

(解説)

純鉄系軟磁性材料の鍛造加工ひずみの影響を考慮した磁場解析による効果検証

笠井信吾*¹・千葉政道*²(博士(理学))・森田晋也*³・北山 巧*³

Benefit Estimation of Soft-magnetic Pure Iron by Magnetic Field Analysis Considering Effect of Forging Strain

Shingo KASAI・Dr. Masamichi CHIBA・Shinya MORITA・Takumi KITAYAMA

要旨

環境意識の高まりからカーボンニュートラルを目指す動きが拡大している。電動化の進展により使用量の増加が見込まれる軟磁性材料では、磁気焼鈍とよばれる熱処理工程の省略がCO₂排出低減対策の一つに挙げられる。当社の純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズは、磁気焼鈍無しでも低炭素鋼の磁気焼鈍材並みの磁気特性を持つため、低炭素鋼の熱処理省略材として期待できる。本稿では、鍛造解析と磁場解析を用いて、ソレノイド鉄心を低炭素鋼の磁気焼鈍材からELCH2の冷間鍛造/焼鈍省略品に変更した場合の部品特性を比較した。その結果、低電流時の電磁力は同等となり、高電流時の電磁力はELCH2磁気焼鈍省略材の方が低炭素鋼の磁気焼鈍材より高くなったので紹介する。

Abstract

The movement toward carbon neutrality is expanding as a result of heightened environmental awareness. For soft-magnetic materials, whose usage is expected to increase as electrification progresses, the omission of the heat-treatment step called magnetic annealing is regarded as one of the measures for reducing the amount of CO₂ produced by the manufacturing process. Kobe Steel's soft-magnetic pure iron, the ELCH2 series, has magnetic properties comparable to those of the magnetic-annealed material of low-carbon steel, even without magnetic annealing, and is being looked to as a non-heat-treated material of low-carbon steel. Using forging analysis and magnetic field analysis, a comparison has been made among the component characteristics when a solenoid iron core is changed from magnetic-annealed material of low-carbon steel to as-cold-forged material of ELCH2. This paper introduces the results indicating that the ELCH2, even if the magnetic annealing is omitted, achieves the same electromagnetic force at low current and also achieves higher electromagnetic force at high current than what is achieved by the magnetic-annealed material of low-carbon steel.

検索用キーワード

軟磁性材料, ELCH2, 鍛造, 焼鈍省略, カーボンニュートラル

まえがき = 地球温暖化対策などの環境意識の高まりから、自動車分野を中心に電動化が急速に進みつつある¹⁾。電動化に伴う電磁機器の小型軽量化・高性能化などのニーズに対して、当社では鉄が持っている磁気特性を最大限に活用した純鉄系軟磁性材料の開発を進めている。当社の純鉄系軟磁性材料の適用周波数域と磁束密度域のイメージを図1に示す。

当社製品には、直流用途を中心に実績のある純鉄系軟磁性材料「ELCH2シリーズ」(線材・棒鋼)、交流用途で電装系の磁性部品などに実績のある純鉄系の「磁性鉄粉(マグメル)」がある。また、交流磁気特性を低下させる渦電流を低減するために、線材の線径を小さくした「純鉄系磁性細線」、板厚を薄くした「純鉄鋼板」を開発しており、用途に適した純鉄系軟磁性材料を提案できる体制づくりを進めている。

本稿では、その中の一つである純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズを取り上げる。ELCH2シリーズは、リニアソレノイドや電磁クラッチなどの鉄心材として用いられ、電磁制御部品の高性能化に貢献している材料である。1章ではELCH2シリーズの特長(優れた磁気特性・

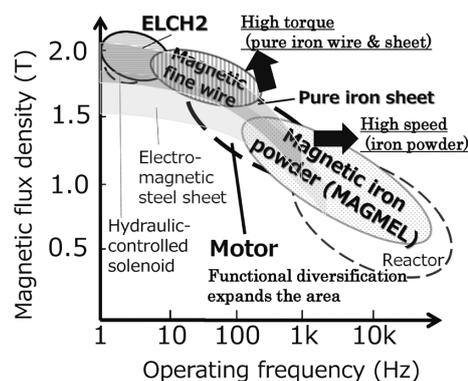


図1 適用周波数領域と磁束密度

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

冷間鍛造性)、2章ではカーボンニュートラルによる磁気焼鈍省略のニーズ拡大を想定し、冷間鍛造加工によるひずみを考慮した磁場解析結果について述べる。

1. 純鉄系軟磁性材料ELCH2シリーズ

1.1 化学成分

表1に、ELCH2シリーズ(ELCH2およびELCH2S)

*¹ 鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット *² 鉄鋼アルミ事業部門 技術開発センター 線材条鋼開発部 *³ 技術開発本部 応用物理研究所

表 1 磁性材料の化学成分例

Table 1 Example of chemical composition

Priority	Steel grade	C	Si	Mn	P	S
Magnetic properties	ELCH2	0.005	0.004	0.25	0.009	0.008
Machinability	ELCH2S	0.005	0.004	0.26	0.010	0.025
JIS SUY		≤0.03	≤0.2	≤0.5	≤0.03	≤0.03

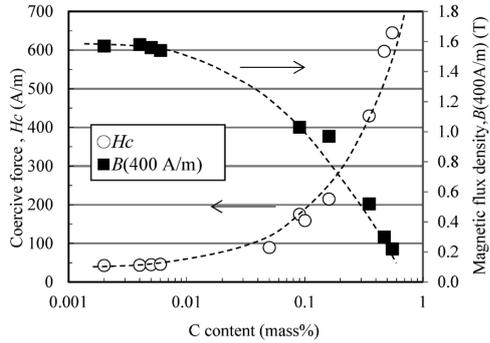


図 2 磁気特性への炭素含有量の影響²⁾

Fig.2 Carbon content dependence of magnetic properties²⁾

の化学成分例と、JIS電磁軟鉄SUYの成分規格を示す。

ELCH2シリーズは極低炭素の純鉄系軟磁性材料であり、磁気特性に悪影響を及ぼす因子を可能な限り低減することで強磁性の起源となる磁気モーメントを増加させ、低磁束領域から高磁束領域まで優れた磁気特性（高磁束密度・低保磁力）を実現している。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。炭素量の減少に伴い強磁性を持つフェライト相が増加するため、磁束密度と保磁力の両方が改善している²⁾。また、冷間鍛造性向上のために、Siを低減してMnを添加していることも特長である³⁾。

ELCH2Sは快削性改善元素のSを少量添加しており、ELCH2に比べて工具摩耗量の半減が期待できる鋼種である。Sを過剰に添加すると、旧オーステナイト粒界にFeSが析出して磁気特性を低下させるため、FeSが析出しないようにMn/S比を適正に制御している⁴⁾。

1.2 ミクロ組織

磁気特性を左右する重要因子として、材料中の磁壁移動がある。磁壁は外部磁界の変化に応じて材料中を移動していくが、磁気エネルギーの低い結晶粒界や析出物、転位などの格子欠陥があると、移動が妨げられて磁気特性低下を招くことが知られている⁵⁾。このため、圧延・伸線・鍛造・切削などの部品加工工程により生じた格子欠陥を回復させ、さらに結晶粒を粗大化させることを目的とした「磁気焼鈍」と呼ばれる熱処理を行うことが一般的である。

図3にELCH2の磁気焼鈍前後の平均粒径と保磁力の関係、図4にELCH2圧延材の磁気焼鈍前後の組織とフェライト結晶粒度を示す。磁気焼鈍により結晶粒径が粗大化することや、粒径が大きいほど保磁力が減少することがわかる。結晶粒は焼鈍温度が高いほど成長するが、ELCH2シリーズのAc3点が約910℃にあるため過熱には注意を要する。焼鈍温度が高すぎるとフェライトの一部がオーステナイトに変態し始め、さらにAc3点を超えるとオーステナイト単相となり、冷却過程における微細なフェライト相の生成に繋がるため、磁気特性は悪化する。

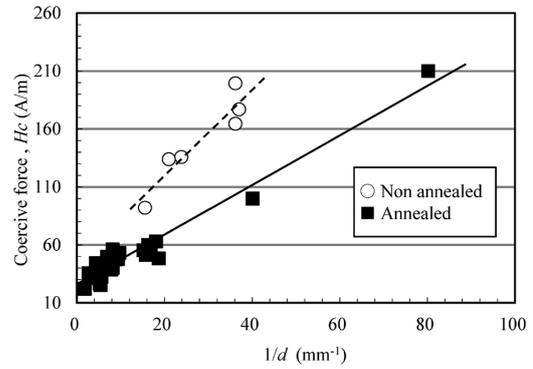
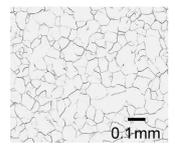
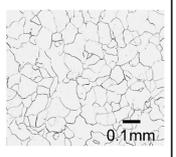


図 3 結晶粒径と保磁力の関係²⁾

Fig.3 Relation between grain size and coercive force²⁾

Magnetic annealed	Non-annealed	850℃×3 h
Ferrite grain size number	6.0	4.0
Microstructure		

・Magnetic annealed ⇒ furnace cooling (cooling speed < 100℃/s)

図 4 磁気焼鈍前後の組織

Fig.4 Microstructure before and after magnetic annealing

表 2 初磁化曲線データと保磁力の例

Table 2 Example of magnetic properties

Steel		Magnetic flux density (T)				Hc (A/m)
		100 A/m	500 A/m	1,000 A/m	4,000 A/m	
Magnetic annealed	ELCH2	1.22	1.58	1.64	1.82	45
	ELCH2S	1.09	1.53	1.59	1.80	56
	S10C	0.45	1.40	1.54	1.74	86
Non annealed	ELCH2	0.32	1.32	1.54	1.76	96
	ELCH2S	0.23	1.29	1.54	1.76	105
JIS	SUY-0	0.90	1.35	1.45	1.60	≤60

る。磁気焼鈍はフェライト単相域の温度範囲とすることが望ましく、加熱炉の温度ばらつきを考慮して850℃付近で行うことが望ましい。

1.3 磁気特性

表2に、ELCH2シリーズの磁気焼鈍前後と低炭素鋼S10Cの初磁化特性、およびJIS電磁軟鉄の最高グレードであるJIS SUY-0の特性下限値を示す。磁気焼鈍後のELCH2シリーズはSUY-0の規格を満足する磁束密度を有し、電磁部品の小型軽量化・高出力化に貢献できる特性を持つ。また、磁気焼鈍なしでも、磁気焼鈍後のS10Cと同等レベルであるため、低炭素鋼の磁気焼鈍省略による生産性の向上やカーボンニュートラルへの貢献が期待できる鋼材でもある。

1.4 冷間鍛造性と焼鈍後組織への影響

ELCH2シリーズは、高延性で割れが発生しにくい特長を持つ。図5に、円柱試験片に切欠を入れた過酷な条件下における、ELCH2とS10Cの割れ発生限界圧縮率の比較例を示す。ELCH2シリーズは圧延ままでもS10C球状化焼鈍材に比べて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することが可能である。

いっぽう、冷間加工によるひずみエネルギーは、結晶粒成長の駆動力を増加させるため⁶⁾、ひずみ分布は磁気

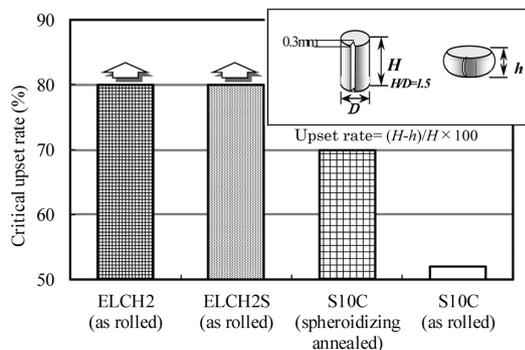


図5 割れ発生限界圧縮率²⁾
Fig.5 Comparison of critical upset rate²⁾

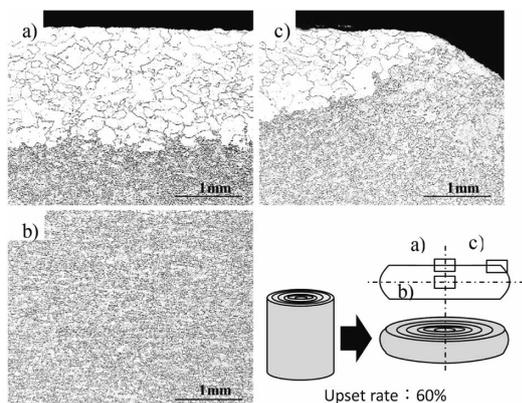


図6 圧縮試験片の磁気焼鈍後の断面組織²⁾
Fig.6 Microstructure of compressed specimen after magnetic annealing²⁾

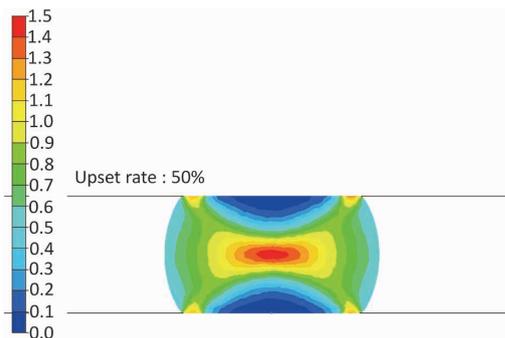


図7 相当ひずみの解析結果 (冷間据え込み加工)
Fig.7 FEM-analysis of equivalent strain (cold upsetting)

焼鈍後の結晶粒径に影響する。図6に冷間据え込み加工後に磁気焼鈍したサンプルの断面組織、図7に冷間据え込み加工時の相当ひずみ分布の解析結果を示す。塑性加工解析ソフトFORGE(Transvalor社の商標)を用い、材料をELCH2として軸対称モデルによる解析を行った。固定端面付近のひずみが小さい部分(図6 a, c 上部)の結晶粒は粗大化しているが、中央の大きい部分(図6 b)はひずみ影響が残り粗大化していないことがわかる。磁気回路の磁束集中部など、部品内で磁気特性を重視する部位の結晶粒径を最大化できるひずみ分布や焼鈍条件とすることが、部品の特性向上には必要となる。

1.5 温度依存性

ELCH2シリーズの保磁力の温度依存性を図8、磁束密度の依存性を図9に示す。測定の詳細条件が異なるため、室温特性を100%に規格化してプロットしている。

磁束密度には顕著な差が見られず、保磁力には低温側において悪化が見られた。低温側の保磁力が悪化する原

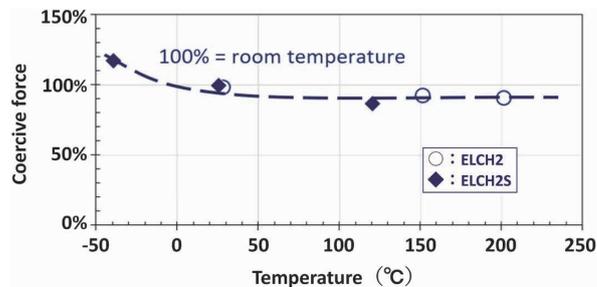


図8 保磁力の温度依存性
Fig.8 Temperature dependence of coercive force

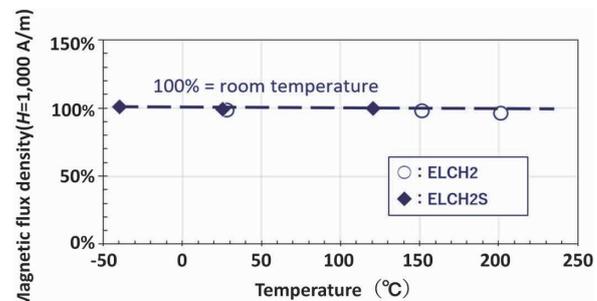


図9 磁束密度の温度依存性 (H=1,000 A/m)
Fig.9 Temperature dependence of magnetic flux density (H=1,000 A/m)

因として、磁気異方性係数の増加⁷⁾や、試験片の熱収縮(内部ひずみ増加)の影響が考えられる。軟磁性材料の性能を発揮するには、製造工程や使用環境を考慮することが重要である。

2. 電磁部品への適用検討例

電磁部品の機能最大化と生産性を両立させるためには、磁性材料の特性を最大限に活用できる加工条件の設定が重要である。本章では、カーボンニュートラルの観点から熱供給におけるエネルギー低減が検討されている⁸⁾ことを受け、ELCH2を冷間鍛造加工したまま磁気焼鈍を省略して使用することを想定し、冷間鍛造ひずみが部品特性に与える影響を磁場解析した事例について述べる。磁場解析には、電磁界解析ソフトJMAGを使用した。

2.1 冷間鍛造による磁気特性の変化

冷間加工に伴うひずみは、磁気モーメントの減少に加えて、磁壁のピンニングとして作用するため、冷間加工後の磁気特性は低下する。表3に、φ44 mm × 50 mmのELCH2圧延材サンプルを室温で冷間鍛造(据え込み加工)した後、サンプル軸方向中央部からφ38 mm × φ30 mm × 厚み4 mmのリング形状を採取し測定した磁気特性を示す。圧縮率の増加に従ってひずみが増加し、磁気特性は悪化していく。

2.2 解析方法と結果

φ16.2 mm × 55 mm円柱鉄心の上側を中心に冷間鍛造したサンプルの形状概略図を図10、鍛造解析の相当ひずみコンター図を図11に示す。変形量の大きい上側のひずみが大きいことがわかる。電磁部品として上記の鉄心を二つ突き合わせ、その外側にコイルと外筒を配置したソレノイドをモデルとし、鉄心をELCH2(ひずみ考慮なし、磁気焼鈍なし)、ELCH2(ひずみ考慮、磁気焼鈍なし)、S10C(ひずみ考慮なし、磁気焼鈍あり)と

表3 ELCH2(磁気焼鈍無し)の冷間据え込み加工後の磁気特性

Table 3 Examples of magnetic properties of ELCH2 applied work strain by cold upsetting

Steel	Upset rate	Magnetic flux density (T)				Hc (A/m)
		100 A/m	500 A/m	800 A/m	5,000 A/m	
ELCH2 non magnetic annealed	0%	0.39	1.24	1.45	1.79	91
	20%	0.04	0.80	1.03	1.74	178
	40%	0.03	0.71	1.01	1.74	218
	60%	0.02	0.61	0.96	1.73	228

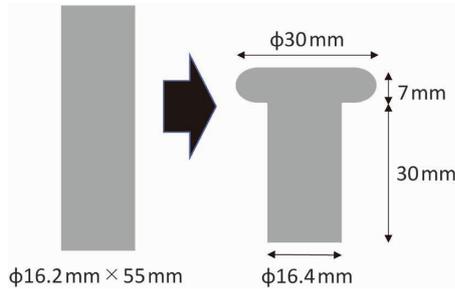


図10 据え込み加工による鉄心形状

Fig.10 Shape of iron core after cold upsetting process

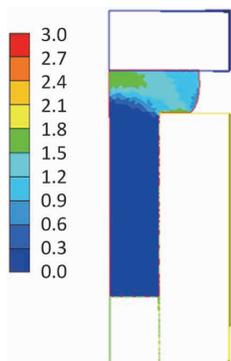


図11 冷間据え込み加工での相当ひずみの解析結果

Fig.11 Calculated equivalent strain in cold upsetting

した場合の鉄心間の電磁力を解析して比較した。解析は、①軸対称の鍛造解析をFORGEで行い、ひずみ分布データを出力、②ひずみ分布データをJMAGに受け渡し、各部位の磁気特性をひずみ分布を参照して測定データより内挿、③軸対称の磁場解析をJMAGで行い、電磁力を出力、の順序で実施した。コイル電流0.5 A通電時の磁束密度コンター図を図12、電磁力の解析結果を図13に示す。

ELCH2のひずみ考慮有無のコンター図を比較すると、考慮有りの磁束がツバ根本角部に集中している。これは鍛造加工のひずみが大きい頭頂部の磁気特性が低下したためであり、角部集中による磁気飽和がわずかに電磁力を低下させている。ひずみ影響であることは、ELCH2とS10Cのひずみ無し同士のコンター図が同様であることからわかる。電磁力解析の結果から、高電流領域ではひずみの有無にかかわらずELCH2の方がS10Cより大きな電磁力が得られている。これは、高磁界側の磁束密度はELCH2の方が優れている(表2)ためである。ひずみを考慮した解析を行うことで特性変化の原因がわかり、角に丸みをつける等の飽和を緩和する対策ができることから、焼鈍省略したELCH2鍛造加工品においてS10C焼鈍品と同等の性能を得ることは可能と考えられる。

本結果から、S10C切削加工品(磁気焼鈍あり)をELCH2の鍛造加工品(磁気焼鈍なし)に変更することで、

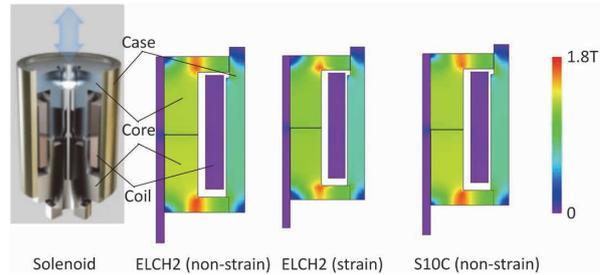


図12 ソレノイド部品での磁束密度分布例

Fig.12 Magnetic flux density distribution in solenoid components

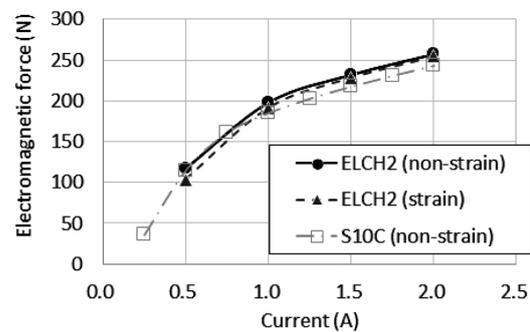


図13 電磁力解析結果

Fig.13 Estimated magnetic force by FEM analysis

部品特性を同程度としたまま、切削から鍛造に工程変更することによる材料歩留りの向上、磁気焼鈍省略による生産性向上およびエネルギー低減の可能性を示すことができました。

引き続き、製造工程を考慮した部品機能の最大化や生産性向上に解析技術を活用し、ソリューションの提案を行うことで、カーボンニュートラルの実現に貢献していく。

むすび = 当社の純鉄系磁性材料ELCH2シリーズの特長を紹介するとともに、熱処理(軟化焼鈍および磁気焼鈍)省略や材料歩留り向上のニーズに対して、低炭素鋼の切削加工品(磁気焼鈍あり)をELCH2の鍛造加工品(磁気焼鈍なし)に変更できる可能性を示した。今後も、部品の製造工程にまで踏み込んだ最適条件をソリューションとして提案し、カーボンニュートラルの実現などの課題解決に貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省.自動車新時代戦略会議(第1回)資料. 2018.
- 2) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 3) 千葉政道. 特殊鋼. 2015, Vol.64, No.2, p.24-27.
- 4) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2005, Vol.55, No.2, p.18-21.
- 5) 岡本祥一. 磁気と材料. 共立出版. 1988, p.72.
- 6) 邦武立郎ほか. 日本金属学会会報. 1982, Vol.21, No.8, p.589-596.
- 7) 珪素鋼板特別委員会. 電気学会雑誌. 1954, Vol.74, No.790, p.822-830.
- 8) NEDO. TSC Foresight. 2020, Vol.101.