

特殊鋼

2019
Vol.68 No.6

11

The Special Steel

特集／磁性材料の基礎知識



特殊鋼

11 目次 2019

【編集委員】

委員長	井上幸一郎 (大同特殊鋼)
副委員長	渡辺 豊文 (中川特殊鋼)
委員	沢田 譲 (愛知製鋼)
〃	増田 智一 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	小川 道治 (大同特殊鋼)
〃	正能 久晴 (日本金属)
〃	殿村 剛志 (日本高周波鋼業)
〃	浜田 貴成 (日本製鉄)
〃	戸塚 覚 (日本冶金工業)
〃	北園 大輔 (日立金属)
〃	福田 方勝 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	高橋 秀幸 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人 (平井)

【特集／磁性材料の基礎知識】

I. 特別寄稿

我々は希土類鉄時代に向かっている

..... 大同特殊鋼(株) 佐川 真人 2

II. 総論..... 元日立金属(株) 徳永 雅亮 4

III. 永久磁石材料

- | | | | |
|-------------------|----------|-------|----|
| 1. 希土類磁石..... | 大同特殊鋼(株) | 日置 敬子 | 8 |
| 2. ボンド磁石..... | 愛知製鋼(株) | 山崎 理央 | 12 |
| 3. フェライト磁石..... | 日立金属(株) | 小林 義徳 | 15 |
| 4. 铸造磁石・圧延磁石..... | 三菱製鋼(株) | 福田 方勝 | 18 |

IV. 軟磁性材料

- | | | | |
|--------------------------|------------|-------|----|
| 1. 電磁鋼板..... | 日本製鉄(株) | 森重 宣郷 | 21 |
| 2. 電磁ステンレス鋼..... | 大同特殊鋼(株) | 齋藤 章彦 | 24 |
| 3. 電磁軟鉄、パーマロイ..... | 大同特殊鋼(株) | 齋藤 章彦 | 27 |
| 4. 粉末軟磁性材料..... | 山陽特殊製鋼(株) | 相川 芳和 | 30 |
| 5. アモルファス・ナノ結晶軟磁性合金..... | 日立金属(株) | 中島 晋 | 33 |
| 6. ソフトフェライト..... | 電子情報技術産業協会 | 平塚 信之 | 36 |

V. 最新の開発動向

- | | | | |
|---|-----------|-------|----|
| 1. アモルファスモータ
～省エネに貢献する産業用IE5クラス高効率モータ～
..... (株)日立製作所 | 榎本 裕治 | 39 | |
| 2. 高効率モーター用磁性材料
..... 高効率モーター用磁性材料技術研究組合 | 谷川 茂穂 | 44 | |
| 3. 自動車への応用..... | トヨタ自動車(株) | 歳田 寿充 | 48 |

VI. 会員メーカーの商品紹介

- | | | | |
|--|----------|-------|----|
| 自動運転・電動化のための高透磁率パーマロイ帯鋼
(MEN*PB-S、MEN PC-2S)..... | 大同特殊鋼(株) | 高野 昌樹 | 52 |
|--|----------|-------|----|

(株)ダイドー電子の製品紹介… (株)ダイドー電子 灰塚 弘	53
大きな振動発電機能を有する クラッド銅板…………… 東北特殊鋼(株) 小野寺隆一	54
パーマロイと感温磁性材料 …………… (株)日立金属ネオマテリアル 横山紳一郎	55
軟磁性粉末…………… 三菱製鋼(株) 齊藤 晴一	56
“特集”編集後記…………… 日立金属(株) 北園 大輔	69

●一人一題：「自炊のすすめ」…………… 山陽特殊製鋼(株) 木田 忠伯	1
-------------------------------------	---

■業界のうごき ……………	57
▲特殊鋼統計資料 ……………	60
★倶楽部だより (2019年8月1日～9月30日)……………	64
☆特殊鋼倶楽部の動き ……………	65
◇お知らせ 4年連続して、高機能金属展に特殊鋼倶楽部として出展	67
☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧 ……………	68

特集／「磁性材料の基礎知識」編集小委員会構成メンバー

役 名	氏 名	会 社 名	役 職 名
小委員長	古谷 匡	日 立 金 属 (株)	金属材料事業本部 技術部長 兼 熱処理技術支援グループ長
〃	北園 大輔	日 立 金 属 (株)	金属材料事業本部 技術部長
委 員	沢田 譲	愛 知 製 鋼 (株)	品質保証部 お客様品質・技術室 主査
〃	大矢 耕二	大 同 特 殊 鋼 (株)	ソリューションパートナー部 副主席部員
〃	殿村 剛志	日本高周波鋼業(株)	技術開発本部 開発企画部 担当次長
〃	戸塚 覚	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部 部長
〃	福田 方勝	三 菱 製 鋼 (株)	技術開発センター
〃	渡辺 豊文	中 川 特 殊 鋼 (株)	鉄鋼事業部 技術部長
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長

「自炊のすすめ」

山陽特殊製鋼(株)
海外営業部長

き だ ただ のり
木 田 忠 伯



冬と言えば、鍋ですね。鍋のおいしい季節になりました。鍋はこたつでぬくぬくしながら楽しめるおいしい料理です。手間もかからないし、ビールや日本酒にも合うので、宅飲みでも楽しいひと時が過ごせる料理です。

うちの定番鍋は、湯豆腐から始まります。土鍋に水を張り、昆布を一枚入れ火にかけます。沸騰の少し手前で昆布を取り出し、豆腐を投入し、弱火で加熱します。豆腐は最初沈んでいますが、ゆらゆらと揺れだしたら、食べごろです。火を止めて、湯豆腐を堪能します。湯豆腐が終われば、次に鶏肉、野菜などを投入し、鶏の水炊きを食します。2日目はこの出汁を利用しておでんにします。昆布と鶏の出汁がでていますので、しょうゆ、みりんなどでおでん用に味を調えれば、あとは大根、ゆで卵、練り物などのおでん種を投入するだけでおでんが楽しめます。おでんは、おでん種を投入することでリピートできるお手軽料理です。冬の鍋はこのようにお手軽に長く楽しむことができます。

昨年から大学生の娘と東京江東区で二人暮らしをしており、朝ご飯、お弁当は手作りで賄っています。娘は料理をしないので、すべて私の役目になります。ただ、こうした生活をしているとやはり自炊で作る食事が一番おいしいと感じるようになりました。自分で食材を選び、調理方法を選択できることが自炊生活の醍醐味です。

これから、寒い季節になりますが、冬の食材も夏や秋に劣らずおいしいものがたくさんあります。野菜では白菜、大根、蕪、ほうれん草、山芋など、魚では鰯、鰯、フグなど、これらの旬の食材は、価格が安いだけでなく、栄養価も高く、季節を感じることができるお勧め食材です。旬には、旬の「はしり」「さかり」「なごり」という言葉もあります。これは、旬の時期だけでなく、味や食感が微妙に変化していくことも同時に表現していて、微妙な味わいの変化、それに合った調理方法が日本の和食では重視されます。

徒然草に「食は、人の天なり。よく味はひを調へ知れる人、大きな徳とすべし。」という言葉があります。食事は人にとって、天とおなじように最重要なものであり、優れた料理人は重宝されるという意味です。

口から摂る食物によって、人の体が形成されているということを自炊によって再認識できました。日々の体調管理についても食事との関連性を感じ取れるようになり、食事と健康には密接な関係があることを実感できます。毎日、メニューを考えると、現在の体調も自然に考慮できるため、自炊はそれ自身が体調管理、ひいては健康維持につながる重要なプロセスとなっています。病気になって健康のありがたさがわかるという事を聞きますが、自炊生活では、日々、健康であることを実感できます。健康であれば、心も健やかで、心身ともに健全な状態が維持できると考えます。

栄養価の高い旬の食材を取り入れ、調理法を工夫することによって、日本の四季を感じながら、健康な日々を維持できる自炊生活に喜びを感じています。

〔海外委員会ステンレス条鋼分科会長〕



特集 磁性材料の基礎知識

I. 特別寄稿

我々は希土類鉄時代に向かっている

大同特殊鋼(株) 顧問 さ がわ まさ と 佐川真人

Nd-Fe-B磁石がなければ、今のハードディスクドライブ（HDD）の性能は全く出せない。スマートフォンの中のスピーカー、振動モーター、オートフォーカスカメラにもNd-Fe-B磁石は不可欠である。高効率エアコンのコンプレッサーにNd-Fe-B磁石が必須である。エアコンは快適に暮らすために、地球上どこに住んでもなくてはならない。EV、HEV、FCVの主機モーターにもNd-Fe-B磁石が使われて高効率化に貢献している。産業用ポンプや自動車の中に使われるポンプにSm-Fe-N磁石が大量に使われようとしている。今や、希土類鉄磁石は現代社会を支えているといっても過言ではない。人類は、もう希土類鉄磁石がない時代には戻れない。

希土類鉄磁石は誰が発明したのか。Nd-Fe-B焼結磁石は佐川真人、Nd-Fe-B超急冷磁石はJohn Croat、そしてSm-Fe-N磁石は入山恭彦がそれぞれ独立に発明した。これら3人以前にも、希土類鉄化合物、希土類鉄磁石の研究をした人はいたが、Nd-Fe-B磁石とSm-Fe-N磁石の的からは大きく外れていた。Sm-Fe-N磁石の発明者として、しばしばこの磁石の学術論文を世界で最初に出したアイルランドのMichael Coeyの名前が挙げられるが、入山恭彦の方が1年も早くSm-Fe-N磁石についての特許出願をしていた。特許明細書の内容はしっかりとした実験結果に基づいており、Coeyの論文の内容を完全にカバーしていた。大同特殊鋼には、希土類鉄磁石の3人の発明者のうち2人が所属し

ていることになる。

希土類鉄磁石を分類すると、フル密度磁石としてNd-Fe-B焼結磁石およびNd-Fe-B熱間加工磁石（MQ3）、ボンド磁石としてNd-Fe-Bボンド磁石およびSm-Fe-Nボンド磁石がある。フル密度磁石は圧倒的な高磁力が特長である。これを搭載したモーターは、高出力化・小型化・省電力化が図れ、ハイブリッド車、電気自動車、省エネ家電、風力発電等に大量に使用されている。ただ、希土元素であるDyの削減が課題となっている。ボンド磁石は、磁石粉末と樹脂を混合して成形するため、磁力はフル密度磁石対比劣るものの、種々の形状に成形でき、小型の磁石でも安定した磁気性能が得られる。その応用はHDDのスピンドルモーターに始まり、情報通信分野、自動車用モーター、センサーと広範囲に渡る。

大同特殊鋼は、Dy使用量削減のための有効手段である結晶粒の微細化に力を入れている。Nd-Fe-B焼結磁石については、ニアネットの焼結体を得られるPLP（プレス・レス・プロセス）法を採用している。従来の製法とは異なり、プレス機を使用せず、モールドに磁石粉末を充填し、パルス強磁界により粉末を配向させた後にモールドごと焼結するという新製法であり、設備がコンパクトなため、粉末充填工程から焼結工程に到る全設備を不活性雰囲気ボックス中に収めることができ、粉末酸化による磁気特性劣化が小さい。そのため、

従来プロセスよりも細かな磁石粉末が使用できるようになった結果、磁気特性向上や重希土類元素の使用量低減につながった。Nd-Fe-B熱間加工磁石（MQ3）は、焼結法とは異なり、超急冷法によるナノ結晶からなる原料粉末を使用する。これをホットプレスにより高密度化し、さらに熱間加工を施すことにより製造される。熱間加工時に結晶の方向が特定の方向に揃うため、高い磁力が得られる。焼結磁石よりも一桁ほど結晶粒子が微細なため重希土類元素使用量を削減できることが大きな特徴である。さらに、超急冷法によるナノ結晶原料粉末を使用したSm-Fe-N等方性ボンド磁石を製造している。等方性ボンド磁石として最高の磁力を誇り、耐食性・耐熱性に優れるといった特長を持っており、ボンド磁石の応用分野のうち、高磁力や高耐食・高耐熱が要求されるものに使用されてきた。最近では、磁石が直接水に接触する構造をもつ産業用水ポンプや自動車用冷却ポンプにも使われようとしている。Nd-Fe-B磁石の生産量突出のためにSmは余剰、低価格となっており、Sm-Fe-N磁石の拡大は、希土類資源の有効活用としても好ましいことである。

本稿のタイトル「我々は希土類鉄時代に向かっている」の「希土類鉄時代」という言葉は、それ以前の最強磁石「希土類コバルト磁石」時代に対する対語として使っているのではない。我々の文明は、石器時代、青銅器時代、鉄器時代と、その時代を代表する材料名を冠して名前が付けられて

きた。その呼び方では、今はシリコン時代である。シリコンは電子機器の頭脳の役割をする。そして我々はその電子機器を駆使したAI/IOT時代に突き進んでいる。自動車は100%自動運転の電動車になる。2050年には自動車を含めたロボットの数は200億台になると予想されている。この時代には、一人一人の人に接して、その人にサービスを施すために使われる電動車やロボットのモーターやスピーカーが主役である。これらの機器の手、足、翅、声帯に使われる希土類鉄磁石が時代を代表する材料になる。この意味で、我々はまさに、「希土類鉄時代」に向かっているのである。

希土類資源は枯渇しないのか心配である。地球上に希少であるという意味でつけられた希土類元素という名前から、資源の心配をするのは当然である。調べてみると、希土類鉄磁石に使われる主要希土類元素であるNd、Pr、Smについては全く心配ない。今のままで掘り続けて1000年分の埋蔵量があるということである。問題はNd-Fe-B磁石の耐熱性改善に使われるDyとTbである。これらの重希土類は極めて希少であるので、早急に代替策を見つけないといけない。大同特殊鋼では、結晶粒微細化法により、Nd-Fe-B磁石の耐熱性向上の研究を発展させている。我々はこの研究をさらに発展させて、重希土類使用量ゼロで、電気自動車用主機モーターに使えるNd-Fe-B磁石を実現していく。また、Sm-Fe-N磁石の高性能化の研究開発を突き詰めていく。

Ⅱ．総 論

元日立金属(株) とく なが まさ あき
徳 永 雅 亮

ま え が き

工業材料としての磁性材料は保磁力のレベルによって軟質磁性材料と硬質磁性材料に分類できる。その中間レベルの保磁力を有する材料を半硬質材料と呼ぶこともある。軟質磁性材料は一般に高透磁率を示し、小さな外部磁界によって大きな磁束密度を誘導する機能を有する。硬質磁性材料は電磁石と異なり、電力の消費を伴うことなく磁束密度を発生する機能を有する。

本稿では工業材料としての磁性材料を概説する。

◇ 物質の磁性

物質の磁性は原子のもつ電子に由来する。原子に存在する電子は原子核を中心に運動することによる軌道角運動量と自転に相当するスピン角運動量をもつ。スピン角運動量はDiracによる相対論的量子力学によって導出される。電子の3次元角運動量成分の他にもう1つの自由度があることが明らかになり、第4の自由度がスピンに相当することが示された^{1)、2)}。原子の磁性が明らかになり、原子の持つ磁性を特筆して、原子を原子磁石³⁾と呼ぶ場合がある。これら原子が結晶構造をもつ固体や非晶質固体を構成し、固体の磁性の議論が行われる。

磁気となると、各種の磁性の中でも強磁性が主役になる。強磁性原子はよく知られているようにFe、Co及びNiがその代表である。これら孤立した原子では1s、2s、2p、3s及び3p軌道は閉殻であり、4s軌道に2つの電子を持ち、3d軌道の電子数はFeで6つ、Coで7つ、Niで8つである。Fe原子の電子状態は5つの3d軌道に6つの電子が存在する。遷移金属元素では軌道磁気モーメントがほぼゼロになっている。図1にFe原子の6つの3d電子のスピン配置⁴⁾を示す。5つの軌道のうち、磁気量子数 $m = 2$ の軌道にはアップスピンとダウンスピンがペアになっているために、4つの電子が $m = 1 \sim -2$ に配置され、Fe原子の磁気モーメン

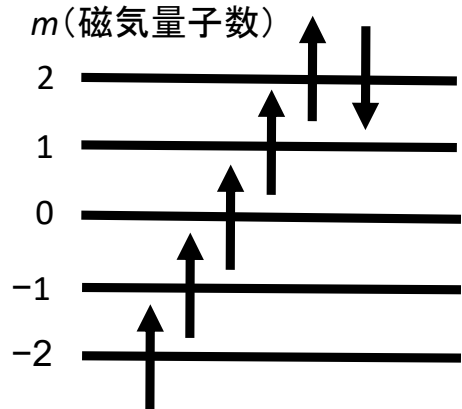


図 1 Fe原子の6つの3d電子のスピン配置

トに寄与することになる。これによってFe原子磁石の磁気モーメント $4\mu_B$ が導かれる。 μ_B はボーア磁子⁵⁾と呼ばれ、 $\mu_B = \mu_0 e \hbar / (2m_e) = 1.165 \times 10^{-29}$ (Wb・m) [μ_0 : 真空の透磁率、 e : 単位電荷、 $\hbar$: プランク定数、 m_e : 電子の質量] である。

Fe^{3+} イオンでは3d軌道の1つ ($m = 2$ のダウンスピン) と4s軌道の2つの電子が欠けることで3d軌道の5つの電子が総て不対電子になり $5\mu_B$ の磁気モーメントを示す。

金属系Fe固体の磁気モーメントは孤立したFe原子磁石や Fe^{3+} イオンの磁気モーメントとは一致しない。Fe原子が固体を構成すると、その結晶構造はbccになり、原子間の相互作用である交換結合や電子の遍歴性により、その原子当りの磁気モーメントは $2.219\mu_B$ を示す⁵⁾。bcc構造の結晶場による3d軌道の縮退が解けて軌道角運動量がほぼ消失する。bcc Feの磁気モーメントは固体化によるバンド理論によって飽和磁気モーメントが決定される。

Fe系酸化物であるフェライトはイオン結晶であり、 Fe^{3+} イオンの磁性を適用できる局在系である。Niフェライトは逆スピネル構造を持ち、(Fe^{3+}) [$\text{Fe}^{3+}\text{Ni}^{2+}$] と表される。 (Fe^{3+}) はAサイト、 $[\text{Fe}^{3+}\text{Ni}^{2+}]$ はBサイトに入る。 Fe^{3+} イオンの磁気

モーメントは $5\mu_B$ で、A-B間にアンチフェロの相互作用が働き、Aサイトはマイナススピンの、Bサイトはプラススピンの配列になる。従って、Niフェライト1分子の磁気モーメントは $-5\mu_B + 2\mu_B + 5\mu_B = +2\mu_B$ と計算でき、 $+2\mu_B$ を示す⁶⁾。なお、実測値は $2.2\mu_B$ である。

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物のFeの磁気モーメントを考えてみよう。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物は正方晶構造を有し、Feのサイトは $16k_1$ 、 $16k_2$ 、 $8j_1$ 、 $8j_2$ 、 $4c$ 及び $4e$ の6つのサイトがある。各サイトの磁気モーメントは各サイトの周囲の電子状態によって変化する。メスバウアー効果による4.2KにおけるFeモーメントは上記のサイトに対して、2.60、2.60、2.3、2.85、2.10、 $2.75\mu_B$ と実測されている^{7)、8)}。

酸化物系は局在モデルが主役になるが、金属系固体の磁気モーメントは結晶構造、バンドモデル及び電子間相互作用等で決定されることが理解できる。

◇ 磁区と反磁界

電荷はプラスとマイナスが存在するのに対し、磁気単極子（磁気モノポール）の存在は確認されていない。すなわち、磁石を微細に分割してもNとSは分離できず、磁気双極子になる。これは電磁気学におけるマクスウェル方程式の $\text{Div } D = \rho$ （ ρ ：電荷密度）と $\text{Div } B = 0$ の差として現れる。

着磁前の磁性体は図2⁹⁾に示すように、向きの異なる領域で磁気モーメントの揃った多くの磁区

によって構成され、磁性体全体として磁化を打ち消している[図2(a)及び(b)の状態]。(b)の状態は(a)の状態よりも磁壁が少なく、磁壁エネルギーは少ない。図2(c)及び(d)に示す様に、磁場の印加によって磁性体が磁化されると磁区の数は一減り、外部に磁束を発生する。磁性体の磁化に伴い、最終的に磁性体が単一磁区になると、反磁界が発生する。図2(e)に示した小さな原子磁石のN極は隣合う原子磁石のS極と接しているため、内部は打消し合い、磁石の両端にのみ磁極（磁荷）が残ることになる。磁区構造は概略磁極発生に伴う静磁エネルギーと磁壁エネルギーの和を最小にするように決定される。

◇ 強磁性材料とその保磁力

図3に磁性材料を残留磁束密度（ B_r ）と保磁力（ H_c ）平面上に示した¹⁰⁾。あくまで概略ではあるが、保磁力のレベルが 10^{-1} から 10^6 A/m の広い範囲にあることがわかる。保磁力を用いて、 10^3 A/m 以下を軟磁性、 $(1 \sim 20) \times 10^3 \text{ A/m}$ を半硬質、 2×10^4 以上を硬磁性に分類される。これら磁性材料は組成、結晶構造、微細組織等を調整して、工業材料として利用されている。残留磁束密度（ B_r ）は硬磁性材料では重要な材料特性の指標となるが、軟磁性材料ではむしろ飽和磁束密度（ B_s ）がより良い指標になるので、図3の縦軸は軟磁性材料では B_s と読み替えて欲しい。 B_s はFeCo（パーメニウム）で最も高く、高保磁力側で B_r が、低保

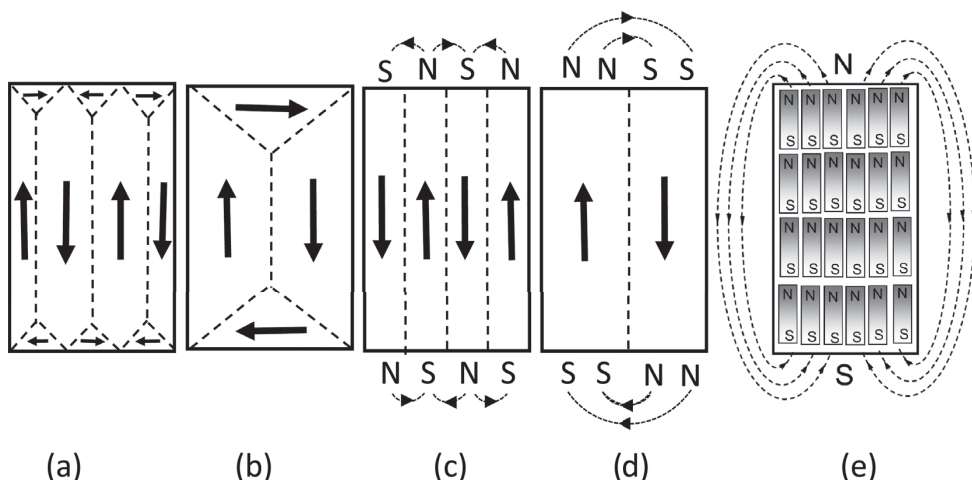


図 2 強磁性体の磁区構造

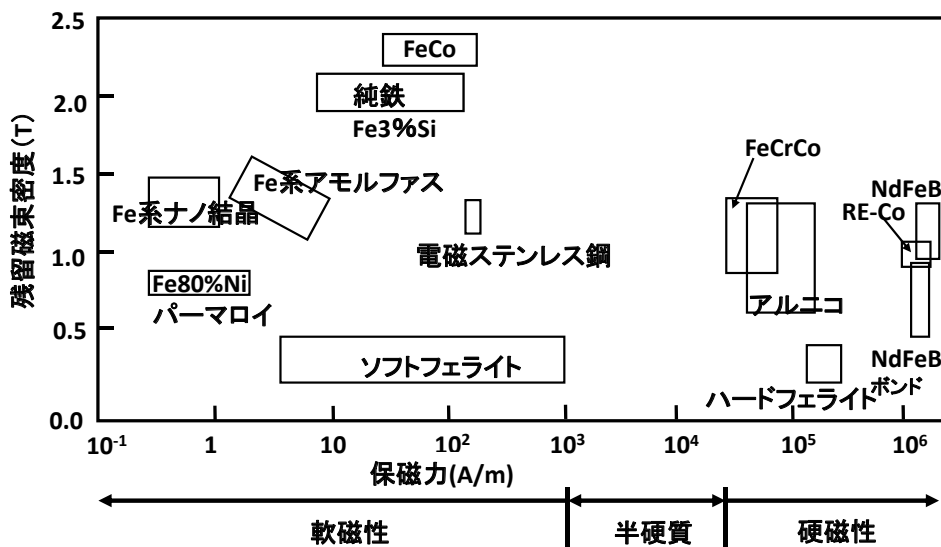


図 3 強磁性材料の残留磁束密度と保磁力

磁力側で B_s は低下する。それぞれの材質の組成及びその機能を発揮するための微細組織的な工夫が付与されるために低下すると考えて良い。

◇ 硬磁性材料と軟磁性材料

図 4 に硬磁性材料の減磁曲線を示す。硬磁性材料の磁気特性として残留磁束密度 (B_r)、保磁力 (H_{CB})、固有保磁力 (H_{CJ}) 及びエネルギー積 $[(BH)_{max}]$ がある。 $J-H$ 曲線は材料固有の特性を把握するために、又、 $B-H$ 曲線は得られる磁束量を推定するために、材料応用分野において用いられる。 B_r は硬質磁性材料が発生できる磁束を決定する最も重要な特性である。近代磁石では B_r-H_{CJ} が実現しており、磁気回路設計が行い易い。 H_{CJ} が大きいことは硬質磁性材料の磁化状態を維持する最も重要な特性で、特に昇温時の H_{CJ} の大きさが耐熱性を決定する。

材料特性のポテンシャルを発揮するためには飽和着磁を施す必要がある。材料の信頼性に関しては常温および加熱時の経時変化を実験的に確認する必要がある。飽和着磁が得られない場合、加熱時の長期信頼性が低下する場合がある¹¹⁾。磁石応用磁気回路設計では減磁曲線上の動作点が永久磁石の発生する磁束 (B_d) 及び反磁界 (H_d) の大きさを示す。動作点は (H_d , B_d) で表し、その比、 B_d/H_d をパーミアンス係数と呼ぶ。

図 5 に軟磁性材料のヒステリシス曲線を示す。軟磁性特性では飽和磁束密度と透磁率が重要な磁気特性である。透磁率は初磁化曲線上で多様な定義が行われる。最もシンプルには初磁化曲線上の接線の傾きで透磁率を定義する $\mu(H) = dB/dH$ であるが、初透磁率や最大透磁率等も使用されている。図 5 には最大透磁率 (B_m/H_m) を示した。透磁率が大きいことはより小さな磁場で大きな磁束密度を誘導できることを意味する。

軟磁性材料は小さな磁場で高い磁束密度を誘導し、基本的に交流磁場で駆動される。交流磁場駆

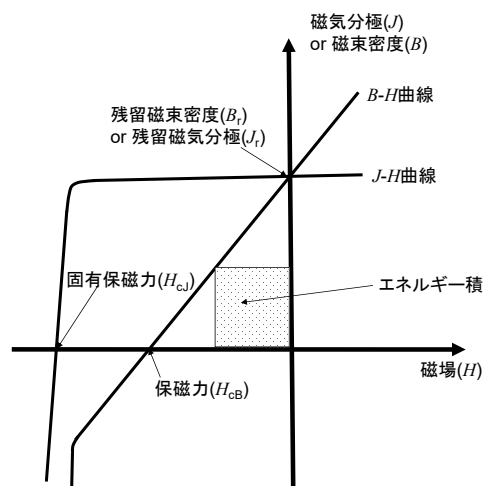


図 4 硬磁性材料の減磁曲線

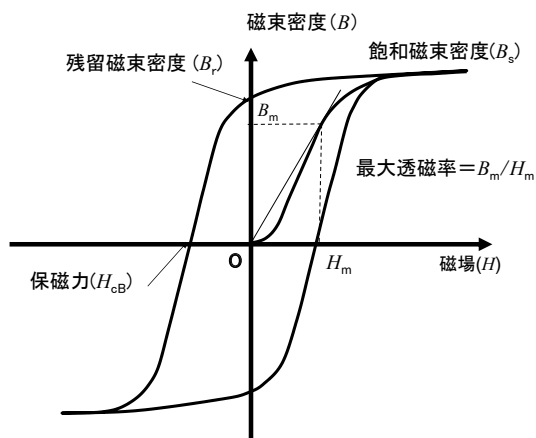


図 5 軟磁性材料のヒステリシス曲線

動によってヒステリシス曲線上を周回するためにヒステリシス曲線の面積に相当するエネルギーを損失し、これを「ヒステリシス損」という。交流磁場の電磁誘導によって軟磁性材料中に電流が流れ、エネルギー損失が発生し、これを「渦電流損」と呼ぶ。「ヒステリシス損」と「渦電流損」の和を「コアロス」又は「鉄損」と呼ぶ。磁気特性及び鉄損の周波数依存性が評価され、周波数帯域によって適切な軟磁性材料が選択される。複素透磁率は $\mu = \mu' - j\mu''$ と表記し、 μ' は実数部で高周波磁場と同相である。 μ'' は虚数部で高周波磁場と 90° の位相遅れがあり、損失を表す。高周波透磁率は複素透磁率の周波数依存性を指す。

磁性材料には結晶磁気異方性が存在する。結晶のどの方位に磁場を印加するかによって磁化のされ方が異なることを結晶磁気異方性と呼ぶ。結晶構造のある一軸に対する磁化の方向によって異方性エネルギーが定義できる異方性を一軸異方性という。他にも形状異方性や誘導異方性が存在する。硬磁性材料では高い異方性を利用して保磁力を向上させているのに対し、軟磁性材料ではこれら異方性を低減することによって保磁力を小さくして、軟磁気特性を確保する。言い換えると永久磁石材

料では高い結晶磁気異方性を利用して高保磁力を実現するが、軟磁性材料では結晶磁気異方性は害になるので、小さく押さえ込む必要があると言える。

むすび

磁性材料を理解するためには磁気分極（磁化）と磁気異方性の起源の勉強から始める必要がある。又、高 B_r と高 H_{cj} を狙う硬磁性材料や高 B_s と低 H_{cb} を狙う軟磁性材料開発には微細組織の適正化という金相学をベースにしたアプローチも重要である。現状の材料を理解し、その理解をベースにした新材料開発が常に期待されている。

磁気物性では古典論が先行し、量子論によって交換積分による強磁性が説明された。考えるべきテーマが本質的な量子論で進めるべきなのか、古典論で論理的に整理できるのか判断して実行する必要もある。最近では第一原理計算を用いた計算科学が磁性分野でも主流になりつつある。計算によるプレディクションも取り入れた全方位的な開発手法が可能になっている。

参考文献

- 1) 近角総信著 「強磁性体の物理 (上)」 p. 57、裳華房 (1978)
- 2) シッフ著 (井上健訳) 「量子力学」 p. 382、丸善 (1957)
- 3) 佐藤勝昭著 日本磁気学会編 「磁気工学超入門」 p. 23、共立出版 (2014)
- 4) 佐藤勝昭著 日本磁気学会編 「磁気工学超入門」 p. 36、共立出版 (2014)
- 5) 高梨弘毅著 日本磁気学会編 「磁気工学入門」 p. 100、共立出版 (2008)
- 6) 太田恵造著 「磁気工学の基礎 I」 p. 187、共立出版 (1973)
- 7) A. F. Aly: International Journal of Pure and Applied Physics, 5 (2009) 215
- 8) D. Givord, H. S. Li and F. Tosset: J. Appl. Phys., 57 (1985) 4100
- 9) 高梨弘毅著 日本磁気学会編 「磁気工学入門」 p. 70、共立出版 (2008)
- 10) https://www.sekels.de/fileadmin/PDF/Englisch/30_NdFeB_Magnets___Properties_and_Applications_revised_13_03_09.pdf
- 11) 電気学会技術報告 第1011号 (2005年4月)

Ⅲ．永久磁石材料

1．希土類磁石

大同特殊銅(株) 技術開発研究所 磁石材料研究室 主任研究員 日置敬子

まえがき

希土類磁石は、その名の通り、希土類元素*と鉄属元素（磁石に使用されるのは鉄、コバルト）の化合物であり、量産されている磁石に限れば、表1に示すように、SmCo磁石（サマリウムコバルト磁石）、NdFeB磁石（ネオジム磁石）、SmFeN磁石（サマリウム鉄窒素磁石）の3種類に分類される。主に、鉄属元素が高い飽和磁化とキュリー温度に、希土類元素が結晶磁気異方性の発現に寄与しているが、希土類元素の電子構造（非閉殻の4f軌道）によって希土類鉄属化合物の物性は異なるため、磁石として望ましい物性値を得るための希土類成分は磁石の種類によって異なる。また、磁石材料として高い残留磁束密度と保磁力を得るためには、磁石相の物性値だけでなく、製造方法と材料の組織制御も重要である。図1に、代表的な永久磁石の最大エネルギー積と保磁力を示す。図の右上の特性を示す磁石ほど、磁気特性面で高特性と言える。本節では、各希土類磁石の磁気特性や特長、および、使用用途を紹介する。なお、各希土類磁石は製造方法により、焼結磁石、熱間

加工磁石、ボンド磁石に分類されるが、ボンド磁石については次節で解説されるため、本節では、焼結磁石、熱間加工磁石を主に紹介する。

*希土類元素は、スカンジウムSc、イットリウムYの2元素と、ランタンLaからルテチウムLuまでの15元素（ランタノイド）の計17元素の総称。La～Euを軽希土類元素、Gd～Luを重希土類元素と分類することもある。

◇ SmCo磁石

1966年に、HofferとStrnatらが、R-Co₅型系化合物（Rは希土類元素）は磁石に適した物性値を持つことを示し¹⁾、1967年には希土類元素がSm（サマリウム）であるSmCo₅磁石が発明された。世界初の希土類磁石である。その後、SmCo₅系磁石は、組成や熱処理技術を発展させたSm₂(Co,Fe,Cu,Zr)₁₇系磁石へ改善され、その磁気特性は240kJ/m³（30MGOe）程度に向上した^{2)、3)}。（2-17型系という名称であるが、実際は、磁化の高いSm₂Co₁₇相と結晶磁気異方性が高いSmCo₅相の両者を含む組織で、組成比は、SmCo₅程度）SmCo磁石は、コバルト使用量が高いため、原料価格の問題を切り離す

表 1 希土類磁石の種類と特徴

材料系	製法	磁性	特徴
サマリウムコバルト磁石 SmCo ₅ ～Sm ₂ Co ₁₇	焼結	異方性	高い温度安定性・高耐食性
	ボンド	等方性、異方性	
ネオジム磁石 Nd ₂ Fe ₁₄ B	焼結	異方性	高磁気エネルギー積
	熱間加工	異方性	
	ボンド	等方性、異方性	
サマリウム鉄窒素磁石 Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	ボンド	異方性	高耐熱性・高耐食性
サマリウム鉄窒素磁石 SmFe ₉ N	ボンド	等方性	

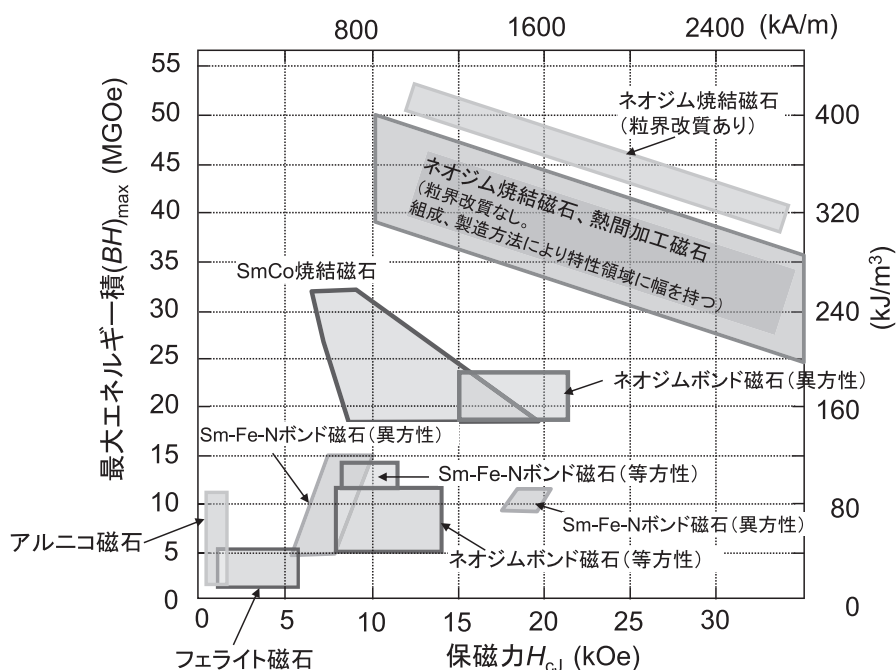


図 1 代表的永久磁石の特性マップ

ことはできない。しかしながら、耐食性に優れているため、コーティングなどの後加工が不要ことが多い。また、高いキュリー温度を持ち（700～800℃）、磁気特性の温度安定性に優れている。そのため、本磁石は、磁力の温度安定性を要する磁気センサーや音響機器などの精密機器に使用されている。

◇ NdFeB磁石

1970年代は、SmCo磁石の価格問題を解決するために、安価で、かつ、高い有効磁気モーメント持つ鉄の比率を高めた希土類磁石の研究がさかんに行われた。そのような社会的背景の中で、1982年に佐川ら⁴⁾とCroattら⁵⁾により、それぞれ独立に発明されたのが、ネオジウム磁石である。図1に示すように、今でも世界最強の最大磁気エネルギー積を示している。

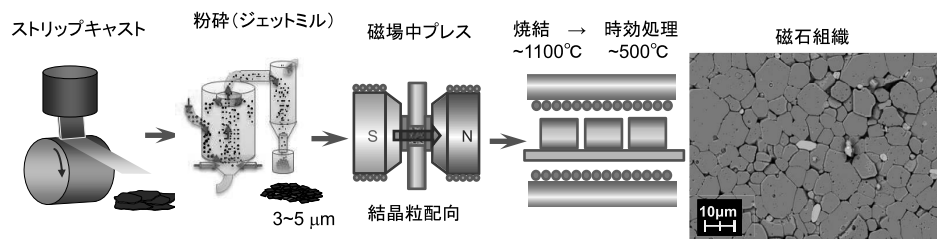
ネオジウム磁石は、約30wt.%の希土類元素と、1wt.%のボロン、残部は鉄（と少量のコバルト、微量の添加元素など）から構成されている。鉄比が高いため、希土類元素がNd（ネオジウム）、Pr（プラセオジウム）の場合、高い飽和磁化を示す。その一方で、温度上昇による保磁力低下は比較的大

きい。その解決方法として、使用環境に応じて、Nd、PrをDy（ディスプロシウム）、Tb（テルビウム）などの重希土類元素で置換することにより、室温での保磁力を十分高める手法がとられていた。しかし、この手法では、保磁力は向上するが、飽和磁化は低下する。また、重希土類元素は産出量がネオジウムの10分の1程度な上に、工業的に有望な鉱床は中国に偏在しているため、資源問題の面でもそれらの使用量削減は必須課題である。

佐川らの発明したネオジウム焼結磁石は、磁気特性と工業生産性の高さから、高特性磁石の主流となっている。一方、Croattらが発明した急冷薄帯は、主にボンド磁石の原料として使用されている他、熱間加工磁石⁶⁾の原料としても使用されている。図2に、焼結磁石と熱間加工磁石の製造方法を示す。焼結磁石と熱間加工磁石では、原料組成はほぼ同じであるが、製造方法の違いにより最終製品の磁石組織が異なる。

前述した重希土類元素の使用量削減に対しては、磁石相である結晶粒の微細化や、結晶粒を被覆するように存在する粒界相の組成や組織制御により、保磁力を高める手法が有効である。焼結磁石の場合、原料の微粉化と工程中の酸化低減技術の改善

1) ネオジム焼結磁石



2) ネオジム熱間加工磁石

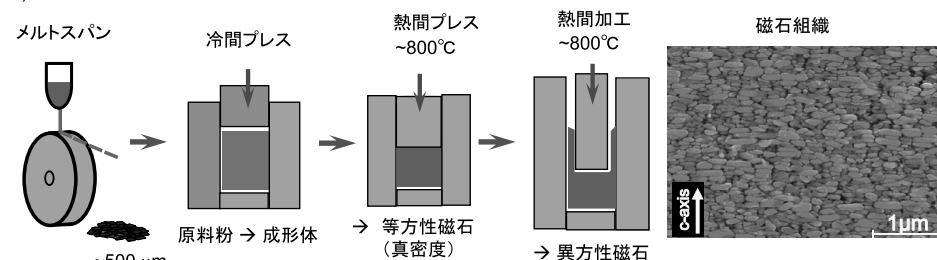


図 2 焼結磁石と熱間加工磁石の製造方法と磁石組織

により、結晶粒の微細化が行われてきた。また、重希土類元素を効率よく使用するため、保磁力に強く影響する結晶粒表層に、重希土類元素を拡散させる、粒界改質技術も量産磁石に適用されている⁷⁾。一方で、熱間加工磁石は、製造方法に起因してもともと結晶粒サイズが焼結磁石の10分の1程度で保磁力向上には有利な組織である。そこで、組成の最適化と熱間加工工程の組織制御技術を高め、結晶粒の微細化や粒界相状態の最適化を行うことにより、重希土類元素完全フリーでのさらなる保磁力改善を行った^{8), 9)}。このように、ネオジム磁石は、発明から40年経とうとしている今でも、省重希土類、および、重希土類フリーそれぞれの領域で、磁気特性の最高値は更新されている。

ネオジム磁石は、発明以降、家電や工業用機械、OA機器など多岐にわたり使用されている。高い残留磁束密度持つため、近年は、モータの高出力化が必要な電動車駆動モータへの使用量が急増している。

◇ $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁石

SmFeN 磁石¹⁰⁾は、優れた物性値を有する。その飽和磁化は、ネオジム磁石に匹敵し、キュリー温度、異方性磁場はネオジム磁石以上を示す。しか

しながら、原料粉末は600℃以上の加熱により主相が分解されてしまうため、ボンド磁石として量産されている。

むすび

ネオジム磁石の重希土類元素の資源問題に触れたが、最近では、希土類鉱物をバランスよく使用するため、Nd、Prの使用量低減にも着目されている。そのため、ネオジム磁石よりもさらに希土類比を低減した、 R-Mn_{12} 型構造を持つ $\text{Nd}(\text{Fe}, \text{Ti})_{12}\text{N}_x$ 、または、 $\text{Sm}(\text{Fe}, \text{Ti})_{12}$ 系がふたたび注目を浴び始めている。この系は、 R-Fe_{12} の形態では存在できない。鉄以外の第3元素の導入により安定化するが、著しく飽和磁化が低下する¹¹⁾。平山らは、Tiを含まない $\text{NdFe}_{12}\text{N}_x$ 膜を作製し、ネオジム磁石を上回る飽和磁化と異方性磁場を持つことを報告した¹²⁾。工業生産のためにはバルク化の技術確立が待たれるところであるが、 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$ 磁石以来の快挙と言える。また、希土類元素をバランスよく使用するため、ネオジム磁石のNdを産出量の高いCe（セリウム）で代替することも検討されている。単純置換であれば、物性値が示すように磁気特性は低下するが、最近の研究で、LaやCoとの複合添加により、コスト対比で高特性を得られる可能性が示唆

されている。このように、現行磁石の特性改善や新磁石の探索と同様に、使用目的に応じた磁気特性を有する磁石をいかにバランスよく資源を使い量産するのも重要な課題である。

参 考 文 献

- 1) G. Hoffer and K. J. Strnat, IEEE Trans. Mag., MAG-2, 487 (1966)
- 2) Y. Tawara and H. Senno, IEEE Trans. Mag., MAG-8, 560 (1972)
- 3) T. Ojima, S. Tomizawa, T. Yoneyama and T. Hori, IEEE Trans. Mag., MAG-13, 1317 (1977)
- 4) M. Sagawa, S. Fujimura, N. Togawa, H. Yamamoto and Y. Matsuura, J. Appl. Phys., 55, 2083 (1984)
- 5) J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee and F. E. Pinkerton, Appl. Phys. Lett., 44, 148 (1984)
- 6) R. W. Lee, Appl. Phys. Lett., 46 (8), 790 (1985)
- 7) 中村元、まてりあ、50巻9号、374 (2011)
- 8) 日置敬子、服部篤、次世代永久磁石の開発最前線 (株)エヌ・ティー・エス出版、123
- 9) 相馬慎吾、藤代智、次世代永久磁石の開発最前線 (株)エヌ・ティー・エス出版、297
- 10) 今井秀秋、入山恭彦、特許公報、特許第2703281号
- 11) K. Ohashi, Y. Tawara, R. Osugi and J. Sakurai, J. Less-Common Met., 139 (1988)
- 12) Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirose and K. Hono, Scr. Mater., 95, 70 (2015)



2. ボンド磁石

愛知製鋼(株) 未来創生開発部 やま ぎき まさ お
モーター・磁石開発室 山 崎 理 央

まえがき

永久磁石は、主にモーターの回転子（ロータ）の部品として用いられており、粉末冶金法で作製される焼結磁石と、磁石粉末を樹脂などのバインダーで固化成形することで作製されるボンド磁石に大別される。それぞれの磁石の特徴を表1に示した。ボンド磁石は、非磁性の樹脂を含んでおり、また、樹脂を介しているとは言え、直接磁石（粉末）が外部の水分や酸素といった環境による影響を受けやすい。そのため、磁力と耐環境性の点で焼結磁石に劣る。一方で、ボンド磁石は高い寸法精度を有しているため、焼結磁石に必要な磁石成形後の加工が不要であり、ロータとの一体成形を行うことでロータを組み立てる際の接着も不要となるため、製造プロセスの簡略化が可能となる。また、ボンド磁石を用いることは、モーターを小型化する上でも利点がある。モーターの出力はモーター

の回転数とトルクの積に比例し、そのトルクは回転子の体積と磁石の磁力に比例する。そのため、モーターの高速回転化は、モーターの小型化にとって有力な手段となる。このとき、焼結磁石では渦電流によるエネルギー損失や発熱による磁石の磁力低下が問題となるが、これは、電気抵抗率の高いボンド磁石を用いることで解決できる。その他に、形状自由度を活かすことでモーターの最適化設計が可能であることや、リサイクル性に優れるなど、ボンド磁石を用いることのメリットは多い。

このように、ボンド磁石は、焼結磁石にはない特徴を活かすことでこれまで需要を伸ばしてきており、現在では、家電、情報機器、自動車、最近ではドローン¹⁾など、生活の様々な場面で用いられている。本稿では、代表的なボンド磁石の製造方法とその種類について説明した後に、ボンド磁石の今後の展望について述べる。

◇ ボンド磁石の製造方法

ボンド磁石は、磁石粉末の表面処理、樹脂混合、混練、成形という工程で製造される。無機物である磁石粉末と、有機物である樹脂は、そのままではなじみが悪いいため、表面処理工程では、シラン系、チタネート系等のカップリング剤を磁石粉末に表面処理する。次に、表面処理した磁石粉末と、樹脂および添加剤を混合する。樹脂は、成形方法にも依るが、熱可塑性または熱硬化性の樹脂が用いられ、添加剤は、樹脂の熱安定性、柔軟性や成形加工性を考慮して適宜選択される。それによって、樹脂中に磁石粉末が均一に分散したコンパウンドが得られる。最後に、コンパウンドを成形し、磁場による着磁を行うことで、ボンド磁石が得られる。

◇ ボンド磁石の種類

上述した工程によって製造される、代表的なボンド磁石の種類と磁気特性を表2に示した²⁾。こ

表 1 焼結磁石とボンド磁石の比較

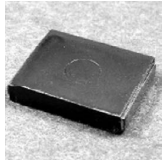
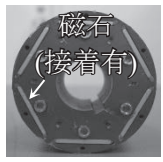
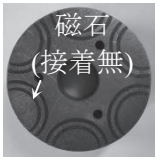
	焼結磁石	ボンド磁石
磁石概観		
ロータ組付後 (参考)		
磁力	高い	低い
耐環境性	良い	悪い
寸法精度	低い	高い
一体成形	不可	可
形状自由度	低い	高い
電気抵抗率	低い	高い
リサイクル性	悪い	良い

表 2 各ボンド磁石の磁気特性²⁾

磁石粉末の種類	フェライト系	希土類系						
		Nd-Fe-B系				Sm-Fe-N系		
成形方法	射出	圧縮		射出		圧縮	射出	
磁石配向の有無	異方性	異方性	等方性	異方性	等方性	等方性	異方性	等方性
$(BH)_{\max}$ (kJ/m ³)	17	199	80	135	61	105	111	77
H_{cj} (kA/m)	200	1,114	796	1,114	796	796	756	796
密度 (g/cm ³)	3.4	6.0	6.0	5.2	5.2	6.2	4.8	5.2

ここで、 $(BH)_{\max}$ は最大エネルギー積と呼ばれ、単位体積当たりの永久磁石が磁石外部に放出できるエネルギーの最大値を示し、おおよそ磁力の2乗に比例する。また、 H_{cj} は保磁力と呼ばれ、永久磁石の磁化方向に対して、逆方向に磁場を印加した際に、磁化が反転してその値が丁度0になるときの磁場の値を指す。 H_{cj} は永久磁石の耐熱性の指標とされており、 H_{cj} が高いほど高温での使用が可能となる。

表2に示したように、ボンド磁石は、①磁石粉末の種類、②磁石配向の有無（等方性と異方性）、③成形方法によって、異なる磁気特性と密度を示す。以下に、それぞれについて詳しく述べる。

①磁石粉末の種類

ボンド磁石の磁石粉末には、主に鉄酸化物ベースのフェライト系磁石粉末と、希土類を用いた、Sm-Fe-N系、Nd-Fe-B系に代表される希土類系磁石粉末が用いられる。希土類系磁石粉末は、フェライト系磁石よりも高価であるが、磁気特性に優れる。また、希土類系磁石粉末は異方性と等方性両方の磁石粉末が製造されているが、フェライト系磁石粉末は主に異方性磁石粉末が製造されている。この中で、Nd-Fe-B系異方性磁石粉末は最も高い磁気特性を有している。このNd-Fe-B系異方性磁石粉末は、Nd₂Fe₁₄B相と水素との反応を利用したHDDR法³⁾によって製造される。HDDR法は、Nd₂Fe₁₄B相の結晶粒を0.3μm程度まで微細化し、かつ異方性化することができるため、磁気特性に優れた磁石粉末を得ることができる。この手法を用いたNd-Fe-B系異方性磁石粉末と、それを用いて製造されるNd-Fe-B系異方性ボンド磁石は、現在愛知製鋼株式会社^{1)、4)}などで製造されている。

②磁石配向の有無（等方性と異方性）

ボンド磁石は、異方性ボンド磁石と等方性ボ

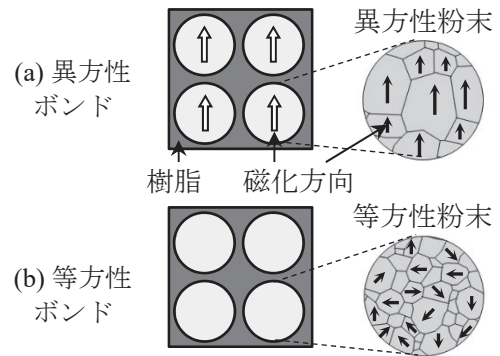


図 1 ボンド磁石の模式図、(a) 異方性、(b) 等方性

ンド磁石の2種類に分類される。それらの模式図を図1に示した。異方性ボンド磁石は、磁石粉末内部の磁化の方向が一方向に揃った異方性磁石粉末が用いられており、さらにそれらの粉末が、磁石内部で磁化の方向が同一となるように整列しているという特徴がある。一方で、等方性ボンド磁石は、磁石粉末内部の磁化の方向がランダムに配列した等方性磁石粉末が用いられており、そのため、磁石内部で磁化の方向はランダムとなる。磁化の方向が揃うほど $(BH)_{\max}$ は高くなるため、一般的に $(BH)_{\max}$ は、等方性ボンド磁石よりも異方性ボンド磁石の方が高い。尚、異方性ボンド磁石の場合は、成形時に磁場を加えるなど、磁石粉末の配向技術が要求されるため、磁石粉末の配向度は $(BH)_{\max}$ を決定する上での重要な因子となる。

③成形方法

ボンド磁石の成形には、磁石粉末の充填量や必要とされる形状ならびに、使用環境に応じて、圧縮成形法、射出成型法、または、押出成型法が用いられる。ここでは、ボンド磁石に多く用いられている圧縮成形法と射出成型法について説明する。

圧縮成形法は主に希土類系ボンド磁石に適用さ

れ、バインダーはエポキシといった熱硬化性樹脂が用いられる。圧縮成形法は、荷重880MPaと非常に高い圧力で成形できるため磁石が高密度になりやすく、また、使用する樹脂量が少ないため磁石粉末の充填率も高くなり、比較的高い $(BH)_{\max}$ が得られる。しかしながら、高圧力のため金型形状に制限があり、磁石形状はリング状、瓦状やブロック形状といった単純形状に限られる。

射出成形法は、多種の磁石粉末に適應される。バインダーには熱可塑性のナイロン12やPPSが主に用いられ、高温・多湿のような悪環境にはPPSが選定される。射出成形は、シリンダー内で液状化した樹脂と固体の複合物をシリンダーで押し出して、金型に充填することで成形される。製法上、樹脂量が多く必要となるため、磁石粉末の充填率と密度が圧縮成形に比べて低く、 $(BH)_{\max}$ は圧縮成形よりも劣る。一方で、圧縮成形よりも形状自由度に富み、また、ロータとの一体成形が可能なため、複雑形状や製造プロセスの簡略化が要求される場面では、射出成形法が優位である。

◇ ボンド磁石の将来展望

今後、人口増加や自動車等の電動化によって、

モータの需要はさらに拡大していく見通しである。しかしながら、このとき問題になるのが、資源問題である。モータには、永久磁石、導線、鉄芯などさまざまな部品が使われているが、資源不足によって需供バランスの乱れが懸念される。そのため、モータの小型化や、部品のリサイクルによる省資源化は、さらに重要性を増すと考えられるが、そのとき重要な役割を担うのが、ボンド磁石である。先に述べたとおり、ボンド磁石は、高い電気抵抗率を有しているため、モータの高速回転化による小型化が可能であり、また、リサイクル性に優れているため資源の再生が容易で、今後の省資源化による持続可能な社会を実現する上で、重要な役割を担っていると考えられる。

参考文献

- 1) 愛知製鋼株式会社ホームページ : <https://www.aichi-steel.co.jp/>
- 2) 各社磁石メーカーカタログ
- 3) T. Takeshita and R. Nakayama: Proc. 10th Int'l. Workshop on R. E. Magnets & Their Applications, Kyoto, (1989)、551-557
- 4) 三嶋千里、濱田典彦、御手洗浩成、本藏義信：日本応用磁気学会誌 24 (2000)、407-410

3. フェライト磁石

日立金属(株) こ ばやし よし のり
小 林 義 徳

エアコンのコンプレッサー用モータあるいは自動車の車載用モータは、永久磁石式のモータが広く流通しているが、その永久磁石はネオジム磁石に代表される希土類磁石とフェライト磁石とに大別できる。フェライト磁石の最大磁気エネルギー積（ $(BH)_{\max}$ ）は、ネオジム磁石の10%程度と小さいが、酸化鉄を主成分とするため低コストで化学的安定性に優れるといった特長を有している。また、金額ベースでは希土類磁石がトップシェアを占めるが、重量ベースではフェライト磁石がトップシェアを占める。フェライト磁石の用途は、自動車向けがその大半を占め、ワイパー、パワーウィンドウ、スタータ、電動パワーステアリングといった電装モータに用いられている。フェライト磁石の歴史は意外と古く、バリウム（Ba）フェライト磁石が、1951年にオランダのフィリップス社により実用化され¹⁾、さらにその約10年後の1963年にストロンチウム（Sr）フェライト磁石がアメリカのウェスティングハウス社により実用化された²⁾。いずれのフェライト磁石ともに、代表的な材料組成は $\text{AO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ （A元素がSr、Baなど）で表現され、その結晶構造は六方晶系のマグネトプランバイト型構造（M型構造）に分類されるため、一般的にBaM型フェライトやSrM型フェ

ライト磁石とも呼ばれる。

近年、自動車の燃費規制の厳格化にともなう自動車電装モータの小型・軽量化を背景として、フェライト磁石の性能向上の取り組みが国内磁石メーカーを中心として進展してきた。実用的なフェライト磁石の製品特性を図1³⁾に示す。図1には日立金属における製品材質名称を示している。当社材質名ではNMF-6シリーズ（6Cから6Gまでの製品群）に該当する製品が、Srフェライト磁石として知られている。次にNMF-9シリーズ（9Dから9Gまでの製品群）に該当する製品が、SrLaCo（ストロンチウムランタンコバルト）系フェライト磁石⁴⁾として知られており、その実用化時期が1998年ごろであるから、Srフェライト磁石の実用化から35年を経て特性の大幅な改善が得られた。そして、さらにフェライト磁石の組成に関する改良が進み、CaLaCo（カルシウムランタンコバルト）系フェライト磁石⁵⁾として知られるNMF-12シリーズ（12Eから12Kまでの製品群）およびNMF-15シリーズに該当する製品が、それぞれ2007年と2016年に実用化された。

SrLaCo系フェライト磁石の開発は、Coスピネルフェライト（ CoFe_2O_4 の組成式で表現される軟磁性材料）において、結晶磁気異方性定数（保磁力

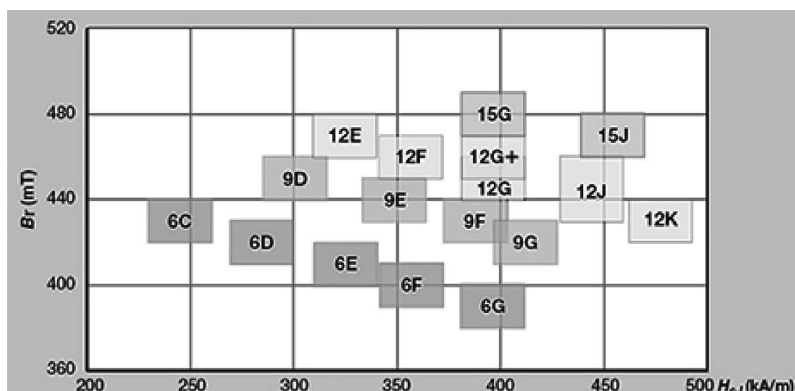


図 1 日立金属におけるフェライト磁石の製品特性³⁾

の強弱の元となる磁気的性質)が他のスピネルフェライトよりも大きくなることに着目し、Feの一部をCoで置換することでM型フェライトでも同様の効果が期待でき、保磁力(H_{cj})向上につながるのではないかと緒方らが着想したことに始まる⁴⁾。またその場合、3価のFeの一部を2価のCoで置換するため、結晶中の電気的な中性状態を保つにはSrサイトあるいはFeサイトを別種イオンで置換する必要があるとして、Srの一部を3価の希土類金属で置換することを検討した。その結果、Laが他の希土類元素に比べて磁石特性が高くなることを見出した⁴⁾。

SrLaCo系フェライト磁石の開発当時、それが非常に画期的な材料であったため、SrLaCo系フェライトをベース組成としてその性能向上要因を解明する研究や、組成やプロセスの適正化により性能を向上させようとする研究が主流であった。そのようななか、筆者らはSrLaCo系フェライトの磁石特性を越えるフェライト磁石を開発すべく、M型フェライトへのLaCo置換をベースとして、 $A_{1-x}La_xCo_3Fe_{n-y}O_a$ の組成式で表現したとき、A元素をSr以外のアルカリ土類金属(周期表の第二族に属する元素、Sr以外に、よく知られた元素としては、Ba(バリウム)やMg(マグネシウム)やCa(カルシウム)など)についても検討するとともに、 x 、 y 、 n の組成比をある程度広範囲に検討した⁵⁾。その結果、アルカリ土類元素をCaとしたCaLaCo系フェライトにおいて、LaとCoの置換量を増量することで、磁石特性を大きく改善できることを見出した⁵⁾。CaLaCo系フェライト磁石の特徴は、その材料組成がSr系や、SrLaCo系フェライトと大きく異なる点である。Sr、SrLaCo系フェライトは、 n 値をSrとFeの元素比 $2n = Fe/Sr$ あるいはSr、LaとFe、Coの元素比を $2n = (Fe+Co)/(Sr+La)$ と表現したとき、 $n=6.0$ のときにM型フェライトが単相で合成できることが確認されている。一方、CaLaCo系M型フェライトにおいて $n=5.2$ であり、 $n=6.0$ とはかなり差がある。最近の研究では、このような組成的な特徴が一因となって、原子レベルでの微細構造の変化が生じて磁石特性の向上につながったと考えられている⁶⁾。

これまで述べてきたように、添加元素やそれら成分組成に関する検討により、フェライト磁石の

特性向上、そのなかでも主に H_{cj} 向上が図られてきた。そういった組成探索とは別に、フェライト磁石の微細組織を制御することにより、保磁力を向上させようとする研究が検討されている。ここでフェライト磁石の作製工程について簡単に述べておく。フェライト磁石は、①素原料調合・混合⇒②仮焼⇒③微粉碎⇒④磁場中成形⇒⑤焼成⇒⑥研削加工の主に6つの工程を経て作製される。フェライト磁石の微細組織をコントロールするうえで、これら6つの工程の中でも③から⑤までの工程が特に重要である。これら工程を経て、永久磁石としての性能の指標となる磁石特性、すなわち残留磁束密度(B_r)や H_{cj} が決まり、前者は焼結体中におけるM相の比率、焼結密度、配向度(フェライト粒子の磁化容易軸方向への整列の度合い)、後者はM相粒子の粒径や粒界組織(磁区構造、主相界面の結晶磁気異方性など)と密接に関係している。Srフェライト磁石で、 B_r は飽和磁化の97%~98%で限界値に近いが、 H_{cj} は異方性磁界の15%~20%と B_r に比べると限界値との差が大きく検討の余地が残されている。 H_{cj} はフェライト焼結磁石の主相界面近傍組成や組織といった微細構造に強く影響を受けるため、その微細構造について解析し、高 H_{cj} 材料を作製するためのプロセス設計指針を獲得することが課題であった。フェライト焼結磁石の主相界面近傍組成や組織といった微細構造を解析した事例については割愛するが、その研究成果にもとづき H_{cj} を改善した結果についてここで簡単に紹介しておく⁷⁾。

配合組成を $Ca_{0.5}La_{0.5}Co_{0.30}Fe_{10.1}O_a$ とし、焼結助剤を $CaCO_3$: 1.25mass%、 SiO_2 : 0.68mass% (以降条件1とする)ならびに、 $CaCO_3$: 2.68mass%、 SiO_2 : 1.36mass% (以降条件2とする)として作製した焼結体の磁気ヒステリシス曲線を図2に示す。添加物量を増量すると B_r の低下や角型性の低下(条件1が94%、条件2が82%)を伴うものの、 H_{cj} が大幅に増加し、489kA/m(H_a の24%)となった⁷⁾。

得られた焼結体のFE-SEMによる組織写真を図3⁷⁾に示す。図3中いくつか矢印で例示した部分で、暗いコントラストとなっていることが確認できる。その部分に存在している相は、焼結助剤として添加したCaOや SiO_2 を主成分とする多粒子粒界相(フェライト粒子が3つ以上会合した粒界相)

である。SEMの視野中におけるその相の存在割合は、条件1が3.1%であったのに対して、条件2が6.3%となり概ね2倍程度の多粒子粒界相の領域が増加していることが確認された。また、条件1の焼結体中に含まれるフェライト粒子の平均結晶子径は $2.53\mu\text{m}$ であり、条件2ではその平均結晶子径は $2.18\mu\text{m}$ となり、添加物を増量することでフェライト粒子の粒成長を抑制できることがわかった⁷⁾。

以上のことから、条件2 (CaCO_3 、 SiO_2 の添加量が多い)の方が条件1 (CaCO_3 、 SiO_2 の添加量が少ない)に比べて結晶子径が小さく比表面積は大きくなるが、多粒子粒界相の形成量も2倍程度多いために、その相がより広い領域で均一にフェ

ライト粒子界面に介在しているものと考えられる。またそのような場合、その相は非磁性相もしくは低磁性相であり、その量の増加に伴って B_r が低下する半面、フェライト粒子を磁氣的に孤立させて、 H_c を高める役割を果たしたものと考えられる。

本稿で、フェライト磁石の高性能化は、Coの添加とその増量により、大きく進展したことを述べた。その一方で、近年のリチウムイオン電池の需要増に伴い、Co価格は一時的に大きく高騰し(2019年7月現在のおよそ3倍)、フェライト磁石産業に悪影響を及ぼした。今後は、フェライト磁石の価格変動リスクといった新たな問題を払拭するために、高性能フェライト磁石の省Co化を最重要課題ととらえ、技術開発を推進していく必要があるだろう。

参考文献

- 1) J. L. Went, G. W. Ratenau, E. W. Gorter and G. W. van Oosterhout, Philips Tech. Rev. 13, p. 194 (1951)
- 2) A. Cochardt, J. Appl. Phys., 34, p. 1273 (1963)
- 3) 日立金属株式会社ホームページ (<http://www.hitachi-metals.co.jp/products/>)、「高性能フェライト磁石NMFシリーズ」
- 4) 緒方安伸、高見崇、久保田裕、粉体および粉末冶金、50 (8)、636-641 (2003)
- 5) 小林義徳、細川誠一、尾田悦志、豊田幸夫、粉体および粉末冶金、55 (7)、541-546 (2008)
- 6) 中村裕之、まぐね、13 (2)、59-67 (2018)
- 7) 小林義徳、大阪大学大学院工学研究科 博士学位論文、75-76 (2016)

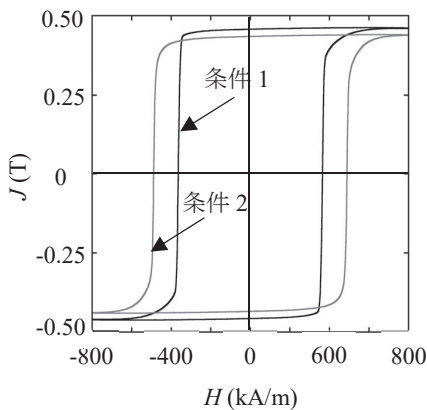


図 2 Ca-La-Co系M型フェライト磁石の磁気ヒステリシス曲線⁷⁾

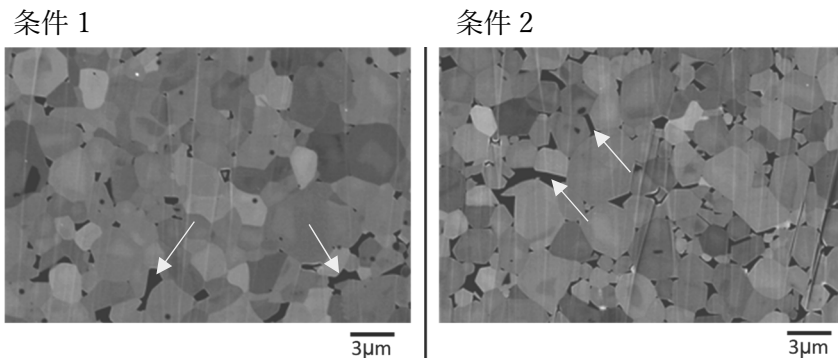


図 3 フェライト焼結磁石のFE-SEM像⁷⁾

4. 鑄造磁石・圧延磁石

三 菱 製 鋼 (株) 三 菱 製 鋼 (株) 三 菱 製 鋼 (株)
技術開発センター 福 田 方 勝

ま え が き

1917年に本多光太郎先生がKS鋼を発明されて近代永久磁石開発の幕が開いてから、すでに百年が経過しました。当初の永久磁石は鍛造磁石（焼入れ硬化型磁石）でした。「鑄造磁石・圧延磁石」という分類は、永久磁石の製造方法による分類で、材質による分類ではありません。材質としては金属・合金磁石に相当します。一般的には、鑄造磁石はアルニコ磁石と鉄・クロム・コバルト磁石（以下、Fe-Cr-Co磁石）を指し、圧延磁石はFe-Cr-Co磁石とその他の塑性加工法によって製造される永久磁石を指しますが、現在ではFe-Cr-Co磁石により淘汰されました。

1975年までは鑄造磁石の全盛期でした。その後、フェライト磁石、希土類磁石が増えていき、鑄造磁石のシェアは下がっていきました。現在では、鑄造磁石・圧延磁石は永久磁石全体の生産量に対して1%程度以下（重量比）と推定されています。しかしながら、鑄造磁石・圧延磁石は希土類磁石やフェライト磁石にはない優れた特徴をもっており、個性のある磁石として力を発揮しています。

◇ アルニコ磁石（鑄造磁石）

アルニコ磁石は、1931年に東京帝国大学の三島徳七先生がFe-Niの非磁性鋼の研究の中で発明したFe-Ni-Al系の「MK磁石」と、1933年に東北帝国大学の本多光太郎、増本量、白川勇記先生らが開発したFe-Ni-Co-Ti系の「NKS磁石」をオリジナルとして、その後の多くの研究開発により完成された永久磁石です。Fe、Al、Ni、Co、Cuを主な構成元素とし、それらの元素の頭文字をとってAlnico磁石と呼ばれました。

合金組成、鑄造組織、熱処理法により種々の磁気特性を持った磁石が開発されましたが、大きく以下の3つに分類されます。

・等方性アルニコ磁石：三島先生の発明した

MK磁石を基本として、Coを0～13%含むものです。溶体化処理温度から空冷し、さらに時効処理をするだけで磁気特性が得られます（等方性磁石）。Co含有量が1%以下のものは、特に「アルニコ磁石」と呼ばれています（代表組成：Fe-12Al-26Ni-4Cu）。

・アルニコ5磁石：等方性のアルニコ磁石の熱処理において、磁場中で熱処理（磁場中冷却）を行うことにより磁気特性が向上することが発見され、工業化されたものです（異方性磁石）。Fe-8Al-14Ni-24Co-3Cuを代表組成としています。さらに、鑄造組織を柱状晶として、その方向に磁場を印加して熱処理をすることにより磁気特性が格段に向上します。

・アルニコ8磁石：保磁力を高くするためにCoを増加しTiを添加したものです（Fe-7Al-15Ni-35Co-4Cu-5Ti）。溶体化処理後、磁場中で熱処理（等温磁場中熱処理）し、その後時効処理を行います。磁気特性は残留磁束密度はあまり高くはありませんが保磁力が高いという特徴があります。

◇ Fe-Cr-Co磁石（鑄造磁石・圧延磁石）

Fe-Cr-Co磁石は、1971年に東北大学の金子秀夫先生らによって発明され、その後の多くの研究開発により実用化された永久磁石です。Crリッチのマトリクス中に磁場印加方向に伸びたFeCo微粒子が分散することにより磁気特性が発現します。アルニコ磁石も同様で、分散硬化型磁石と呼ばれます。FeCrCo固溶体の α 相がFeCoの α_1 相とCrリッチの α_2 相に分解するため（ $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$ ）、二相分離型磁石とも呼ばれます。

初めは圧延磁石として大いに注目を浴び工業化され、その後、鑄造磁石としても工業化されました。開発当初は、アルニコ5磁石と同程度のCo含有量である20～25%Coの組成について研究が行われましたが、その後、溶体化熱処理を容易にする目的で15%Coの組成での開発が行われました。

1970年代後半のCo価格の高騰を契機として、より低Co組成の研究が行われました（15%Co→10%Co→8%Co）。実験室的には数%のCo組成においても保磁力は得られることが確認されていますが、時効処理が非常に長時間となるため工業的には10～15%Co程度の組成で製造されています。保磁力を大きくするためにMoを添加したり、溶体化処理を容易にするためにVやAlを添加したり、不純物であるCやNを固定するためにTiを添加したりする工夫が行われています。

熱処理の際磁場を印加しないで等方性としたものは、半硬質磁石としてそのヒステリシス特性を利用した用途に使用されます。

◇ 鋳造磁石・圧延磁石の特徴

鋳造磁石は、大気溶解→シェルモールド鋳造→粗加工→熱処理→仕上加工という工程により製造されます。一方、圧延磁石は、真空溶解→インゴット鋳造→鍛造→圧延という工程で形状を付与します。その後、熱処理→仕上加工という工程で製造されます。圧延、引抜き、打抜き、曲げ加工、絞り加工、切削加工も可能であることから、複雑形状、薄肉、細線、小型形状の製品が比較的容易に製造できる特徴があります。

アルニコ磁石、Fe-Cr-Co磁石の代表的な磁気特性を他の永久磁石と比較して表1に示します。磁石の強さを表す最大エネルギー積 $((BH)_{\max})$ は、フェライト磁石と同程度で希土類磁石には及びません。しかし、磁石から取り出すことができる磁束の目安となる残留磁束密度 (B_r) は高い値を示します。一方、保磁力 (H_{cj}) は他の永久磁石に比べて小さいため、減磁場の大きい用途には適しま

せん。逆に、保磁力が小さいことにより着磁に必要な磁場が小さくて済むというメリットもあります。

最も優れている特徴は、温度特性が極めて良いということです。Nd磁石の B_r の温度係数はアルニコ磁石の5倍も悪く、また、 H_{cj} の温度係数も非常に悪く、熱安定性に対して致命的です（100℃の温度上昇で40%に減少）。フェライト磁石は、 H_{cj} の温度係数が正の大きな値をもち、温度が下がると減磁することを示します（低温減磁）。アルニコ磁石、Fe-Cr-Co磁石は温度係数が小さく、しかも、500℃までの高温での使用も可能です。

希土類の価格は現時点では安定しています。しかし、中国での採掘・精錬コストの上昇などにより安心はできない状況です。アルニコ磁石とFe-Cr-Co磁石はレア・アースフリーの磁石ですからその影響は受けませんが、Coを含むためCo価格の変動の影響を受けるという弱点もあります。

◇ 鋳造磁石・圧延磁石の用途

アルニコ5磁石は、残留磁石密度が高いという特長を生かして内磁型スピーカの磁気回路に使用されています。また、温度特性が良いため、長期間（30年間）の温度安定性が要求される積算電力量計の制動磁石として広く用いられています。ただし、最近では半導体によるスマートメータの普及により減少しています。

等方性のアルニコ磁石は、Coを含まず、熱処理も簡単であることからコストパフォーマンスの良い磁石として、スピードメータ（特に二輪車用）などに使用されています。

Fe-Cr-Co磁石は、残留磁束密度が高く、Co含有量がアルニコ5磁石の1/2程度でありコストパ

表 1 アルニコ磁石、Fe-Cr-Co磁石と他の磁石の比較（cgs単位系）

分 類	$(BH)_{\max}$ [MGOe]	B_r [kG]	H_{cj} [kOe]	温度係数		使用上限 温度 [℃]	特長
				B_r [%/K]	H_{cj} [%/K]		
アルニ	1.5	6.5	0.50	-0.02	+0.03	550	Coフリー
アルニコ5	5.5	13.0	0.65	-0.02	+0.03	550	高 B_r
アルニコ8	5.5	9.0	1.50	-0.02	+0.03	550	
Fe-Cr-Co	6.0	14.0	0.60	-0.03	+0.04	500	高 B_r
Srフェライト	4.5	4.5	3.5	-0.18	+0.40	250	低価格
Sm-Co	30	11.2	10.5	-0.03	-0.25	350	高 $(BH)_{\max}$
NdFeB	50	14.5	11.0	-0.11	-0.59	150	高 $(BH)_{\max}$

パフォーマンスが良いということで、同様にスピーカの磁気回路や、ハイブリッド型ステッピングモータに使用されています。例として、このモータに使用されるFe-Cr-Co磁石とNd磁石の減磁曲線を図1に示します。パーミアンス係数(Pc)が約30以上では42MGOeクラスのNd磁石と同等以上の高い磁束密度が得られます。このステッピングモータは、高分解能であるため複写機などのOA機器、FA機器(位置決め機構)、ロボット、医療機器、遊戯機器などに大量に使用されています。

Fe-Cr-Co圧延磁石は、形状の自由度を生かし、センサ、リレー、リードスイッチなどに使用されています。また、薄肉のリング形状の圧延磁石は、等方性のヒステリシス特性を生かして、トルクカップラなどの部品として複写機やプリンタなどの紙送り制御用などに使用されています。

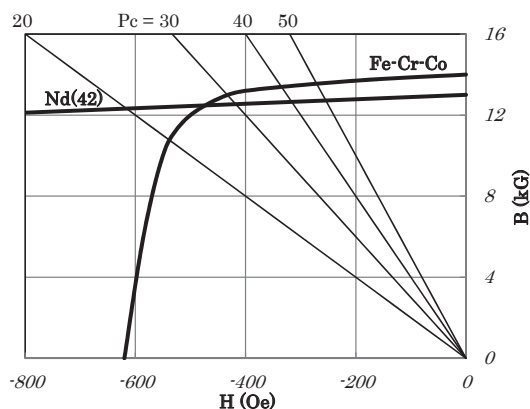


図 1 Fe-Cr-Co磁石とNd磁石の減磁曲線

むすび

現在製造されている永久磁石はNd磁石とフェライト磁石が主流です。そして、この傾向は今後も続くものと思われます。2050年に向けてNd磁石の需要はますます増えることが予想されています。それらを牽引するのは電動自動車の駆動モータです。これらの需要に対応するためには、現在の生産量の数十倍が必要となり、Nd磁石の供給が不足することも起こりえます。Nd磁石のハイグレードのものは駆動モータに向けられるでしょうが、それ以外の製品にはローグレードのものが使われるでしょう。足りない分はほかの磁石となりますが、選択肢としてフェライト磁石しかないという状況にはならないようにするべきだと思います。

形状自由度が非常に大きい圧延磁石、ボンド磁石、温度安定性に優れ高い磁束密度が得られる鑄造磁石など用途に応じて使い分けていくこと、すなわち、『永久磁石の多様性』(図2)が大事であると思います。

磁力が強い磁石は当然として、形状自由度のある磁石、フレキシブルな磁石(ボンド磁石)、温度安定性の良い磁石、熱に強い磁石、放射線に強い磁石、機械強度の強い磁石、耐食性のある磁石、安い磁石、弱い磁石(教材用、玩具用)など多様な特長を生かして永久磁石を使いこなしていく必要があると思います。鑄造磁石、圧延磁石が活躍する場は、まだまだあると思います。

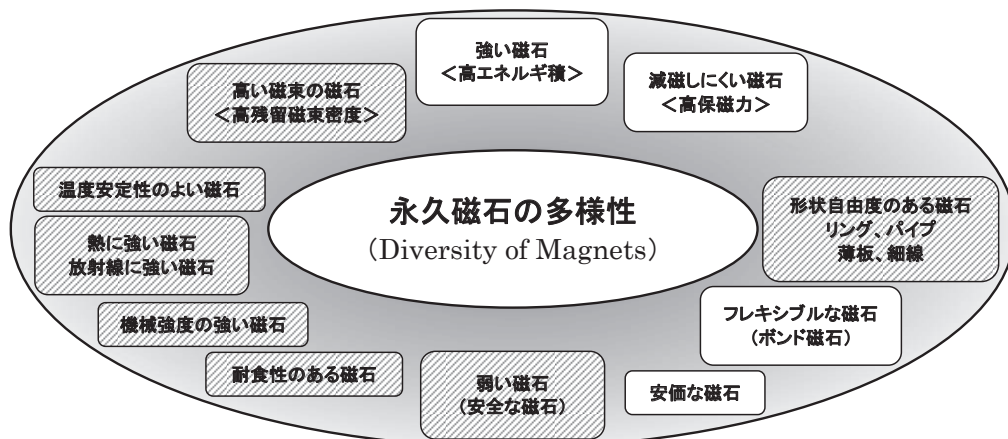


図 2 永久磁石の多様性(網掛けは鑄造磁石、圧延磁石の長所)

Ⅳ．軟磁性材料

1．電磁鋼板

日 本 製 鉄 (株) もり しげ のぶ さと
電磁鋼板研究部 主幹研究員 森 重 宣 郷

◇ 電磁鋼板とは

電磁鋼板は鉄の磁気特性を引き出した薄鋼板であり、変圧器やモータ、発電機のほとんど全ての鉄心に積層して使用される材料です。鉄心に電磁鋼板を利用するのは、磁気エネルギーを効率的に利用するためです。理科の実験で作った電磁石を思い返せば、イメージを持っていただけかと思えます。電磁鋼板の生産量は世界で年間1,000万トンを超え、最も多く使われている磁性材料であると言え、見えないところで我々の生活を支える重要な材料です。

電磁鋼板には、方向性電磁鋼板（Grain-Oriented electrical steel sheet、GO）と無方向性電磁鋼板（Non-Oriented electrical steel sheet、NO）の二種類があり、GOは変圧器の鉄心に、NOはモータ・発電機の鉄心に主に使用され、用途に応じて使い分けられています。図1に示すように、変圧器は、電気エネルギー⇒鉄心に発生する磁気エネルギー⇒電気エネルギーの順に変換することで、電圧を変えます。モータは、電気エネルギー⇒鉄心に発生する磁気エネルギー⇒運動エネルギーの順に変換することで、回転します。いずれの場合も、銅やアルミのコイルを巻いた方向に強い磁石となる性質を利用しています。

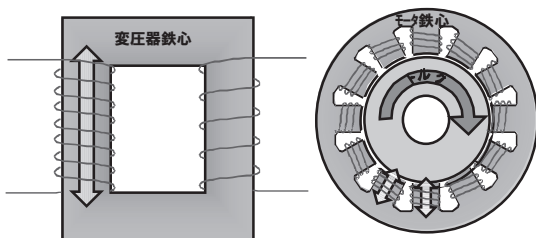


図 1 変圧器とモータの模式図

電磁鋼板に要求される磁気特性は、大きく分けて二つあります。一つは磁気エネルギーを閉じ込める性能である磁束密度（正確には、磁場に対する敏感さである透磁率）が高いことです。もう一つは電気エネルギーと磁気エネルギーの変換時に熱として失われる損失（鉄損）が小さいことです。電磁鋼板は、これら二つの特性を高めるための造り込みを施しています。

磁束密度を高める造り込みとは、結晶方位の制御に他なりません。鉄は原子一つ一つの持つ磁力（磁気モーメント）が強く、それぞれが平行に揃って自発的に磁化を形成する性質を持つ“強磁性体”です。この磁化が結晶中でどの方向を向いているかによって磁気エネルギーが変化するため、磁化されやすさが結晶方位（原子の並ぶ方向）に依存する磁気異方性が発現します。鉄の結晶構造では、図2に示すように、 $\langle 100 \rangle$ 軸が最も磁化されやすい方向（磁化容易軸）です。

一方、我々が使用する電磁鋼板は、様々な結晶方位を持った結晶粒の集合体です。用途に応じて、 $\langle 100 \rangle$ 軸の揃え方を制御して鋼板を作り込むことが非常に重要です。鋼板の名前に“方向性”と付くのは、このためです。具体的には、変圧器鉄心用のGOは、圧延方向にできるだけ $\langle 100 \rangle$ 軸が揃うように製造されています。このような方位制御を施すことで、コイルに僅かな電流を流しただけで非常に強い電磁石が得られることになります。一方、モータは強いトルクを得つつスムーズに回転することが重要です。そこでモータ鉄心用のNOは、鋼板面内に $\langle 100 \rangle$ 軸を持つ結晶粒が、全周方向に満遍なく存在することを目指しています。“無方向性”電磁鋼板と呼ばれていますが、実はNOも結晶方位を高度に制御した鋼板と言えます。

もう一方の重要な磁気特性である鉄損は、磁化

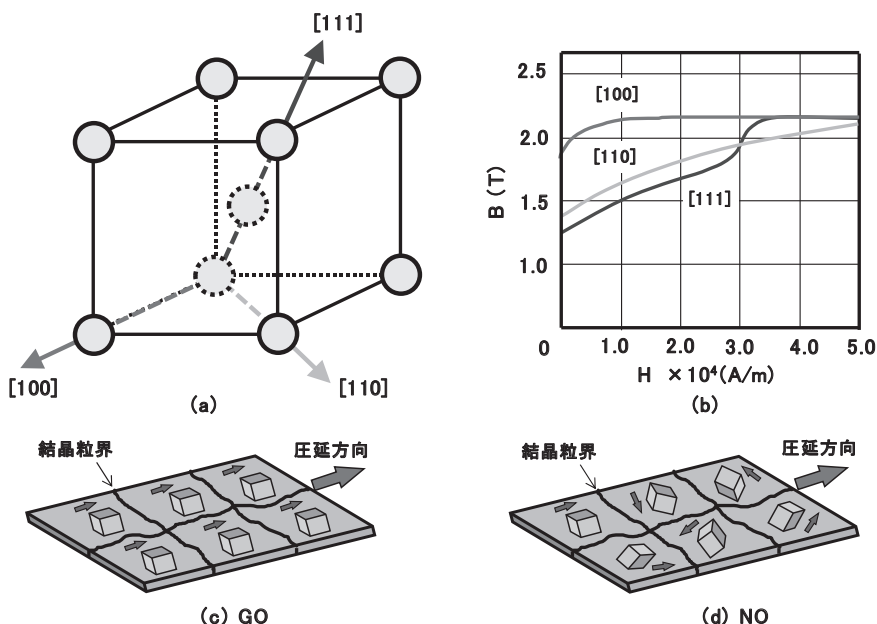


図 2 鉄の結晶構造と磁気異方性、GO、NOの結晶方位

変化で誘導される電流（渦電流）による発熱（渦電流損）が主原因の一つです。渦電流を抑制するために、電磁鋼板では電気抵抗を高める合金元素を添加しており、電気抵抗増加の効果が大きく、かつ安価な珪素（Si）が最もよく用いられています。また、渦電流の抑制には、板厚の薄手化も有効です。積工数は増加してしましますが、板厚の薄い電磁鋼板を用いることで、鉄心の損失を低減することができます。電磁鋼板の板厚が一般の鉄鋼材料と比較して薄いのは、このためです。このとき、積層した鋼板間で渦電流が流れることのないよう、電磁鋼板の表面には絶縁被膜が施されています。これら渦電流を抑制する手法のほか、電磁鋼板が磁化されるのを妨げる結晶粒界、不純物、歪み等の低減や、 $\langle 100 \rangle$ 軸を鋼板面内で増加させることも鉄損低減には有効です。電磁鋼板はこれらを総合的に制御することで、鉄の磁気特性を引き出しています。以下、開発事例を紹介します。

◇ 高磁束密度低鉄損GO

変圧器は設置されたその日から絶えず交流で磁化され、その寿命までの数十年間、エネルギー変換を続けると同時に鉄損を発生し続けます。そのため、低鉄損のGOを使用することは、将来に亘り

エネルギー消費を抑えられることを意味します。一方、設置スペース、鋼板使用量、コイル等の材料費など、経済的な観点からは変圧器は小型化することが好ましく、電磁鋼板を高い磁束密度で使用するよう設計されます。しかし、一般にこのような使用条件では電磁鋼板の鉄損は大きくなるため、高磁束密度低鉄損GOの開発が重要となります。

高磁束密度低鉄損GOは、結晶方位制御のさらなる厳格化により実現されます。前述した $\langle 100 \rangle$ 軸の圧延方向への集積度（ずれ角の平均値）が、従来のGOでは約 7° であったものを、約 3° まで高めることができました。これにより磁束密度が5%以上高くなり、高い磁束密度での鉄損を20%も下げることができました。

また、高磁束密度GOには、変圧器の騒音が小さくなるという効果もあります。変圧器に近づくとブーンという音にお気づきの方もいらっしゃるでしょう。この騒音の原因の一つはGOの“磁歪”です。磁歪とは電磁鋼板が磁化されたときに伸び縮みする現象ですから、鉄損と同様、寿命まで絶えず騒音を出し続けることになります。従って、騒音を低減させることは極めて重要です。一般に、使用する磁束密度を下げれば騒音は減少しますが、

高磁束密度設計の要請と背反するため、電磁鋼板自身の磁歪が小さいことが望まれます。高磁束密度GOは、従来のGOよりも磁歪が小さく、変圧器騒音を低く抑えることができます。近年、都市近郊に設置される変圧器が増えていることから、騒音低減の要求は強まっています。高磁束密度低鉄損GOは、今後も変圧器の高効率化と低騒音化に貢献し続けます。

◇ 磁区制御低鉄損GO

GOの鉄損をさらに低減する技術として、電磁鋼板の表面にレーザ処理や機械溝加工を施す“磁区制御技術”が開発されています。実は、電磁鋼板の内部は均一に磁化されているわけではなく、同じ方向に磁化されている“磁区”に分かれています。図3はGOの磁区構造を示しています。白黒のコントラストは磁化の向きを表し、それぞれの磁化の向きは<100>軸に沿っています。その境界である“磁壁”で磁化の向きが反転しており、外部から磁場をかけていない時、白・黒それぞれの領域の体積は等しくなります。

外部から磁場をかけると、磁壁が移動し、それぞれの領域の体積が増減して磁化されます。図3でいえば、右向きの磁場で白い磁区が増え、左向きの磁場で黒い磁区が増えます。変圧器鉄心のように交流で励磁されると、磁壁は移動を繰り返し、渦電流は磁壁に集中します。その際、磁壁の間隔（磁区幅）が小さい方が、磁壁の動きはゆっくりとなり、誘導される渦電流は小さくなるので、鉄損

も低く抑えることができます。この原理を利用しているのが磁区制御技術です。図3－右はレーザ処理を施したGOの磁区構造であり、磁区が細分化されているのが判ります。この磁区制御技術によって鉄損を10%近く低減したGOは、最高効率の変圧器に使用されています。

◇ 高効率NO

NOの主用途であるモータは、工場の機械設備や電車などの比較的大型な用途以外に、家庭でも数多く使用されています。トップランナー方式導入に伴って、消費電力量の多い機器については省エネ基準の達成が義務付けられています。長時間使用される家電製品はモータでの消費電力量が大きく、なかでもエアコンと冷蔵庫は、この二つの用途のみで家庭内消費電力の約40%を占めています。従って、これらの圧縮機モータの効率改善は必須であり、鉄心での損失を低減するとともに、コイルに流れる電流による発熱（銅損）も低減する必要があります。このため、NOには低鉄損と高磁束密度（少ない電流で高い磁束密度が得られるため、銅損低減に有効）が求められます。

鉄損低減を目的として珪素などの合金元素が添加されますが、その分、強磁性体である鉄の量が減り、磁束密度は低下します。そこで、合金元素とプロセス条件を適正化し、同一の鉄損でも高い磁束密度を有する高効率NOシリーズが開発されました。高効率NOは、家電のみならずハイブリッド車の駆動モータなどにも使用されています。

◇ 高張力NO

近年、モータ性能向上を目的に、回転部分（回転子）の内部に永久磁石を埋め込んだIPMモータが多く製造されています。駆動条件や回転子の形状も多岐にわたり、高速回転時の遠心力による変形や、回転数変動に起因する疲労破壊など、機械特性の要求も増えてきました。この要請にこたえるため、降伏応力を高めた高張力NOが開発されています。

変圧器、モータの高度化に合わせて、電磁鋼板は着々と進化しています。これからも市場ニーズに応えるために、高性能電磁鋼板の開発を続けていきます。

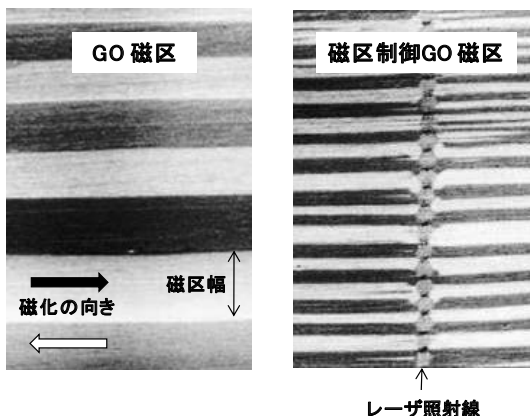


図 3 GOの磁区構造

2. 電磁ステンレス鋼

大同特殊鋼(株) さいとう あき ひこ
技術開発研究所 齋 藤 章 彦

ま え が き

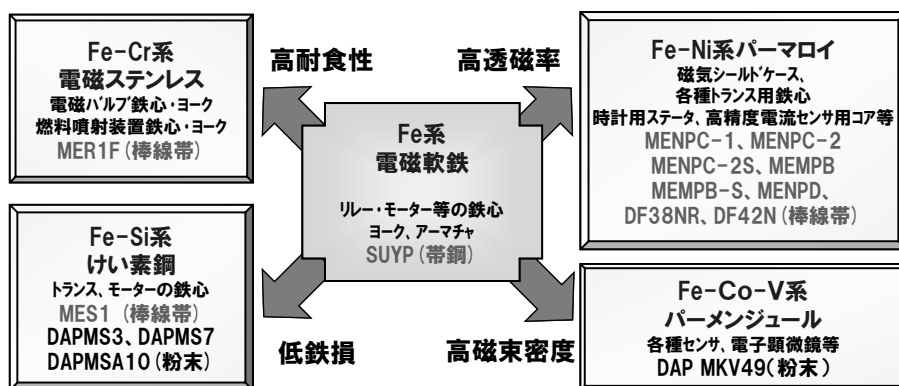
磁性材料には、「磁石である硬質磁性材料」と「磁石にくっつく軟磁性材料」があります。わかりやすく言うと、例えば、会議室等にホワイトボードがあるとします。磁石で、会議資料をクリップしたりします。その構造は、磁石と紙である資料とホワイトボードです。磁石から磁界を発生させ、ホワイトボードでその磁界を受け止めるため、紙資料は、重力に負けずに、その場に留まります。このホワイトボードこそ、軟磁性材料です（ホワイトボードによっては、そうでないものもありますが）。軟磁性材料にも、いろいろな種類があり、金属系や酸化物系（ソフトフェライトと呼ばれます）です。金属系軟磁性材料にも、いろいろな種類があり、アモルファス材（非結晶）やナノ結晶材や結晶系材料があります。結晶系材料には、リレーやモータヨーク・コア、電磁弁に使用される純鉄系の電磁軟鉄や、磁気センサに用いられる微弱磁石（磁界）に反応する高透磁率材料（主にパーマロイ、Fe-Ni系材料）や、ドローンのモータコア・ヨークや電子顕微鏡の磁気が集中する部分に使用される高磁束密度材料であるパーメンジュール

ル（パーメンバー等、呼び名は多数有）、そして、この章で紹介する電磁ステンレス鋼であります（図1）。

◇ 電磁ステンレス鋼

一般に「ステンレス鋼」と聞くと、非磁性、すなわち、磁石を近づけても、くっつかない材料として知られていますが、電磁ステンレス鋼は、弱い磁石でもくっついて錆びない特殊な材料です。

最初に登場するのは、1959年頃、アメリカの雑誌に、低炭素で13%クロムを含有するステンレス鋼が記載されていました¹⁾。1970年代に入ると、自動車の電動化が急速に発展します。従来、ガソリン燃料をエンジンシリンダー内へキャブレターで空気と混合し、挿入噴射し、爆発させていました。それでは、ガソリン燃料を、かなりの割合で、空気中へ放出してしまい無駄になっていました。そこで、電磁弁（電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクター）を用いて、開閉で、ガソリン燃料をエンジンシリンダー内へ噴射し、無駄なガソリン燃料を低減しようとした。図2²⁾に、そのインジェクターの構造を示しますが、当初は、インジェクター先端の開閉を担うコア（鉄芯部）



DAPとMENは大同特殊鋼の登録商標です

図 1 軟磁性材料

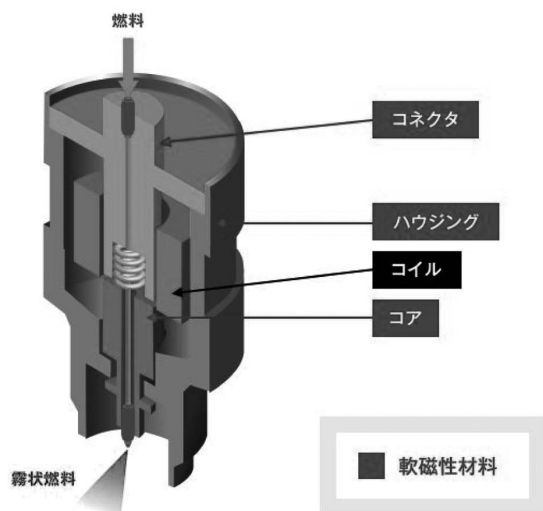


図 2 電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクター

にパーマロイPB系軟磁性材料を、磁気回路を形成するハウジングには、純鉄系軟磁性材料を、固定子側で、ばね力に反発してコアを電磁力で吸引駆動するコネクタ（鉄芯部）には電磁ステンレス鋼が採用されました。

◇ 電磁ステンレス鋼の快削性

主な用途である電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクターでは、コネクタ部分は、主に冷間鍛造で成型します。その後、仕上げで、燃料が通過する細長い穴を開ける必要性がありました。そこで、大同特殊鋼（弊社）の加藤哲男氏が、快削元素を、アメリカで開発された電磁ステンレス鋼に添加することで、この問題を解決しました。「快削電磁ステンレス鋼」の誕生でした³⁾。

◇ 電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクターに求められる電磁弁の開閉応答性

当初のインジェクターでは、電磁ステンレス鋼は、コネクタ部分のみに使用されていました。コア部分は、軟磁気特性の透磁率の高いパーマロイPB系材料が使用され、ハウジング部分には、磁束密度の比較的高い電磁軟鉄が使用されていました。

1987年頃から、キャブレターに替わり、電子制御式噴射弁インジェクターが、ガソリン燃料のエンジンシリンダー部への供給装置として、主流を

占めるようになりました。また、さらなる燃費向上の社会的ニーズも高まりを見せていました。そのような時代背景で、電子制御式噴射弁インジェクターには、精度よく、ガソリンを噴射することが求められ、噴射弁の開閉速度（応答性、短時間での噴射開閉）の向上が求められました。また、時を同じくして、それまでの電磁場解析は静磁場しか計算できませんでしたが、動磁場も計算できるようになっていました。まだ、計算精度は、ソフトによって異なっていました。現在では、どの解析ソフトも、電磁弁の開閉の動磁場解析で出来るようです。そこで、大同特殊鋼では、動磁場解析を行い、軟磁性材料の各種電磁気特性（比透磁率 μ_m 、保磁力 H_c 、飽和磁束密度 B 、電気抵抗等）のうち、どの特性が、電子制御式噴射弁インジェクターの電磁弁の開閉応答性に、効果があるかを定量的に解析しました（図3）⁴⁾。

軟磁性材料の測定したBH曲線（比透磁率 μ_m 、保磁力 H_c 、磁束密度 B を含んだデータ）と電気抵抗や、吸引力を発生させるためのコイルにパルス（台形波）電圧波形を入力データとして、コアとコネクタに発生するコイルによる電磁力（吸引力）が10 [N] になるまでの時間を立ち上がり時間 T_o （open）としました。つまり、立ち上がり時間 T_o を、軟磁性材料の各種電磁気特性を変化させて、いかに短時間になるかをシミュレーションしました。

その結果、軟磁性材料の特性のうち、比透磁率 μ_m や保磁力 H_c は、ある程度あればよく、やはり、軟磁性材料の電気抵抗が、電子制御式噴射弁インジェクターの開閉応答性に一番効くことがわかりました。その解析結果を受け、従来の電子制御式噴射弁インジェクターの磁気回路を形成するハウジングは電気抵抗が低い電磁純鉄（電気抵抗 $\rho = 0.2$ [$\mu\Omega m$]、比透磁率 $\mu_m \div 4,000$ ）やコアも電気抵抗が少し低めのパーマロイPB（電気抵抗 $\rho = 0.45$ [$\mu\Omega m$]、比透磁率は高い $\mu_m \div 140,000$ ）を電磁ステンレス鋼（電気抵抗 $\rho = 0.7$ [$\mu\Omega m$]、比透磁率は $\mu_m \div 4,000$ ）に変更することで、電子制御式噴射弁インジェクターの特性（電磁弁の開閉応答性）が向上しました（図3）⁴⁾。

◇ 電磁ステンレス鋼の耐食性

当初、電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェ

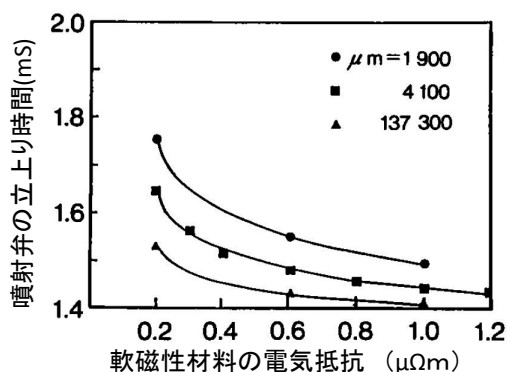


図 3 軟磁性材料の電気抵抗と比透磁率 μm の噴射弁の応答性（立上り時間）に及ぼす影響

クター（EFI, Electronic Fuel Injection）では、コネクター部分のみに快削電磁ステンレス鋼は採用されていました。ここでの課題は、ガソリン燃料に対する耐食性です。

世界中で、いろいろなガソリン燃料が使用されており、バイオ燃料や発展途上国等で使用される粗悪ガソリン等があります。コネクター部分については、それらのバイオ燃料や粗悪ガソリンにも錆びない軟磁性材料が求められます。

それらの粗悪ガソリンにも耐える耐食性を、電磁ステンレス鋼は、もっています。

先程も記述しましたが、電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクターの開閉応答性には、磁気回路を形成するハウジング部、コネクター部、コア部に、電磁ステンレス鋼を使用することで、特性が向上することがわかり、徐々に、電磁ステンレス鋼の適用部品が増えていきました。

ここで、問題になったのは、ハウジング部の耐食性でした。寒冷地や、アメリカ等の国々では、道路の凍結防止のために、塩をまいていました。電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクターのハウジング部分は、エンジンシリンダーの近くに設置され、道路からの塩の影響を受けるため、塩水噴霧にも耐える耐食性が became 必要になりました。当初の電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクター

のハウジング部品は、電磁純鉄が使用されていました。当然、耐食性が必要なため、ハウジング部品は、メッキ塗装（黒色が多かった）が、ハウジング成形後、別工程で行い、コスト高にも繋がっていました。

大同特殊鋼が、開発したFe-Cr-Al系電磁ステンレス鋼は、従来のSi添加から変更し、アルミを添加することで、軟磁性材料の表面にアルミナや酸化クロム層が形成されたため、低炭素13%クロム鋼よりも耐食性が向上したと推測しています⁴⁾。

◇ 電磁ステンレス鋼の冷間鍛造性

電子制御式ガソリン燃料噴射弁インジェクターのハウジング部品、コネクター部品、コア部品は、従来、主に、切削中心に部品加工していました。それでは、材料の歩留りは、悪くなります。そこで、部品メーカーは、なるべく、素材を100%使うことで、歩留り向上、コスト低廉化を狙い、冷間鍛造で部品成型を狙いました。目標は、電磁純鉄並の冷間鍛造性と、電磁純鉄の約3.5倍の電気抵抗と、塩水噴霧等にも耐える耐食性と、軟磁気特性（比透磁率 $\mu m > 3,000$ ）が求められました。

従来の電磁ステンレス鋼は、Fe-13Cr-0.8Si-0.3Alでしたが、この成分では、純鉄並の冷間鍛造性は望めませんでした。そこで、大同特殊鋼は、Siの代わりにAlを多く添加することに着目しました。最終的にはFe-13Cr-0.7Alの電磁ステンレス鋼を開発しました。Al添加の効果は、特に、冷間鍛造性を向上させ、純鉄並の冷間鍛造性を得ることが出来ました。耐食性も向上し、電気抵抗もCrとAlの複合添加の効果があり、少量のAlでも従来材と同等の値を得ることが出来ました。

参考文献

- 1) 加藤哲男：折々の葉 pp. 115-116 (2007)
- 2) <https://www.daido.co.jp/products/smm/what/activity.html>
- 3) 加藤哲男：電気製鋼 Vol 42, No. 1, pp. 41-54 (1971)
- 4) 齋藤章彦：電気製鋼 Vol 61, No. 3, pp. 183-192 (1990)

3. 電磁軟鉄、パーマロイ

大同特殊鋼(株) さいとうあきひこ
技術開発研究所 齋藤章彦

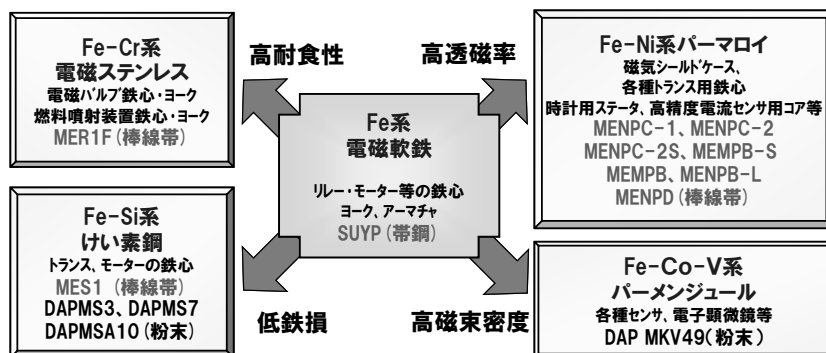
まえがき

Ⅳ 2. 電磁ステンレス鋼の紹介で述べましたが、磁性材料には、「磁石である硬質磁性材料」と「磁石にくっつく軟磁性材料」があります。わかりやすく言うと、例えば、会議室等にホワイトボードがあるとします。磁石で、会議資料をクリップしたりします。その構造は、磁石と紙である資料とホワイトボードです。磁石から磁界を発生させ、ホワイトボードでその磁界を受け止めるため、紙資料は、重力に負けずに、その場に留まります。このホワイトボードこそ、軟磁性材料です（ホワイトボードによっては、そうでないものもありますが）。軟磁性材料にも、いろいろな種類があり、金属系や酸化物系（ソフトフェライトと呼ばれます）です。金属系軟磁性材料にも、いろいろな種類があり、アモルファス材（非結晶）やナノ結晶材や結晶系材料があります。結晶系材料には、リレーやモータヨーク・コア、電磁弁に使用される純鉄系の電磁軟鉄や、磁気センサーに用いられる微弱磁石（磁界）に反応する高透磁率材料（主にパーマロイ、Fe-Ni系材料）や、ドローンのモータコア・ヨークや電子顕微鏡の磁気が集中する部分に使用される高磁束密度材料であるパーメンジュール

ル（パーメンバー等、呼び名は多数有）、この章では電磁軟鉄とパーマロイについて紹介します（図1）。

◇ 電磁軟鉄

一般に「電磁鋼板」（Fe-Si系）は、無方向性では、xEV用モータ等のステータやコア材に使用され、方向性の場合では、変圧器の巻コアに多く使用されています。では、この章で紹介する「電磁軟鉄」は、いかなるものかと思われるかも知れません。電磁軟鉄は、JIS C2504で定義されています。主な用途は、リレー、電磁石、磁気クラッチ、ブレーキ、発電機、モータ等の鉄芯、継鉄、その他磁気シールドです。化学成分としては、低炭素、低シリコン等です。直流の磁気特性によって、いくつかの分類があります。例えば、SUY-0（保磁力 $H_c < 60$ [A/m]）、SUY-1（保磁力 $H_c < 60$ [A/m]）、SUY-2（保磁力 $H_c < 120$ [A/m]）、SUY-3（保磁力 $H_c < 240$ [A/m]）等、分類されています。最近では、xEVに使用されるリレーの鉄芯として多く使用されています。特徴は、軟質磁性特性（例えば、保磁力 H_c が、いくつ以下というように）を品質保証している点です。これらの保証値に従って、顧客（ユーザ）は、どの電磁軟鉄を使用するかを判断しています。



DAPとMENは大同特殊鋼の登録商標です

図 1 軟磁性材料

◇ 電磁軟鉄の磁気特性

電磁軟鉄は、主に、部品成型後、磁気特性を確保するために焼鈍処理を行います。いわゆる磁気焼鈍と言われ、通常、真空中で850℃×2時間（保持）→冷却、で行います。

電磁軟鉄は、不純物、特に、炭素、窒素、酸素の影響が大きく、炭素については、0.1wt%以下にすることによって、軟磁気特性が担保されています¹⁾。

◇ パーマロイ

パーマロイとは、Fe-Ni系の軟磁性材料です。JIS C2531で定義されています。Fe-41～51%Ni系をPB、Fe-70～85%Ni系をPC、Fe-35～40%Ni系をPDと呼ばれています。主に、パーマロイPBとパーマロイPC系軟磁性材料が使用されています。

パーマロイPB系軟磁性材料の用途としては、大電流／高感度用磁気センサー、磁気シールド等、xEV用電流センサー、自動車電動パワーステアリング用トルクセンサ、変流器、ステッピングモータです。パーマロイPC系軟磁性材料の用途としては、微弱磁界／超高感度用磁気センサー、磁気シールド等、xEV用の充電ケーブル内の漏電遮断器用ZCTコア、xEV用電流センサー、自動車電動パワーステアリング用トルクセンサ、変流器、ステッピングモータです。

パーマロイPB系の主な成分は、Fe-41%Ni（大同特殊鋼では、MENPB-L）、Fe-45%Ni（大同特殊鋼ではMENPB）及びFe-48%Ni（大同特殊鋼ではMENPB-S）です。

パーマロイPC系では、PC-1系軟磁性材料と、PC-2系軟磁性材料系があります。

PC-1系の主な成分は、Fe-81%Ni-5%Moであり、PC-2系の主な成分は、Fe-78%Ni-4.5%Mo-3.5%Cuです。

◇ パーマロイPC系軟磁性材料の最適成分例

パーマロイPC系軟磁性材料では、磁性成分Fe、Ni以外の成分、例えば、Cu、Mo等も磁気特性に影響があるとされています。具体的には、磁氣的Ni原子数とFe原子数の最適な比が存在します。Fe、Ni以外の添加元素・不純物元素の価電子により3d空孔が埋められ、磁気モーメントが失われま

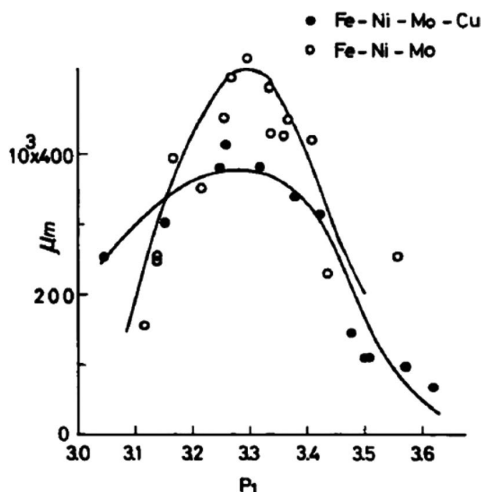


図 2 最大透磁率とP1値（例）

す。そこで、Fe、Ni元素や添加元素及び不純物元素の成分範囲を理論計算し、具体的には、下記（1）式のP1値を3.3にすると透磁率μmが最高値になります。そのために、Cu、Mo、他の元素も含めて、P1値を3.3に最適化する必要があります。

$$P_1 \cong \text{Magnetic Ni/Fe}$$

$$= \left\{ C_{Ni} - \frac{1}{3} \sum_i (5Z_i - 3) C_i \right\} / C_{Fe} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 C_{Ni} : Ni at%, C_{Fe} : Fe at%

C_i : 添加元素 i の at%

Z_i : 添加元素 i の価電子数（例えば

Cuでは $Z_i = 1$, Moでは $Z_i = 6$ ）

◇ パーマロイ系軟磁性材料の磁気特性

各種パーマロイ系軟磁性材料の位置付けを図3に示します。

◇ パーマロイ軟磁性材料の社会への波及効果

従来の軟磁性材料（酸化物系や積層電磁鋼板）を用いた電流センサーでは、透磁率がパーマロイより高くないので、電流検出精度が悪い。例えば、従来の軟磁性材料（酸化物系や積層電磁鋼板）を用いたEV用電流センサーでは、バッテリー1充電当たりの走行距離が200kmぐらいとすると、パーマロイPB系軟磁性材料を、xEV化の要であるバッテリーとインバータ間の電流センサー・コアに使

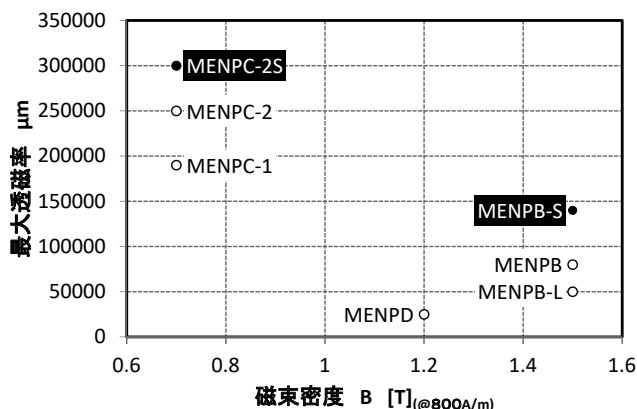


図 3 最大透磁率 μ_m と磁束密度 B

用すると、電流を高精度に検知でき、バッテリー残量を正確に把握できるので、バッテリーを最大限（例えば電池残量10%から90%まで）使用できるため、走行航続距離が約400kmと飛躍的に向上します。世界のxEV化への加速にも貢献しています。xEV車の走行距離の飛躍的向上により、省エネルギーに多大に貢献します。また、自動運転分野では、超高精度制御が可能となり、例えば、自動駐車や安全な運転制御が実現、安全・安心・省エネルギー社会の実現を達成します。

◇ 高磁束密度高透磁率材パーマロイMENPB-Sの例

パーマロイMENPB-Sは、自動車の自動運転・電動化のための電流センサー等の高精度化・小型化・大電流化に対応した材料です。高感度化に必要である透磁率を140,000に高め、加えて磁束密度が1.5 [T]と高く、センサーの小型化にも対応しています。そのため、xEV用途では、2次電池の充放電検知のための電流センサーの高感度化により、バッテリー残量の計測が今まで以上に正確になり、使用できる電池の容量範囲が広がるため、走行航続距離を増加させることが可能になります。また、駆動系モータの電流センサーなどにも用途が広がっています。パーマロイMENPB-Sは、従来のMENPBから、成分バランスの調整および製造プロセスの最適化を行い高透磁率化を行った材料です。自動車の電動パワーステアリング用トルクセンサの磁気コアなどの他、変流器、磁気シールド、ステッピングモータのコア等に適しています^{3)、4)}。

◇ 超高透磁率材パーマロイMENPC-2Sの例

一方、パーマロイMENPC-2Sは、磁気センサーの超高感度化に対応した材料です。比透磁率を300,000まで向上させており、電流の不具合などを検出するセンサー用コア材に活用が期待できます。例えば、EVやPHVなどでは、新規格IEC-62752:2016にも記載されているように、家庭用電源および充電スタンドから充電するケーブルには、安全上、高感度の漏電遮断器が義務付けられています。漏電遮断器には、漏電を検出するZCT（零相変流器）が必須です。ZCTは透磁率の高い軟磁性材料のコア材と検出コイルから構成されています。コア材の比透磁率を高めることで、微弱な漏電電流を瞬時に検知できるので、ZCTに適した材料です。パーマロイMENPC-2Sは、MENPC-2から微量添加元素の成分バランスと製造プロセスを最適化し超高透磁率化を行った材料です^{2)~4)}。

むすび

今回紹介したパーマロイPB系軟磁性材料及びパーマロイPC系軟磁性材料は、高透磁率軟磁性材料であり、従来の電磁鋼板などに比べ透磁率が格段に高いため、センサー用コアとして積層せずに使用することができます。パーマロイPB系軟磁性材料は、特に、xEV用2次電池の充放電電流センサー・コアに用いられています。パーマロイPC系軟磁性材料は、特に、xEV用の充電ケーブル制御ボックス内の漏電遮断器用ZCTコアに適しています。

パーマロイ軟磁性材料は、電流・磁気センサーの高感度化や小型化に対応した高透磁率軟磁性材料であり、今後も自動運転・xEVの発展への寄与するものと考えます。

参考文献

- 1) 加藤哲男：電気製鋼 Vol 36、No. 3、pp. 107-115 (1965)
- 2) 加藤哲男、高野正吉、矢萩慎一郎：電気製鋼 48、pp. 265-270 (1977)
- 3) プレスリリース：https://www.daido.co.jp/about/release/2018/0301_smm.html
- 4) 新聞記事（鉄鋼新聞）：https://this.kijiiis/349395437108806753

4. 粉末軟磁性材料

山陽特殊製鋼(株) あいかわよしかず
粉末事業部 粉末技術部 相川芳和

まえがき

軟磁性材料とは、磁場の影響下では磁化される（磁石となる）が、磁場が存在しない場合は磁力を持たない（磁石ではない）という特異な性質を有した材料の総称である。例えば、小学生の頃の実験等で覚えておられる方も多いだろうが、U字型の磁石（棒磁石でもいい）に釘が引き寄せられ、釘同志も引き付け合う状態を想像してほしい。これは引き寄せられる釘（鉄）が、軟磁性としての特徴を有しており、磁石が存在する（磁場の影響がある）がゆえに釘自身も磁石として振る舞うことに起因している。

軟磁性材料は、前記のような特徴を活かして、家電やコンピューター関連機器、一般産業機器として使用されており、最近では自動車エンジンの燃料噴射装置の電磁弁、各種インダクタンス部品、トルクセンサ等、さまざまな用途で用いられている。

これら軟磁性部品には、フェライト（鉄の酸化物）系の材料と金属系の材料（鉄、ニッケル、コバルト等が主成分）が多く使われている。さらにこれら軟磁性部品は、小型で複雑形状である場合も多く、古くから粉末冶金法を用いたニアネットシェイプ工程（型成形・焼結により完成品形状に近い状態で作製）が使用される場合も多い。軟磁性材料を粉末冶金法で作製することは、ニアネットシェイプ工程によるコスト面での有利性だけにとどまらず、粉末を用いること自体が部品の軟磁気特性向上に繋がるケースが多いことも特筆すべき点である。

本稿では、特に金属系粉末の軟磁性材料について、代表的な粉末製造法として広く知られているガスアトマイズ法の原理、および特徴を紹介する。さらに、ガスアトマイズ粉末を軟磁性材料に応用した場合のメリットについて、代表的な用途として知られる圧粉磁心材を例に、ガスアトマイズ粉との適合性を解説する。

◇ ガスアトマイズ法の特徴

金属粉末の製造方法は、溶融プロセス、機械プロセス、化学的プロセスに大別され、このうちガスアトマイズ法は溶融プロセスに分類される製法である。図1にガスアトマイズ装置の概略図を示す¹⁾。一般的にガスアトマイズ装置は、原料溶解部（坩堝）、噴霧部、冷却タワー、粉末回収部からなる。所定の原料を坩堝内で溶解後、ノズルから鉛直下方に落下させ、その溶湯に高圧の不活性ガスを噴霧することにより溶湯を液滴に分断する。液滴は冷却タワーを落下する過程で急冷凝固することにより金属粉末が得られる。噴霧ガスには通常ArもしくはN₂などの不活性ガスが選定される。

工業的に安価であるN₂ガスが広く用いられる一方、窒化物の生成を避ける必要がある場合、あるいはより高品位な粉末が求められる場合等にはArガスが使用されるケースも多い。

ガスアトマイズで製造される粉末外観の一例を図2に示す。一般的にガスアトマイズ法で得られる金属粉末は球形状である。ガスアトマイズ法は冷却媒体として不活性ガスを用いているため、酸素値が低い粉末が得られる工程としても知られており、合金によって異なるものの数10ppmから数100ppmの酸素レベルを有する金属粉末の作製が可能である。

また、噴霧媒体として高圧水を使用する水アトマイズも大量生産に向けた汎用の粉末製造法として広く知られている。この場合得られる粉末はガスアトマイズと異なり突起の多い不定形状になりやすい。この要因としては、それぞれのアトマイズ法における、“冷却速度”と“溶湯の表面張力”の2つの差異から説明が可能である。すなわち、ガスによる冷却速度は水に比べて小さい。このことは、ガスアトマイズの場合、冷却媒体（ガス）の衝突により生成した液滴が、表面張力により球状化するだけの凝固時間を有しているためと理解

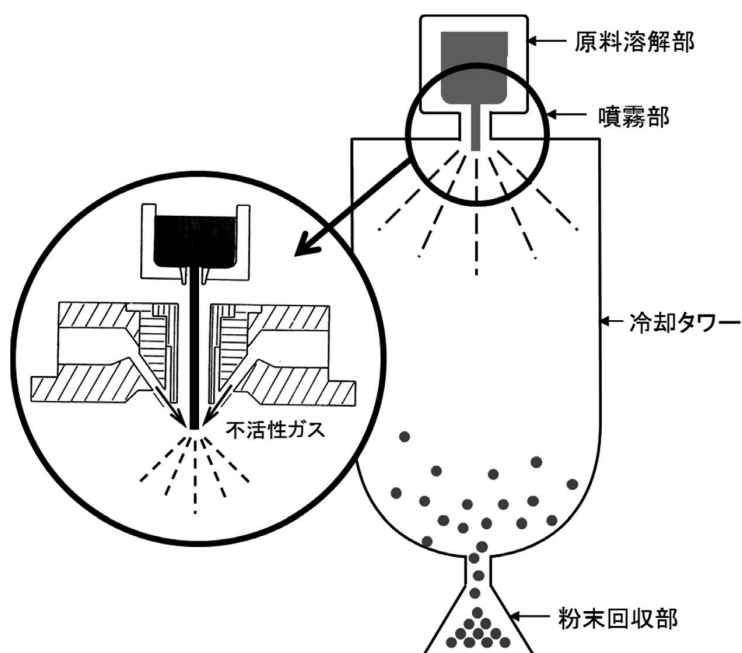


図 1 ガスアトマイズ装置の概略

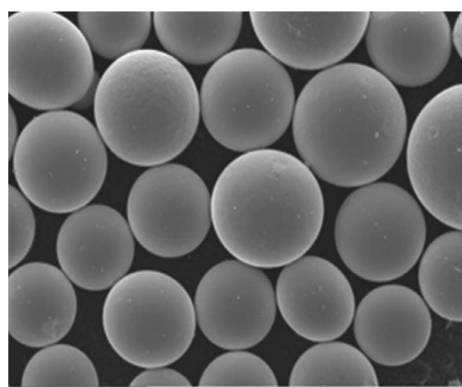


図 2 ガスアトマイズ粉末の外観例

されている²⁾。

さらにガスアトマイズの場合は、水アトマイズと比較して溶湯の表面張力を低下させる酸化物の生成が極めて少ないことが二つ目の要因と考えられている³⁾。

◇ 圧粉磁心材へのガスアトマイズ粉の適用

圧粉磁心材は、Fe-Si-Al系、Fe-Si系、Fe-Ni系といった代表的な軟磁性金属粉末を、樹脂、ゴム等

で絶縁被覆したのちプレス成型したものである。主にコイルの鉄心（コア）用材料としてノイズフィルタやリアクトルなどの電源部品を中心に幅広い分野で用いられている。

例えば電源装置の場合、整流出力に含まれる交流成分を除去する時や、商用電源に付加されるノイズを除去する時に、ノイズフィルタが用いられる。鉄心材料としては、従来から電磁鋼板やフェライトコアが広く知られているが、圧粉磁心材はバインダーを介したプレス成型であるため形状自由度に優れている。さらに、個々の粒子が絶縁されており電気抵抗が高いため高周波特性に優れているという特徴を有している。さらに、フェライトと比較して磁性（飽和磁束密度）が高いという特徴もある。

この圧粉磁心材に用いられる金属粉末の製造には、一般的に前述の水アトマイズもしくはガスアトマイズ法が採用されることが多い。

ガスアトマイズは前述のとおり、①急冷凝固 ②球形状 ③低酸素という特徴を有している。それぞれの特徴について、圧粉磁心材に用いる軟磁性粉末と言う観点からその適合性を考えてみる。

①急冷凝固：金属が液体から凝固する際の速度

が非常に大きい場合、鑄造法で起こるような凝固偏析がない様な成分をもつ材料を得ることができる。このことは磁気特性の点でも有利に働く場合がある。例えば、センダストとして知られるFe-10%Si-5%Alは、非常に高い軟磁気特性（透磁率）を有していることで知られている⁴⁾。ただし、この合金は透磁率に対する組成依存性が非常に高く、若干の組成偏析が透磁率を低下させる場合がある。

ガスアトマイズにより得られた急冷凝固粉末の組成均一性は、成分偏析に起因する透磁率の低下が起こらないことを意味しており、高い軟磁気特性を有する材料が得られる。

②球形状：鉄心材料が使用される用途では、近年高周波化がますます進んでいる。ここで、金属系軟磁性材料は、フェライトなどの酸化物系材料と比較して電気抵抗が低く、高周波の交流磁界が加わると、渦電流損による発熱ロスが膨大になってしまうという難点がある。

圧粉磁心材は金属粉末を絶縁被覆しているため、部品そのものの電気抵抗はバルクの金属体と比較して高いという特徴を有している。それぞれの金属粉末が球形状である場合、不定形状の場合と比較して粉末同士の接触がさらに抑制されるため、高周波特性に優れた鉄心材料を得ることが可能と

なる。

③低酸素：軟磁性材料の透磁率は、成分、ミクロ組織、内部応力等、種々の因子の影響を受けるが、不純物の影響も大きい（不純物は透磁率を低下させる）。ガスアトマイズ法は前述の通り凝固時に不活性ガスを用いることから、酸素レベルが低い粉末が得られることを特徴としている。このことは、酸化物等の不純物を起因とした透磁率の低下を抑えることが可能となり、優れた軟磁気特性を得られる粉末製造法と言える。

むすび

今回は軟磁性材料に用いられる金属粉末と言う観点で、代表的な粉末製造法であるガスアトマイズ法と、その適用例として圧粉磁心を紹介した。軟磁性部品へのガスアトマイズ法の適用は磁気特性そのものに有利に働く場合も多くあることから、今後ますます拡大することを期待したい。

参考文献

- 1) 柳谷彰彦：特殊鋼、65（2016）、4、2-5
- 2) 河合伸泰、佐藤義智、関義和：資源処理技術、33（1986）、4、39-44
- 3) 日本金属学会：改訂4版金属データブック、丸善株式会社（2004）、71
- 4) 日本金属学会：磁性材料、丸善株式会社（1995）、148

5. アモルファス・ナノ結晶軟磁性合金

日立金属(株) 機能品部材事業本部 なか じま しん
パワーエレクトロニクス統括部 エンジニアリングフェロー 中 島 晋

まえがき

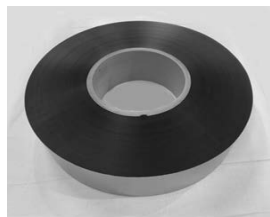
金属軟磁性材料はその金属組織から電磁鋼板などの結晶質軟磁性合金、アモルファス軟磁性合金およびナノ結晶軟磁性合金に大別される。ここでは電力消費量の50%以上を占めるモータの省エネルギーとCO₂排出量低減に貢献する低鉄損軟磁性材料として注目されているアモルファスおよびナノ結晶合金の製法、特徴およびその現状について解説する。

◇ アモルファス軟磁性合金

アモルファス合金は溶融した合金を結晶成長速度より速い10⁶K/s程度以上で超急凝固することを得られる。このような超急凝固を実現できる合金形態は薄帯、粉体、細線、薄膜に限られ、量産性と経済性に優れることから広く大量に使用されているのが薄帯である。代表的なアモルファス合金であるMetglas® 2605SA1（以下2605SA1）¹⁾の場合、Feを主成分としこれにSiとBを添加した合金で、単ロール液体急冷法²⁾による連続製造される。写真1(a)にアモルファス合金（標準製造幅：142mm、170mmおよび213mm）、同(b)に標準供給形態であるアモルファス合金コイル（紙管内径406mm、最大外径1,120mm）を示す。アモルファス合金の年間世界生産量は約15万トンと推定され、金属軟磁性材料では電磁鋼板に次ぐ生産量である。



(a)アモルファス合金



(b)アモルファス合金コイル

写真1 アモルファス軟磁性合金（Metglas® 2605SA1）

アモルファス合金は重量ベースで95%以上が配電用変圧器の鉄心に用いられているが、最近、モータの高効率化のため、その鉄心にアモルファス合金を適用する検討が進められている。アモルファス合金とモータ用鉄心材料の主流である無方向性電磁鋼板の寸法、物理特性と磁気特性を表1に示す。圧延で製造される無方向性電磁鋼板に比べ、アモルファス合金は単ロール液体急冷法で製造されるため表面が粗く薄いため占積率が低く、大きな内部応力を有する。また、アモルファス合金は無方向性電磁鋼板比で引張強さは約4倍、ビッカース硬度は約5倍ある。材料本来の磁気特性を十分に引き出すには、内部応力を緩和するための熱処理が必要である。しかし、この熱処理により、構造緩和によるクラスタ（微結晶核）が部分的に生じ脆化を引き起こす⁴⁾。このため、モータへの応用を考えた場合、未熱処理状態での適用が検討されている^{5)、6)}。未熱処理のアモルファス合金は、表1に示すように無磁場で熱処理したものに比べて、その鉄損は数倍大きい、無方向性電磁鋼板に比べれば十分小さい。アモルファス合金は無方向性電磁鋼板に比べFeの含有率が低いため、飽和磁束密度B_sが小さい欠点がある。アモルファス合金は不規則な原子配列のため、結晶磁気異方性を持たず結晶質合金に比べて低保磁力でヒステリシス損失が小さい。また、板厚が薄いこと、および不規則な原子配列により電気抵抗率も結晶質合金に比べ高いため渦電流損失も大幅に小さい。このようにヒステリシス損失と渦電流損失とも小さいため、アモルファス合金の鉄損は無方向性電磁鋼板の鉄損に比べて大幅に小さい。アモルファス合金は、無方向性電磁鋼板に比べ磁歪定数が大きいため、応力を加えると磁気特性劣化（鉄損増、透磁率低下）を起こしやすい。

アモルファス合金は通常は無方向性電磁鋼板に比べて、板厚が1/10以下と薄く、ビッカース硬度は約5倍も硬いため、アモルファス合金の打抜き

表 1 アモルファス合金と無方向性電磁鋼板の比較^{1), 3)}

		アモルファス合金Matglas [®] 2605SA1		無方向性電磁鋼板35H300
		無磁場中熱処理	未熱処理	
公称板厚 (mm)		0.025		0.35
占積率 (%)		86min.		95min.
密度 (kg/dm ³)		7.18		7.65
電気抵抗率 ($\mu\Omega\cdot\text{m}$)		1.3		0.52
引張り強さ (N/mm ²)		2,000		530
ビッカース硬度		900		187
鉄損 (W/kg)	W _{10/50}	0.056typ.	0.17typ.	1.11typ.
	W _{10/400}	0.81typ.	2.2typ.	18.2typ.
	W _{10/1k}	3.0typ.	7.4typ.	78typ.
磁束密度 (T)	B ₅₀	1.56typ.	1.52typ.	1.46typ.
	B _s	1.56		2.03
直流比透磁率B _m = 1.0T		30,000typ.	4,700typ.	7,200typ.
磁歪定数 (ppm)		27*		3**
キュリー温度 (℃)		399		750

* 飽和磁歪定数、** B_m = 1.0T、400Hzの磁歪定数

加工には、僅少クリアランスの金型が必要で工具寿命の問題もある。このため、アモルファス合金をモータに応用するためには、低コスト鉄心加工プロセスの確立が必須である。これに対し、スリット加工と切断加工を用いて製作した短冊積層型のアモルファス合金鉄心を固定子に用いた高効率アキシアルギャップモータが開発され^{5), 7)}、これを用いた小型の圧縮機が製品化されている⁸⁾。

◇ ナノ結晶軟磁性合金

アモルファス合金を結晶化すると磁気特性が大幅に劣化するとの常識を覆して開発された史上初のナノ結晶軟磁性合金が、吉沢らによるFe-Si-B-Nb-Cu系ナノ結晶合金「ファインメット[®]」である⁹⁾。この開発により、アモルファス合金を結晶化させた場合でも均一微細なbcc Fe相からなるナノ結晶組織が得られれば優れた軟磁気特性が得られることが明らかになった。このタイプのナノ結晶合金では、単ロール液体急冷法で鑄造したアモルファス合金から結晶粒成長を抑制して均一微細なbcc Fe相からなるナノ結晶組織を得るため、Nbなどを含有させる必要がある。このためFeの含有量が少ないので、その飽和磁束密度B_sは1.7T以下となる。このタイプでは「ファインメット[®]」に代表されるFe-Si-B-Nb-Cu系合金が磁気特性良好で製造容易なため主流となっている。

一方、Feの含有量を上げ高B_s化した最初のナノ結晶合金が太田らによるFe-Si-B-Cu系ナノ結晶合金である¹⁰⁾。この系のナノ結晶合金は、bcc Feのクラスタを含むアモルファス合金を単ロール液体急冷法で鑄造、これを熱処理することでクラスタが成長して均一微細なナノ結晶相が得られるタイプ（以下、初期微結晶タイプ）である。これとは別に、太田らによってクラスタを含まないアモルファス合金を単ロール液体急冷法で鑄造、これを2～1,000K/s程度の昇温速度で昇温し均一微細なナノ結晶相を得るタイプ（以下、急速昇温熱処理タイプ）のFe-Cu-Nb-Si-B系とFe-Cu-Si-B-P系ナノ結晶材が開発されている¹¹⁾。

ナノ結晶合金と従来材の磁気特性を表2に示す。「ファインメット[®]」FT-3Mは、アモルファス合金と比べ、B_sは1.23Tと小さいが、鉄損は1ケタ小さい。同表でFT-3Mを除くナノ結晶合金は前述した高B_sタイプのもので、B_sはアモルファス合金を超え、50Hzの鉄損はアモルファス合金より大きい。周波数が上がるとその差は小さくなる。

「ファインメット[®]」に代表されるFe-Si-B-Nb-Cu系ナノ結晶合金をモータに適用する場合の課題は、アモルファス合金の場合と同様である。ただし、ナノ結晶化により熱処理したアモルファス合金より大幅に脆化するので、樹脂含侵などにより鉄心の機械的強度を高める必要がある。初期微結晶タ

表 2 ナノ結晶軟磁性合金と従来の軟磁性合金の磁気特性の比較^{1)、3)、11)、12)}

材 料		B _s (T)	P _{15/50} (W/kg)	P _{10/400} (W/kg)	P _{10/1k} (W/kg)
ナノ結晶合金	「ファインメット [®] 」FT-3M	1.23	－	0.12typ.	0.57typ.
	Fe ₈₂ Cu ₁ Nb ₁ Si ₄ B ₁₂ ¹¹⁾	1.78	0.20	1.3	4.4
	Fe ₈₂ Cu ₁ Nb ₁ Si ₂ B ₁₂ P ₂ ¹¹⁾	1.76	0.20	1.5	4.2
	Fe _{80.8} Cu _{1.2} Si ₄ B ₁₁ P ₂ ¹¹⁾	1.79	0.18	1.8	6.8
	Fe _{80.5} Cu _{1.5} Si ₄ B ₁₄ ¹¹⁾	1.80	0.27	1.6	5.8
	Fe _{81.8} Cu _{1.0} Mo _{0.2} Si ₄ B ₁₄ ¹²⁾	1.75	0.28	1.5	5.0
アモルファス合金 2605SA1*		1.56	0.056typ.	0.81typ.	3.0typ.
無方向性電磁鋼板35H300		2.03	2.4typ.	18typ.	78typ.

* 磁路方向磁場中熱処理

イプ高B_s材は、クラスタを適量含むアモルファス合金薄帯が必須であり、これを長時間安定して鋳造することが難しい。また、クラスタを含むため熱処理前でも合金薄帯は脆化しており加工が極めて困難である。一方、急速昇温熱処理タイプは、合金薄帯の鋳造は比較的容易であるが、急速昇温熱処理が必須である。このため、鉄心などバルク化した状態での熱処理が困難であり、薄帯単板での急速昇温熱処理が必要である。この急速昇温熱処理で脆化した薄帯を用いて鉄心に加工しなくてはならないという課題を抱えている。

以上のように、ナノ結晶合金をモータに適用するには、アモルファス合金以上に克服すべき難しい課題がある。しかし、表2に示す急速昇温熱処理タイプ高B_sナノ結晶合金を固定子に用いた定格駆動3,000rpmでモータ効率98.3%を実現した小型超高効率の11kWアキシアルギャップモータが開発されており、実用化に向けた検討が進められている¹³⁾。

むすび

高効率モータを実現するための重要な課題として、その鉄損の大幅な低減が求められている。このための有効な手段である従来の無方向性電磁鋼板に代わる新素材であるアモルファス合金、およびナノ結晶軟磁性合金について解説した。両材料とも難加工材であり、鉄心への加工が難しいとい

う課題を抱えている。しかし、前者については、その加工法を工夫することで産業機器用での実用化が開始された。後者についても、その実用化に向けた検討が進められている。

参考文献

- 1) 日立金属株式会社カタログ：「アモルファス合金薄帯Metglas[®]」, No. HJ-B10-C (2015)
- 2) 増本編：「アモルファス金属の基礎」、オーム社、pp. 14 (1982)
- 3) 新日鐵住金株式会社カタログ：「無方向性電磁鋼帯」、D005je_01_201904f (2019)
- 4) 増本編：「アモルファス金属の基礎」、オーム社、pp. 69 (1982)
- 5) 杉山、榎本、今川、床井：電気学会論文誌 D、Vol. 134、No. 8、pp. 760 (2014)
- 6) S. Okamoto、N. Denis and K. Fujisaki: IEEE Trans. Indt. Appl., Vol. 52、No. 3、pp. 2261 (2016)
- 7) 榎本、床井、今川、鈴木、小俣、相馬：日立評論 Vol. 97 No. 06-07 368 (2015)
- 8) 株式会社日立産機システム ニュースリリース：「世界初「アモルファスモーター一体型オイルフリースクロール圧縮機」を販売開始」(2017)
- 9) Y. Yoshizawa、S. Oguma and K. Yamauchi: J. of Appl. Phys., Vol. 64、No. 10、pp. 6044 (1988)
- 10) M. Ohta and Y. Yoshizawa: Jpn. J. of Appl. Phys., Vol. 46、No. 20、pp. L447 (2007)
- 11) M. Ohta and Y. Yoshizawa: Appl. Phys. Express 2、023005 (2009)
- 12) M. Ohta and R. Hasegawa: IEEE Trans. on Mag., Vol. 53、No. 2、2000205 (2017)
- 13) 榎本、出口、今川：平成30年電気学会産業応用部門大会3-54 III-299 (2018)

6. ソフトフェライト

電子情報技術産業協会 平塚信之
IEC/TC51 国内委員会

まえがき

酸化第二鉄 (Fe_2O_3) を主成分とする強磁性酸化物を総称してフェライト (ferrite) と呼んでいる。フェライトの特徴を金属および合金の磁性材料と較べると、比重は合金の約1/2で軽いこと、飽和磁化値は金属磁性材料の1/2~1/4であること、比抵抗が金属系材料の10,000倍以上である。これらの特徴が反映して金属系は低周波用、酸化物系は高周波用磁性部品として使用されている。

フェライトは出発原料として酸化鉄を約70wt% 含み、各種の酸化物粉末を混合して成形、焼結することによって製造する。粉末を成形するので複雑な形状の製品を大量に生産することができる。さらに主成分の酸化鉄が比較的安価であることも広く用いられている要因になっている。

フェライトは結晶構造により、スピネル型、ガーネット型、六方晶、ペロプスカイト型、イルメナイト型等に分類される。スピネル型フェライトの化学式は、 MFe_2O_4 または $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Mは2価の金属) である。このMとしてMg、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、 $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}$ などがある。ガーネット (Garnet; ざくろ石) は、珪酸塩 $\text{M}^{2+}_3\text{M}^{3+}_2(\text{Si}^{4+}\text{O}_4)_3$ で表わされる。この構造において3価の希土類酸化物 (R_2O_3) および Fe_2O_3 で置換して $3\text{R}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$ または $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ で表わされるものがガーネット型フェライトである。Rとしては、Y、Sm、Eu、Gd、Tb、Ho、Tm、Er、Yb、Luがある。この結晶は立方晶系に属する。六方晶フェライトは、M、W、Y、X、UおよびZの組成に分類される。代表的な化学式を挙げると、M型フェライトは $\text{MO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$) で、MとしてはBa、Sr、Pbである。また、Z型フェライトのそれは $\text{Ba}_3\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ である。Meは主に遷移金属元素である。

本稿では顕著な軟磁気特性を示すフェライトについて応用製品を例示しながらその特徴、性質お

よび適用分野について述べる。

◇ トランス (transformer)

電線をらせん形状に形成したものをコイルという。そのコイルが磁束変化に感應して誘導性 (inductive) 起電力を発生する (電磁誘導現象)。その働きの大さをコイルのインダクタンス (単位はH:ヘンリ) という。真空中の透磁率は1であるが、フェライト磁心にコイルを巻くと透磁率は大きくなり、磁気部品が小型、軽量化できる。

トランスは2つの巻線をもつコイルで巻線間に相互インダクタンスを有することにより電気エネルギーの授受が行われる。このトランスにフェライトコアを用いると、少ない巻き数で大きなインダクタンスが得られる。また、巻線長が短くなるので電気抵抗も小さくなり、電力の消費も少なくなる。巻線の自己インダクタンスが増加すると励磁電流も減少させることができる。

トランスのコアには比抵抗の小さなケイ素鋼板が用いられている。そのため磁力線がコア材を通る度にうず電流が発生する。このうず電流によりジュール熱が発生し、エネルギー損失になる。さらに使用周波数が高くなると発熱が著しく増大する。しかも、さらに50kHzや1MHzへと周波数が高くなるとケイ素鋼は使用できなくなり、比抵抗の大きなMn-Zn系フェライトが使用される。このフェライトは初透磁率が $10^3 \sim 10^4$ あり、磁気損失も極めて小さくなる。

◇ スイッチング電源 (switched-mode power supply、略称: SMPS)

最も身近な家庭用機器の電源は、携帯電話のACアダプタである。これは半導体のスイッチング特性を用いた安定化電源である。直流安定化電源としてDC-DC、AC-DCコンバータがあり、交流安定化電源としてDC-AC、AC-ACインバータがある。

スイッチング電源では商用交流をまず直流に整

流してから電圧を変換する。しかし、整流されてしまうとトランスで変換できなくなる。そこで、整流された電流を半導体素子（トランジスタやMOS FET）の高速スイッチングによりパルス波の交流に変換し、これを高周波トランスに送る。スイッチング電源の制御方式には各種あるが、最も代表的なのはPWM（パルス幅変調）方式である。パルス波の幅（スイッチングON/OFFサイクルのONの時間）を調整して、各パルスの面積を同じにすることで、電圧の安定化を図る。

また、トランスの大きさは周波数に反比例するので、交流周波数が50Hz/60Hzと低いと、電源のトランスは、どうしても重く大きくなる。スイッチング電源のパルスの周波数は数10～数100kHzの高周波なので、トランスも小型・軽量になる。そこで、不可欠となるのがフェライトコアであり、Mn-Zn系およびNi-Zn系が用いられている。これらは高周波領域で磁束密度変化が大きくても損失が小さいという特長がある。

しかし、スイッチング電源にも弱点がある。それは高速スイッチングによりノイズが発生することである。これに対応できるフェライトについては後述する。

◇ ノイズ対策用フェライトビーズ

外観が糸を通すビーズに似ていることからフェライトビーズと呼ばれている。ビーズ形状のフェライトコアにリード線を貫通させ、そこに電流を流すとフェライトコア内部に磁束が発生する。電流の周波数が高くなるとインピーダンスが大きくなり、その電流は流れにくくなる。この性質を利用して低い周波数の電流は通し、高い周波数の電流を阻止する素子がフェライトビーズである。これは、電源ラインから高速信号ラインまで幅広く使われているノイズ対策部品である。30MHzを超える周波数で問題になる放射妨害波の対策には通信ケーブルにNi-Zn系フェライトが用いられている。

◇ コモンモードチョーク用フェライト

基板上の電気回路において、ある回路から流れ出た電流は負荷を通して別の回路へ行き、基板上の別のルートを通して戻ってくる。これをディファレンシャルモード（ノーマルモード）という。

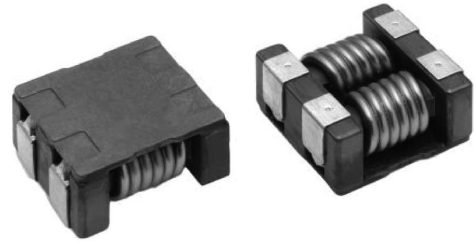


図 1 コモンモードチョーク用フェライト外観

一方、別の伝導ルートも存在する。基板上の各配線と基準大地間に微小な浮遊容量が生じるために、基準大地面から基板上の配線を共通に流れて反対側から基準大地面に戻っていく伝導ルートができる。これをコモンモードと呼ぶ。基準大地面との間の浮遊容量は微小であるが、信号周波数が高くなると微小な浮遊容量でもインピーダンスが低くなるので、このコモンモードの電流が流れる。これがコモンモードのノイズとなる。

コモンモードチョーク用フェライトは、図1に示すように一つのコアに2本の導線を巻いた端子をもつ構造になっている。このため、4端子になる。両者の巻き方向は互いに反対方向になっている。このフェライトコイルにコモンモードの電流が流れると、それぞれのコイルにおける電磁誘導現象によって磁束が発生するが、発生した磁束の向きは同じ方向になるため互いの磁束が強めあってインダクタとしての働きが高くなる。これによりインピーダンスが大きくなり、電流が流れにくくなる。一方、このコイルにディファレンシャルモードの電流が流れると、発生した磁束の方向は逆方向になるため磁束が打ち消しあう。これによってインダクタとしての働きがなくなる。このようにコモンモードに対してだけインダクタとして働くノイズフィルタになる。

◇ 積層フェライトチップインダクタ

電子機器は、表面実装技術（SMT: surface mount technology）の進歩によって急速に小型化・高性能化してきている。それに伴って基板表面に直接実装されるチップ素子においても小型化、高性能化、高機能化、高信頼性が求められている。小型・高性能化する場合には、使用周波数を高周波化する必要があり、これに対応できるNi-Zn-Cu系

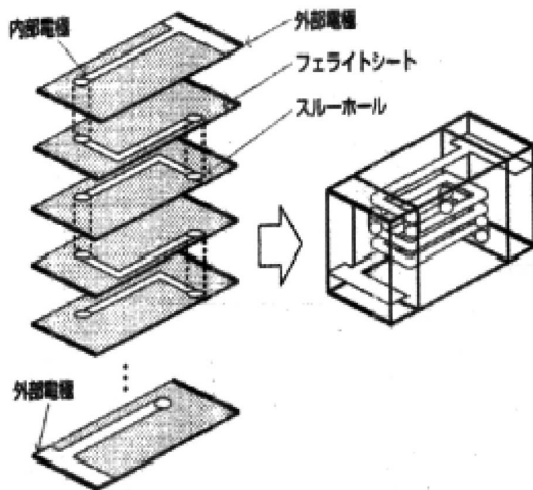


図 2 積層フェライトチップインダクタの構造と積層方法

フェライトを用いる。フェライトとコイルを一体化することは小型化に有効であるため、図2に示すように積層チップ化フェライト（チップインダクタ）にする。これはNi-Zn-Cu系フェライトペーストと導体（Ag）ペーストを交互に印刷積層する工法、およびフェライトシートにスルーホール加工をして導体ペーストを印刷充填して積層するシート工法を用いて、導体を3次的に連続して形成することにより製造される。Agの融点が960℃であるため900℃以下で焼結して緻密化する。現状では0201サイズ（0.25×0.125mm）（2013年）と小型化が実現している。

◇ サークュレータ

1950年代にイットリウム鉄ガーネット（YIG）のマイクロ波域での磁気損失が非常に小さいことが見出されてマイクロ波アイソレーやサーキュレータなどへの応用が進展した。ガーネット型フェライトの特長は透明な磁性体である。そのためファラデー効果を利用したサーキュレータは、光ファイバ通信が普及することにより半導体レーザへの戻り光の防止や送受信光分離素子としての重要性が高まり、小型化、高信頼性、低コスト化を図りながら開発され、実用している。

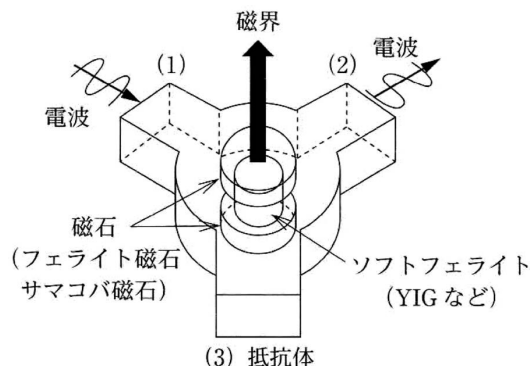


図 3 サークュレータの構成

図3に示すようにファラデー回転型サーキュレータは三叉路のような構造を有する。中央には磁石に挟まれたYIGなどのソフトフェライトが組み込まれている。(1)の端子から送られた電波は(2)の端子（アンテナ側）へ流れる。しかし、偏波面は回転してしまうため、電波は(2)から(1)へは戻れない。さらに、異常反射などの有害な電波は、(2)から入ることになり、同様に(3)の方向に誘導され、抵抗体内部で熱として消費される。このようにサーキュレータは電波の一方通行の通路を作り、送信部の電源を安定化して通信信号を劣化させない役割を果たしている。

◇ 磁わい（歪）現象を応用した超音波機器

フェライトに外部磁界を印加して磁化すると、磁壁の移動に伴い、その形が変わる現象を磁気ひずみ（磁歪）という。このひずみ率は 10^{-6} オーダーである。強磁性体が形状的に（ミクロにみると結晶格子）ひずむことによって張力または圧縮力が働く。この磁わい現象を利用して、電流の振動を機械的振動に、あるいはその逆に変換するものを磁わい振動子と呼んでいる。5～50kHzの高周波電力を投入すると、超音波が発生する。

Ni-Cu-Co系フェライトは磁わい定数が大きく、電気抵抗が極めて大きいのでうず電流損も少なく、高周波で利用できる特長がある。装置の例を挙げると、ソナー（音響測深器、魚群探知機を含む）がある。

V. 最新の開発動向

1. アモルファスモータ

～省エネに貢献する産業用IE5クラス高効率モータ～

(株)日立製作所 研究開発グループ えの もと ゆう じ
制御イノベーションセンタ 主管研究員 榎 本 裕 治

◇ 産業用モータを取り巻く状況

モータは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する機械要素として様々な製品に応用され、我々の生活に不可欠なものとなって久しい。その原理は発明されてから200年以上となるが、近年でも自動車や航空機の駆動源などへの広がりを見せており、更なる高性能化のための技術開発が進められている。産業用モータの分野では、高効率化の開発が急務となっている。昨今の国際的な地球温暖化防止の動きを背景に、モータの消費電力削減に注目が集まっている。図1に国内の電力使用量の割合を示す。国内の年間電力使用量は、約1兆kWhであり、そのうちの半分以上がモータで消費されている。また、工場などで使用される産業部門に限っては、75%がモータでの電力使用となっている¹⁾。このことより、産業用で使用されるモータの効率改善が重要であることが理解できる。

このような背景をもとに、産業用途で使用されるモータの効率に関する法規制化が各国で進めら

れている。IEC（国際電気標準会議：International Electrotechnical Commission）では、産業用モータの国際高効率規格（IEコード）を規定している。2014年に発行されたIEC60034-30-1では、IE4までの効率クラスの規格値が示されており、IE5についてもIE4クラスからさらに損失を20%低減する規格値とするといった見解が示されている。現在、各国で法規制によるモータの高効率化が推進されており、アメリカ、カナダでは、既にIE3クラスの義務化が開始されており、日本でも2015年4月から、産業用モータを対象としたトップランナー方式での規制が開始された。これにより、産業用モータメーカーには、IE3効率クラス以上の効率を満足するモータの販売が義務付けられることになった。

モータの高効率化手法については、種々の方法が検討されているが、ルームエアコンや冷蔵庫などの家電分野で適用が進んだ永久磁石同期モータ化が産業用途においても進められている。ただし、大量生産の家電や車載用モータに比べると多品種少量の生産となる産業用モータでは、量産効果による材料費の低減が期待できないことより、もともとの素材が安価な材料で構成することが求められる。また、インバータでの駆動となると、インバータの損失を含めた総合効率が省エネルギー化の指標となるため、すでに効率規制が開始されている誘導モータ単体のIE3に比べてモータ単体の効率がIE5以上となるような高い効率レベルが必要とされる。モータの損失は、コイル抵抗による銅損と、鉄心材料での鉄損、軸受の摩擦等による機械損で構成される。同一出力のモータで損失を低減するためには、コイルの抵抗値を低減するか、

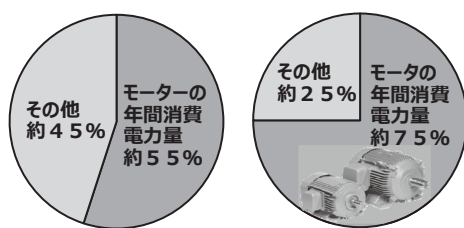


図1 消費電力量に占めるモータ利用の割合

出典：「2009年エネルギー消費機器実態等調査報告書IAE-091907」資源エネルギー庁（2009）

鉄損の少ない素材を利用するかという選択肢がある。筆者らは、通常のモータ用鉄心材料に比べて大幅に鉄損レベルの低い鉄基アモルファス金属を鉄心に採用することで、モータの効率を高めるという方針でモータの開発を推進している²⁾。本稿では、IE5の効率クラスに対応できる産業用アモルファスモータの開発事例について述べる。

◇ アモルファス金属をモータに適用するための課題

表1に電磁鋼板とアモルファス金属との性能比較を示す。前章まででも述べられているとおり、鉄基のアモルファス金属は、透磁率が高く鉄損が小さいなど磁気的な特性が優れており、電磁応用製品への適用に向いている材料である。しかし、現在のところは主として変圧器で製品に適用されている状況に留まっている。その理由としては、変圧器ではアモルファス金属を複雑な加工することなく利用できることが挙げられる。一方でモータでは、一般的なモータ鉄心は複雑形状となることが多いため、プレス金型による打ち抜き加工が採用されている。アモルファス金属は、下記に示す5つの理由によってプレス工法が経済性に合致しないために製品への適用が進んでいないものと考えられる。

アモルファス金属のモータ利用における課題

- ①板厚が薄いため加工枚数(回数)が増加する。
- ②打ち抜きした箔帯部品の難ハンドリング
- ③加工応力による磁気特性の劣化

表 1 電磁鋼板とアモルファス金属の特性比較

項目	電磁鋼板	アモルファス金属
材料名	35A300 (JIS)	2605SA1 (日立金属)
構造 (外観)		
密度 (g/cm ³)	7.7	7.2
板厚 (mm)	0.35	0.025
B _l [100A/m] (T)	0.95	1.26
抵抗率 (μΩ・m)	0.52	1.3
鉄損 W _{10/400} (W/kg)	18	1.5
硬度 (ビッカース)	100~200	900

④硬さと加工回数増による金型寿命低下

⑤材料の最大幅が200mm程度と小さい

上記の課題は、アモルファス金属の加工に関するものがほとんどであり、逆に考えるとこれを解決することで磁気特性に優れる効果を発揮させることができる。そこで筆者らは、アモルファス金属を複雑な加工無しで鉄心形状を構成する方法を検討することにした。

◇ アキシシャルギャップ型モータ構造

アモルファス金属をモータの鉄心に利用するために、2つのロータを有するアキシシャルギャップ型モータ構造に着目してそのステータ鉄心構造の検討を行った。図2に一般的なラジアルギャップモータとアキシシャルギャップ型モータの構造の違いを示す。アキシシャルギャップ型モータのステータ鉄心は、軸方向が同一断面形状の柱体で構成されることが多く、この形状であればアモルファス金属で構成できると考えた。さらに、アキシシャルギャップ型モータは軸方向の長さが短い場合には、ラジアルギャップ型のモータに比べて大きなトルクを得られる構造であることがわかった。トルクは電流と磁束の積に比例するため、ステータとロータの間で磁束を受け渡すギャップ部の面積が大きいほどトルクを大きくできるためである。ラジアルギャップ型のロータは、ステータの内側に配置されるため、ロータ外径が小さくなるために、トルクに寄与できるギャップ部面積が小さくなってしまいうためである。産業用の一般的なモータ体格で比較すると、同一体格でのラジアル型とアキシシャル型のギャップ部面積差は、約3倍程度となる。

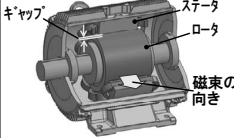
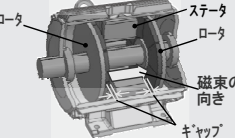
	ラジアルギャップ構造	アキシシャルギャップ構造
構成		
概念	 キゃップ面積 = πdL 体格増が必須 ギャップ面積: 1.0	 キゃップ面積 = $(1/4)\pi D^2 \times 2$ 同一体格で面積拡大 ギャップ面積: 3.12*

図 2 ラジアルギャップ構造モータとアキシシャルギャップ構造モータの比較

ロータの磁石表面積が3倍にできることを裏返せば、磁石の磁力を1/3に出来ることと等価である。前述したとおり、産業用途のモータに使用される磁石の素材価格は安価で、かつ、安定供給が可能な材料で構成する必要がある。このため、希土類磁石に比べて磁力が1/3と非常に安価なフェライト磁石を用いてアキシャルギャップ型モータを構成することにした。図3にアモルファス金属ステータとフェライト磁石ロータで構成したアキシャルギャップモータの基本構造を示す²⁾。

図4には、アモルファス金属をステータコアの形状に加工する工法とステータコア構造を示す³⁾。この工法では、アモルファス金属をせん断加工による切断するため、アモルファス金属に過度な応力を与えることなく加工が可能とできる。また、複雑形状の金型を使用せず、切断した後の部材のハンドリングも容易にできるため、先に示した①～⑤の課題を概ねクリアすることができる。

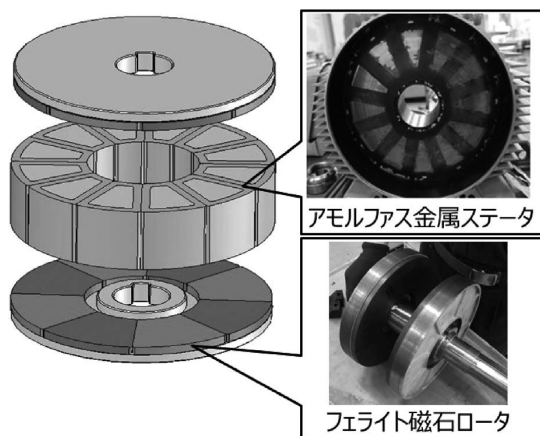


図 3 アキシャルギャップモータの基本構造

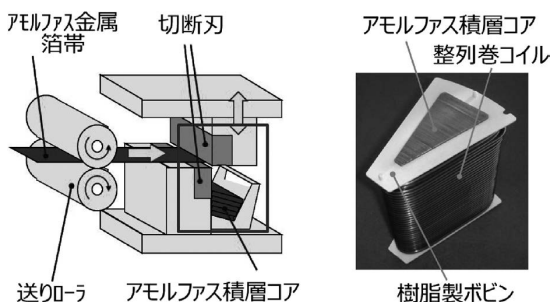


図 4 ステータコアの切断・積層工法とコア構造

◇ IE5効率クラスアモルファスモータ

図5には、前述した構造のアモルファス鉄心を使用した開発モータの効率比較を示す⁴⁾。開発モータは、11kWモータ容量において定格出力時のモータ効率が96.2%（実測値）とIE5クラスのモータ効率を満足している。また開発モータの体格は、従来の産業用誘導モータと比べて軸方向に半分以下の薄型となっている。

図6にはアモルファス金属鉄心を使用して薄型とできることの特長を活かして圧縮機構と一体化した製品事例を示す⁵⁾。この製品では、IE5クラスの高効率化に加え、従来はモータと圧縮機構をプーリとベルトを介して動力伝達していたのを機構側とモータを同一軸上に一体化することで機器の大幅な小形化を実現している。製品パッケージの体積は、同一出力の製品比較で-63%の体積低減を実現している。更にインバータ駆動による可変

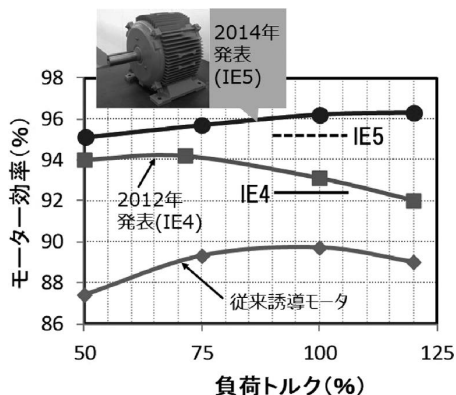


図 5 開発モータの効率特性 (11kW)

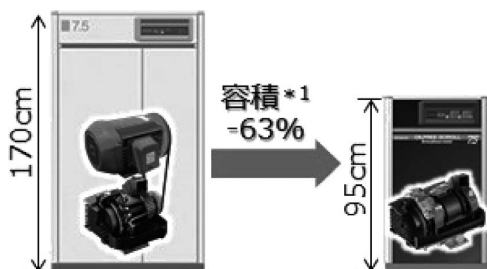


図 6 アモルファスモーター一体型オイルフリースクロール圧縮機

*1 (株)日立産機システム社製7.5kW機、SRL-A7.5DVとPOD-7.5VNPとのパネル寸法での体積比較
出典：(株)日立産機システム カタログSB-527 (2017)

速運転により、モータの効率差以上の省エネ効果を発揮できる。空気圧縮機の変速運転は、ある使用条件下での試算によると20%以上の電力消費低減効果が実現できるとされており⁶⁾、冒頭に示した産業部門の電力使用量低減に大きく貢献できるものである。

◇ 将来への期待

(1) 将来に向けたモータの研究開発

現在、筆者らの研究グループではアモルファス金属のモータ利用拡大をめざしてラジアルギャップ構造のモータでもアモルファス金属を利用できる構造を検討している^{7), 8)}。アキシシャルギャップ構造のモータは、ロータやステータの径が大きくなりすぎると機械的強度や応答性が問題となる場合も多く、適用できる機械が限定される。それに対し、ラジアルギャップ型モータは、現在流通しているほとんどのモータがその構造であり、この構造にアモルファス金属を適用できると大きな省エネ効果を刈り取ることができると考えられる。また、消費する電力量低減に加え、自動車の電動化にも対応することで、大幅なCO2の削減にも貢献することができると考えられる。

(2) モータ技術者から見た磁性材料への期待

図7には、各種軟磁性材料の磁気特性比較を示している⁹⁾。これまでの軟磁性材料開発の結果を振り返ると、磁束密度の向上と低損失化を各材料

系で進めて来られたことが理解できる。また、左上にプロットされた高Bsナノ結晶合金は、磁束密度、鉄損の両立が期待できる材料であることがわかる。このような素材の良さをモータ性能に利用する検討も徐々に進められている¹⁰⁾。モータの性能向上、および、適用製品の拡大は、磁石や軟磁性材料の進歩とともに進化を遂げてきたと言っても過言ではない。エネルギー変換効率が90%を超え、モータの小型化が進んだ現在でも、その進化のための技術開発は留まるところなく進められている。その理由としては、電気エネルギーを運動エネルギーとして変換する機械は今のところモータしか見当たらないことが挙げられる。今後もモータは、永遠の課題である小形（高出力密度）、高効率、低コストを実現する技術開発が続いていく。磁性材料の開発側も、モータ開発の課題、要求を理解しその性能向上に努めるとともに、モータ製造プロセスや、利用環境までもを考慮した材料特性も向上させる技術開発に期待している。

むすび

本稿では、鉄基アモルファス金属が低損失であるという特徴を利用した産業用途高効率モータの開発事例を紹介し、このアモルファス金属のモータ利用拡大への取り組みと、磁性材料の進化への期待を述べた。新しい用途が拡大していくであろう次世代モータでは、新たな高性能な磁性材料が

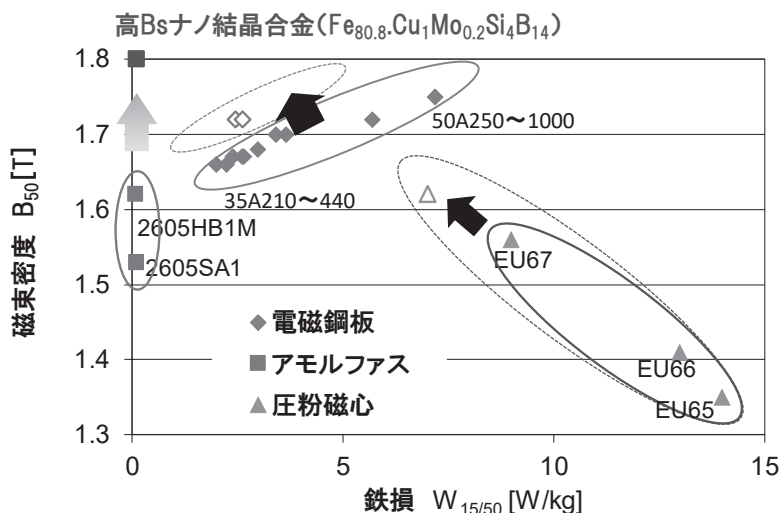


図 7 各種軟磁性材料の磁気特性比較

必要となる時代がくると思われる。魅力ある材料開発加速のために、本文が読者のそれぞれの研究開発の一助となることを期待している。

謝 辞

本研究の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業」を受けて遂行されたことを付記し、関係各位に心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁、2009年エネルギー消費機器実態等調査報告書 IAE-0919107
- 2) 森永茂樹：産業・家電機器への応用 ～新材料のモータへの応用～」特殊鋼58巻6号pp. 35-37 (2009)
- 3) 山田ふしぎ：「日立モータ100年の技術結集！アモルファスモータを使った空気圧縮機」日本機械学会誌、Vol. 121、No. 1198、pp. 36-37 (2018.9)
- 4) 株式会社日立製作所ニュースリリース：国際高効率規格IE5レベルを達成したアモルファスモーターを開発<http://www.hitachi.co.jp/rd/news/2014/0709.html> (2014.7)
- 5) 株式会社日立産機システムニュースリリース：「アモルファスモーター体型オイルフリースクロール圧縮機」<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2017/02/0213.pdf> (2017.2)
- 6) 株式会社日立産機システム空気圧縮機カタログhttps://www.hitachi-ies.co.jp/products/cmp/bebicon/oilfree/package_v.html
- 7) 榎本裕治：「ラジアルギャップ型アモルファス金属鉄心モータの基礎検討」、電気学会論文誌D、Vol. 139、No. 6、pp. 606-611 (2019)
- 8) 榎本裕治、永田稔、今川尊雄：「アモルファス金属鉄心をティース部に用いた分布巻IPMモータ」、電気学会産業応用部門大会講演論文集、R3-8、3-28 (2019)
- 9) M. Ohta, R. Hasegawa: "Soft Magnetic Properties of Magnetic Cores Assembled With a High Bs Fe-Based Nanocrystalline Alloy", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 53, NO. 2, FEBRUARY (2017)
- 10) 榎本裕治、出口見多、今川尊雄：「高Bsナノ結晶合金を適用した究極高効率モータの開発」、電気学会論文誌D、Vol. 139、No. 5、pp. 488-494 (2019)



2. 高効率モーター用磁性材料

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

まえがき（組合設立の目的）

高効率モーター用磁性材料技術研究組合（MagHEM）は、2012年9月に設立された。MagHEMの目的は、現在高効率モーターに大量に使用されている、希土類金属（レアアース）を主成分とする永久磁石を上回る性能を持ちながら、レアアース使用量を可能な限り削減した革新的な高性能磁石の開発、および内部エネルギー損失を低減する低損失軟磁性材料の開発と、これら革新的磁性材料を応用し、モーター構造をはじめとする最適設計を通じて小型高効率化を図ることである。

◇ 研究目標とアプローチ

図1に当組合での研究目標とアプローチを示す。研究開発期間は10年間で計画されており、第一期（2012～2016年）、第二期（2017～2021年）で、それぞれ目標が設定されている。第一期の磁性材料の開発目標は、磁石材料はDyやTbなどの高価で資源リスクの高いレアアースを使用しない磁石で、180℃の環境温度で最大エネルギー積38MGOeを実現することである。また軟磁性材料においては、

単位重量当たりの鉄損が4W/kg以下の低損失を実現することである。これら第一期の磁性材料の目標値は、すでにクリアされており、現在実用化に向けた技術開発が進められている。またモーター設計グループでは、永久磁石や軟磁性材料がモーターに実装された状態での磁気特性等を、より正確に評価するための研究開発が行われ、当初目標とした材料評価技術を確認し、損失の25%低減を第一期末で達成している。第二期は、超高性能永久磁石材料と超高効率モーターの開発に焦点を当てて研究開発が進められている。超高性能磁石の最終目標は、180℃で最大エネルギー積50MGOeを実現することである。また高効率モーターの開発目標は、現有モーターに対しパワー密度を40%以上向上し、かつエネルギー損失を40%低減することである。ベンチマークとなる現有モーターは、第三世代プリウスに搭載されているIPMモーターである。図1に研究目標・目的と達成手法を示す。

◇ 永久磁石材料の高性能化

高性能永久磁石材料に要求される基本物性は以下である。

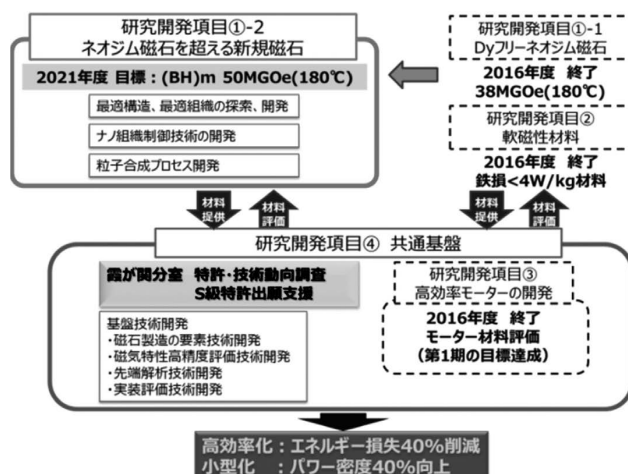


図 1 研究目標・目的とアプローチ

- ①大きな磁気異方性→高保磁力
- ②高い飽和磁束密度→高い残留磁束密度・高いエネルギー積
- ③高い磁気変態点（キュリー温度）→残留磁束密度の温度変化小

図2に既知の広義の強磁性材料（フェリ磁性体を含む）の磁気異方性とキュリー温度の関係を示す。図中（ ）内に記載した数値は飽和磁束密度である。図2に記載の強磁性材料でNd-Fe-B磁石（Nd₂Fe₁₄B化合物）より、上記3つの物性値全てが高い材料は極めて少ない。

磁気異方性およびキュリー温度がNd₂Fe₁₄Bより高い材料は、Sm₂Fe₁₇N₃、FePt、CoPt、SmCo₅、などが挙げられる。ただし高価な貴金属であるPtを主成分とする材料は、モーターに使用する永久磁石として実用性が無い。SmCo₅に代表される、RE-Co₅系化合物は飽和磁束密度が低いため、超高性能磁材料には適さない。ちなみに180℃で50MGOeを実現するには、磁石の残留磁束密度（Br）が1.42T、保磁力（Hcj）が5.6MA/m（7kOe）以上の磁石特性が必要となる。現行のNd-Fe-B磁石の温度特性をベースに室温（25℃）での磁石特性に換算すると、Br=1.68T、Hcj=18.5MA/m（23.1kOe）となる。この磁石特性（Br）はNd₂Fe₁₄B化合物の室温での飽和磁束密度を超えるため、目標達成のアプローチのひとつはNd₂Fe₁₄B化合物に替わる化合物の探索である。候補となる化合物として、

Fe₁₆N₂、L₁₀型Fe-Ni、L₂₀型Fe-Coなどが検討されている。これらレアアースフリーの化合物以外では、ThMn₁₂型のレアアース-遷移金属化合物が注目されている。この化合物は1980年代にポストNd-Fe-B磁石材料として研究されたが、当時は安定な1/12構造を形成するためにFeの一部を原子比で8～15%のTi、V、Mo等の安定化元素で置換する必要があった、そのため飽和磁束密度が大幅に低下するという課題があった。2014年に薄膜プロセスによるNd₂Fe₁₂N_x化合物の研究結果がESICMM（元素戦略研究拠点）の平山等から公開され、有力なポストNd-Fe-B磁石材料として再び脚光を浴びるようになった¹⁾。薄膜プロセスによるその後の研究で、バルク磁石化に有利な非窒化物系のSm-(Fe-Co)₁₂系で高い磁気物性値が確認されており。薄膜磁石で、800kA/m（10kOe）弱の保磁力が発現されている²⁾。表1に、Sm-(Fe-Co)₁₂系薄膜で報告されている磁気物性値を示す。

1/12系化合物によるバルク磁石の研究は、静岡理工大の小林教授グループを中心に精力的に進められている。レアアースの一部をZr置換すると構

表 1 (Sm_{1-x}Zr_x) (Fe_{0.8}Co_{0.2})₁₂薄膜の磁気特性³⁾

X	飽和磁化 (T)	K1 (MJ/m ³)	Tc (K)
0	1.78	5.79	859
0.18	1.86	3.62	671
0.26	1.90	3.04	675

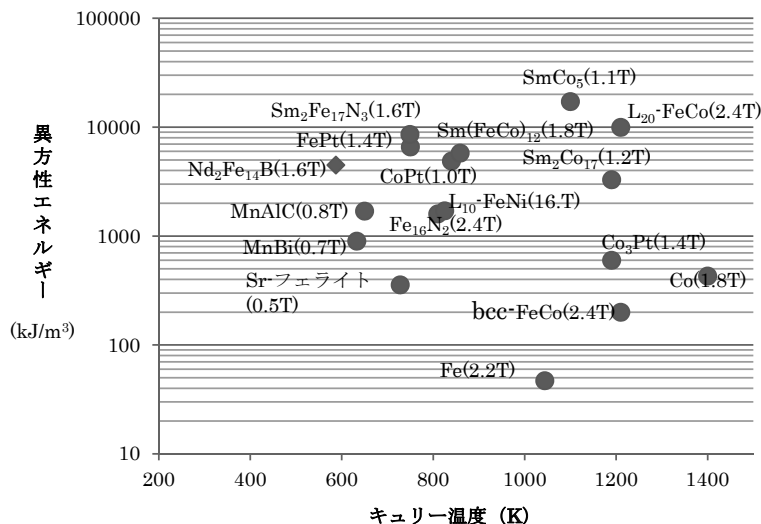


図 2 強磁性化合物の磁気物性値

造が安定化することを予測し、Feを置換するTiなどの添加量を低減出来ることを見出した。ストリップキャスト法により急冷凝固した $(\text{Zr}_x\text{Sm}_{1-x})(\text{Fe-Co})_{12-z}\text{Ti}_z$ などの合金系で検討されている。実用磁石材料としての保磁力発現プロセスの開発が課題となっている⁴⁾。 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 化合物は異方性ボンド磁石などの形態で、一部モーターなどに実用化されているが、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物と同等の飽和磁化を有し、キュリー温度と異方性磁界が高いことから超高性能磁石の有望な候補材料のひとつとして基盤技術開発グループで革新的プロセス創製による高性能化の研究が継続されている^{5)、6)}。

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系では、ハードルは高いがBrの室温～200℃の温度係数を30%程度改善出来れば目標性能を達成できる可能性が残されている。

◇ MagHEM第二期の研究成果

現在MagHEMプロジェクトにおいて進められている磁石材料開発の成果の一部につき、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）公開資料に基づき紹介する。

「FeNi超格子磁石の革新的合成方法の開発」 日進分室

規則合金は不規則合金を熱処理し、原子を相互拡散させることで得られる。FeNi超格子の場合、規則化するための熱処理温度が320℃以下と低く、熱力学的には規則化変態に天文学的な時間を要する。これまでに拡散を促進するアプローチとして、中性子線照射、高圧ひずみ加工、アモルファス金属のナノ結晶化などが提案されてきたが、規則度が低い、含有率が低い等のハードルの高い課題が残されている。この課題を克服する手段とし、予め規則化した中間生成物を経由した規則合金形成プロセスであるNITE（Nitrogen Insertion and Topotactic Extraction）法を考案した。NITE法

（図3）では原料である（a）FeNi不規則合金粉末を窒化することで、規則化した（b）FeNi窒化物を合成し、その後規則構造を維持したまま、窒素原子を引き抜くトポタクティック脱窒素法により、短時間で高い規則度の（c）FeNi超格子を得ることを可能とした。具体的には、窒化はアンモニアガスとの反応、トポタクティック脱窒素は水素ガスとの反応によって行われる。これらは比較的シンプルなプロセスであることから、工業的な生産に適すると考えられる。加えて、FeNi超格子を単一相で、粉末形状で得ることができる。これらの成果は、高性能レアアースフリー磁石であるFeNi超格子磁石の開発を飛躍的に加速できると期待されている。現在FeNi超格子磁石のモーター用永久磁石への適用を目指して、保磁力をさらに高めるための結晶方向の整列、粒子形状制御や成形法が検討されている。

図3のトポタクティック脱窒素後の試料のSTEM-EDX像から、FeとNiが原子レベルで規則的に配列していることが明らかになり、FeNi超格子の合成に成功したことが確認された。

また、中間物であるFeNi窒化物が単一相で得られていることがX線回折等で確認されている。

「省Nd高耐熱磁石の開発」 東富士分室

モーターに採用される磁石は、高温でも磁力を高く保つことが重要になる、強力なNd（ネオジム）磁石を自動車用途などの高温環境下で使用するには、一般的にDy（ジスプロシウム）やTb（テルビウム）等を添加することにより、高温環境下でも保磁力が高くなるようにしている。しかし、DyやTbはレアアースの中でも高価で希少な金属に分類され、地政学的なリスクの高い金属であるため、DyやTbを使わない磁石の開発はこれまで多く取り組まれ、成果が上がっている。一方、レアアースの中で比較的産出量が多いNdも、今後の

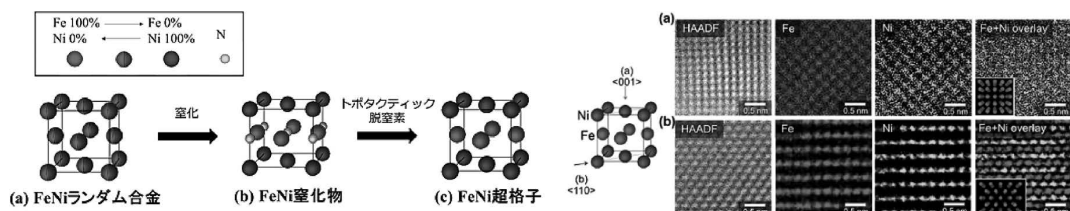
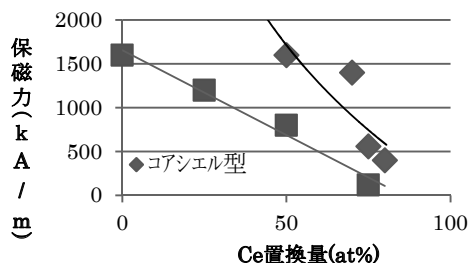
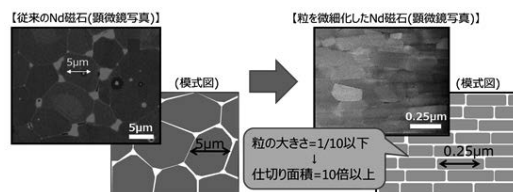


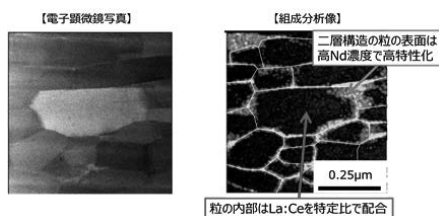
図 3 NITE法による変態機構と脱窒素試料のSTEM-EDX像⁷⁾



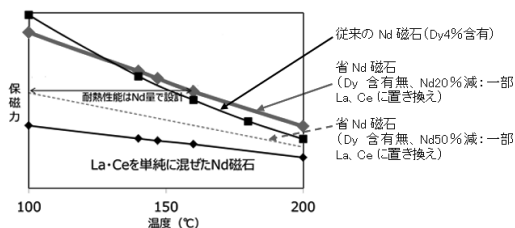
4-1 2層構造による高保磁力化⁸⁾



4-2 結晶粒の微細化⁹⁾



4-3 レアアースの配合比最適化⁹⁾



4-4 開発材料の保磁力の温度変化⁹⁾

図 4 省Nd耐熱磁石と要素技術

電動自動車（EV、PHV、HEV、FCV）やロボットなどのグローバル市場での普及を想定すると不足することも懸念されている、国内ではこれまで省Nd化への関心は比較的低く、本格的な取り組みが少ない。MagHEMの東富士分室において、これらの課題を克服するために、Nd磁石の耐熱性能に必要なDy（Tb）を使わないだけでなく、新技術を開発することで、Ndの一部をレアアースの中でも安価で豊富なLa（ランタン）とCe（セリウム）に置き換え、Ndを最大50%削減しても、従来のNd磁石と同水準の耐熱性能を確保した世界初の新型磁石、省Nd耐熱磁石を開発した。この新型磁石は、次世代自動車やロボットなど、さまざまな分野でのモーター使用の拡大と貴重なレアアース資源の需給バランスを保つために役立つことが期待される。今回開発した省Nd耐熱磁石は図4に示す、3つの新技術を組み合わせることで保磁力を高温環境下でも維持できる性能を実現している。粒の表面を高特性にした二層構造化（図4-1）、磁石を構成する結晶粒の微細化（図4-2）、LaとCeの特定のレアアース配合比を最適化（図4-3）。

上記3つの新技術を組み合わせ、Ndの20%以上を資源的に豊富なLa、Ceで置換した磁石で既存のNd-Fe-B磁石より保磁力の温度変化を小さくした、耐熱性に優れた磁石を開発した。

むすび

地球温暖化防止等による環境保全は、人類が直面している重要な課題である。モーター効率化は、この課題の解決策のひとつと考えられる。磁性材料は、高効率モーター必須の機能材料であり、現在のネオジム磁石、電磁鋼板を上回る高機能材料の出現が期待されている。本稿では、現在MagHEMで取り組んでいる次世代高性能磁石材料開発の概要を公開可能な内容について報告した。

参考文献

- 1) Y. Hirayama 他：Scripta Mater. 95, 70 (2015)
- 2) Y. Hirayama 他：Scripta Mater. 138, 62 (2017)
- 3) K. Takahashi 他：日本金属学会秋期講演大会予稿集、S7-13 (2018)
- 4) K. Kobayashi 他：REPM2016 Darmstadt, 04-1645 (2016) 99
- 5) K. Takagi 他：日本金属学会秋期講演大会予稿集、S7-7 (2018)
- 6) R. Hashimoto 他：日本金属学会秋期講演大会予稿集、S7-9 (2018)
- 7) 新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）ニュースリリース（2017年10月18日）
- 8) M. Yano 他：Joint Conf. MMM/INTERMAG (2016)、Abstract, AH-06, 48等より作成
- 9) 新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）ニュースリリース（2018年2月20日）

3. 自動車への応用

トヨタ自動車(株) 第2材料技術部 エネルギー変換材料室 室長 とし だ ひさ みつ
歳 田 寿 充

◇ 自動車を取り巻く環境

1900年初頭にガソリン自動車の本格的な量産が始まり、2000年頃までは先進国を中心にモビリティ社会が進展してきた。そして21世紀は人口が増加する他の地域にもモータリゼーションが進むことで、今後も車両生産台数は大きく拡大すると思われる。

この世界的なモビリティ社会の進展は、産業・技術の発展や、快適・利便性向上に大きく貢献する一方で、課題である『エネルギー対応』、『CO₂の削減』、そして『大気汚染防止』への対応がこれまで以上に求められ、世界中の自動車各社が電動車の開発を急ぐ背景の一つとなっている。また世界各国も政策を掲げて電動化を推進する動きが活発化してきており、EVやFCV等といった一部の電動車の推進には、インフラの普及がまだ追いついていないといった課題はあるものの、電動化が世界的規模で進んでいくことは不可避だと思われる。こうした中、トヨタ自動車での取り組みを例に挙げると、2015年に「トヨタ環境チャレンジ2050」を公表し、クルマの環境負荷をゼロに近づけるとともに、持続可能な社会の実現に貢献するためのチャレンジを実施している（図1）。

◇ 電動化への取り組み

電動化に必須となる基幹部品はモーター、インバーター、電池の3つの電動ユニットであるが、これらを他の技術と組み合わせることで様々なタイプの電動車を作ることができる。

例えばエンジンと組み合わせればHV、更に充電機能を組み合わせればPHVとなる。また充電機能のみと組み合わせればEVとなり、燃料電池と水素タンクを組み合わせることでFCVにもなる。

このように電動化の基幹部品は全ての電動車に共通する技術であり、こうした自動車の世界的な普及が地球環境への貢献に大きく繋がっていくことになる。

加えて電動化は「CASE*」と呼ばれる技術革新の大きな柱の一つでもあることから、未来のモビリティ社会の実現に不可欠な技術であり、基幹部品の更なる進化が求められている。

一例としてトヨタ自動車での車両電動化のコア技術・CASE技術について図2に示す。

※ Conected（コネクテッド）、Autonomous（自動運転）、Shared（シェアリング）、Electric（電動化）の頭文字をとった造語。

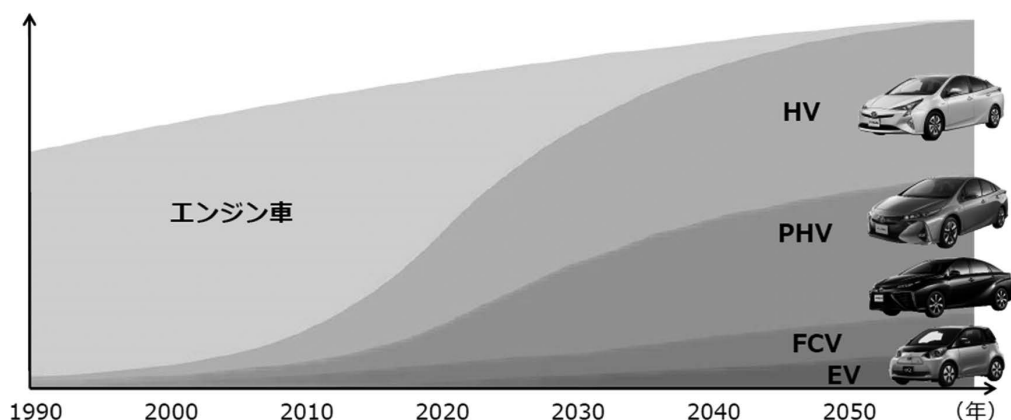


図 1 電動車拡大のイメージ¹⁾

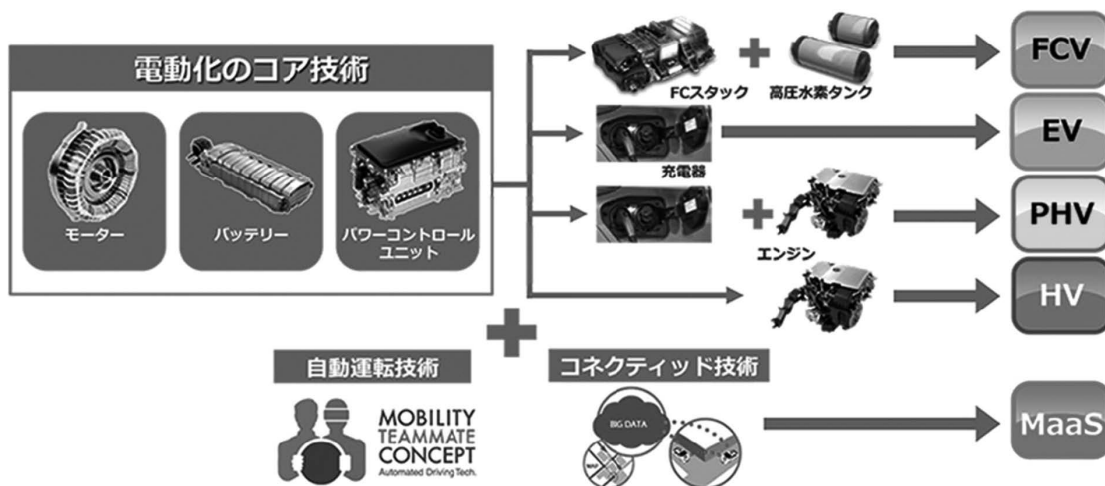


図 2 トヨタの車両電動化のコア技術・CASE技術²⁾

◇ 電動ユニットを支える磁性材料

ここでは電動ユニットを支える磁性材料として、電磁鋼板と磁石について述べる。ポイントは小型化、高出力化に向けて高電圧・大電流が用いられ、使用時の発熱が大きくなるため、材料の耐熱性向上、およびユニットの熱損失抑制を目指した開発となる。また同時にコスト低減も重要な観点である。

1. 電磁鋼板

電動ユニット用モーターのコア材料には電磁鋼板が幅広く用いられている。それは鉄に3%程度のケイ素を添加した材料であり、モーター性能であるトルクに寄与する磁束を多く流す性質を有する。また結晶方位を圧延方向だけに配列することにより磁束を一方方向に通やすくした方向性電磁鋼板と、結晶方位を鋼板面にできるだけ均一に揃えた無方向性電磁鋼板に大別されるが、磁束の流れが複雑なモーター用コア材料には主に後者が使用される。一方、モーター運転中は内部の温度が上昇するが、その原因として電磁鋼板に流れる磁束が変化することによって発生するヒステリシス損失と誘導電流が流れることで発生する渦電流損失と呼ばれる損失熱が主に存在する。なかでも渦電流損失の低減策として板厚を薄くし、厚さ数 μm 以下の絶縁被覆を施した鋼板を積層することや、ケイ素やアルミ等の合金成分の添加で電気抵抗を高めることによって誘導電流を抑えるのが一般的である³⁾。

ところで自動車の場合ほとんど定格で運転するような産業モーターとは異なり、走行状況に応じて負荷が変わることから、低回転（低周波数）から高回転（高周波数）までの全域での損失低減が求められる。しかしながら渦電流損失を低減させるための有効手段である薄板化は圧延回数を増やすこととなるため生産性が悪くなること、また合金量成分の増加は生産性が悪くなることと併せて磁束密度も低下させるため、モーター仕様に合わせた損失・生産性・磁束密度のバランスを考慮した材料設計を実施する必要がある。加えて軽量・小型化、低コスト化を狙った高回転型モーターでは回転するロータへ大きな遠心力がかかるため、高い強度も要求される。

したがって先に述べた薄板化や合金添加の調整と併せて、熱間圧延や冷間圧延、連続焼鈍時のプロセス制御による集合組織・結晶粒径制御や製鋼段階での不純物低減等による高純度化により磁気特性・機械特性向上の材料開発が進められている⁴⁾。また電磁鋼板の磁気特性はコア製造工程（プレス加工、カシメ、溶接など）時に発生する歪や応力に対し敏感なので、コアの打ち抜き性やコア積層方法などの影響も踏まえた開発や使いこなしの検討も行われている。モーター製造時にもコアへ巻き線を挿入する時やモーターケースへ固定するための圧入や焼嵌め時にも応力が印加されるので、これらの影響を考慮に入れた開発が必要である⁵⁾。

以上、電磁鋼板について述べてきたが、更なる低損失化の観点から現在、結晶構造に由来する異方性がなく、磁壁の移動を妨げる結晶粒界が存在しない低損失なアモルファス磁性や結晶粒径を極限まで小さくしたナノ結晶軟磁性が注目されており、それらのモーターへの適用検討が行われている^{6)、7)}。

2. 磁石

現在、電動ユニット用モーターには高い飽和磁化を有するネオジム磁石が広く用いられている。これは1982年、佐川氏らによって発明された最大エネルギー積を持つ磁石であり、以降のモーターを大きく進化させた材料の一つである。

発明当時は明確になっていなかったが、現在ではメカニズム解析が進み、ネオジム磁石は主に主相と呼ばれる結晶粒とそれを覆う粒界相から構成され、各相の割合や量、質、ならびに配置が磁石特性に大きく影響することが分かっている。具体的に述べると、主たる物性である残留磁束密度は主相の飽和磁化だけでなく、配向度や主相率、相対密度によって左右され、保磁力は粒界相の存在と品質に加え、主相の異方性磁界や結晶粒のサイズで変化する。

磁石メーカー各社は、メカニズム解析と技術開発、量産開発を並行して進めながら磁石そのものの性能を向上し、電動ユニット用モーターの性能を向上させてきた。

また資源リスクの観点から重希土類元素使用量を低減する技術開発も進められてきた。

もともとネオジム磁石は磁力が強力である反面、熱に弱いという欠点があり、その耐熱性向上のために、モータートルク性能に影響する残留磁束密度が低下することになるが、ディスプロシウムなどの高価な重希土類元素を原料磁粉に添加することで耐熱指標となる保磁力を高めてきた。

そこで希土類元素を含まないネオジム磁石を焼結した後、熱処理等によって粒界から重希土類元素を拡散させる「粒界拡散技術」が見出された。また局所的な数nmの粒界相の原子配列や主相近傍のひずみの計測等が可能になり⁸⁾、保磁力発現のメカニズム解明や、品質・信頼性を確保する裏付けを基に材料開発の指針が立てられるようになったことで、任意の少量の重希土類元素量で所望の

保磁力を得ることができるようになった。この技術は高い保磁力が必要な磁石表面の重希土類元素濃度を高く、磁石内部のそれを低くすることができるので、重希土類元素の使用量を低減するだけでなく、残留磁束密度の低下を最小限に抑えることができるため、資源リスク低減と高性能化を両立させた画期的な技術である。昨今はディスプロシウムに比べてより少量の使用で高保磁力が得られる重希土類元素のテルビウムを用いた粒界拡散磁石も製品化されている。

このようにネオジム磁石は市場の要求と資源的な問題に対応しながら進化してきた。その進化は今も続いており、先述した観点である粒界相改質や結晶粒の微細化技術を追求することで、重希土類元素の添加量を大幅に削減あるいは添加しなくても高い保磁力を有するネオジム磁石が開発されている^{9)、10)}。

また、磁気特性の進化に加え、部品の付加価値向上として絶縁目的の皮膜が表面処理された磁石も開発・製品化されている。この絶縁皮膜は電磁鋼板と磁石の間を絶縁し、磁石の渦電流損失を低減させ、磁石の発熱及びモーターの損失を低減することで車両の燃費・電費の向上に貢献する。もちろん磁石そのものの電気抵抗が十分に高ければこの絶縁皮膜は不要であるが、磁石の組織制御においては磁気特性との両立が難しいのが現状であるため、磁石の部品としての進化も必要となってきた。

加えて今後の世界的な電動化の進展に伴い、急速な需要の高まりに対応する生産量・供給能力の増強はもとより、規模の拡大に適した生産性の高い材料開発や量産効果を最大化する製造工程の開発などによる低コストな磁石の出現が期待されている。

むすび

環境世紀と呼ばれる21世紀において、自動車を取り巻く環境も大きな変革期を迎えている。一方で本来の自動車に求められる安全・楽しさ・快適性を忘れてはならない。このような現状認識に立ち、緑豊かな地球と寄り添い続ける為にも将来を見据えたもっと高いレベルでのチャレンジを続けることが必要である。今後のモビリティ社会の更

なる発展の為にも、磁性材料の更なる性能向上が期待される。

参 考 文 献

- 1) トヨタ自動車ホームページ、<https://global.toyota/jp/>
- 2) トヨタ自動車プレスリリース2019.6.7、EVの普及を目指して
- 3) 尾田義彦ほか：JFEスチールにおける無方向性電磁鋼板の最近の進歩、JFE技報、No. 36、P6-11 (2015)
- 4) 田中一郎ほか：特殊鋼、Vol. 63、No. 5、P12-14 (2014)
- 5) 開道力：回転機用電磁鋼板の限界特性とその可能性、日本磁気学会、第221回研究会資料、P7-12 (2019)
- 6) 日立金属プレスリリース2018.10.24、アモルファス金属を用いたモーターの高効率化技術を開発
- 7) 榎本裕治ほか：高Bsナノ結晶合金を採用した究極高効率モーターの開発、平成30年度電気学会産業応用部門大会、3-54、Ⅲ 299-Ⅲ 304 (2018)
- 8) 佐々木泰祐ほか：ネオジム焼結磁石の微細組織一粒界相および界面組織、日本金属学会、第81巻、第1号、P2-10 (2017)
- 9) 中村元：Nd-Fe-B系焼結磁石の展望と新磁石への期待、日本金属学会秋季講演大会 (2018)
- 10) 廣田晃一：ネオジム焼結磁石の開発動向、日本磁気学会、第221回研究会資料、P19-23 (2019)



Ⅵ. 会員メーカーの商品紹介

大同特殊鋼(株)

自動運転・電動化のための 高透磁率パーマロイ帯鋼 (MEN*PB-S、MEN PC-2S)

まえがき

大同特殊鋼（以下、当社という）は、電磁純鉄、電磁ステンレス、各種パーマロイと、軟磁性金属材料の幅広いラインアップを取り揃えている。

自動運転やハイブリッド（以下、HVという）、プラグイン・ハイブリッド（以下、PHVという）、EV（以下まとめて、x-EVという）の開発の加速に合わせ、自動車のセンサの高感度化や電装部品の小型化等のニーズが増大している。特に軟磁性金属材料を用いたセンサは、電磁鋼板（当社従来品の透磁率は5,000）の積層品やパーマロイがコアとして使われてきたが、センサの小型化、高感度に寄与する材料が求められている。

今回、主にニッケル、その他の微量添加元素の成分バランスと製造プロセスの最適化を図ることにより、パーマロイの高透磁率化に成功したので紹介する¹⁾。

◇ 製品の特長および用途

当社が新たに製品化したパーマロイおよび従来品の代表的な特性値を図1に示す。

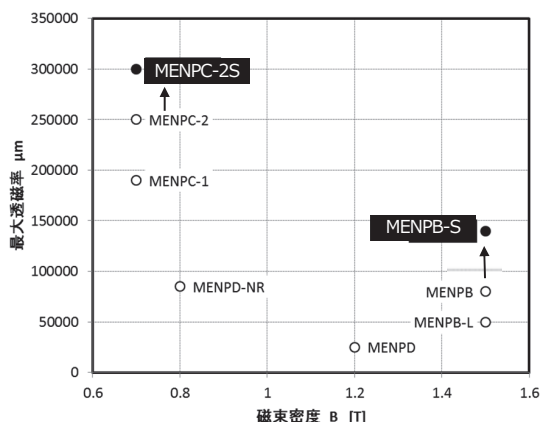


図 1 パーマロイ系各種磁性材の位置付け

1. MEN PB-S

MEN PB-Sは、自動車の自動運転・電動化のためのセンサの高感度化・小型化・大電流化に対応した製品である。高感度化に必要である透磁率を140,000に高め、加えて磁束密度が1.5 [T] と高く、センサの小型化にも対応している。x-EV用途では、2次電池の充放電検知のため、電流センサを使用している。センサの高感度化により、バッテリー残量の計測が正確になれば、使用できる電池の容量範囲が広がるため、走行距離を増加させることが可能となる。また、駆動系モータの電流センサなどにも用途が広がっている。MEN PB-Sは、従来のMEN PBから、成分バランスの調整および製造プロセスの最適化を行い高透磁率化を行った材料である。

電動パワーステアリング用トルクセンサの磁気コアなどの他、変流器、磁気シールド、ステッピングモータのコア等に適している。

2. MEN PC-2S

一方、MEN PC-2Sは、磁気センサの超高感度化に対応した製品である。透磁率を300,000まで向上させており、電流の不具合などを検出するセンサ用コア材に活用が期待できる。例えば、EVやPHVなどでは、新規格IEC-62752:2016にも記載されているように、家庭用電源および充電スタンドから充電するケーブルには、安全上、高感度の漏電遮断器が義務付けられている。漏電遮断器には、漏電を検出するZCT（零相変流器）が必須である。ZCTは透磁率の高い軟磁性材料のコア材と検出コイルから構成されている。コア材の透磁率を高めることで、微弱な漏電電流を瞬時に検知できるので、ZCTに適した材料である。

MEN PC-2Sは、MEN PC-2から微量添加元素の成分バランス²⁾と製造プロセスを最適化し、超高透磁率化を行った材料である。

* MEN 当社登録商標

参考文献

- 1) 細川真、戸塚基太、齋藤彦彦：電気製鋼、89（2018）、2号、P. 109-110
- 2) 加藤哲男、高野正吉、矢萩慎一郎：電気製鋼、48（1977）、2号、P. 265-270

〔大同特殊鋼(株) たかの まさき〕
ソリューションパートナー部 高野 昌樹

(株)ダイドー電子

(株)ダイドー電子の製品紹介

ま え が き

(株)ダイドー電子は、希土類磁石メーカーとして、等方性ネオジムボンド磁石、等方性サマリウムボンド磁石、ラジアルリング異方性ネオジム熱間加工磁石を従来から製造販売してきましたが、近年、板状異方性ネオジム熱間加工磁石と焼結ネオジム磁石PLPを新たに加え、希土類磁石のラインナップの幅を広げています。

◇ 各製品の紹介

《NEOQUENCH-P、NITROQUENCH-P》

超急冷法によりつくられたNd・Fe・B系粉末を樹脂で結合させた等方性ボンド磁石がNEOQUENCH-Pであり、高磁力を特徴とする圧縮成形品、多様な形状に成形できる射出成形品、シャフト等の金属や樹脂と成形した一体射出成形品、射出成形品と樹脂の2材質のものを一金型で成形した二材成形品があります。NITROQUENCH-Pは、超急冷でつくられたSm・Fe系粉末を窒化し、樹脂で結合させた等方性ボンド磁石です。高耐食性と高耐熱性が特徴です。両者共に、従来はOA・家電への用途が中心でしたが、近年は環境面や安全性の要求の強い自動車でのモータや磁気センサへの用途展開が進んでいます。

《NEOQUENCH-DR、D》

超急冷法によりつくられたNd・Fe・B系粉末を熱間でリング状に押し出し加工したラジアル異方性磁石が、NEOQUENCH-DRです。リング形状で長尺・小径でも

高磁力であることを特徴として、従来からのFA用ACサーボモータを中心に使用されていますが、近年、自動車の補機モータ用途が中心となり展開されています。

上記の磁石で板状に押し出し加工した異方性磁石がNEOQUENCH-Dです。結晶粒がNanoレベルであり高保磁力である為、高価で資源問題となるDy等の重希土類が低減できるという元々の特徴に加え、大型DCブラシレスモータのIPMモータ化に適応すべく、板形状磁石としたものです。大同特殊鋼株式会社がプロセス開発し、当社にて量産化に繋げました。単に磁石開発では実現が困難でしたが、本田技研工業株式会社様の共同開発でモータ技術改善を行う事により、2016年秋量産化を実現できました。重希土類を全く使用しない磁石をHEV用主機モータに使用されたとして、2018年に日本ものづくり大賞、経済産業大臣賞を受ける他、数々の賞を受賞しています。今後も本磁石の多くの採用が期待されています。

《PLP (Press Less Process)》

ストリップキャスト装置でNd・Fe・B系の原料が合金化され、約3μm程まで微粉砕されます。専用型に原料を挿入した後、磁場成形し、焼結、アニールされますが、その専用型がアニールまでそのまま工程を進み、且つ無酸素状態で流れます。よって、焼結体は製品形状に近く、ニアネットシェイプを実現しています。板やブレード形状を主とし、世界最高レベルの磁力を実現しています。自動車EV/HEV用主機モータに使用される他、自動車補機モータへ展開されています。特徴ある粒界拡散技術によりこれも重希土類レス高磁力磁石として、今後の拡大が期待されています。

む す び

過去、2011年に尖閣列島を巡って中国側がレアアースの輸出を禁止し、世界のレアアース価格が100倍以上に値上がりした時期があり、後に各日本の磁石メーカーは中国大陸に移転し始めましたが、当社は他社よりも先駆け、2011年以前に、タイ、中国へ進出し、リスクヘッジしています。地球上では、環境問題がますます激化し、気候変動は経済にも影響を及ぼしています。省エネルギーを対象とした自動車・家電・発電の要求は増し、高耐熱、高磁力の磁石の需要は高まる一方です。(株)ダイドー電子は、更に重希土類フリー化を推し進め、環境にやさしい地球と豊かな社会づくりに貢献していきます。

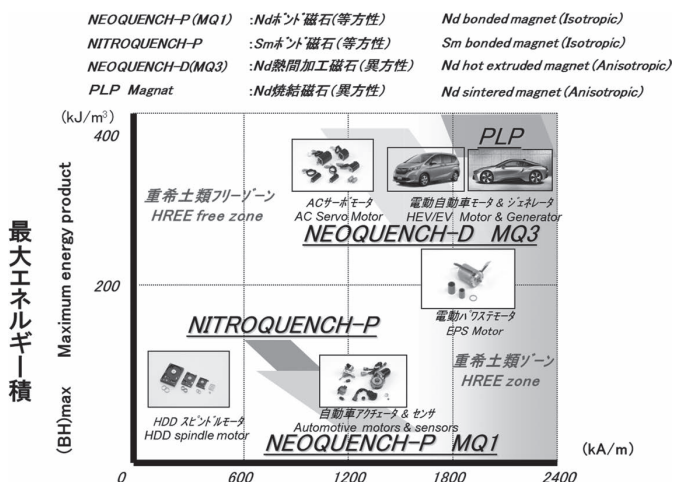


図 1 ダイドー電子の製品ラインナップ

(株)ダイドー電子 営業部次長 灰塚 ひろし

大きな振動発電機能を有するクラッド鋼板

まえがき

あらゆるモノがインターネットにつながり、センサが搭載されたモノからデータを収集して活用するIoT (Internet of Things) 技術が様々な分野で普及しつつあり、センサの数は2030年には1兆個を超えるといわれている。膨大な数のセンサの駆動や通信用電源として、電池や配線は保全コスト上現実的でなく、周囲の環境に存在するエネルギー（振動・光・熱・電磁波など）を利用する環境発電が注目されている¹⁾。当社では設備の振動を発電に活用することを目的として、FeCo磁歪材料を利用した振動発電器を、設備監視IoTセンサシステムの電源として採用し試験運用している²⁾。

磁歪式振動発電は従来から知られているが、新開発の「磁歪材料と軟磁性材料とを接合したクラッド鋼板」は、発電能力が飛躍的に向上し、これまで利用出来なかった非常に僅かな設備振動も、センサシステム用の発電に活用できるようになった。

◇ 逆磁歪効果と振動発電

磁歪効果とは、磁性体を磁化させたときに材料の外形が変化する現象で、ジュール効果とも呼ぶ。逆に、磁歪材料に外部から力を加えて歪ませると、材料内部の磁化方向が変化する現象を逆磁歪効果もしくはビラリ効果と呼ぶ。この時、磁歪材料の周りにコイルを配置すると、コイル内の磁束が変化して電磁誘導の原理により電気が発生するのが磁歪式振動発電の原理である。

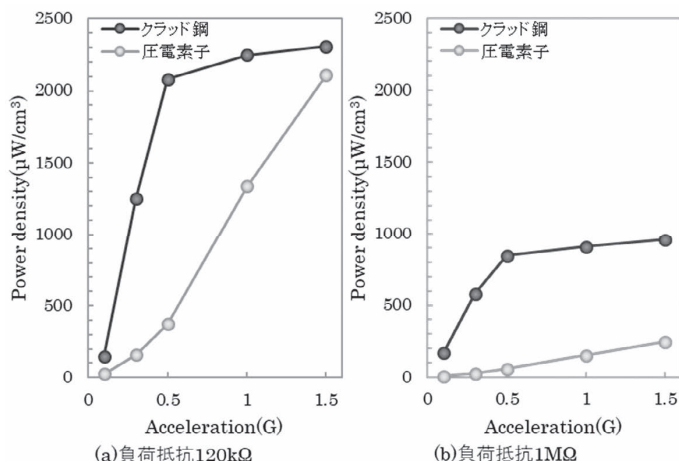


図 1 クラッド鋼板の振動発電能力

◇ 超磁歪材並みの発電性能を有するクラッド鋼板

FeCo磁歪材料とFeやNiなどの軟磁性材料とを、当社の熱拡散工程を利用してクラッド構造にしたところ、磁歪材料単体よりも大きい発電出力が得られることが分かった。正磁歪（磁化方向に伸びる）のFeCo磁歪材と負磁歪（縮む）のNiからなるクラッド鋼板を発電素子とした振動発電器では、FeCo磁歪材単体の板を用いた場合よりも数倍から20倍以上の発電出力が得られた³⁾。図1は、FeCo/Niクラッド鋼板の片持ち梁式振動発電器及び市販の圧電素子による振動発電器の出力電力密度と加速度の関係を示す。いずれも50Hzでの共振状態で、測定時負荷抵抗は120kΩ、1MΩである。クラッド鋼板では、0.1Gの微かな振動でもセンサ信号を送信するに十分な電力が得られ、出力電力密度レベルから、超磁歪材料と呼ばれるFeGa合金に匹敵する発電性能を有すると思われる³⁾。これはクラッド構造の表裏で磁化方向が揃う上に接合界面で磁束が集中することに起因すると考えられる⁴⁾。強靱で衝撃に強い材質をいかして大型大出力の環境発電への応用も期待される。

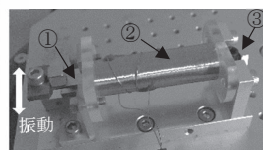
また、発電とは逆に、コイルに通電して磁歪効果により素子を変形させると、大きな曲げ変位が得られており⁵⁾、アクチュエータへの活用も期待される。

磁歪材料と軟磁性材料とのクラッド構造による増幅効果は、材質の組合せによるバラエティも考えられるので、今後応用面でも幅広い展開が期待される。

参考文献

- 1) F. Narita and M. Fox: Adv. Eng. Mater. 20, 1700743 (2018)
- 2) 田山 巖：機械設計 第60巻 第16号 (2016)
- 3) Z. Yang et al: Appl. Phys. Lett. 112, 073902 (2018)
- 4) Z. Yang et al: Smart Mater. Struct. 28, 034001 (2019)
- 5) 成田史生：バリティ 第33巻 第11号 (2018)

〔東北特殊鋼(株) 研究開発部 主査 小野寺隆一〕



- ① 発電素子 (t1xw5xL70mm)
- ② コイル
- ③ 磁石

パーマロイと感温磁性材料

ま え が き

（株）日立金属ネオマテリアルでは、磁性材料として、パーマロイや感温磁性材料の板材（冷間圧延材）を製造しております。また、パーマロイの板材を部品形状に加工した後、磁性焼鈍を行った個片製品も製造しております。

◇ パーマロイ

パーマロイは、高透磁率特性を特長とする軟磁性材料で、電動パワーステアリング用のトルクセンサ部材、電流センサ用のコア材や磁気シールド材等に使用されています¹⁾。このパーマロイの磁気特性は、僅かな化学成分の変動によって著しく変化しますので²⁾、高透磁率特性を安定して得るためには、厳密な化学成分の管理が必要となります。また、高透磁率特性を得るためには、部品形状に加工後の磁性焼鈍によって、材料から完全にひずみを取り除くとともに、結晶粒を粗大化させることが必要となります。磁性焼鈍後にひずみを加えると、磁気特性は劣化致しますので、パーマロイ部品を磁性焼鈍後の取り扱いには注意が必要です。

当社の主なパーマロイの直流磁気特性の代表値を表1に示します。表1の磁気特性値は、冷間圧延材を1100℃で磁性焼鈍後の値です。パーマロイとして実用化されているNi-Fe合金は、PB系（約45%Ni）とPC系（約78%～80%Ni）に大別されます。

PB-1は、標準的なPBパーマロイで、高磁束密度と高透磁率を特長とする材料です。当社では、このPB-1の他に、より透磁率を高めたPB-12も製造しております。

また、PC-2は、磁歪と磁気異方性がともにゼロ近傍となるように成分調整することによって高透

磁率特性を実現した材料で、現在、広く使用されているPCパーマロイです。また、使用中にひずみがかかる用途では、ひずみによる透磁率の低下を小さく抑えるために、僅かに磁歪がある材料を使用する場合があります。PC-80は、磁性焼鈍後の樹脂モールドにより、使用中にひずみがかかることを想定した耐ひずみ特性の良いPCパーマロイです。更に、PC-22は、環境温度の変化に伴う透磁率の変化が小さいことを特長とするPCパーマロイです。

◇ 感温磁性材料

感温磁性材料は、磁性材料の磁気特性が、ある温度（キュリー温度）以上で消失することを利用し、温度スイッチや過熱防止機能を持つ誘導加熱用材料として使用されています³⁾。この感温磁性材料のキュリー温度も、化学成分の変動によって大きく変化しますので、用途に応じたキュリー温度を実現するためには、厳密な化学成分の管理が必要となります。当社では、MS-135（キュリー温度135℃）、MS-220（キュリー温度220℃）、MS-260（キュリー温度260℃）等、キュリー温度の異なる感温磁性材料をラインアップしております。

◇ 製品・技術の展開

当社では、お客様のご要求に応じて、パーマロイや感温磁性材料を他材料とクラッドした磁性材料を開発・製造することも可能です。一例として、PCパーマロイのPC-80と、導電率の高いCu合金をクラッドした材料の製造実績がございます。

参 考 文 献

- 1) 横山紳一郎：特殊鋼 Vol. 68 No. 4 (2019年7月号) pp. 57-59
- 2) 藤原義行、横山紳一郎、長塩隆之：日立金属技報 Vol. 28 (2012) pp. 42-45
- 3) 日立金属技報 Vol. 24 (2008) p. 71

〔（株）日立金属ネオマテリアル 技術開発部 横山紳一郎〕

表 1 当社の主なパーマロイの代表的な直流磁気特性^{注1)}

材質	初比透磁率 μ_i	最大比透磁率 μ_m	磁束密度 $B_{800}/T^{注2)}$	保磁力 $H_c/A/m$	特長
PB-1	7,500	110,000	1.51	4.56	
PB-12	29,000	180,000	1.54	2.75	高透磁率PBパーマロイ
PC-2	220,000	380,000	0.75	0.59	高透磁率PCパーマロイ
PC-22	140,000	290,000	0.75	0.65	温度特性良好
PC-80	55,000	140,000	0.73	1.15	耐ひずみ特性良好

注1) 冷間圧延材を1100℃で磁性焼鈍後の代表値を示します。品質保証値ではありません。

注2) 磁場800A/mでの磁束密度

軟磁性粉末

まえがき

当社では水アトマイズ設備を保有しており、軟磁性粉末を製造しています。鉄系合金として、Fe-Si系、Fe-Si-Cr系、Fe-Ni系、Fe-Co系などの粉末を製造しています。粒径が数ミクロン～数百ミクロンまでの粉末を製造可能です。

軟磁性粉末に要求される代表的な磁気特性は透磁率特性とコアロス特性です。これらの特性は粉末の成分や粒度によって大きく変わってきます。そのため、様々な用途において適材適所の成分・粒度を選定し、使用しています。例えば、低周波領域で使用されるリアクトルコイルなどでは比較的粗い粉末が望まれ、高周波領域で使用されるインダクタなどでは比較的細かい粉末が望まれます。また直流重畳特性に対する要求もあります。

◇ アモルファス粉末

アモルファス粉末とは結晶のように規則的な原子配列を持たない粉末であり、電気抵抗が高く、耐食性、機械強度が優れている特徴があります。アモルファス粉末を得るためには、熔融状態の金属を急速に冷却することで結晶を析出させずに固化させます(水アトマイズ)。写真1にアモルファス粉末のSEM写真を示します。また、アモルファス粉末に熱処理を施すことで、微細な結晶(ナノクリスタル)を析出させた粉末もあります。アモ

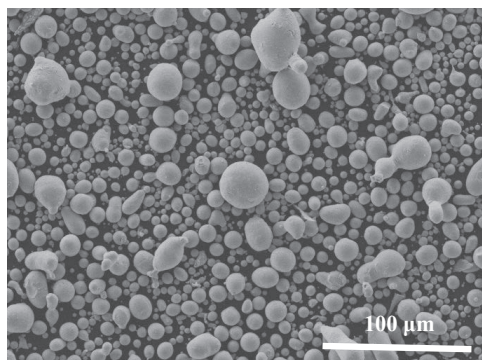


写真1 アモルファス粉末のSEM写真

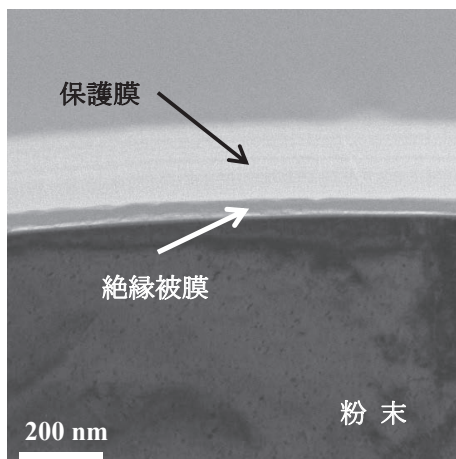


写真2 絶縁処理粉末の断面TEM写真
(TEM観察のため保護膜を塗布)

ルファス粉末やナノクリスタル粉末は、透磁率が高く、また、電気抵抗が高いため高周波領域でのコアロスが小さいという特長を持っています。

◇ 絶縁処理粉末

粉末の周囲を絶縁材で被覆した粉末が絶縁処理粉末です。代表的な絶縁被覆材としては、リン酸やシリコンなどがあります。

この絶縁処理の目的は2つあります。一つは耐電圧特性の付与です。最近では電子部品の高電流化が進んでいるため、ショート防止として耐電圧特性の付与が必要とされています。もう一つはコアロスの低減です。電子部品の高性能化に伴い、高周波化が進んでいます。その際に生じるエネルギー損失(コアロス)を低減する必要があります。粉末の表面を絶縁被覆処理することにより、粉末粒子間の渦電流損失が低減されます。写真2に粉末の断面のTEM写真を示します。

むすび

スマートフォンやPCなどの高性能化に伴い、それに使用される電子部品の高性能化が進んでいます。その電子部品に使用される軟磁性粉末も高性能化していく必要があります。最近では上記のような様々な技術が開発されており、今後も軟磁性粉末の研究は着実に進んでいくものと考えます。

〔三菱製銅(株) さいとう せいいち
技術開発センター 斉藤 晴一〕

業界のうごき

佐久間特殊鋼、樹脂複合材料を販売 20年度中めど、高強度ニーズ捕捉

佐久間特殊鋼は、リサイクル炭素繊維（リサイクルCF）を使った樹脂複合材料「ReMax Composite（リマックスコンポジット）」の販売を2020年度中にも開始する。リサイクルCFは、バージンCFに比べてコスト、環境面での優位性に期待がかかるが、その量産レベルでの実用例は全国的にもごく少ない。このリサイクルCFと樹脂材料を複合化させることで量産・実用性を確立。今後幅広い産業分野で拡大が見込まれる高強度、軽量化ニーズを捕捉する考えだ。

「ReMax Composite」は、チョップドサイズのリサイクルCFとPPSなどのエンジニアリングプラスチックを複合化しペレット化したりリサイクル炭素繊維強化樹脂（リサイクルCFRP）で、高機能樹脂コンパウンダー、山陽化工と共同で開発した。

ペレットは量産部品での活用を前提に、標準的な射出成型設備で使えることを目指したものとなっており、金属並の比強度とバージンCFRPに匹敵する機械的特性を確保している。さらに、部品製造にかかるコストは、CFRPのバージンCFを使ったケースと比較し、少なくとも3割以上のコストダウンを図ることができる点が特長。

（9月5日）

佐藤商事、タイ現法が倉庫を新設 電子材料と電子部品を在庫

佐藤商事のタイ現地法人である佐藤商事タイランドがタイに電子材料と電子部品を在庫する自社倉庫を新設した。タイ国内4カ所で倉庫を賃借していたが、自社倉庫への集約が完了し、7月1日から新倉庫での在庫・出荷業務を開始している。

新倉庫はプラチンブリ県304工業団地内の土地を取得し、新築した。

敷地面積は2万平方メートル、倉庫面積は2棟で合計4,200平方メートル。保冷機能は空調管理倉庫が庫内温度20℃以下、冷蔵倉庫は庫内温度10℃以下が可能。新倉庫に従事する従業員数は11人。

保税倉庫は港や空港付近に置くケースが多いものの、今回、取引先に近い工業団地内に設置し、外貨での在庫、販売を可能にした。一般倉庫は電子材料保管に必要な保冷機能を有する。タイは加工ビジネスがメインで、原材料を中心に輸入依存度が高い。新倉庫を活用し、取引先へのサービス強化、事業拡大に注力する。

（8月20日）

住友商事、車輪メーカーの出資拡大 鉄道用、北米市場で存在感高める

住友商事は、日本製鉄と2011年に共同で買収した米国の鉄道用車輪・車軸メーカーであるスタンダードスチール社（本社＝米国ペンシルバニア州）の株式を、日本製鉄の持分より追加取得し、20%から30%に引き上げた。

鉄道貨物輸送は環境負荷が低く、長距離大量輸送が可能のため、北米における鉄道貨物輸送量は年率2～3%の成長が予想され、年間新造貨車数は継続して4万両を超える見込み。世界最大級の鉄道市場である北米では、今後も鉄道用車輪・車軸の堅調な需要が期待される。

北米を重要な鉄道市場と位置付け、スタンダードスチール社への経営に従来以上に深く参画することで、事業成長に貢献するとともに北米鉄道市場におけるプレゼンスおよび顧客への付加価値を高めていく。（9月11日）

ノボル鋼鉄、切断・加工設備を増強 仙台支店、NC帯鋸盤など更新

ノボル鋼鉄仙台支店は、2019年6月期に生産効率化投資を行い、切断・加工設備を増強した。総額約4,400万

円を投じて仙台支店でNC帯鋸盤（バンドソー）を1台更新し、機械加工拠点である宮城テクニカルセンター（宮城県名取市）ではNCフライス盤1台、福島テクニカルセンター（福島県南相馬市）ではNCフライス盤、縦型マシニングセンター1台をそれぞれ増設した。

東北6県を中心に特殊鋼需要をカバーする。構造用鋼、構造用合金鋼、工具鋼、ステンレス鋼など特殊鋼全般を在庫し、切断設備をそろえている。バンドソーは全8台有するが、今回更新したのはアマダ製バンドソー「HFA-400」で前期（18年6月期）に続く更新。

切断設備は今後も更新時期を迎えるが、慎重に需要動向を見極める。仙台支店が管轄する宮城および福島の両テクニカルセンターではNCフライス盤、福島ではマシニングセンターを増設した。

（9月25日）

三井物産、鉄鋼原料の安定供給強化 新鉱区を開発、原料炭も増産へ

三井物産は中長期で鉄鋼原料の安定供給体制を強化する。鉄鉱石は伯ヴァーレ、英リオ・ティント、豪BHPとの連携を軸に供給力拡充を目指す。生産量の維持・拡大に向けてそれぞれのオペレーターと30年先をにらんで新鉱区開発に取り組んでいる。原料炭は需要の拡大に併せ、モザンビークでの増産を軸に、豪州の炭鉱を含めた既存事業で供給拡大を進める。

リオ・ティントとの豪鉄鉱石合弁事業、BHPとの豪鉄鉱石合弁事業では、昨年それぞれで新鉱区開発を決めた。ローブリバーでは年産7,000万トンの維持に向け、新鉱区を開発する。BHP、伊藤忠商事との合弁ではヤンディ鉄鉱山の後継鉱床、年産8,000万トンのサウス・フランク鉄鉱山を開発し、21年に生産に入る。

石炭はモアティーズ炭鉱でフル操

業界のうごき

業に向けて増産を続ける。豪州も長期供給拡大を狙う。(8月19日)

リントツ、レーザー能力を上げ 半田にファイバーレーザー初導入

リントツは来年1月をめどに、半田ステンレス加工センター(半田市)に初となるファイバーレーザー加工機を導入する。拡大するレーザー加工ニーズに対応するもので、新鋭機を加えレーザー加工機の5台体制を構築し、レーザー加工能力を最大20%引き上げるとともに、AIアシスト機能などの活用による品質向上、工程効率化、コスト低減などの各種投資効果を引き出す考えだ。

新設するのは三菱電機製のファイバー二次元レーザー加工機「GXF」で、新型ファイバーレーザー発振器と加工機の高い親和性による、加工機の加工速度向上に対応した最適制御、世界で初めてレーザー加工機の加工条件を自動調整する「AIアシスト」の搭載による、連続自動運転の加工安定性向上が最大の特長。

銅板の切断スピードは既存のCO2レーザー加工機と比べ、6ミリ厚で約5倍、3ミリ厚で約7倍に上がる見通し。運用は切断面品質を踏まえ20ミリ厚までを視野に、10ミリ厚以下を中心に行う方針。(8月22日)

愛知製鋼、印特殊鋼メーカーに出資 グローバルでの競争力向上へ

愛知製鋼は、インドの特殊鋼メーカーであるバルドマン・スペシャルスチール(本社=パンジャブ州ルディアナ市、サチット・ジェイン社長)に資本参加し、技術支援を行うことなどに合意した。海外鉄鋼メーカーに出資するのは初めて。第三者割当増資を引き受け、増資後発行済株式の約11%(7.4億円相当)を出資するもので、8月27日に調印式を行った。

今回の資本参加および技術支援を足掛かりとして、グローバルでの品質・コスト競争力向上による特殊鋼事業の基盤強靱化を実現していく。

バルドマン・スペシャルスチールは、特殊鋼棒鋼を中心に年間約18万トン(2018年度)を生産している、自動車・二輪車向け製造比率が約90%の特殊鋼メーカー。1973年設立で、デリーから約300キロ北方のパンジャブ州ルディアナ市に立地し、従業員数は988人(19年3月31日時点)。18年度の売上高は約179億円で、主要設備として電気炉、二次精錬設備、連続鍛造設備、圧延機、検査設備、二次加工設備などを擁している。(8月28日)

JFEスチール、水稻直播試験開始 フィリピンで、国際稲研究所主導

JFEスチールは、2019年3月に国際稲研究所(IRRI)が主導する水稻直播コンソーシアムに参画し、5月から鉄コーティング種子を用いた水稻直播技術の普及に向けた試験をフィリピンで開始した。コンソーシアム活動を通じた国際版マニュアルの作成などで、鉄コーティング種子を用いた水稻直播技術のアジア地域でのさらなる普及を目指す。

10年前から種子のコーティングに適した鉄粉の研究を開始し、14年には種子コーティングに適した鉄粉「粉美人」を世界で初めて開発し、東日本製鉄所千葉地区で製造。

コンソーシアムを通して、高い鉄粉製造技術と日本国内で開発された鉄コーティング種子の直播技術とを組み合わせ、アジアの米生産事情の改善と環境保全に貢献していく方針だ。(9月27日)

大同特殊鋼、タイに二次加工拠点 車関連向けに高機能鋼材を提供

大同特殊鋼は、連結子会社の下村特

殊精工と大同興業がタイに特殊鋼の冷間引拔棒鋼の製造、販売、在庫事業を展開する新会社・Daido Shimomura Steel Manufacturing(Thailand)を設立した。2021年4月の稼働開始を目指し、今後、二次加工拠点を建設し、月間加工能力1,000トン体制を構築する。総投資額は11億円。

新会社の資本金は4億3,000万バーツで、株主構成は下村特殊精工が51%、大同興業が46%、Daido Kogyo(Thailand)が3%。Daido Steel(Thailand)の敷地内に建設する在庫加工拠点は1万平方メートルの土地に、3棟トータルで敷地面積約5,000平方メートルの工場棟、倉庫棟、事務所棟が建つ計画で年末に着工し、来年夏ごろに竣工する。加工はコンパインドマシーン2基のほか、切断機、検査機などを擁し、5-25ミリメートルサイズに対応する。主に日系の部品メーカー向けにステンレス鋼や軸受鋼などの高機能鋼材を提供する方針だ。(8月9日)

東北大が新研究棟の安全祈願祭開催 JX金属と、20年7月完成予定

東北大学とJX金属は、東北大学青葉山新キャンパス内に建設する研究棟「東北大学革新材料創成センター(仮称)」の安全祈願祭を開催した。総建築費は約10億円で、2020年7月末に完成予定。東北大学研究者や大学発ベンチャーを含む国内外の企業、研究機関などが結集した材料科学分野の国際オープンイノベーション拠点としての発展を目指す。

安全祈願祭には東北大学、JX金属の関係者をはじめ、文部科学省、経済産業省など国の機関、宮城県や仙台市などの地方公共団体、研究開発支援機関、ベンチャーファンドなどの来賓を合わせて約60人が出席した。

(8月9日)

日鉄ステンレス、独自二相鋼を開発 SUS316系から代替可能

日鉄ステンレスは、SUS316系から代替可能な高強度・省資源型独自二相ステンレス鋼「NSSTS2351」を開発した。「NSSTS2351」（クロム23%、ニッケル5%、モリブデン1%、窒素を含有）は高耐食・高加工性のステンレス鋼であるSUS316・316Lに比べて耐食性や溶接性、強度と、高いコストパフォーマンスと省資源鋼として価格安定性に優れる。

「NSSTS2120」で培った溶接部の特性低下を抑制する成分設計技術をベースに微量のニオブを添加し、鋼材特性を向上させるマイクロアロイニング技術を導入することで大入熱溶接を可能にし、代表的な溶接方法でSUS316系と同等以上の溶接部耐食性を実現。SUS316Lに対しては約30%、316に対しては約25%の薄肉化が可能だ。構造物の強度余裕を大きくできると同時に、設計板厚の薄肉化を通じて、鋼材使用量を最大50%まで削減できる。（9月18日）

日本精線、低温の脆性を改善 ばね用ステンレス鋼線を開発

日本精線は、高圧水素環境下で使える耐水素脆性ばね用ステンレス鋼線「HYBREM（ハイブレム）」の新製品として、ニッケル当量を高めながら、炭素や窒素の成分バランスを最適化することで、高圧水素環境下で低温の脆化特性を大幅改善した「HYBREM-S（ハイブレム-エス）」を開発した。本年中に既存製品から新製品への切り替えを進め、ユーザーや公的機関による耐久性評価を得ながら、受注獲得を進める。

ハイブレムはオーステナイト系ステンレス。冷間加工後に発生する組織の変化を防止し、SUS304並みの強度のばね特性を持ちながら、水素

環境下での絞り値を安定化。09年に開発、15年には水素ステーション向け部材として初採用。今後は化学プラント関連など新規需要開拓を図る。

（8月26日）

日本製鉄、ステンレス形鋼を値上げ 国内向け、9月契約分から10%

日本製鉄は2019年9月契約分から、国内向けステンレス形鋼の販売価格を現行比で10%程度引き上げる。ニッケルなどの主原料価格動向以外の各種コストアップ分を販価に反映させるのが目的。販価引き上げは18年5月契約分以来、1年4カ月ぶりとなる。

対象は国内向けで、品種はステンレス形鋼（アングル、チャンネル、フラットバー、C形半丸鋼、ロールH形鋼）。アジア向けなどを主体とする輸出に関しては需要家と個別に値上げ交渉を行っている。

資機材、電力などエネルギー、物流関連などの各種コストが大幅に上昇。過去のコスト上昇分をステンレス形鋼の販価に転嫁してきたが、採算を回復するには至っておらず、自助努力でコスト上昇分を吸収するにはすでに限界に来ている。

設備の維持・更新を図ることで安定供給を維持し、技術開発を進めることができる再生産可能な販価に改善する。（9月4日）

日本冶金工業、高効率電気炉を導入 川崎製造所に、生産効率向上へ

日本冶金工業は、川崎製造所製鋼工場に高効率電気炉設備を導入する。工場建屋を拡張して、70トン交流電気炉をはじめ付帯設備、大型クレーンなどを新設。ステンレスの一般材と高機能材を溶解していた60トン電気炉2基を今回、新鋭の70トン電気炉1基に電気炉体制を切り替え、電気炉能力ネックを解消して生産効率

を高めるとともに、安価原料使用やエネルギー効率アップ等でコストダウンを図る。総投資額は約130億円。19年12月から工事に着手し、22年1月の稼働開始を計画する。年間20億円のコスト削減効果を想定している。

高機能材溶解と一般材溶解の生産プロセスの整流化を実現し、ユーザーニーズに迅速対応するべく、よりチャンスフリーでの生産対応を可能にする。また、スクラップの不均一な溶解を解消し、高効率操業を実現する炉体旋回装置や、炉内の均一攪拌によって溶解スピードアップと温度・成分を均一化する電磁攪拌装置を備えた高効率電気炉1基操業に転換することで、省エネルギー化による大幅なコスト削減に繋げる。

（9月30日）

不二越、多用途向け超硬ドリル オイルホール採用で新製品

不二越は、「アクアREVOドリル」シリーズの新製品として、オイルホール形状採用により長寿命、高能率かつ多用途向けの超硬ドリルを商品化し、9月21日から世界同時販売した。自動車部品や機械部品など高能率加工を求める現場で、生産性向上とコストダウンに寄与するとして、初年度で年間5億円、3年後をめどに年間15億円の販売を目指す。

新製品は、硬さと靱性、耐摩耗性に優れた新超硬材に、新発想のオイルホールを採用。冷却性・潤滑性・切りくず排出性が飛躍的に向上するとともに、汎用オイルホールドリルと比べ約2倍の長寿命化を実現。耐摩耗性と耐酸化性に優れたREVO-Dコートで、高速切削や高送り加工など加工性能も向上している。

（9月2日）

文責：（株）産業新聞社

特殊鋼統計資料

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

鋼 種 別

(単位：t)

年 月	構 造 用 鋼				特 殊 用 途 鋼						計	合 計
	工具鋼	機械構造用炭素鋼	構 造 用 合 金 鋼	計	ばね鋼	軸 受 鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力	そ の 他		
'17 暦 年	262,744	5,014,549	3,947,953	8,962,502	438,097	1,011,176	2,850,849	629,459	5,562,736	609,458	11,101,775	20,327,021
'18 暦 年	265,850	5,232,401	4,055,787	9,288,188	428,588	1,029,788	2,954,588	651,312	5,616,124	552,701	11,233,101	20,787,139
'17 年 度	268,659	5,058,907	4,010,098	9,069,005	434,231	1,025,656	2,898,689	637,160	5,672,002	575,660	11,243,398	20,581,062
'18 年 度	254,113	5,231,860	4,054,690	9,286,550	430,796	1,032,732	2,881,369	648,216	5,498,472	564,665	11,056,250	20,596,913
'18. 7- 9 月	65,487	1,278,114	980,947	2,259,061	102,331	245,192	739,295	157,371	1,303,340	141,240	2,688,769	5,013,317
10-12 月	59,707	1,342,687	1,033,274	2,375,961	107,718	270,652	713,253	166,547	1,388,079	140,477	2,786,726	5,222,394
'19. 1- 3 月	59,133	1,285,351	1,015,067	2,300,418	109,020	257,157	692,224	156,026	1,347,700	143,155	2,705,282	5,064,833
4- 6 月	59,607	1,214,992	1,003,656	2,218,648	106,395	257,956	662,226	151,618	1,325,442	128,939	2,632,576	4,910,831
'18年 7 月	20,555	431,726	349,361	781,087	37,727	81,011	242,273	59,279	396,927	49,094	866,311	1,667,953
8 月	20,048	422,671	310,377	733,048	33,536	79,855	246,448	47,506	474,025	50,823	932,193	1,685,289
9 月	24,884	423,717	321,209	744,926	31,068	84,326	250,574	50,586	432,388	41,323	890,265	1,660,075
10 月	19,299	450,796	355,754	806,550	36,898	91,578	238,598	52,734	492,624	53,380	965,812	1,791,661
11 月	20,280	442,033	339,996	782,029	34,331	85,646	232,145	58,757	458,521	43,379	912,779	1,715,088
12 月	20,128	449,858	337,524	787,382	36,489	93,428	242,510	55,056	436,934	43,718	908,135	1,715,645
'19年 1 月	20,434	434,551	329,353	763,904	37,528	79,435	226,667	54,103	456,023	50,861	904,617	1,688,955
2 月	19,080	405,541	331,266	736,807	34,145	83,307	223,912	50,926	402,421	41,825	836,536	1,592,423
3 月	19,619	445,259	354,448	799,707	37,347	94,415	241,645	50,997	489,256	50,469	964,129	1,783,455
4 月	21,290	413,374	346,443	759,817	34,096	85,831	211,052	52,162	410,739	44,250	838,130	1,619,237
5 月	20,098	406,199	330,484	736,683	35,942	84,342	235,021	47,734	445,952	39,429	888,420	1,645,201
6 月	18,219	395,419	326,729	722,148	36,357	87,783	216,153	51,722	468,751	45,260	906,026	1,646,393
7 月	20,072	410,278	333,648	743,926	31,001	68,405	223,023	49,985	468,266	48,818	889,498	1,653,496
8 月	15,421	353,393	289,877	643,270	27,841	65,863	204,477	41,776	459,321	43,043	842,321	1,501,012
前 月 比	76.8	86.1	86.9	86.5	89.8	96.3	91.7	83.6	98.1	88.2	94.7	90.8
前年同月比	76.9	83.6	93.4	87.8	83.0	82.5	83.0	87.9	96.9	84.7	90.4	89.1

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形 状 別

(単位：t)

年 月	形 鋼	棒 鋼	管 材	線 材	鋼 板	鋼 帯	合 計
'17 暦 年	345,018	6,272,447	1,112,835	4,249,655	1,716,315	6,648,155	20,344,425
'18 暦 年	374,683	6,452,802	1,188,873	4,261,952	1,647,479	6,868,340	20,794,129
'17 年 度	347,415	6,340,621	1,168,193	4,199,478	1,780,457	6,761,726	20,597,890
'18 年 度	383,020	6,439,522	1,203,698	4,292,348	1,495,812	6,788,499	20,602,899
'18. 7- 9 月	89,994	1,558,119	287,903	1,054,854	351,482	1,672,547	5,014,899
10-12 月	93,323	1,644,444	299,017	1,093,111	375,559	1,718,060	5,223,514
'19. 1- 3 月	96,599	1,588,574	317,290	1,070,966	323,004	1,669,733	5,066,166
4- 6 月	75,598	1,563,314	295,776	1,000,644	311,269	1,665,778	4,912,379
'18年 7 月	29,835	548,334	93,366	365,812	105,218	526,157	1,668,722
8 月	26,322	483,072	105,550	352,595	127,862	590,339	1,685,740
9 月	33,837	526,713	88,987	336,447	118,402	556,051	1,660,437
10 月	30,886	551,807	103,018	368,159	145,165	592,787	1,791,822
11 月	31,573	554,793	93,687	357,968	114,486	563,321	1,715,828
12 月	30,864	537,844	102,312	366,984	115,908	561,952	1,715,864
'19年 1 月	25,837	512,321	103,122	364,796	105,736	577,550	1,689,362
2 月	39,550	514,051	99,936	340,701	98,157	500,768	1,593,163
3 月	31,212	562,202	114,232	365,469	119,111	591,415	1,783,641
4 月	20,116	529,582	107,602	333,637	104,685	524,182	1,619,804
5 月	21,523	505,525	100,690	337,026	101,841	578,912	1,645,517
6 月	33,959	528,207	87,484	329,981	104,743	562,684	1,647,058
7 月	29,571	480,049	106,271	348,559	118,268	571,126	1,653,844
8 月	25,128	431,139	97,429	298,588	127,327	522,140	1,501,751
前 月 比	85.0	89.8	91.7	85.7	107.7	91.4	90.8
前年同月比	95.5	89.2	92.3	84.7	99.6	88.4	89.1

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位:t)

年 月	工 具 鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他	計		
'17 暦 年	328,624	3,662,276	3,174,867	6,837,143	209,980	558,894	2,401,141	182,809	98,145	56,347	3,507,316	10,673,083	
'18 暦 年	330,317	3,525,290	2,049,316	5,574,606	122,660	581,255	1,703,148	181,436	95,234	49,039	2,732,772	8,637,695	
'17 年 度	328,965	3,482,828	2,582,257	6,065,085	169,371	561,237	2,045,095	180,396	100,874	56,424	3,113,397	9,507,447	
'18 年 度	322,765	3,543,660	2,028,274	5,571,934	119,549	546,004	1,681,386	179,074	95,026	47,294	2,668,333	8,563,032	
'18年 12月	25,884	277,922	160,372	438,294	9,741	36,448	139,276	12,978	7,634	3,727	209,804	673,982	
'19年 1月	24,877	284,735	157,391	442,126	14,858	35,139	136,927	12,046	7,415	3,304	209,689	676,692	
2月	25,815	277,669	161,764	439,433	5,436	36,083	139,797	13,667	7,824	3,714	206,521	671,769	
3月	23,332	278,236	148,944	427,180	4,526	33,997	128,306	15,513	8,456	3,492	194,290	644,802	
4月	22,382	272,499	133,232	405,731	4,371	32,005	123,147	11,898	8,116	3,817	183,354	611,467	
5月	22,911	242,425	136,529	378,954	4,301	30,567	122,915	11,671	7,418	2,646	179,518	581,383	
6月	23,555	228,385	131,682	360,067	4,842	30,709	123,571	11,834	7,596	9,554	188,106	571,728	
7月	25,205	257,150	141,572	398,722	4,660	31,487	125,931	12,086	7,736	10,574	192,474	616,401	
8月	19,082	214,078	119,311	333,389	3,171	27,243	104,810	8,671	7,096	8,373	159,364	511,835	
前 月 比	75.7	83.3	84.3	83.6	68.0	86.5	83.2	71.7	91.7	79.2	82.8	83.0	
前年同月比	74.4	73.8	74.3	74.0	34.0	59.1	76.3	65.3	107.3	214.0	73.6	73.9	

出所：一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位:t)

年 月	工 具 鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他	計		
'17 暦 年	7,366	231,844	127,052	358,896	33,141	32,395	122,991	26,401	188,923	21,699	425,550	791,812	
'18 暦 年	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772	
'17 年 度	6,776	223,466	121,672	345,138	32,300	31,384	119,951	28,451	175,114	21,424	408,624	760,538	
'18 年 度	8,276	237,787	154,530	392,317	29,638	33,728	122,372	25,391	162,107	28,897	402,133	802,726	
'18年 12月	9,022	265,513	163,666	429,179	30,989	37,438	132,754	28,173	163,433	19,784	412,571	850,772	
'19年 1月	11,565	269,577	157,469	427,046	32,757	33,824	142,362	32,024	159,994	28,013	428,974	867,585	
2月	9,451	251,098	155,154	406,252	32,019	31,187	138,320	27,521	156,811	24,435	410,293	825,996	
3月	8,276	237,787	154,530	392,317	29,638	33,728	122,372	25,391	162,107	28,897	402,133	802,726	
4月	9,881	245,655	162,208	407,863	27,712	33,244	132,935	29,771	179,631	26,382	429,675	847,419	
5月	10,510	252,669	161,370	414,039	27,503	32,750	134,786	30,974	166,655	25,446	418,114	842,663	
6月	9,608	254,437	164,494	418,931	27,656	37,018	139,751	27,966	198,581	25,747	456,719	885,258	
7月	9,180	260,101	169,211	429,312	22,520	30,313	139,613	30,677	204,687	29,138	456,948	895,440	
8月	8,687	266,125	177,380	443,505	22,806	32,897	141,151	31,595	222,825	29,980	481,254	933,446	
前 月 比	94.6	102.3	104.8	103.3	101.3	108.5	101.1	103.0	108.9	102.9	105.3	104.2	
前年同月比	123.9	102.6	105.8	103.9	78.0	105.6	102.7	104.3	107.1	94.6	102.9	103.5	

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

年 月	工 具 鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼							計	合 計
		機械構造用炭素鋼	構 造 用 金 鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ス テ ン ス 鋼	快 削 鋼	高 抗 張 力 鋼	そ の 他	計		
'17 暦 年	55,932	183,466	146,595	330,061	12,917	53,973	144,088	9,965	10,293	2,213	233,449	619,442	
'18 暦 年	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524	
'17 年 度	65,001	195,049	149,069	344,118	12,899	52,740	161,067	10,837	10,373	2,192	250,108	659,227	
'18 年 度	71,065	243,896	179,491	423,387	12,518	51,977	183,062	13,627	10,935	3,646	275,765	770,217	
'18年 12月	65,783	207,930	157,295	365,225	13,020	47,754	170,896	9,657	10,264	2,925	254,516	685,524	
'19年 1月	68,767	218,512	166,049	384,561	12,149	49,897	174,241	12,416	10,359	3,043	262,105	715,433	
2月	68,501	219,821	166,896	386,717	12,264	49,190	177,649	12,793	10,160	3,056	265,112	720,330	
3月	71,065	243,896	179,491	423,387	12,518	51,977	183,062	13,627	10,935	3,646	275,765	770,217	
4月	72,303	239,997	185,043	425,040	12,821	52,084	179,206	15,172	11,188	3,487	273,958	771,301	
5月	73,475	243,212	188,394	431,606	12,762	55,049	181,625	12,557	11,091	11,549	284,633	789,714	
6月	74,133	248,968	194,691	443,659	12,931	58,312	183,696	13,291	10,684	11,316	290,230	808,022	
7月	75,351	247,828	190,021	437,849	12,765	55,343	179,844	13,663	10,901	12,109	284,625	797,825	
8月	78,051	245,497	187,694	433,191	12,879	54,597	176,733	13,434	10,606	12,603	280,852	792,094	
前 月 比	103.6	99.1	98.8	98.9	100.9	98.7	98.3	98.3	97.3	104.1	98.7	99.3	
前年同月比	115.8	120.2	120.2	120.2	92.0	112.3	108.0	124.3	108.1	484.4	112.6	116.9	

出所：一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

特殊鋼鋼材の輸出入推移

輸 出

(単位：t)

年 月	工具鋼	構 造 用 鋼			特 殊 用 途 鋼					そ の 他 の 鋼			特 殊 鋼 鋼材合計
		機械構造 用炭素鋼	構造用 合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	快削鋼	ピアノ 線 材	計	高炭素鋼	合金鋼	計	
'17 暦 年	42,292	453,298	604,953	1,058,252	187,297	991,116	111,512	120,960	1,410,884	5,337	5,760,691	5,766,028	8,277,455
'18 暦 年	42,373	471,715	598,677	1,070,392	189,872	975,751	118,025	92,901	1,376,549	3,582	5,507,686	5,511,269	8,000,583
'17 年 度	42,058	459,167	611,145	1,070,312	187,017	986,779	109,512	110,363	1,393,671	5,038	5,624,583	5,629,621	8,135,663
'18 年 度	40,883	456,948	586,216	1,043,164	189,839	943,015	119,463	92,202	1,344,519	3,295	5,260,314	5,263,608	7,692,175
'18年 11月	3,302	37,270	44,858	82,129	15,227	85,209	11,696	8,684	120,817	250	439,336	439,587	645,834
12月	3,068	40,332	52,223	92,555	15,831	75,118	15,298	6,514	112,761	424	406,495	406,919	615,304
'19年 1月	2,483	29,789	45,805	75,594	14,550	66,761	4,878	7,549	93,738	157	372,738	372,895	544,709
2月	3,476	37,331	46,108	83,440	16,459	63,436	10,068	7,973	97,935	416	387,540	387,955	572,806
3月	3,253	35,643	50,381	86,024	16,712	84,507	9,623	6,321	117,163	296	392,417	392,713	599,153
4月	3,455	34,018	52,968	86,986	18,434	71,940	6,520	6,279	103,173	535	397,656	398,192	591,806
5月	2,989	26,968	43,487	70,456	14,905	68,979	7,807	6,472	98,163	313	373,302	373,614	545,222
6月	3,086	32,525	51,470	83,995	14,467	71,592	10,398	7,961	104,417	346	391,215	391,560	583,059
7月	3,430	28,925	47,665	76,589	20,204	86,189	5,803	6,861	119,056	397	451,340	451,738	650,814
8月	2,968	28,698	40,921	69,619	15,817	75,129	9,842	11,731	112,520	240	419,594	419,834	604,941
前 月 比	86.5	99.2	85.9	90.9	78.3	87.2	169.6	171.0	94.5	60.4	93.0	92.9	93.0
前年同月比	94.7	74.9	90.0	83.1	107.6	97.0	101.7	123.6	101.1	86.8	83.7	83.7	86.5

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

輸 入

(単位：t)

年 月	工具鋼	ばね鋼	ス テ ン レ ス 鋼						快削鋼	その他の鋼			特 殊 鋼 鋼材合計
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管	計		高炭素鋼	合金鋼	計	
'17 暦 年	3,597	3,665	779	12,136	12,315	206,740	16,077	248,047	127	10,199	599,044	609,243	864,679
'18 暦 年	3,821	4,446	1,079	11,731	9,183	222,159	16,704	260,857	297	5,724	444,746	450,470	719,892
'17 年 度	3,720	3,649	896	11,567	11,437	216,687	16,435	257,022	125	8,434	544,543	552,977	817,491
'18 年 度	3,789	4,813	901	12,809	9,392	214,008	17,217	254,327	379	6,282	524,362	530,643	793,952
'18年 11月	356	456	20	1,298	861	15,762	1,557	19,498	0	187	49,391	49,578	69,888
12月	335	390	35	1,071	695	18,490	1,349	21,640	31	1,123	43,160	44,283	66,679
'19年 1月	470	424	36	1,443	1,152	17,891	1,544	22,065	21	472	53,928	54,401	77,380
2月	134	276	34	736	391	15,747	1,338	18,245	35	48	51,493	51,541	70,231
3月	273	615	36	1,530	819	14,999	1,651	19,035	36	1,234	59,360	60,594	80,553
4月	353	763	37	1,388	946	17,070	1,218	20,658	45	394	46,292	46,686	68,505
5月	435	793	48	1,401	1,042	14,379	1,429	18,299	5	287	27,910	28,197	47,729
6月	277	623	69	1,628	650	14,799	1,011	17,957	14	716	23,534	24,251	43,122
7月	285	873	24	1,224	838	16,602	1,334	20,022	20	1,040	40,191	41,230	62,430
p 8月	461	756	81	1,371	465	13,958	1,139	17,013	12	802	33,113	33,915	52,157
前 月 比	162.0	86.7	329.5	112.0	55.5	84.1	85.3	85.0	60.8	77.2	82.4	82.3	83.5
前年同月比	133.5	207.5	2,169.8	148.6	136.7	75.0	80.8	80.0	10.5	413.4	169.4	171.8	124.6

出所：財務省関税局『貿易統計』から作成。

(注) p:速報値

関連産業指標推移

(単位：台)

(単位：億円)

年 月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新 車 登 録・ 軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機 械	産業機械	工作機械
	うち トラック		うち トラック		うち トラック		フル ドーザ	パワー ショベル	フォーク リフト	ショベル トラック	受注額	受注額	受注額
'17 暦 年	9,690,674	1,219,741	4,705,848	368,407	5,234,165	832,195	-	178,930	113,932	11,460	101,431	50,328	16,456
'18 暦 年	9,729,594	1,257,111	4,817,470	350,091	5,272,067	867,205	-	192,131	121,971	12,099	105,091	50,701	18,158
'17 年 度	9,683,262	1,224,728	4,786,909	362,966	5,197,109	832,361	-	182,533	116,204	11,544	101,480	49,284	17,803
'18 年 度	9,750,021	1,265,838	4,837,553	347,731	5,259,589	882,342	-	197,549	122,108	12,318	104,364	52,276	16,891
'18年 11月	886,966	113,202	430,553	28,053	441,943	83,612	-	18,751	11,163	1,222	8,714	5,655	1,316
12月	792,271	101,332	434,349	27,743	387,525	66,636	-	16,759	9,756	1,078	8,692	3,977	1,355
'19年 1月	790,114	104,623	362,443	24,577	407,975	64,645	-	15,831	9,605	947	8,223	3,553	1,254
2月	864,463	109,305	417,128	29,894	479,427	76,888	-	16,980	9,942	876	8,367	3,329	1,097
3月	900,593	111,152	432,900	30,660	640,813	105,840	-	18,714	10,364	956	8,688	8,488	1,307
4月	814,351	104,925	422,646	26,241	378,687	62,751	-	17,991	9,773	899	9,137	2,535	1,087
5月	792,919	106,308	354,984	24,230	396,120	67,865	-	16,957	10,071	868	8,429	2,814	1,085
6月	810,188	104,242	415,389	28,290	450,398	82,364	-	17,878	10,453	928	9,603	3,889	989
7月	896,906	111,146	445,714	29,064	459,456	78,897	-	19,713	11,427	1,071	8,969	3,429	1,013
8月	-	-	349,518	24,187	388,600	70,133	-	14,824	8,394	888	8,753	4,675	885
前 月 比	-	-	78.4	83.2	84.6	88.9	-	75.2	73.5	82.9	97.6	136.3	87.4
前年同月比	-	-	94.1	98.2	106.7	115.1	-	99.4	93.5	90.4	89.7	133.6	63.0

出所：四輪自動車生産、四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、
 新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、
 軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、
 建設機械生産、産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、
 機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、
 工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r:訂正値

特殊鋼需給統計総括表

2 0 1 9 年 8 月 分

鋼種別	月 別		実 数 (t)	前 月 比 (%)	前 年 同月比(%)	2015年基準 指 数(%)	
	項 目						
工 具 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		15,421	76.8	76.9	74.8	
	鋼 材 輸 入 実 績		461	162.0	133.5	149.5	
	販 売 業 者	受 入 計	21,782	82.4	86.7	80.7	
		販 売 計	19,082	75.7	74.4	72.6	
		うち消費者向	15,865	74.8	81.3	83.9	
		在 庫 計	78,051	103.6	115.8	132.2	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績		2,968	86.5	94.7	62.3	
	生 産 者 工 場 在 庫		8,687	94.6	123.9	104.8	
	総 在 庫		86,738	102.6	116.6	128.8	
	構 造 用 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		643,270	86.5	87.8	94.0
販 売 業 者		受 入 計	328,731	83.7	71.7	50.3	
		販 売 計	333,389	83.6	74.0	51.0	
		うち消費者向	269,872	84.7	79.3	61.5	
		在 庫 計	433,191	98.9	120.2	123.1	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績		69,619	90.9	83.1	84.7		
生 産 者 工 場 在 庫		443,505	103.3	103.9	126.8		
総 在 庫		876,696	101.1	111.4	124.9		
ば ね 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		27,841	89.8	83.0	77.4
		鋼 材 輸 入 実 績		756	86.7	207.5	185.6
	販 売 業 者	受 入 計	3,285	73.1	33.1	15.5	
		販 売 計	3,171	68.0	34.0	15.1	
		うち消費者向	2,107	66.5	58.7	45.3	
		在 庫 計	12,879	100.9	92.0	105.5	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績		15,817	78.3	107.6	100.6	
	生 産 者 工 場 在 庫		22,806	101.3	78.0	88.3	
	総 在 庫		35,685	101.1	82.6	93.8	
	ス テ ン レ ス 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		204,477	91.7	83.0	89.0
鋼 材 輸 入 実 績		17,013	85.0	80.0	117.6		
販 売 業 者		受 入 計	101,699	83.3	69.8	40.6	
		販 売 計	104,810	83.2	76.3	41.7	
		うち消費者向	55,492	82.6	84.8	99.2	
		在 庫 計	176,733	98.3	108.0	129.3	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績		75,129	87.2	97.0	85.7		
生 産 者 工 場 在 庫		141,151	101.1	102.7	122.5		
総 在 庫		317,884	99.5	105.6	126.2		
快 削 鋼		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		41,776	83.6	87.9	81.4
	販 売 業 者	受 入 計	8,442	67.8	59.1	59.7	
		販 売 計	8,671	71.7	65.3	60.3	
		うち消費者向	8,398	72.6	66.6	60.3	
		在 庫 計	13,434	98.3	124.3	99.2	
	鋼 材 輸 出 船 積 実 績		9,842	169.6	101.7	102.9	
	生 産 者 工 場 在 庫		31,595	103.0	104.3	113.8	
	総 在 庫		45,029	101.6	109.6	109.1	
	高 抗 張 力 鋼	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		459,321	98.1	96.9	111.3
		販 売 業 者	受 入 計	6,801	85.5	106.9	66.1
販 売 計			7,096	91.7	107.3	69.8	
うち消費者向			5,338	90.5	107.1	79.6	
在 庫 計			10,606	97.3	108.1	96.7	
生 産 者 工 場 在 庫		222,825	108.9	107.1	117.5		
総 在 庫		233,431	108.3	107.1	116.4		
そ の 他		熱 間 圧 延 鋼 材 生 産		108,906	92.9	83.3	78.7
		販 売 業 者	受 入 計	35,364	88.7	71.1	87.3
			販 売 計	35,616	84.7	71.2	87.9
	うち消費者向		33,449	85.7	95.9	91.0	
	在 庫 計		67,200	99.6	131.2	126.5	
	生 産 者 工 場 在 庫		62,877	105.8	100.1	90.9	
	総 在 庫		130,077	102.5	114.1	106.4	
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱 間 圧 延 鋼 材 生 産 合 計		1,501,012	90.8	89.1	95.4
		鋼 材 輸 入 実 績 計		52,157	83.5	124.6	64.2
		販 売 業 者	受 入 計	506,104	83.5	71.3	49.7
販 売 計			511,835	83.0	73.9	50.3	
うち消費者向			390,521	83.7	81.1	67.8	
在 庫 計			792,094	99.3	116.9	124.3	
鋼 材 輸 出 船 積 実 績 計		604,941	93.0	86.5	94.1		
生 産 者 工 場 在 庫		933,446	104.2	103.5	118.8		
総 在 庫		1,725,540	101.9	109.3	121.2		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』、

それ以外は経済産業省『経済産業省生産動態統計』、『鉄鋼生産内訳月報』、但し総在庫は特殊鋼倶楽部で計算。

(注) 総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの。生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び銅管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれに含まない。

倶楽部だより

(2019年8月1日～9月30日)

海外委員会

講演会（9月30日）

演題：「メキシコ自動車裾野産業の最新事情
と新NAFTA（USMCA）等通商協定の影響」

講師：日本貿易振興機構（JETRO）
メキシコ事務所 中畑 貴雄 氏

参加者：83名

説明会（8月27日）

演題：「輸出貿易管理令改正」

説明者：経済産業省 安全保障貿易管理政策課
國藤 貴之 氏

参加者：109名

市場開拓調査委員会

調査WG（8月7日）

2019年度調査WGテーマ「建設機械」の企画
書説明

調査委託会社：神鋼リサーチ(株)

編集委員会

小委員会（9月26日）

3月号特集「ボルト・ねじの動向（仮題）」
の編集内容の検討

人材確保育成委員会

2019年度特殊鋼教養講座（8月30日）

講師：（一社）特殊鋼倶楽部 専務理事
小澤 純夫

参加者：51名

2019年度前期（第1回目）ビジネスパーソン研
修講座（9月3日、4日、2団体共催）

テーマ：「タイムマネジメント～働き方改革の
視点から～」

講師：日鉄総研(株) コンサルタント
柳生 幸枝 氏

参加者：16名

「国内外での外国人材活用について」講演会（9
月17日、人材確保育成委員会・流通海外展開委
員会共催）

演題：外国人材受け入れ拡大に向けた最近
の政策動向～その現状・課題、留意
点～

講師：東海大学 教養学部 人間環境学科
社会環境課程 准教授
万城目 正雄 氏

演題：「AOTS事業に見る『高度外国人材』
の活用の可能性について」

講師：（一財）海外産業人材育成協会
（AOTS）総務企画部 経営戦略グルー
プ長兼総務グループ長
志村 拓也 氏

参加者：23名

[大阪支部]

三団体責任者会議（8月27日）

- ①本年共催講演会検討
- ②本年下期事業のすり合わせ他

2019年度特殊鋼教養講座（9月18日）

講師：特殊鋼倶楽部専務理事 小澤 純夫
内容：「鉄鋼業界（特殊鋼業界）の全体像、
取り巻く環境、今後の課題と展望、
求められる人物像」をテーマとした、
①講義②グループディスカッション
③立食懇親会。

参加者：45名

2019年度工場見学会付新人研修講座（全特協と
共催、9月24日）

- ①座学「特殊鋼の基礎講座」
- ②工場見学
- ③業界からのメッセージ
- ④懇親会

参加者：70名

特殊鋼倶楽部の動き

「メキシコ自動車裾野産業の最新事情と新NAFTA（USMC）等 通商協定の影響」に係る講演会開催

去る2019年9月30日において、一般社団法人日本鉄鋼連盟、一般社団法人特殊鋼倶楽部との2団体共催で、JETROメキシコ事務所の中畑貴雄氏を講師としてお招きして「メキシコ自動車裾野産業の最新事情と新NAFTA（USMC）等通商協定の影響」について講演会を開催しました。メキシコにおける自動車産業の最新動向と、米墨通商関連を非常にわかりやすくかつ、詳細にお話頂き、盛会の内に終了いたしました。2団体の会員様100名弱の方にご参加頂きました。

当日、説明会に参加された方々にはアンケートを実施し、お聞かせいただいた貴重なご意見は今後の説明会に是非とも反映させたいと思います。多数のご参加をいただき、誠にありがとうございました。

なお、当日資料は特殊鋼倶楽部ホームページ-会員専用ページ-イベントに掲載しています。

日 時：2019年9月30日（月）15：00～17：00

場 所：「鉄鋼会館」701号室（東京都中央区日本橋茅場町3-2-10）

講 師：日本貿易振興機構（JETRO）メキシコ事務所 中畑 貴雄 氏

テーマ：「メキシコ自動車裾野産業の最新事情と新NAFTA（USMCA）等通商協定の影響」

ご講演内容

1. 自動車産業の概況と最新動向
2. サプライチェーンの現状
3. USMA（新NAFTA）が与える影響
4. 対ブラジル・アルゼンチン自動車協定（ACE55号）と原産地規則
5. 米中貿易摩擦とメキシコ

以下に、会場写真を掲載いたします。



【ご講演されるJETROの中畑氏】



【司会進行役の日本鉄鋼連盟の萩生田氏】



【真剣に説明を受けるご参加いただいた会員の皆様】



【講演会の模様】



■ お知らせ ■ ■ ■ ■ ■

～4年連続して、高機能金属展に特殊鋼倶楽部として出展～

第6回 高機能金属展
会期:2019年12月4日(水)～6日(金)
時間:10:00～18:00 6日(金)のみ17:00終了 会場:幕張メッセ
主催:リードエグジビションジャパン(株) 協賛:(一社)特殊鋼倶楽部

特殊鋼倶楽部は、「選ばれる特殊鋼」を目指して、特殊鋼のPRの強化を図っています。その一環として、市場開拓調査委員会で検討した結果、昨年に引き続き『第6回高機能金属展』に出展することにしました。

特殊鋼商品知識の普及及び啓蒙、特殊鋼倶楽部、会員会社の紹介、会員会社の出展ブース会場案内図、当倶楽部出版物配布を行います。

是非ご来場ください。会場にてお待ちしております。

◆特殊鋼倶楽部ブースNo. : 12-40

弊社ブース No. 12-40

第6回 高機能 金属展

金属材料・金属加工機 などが出展

会期:2019年12月4日[水]～6日[金]

会場:幕張メッセ

◆倶楽部ブース内会員会社展示

- ・浅井産業株式会社
- ・秋山精鋼株式会社
- ・中川特殊鋼株式会社

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧

(社名は50音順)

【会 員 数】		【販売業者会員】	
(正 会 員)			
製造業者	26社		
販売業者	103社		
合 計	129社		
【製造業者会員】			
愛 知 製 鋼 (株)		住友商事グローバルメタルズ(株)	日 立 金 属 商 事 (株)
秋 山 精 鋼 (株)		大 同 興 業 (株)	(株)日立ハイテクノロジーズ
(株)川口金属加工		大同DMソリューション(株)	(株) 平 井
高周波熱錬(株)		大 洋 商 事 (株)	(株) フ ク オ カ
合 同 製 鐵 (株)		大 和 興 業 (株)	藤 田 商 事 (株)
(株)神 戸 製 鋼 所		大 和 特 殊 鋼 (株)	古 池 鋼 業 (株)
山陽特殊製鋼(株)		(株)竹内ハガネ商行	(株) プ ル ー タ ス
J F E ス チ ール (株)		孟 鋼 鉄 (株)	(株) 堀 田 ハ ガ ネ
J X 金 属 (株)		田 島 ス チ ール (株)	(株)マクシスコーポレーション
下村特殊精工(株)		辰 巳 屋 興 業 (株)	松 井 鋼 材 (株)
大 同 特 殊 鋼 (株)		千 曲 鋼 材 (株)	三 沢 興 産 (株)
高 砂 鐵 工 (株)		(株) テ ク ノ タ ジ マ	三 井 物 産 (株)
東 北 特 殊 鋼 (株)		(株) 鐵 鋼 社	三井物産スチール(株)
日鉄ステンレス(株)		デルタスティール(株)	(株) メ タ ル ワ ン
日鉄日新製鋼(株)		(株) ト ー キ ン	(株)メタルワンチューブラー
日 本 金 属 (株)		東京貿易マテリアル(株)	(株)メタルワン特殊鋼
日本高周波鋼業(株)		(株) 東 信 鋼 鉄	森 寅 鋼 業 (株)
日 本 精 線 (株)		特 殊 鋼 機 (株)	(株) 山 一 ハ ガ ネ
日 本 製 鉄 (株)		豊 田 通 商 (株)	山 進 産 業 (株)
日 本 冶 金 工 業 (株)		中 川 特 殊 鋼 (株)	ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)
日 立 金 属 (株)		中 野 ハ ガ ネ (株)	山 野 鋼 材 (株)
(株)広島メタル&マシナリー		永 田 鋼 材 (株)	陽 鋼 物 産 (株)
(株) 不 二 越		名 古 屋 特 殊 鋼 (株)	菱 光 特 殊 鋼 (株)
三 菱 製 鋼 (株)		ナ ス 物 産 (株)	リ ン タ ツ (株)
ヤマシンスチール(株)		南 海 鋼 材 (株)	渡 辺 ハ ガ ネ (株)
理 研 製 鋼 (株)		日 金 ス チ ール (株)	
		日 鉄 物 産 (株)	
		日鉄物産特殊鋼西日本(株)	
		日 本 金 型 材 (株)	
		ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)	
		野 村 鋼 機 (株)	
		白 鷺 特 殊 鋼 (株)	
		橋 本 鋼 (株)	
		(株)長谷川ハガネ店	
		(株)ハヤカワカンパニー	
		林 田 特 殊 鋼 材 (株)	
		阪 神 特 殊 鋼 (株)	
		阪 和 興 業 (株)	
		日 立 金 属 工 具 鋼 (株)	

“特集” 編集後記

今号は「磁性材料」の題名で特集を組みました。およそ5年ぶりの磁性材料に関する特集となりますが、この間自動車業界ではCASE（Connected、Autonomous、Shared/Service、Electric）が一部実現している他、通信においても5Gの普及が進むなど電動化、情報化の発展には著しいものがあり、これに応じて磁性材料への要求も高度化、変化しております。

今回の特集ではいわゆる「特殊鋼」の分野から更に広く磁性材料を扱ったことで読者の皆様が業界と材料について一望できるように編集しました。

最初に特別寄稿として佐川様より希土類磁石の開発について大変リアルな経験談を頂戴することができ、世界を変える材料開発についても知って頂くことができたものと考えます。

総論では「磁気と磁石の世界」として磁性材料と磁石の全体像を概観して頂き、後の各論に進んで頂ければと思います。基礎的な理論から詳細な解説がなされており、まず読んで頂くことで後の内容の理解が深まるものと思います。

各論ではⅢの永久磁石材料、Ⅳの軟磁性材料において用途やその材料に要求される特性、各種の

材質について紹介されています。各記事とも開発の歴史に始まりその後の発展、最新の動向と今後の見通しがわかりやすく紹介されています。Ⅴでは最新の開発動向として、永久磁石や軟磁性材料の応用について各種のモータを例にとり紹介しています。いずれも写真や図表とともにわかりやすく解説されていることから読者の理解を深めて頂けるものになっています。

また、会員各社におかれましては更なるエネルギー効率の向上、小型軽量化に資する新製品の開発が日夜たゆみなく進められております。こちらも是非ご参照頂き活用されることを希望します。本特集号を活用して頂き、磁性材料の用途展開がさらに進めばこれに勝る喜びはありません。

最後になりましたが、着任直後に編集委員の大任を頂き、何かと不慣れな中でのお願いとなり大変ご迷惑もお掛けしたと存じますが、本特集号に寄稿頂きました方々、ご協力を頂きました編集委員の方々と及び事務局各位に厚く御礼申し上げます。

〔日立金属(株) 金属材料事業本部 技術部 北園 大輔〕

特 集／夢みる鉄

I. 若手社員の夢－製造業者

II. 若手社員の夢－販売業者

3月号特集予定…ボルト・ねじとそれらを支える技術

特 殊 鋼

第 68 卷 第 6 号

© 2 0 1 9 年 11 月

2019年10月25日 印 刷

2019年11月1日 発 行

定 価 1,252円 送 料 200円

1年 国内7,434円（送料共）

発 行 所

一般社団法人 特殊鋼倶楽部

Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館

電 話 03(3669)2081・2082

ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>

編集発行人 小 澤 純 夫

印刷人 増 田 達 朗

印刷所 レタープレス株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、一般社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。

「特殊鋼」誌第68巻索引

2019年 1～11月

	号・頁	7. その他
「2019年新年挨拶」……………石黒 武	1・1	山陽特殊製鋼(株)…1・51 三菱製鋼(株)……………1・52
【年頭所感】		
「年頭に寄せて」……………井上 宏司	1・3	
「年頭所感」……………山中 敏幸	1・5	
「年頭所感」……………佐久間貞介	1・6	
「貿易摩擦に思う事」……………赤阪 太郎	1・7	
「年頭所感」……………西村 悟	1・8	
「2018年の振り返りと2019年の展望」…大前 浩三	1・9	
「年頭所感」……………須田 守	1・10	
「年頭所感」……………松岡 弘明	1・11	
「チャレンジングな課題に取り組みを」…土屋 敦	1・12	
「年頭所感」……………山下 匡史	1・13	
「誠実は美鋼を生む」……………佐藤 光司	1・14	
【需要部門の動向】		
産業機械……………片岡 功一	1・15	
「ご挨拶」……………樋口 眞哉	7・1	
【一人一題】		
「私の愛読書」……………野坂 哲嗣	3・1	
「継続は忍耐」……………松岳 大樹	5・1	
「北アルプス・立山連峰を望む」……定村 剛	9・1	
「自炊のすすめ」……………木田 忠伯	11・1	
■ 特集記事 ■		
☆ 実はすごいんだ、日本の特殊鋼		
まえがき……………井上幸一郎	1・19	
1. 自動車		
愛知製鋼(株)……………1・21	新日鐵住金(株)……………1・29	
(株)神戸製鋼所……………1・22	大同特殊鋼(株)……………1・30	
(株)神戸製鋼所……………1・23	日新製鋼(株)……………1・31	
(株)神戸製鋼所……………1・24	日新製鋼(株)……………1・32	
山陽特殊製鋼(株)……………1・25	日本高周波鋼業(株)……………1・33	
JFEスチール(株)……………1・26	日本高周波鋼業(株)……………1・34	
JFEスチール(株)……………1・27	(株)カ ム ス……………1・34	
新日鐵住金(株)……………1・28	日立金属(株)……………1・35	
2. 航空宇宙		
日立金属(株)……………1・36		
3. 電気・電子		
大同特殊鋼(株)……………1・37	日本冶金工業(株)……………1・39	
大同特殊鋼(株)……………1・38	三菱製鋼(株)……………1・40	
4. 産業機械		
日新製鋼(株)……………1・41	日立金属(株)……………1・44	
日本冶金工業(株)……………1・42	三菱長崎機工(株)……………1・45	
日本冶金工業(株)……………1・43		
5. 建築・プラント		
新日鐵住金(株)……………1・46	日立金属(株)……………1・48	
日本高周波鋼業(株)……………1・47		
6. エネルギー		
愛知製鋼(株)……………1・49	大同特殊鋼(株)……………1・50	
☆ 自動車用歯車の最新動向		
I. 特別寄稿		
和時計から日本の歯車の源流を探る		
……………上田 昭夫	3・2	
II. 総論／技術解説		
1. 歯車設計の現状と将来……………久保 愛三 3・13		
2. 歯車のものづくりの現状と将来		
……………大林 巧治	3・19	
3. 表面硬化熱処理用鋼の研究開発動向と将来		
……………井上 圭介	3・24	
III. 歯車の加工技術		
1. 鍛造成形……………森下 弘一 3・30		
2. 切削加工……………河野 賢祐 3・33		
3. 熱処理（制御ガス窒化）……………平岡 泰 3・36		
4. 最近のショットピーニング処理の		
動向と開発の方向性……………小林 祐次	3・40	
IV. 歯車の強度評価・シミュレーション		
1. 歯車強度評価の現状と今後の課題		
～日本機械学会研究協力分科会		
RC268／RC275での取り組みから～		
……………藤井 正浩	3・43	
2. 浸炭焼入時の熱処理ひずみ解析技術の動向		
……………杉本 剛	3・49	
……………藤川真一郎		
V. 各社の歯車用鋼		
……………3・55～3・65		
愛知製鋼(株)、(株)神戸製鋼所、山陽特殊製鋼(株)、		
JFEスチール(株)、新日鐵住金(株)、大同特殊鋼(株)		
☆ 工作機械の種類と加工方法の基礎および最新の動向		
I. 総 論		
工作機械の歴史と今後の動向……………大槻 文芳 5・2		
II. 加工方法と工作機械の種類		
1. 加工方法……………大槻 文芳 5・7		
2. 工作機械の種類……………大槻 文芳 5・9		
III. 最新の工作機械の動向		
1. バンドソー……………瀬戸 章男 5・15		
2. 最新マシニングセンタの動向		
……………高野 和雅	5・19	
3. ターニングセンタ……………栗谷 龍彦 5・22		
4. 放電・ワイヤ加工……………小林 浩敦 5・25		
IV. 最新の加工工具の動向		
1. 旋削工具		
-TungTurn-Jet-……………山田 洋介 5・29		
2. ドリル……………伊藤 一豊 5・32		
3. エンドミル……………吉岡 尚吾 5・36		
4. フライスの刃先交換工具……………沖田 泰彦 5・40		
V. 会員メーカーの商品紹介		
……………5・44～5・47		
山陽特殊製鋼(株)、大同特殊鋼(株)、日本冶金工業(株)、日立金属(株)		

☆ 特殊鋼の合金元素の基礎知識

I. 総 論

資源としての合金元素	原田 幸明	7・2
------------	-------	-----

II. 合金元素の役割

1. 主要5元素	宇田川毅志	7・10
2. 高温強度	田村 庸	7・12
3. 耐食性	戸塚 覚	7・15
4. 結晶粒制御	橋本 和弥	7・17
5. 被削性	大橋 亮介	7・20

III. 合金元素の応用

1. 高張力鋼	古谷 仁志	7・24
2. 超強力鋼 (マルエージング鋼)	西田 純一	7・28
3. 構造用鋼	牧野 孔明	7・30
4. ばね鋼	養口 光樹	7・33
5. 軸受鋼	藤松 威史	7・36
6. 快削鋼	長谷川達也 伊藤 誠司	7・39
7. 工具鋼	福元 志保	7・42
8. ステンレス鋼	柘植 信二	7・45
9. 耐熱鋼	平田 茂	7・49
10. 超合金	鷺見 芳紀	7・54
11. 機能材料		
(1) 電子材料	横山紳一郎	7・57
(2) 電磁鋼板	高島 稔	7・60
(3) 磁 石	山崎 理央	7・63
12. チタン合金	森倉 功和	7・66

☆ 金属系バイオマテリアルのやさしい解説

I. 総 論

1. 金属系バイオマテリアルの概観	塙 隆夫	9・2
2. 金属系バイオマテリアルの歴史と今後の動向	新家 光雄	9・7
3. 金属系バイオマテリアルのレギュラトリーサイエンス	岡崎 義光	9・12

II. 金属系バイオマテリアルの種類と性質について

1. ステンレス鋼	土山 聡宏	9・17
2. コバルトクロム合金	野村 直之	9・20
3. チタンとチタン合金	中野 貴由	9・23
4. 形状記憶合金と超弾性合金	細田 秀樹	9・27
5. 貴金属合金	高田 雄京	9・30
6. マグネシウム合金他	向井 敏司	9・34

III. 金属系バイオマテリアルの腐食と表面改質

1. 生体内での耐食性	堤 祐介	9・37
2. 生体組織との界面で生じる生体反応と生体親和性	石原 一彦	9・41
3. 金属系バイオマテリアルの表面処理	成島 尚之	9・45

IV. 金属系バイオマテリアルの適応事例

1. 整形外科	伊東 学	9・49
2. 循環器外科・内科	岸田 晶夫	9・53
3. 歯 科	澤瀬 隆	9・56
4. 検査器具・治療器具	塙 隆夫	9・60

V. 各社のバイオマテリアル紹介

		9・63
--	--	------

大同特殊鋼(株)

☆ 磁性材料の基礎知識

I. 特別寄稿

我々は希土類鉄時代に向かっている	佐川 真人	11・2
------------------	-------	------

II. 総 論

	徳永 雅亮	11・4
--	-------	------

III. 永久磁石材料

1. 希土類磁石	日置 敬子	11・8
2. ボンド磁石	山崎 理央	11・12
3. フェライト磁石	小林 義徳	11・15
4. 铸造磁石・圧延磁石	福田 方勝	11・18

IV. 軟磁性材料

1. 電磁鋼板	森重 宣郷	11・21
2. 電磁ステンレス鋼	齋藤 章彦	11・24
3. 電磁軟鉄、パーマロイ	齋藤 章彦	11・27
4. 粉末軟磁性材料	相川 芳和	11・30
5. アモルファス・ナノ結晶軟磁性合金	中島 晋	11・33
6. ソフトフェライト	平塚 信之	11・36

V. 最新の開発動向

1. アモルファスモータ		
～省エネに貢献する産業用IE5クラス高効率モータ～	榎本 裕治	11・39
2. 高効率モーター用磁性材料	谷川 茂穂	11・44
3. 自動車への応用	歳田 寿充	11・48

VI. 会員メーカーの商品紹介

		11・52～11・56
--	--	-------------

大同特殊鋼(株)、(株)ダイドール電子、東北特殊鋼(株)、(株)日立金属ネオマテリアル、三菱製鋼(株)

【業界の動き】…………… 毎号掲載

【特殊鋼統計資料】

▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移	毎号掲載
▲特殊鋼鋼材の鋼種別販売 (商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)	毎号掲載
▲特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移	毎号掲載
▲特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)	毎号掲載
▲特殊鋼鋼材の輸出入推移	毎号掲載
▲関連産業指標推移	毎号掲載
▲特殊鋼需給統計総括表	毎号掲載

【倶楽部だより】…………… 毎号掲載

【特殊鋼倶楽部の動き】

	1・63、3・75、5・57、9・73、11・65
--	---------------------------

◇お知らせ

経済産業省からのお願い	7・77
第239・240回西山記念技術講座	9・77
第71回白石記念講座	9・78
4年連続して、高機能金属展に特殊鋼倶楽部として出展	11・67

【会員会社一覧】…………… 毎号掲載