

学位論文の要旨

氏名	李 笛
学位論文題目	固液流動層内二成分粒子群の定常と非定常流動特性に関する研究

本研究は、実際の工業プロセスの要求に基づいて、粒子径が異なる二成分粒子群を用い、固液流動層における定常状態及び非定常状態の流動特性を明らかにすることを目的として行ったものである。定常状態における研究では、適用範囲が広く、精度が高いスリップ速度推算モデルを構築した。非定常状態に関する研究では、流動層における粒子群の濃度経過時変化を実験的に調べ、この変化は様々な操作条件にどのように依存するかについて検討した結果に基づいてモデルを構築し、塔内粒子濃度の経時変化について数値シミュレーションを行った。本論文は、固液流動層における定常状態と非定常状態の流動特性をまとめたものである。

第1章は、緒論として、固液流動層について、工業プロセスにおける様々な応用例など紹介し、また、関連する既往の研究を振り返って、どのような研究が展開されているか説明した。実際の要求と既存研究の足りないところから、本研究の目的を明らかにし、研究の概略を説明した。

第2章は、粒子径の異なる二成分粒子群を用いた粒子群・流体間スリップ速度について検討した。完全に発達した鉛直管内固液二相流における二成分粒子群・流体間のスリップ速度を実験的に測定し、全粒子濃度、粒径比、濃度比がスリップ速度の変化に与える影響を定量的に解明した。各成分の粒子群間に相互干渉が起こるという観点から、粒子群・流体間のスリップ推算するモデルを構築した。本モデルは、全粒子濃度、粒径比、濃度比によらず、各粒子群のスリップ速度を高精度に推算可能であることが検証した。

また、本モデルにおいても使用した、単成分粒子群を用い、層膨張の場合に得られたHidakaモデルは、粒子が上昇、沈降する場合にも適用可能であることを確認した。

さらに、二成分粒子群における各粒子群に作用する力の大きさを分析し、本実験範囲では、衝突の影響が無視できることを示し、大粒子・小粒子群の抵抗係数について推算可能な式を定義した。

第3章は、単成分粒子群を用いる場合、固液二相流動層の応答特性について検討した。操作条件が変化すると、固液二相流動層における粒子の運動状態は変化し、装置内における反応や、熱と物質の移動は大きな影響を受ける。それによって、このような装置を最適な条件で設計、運転、制御するためには、非定常特性に関する情報が大変重要である。

液速度を急激変化させた場合において、固液流動層内単成分粒子群の濃度経時変化を実験より調べた。また、異なる粒子径、液速度の変化幅、及び液速度の増加と減少など操作条件が粒子群の濃度経時変化に与える影響を考察し、この変化が様々な因子にどのように依存するかについて検討し、擬定常近似式に拡散の効果を考慮する粒子濃度の経時変化のシミュレーションモデルを構築した。このモデルによる結果は、単成分粒子群において実測値とほぼ一致することを検証した。

第4章は、実際の流動層操作条件における固体粒子がまったく同じ特性を持っている場合は少ないと想定されることから、粒子径が異なる二成分粒子群を用い、固相粒子の非定常流動特性について検討した。

二成分粒子群を用い、液速度を急激に変化させた場合における各粒子群の濃度変化について、実験的に解明した。さらに、濃度変化に影響を与える様々な因子を定量的に調べて検討し、シミュレーションモデルを構築した。このモデルによる数値解析結果について、二成分粒子群中の大粒子の実測値とほぼ一致し、小粒子の実験結果と定性的に一致するが、単成分時に比べて実測値との差異が拡大したことがわかった。

第5章は、本研究の結果について総括したものである。本研究で、定常状態における粒径の異なる二成分粒子群のスリップ速度を高い精度で推算可能なモデルを構築し、また、衝突を無視した抵抗係数を推算可能な近似式を得た。

さらに、液速度を急激に変化させた場合、単成分及び二成分粒子群の濃度変化状態について、実験により考察し、粒子濃度の経時変化について、妥当な推算精度を有する数値モデルを構築した。

論文審査の要旨

報告番号	理工研 第219号	氏名	李 笛
審査委員	主 査	松本 利達	
	副 査	幡手 泰雄	甲斐 敬美

学位論文題目 固液流動層内二成分粒子群の定常と非定常流動特性に関する研究
(A Research on Flow Characteristics of Two-Sized Particles under Steady and Unsteady State in a Liquid-Solid Fluidized Bed)

審査要旨

提出された学位論文及び論文目録等を基に学位論文審査を実施した。本論文は、平均粒径の異なる2種類の粒子を混合して流動させた固液流動層内の粒子濃度分布および混合特性を定常操作時および非定常操作において実験的、解析的に研究した結果をまとめたもので、全文5章より構成されている。

第1章は序論で、固液流動層に関する従来の研究は比較的粒子径分布の狭い粒子を用いた場合の研究が殆どであり、幅広い粒子径分布あるいは代表粒子径が異なる混合粒子の場合の研究、また液速変化等の非定常操作における粒子濃度分布の過渡応答特性に関する研究例は少なく、触媒流動装置等の精密設計および非定常操作時の層内挙動の予測方法は必ずしも確立されていないため現象の基礎的解明が必要なことを述べ、本研究の目的がその基礎として代表粒子径の異なる二成分粒子の固液流動層における鉛直方向濃度分布等の解明にあることを述べている。

第2章では、代表粒子径が異なる2種類のガラスビーズを管径7cmの鉛直管内に水道水を用いて流動させ、鉛直方向約4mに渡る粒子濃度分布一定区間の各成分濃度と質量流量の測定から管断面平均値としての各成分粒子の粒子一流体間のスリップ速度について検討した結果を述べている。平均粒子径152 μ mから915 μ mに及ぶ5種類の粒子を組み合わせた二成分系について、全粒子濃度、成分濃度比、粒子径比の影響を明らかにしている。全粒子濃度が低い場合は個別に単成分の場合のスリップ速度となるが、全粒子濃度が高くなるにつれて両者の速度は濃度比の重みをもって互いに接近した速度を示し、全粒子体積分立が約0.5以上では両成分とも濃度比の重みつき平均値を取ること明らかにし、これらの挙動を系統的に表す実験式および各成分粒子一流体間の抵抗係数として無次元整理式を示し、成分粒子及び液の質量流量等と管内粒子濃度の関係を一義的に求めることを可能にした。

第3章では、粒子径分布幅の少ない固液流動層において、液速をステップ状に増加あるいは減少した場合の鉛直方向粒子濃度分布および粒子層高の非定常変化について述べている。液速上昇時には流動層下部から粒子濃度が減少し始めその上部層に最大値を持つ分布が蠕動的に上層へ移動しその後徐々に均一な定常時の分布に漸近し、液速減少時には層下部から濃厚層が形成されることを見出し、粒子流体間のスリップ速度の擬定常近似と乱流変動に起因する粒子の乱流拡散係数を導入したモデル解析を提案し、最大で約2倍程度の液速変化幅に対して濃度分布の応答特性が良好に表せることを示し、導入した拡散係数は粒子径と変化前後の液速を考慮した相関式で表せることを述べている。

第4章では、二成分系の場合の液速ステップ状変化時における鉛直方向粒子濃度分布の経時変化を検討した結果を述べている。すなわち、測定結果を第2章で述べた粒子流体間スリップ速度と第3章で述べた各成分粒子の拡散係数を用いたモデル解析と比較考察し、主として層下部の大粒子濃厚層の濃度変化はほぼ良好に表せるが、塔上部に形成される小粒子濃厚域との混合域の複雑な遷移過程を詳細に表すにはモデル解析の若干の改良に加えてさらなる現象論的解明が望まれることを述べている。

第5章は結論で、各章の要約と総括、及び多成分形への拡張など今後の課題と展望を述べている。

以上本論文は、代表粒子径を異にする二成分固液流動層の流動特性に関して、定常状態における粒子流体間のスリップ速度および液速をステップ状に変化した場合の濃度分布の過渡応答特性を明らかにしており、かかる装置の設計における混合や分級状況の推定、運転・制御における粒子の溢注予測に資する有用な知見を与えたものであり、この分野の工学の進展に寄与するところが大きい。

よって、審査委員会は博士(工学)の学位論文として合格と判定する。

最終試験結果の要旨

報告番号	理工研 第219号	氏名	李 笛
審査委員	主 査	松本 利達	
	副 査	幡手 泰雄	甲斐 敬美

最終試験は、平成18年2月3日午後3時10分から1時間にわたり行われた。著者より、40分間の論文の概要説明があった。概要説明は、本論文の序説としての第1章の簡単な内容説明と、論文の中核をなす第2章から第4章を中心に発表し、最後に簡潔に第5章の研究の総括を行った。この概要説明の後、副査及び公聴会出席者との質疑応答が行われた。主な質問と回答は以下のものであった。

(1) 本研究によって得られた情報の具体的な工業上の応用例について質問があった。これに対して、直接重油脱硫装置や接触改質装置では触媒を担持した粒子を流動させる固液流動装置の例であるが、本研究のように代表粒子径を異にする粒子を用いた具体例は文献検索上では見あたらない。しかし、今後多成分系に拡張することにより、運転中の粒子の凝集による肥大化あるいは破砕などの場合の分級状況予測や破砕粒子の水篩除去などの場面で応用することを期待しているとの回答がなされた。

(2) 液速変化直後の塔底部のシミュレーション結果と測定値の一致性があまり良くないことについて質問があった。これに対し、本研究では流量変化がほぼ1秒内外でステップ状に反応しているのに対し層全体の遷移状況が約60秒とゆっくりしていたため、固液間のスリップ速度に擬定常の手法で処理しているので変化直後の非定常性が大きいときの一致性が悪くなったのではと考え、粒子の運動に慣性項を考慮した計算も行って見たが1秒以内で終末速度に達していることになり、主たる要因は塔底付近の局所的流動の影響も強く反映されているためではないかと考えているとの説明がなされた。

(3) 非定常現象のモデル解析において拡散係数は層内で一定値を用いているが、この拡散係数は塔内の位置、塔の高さなどの影響は無いのかとの質問があった。このことに対しては、鉛直方向に局所の拡散係数を実測の濃度分布の微分値から逆算し検討したが、経過時間、粒子濃度によって異なる複雑な値となり整理とパラメータ同定が困難であり、本研究では、モデルの単純さを重要視して一定値として同定したが、本実験の範囲ではほぼ妥当な応答特性の表現ができていると判断したとの回答がなされた。また関連する事項として、この拡散係数は分子拡散か乱流拡散かとの質問に対し、乱流変動に伴う時間平均値を時間平均濃度勾配に比例すると仮定して導入した乱流拡散係数であって、管型反応器などの場合の逆混合係数に相当するものである。固気系の流動層では $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーであるのに対し本研究の場合は $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ のオーダーであり、ほぼ妥当な値と考えているとの回答がなされた。

(4) 塔内半径方向の中心部と壁付近における粒子は異なる速度で運動していると思われるが、シミュレーションする際には、粒子の平均速度を使用している。これは誤差の原因と思われるが如何かとの質問がなされた。これに対して、厳密には確かにそのとおりであり精度は向上すると思われるとの回答がなされた。また、補足的に、特に濃厚状態において確実に半径方向の情報を得る手段が得られなかったため、本研究ではシャッターリング法により管断面平均値の濃度とそれに対応した管断面平均速度の情報しか得ていないが定常状態単成分の場合には層膨張の状態と流通状態のときでスリップ速度はほぼ同一の値となったことからシミュレーションにも平均値を用いたとの説明がなされた。

(5) その他、発表時の聴き取り難かった事項および説明を割愛した事項など数点の質問があり、これらに対しても用意した図を用いて適切な説明を行った。

以上の質疑応答において、著者の回答と説明は質問者を十分に納得させるものであった。よって、本審査委員会は、学位申請者、李笛氏が大学院博士課程修了者として認められる学力を有していると判断し、最終試験を合格とした。