

仙台湾周辺の熱環境評価

ESTIMATION OF THE THERMAL ENVIRONMENT AROUND THE SENDAI BAY

楊燦守¹・田中仁²・沢本正樹³・花輪公雄⁴

Chan-Su YANG, Hitoshi TANAKA, Masaki SAWAMOTO and Kimio HANAWA

¹学生会員 工修 東北大学大学院 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉06)

²正会員 工博 東北大学大学院教授 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉06)

³フェロー 工博 東北大学大学院教授 土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉06)

⁴ 理博 東北大学大学院教授 地球物理学専攻 (〒980-8578 仙台市青葉区青葉)

To find the characteristics of coastal sea surface temperature (CSST) variations in the Kuroshio/Oyashio frontal region, the calculation of the heat flux and the interpretation of satellite data are performed. The CSST and meteorological data from January through December 1995 are used to estimate the net surface heat flux and heat content for the Sendai Bay. The largest heat gain ($+56 \text{ Wm}^{-2}$) occurs in the Matsukawaura, where strong Kuroshio/Oyashio interaction produces anomalous CSSTs and wind is more moderate than other regions over most of the year. The lowest heat gain ($+35 \text{ Wm}^{-2}$) occurs around the Tashiro Island, where the temperature difference between air and sea surface is lower and wind is stronger. The heat loss is larger during winter. From the AVHRR and SeaWiFS data, the offshore condition between the bay and Eno Island is differentiated by Ojika Peninsula, with varying dominant current. It is shown that the temporal behaviors of SSTs are closely connected with the air-sea heat flux and offshore condition.

Key Words: AVHRR image, SeaWiFS image, sea surface temperature (SST), Kuroshio, Oyashio, heat flux

1. はじめに

開放型湾である仙台湾周辺沿岸海域(図-1)の大きな特徴の一つは、親潮、黒潮および津軽暖流の相互作用によって複雑な自然現象を呈していることであり、したがって仙台湾周辺の水温特性を考える上では、沖合海域からの影響、特にその影響に対する地形・地理的条件の役割を明らかにすることが重要である。

江の島付近の水温変動特性として、5月の平均水温が12月の平均水温より低く、また江ノ島は仙台湾内の松川浦と田代島より北に位置するにも関わらず、冬の水面温度が高い傾向がみられることがあげられる^{1), 2), 3)}。永田ら⁴⁾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。しかし、楊ら¹⁾によると三陸沿岸を含むこの地域の水温環境は大気条件とも密接な関係にある。例えば、沿岸水温の負偏差が一番高かった93年には東北地域の大冷害が発生した。今までの研究では地形的条件、大気および外洋環境を、総合的に考察し

た例はない。特に仙台湾周辺における水温の季節的変動特性が十分に理解されていない。

そこで、本研究では1995年の気象資料および水温データを用いて仙台湾の熱収支などの解析を行い、

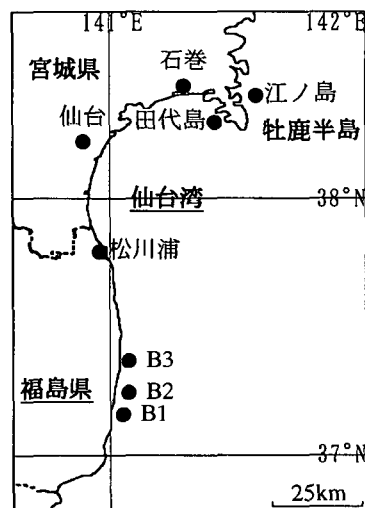


図-1 仙台湾周辺の実測点。

NOAA/AVHRR 衛星画像の海面温度 (SST) と NASA/SeaWiFS 衛星画像の chlorophyll-a データから外洋条件を判断し、水温と大気、沖合との関係を明らかにすることを目的とする。

2. データの概要

(1) 気象資料および沿岸実測データ

気象資料として、石巻と仙台の気象観測所で得られた日平均地上気圧、海面気圧、蒸気圧、相対湿度、雲量を用いた。また、江ノ島、石巻、松川浦の AMeDAS の気温、日照時間、風速、降水量データも利用した。期間は1990年4月から1998年12月までの約9年間である。

沿岸実測データは、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 (江ノ島と田代島)、福島県水産試験場による松川浦の沿岸水温である。また、図-1の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 (沿岸から約8km) であり、福島県温排水調査管理委員会報告書のデータを利用した¹⁾。

(2) 衛星画像

衛星観測は分解能、広域性、同時性において現場観測にはない利点がある。リモートセンシングの中でも水温は、海洋研究では物理をはじめ生物、化学にとって最も基本的な観測対象である。chlorophyll-a データは一般に表層生物学的過程の観測のため利用されるが、ここでは黒潮と親潮の流れのパターンを求めるために用いた⁵⁾。

水温データは、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。また、chlorophyll-a データは97年8月に NASA と OSC (Orbital Science Corporation) によって立ち上げられた SeaWiFS のデータである。

3. 海面水温の変動特性と気象要素との関係

(1) 仙台湾と三陸沿岸における水温の季節変化

図-2には37°Nから39°Nまでの5地点における1995年の月平均水温を示す。図-2によると北側に位置する江ノ島で水温の季節変動が小さく、仙台湾の田代島で一番大きいことが分かる。また、春の5月と冬の12月 (図の楕円部分) のところで水温の順位が大きく変わる。これらは仙台湾が開放型の湾にも関わらず水温に対する外力条件が他の場所と比べて季節によって大きく異なることを意味する。

4月の水温分布は2つのグループに分けられる。すなわち、田代島と江ノ島が一つのグループであり、B点らが他のグループである。江ノ島以外の場所では3月から4月までの昇温率が極めて高い。また、5月になると田代島はB点らのグループに合流して江ノ島との温度差は4-5℃まで広がる。この状態が6月

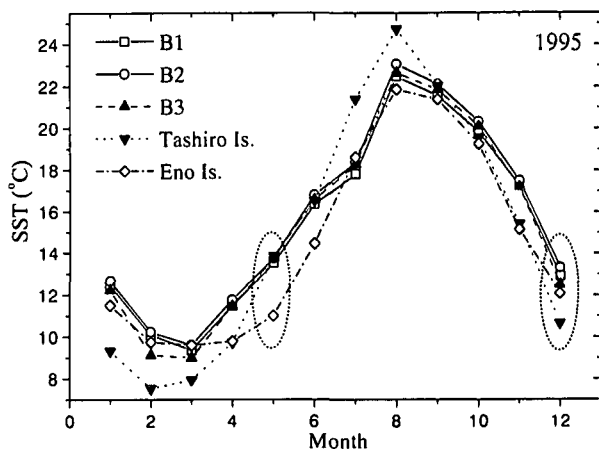


図-2 海面水温の季節変動。

まで持続する。4月から5月までの昇温率は、仙台湾 (松川浦と田代島) で0.12℃/day以上であるが江ノ島では0.08℃/day程度である。楊ら¹⁾によると4月の沖合条件は、黒潮が福島沿岸に沿って北上し、沖合では黒潮と親潮の勢力が拮抗する。5月には、黒潮の北上がさらに強くなって牡鹿半島を中心に北東までその影響が見られるが、江ノ島を含む三陸沿岸では黒潮の影響が少ない²⁾。

夏 (7月と8月) になると田代島だけ他の場所より離れて約3℃程度高くなる。しかし、夏は雲の増加と一様な水温分布のため、水温の衛星画像では流れのパターンを把握することが出来ない。また、降水量が大きく増加するので表層塩分濃度も良い指標ではない。chlorophyll-a 画像によると仙台湾内部の方が沖合と比べて非常に高い。このことから水深が浅い仙台湾は日射によって熱を吸収して海面水温が最も高くなると考えられる。9月以後、その順位は逆転することが分かる。すなわち、田代島の月平均水温は江ノ島より5月から8月まできわめて高いが、冬期間 (12月から3月) には仙台湾より江ノ島のほうが高い水温なのである。また、水温データから求めた12月の降温率も仙台湾 (-0.14℃/day) より江ノ島 (-0.09℃/day) で低い。

B1, B2, B3地点は基本的に江ノ島より高い傾向であり (ただし、7月は例外)、特に春の期間 (4-6月) にその差が大きくなる。

春の黒潮は強く北上するのに対し、冬には黒潮が弱いいため経路も一定ではない。図-2の春と冬の現象は海洋条件と地域の特徴を現していると考えられる。すなわち、黒潮の北上によってB地点で4月ごろに水温が高くなり、4月と5月には南下する親潮によって黒潮は仙台湾までしか影響を及ぼさないの、田代島以南はほぼ同じ水温分布を示す。夏になると仙台湾は大気から熱の流入を受けてさらに水温が高くなる。また、冬になると海洋条件は変化し、牡鹿半島から北側は津軽暖流と黒潮の影響を受けるが、福島県のB3地点から南は黒潮のみに影響を受ける。したがって、仙台湾の表面水温は東北沿岸で変動性が一番大きい傾向を示す。

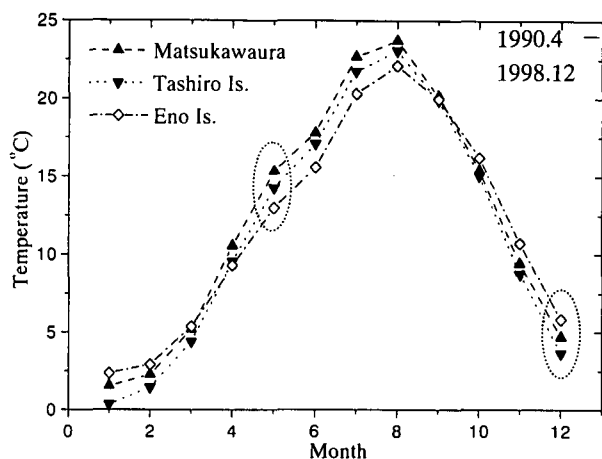


図-3 気温の季節変動.

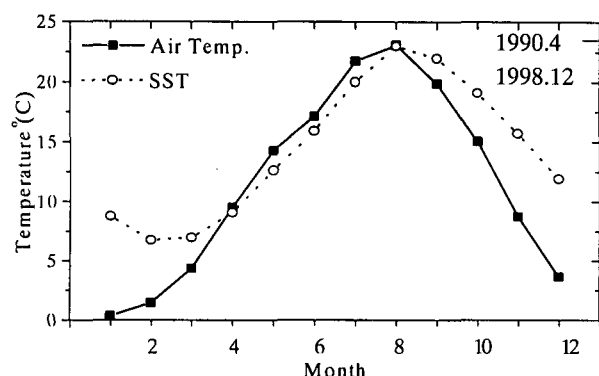


図-4 田代島における気温と水温の変動特性.

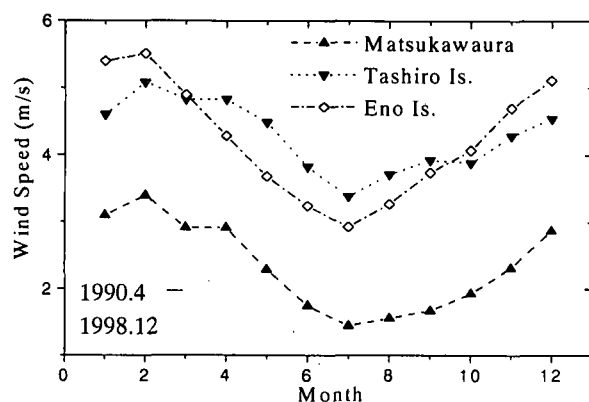


図-5 仙台湾周辺の風速分布.

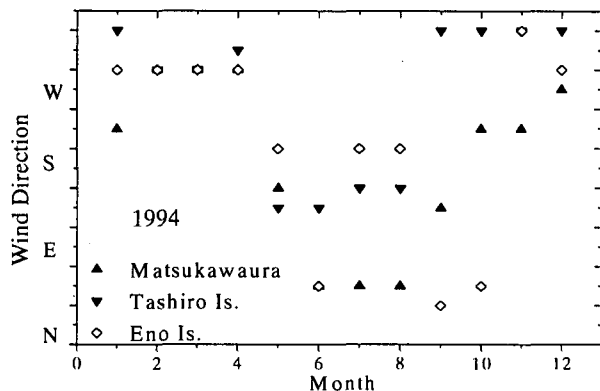


図-6 仙台湾周辺の風向分布 (1994).

(2) 気温変動に対する海面水温の応答

図-3に仙台湾周辺における1990年4月から1998年12月までの気温（月平均値）を示す。ここで、海面水温の季節変化の特徴（図-2）と同様な現象が気温にも見られる。春から8月までの気温は仙台湾の松川浦で高く、10月から冬までは北側に位置する江ノ島で高い。また、春の5月と冬の12月（図の楕円部分）の順位は、松川浦-田代島-江ノ島から江ノ島-松川浦-田代島と大きく変わる。これは大気と水面の相互作用の一例であると考えられる。

気温変動と水温変動の因果関係は、両者のラグ相関を計算して調べることができる。そこで田代島における95年の日平均データに対するラグ相関解析の結果、30日以上で長周期スケールでは、ゼロラグの時にも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30日以下の短期間スケールでは、ラグがゼロで相関が高いが値は低い（0.62）。

仙台湾の海面水温と気温の季節変化の例として、田代島における約9年間の月平均値を図-4に示した。水温と気温の変動を比較すると、気温の年較差（約23℃）が水温の年較差（約16℃）よりもかなり大きいことは分かる。4月上旬から8月中旬にかけての昇温期には気温の方が高く推移し、9月から1月までの降温期には水温の方が高い。また、気温の上昇が6月に著しく抑えられている。これはこの時期に北西太平洋上から吹き込む冷たい北東気流（ヤマセ）に

よるものである。江ノ島ではその年較差が田代島よりそれぞれ約3℃程度低い。

(3) 風の分布特性

風は海面での熱交換と海洋へのエネルギー伝達などに重要な要素である。図-5と6にそれぞれ仙台湾周辺の風速（9年間の月平均値）と風向（1994年の月最大風向）を示す。平均風速は松川浦2.4m/s、田代島4.3m/s、江ノ島4.2 m/sであり、松川浦で他の場所より約2m/s低い。また、松川浦で無風の比も1%（11月）から42%（8月）の範囲を持ち、年平均では22%で他の場所よりかなり多い。年較差は江ノ島（2.6 m/s）で大きい。月平均SSTに対する相関は-0.8以上である。

卓越する風向は季節によって違い9月から4月までは西風が多く、5月から8月までは東風が多い（例外：江ノ島はSSWの風が多い）。風向の月別分布は地理的な条件によって大きく異なる。したがって、風は直接的にSSTの傾向との関連が大きいと考えられる。

4. 熱収支評価

仙台湾周辺の水温変動特性の原因としてまず考えられるのは日射の効果である。海岸域は水深が浅いため、夏季の強い日射の影響を受けて、浅い湖沼や閉鎖性の強い浅海域のように水温が変動する。

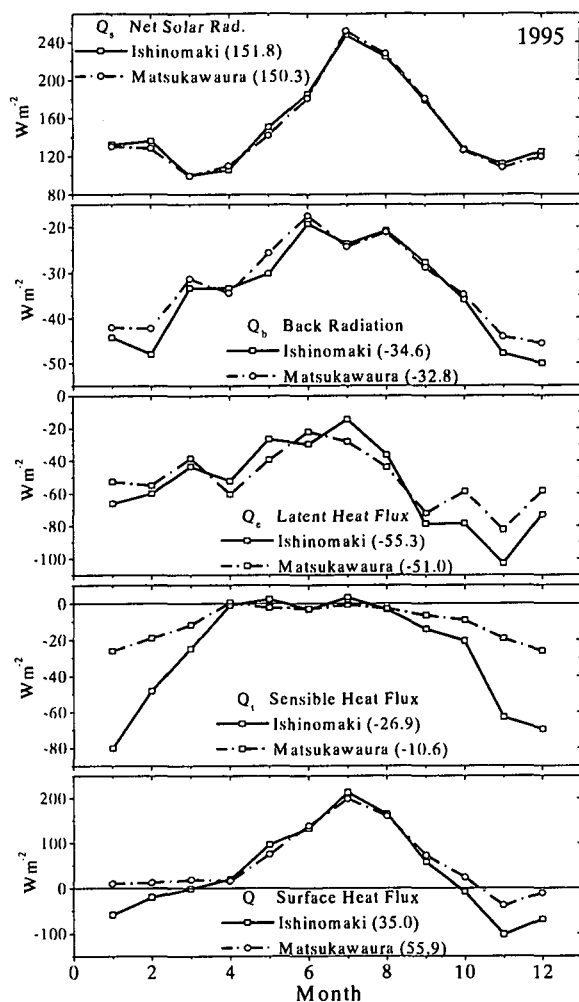


図-7 海面フラックス (石巻と松川浦).

(1) 海面フラックス評価

本研究では、仙台湾の湾奥部 (石巻) と湾口部 (松川浦) の2つの海域に対してYangら⁶⁾が用いた式を利用して大気-海洋間の熱の出入りの計算を行った。使用データは、石巻と仙台での気象台データ、田代島と松川浦の海水面温度、そして松川浦のAMeDASデータである。

海面フラックスは、太陽からの短波放射 Q_s 、海洋からの長波放射 Q_b 、海水の蒸発による潜熱輸送 Q_e 、海水面と大気の接触面での伝導や対流による顕熱輸送 Q_i によって以下ようになる。ここで、海面へのフラックスはプラスで、海面からのフラックスはマイナスとする。

$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_i \quad (1)$$

短波放射フラックスはReedの式⁷⁾ (2)によって求めた。

$$Q_s = Q_o(1 - 0.62C + 0.0019\alpha)(1 - A) \quad (2)$$

ここで、 Q_o は快晴時の日平均日射量 (W m^{-2})、 C は雲量、 α は正午の太陽高度 (degrees)、 A はalbedo (0.06) である。

長波放射 Q_b は式 (3)で与えられる⁸⁾。

$$Q_b = -\sigma\epsilon(T_s + 274)^4(0.254 - 0.00495e_a)$$

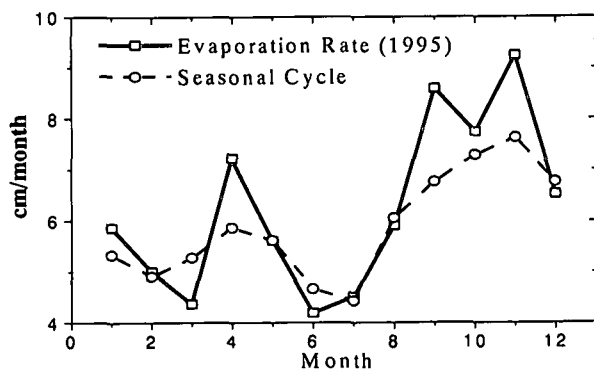


図-8 石巻での蒸発率。

$$(1 - 0.8C) \quad (3)$$

ここで、 T_s (degrees)は海面温度、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ は Stefan-Boltzman 常数、 $\epsilon = 0.97$ は海面の射出率である。 e_a は大気中の水蒸気圧 (hPa) であり、相対湿度と飽和水蒸気圧 (海面での) から計算される。

潜熱フラックス Q_e は次のようにGill⁹⁾の式を利用した。

$$Q_e = -\rho_a C_e W (q_s - q_a) L_v \quad (4)$$

ここで、 ρ_a は大気密度であり、Iwasaka and Hanawa¹⁰⁾が採用した方法を用いた。 W は平均風速 (m/s)、 q_s は海面の飽和比湿、 q_a は大気の比湿である。交換係数 C_e はBunker¹¹⁾の表から求めた。蒸発潜熱 $L_v = (2.5008 \times 10^6) - (2.3 \times 10^3) T_s \text{ J kg}^{-1}$ である⁹⁾。顕熱フラックス Q_i は式 (5)で与えられる。

$$Q_i = \rho_a C_p (0.0026 + 0.86 \times 10^{-3} W \Delta T) \quad W \Delta T < 0$$

$$Q_i = \rho_a C_p (0.002 + 0.97 \times 10^{-3} W \Delta T) \quad 0 < W \Delta T < 25$$

$$Q_i = \rho_a C_p (1.46 \times 10^{-3} W \Delta T) \quad W \Delta T > 25 \quad (5)$$

ここで、 $\Delta T = T_s - T_a$ 、 C_p は空気の定圧比熱であり、 $C_p = 1004.6(1 + 0.8375 q_a) \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ である。

計算結果を石巻と松川浦の海域について、図-7に上から短波放射フラックス、長波放射フラックス、潜熱フラックス、顕熱フラックス、正味の海面フラックスをそれぞれ示す。図中の括弧内の数値は年平均値 (W m^{-2}) である。これらの月平均値は誤差を小さくするため日平均計算値から求めた。図-7の Q の年平均によると仙台湾は海面を通して熱を吸収することになる。したがって、海面では吸収する熱が冬に蒸発などで損失する量より多いことを意味する。

図-8には石巻における蒸発率を示す。鎖線は4年間の平均値を、実線は1995年の蒸発率 (cm/month) を示す。冬、特に11月に最大となることが分かる。平均的に石巻の蒸発率 (0.70m/yr) が松川浦 (0.46m/yr) より高いが1m/yr以下である。蒸発率の季節的特徴は図-8のような仙台湾の海面フラックスとの関連が大きいことが分かる。

湾の奥と入口は大気と外洋条件が全然違うので、

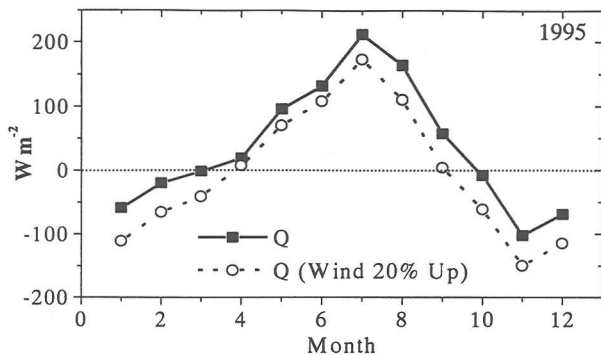


図-9 風速の増加による海面フラックス変化。

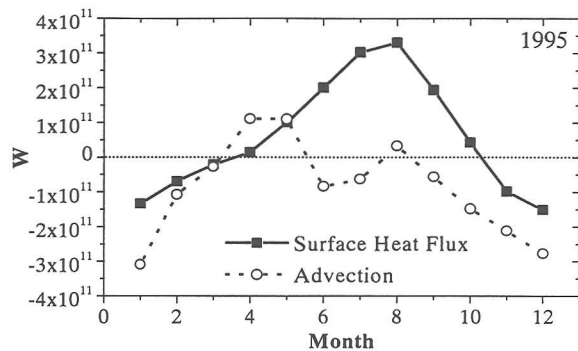


図-10 仙台湾の熱収支。

熱の吸収の程度は地域によって大きく異なる。海面フラックスには場所（石巻と松川浦）による差がある。具体的には、仙台湾の奥は 35Wm^{-2} 、入口は 56Wm^{-2} である。これは主に顕熱フラックスの差によることである。この原因としては2つが挙げられる。一つは、図-5のように場所によって大きく異なる風速であり、もう一つは2つの場所での気温と水温の差である。特に、冬（11-3月）の期間はその差が大きくなって、松川浦での絶対値は石巻と比べて 2°C 程度高い。

ここで使用したデータは海上気象データではなくて沿岸から何kmか離れている場所の気象資料である。例えば、用いた風速を20%増加させて海面フラックスを計算すると図-9に示すように年平均はマイナスになる。

(2) 仙台湾の熱収支

水深 D の単位水柱の熱量変化は、次式のようになる。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \rho C_p \int_{-D}^0 \frac{\partial T}{\partial t} dz = Q + F \quad (6)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 C_p は定圧比熱、 T は温度そして z は鉛直座標（上向き正）である。式(6)右項の F は水平移流または混合による熱発散項であり、 Q は海面で単位面積あたり流入・流出する熱量である。本研究では式(6)を仙台湾全体に適用し、Yangら⁶⁾と同じ条件で仙台湾の熱収支を評価した。

牡鹿半島から松川浦を結ぶ線の内部（表面積： $1,757\text{km}^2$ ）に対して、14実測地点によって海域を分けて鉛直水温データを用いて計算した。また、式(6)の F は熱量と海面での熱交換量から求めた。図-10には1995年の仙台湾の熱収支を示した。

海面での熱交換量（図-10の実線）を見ると、仙台湾の海面で熱の流入は春から夏に大きいが移流は春と冬に大きい。また、仙台湾は海面を通して正味熱を吸収する。重要な特徴は、1) 海面での年平均熱交換はプラス、2) 春から夏にはプラスまたは弱い負の移流と9月まで海面熱吸収の増加、3) 冬になると海面での熱収支と移流もマイナスになることである。したがって、このことは図-2に示した田代島の水温の季節変動と関係があると判断される。す

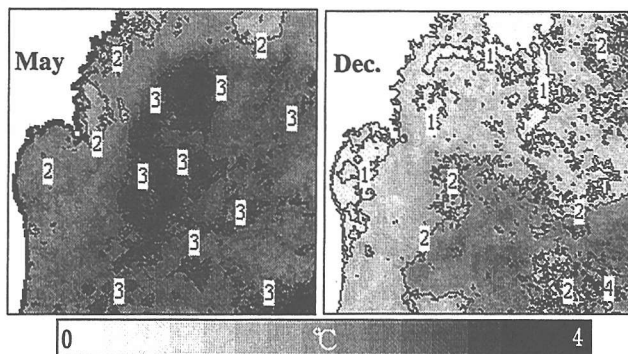


図-11 SSTの標準偏差分布(5月と12月)。

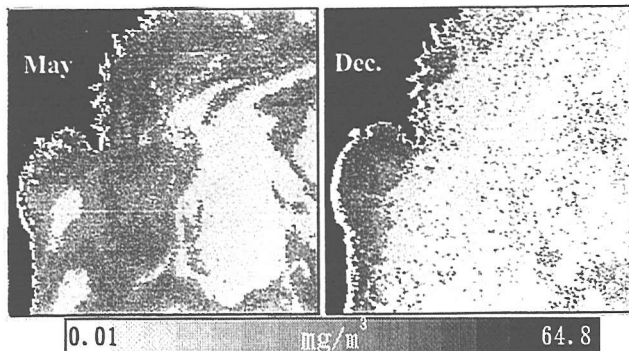


図-12 Chlorophyll-a画像の例(5月と12月)。

なわち、これが仙台湾の水温において、夏には他の場所より高くなるが冬には低くなる理由である。したがって、仙台湾は牡鹿半島という地形的な原因によって影響を大きく受けていることが分かる。

4. 沖合条件の変動特性

(1) SST画像による水温変動

図-11には5月と12月の衛星データから得られた水温の標準偏差画像をそれぞれ示す。まず、5月を見ると春に黒潮と親潮によって全体的に水温の変動が大きく、仙台湾と三陸沿岸の沖合は特に大きい。また、仙台湾内部も沿岸に沿って北上する黒潮の影響を受けて仙台湾周辺とあまり変わらない。

しかし、冬には黒潮と親潮だけではなくて津軽暖流の南下が見られる³⁾。さらに、黒潮と親潮は春と

比べて弱いし、黒潮は福島沿岸を離れて北上して牡鹿半島から三陸沿岸に影響を及ぼすことが多い。したがって、図-11（右）のように、標準偏差の等値線が仙台湾の入口にあり、変動も小さい。江ノ島を含む三陸沿岸や仙台湾の沖は高い変動性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（図-2）。しかし、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。

(2) Chlorophyll-a画像による流れ分布

図-10に見られる移流の特徴はchlorophyll-a衛星画像からも確認される。図-12は1998年5月31日と12月4日のchlorophyll-a画像を示す。図で白色と黒色部分はそれぞれchlorophyllの低濃度（主に、黒潮）と高濃度（主に、親潮）を示す。牡鹿半島と中心に流れが大きく変わることが分かる。特に、5月は親潮の南下によって北上する強い黒潮は仙台湾に影響を及ぼしながら半島の右に回る。しかし、親潮と黒潮が弱い12月は沖合から孤立し、仙台湾から福島沿岸まで同じ水塊で占められる。

夏のchlorophyll-a画像（図省略）によると仙台湾内部沖合と全く異なり、極めて高い高度を示す。

5. おわりに

今回の解析では宮城県と福島県沿岸の水温データの年変動パターンを調べ、その原因を明らかにした。また、仙台湾内外の環境（大気と海洋）条件は、親潮、黒潮と津軽暖流が混在して季節的に変動することと仙台湾周辺の特別な地形によって決まることを確かめた。さらに、仙台湾内部は場所によって水温および海面を通しての熱交換量が異なることが分かった。また、牡鹿半島は流れのパターンに対して季節によって重要な役割していると判断される。

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提供頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 楊燦守: 昇温期間における東北沿岸海面温度の変動特性, 水工学論文集, 第44巻, pp.927-932, 2000.
- 3) 楊燦守, 田中仁, 沢本正樹, 花輪公雄: 降温期間における仙台湾周辺の海水温環境, 海岸工学論文集, 第47巻, 2000. (印刷中)
- 4) 永田 豊, 桜井仁人, 寺元俊彦, 関野清成, 伊達大喜: 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, 1978.
- 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, pp.1024-1032, 1999.
- 6) Yang, C. S., Tanaka, H., Sawamoto, M. and Hanawa, K.: Surface heat flux, horizontal advection, and the seasonal evolution of water temperature over the Sendai, *Coastal Eng. J.* (submitted for the publication)
- 7) Reed, R.: On estimating insolation over the ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.7, pp.482-485, 1977.
- 8) Reed, R.: Heat fluxes over the eastern tropical Pacific and aspects of the 1972 El Niño, *J. Geophys. Res.*, 88(C14), pp.9,627-9,638, 1983.
- 9) Gill, A. E.: *Atmosphere-Ocean Dynamics*, 662pp., Academic Press, San Diego, Calif., 1982.
- 10) Iwasaka, N. and Hanawa, K.: Climatologies of marine meteorological variables and sea fluxes in the North Pacific computed from COADS, *Tohoku Geophys. J. (Sci. Rep. Tohoku Uni., Ser. 5)*, Vol. 33, No. 3, pp. 185-239, 1990.
- 11) Bunker, A. F.: Computations of surface energy flux and annual air-sea interaction cycles of the North Atlantic Ocean, *Mon. Weather Rev.*, No.104, pp.1122-1140, 1976.