超砥粒ホイールの研削性能予測に関する研究 (第1報)*

—超音波コアリング法に基づく超砥粒ホイールの迅速結合度試験機の試作—

海野 邦 昭** 秋 山 智 彦*** 竹 内 恵 三***
河 端 則 次*** 高 橋 孝 誠†Study on Estimation of Grinding Performance of Super Abrasive Wheels (1st Report)
— Development of a Rapid Wheel Grade Testing Machine based on Ultrasonic Coring Method —Kuniaki UNNO, Tomohiko AKIYAMA, Keizou TAKEUCHI,
Noritsugu KAWABATA and Kousei TAKAHASHI

For an automatic grinding operation, it is necessary to establish a grinding performance database of super abrasive wheels. In this paper, a new rapid grade testing machine based on the ultrasonic coring method is developed in order to decrease the total cost and the period of grinding performance estimation of super abrasive wheels, and its validity is discussed. As the result, it is cleared that this method has good repeatability and is suitable for rapid testing of the grades of super abrasive wheels. Also, the stock removal rates in ultrasonic coring are dependent upon the specifications of abrasive wheels and their MOR values.

Key words: super abrasive, wheel grade, ultrasonic coring, stock removal rate

1. は じ め に

超砥粒ホイールを用いた研削作業の自動化を進めるには、工具であるホイールの研削性能をいかに予測するかということがまず重要であり、そのためには多くの種類の超砥粒ホイールの研削性能のデータベースを短期間に、かつ安価に構築する必要がある。通常、一般研削砥石を用いた研削作業には、JIS R 6240に規定された大越式試験方法、ロックウェル試験方法およびソニック試験方法によって評価された結合度が、砥石選択の目安として用いられている。また砥石の結合度と研削性能との関連が多く研究者によって検討されている¹⁾。しかしながら一般的な研削砥石と異なり、超砥粒ホイールは、有気孔のビトリファイドボンドホイールを除いて、前述の結合度試験方法が適用しにくいという不都合がある。そのためJIS B 4131では、結合度の中間値を N とすると述べるだけで、その評価はメーカの独自性に任せている。その結果、メーカ間の結合度の相関関係は全くなく、また同じメーカでも、結合剤の種類が異なると、その相関関係が全くないのが現状である。この点は超砥粒ホイールを用いた研削作業の自動化を進める上での障害の一つになっている。このように超砥粒ホイールの場合には、結合度の評価法が確立されておらず、一般的に、実際の研削作業と同様な研削実験に基づいて、その評価が行われている。このような結合度の評価方法は、現状では、最も理想的と言えるが、その評価にあたっての人件費や工具費等の総経費が非常に大きくなってしまいうという不都合がある。

超砥粒ホイールの結合度 (Grade) は、砥粒が砥粒層中に保持される保持力の大小関係を示すものと定義されているが、一般的には、研削時におけるホイールの摩耗量の大小関係に関連するものと理解されており、そして目こぼれ型研削 (軟らかく作用)、あるいは目つぶれ型研削 (硬く作用) といったホイー

ルの研削性能に関係する作用硬さ (Hardness) と広義に解釈される場合が多い。そこで本研究では、超砥粒ホイールの研削性能を定量的に予測する上での尺度とその評価方法の確立を目的とし、またホイールの結合度を、前述のように研削時におけるホイール摩耗に関連した作用硬さで、ホイールの研削性能を予測する上での一つの尺度というように広義に定義することとした。そして超音波コアリング法に基づく超砥粒ホイールの迅速結合度試験機を試作し、その有効性を検討した。

2. 試験機の概要と試験方法

超音波研削を用いると、ファインセラミックス等の硬ぜい材料の加工が迅速に行え、定荷重 (定圧) 研削の場合には、通常の研削と比較し、高い除去速度が得られるという特徴がある²⁾。さて、無気孔ビトリファイドやぜい性メタルボンドホイールを一種の硬ぜい材料、またレジンボンドホイールを一種の分散強化複合材とみなし、そしてそれらの加工に超音波研削を利用すれば、超砥粒ホイール試験片のコアリング時に、高い除去速度が得られ、そしてそれらの差異により、摩耗試験、換言すれば結合度の評価が、簡便に、かつ迅速に行えるのではないかと考えられる。そこで超音波コアリング法を利用した超砥粒ホイールの迅速結合度試験機を試作し、その有効性を検討することとした。試作した迅速結合度試験機の概略を図1に示す。試験機は図のように超音波振動子とDCモータより成る超音波研削装置と、天びん式加圧機構を含む定圧テーブル部とにより構成されている。超音波の周波数は19.5 kHzで、コアドリル取付け後の振幅は0~約50 μm 、そして主軸回転数は、0~5 000 rpmである。そして振動子の先端に、段付きホーンと外径10 mm、内径8 mmの中空形状をしたメタルボンドダイヤモンドホイールで構成されるコアリング工具 (固有振動数19.5 kHz) を取り付け、そして外部よりウォータージャケットを介して、研削液を供給するようにしてある。試験に際して、試験片として超砥粒ホイールのスティック ($7^{\text{W}} \times 4^{\text{T}} \times 40^{\text{L}}$ mm) をテーブル上面にワックスで固定し、天びん式加圧機構を作動すると、一定の負荷が軸方向に掛かる。そしてコアドリ

* 原稿受付 平成6年9月12日

** 正 会 員 職業能力開発大学校 (相模原市橋本台4-1-1)

*** 正 会 員 ノリタケダイヤ (株) (福岡県浮羽郡田主丸町)

† 正 会 員 熊本県工業技術センター (熊本市東町3-11)

Fig. 1 Set up of new grade testing machine

ルが試験片に貫入すると、テーブルが上方に移動するが、その変位量はダイヤルゲージ式の変位計で検出され、そしてひずみ増幅器を経てペンレコーダに記録される。そのためコアドリルの貫入時の除去速度は、単位時間あたりのテーブルの変位量より求められる。この場合、除去速度は、テーブルの質量に依存し、その動剛性の影響を受けると考えられるが、今回は、便宜上、テーブルの質量を一定に保った状態、すなわち動剛性を一定とした状態で、結合度の違いによる除去速度の差異のみを比較検討することとした。

次に試験片は、表1に示すように、粒度、コンセントレーションおよびフィラーの種類がそれぞれ異なる64種類である。またそれらの仕様と機械的特性を表中に示してある。また試験には、メタルボンドコアドリル (SD 140-100 M) を用い、その周速度を63.0 m/minと一定にした。そして表2に示す条件で試験を行った。ここで問題となるのは、コアドリル先端の振幅とその切れ味をいかに一定に保つかということである。そこで図2に示すように、負荷を掛けた状態におけるコアドリル先端の超音波の振幅を芯だし顕微鏡を用いてあらかじめ測定し、試験に際し、常に一定に保つようにした。図3に負荷荷重と工具振幅との関係を示す。図より、負荷を大きくすると、工具振幅

Table 2 Testing condition

Machine	Ultrasonic grinding machine
Diamond core drill	SD 100-100 M
	SD 100-100 M
	SD 200-100 M
Core drill speed	63.0 m/min
Ultrasonic frequency	19.5 kHz
Tool amplitude	30 μ m
Grinding fluid	Soluble type (1 : 50)

Fig. 2 Measuring method of tool amplitude

Fig. 3 Relationship between load and tool amplitude

が直線的に小さくなることが認められるが、試験片の砥粒径と比較し、1/6以上の相対的に大きな振幅が得られているので、試験に際して、問題はないと考えられる。またGC砥石でドレッシングした後のコアドリルの作動面上の砥粒の突出し高さを、図4に示す電気マイクロメータで測定し、そしてその切れ味を一定に保つようにした。

Table 1 Specifications and properties of testpieces

Grain size	Concentration	Kind of bond		Compression strength MPa	Young's modulus GPa	MOR value
		Bond	Filler, Grade			
100	75	Resinoid	SiC	274	14.9	2.52
200				276	15.3	2.49
400				263	14.8	2.34
800				234	13.3	2.06
400	50	Resinoid	SiC	264	14.4	2.42
	75			263	14.8	2.34
	100			259	14.3	2.35
	125			237	15.2	1.85
400	100	Resinoid	Carbon	186	7.8	2.21
			SiC	263	14.8	2.34
			Pulp	236	8.4	3.32
			Copper	291	12.7	3.33
400	100	Vitreous	VA (Soft)	235	13.4	2.06
			VB (Medium)	662	36.2	6.05
			VC (Hard)	776	40.7	7.40
400	100	High brittle metal	MA (Soft)	551	29.1	5.22
			MB (Medium)	687	27.9	8.46
			MC (Hard)	694	25.9	9.30

 Size : 7^W × 4^T × 40^L

3. 結果と考察

3.1 試験機の性能の検討

まず最初に試作した迅速結合度試験機の有効性を吟味するために、コアドリルに超音波を付加した場合と、付加しない場合のダイヤモンドスティック試験片の除去速度の違いを比較した。その結果を図5に示す。図より明らかなように、超音波振動を付加しない場合は、加工圧力を大きくしても、除去速度はあまり変化しないが、付加した場合は、圧力の増大に伴って、急激に高くなることが分かる。このことは、工具に超音波振動を付加することにより、同一の小さな加工圧力においても、高い除去速度が得られ、超砥粒ホイールの結合度を迅速に評価できる可能性があることを意味する。またこの点は、前述のように、広義のホイール結合度評価に際してのトータルコストの削減と評価時間の短縮という点での効果が非常に大きいことになる。

ここで問題なのは、結合度評価に際しての再現性で

Fig. 4 Measuring method of amount of grain ejection

Fig. 5 Influence of ultrasonic vibration on stock removal rate

Fig. 6 Change of various measure quantities by repeat test
Core drill; SD 140-100 M. Pressure; 12.8 MPa
Workpiece; # 400, Conc. 100, SiC filler bond

あり、信頼性である。そこでコアドリルの作動面性状の違いが、除去速度に及ぼす影響を検討するために、同一条件でドレッシングした後、6回、繰返しコアリングを行い、そして作動面上の砥粒の突出し量、摩耗量および除去速度の変化を測定した。これらの結果を図6に示す。図において、測定時のコアドリルの砥粒突出し量は、ドレッシング直後と比較し、小さな値を示すが、その後、繰返しコアリングを行っても、ほぼ一定の値を示すことが分かる。またコアドリルの摩耗量および試験片の除去速度は、繰返し実験を行っても、多少のばらつきはあるものの、ほぼ一定の値を示す。したがって超音波コアリング時におけるホイール作動面上の砥粒突出し量は、ドレッシング直後と比較し、小さな値となるが、その後、目替わり（自生作用）が安定して生じるため、一定となり、そのため除去速度も、ほぼ一定に保たれると考えてよい。

Fig. 7 Influence of loading pressure on various measure quantities

次に問題となるのは、コアリング時の加工圧力を増大した場合の砥粒突出し量、ホイール摩耗量および除去速度の変化である。図7に加工圧力の増大が除去速度に及ぼす影響を示す。図より、加工圧力が増大すると、除去速度がそれに比例して大きくなるが、そのばらつきは小さいことが分かる。そしてコアドリル作動面上の砥粒突出し量は、加工圧力の増大に伴って、わずかに大きくなる傾向が認められるが、その増加幅はばらつきの範囲内であり、加工圧力を増大しても、ほぼ一定の値を示すとみなせる。また同様のことがコアドリルの摩耗量についても言える。したがって、今回の試験の範囲内では、加工圧力が増大しても、コアドリル作動面上の砥粒突出し高さおよびその摩耗量は、ほぼ一定の値を保ち、そして加工圧力に対応して、安定した除去速度が得られると考えてよい。

また次は試験に際して、どのような仕様のコアドリルを用いたらよいかという問題である。図8に同一の試験片（#400, Conc. 100, SiC フィラー粒子ボンド）を異なる粒度のコアドリルで超音波コアリングした時の除去速度、砥粒突出し量および摩耗量の差異を示す。図より、工具の摩耗量は粒度に無関係に、ほぼ一定となるが、粒度が低いコアドリルほど、作動面上の砥粒突出し高さが大きく、そして除去速度が高いことが分かる。また粒度が高いコアドリルの場合には、加工圧力が大きくなると、切りくずの排出が悪くなるなどの影響により、除去速度の低下が認められるようになる。そのため試験に際しては、できる限り、粗粒のコアドリルを用いたほうがよいことになる。そこで今回は、SD 140-100 M をコアドリルの標準仕様とした。

以上の結果より、超音波コアリング法は、超砥粒ホイールの結合度の迅速な評価法として利用できる可能性があり、そして試作した試験機は、比較的、再現性があると言える。

3.2 ホイール試験片の仕様と除去速度

前述のように、ホイールの結合度を研削時における作用硬さと広義に定義したので、その作用硬さには、ホイールの仕様のすべてが影響することになる。そこでホイール試験片の仕様と除去速度の関係を検討した。最初に砥粒の種類であるが、今回は問題を簡略化する意味で、合成ダイヤモンド砥粒、SDのみを対象とし、CBN 砥粒などの吟味は割愛した。そこでまず除去速度に及ぼす粒度の影響を検討した。その結果を図9に示

Fig. 8 Influence of grain size of core drill

Fig. 9 Influence of grain size on stock removal rate
Core drill; SD 140-100 M

す。図において、粒度が異なると、除去速度に差異が生じ、また #100 から #800 へと、粒度が高くなるにつれて、除去速度が、順次、高くなることから分かる。

次に除去速度に及ぼすコンセントレーションの影響である。その結果を図 10 に示す。ホイールのコンセントレーションが大きくなると、研削時の作用切れ刃数が増大するため、ホイールの摩耗量が少なくなり、そのため除去速度が低下すると予想されたが、図より明らかなように、除去速度に及ぼすコンセントレーションの影響はあまり認められない。この理由については、現在のところ、明確な答えを得ていないので、今後、詳細に検討するつもりである。

図 11 に除去速度に及ぼす結合剤の種類の影響を示す。試験には、表 1 中のレジンボンド B、ビトリファイドボンド VB および高ぜい性メタルボンド MA の 3 種類を用いている。図より明らかなように、結合剤の種類により、除去速度に大きな差異が生じ、レジンボンドの除去速度が最も高く、また高ぜい性メタルボンドが最も低いことが分かる。そしてビトリファイドボンドは、両者の中間的な値を示す。このことは、結合剤の種類により、超微粒ホイールの研削性能に差異が生じることを意味する。

次にレジンボンドの場合には、添加されるフィラーの種類に

Fig. 10 Influence of concentration on stock removal rate

Fig. 11 Relationship between kind of bond and stock removal rate
Core drill; SD 100-100 M

より結合度が変化し、除去速度に影響を及ぼすと考えられる。図 12 にフィラーの種類と除去速度との関係を示す。今回は、フィラーの種類として、カーボン質、炭化けい素、パルプ質および銅の 4 種類を用いているが、図において、一口にレジンボンド B と言っても、フィラーの種類によって、除去速度が顕著に異なることが分かる。このことは、図 11 の場合と同様に、フィラーの種類によってホイールの結合度が変化し、そして研削性能に顕著な差異が生じることを意味する。しかしながら実際の研削性能との関連については、今後、詳細に検討することにする。

最後に同一の結合剤の種類で、ホイールに表示された結合度が異なる場合の除去速度の変化である。これが Hardness ではなく、Grade という意味での超微粒ホイールの結合度評価に該当する。図 13 にビトリファイドボンドの場合を、そして図 14 に高ぜい性メタルボンドの場合を示す。ビトリファイドボンドの場合、VA が軟質、VB が中間、そして VC が硬質である。また高ぜい性メタルボンドの場合、同様に、MA が軟質、MB が中間、そして MC が硬質である。図より明らかなように、いずれのボンドの場合であっても、表示された結合度が除去速度に顕著に影響し、軟質ボンドの場合は除去速度が高く、そして硬質ボンドの場合は低くなる。また中間のボンドのものは、それらの中間的な値を示す。そのため以上の結果に基づけば、超音波コアリング法は超微粒ホイールの迅速結合度評価法として有効と言える。

ここで問題となるのは表示された結合度、あるいは測定された除去速度がホイールの物性のどのような特性に依存するのかということである。一般的にコアリングの場合は、ホイールに大きな圧縮力が作用するので、ここではとりあえず試験片の圧

Fig. 12 Influence of kind of filler on stock removal rate
Core drill; SD 140-100 M

Fig. 13 Stock removal rate of vitreous bond
Core drill; SD 100-100 M

Fig. 14 Stock removal rate of high brittle metal bond
Core drill; SD 100-100 M

縮強度と除去速度の関係を検討することとした。表1、図12、13および14より明らかなように、ビトリファイドやぜい性メタルボンドの場合には、それぞれ圧縮強度の大きなものほど、除去速度が低くなっているが、レジンボンドの場合には、圧縮強度の小さなパルプ質のものの方が、大きなSiCフィラーのものよりも、除去速度が低いという現象が認められた。すなわちこの場合は、圧縮強度のみでは、除去速度の違いが説明できないことになる。そこでホイール試験片の破壊現象をエネルギー的に考えることとし、各種試験片の弾性エネルギー値（以下MOR値と呼ぶ）と除去速度との関連を検討した。この場合、通常、破壊強度を引張強さで考えるのが普通であるが、今回は、便宜上、MOR値を、表1に基づき、試験片の圧縮強度 σ_c とヤング率 E より、 $\sigma_c^2/2E$ として求めた。

図15に各種ボンドのMOR値と除去速度の関係を示す。試験には、粒度が#400、またコンセンレーションが100とそれぞれ一定で、フィラーの種類や結合度の異なる各種結合剤試験片を使用した。また工具と試験片の相対的な強度の関係上、

Fig. 15 Relationship between MOR value and stock removal rate
Loading pressure; 12.8 MPa

レジンボンドには、SD 140-100 Mのコアドリルを、そしてビトリファイドと高ぜい性メタルボンドには、SD 100-100 Mのものをそれぞれ用いた。図より明らかなように、いずれの種類の場合であっても、試験片のMOR値が大きくなるにつれて、コアリング時の除去速度が低下することが分かる。しかしながら低下する割合は、レジンボンドの場合が最も大きく、次いでビトリファイドボンドで、高ぜい性メタルボンドの場合が最も小さくなっている。

以上の結果より、多少、データ数が少ないという問題点はあるものの、超音波コアリング時の除去速度は結合剤の種類とともに、試験片のMOR値に依存することが明らかになった。そして今回の試験の範囲内では、MOR値の大きなホイールほど、結合度が高く、そしてコアリング時の除去速度が低くなることが分かった。そのため試作した超砥粒ホイールの結合度試験機はその結合度を簡便に、かつ迅速に評価する上で有効と言える。しかしながらホイールの破壊強度と除去速度との関係およびその除去速度と実際の研削性能との関連を詳細に吟味する必要があるが、それらの点については、今後の課題にしたいと考えている。

4. おわりに

超砥粒ホイールを用いた研削作業の自動化を進めるには、工具であるホイールの研削性能をいかに予測するかということが重要であり、そのためには多くの種類の超砥粒ホイールの研削性能のデータベースを短期間に、かつ安価に構築する必要があるとの見地のもとに、超音波コアリング法を用いた超砥粒ホイールの迅速結合度試験機を試作し、その有効性を検討した。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 試作した超音波コアリング法に基づく超砥粒ホイールの結合度試験機は、比較的再現性よく、かつ迅速に結合度の評価ができる。
- (2) コアリング時の除去速度はホイールの仕様に依存する。
- (3) 今回の試験の範囲内では、MOR値の大きなホイールほど、除去速度が低く、結合度が高い。

参考文献

- 1) 例えば、海野邦昭ほか：研削砥石の結合度測定に関する研究（第2報）、精密機械、36, 9 (1970) 20.
- 2) 海野邦昭ほか：超音波研削装置の試作とその加工特性、精密工学会誌、52, 1 (1986) 107.