

密度成層場における温排水の拡散過程
Diffusion Processes of Warm Water Discharged in Stratified Environment.

電力中央研究所 正員 水鳥雅文 M. Mizutori
電力中央研究所 正員 片野尚明 N. Katano

1. はじめに

我が国の臨海発電所前面海域の中には、河川水の流入や大気との熱交換作用などの影響により、空間的に非一様な密度場を呈していることがある。このような海域に温排水が放流された場合、その拡散挙動は何らかの形で場の密度構造の影響を受け、一様な海域へ放流された場合とは異なる様相を示すことが予想されるが、現在のところこうした場での温排水拡散過程は、十分に解明されていない状況にある。

そこで筆者らは、まず河川水流入に起因する密度成層場を対象に温排水拡散の実態を把握するため、2度にわたる現地観測を実施してきた。本報告は、この現地観測結果に基づき、その温排水拡散挙動に対して検討した結果を述べるものである。

2. 現地観測の内容

現地観測は、昭和59年10月太平洋沿岸海域（以後、A海域と呼ぶ）、ならびに昭和60年11月に大規模内湾海域（以後、B海域と呼ぶ）を対象に、それぞれ5日間にわたり実施した。一般に、発電所前面海域における河川水の拡散状況には様々なケースが考えられるが、ここでは一応図-1に示す2つのタイプに分けて取り扱う。第一のタイプは、河口部と放水口とが比較的近接し、河川水の拡散域が明瞭に識別できる海域であり、A海域がこれに当る。第二のタイプは、河川水が前面海域全体にほぼ一様に拡がっている海域であり、B海域がこれに当る。

各海域における当該発電所の冷却水量は、前者が約60m³/s、後者が約140m³/sであり、共に表層放流方式がとられている。

測定項目は、船上からの水温・塩分および流動観測、および航空機からのMSS撮影に大別でき、主として空間的な分布の把握に重点を置いた観測を行った。観測内容の概要は、表-1に示すとおりである。

3. 海表面分布特性

図-2は、熱赤外画像から測定

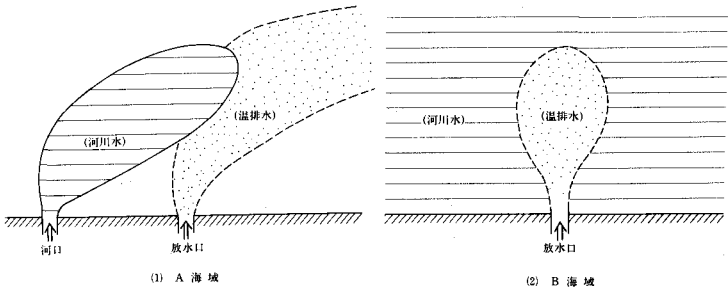


図-1 河川水拡散状況の様式化

表-1 観測内容の概要

観測方法 項目	観測期間	測点	測定層	測器	測定間隔
1) 流動・水温・塩分連続観測	S59 10月22日～23日	6点	海面下1.3m	PRCM-4	1分
	S60 11月18日～26日	4点	海面下1.5m		10分
2) 水温・塩分・曳航式測定	S59 10月22日～23日	対象沿岸域	海面下0.5,1,1.5,(2),(2.5),(3)m	曳航式水温計	1日3回
	S60 11月19日～23日		海面下(0.5),1,(2),3,(4),5m	CT-2000	
3) 水温・塩分・(流動)鉛直分布観測	S59 10月22日～23日	約30点	海面下1mまでは0.2～0.5m間隔、以下1m間隔で着底まで	CSTD計	1日3回
	S60 11月19日～23日			電磁流速計	
4) 航空機によるMSS撮影	S59 10月22日,24日,26日	対象沿岸域	表面水温 温度分布	マルチスペクトル	1日1パターン
	S60 11月19日～21日		表面水温	スキャナー	ないし2パターン

※ 2) の測定層中の () 内は水温のみ測定

したA海域における海表面水温分布である。温排水の拡散域は、周辺海域の環境水温（約18.5℃）より高く、逆に河川水の拡散域は低く現われている。この図より、温排水と河川水との拡散域の境界が明瞭に判別することができ、顕著な水温フロントが形成されていることがわかる。また、目視観測によってこの境界線上に『潮目』と呼ばれる表面物質の収束線を確認している。

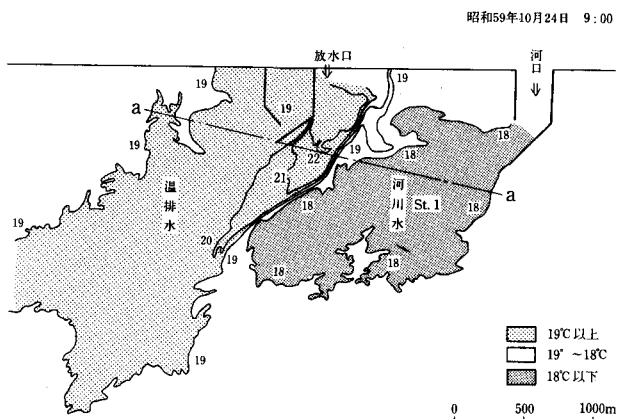


図-2 A海域における海表面水温分布

図-3は、船上観測によるB海域での海表面水温分布である。本海域の場合、観測期間中前面海域への河川水影響の大小により、水温分布パターンは鋭敏に変化し、 ΔS （場の表層水と温排水との塩分差）が大きい時程、温排水の表面拡散域は縮小する傾向が認められた。

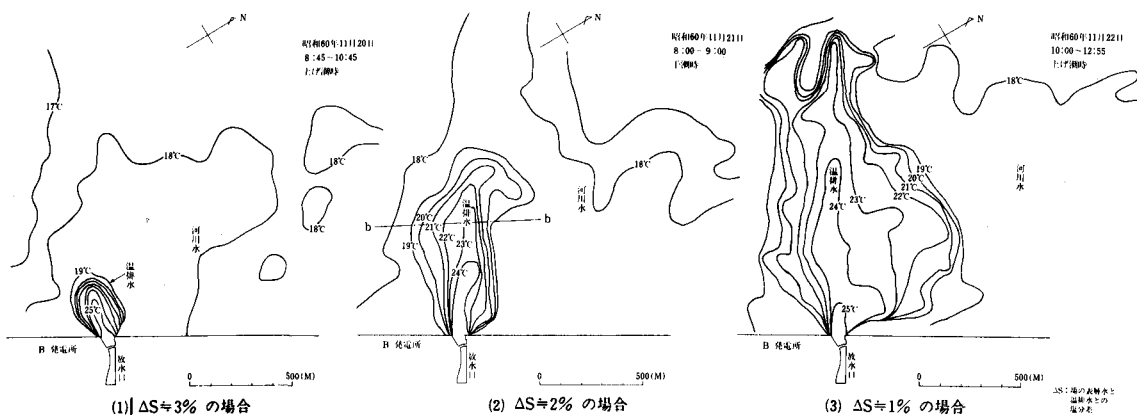


図-3 B海域における海表面水温分布

また、本海域においてもA海域の場合と同様に、温排水拡散域の外縁部において顕著な水温フロントと所々に潮目現象が認められた。

4. 鉛直分布特性

次に、鉛直方向から見た拡散構造について検討した。

まず、今回両海域の数多くの地点で観測された水温ならびに塩分の鉛直分布を、両者の組み合わせを念頭に置き、類型化を行った。その結果、図-4に示す5種類の組み合わせに大別できることが明らかとなった。この水温・塩分各々の分布形状から温排水および河川水の拡散状況は、図下の表中に示したように想定される。

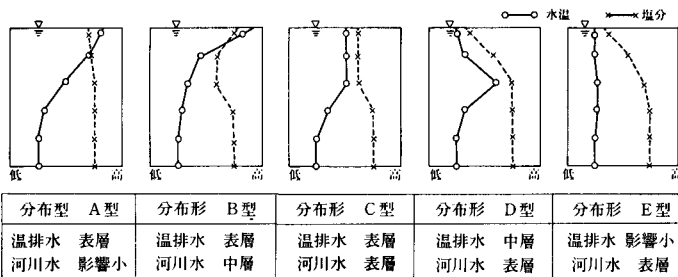


図-4 水温・塩分鉛直分布構造の分類

こうして類型化された鉛直分布形を図-2および3に示した各温排水拡散パターンに当てはめると図-5のようになる。ただし、本図は主流軸に沿った鉛直断面構造を模式的に表わしたものである。A海域の場合、放水口が放流された温排水は表層を拡がりながら、河川水の拡散域の端部でフロントを形成した後、河川水下へ潜り込む状態を示している。一方、B海域では、 $\Delta S \approx 3\%$ の場合温排水は放水口からの放流直後より河川水下に潜り込み、逆に $\Delta S \approx 1\%$ の場合には河川水の上方を表層拡散し、 $\Delta S \approx 2\%$ ではその中間的な挙動を示している。

5. 中層での拡散形態と成層の安定性

以上の分布特性の概略から、一様密度場ではみられない幾つかの成層場特有の拡散現象が起こっていることがわかる。その一つに、温排水の河川水下への潜り込み現象が挙げられる。

図-6は、温排水が潜り込んで中層を拡散している測点（前述のD型に相当する）での水温鉛直分布実測結果の一例を示す。ただし、水温値はその測点での下層水温を基準値として、最大水温差 ΔT_{max} で無次元化している。また、図中には実測値に比較的適合する指数関数型を破線で示しており、A海域の場合にはおよそ海面下1m、B地域では海面下5m付近を中心に、やや上側に歪んだ指数関数型で近似できる。

このような温排水の拡散状態の安定性を検討するため、次式のような勾配型リチャードソン数を算出し、温排水の主軸に沿った縦断面内における分布を求めた。

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right) / \left(\frac{du}{dz} \right)^2$$

上式中の密度(ρ)はクヌードセン式より、速度勾配(du/dz)はベクトル差のスカラー量を用いて算定した。

この場合のリチャードソン数の成層安定条件は、現象が3次元的で複雑であるため、明確な基準値

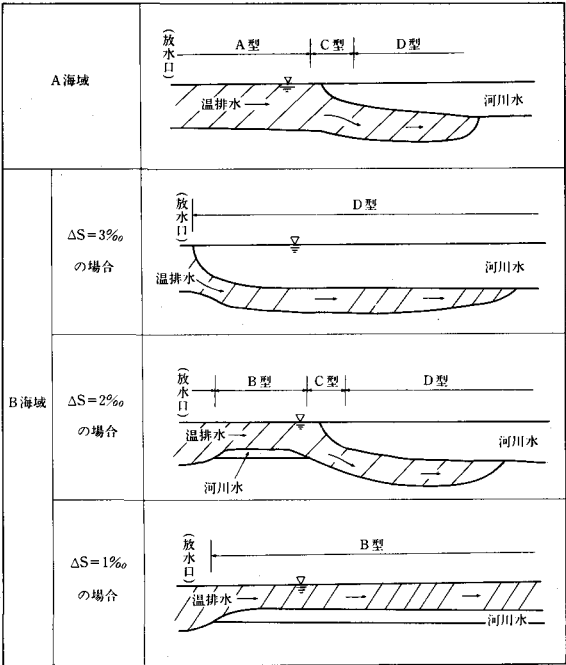


図-5 温排水鉛直拡散パターンの模式化

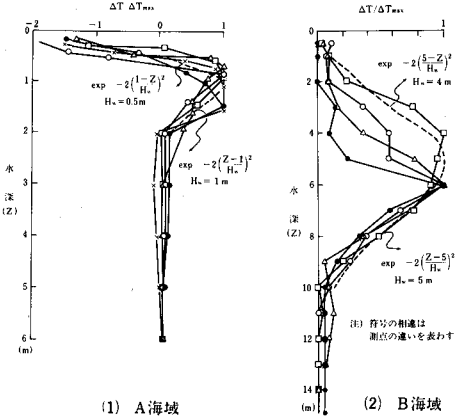


図-6 水温鉛直分布の観測結果 (D型)

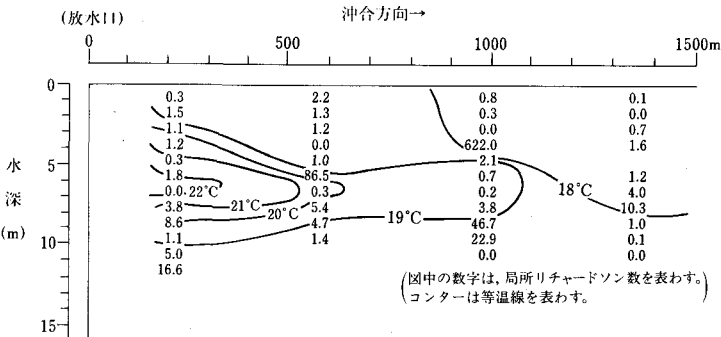


図-7 局所リチャードソン数の断面分布

として設定できないが、断面内の相対的な安定性については推察することができると考える。

図-7は、その解析結果の一例である。図中には、水温分布を併記している。温排水拡散域のほぼ外縁部と目される19℃の等温線上において周辺部よりも1オーダー以上大きい値を示しており、成層安定度から見て比較的安定した、3成層構造をしているものと判断される。

こうした成層状況下において、次に興味ある所は、温水層と河川水層間での混合・拡散現象の把握である。

図-8に、図-2中に示すSt.1での水温・塩分鉛直構造の経時変化を示す。前述の分類に従うと、9時頃まではE型、それから13時頃までD型、あるいはC型、それ以降A型と推移していることがわかる。

図-9は、前図と同時間帯における上記測点海面下1m層での流速、水温および塩分の時系列変動を示す。水温変動をみると、10時前後に急激な水温上昇が認められると共に、それ以降変動が顕著となっていることがわかり、温排水層内での変動の大きさを表わしている。また、塩分変動をみると、図-8からわかるように本測定層は9時頃まで河川水拡散域の内部境界面付近に位置しており、スパイク状の塩分降下がみられるが、水温上昇後の塩分変動はその傾向を異にしていることがわかる。流速変動については特に顕著な傾向は認められない。

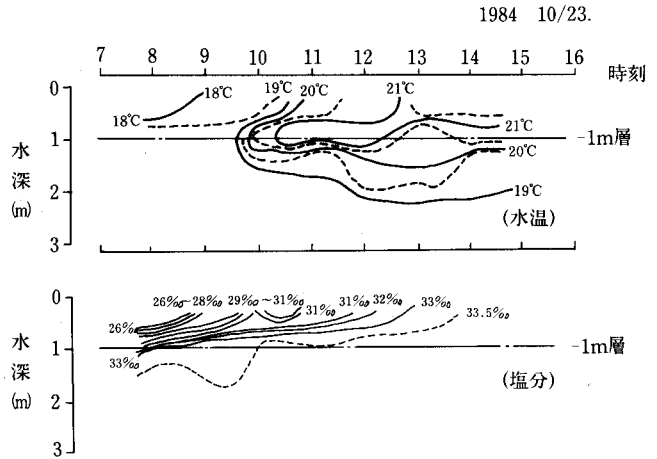


図-8 水温・塩分鉛直構造の経時変化

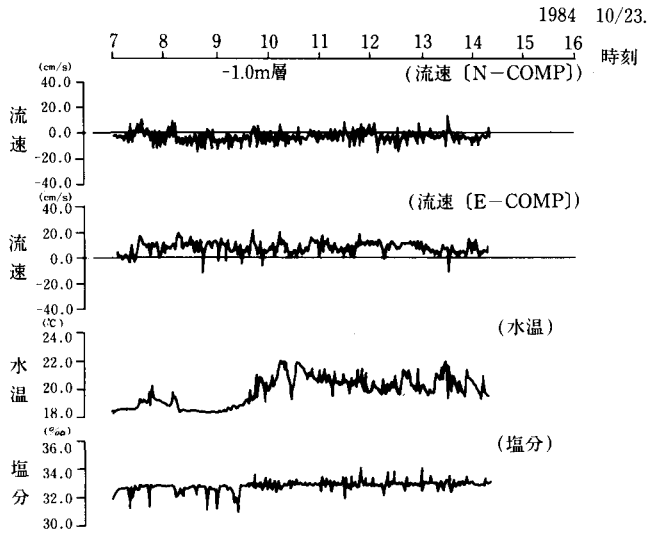
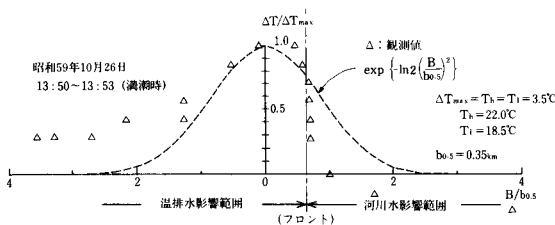
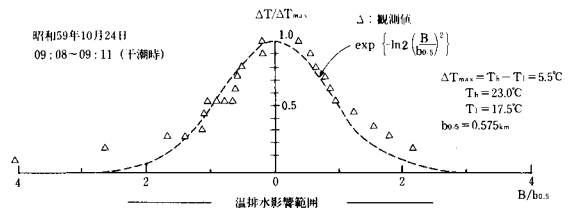


図-9 流速・水温・塩分の時系列変動（海面下1m層）



(1) 河川水影響のある場合



(2) 河川水影響のない場合

図-10 海表面水温横断分布形状（a-a断面）

以上のように、実海域では潮汐や沿岸流などの影響により、その拡散状況が時々刻々変化しており、今回のような現地観測によって両者の境界層における変動現象を定常的に測定することは非常に困難であり、この点については、水理実験等による検討を待つ必要がある。

6. 海表面水温フロント近傍の分布特性

今回の観測において、もう一つの特徴的な現象として、海表面における水温フロントの形成が挙げられる。

図-10は、図-2中に示すa-a断面での水温水平分布を表わすと共に、比較のため同断面における河川水のはり出しのない場合の水温分布を示す。ただし、水温値は環境水温を基準として最大水温差 ΔT_{max} で、水平距離は半値半幅 $b_{0.5}$ でそれぞれ無次元化している。また、図中の破線はガウス分布を示している。河川水のはり出しのない場合には、ほぼガウス分布を満足しているのに対し、河川水影響下ではフロント部において急激に変化する形状となっている。

こうした水温フロント近傍域での鉛直分布構造は、前述のようにC型となる。図-11に、B海域を観測されたフロント近傍での水温・塩分鉛直分布の一例を示す。表示に当っては図-6と同様の無次元化を行っている。フロント近傍では温水和河川水とが密度的に平衡状態を保っていると考えられるものの、両成分の分布形状をみると、変動が大きく、複雑な構造をしていることがわかる。

次に、図-3中に示すb-b断面での海表面水温ならびに密度の水平分布を図-12に示す。この図より密度分布形状をみると、水温勾配の急なフロント部において密度の極大値が生じていることがわかる。この特徴は、本現象よりもかなりスケールの大きい沿岸フロント¹⁾(沿岸水と外洋水との接触部にできるフロント)で観測されている特徴と共通するものであり、興味深い。また、現象的に沿岸フロントの主な成因が沿岸からの淡水流入と海面冷却過程と考えられていることから、共に『熱塩循環』という点で本現象との共通性の高い現象と考えられる。

7. おわりに

2箇所の海域を対象に実施した現地観測結果をもとに、河川水によって密度成層の形成された海域における温排水拡散特性について考察した。その結果、海表面での明瞭な水温フロントの形成や河川水下への潜り込みなど密度成層場特有の温排水拡散特性を明らかにすると共に、こうした場での典型的な温排水拡散パターンを示した。

しかし、今回の検討ではこれらの現象の定性的な考察にとどまっており、温排水と河川水との間の境界層における安定度、混合形態ならびに拡散率など未解明な点も多い。今後は、水理模型実験ならびに数値解析手法を用いて、このような未解明事項の検討を行っていく予定である。

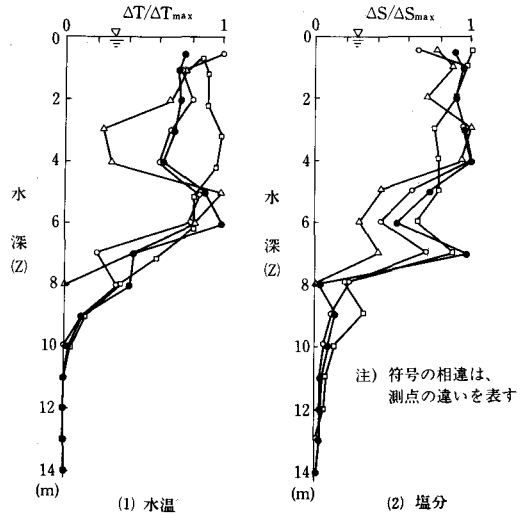


図-11 水温・塩分鉛直分布の観測結果(C型)

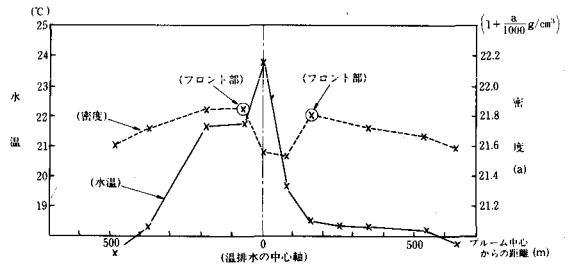


図-12 水温・密度の海表面横断分布(b-b断面)

参考文献

- 1) 吉岡 洋：沿岸海域のフロント，沿岸海洋研究ノート 第21巻 第2号，p. 110-117, 1984.
- 2) 鳥羽良明・杉本隆成：沿岸過程と海面過程，沿岸海洋研究ノート 第11巻 第2号，p. 97-104, 1974.