

海底に落下する密度噴流の温度拡散 に関する基礎的実験

AN EXPERIMENTAL STUDY ON TEMPERATURE DIFFUSION OF NEGATIVELY BUOYANT JETS ON THE BED FLOOR

水野準也¹・新井信一²
Taira MIZUNO and Shinichi ARAI

¹ 足利工業大学大学院土木工学専攻研究生 (〒326-8558 栃木県足利市大前町 268)

² 正会員 工博 足利工業大学教授 工学部土木工学科 (〒326-8558 栃木県足利市大前町 268)

The diffusion of negatively buoyant jets issued horizontally was investigated experimentally focusing on the behavior in the impinging zone. The profiles of temperature were measured clearly and the shape of them that progress on the floor horizontally are Gaussian. The jet issued from the height of water surface dilutes much more than that from the height in the water. Dilution of velocity and temperature along the path of jet are presented as well as the thickness.

Key Words : Temperature profile, Gaussian distribution, dilution, breadth of jet

1. 緒言

海洋深層水の清浄で栄養豊富な特質に着目し, いろいろな利用法が考えられている。その中で, 深層水を表層に汲み上げ散布して, 磯焼け現象などにより枯渇した海域を蘇生させ, さらにはアワビなどの養殖の収穫量をあげようとする案がある。その際に問題となるのは低温な深層水の放流法である。表層から放流すると, 水はその周囲の流体よりも冷たくて密度が大きいため落下しながら拡散していく。海洋生物に快適な環境をつくり出すためには, 十分に拡散させて, 海底に冷水塊を形成させないなどの工夫が必要となろう。そのためには冷排水の密度噴流拡散現象の基本的な特性を正しく把握しておく必要がある。この問題は, 発電プラントの加温や地域冷暖房による冷排水の問題とも共通である。

噴流に関する 1975 年までの研究成果はラジャラトナム¹⁾により, また, 密度噴流に関する 1979 年までの研究成果の一部は玉井²⁾によりまとめられている。しかし, 冷排水に関しては 1979 年に片野ほか³⁾により無限流体中の冷水噴流が研究され, その性質が明らかとなりはじめたといえる。その後, 水島・首藤⁴⁾は冷水を底層放流した場合に, 図-1 の上図(底層放流)のように $x/L_s = 0 \sim 6$ が噴流領域, $x/L_s = 6 \sim 24$ が遷移領域, $x/L_s > 24$ が成層領域となるこ

とを報告している。ここに, L_s は密度噴流の特性長さで定義は後述のとおりである。

本研究では, 図-1 の下図に示すように水中あるいは水面高さから放流するので, 放流直後の噴流が自由落下する領域と, それが水底に衝突する領域と, 衝突後に水平拡散する領域に分けることができる。

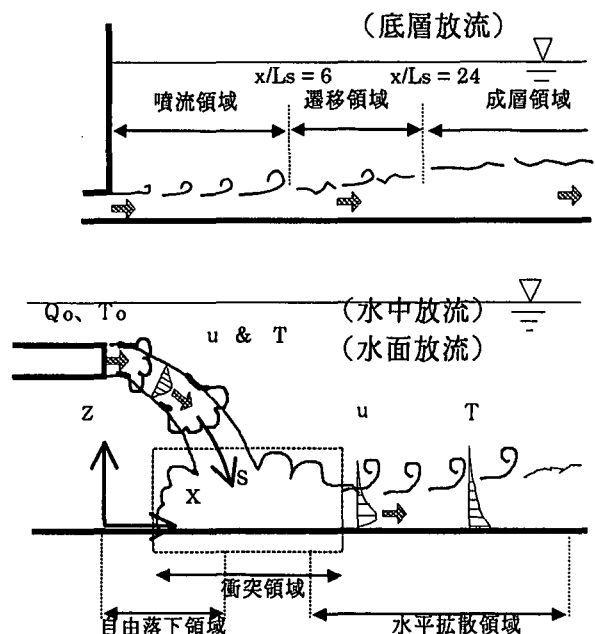


図-1 放流冷水の挙動の説明図

水中放流時を調べた前報^{5),6)}によれば、図-1に説明するように、自由落下領域では流下距離に沿って速度も温度も正規分布の相似形を保ち、衝突領域では落下前の軸対称分布形が壁面噴流へと滑らかに変化すること、水平拡散領域では水鳥・首藤が調べた壁面噴流と同じ分布形となることを報告した。しかし、噴流の衝突域前後の温度拡散状況は流速に比べてまだ十分に詳しく調べられていなかった。そこで、本研究では温度計測に焦点を当てた実験を実施して、水底衝突前後の温度変化の様子を明らかにしようとした。また放流口の高さを水面高さとした場合も新たに調べてみた。さらに、前報の結果も引用して再解析し、考察した。

なお、壁面噴流の結果を引用すれば、前報も含めた本研究の一連の計測範囲は $x/L_s < 10$ であり、従って、そこは噴流の特性のまま水底にぶつかって水底上を拡散していき、遷移領域へ変化する実験領域となる。

2. 実験方法

使用した実験装置は前報と同じであり、図-2に示すように幅5m、長さ12m、水深0.3mの水槽で、壁からの水平距離1mのところに放流口を配置し、冷水を水平方向に放流した。座標系は図-1および図-2に示すように、放流口直下の水底面上に原点を置き、 x を放流方向に、また、 z を鉛直上向きにとった $x-y-z$ 直行座標系と、放流口を原点とする噴流の流下距離 s をとる。放流口の高さは、前報と同じ底面上0.2mおよび、放出冷水温度の希釈が進むと期待される水面の2種類である。計測領域で流れが定常となる放流開始後15分から計測を開始し、拡散した冷水が水槽壁で反射して計測点に戻る前に計測を終了した。温度センサーは熱電対(Cタイプ)で、センサーを水底から水面までの沿直線上に25点を配置して、これを移動させながら平面内計測点一点あたり3分間の温度を計測し、センサーごとの時系列の平均値を水温とした。平面の計測位置は、噴流中心軸が水底

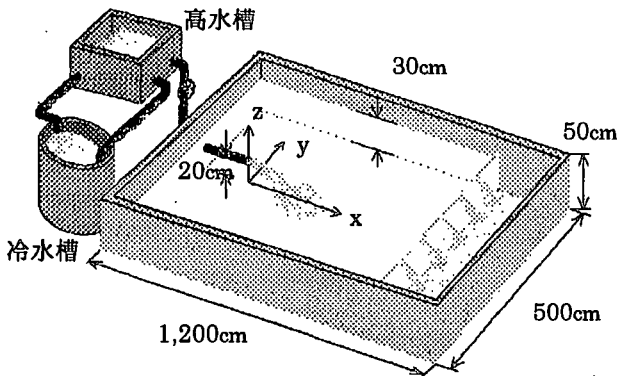


図-2 実験装置

に落下する点を求め、その付近の前方の10cm間隔メッシュの11点とした。

実験ケースを表-1に示す。表中の記号で添え字の o は放流口での値であることを意味しており、 F_{ro} は内部フルード数、 u_o は放流速度、 ΔT_o は放流冷水と周囲流体との温度差、 h_o は水底からの放流口高さである。なお、内部フルード数の定義は次式のごとくである。

$$F_{ro} = u_o / \sqrt{(\Delta \rho_o / \rho_a) g D_o} \quad (1)$$

ここに、 ρ_a は周囲流体の密度、 $\Delta \rho_o$ は放流口での放流冷水と周囲流体との密度差、 g は重力加速度、 D_o は放流口の口径である。(1)式の分子は慣性力の、また、分母は浮力の効果を表しているので、 F_{ro} が小さいほど噴流拡散に温度すなわち密度の影響が強くなることになる。

表で、Case名のFRは前報⁶⁾の実験ケースであり、FTとFSはそれぞれ順に、温度計測のため今回新たに追加した水中放流と水面放流の実験ケースである。これらに組み合わせた数字はそのケースのおよその内部フルード数である。今回のケースでは、放流口での放流冷水の温度差を極力大きくとり、温度差計測の精度が向上するように努めている。

表-1 実験ケース

Case	F_{ro}	u_o (cm/s)	ΔT_o (deg.)	h_o (cm)
FR17	17.0	18.9	-4	20
FR13	13.3	18.9	-6	20
FR11	11.3	9.4	-2	20
FR 9	8.7	9.4	-4	20
FR 7	6.7	9.4	-5	20
FT18	18.3	23.6	-5.5	20
FT15	15.7	23.6	-7.9	20
FT11	11.4	23.6	-9.0	20
FT10	10.7	11.8	-5.2	20
FT 7	7.6	11.8	-8.1	20
FT 6	6.8	11.8	-9.2	20
FS13	13.1	11.8	-4.3	30
FS 7a	7.3	11.8	-8.2	30
FS 7b	7.3	11.8	-8.7	30

3. 実験結果と考察

実験結果の整理にあたり、次の密度噴流特性量をスケールとして使用した。すなわち、放流口での平均流体力 M_o と浮力流速 N_o が次式で与えられる。

$$M_o = u_o^2 A_o + (\Delta \rho_o / \rho_a) g D_o A_o \quad (2)$$

$$N_o = u_o(\Delta\rho_o/\rho_a)gA_o \quad (3)$$

ここに、 A_o は放流口断面積である。これを用いると、長さや速度や浮力のスケールはそれぞれ順に以下のように与えられる。

$$L_s = N_o^{-1/2} M_o^{3/4} \quad (4)$$

$$U_s = N_o^{1/2} M_o^{-1/4} \quad (5)$$

$$G_s = N_o^{3/2} M_o^{-5/4} \quad (6)$$

なお、これまでの結果⁶⁾から、水中放流時の自由落下域での噴流中心軸は次式で与えられる。

$$(z - h_o)/D_o = -0.493 \cdot F_{ro}^{-2} (x/D_o)^3 \quad (7)$$

(1) 衝突領域における温度分布

放出口高さが20cmの水中放流で、放出流速が小さい場合の例を図-3から図-5に示す。順に放流口温度差が大きくなる場合である。噴流落下点分かるように(7)式による噴流の軌道を示してある。その水底落下点は、実寸では例えばFT10(図-3)が $x=74.8\text{cm}$ 、FT7(図-4)が $x=59.4\text{cm}$ の場所であって前者が速くに落下しているのであるが、長さを密度噴流のスケール L_s で無次元化すると図のように逆に近くなる。点線で示した縦軸が温度計測線であり、そこでの温

度差 ΔT を図中に示したスケールでプロットしてある。軸より右側の値が負となる。

さて、図に見るように今回の実験では衝突領域での温度分布が明瞭に記録された。自由落下域での温度の軸対称正規分布形⁶⁾が、水平拡散時の壁面噴流の分布形、すなわち壁面から指数関数的に温度差が減少するような空間分布形へ、滑らかに移行している様子を確認できる。さらに続いてその分布形の厚さ(この場合は水底からの高さ)が速やかに小さくなり、その後はその形を保ちながら前方に進行していく様子がとらえられている。この様に、衝突領域における温度の拡散現象は前報で調べた流速の拡散現象と概ね同様の挙動を示すことが確認された。放流口での温度差が小さい場合の図-3では、温度差分

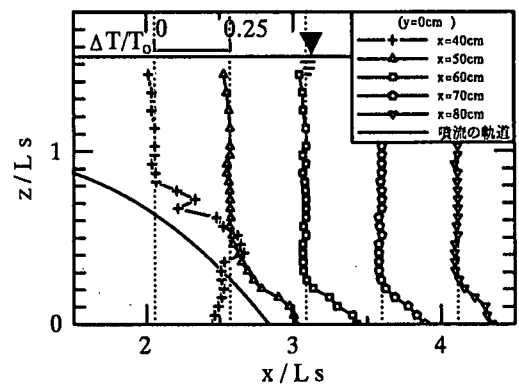


図-5 温度分布(FT6)

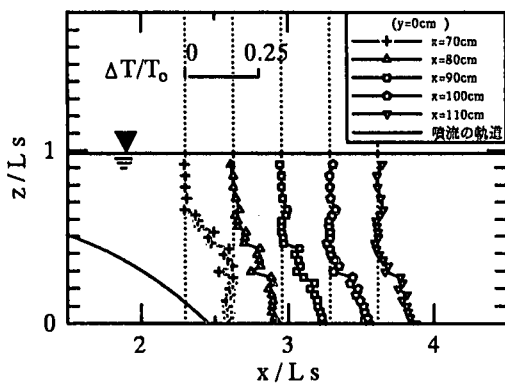


図-3 温度分布(FT10)

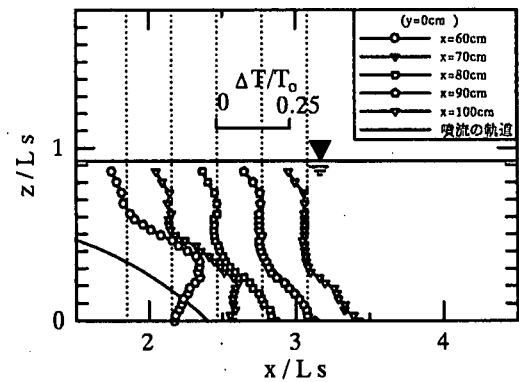


図-6 温度分布(FT11)

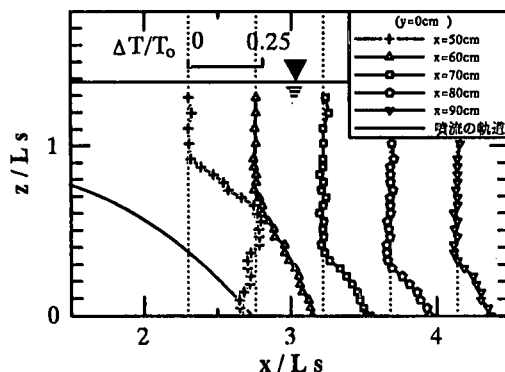


図-4 温度分布(FT7)

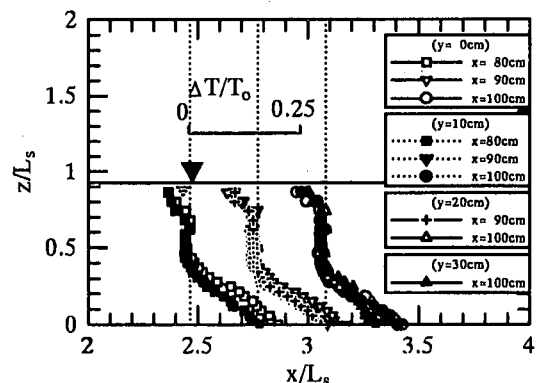


図-7 噴流幅方向での温度分布(FT11)

布が水深半ばまで達しているが、温度差が大きく噴流が重い場合は、図-5に見られるように落下後の層厚が小さくなる傾向がみられる。

図-6には放流量が図-5の倍になった場合の結果を示す。落下後の層厚が若干厚くなっている。この例では、気温変化の影響と思われる水面付近の温度上昇が見られるので注意が必要である。しかし、後出の図-12から判断すると、他の例よりも底部の温度希釈が進んでおらず、水面部の温度は底部に潜行する冷水噴流には影響しなかったものと思われる。

これまでの例は噴流中心軸上 ($y=0\text{cm}$) の分布を説明したものであるが、図-7には噴流幅方向の位置での温度分布を中心軸上の値とともに示した。この様に噴流幅方向にも温度差の変化は緩やかで、分布の形もおおむね同じといえる。

図-8には水面から放流した時の結果の例を示した。放流冷水の一部が、主流と分離して水面に沿って広がり、混合している現象が現れている。主流は水中放流の図-4や図-5よりも遠くに落下し、その時の層厚は比較的厚い。しかし、着底後の層厚は速やかに小さくなる。このケースでは噴流の軌道は(7)式となる保証はないが、参考として図中にプロットしてある。

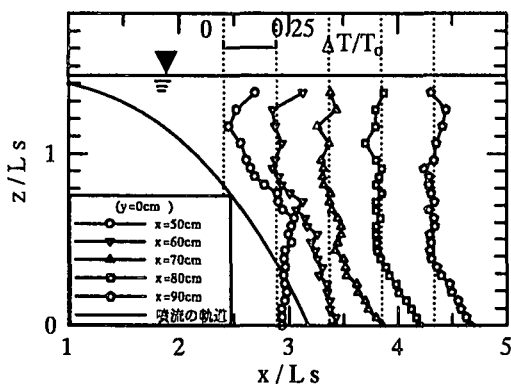


図-8 温度分布(FT7b)

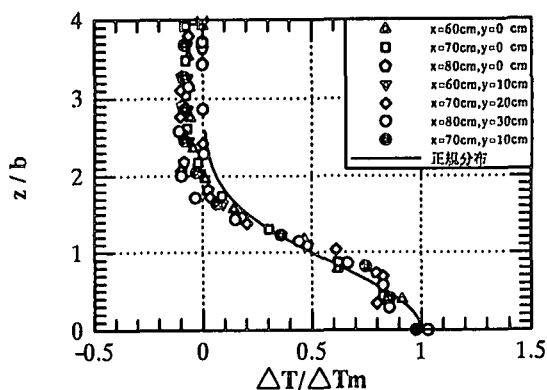


図-9 温度分布形状(FT6)

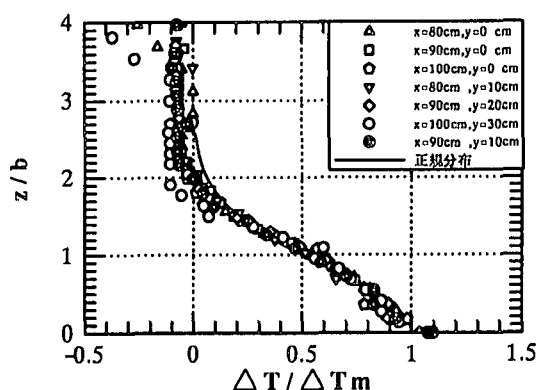


図-10 温度分布形状(FT11)

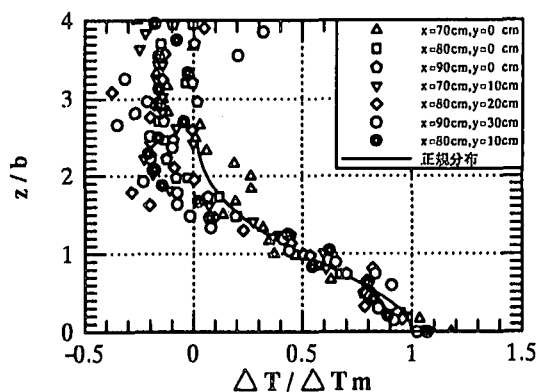


図-11 温度分布形状(FT7b)

(2) 水平拡散領域における温度分布形状

衝突領域で得られた温度分布から水平拡散域の分布形になったと思われるものだけを取り上げ、その形状を比較した。図-9は図-5の例を比較したもので、噴流幅方向の位置 ($y=10, 20, 30\text{cm}$) の分布形も合わせて載せている。横軸は温度差であり、水底部の最大温度差 ΔT_m で規格化されてある。縦軸は水底からの高さで、温度差がその最大値の半値になる高さ、すなわち b (半値半幅) で規格化されている。図中の実線は正規分布曲線である。同様に図-10には図-6の、また、図-11には図-8の場合をまとめた。この様に規格化すると、水平拡散領域における噴流はどこでもまったく同じ分布形をしており、それが正規分布形であることがわかる。

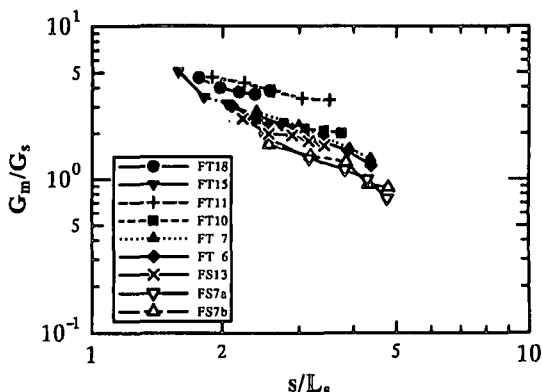


図-12 浮力の変化

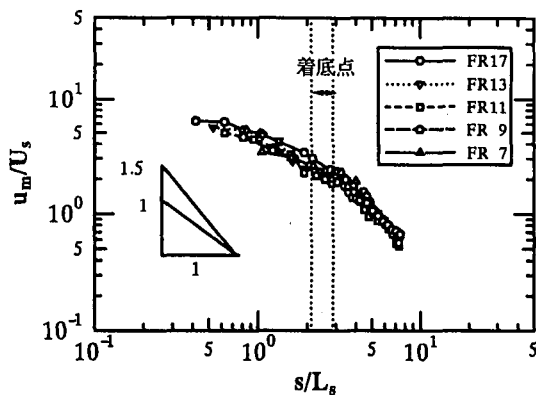


図-13 最大流速の減衰 [文献6] より]

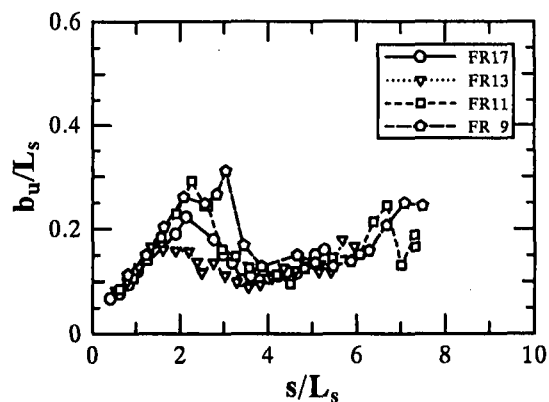


図-15 流速分布の半値半幅

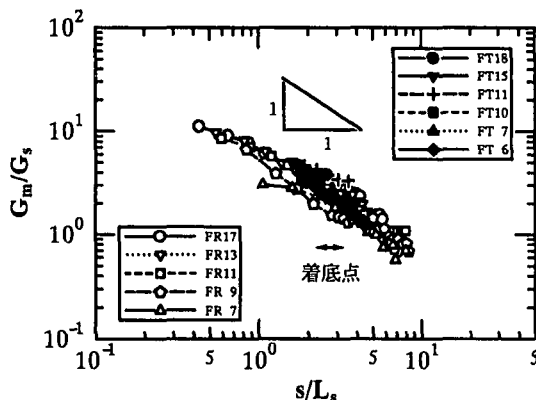


図-14 浮力の減衰

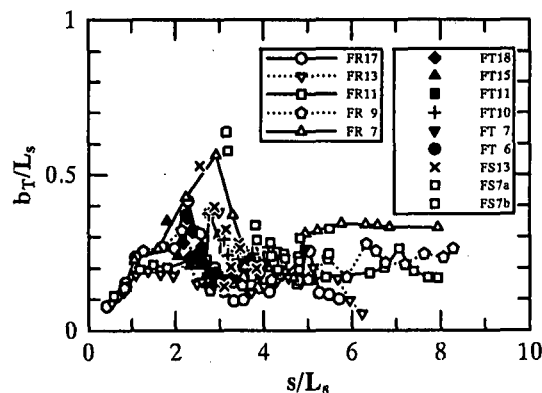


図-16 温度差分布の半値半幅

(3) 温度の希釈率

放流による温度の希釈率は、放流口での温度差に対する放流水中の温度差の比、すなわち $\Delta T/\Delta T_0$ で表すと直感的で分かりやすい。しかし、実験における温度設定が外気温に左右されるので、実験条件で周囲流体の温度が異なると、同じ温度差でも流体密度が異なる不都合がある。分子拡散を無視すれば、温度拡散は密度差による浮力の作用を受けた混合拡散によるのであるから、ここでは複数の実験結果を比較するため、密度すなわち浮力の希釈率を調べることとした。なお、密度差が $\Delta\rho$ の単位体積あたりの浮力は次式で与えられる。

$$G = (\Delta\rho/\rho_a)g \quad (8)$$

図-12 は、衝突領域の実験結果で、分布の最大温度差 ΔT_m における浮力 G_m を噴流走行距離 s に対して調べたものである。 G_m は放流口での浮力特性値 G_s で規格化してある。放流口高さが 20cm の水中放流の場合 (FT) の結果を見ると内部フルード数が小さくなるほどに浮力の減少が進み、希釈されているといえる。すなわち、温度の希釈が進むといえる。また、放流口を水面位置にした場合 (FS) はさらに希釈が進行していることがわかる。これは、噴流の走行距離が長くなるのと、冷水の一部が水面に広がるためと考えられる。

考察のため図-13と図-14には前報⁶⁾の結果における速度と温度の希釈状況を再掲載した。ただし、後者は浮力で整理し直したものである。その図-14には今回実験の水中放流の結果をプロットしてあるが、両者は一致した結果を与えている。

水鳥・首藤の壁面噴流の結果によれば、 $s/L_s < 6$ において流速 u_m の減少勾配は s の -1 乗、浮力 G_m のそれは -0.5 乗である。図-13 と図-14 の結果はいずれも約 -1 乗であり、浮力の減少速度が壁面噴流とは異なるといえる。

図-15 と図-16 にはそれぞれ流速と温度差の分布の半値半幅を示した。横軸 s/L_s が 2 から 3 の範囲に噴流着底点がある。半値半幅は、着底するまでその幅を広げるが、先に見たように着底時には幅を急激に減少させ、水平拡散領域では緩やかではあるが再び広がっていく様子が現れている。流速では着底時の挙動が内部フルード数で異なるが、自由落下領域と水平拡散領域では内部フルード数にかかわらず同じ増加率であるとみなせる。浮力の場合も半値半幅は基本的に流速の例と同様の挙動を示すが、水平拡散領域における値がばらついており、そこでは、結論付けができないけれど、内部フルード数と関係しているのかもしれない。

4. 結言

浅海域で水平に放流された冷排水の温度拡散について実験的に調べ、以下の結果を得た。

- 1) 噴流が海底に落下した衝突領域から水平拡散領域に移行する所での温度差の分布形を把握することが出来た。
- 2) また、放流の高さについては、水中よりも水面の位置から放流する方が、より温度希釈が進むことが分かった。
- 3) 噴流の浮力の減少は走行距離の-1 乗に比例している。
- 4) 自由落下領域から水平拡散領域までの噴流の半値半幅を示した。

改定に落下する冷水の密度噴流特性をよりよく把握するためには、今後、水平拡散域での y 方向半値半幅などを把握する必要がある。

謝辞： 本研究を実施するにあたり、本学の平成12 年度卒研生の新井高弘氏と真下浩和氏には多大な尽力をいただいた。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) Rajaratnam, N., 野村安正訳：噴流，森北出版，p. 309, 1981.
- 2) 玉井信行：新体系土木工学 22 密度流の水理，技報堂出版，p. 260, 1980.
- 3) 片野尚明，河村博美，和田明，鈴木慶一，田中一彦：冷排水噴流の重力拡散特性に関する実験的検討，電力中央研究所報告依頼報告 378560, 55p, 1979.
- 4) 水鳥雅文，首藤 啓：冷排水の拡散特性に関する研究，海岸工学論文集，第 42 巻，pp. 1051-1055, 1995.
- 5) Arai, S, Nagao, M, Sakyo, H, Iwasaki, T. and Suizu, S.: Spreading of Negatively Buoyant jet on the Bed Floor, *Proc. of the 3rd International Conf. on Hydro-Science and -Engineering (on CD-ROM)*, 1998.
- 6) 新井信一，長尾昌朋，上岡充男，新井孝法：海底に落下する密度噴流の拡散現象，海洋開発論文集，第 15 巻，pp. 415-420, 1999.