

氏 名	宇 佐 美 毅
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 60 年 11 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 38 年 3 月 東北大学工学部鉱山工学科卒業
学 位 論 文 題 目	エアリフトポンプによる固体粒子の輸送に関する 研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 川島 俊夫      東北大学教授 田中 正三 東北大学教授 大谷 茂盛      東北大学教授 斎藤正三郎 東北大学教授 野田 佳六

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

エアリフトポンプには空気圧縮機以外に機械的な運動部分が存在しないため、固体粒子の輸送には適しており、今後も海底鉱物資源の開発および鉱山・土木などの種々の分野で積極的に用いられることが予想される。しかしながら、これまでは、エアリフトポンプの特性が把握されていないため、使用に際しては経験に基づくことが多く、適切な使用法がとられているとはいえなかった。今後はエアリフトポンプの適用範囲が広がることが予想される。すなわち、輸送管の状態はかならずしも垂直のみではなく、傾斜の場合もあり、また輸送対象物は大き粒径の固体粒子も対象となり、さらに搬送流体も非ニュートン流体になることも考えられる。このような場合には、エアリフトポンプの稼動方法によって経済的に大きな差異が生ずるものと予想される。しかし、エアリフトポンプに関する既往の研究は、揚液を対象にした気液二相流のものがほとんどで、固体粒子の輸送も取扱った気液固三相流の系統的研究は非常に少なく、エアリフトポンプによる固体粒子の輸送に関する基本的な稼動基準になるものがいまだに明確にされていないのが現状である。

本研究は、種々の稼動・輸送条件下で固体粒子をエアリフトポンプにより輸送する際の輸送特性に関する基礎資料を得ること、ならびに十分なる精度で固体粒子輸送量を求める計算法を確立す

ることを目的としたものである。

このため基礎研究として、気液二相流の揚液量、摩擦損失などを測定し、これらの結果に基づいて気液固三相流の流動特性を考察した。さらに理論的考察によって得られた式との関係などから、それぞれの計算値と実験値との比較検討を行うことによって精度の高い算定式を求め、これにより稼動・輸送条件が流動特性に及ぼす影響を明らかにし、エアリフトポンプを運転する際の指針を得たものである。

## 第2章 エアリフトポンプにおける流動特性に関する理論的研究

気液二相流、気液固三相流のニュートン流体、非ニュートン流体に関し、それぞれ管傾斜角を考慮した揚液量ならびに固体粒子輸送量を求める算定式について検討した。なお、非ニュートン流体としては擬塑性流体を対象にした。

気液二相流のニュートン流体、非ニュートン流体に関する揚液量は、次式を用いることによって求めることができた。

(1) ニュートン流体の場合

$$\frac{V_{\ell 1}^2}{2gL} = \frac{(\sigma - \bar{f}_{L2}) \sin \theta}{2 \left( \frac{1}{f_{L2n}} - 1 \right) + \lambda_{\ell 0} \left( \frac{L_s + L \cdot \alpha \bar{f}_{L2} \alpha'}{D} \right) + \zeta}$$

(2) 非ニュートン流体の場合

$$\frac{V_{\ell 1}^2}{2gL} = \frac{(\sigma - \bar{f}_{L2}) \sin \theta}{2 \left( \frac{1}{f_{L2n}} - 1 \right) + \lambda_{\ell 0} \frac{3(3n+1)}{4(2n+1)} \left( \frac{L_s + L \cdot \alpha \bar{f}_{L2} \alpha'}{D} \right) + \zeta}$$

なお、 $\alpha$ 、 $\alpha'$ には第3章の実験値を用いる。

一方、気液固三相流のニュートン流体、非ニュートン流体に関する固体粒子輸送量は、次式によって示すことができた。

(3) ニュートン流体の場合

$$\begin{aligned} & \left\{ (H_s - \bar{f}_{L3}L + C_v L_s) - (\bar{f}_{s3}L + C_v L_s) S'_s \right\} \sin \theta \\ &= \frac{1}{g} \left[ \left( \frac{1}{X} - 1 \right) \left\{ 1 + C_v (S'_s - 1) \right\} + \left( \lambda_{\ell 0} \frac{L_s}{2D} + \frac{\zeta}{2} \right) \right] V_{m1}^2 \\ & - \frac{1}{g} \left( \frac{1}{X} - 1 \right) (1 - C_v) (S'_s - 1) V'_{s0} V_{m1} C_v + i_{2f} \cdot L (1 + C_v \cdot \beta F_{rm} \beta' / \lambda_{\ell r}) \end{aligned}$$

(4) 非ニュートン流体の場合

$$\begin{aligned} & \left\{ (H_s - \bar{f}_{L3}L + C_v L_s) - (\bar{f}_{s3}L + C_v L_s) S'_s \right\} \sin \theta \\ &= \frac{1}{g} \left[ \left( \frac{1}{X} - 1 \right) \left\{ 1 + C_v (S'_s - 1) \right\} + \left\{ \lambda_{\ell 0} \frac{3(3n+1)}{4(2n+1)} \frac{L_s}{2D} + \frac{\zeta}{2} \right\} \right] V_{m1}^2 \\ & - \frac{1}{g} \left( \frac{1}{X} - 1 \right) (1 - C_v) (S'_s - 1) V'_{s0} V_{m1} C_v + i_{2f} \cdot L (1 + C_v \cdot \beta F_{rm}^{\beta'} / \lambda_{\ell r}) \end{aligned}$$

ただし、上式において  $X = f_{L3II} + f_{s3II}$ ,  $S'_s = r_s / r_\ell$  とし、また  $i_{2f}$  は気液二相流における摩擦損失を水力こう配で表わした。なお、 $\beta$ ,  $\beta'$  には第4章の実験値を用いる。

### 第3章 エアリフトポンプにおける気液二相流に関する実験的研究

ニュートン流体、非ニュートン流体の摩擦損失  $\Delta P_{2f}$ 、揚液量  $Q_\ell$  を管傾斜角  $\theta$  などを変え測定した。

摩擦損失は、平均液体体積率  $\bar{f}_{L2}$  と  $\Delta P_{2f} / \Delta P_{\ell 0}$  との比によって整理できることを明らかにし、次のような実験式が得られた。ここで  $\Delta P_{\ell 0}$  は液体だけが管内を一杯に流れたときの摩擦損失である。

$$\Delta P_{2f} / \Delta P_{\ell 0} = \alpha \bar{f}_{L2}^{\alpha'}$$

ここに、 $\alpha = -1.01K_e^2 + 1.62K_e + 1.03$

$$\alpha' = 1.32K_e^2 - 0.38K_e - 1.72$$

$K_e = 1 - 2\theta/\pi$ 、ただし適用する管傾斜角は  $50^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  ( $\theta$  はラジアン表示) であるが、 $\theta = 90^\circ$  の場合には、 $\bar{f}_{L2} > 0.60$  において、 $\alpha = 0.46$ ,  $\alpha' = -3.17$  となる。

また揚液量については、種々の条件下で測定した実験値を、管長を基準にしたフルード数  $F_{rg}$  と  $\bar{f}_{L2}(x)$  との関係で整理でき、次のような実験式が得られた。

$$1 - \frac{\bar{f}_{L2}(x)}{\sigma^{3/5}} = m F_{rg}^n$$

なお、上式において  $\sigma$  は浸液率、 $m$ ,  $n$  の値は  $F_{rg}$  により定まる値である。また揚液量  $Q_\ell$  は  $\bar{f}_{L2}(x)$  と  $Q_\ell / Q_{g0}$  との関係から容易に算定する方法を提示し得た。

さらに、効率曲線ならびに稼動経費曲線から最小稼動経費に対応する効率を稼動効率  $\eta_\ell^*$  と定義し、これを用いて液体を輸送する際の最適条件を明らかにした。

### 第4章 エアリフトポンプにおける気液固三相流に関する実験的研究

搬送流体としてニュートン流体、非ニュートン流体を用い、摩擦損失  $\Delta P_{3f}$ 、固体粒子の輸送量

$W_s$  を測定した。

摩擦損失について、圧力損失係数  $\phi$  と修正フルード数  $F_{rm}$  との関係で整理できることを見出し、かつ次のような実験式が得られた。

$$\phi = \frac{\beta}{\lambda_{\ell r}} F_{rm}^{\beta'}$$

$$\text{ここで、 } \phi = \frac{(\Delta P_{3f} / r_w \cdot Z) - (\Delta P_{2f} / r_w \cdot Z)}{C_v \cdot \Delta P_{2f} / r_w \cdot Z}$$

$$\phi = \frac{V_{mr}^2 \sqrt{C_D}}{gD (r_s / r_w - 1)}$$

$$\text{ただし、 } \theta = 50^\circ \text{ では、 } \beta = 2.75 \quad \beta' = -1.75$$

$$\theta = 70^\circ \text{ では、 } \beta = 3.00 \quad \beta' = -1.66$$

垂直管の場合には固体粒子による付加損失は無視でき、気液固三相流の摩擦損失は、搬送流体による損失であるといえる。

固体粒子の輸送量については、比重量の高いベントナイト泥水 B.W. (II) の方がベントナイト泥水 B.W. (I) のものより輸送量が多く、特に、 $\theta = 50^\circ$  の場合には、B.W. (II) による輸送量が水のそれより多いことがわかった。また輸送量の実験値から、気液固三相流における平均液体・固体体積率  $\bar{f}_{L3}(x')$  と同一条件における気液二相流の平均液体体積率  $\bar{f}_{L2}(x)$  との関係を明らかにし、揚液量の算定法に基づいて、 $\bar{f}_{L3}(x')$  と  $(Q_\ell + Q_s) / Q_{g0}$  との関係から固体粒子輸送量を容易に算定する方法を提示し得た。

さらに、固体粒子輸送効率曲線ならびに稼動経費曲線から最小稼動経費に対応する効率を固体粒子の稼動効率  $\eta_s^*$  と定義し、これを用いて固体粒子を輸送する際の最適条件を明らかにした。

## 第5章 エアリフトポンプにおける固体粒子の流動特性に関する総括的考察

第2章、第3章および第4章で検討したエアリフトポンプにおける気液二相流ならびに気液固三相流の流動特性に関し総括的考察を行った。はじめに揚液量に関する算定式から求めた計算値と第3章の実験結果との関係を、種々の稼動・輸送条件について比較検討した結果、両者はほぼ満足し得る一致を示した。また固体粒子輸送量に関しても、算定式から求めた計算値と第4章の実験結果との関係を、種々の稼動・輸送条件について比較検討した結果、送気量の高い領域ほど良好な一致を示した。

以上、実験値と計算値との比較の結果を基にして、管長40mのエアリフトポンプを想定し、管径、空気吹込管長、管傾斜角、送気量、液体の比重量などが揚液量、固体粒子輸送量、稼動効率、所要動力などに及ぼす影響について総括的に考察した。これにより、所期の目的であるエアリフトポンプを運転する際の指針は得られたものと考えられる。

## 第 6 章 結 論

以上、本研究は、気液二相流、気液固三相流における流れを観察し、種々の稼動・輸送条件と揚液量、固体粒子輸送量ならびに摩擦損失との関係を明らかにし、かつ揚液量、固体粒子輸送量の算定に関する理論的考察を行い、また実験値との詳細なる検討により、液体の物性値を考慮に入れた揚液量、固体粒子輸送量に関する新しい算定法を確立したものである。この結果、種々の稼動・輸送条件下における揚液量、固体粒子輸送量を十分なる精度で予測でき、かつ流動様式、摩擦損失などの基礎資料を得るとともに、新たに固体粒子を輸送する際の最適稼動効率を定義し、これを用いて種々の条件下で運転する際の最適輸送条件を明らかにしたことは、エアリフトポンプの設計を可能ならしめたことになり、エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送に関する新しい知見を得たものと考ええる。

## 審査結果の要旨

エアリフトポンプには空気圧縮機以外に機械的な運動部分がないため、固体粒子の輸送には優れた点が認められている。最近では、特に、マンガン団塊など海底鉱物資源の開発にも積極的に用いられている。しかし、エアリフトポンプに関する研究は、揚液を対象とした気液二相流の研究がほとんどで、固体粒子の輸送も取扱った気液固三相流に関する研究は非常に少なく、設計の基礎的資料に欠くところが多々ある現状である。

本論文は、気液二相流及び気液固三相流の流動特性に関する解析及び実験を通じ、エアリフトポンプの基礎的資料を得ることと、十分な精度で固体粒子の輸送量を推定する計算法を確立することを目的とした研究成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、エアリフト管路内を固体粒子が流動する場合の流動特性に関する理論的研究を述べている。すなわち、気液二相流、気液固三相流における摩擦損失に及ぼす管路の傾斜角、液体の比重、浸液率及び液体体積率の影響を実験的に検討した第3章および第4章の結果を基に、揚液量ならびに固体粒子の輸送量に関する算定式を求めている。これは有用な知見である。

第3章では、気液二相流における揚液量及び摩擦損失に関する実験的研究を述べている。

室内実験及び海洋実験を通じて解析を行い、液体体積率とフルード数との関係を求め、気液二相流の揚液量を容易に算定できる新しい方法を提案している。

第4章では、気液固三相流における固体粒子輸送量や摩擦損失に関する実験的研究について述べている。この結果、固体粒子輸送量の算定法を導き出すとともに、最適輸送条件を明らかにしている。また、フルード数と圧力損失との関係を明確にしている。これらは、優れた成果である。

第5章では、固体粒子の流動特性に関する総括的考察を述べている。はじめに、固体粒子の輸送量に関する算定値と実験結果との関係を詳細に比較検討し、十分な精度で輸送量の算定が可能であることを確かめている。次いで、以上の算定式により輸送量と所要動力との関係をも検討し、エアリフトポンプの設計に対する詳細な指針を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、気液二相流、気液固三相流における稼動ならびに輸送条件と揚液量、固体粒子輸送量及び輸送動力との関係を明らかにし、エアリフトポンプ方式による輸送システムの確立に関し、多くの知見を得たもので、資源工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。