

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246052

研究課題名(和文) 高効率高磁束密度低速回転アキシアルギャップ型デュアル構造発電機の開発

研究課題名(英文) Development of axialgap typed dual structure generator with high efficiency, high induction and low speed rotation.

研究代表者

榎園 正人 (ENOKIZONO, Masato)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：40136784

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,600,000円、(間接経費) 11,280,000円

研究成果の概要(和文)：低速高効率発電機の開発に必要な要件は次の通りである。1.高密度設計による小型軽量化。2.ベクトル磁気特性技術を適用,E&Sモデルを導入し、ベクトル磁気特性解析により、磁気損失の解析。3.増速機に発生する機械損を減少させ、発電効率を向上。4.鉄心材料の磁気特性の劣化の防止。5.ベクトル磁気特性制御技術による鉄心、コイル、永久磁石構造の整合。さらに方向性電磁鋼板の磁区構造の微細分化技術の開発で圧延に直角方向の磁気損失を半減させることに成功しベクトル磁気特性制御材を開発した。これは変圧器用鉄心材料にもかかわらず、回転機用鉄心材料としても使用可能で大幅な磁気損失の低減が望め高効率化が期待できる。

研究成果の概要(英文)：A necessary requirement is as follows for the development of a low-loss and highly efficiency.1.The decrease of loss for high efficiency can be obtained from the magnetic power loss analysis by the vector magnetic characteristic analysis that introduces the E&S model.2.The vector magnetic characteristic technology is applied for the low loss and upgrading to highly efficiency.3.The decrease of mechanical loss occurred in the step-up gear is decreased, and the power generation efficiency is improved. As a result, the mechanical loss can be decreased by 80% or more.4.Deterioration in the magnetic characteristic of the core material is prevented. The induced annealing method was designed for the decrease of the residual stress generated in manufacturing.5.The adjustment of the core, the coil, and the permanent-magnet structure is attempted by the vector magnetic characteristic control technology.The vector magnetic characteristic control material was developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：発電機 高効率 エネルギー 磁気増速機 ベクトル磁気特性

### 1. 研究開発当初の背景

エネルギー問題や環境問題が重要視され、省エネルギーのみならず節電にまで至るようになってきた。また、電気自動車、ハイブリッド車の出現の影響も大きい。そのような中で2011年3月11日に東北大地震で原子力発電所が破壊され様々な妨げ問題を引き起こし、原子力発電が一斉に停止した。今までとは異なる社会の有り様が模索されていた。

### 2. 研究の目的

高効率発電のためには低速回転多極のダイレクト駆動の発電機が求められる。さらに、昨今のレアースメタルの入手困難から、レアース永久磁石を必要としない高効率で高密度(出力/機体重量)の低速回転ダイレクト発電機を開発する。高密度化(小型・軽量化)するため、高磁束密度領域で低損失高効率化を目指す。デュアルギャップ構造でフェライト磁石で事足りる多極マイクロ発電機を開発する。その開発方法の基本はベクトル磁気発生理論と永久磁石の磁束集束化を基礎技術として適用する。(1)高磁束密度機器の信頼性開発の確立。(2)電機子鉄心の高磁束密度化とデュアル構造。(3)アキシアルギャップ型発電機の開発設計と試作。(4)42rpm極低速回転発電機に向けた技術開発。

### 3. 研究の方法

風力発電用発電機の低損失・高効率化の仕様要求は、(1)発電のための回転速度が低いいため、銅損よりも鉄損が支配的な鉄機械であるため、鉄心材料の有効活用技術を背景に低損失化設計をする必要がある。(2)鉄心の単位重量当たりの発電量を増加させるためには、鉄心の高磁束密度レベルでの設計が必要で、ギャップ磁束の磁束密度を上げることが重要である。(3)通常、低速回転での発電では発電機が低速ダイレクト発電に対応していないので、機械式歯車による増速機を必要不可欠としているため、歯車の接触抵抗などによる機械損が大きく、発電機の効率を50%以下に低下させており、この機械損の大幅な低減が風力発電システムでは重要となる。(4)風力

発電は発電電圧並びに回転数が変動するため、蓄電設備との統合が必要となる。以上の問題点の解決を目指して研究を遂行し、本システムの活用として発電分散化による独立給電システムとしてファミリーマイクログリッドの構築研究に繋ぎ、発展研究をする。

### 4. 研究成果

(1)永久磁石の磁束集束配列構造を改良し、集束部分に鉄心を挿入することにより、ギャップ磁束を1.8Tまで上げることが成功した。(2)発電機の鉄心の低損失・高効率化設計のために開発したダイナミックE&Sモデルの高磁束密度化レベルでの適用のための改良モデルを開発し、ほぼ2T領域までのデータを背景に1.8T領域までのベクトル磁気発生解析を可能にした。(3)磁気歯車機構をもとにした非接触でメンテナンスフリーの磁気増速機を開発し、歯車比1:5を実現した。これにより機械式の歯車による増速機に比べて80%以上の損失低減化を実現できる。またこれにより、風力発電機の発電効率を従来の40-50%台から80%以上の高効率風力発電システムを実現でき、実証実験の段階に到達できた。(4)実証実験のため、蓄電池(リチウムイオン)に充電し、その効果を検証するため蓄電池を購入することにし、1kW当たり最も格安な電気自動車(リーフ)の中古車を購入し、風力発電使用に専用充電ステーションを使用することなく充電できるように改造を行った。これにより、実証実験システムの骨格が完成する。(5)これまでの研究成果からラジアル・デュアル構造よりアキシアル・デュアルギャップ構造の方が製作・組立がしやすくかつ作成費用も安いことから当初の研究計画を変更し設計を行った。(6)本発電機は5.5kW級で回転速度200~400rpmを想定し磁気増速比1:5で、縦型風車構造とする風力発電機システムの開発・製作に着手した。完成は平成26年度9月の予定である。本研究はマイクロ発電用(200kW以下)として研究開発したもので、我が国における電力の分散化に貢献できるものである。引き続き今後も継続して実証実験を行い、問題点の把握に努め、実用化を推進していくつもりである。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計69件)

甲斐 祐一郎 , 榎園 正人 , 城門 由人  
せん断応力下における無方向性電磁鋼板のベ  
クトル磁気特性測定. IEEJ transactions on  
fundamentals and materials  
133(12), P654-659. 2013. 12. 1

磁塩田 活幸 , 戸高 孝 , 榎園 正人. 性  
体併用磁束集束型永久磁石配列を用いたアキ  
シャルギャップ発電機の開発. 日本 AEM 学会  
誌 21(2), P284-289 2013/06/

岩尾 真吾 , 戸高 孝 , 榎園 正  
人. IM/PMハイブリッドモータの有限要素電磁  
界解析による検討日本 AEM 学会誌 21(2),  
P278-283. 2013. 6

岡 茂八郎 , 小笠原 崇人 , 榎園 正人  
小型励磁用内挿コアを用いた実機ステータコ  
アの磁気特性評価日本 AEM 学会誌  
21(2), P116-121. 2013. 6

榎園 正人 ビオ・サバールの法則とアンペ  
ールの法則. 日本 AEM 学会誌  
21(1), P58-65. 2013. 10

藤田 智之 , 安藤 嘉則 , 長屋 幸助 ,  
榎園 正人 , 戸高 孝 , 杉浦 和伸 高減速表  
面磁石型磁気歯車. 日本機械学会論文集 C 編  
79(807), p4452-4463. 2013. 11. 25

下地 広泰 , 戸高 孝 , 榎園 正人. 熱的  
測定法による鉄損分布可視化. IEEJ  
transactions on fundamentals and  
materials Vol. 133. No. 4, P217-223. 2013

若林 大輔 , 戸高 孝 , 榎園 正人 高磁束  
密度下における電磁鋼板の 2 次元磁気ひずみ  
. 電気学会論文誌. A, 基礎・材料・共通部  
門誌 133(1), p20-27. 2013

UTSUNOMIYA Kenshiro , TODAKA Takashi ,  
ENOKIZONO Masato. Magnetic Field and  
Oscillating Analysis of Hybrid Suspension  
Systems Combining Magnetic Spring and  
Damper (Special Issue on the Asia-Pacific  
Symposium on Applied Electromagnetics and  
Mechanics. Journal of the Japan Society of Applied  
Electromagnetics and Mechanics 21(3), 2013

ENOKIZONO Masato. Vector Magnetic  
Technology for Development of High  
Efficiency Machines in Oita National  
Project (Special Issue on the Asia-Pacific  
Symposium on Applied Electromagnetics and  
Mechanics. Journal of the Japan Society of Applied  
Electromagnetics and Mechanics 21(3). 2013

Keiichiro OOKA , Shigeru AIHARA , Takashi  
TODAKA , Masato ENOKIZONO. Measurement of  
Vector Magnetic Property Distribution in  
a Transformer Model Core by using a Vector  
Magnetic Sensor. Journal of the Japan Society of  
Applied Electromagnetics and Mechanics 21(3). 2013

Mohachiro OKA , Terutoshi YAKUSHIJI , Yuji  
TSUCHIDA , Masato ENOKIZONO Examination of  
the Inductance Method for Non-Destructive  
Testing in Structural Metallic Material by  
Means of the Pancake-type Coil. Journal of  
the Japan Society of Applied Electromagnetics and  
Mechanics 21(3). 2013

Tomoyuki FUJITA , Yoshinori ANDO ,  
Kosuke NAGAYA , Masato ENOKIZONO , Takashi  
TODAKA High Gear Ratio Surface Permanent  
Magnetic Gear, Kazunobu SUGIURA.  
TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF  
MECHANICAL ENGINEERS Series C Vol. 79 No.  
807. 2013

Yuichiro Kai , Shingo Zeze , Takashi  
Todaka , Masato Enokizono Kai Magnetic  
Characteristic Analysis and Measurement  
of Vector Magnetic Property of a  
Non-oriented Electrical Steel Sheet Under  
High Magnetic Flux Condition, IEEE  
Transactions on Magnetics, Vol. 49, No5  
p. 1981-1984. 2013. 5. 5

Shingo Zeze , Yuichiro Kai ,  
Takashi Todaka , Masato Enokizono  
Complex-Variable Vector Magnetic  
Characteristic Analysis Considering  
Residual Stress Effect IEEE TRANSACTIONS

ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 2, P 7008204-7008204.2014.2

Shingo Zeze, Yuichiro Kai, Takashi Todaka, Masato Enokizono Vector Magnetic Characteristic Analysis of a PM Motor Considering Residual Stress Distribution with Complex-Approximated Material Modeling IEEE Trans. On Magn., Vol. 48, No. 11, pp. 3352-3355, 2012.

Shigeru Aihara, Hiroyasu Shimoji, Takashi Todaka, Masato Enokizono Measurement of Local Vector Magnetic Properties in Laser Scratched Grain-Oriented Silicon Steel Sheer with a Vector-Hysteresis Sensor IEEE Trans. On Magn., Vol. 48, No. 11, pp. 4499-5402, 2012.

甲斐祐一郎, 植田雄二, 戸高孝, 榎園正人 ロックインアンプを用いた電磁鋼板の磁気ひずみ測定法の検討, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 132, No. 11, pp.1033-1038, 2012

Daisuke Imamura, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Fe-Mn-Si/6.5wt%Si-Fe Bilayer Ribbons produced by using Melt Spinning Technique Material Science Forum, Vol. 721, pp. 53-58, 2012

Yuta Enokizono, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Development and Verification of Viscoelasticity Measurement System of MR Fluids in Magnetic Field Material Science Forum, Vol. 721, pp. 114-119, 2012

②① Takayuki Kai, Shigeru Aihara, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Measurement of Local Vector Magnetic Properties in Three-Phase Induction Motor Model Core Using Small-sized Vector Hysteresis Sensor, Material Science Forum, Vol. 721, 219-224, 2012

②② Asaru Oka, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Study of improve transmission torque for A Surface Permanent Magnet type Magnetic Gear Material Science Forum, Vol. 721, pp. 237-242, 2012

②③ 甲斐祐一郎, 植田雄二, 戸高孝, 榎園正人, 応力下における無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性測定法, 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門誌), Vol. 132, No. 10, pp.930-935, 2012

②④ Atsushi Ikariga, Akira Goto, Takuya Okamoto, Takashi Todaka, Masato Enokizono Development of a High-Density Linear Synchronous Motor, Journal of the

Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No.2, pp. 15-20, 2012

②⑤ Kyohei Miyamoto, Takashi Todaka, Masato Enokizono Analysis of Vector Magnetic Properties in a Three-Phase Three-Leg Transformer Model Core Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No.2, pp. 118-123, 2012

②⑥ Takayuki Kai, Shigeru Aihara, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Distributions of Local Vector Magnetic Property in a Three-Phase Induction Motor Model Core by using a Small-Sized Vector Hysteresis Sensor, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No.2, 149-154, 2012

②⑦ Takashi Todaka, Masato Enokizono, Improvement of Magnetic Properties of Fe-Mn-Si Based Ferromagnetic Shape Memory Ribbons with Heat-Treatment under Tensile Stress, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No.2, pp. 174-179, 2012

②⑧ Shigeru Aihara, Hiroyasu Shimoji, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Magnetic Property Distribution in a Magnetic Circuit Model Core Measured with a Very Small Two-Dimensional Vector Magnetic Sensor, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 20, No.2, 192-197, 2012

②⑨ S. Ueno, Todaka, M. Enokizono, Vector Magnetic Property of Fe-based Amorphous Sheets under Alternating Flux Condition, Journal of Applied Physics, Vol. 111, No. 7, 07A327 (1-3), 2012.

③⑩ Y. Nakahata, B. Borkowski, H. Shimoji, K. Yamada, T. Todaka, M. Enokizono, Precise Measurement of Magnetization Characteristics in High Pulsed Field, Journal of Applied Physics, Vol. 111, No.7, 07A712 (1-3), 2012.

その他(39件)

【学会発表】(計 198 件)

1 Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Influence of stress on two-dimensional magnetostriction of a non-oriented electrical steel sheet.

INTERMAG.2012.5.8. Vancouver(カナダ)

2 Masato Enokizono, Vector Magnetic Characteristic Technology for Development of Super Premium Efficiency (IE4 Level) Motor, (Invited) INTERMAG.2012.5.8. Vancouver(カナダ)

3 Mohachiro Oka, Kazunori Shimada, M. Enokizono, Influence of External Compressive Stress on Circumferential Iron Loss Distribution in an Induction Motor Stator Core. INTERMAG.2012.5.9. Vancouver(カナダ)

4 Hiroyasu Shimoji, Bartosz E. Borkowski, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Accuracy in measuring iron loss of electrical steel sheets with a thermographic camera, INTERMAG.2012.5.9. Vancouver(カナダ)

5 Hiroyasu Shimoji, Bartosz E. Borkowski, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Iron loss under rotating flux in electromagnetic steel sheets with high flux density by using iron loss visualization system, INTERMAG.2012.5.9. Vancouver(カナダ)

6 Shingo Zeze, Yuichiro Kai, Takashi Todaka, Masato Enokizono Vector Magnetic Characteristic Analysis of a PM Motor considering Residual Stress Distribution with Complex-approximated Material Modeling. INTERMAG.2012.5.9. Vancouver(カナダ)

7 Masato Enokizono, Daisuke Wakabayashi, Takashi Todaka, Two-dimensional Magnetostriction of Grain-oriented Electrical Steel Sheet under Rotating Flux Conditions. INTERMAG.2012.5.9. Vancouver(カナダ)

8 Tomasz Chady, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Vector magnetic field camera for rapid evaluation of permanent magnets. INTERMAG.2012.5.10. Vancouver(カナダ)

9 Shigeru Aihara, Hiroyasu Shimoji, Takashi Todaka, Masato Enokizono Measurement of Local Vector Magnetic Properties in Laser Scratched Grain-oriented Silicon Steel Sheet with a Microscopic Vector-hysteresis Sensor. INTERMAG.2012.5.11. Vancouver(カナダ)

Masato Enokizono, Vector Magnetic Characteristic Analysis Technology for Development of Super Premium High Efficiency (IE4 Level) Motor, ICF 2012.6. Dairen (中国)

Takash Todaka, Masaru Oka, Masato Enokizono, Improvement of Torque Characteristic of Flux-Concentration-Type Surface Permanent Magnet Motors, APSAEM, 2012.7.5 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Kenshiro Utsunomiya, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Magnetic field and oscillating analysis of hybrid suspension systems combining magnetic spring and damper, APSAEM, 2012.7.25 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Takashi Todaka, Subaru Matsumura, Masato Enokizono, Magnetic Properties and Heat-treatment Conditions of Permanent Magnet Wires Produced by Spinning Method In Rotating Liquid, APSAEM, 2012.7.25 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Mohachiro Oka, Terutoshi Yakushiji, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, Examination of the Inductance Method for Non-Destructive Testing in Structural Metallic Material by means of the Pancake-type Coil APSAEM, 2012.7.26 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Effect of Stress on Vector Magnetic Property and Two-dimensional Magnetostriction of a Non-oriented Electrical Steel Sheet, APSAEM, 2012.7.26 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

S. Nagata, G. Nagasaka, M. Enokizono, Local magnetic property measurement by means of a miniature transducer APSAEM, 2012.7.26 Hb Chi Minh city, Vietnam

Keiichiro Ooka, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Measurement of Vector magnetic property distribution in a transformer model core by using a vector magnetic sensor, APSAEM, 2012.7.26 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Masato Enokizono, Vector Magnetic Characteristic Technology for Development of High Efficiency Machines in Oita National Project, APSAEM, 2012.7.26 Hb Chi Minh city, (ベトナム)

Yasushi Nakahata, Bartosz E. Borkowski, Hiroyasu Shimoji, Koji Yurada, Takashi Todaka, Masato Enokizono, Study on Improvement of Coercive Force in Sintered Nd-Fe-B Magnets using Heat Treatment, REPM12, 2012.9.3 (長崎県)

Yasushi Nakahata, Bartosz E. Borkowski, Hiroyasu Shimoji, Koji Yurada, Takashi Todaka, Masato

Enkizono, Comparison of Distributions of Magnetic Flux Density over Various Permanent Magnets, REPM12, 2012.9.4 (長崎県)

②1 Yuichi Kai, Shingo Zeze, Takashi Todaka, Masato Enkizono, Magnetic Characteristic Analysis and Measurement of Vector Magnetic Property of a Non-oriented Electrical Steel Sheet under High Magnetic Flux Condition, CEFC2012.11.13 (大分県)

②2 Takeru Sato, Hiroyasu Shimoji, Takashi Todaka, Masato Enkizono, Approximation of Coefficients used in Integral-type E&S Modeling for Magnetic Characteristic Analysis, CEFC2012.11.13 (大分県)

②3 Shoichiro Nagata, Masato Enkizono, Direct Solver for Sparse Matrix of Integral Type E&S Modeling FE Analysis, CEFC2012.11.13 (大分県)

②4 Torayuki Fujita, Yoshinori Ando, Kousuke Nagaya, Masaru Oka, Takashi Todaka, Masato Enkizono, Kazunobu Sugiura, Development on Surface Magnet Gears with New Magnet Arrangement and Optimal Shape of Stationary Pole Pieces, CEFC2012.11.13 (大分県)

②5 Masaru Oka, Takashi Todaka, Masato Enkizono, Three-dimensional Boundary Element Analysis of Coupled magnetic field and moving problem of a magnetic gear model, CEFC2012.11.14 (大分県)

②6 Ryuichi Koga, Takashi Todaka, Masato Enkizono, Vector Magnetic Characteristic Analysis of a Synchronous Reluctance Motor Model Core utilizing Grain-Oriented Electrical Steel Sheet, CEFC2012.11.14 (大分県)

(その他172件)

[図書](計1件)

べ外磁気特許技術(モータの低損失・高効率検査法)

[産業財産権]

出願状況(計10件)

名称: 磁気歯車装置

発明者: 長屋幸助, 藤田智之, 榎園正人, 戸高孝

権利者: 長屋幸助, 藤田智之, 榎園正人, 戸高孝

種類: 特願

番号: 2012-154163

出願年月日: 2012.07.09

国内外の別: 国内

名称: 発電装置

発明者: 長屋幸助, 藤田智之, 榎園正人, 戸高孝

権利者: 長屋幸助, 藤田智之, 榎園正人, 戸高孝

種類: 特願

番号: 2012-154162

出願年月日: 2012.07.09

国内外の別: 国内

名称: 磁気歯車装置

発明者: 榎園正人, 戸高孝, 藤田智之, 長屋幸助

権利者: 榎園正人, 戸高孝, 藤田智之, 長屋幸助

種類: 特願

番号: 2012-154161

出願年月日: 2012.07.09

国内外の別: 国内(その他7件)

取得状況(計10件)

名称: 磁気歯車装置

発明者: 榎園正人, 戸高孝, 藤田智之, 長屋幸助

権利者: 榎園正人, 戸高孝, 藤田智之, 長屋幸助

種類: 特願

番号: 2011-186100

取得年月日: 2013.10.18

国内外の別: 国内(その他9件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者: 榎園正人(ENOKIZONO Masato)

大分大学 工学部 教授

研究者番号: 40136784

(2) 研究分担者: 戸高孝(TODAKA Takashi)

大分大学 工学部 教授

研究者番号: 50163994

研究分担者: 槌田雄二(TUCHIDA Yuuji)

大分大学 工学部 助教

研究者番号: 80284785