東海大学紀要海洋学部「海―自然と文化」 第７巻第２号　73-85頁（2009）
Journal of The School of Marine Science and Technology, Tokai University, Vol.7, No.2, pp. 73-85, 2009

個別要素法を用いたマーガリン製造工程シミュレーション

伊藤博史*1・清水賀之*2

Numerical Simulations on Kneading Process of Margarine in Pin Machine Using Discrete Element Method

Hiroshi ITO and Yoshiyuki SHIMIZU

Abstract

The Discrete Element Method (DEM) is used to analyze behavior of margarine inside a pin machine used for kneading margarine in processing equipments. Comparing two rotation speeds of a shaft, 900 rpm and 450 rpm, it turns out that in the case of 900 rpm, kneading proceeds 13.6% more than in the case of 450 rpm. Further, it is found that several particles move rotationally around the shaft, also move backward against the flow direction.

１．はじめに

マーガリンは油中水滴型（W/O）エマルションで，連続相は固体の油脂結晶の網目状構造中に液体の油を含む構造となっており，全体として３相の成分から構成された加工油脂食品である．マーガリンはトーストなどに使用する家庭用途と製菓・製パンの原料として使用される業務用途とに大きく分かれ，使用用途によって形状や包装形態が異なっている．マーガリンの製造は一般的に，油脂に乳化剤などの添加物を溶解させた油相と水に食塩などを溶解させた水相とを混合し，表面掻き取り式熱交換機型の冷却ユニットとピンマシンとよばれる混練ユニット（Fig. 1）を複数組み合わせた急冷捏和装置によって連続的に行われる(例えばFig. 2)．ユニットの組み合わせはマーガリンの用途によって変更する．冷却ユニットを通過する前のマーガリンは液体だけのW/Oエマルションであるが，冷却ユニットを通過すると油脂の一部が結晶化して固体になる．そのため冷却ユニットを通過したマーガリンには保形性や乳化安定性が付与される．ピンマシンはマーガリンの充填性や均一性を向上させるために使用されている．

従来マーガリンには安価で物理的性状に優れた水素添加と呼ばれる手法で加工された油脂（水素添加油脂）が主に使用されてきた．近年健康上の関心が高まりから水素添加油脂に含まれているトランス脂肪酸が敬遠されてきている．マーガリンメーカーでは，水素添加油脂を用いなくても従来の性状を維持したマーガリンを製造するための研究開発が行われている．しかしながら，非水素添加油脂は水素添加油脂と大きく物性が異なるためマーガリンの物性を維持させることは難しく，従来からの製造ノウハウが通用しにくくなっているのが実情である．その製造ノウハウも最終製品の性状から判断した経験に基づくものが多く，製造中に個々のユニットで起こっている現象を解析した事例はほとんど報告されていない．

個別要素法（Cundall, 1971; Cundall and Strack, 1979）は，主に岩盤や地盤といった不連続体を対象とした数値解析手法で，解析対象を微小な粒子の集合体としてモデル化することにより，大変形や破壊に至る現象を解析することができ，また粒状体の動的挙動を追跡することが可能である．個別要素法の粒子間接触モデルをFig. 3に，計算フローをFig. 4に示す．粒子間あるいは粒子と壁の接触にスプリングとダッシュポット，せん断方向にはさらに摩擦スライダーを配し，力と変位の法則から接触力を求め，その接触力から個々の粒子について運動の法則を適用し，加速度，速度及び変位を算出し粒子の挙動を追跡する．近年，コンピュータの性能が飛躍的に向上したことにより，

2009年４月６日受理
＊1　株式会社J-オイルミルズ（J-OIL MILLS, INC.）
＊2　東海大学教授　海洋学部海洋資源学科（Department of Marine Mineral Resources, School of Marine Science and Technology, Tokai University）

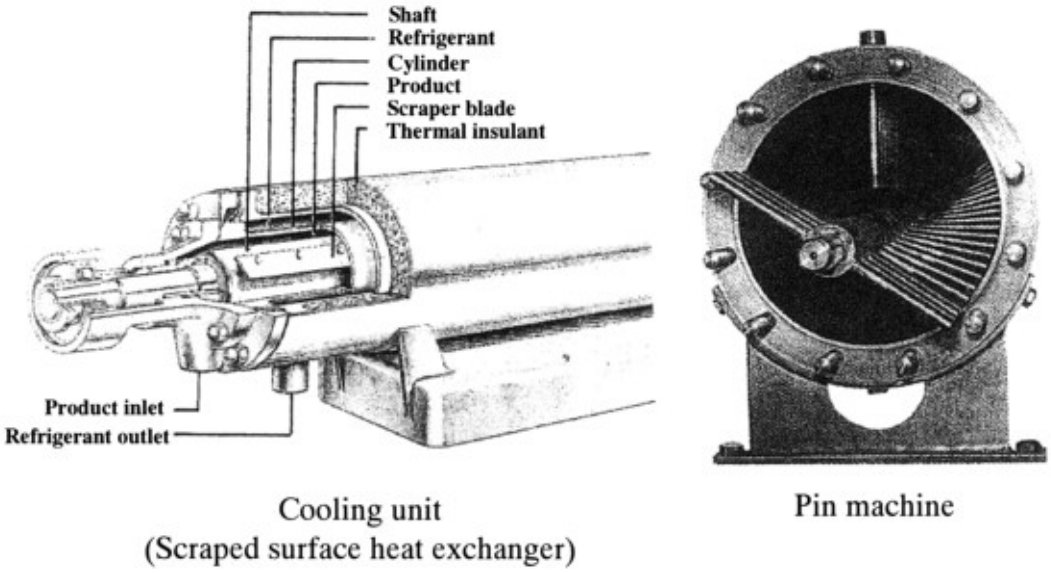


Fig. 1 Units in margarine processing equipment (Fujita, 2000)

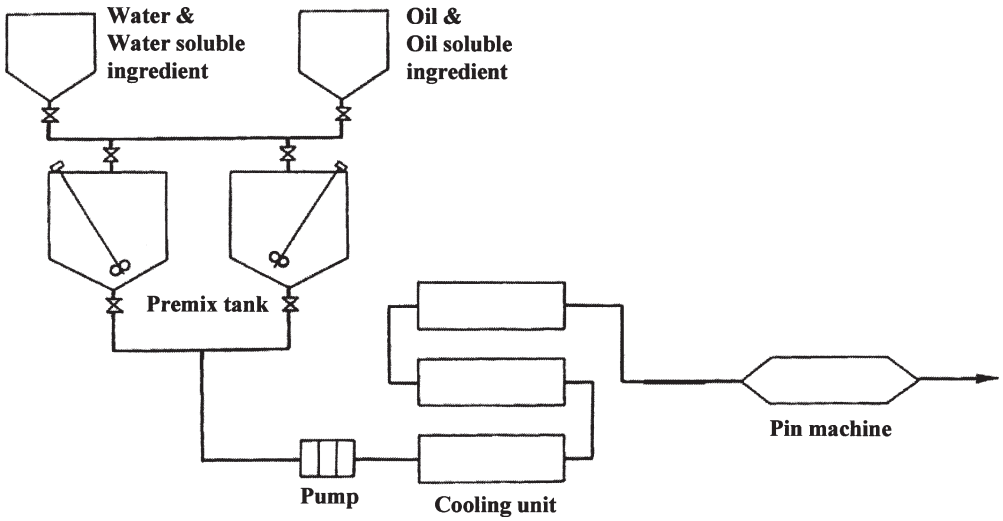


Fig. 2 A example of sequence during margarine processing (Nakazawa, 1979)

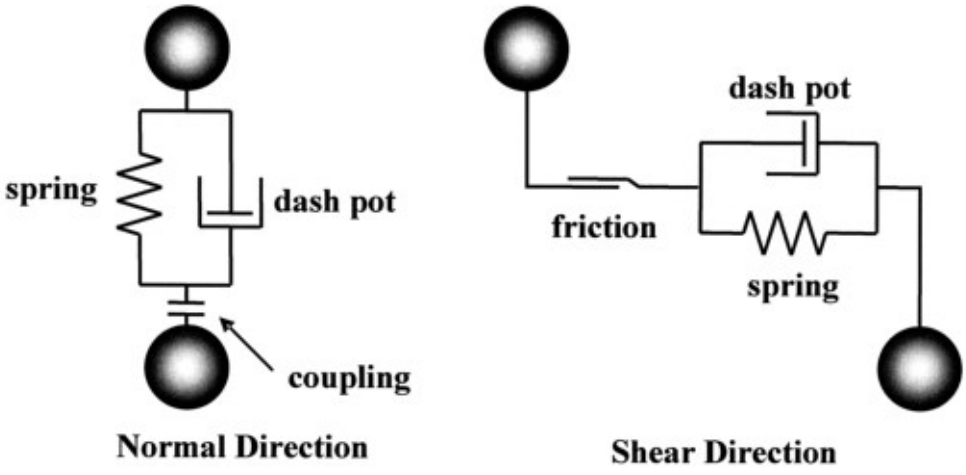


Fig. 3 Contact model between particles for DEM

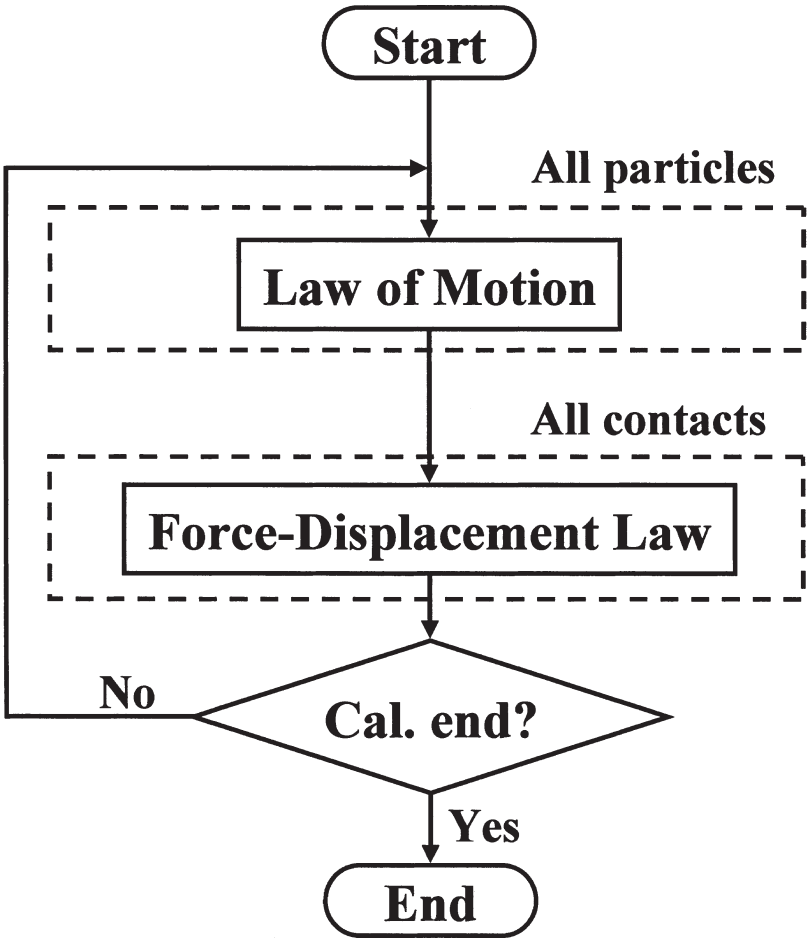


Fig. 4 Flowchart of DEM calculation

個別要素法を用いた理工学に関する諸問題についての適用事例が多く見受けられるになった（例えば Shimizu and Cundall, 2001; Shimizu, 2006 など）.

そこで，粒状体の動的挙動の追跡や固体の大変形解析が可能な個別要素法をマーガリンの製造工程の解析に適用しマーガリンの品質向上を目的として，急冷捏和装置のひとつのユニットであるピンマシンに注目して個別要素法によるシミュレーションにより，装置内での混練状況を明確化することを試みた．ピンマシンは先に示したようにマーガリンの充填性や均一性を改善する効果があり，重要な役割を担っている．ピンマシンで起こっている現象を明確化できれば，マーガリンの製造プロセスの調整制御をより容易に行えるようになること，性能を向上させた新しいピンマシンの設計が可能になることなどが期待できる．なお，本研究では個別要素法の汎用数値解析ソフトウエア *PFC*^{3D} *ver.3.1*（Itasca Consulting Group, Inc., 2004）を用いた．

2．シミュレーション

2-1. モデルおよび計算条件

ピンマシンの概略図を Fig. 5 に示す．このピンマシンは小型の実験機で，全長は 150mm，ケーシング（シリンダー）の直径は 40mm，回転軸の直径は 14mm，ピンの直径は 5 mm，ピンとピンの間隔は 3 mm，ピンの長さは 11mm である．固定ピンはケーシングに 11mm 間隔で向かい合わせになるように配置されている．シャフトピンも回転軸に 11mm 間隔で配置されているが，隣接するピンは交差するようになっている．定量ポンプや冷却ユニットとこのピンマシンを組み合わせて，少量のマーガリンを試作している．このピンマシンは対称性があり破線で区切られた領域が繰り返された構造となっている．従って少なくとも破線領域をシミュレーションすることができれば，それを繰り返すことで全体をシミュレーションすることが可能である．そこで破線領域を解析対象として設定した．

解析モデルを Fig. 6 に，モデルの寸法諸元を Table 1 に示す．Table 1 のうちケーシングの直径，回転軸の直径，ピンの直径およびピンとピンの間隔は実際のピンマシン（Fig. 5）と同じ寸法である．Fig. 5 に示すように固定ピンは回転軸と，シャフトピンはケーシングとそれぞれ接触しているわけではなく隙間が存在するが，この隙間を通過する粒子の割合は全体から見ると少ないので混合状態への影響がほとんどないと考えられる．そこで解析モデルで

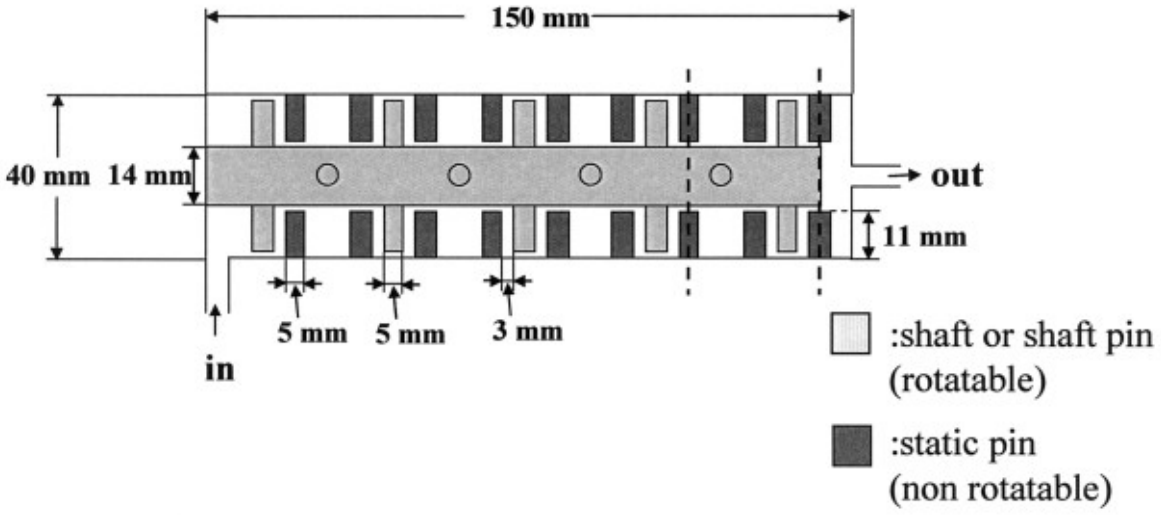


Fig. 5 Schematic diagram of pin machine

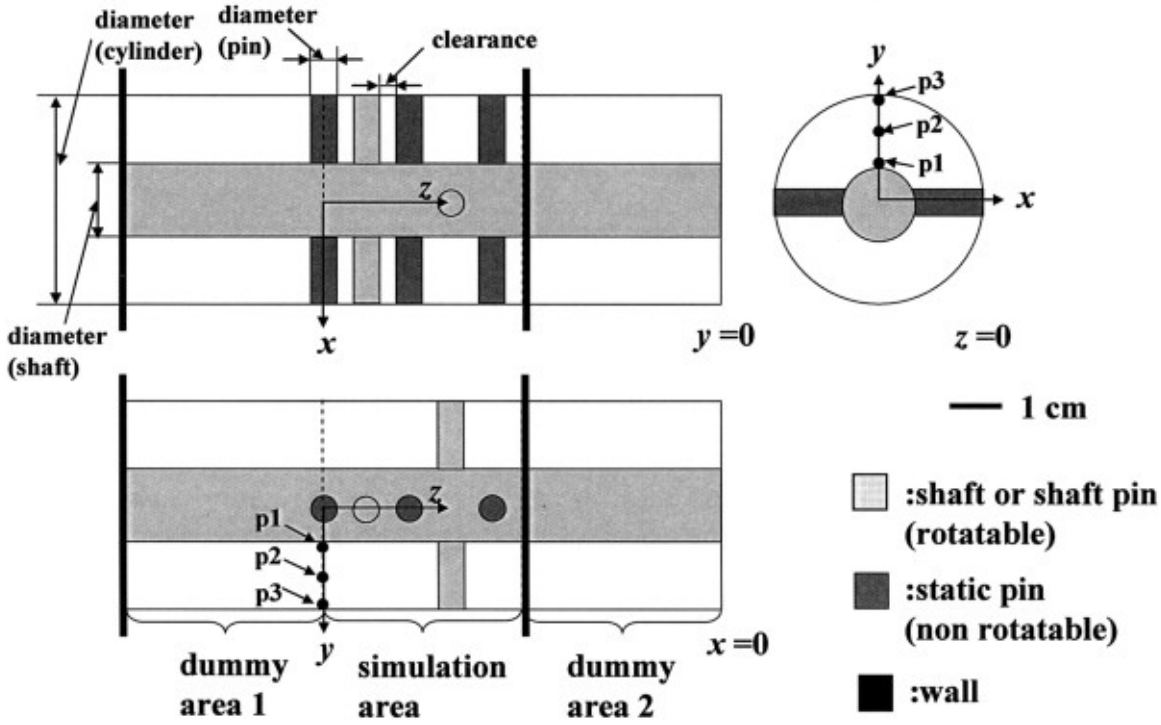


Fig. 6 Numerical analysis model for pin machine

はこれらの隙間はないこととした．ピンマシンへの送液はピストンポンプなどの定量ポンプで行われる．定量ポンプを表現するために解析領域の前後に 2 つの仮想領域と 2 枚の壁を設けた．仮想領域は解析領域と同じ大きさとしたがピンは配置していない．仮想領域 1 は解析領域に供給する粒子の保持する役割，仮想領域 2 は解析領域から排出される粒子を受け入れる役割を果たしている． 2 枚の壁を z 軸に対して正の方向へ同じ速度で動かすことにより一定流速を表現した．

材料物性を Table 2 および Table 3 に示す．マーガリン中の固体成分である油脂結晶は数 μm の大きさであるため，結晶自身をシミュレーション対象にすると膨大な粒子数となり現実的ではない．Table 1 に示すようにピン間隔が 3 mm であることから，ピン間を通過できるようにするためには粒子径は 3 mm 未満に設定する必要があるため，平均粒径は 2.0mm とし，5 % の均一分布を持たせた．粒子は合計 11,503 個設定した．粒子にはマーガリンの平均物性を示すような力学的なパラメーターを設定すべきである．マーガリンの物性は粘弾性体であるとされている（例えば，Alejandro, 2005 ; 種谷，1989 など）が，こ

Table 1 Dimension of pin machine model

Component	Dimension
Cylinder	
Length (total)	1.14×10^{-1} m
Length (each dummy area)	3.8×10^{-2} m
Length (simulation area)	3.8×10^{-2} m
Diameter	4.0×10^{-2} m
Shaft	
Length	1.14×10^{-1} m
Diameter	1.4×10^{-2} m
Pin	
Length	1.3×10^{-2} m
Diameter	5.0×10^{-3} m
Clearance	3.0×10^{-3} m

Table 2 Material properties (Particle)

Number	11,503
Mean diameter	2.0×10^{-3} m
Density	1.0×10^{3} kg/m^3
Normal stiffiness	1.0×10^{8} N/m
Shear stiffiness	1.0×10^{8} N/m
Friction coefficient	0.25

Table 3 Material properties (Pin machine)

Normal stiffiness	1.0×10^{8} N/m
Shear stiffiness	1.0×10^{8} N/m
Friction coefficient (simulation area)	0.25
Friction coefficient (dummy area)	0

れらのデータは製造後のマーガリンを測定したものであり，製造段階のマーガリン物性を的確に示すデータが得られていない．そこでピンマシン内の挙動を確認することを目的として，接触モデルは線形モデルを用いた．剛性係数は法線，接線方向とも 1.0×10^{8} N/m，摩擦係数は 0.25 とした．壁の剛性係数は法線，接線方向とも 1.0×10^{8} N/m としたが，摩擦係数は解析領域内では 0.25，仮想領域では 0 とした．重力は設定しなかった．なお，運動エネルギー消耗項について，接線方向の摩擦のほかに個々の粒子に対して運動方向と反対方向に粒子の持っている慣性力の 70% を減衰させるダンピング項を与えた．

初期状態を作成するために以下の方法を用いた．仮想領域 1 及び解析領域の長さをそれぞれ約 1.7 倍に拡大し，その両端にそれぞれ壁を配置した．壁，ケーシング，回転軸及びシャフトピンで囲われた空間に間隙率が約 67% になるように粒子をランダムに分布させた．回転軸を 4,500rpm で回転させながら両端の壁を間隙率が約 40.6% になるまで圧縮後，回転軸の回転を止めて内部応力が均一化させるまでサイクルを掛けた．内部応力が均一化したら仮想領域及び解析領域を Fig. 6 の大きさに設定し直し，Fig. 7 に示すような初期状態を作成した．初期状態の内部圧力はおよそ 50MPa であった．

解析領域の回転軸及びシャフトピンを 450rpm 及び 900rpm の 2 条件で回転させた．定量ポンプを表現するための 2 枚の壁の z 軸方向の速度は 1.0×10^{-2} m/s とした．回転軸の回転運動と壁の等速運動を同時に行いながら，解析領域内の粒子挙動を追跡した．時間刻みは約 5.5×10^{-8} 秒であった．計算は初期状態から約 0.75 秒経過するまで行った．計算中の内部圧力は 50MPa 以上であった．また Fig. 7 のように混合具合を見やすくするために初期状態の粒子は z 軸方向に 6 mm 間隔で異なる色を付けてある．

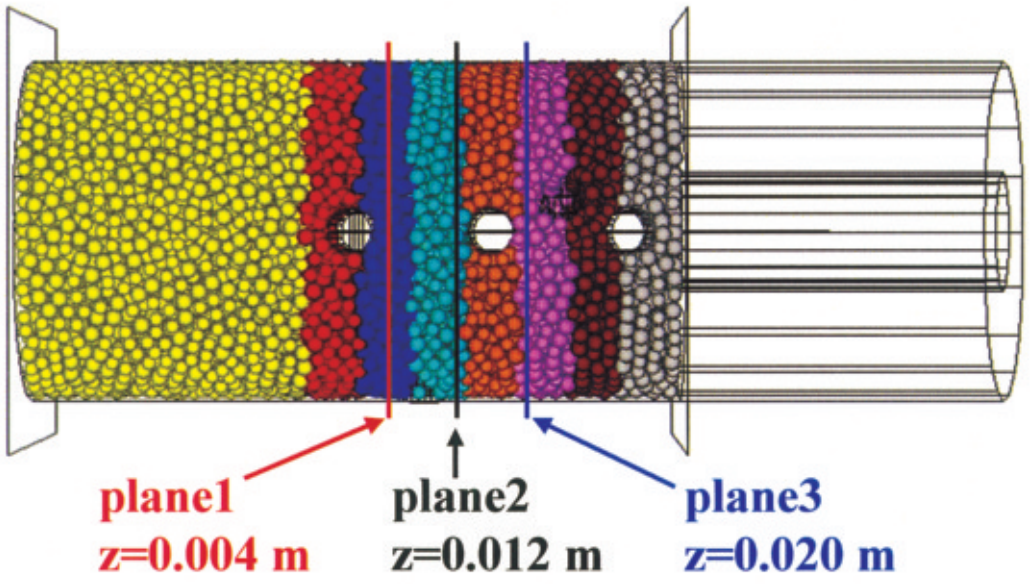


Fig. 7 Initial stage of the model

青色と赤色との境は $z=0$ の面に相当する．粒子混合具合を定量化するために固定ピンとシャフトピンとの間に 3 ヵ所の面（plane 1, plane 2, plane 3）を設定した．これらの面に接しているか跨っている粒子を色別に比率を求めた．0.75 秒経過した時に初期状態から平行移動した場合に各面にある色，具体的には plane 1 は赤色，plane 2 は青色，plane 3 は橙色の各粒子を主粒子として，主粒子以外の粒子の割合を混練状態の指標とした．ピンマシン内の個別粒子の運動を把握するために，標的粒子を定めてその軌跡をとった．標的粒子は Fig. 6 に示す p1，p2 及び p3 で，それぞれ初期状態の（x, y, z）=（0，0.007，0），（0，0.014，0），（0，0.020，0）［単位は m］の各座標に最も近い粒子とした．

2-2. 結果および考察

Fig. 8 は，初期状態から 0.75 秒までの 0.25 秒毎の混練状況の全体図を回転数が 450rpm と 900rpm のそれぞれの場合について示したものである．粒子は領域内全体に詰まっているが，内部の粒子の運動を見やすくするために y 座標が 0 以下の粒子のみを表示している．900rpm の方が 450rpm よりも粒子が分散されているように見える．

Fig. 9 ないし 14 は，Fig. 7 に示した 3 つの面（plane 1，plane 2，plane 3）に接触もしくは跨った各粒子の断面図及びそれらの履歴を回転数別に示している．いずれの面に

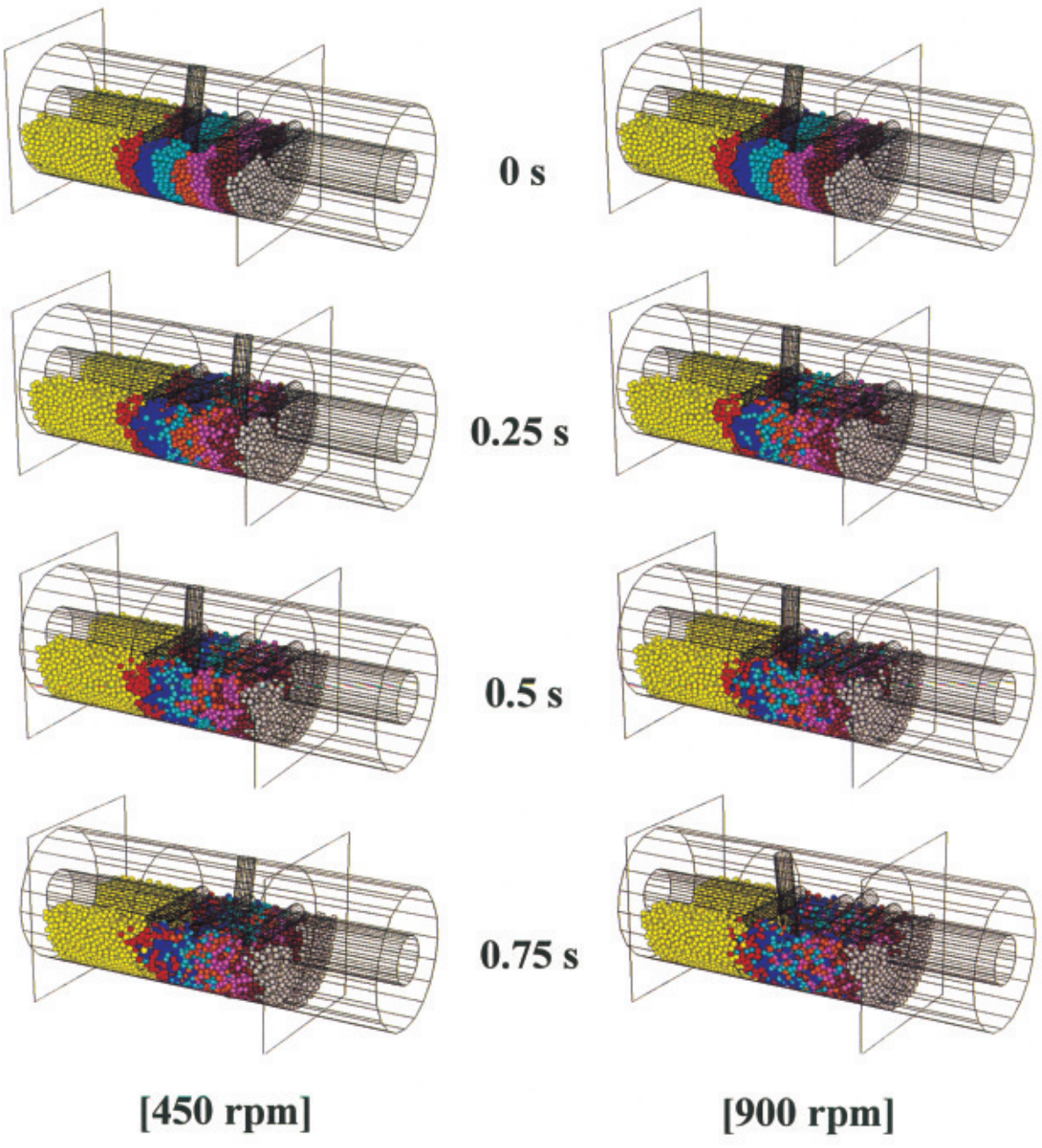


Fig. 8 General view of results (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

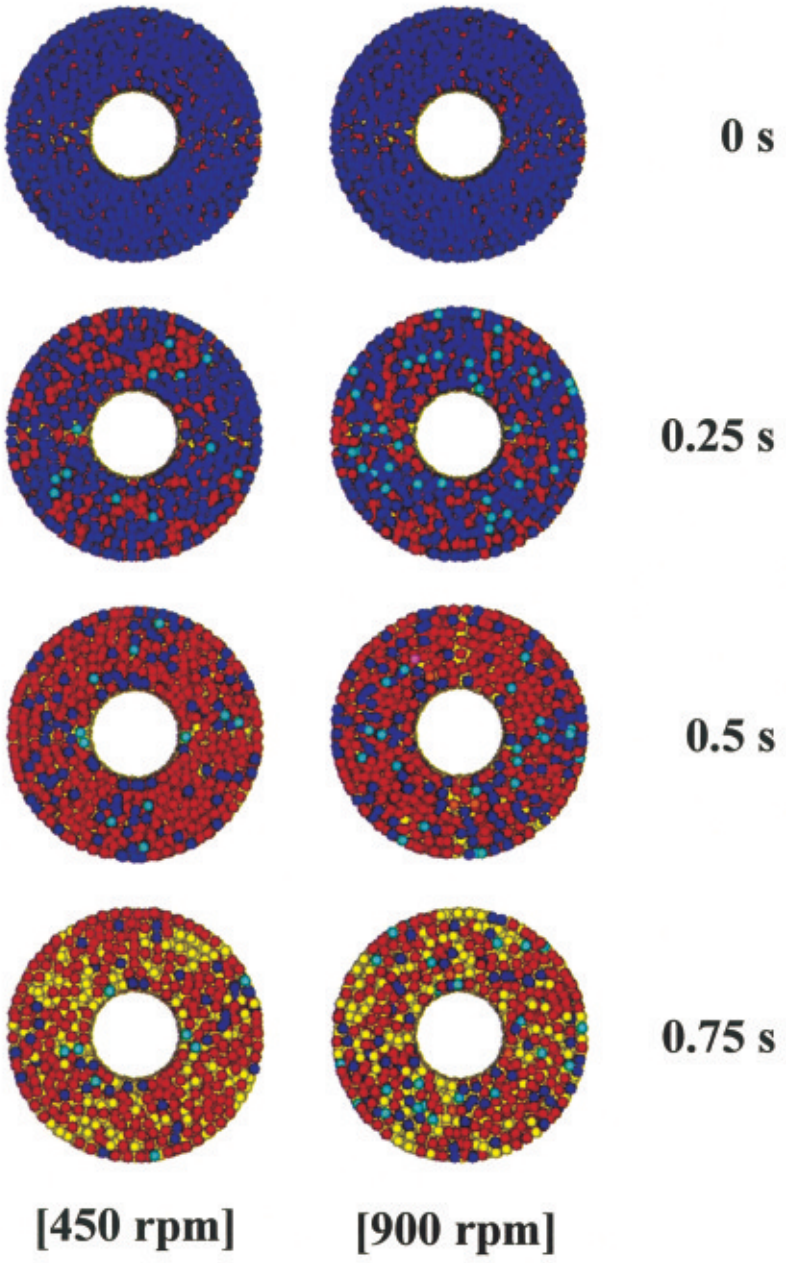


Fig. 9 Section view of results at plane 1 (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

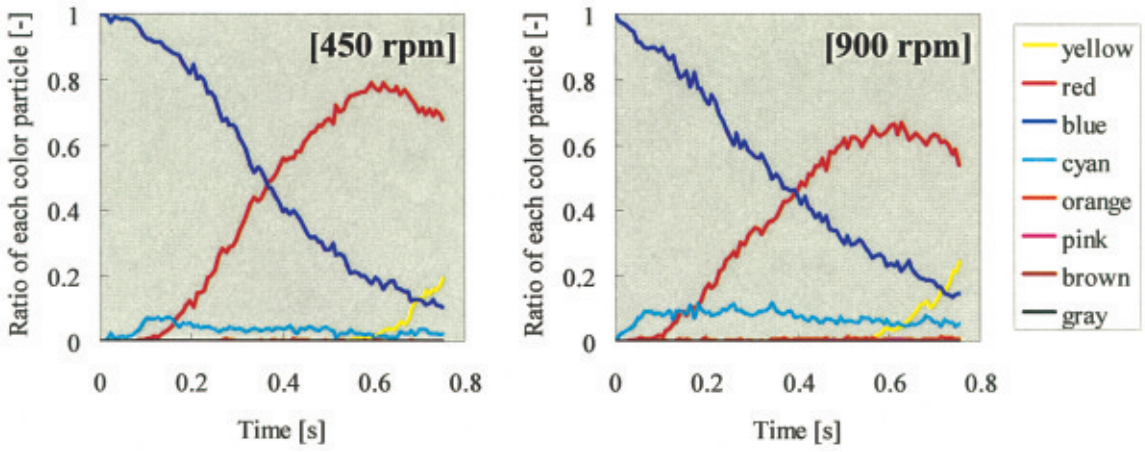


Fig. 10 Time histories of ratio of each color particle on plane 1 (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

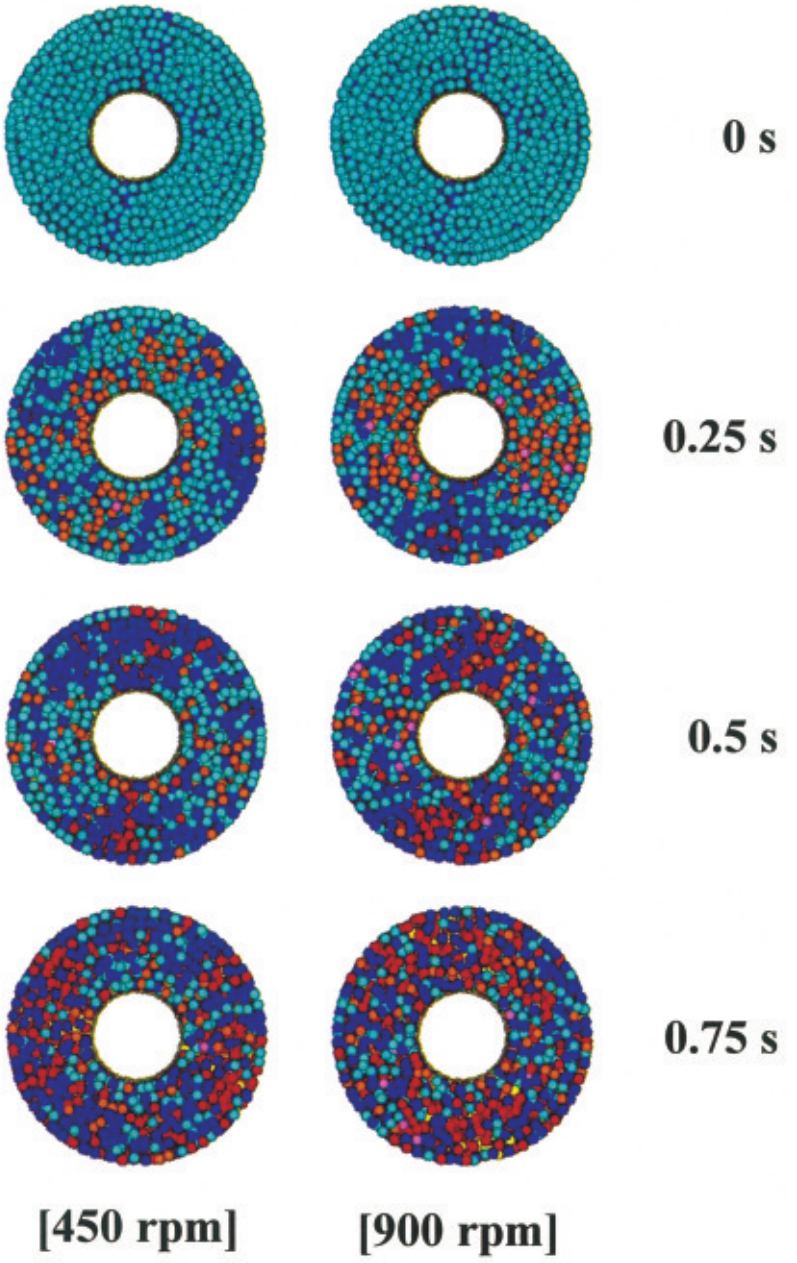


Fig. 11 Section view of results at plane 2 (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

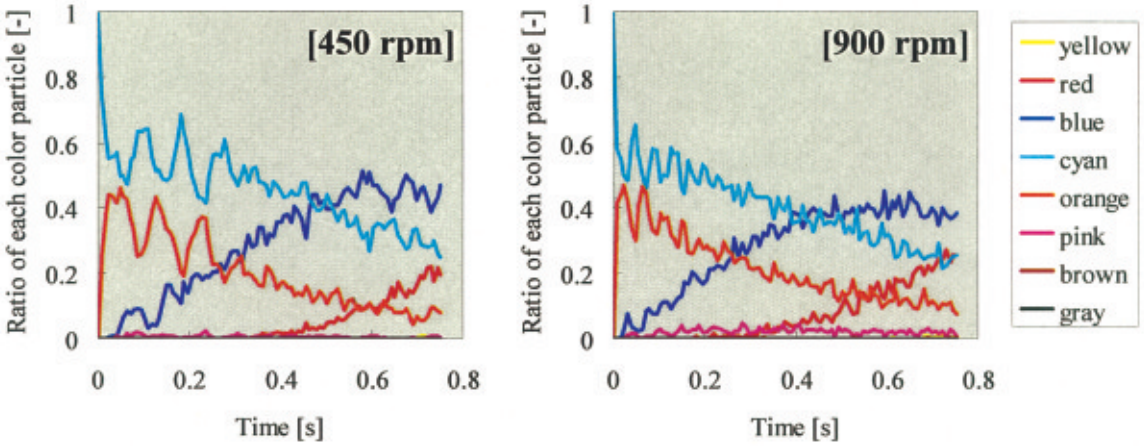


Fig. 12 Time histories of ratio of each color particle on plane 2 (0 – 0.75s, 450prm : left, 900rpm : right)

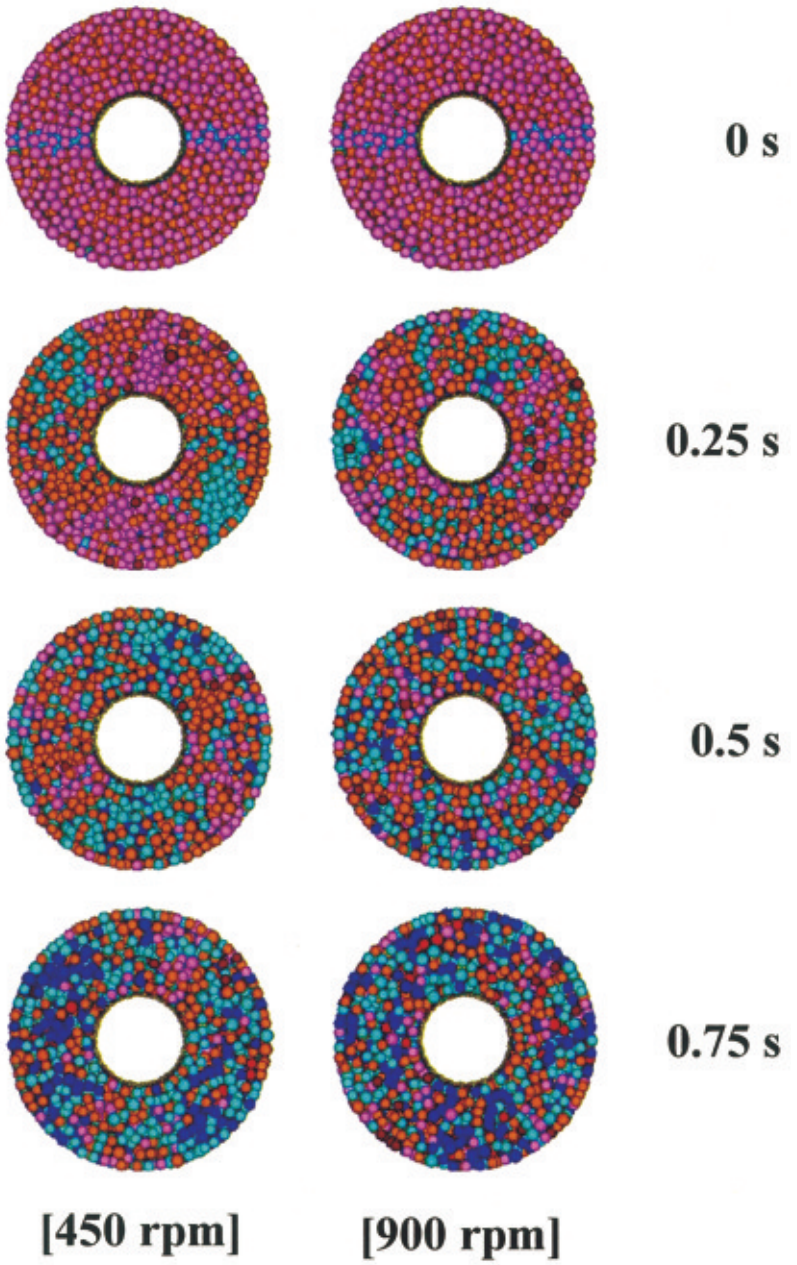


Fig. 13 Section view of results at plane 3 (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

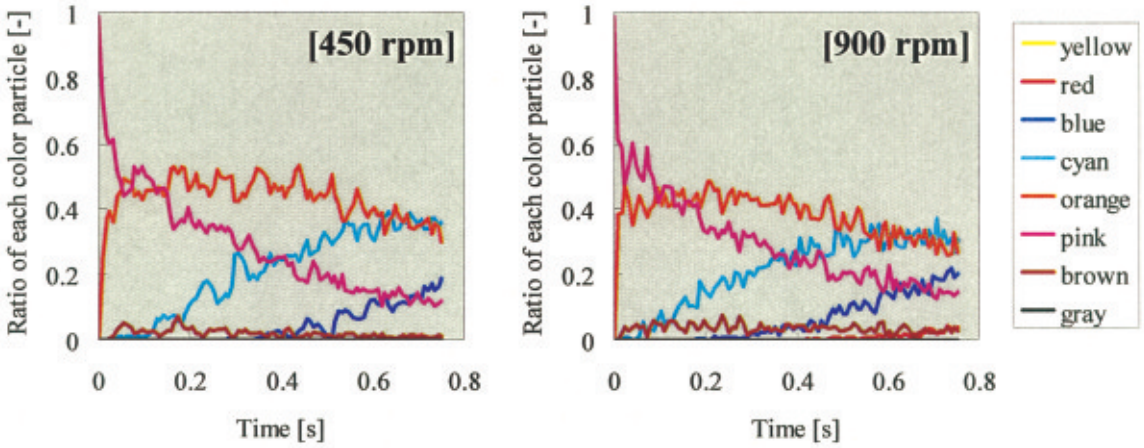


Fig. 14 Time histories of ratio of each color particle on plane 3 (0 – 0.75s, 450rpm : left, 900rpm : right)

おいても初期状態で最も多かった粒子が経時で減少するが，900rpm の方がより短時間で減少している．また，初期状態で各面の z 座標よりも大きい位置にある色の粒子が観察されていることから後退する粒子があることがわかる．

Fig. 15 は初期状態から 0.75 秒経過した最終状態時に各面に接するもしくは跨っている主粒子以外の割合を表している．plane 1 では 13.6%，plane 2 では 8.5%，plane 3 は 3.2% それぞれ 450rpm よりも 900rpm の方が高く，900rpm で回転軸を回転させた方がよく混合できていることがわかる．

Fig. 16 は，回転数を 450rpm，900rpm でそれぞれの回転させた場合の標的粒子 p1，p2，p3 の角変位履歴を，回転軸の角変位（初期位置からの回転角）とともに示している．なお角変位は $\sin\theta$ で表し，標的粒子の x，y 座標より式 (1) を用いて計算した．

$$\sin\theta = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \tag{1}$$

いずれの粒子についても粒子が回転軸の周りを回り始めるまでに遅延時間がある．遅延時間は粒子によって異なり，p1 で約 0.2 秒，p2 で約 0.3 秒，p3 は約 0.5 秒であった．回転軸の回転数による遅延時間の差はほとんどないが回転軸から離れた粒子ほど長くなっている．900rpm では p3 を除き，回転軸の周りを 1 回転以上していることが確認できる．900rpm で粒子が回転軸の周りを回る運動を回転軸の回転と比較すると，p1 が回転軸 3 回転，p2 が回転軸 4 回転，p3 は回転軸 5 回転でそれぞれ回転軸の周りを 1 周していることがわかる．これらのことから粒子の回転軸の周りを回る運動は回転軸の回転に完全に追随しているわけではないこと，回転軸の回転が回転軸近傍の粒子から遠方の粒子に伝播していることがわかる．

Fig. 17 は各標的粒子の z 座標履歴をグラフに表している．壁の変位は初期位置から動いた距離を示しており，仮想領域での平均変位に対応する．解析領域にはピンがあり仮想領域よりも容積が小さいので，解析領域中の粒子の平均変位は壁の変位よりも少し大きくなる．これ以後壁の変位方向を前方，壁の変位方向と反対側を後方と表現する．粒子の z 軸方向への駆動力は壁の変位に依存しているはずであるが，粒子は後方への動きを周期的に行っていることがわかる．後方への動きは，粒子よりも前方にあるシャフトピンが粒子と z 軸に対して平行の位置に来た時に押されることで起こると考えられる．回転軸が半回転するとピンの配置が同じ位置になるため，粒子の後方へ動く周期は回転軸の半回転周期に対応するはずである．回転軸の半回転周期は 450rpm では約 0.067 秒，900rpm では約 0.033 秒であるが，実際の各粒子の後退運動の周期は回転軸の半回転周期よりも若干長い．例えば p3 の 900rpm の場合，0.038〜0.047 秒であった．これは Fig. 6 に示したように粒子自体も回転軸の回転方向と同じ方向に回転軸の周りを回っているためである．p1 は回転軸の回転数によって変位の大きさが大きく異なっており，0.75 秒後では 450rpm では壁の変位を下回り，900rpm では壁の変位を上回っている．このことから回転軸の回転速度を変えると粒子の回転軸の周りを回る速度が変わるだけでなく，粒子の進行速度も大きく変化することがわかる．これらのことからピンマ

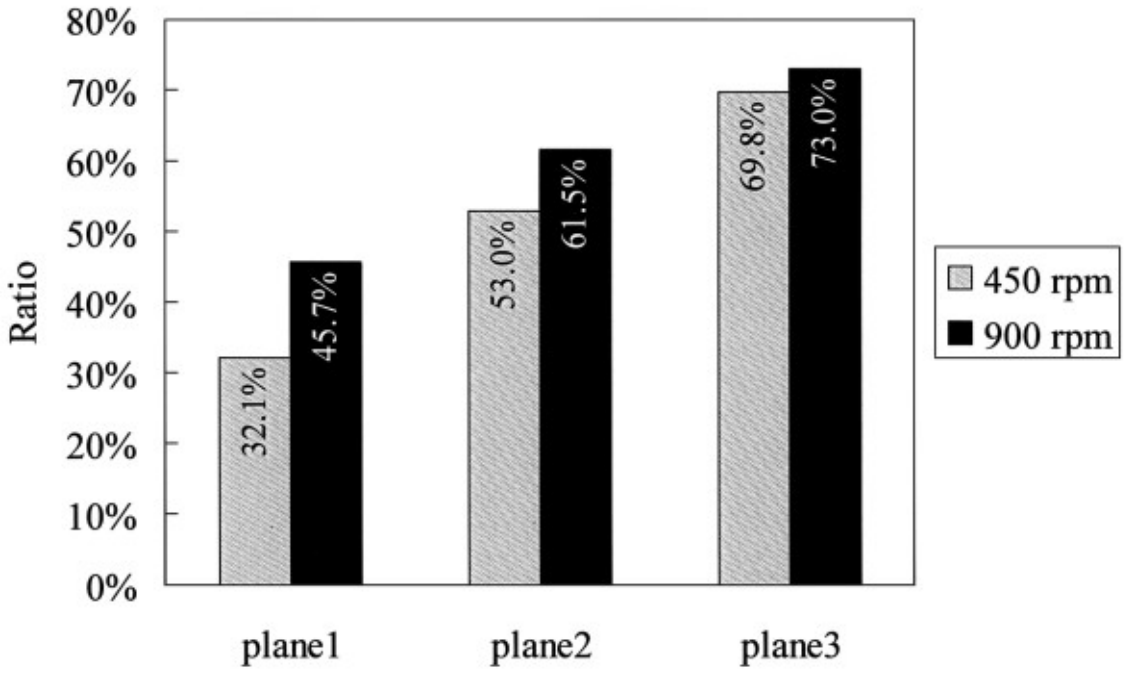


Fig. 15 Ratio of particles except main color on each plane at terminal stage
(450rpm, 900rpm, Main color ; plane 1 : red, plane 2 : blue, plane 3 : orange)

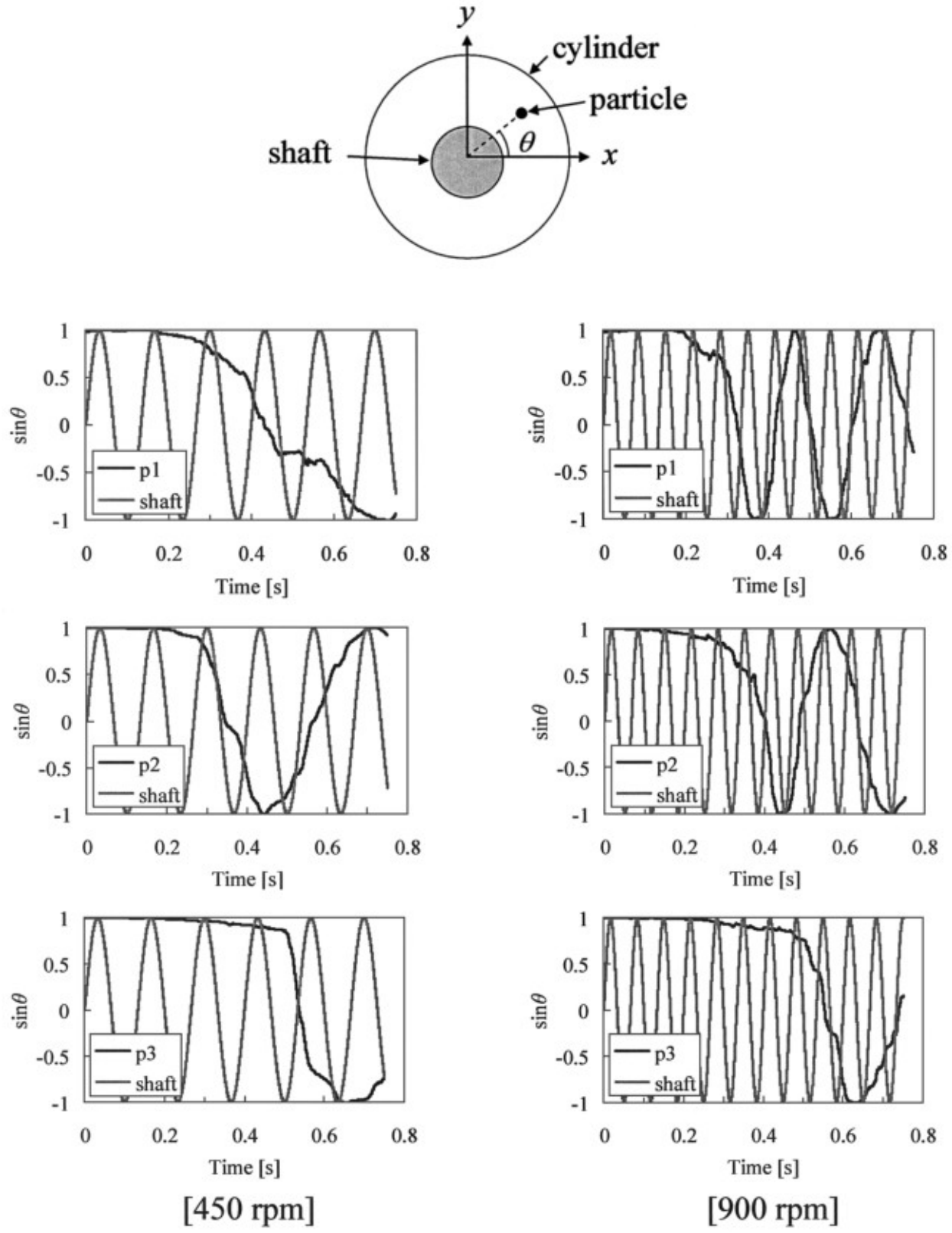


Fig. 16 Time histories of angular position of each particle p1, p2, p3 (angular position of the particle : top , 450rpm : left, 900rpm : right,)

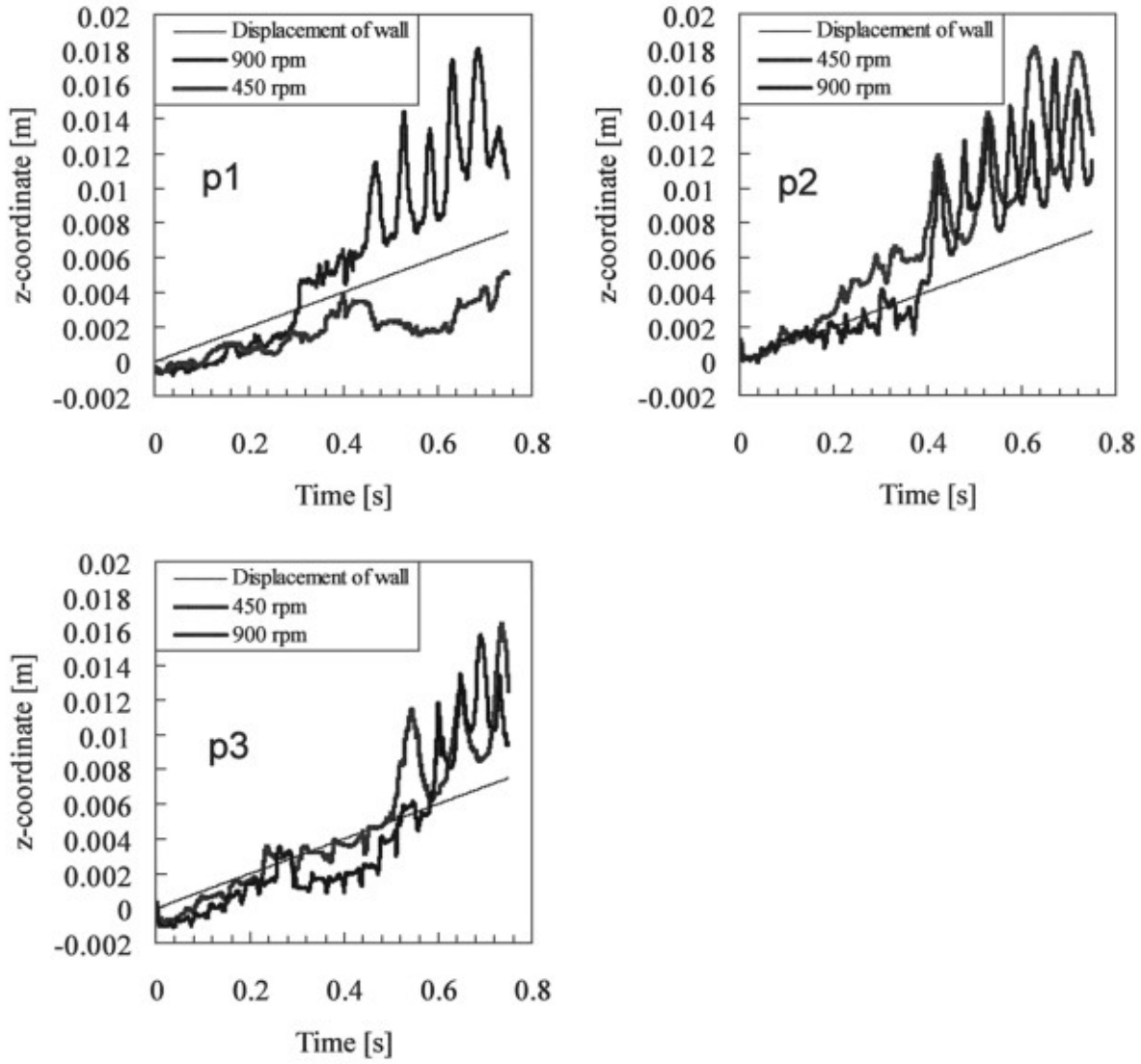


Fig. 17　Time histories of z position of each particle p1, p2, p3

シン内でマーガリンは回転軸の周りを回る運動，前方後方の往復運動を繰り返しながら混練されていくと考えられる．

3．ま と め

マーガリン製造装置を構成するユニットの一つであるピンマシン内の挙動を解明するために，個別要素法を用いたシミュレーションを行った．その結果，回転軸の回転を速くするとより混練されることが確認でき，部位によっては900rpm の方が 450rpm よりも混合が 13.6% 良好であることがわかった．また，ピンマシン内では回転軸の周りを回る運動や進行方向に逆行する運動といった複雑な動きがあることも示された．

しかしながら，今回のシミュレーション技法には課題がある．今報ではピンマシン内の混練状況の把握に主眼を置いたため，力と変位の関係に線形モデルを使用しその物性値を設定している．そのため，その応力-ひずみ特性は実際のマーガリンとは異なる．また，実験機のピンマシンは 0.1MPa 程度の圧力下で用いられている．シミュレーションの対象はピンマシンの一部であるから圧力は 0.1MPa 未満になっているはずであり，50MPa 以上の圧力下でのシミュレーションは著しく大きな圧力のもとで行われたことになる．さらにまた，時間刻みが約 5.5×10^{-8} 秒と小さいため 0.75 秒分程度のシミュレーションにも約 1,400 万サイクルと多くの計算回数が必要となった．実際には今回のモデルの大きさであってもより長時間のシミュレーションをしないと混練状況の解析には不十分であるため，時間刻みが長くとれるような物性値や初期状態の設定が必要となる．今後，実際のマーガリンの物性を示すような粒状体モデルを設定できるように実験データと照合しながらシミュレーションを行っていけば上記の問題が改善し，より精度が高い結果が得られると考える．

謝　辞

本報文を作成するに当たり，査読をしていただいた株式会社Ｊ－オイルミルズ貞包忠義氏に深く感謝申し上げます．なお，本報文は株式会社J-オイルミルズと東海大学海洋学部で2008年度より共同研究と実施している「数値解析手法（個別要素法）を用いたマーガリン製造工程の最適化」の研究成果の一部である．

参考文献

Alejandro G. Marangoni (2005): Fat Crystal Networks. Marcel Dekker, New York, 854pp.

Cundall, P.A. (1971): A Computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock system, Symp. ISRM, Nancy France Proc., **2**, 129-136.

Cundall, P. A. and Strack O.D.L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, **29**(1), 47-65.

藤田　哲（2000）：食用油脂－その利用と油脂食品，幸書房，東京，293pp.

Itasca Consulting Group, Inc. (2004): PFC^{3D} - Particle Flow code in 3 Dimensions, Version 3.1. Minneapolis, Itasca

中澤君敏（1979）：マーガリン ショートニング ラード，光琳，東京，458pp.

Shimizu, Y. and Cundall, P.A. (2001): Three-dimensional DEM simulations of bulk handling by screw conveyor. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, **9**, 864-872.

Shimizu, Y. (2006): Three-dimensional simulation using fixed coarse-grid thermal-fluid scheme and conduction heat transfer scheme in distinct element method. Powder Technology, **165**, 140-152.

種谷真一（1989）：食品の物理，槇書店，東京，352pp.

要　旨

マーガリン製造工程で混練を行うユニットであるピンマシン内のマーガリンの挙動について，離散的数値解析手法である個別要素法（DEM）を用いてシミュレーションを行い，混練具合の検討を行った．その結果，回転軸の回転速度を900rpm，450rpmとした場合を比較すると，900rpmで回転させた方が450rpmで回転させた時よりも混練度が13.6%進行している部位があることがわかった．また，ピンマシン内では粒子は流れ方向以外にも回転軸の周りを回る運動や流れ方向と反対側への運動をしていることなど新たな知見が得られた．