

水中放水および表層放水混在場での温排水拡散挙動

Mixing Processes of Buoyant Jet Simultaneously Discharged
from Submerged pipes and Surface Outlets

坪野考樹¹・松梨史郎²・角湯正剛²

Takaki TSUBONO, Shiro MATSUNASHI, Masatake KADOYU

¹ 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部 (〒270 千葉県我孫子市我孫子1592)

² 正会員 工博 同上

This report is concerned with experimental investigation on the behavior of buoyant jets simultaneously discharged from neighboring two outlets, which are multiple submerged pipes and surface outlet. Three cases of a hydraulic experiments on buoyant jets discharged from only submerged outlets, only surface one and each ones are conducted respectively. Because the mixing of jets from neighboring submerged pipes and surface outlets are interacted each other, the diffusion behavior of these jets is different from one from only submerged pipes or surface outlet, especially the horizontal transverse spreading, the trajectory and the decreasing ratio of the temperature. These jets cross the current are also reported.

Key Words: Buoyant Surface Jet, Buoyant Submerged Jet, Hydraulic Experiment, Environmental Engineering

1. はじめに

表層放水方式、もしくは水中放水方式単独の放水形式から放水される温排水の拡散形態、挙動に関する密度噴流およびブルームの解析は、これまで多くの水理実験、数値計算を用いた解析および理論化などが行われてきており、^{1) 2) 3) 4)} 実海域に放水される温排水の拡散範囲の把握および影響低減化などに、その解析手法、結果が用いられてきた。

しかし近年の増設を伴う発電所では、温排水による環境影響低減化の立場から、既設表層放水方式の近接した位置に放水形式の違う放水口(水中放水方式)が採用されるケースが現われてきており、このような温排水の拡散範囲などについての環境影響評価をする必要性が生じてきた。

一般に表層から放水される密度噴流の上昇温度域は、表層に薄く、沖合方向に進むにつれて横断方向に大きく広がる水平分布になる。また、水中から放水された密度噴流は、鉛直方向に厚く、横断方向には小さく広がる水平分布になる。このような違った拡散形態を持つ密度噴流が近接して放出される場合の、温排水の拡散形態、挙動に関する研究、知見は、筆者らの知る限りほとんどない。

本研究は、表層放水と水中放水と異なった放水方式の放水口が近接する場合について、温排水の拡散形態および挙動を把握するために水理実験を行い、その結果について検討を行ったものである。

2. 実験装置および計測方法

使用した実験装置は図-1に示すような幅21m、長さ16m、高さ0.46mの水槽に、海岸地形および放水口を設置したものである。座標は図-1に示すように、水中放水と表層放水口の間を原点を、そして沖合方向を x 軸にとった右手系の座標としている。

表-1に放水条件を示す。これは、実スケール上の放水条件として(表層放水方式の条件:放水流量:80m³/s、放水流速:1m/s、放水口高さ:2m、放水口幅:40m、および水中放水方式の条件:放水流量:100m³/s、放水流速:4m/s、パイプ口径:2.523m)を想定した縮尺1/150の無歪み模型である。ここに、 $Fr = U/(\epsilon H)^{1/2}$:内部フルード数、 $Re = Uh/\nu = UD/\nu$:レイノルズ数、 $\epsilon = \delta\rho/\rho = 0.0015$:相対密度差、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$:動粘性係数である。

各放水口は図-1に示すように設置し、汀線と直角方向に放水を行なっている。[表層放水口位置

表-1 各放水口の放水条件

水中放水の放水条件							
放水流量 $Q1$ (l/s)	放水流速 $u1$ (cm/s)	パイプ口径 D (cm)	放水水深 d	パイプ数	パイプ間隔 L	内部フルード数 $Fr1$	レイノルズ数 $Re1$
0.363	32.65	1.682	$3D$	5	$3D$	18.	5491
表層放水の放水条件							
放水流量 $Q2$ (l/s)	放水流速 $u2$ (cm/s)	放水口高さ H (cm)	放水口幅 l (cm)			内部フルード数 $Fr2$	レイノルズ数 $Re2$
0.29	8.16	1.33	26.67			5.	1085

表-2 実験ケース

RUN	放水形式	場の流れ
1	水中放水	なし
2	表層放水	なし
3	水中、表層混在	なし
4	水中、表層混在	西流 -0.8cm/s
5	水中、表層混在	東流 0.8cm/s

(x, y)=(0.9m, 1.1m)、水中放水口位置 (x, y)=(0.225m, -1.3m)] 放水水温は、海域の条件 (環境水温 $T_e = 11.0^\circ\text{C}$ 、塩分 34.1) を考慮し、 $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ となる密度差になるように設定した。

水温分布の測定はサーミスタ型水温計を架台に 169 本設置し、水平方向および鉛直方向 (11 層) に逐次移動させて、データ収録装置に記録させた。水温測定は、重力噴流が十分に定常に達したと判断される 15 ~ 20 分後から測定を開始し、境界の影響を受けない時間 (40 分程度) まで測定した。水温値は 0.7 秒間隔で 25 回測定した平均値を採用している。

表-2 に実験ケースを示す。場の流れを考慮したケースである RUN4,5 は、実海域のスケールで汀線方向に $\pm 10\text{cm/s}$ で流れる場を想定して行なった。模型内の流れについては、水槽長手方向の両側に水深を一定に保つための多孔分散管を配置し、その間をポンプ管路系によって水を循環させることにより、模型内に流れを与えた³⁾。

3. 実験結果と考察

海域場に流れのない状態で、水中放水、表層放水がそれぞれ単独に放水された場合、および表層放水と水中放水が同時に放水された場合の温排水の拡散形態、挙動の比較検討を行った。

(1) 表層での水平分布および希釈効果

図-2,3,4 に、表層における上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布および汀線に平行な各横断面における上昇水温最大

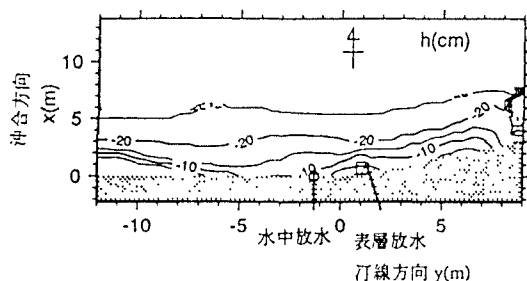


図-1 実験装置

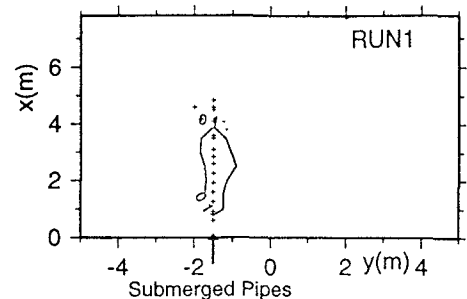


図-2 温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布:水深 0.5cm
RUN1:水中放水単独の場合

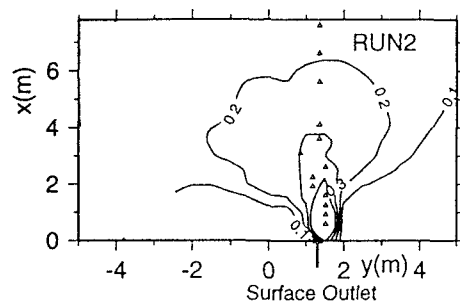


図-3 温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布:水深 0.5cm
RUN2:表層放水単独の場合

値の位置 (○等) を示す。ここに、 $\Delta T = T - T_e$: 上昇水温、 T_e : 環境水温、 T : 任意の点での水温、 T_0 : 放水水温、 $\Delta T_0 = T_0 - T_e$: 放水口での上昇水温である。

汀線に平行な横断面上の上昇水温最大値の位置を見ると、RUN1,2 では各放水口の前面に位置するのに対し、RUN3 では、 $x = 4\text{m}$ 程度まではほぼ表層放水口前面に位置し、それ以降、最大値の位置は沖合方向に進むにつれて、徐々に水中放水口側に移動し、約 $x = 5.5\text{m}$ の位置より水中放水口と表層放水口前面の中心の位置に位置することとなった。水中放水と表層放水が混在するケース RUN3 の水平分布をみると、 $\Delta T/\Delta T_0 = 0.1, 0.2$ のコンターは、両放水口に挟まれた領域で一定の幅を保ちながら沖合方向に伸びる傾向にある。特に表層放水口からの噴流の上昇水温は、表層単独放水 (RUN2) の放射状に広がるような水平分布とはならず、両放水口に挟まれた領域で沖合に伸びていく分布となった。表層放水口近傍での浮標による流速測定結果をみると、表層単独放水 (RUN2) では放水口を中心に放射状に広がる流れとなった。これに対し、同時放水された測定結果では、表層放

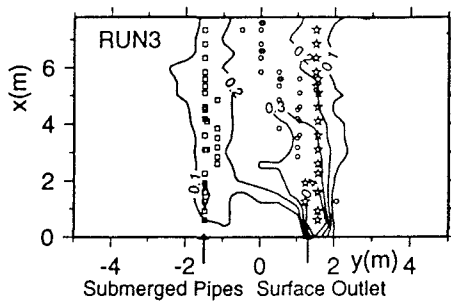


図-4 温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布:水深 0.5cm
RUN3:水中、表層放水混在の場合

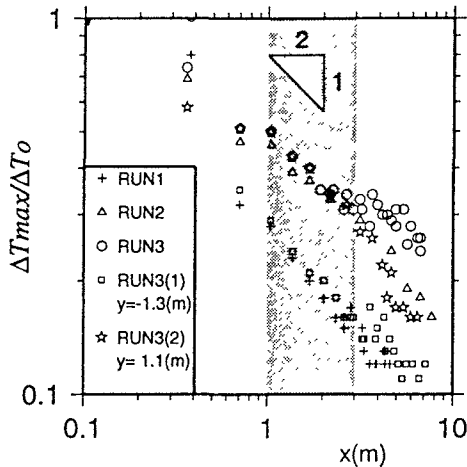


図-5 上昇水温の低減率

水口右側の領域に、表層放水口の右側の領域から水中放水口および表層放水口の挟まれた領域に向かう周囲水の流れが観測された。また両放水口に挟まれた領域では、水中放水口側にシフトしながら沖合方向に向かう表層放水口からの流れが観測された。この水中、表層同時放水の流速結果は、表層放水に比べて放水流速の大きい水中放水による周囲水の連行の影響が、表層放水口前面およびその右側まで及んだことを示唆している。この連行の影響により、表層放水起因の噴流による汀線方向右側への拡散が抑制され、上述した上昇水温の水平分布結果となったと考える。

このように水平分布では、各放水口から単独に放水された水温分布を用いて線形的な重ね合わせ、もしくは加重平均などで混在した場の水温分布を再現することは難しく、両放水口からの噴流の運動量が大きいと、流れ自体が各放水口のみから放水される分布とは異なり、まったく別の分布を示している。

図-5に図-2,3,4に示した記号の位置(○等)における最大上昇水温の低減率 $\Delta T_{max}/\Delta T_0$ を示す。RUN3については、各放水口の前面での希釈効果も併せて検討するため、水中放水口前面の縦断面($y = -1.3\text{m}$)の上昇水温最大値 RUN3(1)、表層放水口前面の縦断面($y = 1.1\text{m}$)の上昇水温最大値 RUN3(2)も図-5に併記している。図-5

のような噴流の低減率を示す場合、仮想原点を設定して原点を合わせるが、今回の水理実験では放水口近傍で測定点が少ないために合わせていない。また x についても、水中放水では口径 D で、表層放水では径深などで無次元化を行うが、今回のような混在する場では、無次元化するためのスケールについて、判断がつかなかったため、そのままの値を採用している。

水中放水および表層放水の上昇水温の低減は、放水口近傍 $x = 1\text{m}$ までは初期の混合希釈の様相が異なるため、低減率は違ったものになる。 $x = 1\text{m}$ 以降では水中放水の噴流は表層に浮上し、表層で拡散希釈するため、 $\Delta T_{max}/\Delta T_0$ の低減する勾配は表層放水で放水されたものと同じ、距離の $-1/2$ 乗程度となる。片野³⁾は、水中放水口から放水される水平重力噴流の水理実験を行っており、この噴流が表層に浮上し、十分発達すると、表層から放水される密度噴流と同じように無次元化された距離の $-1/2$ 乗程度の低減率となることを示している。距離について無次元化をおこなっていないが、本水理実験の水中放水口から放水される噴流の水温は、 $-1/2$ 乗の勾配で低減することとなった。

RUN3,3(1),3(2) の上昇水温の低減の結果をみると、RUN3(1)、RUN3(2) も $x = 4\text{m}$ 程度までは、RUN1,2 と同じ低減の割合となっており、網掛け部 ($x = 1 \sim 3\text{m}$ 程度) では、勾配も距離の $-1/2$ 乗程度の低減率となっている。これは、水中放水および表層放水が混在する場合であっても、沖合方向 $x = 1 \sim 3\text{m}$ 程度までは、放水口前面で水中放水、表層放水それぞれの拡散、希釈過程をとっていることを示している。しかし $x = 4\text{m}$ 以降では、RUN3(1)では希釈が悪く、RUN3(2)では希釈がよくなる傾向がある。また、RUN3をみると、 $x = 3\text{m}$ 程度までは上昇水温の最大値の位置が RUN3(2) とほぼ同じであるため、RUN3(2) と同じ低減率で希釈していくが、 $x = 4\text{m}$ で一度低減率が悪くなっている。これは今回の両放水口の距離では、両噴流の相互干渉がおり、周囲水の連行が抑制されたため希釈率が低減したと考えられる。その $x = 4\text{m}$ 以降は、各放水口の前面の低減率 (RUN3(1),3(2)) も RUN3 の低減率もまた網掛け位置の低減率と同じように約 $-1/2$ 乗という同じ勾配で低減しており、それ以前の RUN1 もしくは RUN2 と同じ拡散、希釈過程をしていると考えられる。

(2) 鉛直分布

図-6(1)に図-2,3に示す RUN1,2 の + line および Δ line の各断面での水温分布を、図-6(2)に図-6(1)で示した a-a' ~ e-e' 上での水温の鉛直分布を示す。各鉛直分布図-6(2)は上昇水温最大値で無次元化表示している。

水中放水口から放水された噴流は、 $x = 1\text{m}$ で水面に

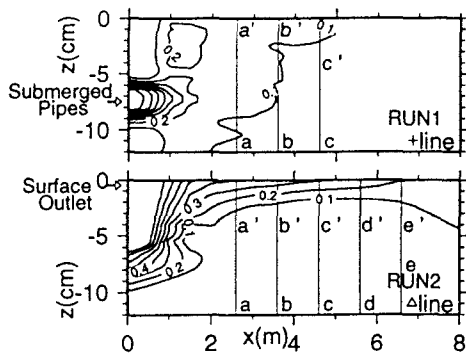


図-6(1) RUN1,2 の水温分布

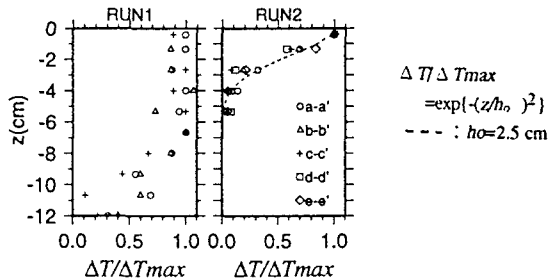


図-6(2) RUN1,2 の $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布

浮上する。表層放水口から放水された噴流は、放水口前面下部に高温領域が存在するが、 $x = 2.0\text{ m}$ 以降では、上昇水温高温部は表層に位置する。また、図-6(1) に示す RUN2 の a-a' ~ e-e' での上昇水温の鉛直分布は、各ラインではほぼ同じような分布となっており、下層で若干小さくなる傾向を示すが、2次元積分モデルで鉛直方向に分布を仮定するとき用いられる Gauss 曲線 $\Delta T/\Delta T_{max} = \exp(-\eta^2)$ をほぼ満足している。ここに、 $\eta = z/h_0$: 無次元化された水深、 h_0 : $\Delta T/\Delta T_{max} = 1/e$ の水深 (今回の点線は $h_0 = 2.5\text{ cm}$) である。

図-7(1) に図-4 の RUN3 の各放水口前面 (□と☆のライン上) の水温分布 RUN3(1),(2) を、図-7(2) に図-7(1) の a-a' ~ e-e' での図-6(2) と同様の無次元化表示を行なった鉛直分布を示す。図-7(2) の点線は図-6(2) で示した Gauss 曲線で、実線は $h_0 = 3.24\text{ cm}$ の Gauss 曲線である。

水中放水口から放水された噴流は、RUN1 と同じように $x = 1\text{ m}$ 程度で浮上する。表層放水から放水された噴流は、RUN2 と同じように表層付近で上昇水温高温部が表層に位置している。しかし、0.1 のコンターは RUN2 に比べて深い位置にあり、コンターの間隔は RUN2 に比べて大きくなる。そして図中の矢印に示した位置より沖合になると、0.1 のコンターは一時的に下方に移動し、それまでより温水層厚が大きくなった。この矢印の位置は、図-5 の一時的に希釈がよくなる位置とはほぼ一致しており、水中放水起因の噴流の影響により水深方向に深く混合し、表層での希釈がよくなったと推察される。

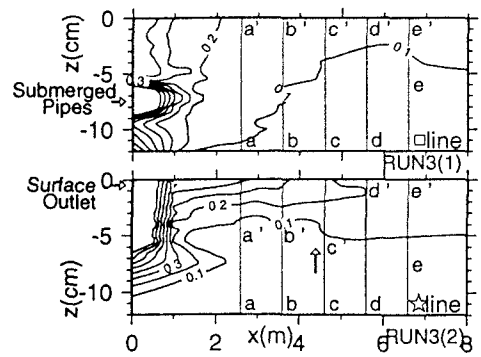


図-7(1) 各放水口前面の水温分布:RUN3(1),(2)

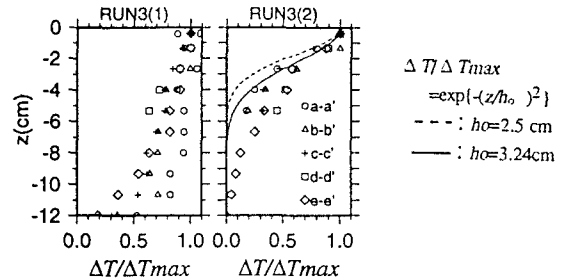


図-7(2) 各放水口前面の $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布:RUN3(1),(2)

a-a', b-b' の鉛直分布は、実線の Gauss 曲線をほぼ満足しており、表層放水単独である RUN2 に比べて、 h_0 が大きくなる。これは、水中放水および表層放水から放水される噴流の運動量が表層放水単独の噴流に比べて大きいことから、このようになったと考える。図-7(1) の RUN3(2) の矢印以降の c-c', d-d', e-e' ラインでの鉛直分布は、a-a', b-b' ラインと若干異なり、水深 $z = -3\text{ cm}$ 以下の $\Delta T/\Delta T_{max}$ は、実線で示した Gauss 曲線よりも大きな値となった。

図-8(1),(2) に、RUN3 の図-4,5 の oline 上の水温分布および鉛直分布を示す。上昇水温最大値の経路上でのコンター図は図-7(1) の RUN3(2) に近い形状となる。上昇水温最大のライン上では、水中および表層放水からの噴流が相互干渉して両放水口の間で希釈が悪くなり、図-5 に示すように上昇水温の低減率が一時的に悪くなる。この位置は図-8(1) の矢印の位置であり、相互干渉時に鉛直方向にも水中放水起因の噴流と表層放水起因の噴流が混合していることを示唆する。矢印位置以降の鉛直分布 c-c', d-d' を見ると b-b' の実線で示す分布から徐々に c-c', d-d' へ、太線の示す Gauss 曲線 ($h_0 = 5\text{ cm}$) の分布に、最下層から移り始めており、鉛直的に混合が進んでいることがわかる。

以上より、水中放水口および表層放水口から放水される噴流の相互干渉を考える場合、各放水口からの噴流の水平的な上昇水温の希釈率低下と鉛直方向の混合希釈の 3 次元的な現象を考慮する必要があると思われる。

(3) 場の流れを考慮した場合

図-9(1)に RUN4 の、表層 ($z = -0.5\text{cm}$) における水温上昇率の水平分布、図-9(2)に図-9(1)の x - x' , y - y' , z - z' 断面上の水温上昇率の分布および図-9(3)に図-9(2)の a - a' ~ d - d' の鉛直分布を示す。同様に図-10(1),(2),(3)に RUN5 の水平分布、鉛直分布を示す。

表層の水平分布図-9(1)を見ると、表層放水口から放水された噴流は、場の流れにより曲げられ、水中放水および表層放水からの噴流がほとんど相互干渉せずに、水中放水の浮上する海域のまわりを反時計回りに沖合で拡散しているように見える。流れにより曲げられた表層放水起因の噴流は、流れ無しの条件では水中放水および表層放水からの噴流が相互干渉する x - x' 上に到達しても、図-9(2)(3)に示すように上昇水温高温部のコンターは表層に位置し、 a - a' ~ d - d' は RUN2 と同じような分布形となり、鉛直方向にも相互干渉をしていない。

また、水中放水口前面 y - y' および下流側の z - z' 上の a - a' ~ d - d' の鉛直分布図をみると、汀線近傍位置である a - a' , b - b' では、下層まで水温上昇がみられる水中放水された噴流の鉛直分布形状であるのに対し、沖合での c - c' , d - d' では、表層近傍に水温上昇がみられる表層放水された噴流の鉛直分布形状である。このように、この領域では、 a - a' , b - b' と c - c' , d - d' で分布形が異なり、流れ無しの条件のような鉛直方向の混合が促進される領域が見られなかった。

表層の水平分布図-10(1)をみると、水中放水口の前面で流れに対してフロントが形成されており、表層放水口前面から下流側にかけて、汀線方向に広く拡散する水平分布となった。水中放水起因の噴流が場の流れの影響を受けて、表層放水口側に移動するため、 x - x' の各鉛直分布 a - a' ~ c - c' は、水中放水からの噴流による鉛直混合の影響を受けて混合している。 y - y' , z - z' の各鉛直分布 a - a' ~ d - d' も x - x' の各鉛直分布 a - a' ~ c - c' とほぼ同じ分布になり、 x - x' と同様の混合形態をしていると考えられる。

場の流れにたいして上流側に表層放水口がある場合、表層放水形式の流速が小さいことから、場の流れの影響は水中放水口前面まで影響し、水中放水口からの噴流は場の流れによって下流側に曲げられる。このようになると、表層放水の噴流が流れにより下流側に流されていくのに対し、環境水の連行量が大きい水中放水の噴流も同様に下流側に流されて、相互干渉が生じにくくなる。

逆に、場の流れにたいして上流側に水中放水口がある場合、水中放水形式の流速が大きいことから、水中放水口前面でフロントが形成されるなど、場の流れの影響は表層放水口前面海域では小さくなり、環境水の連行量が大きい水中放水による噴流が、表層放水による噴流に接近し、相互干渉が生じやすくなると考えられる。

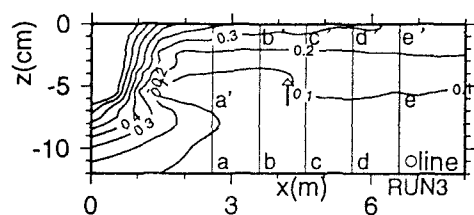


図-8(1) 上昇水温最大値経路上での水温分布:RUN3

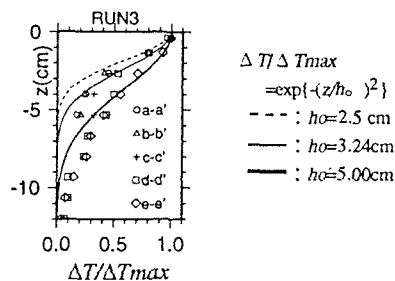


図-8(2) $\Delta T/\Delta T_{max}$ の鉛直分布:RUN3

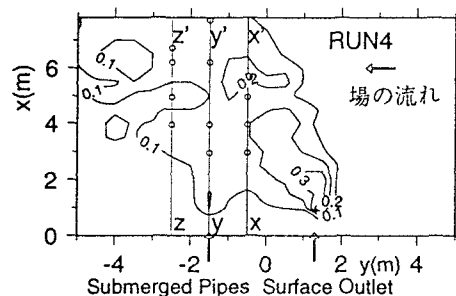


図-9(1) 表層での温度上昇率:RUN4

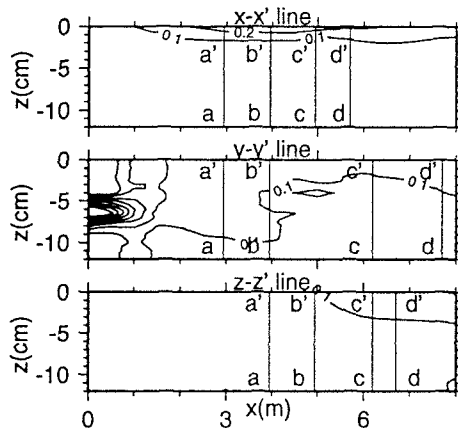


図-9(2) x - x' , y - y' , z - z' line 上での温度上昇率の分布:RUN4

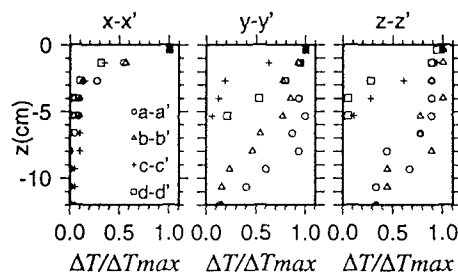


図-9(3) a - a' ~ e - e' line 上での鉛直分布:RUN4

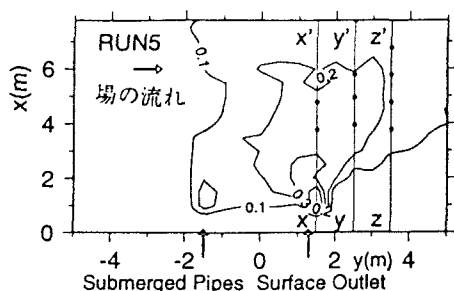


図-10(1) 表層での温度上昇率 (RUN5)

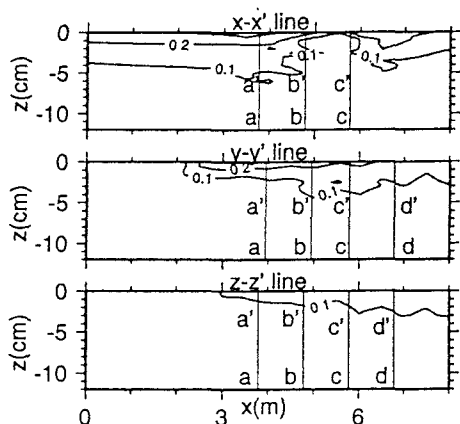


図-10(2) x-x',y-y',z-z'line 上での温度上昇率の分布 (RUN5)

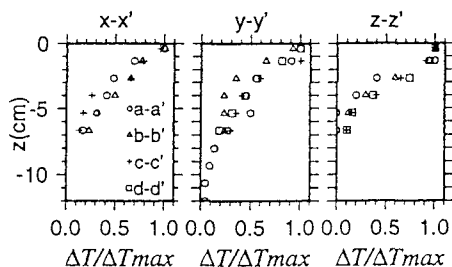


図-10(3) a-a'~d-d'line 上での鉛直分布分布 (RUN5)

このように、場に一方向流が卓越する海域で水中放水および表層放水口を設置する場合には、本実験のような放水条件では表層放水形式の放水口を場の流れに対して上流側に配置し、相互干渉を生じさせない配置とすることが望ましいと考える。

4. まとめ

水中、表層放水口から近接かつ同時に場に放水される温排水拡散実験を行ない、限られた実験条件の下ではあるが、以下のような結果を得た。

1. 水中、表層放水口から同時放水された密度噴流の表層での水温分布は、各々の放水口から単独放水される噴流と異なり、汀線方向に拡散せず、沖合方向に帯状に拡散する。上昇水温の最大値の位置は、初期段階にたいしては表層放水口の前面にあるが、沖合方向に進むにしたがって、各放水口前面の中心線上

に移動する。

2. 各放水口前面の上昇水温の低減率は、各放水口形式から単独に放水される噴流と同じ約 $1/2$ 乗の勾配で沖合方向に低減していくが、水中放水口の前面で希釈が悪くなり、および表層放水では逆によくなる位置が存在する。この位置より放水口に近い領域では、汀線に平行な横断面での最大水温の上昇水温の低減率は、表層放水と同じ希釈の割合を示すが、この位置前後で水中放水口および表層放水口からの噴流が干渉しあい、希釈が一時的に悪くなる。この位置以降沖合では、最大水温の上昇水温は $1/2$ 乗の勾配で低減する様子が示唆された。
3. 水中、表層放水口からの噴流が相互干渉し、上昇水温最大値の希釈が一時的に悪くなる位置以降での鉛直分布は、水中放水の噴流の影響により下層側から鉛直的な混合が促進され、それ以前の鉛直分布よりも水深方向に厚く混合する。
4. 表層放水口からの噴流が場の流れに対して上流側にある場合、表層放水および水中放水からの噴流の相互干渉が弱くなる。逆に水中放水口からの噴流が場の流れに対して上流側にある場合は、表層放水および水中放水からの噴流の相互干渉が強くなる。このように水中、表層放水口から同時放水された拡散形態は、汀線方向の流れの方向により異なり、場の流れに応じた両放水口の配置を考慮することが必要である。

今後は、現象が3次元的事実であることから3次元数値モデルを用いて、各放水口条件を変更した場合での水温上昇最大値の位置および希釈特性についての検討を行なう予定である。

謝辞:本水理実験を行なうにあたり、有益なご助言とご協力をして頂きました(株) CRSの曾我雅海氏には、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 室田 明、中辻 啓二、柴垣 雄一：沿岸域での表層放流水束におよぼす浮力効果について、第28回水理講演会論文集,pp113-119,1984
- 2) 小松 利光、古本 勝弘、椿 東一朗、細山田 得三：3次元表層成層せん断流の流れ特性、第31回水理講演会論文集,pp473-478,1987
- 3) 片野尚明：水中放流方式による温排水の混合希釈実験に関する研究、日本大学博士論文,1983
- 4) 仲敷 憲和、松梨 史郎、坂井 伸一、丸山 康樹：水平方向に放出された重力噴流の挙動について、水工学論文集第40巻,pp.537-542,1996

(1998.9.30 受付)