

バブルジェット式エアリフトポンプの開発*

(実現性確認試験と性能予測)

佐田富 道雄^{*1}, 川原 顕磨呂^{*2}
木村 隆直^{*3}, 中尾 淳一^{*4}

Development of a Bubble-jet-type Air-lift-pump (Feasibility Test and Performance Prediction)

Michio SADATOMI^{*5}, Akimaro KAWAHARA,
Takanao KIMURA and Junichi NAKAO

^{*5} Department of Mechanical System Engineering, Graduate School of Science
and Technology at Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

An advanced micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube was invented by Sadatomi in 2003. In the present paper, as an industrial application of the micro-bubble generator, a bubble-jet-type air-lift-pump also invented by Sadatomi in 2005 has been presented together with the results of its feasibility test. In the test, effects of particles size, submergence ratio (=the riser length submerged in water divided by the total riser length), and water and air supply rates to the bubble-jet generator on the pump performance have been studied. Yoshinaga-Sato model for predicting water and particles discharge rates has been modified and tested against the present experimental data to confirm its validity. The results of such experiments and analyses are reported in this paper.

Key Words: Multi-phase Flow, Air-lift-pump, Feasibility Test, Performance, Prediction

1. 結 言

直径 100 μm 以下程度のマイクロバブルは、液への溶存性が高く、牡蠣や真珠貝の育成に有効であるなどの様々な利点を持つことが知られている⁽¹⁻²⁾。このため、例えば、上山・宮本の本⁽³⁾に紹介されているように、我が国では多くの研究者や技術者によってその発生法や応用性が研究されている。これらの研究の中で、佐田富は図1に示す円管内に球状物体を持つマイクロバブル発生装置を考案し⁽⁴⁾、その最適設計条件⁽⁵⁾と流体力学的性能予測法⁽⁶⁾を見出している。

この発生装置では水などの液体を導入すると、物体周りの液流速が装置出口のそれよりも著しく大きいので、エネルギー保存のため出口の液圧如何によっては物体のすぐ下流では負圧となることがある。したがって、空気などの気体が管壁に設けた小孔から自動吸引され、物体周り的高速せん断液流れによって細かくされ、装置の出口からマイクロバブルを大量に含む水ジェットとして放出される。

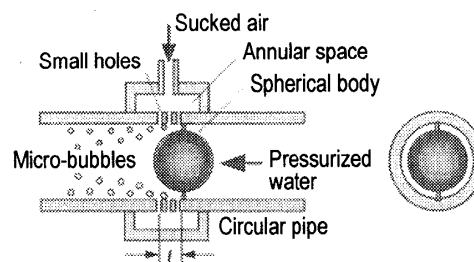


Fig. 1 Micro-bubble generator by Sadatomi⁽⁴⁻⁶⁾

図2は、海底や湖底などに堆積した汚泥や土砂を除去するために佐田富が考案した、バブルジェット式エアリフトポンプ⁽⁷⁾である。そのポンプでは、従来型のエアリフトポンプのように空気圧縮機による給気がなくても、ライザー下部のスカート内に設置した複数のバブルジェット発生装置(マイクロバブル発生装置の吸気穴を拡大して空気の吸引量を増やしたもの)に水中ポンプなどによって水を供給すれば、自動的に空気が吸引されライザーに給気される。そして、気泡を含む水ジェットが旋回流を起こすように斜め下方に放出されて堆積物を浮遊させる。気泡は旋回流が持つ遠心力のためにスカート中心部に集まりライザー内を上昇

* 原稿受付 2007年9月10日。

^{*1} 正員, フェロー, 熊本大学大学院自然科学研究科(☎860-8555 熊本市黒髪2-39-1)。

^{*2} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科。

^{*3} 三菱電機(株)冷熱システム製作所(☎640-8686 和歌山市手平6-5-66)。

^{*4} ソニーセミコンダクタ九州(株)長崎テクノロジーセンター(☎854-0065 諫早市津久葉町1883-43)。

E-mail: sadatomi@mech.kumamoto-u.ac.jp

するので、ライザーの内外には圧力差が現れ、結局、浮遊した堆積物は水・空気と共にライザー内を上昇することになる。この結果、バブルジェット式エアリフトポンプは堆積汚泥・土砂の除去だけでなく、マイクロバブルによって水に溶け込んだ酸素が好気性のバクテリアを活性化させるので水質浄化にも役立つと考えられる。

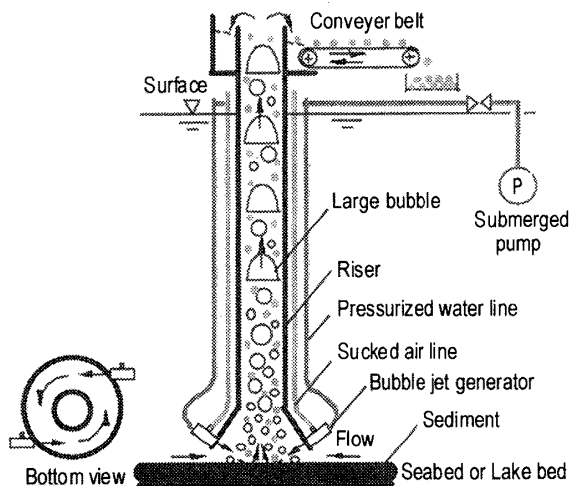


Fig. 2 Bubble-jet-type air-lift-pump by Sadatomi⁽⁷⁾

この論文の目的は、上記の新型エアリフトポンプの設計指針を得ることである。そのため、(a) 小型装置の性能試験によって揚水・揚固量等の実験値を取得し、(b) その性能を予測するために、通常の揚固用エアリフトポンプに関する吉永と佐藤のモデル⁽⁸⁾を修正し、(c) その修正モデルの妥当性を本実験値によって検証した。それらの試験結果、モデルの修正ならびに修正モデルの検証結果を以下に述べる。

Table 1 Specifications of test particles

| Name | Mean dia. (Standard deviation) mm | Material | Density kg/m ³ | Free fall velocity m/s |
|-------|-----------------------------------|----------|---------------------------|------------------------|
| SP-01 | 1.21 (0.04) | Ceramics | 3761 | 0.27 |
| SP-02 | 1.94 (0.08) | Glass | 2740 | 0.29 |

2. 実験

2.1 供試粒子 試験では、実際の堆積物の代わりに、粒子の寸法等の影響を知るために、表1に特性を示す平均外径1.21 mmの白色セラミック粒子と1.94 mmの赤色ガラス粒子を使用した。これらの粒子はSP-01とSP-02と呼ばれ、外径の標準偏差は0.04 mmと0.08 mmであった。両粒子は水中における自由沈降

速度(壁面の影響が無視できる場合)に近い値であり、その速度に基づく粒子レイノルズ数は両方とも600未満であった。

2.2 試験装置 図3に本実験装置を示す。主要部は、水と供試粒子(SP-01あるいはSP-02)が入った水槽、スカートを持つ内径D=26 mm・全長H=5.0 mの垂直なライザー、二つの同寸法のバブルジェット発生装置(図4参照)、その装置への給水ポンプ、ライザー出口の相分離器、および内径50 mmの戻り管である。スカートは、外径300 mm・深さ60 mmの深皿状で、中央の内径26 mmの穴はライザーとつないであり、最下部は粒子のスカート外への流出を少なくするために粒子層の上部に触れるように設置した。なお、バブルジェット発生装置は内径11.0 mmの管内に外形9.53 mmの球が固定された3/8インチ型で、球の中心から2 mm下流の管全周に内径1.0 mmの空気吸入穴が12個設けてある。浸水率 $\sigma (= H_s/H)$ については、図3の H_s を変えることによって、0.76から0.86の範囲で変えた。

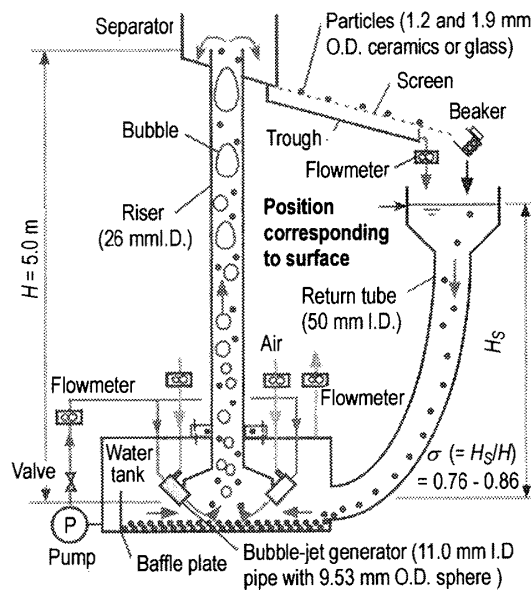


Fig. 3 Test apparatus of bubble-jet-type air-lift-pump

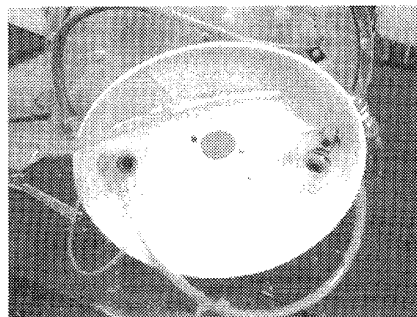


Fig. 4 Bottom view of skirt with bubble-jet-generators

各浸水率において、バブルジェット発生装置への給水流量 Q_L を変えながら、ライザー出口からの空気・水・粒子の排出流量 Q_{GO} , Q_{LO} , Q_{SO} を測定した。ここで、添字 G, L, S は気相、液相、固相を、 I と O は入口と出口を表す。その際、給水流量 Q_L はタービン流量計によって、空気の吸入流量 Q_{GI} は質量流量計によって、それぞれ 1% と 2% の不確かさで測定した。空気の排出流量 Q_{GO} は、上述の Q_{GI} からスカートの外側への流れ流量の測定値を差し引くことにより 3% の不確かさで測定した。水と粒子の吐出流量 Q_{LO} と Q_{SO} は、両者を分離器で分けたあとに、水については電磁流量計によって、粒子についてはピーカー・電子秤・ストップウォッチを用いた重量法によって、それぞれ 2% の不確かさで測定した。

試験においては、効率的な運転条件の調査に加えて、粒子径、浸水率、ライザーへの空気供給流量が本エアリフトポンプの性能に及ぼす影響を調べた。

さらに、給水流量を $Q_L = 34.8 \text{ l/min}$ に固定して、バブルジェット発生装置の吸気口から加圧空気を導入する、別の試験も行った。その試験では Q_L が小さいので空気は自動吸引されないが、バブルジェットの速度が小さくなるのでスカートの外側への粒子の逃げを少なくできる。この論文では、バブルジェット発生装置によって空気が自吸される場合を原型装置試験、 Q_L を小さくして加圧空気を導入する場合を改良装置試験、とそれぞれ名付けることにした。

3. 実験結果と考察

3・1 原型装置試験 図 5 は SP-02 粒子に関する原型装置の試験結果で、浸水率が $\sigma = 0.76$ と 0.86 の場合である。二つのバブルジェット発生装置への合計の給水流量 Q_L を 62 l/min まで増加させ、空気の合計吸入量 Q_{GI} とライザー出口からの吐出量 Q_{GO} の実験値とを比較している。 $Q_L < 45 \text{ l/min}$ において空気を吸入できなかったのは、バブルジェット発生装置の出口に働く圧力 $\rho g H_s$ が高く、吸気用小孔出口におけるゲージ圧が負圧にならなかったためである。しかし、 $\sigma = 0.76$ では、 $Q_L = 45 \text{ l/min}$ で空気を吸入し始め、 Q_L の増加に伴って負圧の度合いが大きくなるので Q_{GI} は増加した。いっぽう、 $\sigma = 0.86$ では、装置出口の水圧が $\sigma = 0.76$ よりも高いので吸気用小孔出口のゲージ圧は負圧になりにくく、 $Q_L = 45 \text{ l/min}$ では空気を吸入できなかった。なお、任意の水深と Q_L における Q_{GI} とバブルジェット発生装置の入口水圧 P_1 は予測可能であり⁽⁶⁾、本実験値はその予測法でうまく予測できた。

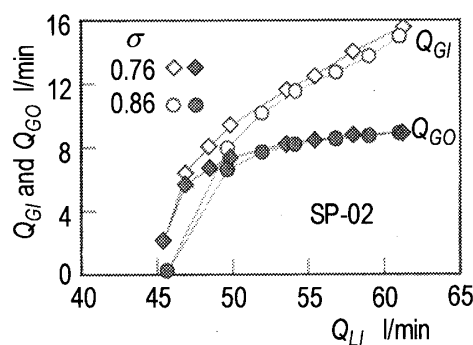


Fig. 5 Air discharge rate, Q_{GO} , air suction rate, Q_{GI} , vs. water supply rate to the bubble-jet-generators, Q_L

ライザー出口からの空気吐出流量 Q_{GO} は、吸入した空気流量 Q_{GI} の一部がスカートの外側へ漏れたため、 Q_{GI} よりも少ない。その漏れは Q_L の増加にしたがって増えたので、 Q_{GO} は σ に依らず 8.5 l/min を超えることはなかった。その漏れの増加の原因は、 Q_L の増加と共にバブルジェット発生装置から吐出される空気-水混合物の速度が大きくなり、空気がスカートの下部に滞留できないためである。

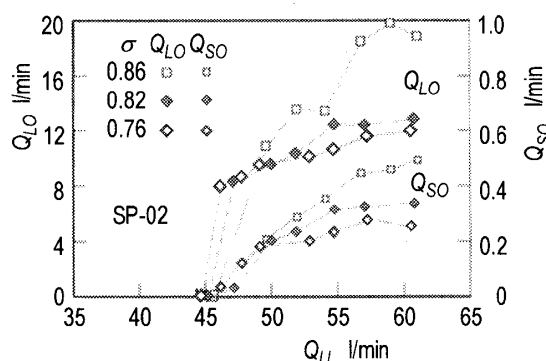


Fig. 6 Water and particles discharge rates, Q_{LO} and Q_{SO} vs. water supply rate to the generators, Q_L ; Effects of submergence ratio

図 6 は、 $\sigma = 0.76, 0.82, 0.86$ における水と SP-02 粒子の吐出流量の実験値である。図 5 から分るように Q_L 一定では、 Q_{GO} は σ に依らずほぼ等しくなり、 Q_{GO} が同じであれば、水の Q_{LO} については粒子の Q_{SO} も σ の増加と共に増えるのが一般的である。

図 7 は、 $\sigma = 0.86$ の条件で SP-02 粒子と SP-01 粒子の Q_{GO} , Q_{LO} , Q_{SO} の実験値を比較している。SP-02 粒子では Q_L の増加と共に Q_{LO} と Q_{SO} は増えたが、SP-01 粒子では $Q_L > 53 \text{ l/min}$ の高 Q_L 領域において Q_{LO} と Q_{SO} が増えないという異常が生じた。その原因は次の二点と考えられる。(a) SP-01 粒子は SP-02 粒子よりも軽いの

で、バブルジェット発生装置が吐出する噴流によってスカートの外側に押し出され易い、(b) スカートの外側に出た粒子は水のスカート内への流入を妨げるので、水の吐出流量も減る。

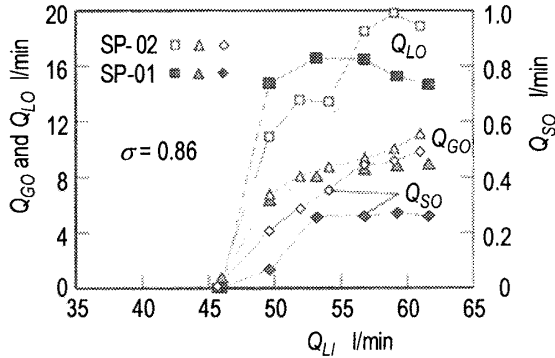
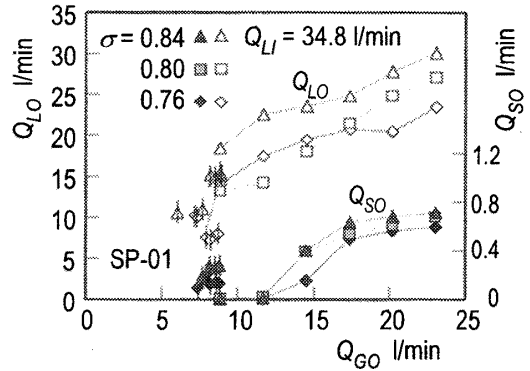


Fig. 7 Air, water and particles discharge rates, Q_{GO} , Q_{LO} and Q_{SO} vs. water supply rate to the generators, Q_{LI} ; Effects of particle type

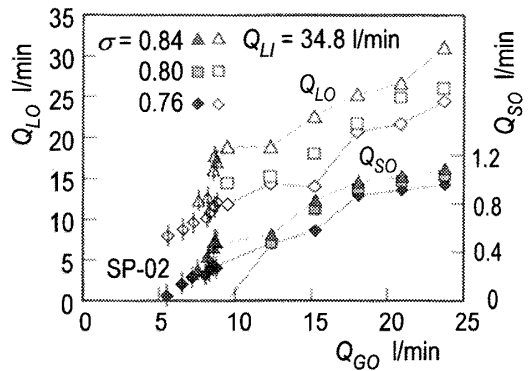
3・2 改良装置試験 上記の異常を解消し、 Q_{LO} と Q_{SO} を増やすためには、バブルジェットの速度を下げるのが有効であろう。そこで、バブルジェット発生装置への水の供給流量 Q_{LI} を、空気は自動吸引しないが粒子を巻き上げることができる 34.8 l/min まで下げ、バブルジェット発生装置の吸気口に加圧空気を導入してライザーに供給すべき空気量を増加させた改良装置試験を行った。その改良装置試験では、水を循環するポンプに加えて動力源として空気圧縮機が必要であり、原型装置試験のポンプだけの場合と比較して、ポンプの供給水量は減るものの空気圧縮機の購入に関する初期投資が増えるため経済的に不利ではないかという懸念が生じた。

図 8(a)と(b)は、SP-01 粒子と SP-02 粒子に関する改良装置の試験結果である。三種類の浸水率における Q_{LO} と Q_{SO} の実験値をライザー出口からの空気の吐出流量 Q_{GO} を横軸として示している。 $Q_{GO} < 8.5$ l/min における縦棒付の原型装置の試験結果と比較して、改良装置では Q_{GO} の範囲が広がり、 σ と粒子の種類に依らず、 Q_{LO} と Q_{SO} は 2 倍以上に増えた。 Q_{LO} は Q_{GO} の増加と共に増えたが、 Q_{SO} は $Q_{GO} > 20$ l/min では増加は少なかった。

改良装置ではポンプに加えて空気圧縮機が必要であるので、バブルジェット発生装置入口における水と空気の全動力 L_T を改良の前後で比較することは意味がある。その動力評価において、水と空気の動力 L_L と L_G は次式で計算した。



(a)



(b)

Fig. 8 Water and particles discharge rates, Q_{LO} and Q_{SO} vs. air flow rate, Q_{GO} , before and after revision

$$L_L = (P_{LI} + \rho_L u_{LI}^2 / 2) Q_{LI} \quad (1)$$

$$L_G = (P_{GI} + \rho_G u_{GI}^2 / 2) Q_{GI} \quad (2)$$

式(1)において、 ρ_L は液の密度であり、 P_{LI} , u_{LI} , Q_{LI} はバブルジェット発生装置入口における液体の圧力、平均速度、発生装置 2 個分の体積流量である。圧力 P_{LI} と式(2)の P_{GI} は、装置入口における気、液の流量データを既報の予測法⁽⁶⁾に代入して求めた。なお、全動力 L_T は改良装置では $L_L + L_G$ であるが、原型装置では L_L である。

図 9 は、改良装置と原型装置について、粒子 SP-02、浸水率 $\sigma = 0.84$ の条件で水動力 L_L 、空気動力 L_G 、全動力 L_T を求めた結果で、ライザー出口からの空気吐出流量 Q_{GO} を横軸としている。原型装置では $Q_{GO} = 8$ l/min 付近から L_L は Q_{GO} と共に急増した。しかしながら、改良装置では L_T はあまり増えなかった。これは、式(2)における P_{GI} は最大でも 70 kPa しかなく、全動力に占

める空気動力の寄与は25%以下であったためである。ほかの σ の条件でも類似の結果が得られた。

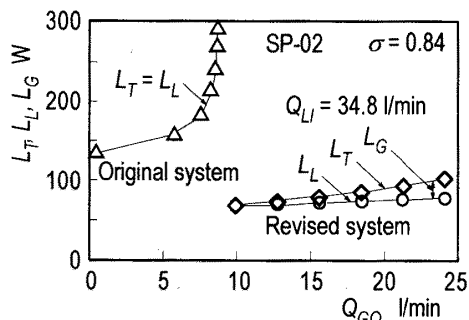
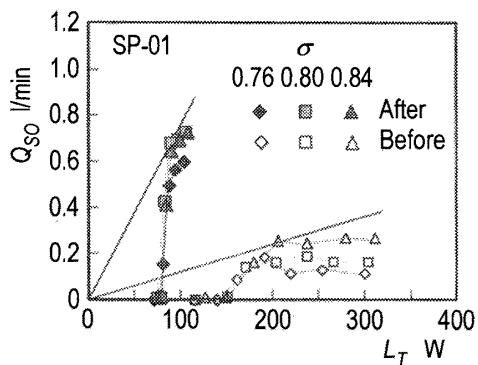
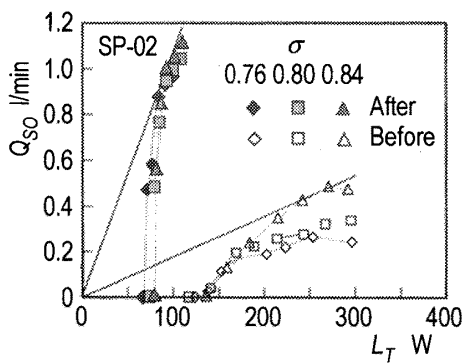


Fig. 9 Water, air and total powers, L_L , L_G and L_T vs. air supply rate to the generators, Q_{G0} , before and after revision



(a)



(b)

Fig. 10 Discharge rate of particles, Q_{S0} vs. total power, L_T , before and after revision

図10(a)と(b)は、SP-01粒子とSP-02粒子について、粒子の吐出流量 Q_{S0} と全動力 L_T の関係を示している。改良装置における Q_{S0} は原型装置のその2倍以上であり、 Q_{S0} の増加は σ が小さいほど著しい。したがって、ライザーが短ければ空気圧縮機が不要な原型装置でも構わないが、ライザーが長い場合は、浸水率が小さい

ほど改良装置のほうが有利であるといえる。効率的な運転の観点からは、図10において原点を通る接線の勾配が高い実験条件ほど優れている。その効率的な条件は、改良装置では $L_T \approx 90$ Wの条件であり、その L_T では図9から $Q_{G0} \approx 20$ l/minとなることが分る。さらに、上記の勾配 Q_{S0}/L_T は効率を表す指標であり、改良装置のほうが原型装置の6倍以上高いことも分った。

4. 解析モデル

吉永と佐藤⁽⁸⁾は、加圧空気をライザーの中途から供給する従来型の揚固用エアリフトポンプについて、性能予測用の解析モデルを提案している。彼らのモデルでは、給気部上流の固液二相流と下流の気液固三相流のそれぞれに関する運動量保存式を基礎式としており、給気流量 Q_{G0} に加えて揚固流量 Q_{S0} を与えて、揚水流量 Q_{L0} が計算される。しかるに、本エアリフトポンプでは、ライザーの下端から給気されるので固液二相流は現れない。そこで、彼らのモデルの固液二相流の部分を削除して、本エアリフトポンプに適する形に修正した次の基礎式を用いて解析を行ってみた。

$$\begin{aligned}
 & (j_G \rho_G u_G + j_L \rho_L u_L + j_S \rho_S u_S)_I \\
 & - (j_G \rho_G u_G + j_L \rho_L u_L + j_S \rho_S u_S)_O - \Delta P_I - \frac{dP_f}{dz} H \\
 & - \int_0^L (\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L + \rho_S \alpha_S) g dz + \rho_L g H_S = 0.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

ここで、 j , ρ , u , α は各相の容積流束 ($=4Q/\pi D^2$)、密度、平均流速、体積率であり、 dP_f/dz は三相流における圧力勾配の摩擦成分、 g と z は重力加速度と管軸方向距離である。式(3)において、第一項と第二項はライザーの入口と出口における運動量流束、第三項、第四項と第五項はそれぞれ入口損失、摩擦損失と静水圧損失である。また、第六項はライザーの外側から入口に働く静水圧である。式(3)を解くには、多くの構成方程式、例えば各相の体積率や三相流の摩擦損失倍数など、が必要であり、本研究では次の入口損失の式以外は、吉永と佐藤⁽⁸⁾が用いた式をそのまま使用した。

$$\Delta P_I = \zeta \rho_3 (j_{G1} + j_L + j_S)^2 / 2.
 \tag{4}$$

式(4)において、 ζ は入口形状 ($=0.56$, 単相流の場合) と流れの発達 ($=1.4$, 乱流の場合) に関わる入口損失係数であり⁽⁹⁾, ρ_3 は次式の三相流密度である。

$$\rho_3 = \rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L + \rho_S \alpha_S. \quad (5)$$

式(4)の採用理由は、本エアリフトポンプではライザーの入口が気液固三相流であり、吉永と佐藤⁸⁾が扱った装置の固液二相流とは異なるためである。

5. 解析モデルの検証

図 11(a)–(d)は改良装置に関する揚水流量 Q_{LO} の実験値を解析モデルによる計算値と比較したもので、図 (a), (b), (c)は SP-01 粒子で浸水率が異なる場合を、図 (d)は SP-02 粒子で浸水率が 0.84 の場合を示す。

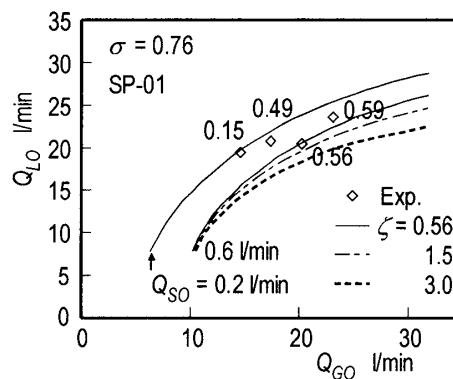
図 11 (a)では 4 個の実験点の揚固流量 Q_{SO} は 0.15 l/min から 0.59 l/min の範囲にあったので、入力値として与えるべき Q_{SO} には 0.2 l/min と 0.6 l/min を選んだ。そして、入口損失係数 ζ には入口形状のみの影響を含む 0.56 とその係数の感度を見るために 1.5 と 3 とを選んだ。しかし、複雑さを避けるために、 ζ を変えた結果は $Q_{SO} = 0.6$ l/min についてのみ示した。 $\zeta = 0.56$ とした Q_{LO} の計算値は実験値と良く合うことが分った。

図 11 (b)では Q_{SO} は 0.4 l/min と 0.6 l/min として、図 11 (c)では Q_{SO} は 0.4 l/min, 0.6 l/min と 0.7 l/min として、それぞれ Q_{LO} を計算し、 ζ を 0.56 とした計算値は実験値と良く合うことが分った。図 11 (d)では Q_{SO} は 0.6 l/min, 0.8 l/min と 1.0 l/min として Q_{LO} を計算し、 Q_{GO} の一番低い場合と高い場合を除き、 ζ を 0.56 とした計算値は実験値と合うことが分った。

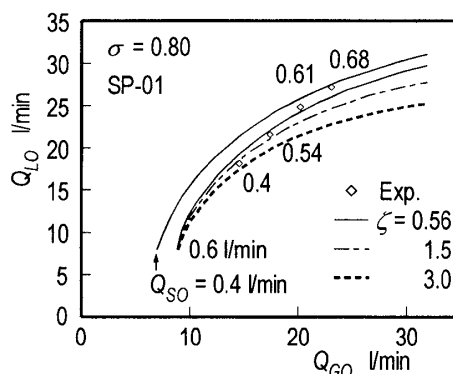
上述の比較から、 ζ を 0.56 にとれば、吉永と佐藤⁸⁾のモデルの修正版は 2 点を除き、本実験値を妥当な精度で表せると結論できる。しかしながら、このモデルは更なる改良が必要であり、その検証には実際の土砂に似たより細かい、かつ不規則な形状の粒子での実験値を得る必要がある。

さらに、 Q_{LO} と Q_{SO} のいずれかの値を入力せずとも他方が予測できるようにモデルを改良する必要がある。そのためには、 Q_{SO} と Q_{LO} を関係付ける実験式などを得て、モデルに組み込まなければならない。

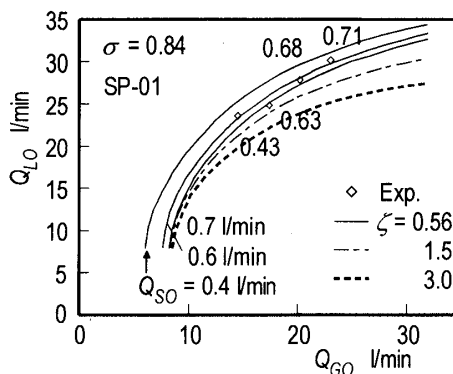
図 12 は上記の改良の手始めであり、縦軸に固体の固液全体に対する体積流量比 $Q_{SO}/(Q_{SO} + Q_{LO})$ を採っている。 $Q_{GO} > 16$ l/min の高 Q_{GO} 領域では、 $Q_{SO}/(Q_{SO} + Q_{LO})$ は浸水率には依存せずに、粒子のみで変わるので、粒子の寸法・形状・密度の異なる数種類の粒子を用いた実験を行って、粒子の特性を変数とする $Q_{SO}/(Q_{SO} + Q_{LO})$ の実験式が得られる可能性がある。



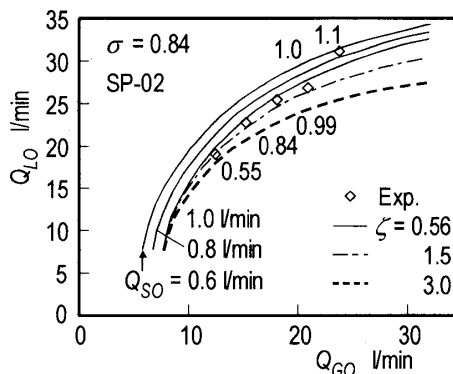
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11 Comparison of discharge rate of water, Q_{LO} , between experiment and calculation in the revised system

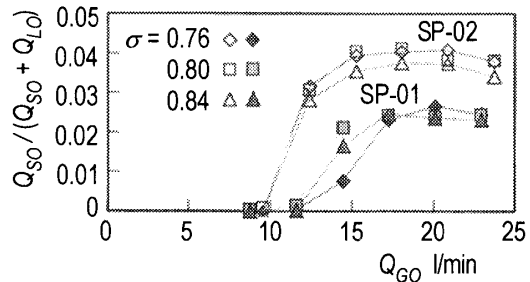


Fig. 12 Relation among the volume flow rate ratio of the particles, the discharge rate of air, the particle type and the submergence ratio in the revised system

6. 結 言

新型のバブルジェット式エアリフトポンプについて、性能試験と解析を行った。試験では、固相として平均粒径 1.21 mm と 1.94 mm の球形粒子を使用し、浸水率は 0.76–0.86 の範囲で変えた。主な知見は次の通りである。

1. 原型装置でも粒子を揚固できたが、粒子が小さいとスカートの外側に押し出されて性能が下がることが分った。この欠点を克服するために、バブルジェット発生装置の噴出速度を下げた加圧空気を供給する改良装置を開発した。
2. 改良装置は高性能を示し、揚固流量は原型装置の 2 倍以上となり、効率を表す指標である（揚固流量/全動力）は最適運転条件において 6 倍以上となった。
3. 従来型の揚固用エアリフトポンプに関する吉永と佐藤⁽⁸⁾のモデルを本エアリフトポンプの性能が予測できる形に修正した結果、改良装置の試験結果を妥当な精度で予測できることが明らかとなった。したがって、このモデルは本試験装置と異なるライザー管内径等を有する装置の性能予測にも使用できそうである。

今後の課題は、実用装置の設計に活用できる解析モデルを構築するために、上記の修正モデルを Q_{L0} と Q_{S0} のいずれかの値を入力せずとも他方が予測できるように改良することである。それには、寸法・形状・密度の異なる数種類の粒子を用いた実験を行って、 Q_{S0} と

Q_{L0} を関係付ける実験式などを得て、モデルに組み込む必要がある。さらに、このポンプの実用上の適用限界（最大水深等）を明らかにすることも課題である。

終わりに、従来型のエアリフトポンプに関する計算コードを提供いただいた西日本工業大学の吉永俊雄教授、装置作りに尽力いただいた熊本大学の有吉剛治技術職員、実験に協力いただいた熊本大学学生の武藤雄治、平野達也、後藤達憲君、研究資金を提供いただいた科学技術振興機構(No. 08-150)と西田鉄工株式会社 に感謝いたします。

文 献

- (1) Ohnari, H., Waste water purification in wide water area by use of micro-bubble techniques (In Japanese), *Japanese J. of Multiphase Flow*, Vol. 11, No. 3 (1997), pp. 263 - 266.
- (2) Ohnari, H., Fisheries experiments of cultivated shells using micro-bubbles technique (In Japanese), *Journal of the Heat Transfer Society of Japan*, Vol. 40, No. 160 (2001), pp. 2 - 7.
- (3) Ueyama, T. and Miyamoto, M., *World of micro-bubbles - cooperative action of water and gas* (In Japanese), (2006), Kougyoutyousakai.
- (4) Sadatomi, M., Japanese Patent, JP.2003-305494. A (2003).
- (5) Sadatomi, M., Kawahara, A., Kano, K. and Ohtomo, A., Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 29, (2005), pp. 615 - 623.
- (6) Matsuyama, F., Kanazawa, S., Sadatomi, M., Kawahara, A. and Kano, K., Optimum design of a new micro-bubble generator and its applications to industries - Prediction of hydraulic performance at deep water level (In Japanese), *Progress in Multiphase Flow research I*, (2006), pp. 25 - 32, Japan Society for Multiphase Flow.
- (7) Sadatomi, M., Japanese Patent, JP.2005-291171. A (2005).
- (8) Yoshinaga, T. and Sato, Y., Performance of an air-lift pump for conveying coarse particles, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 2 (1996), pp. 223 - 238.
- (9) JSME Handbook for Mechanical Engineers 6th Edition, 8. Fluid Mechanics (In Japanese), (1976), p. 14, Japan Society for Mechanical Engineers.