

## 電磁マテリアルソリューション展開

## Electromagnetic Steel Solution in Electromagnetic Field Technique

藤崎 敬介<sup>\*(1)</sup>  
Keisuke FUJISAKI平山 隆<sup>\*(2)</sup>  
Ryu HIRAYAMA根本 泰<sup>\*(2)</sup>  
Yasushi NEMOTO

## 抄 録

磁気特性の優れた磁性材料は異方性、飽和性の利用技術上の課題があり、材料特性を考慮した電磁場解析技術でその利用技術を確立する必要がある。異方性、応力および回転磁界を考慮できる電磁場解析技術TESSon-1, 2を開発し、実現象を適切に表現できるところまで達した。

## Abstract

Electromagnetic steel with superior magnetic characteristic has such steel using technical problems as anisotropy and magnetic saturation. Electromagnetic calculation technology taken into consideration of magnetic material characteristics is useful for solving the problems. New electromagnetic calculating tool named "TESSon-1, 2" taken into account of magnetic anisotropy, mechanical stress effect and rotating magnetic flux is developed and expresses the experimental phenomena.

## 1. 結 言

鉄鋼材料は、構造材であると同時に強磁性体であるため、鉄の磁気特性を利用した機器が、モータや変圧器などの電機分野で幅広く展開されている。

強磁性下における磁気特性は、磁区磁壁、テクスチャなどに基づく異方性、ヒステリシスのように複雑な磁気特性を有する<sup>1,2)</sup>ため、磁気特性を第一原理、分子動力学のような原理式<sup>3,4)</sup>より直接数値解析的に求めることは、現在の進んだ計算機技術を駆使しても甚だ難しい状況にある。このため、現実の磁性材料の磁気特性を得るには、測定による特性解析が行われている。

一方こうした磁性材料を利用したモータや変圧器などの電気機器の設計は、近年大きく変化しておらず、磁性材料は線形、等方性を前提とした設計法が主流であった<sup>5,6)</sup>。

しかしながら、近年の磁性材料の進歩は目覚しく、従来材よりも低鉄損、高透磁率など磁気特性が大きく改善している<sup>7)</sup>。こうした優れた磁気特性材料は、方向性電磁鋼板をはじめとして一般に、磁化しやすい(磁気飽和性)、方向によって磁気特性が異なる(異方性)などの特徴を有しており、その材料の磁気特性を活かそうと思えば、磁気飽和や異方性といった従来にない磁気特性を考慮した電気機器の設計技術が必須である。

最近の環境問題およびトッランナー方式により、より効率の良

い電気機器のニーズが高まっている。従来材料の範囲内(線形、等方)では、既に最適設計法により、あるレベルまで達しているといえるので、今まで以上の高効率な電気機器は、新しい磁性材料の利用技術の確立によるところは極めて大きいものといえる。

有限要素法による電磁場の数値解析による電気機器の設計方法は、計算機の進歩および解析手法の進歩により、実用域のレベルまで達している<sup>8)</sup>。しかしながら、新しい磁性材料に対する解析技術および電気機器に展開したときに発生する回転磁界、応力の影響などの技術課題に対しては、単にMaxwell方程式の解法だけでは不十分で、新たに磁性材料の磁気特性という技術領域まで踏み込み融合、連成する必要がある。

新日本製鐵の電磁場解析技術は、有限要素法がMaxwell方程式に適用され始めた20年前から研究を行っており<sup>9,10)</sup>、新日本製鐵社内で製作したソフトウェアは“FLEDY( FIELD OF EDDY )”という名前で社外に販売するレベルにある。その後、製鐵プロセスの電磁場応用技術に適用され、流体、伝熱、凝固、品質などの物理現象との連成解析によるマルチフィジカルモデルを形成している<sup>11,12)</sup>。

そこで本報では、新日本製鐵が得意としている高レベルな磁気特性材料の利用技術を、主に電磁場解析技術を用いてユーザソリューションを行う技術について述べることにする。

<sup>\*(1)</sup> 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主幹研究員 工博  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511 TEL:(0439)80-2460

<sup>\*(2)</sup> 環境・プロセス研究開発センター 計測・制御研究開発部 主任研究員

## 2. 電磁マテリアルソリューション

新日本製鐵は、電磁鋼板を製造し、電気機器を製造している電気メーカー等に販売している。近年の電磁鋼板は、非線形性、異方性等々の高度な磁気特性を付随しているため、高級な電磁鋼板を使用すれば、優れた特性が出るかどうかは、その使い方に依存する場合が多くなってきた。特に、異方性の強い高級電磁鋼板にその傾向が強い。そのため、電磁鋼板の磁気特性が最大に引き出せるように、その利用技術を含めてユーザに提供するソリューション展開が必要となる。

ユーザは、その目的に応じて、使うべき材料、形状、励磁方法が異なるので、材料の特性を活かした電磁場解析技術は、汎用性があり、目的に応じて使い分けられるので、極めて有効なツールである。我々は、磁気特性を電磁場解析技術および測定技術に反映させることで、図1のごとく、ユーザソリューションの展開を考えている。

そこでは、電磁鋼板の磁気特性が最大に活かせるような利用技術で、電磁場解析および高度測定技術を駆使することで、鋼材のユーザに提供し、また、ユーザのニーズを材料開発に反映させるために、解析技術を用いることを考えている。

そこでキーとなるのは、材料特性を考慮した電磁場解析技術である。電磁場解析技術自体は、辺要素、ICCG法、Newton-Raphsonの収束法など、既にその解析手法は10年以上前ほぼ完成されている。しかしながら、材料特性を考慮した解析技術となると、今まで解析してきた事例は少ない。

それは、従来のMaxwell方程式の解析手法だけでは不十分で、電界と磁束密度の関係が、現代物理学、磁区磁壁理論にまで遡る複雑な現象、材料の知識をも必要とするからである。つまり、電磁場解析手法と磁性材料との融合、連成を必要とするからである。こうした融合技術は、世界先端の電磁鋼材料を研究しており、かつ同時に世界先端の電磁場解析技術とを保持しているところにおいて初めて達成することができる。新日本製鐵は、その要件を満たしている世界でも数少ない企業である。

磁性材料を電気機器に使用する場合の技術課題は、磁束密度分布、非線形性、異方性、回転磁界、ヒステリシス、応力の影響、鉄損の計算が挙げられる。ツールとしての電磁場解析技術は、目的に応じて開発すべきであるので、従来のFLEDY®に加えて、TESSon-1(Theoretical Evaluation Simulation System for Iron Loss)、TESSon-2を新たに開発した。

### 3. 応力、異方性を考慮した電磁場解析技術：TESSon-1<sup>13)</sup>

電磁場解析の事例として、材料の違いによる鉄損の解析結果を示す。図2は、無方向性電磁鋼板NO材50H230と50H1300の磁気特性

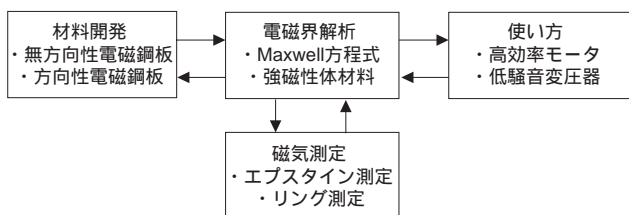


図1 電磁マテリアルソリューションにおける電磁場解析技術の位置付け

を示している。50H230材の方が、高透磁率、低鉄損な磁気特性を示している。図3は、モータにしたときの鉄損分布であり、50H230材のほうが鉄損分布で小さい値を示している。

次に異方性を考慮した鉄損分布を図4に示す。異方性を考慮することで、周回方向の鉄損に大小の分布が生じてくる。部分Aのティース部分では、磁束は困難軸方向に向いているので鉄損は大きくなっているが、部分Bのティース部分では、磁束は容易軸方向に向いているので鉄損は小さくなっている。また、部分Aのヨーク部分では、磁束は容易軸方向に向いているので鉄損は小さくなっているが、部分Bのヨーク部分では、磁束は困難軸方向に向いているので鉄損は大きくなっている。

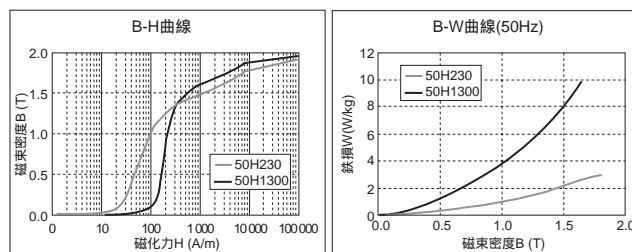


図2 50H230と50H1300の磁気特性

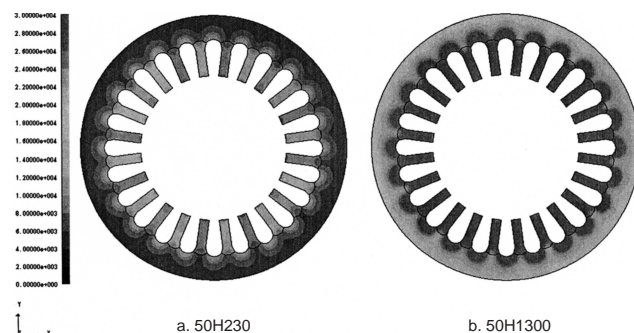


図3 50H230と50H1300の鉄損分布

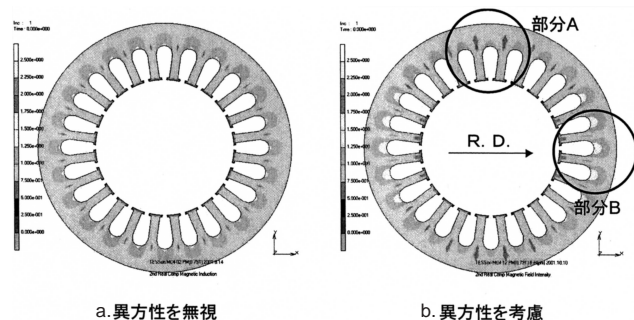


図4 異方性を考慮した場合の鉄損分布

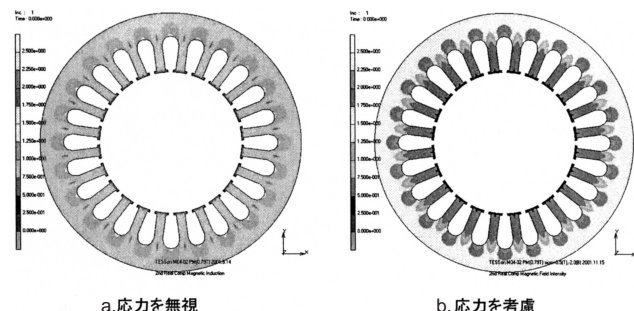


図5 応力を考慮した場合の鉄損分布

応力を考慮した場合の鉄損分布を図5に示す。応力が印加されることで、磁気特性は劣化するので、鉄損分布が大きくなっていることが分かる。

図6、表1は、この電磁場解析の鉄損結果と、実験の鉄損結果

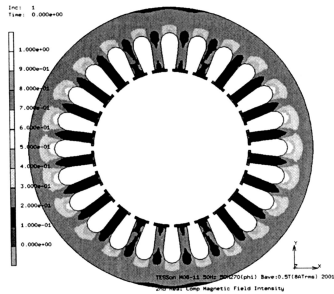


図6 鉄損解析結果と実測値データとの比較例

表1 鉄損解析結果と実測値データとの比較例

	実測	計算
モータコア鉄損(W/kg)	0.24	0.25

表2 電磁マテリアルソリューションにおける電磁場解析技術

解析条件	異方性	無視	考慮	無視	無視	考慮
	鉄損分布	無視	無視	無視	考慮	無視
寄与率 <sup>1)</sup>			10%	50%	40%	100%

\*鉄損増加要因の割合(鉄損増加分を100%としたときの各影響因子の割合)

(回転鉄損シミュレータ<sup>14)</sup>)を比較したもので、この場合では両者はよく一致しているといえる。

今まで考慮されていなかった、異方性、応力更に時間高調波の影響を考慮した解析結果をまとめて表2に示す。この場合では、大まかな目安であるが、鉄損増加の各要因の寄与率を示すと、異方性：1割、応力：5割、時間高調波：4割といえる。

#### 4. ヒステリシス回転磁界を考慮した電磁場解析 TESSon-2<sup>15-17)</sup>

鋼板の磁気特性と2次元ベクトル磁気特性測定法の重要性を明らかにするために、2次元ベクトル磁気測定法による基本的な実測結果を図7に示す。上部は、細線で磁束密度を示し、太線で磁界強度を示している。

左部は、無方向性電磁鋼板(NO)の実測結果で、右部は方向性電磁鋼板(GO)の実測結果である。電磁鋼板は板状の形状であるため、電磁鋼板は3次元ではなく2次元に磁化される。電磁鋼板は、磁束密度が1Tの大きさになるように2次元平面中で円の軌跡を描くように磁化されている。

無方向性電磁鋼板においては、磁束密度の軌跡は円形であるが、磁界強度の軌跡は円ではない。これは、無方向性電磁鋼板でさえ、磁気特性に異方性があることを示している。

方向性電磁鋼板は、磁気特性の異方性が強い。圧延方向においては、磁束密度1.0Tを得るための磁界強度は小さい。圧延方向に方向性電磁鋼板を磁化することは容易である。下部は、圧延方向と磁束密度ベクトルのなす角度が0度から360度まで回転して変化した時の磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルの位相差である。位相差が0度と等しくないことから磁界強度ベクトルと磁束密度ベクトルが平行でないことが分かる。

無方向性電磁鋼板において、位相差は0度から45度に変化してい

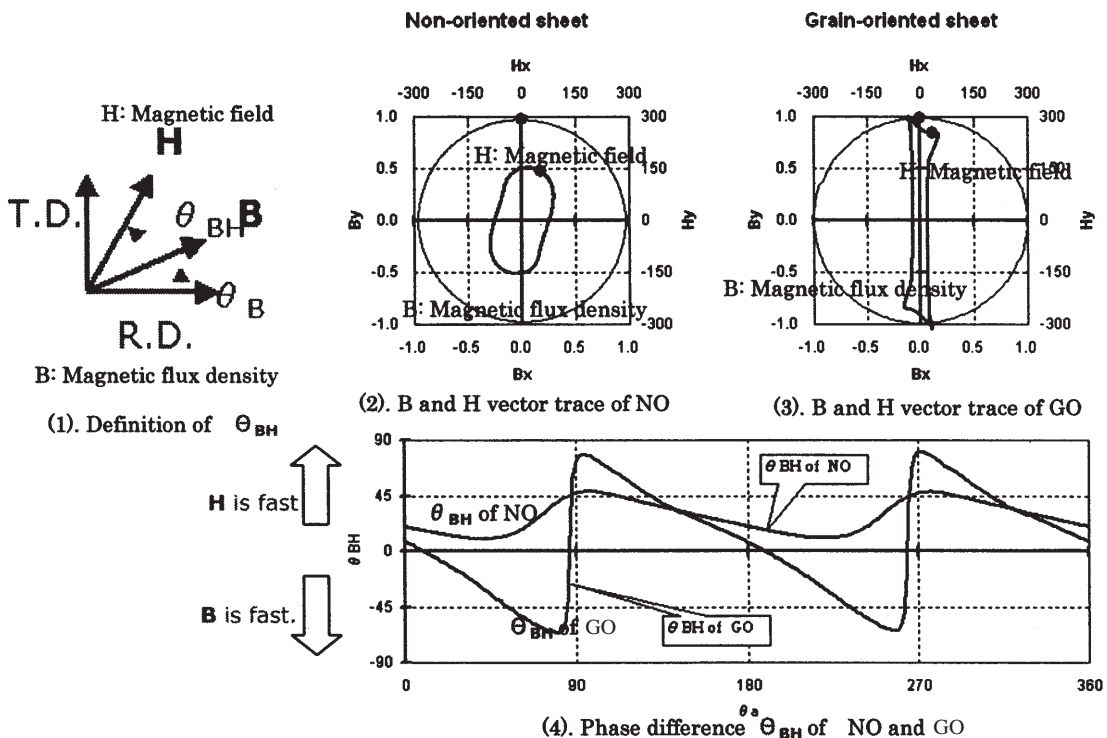


図7 2次元ベクトル磁気測定法による基本的な実測結果

る。この範囲では、磁界強度ベクトルは、磁束密度ベクトルより位相が進んで回転している。このことは、無方向性電磁鋼板は通常ヒステリシスの特性を持っていることを示している。

方向性電磁鋼板においては、位相差は、-66度から+78度まで変化する。特に、磁束密度ベクトルが困難軸を超える時に雪崩効果のように-66度から+78度まで劇的に変化している。このことは、磁界強度ベクトルがほとんど180度変化していることを示している。

方向性電磁鋼板は、ある領域でマイナスの位相差を持つ。マイナスの位相差は、磁束密度ベクトルが磁界強度ベクトルより進んでいることを示している。この現象は、通常のヒステリシス特性では発生しない。位相差が0度になった時に磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルがB-Hヒステリシス特性曲線において交差していることが分かる。そしてB-Hヒステリシス特性は、方向性電磁鋼板では、あるループを持つ。この現象は、Preisachモデルのような通常のB-H曲線モデルでは表現できない。そして、このこれまでのヒステリシス曲線とは異なる新しいモデル・概念は、磁束密度が磁界強度より進んでいることを理解するために必要である。

図8に示すのは、トランスの1/2領域の鉄損分布である。鉄損は、(1)式の一周期中の時間積分から計算される。

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{H} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dt \quad (1)$$

ただし、 $\vec{H}$ ：磁界ベクトル、 $\vec{B}$ ：磁束密度ベクトル、T：1周期

図8(a)は、実験結果である。PTBのJ. Sievert博士によって開発された特別なセンサは、磁界強度用のHコイルと磁束密度用の針を有している。励磁コイルの配置のため、鉄損の右上部が見えなくなっ

ている。図8(b)と(c)は、それぞれ従来手法と2次元磁気ベクトル法による解析結果である。これら三つの鉄損分布を比較すると、変圧器の下部が異なっている。従来法は、他二つより大きな値になっているけれども、実験結果と2次元磁気ベクトル法は、よい一致を見ている。2次元磁気ベクトル測定法は、従来法に比べてより正確な鉄損分布を表現している。

### 5. 結論

磁気特性の優れた磁性材料は異方性、飽和性の利用技術上の課題があり、材料特性を考慮した電磁場解析技術でその利用技術を確認する必要がある。異方性、応力および回転磁界を考慮できる電磁場解析技術TESSon-1, 2を開発し、実現象を適切に表現できるところまで達した。

### 参考文献

- 1) 茅誠司: 強磁性 岩波全書, 158(1952)
- 2) 近角聡信: 強磁性体の物理(上)・(下) 裳華房物理学選書4, 1984, p.18
- 3) Kawazoe, Y., Kondo, T., Ohno, K. (eds.): Clusters and Nanomaterials. Theory and experiment. Springer-Verlag, 2001
- 4) Fujisaki, K., Kawazoe, Y., Mizuseki, Jain, H.A.: Ab-initio and Electromagnetic Field Combined Calculation. The 4th International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials, 2003
- 5) 竹内: 電気機器設計学, オーム社, 1947
- 6) 磯部昭二: 電気機械設計法, 開発社, 1981
- 7) 電磁鋼板技術部編: わかる電磁鋼板, 新日本製鐵, 1985
- 8) 中田, 高橋: 電気工学の有限要素法, 第二版, 森北出版, 1986
- 9) Fujisaki, K., Ueyama, T., Okazawa, K.: Magneto hydrodynamic Calculation of Inmold

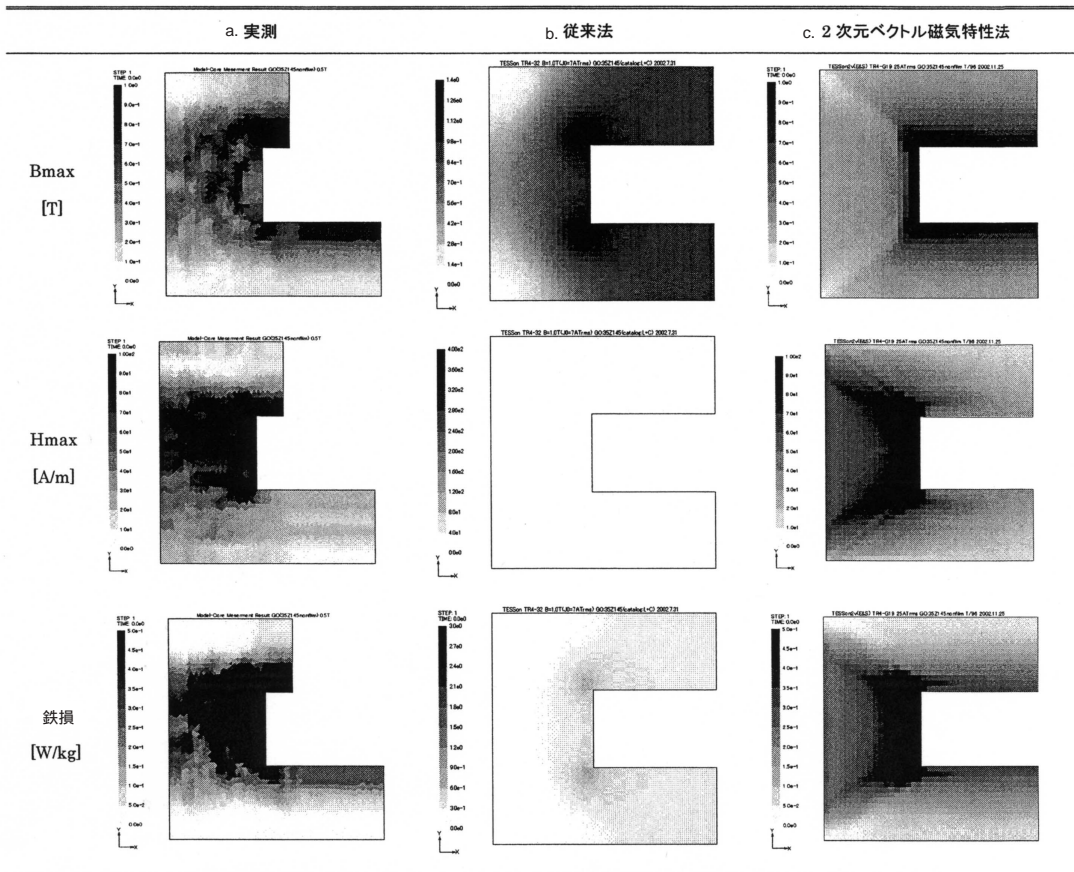


図8 2次元ベクトル磁気測定法と従来法 測定結果との比較

- Electromagnetic Stirring, IEEE Trans, Magn. 33(2), 1642-1645(1996)
- 10) Fujisaki, K., Wajima, K., Sawada, K., Ueyama, T.: Application of Electromagnetic Technology to Steelmaking Plant. Nippon Steel Technical Report. (74), (1997)
  - 11) 藤崎: マルチフィジカルモデルによる電磁プロセスソリューション 金属学会誌マテリア. 42(3), 239-241(2003)
  - 12) 藤崎: 特集: 電磁界を利用した材料プロセッシング 2. 電磁界の駆動・制動機能を利用した材料プロセッシング 電気学会論文誌. 119(4), 212-214(1999)
  - 13) 藤崎, 平山 藪本: モータ用電磁鋼板の性能評価技術と鉄損解析 JMAG User's Conference, 2002
  - 14) Kaido, C.: Mechanical Method of Iron Loss Measurement in a Rotational Field and Analysis of Iron Loss in a Motor. J.Appl.Phys., 69(8), 5106-5108( 1991)
  - 15) Fujisaki, K., Nemoto, Y., Sato, S., Enokizono, M., Shimoji, H.: 2-D avector Magnetic Method in Comparison with Conventional Method. 7th International Workshop on 1&2-Dimensional Magnetic Measurement and Testing, VI.3, 2002
  - 16) Enokizono, M.: Two-dimensional Magnetic Property. JIEE-A. 115(1), 1-8(1998)
  - 17) Enokizono, M., Soda, N.: Iron Loss Analysis of Transformer Core Model by FEM Considering Vector Magnetic Property. IEEE Tran. on Mag. MAG-35(5), 3008-3011 (1999)