

俯角方向に水中放水される温排水の 移流拡散過程に関する研究

STUDY ON ADVECTION AND DIFFUSION PROCESS OF WARMED COOLING - WATER DISCHARGED WITH A DIP FROM SUBMERGED OUTLET

高田 英明¹・田中 等²・牛島 省³

Hideaki TAKADA, Hitoshi TANAKA and Satoru USHIJIMA

¹正会員 中国電力株式会社 技術研究センター (〒739-0046 広島県東広島市鏡山三丁目 9-1)

²正会員 中国電力株式会社 技術研究センター (〒739-0046 広島県東広島市鏡山三丁目 9-1)

³正会員 工博 電力中央研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

This report explains the experimental investigation on the advection and diffusion process of warmed cooling-water discharged with a dip from submerged outlet into a stagnant ambient water, which is now discharged horizontally. The experimental formulas of warmed cooling-water horizontally discharged for jet trajectory, temperature decay ratio and so on, is confirmed the application to those discharged with a dip by rotation of axes. We present the decisive equation whether warmed cooling-water is affected by the bottom bed of the sea or not, which consists of the distance from the bottom of jet to the bottom of the sea, the size of the nozzle diameter and densimetric Froude number, and present the charts which predict jet trajectory, temperature decay ratio and so on.

Key Words: *Warmed cooling-water, advection and diffusion process, a dip, rotation of axes
decisive equation*

1. まえがき

火力・原子力発電所から水中放水される温排水は、正の浮力を持った密度噴流で、環境水温より約7℃高い温度で海域に放出され、周囲水を連行し希釈されながら浮上する。この温排水による放水口周辺の水温の上昇は、発電所立地に際して重要な課題であり、拡散範囲を低減することは海生生物への影響低減およびコスト低減という面から意義深い。

単一放水管で水平または上向きに角度を持って放水する場合の水温低減効果については、片野ら¹⁾により実験式が提案されている。一方、俯角方向に放水した場合については、洗掘の問題もあり、取り扱われた事例は少ない。水平に放水されている温排水を俯角方向に放水することにより、同じ放水速度でも連行距離が長くなり温排水拡散範囲の低減が期待できるので、本研究では、単一放水管で下向き放水角度等を変えて実験を行い、

・水平放水に対する下向き放水の水温低減効果の推定
・下向き放水による洗掘対策の必要性の判断
が簡易的に可能となるシステムの開発を目標とし、発電所放水設備の基礎検討に活用しようとするものである。

2. 実験装置および実験方法

2次元水路(長さ40m, 幅1m, 深さ1.5m)に、温排水の浮上点付近までの現象の再現性に必要な範囲を考慮して、フルードの相似則に基づく模型縮尺 $S=1/100$ の無歪み模型を製作した。模型のうち放水管は黄銅管を支持架台に取り付け、底面については現地捨て石、岩盤地盤を模擬した粗面(碎石10-20mmで再現)、現地砂地盤を模擬した滑面(塩ビ板で再現)および放水管前面が鉛直に下がっている場合とした。実験装置概要図を図-1に、想定する原型値と模型値を表-1に示す。

実験は、表-2に原型値で示すとおり放水速度 V_0 (V

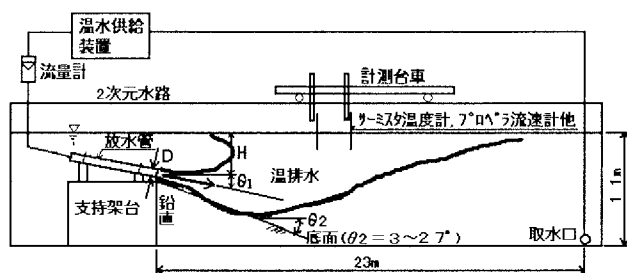


図-1 実験装置概要図

表-1 想定する原型値と模型値

諸 元	原型値	縮小率および模型値 (模型縮尺 $S=1/100$)
平 面	X_p : 幅100m	$X_m=X_p \times S$: 幅1m
深 さ	H_p : 放水水深15m	$H_m=H_p \times S$: 15cm
放水速度	V_p : 3.0~5.0m/s	$V_m=V_p \times S^{1/2}$: 30~50cm/s
放水量	Q_p : 20~30m ³ /s	$Q_m=Q_p \times S^{5/2}$: 200 ~300cm ³ /s
時 間	T_p : 1時間	$T_m=T_p \times S^{1/2}$: 6分
放水管 内径	D_p : 2.52~3.26m	$D_m=D_p \times S$: 2.52 ~3.26cm
取・放水 温度差	ΔT_o : 原型の放流水の密度差と合うように放水温度を調整する。	
添字 _p は原型値, 添字 _m は模型値を表す。		

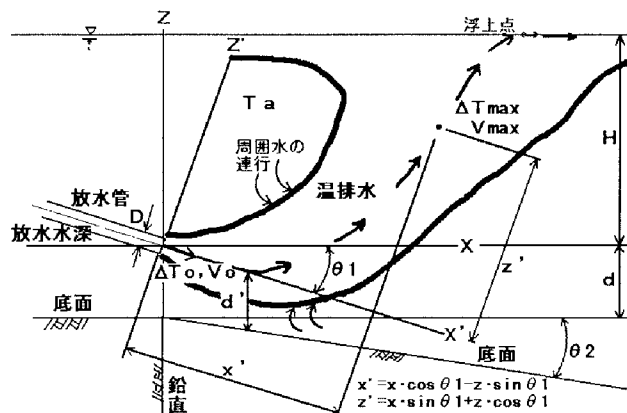


図-2 模式図および座標系

3. 結果と考察

下向き放水による低減効果を定量的に把握することを目的に、底面の影響を受けないと思われる放水管中心から底面までの距離 $d=5$ mで現地捨て石を模擬した底面の下向き角度 $\theta_2 \doteq 27^\circ$ 粗面 (case 1~7) および底面鉛直 $\theta_2=90^\circ$ (case 8) のケースについて実験を行い、噴流中心軸における水温低減率、流速低減率、噴流中心軸の経路について検討した。また、温排水の移流拡散におよぼす底面の影響および温排水による底面洗掘の可能性の検討を目的に、現地砂地盤を模擬した $\theta_2 \doteq 3^\circ, 6^\circ$ (case 9~16) の滑面の条件で実験を行った。噴流の位置は、水平に放水した場合のX軸、Z軸に対し、下向きに放水した場合は、俯角 θ_1 で座標変換したX'軸、Z'軸で表す。図-2に温排水を放水した場の模式図および座標系を示す。実験結果は特記ない限り原型値で示す。

(1) 噴流中心軸における水温低減率

case 1~3, 8の結果を片野らの底面の影響を受けない条件での単一水平放流管による実験¹⁾と比較検討した。

片野らは水温低減効果を求めるため、希釈倍率 s を以下のとおり定義して実験式を求めているが、

$$s = \frac{T_o - T_a}{T_{\max} - T_a} = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{\max}} = \frac{1}{S t} \quad (1)$$

今回の検討では水温低減率 $S t$ で表した。ここに、 T_o は放水温度、 T_a は周囲水の温度、 $T_{\max}$ は噴流断面内の最大温度、 ΔT_o は取・放水温度差、 $\Delta T_{\max}$ は噴流断面内の最大温度上昇分である。

噴流中心軸における $S t$ は以下の無次元パラターにより表される。

$$X = (x' / D) \cdot Fr_o^{-1} \quad (2)$$

$$Y = (z' / D) \cdot S t \quad (3)$$

今回の実験結果を俯角 θ_1 で座標変換し、水平放水による片野らの実験式と比較した結果、図-3に示すとおりほぼ一致している。

表-2 実験ケース一覧表 (原型値)

目的	case	放水速度 V_o (m/s)	放水水深 H (m)	放水管から底面距離 d (m)	放出密度フルード数 Fr_o	放水量 Q (m ³ /s)	放水管内径 D (m)	放水方向俯角 θ_1	底面形状 俯角 θ_2	測定項目
低減効果の確認	1	3.00	15	5	11.4	25	3.26	0~15	粗面 27	温度 流速
	2	4.00	"	"	16.3	"	2.82	"	"	
	3	5.00	"	"	21.5	"	2.52	"	"	
	4	3.31	"	"	12.3	30	3.4	"	"	
	5	4.18	"	"	16.4	"	3.02	"	"	
	6	4.00	"	"	17.2	20	2.52	"	"	
	7	3.83	"	"	16.3	"	2.58	"	"	
底面の影響確認	8	4.00	"	"	16.3	25	2.82	15	底面鉛直 90	温度 流速
	9	3.00	11.13	9.7	11.4	"	3.26	5	滑面 3	
	10	3.00	6~13	14~7	"	"	"	10	滑面 6	
	11	3.00	6.8	14.12	"	"	"	15	"	
	12	4.00	9.11	11.9	16.3	"	2.82	5	滑面 3	
	13	4.00	6~15	15~5	"	"	"	10	滑面 6	
	14	4.00	6	14	"	"	"	15	"	
	15	5.00	7~9	13~11	21.5	"	2.52	5	"	
	16	5.00	6~15	14~10	"	"	"	10	"	

$o=3.0 \sim 5.0$ m/s), 放水水深 H ($H=6 \sim 15$ m), 俯角 θ_1 (下向き放水角度, $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$) 等を種々変えて行ない、サーミスタ温度計により温度を、プロペラ流速計、熱線流速計により流速を測定した。同表に示す放出密度フルード数は、 $Fr_o = V_o / ((\Delta \rho_o / \rho_a) \cdot g \cdot D)^{1/2}$ であり、ここに、 $\Delta \rho_o = \rho_o - \rho_a$, ρ_o は放流水の密度、 ρ_a は周囲水の密度、 g は重力加速度、 D は放水管内径である。

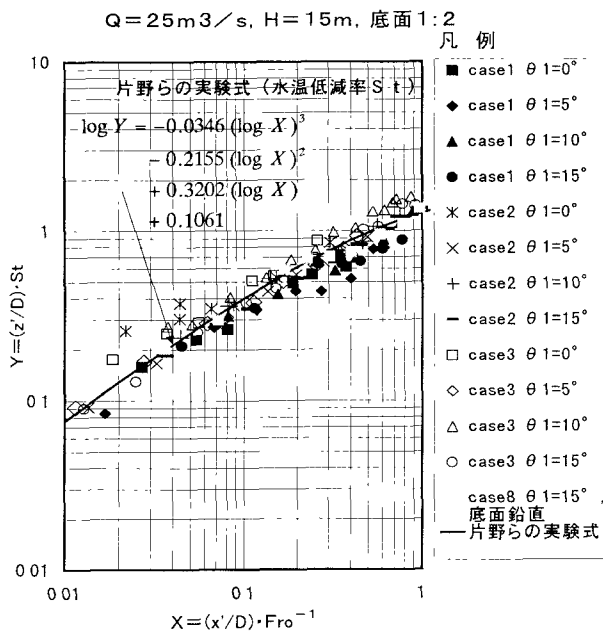


図-3 水温低減率

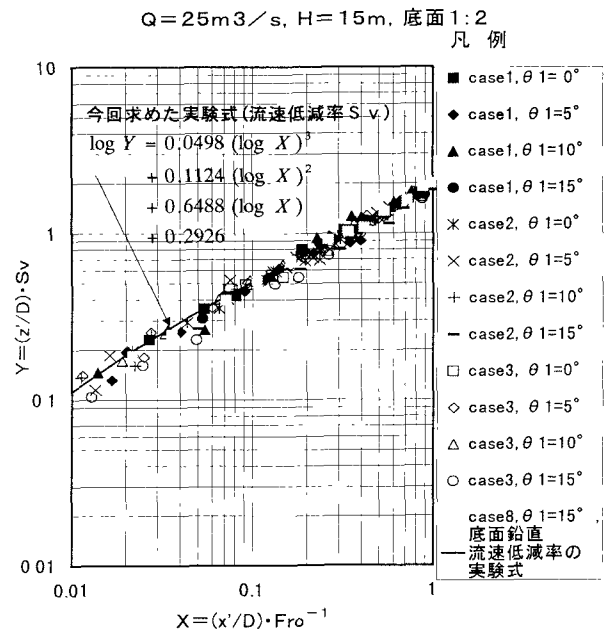


図-4 流速低減率

(2) 噴流中心軸における流速低減率

片野らは水面における水平最大流速について実験式を求めているが、今回、流速は-1m層から底面近傍までプロペラ流速計により測定しており水温低減率 S_t と同様に噴流中心軸における流速低減率 S_v を求めた。

S_v は噴流中心軸における流速低減率で

$$S_v = V_{\max} / V_o \quad (4)$$

ここに、V_{max} は噴流断面内の流下方向の最大流速、V_o は放水速度を示す。

噴流中心軸における S_v は以下の無次元パラメーターにより表される。

$$X = (x' / D) \cdot Fro^{-1} \quad (5)$$

$$Y = (z' / D) \cdot S_v \quad (6)$$

今回の実験結果を俯角 θ_1 で座標変換した結果を図-4に示す。これより、水平放水、俯角方向に放水した場合とも図中に示す実験式で表される。

(3) 噴流中心軸の経路

噴流中心軸の経路は、以下の無次元パラメーターにより表される。

$$X = x' / D \quad (7)$$

$$Y = (z' / D) \cdot Fro^2 \quad (8)$$

今回の実験結果を俯角 θ_1 で座標変換し、水平放水による片野らの実験式と比較した結果、図-5に示すとおりほぼ一致している。

(4) 既往の実験式の適応性

以上のように俯角方向に放水した場合でも、本実験のように $Fro = 11 \sim 22$ 、 $\theta_1 = 0 \sim 15^\circ$ の条件では水温低減率、噴流中心軸の経路は、 θ_1 で座標変換するこ

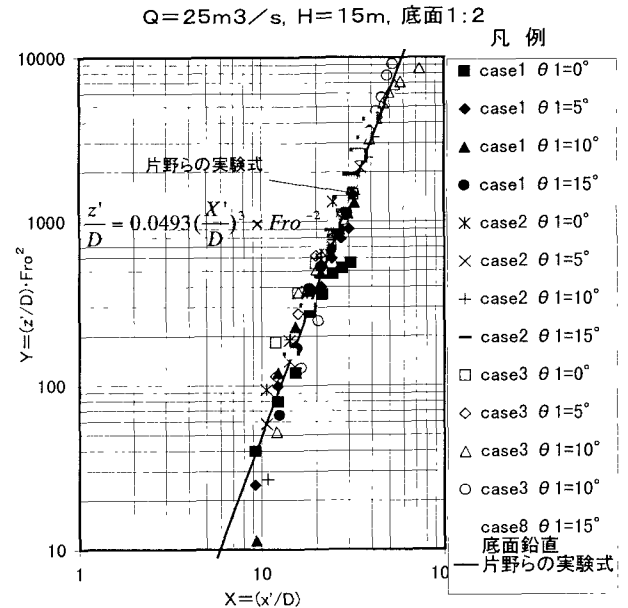


図-5 噴流中心軸の経路

とにより水平に放水した場合の片野らの既往の実験式をほぼ満足しており、底面の下向き角度 $\theta_2 \cong 27^\circ$ では噴流が底面の影響を受けないこと、また、これら実験式が適用可能であることが判った。

(5) 重力噴流の領域

噴流が底面の影響を受けない場合、図-3, 4, 5に示す実験式により温度、流速および噴流の経路の推定が可能となる。底面および放水方向が水平の場合、片野らの実験によると

$$d/D > 3 \quad (9)$$

を満足すると重力噴流の領域としている。

$Q=25\text{m}^3/\text{s}$, $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2=6^\circ$

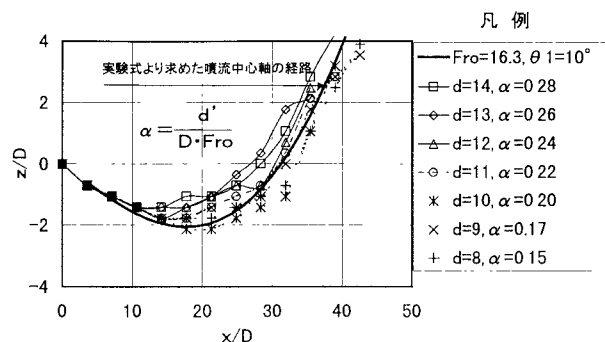


図-6 経路比較図($V_o=4.0\text{m/s}$, $F_r o=16.3$)

放水方向および底面が俯角を持つ場合の重力噴流の領域を求めることを目的に θ_1 , θ_2 , d 等を種々変えて実験を行った(case 9~16)。なお、底面が粗面(捨て石, 岩盤地盤相当)の場合は洗掘の可能性がないと思われるため、実験は滑面(砂地盤相当)のみとした。

放水された温排水は、放水口近傍において初期の運動量が支配的で、噴流として混合希釈され、流下するにつれて運動量の効果は小さくなり、浮力により浮上する。俯角方向に放水する場合は、運動量が支配的な状態では俯角方向に流下し、運動量の効果が小さくなり、浮力の方が大きくなった時点で浮上に転ずる。従って、この浮上に転ずる最下点における噴流中心から底面までの距離 d' (図-2参照)をパラメーターとして重力噴流の判定式が考えられる。また、最下点までの到達距離は $F_r o$ に依存し、流下距離が長くなるに従い拡散幅が大きくなるため、 d' を D および $F_r o$ で除することにより放水方向および底面が下向き角度を持つ場合の重力噴流の判定式(10)を定義した。

case 13の温度測定による噴流中心軸の経路、温度上昇が 0°C となる水深を図-6, 7に示す。

この結果、(10)式に示す重力噴流の領域判定式 α が0.24以上になると下記の①~②の条件をほぼ満足し、底面の影響を受けない重力噴流の領域であると判断された。

$$\alpha = d' / (D \cdot F_r o) \quad (10)$$

①噴流中心軸の経路が実験式から求めた経路より上側に位置する。(図-6)

②底面では水温上昇がない。(図-7)

実験結果を総合的に検討した結果、

判定式

$$\alpha = d' / (D \cdot F_r o) > 0.25 \quad (11)$$

を満足すると放水方向および底面が俯角を持つ場合の底面の影響を受けない重力噴流の領域と推定される。なお、噴流の最下点の位置は図-5に示す実験式より求められる。図-8に同式より求めた噴流の最下点の位置 x , z を D で除した無次元距離、 $F_r o$ および θ_1 で表した噴流最下点の位置を示す。

$Q=25\text{m}^3/\text{s}$, $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2=6^\circ$

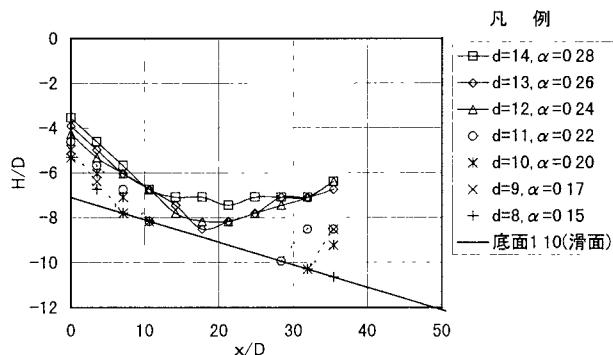


図-7 温度上昇 0°C の水深($V_o=4.0\text{m/s}$, $F_r o=16.3$)

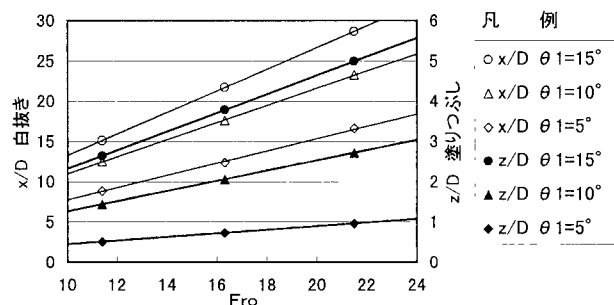


図-8 噴流最下点の位置

(6)洗掘に対する検討

これまで、温度測定結果より、温排水が底面の影響を受けないと思われる限界範囲を把握したが、底面の洗掘の可能性から(11)式について検討するため、case 13のうち $d=13\text{m}$ ($\alpha=0.26$), 12m ($\alpha=0.24$), 11m ($\alpha=0.22$), 10m ($\alpha=0.20$)について、底面付近の流速を熱線流速計により測定した。熱線流速計は、放流水による温度変化の影響を受けるため、流速測定用プローブ背後に近接して温度補償プローブを取り付け、温度変化に伴う影響を補正した。実験結果のうち噴流の最下点である $x=50\text{m}$ の境界層付近の流速分布を図-9に示す。

その結果、 $d=13\text{m}$, 12m では図中に太線で表す粘性底層の流速分布(12)式に近い分布を示し、 $d=11\text{m}$, 10m では細線で示す対数分布則(14)式に近い分布となる。

$$\frac{u}{u^*} = \frac{u^* z}{\nu} \quad (12)$$

$$\tau \doteq \tau_o = \mu \frac{du}{dy}, u^* = \sqrt{\tau_o / \rho} \quad (13)$$

$$\frac{u}{u^*} = 5.5 + 5.75 \log\left(\frac{u^* z}{\nu}\right) \quad (14)$$

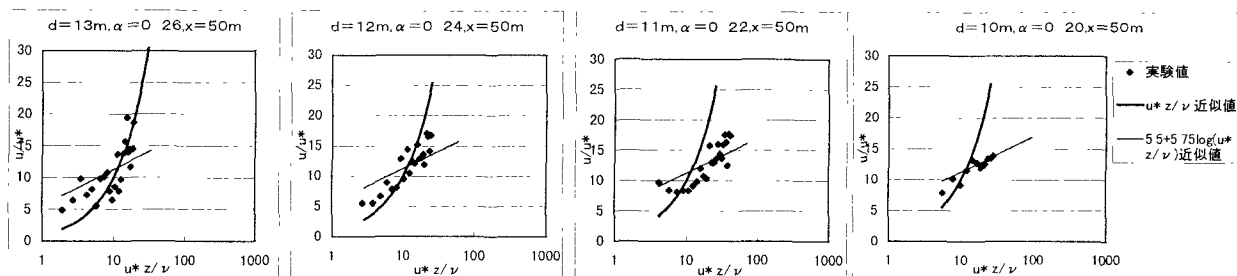


図-9 境界層付近の流速分布

(11)式に示す重力噴流の限界付近の $d=1.3\text{m}$ ($\alpha=0.26$), $d=1.2\text{m}$ ($\alpha=0.24$)の実験結果のうち底面からの高さ 2.5cm (模型値 0.25cm)の流速測定結果より(13)式を用いて求めた摩擦速度と、岩垣の式²⁾より求めた砂の限界摩擦速度 u_*c を流下距離ごとに比較し図-10に示す。

なお、摩擦速度の原型値は以下の関係式より求めた。摩擦速度の原型値を算出する際には、境界層に関する相似性を仮定して、 $1/7$ 乗則から導かれた次の関係式を利用した。

$$\frac{u_*p}{u_*m} = \left(\left(\frac{1}{S} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{7}{8}} \times \left(\frac{1}{S} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (15)$$

ここに S は模型縮尺、 u_*p は摩擦速度の原型値、 u_*m は模型値である。

その結果、温排水が底面の影響を受けないと推測される $\alpha=0.25$ 付近のケースでも、図-10に示すように砂の粒径によっては、洗掘が生じることが判った。よって(11)式からは洗掘の可能性を判定することはできないが、今後 α 値と摩擦速度の関係についてデータを蓄積すれば、 α 値は洗掘の可能性を検討するための指標となり得ると考えられる。

(7) 3次元局所洗掘数値解析手法の適用

上記のように、境界層に関する相似性を仮定して、水理実験結果から現地における摩擦速度を推定した。しかし、実際の温排水の移流拡散過程では、浮力によりこの相似性が必ずしも満足されない可能性がある。このため、水理実験と並行して、数値解析手法により俯角方向に水中放水する場合の洗掘現象の予測を行う検討を進めている。水平放水を対象としている既報³⁾数値モデルの俯角方向に放水する場合の適用性を検討するため、上記モデルと同様の数値モデルを用いて数値計算を行ない、実験結果と比較した。

計算では、実験 case 13のうち温排水が底面の影響を受けないと推測される $d=1.2\text{m}$ ($\alpha=0.24$)および温排水が底面に接する $d=5\text{m}$ ($\alpha=0.09$)を対象として、底面を固定床とした温排水の3次元定常流況

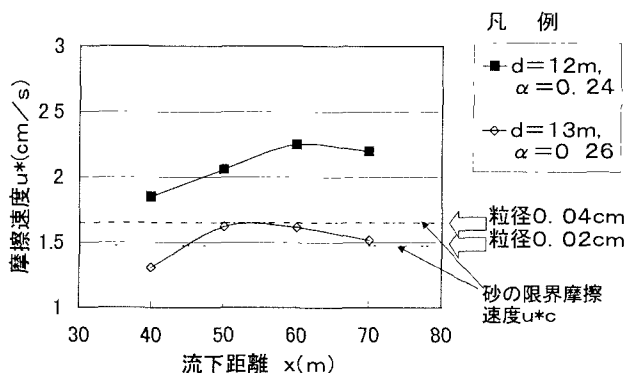


図-10 底面付近の摩擦速度と砂の限界摩擦速度

を求めた。図-11, 12に、それぞれのケースの噴流中心軸を含む鉛直断面内における計算結果と実験結果を ΔT_0 , V_0 に対する無次元値で示す。計算結果は流速ベクトルと温度の等温線、また実験結果は温度の等温線の分布のみを示している。これらの結果に見られるように、 $d=1.2\text{m}$ では、計算結果でも俯角方向に放水された温排水が途中から浮上する傾向が明瞭に見られる。また、 $d=5\text{m}$ では、計算結果でも実験結果と同様に、噴流が底面にはりつく状態が再現されている。以上のように両ケースとも実験結果をほぼ再現しており、俯角方向に水中放水される場合でも上記モデルが適用可能であると思われる。

(8) 低減効果推定汎用図の提案

俯角方向に放水する場合の水温低減効果等を簡易的に求めるため、既往の水平に放水した場合の水温低減率、噴流中心軸の経路の実験式より、各フルード数における俯角ごとの浮上点温度、噴流中心軸の経路が簡易的に求められる汎用図を作成した。温度、経路の推定汎用図を図-13, 14に示す。

4. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す。

(1) 今回実験した $Fr_0=1.1 \sim 2.2$, $\theta_1=0 \sim 15^\circ$ の範囲では、噴流の位置を θ_1 で座標変換した軸で表すこ

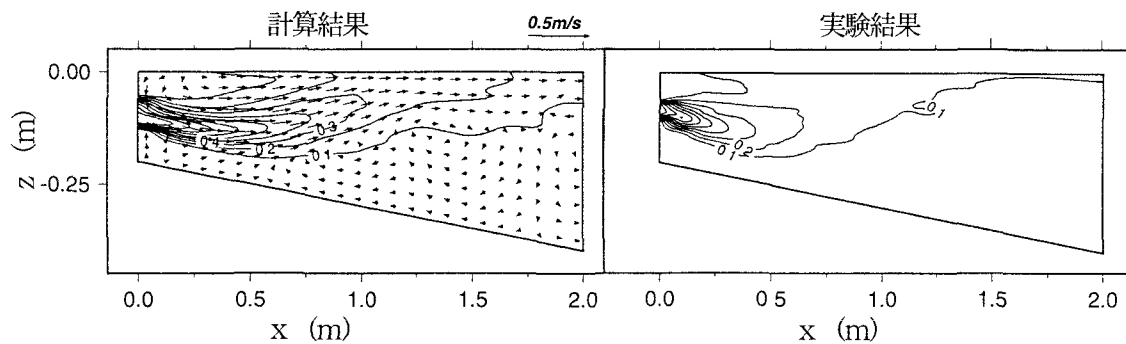


図-1.1 計算結果と実験結果の比較図 ($d=1.2\text{m}$, $\alpha=0.24$)

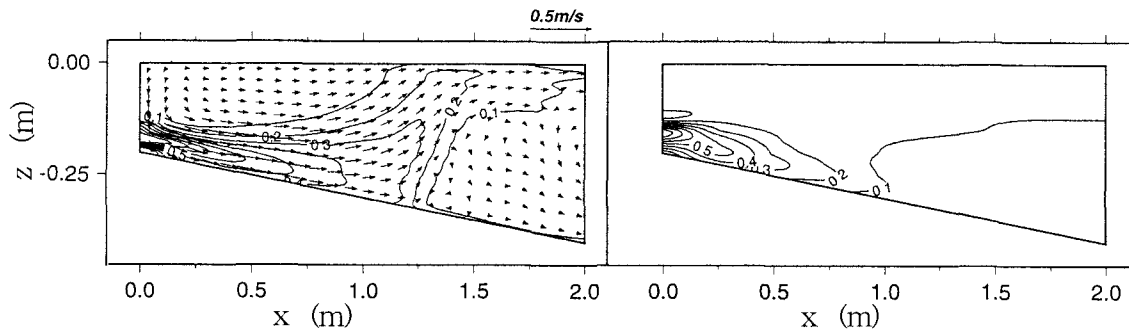


図-1.2 計算結果と実験結果の比較図 ($d=5\text{m}$, $\alpha=0.09$)

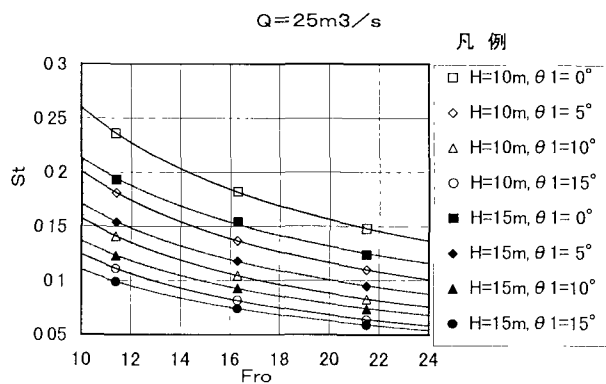


図-1.3 浮上点温度推定汎用図

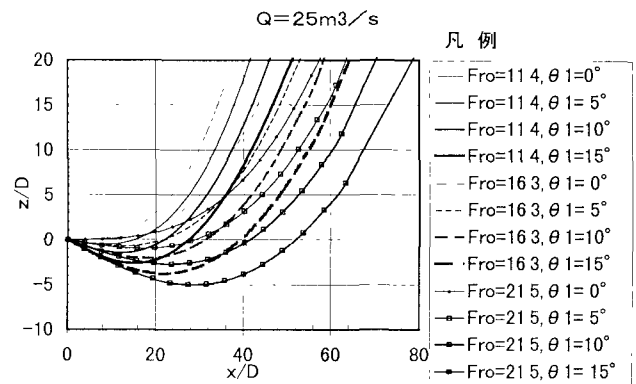


図-1.4 噴流の中心経路推定汎用図

とにより、水平に放水した場合の実験式が適用可能なことが判った。

(2) d' , D , Fro をパラメーターとして重力噴流の領域判定式を提案し、その限界を把握した。

(3) 今回提案した重力噴流の限界 $\alpha=0.25$ 付近の実験結果より(13)式を用いて求めた摩擦速度から洗掘の検討を行なった結果、粒径 $0.02 \sim 0.04\text{cm}$ の砂においては移動限界付近である。

(4) 既報³⁾ による底面を固定床とした温排水の3次元定常流況の計算では、実験結果をほぼ再現しており、俯角方向に水中放水される場合でも適用可能であると思われる。

(5) 今回作成した浮上点温度推定汎用図により、水平に放水した場合と同程度の浮上点温度となる放水水深、放水角度が判り、放水水深を浅くすることによる工事費の低減等放水口諸元の基礎検討に資するものと思われる。

以上のように所期の目標である水温低減効果を推定することは可能となったが、洗掘の可能性の判断については、 α 値を変えて実験を行うなど追加検討を行なう予定である。

参考文献

- 1) 片野尚明・河村博美：単一水平管による温排水の水温低減化に関する研究，電力中央研究所報告，研究報告：377021, 1978.
- 2) 水理公式集，昭和60年版，pp. 222
- 3) 牛島省・清水隆夫・保坂稔：局所洗掘数値解析手法の発電所放水口前面への適用性，水工学論文集，第42巻，pp. 1009-1014, 1998.

(1998. 9. 30 受付)