

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05332・20K20350

研究課題名（和文）ラジアル方向電磁力のベクトル制御機能による革新的モータの振動騒音の低減方法の開拓

研究課題名（英文）Novel noise and vibration reduction by radial force vector regulation

研究代表者

千葉 明（Chiba, Akira）

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号：30207287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000円

研究成果の概要（和文）：モータに作用するラジアル方向電磁力を制御することにより、モータの振動騒音の低減を図り、この分野において世界に先駆けて、挑戦的な学術研究を推進した。申請者らは強力な永久磁石を用いたモータよりも、リラクタンストルクを活用し、磁界の強さを可変可能なモータが今後の突破口になると考えている。負荷トルクが小さい時には鉄損が低減でき効率が高い特長があるからだ。しかし、ラジアル方向の電磁力が大きく脈動し、振動騒音が発生する問題がある。そこで、申請者らが世界に先駆けて発見した電磁力の和をフラットにする方法は、スイッチドリラクタンスマータと永久磁石モータへも効果的であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請者らが世界に先駆けて発見したラジアル力の和をフラットにし、騒音振動を低減する方法が、スイッチドリラクタンスマータだけでなく、レアアース永久磁石モータにも適用可であるかどうか挑戦し、可能であることを明らかにした。ラジアル方向力の和をフラットにする方法が一つの学術的な突破口となり米国、独国でも研究が開始され、自動車、産業機器に波及効果は大きい。申請者はこの分野でトップの5名のパネリストとして、講演を依頼されるとともに、モータ関係の著名人が名前を連ねる2020年IEEEのニコラテスラ賞を受賞した。50才台で受賞が決まった日本人は初めてであり、我が国の研究力アップに大いに貢献できた。

研究成果の概要（英文）：The radial forces acting on the motor are regulated so that acoustic noise and vibration can be reduced. This research is very original idea and challenging project. The researchers believe that reluctance motors with variable excitation level will be one of key motor technologies rather than rare-earth permanent magnet motors, because iron loss can be reduced and efficiency can be enhanced at low torque load. However, switched reluctance motors have significant vibration and acoustic noise. It is verified that the concept of the flattening radial force sum, that is the original idea, is quite effective in reducing acoustic noise and vibration in switched reluctance motors, and a permanent magnet motor.

研究分野：電気機器

キーワード：振動騒音 騒音低減 スwitchドリラクタンスマータ IPMモータ

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、強力な永久磁石を用いたモータよりも、リラクタンストルクを活用し、界磁を可変可能なモータが今後のモータ技術の突破口になると考えている。電流によって界磁が変化するためラジアル方向の電磁力ベクトルの脈動が大きく、振動騒音が発生する問題がある。現状のレアアース磁石を用いたモータが使用されている中で、その対極に位置するモータの効率を向上し、振動騒音を低減することは挑戦的であり、新規性があり、独創的である。

図1は強力な永久磁石を貼り付けた構造をしたモータの回転子とその表面に発生する電磁応力ベクトルを示している。時計方向にトルクが発生している。このモータの電磁応力はほとんどが強力な永久磁石によって発生するため、回転子の回転によって変動することが少ない。したがって、振動騒音は主としてトルク脈動によって発生していた。

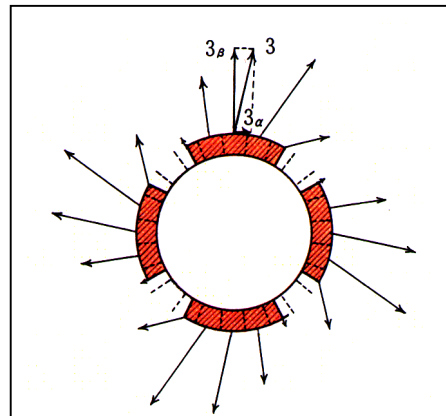


図1 強力な永久磁石をもつモータに作用する電磁応力の分布。

一方、図2に示すリラクタンスタイプ回転子では、回転子の回転に応じて電磁応力ベクトルの大きさが脈動する。このため振動騒音が大きく、いかにして振動騒音を低減するかは問題である。

申請者らは電磁応力が脈動しても、三相の電磁応力ベクトルの和が一定値になれば振動騒音を抑制できる例が存在することを世界に先駆けて発見した。この論理を極に対抗する歯の電磁力ベクトルの和が一定になればよいなど、挑戦的に展開し、電磁界解析、振動解析を駆使してその適用領域を明らかにし、実験で確認する。

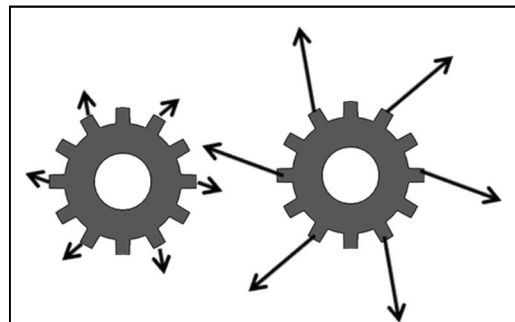


図2 永久磁石が無くリラクタンストルクを発生するモータに作用する電磁応力。回転とともに電磁力の大きさが変動。

三相のラジアル方向電磁力ベクトルの和が一定値になれば振動騒音が低減できる例は特定のモータのある構造で有効であった状況にあり、永久磁石使用量を節約した各種のモータに適用できることは明らかにされていない。本研究は、従来の回転力の脈動に直目していた振動騒音の発生メカニズムとは異なり、ラジアル方向電磁力のベクトル和に着目してモータの振動騒音を低減するものであり、これまでの学術の体系と方向を大きく変革し転換する潜在性をもつ挑戦的な研究課題である。研究構想は合理的で有り挑戦性の高い課題の設定である。

1990年代初頭に、申請者らはモータに巻線を追加することにより電磁力を発生し、磁気浮上できるベアリングレスモータの統一理論を発表し、その後、申請者らは各種モータのベアリングレス化を進め、一流ジャーナル論文を発表し、また、世界で初めてのベアリングレスモータの本を英国グラスゴー大学の Miller 教授 (IEEE Nikola Tesla Field Award 受賞) の薦めがあり執筆した。この書籍がきっかけになり、**申請者は47才で IEEE Fellow (名誉会員) に昇格した。申請者が知る限り、モータ分野において、40才台でフェローになった日本人はいない。**その際、著名な米国 Wisconsin 大 Jahns 教授 (IEEE Nikola Tesla Field Award 受賞)、Lequesne 博士 (IEEE-IAS President, IEEE Nikola Tesla Field Award 受賞) などから推薦を得ることができた。

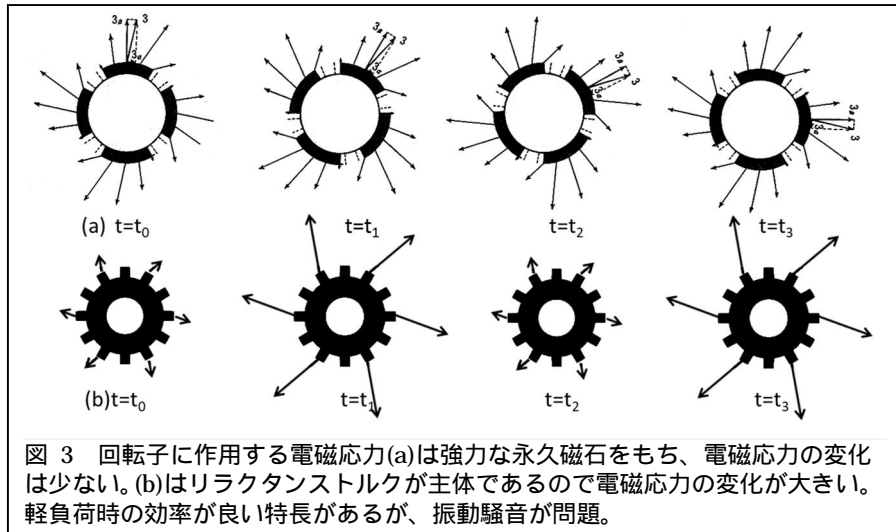
また、申請者らは30年の長期にわたり研究戦略を重視して、研究テーマにじっくりと取り組み、数々の工夫を行うことで同等あるいはそれ以上の性能が実現できる例を示した。その例は2011年に電気機器学では世界で最も難関とされる IEEE Industry Applications Society の Electric Machine Committee で第一位の論文賞を受賞した。当日は委員長 Dr. Omekanda (General Motors, MIT 卒) が今年の第一位ははずば抜けた一番であったと話され、その理由は誰もできないと思っていたことを実現しているところがユニークであると述べていた。さらに、一流国際ジャーナル IEEE Transactions on Energy Conversion の400件近い掲載論文から、毎年3件に与えられる論文賞を2016年、2017年二年連続で受賞している。なお、電気学会の論文賞も2度受賞している。

2. 研究の目的

本研究の目的はモータの回転子に作用するラジアル方向電磁力ベクトルに着目することにより、モータの振動騒音の低減を計ることにより、この分野において世界に先駆けて、先駆的で挑

戦的な学術研究を推進することにある。

申請者らは電磁応力が脈動しても、三相の電磁応力ベクトルの和が一定値になれば振動騒音を抑制できる例が存在することを世界に先駆けて発見した。この理論の適用方法、適用範囲を明らかにするとともに、他のモータへの展開の可能性を明らかにする。



3. 研究の方法

図 3 は極力な永久磁石を持ったモータ(a)とリラクタンストルクが主体のモータ(b)の回転子に働く電磁応力の時間変化を示している。強力な永久磁石を持つ回転子の電磁応力はほぼ永久磁石で決定するため、脈動は小さい。

一方、リラクタンストルクを主体とするモータでは、磁束の粗密が変動するため、軽負荷時の効率が良い特長があり、連れ周り損失が少ないメリットがあるものの、電磁応力の大きさの変動が大きいと、振動騒音が生じやすい問題がある。振動騒音を低減する方法として、申請者は数年前に隣り合う三相の電磁力ベクトルの和が時間的に脈動しなければ振動騒音が低減できる可能性を示し、実際に実験を行い、世界に先駆けて振動騒音を低減できる例があることを示した。申請者らの論文に基づき、米国の大学、企業、ドイツのアーヘン工科大学などで追試が行われ、効果があることが検証された状況にある。しかし、いくつかの例について検証が行われただけで、この原理は永久磁石を節約したモータ、可変界磁モータ、リラクタンスマータなどに広く適用できる可能性がある挑戦的な研究である。

4. 研究成果

図 4(a)にレアアース永久磁石を埋め込んだ構造の埋め込み磁石モータの断面を示す。さらに、図 4(b)には、等しい直径と軸長をもつスイッチドリラクタンスマータの断面を示す。

なお、スイッチドリラクタンスマータの濁点を除去した記載方法が提案されているが、申請者らは、その提案以前より濁点を施して記載している。この表記方法は申請者らが、スイッチドリラクタンスマータの権威である英国グラスゴー大学の Miller 名誉教授 (IEEE Field Award, Nikola Tesla Award 受賞) の発音を何度か聞き取り、カタカナ表記としては濁点をつけた方が近い発音であったからである。

図 4(b)のスイッチドリラクタンスマータは図 4(a)のモータと等しい直径、軸長であり、等しいトルク密度、等しい最高効率を持つことをすでに報告した。さらに、**スイッチドリラクタンスマータは、最大トルク時の電流が小さい特長があること、また、最大出力は 170%と大きくなる特長がある**ことを明らかにした。この 18 / 12 のハイブリッド自動車クラスのスイッチドリラクタンスマータの騒音・振動を低減することは重要な課題である。特に、低速だけでなく、中速での適用方法、また、どのような構造であれば適用可能であるのかも明らかにする必要がある。さらに、なぜラジアル力の和がフラットである

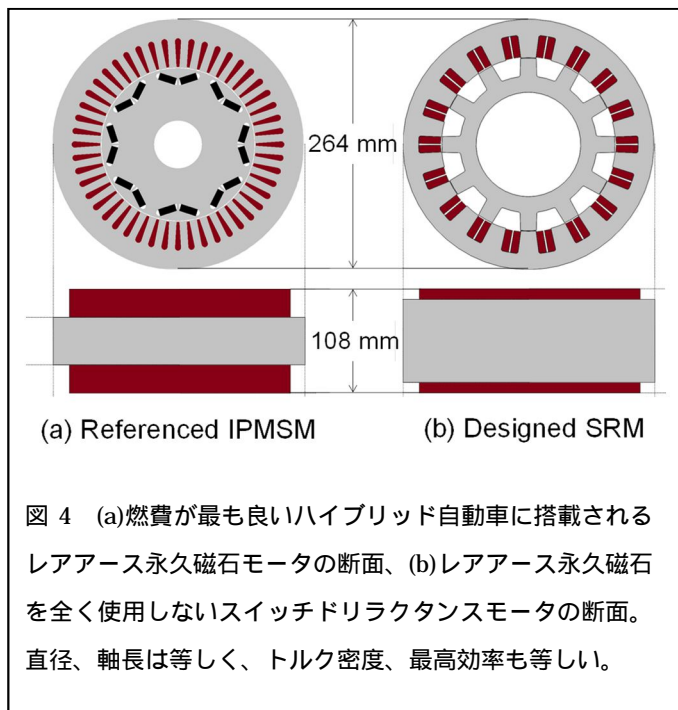


図 4 (a)燃費が最も良いハイブリッド自動車に搭載されるレアアース永久磁石モータの断面、(b)レアアース永久磁石を全く使用しないスイッチドリラクタンスマータの断面。直径、軸長は等しく、トルク密度、最高効率も等しい。

と振動騒音が低減するのかが明らかになっていない。

図5(a)はスイッチドリラクタンスモータの電流波形の比較を示している。Squareは方形波状のスイッチドリラクタンスモータでは標準的な波形である。Proposedは提案電流波形である。二つの波形によって発生する平均トルクは10Nmであり、回転速度は1000rpmである。電流実効値は、提案波形の方がやや小さく効率が良い。

図5(b)は3つの隣り合う固定子の歯に作用する電磁吸引力の和の波形を示している。方形波状の電流で駆動したときは、一周に3回のこぎり波状になる。すなわち、電流周期の一周期に3回の大きな脈動が発生する。このため、振動、騒音は電流周波数の3、6、9、12などの3の倍数の周波数で発生する。一方、提案電流では、直流に正弦波状の波形がラジアル力の和となる。全くフラットになっているわけでは無く、3倍周波数の脈動が発生している。しかし、のこぎり波に比較すると、6、9、12次などの高い周波数成分は少ない。

図6(a)は方形波電流駆動時の3の倍数の周波数での振動を示している。いずれも、径方向にはモード0の振動が発生し、軸方向には1次の振動が発生している。すなわち、径方向と軸方向の連成の振動が発生する。図6(b)はフレーム端部の円周上に線が描かれ、測定箇所を示している。この測定箇所での振動をスペクトラム分析したものが図6(c)であり、半径方向にはモード0が支配的であることがわかる。

図7は試作したハイブリッド自動車クラスでの騒音の実測値である。方形波電流駆動に比較してほとんどのピークで騒音が低減されている。たとえば、最大のピーク27次5400Hzでは、-22.11dBの騒音低減が実現している。そのほかのピークでも騒音は大きく低減している。

このようにラジアル力の和をフラットにすることにより騒音・振動を大きく低減することができる。これは、方形波駆動時の振動のほとんどがモード0であり、ラジアル力の和をフラットにするとモード0の加振力がフラットになるからである。この原理を現在自動車の主流の埋め込み磁石モータに適用した。

図8は4代目の最新型プリウスのモータに近いレアアース磁石を用いたモータの断面である。このモータに原理を適用する際に問題となったのは、隣り合う3つの歯の力の和

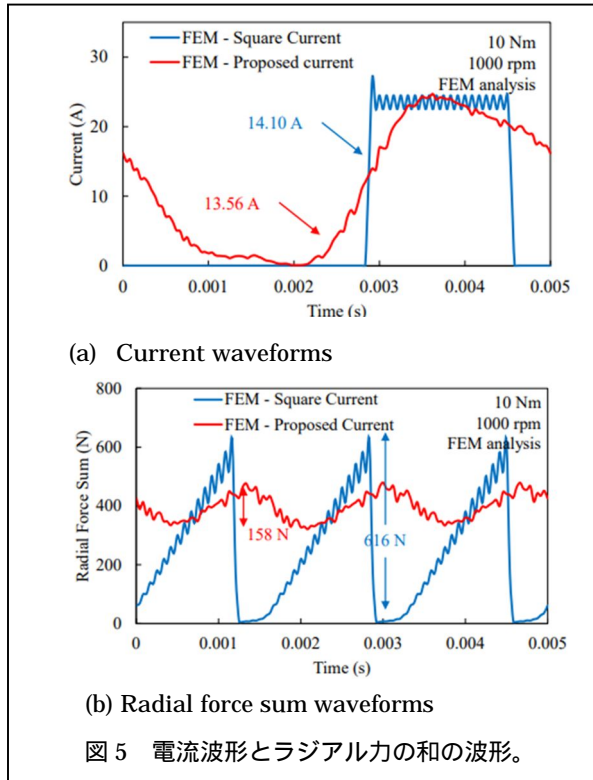


図5 電流波形とラジアル力の和の波形。

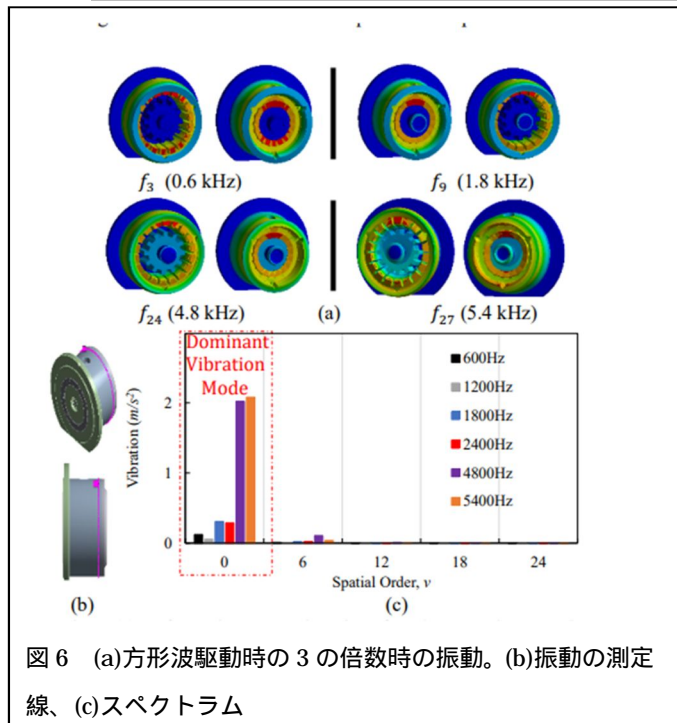


図6 (a)方形波駆動時の3の倍数時の振動。(b)振動の測定線、(c)スペクトラム

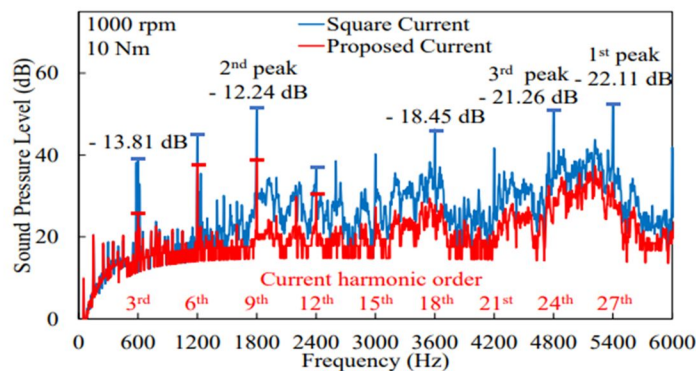


図7 騒音の実測スペクトラム

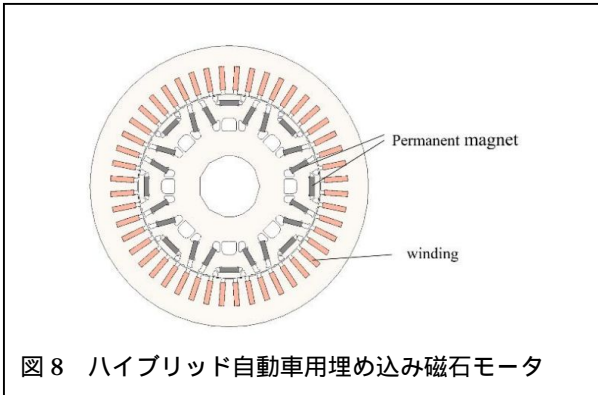


図8 ハイブリッド自動車用埋め込み磁石モータ

はなく、24 スロットを極対数 4 で除した 6 つの歯の和を取るべきであることを新しく発見した。

図 9 はラジアル力の和とそのスペクトラムを示している。ラジアル力の和の電流周波数の 6 倍成分を除去する電流を算出し、振動が大幅に低減することを明らかにした。これまで、5, 7 次の電流を重畳すると振動騒音が低減することが明らかになっていたが、ラジアル力の和をフラットにすることが重要であることを新しく明らかにした。

図 10 は小型スイッチドリラクタンスモータの構成を示している。小型のスイッチドリラクタンスモータは誘導電動機より効率がよく、誘導電動機の置き換えとして、米国などで研究開発が進んでいる。このモータに、従来の方形波電流と、ラジアル力の和がフラットになる電流を流したときの騒音解析の結果が図 11 である。方形波状の電流では、3, 6, 9 次の騒音が発生している。一方、提案方式では、これらの騒音が消えている。このようにスイッチドリラクタンスモータを静かにすることができる。

まとめ

ラジアル力の和をフラットにする方式が、いくつかのスイッチドリラクタンスモータで有効であることを明らかにした。最も多数使用されている誘導機を置き換え、効率を向上することができる。また、スイッチドリラクタンスモータは、レアアース永久磁石などが不要であるため、レアアースの供給によらず、省エネルギーを推進することができる。また、レアアース永久磁石への展開も有効であることを確認した。

2020 年には、申請者は IEEE の Field Awards の一つの Nikola Tesla 賞を受賞した。この賞は、モータ分野の顕著な功績を残した研究者が名前を連ねている最高の賞であり、50 才台で受賞が決定した日本人は初めてである。

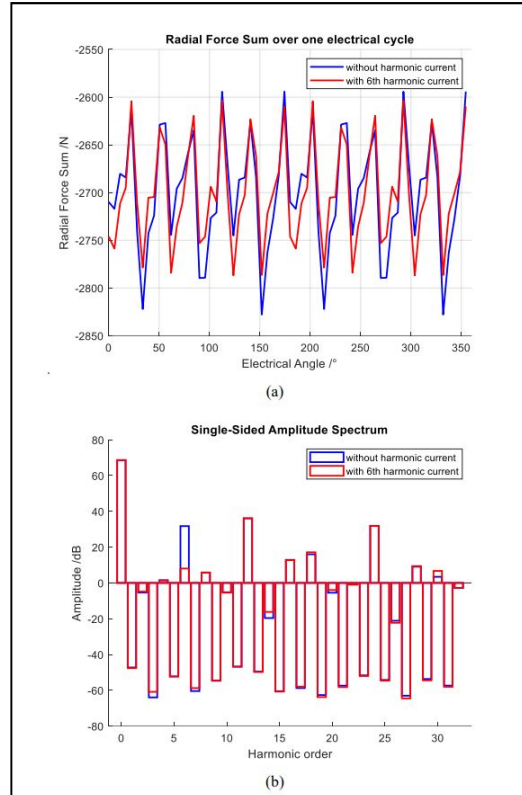


図 9 埋め込み磁石モータのラジアル力の和とスペクトラム

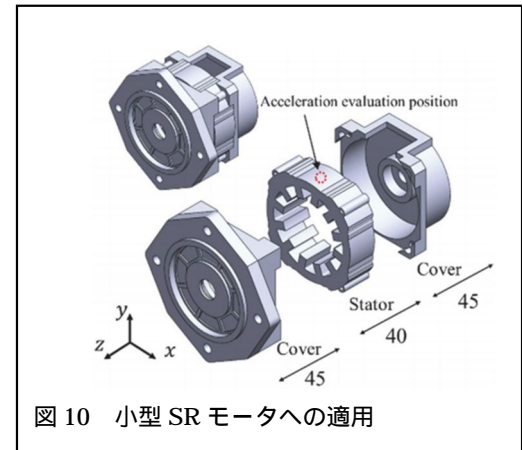


図 10 小型 SR モータへの適用

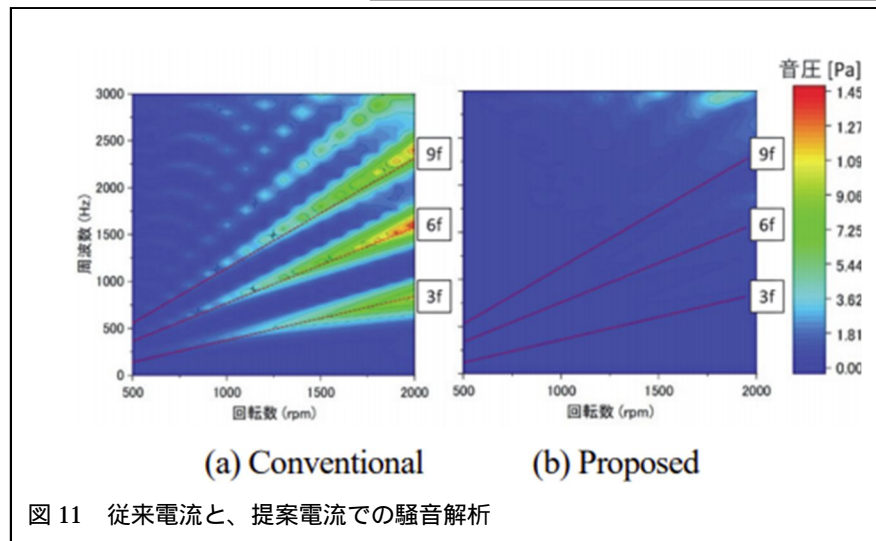


図 11 従来電流と、提案電流での騒音解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawa Masachika, Kiyota Kyohei, Furqani Jihad, Chiba Akira	4. 巻 55
2. 論文標題 Acoustic Noise Reduction of a High-Efficiency Switched Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles With Novel Current Waveform	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 2519 ~ 2528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2018.2888847	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Jihad Furqani*, Candra Adi Wiguna*, Akira Chiba*, Omer Gundogmus**, Mohammed Elamin**, Yilmaz Sozer**	4. 巻 1
2. 論文標題 Analytical and Experimental Verification of Novel Current Waveforms for Noise Reduction in Switched Reluctance Motor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Proceeding of IEMDC 978-1-5386-9350-6/19/\$31.00 ©2019 IEEE	6. 最初と最後の頁 576-583
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Candra Adi Wiguna*, Jihad Furqani, Yifei Cai, Akira Chiba	4. 巻 III
2. 論文標題 Flattening Radial Force Sum for Noise Reduction of Switched Reluctance Motor at High Speed Operation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019年電気学会産業応用部門大会	6. 最初と最後の頁 447-450
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Omer Gundogmus Mohammed Elamin Yilmaz Sozer Akira Chiba	4. 巻 1
2. 論文標題 Simultaneous Torque and Radial Force Ripple Control for Reduction of Acoustic Noise and Vibration in Switch Reluctance Machines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 978-1-4799-7312-5/18/\$31.00 ©2018 IEEE	6. 最初と最後の頁 722 - 728
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Candra Adi Wiguna, Jihad Furuqani, Akira Chiba	4. 巻 1
2. 論文標題 Improved current profile derivation process for noise reduction of switched reluctance motor at high speed operation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成31年電気学会全国大会 5 - 066	6. 最初と最後の頁 111 - 112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Jihad Furqani, Candra Adi Wiguna, and Akira Chiba	4. 巻 5
2. 論文標題 Effectiveness of Flattening radial force sum in reduced number of pole switched reluctance motors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 平成31年電気学会全国大会 5 - 067	6. 最初と最後の頁 113 - 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Akira Chiba et al
2. 発表標題 Acoustic Noise Reduction of Interior Permanent Magnet Motor with a Principle of Radial Force Sum Flattening
3. 学会等名 IEEE Enegy Conversion and Exhibition Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jihad Furqani
2. 発表標題 Analytical and Experimental Verification of Novel Current Waveforms for Noise Reduction in Switched Reluctance Motor
3. 学会等名 IEEE IEMDC2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Candra Adi Wiguna
2. 発表標題 Flattening Radial Force Sum for Noise Reduction of Switched Reluctance Motor at High Speed Operation
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Omer Gundogmus
2. 発表標題 Simultaneous Torque and Radial Force Ripple Control for Reduction of Acoustic Noise and Vibration in Switch Reluctance Machines
3. 学会等名 978-1-4799-7312-5/18/\$31.00 ©;2018 IEEE (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 梅岡諒
2. 発表標題 IPMの高調波電流重畳による6次ラジアル力の低減
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 千葉明
2. 発表標題 次世代自動車用スイッチドリラクタンスモータに関する研究
3. 学会等名 モータ技術シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Candra Adi Wiguna
2. 発表標題 Improved current profile derivation process for noise reduction of switched reluctance motor at high speed operation
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jihad Furqani
2. 発表標題 Effectiveness of Flattening radial force sum in reduced number of pole switched reluctance motors
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	朝間 淳一 (Asama Junichi) (70447522)	静岡大学・工学部・准教授 (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Universiy of Akron		