

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

Numerical Simulation of Influence of Urban Heat Release into Osaka Bay

森 信人¹・佐地泰昭²・中尾正喜³・石川貴司⁴・重松孝昌⁵・矢持 進⁶

Nobuhito MORI, Yasuaki SACHI, Masaki NAKAO, Takashi ISHIKAWA,
Takaaki SHIGEMATSU and Susumu YAMOCHI

The stratification of upper layer of coastal water can be regarded as an unused energy source in summer. Moreover, the coastal water has capability to store the urban heat owing to the heat capacity difference to the atmosphere. The numerical simulation of the urban heat release into coastal zone is performed. The estimated urban heat along Osaka Bay is 1kJ/h within the distance from 500 m to 5000 m from the coastal line. The urban heat released with 2000 m from the coastal line had little influence on the sea surface temperature of Osaka Bay.

1. 序 論

現在, 東京や大阪などの大都市では, ヒートアイランド現象が問題となっており, これを緩和するためのさまざまな対策が考えられている. 代表的な対策としては, 緑化や路面舗装など地表被覆の物性を変化させる対策, 風を利用するために市街地形態を変化させる対策, 建物などから排出される人工排熱を減らす対策などがある. 特に都市部における人工排熱を減らすことは, 夜間の気温に影響を与えることが可能であるが, 現実的には, 都市排熱を大気以外に放出することは困難であると考えられてきた.

しかし, 近年では, 河川や沿岸部の水域を利用し, 大気へ放出される熱負荷を低減させる取り組みが見られるようになってきている. 例えば妹尾ら (2006) は, 工業用水道を用いた都市排熱処理システムの環境負荷抑制効果について検討を行っている. また, 大阪湾などの海に隣接する大都市では, 水の熱容量が空気に比べて十分に大きいということを利用して, 都市排熱を海域へ放出し, 大気への熱負荷を軽減するという議論もなされている (中尾ら, 2007). さらに, 夏期において, 成層化する海水の温度差を未利用エネルギーとして活用することも提案されている (例えば道奥, 1994; 森ら, 2007). 都市排熱を海域へ放出した場合, 放水により湾内の海水交換が促進され, 閉鎖的な湾の水質を改善するという副次的効果も期待できる (松梨ら, 1994).

このような大規模な環境改善対策の効果を定性的にも

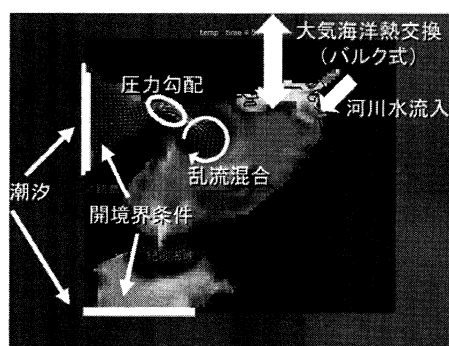


図-1 今回数値モデルで考慮した物理過程

定量的にも評価するためには数値モデルの活用が必要となる. これまで, 大阪湾については数多くの研究が行われている一方 (例えば入江ら, 2004), 都市排熱と大阪湾の関係については検討されていない.

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, 大阪湾の熱移動を正確に再現するモデルの構築を行う. ついで, 大阪湾臨海部で発生する都市排熱量の推定を行い, 温排水を媒体として都市排熱を海域へ放出した場合のシミュレーションを実施し, その影響を評価する.

2. 数値モデルの概略

海流の計算にはプリミティブ方程式を差分方程式とするROMSモデル (Shchepetkinら, 2005) を用いた. 考慮した物理過程は, 潮汐, 乱流混合, 河川水流入, 大気海洋熱交換である. 図-1に示すのはその概略であり, 側方境界条件を含めた詳細は以下のようにまとめられる.

(1) 基本条件

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

1 正 会 員 博(工)京都大学准教授 防災研究所
2 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科
3 博(工)大阪市立大学教授 大学院工学研究科
4 大阪市立大学大学院工学研究科
5 正 会 員 博(工)大阪市立大学准教授 大学院工学研究科
6 正 会 員 農博 大阪市立大学教授 大学院工学研究科

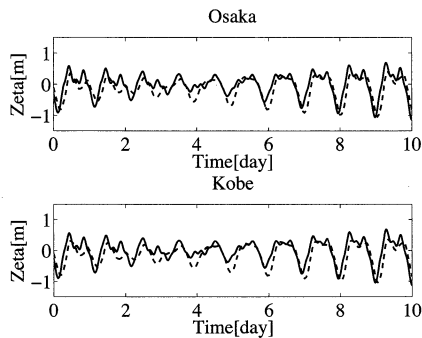


図-2 大阪及び神戸における潮位の比較 (実線：計算結果, 点線：天文潮位)

表-1 建物用途分類の整理

部門分類	大阪市分類	整理後
民生部門	戸建住宅	集合住宅
	共同住宅	
	店舗	商業施設
	事務所	
	遊興・娯楽施設	
	文教施設	業務施設
	学校	
	庁舎建築	
	宿泊施設	宿泊施設
	医療施設	医療施設

1km×1kmで分割を行った。鉛直方向には σ 座標を用い、20層に分割した。

(2) 開境界条件

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、外部境界の水位として、主要4大分潮の振幅・遅角を与え、一度計算を行い、そのスペクトル解析の結果から、湾内の水位が天文潮位に適合するように外部境界の逆推定を行った(図-2参照)。

(3) 乱流モデル

排熱の拡散に重要な乱流モデルについては、Mellor-Yamada level 2.5モデル、GLSモデル(Umlaufら, 2003)の各モデルを用いて比較した。DBFレーダーによる沖ノ瀬環流域の小潮時、大潮時における1日平均残差流の流動観測と比較した結果、表面流のパターンの再現性が優れていたMellor-Yamada level 2.5モデルを用いることにした。

(4) 流入河川水

淡水の影響を見るために、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

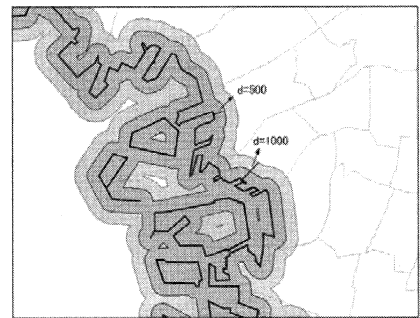


図-3 臨海エリアの設定 (d=500m, 1000mの例)

川の4河川の流入について考慮した。河川流量は平成10～12年における6～8月の平均の値を用い、流速と水温の鉛直分布は鉛直20層に均等分割して与えた。

(5) 海面での熱収支

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。日射については緯度から月平均短波放射量を与え、これに日変動を考慮した(Niemelaら, 2001)。表層での熱フラックスはバルク式を用いて短波及び長波放射による熱交換を考慮した。

3. 大阪湾臨海部排熱量の推定

(1) モデル条件

大阪湾臨海部の排熱規模がどの程度であるか把握するため、既存建物を対象とし、大阪市都市計画局DBより7月、8月、9月の冷房排熱を原単位法により算定した。臨海部の設定は海岸線より一定距離 $d=500\text{m}$, 1000m , 2000m , 5000m を対象として(図-3参照)、大阪市計画調整局による建物分類を表-1のように整理した。

(2) 計算方法

5つの建物用途分類毎に想定範囲内における臨海部の月・時刻別排熱の積分量を求めた。以下に手順を示す。

1. 「年間熱負荷原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$) $\times$ 月別負荷変動割合 $\times (1+1/\text{COP})$ 」より月別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{月}$) を求める。
2. 「月別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{月}$) / その月の日数」より日別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$) を求める。
3. 「日別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{日}$) $\times$ 時刻別負荷変動割合」より時刻別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) を求める。
4. 「時刻別原単位 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) $\times$ 延床面積 (m^2)」より月・時刻別排熱量 (MJ/h) を求める。

年間熱負荷原単位、および月・時刻別負荷変動割合は空気調和衛生工学会(2000)の値を用い、冷房機器などのエネルギー消費効率の目安として使われるCOP(成績係数)は3と仮定した。計算例として $d=500\text{m}$ の場合の建物用途毎の熱負荷を延床面積とともに表-2に示す。

表-2 建物用途別の年間熱負荷原単位 (空気調和衛生工学会, 2000) と延床面積 ($d=500\text{m}$ の例)

建物用途	冷房負荷(MJ/m ² ・年)	延床面積(m ²)
集合住宅	33.488	1.04×10^6
業務施設	293.02	8.52×10^5
商業施設	523.25	2.59×10^6
宿泊施設	418.6	1.30×10^5
医療施設	334.88	6.37×10^4

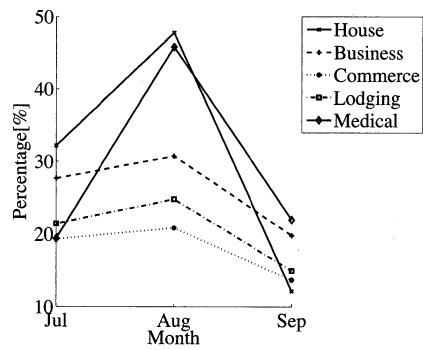
図-4に示すのは、冷房排熱の月・時刻別負荷変動であり、月別にみると、全建物用途において8月が最も高い割合となっている。特に集合住宅と医療施設に関しては、8月の冷房排熱の月別負荷変動は45%を超えており、他の月との差が激しいということがわかる。その他の建物用途の場合では、7月と8月の冷房排熱の月別負荷変動はほぼ同じ割合を示し、9月に減少するという傾向が見られた。また、時刻別にみると、1時から5時にかけて全建物用途に共通して変動割合が低くなっている。しかし、ピークの時間帯は建物用途によって異なっており、集合住宅を除く建物用途では、昼間もしくは夕方に迎えているが、集合住宅では夜にピークを迎えている。

図-5は、8月における $d=500\text{m}$ の場合の排熱量の時間変化を建物用途別に表したものであり、住宅施設・宿泊施設・医療施設で発生する排熱量は一日を通して非常に少ないということがわかる。商業施設・業務施設においても、朝と夜はあまり排熱が発生せず、主に昼間に発生しているということがいえる。特に商業施設で発生する排熱量が多く、14~15時にかけて全排熱量のうちの75%以上が商業施設で発生するという結果となった。

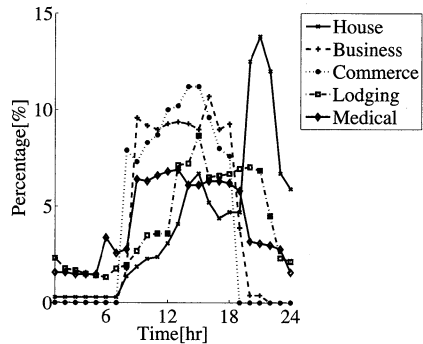
このように、月・時刻によって排熱量は異なるが、8月の日中に発生する排熱は突出しており、これが夏期における最大値となる。そこで本研究では、これを時間平均した排熱量を基に、温排水を媒体として海域へ放出することを想定した。排熱量を流量に換算する式は、

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

を用いた。ここで、 Q_{bar} は流量(m³/s)、 H_{urb} は都市排熱量(J/h)、 C_p は比熱(J/g・K)、 ΔT は温排水と周辺海域の温度差(°C)、 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/g・K)とし、温排水と周辺海域の温度差は+7°Cとした。都市熱の放出地点は水平方向においては北緯34°39′、東経135°23′とし(図-6(a)参照)、最下層の格子から西向きに温排水を放水した。森ら(2007)が示したように、比較的水温の低い底層の海水を取水して未利用エネルギーとして活用することも考えられるが、ここでは放水のみを対象とする。



(a) 月別負荷変動 (%)



(b) 時刻別負荷変動 (%)

図-4 冷房排熱負荷の月・時刻別変動割合

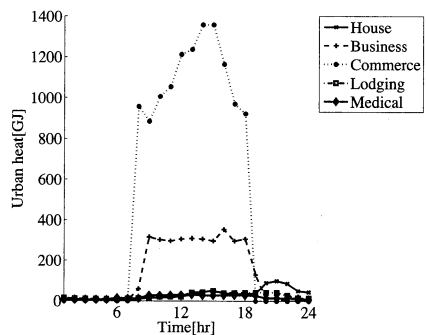


図-5 8月における冷房排熱量の時間変化 ($d=500\text{m}$ の場合)

4. 結果と考察

式(1)を用いて臨海部における排熱量を流量に換算した結果、 $d=500\text{m}$ では $7.0\text{m}^3/\text{s}$ 、 $d=1000\text{m}$ では $9.2\text{m}^3/\text{s}$ 、 $d=2000\text{m}$ では $13.5\text{m}^3/\text{s}$ 、 $d=5000\text{m}$ では $48.2\text{m}^3/\text{s}$ となった。

図-6, 7は、大潮・小潮時について排熱量の大きな8月の $d=500\text{m}$ 、 2000m 、 5000m のケースの表層の流速と排熱による表層の水温上昇の水平分布を表したものである。 $d=500\text{m}$ のケースにおいて、水温上昇の最大値は大潮時には約 0.34°C 、小潮時には約 0.1°C 、 $d=2000\text{m}$ の

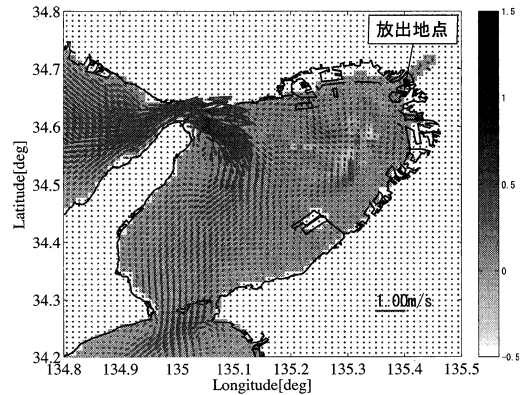
ケースにおいては、水温上昇の最大値は大潮時には約 0.42°C 、小潮時には約 0.13°C となった。しかし、想定する中で最大の流量である $d=5000\text{m}$ のケースにおいて、水温上昇の最大値は大潮時には約 1.3°C 、小潮時には約 2.5°C となっており、排熱の影響が大きく寄与しているということがわかる。大潮時は、水平方向の熱拡散が大きく、沖側に数個の渦対が見られ、パターンは同じながらも放水量に応じて温度差の強度が大きくなっていることがわかる。一方、小潮時の水温上昇は沿岸部に集中し、その時の水温上昇は大きな値となっている。これは潮流が弱く、移流拡散が不十分であることが原因として考えられる。さらに、 $d=5000\text{m}$ のケースの小潮時においては、温水が河川を遡上しており、淀川における表層水の水温上昇も大きい。

図-8は排熱による表層の水温上昇が 1°C 以上になる面積を示しており、 $d=2000\text{m}$ までの範囲で発生する排熱量では、潮汐によって生じる流動や拡散により、表層にはほとんど影響が表れない。しかし、 $d=5000\text{m}$ の範囲で放出する排熱量では、最大で約 30km^2 の範囲で表層の水温が 1°C 以上上昇しており、都市排熱が海域へ及ぼす影響は大きい。

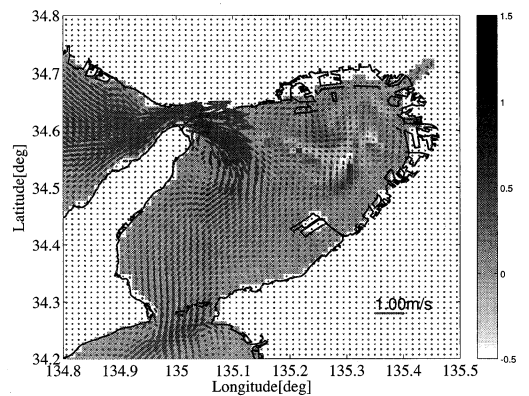
最後に、図-9は北緯 $34^{\circ}30' \sim 34^{\circ}41'$ 、東経 $135^{\circ}00' \sim 135^{\circ}23'$ 内の海域を対象範囲とした場合における、排熱による表層の平均水温上昇の時間変化を示しており、海岸線から 2000m までの範囲で発生する排熱量を大阪湾に放出した場合では、平均水温が低下している部分もあり、海面の温度上昇はほとんど見られないことがわかった。排熱なしの結果と比較して、排熱放出時に海水温度が一時的に下がる領域は、放水流による底層の低温水の湧昇であると思われる。しかし、海岸線から 5000m の範囲で発生する排熱量では、表層の平均水温は最大で約 0.07°C 上昇するという結果となっており、先ほどと同様に海域への悪影響も考えられる。

5. 結 論

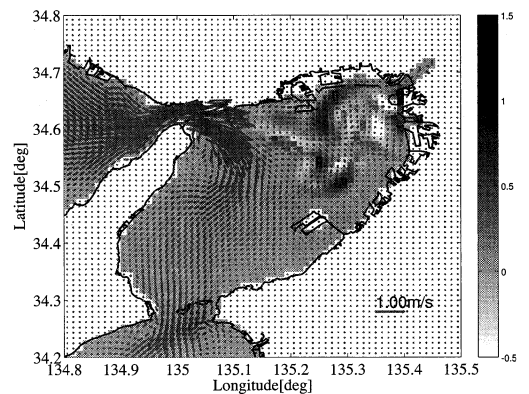
本研究では、海域への都市排熱放出によるヒートアイランド対策の実用化に向けて、大阪湾の熱移動をシミュレートする数値モデルを構築した。ついで、大阪湾臨海部の排熱規模がどの程度であるか把握するため、海岸線より一定距離 $d=500\text{m}$ 、 1000m 、 2000m 、 5000m のエリアを対象として、夏期の月・時刻別の冷房排熱量を単単位法により算定した。これを基に、温排水を媒体として都市排熱を大阪湾へ放出した場合のシミュレーションを行った。その結果、表層の水温上昇は大潮時と小潮時で大きく異なった。また、 $d=2000\text{m}$ までの範囲で発生する排熱量では、表層の水温上昇が 1°C 以上になる範囲は 0 と影響がないことがわかった。



(a) $d=500\text{m}$



(b) $d=2000\text{m}$



(c) $d=5000\text{m}$

図-6 大潮時における表層の水温上昇の分布（コンター：排熱ありと排熱なしの温度差、ベクトル：流速）

今後、放水方法および大気との相互作用について検討を行う予定である。

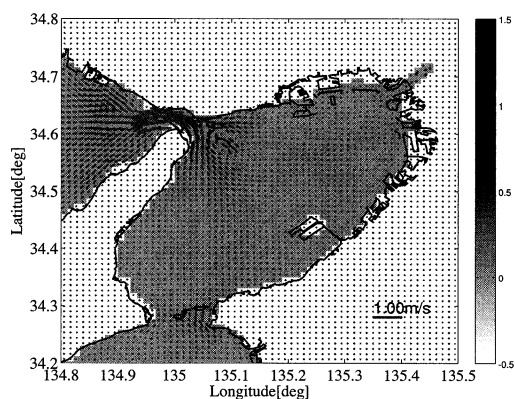
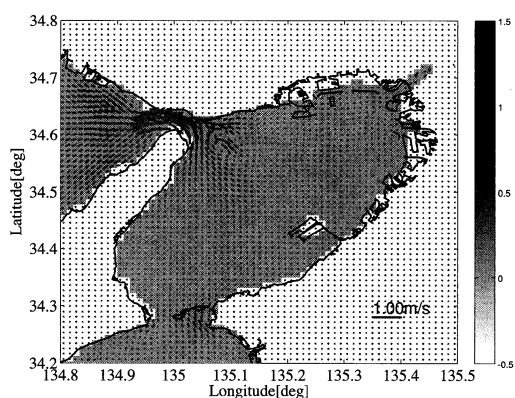
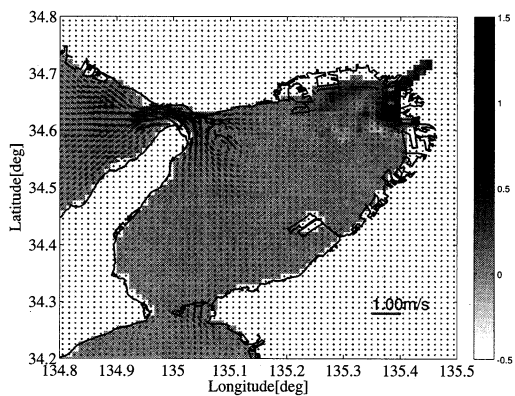
(a) $d=500\text{m}$ (b) $d=2000\text{m}$ (c) $d=5000\text{m}$

図-7 小潮時における表層の水温上昇の分布 (コンター: 排熱ありと排熱なしの温度差, ベクトル: 流速)

謝辞: 本研究の成果の一部は, 科学研究費補助金 (20360263, 代表: 中尾) によるものである。

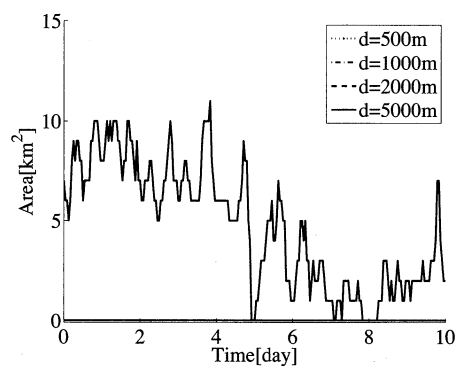


図-8 表層水温上昇が 1°C 以上の面積の時間変化

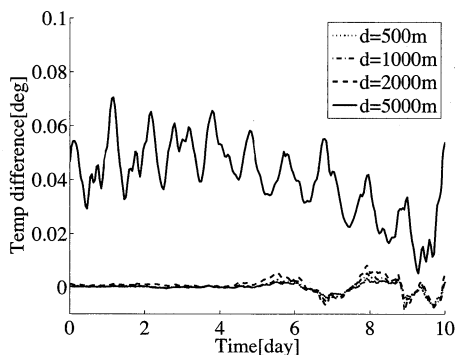


図-9 排熱による表層の平均水温上昇の時間変化

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.
- 空気調和衛生工学会 (2000): SCHEDULE Ver2.0 - 生活スケジュール自動生成プログラム -
- 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.
- 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エネルギーの利用, 空気調和・衛生工学会学術講演会, 4p.
- 松梨史郎・坂井伸一・角湯正剛 (1994): 冷却水取放水を利用した内湾の水質改善効果, 水工学論文集, 第38巻, pp.215-222.
- 道奥康治 (1994): 成層水域からの熱エネルギー抽出に関する試算, 水工学論文集, 第38巻, pp.229-234.
- 森 信人・大石智洋・中尾正喜・中井真由美・重松孝昌・矢持進 (2007): 港湾内未利用エネルギー利用とこれに関連する温度成層の特性把握に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1316-1320.
- Niemela, S., P. Raisanen and H. Savijarvi (2001): Comparison of surface radiative flux parameterizations, Atmospheric Research 58, pp.141-154.
- Shepetchkin, A.F. and J.C. McWilliams (2005): The regional oceanic modeling system (ROMS), Ocean Modeling, 9, pp.347-404.
- Umlauf, L. and H. Burchard (2003): A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, Journal of Marine Research 61(2), pp.235-265.