

(技術資料)

省合金-半硬質磁性材料

池田憲史*¹・千葉政道*¹(博士(理学))・笠井信吾*¹・久井志紘*¹・森田晋也*²

Low Alloy, Semi-hard Magnetic Material

Kenshi IKEDA・Dr. Masamichi CHIBA・Shingo KASAI・Yukihiro HISAI・Shinya MORITA

要旨

カーボンニュートラルや安全な自動運転システム構築を目指す動きが世界的に加速する中、自動車制御の電動化が拡大しており、車載電装部品の省電力化が大きな課題となっている。近年では、電動車（BEV, PHVなど）の航続距離伸長などを目的に、電力消費が少ない周辺機器でも省電力化が切望されており、新たな磁性材料への期待が高まっていることから、部品加工性に優れかつ無通電で磁気吸着力を維持できる新着想の磁性材料（省合金-半硬質磁性材料：ELSHM）を開発した。本稿では、本開発鋼の設計指針と主な特長、および想定される適用例と期待効果について紹介する。

Abstract

As the movement toward carbon neutrality and the creation of safe autonomous driving systems accelerates worldwide, the electrification of automotive control is expanding, making energy saving in on-board electrical components a major challenge. In recent years, energy saving has been highly desired even for peripheral equipment with low power consumption in order to extend the cruising distance of electric vehicles (BEVs, PHVs, etc.), and expectations for new magnetic materials are rising. For this reason, a new-concept magnetic material (low alloy, semi-hard magnetic material) has been developed that has excellent part-processability and can maintain magnetic attraction even when de-energized. This paper introduces the design guidelines, the main features of the developed material, and examples of anticipated applications with their expected effects.

検索用キーワード

半硬質磁性材料, ELSHM, 省電力, 電磁クラッチ, カーボンニュートラル

まえがき = 地球温暖化に伴う世界的な環境規制の強化を受け、自動車制御の電動化が急速に進みつつあり¹⁾、車載電装部品の省電力化が重要課題となっている。当社はこれまで、磁気特性と冷間鍛造性に優れた純鉄系軟質磁性材料（ELCH2シリーズ）を開発し^{2)~4)}、精緻制御を要する電磁部品の高性能化、小型軽量化および省電力化に大きく貢献してきた。

近年、バッテリーからの電力を主な駆動源とする電動車（BEV, PHVなど）において、航続距離伸長や車載コンピュータへの電力供給増を背景に、駆動系以外の周辺機器（主にON-OFF制御）に対しても消費電力のさらなる低減要望が高まっている。直接的な電力消費なしに磁力活用する従来技術として、永久磁石（硬質磁性材料）が挙げられるが、軟質磁性材料のような励磁と減磁の制御柔軟性がなく、かつ高コストで難加工材料のため、車載の周辺機器においては汎用性が乏しい。

上記課題の解決にあたり、当社は軟質磁性と硬質磁性の中間特性を有する半硬質磁性に着眼し、軟質磁性材料で培ってきた鋼材設計力・製造ノウハウを最大限に反映することで、部品加工性に優れかつ大幅な省電力化が可能な省合金-半硬質磁性材料（ELSHM, Electromagnetic & Semi-Hard Magnetic steel）を開発した。

本稿では、本開発鋼の設計指針と主な特長、および想

定される適用例と期待効果について述べる。

1. 半硬質磁性材料ELSHMの位置づけ

図1に、主な磁性材料について、保磁力と残留磁束密度の関係^{5), 6)}を示す。電磁部品の省電力化の観点で、当社が着眼した半硬質磁性材料は、保磁力・残留磁束密度が軟質磁性材料と硬質磁性材料の中間に位置する材料である。

図2に、各磁性材料を電磁部品に適用する場合の、電流と吸着力の関係例を示す。軟質磁性材料は、小電流で大きな電磁力が得られるが、保磁力が低いいため、材料の残留磁束で電磁力を安定維持することは難しい。すなわち、電磁力の維持に通電（励磁）が必須である。いっぽう、硬質磁性材料は、磁力を直接的な電力消費なしに維持できるが、着磁や減磁で多大な電力を消費するため、制御柔軟性が乏しい。また、希土類元素を含有する焼結材料が多く、高コストで難加工材料である。これらに対し、半硬質磁性材料は、瞬間励磁後、残留磁束により磁気吸着力を無通電で維持することができ、大幅な省電力化が実現できる。これまでラッチングリレーなどでの小型部品での活用例が挙げられる⁷⁾。

半硬質磁性材料には、炭素鋼、高クロム鋼、コバルトクロム鋼、高マンガン鋼などが用いられているが^{6), 7)}、

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット *² 技術開発本部 応用物理研究所

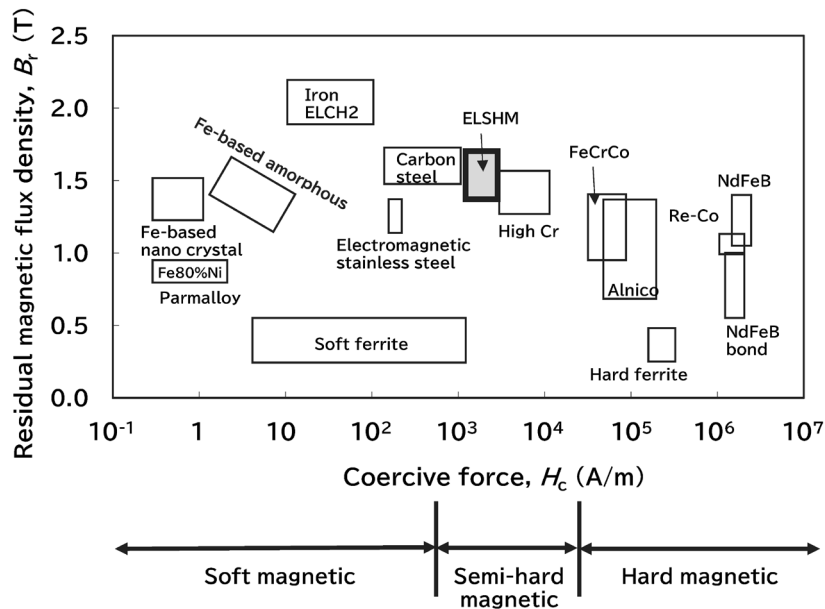


図1 代表的な磁性材料の保磁力と残留磁束密度
Fig.1 Coercive force and residual magnetic flux density of typical magnetic materials

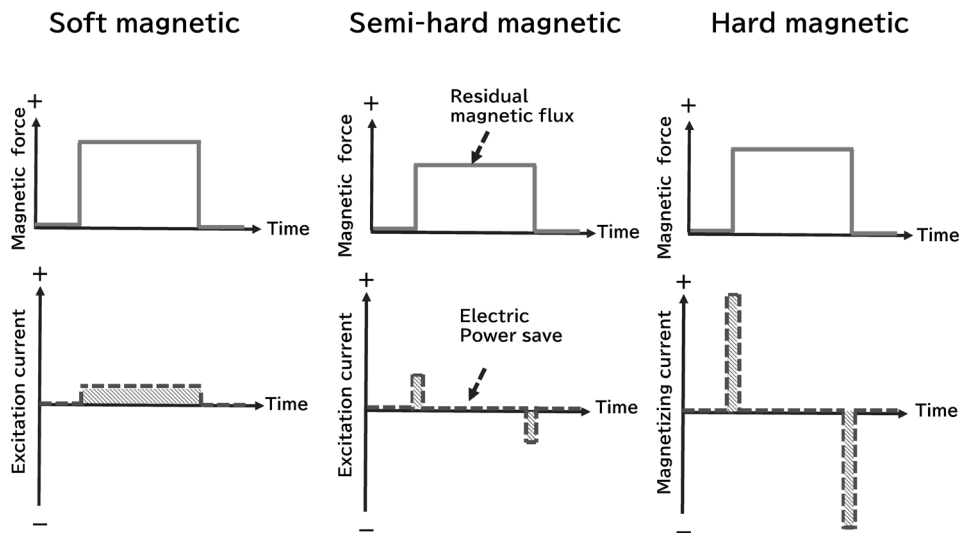


図2 電流と吸着力の関係
Fig.2 Relationship between current and magnetic force

炭素鋼は保磁力が1,200 A/m以下と比較的低く⁶⁾、省電力化を重視する近年の部品には適用困難な可能性が高い。また、保磁力の高い高クロム鋼、コバルトクロム鋼、高マンガン鋼は、永久磁石と同様、高合金のため高コスト・難加工性に課題が残っている。

上記した従来材料の課題を克服すべく、半硬質磁性が発現する組織因子を調査し、実用的な磁気特性と部品加工性を低コストで両立できる省合金-半硬質磁性材料 ELSHMを開発した。

2. 省合金-半硬質磁性材料 ELSHM の設計指針

半硬質磁性材料の性能指標の一つである保磁力は、磁化過程における磁壁移動に対する抵抗力が大きいほど高くなる。また、吸着力を左右する磁束密度は、主に材料が有する磁気モーメントが大きいほど、増加する。磁壁移動に対する抵抗力と磁気モーメントは、材料の化学成分とマイクロ組織の複合的な影響を受ける²⁾。図3に、磁

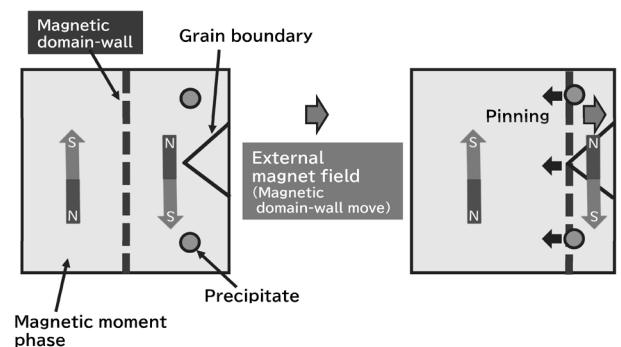


図3 磁壁移動に対する抵抗機構
Fig.3 Resistance mechanism against magnetic domain wall movement

壁移動に対する抵抗機構の模式図を示す。図3に示すとおり、結晶粒界や析出物、ひずみなど磁気エネルギーの低い箇所は磁壁移動の妨げとなり、保磁力に大きく影響をおよぼす。いっぽう、材料の磁束密度は、強磁性を示すフェライト相やマルテンサイト相を含有する際に大き

くなり、非磁性相の存在や強磁性相への固溶元素の増加は悪化を招く。すなわち、一般に保磁力と磁束密度はトレードオフの関係にある。

従来の半硬質磁性材料^{6), 7)}は、磁気モーメントをフェライト相またはマルテンサイト相が担い、磁壁移動に対する抵抗力を非磁性相（残留オーステナイト（ γ ）または非磁性化合物）によって担保している。しかし、残留 γ は一般に不安定であり、温度上昇により分解し⁸⁾、磁気特性の変化を招く懸念があり、非磁性化合物を活用したコバルトクロム鋼などは、高合金のため、合金コストと部品加工性に課題が残る。

このため開発鋼 ELSHMでは、磁気特性の安定化に加え、合金コスト、部品加工性などの実用面を考慮し、下記①～③の観点から鋼材最適化を図った。

- ①省合金の強磁性析出物（鉄系の炭化物）の分散で磁壁移動を抑制⇒磁気モーメントの減少を抑制しつつ、十分な磁壁移動の抵抗力を確保
- ②磁壁移動の抵抗に結晶粒界を積極活用（焼入れ焼戻し）
- ③固溶元素・残留 γ ・非磁性化合物を低減し、磁気モーメントを最大化・安定化

表1に、ELSHMのミクロ組織例を示す。ELSHMは、従来材料と違い、残留 γ を有さず、結晶粒径が約0.5 μm の微細組織である。さらに鉄系の炭化物が多数分散しており、磁壁移動の抵抗因子を多く含む組織となっている。

ELSHMは上記①～③の設計指針に基づき、化学成分と加工工程の最適化を図った。ELSHMは鉄系の炭化物を積極活用するため、従来の炭素鋼ベースの半硬質磁性材料よりも炭素量を高位とし、そのほかの元素は最小限の添加としている。

図4に、炭素量を変化させた焼入れ焼戻し鋼の保磁力測定結果を示す。炭素量の増加に伴い、保磁力増大効果が增加するが、過剰添加では炭化物が粗大化して数密度が減少し、磁壁移動に対する抵抗力が低下するため、

保磁力増大の効果は飽和する。また、粗大な炭化物は応力集中源として作用し、部品加工性の悪化も招くため、磁気特性とのバランスを加味して炭素量を選定した。

図5に、ELSHMの適用工程例を示す。従来の高合金-半硬質磁性材料^{6), 7)}に比べて、クロム、コバルト、ニッケルなどの合金元素の含有が少ないため、伸線加工、鍛造加工など塑性加工や切削加工が可能である。ただし、加工ひずみは磁気特性の低下を招くため⁹⁾、組織制御（ひずみ除去、結晶粒微細化、炭化物分散など）による材料特性最大化の観点から、粗加工後に適切な条件で焼入れ焼戻しを施す必要がある。

3. 省合金-半硬質磁性材料ELSHMの主要特性

本章では、開発鋼ELSHMの主要特性について述べる。

3.1 磁気特性

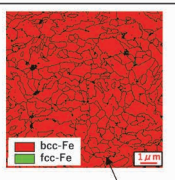
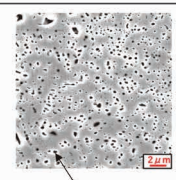
表2に、ELSHMの磁気特性例を示す。なお、半硬質磁性材料の文献情報⁶⁾を模擬した中炭素鋼S45Cと軟質磁性材料の代表例（低炭素鋼S10C）を比較として示す。

保磁力と残留磁束密度のバランス指標として、最大エネルギー積（ $[\text{BH}]_{\text{max}}$ ）がある。 $[\text{BH}]_{\text{max}}$ は、磁気ヒステリシス曲線（B-H曲線）上の第2象限における磁界の強さ（ H ）と磁束密度（ B ）の積の最大値であり、磁石エネルギーの大きさに相当する。

ELSHMの $[\text{BH}]_{\text{max}}$ は、中炭素鋼の半硬質磁性材料や低炭素鋼の軟質磁性材料よりも良好な値を有する（表2）。永久磁石のような硬質磁性材料と比較しても保磁力が過大でなく、最大比透磁率（ μ_{max} ）が高いことも特長である。

硬質磁性材料は保磁力が大きくかつ比透磁率が低い⁵⁾ため、着磁や減磁に電力を多く消費し、省電力効果が不十分である。ELSHMは省電力化の実現において、適度な磁気特性バランスを有しているため、4章で詳述するように電磁部品の省電力化を実現できる。

表1 ELSHMのミクロ組織と特長
Table 1 Microstructure and feature of developed steel

	EBSD phase map	SEM image
Microstructure		
Feature	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrafine grain • Non-γ phase 	<ul style="list-style-type: none"> • Carbide dispersion much

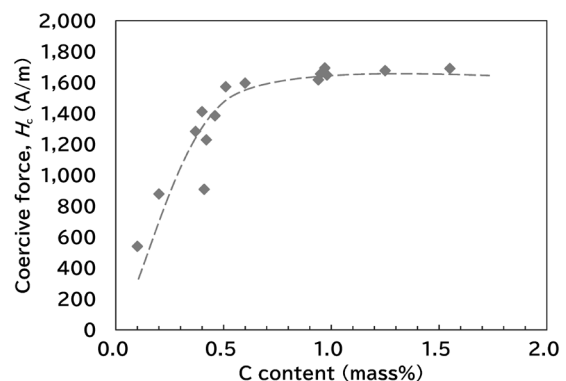


図4 炭素量が保磁力に及ぼす影響（焼入れ焼戻し鋼）
Fig.4 Effect of C content on coercive force (Quenching and tempered steels)

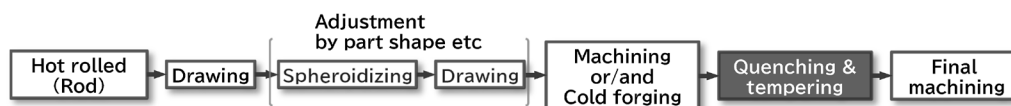


図5 開発鋼を適用した部品製造工程例
Fig.5 Example of parts manufacturing process applying developed steel

3.2 磁気特性の温度依存性

励磁電流（銅線）のジュール損失や磁性材料の鉄損による発熱が部品の冷却能を上回った場合、磁性材料を含む部品の温度上昇を招く。温度による磁気特性変化が大きいと、使用環境により部品性能の悪化が顕在化するため、温度影響の少ない安定した磁気特性が重要となる。

図6に、ELSHMの残留磁束密度の温度依存性を示す。ELSHMは残留 γ を含有していないため（表1）、残留 γ 分解起因の組織変化が生じず、磁気特性の温度安定性が高いことが分かる。

3.3 機械的性質

磁気回路を形成する電磁部品の部品形状・寸法精度は、部品性能に大きく影響をおよぼす。部品形状の複雑化、高寸法精度に対応するため、焼入れ焼戻し後の仕上げ加工性に寄与する機械的性質は重要である。

表3に、ELSHMの機械的性質（焼入れ焼戻し後）の一例を示す。引張強度は1,111 MPa、伸びは15.4%であり、構造材料としても適用可能な良好な機械的性質を有する。対して、硬質磁性材料である永久磁石の引張強度は100 MPa以下であり、延性がない¹⁰⁾。また、クロム、コバルト、ニッケルなどを多く含有した従来の半硬質磁性材料は、高合金の析出物が多く分散するため、延性が乏しいと考えられる。ELSHMは硬質磁性材料や高合金-半硬質磁性材料とは異なり、部品加工性が良好であり、複雑部品形状・高寸法精度に対応できる。

4. 電磁部品への適用検討例

ELSHMは保磁力と残留磁束密度のバランスが良好という特長を有し、図2に示すような残留磁束を活用した部品設計・省電力化が可能である。本章では、電磁界解析を用いてELSHMの期待効果を定量的に検討した事例を報告する。

4.1 対象部品と解析方法

電磁部品の特性解析にあたってここでは、市販の電磁シミュレーションソフトJMAG (Ver22.3)を使用した。また解析対象とした電磁部品は、自動車分野で省電力要望の大きい部品の一つである電磁クラッチとした。図7に、電磁クラッチを模擬した構造を示す。

電磁クラッチは、磁束を通過させるための可動子、固定子といった磁性部品と、励磁コイルなどの部品から構成される。コイルに電流を流すことで発生する吸着力を利用して、動力を伝達・遮断する部品である。

コイルに電流を流すと、図中の矢印のように磁束がコイル周囲を流れ、吸着力によって可動子が下部へ引きつけられ、動力を伝達する。本検討では、可動子寸法 $\phi 38 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 、固定子寸法 $\phi 38 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ 、コイル巻き数250ターンとした。

磁性材料（可動子、固定子）の材質は表2に示したELSHM、S45C（半硬質磁性材料）、S10C（軟質磁性材料）の3通りとした。S45Cは、従来文献⁶⁾の焼入れ焼戻し型の炭素鋼を模擬した材料である。解析に用いた磁気特性データは表2のデータとした。高精度な残留磁束を考

表2 磁気特性例 ($H_m=10,000 \text{ A/m}$, RT)
Table 2 Example of magnetic properties ($H_m=10,000 \text{ A/m}$, RT)

Steel	Magnetic field density (T)					H_c (A/m)	B_r (T)	$[BH]_{\max}$ (kJ/m ³)	H_{\max}	Typical process	Class
	100 A/m	400 A/m	1,000 A/m	5,000 A/m	10,000 A/m						
ELSHM	0.010	0.038	0.130	1.431	1.544	1,655	1.35	1.68	429	Quenching and tempering	Developed steel
S45C	0.000	0.011	0.666	1.567	1.727	910	1.45	0.72	1,208	Quenching and tempering	Conventional Semi-hard magnetic steel
S10C	0.097	0.960	1.368	1.667	1.785	191	0.99	0.07	2,955	Magnetic annealing	Soft magnetic steel

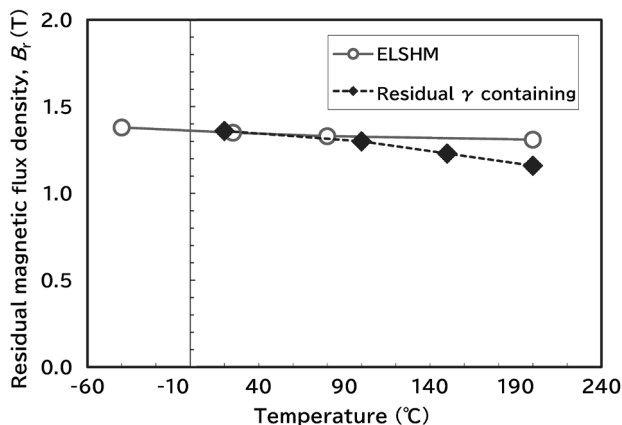


図6 残留磁束密度の温度依存性 ($H_m=10,000 \text{ A/m}$)
Fig.6 Temperature dependence of residual magnetic flux density ($H_m=10,000 \text{ A/m}$)

表3 ELSHM（焼入れ焼戻し後）の機械的性質
Table 3 Mechanical properties of ELSHM as quenching and tempering

Steel	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)
ELSHM	1,111	1,035	15.4	49.5

慮した解析のため、JMAGが推奨する複数のヒステリシスカーブを用いて解析した。

4.2 ELSHMの適用効果

各材料を使用した際の無通電時の吸着力 (F_m) を比較するため、励磁電流を流した後に、電流を止めて、 F_m を解析した。図8に、励磁電流と F_m の関係を示す。ELSHMは励磁電流が0.6 A以上の条件で、S45Cや軟質磁性材料(S10C)と比較し、高い F_m を得ることができる。

図9に、保磁力と残留磁束密度のバランスの指標として用いられる $[BH]_{max}$ と F_m の関係を示す。 $[BH]_{max}$ が大きいほど、 F_m は大きく、ELSHMの高い残留磁束密度を反映して、高吸着力を得られることを示唆している。なお厳密には、電磁部品の形状などによって最適な磁気特性パラメータは変わりうるため、磁気特性と磁気回路設計の相互考慮が必要である。

つぎに、ELSHM適用での省電力効果を算出するため、電磁クラッチ部品の吸着力に300 Nが必要と仮定し、適用効果を算出した。図8に示す通り、ELSHMは励磁電流を0.9 Aから0 A(無通電)にすることで300 Nの吸着力を得ることが可能である。いっぽう、S45CとS10Cは、通電なしの無励磁状態で300 Nの吸着力を得ることができない。

S45CとS10Cの300 Nの吸着力を得るために必要な励磁電流を算出するため、電磁界解析にて、励磁電流と吸着力 (f) の関係を整理した。図10に、励磁電流と f の

関係を示す。図10に示す通り、300 Nの吸着力を得るためには、S45C、S10Cの場合、それぞれ0.49 A、0.3 A流す必要がある。軟質磁性材料であるS10Cは比透磁率が高いため、S45Cと比べて小電流で高吸着力を得ることができる。

図11に、300 Nの吸着力を得るために必要な励磁電流の解析結果を示す。ELSHMは、外乱に対する吸着力の安定性を高めるために、60 sに一度励磁が必要と仮定をした。S45CとS10Cは電流を常時流す必要があるのに対し、ELSHMはある一定時間に一度励磁電流を流せば、必要な吸着力を安定維持することができる。

図11を元に消費電力を算出した結果、ELSHMはS45CやS10Cと比較し、95%以上の大幅な消費電力低減効果を示した(図12)。

上述したように開発鋼ELSHMは、電磁部品の省電力化に非常に有効な材料である。さらに従来の同種の磁性材料と比較し、省合金であるため、低コストかつ優れた部品加工性を有すると考えられる。当社は軟質磁性材料を主に電磁部品の磁場解析によるソリューション技術を構築・強化してきた^{2),4)}。軟質磁性材料で培ってきた部品設計ソリューション技術を最大限反映して、ELSHMの商品化により、カーボンニュートラルの実現などの課題解決に貢献していく。

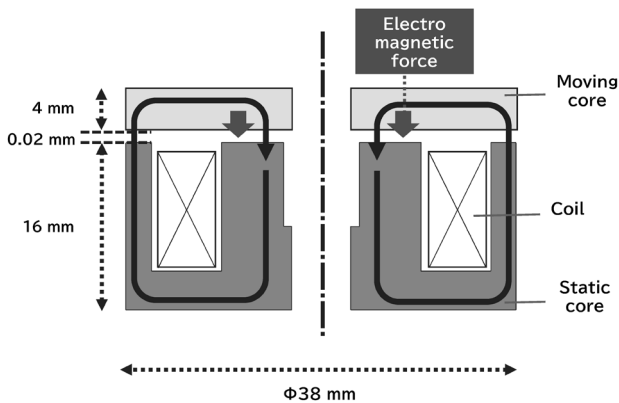


図7 電磁クラッチ部品の構造例

Fig.7 Schematic illustration of electromagnetic clutch structure

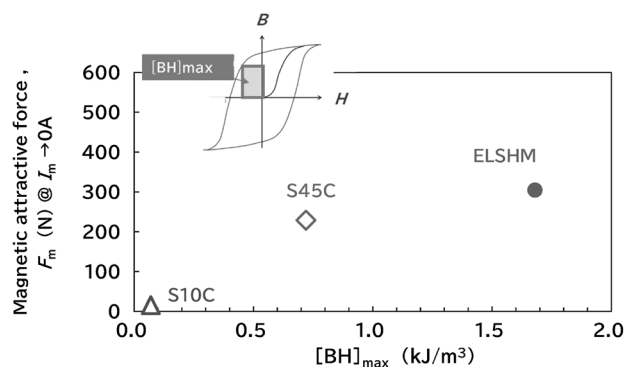


図9 $[BH]_{max}$ と無通電時の吸着力の関係

Fig.9 Relationship between $[BH]_{max}$ and magnetic attractive force without current

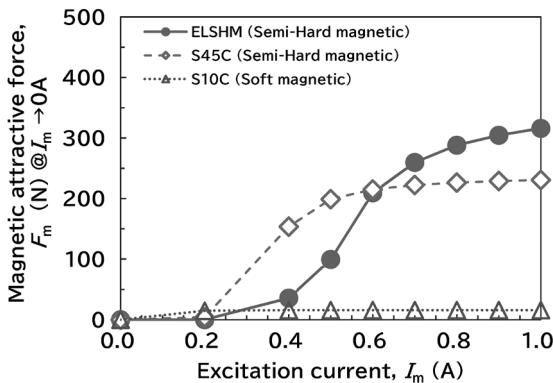


図8 励磁電流と無通電時の吸着力の関係

Fig.8 Relationship between excitation current and magnetic attractive force without current

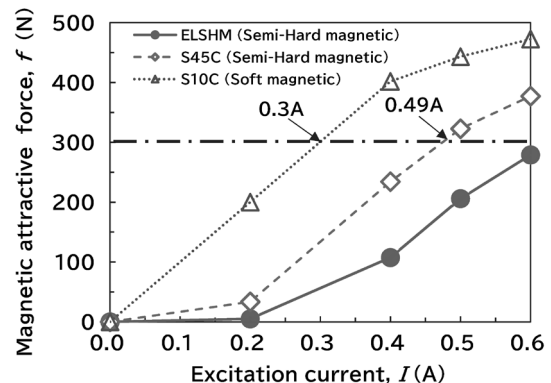


図10 励磁電流と吸着力の関係

Fig.10 Relationship between excitation current and magnetic attractive force

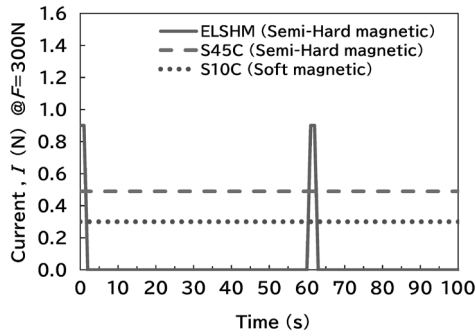


図11 吸着力300Nに必要な励磁電流解析結果

Fig.11 Analysis results of excitation current required to maintain holding force ($F=300\text{ N}$)

むすび = 省合金-半硬質磁性材料ELSHMの特長を紹介するとともに、電磁クラッチを一例として、ELSHM適用による省電力効果を検証した。省電力化ニーズの拡大に伴い、本稿で紹介した残留磁束を活用した半硬質磁性材料の適用拡大が想定される。今後は、さらなる好適部品の抽出・検証と成長部品に適した材料開発を推進し、カーボンニュートラルの実現などの課題解決に貢献していく。

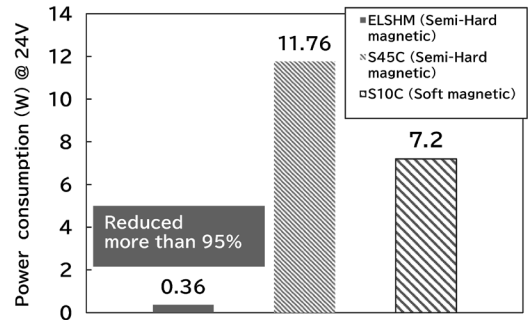


図12 開発鋼適用による省電力効果 (FEM解析)

Fig.12 Power-saving effect by applying development steel (Estimated by FEM analysis)

参考文献

- 1) 経済産業省. 自動車新時代戦略会議(第1回)資料.
- 2) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 3) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.
- 4) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.3-6.
- 5) 徳永雅亮. 特殊鋼. 2019, Vol.68, No.6, p.4-7.
- 6) 川口寅之輔ほか. 電気製鋼. 1974, Vol.45, No.3, p.175-187.
- 7) 木村康夫ほか. 日本金属学会会報. 1970, Vol.9, No.11, p.703-707.
- 8) 笹栗信也ほか. 鑄造工学. 2004, Vol.76, No.3, p.198-204.
- 9) 馬越佑吉. 日本金属学会会報. 1980, Vol.19, No.9, p.645-p654.
- 10) Characteristics of NdFeB Magnets.
<https://www.stanfordmagnets.com/characteristics-of-ndfeb-magnets.html>, (参照 2024-06-07).