

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05930

研究課題名(和文)トルク制限機能を設計可能とする非接触伝達機構の開発

研究課題名(英文)Development of non-contact transmission mechanism for design of torque limit function

研究代表者

安藤 嘉則 (ANDO, YOSHINORI)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：70242831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高減速比が得られ磁石の利用効率が高い高調波型磁気歯車において、積層数の変更によりトルク調節が可能な積層型の磁気歯車において、積層するレイヤーに磁石のハルバツハ配列を用いトルク密度の向上を図った結果、シミュレーションと実験により、提案した構造は従来の積層式高調波型磁気歯車に比べて、トルク密度が向上した。
また、磁気歯車のトルクリミッタ機能を検討し、磁気歯車間にコイルを挿し込むことで組立後の脱調トルクの調節を試みた結果、歯車間に挿入するコイルを変更することで脱調トルクを調節できることが確認できた。また、コイルに電流を印加することで、同一のコイルでも脱調トルクの調節可能な範囲を拡大することができた。

研究成果の概要(英文)：A harmonic magnetic gear with a high reduction ratio and high utilization efficiency of magnets is studied. In the stackable structure, a proposed gear can adjust a transmission torque by changing the number of stacks. The Halbach array of magnets is used for each layer. Through simulation and experiments, the proposed structure has improved torque density compared with conventional stackable harmonic magnetic gear.
The torque limit function of the cylindrical magnetic gear is concerned and adjust of the step-out torque after assembling was attempted by inserting the coil between the magnetic gears. It was confirmed that the maximum transmission torque can be adjusted by changing the coil inserted between the gears. In addition, it was possible to extend the adjustable range of step-out torque even with the same coil by applying current to the coil.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：磁気歯車 積層式 ハルバツハ配列 トルク制限機能

1. 研究開始当初の背景

非接触で運動を伝達する手段として磁気歯車が検討されている。磁石の性能向上に伴い磁気歯車の伝達特性も向上が図られてきた。磁気歯車の有する特性の一つに過大なトルクが入力されると噛み合いが外れて脱調するというトルク制限機能がある。これを用いると機械装置や人の安全などへの応用が可能となる。従来脱調トルクは磁気歯車の設計時に定められ、組立後には調整できないものであった。しかし安全装置などへの応用を考えると脱調が発生するトルクは調整できるのが望ましいと考えられる。そこで、高調波型磁気歯車では積層型が提案[①]され、また、円筒型では向かい合う歯車の位置の調整機構を組み込むことで、脱調トルクの調整が提案[②]されてきた。積層型では調整が可能ではあるがトルクの値が小さく、円筒型では、位置の調整機構を組み付けなければならないなど、改良すべき点が見受けられた。そこで、これらの短所を解決することが望まれており、本研究ではその解決策を見いだすことを検討した。

2. 研究の目的

運動・動力伝達の際に生ずる接触に基づく騒音・振動・摩擦などを避けることができる非接触による伝達が可能な機械要素である磁気歯車において、従来は磁石利用効率が悪いという短所があった。これを解消するため高調波型磁気歯車などが検討されているが、組付けの難しさなどが指摘されている。そこで、組立が容易な積層構造を持つ新しい磁石磁気歯車の開発を目的とする。さらに、磁気歯車の特徴であるトルクリミット機構についてその脱調が始まるトルクの大きさを設計するための基礎実験を行い、提案する新しい構造を持つ表面磁石型磁気歯車においてトルク特性の向上を図るとともに、トルク制限値の設計を可能とすることを旨とする。

また、構造が簡単な円筒型磁気歯車において複雑な調節装置を組み込むことなく、歯車間にコイルを挿し込むことによる脱調トルクの調節を試み、より簡便な脱調トルク調整法の開発を目指す。

3. 研究の方法

本研究では新たな構造を有する積層式高調波型磁気歯車の構造を提案する。インナー、センター、アウターの3つの構造からなる点は従来のタイプと同様であるが、それぞれの構造に新たな提案を行う。

インナーとアウターには Layer1 と Layer 2 を交互に積層する。これらはそれぞれ着磁方向が半径方向と軸方向に着磁された磁石が隣り合うものが磁極の異なるように複数個円状に配置されている。Layer1 と Layer2 を交互に積層することによって、Layer1 を中心としたハルバッハ配列が形成される。これにより、運動伝達に用いられる半径方向の磁束を

強める構造となる。さらに、提案構造は組立が容易な構造を持っている。試作機の開発・製作とそれを用いた実験による性能の測定と数値計算による特性の推定を行う。試作機の開発を通して、提案する積層型磁気歯車の有効性と問題点を明確にしていく。

また、円筒型磁気歯車の脱調トルクの調節においては、従来のように組み込んだ機械的な調節機構により歯車を移動させて調節するのではなく、歯車間にコイルを挿入することによる調節を試みる。各種のコイルや FPC (Flexible printed circuits) を挿入しトルク特性を測定する。さらに、コイルに電流を印加することで調節の幅の拡大を試みる、このような新たな調整法を提案し、シミュレーションと実験を通して提案方法の有効性を確認する。

4. 研究成果

本研究では、主に以下のふたつの観点から非接触伝達機構である磁気歯車について開発を行った。まず、従来提案していた積層式高調波歯車に対して、磁石のハルバッハ配列を採用した新しい積層構造を提案した。また、円筒型磁気歯車の間にコイルを差し込むことで最大伝達トルクを調節する手法を提案した。それぞれにおいて積層数の調整やコイルの選択を行うことにより伝達トルクの調整が可能な伝達機構の構成を行った。

(1) 新しい積層型磁気歯車の構造の提案

積層式高調波型磁気歯車において、これまで研究してきた積層式高調波磁気歯車の脱調トルクやトルク密度を向上させることを

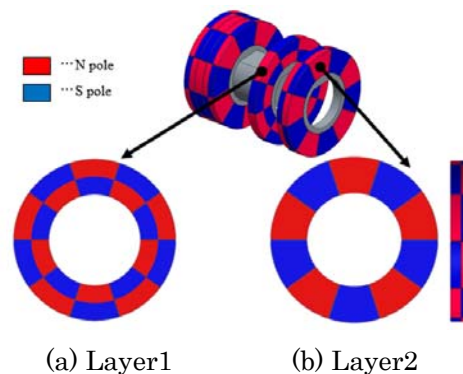


図1 提案した積層型磁気歯車

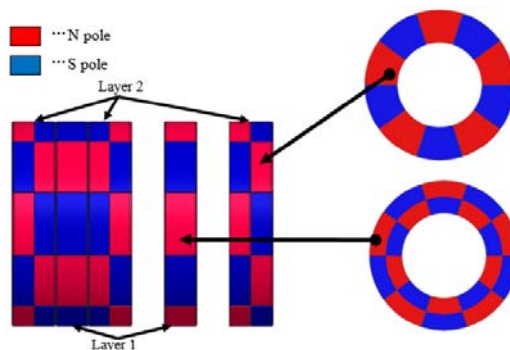


図2 積層によるハルバッハ配列の構成

目的に、新たな構造の提案を行った。従来の積層式高調波型磁気歯車とは違い、図1に示すようにインナーとアウトに用いる各Layerの従来のように鉄板やリング磁石を用いずすべてセグメント型磁石で構成するものである。Layer1とLayer2では磁石の磁化方向がそれぞれ半径方向と軸方向と異なっているので、新提案の構造は、Layer1とLayer2を交互に積層することでハルパツハ配列を形成している。(図2)

新たに提案する構造が脱調トルクやトルク密度の向上に効果があるか、シミュレーションを行った。従来の構造と、新たに提案する構造について、寸法、極対数を同じとしたモデルを用いて、最大伝達トルクとトルク密度の算出を行った。

その結果、新たに提案する構造は、従来のものと比べ、最大伝達トルクは2.5倍、トルク密度は2.2倍となる結果が得られた。このことから、新たに提案する構造が磁気歯車のトルク密度の向上に効果があることが確認できた。

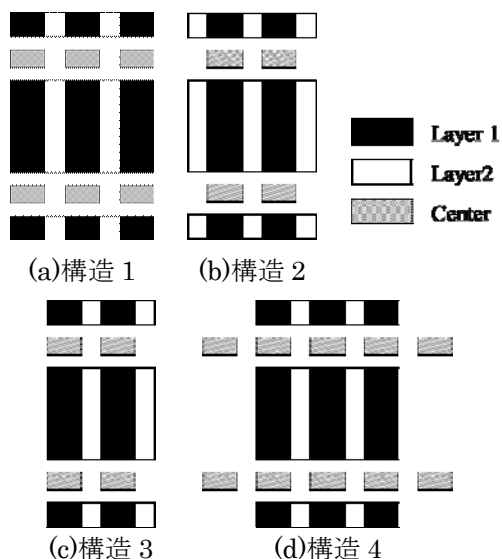


図3 Layerの組み合わせによる構造

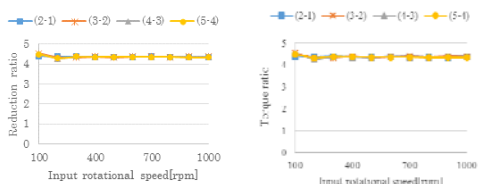


図4 実験結果 (負荷 1Nm)

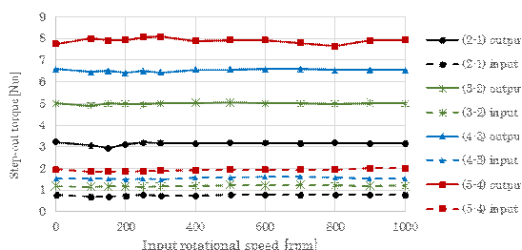


図5 脱調トルクの測定結果

シミュレーション結果を受け、試作機の製作を行った。試作機による実験を通して、新たに提案した構造を用いた積層式高調波型磁気歯車の基礎特性を調べた。積層方法もLayerの組み合わせを替えた構造1~4(図3)を作製し、それらを用いた実験を行った。実験結果の一例を図4に示す。これは構造1の時の減速比とトルク比である。実験を通して以下のことが明らかになった。

- ① 試作機は各構造において、減速比・トルク比ともに極対数に基づく理論値 13/3 に近い値となった。このことからどの構造でも、正常に回転運動の伝達が行えることが確認できた。(図4)
- ② 実験結果より、最大で約 7.83[Nm]の出力トルクを伝達することができた。従来の積層式高調波型磁気歯車が約 1.05[Nm]であり、およそ 7.5 倍である。(図5) なお、図中の凡例における(x-y)は組立てに用いた layer1 と layer2 の数を示している。
- ③ 両端に Layer1 を配置する構造 1 で脱調トルクが最大となり、トルク密度は約 1.08×10^5 [Nm/m³]であった。サイズが異なるものの従来の積層式高調波型磁気歯車のトルク密度が約 1.89×10^4 [Nm/m³]であり、およそ 5.7 倍である。
- ④ 両端に Layer1 を配置する積層方法とした構造 1 がトルク密度の観点から最も効果的であることが分かった。
- ⑤ センターは今回の試作機のように各Layerに対応するように分離して製作・組立した場合でも、従来の試作機のように一体で製作したとしても、脱調トルクへの影響に大きな差はなかった。
- ⑥ 今回新たに提案した構造では、センターを積層可能な構造とした。また、アウトのケースもそれぞれのレイヤーごとに分離させた。このことによって、積層式高調波型磁気歯車の組み立てやすさが向上した。

(2) 円筒型磁気歯車の脱調トルクの調整

本研究では、円筒型磁気歯車における最大伝達トルク(脱調トルク)の調節方法について検討した。従来提案されていた方法とは異なり、磁石の間にコイルを挿し込む方法を提案する(図6)。コイルの巻き数を替えたもの

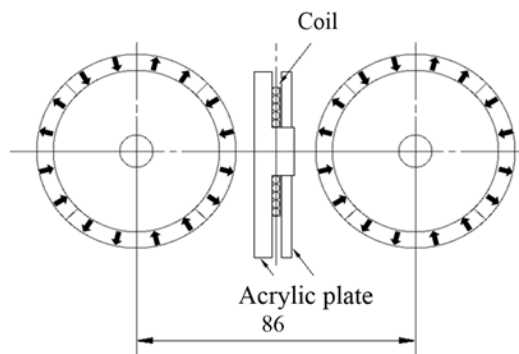


図6 円筒型磁気歯車とコイル

で脱調時のトルクがどのように変化したかを測定した。測定結果よりトルクの減少率を算出し、さらに減少率のうちコイルに起因すると考えられるものを図7に示している。

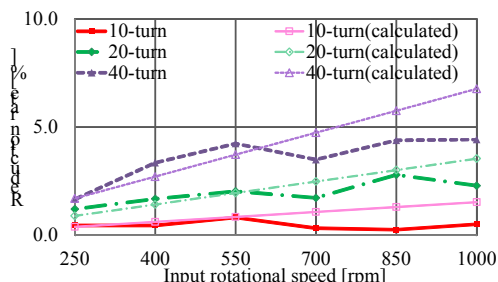


図7 コイルに起因するトルク減少率

図中 **calculated** で示されているものは計算式を用いてコイルによる磁束を求め、コイルによる減少率を計算したものである。回転数の増加とともに実験の方が小さな値となっている。これは高回転ではコイルによる発熱等の影響があるためだと思われる。低回転域では誤差が小さいので、計算方法や各種条件の見直しでさらに良い計算結果が得られると思われる。

次に磁気歯車の回転に同期してコイルに電流を流して脱調トルクの調節を試みた。磁石によりコイルを通る磁束を強める方向や弱める方向の電流を印加したときのトルク減少率を図8に示す。

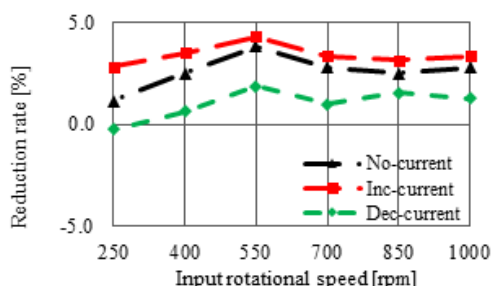


図8 電流印加時のトルク減少率

コイルによるトルク減少率は、通電なしの状態では2.8%であったのに対して、強め方向の電流(Inc-current)を印加したときは3.3%、弱め方向の電流(Dec-current)を印加したときは1.3%であった。40回巻きコイルの1000rpmにおける測定では、電流を印加することでトルク減少率を1.3%から3.3%の範囲に拡大することができた。本研究では印加電流の最大値を1Aとしたが、印加電流の大きさを変更することでトルク低減率を1.3%から3.3%の間で任意に設定することが期待される。また、印加電流は誘導電流を増減させる $\pm 1A$ の矩形波としたが、電流波形や印加タイミングを変えることで、振幅1Aの印加電流でもより効果的に脱調トルクを変化させることが期待される。

さらに、FPCを用いてコイル薄型化の検討を行った。実験におけるトルク減少率を図9に示す。

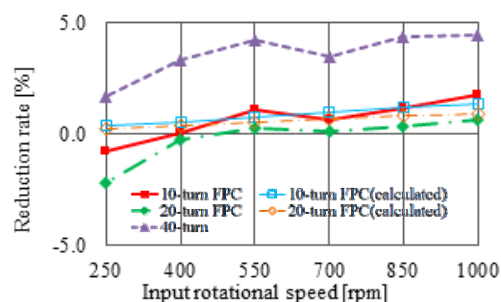


図9 FPC使用時のトルク減少率

10、20回巻きFPCを歯車間に挿し込むことでコイルなしのトルク減少率に比してそれぞれ2.5%、0.6%大きくなった。しかし、FPCはパターンギャップがあるため40回巻きコイルより小さい値であったと考えられる。10回巻きFPCの計算値と実測値の比較では、高回転域では近い値を求めることができた。

以上の結果より、組立後の磁気歯車に対して、歯車間にコイルを挿入することで脱調トルクを変更できることが確認できた。また、コイルに電流を印加することで、同一のコイルでも脱調トルクを変えることが可能で、これにより脱調トルクの調節可能な範囲を拡大することができた。したがって、挿し込むコイルを変更することで脱調トルクを段階的に調節し、電流を印加することでより細かく調節することが期待される。FPCにおいても、出力トルクの低下が確認できたため、コイルよりも厚みの薄いFPCを用いることで、磁気歯車間距離が狭い状態(伝達トルクが大きい状態)でも脱調トルクの調節が可能と考えられる。本研究で脱調トルクの計算値を求めるために得た矩形コイルにおける発生磁束密度の計算式は、発熱が少ない条件においては、コイル設計の指標として利用できると考えられる。その際、コイルなしの伝達効率と所望の脱調トルクとなるトルク減少率を決定し、歯車間の磁束密度、コイルのパラメータを設定して計算することで、コイル製作前に所望の脱調トルクを満たすか確認することができる。

(3) まとめ

本研究では、非接触の伝達機構として磁気歯車を対象とした。そこで、まず新しいハルバッハ配列を有する構造を持つ積層式高調波磁気歯車を提案した。提案した積層型磁気歯車では、積層数の変更で最大伝達トルクの調節を可能にする構造ながら最大伝達トルクの値を従来の7.5倍へ向上させることが実現でき、さらにトルク密度も5.7倍の向上も達成できた。また、円筒型磁気歯車における脱調トルクの調節では、挿し込むコイルの変更で脱調トルクの調整が可能であることが示され、さらに電流の印加でよりきめ細かい調節が可能であることが期待できる成果を得た。また、FPCの使用により磁石間距離を短くすることが可能となり、より大きな脱調トルクにおいてもその調整が可能と思われる。

以上より、脱調トルクの大きさの調節が可能な非接触伝達機構である磁気歯車の開発について、基本的な結果を得ることができた。今後はさらなる性能向上のための条件に関するしての検討が必要である。

<引用文献>

- ① 内堀 憲治, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 円筒型磁気歯車におけるリミットトルク値の設定, 日本 AEM 学会誌, Vol.23, 2015, 68-73
- ② Y. Ando, S. Kuroiwa, K. Kobori, and I. Murakami, Development of Magnetic Harmonic Gear with Stackable Structure, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 52, 2016, 809-816

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 1 件)

- ① K. Chigira, Y. Ando, I. Murakami, and T. Kurahashi, Study on Structure for Increase of a Transmit Torque on Magnetic Harmonic Gear with Stackable Structure, Materials Science Forum, 査読有, 915, 77-82, 2018

[学会発表] (計 8 件)

- ① 関島 裕弥, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 矩形コイルを用いた際の円筒型磁気歯車の脱調トルクの挙動に関する研究, 第26回MAGDAコンファレンス in 金沢, 2017
- ② 千明 幸司, 倉橋 崇仁, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 積層式高調波型磁気歯車における磁石の利用効率を向上させる構造の検討, 第26回MAGDAコンファレンス in 金沢, 2017
- ③ K. Chigira, Y. Ando, I. Murakami, and T. Kurahashi, Study on the magnetic harmonic gear with stackable structure - Improvement of its torque density -, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2017), 2017.
- ④ Y. Sekijima, Y. Ando, I. Murakami, Study on Step-out Torque Behavior of Cylindrical Magnetic Gear with Plane Rectangle Coil, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM2017), 2017.
- ⑤ K. Chigira, Y. Ando, I. Murakami, and T. Kurahashi, Study on Structure for Increase of a Transmit Torque on Magnetic Harmonic Gear with Stackable Structure, The tenth Japanese-Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting(JAPMED10), 2017
- ⑥ 倉橋 崇仁, 千明 幸司, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 積層式高調波磁気歯車における最適構

造の検証実験-トルク特性の向上にむけて-第29回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2017

- ⑦ 千明 幸司, 黒岩 翔太, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 積層式高調波型磁気歯車におけるトルク向上に向けた構造の検討, 第25回MAGDA コンファレンス in 桐生, 2016
- ⑧ 千明 幸司, 黒岩 翔太, 安藤 嘉則, 村上 岩範, 積層式高調波型磁気歯車における脱調特性の検討, 第28回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2016,

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 嘉則 (ANDO, Yoshinori)
群馬大学・大学院理工学府・准教授
研究者番号: 70242831

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

村上 岩範 (MURAKAMI, Iwanori)
千明 幸司 (CHIGIRA, Koji)
関島 裕弥 (SEKIJIMA, Yuya)