

海洋深層水の新しい放水方式の検討

The Study on the New Discharge System of Deep Sea Water

高月 邦夫¹・林 成年¹・足達 康行¹

Kunio TAKATSUKI, Shigetoshi HAYASHI and Yasuyuki ADACHI

Abstract

In order to make practical use of the deep sea-water (DSW) on commercial base, it is desired to have a large quantity of DSW for many purposes, especially for using its energy resource. For example, in case of using DSW for cooling a power plant of 600mega-wat, the required volume of DSW is estimated as large as 1,000,000 m³ per day. When such large quantity of DSW is discharged to the coastal sea area, it is necessary to study how to discharge DSW with a minimum damage to the ecosystem or even with giving positive influence (s).

The swirl flow discharge head was then proposed for discharging such a large quantity of DSW, and its basic character was evaluated by the experiments in the present study.

Key Words: Deep sea-water, swirl flow discharge head

和文要旨

商業規模での海洋深層水の実用化には大量取水による多目的・多段階利用、特に経済性メリットの大きい海洋深層水の低温安定性を活用する高効率エネルギー利用が望まれる。海洋深層水を発電所復水器冷却用水とする発電エネルギーの利用は、発電効率の向上や省資源化そしてCO₂の排出削減につながることが期待されており、この場合の利用水量は日 100 万 m³ 程度となる。このような大量の海洋深層水を取水し、海域に還流することは、周辺海域環境への様々なインパクトが想定されるものの、海洋深層水を適正に放水すれば、大型藻類の生長促進による磯焼け防止、磯根資源の増大、海域肥沃化による海洋バイオマス全体の増大が期待される。

これらのこととを効率良く可能にするには、放水技術の検討が望まれる。

本研究は、還流による大型藻類の生長促進や海域肥沃化を図りつつ環境影響の軽減化を目的とした新しい放水技術の研究開発を行ったものである。

キーワード：深層水、旋回流型放水口

1. はじめに

1980 年代から開始された海洋深層水（以下、深層水）に関する研究は、深層水の特性把握や水産関連、食品加工などを対象とした小規模かつ個別的な利用に関するものを主体として進められてきた。一方、大量取水による多目的・多段階利用によって深

層水利用の経済性向上を図り、特に経済性メリットの大きい深層水の低温性を冷熱源として最大限に活用し、従来にない省エネ型の資源利用を図ることへの研究の必要性が商業規模実用化への打開策として指摘されてきた。例えば、この深層水の安定した低温・清浄性を発電所復水器冷却用水として発電エネルギーに利用することによって、発電効率の向上や

¹株式会社東京久栄 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-1-15)

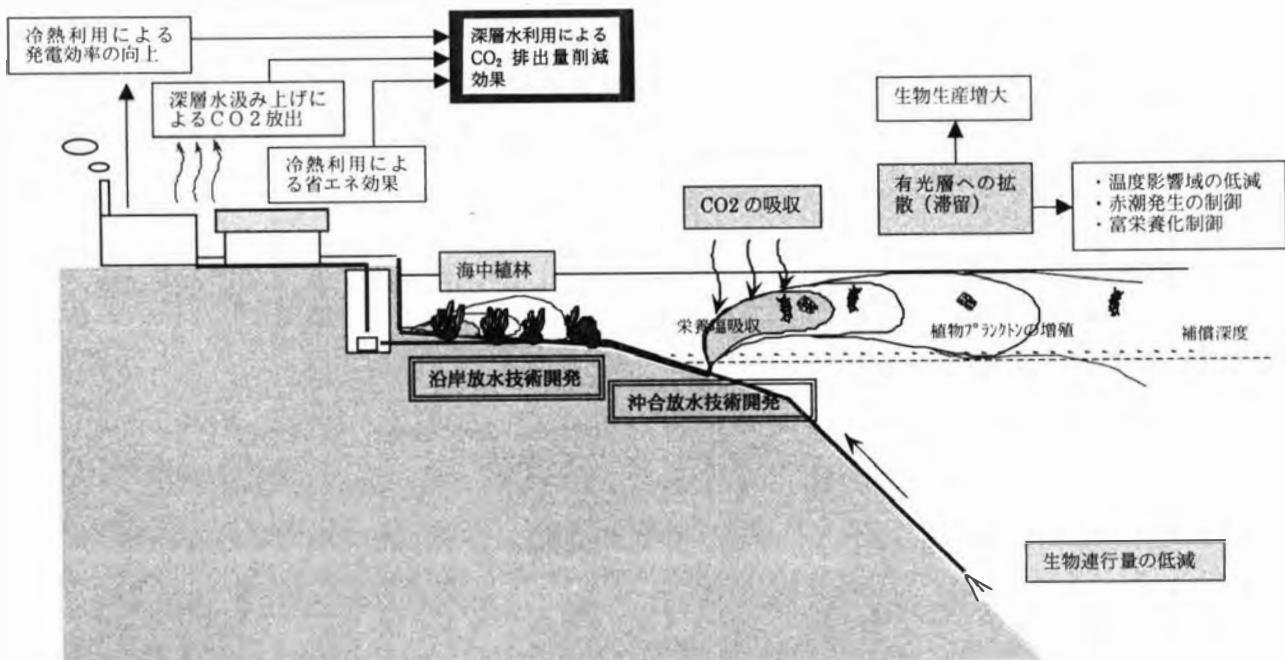


図-1 大量取水及び放水による影響模式 (社団法人日本海洋開発産業協会 2002)

省資源化そしてCO₂の排出削減につながることが期待されている。この場合の利用水量は既往の深層水利用水量より大規模な日量100万m³程度と見込まれている。

このような大量の深層水を取水しさらに海域に還流することは、図-1（社団法人日本海洋開発産業協会、2000）に示すように周辺海域の海域環境へ様々なインパクトを与えることが想定されるものの、還流する深層水を目的に則して適正に放水し、深層水の特性を有効に利用すれば、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る。深層水の放水地先海域での海藻への効果については、高知県海洋深層水研究所の放水口前面海域で藻場調査が実施されており、図-2に示すようにホンダワラ類の生長が確認されている（社団法人日本海洋開発産業協会、2000；鍋島ら、2000）。

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、放水流量が小規模であったことからこれまで十分な検討がされていない。そこで本研究では、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を目的とした新しい放水技術の検討を実施したものである。なお、この研究に先

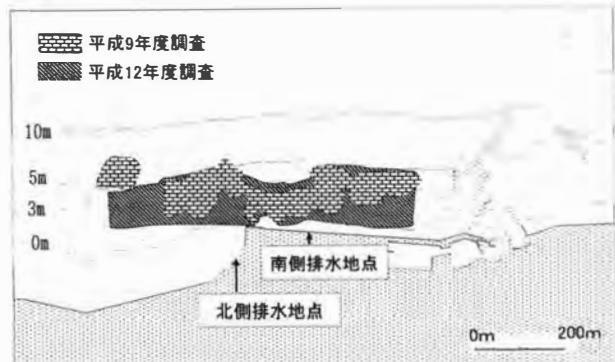


図-2 高知県海洋深層水研究所地先海域でのホンダワラ類の分布 (鍋島ら 2000)

立ち、現在稼動中の数千m³/日の深層水施設の放水方式は、護岸からの自然放流を採用しており、この流量規模での海域肥沃化が図れる放水方式についても検討を行った。

本研究の一部は新エネルギー・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。

2. 従来の放水方式

大量の海水の放水技術については、発電所の復水器冷却用海水やLNG基地の気化器加熱用海水の放水設備として検討がなされてきた。放水方式の決定

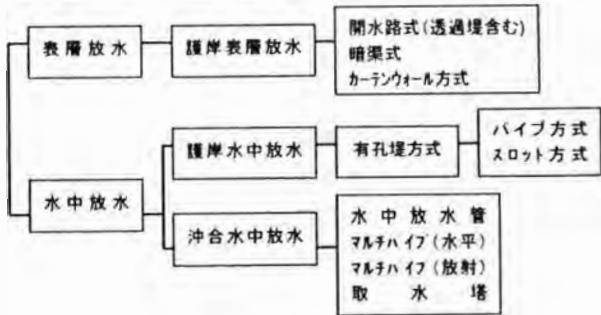


図-3 重密度排水の放水口形状

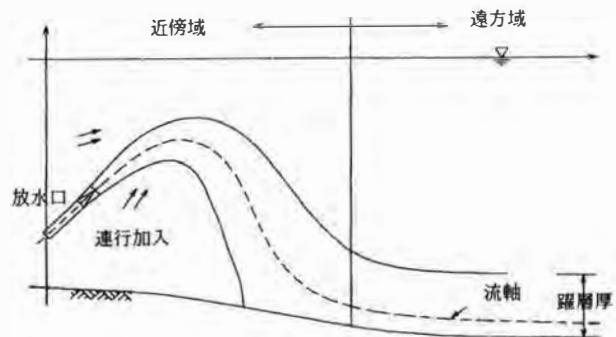


図-4 重密度排水の放水口形状



写真-1 重密度排水の放水口形状

は、放水される海水性状や放水先の様々な制約条件などにより選定され、図-3に示すように分類されている（社団法人電力土木技術協会 1996）。排水の高希釈を期待するには、海底面近くの水中部から比較的高速で放流し、密度噴流内への周囲水の連行を促進する水中放水方式が採用されている。

重密度排水の放水設備事例として、LNG基地の気化器加熱用海水（冷排水）の放水口形状を写真-1に示す。この放水口は航行船舶への影響を回避するために放水流速を0.8m/s程度と比較的低速とする代りに、ノズルを多数設け排水を分散し冷排水の速やかな希釈を得ている。

3. 深層水の拡散特性

深層水は陸上での利活用によって海域に放水される時の海水性状が変化し、また放水先の海水も季節によって水温や塩分が変動する。このため、放水される海水は周囲海水に比べて密度が軽い排水（軽密度排水）、あるいは密度が重い排水（重密度排水）となる。これらの排水の海域での拡散形態は、軽密

写真-2 水中放水された重密度排水の拡散状況
(水温差-4°C相当：放水流速2 m/s)

度排水では海表面近くを舌状に拡散し、重密度排水では負の浮力により海底面に沈降（図-4参照）するよう広がる。水温差4°C、上向き仰角15度、放水初期流速2m/sの高流速で放水された重密度排水の拡散状況を写真-2に示す。放水口近傍域で周囲水の取り込み（連行）現象により希釈拡散されるが、放水の慣性力で水面付近まで上昇した priyームは、まだ周囲水より重いため水底に下降する挙動を示す。

4. 小規模流量の深層水の拡散状況

現在稼動している深層水取水施設の放水方式のほとんどは、護岸からの自然流下方式を採用している。ここでは、大規模流量の放水方式の検討に先立って、数千m³/日規模の放水量に対し、海域肥沃化が図れる放水方式について水理実験により検討を行った。

4-1 検討方法

海洋深層水の拡散現象の予測方法については、放水口近傍域での三次元的振る舞いを再現することか

ら無歪の水理模型実験により検討した。

(1)相似則及び模型縮尺

水理模型実験の相似則は、対象とする水理現象は摩擦力に比べて重力が卓越しているため、慣性項と重力項の比が原型と模型で同じ値をとるフルードの相似則を採用した。

実験縮尺は、実験場の規模および測定精度等を考慮して 1/30 とした。なお、原型の放水量を日量 4000 m³ とし、放水流速を 1 m/s とした場合の模型上の放水レイノルズ数は、 $Re=1,460$ となり乱流条件を満たすと考えられる。

フルードの相似則に従い、水理模型の諸量と原型との代表的な関係を表-1 に示す。

(2)実験設備

水理実験設備は、縦 7 m × 横 3 m の平面水槽内に、1/25 の海底勾配を模擬した（図-5 参照）。模型縮尺 1/30 とした各種放水口模型を水槽内に設置し、放水実験を行った。本水槽の付帯設備として、放流水ストック水槽および下層水供給用水槽を備えている。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)実験方法

模型実験における深層水は塩分でその密度を調整するために、本実験では導電率計による電気伝導度（塩分）の計測を行った。この塩分測定は、測定台車に導電率計を設置し、測定台車を下降させ導電率の連続計測を行った。導電率計は、東京計測（株）の測器を用いた（測定範囲：0~3%，出力電力：5V/FS、非直線性： $\pm 0.5\% / FS$ ）。

表-1 実験緒元

緒元	原型量	縮尺	模型量
水深	10.0 m	1/30	33.3 cm
放水口径	0.24 m	1/30	0.80 cm
放水量	0.046 m ³ /s	1/30 ^{2.5}	0.56 l/m
平均流速	1.0 m/s	1/30 ^{0.5}	18.3 cm/s

塩分濃度測定位置を図-6 示す。ただし、鉛直方向の測定点は、0.3 m ないし 0.6 m 間隔とした。実験で得られるデータは、次式で示す希釈倍率（S）で整理した。

$$S = (\text{放水濃度} - \text{周囲水濃度}) / (\text{測定点での濃度} - \text{周囲水濃度})$$

（周囲水濃度：排水の影響を受けない場所での濃度）

4-2 護岸からの直接自然放流

現有施設の多くで採用されている護岸からの直接自然放流時の深層水の拡散状況を把握した。水理実験は、海底勾配 1/25 の地先海域に流量 4,000 m³/day、周囲水との水温差 14°C、塩分差 1.08 psu

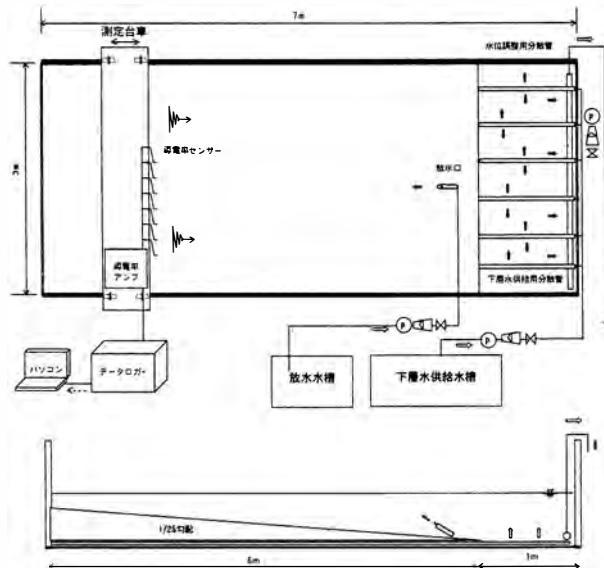


図-5 実験設備概略

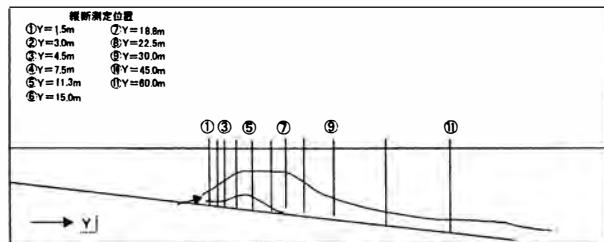


図-6 データ測得位置

(密度差 $0.0044\text{g}/\text{cm}^3$) の深層水を海岸線付近から自然流下させた場合について、放水口から 75 m 離れた水深約 4 m 地点に消波ブロックを利用した深層水の滞留構造物（高さ 0.9 m 、幅 1.8 m 、空隙率 50% ）を設置した場合と無い場合について実施した。滞留構造物を設置した場合の染料拡散状況を写真-3、滞留構造物がある場合と無い場合の拡散主軸での鉛直断面及び海底面での希釈倍率分布を図-7に示す。海底面に到達した深層水の希釈倍率は概ね $2\sim 4$ 倍程度であり、到達後の希釈混合は少ない。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、希釈倍率 5 倍以下の濃度が海底面近くを 1 m 以下の薄い厚さで舌状に広がり、大きな希釈も無いままに海底面に沿って流下していく。

一方、滞留構造物の設置効果は、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鉛直方向に厚くなり、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。

4-3 沖合から岸向きへの水中放水の場合

沿岸域に生息する大型海藻への深層水の供給を目的として、沖合から岸に向かって深層水を放流した場合について検討を行った。実験条件は、放出内部フルード数 {=放水初期流速/(相対密度差×重力加速度×管径) $^{1/2}$ } を $10\sim 65$ 、放水ノズルの上向仰角を 30 度として実施した。代表例として、放出内部フルード数が 9.8 及び 23.4 の主軸の縦断面分布及び海底面での水平分布を図-8に示す。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。また、放出内部フルード数が 23.4 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と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。

一方、放出内部フルード数が 9.8 の場合には深層

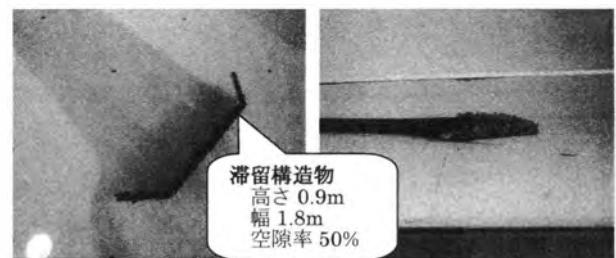


写真-3 滞留構造物による深層水の挙動

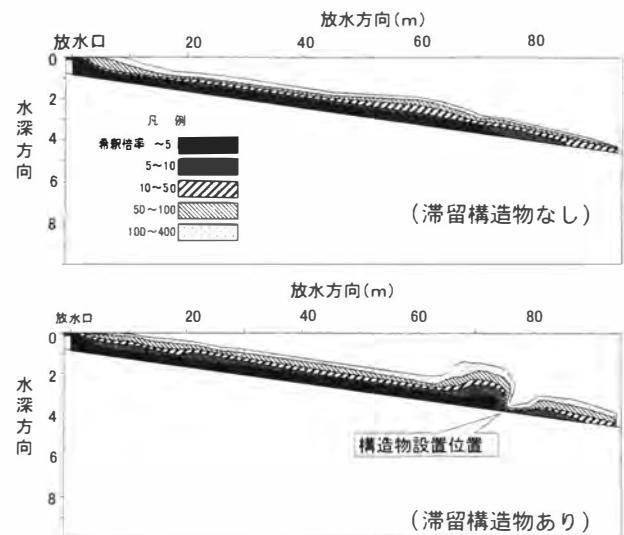


図-7(1) 希釈倍率の縦断面分布

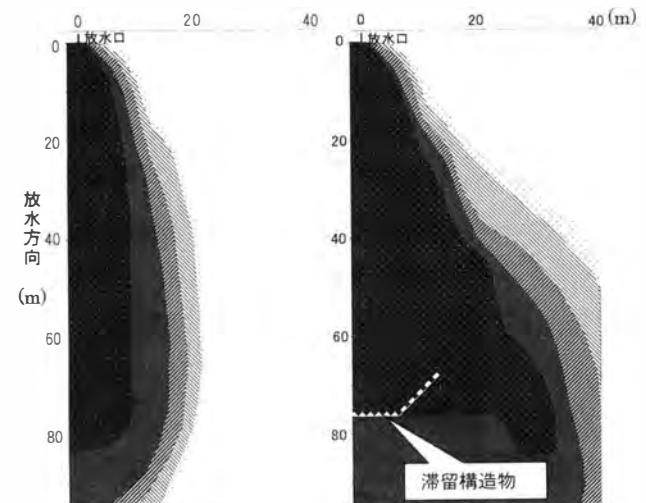


図-7(2) 希釈倍率の平面分布 (海底面)

水の拡散範囲は小規模で薄い拡散厚さとなり、肥沃化の範囲が限定される。

5. 新しい放水方式の検討

5-1 新しい放水口検討の必要性

小規模流量の深層水を海域に放水した場合の拡散状況を前述したが、日量 100 万 m^3 規模の大流量

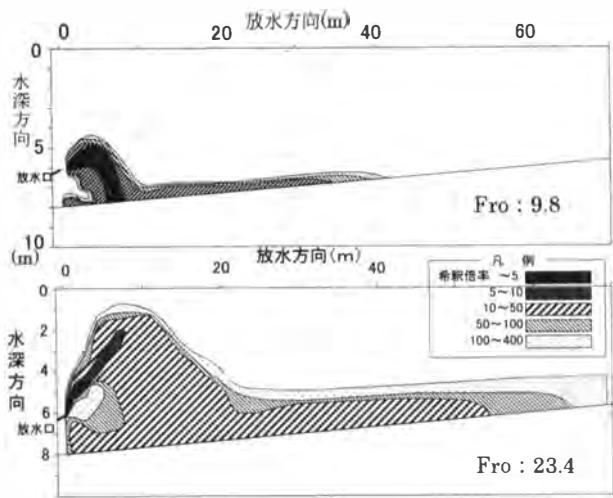


図-8(1) 希釈倍率の縦断面分布

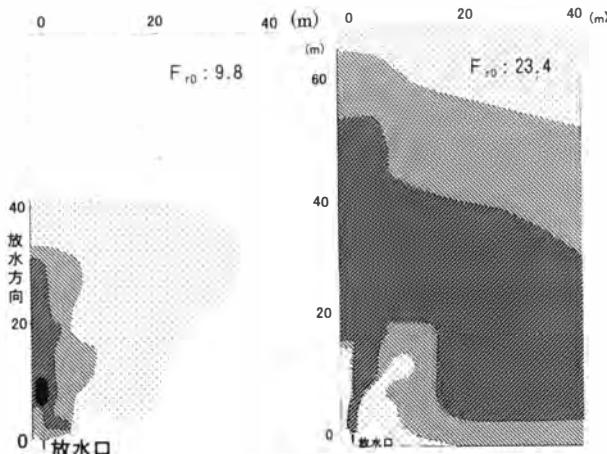


図-8(2) 希釈倍率の平面分布（海底面）

の場合には、既往の放水技術を進展させ周辺海域環境への影響を可能な限り小さくし、海域肥沃化が図れるような放水方式の検討が必要となる。すなわち、放水方式の選定への留意点は、海域肥沃化できる面積を出来る限り大きく、かつ深層水を補償深度以浅に留めることができることである。

5-2 選定した放水口形状

現時点で実用化されている放水方式及び放水口の分類は図-3に示したとおりであり、大量深層水の放水時に期待される効果を満足するには、周囲海水の連行加入が促進される水中放水方式の採用が前提となる。一方、田中・米倉の研究（田中・米倉、2000）ではさらに様々な放水口形状による希釈効果、特に鉛直方向の希釈促進に主眼をおき検討した結果、放水の管路を管径の異なる放水口ヘッドに偏

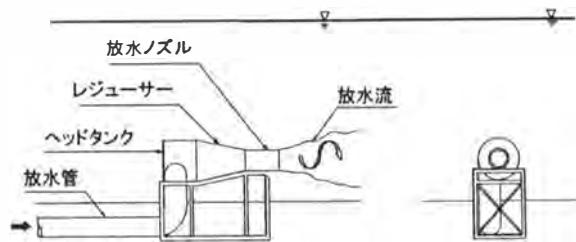


図-9 旋回流型放水口の概要

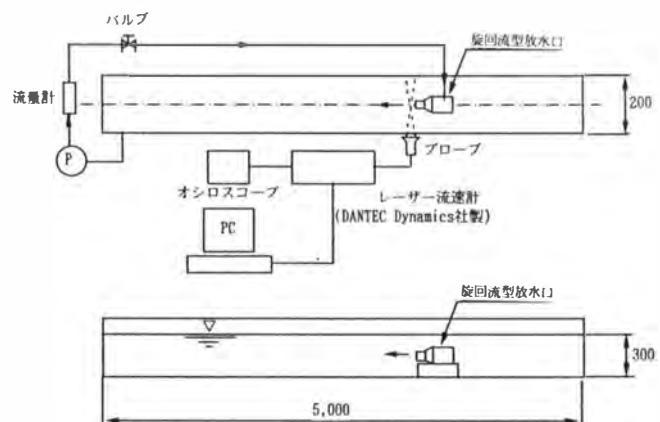


図-10 実験水槽

心させて接続することにより、流れに回転を与え放水する形状である「偏心型旋回流型放水口」が優れた希釈特性を有することが見出している。この放水口の模式を図-9に示す。この研究では、軽密度排水を対象とし、旋回流を与えない放水口と何らかの旋回流を与えた放水口との拡散希釈について相対比較し、旋回流放水口が希釈に優れていることを示している。そこで本研究では、旋回強度と放出フルード数の関係や損失水頭などの基本特性を把握とともに、重密度排水を対象とした10万m³/日規模の拡散特性について捉えることを目的とした。

5-3 旋回流型放水口の基本特性

管路内の旋回流成分を伴う流れについての研究はこれまで多く行われているが（鬼頭 昭 58年、畠沢 2000），放水口出口において旋回流成分を伴った旋回流型放水口に関する研究はほとんど行われていない。そこでここでは、旋回流型放水口の基本特性を把握するために、図-10に示すような2次元水路内に旋回流型放水口を設置し、放水口出口における流速分布の計測および損失水頭の測定を行った。本実験で使用した「偏心型旋回流型放水口」の外形

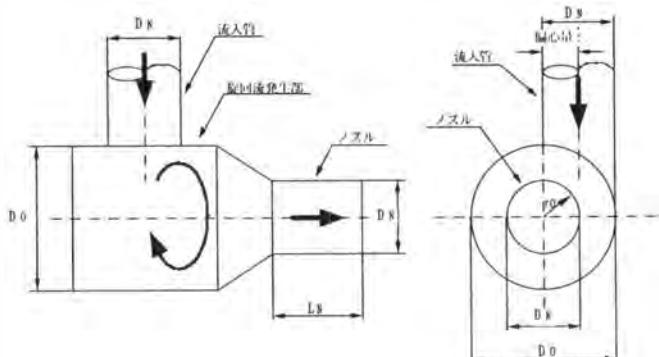


図-11 偏心型旋回流型放水口模型外形図

図を図-11に示す。図に示すように、本実験では旋回流発生部において流入管を放水口の中心軸より偏心させることにより旋回流を発生させている。実験縮尺は1/50としており、放流水の密度は本実験が旋回流型放水口の基本特性を把握することを目的としているため、周開水と同じ密度とした。表-2に実験ケースを示す。

(1) 出口流速分布の測定

旋回流型放水口出口での流速分布を把握するためには、レーザー流速計(DANTEC Dynamics A/S社製レーザー流速計システム：Model 165-06)を

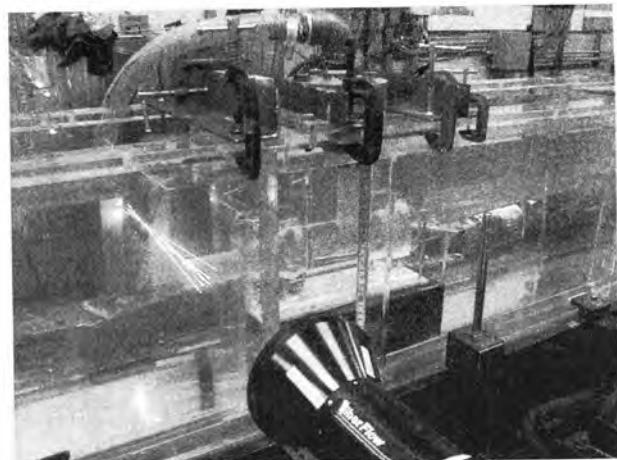


写真-4 レーザー流速計の測定状況

用いて放水口出口における旋回方向流速および軸方向流速を測定した。写真-4に測定状況を示す。

代表的な放水口出口での流速分布を図-12に示す。図中、横軸はノズル半径で無次元化したノズル中心からの距離を示し、縦軸は軸方向平均流速(u_m)で無次元化した流速値である。標準的な単一ノズル型放水口ではほぼ一様な軸方向の流速分布を示すのと大きく異なり、旋回流型放水口の場合は、放水方向の流速分布は放水流に回転を与えることによ

表-2

Case No.	偏心量 (e)	ノズル長さ (LN)	出口流速 (cm/s)	放出フルード数 (Fr)
Mid-1D-1	0.5D _N	1.0D _N	28.3	0.51
Mid-1D-2	0.5D _N	1.0D _N	42.4	0.77
Mid-1D-3	0.5D _N	1.0D _N	56.6	1.03
Mid-3D-1	0.5D _N	3.0D _N	28.3	0.51
Mid-3D-2	0.5D _N	3.0D _N	42.4	0.77
Mid-3D-3	0.5D _N	3.0D _N	56.6	1.03
Mid-5D-1	0.5D _N	5.0D _N	28.3	0.51
Mid-5D-2	0.5D _N	5.0D _N	42.4	0.77
Mid-5D-3	0.5D _N	5.0D _N	56.6	1.03
Lrg-1D-1	1.0D _N	1.0D _N	28.3	0.51
Lrg-1D-2	1.0D _N	1.0D _N	42.4	0.77
Lrg-1D-3	1.0D _N	1.0D _N	56.6	1.03
Lrg-3D-1	1.0D _N	3.0D _N	28.3	0.51
Lrg-3D-2	1.0D _N	3.0D _N	42.4	0.77
Lrg-3D-3	1.0D _N	3.0D _N	56.6	1.03
Lrg-5D-1	1.0D _N	5.0D _N	28.3	0.51
Lrg-5D-2	1.0D _N	5.0D _N	42.4	0.77
Lrg-5D-3	1.0D _N	5.0D _N	56.6	1.03

D_N : ノズル径 (=31 mm)

放出フルード数=出口流速/(重力加速度×ノズル径)^{0.5}

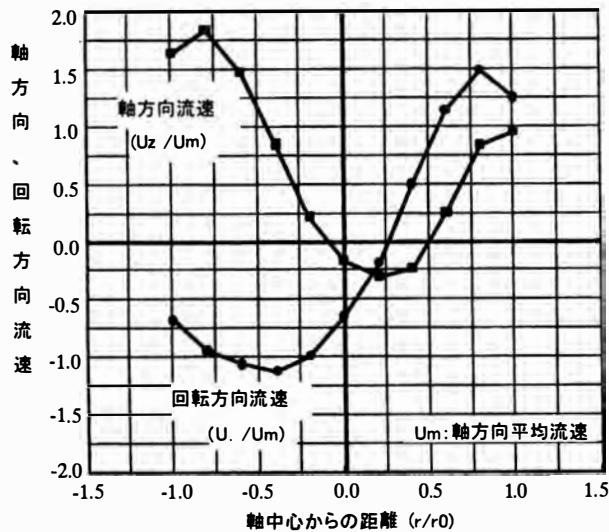


図-12 旋回流型放水口出口の流速分布の計測例

よりノズル中心で小さく、ノズル管壁付近で最大流速となっている。

(2) 旋回強度

旋回強さを表すパラメータとして、ここでは従来の旋回流の研究にならって、以下に示す無次元角運動量 S を用いる。

$$S = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} u_\theta u_z r^2 dr d\theta / (\pi r_0^2 u_m^2 \times r_0) \quad (1)$$

$$= \int_0^{r_0} u_\theta u_z r^2 dr / (r_0^2 u_m^2 \times r_0)$$

ここで、

S ：旋回強度（無次元角運動量）

r_0 ：ノズル半径 ($D_N/2$)：回転方向の流速値（測定値）

u_z ：軸方向の流速値（測定値）

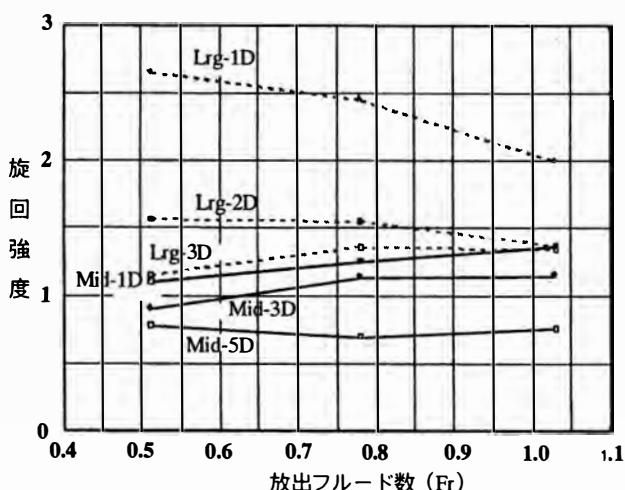


図-13 旋回流型放水口の旋回強度

u_m ：軸方向の平均流速（）

図-13 に各ケースで得られた流速分布から計算した旋回強度の値を示す。図中、横軸は放出フルード数、縦軸は旋回強度を示す。この結果より、偏心型旋回流型放水口出口における旋回強度は流入部の偏心量が大きいほど大きく、またノズル長さが長いほど小さいことがわかる。一方、放出フルード数に対する旋回強度の変化は本実験結果からは明らかではなく、今後さらに放流流速を変化させた実験が必要である。

(3) 損失水頭

旋回流型放水口の損失水頭は図-14 に示すように、旋回流型放水口流入部とノズル端部にマノメータを取り付けその水位差 (h) を計測し、次式により損失水頭係数を求めた。

$$f = \left(h + \frac{u_m^2}{2g} \right) / \left(\frac{u_m^2}{2g} \right) \quad (2)$$

ここで、 f ：損失水頭係数

g ：重力加速度

u_m ：軸方向の平均流速

計測結果を図-15 に示す。図中、横軸は放出フルード数、縦軸は損失係数を示す。通常の単一ノズル型放水口の場合の損失水頭係数が約 1.0 であるのに対し、旋回流型放水口では偏心量が 0.5 場合でも損失係数は 3~4 と大きく、偏心量が 1.0 の場合は 6~9 と非常に大きくなる。このように、旋回流型放水口は回転方向の流れを与えるために単一ノズル型放水口よりも大きなエネルギーが必要となる。一方、先の旋回強度においてはノズル長さが長くなるに従っ

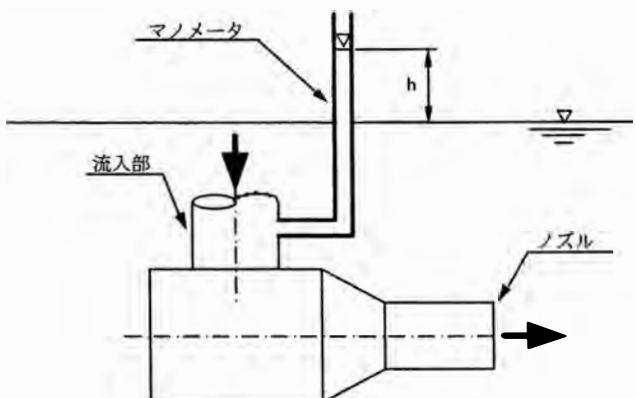


図-14 旋回流型放水口損失水頭計測方法

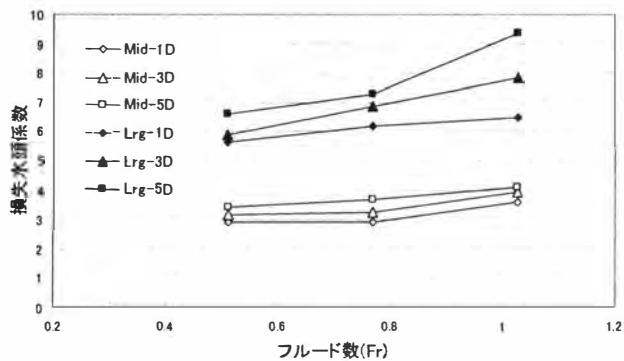


図-15 旋回流型放水口の損失係数

て旋回強度が小さくなるのに対し、損失水頭に関してはノズル長さが長くなるに従って大きくなる。したがって、旋回流型放水口ではノズル長さは短い方が旋回強度は大きくエネルギー損失が小さい。

5-4 旋回流型放水口による深層水の希釈特性

旋回流型放水口の希釈特性を確認するために、通常の放水口である単一ノズル型放水口と偏心型旋回流型放水口との比較実験を行った。実験条件としては、フルードの相似則に従った1/30の無歪実験、流量10万m³/day、放水流速2m/s（放出内部フルード数=10.6）、放水仰角0度とした。放水密度差は、高知県海洋深層水研究所で取水されている深層水（取水深度320m）と表層水の夏季（7、8月）平均値を用いて設定した。水温差は約14℃、塩分差は約1.1psuである。また、旋回流型放水口（表-2、Mid-1D）の旋回強度はS=1.2である。

図-16に両者の主軸での希釈倍率の比較、図-17に両者の鉛直断面での希釈倍率分布の比較を示す。これらの結果より、旋回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倍以上の効果が得られた。

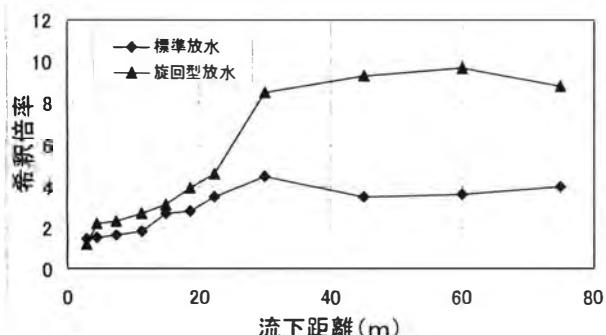


図-16 主軸での希釈特性の比較

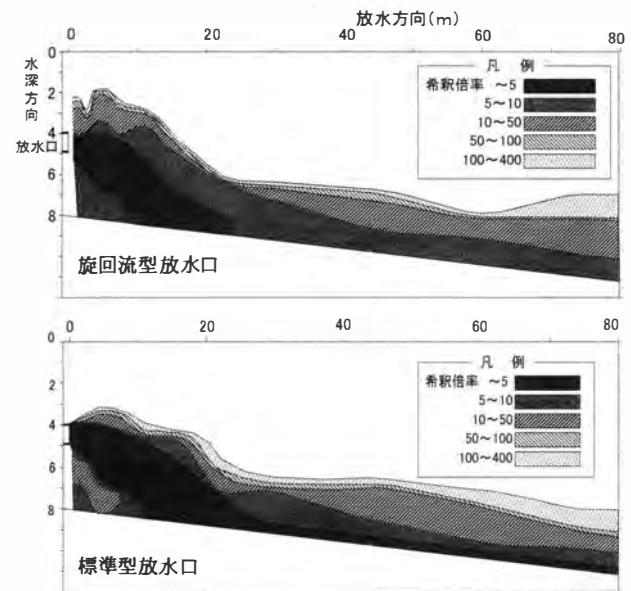


図-17 鉛直断面での希釈倍率分布の比較

一方、海域肥沃化のために深層水を留めることについて高知県高岡前面域で観測した夏季の水温・塩分鉛直分布結果をもとに検討すると、①大型海藻の生息域である水深10m付近に深層水を滞留させるには希釈倍率は10倍程度必要であり、旋回流型放水口の速やかな希釈特性が必要である。②浮遊性植物プランクトンの増殖には深層水を補償深度以浅に広範囲に拡散させることにも本放水方式が有用であることが示唆された。なお、密度成層下での深層水の拡散状況については、今後、水理模型実験や三次元拡散予測を用いて定量化を図る予定である。

以上のことから、本実験で用いた旋回流型放水口は単一ノズル型放水口よりもさらに初期希釈に優れ、大容量の深層水を効果的に放水するための有効な放水方式であると考えられる。

このように、従来の研究では水中放流の初期希釈等の基本特性は放出内部フルード数のみで整理されてきたのに対し、旋回流型放水口ではさらに旋回強度も含めてそれらを検討していくことが今後必要となる。

6. 結 論

ここでは、深層水を効果的に海域に放流するために水理実験により各種放水口の効果について確認を行った。また、大容量深層水の放流を目的とした旋回流型放水口についてその基本特性を明らかにし、その

有効性を確認した。その結果をまとめると以下のようになる。

- ①小容量の深層水の拡散実験より、護岸から直接放水した場合は大きな希釈もないまま、海底面上を流下していくのに対し、水中放流の場合には海底面に到達した深層水は約10倍に希釈されており、浅海域での広範囲な深層水の滞留が期待できることが明らかとなった。
 - ②大容量深層水の放流を想定した旋回流型放水口は、単一ノズル型放水口に比べさらに放水口近傍域での鉛直混合及び周囲水連行など優れた希釈混合が得られることが確認された。
- この新しい放水形状は、大量深層水の海域での放水による深層水還流後の海域肥沃化及び周辺海域環境への低減化に役立つものと考える。
- 一方、旋回流型放水口については旋回強度と希釈特性の関係など、さらに実験により確認していくことが必要であると同時に、エネルギーロスの少ない旋回流型放水口の形状などの検討が今後とも必要である。

参考文献

- 鬼頭 修己、「直管内乱流旋回流の非軸対称性」、日本機械学会論文集（B偏）、49巻444号（昭58-8），1641-1649。
- 社団法人電力土木技術協会（1996）：火力原子力発電所土木構造物の設計、807頁
- 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、1116頁
- 高月邦夫・林成年・池田知司・長谷部雅伸・大山 巧・平山彰彦（2000）海洋深層水の適正放水方式の検討、海岸工学会、第48巻、1346-1350。
- 高月邦夫・林成年・足達康行（2001）：深層水の新しい放水方式の検討、第5回海洋深層水利用研究会全国大会、11-12。
- 田中亮三・米倉正美（2000）：新しい水中放水方式（旋回流型他）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、44-45。
- 鍋島浩・渡辺貢・土居聰・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、44-59。
- 畠沢 政保、「まっすぐな円管内の乱流旋回流の特性」、ながれ、19（2000）、129-138。

（2001. 12. 27 受付, 2002. 3. 15 受理）