

— 速報 —

東京湾における水温の長期変動傾向について*

安藤 晴夫[†]・柏木 宣久[‡]・二宮 勝幸^{**}・小倉 久子^{††}・山崎 正夫[†]

要 旨

1970年代から月1回実施されている公共用水域の水質モニタリングデータを用いて、東京湾全域の表・底層水温の長期的な変動傾向を月別に検討した。その結果、水温の長期変動傾向は季節により異なり、概ね5月～8月には下降傾向、10月～3月には上昇傾向が認められた。また、地域的にも傾向が異なり、外洋水の湾内への流入経路と考えられる湾南西部の海谷に沿う地点で特にこうした上昇・下降傾向が顕著であった。外洋水の水温は湾内の海水に比べて夏季には低く、冬季には高いことから、湾内への外洋水流入量が長期的には増加傾向にあると仮定すると、こうした傾向をよく説明できる。

キーワード：東京湾, 海水温の長期変動, 外洋水流入

1. はじめに

東京都心の年平均気温はこの100年間で約3°C上昇し、その上昇率は、日本の大都市の中でも最も大きいと報告されている(気象庁, 2002)。こうした都市部の気温上昇は、都市活動に伴う自動車やオフィス、家庭などからの人工廃熱量の増加や都市開発による水面や緑地面積の減少などが主な原因と考えられる(環境省, 2001)。

都市活動で生じた廃熱の一部は、下水や河川水、工場排水とともに東京湾に流入している。それによって東京湾の水温が上昇した場合には、水質や生態系への影響が考えられるほか、夏季に都心部に吹き込む海風の冷却効果を弱め、陸域の気温上昇を一層促進する恐れがある。したがって、東京湾における水温の変動傾向を明らかにすることは、単に海域環境への影響だけ

でなく、都市域への影響やヒートアイランド抑制対策を考える上でも非常に重要になっている。

東京湾の水温については、東京湾の周辺海域で、冬季に経年的な上昇傾向があることが報告されている(木内, 2003)。しかし、東京湾全域における水温の20年以上にわたる長期的な変動傾向については、広域的に統一された方法で長期間継続して観測されたデータが数少ないため、これまでほとんど報告されていない。

ここでは、東京湾の水質モニタリングの一環として観測された水温データを使用して、東京湾全域の水温の長期変動傾向を解析した結果について報告する。

2. 解析方法

2.1. 使用したデータ

東京湾では、1970年代から、公共用水域水質測定計画に基づいて、定点での定期水質調査が実施されている。2002年度現在で85の測定地点があり、そのうちの主要な地点では月1回の頻度で表層(水面下0.5 m)と底層(海底上1 m, ただし水深が50 mを超える地点では

* 2003年4月7日受領; 2003年5月1日受理
著作権: 日本海洋学会, 2003

[†] 東京都環境科学研究所; 〒136-0075 江東区新砂1-7-5,
主著者 e-mail address: hando@kankyo.metro.tokyo.jp

[‡] 統計数理研究所; 〒106-8569 港区南麻布4-6-1

^{**} 横浜市環境科学研究所; 〒235-0012 横浜市磯子区滝頭1-2-15

^{††} 千葉県環境研究センター; 〒290-0046 市原市岩崎西1-8-8

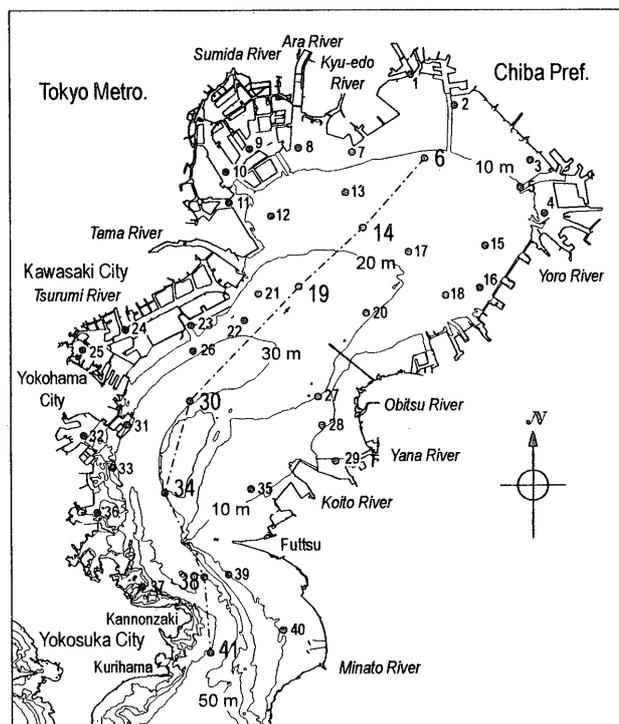


Fig. 1. Stations for water quality monitoring in Tokyo Bay.

50 m) の水質測定が行なわれ、調査結果が公表されている。本研究では、これらの地点のうちから、測定が長期間継続され、湾全域に広く分布する 41 地点 (Fig. 1) の表層と底層の水温データを使用した (東京都, 1976-94, 1995-97; 千葉県, 1976-97; 神奈川県, 1976-97)。水温データの解析は 1976 年 4 月~1998 年 3 月の 22 年間 (264 か月) を対象として行なった。

2.2. 回帰係数の算出

東京湾全域の表層及び底層における水温の変動傾向を明らかにするために、各地点の水温データを、月別に分け、Fig. 2 の一例に示すように x 軸を年度、y 軸を水温とした散布図に当てはまる回帰直線の傾き (回帰係数) を最小二乗法により計算した。すなわち 41 地点、2 層、12 か月の計 984 ケースの回帰係数を求めた。

この回帰係数の値は、1 年当りの上昇水温 ($^{\circ}\text{C yr}^{-1}$) を表し、値が負の場合には水温が下降傾向にあることを示している。また、得られた回帰係数について、t 検定によりその有意性を検討した。

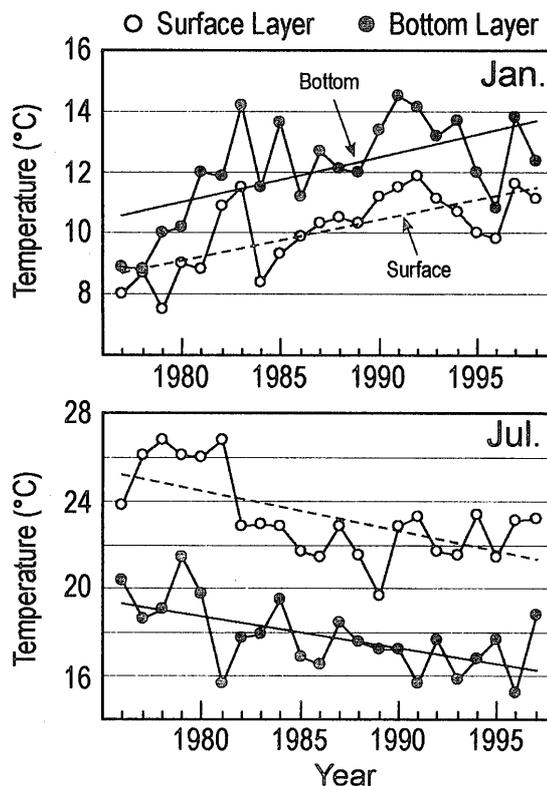


Fig. 2. Trends of water temperature in January and July at Sta. 21.

2.3. 湾口と湾奥の水温差

東京湾の湾奥部と湾口部の水温の関係を検討するため、22 年間の測定データから外洋に最も近い Sta. 41 と他地点の水温の差を“他地点の水温 - Sta. 41 の水温”として計算した。すなわち水温差は、Sta. 41 の水温の方が低ければ、正、高ければ負の値を示す。次に各地点の結果から、月別に水温差の平均値を求め、その月の代表値とした。例えば、Sta. 30 における 1 月の水温差は、計算で得られた毎年 1 月の水温差 22 個の平均値である。

3. 長期変動の解析結果

Fig. 3, 4 は、年間 (4 月~3 月) にわたる、各地点の回帰係数の値を記号化して、地図上にプロットしたもので、○は回帰係数が正 (上昇傾向)、△は負 (下降傾向) の地点を表している。回帰係数の絶対値の大きさ

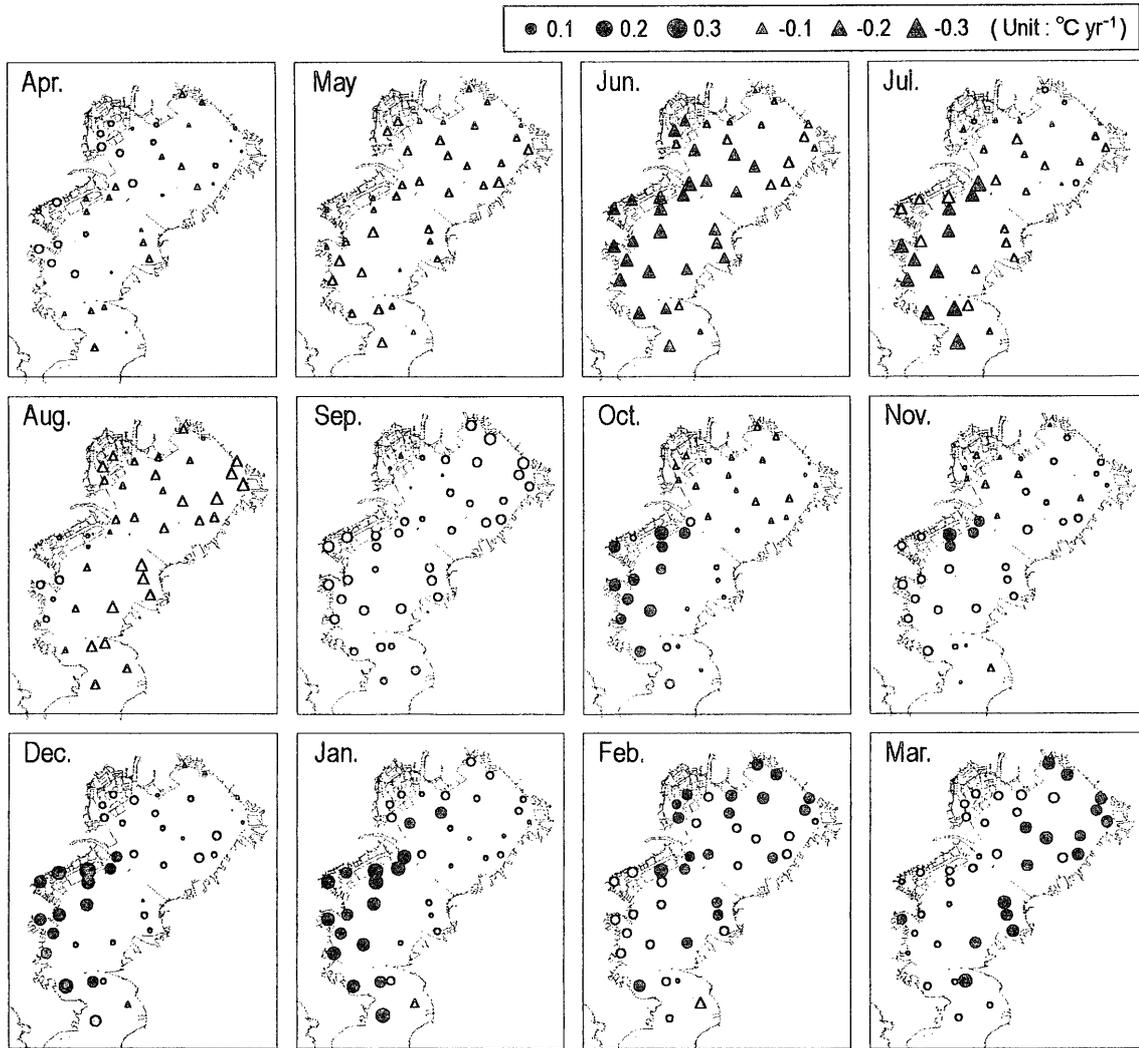


Fig. 3. Water temperature trends in the surface layer at each month during the period from April 1976 to March 1998. Each plot shows the trend being statistically significant (\blacktriangle , \bullet) or non-significant (\triangle , \circ).

は、記号の大小に対応させた。また、黒塗りの \bullet と \blacktriangle は、回帰係数が有意と判定された地点を示し、多くは回帰係数の絶対値も大きい。なお、Fig. 3は表層、Fig. 4は底層データについての結果である。

3.1. 表層水温の変動傾向

表層 (Fig. 3) では、5月～8月にはほぼ全域で水温が下降傾向を示し、特に6, 7月には、下降率の大きい \blacktriangle で示す地点が多数存在する。また7月には、湾口部から多摩川河口までの西岸寄りの地点に、下降率の大き

い地点が集中している。水温の下降率が最も大きかったのは、7月のSta. 21 (浮島沖) の値で $-0.19\text{ }^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ であった。

一方、9月には、水温が上昇傾向へと転じ、その後3月までは全域で水温が上昇傾向を示している。また、上昇率の高い \bullet で示す地点の位置は、10月～12月までは湾南西部のみに認められ、その後1月には湾奥西岸まで、2月には、湾奥全体まで拡がり、この時期には湾南西岸付近の地点の上昇傾向は小さくなっている。この間に最も高い水温上昇率を示したのは、12月のSta. 23 (川崎防波堤沖) で、その値は $0.19\text{ }^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ であった。

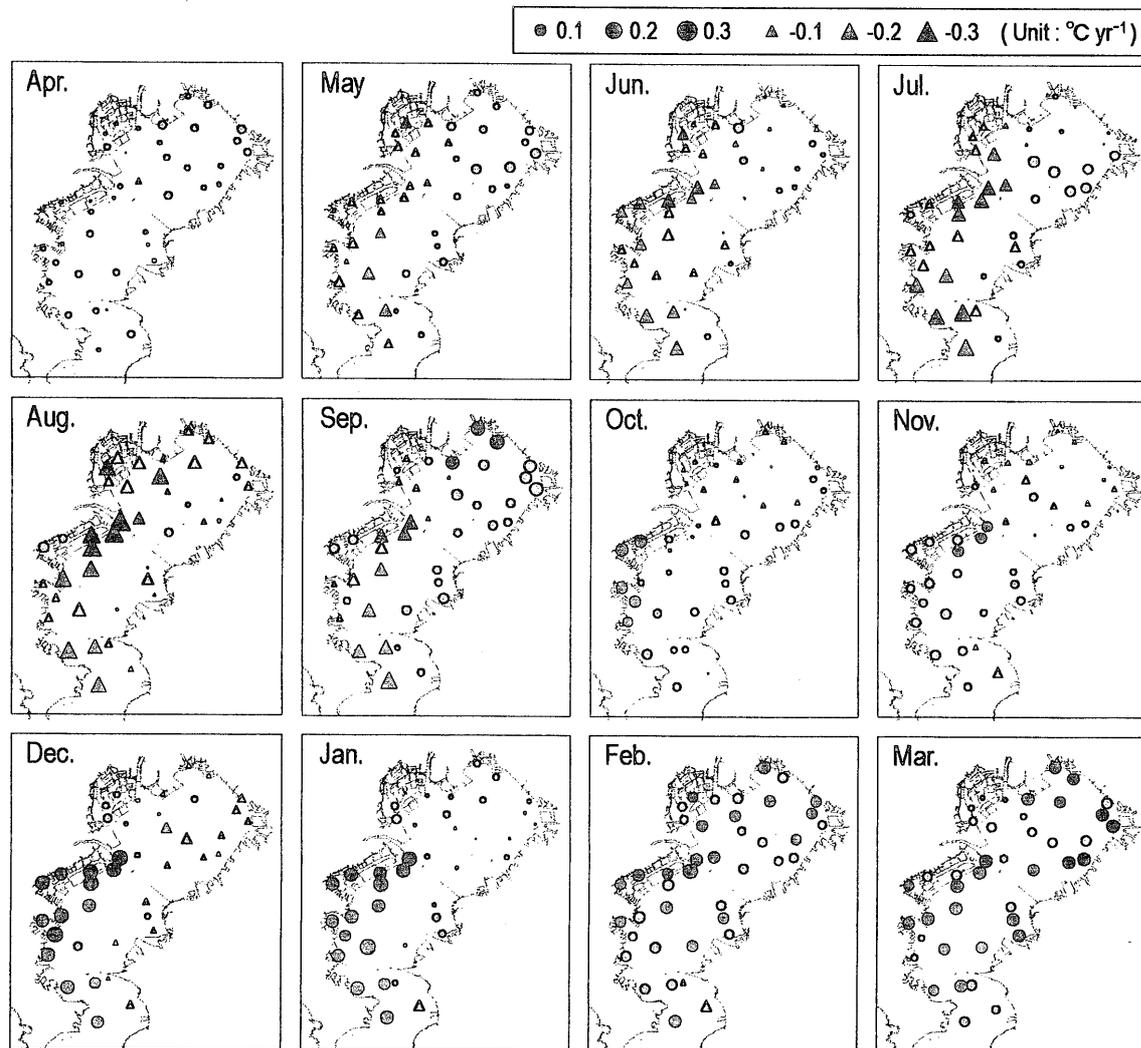


Fig. 4. Water temperature trends in the bottom layer at each month during the period from April 1976 to March 1998. Each plot shows the same as in Fig. 3.

3.2. 底層水温の変動傾向

底層 (Fig. 4) では、表層とやや異なり、多摩川河口以南の西岸寄りの地点では5月～9月まで水温は下降傾向であるのに対して、湾奥部の千葉県寄りの地点では、8月を除いてこの間の水温は、上昇傾向を示している。また9月には、湾奥部の地点では水温上昇率が大きいのに対して、湾口に近い地点では水温下降率が大きく、両者で逆の傾向になっている。一方、10月以降3月までは、表層と同様な変動傾向で、水温の上昇傾向を示す地点が次第に湾奥部に移動し、2、3月には

東京湾全域で上昇傾向が大きくなっている。

底層の水温で、下降率が最も大きかったのは、8月のSta. 21で、 $-0.32\text{ }^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ 、上昇率が最も大きかったのは1月のSta. 34 (中の瀬南) で $0.18\text{ }^{\circ}\text{C yr}^{-1}$ であった。

4. 考察

4.1. 水温変動の要因

前述の結果は、東京湾の水温が夏季には経年的な下降傾向、冬季には上昇傾向にあることを示している。

東京湾の水温は、日射や風による海面での熱交換、海水の上下混合、河川水や温排水、外洋水の流入など、様々な要因によって影響を受ける(宇野木, 1985)。蓮沼ら(1983)は、東京湾の表面水温が、風により数日間で数°C変化する場合があることを報告している。また、日比野ら(1999, 2000)は、詳細な現地観測の結果に基づき、東京湾の水温に、黒潮の接近や朔望周期に伴う外洋水の流入などが関係していることを述べている。今回使用した水温データは、公共用水域水質測定計画の留意事項に基づき、比較的水質が安定した日の観測結果であると考えられるが、観測頻度が月1回と限られるため、推定された長期変動傾向には、短期変動が影響している可能性があることは考慮する必要がある。

ここでは、傾向変動の地域的な特徴から水温に影響する要因を検討した。解析結果(Fig. 3, 4)によれば、2, 3月を除いて、水温の上昇および下降傾向が顕著に現れている地点は、主に東京湾の多摩川河口以南の西岸寄り海域に位置している。東京湾のこの海域は、海底が谷を形成し、外洋水の湾内への流入経路であることから、こうした水温の変動要因に外洋水の流入が関係していることが推察される。

4.2. 湾内水温に対する外洋水の影響

Fig. 5は、東京湾の中央付近に位置する湾奥から湾口までの6地点(Fig. 1の一点鎖線で結んだ地点: Sta. 6, 14, 19, 30, 34, 38)について、外洋に最も近いSta. 41との水温差の年間の変化を示したものである。Sta. 41は浦賀水道に位置し、冬季には熱塩フロントが形成され、短期変動が大きいと言われているが(柳, 1990)、今回のデータについて求めた月別の水温変動幅は、他の地点とあまり差が無かった。

外洋水は、主に湾口部の下層から東京湾内へ流入すると言われている(堀江, 1993)。また、塩分の鉛直分布によれば、外洋水の影響は湾奥部の水深が10 m程度の地点の底層にも及んでいると考えられる(宇野木ら, 1977)。そこで、●で示す底層の水温差についてみると、Sta. 19を除いて、概ね各地点とも5月と10月に湾口部との水温差が非常に小さくなり、その間の6月~9月

は湾内海水の水温の方が高く、11月~4月は湾口海水の方が水温は高い傾向が認められる。したがって、流入過程における風や日照等が水温への影響が小さいと仮定すれば、湾内への外洋水流入量の増加は、夏季には湾内海水の水温を低下させ、冬季に上昇させると考えられる。なお、Sta. 19は、多摩川河口に位置することから、河川の影響を強く受けていて、他の地点とは異なる傾向を示していると考えられる。

以上の結果から、外洋水の湾内への流入量が年間を通じて増加傾向にあると仮定すると、Fig. 4で認められるように、概ね5月~9月は水温が下降傾向、10月~3月は水温が上昇傾向を示すことが説明できる。

一方、表層において10月~3月に湾全域で認められる底層と同様な水温上昇傾向は、この時期に成層構造が崩れて上下層の混合が起こり、底層に流入した外洋水が表層まで影響を及ぼすためと考えられる。なお、ヒートアイランド現象による気温の上昇傾向は、夏季よりも冬季に顕著であることが知られており、下水や工場排水等に伴って湾奥部に流入する排熱の影響もこの時期に強まると考えられる。したがって、2月~3月の最湾奥部東岸に認められる水温の上昇傾向は、外洋水流入の影響よりはむしろ、都市活動の影響で暖められた表層の海水が上下混合により底層水の温度上昇傾向に寄与している可能性がある。

5. 結論

従来、都市活動の影響によって水温の上昇傾向のみが指摘されていた東京湾で、気温の最も高くなる夏季に、水温はむしろ下降傾向にあることが明らかになった。その原因は、東京湾内へ流入する外洋水の量が長期的に増加していると仮定することで一応説明が可能であると考えられる。すなわち、外洋水の水温は、湾内の海水の水温と比較して、夏は低く、冬は高いことから、その流入量の増加は、夏季の水温下降、冬季の水温上昇をもたらすと考えられるからである。

ここでは、東京湾の水温データを解析した結果、当初予想していなかった夏季と冬季での全く逆の長期変動傾向が認められたことや、特にヒートアイランド現象との関連で温度上昇が懸念されている夏季の水温が

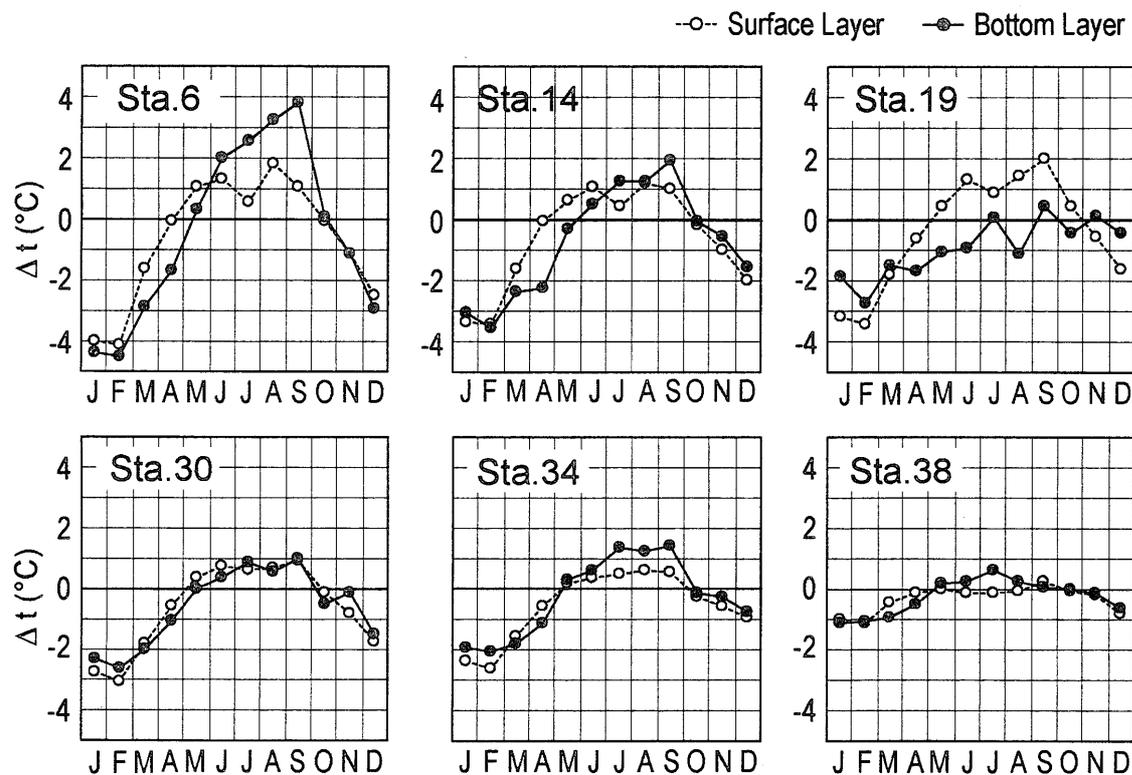


Fig. 5. Water temperature differences between Sta. 41 and other stations.

Δt = water temp. of Sta. n - water temp. of Sta. 41 (n = 6, 14, 19, 30, 34, 38)

むしろ下降傾向にあることが明らかになったため、とりあえず、その結果について早急に取りまとめて報告した。

今回のデータでは、観測頻度が月1回という制約があり、解析結果から予想された外洋水流入量の増加についての定量的な解釈や、その原因となる現象の解明については、今後の課題として残されている。

References

- 千葉県 (1976-97): 公共用水域水質測定結果 (昭和 51 年～平成 9 年度版), 千葉県.
- 蓮沼 啓一, 平野 敏行, Antony, M. K. (1983): 汚染水の広がり変動の実態把握, p. 8-13. 平野 敏行編, 沿岸域保全のための海の環境科学, 恒星社厚生閣.
- 日比野 忠史ら (1999): 非成層期の東京湾における朔望周期の流れ場. 海岸工学論文集, **46**, 996-1,000.
- 日比野 忠史ら (2000): 東京湾における成層期の流れ場. 海岸工学論文集, **47**, 1,056-1,060.
- 堀江 毅 (1993): 東京湾の姿 流れ, p. 27-38. 小倉 紀雄編, 東京湾—100 年の環境変遷—, 恒星社厚生閣.
- 神奈川県 (1976-97): 神奈川県水質調査年表 (昭和 51 年～平成 9 年度版), 神奈川県.
- 環境省 (2001): 平成 12 年度ヒート アイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書 (増補版), 環境省.
- 気象庁 (2002): 暑くなった大都市, p. 30-32. 20 世紀の日本の気候, 財務省印刷局.
- 木内 豪 (2003): 都市が東京湾に与える影響—水・熱輸送の視点から—. 東京湾の環境回復の目標と課題, 第 4 回東京湾海洋環境シンポジウム, 16-17.
- 東京都 (1976-94): 公共用水域の水質測定結果 (資料編) (昭和 51 年～平成 7 年度版), 東京都.
- 東京都 (1995-97): 公共用水域及び地下水の水質測定結果 (昭和 51 年～平成 7 年度版), 東京都.
- 宇野木 早苗, 岸野 元彰 (1977): 東京湾の平均的海況と海水交流. *Tech. Rep.*, **1**, 理研海洋物理研究室, 89 pp.
- 宇野木 早苗 (1985): 東京湾 物理, p. 334-361. 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編, 日本全国沿岸海洋誌, 東海大学出版会.
- 柳 哲雄 (1990): 潮目の科学—沿岸フロントの物理・化学・生物過程. 恒星社厚生閣, 169 pp.

Long Term Trends of Seawater Temperature in Tokyo Bay

Haruo Ando *, Nobuhisa Kashiwagi †, Katsuyuki Ninomiya ‡,
Hisako Ogura §, and Masao Yamazaki †

Abstract

The long term trends of water temperature in Tokyo Bay were analyzed using the monitoring data, which have been measured by the related local governments every month since the 1970s. The seawater temperature in Tokyo Bay shows descending trends in summer and rising trends in winter. These trends are more obvious in the area receiving greater water intrusions from the open ocean. Comparing to the in-bay water, the outer water is cooler in summer and warmer in winter. Therefore, the amount of ocean water entering from the Pacific Ocean must have been increasing during the last 22 years, thereby resulting in such trends of water temperature in Tokyo Bay.

Key words: Tokyo Bay, long term trends of water temperature, sea water inflow from the Pacific Ocean

(Corresponding author's e-mail address: hando@kankyo.metro.tokyo.jp)

(Received April 7, 2003; accepted May 1, 2003)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2003)

* The Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection, Shinsuna 1-7-5, Koto-ku, Tokyo 136-0075, Japan

† The Institute of Statistical Mathematics, Minamiazabu 4-6-1, Minato-ku, Tokyo 106-8569, Japan

‡ Yokohama Environmental Research Institute, Takigashira 1-2-15, Isogo-ku, Yokohama 235-0012, Japan

§ Chiba Prefectural Environmental Research Center, Iwasakinishi 1-8-8, Ichihara 290-0046, Japan