

1. 東京湾を媒体とした熱循環による 暑熱緩和効果に関する研究

一ノ瀬 俊明^{1*}・鈴木 一令²・鈴木 高二郎³・清野 聡子⁴

¹正会員 工博 独立行政法人国立環境研究所 社会環境システム研究領域

/名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

²工修 八千代エンジニアリング株式会社 (〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12)

³工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 海象情報領域 (〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬3-1-1)

⁴工博 東京大学大学院総合文化研究科 (〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1)

* E-mail: toshiaki@nies.go.jp

都市環境問題として、ヒートアイランドに象徴される夏季の暑熱現象が近年社会的関心事となっている。既に屋上緑化等の対策が実施されているが、それらの対策以上に効果が期待できる方策として、東京湾の海風を有効利用する対策があげられる。しかし今日、東京湾は人工排熱により高い水温状態にあるため、海風の冷却効果を発揮させるには、海面温度を自然状態に近づける必要がある。また、首都圏の貴重な資源である東京湾の環境も、流入する汚濁物質や排熱等により望ましい状況とはいえない。本研究は既往都市暑熱対策や水質浄化対策とは異なった方策として、海風等の自然システムに着目し、海洋深層水導水による海面温度低減と都市暑熱問題の緩和技術ならびに湾環境の改善を提案するものである。

Key Words : heat island, Tokyo Bay, deep-ocean water, sea breeze, environmental improvement

1. はじめに

今日ヒートアイランド等都市の暑熱問題への対策は、各自治体等において屋上緑化や保水性舗装等の即地的なものを主体に行われている。つまり、これまで実施されてきたヒートアイランド対策は、市街地等の陸上での対策がほとんどであった。しかしこれら陸上での対策は、巨額の投資にもかかわらずその効果は空間的に限られており、対策効果を顕著なものとするためには相当規模の施工が必要となることが明らかになってきている。たとえば東京23区において、1) 建物・事業所排熱を50%、2) 自動車交通排熱を20%削減し、3) 全舗装面を50%透水化(草地・裸地化)、4) 全建物屋上を50%緑化したとしても、都心3区我真夏日の日最高気温は約1℃しか低下しないことが環境省の委員会¹⁾で明らかとなっている。これら既往の対策が今直面している都市の暑熱問題を解決するには時間を要し、即時性や更なる効果を期待できる抜本的な対策が必要とされている。

一方首都圏では、典型的な真夏日に東京湾からの海風が都心に進入するため、湾水温を現状よりも低くできれば海風はより冷涼で強いものとなり、都心の冷却や換気

が促進されるものと考えられる。最近40年程度に限れば、東京湾への流入水温・流入熱量²⁾および海面水温³⁾は冬季の上昇が顕著であるとの報告もあるが、都市活動からの東京湾への排熱とヒートアイランドとの関連性については、統合的な検討がほとんどなされていない。

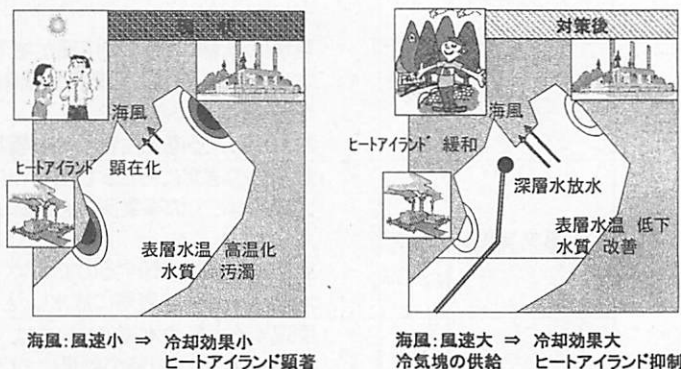


図-1 海洋深層水導水によるヒートアイランド現象緩和の概念

これらを踏まえ本研究では、海面冷却によるヒートアイランド対策、つまり海面温度を数℃下げる手段として、海洋深層水を東京湾奥の温排水の影響が顕著な区

域へ導水することが有効であるとの仮説を提示し、おもに専門家へのヒアリングと数値シミュレーションをベースに、海洋深層水導水による東京湾の海水面温度低減方策を具現化するための検討を行う（図-1）。

また、1970年代以降の水質汚濁防止法の施行などにより水質の改善傾向はみられるものの、東京湾では現状においても赤潮・青潮等が発生している⁹⁾。つまり、生物の生息状況や環境基準達成状況等からみる限り、水環境の改善が十分にははかられているとはいえない。そこで本研究においては、ヒートアイランド現象緩和方策としてのみならず、海洋深層水導水による東京湾の浄化再生など、副次的効果とセットにした施策の計画についても検討を行うものである。

2. 有識者へのヒアリング

有識者（学識経験者・ゼネコン・揚水施設メーカーなど）へのヒアリング（2003）は対面により実施し、本検討の可能性・課題等について行った。おもな指摘事項は、海洋深層水の水質特性による生態系への影響、漁業者との調整、導水量と対象区域の設定などである。零細多数な東京湾の漁業主体との調整⁹⁾や表層を低温に維持するための湾内における鉛直混合維持対策の必要性など、当初想定されていなかった新たな課題も浮き彫りとなった（表-1）。

表-1 有識者ヒアリングの概要

項 目	内 容
取水・導水	・ 取水、導水、放水については、実用化されている海洋深層水の取水施設の技術で対応が可能である。 ・ 海洋深層水は高塩分低温であることから、表層に導水する場合密度が大きいことに留意する必要がある。 ・ ソーラーパネルを海上に浮かべるなど、自然エネルギーを利用した導水技術が必要である。
水質	・ 海洋深層水に含まれる栄養塩類をそのまま放水することは難しい。ある程度水質浄化対策が必要である。 ・ 夏場は赤潮により栄養塩類が枯渇しているため、海洋深層水の供給は影響をもたらす可能性がある。 ・ 本事業の推進には漁業者の理解と協力が必要であり、水質環境の改善と漁獲量の増加などに結びつく提案が必要である。 ・ 冷水が与える底生生物への影響が問題となりうるが、体系的にまとめられた知見がほとんどない。
事業実施区域	・ 放水先の選定にあたっては、羽田沖および中央防波堤といった埋立地を考慮する必要がある。 ・ 大阪湾などでの事業実施を検討してみる価値がある。面積が小さいので効果が出現しやすいものと考えられる。 ・ 東京湾全域を冷却するのではなく、地域を限定して事業化を検討すべきである。 ・ 水深50mの水を表層に放水し、どのような影響および効果があるか試験的に実施する必要がある。
数値シミュレーション	・ 関連する大気や水質については、精度に幅があるものの、シミュレーションにより予測可能である。 ・ ヒートアイランド対策の効果については、空間スケールによって解釈が異なってくるので、対象をどのようにとらえるかが重要となる。 ・ 発電所や工場からの温排水による東京湾の水温への影響をシミュレーション等で検討する必要がある。そのほか河川、下水道など、流入する水温および水量を把握する必要がある。
その他	・ パイプラインで道路などを冷却し、海域へ戻すという、より直接的な冷却方式が考えられる。 ・ 海洋深層水導水のためには、東京湾の物理学・化学・生物学的な特徴をある程度把握しておく必要がある。 ・ LNG 基地では低温排水が大量に発生するものの、現在その多くが有効活用できない状況であり、このエネルギーを利用する方法を考えるべきである。

3. 冷却効果などの理論的検討

前述のヒアリングで指摘された項目のうち、技術的な計算で対応が可能なものについて、以下のように試算を行った。計算結果はいずれも本事業の可能性を否定するようなものではなかった。

(1) 東京湾海水面冷却による都心の気温・風速への影響

東京湾海水面冷却による東京都心部の気温や風速への影響について、メソスケール気象モデルCSU-MM⁹⁾による数値シミュレーションを行った（図-2）。計算の詳細な条件・パラメータ設定はIchinose⁷⁾と同じである。

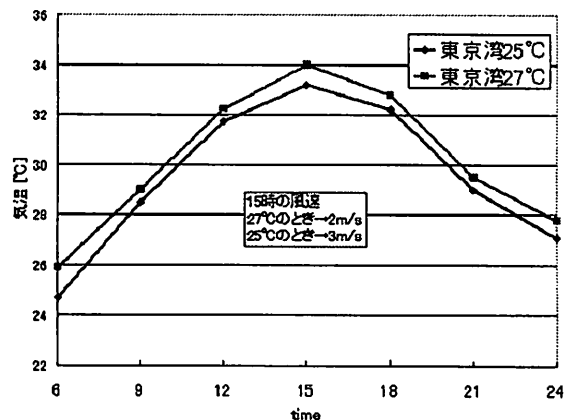


図-2 東京湾海水面冷却による大手町の気温・風速への影響

東京湾の海面温度を27℃から25℃へ低下させた場合、大手町における典型的真夏の地上気温には終日約1℃の低下がみられたほか、15時における海風の風速は2m/sから3m/sへと強化された。なお、このシミュレーション結果は以下における数値的な検討を踏まえたものではない。

(2) 接水境界層吹走時における海風の気温低減効果

ある水温の海面上を風が通過する場合、海風の気温がどの程度変化するかを図-3のような簡単な試算で求めた。海水温が一定の水面上を気温 T_g の気塊が通過した場合、湾奥市街地側ではどの程度気温が変化するかを求めている。風速 W (m/s)、接水境界層厚さ h_a (m)、海水温 T_w (℃)、湾口部での気温 T_g (℃)、吹走距離 L (m)を変化させて検討した。また気温の変化は、簡単に顕熱輸送によって生じるものとした。顕熱フラックスは式(1)⁹⁾で与え、その場合の気温の変化を式(2)で表現した。式(2)は気塊が湾口部から湾奥部へ移動するにつれ、時間とともに徐々に顕熱輸送で冷やされ、気温が T_g (℃)から T_s (℃)へ変化するものと考えた式である。式(1)および式(2)より式(3)を導き、気温変化を計算した。

$$Q_H = \rho_a c_p C_H (T_w - T_s) W \quad (1)$$

$$V_a \rho_a c_p \frac{dT_s}{dt} = Q_H S \quad (2)$$

$$h_a \frac{dT_s}{dt} = C_H (T_w - T_s) W \quad (3)$$

ここで、 ρ_a ($=1.2 \text{ kg/m}^3$) は空気密度、 c_p ($=1000 \text{ J/kg/K}$) は空気の定圧比熱、 C_H ($=1.5 \times 10^{-3}$) は無次元量の顕熱輸送係数、 V_a (m^3) は気体の体積、 S (m^2) は気体と海面が接する面積である。式(3)の解は以下のような解析解となる。

$$T_s = T_w + (T_{s0} - T_w) e^{-C_H W L / h_a} \quad (4)$$

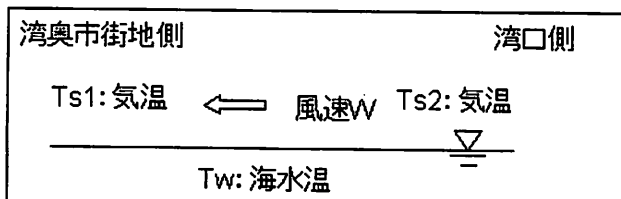


図-3 内湾の表層水温と海風の気温との関係

図-4は、気温30℃の風が水温27℃の海上を通過した際

の気温の変化である。接水境界層の厚さが10mの場合には、吹走距離が4km程度でも1℃程度気温が低減している。境界層の厚さが50mであっても、十数kmで1℃程度も低減する可能性がある。東京湾の長さは約50kmであることから、東京湾全体の水温が1℃低ければ、気温も同程度低くなることが予想できる。また、東京港や横浜港といった局所水域のみを下げることも対策として考えられる。その場合は1～5km程度の吹走距離で十分である。式(4)は指数関数であるため、最初の低減率が大きく、接水境界層の厚さにもよるが、気温と水温の差の約5～50%を低減、図-4の場合は0.3～1.5℃ほど低減できることになる。なお、式(4)において W が吹走距離 L となるため、風速 W (m/s)の変化は図-4のグラフに変化をもたらさない。

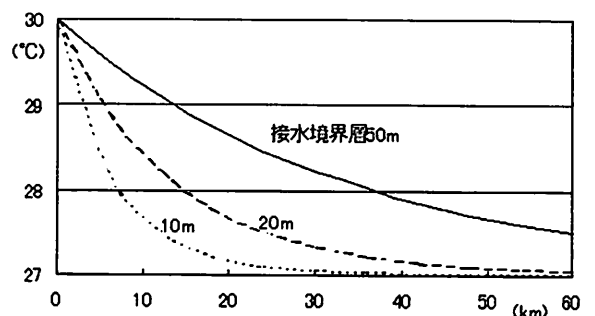


図-4 吹走距離（横軸）と気温（縦軸）との関係

式(4)より、気温よりも水温が高い場合、図-4とは逆の方向、つまり急激に気温が上昇する可能性もあるものと考えられる。通常夏季は外洋よりも内湾の方が水温が高く、外洋の比較的気温の低い気塊が東京湾に入ってくると、徐々に気温も上昇している可能性がある。

以上より、東京湾の水温を低減することができれば、ヒートアイランド現象を軽減できる可能性が高いと考えられる。また、東京港や横浜港のような狭い水域であっても、気温と水温差の約5～50%を低減する可能性が示唆された。

なお本モデルでは、 C_H を和田⁹⁾の算定式(5)により、風速約10m/s、水温と気温との差を約3℃として求めている。

$$C_H = (0.1 + 0.03X + 0.9e^{4.8X}) C_{H0}$$

$$X = X_0 \frac{|X_0|}{|X_0| + 0.01} \quad X_0 = \frac{T_w - T_s}{W_{10}^2}$$

$$C_{H0} = \{1.170 + 0.0075W_{10} - 0.0004(W_{10} - 8)^2\} 10^{-3}$$

(5)

ここで、 W_{10} (m/s) は海面上10mにおける風速 ($W_{10} > W$ と仮定) である。ただし、 C_H と接水境界層の厚さとの相互作用などは無視しているため、気温の低減効果が得られない可能性もある。今後現地データと比較するなどして、モデルの精度を確認する予定である。

(3) 冷水沈降の可能性

低温高塩分の海洋深層水を高温低塩分の湾奥部に散布した場合、密度が大きいためすぐに沈み込んでしまう可能性がある。ここでは低温高塩分の海洋深層水が、どの程度の速度で沈降するかについて簡単な試算で求めた。

ここでは単純に、密度の大きい水塊（質点）が密度の小さい海に入った場合の沈降速度について調べた。なお沈降を抑える効果として、図-5のような抗力を入れている。水塊の沈降する方程式は式（6）で表現される。

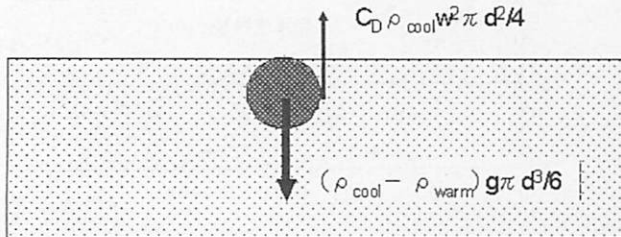


図-5 高密度水塊を海面上に噴霧した時の水塊の沈降模式図

$$\rho_{cool} \frac{\pi d^3}{6} \frac{dw}{dt} - (\rho_{cool} - \rho_{warm}) g \frac{\pi d^3}{6} + C_D \frac{1}{2} \rho_{cool} w^2 \frac{\pi d^2}{4} = 0 \quad (6)$$

ここで、 w ：水塊の沈降速度 (m/s)、 d ：水塊の直径 (m)、 ρ_{cool} ：海洋深層水の密度 (kg/m³)、 ρ_{warm} ：湾奥海水の密度 (kg/m³)、 C_D ：抗力係数、 T (°C)：水温、 S (PSU)：塩分濃度であり、抗力係数は式（7）により、密度は式（8）により求められる。なお、 ν ：海水の動粘性係数である。

$$C_D = \frac{16}{Re} \quad Re = \frac{wd}{\nu} \quad (7)$$

$$\rho = 1000 + 28.14 - 0.0735T - 0.00469T^2 + (0.802 - 0.002T)(S - 35) \quad (8)$$

図-6は水温、塩分、海洋深層水を散布する際の粒子径を変化させて計算した結果である。計算は、湾奥部の海水の塩分を15 PSU、水温を30°Cとして行っている。直径1cmで散布すると沈降速度は比較的大きく、10分で20m近く沈降している。一方、塩分を後述する図-7の④や⑤

のような放水方式により湾奥部と同程度に調整（17 PSU）すると、沈降速度は1/3以下となる。また粒子径を0.1cmにすると、沈降速度は極端に小さくなり、10分経過しても20cm程度しか沈降しない。このように塩分、水温、粒子径によって大きく沈降速度が変化するため、散布方法によっては海洋表面を冷やしたままにすることが可能と考えられる。

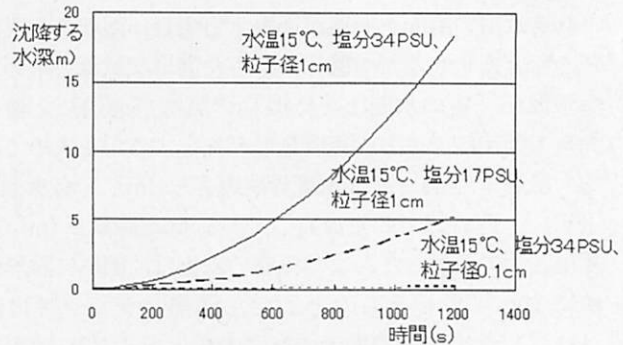


図-6 水塊の沈降時間と沈降水深

なお粒子径が小さい場合、散布される海域の表層水温に短時間で近づいてしまうものの、散布を繰り返すうち徐々に海域全体の表層水温が低くなるものと考えられる。ただし、散布を続けると小粒子同士が結合して大きな冷水の塊となり、沈降速度が速くなる可能性もある。この点については、今後水槽実験により詳細に検討する予定である。

4. 現状におけるヒートアイランド対策のコスト

現状で実施されているヒートアイランド対策は、夏季における昼間気温の上昇・熱帯夜の出現日数の増加とそれに伴う熱中症による死亡との相関関係への指摘や、高温化に伴う冷房需要の増加によるエネルギー消費量の増大、光化学オキシダント生成助長や局所的な集中豪雨発生との関連性などへの対策として、平成16年3月にヒートアイランド対策大綱¹⁰⁾として体系的に取りまとめられている。このヒートアイランド政策大綱には、対策の基本方針として人工排熱の低減、地表面被覆の改善、都市形態の改善およびライフスタイルの改善が示されており、これらの方針等に沿って各地方自治体等において対策が進められている。特に東京都や大阪府などの大都市では各種の対策が実施されており、東京都では屋上緑化、壁面緑化、高反射性塗装、保水性建材、保水性舗装が示されている。

東京都のクールルーフ事業（補助上限2,000万円、補助率1/2）は千代田区、中央区、港区などの都心7区で実

施されている屋上緑化等の事業であるが、事業費を試算すると、7区の都市計画区域のうち、戸建て住宅が主体と考えられる第1種、第2種低層住居専用地域を除いた都市計画区域面積（約9,700ha）の30%を建築物の屋上面積と仮定し、1m²あたりの整備費を2万円/m²とした場合、約5,800億円の整備費が必要となる。また東京都23区について推計してみると、都市計画区域のうち、上記と同様に第1種、第2種低層住居専用地域を除いた都市計画区域面積（約46,000ha）の30%を建築物の屋上面積、1m²あたりの整備費を2万円/m²とした場合、約2兆7,000億円の整備費が必要となる（表-2）。

表-2 屋上緑化等の概算整備費

対象	概算面積(m ²)	m ² 当たり単価	整備費(億円)
東京都心7区屋上緑化	29,000,000	2万円/m ²	5,800
東京都23区屋上緑化	138,281,000	2万円/m ²	27,658
東京都都計道保水性舗装	72,187,000	2万円/m ²	14,437

資料：都市計画年報 H16年版

保水性舗装では、東京都内の都市計画道路面積が概算で約7,200haとなり、整備費単価を2万円/m²と仮定すると整備費は約1兆4,000億円になるものと推計される。

5. 導水対象区域・導水手法等の検討

本研究の対象である東京湾は、狭義には三浦半島の観音崎と房総半島の富津岬を結んだ線の北側をさし、面積は約922km²である。狭義の東京湾の平均水深は約17m、最大水深は70mであり、容積は約15.7km³となる。したがって海洋深層水を導水する場合、全域へではなく、東京湾からの海風の風向・風速と湾水域の水温をもとに対象区域を設定すべきである。これにより、東京港のお台場周辺と川崎港周辺等が対象と考えられる。東京港のお台場周辺の面積は約16km²であり、水深は約10mであるため、全量を導水する場合は約1億6,000万（m³）の水量が必要となるが、全量ではなく水面下1～2mに対応した水量を導水し、低温水の沈降による海洋深層水（もしくは外洋水）と表層海水の鉛直循環にもとづく海水の混合と表層水温の低減方法等を今後検討することになる。

本研究において提案する海洋深層水導水施設については、既往の海洋深層水導水施設や関連検討が、その具体例になるものと考えられる。海洋深層水利用学会の資料によると、現在日本全国で16ヶ所の海洋深層水取水分水施設が設置されている（表-3）。そのうち12ヶ所が公共系の研究施設などであり、導水管を水深300m程度の海洋深層水の取水位置まで伸ばして設置し、サイフォンの原理によって汲み上げを行っている。

表-3 既設海洋深層水取水施設の概要

no.	名称	所在地	運営主体	取水能力(m ³ /日)	取水水深(m)
1	知床くすり 深層水取水施設	北海道日置郡羅臼町	羅臼町	4,560.0	356.3
2	宮内湾 深層水取水施設	北海道紋内郡紋内町	紋内町	3,000.0	300.0
3	長門海峡 深層水取水施設	北海道二世帯町八雲町	八雲町	3,500.0	343.0
4	佐田湾 深層水取水施設	新潟県佐和田市	佐和田市	1,200.0	332.0
5	陸奥 深層水取水施設	石川県鳳珠郡能登町	能登町	100.0	320.0
6	富山県水産試験場 深層水利用研究施設	富山県滑川市高専	富山県水産試験場	3,000.0	321.0
7	滑川湾 深層水分水施設	富山県滑川市滑川町	滑川市	2,000.0	333.0
8	入谷湾 深層水分水施設	富山県下新川郡入谷町	入谷町	2,400.0	384.0
9	三浦半島 深層水分水施設	神奈川県三浦市三崎町	三浦ディーエスグループ株式会社	1,000.0	330.0
10	株式会社 アクアミニア	東京都大島町	株式会社 アクアミニア	500.0	512.0
11	みえ屋敷 深層水分水施設	静岡県焼津市	静岡県農業水産部	2,000.0	397.687
12	三重県 深層水分水施設	三重県熊野市	熊野市	2,885.0	415.0
13	高知県 深層水分水施設	高知県高知市高知町	高知県海洋深層水研究所	920.0	320.344
14	宮戸湾 深層水分水施設	高知県高知市宮戸町	宮戸湾深層水アクアファーム	4,000.0	374.0
15	鹿児島県 深層水分水施設	鹿児島県薩摩川内市下西町	鹿児島県深層水株式会社	400.0	375.0
16	沖縄県 深層水分水施設	沖縄県豊後町久米島町	沖縄県海洋深層水研究所	13,000.0	612.0

資料：海洋深層水利用学会 HP 取水・分水施設

取水能力には数百m³から1万3千m³/日と幅があり、2千～4千m³/日程度の取水能力を有する施設が最も多い。有識者へのヒアリングにおいては、現状の海洋深層水取水施設における技術で対応は可能との意見であったが、本研究において実施する導水では、先に設定した対象範囲を考慮した場合、その取水量は日量数十万～100万m³程度が必要となる。その取水量を満足する導水方式について、経済産業省等での検討事例¹¹⁾を参考とした場合、導水施設（揚水量：100万m³/日）の建設費は約25億円/kmとなる。

本研究における導水距離を東京湾口から湾奥までの約60kmとすると建設費は約1,500億円となり、付帯施設等を含めて約2倍と考えても約3,000億円となる。ただしコストの厳密な比較には、東京湾表層水の冷却による都心気温の低減がどの範囲にどの程度及ぶのかについてのさらなる検討が必要である。

なお、地球規模の課題となっているCO₂の排出等については、屋上緑化等現状のヒートアイランド対策におけるLCCO₂の事例が少なく、比較等は容易ではないが、本研究の提案するシステムにおいても、湾口と湾奥の潮位差や自然エネルギー（風力、太陽光、潮汐等）を活用し、CO₂排出抑制に留意している。また運用段階の評価については、現在までに十分な資料が収集されていないものの、海上に浮かべたソーラーパネルによる電力を用いた運用・維持が想定されている。

4章では屋上緑化と保水性舗装をあわせ4兆円以上の費用を積算しているが、本研究で議論している対策の効果については、たとえば4兆円を東京湾冷却に投資した場合、陸上での対策にくらべさらにどのくらいの気温低減が可能となるかなど、さらなる検討が必要である。本研究はそのための考え方の方向性を、現在までに収集可

能な資料にもとづいて示すものである。

表-4 各種方式のメリット・デメリット

方式	メリット	デメリット
①海水散布方式	導水した海水を散布するだけなので、原理が複雑ではない。	高塩分、高栄養塩の海水を導水するため、環境インパクトが大きい。
②ラジエーター方式	湾奥の海水をそのまま使うため、①よりも環境インパクトが小さい。	間接的に湾奥の海水を冷却するため、①よりも冷却効果が小さく、追加のコストが生じる。
③温排水冷却方式	もともと人為的に温められた水温を下げるのれで、環境に最もよい。	効果が工場地帯に限定される。
④浅水・深層水混合方式	表層海水と混ぜるため、深層水の水質面での問題が緩和される。	表層水塊のため、管路へ生物付着が問題となる。
⑤貯留型・夏季放水方式	湾奥の海水をそのまま使うため、①よりも環境インパクトが小さい。	貯留施設が必要である。

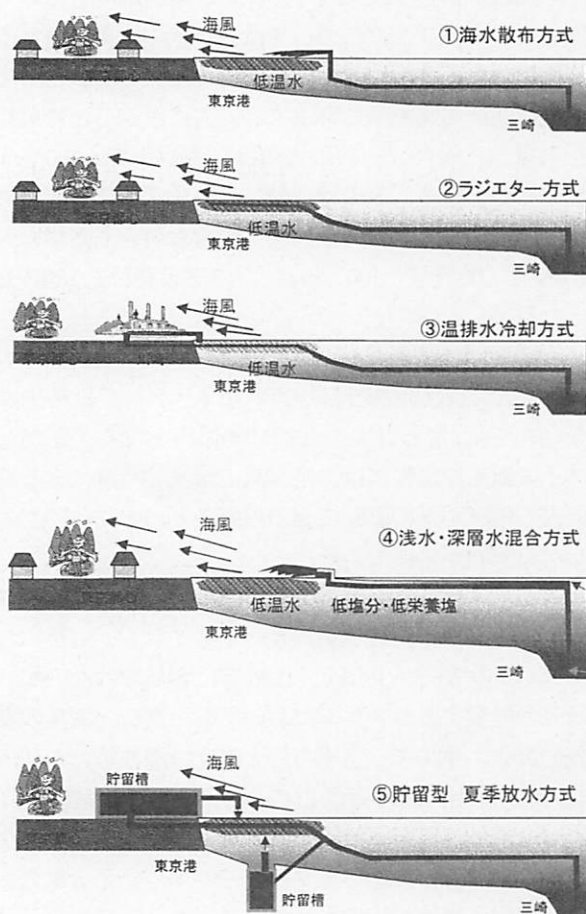


図-7 放水方式

また放水方式については、海洋深層水の栄養塩類や塩分濃度等を考慮し、

①海洋深層水の沈降と希釈効果を期待する海水散布方式、

②栄養塩類の混合を排除し熱交換のみを行うラジエーター方式、

③温排水排出源の温水等を直接冷却する温排水冷却方式、

④東京湾内の表層水を海洋深層水と混合し、塩分・栄養塩類を希釈して放水する浅水・深層水混合方式、および

⑤埋立地等に貯留槽等を設置し容量の確保等を考慮した貯留型夏季放水方式を提案する(図-7)。

ただし、表-4のようなメリット・デメリットもそれぞれ想定されるため、コストの増加や対策の効果も含め、今後さらに検討する予定である。

6. 海洋深層水の水質

本研究において計画する海洋深層水の導水は、前章において整理した神奈川県三浦の海洋深層水取水施設が立地する東京湾口三崎周辺の相模湾からを想定している。入手が可能であった三浦の海洋深層水取水施設の水質については、データが取水後のものであり、水温等の値が変化しているため、神奈川県環境科学センターによる相模湾海洋深層水含有成分測定結果¹²⁾と千葉県水質保全課による公共用水域水質測定結果¹³⁾をもとに、海洋深層水と東京湾の主要な水質を表-5に整理した。本来ならばT-Nで水質の比較を行うべきであるが、相模湾のデータが限られていたため、特定日におけるアンモニア性窒素で代替している。

表-5 東京湾と相模湾海洋深層水の水質比較

地点名等	水温 (°C)	DO (ml/l)	COD (ppm)	アンモニア性窒素 (Mg/l)	リン酸性リン (Mg/l)
横須賀長井沖 表層*1	27.52	4.68	1.59	0.003	0.0001
横須賀長井沖 水深300m*1	8.36	3.41	1.58	0.002	0.001
東京湾公共用水域水質 測定点No.8(湾中央) 上層*2	25.0	8.3	4.2	0.01	0.006
東京湾公共用水域水質 測定点No.8(湾中央) 下層*2	23.6	3.9	1.8	0.12	0.049

資料*1
神奈川県環境科学センター研究報告：2002年9月5日の値

資料*2
千葉県水質保全課公共用水域水質測定地点(海域)水質資料：2004年9月14日の値

相模湾の横須賀長井沖水深300mの海洋深層水は、東京湾の湾中央部に位置する公共用水域水質測定点(No.8)の上層および下層のデータと比較して、COD、アンモニア性窒素、リン酸性リンともに下回っており、

東京湾の水質にくらべ栄養塩類が多いとはいえない状況を示している。一方、水温は横須賀長井沖の海洋深層水で8.36℃と、東京湾表層水温に対する十分な低温性を示している。

また塩分濃度については、横須賀長井沖（水深300m）の海洋深層水では34.33 PSUを示し、東京湾公共用水域水質測定点（No.8）では上層で30.23 PSU、下層で32.05 PSUを示しており、海洋深層水が若干高い塩分濃度となっている。今後これらの知見をもとに、現況調査を含めた水質等のデータ収集とシミュレーション等による検討を実施する必要がある。

7. 今後の課題

NEDO 報告書¹⁴⁾の「潮位差を利用した東京湾熱交換数値実験」によれば、東京湾の中央部から湾奥部に向け、湾口部からのパイプ（管径 5m）を敷設（計 660 本および計 6,600 本の 2 ケース）し、湾口部と湾奥部との潮位差により湾口外洋水を湾奥等へ導水した場合、表層水温低減効果（湾全体平均）としては前者で-0.11℃（鶴見川以北の湾奥部では-0.22℃）、後者で-0.69℃（同-1.22℃）であるとしている。また、メソスケール気象モデルによる数値シミュレーションから、東京湾の表層水温を 8℃下げた場合でも昼間の都市気温への影響は-0.6℃程度であるとしている。さらにパイプ敷設による冷却効果がパイプ出口近傍に限定される場合、外洋冷水塊の急速な沈降が懸念されるとしている。

これに対する本研究の独自性は、

- ・導水量を抑えるため、より低温である海洋深層水を取り上げたこと、
 - ・NEDO 報告書では水面下にパイプ出口を設定しているが、それとは異なる新たな散水方式を提案していること、
 - ・散水後の水塊の挙動に関する物理学的な検討を行っていること、
- などである。

また、海洋深層水の導水によって東京湾の生態系がどのような影響を受けるかを、今後生態系シミュレーションなどで検討する必要がある。生態系シミュレーションにおいては、潮流や流入による栄養塩類・水温・水質等の変化に対応した植物プランクトンと一次捕食者である動物プランクトンを含む低次生態系モデルに加え、東京湾の潮流シミュレーションとの組み合わせ、（独）港湾空港技術研究所の実測調査^{15) 16)}による知見（夏季5日ほどで東京湾の半分ほどの水が外洋と入れ替わる等）を取り込む必要がある。海洋深層水や外洋水を導入する場合、東京湾の生態系や陸域の気象がどの程度の許容量を持っ

ているのか、あるいは最適な導水量をどのように規定するのかについてはいまだ不明な点が多い。特に、江戸時代からの東京湾の開発は急激であり、湾内の生態系はもちろん、陸域の生活形態も大きく変化しており、どの時点の塩分、水温、水質を目標とするかを決定することは難しい。

さらに、本事業の推進においてステークホルダーとの関わりは大きな要素である。とりわけ、東京湾の水質と関係性の深い漁業については、東京湾の漁業者の多くが零細であり、また多数の組合組織が存在する。よって、東京湾の再生方向性など事業立案の段階から、東京湾の環境に関する知見や古来の利用方法等についてのヒアリング・検討会等を通じ、彼らステークホルダーの参画をはかる必要がある。開発があまり進んでいない時代の生態系や陸域の生活形態を、歴史的な文献や漁労関係者からのヒアリング等から抽出することにより、過去の塩分や水温、さらには水域の環境を推定することは有意義である。これにより、許容される、あるいは最適な海洋深層水や外洋水の導水量を推定することが可能となろう。このような歴史的見地からの推定法は斬新といえる。

このほか、本事業推進のために今後整備しなくてはならない法制度の検討、パイプラインなど湾空間を占有するプラントの量に関する検討に加え、たとえば、都心の気温-5℃を達成するために必要な陸上対策のコストと、同じ目標を達成するための本事業のコストの比較、といったわかりやすい比較が必要である。

8. 結論

本研究では、都市域における環境問題として顕在化しているヒートアイランド現象の緩和ならびに閉鎖性湾の再生対策の構築をめざし、既往対策とは異なる海洋深層水を活用した新たな有効性の高い方法論の提案をおこなった。

1) 現状での都市域におけるヒートアイランド対策は、屋上緑化や保水性舗装等陸上での対策が主流である。既往の陸上対策のみでは限界があり、本提案は現状でも首都圏を冷却している海風をさらに有効に利用しようとする点に新規性を有する。

2) 夏季の東京湾奥では密度成層が極端に成長し、底層に蓄積した高濃度の栄養塩により、貧酸素化（場合によっては無酸素化）しやすい。東京湾の水質を改善するにはこのような富栄養化した底層の海水を湾外へ送り出すとともに、密度成層をできる限り解消することが望まれる。水質の総量規制は、このような東京湾の水質を改善するにあたって大きな役割を果たしてきたが、現状では

さらに水質を改善する抜本的な方策がない。本研究で提案する海洋深層水の湾奥への導入は、これまでの水質浄化対策とは異なった新たな方策であり、海洋深層水の湾奥への導水による希釈効果のほか、湾内の海水循環による底層の低温水の利用を考えている。通常、ダム湖では同様な循環をエアレーションによって実施する例が多いが、本研究では重い海洋深層水を沈降させ、成層化した海水を混合させるという新たな海水の循環を考慮している。また、このようにすることで密度成層による貧酸素化を防止できるとともに表層海水温を低減することができる。このような海水の混合方法は革新的であり、東京港、お台場周辺のような面積であれば十分実現可能性がある。

3) さらに、導水による環境への影響については、今後生態系シミュレーション等での検討を行うとともに、海洋深層水の段階的な導水ならびに環境モニタリングを既往環境観測点等において行い、影響の最小化に配慮するものである。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究C（企画調査）「東京の暑熱緩和のための海洋深層水導水による東京湾海面冷却事業のFSに向けた検討」（代表・一ノ瀬俊明）をシーズとしてはじめられた研究の成果である。ヒアリングにご協力いただいた（株）国土環境、（株）JFEエンジニアリング、（社）海洋産業研究会の皆様、日本大学理工学部・近藤健雄先生（海洋建築）、東京大学名誉教授・平野敏行先生（海洋生物学）、東京都環境科学研究所・安藤晴夫先生（水質環境）、（独）港湾空港技術研究所理事（当時）・細川恭史先生（海洋環境）、埼玉大学大学院教授・浅枝隆先生（水域生態系・都市熱環境）、東京大学大学院教授・山室真澄先生（水域生態系）ほかの皆様には感謝いたします。

引用文献

- 1) 一ノ瀬俊明：地方自治体におけるヒートアイランド対策～環境省委員会の活動～，大気環境学会誌，37，6，pp. A71-A84，2002.
- 2) 木内豪：都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化～東京都区部下水道と東京湾を事例として～，水工学論文集，47，pp.25-30，2003.
- 3) 安藤晴夫，柏木宣久，二宮勝幸，小倉久子，山崎正夫：東京湾における水温の長期変動傾向について，海の研究，12，pp. 407-413，2003.
- 4) 佐々木淳，磯部雅彦，今井誠：東京湾における赤潮の消長要因に関する考察，海岸工学論文集，46，pp.1021-1025，1999.
- 5) 清野聡子ら：住民との合意形成に基づく海岸整備計画検討の実践，海洋開発論文集，19，pp.95-100，2003.
- 6) Ichinose T. Shimodozono K. and Hanaki K.: Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 33, pp. 3897-3909, 1999.
- 7) Ichinose T.: Regional warming related to land use change during recent 135 years in Japan, *Journal of Global Environment Engineering*, 9, pp. 19-39, 2003.
- 8) 近藤純正編著：水環境の気象学～地表面の水収支・熱収支～，朝倉書店，350p，1994.
- 9) 和田明著：海洋環境水理学，丸善，329p，2007.
- 10) ヒートアイランド対策関係府省連絡会議：ヒートアイランド対策大綱，2004.
- 11) 社団法人日本海洋開発産業協会，清水建設株式会社，株式会社関西総合環境センター：エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発～モデル実証研究及び基盤研究～，2004.
- 12) 山田佳昭ら：相模湾における海洋深層水の含有成分，神奈川県環境科学センター研究報告，pp.109-112，2004.
- 13) 千葉県水質保全課：公共用水域地点別水質測定結果，2004.
- 14) 石谷久ら：ヒートシンクを利用した大規模冷房システムの開発（大都市における夏季高温化対策の検討），新エネルギー・産業技術総合開発機構提案公募型・最先端分野研究開発事業研究成果報告書 H-0307，1997.
- 15) 鈴木高二朗，竹田晃，下司弘之，亀山豊，清水勝義：東京湾口のフェリー観測データからの潮汐成分と残差流成分の推定，海岸工学論文集，52，pp.331-335，2005.
- 16) 岡田知也，中山恵介，野村宗弘，古川恵太：東京湾湾奥における表層の植物プランクトンに対する底層栄養塩の影響，海岸工学論文集，48，pp.1086-1090，2001.

(2009.2.23 受付)

(2009.8.6 受理)

Research on Effect of Urban Thermal Mitigation by Heat Circulation through Tokyo Bay

Toshiaki ICHINOSE¹, Kazunori SUZUKI², Kojiro SUZUKI³ and Satoko SEINO⁴

¹Social and Environmental Systems Division, National Institute for Environmental Studies
/ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

²Yachiyo Engineering Co., Ltd.

³Port and Airport Research Institute

⁴University of Tokyo

To mitigate urban thermal conditions, we have formulated a new strategy that effectively uses the sea breezes flowing into the Tokyo Metropolitan Area from Tokyo Bay with efficiency, when the temperature goes above 30 °C on a typical summer's day. Tokyo Bay can develop high surface water temperatures in response to high daily levels of anthropogenic heat discharge. If cool breezes were to flow into the Tokyo Metropolitan Area from Tokyo Bay on a typical summer's day, then it might be possible to mitigate urban heat more smoothly. To decrease the bay surface temperatures and thus enhance the cooling effect of the sea breezes, we therefore need to introduce deep-ocean water (from 300 m below the surface) to the surface waters of Tokyo Bay when they are affected by these warm discharges. In numerical studies, we found that a 2 °C decrease in bay surface temperature would lead to a 1 °C cooling of central Tokyo and a 1 m/s enhancement of the bay breeze. We also demonstrated (1) a mechanism of heat exchange between the bay surface and the atmosphere; and (2) a mechanism for keeping the bay surface cool after introduction of the deep-ocean water.