

表層・水中放水口から同時放水された温排水の拡散形態

坪野考樹*・松梨史郎**・平口博丸**

1. 緒 言

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）が採用されることがあり、このようなケースについての温排水拡散範囲について環境影響評価を行う必要性が生じてきた。

このような近接して表層・水中から同時放水された温排水について、水理実験を行った結果、上昇水温の水平分布では、各放水口から単独で放水される噴流と異なる分布となり、鉛直分布では、表層・水中放水口からの噴流が相互干渉する領域内で、各放水口形式単独で放水された上昇水温の鉛直分布(室田他, 1984；小松他, 1987；片野, 1983) およびこれらと異なる鉛直分布を示す地点がみられ、3 次元的に拡散している様子が示唆された(坪野他, 1999)。このような各放水口からの噴流が混在し、3 次元的な拡散現象をする本水理実験では、温排水の拡散形態を示す上昇水温およびその水平・鉛直分布を併せて解析を行うことが望ましい。そこで、鉛直分布を分類し、分類された鉛直分布の水平的な拡がりと上昇水温の水平分布を用いて解析を行った。本水理実験で扱った鉛直分布は 1000 点程度あり、分類を行うための鉛直分布について明確な指標が無いことから、自動的・客観的に分類を行うことが出来る、クラスター分析を用いた(宮本, 1999)。そして、この分類した鉛直分布および上昇水温を用いて、表層・水中から同時放水された温排水の拡散形態・挙動について検討を行った。

2. 実験装置及び計測方法

図一1 に示すような幅 21 m、長さ 16 m、高さ 0.46 m の水槽に、海岸地形および放水口を設置し、実験を行った。座標は図一1 に示すように、水中放水と表層放水口の中間に原点を、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。表一1 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：放水流量：80 m³/s、放水流速：1 m/s、放水口高さ：2 m、放水口幅：

表一1 各放水口の放水条件

水中放水の放水条件							
放水流量 Q_1 l/s	放水流速 u_1 cm/s	パイプ口径 D cm	放水水深 d cm	パイプ数	パイプ間隔 L cm	内部フルード数 F_{r1}	レイノルズ数 Re_1
0.363	32.65	1.68	3 D	5	3 D	18.	5491
表層放水の放水条件							
放水流量 Q_2 l/s	放水流速 u_2 cm/s	放水口高さ H cm	放水口幅 b cm			内部フルード数 F_{r2}	レイノルズ数 Re_2
0.29	8.16	1.33	26.67			5.	1085

40 m、水中放水：放水流量：100 m³/s、放水流速：4 m/s、パイプ口径：2.523 m）を想定した、縮尺 1/150 の無歪み模型である。ここに、 U ：放水流速 u_1, u_2, h ：パイプ口径 d 、放水口高さ $H, F_r = U/(\epsilon h)^{1/2}$ ：内部フルード数、 $Re = Uh/\nu$ ：レイノルズ数、 $\epsilon = \delta\rho/\rho = 0.0015$ ：相対密度差、 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2$ ：動粘性係数である。各放水口は図一1 に示すように設置し、汀線と直角方向に放水を行っている。[表層放水口位置 $(x, y) = (0.9 \text{ m}, 1.1 \text{ m})$ 、水中放水口位置 $(x, y) = (0.225 \text{ m}, -1.3 \text{ m})$] 放水水温は、海域の条件(環境水温 $Te = 11.0^\circ\text{C}$ 、塩分 34.1)を考慮し、 $\Delta T_0 = 7^\circ\text{C}$ となる密度差になるように設定した。

水温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 分後から開始し、境界の影響を受けない時間 (40 分程度) まで行った。水温値は 0.7 秒間隔で 25 回測定した平均値を採用した。

表一2 に実験ケースを示す。場の流れを考慮したケースである RUN 4, 5 は、実海域スケール±10 cm/s で汀線方向に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 (片野, 1983)。

3. 実験結果と考察

水理実験の鉛直分布について、クラスタ分析を行い、その結果と上昇水温の水平分布を併せて検討を行った。

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 環境科学部
 ** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学部

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-0.8 cm/s
5	水中, 表層混在	東流0.8 cm/s

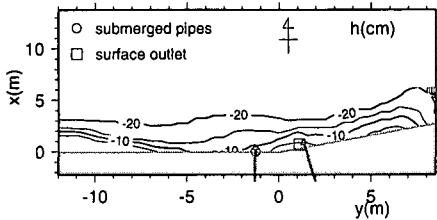


図-1 実験装置

海域場に流れのない状態の、RUN 1, 2, 3 の温排水の拡散形態, 挙動の比較検討を行い, ついで流れのある場合 (RUN 4, 5) の拡散形態について検討を行った。

(1) クラスタ分析

個体 X_k^i , k : 個体数, p : 要素数とし, 個体 $x^i, x^j \in X$ の類似度をユークリッド平方距離 $d_{ij} = \sum_{p=1}^p (x_p^i - x_p^j)^2$ で定義し, この類似度を用いて, クラスタを逐次結合する。具体的には, 以下の手順でおこなった(宮本, 1999)。

第一段階) n 個の個体を n 個のクラスターがあるとし, 各クラスター間のユークリッド距離を計算する。

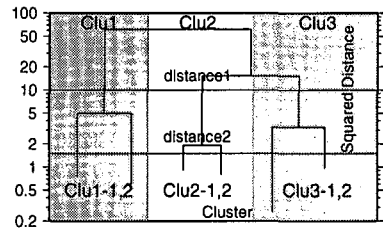
第二段階) ユークリッド距離のもっとも近いクラスターを併合して, 1 つのクラスターとする。そして, クラスタ a と b が併合されて, クラスタ c が作られたとすると, d_{ab}, d_{xa}, d_{xb} をクラスター a, b が併合される前のクラスター x との距離としたとき, 併合後のクラスター c との新しい距離は次の式で表される。

$$d_{xc} = \alpha_a d_{xa} + \alpha_b d_{xb} + \beta d_{ab}$$

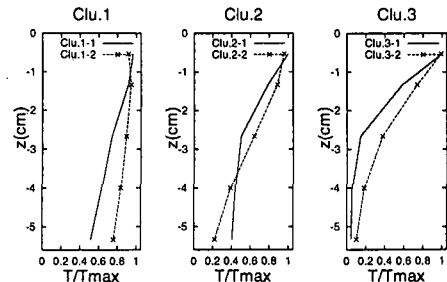
本クラスタ分析では, ウォード法を用いたため, 定数 $\alpha_a, \alpha_b, \beta$ はそれぞれ $(n_x + n_a)/(n_x + n_c)$, $(n_x + n_b)/(n_x + n_c)$, $-n_x/(n_x + n_c)$ とした。ここに $n_{a,b,c,x}$ はクラスター a, b, c, x に含まれる個対数である。

第三段階) 1 つのクラスターになれば終了し, 1 つのクラスターになるまで, 第二段階に戻る。

鉛直分布の最大温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ が 0.1 以上の値を持つ鉛直分布を個体 X に, 各個体の $z = -0.5, -1.3, -2.6, -4, -5.3$ cm (実験スケール), $-0.6, -2, -4, -6, -8$ m (実スケール) の水温データを最大温度上昇率で正規化した値を要素として, クラスタ分析を行った。また, 要素として用いた実験結果が, 実スケールで-8 m までと, 水理実験(水中放水)で報告されている層厚(-10~-20 m)に比べて短いことから, -10 m 以上の層厚を持つ実験結果の確認, および分類されたクラスターの指標として, Gauss 曲線: $\Delta T/\Delta T_{\max} = \exp(-(z/h_0)^2)$ で近似した水温分布も, 実験結果とあわせてクラスタ分析を行った。 h_0 は温水層厚を示し, h_0 は実スケール水深 2, 3, ..., 19, 20 m を用いて鉛直分布を作成した。



(a) 樹形図



(b) 平均した鉛直分布

図-2 クラスタの樹形図と各クラスターの平均鉛直分布

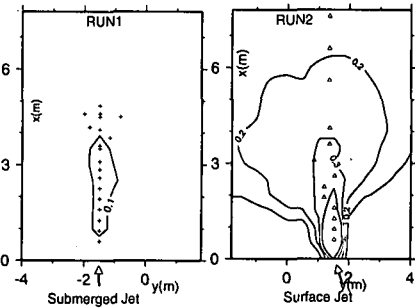
図-2 にクラスタ分析で得られる樹形図, および分けられた各クラスターの平均鉛直分布を示す。樹形図から, まず始めにクラスター Clu 1 (以下 Clu 1 と記述) と Clu 2, 3 に, その次に Clu 2 と 3 に枝分かれし, 各クラスターの距離 distance 1 で区切ると図上で色分けされたように Clu 1, 2, 3 の 3 つに分類される。その後, 各クラスターの距離 distance 2 で区切ると, 各 Clu 1, 2, 3 で 2 つずつに分けられる。クラスタ分析より分類された鉛直分布は, 上昇水温が鉛直方向に一樣になる分布 (Clu 1-1, 2), 表層で高くなり, 鉛直方向下向に徐々に水温が低下する分布 (Clu 3-1, 2), 両者の中間にあたる分布 (Clu 2-1, 2) を示した。その他の特徴として, Clu 2-1 で分類される鉛直分布は, 他の鉛直分布と異なり, 鉛直下向きに滑らかに低減する分布とはならず, 表層から鉛直方向に低減していた水温が, -2 から -3 cm の間で急に折れ曲がり, その後鉛直方向に一定の分布となっている。

図-2 にクラスタ分析で得られる樹形図, および分けられた各クラスターの平均鉛直分布を示す。樹形図から, まず始めにクラスター Clu 1 (以下 Clu 1 と記述) と Clu 2, 3 に, その次に Clu 2 と 3 に枝分かれし, 各クラスターの距離 distance 1 で区切ると図上で色分けされたように Clu 1, 2, 3 の 3 つに分類される。その後, 各クラスターの距離 distance 2 で区切ると, 各 Clu 1, 2, 3 で 2 つずつに分けられる。クラスタ分析より分類された鉛直分布は, 上昇水温が鉛直方向に一樣になる分布 (Clu 1-1, 2), 表層で高くなり, 鉛直方向下向に徐々に水温が低下する分布 (Clu 3-1, 2), 両者の中間にあたる分布 (Clu 2-1, 2) を示した。その他の特徴として, Clu 2-1 で分類される鉛直分布は, 他の鉛直分布と異なり, 鉛直下向きに滑らかに低減する分布とはならず, 表層から鉛直方向に低減していた水温が, -2 から -3 cm の間で急に折れ曲がり, その後鉛直方向に一定の分布となっている。

表-3 にクラスタ分析により分類された各実験結果の個体数および, Gauss 曲線の層厚 h_0 を示す。指標である Gauss 曲線の層厚は, 層厚 7~20 m がクラスター Clu 1 に, 層厚 4~6 m が Clu 2 に, 層厚 2~3 m が Clu 3 に分

表-3 各クラスターに含まれる鉛直分布

クラスタ	Clu 1-1/1-2	Clu 2-1/2-2	Clu 3-1/3-2
Run 1	9/15	0/0	0/0
Run 2	0/0	0/20	63/30
Run 3	76/66	49/27	3/42
Run 4	38/27	6/12	53/39
Run 5	14/29	35/54	17/67
h_0	7~9 m/10~20 m	無し/4 m~6 m	2 m/3 m



(a) RUN1 水中放水単独
(b) RUN2 表層放水単独
図-3 温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

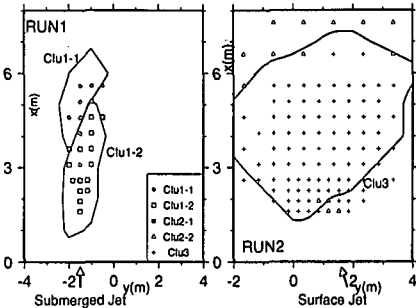
類されている。また、層厚 7~9 m は Clu 1-1 に、層厚 10~20 m は Clu 1-2 に分類されており、計測水深よりも大きい層厚をもつ鉛直分布にたいしてもクラスター分析で分類されることが確認できた。

水中単独放水された鉛直分布は全て Clu 1 に、表層単独放水された鉛直分布の大半は、Clu 3 に分類されており、図-2(b) の鉛直分布、および Clu 1, 3 の温水層厚が、それぞれ 7~20 m および 2, 3 m であることから、分類された Clu 1, 3 は、水中・表層放水された温排水の鉛直分布を示すことが分かる。

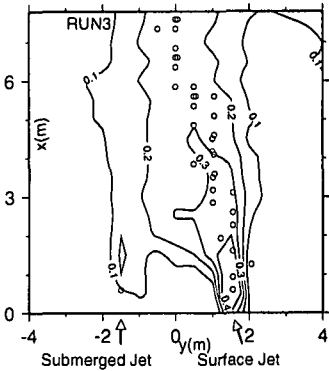
表層・水中同時放水された鉛直分布群には、Clu 1, 3 以外に Clu 1, 3 の中間である Clu 2 の分布が見られる。また、Clu 2 はさらに 2 つに分類され、Clu 2-2 が表層単独放水実験 (RUN 2) で存在するのにたいし、Clu 2-1 で分類される鉛直分布は、表層・水中単独放水 RUN 1, 2 中には存在せず、同時放水された RUN 3, 4, 5 でしか見られない。そして、温水層厚 4 m の Gauss 曲線は Clu 2-2 で分類されるが、Gauss 曲線で示される分布は、Clu 2-1 に分類されない結果となった。このような結果から、分類された Clu 2-1 は、表層・水中同時放水された際に生じる特殊な分布であると推察される。

(2) 表層放水・水中放水混在場での拡散特性 (場の流れ無し)

図-3 に、RUN 1, 2 の上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布お



(a) RUN1 水中放水単独
(b) RUN2 表層放水単独
図-4 RUN 1, 2 の各クラスターの平面分布

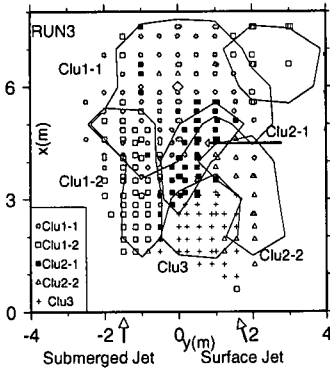


RUN 3: 水中、表層放水混在の場合
図-5 温度上昇率 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布

よび汀線に平行な各横断面における上昇水温最大値の位置 (+, Δ) 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。また、図-4 に、RUN 1, 2 のクラスター Clu 1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3 の位置を示す。ただし、図が繁雑になったため、Clu 3-1, 3-2 は一つのクラスターとして、Clu 3 とした。

RUN 1 (水中放水単独) の上昇水温は放水口前面に細長く拡散する分布となり、この領域では、Clu 1 の鉛直分布 (鉛直方向に一樣な分布) となっている。また、RUN 2 (表層放水単独) の上昇水温は、放水口前面より放射上に拡散する分布となり、この領域では、放水口前面および沖合いを除き、Clu 3 の鉛直分布 (上層で高く鉛直方向に低減する分布) となっている。RUN 2 で Clu 2-2 (Clu 1, 3 の中間の分布) となる領域 (放水口前面および沖合い領域) が見られたが、放水口前面では、放水直後の表層噴流が発達する過程で鉛直方向に希釈・混合したため、および沖合い領域では、境界壁の影響のためと考えられる。

図-5 に、RUN 3 の上昇水温 $\Delta T/\Delta T_0$ の平面分布およ



RUN 3: 水中, 表層放水混在の場合

図-6 各クラスターの平面分布

び汀線に平行な各横断面における上昇水温最大値の位置(○)を、図-6にクラスター-Clu1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3の位置を示す。

表層・水中同時放水したケース RUN 3 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り、上昇水温の水平分布は、表層放水口の右側で RUN 2 とは異なる。この領域での鉛直分布は Clu 2-2 と分類され、RUN 2 よりも鉛直方向に混合することを示している。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 (RUN 2) では放水口を中心に放射状に広がる流れとなったが、同時放水 (RUN 3) では、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流れが観測されており、放水流速の大きい水中放水の連行の影響が、表層放水口前面およびその右側まで及んだと考えられる。そして、この連行の影響によって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になったと考えられる。

上昇水温最大値の位置は、RUN 1, 2 ではほぼ各放水口の前面に位置したのに対し、RUN 3 では、 $x=4$ m 程度まで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へ移動し、約 $x=5.5$ m の位置より水中放水口と表層放水口前面のほぼ中間に位置する結果となった。

両放水口にはさまれた領域の鉛直分布を見ると、水中放水口近傍では Clu 1-2 (温水層厚 $h_0=10\sim 20$ m) に分類された鉛直分布を、表層放水口近傍では、Clu 3 (温水層厚 $h_0=2\sim 3$ m) に分類された鉛直分布となり、各放水口から単独放水する鉛直分布と類似した形状となった。これより沖合いでは、水中放水口側 (約 3 m, -0.5 m) から表層放水口側 (約 5 m, 1 m) までを斜めに結ぶ領域で Clu 2-1 の鉛直分布となり、Clu 2-1 の領域より沖合いでは、

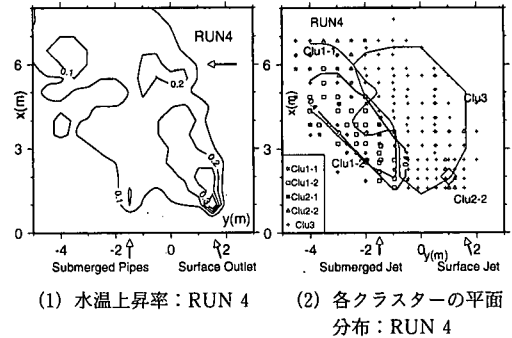


図-7 RUN 4 の水平分布

Clu 1-1 で分類された鉛直分布となった。

Clu 2-1 で分類される鉛直分布は、上層水温が表層で高く、鉛直下向きに低減していくが、下層で一様となる形状を呈し、表-3では、Gauss 曲線で近似される鉛直分布が分類されない水中・表層同時放水された実験固有の鉛直分布である。

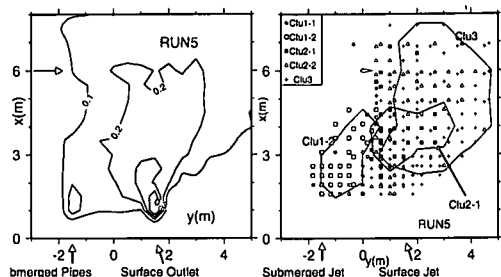
坪野他(1999)によると、図-5に示した記号の位置(○等)を結ぶライン上での上昇水温の低減率 $\Delta T_{\max}/\Delta T_0$ が、放水口近傍 $x=1\sim 3$ m では、単独放水のケース (RUN 1, 2) の上昇水温の低減と同様に、距離の $-1/2$ 乗程度で低減し、上昇水温最大値の位置 (図-5) が表層放水前面から水中放水口側へ移動し始める $x=4$ m で低減率が悪くなり、鉛直方向に深くまで混合していることが報告されている。クラスター分析によると、低減率が悪くなる位置周辺で、Clu 2-1 と分類されており、Clu 2-1 に分類される領域は、水中・表層放水の各噴流が相互干渉し、鉛直方向に混合が促進されている領域と推察される。

この Clu 2-1 の領域より沖合いで分類される Clu 1-1 の領域での上昇水温の低減率は、単独放水の低減率と同様に、距離の $-1/2$ 乗程度となることが報告されており (坪野他, 1999), 両放水口から放水された温排水は、Clu 2-1 の領域で相互干渉した後、沖合いにいくにつれて発達していき、一定の温水層厚となり、単独放水のケース RUN 1, 2 と同様の拡散、希釈過程することが分かる。

(3) 場の流れを考慮した場合

図-7(1)に RUN 4 の、水温上昇率の水平分布、図-7(2)に各クラスターの水平分布を示す。同様に図-8(1), (2)に RUN 5 の水平分布、各クラスターの水平分布を示す。

水温上昇率は、図-7, 8(1)より、RUN 4 では、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、水中放水からの噴流とはほとんど相互干渉せず、水中放水の浮上する海域のまわりを反時計回りで、沖合に拡散しているように見える。また、RUN 5 では、水中放水



(1) 水温上昇率: RUN 5

(2) 各クラスターの平面分布: RUN 5

図-8 RUN 5 の水平分布

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。

各クラスターの平面分布図-7, 8(2)より, RUN 4では, 流れにより曲げられた表層放水起因の噴流が, Clu 3に属する鉛直分布となり, 水中放水起因の噴流が, Clu 1に属する鉛直分布となり, 各噴流の相互干渉を示す Clu 2の鉛直分布は, ほとんど見られない結果となった。これに対し, RUN 5では, RUN 4に比べて鉛直分布が Clu 2で分類される地点が多く観測された。これは, 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したため, および水中放水の噴流が表層放水の上流側でフロントを形成し, 表層放水起因の噴流が, 流れに曲げられることなく拡散するため, 表層放水起因の温排水が水中放水の噴流の影響を受けやすくなったためと考えられる。

場に流れのある RUN 4, 5の鉛直分布の変化を把握するには, RUN 3のように, 各放水口に挟まれた領域を検討するだけでなく, さまざまな $x-z$, $y-z$ 断面を検討する必要がある。クラスターで鉛直分布の判別を行うと, 各放水口からの噴流が支配的な領域, 相互干渉する領域, 相互干渉の後, 噴流が発達し, 鉛直方向に混合している領域が平面的に理解できる。密度噴流の形態を表す成分が, 鉛直分布と上昇水温であることを考慮すると, クラスター分析は, 温排水の拡散形態を理解する上で有効な手段であると考えられる。

4. ま と め

表層・水中放水口から近接かつ同時に放水される温排水拡散実験データについて, クラスター分析を用いて,

鉛直分布の分類を行ったところ, 以下のような結果を得た。

1. 鉛直分布のクラスター分析の結果より, 各放水形式の影響による鉛直分布と, 同時放水された場合に生じる鉛直分布とに分類された。また, 計測水深よりも大きな層厚を持つ鉛直分布にたいしてもクラスター分析により分類が可能であることが確認できた。
2. クラスター分析を表層・水中同時放水の実験に適用した結果, 坪野ら (1999) に報告された, 各放水口からの噴流が相互干渉して, 希釈が悪くなり, 鉛直分布が Gauss 分布とは異なる分布となる領域を把握することが可能となった。この領域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たため, それ以前の分布よりも深くまで混合した層厚 7~9 m の Gauss 曲線で示される分布に発達することが確認された。
3. 場に流れがある場合, 流れが無い状態に比べて解析範囲が広がるが, クラスター分析は, 大量なデータでも自動的に分類出来, またクラスター分析で分類された鉛直分布を用いると, 鉛直混合の様子を面的に詳しく知ることが出来る。上昇水温同様, 水温の鉛直分布は, 温排水の拡散形態を表す指標であることから, 鉛直分布のクラスター分析は, 有効な手段であると考えられる。

今後, 実験よりも変動量の多い観測データにクラスター分析を適用し, 得られた結果を 3 次元現象把握, および 3 次元数値モデルの検証に使用する予定である。

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

- 片野尚明 (1983): 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。
- 小松利光, 古本勝弘, 椿東一朗, 細山田得 (1987): 3 次元表層成層せん断流の流れ特性。第 31 水理講演会論文集, pp. 473-478。
- 坪野考樹, 松梨聖郎, 角湯正剛 (1999): 水中放水及び表層放水混在場での温排水拡散挙動。水工学論文集第 43 巻, pp. 923-929。
- 宮本定明 (1999): クラスター分析入門。森北出版株式会社。
- 室田 明, 中辻啓二, 柴垣雄一 (1984): 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, pp. 113-119。