

放水ピット内における気泡混入と流況に関する 実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY OF AIR ENTRAINMENT AND FLOW IN OUTLET PIT

落合 実¹・遠藤茂勝²・和田 明²
Minoru OCHIAI, Shigekatsu ENDO and Akira WADA

¹正会員 工修 日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²正会員 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

The characteristics of the circulation flow were investigated for the water flow with the air entrainment slightly from the free water surface in a three-dimensional rectangular outlet pit. At first, the air entrainment pattern was classified into two types by the visual observations.

Measurement of the flow velocity distribution in the pit revealed that the dominant types of flow include circulating flow and vertical eddies. And relation of the three-dimensional steady flow field and the primary factor of the air entrainment were clarified. The primary factor of air entrainment made clear that it was the velocity of the radiated surface flow from the end wall, the flow velocity along the side wall and the instantaneous velocity of downward flow at water surface in outlet pit. Turbulent flow velocities in the three-dimensional flow field near the water surface were also investigated. It was concluded from these results that air entrainment is caused by interference between the steady circulating flow and instantaneous velocity variations near the water surface.

Key words : Outlet pit, air entrainments, circulation flow, high Reynolds Number flow,

1. はじめに

火力や水力発電所などの冷却水の放水設備には管路あるいは開水路と管路を組み合わせた水路系に維持管理用立坑（ピット）が設置されている。それら水路系の自由水面では空気が巻き込まれて泡が発生する場合がある。この泡が発生し、そのまま外海に放出されると景観上問題視されることがあるため、放水路系では泡が発生しない構造形式を設計する必要がある。

放水路系における泡は、その開水路部における滝落としや堰上げあるいは跳水箇所では気泡を巻き込むことで発生するとして、実験的に消泡対策が検討されてきた¹⁾²⁾³⁾。一方、放水ピットは放水路系の保守点検あるいは複数の水路系を一系統に集約するための設備として設けられるが放水流量の変動や外海水位の変化の影響を受けて、ピット内で複雑な水面動揺が生じ、水面から気泡が巻き込まれて泡が発生する場合もある⁴⁾⁵⁾。このような泡に関しては消泡対策が中心であり、泡の発生源である気泡混入の水理学的研究例は少ない。

本研究では放水ピットにおける気泡の巻き込み現象と

流れ場の流況を実験的に検討するものである。そこで、まず自由水面における気泡巻き込みの発生限界と発生形態を検討する。次にわずかに気泡巻き込みが発生する場合のピット内の循環流れと気泡が巻き込まれる水面近傍の流れ、そして混入した気泡の挙動を検討する。本研究で得られる結果は今後構築する数値解析モデルの検証データと位置付けている。

2. 気泡の巻き込み限界実験

(1) 実験装置および方法

実験に用いた実験設備の概略を図-1に示す。試験水槽に安定した流量を供給するためにヘッドタンク方式（ヘッド差約10m）とし、整流水槽（長さ;1.1m, 幅;0.8m, 高さ;0.5m, アクリル製）を経由して試験水槽（長さ;0.5m, 幅;0.6m, 高さ;0.5m, アクリル製）に供給する。試験水槽における放水ピット形状は図-2に示すように矩形水槽の床面に水平流入および流出口を配置し、水平壁噴流として流入させる単純モデルであり、実験結果の汎用性を考慮している。試験水槽は実機の約1/25を想定して幾何

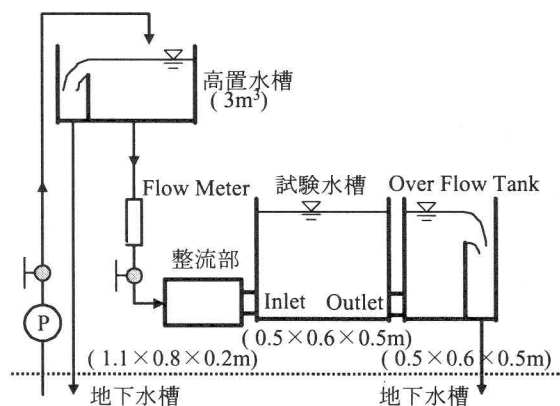


図-1 実験設備概略図

学的寸法を定めている。試験水槽の下流には試験水槽内の水位を調整するために可動越流ゲートを取り付けた水位調整水槽を設けている。実験水は地下水槽（約100m³）に貯留した水道水を用いる。

本文での座標は、水槽流入口における中央床面を原点として流下方向: X 、幅方向: Y 、鉛直上向き: Z である。それら X, Y, Z 方向の平均流速を U, V, W 、それらの乱れ量を u', v', w' としている。

水面から気泡が巻き込まれるか否かの測定は、表-1に示す条件で流入した流れ場において、水槽両側からの5分間の目視観測で行う。目視では水面の状態、巻き込み位置、巻き込み気泡数を観測する。なお、本論文では1つ以上の気泡の巻き込みが観測された場合を「気泡巻き込み発生」と定義する。

表-1 実験条件（気泡巻き込み観測）

流入レイノルズ数: Rei	約8000～30000
流入流量: Q (l/min)	300～1100
水深: h (m)	0.15～0.45

ここで、 $Rei = UoBi/v$ 、 Uo : 流入口平均流速、 v : 水の動粘性係数、 h : 座標原点における平均水深である。

(2) 気泡混入限界マップと混入形態

気泡が巻き込まれるか否かを示した気泡混入限界マップが図-3である。図は流入レイノルズ数 Rei と相対水深 h/Bi の関係で表し、同時に巻き込み気泡数も示している。図のように水深が小さく、流入レイノルズ数が大きいほど気泡の巻き込みが多く発生する。この巻き込みの発生形態は目視観測から、相対水深が約 $h/Bi=6.25$ 以下の場合には下流端に衝突した噴流の上向き流れが水面を大きく動揺させ、その波が干渉して波峰が崩れ、気泡が巻き込まれる。そして混入した気泡のほとんどが放出口から試験水槽外に放出する現象が多く確認された。一方、水深が約 $h/Bi=6.25$ より大きい場合には、水深が小さい場合よりも波立ちが小さく、よどみ域が流入口近くで確認された。よどみ域との境で水面勾配が大きくなって巻き

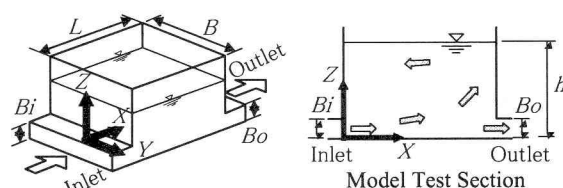
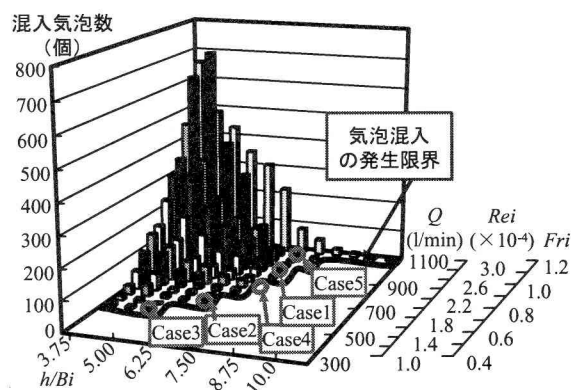


図-2 座標系



* 実験水槽両側より5分間目視観測

図-3 気泡混入限界および混入気泡数マップ
(実験水槽両側より5分間目視観測)

込まれる現象やよどみ域では、下降渦によって巻き込まれる現象が多く確認された。

気泡の巻き込み形態は水面の波立ちが碎けて気泡が取り込まれる場合やよどみ域との境界で潜り込む形式、そして水面で生じた回転が下降渦となって取り込まれる場合に大別される。それらの形態は同時に発生する場合と単独に生じる場合がある。

特徴的な水面動揺として水面が流下方向に一次のモードで振動するスロッシング現象^{6,7)}が確認された。このスロッシングは周期的に数秒間発生し、振幅が最大で約2 cm程度であった。スロッシングの発生要因およびスロッシングと気泡巻き込みとの関連については今後、検討する。

3. 気泡混入を伴うピット内の流況測定実験

(1) 実験方法および実験条件

放水ピットにおける泡の発生を水面からの気泡巻き込み発生と考えて、わずかに気泡巻き込みが発生する場合を検討対象とする。図-3の気泡巻き込み限界からその条件を選定する。気泡巻き込みは水深が大きいほど少ないが水路系の掘削工費が嵩むことからあまり高くできない。また水深が小さい場合には巻き込み気泡が試験水槽外に放出されること等を考慮して表-2に示す実験条件とする。

Case1は気泡がわずかに混入した条件であり、このCaseを基本とする。Case2および3はCase1よりも水深が小さく、わずかに気泡が巻き込まれる条件である。

Case4および5はCase1と同じ水深でそれぞれ気泡が巻

表-2 実験条件(流速測定)

	Re_i	Fri	h/Bi	混入気泡数(5分間)
Case 1	25000	1.00	7.50	7
Case 2	18000	0.72	6.25	5
Case 3	14000	0.55	5.00	2
Case 4	21000	0.83	7.50	0
Case 5	29000	1.16	7.50	35

き込まれない場合および多くの気泡巻き込みが生じる条件である。実験では放水ピット内の循環流れと気泡が巻き込まれる水面近傍の流れ、そして混入した気泡の挙動を測定する。

循環流れの計測は三次元電磁流速計（直径2cm）を用い、収録時間60s、収録データ数3000個である。水面近傍の流速および流入口流速は一次元ファイバーレーザ流速計（LDV）を用い、測定最大時間300s、収録データ数は1050個で測定する。そして気泡の挙動は厚さ約1cmのスリットストロボ光を水槽末端面から照射して気泡が混入した瞬間のX-Z平面をCCDカメラで撮影する。それらの画像を1/30sごとにレーザディスクに記録させ、その記録画像をデジタル化して気泡速度を測定する。

(2) 流入口近傍流速

図-4は流入口近傍の流況を把握するためにCase1における流下距離 $X/L=0.04$ 、幅方向 $Y/B=-0.4$ および $Y/B=0.4$ の鉛直流速分布を示したものである。図はLDVを用いて測定した流下方向、水平方向および鉛直方向の結果であり、

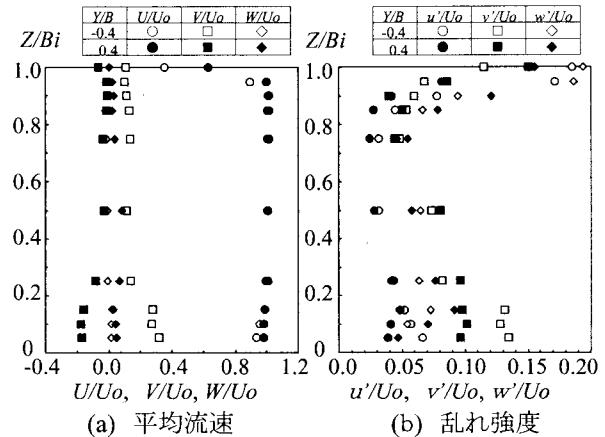


図-4 流入口流速分布 (Case1)

図-4(a)および4(b)は、それぞれ無次元平均流速(U/Uo , V/Uo , W/Uo)および乱れ強度(RMS; u'/Uo , v'/Uo , w'/Uo)である。平均流速結果において流下方向流速: U はほぼ $0.125 < Z/Bi < 0.875$ で一定値となり、約 $Z/Bi < 0.125$ では水槽床面抵抗の影響、そして約 $Z/Bi > 0.875$ では上部流体の連行や混合による流速低減が認められる。水平方向の平均流速; V は約 $Z/Bi > 0.18$ でほぼ様な値であり、それ以下の床面近傍で若干大きくなる。また V は $Y/B=-0.4$ で平均的に正、 $Y/B=0.4$ では負である。鉛直方向の平均流速 W は $0 < Z/Bi < 1.0$ の範囲でほとんどが上向きの小さい値が認められる。これらのことから流入口では水槽側壁近傍や底面付近の影響を受ける部分以外はほぼ様な分布となっている。図-4(b)において流下方向流速の乱れ強度; u' は水平方向や鉛直方向の乱れ強度よりも約1/2であり、ま

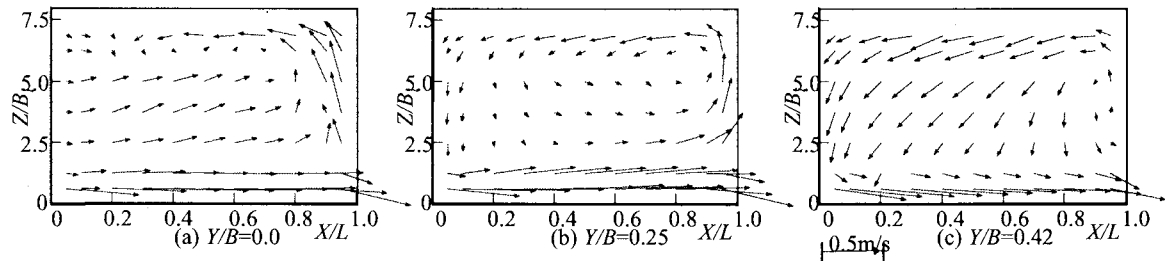


図-5 平均流速(X-Z平面, Case1)

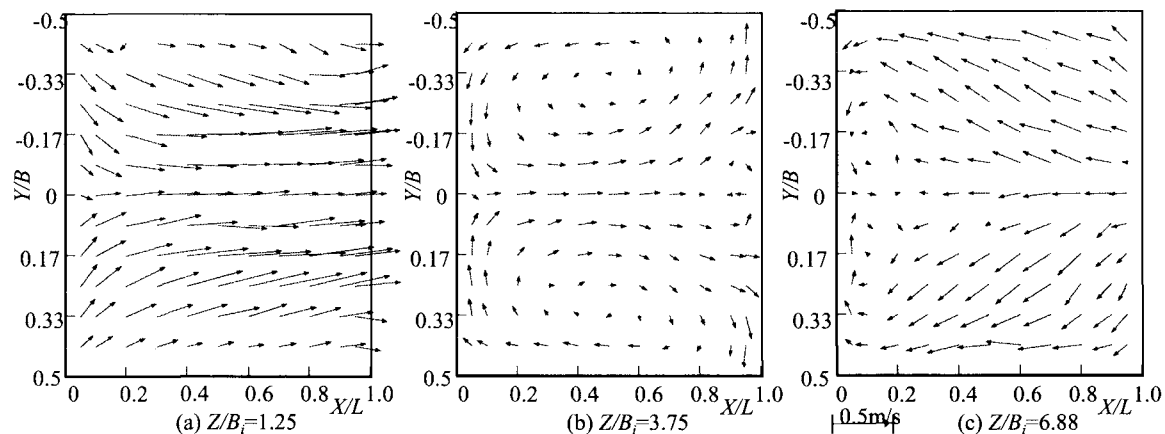


図-6 平均流速(X-Y平面, Case1)

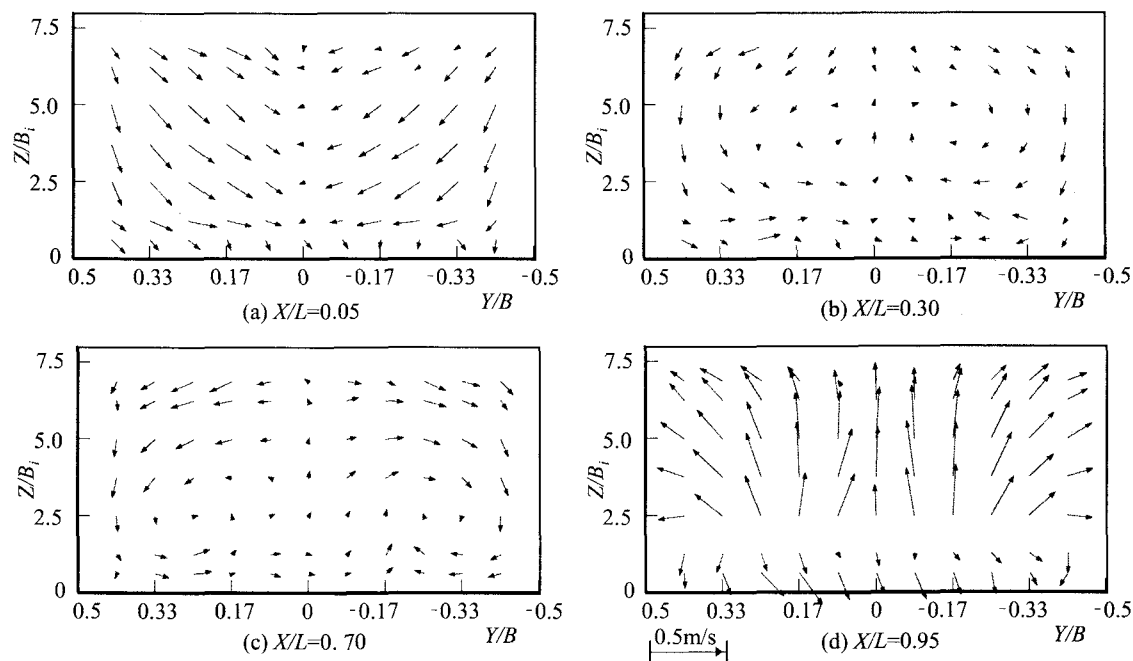


図-7 平均流速(Y-Z平面, Case1)

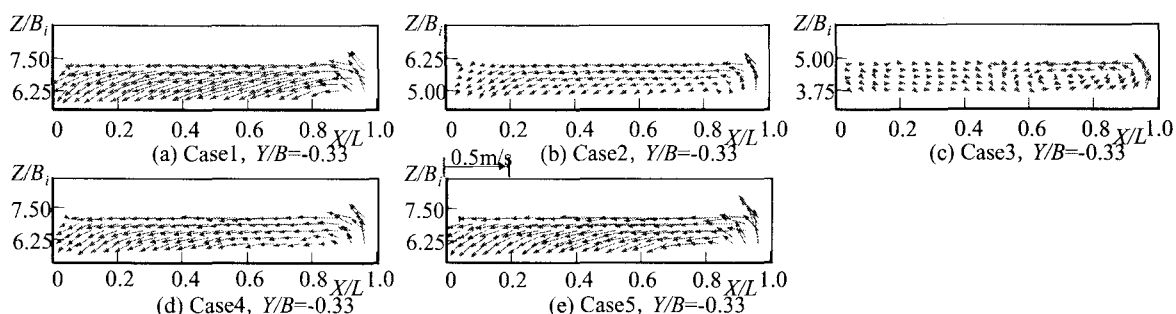


図-8 水面近傍平均流速(X-Z平面)

た水平方向と鉛直方向流速の乱れ強度がほぼ等しい。そして水槽床面近くの $Z/B_i < 0.18$ や上部の $Z/B_i > 0.85$ では乱れ強度が平均的に大きく、水槽床面や上部流体の影響と考えられる。

(3) 放水ピット内の循環流れ特性

放水ピット内の循環流れを平均流速ベクトルで表したものが図-5～7である。図はCase1における結果である。図-5はX-Z平面の一部を示したものであるがX-Z平面の流動パターンは水槽中央面 $Y/B=0$ に対して側壁方向に対称分布であった。図では水槽中央平面 $Y/B=0$ において、流入噴流が水槽末端壁に衝突し、その流れが水面で逆向き流れとなる。流入口近くの水面では流下方向の流れと衝突する様子も見られる。中央平面と側壁の間 $Y/B=0.25$ の平面では水槽末端壁近くの鉛直上向きの流速が中央面より小さくなり、水面全体は流下方向と逆向きの流れとなる。そして約 $X/L=0.8$ 、 $Z/B_i=6.0$ 付近を中心に反時計回りの循環流れが確認できる。より側壁に近い $Y/B=0.42$ の平面では水槽末端壁付近の上向き流速がより小さくなり、

逆に水面から流入口や床面に向かう下向きの流速が大きくなる。

図-6はX-Y平面の平均流速ベクトルである。水路床に近い平面では流入噴流に励起されて中央部に収斂する流れとなる。 $Z/B_i=3.75$ の平面では Y/B が正の領域で時計回り、 Y/B が負の領域で反時計回りの循環が認められる。水面近傍の平面では循環流れの中心が流入口近くに生じ、水槽末端中央から側壁へ放射状に流れ、側壁では流入口に向かう流速が大きい。

図-7はY-Z平面の平均流速ベクトルである。流入口に近い平面 $X/L=0.05$ では水面や側壁から水槽中央に向かう流れとなる。 $X/L=0.3$ の平面では水槽中央 $Y/B=0$ を境に Y/B が正の領域で反時計回り、 Y/B が負の領域で時計回りの循環流れとなる。 $X/L=0.7$ の平面では循環流れの中心が側壁底面付近に移動し、水面から側壁に向かう流速が大きい。そして水槽末端に近い $X/L=0.95$ の平面では末端壁面に衝突し、鉛直上向きの大きな流速が生じている。

これらのことから放水ピット内の流れは、以下のよう

面に沿って試験水槽から流出するが噴流外縁部は水槽末端壁に衝突して水面に達し、その流れが水槽側壁に向かう。側壁では流入方向と床面に向かう流れとなり、流入方向に向かった流れは流入口近くで水槽中央に集まり水槽末端壁に向かう循環流れとなる。そして床面に向かった下降流れは水槽中央に向かって流れ、流入噴流の外縁部と合流して水槽末端壁に向かう。

気泡巻き込みは約 $X/L=0.7\sim0.8$ 、 $Y/B=\pm0.25\sim0.4$ の範囲で発生を確認していることから、その領域の水槽末端壁中央部から側壁に向かう放射状の流れ、および側壁に沿う流れにおいて瞬間的に生じる下降流れが気泡巻き込みの主要因であることがわかった。

(4) 気泡巻き込みが生じる領域の水面近傍の流れ特性

図-8は気泡の巻き込みが認められた $Y/B=0.33$ 平面における水面近傍の平均流速ベクトルを X - Z 平面で示す。

水槽末端付近の鉛直上向きの流速は流入噴流の流速に比例して大きくなっている。流入方向に向かう流速がCase3を除く他のCaseで見られるが、Case3では水槽末端からの流れと流下方向の流れが干渉する流れや反時計回りの循環も認められる。これらの図の水面に近い地点（平均水面高さ h より1cm下）の流速のみを示したものが図-9である。図には流下方向および鉛直方向流速の平均流速と乱れ強度（RMS）を示す。各Caseで気泡が巻き込まれた位置はCase1が約 $X/L=0.7\sim0.8$ 、Case2,3では約 $X/L=0.45\sim0.55$ 、Case5は約 $X/L=0.65\sim0.95$ であった。

水深と流入レイノルズ数が異なるCase1,2,3を比較する。流下方向の流速分布ではCase1,2とも流入方向に向かう流れがほとんどであるがCase3では気泡巻き込みが観測された約 $X/L=0.5$ で流下方向の流れと干渉している。鉛直流速は全Caseが約 $X/L=0.9$ 以上で水面を上昇させている上向きの流速が示され、それ以下の X/L ではほぼ一様な負の小さい値となっており、Caseによる違いは認められない。Case1の乱れ強度 u'/U_0 は約 $X/L=0.3$ で若干大きい値を示し、約 $X/L=0.4$ 以上では小さい値となっている。Case2では約 $X/L=0.5$ 以上でCase1よりも平均的に大きい。Case3の u'/U_0 はCase1,2よりも約 $X/L=0.5\sim0.8$ の領域で大きくなっている。そしてCase3の乱れ強度 w'/U_0 は約 $X/L=0.4$ 以下で平均的に小さく、約 $X/L=0.4$ 以上で大きくなっている。

これらのことから、水深が小さいCase3では流入方向に向かう流速が大きく、その流れが流下方向の流れと干渉することによって気泡巻き込みが生じることが明らかとなった。そしてピット内ではこの水深より大きい水深を確保する必要があることがわかった。

(5) 混入気泡の挙動特性

図-10および11はそれぞれCase1およびCase5において、気泡が混入した瞬間から、1/30s間隔にその気泡を追跡して得られた気泡速度と気泡の流下方向位置の関係を示す。

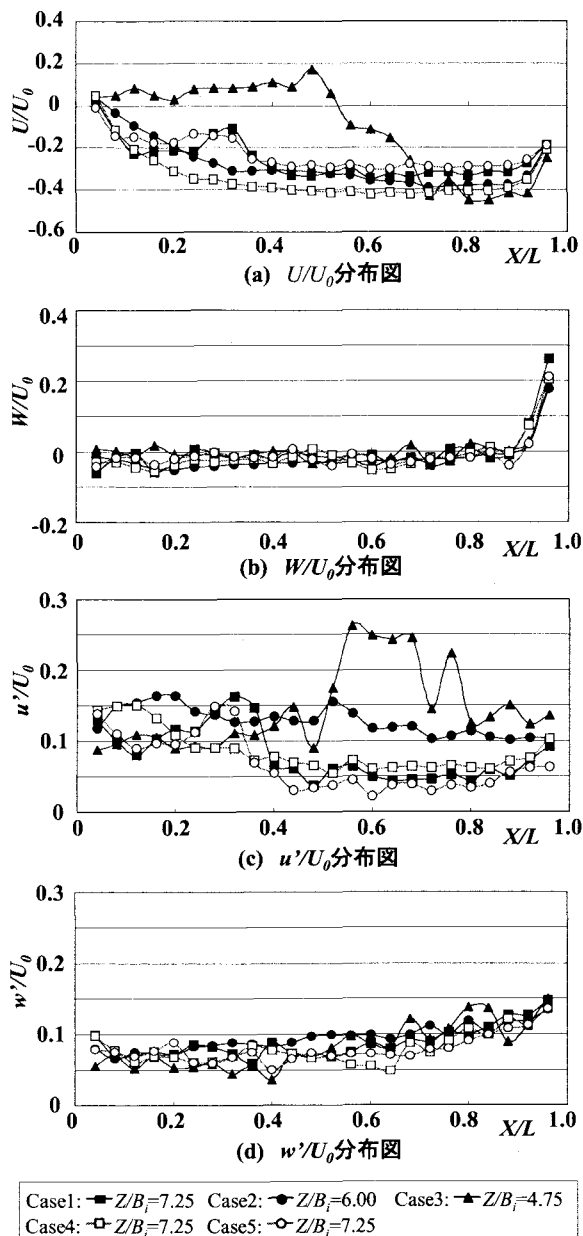


図-9 水面近傍流速 ($Y/B=0.33$)

図中の矢印は時間の経過方向を示す。図-10(a)では流下方向の気泡速度は混入した瞬間が最大約30cm/s程度であり、その後、気泡は巻き込み地点の流れとともに流下する。一方、鉛直方向の速度は混入直後が最大値となるがその後、水深が大きい流れ場であることから気泡の浮力によって水面に移動する。図-11では混入直後の気泡速度は流下方向が最大約35cm/s、鉛直方向が最大約30cm/sである。これらの値は気泡がわずかに巻き込まれたCase1の場合とほぼ同程度であった。また巻き込み後の気泡挙動はCase1と同様に流下方向には周囲流体の運動と共に移動し、鉛直方向に上昇して水面に達する。

4. まとめ

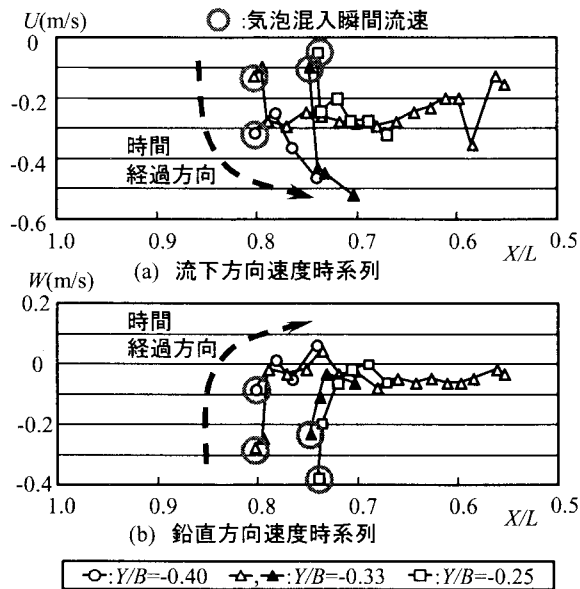


図-10 混入気泡の速度分布図 (Case1)

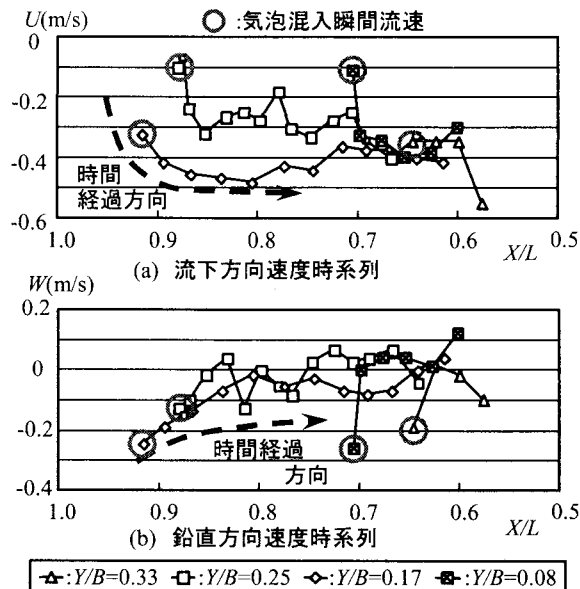


図-11 混入気泡の速度分布図 (Case5)

本研究では放水ピット内において泡の発生限界を水面から気泡が巻き込まれる限界として捉えて、気泡巻き込みがわずかに発生する場合の現象を対象とした。そして本論文では放水ピットを矩形水槽で模擬し、水面から気泡が巻き込まれる現象とその場合の流れ場の流況を実験的に検討した。以下に得られた知見をまとめる。

(1)自由水面における気泡巻き込みの発生限界と発生形態を検討した。その結果、流入レイノルズ数が大きく水深が小さいほど気泡巻き込みが多く発生し、水深が小さい場合には巻き込まれた気泡がピット外に放出されることが明らかとなった。また気泡の巻き込み形態は定性的に3つに分類できた。

(2)わずかに気泡巻き込みが発生する場合のピット内の循環流れと気泡が巻き込まれる水面近傍の流れを検討した。気泡の巻き込みは水槽末端中央部から側壁に向かう放射状の流れ、および側壁に沿う流れにおいて瞬間的に生じる下降流れが気泡巻き込みの主要因であることがわかった。

水深が $h/Bi=6.25$ 以下の場合には水面で流入口に向かう流速が大きく、その流れが流下方向の流れと干渉することによって気泡巻き込みが生じることを明らかにした。そしてこの場合には巻き込まれた気泡が水槽外に流出することから、ピット内の水深は $h/Bi=6.25$ より大きい水深を確保することが必要である。

(3)水深が大きい場合、水面から気泡が巻き込まれた瞬間の混入気泡の挙動を検討した。混入した瞬間の気泡速度は本実験の範囲において、流入レイノルズ数の違いによる差は少なかった。そして混入気泡は、流れ場の流れに乗って流下方向には移動するが鉛直方向は浮力の影響で水面まで到達する。

今後は気泡巻き込み現象の主要因である水面近傍の流動と水面動揺に関するより多くのデータを蓄積して、それらのスケール効果を検討し、水面近傍領域における現象の相似則を明らかにしたい。そして、本研究で得られたデータを今後構築する解析モデルの検証データとして活用し、構築した数値解析と模型実験を組み合わせ、実機放水ピットにおける泡の発生予測を行う予定である。

参考文献

- 1) 福原華一：復水器冷却水路系の発泡防止対策設計，電中研報告，No.U90021，1990。
- 2) 長谷川寛：敦賀発電所2号機放水口発泡対策工の水理的検討，電中研報告，No.U98044，1999。
- 3) 藤井直樹，窪 泰浩，大谷英夫，小原実香，福井史朗：曲がり水路の数値シミュレーション，土木学会第49回年次学術講演会概要集，pp.314-315，1994。
- 4) 大谷英夫，酒井雅史，石野和男，荒川茂樹，水向直人：放水路内の段波による立坑の水位変動現象と段波の抑止方法，水工学論文集，第42巻，pp.667-672，1998。
- 5) 元田啓一，竹下遠夫，山田雄二：放水ピットの発泡対策について，電力土木，No.254，pp.76-82，1994。
- 6) 深谷征史，班目春樹，岡本孝司：噴流による矩形容器内自励スロッシングの発生機構(第1報，垂直水平噴流による自励スロッシング)，日本機械学会論文集B,62-594，pp.541-548，1996。
- 7) 深谷征史，班目春樹，岡本孝司：噴流による矩形容器内自励スロッシングの発生機構(第2報，水平矩形噴流による複数モードスロッシング)，日本機械学会論文集B,62-599，pp.2604-2611，1996。

(2004. 9. 30 受付)