

論文 Article

両頭平面研削盤における切り込み量の計算法

原稿受付 2013 年 3 月 5 日

ものづくり大学紀要 第 4 号 (2013) 4~9

平岡尚文^{*1}, 高柳映介^{*2}, 高橋敏夫^{*3}^{*1}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科^{*2}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科 学生^{*3}ものづくり大学 技能工芸学部 製造学科 非常勤講師

Calculation Method for Predicting Grinding Depth in Double Disc Grinding

Naofumi HIRAOKA^{*1}, Eisuke TAKAYANAGI^{*2} and Toshio TAKAHASHI^{*3}^{*1} Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Student, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*3} Part-time Lecturer, Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists

Abstract

A method to calculate grinding wheel surface shape of double disc grinder and grinding depth was described. Coordinate transformation using rotation and translation matrices was applied to calculate the tilted and dressed grinding wheel surface and processed workpiece shape. Simple actual procedure of calculation using a spreadsheet program was shown. Calculated contour map of the grinding wheel surface could indicate and explain the grinding process.

Key Words : Grinding wheel, tilting, dressing, coordinate transformation, simulation

1. はじめに

両頭平面研削盤は、対向して回転するディスク型の砥石の間に加工物を連続通過させることにより、加工物の両端部平行面を同時に高精度、高能率に平面研削する工作機械である¹⁾。平行度、平坦度、幅寸法等が μm オーダの精度で加工可能であり、ベアリングの内、外輪の両平面(加工の基準面)、ブロックゲージ、ピストンリング等、多くの製品の研削加工に使用されている。

砥石は、平行に対向配置された位置から3次元的に微小に傾斜させて使用される(スルーフィード方式)。これによって両砥石間の距離に微小な大小が付き、加工物の砥石間への進入・加工・脱出がスムーズになされるようになる。現状、砥石傾斜量と加工量の関係は定量的に予測が困難であ

り、熟練作業者が経験と勘によって傾斜量の標準値を決めている。このため、加工物の変更のたびに調整に時間がかかり、また最適条件で運用しているとは必ずしもいえない状況にある。

シリコンウェーハ等の研削においては、インフイード方式と呼ばれる、通常砥石に傾斜をつけない研削法が用いられることが多いようである。このような場合に研削量等を予測する試みは比較的行われている^{2~7)}が、スルーフィード方式における研削量予測に関する報告は、筆者らの知る範囲では本報でもその手法を参照する1件⁸⁾があるのみである。

本研究はこの状況を鑑み、砥石に任意の傾斜を与えたときに予測される砥石間空間形状と切り込み量を求める簡便な計算法を示すものである。

2. 両頭平面研削盤概要

図1に両頭平面研削盤の外観を示す⁹⁾。横軸型と呼ばれる、砥石回転軸が水平に配置された形式の例である。その機構の模式図を図2に示す。初期には平行に配置される二枚の砥石は、それぞれ図3に示す砥石対向面表面に固定した座標系において、 x 、 y 軸まわりに回転可能な機構となっている。

加工前には砥石を傾斜させた後、ドレッシングを行う。それに用いられるドレッシング装置の模式図を図4に示す。砥石面外に回転中心を持つアームの先端に取り付けられたドレッサが、傾斜前の砥石表面 (x - y 平面) に平行にスイングされ、砥石表面を削る。砥石は2軸まわりに回転され、ドレッサのスイング曲線に対して3次元的に傾斜しているため、ドレッシング後の砥石形状は予測の難しい独特な曲面となる。

加工物の砥石間空間の通過の様子を図5に模式的に示す。加工物の通過方法は直線的に送られる方法もあるが、ここでは比較的良好に用いられるロータリーキャリア式と呼ばれる、キャリア円板上に円周方向に加工物を並べて固定し、円板回転によって加工物を送りこむ方法を示してある。

砥石間の空間は砥石の傾斜とドレッシングによる表面の曲面化により、微小な高低差を持つものとなる。適切にこの空間を設定し、加工物を通過させると、高→低→高の空間を連続的に通過し、図5に示したように「荒研削→仕上げ研削→スパークアウト（加工物の弾性回復分の研削過程）」が連続的に行われ、精度、効率の高い加工が行える。しかしながら、このときの加工量をあらかじめ予測するのは非常に複雑な作業となり、困難と考えられていた。

3. 計算方法

3.1 計算方法の概念

砥石研削面上に固定した座標系（図3参照）に回転の座標変換を施すことにより、傾斜後の砥石間距離を変換後の平面の z 座標として読み取る計算方法が文献8)に示されている。本計算はこれを

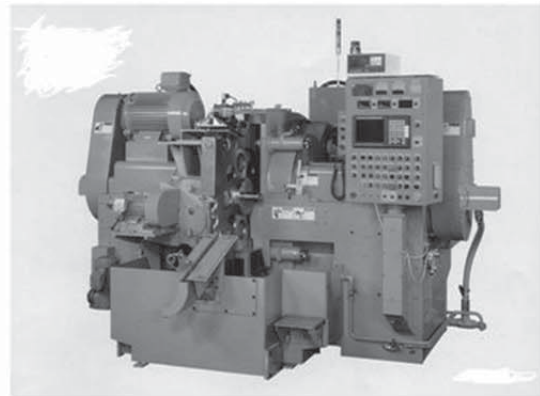


Fig.1 Photo of double-disc-grinder⁹⁾

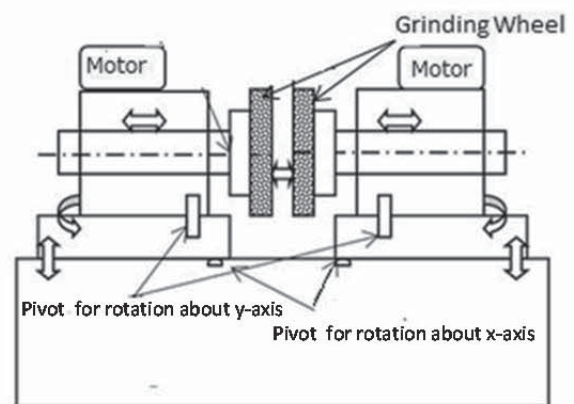


Fig.2 Schematic of double-disc-grinder

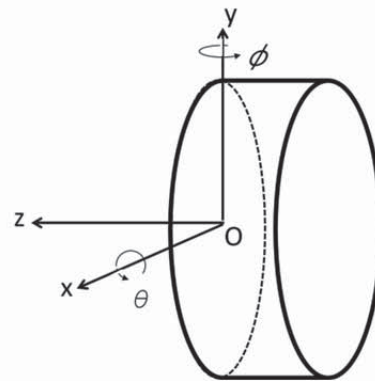


Fig.3 Coordinate system on grinding-wheel

基本とし、砥石の平行移動と、実際の加工量に大きく影響するドレッシングによる砥石の形状変化を考慮し、加工物の研削面形状を3次元的に求められるものとする。

研削盤を平行なまま用いるインフィード方式や、傾斜量が非常に小さい場合は、加工により生じる砥石の摩耗による変形が加工量や加工能率に大きく影響する^{3,8)}が、本計算では研削盤を調整する際

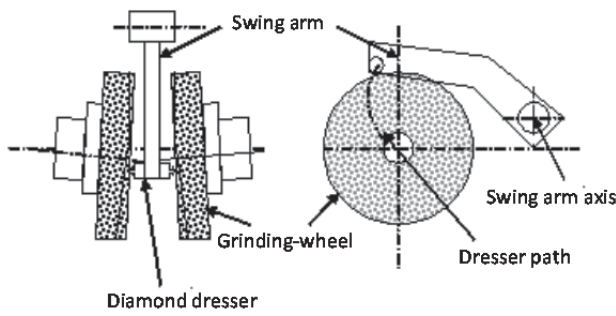


Fig. 4 Schematic of dressing unit

の指針となる砥石間空間形状を求めることを目的とし、砥石、ドレッサ、加工物間の幾何学的な干渉量のみを研削量として計算する。それらの変形や摩耗は考えない。

例として図3の x 軸まわりにのみ砥石を回転させた場合について説明する。対面する2個の砥石の形状は同じ方法で計算でき、それを用いて両面間の距離も容易に求めることができるので、2個の砥石のうち、片方についてのみ示す。

図6は回転後の砥石を x 軸の負方向に向かって見た図である。 x 軸まわりに砥石を $-\theta$ 回転したとき、砥石表面に固定した y, z 軸は y', z' 軸に移動する(x' 軸は x 軸と一致)。この時ドレッサの軌跡(元の $x-y$ 平面に平行)を $x'-y'-z'$ 座標系で表せば、ドレッサ軌跡上の点の座標 (x', y', z') における $z' (< 0)$ そのものの絶対値が、砥石上の座標 $(x', y', 0)$ における砥石の削り込み深さ d となる。

同様に、 x 軸まわりに続けて y' 軸まわりに砥石を回転したときには、 $x'-y'-z'$ 座標系を y' 軸まわり回転した $x''-y''-z''$ 座標系における砥石軌跡上の点の z'' 座標値の絶対値が削り込み深さ d となる。

3.2 具体的計算方法

砥石を図3における x 軸まわりに角度 θ 回転させた後、回転後の y' 軸まわりに角度 ϕ 回転させる場合を考える。実際の研削盤では回転の中心が砥石研削面中央にないことが多いので(図2参照)、座標系原点は回転と同時に平行移動する。 x 軸まわり回転時の原点 O の新しい原点 O' への y 方向、 z 方向移動量をそれぞれ s, t とし、 y' 軸まわりに回転時の原点 O' の x', z' 方向への移動量をそれぞれ u, v とする。これらの平行移動量は実物の研削盤の構造から幾何学的に求まる。

図3の (x, y, z) 座標は、回転後以下のように

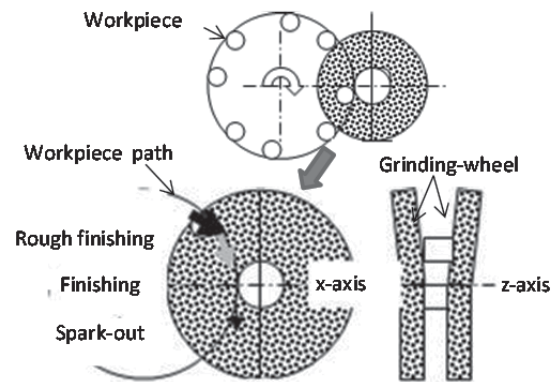
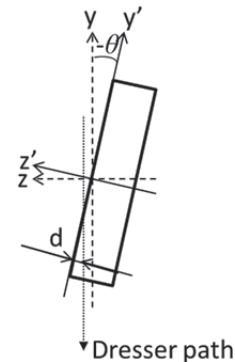


Fig. 5 Schematic of grinding process

Fig. 6 Relation between the dressing depth and $y'-z'$ coordinates

(x', y', z') 座標に変換される。

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = B(\phi) \left\{ A(\theta) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ s \\ t \end{pmatrix} \right\} - \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ v \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$A(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$B(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$A(\theta), B(\phi)$ はそれぞれ x 軸、 y' 軸まわりの回転(逆)行列である。

これを用いてドレッシング後の砥石形状を求める。ドレッサのスイング軌跡を

$$\begin{aligned} (x-a)^2 + (y-b)^2 &= r^2 \\ z &= c \end{aligned} \quad (2)$$

a, b, c : ドレッサスイングアーム回転中心の x, y, z 座標

r : スウィングアーム回転中心からドレッサ先端までの距離

とおく. これを式(1)によって変換し, $x''-y''-z''$ 座標系で表したときの $z'' (<0)$ が研削盤の削り込み深さである. この様子を図7に示す.

砥石は回転しているのに, 砥石上の半径 $R = \sqrt{x''^2 + y''^2}$ のすべての位置での削り込み深さは, 砥石にドレッサが食い込む点 (x'', y'', z'') における削り込み深さ $d = |z''|$ となる. ドレッサの食い込み点が異なる2点で同じ R となる場合は, 深い方の d が削り込み深さとなる. このようにして砥石の表面形状が定まる.

次に加工物の研削深さを求める. 加工物はドレッサ同様 $x-y$ 平面内をスイングして砥石間に侵入してくる. この様子を図8に示す. 円筒状の加工物の端面を研削する例である. 円筒加工物端面上のある点 M がスイングによって座標 (x_M, y_M, z_M) にあるときの点 M の研削深さ D は, z_M と, 先に求めた $x''-y''-z''$ 座標系の砥石表面形状を逆変換して $x-y-z$ 座標系で表したときの砥石上の点 (x_M, y_M, z_g) における z_g との差で求まる ($D = z_M - z_g < 0$).

点 M はスイングによって砥石内部を弧を描いて通り抜ける. この軌跡に沿って D を計算し, もっとも深い D が点 M の研削深さとなる. 加工物がアームに固定されている場合は, 図8に等高線として示すように, 加工物端面において点 M と同じスイング半径上にある点が, すべて同じ研削深さ D を持つことになる. したがって, 計算点 M をスイング半径方向に移動して計算することにより, 加工物端面全体の研削後の形状を計算することができる. 加工物が砥石との作用によって自転できるようにアーム先端に取り付けてある場合は, 加工物端面全体がほぼ計算上のもっとも深い研削深さに研削されると考えられる.

4. 計算例

本章では表計算ソフト「Excel」を用いて, 離散的な座標値を使用し, 簡便な計算を行った例を示す.

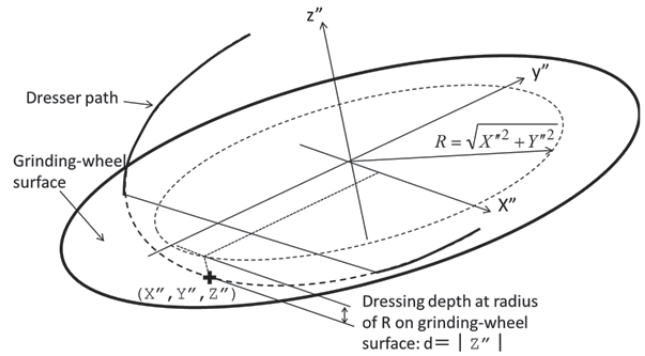


Fig.7 Relation between the dressing depth and x'', y'', z'' coordinates

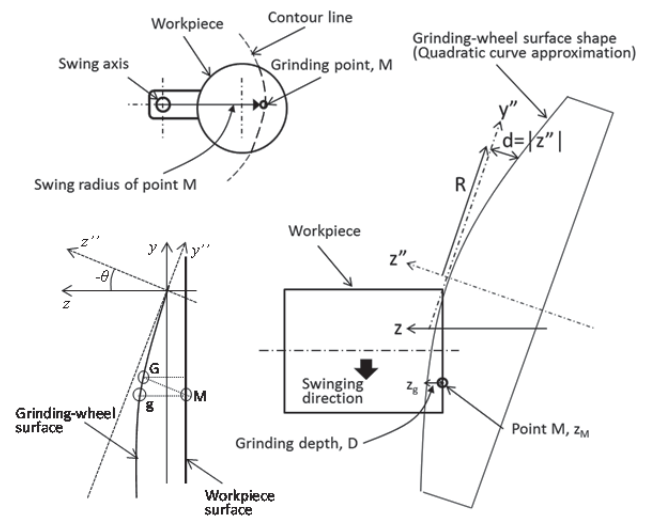


Fig.8 Relation between the tilted dressed-grinding-wheel and workpiece surface

まずドレッシング後の砥石形状を計算する. ドレッサのスイング軌跡上にある点を式(2)によって離散的に求める. 具体的には必要な精度に応じて点の数を決め, その各々の x 座標を決めて式(2)によって y 座標を計算する. こうして定めた x, y, z 座標数値を式(1)に代入して x'', y'', z'' の数値を求める.

これによって砥石形状は, $x''-y''-z''$ 座標系において半径 $R = \sqrt{x''^2 + y''^2}$ の位置で元の表面より $|z''|$ だけ低い形状を持つ円盤として定まる. ただし, 半径 R の位置は離散的にしか求められていないため, 後の計算のために砥石形状を半径 R の関数として近似する. 今回の計算条件では Excel に付属の近似関数のうち, 2 次関数で近似することで $\pm 3\%$ 以下の誤差に収まった. この近似式を,

$$z_g'' = eR^2 + fR + g \quad (3)$$

e, f, g : 定数

とおく．ここに z_g'' は，半径 R における砥石表面の z' 座標である．

次に加工物の研削深さを計算する．正確には前述のように砥石表面を x - y - z 座標系で表し，加工物の加工点 M の座標 (x_M, y_M, z_M) と，その x, y 座標が対応する砥石上の点 g の座標 (x_M, y_M, z_g) を求める．これを砥石と加工物が干渉する範囲の座標で計算し，中でもっとも絶対値が大きい z_g を用いて $D = z_M - z_g$ が求められる (図 8 における gM) ．しかしながら，実際には砥石表面形状の z が任意の x, y に対して求められるように x'' - y'' - z'' 座標系から変換するのは非常に手間がかかるため，以下の近似を用いる．

x - y - z 座標系における加工点 M の軌跡は式(2)と同様，円 (の一部) で表される．上記ドレッサと同様に，精度に応じて必要な数だけ軌跡上の点 (x_M, y_M, z_M) を選定して (x_M'', y_M'', z_M') に変換し， x_M'', y_M'' を用いて式(3)によって z_g'' を求め， (x_M'', y_M'', z_g') を逆変換によって再び x - y - z 座標系に戻した点 $G (x_G, y_G, z_G)$ の z_G を z_g と近似する．この様子を図 8 左下に示す．

(x_G, y_G, z_G) は (x_M, y_M, z_g) と一致しないが，次に示す計算例の計算条件のように θ, ϕ が 10^{-2}° のオーダーであれば， x_G, y_G のずれ量は最大でも 10^{-5} mm のオーダーであった． z_G のずれ率は $1 - 1/(\cos \theta \cos \phi)^2$ のオーダー，すなわち 10^{-6} %程度と見積もられ，両者はほとんど一致する．さらに言えば，今回のよ

うな微小傾斜では，逆変換せずに図 8 の GM を gM と近似しても同程度の誤差に収まるはずである．

図 9 に傾斜後ドレッシングした砥石表面を傾斜前の砥石表面 (x - y 平面) から見たときの等高線 (z_G) 計算例を示す．表 1 に計算条件を示す．図 9 左にはドレッサと加工物の配置状況を示した．また，砥石の半径を 200mm としたときの傾斜前の砥石外径 (傾斜後もこのスケールで表示するとほとんど変わらない) を実線の円で，加工物の右端，左端のスイング軌跡を破線の円弧で示してある．加工物は幅 100mm で，その端面は x - y 平面 (傾斜前の砥石表面) より 0.08mm 砥石にくい込んだ高度をスイングするとした．

図において色の薄い部分ほど標高が高いことを示している．砥石，加工物の弾性変形や摩耗を考慮せず，幾何学的干渉のみで考えると， x - y 平面に平行な面内をスイングしてきた加工物は図中△の列で示す研削開始点で砥石と接触を開始し，◇の列で示す研削終了点でもっとも深く削れ，それ以降砥石と接触せずに砥石間から抜けてゆくことになる．

実際の研削現象では，加工物軌跡に沿う等高線の密度勾配から考えると，研削開始点直後が砥石表面の加工物に対する傾斜が比較的大きい荒研削領域，終了点手前が同傾斜が比較的緩やかな仕上げ研削領域となり，終了点直後は加工物の弾性回復によって砥石との接触が少しの間続くスパーク

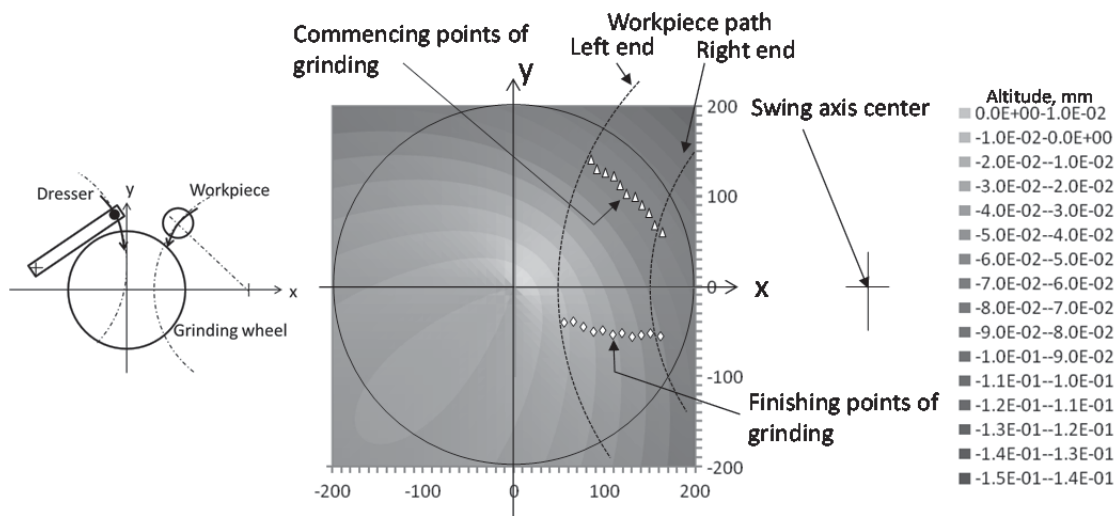


Fig.9 Contour map of the tilted dressed grinding wheel viewed from x - y plane

Table 1 Calculation conditions

Grinding-wheel	Rotation angle about x-axis, deg.	Translation in y-axis, mm	Translation in z-axis, mm
	-0.01	0	0
Dresser	Rotation angle about y'-axis, deg.	Translation in x'-axis, mm	Translation in z'-axis, mm
	+0.01	0	0
Workpiece	x-y-z coordinates of swing axis center, mm		Swing radius, mm
	-300, 80, 0		310
Dresser	x-y-z coordinates of swing axis center, mm		Swing radius, mm
	400, 0, -0.08		250-350

アウトの領域となると推定される。

図 10 に加工物端面のスイング半径方向の研削深さの分布を示す。図 9 において加工物端面右側が図 10 では位置 0 としている。この加工条件では加工物が自転しないよう固定されている場合、100mm の幅で 40 μm ほどの傾斜がついてしまうと予想される。図 10 より平坦度については、数 μm に収まることがわかる。

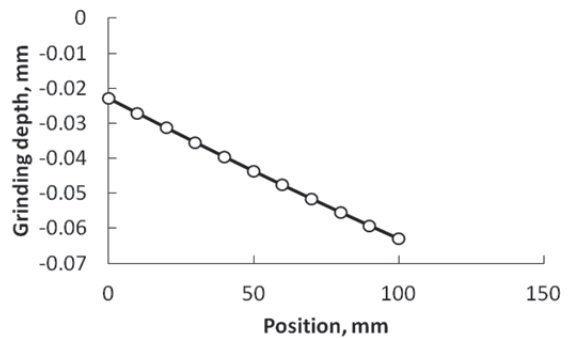


Fig.10 Grinding depth distribution along workpiece width direction

5. まとめ

座標変換を用いて、両頭平面研削盤の砥石が 2 軸まわりに傾斜され、ドレッシングを受けたときの表面形状と、その砥石を用いたときの切り込み量を計算する方法を示した。計算例によって荒削り-仕上げ削り-スパークアウトの研削現象の発生を視覚的に追うことができる図を示した。

文献

- 1) 田中勝：両頭平面研削加工とホイール，機械と工具，49，7 (2005) 51-54.
- 2) 松井正己：両頭平面研削に関する一考察，機械の研究，28，7 (1976) 859-862.
- 3) 竹崎源八：両頭平面研削盤の研削抵抗，応用機械工学，18，12 (1977) 126-133.
- 4) Z. H. Lin: An Investigation on the Accuracy of the Double Disc Grinding, Proc. Int. Machine Tool Design & Research Conf., 22 (1982) 329-333.
- 5) 村井史朗：両頭研削装置と加工特性，機械と工具，46，5 (2002) 29-32.
- 6) 石田浩修：両頭研削における加工シミュレーション，2004 年度精密加工学会秋季大会学術講演会講演論文

集，E63 (2004) 391-392.

- 7) 鈴木幹雄：極薄ウェーハの研削と研磨技術，砥粒加工学会誌，52，3 (2008) 142-145.
- 8) N. Shanbhag: Analysis and Simulation of Double Disc Grinding, Trans. NAMRI/SME, 26 (1998) 111-116.
- 9) (株) 日平トヤマ カタログ.

補遺

x''-y''-z''座標系から x-y-z 座標系への逆変換は下記のようなである。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A^{-1}(\theta)B^{-1}(\phi) \begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} + A^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ s \\ t \end{pmatrix}$$

$$A^{-1}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$B^{-1}(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$