

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

Thermal Energy Usage for Heat Pump in Coastal Area and Related
Characteristics of Thermal Stratification

森 信人¹・大石智洋²・中尾正喜³・中井真由美⁴・重松孝昌⁵・矢持 進⁶

Nobuhito MORI, Tomohiro OHISHI, Masaki NAKAO, Mayumi NAKAI
Takaaki SHIGEMATSU and Susumu YAMACHI

The stratification of upper layer of coastal water can be regarded as an unused energy source for heat pump systems near coastal area in the summer. This study examines feasibility of heat pump system for coastal area using a cold water mass beneath the thermal stratified upper water. The field observations for thermal characteristics in the harbor were conducted through the summer season. The characteristics of stratified water are investigated by the field observations and numerical simulations. The breakdown of stratification is also examined by the numerical simulations for the heat pump system using the coastal water.

1. 序 論

都市域の気圏に放出される排熱のうち約 1/2 は建物由来の排熱で、そのうち約 45 % が業務系建物からの顕熱排熱であるとの試算がある。建物由来の排熱を削減することは、都市域における快適な生活環境を実現する上で重要となる。一方、臨海都市の沿岸海域では、夏季に表層が成層化し鉛直循環が阻害され、閉鎖性が強いために水平流動も弱く、その結果、底層の貧酸素化を招くなどの深刻な問題を抱えている。このような夏季の底層水の水温は表層水のそれより 5～10℃低く、比較的気象などの擾乱の影響を受けにくく、安定した水温を保っている。

一般的に、海水を冷却水として利用することは、化石燃料・原子力発電所では古くから行われている。実務的には、出口近傍の噴流域から低温拡散域の遠方域までを精度良く予測できる密度成層下における 3 次元温排水拡散予測モデルが開発されており(例えば坂井ら, 2004)、水中放水時の流れの水温、密度、流速の高精度な拡散範囲の予測が可能となっている。一方、海水を利用した地域熱供給システムでは、発熱量の規模から必要な流量がそれほど多くなく、またコストの面からも大規模な取放水路の設置が困難であるため、港湾奥部の泊地への立地が想定される。それゆえ、このような海水を利用した小

規模な熱供給システムの利用において重要となるのは泊地近くの水深数 m の極浅海における成層化した海水の安定性となる。一般に、泊地内で水温の鉛直分布は港の形状および気象・海象条件、特に海上風による海面表層の攪乱に左右される。例えば、Durski ら(2004)は、K Profile Parameterization と level 2.5 Mellor-Yamada scheme による表層乱れの生成と特性について比較を行っている。その結果、風応力による表層境界層の変化は Richardson 数に依存し、scheme により層厚が異なることが指摘されている。また、Mellor・Blumberg(2004)は、風波が温度躍層の崩壊に重要な役割を担っていると指摘している。水面波の碎波を考慮した表層混合については、Craig・Banner(1994)のモデルが有名であるが、港内などの小領域を対象とした検証は行われていない。

本研究では、現地観測により夏季の港湾内極浅海海域における成層特性を把握するとともに、実測データに基づいて、海水を利用した熱供給システムを調査海域に適用した場合の効果について検討を行う。ついで、熱供給システムに重要な港湾内の温度成層の発達と気象変化による崩壊過程等について数値シミュレーションを行い、熱供給システムに及ぼす気象・海象条件の影響を考察する。

2. 研究対象地域および熱利用システムの概要

研究対象地点として大阪湾湾奥部に位置する南港外港 O's 岸壁(以下、対象地域と表記)を選定した(図-1)。この地点は大阪湾湾奥に位置し、商業地に隣接した長さ 1000 m、幅 300 m、水深約 10 m の矩形型の泊地である。対象領域では、海水を冷却水として利用した地域冷暖房システムが既設設備として導入されている。以下では、

1 正会員 博(工) 大阪市立大学講師 大学院工学研究科
2 筑波大学大学院環境科学研究科
3 博(工) 大阪市立大学教授 大学院工学研究科
4 元大阪市港湾局
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 農学博士 大阪市立大学教授 大学院工学研究科

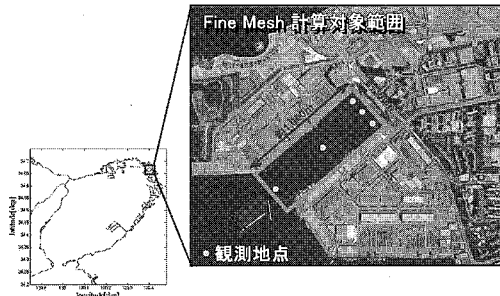


図-1 全体の計算領域、対象地点および観測点の関係 (大阪湾南外港 O's 岸壁付近)

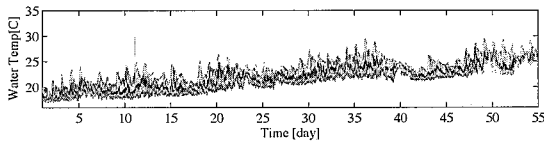


図-2 観測された水温分布の一例 (2006年6月2日～7月末)

2006年夏季(6月～8月)に対象地点において実施した気象・海象観測結果について概略を説明する(詳細は中尾ら, 2007を参照)。

大阪港内で夏期温度成層の挙動を把握するため、水温の垂直分布の計測を行った。海水温度の計測場所を図-1に示す。水温測定にはT型熱電対を用い、海底から約1m間隔に熱電対を取付け観測を行った。計測のサンプリングは1分、10分間の平均値を代表値とし、水深はOPを基準とした。

図-2に示すのは、観測された水温分布の一部分である。図の濃い実線がDL-3.80m、一番上に位置する淡色の実線がDL+0.2mの地点で観測された水温である。図より、対象地点では6月初旬には温度成層が既に形成されていることがわかる。表層に近いDL+0.2mの水温は、全日射量、あるいは、気温がピークを迎えた後、2～4時間程度遅れてピークが現れている。また、図-2に示す水温変化より、6、7月には、底層部(DL-3.80m)での水温は非常に緩やかに上昇し、1日あたりの水温変動は1℃未満程度であることがわかる。一方、全日射量の多い日には、表層と底層の水温差が非常に大きく、水深4mの違い(DL+0.2mと-3.80m)で、6℃程度の水温差になることもあった。

7月も6月同様の傾向であるが、7月17日～7月20日(図-2中40日前後)における全日射量は非常に少なく、特に7月18日には風速10m/sを超える強風が吹いて成層が崩壊したため、この4日間でDL+0.2mでの平均温度は、約4℃低下している。藤原ら(1989)は、瀬戸内海での成層崩壊の限界風速 U_c について調べており、平均水深 h 、湾の長さ L を持つ湾における成層

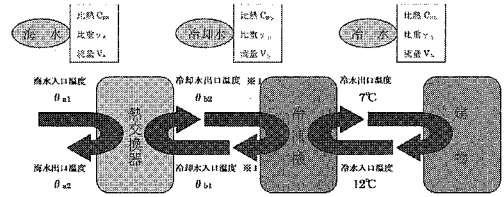


図-3 海水利用の地冷暖房設備の概略

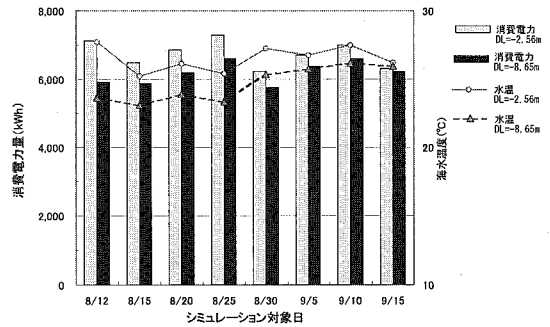


図-4 取水位置による消費電力の差

密度差を $\Delta\rho$ とおいたとき、 $U_c = \sqrt{2\Delta\rho gh^2/C_D\rho_a L} = 4 \sim 12 \text{ m/s}$ で成層崩壊が生じると検討を行っている。ここに、 C_D は水面における抵抗係数、 g は重力加速度、 ρ_a は気体密度である。また、入江ら(2003)は、尼崎西宮芦屋港を対象に密度躍層崩壊と限界風速の関係について調べ、貧酸素水塊との関連について報告している。今回の観測結果対象地域における成層崩壊限界風速は約10.3m/sであり、7月5日と7月18日がこれを上回っている。また、9月中旬以降は夜間において上層に近い部分での水温のほうが低くなる逆転現象が継続して観測された。

以下では観測された水温の鉛直分布の時系列データを利用して、これを沿岸部の地域冷暖房施設の未利用エネルギーとして利用した場合の効果と、成層崩壊の再現計算を行う。

3. 底層水の未利用エネルギーとしての利用

対象地域では、海水を利用した地域熱供給システムが導入されている。海水の取水口・放水口は設備前面に面する長さ約350mのO's岸壁(水温計測地点)に位置し、取水口は護岸のDL-2.58m、放水口は取水口とほぼ同じ高さに設置されている。そこで、対象地域に冷凍機を導入し、港内の低温な底層水の利用が可能であると仮定した場合における環境性能の改善についてのシミュレーションを行う。まず対象地域に導入されている地域熱供給システムのシミュレーションを行い、未利用エネルギーである低温底層水を利用した場合の省電力効果につい

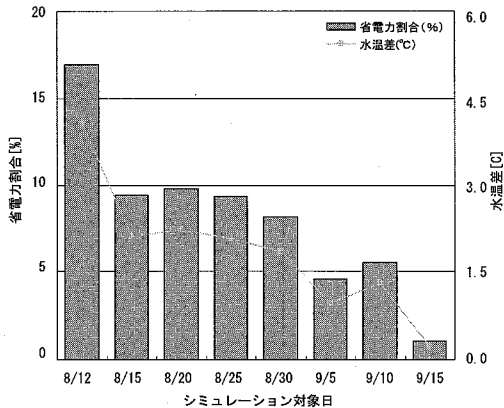


図-5 底層水取水によるエネルギー削減効果

て検討する。

既存設備の冷房負荷値と水温の実測値を用いて、低温底層水利用時のターボ冷凍機の運転シミュレーションを行った。本シミュレーションに用いたシステム構成を図-3に示す。熱交換器～冷凍機間での配管の保温は十分であると考え、配管経路内での熱の出入りは考慮しないものとした。消費電力は以下の連立式より計算を行った。

$$H = E + Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = E \times COP \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$H = C_{pa} \gamma_a V_a (\theta_{a2} - \theta_{a1}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$H = C_{pb} \gamma_b V_b (\theta_{b2} - \theta_{b1}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$H = KA \Delta \theta_m \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで H は排熱量、 Q は冷房負荷、 K は熱通過率、 A は伝熱面積、 V_a 、 V_b は流量、 $\Delta \theta_m$ は対数平均温度差であり、添字の a 、 b は海水と熱交換機および熱交換器と冷凍機間を意味し、1、2 は入口および出口温度を意味する。また定数は、海水の比熱 $C_{pa} = 0.96$ (kcal/kg·K) = 4.006×10^{-6} (GJ/kg·K)、比重 $\gamma_a = 1025$ kg/m³、水 (冷却水・冷水) の比熱 $C_{pb} = 1$ (kcal/kg·K) = 4.186×10^{-6} (GJ/kg·K)、比重 $\gamma_b = 1025$ kg/m³ である。未知数は、 E 、 H 、 θ_{a2} 、 θ_{b1} 、 θ_{b2} 、 COP 、 KA の7つとなり、これらの連立方程式を準ニュートン法により解くことで、消費電力 E を求めた。

シミュレーション対象日は、8月、12日、15日、20日、25日、30日とした。シミュレーション対象日における既存取水位置 DL-2.58m と仮想的に底層 DL-8.65m に設置した場合での消費電力量算出を図-4に示す。さらに図-5および表-2に示すのは、省電力量割合と水温低下割合の関係である。紙面の関係上示していないが、DL-3.80m に取水口を設置した場合と比較して、DL-8.65m に設置した場合の消費電力量の削減が顕著であった。取水深度が約6m 低くなることによ

表-1 消費電力量算出シミュレーション結果

Date	EPC(kWh) $h = -2.58m$	EPC(kWh) $h = -3.80m$	削減(%)	温度差(°C)
8/12	7,127	5,920	16.9	4.08
8/15	6,499	5,886	9.4	2.11
8/20	6,862	6,192	9.8	2.21
8/25	7,305	6,622	9.4	2.07
8/30	6,255	5,747	8.1	1.84
9/5	6,703	6,396	4.6	0.95
9/10	6,994	6,607	5.5	1.29
9/15	6,318	6,251	1.1	0.23

表-2 計算条件

	広 域	南港外港周辺
東西範囲	北緯 33.85 ~ 34.90 度	1.0 km
南北範囲	東経 134.35 ~ 135.70 度	0.3 km
空間解像度	1/30 度	10 m
時間解像度: 3D	60 s	5 s
時間解像度: 2D	2 s	1 s

る省電力割合は、8月で8～17% (水温差 1.8～4.1℃) 9月で1～6% (水温差 0.2～1.3℃) であった。8月12日は、海水温度差が4.1℃もあることから、省電力割合についても17%という非常に高い数値を示した。12日を除いた、8月のシミュレーション対象日の平均値をとっても約9%の省電力量効果が得られることがわかった (平均水温差 2.06℃)。6、7月における DL-8.65m の実測データがないためにシミュレーションを実施していないが、8月のシミュレーション結果から類推すると温度成層の発達した6、7月においては、15%程度以上の省電力効果が得られることが期待できる。

以上のように、対象地域の熱負荷能力にも依存するが、小規模な地域熱供給システムにおいても港湾内の取水口位置を温度躍層より下層に設けることにより熱効率から見て10%以上の省エネ効果が得られることがわかった。熱供給システムの効率、港湾内の安定した低温底層水の存在に強く依存する。港湾内の海水流動は気象・海象の影響を受けるため、地域熱供給システムの取水口の位置を決定するには、これらの影響を予め予測する必要がある。以下では、観測データの無い地域における未利用エネルギー活用のための温度成層発達および風による崩壊の数値シミュレーションを実施し、その妥当性について検討を行う。

4. 温度成層に関する数値計算

熱供給システム利用効果に最も重要なのは泊地内の低温底層水の安定性である。一般に、閉鎖性の強い泊地内で水温の鉛直分布は気象・海象条件に左右される。そこで、日射による温度成層の発達、および風波による崩壊の数値シミュレーションを実施した。まず大阪湾を対象とした広域の計算を行い、この計算結果を利用して対象

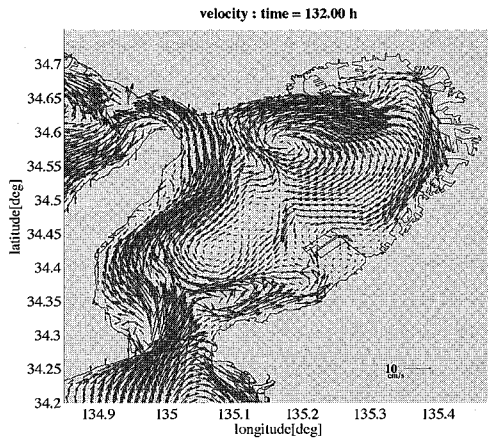


図-6 広域の計算結果：鉛直平均速度

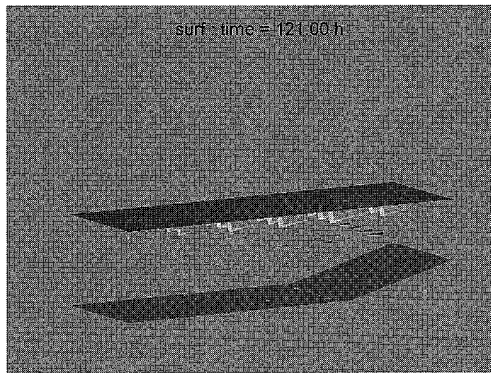
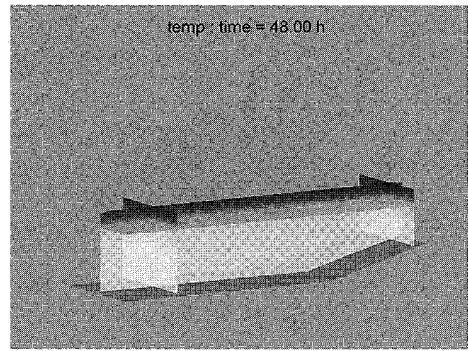


図-7 港内領域の計算結果：瞬時流速

海域内の高解像度計算を行った(図-1)。両者の計算は、Regional Ocean Modeling System (ROMS, Shchepetkin and McWilliams, 2005) を用いて行った。詳細な計算条件を表-2 に示す。海底地形は、(財)日本水路協会のデジタル海岸線及び等深線データを地形データとして利用した。また潮汐データは TPXO.6 モデルを使用し、気温等の気候値は COADS を利用した。

鉛直混合モデルには level 2.5 Mellor-Yamada scheme を用い、特に表層混合については水面波の碎波を考慮した Craig・Banner(1994) のモデルに Charnok の式と Janssen の式を組み合わせた風波の粗度高さと波齢の関係を用いたモデルを適用した。また比較のために、鉛直混合に $k-\varepsilon$ モデルを用いた場合の計算も行った。港湾スケールの境界条件は、潮汐は湾スケールの計算結果から気温、水蒸気量および太陽からの短波放射については観測値を元に与え、観測結果をもとに夏季の特徴的な期間である 2006 年 7 月 12 ～ 20 日を対象に 1 週間分の計算を行った。

図-6 および図-7 に示すのは、大阪湾全体および南港



(a) 計算開始48時間後

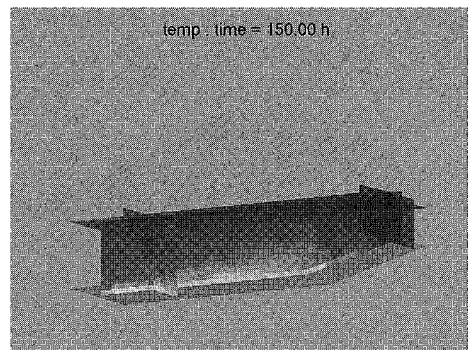
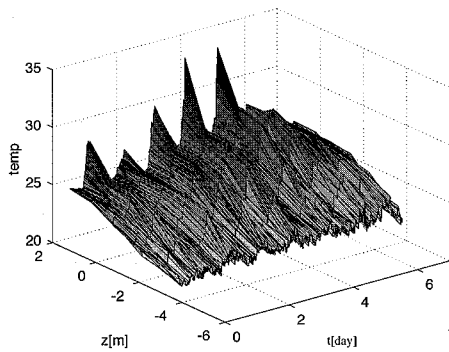
(b) $U_{10}=10\text{m/s}$ の一様風生成後6時間

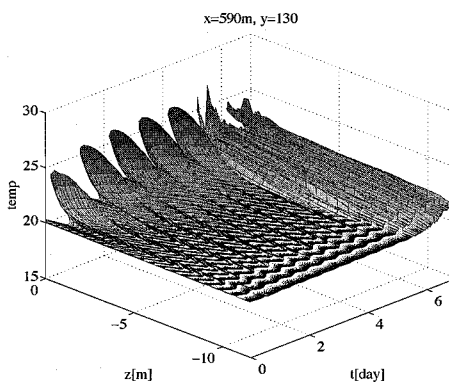
図-8 O's 岸壁周辺の水温の鉛直・水平分布 (黒色：25 度 → 白色：20 度)

外港対象地区の計算結果である。港内を対象とした計算では、風速を与えず気温の日変化のみを与えて温度成層の発達を計算した。具体的には計算初期から 120 時間までは無風で日周期を考慮した一定の日射量を与え、成層が生成された後、港内入口から奥に向かって風速 $U_{10}=10\text{ m/s}$ の一様風を起こし、風波による鉛直混合による成層の崩壊を模擬した。この気象条件は、2006 年 7 月 15 日前後の気象条件を模擬したものである。図-7 に示すのは、一様風生成時の港内の瞬時流速である。図中のベクトルは流速を示し、表層で約 30 cm/s の表層流が生成されている一方で、中層以深では補償流としてゆっくりとした沖向き流れが生じている。

図-8 に示すのは、対象泊地内の水温分布の計算結果である。前に述べたように、計算初期から 120 時間までは無風で日周期は考慮した一定の日射量を与え、計算開始 120 時間後から $U_{10}=10\text{ m/s}$ の風を港の長手方向に吹かせている。図-8(a) 無風時および(b) 強風時からわかるように、無風条件で日射により発達した温度成層は、風波による摩擦応力による吹き寄せと躍層面の振動を経て、碎波による鉛直混合が進むという結果が得られた。



(a) 観測結果



(b) 計算結果

図-9 水温の鉛直分布の時間変化 (5日目に風波による成層崩壊を観測, $z=0$: 水面)

図-9に示すのは、風波による鉛直混合が生じたイベント前後の定点における水温分布の現地観測結果とこれを模擬した計算結果である。観測結果は、水面下4m ($z=-4$ m) までしか計測点が無いが、表層付近で発達している温度成層が、10 m/s 前後の風が吹き始めた5日目に崩れていることがわかる。観測結果と比べて、計算結果は水表面近傍の水温の鉛直分布形状が異なり、急峻な鉛直分布を持っている。しかし、風の吹き始め(5日目)からの成層崩壊の再現については両者に大きな違いはない。また風波による鉛直混合により温度成層は崩れるものの底層水の温度上昇は見られず、熱供給システムには大きな影響がないことがわかる。この他、潮汐による泊地内の海水交換、泊地の規模と日射量による成層発達についても検討を行い、これらの要因の底層水の温度変化への影響を検討した。

5. 結 論

本研究では、エネルギー工学的立場から、海水利用の促進を目的として、海水温度の実測・推定モデルの提案、

底層水利用に対する省エネルギー効果の推定を行った。大阪港南港外港の港内という限定された小領域においても、6月から8月にかけて安定した温度成層が形成され、その他の観測地点における観測結果からも、大阪港内の広範囲において比較的類似した温度分布を示すことがわかった。

ついで、各種気象データおよび実測により得られた海水温度データより省エネルギー効果の推定を行い、既存の地域冷暖房設備における負荷データを元に消費電力量算出のシミュレーションを行った。その結果、温度成層発達時に比較的温度変化の大きな推移であったこともあり、取水深度が約1.2 m低下するだけでも、6月～8月の平均水温差は0.84℃もあり、平均省電力効果は約4.2%もあった。また、取水深度を約6 m下げると、同期間の平均水温差は2℃程度、平均省電力効果は12%以上期待できることがわかった。

最後に、温度成層の発達および強風時の成層崩壊の数値計算を行い、その妥当性について検討を行った。これらの結果を総合的に活用することにより、夏季における温度成層の変化とこれを利用した熱供給システムの設置の為の予測が可能となった。

本研究の一部は住友財団環境研究助成(代表者: 森 信人)の援助による成果であり、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- Craig, P. and M. Banner (1994), Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer, *J. Phys. Oceanogr.*, 24, pp. 2546-2559.
- Durski, S. M., S. M. Glenn, and D. B. Haidvogel (2004), Vertical mixing schemes in the coastal ocean: Comparison of the level 2.5 Mellor-Yamada scheme with an enhanced version of the k profile parameterization, *J. Geophys. Res.*, 109, C01015, pp. 10.1029/2002JC001702.
- Mellor, G. and A. Blumberg (2004), Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, pp. 693-698.
- Shchepetkin, A. F. and J. C. McWilliams (2005), The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, *Oceans Moldeing* 9, pp. 347-404.
- 酒井伸一・松梨史郎・仲敷憲和・坪野考樹(2004), 密度成層下における3次元温排水拡散予測モデルの適用性—水中放水方式による水理実験結果との比較—, U03059, 電力中央研究所。
- 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低層低温エネルギーの利用: 第一報港湾内垂直温度分布の特徴, pp. 4.
- 藤原建紀・高杉由夫・肥後竹彦(1989), 風による成層崩壊現象の発生頻度と発生限界風速, 沿岸海洋研究ノート, 27, 1, pp. 70-75.
- 入江政安・西田修三・中辻啓二・金俊憲・湯浅楠勝(2003), 都市域近傍の閉鎖性水域における貧酸素水塊の挙動に及ぼす気象の影響, 海岸工学論文集, 50, pp. 991-995.