

(論文)

# 純鉄系軟磁性材料

## Soft Magnetic Iron Wire

千葉政道(理博)  
Dr. Masamichi Chiba鹿磯正人  
Masato Kaiso

Recently, the demand for a soft magnetic material, which can generate a large electromagnetic force with little electric power, has increased in the growing area of electronically controlled parts for automobiles, etc. In this report, the advantages and the factors that determine electromagnetic properties in soft magnetic iron wire (ELCH2) are described.

まえがき = 近年、自動車分野をはじめとして、環境負荷低減と省エネルギー化が大きな課題となっている。このため、従来よりも精緻なシステム制御が要求されており、各種制御部品の高性能化に対する要望が拡大している。

このうち、ソレノイドやアクチュエータなど電磁力を利用する部品では、磁界を発生させるコイル部のほかに、システムの応答性とエネルギー効率を向上させるため鉄心材が通常用いられている。従来、一般的な電磁部品の鉄心材料には、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、近年の電子制御部品の増加に伴いバッテリーへの負荷が増大しており、一層の省電力化が必須な状況にある。このため各種電磁部品において、軟磁性特性が優れた材料への要望が強まってきている。

本稿では、軟磁性材料の化学成分及び加工工程が磁気特性に及ぼす影響について報告するとともに、当社の純鉄系軟磁性材料(ELCH2, Extra Low carbon Cold Heading wire)の諸特性について紹介する。

### 1. 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ことが知られている<sup>1)</sup>。

このため本開発鋼ELCH2では、以下の観点から磁気特性の向上を図った。

- 清浄なフェライト単層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

また、金属系の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ほかの磁性材料に対する大きな利点の一つであるため、次の点も考慮した。

冷間鍛造性の向上 Si低減, Mn添加(Sの無害化)  
上記の考え方に基づき、磁気特性と冷間鍛造性の向上を図った開発鋼ELCH2について、電磁部品として要求される主特性を評価した。

### 2. 試料及び実験方法

表1に開発鋼であるELCH2及び比較鋼として用いた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。この圧延材を所定の減面率で伸線加工し、磁気焼鈍を行ったあと、直流磁気特性、電気抵抗及び機械的性質を評価した。また、使用環境による影響を把握するため、耐食性試験を実施した。

#### 2.1 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、透磁率及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(200~250A/(m・s))。

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	Al	N
ELCH2	0.005	0.004	0.24	0.008	0.006	0.004	0.0016
JIS SWRCH10A	0.1	0.04	0.45	0.014	0.009	0.050	0.0048

## 2.2 電気抵抗

電気抵抗測定は直流通電による4端子法で行い、通電電流と発生電圧との比から抵抗値を算出した。通電試験には、圧延材から採取した直状試料(2mm<sup>t</sup>×4mm<sup>w</sup>)を用い、電流導入部の電極接続長さは線径の10倍、電圧端子間距離は線径の20倍とした。また通電方向を正逆2通り実施して、接触抵抗、偏流、熱起電力などの影響を除去した。

## 2.3 機械的性質

機械的性質は、常温での引張試験を実施した。引張試験片は、JIS Z2201による9号試験片を切出し試験に供した。

## 2.4 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た試験片(20×30<sup>t</sup>mm)を作製し、1600tf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。

## 2.5 耐食性

耐食性試験は、JIS Z2371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%のクエン酸アンモニウム10%溶液に浸し、錆を除去して得られた減量を評価した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 磁気特性

#### 1) 熱処理条件の影響

図1に、開発鋼 ELCH2 圧延材についての磁束密度特性に及ぼす磁気焼鈍温度の影響を示す。ここで、焼鈍時間はすべて3時間とした。なお、写真1に各試料の磁気焼鈍後の組織写真を示す。焼鈍温度が上昇するに伴い結

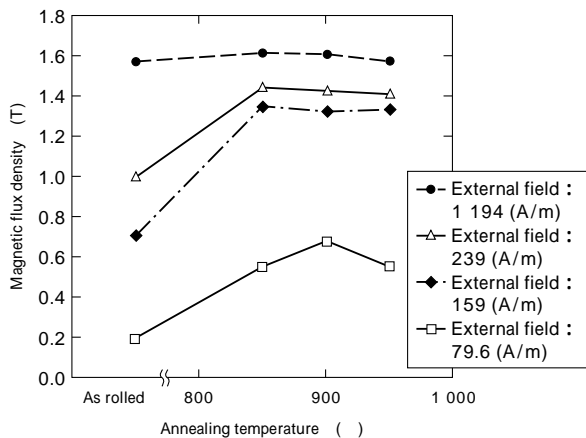


図1 磁束密度と磁気焼鈍温度の関係  
Fig. 1 Effect of annealing temperature on magnetic flux density

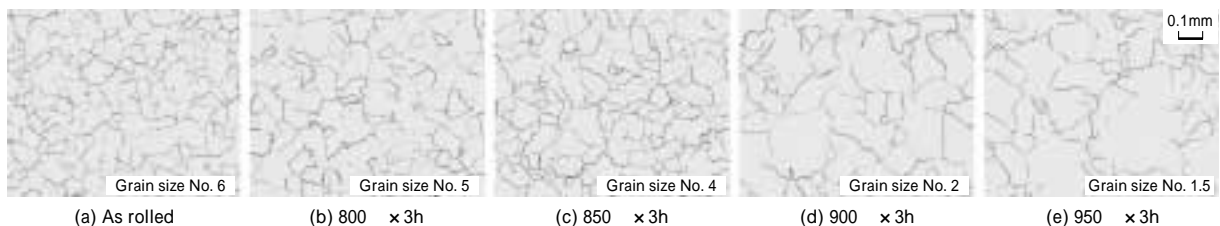


写真1 開発鋼における磁気焼鈍後の断面組織  
Photo 1 Microstructure of developed steels after magnetic annealing

晶粒成長が顕著になり、特に低磁界側での磁束密度が改善することが分かる。これは、結晶粒界面積の減少に伴い、磁壁ピン止めエネルギーが低下した効果と考えられる。ただし、磁気焼鈍温度を950℃まで上げた場合においては、結晶粒径が成長しているにもかかわらず、低磁界側で磁束密度の低下が認められる。この高温焼鈍による磁気特性の低下は、磁気焼鈍過程で組織が相(bcc)から相(fcc)に変態する際に生じた結晶格子のひずみに起因するものと考えられている<sup>2)</sup>。

#### 2) 加工条件の影響

図2に、開発鋼 ELCH2 を伸線加工した際のひずみ量と磁気焼鈍後の保磁力の関係を示す。ひずみが0.1(伸線減面率:約10%)の状態に伸線加工したあと、磁気焼鈍することで保磁力の極小値が得られ、それ以上の加工率では保磁力が増加した。図3に、開発鋼の伸線減面率と磁気焼鈍条件を変えて、結晶粒度と保磁力の関係を調査した結果を示す。フェライト結晶粒度が4番(結晶粒径:約100μm)程度までは、結晶粒が大きくなるに従い保磁力は急激に減少することが分かる。したがって、上記の極小値の出現は、軽加工で導入されたひずみによって結晶粒成長の駆動力が増加したことで、保磁力が改善した結果と考えられる。

一方、開発鋼における結晶粒度と磁束密度の関係を図4に示す。保磁力の場合と同様、フェライト結晶粒度が4番以下の条件で、良好な磁束密度特性が得られることが分かる。ただし、図5に示すように、伸線減面率との関係については、保磁力の場合ほど顕著な影響は認められない。

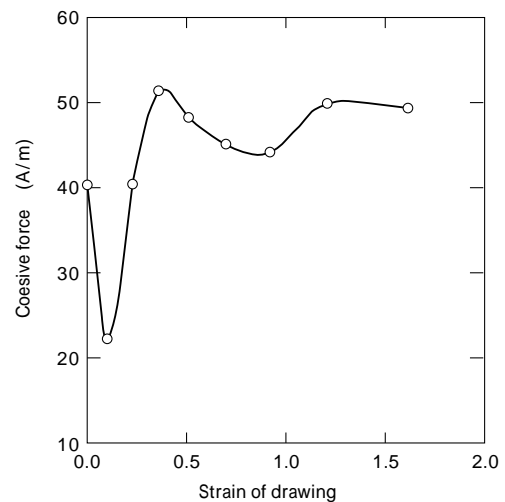


図2 伸線ひずみの保磁力への影響(磁気焼鈍条件:850℃×3時間)  
Fig. 2 Influence of cold reduction on coesive force after magnetic annealing

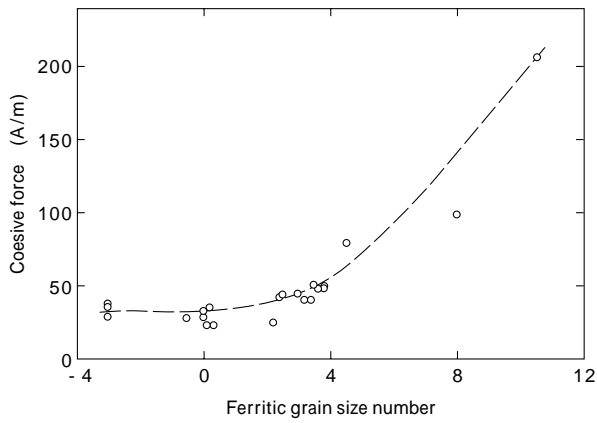


図3 結晶粒度と保磁力の関係  
Fig. 3 Influence of grain size after annealing on coesive force

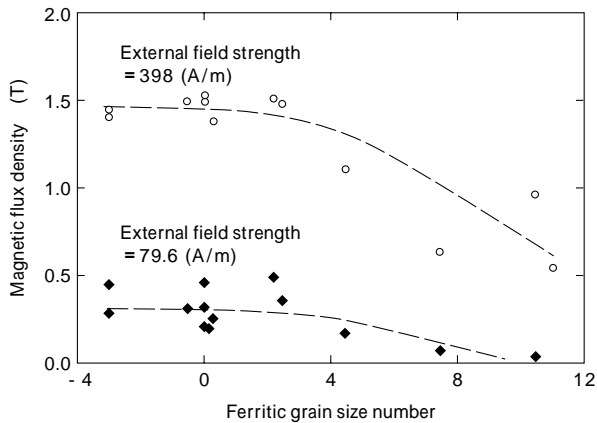


図4 結晶粒度と磁束密度の関係  
Fig. 4 Influence of grain size after annealing on magnetic flux density

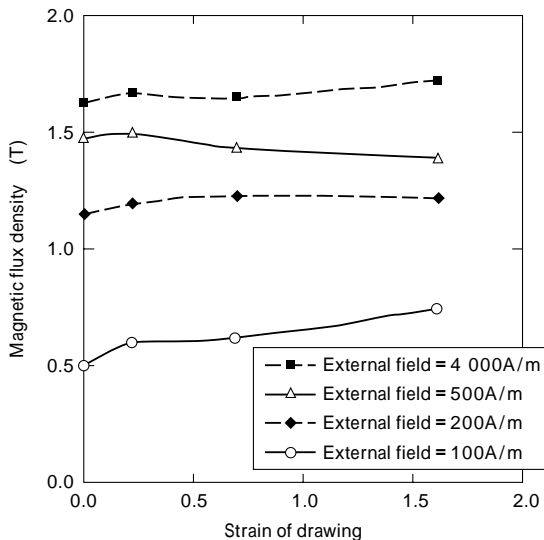


図5 伸線ひずみの磁束密度への影響(磁気焼鈍条件:850 × 3時間)  
Fig. 5 Influence of cold reduction on magnetic flux density after magnetic annealing

### 3) 既存鋼種との比較

図6に開発鋼ELCH2と比較鋼であるSWRCH10Aについて、印加磁界と磁束密度の関係を示す。ここで、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時間とした。飽和磁束密度は、双方とも約1.6Tで同等である。しかし、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

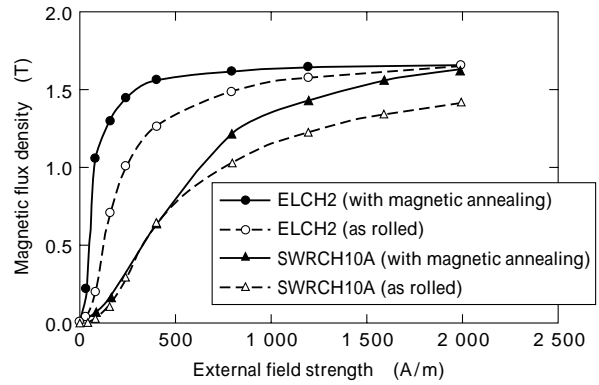


図6 磁束密度特性  
Fig. 6 External field strength dependence of magnetic flux density

表2 ELCH2の磁束密度特性(磁気焼鈍材)  
Table 2 Magnetic properties of ELCH2

Steel	Magnetic flux density (T)					Coesive force Hc (A/m)
	B100	B200	B300	B500	B1000	
ELCH2	0.92	1.30	1.50	1.60	1.65	45
JIS SWRCH10A	0.08	0.25	0.48	0.8	1.35	160
JIS SUY-0	0.90	1.15	1.25	1.35	1.45	63.7

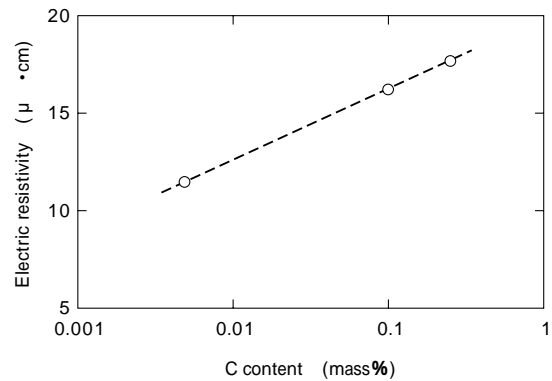


図7 電気抵抗へのC量の影響  
Fig. 7 Influence of carbon content on the electric resistivity

られることが分かる。表2に開発鋼ELCH2と比較鋼SWRCH10Aの主な磁気特性を示す。開発鋼は、JIS SUY-0種を満足する優れた磁気特性を有することから、印加磁界を小さくしても同一の電磁力を得ることが期待できる。例えば、動作磁界が500 A/mで、制御に必要な磁気エネルギーが等しいと仮定した場合、開発鋼では鉄心材の重量をSWRCH10Aに比べて約1/2に軽量化することが可能と推定できる。

また図6に示すように、開発鋼ELCH2では磁気焼鈍を行わない状態でも、磁気焼鈍したSWRCH10A相当の磁気特性を満足する。よって、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。

### 3.2 電気抵抗

圧延材を用いて、直流四端子法により電気抵抗を測定した結果を図7に示す。開発鋼ELCH2の比抵抗は約11 μ·cmであり、SWRCH10Aに比べ約30%低く、工業用Niとほぼ同水準である。電気抵抗が低いと、定常的に交流磁界のかかる用途では渦電流損失の増加を招くため望ましくないが、直流用途に限定すれば、ジュール発

熱によるエネルギー損失の低減や通電電流密度の増加が期待できるため、部品の小型化・軽量化に寄与できるものと考えられる。

### 3.3 機械的性質

図8に開発鋼ELCH2の伸線加工特性を示す。圧延材の引張強さは約300N/mm<sup>2</sup>であり、SWRCH10Aの球状化材とほぼ同等である。伸線加工によって引張強さは上昇するが磁気焼鈍時に軟化するため、表3に示すように引張強さは伸線減面率によらず230N/mm<sup>2</sup>程度となる。

### 3.4 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9に示す。比較鋼では、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、割れが発生しないことを確認した。このため、開発鋼ELCH2を適用することで、冷間鍛造前の熱処理工程の省略や切削加工の負荷を大幅に軽減でき、部品製造コスト

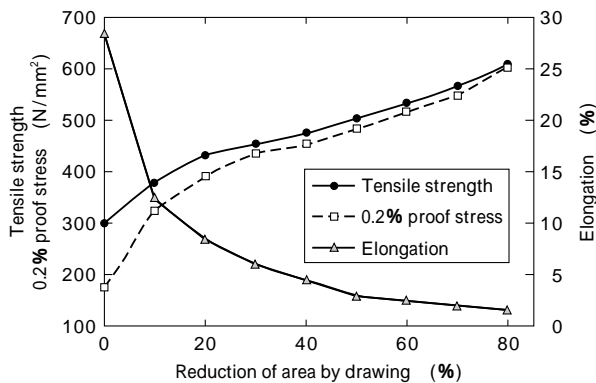


図8 ELCH2の伸線加工特性  
Fig. 8 Mechanical properties of ELCH2 wire drawn in various reduction area

表3 ELCH2の機械的性質  
Table 3 Mechanical properties of ELCH2 after magnetic annealing

1st reduction of area	Annealing condition	2nd reduction of area (%)	Magnetic annealing	TS (N/mm <sup>2</sup> )	EI. (%)
40	780 × 3h	15	850 × 3h	248	28.8
65	780 × 3h	15	850 × 3h	239	30.6
80	780 × 3h	15	850 × 3h	233	30.9

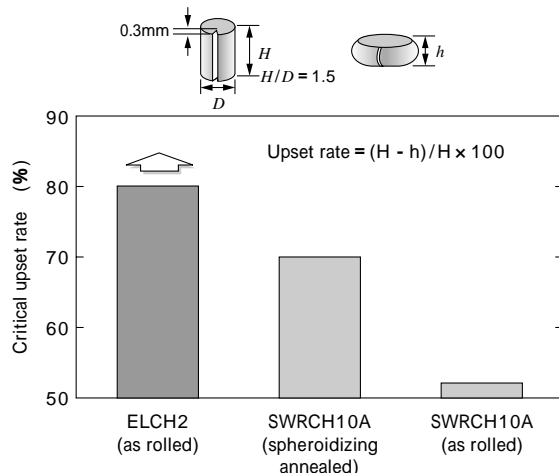


図9 割れ発生限界圧縮率  
Fig. 9 Critical upset rate

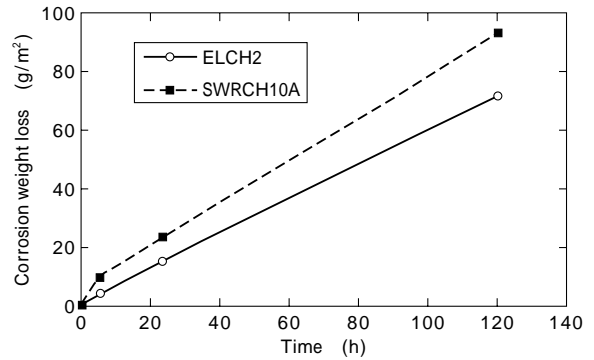


図10 腐食減量  
Fig.10 Corrosion weight loss

の低減に極めて有用であると考えられる。

### 3.5 耐食性

SWRCH10Aと比較して塩水噴霧試験を行った。図10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。

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ことにより、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。

むすび = 磁気特性と冷間鍛造性の双方に優れた純鉄系の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、部品の発熱量の低減や制御回路への負荷軽減を実現できる。

複雑形状部品を冷間鍛造で成型できる可能性があることから、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。

このため、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として、純鉄系軟磁性材料の適用は拡大していくと見込まれる。

### 参考文献

- 1) 福田方勝：特殊鋼，Vol.51, No.6 (2002) p.4.
- 2) 加藤哲男ほか：電気製鋼，Vol.38, No.1 (1967) p.2.