

干潟域を考慮した3次元流動・水質予測モデル

CURDIF-3D Model

3-Dimensional CURrent and DIFfusion Model in coastal sea areas extending over tidal flats

所有者	株式会社エコー
所属(部署)	沿岸デザイン本部 環境水工部
開発担当者	柴木秀之
連絡先(TEL/FAX/ e-mail)	TEL 03-5828-2173 FAX 03-5828-2176 e-mail shibaki@ecoh.co.jp

【モデル・ソフトウェアの開発あるいは使用の目的】

干潟が隣接する沿岸海域における3次元の海水流動と水質拡散(水温と塩分等)を予測するためのモデルである。このモデルは、沿岸域における水質の環境影響評価及び水質管理に利用される。

このモデルにより、発電所等からの温排水の供給と干潟からの熱の影響を定量的に予測できる。

【開発又は改良の経緯について】

韓国西海岸に位置する発電所の周辺沿岸域は、広大な干潟が発達している。この干潟からの熱の授受は、海域の水温の空間分布に影響するとともに、発電所からの温排水の拡散にも影響を与える。発電所からの温排水と隣接する干潟域からの熱の各効果は、水温分布の現地観測結果からは明らかにできない。そのため、温排水による熱供給と干潟からの影響を同時に考慮した3次元流動と水温の移流拡散を予測するシミュレーションモデルを開発した。モデルの計算結果は2つの効果を分離できる。

【モデル・ソフトウェアの特徴】

シミュレーションモデルの特徴を以下に記述する。

- 静水圧近似・ブシネスク近似を用いた3次元マルチレベルモデルである。
- 水平渦動粘性係数の算定にはスマゴリンスキーモデルを用いる。鉛直渦動粘性係数の算定にはリチャードソン数依存型(Munk and Anderson)を用い、乱流や密度成層の効果を考慮する。
- 複数分潮(M_2, S_2, K_1, O_1 等)の潮汐を入力し、任意時刻の潮汐流をリアルタイムで再現する。
- 干潟における汀線の変化は移動境界条件を適用して表現する。
- 海域の熱収支は、次の成分を考慮する。
 - ・海水の熱輸送(水温の移流拡散) ・海表面と大気間の熱輸送 ・干潟表面と大気間の熱輸送
 - ・干潟表面と海水の熱輸送 ・干潟地中の熱輸送(地中の熱拡散)
- 気象条件(日射・気温・蒸気圧・雲量・風向・風速・気圧)をリアルタイムで入力し、任意時刻の海域における熱収支を再現する。

【適用事例・実績】

韓国西海岸の発電所の温排水影響調査において、温排水の影響範囲を予測した。

【その他(学会発表実績、著作権、使用权、価格等)】

“Effect of tidal flat to the thermal effluent dispersion from the power plant”

(Journal of Geophysical Research, Vol.110 C03023)

モデルを用いた温排水影響予測の出力結果例

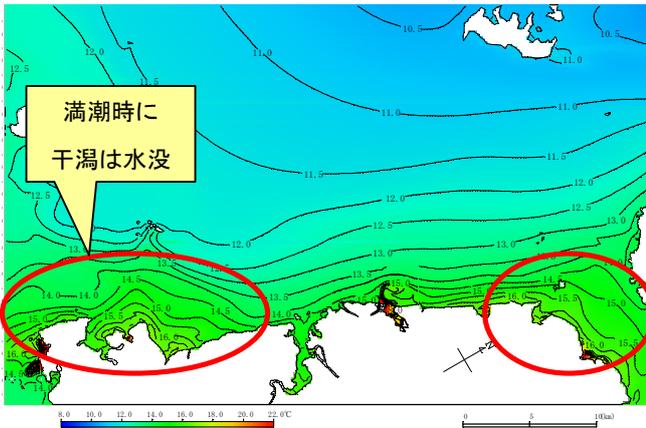


図1 満潮時の水温の空間分布(計算分布)

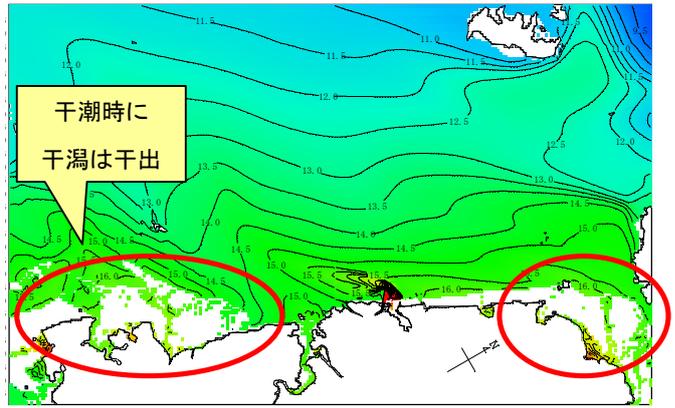


図2 干潮時の水温の空間分布(計算分布)

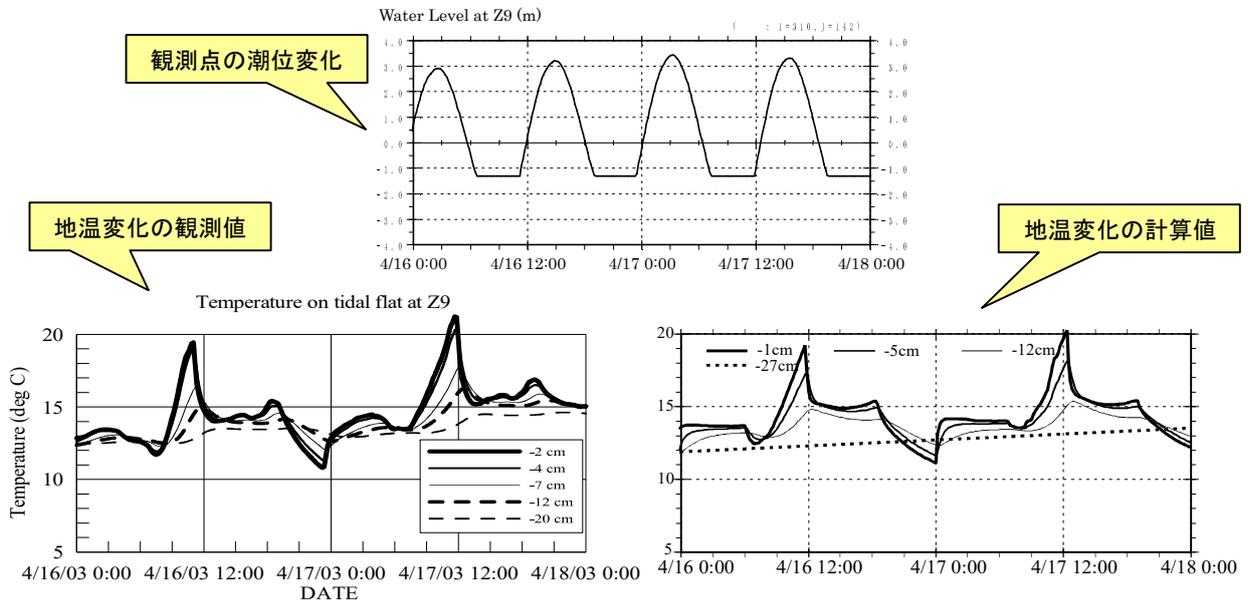


図3 干潟域の地中温度比較(観測値とモデルによる計算値)

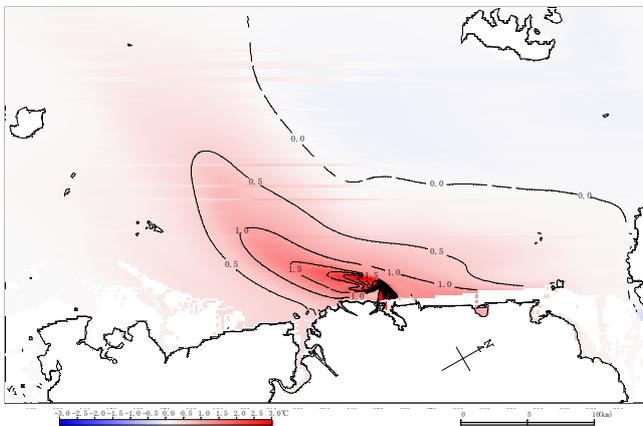


図4 干潮時の温排水の影響範囲の推定

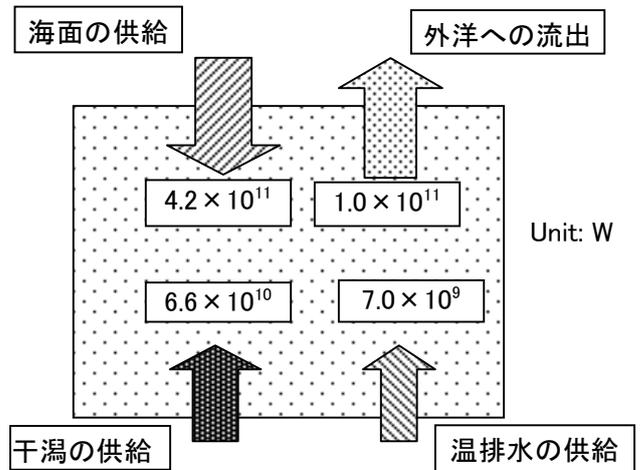


図5 春季大潮時の海域における熱收支

干潟域を考慮した3次元流動・水質予測モデルについて（温排水評価への適用）

株式会社エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部 杉松宏一・柴木秀之

1. 調査背景

韓国西海岸に位置する原子力発電所(NPP: $5.8 \times 10^6 \text{kW}$, 最大排水量 $366 \text{m}^3/\text{s}$)の周辺海域(Fig.1)は、広大な干潟が発達している。この干潟からの熱の授受は、海域の水温分布に影響を与えるとともに、NPPからの温排水の拡散にも影響を与える。NPP起源の温排水と隣接する干潟域からの熱効果は、観測による水温分布からは明確に区別することは出来ない。そこで干潟からの熱供給を考慮した3次元流動・水質モデルを開発し、発電所からの温排水影響評価に適用した。このモデルを使用すれば、発電所からの温排水と干潟からの熱効果を区別することができ、両者の影響を定量的に評価することが可能となる。

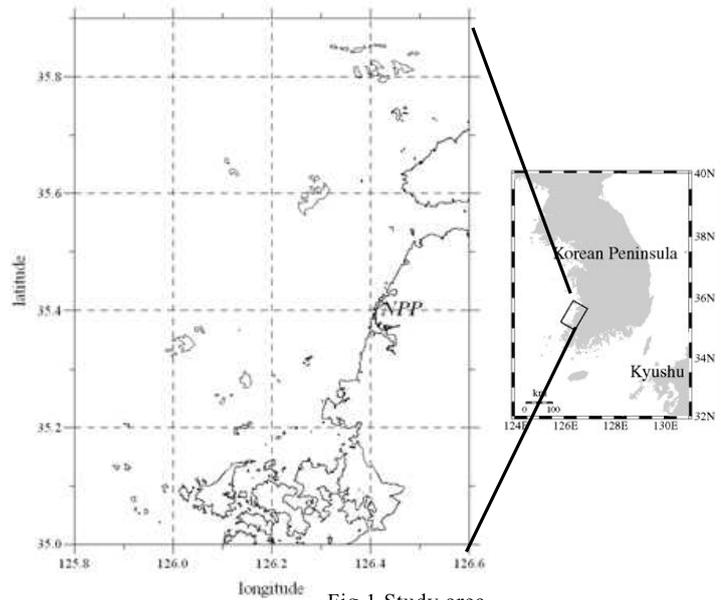


Fig.1 Study area

2. 現地観測

2003年3月23日より、現場海域の集中観測が実施された。観測は、表層水温(SST)の連続観測が117地点、CTD観測(水温、塩分濃度の鉛直分布)が25地点、流速の連続観測が2地点、干潟域の地温観測が10地点、潮汐観測が6地点で行われた。観測地点をFig.2に示す。

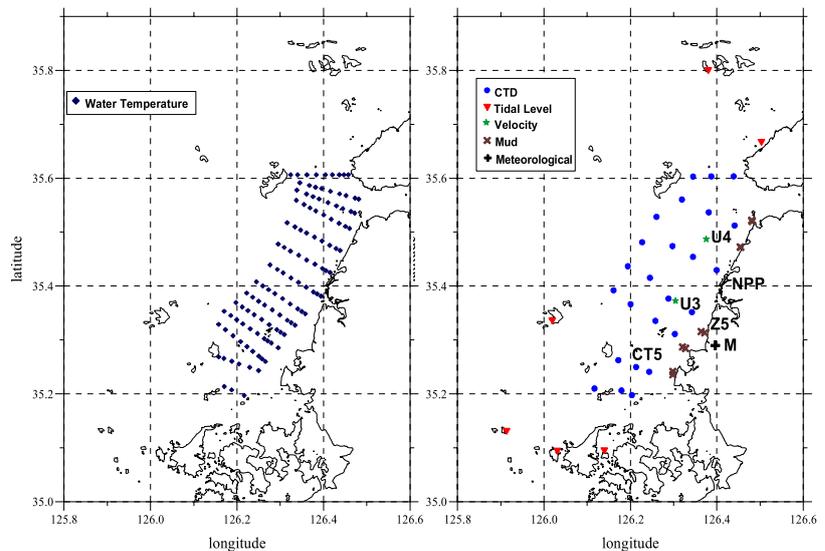


Fig.2 Observation points

3. 数値モデルの概要

モデルは静水圧近似、ブシネスク近似を仮定したマルチレベルモデルを使用する。基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(u^2) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + f_0 v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_{-z}^0 \frac{\partial \rho}{\partial x} dz' + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uv) - \frac{\partial}{\partial y}(v^2) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) - f_0 u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_{-z}^0 \frac{\partial \rho}{\partial y} dz' + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

ここで、 (u, v, w) は (x, y, z) 方向の流速、 f_0 はコリオリパラメータ、 g は重力加速度、 η は水位、 ρ は海水密度、 A_h は水平渦動粘性係数、 A_z は鉛直渦動粘性係数を表す。水平渦動粘性係数にはスマゴリンスキーモデル(Smagorinsky et al., 1963)を、鉛直渦動粘性係数にはリチャードソン数依存型(Munk and Anderson,

1948)を使用し、乱流や密度成層の効果を考慮している。

また、水温及び塩分の保存式は以下の通りである。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uS) - \frac{\partial}{\partial y}(vS) - \frac{\partial}{\partial z}(wS) + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial S}{\partial z}\right)$$

ここで、 T は水温、 S は塩分濃度を示す。水平渦動拡散係数 K_h はスマゴリンスキーモデルより算出され、鉛直渦動粘性係数 K_z はリチャードソン数依存型を使用している。

海表面を通しての熱輸送 Q_s は、太陽からの短波放射を Q_A 、海洋からの長波放射を Q_B 、潜熱輸送を Q_c 、顕熱輸送を Q_h とおくと、以下の式で表される。

$$Q_s = Q_A - Q_B - Q_c - Q_h$$

干潟地表面を通しての熱交換は、干潟表面が冠水している状態と干出している状態を考慮する必要がある(Fig.3)。冠水した状態では、干潟地表面の温度は底面付近の水温 T_w ほぼ同一と考えられ、熱輸送量は次式によって与えられる(水鳥・蘇我, 1987)。

$$Q_b = K(T_w - T_2)/(z_2 - z_1)$$

ここで、 K は熱伝導率($5 \times 10^{-3} \text{ cal}/(\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C})$)、 z は干潟地中の深さ、添え字の数字は干潟地中の

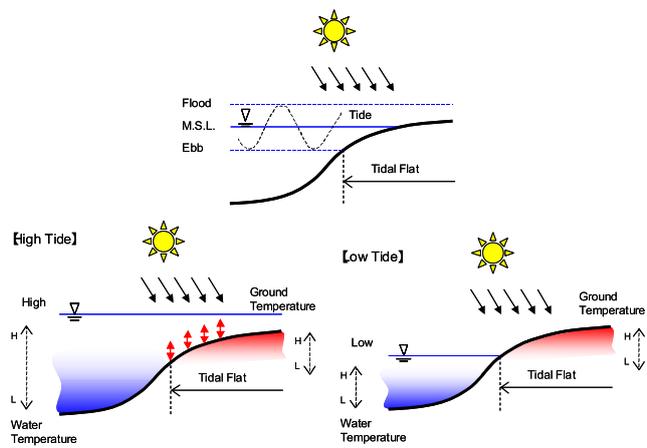


Fig.3 The image of heat budget on tidal flat area

層数を示している。一方、干出しているときの干潟地表面は、大気と熱交換を行う。干潟地表面が受け取る日射量を Q_A' 、大気と地表面間の長波放射量を Q_B' 、干潟地中の潜熱輸送量を Q_c' 、干潟地表面での顕熱輸送量を Q_h' とすると、干潟地中への熱伝達量 Q_g とバランスが保たれているから、次式のように表される。

$$Q_g = Q_A' - Q_B' - Q_c' - Q_h'$$

計算領域は、NPPを中心に、岸沿いにおよそ100km、沖側におよそ40kmを設定し、外側の領域は200m格子、発電所周辺は50m格子で接続計算を行う(Fig.4)。海域の鉛直層分割は4層とし、それぞれ0(平均水位面)~4.5m、4.5~10m、10~15m、15m~海底までとする。潮汐は10分潮を考慮し、任意時刻の潮流を再現させる。また、気象条件(日射量・気温・気圧・蒸気圧・雲量・風向・風速)をリアルタイムで入力し、対象日時(2003年4月17日:大潮期、晴れ)の水温分布の再現を試みる。

4. 数値解析結果

Fig.5に、観測点U3の潮流観測より得られた潮流楕円と、計算結果を比較する。S2成分及びK1成分で計算値が若干大きめにしているが、計算結果はほぼ観測された潮流を再現出来ている。観測点U4でも同様の結果が得られており、大潮期の潮流は、最大で110cm/s程となる。24時間の残差流は、観測点U3ではおよそ北東へ10cm/s

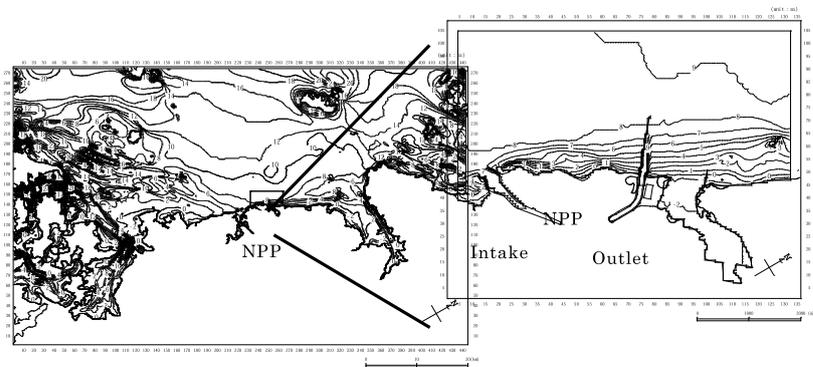


Fig.4 Simulation area

であり、計算値も近い値を示しているが、U4 では観測値はおよそ北東へ 6cm/s に対して、計算値は半分以下の値を示している(図は省略)。

CTD 観測点 CT5 において、高潮時に近い 4 月 17 日 14:00 の水温・塩分・密度(σ_t)の鉛直分布を Fig.6 に示す。対象海域は潮流が速いため鉛直混合が盛んに行われている。そのため、観測結果も計算結果も表層から底層までほぼ一様な水塊分布を示している。観測値と計算値の誤差は、水温でおよそ 0.8°C、塩分濃度でおよそ 0.3PSU、密度はおよそ 0.1 σ_t であり、再現性は良い。

Fig.7 に、観測点 Z5 における 4 月 16~17 日の干潟地中の地温変化を示す。干潟上層の温度は、日中は上昇傾向にあり、特に干潮時の干潟が干出す時刻になると干潟地温は急激に上昇する。一方、夜間の干潟上層の地温は下降傾向にあり、特に干潟が干出す干潮時になると急激に冷却され、4 月 16 日の夜間は上層の地温より底層の地温の方が高くなる。計算結果も観測結果によく似た特徴を示しており、干潟地中の地温変化を良好に再現している。

2004 年 4 月 17 日 9:00(低潮時)に観測された表層水温分布(SST)と、計算結果により得られた SST の比較を Fig.8 に整理する。水温コンターは沿岸線に沿って分布しており、低潮時になるとNPPや干潟周辺の暖水塊は海域南側へと広がっていく。一方、高潮時には、NPP や干潟前面の暖水塊は沿岸線に沿って北東方向へと輸送される(図は省略)。これらの特徴は、計算結果からも確認することができる。

計算精度を定量的に評価するため、観測された SST と、計算により算出された SST を、Fig.9 に示す相関図に整理する。この相関図は、2003 年 4 月 17 日の全水温観測点における観測結果と計算結果を、3 時間ごとにプロットしたものである。予報誤差の大きさを表す RMSE (Root Mean Square Error)は、0.53°C であり、精度の高い再現性を示している。

5. 解析結果の考察

干潟からの熱供給を除いた条件の下、シミュレーションを実施することで、干潟か

らの自然の熱的影響を除いた環境水温分布を導き出すことができる。先に求めたシミュレーション結果より、この環境水温を差し引くことで、干潟からの熱供給のみの影響を分離することができる。Fig.10 は 4 月 17 日 9:00(低潮時)に

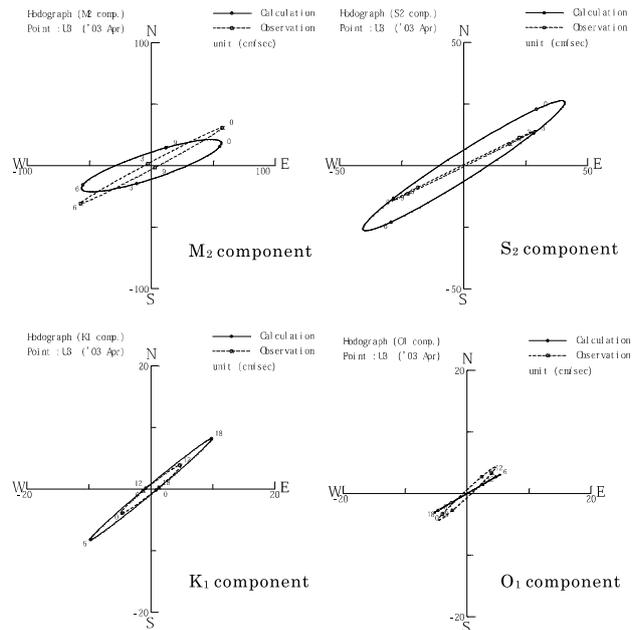


Fig.5 Observed and calculated tidal current ellipses

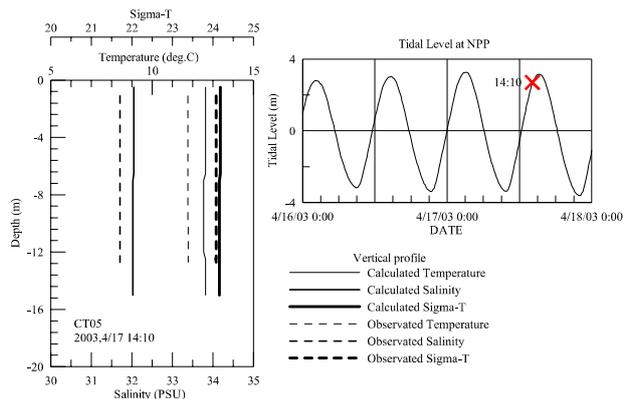


Fig.6 Observed and calculated vertical profiles

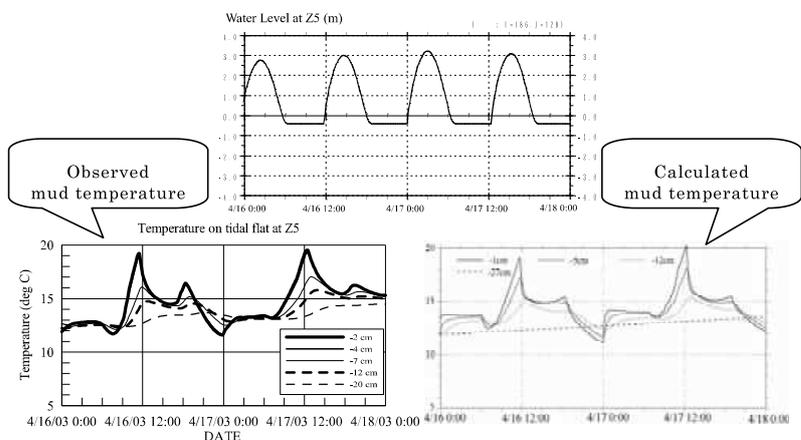


Fig.7 Observed and calculated mud temperatures

おける, 干潟からの熱供給に起因する水温上昇分布を示す。干潟の熱は, 発電所の東と西側海域で, 低潮時に南西側へ拡がり, 高潮時には沿岸線に沿って北東へと拡がっていく(高潮時の図は省略)。このように, 本モデルを使用することにより, 干潟からの熱供給が周辺海域へ与える影響を明確に示すことができ, 環境影響評価に利用できる。

4月17日における, 対象海域の熱収支を Fig.11 に整理する。熱量の算出には, 潮汐による影響を考慮し, 2003年4月17日0:00~18日0:50までの24時間50分(lunar day)を使用している。干潟域を除く海表面を通して海域が受ける熱量(4.2×10^{11} W), NPP が海域に与える熱量(7.0×10^9 W), 干潟域が海域へ与える熱量(6.6×10^{10} W)及び開境界を通して対象海域外へと流出する熱量(1.0×10^{11} W)の総和(3.9×10^{11} W)は, 対象海域が単位時間に受ける全熱収支量に相当する。2003年4月17日0:00から18日0:50までに海域の平均水温は0.18℃上昇しており, この水温上昇は海域が受け取る全熱収支量(3.9×10^{11} W)に起因していると考えられる。また, 干潟が海域へ与える熱量は, NPP が海域へ与える熱量に比べ1オーダー大きい。干潟は対象海域の水温分布や NPP からの温排水拡散に多大な影響を与えていることがわかる。

2003年4月17日における干潟を除く海表面を通しての単位面積当りの熱輸送量は 218W/m^2 , 干潟域の単位面積当りの熱輸送量は 168W/m^2 である。この日 NPP から排出された単位時間当りの熱量は, 面積およそ $4.17 \times 10^7 \text{ m}^2$ (東京ドームの面積のおよそ900倍)の干潟が単位時間当りに受け取った熱量に相当する。

6. 今後の課題

本調査では, NPP 及び周辺の干潟が, 対象日時(2003年4月17日, 大潮期, 晴れ)の沿岸海域の水温分布に与える熱的效果を明らかにしてきた。この熱的效果の季節変動等を, 今後, 明らかにする必要がある。また, 干潟生態系及び干潟地形変化モデルとの結合も重要な課題である。

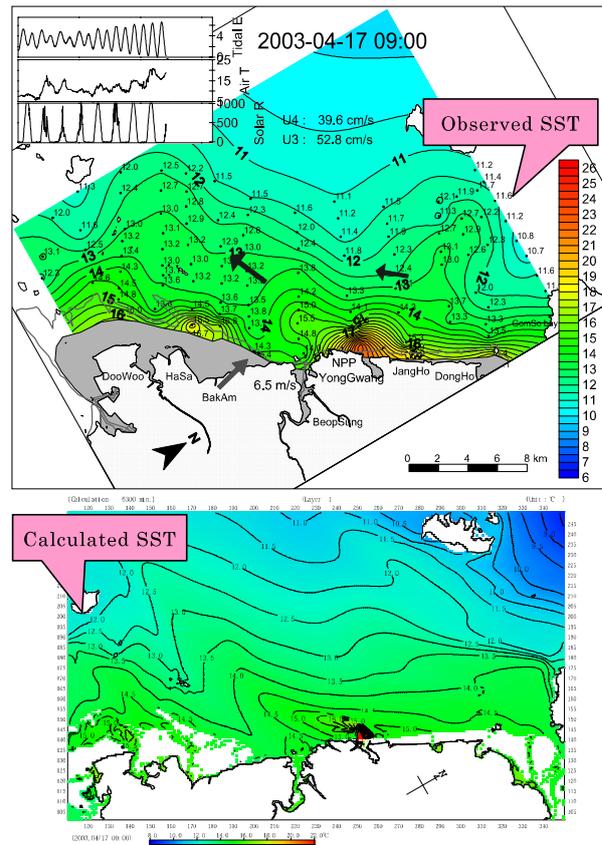


Fig.8 Comparison of SST on 9:00 17 April 2003 (Low water)

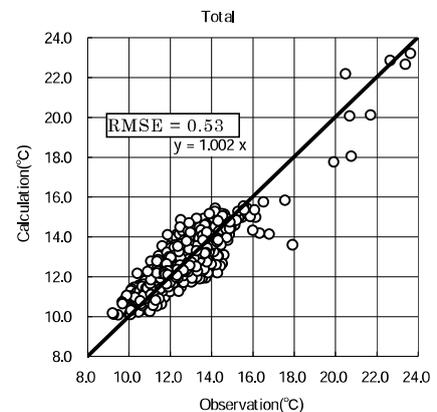


Fig.9 Correlation between the observed and calculated SST on 17 April 2003

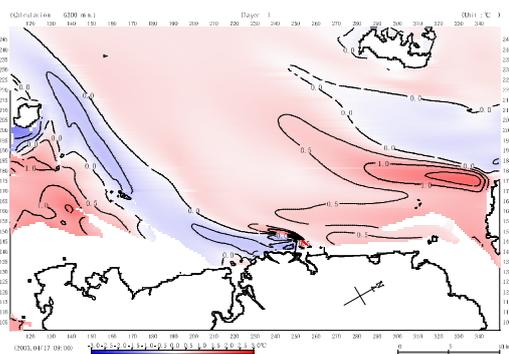


Fig.10 Thermal effluent from Tidal flat on 9:00 17 April 2003(Low water)

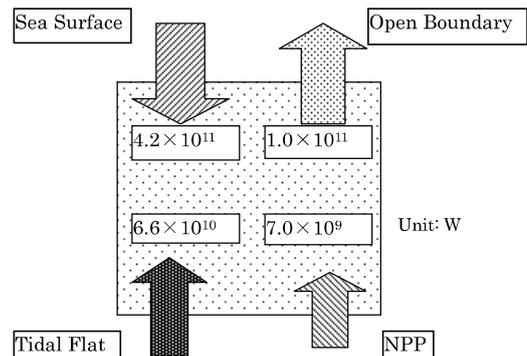


Fig.11 Heat budget in the study area on 17 April 2003