

仙台湾周辺海域水温環境に対する外洋・気象変動の 影響に関する研究

楊 燦守*・田中 仁**・沢本正樹***・花輪公雄****

1. はじめに

仙台湾の物理的環境の特徴は、開放性が高く、また、河川水、親潮系水、津軽暖流系水、黒潮系水が多様な形態で湾内水を構成している点にある。仙台湾に流入する沖合水はこれら諸水系の勢力の消長によって変化している。このような沖合水の変化に加え、陸域(河川水流入)や大気との関連によって物理的な環境(流動場、水温、塩分等)がきわめて短時間に变化するという特徴も挙げられる。

本研究では1990年から1994年(一部の資料は1996年)までの5年間の4月を対象として、気象と外洋条件による仙台湾周辺の水温変動および流れのパターンを調べた。使用した資料は、仙台湾を中心とする沿岸の水温・塩分データとAMeDAS観測の気象データ、NOAA/AVHRR熱画像であり、これらを用いて大気と海流が沿岸水温環境に及ぼす影響を解析した。また、重回帰モデルにより水温変動の推定を試みた。

2. 対象海域と使用データ

本研究では、図-1に示す仙台湾を中心に宮城県と福島県の沿岸および沖合を対象として考察する。

使用データは水温と塩分のデータおよびAMeDASの風、日照時間、降水量データである。図-1に示すすべての場所で水温データが得られており、田代島と江ノ島ではこれに加えて塩分データも取得されている。B1, B2, およびB3は、それぞれ広野火力発電所、福島第二原子力発電所、福島第一原子力発電所の前面海域であり、福島県温排水調査管理委員会報告書(1990, 1991, 1992, 1993, 1994)のデータを利用した。B1とB2の距離は7.5 kmで、B2とB3の距離は11.0 kmである。これらの場所での水温観測点は、沿岸からそれぞれ2.0 km (B1), 1.6 km (B2), 1.5 km (B3) 離れている。

衛星データとして、東北大学大型計算機センターの日本画像データベース(JAIDAS)からNOAA/AVHRRの

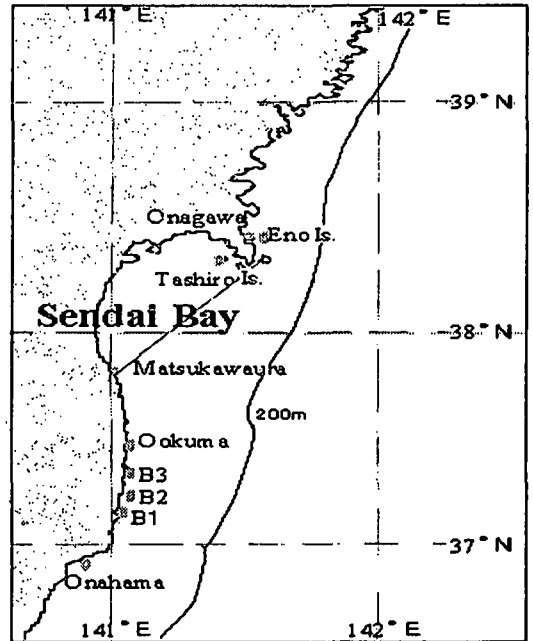


図-1 仙台湾周辺の観測点

チャンネル4(遠赤外線)データを利用した。これらの画像をHDF fileに変換して、一つの平面二次元時系列データを作り、水温の時系列解析を行った。

3. 三陸沿岸と宮城県沖の海況の概要

三陸沿岸域には主に親潮系と黒潮系の水塊と津軽暖流水が存在する。親潮第一分枝に由来する親潮系水塊は蒸発よりも降水が卓越する高緯度域で生成される海水であり、低温低塩分の海水である。3月頃より南下の勢力を強め、4月に最も強勢となる。5月になると親潮系水塊の勢力は次第に弱まり、夏になると東北海域にはその姿は見られなくなる。一方、黒潮系水塊は蒸発が降水を上回る低緯度域からやってくるため高温高塩分の海水である。夏期から秋期にかけて非常に勢力が強い。春期には親潮系水塊の勢力が沿岸近くで強まるため、黒潮系水塊は沿岸部には見られず、沖側で発達していることが多い(福渡, 1993)。

* 学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
*** フェロー 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻
**** 理博 東北大学大学院教授 理学研究科地球物理学専攻

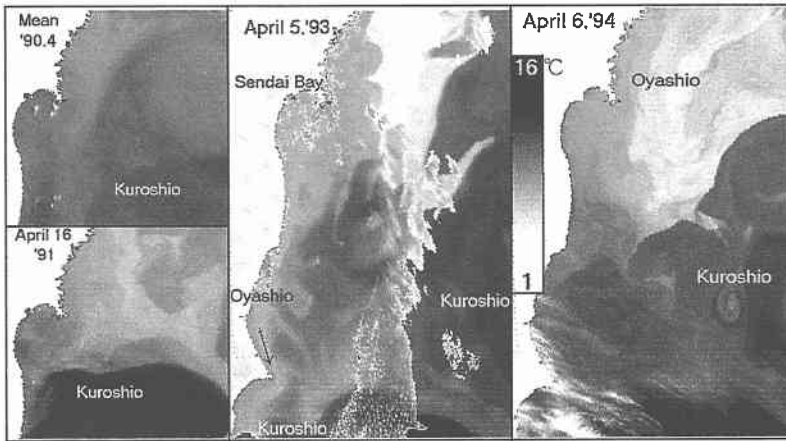


図-2 AVHRR 画像

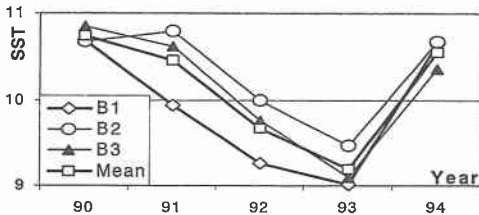


図-3 B点の水温変化

1990-1994年の4月の衛星画像によると親潮の接岸の仕方は二種類あり、一つは三陸から金華山まで接岸するタイプ(図-2, 1994年)、もう一つは松川浦から接岸するタイプ(図-2, 1993年)である。すなわち、流速の強い黒潮の状況によって親潮の到達範囲が決定される。これらのことは実測水温データからも確認された(図-3)。例えば、小名浜の1993年平均水温が1992年より3°C程度下がっていた(図-9参考)。また黒潮の経路によっても沿岸の水温環境は大きな変化が生じた。衛星データによると1990年と1991年には親潮が弱く、黒潮が強いため仙台湾周辺の水温は高かった。さらに1991年に比べて1990年に黒潮の進出が著しかった。

沖合水の流入パターンも、親潮と黒潮の流れと経路によって工藤(1971)の分類と異なるパターンが見られた。すなわち、外洋域から仙台湾への流入は、SとSSEから(1990年)、SEから(1991年)、EとSから(1992年)、EとSから(1993年)、EとSEから(1994年)という流入パターンであることが分かった。

津軽暖流は黒潮の支流である対馬暖流の一部が津軽海峡を通過して三陸沿岸を南下する海流で、その水塊特性は他の2水塊と比較すると中程度の水温、中度の塩分となっている。津軽暖流水の影響の判別は難しいが、以下のことは認められる。冬から春にかけて、津軽暖流の勢

力は弱く、三陸沿岸におけるその流路の幅は狭い。夏から秋にかけては、津軽海峡を抜けた津軽暖流水は沿岸を離れ北海道南方に大きな渦を形成することが多い。そのため、直接、仙台湾の沿岸に影響を与えることはなく、混合水の形として南下する。

4. 解析結果と考察

4.1 SSTと気象要素(日照時間と風)の関係

三陸沖海域には様々な水塊が混在しており、それら水塊間の水温の相違は大きい。その空間

分布は大きな季節変動を有しており、この海域における熱輸流量の総熱収支量に対する割合が、他の海域に比べて非常に大きいことが推測される。Ostrovskiiら(1995)によると東日本の沖合のSST(Sea Surface Temperature) anomaly transportの傾向は黒潮と親潮の循環とおおよそ一致する。仙台湾で海面を通しての総熱収支は、3月から8月までは海面が暖められ、5月または7月に加熱のピークとなる。ただし、このような季節的な変動を持つ気象条件のみでなく、前述のように、さらに沖合水の条件によって、場所毎に仙台湾の水温環境は大きな変化するはずである。

ここで、三つの沿岸地点、江ノ島、田代島、松川浦の水温環境を把握することを目的とし、日照時間と風による水面温度の変動に関する考察を行う。また、沖合水の影響を推定することを試みる。

まず、SST保存の方程式として次式が成り立つ(Hanawa and Toba, 1981)。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla)T + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_H \nabla^2 T + K_v \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots (1)$$

ただし、 T :水温、 t :時間、 z :鉛直座標、 v :水平流速ベクトル、 w :鉛直流速、 K_H 、 K_v :水平、鉛直拡散係数である。水平移流と水平拡散の寄与が少ない場合には、式(1)を鉛直に表面から深さ h まで積分すると、以下の単なる単位面積の水温変化式になる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q}{\rho C_p h} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ρ :海水密度、 C_p :定圧比熱、 $Q: K_v(\partial T/\partial z)|_{z=0}$ である。

海面熱フラックス Q は太陽からの短波放射 Q_s 、大気・海洋間の有効長波放射 Q_b 、潜熱 Q_e 、顕熱 Q_h の総和として求めることができる。すなわち、各熱輸送量からの正味の海面熱フラックスは

$$Q = (1 - A)Q_s - (Q_o + Q_e + Q_h) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。ただし、 A はalbedoである。ここで、日射量(短波放射)は直接計測されていないが、日照時間にほぼ比例するとみてもよい(近藤ら, 1991)。そこで、さらに

$$Q_n \propto \text{日照時間 (Rate of Solar Radiation)} \dots\dots\dots (4)$$

の関係を仮定することができる。

ここでは、時間的に積分した日照時間(Accumulated Duration of Sunshine, 以下日照時間)、すなわち太陽からの光エネルギーだけを考慮してSSTとの関係を調べた。一般に、昇温率(R)を支配する要因は、日照時間(S)、風(W)、移流(F)であると考えられるので、まず第一に R と S の関係を調べ、これで説明のつかない部分については風の影響を検討することとする。異なる温度の海水が近づく場合の移流(F)に対しては衛星画像の水温データから判断した。

図-4には91年の仙台湾周辺における水温の変動を示した。図-5は、図-4から得られた江ノ島、田代島と松川浦でSST昇温率と日照時間との関係を定量的に示したものである。図中の直線は日照時間に対する三つの場所における4月の平均昇温率である。

6h/dayの日照時間で、江ノ島では平均0.04°C昇温し、田代島では平均0.06°C昇温する。松川浦では、6h/dayの日照時間で平均0.08°C昇温する。場所による昇温率に差があるのは周辺の流れの状況、卓越する風の差、大気温の差などが原因と判断される。

図-5の円で示すように、三つの場所で1990年度のデータはほぼ同じ場所に集まっており、日照時間が少ないにもかかわらず温度が高い。衛星画像によれば、この年には黒潮が支配的であることが分かった。一方、親潮が強かった1993年に松川浦では他の場所より水温が高い。以上のように、仙台湾では地形的に黒潮の影響が大きく、親潮は局部的に特に北部に影響を及ぼしていると判断できる。

風と昇温率の関係をみると、平均風が一番弱かった年に最も高い昇温率を示した。それらの年は、江ノ島と田代島では1991年、松川浦は1994年であった。1991年の松川浦では他の年より月平均風速が約2m/s高かった。

仙台湾周辺の寒候期には西～北の季節風が卓越し、風速は3～4月に大きい(日本海洋学会・沿岸海洋研究会, 1985)。図-6は仙台湾沿岸の2地点での4月の風の分布を示したものであり、図中の括弧内の数値は平均風速である。江ノ島と田代島では主に海岸線に直角の風向きが卓越するのに対して、松川浦では風速も弱く、また特に卓越する方向もない。西風の出現率は、全観測数(時間)に対して江ノ島で62%、石巻で47%、仙台で49%、

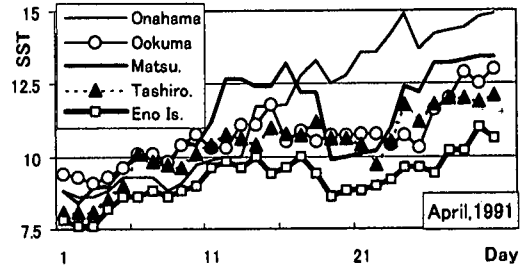


図-4 仙台湾周辺の水溫

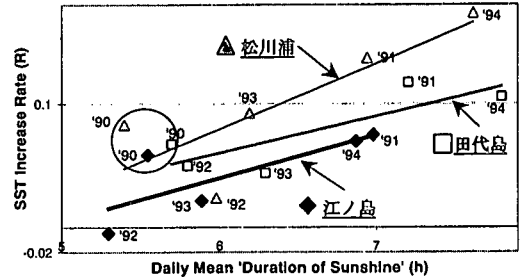


図-5 日照時間とSST昇温率

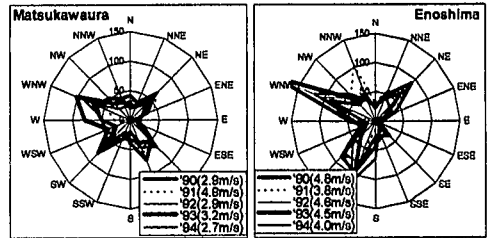


図-6 4月の風の分布

松川浦で50%である。無風の頻度は、江ノ島で1.7%、石巻で1.1%、仙台で3.3%、松川浦で11.1%である。風の岸(南北方向)に平行成分の和はいずれの場所でもマイナス値(江ノ島-457 m/s, 石巻-187 m/s, 松川浦-242 m/s)、直角成分の和はプラス値(江ノ島 538 m/s, 石巻 76 m/s, 松川浦 584 m/s)である。すなわち、平行成分の和は江ノ島で、直角成分は松川浦でもっとも高い。このように、それぞれ地点で風速・風向に特徴があることが分かる。

4.2 T-S diagram

T-S Diagram(図-7)上で、鉛直的な変化は同じ水塊の中での温度変動を表わすが、水平方向の変化は塩分の変化であり一般に異なる水塊の侵入を意味する。1990年に塩分変動(低下)が大きい期間は、江ノ島で16日～19日、田代島で25日～27日である。同じ水温で塩分の低下の原因には降水の影響が考えられるがこの期間には降雨はなく、結局、これは親潮水が影響した水塊の移流を意

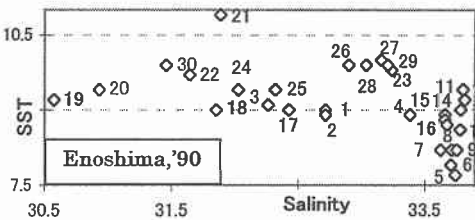


図-7 T-S Diagram



図-8 平均塩分

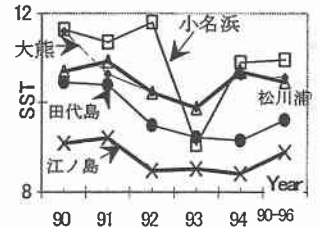


図-9 平均水温の変化

味する。また、表面温度の増加は、親潮と津軽海流また黒潮が混合された結果だと考えられる。これが SST 画像で確認できなかった原因である。

しかし、塩分と沖合の海況との関係が対応していない事例も存在した。江ノ島と田代島で1993年度の塩分が一番高かったが、その年は親潮の影響も強かった年である。1993年の気象年鑑によると東日本の太平洋側では低気圧や前線の影響が少なく、晴れの日が多く、少雨(平年比69%)・多照(平年比107%)・低温だった。さらに、親潮が金華山までには数十 km ぐらい離れて南下するので、江ノ島と仙台湾には直接的な影響がない。以上の複合的な要因によって塩分と沖合海況との関係が見られなかったと考えられる。

4.3 沿岸における SST と海況の関係

まず、4月の沿岸の平均水温と1990-1996年の平均の傾向を見る(図-8, 図-9)。黒潮の勢力が強かった1990と1991年には全体的に水温が高く、親潮の南下が強かった1992年, 1993年, 1994年の仙台湾の周辺は低かった。しかし、他の沿岸ではその年の黒潮と親潮の経路によって、大きな変動が見られる。

1990年4月は全体的に黒潮が Tongue と Streamer の形で岸近くに存在していた。そのため、図-3に見られるように、他の年に比べて B1, B2, B3 とも水温が高かった。しかし、4月の初めは、黒潮系北上暖水の勢力が弱く、逆に親潮が小名浜付近まで南下し、三陸および仙台沿岸には7°Cの冷水が広く分布していた。このとき、9つの水温観測点での最高と最低の温度差は4.2°C(小名浜と江ノ島)であった。しかし、4月の末になると黒潮の Crest から Streamer が39°Nまで北上して沿岸の温度差は2.6°C(松川浦と女川)に低下した。

1991年は黒潮が Crest として北上し、すべての沿岸で SST 昇温率が一番高く、大熊ではその Crest の左に位置して水温の変動が大きく、平均温度は低かった。B1, B2, B3の温度も急に上がる。19日から25日の温度急落は黒潮の Crest の西側に親潮が侵入したためである(図-4)。4月の終わりには、黒潮が直接 Crest として湾の入口まで北上して沿岸の水面温度差は4.2°C(小名浜と江ノ島)にまで上昇した。

1992年には黒潮より親潮が強くて福島沿岸まで影響を与えている。小名浜までは黒潮の支配を強く受け、その北の B1, B2, B3の温度は低い。1993年には親潮の影響がもっと増大して全体的に温度が下がる。ここで小名浜での温度急落は沿岸に沿って南下する親潮からの流れが黒潮によって阻止されて小名浜に接岸したと考えられる。

親潮の影響が強まった1992年には、沿岸での最高と最低の平均水温差は3.3°C(小名浜と江ノ島)であり、福島県沿岸から35°Nまで南下した1993年にはその水温差は1.1°C(松川浦と江ノ島)になった(図-2)。1993年には全般的に福島県沿岸は弱い黒潮が、金華山から36°Nまでの沖合は親潮で存在し、2.5°C(小名浜と江ノ島)の平均水温差が現れた。

1994年には沿岸には黒潮、沖合には親潮が分布している。しかし、金華山までは親潮が沿岸に沿って南下し、江ノ島と田代島の水温は1993年よりも低かった。7日に B1, B2, B3 で急激な昇温は、沿岸と沖合に広がっていった黒潮が南下する親潮によって阻止されて接岸したと考えられる。この時、松川浦でも時間の遅れをもって、同じような現象が起こった。

図-10に4月の平均画像に対して1990年と1993年の SST 偏差画像を示した。平均的に4月は、仙台湾から福島県の沿岸、および142°Eの東側海域は黒潮の影響下にあり、仙台湾の沖合から北側は親潮の影響が大きいと判断される。この様な平均的な水温分布からのずれは、図-10に示したそれぞれ年の偏差画像から確認できる。

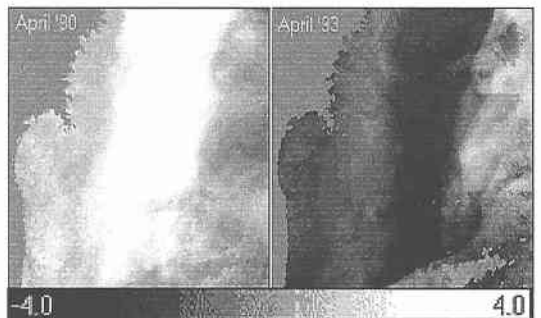


図-10 90年と93年の偏差図

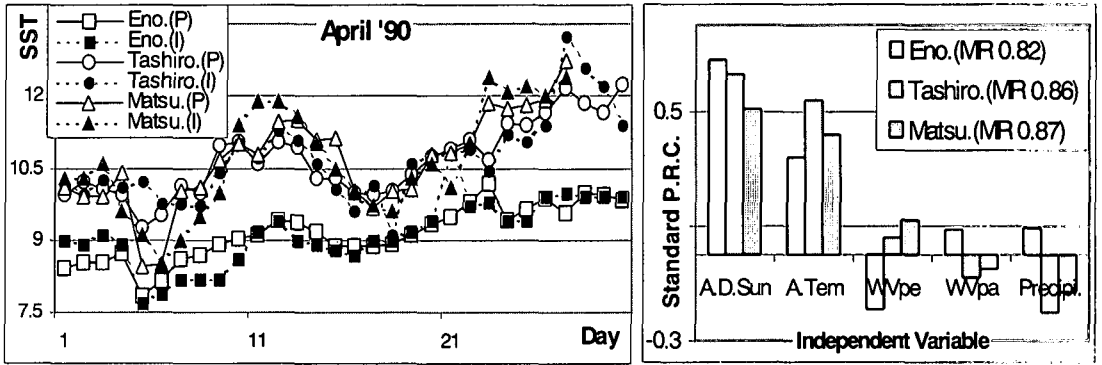


図-11 重回帰モデルによる計算結果と標準偏回帰係数

画像の黒色の部分は1990-1994年までの4月の平均画像からプラス偏差を、白色は偏差のマイナス値を示す。

分散図を作成し、外洋や仙台湾における変動の大きさを調べたところ、三陸から仙台北岸側で変動が少ないことが分かった。

4.4 重回帰モデル

図-11(右)に、風の沿岸成分(WVpa)と直角成分(WVpe)、日照時間(A.D.Sun)、雨(Precipi)、大気温度(A.Tem)という、5つの独立変数に対する標準偏回帰係数を示す。また、図-11(左)(P:予測値, I:実測値)は、SSTに対する重回帰モデルに基づき求めた結果であり、予測値はSST実測値をよく表現していることが分かる。江ノ島、田代島そして松川浦で実測値と予測値との重相関係数(MR)は0.82以上と高いものである。また、変数の単位が異なるため標準偏回帰係数を求めてSST貢献度の大きい変数を調べた結果、日照時間がもっとも高い値を示した。

5. おわりに

一般に温度変化率と日照時間の関係は線形的であるが、急激な温度変動は外洋の条件とくに海流の経路によって大きな影響を受けていることが分かった。さらに、場所によって仙台湾内外の流動パターン、気象、水温環境は異なることが分かった。また、重回帰モデルによる

とSST貢献度は日照時間が高く、予測値が実測値とよく一致した。

謝辞：本研究の調査を行うに当たり、福島県温排水調査管理委員会、東北電力、福島県水産試験場および宮城県水産研究開発センターから貴重な資料を御提供頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 工藤英郎(1971): 仙台湾に流入する沖合水について、昭和45年度IBP, PM北方冷水海域における生物群集の生産に関する総合的研究, 仙台湾研究班, pp. 9-26.
- 近藤純正・中村 亘・山崎 剛(1991): 日射量および下向き大気放射量の推定, 天気, Vol. 38, No. 1, pp. 41-48.
- 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会(1985): 洋日本全国沿岸海洋誌, pp. 253-271.
- 福島県温排水調査管理委員会(1990-1994): 温排水調査報告書, 95 p.
- 福渡淳一(1993): 三陸沿岸海況の変動の解析, 修士論文, 東北大学大学院土木工学専攻, pp. 10-13.
- Hanawa, K. and Y. Toba (1981): Terms governing temperature and thickness of the oceanic mixed layer and their estimates for sea area south of Japan, Tohoku Geophys. Journ., Vol. 28, Nos. 3-4, pp. 161-173.
- Ostrovskii, A. G. and L. I. Piterberg (1995): Inversion for heat anomaly transport from sea surface temperature time series in the northwest Pacific, J. Geophys. Res. Vol. 100, pp. 4845-4865.