バブルジェット式エアリフトポンプによる堆積土砂の浚渫* (改良型装置の実験と性能予測)

Dredging of Sediments by Bubble-Jet-Type Air-Lift-Pump
(Experiment and Performance Prediction in Its Revised System)

佐田富 道 雄** 川 原 顕磨呂** 後 藤 達 憲***
SATATOMI Michio KAWAHARA Akimaro GOTO Tatsunori

Abstract The bubble-jet-type air-lift-pump developed by Sadatomi can dredge sediments hardly deposited on lake and sea beds by striking water jet with small bubbles against them and causing air-lift force on gas-liquid-solid mixture in the riser of the pump. In order to make the pump efficient even in deep-water zones, the pump was revised in our previous study. In the present study, results of additional experiments and performance predictions on the revised one of laboratory size are reported. In the experiment, 26 mm I.D. riser and a new 50 mm I.D. riser, each 5.0 m in length, and four kinds of solid particles of different size and density were used. Air supply rate was varied systematically at three submergence ratios from 0.76 to 0.84. The experimental results on the revised system has better particle discharge rate than the original system under the same power consumption condition. In the performance prediction, Yoshinaga et al.'s model was modified for the present purpose because their model is applicable only to a usual air-lift-pump. In addition, a new correlation of flow rate ratio of particles was derived based on the present data, and the new correlation was included in the model. As a result, the particle discharge rate at any air supply rate could be well predicted.

Keywords: Air-lift-pump, Bubble-jet-generator, Dredging, Sediments, Performance prediction

1. 緒 言

養殖漁業が盛んな閉鎖水域では、食べ残しの餌や糞などが海底に堆積して汚泥となり、水質悪化の原因となっている。また、湖や貯水池では、落葉や土砂が堆積して、貯水量の減少や水質悪化の原因となっている。

堆積した土砂・汚泥の処理には、浚渫や覆砂工法、化学的処理といった様々な方法があるが、多額の費用を要する欠点がある。そこで、これらの堆積物を低コストかつ持続的に取り除くためにエアリフトポンプが注目されている。エアリフトポンプは他のポンプと比べて構造が簡単であり、土砂などによる閉塞を起しにくい特徴がある。しかし、圧縮空気を揚水管に送り込むだけの単純な

エアリフトポンプでは、浮遊状態の堆積物は別として、一般的な堆積物は取り除くことができない。

Fig. 1 Bubble-jet-type air-lift-pump.

* 2009.9.29 受付

** 熊本大学大学院自然科学研究科先端機械システム講座 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1

TEL: (096)342-3757 FAX: (096)342-3757 E-mail: sadatomi@mech.kumamoto-u.ac.jp

*** 三菱電機株式会社三田製作所

そこで、佐田富は Fig. 1 に示すバブルジェット式エアリフトポンプ[1]を考案した。この装置では、バブルジェット発生装置（以下、BJ 発生装置、詳細後述）をスカート下部に旋回流が生じるように取付けて気泡を含む水噴流を作り、湖底・海底に堆積した堆積物に衝突させて浮遊状態とし、エアリフト作用によりライザー内を上昇させ回収することができる[2]。浚渫への利用のほか様々な産業上の用途が考えられる。

既報[3-5]の研究では、内径 26 mm のライザーを持つ試験装置と 2 種類の堆積物を用いて、浅水域用の原型装置と魚類養殖場などがある 50 m 程度までの深水域での利用を想定した改良型装置について性能比較を行った。なお、原型装置[1,2]ではバブルジェット発生装置に水を流すことによって生じる負のゲージ圧によって空気は自吸されるが、改良型装置[3-5]では空気を自吸できない程度に水流量を抑えた状態で加圧空気が導入される。さらに、エアリフトポンプに関する吉永らの性能予測モデル[6]を用いた計算値と実験値の比較を行い、モデルにおいて改良を要する部分を明らかにした。

本研究では、まず、内径 26 mm のライザーの試験装置において粒子の種類を 2 種類追加して実験を行うと共に、内径 50 mm ライザーの新装置を用いて実験を行った。そして、それらの実験値を既報の実験値[3-5]と比較することにより、粒子の寸法・性状およびライザー管径が堆積物の除去性能に及ぼす影響を明かにする。次に、前述の吉永らの性能予測モデル[6]の修正を行い、その妥当性を既報と本報の実験値によって検証する。

なお、吉永らのモデルでは空気の供給流量と固体粒子の吸い込み流量を入力して揚水流量を算出するが、本報のモデルでは水粒子混合物内の粒子の体積流量比に関する実験式を新たに導いて性能予測モデルに組み入れたため、空気の供給流量を入力するだけで粒子の揚固流量を算出できる。この点が大きな進歩である。

2. 実験

実験は Fig. 2 の装置で行った。ライザーは透明アクリル樹脂製で高さ $H = 5$ m、内径 $D = 26$ mm [3-5]と 50 mm の 2 種類であった。堆積物に見立てた粒子は 4 種類で（詳細は後述）、それぞれを別々に下部タンクに入れた。粒子はバブルジェッ

トの発生によって巻き上げられ、ライザー内を空気、水と一緒に上昇し、ライザー出口から吐出された。その後、粒子は水と分離して各流量が測定され、下部タンクに戻された。いっぽう、空気は大気中に放出された。

Fig. 2 Experimental apparatus.

実験では浸水率 $\sigma (= H_s/H)$ を 0.76-0.84 の範囲で変化させ、浸水率が空気、水、粒子の各吐出流量に与える影響を調査した。粒子の流量は水と分離後にビーカー等で収集して電子天秤で計量して求めた。いっぽう、水流量は電磁流量計で求めた。各流量の測定精度は、粒子、水ともに 2 % 以内であった。空気流量は BJ 発生装置への導入前に浮子式流量計で測定し、大気圧・水温における体積流量に換算してライザー出口における流量 Q_{Go} とみなした。ただし、BJ 発生装置から噴出した空気の一部がスカートの外側に漏れたため、その漏れ流量を別途測定して、その分を差し引いて処理した。こうして求めた Q_{Go} の測定誤差は 3 % と見込まれた。なお、バブルジェットの噴出速度が大き過ぎると、上述した空気の漏れが大きくなり、川砂のような細かい場合は粒子がスカートの外側へ押し出されるので、揚水・揚固作用が悪化する。そこで、改良型装置では、BJ 発生装置への水供給量を空気が自吸できない程度の一装置あたり $Q_{Li} = 17.5$ l/min に抑え、不足分の空気をコンプレッサーから供給した。これにより、上述した空気の漏れ等の弊害は抑えることができた。

堆積物には、模擬粒子として Table 1 に示す川砂、およびガラス製とセラミックス製の 3 種類の球状粒子を用いた。表中、 $u_{s\infty}$ は単一粒子が壁の

干渉を受けずに静止水中を沈降する際の終端速度である。その速度と平均粒子直径 d_s とを基準とする粒子レイノルズ数 Re_s は 79-804 の範囲にあり、供試粒子は中粒子の範囲にあることが分かる。平均粒径 0.72 mm の川砂は熊本県内の河川で採取されたもので、有明海に堆積した海砂と同様な性状と聞いている。川砂は軽量なためにバブルジェットの方向如何ではスカートの外側に押し出されるので他の供試粒子と比較して厄介である。

なお、Gla-20 と Cer-20 のデータ比較により、密度の影響を見ることができる。なお、海底等の堆積土砂には 2 mm を超える粒子も混ざっている。将来的には大きい粒子が混ざった場合の試験も行う予定である。

Table 1 Specification of particles.

Name	Materials	Density kg/m ³	Mean dia. mm	Fall vel. $u_{s\infty}$ m/s	Particle Re_s
Sa-07	Sand	2556	0.72	0.11	79
Gla-20	Glass	2740	1.94	0.28	537
Cer-10	Ceramics	3761	1.21	0.25	306
Cer-20	Ceramics	3703	2.12	0.38	804

Fig. 3 に BJ 発生装置を示す。空気を環状室と小孔を介して水流中に導き、球周りの高速水流でせん断して、微細気泡を含む水流を噴出できる。文献 [7] の試験結果を参考にして円管と球の直径は 11.0 mm と 9.53 mm とし、小孔直径はマイクロバブル用よりも大きい 1.0 mm とした。これは、多量の空気を入れ易くするためである。このような BJ 発生装置を Photo 1 に示すように 50 mm ライザーでは四つをスカート部に取り付けた。

Fig. 3 Bubble-jet generator.

Photo 1 は 50 mm ライザーのスカート部を下から見たものである。直径 415 mm のスカートの中央にライザーの入口がある。BJ 発生装置は予備検討の結果、 $L = 25$ cm のピッチ円上に四つを取り付けた場合が最も高性能であったので、本実験はその状態で行った。なお、26 mm ライザーの装

置では直径 330 mm スカートに BJ 発生装置は二つを対角 ($L = 19$ cm) に取り付けた。

Photo 1 Four bubble-jet-generators and the riser inlet for 50 mm i.d. riser are seen underneath the skirt.

3. 実験結果

3.1 26 mm ライザーの結果

Photo 2 に 26 mm ライザー内三相スラグ流における Gla-20 粒子の揚固状態の典型的な写真を示す。ビデオ映像の一コマであるので鮮明さに欠けるが、粒子は赤色であったため、白っぽく写った大気泡や多数の小気泡とは区別することができる。ほとんどの粒子は水中に存在しており、スラグ流特有の間欠的な水の上昇に伴って上昇するので、ライザー出口では水と共に間欠的に吐出される。また、水の吐出流量の増加と共に粒子の吐出流量も増加する傾向がある。

Photo 2 Typical picture of Gla-20 particles lifting in three-phase slug flow in 26 mm I.D. riser.

Fig. 4に26 mmライザーの改良型装置において、浸水率を $\sigma=0.8$ と固定して、粒子を変えた場合の実験結果を同時に示す。横軸は供給空気流量 Q_{GO} で、縦軸は吐出した水流量 Q_{LO} と粒子流量 Q_{SO} である。 $Q_{GO}<9$ l/minではライザー内の平均密度が水のそれに近く駆動力が不十分であるため、どの粒子も揚固できなかった。一般的には、ライザー内の平均水流速 u_L が静止水中における粒子の自由沈降速度 $u_{S\infty}$ を超えたら揚固が始まる（Cer-20粒子ではTable 1より $u_{S\infty}=0.38$ m/sであり、 $u_L=0.38$ m/sは $Q_{LO}=12$ l/minに相当）。つまり、揚固開始水流量は当該粒子の $u_{S\infty}$ の大小に依存する。その水流量を与える地点から Q_{GO} を増していくと、 Q_{LO} も次第に増えて平均水流速 u_L が増すので揚固粒子流量 Q_{SO} も増える。このような傾向は、ライザーの管径と浸水率の値に依らず見られた。

Fig. 4 Discharge rates of water and particles against air supply rate in 26 mm riser at submergence ratio of 0.8. –Comparison among 4 kinds of particles.

Fig. 5は26 mmライザーのCer-20粒子について、原型装置と改良型装置の揚固性能を比較したものである。横軸は消費動力 L_T である。 L_T は、原型装置では式(1)による水動力 L_L のみであり、改良型装置では L_L と式(2)による空気動力 L_G との和、 $L_T=L_L+L_G$ である[8]。

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

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

式(1)において、 ρ_L は液の密度であり、 P_{LI} と u_{LI} はBJ発生装置入口における液の圧力と平均速度である。 Q_{LI} は供給する液の全体積流量で、26 mm

ライザーの場合はBJ発生装置2個分、50 mmライザーの場合は4個分である。式(1)の圧力 P_{LI} と式(2)の P_{GI} は、装置入口における気、液各流量の測定値を既報の予測法[8]に代入して求めた。

効率的な運転を考えると、揚固流量／消費動力、Fig. 5の原点を通る接線の傾き Q_{SO}/L_T 、が高いほど優れている。したがって、改良型装置では $L_T \approx 69$ Wにおいて最高効率を示す。最高効率点における改良型装置の Q_{SO}/L_T 比は原型装置のその比の約4.7倍であることが分かった。

Fig. 5 Particle discharge rates of original and revised systems in 26 mm riser at submergence ratio of 0.76 - 0.84.

Fig. 6は、Fig. 5の浸水率 $\sigma=0.80$ の条件について、改良型装置と原型装置の水動力 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 は少しずつ増加した。これは、式(2)における P_{GI} が高々6.6 kPaであり、全動力に占める空気動力の割合が20%以下であるためである。ほかの σ の条件でも類似の結果が得られた。なお、前述した $L_T \approx 69$ Wの条件はこの図では $Q_{GO} \approx 24$ l/minであるので、その Q_{GO} において最高効率であるといえる。

Fig. 6 Water, air and total powers, L_L , L_G and L_T vs. air supply rate to the generators, Q_{GO} , before and after revision.

3.2 50 mm ライザーの結果

26 mm ライザーに関する以上の実験と考察から、ライザー長が 5 m の場合であっても改良型装置の方が効率的であることが明らかとなった。そこで、50 mm ライザーでは改良型装置のみを実験することにした。先ず粒子が Cer-10 と Cer-20 の場合の実験値を取得したので、その結果を以下に紹介する。

Fig. 7 は、50 mm ライザーの改良型装置において、Cer-10 粒子を用いた場合の実験結果である。一般的には浸水率が大きいほど Q_{LO} と Q_{SO} が共に大きいことが分かる。しかし、低 Q_{GO} 条件では $\sigma = 0.80$ のほうが $\sigma = 0.84$ の場合よりも Q_{LO} が大きくなった。この原因は不明であるが、単なる計測誤差ではなさそうである。 Q_{GO} の増加に伴う Q_{LO} と Q_{SO} の増加の傾向は 26 mm ライザーに関する Fig. 4 と同じである。

Fig. 7 Discharge rates of water and Cer-10 particles against air supply rate in 50 mm riser at submergence ratio of 0.76 - 0.84.

Fig. 8 は、Fig. 7 から浸水率 $\sigma = 0.80$ における Cer-10 粒子の実験値を取り出して、同じ浸水率における Cer-20 粒子の実験値と比較したものである。静止水中の自由沈降速度 u_{∞} が大きい Cer-20 粒子のほうが揚固流量 Q_{SO} は小さく、揚水流量 Q_{LO} は大きいことが分かる。このような Q_{SO} と Q_{LO} の大小関係が逆転する傾向は、26 mm ライザーに関する Fig. 4 においても見られる。両粒子では Cer-10 粒子のほうがバブルジェットによって浮遊させられ易いので、ライザー入口では粒子濃度が高くなり、水の侵入に対する抵抗となるために Q_{LO} が低下するのであろう。また、Cer-10 粒子の Q_{SO} が大きいことから判断して、本バブルジェット式エアリフトポンプでは大小の様々な粒子が混在して堆積している場合、 u_{∞} がより小さい微粒子が優先的に揚固されると推定できる。

Fig. 8 Discharge rates of water and particles against air supply rate in 50 mm riser at submergence ratio of 0.8. -Comparison between Cer-10 and Cer-20.

3.3 26 mm ライザーと 50 mm ライザーの比較

両ライザーの実験結果の比較のために、ライザーの断面積 A の大小を考慮して、容積流束 $j (= Q/A)$ の形で実験値を比較してみた。

その結果の一例を Cer-10 粒子について Fig. 9 に示す。26 mm ライザーの場合、50 mm ライザーと比較して管摩擦の影響が相対的に大きくなるため、 $j_{LO} = 0.9$ m/s 程度が上限のようなのである。そのため、粒子の揚固量も $j_{SO} = 0.02$ m/s 程度で上限となる。しかし、その上限より j_{GO} が小さい領域では、ライザーの直径の影響は小さくなく、両ライザーの j_{LO} と j_{SO} の実験値は近い値となっている。なお、 $j_{GO} = 0.3$ m/s 付近において 50 mm ライザーのほうが j_{SO} は大きく、 j_{LO} は小さくなった理由は、50 mm ライザーでは BJ 発生装置を 4 個持つためにライザー入口付近でより多くの粒子を均一に浮遊できるためと考えている。

Fig. 9 Discharge rates of water and Cer-10 particles against air supply rate at submergence ratio of 0.8. -Comparison between 26 mm riser and 50 mm riser.

Fig. 10(a), (b) は、揚固流量／消費動力の比、 Q_{SO}/L_T 、に及ぼすライザー直径の影響を調べるた

めのもので、それぞれ Cer-10 粒子と Cer-20 粒子を用いた場合である。原点を通る実線はライザー直径ごとに Q_{SO}/L_T 比が最大となる場合である。これらの図では浸水率の影響は現れにくく、 Q_{GO} の増加に伴って L_T が増加し、 Q_{SO} も増加している。そして、 Q_{SO}/L_T 比の増加は直径が大きい 50 mm ライザーのほうがより顕著であることが分かる。したがって、ライザー直径を大きくするほど消費動力あたりの粒子の揚固量は高まると推定できる。

Fig. 10 Particle discharge rate against total power required at submergence ratio of 0.76 - 0.84. -Comparison between 26 mm riser and 50 mm riser.

3.4 水粒子混合物内の粒子流量率の実験式

ライザー内では粒子はほぼ水中にあるので、水粒子混合物内の粒子流量率 $\beta_s (= Q_{SO} / (Q_{SO} + Q_{LO}))$ を吐出流量の実験値から求めてみた。

Fig. 11 の左側が 26 mm ライザー、右側が 50 mm ライザーの結果である。揚水流量が不足する空気供給流量が小さい領域を除き、 β_s は Q_{GO} や浸水率 σ の影響をほとんど受けずに粒子の種類で決まる値となった。そこで、 Q_{GO} が高い領域を対象として、次の実験式を導いた。

$$\beta_s = 407 \cdot \left(\frac{d_s}{D} \right)^{-0.16} \left(\frac{\rho_s}{\rho_L} \right)^{-3.4} \left(\frac{\rho_L u_{se} d_s}{\mu_L} \right)^{-1.0} \quad (3)$$

ここで、 d_s は粒子直径、 D はライザー内径、 ρ_s および ρ_L はそれぞれ粒子と水の密度、 μ_L は水の粘度である。式(3)では、 β_s を粒子径と管径の比、粒子の比重、粒子レイノルズ数の三つの無次元数の関数として表している。次の性能予測モデルにおいては、この実験式を組み込むことにした。

Fig. 11 Flow rate ratio of particles against air supply rate in 26 mm and 50 mm risers at submergence ratios of 0.76 - 0.84.

4. 性能予測モデルとその検証

粒子揚固用エアリフトポンプに関する吉永ら [6] の性能予測モデルを本エアリフトポンプに適用できるように固液二相流部を含まない形に書き換えて解析を行った。基礎式は運動量理論に基づく次式である。

$$\Delta(\rho_G j_G u_G + \rho_L j_L u_L + \rho_s j_s u_s)_{in-out} - dP_E - \frac{4}{D} \int_E \tau_3 dz - \int_E (\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L + \rho_s \alpha_s) g dz + \rho_L g H_s = 0 \quad (4)$$

ここで、第一項は三相混合物のライザー入口ー出口間の運動量変化、第二〜四項は入口、管摩擦、静水圧の各損失、第五項はライザー入口に管外から働く静水圧であり、吉永らと同じ方法で計算した。なお、吉永らのモデルでは給気流量 Q_{GO} と揚固流量 Q_{SO} を与えて揚水流量 Q_{LO} を計算するが、本解析では式(3)を組み込むことにより、 Q_{GO} を与えて Q_{LO} と Q_{SO} の両方を計算可能である。

(a) Cer-10, $\sigma = 0.76$, 50 mm i.d. riser

(b) Cer-20, $\sigma = 0.80$, 26 mm i.d. riser

(c) Gla-20, $\sigma = 0.84$, 26 mm i.d.

(d) Sa-07, $\sigma = 0.84$, 26 mm i.d. riser

Fig. 12 Validation test of modified Yoshinaga model against four kinds of particles in 50 mm and 26 mm riser at submergence ratio of 0.76 - 0.84.

Fig. 12(a)-(d) は、粒子、浸水率、ライザー直径の異なる代表的な 4 種類の例について、モデルの検証結果を示す。

Fig. 12(a) は、Cer-10、浸水率 0.76、50 mm ライザーの場合である。入口損失係数 ζ を変えた時の計算値を 3 種類の曲線で描いている。 $Q_{GO} < 110$ l/min においては、 β_s の実験値と式(3)との一致が十分ではないために、 Q_{SO} の予測精度が良くないが、 Q_{GO} が大きい場合は $\zeta = 1.5$ (単相乱流相当) としての計算値との一致は良い。

Fig. 12(b), (c) に示す Cer-20、浸水率 0.80、26 mm ライザーの場合と Gla-20、浸水率 0.84、26 mm ライザーの場合も同程度に一致した。しかし、Fig. 12(d) の Sa-07、浸水率 0.84、26 mm ライザーの場合は揚固量、揚水量共に $Q_{GO} > 17$ l/min の高い空気流量の領域において、計算値は実験値より 20% 程度低めとなった。したがって、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子については、実験値を追加して式(3)等の見直しを要する可能性がある。しかし、このモデルによって装置を設計した場合、 Q_{SO} の低めの予測は揚固性能を誇大表示する訳ではないので、現状のモデルままでも実用上は問題ないのではないかと考える。

今後の課題として、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子に関する実験値の増強と実用性を考えた時に必要な大口径ライザーを用いた場合のフィールド試験の実施を行う必要がある。

5. 結 言

佐田富考案のバブルジェット式エアリフトポンプの改良型装置に関する揚水・揚固特性の実験と性能予測モデルの検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 改良型装置は原型装置よりも揚固流量/消費動力の比が優れることが明らかとなった。
- (2) 26 mm ライザーでは、50 mm ライザーと比較して管摩擦の影響が相対的に大きくなるため、揚水量、揚固量ともにあまり大きくなれず、揚固流量/消費動力の比は 50 mm ライザーのほうが優れることが明らかとなった。
- (3) 本エアリフトポンプにおける水粒子混合物内の粒子流量率に関して、粒子径と管径の比、粒子の比重、粒子レイノルズ数の三つの無次元数で記述する新しい実験式(3)を得た。
- (4) 吉永らの性能予測モデルに上記の式(3)を組み込んだ本修正モデルは、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子の場合については検討の余地を残

すものの、本実験値をよく表すことが明らかとなった。

謝 辞

本実験装置の製作に協力いただいた熊本大学技術職員の有吉剛治氏、実験に協力いただいた熊本大学学生田中直樹氏と館良成氏、ならびに 2006 年度に研究助成を頂戴した西田鉄工株式会社に感謝の意を表する。

Nomenclature

A	: cross-sectional area of riser	[m ²]
d_s	: particles mean diameter	[m]
D	: riser diameter	[m]
dP	: pressure loss	[Pa]
g	: gravitational acceleration	[m/s ²]
H	: length of riser	[m]
H_s	: length of riser submerged	[m]
j	: volumetric flux	[m/s]
L	: power consumed	[W]
Q	: volume flow rate	[m ³ /s]
Re	: Reynolds number	[-]
u	: mean velocity	[m/s]
$u_{s\infty}$	: particle fall velocity in stagnant water	[m/s]
z	: distance along the riser axis	[m]

Greek letters

α	: volume fraction	[-]
β	: volume flow rate ratio	[-]
μ	: viscosity	[Pa·s]
ρ	: density	[kg/m ³]
σ	: submergence ratio ($= H_s/H$)	[-]
τ_3	: wall shear stress for three-phase flow	[Pa]
ζ	: inlet loss coefficient	[-]

Subscripts

G	: gas phase
L	: liquid phase
S	: solid phase
T	: total
E	: inlet
O	: outlet

参考文献

- [1] Sadatomi, M., Japanese Patent JP, 2005-291171, A, (2005).
- [2] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuyama, F. and Kimura, T., An Advanced Microbubble Generator and Its Application to a Newly Developed Bubble-Jet-Type Air-Lift Pump, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 19(4), 323–342 (2007).
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kimura, T. and Nakao, J., Development of a Bubble-Jet-Type Air-Lift-Pump –Its Feasibility Test, *Proc. 6th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF2007)*, CD-ROM, Paper No. S7_Mon_B_1 (2007).
- [4] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kimura, T. and Nakao, J., Development of a Bubble-Jet-Type Air-Lift-Pump –Feasibility Test and Performance Prediction, *Trans. JSME, Ser. B*, Vol. 74(742), 1263–1269 (2008).
- [5] Goto, T., Sadatomi, M. and Kawahara, A., Performance Examination and Its Prediction of Bubble-Jet-Type Air Lift Pump, *Preprint of JSME*, No. 088-1, 51-52 (2008).
- [6] Yoshinaga, Y. and Sato, Y., Performance of an Air-Lift Pump for Conveying Coarse Particles, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22(2), 223-238 (1996).
- [7] 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, 615-623 (2005).
- [8] 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, *Progress in Multiphase Flow research*, Vol. 1, 25–32 (2006).

(a) Cer-10, $\sigma = 0.76$, 50 mm i.d. riser

(b) Cer-20, $\sigma = 0.80$, 26 mm i.d. riser

(c) Gla-20, $\sigma = 0.84$, 26 mm i.d.

(d) Sa-07, $\sigma = 0.84$, 26 mm i.d. riser

Fig. 12 Validation test of modified Yoshinaga model against four kinds of particles in 50 mm and 26 mm riser at submergence ratio of 0.76 - 0.84.

Fig. 12(a)-(d) は、粒子、浸水率、ライザー直径の異なる代表的な 4 種類の例について、モデルの検証結果を示す。

Fig. 12(a) は、Cer-10、浸水率 0.76、50 mm ライザーの場合である。入口損失係数 ζ を変えた時の計算値を 3 種類の曲線で描いている。 $Q_{GO} < 110$ l/min においては、 β_S の実験値と式(3)との一致が十分ではないために、 Q_{SO} の予測精度が良くないが、 Q_{GO} が大きい場合は $\zeta = 1.5$ (単相乱流相当) としての計算値との一致は良い。

Fig. 12(b), (c) に示す Cer-20、浸水率 0.80、26 mm ライザーの場合と Gla-20、浸水率 0.84、26 mm ライザーの場合も同程度に一致した。しかし、Fig. 12(d) の Sa-07、浸水率 0.84、26 mm ライザーの場合は揚固量、揚水量共に $Q_{GO} > 17$ l/min の高い空気流量の領域において、計算値は実験値より 20% 程度低めとなった。したがって、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子については、実験値を追加して式(3)等の見直しを要する可能性がある。しかし、このモデルによって装置を設計した場合、 Q_{SO} の低めの予測は揚固性能を誇大表示する訳ではないので、現状のモデルままでも実用上は問題ないのではないかと考える。

今後の課題として、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子に関する実験値の増強と実用性を考えた時に必要な大口径ライザーを用いた場合のフィールド試験の実施を行う必要がある。

5. 結 言

佐田富考案のバブルジェット式エアリフトポンプの改良型装置に関する揚水・揚固特性の実験と性能予測モデルの検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 改良型装置は原型装置よりも揚固流量/消費動力の比が優れることが明らかとなった。
- (2) 26 mm ライザーでは、50 mm ライザーと比較して管摩擦の影響が相対的に大きくなるため、揚水量、揚固量ともにあまり大きくなれず、揚固流量/消費動力の比は 50 mm ライザーのほうが優れることが明らかとなった。
- (3) 本エアリフトポンプにおける水粒子混合物内の粒子流量率に関して、粒子径と管径の比、粒子の比重、粒子レイノルズ数の三つの無次元数で記述する新しい実験式(3)を得た。
- (4) 吉永らの性能予測モデルに上記の式(3)を組み込んだ本修正モデルは、平均粒径 1.0 mm 未満の微粒子の場合については検討の余地を残

すものの、本実験値をよく表すことが明らかとなった。

謝 辞

本実験装置の製作に協力いただいた熊本大学技術職員の有吉剛治氏、実験に協力いただいた熊本大学学生田中直樹氏と館良成氏、ならびに2006年度に研究助成を頂戴した西田鉄工株式会社に感謝の意を表する。

Nomenclature

A	: cross-sectional area of riser	[m ²]
d_s	: particles mean diameter	[m]
D	: riser diameter	[m]
dP	: pressure loss	[Pa]
g	: gravitational acceleration	[m/s ²]
H	: length of riser	[m]
H_s	: length of riser submerged	[m]
j	: volumetric flux	[m/s]
L	: power consumed	[W]
Q	: volume flow rate	[m ³ /s]
Re	: Reynolds number	[-]
u	: mean velocity	[m/s]
$u_{s\infty}$	: particle fall velocity in stagnant water	[m/s]
z	: distance along the riser axis	[m]

Greek letters

α	: volume fraction	[-]
β	: volume flow rate ratio	[-]
μ	: viscosity	[Pa·s]
ρ	: density	[kg/m ³]
σ	: submergence ratio ($= H_s/H$)	[-]
τ_3	: wall shear stress for three-phase flow	[Pa]
ζ	: inlet loss coefficient	[-]

Subscripts

G	: gas phase
L	: liquid phase
S	: solid phase
T	: total
E	: inlet
O	: outlet

参考文献

- [1] Sadatomi, M., Japanese Patent JP, 2005-291171, A, (2005).
- [2] Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuyama, F. and Kimura, T., An Advanced Microbubble Generator and Its Application to a Newly Developed Bubble-Jet-Type Air-Lift Pump, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 19(4), 323–342 (2007).
- [3] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kimura, T. and Nakao, J., Development of a Bubble-Jet-Type Air-Lift-Pump –Its Feasibility Test, *Proc. 6th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF2007)*, CD-ROM, Paper No. S7_Mon_B_1 (2007).
- [4] Sadatomi, M., Kawahara, A., Kimura, T. and Nakao, J., Development of a Bubble-Jet-Type Air-Lift-Pump –Feasibility Test and Performance Prediction, *Trans. JSME, Ser. B*, Vol. 74(742), 1263–1269 (2008).
- [5] Goto, T., Sadatomi, M. and Kawahara, A., Performance Examination and Its Prediction of Bubble-Jet-Type Air Lift Pump, *Preprint of JSME*, No. 088-1, 51-52 (2008).
- [6] Yoshinaga, Y. and Sato, Y., Performance of an Air-Lift Pump for Conveying Coarse Particles, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22(2), 223-238 (1996).
- [7] 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, 615-623 (2005).
- [8] 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, *Progress in Multiphase Flow research*, Vol. 1, 25–32 (2006).