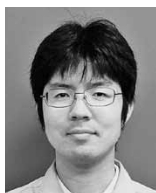


(解説)

純鉄系軟磁性材料の開発と磁場解析による効果検証

Development of Soft Magnetic Iron Wire and Benefit Estimations by Magnetic Field Analysis



坂田昌之*1
Masayuki SAKATA



千葉政道*1 (博士(理学))
Dr. Masamichi CHIBA



森田晋也*2
Shinya MORITA

Recently, improvements in electronic devices in control units have increased the demand for soft magnetic materials in the automobile industry and elsewhere since such materials can produce a larger electromagnetic force with less electronic power. Also, the demand for improving electromagnetic properties and stabilizing the properties is becoming greater each year. This report explains factors affecting the major properties of soft magnetic iron wire and introduces focal points for extracting the best performance from developed steel (ELCH2 series) and examples of applications.

まえがき = 電子制御部品は、自動車分野をはじめとする燃費改善や安全性向上を支える中核技術において不可欠な存在であり、その需要は増加傾向にある^{1), 2)}。これら電子制御部品の多くには、モータやソレノイドなどの電磁制御部品が組み込まれている。そうしたなか、ハイブリッド車や電気自動車などに代表される近年の自動車の電動化に対応して、電磁制御部品のさらなる精緻制御化と省電力化が重要課題となっている。

当社はこれまでに、磁気特性と冷間鍛造性に優れた純鉄系軟磁性材料 (ELCH2シリーズ) を開発し^{3), 4)}、主にリニアソレノイド (図1) や電磁クラッチの鉄心材として用いられるなど、電磁制御部品の高性能化と部品製造コストの低減に大きく貢献してきた。一方、電磁制御部品に対する要求特性も年々高度化・厳格化してきており、磁性材料の特性向上に加え、磁気回路の全体構成を見据えた磁気回路設計 (部品形状) と部品製造工程の適

正化が不可欠となっている。

本稿では、純鉄系軟磁性材料について主要特性への影響因子を概説するとともに、電磁界解析を用いることによって部品特性を向上させた事例とその効果を紹介する。

1. 磁気特性への影響因子

軟磁性材料の磁気特性は、材料が有する磁気モーメントの大きさと磁化過程における磁壁移動への抵抗力に強く依存する。これらは材料の化学成分やマイクロ組織などと複合的な相関関係を有する。

1.1 化学成分の影響

強磁性を発現する磁気モーメントの主たる担い手は体心立方構造のフェライト相である。斜方晶のセメンタイトも強磁性体であるが、フェライト相に比べて磁気モーメントは非常に小さく、悪影響を及ぼす側面が強い⁵⁾。したがって一般に、磁気特性には炭素量の影響が顕著に表れる。

図2に、炭素量が保磁力および磁束密度に及ぼす影響を示す。なお、結晶粒度などの組織要因を極力排除するため、本比較では磁気焼鈍材 (850℃×3時間保持) を用いた。炭素量の減少に伴いフェライト相が増加することから、磁束密度と保磁力の双方が改善することが分かる。また、注目すべき点として、炭素量が0.02%程度を超えると急激に磁気特性が低下することが挙げられる。これは、一般的な低炭素鋼 (S10C, SUM系快削鋼) を鉄心材などに用いた場合、化学成分変動が規格内の範囲であっても磁気特性の差異が大きく、部品特性のばらつきに大きく影響する可能性を示唆している。

JIS SUY (C 2504) では、炭素量の上限值をフェライト中への炭素の最大固溶量 (0.03%, 723℃) としている。

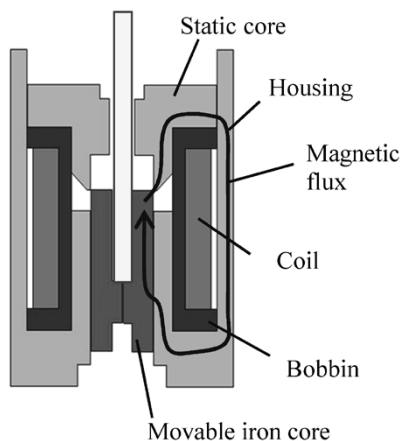


図1 ソレノイド部品の構造例

Fig. 1 Schematic illustration of solenoid structure

*1 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 *2 技術開発本部 電子技術研究所

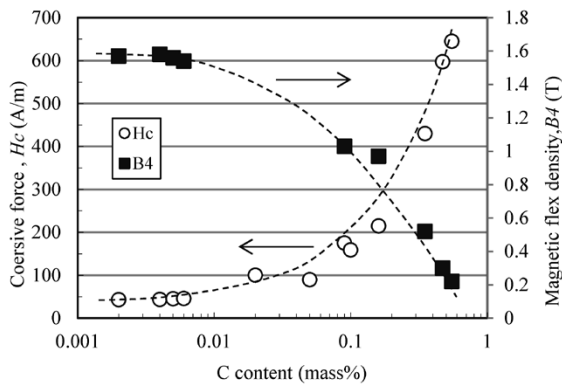


図2 磁気特性へのC含有量の影響
Fig. 2 C content dependence of magnetic properties

しかし、室温における炭素の最大固溶量の低下に伴うセメンタイトの析出を完全に抑制し、かつ固溶炭素による磁気特性の低下を防ぐには、炭素量を0.01%程度に低減することが望ましい。そこで開発鋼ELCH2シリーズでは、磁気特性の向上とばらつき低減を両立させるため、炭素量を0.01%以下とした。また、部品製造面で重視される冷間鍛造性や切削加工性を高めるため、磁気特性に影響しない範囲でMn, Sを適量添加する成分設計を行った^{3), 4)}(表1)。現在、磁気特性を重視した基本鋼(ELCH2)と、切削加工性改善鋼(ELCH2S)の2種類をメニュー化している。

1.2 ミクロ組織の影響

磁気特性を左右するもう一つの重要因子は、磁壁移動への抵抗力である。磁壁は外部磁界の変化に応じて材料中を移動するが、磁気エネルギーの低い結晶粒界や析出物などは磁壁移動の障害物として作用することが知られている⁶⁾。したがって、結晶粒を粗大化して結晶粒界を減じることが保磁力の低下防止に有効である。ただし、過度に結晶粒を成長させた場合、冷間鍛造時に肌荒れなどの問題が生じる。このため、鍛造用軟磁性材料では、鍛造加工後の熱処理(磁気焼鈍)により結晶粒を粗大化させる工程が一般的に採用されている。

各種材料の磁気特性例を表2に示す。純鉄系材料では、磁性不純物を徹底排除することにより、高透磁率、高磁束密度および低保磁力を総合的に実現し、電磁制御部品の小型化・省電力化などに活用できる。ただし、高純度化に伴い電気抵抗率が減少するため、励磁周波数の高い用途では表皮効果や渦電流損失などへの配慮が必要である。

1.3 ひずみの影響

伸線加工や鍛造加工で材料を塑性変形させると、材料中に転位(格子欠陥)が導入される。転位の周囲では、ひずみ場の作用で磁気モーメントが乱される。また、転位が磁壁の障害物として作用することから、磁気特性の低下を引き起こす⁷⁾。

図3に伸線加工でひずみを付加した際の磁束密度を示す。各鋼種とも、ひずみ量の増加とともに磁束密度が低下するが、開発鋼(ELCH2S)では、 $\epsilon = 0.43$ のひずみを付与した場合でも、無加工のS10Cより高い磁束密度を有する。磁気焼鈍をせずに鍛造加工ままで使用する

表1 開発鋼の化学成分

Table 1 Chemical composition of developed steels

Steel	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	N
ELCH2	0.005	0.004	0.25	0.009	0.008	0.0028
ELCH2S	0.005	0.004	0.26	0.010	0.025	0.0023

表2 磁気特性及び機械的性質の鋼種間比較

Table 2 Comparison of magnetic properties and mechanical properties

Steel	Magnetic flux density (T)				H_c	TS	YP	EL	RA	Hv
	B_1	B_5	B_{10}	B_{50}	(A/m)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	
ELCH2	1.37	1.49	1.55	1.73	32	295	136	42	90	73
ELCH2S	1.40	1.54	1.60	1.77	36	310	192	37	87	83
SUM24L	0.18	1.25	1.45	1.69	146	423	241	28	50	113
S10C	0.45	1.40	1.54	1.74	86	393	250	39	69	126
SUS410L	0.15	0.98	1.21	1.51	150	-	-	-	-	-

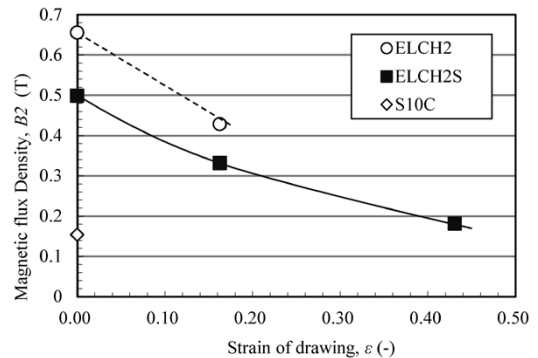


図3 伸線加工ひずみと磁束密度の関係
Fig. 3 Relationship between strain in wire drawing and magnetic flux density

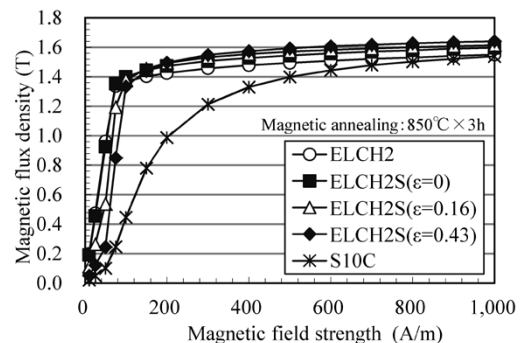


図4 伸線加工および磁気焼鈍後の初磁化曲線
Fig. 4 Initial magnetization curve after drawing and magnetic annealing

場合でも、本開発鋼の適用により部品性能の向上が期待できる。

図4には、ELCH2Sの磁気焼鈍後の初磁化曲線(B-H曲線)を示す。磁気焼鈍条件は、工業用で広く採用されている850°C x 3時間保持とした。磁気焼鈍材では、加工ひずみによる悪影響を再結晶過程で解消し、さらに結晶粒成長による粒界面積の減少で磁壁移動抵抗を低減できるため、磁気特性が大きく改善する。その効果は低磁界側で顕著であり、またフェライト単相組織である純鉄系材料の方が大きい。

図5に、保磁力に及ぼす伸線加工ひずみの影響を示す。磁束密度と同様、加工ひずみの増加に伴い悪化するが、磁気焼鈍の適用により大幅に改善される。伸線加工まま材と磁気焼鈍材について、平均結晶粒径と保磁力の

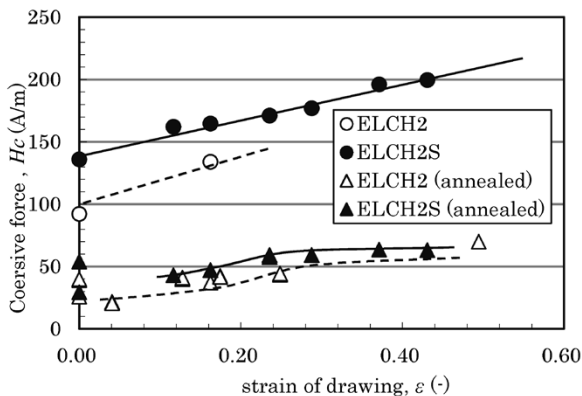


図5 保磁力への伸線加工ひずみの影響

Fig. 5 Strain in wire drawing dependence of coercive force

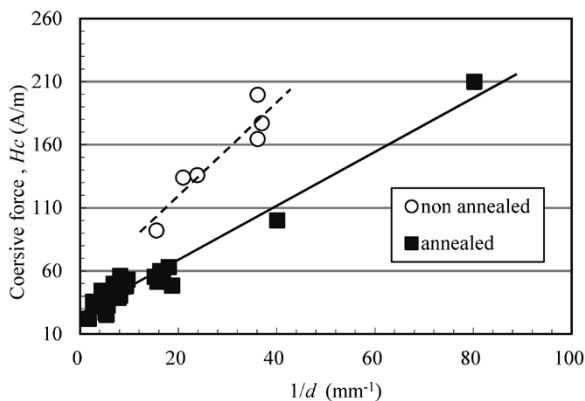


図6 結晶粒径と保磁力の関係

Fig. 6 Relation between grain size and coercive force

関係を図6に示す。双方とも保磁力は結晶粒径に反比例するが、同一結晶粒径で比較すると磁気焼鈍材は伸線まま材に比べ保磁力が低減されている。

磁気エネルギーの考察から、保磁力 H_c は式(1)で与えられる⁸⁾。

$$H_c \propto 3 \frac{\gamma_w}{M_s D} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 γ_w ：磁壁エネルギー、 M_s ：飽和磁化、 D ：結晶粒径である。高磁界特性である飽和磁化には加工ひずみの影響はほとんどないと類推できるため、同一結晶粒径で磁気焼鈍材の保磁力が伸線まま材に比べ低減されているのは、転位による磁壁移動抵抗が低減し磁壁エネルギーが低下したためと考えられる。

また、図6の結晶粒径無限大での漸近値から、純鉄系材料(磁気焼鈍材)での保磁力の理論限界値は、約20A/mと推定した。

2. 部品製造条件の最適化

本章では、純鉄系材料の適用効果を最適化するために留意すべき製造条件の影響について述べる。

2.1 冷間鍛造性

図7に、割れ発生限界圧縮率を測定した結果を示す。純鉄系材料は、高延性で割れが発生しにくい材料のため、切欠入りの円柱試験片を用いた苛酷な条件で比較を行った。開発鋼ELCH2およびELCH2Sは、圧延ままでもS10Cの球状化焼鈍材より割れ発生限界圧縮率が高く、軟化焼鈍なしに複雑形状部品を冷間鍛造できる優れた変

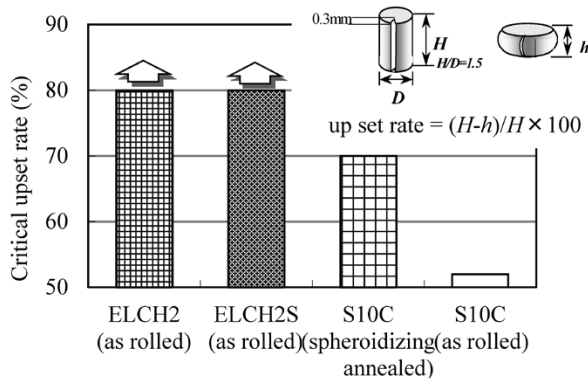


図7 割れ発生限界圧縮率

Fig. 7 Critical reduction for crack on upset test in various materials

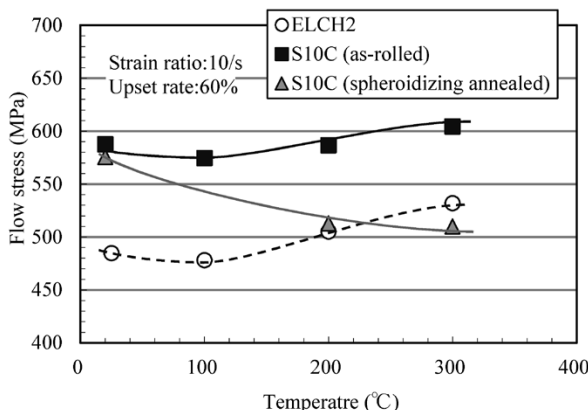


図8 変形抵抗の温度依存性

Fig. 8 Temperature dependence of flow stress

形能を有することが分かる。

一方、金型寿命に対応する加工率60%の変形抵抗の測定結果を図8に示す。なお、加工発熱による温度上昇を想定し、変形抵抗は室温から300℃の範囲で測定した。

室温から200℃未満の温度領域では、開発鋼ELCH2の変形抵抗はS10Cの球状化焼鈍材よりも低く、金型寿命向上の観点からも有効であることが分かる。ただし、S10Cの球状化焼鈍材の変形抵抗が温度上昇に伴い減少するのに対し、開発鋼では、加工発熱で想定される200℃以上の温度域で若干の変形抵抗増加が認められる。これは、僅かに残存した固溶Cや固溶Nに起因する動的ひずみ時効による影響と考えられる⁹⁾。したがって、加工発熱に伴う温度上昇が大きい大型部品や高加工率の冷間鍛造部品では、鍛造荷重や金型負荷の面でひずみ時効の考慮が必要である。

さらに、磁気特性の面からも鍛造工程設計への配慮が重要となる。図9に、圧縮加工した試験片の磁気焼鈍後の断面組織を示す。冷間鍛造品では、鍛造形状に応じて内部にひずみ分布が生じ、各部位のひずみ量の大きさは磁気焼鈍後の結晶粒径に影響を及ぼす。したがって、磁気回路の磁束集中部など、部品内で磁気特性を最重視する部位での結晶粒成長を最大化させ、かつ結晶粒径のばらつきを低減できる鍛造工程設計が望ましい。

2.2 熱処理条件

開発鋼ELCH2を対象に、磁気焼鈍温度と保磁力の関係を調べた(図10)。結晶粒成長は磁気焼鈍の温度と時間の双方に関係するが、焼鈍温度の影響の方が大きい。

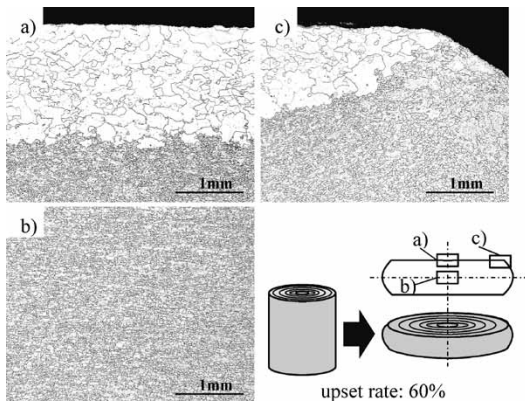


図9 圧縮試験片の断面組織

Fig.9 Microstructures on each cross section after compression test

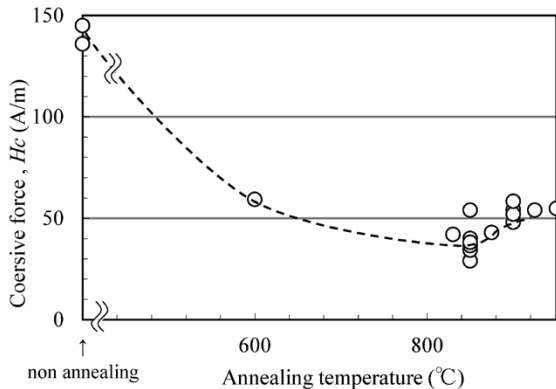


図10 磁気焼鈍温度と保磁力の関係

Fig.10 Relationship between magnetic annealing temperature and coercive force

同一の焼鈍時間で比較すると、焼鈍温度が高いほど結晶粒は成長し、磁気特性に優れた組織が得られる。ただし、開発鋼ではAc3点が約910°Cにあり、過加熱には注意を要する。910°Cを超えて昇温した場合、フェライト組織がオーステナイト組織に変態し、冷却過程でフェライト相が生成・成長するため、組織が微細化する可能性がある。磁気焼鈍は、組織がフェライト単相域の温度範囲で行うのが望ましく、加熱炉における温度のばらつきを考慮して850°C付近で行うことが工業的には一般的である。

また、磁気焼鈍での冷却条件も磁気特性に影響を及ぼす。磁気焼鈍過程としてここでは、真空雰囲気中で850°C×3時間保持し、ある温度まで徐冷(−100°C/h)した後、急冷(ガス冷却)する熱処理手法を採用した。そのときの急冷開始温度と保磁力の関係を調べたのが図11である。この図より、600°Cまで徐冷後に急冷した場合、室温まで徐冷した場合と比べて保磁力が約5%悪化することが分かる。

これは、急冷温度開始が低い方が熱ひずみによる悪影響が少ないことが考えられる。また、600°C付近の徐冷は、磁気特性に有害な固溶C、Nを磁壁ピンニング力が小さい粗大な炭窒化物として析出させる効果をもつことから、C、Nの悪影響度が軽減したと考えられる。したがって、部品の量産性と製造コストの面からは加熱保持後は速やかな冷却・炉出しが望まれるものの、高い磁気特性が必要な部品を磁気焼鈍する際は400°C程度までは徐冷することが好ましい。

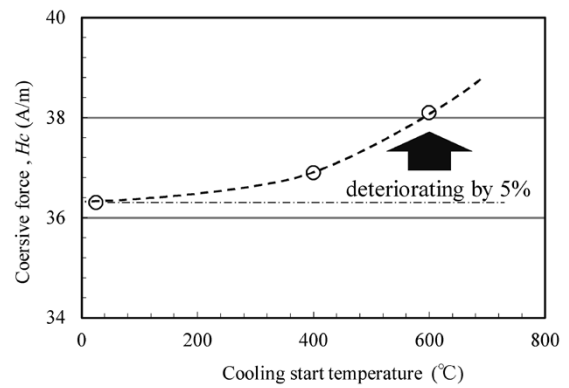


図11 急冷開始温度と保磁力の関係

Fig.11 Relationship between cooling start temperature and coercive force

2.3 切削加工性

純鉄系材料は延性が高く、優れた冷間鍛造性を有する反面、切削加工性が劣る問題を有していた。この問題に対し、千葉ら¹⁰⁾は切削加工性に及ぼす影響因子について調査し、切削加工性改善材ELCH2Sを開発した。開発鋼では、鋼中に分散析出したMnSがチップブレーカとして作用するため、切りくず処理性が格段に改善されている。

3. 電磁部品への適用例

当社が開発した純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズは、磁束密度が高く磁気ヒステリシスが小さいという特長を有し、高電磁力、高動作精度を実現できる。自動車分野では、小型化に加えて精緻制御の要望が強いオートマチックトランスミッションの油圧制御用リニアソレノイド(比例制御電磁弁)などで広く採用されている。

本章では、電磁界解析を用いてELCH2の適用効果を定量的に検討した事例を報告する。

3.1 電磁部品の特性解析

電磁部品の特性解析にあたってここでは、市販の電磁界シミュレーションソフトJMAG[®](Ver13.0)を使用した。また、解析対象とした電磁部品は、図1に示したリニアソレノイドである。リニアソレノイドは、磁束を通過させるためのハウジングや固定鉄心、可動鉄心といった軟磁性材料部品と、コイル、ボビン、軸受といった部品から構成される。コイルを励磁すると図中矢印のように磁束がコイル周囲を流れ、磁気力によって可動鉄心は図の上方へ引き付けられる。シャフトの上部にはスプール弁とばねが設置されており、電磁力とばねの釣り合いで定まる弁の位置によって油圧や油量が制御される。本検討では、ソレノイドの寸法：φ34×57mm、コイル巻数：600ターン、励磁電流：0～2A、ストローク：1.5mmとした。また、軟磁性材料の材質をELCH2と低炭素鋼S10Cの2とおりにして解析した。本解析では、図4に示した磁気特性データを使用した。

3.2 電磁力の向上効果(小型・軽量化)

図12に電磁力の電流依存性の解析結果を示す。励磁電流とともに電磁力は徐々に増加し、0.5A付近から電磁力と励磁電流はほぼ比例関係を示す。励磁電流が0.5Aを

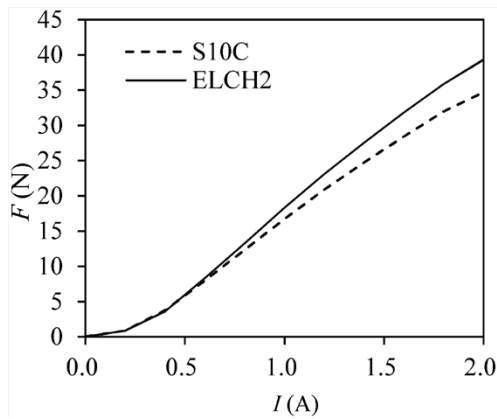


図12 励磁電流と電磁力の関係

Fig.12 Relationship between excitation current and electromagnetic force

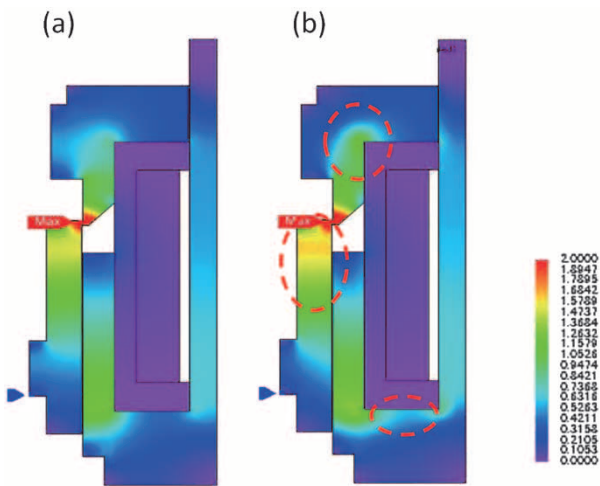


図13 磁束密度分布：(a)S10C, (b)ELCH2

Fig.13 Distribution of magnetic flux density: (a)S10C, (b)ELCH2

超えると鋼種によって電磁力に差が現れ始め、ELCH2の電磁力はS10Cに比べて高くなっている。電磁力の向上効果は、励磁電流1A時で10%、2A時で14%となる。

図13に解析したりニアソレノイドの磁束密度分布を示す。破線の赤丸で囲んだ領域では、磁束密度の差が大きい(0.7~1.5T)ことを確認できる。これは、同一の印加磁界ではELCH2の磁束密度が高く、リニアソレノイド全体の磁気エネルギーが増加することに起因する。

電磁力の向上に加え、ELCH2の適用は、電磁部品の省電力化や小型化などでも効果が期待できる。例えば、図12に示す電磁力-励磁電流特性から、電磁力20Nを得るのに必要な励磁電流は、S10Cで1.16AであるがELCH2では1.07Aと、約8%の省電力化が可能となる。また小型化・軽量化においても、今回解析したりニアソレノイドでは、電磁力を維持して、径方向に5%小型化でき、鉄心材料を10%程度軽量化できる。

自動車用途では、電磁部品の小型・軽量化は製品ユニットの設計自由度の向上や省スペース化、燃費改善において極めて重要である。本開発鋼の適用効果は非常に大きいといえる。

3.3 動作精度の向上効果

リニアソレノイドなどの電磁部品は、電磁力が大きいことのほかに高い動作精度や制御性が要求される。油圧

機器の油圧や油量は電磁弁の数10 μ m単位の位置制御によって決まるため、リニアソレノイドの可動鉄心を精緻に制御することが要求される。

動作精度の低下原因の一つとして、磁性材料の磁気ヒステリシスが挙げられる。磁気ヒステリシスが大きい材料を使用した場合、励磁電流の値が同一でも、電流増加時と減少時で電磁力に差異が生じ、その結果として可動鉄心の動作精度が低下する。前述のように、ELCH2は保磁力が小さく磁気ヒステリシスも少ない材料であり、リニアソレノイドの動作精度を高める効果がある。

本効果を検証するため、リニアソレノイドにおける電磁力のヒステリシスを電磁界解析で行った。解析では、S10CとELCH2の磁気焼鈍材を用いた。保磁力はS10Cが86A/mであるのに対し、ELCH2は32A/mとS10Cより63%も低く磁気ヒステリシスが小さい。この結果を図1のリニアソレノイドモデルに適用し、励磁電流を0A→2A→0Aと静的に変化させたときの電磁力を解析した。

電磁力のヒステリシス(ΔF)は、励磁電流減少時(2→0A)と電流増加時(0→2A)の電磁力差として定義した。解析結果を図14に示す。ELCH2を適用した際の ΔF は、S10Cと比べて半分以下に改善している。具体的には、0.5Aにおける ΔF はS10C:0.43N、ELCH2:0.17Nであり、図12における励磁電流0.5Aのときの電磁力の大きさに対してそれぞれ8.1%、3.1%である。リニアソレノイドにおいて電磁力に対する ΔF の割合は、通常5~10%以下が要求されるため、ELCH2の適用でリニアソレノイドの動作精度の大幅改善が期待できる。

3.4 さまざまな電磁部品への適用例

リニアソレノイド以外でも、電磁ブレーキ・クラッチやリレー、オルタネータ(発電機)などで、純鉄系軟磁性材料の適用効果が期待される。上記と同様の解析で、これら部品での推定効果を表3にまとめた。

電磁ブレーキやリレーといった電磁力を用いる電磁部品では省電力化、小型・軽量化の効果が期待でき、オルタネータについては発電効率の向上が期待できる。

以上のように、開発鋼ELCH2は各種電磁部品の性能向上に非常に有効な材料である。とくに、ELCH2の磁

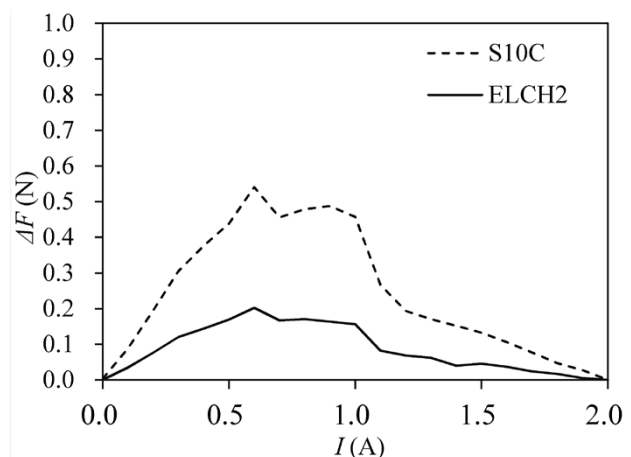


図14 電磁力のヒステリシス特性

Fig.14 Hysteresis property of electromagnetic force

表3 様々な部品の電磁界解析結果

Table 3 Results of electromagnetical field analysis on varied part

	Electric power saving	Down-sizing	Weight saving	Operating accuracy	Generating efficiency
Linear solenoid	8% ↗	5% ↗	10% ↗	60% ↗	-
Electric brake	10% ↗	7% ↗	10% ↗	-	-
Relay	15% ↗	10% ↗	15% ↗	-	-
Alternator	-	-	-	-	8% ↗

気特性を考慮した磁気回路設計を行うことにより、一層の小型・軽量化や省電力化が可能となる。

むすび=ハイブリッド車や電気自動車の普及拡大に伴い、今後も新たな電磁制御部品が開発され、拡大するも

のと予測される。純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズは、電磁制御部品の高性能化、省電力化および製造コストの低減に有効であり、低燃費化や環境負荷低減、安全性向上などへの取り組みに貢献できると考えられる。

参考文献

- 1) 伊東維年. 産業経営研究. 2010, Vol.29, No.3, p.65.
- 2) 日本政策投資銀行調査研究レポート. 2008, Vol.95, Vol.54, No.2 (2008), p.4.
- 3) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 4) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2011, Vol.61, No.1, p.57-61.
- 5) 梅本 実ほか. 鉄と鋼. 2002, Vol.88, No.3, p.117-128.
- 6) 岡本祥一. 磁気と材料. 共立出版, 1988, p.72.
- 7) 馬越佑吉. 日本金属学会会報. 1980, Vol.19, No.9, p.645-654.
- 8) R. H. Yu et al. JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. 1999, Vol.85, No.9, p.6655-6659.
- 9) 添野 浩. 塑性と加工. 1970, Vol.11, No.112, p.367-376.
- 10) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.