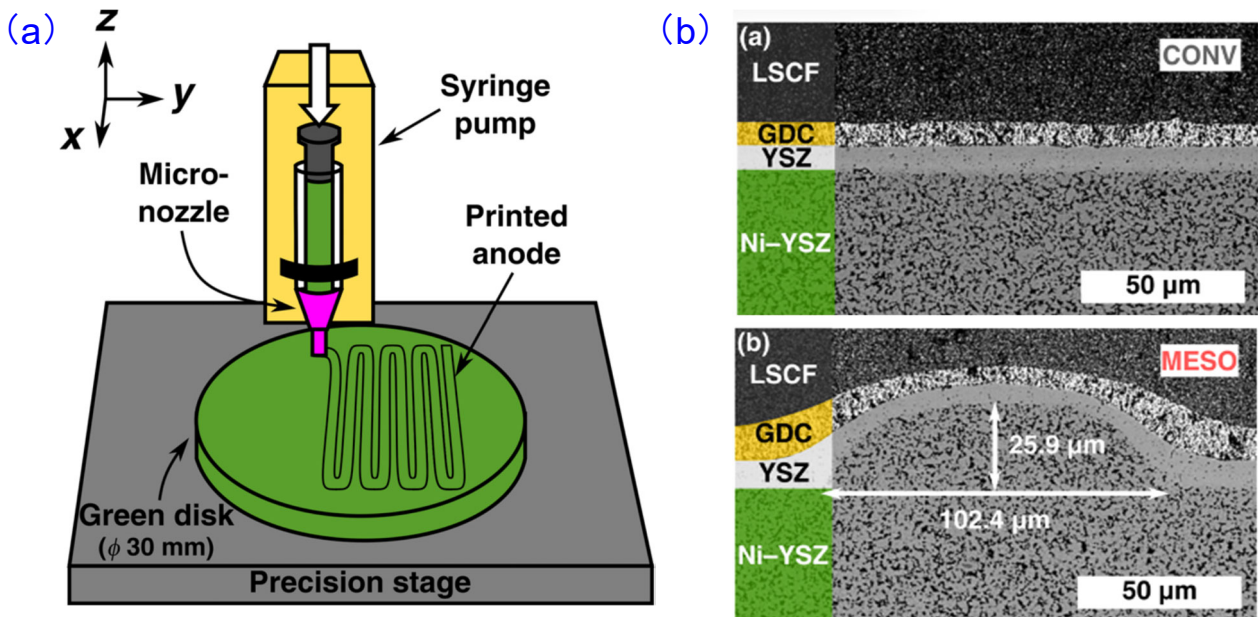


図5 (a)マイクロ押し出し法の装置概念図 (b)通常のセルとメゾ凹凸形状を有するセルの断面SEM画像 (H. Seo et al., Fuel Cells **20**(2020)570)

相転換法によるメゾスケール空隙の導入

近年のSOFCとして主流なのは、燃料極支持型セルと呼ばれるものであり、燃料極がセルの機械的強度を保証します。これにより電解質が薄くでき、高出力化が望めますが、一方で燃料極内のガス輸送抵抗が大きくなりがちです。ガス輸送に有利な構造としては、電極の表面から電極—電解質界面に向かう縦穴が考えられます。そのような構造を実際にするために、相転換法を適用しました。これはもともと脱塩用の高分子膜を作るための手法ですが、高分子溶液に電極材料を混ぜ込むことで電極の作製にも利用可能です。作製された膜の断面を見ると、図6のように表面から垂直に空隙が伸びた構造になっていることがわかります。このような構造を持つ電極をもとにセルを作製し、電気化学的な性能を調べたところ、ガス輸送に起因する抵抗を大幅に低減することができました。

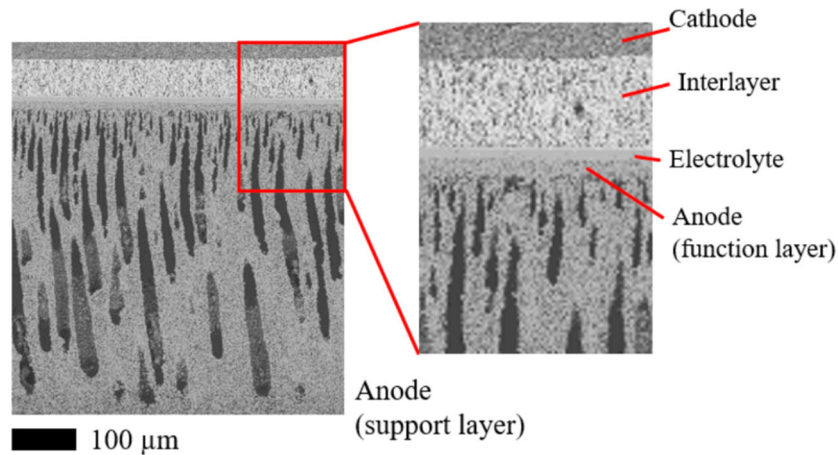
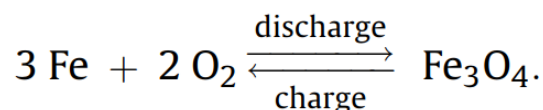


図6 燃料極多孔質内に導入した異方性空隙（縦方向に見える黒い部分）
 (M. Kishimoto et al., ECS Transactions **91** (2019) 1861)

2. 3 エネルギーの変換・貯蔵に関する新コンセプトの創出と検証

エネルギーの変換や貯蔵に関わる新しいシステムや、既存システムの新しい使い方の模索・提案を行っています。例えば図7は、新しいコンセプトの充電池である固体酸化物形鉄-空気電池です。水素と酸素の反応により水蒸気が生成される過程で電力と熱が得られる燃料電池モードと、電力と熱を加えることで水蒸気を水素と酸素に分解する電解モードの双方向の運転が可能な固体酸化物形電気化学セル（Solid Oxide Electrochemical Cell, SOEC）と、鉄多孔質体の酸化還元反応を組み合わせています。鉄の酸化は使い捨てカイロをイメージしていただくとよいでしょう。使い捨てカイロとは違い、酸素ではなく水蒸気で鉄を酸化させることで放電時に容器内で水素を発生させています。充電時にはその逆反応が起こっています。本質的には次式で表される鉄の酸化還元によるエネルギー貯蔵なので、安価な大容量エネルギー貯蔵装置となる可能性があります。



電力貯蔵が注目されるところではありますが、大きな熱の出入りもあるので蓄熱装置にもなっています。SOECの高電流密度化、反応に伴い構造変化が生じる鉄多孔質体におけるガス拡散などの要素研究のほか、システム化した場合のエネルギー収支の解析を行っています。

その他、燃料としてメタンやアンモニアをSOFCに直接供給して燃料電池内で改質・分解反応を生じさせ、その吸熱反応を利用して燃料電池を冷却する方法や、さらに進んでメタンとアンモニアの混合ガスを燃料とする手法の研究を行ってい

ます。後者では、アンモニアの混合でメタン改質反応が強烈に抑制されることを初めて見出しました。強い吸熱反応であるメタン改質反応が生じる領域を、アンモニア混入量で制御できる可能性を示すものです。

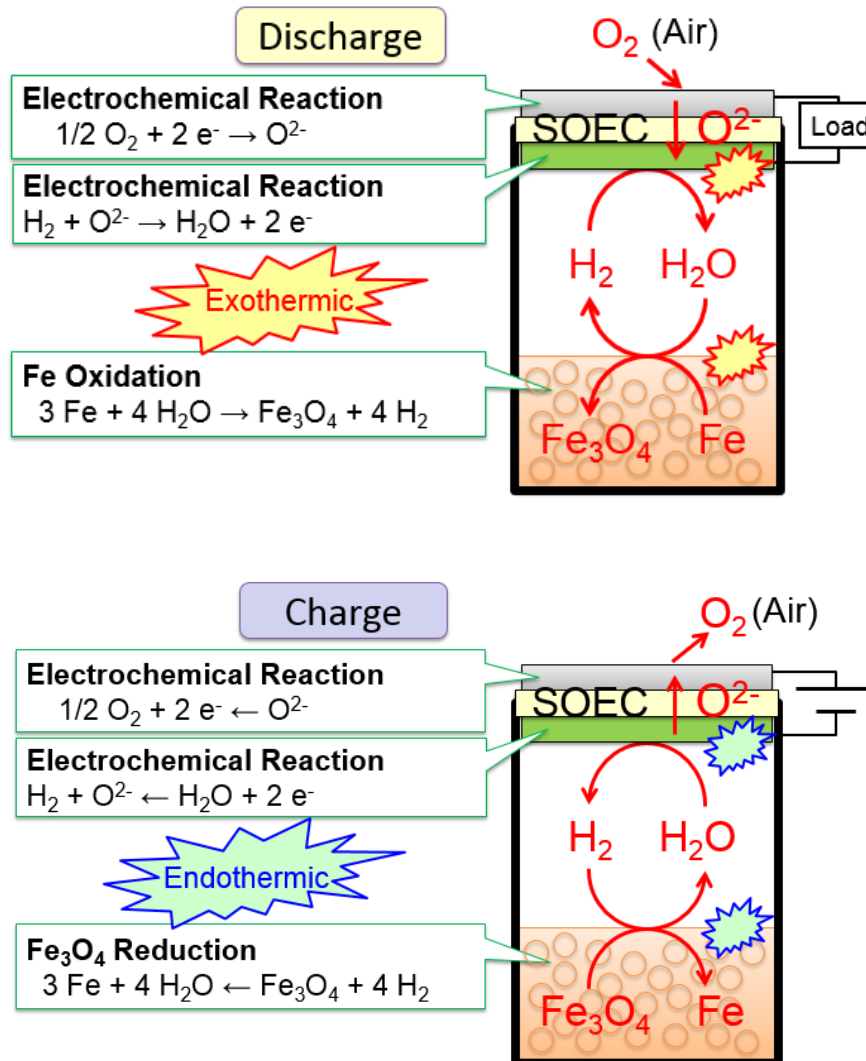


図7 固体酸化物形鉄-空気電池の模式図 上：放電時反応 下：充電時反応

3. コロナ下でスタート

最初の学部生と修士1回生を迎えて研究室が本格スタートした2020年4月は、新型コロナウイルスの第一波のころでした。研究会やミーティングはもちろん新歓コンパもオンラインでした。この原稿は第六波のただ中に書いています。波が収まる時期には、注意しつつ研究会を対面で実施していますが、2年が経とうとする現在まで対面でのコンパはおろか食事会も、あるいは研究室旅行ももちろん実現していません。当初は難しさも感じましたが、研究活動に関する日々のコミュニケーションは十分とれる、というのが実感です。ただ遊びが減っていて「あの時

あんなバカなことがあった」と後で皆で笑えるようなエピソードは生まれにくいと感じています。何年か経ってこの記事を読み返し、私は何を思うのでしょうか。いっぽう世界的にオンライン会議が普及したことで、新しいことも試しています。図8は共同研究先のポーランドの研究室と、合同でオンラインセミナーを開催した時の写真で、今後定期開催する方針です。

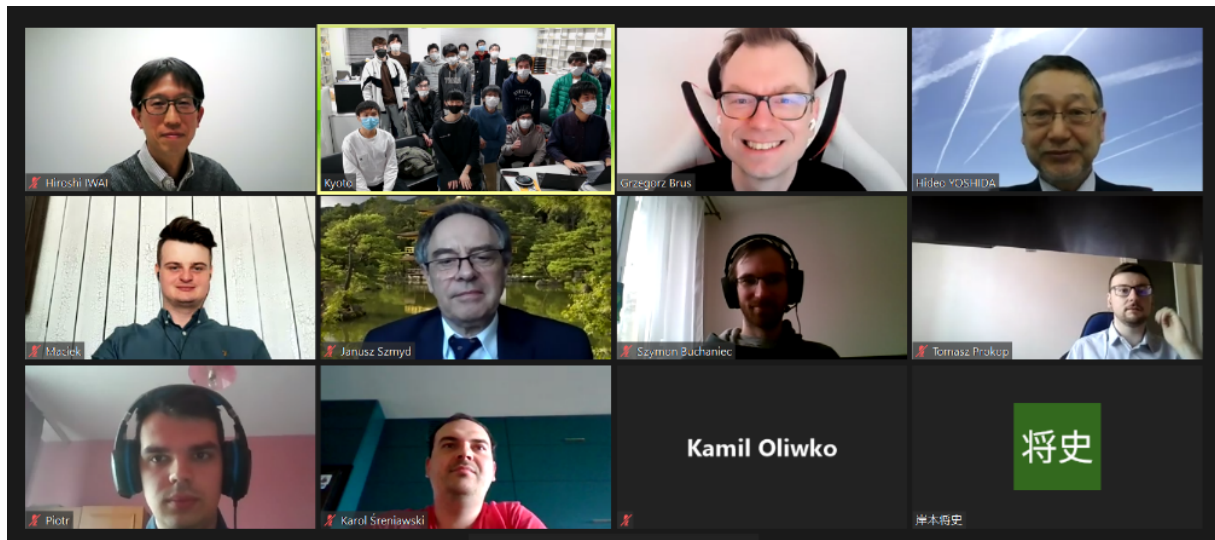


図8 Prof. J. Szmyd, Prof. G. Brusの研究室（AGH科学技術大学、ポーランド）とのオンライン共同セミナー

4. 終わりに

輸送現象を切り口として、固体酸化物形燃料電池を中心とした電気化学デバイスやその周辺技術を対象にこれまで展開してきた研究の一部を紹介しました。まだまだ未解明のことが多くあり、今後もこの方向は当研究室のひとつの軸であると考えています。いっぽうそこで培った実験・構造定量化・数値解析を一体とした手法は対象を限定するものではなく、既に電解セルや全固体電池に適用する検討も始まっています。電気化学デバイスである必要も、またそこに限定するつもりもありません。学生・スタッフの興味と好奇心を大切に、エネルギー変換・輸送・貯蔵の未来を開拓する気概で新しいテーマに挑戦し続けたいと思います。

また、発足して2年余りが経ち研究室の体制も整った最高のタイミングで、研究室の紹介を書く機会をいただきました。ありがとうございました。簡単ではありますが、人の繋がりを軸に研究室の系譜も記しました。OB・OGの皆様には、京機会のイベント等で見かけられましたら、ぜひお気軽にお声掛けいただければと思います。