

気象データを用いた海洋モデルによる大阪湾への都市排熱放出の影響評価

環境水域工学分野 佐地泰昭

近年、東京湾や大阪湾で考えられている海域を利用したヒートアイランド対策の有意性を評価するためには、大気と海洋の影響を大きく受ける海面温度を推定することが非常に重要である。そこで、本研究では、大阪湾を対象として海洋モデルを用い、JMA/GPVの気象データを取り込んだ数値モデルの構築を行った。その結果、大阪湾における夏季の水温鉛直分布を再現するためには、乱流モデルとしてGLS、安定関数としてKCを用いるのが良いということがわかった。また、そのモデルを用いて、都市排熱を海洋へ放出した場合のシミュレーションを行い、海面温度に与える影響について評価した。その結果、夏季における海域への都市排熱放出は海面温度を低下させる効果も期待できるということが示唆された。

1 研究背景

近年、海に隣接する大都市では、ヒートアイランド現象を抑制するための対策の1つとして、都市で発生した人工排熱を海域へ放出することが考えられている。この対策は、大気と比較して熱容量はるかに大きい海域に都市排熱を放出し、大気に放出される都市排熱を低減させることによって、ヒートアイランド現象の緩和を目指すものである。一方、静穏な閉鎖性海域では夏季には成層化して底層貧酸素化が著しく、都市排熱を含んだ水を底層に放流することによる鉛直混合機能の促進により、海域環境の改善も期待される(図-1 参照)。

一方、ヒートアイランドを考える上で、隣接する海域の海面温度は重要なファクターの1つであるという議論もなされている。大阪湾において、玉井ら(2007)は海面温度を1°C低下させることによって都市部の最低気温を0.3°C低下させることができるとしている。また、二宮ら(2009)は1°Cの海面温度上昇によって都市部の平均気温が0.6°C上昇するという結果を数値計算から導いている。

上述したような海域を利用したヒートアイランド対策の有意性を評価するためには、海域へ放出した都市排熱が海面温度に及ぼす影響について検討する必要がある。森ら(2008)の研究においては、海面温度が気象条件に大きく左右されるにも関わらず、気温は一定、風速は無風を仮定しているなど、大気が海洋に与える影響について十分に考慮できていない。そこで、本研究では、大阪湾を対象として、海洋モデルを用いて内湾流動を再現するために適切な構成モデルを選定し、気象条件が海域の表層の流動及び気液界面における熱輸送に及ぼす影響を考慮した上で、都市排熱を海域に放出すること

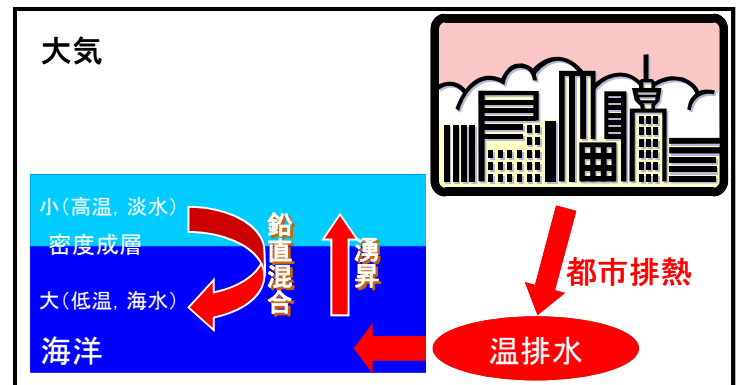


図-1 都市排熱処理システム概念図

による大気への排熱量の低減効果について検討することを目的とする。

2 数値モデルの概要

2.1 海洋モデル

本研究において、海洋モデルには Regional Ocean Modeling System (ROMS) を用いる (Shchepetkin, 2005)。ROMS は自由表面で地形に適合する座標系をもつ格子を導入し、静水圧近似を仮定した海洋モデルである。また、数多くの物理モデルや境界条件で構成されており、それらを組み合わせ、対象とする場所の地形や条件に適合させることが可能なオープンソースモデルである。大気海洋間における運動量・熱輸送は Fairall et al (1996) のバルク法を用いて計算される。これはバルク係数の算出に大気安定度を考慮していることに加え、風速が小さい場所にも適用できるようなアルゴリズムである。

2.2 海底地形

海底地形は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、計算対象範囲は北緯 34.00 度~34.85 度、

東経 134.50 度~135.65 度とした。図-2 は計算対象領域であり、コンターは水深を表している。水平方向にはデカルト座標系を導入し、格子の数を緯度方向に 187、経度方向に 208 の解像度 500m×500m で離散化を行った。鉛直方向にはσ座標系を導入し、10 層に分割した。

2.3 外部境界条件

対象領域の北側及び東側は壁と仮定し、西側境界（小豆島の北側，南側）と南側境界（紀伊水道の南側）には潮汐の影響を考慮するために、海上保安庁による潮汐推算の値を用いて潮位変動を与えた。図-3 は大阪における水位変動を示しており、計算結果と天文潮位との相関係数は 0.99、RMSE(Root Mean Square Error)は 0.06m となった。河川水の影響は大阪湾に流れ込む河川の中でも比較的流量の多い 4 河川について考慮し、流量は平成 10~12 年、6~8 月の平均値を用いた。また、水温は 30.0℃、塩分は 0psu とし、鉛直方向に関しては最上層からのみ河川水が流入するように設定した。

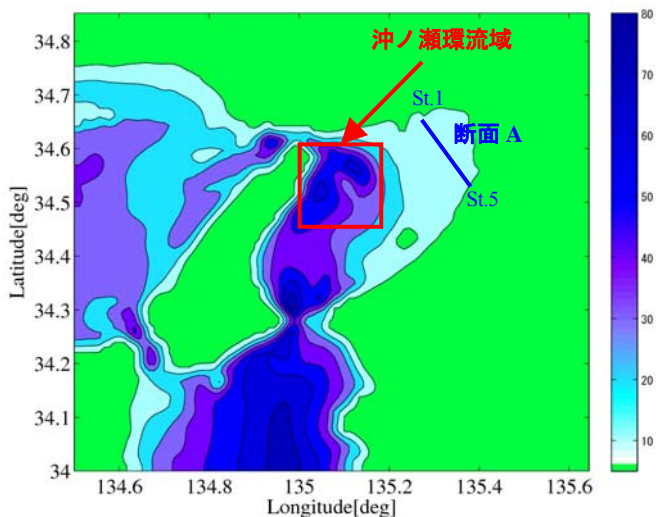


図-2 計算対象領域（コンター：水深）

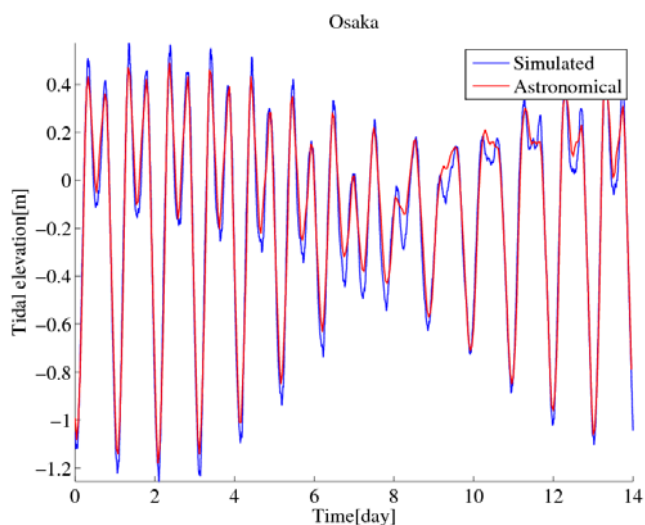


図-3 大阪における水位変動(青：計算結果，赤：天文潮位)

3 気象データ

3.1 再解析データの概要

本研究では、気象データとして、数値予報と過去の観測データを同化させて集めた再解析データについて検討を行う。これはできる限り観測に近い気象データを利用したいことに加え、数値計算を行う上では広い範囲を対象とした格子点毎のデータが必要となるからである。ここでは、2つの再解析データについて述べる。

3.1.1 NCEP reanalysis

NCEP(National Centers for Environmental Prediction)では、天気予報、気候変動、海洋、宇宙、熱帯、嵐等の環境全般について、モデル再解析による予測を実施している。NCEP reanalysis(以下 NCEP/FNL)は全球を対象として気象に関する物理量を出力しており、得られるデータの空間分解能は約 2.5 度、時間分解能は 6 時間である。

3.1.2 気象庁 GPV

気象庁 GPV(以下 JMA/GPV)は気象庁が予報資料として作成しているさまざまな気象要素の格子点データであり、領域数値予報モデル(RSM)やメソ数値予報モデル(MSM)などがある。その中で最も解像度が高いのは MSM であり、時間分解能は 1 時間、空間分解能は緯度 0.05 度×経度 0.0625 度のデータを利用することができる。

3.2 再解析データと観測データの比較

ROMS のツールを通して得られる気象の再解析データは全球を対象とした NCEP/FNL であるが、本研究のように狭い領域を対象とした数値計算には向かないと予想される。そこで、JMA/GPV の再解析データを入力可能とするプログラムを作成し、これら 2つの再解析データと気象庁の地上観測データの比較を行った。観測データは大阪、神戸、和歌山の 3 地点のデータを用い、対象期間は 2008 年 8 月 1 日~2008 年 8 月 30 日の 30 日間とした。

表-1 は各地点における再解析データと観測データの比較をまとめたものである。気温に関しては、どちらの再解析データも相関係数が 0.8 を超え、観測データを良好に再現する結果となった。一方、風速における観測値との整合性は気温の場合と比べて極めて低くなった。この原因の 1 つとして、風は地形の影響を大きく受け、空間的に激しく変動する気象要素であるということが挙げられる。その影響は空間解像度が低い NCEP/FNL で顕著であった。最後に、比湿は気温、風速と比べて JMA/GPV と NCEP/FNL の間で再現精度が大きく異なる結果を示した。NCEP/FNL が観測値を高く見積もる傾向がある一方、JMA/GPV は観測値を良く再現しており、RMSE、相関係数ともに NCEP/FNL の値を大きく上回るということがわかった。

これらのことをまとめると、NCEP/FNL の空間解像度の低さが観測データとの整合性の向上を妨げている一方で、JMA/GPV は観測データを良好に再現しているという

表-1 再解析データと観測データの比較

RMSE	気温 (°C)		風速 (m/s)		比湿 (g/kg)	
	JMA/GPV	NCEP/FNL	JMA/GPV	NCEP/FNL	JMA/GPV	NCEP/FNL
大阪	1.47	2.94	0.91	1.59	1.18	3.34
神戸	1.76	2.75	3.02	2.94	1.50	2.31
和歌山	1.55	2.26	1.57	2.24	2.12	3.77
相関係数	気温		風速		比湿	
	JMA/GPV	NCEP/FNL	JMA/GPV	NCEP/FNL	JMA/GPV	NCEP/FNL
大阪	0.90	0.83	0.66	0.34	0.86	0.68
神戸	0.91	0.80	0.52	0.43	0.85	0.68
和歌山	0.90	0.80	0.60	0.09	0.81	0.65

ことがわかった。よって、本研究では、以降のシミュレーションで必要となる気象データとして JMA/GPV を用いることとした。

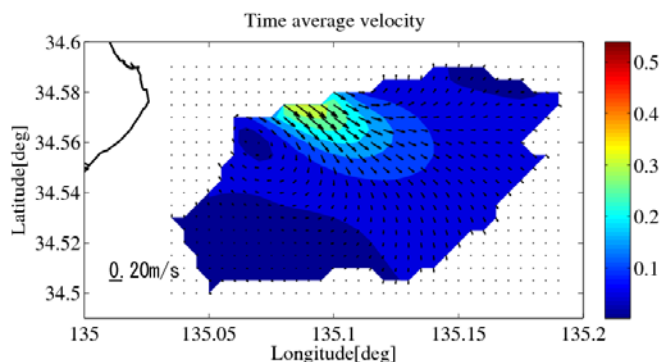
4 大阪湾の物理環境の再現

4.1 表層残差流

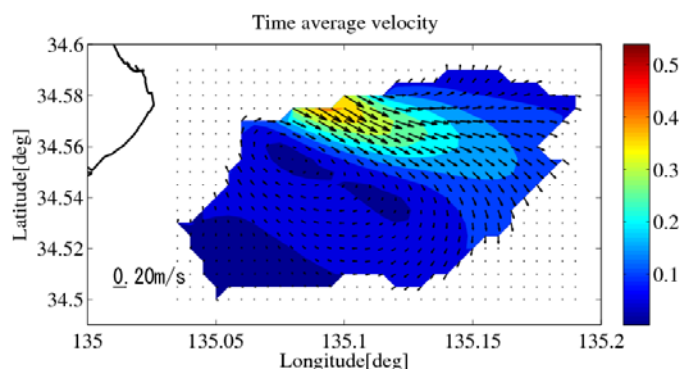
海域へ放出された都市排熱の拡がりを考える上で、表層の残差流の再現性について検討することは重要であり、特に、乱流モデルの違いによって流動が大きく異なることが指摘されている(例えば Warner J.C.ら, 2005)。本研究では、Generic Length Scale model(以下 GLS), Mellor-Yamada level 2.5 closure model(以下 MY25)において観測結果との比較を行った。比較に用いた観測データはDBF レーダーによる沖ノ瀬環流域(図-2 参照)の流動観測結果(坂井ら, 2004)である。図-4 は表層残差流の計算結果と観測結果を比較したものであり、どちらも14日間平均を表している。また、計算結果は最上層における値を用いている。これを見ると、どちらの乱流モデルも計算結果は観測結果よりも流速が小さくなっていることがわかる。観測結果との間の流速の RMSE はどちらも 0.20m/s 程度であり、相関係数は GLS で約 0.65, MY25 で約 0.55 となった。

4.2 水温の鉛直分布

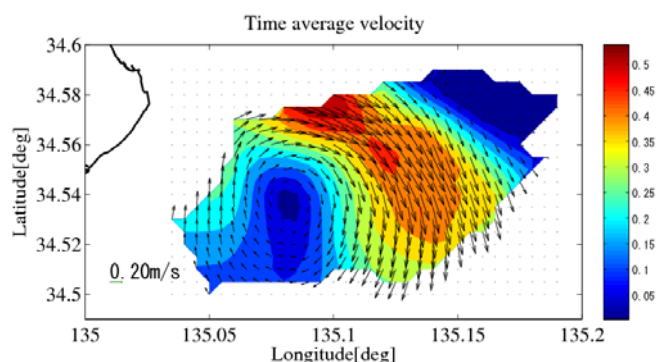
水温・塩分の鉛直分布は海上保安庁による ADCP 観測のデータと比較することで計算結果の妥当性を評価した。図-5 は図-2 の断面 A における水温の鉛直分布の計算結果と観測結果を表している。また、ここでは、乱流モデルに加えて Kantha and Clayson(以下 KC)と Canuto A(以下 CA)の2種類の安定関数についても検討を行った。その結果、乱流モデルに関して、MY25はGLSよりも温度躍層深さが浅く、鉛直混合が抑制されるという結果となった。また、安定関数に関しては、乱流モデルほどの違いは見られないものの、KCのほうがCAよりも鉛直混合を促進するということがわかった。観測結果との比較より、大阪湾における夏季の水温鉛直分布を再現するための物理モデルとして、乱流モデルはGLS、安定関数はKCを用いるのが良いということがわかった。



(a)GLS



(b)MY25



(c)観測結果

図-4 14日間平均の表層残差流

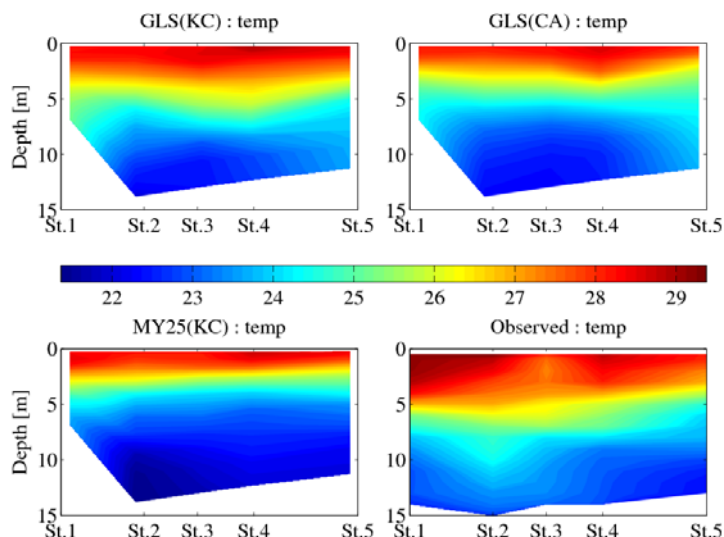


図-5 断面 A(図-2 参照)における水温の鉛直分布

5. 大阪湾への都市排熱放出の影響評価

都市排熱は温排水を媒体として夏季に海域へ放出することを想定している。排熱量は次式を用いて流量に換算される。

$$Q_{bar} = \frac{H_{urb}}{C_p \cdot \Delta T \cdot \rho \cdot 1000 \cdot 3600} \dots (1)$$

ここで、 Q は流量(m^3/s)、 H_{urb} は都市排熱量(J/h)、 C_p は比熱(J/g/K)、 ΔT は温度差($^{\circ}C$)、 ρ (kg/m^3)は密度を表す。温排水条件として、水温は環境アセスメントの観点から底層水温 $+7^{\circ}C$ ($\Delta T=7$)、塩分は海水と同じ値を用いた。密度、比熱はそれぞれ $1027.0(kg/m^3)$ 、 $3.93(J/g/K)$ とした。都市排熱放出地点は大阪湾奥部の1格子点であり、その点の最下層から西向きに温排水を放出した。都市排熱量は原単位法を用いて求め、対象範囲を大阪湾に隣接している大阪府大阪市住之江区とした結果、流量は $9.9m^3/s$ と推定された。本研究では、この値を参考にし、 $Q=5m^3/s$ 、 $10m^3/s$ 、 $20m^3/s$ 、 $30m^3/s$ の4パターンについて計算を行った。計算対象期間は2008年7月18日~2008年8月7日までの3週間(最初の1週間は助走期間)であり、温排水の流量は期間中一定とした。

都市排熱放出の影響評価に関しては、平均海面温度と表層における熱フラックスの2つの観点から行う。また、湾奥部における影響について検討するために、都市排熱放出地点から20km以内に位置する格子点についての評価を行う。

図-6は潮汐変動と平均海面温度変化の時間変動を表したものである。これを見ると最も流量の多い $Q=30m^3/s$ の時に海面温度への影響が大きいということがわかる。温排水を放出しているにも関わらず、平均海面温度が低下している時間帯が見られるのは、温排水の湧昇が海水の鉛直混合を促進していることが原因の1つとして考えられる。また、潮汐変動との相関を見ると、 $Q=10m^3/s$ 、 $20m^3/s$ のケースではあまり影響が見られないが、その他の2ケースでは下げ潮時に平均海面温度が上昇する傾向があった。

最後に、図-7は全期間(2週間)における海洋から大気へ向かう熱フラックスの増加量と都市排熱放出量の合計の比を表している。最も大気へ放出される割合が多い $Q=10m^3/s$ のケースでもその割合は70%以下であり、都市排熱量の30%は海域へ蓄えられるということがわかった。また、 $Q=30m^3/s$ の場合には、負の値を示しており、都市排熱量に加えて大気海洋界面における下向きの熱フラックスも増加するという結果となった。

6. 結論

・大阪湾を対象として海洋モデルを用い、JMA/GPVの気象データを入力可能とする数値モデルの構築を行った。

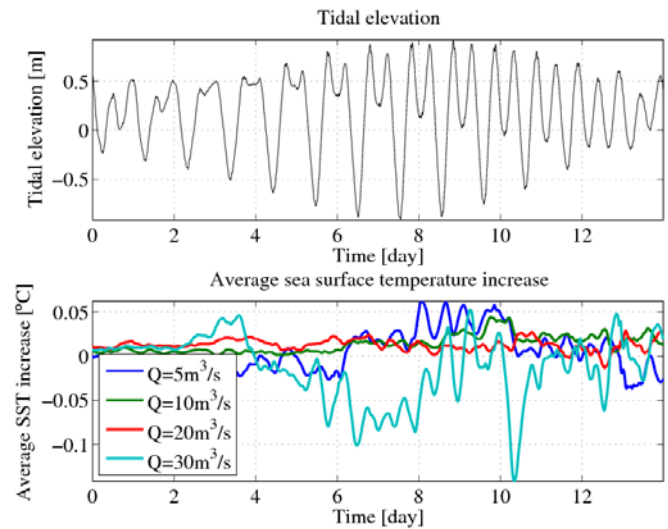


図-6 潮汐変動と平均海面温度変化

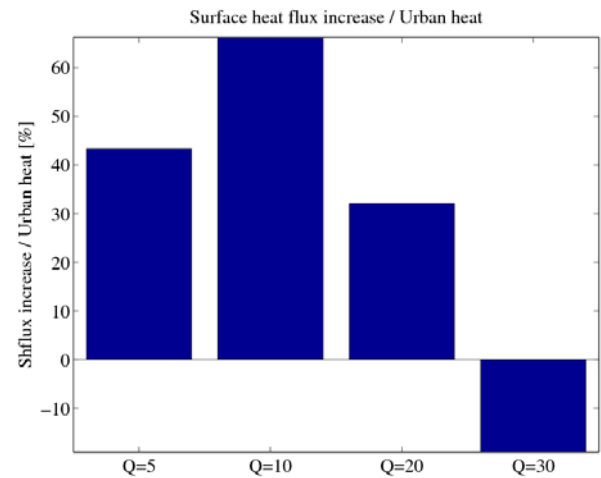


図-7 表層の熱フラックス増加量と都市排熱量の比

その結果、夏季における水温の鉛直分布を再現する物理モデルとして、乱流モデルはGLS、安定関数はKCを用いるのが良いということがわかった。

- ・ついで、そのモデルを用いて大阪湾への都市排熱放出の影響評価を行った。その結果、夏季における海洋への都市排熱放出は海面温度を低下させる効果も期待できるということが示唆された。

(参考文献)

- Fairall, C.W., E.F. Bradley, D.P. Rogers, J.B. Edson and G.S. Young(1996) : Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment, Journal of Geophysical Research, Vol.101, pp.3747-3764.
- Warner, J.C., C.R. Sherwood, H.G. Arango and R.P. Signell(2005) : Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method, Ocean Modeling, 8, pp.81-113.
- Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams(2005): The regional oceanic modeling system(ROMS), Ocean modeling, 9, pp.347-404.
- 坂井伸一・松山昌史・坪野考樹・森信人・中辻啓二・西田修三・中池悦朗・谷川陽祐(2004): DBF レーダーによる沖ノ瀬環流領域の広域流動観測, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1416-1420.
- 玉井昌宏・有光剛・花立和之・高見和弘(2007): 沿岸都市域の夏季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.
- 二宮順一・森信人・日下博幸・重松孝昌(2009): 都市気温へおよぼす大阪湾の海水温の影響, 海洋開発論文集, Vol.25, pp.285-290.
- 森信人・佐地泰昭・中尾正喜・石川貴司・重松孝昌・矢持進(2008): 数値シミュレーションを用い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55巻, pp.1346-1350.

討 議 等

◆討議 [西岡真稔 准教授]

乱流モデル，安定関数に関して既往研究との違いはあるのか。

◆回答：大阪湾における数値計算は数多くなされていますが，本研究のように乱流モデルや安定関数の物理モデルによる計算結果の変化について検討したものはありません。

◆討議 [西岡真稔 准教授]

気象条件に対する感度解析はしているのか。

◆回答：本研究では1ケースの気象条件における計算しか行っていないため，はっきりとしたことは言えません。しかしながら，本研究の結果にあるように，風速は海面温度に大きな影響を与える可能性があると考えています。

◆討議 [矢持進 教授]

乱流モデル，安定関数を選択する時は何を根拠にしているのか。

◆回答：最終的には水温の鉛直分布の再現性という観点から乱流モデル，安定関数を決定しましたが，定量的な評価は行っておりません。しかしながら，大阪湾における観測データが充実しておらず，定性的な評価しか行えないというのが現状です。

◆討議 [矢持進 教授]

海洋へ温排水を放出することによる生態系への影響はないのか。

◆回答：確かに温排水によって海水温が上昇する範囲も見られ，生態系に影響を及ぼす可能性があります。しかしながら，大阪湾湾奥部では流動が少なく，貧酸素状態が慢性化しているという現状があるため，温排水の湧昇を利用して海洋へインパクトを与えることも重要であると考えています。

◆討議 [中尾正喜 教授]

温排水の流速をリアルな値にすると影響は変わるのか。

◆回答：本研究では水平メッシュサイズの都合上，温排水の流速は数 cm/s でしたが，よりリアルな値を用いると運動量も大きく異なるため，海洋へ与える影響も変化すると考えられます。

◆討議 [内田敬 准教授]

温排水の流量は海洋全体に対してどれくらいの値なのか。

◆回答：温排水の流量は最大のケースでも $30\text{m}^3/\text{s}$ であり，大和川の流量と同程度です。しかしながら，河川水は格子点の最上層から放出しているのに対して，温排水は最下層から放出しているため，鉛直混合に関しては温排水のほうが河川水よりも大きな影響を及ぼすことが予想されます。

◆討議 [日野泰雄 教授]

今回のスケールよりも詳細な範囲で温排水が海洋へ与える影響について検討できるのか。

◆回答：本研究で用いた海洋モデルでは，低い解像度の領域と高い解像度の小領域で計算を行い，双方の計算結果を相互に交換しながら数値計算を行うネスティングと呼ばれるシステムを利用することができます。そのため，本研究で対象とした計算領域を大領域とすることで，より詳細な範囲で検討することができます。