

沿岸海域環境の季節変動に伴う深層水放流時の拡散形態の変化

長谷部雅伸* ・大 山 巧**・平 山 彰 彦***
高 月 邦 夫****・池 田 知 司*****

海域で水中放流される深層水を対象として、放流海域の流れ場および成層場の影響を考慮した 3 次元流況解析を行い、周辺海域環境の季節変動に伴う放流水の拡散形態の変化について検討した。その結果、1) 冬期には温排水となる放水条件であっても、夏期の成層場では放流水がある特定の深度で平面的に拡散すること、2) 潮流などの流れの作用する場で放流する場合、放水口近傍では流れの干渉効果により 2 つの渦対が発生し、その挙動は放水・環境条件により大きく変化すること、3) これらの渦対は放水口近傍だけでなく遠方域の拡散形態にも影響し、渦対の移動に伴い低希釈水塊が分離する場合があること、などを明らかにした。

1. はじめに

近年、海洋深層水の新たな利用形態として、発電用冷却水への活用を含めた大規模なものが提案されている。これに伴い、従来、日量数千トン程度であった取水量も日量百万トンに達する大規模なものとなるため、放流時の周辺海域環境への影響を予測・評価することがより重要になる。

一方、栄養塩に富む深層水を放流することによる磯焼け防止や海域肥沃化の効果も期待されており（渡辺ら、2000）、効果的な放水方式の検討が行われている（高月ら、2001）。この場合、放流水は補償深度で浅で拡散させることが望ましいが、冬期では温排水となる放水条件であっても、海域の水温が高くなる夏期では放流された深層水が冷排水となり海底付近まで沈降するおそれが生じる。そのため、放水直後の速やかな混合希釈により放流水を適切な密度とすることができ、同時に環境影響の低減も図ることができる水中放流方式が有望視されている。

海域に放流される水塊の拡散予測に際しては、平面 2 次元モデルや準 3 次元モデル（例えば和田ら、1974 など）が適用される場合が多いが、水中放流方式では局所的に 3 次元性の強い流れ場が形成されるため、これらをそのまま用いることは予測精度の観点から問題がある。また、発電所からの温排水など表層への浮上が明らかなケースに対しては簡易拡散予測手法（片野ら、1989）が提案されているが、深層水の放流では放流先海域の季節変動により拡散する深度が変化するため適用が困難になる。

本研究では、発電用冷却水としての利用を踏まえ、海域環境の季節変動と放水条件の違いによる拡散形態の変化を捉えることを主目的として、場の流れや夏期における成層場の発生などを考慮した 3 次元モデルによる数値シミュレーションを行う。また、環境条件・放水条件に

より拡散形態が変化するメカニズムについて考察する。

2. 計算条件の設定

図-1 に本研究で想定した計算領域を示す。簡単のため海底地形は 1/25 の一定勾配を有する斜面とし、深層水放流地点は岸壁から沖合 500 m に設定した。座標系は放流地点の海表面上を原点として、 x 、 y 、 z の正の方向をそれぞれ沿岸右手方向、沖合方向、鉛直上方に設定した。境界条件として、海底面と岸壁面は壁面境界とし、壁関数により摩擦の影響を考慮している。また、領域を囲む一方の鉛直断面は潮流を模擬した 0.5 m/s の一定流を与える流入境界とし、残り 2 方の鉛直断面を開境界とした。なお、海表面については free-slip の壁面境界条件を課した。海表面および海底面・岸壁面における熱・塩分等のフラックスは 0 とし、流入境界と開境界における水温・塩分として、冬期は水温 18.2°C、塩分 34.55 psu、夏期には図-2 に示すような鉛直分布で示される値を与えた。

放水口は沖合 500 m 地点の水面下 20 m に沖向きに設置し、直径 2.2 m の単一円管で 10° の仰角が設けられている。取水される深層水として水温 10°C、塩分 34.3 psu を設定し、発電施設での水温上昇量が 10°C、15°C となる計算ケースを設けた。従って放流される深層水の水温は 20°C および 25°C となる。放流速は 3.0 m/s（日量 98.5 万

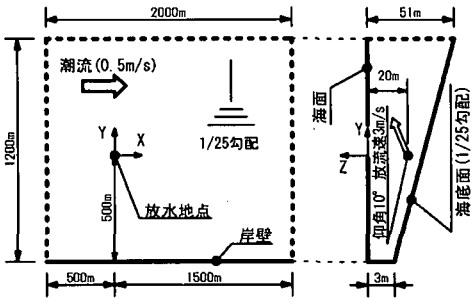


図-1 計算領域

* 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
**** (株)東京久栄環境創造エンジニアリング部
***** 農博 (株)関西総合環境センター技術開発部

トン)とし、放流水の希釈倍率を求めるトレーサーとして水と同じ物性値で海水の密度には影響しない仮想物質“染料”を混入した。表-1に本検討での主な計算条件を示す。なお、S-0、W-0については後の比較検討のため行った計算ケースであり、取水した深層水をそのまま放流した場合を想定したものである。

3. 数値モデル

水中放流方式では、放水口近傍において3次元性の強い複雑な流れ場が形成されることが予想されるので、数値シミュレーションに際しては仲敷ら(1996)のように、静水圧近似を適用しない3次元モデルを用いるのが適切であると考えられる。仲敷らは発電所からの温排水を対象としているため水温による密度変化のみを考慮しているが、深層水放流では塩分濃度による影響も考慮する必要がある。そこで本研究では、支配方程式として連続式、運動方程式、熱輸送に関する方程式、乱流方程式($k-\epsilon$ 二方程式モデル)とともに、塩分や染料など溶存物質に関する移流拡散方程式を考慮した。なお、海水の密度については、水温と塩分濃度の関数で表される UNESCO の式を用いて評価した。

支配方程式を有限体積法に基づき数値的に解くために、図-1に示す計算領域を非構造格子を用いて分割した。水平方向の最大格子間隔は20 mであり、放流水の影響が強い放水口近傍ほど格子間隔が小さく(およそ30 cm程度)になるように要素分割した。計算領域全体での格子数は約15万個である。支配方程式の空間的離散化スキームとして風上1次精度差分を用い、SIMPLE法による定常計算を行って収束解を得ている。

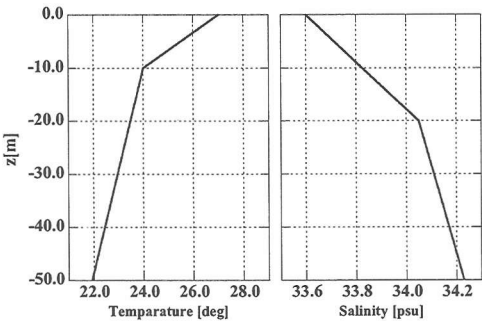


図-2 夏期における水温・塩分の鉛直分布

表-1 計算ケース

		S-0	S-1	S-2	W-0	W-1	W-2
環境条件 (初期条件)	季節	夏期			冬期		
	水温[°C]	成層場(図-2参照)			18.2		
	塩分[psu]				34.55		
放水条件	水温[°C]	10	20	25	10	20	25
	塩分[psu]	34.3					

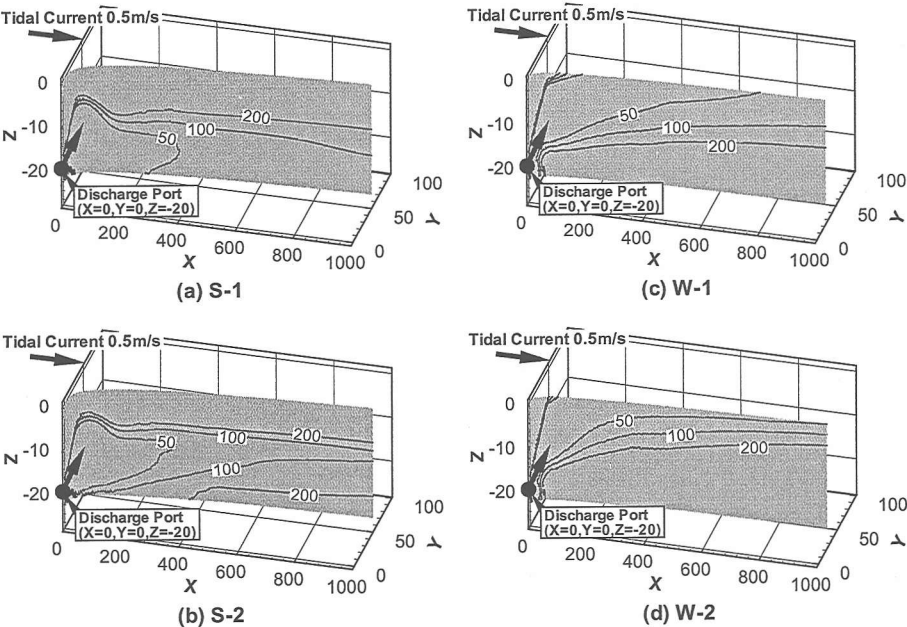


図-3 鉛直断面における希釈倍率分布

4. シミュレーション結果に基づく拡散形態の検討

4.1 海域環境の季節変動による滞留深度の変化

本研究で行った数値シミュレーションでは計算領域に一樣な流れ（潮流）を想定しており、深層水は場の流れに直交する向きで放流されている。従って放流水は、冲向き（ y 方向）から次第に沿岸下流方向（ x 方向）へと向きを変えるような経路を辿ることになる。図-3は鉛直断面内における希釈倍率分布を夏期（S-1, S-2）および冬期（W-1, W-2）について示したものである。希釈倍率 D は放流水に混入させた仮想物質“染料”の濃度により、

$$D = S_0 / S \dots\dots\dots (1)$$

と定義した。ここで S_0 :放水口における染料濃度、 S :染料濃度である。冬期のケース（W-1, W-2）では温排水となっており海面への浮上が見られる一方、同じ放水条件で夏期を想定したケース（S-1, S-2）では、成層場の影響により特定の深度を中心として拡散している。放水温が 20°C であるS-1のケースでは海底面近くでの拡散となり、S-1よりも放水温が高いケースS-2では海面下12 m程度の領域を中心に分布していることがわかる。

より詳細な検討を加えるため、図-4に z - x 鉛直断面内における各ケースの放水主軸経路を示す。ここで、放水主軸は、 y - z 鉛直断面内において染料濃度が最大となる点のつながりとして定義した。冬期の温排水となるケースW-1では放水口から約600 m下流の地点で、また、より密度の低い放流水となるW-2では約200 m下流で主軸が海面へと浮上していることがわかる。一方、夏期のケースS-1, S-2では約500 m下流で密度の釣り合う深度（それぞれ水面下約24 m, 12 m）に留まっている。また、冷排水となるケースS-0, W-0ではいずれも主軸が海底面に到達する。ただし、W-0では1500 m下流においても海底斜面に沿って沈降を続けるのに対し、成層場を考慮したS-0では水面下25 mにおいて放流された水塊と周囲水の密度が釣り合うため、この地点よりも下流側では深度の変化は無い。

4.2 放水主軸の経路と希釈倍率

図-5は x - y 水平面内における放水主軸経路を示したものである。各ケースの結果には有意な差が現れているが、最も特徴的な点は温排水となるケース（W-1, W-2）で主軸経路が放水口位置よりも岸側に接近することである。図-6に、W-2における水面下10 mでの希釈倍率コンターを示す。放水直後に流軸が2つに分岐しており、図-5で岸寄りの経路が示されたのは沖側に比べ岸側の軸上における希釈倍率が低いためであることがわかる。図-7は先に求めた放水主軸上の希釈倍率を示したものである。

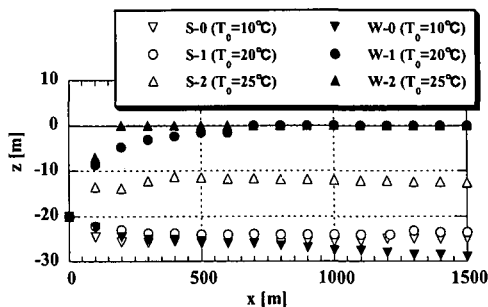


図-4 z - x 断面内における放水主軸経路

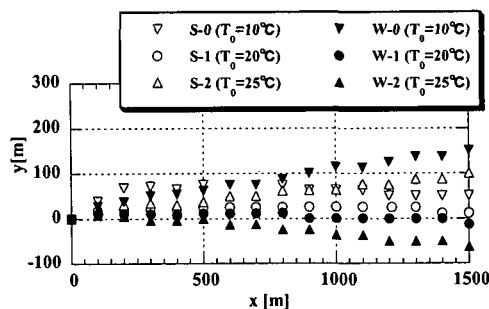


図-5 x - y 平面内における放水主軸経路

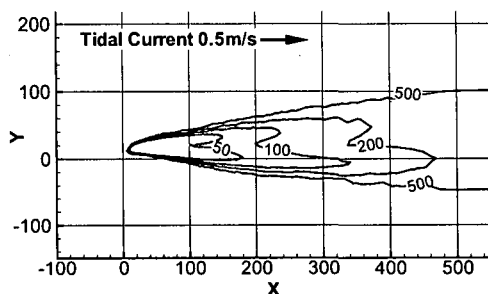


図-6 $z = -10$ mにおける希釈倍率分布（W-2）

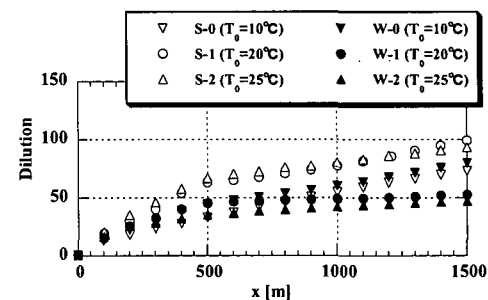


図-7 放水主軸上の希釈倍率分布

である。各ケースとも x 方向へと流されるに従い希釈が進行しているが、温排水となるケース (W-1, W-2) では、中層拡散 (S-1, S-2) や冷排水 (S-0, W-0) となるケースに比べて遠方域の希釈倍率の変化が小さくなっている。この結果、1500 m 下流の位置における希釈倍率として、中層拡散で 90~100 倍、冷排水では 70 倍~80 倍となるのに対し、温排水となるケースでは 50 倍以下の低い値を示している。以上のように、放水・環境条件は、滞留深度のみならず、主軸経路や希釈倍率を含む拡散パターンにも影響を及ぼす。そこで、次節においてその原

因を考察する。

4.3 放水口近傍での流れの干渉と拡散形態への影響

場の流れに対して直交する方向に放出される噴流については、片野ら (1976) が行った水理実験において放水軸の分岐が確認されており、放水口近傍における場の流れと放水流の干渉によって生じる上下 2 対の渦が原因であることが知られている (Kelso ら, 1996; Camussi ら, 2002)。図-8 には W-2 のケースについて、放水口近傍での流速ベクトルを示す。本計算においても、放水方向と直交する平面内に渦対が発生していることがわかる。

図-9, 10 には、それぞれ W-2 および S-2 のケースにおける y - z 断面内の流速ベクトルを示す。図中、灰色で示される領域は、希釈倍率が 50 倍以下となる低希釈水塊を表している。放水直後の $x=20$ m 地点では、いずれのケースでも顕著な渦が形成されているが、その強さや位置については W-2 と S-2 でほとんど差異がない。しかし、 $x=50$ m 地点まで流下すると両者の流れのパターンは大きく異なってくる。W-2 のケースでは、もともと放流水の下方に形成された渦が浮力により浮上し、上方の渦を岸側に押し動かしている。 $x=100$ m に達するとふたつの渦の中心はほぼ水平に並ぶ形となり、やがてひとつの渦は岸沖方向に離れていく。これに対して S-2 のケー

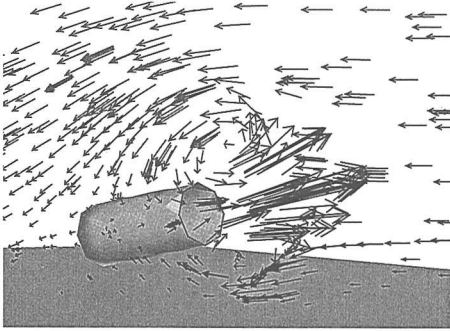


図-8 放水口近傍での流れ場 (W-2)

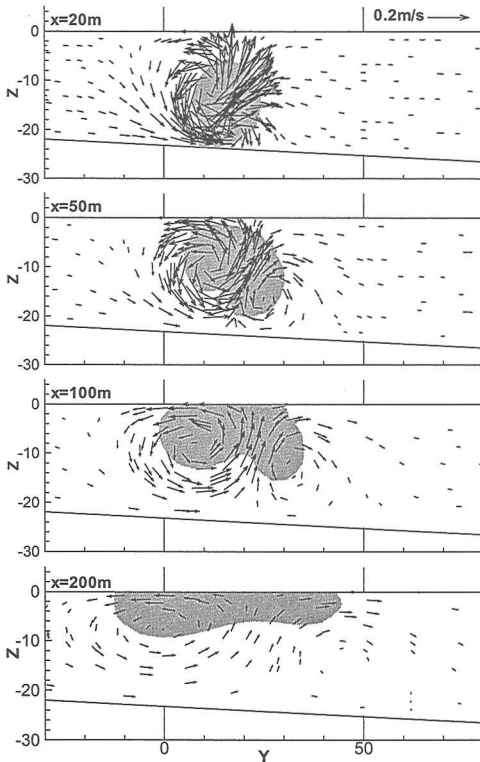


図-9 y - z 断面流速分布 (W-2)

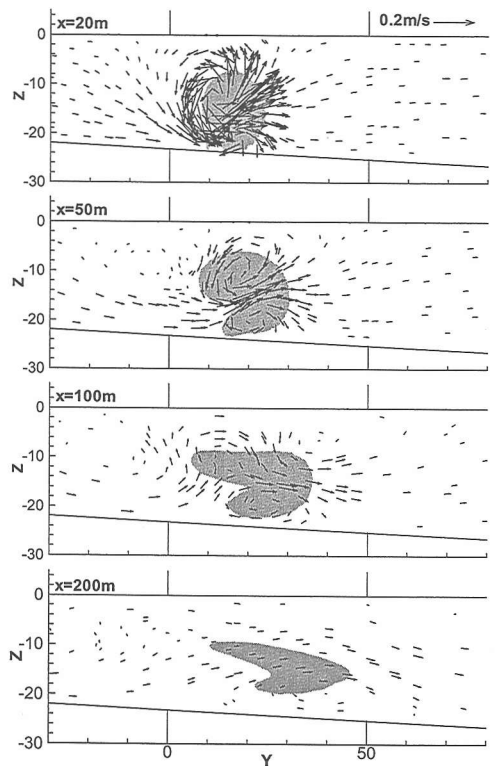


図-10 y - z 断面流速分布 (S-2)

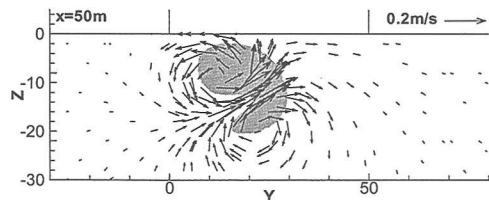


図-11 y - z 断面流速分布 (W-2: 水深 60 m 一定領域での放水)

スでは、 $x=50$ m 地点でも渦対の相対的な位置は $x=20$ m 地点とほとんど変わらない。さらに下流の $x=100$ m 地点では、 $x=20$ m, 50 m 地点に見られた 2 つの渦対の明確なパターンが崩れ、 $x=200$ m 地点に達すると大きなスケールの渦はほぼ消滅している。

以上のように、放流水の滞留深度は放水口近傍で発生した渦対の挙動に大きな影響を及ぼす。希釈倍率の分布はこのような渦対の動きに対応しており、例えば、W-2 の $x=200$ m 地点の結果に見られるように、ふたつの渦の岸沖方向の移動に伴って低希釈水塊も平面的に引き伸ばされ、結果として図-6 に示される分岐現象が現れる。

また、渦対の相対的な位置関係は、希釈混合の強弱を決定付ける重要なファクターとなっている。例えば $x=50$ m 地点での結果を W-2 と S-2 で比較してみると、渦対がほぼ水平に並ぶ W-2 では海底面の存在により水塊下方からの周囲水の流入が制限されているのに対して、渦対間の傾斜が大きい S-2 では岸側からふたつの渦の間に周囲水が顕著に流入している。参考のため、W-2 と同様の放水・環境条件に対して水深を 60 m で一定とした場合の結果を図-11 に示す。この場合には、水塊の下方からの流入がスムーズになるため、図-9 の結果に比べて希釈の進行が促進されていることがわかる。

5. ま と め

水中放流される深層水を対象として、流れ場や成層場の影響を考慮した 3 次元モデルによる拡散シミュレー

ションを行った。その結果、冬期では温排水となるような放水条件であっても、夏期の成層場では放流された深層水がある特定の深度を中心とした領域で拡散することが確認された。また、流れの作用する場では放水口近傍で渦対が発生し、放流水とともに遠方域へと移動する場合がある。これら渦対の挙動は放水条件や環境条件によって大きく異なり、低希釈水塊の分離や、水深が浅い場合には周囲水との混合希釈にも有意な差をもたらすなど、遠方域における拡散形態にも影響を及ぼすことを明らかにした。

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礎研究である、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

- 片野尚明・和田 明・角湯正剛・河村博美 (1976): 水域中における温水噴流の拡散過程, 第 20 回水理講演会論文集, pp. 185-190.
- 片野尚明・曾我雅海・五十嵐由雄 (1989): 水中放水による温排水拡散予測範囲の簡易予測法, 電力中央研究所報告, 研究報告 U 88071, 33 p.
- 高月邦夫・林 成年・池田知司・長谷部雅伸・大山 巧・平山彰彦 (2001): 海洋深層水の適正放水方式の検討, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1346-1350.
- 仲敷憲和・松梨史郎・坂井伸一・丸山康樹 (1996): 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.
- 和田 明・片野尚明・角湯正剛・荒木 洋 (1974): 沿岸海域における温排水拡散予測手法の適合性に関する研究, 電力中央研究所技術第二研究所報告, 研究報告 73011, 121 p.
- 渡辺 貢・谷口道子・池田知司・小松雅之・高月邦夫・金巻精一 (2000): 海洋深層水による沿岸海域の肥沃化, 月刊海洋, 号外 No. 22, pp. 160-169.
- Kelso, R. M., T. T. Lim and A. E. Perry (1996): An experimental study of round jets in cross flows, J. Fluid Mech., Vol. 306, pp. 111-144.
- Camussi, R., G. Guj and A. Stella (2002): Experimental study of a jet in a crossflow at very low Reynolds number, J. Fluid Mech., Vol. 454, pp. 113-144.