

降温期における仙台湾周辺の海水温環境評価

楊 燦 守*・田 中 仁**・澤 本 正 樹***・花 輪 公 雄****

1. はじめに

開放性が高い沿岸域の流れは、場が開放的であるがゆえに海上の気象条件、外洋、陸水といった様々な影響を受けやすい構造となっている。福島県・仙台湾の沖合には、黒潮と親潮による比較的強い流れが存在する。黒潮系暖水は春だけではなくて冬にも張り出しがある(楊ら, 1999; 福島県温排水調査管理委員会, 1990-1998)。すなわち、春と冬の外洋条件は、仙台湾の沖合には、主に黒潮と親潮による強い水温 front が形成され、類似していると考えられる。しかし、東北沿岸の海面水温(SST)分布によると、冬の流れパターンは春に比べて極めて異なるパターンを持っている(楊ら, 1999; 楊ら, 2000)。

図-1 に日本東北沿岸における 12 月の水温と塩分の実測例(毎日 10 時データ)を示す。ここで、江ノ島以外の場所で水温が極めて短時間に変化しうるという特徴が挙げられる。SST の日平均(緯度)は、小名浜で 14.6°C (36.8°N), 大熊 14.1°C (37.5°N), 松川浦 10.8°C (37.8°N), 田代島 12.6°C (38.3°N), 江ノ島 14.9°C (37.4°N) である。すなわち、北の海域ほど水温が低いと一般に考えられるが、田代島と江ノ島では当てはまらず、一番北側にある江ノ島の SST が一番高く、その変動も他の場所と比べて低いことが分かる。一方、塩分の場合も、江ノ島の方が田代島より高く、また非常に安定している。しかし、その変動特性はまだ十分に理解されてない。

そこで、本研究では 1990 年から 1994 年までの 5 年間の 12 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および経験的固有関数解析に水温変動特性を調べた。

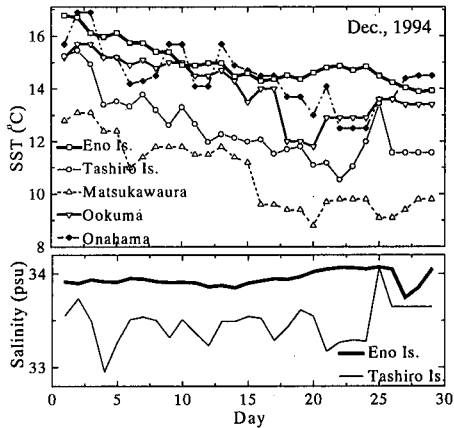


図-1 東北沿岸域水温と塩分の実測例

2. 対象海域と使用データ

本研究では、図-2 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-2 に示すすべての地点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 のチャンネル 4 (遠赤外域) データを利用した。

3. 一般的な海況および気象環境

B2 地点で得られた流動の季節別観測結果(福島県温排水調査管理委員会, 1996)によると、各季節を通じて沿岸に平行な方向の南流および北流が卓越しており、半

* 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

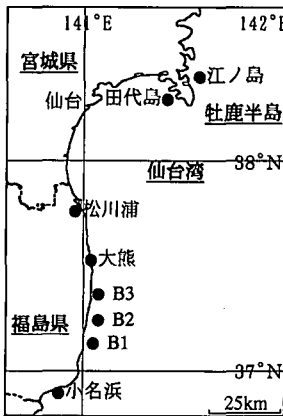


図-2 東北沿岸の実測点

日一数日程度の間隔で転流している。流速は、春季および夏季に 0.5 m/s を超える場合も認められるが、年間を通じて 0.5 m/s 以下の流速の出現頻度が高くなっている。秋季および冬季は春季、夏季と比較して 0.1 m/s 以下の流速の出現頻度が高くなっている。また、水温は、いずれの場所 (B1-B3) とも年間を通じてほぼ同様の変動を示しており、春から夏にかけては、最大で $6\text{--}8^\circ\text{C}$ 程度の比較的大きな日較差を伴う水温上昇を示し、秋から冬にかけては全体的に穏やかな水温低下を示している。衛星データによると春から夏にかけては黒潮が沿岸近くで北上し、冬の時には、沿岸から離れて北上する傾向が多い。また、福島県水産試験場から作成した表面水温分布図を見ると、冬から春にかけて暖水が沿岸近くまで接近することが分かる。すなわち、B点での海況は外洋条件と密接な関係があると考えられる。八木ら (1996) は、鹿島灘の沿岸と沖合水温・流速データに基づいて、流れの変動は海上風以外に外洋の海洋構造の影響を受けていることを指摘している。

図-3 には 1994 年 12 月の B 点における水温 (日平均値) の変動を示した。B 点の降温率 (B1 で $-0.04^\circ\text{C}/\text{day}$, B2 で $-0.05^\circ\text{C}/\text{day}$, B3 で $-0.06^\circ\text{C}/\text{day}$) は他の沿岸 (図-1 の水温) と比べて低い。図-1 の場合、江ノ島で $-0.08^\circ\text{C}/\text{day}$, 田代島で $-0.12^\circ\text{C}/\text{day}$, 松川浦で $-0.14^\circ\text{C}/\text{day}$, 大熊で $-0.11^\circ\text{C}/\text{day}$, 小名浜で $-0.09^\circ\text{C}/\text{day}$ である。これは、B 点が沿岸から 1.5 km 以上離れているので沿岸環境の影響が少ないことと、黒潮の影響がより顕著な南側に位置することが原因であると判断される。すなわち、田代島の水温環境は 12 月を通じて比較的一定であり、外洋条件としての親潮の影響がほとんどないと言える。

図-1 の SST と大気変動間の関係を見るため、図-4 には仙台湾周辺の日射時間、降水量、大気温度の変動を示す。日射時間と降水量は場所による差があるが大きく

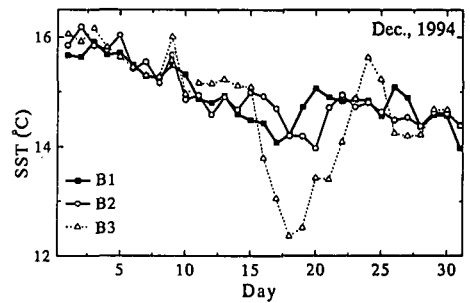


図-3 B 点の水温変化

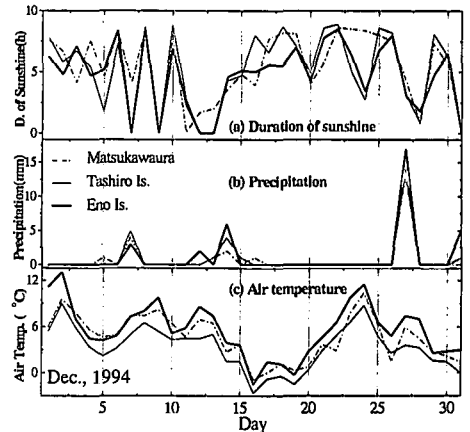


図-4 仙台湾周辺の気象要素変化

ない。しかし、日射時間は松川浦で長く、降水量は江ノ島で多いが、気温は江ノ島で高く、田代島で一番低い。また、図-1 の SST と気温の時間変動傾向は互いに異なるが、江ノ島では SST と気温共に他の場所より高いことが分かる。すなわち、仙台湾周辺の沿岸海域でも大気・海洋相互作用が見られる。

永田ら (1978) は、水温実測データを用いて 5 月と 12 月の水温を比較し、5 月平均水温が 12 月より低いことの原因は、三陸沖冷水の季節的な消長であるとしている。楊ら (2000) は仙台湾の熱 flux を計算して、春は移流と表面から熱を獲得することに対して、冬は湾内の熱が大気と外洋にうばわれていることを示した。すなわち、仙台湾周辺の水温環境は外洋・大気の季節的変動特性によって強く影響を受けていると言える。

4. 解析結果と考察

4.1 水温・気象環境

仙台湾周辺の江ノ島と田代島における冬の SST と気温の日変動を調べるために、1994 年 12 月の 1 時間データに対して時間別に平均を取った値を図-5 に示す。まず、SST の日較差は 0.5°C 以下であるが気温は $3\text{--}4^\circ\text{C}$ で

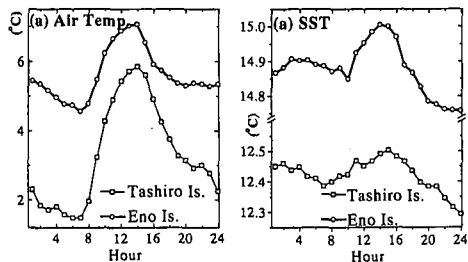


図-5 気温と SST の日変動 (1994 年 12 月)

ある。

田代島と江ノ島間の気温の差は夜間に増大し、昼間に減少して 15 時に最低となる。日中最高値は 14 時であり、最低値は 6 時 (田代島) か 7 時 (江ノ島) である。日較差は江ノ島で 2.5°C 、田代島で 4.4°C でその差が大きい。SST の日較差は江ノ島で 0.25°C 、田代島で 0.21°C でその差は極めて小さい。最高値は 14 時 (江ノ島)-15 時 (田代島) であり、最低値は 2 つの場所共に 24 時である。

図-5 に仙台湾周辺の風配図と風ベクトルの年別日変動を示す。風配図は 90 年から 94 年まで 12 月の 16 方位風の頻度数に対して % として表わした。最大風向とその割合 (無風率) は、松川浦で SW 方向が全体の 15% (無風 10%)、田代島で NNW 方向が 25% (無風 1%)、江ノ島で WNW 方向が 31% (無風 1%) である。一般に西風が強いが、地域によって冬の風向特性があることが分かる。

風ベクトルの年別日変動を 12 時間 (9-20 時) を昼間、残りの 12 時間 (21-8 時) を夜間として求めた (図-6)。松川浦で風の頻度と風ベクトルとの関係は低いし、松川浦と田代島で昼間と夜間の区別が著しいが海陸風による日周期性とは言えない。また、松川浦と田代島で最大になる時間は 12 時ころ、最小は夜 (20-24 h) である。田代島で年別日変動が大きい。しかし、江ノ島では昼・夜間の区別が出なく、最大最小の時間も一定ではない。

仙台湾周辺の冬の風は、海域による特徴が顕著である局地風であり、さらにシベリア気団から北西季節風の吹き出しが強く、海陸風ではない日変動をするため、局所

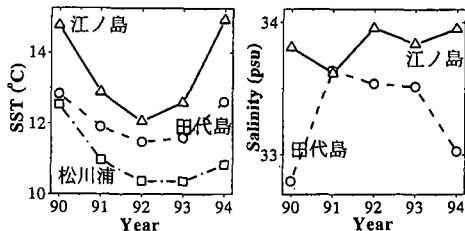


図-7 月平均水温と塩分の変化

的な水温環境に重要な要素であると考えられる。

ここで、3 つの沿岸地点、江ノ島、田代島、松川浦の月平均水温と塩分を考察する (図-7)。3 つの場所で年によって似ている変動を示すが江ノ島の SST は田代島と松川浦より明らかに高く、松川浦よりは約 2°C 以上高い傾向がある。沿岸水温の年変動は沖合の海況と深い関係がある。例えば 1992 年の冬は親潮の強い南下によってほとんど負の偏差となった。次の年 (1993 年) には東北地域で大冷害となった。

塩分の季節変動は一年を通じて江ノ島の方が田代島より高い。仙台湾周辺の塩分変動においては、河川水の影響が大きいので外洋条件よりも湾の内部か外部かという地形的な条件が重要な役割をする。1990 年の低塩分は降水量 (11-12 月の降水量 160 mm) によるものであると考えられる。したがって、移流などのイベント的な現象は図-7 の水温と塩分の間には相関が高くない。湾内部では塩分が沿岸から水平方向に離れると塩分が増加し、牡鹿半島付近では逆に沿岸に近くなると高い。

図-8 は 12 月の平均風速と気温の分布を示す。年によってその値は変化しているが、地域別風速と気温の順序は一定である。風が強い江ノ島で気温と SST が一番高い。

図-9 には SST 昇温率と日照時間との関係を定量的に示した。図中の直線は日照時間に対する 3 つの場所における 12 月の平均昇温率である。日照時間は 1994 年に一番長いのが 92 年は一番短く、その差は日平均 0.7 h 程度である。場所別に見ると、江ノ島が一番短い (例外、1992 年は 2 番目) のに対して、松川浦が一番長い。したがっ

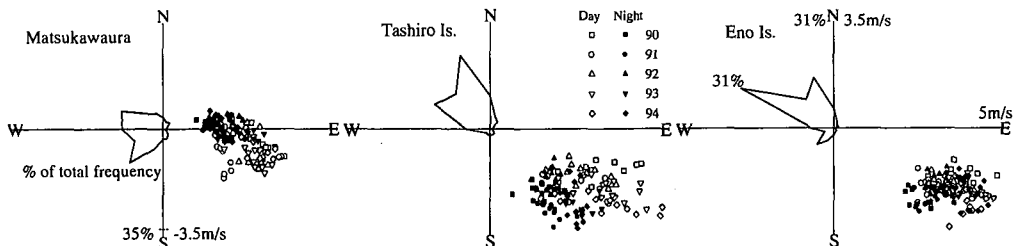


図-6 風配図と風ベクトルの年別日変動

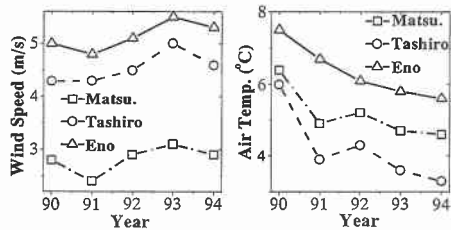


図-8 12月の風速と気温の分布

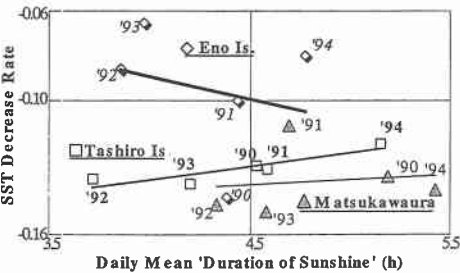


図-9 日照時間と SST 降温率

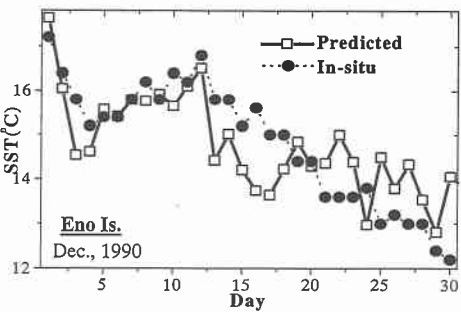


図-10 重回帰モデルによる計算結果

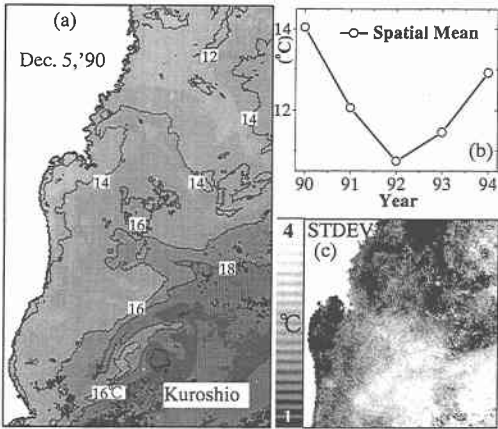


図-11 12月の衛星画像例 (a), 画像の空間平均 (b), 標準偏差画像 (c)

て、江ノ島では降温率が低く、日照時間との関係が弱いことから大気の影響が少ないと言える。

図-10 に、風の沿岸成分と直角成分、日照時間、雨、大気温度という、5つの独立変数に対する SST 重回帰モデルに基づき求めた結果を示す。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 0.75 以上と高いものである。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、大気温度がもっとも高い値 (0.87) を示した。すなわち、局地気象 (局地的天気現象) は水温と密接な関係があるのでこの地域は局地環境の特徴が大きいのと考えられる。

また、貢献度が高い気温と風成分の 1 時間データを用いて 1 時間後の江ノ島 SST 予測を試した。しかし、その残差は -2°C (月末) から 2°C (月初め) であり、重相関係数も 0.6 程度である。そこで水温と大気温度データとのラグ相関を計算した。1 年間 1 日平均データの場合 (田代島)、ゼロラグの時に両者の相関は高いが (0.90)、水温は気温に約 20 日遅れて応答することが分かった。しかし、冬 12 月の 1 時間間隔データの場合、表面水温はほぼ 0 日 (1 h, 江ノ島) と 1 日 (23 h, 田代島) の遅れで気温変動に応答しており、その相関も低い (江ノ島で 0.6, 田代島で 0.5)。

4.2 外洋環境

衛星画像によると 12 月の SST 空間分布は 5 月と似ている。異なる点は津軽暖流の南下と黒潮と親潮が比較的弱いことである。また、黒潮は春の場合より沖合から北

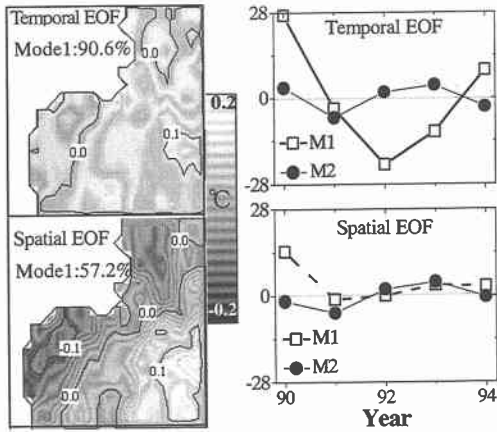
上して牡鹿半島の北東に向かって移動することが衛星データから確認された (図-11 (a))。

衛星画像による空間平均が最低になる 1992 年 (図-11 (b)) は、沿岸 SST (図-7) が一番低かった年であり、日照時間 (図-9) も最低の年である。図-11 (c) の画像は 1990-94 年 12 月の composite 画像から求めた SST 標準偏差を示す。仙台湾の周辺は水温の変動が小さい (図の黒色部分) が、江ノ島を含む三陸沿岸や仙台湾の沖は高い変動性 (図の白色部分) を持っていることが分かる。標準偏差が高い江ノ島の周辺は津軽暖流と黒潮によって SST も高くなるので水温の降温率 ($-0.09^{\circ}\text{C}/\text{day}$) が低いものと言える。

すなわち、仙台湾は①外洋から孤立していること、②河川水により冷却されること、さらに③強い北西風によって蒸発率が増加していることによって高い降温率 ($-0.14^{\circ}\text{C}/\text{day}$) を示すと言える。

4.3 経験的固有関数解析

経験的固有関数解析では、まず 3 次元の衛星データを pixel の位置 x と時間 t に対する 2 次元の配列に変換す



図一12 経験固有関数解析 (左: 固有関数, 右: 固有ベクトル)

ると式 (1) のように表現できる。

$$SST(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) F_n(x) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, a_n : 固有ベクトル, F_n : 固有関数, N : 衛星画像数である。式 (1) に対して 2 つの方法で解析した。一つは一般に使われる方法で時間的な変動成分を取る時間の経験的固有関数解析 (Temporal EOF) であり, もう一つは空間的な変動特性を分かるように空間の経験的固有関数解析 (Spatial EOF) である。本研究では, 月平均画像を用いて Temporal と Spatial EOF はそれぞれ時間と空間平均を除いて共分散 matrix から計算した。

時間の経験的固有関数解析の結果 (図一12 の左上), Mode 1 は全変動中約 91% を説明でき, 支配的外洋条件を示す。Mode 1 の固有関数はすべて正の値を持ち, 固有ベクトルの変動は沿岸水温の月平均値および空間平均値と似ていることが分かる。Mode 2 は湾内部と三陸沿岸が負であり, 約 1% 程度説明できる。

空間の経験的固有関数解析の結果 (図一12 の左下), Mode 1 は全変動中約 57% を説明でき, 水温の空間的分布における特性を示す。固有関数から冬の水温分布は仙台湾の方が沖合より低く, 湾の入口で空間分布が別れていることが分かる。それで沿岸で高い水温が見られた 90 年には固有ベクトルの値も高いので仙台湾の内部と沖合

の水温勾配が大きくなり, 逆に親潮の南下が強かった 91 年には仙台湾の内部の水温が沖より高いことが分かる (Mode 1 と 2 の固有ベクトル)。Mode 2 は湾内部と沖合は正, その間は負であり, 外洋の変動特性 (約 22%) を示す。

すなわち, 仙台湾周辺の水温環境は外洋条件によって大きく左右され, 仙台湾の入口を中心に SST は変動し, その振幅が大きいことが分かる。

5. おわりに

本研究では, 仙台湾周辺で場所による 12 月の降温率差の違いとその要因を気象と外洋条件の観点から考察した。その結果, 降温率は仙台湾の北側の江ノ島と南側の B 点で低く, 湾 (田代島と松川浦) で高い。その原因として, ①仙台湾は高い蒸発率などで大気への熱損失, ②冬の外洋条件は黒潮, 親潮および津軽暖流混在しているが黒潮は春より沿岸から離れて北上し, 牡鹿半島の右側には黒潮と津軽暖流の影響が大きい, ③ B 点は黒潮の影響によって降温率が一番低いことに対して仙台湾は外洋の暖水塊による影響が少ないことが挙げられる。これらは重回帰モデルによる水温変動の推定, および経験的固有関数解析による水温変動特性の調べなどから得られた。

謝辞: 本研究の調査を行うに当たり, 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提供頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 永田 豊, 桜井仁人, 寺本俊彦, 関野清成, 伊達大喜 (1978): 三陸沿岸の表面水温の地域的特性, 沿岸海洋研究ノート, 16(1), pp. 43-49.
- 福島県温排水調査管理委員会 (1990-1998), 温排水調査報告書, 95 p.
- 八木 宏, 緒方健太郎, 坂本太郎, 灘岡和夫 (1996): 開放性海岸における夏季の水温変動特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1201-1205.
- 楊 燦守, 田中 仁, 沢本正樹, 花輪公雄 (1999): 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, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1326-1330.
- 楊 燦守, 田中 仁, 沢本正樹, 花輪公雄 (2000): 仙台湾周辺の熱環境評価, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 135-140.