

気泡を用いた高密度の深層水揚水施設の解析

ANALYSIS ON THE HYPOLIMNETIC HEAVIER WATER LIFTING SYSTEM USING AIR BULLETS

浅枝 隆*・中井正則**

By Takashi ASAEDA and Masanori NAKAI

A new system was contrived to lift the heavier water from the bottom layer with an air bullet rising through a long shroud, and to destratify the sea or reservoirs. In this system, heavier water in the lower layer is lifted up through the shroud to the free surface, impinges on the free surface, spreads radially then plunges downwards. The mixing with environmental water is expected mainly during the fall process. First, the rising water behaviors such as the upward velocity have been analyzed and confirmed by laboratory experiments for the homogeneous layer. Second, the analysis has been extended to the two-layer system, and important parameters, periodicity of the oscillation, rising velocity reduction have been obtained. Then using these results, the energy conversion efficiency has been predicted.

Keywords : bubble, aeration, reservoir, destratification, hypolimnion

1. はじめに

貯水池の富栄養化の防止のための温度躍層を破壊する場合や海底の栄養塩を日光の届く水面付近にまで浮上させ、プランクトンの増殖を助け新しく漁場を開拓する場合など密度の高い下層の水を水面付近にまで持ち上げる必要のある場合は非常に多いであろう。そうした場合、水中に円筒をたて下方から気泡弾を放出させ筒の中の水を持ち上げようとする発想は特に目新しいというものではない。しかし、従来多く用いられている方法では筒の高さは水深に比べ極端に小さくしておき、筒のてっぺんからでてきた気泡弾が上昇する間に碎けて多くの小さい気泡になってからの気泡による周囲の水との混合効果を期待したものである。しかし、この方法の原理は筒より下に存在していた下層水を筒より上全体にまき散らそうというものであるが、筒より上の水深が大きければ大きいほど持ち上げられる高密度の水が低い位置で周囲に逸散してしまいエネルギー効率は悪いものになってしまう。そこでここで提案し解析しようとするものは筒の高さを水面近くに達するまで高くし、下層の水を気

泡によって水面近くまで持ち上げその後に自由に落下させ混合させようというものである。すなわち、いくら密度の高い水でも必ず水面まで持ち上げられ、界面位置にまで重力で落下するため、この場合の混合効果は前述の気泡によって上昇させられる場合の混合効果に比べて大きいことが予想される。ここでは、積極的にその効果を利用しようとするものである。

2. 実験装置および実験方法

実験では Fig. 1 に示されるような断面が 1.5 m × 1.5

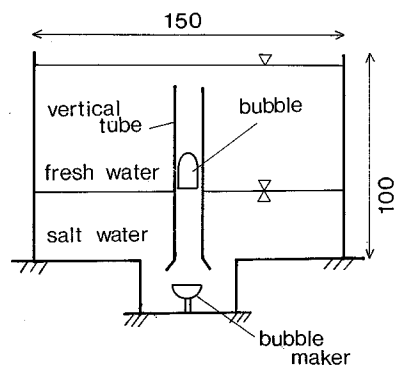


Fig. 1 Experimental apparatus used.

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部建設基礎工学科
(〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

m, 深さ 1 m で, 中央部が深くなっているような水槽を用いた。水槽の中央に下端にじょうごのついた内径 5.6 cm, 高さ 65 cm の筒を設置し, その下に自動的に反転可能な半球形の器をおきその下に空気注入口を取り付けた。実験では水槽中に真水を所定の深さまで入れるか, 真水と塩水で成層をつくっておき, 半球を逆さまにして空気を所定の量入れておき, 一気にその半球を反転させ空気弾となって上昇する空気を筒の中に注ぎ込んだ。上昇する空気弾をビデオカメラに撮り速度, 形状などを解析した。また, 筒の上端に直径 3 mm のプロペラ流速計を設置しておき流速の時間変化を追跡した。さらに, 成層中での実験では電導度計により, 密度の分布の変化を計測した。

3. 解析モデル

ここで考えている装置においては bubble をある時間間隔で放出する必要があるが, その前に 1 つの bubble が放出される場合の流れについて解析をする。本研究では, Fig. 2 に示すようなタンク内の淡塩 2 層中に鉛直に立てた筒内を bubble が上昇する場合を考える。bubble は筒内を上昇し, 筒内の水を上方に持ち上げるため下層から塩水が筒内に流入し, これもまた上方に引き上げられる。このとき, 筒内の bubble と水の運動は次のような力のつり合いから求められる。すなわち, bubble に働く浮力, 筒内の水と周囲水との密度差に基づく浮力, 筒内の水全体に作用する慣性力, 筒壁に作用する粘性摩擦力の 4 つの力である。これらの力により bubble は筒内を下端から先端まで上昇し, 筒からとびだす。それに伴い, 下層の塩水は筒内を通じて水面に達し, 水面直下を放射状に拡がる (Fig. 3 参照)。このとき, 筒内の水のうち周囲水の密度界面より上の部分は周囲水との密度差により下向きに負の浮力が作用する。この負の浮力は慣性力, 粘性摩擦力に比べて大きいので, 筒内の上昇流は減速しやがて下降流が生じる。水面直下に拡がっていた塩水は筒内の水が下降するのに伴って筒内にとり込まれ, そのまま下層へ引き戻される (Fig. 4 参照)。この際に, 下降流の慣性力によって塩水だけでなく真水も下層にとり込むために今度は上向きの浮力が働き上昇流が生じる。以後, 同様のメカニズムにより上昇流と下降流が繰り返される。本研究では, このような筒内の水の上昇および下降運動の力学的メカニズムをできるだけ簡単にモデル化した。

筒内の水の運動は Fig. 2 で示される筒の軸に沿った軸対称座標系における次のような鉛直方向の運動方程式を用いて考える。

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z}$$

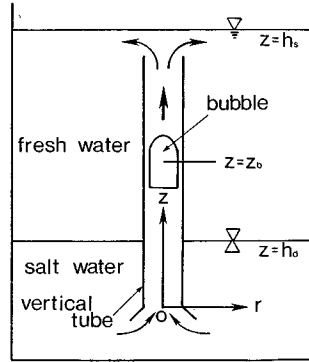


Fig. 2 Definition sketch and coordinate system.

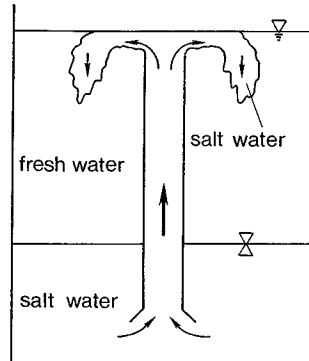


Fig. 3 Upward flow stage.

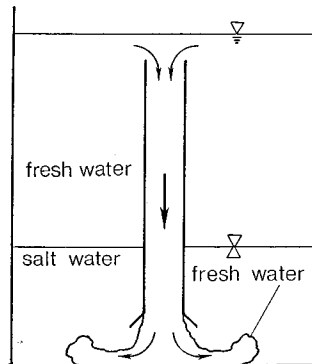


Fig. 4 Downward flow stage.

$$+ \mu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, V_z は鉛直流速, P は圧力, F_z は外力, ρ は密度, μ は粘性係数である。

式 (1) を筒全体にわたって体積積分することによって次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \rho A (L-l) \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho A U^2 &= -(\rho_2 - \rho_1) g (Z_0 - h_d) A \\ &+ (\rho_1 - \rho_2) g l A - 2 \pi a \tau_0 L \quad (t \leq t_b) \\ \rho A L \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \rho A U^2 &= -(\rho_2 - \rho_1) g (Z_0 - h_d) A \\ &- 2 \pi a \tau_0 L \quad (t > t_b) \end{aligned} \right\}$$

.....(2)

ここで、 a, A, L はそれぞれ筒の半径、断面積および全長、 l は bubble の長さ、 U は平均流速、 τ_0 は壁面せん断力、 ρ_1, ρ_2 はそれぞれ、真水および塩水の密度、 ρ_b は気泡の密度、 t_b は bubble が筒からとびだす時刻である。また、 Z_b, h_a はそれぞれ、筒内およびタンク内の密度界面の高さである。筒の下端では、実際には水は加速しながら接近し、筒に流入する。しかし、ここでは簡単のために筒の下端直下の水が接近する領域を無視し、流速は流入したとたんにある流速まで加速されるものとした。

bubble が筒内を上昇している間は筒の上端から発生する強い上昇流が水面にぶつかり、その部分が少し盛り上がる。この盛り上がりは水面下の圧力分布に変動をきたすが、この圧力変動についてはこれまでのところ利用可能な研究結果は見当たらない。しかし、Murota と Muraoka¹⁾ によれば水面から $0.75 H$ (H は筒の先端から水面までの距離) より深い部分ではこの変化を無視してよい。したがって、ここではまずこの結果を無視して解析を行うことにする。

式(2)の各項は次のような量を表わしている。左辺については第1項は非定常項、第2項は慣性力である。右辺は第1項が筒内の水と周囲水との密度差に基づく浮力である。この場合、水の挙動を考えると、筒の延長上にある水は筒内の水と一体として動くと考えるのが自然であろう。したがって、ここではこの浮力は筒の全長のみならず、筒の上端から水面までおよび筒の下端からタンクの底までの筒の延長上にある水柱にも作用するとした。筒先端から水面までの距離は筒の長さに比べて圧倒的に小さいことを考えればこの仮定は解析にそれほど重大な影響を及ぼすものではない。水面直下に拡がった塩水は重力の効果で自然落下しているのでこの塩水が筒内の水に及ぼす重力効果はないと考えてよからう。しかも、観察によっても筒の延長上にある塩水の重力効果のみ考慮するという仮定はそれほど実際現象とかけ離れたものではない。なお、この項において、密度界面の高さ Z_b は次のように考えられる。まず、bubble が筒内にあるときは bubble の位置より bubble の上昇過程において bubble の背後にまわった真水の分だけ低い位置になる。しかし、実際の計算結果においてもこれを bubble の位置としてもそれほど大きな差は現われなかった。また、 Z_b は筒内が塩水で満たされ、水面直下に塩水が拡がっているときは水面の位置に、逆に、塩水がタンクの底に引き戻され、筒内が真水で満たされているときは水底の位置となる。もちろん、bubble 放出の位置が水底からある程度離れた位置にある場合や塩水と真水の密度差がきわめて大きい場合には筒内を下降してきた

真水が水底にまで到達することはなくなるが、ここで考えているように水底付近から bubble を放出する場合には真水は水底にまで到達し周囲に拡がる。第1式右辺第2項は bubble が受ける浮力、最終項は壁面せん断力である。壁面せん断応力 τ_0 は近似的に次式で示すようなブラジウスの式による摩擦損失係数 f^2) を用いて算定した。

$$\tau_0 = \frac{1}{8} f \rho \frac{U^2}{2} \left(f = 0.3164 \left(\frac{2Ua}{\nu} \right)^{-1/4} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式(2)を時間について積分していけば平均流速 U が求められる。

bubble は筒内を筒壁との間にわずかに間隙を保ちつつ上昇する。そのため、水は bubble の移動に伴ってこの間隙を通して bubble の背後に移動する。したがって、筒内の流速は bubble によって押し上げられている部分は速く、壁面付近のものはきわめて遅くなっている。

この量をそのまま見積った研究は見当たらないが Collins³⁾ の巧みな実験ならびに解析は応用できよう。彼は上端が閉鎖された筒中に bubble を発生させ、bubble の体積と bubble 前面の曲率半径の関係および曲率半径と bubble の上昇速度の関係を求めている。これを bubble の体積と上昇速度との関係に直すと Fig. 5 を得る。 V は bubble の体積である。これより、 $V^{1/3}/a < 0.7$ の範囲において bubble の上昇速度 V_b は経験的に

$$V_b = 0.49 \sqrt{ga} \dots\dots\dots (4)$$

のように求められる。この関係は定数のわずかな差を除き解析的にも得られるものであり信頼してよからう。これと同体積の流体が bubble の背後に移動していくわけであるから、その量は

$$q = V_b \pi a_2^2 \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。ここで、 a_2 は bubble の半径である。bubble により下から押し上げられて移動する水の流速分布は中央付近の水は bubble によって押し上げられているので通常の管路でみられる対数分布則とは異なり、中央部が速くなる。計測によるとこの流速分布はおおむね

$$\frac{u}{U_{max}} = \left(\frac{a-r}{a} \right)^{1/15} \dots\dots\dots (6)$$

で表わされることがわかった。したがって、ここでは筒内の水が bubble により下から押し上げられている場合の流速分布は式(6)の形式をとり、しかも平均流速 U とともに移動する座標系でみた場合には式(5)で表わされる量の水が背後に移動するように中心軸上の最大流速を求めた。

また、bubble がとびだしたのちの流速分布は通常の対数分布則とした。

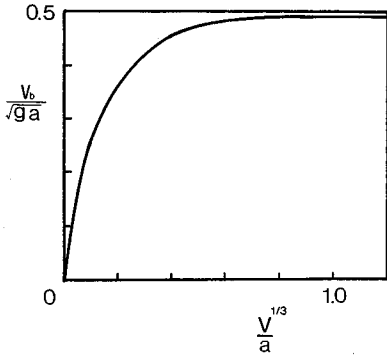


Fig. 5 Relation between bubble volume and rising velocity.

4. 解析結果と実験結果との比較

最初に、一様水中に立てた筒内を bubble が上昇する場合の結果を Fig. 6 に示す。なお、水理諸元は L は 65 cm、一様水中であるため ρ_1 と ρ_2 とは両方とも 1.00 g/cm³、bubble の体積 V は 40 cc である。同図より、解析結果は実験結果とよく一致していることがわかる。同図中で、流速のカーブが原点から急激に立ち上がっているが、この部分が bubble が筒内を上昇している期間である。そして、bubble が筒からとびだした後は、上向きの駆動力がなくなるために流速は急激に減衰し、しだいに 0 へと減衰していく。この減衰していく速さは次のように求まる。bubble がとびだした後は、筒内の水に働く力は慣性力と粘性力の 2 つである。これらの力のうち、慣性力は平均流速 U の 2 乗に、粘性力はほぼ $7/4$ 乗に比例する。式 (2) に $\rho_1 = \rho_2$ を代入すると次式で示すように dU/dt も U のべき乗で表わされることがわかる。

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{U^2}{L} - 0.104 \frac{a^{3/4}}{\nu^{1/4}} U^{7/4} \dots\dots\dots (7)$$

これより、式 (4) は $t = \infty$ で 0 に収束する解をもつことがわかり、また、筒長 L 、筒径 a の効果も解析できるであろう。

次に、淡塩 2 成層中での結果を Fig. 7 に示す。なお、水理諸元は $\rho_1 = 1.00$ g/cm³、 $\rho_2 = 1.02$ g/cm³、 $h_a = 5$ cm であり、他の条件は一様水中のものと同じである。解析結果は実験結果と定性的によく一致しているが、絶対値には若干のずれが生じている。すなわち、 $t = 0 \sim 1$ s では解析値が実験値を上回り、また $t = 4 \sim 15$ s でも解析値が大きくなる傾向がある。それにひきかえ、その後 ($t = 15 \sim 20$ s) では解析値の方が下回っている。この原因は次のように考えられよう。まず、 $t = 0 \sim 1$ s でのずれは、bubble が筒内を上昇する際に水面を押し上げるが、こ

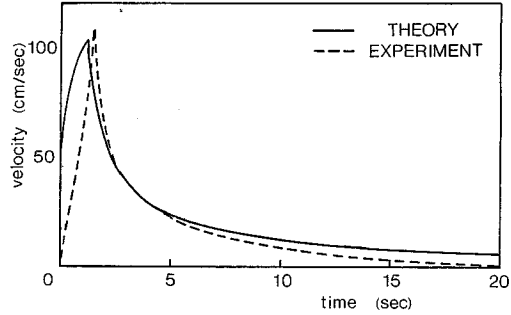


Fig. 6 Time variation of velocity at the outlet in case of fresh water.

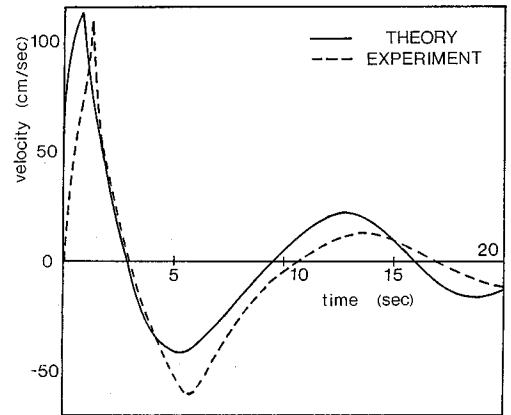


Fig. 7 Time variation of velocity at the outlet in case of two-layered system.

こでは過去の筒のない実験からの類推からそれによる圧力の増加が全くないと考えている。ところが、筒が存在する場合にはこの水面の変化の効果は筒のない場合より大きくなり考慮する必要がある。このため、解析値の方が小さくなったものと考えられる。これと同じことは筒内に上昇流の発生している $t = 10 \sim 13$ s の部分についてもいえる。逆に、下降流に転じる場合においては、それまで筒上方で水面が盛り上がっていたために下降流の速度は水面の影響を無視していた場合よりも大きくなる。そのために、 $t = 4 \sim 10$ s 付近でも解析値の方が大きくなっている。しかしながら、解析においては複雑因子をすべてとり去り手軽な計算で求まるように主要な因子だけをとりだしてきた経緯を考えれば、この程度の差はやむを得ないことである。それよりも、この程度の手軽な計算でもこれほどの精度で予測可能であることが強調されてよいであろう。このときの現象のメカニズムは以下のようなものである。筒内の水に働く力のうち慣性力と粘性力の 2 つは真水中の場合と同様に存在する。ところが、この場合にはさらに真水と塩水の密度差による浮力が作用する。この力は流速によっては規定されず、

密度界面の高さによって決まる。すなわち、上昇流が生じているときには Fig. 3 のように塩水が筒を通して水面にまで達し、水面付近に拡がっている。この場合には筒内とその下方の水のうち周囲の密度界面より上にある部分は下向きの浮力を受ける。また、Fig. 4 のように下降流が生じ、塩水が筒内を通じてタンクの底に引き戻され、筒内に真水が満たされているときには筒内の水のうち周囲水の密度界面より下にある部分には上向きの浮力が作用する。このように、筒内の水の運動方向と反対方向に浮力が作用するため、筒内の水の上下運動が、その振幅を減衰させつつ続くことになる。

5. 工学的応用

本研究で考えているような気泡塔を実際に用いるためには、そのエネルギー効率を考える必要がある。

密度成層中に立てた筒内に bubble を打ち上げたときの流速の時間変化は Fig. 7 に示した。bubble が筒からとびだした後、bubble に従って筒先端まで持ち上げられた塩水は水面に衝突する。実験によると、衝突した塩水は放物線軌道を描いてすぐに落下を始めるのではなく、水面に沿ってある距離流下した後急激に沈み込む。この沈み込む過程は下降する重力プリュームの形態によく似ている。したがって、ここではこれを下降プリュームとよぶことにする。この下降プリュームは周囲水を行しながら落下する。そして、下降運動の慣性力のために周囲水の密度がプリュームそれ自身の密度より少し大きくなる高さまで達した後、再び少し上昇し同じ密度の高さに至って intrusion となって周囲に広がる。したがって、タンク内の密度分布には時間がたつにつれて遷移層が形成され、その層が厚くなることによって混合が進む。また、その遷移層厚の増加に伴ってこの成層全体のもつポテンシャルエネルギーが増加する。このようにして、bubble を打ち上げることによって成層は破壊されてゆくが、一方、この操作においては bubble を水底まで沈め込むエネルギーを要する。そこで、bubble を水底にまで沈める場合空気流入管の壁面での損失や bubble として放出するときのエネルギー損失を考えないとすれば、ポテンシャルエネルギーの増加分とこの消費エネルギーとの比がこのシステムのエネルギー効率といつてよいであろう。そしてこのエネルギー効率を高めることが工学的に重要な問題である。

以上の点を踏まえて、ここで行う解析では、このような水面にまで到達する気泡塔を用いた場合と用いない場合についてエネルギー効率を比較し、気泡塔を用いる方が有利であるかどうかを調べるとともに気泡塔を用いた場合にエネルギー効率が最もよくなる気泡の打ち上げ方の基準となる基礎的なデータを提供します。ここでは、実

験室規模の2成層でそのエネルギー効率を計算する。

bubble によって下層の高密度水を持ち上げた場合には、いったん水面付近にまで高密度水を持ち上げても筒内の水の下向きの重力効果によって水の上昇速度が時間とともに減速し、下降する速度に転じ、せつかく持ち上げた高密度水もそのまま筒内を下降してしまう。したがって、高密度水の速度が下向きに転じる前に次の bubble を発生させる必要がある。これが、bubble の発生周期となる。

水面に達した高密度水は周囲に拡がった後、重力プリュームとして下降する。しかしながら、現在までのところこの高密度の水平プリュームの水面での拡がり幅を見積る実験も理論も報告されていない。ここでは、実際に室内実験を行いその値を見積った。その結果が Fig. 8 である。同図より、水面での拡がり幅 L は初期密度フルード数 F_{d0} と筒の直径 D で無次元化した筒先端から水面までの距離 h/D の関数として求められる。ここで丸、三角、正方形印は実験値を、実線、破線は理論値¹²⁾を示す。

水面で同心円状に拡がった高密度水は衝突点から距離 L だけ離れたところから急に沈み込み、下降プリュームとなる。したがって、このプリュームは筒状をしているが、近似的に幅 $2\pi L$ の二次元プリュームと考えてよいだろう。そこで、本研究では二次元プリュームの解析

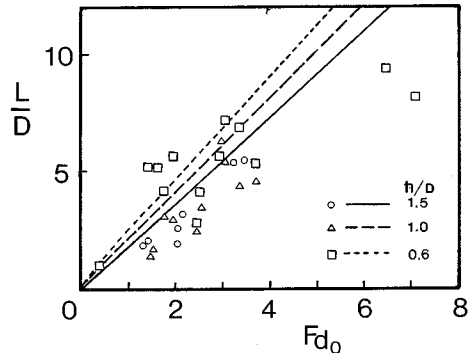


Fig. 8 Spreading length of impinging plume versus densimetric Froude numbers.

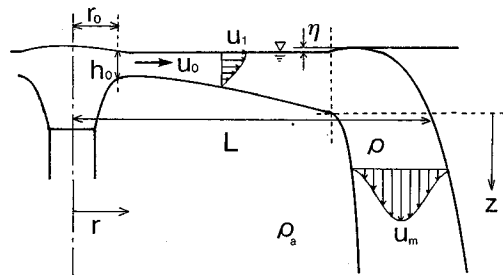


Fig. 9 Schematic diagram of falling down of plume.

結果を用い、この下降プリュームの挙動を求めることにした (Fig. 9 参照)。

なお、筒内を上昇してきた高密度水が水面で衝突してから沈み込み点にまで至る間の水平プリュームの部分についての現象は水面直下にある水平の高密度プリュームとみなされる。しかし残念ながらこうした現象を扱った研究は見当たらない。しかし、水平方向の運動量が卓越していることを考えれば、これを水面に沿った水平な軸対称プリュームと考えてよいだろう。これは Rajaratnam⁴⁾ により次式で表わされる。

$$\frac{U_1}{U_0} = 3.5 \frac{\sqrt{h_0 r_0}}{r} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{h_1}{h_0} = 0.11 \frac{r}{h_0} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 U_1 は水面での流速、 h_1 は流速が U_1 の半分の値になる深さ、 U_0 は初期流速、 h_0 は初期のプリュームの深さ、 r_0 は初期のプリュームの位置である。そして、沈み込み点において水平プリュームと下降プリュームの流量、質量ならびにエネルギーが保存するように下降プリュームの初期条件を設定した。下降プリュームについては Fisher *et al.*⁵⁾ を参照して、成層流体中での二次元プリュームの質量、運動量、浮力の保存式は次のように与えられる。

$$\frac{d}{dz} (U_m W) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \alpha U_m \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{d}{dz} (U_m^2 W) = \sqrt{2} \lambda D_m W \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{d}{dz} (U_m D_m W) = -\frac{\sqrt{1+\lambda^2}}{\lambda} U_m W \frac{d\rho_a}{dz} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 U_m 、 D_m はそれぞれ中心上での流速および密度差、 W は流速分布上で流速が最大流速の半分の値をとる点までの距離、 α は連行係数、 $\lambda (=1.14)$ は流速分布と密度差の分布の拡がり率の比、 $d\rho_a/dz$ は周囲水の密度勾配である。計算においては、Germeles⁶⁾、Bains⁷⁾、Kumagai⁸⁾ らの解析と同様にプリューム自身の密度が周囲の密度と同じ高さに達した後瞬間的にタンク全体に拡がるものとした。また、上記のように流れが下降流に転じた瞬間に次の bubble を発生させるものとし、下降プリュームの流量はその間の平均流速を用いて算定した。また、下降プリュームが周囲と同密度になる高さに達する時間が発生周期より長い場合には前の bubble で生じたプリュームの一部が重ね合わさるものと仮定した。

このようにして、タンク内の密度分布の時間変化を求め、その結果を用いてポテンシャルエネルギー E_p の増加率 $\Delta E_p / \Delta t$ を次式より算出した。

$$\frac{\Delta E_p}{\Delta t} = \frac{\left(\int_0^H \rho g z dz_{(t=\Delta t)} - \int_0^H \rho g z dz_{(t=0)} \right) A}{\Delta t} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 z は水底から上向きにとった鉛直座標、 t は時間、 Δt は bubble の発生間隔、 A はタンクの断面積、 H は全水深である。ここで発生間隔は、下降流が生じない範囲での最大値を用いた。

一方、bubble を水底まで沈め込む際に必要なエネルギーは $\rho g V H$ (V は bubble の体積) で与えられ、この条件において、1つの bubble による平均のエネルギー効率 E_f は次式で表わされる。

$$E_f = \frac{\Delta E_p}{\rho g V H} \dots\dots\dots (14)$$

bubble はその体積が小さすぎると十分な浮力が得られず、筒内の高密度水を重力に逆らって持ち上げることができない。bubble が水底から水面まで高密度の水を持ち上げながら上昇することができる条件は次のようである。

$$\rho g V \geq \Delta \rho g A_1 H_1 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $\Delta \rho$ は上下層の密度差、 H_1 は上層厚さ、 A_1 は筒の断面積である。これより、上昇し得る bubble の体積の最小値 V_{min} は次式で与えられる。

$$V_{min} = \frac{\Delta \rho}{\rho} A_1 H_1 \dots\dots\dots (16)$$

解析に用いた設計条件は Table 1 に示されている。この条件のもとで上昇し得る bubble の最小体積 V_{min} は式 (16) より直径 5.0 cm の筒の場合、 $V_{min} = 2.9$ cc、直径 7.5 cm の筒の場合、 $V_{min} = 6.6$ cc と求まる。

こうした V_{min} の値では bubble と筒壁との間の隙間が大きくなりそこを通過して bubble の後ろに流れ込む水の量が増す。ところがこの程度の隙間が存在する場合は Collins の解析の条件の範囲内に入っており、彼の解析結果をそのまま用いている本解析の適用範囲内といつてよい。

Fig. 10 に bubble の体積に対するエネルギー効率 E_f の変化を示す。同図から、エネルギー効率は bubble の体積が小さいほど大きいこと、また、筒の直径が大きい

Table 1 Conditions in analysis.

	RUN 1	RUN 2
筒の直径 (cm) D	5.0	7.5
筒の先端から水面までの距離 (cm) h	3.0	5.0
上層厚 (cm) H ₁	3.0	3.0
下層厚 (cm) H ₂	5.0	5.0
密度差 (g/cm ²) Δρ	0.005	0.005
タンクの断面積 A (cm ²)	6400	6400

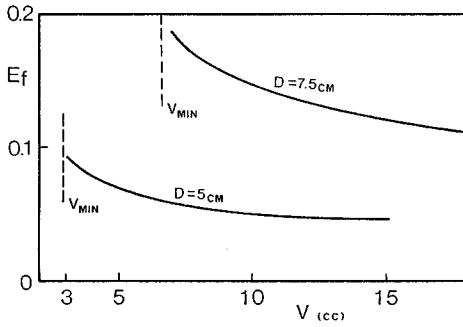


Fig. 10 Energy conversion efficiency.

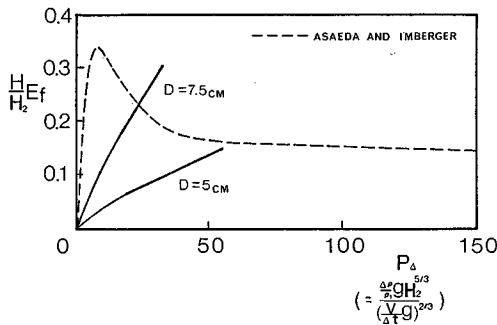


Fig. 11 Comparison with the case of continuous shroudless release.

方が大きいことがわかる。特に、 $D=7.5\text{ cm}$ の場合エネルギー効率の最大値は $E_f=0.19$ と大きい値を示していることは注目値する。気泡塔を設けなく、短くした場合にはたとえ体積の大きな bubble を間欠的に発生させても上昇途中で bubble は砕け多数の小さい気泡群になるために、通常の水底から散気管により気泡を発生させた場合の bubble plume の挙動に類似している。この現象は松梨と宮永⁹⁾、McDougall¹⁰⁾、Asaeda と Imberger ら¹¹⁾、松尾ら¹³⁾の研究で詳細に調べられている。特に、Asaeda と Imberger はそのエネルギー効率を実験的に調べているのでその結果と比較してみる。Fig. 11 は 2 成層での実験において通常の bubble plume による結果と本研究で提案している水面付近にまで達する気泡塔を用いた場合のエネルギー効率 (実線) を比較したものである。同図より、エネルギー効率は筒の直径 $D=7.5\text{ cm}$ で bubble の体積 $V=11\text{ cc}$ 以下の範囲においてこのような気泡塔を設けた場合には散気管による bubble plume のものよりよいことがわかる。空気を水中に放出させる場合には、静水圧よりわずかに大きい圧力で空気を放出する必要があるが、水位が変化する状況下でこうした量を保つためには、放出流速を大きくするなどのことが必要である。しかし、放出流速を上げることはエネルギー効率を下げることにつながる。したがって、

空気を水中で放出する際の損失まで考えれば多量の空気を間欠的に発生させることの方が効率的である。一方、このような気泡塔を設けなくごく短いものを設け、bubble を間欠的に発生させた場合には、bubble によって発生した上昇流がこのシステムのように長時間続くということではなく、bubble による上昇流はほぼ bubble が存在しているときのみ存在している。したがって、間欠的に気泡を発生させる場合でも気泡が発生している間の効率は継続的に発生させている場合のものと同程度変わらないので時間平均したエネルギー効率はその分小さくなる。ちなみに、現在通常使用されているシステムの条件を単位時間の気泡発生量にひきなおして Fig. 11 に示せばほぼ左端に位置しており、決して効率のよい運用を行っているとはいえない。こうした点を考慮すれば以上のように本研究で提案した下降プリュームによる成層破壊を期待するシステムの方が従来のシステムに比較してエネルギー効率がよく、利用価値は高いといえるだろう。

このシステムでの bubble の発生位置は本解析で行っているように筒の直下である必要はなく筒の途中にあってもよい。水深が深い場合にはむしろその方が適当であろう。また、筒は固定されたものを想定しがちであるが、もちろん伸び縮みするようなものであってもよく、現場まで曳航していきそこで引き伸ばすというようなシステムの方が応用範囲は広いであろう。また、このようなときには伸縮自在の骨組みに膜で筒がつくられているようなもので十分機能を果たし、また安価である。

6. むすび

最後に、本研究で得られた結論を述べる。

(1) 2 成層中に鉛直にたてた筒内を上昇する bubble による水の運動を解析した。しかも、その解析結果は実験結果と良く一致していた。

(2) 本研究で提案した下降プリュームによる成層破壊の方法を実験室規模の成層に対して適用した結果、エネルギー効率が約 19% 程度にまで達し、散気管式のものと同程度まで高められることがわかった。しかも、bubble を放出させる際のエネルギー損失を考えればこの方式の方がより高い効率を上げることが期待できる。

謝 辞：本研究を行うにあたって、(株)太陽工業の能村龍太郎会長、磯野義人設計部長には膜構造物の耐久性について貴重なご意見をいただいた。また、東京大学 玉井信行教授には研究の便宜を図っていただいた。なお、本研究を行うにあたって文部省科学研究費 (試験研究 (1) 代表：浅枝 隆) の援助を受けた。また、本論文の査読者の方々からは非常に多くの有益な助言をい

ただいた。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Murota, A. and Muraoka, K. : Turbulent diffusion of a vertically upward jet, Proc. 12nd Cong. I. A. H. R. Colorado, Vol. 4, pp. 60~70, 1967.
- 2) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，pp. 170~171, 1974.
- 3) Collins, R. : The effect of a containing cylindrical boundary on the velocity of a large gas bubble in a liquid, J. Fluid Mech., Vol. 28, pp. 97~112, 1967.
- 4) Rajaratnam, N. : Turbulent jets, Elsevier Scientific Publishing Company, pp. 60~62, 1976.
- 5) Fisher, H. B., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J. and Brooks, N. H. : Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, pp. 370~372, 1979.
- 6) Germeles, A. E. : Forced plumes and mixing of liquids in tanks, J. Fluid Mech., Vol. 71, pp. 601~623, 1975.
- 7) Bains, W. D. : Entrainment by a plume or jet at a density interface, J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 309~320, 1975.
- 8) Kumagai, M. : Turbulent buoyant convection from a source in a confined two-layered region, J. Fluid Mech., Vol. 147, pp. 105~131, 1984.
- 9) 松梨史郎・宮永洋一：曝気による貯水池内の流動シミュレーション，第31回水理講演会論文集，pp. 629~634, 1987.
- 10) McDougall, T. J. : Bubble plumes in stratified environments, J. Fluid Mech., Vol. 85, pp. 655~672, 1978.
- 11) Asaeda, T. and Imberger, J. : Structures of bubble plumes in stratified environments, J. Fluid Mech. (to be submitted).
- 12) 浅枝 隆・中井正則・玉井信行：水面に衝突する高密度噴流の拡がり幅，土木学会論文集，第411号，pp. 109~115, 1989.
- 13) 松尾直規・岩佐義明・雑賀正嗣：間欠式揚水筒を用いた曝気循環による流れの数値解析，土木学会第42回年次学術講演会概要集Ⅱ，pp. 470~471, 1987.

(1989. 3. 6・受付)