特集 電磁力関連のダイナミクス ア・ラ・カルト

磁気歯車の開発動向

Current Development Trend of Magnetic Gears

安藤 嘉則^{*1}(正員)

Yoshinori ANDO (Mem.)

The magnetic gear is a device to transmit the motion and/or the torque without contact. Many types of magnetic gears are researched and developed. One is like conventional mechanical gear. This type is researched in long time and some of them become the commercial products. But, a weak point of this type is low usage rate of magnets. So recently the harmonic magnetic gears attract the attention for the high transmission torque and the high usage rate of magnets. This paper reports the recent trend of the researches in the magnetic gears.

(2016 年 6 月 2 日受付)

1 緒言

現在様々な機械装置においてモータが使用されている。このモータの消費する電力は、全国のエネルギー消費の半分以上を占めると言われている。そのため、モータの効率の向上は様々な機会で見られており、高効率化に向けた規制も施行されるようになってきている。しかし、モータは本来高回転低出力トルクのものが多い。そこで、必要なトルクを取り出すために、モータを高回転で回転させ減速機によって低回転にすると同時にトルクを大きくするように用いられることが一般的である。その際のトルク T は以下の式で表すことができる。

$$T = T_m \times G \times \eta \quad (1)$$

ここで、 T_m はモータトルク、 G は減速比、 η は減速部の効率である。したがって、トルクを大きくするに当たっては、モータのトルク向上のみならず、減速機の効率も大きな役割を持っている。従来の機械式歯車等の減速部の効率は、80%程度であり、高効率の減速機でも 90%程度と考えられる。これらの効率を決定するのは歯同士のかみ合いなどの各種摩擦による損失や潤滑油などの使用に起因する損失と考えられる。そこで、歯の摩擦による損失を無くするために、非接触による運動の伝達が考えられる。その際に有効と考えら

れるのが電磁力による非接触伝達である。

磁石を用いた非接触による運動伝達は古くから検討されている[1]。従来の機械式歯車の歯に磁石を張るなどして対向する歯同士を同じ極性を持たせることにより、歯と歯が磁気による反発力により接触することなく運動を伝達することが考えられた。さらに、かみ合う歯車の表面を異極に磁化した状態にしてかみ合わせるとバックラッシュを無くすることが可能となり、そのための構造も提案されている。

次に、通常の歯の代わりに磁石そのものを歯として用いる方法が検討されてきた。これは、磁石による反発力や吸引力を用いることにより運動を伝達させる物である。鶴本ら[2-7]は多くの方法で、これらの磁気歯車について検討をしている。このタイプの磁気歯車は、商品化もされて実用化されているものもある[8-11]。しかし、これらの従来の歯車の歯を磁石で置き換えた磁気歯車は、使用している磁石に比べて運動の伝達に用いられている磁石がごく一部であり、その意味で、磁石の使用効率が悪いといえる。そのため、伝達力や伝達トルクを大きくするために希土類を用いた磁石を利用しようとする場合、価格が高くなる懸念がある。

そこで、検討されてきたのが Attala ら[17,18]によって提案された高調波磁気歯車(表面型磁気歯車)である。従来の歯車の歯を磁石に置き換えた磁気歯車が平歯車や傘歯車などと同様と考え、高調波磁気歯車はRV減速機やハーモニックドライブなどの減速機の磁気歯車版と考えると理解が容易と思われる。機械式歯車の歯を磁石に置き換えた物は動作の理解が容易であるが、高調波型磁気歯車は、基本的には差動歯車の原理と同

連絡先： 安藤 嘉則，〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1，群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門，
e-mail: ando@gunma-u.ac.jp

^{*1} 群馬大学

じで、駆動部が三個所あり、どこも入力や出力にすることが可能である。そのため、減速機のみならず増速機としての利用も容易である。この形式の磁気歯車については国内外多くの研究者が取り組んでいる。日本国内では、東北大学のグループ、大阪大学のグループ、群馬大学のグループ、大分大学のグループなどがそれぞれ研究を進めている。また、実用化を図り商品化を目指している企業もある。

磁気歯車が持つ特徴として下記の物をあげることができる。

- (1) 非接触であるので摩擦がない。そのため、潤滑が不要である。そのため、潤滑油の飛散による雰囲気汚染がないので、食品や半導体など扱う現場での使用に適している。また、メンテナンスフリーを実現しやすい。
- (2) 非接触での伝達が可能なため、非磁性体を間に挟んでも運動の伝達が可能である。そのため、水槽の外から水槽の中に運動を伝達することができるというような特徴がある。
- (3) 伝達に用いる磁力の大きさの制限から、過度なトルクが作用すると、かみ合いが外れて脱調する現象が発生する。これを有効利用すると、トルク制限機能付き伝達装置として利用可能である。

以下では、これらの磁気歯車について現状について触れながら解説していく。

2 従来の機械式歯車に対応する磁気歯車

この分野では国内でも古くから研究が行われてお

り、近年では鶴本ら[2-7]が積極的に研究を進めてきており、それらの成果として(株)プロスパイン[8]により商品化が行われている。また、安藤ら[12,13]により、円筒型磁気歯車における基本的なトルク伝達特性についての実験とシミュレーションによる考察も行われている。

これらの研究では、円筒や円盤などに磁石を貼り付けたり材料を磁化したりなどして磁石の吸引力や反発力を利用して磁気的に運動やトルクを伝達しており、従来の機械式歯車を置き換える構造 (Fig. 1,2) をしている。Fig.1 では(a)では、磁気的な吸引力と反発力が安定しており静止状態である。つぎに(b)(c)では一方が回転を開始すると、磁気的な安定が崩れ吸引力や反発力のせいでもう一方が回転を開始する。(d)でまた磁気的な安定な状態になる。これらを繰り返して一方の回転が他方の回転に伝達していく。なめらかな伝達には、対向する磁極の円弧の長さが等しい方がよく、そうでない場合も伝達は可能であるが、運動や伝達トルクの脈動が大きくなる。

これらの歯車では、従来の歯車とは異なり、非接触で運動やトルクを伝達している。そのため、歯の接触に起因する摩擦や粉塵、騒音などが発生しない特徴がある。そのため、食品や半導体などの分野での利用が見られる。また、非接触であるので、非磁性体を間に挟んでも運動を伝達できるので、水槽やクリーンルームの外から内部の機構を駆動したりすることが可能である。このような利用も今後検討されていくと思われる。

トルクのむらを少なくするために、平歯車の代わりにはす歯歯車を用いるような磁石配置をすることも検討されている (Fig.2)。

Fig. 1 Principle of Magnetic Gear Transmission[12]

Fig.2 Examples of Magnetic Gear [9]

Ando ら[14,15]は円筒型磁気歯車の試作の製作と実験をおこない、磁気歯車における歯数と伝達トルクの大きさや位置決め精度に及ぼす影響などを調べ、磁気歯車が実際に伝達装置として使用された場合における設計指針について検討している。歯数が多いほど伝達トルクが小さくなり、位置決め精度は磁石の対向位置により差が現れることが明らかにされている。また、最大伝達トルクの設定方法についても検討を加えて、組み立て時に対向するギャップの大きさや対向する磁石の長さを調節して行う脱調トルクの設定方法について報告している[16](Fig.3)。

しかし、先にも述べたとおり、運動・トルクの伝達に利用される磁石がほぼ対向している磁石に限られるため、磁石の使用効率が悪くなり近年の希土類の価格高騰化などの影響で、より大きな伝達トルクなどを要求される用途での使用が難しくなっている。

3 高調波型磁気歯車

近年従来の機械式歯車の歯を磁石で置き換えた磁気歯車のもつ、磁石の使用効率が悪い、伝達トルクが小さい、軸の曲げトルクが作用するなどという短所を補うために、高調波型磁気歯車(表面磁石型磁気歯車)の研究がさかんに行われている。これは Attalah ら[17,18]により初めて提案されたもので、代表的なものは Fig.4 で示される様な同軸構造をしており、内側より

- (1) インナーロータ：磁極の N 極と S 極を交互に入れ替えた半径方向に磁化された扇形の永久磁石をヨークに貼り付けたもの

Fig. 3 Torque Adjustment for Cylindrical Magnet Gear [14]

- (2) センターロータ：インナーロータに貼り付けた磁石からの磁束をアウターロータに導くはり状の磁極片と非磁性体の配列を有するもの
- (3) アウターロータ：N 極と S 極を交互に入れ替えた厚み方向に磁化された長手（軸）方向に一樣な磁束を有する永久磁石をヨークに貼り付けたもの

の 3 つの要素により構成されている。たとえば、インナーロータを回転させるとインナーロータの磁石が発生する磁束がセンターロータの磁極片により変調され、その変調された磁場とアウターロータの磁石の磁場が作用してトルクが発生する。この形式の動作原理については文献[19,20]が詳しい。

以下のように 3 つのロータのそれぞれの歯数に当たる極対数や極片数を定める。

P_i : インナーロータの極対数

P_c : センターロータの磁極片数

P_o : アウターロータの極対数

ここで、磁極対は N 極と S 極がセットで 1 対としている。この形式の磁気歯車が動作するためには、

$$P_c = P_i + P_o \quad (1)$$

の関係を満足する必要がある。3 つの要素のうちどれかを固定して使用すれば、速度変換器(減速機または増速器)として使用可能となる。センターロータを固定すれば、回転するインナーロータとアウターロータの回転速度比は

$$G_r = -\frac{P_o}{P_i} \quad (2)$$

Fig. 4 Structure of Magnetic Harmonic Gear

となる。また、アウターロータを固定すれば、回転するインナーロータとセンターロータの速度比は

$$G_r = \frac{P_c}{P_i} \quad (3)$$

となる。(2),(3)式において速度比の符号は、正が同方向、負が逆方向の回転であることを示す。このように、この形式の磁気歯車では、従来の機械式減速機である RV 減速機、サイクロ減速機、ハーモニックドライブと同様な同軸の入出力を持つような伝達動作を行う。したがって、2 入力 1 出力での使用も可能となる。

この形式においては、伝達トルクを向上させるための研究、トルクむらを少なくする研究、損失を少なくするための研究などが多くなされている。さらに、機械式歯車でも大きなトルクを得るためには多段の減速が行われるように、伝達トルクを大きくするには多段化が有効であるが、藤田ら[21]は半径方向に2段、新口ら[22]は軸方向に2段の磁気歯車を提案することによりコンパクトではあるが伝達トルクを大きくするように最大伝達トルクの向上を図っている。磁気的な不思議歯車の提案もされており、速度比も大きな範囲の中から選択できるようになってきている。また、Fujita ら[27]はセンターロータを構成する磁性体の形状について検討を加えることにより高トルクの伝達を可能とするための断面形状について検討を加えている。

大阪大学のグループ[22-24]や東北大学のグループ[25-32]では、いろいろな形式のタイプについて研究を進めている。大分大学のグループ[33,34]では、空間高調波型磁気歯車の伝達特性について理論的な解析を行っている。

さらには、Atallah ら[35]や新口ら[36]によりモータと高調波磁気歯車を一体化したコンパクトな磁気ギア

ードモータ(Fig.5)の提案・開発も行われており、擬似的なダイレクトドライブモータとしての使用も検討されている。

群馬大学のグループ[37,38]では、リング磁石を使用し磁束集中を利用した厚みの少ない表面磁気歯車を多段に積層する構造(Fig.6)を検討して、組立て段階で積層段数を調整して最大伝達トルク（脱調トルク）の設定が可能になるような構造を持つ磁気歯車の研究を行っており、この型式ではその構造から製作・組み立ても容易になっていると報告されている。

また、本形式では回転タイプのみならずリニアタイプの研究も行われている。これは Holehouse ら[39]により提案され Li ら[40]により解析されている。国内では原野ら[41]による簡便なタイプの開発の報告もされている。

4 結言

上記で概要を見てきたように、磁気歯車は非接触という特徴を有効に利用した装置としての研究開発が行われ、その実用化が図られてきている。この発展として、トルクが制限されることを利用してトルクや力の制限機能の有効な利用が利用の検討が進んでいる。この機能は風力発電機における突風に対する発電機の保護や、ロボット等における機械と人間の衝突時の安全確保などへの応用が期待されている。さらに、非接触という特性のみならず、現在ではその伝達効率の高さに注目を集めている。機械式歯車より高効率な伝達が可能と考えられており、磁気歯車では伝達効率 95%程度は実現可能と思われるその実用化が望まれている。また、モータと一体化したギアードモータへの展開も期待される場所である。

磁石を用いる上での価格の高騰やトルク密度など

Fig. 5 Magnetic-geared motor [36]

Fig. 6 Stackable Structure [37]

の観点から容積の拡大という問題点を解決しながら、磁気歯車は今後のさらなる性能向上とその特性を有効に利用した実用化が望まれている。

参考文献

- [1] 田, 長屋, 井関, 磁気歯車伝達系のロバスト制御, 日本機械学会論文集 C編 Vol. 58 No. 556, pp. 3614-3620, 1992
- [2] 鶴本, 熊坂, 非円形磁気歯車の試作と実用化に関する一考察, 日本応用磁気学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 429-432, 2004.
- [3] 鶴本, 電磁石式磁気歯車の試作とその出力-効率特性試験, 日本応用磁気学会誌, Vol. 22, No. 4-2, pp. 821-824, 1998.
- [4] 鶴本, ハイブリッド式磁気歯車のかみ合い性能に関する一考察-かみ合い領域における荷重負担のメカニズム-, 日本応用磁気学会誌, Vol. 23, No. 4-2, pp. 1589-1592, 1999.
- [5] 鶴本, 単面板による多段変速型磁気歯車の性能と実用歯車設計に関する一考察, 日本応用磁気学会誌, Vol. 24, No. 4-2, pp. 1007-1010, 2000.
- [6] 鶴本, 田中, 熊谷, 新型磁気式遊星・差動歯車機構の創出に関する一考察, 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4-2, pp. 1179-1182, 2001.
- [7] 鶴本, 田中, 新型磁気式遊星・差動歯車装置の試作と性能試験, 日本応用磁気学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 703-706, 2002.
- [8] (株)プロスパイン ホームページ, <http://www.prospine.co.jp/product1/index.html>, 2016.05.11閲覧
- [9] (株)ビープロ ホームページ, <http://www.bpro.jp/product/magear/magear01.htm>, 2016.05.12閲覧
- [10] T. Price, W. McDonald, and G. Hatch, The MagneGear™-Efficient Rotary and Linear Magnetic Gearing Devices for Downhole Applications, *DEXTER magnetic technology*, Technical paper, 1, 2007.
- [11] L. Baghli, E. Gouda, S. Mezani, A. Rezzoug, Hybrid vehicle with a magnetic planetary gear, *EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications*, 1, 2010
- [12] 安藤, M. A. Qurni, 伊藤, 宇賀神, 村上, 山田, 磁気歯車装置の開発 -円筒型磁気歯車の試作と性能試験-, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 81-86, 2010.
- [13] Y. Ando, M. Awis Qurni, I. Murakami and K. Yamada, Analysis and Experiment of Cylindrical Magnetic Gear, *Materials Science Forum*, Vol. 721, pp.249-254, 2012.
- [14] Y. Ando, T. Onuma, A. Baba, I. Murakami and K. Yamada, Relationship between Number of Teeth and Transmission Torque on Cylindrical Magnetic Gear, *Materials Science Forum*, Vol. 792, pp.349-354, 2014.
- [15] Y. Ando, A. Baba, T. Onuma, I. Murakami and K. Yamada, Relationship between number of teeth and positioning accuracy on cylindrical magnetic gear, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 45, pp.75-82, 2014.
- [16] 内堀, 安藤, 村上, 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, No.23, pp. 68-73, 2015.
- [17] K. Atallah, D. Howe, A Novel High-Performance Magnetic Gear, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4, pp. 2844-2846, 2001.
- [18] K. Atallah, S. D. Calverley, D. Howe, Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol. 151, No. 2, pp. 135-143, 2004.
- [19] 平田, 新口, 矢野, 上野, 井門, 脇若, 次世代アクチュエータ原理と設計法, 科学情報出版, 2013.
- [20] X. Li, K.T. Chau, M. Cheng and W. Hua, Comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines, *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 133, 177-198, 2013
- [21] T. Fujita, Y. Ando, K. Nagaya, M. Oka, T. Todaka, M. Enokizono and K. Sugiura, Surface magnet gears with a new magnet arrangement and optimal shape of stationary pole pieces, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 5, 243, 2013.
- [22] 新口, 平田, 村松, 加藤, 表面磁石型磁気歯車伝達機構に関する研究, 日本AEM学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 45-50, 2010.
- [23] 新口, 平田, 早川, 表面磁石型磁気減速機のコギングトルク低減に関する研究, 第22回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, 21B1-1, pp. 562-567, 2010.
- [24] 新口, 平田, 早川, 表面磁石型磁気減速機の伝達トルクに関する研究, 電気学会論文誌 D, Vol. 131, No. 3, pp. 396-402, 2011.
- [25] 池田, 中村, 一ノ倉, 永久磁石式磁気ギアの効率向上に関する一考察, 日本磁気学会論文誌, Vol. 33, No. 2, pp. 130-134, 2009.
- [26] 福岡, 中村, 一ノ倉, RNAによる表面磁石型磁気ギアの動特性算定と試作試験, マグネティックス研究会資料, MAG-11-010, pp. 13-18, 2011.
- [27] M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura, Dynamic Analysis of Planetary-Type Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 47, No. 10, pp. 2414-2417, 2011
- [28] 福岡, 中村, 一ノ倉, 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する検討, 日本磁気学会論文誌, Vol. 36, No. 2, pp. 123-126, 2012.
- [29] M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura, RNA-Based Optimum Design method for SPM type Magnetic Gears, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 37, No. 3-2, pp. 264-267, 2013.
- [30] K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura, Performance improvement of magnetic gear and efficiency comparison with conventional mechanical gear, *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, 17A314, 2014.
- [31] M. Fukuoka, K. Nakamura, O. Ichinokura, Experimental Tests and Efficiency Improvement of Surface Permanent Magnet Magnetic Gear, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 3, No. 1, pp. 62-67, 2014.

- [32] K. Nakamura, K. Akimoto, T. Takemae, O. Ichinokura, Basic Characteristics of In-Wheel Magnetic-gear Motors, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 39, No. 1, pp. 29-32, 2015.
- [33] 岡, 戸高, 榎園, 長屋幸助, 藤田智之, 二次元有限要素法による表面磁石型磁気歯車の磁界解析, 第19回 MAGDAコンファレンス講演論文集, pp. 623-628, 2010.
- [34] 岡, 空間高調波型磁気歯車の開発に関する研究, 大分大学学位論文, 2016.
- [35] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani and D. Howe, A Novel “Pseudo” Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, pp. 4349-4352, 2008.
- [36] 新口, 平田, 新しい磁気ギアドモータ, 日本 AEM 学会誌, Vol. 21, pp. 110-115, 2013
- [37] 黒岩翔太, 安藤嘉則, 村上岩範, 積層可能な構造を持つ表面磁石型磁気歯車の開発, 日本 AEM 学会誌, Vol. 22, pp. 82-87, 2014.
- [38] Y. Ando, S. Kuroiwa, K. Kobori, and I. Murakami, Development of Magnetic Harmonic Gear with Stackable Structure, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, in printing.
- [39] R. C. Holehouse, K. Atallah, J. Wang, Design and realization of a linear magnetic gear, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, 4171, 2011.
- [40] X. Li, K. T. Chau, Analytical field calculation for linear tubular magnetic gears using equivalent anisotropic magnetic permeability, *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 127, pp. 155-171, 2012.
- [41] 原野, 多田, 川畑, 中迫, 長谷部, 板磁石を利用した非接触リニア駆動機構の設計開発 (第1報, 伝達性能に及ぼす各部寸法パラメータの影響 (減速比1/3の場合)), 設計工学, Vol. 51, No. 5, pp. 335-343, 2016.