

東京湾及び周辺水域の長期水温変動特性

八木 宏* ・石田大暁** ・山口 肇***
木内 豪**** ・樋田史郎***** ・石井光廣*****

本研究では、複数の環境計測データを組み合わせることによって、東京湾及び周辺水域の長期的な水温変化の傾向とその原因を明らかにすることを試みた。その結果、東京湾では冬季を中心として水温上昇傾向にあり、東京湾に流入する河川にも冬季に水温上昇の傾向が見られること、一方、同じ閉鎖性水域でも伊勢湾、大阪湾では水温変化の傾向が東京湾ほど顕著でないことがわかった。さらに、1966~1975年及び1993~2003年のそれぞれ10年間の月平均水温から東京湾全体の貯熱量年間変動特性の長期変化を調べた結果、貯熱量は10~3月の期間において近年大きくなっており $8 \times 10^4 \text{ TJ}$ 程度増加(湾全体平均で 1.7°C の水温上昇)していること、また、貯熱量の増加とともに高塩分化の傾向があり、東京湾の水温上昇は外海域からの熱供給の増加が主要な原因の一つであると考えられる。

1. はじめに

閉鎖性内湾域の水質・生態環境を考える上で、温熱環境は重要な支配因子の一つである。都市の大気環境については、ヒートアイランド現象により気温が上昇していることが都市気象学の数多くの研究によって既にその詳細が明らかにされつつあるが、東京湾のように都市に面した水域において、水温が都市の影響を受けてどのように変化しているかは十分に明らかにされていない。

最近、安藤ら(2003)は、長期間にわたる公共用水質データに基づいて、東京湾においては冬季を中心として長期的な水温上昇の傾向があることを指摘しており、また木内(2004)は、近年の下水温の上昇が東京湾への熱フラックスの増加につながる可能性を指摘している。今後、東京湾のような都市型閉鎖性水域の熱環境、特に長期的な水温変化の傾向やそのメカニズムの詳細を明らかにしていくためには、多様な計測データに基づく傾向分析の精緻化やそれに基づく水温変化メカニズムの解明が不可欠である。

そこで本研究では、公共用水質データも含めた複数の環境データを組み合わせることによって、河川も含む広範囲の水温変化の実態把握と東京湾以外の都市型閉鎖性水域との比較、さらには東京湾全体の貯熱量の変化や塩分との関係を検討することによって、東京湾の長期的な水温変動の原因を把握することを試みた。

2. 対象とした観測データ

本研究では、公共用水質データも含めた複数の環境データを組み合わせることによって、東京湾及び東京湾の周辺河川、さらには東京湾以外の都市型閉鎖性水域と

* 正 会 員 博(工) 東京工業大学助教授 大学院情報理工学研究所
** 学生会員 東京工業大学理工学研究所土木工学専攻
*** 富士通(株)
**** 正 会 員 博(工) 土木研究所水工研究グループ水理水文チーム
***** 神奈川県水産総合研究所海洋情報部
***** 千葉県水産研究センター富津研究所

の比較を行うために、伊勢湾、大阪湾を対象とした水温長期変動特性の解析を行った。それぞれの水域の解析に用いた観測データの種類、期間、計測時間間隔、測定深及び観測点位置は表-1、図-1に示す通りである。

3. 解析結果と考察

(1) 長期的な水温変化の傾向

はじめに、東京湾とその周辺河川、伊勢湾、大阪湾のすべての水域に共通している表層水温データに基づいて長期的な水温変化の傾向を検討した。検討方法は、対象とした観測データを1~12月までの各月の代表水温として(東京湾フェリー航走水温データについては、毎日の計測値であるため1ヶ月平均値を算出)、その長期的な水温変化の傾向に統計学的な有意性が認められた場合(t検定において有意水準5%以下)に長期水温変化率($^\circ\text{C}/\text{y}$)を算出し、その空間分布構造や季節変動特性から東京湾と周辺河川の長期水温変動特性、さらには伊勢湾、大阪湾との比較を行った。

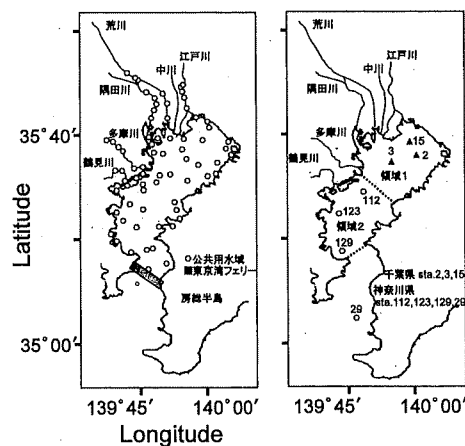
図-2に、東京湾及び周辺河川について、1~12月の各月の長期的な水温変化率の空間分布を示す。これを見ると東京湾については、冬季(12~3月)に湾口に近い神奈川県側海域を中心として水温上昇の傾向があり、6月には湾奥部千葉県側を中心に低温化の傾向が見て取れる。一方、東京湾周辺の河川については、荒川、鶴見川を中心として10~4月の期間に顕著な水温上昇傾向が見られた。

次に、東京湾の表層水に見られた水温変化の空間構造を把握するために、水温鉛直分布データが充実している神奈川県水産総合研究所定期観測データ及千葉県水産研究センター定期観測データに基づいて、東京湾の湾奥部から湾口域にかけて(Sta. 3, 112, 123, 129, 位置は図-1参照)の水温鉛直構造の長期的な変化を1966~1975年、1993~2002年のそれぞれ10年間平均値を比較することで検討した(図-3に奇数月のみ表示)。その結果、①対流期(10~4月)には、最大 2°C 程度の全水深的な水温上昇がみられるが、成層期(5~9月)は水温の長期

表一 解析対象とした観測データ

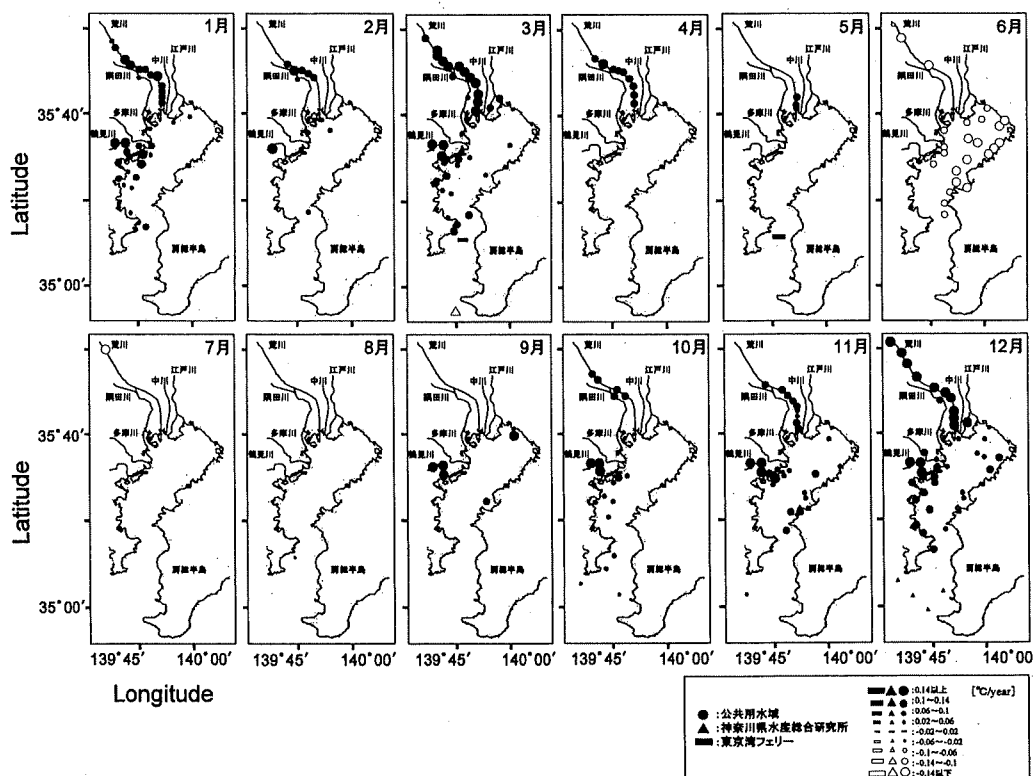
対象水域	データの種類	期間(年)	計測間隔	測定深
東京湾	公共用水域水質データ	1979~1999	1ヶ月	表層・底層
	神奈川県水産総合研究所定期観測データ	1966~2003	1ヶ月	0, 10, 20, 30, 50, 75 m 深
	千葉県水産研究センター定期観測データ	1966~1975 1993~2002	1ヶ月	0, 10, 20, 30, 50 m 深又は底層
	東京湾フェリー航走水温データ	1984~2003	1日	表層 (5 m 深)
東京湾周辺河川	公共用水域水質データ	1979~1999	1ヶ月	表層・底層
伊勢湾大阪湾	公共用水域水質データ	1978~1999	1ヶ月	表層・底層

※千葉県水産研究センター定期観測データは各期間の10年平均値。



(a) 公共用水域データ等 (b) 神奈川県・千葉県の観測点

図一 水温観測点位置及び貯熱量計算のための設定領域



図二 東京湾及び周辺河川の長期的な水温変化率

変化の傾向が対流期ほど明確でない、②対流期の長期的な水温上昇は湾口域から湾奥部まで広範囲に及ぶが、水温変化量は湾口に近い海域において大きい傾向があるなどの特徴がわかった。

図一4 は、伊勢湾・大阪湾の表層水温の長期変化率を東

京湾において顕著な水温上昇が見られた冬季(12~3月)について同様に表示したものである。これを見ると、湾奥域に水温上昇している部分が多少存在するものの、東京湾のような湾スケールの顕著な水温変化の傾向は見られない。この様に同じような閉鎖性海域であっても、東

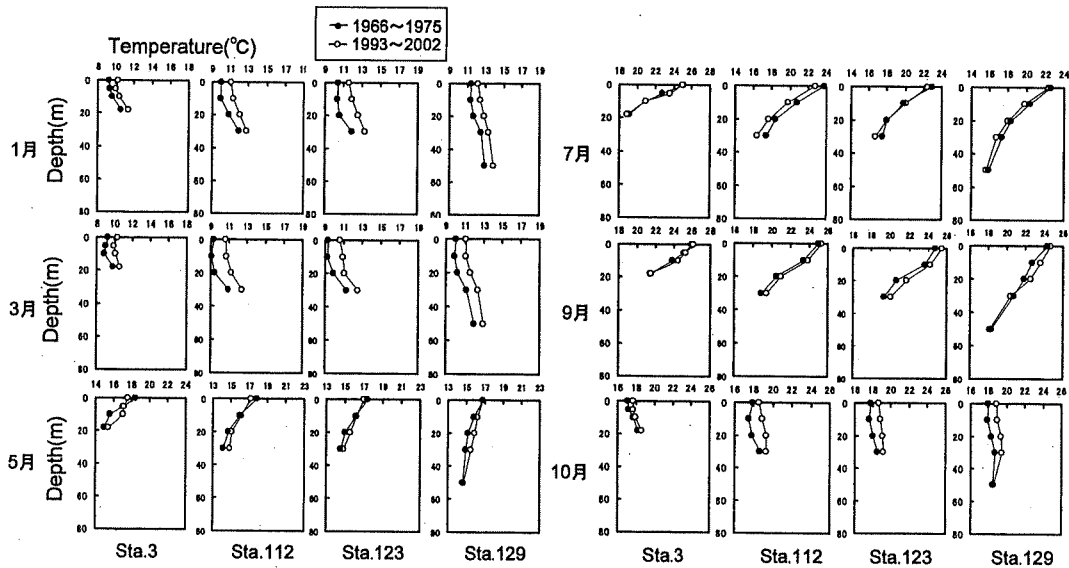


図-3 東京湾内 (Sta. 3, 112, 123, 129) の水温構造の長期的な変化 (1966~1975年, 1993~2003年の10年間平均値の比較)

京湾と伊勢湾・大阪湾では長期的な水温変化の傾向に違いがあることがわかる。

(2) 東京湾の貯熱量年間変動特性とその長期的変化

次に、対流期に見られる東京湾の水温上昇現象を定量的に評価するために、東京湾全体の貯熱量を算出し、それが過去30年程度のスケールでどのように変化しているかを調べた。東京湾の水温データのうち、神奈川県、千葉県 の定期観測データは、時間情報 (1966年のデータまで存在)、空間情報 (鉛直分布が計測されており東京湾内全体に観測点が分布) が充実しており、水温だけでなく塩分データもあることから、ここではこれに基づいた検討を行った。具体的には、神奈川県 (Sta. 112, 123, 129)、千葉県 (Sta. 2, 3, 15) の計測値について、1966~1975年、1993~2002年それぞれの10年間平均値 (水温、塩分) を1年間の各月について算出し、それを鉛直方向に補間した1m間隔の鉛直分布データを貯熱量計算の基礎データとした。ここでは、観音崎と富津を結ぶラインの内側を東京湾と定義し、貯熱量の算定にあたっては、東京湾内をさらに湾奥側海域 (領域1)、湾口側海域 (領域2) に分け (図-1(b) 参照)、それぞれの領域について次式によって貯熱量を算出し、その合計を東京湾全体の貯熱量とした。なお、領域2については、領域内の海底地形変化が大きいため、Sta. 112, 123, 129に対応した小領域にさらに分割し、各小領域の貯熱量の合計を領域2の貯熱量として計算した。

$$Q_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} V_{ij} \quad (i=1, 2) \dots \dots \dots (1)$$

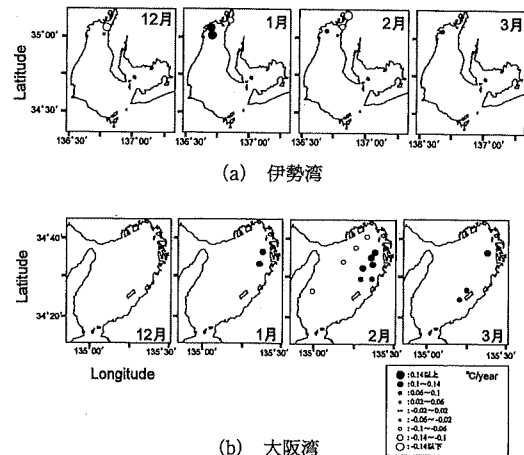


図-4 伊勢湾・大阪湾の長期的な水温変化率

ここで、 T_{ij} 、 V_{ij} ：領域 i の水面から j 番目の層の水温及びその層の海水体積 (層厚 1m)、 n ：領域 i の層数、 Q_i ：領域 i の貯熱量 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^3$) をそれぞれ示している。

図-5(a)は、上記の方法で算出した東京湾の全貯熱量の年間変動を1966~1975年と1993~2002年について比較したものであり、図中には両者の差をエネルギー表示として棒グラフでも表示している。これを見ると、貯熱量は成層期には大きな違いが見られないが、対流期にあたる10~3月の期間において、近年 (1993~2002年) 大きくなっており、その増加量は $8 \times 10^4 \text{TJ}$ 程度 (湾全体平均で 1.7°C の水温上昇) になっている。図-5(b)は、各

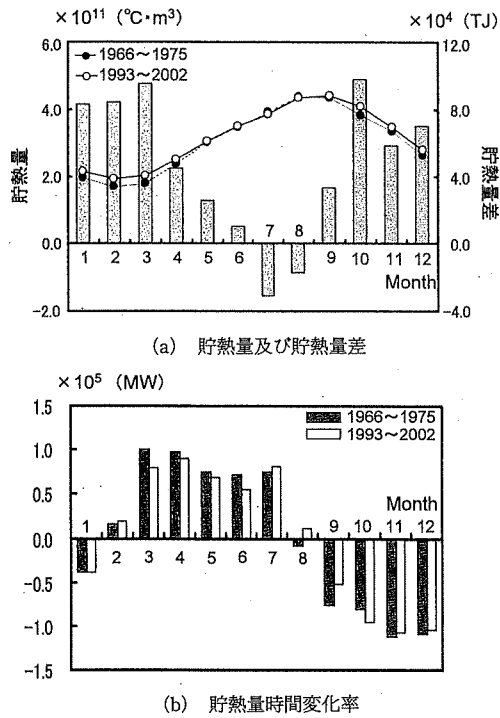


図-5 東京湾の貯熱量及び貯熱量時間変化率の年間変動 (1966~1975年, 1993~2003年の10年間平均値の比較)

月の貯熱量の差から算出した貯熱量時間変化率の年間変動を示したものである。貯熱量の長期的な増加が明確な冬季(12~3月)については、貯熱量時間変化率に大きな変化は見られず、むしろ特徴的なのは、成層期から対流期に移行する時期(9月)に1966~1975年の方が1993~2002年より貯熱量時間変化率が負の大きな値を示していることである。このことは、30年前(1966~1975年)の方が秋季の水温冷却が顕著であり、近年は秋季に水温が低下しにくくなっていることを示している。

(3) 長期的な水温変化と塩分変化の関係

次に、長期的な水温変化と塩分変化の関係について検討を行った。図-6は、前節で貯熱量算出に用いた1966~1975年, 1993~2002年それぞれの水温・塩分の10年間平均値について、水温変化量($\Delta T = T_{new} - T_{old}$)と塩分変化量($\Delta S = S_{new} - S_{old}$)の関係(添え字oldが1966~1975年の平均値, newが1993~2002年の平均値を表す)、図-1(b)に示した領域1 (Sta. 2, 3, 15: 湾奥側海域), 領域2 (sta. 112, 123, 129: 湾口側海域)それぞれについて示したものである。図中では、1年間を4つの期間(1~3月, 4~6月, 7~9月, 10~12月)に分けて表示している。これを見ると、湾口側である領域2については、データのばらつきはあるものの、対流期(10~3月)に、第1象限(高温-高塩分)に

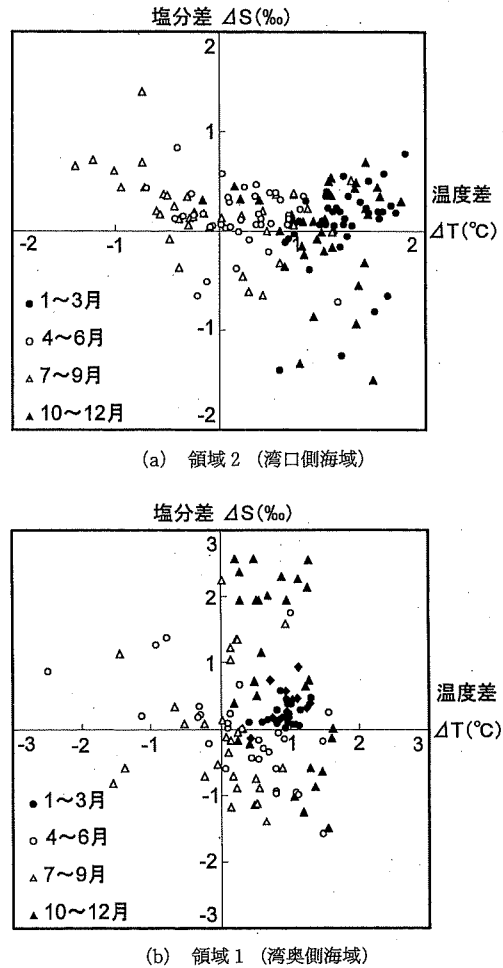


図-6 長期的な水温変化量-塩分変化量の相関図

多く分布しており、長期的な水温上昇が塩分上昇に対応したものであることがわかる。湾奥側の領域1については、陸水影響を受けるために塩分差の変動が大きいものの、対流期に第1象限(高温-高塩分)に分布する傾向は領域2と同様である。このように長期的な水温上昇が高塩分を伴っているという事実は、対流期において東京湾で発生している30年スケールの長期的な水温上昇現象が、外海影響の増大にともなう外海域から内湾域への熱フラックスの増加が主要な原因の一つであることを示している。このことは、東京湾の長期的な水温変化の原因として外海影響の可能性を指摘した安藤ら(2003)の結果を支持するものである。

(4) 東京湾の長期水温変化特性のまとめ

以上に示した長期的な貯熱量変化や水温変化と塩分変化の相関関係を併せて考えると、東京湾の長期的な水温変化の仕組みを以下のようにまとめることができる。一般に、対流期には海面冷却が進み海域から熱が奪われ水

深が浅い内湾域では外海域より水温が低くなる。前節で示したように、近年外海影響が大きくなったとすれば、外海から内湾域への熱供給（熱フラックス）が大きくなり、内湾の水温はその時点の海面冷却とバランスするまで上昇する。長期的な水温上昇が顕著な冬季(12～3月)は、水温が比較的安定した時期であり、外海域からの熱フラックスの増加に対応して、海面からの放熱量（海から大気への熱フラックス）が増加することで、熱的に平衡に近い状態を形成し、30年前と現在で比較すると貯熱量は増大し貯熱量時間変化には大きな変化が見られない(図-5参照)。これに対して、成層期から対流期への移行時期(9月)は、冷却期であり熱的な平衡状態に達していないために、外海からの熱供給量の増加に対応して、30年前と比べて水温低下の遅れ(貯熱量時間変化の減少)がより顕著な形で現れると考えられる。さらに、このような対流期の水温上昇が東京湾において顕著であり、伊勢湾・大阪湾において明確ではないのは、それぞれの湾の外海影響の受け易さの違いによるものと考えられ、東京湾は、伊勢湾・大阪湾に比べてより外海水影響を受け易い構造となっていることが長期的な水温変化がより明確に現れた原因と考えられる。

4. ま と め

本研究では、複数の環境計測データを組み合わせることによって、東京湾及び周辺河川の長期的な水温変化の傾向とその原因を明らかにすることを試みた。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 東京湾では、冬季を中心として水温上昇傾向があり、東京湾に流入する河川にも冬季に水温上昇の傾向が見

られた。一方、同じ閉鎖性水域であっても伊勢湾、大阪湾では水温変化の傾向が東京湾ほど顕著でない。

- (2) 1966～1975年及び1993～2003年のそれぞれ10年間の各月平均水温から東京湾全体の貯熱量年間変動特性の長期変化を調べた結果、貯熱量は10～3月の期間において近年大きくなっており、 8×10^4 TJ程度増加(湾全体平均で 1.7°C の水温上昇)している。
- (3) 長期的な水温変化と塩分変化の関係を調べた結果、高水温化と同時に塩分化の傾向があり、東京湾の長期的な水温上昇は外海域からの熱供給増加が主要な原因の一つと考えられる。

謝辞：本研究を行う上で解析結果の図作成等に協力してくれた東京工業大学大学院修士1年瀬戸徹君、工学部土木工学科4年井瀬肇君に謝意を表します。本研究は科学研究費基盤研究(c)『相互作用系として捉えた河川—沿岸域間の動的な水環境形成機構解明と河口機能の評価』(代表者：八木 宏，課題番号：15560441)，とうきゅう環境浄化財団，河川環境管理財団の補助を受けて行われたものである。また、本研究の実施にあたっては科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業の支援を受けた。

参 考 文 献

- 安藤春夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・山崎 正 (2003): 東京湾における水温の長期変動傾向について，海の研究，Vol. 12, No. 4, pp. 407-415.
- 木内 豪 (2004): 都市の水・エネルギー利用が水域に及ぼす影響のモデル化と東京都都市部下水道への適用，水文・水資源学会誌，Vol. 17, No. 1, pp. 13-21.