有気孔メタルボンダイヤモンドホイールの 開発とその研削特性*

杉下潤二** 石井正巳*** 河端則次† 熊本健一郎†

Development of Metal Bonded Porous Diamond Wheel
and Its Grinding Performance

Junji SUGISHITA, Masami ISHII, Noritsugu KAWABATA and Kenichiro KUMAMOTO

This paper describes the results of developmental research on the new porous diamond wheels based on the aluminium alloys. Structural features of the new wheel include various aluminide compounds (Ti/Al or Fe/Al phase) as a part of bond matrix and soluble-type compounds (Na_2SO_4 , MgSO_4) as a pore formative substance. The results obtained are as follows: (1) The porous aluminium wheel containing a Ti/Al phase and Na_2SO_4 -compound showed the intermediate performance between the usual metal bonded wheel and resin bonded wheel. (2) In comparison with the consumed power or the tangential grinding force, the porous wheel showed superior performance compared with the poreless diamond wheel. (3) Wear loss of the porous Ti/Al-wheel with MgSO_4 compound is smaller than the Na_2SO_4 -wheel, but it has no recognizable effect in the Fe/Al-wheel. (4) Wear loss of the Ti/Al-wheel containing the tough-particles belongs to the G 5-group is very smaller, and the stock removal rate is doubled comparing with the G 2-wheel.

Key words: porous diamond wheel, pore-formative, metal bonded wheel, intermetallic compounds, consumed power, stock removal, bond matrix

1. 結 言

著者ら¹⁾はすでに、チタンとアルミニウムの金属間化合物相を含むアルミニウム合金基ダイヤモンドホイール(無気孔)を遠心鋳造法で製作し、その研削特性を報告した。その結果、このホイールは従来のブロンズ系統結ホイールに比較して、勝るとも劣らない特性を示した。そこで今回は無気孔メタルボンダイヤモンドホイール特有のダイヤモンド層加工の困難さを軽減し、研削性の向上を目的とした有気孔ホイールの開発を試みた。

ダイヤモンド層の有気孔化によってツルーイングやドレッシングなどボン除去性が向上するばかりか、ポケット形成によって、切りくずの排除や研削点への研削液供給も容易となる。すでに、メタルボンホイールでもその有気孔化策がいくつか提案^{2)~4)}されている

が、ビトリファイドの有気孔ホイール⁵⁾ほど実用に供されていない。本報のメタルボン有気孔ホイールはダイヤモンド層に複合された気孔形成のための水溶性化合物(以下、気孔形成剤または気孔剤と呼ぶ)が研削液によって溶出し気孔となるタイプのもので、前報¹⁾の無気孔ホイールと研削特性を比較検討した。

2. 有気孔ダイヤモンドホイールの構造と製法

2.1 基本構造

有気孔メタルボンホイールの開発は基本的には表面有気孔複合材、つまり多孔質のダイヤモンド層をいかに設計し、製作するかである。筆者ら^{6)~9)}は、従来から表面複合鋳物の開発を行っているが、今回の有気孔ホイールの製法も従来の遠心(加圧)鋳造法を利用したものである。すなわち、前報¹⁾同様、ホイールはダイヤモンド層と台金材部が一体の表面複合鋳物で、異なる点はダイヤモンド層に不連続孔を形成させるための水溶性化合物を複合させ、この化合物の研削液による溶出跡を気孔とするもので、正確には表面有気孔ホイールである。したがって、研削液にさらされない部分では気孔形成はなく、多孔質化によるホイール全

* 原稿受付 昭和63年7月26日。精密工学会東海支部浜松地方講演会(昭和63年7月15日)にて発表

** 正会員 名城大学理工学部(名古屋市天白区塩釜口1-501)

*** アイシン精機(株)(刈谷市朝日町1-1)

† ノリタケダイヤ(株)(福岡県浮羽郡田主丸町大字竹野210)

Fig. 1 Fundamental structure of the new wheel
Left; composite concept, Right; after pore-formation,
A; base alloy, B; bond matrix contains intermetallic
compounds, C; pore-formative, D; diamond, E; poros-
ities

Fig. 2 Shape and sizes of the trial wheels
Upper; 28 D type, Lower; 100 D type

体の強度低下も防ぐことができる。図1は開発ホイールの基本構造で、アルミニウム合金台金部(A)と一体構造のダイヤモンド層である。

このホイールのもう一つの特徴はTi-Al系及びFe-Al系金属間化合物(以下、それぞれTi/Al及びFe/Alで示す)をボンドマトリクスの一部として利用したことである。特に今回のFe/Al相はすでに報告⁹⁾したTi/Al系化合物に比較して、倍以上の硬さを有し、なかでもFe₃Al相は降伏応力の温度に対する逆依存性⁹⁾を示すことで知られている。したがってFe/Al相の混入はボンドマトリクスの砥材拘束力を増し、有気孔化によるダイヤモンド層の軟弱化を防いで目こぼれ現象を減少させるなど、Ti/Al相を含む場合とは異なった研削特性が期待される。図2は試作した2種類のカップ型ホイールの寸法と形状であり、表1はそれらの詳細である。

2.2 Fe/Al相を含むAl合金のボンド適性

Ti/Al相とそれを含むアルミニウム合金鋳物の機械的特性については前報⁹⁾で詳述した。今回のFe/Al相は純度95%の鉄粉末(200メッシュ)、またはFCD40

Table 1 Specification of the trial wheels

Wheel type	28 D	100 D
Wheel sizes	28 D×20 T×9.6 H 3 W×3 X	100 D×25 T×31.7 H 3 W×3 X
Dia-group (SD)	G 5, 140/170	G 2, G 4, G 5, 140/170
Pore-formative	Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ 100/150	Na ₂ SO ₄ , MgSO ₄ 35/65, 40/60
Base alloys	Wrought & AC 8 A	2024, AC 8 A
Bond & I. M. C castings	Al-alloys containing 10/18% Fe/Al or Ti/Al phase, Centrifuged, 700°C×10/60 min, G-number; 365-500	

Table 2 Some properties of pore-formative

Pore-formative	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
Melting point °C	884	1 124
Specific gravity	2.66	2.66
Solubility (water)	19/100 (20°C)	27/100 (0°C)
Corrosiveness 10 ⁻³ mg/cm ² /day	6.0	11.0

破碎粉とAl粉の充てん層に700°Cのアルミニウム溶湯を侵入させ、鋳物となる間の拡散反応によって生成させたものである。鋳物中のFe/Al相にはFeAl相のほか、FeAl₃、Fe₂Al₅、及びFe₃Al相が存在し、FCD40粉では黒鉛相も一部混在する。これまでに知られている50 at% FeのFeAl相硬さは約400 HVである⁹⁾。しかし以前に報告⁸⁾したように、FCD60繊維複合によって生成したFeAl相硬さは600 HVで、それらを含む2024合金鋳物の硬さは400~900 HVであった。また耐摩耗性は相手材がSUJ2鋼の場合、乾燥摩擦下の比摩耗量で10⁻⁶から10⁻⁷ mm³/Nのオーダーであり、マトリクス中のFe/Al相が増加すると凝着摩耗は軽減する傾向も示し⁸⁾、ボンドマトリクスとしての適性が認められた。

2.3 気孔形成剤の特性と腐食性

表2は今回用いた気孔形成剤2種類の物性と腐食性である。化合物の選定にあたっては比重、融点、水溶性、腐食性のはかマトリクスとの化合物相生成の可能性などを考慮した。表中の腐食試験は鏡面仕上のS45C材を化合物1 wt%を加えた水溶性研削液に常温状態で保持した場合の結果である。その結果が、MgSO₄溶液はNa₂SO₄よりも腐食性を示したが、0.1%濃度では両者とも腐食跡はほとんど認められなかった。したがって実際研削においては、ホイール損耗やタンクの容量から想定して、研削液中の気孔形成濃度は0.1%以下と考えられるので、腐食作用については配慮する必要はない。

2.4 有気孔メタルボンドホイールの製法

有気孔ダイヤモンドホイールの製作手順は、これま

Table 3 Grinding test conditions

Tests	Practical	Basic
Grinding machine	Makino CF 1 A	Okuma GCU
Workpieces	K 20	P 20
Wheel type	100 D	28 D
Wheel speed V_c	1 190 m/min	785 m/min
Table speed V_t	1.5 m/min	0.5 m/min
Depth of cut A_c	0.02 mm	0.015 mm
Stock removal	16 000 mm ³	550 mm ³
Grinding fluid	S 75 Tx 50	S 75 Tx 50
Dressing	WA-stick	WA-stick

でに報告¹⁾⁶⁾した表面複合ないし部分複合鋳物の製法と基本的には同じである。すなわち、鋳型はりん酸塩系埋没材で作成し、カップ型ホイール鋳型のダイヤモンド層形成部にダイヤモンド粒子、金属間化合物相を得るための各種金属粉（鉄、鋳鉄、チタン、アルミニウム）及び気孔形成剤（ Na_2SO_4 、 MgSO_4 など）を一定割合で混合し充てんした。その上に台金材であるアルミニウム合金を置き、溶融した時点から一定時間後に遠心力を付与しながら凝固させた。金属間化合物相や気孔率の制御は保持時間や G ナンバ（Gno）の増減によった。

3. 研削試験の結果

3.1 研削試験法

研削試験は 28 D 型ホイールによる基礎試験と 100 D 型ホイールによる実用条件下での試験を行った。試験条件は表 3 である。まず基礎試験では万能研削盤の内面研削装置に 28 D 型ホイールを取り付け、設定切込み量 (A_c) 0.015 mm が完全に除去されるまでトラバース研削を行ったが、軸剛性が低い ($0.88 \text{ kgf}/\mu\text{m}$) ため切残し量が生じる。今回はこの量が完全に研削除去されるまでの接線方向の研削抵抗 F_t をワークホルダのひずみゲージで測定し、ワンパスごとに発生する F_t の総和を求めた。実用条件下の研削試験では F_t の代わりに直接、消費電力の変化を測定したが、基礎試験と異なる点は研削盤やホイール径ほか、ワークが K 20 で、研削量が約 16 000 mm³ と基礎試験の 30 倍以上であることである。

3.2 気孔有無による研削特性の差異

図 3 は Ti/Al 基の 100 D 型ホイールで超硬合金 K 20 を研削加工した場合の気孔有無による研削特性の差異である。同図には従来のブロンズ系焼結（無気孔）ホイール (SD 140 Q 50 MW 6)、遠心成形法による無気孔メタルボンドホイール及びレジンボンドホイール (SDC 140 P 75 BW 6) の特性を参考までに示したが、これらと比較すると試作した Na_2SO_4 有気孔ホ

Fig. 3 Change of consumed power due to the presence of porosity (100 D-Ti/Al wheel)

Fig. 4 Difference in tangential force F_t required to remove the depth of cut

ール ($V_p=27\%$) は無気孔メタルとレジンホイールのほぼ中間的特性を示した。

図 4 は Fe/Al 基 28 D 型ホイールの場合で、ワークは P 20 である。設定切込み量 ($15 \mu\text{m}$) が完全に除去されるまでに要した F_t の総和を研削除去総量 500 mm³ までプロットしたものである。図右側の数値はワーク研削面の粗さである。

いずれの結果からでも、ダイヤモンド層の有気孔によって研削抵抗 F_t や消費電力 C_p は減少し、研削エネルギーは低下することがわかる。これは有気孔化によってホンダマトリクスが柔軟に作用し、ホイールの目直し頻度が増すため、ツルニングやドレッシングなどの成形作業も容易になることを示唆している。図 4 において台金材の 2024 と AC 8 A を比較した

Fig. 5 Wheel wear loss due to the pore-formative (28 D-Ti/Al/G 5-wheel)

場合、両者の差はほとんどない。有気孔ホイールでは AC 8 A を台金とするほうがやや F_1 の変化幅は小さくなっているが、これは Si 量の多い AC 8 A の方が凝着性に乏しく、目づまり物質の移着・成長が軽減するためと考えられる。

3.3 有気孔形成剤による差異

目こぼれなどダイヤモンド層摩耗の最大要因は気孔形成に伴うマトリクスの強度低下である。気孔形成剤として Na_2SO_4 や MgSO_4 を用いた場合、それらはマトリクスと反応して材質の影響を与える。たとえば Al 合金に対する Mg の添加量は 0.3% ぐらいまでならば、Mg が多いほど強じんになり、Na は Al/Si 合金の改良剤となるが、Fe 成分が増すと改良効果は減退することが知られている。そこで各種の台金材に各気孔形成材を複合し、超硬 (P 20) 研削時のダイヤモンド層損耗量を比較した。図 5 は 28 型ホイールの結果である。純アルミニウムに近い 1050 材を除くと、どの台金材においても Na_2SO_4 よりも MgSO_4 を気孔形成剤とする方がダイヤモンド層の損耗は少ないばかりか、目づまりやトランスファによるホイールの重量増加も発生した。これは MgSO_4 を複合することによって各種化合物相 (Mg_2Si , MgZn_2 , Al_2CuMg など) の析出及び室温における時効促進によってボンドマトリクスが硬化し、砥粒拘束性が増したことが根本要因である。

図 6 は Ti/Al 基の 2024 ベース 100 D 型ホイールの結果である。このように Ti/Al 基では MgSO_4 を気孔形成剤とするほうが Na_2SO_4 を複合した場合よりもダイヤモンド層の損耗量が小さく、研削比も高くなる。したがって、図 5 の結果も含めるとダイヤモンド層の硬化には Mg 系化合物を気孔形成剤として利用することは効果的であるが、Fe/Al 基ではよくなかった。したがって、気孔形成剤はボンド組成や腐食性を考慮して選択すべきである。

3.4 Fe/Al 基ボンドホイールの場合

以上述べたように Ti/Al 相をボンドの一部とし、か

Fig. 6 Changes of grinding performance with pore-formative (100 D-wheel)

Fig. 7 Grinding performance of various metal (Ti/Al, Fe/Al) and vitrified bonded wheels (100 D/G 5-wheel)

つ Na_2SO_4 を気孔形成剤とする有気孔ホイールではダイヤモンド層の消耗が大きく、ホイール寿命が短くなり過ぎる傾向がある。そこで気孔形成剤を Na_2SO_4 、ボンドマトリクスの一部により硬質の Fe/Al 相を利用することによって砥粒拘束力の増大とダイヤモンド層損耗の軽減を目的としたホイールの製作を行った。

図 7 は試作した各種有気孔ホイール (100 D 型) の試験結果を気孔有無や化合物別に比較し、さらに現在実用化されているビトリファイドの微小気孔ホイール (N/VSV, コンセント 100) の特性¹⁰⁾ も参考までに挿入した。図から明らかなように、無気孔ホイールや鉄粉利用の有気孔 Fe/Al ホイールは Ti/Al ホイールと比較して研削特性が優れているとは言えない。しかし、球状黒鉛を含む FCD 40 粉を用いた Fe/Al 基の有気孔ホイールは Ti 粒子複合による Ti/Al ホイールより

Fig. 8 Effect of diamond toughness on the grinding performance (100 D-Ti/Al)

も研削比 G_r および消費電力 C_p において良好な特性を示した。

3.5 ダイヤモンド種別による差異

ボンドマトリクスから露出したダイヤモンド砥粒の損耗は研削時の完全脱落を除くと、大別して摩耗するか破砕するかである。したがって、拘束性の高いメタルボンドに破砕強度の大きい砥粒を介在させると、いわゆる目直しまでの時間が長くなる。すでに著者らの一人¹¹⁾は合成ダイヤモンドやCBNなど主要砥材の破砕強度を天然ダイヤモンド砥粒に対する強度(指数)の差で区別し、グループ分けを試みた。たとえば、メタルボンド用140/170粒径G5グループ砥粒の破砕強度指数はG4より25%も高く、G2は35%減である。

本研究で主として用いたダイヤモンドは破砕強度の高いG5グループ砥粒(MBGII)である。しかし砥粒保持力に乏しいボンドにあっては、その特性を発揮しないまま脱粒し、研削比の低下をまねくとも考えられる。逆に、メタルボンドでも不規則モザイク状で破砕しやすい構造の砥粒(たとえばG2グループ)を用いればホイール損耗量も増し、有気孔化によってボンド層は一層軟弱となりホイールの損耗は拡大することが予想される。

そこで有気孔ホイールにおけるダイヤモンド種別と研削特性の差異を明らかにした。図8は Na_2SO_4 を気孔形成剤とした場合のダイヤモンドグループ別に示した試作ホイールの研削特性である。結果から明らかにように、破砕しやすいG2砥粒より破砕強度の高いG5のほうが、研削比は高く、消費電力も低下するなど微小気孔ビトリファイドボンド(N/VSV)の場合¹⁰⁾

とは逆の結果となった。したがって、この種の有気孔メタルボンドホイールではダイヤモンド層の損耗量または研削比及び消費電力の差から超硬(K20)研削においては破砕強度の高い砥粒を用いる方が研削特性は向上することが判明した。

4. 結 言

ダイヤモンド層に複合された水溶性化合物が研削液に溶出し気孔となるタイプのアルミニウム合金基のダイヤモンドホイールを製作した。その研削特性に関する試験結果を要約すると次の通りである。

- (1) 金属間化合物のFe/Al相を含むアルミニウム合金も適性なボンド特性を示し、気孔剤に Na_2SO_4 を用いたダイヤモンドホイールでは従来の無気孔メタルホイールとレジンボンドホイールの中間的研削特性を示した。
- (2) 金属間化合物相と気孔形成剤の組合せによって研削特性は異なった。すなわち、ボンドの一部がTi/Al相のとき、気孔形成剤の Na_2SO_4 と MgSO_4 を比較すると、後者は化合物相の生成とマトリクスの硬強化を促進し砥粒保持力を向上させる。また、黒鉛を含むFe/Al基で、気孔剤が Na_2SO_4 の場合は良好な研削特性を得た。
- (3) Na_2SO_4 を気孔剤としたTi/Al基ホイールでは、破砕強度指数の高いダイヤモンド砥粒(G5)を用いたほうが研削比またはホイール損耗量及び消費電力の観点から優れていた。

参 考 文 献

- 1) 杉下潤二, 石井正巳, 河端則次: 遠心鑄造法によるアルミニウム合金基ダイヤモンド砥石の製作とその研削特性, 精密工学会誌, **53**, 3 (1988) 493.
- 2) 小林正次: ダイヤモンドまたはCBNを砥粒とする研削砥石, 特開昭57-21270.
- 3) 福井保夫, 長田純夫: 連続多気孔メタルボンド砥石及びその製造方法, 公開特許公報, 昭59-18, 2064.
- 4) 浅枝敏雄, 吉川昌範: 研削砥石, 実用新案公報, 昭51-5114.
- 5) 稲田 博, 余語隆夫: ビトリファイド超砥粒砥石及び製造方法, 公開特許公報, 昭57-17, 8667.
- 6) J. Sugisita: A Study of Cast Alloys with Partially Dispersed Graphite, Wear, **87**, (1983) 181.
- 7) 杉下潤二: 遠心鑄造法によるAl11%Si合金複合材の製造と二三の特性, 鋳物, **57**, 2 (1985) 102.
- 8) 杉下潤二: 遠心鑄造法による球状黒鉛鋳鉄繊維を含むAl/Cu/Mg合金基表面複合材の製造と二三の特性, 鋳物, **58**, 10 (1986) 707.
- 9) S. Hanada, S. Watanabe, T. Sato and O. Izumi: Trans. Japan Inst. of Metals, **22**, (1981) 873.
- 10) 河端則次, 余語隆夫: ビトリファイドボンドホイール, ダイヤモンドツール, 日経技術図書 (1987) 461.
- 11) 河端則次: ダイヤモンドホイールの特性, 機械と工具, **20**, 12 (1985) 39.