

TODAY

カーボンニュートラルを実現する
日本の鉄鋼業の戦略検討

東京大学大学院工学系研究科
マテリアル工学専攻

教授 星野 岳穂

東京大学大学院マテリアル工学専攻の「基盤材料マネジメント工学寄付講座」の特任教授に2019年4月から着任しており、早くも3年経ちました。この3年間の間に、元号が平成から令和に代わり、消費税が10%になり、東京オリンピック開催、九州等各地の豪雨被害、福島第一「処理水」の海洋放出決定等、国内だけでも大変目まぐるしい3年でしたが、経済社会や日々の暮らしに影響が大きかったのは、何といたっても新型コロナウイルスの感染拡大と、ロシアのウクライナ侵攻、そして世界中の「脱炭素」に向けた大潮流の始まりだと思います。直近では2020年からの急激な物価高、最近の円高も今後の展開が非常に気になります。

どの動きも日本にとって厳しい環境で、「大転換」を余儀なくされています。大学生活では、ある日突然、コロナ感染の対策として全授業をオンラインとするという「大転換」の方針が下達され、「Zoom」ってなんだ？と言っているレベルでいきなり正式な授業をオンラインで進めるということで、大混乱と試行錯誤しているうちに1年間を乗り切った、思い出深い時期を過ごさせていただきました。

産業界は「カーボンニュートラル」時代を迎え、素材産業の皆様のその対策の切迫感を日ごとに強まるのを感じてきた3年間でした。私の担当する寄付講座の研究室は、鉄鋼を代表とする各種の基盤金属材料の社会との関係、特に金属素材のマテリアルフローや、CO₂排出量のリサイクルを含めた場合LCA手法等の研究を続けてきました。このため、昨今、色々な素材分野の方々から問い合わせや共同研究、情報交換の機会をいただくようになりました。日本アルミニウム協会様との共同研究、あるいは、日本ファインセラミックス協会様のカーボンニュートラル研究会の取りまとめ役を仰せつかったりしています。丁度、時代と研究室のテーマとマッチしてきた幸運な時期に巡りあいました。

そして、今年4月より、日本鉄鋼協会（小澤専務理事）内に新たに設立されました「鉄鋼カーボンニュートラル検討会議」の委員長を担当することになりました。鉄鋼は、御案内の通り、人類の長い歴史と共にあります。人類4000年の英知・試行錯誤の結果の技術の結晶が現在

の製鉄プロセスで、古来より不変の製鉄のあり方である炭素による還元技術にあり、不可避免的にCO₂が発生してしましますが、それが製鋼法としては人類にとって最効率の技術だったわけです。「グリーンスチール」は、大幅削減プロセスの「大転換」を求めることとなり、日本の製鉄各企業は、世界で最も高効率で稼働し、世界でも最もクリーンな鉄を生産している産業であり、さらに、最も高品質の鉄鋼材料を国内及び世界に供給し、経済発展に貢献しているポジションにあります。現状の素晴らしいプロセスを転換し、新たな製鋼プロセスを開発・導入するというのは非常に勇気と決断のいる局面です。

実は良く誤解されるのですが、鉄鋼は、リサイクルを含めてLCAで評価をすると、重量当たりで他の材料より圧倒的にCO₂排出量が小さいエコな材料です。何しろ国内の粗鋼生産量は年間1億トン（これも他の材料に比べて桁違い）のため、産業としてのCO₂排出「総量」が大きいのです。それを知らずに鉄鋼材料から他の材料に転換すると、SCOPE3で痛い目に合うことになりますから、LCAで定量評価をして、材料選択は慎重にお願いします。

さて日本の「グリーンスチール」戦略は、経産省・NEDOの強力な支援の下で進めている「COURSE50」プロジェクトが主軸で、高炉のシステムを活かしつつ大規模な「水素還元」製鉄のシステムを完成させることで、これが出来れば、世界随一の強力な技術となりますが、当該技術だけでは「カーボンニュートラル」に届かないこと、大量の製鉄に必要な大量の「グリーン水素」（700万トン）を調達できるのか、そのコストはどうするのか、など未だ大きな技術的課題が山積です。

かといって悩んで立ち止まっていると、欧州、中国等の諸外国の鉄鋼業は、今のゲームチェンジの節目で、イノベーション的な戦略であればどんどん試していこうというスピード感、雰囲気があり、革新的な製鉄プロセスが早くも実用されつつあります。日本も鉄橋ならぬ石橋を叩いて渡るようなことでは「グリーンスチール」時代に現状の様な国際競争力が維持確保できるのかという課題があります。

ここは、「学」の立場で、英知を結集すれば、従来の発想とかけ離れたところに、有望なシーズが眠っている可能性は大きいのではないかと、検討会議での議論に期待しています。鉄鋼業は日本の産業全体の基盤、モノづくりを支える基幹産業である鉄鋼業の将来にかかわる課題だけに、カーボンニュートラルの実現に向けては、複数の技術的なアプローチを行いながら、脱炭素に向けた技術の確立を世界の動向を見極め、後に後悔することのない柔軟な戦略を見定めることが必要と考えている次第です。

電動機とシステムに関する国際会議 ICEMS2021 @ 慶州に参加して

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 主席研究員 谷川 茂穂
 一般財団法人金属系材料研究開発センター 磁性・先進技術研究部長 豊田 俊介

1. はじめに

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 MagHEM の技術調査活動の一環として、2021年10月31日～11月3日に韓国 慶州を拠点としてハイブリッド開催された電動機とシステムに関する国際会議 ICEMS2021 に参加し、電動自動車用高効率モーターを中心に関連する技術・市場動向を調査したので概要を報告する。

2. ICEMS2021 の概要

ICEMS は日本の電気学会産業応用部門、中国電気学会、韓国の大韓電気学会、国際電気学会産業応用部門の共催でアジア・オセアニア地域で毎年開催されており今回で第24回目となる。世界22ヶ国からキーンノート4件、オーラル223件、ポスター308件他計約540件の講演があった。図1に国地域別の一般講演件数を示す。中国が50%を占め、韓国26%、日本8%、欧州8%、北南米3%であった。参加者は約630名でうち62%がオンライン参加であった。表1に一般講演

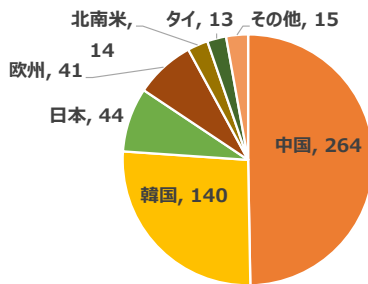


図1. ICEMS2021 国地域別の一般講演件数

表1. ICEMS2021 セッション・トピックス別の講演件数

セッション	トピックス	件数
電動機と電界解析	永久磁石モータ / 発電機	81
	誘導機 / AC モータ	26
	リニア / 特殊モータ	22
	磁気・電界解析	16
	その他	34
パワエレ・モータ駆動	モータ制御・モータ駆動	70
	電圧変換	33
	パワエレ・モータ駆動	23
	センサレス制御	20
	その他	18
エネルギーシステム・電動モビリティ	スマートグリッド	29
	再生エネルギー	23
	エネルギーシステム・電動モビリティ	19
	バッテリーモデリング・制御システム	15
	ワイヤレス給電システム	10
	電動モビリティ・電動駆動システム	8
特別セッション	その他	6
	リラクタン্সモータとその応用	17
	航空機用電動機	13
	パワエレ機器と電動機のモニタリング	11
	電動機械と電動車駆動	10
その他	16	

のセッション・トピックス別件数を示す。電動機のタイプ別では、永久磁石モータ / 発電機の講演が81件と最も多く、誘導機26件、リニア / 特殊モータ22件、リラクタン্সモータ17件であった。パワーエレクトロニクスとモータ駆動のセッションでは、モータ制御・モータ駆動が70件と最も多く、電圧変換が33件などとなっている。エネルギーシステムと電動モビリティのセッションでは、スマートグリッド29件、再生エネルギー23件、エネルギーシステムと電動モビリティ19件などとなっている。

2.1 キーノート講演

電気自動車駆動系へのワイドバンドギャップ半導体パワエレ技術の影響と課題

バージニア工科大 (米国) Jih - Sheng Lai 教授
 ワイドバンドギャップ WBG 半導体デバイスの急速な発展に伴われた超高効率パワエレデザインについて概説。WBG 半導体のコストは依然高いが、EV 駆動系デバイスへの適用拡大は確実に進展してゆく。先進的なパッケージング技術と冷却技術が WBG の潜在能力を引き出しに行く。なお、優れた伝導特性とスイッチング特性は両刃の剣であり超高効率と小型化には課題が立ちはだかっている。小さなチップは冷却が困難となり、耐短絡性が低下する。デバイスの電圧降下の温度依存性、特に GaN における高い電圧変動も課題であり、これらに対し新しい解決策が求められている。

ハンファの空飛ぶ都市モビリティの紹介

ハンファシステムズ (韓国) Jouyoung Jason Choi 氏
 地上の2次元都市交通は混雑を極めており、3次元空間を利用した交通は実行可能な発展の選択肢である。ハンファ社は米国のオーバーエア社と協業し、空飛ぶ都市モビリティ“バタフライ”を開発してきた。低騒音、完璧な安全性、高性能、低運転コストが空飛ぶ都市モビリティ設計の鍵である。バタフライはこうした必須要件を満たすための独自の技術的特徴、即ち、最適速度チルト回転翼 OSTR、回転翼板個別制御 IBC、高効率回転翼システムを有している。オーバーエレベートは5\$/マイル/席を目標に掲げているが、ハンファ社は2\$/マイル/席を目指している。空飛ぶ都市モビリティは2040年に1.5兆\$の市場になると予測されている。現代自動車、大韓航空、現代建設、KT、仁川国際空港公社がアーバンエアモビリティ UAM エコシステムの構築と社会的受容の拡大に向け提携した。UAM エコシステムは、eVTOL の製造、発着場などのインフラ整備、運航・メンテナンス・保険などのサービスを包含する。簡素な推進シス

テム、電動化、自動運転などが調達・運転コスト低減の鍵を握っている。垂直離着陸機 VTOL は一般に複数の小型回転翼、電気式モータとバッテリー、トランスミッションフリーによる軽量化、低トルク荷重分散に対応したメンテナンス容易な単純な形式、低騒音設計などの特徴を有している。離着陸に必要な高出力でかつクルーズのための高効率モータシステムと高エネルギー密度バッテリーが必要となる。角度可変推力方式を採用している会社としてオーバーエア社のバタフライの他、Joby 社、Bell 社、Kitty Hawk 社、Lilium 社、Hyundai 社が挙げられる。マルチコプター方式を採用している会社としては Volocopter 社、Airbus 社、Ehang 社などが挙げられ、リフト+クルーズ方式を採用している会社としては Wisk 社、Aurora 社、Eve(Embraer) 社が挙げられる。バタフライは設計スペックとして、最も幅広い天候での飛行能力、100 m ホバリングでの 55dBA 以下、500m 飛行時の 30dBA 以下などの低騒音、最高速度 200mph、巡航速度 150mph、100 マイルを超える飛行距離、5 人+荷物、約 1000 ポンドの最大積載量を掲げている。バタフライロータの鍵技術として、ホバリング時の高効率、1 プロペラが動作不能になった際の緩和機構、最適なスピード過渡応答によるクルーズ時の高効率、先進炭素繊維を用いた動的同調による低振動設計などが挙げられる。今後バタフライは、2021 年まで詳細設計を終え、カリフォルニアでプロペラシステムの地上試験を行い、2022 年までに試作機を公開し、2023 年までに試作機の試験飛行を行い、量産機を公開し、2024 年までに認証のための試験飛行を行い、2025 年までに FAA の型式証明を取得する計画である。

MagHEM プロジェクトでの電動自動車の主機用ハイブリッド励磁モータの開発

名工大 小坂卓 教授
MagHEM プロジェクトの成果紹介。名工大では電動自動車の主機用を狙いとして新規磁石材料を用いた様々なタイプのハイブリッド界磁モータを、第 3 世代プリウスの主機モータ (ϕ 264mm \times L120mm、22.7kg、最大トルク 207Nm、最大出力 60kW、最大回転数 13500r/min) をベンチマークとして追求してきた。今般、永久磁石界磁と巻線界磁を併用したハイブリッド界磁フラックススイッチングモータ HEFSM をベースに、可変磁束化を検討した。可変磁束化により銅損の低減など大幅な損失低減の可能性が示された一方、大幅な出力密度の向上へのハードルは依然高く、高トルク条件での銅損の低減も今後の課題である。

モータトルク最大化設計のためのエアギャップの磁束の制御

華中科技大 (中国) Ronghai Qu 教授
電気自動車、船舶の推進、風力発電、産業ロボット、鉄道、電動飛行機、ガスタービン発電機、エレベータなどモータ/発電機の体積と質量、コスト低減のためトルク密度の最大化は常に求められている。複数のエアギャップによる磁束変調によりモータのトルク密度は大幅に

向上できるようになった。永久磁石による磁束集中と磁束ブリッジを用い、新しい磁束変調回転機を永久磁石バーニアモータ (PMVM) をベースに設計・評価し、大幅にトルク密度を上げることができた。

2.2 永久磁石モータ/発電機に関する講演

I1-1156 Investigation of Stator Slots and Rotor Flux Barriers Number Impact on the Performances of a Six Phases Synchronous Reluctance Motor Assisted by Permanent Magnets (IFP 新エネルギー、仏) スロット数とフラックスバリアー数を変えた永久磁石アシスト型リラクタンス同期モータを FEM により設計評価。

I1-0631 : Reduction of Iron Loss in Ultrahigh-Speed Interior Winding Synchronous Motor Using Magnetic Composite Material Yoshida 氏ら (信州大) 圧粉コアを用いた埋込巻線形型超高速回転同期モータにおける鉄損低減の検討。

I1-1465 : Study on High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor with Large Airgap for Electrically (浙江大、中国) 電動アシストターボチャージャに搭載される高速モータで課題となるロータからの熱放散を促進するため、エアギャップ大きくする対策を検討し最適構造を提案。

I1-1137 3-D Analytical Model of Armature Reaction Field Calculation for Ironless Axial Flux Permanent Magnet Motor (浙江大、中国) アキシシャル構造 PM モータ実装時の三次元 FEM 鉄損解析手法を提案。

I1-0741 Analysis of Counter Electromotive Force in Surface Permanent Magnet Type Vernier Motor Kataoka 氏ら (秋田県立大) SPM-VM の逆起電力と永久磁石の厚さの関係を FEM 解析し試作検証。

I1-1868 Design and Optimization of Electromagnetic Torque for a Surface Mounted PMSM by Using Subdomain Model and GA in Electric Vehicle Application (ペルリス大、マレーシア) 12 スロット/8 極の SPM において、トルクリップルを最小とし平均トルクを最大とするモータ構造を解析により検討。

I11518 The Effect of the Number of Concentrate Slots and Pole Arc Optimization on the Cogging Torque Reduction in Fractional Slot Number Type of PMMs (アトマジヤヤカトリック大、インドネシア) 集中巻 PM モータにおいて、スロット数とロータアーク形状の最適化によるコギングトルクの低減を検討。

I1-1190 Novel Inherently Fault Tolerant PMSM with Multiphase Windings (ミュンヘン連邦軍大、独) 多相巻き線 PM 同期モータの故障冗長性に関する研究。

I1-1187 New Intelligent Stator Reconfigurable Ampere Response Method for Fault Tolerance against Open Phase Failure in Multiphase Machines (ミュンヘン連邦軍大、独) 多相巻線モータにおける欠相故障のリカバリー手法の提案。

I1-2313 Review of Efficiency Measurement Standards

for Wind Turbines in Nacelles Test Benches (ドイツ国立物理工学研究所) 小型テストベンチを用いた風力発電機の効率測定に関する標準化手法。

11-0250 Slot Number Dependence of In-Plane Eddy-Current Loss in Electrical Steel Sheets of 6-pole Permanent-Magnet Synchronous Machines Ohguchi 氏ら (東海大) 6相永久磁石同期モータにおける電磁鋼板に発生する面内渦電流とスロット数との相関。

11-0690 Research on Direct-drive Low Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Used for Crude Oil Exploitation (天津大、中国) 原油汲み上げ装置に搭載される低速回転ダイレクトドライブ IPM モータの構造最適化。

11-0284 Research on Composite Rotor of 200kW Flywheel Energy Storage System High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for UPS (天津大、中国) 無停電電源装置用エネルギー貯蔵フライホイールシステムにおける高速 PM 同期モータの複合ロータ化。

11-0658 Rotor Sleeve Analysis of High-Speed PMSM Consider Eddy Current Loss and Stress (瀋陽工業大、中国) 高速回転モータにおける渦電流損とロータ強度に及ぼすスリーブ材質及び構造の影響を評価。

11-1332 Optimization of Stator Core Shape to Minimize Harmonic Current in Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using Topology Optimization Algorithm Watahiki 氏ら (日本電産、横浜国大) トポロジー最適化アルゴリズムを用いた SPM 型モータのステータコア形状の最適化。

11-1621 Torque Density Comparison between Axial-Gap Motors and Radial-Gap Motors Using Simple High-Torque Design Based on Permeance Method Hattori 氏ら (静岡大、デンソー) パーミアンスモデルを用いたアキシシャル構造とラジアル構造モータのトルク密度の比較評価。

2.3 誘導機 / AC モータに関する講演

12-1653 Design Study on High Torque Density Multiphase Pole-Change Induction Motor for Vehicle Propulsion Drive Matsuyama 氏ら (名工大) 高トルク密度多相極切替型の車両駆動誘導モータの検討。

12-0416 Comparative Study of Hybrid Excited Half-Wave Rectified Synchronous Motor with Different Hybridization Ratio Considering EVs Operating Conditions Mamo 氏ら (長崎大) EV 用途を想定したハイブリッド励磁型同期モータの検討。

12-0493 Analysis of Electromagnetic Parameters and

Output Performance of Asynchronous Motor under Overload Condition (中国科学院大) 過負荷状態における非同期モータの電磁特性解析。

2.4 電気機械と電動車駆動に関する講演

S3-0957 Design of a 300W Axial Flux Motor for an Electric Bike (科学技術大、韓国) 電動バイク駆動用 PM ブラシレスモータを設計し試作評価。ハルバツハ磁石配列のアキシシャル構造型モータも検討。生産技術は未検討。永久磁石の特性はセグメントにより変えている。

S3-0535 Design and Analysis of 120kW Traction Inverter for Electric Vehicles (科学技術大、韓国) EV 駆動向けのインバータの設計と解析。

S3-0793 Thermal Analysis and Experimental Verification for Optimized Design of Multi-Phase Motor Drive System Considering Heat Dissipation (科学技術大、韓国) 熱放散効率を考慮した多相モータドライブの熱解析と実機検証。

S3-1393 Electro-Mechanical Design of High-Power Density Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Propulsion of Personal Aerial Vehicle Application (東亜大、韓国) 燃料でターボシャフトエンジンを回し、発電機の電力で複数のプロペラを回すシリーズハイブリッドシステムを用いた電動空飛ぶ自動車用に、高パワー密度磁石同期モータを電気機械設計。離着陸時に必要とされる最大トルクとクルーズ時の高効率の両立が設計の鍵。

3. まとめ

ICEMS2021 に参加しモーターの高効率化・高パワー密度化・アプリケーションの拡大等への取り組みを概観した。これまでに行った MagHEM プロジェクトでの特許・技術動向調査結果とも併せ、社会実装が進んでいる分野での日本のモータ技術の水準は依然高い水準にあり、民需用モータの製造方法のノウハウやシステム全体構造など、実際にモータを動かすのに必要な技術分野でも海外企業に比べて高い水準にあると考えられる。一方、既存のモータ構造から離れた新しい構造や、新しいシステムに関する取り組みは、欧米を中心に海外企業が積極的に取り組んでおり、国際会議や学術論文などアカデミア分野では中国の研究機関の論文数が圧倒的に多くなってきている。10年間にわたり産学官の連携で進められてきた MagHEM プロジェクトを1つの足掛かりとして、磁石材料、軟磁性材料、高効率モーター分野の研究・技術とその応用が今後さらに発展してゆくことを期待する。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 425 号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2022年5月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL <http://www.jrcm.or.jp/>
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp