様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２５年　５月２０日現在

機関番号：１２３０１
研究種目：基盤研究（Ｃ）
研究期間：2010～2012
課題番号：２２５６０２６１
研究課題名（和文）　圧粉磁心を用い永久磁石を使用しない電気自動車の開発

研究課題名（英文）　Development of electric vehicle that uses soft magnetic composite core and does not use permanent magnet

研究代表者
石川　赴夫（ISHIKAWA TAKEO）
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40159695

研究成果の概要（和文）：
まず，新しいトポロジー最適化手法が電気モータの材料配置を設計するために開発された。そこでは，材料のクラスターとクリーニング法を考慮した遺伝的アルゴリズムが用いられている。材料としては，空気，鉄心だけでなくｒ，ｘ，ｙ方向に磁化された永久磁石も用いている。空気，鉄心およびｒ方向磁石を用いた場合，表面磁石型の永久磁石モータが得られ，空気，鉄心およびｘ，ｙ方向磁石を用いた場合，埋め込み磁石型の永久磁石モータが得られた。従って，永久磁石は大トルクを発生させるのに有効であることが分かった。
電気自動車用の磁石を用いないモータを開発するために，固定子に 18 の歯，回転子に 12 の歯をもつスイッチトレラクタンスモータ（SRM）を設計する。そこでは，別機関で開発された SRM を初期値として２次元有限要素法と実験計画法を用いて，400N･m 以上の平均トルクを発生させることを目的としている。モータ体積とギャップ長を一定として，モータ形状および電流のターンオン，ターンオフ時刻の７パラメータを設計変数に取っている。更に，非対称ブリッジコンバータと有限要素法を連成する方法を開発し,モータのトルク速度特性を検討している。そして，設計された SRM を製作した。
更に，表面磁石型ブラシレス DC モータに望ましい周波数のｄ軸電流を流すことによって，音階を発生する方法を提案している。その時の振動を解析することによって，理論においても検証している。この方法は，ハイブリッド車や電気自動車に適用可能である。

研究成果の概要（英文）：
A novel topology optimization method has been proposed for the material distribution of electrical motors using the Genetic algorithm combined with the cluster of material and the cleaning procedure. The cluster of several kinds of material is taken into account not only to form the group of iron and the group of air but also to form the group of the r-oriented, x-oriented and y-oriented magnets. Consideration of air, iron and the r-oriented magnet gives a surface permanent magnet type rotor, and consideration of air, iron and the x-oriented and y-oriented magnets gives an interior permanent magnet type rotor. As a result, it was found that permanent magnets are very useful to produce a large torque.
In order to develop a motor for electric vehicle without using permanent magnets, a switched reluctance motor with 18 stator slots and 12 rotor slots is designed. It is designed to produce a large average torque more than 400N･m by using the experimental design method coupled with 2-D finite element analysis, where the conventional shape of SRM is chosen as the initial shape to be designed. Eight parameters are chosen as design variables, which define the whole shape of stator teeth and rotor teeth with the assumption of a constant motor volume and a constant air-gap length. An algorithm for an asymmetric bridge converter coupled with finite element method is developed, and then the torque speed characteristics are investigated. The designed SRM has been manufactured.

Moreover, a method for generating a music scale from a brushless DC motor with surface permanent magnets has been proposed by introducing a d-axis current with a desired frequency. The proposed method is theoretically verifies by analyzing the vibration emitted from the brushless DC motor. The proposed idea could be applicable to systems emitting a loud acoustic noise from HVs or EVs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2010 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総　計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電気機器，最適設計，パワーエレクトロニクス
科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器
キーワード：電気自動車，スイッチトレラクタンスモータ，トポロジー最適化

１．研究開始当初の背景

近年，車社会の急速な発展に伴い，石油エネルギーの枯渇問題，CO2 による地球温暖化や NOX による大気汚染といった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，ハイブリッドカー(HV：Hybrid Vehicle)や電気自動車(EV：Electric Vehicle)で代表される低燃費車や低排出ガス車などが徐々に普及している。HV, EV ではレアアースを用いた永久磁石同期モータ(IPMSM：Interior Permanent Magnet Synchronous Motor）がその主流となっている。今後，電気自動車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。この 1，2 年日本の自動車会社が実用電気自動車を開発し始めたが，インドや中国などで低価格の電気自動車が発表され始めた。従って，我が国においても，性能（特に，燃費）を落とさずに価格を抑えた電気自動車の開発が強く望まれている。

２．研究の目的

電気自動車が普及するには，燃費（効率）を低下させずに価格を抑えた電気自動車の開発が必要である。それを達成するために，本研究は，価格を抑えるために，モータ価格の大部分を占める永久磁石材料を用いない構造とし，永久磁石を用いないことによって一般に効率が低下してしまうが，うず電流損失が少なく，三次元構造が可能な圧粉磁心を用いることによって，効率を低下させない，モータおよびその駆動システムを開発することを目的とする。さらに，現在ハイブリッド自動車で問題となっている，自動車の存在を知らせるための低速時の音の発生を新たな装置の追加なしに，従って価格の上昇なしに実現することを目的とする。

３．研究の方法

３－１．

永久磁石を持たない電気自動車用モータの概形を設計するために，遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて電気機器の材質分布を最適化するトポロジー最適化手法を提案し，空気，鉄，磁石の材質がどのように配置された場合に大きなトルクを発生させられるか検討する。

本研究でトポロジー最適化手法として用いる GA は生物における進化の過程に乗っ取った考え方で，選択，交叉，突然変異を繰り返しながら，高い適応性を持つものへと進化していく手法であり，1 つの個体から他の個体に探索を進めるのではなく，個体群から他の個体群に探索を進めるので，探索範囲が比較的広い場合に適する，局所解に陥りにくいなどの特徴がある。GA にクラスターおよびそのクリーニング法の考えを考慮し，更に扱う材質を 3 あるいは 4 に拡張し，空気，鉄，r 方向に磁化した磁石，あるいは空気，鉄，x および y 方向に磁化した磁石を扱う方法を提案する。クラスターとは図 1(a)に示すように互いに接している材質の塊のことを指す。例えば，鉄 2 と 3 は同じクラスター，鉄 1 あるいは鉄 4 は別のクラスターを構成している。クリーニング法とは，クラスターを構成しているセルの数が N_{min} 以下のものを周りの材質

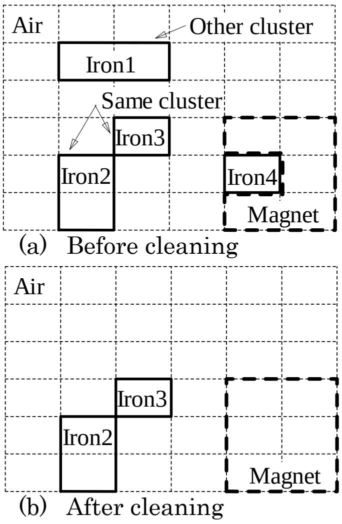


図 1　クラスターの説明と小さいクラスターのクリーニング法

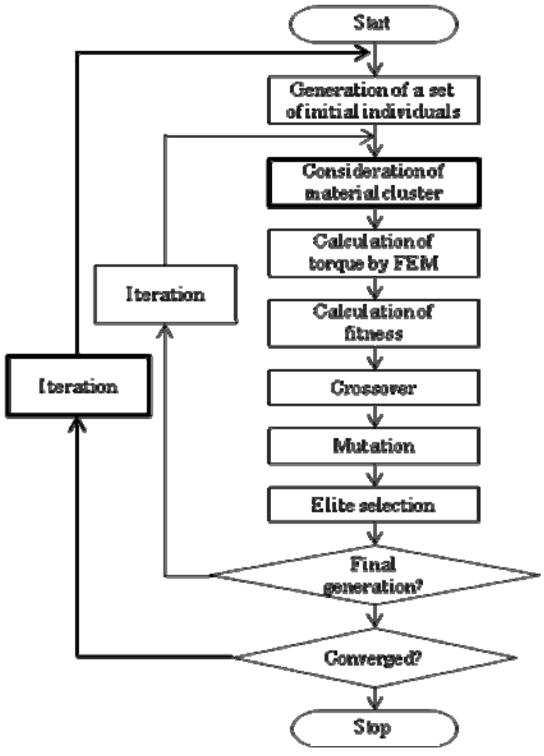


図 2　提案手法のフローチャート

に変更する方法である。例えば，N_{min}=2 とすると，鉄 1 と鉄 4 は図 1(b)のように変更される。このように，小さなクラスターに対してこのクリーニング処理を行うことで小さな鉄領域を取り除く。この処理を永久磁石に対して行えば，空気中や鉄心中に散らばった磁石を取り除くことができる。空気に対して行えば，ロータ中に散乱した小さい空洞を取り除くことができる。また，小さな材質領域を取り除くことで，製造が比較的容易になる利点も挙げられる。更に，本論文では遺伝子長を長くしながら GA を繰り返すことを提案する。すなわち，図 2 のフローチャート内の太線で示したものが，通常の GA に対して本論文で提案する部分である。最初の繰り返しでは粗いトポロジー，続く 2 回目，3 回目では遺伝子長を長くすることでより詳細なトポロジーが得られる。最初の遺伝子長を短くすることで解析時間の短縮も図れることが期待できる。なお，本論文では各世代の個体集合の中で最大の適応度を持つ個体を残すエリート戦略を用いる。永久磁石の使用量を増加させないで平均トルクを大きくする回転子構造を得るために，適応度を以下のように設定した。

$$fitness = \frac{T_{ave}}{kV_{pm}/V_{rotor}+1} \tag{1}$$

ここで T_{ave}：平均トルク，V_{rotor}：ロータの体積（シャフト除く），k：係数，　V_{pm}：磁石体積である。

３－２．

研究成果４－１より，通常の分布巻あるいは集中巻固定子の場合，大トルクを発生するためには磁石が有効であることが分かった。磁石を使用しない一つの解決策としてスイッチトリラクタンスモータ（SRM: Switched Reluctance Motor）がある。このモータは突極状の固定子と回転子を持つ構造で，ケイ素鋼板を積層して製造される。その単純な構造のため，丈夫で耐熱性に優れており，ケイ素鋼板と銅線のみで製作できるので IPMSM と比べリサイクルが容易，低コストかつ大量生産に向いている。さらに，熱による減磁という永久磁石につきまとう問題がなく，高温環境に強い特徴を持っていること等が挙げられる。

そこで，図 3 に示す固定子 18 極，回転子 12 極について，5 パラメータでモータ形状全体を設計する。つまり，r1 は回転子内半径，r2 は回転子外半径，r3 は固定子内半径，θ1 は回転子，固定子の歯幅，θ2 は回転子，固定子の歯の傾き(テーパ)であり，これらを設計変数とし，モータの外半径 110mm，モータ軸半径 20mm，エアギャップ 0.5mm，巻線の占積率は 35%一定と仮定する。図 4 に SRM の駆動回路を示す。これは非対称ブリッジコンバータ回路と呼ばれる回路で，一相に 2 つのトランジスタと 2 つのダイオードを有する。そして，通常は 120°通電方式で電流を制御する。実際にはチョッパ制御を行い，モータを駆動している。したがって電流の立ち上がり，立下りがあるため，120°通電の矩形波電流には正確に制御することはできない。そこで電流のターンオン位相β1，ターンオフ位相

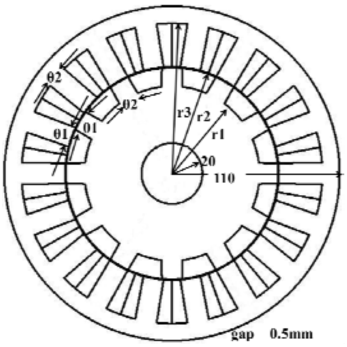


図 3 設計する 18/12 の SRM

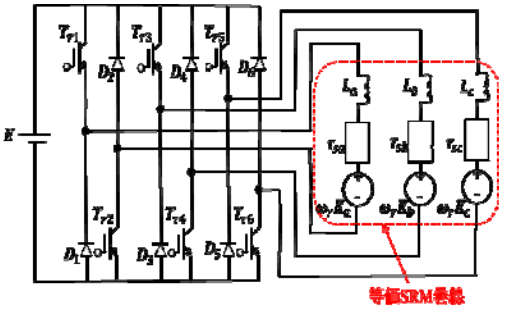


図 4 三相非対称ブリッジコンバータ

$\beta 2$ がトルクに対し，どのように影響を及ぼすかについても検討を行う。従って，設計パラメータは 7 となる。最適化手法としては，実験計画法の L18 直交表を用いる。この方法により，ごくわずかの計算回数で多数の設定変数の要因を調査できる。

３－３．

現在ハイブリッド自動車で問題となっている，自動車の存在を知らせるための低速時の音の発生を新たな装置の追加なしに行うために，ハイブリッド自動車で用いられているブラシレス DC モータについて検討する。ブラシレス DC モータでは制御特性の把握や制御方式の導出において，二軸直流である d-q 座標系で表した回路方程式が用いられる。特に駆動主回路の三相電圧形インバータを電流制御形の PWM インバータとして動作させ，正弦波電流駆動する方式では電流ベクトル制御の自由度が大きく，いろいろな制御が行われている。表面磁石型同期電動機の場合，一般には d 軸電流 i_d=0 とする方法が用いられる。その方法では，トルクが q 軸電流にのみ比例し，トルクの線形制御が容易となることや，同一トルク発生時の電流が最小となり，銅損が最小となるなどの特徴がある。本論文では，次式で示すように i_d に音階周波数に対応した信号を入力することを提案する。

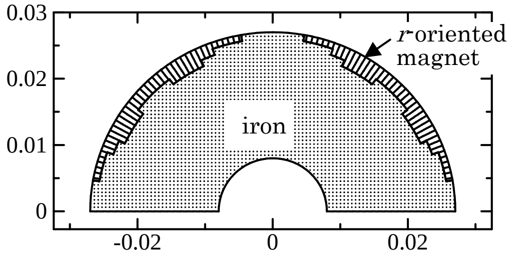
$$i_d = I_s \sin(2\pi f_s t) \qquad (2)$$

ここで，f_s：音階周波数，I_s：音階周波数を発生させるための d 軸電流の最大値。この方法を用いて音階を連続して発生させることにより，対人的には不快でないメロディを発生する。使用した供試機は定格出力 1.0kW，定格回転数 2000min^{-1}，定格電機子電流 7.8A，8 極の表面磁石型同期電動機であり，ds1102 によって制御部を実現し制御する。

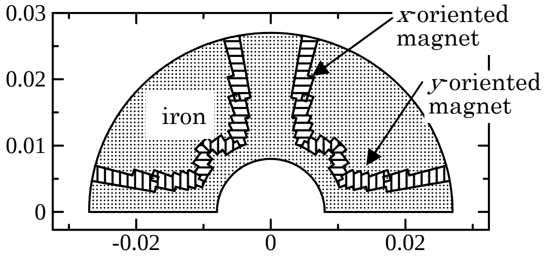
４．研究成果

４－１．研究の方法３－１の成果

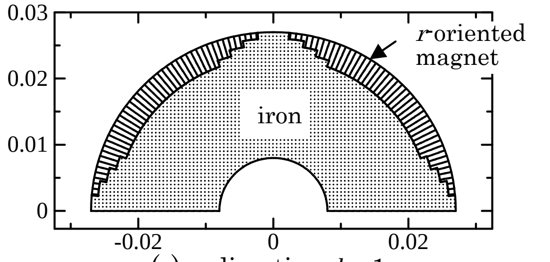
図 5 に 3 回の繰り返しで得られたロータの形状を示す。図(a)が r 方向の磁石，空気，鉄心の 3 種類の材質を考慮した場合で，k=5 である。図(b)が x, y 方向の磁石，空気，鉄心の 4 材料で，k=5 の場合である。図(c)，(d)は図(a), (b)と同じ材質で k=1 の場合である。これらの図から，r 方向に磁化した磁石の場合は磁石がロータの表面に現れ，いわゆる表面磁石型同期電動機のロータ構造となっていることが分かる。それに対して，x, y 方向に磁化した磁石の場合は，磁石がロータの内側に現れ，いわゆる埋め込み磁石型同期電動機のロータ構造になっていることが分かる。また係数 k については，k が大きい方が磁石の体積が小さくなっていることが分かる。これは(1)式より，k が大きいと磁石体積が適応度に与える影響が大きくなるためである。クラスターを考慮せずに，すなわち通常の GA のみで 3 回の繰り返しを行った結果を図 6 に示す。その他の条件は図 8(a)と同じである。図から，磁石は概ねロータの表面に現れるが，小さな空気や磁石の塊が鉄心中に散乱しており，製作が非常に難しくなることが分かる。従って，クラスターおよびクリーニングを考慮する本手法は，製作容易化に繋がるものと考えられる。以上の結果より，永久磁石は大トルクを発生させるのに有効であることが分かった。この成果を雑誌論文 1，2，3，発表論文 1，4，5，6，9，11 として発表した。



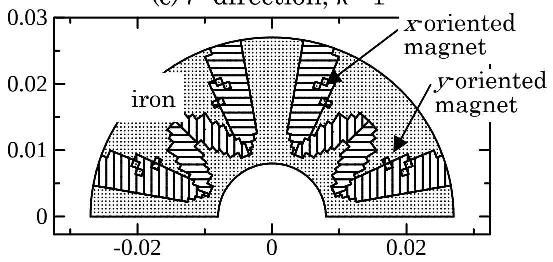
(a) r -direction, k =5



(b) x - and y -direction, r =5



(c) r -direction, k =1



(d) x - and y -direction, r =1

図 5 得られたロータ形状

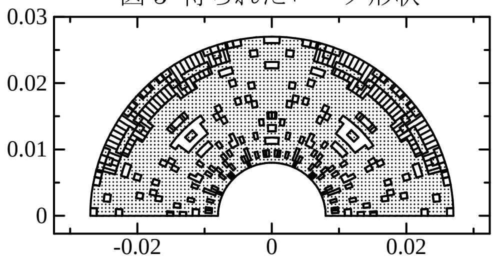


図 6 クラスターを考慮しない場合

4－2．研究の方法３－２の成果

得られた最適形状は初期形状と比べ，回転子外半径が小さくなり固定子内半径が大きくなった。図 7 に 400min^{-1} 時における初期形状でのトルク，電流波形を示す。初期形状では最小トルクは 8.1N･m と小さくトルクの溝ができてしまったが，最適形状の最小トルクは 18.9 N･m であり，初期形状と比べると約 2.3 倍に改善されていることが分かる。また，低速時には指令電流まで立ち上がる時間があり，電流はチョッパ制御できていることがわかる。しかし，高速時になると指令電流まで立ち上がる時間がなく，最適設計した SRM では 1000min^{-1} 以降，平均トルクが低下してしまった。試作したモータを図 8 に示す。この成果を雑誌論文 4，発表論文 6，8，10 として発表した。

4－3．研究の方法３－３の成果

図 9 に音階のピーク値を約 102dB にそろえたときの低音のドと高音のドの結果を示す。図より各音階の音が十分大きく現れていることが分かる。ここで，音階の大きさが一致する電流 I_s の値は振動の場合と必ずしも等しくならないことも分かる。また図より，音階以外の周波数成分の騒音があり，更にインバータのスイッチング周波数での騒音も音階の音より大きい値を示していた。従って，ある 1 つの音のみを発生した場合，人の耳にも

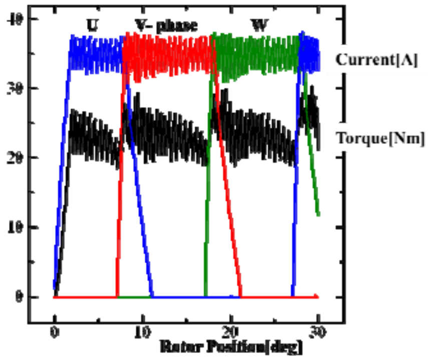


図 7. 400min^{-1} 時における最適形状でのトルク,電流波形

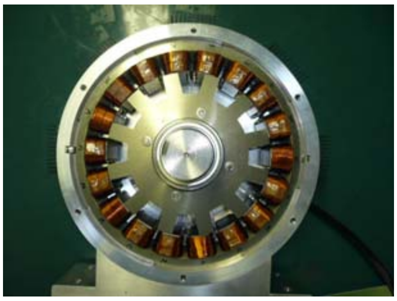
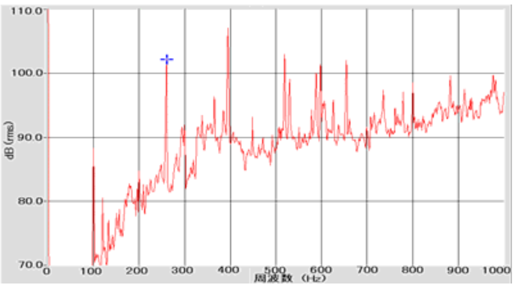


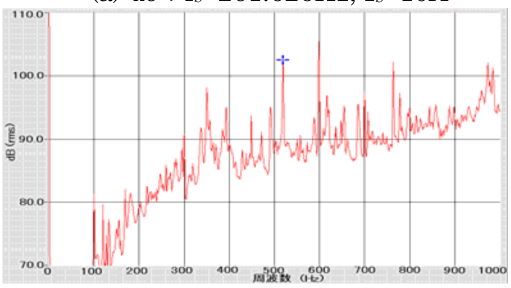
図 8 試作した SRM

騒音が増えたようにしか感じないが，これらの音を連続させてメロディにすることにより，十分に人の耳で聴き取ることができた。

この成果を雑誌論文 5，発表論文 2，12 として発表した。



(a) do : f_s=261.626Hz, I_s=10A



(b) do : f_s=523.251Hz, I_s=1.4A

Fig. 9 提案方法で発生したドと高音のド

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 5 件）

1. T. Ishikawa, Y. Hashimoto and N. Kurita, ″Design and Development of Switched Reluctance Motors by the Experimental

Design Method", 日本 AEM 学会誌, 20 (2), pp.391-396, 2012(査読有)
2. T. Ishikawa, R. Ataka, S. Azami, M. Matsunami, and N. Kurita, "Generation of Music Scale from Brushless DC Motor with Surface Permanent Magnets", Noise Control Engr. J. 60 (6), pp.763-769, 2012(査読有)
3. T. Ishikawa, K. Yonetake, N. Kurita and M. Tsuchiya, Estimation of Magnetization Distribution in Permanent Magnet of Brushless DC Motor, Materials Science Forum, 670, pp. 360-368, 2011(査読有)
4. T. Ishikawa, K. Yonetake, and N. Kurita, "An Optimal Material Distribution Design of Brushless DC Motor by Genetic Algorithm Considering a Cluster of Material", IEEE Trans. Magnetics, 47 (5), pp.1310-1313, 2011(査読有)
5. T. Ishikawa and K. Nakayama, "Topology Optimization of Rotor Structure in Brushless DC Motor with Concentrated Windings Using Genetic Algorithm Combined with Cluster of Material", IEEE Trans. Magnetics, 48(2) pp.899-902, 2011(査読有)

〔学会発表〕(計 12 件)

1. T. Ishikawa, Y. Hashimoto and N. Kurita, "Optimum Design of a Switched Reluctance Motor Fed by Asymmetric Bridge Converter Using Experimental Design Method", Compumag2013, Budapest 2013.6 (accepted)(査読有)
2. S. T. Castillo, K. Shiobara, T. Ishikawa, N. Kurita, "Characteristic of Speed Control for an Electric Vehicle", 電気学会研究発表会資料 ETG-12-06, pp. 268-269, 2013.3.1, 宇都宮大学(査読無)
3. 中山恭一, 石川赴夫, 栗田伸幸, "クラスター考慮遺伝的アルゴリズムによる永久磁石同期モータの回転子構造設計", 電気学会研究発表会資料 ETG-12-74, pp. 203-205, 2013.3.1, 宇都宮大学(査読無)
4. 橋本佳典, 石川赴夫, 栗田伸幸, "実験計画法を用いた電気自動車駆動用スイッチトリラクタンスモータの設計", 電気学会研究発表会資料 ETG-12-73, pp. 199-202, 2013.3.1, 宇都宮大学(査読無)
5. K. Nakayama, T. Ishikawa, and N. Kurita, "Topology Optimization of Rotor Structure in a PM Synchronous Motor for Two Current Driving Methods by Genetic Algorithm Considering the Cluster", ICEMS2012, DS1G5-2, Sapporo, 2012.10.22(査読有)
6. 中山恭一, 石川赴夫, 栗田伸幸, "クラスター考慮遺伝的アルゴリズムによる永久磁石同期モータ回転子のトポロジー設計における電流駆動方式の影響", 平成 24 年度電気学会産業応用部門大会 YPC-81, 平成 24 年 8 月 21 日, 千葉工業大学(査読無)
7. 橋本佳典, 石川赴夫, 栗田伸幸, "電気自動車用スイッチトリラクタンスモータの設計", 電気学会研究発表会資料, ETG-11-78, 2012.3.1, 桐生(査読無)
8. 中山恭一, 石川赴夫, 栗田伸幸, "数種類の電流駆動方式における遺伝的アルゴリズムに材質のクラスターを考慮した永久磁石同期モータの回転子構造設計", 電気学会研究発表会資料, ETG-11-49, 2012.3.1, 桐生(査読無)
9. T. Ishikawa, Y. Hashimoto, N. Kurita, "Design and Development of Switched Reluctance Motors by the Experimental Design Method," The 20th MAGDA, pp.203-208, Nov.14-16, 2011, Kaohsiung Taiwan(査読有)
10. T. Ishikawa, R. Ataka, S. Azami, M. Matsunami, N. Kurita, "Analysis of vibration and music scale of brushless DC motor with surface permanent magnets", 40th Inter Noise, Osaka, 2011.9.5(査読有)
11. 中山恭一, 石川赴夫, 栗田伸幸：数種類の材質のクラスターを考慮した遺伝的アルゴリズムによる永久磁石同期モータの回転子構造設計, 電気学会研究会資料, RM-11-49, pp.37-42, 2011.8.4, 東京(査読無)
12. T. Ishikawa, "Design of Rotor Structure in Brushless DC Motor with Concentrated Windings Using Genetic Algorithm Combined with Cluster of Materials", Compumag2011, PB1.4, Sydney, 2011.7.13(査読有)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：電動機制御装置
発明者：石川赴夫, 安宅亮, 松波道夫, 牧島信吾, 花岡幸司, 保川忍
権利者：東洋電機製造株式会社
種類：
番号：特願 2010-220273
出願年月日：2009-03-13
国内外の別：国内

○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）
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40159695