

解説



Review

小型モータの開発動向

山下文敏*

Recent Technical Trend of Small Motors with High Performance Magnet

Fumitoshi Yamashita

Synopsis

The estimated production number of small motors has exceeded 5.4 billion in 2006. Furthermore, the annual growth-rate of approximately 5 % or more can be expected on average in the future. Therefore, the wide utilization of highly-efficient small motors is strongly required from the viewpoint of the environment protection.

By the way, the usage of high-performance magnets with superior magnetic properties as well as the optimized magnetic circuit is one of the key technologies in the development of small motors for further miniaturization and efficiency.

Up to the present, bonded and sintered rare earth magnets are generally used in typical applications to small motors. For drawing out the maximum characteristics according to a variety of material and processing, however, we need to change the preparation of the magnet, the rotor, and the motor design as well as to improve total performance including further miniaturization and efficiency. This report describes the recent examples of the efficient small motors and their magnets including development status.

1. はじめに

小型モータは他の磁性材料を吸引したり反発したりする能力、並びに外部エネルギーなしに永久的に静磁界を発生する能力をもつ磁石を利用した永久磁石型モータが主流となっている。物理的に見て磁石が他の磁性材料と異なる点は外部磁界を消した後も有効な磁化が残り、熱や比較的大きな逆磁界などを加えたとき、初めて磁化反転（減磁）が起こり、それに伴って磁化の低下が起こる点である。このような磁石の重要な特性値に最大エネルギー積 $(BH)_{max}$ がある。これは磁石の潜在的エネルギーを単位体積で表すものであるが、この基本的特性の他、小型モータの磁石では磁化反転（減磁）に代表される安定性、形状対応力、コスト力が求められる。これらの要件は個々のモータに求められる。1) 低価格（普及に不可欠）、2) 小型・軽量（堅牢性、高速回転化、例えば、体格、重量とも従来比 1/2 ～ 1/3 以下）、3) 高効率（制御装置を含む総合効率）、4) 出力特性（例えば、モータ単体で必要な

トルク特性を満足、低速大トルクなど）、5) 耐久性と信頼性（使用環境での十分な耐久性と信頼性）、6) 静音性、7) リサイクル性（環境保全とともに資源循環型社会の一翼を担う）への最適化が必要である。ところで、2006 年の小型モータの年間生産台数は約 53 億台を超え、省資源・省エネルギーなどの観点から、更なる小型化・高効率化が求められている。その要求に応えるには個々のモータに搭載する磁石、並びに鉄心との磁気回路の最適化が技術開発の要点として位置づけられ、これらの観点から継続的、かつ活発な研究が行われている。

ここでは、小型モータの開発動向として、まず、一般論として磁石とモータの小型化・高効率化との関係を眺め、次いで、磁石と鉄心との一体型ロータ、異方性を連続方向制御したロータによるコギングトルク低減、着磁の工夫による小型高出力化ロータ、および電力、動力、推力、熱エネルギーを発生する微小電気機械システムにつながる微小磁石モータについて概説する。

2008 年 1 月 16 日受付

* 松下電器産業(株) モータ社 モータ開発研究所、工博 (Dr., Eng., Motor R & D Lab., Motor Company, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.)

2. モータの体格と効率

磁石特性に関して、2005年、MatsuuraはNd₂Fe₁₄B相の割合0.982、酸素濃度600 ppm、配向度0.991などに調整することで、最大エネルギー積(BH)_{max} = 474 kJ/m³、残留磁化M_r = 1.555 T、保磁力H_{ci} = 653 kA/mのNd₂Fe₁₄B系焼結磁石を紹介している²⁾。他方では、例えば、中川らは飽和磁化J_s = 1.63 T、結晶粒を10～30 nmなどとするこで、(BH)_{max} = 180 kJ/m³、M_r = 1.07 T、H_{ci} = 0.64 MA/mの等方性(Sm_{0.7}Zr_{0.3})(Fe_{0.8}Co_{0.2})₉B_{0.1}N_a急冷粉末³⁾、あるいはD. GollらはPr₂Fe₁₄B結晶粒を20～30 nm、aFe結晶粒を≈15 nmなどとするこで(BH)_{max} = 180.7 kJ/m³、M_r = 1.17 T、H_{ci} = 0.64 MA/mの急冷薄帯を得る⁴⁾など、希土類磁石や、その材料の特性向上が進んでいる。

Fig.1は永久磁石界磁型小型直流モータにおいて同じモータ性能を得るに必要な(BH)_{max}と磁石体積(V_{mag})の関係を示す。(BH)_{max}とV_{mag}は累乗近似が成り立ち、モータの小型化にとって、磁石特性の重要性が理解できる。しかし、この例では、32～200 kJ/m³の磁石では同じ鉄心が使えるが、270 kJ/m³では磁石と鉄心との磁気回路の最適化が必要となる^{5), 6)}。

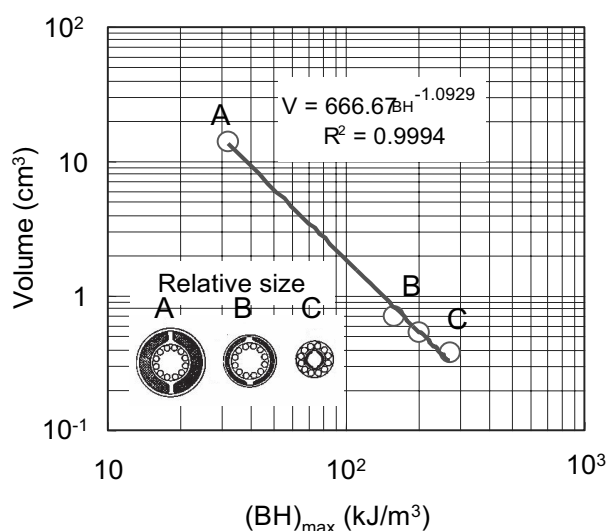


Fig.1. The miniaturization of the small DC motor by using rare earth magnet with high (BH)_{max} values^{5), 6)}.

ここで、モータ体格と効率の関係を整理する。モータ効率 η は機械出力 P 、代表的な損失である銅損と鉄損の和を W とすると

$$\eta = [P / (P + W)] \quad (1)$$

すなわち、高効率化には高出力化、低損失化が必要である。ここで、モータ体格 L 、鎖交界磁磁束 ϕ 、励磁角周波数 ω 、力率 $\cos \theta$ 、巻数 N 、電流 I 、鉄心の磁束密度 B とすると

$$P \propto \omega \cdot \phi \cdot N \cdot I \cdot \cos \theta \propto \omega \cdot B \cdot I \cdot L^4 \cdot \cos \theta \quad (2)$$

ただし、式(2)は面積 S としたとき、 $\phi = B \cdot S$ 、 $N = nS$ なので、係数 a 、 b を用いれば式(3)となる。すなわち、モータの小型化と高出力化は相反する。

$$P \propto a \cdot S^2 \propto b \cdot L^4 \quad (3)$$

一方、代表的な損失である銅損と鉄損の和を W 、巻線の電気抵抗 ρ 、巻線の体積 V_{cu} 、電流密度 ΔI 、鉄心の単位体積当たりの鉄損 $V_{fe}(B)$ 、鉄心の体積 V_{fe} とすると、 $W_{fe}(B)$ と V_{cu} が L^3 に比例することから損失 W は

$$W = V_{cu} \cdot \rho \cdot \Delta I^2 + V_{fe} \cdot W_{fe}(B) \propto L^3 \quad (4)$$

さらに、式(2)、式(4)から a と β を係数とし、モータ効率 η と体格 L の関係を求めると式(5)が得られる。

$$\eta = 1 / \{1 + [\beta / (a \cdot L)]\} \quad (5)$$

したがって、モータは小型化に伴って、その効率も低下する。加えて(BH)_{max}を増しても、モータの構造、あるいは体格によって必ずしも高効率化にならない。例えば、J. Schulzeは小型モータに使用される磁石の残留磁化 M_r とモータ定数 KJ との関係を整理し、 M_r 、すなわち(BH)_{max}に代表される磁石の特性向上はインナーロータ型ブラシレスモータやコアレスモータで、より高いトルク密度を得やすいとしている。しかし、アウトロータ型のブラシレスモータや直流モータでは磁石の特性向上は必ずしも有効に作用しないとしている⁷⁾。なお、モータ定数 KJ は出力トルク KT と抵抗損の平方根 \sqrt{R} の比である。

3. 磁石と鉄心との一体型ロータ

Fig.2は1989年頃に知られた等方性Nd₂Fe₁₄Bボンド磁石の圧縮成形により作製した磁石と積層電磁鋼板との一体型ロータ⁸⁾を示す。外径30～50 mmの磁石を積層電磁鋼板の外周に厚さ1 mmで直接作製できる。しかし、ロータとしての寸法精度と鉄心との機械的強度を満たすには磁石のスプリングバックを0.07%以下とする必要がある。このため5 wt.%以上の結合剤を要し、結果として当該磁石の(BH)_{max}はおおむね60 kJ/m³に止まる。

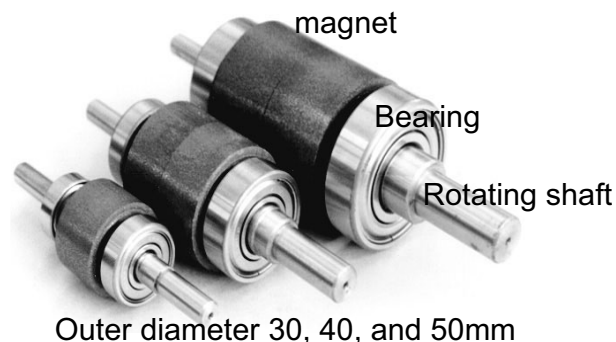


Fig.2. External views of the isotropic NdFeB bonded-magnet with an iron core made by directly compacting. The (BH)_{max} value of the obtained magnet was approximately 60 kJ/m³.

2002年, Fig.3のように結合剤を3 wt.%とし, 密度6 Mg/m³, (BH)_{max} 80 kJ/m³, 外径30 mm, 厚さ1.5 mmのNd₂Fe₁₄B ボンド磁石と圧粉磁心の一体型ロータ⁹⁾が知られた. これは結合剤が未硬化の磁石と圧粉磁心を組み立てたのち, 双方の熱膨張差と圧粉磁心の結合剤を利用して所定の寸法精度と機械的強度を得るものである.

2001, 2005年には松岡ら¹⁰⁾, 馬場ら¹¹⁾により, (BH)_{max} 80 kJ/m³, 外径43 mmの異方性Sm₂Fe₁₇Nx ボンド磁石ロータが知られ, 2006年にはコギングトルク低減を目的として鉄心材料を射出成形して磁石内周側を偏肉したSm₂Fe₁₇Nx系ボンド磁石との一体型ロータ¹²⁾も知られた.

2006年, 増澤らは圧粉磁心とFeB-Nd₂Fe₁₄B系ナノコンポジットボンド磁石, 極異方性HDDR-Nd₂Fe₁₄Bボンド磁石一体型ロータ¹³⁾を報告している. このような磁石と圧粉磁心との一体型ロータは接着レスに伴う組立工数の削減, 信頼性や寸法精度の向上, 形状設計の自由度, リサイクル性の向上を促すものとして期待される.

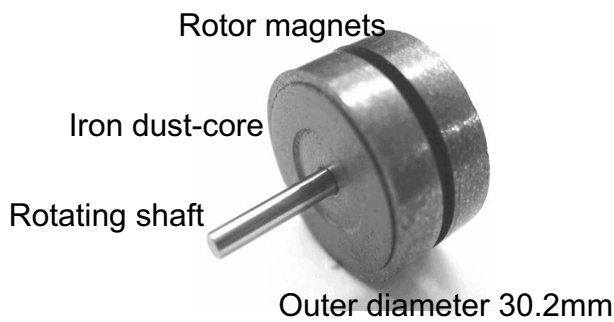


Fig.3. Preparation procedure of solid rotor composed of highly-dense isotropic NdFeB bonded magnet with 80 kJ/m³ in (BH)_{max}, iron dust-core, and rotating shaft.

4. 異方性を連続方向制御したロータ

磁石が発生する強い静磁界はロータ回転に伴うパーミアンズ変化に起因するコギングトルクの原因となり, モータの静音性, 場合によってはモータの制御性が悪化する. したがって, コギングトルクの低減は小型モータに高(BH)_{max} 磁石を応用するうえで重要な技術要件である.

磁石によるコギングトルク低減に関してはさまざまな提案がなされている. 例えば, 前項の磁石内周側を偏肉したSm₂Fe₁₇Nx系ボンド磁石との一体型ロータ¹²⁾, 極異方性¹³⁾によるコギングトルク低減の以外にも磁極の外周側の偏肉¹⁴⁾, 磁極の極間面積変化⁸⁾, スキュー磁極¹⁵⁾, Fig.4のような異方性を不連続方向制御したハルバツハ方式¹⁶⁾などが知られる. しかし, 小型モータは一般に厚さ1.0 ~ 1.5 mm程度の環状磁石が比較的多く用いられるため磁石の実形状や構成上の制約が重複し, とくに, 高(BH)_{max}

磁石を用いる小型モータのコギングトルク低減にかかる決定的な手法はない. しかし, ハルバツハ方式を発展させ, 磁極の異方性の方向を任意に連続制御できればモータの小型化や薄型化に有利なコギングトルク低減が期待される¹⁷⁾. ところで, 異方性ボンド磁石の結合剤の自己組織化で架橋間巨大分子を形成し, その延伸で可撓性を制御し, 面垂直から異方性の方向を転換する(BH)_{max} 160 kJ/m³級のラジアル異方性磁石が知られている^{18)~22)}.

上記技術を基に, Fig.5のように様な磁界中で異方性の方位を機械的に付与し, レオロジーを利用して異方性方向を任意に連続制御する磁石作製法も知られた^{23)~25)}. 一例として(BH)_{max} 160 kJ/m³の当該磁石を出力30 Wアウターロータ型ブラシレスモータに適用すると, 同一構成の80 kJ/m³正弦波着磁等方性Nd₂Fe₁₄B磁石基準でコギングトルク20%減, back EMF(electromotive force) 134%が得られる²⁶⁾. 加えて, 鉄心との磁気回路の最適化でモー

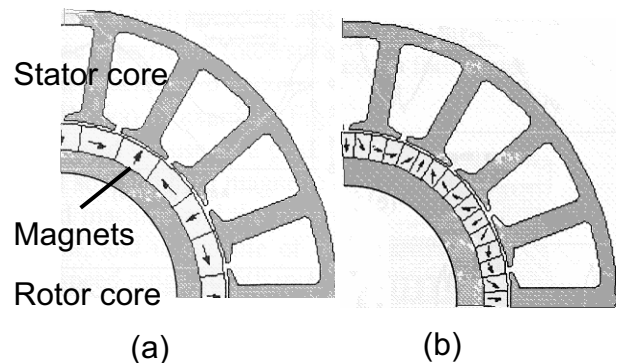


Fig.4. Cross sectional views of the halbach multi-polarly magnetized system. (The fault of the radially-anisotropic magnet with a high (BH)_{max} value is an increase in cogging torque remarkable. Although this difficulty can be solved by using the halbach multi-polarly magnetized system, it needs magnet with a lot of different anisotropy directions.) The arrow in the figure indicates the anisotropy directions.

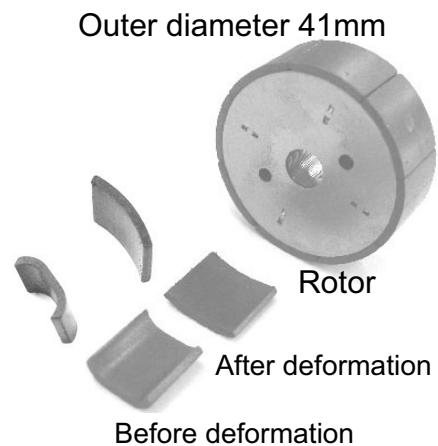


Fig.5. External view of the magnets before and after viscous deformation, and 8-poles radially-anisotropic magnet rotor with continuously controlled anisotropy directions.

タの最高効率率は5%増の90%に達する。これにより、異方性磁石のコギングトルクに起因する低速領域での騒音が最高10 dB低減するなど静音高効率小型モータが得られる。

5. 小口径多極着磁ロータ

Fig.6 は $\alpha\text{Fe}/\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ($\text{R}=\text{Nd}, \text{Pr}$) ボンド磁石の着磁性と初期不可逆減磁の関係を $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ボンド磁石と比較して示す。ただし、ここでいう着磁性とは1.6, および4 MA/m で磁化した際の保磁力 H_{CJ} の比であり、減磁率は外径4 mm (4.1 mmL) 外周10極 (極間距離1.25 mm) 着磁した磁石を120℃で1 hr 高温暴露した前後の減磁である。また、図中の対角線上に H_{CJ} がプロットされればフル着磁を意味している。小さな H_{CJ} の磁石でも対角線からのずれはほとんど同じだが、 H_{CJ} が710 kA/mを超えると1 turn/coil 着磁ヨークを用いたパルス電流着磁 (電流波高値 $I_p \approx 25$ kA/mm²) の着磁性が低下する。また、 H_{CJ} が560 kA/mでは初期不可逆減磁が増加する²⁷⁾。

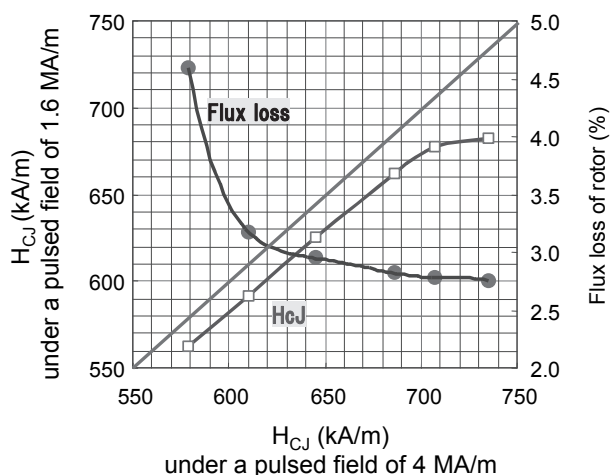


Fig.6. Comparison of the coercivity values between saturation and unsaturated magnetization, and initial irreversible flux loss in nanocomposite bonded magnets.

ここで、 $M_w(T_{\text{EX}})$ を高温暴露での動作点の磁化、 $M_w(T_{\text{RT}})$ を室温での動作点の磁化、 α を残留磁化 M_r の温度係数とすれば、初期不可逆減磁 FL_{int} は式 (6) で表せる。

$$FL_{\text{int}} = 1 - \left\{ \frac{M_w(T_{\text{EX}})}{M_w(T_{\text{RT}})} \cdot [1 - \alpha (T_{\text{EX}} - T_{\text{RT}})] \right\} \quad (6)$$

すなわち、小さな H_{CJ} で初期不可逆減磁を良好させるには動作点の磁化の比 $M_w(T_{\text{EX}})/M_w(T_{\text{RT}})$ が増すか、または $1 - \alpha (T_{\text{EX}} - T_{\text{RT}})$ を小さくすることが必要となる^{28), 29)}。しかし、ここで示した減磁の要因は $M_w(T_{\text{EX}})/M_w(T_{\text{RT}})$ の変化が大きい。従って、 $M_r \geq 0.9$ T の $\alpha\text{Fe}/\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 材料

は H_{CJ} 範囲を特定すると Fig.7 のようにステッピングモータの熱安定性を維持しながら高出力化が図れる³⁰⁾。なお、 H_{CJ} が486 kA/mの材料は初期不可逆減磁のために高出力化の意味をなさない。

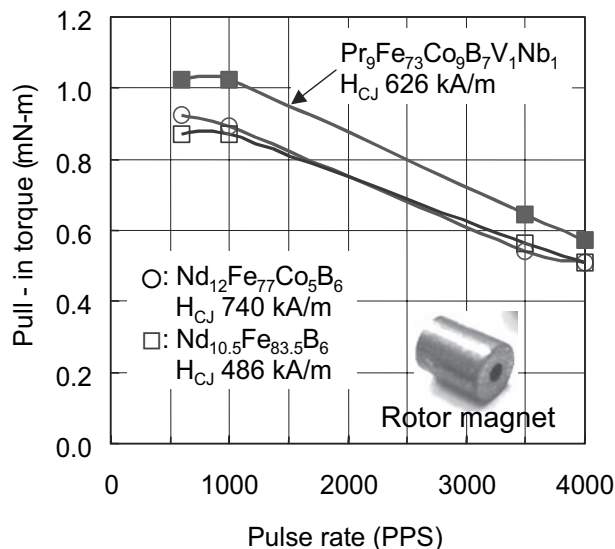


Fig.7. Dependence of the pull-in torque on the pulse rate for two kinds of $\alpha\text{Fe}/\text{RFEB}$ ($\text{R}=\text{Pr}, \text{Nd}$) and NdFeB bonded magnet rotors. The torque curves in the figure were measured at room temperature after exposure at 120℃ for 1 hr²⁷⁾. The intended dimension of the rotor magnet is 4.1 mm in outer diameter.

一方、2007年、H. Komura らは2-17型SmCo磁石で形成した界磁に $\alpha\text{Fe}/\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (MQP-16-7, $M_r = 0.970$ T, $H_{\text{CJ}} = 0.557$ MA/m, $(\text{BH})_{\text{max}} = 127$ kJ/m³, キュリー温度 $T_c = 320^\circ\text{C}$)、または単相 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (MQP14-12, $M_r = 0.840$ T, $H_{\text{CJ}} = 955$ kA/m, $(\text{BH})_{\text{max}} = 111$ kJ/m³, $T_c = 350^\circ\text{C}$) から作製した外径2.6 mmのボンド磁石を挿入し、当該磁石をキュリー温度 T_c 以上に加熱し、次いで95℃程度まで当該界磁中で冷却する方法で極間距離0.5 mmの多極着磁を試みた。その結果、1 turn/coil 着磁ヨークを用いた従来のパルス電流着磁に比べて約3倍の磁束を得たとしている³¹⁾。このような技術によりモータの小型化も着実に進歩している。

6. 微小磁石ロータ

現在のところ市場を形成している小型モータは体積100 mm³程度までと推定される³²⁾。モータの小型化の進展で、いずれはPower MEMS (Power micro-electromechanical system)、すなわち、電力、動力、推力、熱エネルギーを発生する微小電気機械システムにかかる新市場の創出を期待したいところである。

微小磁石ロータを搭載した体積100 mm³以下の径方向

空隙型ブラシレスモータとして 4 mm^3 (外径 OD 1.6 mm・長さ 2 mmL)³³⁾, 15.6 mm^3 (OD 1.9 mm・5.5 mmL)³⁴⁾, 20.4 mm^3 (OD 2 mm・6.5 mmL)³⁵⁾ が知られている。また、軸方向空隙型ブラシレスモータでは体積 62 mm^3 (OD 6 mm・2.2 mmL)³⁶⁾, 20 mm^3 (OD 5 mm・1 mmL)³⁷⁾, 並びに, 0.6 mm^3 (OD 0.8 mm・1.2 mmL)³⁸⁾ が知られている。

上記のモータ体積 $V \text{ mm}^3$ とトルク $T \text{ mNm}$ との関係をプロットすると Fig.8 が得られる。径方向空隙型ブラシレスモータでは $T = 3 \times 10^{-4} \cdot V^{1.0922}$ (相関係数 $r = 0.9924$), 軸方向空隙型ブラシレスモータでは $T = 3 \times 10^{-6} \cdot V^{1.9022}$ (相関係数 $r = 0.9864$) となり, トルクとモータ体積には累乗近似が成り立つ。そこで, 体積 100 mm^3 でのモータトルクを見積ると, それぞれ, 0.045 mNm , 0.019 mNm となり, トルク密度の観点では前者が有利と推定される。

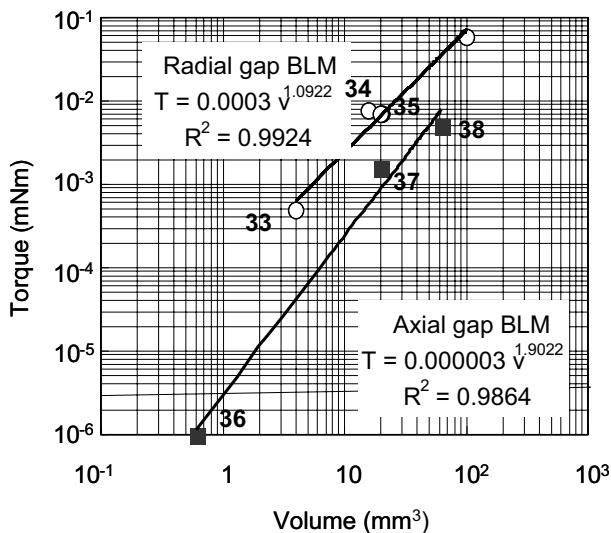


Fig.8. Relationship between volume and torque of the power MEMS motors with rare earth magnets^{33)~38)}. The 33 to 38 of the plots in the figure correspond to a reference number.

一方, 近年, 厚膜磁石や微小磁石, およびその表面改質に関して多くの報告がある。例えば, Hinz らは 750°C での die upset で $M_r = 1.25 \text{ T}$, $H_{cj} = 1.06 \text{ MA/m}$, $(BH)_{\max} = 290 \text{ kJ/m}^3$, 厚さ $300 \mu\text{m}$ の厚膜 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 系磁石を得ている³⁹⁾。また, ボンド磁石では $M_r = 0.87 \text{ T}$, $H_{cj} = 0.9 \text{ MA/m}$, $(BH)_{\max} = 128 \text{ kJ/m}^3$, 厚さ $270 \mu\text{m}$ の厚膜磁石が報告されている⁴⁰⁾。

2004 年, J. Delamere らは, 16 極着磁した SmCo 系磁石ロータ, および対向するステータで, 100000 rpm としたとき 0.001 mNm のトルク, あるいは発電機として 150000 rpm で駆動したとき, 1 W の電力を得たとしている⁴¹⁾。

2007 年, T. Speliotis らは, 直径 10 mm の FeSi 基盤にスクリーン印刷した 15.8 kJ/m^3 , 厚さ $500 \mu\text{m}$ の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

ボンド磁石をロータとし, トルク 0.055 mNm の MEMS モータ⁴²⁾を報告している。このような微小磁石ロータの高出力化では高速回転化が不可欠と思われる。とくに, S-T (Speed - Torque) の垂下特性を考慮すると, 高 $(BH)_{\max}$ 磁石は高速化による高出力化には不適當な点もあり, $(BH)_{\max} 15 \sim 300 \text{ kJ/m}^3$ と幅広い特性をもつ磁石, あるいは多様な構造や動作原理のモータが検討されている。

7. まとめ

小型モータは個々のモータに最適磁石, および当該磁石との最適磁気回路設計を基本とした技術の開発が行われている。希土類元素や希少金属を効果的に利用した磁石の技術革新によって省資源, 省エネルギーのために高性能小型モータの普及が加速されることを期待したい。

(文 献)

- 1) <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/06024.html>
- 2) Y. Matsuura: J. Magnetism and Magn. Mater., 303 (2006), 344.
- 3) 中川勝利, 川島史行, 新井智久: 東芝レビュー, 56 (2001), 56.
- 4) D. Goll, I. Kleinschroth, H. Kronmuller: Proc. 17th REM, (2000), 641.
- 5) A. Cartoceti: Wheeler Associate INC, (1989), 209.
- 6) K. J. Strnat: Gorham conference, Seattle, June 4-5, (1990).
- 7) J. Schulze: Proc. 18th HPMa, (2004), 908.
- 8) M. Wada, F. Yamashita: Proc. 10th REM, (1989), 91.
- 9) F. Yamashita, Y. Sasaki, H. Fukunaga: Trans. MSJ, 26 (2002), 111.
- 10) 松岡篤, 山崎東吾, 川口仁: 電気学会回転機研究会資料, (2001), RM-01-161.
- 11) 馬場和彦, 松岡 篤, 及川智明: 三菱電機技報, (2005), 35.
- 12) <http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2006/0215-h.htm>
- 13) 増澤正宏, 三田正裕, 菊池慶子, 相牟田京平: 日立金属技報, 22 (2006), 35.
- 14) Y. Pang, D. Howe: Proc. 18th HPMa, (2004), 400.
- 15) W. Rodewald, M. Katter: Proc. 18th HPMa, (2004), 52.
- 16) D. Howe, Z. Q. Zhu: Proc. 17th REM, (2000), 903.
- 17) 吉田欣二郎, 袈裟丸勝巳, 佐野真次: 電論誌 D 124 (2004), 144.
- 18) F. Yamashita, S. Tsutsumi, H. Fukunaga: IEEE Trans. Magn., 40 (2004), 2509.
- 19) F. Yamashita, H. Fukunaga: Proc. 18th HPMa, (2004), 76.

- 20) F. Yamashita, H. Fukunaga: IEEE Trans. Magn., **41** (2005), 3775.
- 21) F. Yamashita, H. Fukunaga: J. Alloys and Compounds, **408-412** (2006), 1350.
- 22) F. Yamashita, M. Nakano, H. Fukunaga: J. Magnetism Magn. Mater., **303** (2006), 363.
- 23) 山下文敏, 岡田幸弘, 小串正樹, 中野正基, 福永博俊: まぐね, **1** (2006), 410.
- 24) F. Yamashita, K. Kawamura, Y. Okada, H. Murakami, M. Ogushi, M. Nakano, H. Fukunaga: J. Magnetism Magn. Mater., **316** (2006), e101.
- 25) 山下文敏, 岡田幸弘, 河村清美, 村上 浩, 小串正樹, 中野正基, 福永博俊: 電学資料, (2006), MAG06-146.
- 26) F. Yamashita, K. Kawamura, Y. Okada, H. Murakami, M. Ogushi, M. Nakano, H. Fukunaga: J. App. Phy., **101** (2007), 09K522.
- 27) F. Yamashita, K. Takasugi, H. Yamamoto, H. Fukunaga: Trans. on Magn. Soc. Japan, **2** (2002), 32.
- 28) H. Fukunaga, S. Hayashida, Y. Kanai, F. Yamashita: J. Magnetism Magn. Mater., **203** (1999), 304.
- 29) Y. Kanai, S. Hayashida, H. Fukunaga, F. Yamashita: IEEE Trans. Magn., **35** (1999), 3292.
- 30) H. Yamamoto, K. Takasugi, F. Yamashita: Proc. 17th REM, Newark, US. (2002), 307.
- 31) H. Komura, M. Kitaoka, T. Kiyomiya, Y. Matsuo: J. App. Phy., **101** (2007), 09K104.
- 32) 山下文敏: 応用磁気第143回研究会, 中央大駿河台記念館, 東京 (2005) .
- 33) 太田斎, 小原隆雄, 唐田行庸, 武田宗久: 三菱電機技報, **75** (2001), 703.
- 34) <http://www.micromo.com/>
- 35) 鈴木俊治, 町田憲一, マテリアルインテグレーション, **16** (2003), 17.
- 36) H. Raisigel, O. Wiss, N. Achotte, O. Cugat, J. Delamare: Proc. 18th HPMA, Annecy, France, (2004), 942.
- 37) M. Nakano, S. Sato, R. Kato, H. Fukunaga, F. Yamashita, S. Hoefinger and J. Fidler, : Proc. 18th HPMA, Annecy, France, (2004), 723.
- 38) 伊東哲也: 日本応用磁気学会誌, **18** (1994), 922.
- 39) J. Delamare, G. Reyne, O. Cugat: Proc. of 18th HPMA, Annecy, France, (2004), 767.
- 40) D. Hinz, O. Gutfleisch and K. H. Muller: Proc. 18th HPMA, (2004), 76.
- 41) F. Yamashita, M. Ogushi, M. Nakano, H. Fukunaga: J. Magnetism Magn. Mater., **310** (2007) 2578.
- 42) T. Speliotis, D. Niarchos, P. Meneroud, G. Magnac, F. Claeyssen, J. Pepin, C. Fermon, M. Pannetier, N. Bizier: J. Magnetism Magn. Mater., **316** (2007), e120.