

エアリフトの揚水特性に関する減圧実験の試み

Laboratory experiments for lifting properties of air-lift with decompression method

池田 裕一¹ 木下 靖貴² 須賀 堯三³

By Hirokazu Ikeda and Yasutaka Kinoshita and Kyoza Suga

The variation of buoyancy in air-lift due to pressure change through a large depth is examined in laboratory experiments applying decompression method. It is shown that lifting properties of air-lift can not be explained simply by air rate, water depth, and flow patterns. It is clarified, in combination with momentum conservation, that the characteristic buoyancy rate, γ_a , air-lift length rate, L_R , and Froude Number, F_L , are very important parameters.

Key words: air, bubble, buoyancy, air-lift, decompression

1. はじめに

貯水池の富栄養化対策としての曝気循環¹⁾や水底の汚泥を浮上させるのに用いられるエアリフト²⁾など、気泡を混入して工学的に利用する技術は、最近では、かなり水深が深い水域でも適用されるようになった。こうした大深度で下方から水面に向かって気泡が上昇する場合、水压の変化が大きいため気泡が膨張し浮力の増加につながったり、あるいは分裂することにより乱れの様子に違いが生じたりするなど、そこに大深度特有の現象が現れることになる。こうした現象は、水深が深いほど顕著であるが実験室レベルでは水槽水深が小さいために、そのままでは再現が困難である。本研究では、大水深によって高い水压を得るのとは逆に、大気圧を低くして水压を相対的に高くする「減圧実験法」の適用を試みた。今回は気泡の流動形態の変化を容易に把握するためにエアリフトを用い、大気圧下と減圧時でのエアリフト内の流動形態および揚水量の相違、そして圧力変化による浮力の増加量について若干の考察を加えた。

2. 実験装置および方法

減圧実験は、実験水槽に気密性のある蓋をして水槽内の空気を真空ポンプで吸引し、水面に接する空気の圧力を低くするもので、これによって大深度と同等な状況を作り出し実験を行うことが可能となる。実験装置には図-1に示すような内径50cm、高さ1mの円筒形のアクリル水槽を用い、密封するために厚さ2cmで開封が自由なアクリル製の蓋をする。この蓋には、減圧するために用いる真空ポンプをつなげたチューブ、そ

* 正会員 宇都宮大学工学部建設学科 (321 宇都宮市石井町2753)

** 学生員 宇都宮大学大学院

表-1 実験条件

Series		水面での 圧力水頭 H_a	水深 H	大気圧下の 相当水深	空気量 Q_0	流動形態	L_R	記号	
A	大気 圧下	1020(cm)	80(cm)	80(cm)	1.5~40 (cm ³ /s)	気泡流	0.063	○	
B			65	65			0.065	◇	
C			60	60			0.065	□	
D	減 圧時	617	80	132		スラグ流	0.100	●	
E		349		234			0.163	◆	
F						気泡流		■	

の際の水槽内圧力を測定する圧力計、そして水槽内に気泡を発生させるためのエアポンプとつなげたチューブをそれぞれ接続した。エアポンプのチューブには、大気圧下の空気量を測定するために空気流量計を設置した。水槽内部には、長さ70cm、内径1.8cmのエアリフトを設置し、気泡発生器は、Series-A~Eはチューブの先端にスポンジ状のものを取り付けて細かい気泡が出るようにしたもの、Series-Fにはより細かい気泡が出るようにしたものを用いた。実験中、流況を見るためにビデオカメラで撮影し、流動形態を把握できるようにした。また、揚水量の測定に際しては、塩水を用いて水槽中に予め二成層を形成しておき、エアリフトの揚水によって密度界面が下降するその量から求めた³⁾。実験条件については表-1に示す。

3. 実験結果および考察

減圧による水圧変化の影響が顕著に出てくると考えられる空気量と揚水量の関係について検討した。今回、水槽内での圧力変化を考慮するため大気圧下での空気量 Q_0 ではなく、エアリフト下端での空気量 Q_{BB} を用いた。これは、水圧と空気体積の関係式

$$Q_{BB} = \frac{H_{ao}}{H_a + H} Q_0 \quad (1)$$

から求めることができる。 H_a は水面での圧力水頭を示し、 H_{ao} は水槽外での大気圧水頭を示す(1020cm)。ここで Q_{BB} と揚水流量 Q_w との関係を図-2に示す。まず大気圧下では、水面位置を変化させエアリフト先端が水面より上にある場合と下にある

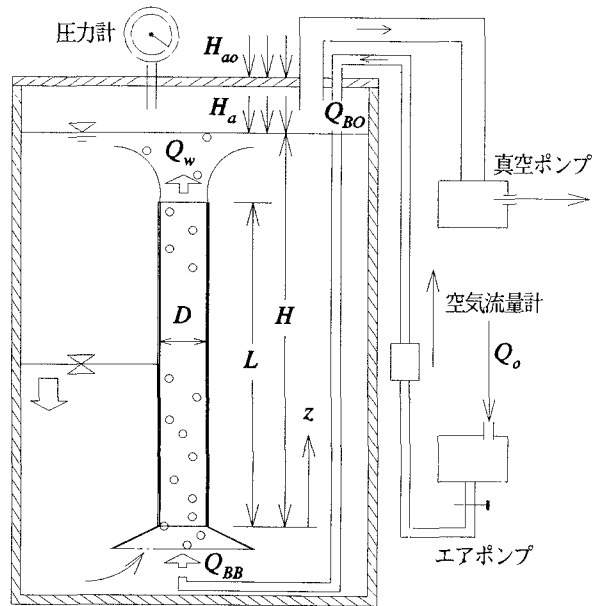


図-1 実験システム

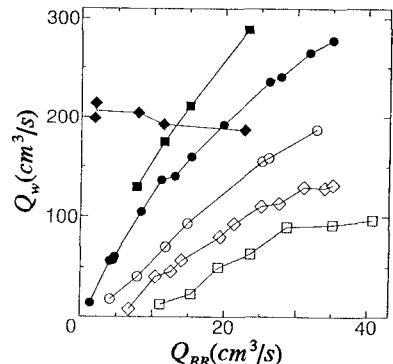


図-2 Q_{BB} と Q_w の関係
(図中の記号は表-1参照)

場合の2種類で測定した。結果として流動形態は気泡流⁴⁾であり、揚水量は水深の相違により異なっていることがわかった。減圧時では、流動形態はSeries-D、Eがスラグ流⁴⁾、Series-Fが気泡流である。揚水量は減圧の割合が大きい方が同じ空気量でも大きな揚水量が得られることがわかる。そしてSeries-A～Cと同じく空気量の増加に伴い揚水量も増加しているが、Series-Eのスラグ流では空気量が大きくなるにつれて揚水量が減少する傾向が見られる。これは、スラグ流がエアリフト内での気相部分をあまりに大きく占めたために液相部分が減少し、揚水量の変化に影響しているのではないかと考えられる。これらの結果を考慮すると、式(1)で補正したエアリフト下端の空気量だけでなく、揚水特性にかかわる要因としては、流動形態の相違や水圧変化による浮力増加などが挙げられる。

そこで、今回は流動形態よりむしろ水圧変化を考え、その影響を受けるであろう浮力に着目した。エアリフト内の浮力の大きさを評価をするにあたり、定常流を仮定し浮力以外の気泡の影響を無視すると、運動量保存則より、浮力の大きさと各損失の関係が次のように得られる⁵⁾。

$$\frac{L_a}{L} = \frac{1}{2}(K_e + K_o + f \frac{L}{D}) F_L^2 \quad (2)$$

ここに L_a は浮力の大きさを示し、高さ z におけるボイド率を $f_r(z)$ を用いて

$$L_a = \int_0^L f_r(z) dz \quad (3)$$

と定義される。 $F_L^2 = u_p^2 / gL$ はエアリフト内の流速を示す無次元パラメーターを示し、 u_p は液相の流速 ($= Q_w / A$ 、 A は断面積)、 K_e 、 K_o はそれぞれ流入、流出損失係数 ($K_e = 0.5$ 、 $K_o = 1.0$) である。壁面摩擦損失係数 f には、扱いが簡便な Blasius 則 $f = 0.3164(u_p D / \nu)^{-1/4}$ (ν は水の動粘性係数) を用いた。今回はこの式(2)を用いて実験結果から浮力の大きさを算出することにする。

次に L_a が減圧によりどのような影響を受けるかを考える。スリップ速度 u_s を用いると、高さ z での空気量 $Q_B(z)$ は、

$$Q_B(z) = A f_r(z) (u_p + u_s) = \frac{H_a + H}{H_a + H_p} Q_{BB} \quad (4)$$

と書くことができる。したがって式(3)と(4)より

$$L_a = \frac{Q_{BB}}{A(u_p + u_s)} \int_0^L \frac{H_a + H}{H_a + H_p} dz \quad (5)$$

が作られる。ここで $H_p = H_p(z)$ は、エアリフト内の圧力水頭であり、変化の仕方は現段階では不明である。第一次近似として、圧力がエアリフト下端での静水圧の値のまま変化しないと考えれば、その場合の浮力の大きさ L_{ao} は

$$\frac{L_{ao}}{L} = \frac{Q_{BB}}{A(u_p + u_s)} \quad (6)$$

となる。今回はこれをエアリフト内の全浮力の尺度と考え、浮力の大きさの比 $\gamma_a = L_a / L_{ao}$ と F_L の関係を図-3に示す。また L_a の値は式(2)、 L_{ao} は式(6)をそれぞれ用いて算出した。 u_s には、気泡流時に 35 cm/s ⁶⁾、スラグ流時には 15 cm/s ⁷⁾ を用いた。ただし、Series-Eについては、式(2)を導く仮定に著しく反しているため

にこの図にはプロットしていない。図より、各Seriesの実験結果は、おおよそ

$$\gamma_a = C_a F_L^{7/5} \quad (7)$$

の式形で表わすことができ、 C_a の違いにより各Seriesを整理できることがわかる。そして大気圧下の相当水深が大きいほど γ_a が大きくなり、つまり圧力変化が影響していることがわかる。そこで、エアリフトを通しての圧力変化の大きさを示すパラメーター $L_R = L/(H_a + H)$ を導入した。図-4に L_R と C_a の関係を示す。図より C_a は L_R によりおおよそ、

$$C_a = 49.8 L_R^{0.85} \quad (8)$$

となる。この関係をさらに大きな L_R の値に適用できるかは現段階では不明であるが、仮にそれが可能とすると、例えば $H=300\text{m}$ 、 $L=310\text{m}$ の現場レベル⁸⁾では、 $L_R=0.999$ なので C_a は大体50程度となる。式(7)よりその時の γ_a の変化を図-3中に実線で示した。 F_L が0.1から1程度となるようにエアリフトを運用すると、図からわかるように γ_a は1から10を越えるあたりまで変化することになる。

4. おわりに

今回、減圧実験法により、実験室レベルで圧力変化の大きい状況を作り出すことを試みた。その結果得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 同じ気泡発生器を用いても、空気量や水圧によって流動形態が異なる。
- 2) 水圧による変化を考慮した空気量と揚水量を比較したところ、流動形態や水圧によって違った傾向を示すことがわかった。
- 3) 水圧変化が気泡の浮力に及ぼす影響について、運動量保存則を用いて検討を加えたところ、流れの慣性の大きさを示す F_L や、エアリフト内の圧力変化の大きさを示す L_R といったパラメーターで、その傾向を考えることができた。

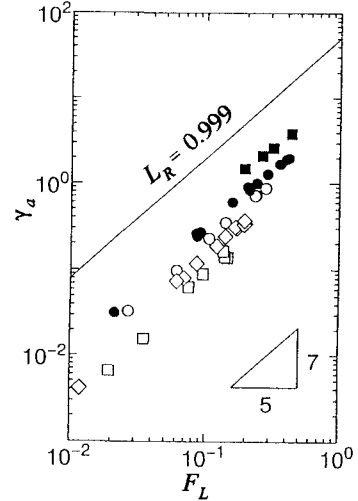


図-3 F_L と γ_a の関係

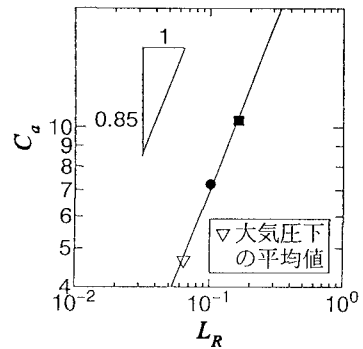


図-4 L_R と C_a の関係

< 参考文献 >

- 1) 松梨史朗・宮永洋一:気泡噴流に関する現地実験, 水工学論文集, 第34巻, pp. 145-150, 1990.
- 2) 服部敦・和泉清・吉川秀夫:エアリフトの開水路における水理機能に関する研究, 土木学会論文集, No. 452, II, 20, pp. 21-30, 1992.
- 3) Leitch, A. M. and Baines, W. D.: Liquid volume flux in a weak bubble plume, J. Fluid Mech., vol. 205, pp. 77-98, 1989.
- 4) 日本流体力学会:混相流体の力学, pp2-6, 朝倉出版, 1991.
- 5) 池田裕一・浅枝隆・須賀堯三:連続曝気式深層水揚水施設による密度成層の混合効率, 水工学論文集, 第38巻, pp. 325-330, 1994.
- 6) J. H. Milgram: Mean flow in round bubble plumes, J. Fluid Mech., vol. 133, pp. 345-376, 1983.
- 7) 日本原子力学会, 熱流動部会: 気液二相流の数値解析, pp. 45-49, 朝倉出版, 1993.
- 8) 磯上一男・相澤林作: 大口径RCD工法, pp. 43-47, 森北出版, 1983.