

5. 三河湾の海面水温の長期変化特性

角野 達郎^{1*}・青木 伸一²

¹豊橋技術科学大学院建築・都市システム学専攻（〒441-8580愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1）

²大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻（〒565-0871大阪府吹田市山田丘2-1）

* E-mail: kakano@jughead.ace.nit.ac.jp

本研究では、三河湾を対象に最近約40年間の長期間の水温観測データをトレンド検定することにより、その長期変化傾向を調べた。検討に当たっては、データの欠測処理を行った後、移動平均法・連環比率法により季節調整したデータを用いてトレンド検定を行った。トレンド検定には、一次回帰分析およびMann-Kendall 検定の2種類の検定を実施し、統計的に有意な長期変化傾向を判定した。本研究で得られた主な知見は以下の通りである。(1)ほとんどの観測点で、長期的なトレンドとして統計的に有意な水温上昇傾向を示し、その上昇量は $0.024 \sim 0.06 [^{\circ}\text{C}/\text{year}]$ であった。(2)三河湾東部に比べ、西部において水温上昇量が大きく、火力発電所建設の影響がみられた。(3)水温上昇量については、全体的に秋・冬が大きかった。(4)日較差は長期的に下降する傾向を示した。

Key Words: *global warming, Mikawa Bay, water temperature*

1. はじめに

近年、地球温暖化は気温上昇などの観測的な事実から、現実的なものとして認識されている。また、温暖化の影響は気温だけではなく、海面水温にも及んでいる。気象庁の統計データによると、三河湾周辺の海域である四国・東海沖北部の海域平均海面水温(統計期間：1902年～2009年)についても、海域平均海面水温は $+1.25 [^{\circ}\text{C}/100 \text{年}]$ 程度上昇している¹⁾。このことから、海面水温が上昇傾向にあることがわかる。また、地球温暖化は加速度的に進行しており、今後もCO₂などの温室効果ガスを多く排出すると、日本では100年後に $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 程度の平均気温の上昇が予測されている²⁾。一方、三大湾等では再生推進会議が設置され、国や自治体の連携で環境改善に向かって動き出しているが、そのゴールとシナリオは必ずしも明確ではなく、漠然とした目標を掲げている印象が強い。内湾の再生を考えるにあたっては、陸域の変化を含めて数十年以上の長期的なスパンで考える必要があるが、地球環境の急速な変化を考慮すれば、その再生シナリオは、内湾環境のバックグラウンドとなる地球規模で

の環境変化を考慮したものでなければならないであろう。本研究では、地球温暖化の影響が内湾の水温変化にどのように現れているかを確認することを目的とし、三河湾を対象に最近約40年間の長期間の水温観測データをトレンド検定することにより、その長期変化傾向を調べた。

2. 概要

(1) 観測データ

研究に使用したデータは、愛知県水産試験場が三河湾において1970年代から実施している自動観測ブイによる連続観測および水質監視のために定期的を実施している定点観測で取得したものをを用いた。自動観測ブイは1973年に3基（1号～3号ブイ）設置され、1時間インターバルで海水面の水温が記録されており、欠測はあるものの日較差等の詳細な検討が可能である。ただし、1990年にブイの更新・移動が行われており、移動による影響が大きかった2号・3号ブイのデータは用いないことにした。定点観測については、三河湾内の22地点において1978年

から毎月1回実施されており、水温変化の空間的な変動特性を把握することができる。なお、比較対象とする気温については、自動観測ブイによるものおよび気象庁による三河湾周辺の4地点での観測データを用いた。図-1のK・Aは水質監視データの定点観測点を示しており、Bは自動観測ブイ1号～3号を示している。また、B-Pは自動観測ブイの移動前の点であり、1990年にBへ移動している。

(2) トレンド検定

水温の長期変化傾向の検討に当たっては、欠測処理を行った後、移動平均法・連環比率法により季節調整したデータを用いてトレンド検定を行った。トレンド検定には、一次回帰分析およびMann-Kendall 検定の2種類の検定を実施し、いずれにおいても1%の危険率で統計的に有意である場合、「統計的に有意な長期変化傾向がある」と判定した。

a) 季節調整

時系列データに含まれる季節変動を除去するために、本研究では移動平均法と連環比率法の2種類の季節調整を行った。図-2に1号ブイ水温における季節による値の変動を表している季節指数(下図)と、季節調整値(上図)について、移動平均法と連環比率法によるそれぞれの値を示している。季節調整値は原データを季節指数で除すことにより得られる。

b) 一次回帰分析

目的変数に水温あるいは気温をとり、説明変数を時間(月)として一次回帰分析を行い、1ヶ月の水温・気温の変化量を求める。また、得られた回帰係数(傾き)の有意性の判断をt検定により行っている。

c) Mann-Kendall 検定

Mann-Kendall 検定はデータ群のばずれ値の影響を受けにくく、時系列データの変化傾向を調べる方法として頑健性が高いとされている検定手法であるため、水質データの経年変動を判定する方法として用いられている³⁾。Mann-Kendall 検定は、確率分布を仮定することなく、順位検定を基礎とした理論に基づいており、ある変数の系列に対して、それが独立で同一の確率分布にしたがうという帰無仮説が成立するかどうかを検定する手法である。この仮説が棄却されると、その系列は傾向変動をもつとみなされる。

Mann-Kendall 検定は(1)式より、検定統計量 T を求め、(2)式で比較対象 T_g を求めて比較することで結果が得られる。 T の絶対値が T_g より大きいとき時系列データはトレンドをもつと判断できる。このとき、 T が正の値であれば上昇トレンド、 T が負の値であれば下降トレンドである⁴⁾。

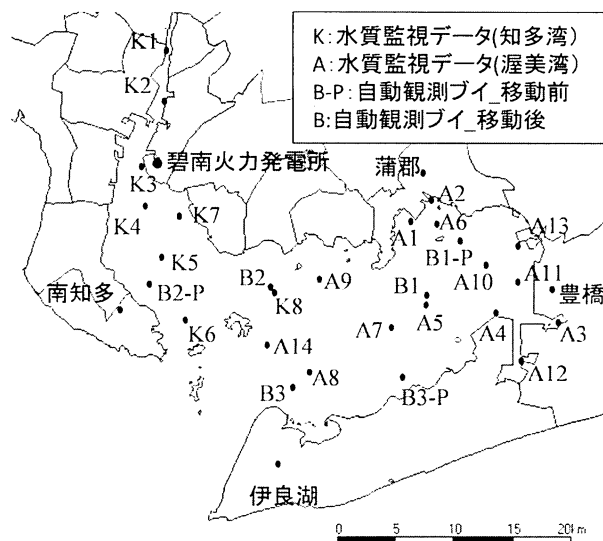


図-1 三河湾観測点

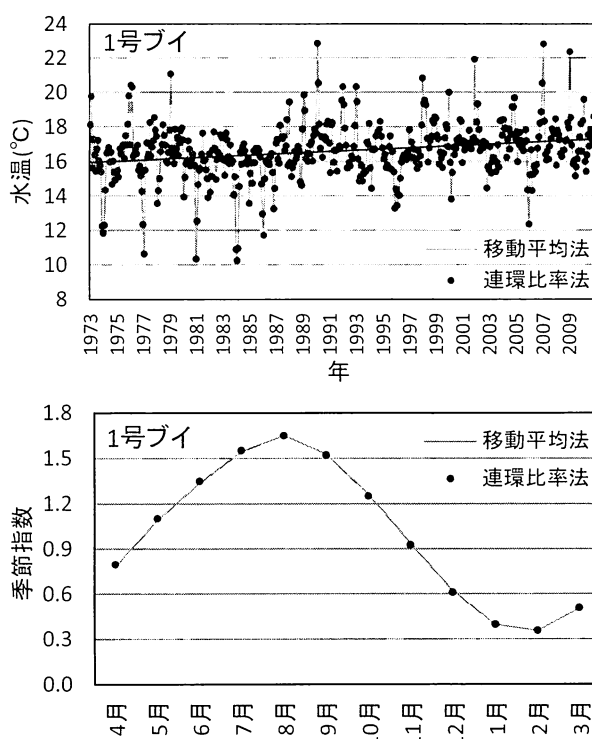


図-2 1号ブイ水温の季節調整値と季節指数

$$T = 4 \left[\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N(N-1)} \right] - 1 \quad (1)$$

$$T_g = t_\alpha \left[\frac{(4N+10)}{9N(N-1)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

n_i : サンプル数 N の時系列データにおいて、 i 番目以降にある i 番目より大きい値の数

N : サンプル数

t_α : 有意水準 α における値

また、長期傾向の定量的把握のためには、トレンドの有意性の検定のみではなく、トレンドの大きさを推定する必要がある⁵⁾。そこでMann-Kendall検定とともに使われることが多いKendall勾配推定量 β を求める。

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \tag{3}$$

x : 水温(季節調整値)
 $i = 1, 2, \dots, n - 1$, $j = 2, 3, 4, \dots, n$

Kendall 勾配推定量 β を求める手順は(3)式におけるすべての i, j の組み合わせ($1 \leq i < j \leq n$)を計算し、その中央値を求め、トレンドの推定量とする。

3. 長期変化傾向

(1) 水温

一次回帰分析とMann-Kendall 検定の結果、23点中17点の観測点（1号ブイ水温，K1～K7,A1,A2,A4～A10）で、統計的に有意な上昇傾向が得られた。各観測点の上昇推定量（Kendall勾配推定量）は図-3に示す。有意な傾向が得られた観測点の観測期間は30年以上であり、有意な傾向が得られなかった観測点は、観測期間10～15年であり、観測期間が短いと有意な結果が得られなかった。

上昇推定量に関してはKendall勾配推定量と比べ、回帰係数のほうが約0.01[°C/year]高い値が得られたが、これは回帰係数がKendall勾配推定量にくらべて、誤差や外れ値の影響を受けやすいため、回帰係数の値が大きくなったと考えられる。

各観測点を開始年とし、以後10年間の水温上昇量を1年ごとにプロットした図を作成した（図-4）。1号ブイの水温は、観測開始当初の変化に比べ、近年では変化量は小さくなっており、安定してきているように思える。また、1980年～1995年の間の上昇量が顕著である。

三河湾の大部分で上昇傾向が得られたが、その中でも知多湾（三河湾西部）に関しては上昇量が大きく、特

にK3における上昇量が著しいものであった。K3は1978年～1981年の10年間の水温は下降傾向、1982年からの10年間で上昇傾向を示しており、1991年から水温が上昇しだしたと考えられる。これはK3地点のすぐそばにあ

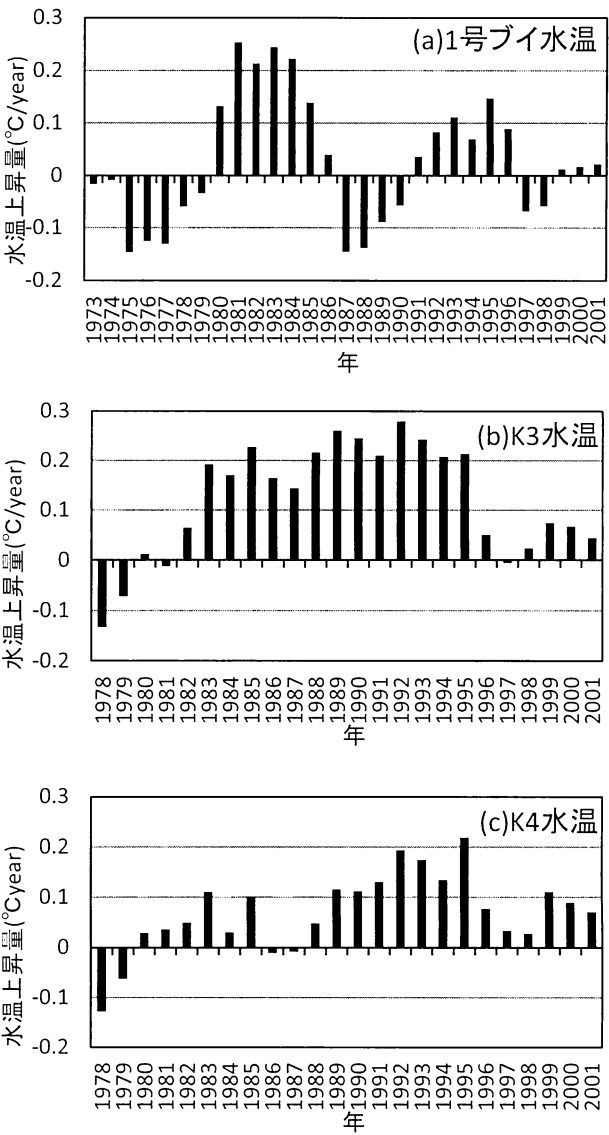


図-4 1号ブイ・K3・K4における1年ごとの10年間の水温上昇量

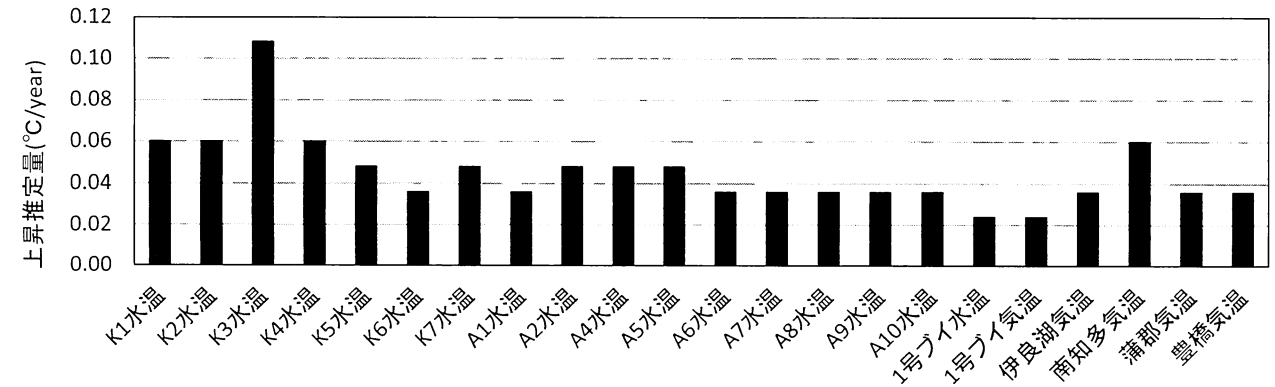


図-3 統計的に有意な上昇傾向の得られた各観測点のトレンド推定量

る碧南火力発電所(石炭火力発電所としては国内最大)の1号機の運転開始時期と一致している。碧南火力発電所は、2002年に5号機の運転を開始しており、全部で5機稼働している。

K3の地点から南に4kmの位置にあるK4は渥美湾（三河湾東部）より高い上昇量を示しているが、K3とは違い1986年～1987年の上昇量が減少している。またK3と比べ全体的に上昇量が小さい。他の知多湾の地点をみると、K4と似た傾向を示し、知多湾の奥から湾口に向かうにつれて上昇量も小さくなっている。これより、碧南火力発電所の影響は、K3のように発電所に近い点が温排水の影響を強く受け、その周辺へは影響が小さいと考えられる。また、渥美湾に関して、知多湾と同じ傾向で、湾奥から湾口に向かうにつれて上昇量が小さくなっている。

2) 気温

一次回帰分析及びMann-Kendall検定の結果、1号ブイ気温、伊良湖、南知多、蒲郡、豊橋のすべての観測点で統計的に有意な上昇傾向が得られた。上昇量に関しては、すべての点で1980～1986年の10年間の上昇量が大きく、水温と似た傾向が得られた。しかし、1号ブイの気温に関しては、近年上昇傾向を示しており、陸上の観測点とは違う傾向を示している（図-5）。また、陸上の4点の観測点では、南知多の観測点の上昇量が全体的に大きくなっている。

3) 月別トレンド上昇量

1号ブイの月別の気温上昇量をみると、7月～3月の間は大きい上昇傾向を示し、4月～6月は小さい上昇傾向を示している（図-6）。1号ブイの水温では、9月～3月まで大きい上昇傾向を示し、5月～8月の間は下降傾向を示している。これらから、気温・水温は、夏の昇温期における水温の上昇が小さく、降温期における上昇が顕著である。また、1号ブイに近い陸域の観測点は、観測ブイほど月による差は大きくなかった。これより、海上と陸上では、上昇傾向に差があると考えられる。

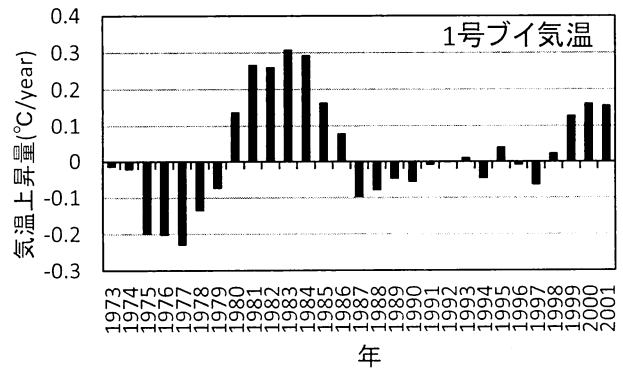


図-5 1号ブイの1年ごとの10年間平均の気温上昇量

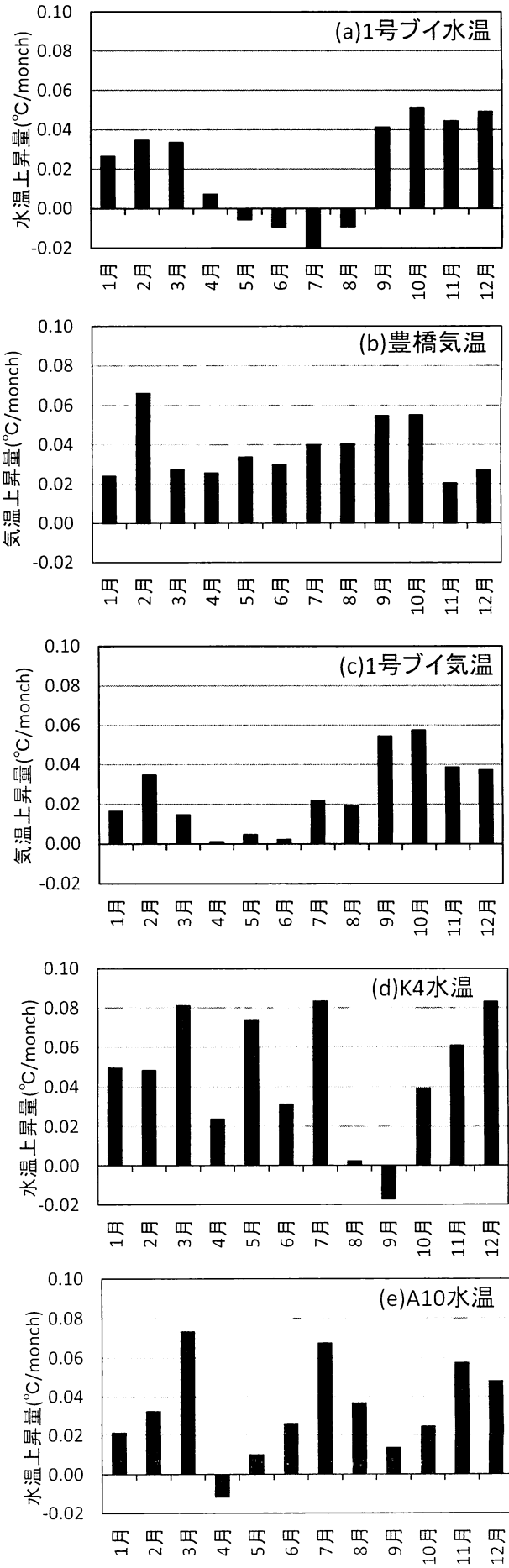


図-6 1号ブイ水温・気温・A10・K4の月別上昇量

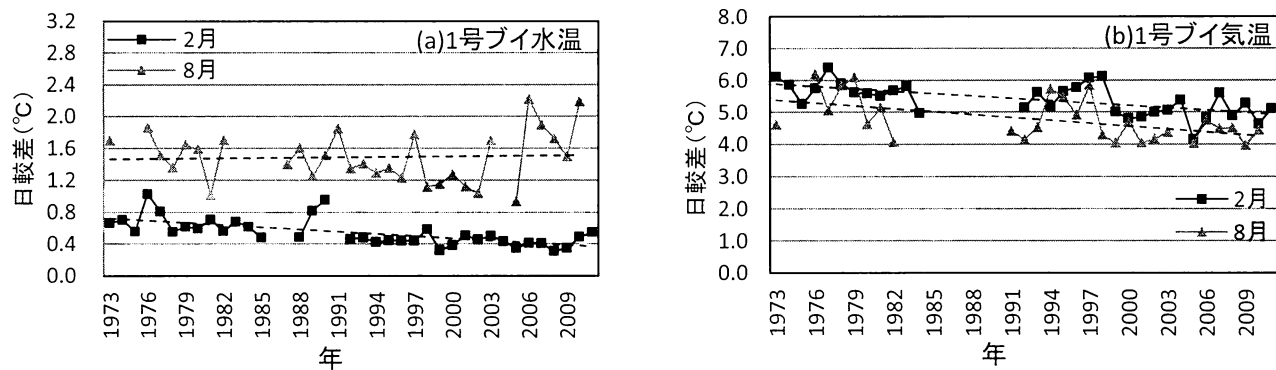


図-7 1号ブイの水温・気温の日較差 (2月・8月)

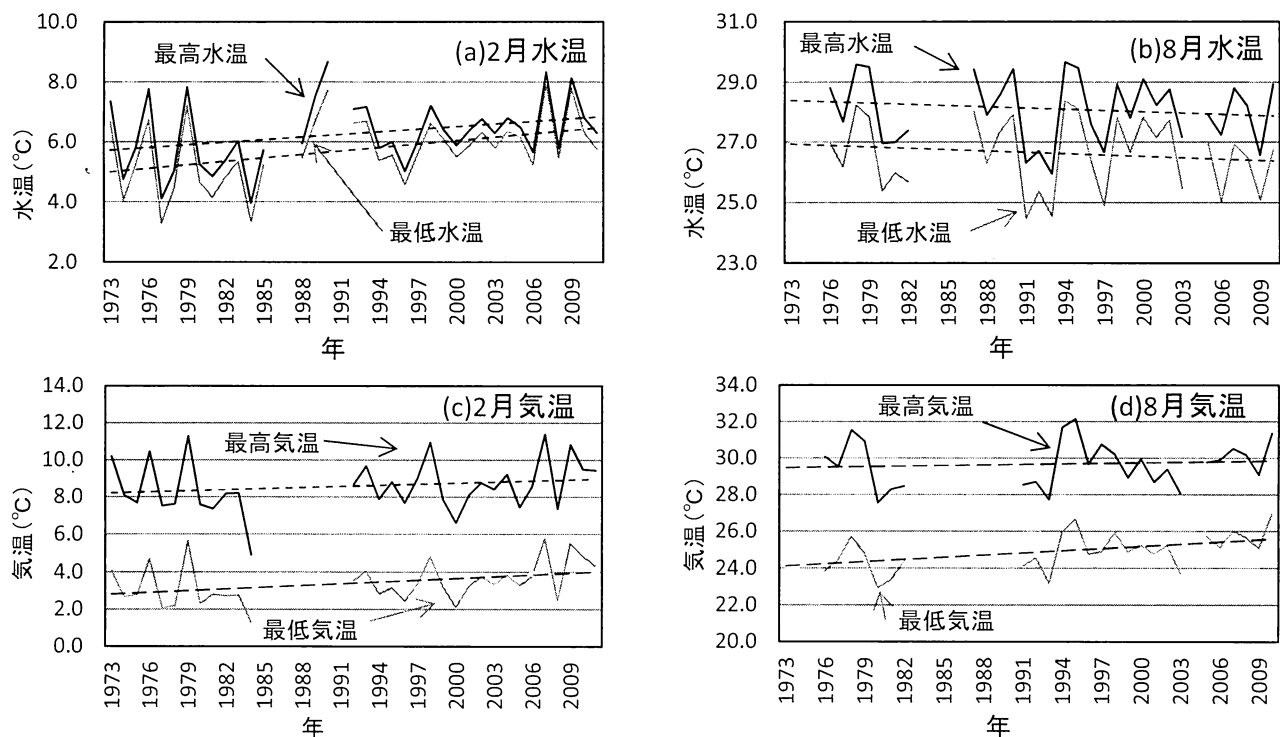


図-8 1号ブイの最高・最低水温, 最高, 最低気温

また、水質監視の観測点について比較した結果、全体的には秋から冬にかけての上昇量が大きく、知多湾では8月・9月に低い値を示し、渥美湾では4月に下降傾向がみられた。また、三河湾中央部の観測点では、上昇量が全体的に低かった。

(4) 日較差

図-7は1号ブイにおける水温・気温の日較差の2月と8月の平均値を1年ごとにプロットしたものである。水温の日較差の長期変化傾向をみると2月は下降傾向、8月は小さいが上昇傾向がみられる。また、7月が8月と同様に小さい上昇傾向を示したが、残りの月ではいずれも下降傾向を示した。これより、多くの月で水温の日較差は下降傾向にあり、上昇傾向を示した月も傾向が小さいため、水温の日較差は下降傾向にあるといえる。水温の日較差

の大きさをみると、2月は小さく、8月は大きい。他の月もみると、秋・冬の降温期の日較差は小さく、春・夏の昇温期の日較差は大きい傾向が得られた。1号ブイにおける気温の日較差の長期変化傾向については、全ての月で下降傾向が得られ、その変化量は水温より大きい。気温の日較差の大きさは、8月に比べ2月が大きく、水温とは逆に昇温期に小さくなり、降温期に大きくなる傾向を示した。

図-8は1号ブイにおける2月と8月の最高・最低水温、最高・最低気温の推移を表している。2月は最高水温・最低水温ともに上昇しており、また日較差は下降傾向にある。これより、最低水温の上昇が最高水温の上昇より大きいいため日較差は小さくなっているといえる。8月の最高・最低水温はともに下降しているが、下降量に差はあまりみられなかった。他の月をみると、多くの月で2

月と同様な傾向を示した。気温においては、2月と8月の最高気温・最低気温ともに上昇している。他の月をみると、最高水温について下降傾向を示した月はあるが、最低気温は全ての月で上昇傾向を示した。これより、気温の日較差の長期的な下降は最低水温の上昇量が大きいことに起因しているといえる。

(5) 地点間の海面水温の相関

三河湾西部（知多湾）、中央部、東部（渥美湾）の代表点をそれぞれ K4, A8, A10 として、月別に各観測点における海面水温の相関係数を図-9 に示す。各観測点の相関は降温期に高く、昇温期は降温期に比べ低い。また、A8 と A10 については 8 月以外の相関はいずれの月でも高いことがわかる。水温変動の主な要因は和田らの研究⁹⁾でも示されていたが、降温期では 3 地点とも相関が高いことより、気象要素などの空間スケールとして湾全体より大きい要素が考えられる。また、昇温期については、河川水の流入や内湾水の流動などの空間スケールとして湾全体より小さい要素も要因として考えられる。

7. まとめ

三河湾における自動観測ブイによる連続観測データ、水質監視の定点観測データ、および気象庁のデータを基に水温・気温の長期変化傾向を調べた。得られた結論は次の通りである。

- 三河湾内のほとんどの観測点で、長期的なトレンドとして統計的に有意な水温上昇傾向を示しており、その上昇量は $0.002\sim0.005[^\circ\text{C}/\text{month}]$ ($0.024\sim0.06[^\circ\text{C}/\text{year}]$) であった。
- 三河湾東部（渥美湾）に比べ西部（知多湾）において水温上昇量が大きく、西部の火力発電所建設の影響を受けたと思われる地点では特に上昇率が大きかった（影響は一部に限られたものである）。
- 水温上昇量の季節変動については、全体的に秋・冬が大きかった。西部（知多湾）では8月・9月に、東部（渥美湾）では4月に上昇量が低く、湾奥から湾口に向かうにつれて上昇量は低くなる。
- 水温・気温ともに日較差は概ね下降傾向にあった。水温は昇温期の方が降温期より日較差が大きく、気温は降温期の方が昇温期より日較差は大きくなる。

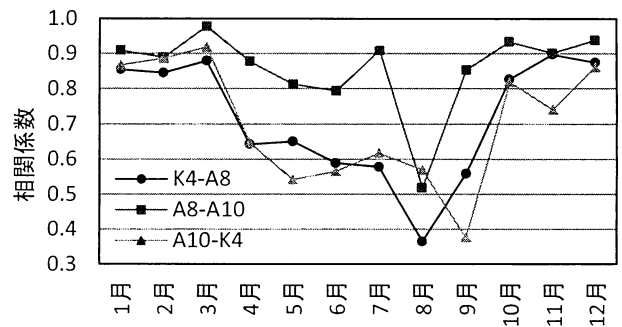


図-9 K4・A8・A10 地点の水温の相関

- 日較差は長期的に下降傾向を示したが、これは最低水温の上昇量が最高気温の上昇量よりも大きいことに起因している場合が多かった。
- 各観測点の相関については、降温期では相関が高いことより、水温変動の要因として、空間スケールとして湾全体より大きい気象要素などが考えられる。また、昇温期では降温期に比べ相関は低く、空間スケールとして湾全体より小さい要素（河川水の流入など）も要因として考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、愛知県水産試験場より貴重な観測資料をしていただいた。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 気象庁：海洋の健康診断表
http://www.data.kishou.go.jp/shindan/e_3/kobe_warm/kobe_warm.html
- 気象庁：地球温暖化に関する知識，2010年10月
http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/portal/chishiki_ondanka/pdf/all.pdf
- 西岡昌秋，寶馨：Mann-Kendall 検定による水文時系列の傾向変動，京都大学防災研究所年報，第46号B
- 崎岡聖導，井上隆信，対馬孝治，山田俊郎，長屋圭治，高橋慎也：伊自良川における降雨時の水質変化特性，環境工学研究論文集，Vol.46, pp.565-572, 2009.
- 篠崎孝一，蒲生祐輔，飯泉佳子，田中茂，原宏：FM 多摩丘陵における気象要素と降水科学の解析，フィールドサイエンス，第7号，pp.71-81, 2008
- 和田明，宮池克人：熱収支量からみた内湾の水環境変化，第24回水理講演会論文集，1980