

# 双方向ネスティングを導入した海洋モデルによる 閉鎖性海域への都市排熱が水温に及ぼす影響に関する研究

環境水域工学分野 前川 雅俊

## Abstract

ヒートアイランド現象，貧酸素化の対策として，温排水を媒体に都市排熱を海域の底層から放出することが考えられている．本研究では，双方向ネスティング計算法を用いて，閉鎖性海域への都市排熱が水温に及ぼす影響について検討した．その結果，放水口周辺  $1\text{km}^2$  における平均海面温度は，都市排熱の放出がある場合もない場合もほぼ同様の変動をしているが， $\pm 1$  程度変化する時間帯があることがわかった．また，検討対象期間の平均海面温度の変化は，放水口付近で  $0.2$  程度の上昇傾向，温排水が中層を流れていく放水点より北西海域で同程度の低下傾向を示すことがわかった．また，大阪湾スケールの平均海面温度にも， $0.2$  程度変化している場所が見られ，温排水の流れが大阪湾の流動や熱移動に影響を及ぼしたことを意味していると考えられる．

## 1 研究背景

近年，都市化の進行に伴い，ヒートアイランド現象が問題となっており，その原因の一つとして，大気中に放出される都市排熱量の増大が挙げられる．その対策として，建物から排出される熱を集積し，大気以外に排熱処理することが考えられている．例えば，妹尾ら<sup>1)</sup>は工業用水道を活用した排熱処理システムを提案しており，また，中尾ら<sup>2)</sup>は，海域の低温な底層水を未利用エネルギーと捉え，都市排熱を海域に放出するシステムを検討している．

一方で，ヒートアイランド現象が顕著となる夏季に，大阪湾のような大都市を背後に抱える閉鎖性海域では，底層水が慢性的な貧酸素状態となり，生態系に悪影響を与えている．その原因の一つに，日射が表層水を暖めることで温度成層が形成され，鉛直方向の流動が抑制されるため，表層に豊富に存在する溶解酸素が底層に供給されないことが影響している．よって，貧酸素化改善のためには，鉛直混合を促進することにより，酸素を十分に含んだ表層水を底層に供給するとともに，密度成層を緩和・破壊することが重要であるといえる．

以上の都市域と海域の問題を踏まえ，本研究では，上述した中尾ら<sup>2)</sup>のシステムに注目する．このシステムは，海域底層の低温な海水を冷却水として利用し，温排水を媒体に都市排熱を海域の底層から放出するものである．これにより，陸域にとっては大気中に放出される都市排熱量を低減することができ，海域にとっては，密度の小さい温排水を底層から放水することに

より，鉛直混合を促進し，貧酸素化を改善することが期待できる(図-1参照)．

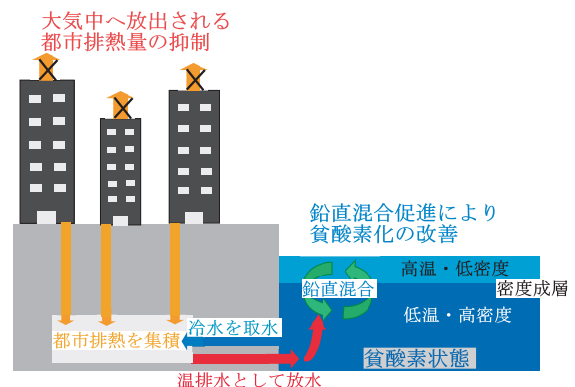


図-1 地域熱供給システムのイメージ図

このような大規模なシステムを導入するにあたり，その効果を予測することは重要である．森ら<sup>3)</sup>は，JMA/GPVの気象データを入力可能とする数値モデルを構築し，気象変動を考慮して，都市排熱の放出が海面温度や大気海洋間の熱フラックスに与える影響について考察を行った．その結果によると，温排水の放出により海面温度を低下させる効果も期待できることを明らかにし，ヒートアイランド対策に向けた有効な成果を得ている．

しかしながら，これまでの研究において，湾スケールの環境構造に及ぼす影響を検討したために，放水口付近が低解像度で，放水流速が微小となることが課題となっており，温排水の底層放水による鉛直混合効果などの港湾スケールの環境構造に及ぼす影響につい

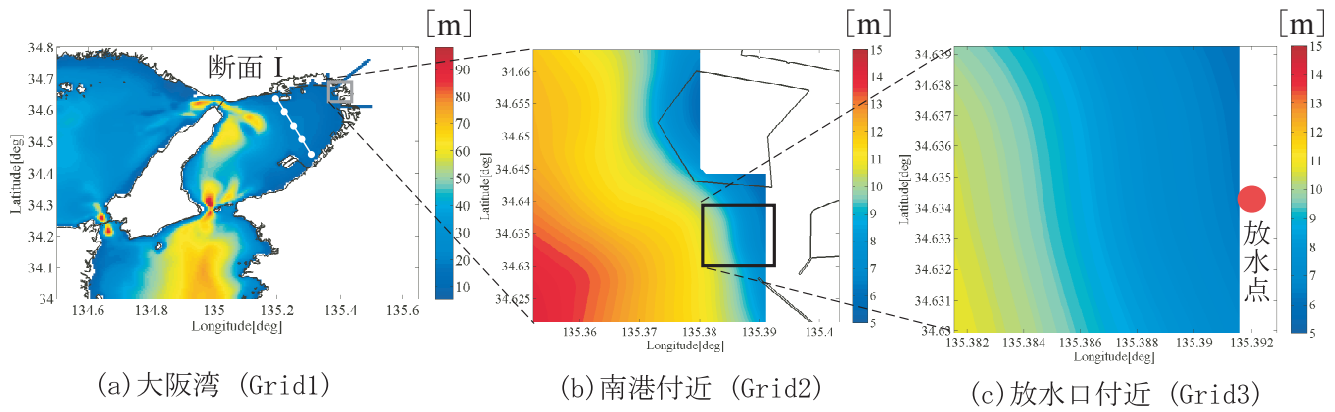


図-2 計算対象領域と海底地形(コンター:水深)

では、十分に検討されているとは言えない。

そのような影響を検討するにあたり、潮位変動をはじめとする湾スケールの流動を考慮することは重要であり、また、港湾スケールの水温変化が湾スケールの水温に及ぼす影響を検討することも重要である。以上のような検討を行うにあたり、低解像度の広域スケールと高解像度の局所スケールの複数の領域間で計算結果を伝達しながら、同時並行的に計算する双方向ネスティングという計算手法が有効である。

そこで、本研究では、双方向ネスティング計算法を用いて、閉鎖性海域への都市排熱の放出が港湾スケールの水温に及ぼす影響を検討した上で、その港湾スケールの水温変化が湾スケールの水温に及ぼす影響について検討することを目的とする。

## 2 検討に用いた数値モデルの概要と検討条件

### 2.1 数値モデルの概要

本研究では、米国で開発された海洋モデル Regional Ocean Modeling System(ROMS)を用いた。ROMSは、自由表面で地形に沿った座標系を導入し、静水圧近似を仮定した海洋モデルで、様々な差分方法・物理モデル及び境界条件を組み合わせ、計算に必要なコンパートメントを取捨選択したうえで計算対象領域の地形や境界条件に適合した海域流動の計算を行うことが可能である。

### 2.2 計算対象領域

本研究では、検討対象とする閉鎖性海域として、大阪湾を選定した。また、都市排熱の放出地点を大阪湾湾奥部の南港とし、大阪湾スケールの大領域(Grid1)から、南港付近の中領域(Grid2)、放水口近傍の小領域

表-1 計算対象領域の諸条件

	Grid1	Grid2	Grid3
領域サイズ[km]	103 × 92.5	5.0 × 5.0	1.1 × 1.0
空間解像度[m]	500	100	20
格子数	206 × 185	50 × 50	55 × 50

(Grid3)まで、空間解像度を5倍ずつ高くした2段階のネスティングを行った。それぞれの領域の諸条件を表-1に、海上保安庁の深浅測量データ(日本水路協会)を基に作成した海底地形図を図-2に示す。

計算にあたっては、水平方向にはデカルト座標系を導入し、それぞれの領域で空間解像度を一定として基礎方程式を離散化した。また、鉛直方向には $\sigma$ 座標系を導入し、10層に分割した。

### 2.3 考慮する物理過程

#### 2.3.1 潮位変動

大阪湾の水位変動を再現するため、計算対象領域の南端と西端で、海上保安庁による潮汐推算値を用いて潮位変動を与えた。同時に、開境界条件を課して、計算領域外への重力波の伝播を許し、鉛直積分流速は長波近似を、平面流速には放射条件を課した。

#### 2.3.2 河川水流入

大阪湾に流れ込む河川の中でも比較的流量の多い淀川、神崎川、大和川、武庫川の4河川の影響を考慮するため、平成10~12年の6~8月の平均値を用いて流入河川流量を与えた。河川流量は検討期間中一定とし、流入条件は、塩分0psu、最上層の格子からの流入とした。

### 2.3.3 気象変動

大気環境が海水流動に及ぼす影響を考慮するため、気温、風向・風速、相対湿度、雲量、降水量、日射量を入力し、大気海洋間の運動量・熱・塩分フラックスを推定し、海面境界条件として与えた。熱フラックスは、短波放射・長波放射・潜熱・顕熱フラックスの4つに分けられる。運動量・顕熱・潜熱・塩分フラックスについては、COARE-2.5 パルクアルゴリズム、長波放射フラックスについては、Berliand(1952)の式、短波放射フラックスは、全天日射量のデータから、アルベド(日射反射率)を0.1として算出した。

## 3 数値モデルの再現性確認

### 3.1 気象が水温の鉛直分布に及ぼす影響

#### 3.1.1 検討条件

気象が水温の鉛直分布に及ぼす影響について、再現性の確認を行う。再現性の確認には、大阪市此花区の埋め立て造成地、夢洲の最終沈殿池(南北約300m、東西約250m、平均水深約5m)で計測した水温データを用いた。計測項目は、水温の鉛直分布と気温・風向・風速・日射量の気象情報である。水温の鉛直分布は、水面直下(SST)、および、水面下0.5mまでは0.1m間隔で、0.5m~5.0mでは0.5m間隔で水温計(TidbiT Temp Logger, Onset Computer社製)を懸垂して、10分毎に連続計測を行った。気象情報も同様に10分毎に計測した。

検討対象期間は、2011年8月23日からの37日間とした。この期間には、計測開始時に水面下2.5~3.0mに形成されていた温度成層が、台風接近に伴い消滅し、その後気温の上昇とともに再形成され、再び台風接近に伴い消滅するという変化が確認された。

計算にあたっては、計測を行った沈殿池を想定した模擬領域(南北300m、東西300m、水深5.5m)を作成し、水平方向にはデカルト座標系を導入し、空間解像度は5mで一定とし、鉛直方向には $\sigma$ 座標系を導入し、10層に分割した。また、境界は全て閉境界とし、水位変動はないものとした。入力した気象条件は、風向・風速・気温・日射量について、現地で連続計測したデータを用い、降水量・雲量・相対湿度について、気象庁大阪観測所の値を用いた。

また、海域の初期条件として、水温と塩分の鉛直分布を与えた。水温については、連続観測している水温データから、計算開始時のものを入力し、塩分については、2011年8月22日の現地調査時に多項目水質計(Compact-CTD, アレック電子(株)製)を用いて計測した値を用いた。塩分成層は、水面下2.5mに形成されており、表層19psu、底層24psuであった。

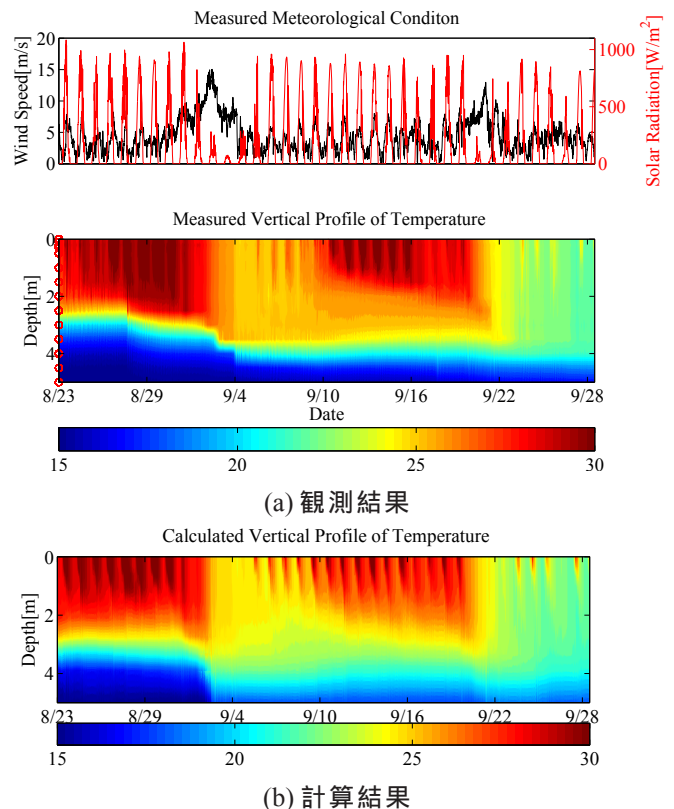


図-3 水温の鉛直分布の時系列変化の再現性

#### 3.1.2 気象が水温の鉛直分布に及ぼす影響の再現性

図-3は、平均風速・日射量の気象情報と水温の鉛直分布の観測値・計算結果の時系列変化を示したものである。同図から、計算結果は、9/2の台風接近時の温度成層の消滅、その後の再形成、9/22の台風接近による再消滅という温度成層の変化を定性的に再現できていることがわかる。

しかしながら、9/2の台風接近時に、計算結果は観測結果に比べて、混合が大きくなっている。その原因として、8/27に発生した集中豪雨による塩分成層の変化が正確に表現できていないことが考えられる。数値モデルにおいて、降雨の影響は大気海洋間の塩分フラックスとして考慮しているものの、現地においては隣の沈殿池から降雨に由来する低塩分の水塊が流入したことにより、塩分成層が強固になっていたと考えられる。つまり、計算においては、現地に比べて密度成層が弱いため、混合が大きくなったと考えられる。

### 3.2 大阪湾の水位変動

#### 3.2.1 検討条件

大阪湾内の水位変動の再現性を確認するため、気象庁の観測所が存在する大阪、神戸、洲本、淡輪の4地点において、水位の計算結果と天文潮位を比較した。以上の4地点のうち、大阪を除く3地点は大領域に存在し、大阪は中領域に存在する。計算対象期間は比較

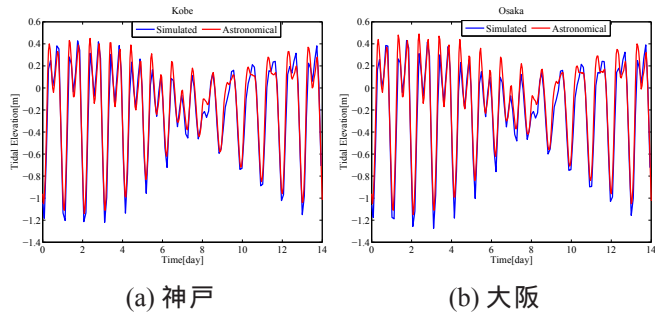


図-4 潮位変動の再現性(青:計算結果,赤:天文潮位)

データに合わせて,2003年1月11日からの3週間とし,最初の1週間は助走期間とした。河川水温は10とし,海域の水温・塩分の初期条件は,それぞれ水平・鉛直方向ともに10,32psuで同様とした。

日射量を除く気象データは,気象庁GPV再解析データを用い,そのデータは,時間分解能が1時間,空間分解能が緯度0.05度×経度0.0625度であるので,これを線形補間して与えた。日射量は,大阪湾周辺における7地点の気象庁観測値で得られている全天日射量のデータを用い,時・空間的に線形補間して与えた。ただし,中・小領域については,空間的に一定値を与えた。

### 3.2.2 水位変動の再現性

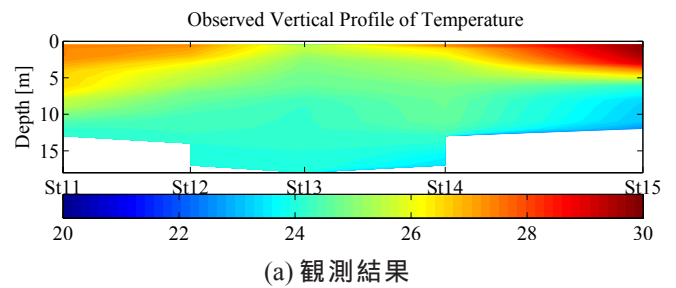
図-4は,神戸と大阪における水位変動の時系列変化を表しており,青線が計算結果,赤線が天文潮位である。同図から,いずれの地点においても,計算結果の水位変動は天文潮位を定性的に再現できているが,天文潮位に比べて大きい値を示している。また,天文潮位と水位の計算結果の相関は,相関係数0.97と高い相関が見られ,RMSE(平均二乗誤差)は0.12m程度であった。他の2地点についても同様の傾向であった。

## 3.3 大阪湾の熱流動

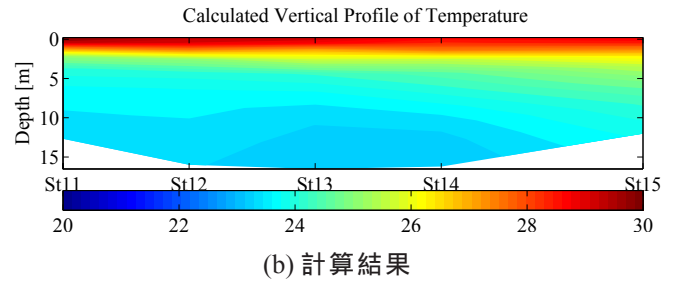
### 3.3.1 検討条件

大阪湾の熱移動の再現性は,水温の鉛直分布について,観測値と計算結果を比較することにより確認した。検討対象期間は,都市排熱を閉鎖性海域に放出することを想定する時期,比較に用いる海上保安庁によるADCP観測データが存在する期間を考慮し,2008年7月18日から3週間とし,最初の1週間は助走期間とした。また,河川水温は30で一定とし,海域の初期条件は,観測値を参考に,表層が27,底層が23となるように,温度成層を設定した。

気象データは,水位変動の再現性確認時と同様に入力した。



(a) 観測結果



(b) 計算結果

図-5 水温の鉛直分布の再現性

### 3.3.2 水温の鉛直分布の再現性

図-5は,図-2(a)における断面Iにおける水温の鉛直分布の観測結果と計算結果を示したものである。図-5の地点は,図-2(a)の白丸であり,北から順にstal1,stal2の順である。同図から,温度成層が定性的に再現できているが,計算結果は観測結果に比べて,地点による違いが少なく,温度成層の上層の厚さが薄くなっていることがわかる。また,断面Iより湾奥部の断面についても,同様の検討を行っており,おおむね同じ傾向であった。

## 4 閉鎖性海域への都市排熱が水温に及ぼす影響

### 4.1 計算条件

#### 4.1.1 都市排熱の放出条件

都市排熱の放出は,海洋の低温な底層水を取水し,温排水を媒体として,海洋へ放出することを想定している。森ら<sup>3)</sup>によると,大阪市住之江区の都市排熱量を推定し,温排水の流量に換算した結果,9.9m<sup>3</sup>/sとなる。本研究では,この値を参考に,10m<sup>3</sup>/s,20m<sup>3</sup>/s,30m<sup>3</sup>/sの3パターンの流量について検討した。計算対象期間は,3.3の大阪湾の熱移動の再現計算と同様とし,計算期間中,放水流量は一定とした。温排水の放水条件として,温度差( $\Delta T$ )は環境アセスメントの観点から7とし,取水する底層水の水温が23であるから,放水温は30とした。また,放水する温排水の塩分は底層水と同じ値である32psuとした。都市排熱の放出地点は図-2の小領域に示す赤丸の地点とし,その最下層のセルから西向きに温排水を放水した。

また、海域の初期条件と気象条件についても、3.3の大阪湾の熱移動の再現計算と同様とした。

## 4.2 閉鎖性海域への都市排熱が水温に及ぼす影響

### 4.2.1 温排水の挙動

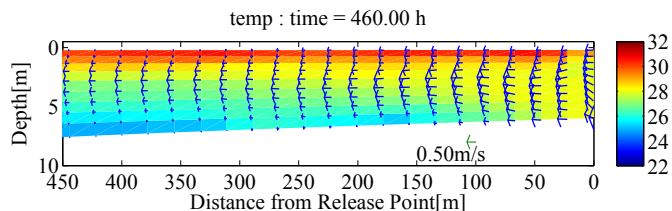
まず、海域の底層から放出された温排水の挙動について調べた。図-6は、 $30\text{m}^3/\text{s}$ 放水時の小潮干潮時における、放水口断面の水温と流速の鉛直分布(a)と中層の水温と流速の水平分布(b)を示したものであり、コンターは水温[ $^{\circ}\text{C}$ ]、ベクトルは流向を表す。同図(a)から、海域の底層から放水された温排水は、湧昇後、中層を沖方向に流れていくことがわかる。また、同図(b)から、湧昇した温排水は最初西進し、その後中領域を陸地を右手に見ながら北進していくことがわかる。この水平方向の流れはコリオリ力によるものと考えられる。その後は、淀川の流れとともに明石海峡付近に西進していく。

また、図-7は放水口から100m離れた地点における表層、中層、底層の流速と潮位変動の時系列変化を示したものであり、流速は放水方向(西方向)を正とした。同図から、中層で最も流動が促進されており、放水流量が大きいほど、大きな流速が発生していることがわかる。また、その流速は潮位変動に合わせて変動しており、沖向きの流速は、下げ潮時に大きくなり、上げ潮時に小さくなる傾向にあることがわかった。

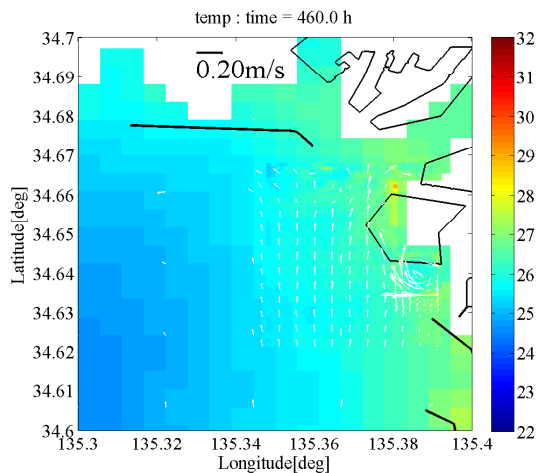
### 4.2.2 海面温度に及ぼす影響

都市排熱の放出が海面温度に及ぼす影響について検討する。海面温度は、都市気象に影響を及ぼすことが指摘されており<sup>4)5)</sup>、ヒートアイランド対策としてこのシステムの影響を検討するにあたり、海面温度に及ぼす影響を検討することは重要である。

図-8は、Grid 3の全領域、つまり放水口周辺 $1\text{km}^2$ の範囲における平均海面温度、その上昇度と水位変動・風速の時系列変化を示したものである。同図から、平均海面温度は、都市排熱の放出がある場合もない場合もほぼ同様の変動をしているが、平均海面温度が1程度上昇する時間帯と低下する時間帯があることがわかる。その変化と潮位変動・風速との関係を見てみると、平均海面温度が上昇するのは上げ潮時に多く、低下するのは高風速後に多く発生する傾向にあることがわかる。上げ潮時に平均海面温度が上昇するのは、下げ潮時に比べて沖方向の流動が小さく、沖方向への熱拡散が少ないためであると考えられる。また、高風速後に平均海面温度が低下するのは、温排水による鉛直混合の効果に、風による鉛直混合の効果加わった



(a) 放水口断面の鉛直分布



(b) 中層の水平分布

図-6 小潮干潮時における各断面の水温と流速の分布 ( $30\text{m}^3/\text{s}$ 放水時)

めであると考えられる。また、放水流量によって、平均海面温度の上昇度に大きな差は見られなかった。

次に、温排水の空間的な広がりについて検討する。図-9は、それぞれ南港と大阪湾における、温排水を $10\text{m}^3/\text{s}$ 放水した場合の平均海面温度(2週間平均)の上昇度を示したものである。同図(a)から、平均海面温度の上昇度は、放水口付近で0.2程度の上昇傾向、温排水が中層を流れていく放水点より北西海域で同程度の低下傾向を示していることがわかる。温排水を放出したにも関わらず海面温度が低下するのは、温排水の放出により、鉛直・水平方向の流動が促進された結果、温度成層が乱され、鉛直混合が促進されたためであると考えられる。また、同図(b)から、大阪湾スケールにおいても、平均海面温度が0.2程度変化している場所が見られる。これは、4.2.1で述べたような温排水の流れが大阪湾の流動や熱移動に影響を及ぼしたことを意味していると考えられる。

## 5 結論

本研究で得られた結論をまとめると、以下のようである。

- 検討に用いる数値モデルの再現性を確認した結果、気象が水温の鉛直分布に及ぼす影響、大阪湾の水位変動・熱移動について、定性的に再現していることがわかった。

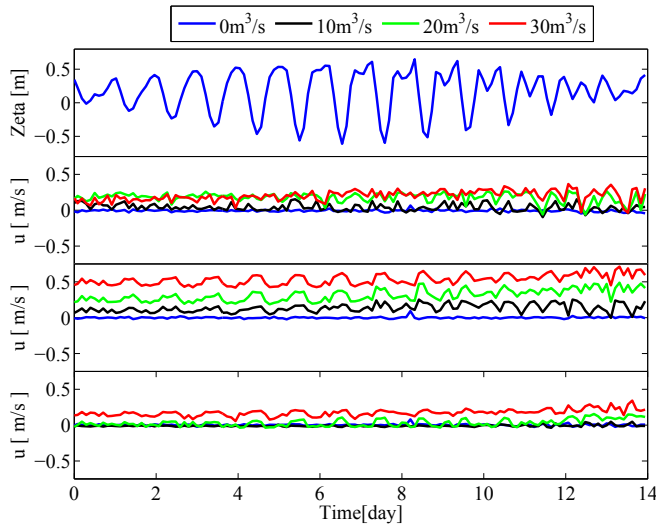


図-7 潮位変動と水平流速の時系列変化(上から, 潮位変動, 表層流速, 中層流速, 底層流速)

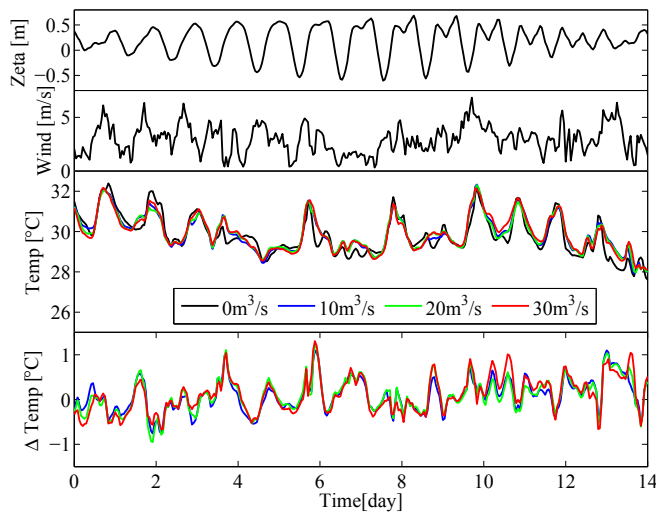
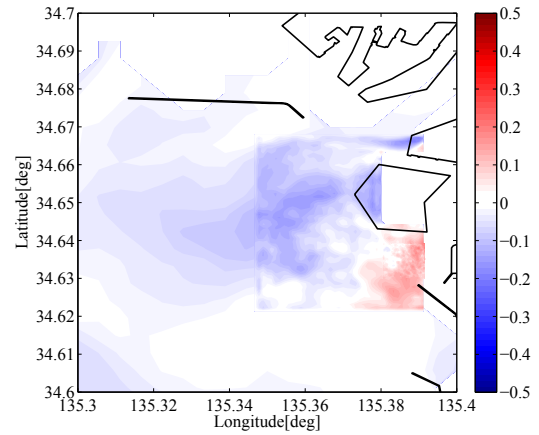
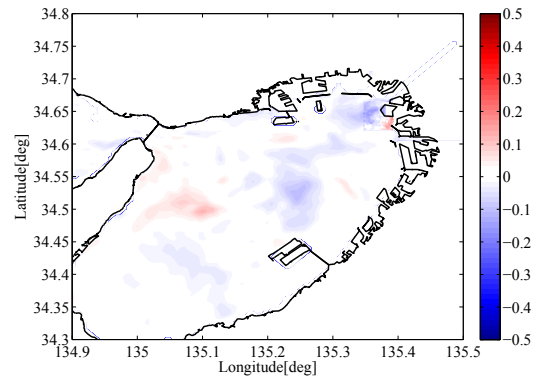


図-8 潮位変動・風速と放水口周辺 1km<sup>2</sup> の範囲における平均海面温度, その上昇度の関係

- 海域の底層から放出された温排水は, 湧昇後, 主に中層を西進し, その後陸地を右手に見ながら北進していくことがわかった. また, その西進する水平流速は, 下げ潮時に大きくなり, 上げ潮時に小さくなる傾向にあることがわかった.
- 都市排熱の放出が水温に及ぼす影響について検討した結果, 放水口周辺 1km<sup>2</sup> の範囲における平均海面温度は, 都市排熱の放出がある場合もない場合もほぼ同様の変動をしているが, 1 程度上昇する時間帯と低下する時間帯があることがわかった. また, 平均海面温度が上昇するのは上げ潮時に多く, 低下するのは高風速後に多く発生する傾向にあることがわかった.
- 都市排熱の放出による, 平均海面温度の上昇度の水平分布は, 放水口付近で 0.2 程度の上昇傾向, 温排水が中層を流れていく放水点より北西海域で



(a) 南港付近



(b) 大阪湾

図-9 平均海面温度(2週間平均)の上昇度の水平分布(10m<sup>3</sup>/s 放水時)

同程度の低下傾向にあることがわかった. また, 大阪湾スケールにおいても, 平均海面温度が 0.2 程度変化している場所が見られ, 温排水の流れが大阪湾の流動や熱移動に影響を及ぼしたことを意味していると考えられる.

## 参考文献

- [1] 妹尾佳和・中尾正喜・鍋島美奈子・西岡真稔・鮫島竜一(2006): 都市排熱処理のための工業用水道の利用に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1311-1312.
- [2] 中尾正喜・中井真由美・西岡真稔・鍋島美奈子・森 信人・矢持 進(2007): 港湾内における夏期底層低温水の利用 第一報 港湾内垂直温度分布の特徴, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, B-54, pp.1733-1736.
- [3] 森 信人・佐地泰昭・重松孝昌・中尾正喜・矢持 進・間瀬 肇(2010): 海洋モデルによる気象変動を考慮した大阪湾への都市排熱放出の影響評価, 海岸工学論文集, 第 66 巻, pp.1296-1300.
- [4] 玉井昌宏・花立和之・有光剛(2007): 沿岸都市域の夏季の気温に及ぼす海面水温の影響, 海洋開発論文集, Vol.23, pp.1047-1052.
- [5] 二宮順一・森 信人・日下博幸・重松孝昌(2009): 都市気温へおよび大阪湾の海水温の影響, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.1047-1052.

## 討 議 等

### 討議 [ 中尾正喜教授 ]

夢洲の再現計算において、海底面における境界条件はどうなっているのか？土壌との熱のやり取りはあるのか？

また、計算結果は観測結果に比べて底層水温が上昇しているように見えるが、その原因も海底面の境界条件ではないのか？

回答：ご指摘いただいた土壌との熱のやり取りは想定しておらず、海底面における熱のやり取りはなしで検討しました。底層水温の計算結果が観測結果に比べて上昇したのは、2011年9月2日の台風接近時の鉛直混合が計算において過大評価されたためであると考えています。鉛直混合が過大評価された原因は、2011年8月27日の集中豪雨時の塩分の鉛直分布が正確に再現できていなかった可能性が考えられます。

### 討議 [ 矢持進教授 ]

大阪湾スケールの平均海面温度が変化するのはなぜか？

回答：温排水の放出が、大阪湾スケールの流動、熱移動に影響を及ぼしたためであると考えています。南港から放出された温排水は、放水方向である西方向に進み、その後陸地を右手に見ながら北進し、淀川の流れとともに西進し、沖ノ瀬環流域付近に流れていきます。その温排水の流れが、大阪湾スケールの流動・熱移動に影響を及ぼしたことにより、大阪湾スケールの海面温度が変化したものと考えています。

### 討議 [ 鍋島美奈子講師 ]

都市排熱の放出地点を複数にした場合の検討は行ったか？

回答：今回は放出地点を複数にした場合の検討は行っておりません。このシステムを導入する際には、複数の放出地点となることが予想されるため、その検討は必要であると考えています。しかしながら、今回の検討では、ネスティング計算法を用いて放水口付近を高解像度で計算しており、計算コストの観点から、放出地点を一つとしました。