

沿岸域に表層放水された重力噴流の 3次元拡散特性

3-DIMENSIONAL DIFFUSION CHARACTERISTICS OF FORCED PLUME SURFACE-DISCHARGED IN COASTAL SEA

水鳥雅文¹・坪野考樹²・坂井伸一²・仲敷憲和¹・松梨史郎¹

Masafumi Mizutori, Tsubono Takaki, Shin'ichi Sakai, Norikazu Nakashiki and Shiro Matsunasi

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境科学部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²正会員 工修

同上

The diffusion behavior of a forced plume surface-discharged in coastal sea was investigated by field observation and numerical simulation. The distribution and fluctuation of velocity and temperature were measured in the field, and then the characteristics of the 3-dimensional structure and vertical eddy viscosity / diffusivity were evaluated. In this case, a 3-dimensional turbulent closure model ($k-\epsilon$ model) was applied to simulate the behavior of surface forced plume. The performance of the 3-dimensional model was also discussed by the comparison of numerical results with the in-situ data.

Key Words : forced plume, surface discharge, turbulent mixing, field observation, $k-\epsilon$ model

1. はじめに

本研究は、実海域において沿岸から比較的高流速で表層放水される温排水（表層重力噴流）の拡散現象を対象として実施した現地観測および3次元数値シミュレーションの各結果について報告するものである。

沿岸から表層放水された温排水は、放水条件や海域条件等の影響により、複雑な拡散特性を示す。一般に、放水口近傍では、噴流的特性が強く、放水条件（流量・流速・放水口形状）や海岸・海底地形の影響を大きく受ける。そして、徐々に遠方に拡散するに連れて、海域の乱流拡散や海面での熱交換の影響が支配的になっていく。

従来から表層重力噴流としての温排水拡散に関する研究は数多くなされてきたが、こうした複雑な影響要因が絡み合う実海域での拡散実態や乱流特性を明らかにした研究事例は数少ない。

本研究では、まず現地観測によって表層放水された温排水の3次元水温・流動構造の空間変化の実態と噴流域近傍における乱流特性について考察する。ついで、筆者らがこれまで水平重力噴流（水中放水）を対象に適用性を明らかにしてきた3次元 $k-\epsilon$ モデル^{1), 2), 3)}を用い、本現象への適用性、特に噴流内の乱流特性の再現性について検討する。

2. 現地観測

(1) 対象海域と放水諸元

現地観測は、平成5年11月、図-1に示す比較的直線的な海岸線を有する外海域において実施された。当該海域は、流れの周期性が微弱で沿岸に平行方向の流れが卓越する海域である。観測期間中は主に南流傾向であった。

対象とした温排水は、図-1中の放水口（幅9m）より、観測期間中、流量47.4m³/s、流速約2m/s、取放水温度差8.4℃、塩分量33.0の条件で表層放水されていた。放水

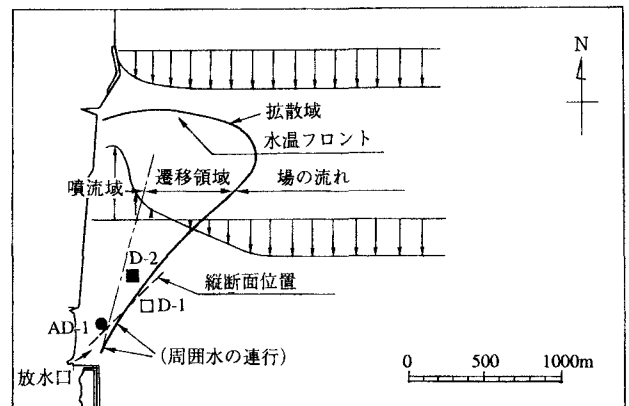


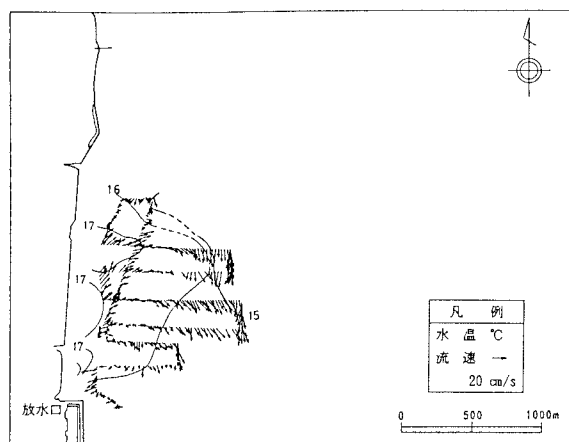
図-1 対象海域と噴流全体像の模式図

方向は、海岸線から約45°の角度である。

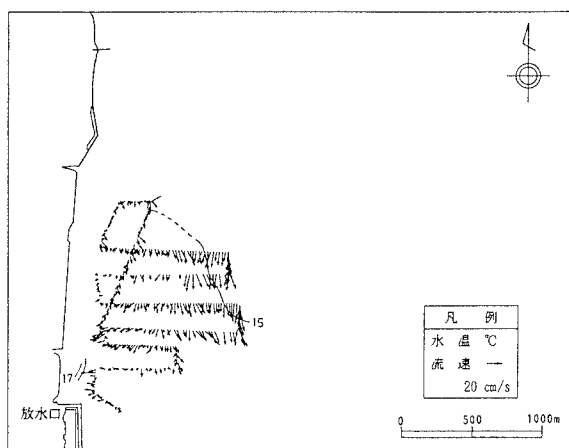
(2) 3次元空間構造の観測

温排水拡散の全体像を把握するため、ADCPおよび曳航式水温・塩分計測システムを用いて、当該海域の流速、水温、塩分の3次元空間分布を測定した。

図-2は、海面下1mおよび3m層における水平流速ベクトルおよび水温の各分布である。観測時の環境水温は、空間的にばらつきが見られたが、概ね15℃前後と判断された。放水口から出た温排水は、その直後から放水方向よりも海岸線に沿った向きに拡散していることがわかる。これは、主に岸沖方向の海底地形の影響により、沖合側からの連行加入が岸側からよりも大きいことに起因していると考えられる。その後は、北上するに従って徐々に沖合方向に向きを変える傾向がみられる。これは、噴流の流れと相対する南向きの海域流動の影響によるものと考えられる。また、海面下1m層でのこの間の岸沖方向の流速分布をみると、沿岸近くでは噴流状の流動分布を形成するとともに、沖合いの南流域との中間に、流れの微弱な遷移領域の形成が認められる。これらの結果から推定される水平的な流れの構造を前出の図-1中に模式的に示す。



(1) 海面下1m



(2) 海面下3m

図-2 水平流速・水温分布（観測結果）

次に図-3に放水口からほぼ放水方向に沿った水平流速ベクトルおよび水温の縦断面分布を示す。放水口に近い噴流域では、水深方向にほぼ様な流速、水温分布を呈し、噴流中心から幾分外れているとみられる400m以遠では、温水層厚は2～3m程度となっていることが分かる。

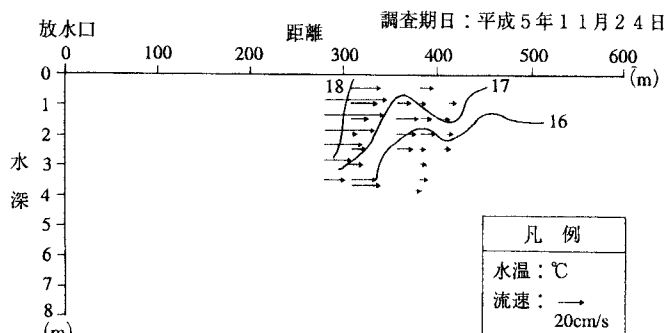


図-3 縦断面流速・水温分布（観測結果）

(3) 噴流域近傍での乱流計測

噴流域近傍での乱流量、特に鉛直方向の渦動粘性／拡散係数を算定することを目的に、2種類の観測を実施した。第一の観測では、図-4に示すように電磁流速計、波圧計および水温・塩分計測システムを付けた架台を海底上に設置し、3方向の流速成分、水圧、水温および塩分を1秒間隔で約40時間連続同期観測した。ただし、各係数の算定にはその内の3時間の連続データを選定している。測定層は、流速と水圧は海底上3m、水温・塩分は海底上0.5mから3mまでを0.5m間隔とした。測点は、図-1中に示すD-1およびD-2の2点である。観測期間中の表層流速分布から判断すると、測点D-1は噴流の流れの影響をそれほど受けておらず、測点D-2はそれに比べ若干噴流域近くに位置しているものと判断された。

第二の観測では、図-1中に示す測点AD-1の海底上に上向きに固定したADCPにより3方向の流速成分を、海底上1.25mから3.75mまで0.5m間隔で、2秒間隔、約1時間連続した。水温・塩分についてはCSTDを用いて、スポット的に鉛直分布を測定した。

鉛直渦動粘性／拡散係数を算定する方法としては、以下の4つの方法を用いて算定した。ただし、測点D-1のデータでは1)と2)の方法を、測点D-2では1)～3)の方法を、測点AD-1では2)と4)の方法を用いた。

[鉛直渦動粘性係数]

1) 自己相関係数から算出する方法(Az₁)

$$A_{z1} = \beta \overline{w'^2} \int_0^{\infty} \gamma_w(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_w(\tau)$ ：鉛直流速の自己相関関数、 $\beta=1$ 。

2) レイノルズ応力から算出する方法(Az₂)

$$A_{z2} = \frac{-\overline{u'w'}}{\partial u / \partial z} \quad (2)$$

[鉛直渦動拡散係数]

3) 乱流熱輸送量から算出する方法(K_{z1})

$$K_{z1} = \frac{-\overline{T'w'}}{\partial T / \partial z} \quad (3)$$

4) エネルギー逸散率から算出する方法(K_{z2})

$$K_{z2} = \frac{0.2\varepsilon}{N} \quad (4)$$

ここで、 N ：ヴェイサラ振動数、 ε ：エネルギー逸散率。

本観測期間においては、海域のうねりが大きく、いずれの測点においても、周期約10秒をピークとする波浪の影響と見られる振動流成分が顕著に認められた。そのため、上式の適用にあたっては、観測データからこうした振動流成分の除去した結果を用いた。除去方法は、測点D-1、D-2のデータについては、流速成分と同期して観測した水圧の時間変化との1次回帰式（図-5）から振動流成分を推算し、除去した。図-6に測点D-2における振動流成分除去後の鉛直流速変動のエネルギースペクトルを示す。なお、測点AD-1のデータについては、同期した水圧データを取得していないため、20秒の移動平均を行い振動流成分を除去した。

各方法によって得られた算出結果を表-1に示す。表中には各係数を算出するために求めたパラメータも併記している。まず、同じ観測方法で測定した測点D-1とD-2の鉛直渦動粘性係数を比較すると、測点D-1よりも噴流の影響を受けているとみられる測点D-2の方がやや大きい値を示している。また、これらの測点と、放水口に近く、より噴流の影響をうけているとみられる測点AD-1の値を比較すると、測点AD-1の方が大きい値を示した。測点D-1、D-2と測点AD-1では観測方法に違いがあるものの、この3測点で得られた結果は、噴流の影響程度から考えて、定性的には妥当な結果と判断される。

一方、鉛直渦動拡散係数については、測点D-2、AD-1とも $1\sim 2\text{cm}^2/\text{s}$ の値を示し、粘性係数に比べ1オーダー程度小さい値が得られた。この結果は、温排水による成層化によって運動量の拡散よりも熱拡散の方が大きく抑制されているためと推察される。

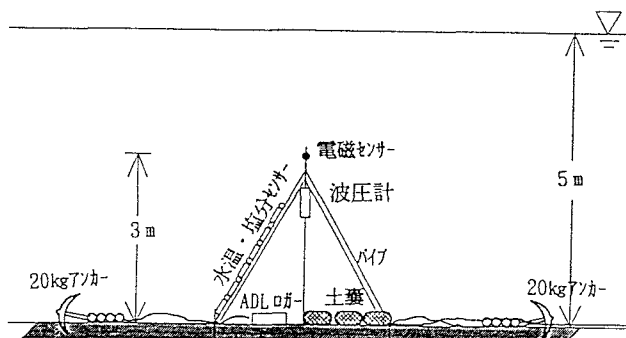


図-4 乱流計測用架台の設置状況

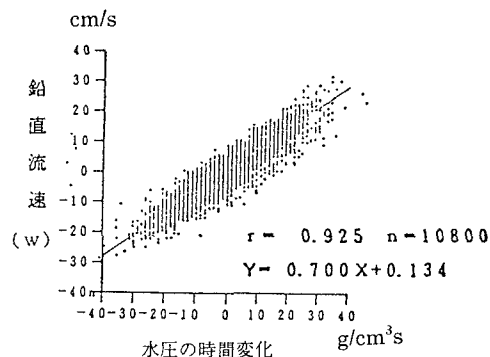


図-5 鉛直流速と水圧の時間変化との相関(測点D-2)

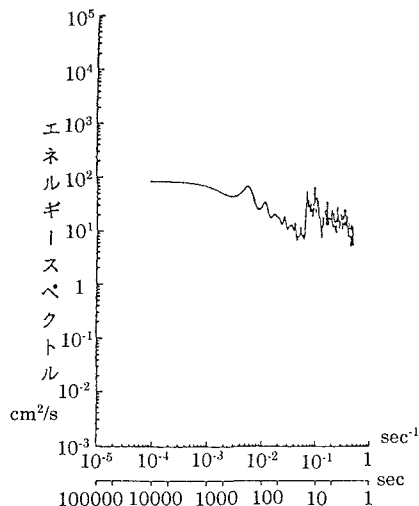


図-6 鉛直流速変動のエネルギースペクトル(測点D-2)

表-1 渦動粘性・拡散係数および関連パラメータの観測結果
(単位はCGS系)

領域の区分	噴流域外	遷移領域	噴流域
測点	D-1	D-2	AD-1
観測層	海底上3m	海底上3m	海底上3.25m
A_{z1}	3.0	6.0	-
A_{z2}	7.5	11.7	23.9
K_{z1}	-	1.2	-
K_{z2}	-	-	1.5
σ_w^2	4.8	8.8	-
$-\overline{u'w'}$	0.69	0.58	1.3
$\partial u / \partial z$	0.092	0.050	0.052
$-\overline{T'w'}$	-	0.0026	-
$\partial T / \partial z$	-	0.0022	-
ε	-	-	0.0091
N	-	-	0.035

3. 3次元k-εモデルによる数値計算

(1) 数値モデルの概要

前章の現地海域に対して、筆者らが水平重力噴流（水中放水）に適用してきた浮力を考慮した3次元k-εモデルを用い、表層重力噴流拡散現象の再現を試みた。

モデルの基礎式および計算手法は、既往の文献1)～3)の通りであるので、詳細な記述は省略するが、用いた計算手法の特徴を述べると、以下のとおりである。

- 1) 圧力の計算は、自由水面を考慮したHSMAC法を採用
- 2) 直交座標系において海底地形を精度良く模擬するために、FAVOR法¹⁾を採用
- 3) 拡散方程式の移流項の差分化には、高精度で安定性のあるTVDスキーム¹²⁾を採用

(2) 渦動粘性／拡散係数の設定

渦動粘性／拡散係数の設定についても基本的には文献3)で用いた設定方法に準じるが、今回は、S.Blossらの成層化関数¹⁾を導入し、非等方的な取扱いをしている。

具体的には、放水口近傍では噴流自身の乱れに依存し、遠方に行くに従って海域の乱れに依存するという考え方を基に、渦動粘性係数 A は、次式のように噴流自身による渦動粘性係数 A_t と海域の乱れによる渦動粘性係数 A_a の卓越する方を計算点毎に設定する。

$A = \max(A_a, A_t)$ (5)

ここで、

$A_a = 0.01 \times L^{4/3}$ (水平方向) (6)

$A_a = A_0 (1 + 3R_1)^{-1}$ (鉛直方向) (7)

$A_t = \nu + C_\mu k^2 / \epsilon$ (水平方向) (8)

$A_t = \nu + C_\mu (1 + 3R_1)^{-1} k^2 / \epsilon$ (鉛直方向) (9)

L ：海岸線からの距離（陸地境界による乱れの空間スケールの抑制を想定し、リチャードソンの4/3乗則に基づき設定。ただし、観測結果に基づき、沿岸方向 5×10^4 、岸沖方向 $1 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ を上限値とした。）、 $A_0 = 5 \text{cm}^2/\text{s}$ 、 ν ：分子粘性係数、 $C_\mu = 0.09$ 、 R_1 ：局所リチャードソン数、である。

渦動拡散係数 K も 式(5)と同様の考え方にに基づき設定する。海域の乱れによる渦動拡散係数 K_a と噴流自身による渦動拡散係数 K_t は、次式のとおり。

$K_a = 0.01 \times L^{4/3}$ (水平方向) (10)

$K_a = K_0 (1 + 3R_1)^{-3}$ (鉛直方向) (11)

$K_t = k_T + C_\mu k^2 / P_r \epsilon$ (水平方向) (12)

$K_t = k_T + C_\mu (1 + 3R_1)^{-3} k^2 / P_r \epsilon$ (鉛直方向) (13)

ここで、 $K_0 = 5 \text{cm}^2/\text{s}$ 、 k_T ：熱の分子拡散係数、 P_r ：乱流プラントル数(=0.7)、である。

(3) 計算条件

計算領域は、南北約8.7km、東西約6kmとし、放水口を原点として、格子間隔を水平方向は2.12m（放水口付近）から約1000mまで、水深方向は0.5m（水面付近）から5.6mまでの可変格子とした。格子数は、南北方向71、東西方向42、水深方向25である。

計算に用いた境界条件の一覧を表-2に示す。放水条件は2(1)で述べた放水諸元と同様である。放水口の格子分割は、水平に3、鉛直に5であり、放水口での乱流エネルギー k および散逸率 ϵ の条件は次のとおりである。

$k = \alpha U^2$ ($\alpha = 0.002$, U ：放水流速) (14)

$\epsilon = C_\mu k^{3/2} / h$ ($C_\mu = 0.09$, h ：放水口開口高) (15)

また、海域の流動条件は、放水口から沖合い約2kmの地点で20cm/sに設定した。

(4) 計算結果

図-7(1)に、放水開始後12時間後における計算領域全体の流速ベクトルおよび水温の表層分布を示す。計算結果は、図-2(1)の観測結果や図-1の模式図で示した放水直後の沿岸に沿った北向きの拡散、ならびにその後の海域流動の影響による沖合方向への流向の変化傾向と良く一致している。

また、放水口近傍を拡大した図を図-7(2)に示す。放水口近傍では、沿岸側からと防波堤護岸に沿った沖合側からの顕著な連行加入が認められ、噴流の中心軸が徐々に沿岸沿いに変化して行く様子がみてとれる。

図-8には図-3で示した観測結果とはほぼ同位置の断面に沿った流速ベクトルおよび水温の鉛直断面分布を示す。放水口に近い噴流域内における水深方向にはほぼ様な流速、水温分布や、噴流域から幾分離れたところでの温水層厚など、計算結果は観測結果を概ね良好に再現していることが分かる。

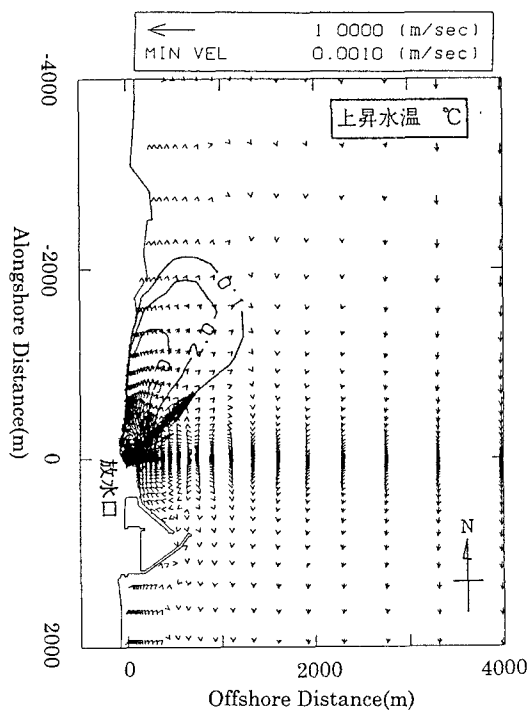
次に、噴流域内での鉛直渦動粘性・拡散係数について計算結果と観測結果を比較する。図-9には前出の測点AD-1における鉛直渦動粘性・拡散係数の鉛直分布を示している。観測結果をみると、両係数とも海面から2～2.5m程度の深さの層に乱れの比較的大きい分布が認められる。計算結果は、観測結果に比べやや乱れの大きい層が厚いものの、形状の特徴や係数値のオーダーなどは、

表-2 境界条件

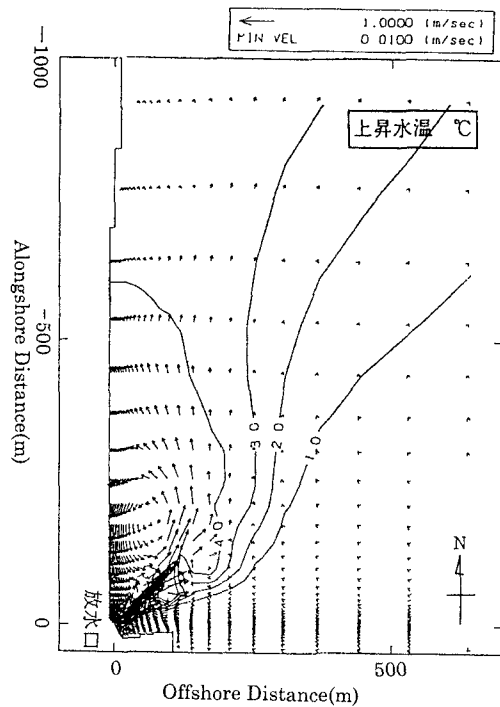
	海岸線 海底面	流出境界	流入境界	海表面
流速	FreeSlip	$\frac{\partial u, v}{\partial n} = 0$	固定	自由水面
圧力	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	0	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
水温	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	環境水温 (15.2℃)	放熱条件
k	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	固定*	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$
ε	$\frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$	固定**	$\frac{\partial \epsilon}{\partial n} = 0$

* $k = \alpha U^2$ ($\alpha = 0.002$, U ：境界に直角方向の流速)

** $\epsilon = C_\mu k^{3/2} / h$ ($C_\mu = 0.09$, h ：水深)



(1) 計算領域全体



(2) 放水口近傍拡大図

図-7 表層流速・水温分布(計算結果)

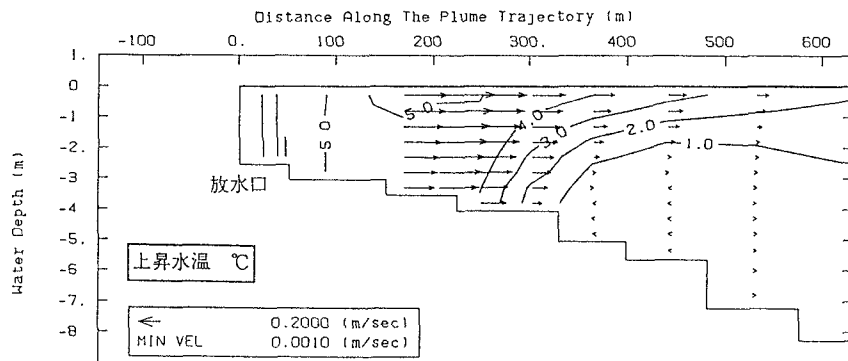


図-8 縦断面流速・水温分布(計算結果)

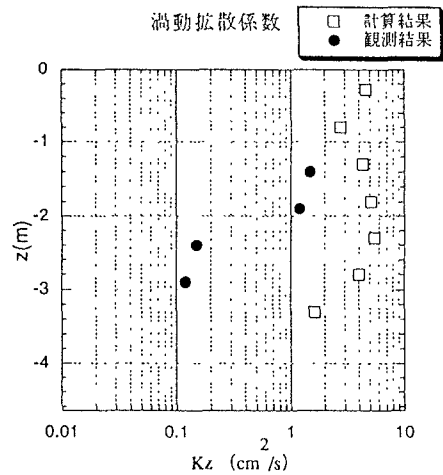
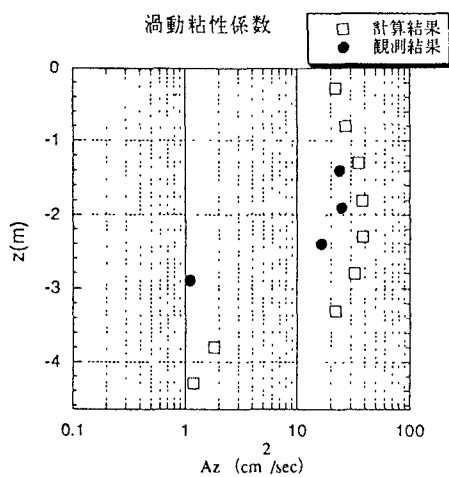


図-9 鉛直渦動粘性・拡散係数の鉛直分布(測点AD-1)

両係数ともに良く一致している。本研究では、両係数のモデル化について他の成層化関数を用いた場合との比較検討等を行っていないが、上記の結果は今回導入した成層化関数の妥当性を示していると言えよう。以上の結果より、本報で用いた3次元 $k-\epsilon$ モデルによって噴流内の鉛直方向の乱れ特性を概ね再現できたものと判断される。

なお、水平方向の渦動粘性／拡散係数については、式(8)および(12)で評価された領域は、放水口から沿岸方向約30m、沖合方向約30mの極近傍域のみであり、その最大値は放水口前面で $A_t = 0.26 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $K_t = 0.37 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$ であった。

4. 終わりに

現地観測結果に基づき、実海域における表層重力噴流（温排水）の拡散挙動の実態や噴流内における乱流特性について考察するとともに、3次元 $k-\epsilon$ モデルによる現象の再現性について検討し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 観測された流速・水温分布より、海岸線から 45° の角度で放水された噴流軸の海域流動や岸沖方向の海底地形の影響とみられる変動や、3次元的な流動・成層構造の特徴が把握された。
- (2) 噴流域近傍における乱流量を測定し、鉛直渦動粘性／拡散係数を算定した。その結果、放水口近傍の噴流域ほど粘性係数値が大きいなど、定性的に妥当な結果が得られた。また、拡散係数値は粘性係数に比べ約1オーダー小さい値が算定された。
- (3) 表層および縦断面の流速・水温分布に関して、計算結果は観測結果にみられる拡散挙動の特徴と良い対応を示した。
- (4) モデル化中の鉛直渦動粘性／拡散係数の算定に成層化関数を新たに導入することにより、両係数とも観測結果と計算結果は良く一致し、噴流内における鉛直方向の乱れ特性を良好に再現できたものと判断された。
- (5) (3)および(4)の結果より、実海域における表層重力噴流現象に対する本3次元 $k-\epsilon$ モデルの適用性の見通しが得られた。

今後は、表層放水と水中放水が混在するような複雑な放水場を対象に、現象の解明とその再現について検討していく計画である。

謝辞：本研究は、資源エネルギー庁受託「環境影響評価技術等実証調査」により実施した研究の一部である。本研究に関して貴重なご意見・ご指摘をいただいた関係者の方々に深く謝意を表します。

注1) FAVOR法⁵⁾：Porous Body Modelの一つ。流体占有率という概念を用い、多孔性と透過性を保存方程式に導入するとともに、運動方程式では、個体と流体の運動量の交換を抵抗として考慮する。

注2) TVDスキーム⁶⁾：Smoothness Sensorと呼ばれるパラメータを導入し、解の振動は起こらないが、数値拡散が大きい1次精度のGodunovスキームと、数値拡散が小さく精度は良いが、解の振動が起こる2次精度のLax-Wendroffスキームのそれぞれのよさを局所的に活かすように考えられた手法。

参考文献

- 1) 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拡散挙動について, 水工学論文集, 第40巻, pp.537-542, 1996.
- 2) 坪野考樹, 仲敷憲和, 松梨史郎, 坂井伸一, 丸山康樹：複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション, 水工学論文集, 第41巻, pp.295-302, 1997.
- 3) 坂井伸一, 松梨史郎, 仲敷憲和, 坪野考樹, 丸山康樹：3次元 $k-\epsilon$ モデルによる沿岸域における水平重力噴流の計算, 水工学論文集, 第41巻, pp.303-310, 1997.
- 4) Bloss, S., R. Lehfeldt and J. C. Patterson: Modeling turbulent transport in stratified estuary, J. Hydr. Eng., Vol. 114, No. 9, pp.1115-1133, ASCE, 1988
- 5) Hirt, C. J.: A porosity technique for the definition obstacles in rectangular cell meshes, Fourth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, pp.450-468, 1985.
- 6) 藤井考蔵：流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, pp.51-76, 1994.

(1998. 9. 30受付)