

海底に落下する密度噴流の拡散現象

DIFFUSION OF A BUOYANT JET FALLING ON THE BED FLOOR

新井信一¹・長尾昌朋²・上岡充男³・新井孝法⁴

Shinichi ARAI, Masatomo NAGAO, Mitsuo KAMIOKA and Takanori ARAI

¹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)

²正会員 工博 足利工業大学助教授 工学部土木工学科

³正会員 足利工業大学 工学部土木工学科

⁴学生会員 工修 足利工業大学大学院

The diffusion of a negatively buoyant jet that issued horizontally from a pipe outlet into shallow water and fell onto the horizontal bed was investigated experimentally. The densimetric Froude number of the jets are from 6.7 to 17.0. The velocity profile and the temperature profile of the freely falling jet and those of the horizontally spreading jet on the bed floor are emerged. Those profiles keep similarity in shape in each zone. As the distance s from the outlet along the axis of the jet increases, the maximum velocity of the profile decreases in proportion to s^{-1} or less in the freely falling zone. Meanwhile the maximum velocity decreases in proportion to $s^{-1.5}$ in the horizontally spreading zone. When the jet impinges onto the bed floor, the freely falling jet transforms smoothly into the horizontally spreading jet, but the entrainment of jet pause for a while.

Key Words : Velocity profiles, temperature profiles, entrainment, impingement

1. 緒言

沿岸に発電プラントなどを建設すると、プラントの冷却あるいは加温に使用された後の温水あるいは冷水を浅い海域に返却、放水しなければならない。海洋生物保護の見地から、冷排水の場合には、海底に落下した後に冷水塊を形成しない様にするなど、その拡散現象を十分把握しておく必要がある。いわゆる密度噴流の拡散特性は、温水の場合に良く研究され多くの知見が得られている。一方、冷水については、水平放出噴流の落下時の状況、及び、水平床に放出されて広がる壁面噴流の状況が調べられているものの、水底に落下して衝突し、それからさらに広がるような拡散現象はあまり調べられていない。

このような状況に鑑み著者らは先に、水平底を有する浅い海域で冷水が水平に放出された場合の噴流拡散状況を実験的に調べ、落下、衝突、水平拡散と続く一連の噴流の挙動について概要を報告し、冷排水温度希釈率の簡易推定法の骨格を提案した¹⁾。この時、衝突による冷水の周囲流体との混合は期待に反してあまり進行しないのではないかなど、さらに調査すべき事項が浮かび上がった。これを受けて本研究では、拡散現象をさらに詳しく調べるための

実験を実施し考察するとともに、特に、水底衝突時の流れの様子を明らかにしようとした。

2. 実験方法

実験は、図-1に示すように、 1m^3 の恒温水槽にあらかじめ所定温度の冷水を作成しておき、これを高水槽にあげて $12\text{m} \times 5\text{m}$ の平面水槽に放水した。放出口は内径 D_o が 3cm の円形であり、水槽側壁から 1m 、水底から($h_o =$) 0.2m の位置に設けられた。平面水槽の水深 h_w は 0.3m であり、放出口の反対側から越流するようになっている。放出された冷水は水底を這うようにして広がるが、計測は、流れが定常状態に収まる15分後から開始し、冷排水が側壁から反射してくる前に終了せしめた。

放出された噴流冷水は、図-2に示すように、まず密度差により落下しつつ拡散し、水底に衝突して、底面を3次元壁面噴流として拡散を続けていく。そこで、それぞれの領域を順に、自由落下領域、衝突領域、水平拡散領域と呼ぶこととする。

ここでは以下の複数の座標系を使用する。一つは

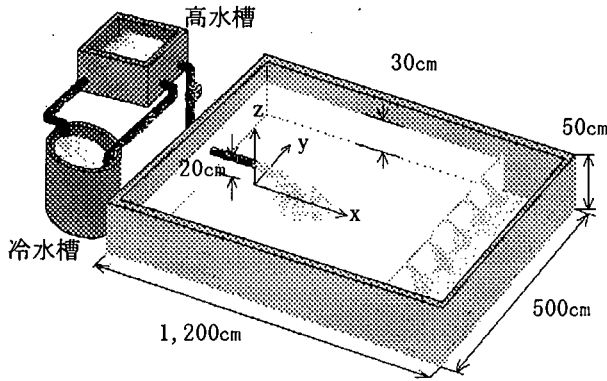


図-1 実験装置

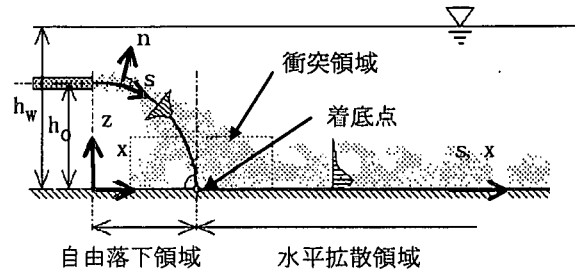


図-2 座標と領域

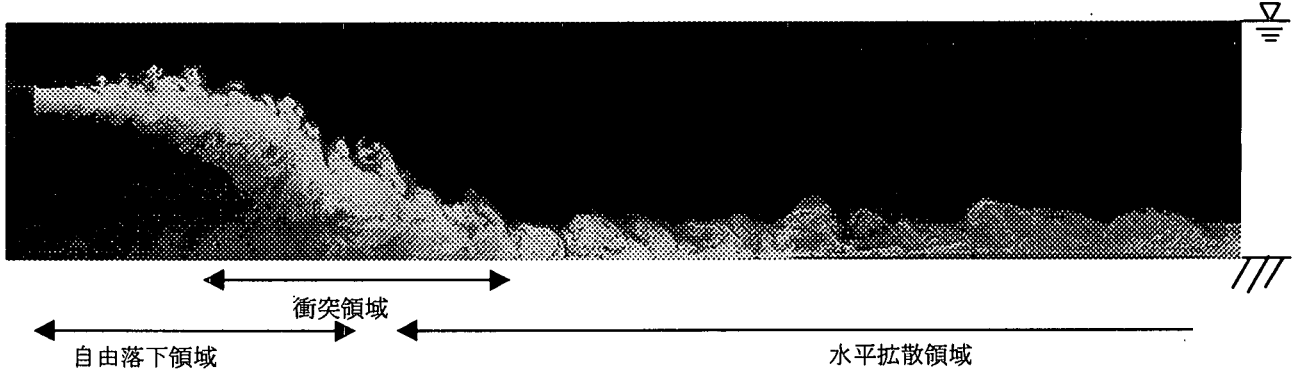


図-3 冷排水拡散状況 (FR9)

表-1 実験ケース

Case	F_{ro}	u_o (cm/s)	ΔT_o (deg)
FR17	17.0	18.9	-4
FR13	13.3	18.9	-6
FR11	11.3	9.4	-2
FR9	8.7	9.4	-4
FR7	6.7	9.4	-6

図-1に示すように放出口真下の底面に原点を有するx-y-z座標系である。この3軸方向の速度を順に、 u 、 v 、 w とする。もう一つは図-2に示すように放出口から流下する噴流の軸に沿ったs軸とそれに直角方向上向きにn軸による座標系である。この2軸方向の速度を順に u_s 、 w_n とする。

密度噴流の流速は3種類の方法を使い分けて計測した。まず、PIV(Particle Image Velocimetry)による計測である。すなわち、放出水を蛍光染料(フルオルセインナトリウム)で着色し、これにアルゴンイオンのレーザーシート光を照射し、所望の断面を可視化する。このようにして得られた映像の模様の変化から断面内の流速を解析する。この方法は、主流方向の速度を求めるのに適しており、従って、密度噴流中央縦断面の流速計測に用いた。図-3は例として示したもので、可視化した放出密度噴流中央縦断面の様子である。

次に、PTV(Particle Tracking Velocimetry)による計測である。これは、放出水に微粒子(ダイヤイ

オンHP20)を混入させておいてレーザーシート光を照射する方法で、照明された画像上の微粒子を追跡することにより流速を求めるものである。噴流横断面での流速計測には、PIVは不適当なので、このPTVを用いた。

最後は、2次元LDV(Laser Doppler Velocimetry)である。水平拡散域では、拡散が進行して着色効果も弱まり画像計測が困難になるので、PIVの他に、この流速計を用いてx,y方向の速度成分を計測した。

密度噴流の温度は熱電対(Cタイプ)で計測した。流速も温度も3分間の平均値を計測値とした。ただし、PTVによる場合だけは25.4秒の平均値である。

実験は、表-1に示すように、放水流速 u_o と放出水の周囲流体に対する温度差 ΔT_o を変えることにより、放出口内部フルード数 F_{ro} を変えて、5ケース実施した。ここに、

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

であり、 $\Delta \rho_o$ は放出流体と周囲流体の密度差、 ρ_a は周囲流体の密度、 g は重力加速度、 D_o は放出口径である。

3. 流速と温度差の分布形状

(1) 自由落下領域

例としてFR9のケースで、自由落下領域の噴流の

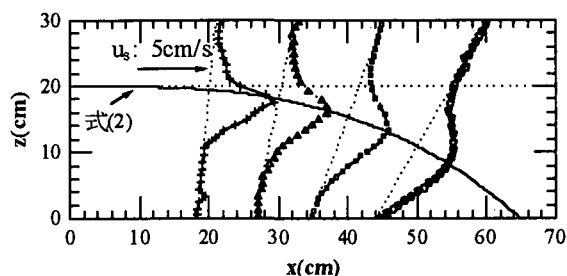


図-4 自由落下領域の流速 u_s (FR9)

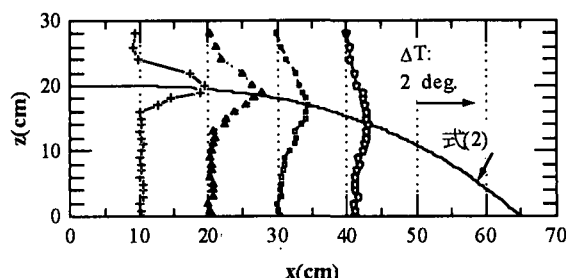


図-5 自由落下領域の温度差 ΔT (FR9)

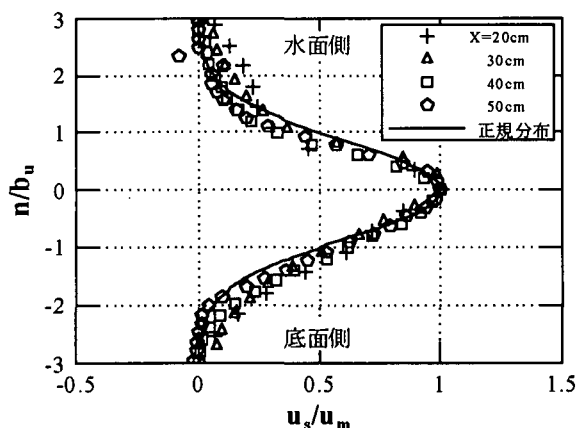


図-6 自由落下領域の流速分布形 (FR9)

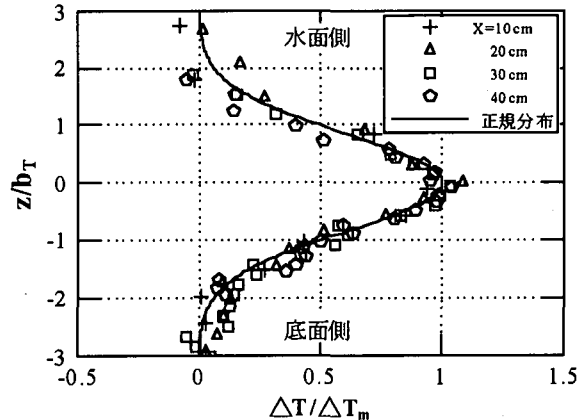


図-7 自由落下領域の温度差分布形 (FR9)

流速と温度差の結果を図-4と図-5に示した。図中に示した実線は、式(2)で示す片野ら²⁾の実験式で、無限流体中における密度噴流に対する中心軸の軌跡である。

$$\frac{z-h_0}{D_0} = -0.0493 F_{r0}^{-2} \left(\frac{x}{D_0} \right)^3 \quad (2)$$

PIVによる計測流速は任意の点における任意の方向の速度を出せるので、(2)式による噴流中心軸である s 軸に直角な n 軸上の s 軸方向流速 u_s を図-4に示した。これにより噴流速度が徐々に拡散していく様が観察されるとともに、本実験例の噴流中心が無限流体中の結果である式(2)とほとんど一致することが分かる。すなわち、本例は水面と水底が境界条件として存在するが、噴流落下経路に及ぼすそれらの影響はほとんどないといえる。

また、図-5では、温度差もこの噴流中心軸に沿って拡散していく状況が分かる。

これらの分布形状を、流速および温度差それぞれの最大値 u_m および ΔT_m と、それぞれの半値における分布の半幅（以下、半値半幅） b_u および b_T で規格化してみると、図-6と図-7を得る。図中の実線は正規分布である。子細に見ると、水面側と底面側では分布の形状が異なる。それは、水面側の境界面では重い流体の上に軽い流体がある安定構造であり、水底側の境界面では軽い流体に重い流体が乗っている不安定構造であるので、両者の混合に対して密度差の及ぼす影響が異なるからである。しかしながら、概略で判断すれば、流下に伴い、流速分布も温度差分布も相似形を保ち、それは正規分布に近いといえる。

(2) 衝突領域

同じくFR9を例とし、衝突領域の x 軸上における x 軸方向速度 u の分布を図-8に示す。これらはPIVにて計測された。図中の実線は式(2)による噴流の中心軸であり、この例の場合は $x=65$ cmで中心軸が水底に衝突している。図-2に示すように、この点を着底点と称することにする。 $x=50$ cmにおいて自由落下噴流の下端が底面に触れ始め、滑らかに壁面噴流へと分布形が変わっていく様子が見て取れる。また、衝突領域における温度差分布の例を図-9に示す。変化の様子があまり明瞭ではないが、温度差の希釈が進行し、軸対称的噴流から壁面噴流へと移行していく様子が分かる。

図-10は、着底点における噴流横断面内の v と w を調べたもので、等速度線図である。この結果はPTVにより得られたものである。 v の図で、実線は右への流れを、そして破線は左への流れを示しているので、着底点では噴流中心から左右対称に広がりつつあることが確認できる。また、 w の図では実線が上昇流を、そして破線が下降流を示しているので、局部的に上昇部があるものの、全体が下降していることが分かる。

一方、図-11は図-10と同じ断面における、 $\Delta T / \Delta T_0$ で表した等温度差線図である。ここに、 ΔT_0 は放出口での温度差である。これによれば、着底点ではすでに幅方向にも成層状の分布となり、冷水が広がりつつあることが分かる。

噴流を目視観察していると、放出された自由落下噴流は、時間的に脈動しながら周囲流体を内部に連行し、着底時にも激しく連行しているように感じら

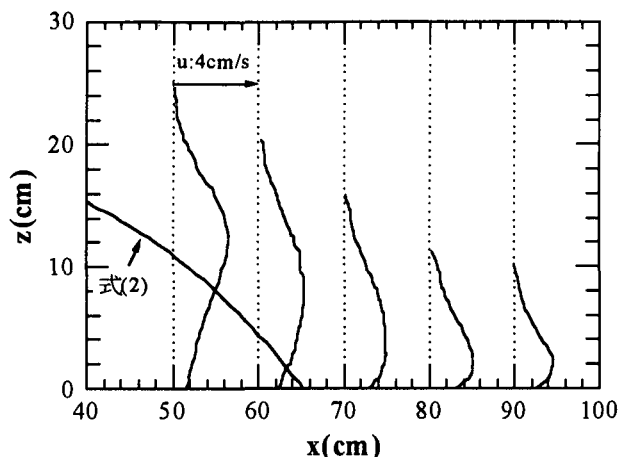


図-8 衝突領域の流速 (FR9)

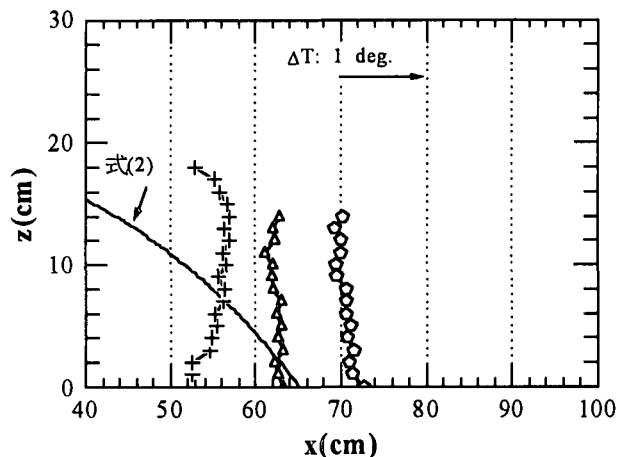


図-9 衝突領域の温度差 (FR9)

れる。しかしながら、現象を時間平均してみると、軸対称噴流的な自由落下密度噴流は水底に衝突すると整然と壁面噴流に移行していくことが、以上の結果より浮かび上がってくる。

(3) 水平拡散領域

噴流は着底後に水底上を水平に拡散していく。図-12はx-y平面におけるその流況をLDVで調べた結果の一例である。冷水はx=0cm、y=0cmから放出され、x=65cm、y=0cmの点で着底し、図示のごとく広がっていく。白丸印が計測点で、そこからベクトルで流速を示してある。実線が水底から2cmの高さの結果、また、点線が11cmの高さの結果である。この様に、水底近くでは流れが強く、落下後には扇状に広がっていくが、その上層では、連行されるためか、噴流の中心軸方向に流れ込む様相となる。

図-13はPIVで調べたx軸上における主流流速uの変化の様相である。進行するにつれて流速が低下し、流れが層厚を増しながら拡散していく様子が分かる。図-14はこの流速分布をその分布における最大流速 u_m で、また、zを分布の半値厚さ h_u でそれぞれ規格化して比較したもので、破線で示してある。図中の実線は、式(3)であり、水底から最大流速の高さまでは壁面境界層の流速分布を、また、そこから上には正規分布を採用した近似式である。

$$u/u_m = \exp\left\{-c_1\left(\frac{z}{h_u} - c_2\right)^2\right\}, \quad \frac{z}{h_u} \geq c_2 \quad (3-1)$$

$$u/u_m = c_3 \cdot \left(\frac{z}{h_u}\right)^{0.6} \exp\left\{-c_4 \frac{z}{h_u}\right\}, \quad \frac{z}{h_u} \leq c_2 \quad (3-2)$$

ここに $c_1=1.413$ 、 $c_2=0.300$ 、 $c_3=3.75$ 、 $c_4=2.01$ である。これらの係数は、水鳥ら³⁾が2次元壁面密度噴流の実験から得たものと同じ結果を与える。また、図中の黒丸印はLDVにより計測された結果で、少しばらついているのは計測時間が十分でないためと思われる。これらの結果を比較すると、まず、LDVとPIVの計測結果が良く対応しており、双方とも良い結果を与えていることを確認できる。ただし、PIV

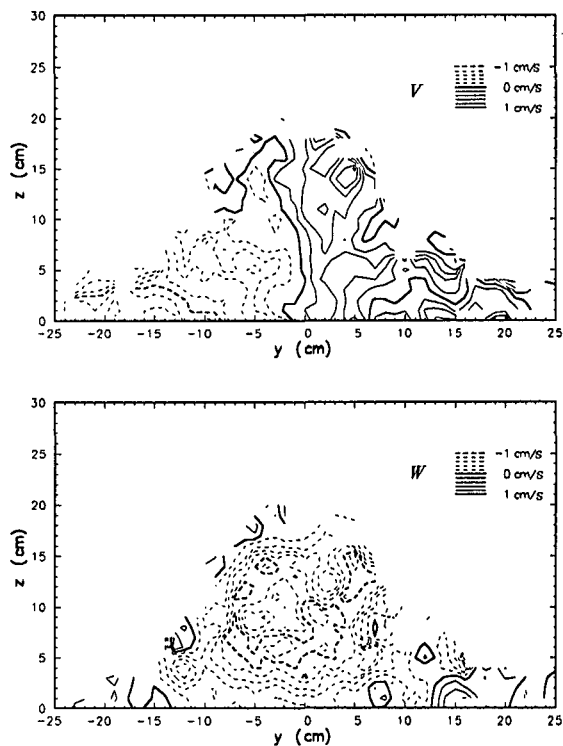


図-10 噴流着底点横断面内流速分布 (FR9)

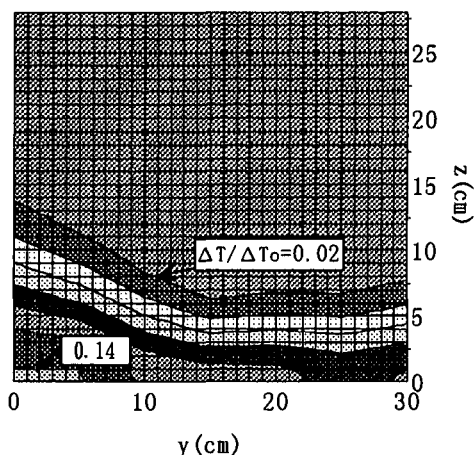


図-11 噴流着底点横断面内温度差分布 (FR9)

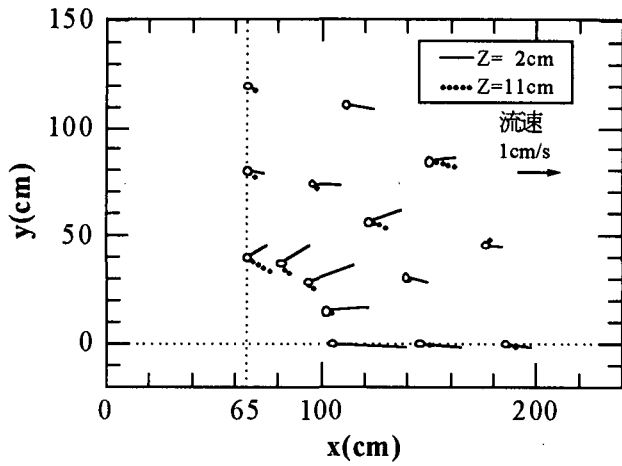


図-12 水平拡散領域の平面断面内流速 (FR9)

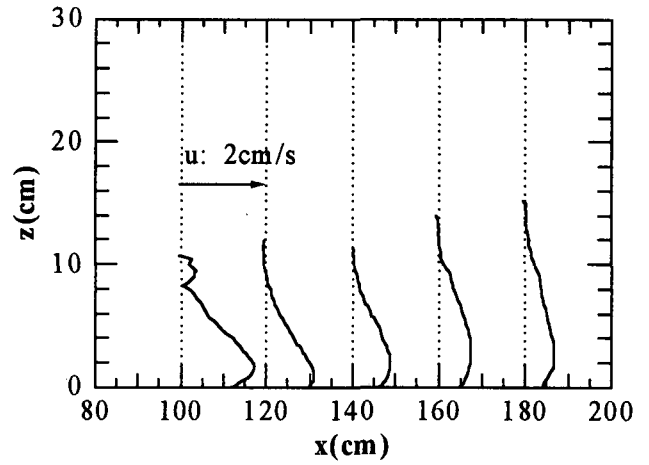


図-13 水平拡散領域の流速 u (FR9)

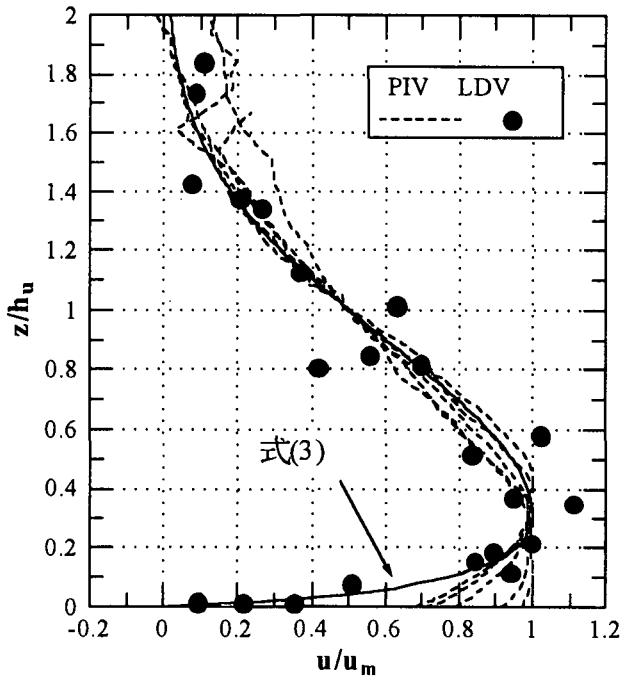


図-14 水平拡散領域の流速分布形 (FR9)

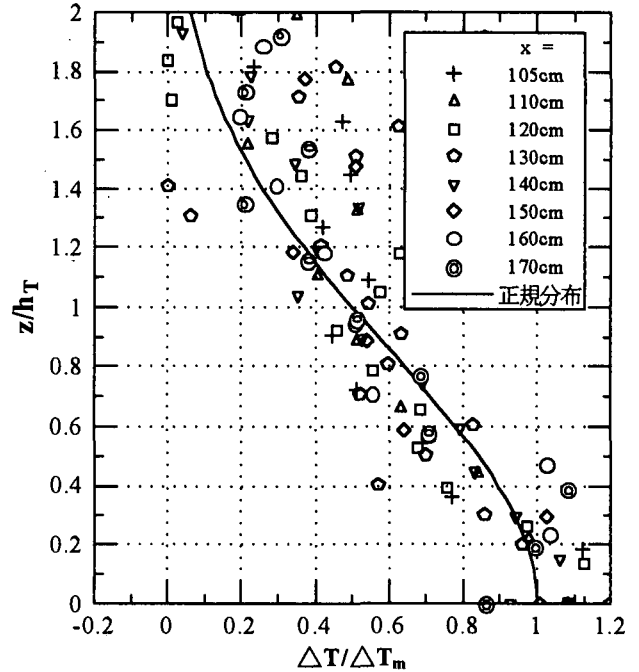


図-15 水平拡散領域の温度差分布形 (FR9)

による結果は、解析手法上の限界により底面境界付近では精度が低下する。すなわち、底面で速度がゼロとならず、LDVとは異なる値を与えていることに注意されたい。次に、実線と比較してみると、実験結果はこれに良く一致していることから、本実験のような3次元壁面密度噴流でも式(3)によりその分布形を近似できることが分かる。

一方、図-15はこの領域における温度差の分布形状で、それぞれの分布の最大温度差 ΔT_m と温度差分布の半値厚さ h_T で規格化されたものである。図中の実線は正規分布である。すでに温度差はかなり希釈されているため、計測精度上の問題から計測値に上部ほど大きなばらつきがでていものの、水平拡散領域での温度差分布は正規分布形で近似できるといえる。

4. 流速と温度の減衰

図-16は、噴流横断面における最大速度 u_m について、自由落下領域から水平拡散領域にわたる減少状況を全実験ケースに対して示したものである。横軸に用いた L_s と縦軸に用いた U_s はそれぞれ密度噴流の特性長と特性速度であって、式(4)により定義される。

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

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

ただし、

$$M_o = u_o^2 A_o + g(\Delta \rho_o / \rho_a) A_o D_o \quad (5-1)$$

$$B_o = u_o g(\Delta \rho_o / \rho_a) A_o \quad (5-2)$$

であり、ここに、 A_o は放出口断面積である。図中

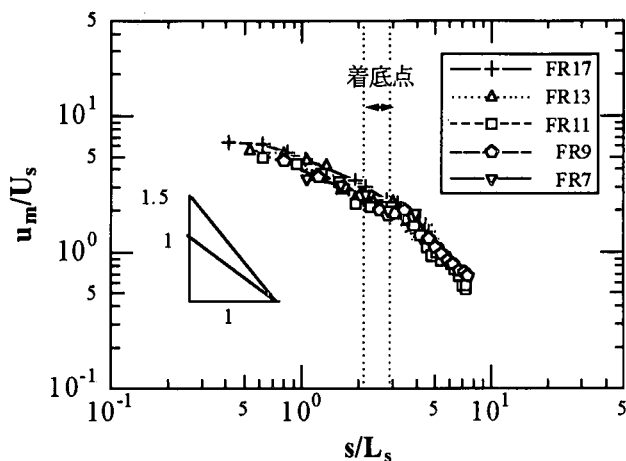


図-16 流下に伴う流速 u_m の減少

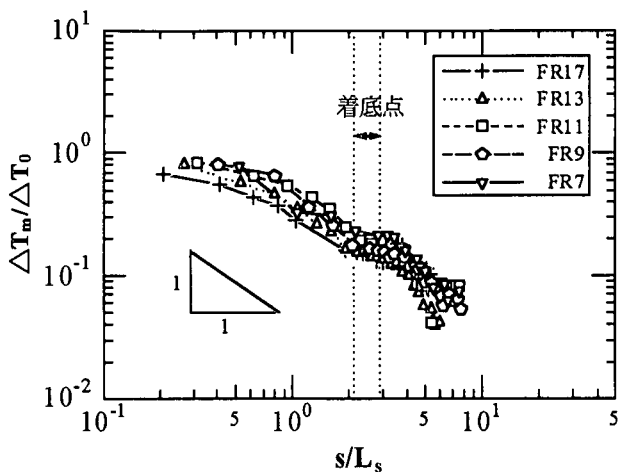


図-17 流下にもなう温度差 ΔT_m の希釈

には各実験ケースの着底点位置の範囲を破線で示している。

図-16によれば、着底点を境に、自由落下領域と水平拡散領域で速度減少の早さが変化する。密度差のない軸対称噴流の u_m は勾配が -1 すなわち s^{-1} で減衰する⁴⁾が、着底前の自由落下密度噴流の u_m は減少の勾配が -1 より緩やかである。これに対して、3次元壁面密度噴流の u_m は $s/L_s \leq 6$ では減少の勾配が -1 と報告³⁾されているが、着底後の密度噴流は、およそ -1.5 の勾配で減少している。

一方、図-17は噴流横断面内の最大温度差の減少状況、つまり、希釈状況を示している。流速と同様に、自由落下時と水平拡散時では温度差の減少の勾配が変わる。この図で注目されたいのは着底時の状況である。すなわち、衝突時には温度差の希釈の進行が一時、停止するということである。これは、衝突領域で冷排水噴流は暖かい周囲流体をほとんど連行・混合しないということを意味しており、前報¹⁾で提案した「衝突領域における非連行」の現象を肯定する結果である。

5. 結言

水平に放出される冷水が海底に落下して拡散していく現象を実験的に調べてみた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 自由落下領域においては密度噴流の上面よりも下面での混合が進む傾向にあるが、噴流断面の速度分布も温度差分布も流下に伴い相似形を保ち、概ね、正規分布形で近似できる。

- (2) 衝突領域では、落下前の軸対称的噴流が滑らかに押しつぶされ、壁面噴流へと変化する。その時、温度差はほとんど希釈されない。これは、前報¹⁾における「衝突領域における非連行」を支持する結果である。

- (3) 落下後の水平拡散領域において流速分布は式(3)によって与えられる。また、温度差分布は正規分布である。

- (4) 密度噴流断面流速の流下に伴う減少は、落下前は流下距離の -1 乗よりやや緩やかであり、落下後の水平拡散時にはほぼ -1.5 乗で減衰していく。

謝辞：本研究を実施するに当たり、本学平成10年度卒研究生、後藤良英、佐藤義久、千田勝幸、眞板典大、萬真典の諸氏には実験で多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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，電中研報告，378506, p. 56, 1979.
- 3) 水島雅文、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.
- 4) ラジャラトナム, N.: 噴流，森北出版，1981.

(1999. 4. 19受付)