

温度成層条件における 海洋肥沃化装置「拓海」の放流水貫入深度

正員 板 東 晃 功* 桜 澤 俊 滋**
梅 木 雅 之* 正員 大 内 一 之***
池 上 康 之*

Intrusion Depth of Discharged Water from Ocean Nutrient Enhancer “TAKUMI”
into the Sea with Temperature Stratification

by Akiyoshi Bando, *Member* Shunji Sakurazawa
Masayuki Umeki Kazuyuki Ouchi, *Member*
Yasuyuki Ikegami

Summary

In this paper, model experiments and numerical calculations were performed in order to clarify the behavior of the discharged water from the ocean nutrient enhancer “TAKUMI” into the sea with temperature stratifications. The results demonstrate that temperature stratification prevents the discharged water from sinking to the bottom, and the calculation in this paper can estimate the intrusion depth of the discharged water from “TAKUMI”.

1. 緒 言

世界規模で食糧不足が一段と深刻化しており、その解決策の1つとして漁業資源の増産が望まれている。しかし漁業資源は、乱獲などの問題を抱えているのが現状である¹⁾。一方、世界の漁業資源の半分が、全海洋の0.1%の面積の湧昇域にあると言われている²⁾。湧昇域は、栄養塩の豊富な海洋深層水が表層に湧き上がる海域である。2000年に社団法人マリノフォーラム21は、漁業資源の増産を目指し、湧昇域を人工的に作り出す海洋肥沃化装置の開発計画を開始した³⁾。海洋肥沃化装置は、深層水取水管の検討^{4) 5)}、放水ポンプ試験⁶⁾、設計・製作⁷⁾などの過程を経て、「拓海」と命名され、2003年5月に相模湾中央に設置⁸⁾、現在稼動中である。「拓海」は、日量10万m³の深層水を取水し、放流水の沈降を防ぐ

ため表層水で密度調節後、水深20mの有光層に日量30万m³の放流を行っている。「拓海」設置海域では湧昇域と同様に、有光層に滞留した深層水の栄養塩により、植物プランクトンが増殖し、食物連鎖に従って好漁場が形成されることが期待されている。「拓海」を用いて効果的に海洋肥沃化を行うためには、放流水の挙動が最も重要である。しかし、実海域が深さ方向に温度勾配を持つ温度成層を有するため、放流水は熱拡散を含んだ複雑な挙動となる。

今までに「拓海」の放流水に関するいくつかの研究が行われてきた。「拓海」設計時に大内ら⁹⁾は、塩分成層を作成した2次元および3次元の水槽で、拓海模型を用いた放流実験を実施した。この実験では重力流の拡散挙動を確認し、「拓海」から放流された放流水が直径500m、厚さ12mの範囲で広がると予測している。また、「拓海」稼動後に大村ら¹⁰⁾、池谷ら¹¹⁾は、「拓海」設置海域における海洋調査を行った。この調査では水温・塩分濃度計測などにより、「拓海」からの放流水が海域に滞留していることが確認されている。その他、「拓海」の放流水と関連する研究として、馬場ら¹²⁾の成層流体中を

* 佐賀大学海洋エネルギー研究センター
** (株)ゼネシス
*** (株)大内海洋コンサルタント

進行する重力流の研究がある。この研究では可視化実験と2次元計算を行い、重力流の進行速度と構造に及ぼす成層の影響の調査を行っている。重力流に関して今まで数多くの研究が行われており^{13) 14)}、現在では、数値計算により重力流の先端部を詳しく調査した研究も実施されている¹⁵⁾。

現在、これらの研究に加えて、より詳細な放流水の挙動の検討が必要とされている。しかし、深層水放流に関して、実海域の温度成層を考慮した研究は少なく、「拓海」実機に適用可能な研究が必要である。本研究では、海洋肥沃化装置「拓海」の効果的な海洋肥沃化のため、温度成層条件下の放流水挙動の解明を目的とした。本論文では、特に「拓海」の技術課題である放流水の有光層への滞留に必要な、放流水の貫入深度に着目し、温度成層を作成可能な実験水槽での模型を用いた放流実験と、温度成層を考慮した3次元の数値計算を行った。

2. 温度成層中の放水実験

実験は、Fig. 1に示す佐賀大学海洋エネルギー研究センターの海洋深層水環境模擬実験水槽¹⁶⁾に「拓海」の模型を設置して行った。この水槽は、長さ10 m、幅1.0 m、水深1.2 mで、深さ方向に温度の異なる5°C~35°Cの温度成層を作成し、5°C~42°Cの水を放流することができる。「拓海」の写真と概略図をFig. 2に示す。本模型は、「拓海」の1/100の縮尺で、模型上部の管より供給された水を、間隔2.78 mmの放水口より8方向に放水することができる。放流水の可視化のため、放流水中にフェノールフタレンを入れた水酸化ナトリウム水溶液を混ぜ、水槽側面の観察窓よりハイビジョンデジタルビデオカメラによる撮影を行った。実験時間は放水開始から5分間とし、動画より5分後の静止画像を取り出し放流水の挙動を評価した。実験条件をTable 1に示す。全ての実験は潮流のない静止流体中で行った。一方、水鳥ら¹⁷⁾は、均一密度場への放流水拡散現象を模型実験で取り扱う場合、内部フルード則を用いる必要があり、内部フルード則を成立させるためには、実機と模型で式(1)の放出内部フルード数 Fr_0 を揃えれば良いとしている。

$$Fr_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gd\beta\Delta T_0}} \quad (1)$$

ただし u_0 : 放出口での放流水放出速度、 g : 重力加速度、 d : 放水口間隔、 β : 流体の体膨張係数、 ΔT_0 : 放流水温度と放水口位置の周囲流体の温度差である。そこで、放出内部フルード数 Fr_0 を、「拓海」実機と模型実験で一致させ、全ての実験で放流水放出速度を0.043 m/sとした。

水槽の水温は、温度成層がない場合とある場合を設定した。温度成層がない場合には20°Cの一定水温とした。一方、静止流体層全体の成層強さとして、池畠ら¹⁹⁾と同様の式(2)のリチャードソン数 R_{ig} を定義した。温度成層がある場合、実海域と水槽で R_{ig} を一致させた。本実験では夏季の温度成層を想定し、相模湾で8月に計測された水温の鉛直分布のデータ¹⁹⁾を基に、水槽内に表層から25°C~13°Cの直線的な水温を設定した。

$$R_{ig} = g\beta \frac{\Delta T_s}{h} / \left(\frac{u_0}{h} \right)^2 \quad (2)$$

ただし、 ΔT_s : 成層上端と下端の温度差、 h : 成層厚さである。放流水水温は、10°C、15°C、20°C、25°Cの4種類とした。なお、10°Cは深層水のみの放流水水温に、20°Cは「拓海」と同比率で深層水と表層水を混合した放流水水温に相当する。



Fig. 1 Deep Ocean Simulation Water Tank

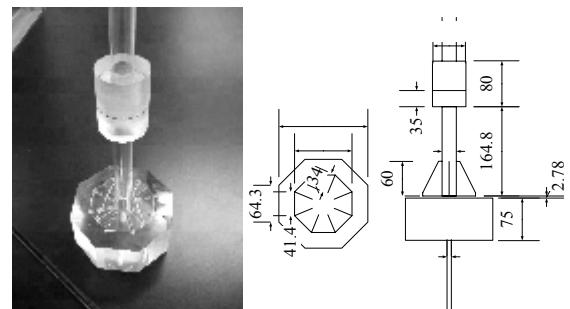


Fig. 2 Photograph and layout of TAKUMI model

Table 1 Experimental conditions of water discharging experiments

Case	Initial temperature of discharged water	Temperature stratifications	Water temperature in the tank	Internal Froude number Fr_0
A-1	10 °C	X	20 °C	5.8
A-2	10 °C	O	25~13 °C	5.1
C-1	20 °C	X	20 °C	-
C-2	20 °C	O	25~13 °C	11

温度成層のある場合の水槽の設定確認のために、水槽に実験条件と同じ $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度成層を作成し、水槽中央で測温抵抗体による水温測定を行った。Fig. 3 に水槽の設定水温と水温計測結果を示す。この図より、本水槽は、温度成層がある場合にはほぼ設定水温どおりに直線的な水温分布を作成できることを確認した。

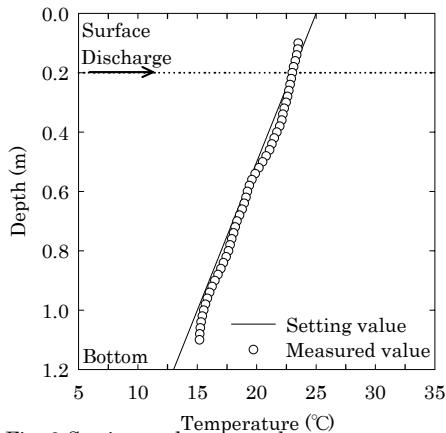


Fig. 3 Setting and measured water temperature in the water tank with temperature stratifications

Fig. 4 から Fig. 7 に、放流開始 5 分後の Case A と C の可視化画像を示す。Fig. 4 と Fig. 5 の放流水水温が $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合を比較すると、温度成層のない Fig. 4 では放流水が底面まで沈降しているのに対し、温度成層のある Fig. 5 では水深約 0.4 m 付近に放流水が留まっている。次に Fig. 6 と Fig. 7 の放流水水温が $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合を比較すると、温度成層のない Fig. 6 では、放流水が全体的に拡散しているのに対し、温度成層のある Fig. 7 では水深約 0.3 m 付近に放流水が留まっている。これらの温度成層の有無により放流水の挙動が大きく異なる結果は、実海域での「拓海」の放流水挙動を検討する場合、温度成層の考慮が重要であることを示す。また、放流水温度が低く、温度成層がある Fig. 5 の Case A-2 の場合、一般的に懸念されている放流水の底面までの沈降がなかった。温度成層がない場合、冷たい放流水は周囲との温度差により下方向に加速され、速度を増しながら沈み込み、周囲の水との熱交換および拡散混合により周囲の水と同温度になる。同温度となった後は加速されないが、放流水が下方向の速度を持っているためにそのまま沈降して底まで達する。一方、温度成層がある場合の放水流は、同温度となった直後でも放流水が温度を保ちながら、自分自身よりも冷たい周囲の水に突っ込むために、浮力で上向きの力が働き、沈降が抑制されたと考えられる。

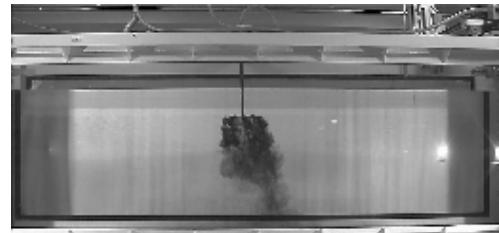


Fig. 4 Experimental behavior of discharged water
(Case A-1, discharged water: $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, without temperature stratifications)

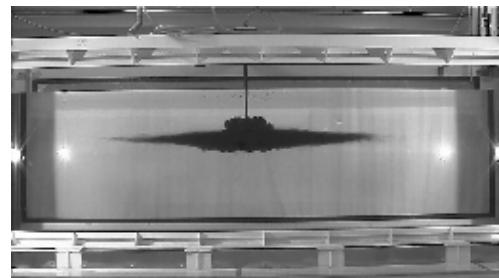


Fig. 5 Experimental behavior of discharged water
(Case A-2, discharged water: $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, with temperature stratifications)

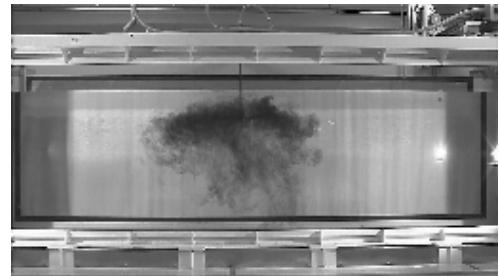


Fig. 6 Experimental behavior of discharged water
(Case C-1, discharged water: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, without temperature stratifications)

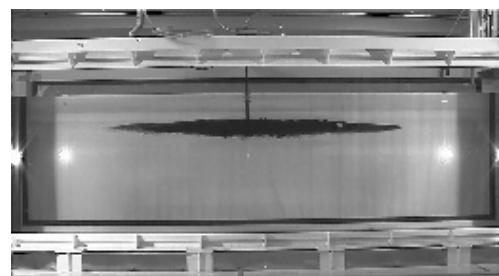


Fig. 7 Experimental behavior of discharged water
(Case C-1, discharged water: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, with temperature stratifications)

3. 3 次元数値計算

3.1 数値計算手法

数値計算は、温度成層中に放流される放流水の3次元挙動を推定できるものを用い、温度成層がある場合について行った。使用する3次元の基礎方程式は、(3)式の連続の式、(4)(5)(6)式のNavier-Stokes方程式、そして(7)式の熱拡散方程式、(8)式の濃度拡散方程式である。なお、流体の温度差は流体の物性値には影響せずに、浮力項のみに働くとするブジネスク近似を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\kappa}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

ここで t : 時間、 x 、 y 、 z : 長さ方向、幅方向、深さ方向、 u 、 v 、 w : x 、 y 、 z 方向の流速、 ρ : 流体密度、 ν : 流体の動粘性係数、 g : 重力加速度、 θ : 流体温度、 θ_0 : 基準温度、 β_0 : 温度 θ_0 の時の流体の体膨張係数、 κ : 流体の熱伝導係数、 C_p : 流体の比熱、 C : 放流水の濃度、 D : 放流水の拡散係数である。これらの方程式を無次元化および差分近似し計算を行った。差分は、対流項で3次精度風上差分(UTOPIAスキーム)を、拡散項に2次精度中心差分を、非定常項はオイラー陽解法を用いた。計算領域は、実験の対称性を考慮して、Fig. 8に示す領域とした。座標は、水面での実験模型中心位置を原点に、長さ方向に x 、幅方向に y 、水深方向に z とした。計算格子は、圧力、温度、濃度などを格子中央で定義し、中央から半格子ずらした点で速度を定義するスタッガード格子を用いた。また、計算結果の格子依存性を別途検討しており、格子を細分化した計算結果を比較し、収束解が得られた格子数を用いた。Fig. 9に示すように、 x 方向に 26 格子、 y 方向に 8 格子、 z 方向に 93 格子、計 19344 格子の不等間隔格子を計算領域に配置した。計算は HSMAC(Highly Simplified Marker-and-Cell) 法²⁰を用いて行った。計算時間間隔は 0.1 s で、全体の計算時間は実験時間と同じ 5 分間とした。

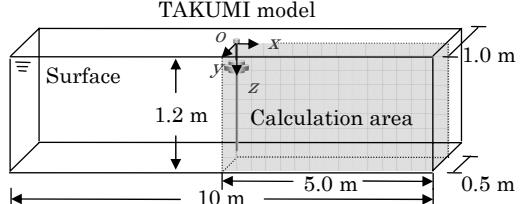


Fig. 8 Calculation area and coordinate systems

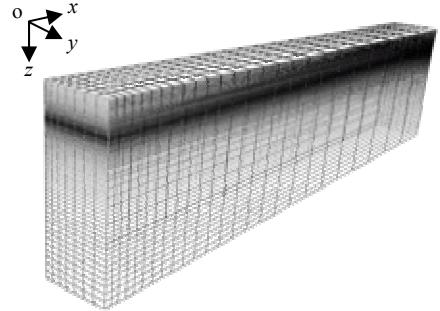


Fig. 9 Staggered grids for this numerical calculations
(19344 cells, x , y , z = 26, 8, 93)

3.2 数値計算結果

Table 2 に示す条件の実験結果と計算結果の比較を、Fig. 10 から Fig. 14 に示す。全ての図において、(a)が実験結果、(b)が計算結果である。実験では、予備的な検討により、放流水濃度が約 1.0×10^{-4} 倍の範囲までフェノールフタレンにより発色していることがわかっている。そこで、計算結果として放流水濃度が 1.0×10^{-4} 倍までの範囲を表示した。図中のセンター線は、放流水濃度が 5.0×10^{-1} 倍、 1.0×10^{-1} 倍… 5.0×10^{-4} 倍、 1.0×10^{-4} 倍と 1/5 倍ごとの放流水濃度を示している。Fig. 10 と Fig. 11 の放流水水温が 10°C と 15°C で、温度成層がある場合、(a)の実験結果と(b)の計算結果は x 方向の放流水の進行距離と z 方向の放流水の沈降深度とも良く一致しており、本計算により放流現象を良く表現できている。次に、Fig. 12 と Fig. 13 の放流水水温が 20°C と 25°C で、温度成層がある場合、(a)の実験結果と(b)の計算結果を比較すると、 x 方向の放流水の進行距離には違いがあるが、 z 方向の放流水の沈降深度は良く一致している。

Table 2 Calculation and experimental conditions

Case	Initial temperature of discharged water	Temperature stratifications	Water temperature in the tank	Internal Froude number Fr_0
A-2	10°C	O	$25\text{--}13^\circ\text{C}$	5.1
B-2	15°C	O	$25\text{--}13^\circ\text{C}$	6.5
C-2	20°C	O	$25\text{--}13^\circ\text{C}$	11
D-2	25°C	O	$25\text{--}13^\circ\text{C}$	13

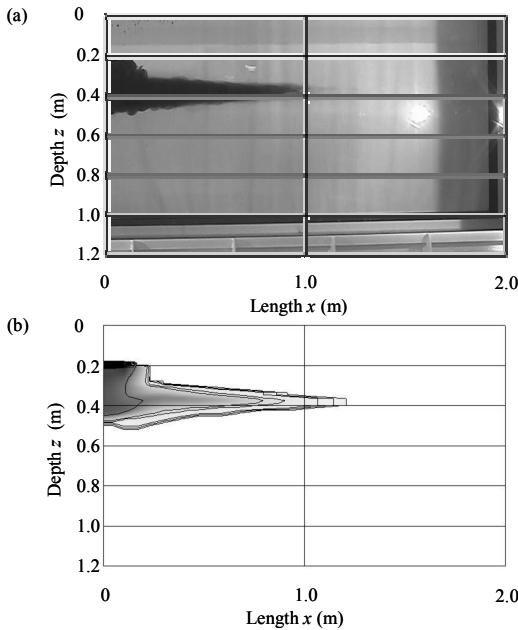


Fig. 10 Results of experiment and calculation
(Case A-2, discharged water: 10 °C,
with temperature stratifications)

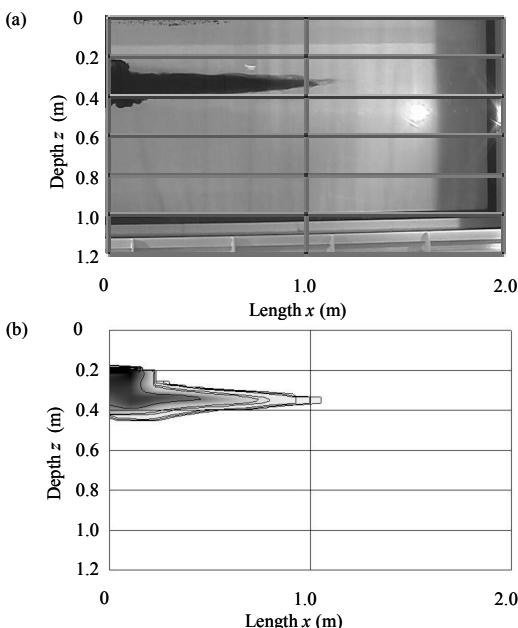


Fig. 11 Results of experiment and calculation
(Case B-2, discharged water: 15 °C,
with temperature stratifications)

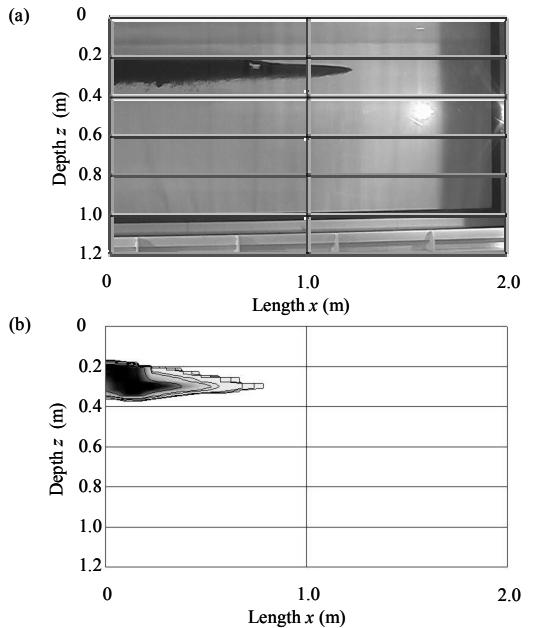


Fig. 12 Results of experiment and calculation
(Case C-2, discharged water: 20 °C,
with temperature stratifications)

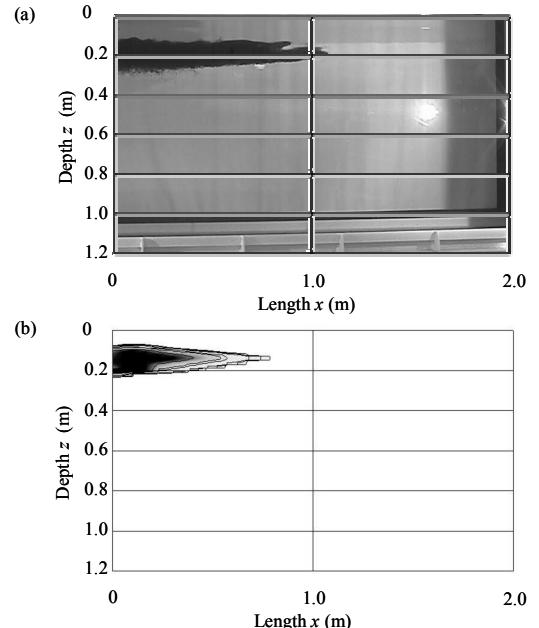


Fig. 13 Results of model test and calculation
(Case D-2, discharged water: 25 °C,
with temperature stratifications)

次にこれらの計算結果の定量的な評価を行った。評価は、実機の「拓海」の放流に最も重要なパラメータである放流水の貫入深度について行った。つまり、計算結果と実験結果について、Fig. 14 に示すように、放流水が x 方向に最も遠くまで到達した点の深度を評価基準とした。Fig. 15 に計算結果と実験結果の比較の結果を示す。放流水温が 25 °C の場合、貫入深度に 0.05 m の違いがあるが、全ての場合の貫入深度は、実験結果と計算結果で良く一致している。この結果は、本計算を用いて、十分な精度で放流水の貫入深度を推定できることを示す。

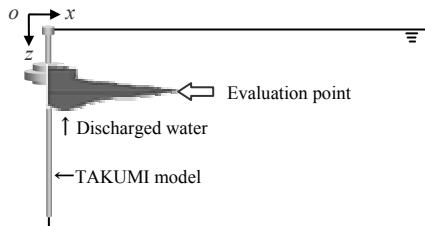


Fig. 14 Evaluation point of discharged water

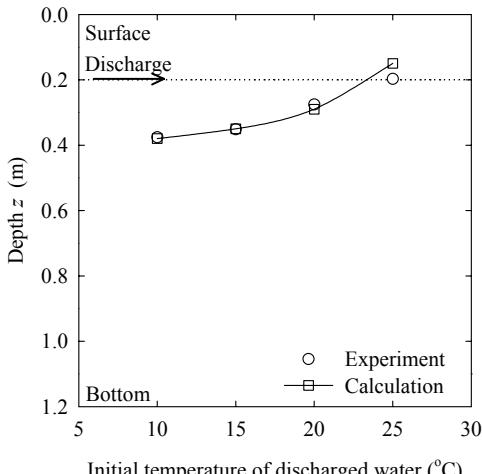


Fig. 15 Diffusion depth of experiments and calculations

4. 結言

温度成層条件下の海洋肥沃化装置「拓海」の放流水の挙動の解明を目的とし、特に放流水の貫入深度に注目した、模型を用いた放流実験と数値計算による検討を行った結果、以下の結言を得た。

1. 温度成層水槽において 1/100 の拓海模型を用いて放水実験を行った結果、温度成層がない場合とある場合では、放流水の挙動が大きく異なる。この結果は、実海域での「拓海」の放流水を検討す

る場合、温度成層の考慮が重要であることを示す。

2. 同実験で、放流水が周囲の流体より冷たい場合でも、温度成層がある場合には放流水は底面まで沈降しなかった。これは温度成層により放流水の沈降が抑制されたものと考える。
3. 温度成層条件下で放流水の挙動推定が可能な 3 次元数値計算を、温度成層のある場合について行い実験結果と比較した。計算結果と実験結果は良く一致しており、本計算で放流水の貫入深度を推定可能であることを示した。

謝 詞

本研究は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「海洋エネルギーの先導的利用科学技術の構築」の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) FAO Fisheries Department : State of World Fisheries and Aquaculture, 2004
- 2) Ryther, J. H. : Photosynthesis and Fish Production in the Sea, Science, Vol.166, 1969, pp.72-76
- 3) Ogiwara, S., Awashima, Y., Miyabe, H., Ouchi, K. : Conceptual Design of a Deep Ocean Water Upwelling Structure for Development of Fisheries , Proc.4th ISOPE Ocean Mining Symp., 2001, pp150-157
- 4) Maeda, K., Tamura, K., Kokubun, K., Ohkawa, Y., Takai, R., Shintomi, K. : Model Tests of Ocean Nutrient Enhancer "TAKUMI" in Deep-sea Basin, Proc. of 14th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. ISOPE, Vol. I, 2004, pp.72-77
- 5) 板東晃功, 大塚耕司 : 海洋肥沃化装置「拓海」ライザーパイプの渦励振動発生条件の検討, 日本造船学会講演会論文集, 第 4 号, 2004, pp.35-36
- 6) 山磨敏夫, 大内一之 : 海洋肥沃化装置「拓海」の密度流拡散式深層水取水ポンプ, 日本造船学会講演会論文集, 第 4 号, 2004, pp.31-32
- 7) 宮部宏彰, 小林日出雄, 萩原誠功 : 海洋肥沃化装置「拓海」の開発, 石川島播磨技報, 第 44 卷第 3 号, 2004, pp.209-214
- 8) 館明, 加藤謙 : 海洋肥沃化装置「拓海」の設置計画と実施, 日本造船学会講演会論文集, 第 4 号, 2004, pp.33-34
- 9) 大内一之, 福宮健司, 山磨敏夫, 萩原誠功 : 成層海域における密度流の挙動に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, No.191, 2002, pp.35-42
- 10) 大村寿明, 井関和夫 : 放流域の水塊分布から見た汲み上げた深層水の移動・拡散-1, 日本海洋学会大会講演要旨集, Vol.2004, 春季, 2004, pp.165
- 11) 池谷透, 高橋正征, 吉田次郎, 北出裕二郎 : 放流域の水塊分布から見た汲み上げた深層水の移動・

- 拡散-2, 日本海洋学会大会講演要旨集, Vol.2004,
春季, 2004, pp166
- 12) 馬場信弘, 岡村将治, :成層流体中を進行する重力流に関する可視化実験と計算, 関西造船協会誌, Vol. 230, 1998, pp. 299-304
 - 13) Masuda, A. and Nagata, Y. : Water wedge advancing along the interface between two homogeneous layers, Journal of Oceanography Society of Japan, 1974, Vol. 30, pp. 289-297
 - 14) Lowe, R. J., Linden, P. F. and Rottman, J. W. : A laboratory study of the velocity structure in an intrusive gravity current, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 456, 2002, pp. 33-48
 - 15) 馬場信弘, 伊藤聰美, 阪口泰規:重力流の先端部の3次元不安定性, 日本造船学会論文集, Vol. 185, 1999, pp. 119-125
 - 16) 池上康之, 板東晃功, 蔡文新, 恋塚初, 村橋達也, 渡辺敬之:海洋深層水実験模擬水槽の性能, 第7回海洋深層水利用研究会講演要旨集, 2003, pp70-71
 - 17) 水鳥雅文, 片野尚明, 仲敷憲和:鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発, 電力中央研究所報告, U88051, 1988
 - 18) 池畠義人, 竹原幸生, 本地弘之:Super-Resolution KC 法を用いた密度噴流の流速計測, ながれ, Vol.20, pp.127-130
 - 19) 岩田静夫, 松山優治:相模湾の表層循環－黒潮流軸変動に対する応答－, 日本海洋学会誌, Vol.45, 1989, 2001, pp.310-320
 - 20) Hirt, C. W. and Cook, J. L. : Calculating Three-Dimensional Flows around Structures and over Rough Terrain, J. Comput. Phys., vol.10, 1979, pp. 324-340