

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年4月19日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560170

研究課題名（和文） 準剛体回転流による高精度サブミクロン分級方式の実用化  
に向けた高効率化の追求研究課題名（英文） PURSUIT OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF AN ACCURATE SUBMICRON-  
CLASSIFICATION SYSTEM USING ALMOST RIGIDLY ROTATING FLOW  
FOR PRACTICAL APPLICATION

研究代表者

土田 陽一（TSUCHIDA YOICHI）名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30144190

研究成果の概要（和文）：本研究の最終目標は、粒度分布をもつ粉体粒子群を、準剛体回転流中で粒子に働く遠心力と流体抗力における粒度に基づく差により高精度で分ける湿式のサブミクロン分級方式を実用化することである。本研究では、これまでに実証した高精度分級方式を実用化するときキーポイントとなる連続処理化・高処理量化・多産物化をすすめるときに認められる精度低下のメカニズムを明らかにして高精度を維持するための方法を見出すために、流れの可視化観察と分級実験並びに流れと粒子運動の理論・数値解析を行った。

研究成果の概要（英文）：

Our final goal of the present study is to make our accurate wet-type submicron-classification system practicable. This system can accurately classify submicron feed-powder particles, different in size, suspended in a liquid medium by the difference in centrifugal force and fluid drag acting on each particle in almost rigidly rotating flow, due to the particle-size difference. The point of making this system practicable is to increase the throughput and classification product in our previous system developed until now. In the present study, in order to clarify the mechanism of deterioration in classification accuracy with increasing throughput and product and find the way keeping the high accuracy, we have conducted classification experiments and have numerically simulated the flow and particle motion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	2,000,000	600,000	2,600,000
平成22年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成23年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：遠心分級・湿式分級・三産物分級・準剛体回転流・

内部流・軸対称流・スチュワートソン層・エクマン層

## 1. 研究開始当初の背景

半導体産業をはじめとする先端技術分野の産業界を支えるファイン・セラミックス、高分子材料や複合材料などの新素材分野で

は、近年、ユーザニーズの高度化に伴ってその材料特性を高機能化するために、原料粉体の粒度調整、特に粒度の均一化とサブミクロン化、の要求が厳しくなっており、今後

なお一層その傾向が強まる方向にある。粉体の製造プロセスには、ブレイキングダウン・プロセス(機械的粉碎)とビルディングアップ・プロセス(化学的合成)の二つがあるが、両プロセスともに程度の差こそあれ製造した粉体に粒度分布が生じるので、製品化の最終工程では精密な微粉分級(粒度によって分ける)が不可欠である。

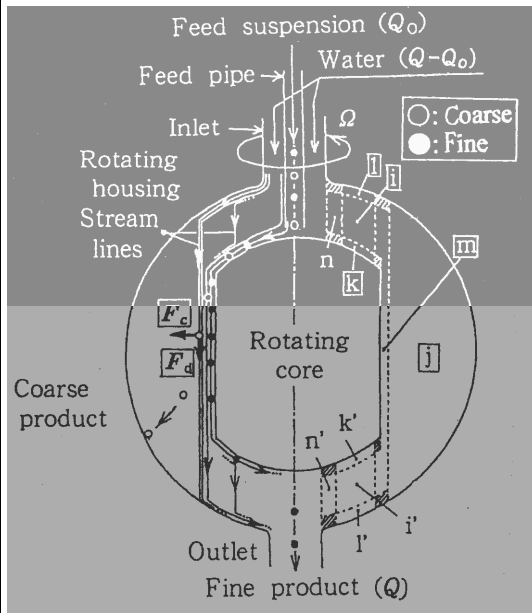
このような背景のもとに種々の湿式(液体)及び乾式(気体)分級機が開発されてきたが、上述の厳しい粒度調整の要求を十分に満足するものが実現しているとはいえない。これを実現するためには、①持続的に働く強力な分離力、②乱れがまったくない分級場(完全な層流場)、③分級後の製品(産物)の混合阻止、④ほぼ完全な粒子分散の四条件を兼ね備えることが絶対に必要である。しかしながら、従来の遠心分級方式では、条件①の強力な分離力が発生する高速回転時の乱流場において乱れを抑制して②の完全な層流場を実現することは原理的に不可能であった。

そこで筆者らは、上述の①～④の精密微粉分級条件を下記のようにすべて満足する準剛体回転流を分級場とする新しい遠心分級方式(湿式)を提案し、まずバッチ式の単段の二産物分級機(原料粉体 Feed を粗粉産物 Coarse と微粉産物 Fine の二産物に分ける)を確立した。

本方式は、①の強力な分離力を生じる高速回転時においても原理的に乱れが発生せず、②の完全な層流場を維持する準剛体回転流の中で分級する。粒度分布をもつ原料粉体の懸濁液を本分級機に供給すると、微細粒子は遠心力よりも流体抗力の影響を大きく受けるが、粗大粒子は遠心力の影響をより大きく受けるので、それらの粒子軌道に差が生じて微粉産物と粗粉産物の捕集部にきっちりと捕集され、捕集後も両産物(製品)が混合することはない(③)。また本方式は湿式であるので、使用可能な分散剤によって、原料粉体の懸濁液はほぼ完全に分散される(④)。

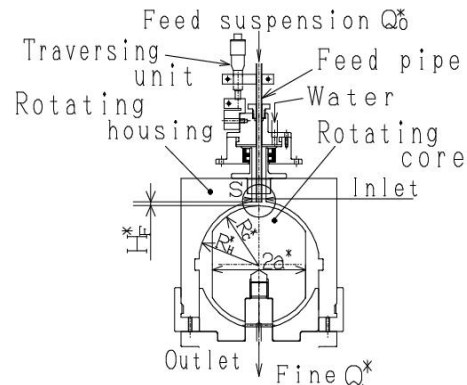
## 2. 研究の目的

本方式の極めて高い精度は、準剛体回転流の生成条件(高速回転で微少流量)から知られるように、処理量の犠牲の上に得られるものであり(少処理量向き)、本方式は基本的に高付加価値の粉体を対象とするが、連続処理化や高処理量化、多産物化のような高効率化を確実に実現できれば、その対象範囲を広げることができ実用化に向かう。そこで本研究の目的は、これまでに実証した高精度分級方式を実用化するときのキーポイントとなる連続処理化・高処理量化・多産物化に伴う精度の低下のメカニズムを明らかにして、極めて高い精度を維持するための方法を見出すことである。



(a) 分級原理

(Feed を Coarse ○ と Fine ● の二産物に分級 ; k, l, k', l' : エクマン層 ; i, i' : 内部領域 ; j : 剛体回転領域 ; m, n, n' : スチュワートソン層 ;  $F_c$  : 遠心力 ;  $F_d$  : 流体抗力)



(b) 実験装置本体

図1 バッチ式の単段二産物分級機

## 3. 研究の方法

主に使用した研究方法は、準剛体回転流の流れ構造を把握するための流れの可視化観察方法並びに分級性能を評価するための分級実験方法及び流れと粒子運動の理論・数値解析方法である。

まず、流れの可視化観察方法と分級実験方法の詳細は、以下のとおりである。

図1は実験に使用したバッチ式の単段二産物分級機を示す。原料粉体は高純度合成球状シリカ(SO-C3, 真比重 2.2, 動力学的形状係数 1), 分散媒は水, 分散剤はポリカルボン酸アンモニウム(セルナ D-305)である。分級実験は以下の手順で行う。まず初期設定として水をフィード(質量流量  $m_0^*$ , 体積流量  $Q_0^*$ )





メータ  $C_E$  とエクマン数  $E$  を設定し、各流入出口部での流れを二円板間のポアユイズ流れと仮定し、入口部  $O$  での粒子の初期速度を流体速度と一致させた。なお、収率（処理量を表す指標）の計算に必要な原料粉体の頻度分布  $f_0$  を、便宜上、一様分布と仮定した。

#### 4. 研究成果

図1のバッチ式の単段二産物分級機について、分級実験により以下の主な知見を得た。

(1) スラリーの高濃度化による高処理量化について、水をフィードとする初期設定時でのフィード比を増やしかつスラリー分級時のフィード比を初期設定時の値に戻せば、分級精度は少し低下するが、希薄時の分級径を維持した高処理量の分級が可能となる。

(2) 高流量化による高処理量化について、高流量化に伴い条件によって分級精度が低下するのは、分級場入口において給水による高精度化（粗粉産物への微細粒子の混入阻止）がうまく働かないからである。給水は原料粉体懸濁液（微細粒子を含む）をコア側のエクマン層に入れることによって粗粉産物に混入しないようにするためのものであるが、高流量時には条件によって入口で乱れが生じるために微細粒子がハウジング側のエクマン層（図5(a)の  $E_U$ ）に入って、精度が低下する。そこで、フィードパイプ（図4(a)）にスカート（図4(b)）を装着して、図5(b)に示すようにハウジング側のエクマン層に入らないようすれば精度低下を防止できる。

(3) 高流量化と高濃度化を併用する高処理量化について、

① 希薄及び高濃度で低流量のときに成立するスケール則の“分級径は遠心効果パラメータを固定したとき一定となる”は、希薄濃度で高流量のとき成立するが、高濃度で高流量のときには成立しない。

② 高濃度で高流量のとき、最小粒径付近の微細粒子は粒子干渉によって微粉産物の捕集部に至らないため、微粉産物の部分分級効率は最小粒径において1の値には到達せず零となる。

③ 原料粉体が従来のようにフィードパイプからコア側のエクマン層にのみ供給される場合、高濃度化すると分級精度は向上し収率は増加するが、ハウジング側エクマン層にも進入する場合は、高濃度化するにつれて精度は悪化し収率は低下する。

図2の連続式高処理量型の三産物分級方式について、分級実験により以下の主な知見を得た。

(1) 分級条件によっては、微細粒子が中間粉産物に混入するため数値解析結果から得られる高精度が得られない。この原因は、入口部から入った原料粉体（微細粒子を含む）が分級場のスチュワートソン層に入らない

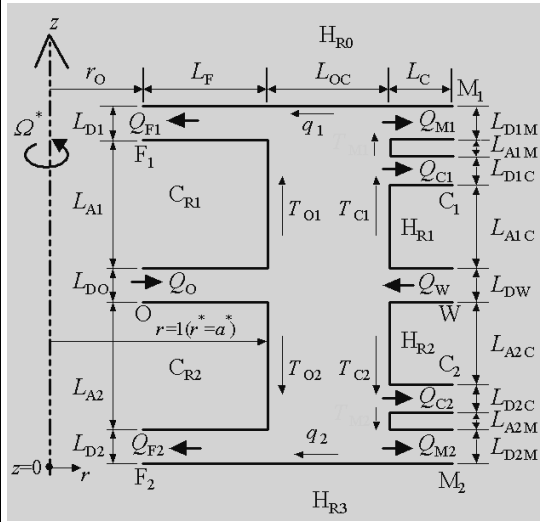
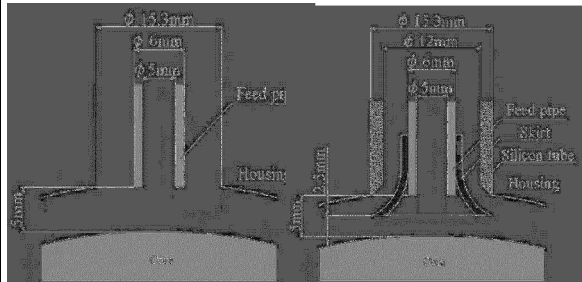
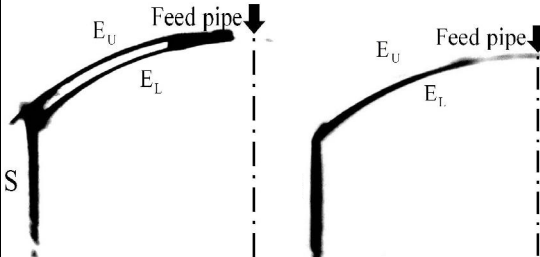


図3 連続式高処理量型三産物分級機の数値解析形状 ( $r_0 = 0.41$ ,  $L_F = 0.59$ ,  $L_{OC} + L_C = 0.868$ ,  $L_{Di} = L_{DO} = 0.15$ ,  $L_{Ai} = L_A$ ,  $L_{DIM} = L_{DIC} = L_{DW} = 0.15$ ,  $L_{AIM} = L_{AM} = 0.075$ ,  $L_{AIC} = L_{AC}$ ,  $L_A - L_{AC} = 0.23$ ,  $Q_0 = 1$ ,  $Q_{ji} = 0.5Q_j$  as  $J = F, M, C$ ,  $Q_W = -Q_0 + Q_F + Q_M + Q_C$ ,  $q_i = q = Q_F - 0.5Q_0$ ,  $T_{O1} = T_O = 0.5Q_0$ ,  $T_{C1} = T_C = 0.5(-Q_0 + Q_F + Q_M + Q_C)$ ,  $T_{M1} = T_M = 0.5(-Q_0 + Q_F + Q_M)$  as  $i = 1, 2$ ; Hr: housing, Cr: core)



(a) スカートなし (b) スカート装着

図4 図1の装置入口部（上部）のフィードパイプへのスカートの装着



(a) スカートなし (b) スカート装着

図5 図4(b)のスカート装着によるハウジング側のエクマン層へのフィード流れの進入阻止

ため、分級作用を受けずに中間粉産物に混入するからである。これを防止するためには、半径方向内向きの給水量を増やして微細粒子を微粉産物に向かわせることが有効であり、これにより数値解析結果とは平均径がずれるものの定性的に同じ結果が得られる。

図3の連続式高処理量型の三産物分級方式について、理論・数値解析により以下の主な知見を得た。

(1) 分級機形状、流量配分並びに支配パラメータの制御による分級性能について、

① 中間粉産物の捕集部の幅を変えると、平均径がシフトするが、流量配分や支配パラメータを制御することで平均径を一定に保つことができる。

② 中間粉産物の捕集部の幅を狭くすると、収率は減少するが、粒度を均一化することができる。

(2) 分級性能に関するスケール則について、

① 支配パラメータであるエクマン数を一定として遠心効果パラメータを増大させると、各産物の部分分級効率曲線は微細側へシフトする。

② 遠心効果パラメータを一定としてエクマン数を減少させても、部分分級効率曲線は微細側へシフトする。

③ 微粉産物と粗粉産物の分級径を定める遠心効果パラメータとエクマン数の関数を導出した。

④ 微粉産物、粗粉産物の任意%の分離粒子径に対する部分分級効率に関するスケール則を導出し、これらから中間粉産物の部分分級効率に関するスケール則を導出した。

⑤ 中間粉産物の分級性能(収率、平均径、粒径の変動係数)を遠心効果パラメータとエクマン数の関数として導出した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計18件)

- ① 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた高処理量型の単段分級方式の開発, 日本機械学会東海支部 第61期 総会講演会講演論文集 No. 123-1 (2頁), 2012年3月15日, 名古屋工業大学.
- ② 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた分級方式における高処理量化のための粉体の供給方法の実験的考察, 日本機械学会東海支部 第61期 総会講演会講演論文集 No. 123-1, (2頁), 2012年3月15日, 名古屋工業大学.
- ③ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた三産物分級方式における壁形状によるスチュワートソン層流れの制御, 日本機械学会東海支部 第61期 総会講演会講演論文集 No. 123-1, (2頁), 2012年3月15日,

名古屋工業大学.

- ④ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた高精度分級方式の高処理量化に関する研究, 日本機械学会 東海支部 第61期 総会講演会講演論文集 No. 123-1, (2頁), 2012年3月15日, 名古屋工業大学.
- ⑤ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた単段遠心分級方式における高流量化と高濃度化の併用に伴う精度変化の実験的考察, 日本機械学会, 2010年度 年次大会講演論文集, (2頁), 2010年9月7日, 名古屋工業大学.
- ⑥ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた三産物分級方式の中間粉産物に関するスケール側の数値的考察, 日本機械学会, 2010年度 年次大会講演論文集, (2頁), 2010年9月7日, 名古屋工業大学.
- ⑦ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた単段遠心分級方式における高流量化・高濃度化に伴う性能変化の実験的考察, 日本機械学会, 2010年度 年次大会講演論文集, (2頁), 2010年9月7日, 名古屋工業大学.
- ⑧ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた三産物分級方式の分級性能に関するスケール則の数値的考察, 日本機械学会, 2010年度 年次大会講演論文集, (2頁), 2010年9月7日, 名古屋工業大学.
- ⑨ Yoichi TSUCHIDA, Scaling Law in Performance of a New Accurate High-throughput Triple-product Classification System using Almost Rigidly Rotating Flow, World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010), (4頁), 2010年4月27日, Nürnberg Messe, Nürnberg, Germany.
- ⑩ Yoichi TSUCHIDA, Improvement in Performance of a New Accurate High-throughput Triple-product Classification System using Almost Rigidly Rotating Flow, World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010), (4頁), 2010年4月28日, Nürnberg Messe, Nürnberg, Germany.
- ⑪ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた単段分級方式における高濃度処理時の分級条件の最適化, 日本機械学会 87期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2頁), 2009年11月8日, 名古屋工業大学.
- ⑫ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた微粒子分級方式における流れおよび粒子運動の理論的・数値的研究, 日本機械学会 87期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2頁), 2009年11月8日, 名古屋工業大学.
- ⑬ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた三産

物分級方式における分級機形状と流量配分の制御による分級性能の高性能化, 日本機械学会 87 期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2 頁), 2009 年 11 月 8 日, 名古屋工業大学.

- ⑬ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた単段分級方式による分級径・精度の変化と分級条件の関係, 日本機械学会 87 期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2 頁), 2009 年 11 月 8 日, 名古屋工業大学.
- ⑭ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた三産物分級方式の性能におけるスケール則の特徴, 日本機械学会 87 期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2 頁), 2009 年 11 月 8 日, 名古屋工業大学.
- ⑮ 土田 陽一, 準剛体回転流を用いた単段分級方式における高流量化による高処理量の実験的研究, 日本機械学会 87 期 流体工学部門講演会講演論文集 No. 09-8, (2 頁), 2009 年 11 月 8 日, 名古屋工業大学.
- ⑯ Yoi chi TSUCHI DA, Numeri cal Performance -Esti mation of an Accurate Centri fugal Triple-Product Cl assi fier. 1. Improve -ment of Yield by Controlling Flow -rate Distri buti on, The Fourth Asi an Technol ogy Symposi um (APT 2009), (6 頁), 2009 年 9 月 16 日, Hotel Samrat, New Delhi, Indi a.
- ⑰ Yoi chi TSUCHI DA, Numeri cal Performance -Esti mation of an Accurate Centri fugal Triple-Product Cl assi fier. 2. Improve -ment of Accuracy by Controlling Flow -rate Distri buti on, The Fourth Asi an Technol ogy Symposi um (APT 2009), (6 頁), 2009 年 9 月 16 日, Hotel Samrat, New Delhi, Indi a.

[その他]

ホームページ等

<http://tsuchi da. web. ni tech. ac. jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

土田 陽一 (TSUCHI DA YOI CHI)  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 3 0 1 4 4 1 9 0

### (2)研究協力者

中林 功一 (NAKABAYASHI KOI CHI)  
名古屋工業大学・名誉教授  
森西 洋平 (MORINI SHI YOHEI)  
名古屋工業大学・工学研究科・教授  
海道 拓哉 (KAI DO TAKUYA)  
橋口 徹 (HASHI GUCHI TORU)  
野津 佑太郎 (NOTSU YUTARO)  
中垣 徹 (NAKAGAKI TORU)

平野 恭兵 (HIRANO KYOHEI)  
吉田 進太郎 (YOSHI DA SHINTARO)  
庄司 光一 (SHOJI KOI CHI)  
廣瀬 晃 (HI ROSE AKI RA)  
祐成 雄志 (SUKENARI YUJI)  
向江 雅人 (MASATO MUKAE)  
鈴木 祥宏 (SUZUKI YOSHI HI RO)  
杉山 惇 (SUGI YAMA ATSUSHI)  
名古屋工業大学・工学研究科・機能工学  
専攻に在籍中あるいは在籍された方々.