

(論文)

高機能電磁部品用純鉄系軟磁性材料

Soft Magnetic Iron for High Performance Electromagnetic Parts



千葉政道* (理博)
Dr. Masamichi Chiba



阿南吾郎*
Goro Anan



尾崎勝彦** (工博)
Dr. Katsuhiko Ozaki

Recently, the demand for a soft magnetic steel, which can generate a large electromagnetic force with low electric power, has increased in the growing area of electronically controlled parts for automobiles. A new, very low carbon steel has been developed that has excellent DC electromagnetic properties, is well suited to cold forging and is highly machineable. In this paper, the advantages of this new soft magnetic steel are described.

まえがき = 近年の自動車分野では、安全性と利便性の向上、および低燃費化による環境負荷低減が大きな課題となっている。このため、エンジンや変速機など多くのユニットでは、従来よりも精緻なシステム制御が不可欠となっており、機械制御に替わってコンピュータ制御による高性能化が急速に伸展している^{1), 2)}。

このうち、自動変速機やパワーステアリング機構を司る油圧回路のコンピュータ制御には、ソレノイドやアクチュエータなどの電磁部品が用いられている。電磁力を利用するこれらの部品では、制御信号に対する応答性とエネルギー効率を向上させる目的で、磁界を発生させるコイル部に鉄心材が組込まれており、従来、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、ここ数年の電磁制御の伸展は目覚しく、各電磁部品では一層の高性能化と消費電力低減が必須な状況にある。

本稿では、電磁部品の鉄心材などに用いられる軟磁性材料の動向を述べるとともに、当社の純鉄系軟磁性材料 (ELCH2 シリーズ) の諸特性について紹介する。

1. 電磁部品用軟磁性材料

図1に油圧制御用ソレノイド部品の構造例を示す。磁気回路を形成する鉄心材およびカバー部品などのハウジング

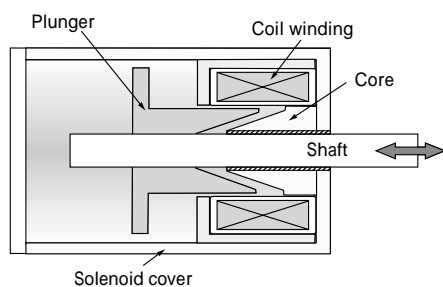


図1 ソレノイド部品の構造例
Fig. 1 Example of solenoid structure

ング部において軟磁性材料が通常用いられる。

1980年代に登場した当初の自動車用ソレノイド部品では、油流量のON-OFF制御が役割だったため、軟磁性材料への要求特性はさほど厳しくなく、材料入手の容易さや加工性を重視して、SWRCH10AやSUM23などの低炭素鋼が使用された。

しかし最近では、最適な油圧を迅速かつ安定して作り出すために、ON-OFF制御に替わってリニア制御が多用される傾向にある³⁾。リニア制御では、制御電流に比例した電磁力を精度良く作り出す必要があり、高透磁率で磁気ヒステリシスの小さい軟磁性材料が不可欠となる。従来のON-OFF制御に用いられてきた材料では、図2に示すように、磁気ヒステリシスが大きく、これらの要求を満足できない。このため、JIS SUY1種以上の磁気特性を有する純鉄系材料がリニア制御用ソレノイドの軟磁性材料に適用されるようになった。当社も磁気特性に優れた純鉄系軟磁性材料ELCH2 (Extra Low carbon Cold Heading wire)を開発し、既に多くの電磁部品で実用化されている⁴⁾。

また近年は、部品の高機能化を果たすため、材料特性

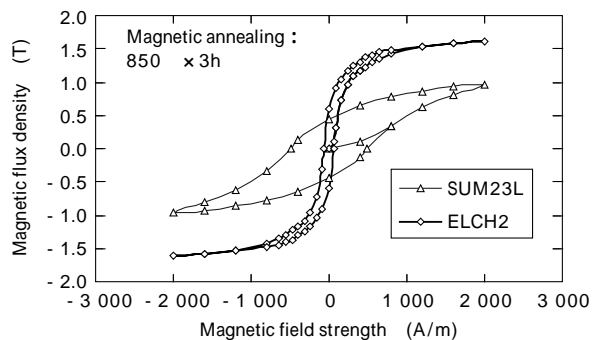


図2 ヒステリシス特性の比較
Fig. 2 Comparison of hysteresis curve

*鉄鋼部門 神戸製鉄所 糸鋼開発部 **技術開発本部 材料研究所

の向上に加えて、部品形状の複雑化や高寸法精度化への要望が高まっており、切削加工性が重視される傾向にある。ただし、純鉄系材料は磁気特性に優れる反面、切削加工時の切屑処理性が悪く、また工具寿命が短いため、切削加工機の自動運転において支障となることが多い。

これまで、その対策として少量の Pb 添加が行われてきたが⁵⁾、環境負荷物質である Pb を使用せずに切削加工性を高めることが、これからの軟磁性材料にとって重要な課題となっている。本背景のもと、筆者らは、磁気特性を犠牲にせず切削加工性を改善させた純鉄系軟磁性材料 ELCH2S を新たに開発した。

2. 開発鋼の考え方

軟磁性材料の磁気特性は、材料の磁気モーメントの大きさに加えて、結晶粒の大きさや析出物などの因子によっても左右される。特に、多結晶体の磁気特性においては、結晶粒界や析出物が磁壁の移動をピン止めする箇所となることから、磁気特性を低下させる原因となる⁶⁾。よって、快削性元素の添加は、一般に磁気特性の悪化を招く。

本開発鋼 ELCH2S では、従来の磁気特性優先鋼 ELCH2 の考えをベースに、以下の観点から磁気特性と切削加工性の両立を図った。

清浄なフェライト単相組織として素材の磁気モーメントを増加させる。 C の低減

磁気応答性を阻害する結晶粒の不均一さを抑制する。 Al, N の低減

冷間鍛造性の向上 Si 低減, Mn 添加 (S の無害化)

切削加工性の向上 S の増量 (MnS の適量分散)

図 3 に、極低碳素鋼への S 添加量と旋削加工時の工具磨耗量の関係を示す。S 量を 0.025% 程度まで増加させることで、従来の純鉄系材料 (S < 0.010%) に比べて、磨耗量の半減が期待できる。

しかし、図 4 に示すように、S を過剰に添加した場合、磁気特性の大幅な低下とばらつき拡大が認められた。写真 1(b) に、磁気特性が低下した試料の断面組織を示す。S 過剰添加鋼では、旧オーステナイト粒界に FeS の析出が認められる。したがって、FeS が磁気モーメントを担うフェライト相の占積率低下と磁壁移動に対する抵抗増加をもたらし、磁気特性を低下させたものと推定できる。よって、本開発鋼では、S の増量とともに FeS が残

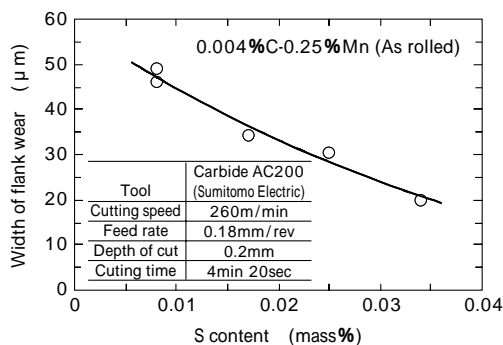


図 3 S 量と逃げ面磨耗量の関係
Fig. 3 Relation between S content and width of flank wear

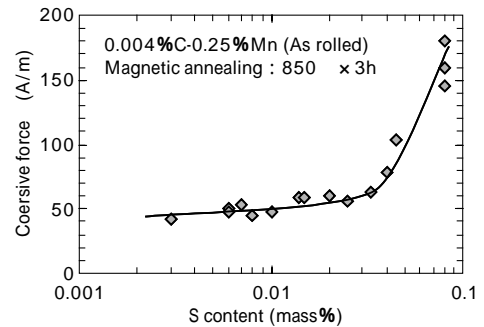


図 4 保磁力への S 量の影響
Fig. 4 S content dependence of coersive force

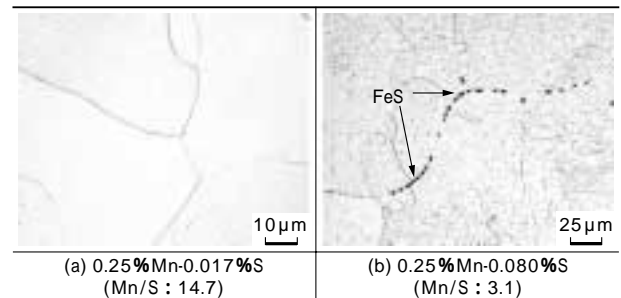


写真 1 断面組織の比較
Photo 1 Comparison of microstructure

存しないよう、Mn/S 比を適正に制御した。

3. 試料および実験方法

表 1 に、今回開発した切削加工性改善鋼 ELCH2S と、比較鋼として、従来鋼 ELCH2 と SWRCH10A の化学成分を示す。上記の供試材を転炉溶製後、20mm の線材に圧延した。この圧延材について、直流磁気特性、電気抵抗および機械的性質を評価した。

3.1 磁気特性

磁気測定に際しては、供試材からリング状の試験片を作製し、JIS 法 (JIS C 2504) に基づいて実施した。測定は自動磁化測定装置 (理研電子社製: BHS-40) を用いてヒステリシス曲線を描き、得られたヒステリシス曲線から保磁力、透磁率および各磁界の強さに対する磁束密度を求めた。なお、測定時における印加磁界の掃引速度は、渦電流損失がヒステリシス曲線に影響を与えない範囲を確認して設定した (200~250(A/m・sec))。

3.2 機械的性質

機械的性質は、常温での引張試験により評価した。引張試験片は、JIS Z 2201 による 14A 号試験片を切出し試験に供した。

3.3 冷間鍛造性 (変形能)

開発鋼の変形能を測定するため、側面に切欠きを入れ

表 1 供試材の化学成分
Table 1 Chemical composition of steels used in this study

Steel	C	Si	Mn	P	S
ELCH2S	0.005	0.004	0.26	0.010	0.025
ELCH2	0.005	0.004	0.25	0.009	0.008
SWRCH10A	0.10	0.04	0.45	0.014	0.009
JIS SUY	max. 0.03	max. 0.20	max. 0.50	max. 0.03	max. 0.03

た試験片 (20×30mm^L) を作製し、メカニカルプレスで端面を拘束した据込み試験を実施した。変形能は、切欠きから割れが発生しない限界の据込み率で評価した。

3.4 切削加工性

ドリル加工による貫通試験および超硬旋削試験を行い、バリの発生性、切屑の分断性および切削工具の磨耗量を評価した。

4. 実験結果と考察

4.1 磁気特性

図5に開発鋼 ELCH2S と従来鋼 ELCH2、および SWRCH10A について、印加磁界と磁束密度の関係を示す。なお、供試材の磁気焼鈍条件は工業用で広く採用されている 850 × 3 時間とし、真空中 (0.5mmTorr 以下) で実施した。開発鋼 ELCH2S は、低磁界から高磁界に渡って従来鋼 ELCH2 とほぼ同等の磁束密度特性を有する。また、SWRCH10A と比較した場合、飽和磁束密度は同等の約 1.6T であるが、飽和磁束密度に達する磁界の強さは SWRCH10A が 1200A/m であるのに対し、開発鋼は 400A/m と低く、より小さな磁界の強さで大きな磁束密度が得られることが分かる。

写真2に開発鋼 ELCH2S と従来鋼 ELCH2 について、磁気焼鈍後の組織写真を示す。純鉄系材料においては、磁気焼鈍時に MnS が結晶粒成長のピン止め点として作用することが危惧される⁷⁾ が、両鋼種のフェライト結晶粒径はほぼ同等であり、結晶粒成長に対する悪影響はほとんど認められない。よって、開発鋼 ELCH2S では、従来鋼 ELCH2 と同一の熱処理条件によって、ほぼ同等の磁束密度特性が確保できることを確認した。

表2にELCH2シリーズの主な磁気特性を示す。開発

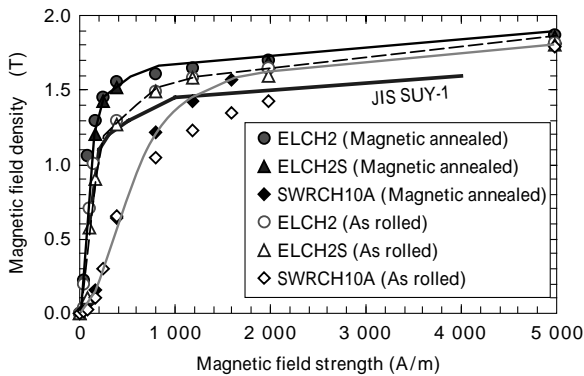


図5 磁束密度特性

Fig. 5 Magnetic field dependence of magnetic flux density

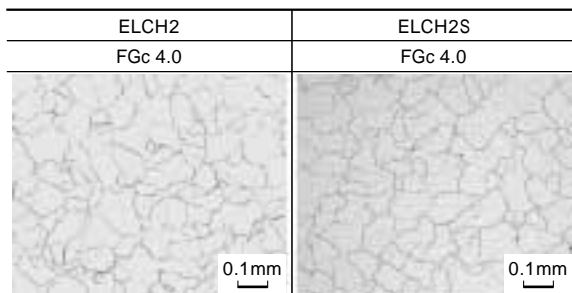


写真2 磁気焼鈍後の断面組織

Photo 2 Microstructure of developed steel after magnetic annealing

表2 ELCH2シリーズの磁束密度特性 (磁気焼鈍材)
Table 2 Magnetic properties of ELCH2 series (Magnetic annealed)

Steel	Magnetic field density (T)						Coersive force (A/m)
	B100	B200	B300	B500	B1000	B4000	
ELCH2S	0.90	1.24	1.47	1.54	1.64	1.80	55.7
ELCH2	0.92	1.30	1.50	1.60	1.65	1.81	45.2
SUY-1	0.60	1.10	1.20	1.30	1.45	1.60	80
SUY-0	0.90	1.15	1.25	1.35	1.45	1.60	60

表3 ELCH2シリーズの機械的性質
Table 3 Mechanical properties of ELCH2 series

Steel	Tensile strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Elongation (%)	Reductin area (%)
ELCH2S	306	209	36.7	92.8
ELCH2	305	208	38.1	90.1

鋼 ELCH2S では、従来鋼 ELCH2 に比べて、保磁力が若干増加するものの、磁束密度特性には顕著な劣化は認められず、JIS SUY0 種の優れた磁気特性を満足する。

このため、通常の下炭素鋼を使用した場合よりも、小さな印加磁界で同一の電磁力を発生でき、部品特性の向上とともに、消費電力の低減にも有効であると推定できる。

更に、図5に示すように、開発鋼 ELCH2S では圧延ままの状態でも、磁気焼鈍した SWRCH10A 相当の磁気特性を満足する。したがって、現行材が SWRCH10A 相当の部品に対しては、磁気焼鈍工程の省略が可能と考えられる。

4.2 機械的性質

表3に開発鋼 ELCH2S における圧延材の機械的性質を示す。圧延材の引張強さは約 300MPa であり、従来鋼 ELCH2 の圧延材とほぼ同等である。なお、伸線加工などを加えることにより引張強さは上昇するが、磁気焼鈍時に軟化するため、最終的な引張強さは、伸線減面率によらず 230MPa 程度となる。

4.3 冷間鍛造性

切欠き入り試験片において、割れが発生する限界の据込み率を図6に示す。SWRCH10A では、球状化焼鈍材においても限界据込み率が 75% であるのに対し、開発鋼は軟化焼鈍を行わない状態で 80% の据込み加工を行っても割れが発生せず、従来鋼の ELCH2 と同様、優れた変形能を有することを確認した。このため、開発鋼 ELCH2S の適用は、冷間鍛造前の軟化熱処理工程の省略など、部

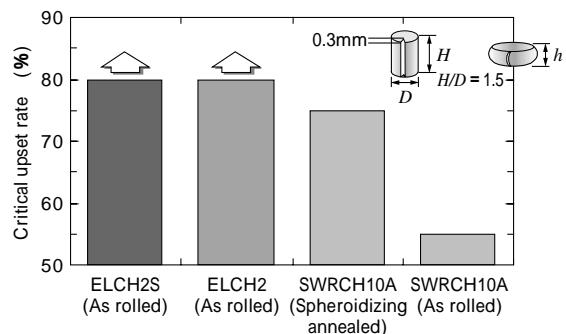
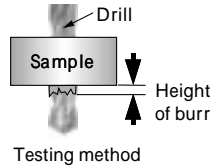


図6 割れ発生限界圧縮率

Fig. 6 Critical upset rate

表4 ドリル加工試験条件
Table 4 Conditions for drilling test

Tool	SKH straight drill
Cutting speed	30m/min
Feed rate	0.20mm/rev
Coolant	Dry



	ELCH2	ELCH2S
Chip		
Height of burr	4.11mm	0.94mm

写真3 切屑とバリの比較
Photo 3 Comparison of chip and height of burr

品製造コスト低減の観点からも、極めて有用であると考えられる。

4.5 切削加工性

1) ドリル加工性

表4の条件でドリル加工した際の切屑と貫通穴部のバリ高さの平均を写真3に示す。従来の純鉄系材料と比べて切屑は短く分断され、バリ高さも大幅に低減されている。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有効に作用し、ドリル加工性が向上することが分かる。

2) 旋削加工性

表5の条件で旋削加工した際の実験鋼ELCH2Sにおける切削速度と逃げ面磨耗量の関係を、図7に示す。同一切削長(800mm)で比較すると、磨耗量は切削速度の増加に伴って減少傾向を示し、切削速度を80m/minから700m/minに増加することで、磨耗量は0.117mmから0.038mmと約1/3に減少した。特に、切削速度が250m/min程度までの領域において改善効果が大きく、本開発鋼のような純鉄系材料では、250m/min以上の高速で切削加工することが、工具磨耗量の軽減に有効であることが判明した。高速切削で磨耗量が減少する主な原因としては、

- i) 加工発熱に伴う温度上昇で被削材が軟化し、切削抵抗が減少する。
- ii) 切削速度が低いと切削工具への付着物生成が少ないため、磨耗が促進される。

などが考えられる⁸⁾。

また図7に、切削速度260m/minでの従来鋼ELCH2の工具磨耗量をあわせて示す。同一加工条件で比較すると、開発鋼の磨耗量は従来鋼の約1/2であり、工具寿命の面からも開発鋼の有用性が確認できた。

5. 適用例

本開発鋼ELCH2Sは、油圧制御用ソレノイドの鉄心材をはじめ、電磁クラッチなどの大型鉄心材としても、今

表5 旋削加工試験条件
Table 5 Conditions for turning test

Tool	Carbide AC200 (Sumitomo Electric)
Cutting speed	80, 150, 260, 350, 700m/min
Feed rate	0.15mm/rev
Depth of cut	0.2mm
Coolant	Water-soluble

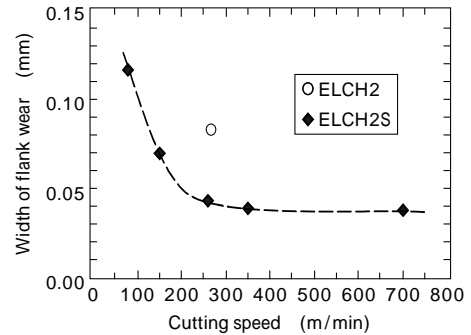


図7 切削速度と逃げ面磨耗量の関係

Fig. 7 Relation between cutting speed and width of flank wear

後、適用拡大が期待されている。これまでに、Honda殿が開発した世界初の四輪駆動力自在制御システム(SH-AWD)を構成する電磁ソレノイドの鉄心材として採用され、消費電力低減と部品の生産性向上に貢献している⁹⁾。

むすび = 磁気特性と冷間鍛造性を維持して、切削加工性を改善した純鉄系軟磁性材料を開発し、以下に示す特長を確認した。

電磁力の発生に要する消費電力を大幅に低減でき、部品の発熱量低減や制御回路への負荷軽減を実現できる。

複雑形状部品でも冷間鍛造で成型できる可能性があり、電磁部品の高性能化とともに、部品製造コストの低減に大きく寄与することができる。

磁気特性を最優先した従来鋼に比べ、切削加工時のバリと工具磨耗量を大幅に低減でき、切削加工に伴う作業負荷の低減が図れる。

今後も自動車分野をはじめとして、省電力化と製造コスト低減への要望を背景に、純鉄系軟磁性材の適用は拡大していくものと見込まれる。

参考文献

- 1) 浜田有啓ほか：三菱電機技報，Vol.61, No.8 (1987) p.651.
- 2) 川延寿継ほか：内燃機関，Vol.26, No.333 (1987) p.230.
- 3) 深谷直幸：自動車技術，Vol.58, No.4 (2004) p.48.
- 4) 千葉政道ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.52, No.3 (2002) p.66.
- 5) 加藤哲男ほか：電気製鋼，Vol.38, No.1 (1967) p.2.
- 6) 近角聡信：強磁性体の物理 (1963)，装華房.
- 7) 尾田善彦ほか：NKK 技報，No.178 (2002) p.16.
- 8) 尾崎勝彦ほか：精密工学会，Vol.52, No.3 (2002) p.66.
- 9) 國井力也ほか：HONDA R&D Technical Review, Vol.16, No.2 (2004) p.9.