超音波平面研削用カップ砥石の開発*

—CAE システムによる最適設計—

清水 弘 幸** 竹 内 芳 美***

Development of a Cupped Diamond Wheel for Ultrasonic Surface Grinding
—CAE Approach to the Optimal Design of the Wheel—

Hiroyuki SHIMIZU and Yoshimi TAKEUCHI

The study deals with the development of a new cupped diamond wheel used in ultrasonic surface grinding of brittle materials such as fine ceramics. The wheel has a larger diameter and higher stiffness than the usual wheel, therefore it allows the user to grind brittle materials efficiently and precisely. By using the CAE system which has been developed to design an optimal high-intensity ultrasonic system, the wheel is designed optimally so as to resonate in half-wave at the resonance frequency of an employed ultrasonic vibrator. Then, the wheel is produced on the basis of the designed values, its vibrational properties are measured, and the experiments using it in ultrasonic surface grinding are carried out. As a result, the reasonabilities of the designed values are proved, and the potentiality of the wheel is confirmed.

Key words: cupped diamond wheel, ultrasonic surface grinding, brittle material, CAE, optimal design

1. ま え が き

硬ぜい材であるセラミックスの加工は、一般にダイヤモンド砥石を用いた研削により行われている。このとき超音波振動を与える超音波研削を行うと、研削特性を良好にし高効率で高精度な加工を可能とすることが報告されている^{1)~5)}。これらの報告中、超音波平面研削加工に関する研究は、筆者らの知る限り、植松らの報告⁵⁾しか見当たらない。この報告で使用しているダイヤモンド砥石製の平面研削用カップ砥石は、通常の研削（超音波振動を用いない研削）で使用するカップ砥石に比べて、かなり直径の小さい小型なものである。小型なカップ砥石であると、それを超音波振動系に付加された集中質量とみなすことができ、超音波振動系を棒の縦振動方程式に基づいて比較的容易に実現することができる。しかし、セラミックスの超音波平面研削をより高効率に行おうとするときには、通常の研削で用いられている直径の大きい大型なカップ砥石を使用する必要がある。このような大型な通常研削用カップ砥石になると、それ自身を集中質量と見なすこ

とができず、棒の縦振動方程式に基づく超音波振動系の実現は不可能となる。そこで、セラミックスの超音波平面研削加工をより高効率に行うためには、通常研削用のカップ砥石と同等の直径を有し、超音波研削に適した新しい形状と構造のカップ砥石の実現が望まれる。このような新しいカップ砥石は、その形状の複雑さから棒の縦振動方程式では実現できず、有限要素法によってのみ実現されることができる。

本研究は、セラミックスの超音波平面研削加工をより高効率化できる新しい超音波平面研削用カップ砥石を開発することを目的とし、まず、それ自身が半波長共振する超音波振動体であり、かつ剛性が高く直径の大きい新しいカップ砥石の構造と形状を考案する。そして、既に開発した有限要素法に基づく強力超音波振動系の最適設計用 CAE システム⁶⁾を用いて、考案したカップ砥石の最適設計を行う。そして、実際にそのカップ砥石を用いた超音波振動系を実現し、その振動特性を測定する。それから、実現した超音波振動系を用いて、セラミックスの平面研削加工実験を行い、考案したカップ砥石の可能性を検討していく。

2. 超音波平面研削用カップ砥石の設計

2.1 形状寸法

セラミックスの平面を超音波振動を与えないで正面

* 原稿受付 平成4年4月13日

** 正 会 員 帝京技術科学大学情報学部（市原市潤井戸大谷 2289）

*** 正 会 員 電気通信大学電気通信学部（調布市調布ヶ丘 1-5-1）

(a) A usual type

(b) A new type

Fig. 1 Shape and structure of two cupped diamond wheels

Fig. 2 Geometry of a new cupped diamond wheel for ultrasonic grinding

研削加工する従来の通常研削用カップ砥石の断面形状と構造を図1(a)に示す。このカップ砥石は、リング状のダイヤモンド砥石とそれを取り付ける円筒状のカップ部から構成されており、通常、50~200 mmの外径のものが使用されている。一方、これまでの超音波平面研削の研究⁵⁾中で使用しているカップ砥石の外径は30 mmと小さく、通常の外径のカップ砥石を使用するとなると、まえがきで述べたようにカップ砥石を集中質量とみなすことができず超音波振動系を実現することができなくなる。そこで、図1(b)に示すような形状と構造のカップ砥石を考案した。このカップ砥石は、リング状のダイヤモンド砥石をろう付け結合する半球殻状のカップ部と、超音波振動子とねじ結合するボス部とにより構成され、全体で半波長共振し、軸長が短くて剛性の高いものである。以後、この考案したカップ砥石を超音波平面研削用カップ砥石と呼ぶことにする。その形状寸法を図2に示すが、図中の●印は形状の特徴を表す点である。本研究では、最初の試みとして、外径70 mm、内径65.4 mm、幅5 mmの中型のリング状ダイヤモンド砥石を使用することにする。使用する砥石の形状が決まるとカップ部の

外径が決まる。また、ボス部の形状寸法を、用いる超音波振動子（共振振動数 $f_0=16.36$ kHz）とのねじ結合を考慮して図2のように決める。結局、超音波平面研削用カップ砥石の形状を決定するパラメータは、カップ部の内径 r_s と、ボス部延長の l の2変数となる。次に、この2つの形状パラメータを変化して、望ましい超音波平面研削用カップ砥石を設計していく。

2.2 CAEシステムによる最適設計⁶⁾

まず最初に、設計に使用するCAEシステムの設計概念を簡単に説明する。いま、形状寸法などの設計諸元よりなる集合を D 、固有振動数などの属性諸元よりなる集合を P とすると、 P の各要素 P_i は、

$$P_i = f_{ci}(D) \quad (1)$$

と求められる。ここで、記号 f_c は集合 D の各要素すべてを引き数とする有限要素法による強力超音波振動系の振動解析専用プログラムでの演算を意味する⁷⁾。

いま、制約仕様と目標仕様が与えられたときの設計を考える。制約仕様は、設計諸元と属性諸元とへの制約があるので、制約諸元からなる集合を $C=[C_1, C_2]$ とすると、

$$C_1 \subseteq D, \quad C_2 \subseteq P \quad (2)$$

なる関係が成立し、制約仕様を

$$C_m \leq \bar{C}_m \quad (m=1, 2) \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、集合 $\bar{C}_m$ は、集合 C_m の各要素に対して制約を定める上限値よりなる集合である。式(3)を満たす集合 C_m の領域を、一般に制約領域と呼んでいる。

一方、目標仕様については、本研究で扱う強力超音波振動系の設計に対しては、振動系の性能を設計目標にする場合が圧倒的に多い。この振動系の性能を表す諸元は、属性諸元に含まれるので目標仕様の定式化は次のように表現できる。すなわち、目標諸元よりなる集合を A とすると、

$$A \subseteq P \quad (4)$$

なる関係が成立し、集合 A の各要素を A_i とすると、目標仕様を

$$f_{ci}(D_0) = \text{Min}[A_i] \quad (5)$$

と表現できる。この式(5)は、式(1)より、 $D=D_0$ のとき A_i を最小（以下で、最小を最大と考えても同じである）にでき、目標値を A_i の最小においたとき D_0 が最適設計値であることを意味する。

本研究で用いる既に開発したCAEシステムの基本的概念は、式(3)の制約条件下で式(5)の方程式を満たす解 D_0 を、有限要素法専用プログラムの演算結果から、一斉探索方式に基づく最適化プログラムにより、自動的に選択することにある。

Fig. 3 Flowchart of a CAE system to design an optimal high-intensity ultrasonic system

なお、このような設計概念に基づいて既に開発した強力超音波振動系専用の最適設計 CAE システムのシステム構成図を図 3 に示すが、その詳細については、既報の文献⁶⁾を参照して頂きたい。

さて、本研究では設計目標を次のように決定した：

(1) 超音波平面研削用カップ砥石振動体の第一次共振振動数が使用する超音波振動子の 16.36 kHz 近傍にあること、(2) 超音波の衝撃破砕を原理とする高能率除去加工を使用するため、砥石先端の振動変位成分が軸方向 (z 方向) 成分になること、である。

このとき、各諸元集合を次のように定義した。

$$D = \{r_s, l\} \quad (6)$$

$$P = \{f_1, V_z, V_r\} \quad (7)$$

ここで、 r_s, l ：各々図 2 に示す設計変数、 f_1 ：第一次モードの共振振動数、 V_z, V_r ：カップ外周での基準化

された z および r 方向変位成分である。また、制約諸元集合 C を、

$$C = \{r, r_s, l, \text{材質}, f_1, V_z, V_r\} \quad (8)$$

と定義する。ここで、 r はカップ部の外形である。実際の上限值を定めた式 (3) に相当する制約条件式は、

$$\begin{aligned} C_1 &= \{r = 35 \text{ mm}, 20 \text{ mm} < r_s < 35 \text{ mm}, \\ &\quad 0 \text{ mm} < l < 30 \text{ mm}, \text{材質} = \text{鋼}\}, \\ C_2 &= \{15.86 \text{ kHz} < f_1 < 16.86 \text{ kHz}, \\ &\quad 0.5 < V_z, V_r < 0.2\} \end{aligned} \quad (9)$$

である。さらに、目標諸元集合 A を、

$$A = \{|f_1 - 16.36 \text{ kHz}|, |V_r|\} \quad (10)$$

と定義する。そして、実際にこの CAE システム中のジェネラティブアプローチを働かせ、

$$f_c(D_0) = \text{Min}[|f_1 - 16.36 \text{ kHz}|, |V_r|] \quad (11)$$

を満たす最適設計値 D_0 を求めた。その結果として、式 (11) を満足する最適設計値として $r_s = 32 \text{ mm}$, $l = 18 \text{ mm}$ なる値を自動的に得た。

2.3 形状パラメータの性質

使用した CAE システムは、通常使用時、最適設計結果のみを出力するが、必要に応じて途中の設計経過もみることができる。そこで、形状パラメータ r_s と l が、共振振動数及び砥石の加工面の振動変位成分 V_z, V_r にどのような影響を与えているのかを調べてみる。まず、形状パラメータ $l = 35 - r_s (\text{mm})$ のとき、すなわちカップ部の内面が図 2 の点 R, Q, H を通る球面のとき、形状パラメータ r_s を変化させて得られた結果を図 4 (a) に示す。次に、形状パラメータ $r_s = 32 \text{ mm}$ と一定にし、形状パラメータ l を変化させて得ら

Fig. 4 Effects of two geometrical parameters r_s and l on vibrational properties of a new cupped diamond wheel

Fig. 5 Mode shape in half-wave resonance of a new cupped diamond wheel designed optimally

れた結果を図4(b)に示す。これらの図中の2つの振動変位成分は、超音波平面研削用カップ砥石のボス部中心(図2の点O)の z 方向振動変位成分で基準化した値である。図4(a)より形状パラメータ r_s が増加すると、共振振動数と r 方向変位成分が大きく減少しているが、 z 方向振動変位成分はそれ程でもないことがわかる。2.2項で述べたように、最適値として $r_s=32$ mmを決定しているが、図4(a)の $r_s=32$ mmをみると、 r 方向振動変位成分が極めて小さく、 z 方向振動変位成分のみが存在することがわかる。これは、2.2項で述べた設計目標の事項(2)を満足する。しかし、共振振動数は18kHz付近にあり、事項(1)を満足しない。

次に、図4(b)をみると、形状パラメータ l の増加に対して、共振振動数は減少し、 z 方向振動変位は増加するが、 r 方向振動変位は変化せず極めて小さい値をとることがわかる。2.2項で述べた最適値 $l=18$ mmをみると、共振振動数は16.36kHzとなり、また、 z 方向振動変位成分のみに近い状態となり、設計目標を達成していることがわかる。図4(a),(b)より、形状パラメータ r_s は主に振動変位成分の設計に、形状パラメータ l は主に共振振動数の調整に役立っていることがわかる。

2.4 設計された振動モードの形

2.2項で最適設計された超音波平面研削用カップ砥石の半波長共振での振動モードの形を図5に波線で示す。実線は有限要素分割モデルを表す。同図をみると、砥石先端の加工面は z 方向にのみ変位し r 方向に変位しないこと、及びその変位方向はボス部の結合端面の変位方向と反対(180°の位相差)であり振動節がボス部とカップ部の結合位置(図2中の線分SQ)よりややカップ部寄りの位置に存在し全体で半波長共振を起こしていることがわかる。また、形状パ

(a) A new type by the CAE approach

(b) A bar type by the conventional one-dimensional approach

Fig. 6 Geometrical comparison between two types of diamond wheels for ultrasonic grinding designed by means of two approaches

ラメータ l を含むボス部は剛体運動をなし、形状パラメータ l の変化が付加質量として超音波平面研削用カップ砥石の共振振動数を調整している(図4(b)に示す)ことがわかる。このように、得られた振動モードの形からも、最適設計値が妥当な値であることがわかる。

2.5 縦振動方程式による設計結果との比較

まえがきでも述べたように、従来の通常研削用カップ砥石を用いる超音波振動系は、棒の縦振動方程式に基づいて設計されることができない。しかし、リング状のダイヤモンド砥石を軸方向に均一に振動させるだけなら、超音波振動系を棒の縦振動方程式を用いることにより設計できる。ただし、砥石の外形が大きくなると、すなわち棒が太くなると縦方向(z 方向)振動成分のほかに径方向(r 方向)振動成分が重畳して、縦振動方程式より求めた共振振動数の値が真の値より低くなる。ちなみに、この方程式が成立する棒の形状範囲を述べると、棒の直径を d 、波長を λ とすると、 $d/\lambda < 1/4$ である⁸⁾。

さて、CAEシステムにより最適設計された超音波平面研削用カップ砥石の形状を図6(a)に、また、棒の縦振動方程式により求めた半波長共振の棒状のカップ砥石を図6(b)に示す。同一の共振振動数16.36kHzに対して、超音波平面研削用カップ砥石の軸長は棒状のものの約1/3に短くなることがわかる。軸長が長いと、研削加工時の横荷重に対する剛性が低くな

Fig. 7 High-intensity ultrasonic system produced for surface grinding

り、砥石の逃げを生じたり早い横送りをかけることができなくなる。よって、棒の縦振動方程式により設計した棒状のカップ砥石は平面研削に使用できないことがわかる。また、逆に、超音波平面研削用カップ砥石は、軸長が短く、横荷重及び偏心縦荷重に対して剛性が高く、平面研削に適することがわかる。

3. 超音波平面研削用カップ砥石の振動測定

前節でCAEシステムにより設計された最適設計値が妥当な値であることを、計算値に基づいて説明した。本節では、更に実験によりその妥当性を調べる。

3.1 超音波振動系の試作

得られた最適設計値に基づいて、超音波平面研削用カップ砥石を含む超音波振動系を図7に示すように試作した。超音波平面研削用カップ砥石に結合する超音波振動子は、ボルト締めランジュバン型振動子とコンカル形固体ホーンを一体化したもので、その共振振動数は16.36 kHzである。この試作した振動系の共振振動数の実測値は16.07 kHzであり、設計値とよく一致している。なお、同図にみえる2つのフランジは支持用のものである。

3.2 ホログラフィ技術による振動測定

超音波平面研削用カップ砥石に近い方のフランジ支持体を支持し、半波長共振を生じさせたときの超音波平面研削用カップ砥石の振動モードの形をホログラフィ技術の実時間ストロボ法により撮影した。図8は、入力パワーが0.5 Wのとき撮影されたホログラムの再生像を示す。写真の左側は超音波平面研削用カップ砥石の側面であり、主として r 方向振動成分が撮影されている。また、写真の右側はこの振動体の正面であり、主として x 方向振動変位成分が撮影されている。同図右側にみえるきれいな同心円状のしま

Fig. 8 Hologram reconstruction of a new cupped diamond wheel in half-wave resonance

Fig. 9 View of an experimental apparatus for ultrasonic surface grinding

模様は、試作した超音波平面研削用カップ砥石が設計値通りの軸対称共振モードで共振していることを示す。このことは、CAEシステムで有限要素として軸対称3角リング要素を使用したことが正しいことを実証する。

4. 超音波平面研削加工実験

本節では、実際に試作した超音波平面研削用カップ砥石を用いてセラミックスの平面を研削加工する超音波平面研削加工実験を行う。

4.1 実験装置と方法

NC旋盤を使用した実験装置の写真を図9に示す。主軸にセラミックス材を固定し、刃物台に試作した超音波振動系を取り付けて、セラミックスを回転させながら超音波平面研削用カップ砥石を横送りして超音波正面研削加工を行う。実験は、切込み深さを変化したときの表面粗さの変化を調べる。このときの実験条件を表1に示す。被加工物としてのセラミックスにはア

Table 1 Ultrasonic grinding conditions

Workpiece	Alumina A 480 (Al_2O_3 : 99.8%)
Wheel	An iron bonded diamond wheel Grain size: # 100/120, concentration: 100
Ultrasonic system	A cupped diamond wheel Resonance frequency: 16.11 kHz Input power: 20 W Amplitude (no-load): 10 μm
Grinding condition	Peripheral speed: 1 600-2 100 mm/s Rate of feed: 50 $\mu\text{m}/\text{rev}$ Depth of cut: 2-50 μm
Cutting fluid	Wet cutting (solution type)

Fig. 10 Relationship between depth of cut and surface roughness

ルミナ系 A 480 材 (京セラ社製) を, また, 砥石には超音波振動をよく伝達する鑄鉄ファイバボンドダイヤモンド砥石を使用する。

4.2 実験結果

セラミックス加工面の表面粗さ $R_{\max}$ を, フォームタリサーフ (ランクテラホブソン社製) を用いて測定した。多くの測定結果から, 切込み深さに対する表面粗さ $R_{\max}$ の変化を求めたものを図 10 に示す。この図より切込み深さが増加しても表面粗さ $R_{\max}$ はほとんど変化しないことがわかる。この実験中に試作したカップ砥石には異常が生じなく, このカップ砥石の可能性を確認することができた。今後, 加工能率や目立て寿命などの必要な事項をさらに検討して行く予定である。

5. む す び

以上, 本研究では, ダイヤモンド砥石によるセラミックスの超音波平面研削加工に用いるカップ砥石として超音波平面研削用カップ砥石を提案し, その設計を最適設計用 CAE システムにより行った。そして, 得られた設計値に基づきこのカップ砥石を試作し, 振動測定実験を行うとともに平面研削加工実験を行った。その結果, 次のことが明らかになった。

- (1) CAE システムにより望まれる超音波平面研削用カップ砥石を最適設計することができた。
- (2) 振動特性の設計値と実測値はよく一致し, 設計値の妥当性を実験的に証明することができた。
- (3) 超音波平面研削用カップ砥石の可能性を確認することができた。

今後, 開発した超音波平面研削用カップ砥石を用いたより詳細な平面研削加工実験を行うとともに, 同心円状溝研削加工への応用を研究して行く予定である。

終わりに, 本研究を遂行するに当たり多大なご協力を頂いた, (株)超音波工業の関戸芳文氏, 武内彰氏, (株)ニコンの木村景一氏 (現(株)ソニー), 川口健一氏, 及び(株)富士写真光機の宇田川哲夫氏に対して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 島川正憲: 超音波工学, 工業調査会, (1975) 9 章。
- 2) 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 (1976) 197。
- 3) 海野邦昭, 西村一仁, 皆川 明, 富森 敏: 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。
- 4) 隈部淳一郎, 神 雅彦, 西尾彰文: 重畳振動切削によるセラミックスの精密穴加工, 精密工学会誌, **55**, 2 (1989) 366。
- 5) 植松哲太郎ほか: マシニングセンタによる硬脆材料の研削加工, 昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1988) 509。
- 6) 清水弘幸, 佐田登志夫: 強力超音波振動系専用の最適設計システムの開発, 精密工学会誌, **54**, 5 (1988) 983。
- 7) 沖野教郎: 自動設計の方法論, 養賢堂, (1982) 第 1 章。
- 8) 清水弘幸, 佐田登志夫: 強力超音波振動系の振動解析法およびその検証, 精密工学会誌, **54**, 1 (1988) 177。