

モータ用ロータにおける焼結拡散接合技術の開発

Development of Sinter Diffusion Bonding for Rotor Core of Hybrid Car

小松 敏 泰*

Toshiyasu KOMATSU

中原 洋 一*

Youichi NAKAHARA

新 崎 知*

Satoru SHINZAKI

浅 香 一 夫**

Kazuo ASAKA

要 旨

磁気特性と機械的特性の両立を要求されるモータ用ロータにおいて、材料を接合する複合化技術に着目し、焼結材料の拡散接合とその影響因子として、接合面積について解析した。その結果、接合面の強度が接合面積に依存することがわかり、機能材料と構造材料という異種材料を拡散接合する技術を確立した。本開発では、焼結材料の熱膨張差に加えて、内側部材と外側部材の組み合わせ寸法差による圧力を付与することで接合面積を向上させ、接合強度を満足する焼結拡散接合技術を確立した。ハイブリッド車のモータ用ロータに開発材を適用することで、機能と強度の両立と生産性を大幅に改善し、50%のコスト低減を可能にした。

ABSTRACT

This research focused on composite technology to bond materials for rotor cores, which require both magnetic properties and mechanical properties at once, and analyzed diffusion bonding of sintered material and the bonding area as a factor affecting it. It was determined, as a result, that the strength of the bonding zone depends on the bonding area, and diffusion bonding was verified as a technique for bonding magnetic material and structural material, which are different materials. This report describes the establishment of a sinter diffusion bonding technique that provides satisfactory bonding strength. This was accomplished by improving the bonding area through application of pressure by press fitting of the inner and outer components, which was in addition to the difference in thermal expansion of the sintered material. Application of the developed material to rotor cores for use in hybrid cars has made it possible to achieve both functionality and strength, to significantly improve productivity, and to reduce costs by 50%.

1. まえがき

最近、地球環境保護や石油資源の枯渇の観点から、自動車の燃費向上は必須の課題である。この解決策として、近年エンジンと電気モータを組み合わせたパワープラントのハイブリッド化の取り組みが高まっている。このような状況の中、本田においてもハイブリッド車・インサイトを市場へ送り出しており、今後は基幹車種へ拡大展開していくことが必要である。そのために、モータの効率向上とコスト低減は重要な課題である。このうち、コスト低減技術としてモータ用ロータに要求されていることは、Fig. 1に示すように磁気特性と機械的特性の両立を狙いとし、安価な

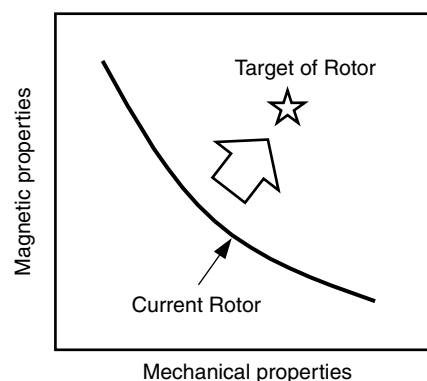


Fig. 1 Relationship between mechanical properties and magnetic properties

* 栃木研究所

** 日立粉末冶金(株)

製造技術を確立することである。一般的なモータ用ロータでは、磁気特性と機械的特性を兼備させる場合、二つの材料を機械的に接合したり、圧入後の加工が必要であるためコストの増大を招く。これに対し、粉末冶金法を用いたニアネットシェイプ成形により、加工工程を削減しコストの低減を図ることと、異種材料間の拡散接合の可能性を検討した。

焼結機械部品の用途の多様化に伴い、Fig. 2 に示すような横方向の溝付き形状や、切り欠き形状等のアンダカットを有する複雑形状部品が要求されるようになり、種々の接合法が開発されてきた。Fig. 3 は、焼結機械部品の接合法の種類を示す⁽¹⁾。このうち、イオンや原子が他の物質の中に浸透し、広がっていく現象を利用した拡散接合以外は、接合強度やコストの点からロータへの適用は難しい。また液相拡散接合(焼結過程で多量の液相を発生して、収縮緻密化と拡散接合する方法)は、特殊な材料組成を必要とするとともに、多量の液相を発生するため、寸法精度の制御が難しい。そこでロータの機能上十分な接合強度が得られる接合法として、固相拡散接合法を採用した。この方法は、焼結過程において、組み合わせ部材の熱膨張量の差を利用して、接合面で両部材を接触させ、拡散により固相状態で接合する方法である。この方法は2セットの歯を持つ自動車エンジン用スプロケット等に採用されている⁽²⁾。

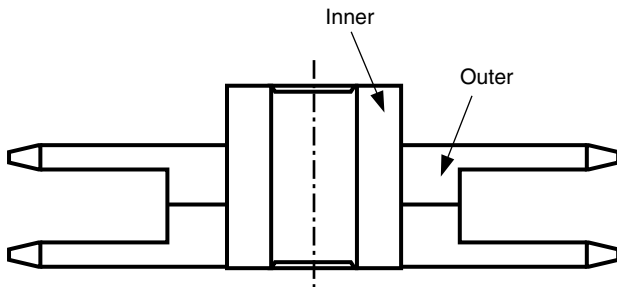


Fig. 2 Shape of undercut

しかしモータ用ロータは内側部材と外側部材の形状が自動車エンジン用スプロケットと異なり、特に外側部材が薄いため、熱膨張量の差だけでは十分な接合強度が得られなかった。そこで焼結材料の特性や初期の組み合わせ寸法差に着目することにより、異種材料の拡散接合に影響を与える要因を明確にし、接合面積と接合強度を向上する焼結拡散接合技術を開発したので報告する。

2. 接合メカニズムと技術課題

一般に、焼結拡散接合に影響を与える要因としては、焼結温度、焼結時間、及び接合面積などがある。このうち焼結温度や焼結時間は製造工程の制約を受ける。そこで本開発では接合面積を拡大することにより、接合強度の向上をめざした。これには、特に圧力因子による接合メカニズムを応用した。このメカニズムを、Fig. 4⁽³⁾に示す。2つの金属の接合面に圧力がかかると、金属原子は相互にÅレベルの距離まで近づく。そして原子間距離が、格子定数(Fig. 4 ポイントa)に近づくとき原子間力は安定し、自由電子が共通化して結合する。よって拡散接合では、圧力を効果的に用い、接合面積を向上することが重要な課題である。

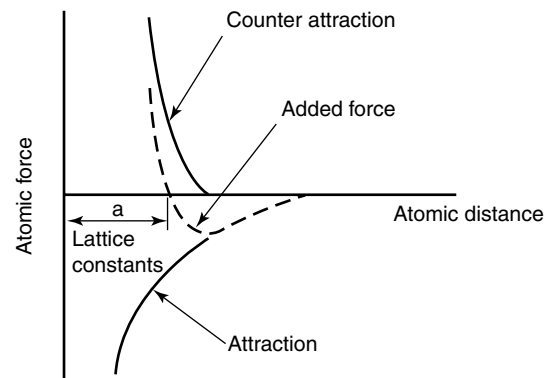


Fig. 4 Relationship between atomic force and atomic distance

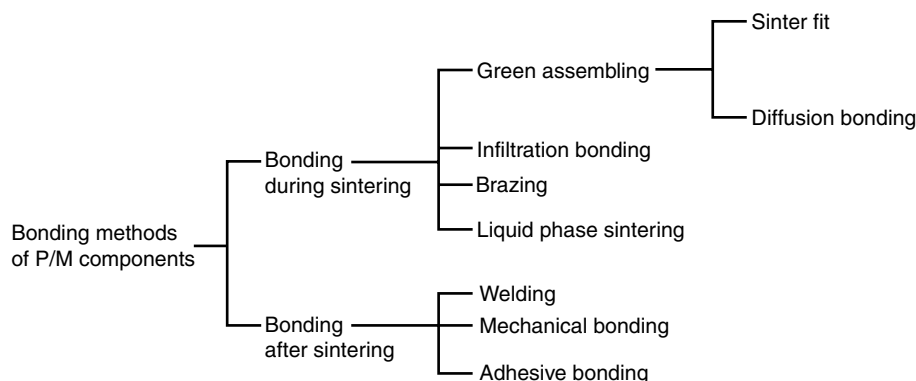


Fig. 3 Bonding methods of P/M components

3. 試験・評価方法

3.1. ロータの材料仕様

ロータの材料としては、Table 1に示すような機械的特性と磁気特性を有する材料を採用した。機械的特性の点から内側部材にはFe-Cu-Ni-C系を採用し、磁気特性の点から外側部材にはFe系を用いた。Table 2に各材料の化学成分を示す。

内側部材の原料粉末は、純鉄粉を基本として、銅とニッケル、炭素を添加した混合粉末を用い、外側部材は、水アトマイズ鉄粉とした。

Table 1 Mechanical and magnetic properties

Item	Inner	Outer
Tensile strength (MPa)	318	200
Yield strength (MPa) (0.2% Yield point)	260	—
Rotating bending strength (MPa)	190	—
Magnetic flux density (T)	—	1.04
Coercive force (A/m)	—	350
Resistivity ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	—	16.4
Density (g/cc)	6.4 min	6.9 min
Apparent hardness	HRB 50 min	HRF 50 min

Table 2 Chemical composition

Chemical Composition (wt%)				
	Fe	C	Cu	Ni
Inner	Bal.	0.6	1.5	2.7
Outer	100.0	—	—	—

3.2. 熱膨張曲線の測定

内側部材と外側部材の熱膨張曲線を測定するための試験片形状をFig. 5に示す。試験装置は東京工業(株)製のジラトメータ1570を用いた。測定はボタン変成ガス雰囲気中で室温から1130℃まで昇温し、20min保持後、室温まで降温する過程で行った。

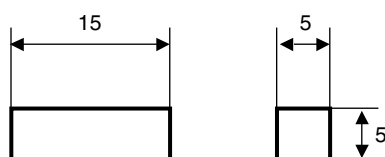
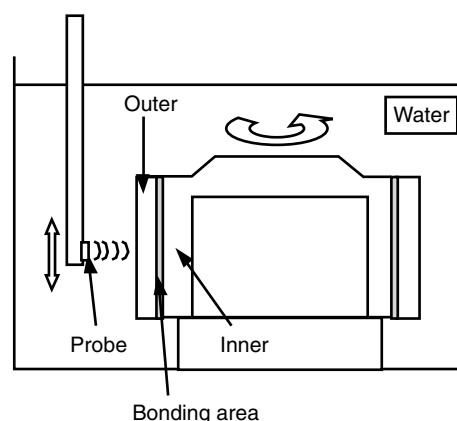


Fig. 5 Heat expansion test specimen

3.3. 接合面積の測定方法

内側部材と外側部材を、焼結拡散接合したときの接合状態を非破壊にて知る方法として、超音波探傷法を用いた。Fig. 6に測定装置を示す。水中に含油処理したロータを置き、回転させる。超音波を接合面に垂直にあてながら測定端子を上下移動して、超音波の反射波を測定した。反射波が少ないほど、十分な接合状態であることを示す。この結果より、設計上の接合面全体に対する、実際の健全な拡散接合部の面積が占める割合を接合面積率(R_s)とした。



Device for supersonic flaw detecting: Canon M-500A

Fig. 6 Device for supersonic flaw detecting

3.4. 接合強度試験

接合面の強度測定は、Fig. 7に示す試験片を用い、Fig. 8に示す方法で接合部分の抜け荷重を測定した。ロータの接合強度の求め方を以下に示す。式(1)より、単位面積あたりの抜け荷重(P_s)を算出し、式(2)より求めた接合面積(S)とともに式(3)へ代入し接合強度(P)を求めた。

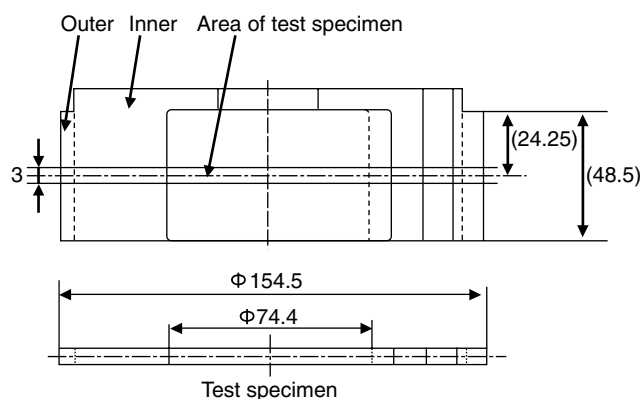


Fig. 7 Diffusion bonding test specimen

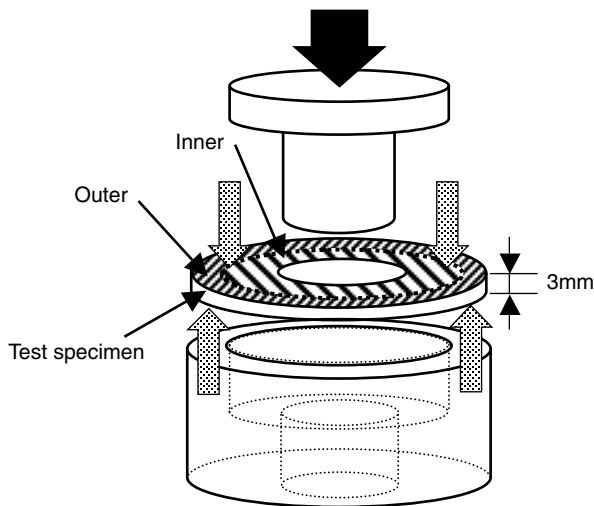


Fig. 8 Measurement method of diffusion bonding strength

$$Ps = Pt / St \quad (1)$$

$$S = A_0 \cdot (Rs/100) \quad (2)$$

$$P = Ps \cdot S \quad (3)$$

S : ロータ接合面積 (mm²)

A_0 : 設計接合面積 (mm²)

Rs : 接合面の面積率 (%)

Ps : 単位面積あたりの抜け荷重 (N/mm²)

Pt : 試験片の抜け荷重 (N)

St : 試験片の接合面積 (mm²)

P : ロータ接合強度 (N)

4. 結果

4.1. 熱膨張特性

Fig. 9 は Fe 系材料(EO 材)と Fe-Cu-Ni-C 系材料(ENK 材)の焼結過程での熱膨張曲線である。これらの曲線は、800℃までは同じような傾向を示すが、この温度を越えると Fe-Cu-Ni-C 系材料の膨張量が変化しはじめ、Cu の融点である

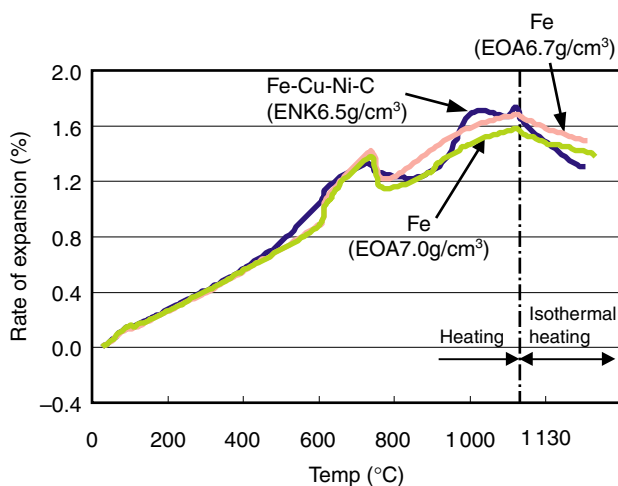


Fig. 9 Characteristic of expansion

1083℃付近では、銅の膨張により Fe 系材料よりも Fe-Cu-Ni-C 系材料の方が膨張量は大きくなっている。そこでこの膨張量の差による圧力を利用して、磁気特性に優れた Fe 系材料を外側部材として、機械的特性の高い Fe-Cu-Ni-C 系材料を内側部材として組み合わせることを検討した。

4.2. 接合面積への影響因子

Fe 系の外側部材と Fe-Cu-Ni-C 系の内側部材を拡散接合する場合の最適条件を選定するために、接合面積への影響因子を明確にした。

4.2.1. 密度の影響

内側部材と外側部材の密度と接合面積率の関係について調べた。まず内側部材の密度変化に対する面積率の関係を Fig. 10 に示す。外側部材の密度を一定とし、内側部材の密

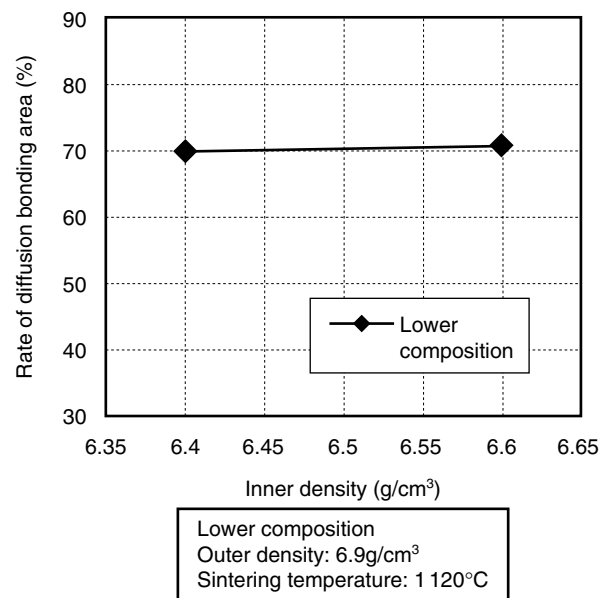


Fig. 10 Relationship between inner density and rate of diffusion bonding area

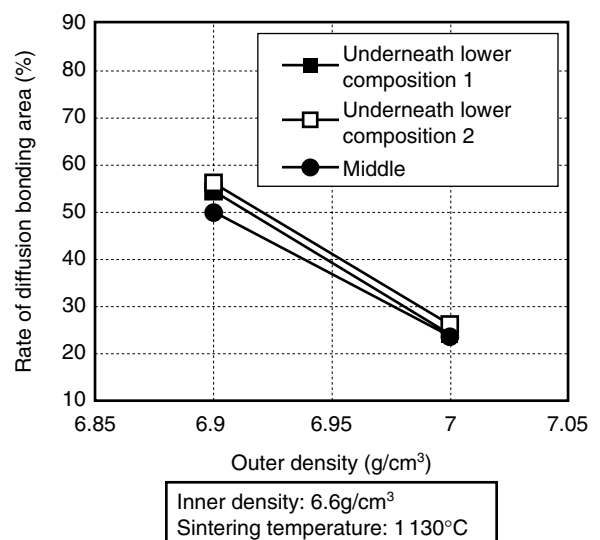


Fig. 11 Relationship between outer density and rate of diffusion bonding area

度を $6.4 \sim 6.6\text{g/cm}^3$ まで変化させても接合面積率は変わらないことが分かった。つぎに、外側部材の密度と接合面積率の関係を Fig. 11 に示す。この結果より、外側部材の密度が高いと面積率は低下する傾向にあることが分かる。

これは材料の熱膨張曲線から予想される傾向とは逆転している。つまり、一般的には外側部材の密度が高いほど熱膨張は小さくなり、内側部材の熱膨張量の増加に伴い圧力が上がり、接合面積は増加する傾向にある。ところがロータの接合では材料の熱膨張の差以外に、ロータ形状に起因する外側部材のひずみの影響があるため、熱膨張曲線だけでは接合面積を定義できない。

4.2.2. 焼結温度の影響

Fig. 12 に焼結温度と接合面積率の関係を示す。焼結温度が高いほど接合面積率は小さくなるのがわかる。熱膨張特性から、外側部材は 1150°C 付近まで膨張を続けるので、焼結温度が高いほど外側部材と内側部材間の圧力は低下し、拡散接合は進みにくくなると考える。

4.2.3. 配合組成の影響

これまでの結果より、材料の熱膨張の差が大きい場合でも拡散接合が進まないのは、内側部材から外側部材へ向かう圧力が高すぎるために、外側部材にひずみが生じていると推定した。よって、配合組成により膨張量を減らし、圧力を弱めた場合の影響を調べた。Table 3 に内側部材の Cu 添加量を減らした場合の成分を、Fig. 13 には配合組成に対する接合面積率の測定結果を示す。この結果、膨張量を減らし圧力を下げても接合面積率への影響が少ないことが明らかになった。このことよりロータ形状では、熱膨張差を用いた従来の拡散接合の手法があてはまらないことが分かった。

一般にロータの磁気特性を改善するには外側部材の密度は高い程良く、強度を増すには焼結温度が高い方がよいことは分かっている。しかしこの条件では、接合面積は低下す

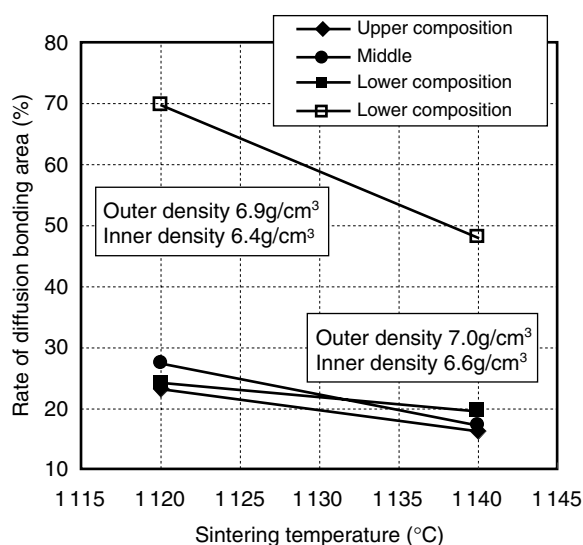


Fig. 12 Relationship between sintering temperature and rate of diffusion bonding area

Table 3 Inner chemical composition of decreasing Cu

(wt%)	Cu	Ni	C
Underneath lower composition 1	1.470	2.940	0.686
Underneath lower composition 2	1.455	2.910	0.679

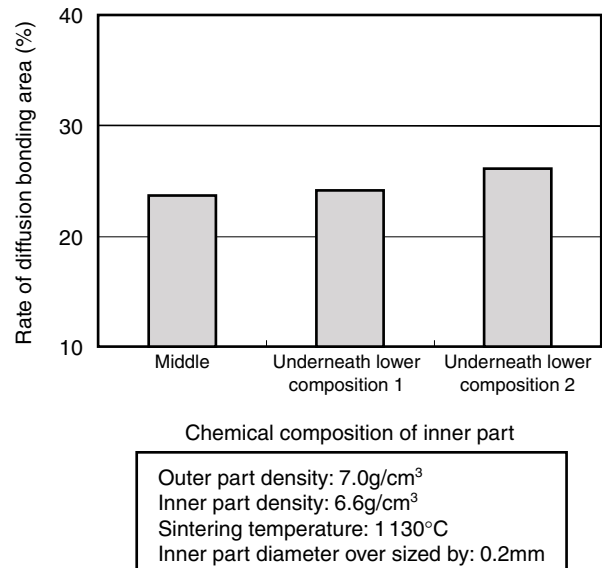


Fig. 13 Influence of chemical composition

る傾向にある。また内側部材の配合組成により銅の膨張量を小さくしても接合面積への影響は少ない。そこで接合面に熱膨張の差以外の圧力を付与することを検討した。

4.2.4. 初期の組み合わせ寸法差の影響

内側部材と外側部材を焼結中に拡散接合するためには、各々の圧粉体を製作したあとに、圧入工程を必要とする。初期の組み合わせ寸法差と面積率の関係を Fig. 14 に示す。初期の組み合わせ寸法差とは、外側部材の内径と内側部材の外径の差を意味する。この内側部材と外側部材の組み合わせ寸法差が増えるほど、接合面積率が增大することがわか

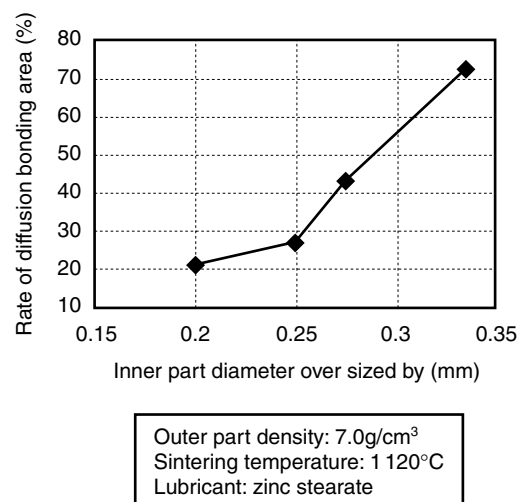


Fig. 14 Relationship between interference and rate of diffusion bonding area

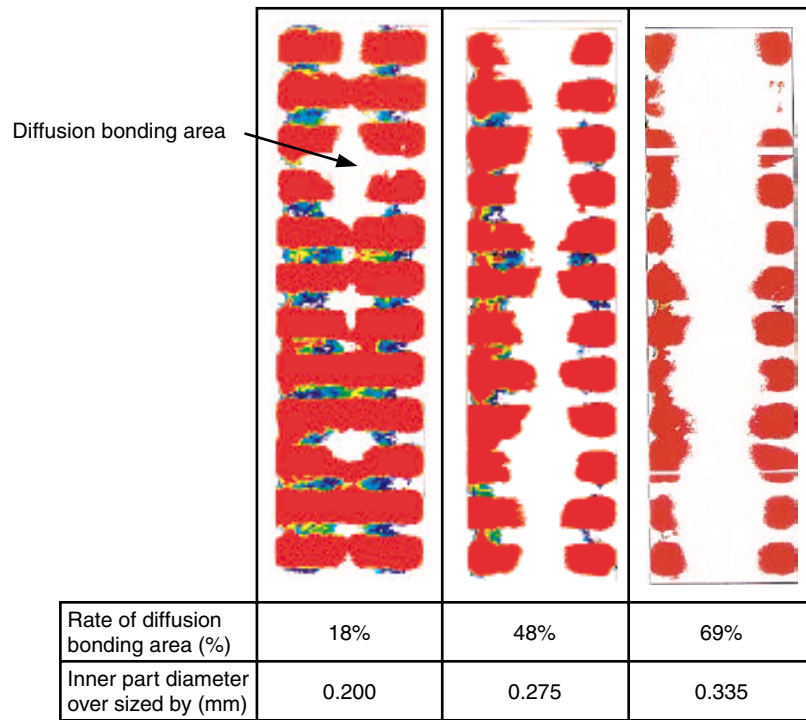


Fig. 15 Rate of diffusion bonding area measured by supersonic flaw detecting

る。従って、接合面積を管理するうえで、初期の組み合わせ寸法差は重要な因子である。しかし、これを増やし過ぎると外側部材に亀裂が生じるおそれがある。試験では、組み合わせ寸法差を0.335mmまで増加した結果、亀裂の発生は見られなかった。そこで限界組み合わせ寸法差を計算により推定した。

浅香によると⁽⁴⁾、材質がFe-Cu-C系、密度が6.7g/cm³の外側部材圧粉体ヘテパ軸を挿入した場合の限界組み合わせ寸法差が明らかにされている。これによると、内径が30mmの外側部材と内側部材の組み合わせ寸法差が75 μmのときに、外側部材の破壊率は100%であることが示されている。このことから外側部材の内径に対する初期組み合わせ寸法差の割合が、0.25%のときに破壊に至ることがわかった。ロータ形状を考慮して、外側部材の内径が144mmの場合の組み合わせ寸法差を求めると0.360mmとなり、これが限界組み合わせ寸法差と推定される。但し本開発材における外側部材はFe系であり、浅香の試験片とくらべ成分は異なるが、密度が6.9～7.0 g/cm³と高いことから圧粉体の強度は向上するため、浅香の実験結果を参考として用いた。

4.3. 接合面積率

拡散接合したロータ接合面の測定結果を Fig. 15 に示す。これは接合面の接合状態を展開して表したものである。拡散接合した部分は超音波が透過するため反射は弱く、白色、青色、緑色で示される。それ以外の黄色や赤色の部分は拡散接合が不十分であることを表す。

接合面積率が18%の場合、白色から緑色の接合部分がは

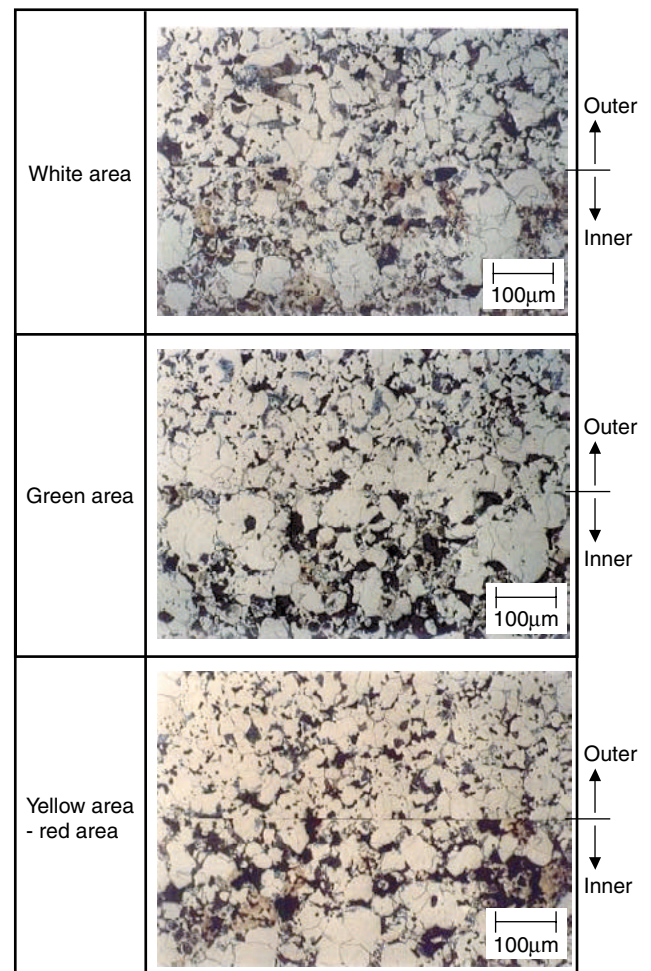


Fig. 16 Microstructure of boundary by diffusion bonding

しご状に規則的に表れている。これは拡散接合がおもに内側部材のスポーク部で促進されているためである。拡散接合の際に、外側部材より内側部材の膨張量が大きくなり、内側部材のスポーク部を中心に外側部材へ圧力がかかることにより、この部分の接合が進むと考える。だがこの状態では接合面積率は低い。したがって内側部材と外側部材の熱膨張差に加え、初期の組み合わせ寸法差による圧力を与えると、接合面積は接合面中央より増え、40～70%の接合面積率を示した。

拡散接合部の断面を組織観察した結果を Fig. 16 に示す。外側部材はフェライト組織を呈し、内側部材はフェライトとパーライトの混合組織である。拡散接合部(Fig. 15, 16の白色部～緑色部)では、接合面を越えてフェライト結晶が良く成長している。また、接合していない部分(Fig. 15, 16の黄色部～赤色部)は、接合面に1 μm 程度の空隙を形成している様子が観察された。

5. モータ用ロータへの適用

焼結拡散接合技術について得られたこれまでの知見をモータ用ロータへ適用した例を示す。

5.1. 焼結ロータの構造

Fig. 17 にモータの構成を示す。ステータは突極集中巻きの分割された磁極と樹脂一体化モールドによるバスリング、

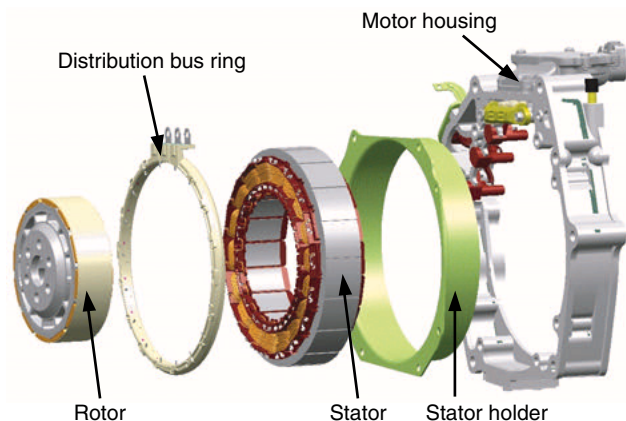


Fig. 17 Motor construction

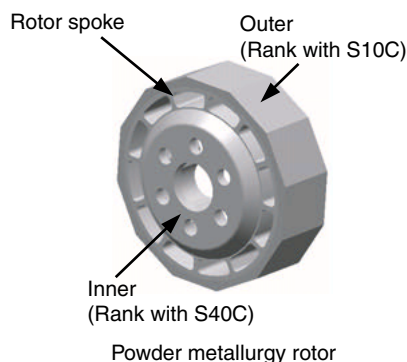


Fig. 18 Rotor construction

およびステータをモータハウジングに固定する構造部品であるステータホルダで構成されている⁽⁵⁾。焼結ロータの外周部には希土類系の焼結磁石(Nd-Fe-B 系)がガラス繊維にて固定され、コンパクト化のためにエンジンのクランクシャフトに直結される構造をとる。Fig. 18にモータ用焼結ロータの構成を示す。磁気特性を重視する外側部材と、強度特性を必要とする内側部材との異種材料からなる。

5.2. 焼結ロータの接合条件

焼結ロータとして磁気特性と機械的特性を兼備するためには、密度や焼結条件を加味した最適な接合条件の設定が必要である。まずこのロータの拡散接合部の強度評価を行うために Fig. 19 の装置を用い、接合面積率が 36%の焼結ロータの捩じり疲労試験を行った。この結果接合部は破断せず、スポーク部が先に破断することがわかった。従って拡散接合部の疲労強度はスポーク部よりも高いといえる。

この結果をもとに、接合面積率の余裕度を1.3倍として、接合面積率の下限値を50%に設定した。そしてこの条件を

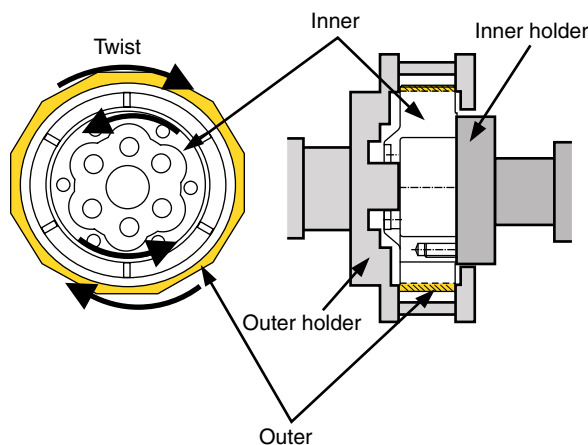


Fig. 19 Equipment of twist test for durability

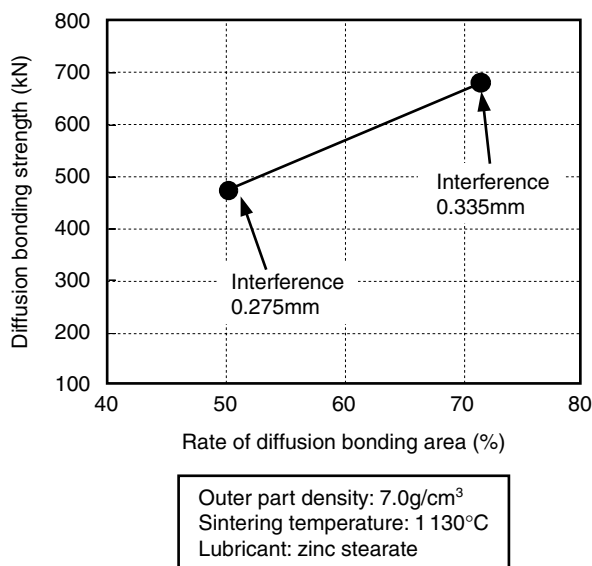


Fig. 20 Relationship between diffusion bonding strength and rate of diffusion bonding area

満足するように製作した焼結ロータの接合強度試験結果を Fig. 20 に示す。接合面積率が 50%以上を示す焼結ロータは、その接合強度も高く、台上耐久試験を満足するための目安となる 179 kN を、上回ることがわかった。そこで接合面積率が50%以上となる焼結ロータの接合条件を、内側部材と外側部材の密度、焼結温度条件、内側部材と外側部材の初期組み合わせ寸法差という観点から、Table 4に示すとおり選定した。これにより異種材料を、拡散接合により組み合わせた焼結ロータが得られた。

Table 4 Condition of diffusion bonding

Density (g/cm ³)	Outer	6.9 ~ 7.0
	Inner	6.4 ~ 6.6
Sintering temperature (°C)		1 120 ~ 1 140
Inner part diameter oversized by (mm)		0.275 ~ 0.335

5.3. 焼結ロータの耐久信頼性とコスト効果

次に実機耐久性を評価するにあたり、スポーク部の疲労強度にて判断した。スポーク部の疲労強度は190MPa(ねじりトルク 3 432N・m)であり、この結果より Fig. 21 の疲労限度線図を得た。これより、実機試験での最大発生応力値に対し、20倍以上の余裕があることがわかり、焼結ロータの耐久性は十分であると判断した。

またこの焼結ロータは、焼結拡散接合によりニアネットシェイプ形状が得られ、加工工程が大幅に削減されたため、インサイト用ロータに対し 50%のコスト低減を実現した。

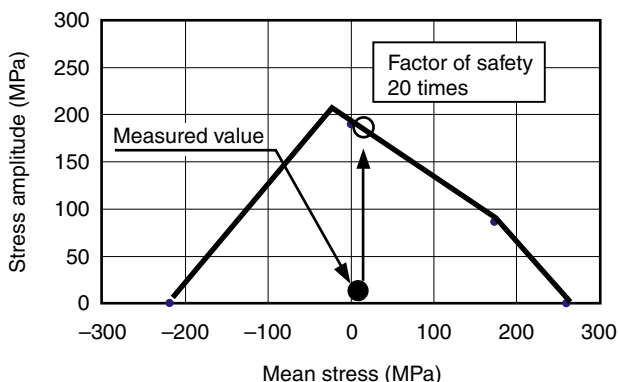


Fig. 21 Durability of boundary by diffusion bonding

6. まとめ

モータ用ロータの磁気特性と機械的特性を両立するために、粉末冶金製法に着目し、焼結拡散接合技術の開発を行った結果以下の成果が得られた。

- (1) 磁気特性と機械的特性の両立を図るために、異なる特性を有する2種類の圧粉体を、焼結拡散接合する技術を開発した。

- (2) モータ用ロータの焼結拡散接合においては、従来の熱膨張の差による接合面への圧力に加え、初期の組み合わせ寸法差による圧力を付与することが重要であることが分かった。

- (3) 拡散接合技術の適用により、実機での強度と耐久性を満足し、さらにニアネットシェイプ成形により、加工工程が削減できるモータ用ロータを供給できた。

なお、この焼結拡散接合を用いたモータ用ロータは、2001年12月よりシビックハイブリッドに適用された。

謝 辞

最後に本開発を進めるにあたり、多大なご協力を頂いた日立粉末冶金(株)の関係者の皆様に、深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本粉末冶金工業会編：焼結機部品，東京，技術書院，1987，p.279
- (2) 藤木 章：高性能エンジン用焼結部品及び材料の開発，粉体および粉末冶金，vol.46，No.5，p.510-518 (1999)
- (3) 大塚 穎三，生嶋 明記：材料化学入門Ⅲ「機械的性質」，東京，岩波書店刊，1965，p.26
- (4) 浅香 一夫：圧粉体組み合わせ焼結拡散接合法に関する研究，学位論文，広島大学，p.61-62 (1997)
- (5) 嶋田 明吉，小川 博久，中島 稔，島田 裕央：ハイブリッドカー「インサイト」用薄型 DC ブラシレスモータの開発，HONDA R&D Technical Review，Vol.12，No.1，p.15-20 (2000)

■ 著 者 ■



小松 敏泰



新崎 知



中原 洋一



浅香 一夫