

氏 名	さいとう たかゆき 齊 藤 隆 之
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 2 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 53 年 3 月 東北大学工学部資源工学科卒業
学 位 論 文 題 目	揺動管路内固液二相流の流動特性に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 千田 侑 東北大学教授 松岡 功 東北大学教授 橋本 弘之 東北大学助教授 益山 忠

## 論 文 内 容 要 旨

固体粒子を液体と混合し管路を用いて輸送する方法、いわゆる水力輸送は、ダム、港湾における浚渫、石炭や鉄鋼石をはじめとする種々の資源の陸上長距離輸送に用いられているが、被輸送対象の固体粒子は、管路閉塞の危険性の高い粗粒子すなわち粒径が約 2 mm 以上の粒子がその大部分を占めている。大量輸送、システム化に適した輸送方法であることから、水力輸送の利用分野は従来に増して広範かつ多様となり、海洋や宇宙などの過酷な環境下での利用が検討されている。その一例として、マンガン団塊やコバルト・リッチ・クラスト等の深海底鉱物資源、海底メタン・ハイドレート等のエネルギー資源の開発への利用が挙げられ、中でも水深 4000~6000m に賦存するマンガン団塊を採鉱するマンガン揚鉱システムの研究開発が国家プロジェクトとして進められている。

これらに使用される水力輸送システムでは、集鉱機、ポンプ、輸送管路などの機器類は洋上の採鉱船より懸下・曳航されることから船体揺動により三次元的に揺動するが、特に、船体の上下動に起因する管軸方向の揺動が支配的であり、またこの管軸方向の揺動速度と固液二相流の主流速度とは同程度である。輸送管路は全長数千 m に達し、海底から海面に向かって、水平、傾斜、鉛直なパイプストリングスを形成する。加えて、固体粒子は粒径数 mm 以上の粗粒子であり、揚鉱管内は沈降性の強い固液二相流となる。一方、従来の粗粒子固液二相流に関する研究は静止固定管路内を対象としたもののみで、外力を受けて揺動する管路内における粗粒子固液二相流の流動特性を論じた研究例は見当たらない。このため、マンガン揚鉱システムの設計・制御に際しては、従来の静止固定管路内におけるデータ、関係式をそのまま利用しているのが現状である。

よって、本研究は、マンガン団塊揚鉱システムを対象として、すなわち、管路が固液二相流の主流速度  $\bar{U}_m$  [m/s] と同程度の揺動速度  $U_p$  [m/s] にて管軸方向に揺動すること ( $|U_p| \simeq \bar{U}_m$ )、

実用輸送範囲を含む修正フルード数範囲すなわち、修正フルード数  $F_{rm}$  が 6 より小さな領域であることならびに固体粒子は粗粒子であることを条件範囲として、外力を受けて揺動する管路内固液二相流の流動特性に関し、粒子群運動の経時変化およびその変動特性、圧力損失ならびに流動様式を明らかにすることを目的としている。このため、揺動管路内における粒子群の非定常次元運動方程式を求めて数値解析により主流方向の粒子群速度の経時変化、変動特性ならびに非定常項（仮想質量項および Basset 項）の影響の大きさを検討した。また、PTV（Particle Tracking Velocimetry）により揺動管路内の粒子挙動を計測するとともにこれを規定する無次元数を導いて、粒子挙動を表す実験式を検討した。さらに、揺動管路内における粒子群挙動と圧力損失との関係を考察し、時間平均圧力損失を規定する無次元数を導き実験結果の整理方法を検討した。加えて、粒子挙動の統計量と流動様式との関係から流動様式を考察し、静止から揺動管路にまで適応可能な新たな様式の識別指標ならびに流動音と流動様式との関係を検討した。

得られた結論は以下のとおりである。

第 1 章は緒論であり、本研究の意義と目的、また関連する従来の研究の概要および本研究の概要を述べた。

第 2 章では、水平揺動管路内の粗粒子固液二相流に関し、主流方向の粒子群運動を次元理論により考察するとともに数値計算によりこれを解析し、以下を得た。すなわち、変動摩擦力、仮想質量項および Basset 項を考慮に入れた主流方向の粒子群の非定常次元運動方程式を得るとともに同式は静止管路の式をも包括するものであることを示した。さらに、同式を数値解析して、粒子群の主流方向粒子速度  $U_s$  [m/s] が  $\bar{U}_m$  および  $U_p$  によらず管路の揺動周期  $T_p$  と同一周期で変動すること、管路揺動の影響は  $\bar{U}_m$  の低い領域ほどまた管路の揺動速度が高いほど顕著であること、および  $U_p$  と  $U_s$  との間には上記非定常項に基づく位相差が存在することを明らかにした。次に、従来の管内固液二相流の研究においては無視されて扱われてきた上記非定常項の影響を数値解析により考察し、これらが主流方向粒子群速度の時間平均値に及ぼす影響は数%以下であり、 $\bar{U}_m$  が高くなるほどこの影響は小さくなることを明らかにした。一方、管路の揺動加速度が負から正に転じる付近の時間領域においては、短時間ではあるものこれら非定常項の影響は大きく、これを無視した場合には粒子速度を最大約 20% も過大評価することを示し、マンガング塊揚鉋システムにおける集鉋機から揚鉋管への給鉋制御に対する有用な知見を得た。さらに、粒子群に作用する力（すなわち、流体抗力、摩擦力、仮想質量力、Basset 力、加速座標系による見掛けの力）を数値解析することにより、これらの作用力の間には互いに位相差が存在すること、この位相差のために本来他の作用力の数%以下の大きさである仮想質量力、Basset 力が相対的に大きくなる時間領域が存在し、このためにこれら両項を考慮する場合としない場合との間に差異が生じることを明らかにした。

第 3 章では、揺動管路内固液二相流の粒子群挙動を PTV により三次元計測を行って実験的に検討した。すなわち、主流方向の粒子群速度に関しては、これを規定する以下の無次元数（修正フルード数  $F_{rm}$  および管路揺動フルード数  $F_{r,pm}$ ）

$$F_{rm} = \frac{\bar{U}_m^2 \sqrt{C_D}}{gD_p(S_s - 1)}$$

$$F_{rPm} = \left[ \frac{U_{Pm a x}^2 \sqrt{C_D}}{gD_p(S_s - 1)} \right]^{0.5}$$

を理論的に得るとともに、時間平均速度比 $\bar{U}_s$ が次の実験式により表されること、

$$\frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_m} = \beta_{s1} \ln(F_{rm}) + \beta_{s0}$$

$$\beta_{s0} = 0.0499 F_{rPm} + 0.637$$

$$\beta_{s1} = -0.0287 F_{rPm} + 0.170$$

また、本実験式が工学的に十分な精度を有することを示した。さらに、主流方向粒子群速度 $U_s$ の経時変化を明らかにし、その変動周期 $T_s$ は管路の揺動周期 $T_p$ と等しいこと、管路の揺動速度との間の位相は $0.3T_p$ 進むことを得た。また、主流方向の粒子の速度変化は、速度変動片振幅 $a_s$ と主流方向の時間平均粒子群速度 $\bar{U}_s$ とにより検討し次の実験式を得た。

$$\frac{a_s}{\bar{U}_s} = \alpha_s F_{rPm}$$

$$\alpha_s = 0.187 F_{rm}^{-0.959}$$

次に、第2章の数値計算結果と本章の実験結果とは、経時変化、変動特性ならびに時間平均値とも定性的かつ定量的に良く一致することを示し、第2章のモデル式の妥当性を検証した。

加えて、主流と直交する2方向の粒子速度成分の時間平均値 $\bar{U}_y$ および $\bar{U}_z$ はともに0を示すこと、また、粒子の時間平均位置 $Y$ は管軸面内にあり、 $Z$ は管底付近にあるが、修正フルード数 $F_{rm}$ の増加とともに増加傾向を示し粒子が浮遊傾向を強めることを明らかにした。さらに、粒子速度ベクトルの変動強度と $F_{rm}$ との関係ならびに変動強度に対する管路揺動の影響を明らかにした。

第4章では、揺動管路内固液二相流の時間平均圧力損失 $\Delta \bar{P}_{ms}$ および変動特性を実験的かつ理論的に検討し、次のことを求めた。すなわち、粒子群の運動方程式と時間平均圧力損失との関係から、 $\Delta \bar{P}_{ms}$ は修正フルード数 $F_{rm}$ および管路揺動修正フルード数 $F_{rPm}$ の関数であることを理論的に明らかにした。さらに、 $\Delta \bar{P}_{ms}$ は同一流速および同一濃度で比較すれば、静止管路内固液二相流の圧力損失 $\Delta P_{mf}$ より低減する流速領域があり、またその低減率は低流速域ほど大きく、かつ流速の増加とともに減少して $\Delta \bar{P}_{ms}$ が $\Delta P_{mf}$ に漸近すること、およびこの低減率は管路の揺動速度が速いほど大きいことを実験的に明らかにした。さらに、 $\Delta \bar{P}_{ms}$ は、圧力損失係数 $\phi_s$ 、 $F_{rm}$ および $F_{rPm}$ の関数として、工学的に十分な精度で次の実験式により表されることを示した。

$$\phi_s = \alpha_{s1} F_{rm}^{-1.29} \quad \text{ただし、} F_{rm} < 2.6$$

$$\phi_s = \alpha_{s2} F_{rm}^{S^2} \quad \text{ただし、} F_{rm} > 2.6$$

$$\alpha_{s1} = -5.327 F_{rPm} + 26.6$$

$$\alpha_{s2} = -1.383 F_{r,pm} + 13.7$$

$$\alpha_{s3} = 2.60 \exp(-0.271 F_{r,pm})$$

$$\beta_{s2} = 0.0126 \frac{a_p}{D_p} - 0.565$$

加えて、揺動管路内固液二相流の圧力損失の変動特性と管路揺動との関係を考察し、この圧力損失は管路の揺動変位より位相が  $T_p/8$  だけ遅れること、ならびに管路の揺動方向と固液二相流の主流方向とが等しい場合には減少し、これらが互いに逆の時には増加することを明らかにした。

第5章では、静止管路から揺動管路内の粗粒子固液二相流に適応し得る流動様式の識別指標ならびに流動音による流動様式の判別方法を新たに提案した。すなわち、粒子速度成分の変動強度は修正フルード数  $F_{r,m}$  の低い領域においては  $F_{r,m}$  の増加とともに急増し、 $F_{r,m}$  の高い領域において一定値に漸近すること、また、粒子速度ベクトルの偏角の変動強度は  $F_{r,m}$  の低い領域において  $F_{r,m}$  の増加とともに急増し極大値をとり、その後減少して、一定値に漸近することを明らかにした。これらの関係は、静止から揺動管路にまで適応し得る流動様式の客観的識別指標となり、これに基づき揺動管路内における粗粒子固液二相流の流動様式を「堆積層を伴う流れ」、「堆積層を伴う流れと摺動層を伴う流れとの遷移流れ」および「摺動層を伴う流れ」と定義した。

次に、揺動管路内および静止管路内における粗粒子固液二相流の流動音と流動様式との関係を考察し、流動音の音圧レベルは  $F_{r,m}$  の関数であることを見出した。また、粒子間衝突音と粒子・管壁間衝突音の特性を考察し、粒子間衝突音は連続スペクトルを呈しかつ比較的高周波域にあること、ならびに粒子・管壁間衝突音は不連続スペクトルを呈しかつ比較的低周波域にあることを明らかにした。さらに、流動実験から揺動および静止管路内における粗粒子固液二相流の流動音の音圧レベルは、 $F_{r,m}$  の低い領域において  $F_{r,m}$  の増加とともに急増し、極大値をとった後減少して、再び僅かに増加すること、この音圧レベルの変化の形態と上記の粒子速度ベクトルの変動強度の変化形態ならびに流動様式の定義域とは極めて良く一致すること、ならびに流動音にはシステム固有なものではあるが流動様式の変化に特に鋭敏な特徴周波数が存在し、これが粒子間衝突に起因するものであることを明らかにした。

第6章は結論である。

以上、本研究は、主流方向に揺動する管路内の粗粒子固液二相流の流動特性について、粒子群挙動、圧力損失および流動様式の観点から実験的かつ理論的に検討を加え、管路揺動と粒子運動との関係ならびに圧力損失低減との関係を得るとともに、それらの無次元整理方法を見出し、さらに、流動音による揺動管路内固液二相流の流動様式判別法を新たに提案するなど、粗粒子固液二相流の流動特性に関して工学的に新しい知見を得ている。

## 審査結果の要旨

固形物を管路を用いて水力輸送する方法は、大量輸送ならびにシステム化に適した輸送方法であることから、深海底に賦存するマンガング塊揚鉤システムとして取り上げられ、研究開発が国家プロジェクトとして進められている。このシステムにおいては曳航に伴う集鉤機の間欠な移動などにより管路が軸方向に揺動するが、外力を受けて揺動する管路内における固液二相流の流動特性を調べた研究例が見当たらないため、システムの設計ならびに制御に供し得る資料がないのが現状である。

本論文は、外力を受けて揺動する水平管路内固液二相流の流動特性に関し、粒子の運動の経時変化およびその流動特性、圧力損失ならびに流動様式を明らかにすることを目的とし、マンガング塊揚鉤システムの設計に指針を与えようとするものであり、全編6章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、揺動水平管路内の固液二相流の粒子の運動方程式を一次元理論により求め、揺動を考慮すればこれまで過大評価されていた粒子速度を適正に評価できることを示し、揚鉤管への給鉤制御について有用な知見を得ている。

第3章では、静止管路を含む揺動水平管路内固液二相流の粒子速度ならびにその速度変動を自主開発した粒子追尾装置により計測し、管路の揺動幅および揺動周期との関係を明らかにし、第2章の数値計算結果と定量的にほぼ一致することを示している。これは貴重な成果である。

第4章では、揺動管路内固液二相流の時間平均圧力損失およびその変動特性を実験的に調べ、圧力損失が静止管路のそれより小さくなる流動範囲が存在すること、ならびに付加圧力損失係数は修正フルード数および管路揺動修正フルード数の影響を受けることを明らかにし、第2章における考察結果を基にその相関式を求めている。これは優れた成果である。

第5章では、揺動管路内ならびに静止管路内固液二相流の流動音と流動様式との関係を調べ、流動音の音圧レベルとフルード数とは相関があることを見い出し、また流動音には流動様式の変化に特に鋭敏な粒子間衝突に起因する周波数が存在することを明らかにし、これらを基にした静止管路を含む揺動管内固液二相流の流動様式判別法を新たに提案している。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、深海底鉤物資源開発システムを対象として、外力を受けて管軸方向に揺動する水平管内における固液二相流の流動特性について、実験的かつ理論的に検討を加え、管路揺動と主流方向粒子速度の変動ならびに圧力損失低減との関係を得るとともに、それらの無次元整理方法を見い出している。さらに、流動音による揺動管内固液二相流の流動様式判別法を新たに提案するなど、固液二相流の流動特性に関して工学的に新しい知見を得たものであり、資源工学ならびに混相流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。