

放水ピット内における気泡巻き込みを伴う流動および水面変動特性について

日大生産工（院） 上村 和弘
日大生産工 落合 実、遠藤 茂勝
日本大学大学院総合科学研究科 和田 明

1.はじめに

火力・原子力発電所の温排水を放水する際、放水ピット内において気泡が発生し外海に流出する場合がある。景観に対する意識が高まっている近年では、気泡の流出は問題視されることがある。このような現象が生じないような構造にするためには、ピット内での水理現象を把握することが必要である。そこで本研究では気泡巻き込みが発生する限界条件における流動、水面変動特性について検討を行った。

具体的な内容としてまず、水流体を用いて単純化した矩形水槽内全体について気泡巻き込み状況の目視観測を行った。そこで、わずかに気泡巻き込みが発生した場合を発生限界条件とし、流速および水位測定を行った。また、K-乱流モデルを用いた数値計算による再現性を試みた。

2.実験方法および条件

Fig.1 は実験水槽概略図である。水槽はアクリル製となっており、ヘッドタンク式を用いて実験水を供給している。座標系は水槽床面の中央を原点とし、流下方向： X 、幅方向を： Y 、および鉛直方向を： Z とし、それぞれの瞬間流速を u 、 v および w とする。本研究ではあらかじめ流量と水深を変化させて気泡混入状況について目視観測を行った。その結果から実験条件を Table.1 のように選定した。本研究ではわずかに気泡が巻き込まれる場合を巻き込み発生限界と定義し、その条件である Case1 を基本条件とした。そこで平均水深の高い方が気泡流出が少なくなると考え、Case1 より平均水深が高い気泡巻き込み発生限界条件を Case2 として選定した。また Case1、2

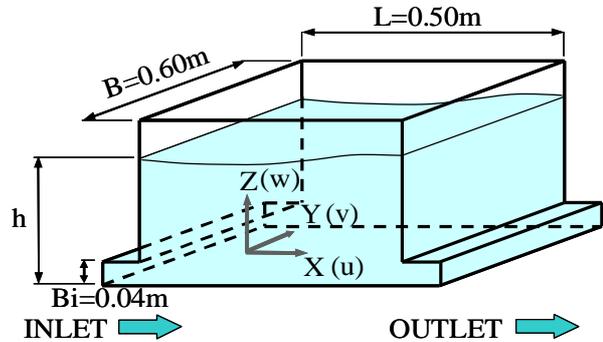


Fig.1 実験水槽外略図

Table.1 実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
平均水深 h (m)	0.25	0.30	0.25	0.30	0.30
流入流量 Q (l/min)	650	900	850	1050	750
流入流速 U (m/s)	0.451	0.625	0.590	0.729	0.521
流入口高さ B_i (m)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
気泡巻き込み	少ない	少ない	多い	多い	なし

と水深が等しく巻き込みがより多く発生する条件をそれぞれ Case3、4、全く混入しない条件を Case5 とした。

本実験では流速および水位測定を行ったが、流速測定では 3 次元電磁流速計を用いて水槽内全域を対象とし、壁面付近を 2.5cm、その他を 5cm 間隔で計測を行った。そして、水位測定は容量式水位計を用いて水面全域を 5cm 間隔で計測を行った。また流速測定では Case1 ~ 3 を、水位測定では全 Case を対象として実験を行った。

3. 数値解析手法および条件

本研究では 3 次元での放水ピット内の流れ場を対象とし、低レイノルズ数型 K-乱流モデルを用いて流速、水面形状の再現を試みた。

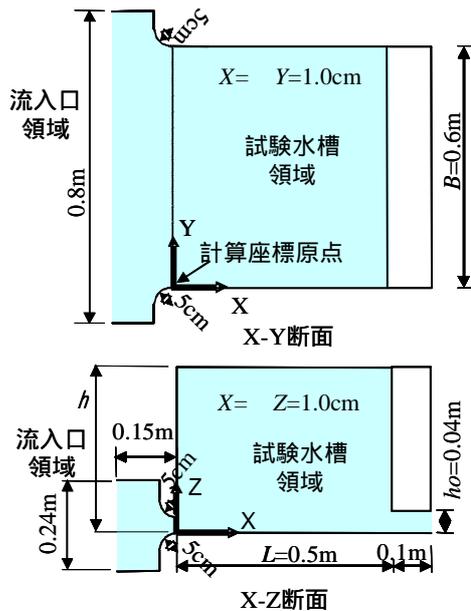


Fig. 2 計算領域および計算座標

解析手法としてまず、VOF 法を用いて水面形状の取り扱いを行うが、水面形は流体充填率および周囲セルの関係からセルを分類し、運動方程式で求めた流速値により流体を移動させ、結果として水面形状を算定する。計算は Fig.2 に示すよう

に実験における試験水槽と同じ領域形状を対象に行うが流入領域の流れを予め計算して、その結果を試験水槽領域の流入条件として流れ場を計算する。試験水槽における計算座標は、Fig.2 に示すように流入口、右側壁そして床面を原点として数値計算を行ったが、本報告では幅 W の床面右端中央を原点としている。計算は、スタaggerドメッシュとし X, Y, Z に対してそれぞれ $X = Y = Z = 1.0\text{cm}$ 、壁境界ではノンスリップ、流出境界では流量一定の自由流出とした。なお、実験条件の Case2 を対象とし、実験結果との比較、検討を行った。

4. ピット内循環流動特性

Fig.3~4 は流速測定実験から得られた各ケースにおける断面の平均流速ベクトル図の一部である。Fig.3 は X-Y 断面における水面近傍流速を示しているが、全てのケースにおいて流入流速とは逆向きで側壁に向かう流れで $Y/B = 0$ に対して対称の分布形になっている。 $X/L = 0 \sim 0.2$ におい

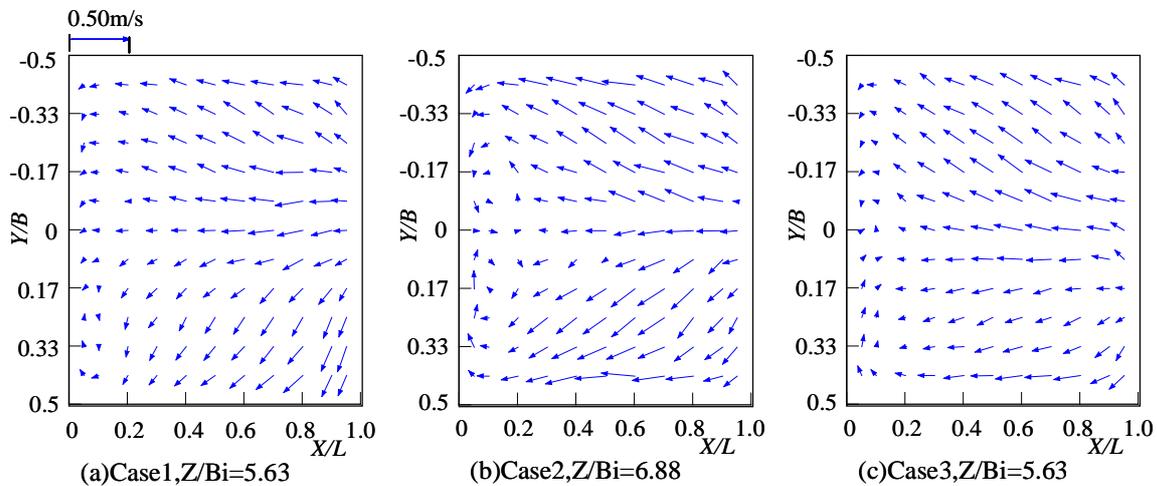


Fig.3 X-Y断面平均流速ベクトル図

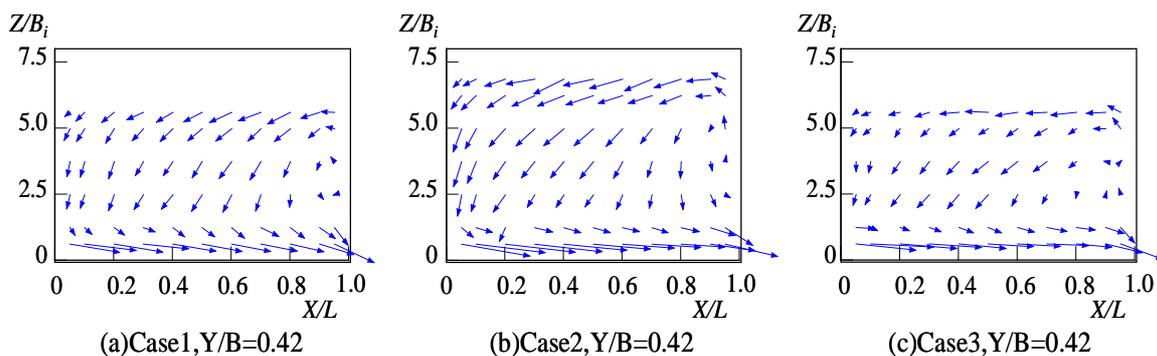


Fig.4 X-Z断面平均流速ベクトル図

て平均流速の方向が一様でない流れとなり、これは壁面に衝突した流れのよどみ域を現している。Fig.4はX-Z断面における壁面付近のベクトル図であるが全体的に鉛直下向き流れで、床面では流出口に向かう流れとなっている。これらのことから循環流動はケース毎に若干の流速値の違いが見られるものの気泡巻き込みが多い場合と限界時とでは顕著な違いは見られず、ほぼ同様の流速パターンとなっていることが認められた。

Fig.5はCase2のY/B=0.0における流下方向および鉛直方向の流速分布を示す。プロットは測定値を、実線は計算値である。流下方向の計算流速では水面付近で最大 $U/U_0=0.3$ 程度の実験値との差が認められ、鉛直方向流速においては流下方向

中央や流入口で若干、実験値との差が認められる。これらのような流速値の違いがあるが、測定値と同様な流速パターンを再現することが出来た。

5 ピット内水面変動特性

5.1 平均水面高さ

水面高さは容量式水位計を用いて最大 180 秒間計測を行った。Fig.6は、各測定点の平均水位： \bar{h} を平均水深： h で無次元化し、コンター表示したものであり、Case2の計算結果も同時に示している。Case1~4では気泡巻き込みが確認されている領域の $X/L=0.6\sim 0.8$ 、 $Y/B=0.33$ の領域で平均水位が他の領域より相対的に低くなっている。また、流出口付近では高くなることが認められ、特にCase3においては容量式水位計で計測でき

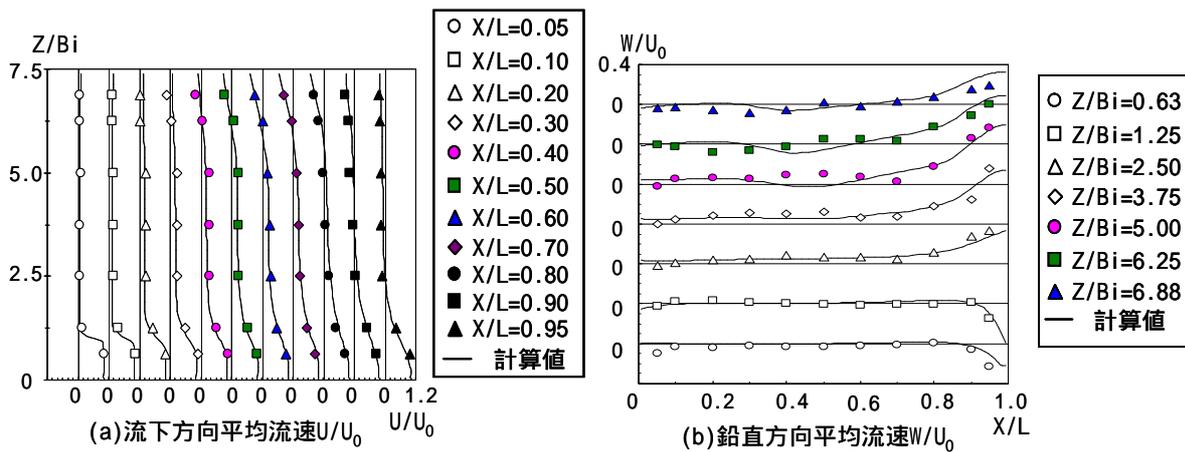


Fig.5 平均流速分布 (Case2 : Y/B=0.0)

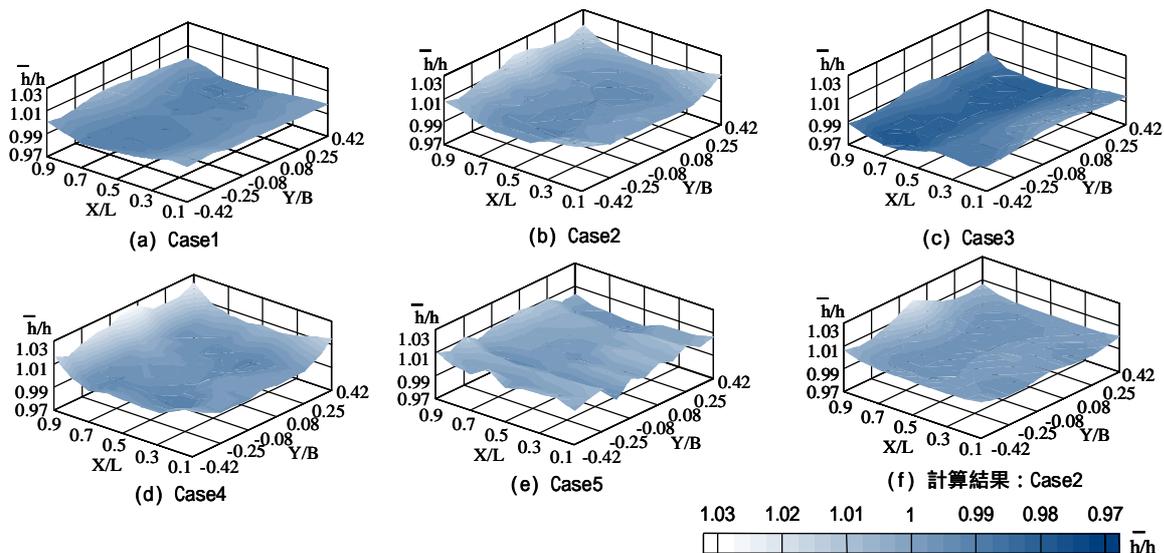


Fig.6 平均水面高さ

なかった $X/L=0.9 \sim 1.0$ で約 $\bar{h}/h=1.02 \sim 1.04$ 程度になることが目視で確認されている。しかし、気泡巻き込みが生じない Case5 においては他の Case と異なり、流入口と流出口の水位に比べて $X/L=0.6 \sim 0.8$ の範囲の水位は極端に低くなっている。このような結果から平均的な水面高さの差、つまり水面勾配が大きい場合に気泡混入が発生するものと考えられる。

また、Case2 の実験値と計算結果を比較してみると、計算値では全体的に水位が高くなっているが、流出口の中央や巻き込み領域など特徴的な水面形状をある程度再現することが出来た。

5.2 水面変動特性

次に得られた水位測定値の時系列を、波浪の波高表現と同様に統計的代表高さで表すこととする。すなわち、平均水深 h に対してゼロアップクロソ法によって波高値を求め、いわゆる波別解析法によって得られたその平均値を平均波高 H_{AVE} 、最大値を最大波高 H_{MAX} および 1/3 有義波高を $H_{1/3}$ とする。そこで、気泡巻き込み領域の水面変動を詳細に検討するために、気泡巻き込みが確認された $Y/B=0.33$ における各ケースの平均波高、最大波高および有義波高の流下距離方向の変化を Fig.7 に示す。

Fig.7(a)は、平均波高分布を示しているが、水深の大きい Case2,4,5 において値が平均的に大きくなっている。Fig.7(b)は最大波高分布を示しているが、気泡巻き込みが多く起こる Case2,4 では、気泡巻き込み領域である $X/L=0.6 \sim 0.8$ においての最大、最小値の差が大きい。また、Case4 ではその差が最大約 0.02 となった。

Fig.7(c)は有義波高を平均波高で除して表現しているが、この図において Case5 だけが平均的に他のケースよりも若干小さい値となっている。一般に風により発達する風波の波高出現確率はレイリー分布に近似されるが、そのときの $H_{1/3}/H_{AVE}$ は、約 1.6 である。そこで、Fig.7(c)を見ると気泡巻き込みの起こるケースでは平均的に約 1.6 近くになっている。これらのことから気泡巻き込み確認

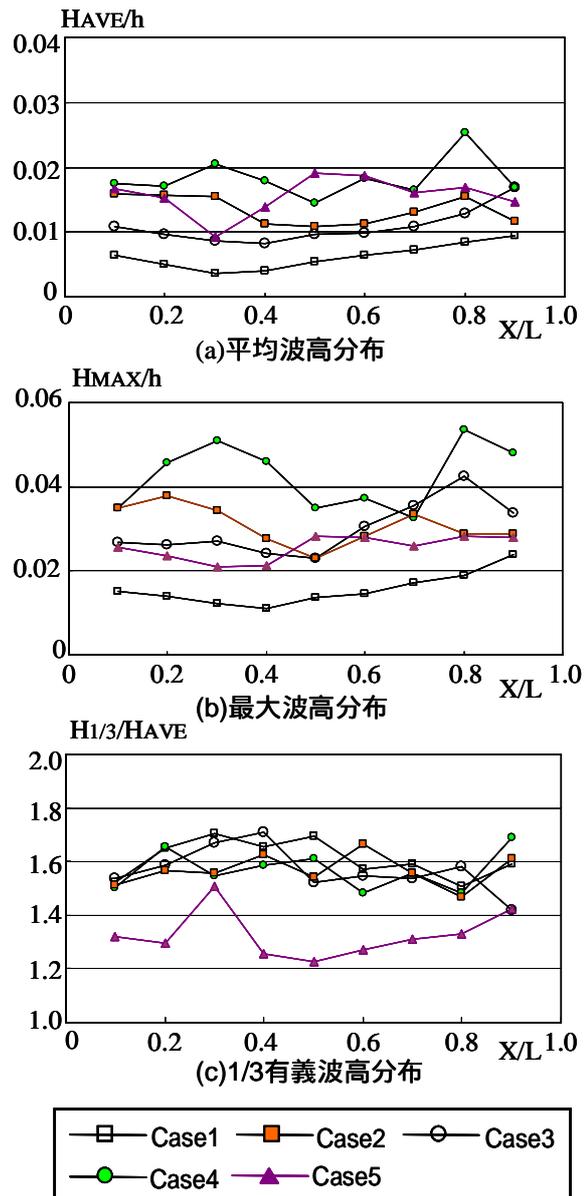


Fig.7 流下方向別波高分布図($Y/B=0.33$)
領域で $H_{1/3}/H_{AVE}$ が約 1.6 以上で巻き込みが発生し、波高出現確率がレイリー分布になる可能性があると考えられる。

6 おわりに

本研究では放水ピットを模擬した単純矩形水槽における気泡巻き込みについて 3 次元流動および水面変動特性を実験で明らかにし、水面近傍の流速分布と水面形状から数値解析手法の妥当性が確認することが出来た。

7 参考文献

- 1) 落合他：水工学論文集，第 49 巻 pp.835-840
- 2) 合田他：第 57、58 回土木学会年次講演会