

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420241

研究課題名(和文) 圧粉磁心を用い永久磁石量を抑えた再生エネルギー用発電機システムの開発

研究課題名(英文) Development of a generator system for renewable energy using soft magnetic composite core and less permanent magnet

研究代表者

石川 赴夫 (Ishikawa, Takeo)

群馬大学・大学院理工学府・教授

研究者番号：40159695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化対策のために再生可能エネルギーを利用した発電システムの開発が急務となっている。本研究の目的は小水力発電や風力発電で使用するために、出力が高く効率も良く信頼性の高い発電機システムを開発することである。同時に、価格が高く産出国に偏りがある永久磁石の使用量を抑えた発電機システムを目指す。革新的な形状を持つ発電機を開発するために、何も無い状態から回転子の形状を設計する方法を開発し、その方法を用いて発電機を設計し試作した。試作機の出力は市販機に比べて46%高く、効率も2%高い特性の発電機を開発できた。また、温度上昇時の磁石減磁を推定する方法を明らかにして、信頼性の高いシステムとした。

研究成果の概要(英文)：The development of a power generation system using renewable energy is necessary for global warming countermeasure. The purpose of this research is to develop a power generating system with high power, high efficiency and high reliability, which is used in micro hydro power and/or wind power system. Moreover, it is to save the amount of permanent magnet, because it is expensive and has bias in the producing country. In order to develop a novel power generation system, we have developed a method for designing the rotor structure from the empty space, and have manufactured the designed one. The developed generator has 46% higher output power and 2% higher efficiency than those of a commercialized one. Moreover, this research has clarified the method for the diagnosis of magnet decrease due to high temperature, and has developed the system with high reliability.

研究分野：電気工学，電気機器

キーワード：再生可能エネルギー 発電機 トポロジー最適化

1. 研究開始当初の背景

近年、石油エネルギーの枯渇問題や CO2 による地球温暖化という深刻な環境問題が引き起こされている。これらの問題に対する解決策として、再生可能エネルギーを利用した発電システムの開発が急務となっている。その中で、小水力発電や風力発電では効率が高く信頼性の高い発電機システムが必要とされている。今後、小水力発電や風力発電システムの需要が増加されることが見込まれるが、永久磁石の材料であるネオジムやジスプロシウム等のレアアースはその産出国に偏りがある他、需要増加が見込まれるため今後さらに価格の高騰が予想される等、安定供給に関して問題がある。更に、アクセスが困難な洋上発電や陸上水力発電の高い信頼性を得るために、運転中の物理量を検出し信号処理によって、システムが故障の一手手前の状態にあるか診断するシステムが望まれている。

2. 研究の目的

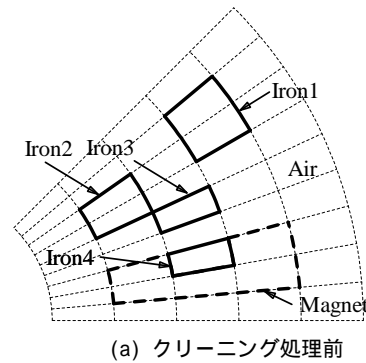
(1) まず、研究代表者らが開発し今年度までの研究でも利用したトポロジー最適化手法を用いて新しい発電機を設計する。この方法は、初期形状を特に指定せず本質的に何も無い状態から大まかな形状を得る方法で、領域全体を細かい小領域に分け、その材質配置を適切に選ぶことによって大まかな形状を得ようとする方法である。何もない状態から出発するために、全く新しい構造でしかも圧粉磁心の特徴を生かすことが出来る機器が開発できる点に特徴がある。具体的には、設計領域をセルに分け各セルに材質を与えて、価格に大きく影響する磁石の量を抑えながら発電出力を最大にするような回転子のおおまかな形状を設計する。

(2) 次に、磁束を3次元で流すことにより、3次元構造を有効利用した小型で高出力の発電機を設計する。その際に積層鉄心が使用できないところには圧粉磁心を用いることを考えて設計する。

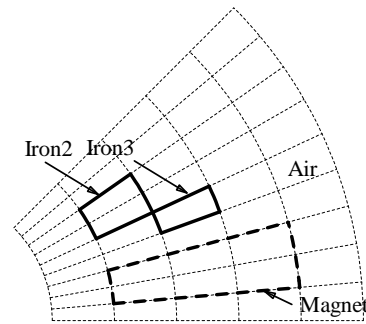
(3) 更に、永久磁石を使用した機器では高温時の磁石の減磁が問題となるので、運転中の物理量を検出し信号処理によって、システムが故障の一手手前の状態にあるか診断するシステムを構築し、信頼性の高い発電システムとすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者らが新たに提案したトポロジー最適化手法を用いて、磁石量を抑えて大きな出力電力を出せる回転子の概形設計を行なう。回転子をいくつかのセルに分け、そのセルの材質を空気（非磁性材料）、鉄心、磁石（半径方向磁化、x方向磁化、y方向磁化）と仮定した状態を1つの個体として、遺伝的アルゴリズムGAを用いて最適化していく。GAをそのまま適用すると、鉄心内に小さな磁石の塊が多数散らばるといった結果となつて

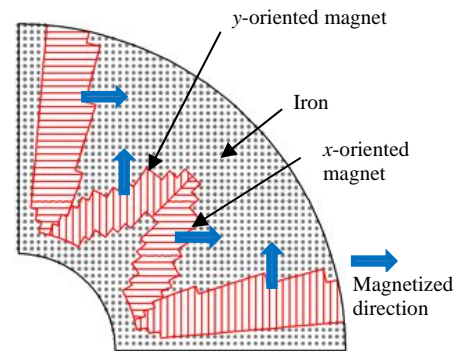


(a) クリーニング処理前

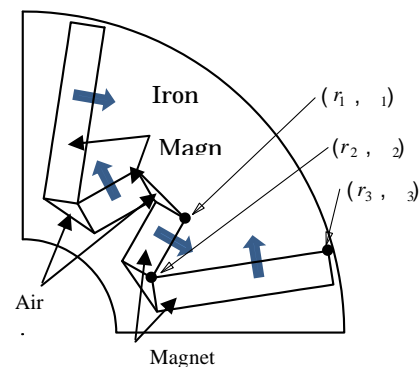


(b) クリーニング処理後

図1 材料のクラスターとクリーニング法



(a) トポロジー最適化で得た回転子構造



(b) 製作容易な形で表した回転子構造
図2 製作容易さを考慮した設計

しまった。そこで、図1に示すように、材質の塊をクラスターとし、クラスターのセルの数が小さいときそのクラスターの材質を周りの材質に変えるという、1つのフィルター作用を適用する。その結果、図1(b)のようになり、鉄心内の多数散らばった小さな磁石の塊が大きな塊とすることが出来る。その結果得られた回転子構造を図2(a)に示す。磁

石は塊となっているがその表面はでこぼこしており、製作が容易とは言えない。そこで、図2(b)のように、直方体の磁石で近似し、その形状を表すパラメータを通常の最適化法で設計する。そして、設計した回転子を製作し、実験により市販機との比較を行なう。(2) 磁束を3次元で流すことによって3次元構造を有効利用した発電機を設計する場合、上記の(2)の方法では莫大な計算時間がかかることが分かった。別の方法として、磁気回路法を用いて多くの寸法パラメータを最適設計する。その際に、市販発電機の外形寸法、極対数、ステータ巻線抵抗、磁石の使用量を同じとして設計する。本研究では、ギャップ磁束が半径方向のラジアル磁束型とギャップ磁束が軸方向のアキシャル磁束型を組み合わせたハイブリッド型を提案する。その形状を図3に示す。そして、設計したハイブリッド発電機を製作する。

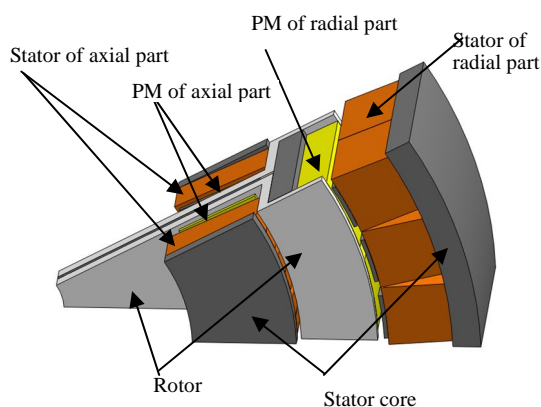


図3 提案したハイブリッド型発電機

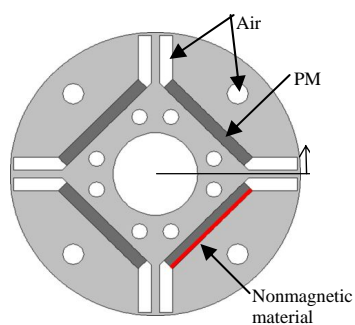


図4 磁石の一部を非磁性材料に置き換えて減磁を模擬した回転子

(3) 永久磁石を使用した機器では高温時の磁石の減磁が問題となるので、運転中の物理量を検出し信号処理によって、システムが故障の一手手前の状態にあるか診断するシステムを構築するために、図4のように磁石の一部を非磁性体に置き換えて減磁状態を模擬する。その回転子を用いた同期機について、実験と計算から減磁状態の特性を明らかにする。計算では、MATLAB/Simulinkを用いたシミュレーションを行なう。その際に、インバータの電圧降下やトランジスタの抵抗成分を考慮してシミュレーションする。

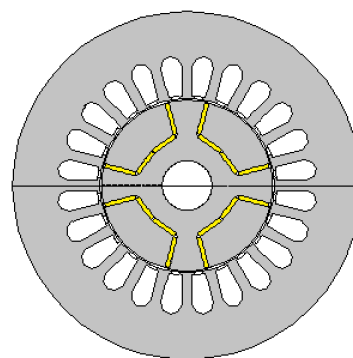
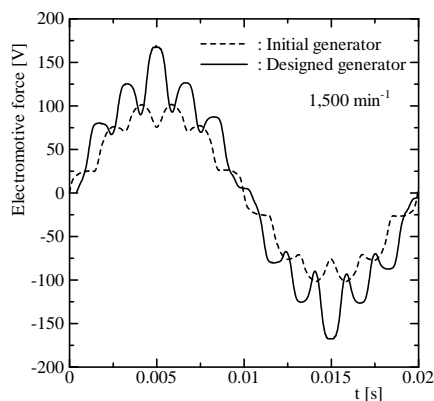
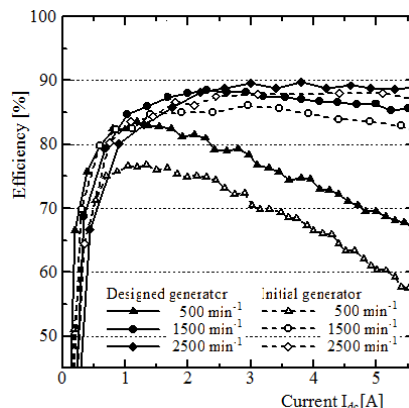


図5 設計試作した回転子の断面構造



(a) 無負荷誘導起電力



(b) 効率

図6 設計試作した発電機の特長

4. 研究成果

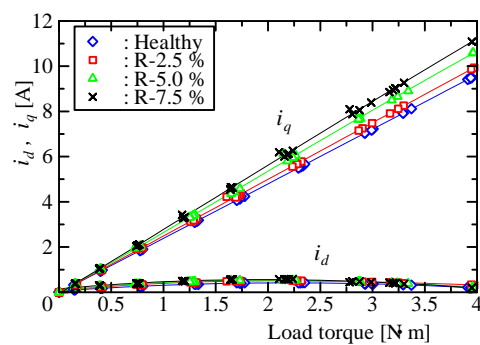
(1) 3(1)の方法を用いて得られた回転子構造を図5に示す。図5より、得られた回転子の構造はUのような磁石形状となっており、市販機と比較すると、薄く幅の広い磁石形状となった。無負荷時の誘導起電力の比較を図6(a)に示す。実効値を比較すると、市販機68.2Vに対して96.3V、1.41倍の電圧を得ることが出来た。しかし、高調波成分も大きくなり、11次成分では市販機の1.85倍となってしまったが、これはあまり大きな問題ではない。また効率を比べると図6(b)となる。図より、最大効率で約2%改善することが出来た。また、ハイブリッド車として知られているプリウス発電機について、同じ固定子を用いてトポロジー最適化を行なった。製作容易さを考慮した設計までは行なわなかったが、トポロジー最適化の結果を表1に示す。表より、磁石として半径方向r成分のみ考慮した

時、ほぼ同じ出力電力で磁石量を 30%削減できた。x, r と 45° の磁化方向磁石を考慮した場合、磁石を 19%削減しながら、11%大きな出力電力を得ることが出来た。ただし、磁石の形状が複雑で製作容易さを考慮していないことや、回転子の遠心力に対する強度を考慮していないことに注意しなければならない。これらについては今後の課題としたい。この成果を雑誌論文 [1], [2], [3] として発表した。

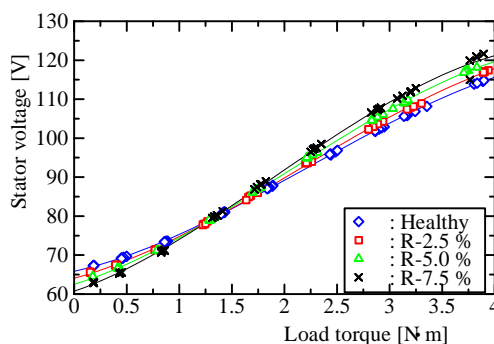
表 1 . 設計機と Prius 発電機の発電出力と磁石量の比較

	Commercialized (measured results)	Proposed (calculated results)
Power	38.25 W	369.6 W
Efficiency	81.5 %	85.2 %
Power density	23.3 kW/m ³	219.1 kW/m ³
Ratio of power density	1.0	9.41
Ratio of efficiency	1.0	1.05

(2) 3 (2)の方法を用いて設計した発電機と市販機の結果を示す。市販機は測定結果であり、設計機は設計値である。市販機はスロットレスの固定子をもつアキシヤルギャップタイプである。固定子がスロットレスのため出力電力が小さく、設計機の出力電力は約 9 倍の結果が得られた。設計機は固定子にスロットと歯を持つため、出力を取らない時でもコギングトルクが存在し、回転させるためにこのコギングトルク以上の回転力が必要である。コギングトルクの低減については、今後の課題としたい。この成果を雑誌論文 [4] として発表した。



(b) 電流



(b) 電圧

図 7 減磁状態が異なる回転子を持つ同機機の電圧, 電流の比較 (実測結果)

(3) 3 (3)の方法を用いて減磁状態を模擬した時の特性を図 7 に示す。この結果は、電動機としてベクトル制御して正弦波電流を流した時の結果であるが、発電機においてもインバータを用いて出力を取り出すことを考えた場合、負荷トルクを入力トルクとしてこの結果を用いることが出来る。図より、トルクが大きい時減磁状態の差が q 軸電流に現れることが分かる。また、無負荷時では、減磁状態の差が固定子電圧の基本波成分に現れることが分かった。この成果を雑誌論文 [5] として発表した。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

T. Ishikawa, S. Amada, K. Segawa, and N. Kurita, "Proposal of a Radial- and Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator", IEEE Transactions on Magnetics, 査読有 Vol. 53, no. 6, 2017, ID: 10.1109/TMAG.2017.2665440

T. Ishikawa, S. Mizuno, and N. Kurita, "Topology Optimization Method for Asymmetrical Rotor Using Cluster and Cleaning Procedure", IEEE Transactions on Magnetics, 査読有 Vol. 53, no. 6, 2017, ID: 10.1109/TMAG.2017.2665441

S. Mizuno, T. Ishikawa, N. Kurita, "Rotor Structure Design of Permanent Magnet Synchronous Generator by Topology Optimization Method Using GA", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有 vol. 52, no. 3-4, pp. 1453-1460, 2016

T. Ishikawa, S. Mizuno, N. Kurita, "Characteristics of a Permanent Magnet Synchronous Machine Designed by a Topology Optimization Method", J. Matr. Sci. Forum, 査読有 Vol.856, pp.172-177, 2016

T. Ishikawa, S. Mizuno, N. Kurita, "Generator Characteristics of an Interior Permanent Magnet Machine Designed by a Topology Optimization with GA Considering Cluster of Materials", 日本 AEM 学会誌, 査読有 Vol.23, No.3, pp.545-550, 2015 (J. the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.23, No.3, pp.545-550, 2015)

S. Shinagawa, T. Ishikawa, N. Kurita, "Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Imperfect Magnets", IEE Japan, Journal of Industry Applications, 査読有

読有 vol.4, no.4, pp.346-451, 2015
〔学会発表〕(計 28 件)

福田 浩平,石川 赴夫,栗田 伸幸, "ラジアル・アキシャル併用型小型発電機の提案と特性解析", 電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-17-55, 足利工業大学, 2017.3.2

渡邊 大貴,石川 赴夫,栗田 伸幸, "永久磁石同期発電機の回転子構造最適化に於けるクリーニング法の構造変遷への影響", 電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-17-33, 足利工業大学, 2017.3.2, 優秀発表賞

T. Ishikawa, S. Mizuno, N. Kurita, "Generator Characteristics of an Interior Permanent Magnet Machine Designed by a Topology Optimization with GA Considering Cluster of Materials", 第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生講演論文集(論文賞受賞講演), 査読無, pp.5-10, 2016.11, 桐生 五十嵐 直人, 石川 赴夫, 栗田 伸幸, "高調波信号を用いた IPMSM の初期減磁診断の検討", 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 査読無, 前橋, 2016.9.1

渡邊 大貴,石川 赴夫,栗田 伸幸, "クリーニング法を用いた GA による永久磁石同期発電機の回転子構造設計の有用性", 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 査読無, 前橋, 2016.9.1

五十嵐 直人, 石川 赴夫, 品川 州平, 栗田 伸幸, "不完全磁石を持つ IPMSM の高調波信号による減磁診断の検討", RM16-92, 電気学会研究会資料, 査読無, 2016.8.5, 大阪

渡邊 大貴,石川 赴夫,栗田 伸幸, "永久磁石同期発電機の回転子トポロジー最適化に於けるクリーニング法の有効性", RM16-90, 電気学会研究会資料, 査読無, 2016.8.5, 大阪

T. Ishikawa, S. Amada, K. Segawa, and N. Kurita, "Proposal of a Radial- and Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator", IEEE CEFC, 査読有, WP041, Miami, 2016.1

T. Ishikawa, S. Mizuno, and N. Kurita, "Topology Optimization Method for Asymmetrical Rotor Using Cluster and Cleaning Procedure", IEEE CEFC, 査読有, MP081, Miami, 2016.1

T. Ishikawa, T. Watanabe, S. Mizuno, and N. Kurita, "Effect of Cleaning Level on Topology Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generator", ICEMS2016, 査読有, DS5G-2-13, Chiba Japan, 2016.11.14

T. Ishikawa, "Failure Diagnosis for Demagnetization in Permanent Magnet Synchronous Motor", 2016 IEEE PES(Power and Energy) General Meeting,

査読有, Boston, 2016.7.20

瀬川 健太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "アキシャルギャップ型発電機のコギングトルクを考慮した最適設計"電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-16-81, 前橋工科大, 2016.3.2

水野 翔太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "材質クラスターを考慮した GA による永久磁石同期発電機の回転子構造の設計"電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-16-72, 前橋工科大, 2016.3.2 1 2 .

瀬川 健太,天田 宗一郎,石川 赴夫,栗田 伸幸, "磁気回路法を用いたアキシャルギャップ型発電機の最適設計", 第 24 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, 査読無, pp.117-122, 東京都市大学, 2015.11.12

石川 赴夫,五十嵐 直人,品川 州平,栗田 伸幸, "不完全磁石を持つ埋込磁石同期電動機の減磁診断の検討", 電気学会研究会資料, 査読無, RM15-161, pp.23-28, 秋田県立大学, 2015.10.22

水野 翔太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "GA を用いたトポロジー最適化手法により設計した埋込磁石同期機の発電特性", 電気学会研究会資料, 査読無, RM-15-082, LD-15-033, HCA-15-035, pp.596 大阪・大阪工業大学うめきたナレッジセンター, 2015.8.6

瀬川 健太,黄 小勇,石川 赴夫,栗田 伸幸, "磁気回路法を用いたアキシャルギャップ型発電機の設計", 電気学会研究会資料, 査読無, RM-15-080, LD-15-031, HCA-15-033, pp.47-52, 大阪, 2015.8.6

S. Mizuno, T. Ishikawa, N. Kurita, "Rotor Structure Design of Permanent Magnet Synchronous Generator by Topology Optimization Method Using GA", The 17th ISEM, 査読有, PS1-29, 兵庫県・淡路島, 淡路夢舞台国際会議場, 2015.9.16

T. Ishikawa, S. Mizuno and N. Kurita, "Characteristics of a Permanent Magnet Synchronous Machine Designed by a Topology Optimization Method", JAPMED'9, 査読有, pp.37-38, Sofia, Bulgaria, 2015.7.6.

黄 小勇,瀬川 健太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "アキシャルギャップ型発電機の設計", 平成 27 年電気学会全国大会講演論文集, 査読無, 5-046, 平成 27 年 3 月 24 日, 東京都市大学

21 水野 翔太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "GA を用いたトポロジー最適化手法による永久磁石同期発電機の回転子構造設計", 電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-15-93, pp.275-277, 2015.3.3, 宇都宮, 優秀発表賞

22 瀬川 健太,石川 赴夫,栗田 伸幸, "磁

- 気回路法を用いたアキシアルギャップ型発電機的设计", 電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-15-92, pp.273-274, 2015.3.3, 宇都宮
- 23 品川 州平, 石川 赴夫, 栗田 伸幸, "不完全磁石を持つ埋込磁石同期電動機の減磁診断のための特性検討", 電気学会研究発表会資料, 査読無, ETG-15-88, pp.262-263, 2015.3.3, 宇都宮
- 24 水野 翔太, 石川 赴夫, 栗田 伸幸, "製作容易さを考慮したトポロジー最適化した埋込磁石同期機の発電特性", 電気学会産業応用部門大会 YPC, 査読無, 東京電機大学東京千住キャンパス, 2014.8.26
- 25 品川 州平, 石川 赴夫, 栗田 伸幸, "不完全磁石を持つ埋込磁石同期モータの特性", 電気学会研究会資料, 査読無, RM-14-061, LD-14-045, HCA-14-032, 静岡, 2014.8.6
- 26 水野 翔太, 石川 赴夫, 栗田 伸幸, "GAを用いたトポロジー最適化手法により設計した埋込磁石同期機の発電特性", 電気学会研究会資料, 査読無, RM-14-059, LD-14-043, HCA-14-030, 静岡, 2014.8.6
- 27 T. Ishikawa, S. Mizuno and N. Kurita, "Generator Characteristics of an Interior Permanent Magnet Machine Designed by a Topology Optimization with GA Considering Cluster of Materials, 8th Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, pp.94-95, Taichung, Taiwan, July, 24 2014,
- 28 S. Shinagawa, T. Ishikawa, N. Kurita, "Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Imperfect Magnets", International Power Electronics Conference (IPEC), Hiroshima, 査読無, 19P3-3, 2014.5.19

〔図書〕(計 1 件)

T. Ishikawa, Optimization Algorithms-Methods and Applications, ISBN 978-953-51-2593-8, Chapter 12, Topology Optimization Method Considering Cleaning Procedure and Ease of Manufacturing, Edited by O. Baskan, pp. 265-279, 2016.9

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~takaryu/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 赴夫 (ISHIKAWA TAKEO)