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

Numerical Simulations of Urban Heat Release into Osaka Bay Considering Meteorological Data

森 信人¹·佐地泰昭²·重松孝昌³·中尾正喜⁴·矢持 進⁵·間瀬 肇⁶

Nobuhito MORI, Yasuaki SACHI, Takaaki SHIGEMATSU, Masaki NAKAO Susumu YAMOCHI and Hajime MASE

The stratification of upper layer of coastal water can be regarded as an unused energy source in summer. The coastal water has large capability to store the urban heat owing to the heat capacity difference between the air and water. The estimated urban heat over Sumiyoshi ward in Osaka is equivalent to 10 m^3 /s warm water if we allow 7 degree water temperature increase from stagnant environment. The numerical simulation of the urban heat release into coastal zone is performed. The larger warm water discharge gives absorption effect of short wave radiation from the atomsphere to the ocean due to enhancement of vertical mixing at the upper occean.

1.序論

近年,海に隣接する大都市におけるヒートアイランド 対策の1つとして,都市人工排熱を集積し,温排水とし て河川や沿岸部へ放出する取り組みが見られる(妹尾ら, 2006).このような対策は,大気と比較して熱容量がは るかに大きい水域に都市排熱を放出することにより,大 気へ放出される熱負荷を低減させ,ヒートアイランド現 象の緩和を目指すものである.一方,ヒートアイランド 現象が顕著となる夏季には,大都市に隣接する閉鎖性海 域では密度成層による鉛直混合阻害により底層貧酸素化 が著しい(入江ら,2004).そこで,都市排熱を含んだ 水を海域に放流することにより,大気への都市排熱放出 量の削減と閉鎖性海域の鉛直混合の両者が期待され,海 域環境の改善も想定される(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 の海面温度は海陸風の強度の重要なファクターであり, 臨海都市の気温に海面温度が影響を与えるという議論が ある.大阪湾において,玉井ら(2007)は海面温度を 1℃低下させることによって都市部の最低気温を0.3℃低 下させることができるとしている.また,二宮ら(2009) は,大阪湾の1℃の海面温度上昇は都市の平均気温を 0.6℃上昇させ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,日常の気象変動を正し

1	正会員	博(工)	京都大学准教授 防災研究所
2		修(工)	南海電気鉄道株式会社
3	正会員	博(工)	大阪市立大学教授 大学院工学研究科
4		博(工)	大阪市立大学教授 大学院工学研究科
5	正会員	農博	大阪市立大学教授 大学院工学研究科
6	正会員	工博	京都大学教授 防災研究所



図-1 システムの概要

く考慮しつつ,海域へ放出した都市排熱の海中での挙動 と熱循環として大気海洋熱交換に及ぼす影響について検 討する必要がある.既往研究(森ら,2008)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るとはいえ ない.そこで本研究では,大阪湾を対象として湾内の熱 循環を評価することができる数値モデルを構築し,気象 変動を考慮し海域の表層の流動およ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 放出することによる大気への排熱量の低減効果について 定量的な影響評価を行う.

2. 気象解析資料

気象データとしてNCEP/NCARおよび気象庁 GPV 再解 析データについて、大阪湾周辺における精度検討を行っ た.NCEP Reanalysis (以下NCEP/FNL) は全球気象解析 値であり、空間分解能は約2.5度、時間分解能は6時間で ある.一方、気象庁 GPV (以下 JMA/GPV) は気象庁の 予報値であり、ここでは、最も解像度が高MSM (時間 分解能は1時間、空間分解能は緯度0.05度×経度0.0625



図-2 大阪における風速・比湿の時間変動(青:JMA/GPV, 赤:NCEP/FNL, 黒:観測結果)

DMCE	気温[℃]		風速[m/s]		比湿[g/kg]	
RMSE	JMA	NCEP	JMA	NCEP	JMA	NCEP
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
COD	気温		風速		比湿	
COR	JMA	NCEP	JMA	NCEP	JMA	NCEP
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

表-1 観測データと解析資料のRMSEと相関係数の関係

度)を用いた.

2つの解析資料と大阪湾周辺における地上観測データ の比較を行った.観測データは大阪,神戸,和歌山の3 地点の気象庁観測データを用い、比較対象期間は2008年 8月1日~2008年8月30日の30日間とした.比較は、気 圧,風速(高度10m),気温(高度2m)および比湿につ いて行った. 図-2および表-1は、再解析データと観測デ ータの比較を表したものである.気温に関して、最小値 はJMA/GPVおよびNCEP/FNLの両者共に観測結果低く 見積もる傾向があるものの、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してい る、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るが、解析資料の水平・ 鉛直空間解像度では地表面付近の再現が難しいことが 考えられ、空間解像度が低いNCEP/FNLでその傾向は 顕著であった.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.



図-3 計算範囲と海底地形(図中の実線は比較鉛直断面, 点線は比較表層流範囲)

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.

これらの結果,NCEP/FNLに比べて,JMA/GPVの方観 測データの再現精度が高いことがわかった.神戸,和歌 山においても同様の傾向を示したため,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.

3. 数値モデルの構築

(1) 基本条件

海流の計算にはプリミティブ方程式を基礎方程式とす る ROMS モデル(Shchepetkin ら, 2005)を用いた.海底 地形は海上保安庁の深浅測量データを元に作成し,計算 対象範囲は北緯34.0~34.85度,東経134.5~135.65度と した.水平方向はデカルト座標で離散化し,解像度 500m×500mで離散化を行った.鉛直方向にはσ座標を 用い,10層に分割した.南側と西側の開境界条件として, 自由表面は重力波の伝播を考慮した条件,鉛直積分流速 は長波近似した条件,3次元流速には放射条件を用いた. また,外部境界の水位は海上保安庁の潮汐推算の値を用 いて与えた.天文潮位に対する再現性は,RMSEで 0.06m程度であった.

乱流モデルについては、GLSモデル(k- ε モデルに相当)、 Mellor-Yamada level 2.5モデル(以下MY25)の2つのモ デルを用いて比較した.次に、成層に関する安定関数は Kantha and Clayson(以下KC)とCanuto A(以下CA)の 2つのモデルについて検討を行った.

流入河川水は大阪湾に流れ込む河川の中で流量の多い 淀川,神崎川,大和川,武庫川の4河川の流入について 考慮し,河川流量は1998~2000年における6~8月の平



均の値を用いて最上層の格子から河川水が流入するよう に設定した.湾内の熱移動については、水温をスカラー 量とし、3次の風上差分を用いて移流拡散させた.表層 での運動量・顕熱・潜熱フラックスはCOARE-3.5バルク アルゴリズムを用いて算出した.短波放射は大阪湾周辺 における気象庁観測から全天日射量のデータを用いた. アルベドは0.1とし、補間方法は時空間ともに線形補間 を用いた.また、長波放射はBerliandの式を用いて気温 と雲量から算出した.

(2) 表層残差流・水温の鉛直分布の再現計算

潮汐以外のモデルの妥当性は,表層残差流と水温の鉛 直分布という2つの観点から評価を行った.乱流モデル と成層に関する安定関数の物理モデルに関して,大阪湾 の流動と熱移動を再現性についてそれぞれ2つのモデル を用いて計算し,比較した.再現計算を行う上で,潮汐 変動と気象データは観測結果の期間と適合するように設 定し、最初の7日間は助走期間とした.

図-4は沖ノ瀬環流域における表層残差流を示してお り、ベクトルは流向、コンターは流速を表している.比 較にはVHF-DBFレーダーによって得られた観測データ (坂井ら、2004)の14日間平均値を用い、計算結果は水 面下2mの値を用いた.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および渦の大きさ 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.紙面の関係上 掲載しないが、空間解像度を下げると計算される残差流 は速くなった.このため、鉛直混合に加えて、数値モデ ルでは明石海峡における水平方向の渦粘性係数が過大に 評価されている可能性がある.

一方,水温の鉛直分布は海上保安庁によるADCPを用いた定点観測観測のデータ(8月)と比較した.図-5は,



図-6 都市排熱放出地点(図-3矢印)における水面変位・風速 と海面温度上昇の関係

図-3に示した断面(St.1-St.5)における水温の鉛直分布 を示したものである.図は左上から時計回りにGLS+KC, GLS+CA,観測結果およびMY25+CAによる鉛直断面で ある.図からわかるように、乱流モデルによる鉛直混合 の影響について見ると、GLSと比較するとMY25は鉛直 混合が強めに表現され、温度躍層深さが浅く、この結果 温度成層厚が抑制されるという結果となった.また、KC とCAの安定関数のモデルによる違いは、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よりも温 度成層厚が薄くなることがわかった.以上、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.

4. 大阪湾への都市排熱放出の影響評価

前節までに得られた物理環境の再現計算モデルをもと に,大阪湾に都市排熱を放出する数値実験を行い,その 影響評価を行う.

(1) 都市排熱量の推定

ここでは、都市排熱は温排水を媒体として海洋へ放出 することを想定する.排熱量は次式を用いて温排水の流



図-7 都市排熱放出に伴なう時間平均熱フラックスと平均海 面温度分布

量に換算した.

ここで、Qは流量 (m³/s)、 H_{urb} は都市排熱量 (J/h)、 C_p は比熱 (J/gK), ∆Tは温排水と周辺海域の温度差 (℃), ρは密度 (kg/m³) を表す. 密度, 比熱はそれぞれ1027.0 (kg/m³), 3.93 (J/gK) とし, 温排水と周辺海域の温度差 は∆T=+7℃とした.温排水の放出地点は図-3に矢印で示 す大阪湾湾奥部の1格子点とし、放出地点の最下層の格 子から西向きに温排水を放水する.排熱量は8月におけ る冷房排熱量とし、既往研究(森ら、2008)と同様に原 単位法を用いて求めた.森ら(2008)では、大阪を対象 とした排熱データベースをもとに,排熱回収地域を海岸 線からの距離を関数として大阪湾奥部を対象としたが, 本研究では、大阪府大阪市住之江区とした. 同区域の8 月における冷房排熱量を原単位法により求め、この熱量 を温排水として海域へ放出することを想定し、式(1) を用いて海水温度+7度となるように等圧条件を仮定して 排出流量Qに換算をした結果,温排水の流量は9.9m³/sと 推定された. この値を参考にして, Q=5m³/s, 10m³/s, 20m³/s, 30m³/sの4パターンを放出した場合について計算



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.

(2) 都市排熱放出の影響評価

図-6は、都市排熱放出地点における水面変位、風速お よびコントロールラン(温排水無し条件)との平均海面 温度差の時間変化を表している. 図から、流量に応じて 平均海面温度差の変動が大きく、特に最も流量の多い Q=30m³/sのケースで顕著であることがわかる. 平均海面 温度差と水面変位との相関を見ると、Q=10および20m³/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. また, 温排水の放出によって海面温度は必ずしも上 昇する訳ではなく,温度が低下する時間帯も見られた. 温排水を放出しているにも関わらず、平均海面温度の低 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,温度成層が乱れて鉛直混合が促進 されるためと考えられる. また,風速が大きい時に平均 海面温度が低下が顕著であり,温排水による鉛直混合と 吹送流による水平移流の相互作用が平均海面温度の変化 に大きな影響を与えることがわかった.

図-7は、Q=30m³/sの場合の,都市排熱放出に伴う検討 対象期間中の海面における平均熱フラックスと平均海面 温度の分布を示したものである.いずれも放出点よりも 西側海域で上昇傾向を,また,南側海域では低下傾向を 示している.これは,海域の底層から放出された温排水 は,鉛直混合しながら上昇した後に陸地を右手に見なが ら西進し,明石海峡を出入りする流れによって水平混合 が促進される.一方,これを補償する流れが生じること によって,広範囲にわたる大阪湾の流動を促進する効果 を有することを意味していると考えられる.

最後に、図-8は、都市排熱放出地点から20km以内の

海域を対象範囲とした場合の,計算期間における海洋か ら大気へ向かう海面熱フラックスの変化量(海洋→大気 が正)と都市排熱放出量の比を表している.熱フラック ス比は流量に依存しており,10m³/s以上では流量の増加 に応じてほぼ単調に減少する傾向が見られた.最も大気 へ放出される割合が多いQ=10m³/sのケースでも,熱フラ ックス比は70%以下であり,都市排熱量の30%は海域 へ蓄えられ,Q=30m³/sのケースでは負の値を示しており, 温排水の混合効果によ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.

5. 結論

本研究では、気象変動を考慮した大阪湾への都市排熱 放出の影響について数値的に検討した.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、これを基に、温排水を媒 体として都市排熱を大阪湾へ放出した場合のシミュレー ションを行った.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ことを明らかに し、今後のヒートアイランド対策に向けた有効な成果を 得た.

謝辞:本研究の成果の一部は,科学研究費補助金による ものである.

参考文献

- 入江政安・中辻啓二・西田修三 (2004):大阪湾における貧酸 素水塊の挙動に関する数値シミュレーション,海岸工学 論文集,第51巻, pp.926-930.
- 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 沖ノ瀬環流域の広域流動観測,海岸工学論文集,第51巻, pp. 1416-1420.
- 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.
- 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,第23巻, pp. 285-290.
- 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. 1047-1052.
- 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.
- Shchepetkin, A.F. and J.C. McWilliams(2005) : The regional oceanic modeling system (ROMS), Ocean Modeling, Vol.9, pp. 347-404.