

一様密度水域におけるエアリフトの揚水特性に関する基礎的研究

Fundamental study on lifting properties of air-lift in homogeneous environments

池田 裕一^{*1} 木下 靖貴^{*2} 須賀 堯三^{*1}
Hirokazu.Ikeda, Yasutaka.Kinosita, Kyojo.Suga

Flow patterns and lifting properties of air-lifts in homogeneous environments are examined in laboratory experiments. The flow patterns are classified into three ones; bubble flow, slug flow and bubble bullet. It is shown that different flow patterns can appear even for the same air-rate, which influence lifting properties. Critical lift head is formulated from the balance of buoyancy and gravity in air-lift. Non-dimensional air rate, Γ_b , is derived. Lifting discharge is explained with the balance between buoyancy and wall friction, and it is clarified that the characteristic buoyancy, M_p , and the characteristic Reynolds Number, R_p , are very important parameters for lifting discharge.

Key words : air-lift, bubble, slug flow, pumping discharge

1. はじめに

エアリフトは、水中に立てた管の下端に空気を送り込み、その気泡の浮力によって管内に上昇流を生じさせる流体輸送方式の一種である。これは、掘削工事時に生じる「ずり」や、水底の汚泥の除去、あるいは海底の栄養塩を浮上させ漁場の開発などに利用することができる。この方式は、管径に近い固形物も持ち上げることができ、管内に機械部分がないので故障が少なく、そして100m以上の水深にも対応できるなどの利点がある¹⁾。そのため将来的には、これからますますさかんになるであろう大深度水域の資源開発などにも利用されることが予想される。しかし現段階では、その輸送限界や揚水特性について、体系的な研究はあまりなされていない。

そこで本研究では、エアリフトの基本的な運搬特性を把握し、有効利用を考えるその手始めとして、一様密度水域中でのエアリフトの流動形態や、揚水限界および揚水量などについて室内実験を行い、これに若干の理論的考察を加えるものである。

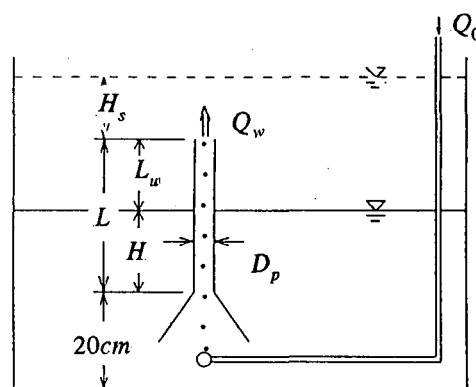


図-1 実験装置

2. 実験概要

実験には、断面 $1.15\text{m} \times 0.64\text{m}$ 、高さ 1.0m のアクリル製の水槽を用い、その中央部分に図-1に示すような長さ $L=60\text{cm}$ のエアリフトを設置した。その内径 D は 0.9 、 1.8 、 4.5cm の3種類を用意した。気泡発生器としては、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 (type-a) とチューブの先から比較的大きな気泡を直接放出するようにしたもの (type-b)、そして図-2に

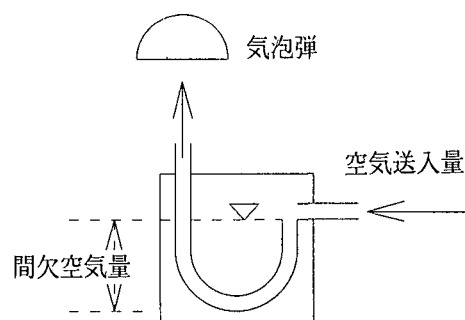


図-2 空気サイフォン

*1 正会員 宇都宮大学工学部建設学科 (321 宇都宮市石井町2753)

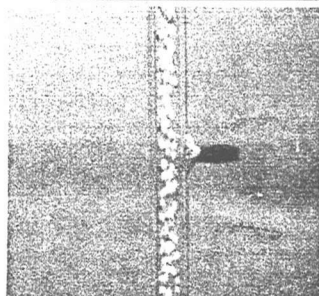
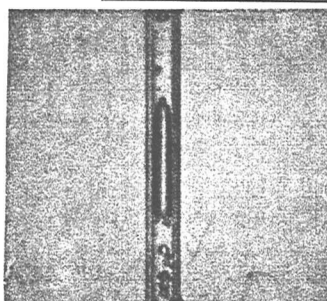
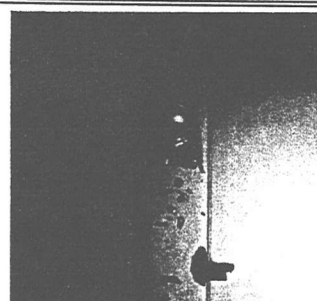
*2 学生員 宇都宮大学大学院

表-1 揚水限界の測定条件

空気量 $Q_0(\text{cm}^3/\text{s})$	1.6~50
内径 $D_p(\text{cm})$	0.8, 1.8, 4.5
管長 $L(\text{cm})$	60

表-2 揚水特性の測定条件

空気量 $Q_0(\text{cm}^3/\text{s})$	管長 $L(\text{cm})$	内径 $D_p(\text{cm})$	$H_c(\text{cm})$
5.0~33	60	0.9	15
		1.8	15
		4.5	10

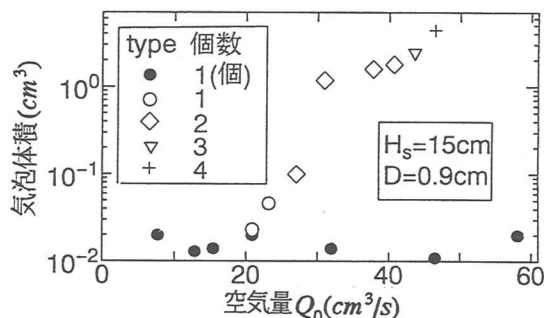
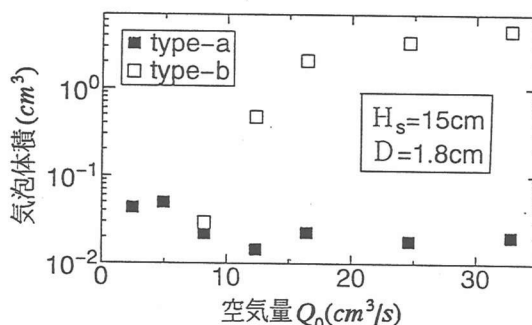
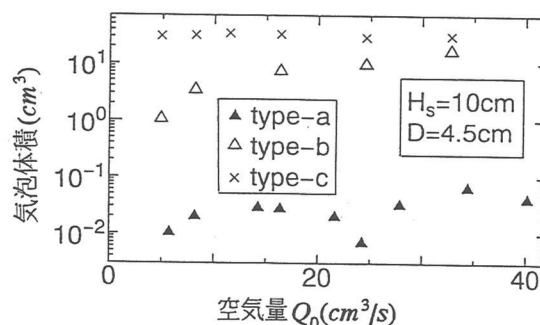
(a)気泡流
($H_s=15\text{cm}$, $D_p=0.9\text{cm}$, type-a)(b)スラグ流
($H_s=15\text{cm}$, $D_p=0.9\text{cm}$, type-b)(c)気泡弾
($H_s=10\text{cm}$, $D_p=4.5\text{cm}$, type-c)写真-1 エアリフト内の流動形態 ($Q_0=2.0\text{cm}^3/\text{s}$)

示すような空気サイフォンを用いて、空気室中の極めて大量の空気を瞬時に噴出するようにしたもの²⁾

(type-c) の3種類を用いた。実験中、流況を見るためにスチルカメラあるいはビデオカメラで撮影し、流動形態や気泡体積、揚水限界の様子を把握できるようにした。また、揚水量の測定には、塩水を用いて水槽中に二成層を形成し、その密度分布の時間変化より求めた³⁾。表-1に揚水限界の、表-2に揚水特性の測定条件を示す。

3. 流動形態

まずエアリフト内の基本的な流動形態を見るために、エアリフトを水没させた条件下で同じ空気量を送入し、その流れを撮影した。その結果、気泡発生器の種類やエアリフトの内径によって、流動形態が異なることがわかった。写真-1(a)、(b)、(c)は、その典型的な例を示したものである。気泡発生器の種類別に見ると、まず type-a については、エアリフトが水没している今回の実験範囲の中では、内径の大きさおよび空気量にかかわらず、均一で細かい球形の気泡が定常的に上昇する流れ（気泡流）⁴⁾が見られた。type-b では、内径 0.9、1.8cm の時、type-a と同じ空気量であるにもかかわらず、気泡は揚水管の管径いっぱい広がる砲弾型となり、脈動的に上昇する流れ（スラグ流）⁴⁾となった。type-c は今回、内径 4.5cm の場合のみ用いた。空気サイフォンから、瞬時に大量の空気を注入するために、内径が大きい

図-3 (a) 空気量 Q_0 と気泡体積図-3 (b) 空気量 Q_0 と気泡体積図-3 (c) 空気量 Q_0 と気泡体積

にもかかわらず、管径一杯に広がる気泡弾²⁾が形成された。ただし、先に説明したスラグ流とは異なり、気泡弾がきわめて大きい分、その射出間隔も非常に長くなり、流れの非定常性が強い。場合によっては、次の気泡弾が射出されるまでに、流れがほぼ停止してしまうことも見られた。これらの3種類の流動形態が、空気量が同じでも見られることを考えると、空気量だけでなく放出される気泡の特性も重要な因子となるであろう。

そこで空気量に対する、気泡の体積変化を図-3(a)、(b)、(c)に示す。内径0.9cmでは、type-aは、空気量の増加にかかわらず気泡体積はほぼ一定で流れている。これに対しtype-bでは、空気量の増加に伴い気泡体積は増加していることがわかる。これは、気泡発生器から放出された個々の気泡が大きくなるよりむしろ主として、それらがエアリフトの流入口で合体するために生じたものである。内径0.9cmの時には、最大で4つの気泡同士の合体が見られ、スラグ流となり流れていた。内径4.5cmでは、type-bは空気量の増加に伴い体積も増加しているが、スラグ流は見られず、様々な大きさをもった気泡流となっているために、気泡が細かいtype-aに比べて揺動が激しい。type-cの場合、空気室での間欠空気量を一定としているので空気量の増加にかかわらず、体積は一定で流れているのが見られた。

4. 揚水限界

図-4(a)、(b)、(c)は空気量 Q_0 と揚水限界時の揚程 L_u との関係を示した図である。今回の実験では、エアリフトの流出口からまったく揚水が行われなくなった状態の時を揚水限界と定義した。内径1.8cmでは、空気量が $15\text{cm}^3/\text{s}$ までは、流動形態による揚程の差は見られないが、これはtype-bにおいてもtype-aと同じ気泡流となって流れているためである。 $Q_0=15\text{cm}^3/\text{s}$ 以上となるとtype-bはスラグ流に変化し、type-aと比較して揚程で約1~2cm上回ることが測定された。内径0.9cmの場合は、他の内径と比較して揚水限界時の揚程の長さが一番大きかった。type-aとtype-bの両方とも流入口で気泡同士の合体が見られ、同じスラグ流となって流れている(写真-2(a)、(b))。内径4.5cmの時には、type-aでは空気量の増加に伴い直線的に揚程が大きくなっている。type-bは空気

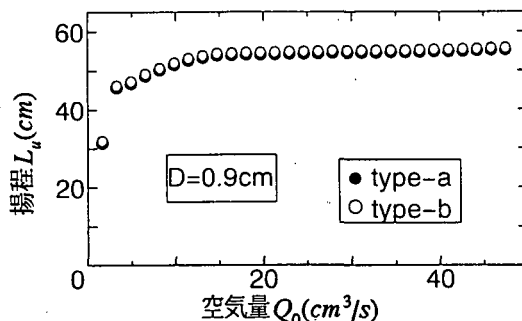


図-4 (a)揚水限界時の揚程

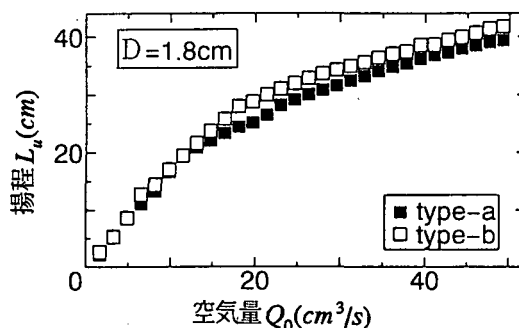


図-4 (b)揚水限界時の揚程

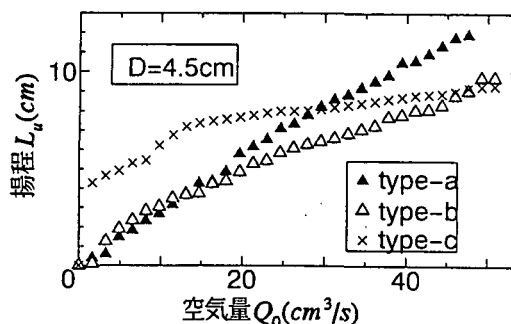
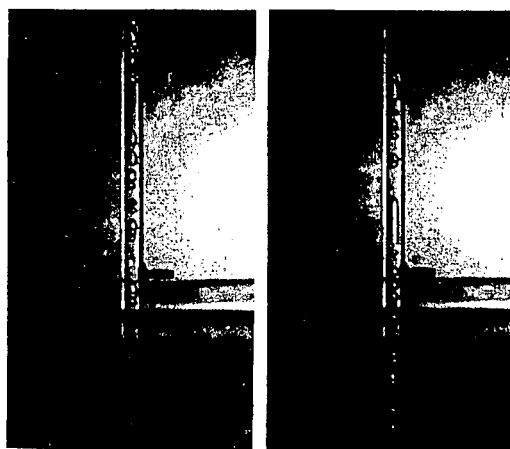


図-4 (c)揚水限界時の揚程



(a) type-a

(b) type-b

写真-2 揚水限界時の流動形態

($D=0.9\text{cm}$, $Q_0=2.0\text{cm}^3/\text{s}$)

量が小さい時には、他の内径と同じく *type-a* とほとんど変わらないが、空気量が増加すると他の2つの内径で見られた傾向と異なり、最大で **4cm** ぐらい *type-a* を下回っている。これは *type-a* の場合、気泡がまっすぐ連続的に上昇するのに比べて、*type-b* は気泡が大きいため、揺れながら上昇していくことが原因ではないかと思われる。*type-c* については、空気量が小さい場合でも、射出される気泡弾の大きさは一定であり、瞬時に大きな浮力が得られる。そのため、 Q_0 が小さい範囲では、揚程は *type-a, b* よりも高くなる。しかし同時に射出間隔が長いので、エアリフト中の水面は減衰振動をした後にもとの位置に戻ってしまう。よって気泡弾の放出ごとに水面をあらためてエアリフト先端まで上昇させなくてはならないから、*type-c* としては L_u の増加の割合は小さめとなる。空気量が $10\text{cm}^3/\text{s}$ を超えるあたりから前に射出した気泡弾による水面の上下振動と、次の射出が同期する機会が増えて L_u は大きくなる。さらに空気量が大きいと、連続的に浮力が供給されることによってエアリフト内の水面位置は安定してくるが、大きな気泡弾通過時の乱れの影響により *type-a, b* ほどの L_u は得られない。以上のような、揚水限界時の揚程の違いは、エアリフトの輸送限界が流動形態によって異なっていることを示唆している。

ところで揚水限界時におけるエアリフト内に作用する力のつり合い（重力=浮力）を考え、揚水筒長さについて無次元化すると

$$\frac{L_u}{H} = \frac{1}{\Gamma_m} - 1 \quad (1)$$

が得られる。ここで、 Γ_m はエアリフト内における気液混合流体の比重を表している。これは、エアリフト内の流れが定常的でその水塊の平均流速を0とすることから若干の式変形を行い

$$\Gamma_m + \frac{\Gamma_b \ln(1 + \frac{\Gamma_l \Gamma_m}{1 - \Gamma_b})}{\Gamma_l} = 1 \quad (2)$$

より求められる。ただし、 Γ_l 、 Γ_b はそれぞれエアリフトの長さおよび空気量の大きさを示す無次元パラメーターとなっており、それぞれ次式で定義される。

$$\Gamma_l = \frac{L}{H_a}, \quad \Gamma_b = \frac{Q_0}{A_p U_s} \quad (3)$$

（ H_a は大気圧水頭、 A_p は揚水筒内断面積、 U_s はスリップ速度）

以上のように無次元化した限界高さ L_u と空気量 Q_0 との関係を示したものが図-5である。まず流動形態の違いによる L_u/H の値を比較してみると、内径 **1.8cm**、**4.5cm** の両方で気泡体積が大きい方が L_u/H の値が大きいことがわかる。特に内径 **4.5cm** の場合、*type-c* については、 Γ_b が小さいときは、理論値大きく上回る。そして Γ_b が大きくなるにつれて理論曲線に漸近する傾向をみせている。このことは、揚程の差こそあるものの、他のケースでも同様である。これは、 Γ_b が小さい場合、特に *type-c* では、実際のながれは非定常性が強く、 Γ_b が増すにしたがい、流れも定常的になっていくためである。ともあれ、理論値と実験値を比較すると、理論式は浮力と重力といった簡単な力のつりあいより導いたものにもかかわらず、実験値の傾向をよく示しているといえる。

5. 揚水特性

次にエアリフトの揚水特性について考える。今回は簡単のため、エアリフトが水没した状態のものについてのみ考える。揚水時の流れの駆動力は気泡の浮力であり、流れが生じるとそれに伴い壁面摩擦が発生する。定常状態では、この両者がほぼつりあうと考えると

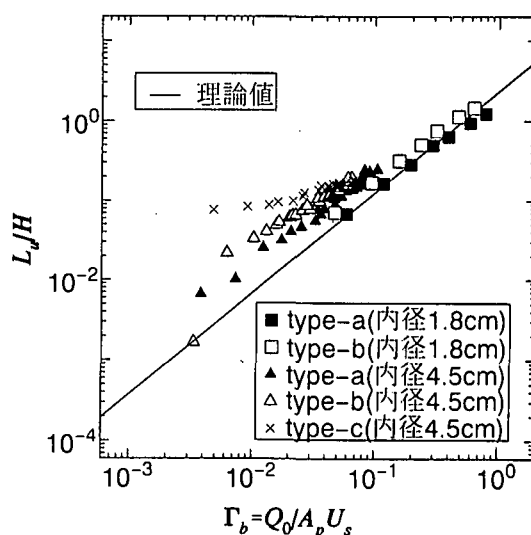


図-5 Γ_b と L_u/H の関係

$$A_p f_a g \sim \pi D_p \frac{\tau_0}{\rho} \quad (4)$$

(f_a : ボイド率、 g : 重力加速度、 D_p : 断面積、 τ_0 : エアリフト内面の壁面せん断応力) となる。

ここでボイド率 f_a は、エアリフト中を流れる空気量と圧力との関係より

$$f_a A_p (v_p + u_s) = Q_0 \frac{p_a}{p} \quad (5)$$

ここに Q_0 は大気圧下での空気流量、 p_a は大気圧水頭、 p は対象地点の圧力で、今回は簡単のため、最下端の静水圧で代表させることにする。また摩擦応力 τ_0 は速度の2乗に比例するとすると

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \frac{1}{8} f v_p^2 \quad (6)$$

となる。(5)式と(6)式を(4)式に代入すると

$$(V + M_p^{-1/3}) V^2 \sim \frac{8}{f} \quad (7)$$

が得られる。ただし

$$M_p = \frac{Q_0 g}{\pi D_p^3} \frac{H_a}{H_a + H}, \quad V = \frac{v_p}{M_p^{1/3} u_s} \quad (8)$$

である。

ここで V は、気泡の浮力で決まる速度スケール $M_p^{1/3} u_s$ を用いた無次元化速度である。 M_p は空気送入による浮力から決まる速度スケールとスリップ速度の比で相対的な浮力発生量の大きさを示している⁵⁾。ここで(7)式右辺は摩擦損失係数の大きさが関与し、これは一般に、レイノルズ数によって変化するものである。今回はその速度スケールにやはり $M_p^{1/3} u_s$ を用いることにすると、

$$R_p = \frac{M_p^{1/3} u_s D_p}{\nu} \quad (\nu: \text{動粘性係数}) \quad (9)$$

が重要なパラメーターになると考えられる。

図-6は $(V + M_p^{-1/3}) V^2$ と R_p の関係を示したものである。限られた範囲ではあり、実験値に多少ばらつきが見られるが、関与するパラメーターの多さを考えると、全体の傾向を系統的に整理できているものといえる。これより揚水時に気泡にかかる浮力と摩擦のつりあい式より導いたパラメーター M_p とレイノルズ数 R_p は揚水特性に関与する重要なパラメーターであることがわかる。そこで R_p と $(V + M_p^{-1/3}) V^2$ の関係について両対数グラフ上で直線回帰を行うと、およそ

$$(V + M_p^{-1/3}) V^2 = 2.0 R_p^{5/9} \quad (10)$$

が得られた。

図-7は式(10)に基づいて、3種類の無次元量 V 、 M_p 、 R_p の計算をしたものである。 R_p が5桁も変化しても、 V は1桁程度の変化である。 M_p が5桁の変化をしてもこの範囲では V はせいぜい2~3倍程度である。このことから無次元速度 V の速度スケール $M_p^{1/3}$ が、エ

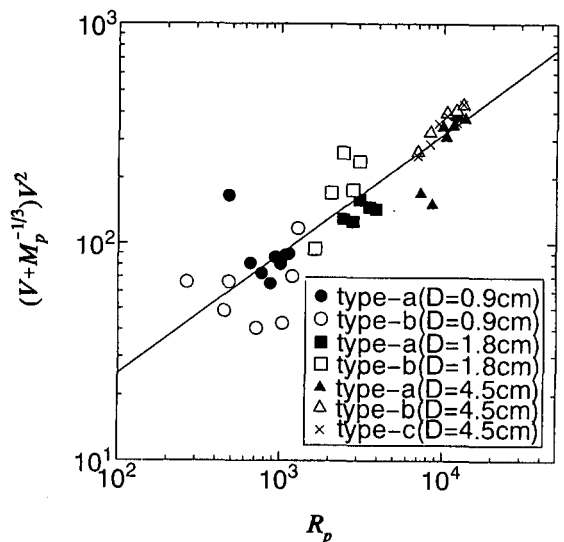


図-6 R_p と $(M_p^{-1/3} + V) V^2$ の関係

リフト内の良い代表速度になっているといえる。また(10)式をみてもわかるとおり、 V が大きくなるにつれ M_p によらない曲線 $V=2.0^{1/3}R_p^{5/27}$ に漸近していくことがわかる。

6. 終わりに

今回は、気泡発生器やエアリフトの内径を変化させて、エアリフト内の流動形態、揚水限界および揚水特性について実験を行った。その結果得られた知見は、以下のようになる。

1) 同じ空気量でも気泡の放出の仕方によって流動形態が異なる。

2) 流動形態の相異は揚水限界に影響を与え、しかも同じ流動形態であっても、内径によって違った傾向を示す。

3) 気泡による浮力を考慮して、揚水限界の簡単な

理論式を導いたところ、実験値の傾向をよく示した。無次元空気量 Γ_b が揚水限界特性に大きく影響していることがわかった。

4) 揚水特性については、浮力と摩擦のつりあいから2つのパラメーター M_p 、 R_p を導き、これを用いて実験値を整理したところ、全体の傾向を説明することができた。

ただし、今回の実験範囲は水深が浅く、エアリフトも小さいので、より深い水域を対象にした現場スケールでの検討が必要である。

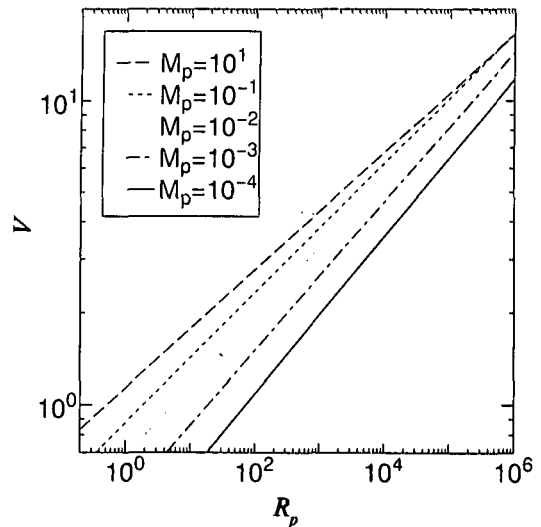


図-7 R_p , M_p による V の変化

< 謝辞 >

本研究を行うあたり、平成6年度文部省科学研究費奨励研究(A) (課題番号06855060、代表者：池田裕一)の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

< 参考文献 >

- 1) 磯上一男・相澤林作:大口径RCD工法、pp.43-47、森北出版、1983.
- 2) 浅枝隆:海・湖の下層低温水を水面まで浮上させる気泡弾を用いた揚水塔の開発、科学研究費補助金研究成果報告書、pp.43-44、1990.
- 3) Leitch, A. M. and Baines, W. D: Liquid volume flux in a weak bubble plume, J. Fluid Mech., vol. 205, 77-98, 1989.
- 4) 日本流体力学会:混相流体の力学、pp.2-6、朝倉出版、1991.
- 5) Lemckert, C. J. and Imberger, J.: Energetic bubble plumes in arbitrary stratification, J. Hydraul. Engng. ASCE, vol. 119, No. 6, 1993.