

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13920

研究課題名(和文)ハイブリッド自動車用スイッチドリラクタンス機の振動騒音の低減

研究課題名(英文)Noise and vibration reduction of switched reluctance motor for hybrid vehicles

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：スイッチドリラクタンスモータの騒音の低減は数十年来研究されているが、効果が限定的な手法ばかりである。このような状況下で、3年前、我々は世界に先駆けてスイッチドリラクタンスモータの騒音低減方法を発見した。その方法は隣り合う3相の固定子歯にかかる力の和をフラットにする方法である。発想は単純であり、歯の根元が強固であれば振動騒音は低下する。

従来の方法を適用するとともに、従来、0から3次までで電流指令値を生成していたが、4次とその位相を取り入れることにより、騒音の低減とともに、電流実効値を低減し、効率を向上する方法を明らかにした。新しい電流波形を提案した。

研究成果の概要(英文)： The noise and vibration reduction of switched reluctance motor has been investigated for last several decades, however, the existing methods are limited. Three years ago, we have found a current waveform to reduce the acoustic noise effectively. The principle is simple, flattening the sum of three-phase radial forces. If stator yoke is rigid, then noise and vibration are reduced.

In this project, current waveform is generated considering up to 4th harmonic components and these phase shift to reduce the rms value of the current, so that efficiency is improved. A novel current waveform has been found to reduce the sum of radial forces.

研究分野：電気機器

キーワード：スイッチドリラクタンスモータ 騒音低減 振動低減 力の和 SRモータ

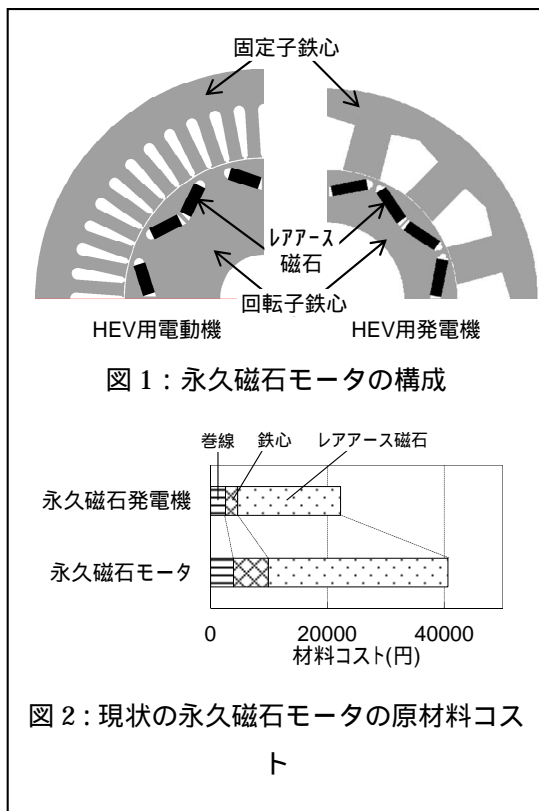
1. 研究開始当初の背景

近年、レアアースの供給不安、価格上昇といったレアアース問題が発生している。二酸化炭素の排出量を削減する切り札と見込まれるハイブリッドなどの次世代自動車の生産に問題が発生しつつある。バッテリーも問題であるが、モータ、発電機なども希土類磁石(レアアース:ネオジム、ディスプロジウム)が適用されている。

図1は埋込型永久磁石同期機(IPMSM)の断面を示しており、黒塗り部分がレアアース磁石である。小型かつ高効率・高出力が求められ、レアアース磁石が適用されている。

図2はモータ発電機のコスト内訳であり、磁石が材料コストの5~7割を占める。2005年から2012年にレアアース原材料の価格が10倍以上高騰し、現在でも数倍の価格である。

脱レアアースモータの研究開発が国内外で進んでいる。そのなかでSR電動機・発電機は効率、トルク密度などで優れた特性があることが申請者らによって明らかになった。しかし、騒音、振動が大きい点が問題となっている。

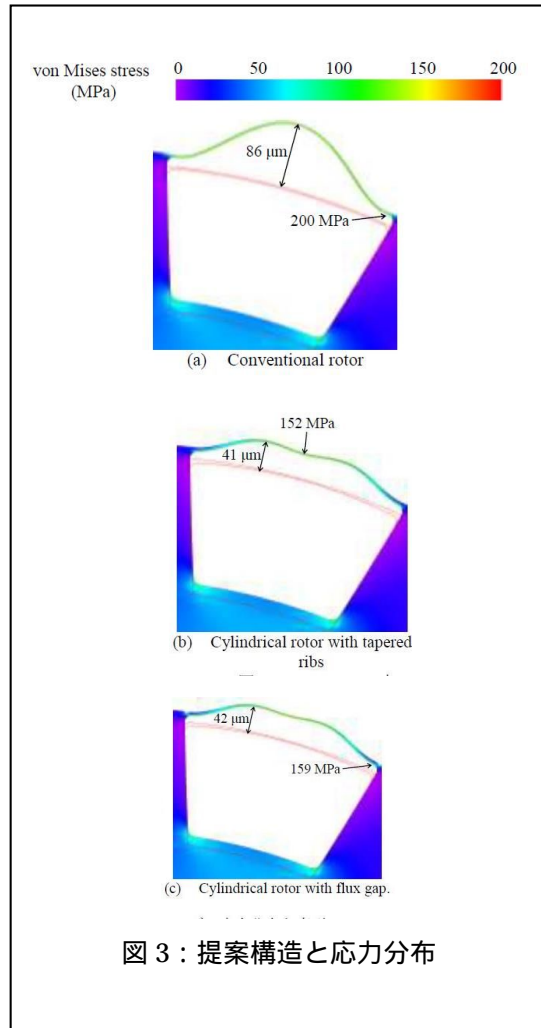


2. 研究の目的

研究期間内に、ハイブリッド自動車に搭載されているモータ・発電機と同等の効率、出力密度、電流のSRモータを試作し、新しい振動騒音低減方法を適用し、振動騒音低減効果を明らかにする。

申請者らは、2008年からHEV用のSRモータの研究を行っており、トルク、効率の面で永久磁石モータと同等以上の特性を持つ

試作機を設計、製作することに成功している。申請者らの独創的な発想は(1)多極化によるトルク向上、(2)低鉄心材料による高効率化、(3)電流連続による運転速度の拡大、であり、その学術的成果は電動機関係で最も難関であるIEEE-IASの電動機委員会の2011年第一位論文賞を受賞した。さらに、SR機の振動騒音低減の糸口を見つけつつある。SR機は従来の半分以下の材料コストで生産することができ、産業界へのインパクトが高く、世界各国をリードする学術研究となることが予測される。



3. 研究の方法

本研究では、低速大トルク36/24極構成のSRモータにて20dB以上の画期的な低騒音化を実現した方法を適用する。SRモータの低速域での電磁騒音を20dB以上実験的に低減できることを確認した例は国内外で見当たらない。その手法は、3相のSRモータの半径方向力の和を一定値とする方法である。

4. 研究成果

図3は風切り音を低減するための従来方法と、新しくフラックスギャップを施した方式を比較している。カースケールは赤いほど応力が集中し、回転速度が制限されてしま

う。(a)は従来方式、(b)はテーパを施した場合、(c)は提案するフラックスギャップをつけた場合である。提案するフラックスギャップでは200MPa程度の応力集中が159MPaに低減できていることがわかる。

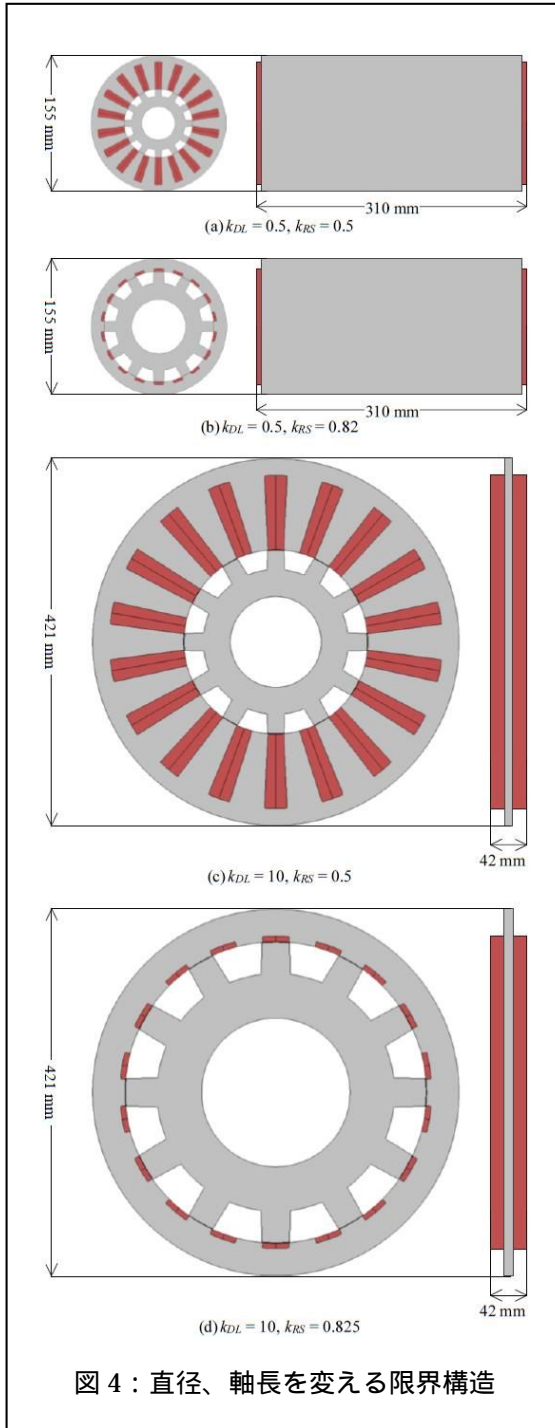


図4：直径、軸長を変える限界構造

図4はモータ外形の直径Dと軸長Lの比率 $k_{DL}$ と、固定子直径に対する回転子直径の比率 $k_{RS}$ を変化させてどのような比の際にトルクが最大になるのかを、体積を一定として検討した際の、最も極端な構造を示している。広い範囲から最もトルクが出るポイントを探すため、かなり極端な構成までを考慮して探索を行った。

図5は最適構造の探索結果である。(a)はトルクで有り、赤い色のところがトルクが大きい領域である。(b)は効率で有り、赤に近いところが効率が良い。効率が良いポイントと、トルクが大きいポイントは近くであるものの、一致はしていないため、要求事項によって適切に選択する必要がある。ハイブリッド自動車などでは、最大トルクで運転する時間が短く、一方、加速トルクは大きなものが要求されるので、最大トルクが大きいポイントで設計することが望ましいが、やや、上方にすれば、効率も良い。

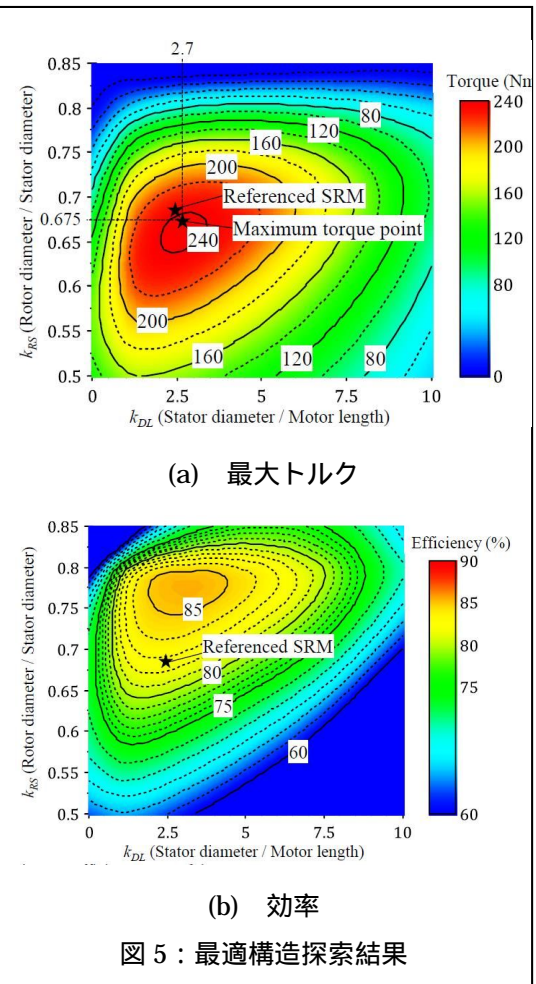
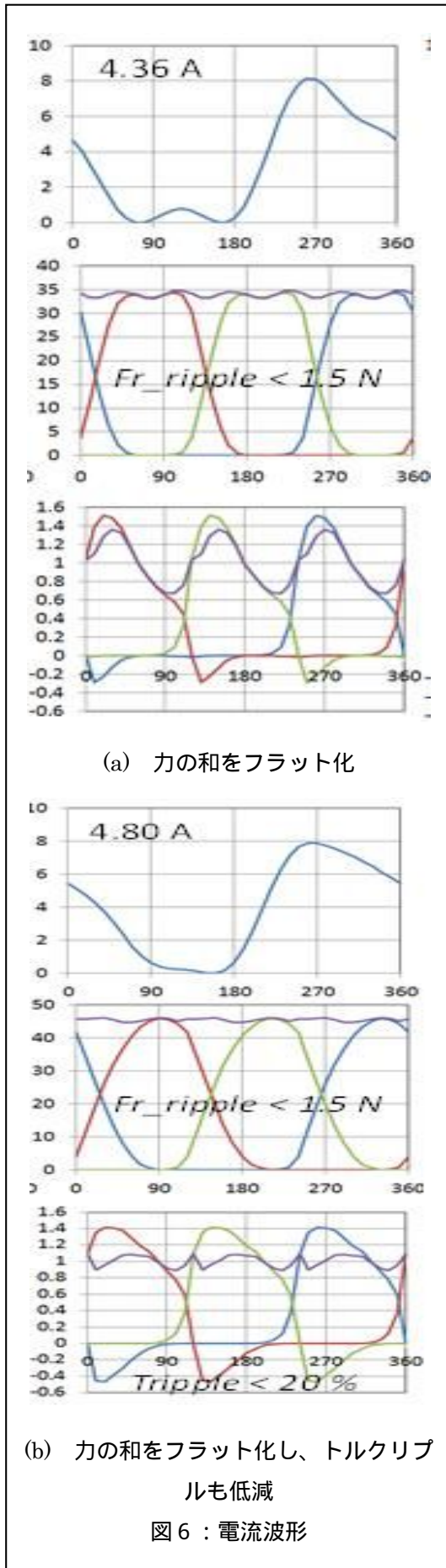


図5：最適構造探索結果

図6は電流波形を最適化して、三相の力の和をフラットにする方法の模索結果である。(a)は三相の力を極力小さい電流で実現した場合、(b)はトルクリプルも極力低減した上で、電流が小さいポイントである。回転速度によっては、トルクリプルが騒音振動を発生する場合もあるため、同時に検討が必要である。ねじれ系の共振周波数から外れているときは(a)の電流波形を適用すれば良い。一方、ねじれ共振系と周波数が一致する場合はトルクリプルを低減する(b)の電流波形を適用する必要があり、電流値はやや上がり、効率は低減せざる終えない。電流値はそれぞれ4.36A, 4.80Aであり、大きく損失が増加することはないので適用は困難ではない。この電流波形は従来0-3次高調波まで考慮していたが、今回、あらたに0-4次高調波を考量して

電流を低減した。



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 3 件)

Kyohei Kiyota, Shinji Nakano, Akira Chiba "Practical Consideration of Cylindrical Rotor for Acoustic Noise Reduction in Switched Reluctance Machine for Hybrid Electric Vehicles" Proceedings of EVTEC 20169097, Society of Automotive Engineers of Japan 2016 pp.1-6 査読無し

Kyohei Kiyota, Shinji Nakano, Akira Chiba "An Optimal Ratio of Outer Diameter and Axial Length for Torque Improvement in Switched Reluctance Motor" Proceeding of International Conference of Electric Machines, IEEE 978-1-5090-2537-4/16 2016 pp.1300-1306 査読有り

Masachika Kawa, Kyohei Kiyota, Jihad Furqani, Akira Chiba "Acoustic Noise Reduction of a High Efficiency Switched Reluctance Motor for Hybrid Electric Vehicles with Novel Current Waveform" Proceeding of International Electric Machines and Drives Conference 6 pages, 978-1-5090-4281-4/17, 2017 IEEE 査読無し

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
 発明者：  
 権利者：  
 種類：  
 番号：  
 出願年月日：  
 国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 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

##### (2) 研究分担者

杉元 紘也 (SUGIMOTO, Hiroya)  
東京工業大学・工学院・助教  
研究者番号：60613552

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

##### (4) 研究協力者

清田 恭平 (KIYOTA, Kyohei)  
東京工業大学 ポスドク