

空気泡プルームの水理特性に関する研究

松尾 直規・岩佐 義朗
南部 茂義・渡辺浩太郎

A STUDY ON HYDRAULIC BEHAVIORS OF AIR-BUBBLE PLUMES

By Naoki MATSUO, Yoshiaki IWASA, Shigeki NAMBU,
Kohtaroh WATANABE

Synopsis

In this study, hydraulic behaviors of the flow induced by the air discharged into the water body through an orifice are investigated by experimental and numerical simulation approaches. The experimental data of time-averaged velocity and turbulence measured in the laboratory show that the fundamental characteristics of the air-bubble plume is similar to the ones of symmetrical density plume or jet, except for the regions near the orifice and close to the free surface. The numerical simulation analysis considering the change of air-bubble volume together with the experimental information of the spread of velocity profiles can represent the flow field which have been measured by the authors and Kobus.

1. 緒 言

貯水池及び湖沼等の富栄養化に関連した貯留水の水質汚濁に対する対策手段の一つに曝気循環法（エアレーション法）があり、わが国においても試験的なものを含めていくつかの実験例が報告されている。しかしながら、その水質改善効果については、欧米等での例を含め、対象水域の諸特性あるいは実施方法により異なることが普通で、統一的な評価が得られていないのが現状である。このため、現実の諸条件の下での各種水質変化過程を明らかにし、その水質改善効果を定量的に把握するとともに、それに基く実用化のための体系的な技術的方法を確立することが緊急かつ重要な課題となっている。

これらの課題、とくに前者については、各種水質変化に寄与する流れの運動学的挙動、すなわちエアレーションにより生ずる空気泡プルームと周囲水の水理特性を明らかにすることが基礎となることはいうまでもない。著者らは、この基礎課題について数年来取り組み、現地実測資料による流れの特徴の把握、ならびにそれに基く数値解析モデルの開発に努めてきた^{1,2)}。その結果一応の成果を収めてはきたが、基礎となる実測資料の数及び精度の不備のために当初の目的を十分に達成するには至っていない。

そこで、本研究においては、実際現象をより明らかにすることを目的に、まず空気泡プルームの水理特性を室内実験により検討し、つぎにその結果に基いて著者らの円筒2次元モデルの適用を図り、モデルならびに各種パラメータの取扱いの妥当性について考察した。以下に、これらの内容と得られた主要な結果について述べることにする。

2. 室内実験による検討

2.1 実験装置及び方法

エアレーションにより生ずる流れの基本的な水理特性を把握するため、次のような装置、方法を用いて室

内実験を実施した。

(1) 実験装置

Fig. 1 に示すように、回転可能な上部測定台を備えた直径 200 cm、深さ 60 cm の円形水槽と、金属製の気泡発生ノズル、流量計、圧力計、減圧弁及びコンプレッサーから構成されている。水槽の側面は写真撮影及び可視化が行えるよう透明なアクリル板により作製されており、また気泡発生ノズルの位置は手動により上下方向に移動することができる。なお、気泡発生ノズルの先端部は交換可能なものとし、気泡発生孔の直径、個数、及び位置を変えられるようにしている。

(2) 流速の測定法

多数の気泡群を含む気液混流の速度を正確に測定することは極めて難しく、測定法として確立されたものはないのが現状である。本実験においては、対象とする流れが2次元あるいは3次元の構造をもつことを考慮し、精度及び再現性に関する若干の予備的検討の後、2成分4方向の同時計測が可能でしかも取り扱いが比較的便利な電磁流速計（本体部：KENEK 製 VM-201 型、検出部：VMT 2-200-08 型）を用いることにした。各測点でのデータは、カセットデータレコーダ（TEAC 製 R-81）に入力した後、AD 変換（TEAC 製 DS-2000 による）され、京都大学大型計算機センター FACOM M-382 により処理された。

(3) 気泡の挙動に関する測定法

個々の気泡の挙動や気泡密度の測定は極めて困難であるため、本実験ではスリット光を用いた可視化による視覚的観察と、写真撮影による追跡にとどめた。

2.2 気泡の定性的挙動と上昇速度

Photo 1 は直径 1 mm の単孔より放出され上昇する数個の気泡の 1 秒間の軌跡を撮ったものであるが、これより個々の気泡がらせん状にゆらぎながら上昇する様子がわかる。このときの気泡の平均上昇速度を、写真左中央に白く見える長さ 10 cm の棒と軌跡の長さとの比較から求めると約 25 cm/sec であった。この値は、ストップウォッチを使って目視により測定した値と同程度であり、気泡形状として球形を仮定した後述の理論式より求めた値（約 28 cm/sec）と比較するとやや小さい。観察された気泡の形状は、松本ら³⁾が報告したように回転円筒体あるいはキノコ笠状であり、こうした実際の気泡形状ならびに関連する気泡周りの局所的な流れの影響が、上述した気泡の上昇経路及び速度に反映されているようである。

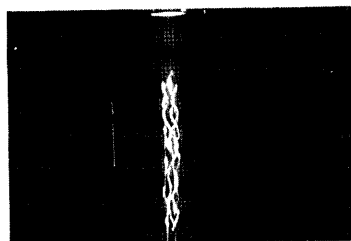
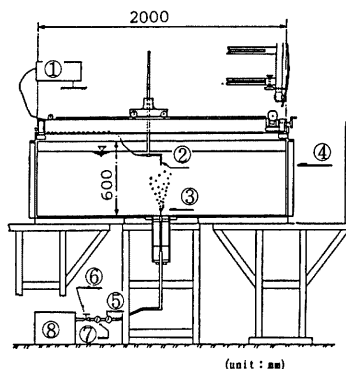


Photo. 1 Traces of rising air bubbles.



- ① recorder ② flowmeter probe
- ③ air bubble injector ④ tank ⑤ volumeter
- ⑥ pressure regulator ⑦ pressure gauge
- ⑧ air compressor

Fig. 1 Experimental apparatus.

次に、気泡の分布特性について、Photo. 2(a)~(d) を比較してみると、その分布幅は、後述する流速のそれと同様に、空気供給量と対応するとともに、気孔発生孔からの距離にほぼ比例して増大していることが認められる。なお、写真より測った気泡の分布幅は、いずれも流速のその約 0.15 倍程度であった。

2.3 平均流の特性

(1) 予備的検討

まず、気泡発生孔の径、個数及び位置の違いが流れに与える影響、1 測点でのサンプリング時間及び間隔、流速計

の応答性等について予じめ検討を行った。その結果、気泡発生孔に関しては、その位置により気泡が鉛直上向きに放出される場合と水平方向に放たれる場合とで発生孔近傍において若干の違いがみられた以外余り影響がないこと、サンプリングは1分間に600個のAD変換されたデータをとれば精度上特に問題はないことを確認した。また、流速計の応答性については、気泡が流速計プローブに衝突した際や水深5cm以浅の領域においていくらか問題があり、乱れの測定精度に悪影響を及ぼすが、平均流に関しては大した支障はないことが確かめられた。なお、以下に述べる実験ケースでは、いずれも直径1mmの単孔を鉛直上向きに設けたノズル先端部を使用し、上述のサンプリング法を用いている。

次に、対象とする空気泡プルームの流れの軸対称性について、流速の3次元分布を測定して検討した。その結果、多少のばらつきはあるが、平均流及び乱れの分布はともに軸対象とみなされ、現象の再現性も良好であることが確認された。

(2) 流速分布

上述した流れの軸対称性に基き、中心軸よりある1方向の鉛直断面内における流速分布についてのみ測定した結果を用いて以下の考察を進める。実験ケースを

Table 1 に示す。各ケースとも水深は50cmとし、水深方向に5cm、また水平方向には中心軸より10cm以内の範囲では1cm、それ以外では10cmの間隔で測点を設け、各方向の流速成分を測定した。

まず、空気泡プルームの流れの概要を示した **Fig. 2** の流速ベクトル図例より、プルームは気泡発生孔からの距離の増加とともに周囲水を連行しながらその幅を拡げて上昇し、水面付近に達すると水面との相互干渉により水平方向に転じていく様子がわかる。

流速の鉛直方向成分の半径方向への分布は、**Fig. 3** の例に示すようであり、従来よりの指摘の通り水深とは無関係にほぼ相似なガウス分布で近似されることが確かめられる。すなわち、流速分布は次式で表示され得る。

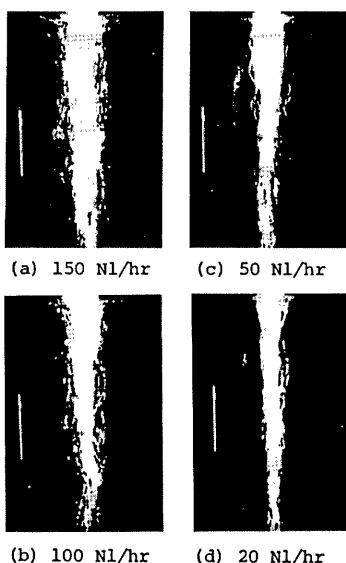


Photo. 2 Distributions of air bubbles under various air supply rates.

Table 1 Test cases for experiments and simulations

Case No.	Air supply (NL/hr)	Temperature (°C)	Depth of orifice (cm)
1	100	14.0	50
2	100	25.5	50
3	75	25.5	50
4	50	26.0	50
5	25	14.5	50
6	150	14.5	50
7	100	14.5	40
8	100	14.5	30

$$\begin{aligned}
 \frac{v}{v_c} &= \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \\
 &= \exp\left\{-0.693\left(\frac{r}{b_{1/2}}\right)^2\right\} \\
 &\dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここに、 v ：流速の鉛直方向成分、 v_c ：中心軸上の v 、 r ：中心軸からの水平距離、 σ ：標準偏差、 $b_{1/2}$ ：プルームの半値半幅である。なお、**Fig. 3** は(1)式の関係を調べたものであり、図中の曲線は最小2乗法により求められたその近似曲線である。

次に、重要な特性量の1つである中心軸上の鉛直流速（以下、軸上鉛直流速という） v_c の分布についてみると **Fig. 4, 5** のようである。両図より、

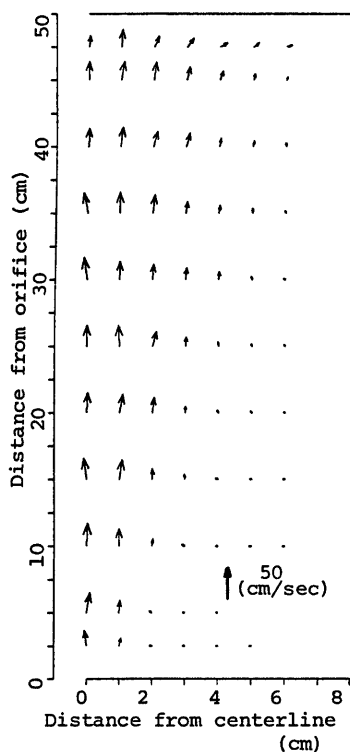


Fig. 2 An example of velocity vector distribution (CASE 6).

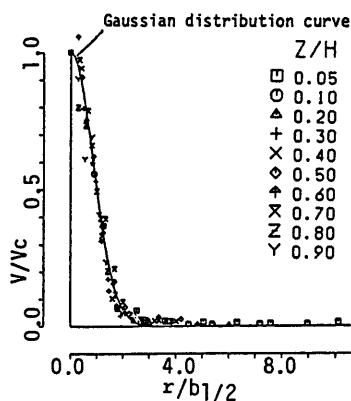


Fig. 3 Vertical velocity distributions (CASE 1).

いずれの場合も多少のばらつきはあるが、気泡発生孔からの距離 z と水深 H との比でみたとき、 z/H が0.2程度までの間で加速され、それから $z/H=0.7$ 程度まではほぼ一定値で推移し、それ以上になると水面の影響により減速する傾向が認められる。この分布傾向は、従来より言われるように空気泡ブルームと密度ブルームとの類似性を反映しているが、 z/H が約0.2~0.7の間の中間領域（噴流域あるいは確立領域）における流速変化の傾向はより大きなスケールの場合の Kobus⁴⁾の実験結果や現地での実測結果例⁵⁾、また Rouse ら⁶⁾の軸対称ブルームに関するそれとは異なった結果となっている。これは、自由表面を含む境界面の影響の程度、いいかえれば流れ

の場のスケールの違いと、気泡量、気泡径及び気泡の運動学的挙動の差によるものと考えられるが、流速の変化特性が異なる領域区分の問題を含めて今後さらに検討を進めなければならない課題である。

(3) 軸上鉛直流速と空気供給量との関係

軸上鉛直流速の値は、上述した気泡発生孔からの距離に加え、一般に空気供給量、周囲流体と気泡の密度差、空気発生孔の水深、気泡の形状要素などによって変化すると考えられる。このうち、空気供給量に関しては、Fig. 4 でも明らかにように、空気量が多い程流速値は大きくなることが知られている。Kobus⁴⁾、Cederwall⁷⁾ は、気泡群を含む水塊の運動量変化が浮力に等しいとして点源より生ずる空気泡ブルームを解析し、上述の中間領域における軸上鉛直流速についてそれぞれ次式を提案している。

$$\text{Kobus ; } v_c = \frac{1}{C(z+z_0)} \sqrt{\frac{-p_{atm} Q_a}{\pi \rho_w v_a} \ln \left(1 - \frac{z}{H_0+H} \right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Cederwall ; } v_c = \left[\frac{25gQ_a H_0 (H\lambda)^2}{24E^2 \pi (H_0+H)} \right]^{1/3} (k+z_0)^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C ：ブルーム幅の水深方向への変化率、 z_0 ：気泡発生孔からブルームの仮想原点までの距離、 H_0 ：大気圧に相当する水柱の高さ、 H ：気泡発生孔の水深、 Q_a ：空気供給量、 E ：連行係数、 λ ：気泡の分布幅とブルーム幅との比、 p_{atm} ：大気圧、 ρ_w ：周囲流体の密度、 g ：重力加速度、 v_a ：気泡の平均上昇速度である。

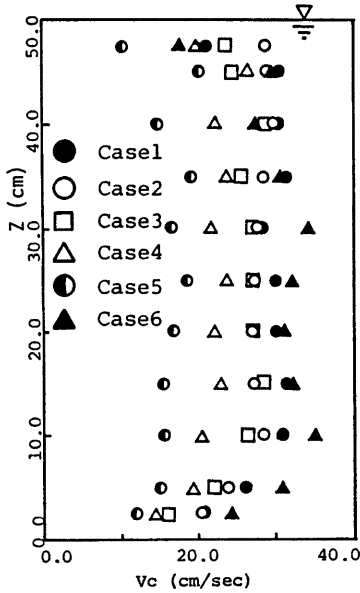


Fig. 4 Profiles of centerline velocity under various air supply rates.

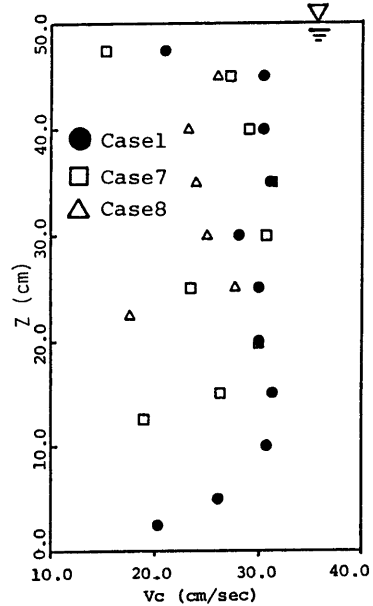


Fig. 5 Profiles of centerline velocity under various depths of orifice.

Kobus は(2)式において、 C 及び v_a が Q_a の約 $1/6$ 乗に比例することを実験的に求め、軸上鉛直流速 v_c が空気供給量 Q_a の $1/4$ 乗に比例するとした。一方、(3)式においては、 $E=5/6C$ より E が Q_a の $1/6$ 乗に比例するとすれば v_c は Q_a の $2/9$ 乗に、また E を一定と考えれば Q_a の $1/3$ 乗に比例する関係が得られる。

そこで、Fig. 4 に示した軸上鉛直流速のうち、中間領域のものについて空気供給量との関係を両対数紙上に整理してみると Fig. 6 のようになる。同図には比較のために Kobus の実験値を同時に示しているが、

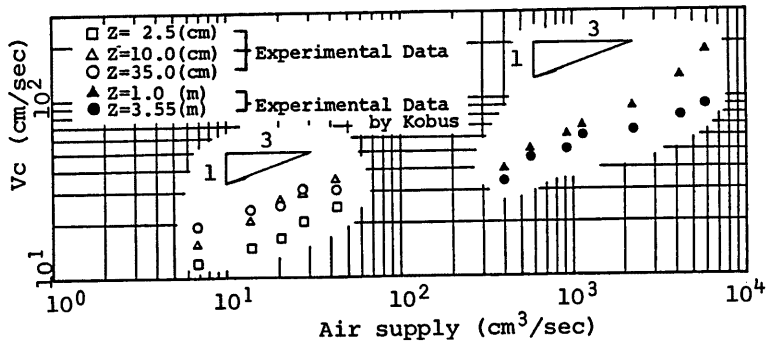


Fig. 6 Relation between centerline velocities and air supply rates.

いずれについても流速値は空気供給量の $1/3$ 乗に比例する傾向をみることができる。しかしながら、後述するように連行係数 E の値が空気供給量と無関係ではないことを考えると、この傾向は(3)式の関係を裏付けるものとは言えず、さらに検討を要するであろう。

(4) プルームの半値半幅

プルームの分布特性を表す代表量としての半値半幅((1)式の $b_{1/2}$)について、その変化の特徴をみたものが Fig. 7 である。同図より明らかなように、半値半幅の変化は(2)で述べた軸上鉛直流速のそれと概ね対応しており、初期加速領域及び水面との干渉による減速領域ではほぼ一様とみなされるのに対し、その中間領域では従来より言われるように距離 z に比例して増大している。また、中間領域での半値半幅の増加率は、空気供給量が多い程大くなる傾向がみられる。

そこで次に、いま述べた両者の関係を Kobus の実験値とともに示すと Fig. 8 のようになる。データ数が少ないため一般性にはやや乏しいが、半値半幅の増加率はいずれも空気供給量のべき乗に比例する傾向が認められる。ところが、定量的にみた場合には、著者らの実験値の方が全体的に高く、またその値の傾きもより大きいことが示されている。これらの違いは、境界面の影響の程度、気泡径及び形状に関する気泡の上昇速度、気泡発生孔の水深などの差に起因すると考えられるが、現段階ではそれ以上のことはわからない。なお、Rouse ら⁶⁾ が報告した軸対称密度プルームにおけるプルーム幅の変化率(半値半幅のそれにすると 0.085)と比べると、Fig. 8 に示した値はいずれもやや小さく、空気泡プルームの一つの特徴を示すものと考えられる。また、今回の実験の範囲内では、気泡発生孔の深さと半値半幅の間に特別な関係は見い出されなかったことを付け加えておく。

(5) 連行係数

プルームと周囲水との関係を表す 1 つのパラメータである連行係数の把握も実用上有意義である。いま、水平面内を通過するプルーム内流量を Q 、軸上鉛直流速を v_c 、プルーム幅を b ($b = \sqrt{2} \sigma \approx 1.2 b_{1/2}$) とし、

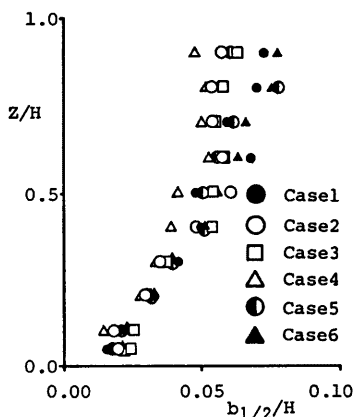


Fig. 7 Nominal half-widths of vertical velocity profiles.

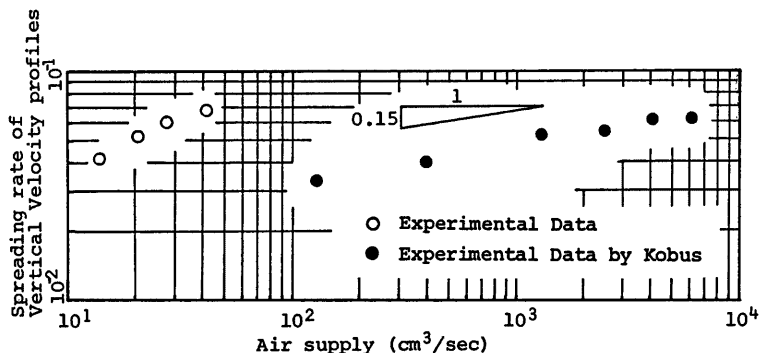


Fig. 8 Relation between spreading rates of vertical velocity profiles and air supply rates.

流速分布としてガウス分布を仮定すると連行係数 E は、次式で定義される。

$$E = \frac{d}{dz} (v_c b^2) / 2v_c b \dots\dots\dots (4)$$

Fig. 9 は、この (4) 式を差分近似し、実験値より E の値を求め図示したものである。同図より E の変動はかなり激しいが、軸上鉛直流速及び半値半幅とはほぼ対応した変化傾向をみることができる。すなわち、流速が加速される初期領域の気泡発生孔に近い位置で 0.1 を越える最大値をとり、中間領域ではある一定値のまわりに増減を繰り返し、水面との干渉領域に入ると急激に低下していく。

空気供給量との関係については、空気量が多い程連行

係数の値は大きくなる傾向があり、中間領域における平均値をとって空気量との関係を見ると Fig. 10 のようになる。同図における両者の関係は、上述した半値半幅の変化率に関するそれとほぼ同一であり、Cederwall がその解析より示した関係⁷⁾、すなわち

$$E = \frac{5}{6} \frac{db}{dz} = \frac{db_{1/2}}{dz} \dots\dots\dots (5)$$

の関係がほぼ成立するようである。

なお、Fig. 9 において、気泡発生孔の水深が浅い場合には、水面との干渉領域での連行係数値の顕著な低減がみられないが、その理由は今のところ明らかでない。こうした気泡発生孔の水深とプルーム特性との関係については、空気供給量との関係同様、実用上も興味ある問題であり、今後さらに検討を進めなければならない。

2.4 乱れ特性

前節に述べた空気泡プルームの平均流特性、とくにその分布特性は、プルーム内の乱れの特徴と密接に関連している。そこで、得られたデータより鉛直及び水平方向の乱れ強度を求め、それらに関する検討を進めることにする。

まず、Fig. 11 に、中心軸上の流速の各成分についてスペクトル解析を行った結果の 1 例を示す。これより、スペクトル分布は、気泡発生孔からの距離に関係なくほぼ相似であり、いずれについても慣性領域における Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則が成立することがわかる。また、水面との干渉領域 ($Z=40$ cm 及び 45 cm)

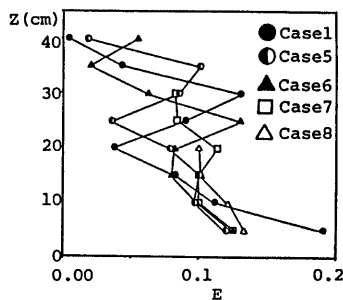


Fig. 9 Distributions of the coefficient of entrainment.

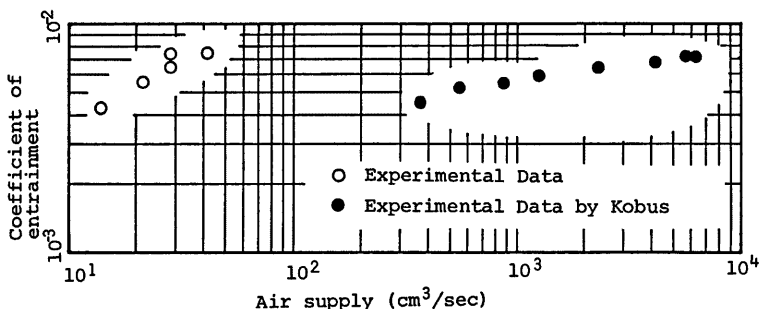


Fig. 10 Relation between the coefficients of entrainment and air supply rates.

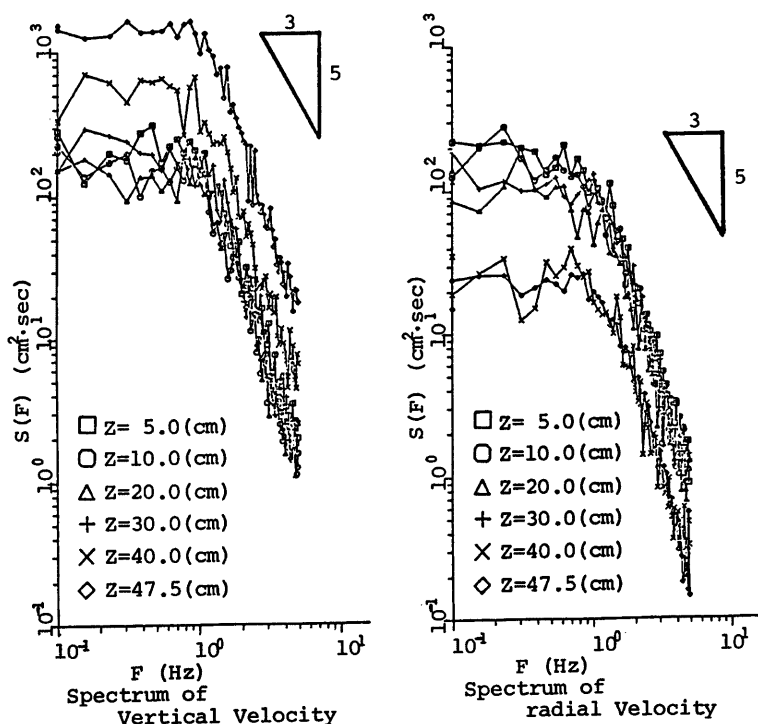


Fig. 11 Energy spectrum of vertical and radial velocity.

を除くと、その値にも大きな差はみられない。すなわち、気泡群の存在とその挙動に起因する乱れ構造への影響はこの限りにおいては認められず、先に述べた平均流の特徴と対応するように、乱れに関しても密度噴流あるいはブルームとの類似性をみることができる。なお、水面との干渉領域における値には、前節の(1)で述べたように流速計の応答性に起因する誤差がかなり含まれていると考えられ、量的な比較は意味がないと思われる。

次に、中心軸上流速に関する乱れ強度を軸上鉛直流速及び水深で無次元化し、その分布を示せば Fig. 12 のようである。同図より、乱れ強度についても3領域における違いは明白であり、その特徴は、先に述べた軸上鉛直流速、ブルームの半値半幅及び連行係数のそれと非常に良い対応をみせている。すなわち、初期領域では上昇する気泡群により周囲水が連行され激しく乱れながら加速されるが、そのようにして発達された流れは中間領域に入って確立され、一定の乱れ強度を保って周囲水を連行しながら周囲へ拡散し、水面付近に達すると、自由表面との相互干渉により再び流れは乱れ、その方向を鉛直方向から水平方向へ転じていくことが推察される。なお、中間領域における乱れ強度の値は、鉛直成分については軸上流速の0.5倍程度、水平成分は0.4倍程度であり、軸対称噴流のそれ⁸⁾と比べるとやや大きい。こうした定量的な比較検討はこれらの実験値のみからでは無理があり、測定精度の問題を含めて今後の課題であろう。

一方、乱れ強度の半径方向への分布は、Fig. 13 の例に示すように、中間領域に限ってみれば、流速分布と同様ガウス分布で近似されるようである。また、乱れ強度分布の半値半幅は流速分布のそれとはほぼ比例す

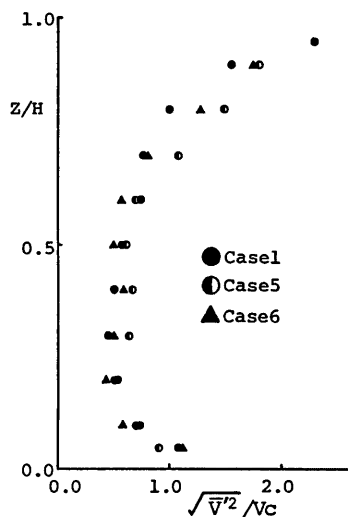


Fig. 12 Normalized turbulence intensities of vertical centerline velocities.

るが、その比例定数は、Fig. 14 に示すように空気供給量により異なり、空気量が少ないときには流速に関する値の方が大きく、空気量が多くなると両者の比は1に近づく傾向がある。これは、空気量が小さく気泡数が少ない場合には、個々の気泡の挙動の影響が相対的に大きいのに対し、空気量がある程度以上になるとそうした局所的な影響は互いに打ち消し合って最早関係なくなり、十分に発達したブルームの流れそのものと関連するようになるためと考えられる。

3. 数値解析

3.1 数学モデルと数値解析法

本章では、前章での検討結果に基いて空気泡ブルームの数値解析を実施した結果について述べ、考察を進める。2.3の(1)で確めたように、対象とするブルームの流れはほぼ軸対称とみなし得ることから、円筒座標系 (r, θ, z) において、 θ 方向の変化を無視したモデルの適用が可能である。従って、以下では、前述の室内実験ならびに Kobus の実験⁹⁾ における流れを対象に、著者らの開発した円筒2次元モデル²⁾ の適用を図ることとする。

(1) 数学モデル

上述のモデルは、気泡体積とその変化を考慮した上で、平均流、水位、水温(密度)、及び気泡密度の変化を取り扱ったものであり、その概要は次のようである。

いま、気液混相流の密度を ρ 、体積を V 、空気泡及び流体の密度、体積をそれぞれ ρ_a 、 V_a 、 ρ_w 、 V_w とする

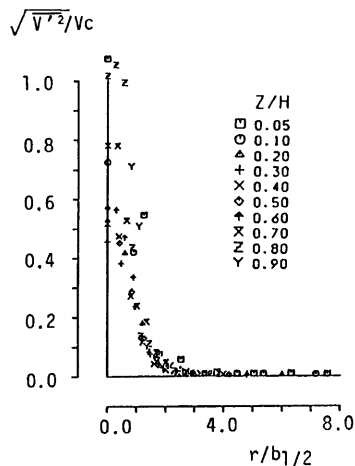


Fig. 13 Radial distributions of turbulence intensity of vertical velocity (CASE 1).

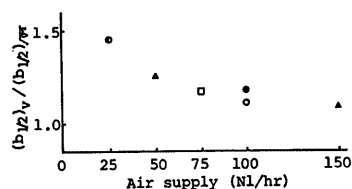


Fig. 14 The rates of nominal half-widths of vertical velocity and turbulence intensity under various air supply rates.

とき、

$$\rho V = \rho_a V_a + \rho_w V_w \dots\dots\dots(6)$$

$$V = V_a + V_w \dots\dots\dots(7)$$

の関係より

$$\rho = \rho_w (1 - V_a/V) + \rho_a V_a/V \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $V_a/V = S$ とし、

$$\rho_1 = \rho_w (1 - S) \dots\dots\dots(9)$$

$$\rho_2 = \rho_a \cdot S \dots\dots\dots(10)$$

において、気体の状態方程式に(10)式を代入し、近似的に等温変化を仮定すると、 ρ_2 はさらに

$$\rho_2 = S \cdot p \frac{M}{RT_a} = \text{const} \cdot \alpha \dots\dots\dots(11)$$

となる。ここに、 p ：圧力、 M ：空気の分子量、 R ：気体定数、 T_a ：空気泡の温度、 $\alpha = S \cdot p$ である。

この ρ_2 あるいは α を一種の拡散量とみなして取り扱うと、対象とする流れの基礎式が記述される。すなわち、

(a) 連続式：

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_1 u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 v) = 0 \dots\dots\dots(12)$$

(b) 運動方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_1 u^2 r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 u v) \\ &= - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\epsilon_{rr} \frac{\partial \rho_1 u}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{rz} \frac{\partial \rho_1 u}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_1 v u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 v^2) \\ &= - \rho_1 g - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\epsilon_{rz} \frac{\partial \rho_1 v}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{zz} \frac{\partial \rho_1 v}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

(c) 水温収支式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_1 T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_1 T u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1 T v) \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\epsilon_{Tr} \frac{\partial \rho_1 T}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{Tz} \frac{\partial \rho_1 T}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

(d) 気泡密度に関する収支式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha u r) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha v + \alpha v_a) \\ &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\epsilon_{ar} \frac{\partial \alpha}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{az} \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) + \alpha_i \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

ここに、 r ：中心軸からの水平距離、 z ：鉛直方向距離、 u, v ： r 方向及び z 方向の流速成分、 v_a ：気泡のスリップ速度、 $\epsilon_{rr}, \epsilon_{rz}, \epsilon_{zz}$ ： r 方向及び z 方向の渦動粘性係数、 $\epsilon_{Tr}, \epsilon_{Tz}$ ： r, z 方向の温度拡散係数、 $\epsilon_{ar}, \epsilon_{az}$ ： r, z 方向の気泡密度拡散係数、 α_i ： $\alpha_i = (RT_a/M)p_{2i}$ で p_{2i} は単位体積、単位時間当りの発生空気密度である。なお、上式における水理諸量はすべて平均流に関するものである。

(2) 数値計算法

従来の方法と同様に、対象水域を半径方向及び水深方向に分割したコントロール・ボリュームについて(12)～(16)式を積分し、空間的平均操作を行って各式を変形した後、さらに staggered scheme による up-wind difference 法を用いて explicit 型の階差式に変形し計算を進める。このとき、Hirt and Cook⁹⁾の方法を用いて、連続式の誤差が許容値以下に保たれるように修正反復計算を行っている。なお、これらの計算法の詳細については文献¹⁰⁾を参照されたい。

(3) 計算条件及び各種パラメータの取扱い

(a) 対象領域及び空間分割法

実験結果より得られた流れの空間的变化の特徴とそのスケールに基くと同時に、また一方で所要の実用計算精度を考慮し、次のように定めた。まず、対象領域は各実験水槽のスケールに合わせ、室内実験の場合は半径 1 m、水深 0.5 m、Kobus の実験に対しては半径 4 m、水深 4.7 m の円柱状領域を考えた。この領域分割にあたっては、水深方向は一定間隔 Δz で、半径方向には中心軸からの距離に応じて間隔 Δr を変化させる方法をとった。なお、それぞれの場合の Δr 、 Δz の値については後述する。

(b) 初期条件

流速の各成分及び気泡密度に関する α の値はすべて 0 とし、水温は各実験時の値を一様に与えた。

(c) 境界条件

気泡密度に関して気泡発生孔位置での発生及び水表面での消失を考える以外、すべての境界面で水、温度及び空気の出入りはないものとする。

(d) 気泡のスリップ速度

水中を上昇する気泡の挙動は極めて複雑であり、その水に対する相対速度すなわちスリップ速度を評価することは容易でない。いま、気泡を直径 d の球形と仮定し、静水中を等温状態で鉛直上方へ上昇する場合を考えれば、スリップ速度 v_a に関し次式が得られる。

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{2}{2\rho_a + \rho_w} \left\{ (\rho_w - \rho_a)g - \frac{3}{4} \frac{\rho_w C_D v_a^2}{d} \right\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

ここで、

$$d = \left(\frac{1}{\rho_2} \frac{6}{\pi} \frac{m_a}{28.9} RT \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\rho_2 = \rho_w g(H - z) \quad \dots\dots\dots (19)$$

であり、 C_D ：抵抗係数、 ρ_1 ：供給空気の圧力、 ρ_2 ：静水圧、 m_a ：気泡の質量である。 v_a はこれらの式を数値的に解くことにより求まるが、計算値は 2.2 で述べたように現実の値とは必ずしも一致せず、多少過大評価する傾向がある。しかしながら、その差はわずかであり、計算結果への影響は過去の経験より判断する限りほとんどないと考えて良い。

以下の解析では、実測値が得られている室内実験のケースについてはその値 25 cm/sec を用い、Kobus の実験におけるそれは実測値が不明であることから (17)～(19) 式より計算される値を用いることにした。

(e) 各種パラメータの取扱い

渦動粘性係数については、前章で述べた平均流の特徴に基き、従来よりこの種の流れにしばしば用いられてきた Prandtl の混合距離理論に基く仮定、さらには等方一様性の仮定を適用して

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{rr} = \varepsilon_{rz} = \varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\theta\theta} = K \cdot b_{1/2} \cdot v_c \quad (K: \text{比例定数}) \quad \dots\dots\dots (20)$$

とした。ここで、半値半幅 $b_{1/2}$ の値は、Fig. 7 に示された実験値の傾向に従って、 $z/H = 0 \sim 0.1$ 間是一定、 $z/H = 0.1 \sim 0.6$ までは距離 z に比例して増加、 $z/H = 0.6$ 以上では再び一定と仮定した。すなわち、次のように定めた。

$$\left. \begin{array}{ll} 0 \leq z/H < 0.1 & b_{1/2} = c_1 H \\ 0.1 \leq z/H \leq 0.6 & b_{1/2} = c_2 z + c_3 H \\ 0.6 < z/H \leq 1.0 & b_{1/2} = c_4 H \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 c_1, c_2, c_3, c_4 ：実験値より定められる定数、 H ：気泡発生孔の水深である。

(20) 及び (21) 式は、中心軸より $2.56 b_{1/2}$ ($= 3\sigma$, σ は流速分布の標準偏差) の範囲にあるブルーム域で適用されるものとし、これ以遠の域外では一様に $\varepsilon_v = 0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とした。

また、温度及び気泡密度に関する拡散係数については渦動粘性係数との相似性を仮定し、次のように定めた。

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{Tr} = \varepsilon_{Tz} = \varepsilon_\rho \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ar} = \varepsilon_{az} = \lambda \cdot \varepsilon_v \quad \dots\dots\dots (23)$$

ここに、(23)式の λ は、気泡分布幅と流速のそれとの比であり、2.2で述べた実験結果より $\lambda=0.15$ とした。

3.2 計算結果及び考察

(1) 室内実験ケースに対する結果

Table 1 に示した実験ケースのうち、空気供給量の異なる CASE 1, 5, 6, 気泡発生孔水深を変えた CASE 8 を対象に、上述の解析手法の適用性を検証した。

計算においては Δz を5 cm とし、 Δr は中心軸より20 cm までを2 cm、それ以遠は距離に比例して増加させた。計算時間間隔 Δt は、 Δz 及び Δr に対して数値解の安定条件を満足するように $\Delta t=0.005$ 秒とした。また、渦動粘性係数の値は(20)及び(21)式より与えられるが、実際の計算にあたっては空間平均量を取り扱うことになるため、 ε_v に代えて

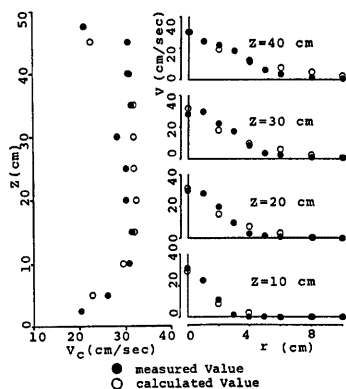


Fig. 15 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (CASE 1).

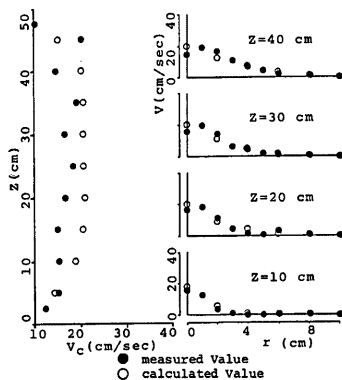


Fig. 16 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (CASE 5).

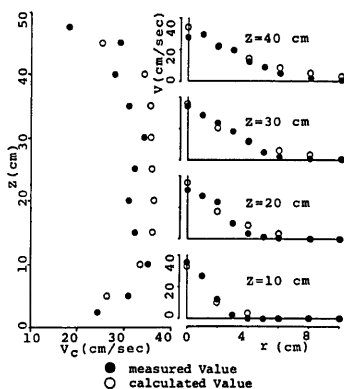


Fig. 17 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (CASE 6).

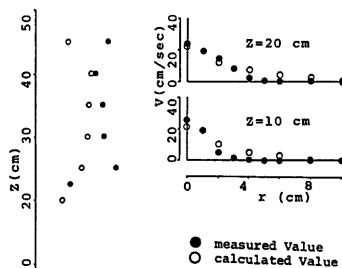


Fig. 18 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (CASE 8).

$$\bar{\varepsilon}_0 = \beta \cdot K' \cdot b_{1/2} \cdot \bar{v}_c = K' \cdot b_{1/2} \cdot \bar{v}_c \quad \dots\dots\dots (24)$$

で定義される $\bar{\varepsilon}_r$ を用いる。ここで、 β ：補正係数、 $K' = \beta \cdot K$ 、 $\bar{v}_c$ ：中心軸カラムでの鉛直流速成分の計算値である。したがって、温度及び気泡密度に関する拡散係数についても $\bar{\varepsilon}_r$ に対応する $\bar{\varepsilon}_r$ 、 $\bar{\varepsilon}_a$ を用いることにする。なお、 $b_{1/2}$ に関する(21)式の $c_1 \sim c_4$ については、各実験ケースより得られた値をそのまま用い、(24)式の K' には、あらかじめ調整された $K' = 0.16$ を与えた。

以上のようにして得られた結果を Fig. 15～18 に示す。各図の計算値は鉛直流速成分がほぼ定常に達したとみなされる時、すなわち計算開始時より20秒後のものであるが、全体的には概ね良好な再現結果が得られたと考えて良いであろう。しかしながら、軸上鉛直流速については CASE 1 の場合を除くと計算値の方が若干大きく、また半径方向への分布に関しては、プルームの外縁付近で計算値の方がやや大きな値を示しより広がった形状となっていることが問題点として挙げられる。これらは個々の気泡の挙動及びその流れとの相互関係の単純化、各種パラメータの設定に関する種々の仮定、さらには数値計算に伴うみかけの分散効果に起因するものと考えられるが、実測値の精度にも多少の疑問がないわけではない。いずれにせよ、これらの問題点についてはさらに検討を進めなければならないが、各種パラメータの値を適当に与えれば、著者らのモデルにより実際現象を精度良く再現し得ることが確かめられたと言えよう。

(2) Kobus の実験ケースに対する結果

次に、Kobus が行ったスケールの異なる場での実験を対象に、主として前述の室内実験結果に基く各種パラメータの取扱いの妥当性について検討した。対象とした流

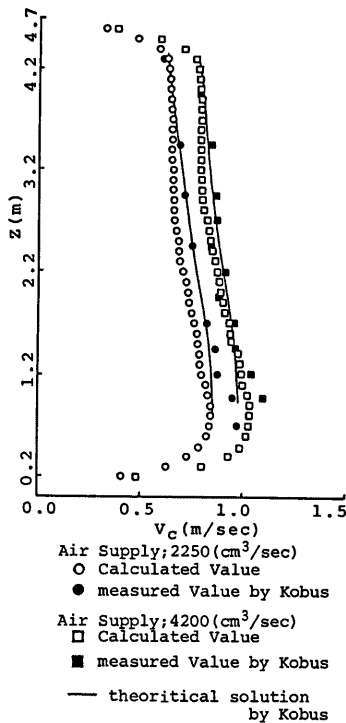


Fig. 19 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (Kobus's experiment).

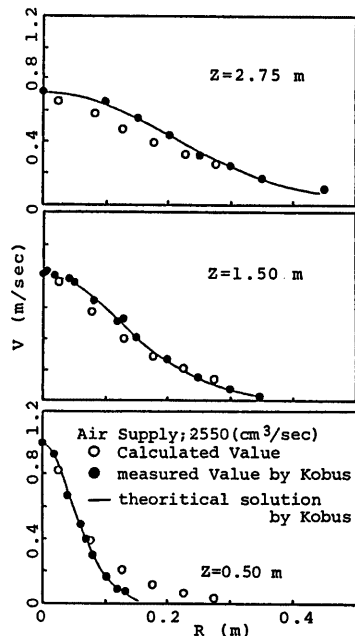


Fig. 20 Comparison of simulated velocity profiles to measured ones (Kobus's experiment).

れは、水深 4.7 m, 幅 8 m, 長さ 280 m の水槽を用いて水底より 0.2 m の高さに設置した直径 0.2 mm の単孔より気泡を発生させたときのものであり、計算は空気供給量が 2550 cm³/s 及び 4200 cm³/s の 2 ケースについて行った。空間分割間隔は、計算機容量及び所要計算時間の制約をも考慮し、 Δz を 10 cm, Δr を中心軸より 0.5 m までは 5 cm, それ以遠は距離に応じて長くした。また、時間間隔 Δt は 0.01 秒とした。渦動粘性係数の値は、上述の計算と同様に、(21)式及び(24)式を用いて与えることとし、(21)式の $c_1 \sim c_4$ の値を Fig. 7 に示された平均的な関係より $c_1=0.02$, $c_2=0.08$, $c_3=0.012$, $c_4=0.06$ とした。なお、(24)式の K' については Δr , Δz の値を考慮し、 $K'=0.08$ とした。

Fig. 19 及び20に得られた計算結果を示す。Fig. 19 より計算値では $z=2.9$ m ($z/H=0.6$) 付近を境として軸上鉛直流速の低減傾向が変わるとともに、そこまでの値が実測値よりもやや小さく、一方その変化率はやや大きい傾向があることがわかる。また、Fig. 20 の分布例では $z=0.5$ m でのブルーム外縁部における不一致など、上述した計算値の傾向を反映した結果となっている。

こうした不一致の原因には種々のものが考えられるが、ここではその1つとしての各種パラメータ値の問題について検討を加えてみる。Fig. 19 及び20に示された計算結果より、ここで用いた渦動粘性係数の値は、 $z=2.9$ m ($z/H=0.6$) 付近より下方ではやや過大、上方ではやや過小であったことが考えられる。これには、後述するように(24)式の K' の値に関する問題も含まれるが、まず(21)式で与えられた半値半幅の値に限ってみると、実際に Kobus の実験で得られた値と比べ $z/H=0.6$ 以下で約15%程度大きく、また半値半幅値が距離 z に比例して増大する区間は、Kobus の実験値ではより上方にまで達していることが指摘される。すなわち、著者の実験より得られた(21)式の領域区分ならびに $c_1 \sim c_4$ の値は、流れの場のスケール及び空気供給量が大きく異なる Kobus の実験に対しては必ずしも適当でなかったと言えよう。次に、このパラメータ値に関するいま1つの問題点は、 Δz , Δr の値に関係する数値計算上のそれである。すなわち、数値分散効果と(24)式の K' あるいは β の評価であり、またそれらは、実際現象のスケールに対し Δr , Δz をどの程度にとれば良いかという問題にも関連している。

以上述べたように、空気泡ブルームの数値解析にあたってはまだいくつかの問題点が残されているが、Fig. 19 及び20においても計算値と実測値との差はわずかであり、実用上の精度からみれば、ここに述べた解析手法は各種パラメータの取扱いを含めて一応妥当であると考えて差し支えないであろう。

4. 結 語

本研究では、エアレーションにより生ずる空気泡ブルームの基礎特性を室内実験により調べ、個々の気泡及び気泡群としての挙動、ブルーム内の流速分布、特性量としての軸上鉛直流速、ブルームの半値半幅、連行係数、さらには乱れの強さについての定性的特徴を明らかにするとともに、定量的にもいくつかの有用な知見を得た。また、それらの実験結果に基づいて円筒2次元モデルによる数値解析を実施した結果、モデルの適用性ならびに渦動粘性係数など各種パラメータの取扱いに関する一応の妥当性が確かめられた。

しかしながら、空気供給量、曝気水深、さらには流れの場のスケールとブルーム特性との関係の解明、数値計算上の分散効果の評価、乱れ特性の定量的把握など、なおいくつかの課題が残されており、今後さらにこれらの課題についての検討と、それに基づく数値解析法の改良を図り、現地スケールでの実際現象の解明を進めていきたい。

最後に、本研究の実験に関して適切な助言を頂いた京都大学工学部の綾史郎助手と、実験、計算ならびに作図等に多大のご協力を頂いた同大学院生、木村玄氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗・松尾直規・尾沢卓思・南部茂義：エアレーションにより生ずる流れの数値解析，京大防災研年報，第27号 B-2，1984，pp. 393-408.

- 2) 松尾直規・岩佐義朗・木村 玄：気泡の体積変化を考慮した空気泡プルームの数値解析，第40回土木学会年次学術講演会講演概要集第2部，1985，pp. 203-204.
- 3) 松本順一郎・中村玄正：単一孔から発生する気泡の性状と分布特性について；土木学会論文報告集第260号，1977，pp. 75-87.
- 4) Kobus, E. H.: Analysis of the Flow Induced by Air Bubble Systems, Proc. 11th Conf. on Coastal Engineering, 1968, pp. 1016-1031.
- 5) 建設省木津川上流工事事務所：木津川上流水質汚濁調査業務報告書，1983.
- 6) Rouse, H., C. S. Yih and H. W. Humphreys: Gravitational Convection from a Boundary Source, Tellus, Vol. 4, 1952, pp. 201-210.
- 7) Cederwall, K. and J. D. Ditmars: Analysis for Air-bubble Plumes, C. I. T. Report, KH-R-24, 1970.
- 8) Wygnanski, I. and H. Fiedler: Some Measurements in the Self-preserving Jet, Jour. Fluid Mech., 38, 1969, pp. 577-612.
- 9) Hirt, C. W. and J. L. Cook: Calculating Three-dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain, Jour. Computation Physics, Vol. 10, 1972, pp. 324-340.
- 10) 太鼓地敏夫：気液混相流の水理に関する数値解析，京都大学修士論文，1984.