



入門講座

電磁鋼板入門－2

無方向性電磁鋼板の基礎知識

Basic Knowledge of Non-oriented Electrical Steel Sheet

大久保智幸

Tomoyuki Okubo

JFE スチール (株)

スチール研究所

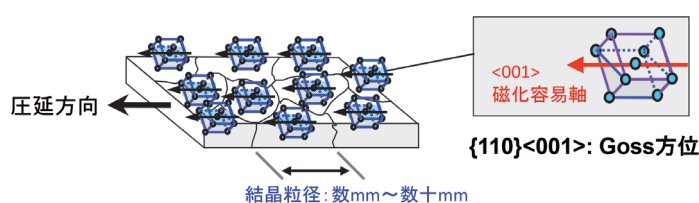
電磁鋼板研究部 課長

1 はじめに

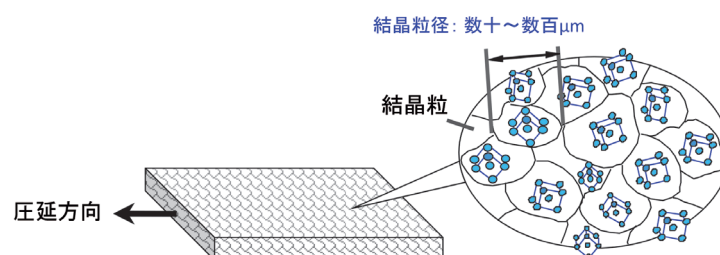
電磁鋼板（けい素鋼板）はFe-Si合金の総称であり、「方向性電磁鋼板」と「無方向性電磁鋼板」の2種類に大別される。このうち、無方向性電磁鋼板は主にモータの鉄心材料として用いられる軟磁性材料である。日本国内の電力消費量の約6割がモータによって消費されており、仮にすべてのモータ効率を1ポイント向上させることができれば50万kWクラスの原発1基分の省エネ効果に相当するとされる¹⁾。鉄心材料の磁気特性はモータ効率に強い影響を及ぼすため、優れた無方向性電磁鋼板を開発・供給することは世界の省エネルギー化に大きなインパクトを与えることになる。特に近年はCO₂排出量削減の観点から自動車の電動化に注目が集まっており、電気自動車（EV：Electric Vehicle）やハイブリッド自動

車（HEV：Hybrid Electric Vehicle）の駆動モータに用いられるハイグレード材の需要が急増している。

本入門講座では無方向性電磁鋼板について解説を行うが、まず方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板の違いについて簡単に述べておく。両者の模式図を図1に示す。両者の本質的な違いは、結晶方位の違いに起因する磁気特性の面内異方性にある。Feの各結晶方位の磁化特性を図2に示す²⁾。〈111〉や〈011〉が磁化しにくい性質を持つ一方、〈001〉軸は非常に磁化しやすいために「磁化容易軸」と呼ばれる。方向性電磁鋼板の結晶方位は{110}〈001〉、いわゆるGoss方位に集積しており、磁化容易軸である〈001〉が圧延方向に強く配向している。このため、圧延方向の磁気特性が特に優れるという特徴があり、変圧器などの静止機の鉄心材料に適している。しかし、圧延方向以外の磁気特性は劣るためモータなどの回転機



(a) 方向性電磁鋼板



(b) 無方向性電磁鋼板

図1 方向性電磁鋼板と無方向性電磁鋼板の比較 (Online version in color.)

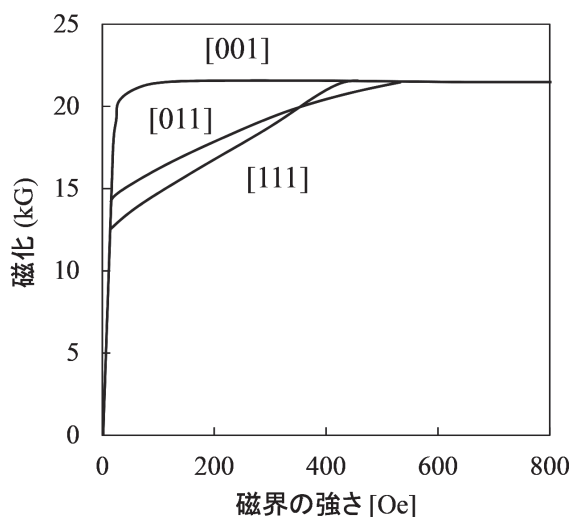


図2 Feの各方位の磁化曲線

に適用することは難しい。これに対して、比較的ランダムな結晶方位を有する無方向性電磁鋼板は磁気特性の面内異方性が小さく、モータ鉄心に適した材料である。EV, HEVの駆動モータでは約3 mass%のSiを含有するハイグレード無方向性電磁鋼板が使用されている。以下、本解説記事ではmass%を単に%と表記する。

2 無方向性電磁鋼板への要求特性

モータの鉄心材料として、無方向性電磁鋼板にどのような特性が求められるのかを確認しておこう。モータは電気エネルギーを運動エネルギーに変換する装置であり、①変換効率が高いこと、②大きなトルクを発生させることが求められる。したがって、鉄心材料である無方向性電磁鋼板には①励磁にともなうエネルギー損失・発熱が小さいこと（低鉄損）、および②強い電磁石になること（高磁束密度）がそれぞれ求められる。どちらの特性を重視するかはモータの形式や設計思想によって異なるが、EV, HEVの駆動モータでは低鉄損化の要求がきわめて強い。低鉄損材を用いることでモータ効率を高め、電費や燃費を改善できるためである。特にEVは航続距離を延ばすために高価なバッテリーが多量に必要であることが課題になっているため、心臓部である駆動モータには高効率化が強く求められている。

さて、鉄損は渦電流損とヒステリシス損で構成され、前者は周波数の2乗、後者は周波数の1乗に比例する。EV, HEVの駆動モータは回転数が高く励磁周波数が高いため、特に渦電流損の低減が重要になる。交流励磁で発生する古典渦電流損は次の式で表される。

$$W = (\pi B_m f t)^2 / 6\rho \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 B_m ：最大磁束密度、 f ：周波数、 t ：板厚、 ρ ：固有抵抗である。式(1)から、渦電流損を低減するためには材料の固有抵抗を高くし、板厚を薄くすることが有効であることがわかる。また、ヒステリシス損は準静的な磁壁移動にともなうエネルギー損失に対応するものであり、磁壁移動を阻害する要因を排除することで低減することができる。例えば、歪・残留応力を少なくすること、またSやNなど第2相粒子を形成する不純物元素を低減することがヒステリシス損低減に有効である。

したがって低鉄損材を得るための基本的な考え方は、Siを添加して固有抵抗を高めること、冷間圧延の仕上げ厚を薄くすること、歪・残留応力や不純物を低減することになる。

3 材料特性に及ぼすSiの影響

無方向性電磁鋼板の材料設計において、Siはもっとも重要な合金元素である。固有抵抗と飽和磁化に及ぼすSiの影響を図3に示す³⁾。Siは鋼の固有抵抗を増加させるうえでもっとも有効な元素のひとつであり、含有量増加にともない固有抵抗はほぼ線形で増加する。式(1)に示されるように、この効果によって電磁鋼板の渦電流損は低減する。これに対して、飽和磁化はSiの添加にともなって減少してしまう。これは非磁性元素であるSiがFeの磁化モーメントを希釈しているように見えるため、希釈効果と呼ばれることもある。この効果によって、電磁鋼板の磁束密度は減少する。したがって、Si量を調整するだけでは低鉄損と高磁束密度を両立することはできない。

図4に、引張強さに及ぼすSiの影響を示す³⁾。よく知られている通りSiは固溶強化能の高い元素であり、添加によって材料の強度を増加させる。また、Siの添加にともなって脆性延性遷移温度が上昇するため、脆性破壊が起こりやすくなっていく側面もある。高速回転するモータにおいては、遠心力によってロータ（回転子）が塑性変形するリスクがあるため、モータ設計者にとっては鉄心材料の強度は高いほうが好ましい。しかし鉄鋼メーカーにとっては頭の痛い問題となり、硬くて脆い高Si鋼を冷間圧延で薄手化することは極めて難しい課題となる。このような事情により、市販されている電磁鋼板のSi量は最大で3%程度に制限されている。

磁性材料は磁化とともに伸縮する性質があり、この現象を磁歪と呼ぶ。磁歪はヒステリシス損発生の一因となり、かつ騒音の原因にもなるため、軟磁性材料としては小さいことが望ましい。Siが飽和磁歪に及ぼす影響を図5に示す^{4,5)}。6.5% Si鋼は磁歪がゼロになる材料であり、極めて優れた軟磁気特性を示すことが1930年代から知られていた。しかしながら上述した通り、このような高Si鋼はきわめて硬く脆い性質が

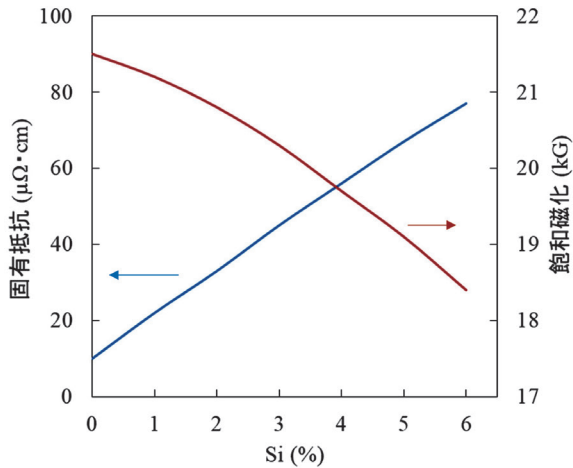


図3 固有抵抗、飽和磁化に及ぼすSiの影響 (Online version in color.)

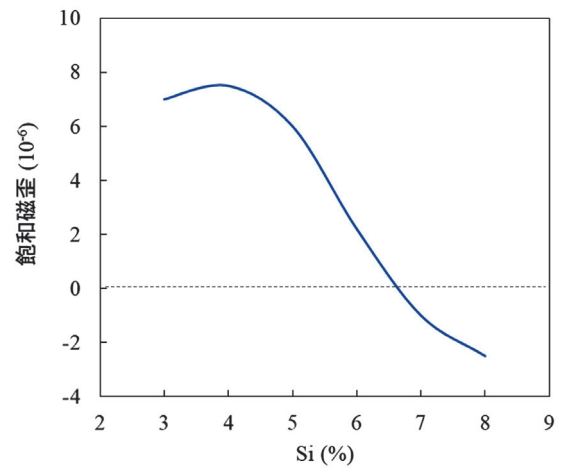


図5 飽和磁歪に及ぼすSiの影響 (Online version in color.)

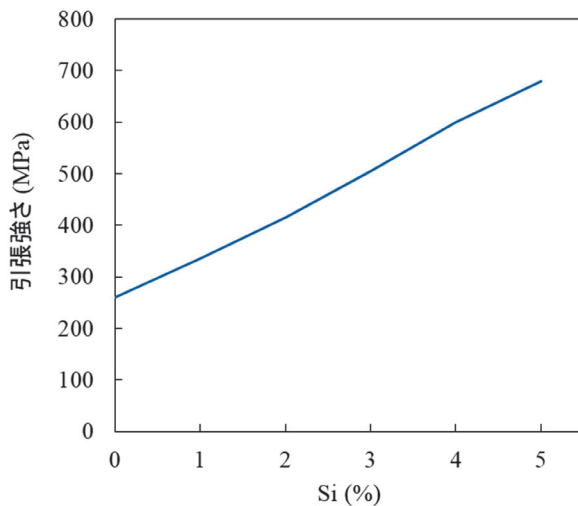


図4 引張強さに及ぼすSiの影響 (Online version in color.)

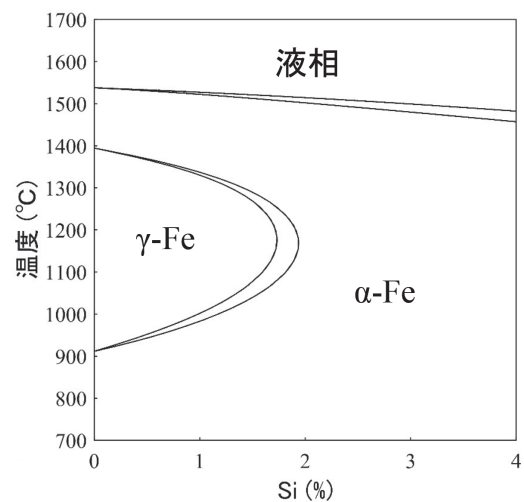


図6 Fe-Si状態図

あるため、冷間圧延で薄手化することは困難である。6.5% Si鋼については6章で述べる。

参考までに、Thermo-calc 2020b (DB:TCFE10) で計算したFe-Si状態図を図6に示す。Siは α 安定化元素であり、約2%以上添加すると γ 相は出現しなくなる。無方向性電磁鋼板のC含有量は数十ppm以下に低減されているため、マルテンサイトやベイナイトを利用することは基本的にできない。仮に高Si鋼で利用が可能だったとしても、これらの変態組織は多量の転位や炭化物、残留応力を含むため鉄損増加を抑制することは困難である。したがって、無方向性電磁鋼板の組織は基本的に第2相粒子が少ないフェライト単相組織であり、その結晶粒径(フェライト粒径)が重要なパラメータになる。

4 鉄損に及ぼす結晶粒径の影響

結晶粒径は鉄損に大きな影響を及ぼす。結晶粒界は磁壁移動を阻害する効果があるため、結晶粒径を大きくすることで

ヒステリシス損を低減することができる。しかしながら、結晶粒径を大きくすると磁区幅が広がり磁壁の移動速度が上がるため、渦電流損は増加してしまう。鉄損はヒステリシス損と渦電流損の合計であるから、ある最適粒径で鉄損の最小値が得られることになる。結晶粒径と鉄損の関係の一例を図7に示す⁶⁾。もっとも低い鉄損を示す結晶粒径は100 μm から200 μm 程度であり、強度や加工性を重視する多くの鉄鋼材料と比較して、結晶粒径をかなり大きくする必要があることがわかる。このような粗大なフェライト組織を得るためには焼鈍温度の高温化、長時間化が有効である。温度を上げても変態が起きないという高Si鋼の特徴は、組織制御の観点からは都合が良いと言えるだろう。

また、結晶粒界の移動を阻害する第2相粒子を制御することも重要である。ZenerとSmithのモデルでは、第2相粒子が結晶粒界をピン止めする場合、定常状態の結晶粒径 R は次の式で表される。

$$R = (4/3)(r/f) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、*r*：第2相粒子の半径、*f*：第2相粒子の体積分率である。式 (2) より、結晶粒径を大きくするためには、第2相粒子の体積分率を低減し、かつ粗大化させることが有効である。このため無方向性電磁鋼板の製造においては、不純物元素を極力低減することに加え、第2相粒子を微細析出させないように製造プロセスが設計されている。

5 無方向性電磁鋼板の特性と用途

図8にJFE スチールの無方向性電磁鋼板の特性例を示す⁷⁾。ここで、横軸は最大磁束密度1.0 T、周波数400 Hzで測定された鉄損 *W*_{10/400} であり、縦軸は磁界の強さ5000 A/mにおける磁束密度 *B*₅₀ である。35JN シリーズは板厚0.35 mmの標準品である。シリーズ内での磁気特性の変化は主にSi含有量の変化に対応しており、Siが高くなるにつれて鉄損が低減する一方、希釈効果により磁束密度が低くなっている。これらの材料は用途によって使い分けされており、高磁束密度を重視する誘導モータでは比較的Siが低いグレードが、低鉄損を重視する永久磁石モータではSiが高いハイグレードが使用される傾向にある。35JNE[®]シリーズは合金元素の最適化や結晶方位（集合組織）制御によって高磁束密度化を達成しており、高効率モータに適した材料である。

板厚0.3 mm以下の薄電磁鋼板は、特に高周波鉄損を低減することを目的として薄手化されたものである。式 (1) に示す通り渦電流損は板厚の2乗に比例するため、薄手化による低鉄損化効果はきわめて大きい。板厚0.35 mmの最高級品に比べて、薄電磁鋼板では20～30%程度の鉄損低減が認められる。この効果は周波数が高いほど顕著であり、回転数が高いEV、HEVの駆動モータでは主に薄電磁鋼板が用いられ

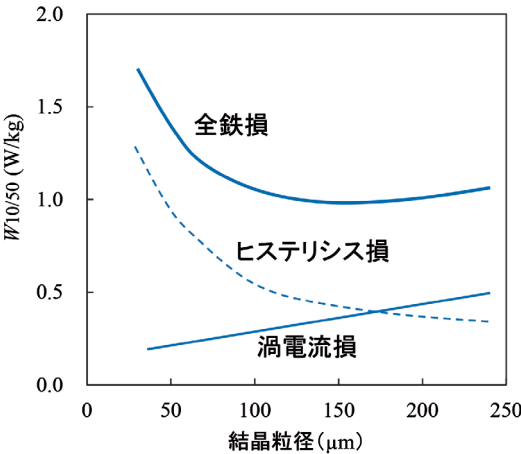


図7 鉄損 *W*_{10/50} に及ぼす結晶粒径の影響 (Online version in color.)

ている。

図9に強度と鉄損の関係を示す⁷⁾。こちらもシリーズ内での特性変化は主にSi含有量の変化に対応し、Siが高くなるにつれ低鉄損かつ高強度な材料が得られる。高速回転モータにおいては、ロータの塑性変形を抑制するために高強度が必要になるため、Si含有量が高いハイグレード材が使用される。高強度電磁鋼板35JNE-Sおよび35JNT590Tは、Siによる固溶強化に加えて結晶粒微細化強化を適用した材料である。図7で示したように結晶粒を微細化すると鉄損が増加してしまうため、高強度電磁鋼板の鉄損は従来材よりも高くなっている。このため、これらの材料はロータのみに適用することが推奨される。永久磁石モータで発生する鉄損全体に比べるとロータで発生する鉄損はごく小さいため、ロータ材の鉄損が高くなっても影響は軽微である。

6 CVDプロセスによる6.5% Si鋼の製造

通常、無方向性電磁鋼板は熱間圧延、冷間圧延および焼鈍の組み合わせで製造される。6.5% Si鋼は冷間圧延で薄手化

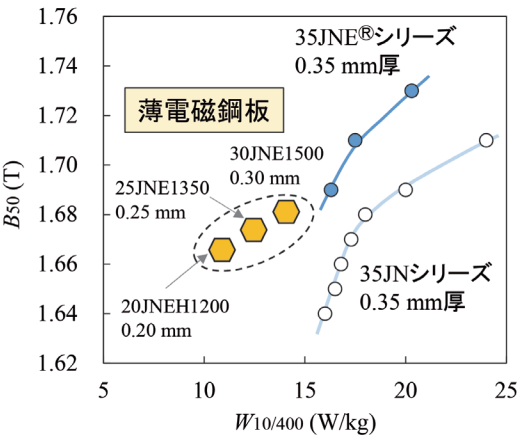


図8 無方向性電磁鋼板の特性例 (Online version in color.)

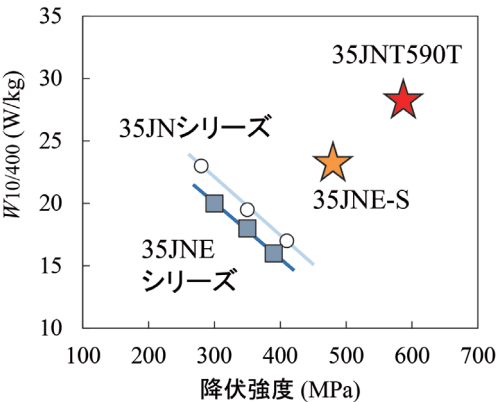


図9 高強度電磁鋼板の強度-鉄損バランス (Online version in color.)

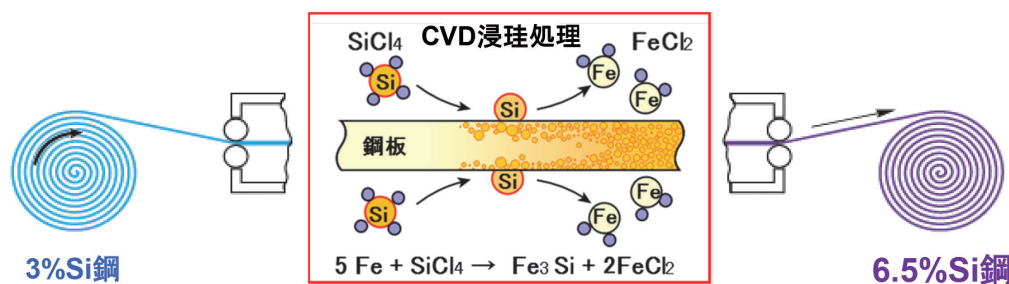


図10 CVDによる連続浸珪プロセス (Online version in color.)

表1 JNEXとJNHFの磁気特性

材料	板厚 (mm)	飽和磁化 (T)	鉄損 (W/kg)				
			W15/50	W10/400	W10/1k	W2/5k	W1/10k
6.5%Si鋼 (10JNEX900)	0.1	1.8	1.29	5.7	18.9	11.3	8.3
Si傾斜材 (10JNHF600)	0.1	1.9	1.82	9.2	30.7	12.7	7.9
3%Si鋼	0.2	2.0	2.04	10.9	39.6	23.1	18.9

することが困難であるため、上記製造プロセスで工業生産を行うことはできない。6.5% Si鋼の製造に関しては温間圧延法、急冷凝固法、浸珪法などが検討されてきたが、現在では化学気相蒸着 (Chemical Vapor Deposition, CVD) を用いた気相浸珪法による工業生産手法が確立されている。図10にCVDによる連続浸珪プロセスの概要を示す⁸⁾。まず比較的加工が容易な低Si鋼を冷間圧延で薄手化し、高温で連続焼鈍を行う。この際、鋼板表面にSiCl₄ガスを吹き付け、FeとSiの置換反応を発生させることで、鋼板のSi含有量を6.5%まで増加させることができる。

CVDプロセスで製造される6.5% Si鋼 (JNEX[®]) は、3% Siを含有する薄電磁鋼板に比べて飽和磁化がやや低いものの、きわめて低い鉄損を示すことが特長である (表1)。また、磁歪がゼロという特徴があるため、変圧器やリアクトルの騒音低減に有効である。CVDプロセスは鋼板表面からSiを浸透させるため、拡散条件を最適化すれば材料の板厚方向にSi濃度勾配を作り出すことができる。このSi傾斜磁性材料 (JNHF[®]) は飽和磁化が比較的高いことに加え、10 kHz以上の領域では6.5% Si鋼よりも鉄損が低くなるという興味深い特徴を有している。これら高Si鋼は、高周波リアクトルや高速回転モータの鉄心材料として使用されている。

7 おわりに

本入門講座では、主に鉄損の観点から無方向性電磁鋼板の解説を行った。本材料はEV、HEV用モータだけでなく、エアコ

ン、掃除機、洗濯機などの家電用モータや、産業用の誘導モータ、大型発電機など多種多様な用途で使用されている。我々の便利な生活を陰ながら支えている、実は身近な材料と言えるだろう。これまで無方向性電磁鋼板にあまり馴染みがなかった方々にも、少しでも興味を持って頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 森本茂雄：環境に優しいモータとそのドライブ技術，大阪府立大学工学部大学院工学研究科ニュース，No.34 (2004)，13.
- 2) K.Honda and S.Kaya：On the magnetization of single crystals of iron, Sci. Repts., Tohoku University, 15, (1926)，721.
- 3) R.M.Bozorth：Feromagnetism, D. Nostrand Co. Inc., (1951).
- 4) W.J.Carr Jr. and R. Smoluchowski：Phys. Rev., 83 (1951)，1236
- 5) R.C.Hall：J. Appl. Phys., 30 (1959) 816.
- 6) K.Matsumura and B. Fukuda：IEEE Trans. Mag., 20 (1984)，1533.
- 7) 尾田善彦，大久保智幸，高田正昭：JFE技報，No.36 (2015)，6.
- 8) 笠井勝司，浪川操，平谷多津彦：JFE技報，No.36 (2015)，12.

(2022年10月28日受付)