

# 海洋深層水の適正放水方式の検討

高月 邦夫\* ・ 林 成年\* ・ 池田 知司\*\*  
長谷部 雅伸\*\*\* ・ 大 山 巧\*\*\*\* ・ 平 山 彰彦\*\*\*\*\*

## 1. はじめに

海洋深層水はその清浄性、富栄養性、冷温性などの特質が着目されており、水産利用や地域振興など様々な分野で利用が試みられてきた。現在に至ってもその利用範囲は拡大を続けており、それに伴って深層水利用計画も全国的な拡がりを見せてきている。

深層水に関する既往の研究では、深層水の取水技術や水質特性を活かした利活用技術に関する研究が中心であり、利用された深層水の海域での放水技術、あるいは放流地先海域での利用面に関する研究は殆ど無いのが現状であった。深層水の放流先での効果については、大型藻類の生長促進による磯焼け防止、磯根資源の増大、海域の肥沃化による海洋バイオマス全体の増大が期待され、その効果についても例えば図-1 に示すように、高知県海洋深層水研究所の放水口前面海域でホンダワラ類の生長が確認されているにもかかわらず、現状では施設前面の海域にただ放水するのみとなっている例がほとんどである。

本研究では、深層水放流による大型藻類の生長促進や海域肥沃化を図りつつ周辺海域への環境影響の軽減化に主眼を置き、水理模型実験を通して沿岸海域の有光層内に深層水が効果的に滞留できるような放水方式、放水口形状の検討を行った。また、数値モデルによる深層水拡散予測手法も確立し、実海域を想定した密度成層条件下における深層水放流シミュレーションも行った。

## 2. 深層水の放水方式の考え方及び検討方法

海域に深層水を放流する場合の留意点としては、海域の肥沃化を効率的に図ること、すなわち海表面付近を生息層とする浮遊性植物プランクトンや海底を生息基盤とする大型藻類の生育場に深層水を拡散させる必要がある。一方、環境面からみると周辺海水性状と異なる深層水が高濃度で広範囲に停滞すれば放流地先の海域環境に

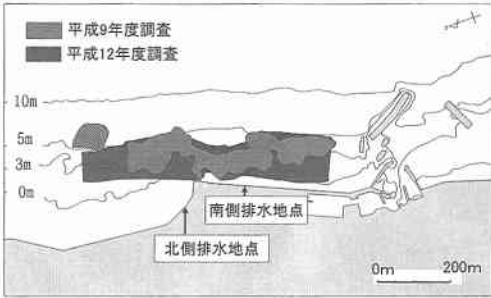


図-1 高知県海洋深層水研究所地先海域でのホンダワラ類の分布(鍋島ら, 2000; 社団法人日本海洋開発産業協会, 2000)

影響を及ぼすことになるため、深層水を速やかに拡散希釈する工夫が必要となる。このような背景において、本研究では、日量 4,000 m<sup>3</sup>程度の小規模流量を想定した場合の放流方式として、①深層水の分散を周囲水の時つ移流拡散作用に依存する『護岸からの直接放水方式』、②放流時の放水エネルギーにより希釈混合を促進する『水中放水方式』を考えた。一方、日量 10 万 m<sup>3</sup>規模の場合には、水中放水方式を前提とし、更に拡散希釈を促進するような放水口形状について検討した。

また、放水方式の検討方法については、深層水の拡散形態が放水方式により大きく異なり、特に、特殊な放水形状を持つ水中放水方式の場合には、初期段階での深層水の拡散特性が極めて三次元的挙動を示すことになるため、水理模型実験手法により様々な放水方式の比較検討を行った。更に、三次元モデルによる数値シミュレーションを実施し、水理模型実験との比較を行った。

## 3. 水理模型実験による検討

### (1) 概要

水理模型実験においては、深層水の放水方式として想定される方法として、①護岸からの直接放流、②沖合から岸向きへの水中放水、③沖向きへの水中放水、④旋廻流型放水形状(田中・米倉, 2000)を選定し、それぞれについて数通りの放出内部フルード数(Fro)を設定し拡散状況の比較検討を行った。なお、拡散希釈の評価につ

\* (株)東京久栄建設環境統括部環境水理部  
\*\* 農博 (株)関西総合環境センター技術開発部  
\*\*\* 正会員 工修 潜水建設(株)技術研究所  
\*\*\*\* 正会員 工博 潜水建設(株)技術研究所  
\*\*\*\*\* 正会員 工博 潜水建設(株)エンジニアリング事業本部

いては、放水口近傍域での希釈倍率を評価指標として整理を行った。

## (2) 実験設備

水理実験設備は、縦7m×横3mの平面水槽内に、1/25の海底勾配を模擬した。水理実験は、無歪で模型縮尺1/30とした各種放水口模型を設置し、フルードの相似則に従って実施した。図-2に示すように付帯設備は、放流水ストック水槽および下層水供給用水槽が備えられている。深層水の放水は、塩分調整され、ポンプ・流量計を介して所定量を放水口より放水する。また、実験水槽内の水位を一定に保つために、放水される量と同量の水を排水できる装置が備えられている。この水槽底部には、密度成層下の実験が行えるように、分散管が設置されている。

## (3) 実験ケースとその結果

### a) 護岸からの直接放流の場合

深層水を汀線付近から直接放水した場合を想定した。この方式は現在深層水を海域に放水している地点での放水形態と類似している。なお、実験条件としては、日流量を4,000 m<sup>3</sup>、放水流速を50 cm/s ( $Fr=4.1$ ) とし、放水口から75 m離れた水深約4 m地点に深層水の滞留構造物(空隙率50%)を設置した場合についても実験を行った。滞留構造物を設置していない場合には放水された深層水は、海底面近くを1 m以下の薄い厚さで舌状に広がっている(主軸での希釈倍率の縦断面分布を図-3(1)に示す)。滞留構造物の効果は、深層水の平面的な拡散域が広くなるとともに、大型海藻の付着基盤である滞留構造物内に深層水が滞留することから、大型海藻の生育場の拡大に役立つと考えられる(図-3(2)参照)。なお、滞留構造物の配置形状は図-4に示すとおりである。

### b) 沖合から岸向きへの水中放水の場合

実験条件は、放出内部フルード数を10~65、放水ノズ

ルの上向仰角を30度として実施した。沖合から岸に向かって放水された深層水は、海底面に到達後、一部は、岸寄りに勾配を駆け上り、一部は沖合の方に勾配を下っている。勾配を駆け上がる深層水は、放水流速の大きさによって、距離が決定されている。放出内部フルード数が20以上の場合には、海底面に到達した深層水は約10倍以上の希釈が得られ、放水エネルギーにより深層水は深部へ流下する傾向は見られない。この方式は、滞留構造物を設置しなくても滞留効果があること、浅海域で広範囲な高希釈深層水の滞留が期待できることから、小規模流量の深層水の放水方式として興味深い方式と考えられる。放出内部フルード数が23.4の場合の主軸での希釈倍率の縦断面分布を図-5に示す。

### c) 沖向き水中放水の場合

実験条件は、②と同様とした。放水口から沖合に向かって放水された深層水は、放出内部フルード数が大きいほど海表面まで到達しており、また海底面到達後の拡散厚みは厚く、希釈倍率は大きくなる傾向を示す。放出内部フルード数が23.4の場合の主軸での希釈倍率の縦断面分布を図-6に、放出内部フルード数の違いによる主軸での希釈状況の比較を図-7に示す。

### d) 成層下での水中放水による場合

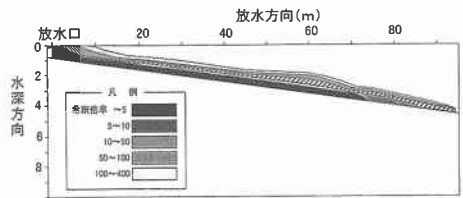


図-3(1) 希釈倍率の縦断面分布(滞留構造物なし)

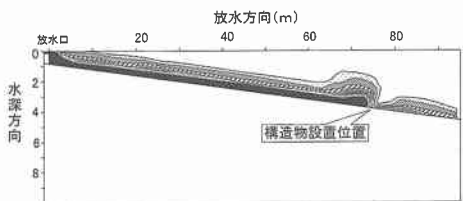


図-3(2) 希釈倍率の縦断面分布(滞留構造物あり)

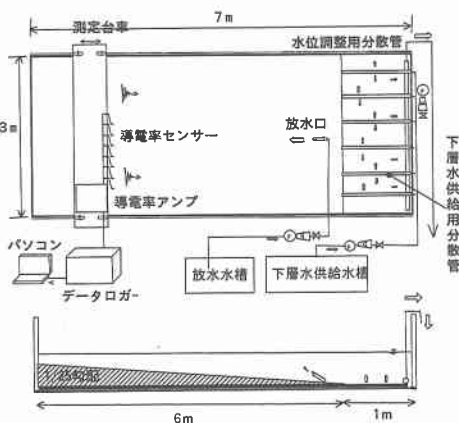


図-2 実験設備概要

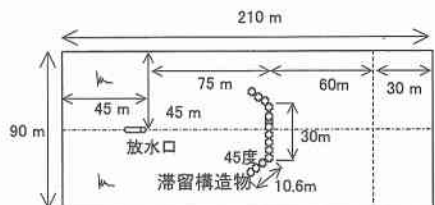


図-4 滞留構造物の配置形状

上記した実験結果は、鉛直方向に密度成層を考慮していない均一場を想定しているが、実際の海域では密度成層が存在する。海域に放水した深層水がこの密度成層内に滞留するならば、深層水の深海部への回帰が制御されることになる。ここでは、海面下約12 mに上下層水温差約3℃に相当する強度の密度界面を作製し、放出内部フルード数4～25の範囲で実験を行った。放出内部フルード数が4の場合には放水された深層水は、密度界面を押し上げ深海部に流下していく。これが10以上になると深層水は密度界面の間に潜り込む場合や密度界面の上に拡散することになる。図-8に放出内部フルード数が23.4の場合の縦断面分布を示す。

e) 旋廻流型放水口による場合

大規模深層水の放水に際しては、環境インパクトへの軽減化、補償深度内への深層水の滞留を図る必要があることから、鉛直擾乱を活発化させ高希釈が得られる放水口形状について検討する必要がある。通常の放水口である単一ノズル型放水口と放水出口で旋廻度を持たせる旋廻流型放水口との希釈比較実験を行った。実験条件としては、流量：10万m<sup>3</sup>/日、放水流速2m/s (Fro=10.6)、放水仰角0度とした。図-9に旋廻流型放水口による主

軸での希釈倍率の縦断面分布、図-10に両者の主軸での希釈状況の比較を示す。旋廻流型放水口は、単一ノズルに比べて高濃度域が小さく、流下距離30m以遠では希釈倍率で約2.5倍以上の効果を得ることになる。大規模流量に対する放水方式としての選択肢として有望であると考えられる。

4. 数値モデルによる拡散予測

(1) 数値計算の概要

本研究では静水圧近似とブジネスク近似を適用しない、有限体積法による3次元モデルを用いた数値シミュレーションを行った。支配方程式は連続式、運動方程式、熱輸送に関する方程式、塩分や染料など溶存物質に関する移流拡散方程式と、乱流方程式（標準k-εモデル）から構成される。シミュレーションは模型実験と同様、流れ場の無い領域への深層水放流を想定し、放水の開始とともに時間発展させる非定常計算とした。

具体的には、表-1に示される模型実験に対応した2ケースについて、放水後4時間経過（実験スケールでおよそ44分後）時点までの数値シミュレーションを行っ

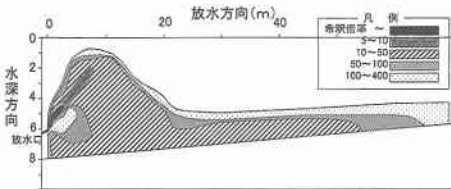


図-5 希釈倍率の縦断面分布（岸向き放出；Fro=9.8）

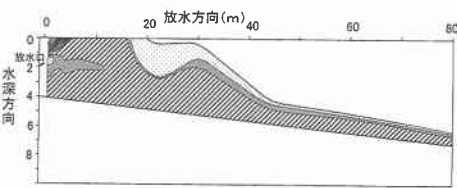


図-6 希釈倍率の縦断面分布（沖向き放出；Fro=23.4）

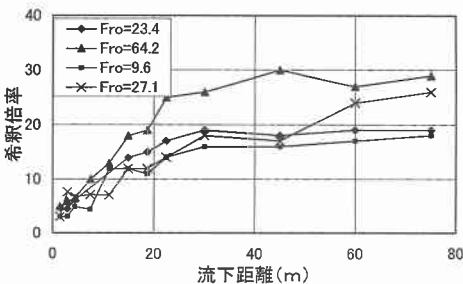


図-7 主軸での希釈状況の比較

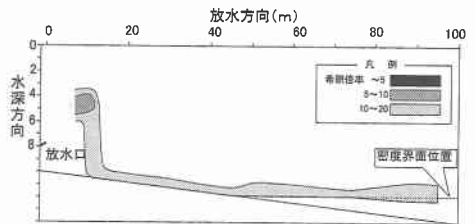


図-8 希釈倍率の縦断面分布（成層実験；Fro=23.4）

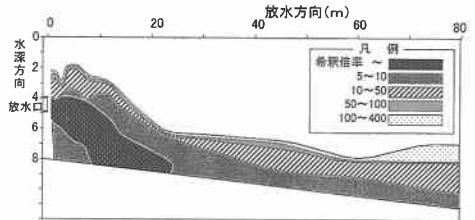


図-9 希釈倍率の縦断面分布（旋廻流型放水口）

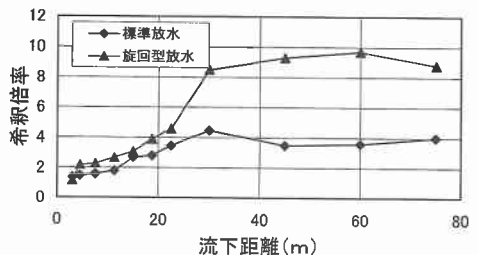


図-10 主軸での低減状況の比較

た。Case 1 は密度成層の無い領域への放水、Case 2 では成層場への放流を想定しており、いずれのケースも冲向き水中放流で放出内部フルード数が 23.4 になるように設定した。各ケースの計算領域を図-11 に示す。両ケースとも領域を総数およそ 30 万程度の適合格子によるメッシュ分割を行い、沖側の鉛直面のみ開境界とし、岸壁面と両サイドの鉛直面および海底面は閉境界（壁面）とした。また、本検討では海面は free-slip の壁面として扱った。なお、成層場を考慮した Case 2 では密度界面は水面下 11.8 m に存在し、放水口から沖合 45 m 以遠の領域が成層場となっている。

## (2) 計算結果

はじめに Case 1 について、図-11 の A-A'断面における塩分に関する希釈倍率分布を図-12 に示す。このケースでは比較的水深の浅い地点での放流であるため、図-6 に示す実験結果と同様、放流された深層水が海面に衝突している様子が見られる。図-13 上図には放水口近傍を中心とした領域での噴流主軸経路を示す。この図より、水平方向 3 m 程度で海面に衝突後、10 m 程度まで海面に沿って移流し、その後周辺水との密度差のため海底へ沈降を開始、水平距離 14 m 付近で海底面へと到達する様子が確認できる。図-13 下図にはこの噴流主軸に沿う各点での希釈倍率を示す。深層水は放水口から放水された直後に最も希釈が進行し、海面に沿って移流する間は希釈倍率はほぼ一定値を保つ。その後、海面から海底へと沈降する領域で若干希釈が進むが、海底面到達後の希釈は非常に緩やかなものとなっている。図-7 に示す実験結果に比べるとやや希釈が促進されているが、深層水の

放流後における一連の挙動を良好に再現している。

図-14 には、Case 2 に相当するシミュレーションの、B-B'断面での希釈倍率分布を示す。本ケースでは希釈倍率を求めるため、仮想的な溶存物質として“染料”に関する移流拡散方程式を解き、その濃度から希釈倍率を求めた。なお、“染料”は、領域全体での初期濃度が 0 で、放水口から放流水とともに領域へと流れ込むように設定した。図-8 に示す実験結果と同じく、放水された深層水は海底面を沿って流下後、密度界面の存在する領域では主に上層部において拡散する。一例として放水口から沖側 60 m の岸壁に平行な鉛直断面（図-11 の C-C'断面）での希釈倍率分布を図-14 に示すが、希釈倍率の低い（＝染料濃度の濃い）部分のほとんどは密度界面の存在する水面下 11.8 m よりも上に存在している。この C-C'断面全体を S、C-C'断面のうち密度界面よりも上の部分を S'、染料濃度を  $m$  とし、

$$\text{滞留率} = 100 \times \frac{\int m dS'}{\int m dS} [\%] \quad \cdots \cdots (1)$$

によって定義した放流深層水の上層への滞留率を求めた結果、約 96.7% となった。なお、放水口から沖側 45 m 以遠の岸壁と平行な各鉛直断面において同様に式（1）から滞留率を求めたところ、図-15 に示すように流下距離 100 m 程度まではおおむね 96% 以上の滞留率を保って流下することがわかった。

## 5. 結 論

### (1) 深層水の放水方式

#### a) 直接放水方式

護岸などからの海域への直接放水の場合、深層水は 1

表-1 計算条件

| 項目          | Case 1  | Case 2  |         |
|-------------|---------|---------|---------|
|             |         | 上層      | 下層      |
| 環境水         |         |         |         |
| 水温 (°C)     | 27.1    | 27.1    | 24.1    |
| 塩分 (psu)    | 33.2    | 33.2    | 33.2    |
| 密度 (g/cm³)  | 1.02132 | 1.02132 | 1.02224 |
| 放流水         |         |         |         |
| 水温 (°C)     | 13.1    | 13.1    |         |
| 塩分 (psu)    | 34.28   | 34.28   |         |
| 密度 (g/cm³)  | 1.02582 | 1.02582 |         |
| 密度差 (g/cm³) | 0.00450 | 0.00450 | 0.00358 |
| 放水流速 (m/s)  | 2.0     | 2.0     |         |

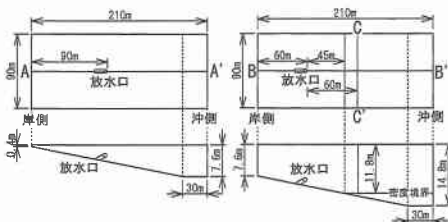


図-11 計算領域（左：Case 1，右：Case 2）

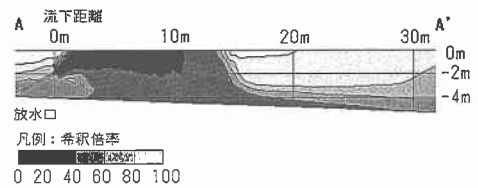


図-12 A-A'断面希釈倍率（Case 1）

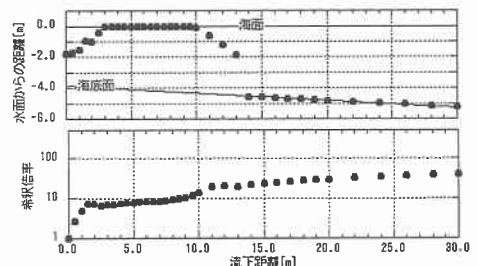


図-13 噴流主軸経路（上）と主軸に沿った希釈倍率（下）

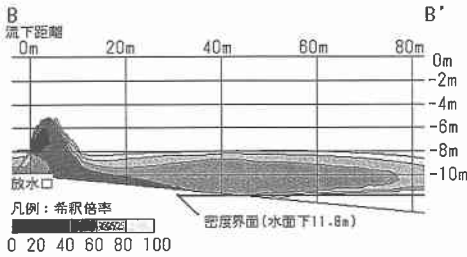


図-14 B-B'断面希釈倍率 (Case 2)

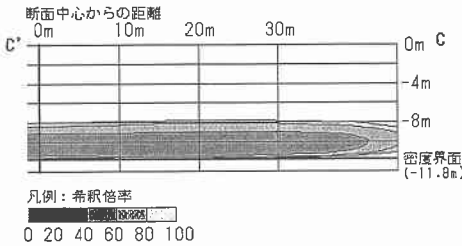


図-15 C-C'断面希釈倍率 (Case 2)

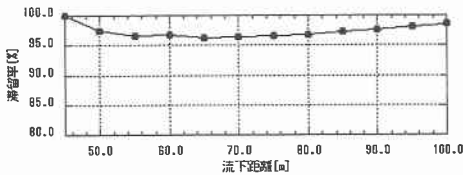


図-16 放流された深層水の上層への滞留率

型放水口の選択が示唆された。

## (2) 補償深度内への滞留効果

深層水に含まれている栄養塩類を効率良く生物体に吸収・固定させるには、深層水を補償深度内に滞留させる必要がある。このためには深層水を上向き仰角で、かつ速い初期流速で水中放水することにより、①植物プランクトンの光合成が活発である上層域に深層水を供給できる。②密度境界面に達するまで補償深度以深の海水の密度より小さくなるまで希釈を得ることができれば、補償深度以浅に深層水を滞留することができる。③放流先によって補償深度や鉛直密度構造などの海象状況が異なるため、海象条件に応じて適正な放出内部フルード数を推定し、放水口位置や形状を設定すれば補償深度以浅に深層水を滞留させることができる。

## (3) 数値モデルによる拡散予測

3次元モデルによる実験スケールでの深層水放流シミュレーションを行った結果、放水口近傍の領域については実験結果を良好に再現することが確認された。また、遠方域の拡散状況に関しては、実験に比べ拡散が促進される傾向が見られるものの、密度界面上で深層水が滞留する様子を再現することができた。本検討ケースでは放流された深層水のうちおよそ96%程度が密度界面よりも上層の領域に滞留する結果となった。

## (4) 今後の課題

大規模流量の深層水の遠方域での拡散状況については、今後、モデル海域での海象条件を取り込んで予測手法の確立化を図るとともに、放水された深層水の補償深度内での滞留度合いなどについて算定し、表層部に放水された深層水による海域環境への影響について評価を行う予定である。

なお、本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構から(社)日本海洋開発産業協会が受託したエネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発の基盤研究である環境影響評価技術等研究の一部成果を用いている。

## 参考文献

- 鍋島 浩・渡辺 貢・土居 聡・谷口道子 (2000): 海洋深層水放水が海域の藻場等生態に及ぼす影響II, 高知県海洋深層水研究所報, 第4号, pp. 44-59.
- 社団法人日本海洋開発産業協会 (2000): エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発成果報告書(II), 平成12年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発事業 新エネルギー・産業技術総合開発機構共同研究業務 (印刷中).
- 田中亮三・米倉正美 (2000): 新しい水中放水方式(旋廻流型)の開発, 第27回新技術発表概要, 社団法人火力原子力発電技術協会, pp. 44-45.

m 以内の拡散厚さで海底部に這うように、低希釈で拡散していく。海底面近くでの滞留構造物などの設置により深層水の滞留や大型海藻の生育場所を拡大させることが出来るものの、高希釈を得ることが出来ないため小規模流量が対象となる放水方式と考えられる。

### b) 水中放水方式

小規模流量の場合には、沖合から岸に向かって水中放水する方法は、海表面付近や海底面への深層水の供給、及び海底面での滞留が期待できることから、興味深い方法であると考えられる。また、期待する希釈を得るには、放出内部フルード数の大小によって海底面に到達する希釈倍率を制御でき、また、上向き仰角による放水で海表面付近を生息層とする浮遊性植物プランクトンに深層水を供給することが出来る。

大規模流量の放水の場合には、周辺海域への環境保全面からも深層水を沖合に向かって放水する水中放水方式の採用が適正であり、放水口形状としては、放水口出口で旋廻度を与え周囲海水の連行を更に促進できる旋廻流