エアリフトポンプによる固体粒子の垂直輸送 に関する基礎的研究*

大庭英樹¹ 中嶋幸敏¹ 平川良一²

[UDC 622.693.4]

A Fundamental Study on Lifting of Solid Particles by Vertical Air Lift Pump

by Hideki OHBA¹, Yukitoshi NAKASHIMA¹ and Ryoichi HIRAKAWA²

Recently, application of the air lift pump for lifting manganese nodules have been the subject of interest.

The purpose of this study is to make clear the complex behavior of solid particles in the vertical three phase pipe flow and to collect useful data for design of air lift pump. The experiments were performed using the transparent acrylic pipe of 30mm in diameter and 5m in height, and three different sized colored glass spheres of 1.46, 5.16 and 12.5 mm in diameter as the solid particles. The two kinds of flow patterns, i.e., the slug flow and the froth flow were observed in this experiments.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The solid particles are lifted and transported in the water slug flow or in the thin water film surrounding the air slug flow.
- (2) The lifted quantity of solid particles per unit time increases with increasing the immersion ratio and decreasing diameter of the solid particle.
- (3) The experimental pump performance for three phase flow agrees well with the calculated result by the Usami's method.
- (4) Among three phases in flow, the mean rising velocity of air is the fastest, and that of solid particles is the slowest. The local rising velocity of solid particle is almost constant in the water slug and decelerated in the air slug flow part and then accelerated rapidly as soon as the solid particle enter into the water slug flow.
- (5) The static pressure fluctuation increases with increasing the air flow rate.

[1~2. Faculty of Engineering, Kumamoto University. 1. Prof., Dr. 2. Graduate student]

1. ま え が き

エアリフトポンプは機械的な運動部分が存在しないため、固体粒子の輸送に適しており、近年、海底鉱物資源、特に深海底のマンガン団塊の揚鉱に利用しようという試みが注目されるようになり、国内外で理論的、実験的研究が進められている^{1)~8)}。

本研究では低揚程、小口径のエアリフトポンプを使用し、スラグ流・フロス流の領域で実験を行なっている。まず気液二相流、気固液三相流における供給空気量、固体粒子径、浸水率の変化が、固体粒子輸送量、気固液の体積率や上昇速度に及ぼす影響を調べ、これら実験結果と宇佐美らの流動特性計算法¹⁾による結果との比

較を行なう。

従来の研究は気固液三相のそれぞれの流れ状態を定常的のみにとらえ、各相の流動状態の時間的変化を調べたものは見当たらない。供給空気量と固体粒子輸送量等との関係については従来の研究で計算法もほぼ確立されていると考えられるが、さらに精度のよい解析法を開発するためには管内空気体積率が大きくなった場合に特に顕著となる流れの非定常性をも考慮することが必要である。また固体粒子の挙動の詳細や管内の脈動流れ状態はエアリフトポンプの設計のみならず、流体力学自体としても大変興味のある問題である。

そこで、空気および固体粒子の局所的挙動をビデオによって詳細に調べ、さらに本装置に特有の大きな脈動をとまなう管内圧力変動状態についても計測を行なっている。

以上のように本研究は垂直パイプ内気固液三相流に関する基礎的な研究であり、非定常性をも考慮した管内流れ解析のための手

* 1988年6月10日受付 10月3日受理
1. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部材料開発工学科
2. 学生会員 熊本大学大学院

図1 実験装置

始めとしての非定常流れ計測をも一部含んでいる。

2. 実験装置と実験方法

図1は実験装置で、水槽には揚水管として内径 $D=30\text{mm}$ の透明アクリルパイプ④が設置されている。コンプレッサ⑦からの空気は減圧弁⑥・フローメータ⑤を通して空気取入口②からパイプ内へ送られる。空気取入口から吐出口までの高さは $L=4.36\text{m}$ で、吸込口から空気取入口までの高さは $L_s=0.54\text{m}$ である。浸水率 $\sigma(H_s/L)$ は浸水深 H_s を一定に保つように内径 $D=120\text{mm}$ の塩化ビニールパイプ⑨に外部からサンプリング中も水を送り続け、オーバーフロー用の穴⑩により $\sigma=0.85, 0.80, 0.75$ の3種類に調整できる。固体粒子⑮は水槽中の円板⑫上に設けたドーナツ状の溝に入れ、吸い込まれる固体粒子の分布状態が時間的に変化しないように円板は一定回転数(3.6 rpm)で回転し、ならし板⑭によって高さを一定に保った状態で実験を行なった。固体粒子としては、比重 $\gamma_s=2.45$ で50%平均径 $d_s=1.46\text{mm}, 5.16\text{mm}, 12.5\text{mm}$ の3種類のガラスビーズを用いた。空気取入口から送気すると、固体粒子は吸込口から吸い込まれ、管内を上昇し、戻りパイプ⑧を経て再び回転円板上へと循環する。揚水管の上端部には、流れをスムーズに戻りパイプに戻すため傾斜をつけ、さらにエア抜きを設けてある。

揚水管の途中には間隔1.83mで2個のボールバルブ③が取り付けられており、これらを同時に閉じることで気固液の管内体積率を測定できる。また、管内静圧を測定するために、空気取入口から1.7m(#1)と2.47m(#2)の位置に圧力タップが取り付けられている。

気固液三相流における固体粒子輸送量と全体輸送量の測定方法としては、揚水および固体粒子を採取容器に取り、はかりで全重量を測定し、次にふるいで水をよくきり、固体粒子の重量を測定した。

ビデオ撮影に際しては、内部を水で満たしたアクリル製矩形容

器を上部ボールバルブの上方に設置し、トレーシングペーパーを透過させた逆光によって撮影した。

3. 実験結果および考察

3.1 気固液三相流の管内流動様式

垂直管内の気固液三相流の気液の流動様式は、基本的には気液二相流の流動様式と同じことが確認されている⁶⁾。本実験の気液の流動様式は、写真、ビデオ観察の結果スラグ流・フロス流領域である。固体粒子は図2(a)の模写図に示されているように、水スラグ中と気体スラグと管壁間の水膜中に存在し、図2(a)の模写図および(b)の写真に示すごとく水膜部では固体粒子を包み込むように水膜が膨れていることが確認された。

3.2 気固液三相流の流動特性に関する実験値と計算値

浸水率、供給空気量、粒子径などの変化と固体粒子輸送量、気固液の管内体積率、さらには管内上昇速度との関係について実験結果を示すと同時に、宇佐美らの流動特性計算法¹⁾による結果との比較を行なう。

3.2.1 固体粒子輸送量について 図3は粒子径 $d_s=5.16\text{mm}$ の場合の固体粒子輸送量と浸水率の関係を示した図である。横軸が標準状態での供給空気量 Q_{g0} (l/min)、縦軸が固体粒子輸送量 W_s (kg/s)である。実線は流れが定常であると仮定し、実測平均吐出体積濃度 $C_V=4.6\%$ を用いて本実験の仕様に対して、流動特性計算法に基づきくり返し計算によって求めた計算値である。なお供給空気量と実測管内体積濃度 C_T および吐出体積濃度 C_V との関係を図4に示しているが、図から明らかのように供給空気量に関係せず、ほぼ一定値をとっている。図3にプロットした点は、各供給空気量、浸水率に対してそれぞれ5回測定した平均値を示している。固体粒子輸送量は、どの浸水率においても供給空気量の増加とともに増加し、やがて最大値に達し、さらに空

(a) 模写図($d_s=12.5\text{mm}$) (b) 写真($d_s=12.5\text{mm}$)

図2 管内流動様式

 図3 浸水率 σ をパラメータとした固体粒子輸送量(曲線は計算値)

図4 管内体積濃度および吐出体積濃度(実験値)

図5 固体粒子輸送量に対する粒子径の影響(曲線は計算値)

気量を増加すると固体粒子輸送量は徐々に減少していく。これは気液二相流における揚水特性⁹⁾と同じである。浸水率の違いによって、固体粒子輸送量を比較すると $\sigma = 0.85$ の場合が最も大きく、次いで0.80、0.75の順となっており、浸水率が大いほど大きい。また計算値と実験値とは非常によく一致している。

図5は $\sigma = 0.85$ の場合における固体粒子輸送量と粒子径の関係

 図6 浸水率 σ をパラメータとした水の管内平均体積率(曲線は計算値)

図7 二相流と三相流における管内平均体積率の比較(実験値)

を示した図である。縦軸は粒子径 $d_s = 5.16 \text{ mm}$ の場合の固体粒子輸送量との比を示している。粒子径 $d_s = 12.5 \text{ mm}$ の場合にはばらつきが見られるが、これは粒子径が大きいために固体粒子の吸込状態が悪くなり、吸込み量が時間的に変化するためである。固体粒子輸送量は粒子径 $d_s = 1.46 \text{ mm}$ の場合が最も大きく、次いで5.16 mm、12.5 mmの順となっており、固体粒子輸送量は粒子が小さいほど大きい。なお図中の実線および一点鎖線は流動特性計算法により求めた計算値である。

3・2・2 管内体積率について 1.83mの間隔で取り付けられたボールバルブを同時に閉じる方法(締切法)により、二相流の場合には気体と液体、三相流の場合には気体、液体および固体のそれぞれの管内平均体積率の測定を行なった。

図6は三相流($d_s = 5.16 \text{ mm}$)の場合について締切法によって測定した水の管内平均体積率と浸水率の関係を示した図である。流れが定常でなく測定値にばらつきが大きいために各空気量において5回ずつ測定を行ない、その平均値をプロットした。水の管内平均体積率は $\sigma = 0.85$ の場合が最も大きく、次いで0.80、0.75の順となっている。水の管内平均体積率は、各浸水率において供給空気量の増加に伴い減少していく。また図中、3つの線は流動特性計算法により求めた計算値であるが、計算値と測定値には多少の違いがあるが、同じような傾向にある。

次に図7は、締切法によって測定した二相流と三相流($d_s =$

図8 各相の管内平均上昇速度(曲線は計算値)

5.16 mm)の管内平均体積率の比較である。供給空気量が増加すると二相流の場合の水、三相流の場合の水および固体の体積率とも小さくなる。また、三相流の場合の水の管内平均体積率は二相流の場合に比べて小さくなっており、固体の体積率を加えても、二相流の場合の水の体積率よりいく分小さくなっている。

3・2・3 管内上昇速度について 縮切法を用いた管内体積率の平均値で各相が管路断面を分けると考え、その断面積で各相の吐出体積量を除することにより二相流においては気体、水、三相流においては気体、水、固体粒子の管内平均上昇速度を求める。

図8は三相流($d_s = 5.16$ mm)における各相の管内平均上昇速度を示している。実線は流れが定常で、吐出された固液に占める固体の体積濃度を空気量に無関係に一定($C_v = 4.6\%$)として計

図9 気体スラグ・固体粒子の上昇速度(実験値)

図10 気体スラグ先端および固体粒子の平均上昇速度(実験値)

算した計算値である。気体、水、固体粒子の平均上昇速度は供給空気量の増加に伴い大きくなっているが、水、固体粒子の平均上昇速度は供給空気量の大きい所では勾配がゆるやかになっている。気体の上昇速度が最も大きく次いで水、固体粒子の順となっているが、平均的な水の上昇速度と固体粒子の上昇速度の差は小さく、このことより本実験に使用した固体粒子の場合には固体粒子は水中を水とほぼ同じかわずかに小さい速度で移動していると考えられる。

3・3 気体スラグ先端の上昇速度および固体粒子の局所上昇速度について

図9(a), (b)は2つの供給空気量32 l/minと70 l/minでの、ビデオによる1/60秒間隔のコマ送り映像(管途中の15cmの区間)から求めた気体スラグ先端の上昇速度および固体粒子の局所上昇速度の経過を、横軸に時間をとって示している。図中四角印は気体スラグの上昇速度を、三角印、丸印は固体粒子がそれぞれ水スラグ部、気体スラグ部を通る場合を示している。ただし気体スラグ部では大部分の固体は図2に示すように管壁近くの水膜部を通ることが映像から確認された。また連続線は一つの気体スラグまたは固体粒子の時間的経過を示している。

気体スラグは各空気量においてそれぞれほぼ一定速度で上昇し、一定周期で現われる。ただし空気量70 l/minにおいては上昇速度が大きくなり、測定区間長が短いために一つの気体スラグについての測定回数が少なくなっている。固体粒子の上昇速度は、各空気量において両図ともそれぞれ水スラグ部ではほぼ同じ値をとり、気体スラグ部にはいると徐々に減速していき、気体スラグ部の終わりで最小となる。さらにこの固体粒子は、次の水スラグ部に入ると急激に加速されている。

図10は図9他から求めた各空気量における気体スラグ先端および固体粒子の上昇速度の平均値である。なお比較のために、縮切法の結果を用いた固体粒子の管内平均上昇速度を×印で図中に示している。固体粒子の上昇速度は、水スラグ中では大きく、気体スラグ中では小さいことがわかる。また縮切法の結果による固体粒子の上昇速度は固体(気相部)の上昇速度とほぼ一致している。

3・4 圧力変動および圧力損失

エアリフト管途中の2箇所に圧力タップ#1, #2(空気取入口からの距離が1.7 m, 2.47 m)を設け、圧力変換器を圧力タップと同じ高さに設置して、壁面静圧の変動を測定した。図11(a), (b)は壁面静圧の変動の一例を示した図である。供給空気量の増加に伴い圧力変動の振幅は大きくなり不安定になってくるが、10秒間での山数はいずれも17程度であり変動の周期にはほとんど変化は見られない。変動周期はスラグの通過周期と一致するかと考え

(a) $Q_{go} = 15 \text{ l/min}$ (b) $Q_{go} = 152 \text{ l/min}$

図11 管内静圧変動

図12 圧力変動の最大振幅

たが図9に示したスラグの通過周期との一致は見られない。

図12は#1, #2における二相流と三相流 ($d_s = 12.5 \text{ mm}$) の壁面静圧の振幅の最大値と供給空気量の関係を示した図である。振幅の最大値は測定場所が違っても大きな違いはない。

次に圧力損失について述べる。2つの測定点の圧力差を基に位置の水頭すなわち二相流については次の式(1)、三相流については式(2)を用いて圧力損失を求める。

$$\Delta P_{2f} = \Delta P_{2T} - \bar{f}_l \rho_l g Z \quad (1)$$

ここで $\bar{f}_l$ は水の管内平均体積率, ρ_l は水の密度, Z は測定区間長である。三相流の場合には固体粒子の管内体積率を考慮に入れ次のようになる。

$$\Delta P_{3f} = \Delta P_{3T} - (\bar{f}_l \rho_l g + \bar{f}_s \rho_s g) Z \quad (2)$$

ここで $\bar{f}_s$ は固体粒子の管内平均体積率, ρ_s は固体粒子の密度である。図13は上の式により計算した気液二相流および三相流 ($d_s = 5.16 \text{ mm}$) における圧力損失 ΔP_{2f} , ΔP_{3f} を示した図である。供給空気量の増加に伴い圧力損失は大きくなっている。二相流と

図13 摩擦損失

三相流における圧力損失はほぼ同じ値をとっており従来の研究¹⁾で述べられているように垂直管において固体粒子による影響は無視できることが本実験でも証明された。

4. む す び

実験によりエアリフトポンプの輸送性能を検討した結果、次のような結論が得られた。

(1) 本実験における管内流動様式はスラグ流・フロス流である。固体粒子は水スラグ中および気体スラグと管壁間の水膜中に存在する。また固体粒子径が大きい場合には水膜が張り出して粒子を覆っている。

(2) 固体粒子輸送量は浸水率が大きいとき、粒子径が小さい場合が大きい。

(3) 水の管内平均体積率は浸水率が大きい場合が大きく、供給空気量の増加に伴い減少する。三相流の水と固体粒子の体積率の和は二相流の場合の水の体積率に比べいくぶん小さくなっている。

(4) 管内平均上昇速度は、空気が最も大きく次いで水、固体粒子の順である。固体粒子の局所の上昇速度は水スラグ部でほぼ等しく気体スラグ部で減速していき、次の水スラグ部に入ると急激に加速される。

(5) 管内静圧の変動は供給空気量の増加に伴い大きくなるが、変動の周期には著しい差異は認められない。

今後特に大きな空気量時における圧力変動(振幅・周期)を詳細に調べ、これらと圧力損失、固体粒子の挙動との関係について研究を進めたい。

本研究は科研費(一般研究C NO. 62550466)の援助により行なわれた。実験に協力された当時熊本大学工学部学生神田和明、古賀学の両君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 宇佐美 毅・斎藤隆之: 日本鉱業会誌, 98 [1133], 37~42(1982)
- 2) 宇佐美 毅・山門憲雄: 日本鉱業会誌, 97 [1118], 37~42(1981)
- 3) 川島俊夫他3名: 日本鉱業会誌, 91 [1054], 13~20(1975)
- 4) 野田佳六・大平和宣・川島俊夫: 日本鉱業会誌, 96 [1103], 19~24(1980)
- 5) 川島俊夫・宇佐美 毅: スラリー・カプセル輸送技術要覧, 171~184(1984)
- 6) 宇佐美 毅・斎藤隆之: 公害資源研究所報告第38号, (1986)
- 7) 清水賀之他7名: 採鉱と保安, vol. 32, No. 12(1986)
- 8) 加藤洋治他3名: 日本機械学会論文集, 40 [335], 1975~1982(1974)
- 9) 轟 一郎・佐藤泰生・本田 進: 日本機械学会論文集, 38 [312], 2085~2091(1976)