

解説・展望

自動車用磁石

加藤義雄

Permanent Magnets in Automotive Applications

Yoshio Kato

要 旨

自動車には、燃費・安全性・快適性向上等から、多くの磁石を用いた電装品が搭載されている。1997年、日本では、フェライト磁石の37%が、また、希土類磁石の6%が自動車用に供給されている。フェライト磁石は、スタータ、ワイパ、ファン、パワーウィンドモータ、燃料ポンプモータ等に組み込まれ、高級車には30個以上のモータが搭載されている。希土類磁石は、アンチロックブレーキシステムの車輪速センサ、エンジン回転数センサ、カム角センサ、イグニッションコイル等に

組み込まれている。

最近、希土類磁石の使用量は、アンチロックブレーキシステムの標準装備化や電気自動車用モータのニーズにより、劇的に増加している。電気自動車やハイブリッドカーの駆動用モータには、高効率化のためNdFeB系焼結磁石が一台にkgのオーダー使用されている。

そこで、自動車への磁石の応用例とそれらの現状と将来について展望する。

Abstract

Modern automobiles use many permanent magnets in various electromagnetic components for comfort, safety and better fuel economy. In Japan, the annual use of permanent magnets for automobiles in 1997 accounted for 37% of the total production for ferrite magnets and 6% for rare-earth magnets. Ferrite sintered magnets are used in starters, wipers, fanmotors, window regulators, fuel-pump motors, etc. A fully-equipped car has more than 30 DC electric motors. Rare-earth sintered magnets are used in anti-lock braking system (ABS) sensors, cam-angle sensors, revolution speed sensors, ignition coils, etc.

Recently, the use of rare-earth magnets has increased dramatically, because of standard equipment of ABS sensors for safety and motors for electric vehicles (EV's). Most of EV's and hybrid electric vehicles (HEV's) employ permanent magnet synchronous motors to improve their efficiency. One traction motor of an EV's or a HEV's requires a few kilograms of high performance NdFeB sintered magnets.

This paper describes the current status and future trends of permanent magnets in automotive applications.

キーワード

フェライト磁石, 希土類磁石, ボンド磁石, 自動車部品, 電気自動車, ハイブリッドカー, 走行支援道路システム, 磁気ネイル

1. はじめに

車の軽量化・エレクトロニクス化・快適性と安全性向上から、各種電装品も小型・軽量・高機能化が叫ばれている。その中で、永久磁石や軟質磁性材料は大きな役割を担っている。

永久磁石は、各種モータや回転数センサに組み込まれ、同時に磁石を取り巻くヨーク、すなわち磁気回路には軟質磁性材料を用いることにより磁石本来の機能を引き出すことができる。特に電装部品の高性能化に対して、最近の高性能な磁石は欠かせない。

以下に、永久磁石の応用例と今後の動向について述べる。

2. 自動車用磁石の位置付け

永久磁石は、鑄造磁石・フェライト磁石・希土類磁石の3種に大別される。鑄造磁石には、アルニコ磁石（Fe-Co-Ni-Al合金）に代表され、Fe-Cr-Co合金系の磁石もある。フェライト磁石には、Ba系（ $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）とSr系（ $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）とがあるが、自動車用には高性能のSr系フェライト磁石が多用されている。希土類磁石には、SmCo系とNdFeB系磁石とがある。

日本電子材料工業会の統計によると、1997年の永久磁石の生産金額は1,132億円である。その内訳をみると、鑄造磁石は1,073トンで42億円（約4円/g）、フェライト磁石は49,195トンで397億円（約0.8円/g）、そして希土類磁石は3,667トンで692億円（約19円/g）である。

日本での永久磁石の歴史を生産金額でたどると、1977年までは鑄造磁石が主役であり、その後フェライト磁石に席をゆずる。そして、フェライト磁石の主役も1993年には希土類磁石にとってかわる。希土類磁石の中でも、1980年代まではSmCo系が主役であるが、それ以降ではNdFeB系磁石である。

このような時代の変遷を文学的に表現されたのが、俵万智の「サラダ記念日」¹⁾の次の歌である。

ひところは「世界で一番強かった」

父の磁石がうずくまる棚

この短歌の中の磁石は、当時信越化学工業の磁

性研究所所長であった俵好夫博士の発明した $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 系磁石のことである。20年前の発明された当初では100円/g以上であったが、現在では30～50円/gである。NdFeB系焼結磁石も上市された10年前では、30円/g以上していたものが、現在では15～20円/gで、医療用の磁気共鳴画像撮影装置に使われる大型の磁石では、10円/g以下になっている。

世界の永久磁石の生産をみると、中国の動向が注目される。1996年、鑄造磁石で2,500トン、フェライト磁石で100,000トン、そして希土類磁石で1,700トン生産されていると推定されている。フェライト磁石では世界第一位の生産国でもある。希土類磁石では世界第二位であるが、中国の内蒙古で産出されるバストネサイト等の希土類資源の豊富さを背景にして、21世紀には世界第一位の生産国になることが予想される。

日本電子材料工業会の用途別の統計から、自動車に搭載のモータや制御機器用磁石で見ると、鑄造磁石では185トン（7億円）、フェライト磁石では18,300トン（140億円）、そして希土類磁石では208トン（51億円）が供給されている。すなわち、鑄造磁石では17%、フェライト磁石では37%、そして希土類磁石では6%が自動車用に使われている。1997年の日本での自動車の総生産台数は1,098万台であるので、単純な割算で車1台当りの平均の使用量になおすと、鑄造磁石では17g、フェライト磁石では1,670g、そして希土類磁石では19gとなる。

自動車の総生産台数と自動車用磁石の需要量を1987年から1997年で整理したのが、Fig. 1である。車1台当りの使用量でみると、フェライト磁石では1992年以降大きな変化は見られない。しかし、希土類磁石では最近数年間で使用量が倍増した。このことは、各自動車メーカーでABS (Anti-lock Braking System) が標準装備化されたことによる。これには、希土類磁石の組み込まれた電磁ピックアップ方式の車輪速センサが多用されているからである。また、地球環境保全のため負荷の少ないEV (Electric Vehicle) やHEV (Hybrid Electric Vehicle) 用の磁石も寄与している。それらの駆動用モータや発電機には高性能なNdFeB焼結磁石が

主に使われているので、今後もさらなる急増が予測される。このような大量消費が始まると、資源枯渇の問題からリサイクルの必要性が重要な課題となる。

なお、上記の数値には、モータや制御機器以外の磁石、たとえば車載のスピーカ用としての磁石の需要量は、その多くが海外生産されているため含まれていない。車載用スピーカには、フェライト磁石が多用されていることを考えると、フェライト磁石は1台当り2kg以上組み込まれていると推察される。

上記の磁石の他に、磁石粉末を樹脂やゴムで複合したボンド磁石がある。1997年フェライト系のボンド磁石が、19,996トン（239億円）、希土類系のボンド磁石が、946トン（184億円）それぞれ日本で生産されている。そして、自動車のメータ用の磁石等にいずれも使用されているが、その需要量の詳細は不明である。

3. 自動車用磁石に要求される耐熱性

車がさまざまな気象条件・使用条件に置かれた時、自動車各部の温度が何度になるかを実測した最高温度をTable 1に示す。これらの値は、SAE

(Society of Automotive Engineers) や自動車技術会などでまとめられている²⁾。電装部品の取付け位置によって、最高温度はかなり異なるが、ごく一般的な場合として、車室内では353K、エンジンルーム内では398K程度の温度となる。

4. 自動車部品への応用とその課題

車に搭載されている磁石は50～100個とも言われ、種々の部品に組み込まれている。Fig. 2に示すように種々の特性を有する磁石があり、鑄造磁石・フェライト磁石・希土類磁石・ボンド磁石の順に応用例を記す。

4.1 鑄造磁石の例

鑄造磁石であるアルニコ磁石は、温度変化に対して磁気特性の変化が小さいことから、スピードメータ³⁾に組み込まれた。Fig. 3に示すように、変速機での回転をフレキシブルシャフトを介して伝えられ、スピードメータの磁石が回転する。アルミニウムと整磁鋼 (Fe-31mass%Ni) とで作製されたカップにはフレミングの右手の法則により渦電流が発生し、回転を始める。この回転力をヘアスプリングで釣合をもたせ、車速を指針で表示する仕組みになっている。最近では、後で述べるフレキシブルシャフトが不要で、構造の簡単なボン

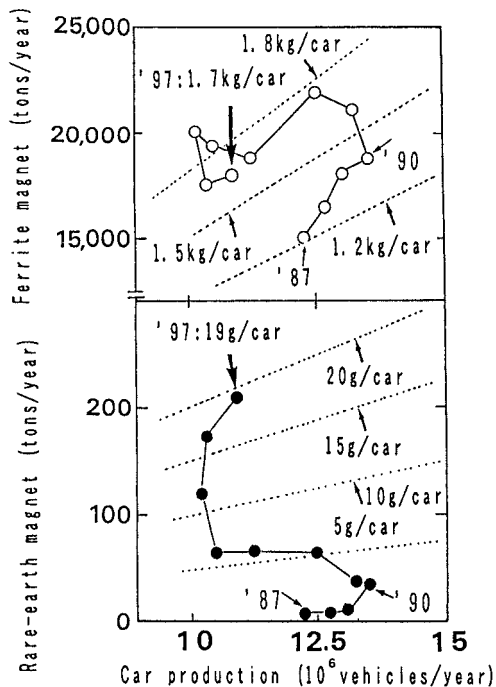
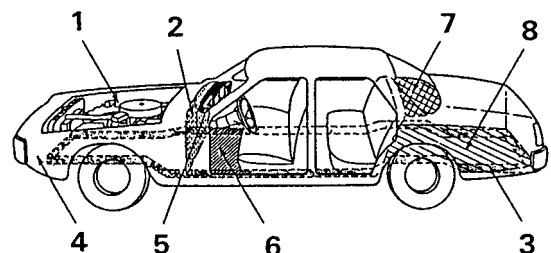


Fig. 1 Annual use of ferrite magnet and rare-earth magnet for automobile applications in Japan.

Table 1 Recommended temperature extremes.

location	maximum temperature (K)
1:underhood-engine(typical)	423
2:underhood-dash panel	413
3:chassis	358
4:exterior	394
5:interior-instrument panel	386
6:interior-floor	358
7:interior-rear deck	380
8:trunk	358



ド磁石を利用した交差コイルメータが多用されている。

4.2 フェライト磁石の例

フェライト磁石は、燃料ポンプ・ウィンドレギュレータ・ワイパ・電動ミラー等々の駆動用DCモータの磁石、オーディオ・ナビゲーション関連のスピーカに組み込まれ、最も多く使われている磁石である。Fig. 4に示すような種々の磁気特性を有する磁石があり、使い分けがなされている。高価である高磁気特性の湿式成形法による磁石は、燃料ポンプ・ウィンドレギュレータ等に、乾式成形法の中で保磁力の大きい高磁気特性の磁石は電動カーテン・電動ミラー等に、そしてスピーカには安価な乾式成形法の磁石が使用される。

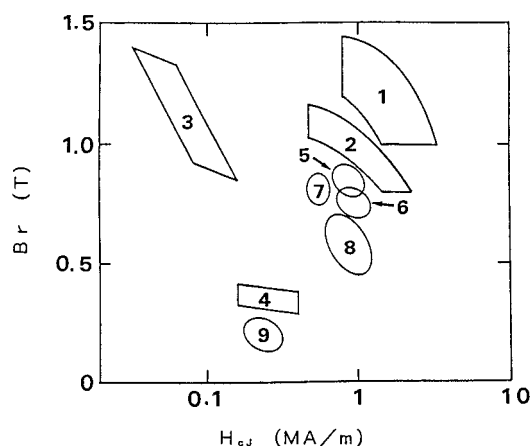


Fig. 2 Characteristics distribution of magnets.
1: NdFeB sintered magnet 2: SmCo sintered magnet 3: Alnico-magnet 4: Ferrite magnet
5: HDDR-NdFeB bonded magnet 6: SmCo bonded magnet 7: SmFeN bonded magnet
8: NdFeB bonded magnet 9: Ferrite bonded magnet

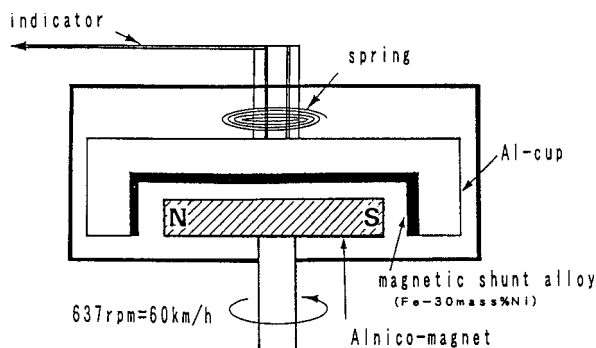


Fig. 3 Structure of old-fashioned speed meter.

室温で着磁した磁石を低温にさらし、再び室温に戻しても元の磁束に回復しないという低温減磁の現象が、フェライト磁石にはみられることがある。しかし、真の保磁力の大きい磁石では低温減磁は起こりにくいので、各種駆動モータ用の磁石には、真の保磁力270kA/m以上の磁石が使われることが多い。

なお、乾式成形法の磁石の値段は0.3～0.5円/gで、湿式成形法の磁石は0.7～2円/gである。いずれもコストパフォーマンスに優れており、20年以上前からコストの変動はほとんどなく、物価の優等生である。この意味からも、フェライト磁石の生産量の1/3以上が、電装部品用の磁石として使われている所以である。

最近、最大エネルギー積40kJ/m³ (5MGOe) を越える高性能な磁石が開発された。一つは、カーบอนを添加した磁性粉を磁場中成形して、還元雰囲気中の焼結で微細構造を制御したSrO・2FeO・8Fe₂O₃のフェライト磁石である (Br = 0.48T, H_{CJ} = 200kA/m, (BH) max = 42.4kJ/m³)⁴⁾。もう一つの磁石は、Srの一部をLaで、Feの一部をZnで置換したマグネトプランバイト型Srフェライト (SrO・6Fe₂O₃) の磁石である (Br = 0.46T, H_{CJ} = 208kA/m,

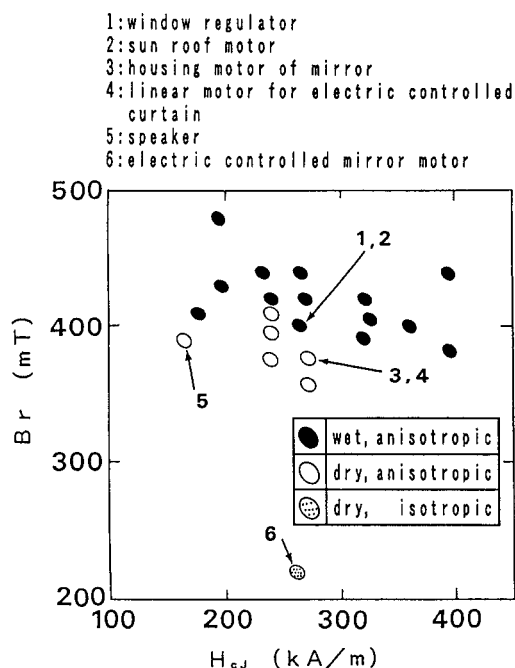


Fig. 4 Characteristics distribution of ferrite magnets and automobile applications.

(BH) max = 41.4kJ/m³)⁵⁾。いずれも保磁力がやや低いので、高保磁力化の検討がなされている。コストさえ折合えば高機能部品への展開が今後活発になると思う。

Fig. 5は、1ボックス車の電動カーテン用のリニアモータに組み込まれる磁石の例⁶⁾である。電動カーテン1m当り約260gの磁石が使われ、車1台当りにすると約1.5kgの磁石が搭載される例もあり、車の快適性向上に貢献している。低コスト化のため、Fig. 4に示す特性値の磁石が、切断や研磨加工をせずに所定形状に乾式成形後焼結され、そのまま組み込まれる。

4.3 希土類磁石の例

Fig. 6は、SmCo系磁石の組み込まれたイグニッションコイルの例である^{7, 8)}。これは、磁石の組み込まれる電装品の中で、最も耐熱性の要求される部品である。近年、点火エネルギーのアップがエンジンの高効率化のため求められている。燃費向上のため、空燃比のリーン側モードで完全燃焼させる必要があり、大きな点火エネルギーが要求される。一次コイルに発生する磁束とは逆向きの磁束を磁石で発生するように組み付けて置く。この状態で、点火時期に一次電流を遮断すれば、磁束

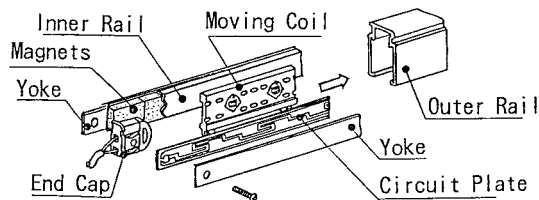


Fig. 5 Structure of linear motor for electric controlled curtain.

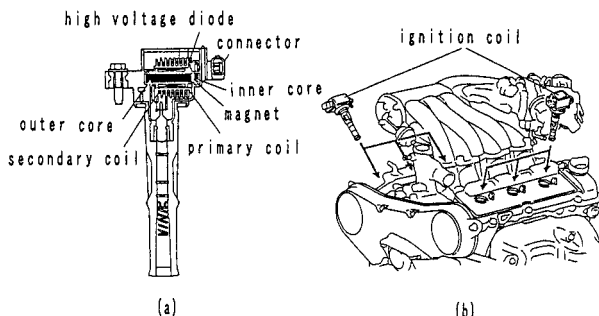


Fig. 6 Structure of ignition coil.
(a) cross section (b) mounting position

変化がコアに生じ、二次コイルには30～40kVの高電圧が発生する。このイグニッションコイルに使われる磁石は、エンジンルーム内の最も厳しい温度環境下で作動しなければならない他に、コイルからの発熱による負荷も加わる。そして、一次コイルに通電することによる逆磁場も作用するので、それにも耐えなければならない。最近、高価なSmCo系磁石の代わりに、耐熱性に優れたNdFeB系磁石の利用も検討され、搭載が始まっている。

Fig. 7は、ABS用の車輪速センサに組み込まれたNdFeB系磁石の例である⁹⁾。センサロータは軟質磁性材料で、SUS434LやSUS410L等の焼結ステンレス品が使われている。凹凸のあるセンサロータの回転により、鉄芯に巻いたコイルに交流波形が発生する。その周波数はタイヤの回転数に比例しているので速度を読み取ることができる。

ABSは、各車輪の速度を検出してスリップしないようにブレーキをかけるシステムで、安全性向上から標準装備化が進んでいる。また、この出力波形はコンピュータ処理して、タイヤ空気圧不足の異常検出にも利用される。

同様な電磁ピックアップが、エンジンのクランク角やカム角の検出用センサとしても使われる。これらは、エンジンの燃焼を高効率に制御するための要の部品でもある。

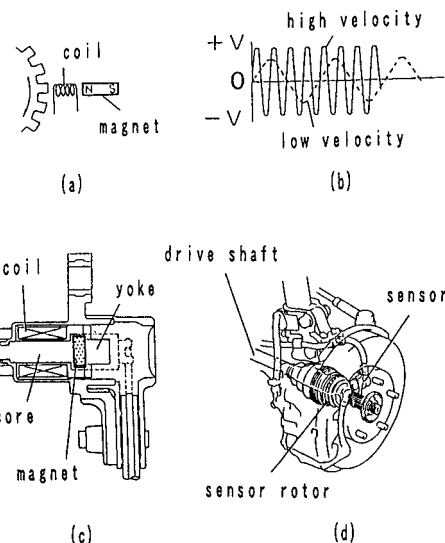


Fig. 7 Structure of electromagnetic pick-up sensor.
(a) operating principle (b) induced voltage
(c) cross section (d) mounting position

このような電磁ピックアップセンサは足周りやエンジン周辺に搭載されるので、耐熱性の他に耐食性や耐久信頼性も問われる。

次に、大型車のブレーキシステムに組み込まれた磁石の例を示す。大型トラックの高速化、高出力化が進む中で、減速や停止に係わるブレーキシシステムとして、フットブレーキ・エンジンブレーキ・排気ブレーキの他に、第4のブレーキとして永久磁石式リターダが開発された。それは、Fig. 8に示すように、磁石の強力な磁力で駆動軸の回転を制御するブレーキの補助装置である^{10, 11)}。磁石部分の固定体（ステータ）とドラム構造の回転体（ロータ）とで構成される。磁石はリング状のヨーク外周面に固定され、隣接する磁石の磁極は交互に配置されている。制動時には、エアシリンダの力でステータがロータのドラム内面にスライドする。この状態でロータが回転すると、ドラム内周面に渦電流が発生すると同時に、ドラムの回転を妨げる方向にローレンツ力という力が働いて、制動力が得られる。回転数が高いほど渦電流が大きくなるため、渦電流で生じる逆磁場と発熱に耐え得るに十分な耐熱性のある高磁気特性のNdFeB系焼結磁石が1台当たり数kgの単位で使用される。

ボンド磁石の使用例として、スピードメータやタコメータに使われる交差コイルメータ¹²⁾を、

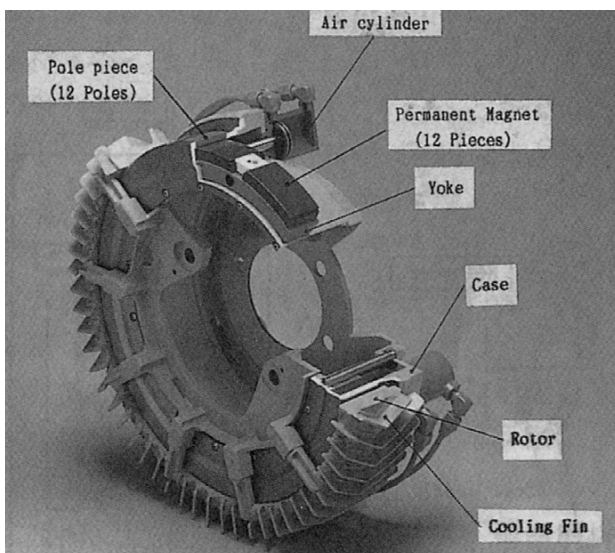


Fig. 8 Structure of permanent-magnet retarder.

Fig. 9に示す。2極に着磁した円形の磁石が回転できるように組み込まれている。上記の電磁ピックアップ方式の出力を利用して、二つのコイルに所定の電流が流れるシステムで、合成磁界の方向に磁石が回転することにより、磁石の中心に取付けた軸が回転して指針が動く。スピードメータやタコメータの場合には等方性NdFeB系ボンド磁石が、燃料計や水温計には等方性フェライトボンド磁石が用いられている。

5. 今後の動向

Table 2¹³⁾は、自動車部品に組み込まれている種々の磁石について、過去¹⁴⁾と現状について整理し、さらに将来の予測をしたものである。モータの中で、ウインドレギュレータ・ファン・電動カーテン等には、コストパフォーマンスから将来ともフェライト磁石が優勢である。アクチュエータやセンサには、まだSmCo系磁石が使われている部品もあるが、コストの面からNdFeB系焼結磁石への移行が進んでいる。希土類ボンド磁石は家電製品の回転機器に多用されているが、自動車の電装部品への応用は耐熱性とコストの問題で行き詰まっているのが現状である。

希土類ボンド磁石の耐熱性をFig. 10に示す¹³⁾。磁石を0.5K/minで加熱しながら、磁束をサーチコイル方式で測定し、3%不可逆減磁の起こる温度を耐熱性の指標として整理した結果である。異方性ボンド磁石では、SmCo系磁石を除いて耐熱性の良い磁石は見当たらない。高エネルギー積を有するHDDR (Hydrogenation Decomposition Desorption Recombination) - NdFeB系やSmFeN系磁性粉のさらなる耐熱性のアップが期待されている。

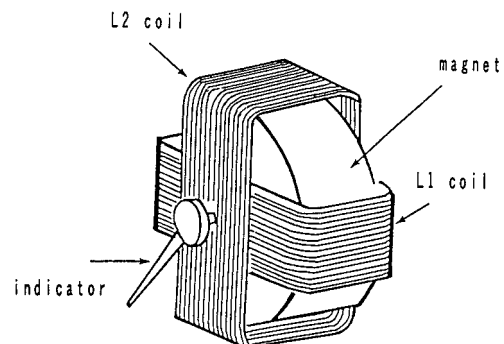


Fig. 9 Structure of cross-coil meter.

上記の自動車部品以外に忘れてならないのが、地球環境に優しい車としてのEVやHEV用のモータとAHS (Advanced Cruise-Assist Highway System) の磁気マーカである。

EVやHEVの駆動用や発電機用モータには、Table 3に示すように¹⁵⁾、種々のモータ様式が検討されている。その中でも、小型で高効率化のためNdFeB系焼結磁石を用いたブラシレスの同期モータが多用されている。磁石によるマグネットトルクに加えて、ロータの突極性に起因して発生するリラクタンストルクが利用できるIPM (Interior Permanent Magnet Motor) が、今後主流になると推察される。1997年12月販売を始めたハイブリッド

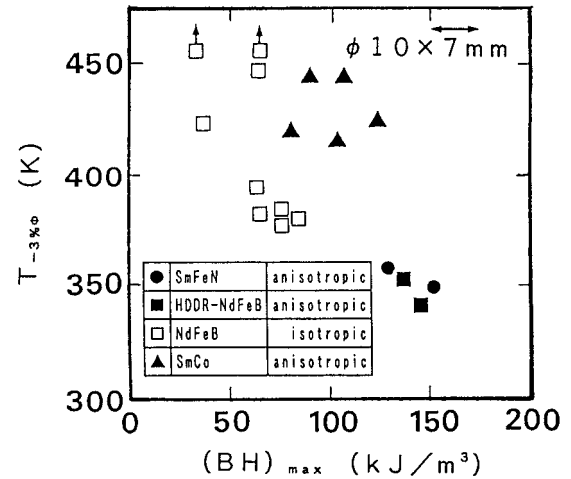


Fig. 10 Heat resistance of rare-earth bonded magnets.

Table 2 The current status and future trends of permanent magnets in automotive applications.

automotive parts	status	Alnico magnet	sintered magnets			bonded magnets		
			Ferrite	NdFeB	SmCo	Ferrite	NdFeB	SmCo
motors starter, wiper, fan, electric controlled curtain, etc	past		◎					
	current		◎				○	
actuator suspension controlled actuator, retarder, etc	past			◎	◎			
	current			◎	◎		◎	
sensor ABS sensor, cam angle sensor, crankshaft position sensor, etc	past			○	◎			
	current			◎	◎			
meter speed meter, tachometer, fuel meter, temperature meter, etc	past	○	◎					
	current	○				◎	◎	

symbol: ◎=mostly ○=partially △=probably

Table 3 Comparison of motor for EV.

classification	DC motor	permanent magnet synchronous motor	induction motor	switched reluctance motor
maximum efficiency (%)	85~89	95~97	94~95	<90
efficiency (%), (10% load)	80~87	90~92	79~85	78~86
maximum speed (rpm)	4,000 ~6,000	4,000 ~10,000	9,000 ~15,000	<15,000
cost/axial output (\$/kW)	10	10~15	8~12	6~10
cost of controller unit	1	2.5	3.5	4.5
servility	○	○	◎	○
reliability	□	○	◎	○
promise and trend	□	◎	○	○

symbol: □=common ○=better ◎=best

車プリウスの駆動用モータと発電機用モータについては、発売前の第32回東京モーターショーでカットモデルが公表された。Fig. 11の矢印の所に磁石が組み込まれたIPMである。

NdFeB系焼結磁石の耐熱性は真の保磁力と強い相関関係を有するので¹³⁾、モータ用には真の保磁力の最も大きい2MA/m (25kOe) 以上の磁石が使用され、耐食性向上のためアルミクロメート等の表面処理が施される。仮に、1台当り2kg使われ、日本の自動車総生産台数の1%に相当する年間10万台生産されると仮定すると、200トンの需要が新たに生まれ、一挙に自動車用希土類磁石の需要量が倍増することになる。

自動車部品ではないが、AHSの磁気マーカ（磁気ネイル）がある¹⁶⁾。1996年9月上旬信越道でのAHS走行テストが行なわれ、その際、約外径30mm高さ70mmのケース中にNdFeB系焼結磁石が、N極を上面にして高速道路の車線中央部に約2m間隔で敷設された。車のバンパに組み込まれた磁気センサが、磁石で発生した磁界を検知し、車線の中央位置を確認しながら自動走行し、ドライバーは運転操作から開放された。例えば、このような方式で高速道路100kmの区間を上下車線に磁石を敷設することを考えると、新たな需要としてNdFeB系焼結磁石が約40トン必要となる。

6. むすび

自動車用部品に組み込まれている磁石に関して、概要を述べた。これらで構成される部品は、

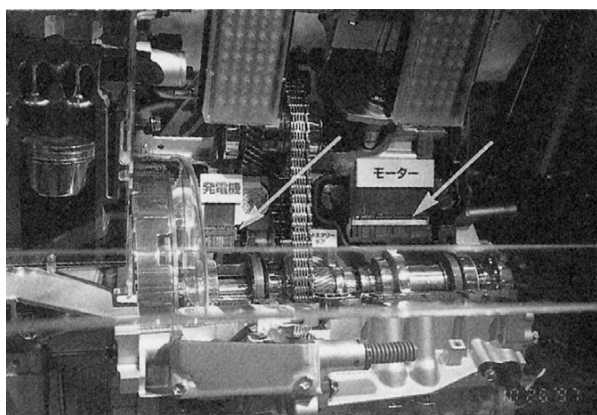


Fig. 11 Toyota hybrid system power train.
(arrow : NdFeB sintered magnet)

いずれも機能部品として重要な位置を占めており、取付け部位もエンジンや足回りに搭載されるため、その使用環境は厳しく、耐熱性・耐食性・耐振性等の信頼性が要求される。いずれの部品も運転制御に係わることから、100%の信頼度が必要である。

一般に磁石はその両端にN極とS極を有する。磁石は切っても切ってもその両端にN極とS極が現われる。ニーズ (Needs) とシーズ (Seeds) は切っても切れない関係にあり、材料メーカーとユーザーとの連携により、100%の信頼度のある部品化が必要である。

参考文献

- 1) 依万智：サラダ記念日, (1987), 43, 河出書房新社
- 2) 例えば, SAE J1211 : Recomm. environ. practices for electron. equip., (1978), JASO D001-94 : 自動車用電子機器の環境試験方法通則, (1994)
- 3) 加藤哲雄：磁石の世界, (1995), 108, コロナ社
- 4) 豊田幸夫：粉体および粉末冶金, 44(1997), 17
- 5) 田口仁, 武石卓, 金子晶紀：粉体および粉末冶金, 44(1997), 3
- 6) 黒木博紀, 岡田正志, 加藤義雄, 本多功：第20回日本応用磁気学会学術講演概要集, (1996), 88
- 7) 三輪哲也, 都築康雄：特開平7-22256
- 8) トヨタ自動車：トヨタアパロン新型車解説書, (1995.5), 1-30
- 9) トヨタ自動車：トヨタアパロン新型車解説書, (1995.5), 2-43
- 10) 桑原徹：内燃機関, 33-8(1994), 43
- 11) 桑原徹：いすゞ技報, 88(1992), 91, および97(1997), 82
- 12) トヨタ自動車：トヨタアパロン新型車解説書, (1995.5), 5-23
- 13) 加藤義雄：まてりあ, 36(1997), 133
- 14) 石嶋洋一：工業レアメタル, (1989), 116
- 15) 桶笠博正：平成8年電気学会産業部門全国大会, S3-2, (1996), S.50
- 16) 上田敏：自動車技術, 50(1996), 81

著者紹介



加藤義雄 Yoshio Kato
生年：1946年。
所属：電磁気材料研究室。
分野：磁性材料，磁気測定技術の開発。
学会等：日本金属学会，日本応用磁気学会，日本鉄鋼協会会員。