

## TODAY



内閣府大臣官房審議官  
(科学技術・イノベーション担当)  
覚道 崇文

内閣府大臣官房審議官(科学技術・イノベーション担当)の覚道崇文と申します。昨年12月に、経済産業省から出向して着任しました。私は、平成20年7月から約3年間、現在の経済産業省金属技術室の前身にあたる製鉄企画室の室長を務めておりました。当時、技術開発プロジェクトの実施等でJRCM及びご関係の皆様には大変お世話になりました。こうした御縁もあり、今回、当職着任を機に、JRCMニュースへの寄稿のお話をいただき、謹んでお引き受けした次第です。ちなみに、製鉄企画室長として平成21年1月の当ニュースにも寄稿させていただいており、今回、12年ぶりとなります。前置きが長くなりましたが、現職に着任し、改めて感じている材料の重要性について、思うところ書いてみたいと思います。個人的な感想めいたこともあり、やや的外れなこともあるかと思いますが、ご容赦いただければと思います。

現在、私が所属する内閣府の科学技術・イノベーション担当部局では、今年度中を目途に政府の「材料革新力強化戦略」を策定すべく、議論・作業が進められています。これまでも、分野別の重要戦略として、AI、バイオ、量子、環境エネルギーなどの戦略が策定されてきていますが、材料に関する政府全体としての総合的な戦略は今回が初めてとなります。上述のとおり、私は昨年末に当部局に着任しましたが、材料分野の戦略が初めて作られるということには意外な印象を持ちました。この背景には、もともと日本は、材料分野では高い技術力・競争力を有していたことと、内閣府が政府全体としての包括的・横断的な戦略を策定せずとも、関係各省において作られる個々の戦略等や、それらに基づく取組でそれなりに対応できてきたことがあるのではないかと思います。

しかし、今日、材料技術は、温暖化問題をはじめとする人類が直面するグローバルな課題の解決や、また現在、策定の最終段階にある次期(第6期)科学技術・イノベーション基本計画が目指すSociety 5.0の実現に向けても極めて重要な役割を果たす、

まさに核心的技術分野であり、国際競争もし烈さを増しています。また、技術の社会実装までを視野に入れたイノベーションの展開は産業から社会の幅広い領域に及び、かつ、その実現に向けた取り組みには、ICTやデータの活用、研究基盤の強化、人材育成など各省の枠を超える広範で横断的な施策が求められます。政府全体としての総合的な材料戦略は、まさに待ったなしの状況にあると言えるでしょう。

私は、製鉄企画室を離れて以降、医療機器、石炭、原子力、電力や高圧ガスの保安など様々な分野の政策に携わってきましたが、思い返してみると、いづれにおいても、関係する政策や技術において材料が重要な要素となっていました。たとえば医療機器開発においては、その機能や加工性、人の体との親和性など様々な面で、使用される多種多様な材料が極めて重要な役割を持ちますし、高効率火力発電技術は、高温・高圧に耐えられる金属材料の開発そのものと言っても過言ではありません。また、電力や高圧ガスの保安確保のための各種技術基準も、その多くは材料に関わるものです。ただ、考えてみると、私たちは、日々あらゆるモノに囲まれて生活しており、それらは何らかの材料で構成されているわけですから、これは至極当然のことなのだろうと思います。

上述した第6期科学技術・イノベーション計画で実現を目指すSociety 5.0は、「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」です。これは、私なりに解釈しますと、生活・社会・経済・環境など私たちをとりまくあらゆる側面・活動にデジタル化が深く浸透し、私たちが様々な課題から解放され、真に快適に生きてゆけるような社会です。その実現のためには、AI、量子などを含めた高度なデジタル技術の開発・社会実装が重要であることは言うまでもありませんが、こうしたデジタル技術は何らかのハードウェアの上に、あるいはそれらを介して存在するものであり、そして、また何よりも、私たちがフィジカル空間、すなわちこの現実社会に生きている以上、材料技術の重要性は勝るとも劣らないものと考えています。

今後とも、日本の材料技術力・競争力の強化に向けて、微力ながら貢献していければと思います。

## 「軟磁性材料に関する国際会議 WMM2020 と 磁性と磁性材料に関する国際会議 MMM2020 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 磁性材料研究部長 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 (NEDO 委託業務 JPNP14015) における技術動向調査の一環として、2020年11月3日～5日にイタリアのローマを主会場として開催された軟磁性材料に関する国際会議 WMM2020 (第9回 World Conference for Magnetism and Metallurgy) と同年11月2日～6日にオンラインで開催された IEEE Magnetics (米国電気電子技術者協会 磁気学部会) 主催の磁性と磁性材料に関する国際会議 MMM2020 (第65回 Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials) に参加し、モーター用磁性材料に関連する技術動向調査を実施したので概要を報告する。

### 2. 軟磁性材料に関する国際会議 WMM2020

WMM2020 は、主に電磁鋼板を中心とする軟磁性材料にフォーカスしたシンポジウムであり、2年毎に欧州で開催される。今回はイタリアのローマでのオンサイトに加え、Webによる参加が可能であったので、オンラインで会議に参加し、軟磁性材料およびモータ関連の技術動向の調査を実施した。招待講演を中心に構成されており、電磁鋼板の材料技術、評価技術、モータ・トランスへの応用技術、コア製造技術などの講演が全体の約8割を占める。一部アカデミックな研究ベースの講演もあるが、多くはエンジニアリングに主眼を置いた講演で構成されている。

#### 2.1. 電磁鋼板に関する講演の概要

- High Performance Synchronous Reluctance Motor for Electric Vehicles - Comparison between NGO & GO Electrical Steels (ラクイラ大:伊) 永久磁石フリーのEV用同期リラクタンスモータのコア材に、グレードの異なる無方向性電磁鋼板 (NGO) や方向性電磁鋼板 (GO) を使用したモータの性能を比較評価。コア材として高性能な電磁鋼板を使用することにより高速域での効率向上効果を確認。比較評価した電磁鋼板は、無方向性 M235-35A、NO30-15、NO20-HS の3グレードと、方向性電磁鋼板 M85-23P。無方向性電磁鋼板を採用したモデルモータは、最大出力 125kW、最大回転数 14,000rpm で、ロータに4層のフラックスバリアーを設けた構造。方向性電磁鋼板を採用したモータは同一体格・出力で、GOの異方性を考慮し2極構造で設計。
- Coil Map - Continuous monitoring of local variations in magnetic properties across the material width and length of electrical steel coils (Dr. Brockhaus Messtechnik 社:独) 電磁鋼板コイルの磁気特性ばらつきをオンラインで連続的に測定評価する技術を開発し、製品化。コイルの局所的な性能分布を測定評価可能。品質管理に適用可能なシステムを開発し販売。
- Electromagnetic materials suited for electrified transport (アルセロールミッタルグローバル R&D : 仏) 輸送用途向けリニアブレーキ、リニアモータ、磁気浮上システムなどの電磁解析の研究内容を紹介。
- Baosteel's Breakthrough on research and development of grain-oriented silicon steel materials (宝武鋼鉄欧州研

究開発センター:独) 中国宝武鋼鉄における、配電トランス用方向性電磁鋼板の先端研究開発の紹介。

- Investigations on microstructural reasons for Goss texture formation in GO electrical steels - a search for the needle in the haystack (マックスプランク鉄鋼研究所:独) 方向性電磁鋼板の組織形成プロセスの詳細なマイクロ解析。
- Comparative analysis between Glue Fastec®, conventional fastenings and housing compression effect in electric motor core losses (Eurotranciatutura México S.A de C.V. 社:メキシコ) モータ用電磁鋼板の接着積層技術 Glue Fastec® の紹介、カシメやスポット溶接などと比較して加工劣化抑制効果を検証。日本の国内メーカーでは、黒田精工や三井ハイテックなどが金型内打ち抜きと接着を連続的に行うシステムを開発し実用化している。一部の電動自動車の駆動モータ用積層コア製造に適用されているとのこと。黒田精工と技術提携している。
- A review of the concept and results of hysteresis loss subdivision into Low and High induction components (サンパウロ大:伯) ヒステリシスロスと低周波誘導成分と高周波誘導成分に分解して評価する手法を紹介。
- Recent Development of Grain-Oriented Electrical Steel at Nippon Steel Corporation (日本製鉄:日本) これまで開発された方向性電磁鋼板の高機能化技術のレビュー講演。ゴス方位の一方向制御技術、薄板化技術、磁区微細化技術を中心に主導原理を含めて解説。
- Metallurgical Model of HTCA for GO Silicon Steel with prevision of Magnetic Properties and Secondary Grain Size (MOGOCA-EVO) (SPIRES SRL 社:伊) 方向性電磁鋼板の高温連続熱処理による組織制御で形成されるマイクロ組織を、計算科学手法を用いてモデル化する手法を確立。さらに組織形態より材料性能を予測するプログラムを開発。
- Origin of Goss {110} Grains in Hot Worked and Hot Band Annealed Grain Oriented High Permeability Silicon Steel (タタスチール R&D : 印) 方向性電磁鋼板 High-B 材の熱間加工～熱処理工程における GOSS 組織形成機構の解析。
- Evolution of Microstructure and Texture for ES Non-Grain Oriented vs Grain Oriented Electrical Steels (RINA Consulting 社:伊) 電磁鋼板の組織改質技術について、方向性および無方向性を対比させながら詳細に解説。
- Compatibility Considerations with Adhesive Bonding of Laminations (Tempel スチール社:米) 電磁鋼板の接着積層技術の最適化に関わる課題分析と要素技術について。
- The Electrical Steel Market: Past, Present and Future (Gwynne Johnston氏, Metals Technology Consulting 社:米) 無方向性電磁鋼板のグローバル市場動向の詳細な調査結果と今後の需要予測を紹介。中国の消費が大幅に増加、インド・韓国は緩やかな増加。日本国内の消費量及び生産量は過去10年間ほぼ横ばい。コロナの影響で全世界の2020年の消費量は低下し2030年にかけてさらに増大してゆくと予想している。無方向性電磁鋼板の全世界でのグレード別の比

率は、汎用グレード 73%、高グレード 14%、HEV/EV グレード 3%、CRML(Cold rolled motor lamination)10%。

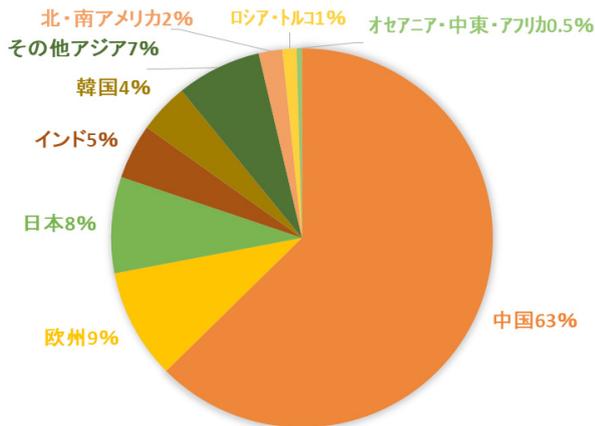


図 1. 無方向性電磁鋼板の国地域別消費量割合 (2019年：全 13456 千トン)

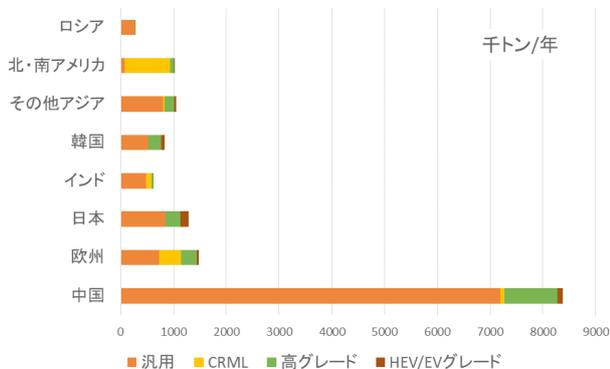


図 2. 無方向性電磁鋼板の国地域別・グレード別生産量 (2019年：全 14936 千トン)

・Research Development on Preparation of Fe-6.5%Si Steel Strip by Near-net Shape Technology (武漢鋼鉄：中国)

双ロールストリップキャスティング法による Fe-6.5% Si 高 Si 電磁鋼板の開発。単ロール法では融点が高いためロールへ密着せず薄帯の製造は不可。双ロール法で 2.5mm 厚の薄板の製造が可能。熱間圧延で 1mm 厚に加工、その後冷間圧延で幅 200mm、長さ 400mm、厚さ 0.1mm の薄板を作製し熱処理を行う。磁気特性は CVD プロセスで量産されている市販品にはほぼ匹敵する材料が得られるとのことだが、表面状態は平滑でなく、長尺コイルが製造できるレベルには無い。パイロットラインの建設を計画している。

・The Fabrication Technique and Magnetic Properties of Grain Oriented Silicon Steel for High Frequency Transformer based on Strip Casting (東北大学：中国)

双ロールストリップキャスティング法による、高周波トランス用電磁鋼板の開発。双ロール法によるラポレベルでの材料研究。高 Si 材料も含め種々の鋼種を検討している。

・Demand and new development of high grade non oriented electrical steel in China (首鋼 Zhixin Qian'an 電磁材料社：中国)

中国における無方向性電磁鋼板の市場および技術動向についての講演。新エネルギー、環境対応自動車、ロボット、環境対応家電市場の成長に伴い、高級品の需要が伸びると想定。環境対応自動車では、第 13 期の 5 ヶ年計画で、2025 年のモータの出力密度の目標値が 4.5kW/kg に設定されている。中国での EV/HEV の 2025 年の販

売台数は 500 万台に伸び、無方向性電磁鋼板の需要は、550 千トンに達すると見込んでいる。高性能電磁鋼板で注力されている材料は、極薄無方向性電磁鋼板、極薄方向性電磁鋼板、極薄 6.5% Si 鋼板であり、研究開発部門で開発に注力している。

・Infrared drying technology to GO and NGO electrical steel production (Ircon-Solaronics 社：仏) 赤外線加熱を活用した電磁鋼板の表面処理プロセス技術の紹介。方向性電磁鋼板の MgO コーティング乾燥工程への赤外線加熱の適用。無方向性電磁鋼板の絶縁被膜形成工程への赤外線加熱の適用。

・Smart solutions for ECO-Design Oil Distribution Transformers (SIM SRL 社：伊) 2021 年から欧州で適用される配電トランスの新規格に対応する、高効率トランスの設計・製造技術を紹介。

・Electrical Steel and Motors performances, Role of Lamination Thickness (Motor Design 社：英) 車載駆動用途向けの誘導モータを想定。ステータコアに M235-35A、M290-50JKE、NO30-15、NO02-HS の 4 種類の無方向性電磁鋼板をインナーおよびアウトローター型構造のモータに採用した場合のモータの電磁気性能と機械強度を評価。評価周波数は 50~1000Hz。インナーローター型では、ロータ鉄損の比率はトータル損の 5%、アウトローター型では 10~20%であった。トータル損はアウトローター型より若干低い。

・Low thickness NGO FeSi electrical steel for high frequency automotive applications (サウスウェールズ大：英) 薄肉電磁鋼板による車載駆動モータの設計技術に関するレクチャー。

・無方向性電磁鋼板の先端製造技術 (企画セッション)

無方向性電磁鋼板の最新の製造技術に関して以下の 5 件の講演があった。① QSP-DUE - Danieli's ultimate technology for non-oriented electrical steel production (Danieli Germany 社：独)、② Innovative solutions for Continuous Cold Rolling and Annealing & Pickling Line of high-quality NGO-ES grades (RINA Consulting 社：伊)、③ Cold rolling technologies for successful production of NGO thin-gauge electrical steels (Primetals Technologies Austria 社：奥)、④ Advanced Heat Treatment Lines for Production of NGO Electrical Steel (Tenova LOI Thermoprocess 社：独)、⑤ Coatings and Coating Equipment for High Grade NGO Electrical Steels (Rembrandtin Coatings 社：独)

2.2. 電磁鋼板以外の磁性材料に関する講演の概要

・New Trends in the Amorphous and Nanocrystalline Soft Magnetic Ribbon Market (Metglas 社：米) 配電トランス用 Fe 基アモルファス材料、トランスコア製造技術、ナノ結晶合金材料と市場分野についての紹介。トランス用アモルファス材料は磁区微細化技術を導入し実用化。電磁鋼板で適用されている、レーザスクライビング技術をアモルファス材に応用したプロセス。アモルファスモータ用コア製造技術について種々の加工プロセスを継続し検討しているが、エンジニアリングの観点から大量生産に有効な手法の確立には至っていない。ナノ結晶材の応用分野は高周波スイッチングが必要なパワーコンディショナーなど。

・Overview of SMC characterization for their adoption in electromechanical systems (トリノ工科大：伊) 圧粉磁心の材料評価技術を中心に解説。

• **Soft magnetic materials for highest power densities and related part production technologies** (VACUUMSCHMELZE 社：独) Fe-Co 系高飽和磁束密度バルク鋼板の磁気特性と高出力密度モータへの応用について。VAC 社で開発した Fe-Co 薄板合金の積層技術ならびに省 Co(17%)FeCo 合金の磁気特性と高密度モータ応用への可能性について紹介。

• **Novel bonded neo magnets to achieve the lighter, smaller and efficient motors** (Neo Performance Materials 社：加) 等方性 Nd-Fe-B 系ボンド磁石 (MQ1) とリング磁石の最新技術の紹介。車載用途市場が 58% (IPS、ウォーターポンプ他)、HDD スピンドルモータ用途が 10%。等方性磁石の利点を活かした分野に展開しつつ、異方性ボンド磁石用の粉末の開発にも注力し MQA シリーズとして商品化している。

• **ポスターセッション** ポスターセッションでは 8 件の論文のショートプレゼンテーションが実施された。磁石材料に関して、フラウンホーファー研究所 IWKS とダルムシュタット工科大が共同で進めているプロジェクトについて 2 件の講演があった。

• **Optimizing the properties of recycled rare earth permanent magnets through microstructural engineering** (フラウンホーファー研究所 IWKS：独) 磁石のダイレクトリサイクル技術、希土類水素化物を利用した省重希土類磁石の作製。

• **Heavy rare earth lean magnets by optimized processes: Strip casting of Nd-Fe-B alloys** (フラウンホーファー研究所 IWKS：独) ストリップキャスト製造装置を開発し、均一微細な重希土類フリー磁石を作製した。現在、省重希土類高性能磁石の開発を目的とした発展ステージのプロジェクトが進められている。

### **3. 磁性と磁性材料に関する国際会議 MMM2020**

オンラインで開催された IEEE Magnetics 主催の磁性と磁性材料に関する国際会議 MMM2020 ではシンポジウム 9、オーラル 61、ポスター 34 のセッションが企画実施された。うち、希土類-遷移金属-ボロン系磁石 (Ce,La,Y 置換、2 合金法、3D プロセス、保磁力の理論解析、など)、Sm 系磁石 (1-12 系、1-5 系、2-17 系など)、希土類フリー磁石 (FeNi, MnAlC など)、ナノ結晶磁石材料 (Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>)、アモルファス・ナノ結晶軟磁性材料 (薄帯、ナノワイヤー、デバイス用薄膜など) のセッションに参加し技術動向を調査した。

#### **3.1. 希土類-遷移金属-ボロン系磁石に関する講演の概要**

**C2-01. 招待講演 Finite-Temperature Dynamical and Static Properties of the Nd Magnet Studied by an Atomistic Modeling.** (M.Nishino ら NIMS：日本) 第一原理計算、KKR グリーン関数法をベースに、マイクロマグネティックシミュレーションを用いて NdFeB 焼結磁石の保磁力のメカニズムを考察。特に表面からおこる磁化反転をシミュレート。磁壁プロファイルの温度依存性を示した。

**C2-02. Revisiting, Understanding, and Predicting Magnetism and Magnetic Anisotropy of RE<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (RE = Rare Earth) From Electronic Structure.** (AMES 研：米) NdFeB 焼結磁石の保磁力の第一原理計算による理論解析。Ce,La 置換磁石の磁気異方性エネルギーと全磁気モーメントを計算し、Ce、La 置換を検討。

**C2-03. Application of Systems Level Modeling for Addressing Criticality in Rare Earth Permanent Magnets.** (AMES 研：米) バインダーとともに 3D プリンティングし、238℃で着磁した NdFeB ボンド磁石のモータ性能を評価。

Ce などクリティカリティの少ない元素への置換が狙い。

**C2-04. 招待講演 Nucleation and Coercivity Analyses on the Atomistic Spin Model of Permanent Magnets.** (Y. Toga 東大、ESICMM：日本) 原子レベルのスピンモデルをベースに、マルチスケール化と直接解析で保磁力を解析。表面或いは相界面からの逆磁区の発生と拡大が保磁力を支配する。保磁力と温度の関係：表面の影響と熱活性化が実際の保磁力を異方性磁界よりも低下させる

**C2-05. Cold Spray Additive Manufacturing of Permanent Magnets.** (ローレンスリバモア国立研究所：米) コールドスプレー 3D プリンティングの試み。NdFeB パウダーを融点以下で 500℃以下の高速ガスで吹き付けると凝着する。もともとは局所修繕技術を大型マグネットの造形に適用。プロセスと特性の最適化が必要。

**C2-06. Upscaling of the Novel 2 Powder Method for the Manufacturing of Heavy Rare Earth-Lean Permanent Magnets.** (フラウンホーファー研 IWKS：独) Dy 合金を副相とした 2 合金法による焼結磁石の保磁力の向上の検討。Dy 相を粒界付近に配するのに粒界拡散法のような厚さの制限がなく 10cm 厚も可能。(Nd<sub>22.7</sub>Pr<sub>7.3</sub>)<sub>302.x</sub>Dy<sub>x</sub>Febal. Co<sub>1.9</sub>Tm<sub>0.32</sub>B<sub>0.91</sub> の粗いパウダー主相 + 異方性 Dy<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> 細かい副相など。保磁力は 770kA/m 以上まで上がり、磁化の低下は 0.03T 程度。

**C2-07. Nd-Fe-B Based Permanent Magnetic Materials Design for Additive Manufacturing: 3DREMAG.** (ダルムシュタット工科大：独) レーザーにより NdFeB 粉末を溶融させ 3D マグネットを形成。歩留まりよく短いリードタイムで製造が可能。磁気特性評価は今後。

**C2-08. Understanding the Enhancement in Hard Magnetic Properties of Rapidly Solidified (Nd, Pr)-Fe-B Melt-Spun Ribbons.** (AMES 研：米) Dy フリーで NdFeB 焼結磁石の保磁力確保を目的とし、組織微細化に及ぼす TiC の影響を評価。(NdPr)<sub>x</sub>Fe<sub>14</sub>B の x を 2.1 ~ 2.3 と化学量論組成から微妙に変化させ DSC、TGA 測定によりキュリー温度への影響を評価。

**C2-09. Magnetic Properties of R<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B Sintered Magnets Substituted 50 at Substitution of Nd With Y and Ce.** (Y. Enokido ら TDK：日本) 省 Nd の観点から Nd を 50% Y と Ce で置換し、粒界相を制御した焼結磁石を評価。BH<sub>max</sub>=44.6MGOe などの特性が得られた。粒界の R<sub>2</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 相は Nd<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 相に比べ磁化が高く保磁力を下げる。RFe<sub>2</sub> 相で粒界相を覆うことで保磁力が上がる。

**C2-10. Manifestation of Initial Crystallization and c-Axis Texture in Pr-Fe-B Thin Films Grown on Glass Substrates.** (元智大：台湾) Pr<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 薄膜の結晶成長挙動を評価。

#### **3.2. Sm 系磁石に関する講演の概要**

**H3-01. 招待講演 Intrinsic and Extrinsic Properties of Sm(FeCo)<sub>12</sub> With ThMn<sub>12</sub> Structure.** (Y. Takahashi NIMS：日本) SmFe<sub>12</sub> 相は相安定性而非磁性粒界相が課題。Ti を入れると安定化しバルク材料が得られ、Co はキュリー点を上げ相を安定化する。Zr は磁化を上げる。N や C の添加は保磁力やキュリー温度を上げる。Cu-Ga の粒界拡散 (+ 熱処理) で保磁力は向上する (0.84T)。単結晶薄膜で Sm(Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>12</sub> の磁化の温度依存性と異方性定数を評価。バルク化にはさらなる保磁力の向上とプロセス開発が必要。

**H3-02. Study on Phase Relations of Sm-Fe,Co-Ti-(Ga)**

**System Towards Development of SmFe<sub>12</sub>-Based Permanent Magnets.** (S. Ashok Krishnaswamy ら NIMS、筑波大：日本) SmFe<sub>12</sub> 系に非磁性粒界相を形成させ、実用で求められる 1T 以上の保磁力を得るために Sm-Fe,Co-Ti-(Ga) 系の状態図を実検討。Sm-Fe,Co-Ti 系では非磁性粒界相は得られず、Sm-Fe,Co-Ti-Ga 系では可能性がある。

**H3-03. Combinatorial Study of Sm-Co-Ti Amorphous Hard Magnet Thin Films.** (ウプサラ大：スウェーデン) 約 40nm 厚の Sm 22~40at%、Co 55~74at%、Ti 2~5 at% の傾斜組成をもつアモルファス薄膜を作成し、その保磁力等、磁気特性を評価。

**H3-04. Micromagnetic Simulation Study on Coercivity in CeCo<sub>5</sub> Magnet.** (AMES 研：米) CeCo<sub>5</sub> バルク磁石は保磁力向上が課題。粒界に Sm をドーピングし、粒界に (Ce,Sm) Co<sub>5</sub> 相を形成しコア-シェル構造とすることで保磁力が向上する可能性がある。

**H3-05. Design of Sm-Fe-N Magnets.** (T. Saito 千葉工大：日本) Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>3</sub> バルク磁石化の検討。放電プラズマ焼結 (SPS) 法で検討。特性は製造条件に依存するが、いずれも  $\alpha$ -Fe と SmN が含まれるなど保磁力が小さかった。これに Zr 粉末を加えると飽和磁化、保磁力ともに向上。圧縮せん断法での作製も試みた。

**H3-07. Nitrided ThMn<sub>12</sub>-Type Compounds for Sustainable Advanced Manufacturing.** (BCMaterials：西) Nd<sub>11</sub>Fe<sub>10.5</sub>Mo<sub>1.5</sub>N<sub>x</sub> 磁石粉末と絹とセルロース母相からなる磁気インクをスクリーンプリンティング。

**H3-08. Production of Sm(Fe,Ti)<sub>12</sub> Magnets by hot Deformation.** (Y. Ogawa ら 千葉工大：日本) 放電プラズマ焼結 (SPS) 法で製造した Sm(Fe,Ti)<sub>12</sub> 磁石にさらに 700~900℃ で熱間圧縮加工し磁気特性を評価。結晶粒は等方的で  $\alpha$ -Fe も少し含まれ、磁気異方性は僅かであった。

**H3-09. Grain Boundary Segregation, Phase Formation, and Their Influence on the Coercivity of Rapidly Solidified SmFe<sub>11</sub>Ti Hard Magnetic Alloys.** (ダルムシュタット工大：独) 吸引鑄造と熱処理で製造した Sm(Fe,Ti)<sub>12</sub> 磁石の粒界を評価。隣接する結晶粒は磁氣的に遮蔽されていないことが確認された。

**H3-10. 招待講演 Recent Advances in SmFe<sub>12</sub>-Based Hard Magnetic Materials.** (H. Sepelri Amin ら NIMS：日本) NIMS での最近の SmFe<sub>12</sub> 基の磁性材料の研究開発状況を概観。Sm とのコスパッタで B をドーピングした Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜は粒径約 40nm のグラニューな組織を呈し、0.5B の時に保磁力  $\mu_0 H_c = 1.2T$  が得られる。このとき、粒界相は約 3nm 厚のアモルファスであり Co 濃度は低下している。またこの B をドーピングした Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 薄膜は 227℃ までの保磁力の温度依存性が低い。熱間加工した SmFe<sub>12</sub> 基粉末 ((Sm,Zr)(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub>、Sm(Fe,Co,Ti)<sub>12</sub>) に、Ga や Cu などの低融点合金を拡散させ、磁気特性等を評価した。HDDR プロセスで作った微細粒は単磁区粒に近いが、粒界相がないため保磁力が低い。粒界相の候補を 4 元系状態図から検討した。Sm(Fe<sub>0.8</sub>Co<sub>0.2</sub>)<sub>12</sub> 系磁石で保磁力を上げるには、まず粒界相が必要で、B ドーピングで得られた粒界相については、磁化をさらに下げなければならない。

**H3-13. The Influence of Grain Size on the Internal Oxidation of Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> Sintered Magnets.** (バーミンガム大：英) Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> のさらに高温での適用を考えた場合、酸化防止を考えなければならない。結晶粒、組成に加え、結晶

方位を考慮した内部酸化層 (IOZ) 形成による制御を試みた。**H3-14. Epitaxy Induced Controlled Phase Separation in Y-Co and Sm-Co Thin Films.** (ダルムシュタット工大：独) RCo<sub>5</sub>、R<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> (R=Sm,Y) 両相を含む薄膜を分子線エピタキシー法で c 軸方向に成長させ構造を確認。結晶方位を制御した相界面のデザインや特性評価などに応用が可能。

### 3.3. 希土類フリー磁石に関する講演の概要

**Q1-01. First-Principles Investigation of the Impact of Chemical Order on the Magneto-Crystalline Anisotropy in L<sub>10</sub> FeNi.** (チューリッヒ工大：スイス) L<sub>10</sub>-FeNi 超格子の磁気異方性エネルギー (MAE) への規則度の影響を第一原理計算。MAE は規則度 0.75 程度で飽和する。

**Q1-02. Extrusion Based 3D Printing of Partially Transformed Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>/Fe Flakes Into Permanent Magnet.** (サバンチ大：トルコ) 10  $\mu$  m の鉄粉にボールミリングで結晶異方性を付与し、Ar/H<sub>2</sub> ガス中 400℃ で還元し、アンモニアガス中 160~190℃ で窒化した Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>=57%、Fe<sub>3</sub>N=10%、Fe=33% の粉末を用いて 3D プリンティング。保磁力が 350 Oe から 997 Oe に増大。

**Q1-04. 招待講演 Novel Database Driven Method for Discovering New Co-Based Ferromagnets.** (カルフォルニア大：米) Co 系化合物約 1 万種に特化したデータベース。SmCo<sub>5</sub>、Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> は高温や厳環境で使用されている。フェロ磁性体 1389 種のうち、TaCo<sub>2</sub>Ga、La<sub>6</sub>Co<sub>11</sub>Ga<sub>3</sub>、LaCo<sub>13</sub>Bi など候補材料 38 種を抽出し、磁石を作成し評価している。**Q1-05. Investigation of Magnetic and Electromagnetic Properties of Cobalt Substituted M-Type Barium Hexaferrite in X-Band.** (ISRS：印) Co 置換した M タイプ Ba フェライト磁石 BaCo<sub>x</sub>Fe<sub>12-x</sub>O<sub>19</sub> を評価。

**Q1-06. Formation and Magnetic Properties of  $\tau$ -MnAlC Synthesized by Spark Plasma Sintering Process.** (ダルムシュタット工大：独) 放電プラズマ焼結 & 熱処理法で作製した L<sub>10</sub> 型  $\tau$ -MnAlC 磁石の評価。ギャップ磁石の位置づけ。

**Q1-07. Recent Progress in the Development of MnAl-C Magnets.** (IFW ドレスデン：独) 等方性 NdFeB ボンド磁石代替として  $\tau$ -MnAlC 磁石を評価。保磁力と BH<sub>max</sub> の向上が必要。

**Q1-08. Rare-Earth-Free MnAl-C-Ni Permanent Magnets With State-of-the-Art Properties, Produced by Extrusion of Milled Powder.** (IFW ドレスデン：独) MnAl-Ni-C 磁石を、粉末の熱間押し出しで作製評価。BH<sub>max</sub>=46kJ/m<sup>3</sup> でフェライトより高く、ボンド磁石並み。

**Q1-09. Novel Ferrite Materials Possessing Record Magnetic Hardness.** (Skoltech：露) 磁気記録材料として  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を検討。

**Q1-10. 招待講演 Modern FORC Data Analysis and Interpretation Approaches.** (マックスプランク研究所：独) 磁気特性の FORC 解析の意義を汎用性の観点から概説。

**Q1-11. Hard Magnetic Properties of FeCoNiAlCu<sub>x</sub>Ti<sub>x</sub> Based High Entropy Alloys.** (NAVSEA：米) AlNiCo 磁石への Cu,Ti 添加の検討。保磁力増大に寄与。ハイエントロピー合金 (5 元素、各 5at% 以上、金属間化合物を除く) の一種。Fe<sub>2</sub>CoNiAlCu<sub>0.4</sub>Ti<sub>0.4</sub> 磁石は Alnico2 磁石よりも特性が向上し、保磁力 H<sub>c</sub>=10800e、BH<sub>max</sub>=2.06MOe を示した。温度依存性が小さく 200℃ でも室温の 90% の保磁力と BH<sub>max</sub> を示す。

**Q1-12. Sub-20nm Rare-Earth Free Ferrimagnetic Films**

Fabricated by Reactive Sputtering. (バージニア大:米) Mn<sub>2</sub>N、GdCo スパッタ薄膜を作成。高密度データ記録材料として磁気スカーミュオン(連続場に生じる位相幾何学的に特徴のある渦のモデル)を確認し、利用検討の予定。

### 3.4. ナノ結晶磁石材料に関する講演の概要

D4-04. Critical Particle Size of  $\alpha$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> Nanoparticles Prepared by Low-Temperature Nitriding. (ミネソタ大:米)  $\alpha$ -Fe と  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のナノ結晶を 180℃以下の低温窒化で 93%の  $\alpha$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> が合成された。 $\alpha$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> を得られるナノ結晶サイズは厚さ 10~15nm 直径は 20~10nm の範囲。  
D4-05. Magnetocrystalline Anisotropy of Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> Under Various DFT Approaches. (ミネソタ大:米)  $\alpha$ -Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub> の結晶磁気異方性を第一原理計算により解析。

### 3.5. アモルファス・ナノ結晶軟磁性材料に関する講演の概要

H1-01. Fe-ETM-Nb-B (ETM = Cr, Mn) Glassy Alloys for Energy Recovery. (NIRDTP:ルーマニア) Fe<sub>79.7</sub>Cr<sub>x</sub>Nb<sub>0.3</sub>B<sub>20</sub>、Fe<sub>79.7</sub>Mn<sub>x</sub>Nb<sub>0.3</sub>B<sub>20</sub>、など Cr、Mn を添加したガラス金属メルトスパンリボンを用意し、キュリー点など結晶構造、機械的特性、磁気的特性、熱力学的特性に及ぼす添加量の影響を評価。

H1-02. Investigating Hidden Devitrification Pathways in the Fe-Si-B System Without Alloying Additions. (ノースイースタン大:米) ナノ結晶の遷移添加元素等の影響を整理考察。Bs を上げるためにより少ない添加量でナノ結晶化を図りたい。遷移金属を添加しない Fe-Si-B 合金のリボンやマイクロワイヤーは遷移金属を添加した金属ガラス(アモルファス)とは異なる失透、ナノ結晶化挙動を示す。

H1-03. Effects of Magnetostriction on Domain Wall Dynamics Inside Multi-Grains Soft Magnet Revealed by Micromagnetic Simulations. (H. Tsukahara ら KEK、AIST:日本) 多結晶軟磁性材料における磁壁移動を、LLG 方程式を用いてシミュレート。結晶粒界の存在は、結晶粒間の傾角が大きくなるほど外部磁界の違いとその動きが大きくなり、磁壁移動に伴うエネルギー損失を増大させる。また、外部引張応力はエネルギー損失低減し、外部圧縮応力はエネルギー損失を増大させる。

H1-04. Iron Loss and Magnetic Properties of Amorphous and Nanocrystalline Ring Core Under Inverter Excitation on the Order of MHz. (A. Yao ら AIST:日本) ナノ結晶(FT-3M)とアモルファス(SA-1)のリングコアのインバーター MHz 高周波励磁時の鉄損と磁気特性を実評価。ナノ結晶リングコアの損失は、アモルファスリングコアの損失に比べ、不感時間に起因する鉄損が減少することにより低くなる。

H1-05. Local Coercivity at X-Rays Nanobeam Irradiated Regions in Amorphous Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> Stripes. (CSIC:西) Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> のアモルファスに X 線マイクロビームを照射すると局所的な磁気異方性のため保磁力が増大する。

H1-06. Soft Magnetic Properties of Co-Based Supersaturated Solid Solutions by Severe Plastic Deformation. (OeAW:奥) Co72wt% -Cu、Cu<sub>20</sub>(Fe<sub>15</sub>Co<sub>85</sub>)<sub>80</sub> などに Co 基軟磁性

材料に高圧せん断成形で高歪成形を行い、過飽和固溶体のナノ結晶組織を形成させ軟磁気特性を評価。Fe の添加は軟磁気特性を向上させる。

H1-07. 招待講演 Tunable Magnetic Anisotropy in morphous-Fiber-Based Structures for Multiferroic Applications. (バルト連邦大:露) モバイルのデバイス用途を念頭とした Fe<sub>77.5</sub>Si<sub>17.5</sub>B<sub>1.5</sub> のガラスコートされたアモルファスマイクロワイヤー。動作周波数は 50~60kHz。今後の課題はワイヤーの体積分率の増大と、ガラスコートとの界面接合の改善。

H1-08. Exceptional Magnetomechanical Response of Glass-Coated Amorphous Microwires. (ノースイースタン大:米) Fe<sub>73</sub>Si<sub>11</sub>B<sub>13</sub>Nb<sub>3</sub> のガラスコートされたアモルファスマイクロワイヤーのバイオセンサー用途への適用検討。動作周波数は 45kHz。比較材料は Metglass アモルファスリボン。

H1-09. Control of the Length of Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>B<sub>9</sub> Microwires to be Used for Magnetic and Microwave Absorbing Purposes. (IMA:西) 磁気とマイクロ波(4~16GHz)吸収体用途の Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub>B<sub>9</sub> のアモルファス磁気マイクロワイヤーの、長さ特性をボールミリングと熱処理で最適制御。

H1-11. Depth Profiling Study of Magnetic CoFeB Thin Film. (デビアヒルヤ大:印) アモルファス CoFeB 薄膜に熱処理を加え特性評価。スピン軌道トルクを利用した低電力スイッチングデバイス用途を念頭。

H1-12. Magnetism and Transport Signatures in Amorphous Transition Metal Silicide and Transitional Metal Germanide Thin Films. (ローレンスバークレー国立研:米) Fe<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>、Fe<sub>4</sub>Ge<sub>1-x</sub> アモルファス薄膜。異常ホール伝導率を示す。

H1-13. The Improvement of the CoZrTaB Thin Films on Different Substrates for Flexible Device Applications. (アリゾナ州立大:米) CoZrTaB 薄膜。フレキシブルデバイス用途。インダクターなど。

H1-14. Magnetic Metal Oxide Nanoparticles for a Remote 3D Thermometry Platform. (NIST:米) Zn、Co を添加した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ結晶。直径 9-11nm。医療用 3D トモグラフィイメージング機器用途。Zn は交流での磁化を増大し、Co を添加することでサイズの制御と併せてセンサー動作温度域の調整ができる。

H1-15. Temperature Dependence of the Dzyaloshinskii-Moriya Constant in Ultrathin Pt/Co(Fe)B/Ir Films. (リーズ大:英) Pt/Co(Fe)B/Ir 薄膜の特性の温度依存性評価。スカーミュオンの利用を念頭。

## 4. まとめ

WMM2020 では電磁鋼板を中心とする実用軟磁性材料と評価応用技術を中心に、MMM2020 では新規磁性材料の研究フェーズのトレンドを中心に、それぞれ概観することができた。モビリティの電動化、パワーエレクトロニクス技術の進展、IoT デバイスの適用拡大等に向け、その高性能・高効率・小型化に寄与するこうした磁性材料とソリューションへの期待は高い。

The Japan Research and Development Center for Metals  
JRCM NEWS / 第 413 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 2021年3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

T E L (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](mailto:jrcm@oak.ocn.ne.jp)