

(技術資料)

純鉄系軟磁性線材および電磁純鉄鋼板の電磁部品への適用効果検証

久井志紘^{*1}・川嶋慎也^{*2}・千葉政道^{*1}(博士(理学))・池田憲史^{*1}・森田晋也^{*3}

Soft Magnetic Iron Wire Rod and Sheet: Estimation of Their Benefit for Electromagnetic Components

Yukihiko HISAI・Shinya KAWASHIMA・Dr. Masamichi CHIBA・Kenshi IKEDA・Shinya MORITA

要旨

自動車分野における電動化や脱炭素化が進む中で、電磁部品の高性能化が求められている。高い磁束密度と冷間鍛造性を特長とする純鉄系軟磁性線材（ELCH2シリーズ）は、電磁部品の小型化や省電力化に貢献してきた開発鋼であり、さらに、多様化する需要に応えるため、応答性や交流特性を向上させた純鉄系軟磁性線材（ELACシリーズ）および薄板化した電磁純鉄鋼板（KELMOS）の開発を進めている。本稿では、純鉄系軟磁性材料の磁気特性や加工性について紹介する。また、電磁リレー部品の磁場解析から、一般的な低炭素鋼の代わりに純鉄系軟磁性線材および電磁純鉄鋼板を電磁部品に適用することで、吸引力や応答性の向上を確認した結果を紹介する。

Abstract

Electrification and decarbonization in the automotive field are raising the demand for higher-performance electromagnetic components. The pure iron-based soft magnetic wire rod (ELCH2 series), which features high magnetic flux density and cold forgeability, is a newly developed material that has contributed to the downsizing of electromagnetic components and energy saving. Furthermore, development is underway on pure iron-based soft magnetic wire rod (ELAC series) with improved responsiveness and alternating current properties to meet diversifying demands. An electromagnetic pure iron steel sheet (KELMOS) is also being developed. This paper introduces the magnetic properties and processability of pure iron-based soft magnetic materials. Also introduced are the results of the magnetic field analysis of electromagnetic relay components, which confirm that the magnetic force and responsiveness have been improved by using pure iron-based soft magnetic material and electromagnetic pure steel sheets instead of typical low-carbon steel in electromagnetic components.

検索用キーワード

純鉄, 軟磁性, 線材, 鋼板, 磁束密度, 応答性, 冷間鍛造性, ELCH2, ELAC, KELMOS

まえがき = 自動車分野のEV電動化やカーボンニュートラルへの取り組みが進展するに伴い、車載電子機器の需要が増加している¹⁾。EVはバッテリーを中心とした複雑なシステムであり、車載電子機器に組み込まれるモータやソレノイド、リレーなどの電磁部品に対する要求も多様化、高度化している。電磁部品には迅速な操作を行うための応答性向上、軽量化および省スペース化のための小型化、バッテリー負荷を軽減するための省電力化などが求められている。また、インバータが搭載されることにより、交流磁界が重畳する部品が増えており、渦電流損失を低減することが求められている。従来、これらの電磁部品にはC量が0.1%程度の低炭素鋼が多く使用されてきた。しかし、高度化した部品要求に応えるには材料の高性能化が不可欠である。

当社の純鉄系軟磁性線材ELCH2^{注)} (Extra Low carbon

Cold Heading wire rod) は高い磁気特性を発揮し、電子制御トランスミッションのバルブ部品（ソレノイド）などに採用され、電磁部品の高性能化に貢献してきた。また当社では、多様化する要望それぞれに適した純鉄系軟磁性材料を提案するべく、さらなる開発に取り組んできた。図1に当社の純鉄系軟磁性材料における適用周

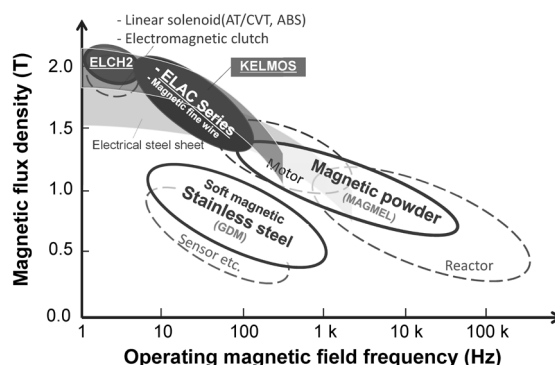


図1 適用周波数領域と磁束密度

Fig.1 Examples of operating frequency range and magnetic flux density

脚注) ELCH, ELAC, KELMOS, MAGMELはそれぞれ当社の登録商標（第4812504号, 第6788096号, 第6668543号, 第4669506号）である。

*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 材料研究所 *3 技術開発本部 応用物理研究所

波数領域と磁束密度の例を示す。直流部品に適したELCH2シリーズのほか、元素添加により応答性向上と渦電流抑制を図ったELAC^{注1)}シリーズや、ELCH2の知見を活用した電磁純鉄鋼板KELMOS^{注2)}、低鉄損・高効率を特長とし3次元磁気回路設計にも適した磁性鉄粉MAGMEL^{注3)}などを開発しており、磁場解析技術や二次加工技術と合わせて磁性材ソリューションを展開している。本稿では、当社が開発した純鉄系軟磁性線材ELCH2シリーズ、ELACシリーズおよび電磁純鉄鋼板KELMOSの主要特性とその用途を紹介する。

1. ELCH2シリーズおよびELACシリーズ

1.1 化学成分と磁気特性

当社の開発鋼はそれぞれ狙いの特性に応じた化学成分および材料組織の設計によって高い特性を発揮する。電磁部品に用いる軟磁性材料では吸引力や出力制御の観点から磁束密度が高く、保磁力が低いことが求められる。また、時間応答性や交流特性を得るためには同時に電気抵抗率を高めることが望ましい。ELCH2シリーズ(ELCH2およびELCH2S)、ELACシリーズ(ELAC20およびELAC30)、代表的な汎用鋼であるS10Cの化学成分例を表1に示す。また、表2に各鋼材の磁気特性および電気抵抗率を示す。ELCH2シリーズおよびELACシリーズの特長は高磁束密度と低保磁力であり、ELCH2シリーズはとくに最大磁束密度に優れ、ELACは高磁束密度と高電気抵抗率を両立している。

ELCH2シリーズは軟磁性材料の磁気特性に悪影響を及ぼす因子を排除することにより、高い飽和磁束密度を発揮する。軟磁性材料の磁気特性は材料中の磁気モーメントの大きさや材料組織によって左右される。ELCH2シリーズは極低炭素化によって材料組織を高純度のフェライト単相組織とすることで磁気モーメントを増大させ、飽和磁束密度(電磁部品の吸引力に対応する)を高めている。また、磁壁の移動を妨げる結晶粒界の面積を

低減するため、粒成長のピンニング源となるAl, Nを低減させ、低保磁力化を実現している(電流制御の容易さに対応する)²⁾。

ELAC (ELectromagnetic wire rod for AC application) シリーズは磁気特性や鍛造性を確保できる範囲でELCH2に元素を添加することで、電気抵抗率を上昇させている。これにより、材料の磁化を妨げる渦電流の発生が抑制され、外部磁場変化に対する時間応答性が高められている。また交流用途においては渦電流損失(消費電力)を低減できる。ELACシリーズではその電気抵抗率によってELAC20(電気抵抗率: 約 $20 \mu\Omega\text{cm}$)、ELAC30(電気抵抗率: 約 $30 \mu\Omega\text{cm}$)などの鋼材を用意しており、要求特性に応じた材料提案が可能である。ELACシリーズは元素添加とのトレードオフとしてELCH2シリーズに比べて飽和磁束密度がわずかに低くなるいっぽうで表2のB1で示されているように低磁界領域での磁気特性が高く、応答速度を求める部品や交流用途に適する。

1.2 冷間鍛造性

ELCH2は添加元素を極低減したことにより冷間鍛造性が向上しており、圧延ままであっても球状化焼鈍した汎用炭素鋼S10Cより変形抵抗が低く、割れが発生するまでの限界圧縮率が高い³⁾。図2に、ELCH2、ELAC20、ELAC30の冷間据込み試験で得られた変形抵抗をそれぞれ

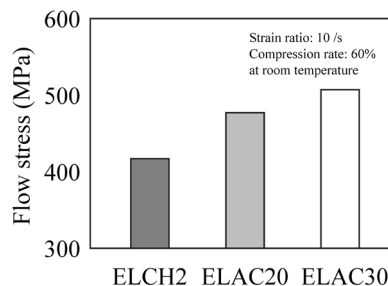


図2 室温における鋼材の変形抵抗
Fig.2 Flow stress of steels at room temperature

表1 鋼材の特徴と化学成分の例

Table 1 Characteristics and example of chemical composition of steels

Characteristic	Steel	Elements (mass%)				
		C	Si	Mn	P	S
Magnetic properties and forgeability	ELCH2	0.005	0.004	0.25	0.009	0.008
Cutting workability	ELCH2S	0.005	0.004	0.26	0.010	0.025
Responsivity and energy efficiency for AC use	ELAC20	0.006	Added a little	0.27	0.005	0.005
	ELAC30	0.008	Added	0.26	0.005	0.005
Conventional steel	S10C	0.08 / 0.13	0.15 / 0.35	0.30 / 0.60	≤0.030	≤0.035

表2 鋼材の磁気特性および電気抵抗率の例

Table 2 Example of magnetic properties and electrical resistivity of steels

Steel	Magnetic flux density (T)				Coercive force (A/m)	Electrical resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)
	B1	B5	B10	B50		
ELCH2	1.35	1.60	1.65	1.90	37	12
ELCH2S	1.33	1.46	1.64	1.89	47	12
ELAC20	1.46	1.57	1.62	1.80	35	22
ELAC30	1.40	1.51	1.55	1.72	31	30
S10C	0.45	1.40	1.54	1.74	86	16

れ示す。φ10 mm × 15 mmの円柱試験片を用意し、ひずみ速度10/s、加工率60%で圧縮した。ELCH2は変形抵抗が小さく、金型寿命の観点で優位である。ELACシリーズは電気抵抗率を上げるための元素添加を行っているため、ELCH2シリーズに比べて変形抵抗が高くなる。しかし、その値は600 MPa未満と低く、ELACシリーズの冷間鍛造性は球状化焼鈍したS30CやS45C（いずれも600 MPa以上）と比べて優れている⁴⁾。以上のように、ELCH2シリーズおよびELACシリーズは高い磁気特性とともに冷間鍛造性を兼ね備え、例えば部品加工を一体鍛造化することで製造コストや部品コストの低減が期待される。

いっぽうで、高い冷間鍛造性は高い延性の裏返しでもあり、切削加工においては工具刃先への凝着が発生しやすく、切り粉が伸びやすい。純鉄系軟磁性材料の被削性を高めるには、Sを添加しMnSを適量分散させることが有効である⁵⁾。そこで当社では、被削性を改善したELCH2SやELAC20Sを開発しており、電磁部品の磁気特性面の要求だけでなく、製造工程も考慮した材料・ソリューション提案が可能である⁶⁾。

2. KELMOS

2.1 化学成分および機械的特性

電磁部品では、部品ごとに適した形状・加工特性を持つ軟磁性材料を用いることで、磁気特性と製造コストを両立することができる。そこで当社では、ELCH2線材で培った知見を鋼板に適用し、ELCH2と同等の磁気特性を発揮できる電磁純鉄鋼板KELMOS（Kobe Extra Low carbon Electro-Magnetic Of Steel）の開発を行っている。

軟磁性材料には①高い飽和磁束密度と②低い保磁力が求められる。表3にKELMOSと一般の軟鋼板の成分例を示す。KELMOSの磁気特性向上コンセプトはELCH2に準じており、極低炭素化により材料中の磁気モーメントを増加させることで、高い飽和磁束密度を実現している。また、磁気応答性を阻害する結晶粒界および、結晶粒成長の均一性を低下させる窒化アルミの生成を抑制するためにAl、Nを低減することで低保磁力を実現してい

る²⁾。これらの特徴から、KELMOSを電磁部品に適用することで、小型軽量化や省エネルギー化、制御機能の向上が期待される。

また、優れた磁気特性と合わせて、良好な部品加工性を有することも特徴である。表4にKELMOSと一般の軟鋼板SPCCの機械特性例を示す。SPCCは成分規格が広いと機械特性もばらつきが出やすいが、KELMOSは上述のように合金成分、不純物成分をできる限り減らしたことで硬さが低く、伸びが高く加工性に優れる。

2.2 直流磁気特性

図3および図4にKELMOSと一般の軟鋼板の直流磁気特性例を示す。板厚1.0 mm、60 mm角の単板を用い、850℃ × 3時間の水素中磁気焼鈍後に、JIS C 2556に準じて、初磁化曲線とヒステリシス曲線を測定し、各磁場強度における磁束密度、保磁力を求めた。図3で示すように、KELMOSは低磁界側から急速に磁束が立ち上がり、また高磁界側においては飽和磁束密度も高いことがわか

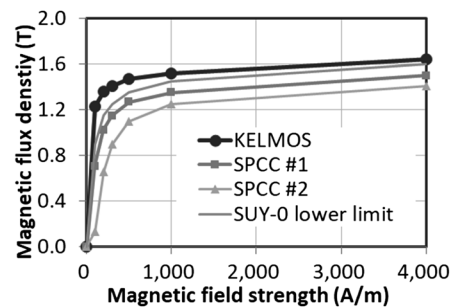


図3 鋼板の直流磁化曲線の例
Fig.3 Example of magnetization curves of steels

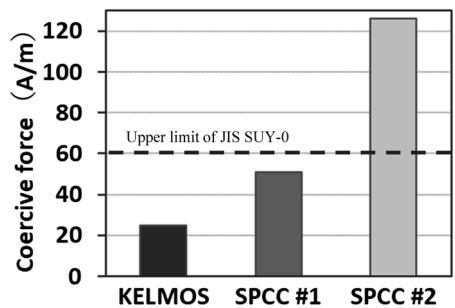


図4 鋼板の保磁力の例
Fig.4 Example of coercive force of steels

表3 KELMOSの化学成分例
Table 3 Example of chemical composition of KELMOS

Steel	Elements (mass%)				
	C	Si	Mn	P	S
KELMOS	≤ 0.02	≤ 0.03	0.20 / 0.30	≤ 0.030	≤ 0.030
JIS SUY-0	≤ 0.030	≤ 0.20	≤ 0.50	≤ 0.030	≤ 0.030

表4 鋼材の機械的特性の例
Table 4 Example of mechanical properties of steels

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV)
KELMOS	236	332	44	98
SPCC #1	215	340	42	103
SPCC #2	262	350	41	109

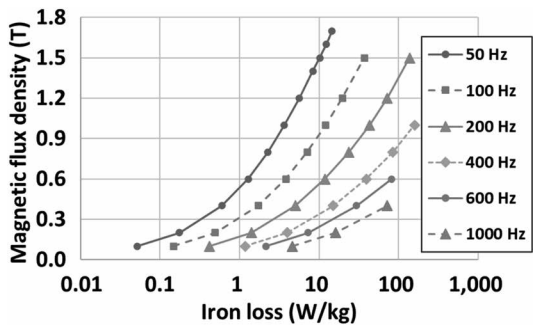


図5 KELMOSの交流磁気特性 (板厚0.8 mm)

Fig.5 AC magnetic properties of KELMOS (thickness 0.8 mm)

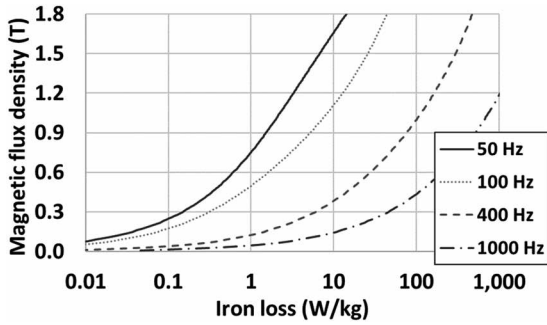


図6 KELMOSの交流磁気特性 (板厚0.5 mmに換算)

Fig.6 AC magnetic properties of KELMOS (converted to thickness 0.5 mm)

る。図4において、SPCCは機械特性同様、成分ばらつきにより、JIS SUY-0 (SUY: Steel Use for Yoke) の保磁力上限60 A/mを満たすものと満たさないものがある。いっぽうで、KELMOSは保磁力が十分小さく、SUY-0と同等以上の磁気特性を示す。そのため、リレーやリニアソレノイドなどの電磁部品へ適用することで、性能の向上が期待できる。

2.3 交流磁気特性

図5にKELMOSの交流磁気特性の例を示す。板厚0.8 mm、30 mm × 300 mmのサンプル12枚を用い、850 °C × 3時間の水素中磁気焼鈍後に、JIS C 2550に準じて、エプスタイン試験を行った。周波数50~1,000 Hzでの各磁界での鉄損値を評価した。この値から以下の式(1)から各周波数においてデータフィッティングを行い、板厚0.5 mmの場合の交流磁気特性へ換算した結果を図6に示す。

$$P = K_h f B_m^{1.6} + K_e \frac{(t f B_m)^2}{\rho} \dots\dots\dots (1)$$

なお、 f は周波数、 B_m は最大磁束密度、 t は鉄板の厚さ、 ρ は磁性材の電気抵抗率、 K_h および K_e は比例定数を表す。例えば、無方向電磁鋼板のJIS規格:C 2552の50A700 (板厚0.5 mm) の1.5 T、50 Hzの鉄損は7 W/kgであり、KELMOSは同条件で約7 W/kgと同程度であることから、交流用途に対しても低周波 (50~60 Hz程度) 用途などではKELMOSが適用できると考えられる。

3. 電磁部品への適用検討

純鉄系軟磁性材料の電磁部品への適用効果やその使い分けを検討するため、磁場解析を実施した。磁場解析には、(株)JSOL社製の電磁界解析ソフトJMAG (Ver.22.3)

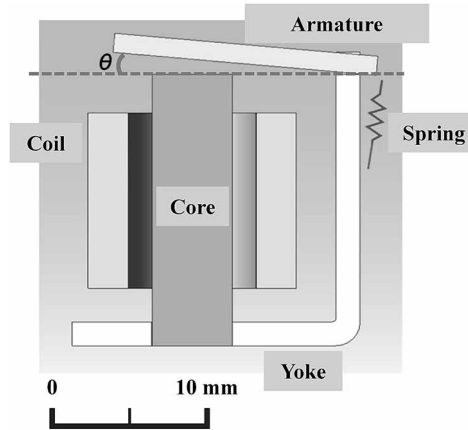


図7 磁場解析に用いた電磁リレーの計算モデル

Fig.7 Calculation model of electromagnetic relay for electromagnetic field analysis

を使用した。本検証で用いたリレー部品のモデルを図7に示す。励磁コイル、コア、鉄片 (アーマチュア) およびヨークからなる電磁部品であり、励磁電流をコイルに流すことで磁気回路を形成し、吸引力が発生する。本検証ではコアの材質をS10C、ELCH2またはELAC20とし、鉄片およびヨークの材質をSPCCまたはKELMOSとした場合の電磁力、応答時間を解析して比較した。コイル巻数は5,400 turns、励磁電圧はDC 24 Vとした。鉄片の角度 θ が5°から0°に移動するまでの時間を応答時間とした。鉄片が0°の状態、すなわち鉄心と鉄片が接触し、リレーが保持されている状態での電磁力を解析し、最大トルク (リレー部品の吸引力に対応する) を算出した。

表5に解析結果を示す。コアの材質をS10CからELCH2とした場合 (Case 2)、高い磁束密度を反映して最大トルクが大きくなった。また、コアの材質をELCH2とし、鉄片およびヨークの材質をKELMOSとした場合 (Case 3) にトルクは最も大きくなり、汎用鋼 (S10CやSPCC) で構成された場合 (Case 1) に比べてトルクが12.4%大きくなった。Case 2およびCase 3の応答時間は、Case 1とほぼ同じであった。純鉄系軟磁性材料では電気抵抗が低いため渦電流が磁化の妨げとなるが、高い磁束密度が鉄片を強く吸引し応答時間を補ったと考えられる。このように、トルクを重視する場合はELCH2の適用が有効である。トルクが大きくなることは、より小さな励磁電流で同等のトルクを得られることを意味しており、省電力化や発熱の抑制、または銅線量の低減および小型化を図ることができる。

コアの材質をELAC20にした場合 (Case 4およびCase 5) も、汎用鋼で構成された場合 (Case 1) より高いトルクを得られた。さらに、応答時間はコア材質をS10CやELCH2とした場合 (Case 1~Case 3) より約2%短くなった。図8にコアの材質をELCH2およびELAC20にした場合 (Case 2およびCase 4) で、電流ONから4 ms後での渦電流分布を示す。ELAC20の電気抵抗率はELCH2に比べて高いため、ELAC20コアの表層では電流密度が低くなった。このため、材料の磁化を妨げる渦電流の発生が抑制され、応答時間が短くなったと考えられる。また、励磁コイルの巻数がより少なく、

表5 電磁リレーの電磁力および応答時間の解析結果

Table 5 Estimated torque and response time of electromagnetic relay

	Core	Armature	Yoke	Maximum torque (mN·m)	Response time (ms)
					ON
Case 1	S10C	SPCC	SPCC	90.7	5.094
Case 2	ELCH2	SPCC	SPCC	98.1 (+8.1%)	5.088 (-0.1%)
Case 3	ELCH2	KELMOS	KELMOS	101.9 (+12.4%)	5.088 (-0.1%)
Case 4	ELAC20	SPCC	SPCC	95.8 (+5.6%)	4.998 (-1.9%)
Case 5	ELAC20	KELMOS	KELMOS	99.3 (+9.5%)	5.000 (-1.8%)

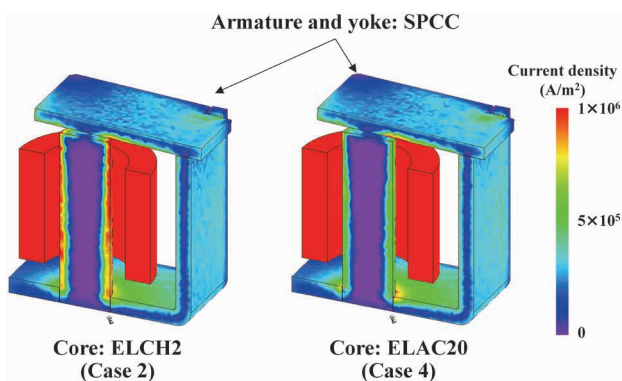


図8 電磁リレー中の渦電流分布
Fig.8 Eddy current distribution in electromagnetic relays

インダクタンスが小さい場合には、応答時間に対する渦電流の影響が相対的に大きくなるため、ELAC20の適用効果はさらに大きくなると推測される。

以上のように、要求性能に応じて適切な材質を選択することで、リレー部品の性能向上や省電力化を効果的に図ることができる。

むすび = EV化の進展につれ、電磁部品の需要は小型化、省電力化、交流用途などいっそう拡大・多様化すると予想される。本稿では、高い磁束密度と冷間鍛造性を特長とするELCH2シリーズ、応答時間や渦電流の低減に優れるELACシリーズ、およびELCH2の知見を薄板に適用したKELMOSの主要特性を紹介した。これらの純鉄系軟磁性材料は、それぞれが電磁部品の要求特性に応える材料であるだけでなく、組み合わせて用いることによって、さらに高性能化を図ることもできる。当社は今後も種々の要求に適した純鉄系軟磁性材料を開発、提案することで、電磁部品の高性能化やコスト低減を実現し、社会課題の解決に貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省ほか. モビリティDX戦略. 2024.
- 2) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 3) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 4) 星野俊幸ほか. 川崎製鉄技報. 1991, Vol.23, No.2, p.21-27.
- 5) 千葉政道. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.57-61.
- 6) 笠井信吾ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.3-6.