遊星バレル槽内における二粒子群の挙動解析*
(遠心力による粒子の流動と偏析)高橋 芳弘^{*1}, 植草 昌彦^{*1}, 嘩道 佳明^{*2}Analysis of Behavior on 2 kinds of Particles in Planetary Barrel
(Particle Flow and Segregation with Centrifugal Force)Yoshihiro TAKAHASHI^{*3}, Masahiko UEKUSA and Yoshiaki TERUMICHI^{*3} Department of Mechanical Science and Engineering, Chiba Institute of Technology,
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016 Japan

Barrel polishing is an extremely efficient processing method for surface smoothing treatment of a large number of workpieces. However, workpieces and grinding materials may separate depending on the processing conditions. Therefore, examination of the processing conditions using dynamic analysis of the behaviors of workpieces and grinding materials is strongly desired. In this study, the behavior of the particles in the planetary barrel that simultaneously rotates around a horizontal axis and revolves around a vertical axis was examined through experiments and simulations using the discrete element method (DEM). The center of the rotary barrel was set up so that the centrifugal force might act on the particles in this barrel. As a result, it was demonstrated that the distribution of two kinds of particles might be replaced by setting position of the center of the rotary barrel even if in same combination of particles.

Key Words: Friction, Machine Element, Abrasive Grain, Numerical Simulation

1. 緒 言

バレル研磨法は、工作物の表面平滑処理を大量に且つ効率的に行う方法として知られている⁽¹⁾。しかしこの方法は、加工条件によっては工作物と砥材とが分離してしまう場合がある。遠心バレル研磨機の一つで、水平軸回りの自転と垂直軸回りの公転を同時に行う遊星回転のバレル研磨機においてもこの分離現象は生ずる。バレル加工は、容器内で工作物と砥材等を混ぜ合わせながら加工するものであるから、この分離が生じることは甚だ具合が悪いものである。従来加工条件は熟練者の経験によって定められてきたが、工作物や砥材の挙動を力学的に解析することより、この条件を検討することが強く望まれている。

このバレルにおける工作物や砥材の運動は基本的には遊星回転する円筒槽内の粒子群の運動と同類である。そこで著者らは、この槽内の粒子群が示す分離現

象(以後偏析と呼ぶ)の特性を知れば適正な加工条件の選定に繋がると考え、槽内の粒子群の運動を実験と個別要素法(Discrete Element Method: DEM)⁽²⁾を用いたシミュレーションより解析し、報告してきた^{(3)~(5)}。それらの結果からは、二種類の粒子の質量比と直径比の組み合わせによりこの偏析には種々のパターンが存在すること等がわかった。また、回転槽の配置位置によって、粒子は遠心力の影響を受け、移動可能な空間へと移動することから粒子群の流動状態が変化する。しかし、粒子群のフローパターンや偏析パターンと偏析の関係については不明である。遠心力は、二粒子群の流動状態にも影響を与え、偏析の発生にも影響すると考えられる。

そこで本報では、遊星回転する円筒の槽の中心を公転回転の方向に偏心させて配置することから、槽内の粒子に作用する遠心力を変化させた場合について粒子群の挙動を調べた。槽内には、材質や大きさの異なる二種類の粒子(以後二粒子と呼ぶ)を多数充填した。そして、二粒子の一部の組み合わせで、回転槽の配置位置により偏析の有無が入れ替わること、二粒子の分布が変化することを示した。また粒子間の接触回数と仕事率を求めることから偏析の特性等を検討した。

* 原稿受付 2010 年 7 月 20 日。

^{*1} 正員, 千葉工業大学工学部(☎ 275-0016 習志野市津田沼 2-17-1)。^{*2} 正員, 上智大学理工学部(☎ 102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)。

E-mail: y_takahashi@sun.it-chiba.ac.jp

2. 力学モデルと計算方法

2.1 粒子の運動方程式 粒子運動の計算方法は既報^{(3)~(5)}と同じであるので、ここでは概略を述べる。

図1のように、回転槽の中心Oを絶対座標系o-xyzの原点からR離れた位置にとり、槽がz軸回りに旋回し公転運動を、Y軸回りに回転し自転運動をしているものとする。次に回転槽に材質とサイズの異なる粒子群を1/3程度充填した系を考え、そのうちの1個の粒子*i*に注目する。

図2のように粒子*i*は一般に複数箇所所周围の粒子と接触し、力を及ぼし合うから運動方程式は(1)式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_j f_{jx}, & J_i \frac{d\omega_{ix}}{dt} &= \sum_j M_{jx} \\ m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_j f_{jy}, & J_i \frac{d\omega_{iy}}{dt} &= \sum_j M_{jy} \\ m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_j f_{jz} - m_i g, & J_i \frac{d\omega_{iz}}{dt} &= \sum_j M_{jz} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、粒子*i*の質量を*m_i*、慣性モーメントを*J_i*、重力加速度を*g*とし、粒子*i*および*j*の中心点座標をそれぞれ*i*(*x_i*, *y_i*, *z_i*), *j*(*x_j*, *y_j*, *z_j*), 半径を*r_i*, *r_j*とした。またo-xyz座標系に平行で、原点を粒子*i*の中心に一致させた座標系の各軸まわりの角速度とモーメン

Fig. 1 Planetary barrel

Fig. 2 Contact condition of two particles

トを ω_{ix} , ω_{iy} , ω_{iz} および M_{jx} , M_{jy} , M_{jz} , 粒子*j*との接触力の*x*軸、*y*軸、*z*軸方向成分を f_{jx} , f_{jy} , f_{jz} とする。

次に、図3のように粒子*i*と*j*の接触に着目し、接触の中心点における法線方向(*n*方向)、せん断方向(*s*方向)、従法線方向(*b*方向)のばね定数、粘性減衰係数をそれぞれ k_{jn} , k_{js} , $k_{jb}(=k_{js})$ および C_{jn} , C_{js} , $C_{jb}(=C_{js})$ とし、*n*, *s*, *b*方向の相対変位増分および接触量をそれぞれ Δu_{jn} , Δu_{js} , Δu_{jb} および u_{jn} , u_{js} , u_{jb} とおくと、接触力 f_{jn} , f_{js} , f_{jb} は次式となる⁽²⁾。

$$\left. \begin{aligned} f_{jn} &= -k_{jn} \cdot u_{jn}^{3/2} - C_{jn} \cdot u_{jn}^{1/4} \cdot \Delta u_{jn} / \Delta t \\ f_{js} &= -k_{js} \cdot u_{js}^{3/2} - C_{js} \cdot u_{js}^{1/4} \cdot \Delta u_{js} / \Delta t \\ f_{jb} &= -k_{jb} \cdot u_{jb}^{3/2} - C_{jb} \cdot u_{jb}^{1/4} \cdot \Delta u_{jb} / \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

x, *y*, *z* 方向成分への変換のための行列 *A* と *B* は、

$$\left. \begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \varphi & -\sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi & \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \theta & 0 & -\sin \theta \end{bmatrix} \\ [B] &= \begin{bmatrix} 0 & -\cos \theta & \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta & 0 & -\sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \theta \sin \varphi & \sin \theta \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \\ \left. \begin{aligned} \because \sin \theta &= D_{ij}/R_{ij}, \quad \cos \theta = -(z_i - z_j)/R_{ij} \\ \sin \varphi &= -(y_i - y_j)/R_{ij} \\ \cos \varphi &= -(x_i - x_j)/R_{ij} \\ R_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \\ D_{ij} &= \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right.$$

であることから、 f_{jx} , f_{jy} , f_{jz} および M_{jx} , M_{jy} , M_{jz} は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} f_{jx} \\ f_{jy} \\ f_{jz} \end{bmatrix} &= [A] \begin{bmatrix} f_{jn} \\ f_{js} \\ f_{jb} \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} M_{jx} \\ M_{jy} \\ M_{jz} \end{bmatrix} &= r_i \cdot [B] \begin{bmatrix} f_{jn} \\ f_{js} \\ f_{jb} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

ここで、計算上、法線方向の弾性力が負となる場合

Fig. 3 Model for analysis

は、粒子 i と j は接触しないので式(2)の接触力 f_{jn} , f_{js} , f_{jb} を 0 とした。また、 s 方向の弾性力 e_{js} と b 方向の弾性力 e_{jb} の合力が摩擦係数 μ_j と n 方向の弾性力 e_{jn} から構成される摩擦力を越える場合は、越えないよう式(2)中の s および b 方向の弾性力を式(4)のように置き換え、 s および b 方向の減衰力は 0 とした。

$$\left. \begin{aligned} e_{js} &= \mu_j \cdot e_{jn} \cdot e_{js} / \sqrt{e_{js}^2 + e_{jb}^2} \\ e_{jb} &= \mu_j \cdot e_{jn} \cdot e_{jb} / \sqrt{e_{js}^2 + e_{jb}^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

2.2 パラメータの決定方法

n 方向のばね定数 k_{jn} は、球同士が接触する場合の Hertz の接触理論式から求めた⁽⁶⁾。すなわち、球に加えた圧縮力 q 、中心の接触距離 δ 、粒子 i, j の縦弾性係数とポアソン比をそれぞれ E_i, E_j および ν_i, ν_j とし、次式で与えた。

$$\begin{aligned} k_{jn} &= q / \delta^{3/2} \\ &= \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}} / \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

減衰係数 C_{jn} は、式(1)がいわゆる振動方程式であるから臨界減衰係数を求め、粒子 i が跳ね返ることを考慮してその値の 1/4 倍とし、次式で与えた。

$$\begin{aligned} C_{jn} &= \sqrt{m_{ij} k_{jn}} / 2 \dots\dots\dots (6) \\ [\because m_{ij} &= m_i m_j / (m_i + m_j)] \end{aligned}$$

次に s 方向のばね定数 k_{js} 及び粘性減衰係数 C_{js} は、縦弾性係数と横弾性係数の比 ε を用いて、次のように定めた。

$$\left. \begin{aligned} k_{js} &= \varepsilon \cdot k_{jn} \\ C_{js} &= \sqrt{\varepsilon} \cdot C_{jn} \\ \varepsilon &= 1 / [2\{1 + (\nu_i + \nu_j) / 2\}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

粒子と回転槽側壁との接触では、ばね定数は式(5)の r_j を ∞ とすることから求めた。また、粒子と円筒面との接触では、円筒の半径を r_w 、槽の縦弾性係数を E_w 、ポアソン比を ν_w とし、ばね定数 k_{nw} を次式で与えた。

$$k_{nw} = q / \delta^{3/2} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{\frac{2r_i r_w}{2r_w - r_i}} / \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_w^2}{E_w} \right) \dots\dots\dots (8)$$

摩擦係数 μ は、回転槽内の粒子が衝突を繰り返し研磨されるため長時間の運転では摩耗粉が生じて変化する。しかし予備的実験では、4~5 分程度の運転では摩耗粉の影響は見られなかった。そこで既報^{(3)~(5)}と同様に DEM で用いる摩擦係数 μ_j は、円筒槽内に直径 12.7 mm の粒子群を充填した場合の実験と DEM の結果とを比較することから得た平均摩擦係数 $\mu = (\mu_j) = 0.3$ とした。

2.3 計算手順

計算手順を簡単に述べる。刻み時間 Δt は差分解が安定となるための条件式⁽⁷⁾, $\Delta t <$

$2\sqrt{m_{ij}/k_{jn}}$ を目安とし、収束性も考慮して $\Delta t = 5.0 \times 10^{-6}$ [s] とした。

初期配置は以下のようにした。まず、回転槽内で粒子間、粒子と回転槽間で接触が起こらないように座標をランダムに指定し、各粒子の変位増分及び回転角増分を零とした。次にこの時点を経験原点として 1 刻み時間における自由落下計算を行うことから各増分値を求め、式(1)~(3)より加速度、角加速度を計算する。これらを積分して求めた変位と 1 ステップ前の変位との差から次の刻み時間における各増分値を計算した。これらを逐次繰り返して、粒子がほぼ静止状態となる 0.3 秒分の計算が完了した時点を経験初期配置とした。この時点から槽の回転が始まり、自転・公転とも設定回転数に到達するまでの時間を後述の実験に合わせ 4 秒とした。

ここで、槽の中心点座標を図 1 の O-XYZ 座標系から O'-X'YZ' へ Y 軸方向に移動させた場合、球と壁面との接触判定を O'-X'YZ' 座標系で行い、自転による Δt 後の変位増分を計算し、これを全体座標系に変換した。更に回転槽の公転による変位増分をこれに加えることから全体座標系における変位増分とし、接触力の計算を行った⁽³⁾。なお、槽の側壁との接触は Y 軸方向の槽の長さに着目する球の Y 座標と半径の和から判定した。

3. 実験及び計算結果

3.1 実験

使用した回転槽は、内径 $d=100$ mm、長さ $L=200$ mm のアクリル製の円筒で、垂直軸(図 1 の z 軸に対応)から 250 mm の位置に水平に配置した。このとき、図 1 の O 点と O' 点が一致している。予備実験の結果から、回転槽を公転回転に対して負の方向に槽を配置した場合、「槽の後方」に粒子群が偏り測定できないことがわかった。そこで本実験では、回転槽を公転方向に対して正方向に配置することとし、槽の中心を偏らせる量 ξ を 0 mm, 10 mm, 20 mm, 35 mm, 50 mm とした。槽の公転は垂直軸の下端をモーターで回転させ、この軸の上端にアームを固定したことから得た。また自転は垂直軸の回転をかき歯車とプーリーを介して公転と同時に得ている(図 4 参照)。ここで公転回転数は本装置におけるモーターと減速機の仕様から 60 rpm とした。粒子の挙動観察は、小型のムービーカメラによる撮影から行った。ムービーカメラは、回転槽内の様子が一望できるように図 1 の X' 軸方向延長上で、O' より 20 度上方に相当する位置に設置した。槽に充填する粒子は、直径 9.5 mm, 12.7 mm, 19.1 mm の炭素鋼とアルミニウ

Fig. 4 Experimental apparatus

ムの球(物性値は表1)から二種類を組み合わせた。回転中の槽内の分布状態は4つに仕切り、各ブロックに存在する粒子の個数を数えることより得た。前報⁽⁵⁾では、槽外部に設置した仕切板が、槽壁面に設けたスリットから引っ張りばねの力で一方向から槽内部に挿入できるように作製した。しかし、本実験では、回転槽の配置位置によっては遠心力により粒子が公転方向に対して「槽の前方」もしくは「槽の後方」に偏り分布する場合があります、一方向からの仕切の方法では1つのブロックに粒子を格納することができない場合があった。そこで本報では、図4に示すように遠隔操作(赤外線リモコン装置)により、槽を挟み込むように設置した槽外部の仕切板が、槽壁面に設けたスリットから引っ張りばねの力で両側から同時に槽内部に挿入できるように製作した。すなわち運転中、この仕切板は槽外部で槽と共に回転するが、支持棒でばねを留めているため槽内には侵入せず、測定時にはDCモーターを介して支持棒を折り曲げ、ばねの支えを除くことから槽内に引き込まれる機構とした。なお、このスリットの幅は運転中の粒子群の挙動に影響がないよう2mmとした。前報との比較のため、充填率(粒子の個数と体積との積より求めた総体積を回転槽の容積で割った値)の最大は18~19%、自転公転比(公転回転数に対する自転回転数の比)=2すなわち自転回転数は120rpmとした。径の異なる二種類の粒子を充填する場合は、両者の体積比が等しくなるように個数を決めた。

3.2 実験と計算結果の比較 図5は $\xi=50$ mmに配置した回転槽に、直径12.7mmの炭素鋼球(黒色)135個と直径19.1mmのアルミニウム球(白色)40個を充填した場合の粒子の挙動である。図5(a)は実験結果、(b)はDEMによる計算結果(スリットなし)で、運転時間60秒後のものである。図5(a)(b)とも

Table 1 Material property

Material	Carbon Steel	Aluminum	Acrylic
Density (kg/m^3)	7873	2712	—
Young's modulus (MPa)	2.07×10^5	7.16×10^4	4.90×10^3
Poisson's ratio	0.26	0.35	0.32

(a) Experiment

(b) DEM

Fig. 5 Flow condition (Black: Carbon Steel particles with diameter 12.7 mm, White: Aluminum particles with diameter 19.1 mm)

公転方向に対し、炭素鋼球が槽の前方部分、アルミニウム球は後方部分に多く分布する偏析が発生していることが目視でわかり、実験とDEMの計算値が良く一致していることがわかる。なお既報^{(3)~(5)}と同様にこれらの偏析は一度発生すると運転継続中は消滅しない。

3.3 偏析発生判定 偏析は種々の組み合わせで発生する。上述の偏析発生は目視により判定したが、以下では偏析発生の有無を既報^{(3)~(5)}と同様に粒子群の分布率を調べることから判定した。

図6は、図5の粒子群の分布率を調べたものである。縦軸の分布率とは各ブロックに存在する同一粒子の総体積を充填した粒子の総体積で割ることから求めた値であり、横軸のブロック番号とは槽を4等分し、公転方向に対して槽の後尾から番号付けをしたもので

ある。図6から1, 2ブロックでは炭素鋼球に比べてアルミニウム球の、逆に3, 4ブロックでは炭素鋼球の分布が高く、2-3のブロック間で分布状態が逆転していることが分かる。そこで偏析の判定には、この分布状態の逆転と、 $|A_n - B_n| \geq 5.0\%$ (ただし A_n, B_n は各ブロックの同一粒子の分布率, n はブロック番号) を満たすブロックが1つ以上存在することを指標にした。すなわちこの図の場合は、この指標を満たすため偏析が発生し、逆転の発生が1回であることから粒子群が2層に分布した偏析パターン(以下では「二層パターン」)であると決めた。

3・4 偏析時の粒子群の分布状態を示す判別図

図7は、 $\xi/L=0.25$ の場合の偏析状態を二粒子群における個々の球形要素の質量比と直径比の関係から調べたもので、DEMによる粒子群の分布状態を示す判別図である。運転時間は60秒後、表1の粒子以外に直径や密度を仮定した粒子の結果も記入している。図7中の黒色の太い実線は、「二層パターン」の偏析発生の有無を示す境界付近と考えられる仮想線である。こ

Fig. 6 Distribution ratio of two kinds of particles in Fig. 5

Fig. 7 Segregation condition ($\xi/L=0.25$)

の線で領域を区切り、二粒子の質量比と直径比を求めるとき、注目した粒子の質量と直径を分子とした値が●印の(A)領域にあれば、注目した粒子群は「公転方向に対して槽の先頭部分」に層を形成する。逆に○印の(B)領域にあれば、「槽の後部」に層を形成する。黒色の実線で囲まれた(C)領域は、▲印であれば注目した粒子群は「公転方向に対して槽の先頭部分」に、逆に△印は「公転方向に対して槽の先頭から2番目」に層を形成する三層または四層で分布する「多層パターン」、*印は「偏析しない」ことを表す領域である。例えば、図5の場合は、炭素鋼球に注目すると図中の(a)点となり、主に公転方向に対して槽の先頭部分、逆にアルミニウム球に注目すると(b)点となり、主に槽の後部に分布する「二層パターン」となる。図7から偏析時の粒子群の分布状態は、二粒子の質量比と直径比の組み合わせにより決まるもので、充填した粒子の直径または質量という単独の要因で生じるものではないことがわかる。

図7中の細い実線で囲まれた領域(D)は、前報⁽⁴⁾で示した $\xi/L=0$ の場合の、灰色の実線で囲まれた領域(E)は、 $\xi/L=0.175$ の場合の(C)領域と同義の領域を表したものである。図から ξ が増加すると(C)領域となる二粒子の組み合わせが反時計回りに変化することがわかる。したがって、「二層パターン」の二粒子の一部の組み合わせでは、 ξ を変化させることによって「多層パターン」や「偏析しない」となる分布状態を作り出すことが可能である。なお、実験結果はDEMの結果と完全に一致した。

3・5 接触回数 図8は粒子群の接触回数について調べたDEMの一例である。直径12.7 mmの炭素鋼を135個と直径9.5 mmの炭素鋼を320個充填した場合で、図7中の(P)に対応する粒子の組み合わせである。上述の指標から、図8(a)は $\xi/L=0$ において「二層パターン」、(b)は $\xi/L=0.25$ において図7の(C)領域で「偏析しない」と判定された。図の横軸は時間でモーターの設定回転数に到達する4秒以降、縦軸は1秒間における同粒子どうし、異粒子どうしの接触回数を数えたものである。図8(a)では、同粒子どうし(△印、◇印)の接触回数は運転開始後徐々に上昇し、逆に異粒子どうし(■印)の接触回数は減少している。図8(b)は同粒子どうし、異粒子どうしの接触回数にあまり変化はなくほぼ一定で、同粒子どうしに比べ異粒子どうしの接触回数が多く、図8(a)に比べ、60s後の異粒子どうしの接触回数が高いことがわかる。また、 $\xi/L=0.175$ は、指標から「多層パターン」と判定され図8(b)と同傾向であった。このことから、

(a) $\xi/L=0$ (b) $\xi/L=0.25$

Fig. 8 Contact frequency of particles (Large: Carbon Steel particles with diameter 12.7 mm, Small: Carbon Steel particles with diameter 9.5 mm)

「二層パターン」の偏析は時間と共に徐々に分離が進行するため、図8(a)のように異粒子どうしの接触が減少、同粒子どうしは増加する。逆に「偏析しない」や「多層パターン」では、「二層パターン」に比べ二粒子の分布が槽全域であることから図8(b)のように粒子間の接触回数は運転中あまり変動しないことがわかる。

図9は回転槽の配置位置を ξ 変化させた場合の粒子群の接触回数を調べた一例で、図8の粒子の組み合わせによるDEMの計算結果である。横軸は ξ と L の比、縦軸は同粒子どうし、異粒子どうしの接触回数で、運転開始後50秒から60秒における1秒間の平均接触回数である。図9から $\xi/L=0.1\sim0.4$ 付近で、同粒子どうしの接触回数よりも異粒子どうしの接触回数の方が高いことがわかる。また ξ が負の範囲では、異粒子どうしの接触回数が ξ によっては他よりも高くなる場合があるが、同粒子どうしの接触回数が著しく増加しており、加工としては好ましくないと考えられ

Fig. 9 Relationship between average of contact frequency and location of rotary barrel

Fig. 10 Relationship between power and location of rotary barrel

る。なお、この範囲は、上述の指標では「二層パターン」と判定された。

これらのことから「二層パターン」で偏析する(A)・(B)領域より(C)領域の組み合わせの方が異粒子間の接触回数が多いことが確認でき、加工条件としても良いと考えられる。

3・6 仕事率 パレル加工では、工作物と砥材間のせん断力のなす仕事率が研磨に大きく影響すると考えられる。そこで図10は、 ξ を変化させた場合の粒子どうしの接触時におけるせん断方向(従来線方向も含む)の仕事率で、50から60秒における1秒間の平均仕事率である。図10から異粒子間の仕事率は下に凸の傾向で、 $\xi/L=-0.1$ 付近まで減少、それを越えると上昇することがわかる。同粒子どうしの仕事率も下に凸の傾向で、 $\xi/L=0.1$ 付近まで減少、それを越えると上昇することがわかる。異粒子どうしと同粒子どうしの仕事率を比較すると、 $\xi/L=-0.1$ で反転していることから、 $\xi/L=-0.1$ 以上であれば加工としても良いと考えられる。また、図9と図10から、 ξ/L の変更

Fig. 11 Flow condition (Black: Carbon Steel particles with diameter 12.7 mm, White: Carbon Steel particles with diameter 9.5 mm)

は、少接触回数で高仕事率、逆に多接触回数で低仕事率の加工が可能であることがわかった。

3・7 粒子の分布状態 図 11(a)(b)は、粒子の分布を示したもので、それぞれ図 8(a)(b)に対応している。図 11(c)は図 8 の粒子の組み合わせで、 $\xi/L=0.5$ とした場合を示している。いずれも運転開始から 60 秒後の図である。図 11 から、遠心力の影響を粒子が受け、図 11(a)のように「公転方向に対して槽の後方部分」に分布している粒子群は、 ξ/L が大きくなるにつれ、図 11(c)のように「槽の先頭部分」に分布する流動状態となることがわかる。また図 11(c)は、図 11(a)の二粒子群が前方と後方で逆転した「二層パターン」の分布であることがわかる。この分布状態の逆転は、他の粒子の組み合わせにおいても生ずる。すなわち、上述の図 7 の(C)領域と(D)領域で囲まれた範囲の粒子の組み合わせは、 ξ/L を 0 から 0.25 に変化させる間に、この分布状態の逆転が発生することを意味する。

このことから、 ξ/L を変化させ、二粒子群の槽内の分布について逆転の有無がわかれば、偏析しない流動状態となる回転槽の配置位置を検討することが可能であり、加工条件検討の一助となる。また、接触回数や仕事率と併用すれば、工作物の仕上げ条件に適切な加工方法の選定に繋がると考えられる。

なお、実際のバレル研磨機の研磨特性と上述の粒子間の接触回数や仕事率及び粒子の流動とは相関があると考えられるが、実際のバレル研磨は、長時間の運転であること、また摩耗粉や熱等も生じることから、これらを考慮した DEM の解析が行えれば、更なる詳細な研磨特性を得られるものとする。

4. 結 言

遊星回転する円筒の回転槽内に材質や大きさの異なる二種類の粒子を多数充填し、粒子群の挙動を実験と DEM により調べた。回転槽の配置位置 $\xi/L=0$ では、粒子は公転方向に対して「槽の後方」に多く分布し、二種類の粒子の組み合わせによっては偏析する場合があった。本研究で得られた結果を要約すると、

(1) 槽を公転回転方向に対し前方に偏らせて配置した場合、槽内の粒子の分布が変化して、二粒子の組み合わせによっては偏析を防げる。

(2) 接触回数や仕事率が高くなる槽の配置位置がある。

(3) 同じ二粒子の組み合わせで生ずる偏析でも、槽の配置位置の違いによって、二粒子群の位置関係が「槽の前方」と「槽の後方」とでほぼ逆転する場合がある。

(4) 偏析時の粒子群の分布状態を示す判別図を作成した。この図から充填した二粒子の偏析の有無、偏析する場合は注目した粒子群が「槽の前方」または「槽の後方」に偏るかを判別できる。

文 献

- (1) Matsunaga, M., Theory and Experiments on Centrifugal Barrel Finishing, *International Journal of Production Research*, Vol. 5, No. 4 (1967), pp. 275-287.
- (2) Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., A Discrete Numeric Model for Granular Assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29 (1979), pp. 47-65.
- (3) Kawamoto, Y., Kataoka, M., Uekusa, M. and Terumichi, Y., Analysis of Behavior on 2 kinds of Particles in Planetary Barrel, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 67, No. 664 (2001), pp. 3969-3976.
- (4) Kawamoto, Y., Kataoka, M., Uekusa, M. and Terumichi, Y., Analysis of Behavior on 2 kinds of Particles in Planetary Barrel (Distribution of 2 kinds of Particles in Various Conditions), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 68, No. 669 (2002), pp. 1543-1549.
- (5) Takahashi, Y., Kataoka, M., Uekusa, M. and Terumichi, Y., Analysis of Behavior of Two Kinds of Particles in Planetary Barrel (In the case of Barrel with Regular Polygonal Cross Section), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 686 (2003), pp. 2802-2809.

-
- (6) Timoshenko, S. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity, Pressure between Two spherical Bodies in Contact*, (1951), pp. 372-384, MCGRAW-HILL.
- (7) Epperson, J. F., *An Intoroduction to Numerical Methods and Analysis*, (2002), pp. 502-506, JOHN WILEY & SONS, INC.
-