

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360263

研究課題名(和文) 海水の熱ポテンシャルを利用した臨海都市の水圏・気圏環境の再生

研究課題名(英文) Restoration of the hydrosphere and atmosphere in coastal cities utilizing the thermal potential of sea water

研究代表者

中尾 正喜 (NAKAO MASAKI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60381977

研究成果の概要(和文)：臨海都市における陸域施設の人工排熱処理と沿岸域の環境再生の相互利用に関するものである。(1)地域熱供給システムの排熱を海水に処理するとともに冷房効率を向上させる効果を明らかにした。(2)都市気温と海水温度の挙動を解析し、海面温度が都市熱環境に与える影響を明らかにした。(3)排熱処理水の放水を利用した沿岸部鉛直混合促進方策を検討し、鉛直混合方策による水域環境への影響評価を高精度に行うことが可能となった。(4)海水放水による海底および底生生物への影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：This paper deals with the restoration of the hydrosphere and atmosphere in coastal cities utilizing the thermal potential of seawater as follows. 1. Defining the effect of using seawater as a heat sink for handling waste heat from the district cooling system, which in turn improves the efficiency of cooling. 2. Analyzing the changes of urban temperature and seawater temperature, and defining the influence which the sea level temperature may have upon urban thermal environment. 3. Examining measures to promote coastal vertical mixing, which makes possible more precise appraisal of the influence of these measures on the water environment. 4. Evaluating the influence of water discharge into the coastal seabed or benthic organisms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：地球・都市環境

1. 研究開始当初の背景

(1)臨海都市における熱環境の現状

近年、都心部では通信機器や事務機器などによる電力需要の伸びに伴い、年間冷房を行う高発熱建物の増加が顕在化している。特に、都市域の大気(ここで、気圏と定義)への熱負荷となる顕熱排熱は夏期のヒートアイラ

ンド現象を助長し、放置できない深刻な社会問題となっている。都市域における建物由来の排熱は全体の1/2を占め、そのうち約45%(8月の東京)が業務系建物から気圏へ放出される顕熱排熱である。都市域の気温上昇を抑制するには、消費エネルギーを低減するとともに、顕熱排熱を積極的に削減するための

対策が不可欠である。ヒートアイランド現象専門委員会での報告によれば、海水を利用した都市排熱処理システムを東京駅周辺に導入することにより、東京駅周辺の最高気温が平均で 0.4℃低下する可能性を示すとともに、東京湾への温排水拡散面積の検討結果より温排水の生態系への影響は少ないと結論づけている。また、大阪都心部では中尾（代表者）が都市排熱輸送システムについて検討し、既存のインフラである工業用水道や下水処理場を活用した排熱処理活用システムを提案しているが、都市全体への影響評価および最終的な排出先についての検討はなされていない。

(2) 臨海都市における沿岸水環境の現状

臨海都市の沿岸水域（ここで、水圏と定義）では、干潟等の浅場の喪失、防波堤等の構造物設置に伴う海水の鉛直混合の低下、さらに陸域からの過剰な栄養塩の流入による低層水の滞留と過剰な酸素消費が生じ、温度成層が発達する夏季には表層から取り込まれる酸素が底層に循環されず、底層水が無酸素状態となる。矢持（分担者）が 2004-2005 年の夏季に国・地方自治体・民間団体などと協同して実施した大阪湾水質一斉調査によると、稚魚の生息地として重要な湾奥浅海域や港湾海域における底層水の無酸素化は深刻な状態であり、何らかの方法で沿岸水域の鉛直循環を促進し、水環境を再生するための手法を見出すことが急務となっている。

(3) 臨海都市における都市圏と沿岸域の関わり

中尾（代表者）らは H18 年度夏季に大阪湾奥の岸壁近傍にて水温計測を行い、水深 8m 程度の海水温度は表層より昼間最大で 7℃程度低いという結果を得た。7℃の海水温度差は冷却水としての熱ポテンシャルが従来の認識より大きく、その利用価値が高いことを示唆している。このような湾内の底層水は、熱供給処理システムの観点から見れば安定した低温水を供給する有用な未利用エネルギーであるが、一方で、鉛直混合を阻害するため底層における貧酸素化を促進する要因の一つとなっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、臨海都市を対象とした次項からなる。

(1) 都市排熱のヒートシンクとして夏季の底層低温水を積極的に活用した効率的な地域熱供給システムを構築する。

(2) 都市排熱(排水)を直接気圏へと放出するのではなく都市外郭の海域に放出させて気圏への直接排出量を軽減することに伴う臨海都市の水圏・気圏の相互作用を明らかにし、マクロな都市気候に及ぼす影響を評価する。

(3) 熱排水の浮力と運動エネルギーにより湾

内の流動を促進し水圏環境の改善を図る。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するための研究項目は、以下に示す 3 つのサブテーマに分けて研究を進めた。

① 熱供給システムのモデル化と都市大気排熱・海域排熱の算定

② 都市気温と海水温度の挙動、気象シミュレーション

③ 効率的な海水の鉛直混合方法の検討と排熱の海域放水に伴う生態系改善効果

4. 研究成果

4.1 熱供給システムのモデル化と都市大気排熱・海域排熱の算定

湾岸部に地域熱供給システムを設置し、沿岸域の需要地の冷房負荷を処理する。需要地の現状として、空冷型冷房機による都市大気への大量の顕熱排熱が発生するが、地域熱供給システム(DHC)を導入することにより、海水への排熱に転換される。四宮らの冷房排熱原単位と建物用途別延べ床面積を用いて、大阪市域の冷熱需要を算定し、500m メッシュのマップ(図 1)を作成した。熱需要建物として、病院、工場、ホテル、事務所、商業施設、集合住宅を想定する。熱需要マップにより湾岸部である南港地域においてピーク冷熱需要 15MW~100MW の需要地が存在することを確認し、その地域に対して冷熱を供給するケーススタディを行った。熱導管は幹線道路に沿って最短経路で結ぶこととし、管長は GIS により算定した。プラントのシステムシミュレーションを行うため冷凍機、熱交換器、ポンプの性能特性、管路の圧力損失を組み込んだモジュラーモデルを構築した。本研究で想定した熱供給プラントシステムの概念図を図 2 に示す。海水への取水・排熱は、7.5m の深度において、需要に応じて変動させ、平均 5℃の温度差で行う。以上のようにシミュレーションモデルを構築したことにより、低温海水利用による COP の向上効果、海水への排熱量の計算が可能となった。このモデルの入力条件として、需要地の時刻別熱負荷、海水温度の時刻変化を与え、時別のシミュレーションを行った。7 月代表日の結果を図 3 に示す。

冷房負荷の日積算値が 1100MWh のケースを現状ケースと比較すると、現状の都市大気顕熱排熱(顕熱 1014MWh、潜熱 452MWh)に対して、DHC 導入時には海水排熱(1198.3MWh)へと転換される結果を得た。DHC プラントの運転シミュレーションの結果より、低層の低温海水を熱源として利用することにより、7 月代表日のプラントシステム COP 日平均値は 6.9 であり、現状の建物個別空調システムと比較して、エネルギー効率が大きく上昇している。

4.2 都市気温と海水温度の挙動、気象シミュ

レーション

夏季の大阪を対象に気象モデルによるシミュレーションを行い、都市熱環境の再現性と海面温度が都市熱環境に与える影響について検討した。その結果、

- ・気象モデルに正確な土地利用データ、海面温度を与えたり、都市キャノピーモデルを導入したりすることで夏季の都市温度再現性はよくなった。
- ・海面温度が1℃上昇することによって、大阪市街地では0.6℃上昇した。海面温度と陸上の気温との差の変化により、海面温度の上昇により海風が弱く短くなる影響が見られた(図4)。

上記の結果をもとに、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、

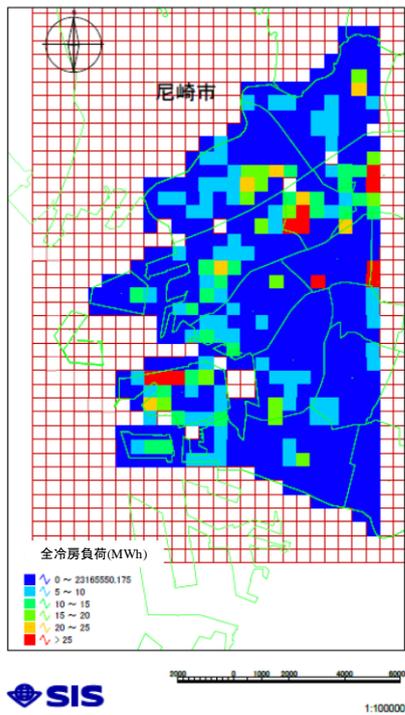


図1 大阪市の冷熱需要マップ

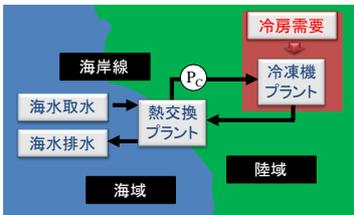


図2 地域熱供給プラントのシステム構成

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。

4.3 効率的な海水の鉛直混合方法の検討と排熱の海域放水に伴う生態系改善効果

(1) 海水の鉛直混合に関する検討
成層化かつ貧酸素化した水域を対象として現地実験を実施するとともに、数値計算モデルを開発して、鉛直混合方法の検討とその効果と示唆される結果が得られた。また、硫化水素が発生するような還元的な水域に放水した場合には、硫化水素の酸化反応によって酸素が消費されるが、この影響を考慮するた

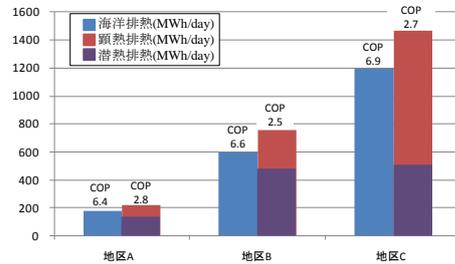


図3 現状・DHC導入ケースの排熱量とCOP

表1 各地区の属性

	構成	ピーク負荷	日積算負荷
地区A	倉庫 他	13	163
地区B	集合住宅 他	25	541
地区C	商業施設 他	100	1112

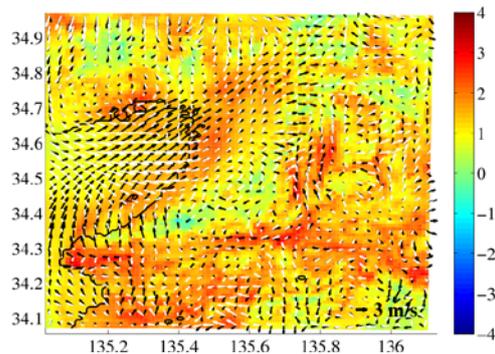


図4 海面温度を1度上昇させた場合のシミュレーション結果: 気温差と風速分布 (濃淡図: 温度差, 黒矢印: 上昇前, 白矢印: 上昇後)

め、硫化水素と酸素の反応実験を実施して硫化水槽による酸素消費速度を定式化し、これを考慮した溶存酸素動態モデルを構築した。

以上の研究成果により、貧酸素化した水域における鉛直混合方法およびそれによる水域環境への影響評価を高精度に行うことが可能になった。

(2)海水放水による底生生物への影響評価

大阪湾沿岸域における底層 DO と CO₂濃度に関する現地調査を実施した結果、

- ・底層 DO と CO₂濃度には高い負の対応関係が存在し、高水温時の大阪湾東部海域底層全体について見ると、有機物の分解により O₂が消費され、それに伴って CO₂が生成されるメカニズムの卓越することが示唆された。
- ・底層水の貧酸素化が強くなると DO と CO₂の線形関係が乱れ、有機物分解以外の要因による CO₂濃度の増加が内湾底層で起こっている可能性が示唆された。

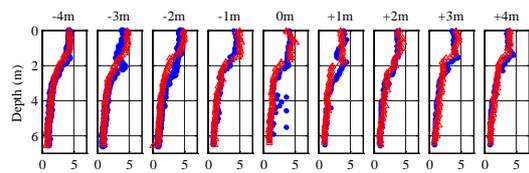
また、大阪湾の代表的な底生甲殻類であるサルエビを用いた貧酸素・高 CO₂暴露実験を実施して、底生動物に与える DO と CO₂の複合影響について検討した。サルエビ成体を用い

て DO 濃度が 0.7, 1.0, 1.3, 1.7mg/l の 4 段階、CO₂濃度が 0.6mg/l (450ppm) と 1.6mg/l (1300ppm) の 2 段階の計 8 パターンについて耐性実験を行った結果、

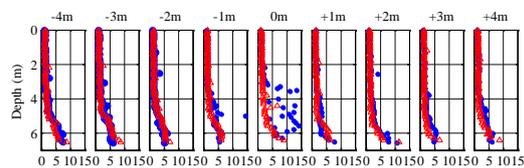
・ CO₂濃度 0.6mg/l の 24 時間半数致死 DO 濃度は 1.1mg/l、また CO₂濃度 1.6mg/l のそれも 1.1mg/l と試算され、両者に違いは見られなかった。

(3) 都市気温-海水温度に関する気象シミュレーションにより 1K 海水温度上昇に対して、0.6K の都市大気温度上昇のフィードバックがあることを確認したが、場合によって海域の排熱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確認した。

(4) サルエビも事例では、夏季の湾岸域では成層が形成され貧酸素化により、生活史が完結できないほど悪化していることがわかったが、これに対し海域排熱の放水を面的に配置することにより鉛直混合を促進すれば、底層環境の改善効果が得られることが示唆された。



(a) Chl-a [ppb] : 表層の植物プランクトンが底層へ輸送された



(b) 濁度 [FTU] : 表層水供給によって底質が巻き上げられた

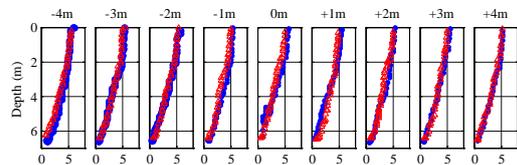
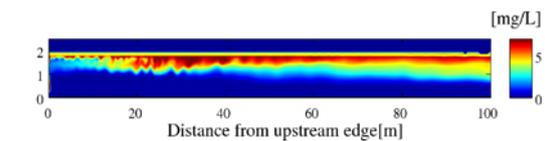
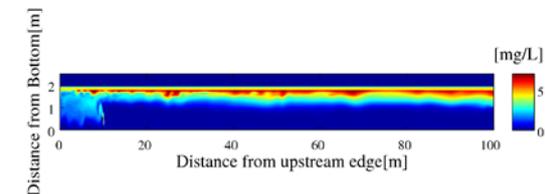


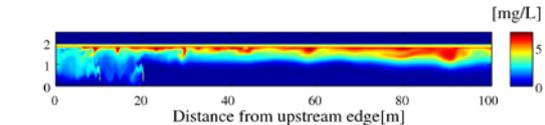
図 5 底層への表層水供給による水質の空間分布の変化 (● : 底層供給実験区, △ : 対象区, 0m が表層水を底層に供給した地点) : クロロフィルと濁度の分布から表層水供給効果が確認できるが、DO 濃度の変化は装置近傍に限られた。



(a) 上流端底層の 1 点から流速 0.2m/s で供給



(b) 上流端底層の 2 点から流速 0.1m/s で供給



(c) 上流端底層の 3 点から流速 0.067m/s で供給

図 6 底層への淡水放水 30 分後における DO 濃度の空間分布の計算結果 (同一流量の淡水を底層に放水した場合、1 点放水よりも 3 点放水のほうが広範囲にわたって DO 濃度が回復した。)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① 森信人、佐地泰昭、重松孝昌、中尾正喜、矢持進、間瀬肇、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、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、66、2010、pp.1296-1300
- ② 重松孝昌、水田圭亮、遠藤徹、底層環境改善指標の提案と現地調査によるその推定法に関する研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、66、2010、pp.1031-1035
- ③ 遠藤徹、重松孝昌、貧酸素海域への酸素供給が堆積物の酸素消費と底層環境に及ぼす影響に関する室内実験、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、66、2010、pp.1196-1200
- ④ 水田圭亮、遠藤徹、重松孝昌、富栄養化した港湾海域における底層環境改善指標に関する研究、海洋開発論文集、査読有、26、2010、pp.117-122
- ⑤ 遠藤徹、重松孝昌、表層水供給装置による港湾海域底層の環境改善に関する現地実験、海洋開発論文集、査読有、26、2010、pp.135-140
- ⑥ 二宮順一、森信人、日下博幸、重松孝昌、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、査読有、Vol.25、2009、pp.1047-1052
- ⑦ Mori, N., Y. Sachi and T. Shigematsu, Dynamic Thermal Response of Urban Heat Release into Coastal Area, Coastal Dynamics, 査読有, No. 102, 2009, pp. 1-12
- ⑧ 水野雅士、鍋島美奈子、中尾正喜、西岡真稔、自動車を用いた移動観測による市街地気温分布調査—セミバリオグラムとクリギング補間による気温水平分布の分析—、日本建築学会環境系論文集、査読有、Vol. 74、2009、pp.1179-1185
- ⑨ 遠藤徹、重松孝昌、港湾海域における底質の酸素消費特性の季節変化に関する研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、査読有、56、2009、pp.1221-1225
- ⑩ 森信人、佐地泰昭、中尾正喜、石川貴司、重松孝昌、矢持進、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、査読有、第 55 巻、2008、pp. 1346-1350
- ⑪ 鍋島美奈子、西岡真稔、中尾正喜、大阪平野における夏季気温の水平分布構造、空気調和・衛生工学会論文集、査読有、140、2008、pp1-10

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① 富永匡哉、中尾正喜、西岡真稔、鍋島美奈子、夏期の底層低温水の熱利用—夏期海水温の鉛直分布計測結果報告—、2010 年度日本冷凍空調学会年次大会、2010 年 9 月 17 日、金沢大学 自然科学本館
- ② 三毛正仁、有山正、末永直之、中尾正喜、西岡真稔、鍋島美奈子、木下厚志、ごみ焼却排熱を利用した上水加熱システムの省エネルギー効果に関する研究—第 1 報 地中埋設管路の動的放熱量計算のための応答係数モデルの算出—、空気調和・衛生工学会、2009 年 9 月 15 日～17 日、熊本
- ③ 堀田裕子、西岡真稔、中尾正喜、鍋島美奈子、木下厚志、建物群幾何学形状の持つ日射受熱特性のモデル化に関する研究—地面の天空率に基づく直達日射受熱特性の類型化—、空気調和・衛生工学会、2009 年 9 月 15 日～17 日、熊本
- ④ 重松孝昌・水田圭亮・遠藤 徹、港湾海域における底質の酸素消費フラックスの定式化に関する研究、環境アセスメント学会、2009 年 9 月 12～13 日 東京
- ⑤ 西岡真稔、崎浩二、中尾正喜、鍋島美奈子、北島洋平、保水性舗装の実用的水分蒸発モデル作成に関する研究 その 3 保水性ブロックの水分伝導率と水分容量の算出、日本建築学会、2009 年 8 月 26 日～29 日、仙台
- ⑥ 北島洋平、崎浩二、西岡真稔、中尾正喜、鍋島美奈子、保水性舗装の実用的水分蒸発モデル作成に関する研究 その 4 差分法を用いた水分計算、日本建築学会、2009 年 8 月 26 日～29 日、仙台
- ⑦ 水野雅士、鍋島美奈子、中尾正喜、西岡真稔、中島隼人、海風の進入と都市気温に関する研究：堀江地区の気温水平分布の調査、日本建築学会近畿支部研究報告会、2009 年 5 月 23 日、大阪工業技術専門学校
- ⑧ 水田圭亮、重松孝昌、遠藤徹、閉鎖性内湾の港湾エリアにおける底質の酸素消費特性に関する研究、環境アセスメント学会、2008 年 9 月 12・13 日、大阪市立大学
- ⑨ 森信人、佐地泰昭、重松孝昌、浅海域における密度成層生成におよぼす混合モデルの影響、日本流体力学会 年会 2008、2008 年 9 月 4・5 日、神戸大学
- ⑩ 重松孝昌、鉛直循環流促進堤による貧酸素化の抑制、日本水産学会近畿支部前期例会シンポジウム、2008 年 7 月 5 日、キャンパスポート大阪
- ⑪ 水田圭亮、重松孝昌、遠藤徹、閉鎖性内湾の港湾エリアにおける底室の酸素消費速度に関する研究、土木学会関西支部年次講演会、2008 年 5 月 24 日、近畿大学
- ⑫ 佐地泰昭、森信人、中尾正喜、矢持進、

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、土木学会関西支部年次講演会、2008年5月24日、近畿大学

〔図書〕(計1件)

中尾正喜、西岡真稔、鍋島美奈子、ほか空気著和・衛生工学会編、オーム社、ヒートアイランド対策—都市平熱化の考え方・進め方—、2009、pp. 51-55、pp. 71-90、pp. 119-124、pp. 155-157、pp. 186-193

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：閉鎖性水域における人工排熱処理システム

発明者：中尾正喜、西岡真稔、鍋島美奈子、矢持進、重松孝昌、遠藤徹、貫上佳則、森信人

権利者：公立大学法人 大阪市立大学

種類：特許

番号：特願 2010-153555

出願年月日：22年7月6日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中尾 正喜 (MASAKI NAKAO)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60381977

(2) 研究分担者

矢持 進 (YAMOCHI SUSUMU)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30315973

貫上 佳則 (KANJO YOSHINORI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90177759

重松 孝昌 (SHIGEMATSU TAKAMASA)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80206086

西岡 真稔 (NISHIOKA MASATOSHI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40287470

鍋島 美奈子 (NABESHIMA MINAKO)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90315979

遠藤 徹 (ENDO TORU)

大阪市立大学・大学院工学研究科・特任助教

研究者番号：00527773

(3) 連携研究者

森 信人 (MORI NOBUHITO)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：90371476