

昇温期間における東北沿岸 海面温度の変動特性

VARIABILITY OF SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE HEATING PERIOD AT THE COASTAL AREA OF THE NORTHEAST JAPAN

楊燦守

Chan-Su YANG

学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉 06)

The aim of this study is to analyze the variability of sea surface temperature (SST) in the month of May 1990-1994 at the Kuroshio/Oyashio frontal areas. SST variations are examined using a combination of weather conditions and offshore water-mass distribution. A series of ocean thermal imagery (37-image) from Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) are analyzed to study influence of moving fronts on the coastal thermal environment. Multiple regression analyses are used to understand the relationship between independent variables (weather variation components and offshore condition) and coastal sea surface temperature (SST) as dependent variable. The regression results provide a good correlation between the predicted value and in-situ SST. Strong impact of variation in offshore circumstances on coastal SST distribution is clearly noticed especially at the edge of warm tongues and streamers of the of the Kuroshio flowing northward.

Key Words : sea surface temperature, offshore condition, weather conditions, NOAA/AVHRR
Sendai Bay, Sanriku, multiple-regression analysis

1. はじめに

一般に沿岸域はいろいろな自然的・人為的な影響に対して敏感に応答する海域である。特に、本州の東北沖合は黒潮、親潮、津軽海流が共に存在し、それらの相互作用は周辺の沿岸環境に大きな影響を与えており、さらに地理的緯度が気候変動の大きいところにあるため、この地域の水温環境は海況と気象変動によって大きく変化する。

黒潮/親潮前線域になる宮城県は、海岸景観に富んだリアス式海岸と多くの河川により、東北地域の農・水産・商業および教育の中心地として、古来より天然の良港と水運が発達してきた。三陸の沿岸は山地が海岸までせまっており、湾の奥に限って小さな平坦地がみられる。さらに著しく狭い大陸棚のため沖合水塊は沿岸に接近し易く、沿岸定地水塊はしばしば沖合の水塊の影響を受ける。三陸沿岸は親潮の影響で、夏に海霧の多いこと、梅雨時に冷湿の程度が大きいことなどが特徴であり、年々の気候の変動が大きく、気象災害が起こりやすい。したがって、本州東北方沖合の黒潮/親潮境界域は、東北地方の冷害や漁場環境の面からも重視されてきた^{1), 2), 3)}。しかし、今までの研究は外海の状態だけ考慮して行

われてきた。

一方、楊ら⁴⁾は昇温期の4月における海面温度の変動特性解析の方法を提案し、海水面水温(SST)と気象および海況との関係を調べた。また、SSTに対する重回帰モデルでは気象要素だけを考慮して沿岸水温予測が行った。

本研究では、楊ら⁴⁾によって提案された方法を親潮の影響が大きいといわれている5月に適用し、海況条件と気象要素を共に含むSST重回帰解析と追波湾からの河川水塊のモニタリングを行った。その際、外洋の流況および気象変動が仙台湾周辺の水温環境に与える影響および相互作用メカニズムを、①現地観測に基づく水温と塩分変動(90-94年)、②衛星画像(水温データ/AVHRR Ch. 4)からの海況変動(90-94年)、③気象変動(AMeDAS, 90-94年)の三つの変動に着目して調べた。

2. 使用データと解析方法

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、福島県水産試験場および宮城県水産研究開発センターによる水温と塩分のデータ、お

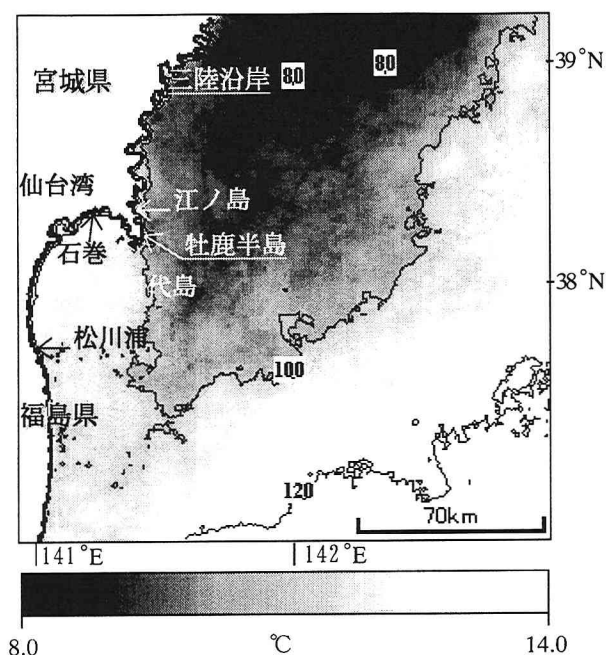


図-1 5月の平均 SST 画像と実測点

よび AMeDAS の風、日照時間、降水量、大気温度データである。図-1 に示す石巻以外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。

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 (遠赤外線) データを利用した。まず、薄い雲の影響を取り去るため、取得時間差が短い画像を合成した。これらの 37 枚画像を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. 三陸沿岸の気象要素変動特性と沖合の海況解析による沿岸水温環境の影響

(1) 気象要素の特徴および SST と塩分の変動性との関係

一般に、3 月から 8 月までは海面が暖められ、5 月または 7 月に加熱のピークがあり、SST も 4 月と 5 月には昇温する。図-1 は 90 年から 94 年までの 5 月の平均水温分布図である。水温分布特性をみると水温の勾配が南北と東西に著しく大きく、その分布パターンが主に黒潮と親潮によって決定されることが分かる。すなわち、牡鹿半島南端を中心に北部の沿岸は親潮が南部は黒潮が支配する構造を持っている。

5 月は 4 月と同じく昇温期間のはじめであるため、SST は日照時間 (Accumulated Duration of Sunshine, 以下日照時間) とはほぼ同じ変動パターンを見せる (図-2)。例外もあるが SST は全体的に日照時間の傾向に従う。したがって、図-3 の T-S diagram のように、江ノ島、田代島および松川浦で水温は上昇する傾向であり、塩分はあまり変わらない。しかし、三

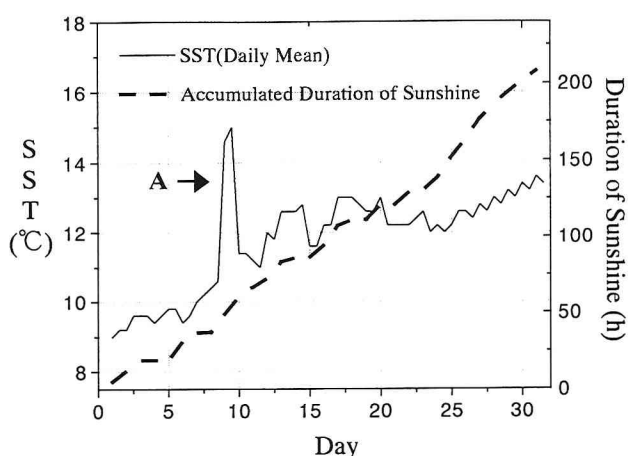


図-2 江ノ島で日照時間と SST (90 年 5 月)

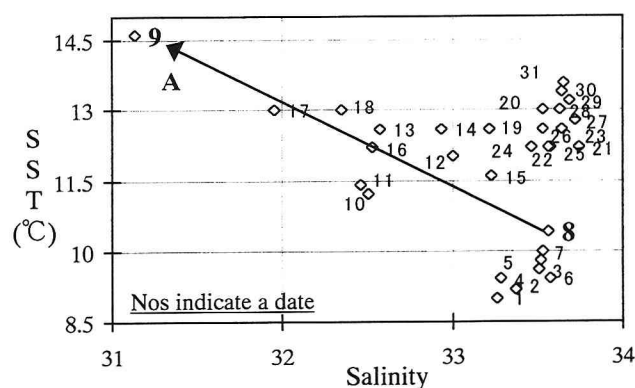


図-3 T-S diagram (江ノ島、90 年 5 月)

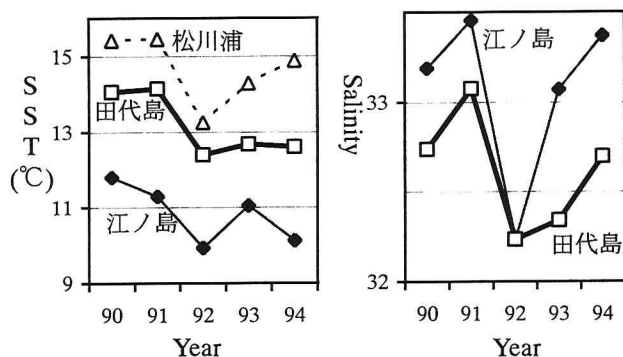


図-4 5月の平均水温と塩分の年次変化

陸および仙台湾周辺の特徴的な地形のため、気象要素の変動もこの 3 つの場所で異なる。さらに、図-1 に示したように異なる沖合水塊条件によっても、その SST 昇温率は大きく変動する。すなわち、図-2 と 3 の A で示した水温のジャンプはこれらの複合作用から起こっている例である。

図-4 は仙台湾周辺の年度別平均 SST と塩分を示す。黒潮の影響を受けて松川浦の水温は高く、親潮の影響を受けて江ノ島の水温は低い。仙台湾の中の田代島は黒潮より河川水流入の影響を受けて塩分が低い。また、場所および年によって SST と塩分の値が大き

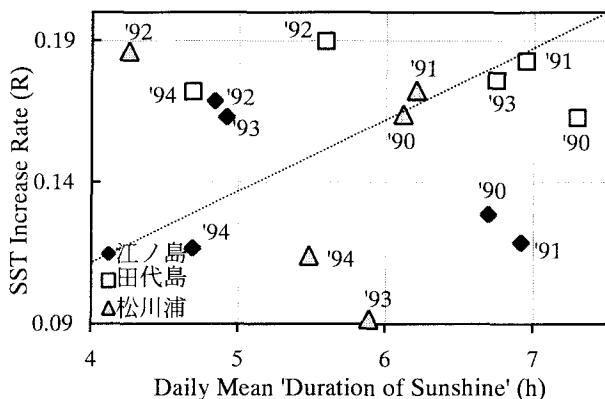


図-5 5月の日照時間と昇温率

く異なるが、それらの年変動傾向は互いに似ている。すなわち、それは沿岸熱環境に対する様々な関連要素の中で短期間の SST 環境に及ぼす重要な共通要因が存在することを意味している。実際、図-4 左図の 3 つ場所のような年次変動パターンを示している環境要素として日照時間、大気温度、外洋条件があげられる。それらの SST に対する寄与率については 5 章で論議する。

楊ら⁴⁾は当海域の 4 月の水温変化に対して日射量（短波放射）が日照時間にほぼ比例するとみて、時間的に積分した日照時間、すなわち、太陽からの光エネルギーだけを考慮して SST 昇温率との関係を調べた。その結果、昇温率と日照時間は線形の関係を示すことが分かった。

5 月の場合、SST 昇温率はプラス値を持ち、図-5 の 5 月平均昇温率線（点線）の付近に位置することが期待されるが 4 月と比べて広く分布している。また、全体的に江ノ島と松川浦より田代島の昇温率が高い特徴を持っていた。すなわち、日照時間以外要素の影響が大きいことを意味する。三ヶ所全部とも 92 年 5 月は低い日照時間にもかかわらず高い昇温率を表した。92 年は、海況条件が急激に変動した年である。4 月はおおよそ平年の水温分布であるが 5 月初めにも親潮の影響が大きく現れ、月末になってから平年 5 月の分布に戻った。また、沿岸の塩分および気象データも他の年と比べて大きな違いを示す。江ノ島の場合、塩分は 90-94 年 5 月の平均より 0.83 低い 32.2 であり、大気温度は 1.4℃低い 11.8℃であった。さらに、降水量は 92 年の総雨量、923mm の約 20%に相当する 185mm を記録した。他の二ヶ所でも似た結果を示した。図-5 で 92 年の分布は以上の状況によって初めは水温上昇が抑制されたが、末期に黒潮の影響で高い昇温率を示した。

図-6 は仙台湾沿岸の 4 地点での 5 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 (m/s) である。東北地方の風向は夏には南東風、冬には北西風が多く、春・秋には卓越する風向がないのが普通であるといわれているが³⁾、風向は地形の影響を受けやすいので地域によってかなり異なる。風

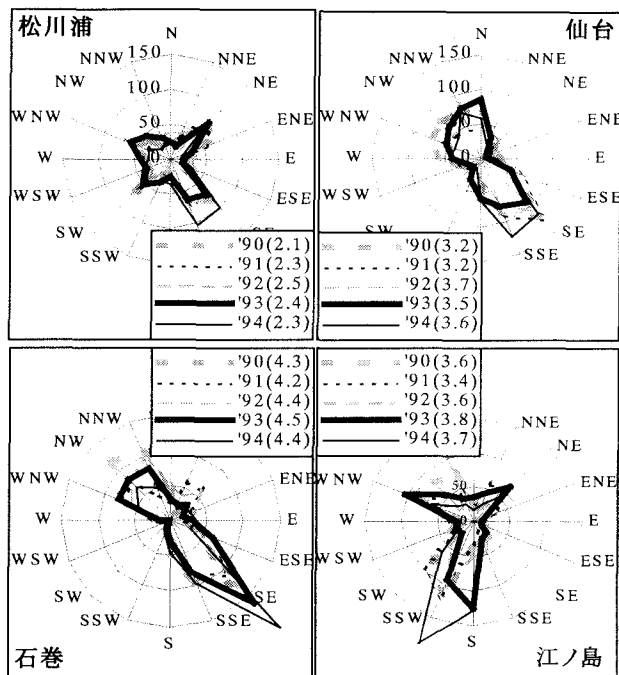


図-6 5月の仙台湾周辺の風分布（括弧内の数値は平均風速(m/s)）

の強さは石巻、江ノ島、仙台、松川浦の順に強い。特に、石巻と仙台および江ノ島と平均風速は 0.7-1.2m/s の差、石巻と松川浦の間は 1.9-2.2m/s の差があり、地域による風特性が大きいことが分かる。しかし、4 月の場合、風の方向はおおよそ一定であるが、風速は年によって大きく変動した反面、5 月の同じ場所では年によって、風の強さと方向はほとんど変わらない。また、5 月の風分布の形状は場所別に 4 月と殆ど同じであるがその風速は 5 月の方が少し弱い。

江ノ島、石巻と仙台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、特に卓越する方向もない。西風の出現率は、無風以外の全観測数(時間)に対して江ノ島で 57%, 石巻で 36%, 仙台で 40%, 松川浦で 40%である。無風の頻度は、江ノ島で 2.3%, 石巻で 1.6%, 仙台で 3.9%, 松川浦で 11.5%である。また、風をベクトル分解した結果(北と東方向がプラス)、風の岸(南北方向)に平行成分は、いずれの場所でもマイナス値(90 年 5 月江ノ島で平均-0.13m/s, 石巻で平均-0.34m/s, 松川浦で平均-0.1m/s), 直角成分の和はプラス値(江ノ島で平均 1.06m/s, 石巻で平均 0.44m/s, 松川浦で平均 0.1m/s)であった。すなわち、日平均の絶対値における平行成分は江ノ島で、直角成分は石巻でもっとも高い。このように、それぞれ地点で風速・風向に特徴があるが、沿岸湧昇とはあまり関係がないことが分かった。平均風が一番弱かった年に最も高い昇温率を示した。

風と昇温率の関係をみると SST と風との間にはあまり線形的な関係がなかった。

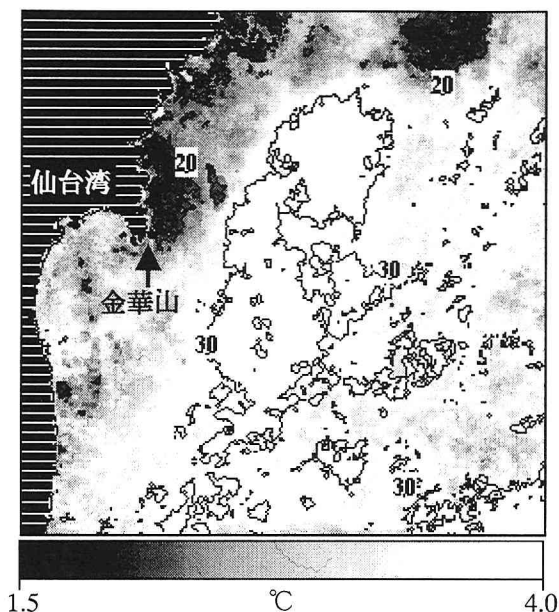


図-7 5月のSSTの標準偏差図

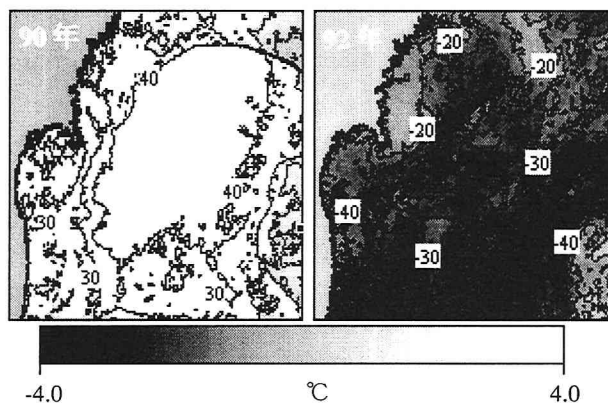


図-8 90年と92年5月のSST Anomaly画像

(2) NOAA/AVHRR データの時系列解析

仙台湾の内部は親潮の影響が少ない地理的特性を持っている(図-1)。Yangら^{5), 6)}は春の期間に対して経験的固有関数解析と Chlorophyll-a 画像データから、沖合の水塊が直接仙台湾の中まで影響を及ぼさないと判断した。図-7は5月の37画像に対する標準偏差図であり、その分布範囲は1.5-4.0℃である。三陸沿岸、特に追波湾から牡鹿半島までの領域は2℃以下で他の場所と比べてその値が小さい。すなわち、この域は単に親潮の影響が大きいことが分かる。また、仙台湾の中央部分は河川と大気などの直接的な影響もあまりないので低い値を示す。図の中で仙台湾と三陸沿岸の沖合でほぼ白い色の部分は3.0℃以上の高い標準偏差を表わしている。ここは黒潮と親潮が交差する場所なのでSSTの変動性が大きい。

図-8は90-94年に対して90年と92年のSST Anomaly画像である。90年画像は殆どプラス偏差(白

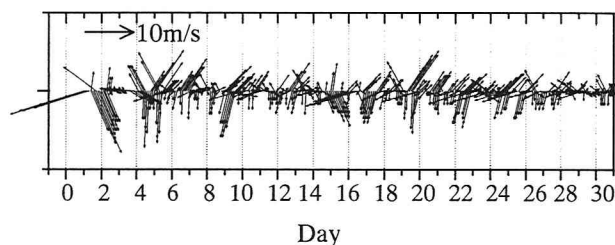


図-9 江ノ島で風Vector (90年5月)

色部分)を、92年はマイナス値を示す。これからこの地域での黒潮・親潮の相互作用は年によっても大きく変化することが分かる。

90年と91年の5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-4から分かるように、水温と塩分は他の年に比べて高かった。91年は黒潮がCrestとして北上し、松川浦と田代島でSSTがまた江ノ島と田代島で塩分が一番高い。

92年には親潮が強くて福島沿岸まで影響を与えているので、すべての沿岸でSSTと塩分は最低である。

93年の5月初めには親潮の影響がもっと強く全体的に温度が下がったが、半ばから黒潮がStreamerとして沖合に存在し、平年水温まで戻った。

94年には、沿岸には黒潮、沖合には親潮が分布している。金華山までは親潮が沿岸から数十km離れて蛇行しながら南下し、江ノ島で低水温と高塩分の特別な現象が起こった。

5月は、4月のように年によって変動するが平均的に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。

4. 河口からの水塊移動のモニタリング

三陸沿岸—沖合の海域では、南から黒潮、北からは親潮が流れ、その間には、二つの海流から派生する暖・冷水が入り込んで分布し、混合水域または混乱水域と称されている。ここでは三陸沿岸で上記の流れに便乗して移動する河川水塊によるSST環境への影響を調べる。

図-2と3は90年5月の江ノ島のそれぞれSST変動とTS-diagramである。一般的に5月のTS-diagramはSSTが昇温する傾向を示す。しかし、これらの図では期待される分布よりばらばらになっており、8日から9日までの急な温度増加(4.5℃)と塩分減少(2.5)現象が現れている。図-9は江ノ島での風Vectorを示す。江ノ島での、4-6日の雨量は14mm、8日は18mmであり、日照時間は5日は0、6日は12.6、7日は5.3、8日は0.5、9日は11.7時間であり、風は9日最大10m/s WNWで前日平均より2倍強かったがTS-diagramの8日から9日までの急な変動の説明は不可能である。

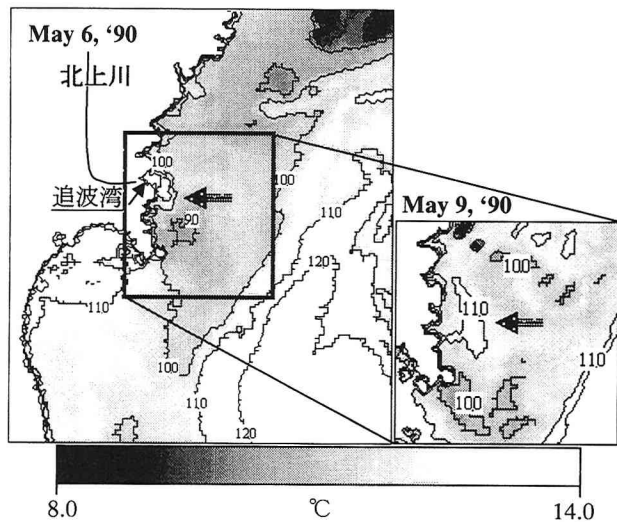


図-10 北上川からの水塊移動と水温変動

この海域に対し、NOAA/AVHRR 衛星データから 6 日と 9 日の画像を解析した結果を図-10 に示す。6 日の画像には追波湾の入口から 8km まで、高い水温の水塊が見える(図-10 の矢印部分)。またそれは南の方向に移動し、9 日には長さ 25km、幅 8km となって江ノ島のそばに位置していたことが分かる(図-10 の右画像の矢印部分)。すなわち、streamer 形として北上する黒潮が右側に回って移動し、親潮はその左側に入ってきた。それに伴って、4-6 日の降水で追波湾から出た河川系水は、8 日の降水の補給を受けつつ、沖合の親潮南下流に引かれて、また西北西の風に押されて、9 日には金華山の北東まで移動した。その間に海面付近にレンズ状に堆積した水塊は日照により暖められ、昇温した。10 日には風が強くなり混合されてレンズ状河川系水は希釈され、水温は低下した。

石川と石川・中田^{7), 8)}によると追波湾は北上川の影響を受け、大流量の場合、全層で 25 程度の塩分濃度になり、北上川の河川水は普通湾の南側に沿って外洋へ運ばれると言う。また、河川水により、上層の水温上昇と塩分濃度の低下時は一致していた。河口から約 30km 上流の登米の河川流量記録では、5 月の平均流量約 274t/sec と較べて 6 日 563t/sec、7 日 466t/sec、8 日 414t/sec と大流量であった。

一方、5 月 16-17 日の間も同じような河川水の流出が起きたが、その時の風と黒潮の条件によって江ノ島での変動はそれほど顕著ではなかった。おそらく、18 日から黒潮が金華山の周辺に出現し、三陸沿岸の南流れは止まったので、水温ジャンプが起きなかった。

追波湾は湾入比(湾の奥行と湾口の幅の比)は約 1.2 程度であるので、外の流れが湾の中に入りやすい特徴を持っている。このため、南へ移動する親潮の流れによって、淡水が湾の南側に沿って外洋へ運ばれると考えられる。

以上のように、AVHRR データは水塊移動の判断の

表-1 標準偏回帰係数

独立変数	江ノ島	田代島	松川浦
風の直角成分	0.06	-0.21	0.85
風の沿岸成分	0.02	-1.07	0.13
日照時間	4.11	4.27	2.98
降水量	0.52	-0.09	0.04
大気温度	0.75	3.26	3.52

ため、重要な基準であることが分かる。

5. 重回帰モデル

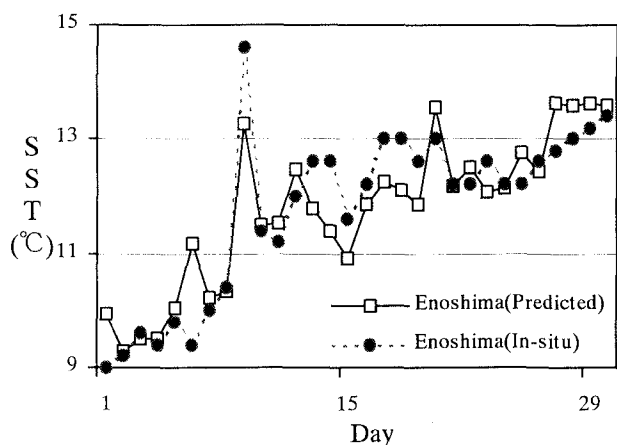
3 章で SST 変動(図-4)と海況および気象変動とに相関関係があることが分かった。一般に、従属変数(目的変数)および独立変数(説明変数)が量的な場合、予測には重回帰解析と呼ばれる手法が用いられる。ここでは SST に対する重回帰解析を用いて、外洋条件と大気の影響を定量的に検討する。

まず独立変数として風、日照時間、雨、大気温度を利用した。ここで風による沿岸水の移流を説明するため、風を沿岸(南北方向基準)に対する直角成分(東西)と沿岸成分(南北)に分離し、SST データ取得時間に合わせて毎日午後 3 時までの平均を取った。また、4 章で調べたように雨の影響が大きかったので江ノ島と松川浦に対して雨の独立変数は SST と 1 日のずれを計算した。その結果、江ノ島で重相関係数(MR)は 0.89、田代島で 0.87、松川浦で 0.81 と求められた。この値は比較的に高く、予測値は SST 実測値をよく表現していることが分かった。

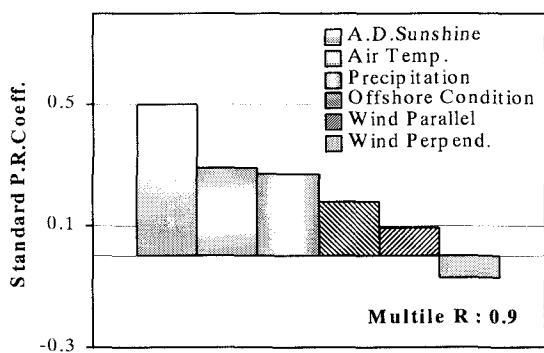
また、変数の単位が異なるため標準偏回帰係数を求めて SST 貢献度の大きい変数を調べた(表-1)。その結果、江ノ島と田代島では日照時間が、松川浦では大気温度がもっとも高い値を示した。江ノ島と松川浦では風成分の影響があまりないが、田代島では南北風が SST の降温に作用することが分かった。降水量の影響は江ノ島で高かった。上記のように外洋条件がない 5 つの独立変数による SST 重回帰解析の場合では日照時間と大気温度が重要な要素であり、仙台湾周辺の SST 実測値をよく表現した。

次は江ノ島で沖合水塊分布を変数に変換して、6 つの説明変数から SST 重回帰モデルを求めた。外洋条件の独立変数は NOAA/AVHRR 衛星データの水温画像から黒潮前線を基準にして、牡鹿半島南端の金華山と 12℃の黒潮 Streamer との最短距離を求めてその値に「-」を付けて計算した。その結果を図-11 に示した。

図-11(a) (Predicted : 予測値, In-situ : 実測値) は、90 年 5 月の江ノ島における 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た。図-11(b)に、風の南北方向に対する直角成分(Wind Perpend.)と沿岸成分(Wind Parallel)、日照時間(A. D. Sunshine)、雨



(a)



(b)

図-11 重回帰モデルによる計算結果と標準偏帰係数

(Precipitation), 大気温度(Air Temp.), 外洋条件(Offshore Condition)という, 6つの説明変数に対する標準偏帰係数を示す。重相関係数(MR)は0.90として外洋条件がない場合より少し高く, 日照時間はSST貢献度が一番大きい変数であることが分かった。また, 外洋条件の変数は4番目であった。図-11(a)で水温の急激な変化が発生した9日の場合, 予測SSTがピークを示した。ところが実測と予測のピークが大きく異なる部分はSSTがいろいろな要素によって変わるためだと考えられる。

今後, 沖合海況変数の値を決める方法の改善が必要である。

6. 結論

仙台湾周辺の三つ地点における, 日平均日照時間とSST昇温率との関係によると同じ日照時間に対して昇温率は違うことが分かった。期待される昇温率とのずれが特に大きい年は親潮の南下が強かった92年である。また, すべての沿岸でSST変動はそれぞれの日照時間, 大気温度, 沖合水塊条件と相関関係があった。そして, 石巻で平均風速は他の場所よ

り0.7-2.2m/sの差があり, 江ノ島, 仙台, 石巻では主に海岸線に直角の風向きが卓越するのに対して, 松川浦では平均的に卓越方向が無く風速も低かった。すなわち, 場所によって影響度は異なるが, 沖合条件と日照時間が沿岸域の水温上昇を支配する大きな要因であることが分かった。

三陸沿岸の追波湾から出ている北上川水塊のモニタリングした結果, 1)湾の内部で北から南に沿岸を沿って移動する流れの確認, 2)河川水の移動による沿岸水温環境に対する影響の平価ができた。

風(直角成分と沿岸成分), 日照時間, 雨, 大気温度, 海況条件を独立変数としたSST重回帰モデルでは, 重相関係数0.81以上として予測値はSST実測値をよく表現した。SST貢献度は日照時間が一番大きかったが海況条件変数は4番目であった。

今後, 沖合海況変数の値を決める方法の改善および熱収支の計算が必要である。

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御提供頂いた。また, 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻沢本正樹教授, 田中仁教授, 理学研究科地球物理学専攻花輪公雄教授に多大なるご協力とご助言を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 工藤英郎: 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, 1971.
- 2) 福渡淳一: 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, 1993.
- 3) 日本海洋学会・沿岸海洋研究部会: 日本全国沿岸海洋誌, pp. 253-271, 1985.
- 4) 楊燦守・田中仁・沢本正樹・花輪公雄: 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, 1999.
- 5) Yang, C. S., Tanaka, H. and Sawamoto, M.: Analysis of coastal thermal environment and variability of SeaWiFS and AVHRR Imagery at the Kuroshio-Oyashio Frontal Region, Proc. '99 Int'l Conf. on Korean Scientists and Engineers, 1999. (In Press)
- 6) Yang, C. S., Tanaka, H., Sawamoto, M. and Hanawa, K.: Empirical orthogonal function analysis of Advanced Very High Resolution Radiometer sea surface temperature variability over the Northwest Pacific, *Progress in Coastal Engineering and Oceanography*, Volume 1, editor B. H. Choi, Hanrimwon Publishing Co., Korea, 1999.
- 7) 石川公敏・中田喜三郎: 追波湾の海域特性(1), 公害資源研究所彙報, 9(4), pp. 35-46, 1980.
- 8) 石川公敏: 追波湾における環境変動と植物プランクトン群構造の変化との関係, 公害資源研究所彙報, 12(2), pp. 49-62, 1982.

(1999. 9. 30 受付)