

(解説)

# 純鉄系軟磁性材料の開発動向

## Development Trends of Soft Magnetic Iron



千葉政道\*<sup>1</sup>(理博)

Dr. Masamichi CHIBA

Driven by advances in electronically controlled parts for automobiles, demands are growing for soft magnetic steels which can generate a large electromagnetic force with low electric power. New steels with very low carbon have been developed in consideration of their DC electromagnetic properties, their cold forgeability, and machinability. In this paper, the recent development trends of soft magnetic steel and the advantages of our developed steel (ELCH2 series) are described.

まえがき＝近年の自動車では、安全性や快適性の向上、燃費低減の観点から、電子制御AT、電動パワーステアリング (EPS)、アンチロック・ブレーキング・システム (ABS) など、電気エネルギーを利用する部品 (電子・電磁制御部品) が多用されている<sup>1), 2)</sup>。

自動車の電子化・電動化が始まった当初 (1950～1960年代) は、各ユニット単独での性能向上や高機能化が主であったが、近年の高度・複雑化した車両制御技術には、ユニット間の高速連係・協調動作が不可欠であり、電子・電磁制御部品の重要性は年々高まってきている。

これらの電子・電磁制御部品のうち、電磁力を利用する部品では、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み込まれており、従来、C量が0.1%程度の低炭素鋼が多く使用されてきた<sup>3)</sup>。しかし、ここ数年の電磁制御の伸展は目覚ましく、各電磁部品では一層の高性能化と消費電力低減が必須となっている。

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 (Extra Low Carbon Cold Heading Wire) シリーズの諸特性について紹介する。

### 1. 軟磁性材料の変遷

自動車用電磁部品の代表例として、油圧制御用ソレノイド部品の構造を図1に示す。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部においては通常、軟磁性材料が用いられる。

初期の自動車用ソレノイド部品では、油流量のON-OFF制御が主な役割だったため、鉄心材の磁気特性よりも、材料入手の容易さや加工性が重視され、SWRCH10A (JIS G 3507-1) やSUM23 (JIS G 4804) などの低炭素鋼が鉄心材に使用された。

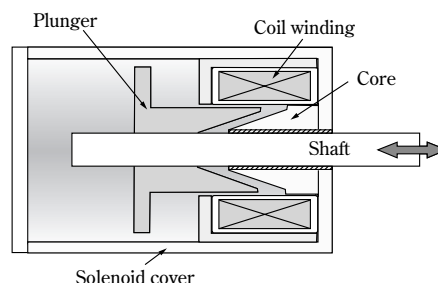


図1 ソレノイド部品の構造例  
Fig. 1 Example of solenoid structure

しかし最近のソレノイド部品では、迅速かつ安定した油圧設定が必要となり、ON-OFF制御に代わってリニア制御が多用される傾向にある<sup>4), 5)</sup>。リニア制御では、制御電流と鉄心材の吸引力 (電磁力) とが比例する必要があり、高磁束密度で低保磁力 (低磁気ヒステリシス) の軟磁性材料が不可欠となる。最新のリニアソレノイド用鉄心材では、SUY-1種 (JIS C 2504) 以上の磁気特性が求められつつあり、ON-OFF制御で用いてきた低炭素鋼では、磁束密度、保磁力ともに要求特性を満足できない状況にある (図2)。

そこで当社では、軟磁性材料の磁気特性に悪影響を及ぼす因子を徹底排除することに取組み、電磁軟鉄としてJISグレードの最良特性 (JIS SUY-0種) を実現することができる純鉄系軟磁性材料ELCH2を1980年代半ばに開発した<sup>6)</sup>。また、鍛造工程を活用しての部品成型と部品機能の両立に取組んだ結果、現在では冷間鍛造用の軟磁性材料として広く使用されるようになってきている。

一方、1990年代後半からは部品形状の複雑化や寸法の高精度化への対応要望が高まってきた。その結果冷間鍛造後の切削加工が必要となり、軟磁性材料の被削性が重視される傾向が強まった。純鉄系材料は磁気特性に優れた反面、通常の炭素鋼に比べて切削加工時の切屑処理性

\*<sup>1</sup> 鉄鋼事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部

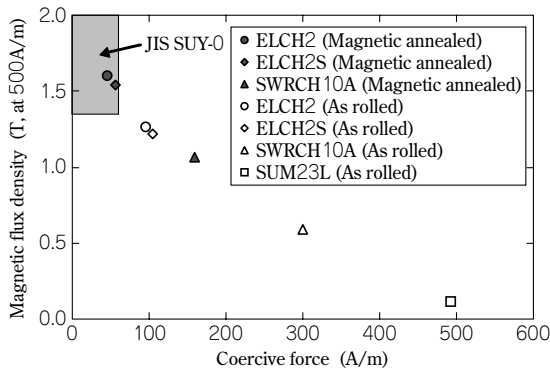


図2 磁気特性の鋼種間比較  
Fig. 2 Comparison of magnetic properties

や工具寿命が低下するため、その対策としてはこれまで、少量のPb添加が行われてきた<sup>7)</sup>。しかし、Pbは環境負荷物質であることから、Pbを使用することなく部品成型を行うことが軟磁性材料にとっての重要な課題であった。

当社では、磁気特性に悪影響を及ぼさない被削性改善手法の研究を進め、Pbフリーの新たな被削性改善鋼ELCH2Sを2001年に開発した<sup>8)</sup>。2004年からは大型電磁クラッチ用鉄心材などでの本格量産を開始し、先行開発した基本鋼とともに、多くの自動車用高機能電磁部品で実用化されている。

## 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金属組織的な因子によっても左右される。とく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移動をピン止めする箇所となることから、磁気特性低下の原因となる<sup>9)</sup>。

このため、ELCH2シリーズでは以下の観点から磁気特性の向上を図った。

- ①高純度の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(≤0.01%, 図3)
- ②結晶粒界面積を低減し、磁壁移動抵抗を低減する。  
⇒Al, Nの低減

また、金属系軟磁性材料は加工性に優れること、すなわち生産性が高いことが利点の一つであるため、次の点も考慮した。

- ③冷間鍛造性の向上⇒Si低減, Mn添加(Sの無害化)
- ④被削性の向上(ELCH2S)⇒S増量(MnSの適量分散)

極低炭素鋼へのS添加量と旋削加工時の工具摩耗量の関係を図4に示す。S量を0.025%程度まで増加させることにより、従来の純鉄系材料(S<0.010%)に比べて工具摩耗量の半減が期待できる。

しかし、図5に示すように、Sを過剰に添加した場合、磁気特性の大幅低下とばらつき拡大が生じ、旧オーステナイト粒界にFeSの析出が認められた<sup>8)</sup>。すなわち、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す、磁気特性を低下させたものと推定できる。このため、被削性改善鋼ELCH2Sでは、Sの増量とともにFeSが残存しないようMn/S比を適正に制御した。

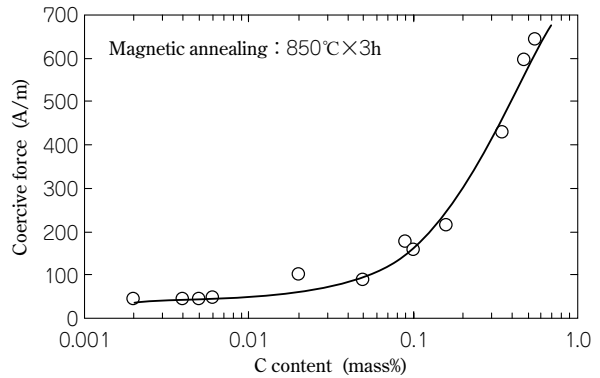


図3 保磁力へのC量の影響  
Fig. 3 C content dependence of coercive force

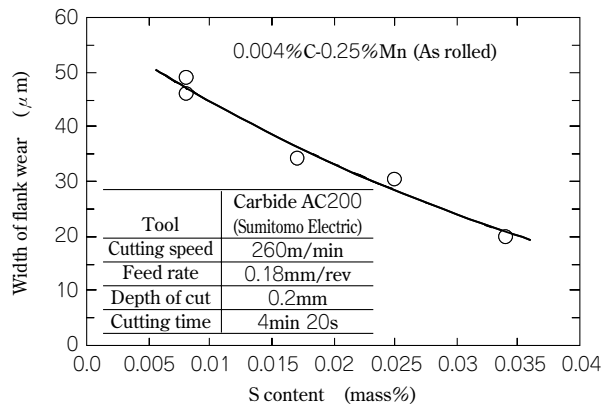


図4 S量と切削工具逃げ面摩耗量の関係  
Fig. 4 Relation between S content and width of flank wear

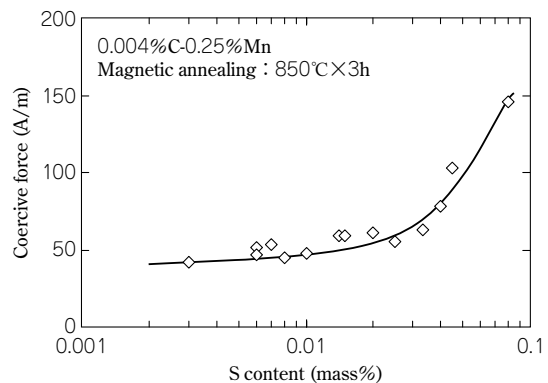


図5 保磁力へのS量の影響  
Fig. 5 S content dependence of coercive force

## 3. 試料および実験方法

基本鋼ELCH2、被削性改善鋼ELCH2S、および比較鋼としてSWRCH10Aの化学成分例を表1に示す。上記の供試材を転炉溶製後、φ20mmの線材に圧延した。この圧延材に対して、直流磁気特性、機械的性質、被削性、および耐食性を評価した。

### 3.1 磁気特性

磁気特性の測定に際しては、供試材からリング状の試験片を作製し、JIS C 2504(電磁軟鉄)に基づいて実施した。測定では自動磁化測定装置(理研電子社製:BHS-40)を用いて初磁化曲線およびヒステリシス曲線を描き、これらから保磁力、透磁率および各磁界の強さでの磁束密度を求めた。なお、測定時における印加磁界の掃

表 1 供試材の化学成分

Table 1 Chemical composition of steels used in this study (mass%)

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

引速度 (200~250 (A/m·s)) 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。

### 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。引張試験に用いた試験片は、JIS Z 2201 (金属材料引張試験片) で規定される 14A 号を供試材より切出した。

### 3.3 冷間鍛造性 (変形能)

開発鋼の変形能を測定するため、側面に切欠を入れた試験片 (φ20×30 mm) 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、切欠から割れが発生しない限界の据込み率で評価した。

### 3.4 被削性

ドリル加工による貫通試験および超硬切削試験を行い、被削性 (バリの高さ、切屑の分断性および切削工具の摩耗量) を評価した。

### 3.5 耐食性

耐食性試験は、JIS Z 2371 (塩水噴霧試験方法) に準拠した 5% 塩水による塩水噴霧試験を行い、試験後に供試材を 70°C のクエン酸アンモニウム 10% 溶液に浸し、錆 (さび) を除去した後の質量変化 (減量) を評価した。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 磁気特性

ELCH2 シリーズおよび SWRCH10A の印加磁界の強さと磁束密度の関係を図 6 に示す。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°C×3 時間とし、真空中 (0.5mmTorr 以下) で実施した。

ELCH2 シリーズでは、比較鋼に比べて磁界印加時の磁束密度が高く、とくに 2,000A/m 以下の磁界領域で顕著な向上が認められる。なお、磁束密度の向上効果が高磁界側で縮小するのは、飽和磁化に近づくに伴い、磁化機構が磁壁移動から回転磁化に移行し、金属組織構造が支配的な磁壁移動の影響が減少するためである。

図 7 に ELCH2 シリーズの磁気焼鈍後の組織比較を示す。いずれも、清浄なフェライト単相組織を呈する。なお、被削性改善鋼 ELCH2S では、MnS が磁気焼鈍時の結晶粒成長のピン止め点として作用することが危惧 (きぐ) された<sup>10)</sup> 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。このため、ELCH2 シリーズでは、熱処理条件が同一であれば、基本鋼と被削性改善鋼とでほぼ同等の磁気特性が確保できると考えられる。

表 2 に ELCH2 シリーズの磁気特性例を示す。基本鋼 ELCH2 および被削性改善鋼 ELCH2S はともに、JIS SUY-0

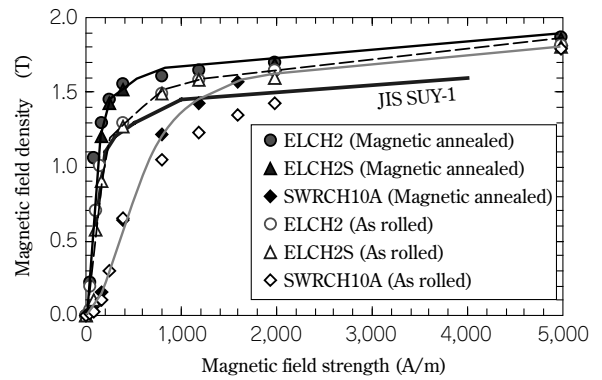


図 6 磁束密度特性

Fig. 6 Magnetic field dependence of magnetic flux density

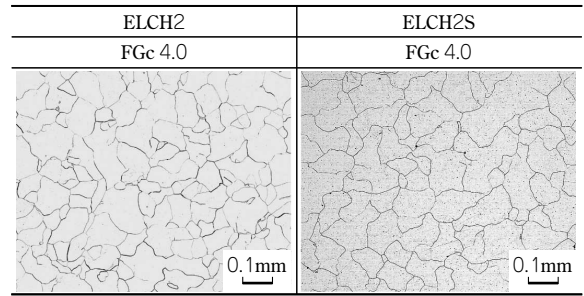


図 7 磁気焼鈍後の断面組織

Fig. 7 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)						Coercive 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

種の優れた磁気特性を満足する。このため、通常の低炭素鋼を使用した場合よりも小さな印加磁界すなわち小電流で同等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察できる。

例えば、電磁部品の動作に必要な磁束密度を 1.6T と仮定すると、SWRCH10A では 1,200A/m の磁界強さが必要であるのに対し、ELCH2 シリーズでは約 400A/m で達成でき、電磁力発生に必要な起磁力エネルギーを約 65% 低減できる。

さらに、図 6 に示したように、ELCH2 シリーズ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 に開発鋼の圧延材での機械的性質を示す。圧延材の引張強さは約 300MPa であり、SWRCH10A の球状化材とほぼ同等である。なお、伸線加工などを施す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。



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 (%)	Reduction area (%)
ELCH2	305	208	38.1	90.1
ELCH2S	306	209	36.7	92.8

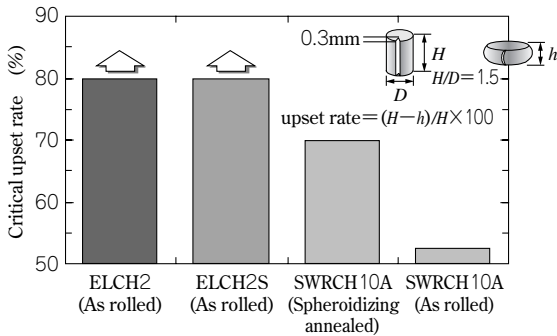


図8 割れ発生限界圧縮率  
Fig. 8 Critical upset rate

#### 4.3 冷間鍛造性

切欠入り試験片において、割れが発生する限界の据え込み率を図8に示す。SWRCH10Aでは、球状化焼鈍材においても限界据え込み率が70%であるのに対し、開発鋼は軟化焼鈍を行わない状態で80%の据え込み加工を行っても割れが発生せず、優れた変形能を有することを確認した。このため、ELCH2シリーズの適用は、冷間鍛造前の軟化熱処理工程の省略など、部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。

#### 4.4 被削性

##### (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図9に示す。被削性改善鋼ELCH2Sでは、基本鋼ELCH2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。ELCH2Sでは、鋼中に分散析出したMnSが切屑中での応力集中源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

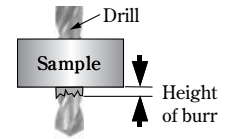
被削性改善鋼ELCH2Sを表5に示した条件で旋削加工した際の切削速度と逃げ面摩耗量の関係を図10示す。同一切削長(800m)で比較すると、摩耗量は切削速度の増加に伴って減少傾向を示し、切削速度を80m/minから700m/minに増加させることによって摩耗量は0.117mmから0.038mmと約1/3に減少した。とくに、切削速度が250m/min程度までの領域において改善効果が大きく、本開発鋼のような純鉄系材料では、250m/min以上の高速で切削加工することが工具摩耗量の軽減に有効であることが判明した。高速切削で摩耗量が減少する主な原因としてつぎの2点が考えられる<sup>11)</sup>。

- i) 加工発熱に伴う温度上昇によって被削材が軟化し、切削抵抗が減少する
- ii) 切削速度が低いと、切削工具への構成刃先の生成が抑制されるため、摩耗が促進される

また図10には、切削速度260m/minでの基本鋼ELCH2

表4 旋削加工試験条件  
Table 4 Conditions for turning 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

図9 切屑とバリの比較  
Fig. 9 Comparison of chip and height of burr

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

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

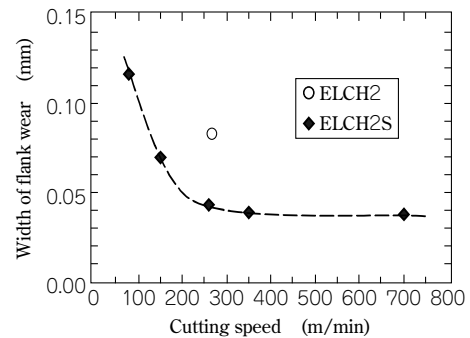


図10 切削速度と逃げ面摩耗量の関係  
Fig.10 Relation between cutting speed and width of flank wear

の工具摩耗量も示した。同一加工条件で比較すると、開発鋼の摩耗量は従来鋼の約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。

#### 4.5 耐食性

開発鋼ELCH2と比較鋼SWRCH10Aを対象とする塩水噴霧試験を行った。図11に腐食減量の変化を示す。開発鋼の腐食減量は比較鋼に比べて約40%少なく、耐食性はSWRCH10Aよりも明らかに優れることが分かる。従来、SWRCH10A相当の材料を用いている部品には問題なく使用できると考えられる。

ELCH2シリーズでは、磁気特性向上を目的に極低炭素化と析出物の生成を抑制して組織を均一化した結果、腐食環境下での局部電池の生成が抑えられ、耐食性が改善したものと考えられる。

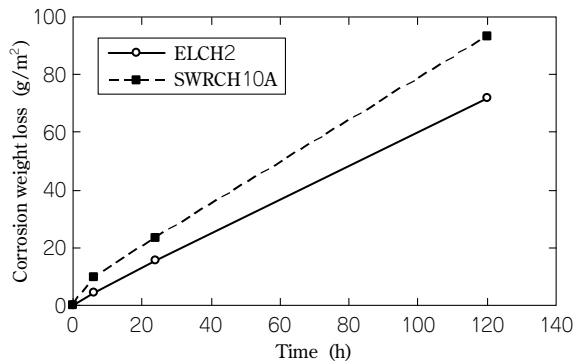


図11 腐食減量  
Fig.11 Corrosion weight loss

## 5. 適用例

ELCH2 シリーズは、電磁制御部品の高性能化・高機能化とともに、部品製造コストの低減にも有用な軟磁性材料である。

これまでに、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採用され、消費電力低減と部品の生産性向上に大きく貢献している<sup>12), 13)</sup>。

**むすび**＝優れた磁気特性と冷間鍛造性を有する純鉄系軟磁性材料 ELCH2 シリーズを開発し、以下に示す特長を確認した。

- ①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が実現できる。

- ②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。

- ③被削性改善鋼では、磁気特性を最優先した基本鋼に比べ、切削加工時のバリと工具摩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。

ハイブリッド車や電気自動車の拡大に伴い、今後も新たな電磁制御部品が創出され、拡大するものと考えられる。電磁部品の高性能化、省電力化および製造コスト低減を可能にする純鉄系軟磁性材 ELCH2 シリーズを提供することによって環境負荷低減の一翼を担い、社会に貢献していきたい。

## 参考文献

- 1) 浜田有啓ほか：三菱電機技報，Vol.61, No.8, (1987), pp.651-656.
- 2) 川延寿継ほか：内燃機関，Vol.26, No.333 (1987), pp.230-241.
- 3) ASM Committee on Magnetically Soft Materials: Metals Handbook, Vol.1, American Society for Metals (1961), pp.785-797.
- 4) 深谷直幸：自動車技術，Vol.58, No.4 (2004), p.48.
- 5) JTEKT Engineering Journal, No.1003 (2007).
- 6) 千葉政道ほか：神戸製鋼技報，Vol.52, No.3 (2002), pp.66-69.
- 7) 加藤哲男ほか：電気製鋼，Vol.38, No.1 (1967), pp.2-8.
- 8) 千葉政道ほか：神戸製鋼技報，Vol.55, No.2 (2005), pp.18-21.
- 9) 近角聡信：強磁性体の物理，裳華房，(1963).
- 10) 尾田善彦ほか：NKK 技報，No.178, (2002), pp.16-20.
- 11) 尾崎勝彦ほか：精密工学会，Vol.52, No.3 (2002), p.66.
- 12) 國井力也ほか：HONDA R&D Technical Review, Vol.16, No.2, (2004), pp.9-16.
- 13) 黒川和司ほか：自動車技術，Vol.59, No.8 (2005), pp.105-108.