

技術委員会より

JABM 理事 兼 技術委員長
元・三菱製鋼㈱
福田 方勝

技術委員会では、5月に技術例会（主にハード材料）、9月に技術例会（主にソフト材料）、12月にBMシンポジウムを開催しています。昨年5月に新型コロナウイルス感染症が感染症法の第5類に移行したことにより、対面での講演会が実施できるのではないかとということで、昨年5月の技術例会から対面とオンラインのハイブリッドで実施してきました。試行錯誤を繰り返しながら、9月の技術例会はそれなりに実施できましたが、12月のBMシンポジウムではオンラインで音声が届かないというトラブルが発生しました。あらためて、ハイブリッド開催の難しさを認識しました。

以下、第102回技術例会について簡単にまとめておきます。参加者は、講師、スタッフを含めて104名でした。講演内容についてはBMレポートを参照ください。

第102回技術例会：

「xEV高性能化およびICT促進に不可欠な軟磁性材料の開発動向とその応用」

日時：2023年9月7日（木）12：55～17：00

場所：アートホテル及びZOOMによるハイブリッド

1. Nd₂Fe₁₇N₃ 磁性材料の高周波特性

日亜化学工業 今岡 伸嘉

はじめに、GHz帯での広帯域電磁波吸収材料の開発について説明されました。Nd₂Fe₁₇N₃は面内磁気異方性であるので、共鳴周波数の計算式から11～84GHzでの電磁波吸収材料の可能性がります。還元拡散法により作製したNd₂Fe₁₇粉体を窒化し、リン酸皮膜処理を行い、樹脂混練し、熱プレスシート成形（ポリアミドエラストマーシート）を行いました。複素透磁率 μ'' の測定から、1～110GHzにおいて $\mu'' > 0.2$ となり、電磁波吸収材料として利用できます。

つぎに、MHz帯での磁場増幅材料の開発について説明されました。リン酸被膜処理の後、大気中で熱処理（380～500℃）することにより、粉体接触による粒子間の渦電流の発生による効率が低下する課題を解決しました。熱処理により被膜はヘマタイト層／リン酸Nd層に分離し、電氣的絶縁に寄与します。また、母材の外周がナノ α Fe相とナノNd酸窒化物相に分離し、電氣的絶縁と磁氣的連結による反磁界の抑制が可能となり、高周波特性が改善されました。熱処理後の粉体を16～20 μ mに分級することにより10MHzで μ' ～10が得られ、高周波磁場増幅特性が確認されました。

2. アモルファスワイヤの磁気特性測定方法

電子磁気工業 岩田 成弘

アモルファスワイヤの測定には以下の課題があります。①試料の断面積が小さく検出される起電圧が小さくノイズの影響が大きい。②試料を切断して測定するので反磁界の影響がある。これらを解決する測定法について説明されました。ワイヤ1本で交流磁界を印加することによりノイズの影響を小さくできます。アモルファスワイヤは比抵抗が大きいので、交流磁界測定による渦電流の影響は無視できます。ワイヤの直径と長さの比が非常に大きくなり、反磁界による影響は無視できます。以上により、アモルファスワイヤの磁化特性測定装置を開発しました。本装置は製造工程に組み込み易く、品質管理にも最適と考えられます。

3. Fe基金属軟磁性材料の開発

TDK 松元 裕之

Fe-B-Nb-P-Si-Crナノ結晶合金粉末における各元素の効果を調べ、高いBs(1.41T)で直流重畳特性の良い粉末Fe_{78.7}B₉Nb₆P₃Si₃Cr_{0.3}を開発しました。また、Fe-Co-B-P-Si-Crアモルファス合金粉末において、高いBsと高い耐食性を持った粉末(Fe_{0.7}Co_{0.3})₈₂B₁₁P₄Si₂Cr₁を開発しました。Bsは1.71Tであり、従来の高BsタイプFeSiBの1.69Tよりも高く、耐食性も優れています。

4. モータの高効率化に寄与するアモルファス積層コアの量産化

ネクストコアテクノロジーズ 金清 裕和

積層コアを製造するための、Fe-Si-B系アモルファス薄板（厚み0.030～0.045mm）を連続打抜きできる技術、重層打抜きによる効率改善、自動積層技術を開発しました。アモルファス積層コアをステータに用いたモータを試作し（ロータは電磁鋼板）、モータ性能を検証しました。試作したモータ“KAGURA”は、8極12スロット集中巻埋込磁石同期モータ（IPMSM）で、モータ外径は130mm、ステータコアの積厚は81mm、ロータコアの積厚は40mmです。既存モータに対して最大10%以上モータ効率を向上しました。回転数全域において鉄損の低減を確認し、高速回転時のモータ効率低下を改善できる可能性を把握しました。定格5kWクラスにおいて、出力密度1.2kW/kg、モータ効率 $\geq 98\%$ を達成しました。

5. 車載用小型リアクトルの開発－複層皮膜による圧粉磁心の高性能化－

豊田中央研究所 大坪 将士

車載用リアクトルは、電池からの電圧を昇圧して駆動用モータを高出力化できるCPUの構成部品です。コア、コイル、ギャップ板で構成されます。コアを圧粉磁心としたリアクトルを開発した経緯を説明されました。リアクトルはインダクタンス、損失、強度の並立が求められます。インダクタンスは規格の最大電流まで必要な値を維持する必要があり、磁化曲線の直線性（低透磁率化）が課題であり、厚くて均一な絶縁皮膜の形成をする必要があります。損失は従来材と同等である必要があり、高周波数域での渦電流損失の低減が課題であり、合金組成の検討をしたFe合金系の球状粉（＋絶縁皮膜）が有効です。コアの強度は従来材以上が必要であり、強度の向上が課題であり、絶縁皮膜を形成した粉末同士を強固に結合できる皮膜の形成が必要です。

これらの課題に対し、組成を最適化したFe-Si-Al系の粉末(Fe-

5Si-4Al) に対し、 Al_2O_3 皮膜と低融点ガラス皮膜の複層皮膜による圧粉磁心のリアクトルへの適用を検討しました。水アトマイズ粉末を 900°C 大気フローで酸化熱処理を行い、 Al_2O_3 皮膜が形成される組成を確認しました。500 nm 以上の Al_2O_3 皮膜により低透磁率化となり、合金組成と Al_2O_3 皮膜による比抵抗の増加により損失が低減しました (従来材の約 25% 低減)。低融点ガラス皮膜により強度が向上し (従来材の約 2 倍)、車載用リアクトルとしての体格も低減しました (前世代の 70%)。

つぎに、2023 BM シンポジウムについて簡単にまとめておきます。参加者は、講師、スタッフを含めて 137 名でした。講演内容については BM レポートを参照ください。

2023 BM シンポジウム :

「高性能磁石の評価方法および製法から応用まで」

日 時 : 2023 年 12 月 8 日 (金) 12:55 ~ 17:30

場 所 : アートホテル及び ZOOM によるハイブリッド

1. SQUID 高感度磁化測定装置 (MPMS) および高磁場 (16T) 物理特性測定装置 (PPMS) の紹介

日本カンタム・デザイン 池田 将洋

高感度磁化測定装置 MPMS[®]3 の装置概略、SQUID 検出回路、DC-SQUID による測定について説明されました。つぎに、DC Scan と SQUID-VSM の比較 (対象、利点) について説明されました。さらに、高磁場物理特性測定装置 PPMS[®] の装置概略、VSM 測定について説明されました。MPMS 3 と PPMS 磁化測定オプションとの比較、測定例を紹介されました。

2. 有限要素法による磁界解析を用いた反磁界補正法

富士通 星名 実 ほか

磁化曲線の測定・解析においてパーミアンス法による反磁界補正が行われていますが、反磁界の分布が考慮されていないため、実際の閉磁路曲線よりも角型が悪くなります。これを解決するために、有限要素法で反磁界分布を考慮した高精度な反磁界補正手法の確立と、非一様磁石における反磁界補正法の確立を目的としました。

有限要素法による反磁界補正として逆解析を組み合わせる手法では、閉磁路測定の磁化が \tanh 関数で表されると仮定して反復計算を行いますが、 \tanh 関数から外れる場合は反復計算が収束せず適用できません。閉磁路曲線の形状を仮定せずに探索できる「逐次代入法」を導入しました。計算結果の例として、加工表面劣化磁石への適用を説明されました。加工劣化表面の影響を除去した磁化曲線を求めることができました。

※加工表面劣化については、実際の磁石において存在しているもので、その影響を除去する必要はないという意見もありました (質疑応答、アンケート)。

3. 塑性加工法を利用した $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 磁石の成形手法の可能性

産業技術総合研究所 細川 明秀

はじめに、塑性論の概略を説明されました。つぎに、高圧ねじり加工

の結果について説明されました。 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ の粗粉末をディスク状に圧密成形し、高圧ねじり加工した結果、Sm-Fe-N 粉末を室温で固化成形することができ、90 ~ 95% の相対密度が得られました。ただし、磁場配向はできず、集合組織化も起こりませんでした。さらに、改良型粉末圧延法について説明されました。粉末をシースに挿入し、磁場配向させ、シースを圧着・封入し、熱間圧延 (室温 ~ 600°C) を行うものです。スケールアップの可能性はあるものの、ひずみ量に限界があり、十分な緻密化はできませんでした。

4. Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた高トルク IPMSM に関する検討

○日亜化学工業 吉田 理恵

秋田大学 吉田 征弘

開発した高 Br、高 Hcj の $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ ボンド磁石を用いた高トルク IPM モータの実現を目標としました。①磁石形状を V 字型から U 字型へ変更することで磁石の表面積を向上させる ②最適な金型設計で高い配向磁場を確保して配向率をアップする ③磁石スロットに磁石材料をギャップなく充填することでマグネットトルクをフル活用する、というアプローチを取りました。

磁石の性能を最大限活用する十分な配向磁場を確保できる金型形状を電磁場解析により決定しました。高 Br、高 Hcj 磁粉を用いたボンド磁石を用いて射出一体成形 IPM ロータを作製しました。解析値とほぼ同等の表面磁束密度が得られました。NdFeB 焼結磁石を用いた V 字型回転子と、開発した SmFeN ボンド磁石を用いた U 字型回転子のモータを解析により比較した結果、 20°C における平均トルク、 150°C における平均トルクはほぼ同等でした。今後、実機でのモータ評価が大いに期待されます。

5. 高性能フェライト磁石を用いた主機モータの検討

プロテリアル 相牟田 京平

モータの出力と直径を同等として、可能な限り積厚の増加を抑えたフェライト磁石を用いた主機モータを検討しました。高 Br フェライト磁石を適用し、リラクタンストルクの有効活用によりトルク低下を抑制し、不足分は積厚で調整することとしました。リファレンスモータは、ロータサイズ $\phi 200 - 140$ mm、モータ重量 36 kg、最大出力 110 kW です。解析の結果、外径と最大出力を同等とする場合、フェライト磁石を使用した場合はロータサイズ $\phi 200 - 200$ mm、モータ重量 48 kg と大きくなりました。また、ロータサイズとモータ重量を同等とした場合、回転数を増加させる (10,000 → 15,000 rpm) ことにより最大出力は 105 kW となりました。解析結果をもとに、フェライト磁石を用いてロータ形状を変えないで実機を製作した結果、100 kW を越えるモータの実現可能性が示されました。

6. 自動車の電動化を背景に、NdFeB 磁石が直面するチャンスと挑戦

煙台東星磁性材料 丁 開鴻

世界の新しいエネルギー車の開発はハイブリッド電源からバッテリー電源へ移行しています。2022 年までに販売台数は 1,000 万台を突破しています。今後 3 年間、世界の新しいエネルギー車の販売は引き続き年平均 30% という高い成長率を維持できる可能性があります。

2022 年の中国の希土類磁石の生産量は 25 万 2,000 トンで、

BM インフォメーション

2025年には28万5,000トンに達すると予想されています。新エネルギー車の主機モータには約3kgの高性能NdFeB磁石が必要であり、新エネルギー車の販売予測によれば、2025年までに新エネルギー車用の高性能磁石の需要は6万1,000トンになると予測されています。

Ceは希土類磁石の製造において用途が少なく、これが希土類資源の不均衡につながっています。粒界拡散法(GBD process)にCeを用い、成分設計を最適化することにより重希土類フリーと、Ce含有磁石の磁気特性の向上が実現できます。Ce含有磁石の工業化は中国の多くのメーカーで導入されており、2024年までに7万トン以上に達すると予想されています。これはNd磁石の資源問題の解決に大きく貢献します。

希土類磁石には幅広い市場見通しがあり、さまざまなモータの用途や特性要件を満たすことができます。

講演会の後は懇親会を実施しています。第102回技術例会の後は講師の方々を含め25名が参加しました。2023BMシンポジウムの後は講師の方々を含め38名が参加しました。講師の方々や他の参加者と情報交換をしたり、つながりを持つことができました。これが現地開催の最も重要なことかもしれません。

技術例会やシンポジウムの企画においては、講師と講演題目が決まった後、講演会のタイトルを決めなければなりません。事務局が中心となって考えてきましたが、なかなかむずかしいものです。2023BMシンポジウムの会長挨拶において、有泉会長が過去のシンポジウムのタイトルと講演テーマについて分析をされていました。それに倣い、シンポジウムのタイトルに使われている語句の分析をしました。

協会の名称を日本ボンド磁石工業協会から日本ボンド磁性材料協会に変更した2006年から2023年までの計18回のBMシンポジウムのタイトルに使用されている語句を分析してみました。語句の頻度とその語句が組み合わされて使用されている例と頻度を表に示します(上位11)。

「磁性材料」と「動向」の語句が12回と最も多く使用されています。当協会は磁性材料の協会であり「磁性材料」が使用されるのは当然のことと思います。「動向」は「最新動向」、「開発動向」、「最新技術動向」、「研究開発動向」などのように使用され、業界や学会の動きに注目していることがわかります。また、「最新」や「最先端」などの語句が多く使用されているのは、常に新しい情報を提供しようと考えてきたからだと思います。「応用」が「技術」と並んで多く使用されているのは、磁性材料そのものだけではなく磁性材料の応用についても目を向けているということを示しています。応用の一つとして、やはり「モータ」に着目するのは当然のことと思います。

2023BMシンポジウムのテーマは『高性能磁石の評価方法および製法から応用まで』でした。「高性能」、「磁石」、「応用」などの語句が使用されています。「評価方法」という語句は意外にも18回のシンポジウムではじめて使用されました。測定方法や装置などの話を聞きたいという意見もあり、今後は増えていくことと思います。

技術委員会では、タイムリーな講演を講師の方々をお願いするとともに、会員の方々が是非参加したいと思えるようなテーマの文言を今後も考えていきたいと思っています。講演会の後のアンケートもよろしくお願いたします。

BMシンポジウム(2006～2023)のテーマに使用された語句の頻度(上位11)

語句	頻度	語句の使用例(括弧内の頻度は重複を含む)
磁性材料	12	磁性材料(5)最先端磁性材料(5)ボンド磁性材料(2)
動向	12	最新動向(3)最新技術動向(3)開発動向(2)研究開発動向(2)最新開発動向(1)世界動向(1)
応用	9	応用(7)応用技術(1)応用製品(1)
技術	8	技術(2)応用技術(1)最新技術動向(3)新旧技術(1)高性能モータ技術(1)
開発	8	研究開発(2)研究開発動向(2)開発動向(2)最新開発動向(1)モータ開発(1)
最新	8	最新動向(3)最新技術動向(3)最新開発動向(1)最新磁石材料(1)
磁石	7	永久磁石(1)高性能磁石(1)希土類磁石(2)ボンド磁石(1)最新磁石材料(1)最先端磁石材料(1)
最先端	6	最先端磁性材料(5)最先端磁石材料(1)
研究	4	研究開発(2)研究開発動向(2)
高性能	4	高性能モータ(3)高性能磁石(1)
モータ	4	高性能モータ(2)高性能モータ技術(1)モータ開発(1)