

博士 (工 学) 倉 本 浩 司

學位論文題名

Motion of Solid Particles in a Riser of Circulating Fluidized Bed Systems

(循環流動層システムライザーにおける粒子群の運動)

学位論文内容の要旨

循環流動層装置は固体粒子群を上昇管（ライザー）内で粒子の終末速度、 u_t 、以上の高速ガスあるいは液によって流動化し、ライザーから飛出す粒子群をサイクロンにより捕集後、下降管（ダウンカマー）中を落下させ、底部から供給器によりライザー底部に再供給して循環するものである。これにより、触媒あるいは固体燃料などの粒子群を連続的に輸送しながら流体に接触させることができるので、石炭燃焼およびガス化、種々の固体反応、造粒など、工業分野において広く利用されている。この高速下での粒子層の流動特性は極めて複雑であり、流体速度および粒子循環速度などの操作条件ばかりでなく、装置構造にも強く依存するため、不明な点が多く残されている。そこで、本研究では、ライザー内の粒子流動特性に対する操作条件と装置因子の影響を明らかにすることを目的として系統的な実験的を行い、結果を考察した。本論文はその成果を纏めたものである。

論文は、つきの6章から構成されている。

第1章では、本研究に関する既往の研究をレビューし、本研究の位置付けと研究目的を述べている。

第2章は、気固系循環流動層ライザー内の巨視的な流動に対する装置構造の影響を明らかにするために、内径が 0.10m、高さが 5.5m および 10.0m のライザーを有する 2 つの循環流動層実験装置を用い、種々のガス速度, u_{g0} , 粒子循環流束, G_s , およびダウンカマー内初期粒子充填高さ, H_{sd} , において、高さ方向の層内粒子濃度分布を系統的に測定した結果を述べたものである。ライザー下部に粒子群のクラスターから成る粒子濃厚領域、上部に希薄領域を形成する結果、S 字型の濃度分布が出現するような特定の u_{g0} および G_s の場合に限り、定常状態に達するまでに長い時間を要し、定常状態における下部濃厚領域の高さは H_{sd} とともに増加することを明らかにしている。また、濃厚領域高さは高いライザーの場合の方が低いライザーの場合より高くなることを明らかにしている。

第3章は、前章で明らかにした特定の u_{g0} と G_s のときに認められた粒子濃度分布の非定常変動特性を詳細に検討した結果を述べたものである。すなわち、 u_{g0} を一定とし、異なる G_s および H_{sd} においてライザーとダウンカマー内圧力分布の経時変化を同時に測定し、ライザー内 S 字型分布と粒子循環流束の変動がダウンカマー底部の圧力、 P_{d0} 、の時間変動と密接に関連することを見出している、さらに、 P_{d0} をダウンカマー底部に空気を供給することにより意図的に変化させる実験を行い、S 字型分布が現れるような条件では P_{d0} の増加に伴って濃厚領域が高くなることを明らかにしている。

第4章は、上述の粒子クラスター生成や粒子濃度分布に対する装置規模の影響や構成装置間の圧力干渉による不安定で不均一な流動状態などの現象を単純化して観察できる液系循環流動層装置を用い、高液速度における粒子群の流動状態を検討した結果を述べたものである。種々の液速度、 u_{l0} 、および粒子循環流束においてライザー内高さ方向の粒子濃度分布を測定し、まず、液系流動層では分布は見られないこと、層は u_{l0} が低い場合は均一流動状態を示すが、高くなると粒子群が縦縞状の凝集体を形成する不均一流動状態となることを初めて見出している。ついで、測定結果に基づいて空隙率および粒子一流体間スリップ速度、 u_{slip} 、と操作条件の関係を解析し、不均一流動状態では u_{slip} は単一粒子の u_t を上回り、既存の回分式液系流動層の層膨張推算式が全く適用できないことを明らかにしている。さらに、粒子を写真撮影、画像解析して、液速度が高くなると大きなスケールの粒子凝集体が現れること、局所的な空隙率の分布はフラクタルであり、複雑さは均一流動と不均一流動の場合あまり異ならないことを明らかにしている。

第5章では、液系循環流動層ライザーにおける局所空隙率、 ε 、および対流伝熱係数、 h_c 、の時間に伴う変動を新規に開発、製作したプローブにより測定し、決定論的カオス理論に基づいて定量的に検討した結果を述べている。種々の条件下で得た ε および h_c の時系列データから再構築したストレンジアトラクターの複雑さおよび時間発展性を示す相関次元、 D_c 、およびコロモゴロフエントロピー、 K 、を求め、時間平均の h_c と ε および熱流束の変動に関する D_c および K の関係を検討している。 u_{l0} の増加および ε の減少とともに h_c の変動に関する D_c の増加を確認し、粒子濃度の増加により局所対流伝熱が促進されていることを明らかにしている。

第6章は、本研究の成果を総括したものである。

学位論文審査の要旨

主査 教授 千葉忠俊

副査 教授 篠原邦夫

副査 助教授 林潤一郎

副査 教授 吉田邦夫(東京大学大学院工学系研究科)

学位論文題名

Motion of Solid Particles in a Riser of Circulating Fluidized Bed Systems

(循環流動層システムライザーにおける粒子群の運動)

循環流動層装置では、固体粒子群を上昇管（ライザー）内で粒子の終末速度以上の高速ガスあるいは液によって流動化し、ライザーから飛出す粒子群をサイクロンにより捕集後、下降管（ダウンカマー）中を落下させ、底部から供給器によりライザー底部に再供給して循環する。これにより、触媒や固体燃料などの粒子群を連続的に輸送しながら流体と接触させることができるので、石炭の燃焼やガス化、種々の固体反応、造粒など、工業において広く利用されている。しかしながら、粒子層の流動特性は極めて複雑で、流体速度や粒子循環速度などの操作条件ばかりでなく、装置構造にも強く依存するため、不明な点が多い。本研究は、このようなライザー内粒子流動特性に対する操作条件と装置因子の影響を明らかにすることを目的として行われた系統的な実験的および理論的検討の成果を纏めたもので、その主要な成果はつきの点に要約される。

- ① 気固系循環流動層ライザーでは、下部に粒子クラスターから成る粒子濃厚領域、上部に希薄領域を形成する特定のガス速度および粒子循環速度の場合に限り、粒子濃度分布が定常状態に達するまでに長い時間を要し、定常状態における下部濃厚領域の高さは充填粒子量とともに増加する。また、濃厚領域高さは低いライザーより高いライザーの場合の方が高い。
- ② 上記の特定のガス速度および粒子循環速度で認められる粒子濃度分布の非定常変動は粒子循環速度変動と対応し、濃厚領域はダウンカマー底部における圧力の増加に伴って高くなる。
- ③ 液系循環流動層では、気固系で見られるようなライザーより高さ方向の粒子濃度分布は

見られないが、液流速が大きくなると粒子群が縦縞状の凝集体を形成して上昇する不均一流動状態を呈し、このような場合には既存の粒子終端速度以下の低流速の場合に関する層膨張式は全く適用できない。

④ 粒子終端速度以上の高液流速における局所空隙率と対流伝熱係数の時系列変化は、決定論的カオス理論を適用して定量的に解析できる。例えば、対流伝熱係数の相関次元は液流速の増加とともに増加する。

これを要するに、著者は、高流体流速下における固体粒子群の複雑な現象を系統的に観測し、新知見を得たものであり、流動層工学ならびに化学工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。