

TODAY

「先進製造技術」における金属積層造形技術の役割



東北大学 金属材料研究所
加工プロセス工学研究部門
教授 千葉 晶彦

製造業は世界的に生産コストの安い国外生産から、国内生産に回帰してきているという。世界の工場としてこの四半世紀にわたって君臨してきた中国での製造コストが上昇傾向にある。加えて、その生産能力が、低付加価値製品から高付加価値製品へと拡大してきた。このため、先進国においても自国の産業基盤の保護、雇用の確保などの観点から国外生産から国内生産に切り替えて、製造プロセスのグローバル化、高価値製造のためのもの作り技術（先進製造技術）をこれまで以上に重視する政策をとり始めているからだという。

その代表的な国であるアメリカは、情報通信技術を駆使して国内の製造業の再生を国策として推進している。その基本戦略は、物のインターネット（IoT）を基調とする「先進製造技術」の確立であるとされている。製造業は、素形材技術、すなわち、溶解・鋳造、鍛造、粉末冶金、切削加工、溶接・接合技術などの多くの加工プロセス包含しており、「職人」の匠の技に依存する部分が多く存在する。一朝一夕に製造業を国内に回帰させ、経済の再生に役立てるといふ戦略は至難の業であるといえよう。

このような文脈において、3Dプリンター金属積層造形技術について考えてみたい。金属積層造形技術は、製造部品の3次元のCADデータがあれば金型なしで、どのようなデザインでも制約がなく成型ができるネットシェイピング技術であり、同時に金属合金部品の高強度化にとって必須な金属組織制御の可能な加工プロセスである。前者については、よく知られているが、後者の機能を併せ持つことはほとんど知られていない。熱源（電子ビーム・レーザービーム）の条件（エネルギー密度、走査速度、走査間隔など）や熱源の走査パターンなどを熱流動や凝固学的な合理性に基づいて最適化することで、まだまだ発展途上ではあるが、複雑な冶金学的なプロセス、例えば、熱間鍛造による組織微細化や偏析除去、さらには単結晶製造などが可能な金属部品製造プロセスとしての機能がある。この機能を用いると、一つの部品の金属組織を部位によって選択的に形成制御が可能となる。例えば、ガスタービンディスクの中心領域を等軸な微細結晶粒として高強度化する。一方、周囲は高温にさらされるために、柱状晶が単結晶とすることで、単結晶タービンブレードとディスクとを一体化させて製造することも可能である。

このような加工プロセスが可能となれば、飛躍的な軽量化や耐熱強度の向上が期待できる。

金属積層造形技術の基本は、素形材生産の基本と同様に溶融凝固プロセスである。しかし、金属積層造形ではCADデザインに基づく一層一層の数 μm 規模の局所領域の選択的な溶融凝固プロセスであり、局所領域（メルトプール）の溶融凝固現象を高精度に制御して積み上げる技術（インクリメンタルキャスト）であると言える。大量に溶融金属を製造して、一度に大型の鋳塊を得る従来型の金属生産プロセスとはこの点が決定的に異なる。最新の、モニタリング技術や制御技術を駆使することにより、メルトプールに発生する欠陥や凝固の際の微細結晶組織までも制御して、各種の素形材製品や機械部品を自由な形状デザインにネットシェイプで生産する新規な加工プロセスとして進化させることが可能である。

以上の理由により、金属積層技術は先進各国が目標とする未来の製造技術である「先進製造技術」、「考える工場」を実現するうえでの革新的なキーテクノロジーとして位置付けられている。アメリカの製造業再生プランでは、上述した金属積層造形技術の革新性に注目し、より進化させてIoTにつなげることにより、製造業そのものを最新の情報通信技術のプラットフォーム上で行う「先進製造業」の創生を目指している。高度な金属積層造形技術開発と普及がアメリカの製造業再生にとって国策上重要なイノベーション戦略とみなされている理由がそこにある。

日本では、一部の製造業分野を除いては、積層造形技術については慎重な姿勢を崩していない。日本が伝統的に強いとされる精密鋳造、金属加工、機械加工、粉末冶金技術などと金属積層造形技術とを比較して優劣を議論する場合がほとんどである。その姿勢が問題と言うわけではないが、金属積層造形技術の発展の先にあるものかもしアメリカをはじめとする先進国の目指す「先進製造業」であるとするならば、日本の製造業として、このままの姿勢を貫き通せるのであろうか、疑問と不安に駆られるところである。

今後のトレンドとして、金属積層造形技術はアメリカやヨーロッパの先進国が目指す「先進製造技術」としてコアとなるもの作り技術として発展することは間違いない。我が国の製造業が、情報通信技術のプラットフォームによって支配するもの作りを目指すアメリカの後追いをすることなく、従来の日本の強みを発揮できる製造業として発展させられるのかどうか、今後の日本の物づくり技術開発の戦略が問われているのではないだろうか。

Intermag2016 国際会議に参加して

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 山内 清隆

1. はじめに

JRCMでは、平成24年度より10年間の予定で開始された新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」プロジェクト(以下“MagHEM”)において、技術調査センターとして特許調査・技術調査活動を行っている。本調査活動の対象となる技術・材料は①永久磁石材料、②軟磁性材料、③モータである。この度、米国San DiegoにおいてIEEE主催のIntermag2016国際会議が、米国物理学会主催のMMM (Magnetism and Magnetic Materials) との共同で開催された。MagHEMから、上記①～③の技術調査を目的に同会議に参加したが、ここでは①②を主にその概要を報告する。



図 1-1 ヒルトンホテル概観



図 1-2 ポスター発表会場

2. 会議の概要

San Diego市は人口130万人、米国で8番目に大きな都市であり、気候が快適なことから治安が良いことから米国で最も住みよい街のひとつとして知られている。また、観光都市であり、米国太平洋艦隊の主要な母港としても知られている。会場となった、Hilton San Diego Bayfrontホテル(図1-1)は、空港からタクシーで15分くらいの海岸沿いにあり、観光地やDown Townに比較的近い位置にあるが、食事場所が遠く、物価が高いなど、国際会議の場としてはいささか不便を感じた。

本会議は、151のセッションからなり、参加者は約1700名、論文投稿数が2928件、採択率が62%と報告された。この数値は、前回(北京)の1750人、2532件、69%と比べて、参加者はほぼ同数で、投稿論文数が増え、採択率がやや下がったと言える。プレゼンテーションは、オーラル約10セッション、ポスター約10セッションがほぼ同時並行的に進められたため、調査対象のセッションが重複し時間調整に苦労する部分があった。以下、磁石材料および軟磁性材料の概要を記述する。

3. 磁石材料

磁石材料は、口頭5セッション、ポスター5セッションで120件超の講演があった。米国の研究機関からの講演が約35%、日本が26%、欧州22%、中国8%、その他8%という内訳であった。民間の磁石及び磁石原料製造メーカーからの発表は極めて少なく、大学や公的研究機関からの講演が大部分を占める。この傾向は、最近の国内開催学会と同様である。以下永久磁石関連の講演概要を示す。

3.1 希土類遷移金属*ライト*及び硬磁性金属間化合物

図3-1に地域別の講演件数の比率を示す。日本を中心とするアジア地域からの講演が54%を占め、次いで米国を中心とする北米地域が27%となっている。焼結磁石を中心とするNd-Fe-B系磁石に関する講演が相変わらず多いが、Ndの一部をCeで置換したCe基R-T-B系磁石の講演も目立つ。また米国の研究機関では、RCo5系やAlNiCo系磁石に関する材料研究が見直されている。日本では過去の磁石材料とみられているが、米国ではこれ

らの材料研究にも国から研究資金のサポートが受けられるということのようである。Sm-Fe-N磁石などの窒化物磁石に関する講演は、数年前に比べて激減している。

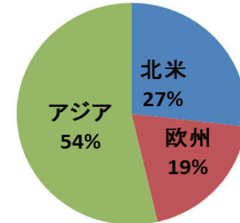


図 3-1 地域別論文比率 (希土類遷移金属*ライト*及び金属間化合物)

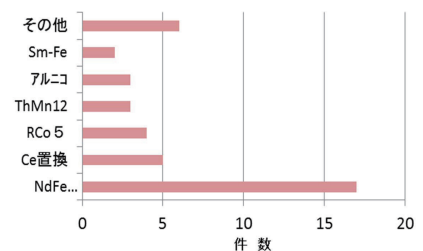


図 3-2 材料分野別発表件数 (希土類遷移金属*ライト*及び金属間化合物)

3.2 硬磁性材料*ロセス*及び応用技術

この分野でもアジア地域からの講演が54%と半数を占める。この分野のアジア地域からの講演は、中国6件、日本6件、韓国4件であり。中国と韓国からの講演も多いのが特徴である。

ただ残念ながら、この分野では特筆すべきブレークスルー技術に関する講演は見当たらなかった。

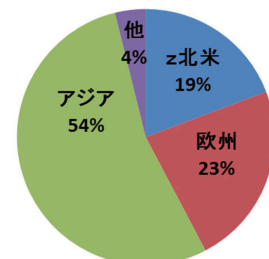


図 3-3 地域別発表件数 (硬磁性材料*ロセス*及び応用)

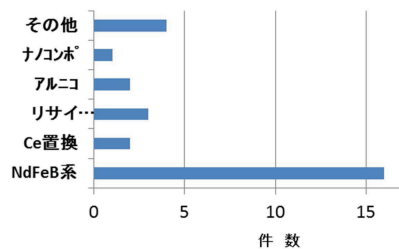


図 3-4 材料別発表件数 (硬磁性材料プロセス及び応用)

3.3 ナノ構造及びナノ粒子硬磁性材料

この分野では、北米地域からの講演が63%を占める。日本からの発表は2件にとどまっている。この背景には、国内でナノボジット磁石やFe-N磁石に関する材料及びプロセス技術に関する技術開発が、やや停滞していることが背景にあると推察される。一方欧米では、ナノ粒子やナノ構造複合磁石等の研究が注目されているようである。

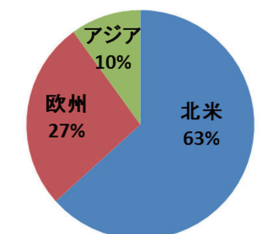


図 3-5 地域別発表件数 (ナノ構造・ナノ粒子硬磁性材料)

3.4 Mn系及びL1₀型硬磁性材料

欧米特に米国で、Mn系硬磁性材料に関する研究が精力的に実施されている。Mn-Al基、Mn-Bi基、Mn-Ga基、またそれらの材料を利用したナノボジット磁石の研究が盛んに行われている。その中でも、結晶磁気異方性定数が正の温度勾配を持つMn-Bi系材料が注目されている。

飽和磁束密度が高くない、硬磁性相の安定温度域が狭い等の本質的な問題があるが、複合磁性材料等へ展開して、保磁力の温度変化の小さい永久磁石としての可能性を持つということでは、今後の展開が注目される。

3.5 注目される論文の概要

3.5.1 Ga添加低B、Nd-Fe-B系焼結磁石

NIMS, トヨタ自動車、トヨタ中研等の共同研究に関し、3件の講演があった。高保磁力を発現するNd₆(Fe-M)₁₄相

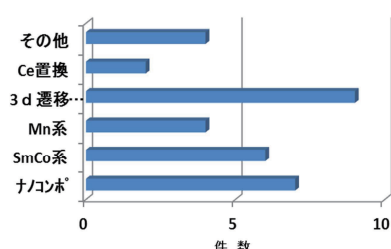


図 3-6 材料別発表件数 (ナノ構造・ナノ粒子硬磁性材料)

の役割が定性的にかなり明らかにされつつあるという印象を受けた。

3.5.2 ThMn₁₂型希土類化合物

静岡理工大とトヨタ自動車による非薄膜プロセスで、Ndの一部をZrで、Feの一部をCoで置換したSTC合金を出発原料とした、(Nd_{0.7}Zr_{0.3})(Fe_{0.75}Co_{0.25})_{11.5}Ti_{0.5}N_xで飽和磁化が1.68Tに達するという講演が注目される。非磁性元素であるZrでNdを置換しても磁気物性値が低下しないことは興味深い。今後の材料開発の進展が期待される。

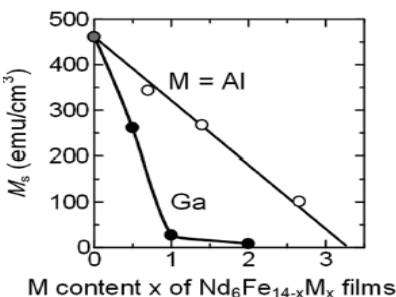


図 3-7 NdFe14-xM 膜の飽和磁化 (講演番号 AR-13)

3.5.3 Ce基磁石材料

MQ3型Ce-Fe-B磁石に、Nd-Cu合金を拡散浸透させたコアシェル構造磁石に関する発表が2件あった。磁石の希土類成分の50%をCeで置換しても、20kOeの高保磁力が得られると報告されている。

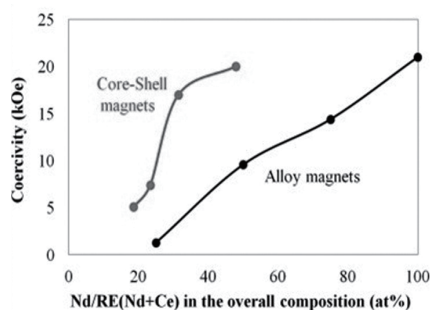


図 3-8 コアシェル型Ce置換磁石の保磁力 (講演番号 AH-06)

3.5.4 Mn基磁石

Mn基磁石の発表は、基礎的な金相学や物性に関する報告が主体であるが、テック大等のグループより、粉末プロセスで、高密度の圧粉磁石が得られたという報告があった。200℃で16kOeの高保磁力が得られるとのことである。

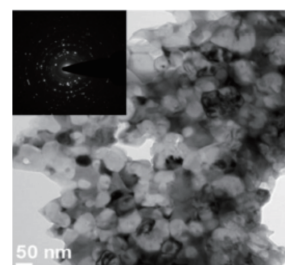


図 3-9 Mn-Bi 基磁石のミクロ組織 (講演番号 DH-09)

3.5.5 遷移金属化合物

Hf-Co, Zr-Co, Fe-Co-B等の材料が検討されている。これらの系では、結晶磁気異方性に基づく大きな保磁力は期待できないと考えられるので、永久磁石材料としての位置づけの評価が難しい面がある。

3.5.6 まとめ

磁石材料の発表件数や材料分野に関しては、前回のIntermagと大きな違いは無い。

日本の研究機関からの講演は、昨秋の磁気学会等で内容の一部が公開されているものが多い。海外研究機関では、Mn系材料や遷移金属間化合物などの研究も精力的に実施されている。

4. 軟磁性材料

軟磁性材料に関連する発表件数は106件あり、前回の北京大会(111件)とほぼ同件数と言える。

その国別の内訳を図4-1に示すが、中国、日本、韓国、インドなどアジア地区が約70%を占めている。前回の北京においてもほぼ同様の傾向であり、軟磁性材料に関しては近年アジア勢が活発に研究を進めていることがわかる。

また、発表機関に関しては、大学や公的研究機関からの発表が96%を占めており、民間からの発表は4%と非常に少ない。この結果が何を意味するかは定かでないが、現状は官民あげて注力すべき新軟磁性材料に乏しいことの裏返しとも考えられる。なお、軟磁性関連106件のうちで、

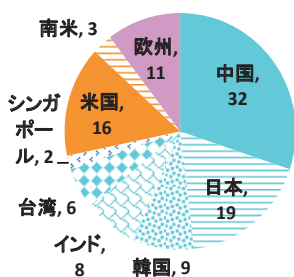


図 4-1 国別発表件数

46 件はフェライトや薄膜に関するものであり、本調査対象とは異なる内容が多く、それらを除く 60 件に関して以下材質別に発表の概要を示す。

4-1. アモルファス

アモルファス（金属ガラス含む）に関しては、表 4-1 に示す国から発表があった。アモルファス材料に関しては、材質の改良や基礎解析的な発表が多くトピックス的な発表はなかった。応用に関しては、豊田工大の藤崎研究室から、ラジアルギャップ構造のステータにアモルファスを用いた IPM モータの発表があり（講演番号 GQ-12）、電磁鋼板を用いた場合に比べて無負荷条件の鉄損が平均約 56% 減少したとの報告があった。

表 4-1 国別発表件数 (アモルファス)

アモルファス	件数
中国	3
日本	1
韓国	1
インド	1
欧州	1

4-2. ナノ結晶

ナノ結晶に関しては、表 4-2 に示す国から発表があった。日本からは、東北大学の牧野教授グループから飽和磁束密度が高いナノ結晶合金「ナノメット」に関する 3 件の発表（講演番号 GQ-13 他）があった。その他は、シミュレーションや基礎解析的

表 4-2 国別発表件数 (ナノ結晶)

ナノ結晶	件数
日本	5
米国	3
中国	2
韓国	1
独	1

な内容や、ファインメットの改良研究等に関する報告が多い。

4-3. 圧粉磁心

圧粉磁心は表 4-3 に示すように発表件数は多くない。

表 4-3 国別発表件数 (圧粉磁心)

圧粉磁心	件数
日本	2
中国	1
韓国	1
台湾	1

そのうちで、信州大学の B 社製のカルボニール鉄粉を用いた高周波用メタルコンポジット (SMC) が興味深く感じた（講演番号 DR-03）。SMC としては透磁率がやや低く課題を残すが、上記カルボニール鉄粉はナノ結晶組織をもち、VORTEX 磁区構造を有している点が特に興味深い。

その他特記すべき発表としては、東北大のナノメット磁性粉末と磁性金属ガラスを混合し、高透磁率と高強度を示す圧粉磁心（講演番号 FD-09）、Cheng Kung 大学（台湾）によるスタータ・ジェネレータの磁気回路に 3D プリンティングにより作製した複雑構造の圧粉磁心（講演番号 GY-09）などがある。

4-4. 新材料ほか

表 4-4 に新材料ほか（電磁鋼板含む）の国別発表件数を示す。

表 4-4 国別発表件数 (新材料他)

新材料ほか	件数
日本	7
米国	6
中国	6
韓国	3
その他アジア	4
欧州	7
南米	1

このうちで電磁鋼板関係が 8 件あり、日本からの発表が多かったが、その大部分は従来の方向性、無方向性電磁鋼板の改良に係わる内容であるが、少し変わった発表としてはインドの研究機関による低コスト化を目的とした Fe-P-Si 系電磁鋼板がある（講演番号 HD-10）。

新材料に関しては、Sandia

National Labs（米国）から窒化鉄 (γ' -Fe₄N) のバルク化に成功したとの報告があった（講演番号 FD-11）。ただ、窒化鉄粉末の作製法やバルク化の手法に関しての詳細は明示されず、トロイダル形状やトランス形状のコアの写真が複数示された。また、飽和磁化は $J_s=188\text{MA}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ であり、磁化曲線も示されたが保磁力はかなり小さいように読み取れた。 γ' -Fe₄N は本来結晶磁気異方性がかかなり大きいことが知られており、なぜ保磁力の小さな軟磁性を示すのかや、その作成方法に関しては今後継続して調査してゆく必要がある。

また、長崎大学からクエン酸液を用いた FeNi 合金膜の発表があった（講演番号 DR-12）。同めっき膜は膜の成長速度が速く（20 μm 厚を 10 ~ 20 分）、さらにナノ結晶組織を有しており軟磁性材料としては極めて興味深い。現在、Fe 量が 50% くらいまで成膜可能で、それ以上になると成膜が難しくなるとのことであるが、高周波用の磁性材料としては有望であるし、パワーレ用の軟磁性材料としても期待したい。

4-5. まとめ

次世代自動車向け高効率モータ用磁性材料という観点でみると、軟磁性材料セッションにおける発表件数はそれほど多くはないが、従来の電磁鋼板に加えて、アモルファスやナノ結晶に関連する技術が着実に進展していることが伺われ、また上述したような新しい軟磁性材料への萌芽となるような研究もはじまっている。今後、特許調査も含めて技術調査を深耕し、有望技術の見極めを行ってゆく所存である。



バルト沿岸のリガト地域

The Japan Research and Development Center for Metals

JRCM NEWS / 第 354 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 2016 年 4 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