

エアリフトに関する研究 (第2報)

—固体粒子の輸送特性—

松村 博久・錦織 智*

(受理 昭和55年5月31日)

STUDIES ON AIR-LIFT PUMPS (Report 2)

Characteristics of Transportation for Solid Particles by Air-Lift Pump

Hirohisa MATSUMURA and Satoshi NISHIKIORI

In the previous report, the relations between the flow pattern and the characteristics of air-lift pumps were analyzed experimentally and the effects of the type of air supply nozzle, length of air-lift pipe and submergence ratio were examined. Then it was concluded that the characteristics of air-lift pumps could be expressed well in terms of nondimensional numbers such as water Froude number, air Froude number and submergence ratio.

In this report, the experimental investigations about the characteristics of transportation for solid particles by air-lift pump are tried and following results are obtained.

(1) The results concerned with amount of air supplied and amount of solid particles lifted are different for the reason of differences of volume ratio of solid particles and mixture, submergence ratio or supplying equipment for solid particles.

(2) The constant relationship is obtained between the delivered volume ratio of solid particles and water and the apparent velocities of air and water.

1. 緒 言

深海底の軟弱な表層にたい積しているマンガノジュールの採鉱システムには、エアリフト式、連続ラインパケット式および潜水バージ式などがある。これらの方式の中でも、流体ドレージ方式である水中ポンプおよびエアリフト・システムが、最近における各国の研究開発で注目されている。しかし、エアリフト・システムについて、現状ではまだ一般に効率が低いので、空気供給装置の性能の向上やエアリフト内の気ほう制御によるエアリフトの効率改善などの対策が必要である。

これらの問題に関連して、固-液系2相流ならびに固-気-液系3相流に関する基礎的研究から、エアリフトの特性を解明することが重要である。また、採鉱実施の段階にあたっては、エアリフトの性能計算シ

テムを確立することが課題となっている⁹⁾。

エアリフト・システムは、上述のこと以外に、堀削やしゅんせつなどの建設工事およびかくはんや輸送などの各種工業へ、今後ますます広範囲に应用されるであろう。

固-液系2相流に関する実験的研究および理論的研究は従来より多数報告⁹⁾されており、実用面においても広く寄与してきている。一方、固-気-液系3相流に関する研究¹⁰⁾は比較的少なく、エアリフトについての研究²⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾¹¹⁾もわずかに見られる程度であるので、エアリフト内の流動現象を明確には握するまでにはいたっていない。

本研究の目的は、エアリフトによる固体粒子の輸送において、固-気-液系3相流の流動現象を解析し、固体粒子の輸送特性を解明することにある。この基礎的研究として、前報⁷⁾では、空気-水系2相流における流動様式およびボイド率などの流動現象と揚水特性の関係を実験的に解析した。そして供給空気吹込み形

* 新日本電気株式会社

ベルトの移動速度は、揚水管による固体粒子輸送量で変化させているが、約 1cm/sec 程度である。なお、揚水管入口と固体粒子層上面の距離、すなわち揚水管吸込み間隙は変えられるようにしてある。

3. 実験結果および考察

3.1. 流動様式について

揚水管内の水中に供給空気を注入すると、揚水管内の流動条件の相違によって、気泡の大きさや形状が変化する。ここでは流動様式をプラグ流 (P)、気泡流

(B)、気泡—スラグ流 (BS) およびスラグ流 (S) の 4 形式に分類している。流動様式の詳細な説明は前報⁷⁾ にしてあるので、ここでは省略する。

気-液系 2 相流の流動様式と固-気-液系 3 相流の流動様式の差異は、3 相流における固体粒子が液相内に混在して流動することである。2 相流および 3 相流についてのそれぞれの流動様式の遷移は、ほとんど似

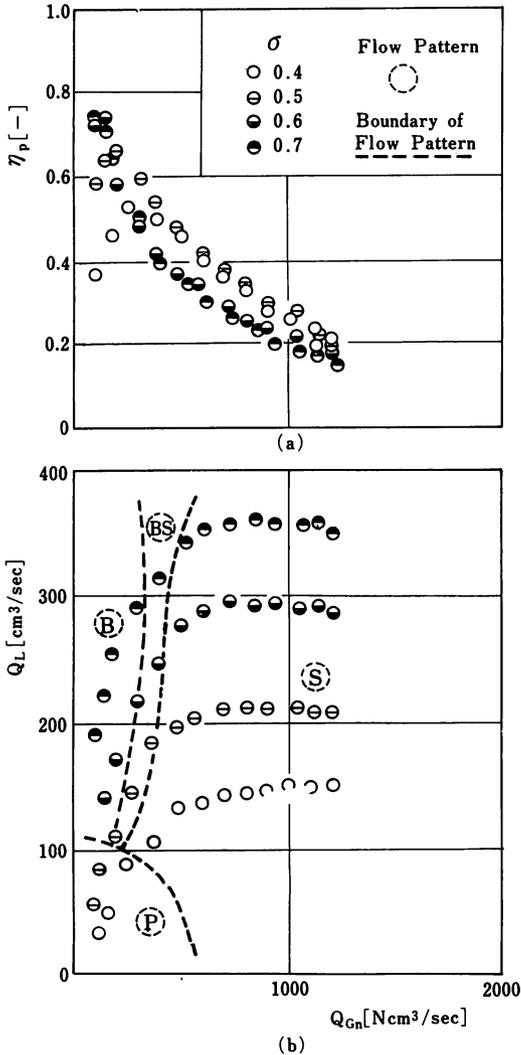


図3 押し込み供給方式 (固体粒子を供給しない場合)
(a) 揚水効率 (b) 揚水特性

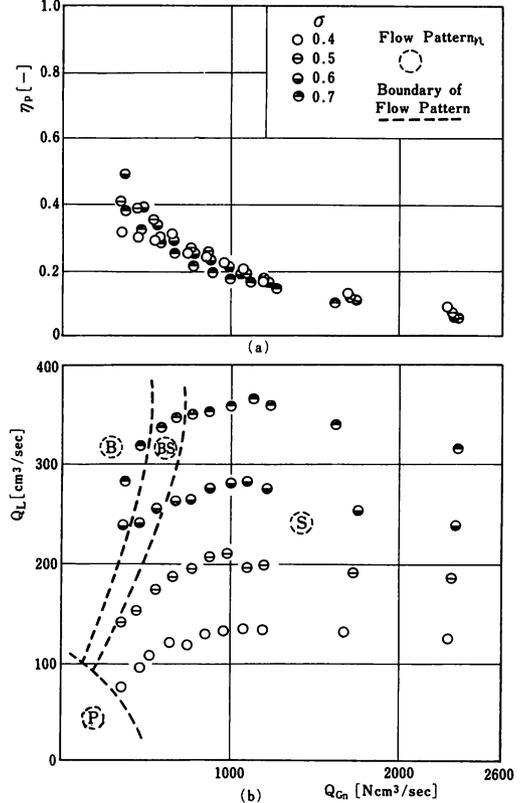


図4 ベルト供給方式 (固体粒子を供給しない場合)
(a) 揚水効率 (b) 揚水特性

たような条件で生じている。そして、たまたま液相内から気相内に飛込んだ固体粒子は、重力の影響で気相を通り抜けて直ちに液相内に戻っていくのが観察された。

3.2. 揚水特性について

固体粒子を供給しない場合の揚水管における揚水効率と揚水特性は、押し込み供給方式については図3に、ベルト供給方式については図4に示している。これらの図中の (a) は揚水効率 η_p と供給空気量 Q_{Gn} の関係で、(b) は揚水量 Q_L と供給空気量 Q_{Gn} の関係である。そして浸水率 σ がパラメータとなっている。

また破線は、前節で述べた流動様式において、肉眼観察によるそれぞれの流動様式のおおよその境界を表わしている。なお、この揚水効率は、従来から使用されているように、気体の等温圧縮動力に対する揚水の正味動力（実際に液体の得た動力）の比として定義している。

揚水量と供給空気量の関係は、それぞれの浸水率に対して、両供給方式ともによく似た変化を示している。最大揚水量についても、浸水率にはほとんど関係がなく、供給空気量が約 1000 Ncm³/sec 付近にある。

供給空気量が小さくなると揚水量は減少し、それとともなって固体粒子輸送量も少なくなる傾向になったので、ベルト供給方式では、この範囲の実験的計測は行わなかった。

3.3. 固体粒子輸送量について

押込み供給方式における供給空気量 Q_{Gn} と固体粒子輸送量 W_s の関係を図5に示し、ベルト供給方式におけるこれらの関係を図6から図9に示している。ベルト供給方式では揚水管吸込み間隙を変えて実験したので、図6は吸込み間隙が 3mm の場合、図7は 0mm の場合、図8は -3mm の場合、図9は -5mm の場合である。ただし、吸込み間隙が -3mm ならば -5mm のようなマイナスの値になっているのは、

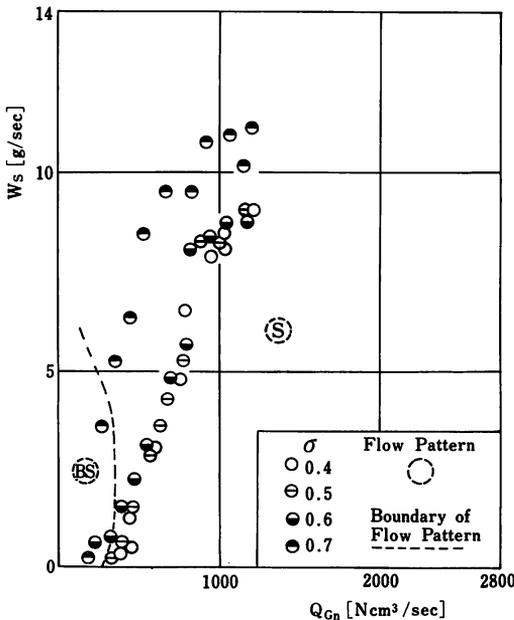


図5 固体粒子輸送量 (押込み供給方式)

揚水管入口が固体粒子層表面から固体粒子層内にそれぞれ 3mm ならびに 5mm 入っていることを意味している。これらの図には、浸水率 σ をパラメータにし、

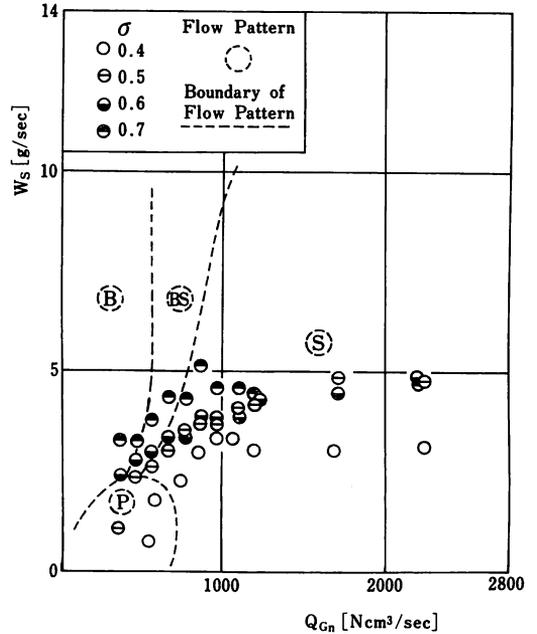


図6 固体粒子輸送量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 3mm の場合)

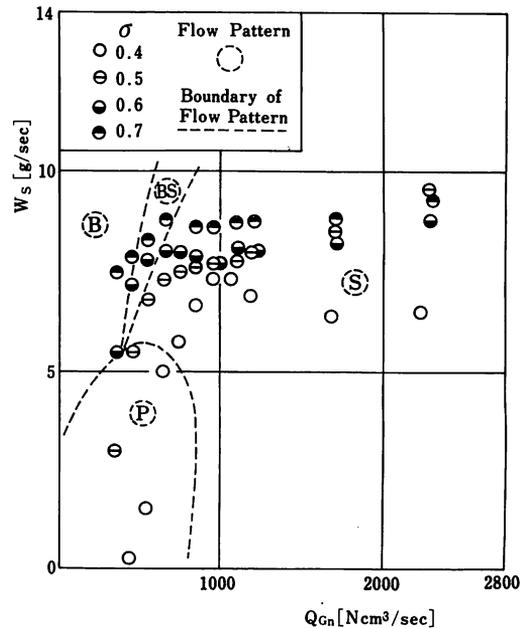


図7 固体粒子輸送量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 0mm の場合)

流動様式およびそれぞれの流動様式のおおよその境界も表わしてある。

押し込み供給方式について、供給空気量の小さい範囲

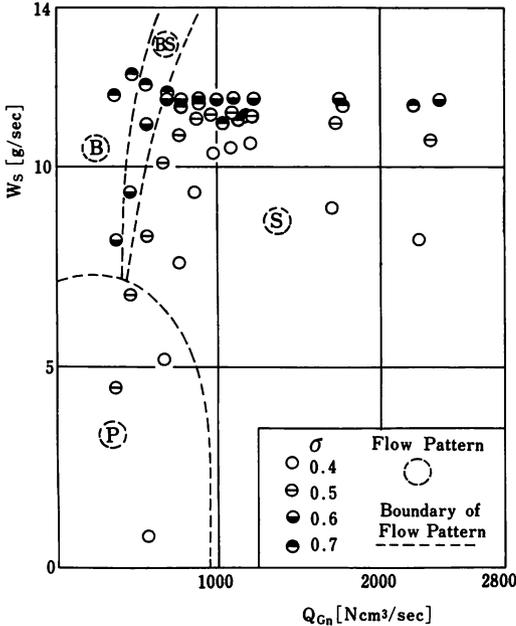


図8 固体粒子輸送量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 -3mm の場合)

における流動様式のプラグ流および気泡流領域では、固体粒子の定常的輸送はほとんど見られなかった。浸水率が0.5付近で、供給空気量に対する固体粒子輸送量の関係はほとんど変化がないが、浸水率が0.6より大きくなると、同じ供給空気量に対しても固体粒子輸送量は増加する傾向にある。

ベルト供給方式について、供給空気量と固体粒子輸送量の関係は、浸水率が大きくなると変化は小さくなるが、同じ供給空気量に対しての固体粒子輸送量は、浸水率が大きいほど大きくなっている。とくに供給空気量が約 1000Ncm³/sec より大きくなると、供給空気量に関係なく、固体粒子輸送量はほとんど一定の値になっている。浸水率が0.4の場合は、供給空気量が大きくなると流動現象に不安定性も加わって、固体粒子輸送量がかえって減少する傾向にある。これらの様子は揚水特性と同じ関係にあり、固体粒子輸送量は揚水量に大きく依存している。

また、これらの関係は揚水管吸込み間隙に影響し、吸込み間隙が小さい場合が固体粒子輸送量は大きくなっている。なかでも吸込み間隙はプラスの値よりもマイナスの値、すなわち固体粒子層内に揚水管入口がある方が、固体粒子輸送量は大きくなっている。吸込み間隙が -3mm と -5mm では、固体粒子輸送特性はほとんど似たような関係にあることから、固体粒子の直径とほぼ等しいマイナスの値の吸込み間隙が固体粒子輸送量の最大の関係を表わすことが推定される。

固体粒子を供給しない場合の図3および図4と固体粒子を輸送する場合の図5から図9では、同じ供給空気量であっても揚水管内の流動条件が少し変わるので、流動様式におけるそれぞれの境界は、いくらかずれていることが認められる。

3.4. 吐出混合量について

揚水量と固体粒子輸送量を加えたものを吐出混合量と定義し、吐出混合量について考察してみる。揚水管において固体粒子を含む混相流体を輸送する場合、固体粒子の管壁における流体摩擦および各相間の干渉によるエネルギー損失がないとすれば、この場合の輸送エネルギーは固体粒子を含まない時の揚水のみに必要なエネルギーにほぼ等しいと仮定できる。

このことから吐出混合量 ($W_L + W_S$) と供給空気量 Q_{Gn} の関係で整理したのが、図10から図14である。図10は押し込み供給方式であり、図11はベルト供給方式で吸込み間隙が3mm、図12は0mm、図13は -3mm、図

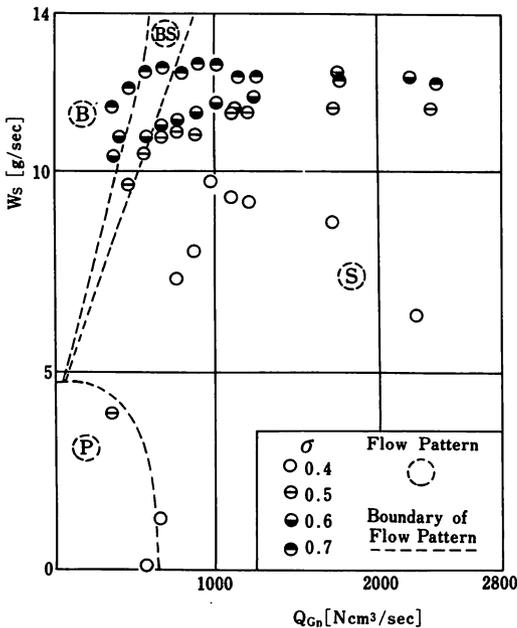


図9 固体粒子輸送量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 -5mm の場合)

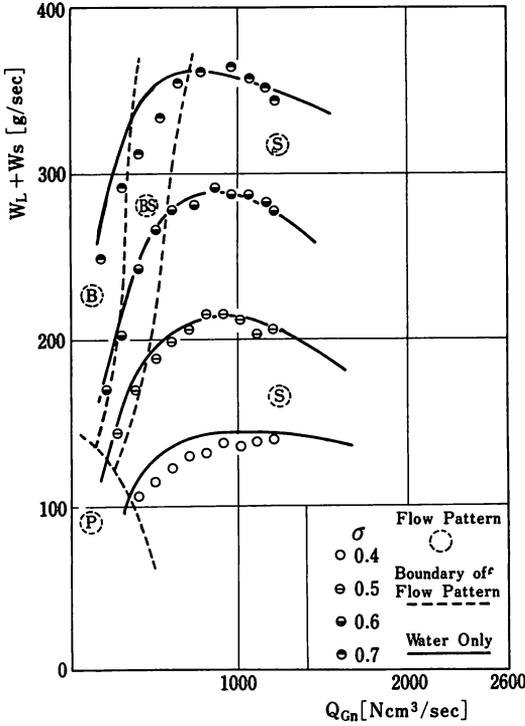


図10 吐出混合量 (押し込み供給方式)

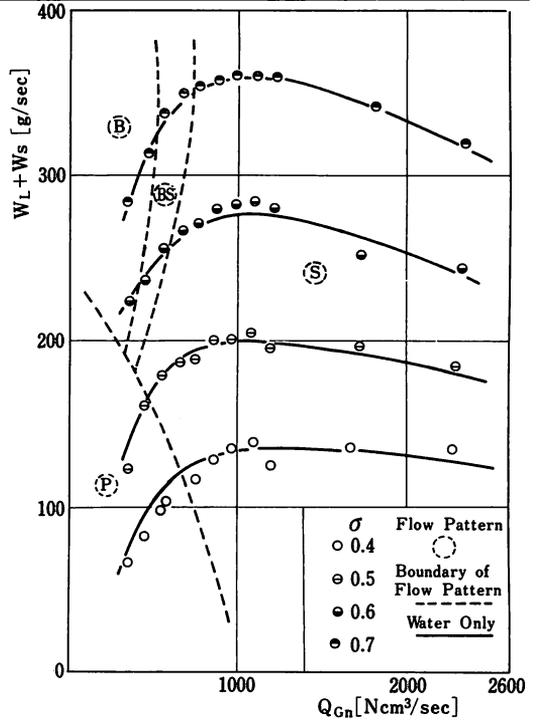


図12 吐出混合量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 0mm の場合)

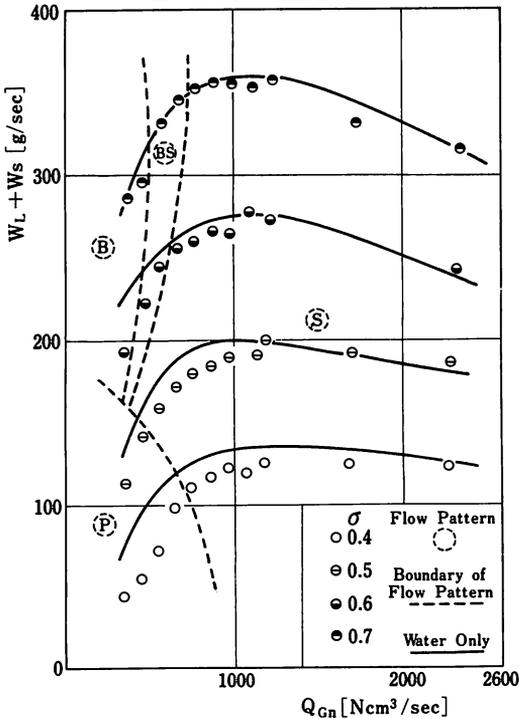


図11 吐出混合量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 3mm の場合)

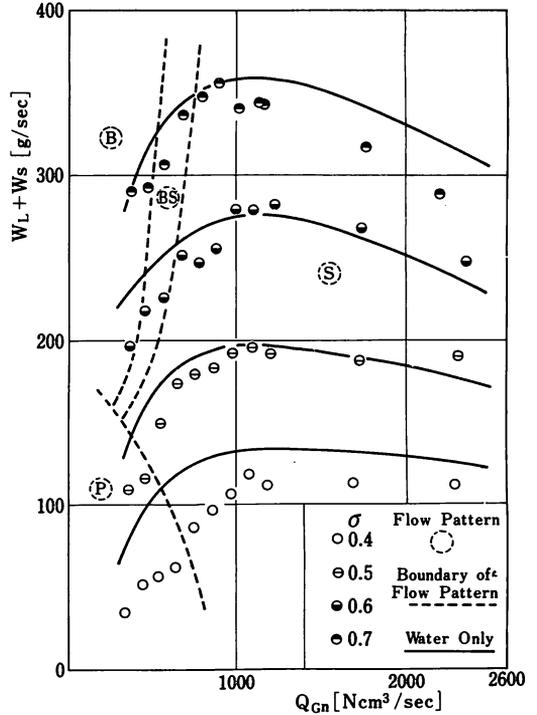


図13 吐出混合量 (ベルト供給方式, 吸込み間隙 -3mm の場合)

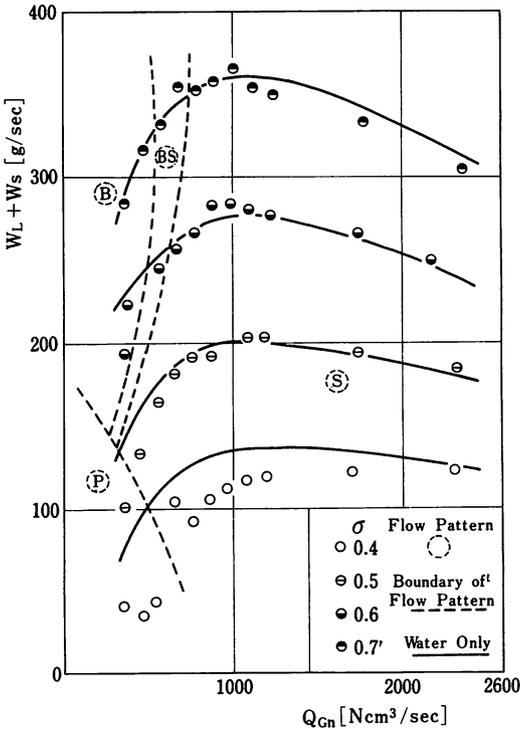


図14 吐出混合量（ベルト供給方式，吸込み間隙 -5mm の場合）

14は -5mm の場合である。図中の実線は固体粒子を供給せずに揚水のみを行った場合の関係であり、破線はそれぞれの流動様式のおおよその境界を表わしている。

押し込み供給方式における図10によると、浸水率の小さい場合および供給空気量の小さい範囲で、実験値は実線よりわずかに下へずれて分布しているのがみられる。これらの範囲において、混相流体の輸送によるエネルギー損失が揚水のみの時よりいくぶん大きくなっていると考えられる。

ベルト供給方式における図11から図14によると、押し込み供給方式と同様の傾向がみられるが、揚水管吸込み間隙の影響が大きいことがわかる。とくに浸水率が0.4の時の吸込み間隙が小さくなっている場合、流動現象の不安定性も少し含まれているが、混相流体の輸送によるエネルギー損失が大きくなっている。

3.5. 整理式について

ベルト供給方式における固体粒子輸送量と供給空気量の関係で、固体粒子輸送特性を調べたのが図6から図9であるが、吸込み間隙の影響もあって固体粒子輸

送量の変化が大きい。そこで固体粒子吐出体積率 f_s をパラメータとして示したのが図15である。この固体粒子吐出体積率は次式で定義している。

$$f_s = \frac{Q_s}{Q_L + Q_s + Q_{G0}} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 Q_{G0} は揚水管内平均静圧値に換算した供給空気量、 Q_L は揚水量、 Q_s は固体粒子輸送体積である。

図15によると、同じ供給空気量において、固体粒子輸送量には大きな幅があるが、固体粒子輸送量が増加すると固体粒子吐出体積率も大きくなっていることがよくわかる。

気-液系2相流の実験において、赤川¹⁾は次の実験式を得ている。

$$\frac{1-f_L}{f_L} = A \frac{V_G^n}{V_L^m} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 A, m, n は実験定数、 f_L は液体体積率、 V_G および V_L はそれぞれ気体および液体のみかけ流速である。

この実験式を固-気-液系3相流に適用すると、

$$\frac{1-(f_L+f_s)}{f_L+f_s} = A \frac{V_G^n}{V_L^m} \quad \dots\dots(3)$$

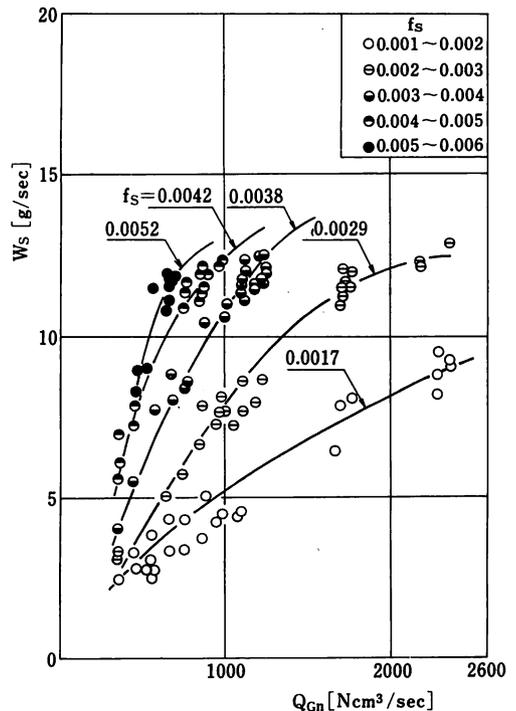


図15 ベルト供給方式による固体粒子輸送量

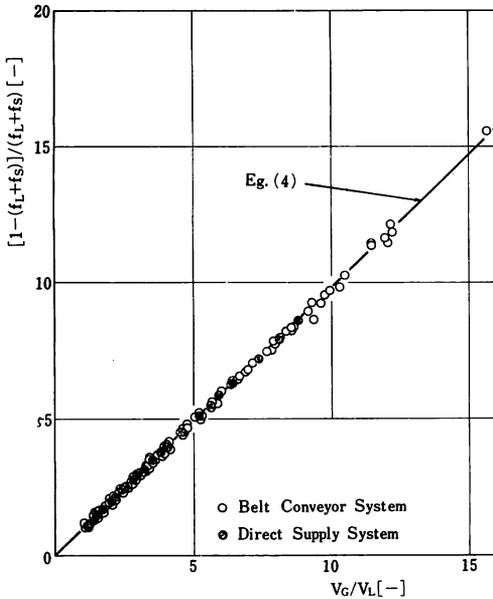


図16 吐出体積率と流速比の関係

となり、実験結果の検討によると、 $m=n=1.0$ であった。式(3)の関係で実験値を整理したのが図16である。固体粒子の押込み供給方式ならびにベルト供給方式ともに良好に整理され、式(3)のAの値は0.98となっている。すなわち、固-気-液系3相流における実験式は次式で与えられる。

$$\frac{1 - (f_L + f_S)}{f_L + f_S} = 0.98 \frac{V_G}{V_L} \quad \dots\dots(4)$$

4. 結 言

エアリフトによる固体粒子輸送の基礎的研究として、揚水管内の固-気-液系3相流の流動現象と固体粒子輸送特性を実験的に解析し、以下の結論を得た。

1) 揚水管への固体粒子供給には、押込み供給方式およびベルト供給方式を用いたが、固体粒子供給方法は固体粒子輸送量に影響を与える。また、ベルト供給方式における吸込み間隙の大きさも固体粒子輸送量に大きな影響を与える。

2) 固体粒子輸送量は揚水量に依存しているが、固体粒子輸送特性は揚水特性ほど浸水率の影響を受けない。

3) 固体粒子吐出体積率と気体および液体のそれぞれのみかけ流速の比の関係で表わした実験式(4)は、押込み供給方式ならびにベルト供給方式の実験値を良

好にまとめた。

終りに本実験に協力を得た黒田幸輝、高木康介および築瀬哲也の各氏ならびに資料整理の援助を得た井手英夫助手に謝意を表わします。

記 号

f_L : 水の吐出体積率, [-]

f_S : 固体粒子の吐出体積率, [-]

H_d : 吐出し揚程, [mm]

H_S : 浸水深さ, [mm]

Q_{G0} : 揚水管内平均静圧値に換算した供給空気量, [cm³/sec]

Q_{Gn} : 標準状態に換算した供給空気量, [Ncm³/sec]

Q_L : 揚水量, [cm³/sec]

Q_S : 固体粒子輸送量, [cm³/sec]

V_G : 空気のみかけ流速, [m/sec]

V_L : 水のみかけ流速, [m/sec]

W_L : 揚水量, [g/sec]

W_S : 固体粒子輸送量, [g/sec]

η_p : 揚水効率, [-]

σ : 浸水率, [-]

文 献

- 1) 赤川：気水混合物の流動，第2報，水平管および傾斜管上向流における相対速度，日本機械学会論文集，23，128，285，1957。
- 2) 千田：リバース・サーキュレーション・ドリルに用いられるエアリフトポンプ，建設機械，8，2，29，1968。
- 3) 古屋ら：混相流研究上の問題点と文献，日本機械学会混相流の摩擦機構分科会(2P-SC 29)成果報告書，43，1978。
- 4) 井伊谷・木村：揚液用エア・リフト・ポンプの性能実験，化学工学，18，12，586，1954。
- 5) 加藤・宮沢・田宮・岩崎：固体粒子用気ほうポンプの研究，日本機械学会論文集，40，335，1974，1974。
- 6) 川島・野田・益山・尾田：エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送，日本鉱業誌，91，1054，765，1975。
- 7) 松村・堀之内：エアリフトに関する研究(第1報)，流動現象と揚水特性，鹿児島大学工学部研究報告，21，63，1979。
- 8) 野田・川島：エアリフトポンプによる固体粒子の水力輸送—空気孔の数および位置による影響，日本鉱業会研究業績発表講演会，講演要旨集，13，1976。
- 9) 佐々木：マンガント塊の採鉱システム技術，日本機械学会誌，38，737，399，1980。
- 10) 都田・島崎・前田：水平気液固3相流の圧力損失，化学工学論文集，4，1，56，1978。
- 11) 宇佐美・植木：エアリフトポンプによる固体粒子の輸送，採鉱と保安，21，12，10，1975。