

連携記事

高い素鋼板の磁気特性と 脱レアアースモータへの適用

Magnetic Properties of High Si Steel Sheet and Its Application to Rare Earth Free Motor

JFEスチール(株)
スチール研究所
主任研究員

尾田善彦
Yoshihiko Oda

JFEスチール(株)
スチール研究所
主任研究員

平谷多津彦
Tatsuhiko Hiratani

東京工業大学
大学院理工学研究科
電気電子工学専攻 教授

千葉 明
Akira Chiba

東京理科大学 理工学部
電気電子情報工学科
准教授

星 伸一
Nobukazu Hoshi

北海道大学
大学院情報科学研究科
准教授

竹本真紹
Masatsugu Takemoto

北海道大学
大学院情報科学研究科
教授

小笠原悟司
Satoshi Ogasawara

1 緒言

モータは電気エネルギーを機械エネルギーに変換する部材として産業機器、工作機械等に古くから使用されているが、近年、電気自動車 (EV)・ハイブリッド電気自動車 (HEV)、電動パワーステアリングといった新しい分野で高性能モータへのニーズが高まっている。これら高性能モータには小型、高効率化の観点から NdFeB 系の希土類磁石を使用した IPM モータが主に使用されており、レアアースとして Nd が使われているほか、磁石の減磁耐力を高める目的で Dy も 7~8% 程度添加されている¹⁾。これらレアアースは資源の稀少さと特定地域に偏在するという問題を有しており、現在供給の大部分を中国に依存しているのが現状である。このような状況からレアアース使用量を低減した省レアアースモータもしくはレアアースを全く使用しない脱レアアースモータの開発が求められている。

脱レアアースモータの一つとしてスイッチドリラクタンスモータ (SRM) がある。本モータは 1838 年にスコットランドの Davidson により最初のモデルが作製されたものであり、磁石を使用しない、機械的に堅牢で高速回転に適するといった特徴を有している。一方で、永久磁石モータに比べてトルク、効率が低いことから SRM の活用は限定的なものとなっているのが現状である。

これに対し、著者らの一部はモータ設計を見直すとともにコア材に低鉄損の 6.5% けい素鋼板を用いることにより、IPM モータと同レベルのトルク、効率を有する SRM を開発した。ここでは 6.5% けい素鋼板を含む高い素鋼板の特徴および試作を行った SRM の特性について述べる。

2 高い素鋼板

2.1 6.5% けい素鋼板

鋼板の固有抵抗を高めるためには Si 添加が最も効果的である。特に Si を 6.5% 添加すると、磁歪がほぼゼロとなり透磁率および鉄損が最も優れた値を示すことは、1950 年代より知られていた²⁾。しかしながら、Si 添加量が増すと材料の伸びが急激に低下し、圧延により薄鋼板を製造することが困難となる。このため、従来、最高級けい素鋼板の Si 添加量の上限は 3.5% 程度と考えられ、6.5% けい素鋼板の工業生産は長年夢とされていた。この夢の材料の工業化に多くの研究者が取り組んだ結果、1993 年、半導体など機能材料の分野で広く利用されている CVD (Chemical Vapor Deposition) を鋼板の仕上焼鈍工程に組み込んだ連続浸珪プロセスが開発され、世界で初めて 6.5% けい素鋼板が量産されるようになった³⁾。

このプロセスは、スリットノズルを多数配置して広幅鋼帯を高速かつ均一に浸珪処理する技術、反応性の高い炉内で鋼板の粒界酸化を抑制し製品の加工性劣化を防止する技術、反応域での板の絞り変形や鋼帯の蛇行を防止する通板技術、排ガス処理技術、原料再利用技術等、多くの要素技術から成り立っている⁴⁾。また 6.5% けい素鋼板の製品出荷量増加に伴って、その剪断・プレス加工技術も進歩してきており、現在は条件設定を適切にすることによって比較的長時間連続プレスすることも可能となっている⁵⁾。

表 1 に 6.5% けい素鋼板の磁気特性を示す。表中において例えば W10/400 とは磁束密度 1.0T、周波数 400Hz における鉄損を示す。また Si 量は質量% を示している。6.5% けい素鋼板の鉄損は、同じ板厚の方向性電磁鋼板よりも低く、特に磁歪

が非常に小さいのが特徴である。また、アモルファスと比較すると磁歪の点で優れており、フェライトと比較すると磁束密度の観点で優れた材料である。

6.5%けい素鋼板は高周波コア材の中では飽和磁束密度が高く騒音が小さいことから、出力容量が比較的大きく数百Hz～数十kHzの高周波が含まれる電源用途、すなわち無停電電源（UPS）や電車で補助電源、最近では太陽光発電やHEV電源回路のリアクトルコア材料として広く利用されている。

また、6.5%けい素鋼板は高速モータ用のコア材としても優れた特性が期待できる。図1に6.5%けい素鋼板、薄電磁鋼板

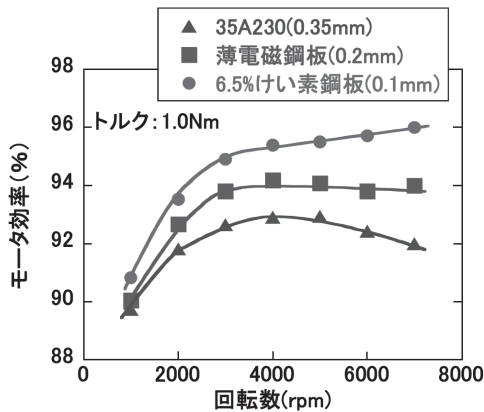


図1 高速モータの効率に及ぼす素材の影響 (35A230、薄電磁鋼板、6.5%けい素鋼板)

および35A230を用いて作製したモデルモータ（IPMモータ、4極、分布巻き、最大出力2kW）の特性を示す⁶⁾。6.5%けい素鋼板を用いることにより薄電磁鋼板よりも更に高い効率を得られており、その効果は高回転域になるほど大きくなる。

2.2 傾斜磁性材料

電磁鋼板の高周波鉄損を低減するためには渦電流損を低減する必要があるが、従来、渦電流損を低減する手段として、板厚を薄くする、または添加元素の量を増やして固有抵抗を高める方法が講じられてきた。しかしながら板厚を薄くしすぎると、鋼板製品のコストアップを招くばかりでなくコア加工費も増大するため好ましくない。また添加元素の増加は鋼板の飽和磁束密度Bsを低下させてしまうという問題があった。このような課題に対し、浸珪技術を活用した新しい電磁鋼板が開発されている。図2に示す連続浸珪プロセスにおいて、鋼板表面とSiCl₄ガスを反応させた後、Siが板厚中心部まで十分に拡散して均一化する前に冷却すると、図3のSiプロファイルに示すように表層のSi濃度が高く、板厚中央部のSi濃度が低いという板厚方向にSi濃度分布を有する鋼板を得ることができる（以降、傾斜磁性材料と表記）。図4に傾斜磁性材料の磁気特性を6.5%けい素鋼板と比較して示す⁷⁾。10kHz以上の周波数領域において、6.5%けい素鋼板を凌ぐ低鉄損特性を示すことがわかる。また図5に、両者の鉄損をヒステリシス損と渦電流損に分離して比較した結果を示す。傾斜磁性材料は、6.5%けい素鋼板に比べて、ヒステリシス損が

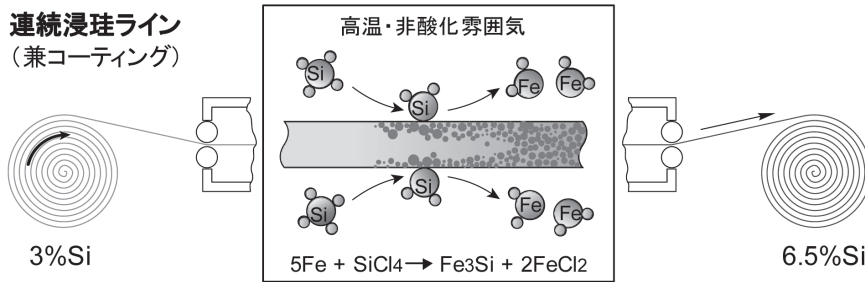


図2 連続浸珪ラインによる高けい素鋼板製造プロセス

表1 6.5%けい素鋼板の磁気特性

材料	板厚 (mm)	磁束密度 Bs(T)				最大透磁率	磁歪 λ _{10/400} (×10 ⁻⁶)
			W10/400	W5/1k	W1/10k		
6.5%けい素鋼板	0.10	1.29	5.7	5.4	8.3	23000	0.1
方向性電磁鋼板	0.10	1.85	6.1	7.0	10.4	24000	-0.8
	0.23	1.92	7.8	10.4	30.0	92000	
無方向性電磁鋼板	0.20	1.51	10.4	11.0	24.0	15000	7.8
	0.35	1.50	14.4	15.0	33.0	18000	
Fe基アモルファス	0.03	1.38	1.5	1.8	3.0	300000	27
フェライト	Bulk	0.37			2.0	3500	21

大きい代わりに渦電流損が小さいという特徴を有する。このため渦電流損の比率が大きくなる高周波域において、傾斜磁性材料は優れた低鉄損特性を示す。傾斜磁性材料のこのような特性は、板厚方向のSi分布を最適化することにより表層に磁束が集中した効果と考えられている^{8,9)}。

このように傾斜磁性材料は、Si含有量を6.5%まで増やさなくてもSi濃度分布を付与することで6.5%けい素鋼板より渦電流損を低減できることから、高いBsと低い高周波鉄損の両立が求められる分野に適したコア材として今後の展開が期待される。現在、傾斜磁性材料はその優れた直流重畳特性から、6.5%けい素鋼板にも増して好適な高周波リアクトルのコア材として使用されている⁶⁾。

3 SRMの特徴

磁石を一切使用しない脱レアアースモータの一つにスイッチドリラクタンスモータ (SRM) がある。基本的な固定子6極、回転子4極のSRMの構造を図6に示す。図よりわかるようにSRMは、回転子、固定子ともに突極構造を有しており、突極構造に起因した磁気抵抗の差により回転子にトルクを発生させることができる。

SRMの特徴をIPMモータと比較すると以下の長所がある。

- ・永久磁石を使用しない (脱レアアース)
 - ・構造が簡単で堅牢
 - ・高温や高速回転に適する
 - ・リサイクル性に優れる
- 一方、短所として
- ・トルクが低い
 - ・効率が低い
 - ・振動、騒音、トルクリプルが大きい

といったことが一般的に指摘されている。これらの内、トルクに関しては、多極化により向上することが示されており¹⁰⁾、さらに固定子のティースにテーパをつけることにより一層の向上が図られている¹⁰⁾。一方、SRMの高効率化のためには鉄心材料の鉄損を極力低減することが重要となる。このような鉄心材料として前章で述べた6.5%けい素鋼板が挙げられる。そこで、脱レアアースモータとしてSRMに着目し、6.5%Si鋼を活用することによりSRMの高効率化について検討した。

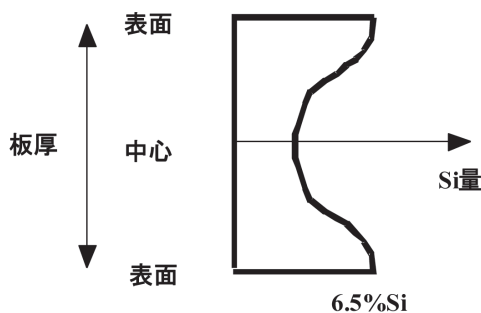


図3 傾斜磁性材料の板厚方向のSiプロファイル

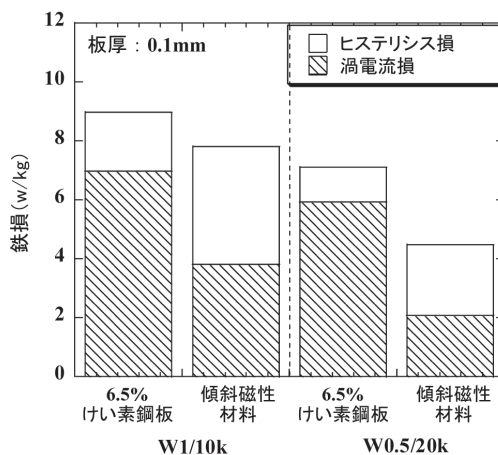


図5 6.5%けい素鋼板と傾斜磁性材料のヒステリシス損と渦電流損

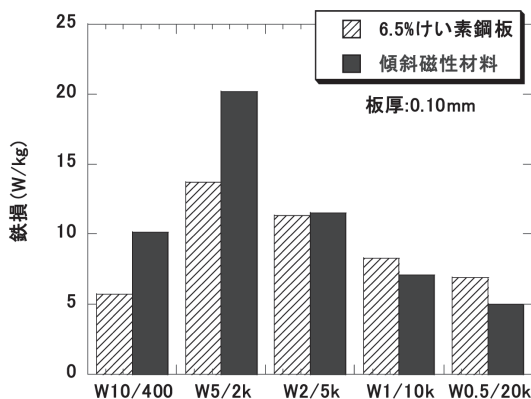


図4 6.5%けい素鋼板と傾斜磁性材料の高周波鉄損の比較

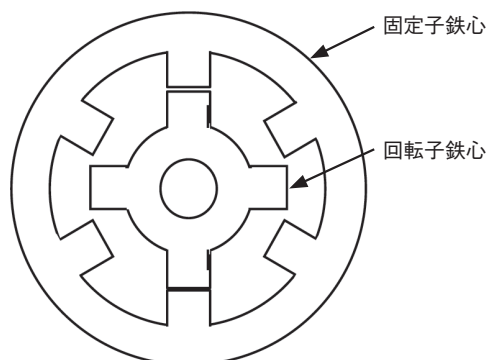


図6 6/4極SRMの構造

4 6.5%けい素鋼板を用いたSRMの数値解析と試作結果

4.1 モータ仕様

ハイブリッド電気自動車の駆動モータはモータ1台当たりの希土類磁石の使用量が0.7～2kg程度であり希土類磁石中にはDyが7～8%と多く含まれている¹⁾。ハイブリッド電気自動車は今後の急激な市場拡大が見込まれることから、将来脱レアアースモータへの要望は非常に高くなるものと予想される。そこで、既存のハイブリッド電気自動車用IPMモータに相当する50kWの出力を有するSRMを試作することとした。図7¹¹⁾、表2¹²⁾にその構造と仕様を示す。外径は269mm、軸長は156mm、極数は18/12極である。鉄心材料は板厚0.1mmの6.5%Si鋼を用い、比較のため板厚0.35mmの3%Si鋼(35A300)でも試作を行った。巻線は各歯ごとに短節集中巻で施されている。3つごとのコイルを6歯分直列に接続して一相を構成している。巻線のスロット占積率は、整数で構成するために、目標とするIPMモータの57%よりやや小さい

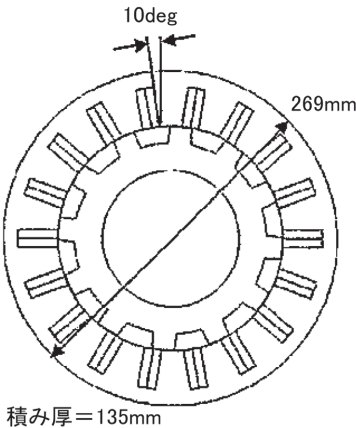


図7 SRMの構造

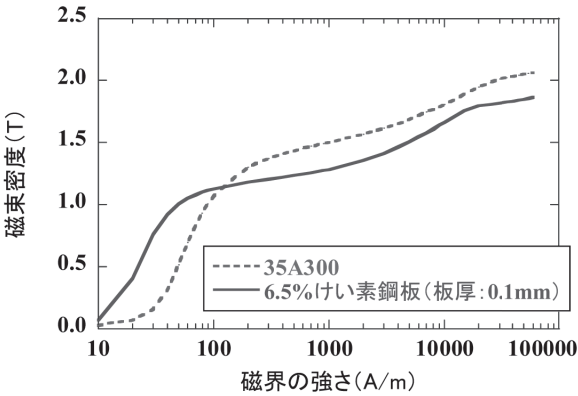
表2 SRMのスペック

外径[mm]	269
回転子直径[mm]	180
コイルエンドを含む軸長[mm]	156
積厚[mm]	135
極数	18/12
スロット巻線占積率[%]	54
最大電圧[V]	500
出力[kW]	50
最大トルク[Nm]@1,200r/min	400
トルク/容積[Nm/l]	45

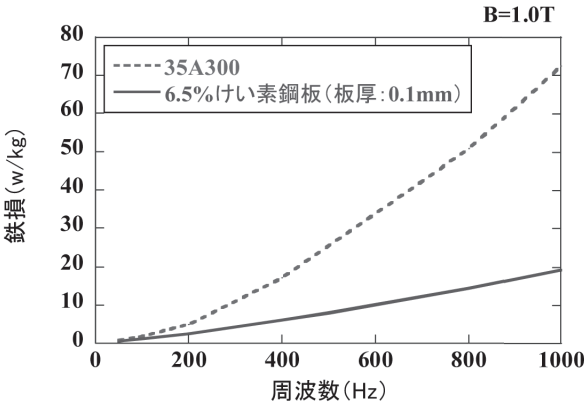
54%とした。図8に材料のBH曲線および鉄損曲線を示す。鉄損の周波数依存性に着目すると、3%Si鋼では周波数が高くなるにつれ鉄損は急激に増加するが、6.5%Si鋼の鉄損増加は少なく、1kHzでは3%Si鋼の1/4程度の鉄損となっている。このことから、6.5%Si鋼を用いることによりSRMの高効率化が期待できる。

4.2 解析結果

モータ効率に及ぼす鉄心材料の影響を把握するため、SRM専用解析ソフト「PC-SRD」で数値解析を行った。600～7000rpmの範囲で電圧、電流、励磁開始角、励磁終了角を最適に選び、トルク、効率曲線を作成した。図9に3000rpmにおける効率の出力依存性を示す¹¹⁾。これより6.5%Si鋼では3%Si鋼に比べ高速域での効率が2～3%程度向上しており94.5～96%といった効率を得られることがわかる。これはIPMモータに匹敵する効率である。図10に6.5%けい素鋼板を用いたSRMの効率マップを示す¹¹⁾。これより、3000rpmで95%、6000rpmで97%という非常に高い効率が計算上可能であることがわかる。



(a) BH 曲線



(b) 鉄損

図8 コア材の磁気特性

4.3 試作結果

前述の数値解析より6.5%けい素鋼板を用いることにより、磁石を用いないSRMであっても、IPMモータと遜色のない非常に優れた効率となることが明らかとなった。そこで、解析の妥当性を検証するためモータ試作を行い、各種特性を評価した。図11に試作したSRMを示す¹³⁾。固定子、回転子ともに板厚0.1mmの6.5%けい素鋼板を用いた。

表3に2000～6000rpmの各速度での最高効率点での入力

電流、トルク、出力、銅損、鉄損、効率を示す¹³⁾。3000rpm以上で94%以上の効率となり、5000rpm以上で95%以上の非常に高い効率が得られている。表4に2000～6000rpmにおいて出力50kW付近の特性を示す¹³⁾。目標とする50kW以上の出力が達成されており、効率も4000rpmにて93.8%が得られている。最高効率が解析値に比べ若干低下した原因は、実モータでは鉄損とその他の損失が解析よりも大きく発生したためであるが、この原因については今後明らかにしていく予定である。

5 結言

本論文では脱レアースモータとしてSRMを取り上げ、鉄損特性に優れた6.5%けい素鋼板をコア材に適用することにより95%を超える最高効率が達成できることを示した。これは従来のSRMの効率レベルを大きく凌駕するものであり、現在主流である永久磁石式のIPMモータに匹敵する。今後、さらなる高効率化、高出力化の検討も進められており、量産レベルでの適用も遠くないものと確信している。

参考文献

- 1) 森本慎一郎：2011年磁気応用技術シンポジウム, A2-2-1
- 2) R.M.Bozorth：Ferromagnetism, D.Nostrand Co. Inc.,

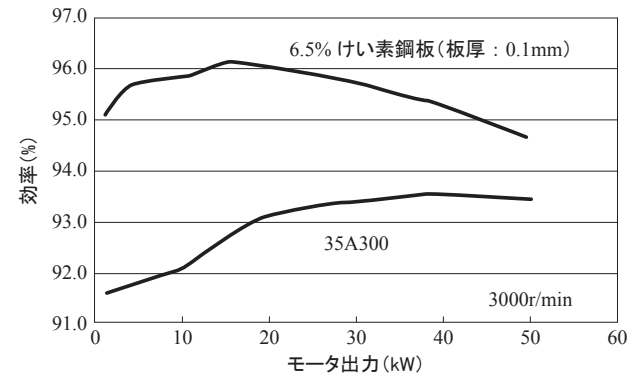


図9 3000rpmにおける効率のモータ出力依存性

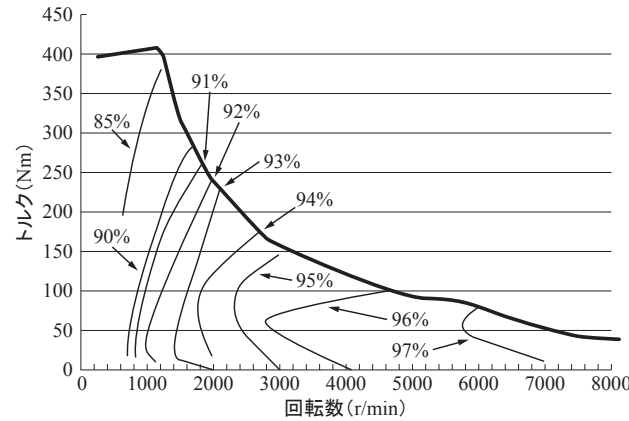


図10 6.5%Si鋼を使用したSRMの効率マップ

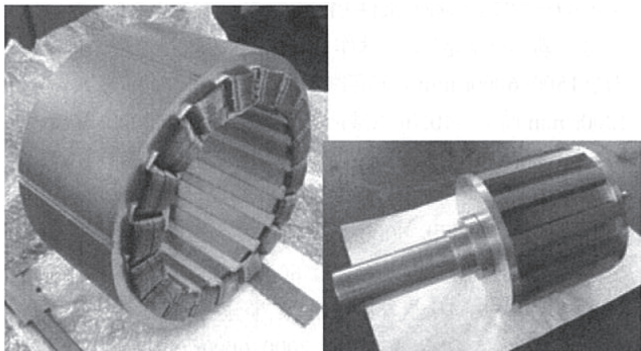


図11 試作SRMの固定子と回転子

表3 試作SRMの最高効率点

Rotational speed [r/min]	2000	3000	4000	5000	6000
V_{rms} [V]	368	440	481	481	462
I_{rms} [A]	53.5	51.0	46.5	39.9	25.1
P_{in} [kW]	19.6	26.0	27.0	24.8	13.8
Torque [Nm]	84.4	77.5	60.4	44.3	19.6
P_{out} [kW]	17.7	24.3	25.3	23.2	12.3
W_c [W]	555	505	420	309	123
W_i [W]	859	1031	1082	823	1369
Efficiency [%]	92.6	94.1	94.5	95.4	95.1

表4 試作SRMの50kW出力

Rotational speed [r/min]	2000	3000	4000	5000	6000
V_{rms} [V]	422	459	507	512	512
I_{rms} [A]	165	101	89.3	76.0	83.6
P_{in} [kW]	61.7	53.9	58.0	55.7	53.5
Torque [Nm]	255	158	129	98.2	76.6
P_{out} [kW]	53.5	49.9	54.1	51.4	48.1
W_c [W]	5324	1980	1544	1122	1356
W_i [W]	2831	1916	2064	2698	3251
Efficiency [%]	86.8	92.8	93.8	93.1	91.4

- N.J., (1951) 77.
- 3) 高田芳一, 阿部正広, 田中靖, 岡田和久, 平谷多津彦: まてりあ, 33 (1994) 4, 423.
- 4) H.Haiji, K.Okada, T.Hiratani, M.Abe and M.Ninomiya: J.Magn.Magn.Mater., 160 (1996) 109.
- 5) 平谷多津彦, 藤田耕一郎, 笠井勝司, 二宮弘憲: 電気学会産業応用部門大会, 3-36 (2011)
- 6) 尾田善彦, 志賀信勇, 河野雅昭, 本田厚人: 平成21年電気学会全国大会, 2-S5-5 (2009)
- 7) 浪川操, 二宮弘憲, 山路常弘: JFE技報, (2005) 8, 11.
- 8) 藤田耕一郎, 高田芳一: 熱処理, 39 (1999) 4, 200.
- 9) Yoshihiko Oda, Masaaki Kohno, Atsuhito Honda: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320 (2008) 20, 2430-2435.
- 10) 高野祐一, 前田知広, 千葉明, 浅間淳一, 竹本真紹, 小笠原悟司, 深尾正: 電気学会回転機研究会資料RM-09-32, (2009) , 1-6.
- 11) Akira Chiba, Yuichi Takano, Motoki Takeno, Takashi Imakawa, Nobukazu Hoshi, Masatsugu Takemoto and Satoshi Ogasawara: IEEE Transactions on industry applications., 47 (2011) 3, 1240.
- 12) 高野祐一, 前田知広, 千葉明: 平成21年電気学会産業応用部門大会, Y99
- 13) 竹野元貴, 星伸一, 千葉明, 竹本真紹, 小笠原悟司: 電気学会全国大会 5-002, (2011)

(2012年9月27日受付)