

1. 緒言

近年の沿岸海洋域における環境問題の1つとして、発電所、工場、都市下水に起因する温排水による熱エネルギー汚染が考えられるが、年間の温排水の放水量はわが国の年間の降水量にも匹敵するとも言われ、その沿岸海域への影響は大きいと考えられる。放水する前の状態の水温（環境水温）と温排水の差は7℃以下にするという法律の下、これまでに大きな生態系破壊報告こそないが、未だその生態系への影響の評価は明確にされておらず、今後検討あるいは対策を行っていくために温排水の拡散範囲や周辺海域の温度場に与える影響の予測をより精度良く行うと同時に、温度場の変化が生態系に与える影響も考慮に入れた予測を行うことが求められている。特に周辺に多くの火力発電所や工場が点在する東京湾のような閉鎖的な湾を対象にする場合は温排水の拡散や混合がゆるやかで熱エネルギーの影響を受けやすく、またその影響は発電所周辺に留まらない可能性がある。さらには将来のエネルギー需要を考えると発電所の大容量化や集中化が考えられ、既存の研究のように局所的に3次元流場を計算するだけでなく、計算時間を短縮しつつもその湾内全域に与える影響を考慮できる流れ・水温・塩分についての数値計算を行う必要がある。

温排水の流れ・水温・塩分といった物理場を解析する数値計算はこれまで電力中央研究所を中心に数多く行われてきた。表層放水が主流だった頃は解析手法として平面2次元モデルが使われていたが近年、放水量の増大と共に水中放水形式が主流となってきた。水中放水される温排水は放水口近傍から海表面に浮上する過程において周囲の冷たい海水を連行しながら浮上するため温度が下がりやすく、表層放水に比べ拡散範囲を抑えることができ放水量や放水流速を大きく設定できるためである。しかし放水口近傍では複雑な希釈・拡散現象となるため3次元数値計算を行う必要があるが、圧力の反復計算を行う関係上多大な計算時間がかかる3次元数値計算では、広い領域の予測と計算時間の短縮化が課題となっていた。計算時間の短縮と高精度化という相反する上記のようなニーズに対応するため、ネスティング（局所細分化格子）を用いた3次元モデルで計算を行い計算効率の向上を図ることができる。（坪野¹⁾ら）

一方、温排水を考慮した生態系のモデル計算は発電所建設の際などに環境評価方法として発電所が企業に委託して行われることはあるが、十分な知見は今のところ得られていない。

2. 研究目的

上記のような背景を踏まえ、水中放水式による温排水を考慮した物理場の計算を効率的に行うため、ネスティングモデルを用いて拡散計算を行い、放水口近傍での現象の再現と周辺海域までを連続して効率良く計算することを目的とする。また生態系に与える影響について考察するために、生態系モデルを組み合わせることで予測計算を行う。そして浮遊生態系や底生生態系の代表的な各状態変数の変化から、温排水が生態系に及ぼす影響について考察することを目的とする。

3. 数値モデル

物理モデルにはネスティングモデルを使用した。このモデルでは支配方程式として静水圧近似、ブジネスク近似下での海水運動を記述する運動方程式、非圧縮流体の連続の式

及び水温・塩分の移流拡散方程式、海水の状態方程式を用いている。上で述べたように、ネスティングモデルは静水圧近似を用いる広い領域から Full-3D 計算を用いる狭領域までを段階を追って領域ごとの格子間隔を変化させることにより、計算時間の短縮と局所的な 3次元流れ場の精度良い再現が狙えるという長所があり、温排水の拡散計算に適した物理モデルであると考えられる。

また生態系モデルには既存²⁾の化学・生物モデルを使用した³⁾が、このモデルでは低次の浮遊・底生生態系のみを考慮しており、状態変数としては浮遊系で植物プランクトン、動物プランクトン、栄養塩、有機物、溶存酸素など 17 種、底生系で珪藻、メイオベントス、マクロベントス、バクテリアなど 16 種の化学物質や生物が存在している。これらの状態変数は相互に複雑に作用しあっており、また水温の影響を受けるものも多いため、温排水のある場合とない場合で違った挙動をみせる可能性が高く、どのような差が生まれるかに注目する。

4. 物理場の検証

水中放水された温排水の挙動を表現するため、佐賀県の玄海原子力発電所から放水される温排水を想定し文献³⁾を参考にして拡散計算を行った。

4. 1 対象海域と計算条件

佐賀県の半島に位置する玄海原子力発電所では水深 13m に位置する 4つの水中放水口と 1つの表層放水口から温排水の放水を行っており、水中では 1つあたり流量 $41\text{m}^3/\text{s}$ 、流速 $4.25\text{m}/\text{s}$ で環境水温との温度差が 6.8°C の温排水を、また表層では $37.8\text{m}^3/\text{s}$ 、流速 $0.305\text{m}/\text{s}$ で環境水温との温度差が 6.1°C の温排水を放水している。Fig.1 に発電所付近の地形を示す。計算領域の格子分割においては 5 段階のネスティングを行い、4つの水中放水口はすべて最内領域に設置し最内領域では Full-3D 計算を、

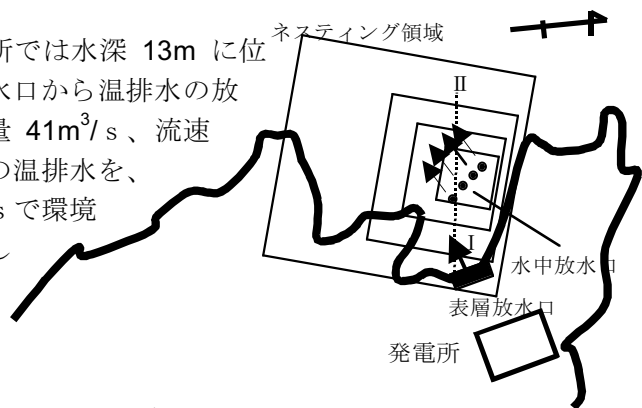


Fig.1 玄海原子力発電所周辺の地形

それ以外の領域では静水圧近似計算を行った。

図中の I - II ラインは、表層放水口の出口前から水中放水口を跨ぐ沖合いまでの観測線である。計算の初期データとしてすべての格子で一律の水温 20.8°C と塩分 34‰を与え、開境界での水温や塩分の勾配はないとした。また大気温度 15°C 、大気との熱交換係数を $1.826 \times 10^3 \text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$

とし、風は満潮、下げ潮、干潮、上げ潮の 4 潮時にそれぞれ南 $5.4\text{m}/\text{s}$ 、北西 $3.4\text{m}/\text{s}$ 、北西 $4.2\text{m}/\text{s}$ 、南に $5.0\text{m}/\text{s}$ を与え、間は線形補間した。

4. 2 計算結果

Fig.2 はライン I - II の鉛直方向の満潮時の水温の観測値 (計算では 11 月を想定している) のコンター図で、Fig.2

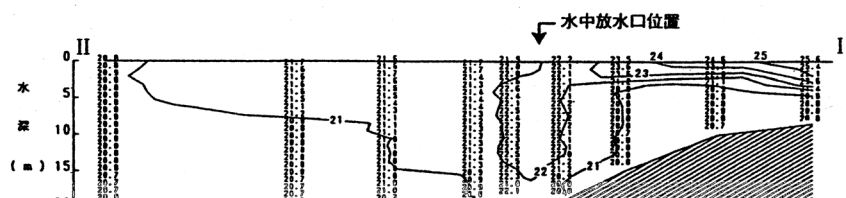


Fig 2. I - II ラインの鉛直方向の水温 (観測値)

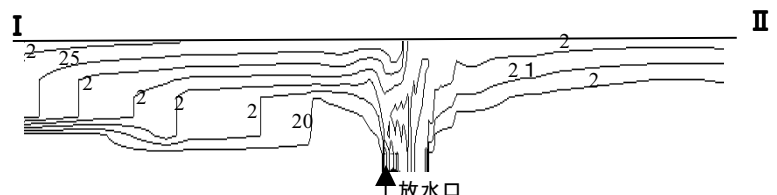


Fig 3. I - II ラインの鉛直方向の水温 (計算値)

はライン I - II の鉛直方向の

満潮時の水温の計算結果のコンター図である。計算結果では放水口近傍での温排水の浮上
が早いことや表層放水された温排水の鉛直方向の拡散が大きすぎるといった観測値との
違いが生じているが、これは鉛直方向の格子間隔を 2 m としていたため、計算では鉛直方
向の拡散の精度が低下しているためと考えられる。しかし全体的には表層放水と水中放水
の混合領域の様子は観測値とほぼ一致している。鉛直方向の格子間隔数に注意を払えば、
水中放水口近傍での温排水の複雑な挙動も十分表現可能であると考えられる。つまりネス
ティングを用いた物理モデルで 3 次元計算を行う放水口近傍から周辺海域までを連続的に
効率良く計算できると考えられる。

5. 生態系への影響の検討

5.1 対象海域

計算対象には東京湾に面する東京電力富津
火力発電所から排出される温排水を選択した。
富津火力発電所は、東京湾に面する発電所中
最大の出力を誇り、環境水温より 6.5℃程
高い水温の温排水を 80m³/s で水中放水して
いる。富津周辺では底生系の代表的なマクロ
ベントスにあたるあさりが多く分布しており、
また北には東京湾内で貴重な干潟である盤洲
が存在していたためこの発電所を選択した。Fig.
4 に計算領域である東京湾(rank1)と発電所
付近(rank2)の地形を示す。なお格子間隔は
rank1 で 1350m、rank1 と rank2 の格子比は
1 : 3 である。Rank1 は幅約 40km×
奥行き約 55km の海域で、rank2 は幅約
12km×約 12km の海域である。

5.2 計算方法

特定の時期(11 月)が続くという設定で全領域静水圧近似の物理場の定常計算を行い、その
後求めた物理場を一定値として入力しながら、生態系の定常計算を行った。具体的にはま
ず一定の気象、開境界、河川、風データを用いて物理場のみの定常計算を行い、11 月の
観測値に水温・塩分が近づくように日射量で調整を行い物理場の定常値を求める。さらに
求めた物理場の各値を潮汐 1 周期で平均した値を入力データとして、生態系の定常計算
を行った。使用した気象データ、開境界データ、河川データ、風データは 10 年間の平均
データのうち 11 月の平均値を入力し続けた。

5.3 計算結果

5.3.1 物理場の定常値

温排水のある場合(ケース:H)と
ない場合(ケース:N)における、
生態系計算で与える定常物理場の違
いについてまず述べると、まず流速
に関しては rank2 の発電所近傍の沖
合いにて、温排水放水の影響を強く

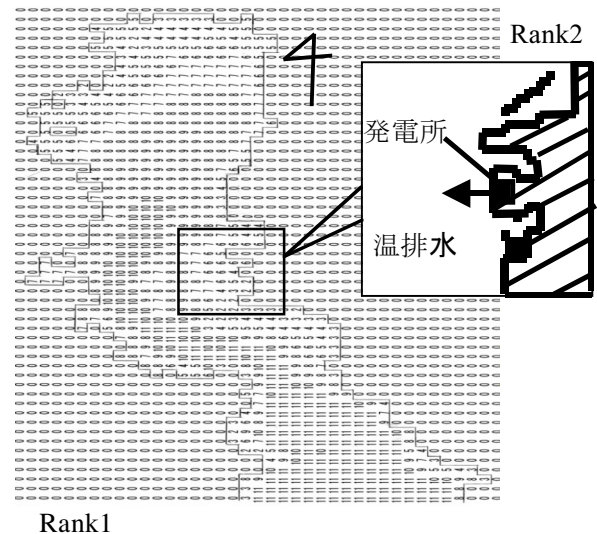


Fig. 4 東京湾と富津火力発電所周辺の地形

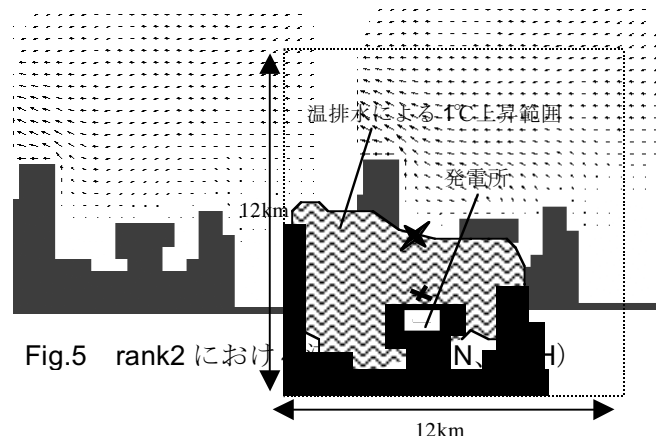


Fig.5 rank2 における

受けて N にはなかった沖合い方向の流れが形成される (Fig.5)。

続いて水温に関してだが、rank 2 において、発電所沖合い方向約 3 km、長手方向約 10km の海域において水温が N に比べ 1℃以上上昇している (Fig. 6)。この rank2 の南側、すなわち富津岬側部分の水温の影響で、rank1 においても富津岬周辺の水溫が約 0 から 0.5℃ 程度の範囲で上昇している。また塩分に関しては N との違いはほとんどみられなかった。

5. 3. 2 生態系の状態変数の変化

生態系の状態変数の変化については、温排水の影響によって水温が大きく変化した rank2 海域

Fig.6 温排水による水温 1℃上昇海域

に注目し、2 地点の表層と底層にて検討した。この結果、植物プランクトンは増殖速度に水温が関連するため、H の場合 N に比べ 2 地点とも 1.5 倍程度増殖している。(Fig.7) また植物プランクトンの枯死、分泌にそれぞれ関わってくる懸濁態および溶存態の有機物に関して、同様の結果が得られ、約 1.5 倍程度の増加が認められた。

6. 結言

温排水の拡散予測と生態系への影響について検討するため、玄海と富津の 2ヶ所の発電所の温排水を対象に数値計算を行った。その結果、玄海発電所の計算では既存の多段階のネスティングを用いたモデルで水中放水口近傍の 3次元計算領域と周辺海域の静水圧近似計算領域がスムーズに効率良く計算できることを確認し、また 3次元領域における水温の分布に

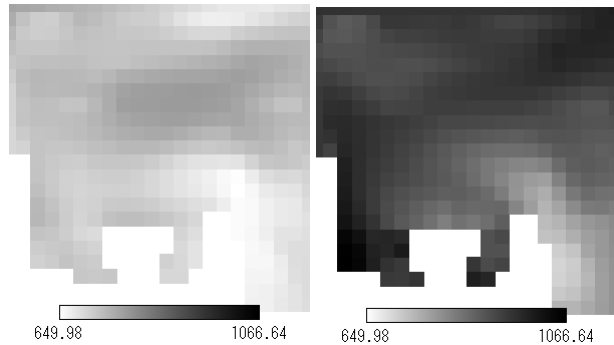


Fig.7 rank2 における植物プランクトン量の分布 (mgC/m³)

関しては、厳密には再現できなかったものの、定性的には一致していることを確認した。また富津発電所の計算においては、既存の化学・生物モデルを組み込んで浮遊および底生生態系の各状態変数変化を温排水のある場合とない場合で比較した。その結果、水温上昇の大きい rank2 においては、植物プランクトン、有機物などの各項目が温排水の放水により増加しており、温排水の影響を大きく受けていることがわかった。

参考文献

- 1) 坪野 考樹、丸山 康樹「3次元温排水拡散モデルの効率化」；電力中央研究所報告、2002
- 2) 北澤 大輔 「数値シミュレーションによる超大型浮体構造物の海洋生態系への影響に関する研究」；東京大学大学院博士課程論文、2001
- 3) 坪野 考樹、坂井 伸一、松梨 史郎、水鳥 雅文「近接する表層放水口および水中放水口より同時放水される温排水の拡散挙動」；電力中央研究所報告、2000

