

総 説

発電所の温排水拡散評価技術

水鳥雅文^{* §}

Diffusion Evaluation Technique of Heated Water Discharged from Power Plant

Masafumi Mizutori^{* §}

要約: 火力・原子力発電所に係る環境アセスメントにおいて、海域へ排出される復水器通過後の冷却水（以後、温排水と呼ぶ）の拡散評価は、海域環境や沿岸漁業等に及ぼす影響を考える上で重要な検討事項の一つである。本総説では、我が国における温排水拡散評価の経緯と現状、拡散評価のための予測手法、海象調査とデータ解析（事前・事後調査）について、その概要や留意点を解説する。

キーワード: 温排水, 拡散評価, 海象調査, 予測手法, 数値解析, 水理模型実験, モニタリング, 環境アセスメント

まえがき

火力・原子力発電所の取水口から取り入れられた大量の海水冷却水は、復水器を通過する時に蒸気から熱を奪うことにより7℃程度水温が上昇し、放水口から放水される。これがいわゆる「温排水」である。

火力・原子力発電所に係る環境アセスメントにおいて、この温排水の拡散評価は、海域環境や沿岸・養殖漁業等に及ぼす影響を考える上で重要な検討事項の一つとなっている。

本総説では、最初に我が国における温排水拡散評価の経緯と現状を概説した上で、拡散評価のための予測手法、および海象調査とそのデータ解析について解説する。

我が国における温排水拡散評価の経緯と現状

我が国の火力・原子力発電所は、そのほとんどが沿岸に立地し、大量の冷却水を海水に依存して

いる。1960年代頃より発電所の規模が大型化するに伴って、徐々に温排水の漁場や養殖業に及ぼす影響への懸念が表明され始めた。また、その頃米国では、温排水が環境問題の一つとして社会的注目を集め、州ごとに水温上昇に関する規制が実施されるなどの動きが見られた。

こうした背景の中、我が国では1970年に制定された水質汚濁防止法において水温が水質規制の対象項目と位置づけられた。この規定によれば、規制の対象となる水温とは「熱による水の汚染状態であって、生活環境にかかわる被害を生じる恐れのある程度のも」(法第2条第2項第二号)となっている。そして、1971年以降、国は温排水問題の究明に積極的に着手し、環境庁は、中央公害対策審議会の中に温排水分科会を設置して水温規制への対応の在り方や温排水拡散予測手法などについて検討・整理され、1975年に「温排水問題に関する中間報告書」が公表されている。

一方、国による電源開発に関する環境影響評価は、1973年資源エネルギー庁の通達により環境調

(2021年8月27日受付, 2021年9月21日受理)

* 公益財団法人海洋生物環境研究所 顧問 (〒162-0801 東京都新宿区山吹町347番地 藤和江戸川橋ビル7階)

§ E-mail: mizutori@kaiseiken.or.jp

査書の提出が義務付けられたことに始まる。1977年以降は、通商産業省（現 経済産業省）の省議決定「発電所の立地に関する環境影響評価及び環境審査の強化について」に基づいて環境影響評価が実施されてきた。いわゆる省議アセスである（（一社）電力土木技術協会，1995）。現在は、1999年に施行された環境影響評価法及び改正電気事業法に基づき、国による発電所の立地に係る環境影響評価の審査手続きが行われている。こうした一連の動向の中で、温排水拡散評価は、当初より水環境に係る重要な評価項目の一つとして位置付けられている。

温排水に関する環境調査・予測評価手法については、1980年に制定された「温排水環境影響調査暫定指針」にまとめられ、その内容は、その後の最新の研究成果を加味しながら、現在の「発電所に係る環境影響評価の手引」（経済産業省，2020）に引き継がれている。

温排水拡散による直接的な環境影響評価項目としては、熱による水温と放水流動による流向・流速が挙げられる。水温は、 1°C 以上の昇温範囲をもって評価される。ただし、放水口近傍（放水口から $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 以上の水温上昇域）では海生生物への影響が発生することも考えられるので、生物の生息場所への配慮や昇温範囲の縮小する方策の検討などが必要である。流速については、明確な閾値は示されていないが、海生生物への影響の他に船舶の航行への配慮が必要となる。

予測手法

温排水の放水方式は、表層放水方式と水中放水方式に大別できる。温排水の拡散過程はこれらの放水方式により異なるため、拡散予測に当たって

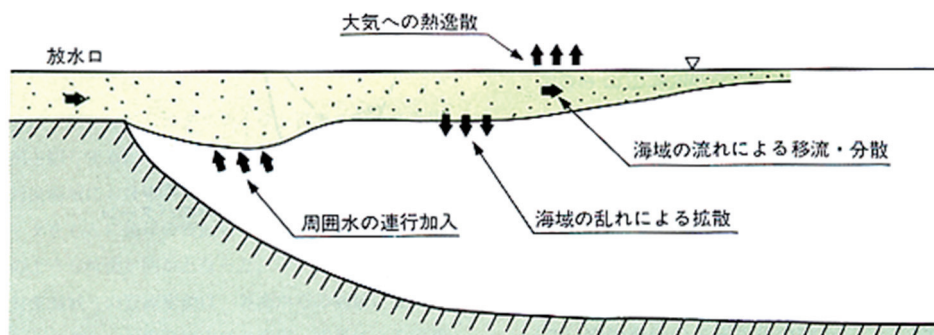
は、各方式の拡散特性を考慮した適切な手法を選択しなければならない。

また、発電所計画段階などにおいては、海域調査範囲の設定や取放水口の配置計画の検討などのために、より簡便かつ迅速に温排水の拡散範囲を予測する方法も必要とされている。

1. 表層放水方式の場合

表層放水方式は、温排水を海域の表層部に低流速で放水する方式である。そのため、温排水の拡散域はほとんど表層に限られ、放水口近傍領域での周囲海水の連行加入に伴う混合希釈効果は少なく、海域の流れと乱れによる移流、拡散ならびに大気への熱逸散が温排水の水温低減に係る主要な因子となる（第1図）。我が国では、こうした主要な因子を組み入れた平面2次元数値解析モデル（和田ら，1974）による数値シミュレーション手法が最も一般的に使われており、表層放水方式を採用するほとんどの地点で適用されている。

本手法では、温排水放水に伴う放水流動と水温の鉛直分布に相似性が成り立つと仮定し、取放水口の位置・放水諸元、海岸・海底地形、ならびに前述の主要な因子を考慮した水平方向の運動方程式、連続式、ならびに熱拡散方程式から成る平面2次元数値解析モデルにより海域流動分布、放水流動分布、および水温分布を求める。主要な因子の内、海域の流れと乱れによる移流、拡散については、現地における海域流動の連続観測データに基づき、恒流や潮汐流といった移流成分と拡散係数として表現される拡散成分に区分して評価される。大気への熱逸散は、環境水温および気象・風速などの気象観測データに基づき、海表面での熱交換係数として評価される。



第1図 表層放水された温排水の水温低減過程

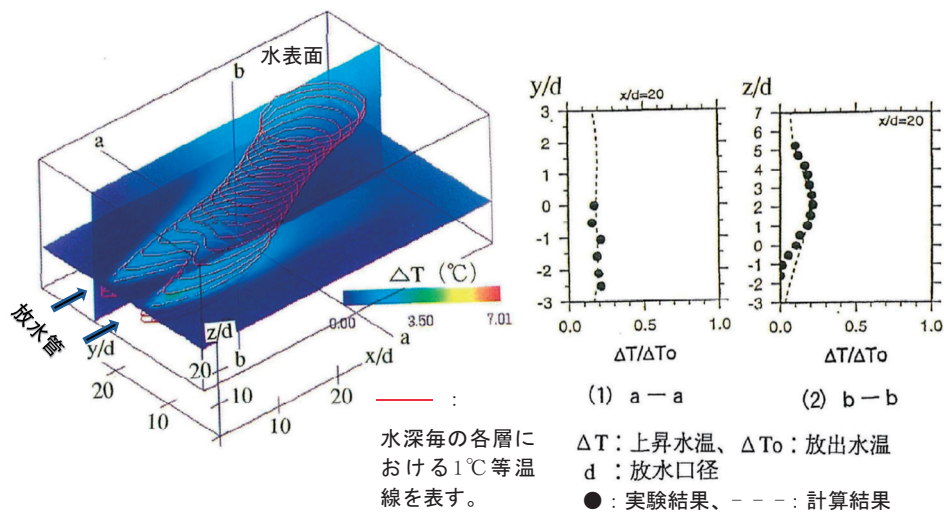
2. 水中放水方式の場合

水中放水方式は、温排水を高速で水中に放水する方式であるため、放水口近傍域での周囲海水の連行加入による混合希釈効果が極めて大である。そのため、こうした現象を比較的容易に取り扱うことができる水理模型実験手法が主に適用されてきている（加藤・和田，1981）。また、放水口近傍での水温低減が十分でなく、温排水が海表面に浮上後も広域に広がる場合には、表層放水方式と同様の水温低減過程も重要となる。そのため、温排水が海面に浮上した付近の水理実験結果を境界条件として表層放水方式の場合に適用する平面2次元数値解析モデルに接続し、遠方域における水温分布を算出する手法が用いられる（（一社）電力土木技術協会，1995）。

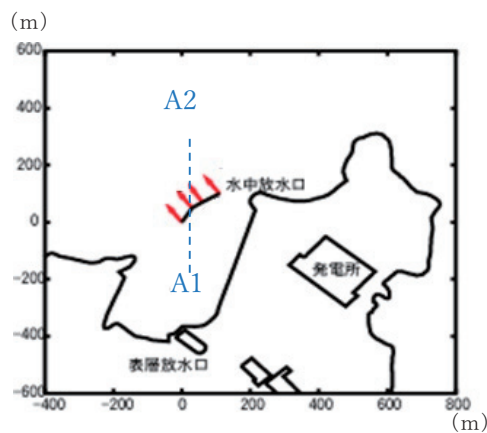
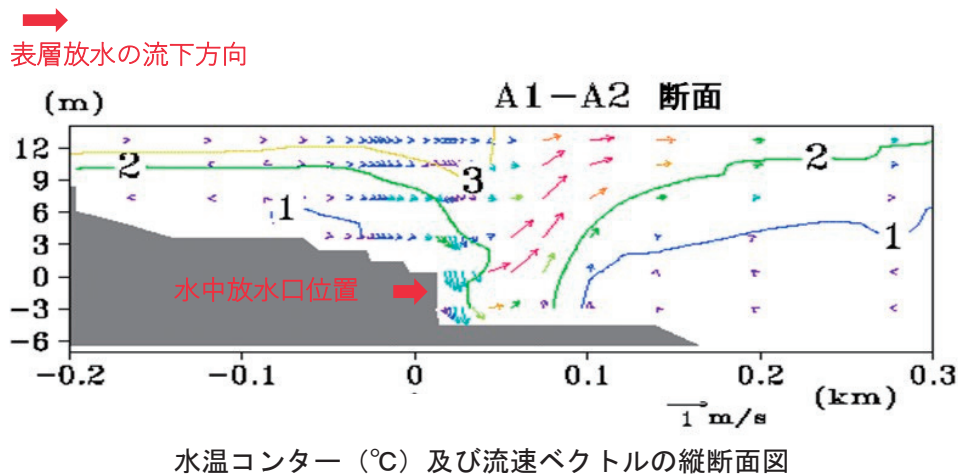
しかし、近年では、数値シミュレーション手法の高度化に伴い、3次元数値解析モデル（坪野ら，2000）が開発され、徐々に適用されるケースが増えてきている。本モデルは、静水圧近似を用いな

い非圧縮性流体の水平及び鉛直3方向の運動方程式、連続式、及び熱拡散方程式から構成され、放水口近傍域では周囲海水の連行加入現象を精度よく計算するために渦動粘性・拡散係数の算出に乱流モデル（ $k-\varepsilon$ モデル）を用いるなど、高速で水中放水される温排水の拡散現象を的確に再現することができる（第2図）。

また、本モデルでは、潮流などの海域の流れや乱れ、大気への熱逸散など、水中・表層両放水方式に係る主要な因子をすべて考慮しており、従来からの予測手法に比べて、特に水中と表層の両放水方式が混在するケースでの適用に優れている。第3図は、こうしたケースでの適用事例を示す。縦断面図をみると、湾奥から表層放水された温排水が、その沖合で水中放水された温排水による鉛直混合の影響を受けて急速に水温を低減し、鉛直分布を変化させながらさらに沖合に拡散していく形態を見ることができる。



第2図 2本の放水管から水中放水される温排水の3次元シミュレーション結果と実験結果との比較
(出典：坪野ら，1998)



第3図 3次元数値解析モデルの適用事例－近接する表層及び水中各放水口により同時に放水される温排水の拡散挙動－（電力中央研究所 坪野考樹氏提供）

3. 簡易予測法

簡易的に拡散範囲を予測する方法としては、表層放水方式の場合には数値計算結果に基づいた汎用図表を利用する方法（和田・角湯，1975）、水中放水方式の場合には既往の実験結果から経験的に導いた簡易予測式（片野ら，1989）などが使われてきた。

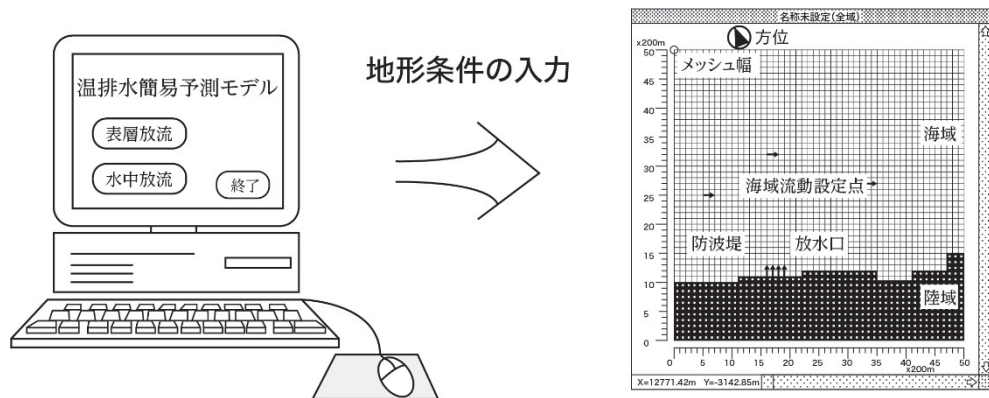
一方、近年ではこうした簡易予測法よりも様々な条件を反映でき、かつ迅速に計算できるパソコンによる簡易予測モデルが提案されている（坂井・水鳥，1994；仲敷・坂井，2013）。本簡易予測モデルは基本的には平面2次元数値解析モデルで、表層放水方式および水中放水方式について、任意の地形、海象、気象、放水条件に対して海域流動計算、放水流動、温度計算を行うもので、計算結果のグラフィックス表示も可能である。ただ

し、1. の平面2次元数値解析モデルとの相違点として、海域流動計算については、流れの連続式を満たす簡易な計算手法を用いている。第4図に本簡易予測モデルのパソコン上のパラメータ設定画面の1例を示す。

こうした簡易な予測法を活用する場合としては、次のようなものが想定される。

- ・海域調査範囲の設定
- ・配慮書段階における複数案の比較
- ・第二種事業についてのアセスの要否判定時（スクリーニング）における簡易な環境影響評価

また、火力発電所のリプレースの場合には、方法書以降の拡散予測評価においても、以下の要件が満たされれば、簡略化された予測手法として上記のパソコンによる簡易拡散予測モデルを選定す



第4図 パソコンによる温排水拡散簡易予測モデルのイメージ図（出典：坂井・水鳥，1994）

ることができる（環境省，2013）。

- ・温排水の熱量（取放水温度差 $\Delta T \times$ 時間当たりの温排水量）が従来と同等、あるいは減少すること。
- ・放水口（温排水に係るもの）が100メートル以上移動しないこと。
- ・排出先の水面又は水中の別が変わらないこと。

海象調査とデータ解析

1. 海象調査の概要

温排水拡散評価に係る海象調査（主に流動および水温調査）には、発電所計画時の事前調査と運開後の事後調査がある。事前の海象調査には、①発電所運開前の海域環境の実態把握と、②拡散予測における海象に係る諸条件の取得、という2つの大きな目的がある。一方、事後調査は、事前の環境影響評価結果の妥当性を確認するという意味で重要な役割を持っている。

海象調査の実施方法については、前述の「発電所に係る環境影響評価の手引」（経済産業省，2020）に示されている。基本的考え方として、調査期間・時期は、海域の水温・流動構造が季節によってその特性を異にするため、季節ごとに原則として1年は実施する必要がある。調査範囲は、温排水による1℃水温上昇域を包含する範囲を目安とするが、当該地形や海域の流れの特性のなども考慮して決められる。また、隣接する発電所からの温排水の重畳が想定される場合には、その発電所の影響の範囲と程度を考慮する必要がある。

調査点は、温排水による水温、流動等への影響は、一般に放水口に近いほど大きさを増すので、調査点は放水口近傍で密に、離れるに従って粗になるように配置し、予想される影響と調査の密度が全体としてバランスを保つよう配慮する（和田，2007）。

2. 流動調査

流動調査の主な観測方法には、定点連続観測とADCP（超音波ドップラー流速計）などを用いた船舶からの曳航式観測などが実施されている。

海域には海流、吹送流、潮流などの流れや様々な大小の渦が存在しており、異なる規模の現象が互いに影響し合っている。観測に当たっては、対象とする現象の時間・空間スケールを考慮した観測計画の立案とデータ評価が必要となる（和田，2007）。

こうした観点から、定点連続観測データの拡散評価では、流動データを温排水拡散過程に及ぼす流れ成分と乱れ成分に区分して考える。この区分に当たっては、前述のように対象とする温排水拡散現象の時間・空間スケールをどのように設定するがポイントとなる。具体的には、当該海域の主たる流れが潮流などによる周期性が顕著な場合には、その内卓越する周潮流を流れ成分とし、卓越する周期よりも短い時間スケールの流れを乱れ成分とする。一方、周期性が不明瞭な海域においては、温排水の放水流量に相当する拡散の時間スケール（1℃水温上昇域を基準）を目安として、流れ成分と乱れ成分を区分する。

流れ成分の評価に当たっては、海岸地形や海底

地形の影響による空間分布特性や、季節的、時系列的な変動特性を把握することが重要となる。特に、周期性の不明瞭な海域では、流れの速度や分布形状が複雑に変化するため、設定した時間スケールで移動平均した流れの時系列データから得られる流速の出現頻度や分布特性から恒流として代表的な流れ場を評価する必要がある。

一方、乱れ成分については、数値解析モデルによる予測手法で使われる拡散係数として、設定した時間スケール以下の流動の時系列データからG.I.Taylorの定理によって算出する。なお、通常ここで述べる拡散係数は水平方向成分を指すが、予測手法として3次元数値解析モデルを利用する場合には、鉛直方向の拡散係数が必要となるため、代表的な観測点において鉛直流速の定点連続データを取得し、算出しておくことが望ましい。

また、こうした温排水拡散評価に用いる拡散係数の既往データは、流れの情報に比べて極めて少

ない。そのため、全国83ヶ所の臨海発電所環境レポートに記載された海域データに基づき、海域の拡散係数を海域代表流速と時間スケールから求める簡易設定法も提案されている（水鳥ら，2006）。第1表には、この簡易設定法によって算定した拡散係数の目安値の早見表を示す。

3. 水温調査

流動と同様に温排水が拡散する沿岸海域の水温についても、海流、気象、河川水の流入などの要因により様々なスケールの空間的・時間的な変動が存在する。

こうした点を踏まえ、事前調査では、①自然条件下での水温変動・分布特性の把握、および②拡散予測に用いる環境水温設定のための自然水温の年変動の把握、が主な目的となる。①では多数の定点観測や船舶による曳航式測定などによる空間的な観測、②では通年の定点連続観測が行われる。

第1表 拡散係数の目安値（出典：水鳥ら，2006）

（周期性の明瞭な海域） [単位：cm²/s]

		拡散時間スケール [hr.]	
		12	
代表潮流振幅 [cm/s]	5	1 × 10 ⁴	
	10	1 × 10 ⁴	
	15	1 × 10 ⁴	
	20	5 × 10 ⁴	
	30	5 × 10 ⁴	
	40	5 × 10 ⁴	
	50	5 × 10 ⁴	

（周期性の微弱な海域） [単位：cm²/s]

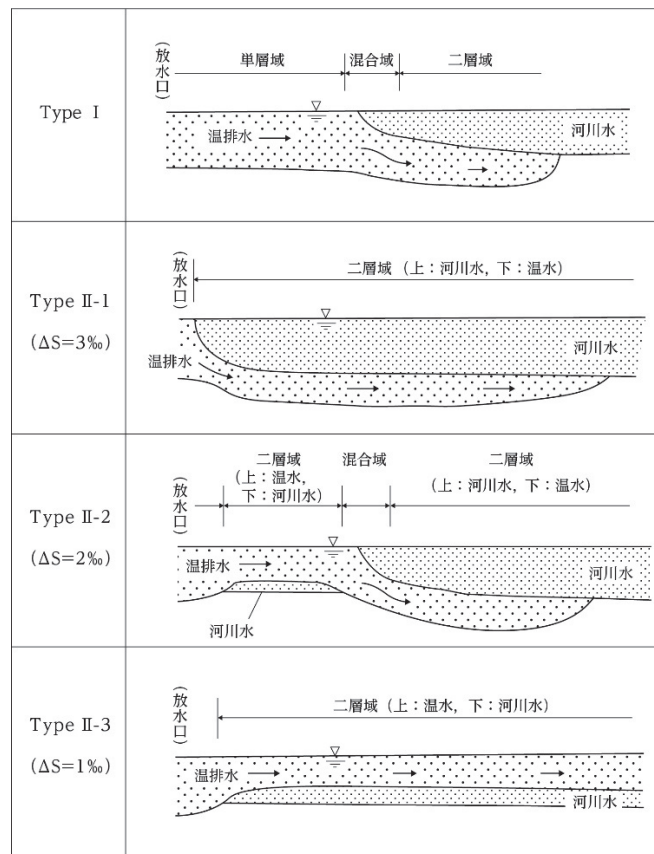
		拡散時間スケール [hr.]			
		12	24	36	48
代表恒流流速 [cm/s]	10	5 × 10 ³	1 × 10 ⁴	1 × 10 ⁴	1 × 10 ⁴
	20	1 × 10 ⁴	5 × 10 ⁴	1 × 10 ⁵	1 × 10 ⁵
	30	5 × 10 ⁴	1 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵
	40	1 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵
	50	1 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵	5 × 10 ⁵	1 × 10 ⁶

一方、事後調査では、発電所運開後の温排水影響範囲を把握し、事前の影響予測結果と照合してその妥当性を評価することが主な視点となる。特に、変動の大きい自然条件下における現地調査では、短時間に同時性の高い空間分布データを取得することが温排水影響範囲を把握する上で重要である。観測方法としては、多数の定点測定や船舶による曳航式測定などとともに、上空からのリモートセンシングによる観測も有力な方法である。例えば、航空機や人工衛星から撮影された赤外線画像による観測（水鳥ら、1991）、また、現在ではドローンを利用した観測も有望と考えられる。

一方、水温分布調査結果において、自然水温の空間分布が一樣でないため適切な環境水温の選定が難しく、温排水による水温上昇範囲の特定に苦

慮する場合が出現することがある。例えば、河川水などの水温の異なる異水塊が流入する海域や、水温の自然変動が大きい干潟が発達するような浅い海域などでこうした場合が認められることが多い。

温排水の拡散域に河川水などの異水塊が流入している可能性がある場合には、塩分分布の観測データなどを参考としながら、異水塊の広がり把握しておくことが重要となる。なお、河川水は低塩分のため海表面付近に明瞭な密度成層を形成するため、温排水の拡散挙動がこの河川水の分布状況に大きく影響を受けて複雑な拡散形態をとることがあることにも注意する必要がある。第5図には、水鳥ら（1988）が実施した現地観測結果に基づき推定した河川水影響下での温排水拡散パターンを分類した結果を示す。

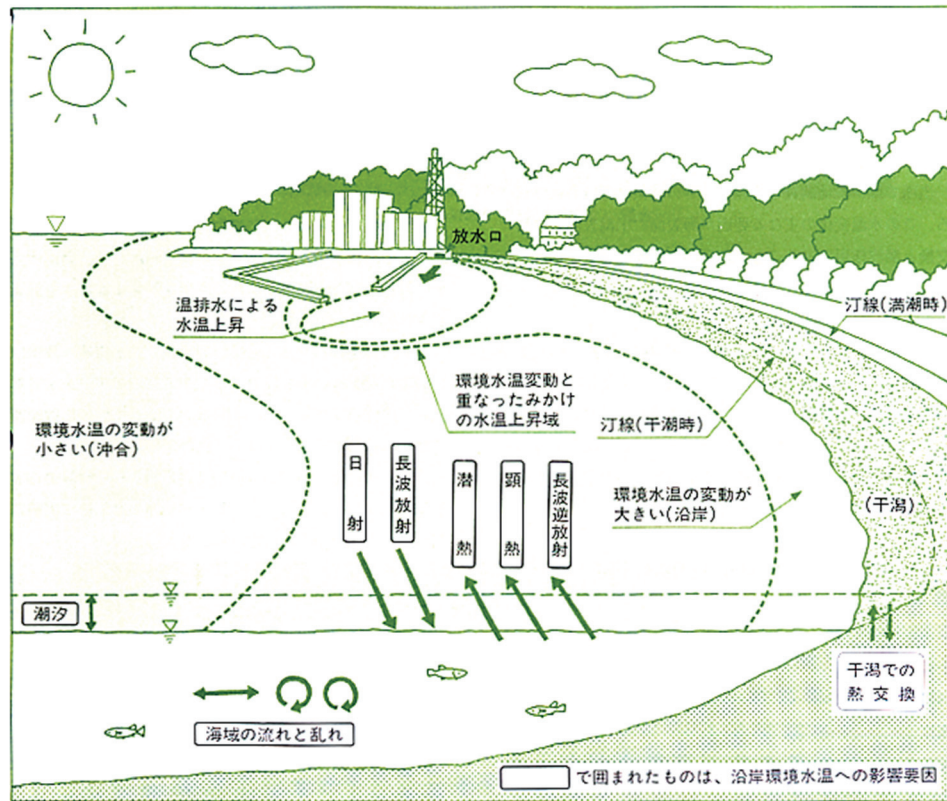


注) Type I: 河川水の拡散範囲が明瞭に識別でき、温排水の拡散範囲と平面的に接触する海域

Type II: 河川水が発電所前面海域全体にほぼ一様に広がっている海域

ΔS : 前面海域の表層海水と温排水の塩分差

第5図 河川水影響下での温排水拡散パターン（水鳥ら、1988）



第6図 干潟の発達する浅海域における水温分布特性と熱交換過程（（一財）電力中央研究所，1989）

また，干潮時に干潟が発達するような非常に浅い海域では，主に大気・海面間及び大気・干潟地表面の熱交換作用によって沖合と比べ自然水温変動の幅が大きくなり，特に日中は沿岸部に高温域が形成される。こうした海域では，事前の現地調査によって当該海域の自然水温変動や分布の特性を十分把握し，理解しておくことが重要となる（水鳥ら，1983）。第6図には，こうした干潟の発達する浅海域における水温分布特性と熱交換過程を模式的に示す。

最後に

環境アセスメントにおける温排水拡散評価は，国による火力，原子力発電所の環境審査が始まった当初より重要な環境影響評価項目の一つとして取り上げられ，現在まで数多くの実績が積み上げられてきた。そして，その影響評価の手法はほぼ確立されていると言える。しかしながら，温排水の排出による海生生物・生態系への影響や海域の水質への影響などについては，未解明な点が多く残されており，今後も継続的な研究及び知見の蓄積が必要である。

また，ここに示した温排水拡散評価のための環境アセスメントの手法は，温排水拡散評価ばかりでなく海域での汚濁物質の拡散評価や，今後増加が見込まれる洋上風力発電所に係る環境アセスメントにも参考となるものと考えられる。

繰り返しになるが，海域の流動や水温といった物理環境は，時間・空間的に様々に変容し，その特性は地域により異なる。環境アセスメントの実施に当たっては，対象となる海域毎にその実態を丁寧に調査・分析・評価することが求められる。

謝 辞

本総説の執筆の機会をいただくとともに，有益なご助言をいただいた（公財）海洋生物環境研究所の関係者の皆さまに感謝の意を表します。また，3次元数値解析モデルに関する図を快くご提供いただいた（一財）電力中央研究所 坪野考樹上席研究員にお礼申し上げます。

引用文献

（一財）電力中央研究所（1989）．環境研究の新

- しい展開－望ましい環境を求めて－. 電中研レビュー, **No.22**, 64-70.
- (一社) 電力土木技術協会 (1995). 火力・原子力発電所土木構造物の設計－増補改訂版－. (一社) 電力土木技術協会, 東京, 133-142, 761-763.
- 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範囲の簡易予測法. 電力中央研究所報告, **U88071**, 1-33.
- 加藤正進・和田 明 (1981). 水理模型実験手法による温排水拡散予測に関する研究. 電力中央研究所報告, **381018**, 1-111.
- 環境省 (2013). 火力発電所リプレースに係る環境影響評価手法の合理化に関するガイドライン (平成25年3月改訂). 環境省, 東京, 1-40.
- 経済産業省 (2020). 発電所に係る環境影響評価の手引 (2020年11月改訂). 経済産業省, 東京, 1-755.
- 坂井伸一・水鳥雅文 (1994). パソコンによる温排水拡散簡易予測モデルの開発. 電力中央研究所報告, **U94003**, 1-26.
- 坪野考樹・坂井伸一・松梨史郎・水鳥雅文 (2000). 近接する表層放水口および水中放水口により同時放水される温排水の拡散挙動－3次元数値モデルの改良と検証－. 電力中央研究所報告, **U00013**, 1-34.
- 坪野考樹・仲敷憲和・丸山康樹 (1998). 複数管から放出された水平重力噴流の拡散特性－実験による現象解明と3次元数値計算法の適用性－. 電力中央研究所報告, **U97057**, 1-33.
- 仲敷憲和・坂井伸一 (2013). 水中放水された温排水の簡易シミュレーション手法の適用性. 電力中央研究所報告, **V12018**, 1-24.
- 水鳥雅文・片野尚明・角湯正剛・曾我雅海 (1988). 密度成層場における温排水拡散の実態. 電力中央研究所報告, **U87043**, 1-35.
- 水鳥雅文・角湯正剛・曾我雅海・加藤正進・和田 明 (1983). 干潟の発達する浅海域の自然水温分布予測. 電力中央研究所報告, **383030**, 1-40.
- 水鳥雅文・坂井伸一・仲敷憲和 (1991). 温排水モニタリングへのLANDSAT衛星の適用性. 電力中央研究所報告, **U91006**, 1-48.
- 水鳥雅文・仲敷憲和・坪野考樹 (2006). 環境アセスメントの簡略化方法に関する調査 (その1)－海域拡散係数の簡易設定法の提案と流動・拡散特性の季節変動の分析－. 電力中央研究所報告, **V06001**, 1-25.
- 和田 明 (2007). 海洋環境水理学. 丸善, 東京, 207-324.
- 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, **73011**, 1-121.
- 和田 明・角湯正剛 (1975). 温排水拡散予測汎用計算図表の提案. 電力中央研究所報告, **375008**, 1-65.