

## 局部堆積層をともなう水平管内気液固三相流の流動に関する研究

著者	? 双科
号	1909
発行年	1996
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7182">http://hdl.handle.net/10097/7182</a>

氏名	Liu Shuang Ke 刘 双科
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）資源工学専攻
学位論文題目	局部堆積層をともなう水平管内気液固三相流の流動 に関する研究
指導教官	東北大学教授 松岡 功
論文審査委員	主査 東北大学教授 松岡 功 東北大学教授 千田 侖 東北大学教授 井小萩利明 東北大学助教授 高橋 弘

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒論

固体粒子と流体を混合し管路を用いて輸送する方法、すなわちスラリー輸送法は、ダム・港湾における浚渫作業ばかりではなく、石炭をはじめ種々の鉱石の長距離輸送など様々な分野で用いられている。このスラリー輸送において、従来は微粒子の輸送が主であったが、近年では粉碎費および脱水費の軽減の目的から粒子径が約2mm以上の粗粒子の輸送が注目されてきており、また輸送効率および前後処理の観点から、スラリーの高濃度化が図られてきている。スラリーを高濃度化すれば単位時間当たりの輸送量は増加するが、一方、体積濃度の増加にともない流動抵抗が急激に増加するという問題がある。それゆえ、高濃度スラリーに空気を混入し、圧力損失の低減を図るなどの試みも行われている。

ところで、沈降性粗粒子スラリーの輸送では、粒子を浮遊の状態では輸送するためにはかなりの高流速が必要とされ、その結果、消費動力が大きくなり経済的ではない。それゆえ、一般に輸送速度は圧力損失が最小となる臨界速度付近に設定される。この臨界速度は摺動層をともなう流れの範囲内にあることが多いことから摺動層をともなう流れの範囲を的確にとらえておくことが必要である。特に摺動層流れの下限は、粒子が管底に堆積を開始する際の流速であり、

管路閉塞を回避する意味からもその際の限界速度を十分に検討しておく必要がある。

粗粒子を含む高濃度スラリーを混気圧送するシステムを設計する場合についても粗粒子の水力輸送システムの場合と同様に、管路閉塞を回避し、かつ経済的な流動状態で流送するように設計することが望ましいと考えられる。固液二相粗粒子スラリーの場合については、この摺動層流れの下限に相当すると考えられる堆積限界速度に関する研究は数多く見受けられる。しかし、水平管内気液固三相流に関する従来の研究としては、摺動層流れにおける圧力損失およびSaltation速度に関する研究が見られるに過ぎない。水平管内気液固三相流の流動様式は浮遊流れ、摺動層流れ、局部堆積層流れおよび堆積層流れなどが考えられるが、圧力損失が最小となる流動状態の範囲は明らかにされていない。

よって本研究は、粗粒子スラリーを混気圧送するシステムにおける輸送速度の選定に資するために、圧力損失が最小となる水平管内気液固三相流の流動状態を明らかにし、この流れにおける圧力損失ならびに流動範囲について実験的かつ理論的に検討することを目的としている。

## 第2章 水平管内気液固三相流における粒子群の挙動に関する実験的研究

沈降性粗粒子スラリーの管内の流れでは、流動する粒子の大部分は管下部に集中し、摺動層流れあるいは堆積層流れを示す。しかし、これらの流れにおいては、粒子による付加圧力損失が大きくなり、かつ管路閉塞に至る危険性も大きい。それゆえ、沈降性粗粒子を水力輸送する場合には、これらの危険性を回避し、かつ輸送を確実にを行うために、管内の粒子群の挙動について検討しておくことが必要不可欠である。粗粒子を含む高濃度スラリーを混気圧送するシステムを計画・設計する場合についても、沈降性粗粒子スラリーの水力輸送の場合と同様に気液固三相流における粒子群の挙動について検討することが必要である。しかしながら、水平管内気液固三相流における粒子群の挙動についてはほとんど検討されていないのが現状である。気液固三相流における粒子群の挙動は空気流量の影響を大きく受けると考えられる。それゆえ、本章においては、広い空気流量の範囲における流動様式の観察を行うとともに、気液固三相流の流速と流動様式との関係について検討した。また局部堆積層流れを呈する気液固三相流における粒子群の挙動について粒子群の移動軌跡、移動速度および飛び出し角について実験的に検討した。

気液固三相流の流動様式および粒子群の挙動に関しては、本実験の範囲内においては、空気

量の大小により気泡流とスラグ流が観察されたが、気泡流をともなう気液固三相流の流動様式は固液二相流の流動様式とほぼ同様であることが確かめられた。ただし、堆積層流れの場合、堆積層上において跳躍する粒子が気泡に取り込まれた時には、固液二相流の場合よりも跳躍距離が長くなることが観察された。一方、スラグ流をともなう気液固三相流の流動様式については以下のものであった。

固液見かけ速度が十分に大きい状態から流速を減少させると、気体スラグを形成するようになり、やがて気体スラグ部における固液相中の粒子群が管底に一時的に停止するが、すぐに動き出すと言った状態が観察される。さらに流速を低下させると、気体スラグ部に静止粒子層が形成されるとともに、固液スラグ部においても管底の粒子群が一時的に停止する状態が観察される。この状態よりもさらに流速を低下させると、管底部全体に静止粒子層が形成されることが分かった。

次に流動様式と圧力損失との関係について実験的に検討した結果、以下のことが分かった。すなわち、本実験の範囲内においては、気泡流およびスラグ流のいずれにおいても粒子の流動状態は浮遊また摺動層流れ、摺動層流れ、局部堆積層流れおよび堆積層流れに分類され、また、粒子濃度がほぼ一定である場合、最小圧力損失を示す流動様式は局部堆積層流れの範囲内にあることが確かめられた。

局部堆積層流れを呈する気液固三相流において、気体スラグ部で静止した粒子は固液スラグ先端で加速され、固液スラグ中である距離だけ移動した後、固液スラグ後部から吐き出され、再び堆積層を形成することが確認された。また、管内において、このような固液スラグが次々と通過することによって粒子が運ばれるが、粒子が下流方向に輸送されるのは粒子が固液スラグ内に存在するときだけであることが確かめられた。また、固液見かけ速度が一定の場合、空気の見かけ速度の増加にともない飛び出し角が増加すること、および空気の見かけ速度が一定の場合、固液見かけ速度の増加にともない飛び出し角が小さくなることが確かめられた。

### 第3章 局部堆積層流れを呈する水平管内気液固三相流における圧力損失に関する研究

第2章では、圧力損失が最小となる流速は局部堆積層流れを呈する流動範囲内にあることを確認した。したがって、本章において、局部堆積層流れを呈する流れにおける圧力損失に関して実験的かつ理論的に検討する。本章では圧力損失と粒子群の挙動との関係を解明するため、

気液固三相流の管内流動における圧力変動を調べるとともに固液スラグおよび気体スラグ内の圧力損失を測定した。圧力変動については局部堆積層をともなう流れの場合、固液スラグ部における粒子群は移動しているが、気体スラグ部における粒子群は、管底に静止しているため、気体スラグ部では圧力変動および差圧変動が小さくなること、また、スラグの周波数および局部堆積層の高さなどについて実験的に検討した結果、次の実験式を得た。

$$v_s = 0.0011 \left[ \frac{V_{sl}}{g \cdot D} \left( \frac{19.75}{V_{sm}} + V_{sm} \right) \right]^{2.2} \quad (3-16)$$

$$h = 3.65 \cdot C_v^{0.6} \quad d_s = 0.99 \text{ mm} \quad (3-18)$$

$$h = 2.7 \cdot C_v^{0.6} \quad d_s = 1.9 \text{ mm} \quad (3-19)$$

$$h = 4.9 \cdot C_v^{0.4} \quad d_s = 2.9 \text{ mm} \quad (3-20)$$

さらに、第2章で得られた粒子群の挙動の結果を基に、局部堆積層をともなうスラグ流モデルを想定し、流れの圧力損失について理論的に考察した。その結果、圧力損失は次式で与えられることを明らかにした。

$$\Delta P_{gls} = \frac{1}{l_s + l_g} \cdot \left[ (\lambda_1 + \lambda_f) \cdot (l_s - l_m) \cdot \frac{\rho_f \cdot V_{sm}^2}{2 \cdot D} + \rho_f (V_{sm} - V_{fm})^2 \right] \quad (3-34)$$

また、(3-34)式より求められる計算値と実験値とを比較した結果、両者はほぼ一致することが確かめられ、本モデルの妥当性が確認された。

#### 第4章 局部堆積層流れを呈する流動範囲に関する実験的研究

粗粒子を含む高濃度スラリーを混気圧送するシステムを設計する場合、粗粒子スラリーの水力輸送システムの場合と同様に、管路閉塞を回避し、最も経済的な流動範囲にて輸送するように設計すべきである。本章においては、気液固三相流における局部堆積層流れの流動範囲を明確にするために、その流動範囲における固液見かけ速度の上限および下限と空気の見かけ速度との関係について実験的に検討した。すなわち局部堆積層流れを呈する流動範囲における固液見かけ速度の上限および下限と空気の見かけ速度を測定した。その結果、空気の見かけ速度が小さい範囲では、空気の見かけ速度の増加とともに固液見かけ速度の上限が小さ

くなり、また、固液見かけ速度の下限が急に小さくなる。空気の見かけ速度が十分に大きくなると、固液見かけ速度の上限はほぼ一定値になり、固液見かけ速度の下限は存在しなくなり、閉塞域は消滅する。また、圧力損失が最小であり、かつ閉塞しない流速は、局部堆積層流れを呈する気液固三相流における流動範囲にあることが確認された。

## 第5章 局部堆積層流れを呈する流動範囲に関する理論的考察

本章では、摺動層流れおよび局部堆積層流れの圧力損失を等しく置ることにより、固液見かけ速度の上限と空気の見かけ速度との関係を算出する基礎式について検討した。さらに、第2章で得られた粒子の挙動を基に、堆積限界状態における堆積層に働く力の関係により下限状態を示す固液見かけ速度と空気の見かけ速度との関係を算出するモデルについて検討した。また、局部堆積層流れを呈する流動範囲における固液見かけ速度の上限および下限の計算値と実験値との比較検討を行った。

固液見かけ速度の上限と空気の見かけ速度との関係は、(5-1)式で示すように、摺動層をともなう流れと局部堆積層をともなう流れの圧力損失を等しく置ることにより求めた。

$$\Delta P_{gls}^1 = \Delta P_{gls}^2 \quad (5-1)$$

また、下限を示す状態における堆積層に働く力の釣り合いにより、固液見かけ速度の下限と空気の見かけ速度との関係を算出するモデルについて検討した。その結果、固液見かけ速度の下限と空気の見かけ速度との関係を求める基礎式は(5-9)式、(5-10)式および(5-14)式であることを明らかにした。

$$T + \tau_s \cdot P_s = f_s \cdot (G - F_v) \quad (5-9)$$

$$\Delta P_{sf} = \Delta P_s \quad (5-10)$$

$$V_{sm} \cdot A = V_f \cdot A_f + V_{sf} \cdot A_s \quad (5-14)$$

さらに、本モデルにより計算される値と、第4章において得られた固液見かけ速度の上限および下限と空気の見かけ速度の実験値とを比較した結果、計算値と実験値とはほぼ一致することから、本研究で提案するモデルはほぼ妥当であることが確認された。

## 第6章 結論

以上、本研究は圧力損失が最小となる局部堆積層流れを呈する水平管内気液固三相流について、粒子群の挙動、圧力損失および流動範囲について実験的に検討し、さらに、圧力損失および流動範囲について理論的な考察を行った。その結果、粗粒子を含む高濃度スラリーを混気圧送するシステムを設計する場合、輸送速度の選定の指針を与えたことになり、気液固三相流に関する新しい知見を得たものと考えられる。

## 審査結果の要旨

固体粒子と水とを混合し、管路により輸送する水力輸送法では、従来は微粒子の輸送が主であったが、粉碎費および脱水費の軽減の目的から近年では粗粒子の輸送が注目され、また輸送効率の点からスラリーの高濃度化が試みられている。しかし、スラリーの高濃度化は体積濃度の増加のために流動抵抗が急激に増大する問題を抱えている。本論文は、低粘性流体である空気を管路に混入することにより、流動抵抗すなわち圧力損失が低減されることを確かめ、圧力損失低減効果が顕著である流動状態を把握するための実験および理論的考察を行ったもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の目的と位置づけを明らかにしている。

第2章では、水平管内気液固三相流における固体粒子の挙動について粒子の移動軌跡、粒子速度および粒子の飛び出し角度などの点から実験的に検討するとともに、固液見かけ速度を広範囲に変化させて圧力損失を測定し、圧力損失の低減効果が見られる流動状態は局部堆積層流れであることを明らかにしている。これは重要な成果である。

第3章では、第2章で確認された圧力損失の低減が見られる流動状態において、圧力損失に及ぼす諸因子の影響について詳細に検討するとともに、気体スラッグの通過にともなう圧力変動を測定し、スラッグ周波数を実験的に求めている。さらに、これを基に気液スラッグ流モデルを気液固三相流まで拡張し、気液固三相流における圧力損失に関するモデルを提案している。

第4章では、第2章において圧力損失の低減が見られる流動様式は、局部堆積層流れであることが確認されたため、局部堆積層流れを呈する流動範囲を実験的に明確にしている。すなわち、この流動範囲は空気の見かけ速度と固液見かけ速度の関係で決定されることから、これらを広範囲に変化させて管内の流動を観察し、局部堆積層流れを呈する流動範囲を明らかにしている。

第5章では、管内の流動をモデル化し、局部堆積層流れを呈する流動範囲における固液見かけ速度の上限および下限と空気見かけ速度との関係について理論的に考察している。また、第4章で得られた実験結果と本モデルより計算される値とを比較検討することにより、本モデルの妥当性を確認している。

第6章は結論である。

以上、本論文は、粗粒子を高濃度の状態で管路を用いて輸送する場合の最適な流動状態を実験的および理論的に求め、高濃度スラリーの混気圧送システムの設計に対して、輸送速度の選定に関する指針を与えたもので、資源工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。