超音波ドレッシング装置の開発*

——装置の試作とその有効性の検討——

幾瀬 康 史** 野々川 岳 司*** 河 端 則 次†
加 茂 健 彦†† 湯 澤 慶 彦††† 海 野 邦 昭**

Development of New Ultrasonic Dressing Equipment

Yasushi IKUSE, Takeshi NONOKAWA, Noritugu KAWABATA, Takehiko KAMO,
Yoshihiko YUZAWA and Kuniaki UNNO

A new dressing equipment applying ultrasonic vibration for CBN grinding wheels has been developed. In order to design the smaller and lighter vibratory head of the dressing equipment and to monitor wheel shapes, the piezoelectric material is used for the oscillator. In this paper, first, the dressing and grinding characteristics of this equipment with a vitreous-bond CBN grinding wheel are described. Next, the relation between the wheel shape and the variance of the electric power of the oscillator is discussed, and the monitoring method is described. As the result, using of this equipment, it is clarified that the grinding electric power is reduced, and the surface roughness is improved. The wheel shapes can be monitored by detecting the variance of the electric power of the oscillator.

Key words: ultrasonic vibration, dressing, CBN grinding wheel, piezoelectric material, monitor, wheel shape

1. は じ め に

研削作業に自動化技術が導入されるにつれ、研削砥石、とくに CBN ホイールのツルーイング・ドレッシング技術の確立が重要な課題となりつつある。とりわけその自動化に際して重要なのは、短時間にかつ簡便に有効なホイール作業面を得るためのツルーイング・ドレッシング方法とホイール作業面性状を定量的に把握できるセンシングやモニタリング技術の確立である。ツルーイング・ドレッシングにおいては、とくに適切なチップポケットを作ることと、砥粒の先端を微小破砕させ砥粒の突出し高さをそろえることが重要となる。現在開発されているツルーイング・ドレッシング方法は、適切なチップポケットを形成するには十分であるが、砥粒の突出し高さをそろえるという点では、不十分と考えられる。またセンシングやモニタリング技術においては、作業効率の向上という点からこれら作業面性状の不良をリアルタイムで判別できることが望まれる。しかし、研削加工現象についてのセンシングやモニタリング技術は多く開発されているが、ツルーイング・ドレッシングのセンシングやモニタリング技術に関しては、極めて少ない。

ところでダイヤモンド工具を用いた超音波加工法は、硬ぜい材料を微細にぜい性破壊させながら加工を進行させる方法であるが^{1)~3)}、ここで砥粒やビトリファイド結合剤も一種の硬ぜい材料とみなせば、超砥粒ホイールのツルーイング・ドレッシングにこの方法を適用することにより砥粒の突出し量の制御や作業効率の向上が期待できる。

超音波加工法のドレッシング・ツルーイングへの適用は、20 年程前に原田らにより行われており、若干の研究報告があ

る⁴⁾。しかし、これらは一般砥石に適用したもので、超砥粒ホイールについてのものではない。また、これらに用いられている超音波振動子は、磁わい振動子であるため、振動子自体が大きくなり、実用化という点で問題がある。

本研究では、超音波振動子に電わい振動子を適用し、振動子の軽量小型化を図ったツルーイング・ドレッシング装置（以下超音波ドレッシング装置と呼ぶ。）の試作を行い、そしてビトリファイド CBN ホイールに適用した場合のその有効性について検討した。また、振動子に電わい振動子を用いた場合、振動子の駆動電圧がドレッシング抵抗による Piezo 効果によって変化するので、この電圧の変動量とホイール形状の相関関係を調べ、ホイール作業面のモニタリング法についての検討も行った。

2. 超音波ドレッシング装置

図 1 に試作した超音波ドレッシング装置の構造を示す。この装置の試作に当たって、超音波ドレッシング中に砥粒に大きなダメージを与えないように、砥粒径に対して振動子の振幅を小さくし、そして振動子の共振周波数を高くすることを考慮した。また振動子のホーンの長さは共振周波数に反比例するの

Fig. 1 Schematic illustration of the ultrasonic dressing equipment

* 原稿受付 平成 6 年 9 月 22 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 （株）ノリタケカンパニーリミテド（名古屋市西区則武新町 3-1-36）

† 正 会 員 ノリタケダイヤ（株）（福岡県浮羽郡田主丸町竹野 210）

†† 島田理化工業（株）（島田市阿知ヶ谷 25）

††† 昭和電工（株）（塩尻市宗賢 1）

Fig. 2 Illustration of dressing tools

Fig. 3 View of the developed dressing equipment installed on the grinding machine

で、共振周波数を高くすることにより、同時に装置の小型化も図れることになる。そこで、汎用の研削盤の主軸の精度および振動子の発熱などの機械構造上の制限を考慮し、本装置の共振周波数を 40 kHz（製作後、約 33 kHz）とし、また無負荷時の振動子の最大振幅を $2.5\ \mu\text{m}$ と決定した。なお振動子の最大振幅は、振動子の先端に取り付けられたドレッサの振幅を示す。また、超音波ドレッシング装置は、重量 1.4 kg、全長約 100 mm および外径 60 mm というコンパクトな寸法となった。そして超音波発振器は、100 V の交流電圧を受けて振動帰還発振によって振動子の駆動信号を発するものであり、20 W から 50 W の範囲で連続発振が可能となっている。

次に振動子は、ランジュバン型のもので、縦振動モードで駆動され、O リングで支持されている。振動子の先端のドレッサ装着部には、超音波ドレッシングの先端工具として図 2 に示す単石、角柱およびインブリダイヤモンドドレッサが取り付けられる。角柱ドレッサの先端には、断面 $0.8 \times 0.8\ \text{mm}$ の柱状合成単結晶ダイヤモンドが埋め込まれている。図 3 に超音波ドレッシング装置を円筒研削盤に実装し、ドレッシングを行っている様子を示す。

3. 超音波ドレッシング装置の有効性とドレッシング特性

3.1 実験方法

本装置のドレッシングにおける有効性を検討するため、砥石軸を油静圧軸受で支持した円筒研削盤を用いて、研削実験を行った。円筒研削盤の静剛性は、 $38.1\ \text{N}/\mu\text{m}$ で、主軸の固有振動数は 510 Hz である。実験には粒度 #80、コンセントレーション 200 のビトリファイド CBN ホイールを用い、トラバース方式でドレッシングを行った後、トラバース研削およびブランジ研削を行い、超音波の有無の影響と通常の単石ドレッシングとの比較を行っている。ドレッシングおよび研削条件を表 1

Table 1 Grinding condition

Grinding machine	Cylindrical grinding machine	
Wheel	CBN 80 L 200 V, dia. ϕ 300 mm	
Dressing condition		
Dressing method	Traverse	
Wheel speed	28.3 m/s	
Traverse speed	0.6 mm/s	
Depth of cut	2 μ m	
Cutting fluid	Soluble	
Grinding condition		
Grinding method	Traverse	Plunge
Wheel speed	28.3 m/s	28.3 m/s
Traverse speed	2.5 mm/s	—
Depth of cut	10 μ m	0.2 μ m/rev
Work speed	0.37 m/s	0.37-0.26 m/s
Workpiece	Chromium molybdenum steel (SCM 440)	
	HRC 55-50, dia. ϕ 70 mm	
Cutting fluid	Soluble

Fig. 4 Comparison of electric power at dressing

に示す。また、被研削材として、焼入れしたクロモリブデン鋼 (SCM 440, HRC 55~50) を用いている。ドレッシング特性の評価には、ドレッシング中の消費電力、法線抵抗およびホイール形状等を用いている。また研削特性の評価には、研削動力（消費電力）および表面粗さを用いている。そして消費電力の測定を微小電力計を使用して行い、ペン書きオシロにより記録した。この測定系の周波数特性が振動子の共振周波数に比べ低いので、測定値は、平均的な消費電力を示すことになる。また抵抗の測定には、圧電式工具動力計を使用した。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 超音波ドレッシング装置のドレッシング特性

図 4 に超音波ドレッシング装置を用いて超音波を付加および停止させてドレッシングを行った場合のドレッシングに要する平均消費電力を示す。この場合、ドレッサには、単石ドレッサ（先端の摩耗面積： $1.25\ \text{mm}^2$ ）を用いている。図から超音波を付加した場合のドレッシングに要する平均消費電力は、超音波を停止した場合に比べ約 1/2 に減少し、かつ安定していることがわかる。つまり、超音波を付加した方が、平均接線抵抗が、小さく安定していると言える。また、図 5 に角柱ドレッサを用いた場合のドレッシング中の法線抵抗を示す。図より法線抵抗は、超音波を付加した方が小さいことがわかる。したがって、超音波を付加することにより、平均ドレッシング抵抗が、小さくなるといえる。

図 6 に角柱ドレッサによるドレッシング後のホイールの断面形状の比較を示す。ホイール断面形状は、ドレッシング後、ブランジ研削によって、その形状を被研削材に転写し、表面粗さ計でそのうねりを測定して求めたものである。図より形状精度は超音波を付加した方が良好であることがわかる。このことは、上記のドレッシング抵抗が、超音波を付加することにより、低く安定したことと関係付けられる。また砥石軸および超

Fig. 5 Influence of ultrasonic vibration on normal dressing force

Fig. 6 Comparison of wheel shape after dressing (dressing tool: rectangular single-point diamond)

Fig. 7 Influence of ultrasonic vibration on dressing ratio

音波ドレッシング装置の固有振動数に比べ振動子の共振周波数が極めて高いことから判断して、限部らが指摘したような不感性振動切削機構が作用し⁵⁾、見かけ上の剛性が高くなるため、形状精度が向上したと考えられる。

図7にドレッシング時のドレス率に及ぼす超音波振動の影響を示す。図中のドレス率は、ドレッサの総設定切込み量100 μm (設定切込み量: 2 μm, 50回) でドレッシングを行った場合の単位設定切込み量当たりのホイール半径の摩耗量を示す。図より超音波を付加した場合のドレス率は、付加しなかった場合に比べ、同等以上に良いことがわかる。またドレッサの総設定切込み量は、ホイール半径の摩耗量にドレッサの摩耗量を加えたものにほぼ等しいと考えられるので、ドレッサの摩耗量が少なければ、ドレス率が高いことになる。したがって、超音波を付加した場合のドレッサの摩耗は、超音波を付加しない場合に比べ、同等もしくは少ないといえる。

次に角柱ダイヤモンドドレッサを用い、ドレッシングを行った直後のCBN砥粒の切れ刃の状態の走査型電子顕微鏡写真を図8に示す。超音波を付加した場合、CBN砥粒の先端が、微細に破碎され、平坦化されているのがわかる。またその平坦化された砥粒の先端には、微細な残留き裂が認められる。そして周囲に微細な破壊が生じている。一方超音波を付加しなかった場合は、CBN砥粒が大きな破碎を生じているのがわかる。

3.2.2 超音波ドレッシング後の研削特性

図9に先端工具として角柱ダイヤモンドドレッサを用い、ドレッシング後にトラバース研削を行った場合における超音波の

Ultrasonic vibration

Non-vibration

Fig. 8 SEM photographs of CBN abrasive grains after dressing

Fig. 9 Comparison of grinding electric power on traverse grinding

Fig. 10 Comparison of surface roughness on traverse grinding

付加が研削動力へ及ぼす影響を示す。図よりドレッシング中に超音波を付加することにより研削動力が低下していることがわかる。また図10は、図9の研削動力が安定したトラバース回数、20回目の表面粗さの比較である。図より超音波を付加することにより表面粗さが向上していることが認められる。同様に単石ドレッサを用いた場合(図11参照)やブランク研削を行った場合(図13参照)においても、超音波を付加することにより研削動力が低下し、かつ表面粗さが向上することが認められる。このことは、研削に伴って砥粒の先端が微細に破碎さ

Fig. 11 Influence of ultra-vibration on grinding electric power and surface roughness

Fig. 12 Distribution of abrasive protrusion height

れ、そして鋭利な切れ刃が形成されていることを示唆するものである。また、図8の砥粒切れ刃の写真で見られた残置き裂の影響を考慮すると、超音波を付加した場合には、研削時に自生発刃の効果が生じていると考えられる。

図11に先端の摩耗した単石のダイヤモンドドレッサを用いた場合の超音波の付加が研削動力と表面粗さ（中心線平均粗さRa）に及ぼす影響を示す。また、同図に鋭利な単石ダイヤモンドドレッサを用いた通常のドレッシングの場合の測定値を付記する。図から単石ドレッサの先端が多少摩耗している場合でも超音波ドレッシングを行うことにより、鋭利な単石ドレッサを用いた通常の単石ドレッシングで得られる表面粗さと同程度の面を得ることができ、かつ研削動力を低下させることができることがわかる。なお同実験で得られたホイールの砥粒切れ刃高さの分布を図12に示す。その測定には、電気マクロメータを用い、測定子の先端に円すい形のダイヤモンド（先端半径0.3mm）を取り付け、ホイール作業面の表面軌跡を測定し、その軌跡から切れ刃高さ分布を求めた。なお切れ刃高さの分布は、ホイール作業面上で最も突き出した砥粒の先端を基準（0点）としている。研削に関与する切れ刃はホイールの最外周部のわずかな所の切れ刃であることから判断して、図より超音波を付加した方が、研削に関与する切れ刃数が多いことがわかる。したがって、超音波を付加した方が砥粒の突出し量がそろっているといえる。このことは、超音波を付加することにより表面粗さが向上することと一致する。

次にホイールの目立て間寿命に及ぼす超音波ドレッシングの影響を検討するため、図13に先端工具として角柱ドレッサを用い、プランジ研削を行った場合における研削時間と表面粗さおよび消費電力の関係を示す。表面粗さに基づいて、目立て間寿命を吟味すると、超音波を付加した場合は超音波を付加しない場合と比較し、寿命が同等以上であることがわかる。

Fig. 13 Relationships between grinding time and grinding electric power, and surface roughness

Fig. 14 Example of a variance of the ultrasonic vibration electric power by forcing impulsive load

4. 超音波ドレッシング装置によるモニタリング

4.1 測定原理

超音波ドレッシング装置の振動子の先端に取り付けられたドレス工具に負荷が作用していない場合、振動子の先端の工具は、共振周波数 ω_0 で振動している。このとき内部の圧電素子に加えられている駆動電圧 V_0 は、 $V_0 = E \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$ である。次に先端の工具に負荷が作用した場合、衝突力に相当する過渡振動が振動子の内部に発生し、ひずみエネルギーとして内部の圧電素子に作用し、Piezo効果により、駆動電圧が変動する。一方、ドレス工具に作用する負荷の変動は、ホイール作業面の崩れや外周面の振れ等によってドレス工具の作用面が変動することにより生じる。したがって、振動子の駆動電圧の変動からホイール作業面の断面形状や外周の振れが検出できると考えられる。また研削盤および超音波ドレッシング装置の機械振動は、振動子の共振周波数に比べ極めて低いため、ほとんど駆動電圧に影響しないと判断される。

4.2 測定方法

図14に振動子の作動中に衝撃荷重を加えたときの駆動電圧の変動波形を示す。今回はモニタリングの検出量として、振動子の衝突によって生じた過渡電圧ではなく、図中に示す駆動電源の1サイクルの電圧のピーク値（以下ピーク電圧と呼ぶ。）の変動量を用いている。ピーク電圧と衝撃荷重の関係は、実験により比例関係にあることが確認されている。しかしながら、ピーク電圧とホイール作業面形状の関係は明らかでないので、実験により両者の関係を比較検討し、モニタリングの検出量としての有効性を吟味している。

図15はホイール形状のモニタリング装置の概要を示す。本装置を用いて、超音波発振器からの駆動電圧を約1/100に減衰し、ピークホールド回路により1サイクルのピーク電圧を検出

Fig. 15 Schematic illustration of the monitoring system

Fig. 16 Example of a monitored wheel shape

し、そして、デジタルオシロスコープでモニタリングしている。

4.3 測定結果

図16は、ビトリファイド CBN ホイールのドレッシング中のホイール作業面の断面形状とピーク電圧の変化を示したものである。この場合、ホイールの断面形状を被研削材をわずかにプランジ研削した後、表面粗さ計を用いて測定した。図よりホイール断面形状とピーク電圧の変動が相似関係にあり、ホイール作業面の断面形状のモニタリングができていことがわかる。なお、この場合のピーク電圧のピークホールドは、長いサンプリング間隔で測定されているので、サンプリング中、最大の高さのホイールの砥粒切れ刃が抽出されたことになる。また図17にドレッシング回数に伴って変化するピーク電圧の様子を示す。そして図18は、ビトリファイドの CBN ホイールを $8\mu\text{m}$ 偏心させ、ツルイーグを行った時の修正前と修正後のピーク電圧の変動を比較したものである。図よりホイールの偏心の様子がモニタリングされていることがわかる。

Fig. 17 Example of a monitored wheel shape in dressing

Fig. 18 Example of a detection of the wheel eccentricity in truing

5. ま と め

5.1 超音波ドレッシング装置の有効性

超音波振動子に電わい振動子を適用することにより軽量小型化を図った超音波ドレッシング装置を試作し、ビトリファイド CBN ホイールに適用した場合、次の有効性を見出した。

- (1) 研削動力を減少させ、かつ表面粗さを向上できること。
- (2) 表面粗さを評価基準とした超音波ドレッシングによるホイールの目立て間寿命は、超音波を付加しない場合に比べて同等以上である。

しかし本報告では、紙面の関係上、詳細なドレッシングおよび研削特性については述べていない。そのため、これらの点については、次報にて評することにする。

5.2 超音波ドレッシング装置によるモニタリング

振動子の駆動電源のピーク電圧の変動を抽出することにより、ツルイーグ時の偏心量とホイール作業面の断面形状をモニタリングできることがわかった。しかし、工具形状やツルイーグおよびドレッシング条件によって、ピーク電圧の出力が変動する現象が認められるので、今後この点については、詳細に検討することにする。

参 考 文 献

- 1) 久保田 護, 田村祐二, 島村則安: ダイヤモンド工具による超音波加工, 精密機械, 42, 3 (1974) 197.
- 2) P. Legge: Ultrasonic Drilling of Ceramics, Ind. Dia. Rev., 24, 278, (1964) 20.
- 3) 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, 51, 1 (1986) 107.
- 4) 原田政志ほか: 超音波および低周波振動による砥石のドレッシングについて, 精密機械, 34, 3 (1968) 166.
- 5) 隈部淳一郎, 谷口 修: 振動切削の動的解析 (第2報), 精密機械, 36, 8 (1970) 532.