

高磁力 EV 用ロータに資する珪素鋼板の 部分非磁性改質技術の開発

濱田典彦^{1*} 堀川高志²⁾ 度會亜起³⁾
御手洗浩成⁴⁾ 及川勝成^{1)*} 杉本 諭^{2)**}

1. はじめに

カーボンニュートラル実現のため、エンジンを搭載した自動車からモータを搭載した電気自動車(EV, PHV, FCV など)への置き換えが急速に進んでいる。そのため、モータに使用される希土類磁石、珪素鋼板、銅などの需要が急増し、供給不足が懸念される。それらの材料の省資源化には、モータの回転部分であるロータの高磁力化やモータの高速回転化による小型化が求められる。本開発ではロータの高磁力化に着目した。

従来、ロータの高磁力化は、磁石の高磁力化や磁石・フラックスバリアの配置の工夫で実現されてきた。しかしながら、図1(a)に示すようにロータのブリッジ部分の磁気ショートは、電気自動車の駆動用モータとして主流として使われているIPM(Interior Permanent Magnet Motor)モータが発明されて以来の問題である。図1(b)に示すようにブリッジを部分的に非磁化すれば、磁気ショートを防止でき、ロータを高磁力化できることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、図2に示したように、ロータコア側面から珪素鋼板とNi-Cr合金線をCO₂レーザにより熔融混合し、ブリッジの一部をα相からγ相に部分非磁性化する先行テスト⁽³⁾を行った。ロータのフラックスは約30%増加したが、ロータコアのブリッジにはクラックなどの凝固欠陥が観察された。また、積層した珪素鋼板の上下のブリッジが短絡しているため、モータ動作時に渦電流損失を増大させモータ効率が低下した。つまり、磁気ショート防止には積層前の珪素鋼板単体に部分的な非磁性化と、その部分の凝固欠陥を抑制する必要がある。そ

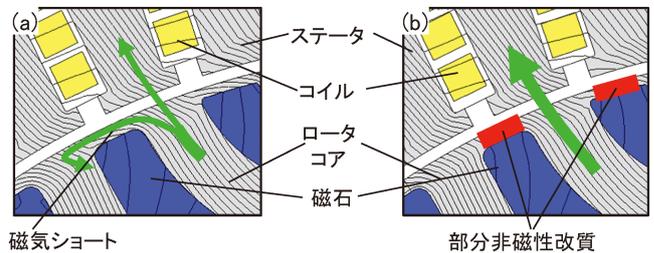


図1 モータ断面の磁力線模式図。従来設計(a)とブリッジの部分非磁性改質設計(b)。

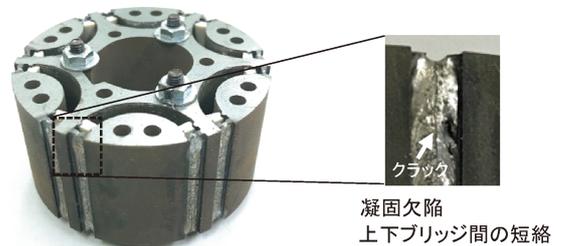


図2 先行テストのロータコアとブリッジの拡大像。

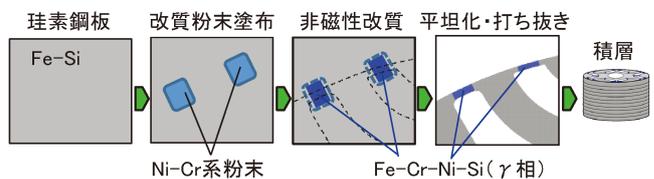


図3 部分非磁性改質のプロセス。

ここで、本開発では、図3に示すようにブリッジとなる部分の珪素鋼板を予め非磁性化後、それを積層してロータを作製する珪素鋼板の部分非磁性改質プロセスと凝固欠陥の抑制技術を開発した。

2. プロセスの検証

1つのブリッジを想定したモデル実験のプロセスを図4に

* 愛知製鋼株式会社；1)主査 2)主幹 3)室長 4)本部長

** 東北大学大学院；1)教授 2)特任教授

Development of Partial Non-Magnetic Improvement Process for Silicon Steel Sheet and its Application to Rotor Core; Norihiko Hamada*, Takashi Horikawa*, Aki Watarai*, Hironari Mitarai*, Katsunari Oikawa** and Satoshi Sugimoto** (*Aichi Steel Corporation, **Tohoku University)

2024年9月25日受理[doi:10.2320/materia.64.44]

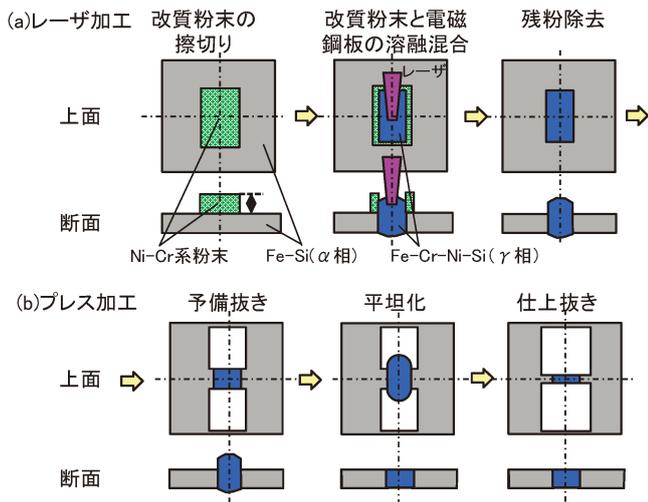


図4 モデル実験の工程 レーザ工程 (a), プレス工程 (b).

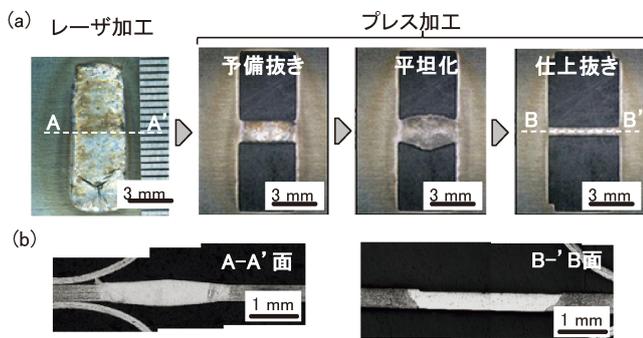


図5 モデル実験による検証結果 上面画像 (a), 断面画像 (b).

示す。非磁性改質は、シェフラーの状態図⁽⁴⁾に基づいて非磁性改質後に厚み方向全域が γ 相になるように改質粉末(Ni-50 mass%Cr)を珪素鋼板上に擦切り、その改質粉末と珪素鋼板(50HXT780T)をファイバーレーザーで熔融混合した。レーザー加工後、非磁性改質部位は珪素鋼板よりも厚いため、平坦化加工により珪素鋼板以下の厚みとし、ブリッジ幅0.5 mmを想定したプレス加工を行った。図5(a)にモデル実験の結果を示す。レーザー加工後は、レーザーの終点側に凝固欠陥(クラック、引け巣)が観察された。プレス工程では狙い通りの試料が得られ、また、試料と珪素鋼板を同時に打抜くことができた。これは、非磁性改質部と珪素鋼板が完全に結合していることを示唆している。図5(b)はレーザー加工後とプレス加工後の非磁性改質部の断面を示している。レーザー加工後では、厚み方向全域に非磁性改質され、珪素鋼板よりも厚い。プレス加工後では、珪素鋼板よりも厚みが薄く、狙い通りとなっている。このことは、積層後のロータコアにおいて、十分な占積率が得られ、また、非磁性改質部の上下が接触しないことからモータ動作時の渦電流も抑制できることを示している。

3. 凝固欠陥の抑制と非磁性改質部の特性

クラックの抑制には、組織の微細・複雑化、凝固時に補填

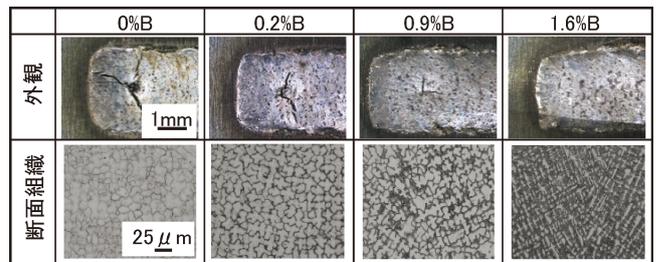


図6 非磁性改質材の外観, 断面組織, EPMA 像.

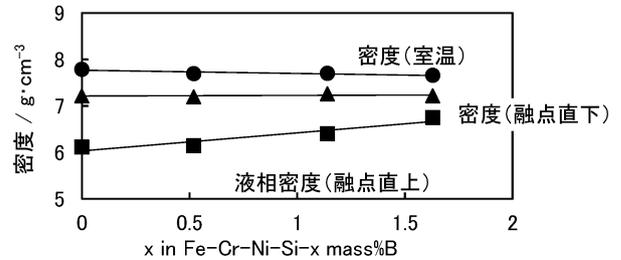


図7 密度に及ぼすB量の影響.

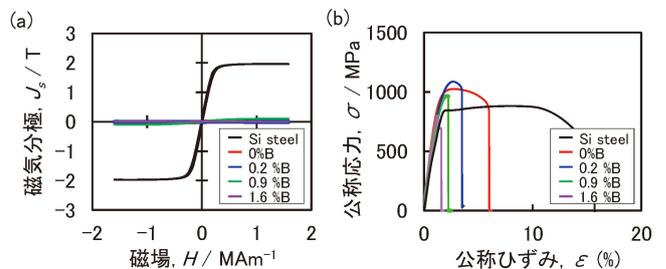


図8 非磁性改質材のヒステリシス曲線 (a) と応力ひずみ線図 (b).

する液相量の増加(共晶組織量の増加)⁽⁵⁾、BTR (Brittle Temperature Range)の低下⁽⁶⁾が求められ、また、引け巣の抑制には、凝固収縮率を抑制する低密度化合物を析出させること⁽⁷⁾が求められる。非磁性改質部に対し、さまざまな添加元素を検討し、クラックと引け巣の抑制にはB添加が効果を示すことを発見した。Bを添加した時の非磁性改質部の外観、組織を図6に示す。Bを添加すると組織が微細・複雑化、共晶組織量が増加し、また、BTRも低下した⁽⁸⁾ことからクラックが抑制されたと考えられる。非磁性改質部の密度に及ぼすB量の影響を図7に示す。B量が増加すると融点直上の密度と融点直下の密度の比、すなわち、凝固収縮率が低下した。この低下は母相よりも低密度な Cr_2B の析出によること確認している⁽⁹⁾。

図8に非磁性改質部の磁気評価と引張強度評価の結果を示す。非磁性改質部の磁気分極はほぼゼロであり、珪素鋼板に比べ極めて低い。引張強度は、0~0.9%Bでは、珪素鋼板と同等以上の強度を示した。

4. ロータの試作と評価

得られた知見に基づきコアシートを作製し、積層、磁石挿入してロータを試作した⁽¹⁰⁾とEDS像を図9(a), (b)に示

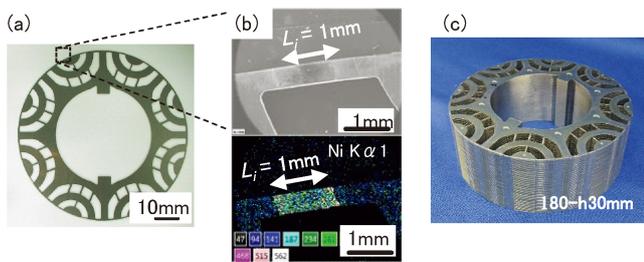


図9 コアシート外観 (a), ブリッジのSEM/EDS像 (b), ロータコア (c).

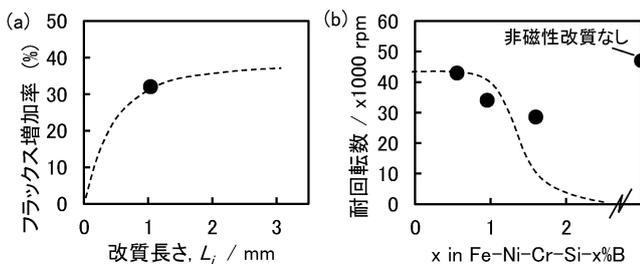


図10 ロータコア評価. フラックスに及ぼす改質長さの影響 (a), 耐回転数に及ぼす B 量の影響 (b).

す。ブリッジ中の非磁性改質部の改質長さ (L_i) は 1 mm, 成分は γ 相となる Fe-13.9Cr-15.1Ni-2.3Si-0.5B (単位: mass%) であった。

部分非磁性化したコアシートを積層し, 試作したロータコアの外観を図9(c)に示す。このロータコアにNd-Fe-B異方性ボンド磁石を挿入して部分非磁性改質ロータを作製し, ステータを模したジグを作製し, フラックス評価を行なった。フラックス増加率に及ぼす改質長さの影響を図10(a)に示す。また, 破線は磁場解析シミュレーションによる値である。非磁性改質なしのロータに比べ, フラックスは32%増加し, モータを小型化の可能性を実証した。次に, ロータのスピントテストを行なった結果を図10(b)に示す。0.5%Bでは, 部分非磁性改質ロータは43000 rpmで塑性変形が開始し, 非磁性改質なしとほぼ同じ結果が得られ, 十分な強度を持つことを検証した。

5. まとめと将来展望

ロータコアのブリッジの磁気ショートに着目し, 珪素鋼板の部分非磁性改質技術を開発した。また, 部分非磁性改質技術を使ったロータを試作し, ロータの高磁力化と耐回転の評価を行い, モータの小型化が可能であることを示した。

この技術の社会実装に向け, モータメーカー等に試作したロータの提供を始めている。電気自動車の普及につれ, モータの小型化, 高出力化が求められる本技術の活用が期待される。持続的発展が可能な社会実現にも貢献する。

6. 対 外 発 表

学協会発表 日本金属学会 4件, 他 2件
論文 Materials Transactions 4件, 他 1件
特許 登録 2件, 出願13件

本研究成果は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「部素材の代替・使用量削減に資する技術開発・実証事業」(JPNP20019), 助成事業「グリーンイノベーション基金事業/次世代蓄電池・次世代モーターの開発」(JPNP21026)の結果得られたものです。

文 献

- (1) M. Mita, M. Masuzawa, N. Hirao and F. Kimura: J. Appl. Phys., **93**(2003), 8769-8771.
- (2) Y. Honkura, H. Mitarai, H. Matsuoka, Y. Hashimoto and M. Kato: Japanese Patent Applications, JP2013-143791 (2013).
- (3) N. Hamada, A. Watarai, H. Mitarai, K. Oikawa and S. Sugimoto: Mater. Trans., **64**(2023), 1058-1064.
- (4) M. A. Pugacz: Welding Jnl., **23**(1944), 536s-544s.
- (5) T. Senda, F. Matsuda, G. Takano, K. Watanabe, T. Kobayashi and T. Matsuzaka: J. J. Welding Soc., **41**(1972), 709-723.
- (6) K. Shinozaki: J. J. Welding Soc., **71**(2002), 43-47.
- (7) T. Watanabe, R. Kimura, T. Nakazawa, H. Chiba, S. Tanaka, T. Ueki, T. Toriyama and M. Yoshida: J. J. Inst. Light Met., **58**(2008), 464-472.
- (8) N. Hamada, T. Horikawa, H. Mitarai, K. Oikawa and S. Sugimoto: Mater. Trans., **64**(2023), 2508-2514.
- (9) N. Hamada, T. Horikawa, K. Oikawa and S. Sugimoto: Mater. Trans., **65**(2024), 422-427.
- (10) N. Hamada, A. Watarai, K. Oikawa and S. Sugimoto: Mater. Trans., **65**(2024), 1341-1348.