

高強度かつ非磁性の鉄系焼結部材

Non-Magnetic and High-strength Iron-based Sintered Parts

前澤 文宏*
Fumihiro Maezawa

伊志嶺 朝之
Tomoyuki Ishimine

播本 大祐
Daisuke Harimoto

鉄系焼結部材は、強度とコストのバランスに優れた代表的金属である鉄を、粉末成形技術により複雑形状へ効率的にネットシェイプ成形が可能のため、これまで様々な分野で構造部品として使用されてきた。近年、自動車の電動化、家電機器の高性能化、スマート工場の拡大などに向け、更なる進化が求められるセンシング技術において、小型化軽量化を実現する高強度な非磁性部材のニーズが増々高まっている。これらの背景から、筆者らは、既存材料を超えた、新たな高強度・非磁性鉄系焼結材を開発した。本稿では、開発材の特徴および優位性について紹介する。

Iron-based sintered parts have traditionally been used as structural components across various fields due to their ability to be efficiently net-shape molded into complex shapes using powder compacting technology, leveraging the excellent balance of strength and cost that iron offers. In recent years, the demand for smaller, lighter, high-strength, non-magnetic materials has been on the rise in sensing technology required for further advancements like electric vehicles, high-performance appliances, and smart factories. In response to these trends, we have developed a new non-magnetic, high-strength iron-based sintered material that goes beyond existing materials. This paper discusses the characteristics and benefits of this newly developed material.

キーワード：粉末冶金、焼結体、鉄鋼、非磁性材、高強度材

1. 緒言

近年、自動車の電動化や家電製品の高性能化、工場のオートメーション化が急速に進行しており、これらの駆動部品の根幹をなすモーターの重要性が一層高まっている。またIoT社会に向けセンシング技術も多様化していくなか、磁気を利用したセンサーも需要が高まるものと考えられる。これら磁性を利用した製品において、磁性部材から発生する磁界を遮蔽し磁気に弱い周辺部品を保護したり、磁束を制御したりといった目的のために、磁性部材の周囲には非磁性の金属製材料が用いられることが多々ある。

非磁性の金属としては銅、亜鉛合金、アルミ、一部の鉄鋼材料、チタンなどが挙げられるが、量産性と原料コストを加味すると亜鉛合金、アルミ、鉄鋼材料に絞られる。さらに実使用環境にもよるが、高回転タイプのモーターのような耐熱性が要求される部品としては、亜鉛合金やアルミではなく、鉄鋼材料が選定される場合がある。

さて、二次加工メーカーや組み立てを行う最終メーカーにおいては、競合他社との差別化の観点から、部品を可能な限り薄型化、小型化することが重要である。しかし、小型化すると部品が単位面積当たりには受ける力は増大するため、素材の強度を高める必要が生じる。そのような需要に対して、鋳造メーカー各社は一般的な非磁性の鉄鋼材料(SUS304やSUS316)を超える高強度の非磁性材料を多くリリースしている⁽¹⁾。

ところが、上記の高強度の素材を用いて、最終部品形状を調達することには一つの問題がある。それは、板金プレスメーカーが保有する成形機の最大荷重以上には成形でき

ないということである。数mm以下の薄板を成形加工する場合とは異なり、板鍛造などのプレス成形で厚みのある複雑形状部品を得るためには、素材が軟質でなければならない。一方で、軟質な材料を成形加工した際の最終的な強度は低くなるため、要求仕様の形状に成形加工しても強度特性が要求仕様を超えることができない。

また、熱処理によって素材の強度を高めることもまた難しい。一般的な鋼にイメージされるような「焼入れ」による強化は、非磁性であるオーステナイト組織から、磁性であるマルテンサイト組織に変化することを利用して行っているが、非磁性の鉄鋼材料に適用すると、非磁性という特性が失われてしまう。むしろ通常の鉄鋼では加工時に生じたマルテンサイト組織が磁性を帯びるため、この組織を消すために熱処理を実施し、強度は低下する場合の方が多い。

まとめると、高強度かつ非磁性な鉄鋼系の複雑形状部品を溶製材から入手するためには成形加工上の課題があると言える。これらの課題に対して我々は焼結部品による非磁性系鉄鋼材料の高強度化を検討し、その開発成果を報告する。

2. オーステナイト系鉄鋼材料の従来の強化手法

鋼材のうち非磁性となるものはオーステナイト系の鉄鋼材料に限定される。オーステナイト系鉄鋼材料を強化するための従来手法としては幾つか存在するが、この章では、溶製材、焼結材それぞれにおいて、素材製造時に強化する方法、成形加工中に強化する方法、製品形状にした後に熱処理で強化する方法、の3つに分けて一般的な強化方法を説明する。

2-1 溶製材の強化手法

(1) 素材製造時に強化する方法

素材製造時に強化する方法として固溶強化がある。図1に示すように、非磁性であるオーステナイト系鉄鋼材料は、鉄原子および遷移金属元素で構成される結晶構造の隙間に侵入型元素である炭素原子や窒素原子を固溶^{※1}することができる。侵入型元素は置換型元素よりも強化能は大きく、金属溶湯中の窒素濃度を上げた高窒素鋼が鉄鋼メーカー各社によって開発されている。それらはオーステナイト安定化元素であるマンガン比率を高くしてあって、同じくオーステナイト安定化元素であるニッケル比率を低減している。しかし高マンガン鋼の欠点として、上述したように、凝固時点で強度が高いために加工が困難であることが挙げられる⁽¹⁾。

また、微細な酸化物等を分散させ強化させる手法も存在する。しかし、金属溶湯中に微細酸化物を大量に分散させることは、強化粒子の凝集、粗大化を招くため難しい。

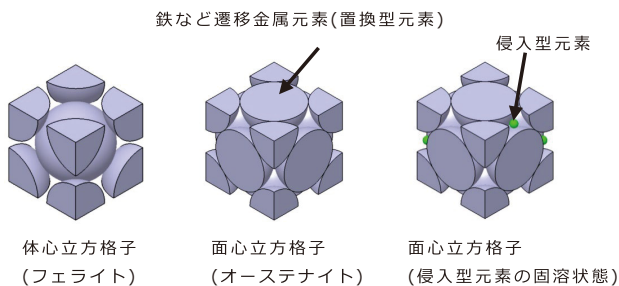


図1 鉄鋼材料の結晶構造と侵入型元素の配置

(2) 成形加工中に強化する方法

冷間加工(冷間鍛造)による強化は、大きな外力を加えることで材料の組織を強制的に変形させることで生じる。強化機構の分類としては、結晶粒微細化強化、転位強化に該当する。この手法は、材料の変形度合いに応じて強化され、その強化能は他の強化手法と比較しても大きい。

(3) 成形加工後に熱処理で強化する方法

長時間の熱処理を実施し、母相に対して第二相粒子を発生させることによる強化手法で、時効処理(時効硬化、析出強化)と呼ばれる。オーステナイト系の析出強化としては Ni_3Ti や Ni_3Al を析出させるものがあり、SUS660が代表的である⁽²⁾。

熱処理中の固溶強化として、鉄鋼部材においては窒素を含有させることで行われる窒素固溶強化が知られている。強化能は析出強化に劣るものの、雰囲気ガス中で焼成処理を行うことで、比較的安価かつ設備コストも安価となる。

2-2 焼結材の強化手法

焼結材の強化手法は、総じて溶製材よりも制約が多い。

(1) 素材製造時に強化する手法

原料粉末製造時に粉末を強化しておく手法は、プレス成形する際に粉末が変形しにくくなり、成形体の密度が著しく低くなるため適用しにくい。また、オーステナイト系鉄鋼材料の粉末冶金用原料粉末は水アトマイズ法で製造されることが多いが、マンガンを高比率で含有する組成はアトマイズで酸化しやすく、粉末の製造が困難である。

(2) 成形加工中に強化する方法

一般的な粉末プレス成形では原料粉末の各粒子の変形量は小さくなく、また成形後に熱処理(焼結)を行うため、結晶粒微細化による強化や転位強化は成立しない。

(3) 成形加工後に熱処理で強化する方法

熱処理時に強化する手法としては、析出強化は原理上は可能であるが、析出強化の強化能が大きいAlやTiといった元素は粉末製造時に容易に酸化するため、水アトマイズ法では粉末の製造が困難である。一方、炭素固溶、窒素固溶は有用な手法である。図2に示すように、成形時点の中間材は内部まで繋がる開気孔を有しており、浸炭、浸窒ガス雰囲気下では、ガスが内部まで浸透し、材料全体が強化される。

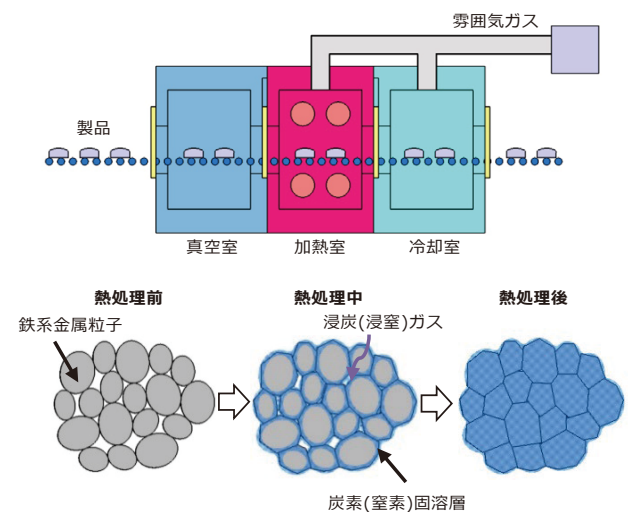


図2 ガス浸炭(浸窒)焼結法

また、粉末冶金でのみ適用可能な手法として、素粉末混合法が知られている。軟質な原料粉に硬質粒子を混合させることで、プレス成形性を維持しつつ、製品として得られる焼結体を強化することが可能である。これは2通りの手法があり、一つは酸化物系、炭化物系、窒化物系、硼化物系などの硬質な微細粒子を混合させることで製造する⁽³⁾。

もう一つは、拡散固溶しやすい元素を混合する手法であり、こちらは後述する。

3. 高強度かつ非磁性の焼結部材のコンセプト

溶製材の場合、生産性の観点から製造される部材は比較的大型であるために冷却は基本的に遅くなる。そのため、溶融凝固の際の炭素濃度の偏析によって炭化物が生成しやすく、強度低下が懸念される。以上から非磁性系の鉄鋼材において、炭素は基本的に除去すべき元素とされる。しかし、粉末冶金においては、溶融凝固プロセスがないため、溶製法に比べ均質であり、製品はネットシェイプ[®]2製法で製造されるため、成形時点で小型であり冷却されやすい。そのために炭化物が生成、粗大化しにくく、炭素の含有量は溶製材よりも増加させることが可能である。

そこで、我々は独自の成分開発および熱処理法を組み合わせ、既存の鉄系焼結体を凌駕する高強度な材料を得ることとした。

特に副原料としては、微細な酸化物や炭化物といった硬質材料でなく、固溶強化のための元素を添加している。炭素のような侵入型元素を用いるほか、置換型元素についても検討した。副原料の粒度と配合比率、混合方法が適正な条件下で実施される場合、工業利用上で現実的な熱処理時間内で、一部の置換型元素も均質な拡散が可能であることを我々は見出している。図3に示すように、副原料として配合された元素は、焼結中に母相の鉄合金中の元素と固相拡散し、焼結後には均質に強化元素が拡散した材料となる。

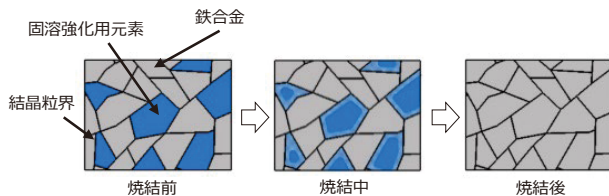


図3 焼結中の元素の固相拡散

また、副原料として用いる粉末は、熱処理時に母材中に均質に拡散することに加えて、磁性を有するマルテンサイト組織への変態を誘発させないために、オーステナイト安定化元素を中心とした組成とすることも重要となる。その指標は、図4に示すように、SCHNEIDERによって改良されたSheafflar状態図⁽⁴⁾で知られるような、Ni、Co、Mn、Cu、C、NのようなNi当量となる元素と、Cr、Si、Mo、V、Al、Nb、Ti、WのようなCr当量となる元素によって定められる。この中で、完全にオーステナイト領域にある組成は、強加工を付与してもマルテンサイト変態はほぼ生じない。ただし、Sheafflar状態図には示されていないが、実際の組成に於いてはCrが過剰である場合、Fe合金である鉄鋼ではなくCr合金となり、Niが過剰であるとNi合金

の分類となる。Cr合金は常温で脆性である。Ni合金はFe合金と結晶構造上は同じで高強度かつ非磁性となることが多いが、高コストとなるため好ましくない。

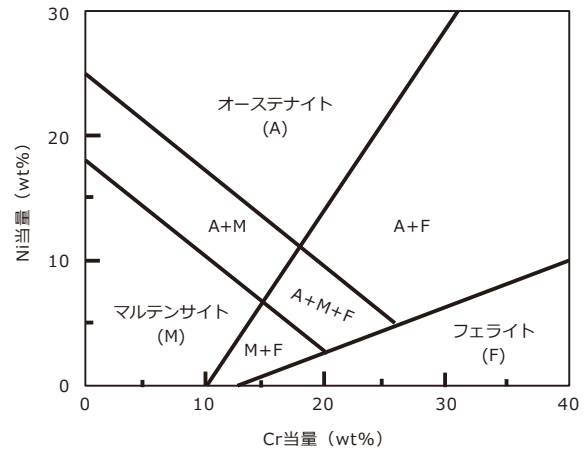


図4 Sheafflarの状態図⁽⁴⁾

図5に示すように、炭素の量が過剰であり冷却スピードが不足すると、余分な炭化物が生成、成長する。このことは母相の組成を不安定化させ、非磁性が担保されないため、適正な配合比を検討し好適条件を得た。

以上のことから、鉄鋼中での拡散性の高い元素の添加を基本とし、合金組成の最適化および合金組成に適した熱処理条件の検討を行った。その結果、溶製材では困難であった高強度、非磁性、複雑形状、生産性のいずれをも満たす焼結材が得られた。

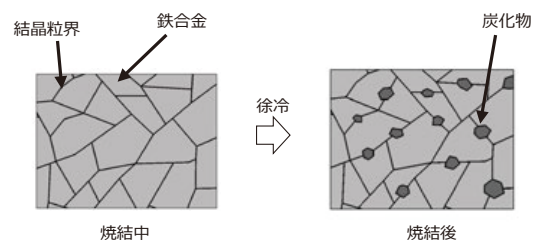


図5 炭化物の生成

4. 開発材の各種特性

表1に開発した焼結材の諸特性を、従来材との比較として示す。焼結体の特性は副原料の種類や配合量、成形条件、熱処理条件によってある程度変動するが、開発材は、当社の従来の焼結材に対し引張強度、硬さが大幅に向上していることがわかる。

表1 開発材および当社従来材の諸特性（代表値）

	開発材	当社従来材
密度 (g/cm ³)	6.7~7.0	6.5~7.0
0.2%耐力 (MPa)	340~390	150~190
破断伸び (%)	~18	~20
ロックウェル硬さ (Bスケール)	68~81	24~49
磁性	非磁性	非磁性

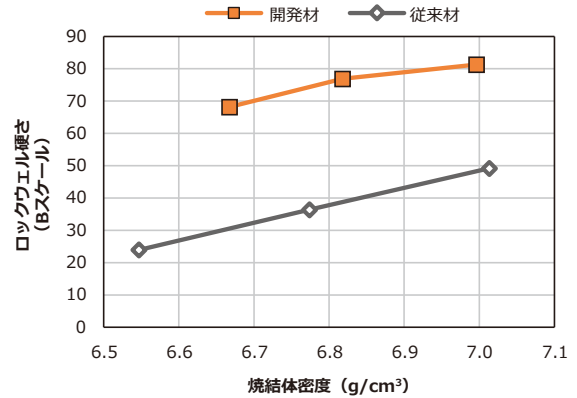
以下、各特性について詳細を述べる。

開発材の0.2%耐力の評価結果の一例を図6に示す。一般的な粉末冶金材の焼結体密度において、従来の焼結部材と比較して200MPa程度と高く、大幅に0.2%耐力が向上している。

開発材のロックウェル硬さの評価結果の一例を図7に示す。一般的な粉末冶金材の焼結体密度において、従来の焼結部材と比較して30~40HRB程度と大幅に硬さが向上している。

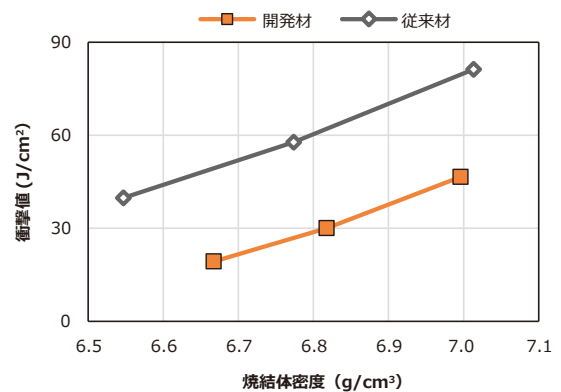
開発材のシャルピー衝撃試験値の一例を図8に示す。開発材の強化原理は固溶強化であり、強度が大幅向上する反面、衝撃値は低下する傾向にある。

開発材の透磁率^{*3}の評価結果の一例を図9に示す。開発材と比較用に市販のSUS316L溶製材を用いた。いずれの素材も一般的に非磁性とされる透磁率1.02以下であるが、開発材は加工前後ともに市販材料よりも透磁率が低い。オーステナイト系の材料は、加工する際にオーステナイト組織から一部加工誘起マルテンサイト変態が発生することで磁性を帯びることがあるが、焼結材は組成の調整によってオーステナイトの安定性を高めているため、このように市販品より低い透磁率を示したと考える。



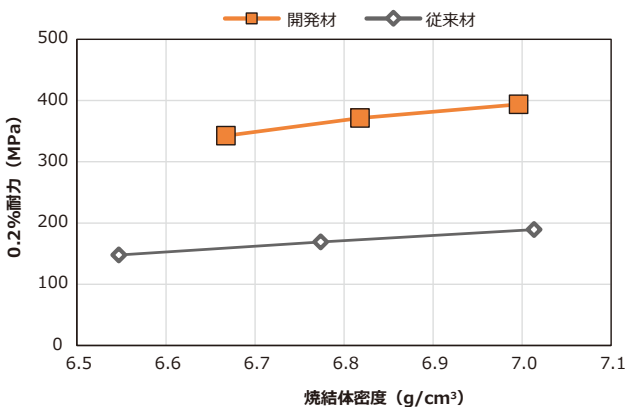
試験条件はJIS Z2245:2021に準拠

図7 硬さ特性



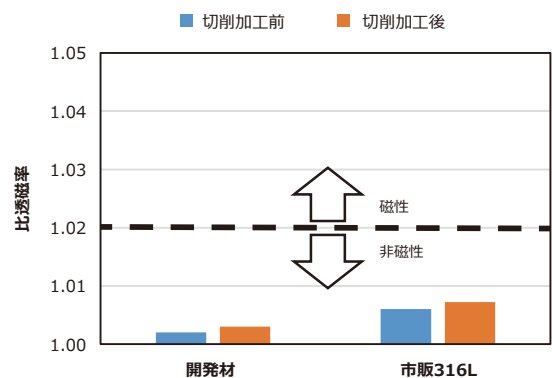
試験片寸法：長さ55mm、幅10mm、厚み10mm。
ただし試験片にノッチは設けずに評価。
他の条件はJIS Z2242:2018に準拠

図8 シャルピー衝撃値特性



試験片形状は全長133mm、並行部長さ32mm、並行部幅5.7mm、並行部厚み5mmの試験片を作製し評価。
オフセット法での評価。
その他の試験条件はJIS Z2241:2022に準拠

図6 耐力特性



φ35×10の試験片の側面をエンドミルにて回転数2500rpm、工具送り500m/minで深さ方向に2mm切削し、切削加工前後の比透磁率を計測した。
比透磁率はStefan Mayer Instruments製の比透磁率計ferromasterを用いて実施。

図9 透磁率特性

5. 結 言

本研究では、近年の自動車の電動化、家電機器の高性能化、スマート工場の拡大などに向け、更なる進化が求められるセンシング技術において、ニーズが高まっている小型化・軽量化を実現する高強度な非磁性部材の開発に取り組んだ。以下に総括する。

- (1) 独自に成分開発した組成を適用し高強度、非磁性、形状自由度、生産性を兼ね備えた新規の鉄鋼系焼結部材を開発した。
- (2) 開発材の0.2%耐力は、従来材に対して約200MPa 優れ、硬さは30~40HRB 程度向上。比透磁率は従来材よりも非磁性側で安定した。

以上の結果より、開発材は従来材より小型軽量化のニーズに対して優れると考える。普及が期待される自動運転やロボットを始めとして、今後、高度センシング技術が求められる用途は飛躍的に増えていくなかで、当社はその社会的ニーズに貢献すべく開発材の量産化に留まらず、更なる高性能化の研究開発を推進していく。

用語集

※1 固溶

金属の結晶構造の中に他の原子が入り込んでいるが、元の結晶構造が保たれている状態で、そのような材料を固溶体と呼ぶ。

※2 ネットシェイプ

最終完成品の複雑形状を機械加工等の後加工を施すことなく実現する粉末成形技術。機械加工等の後加工を施すことなく、金型を用いた加圧成形のみで最終製品形状を得る粉末成形方法。

※3 透磁率

磁界の強さ H と磁束密度 B との関係性を $B = \mu H$ で表した時の比例定数。

参 考 文 献

- (1) 古賀猛、清水哲也、野田俊治、「オーステナイト系高窒素ステンレス鋼 DSN9」、電気製鋼、第73巻2号 (2002年)
- (2) F. B. Pickering, "PHYSICAL METALLURGY AND THE DESIGN OF STEELS," 訳: 藤田利夫、柴田浩司、谷野満、丸善(株) (1981)
- (3) 田中浩司、斎藤卓、「超高剛性鋼の開発」、豊田中央研究所 R&D レビュー、vol.35、No.4 (2000)
- (4) SCHNEIDER, H. Investment casting of high-hot strength 12% chrome steel. Foundry Trade J, 108, pp562-563 (1960)

執 筆 者

前澤 文宏* : アドバンストマテリアル研究所 主査



伊志嶺朝之 : アドバンストマテリアル研究所
グループ長



播本 大祐 : 住友電工焼結合金(株) 開発部長



* 主執筆者