

HEV/EV駆動モータ用無方向性電磁鋼板とその利用技術

Non-oriented Electrical Steel Sheet and Its Application Technology for Traction Motor of Hybrid/Electrical Vehicles

藤村 浩志*
Hiroshi FUJIMURA

平山 隆
Ryu HIRAYAMA

和嶋 潔
Kiyoshi WAJIMA

山崎 修一
Shuichi YAMAZAKI

抄 録

無方向性電磁鋼板は高効率、高出力密度のモータを経済性良く実現できることから、電気自動車駆動モータの鉄心材料として広く使用されている。近年の電気自動車市場の拡大、車種の増加に伴い、駆動モータ用電磁鋼板への要求特性も多様化してきた。市場ニーズに合った電磁鋼板及びその利用技術研究の事例について報告した。

Abstract

Non-oriented electrical steel (NO) is widely used as motor core material since it economically meets requirements for high efficiency and high power motors. The market of hybrid electrical vehicles (HEV) and electrical vehicles (EV) has been expanding and the models of HEV/EV have been increasing, and then performance requirements of NO for traction motor cores have become diversified. In this paper, we introduce newly developed NO and its application technology.

1. 緒 言

21世紀の自動車には地球環境へのやさしさが求められている。地球温暖化の原因となる排出ガスを抑制し燃費を良くするために、エンジンと電気モータを併用するハイブリッド技術が開発され、1997年に世界最初の量産型ハイブリッド電気自動車(HEV)が実用化された。更に電動化比率の高いプラグインハイブリッド電気自動車(PHEV)や電気自動車(EV)なども量産され、国際エネルギー機関(IEA)の見通しでは、2030年には世界の乗用車等の保有台数の約1割がEVになると予測されている。

これらHEV、PHEVやEVなどの電気自動車駆動モータ(以後、EV駆動モータと記す)は、エンジンに替わる駆動機構の心臓部であり、電磁鋼板はその鉄心素材としてEVの駆動性能や燃費の改善に大きく貢献する重要な機能材料である。ここでは、EV駆動モータの高性能化を支える電磁鋼板の最新材料、及び利用技術について述べる。

2. EV駆動モータ用電磁鋼板への要求

EV駆動モータは、一般的なモータと異なり、始動時、登坂時の高トルク特性、最高速運転での高速回転特性が要

求され、高頻度走行領域では高効率などが要求される。更に、HEVではモータは限られたスペースに収められることが重要であり、他用途のモータ以上に小型軽量化及び高効率性が求められる(図1参照)。

モータの高トルク化のためには、モータ巻線に流す駆動電流を大きくするとともに、巻線と鎖交する磁束を大きく

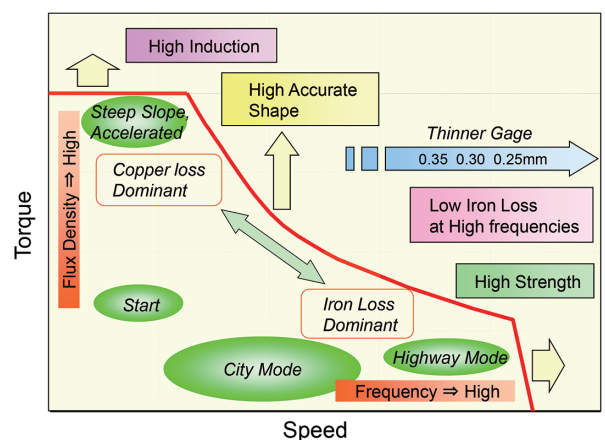


図1 EV/HEV 駆動モータ用電磁鋼板への要求性能
Performance requirements for electrical steel sheet for drive motors of EV/HEV

* 鉄鋼研究所 電磁鋼板研究部 上席主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

することが重要であり、電磁鋼板には与えられた磁界強度に対する高磁束密度、すなわち高透磁率が要求される。また、磁束を大きくするためには、ロータとステータ間の空隙を狭くして、磁気抵抗を低くすることが有効であり、電磁鋼板には高い加工性も要求される。

モータの出力はトルクと回転数の積で表わされるため、モータ小型化のためには回転数の増加が有利である。回転数が増加すると駆動電流の周波数が高くなるため、鉄心電磁鋼板には高周波励磁下での低鉄損が要求される。加えて、モータはインバータで励磁されるため、キャリア周波数（高周波数）下での低鉄損が要求される。また、ロータを高速回転させる場合には大きな遠心力が作用するため、ロータに使用される電磁鋼板には高強度が要求される。

実効的な燃費低減のためには使用頻度の高い駆動領域（中レベルの磁束密度と周波数）における低鉄損や磁化特性向上が重要である。HEV 用の駆動モータにおいて、エンジン駆動に切り替えて駆動電流が流れない状態でモータが空転する場合には、空転時の損失抑制の点から低鉄損であることがより重要視される。

3. HEV/EV 駆動モータに適した電磁鋼板

モータの鉄心素材には電磁鋼板の他に 6.5%Si や Co-Fe 合金、Ni-Fe 合金などがあるが、EV 駆動モータに要求される特性を電磁鋼板より安価にバランス良く要求を満たす鉄心素材は技術的に難しい。実用的には無方向性電磁鋼板 (NO) が使用される。方向性電磁鋼板 (GO) も使用可能であるが、材料特性に応じた工夫²⁾が必要である。

一般に、NO の鉄損を低減するには、鋼板内での渦電流損を抑制するために Si などの合金成分を増加したり、板厚を薄手化したりされるが、高合金化は同時に飽和磁束密度を低下させ、板厚薄手化はコア生産性を低下させる。そのためそれらの得失のバランスを取った商品開発が必要である。例えば、低鉄損と高磁束密度を両立するには、合金成分の調整、結晶方位制御^{3,4)}や結晶粒径制御⁵⁾などが有効である。

日本製鉄(株)では HEV/EV 駆動モータ用電磁鋼板の要求にこたえる新しい無方向性電磁鋼板シリーズを開発してきた。図 2 に、モータ高トルク化のために、同じ鉄損でも磁束密度 B_{50} (5000A/m の磁化力での磁束密度) を向上した高効率無方向性電磁鋼板シリーズ (ハイエックスコア® / 薄手ハイエックスコア® HX) の磁気特性例を示す。HEV/EV 駆動モータ用に開発された薄手 NO のモータ鉄損解析例を図 3 に示す。この解析モデルは、磁石埋込型の電気学会ベンチマークモータ⁶⁾である。図 3 より明らかなように、薄手 NO は従来材に比べてモータ回転が高くなるほどコア鉄損低減効果が顕著である。

図 4 には、高速回転ロータ用途に適した高張力電磁鋼板シリーズ (高張力ハイライトコア® HXT) を示す。高周波鉄

損 $W_{10/400}$ (1.0T, 400Hz の励磁下での鉄損) は汎用材より劣るが、引張強度は汎用材の 1.5 倍を実現しており、市販の HEV/EV 駆動モータに採用されている。更に、鉄損を汎用材並みに改善した高張力 NO も現在開発中⁷⁾である。鉄損はやや劣るものの、開発済みの高張力 NO は IPM (Interior Permanent Magnet) モータのロータ鉄心として好適である。高速回転時の耐久性の観点から永久磁石を保持するロータブリッジ部幅を狭くすることは困難であるが、高張力 NO

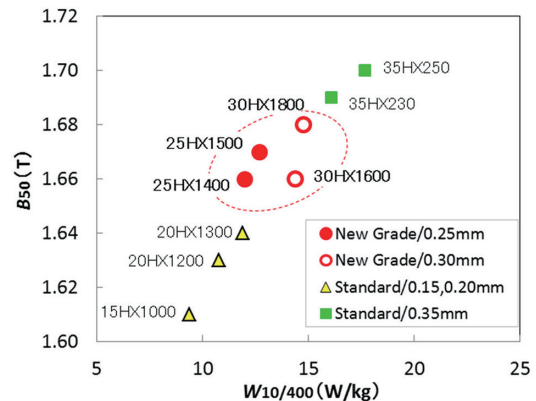


図 2 高効率モータ用薄手ハイエックスコア® の磁気特性
Magnetic properties of THINNER GAUGE HIEXCORE™ for high efficiency motor

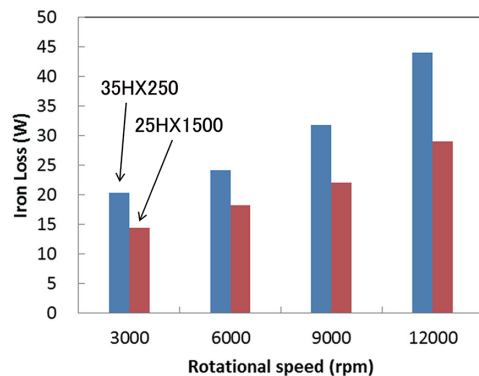


図 3 モデルモータ負荷運転時の鉄損解析
Iron loss analysis of the model motor in load operation

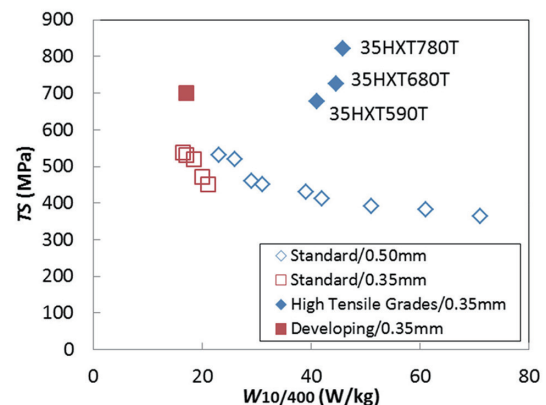


図 4 高張力ハイライトコア® HXT の磁気、機械強度特性
Magnetic and mechanical strength properties of HIGH TENSILE STRENGTH HILITECORE™ HXT

を用いればブリッジ部幅を狭くする設計が可能となりモータ効率が向上する⁸⁾(表1参照)。これは磁石磁束のうち、ブリッジ部への漏れ磁束分が減少してモータのトルク定数が向上し、銅損が低減したことが主たる原因である。

4. 打抜き性に優れた電磁鋼板用環境対応型絶縁皮膜

モータコアに用いられる無方向性電磁鋼板の表面には、打抜き加工性と層間短絡防止のために厚さ1~2 μm の絶縁皮膜が形成されている。そこでは3価のクロム酸化合物と有機樹脂を含有する有機無機混合皮膜(日本製鉄における呼称Lコート)が40年以上にわたって世界的に使用されてきた⁹⁾。一方近年、ヨーロッパのRoHSに代表されるように環境に対する意識の高まりから、クロム酸化合物を含有しない新たな環境対応型絶縁皮膜Gコートを開発した。Gコートは、従来のクロム酸化合物含有皮膜よりも絶縁抵抗が高く、図5に示すように打抜き性に優れるなどの特長を有している。その他にも実使用環境での耐久性が必要とされる場合があり、耐熱性や耐溶媒性なども優れている。

表1 ロータブリッジ幅によるロータ塑性変形限界速度とモータ効率
Plastic deformation limit rotational speed and motor efficiency as a bridge width of rotor core

Rotor core material	YS (MPa)	Brige width (mm)	Speed* (rpm)	Efficiency** (%)
35A300	320	0.5	17000	91.8
	320	1.0	25000	91.1
35HXT680T	659	0.5	25000	91.6

* Result of deformation analysis by 3D-FEM

** Result of motor load experiment at 5400rpm

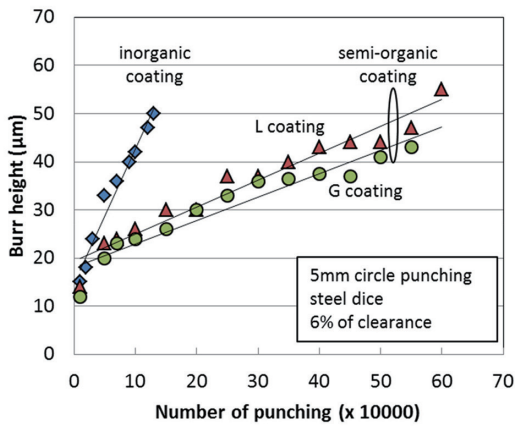
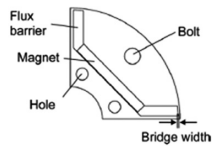


図5 電磁鋼板の打抜き加工性

Punching workability of electrical steel sheet

L coating is chromite based insulating coating with organic resin.

G coating is phosphate based insulating coating with organic resin.

5. EV駆動モータの性能を支える利用技術

電磁鋼板の磁気特性は、国際標準規格の測定法(IEC 60404-2)に基づき、均一かつ一方向交番磁界、無応力、正弦波磁束密度の理想的な条件の下で測定されるが、実使用状態下の電磁鋼板には、①コア構造に起因する不均一磁束、②回転磁界、③打抜き歪みやコア固定による圧縮応力、④空間高調波、⑤電源等に起因する時間高調波、⑥磁石や巻線磁場による重畳磁束、⑦温度不均一、⑧かしめ部の層間短絡等、図6に示す様々な鉄損増加要因が作用する¹⁰⁻²⁴⁾。

この中で特にモータコアへの塑性歪みや圧縮応力は、図7に示すモータコア製造工程で不可避免的に導入されるものであり、鉄損増加への影響が大きい。図8は、外径120

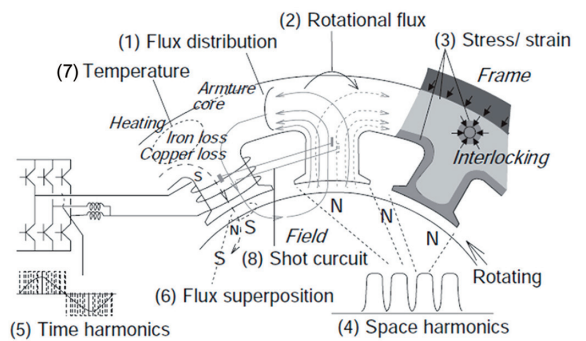


図6 モータコアの鉄損増加要因
Factors in real motor core to increase iron loss

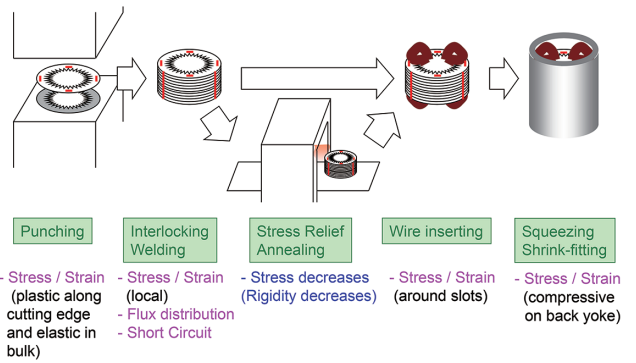


図7 モータ製造工程での鉄損要因
Iron loss deterioration in motor manufacturing process

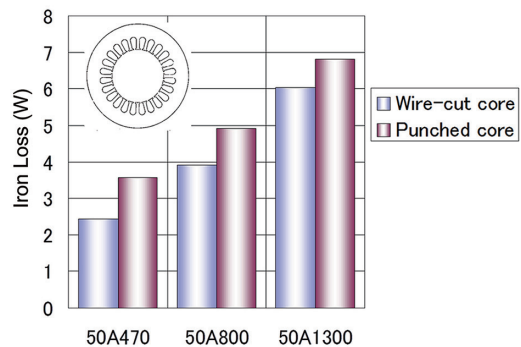


図8 モータコア鉄損に及ぼす打抜き加工の影響
Effect of punching processing on motor core loss

mm, 24 スロットのステータコアを、打抜き加工、及び加工歪みの発生しない放電加工で作製して、自社開発した回転鉄損シミュレータ¹¹⁾で、それぞれコア鉄損を測定した例である¹²⁾。素材によって増加代は異なるが、打抜き歪みにより鉄損が増加することが確認できる。

6. 鉄損増加要因を考慮したモータ電磁界解析²⁰⁾

近年の高効率モータ設計においては、埋込型磁石モータなど複雑な磁気回路を利用するタイプが主流であることから、有限要素法などの電磁界解析を用いることが一般的である。このモータ解析に上述の鉄損増加要因の影響を取り込むことによって、モータ性能を精度良く予測できるだけでなく、モータ損失などの特性を悪化させている因子と、その改善対策効果を効率良く見出すことができる。

表 2 に、50H270 材を打抜きで加工したステータコアを回転鉄損シミュレータ¹¹⁾で試験した鉄損測定結果と、日本製鉄の電磁場解析技術で算出したコア鉄損値を比較して示す¹⁴⁾。両者は良好な一致を示しており、解析手法の妥当性が確認できる。次に、本解析手法を応用して、電磁鋼板の磁気異方性^{22, 23)}、加工歪み²⁴⁾、空間高調波の影響を全て考慮したコア鉄損を計算し、次に各影響因子を順次除外して、理想的な状態を模擬した場合のコア鉄損を算出した。

図 9¹⁴⁾に、理想状態と 3 つの鉄損増加要因全てを考慮した時の鉄損差を 100%とスケーリングし、各因子による鉄損増加量を%で表記したものを示す。加工歪みの影響が最も大きく、例えばコアの歪み取り焼鈍を行うことで、鉄損が大きく改善できることを示唆している。次いで高調波の影響が大きく、素材の異方性の影響は、本モータコアの場合、10%程度と比較的小さい。但し、自動車用駆動モータ

表 2 鉄損解析結果と実測値データの比較例
Calculated value and an experimental value of motor core loss

	Experimental	Calculation
Motor core loss (W/kg)	0.24	0.25

のステータには分割鉄心を採用するものもあり、この場合、コアの主磁束と電磁鋼板の磁気異方性の兼ね合いによって、鉄損値により大きな影響を及ぼす可能性も有り得ることから、数値解析を応用して、適正なコア形状と磁気異方性の組合せを探索することもできる。

また EV 駆動モータや高効率エアコンモータは、インバータ電源で駆動するため、実使用条件下のモータ電磁場解析では、インバータ高調波とモータ空間高調波が重畳した複雑な磁束密度による励磁の影響を精度良く考慮できることが重要である。そこで様々なグレードの電磁鋼板 (35A210, 35A300, 50A470, 50A1300 の 4 鋼種) を鉄心コアとしたリング試料 (外径 47mm, 内径 33mm, コア厚 7mm) を、モータコアの実使用状態に相当する複雑な磁束密度で励磁して鉄損を実測し、日本製鉄の電磁場解析技術による計算値と比較した。図 10 に、多くの高調波成分を含むインバータ変調率を 0.4 とした場合の比較結果を散布図²¹⁾で示す。鋼種や空間高調波起因の波形によらず、計算結果は実測値と 5%の精度で一致しており、実用上十分な精度を有している。これは、高調波が電磁鋼板に誘導する渦電流の影響を、精度良く評価できるモデルを鉄損解析に採用したことに加

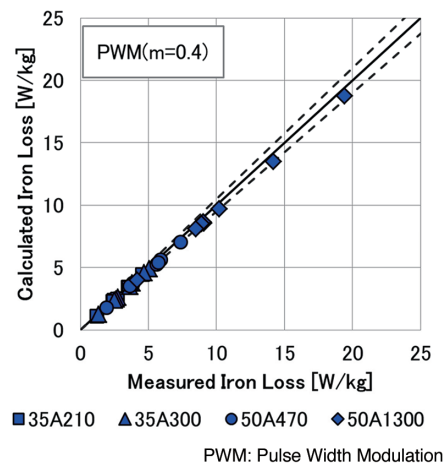


図 10 PWM 励磁下での鉄損計算値と実測値の散布図
Measured and calculated iron losses excited by PWM voltage waveform, modulation ratio 0.4

Analysis condition	Anisotropy	Ignored	Considered	Ignored	Ignored	Considered
	Stress	Ignored	Ignored	Considered	Ignored	Considered
	Harmonics	Ignored	Ignored	Ignored	Considered	Considered
Iron loss contour maps						
Contribution*		10%	50%	40%	100%	

* Ratio of iron loss increase due to various factors

図 9 モータコア鉄損の電磁場解析例
Analysis for iron loss in motor core with various conditions

え、電磁界解析に入力する磁気特性の測定精度も寄与していると考えられる。

7. グローバル市場に向けた電磁鋼板特性値評価のトレーサビリティ向上

自動車電動化や高効率エアコンの普及による省エネルギー化は、世界各国で進展しているグローバルなムーブメントであり、今後、高性能な無方向性電磁鋼板が国際的に取引される割合は、より増加すると考えられる。電磁鋼板の特性値は、IEC 国際規格で規定される測定法にて評価された鉄損値 (W/kg)、及び磁束密度 (T) が代表的であり、モーターメーカーの設計者は、各電磁鋼板メーカーのカatalogに記載された特性値を参考にして、高効率モーターの開発に適した材料を選定する。このような状況を踏まえて、日本製鉄の電磁鋼板分野では、需要家に提供する特性値を国際的な測定機関とのトレーサビリティを確保したものとする取組みを行っている。

無方向性電磁鋼板の特性値は、IEC60404-2 (電磁鋼帯のエプスライン測定法) によって評価するが、その測定の再現性は、英国 NPL (National Physical Laboratory)、独 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)、伊 INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica) などの国際標準測定機関が、回送試験を行って、相互の測定値が一定の範囲にあることを確認することで確保されている。我が国には、国際的に広く認知された磁気測定標準機関が無いため、日本製鉄は、上記の海外標準機関に依頼して標準試験片を確保し、これらを用いて社内装置の精度を評価することで、標準機関と同等の測定であることを確認している。また磁気測定を定めた JIS 規格に関する JAB (Japan Accreditation Board / 日本適合性認定協会) 認定も取得しており、装置、較正、マネジメントに関する適合性を有することを認証されている。

今後も日本製鉄は、モーターメーカーなど需要家のニーズを取り込み新しい高性能電磁鋼板の開発を進めていく。これらの材料の再現性、信頼性の高い特性値を用いることで、各国のモーター設計者が、自らの設計精度を向上させいち早く新しい高性能電磁鋼板を採用することを支援できる。これによって高性能モーターの開発が加速し、電力高効率利用の動勢にグローバルに寄与できると期待される。

8. 結 言

本報告では、HEV/EV 駆動モータ用無方向性電磁鋼板の開発及びその利用技術研究の事例を紹介した。高効率、高出力密度のモータを実現するには、電磁鋼板の薄手化や高張力化及び加工性に優れる絶縁皮膜が有効である。また、モータ性能は使用環境に影響されるので、種々の解析評価技術を用いてモーター損失の内訳と発生要因を明確化することによって、機器性能向上のための対策を検討することが電磁鋼板利用技術で重要である。

参考文献

- 1) 国際エネルギー機関 (IEA) : Global EV Outlook 2018. 2018
- 2) 開道力 : 電気学会論文誌 D. 116 (3), 265 (1996)
- 3) Shiozaki, M. et al.: Textures and Microstructures. 11, 159 (1989)
- 4) Kubota, T. et al.: Journal of Material Engineering and Performance. 1 (2), 219 (1992)
- 5) 小原隆史 : 第 155, 156 回西山記念講座. 1995, p.151
- 6) 電気学会技術報告. 1296, 1 (2013)
- 7) Fujikura, M. et al.: IEEE Transactions on Magnetics. 51 (5), 2001604 (2015)
- 8) Tanaka, I. et al.: IEEE Transactions on Magnetics. 49, 2997 (2013)
- 9) 竹田和年 ほか : まてりあ. 50, 126 (2011)
- 10) 開道力 : モーター技術実用ハンドブック. 2001, p.442
- 11) Kaido, C.: Journal of Applied Physics. 69 (8), 5106 (1999)
- 12) 藪本政男 ほか : 新日鉄技報. (378), 51 (2003)
- 13) 開道力 ほか : 電気学会回転機研究会資料. RM-02-96, 2002, p.11
- 14) 藤崎敬介 ほか : JMAG User's Conference, 2002
- 15) 開道力 ほか : 電気学会論文誌 A. 123 (9), 857 (2003)
- 16) Kurosaki, Y. et al.: Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 320 (20), 2474 (2008)
- 17) 柏原義之 ほか : 電気学会論文誌 A. 131-A (7), 567 (2011)
- 18) 藤村浩志 ほか : 電気学会論文誌 A. 135 (12), 780 (2015)
- 19) 藤村浩志 ほか : 電気学会論文誌 A. 137 (4), 236 (2017)
- 20) 藤崎敬介 ほか : 新日鉄技報. (379), 70 (2003)
- 21) 和嶋潔 ほか : 電学マグネティクス/リニアドライブ合同研究会資料. MAG-15-190/LD-15-100, 2015
- 22) 特許 3643334 号
- 23) 特許 3676761 号
- 24) 特許 3676765 号



藤村浩志 Hiroshi FUJIMURA
鉄鋼研究所 電磁鋼板研究部
上席主幹研究員 博士(工学)
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



和嶋 潔 Kiyoshi WAJIMA
プロセス研究所 計測・制御研究部
上席主幹研究員



平山 隆 Ryu HIRAYAMA
プロセス研究所 計測・制御研究部
上席主幹研究員 博士(環境科学)



山崎修一 Shuichi YAMAZAKI
日鉄テクノロジー(株)
富津事業所 材料ソリューション部
専門主幹