

TODAY

鉄鋼における創造的破壊と革新



東北大学 名誉教授
有山 達郎

表題の「創造的破壊」という言葉は企業経営者がよく使う言葉で、経営に閉塞感、停滞感が出てきた時、あるいは経営者が新規に交代する時に新たな方針として使われることが多い。また「革新的」という言葉も技術開発のスローガンの接頭辞で頻繁に目にする。創造的破壊は鉄鋼にはなじまない感もするが、革新的、革新は常用的の語句で気にも留めなくなってきた。その言葉のルーツが改めて気になり、調べてみると由来は共に経済学者シュンペーターが使い始めた経済用語である。私は約30年間、高炉メーカーの製鉄の研究者で、以降は大学に籍を置いた製鉄研究者であって経済が専門ではない。シュンペーターの原書を読んだ訳でなく、解説書をかじっただけである。シュンペーターは1883年のオーストリア生まれ、欧州、米国で活躍、特に米国で評価された経済学者で、先の言葉が現代においても頻繁に使われていることからわかるように、その思想は今も生きている。元は1912年のドイツ語の初期の著作に遡る。革新のオリジナルは「新結合」という言葉で、英訳では“New combinations”であるが、後に、“Innovation”、“革新”に置き換えられ、それが語源となっている。新結合、革新とは、新しい物、方法、組織の従来にない結合の遂行によって、均衡的な状態から非連続的な動的飛躍が生まれ、発展の原動力になるという経済発展の理論で、後にビジネスでも通じるどころがあり、その言葉は前述のように現代でも使われている。シュンペーターは、例示として古い表現だが、駅馬車は何台連ねても、いくら改良しても、鉄道には変わらないという例えで、新結合の概念を説明している。前例主義を捨て、リスクを恐れず、新しい組織で新しい要素を加えることで飛躍的成長が生じ、新たな価値体系が生まれるという理論であり、後にその過程を「創造的破壊」、「Creative Destruction」と表している。近年、一語で“Disruption”とも呼ばれている。古い学説であるが、前述のように両者の概念は同じルーツで、「新結合」に遡り、今の経営にも通じる。至近ではAI、3-Dプリンターなどが例と挙げられ、技

術開発の世界でもその思想は理解しやすい。

何故、この説、言葉の由来が気になったかであるが、温室効果ガス削減の長期目標達成がきっかけである。周知のように、2015年に採択されたパリ協定では2050年において温室効果ガス80%削減が具体的目標として挙げられている。これに対して鉄鋼でも様々な取り組みが世界的になされている。特に私が関わってきた鉄鋼の製鉄プロセスはCO₂削減に深くかかわり、世界的に様々なプロジェクトが提案され、また進行中である。ほとんどの提案がパリ協定以前のこともあるが、長期目標の80%削減には及ばない。多くが閉鎖的な枠内での既存技術の逐次的改善であって、また原理的な重複もあって、複数の提案で効果が倍加する訳でなく、目標との間にかい離を生じている。前述の例えのように駅馬車を何台、連ねても飛躍はない。その障壁を乗り越えるために、新しい枠組み、着想による本来の革新的技術が望まれている。異分野との新結合が一つの解になり得るかもしれない。最近、欧州を中心に再生可能エネルギーによる電力でCO₂フリーの水素を製造し、水素で鉄鉱石を還元する水素製鉄が提唱され、一部では2020年からパイロットプラント試験が始まる。水素還元は原理的に還元鉄プロセスの拡張で革新的とはいえないが、再生可能エネルギーと従来の鉄鋼プロセスという異分野との結合である。挑戦的な構想ではあるが、長期目標達成手段として期待は大きい。一方、グリーンフィールドのミニミルへの適用は想像できるが、一貫製鉄所ではその上工程を入れ替えることになり、現実への適用性について疑義も生じる。これらは遂行にあたって当然に生じるフリクションで技術構想とのせめぎあいになるが、一方は生産構造の改革に許容量を持ち、また遂行者も現実の製鉄所との連続性から水素利用に関して多様な展開をすれば、その接点から新しい枠組みでの革新的技術となり得る。また、ドイツの鉄鋼大手のT社は鉄鋼とケミカルの産業間連携によるCO₂削減の構想を提唱している。“Carbon2Chem”のプロジェクト名称で、“Cross-industrial Network”と表している。同社は日本の製鉄所と同じく大型の一貫製鉄所を抱える企業である。鉄鋼プロセスから排出されるCO₂を含む排ガスをケミカル原料として活用し、現行の化石原料由来の化学製品を排除しようとする概念である。いわゆるCCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) であるが、大手の化学企業と連携し、CO₂を付加価値の

高い商品に転換する高度なCCU指向である。鉄鋼とケミカルの連携によってCO₂を削減するという意味で“Integrated CO₂ Capture”とも表現している。まずはメタノール合成など手が届くケミカルの出発物質から始め、様々な応用を考えている。基本反応はドイツが得意としてきた合成反応技術で、既知技術の結合でもあるとしている。ハーバーボッシュのアンモニア合成、合成燃料を作るFT合成などを指しているが、いずれも20世紀前半にドイツで考案されたプロセスである。方向としては鉄鋼とケミカルの従来からの技術要素の融合で、前述の新結合の概念に符合する新しいアプローチとも思える。同社は2018年に試験プラントを建設し、キックオフ会議、設備公開には同社の経営幹部に加え、連邦政府のAnja Karliczek 教育研究大臣も出席し、力の入れ様を感じられる。地球環境問題の解決と新たな産業形態の創出にもなり得る。現在、鉄鋼プロセスは地球環境問題でクローズアップされている分野であり、地球環境問題解決に向けて飛躍的な様々な革新的技術

が生まれることを期待したい。

なお、追記的な話として付記すると、ドイツのT社とはThyssenKruppで、同社はエレベーターの世界の有力メーカーでもある。最近、ケーブル牽引ではなく、リニアモーターを利用したエレベーターを開発している。同社によればエレベーターには160年の歴史があるが、それを塗り替える斬新な技術であると大々的にPRしている。一つのシャフトの中に複数の箱を設けることが可能で、箱を縦だけでなく横に動かすこともでき、ビルの設計の自由度が増し、ビル内、駅などで我々の移動形態も変わるそうで、近いうちにベルリンの高層ビルに採用されるとある。日本のメーカーは高速化、静粛性など一方向開発で群を抜き、シェアを稼いでいるが、全く異なる発想展開である。鉄鋼はどの国でも守旧派の代表のようなイメージを持たれるが、高度な産業技術の集合体であってポテンシャルは高く、長い歴史を生き抜いてきた事実が示すように柔軟性もある。視点を変えることで創造的破壊を実践しやすい場である。

JRCM REPORT

軟磁性材料に関する国際会議 SMM2019 @ ポズナンに参加して

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

1. はじめに

高効率モーター用磁性材料技術研究組合 (MagHEM) の技術動向調査活動の一環として、9月4日～7日にポーランドのポズナンで開催された、軟磁性材料に関する国際会議 24th Soft Magnetic Materials Conference (SMM) 2019に参加したので、その概要を報告する。

2. 概要

SMMは2年毎に開催される軟磁性材料およびその応用技術に関する世界最大の国際会議で、第1回は1973年イタリアのトリノで開催され、今回は24回目となる。これまで、第22回が南米ブラジルのサンパウロで開催された以外、全て欧州で開催されている。ポーランドでの開催は、第12回のクラコウに次いで今回が2回目。

開催地のポズナンは、ポーランドの西部に位置するポーランド最古の都市の一つで、中世ポーランド王国の最初の首都。現在、ポーランド5番目の都市で人口は約54万人、近郊にはフォルクスワーゲンの車両組み立て工場があり、ドイツとの経済的な繋がりが強い。ポーランド経済は比較的好調で、治安も安定している。市内の交通網は、路面電車と路線バスだけであるが、朝の5時から深夜まで運行されており、海外からのビジターでも不便は感じない。2016年に

は移住したい世界の22都市のひとつに選ばれている。

SMMの会場となった国立ポズナン大学は、前身が16世紀に遡る由緒ある大学で、1919年に設立され今年設立100周年を迎えた。学生数5万人、教職員5千人と規模が大きい。

今回の国際会議の参加者は約250名で、ポーランドから約150名、その他欧州から約50名、アジアから約40名、うち日本からは約20名であった。3日間で、オーラル講演65件（内招待講演12件）、ポスター講演157件の発表があった。



3. 招待講演

12件の招待講演者の国別内訳を示す表1に示す。欧州からの講演が10件、日本からが2件で、日本からの講演として、東北大学未来科学技術共同研究センター (NICHe) 牧野教授による高磁束密度 Fe-Si-

B-P-Cu 低損失ナノ結晶合金の量産化技術と応用と、日立金属とメトグラスによるアモルファスおよびナノ結晶合金の最新技術動向に関する講演があった。

表1 招待講演者の国別内訳

ドイツ	フランス	スペイン	ポーランド	イタリア	日本
3	2	2	2	1	2

• **Industrialization and Applications of High B Fe-Si-B-P-Cu Nanocrystalline Alloys with Improved Magnetic Softness**

牧野教授 (東北大 NICHe、日本)、L. S. Huo 氏 (寧波中科 B Plus New Material Technology 社、中国) 他

生産性を改善した Fe-Si-B-P-Cu 系高飽和磁束密度ナノ結晶合金の材料特性の紹介。中国のベンチャー企業 B Plus 社にて量産が進められている。講演後半の薄帯製造プロセスについては Huo 氏が講演。薄帯の連続巻取り機が開発され、現在、月産 60 トンのセミ量産体制が構築されている。薄帯の応用分野としてワイヤレス充電器の受動部品への適用を検討している。量産薄帯は 50 および 120mm 幅で、厚さは 18~25 μ m。延性に優れた薄帯のオンライン自動巻取りを実施している。商品名 BP17000、BP18000 の 2 鋼種を生産。共同研究機関として寧波工業技術研究院が含まれている。中国との技術連携は 2009 年に開始したとのこと。

表2 高飽和密度ナノ結晶薄帯の特性例

板厚 (μ m)	磁束密度 B_{800} (T)	保磁力 (A/m)	電気抵抗 (μ Ω m)	鉄損 W1.5/50 (w/kg)	鉄損 W1.7/50 (w/kg)	Fe (at%)
19	1.82	2.8	0.67	0.25	0.38	86

• **Imaging of Magnetic Domain Dynamics at Power Frequency** R. Schaefer 氏 (ライプニッツ固体材料研究所、ドイツ) 他

Fe-3% Si 電磁鋼板の動的磁区観察手法についての解説と実測例の紹介。結晶粒サイズレベルでの磁壁移動や磁束の伝播の様子が高解像度で捉えられている。開発した観察手法は Newtron Dark-Field Microscopy および PMOIF と名付けられている。Newtron Dark-Field Microscopy は中性子線の小角散乱を利用した観察手法で、空間解像度 100 μ m であり、隣接する磁壁の動的変化を観察することが可能。無方向性電磁鋼板の回転磁化過程の観察などに適している。PMOIF (Magneto-Optical Indicator Film with Perpendicular anisotropy) は透明な磁性ガーネット膜を観察試料表面にセットし、磁壁の動きを光学的に観察する手法。ハイスピードカメラを用いて 500Hz 程度までの周波数での観測が可能。分解能は 30 μ m、楔形のランセット磁区を鮮明に観測出来る。

• **Energy Losses in Soft Magnetic Materials**

F. Fiorillo 氏 (Inst. Nazionale di Ricerca Metrologica: INRiM、イタリア)

軟磁性材料の鉄損解析計算手法を歴史的にレビュー。パワーエレクトロニクスの進展に伴い、高周波帯域での非正弦波励磁下での損失解析に焦点が当てられている。このような条件下でのロス評価には、スピン緩和による散逸機構と、周波数が高くなるほど電流が表面に集中し交流抵抗が高くなるいわゆる、表皮効果 (図1: 参考) の扱いが重要。2018 年の世界の電気エネルギー消費量は前年度比 +3.5% 増大し約 26,000 テラ Wh であった。低損失軟磁性材料は、省エネルギー達成のための鍵材料である。

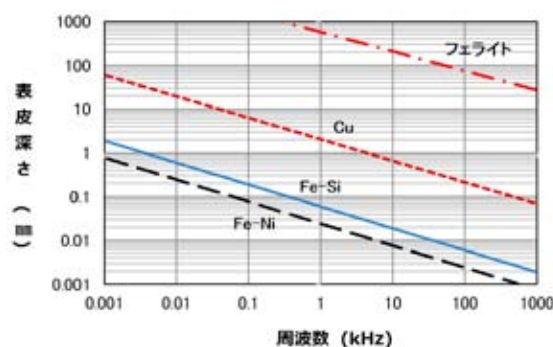


図1 周波数と表皮深さ (電流が表面の約 0.37 となる深さ) の関係
出典: <https://ja.wikipedia.org/wiki/表皮効果>

• **Evolution and Recent Development of 80 % Ni Permalloys** T. Waeckerle 氏 (APERAM、フランス) 他

Fe20%-Ni80% 軟磁性合金 (PC パーマロイ) は代表的な高透磁率材料で、バルク磁気シールド材料として高いシールド性が要求される心磁計や脳磁計などの医療測定装置のシールドルームの構造材として唯一無二の軟磁性材料である。国内では大同特殊鋼、日立金属などが、海外ではドイツの Vacuumschmelze 社がリーディングメーカである。1923 年以降の材料開発の歴史をレビューし、トルクセンサー、磁気シールド、スピントロニクス等の応用分野での本材料の有用性につき解説。

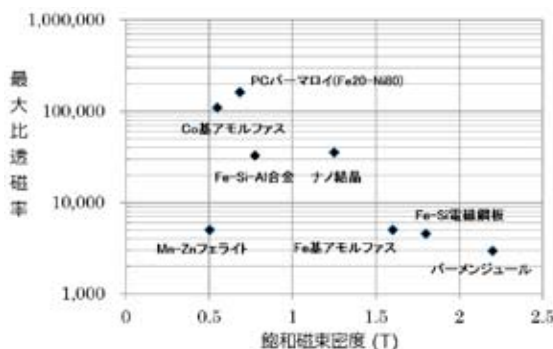


図2 軟磁性材料の透磁率と磁束密度の特性例

4. 一般講演

一般講演における材料別の比率は、電磁鋼板が37%と最も多く、次いでアモルファス・ナノ結晶材料が27%となっている。講演の視点別の比率は、材料機能39%、性能評価・測定26%、解析18%、応用17%となっている。

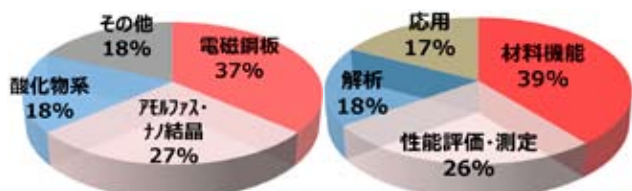


図3 材料別の講演比率

図4 視点別の講演比率

・ Magnetic Properties of Grain-oriented 6.5% Si Steel with Fine-grained Structure

T. Okubo 氏 (JFE スチール、日本) 他

低損失無方向性電磁鋼板としてリアクトルなどに応用されている Fe-6.5% Si をベースとし、さらに結晶配向させ、結晶粒径を 0.1~1mm に微細化した 6.5% Si 電磁鋼板の材料開発に関する講演。3% Si 鋼を板厚 0.1mm に冷間圧延後、再結晶させ、1200℃ で CVD による浸珪処理を施した。結晶配向させ、結晶粒径を 0.1~1mm に微細化した 6.5% Si 電磁鋼板の磁束密度は 1.6T 以上であり、無方向性の Fe-6.5% Si 鋼板と比較して、評価周波数と最大磁束密度を変えた測定条件で、いずれも鉄損が小さくなった。

・ Influence of Co on Microstructure and Magnetic Properties on Nearly-Zero Magnetostrictive Fe-based Nanocrystalline Alloys

N. Lupu 氏 (NIRDTP、ルーマニア) 他

現在量産されている代表的なナノ結晶薄帯、日立金属の FINEMET[®] と Vacuumschmelze 社の VITROPERM[®] に Co をドーブした場合の異方性や磁気弾性などの磁気特性に与える影響評価。結晶化熱処理温度を変え、マイクロ組織と対応させ詳細に検討した。Co 添加により、材料内部のマイクロな応力分布がよりランダムになり、飽和磁歪が大幅に減少。熱処理温度と析出相の対応関係を表3に示す。Co を添加すると機械強度が向上し、ワイヤーや薄帯の形態での医療用センサーなどへの応用が期待される。なお FINEMET[®] と VITROPERM[®] は B と Si の配合量が異なっている。

表3 熱処理温度と析出相の対応関係

Co 置換量	熱処理温度(℃)	FINEMET [®]	VITROPERM [®]
0%	540	bcc-Fe+Am	bcc-Fe+Am+FeSi
	550	bcc-Fe+Am	bcc-Fe+Am
50%	530	bcc-FeCo+Am bcc 相粒径 8~9nm 体積率 30%	bcc-FeCo+Am bcc 相粒径 8nm 体積率 43%
	550	bcc-FeCo+Am bcc 相粒径 11nm 体積率 52%	bcc-FeCo+Am bcc 相粒径 9nm
100%	470	Co 相粒径 5nm Co 相 20%	Co 相粒径 7nm Co 相 30%
	550	Co 相粒径 8nm Co 相 52%	Co 相粒径 8nm Co 相 38%

・ Pinning Field Model Using Play Hysteresons for Stress-Dependent Domain-Structure Model

T. Matsuo 氏 (京大、日本) 他

結晶粒やマイクロな磁区の振舞いが磁性体全体に及ぼす影響を記述し、マクロ磁気特性を計算機上で再現することができるマルチスケール磁気特性モデル開発を行っている。電磁鋼板内での磁区や結晶などマイクロな構造を反映した物理モデルとして、ADSM(Assembled Domain Structure Model) を開発。応力下での損失ならびに B-H ループをシミュレートする解析手法を考案した。ベクトルモデルに基づくヒステリシス損と B-H 曲線の計算結果が実測値と良く一致した。このように、ベクトル磁気特性を取り入れたモデリングを研究テーマのひとつとして取り組んでいる。

・ Impact of Rapid Annealing on the Soft Magnetic Properties of Fe-Co-B-Cu Melt-Spun Alloys

I. Skorvanek 氏 (スロバキア科学アカデミー、スロバキア) 他

Fe(Fe-Co) 基の高 Bs ナノ結晶合金に関する研究。急速熱処理、磁界中熱処理により結晶粒径と磁気異方性を制御することで軟磁気特性を改善。Fe_{83.7}Cu_{1.5}B_{14.8} を基本組成とし、Fe の一部を Co で置換した組成系などで検討。

5. まとめ

軟磁性材料の応用分野では、周波数帯域やパワー密度範囲が広く、それぞれの用途に応じた最適の材料が求められる。パワーエレクトロニクスの進展に伴い、材料に対する要求も年々高くなってきている。軟磁性材料分野の研究開発では、高磁束密度ナノ結晶材の発明などを契機に新しい挑戦が始まっており、今後の技術進展が注目される。

The Japan Research and Development Center for Metals
JRCM NEWS / 第 397 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製・複製・転載することを禁じます。

発行 2019年11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