

# NOAA/AVHRR データを用いた有明海周辺の熱環境解析

福士大介<sup>1</sup>・風間聡<sup>2</sup>・沢本正樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 修士 (工学) 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 3-10-24)

<sup>2</sup>正会員 博士 (工学) 東北大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

<sup>3</sup>フェロー 工学博士 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)

閉鎖性の高い有明海、島原湾、八代海を対象に NOAA/AVHRR を用いて湾内熱構造を調べた。NOAA/AVHRR データ 1 年間 190 シーンのデータセットを作成した。これをフーリエ展開し、変動特性を領域毎に調べ、位相と振幅が湾口からの湾奥にかけて特徴的な分布をすることを示した。また、バルク式から海面での熱収支を計算した。それによると、海面からの熱放出量として夏季には潜熱が、冬季には長波放射が卓越している。これに加え、潮位と河川流量から鉛直面の熱交換量を計算し、水平熱移動を把握した。湾内では、放射により吸収された熱が潮によって外洋へ運ばれること、洪水による熱量の大きなことが確認された。

**Key Words :** NOAA, AVHRR, SST, MCSST, Fourier analysis, heat balance

## 1. 序論

海面温度は海洋の熱的な状態を知るための基本的な物理量であり、その変動を知り熱構造を探ることは、大気、海洋に生じる様々な物理現象を知る上で極めて重要である。湾内の海面温度変動および熱構造を解明しようとする場合、継続的かつ広域的、さらには大気、海洋の現象のスケールに見合うだけの時間的に密な水温データが必要となる。

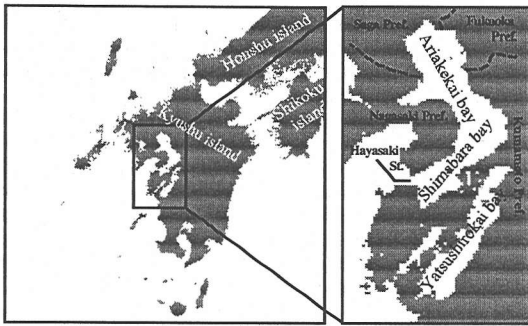
現場観測に比して、人工衛星による観測には分解能、広域性、同時性、反復性、頻度において利点がある。反面、人工衛星により観測された水温を利用するには次のような制約がある。海面情報が得られない点、雲があると海面を計測できない点、途中大気の影響により精度の信頼性が薄れる点等である。しかし、第 1 点は水深が浅い場合には表面水温をある程度その海域を代表していると考えられることも可能である。また、解析の目的に応じた適当な補間を行うことにより第 2 の点もある程度克服できる。第 3 点は統計的手法により大気の影響を補正することで克服が可能である。これらの点に注意して用いれば、人工衛星のデータは有用なデータである。中でもアメリカ大気海洋局により管理、運用されている NOAA 衛星の AVHRR センサは高解像度かつ高頻度で、ある程度の精度を保證された観測を可能としている。人工衛星データを用いた湾内環境の評価は、東京湾の流動と簡単な数値計算から湧昇流の研究<sup>1)</sup>や志津川湾の海水交換を捉えたもの<sup>2)</sup>がある。これらは特徴的な現象を衛星画像

によって捉えたものである。一方、福島沖の水塊の動きを解析したもの<sup>3)</sup>や黒潮の挙動を捉えたもの<sup>4)</sup>は、衛星データを時系列で用いたものである。湾内の熱収支を衛星データから解析しようとする際、画像上の被雲率が問題となり実用には適さなかった。中野渡ら<sup>5)</sup>は、離散的な衛星データを用いて東京湾の年間熱収支を論じたが、詳細な時間変動の考察には至っていない。

本研究は、九州西部に位置する有明海、島原湾、八代海をフィールドに、NOAA/AVHRR のデータを用いて海面温度を推定し、Fourier 解析を用いて海面温度の変動特性を解析し、湾内熱構造の解明を試みるものである。

## 2. 研究対象領域について

本研究では、研究対象領域として九州西部に位置する有明海、島原湾、八代海を扱った。対象領域の周辺図を図-1 に示す。有明海、島原湾は、湾奥の有明海北部に干潟が広がり島原湾に向かって水深 0~20m 程度の浅瀬が続いている。島原湾中央部から湾口の早崎瀬戸にかけては 30~50m 程度の水深が続き、早崎瀬戸には約 100m の海谷が切れ込んでいる。面積は約 1,400km<sup>2</sup> である。八代海は湾奥の北部に水深 0~20m 程度の浅瀬が広がり、南部は 30~50m 程度の水深となっている。面積は約 700km<sup>2</sup> である。なお、有明海、島原湾には 8 本、八代海には 1 本の一級河川が流入している。



図一 研究対象領域

### 3. NOAA14/AVHRR による海面温度の推定

#### (1) データセットの作成

本研究では海面の観測水温として、東北大学大型計算機センターより提供を受けた NOAA14 のデータによる推定温度を使用した。そのデータセット作成の手順を以下に示す。なお、以下の処理により、最終的に解析データとして 1996 年 7 月 31 日から 1997 年 8 月 31 日までの期間で 190 枚のデータを得た。

東北大学大型計算機センターは NOAA の画像を常時受信し公開している。これらの画像を目視により選別し、解析可能と思われる画像の抽出を行った。

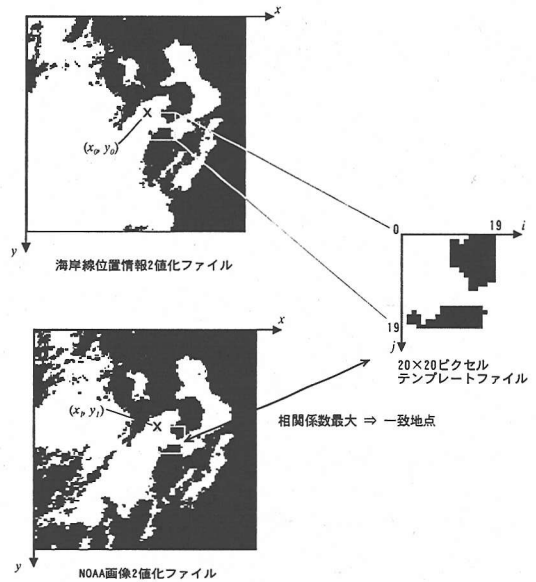
NOAA 画像はシステム補正により地図座標（メルカトル座標）に変換されて供給されており、各ピクセルの緯度、経度を知ることができる。しかしながら、画像を取得する際の衛星の軌道や姿勢のゆらぎにより、各画像には公称座標から数ピクセル程度のずれが生ずる。このずれを以下に示す手順で補正した。

まず、建設省国土地理院から公開されている国土数値情報の海岸線位置情報を NOAA 座標に変換して陸域、海域の 2 値化ファイルを用意した。このファイルから特徴的な地形を持つ地点を 20×20 ピクセルのテンプレートファイルとして抽出する。さらに NOAA の各画像に対して陸域、海域の 2 値化ファイルを作成する。なお、NOAA 画像の 2 値化は NDVI (Normalized Difference Vegetation Index: 正規化差植生指標) に閾値を設け、その閾値以下を海域、以上を陸域、雲域とした。その際の閾値は NDVI=0 を採用した。

$$NDVI = \frac{ch2 - ch1}{ch2 + ch1} \quad (1)$$

ここで、ch1, ch2 はそれぞれ NOAA/AVHRR の可視波長、近赤外波長の輝度値である。

続いて、図-2 に示すように各画像の 2 値化ファイル



図二 相関法

中任意の 20×20 ピクセルとテンプレートファイルとの相関を計算することから位置のずれを補正した。

NOAA 画像から海面温度の推定を行う際に、対象ピクセル上に雲が存在する場合は推定が不可能である。雲域の判別にはさまざまな手法が存在する。しかし、日中の海洋上において雲を判別するには、アルベド値による判別が簡便かつ正確な結果を与える。本研究では可視域のアルベド値である ch1 にその閾値を設け、6.0%未滿を海域、それ以上を雲域とすることで判別を行った。

#### (2) Split-window MCSST 法による海面温度の推定

NOAA/AVHRR の赤外線チャンネル ch.4, ch.5 の観測値は輝度温度値に変換される。この値は現場の実測水温よりも低めの値を示し、両者の差は水温が高くなるほど顕著となる傾向がある。

この不一致の主要因はセンサと測定対象である海面との間にある大気吸収、散乱、再放射などの効果にあり、特に水蒸気による吸収の影響が大きい。したがって、衛星データを用いて海面水温データを得るためには、データに含まれる大気の影響を補正しなければならない。

本研究では、大気補正に split-window MCSST 法を用いた。split-window MCSST 法とは、大気の影響の程度が異なる複数の衛星観測輝度温度値と、現場観測値とを統計的な関係で結びつけた線形回帰式により補正を行う手法である。NOAA/AVHRR の場合、MCSST 式は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$MCSST = aT_4 + b(T_4 - T_5) + c(\sec \phi - 1)(T_4 - T_5) + d \quad (2)$$

表-1 MCSST式の補正係数とBIAS, RMSD

海域	a	b	c	d	BIAS	RMSD	BIAS±RMSD
有明海 (本研究)	0.93219	2.25200	0.88418	18.559	0.05	1.34	1.29, 1.39
瀬戸内海 (塚本ら)	0.95892	1.59835	0.34942	13.0156	1.33	1.56	-0.23, 2.89
外洋 (NOAA)	0.96356	2.57921	0.24260	10.144	1.30	1.39	-0.09, 2.69

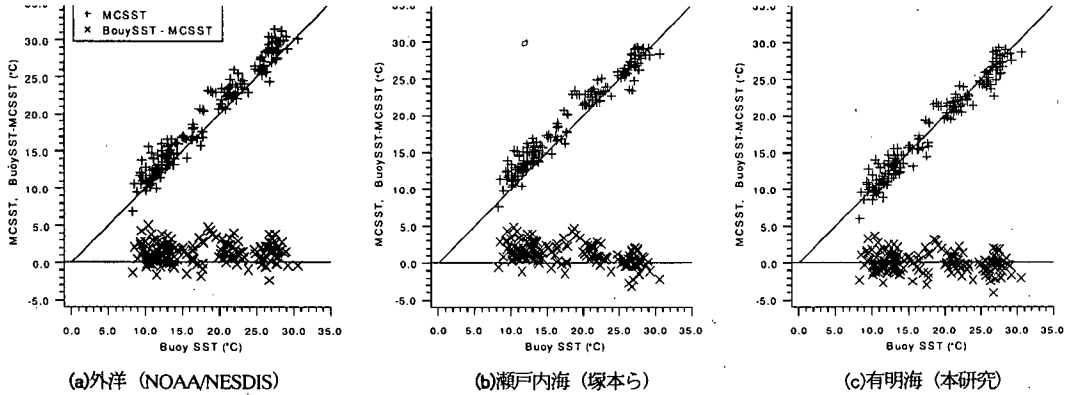


図-3 推定水温とトールズ水温の比較

ここで、MCSSTは推定水温(K),  $T_p$ ,  $T_s$ はそれぞれch4, ch5の観測輝度温度値(K),  $\phi$ は衛星天頂角,  $a, b, c, d$ は補正係数である。補正係数は現場観測水温(シートルス水温)より、統計的に求められる。

MCSST式により海面温度を正確に推定するには、この補正係数に海域の特性に応じた値を用いる必要がある。本研究ではトールズ水温に、熊本県水産研究センターが行っている島原湾内熊本市沖の自動計測ブイによる観測水温を用い、最小二乗法により補正係数の決定を行った。なお、ブイの位置は熊本市沖2~3kmの2点、水温センサは水深50cm程度、観測間隔は1時間である。MCSSTの推定値とトールズ水温の残差の二乗和を $f$ とすると、

$$f = \sum_{i=1}^m \{SST_i - MCSST_i\}^2 = \sum_{i=1}^m [SST_i - \{aT_{ai} + b(T_{ai} - T_{si}) + c(\sec\phi_i - 1)(T_{ai} - T_{si}) + d\}]^2 \quad (3)$$

よって、この $f$ が最小となる補正係数 $a, b, c, d$ を式(4)を解くことにより求める。

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial c} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial d} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

ただし、SSTはトールズ水温(K),  $m$ はデータ数である。

以上の処理によって求められた補正係数を、外洋を漂流するブイの水温データを用いて求められた補正係数(NOAA, 1994)<sup>2)</sup>、瀬戸内海においてフェリー観測水温を用いて求められた補正係数(塚本ら, 1997)<sup>3)</sup>とあわせて表-1に示す。

それぞれの補正係数を研究対象領域に適用した場合の推定水温とトールズ水温を比較した結果を、図-3、表-1に示す。表-1の中のBIASは推定水温とトールズ水温の残差の平均、RMSDは残差の標準偏差である。

$$BIAS = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (MCSST - SST) \quad (5)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (MCSST - SST - BIAS)^2} \quad (6)$$

図-3(a), (b)によると、NOAA, 塚本らの係数を用いた場合には残差が正に偏っており、推定水温が観測水温よりも高めに推定されていることが確認できる。一方、本研究で求めた係数を用いた場合には、図-3(c)に示すように残差の偏りが解消され、誤差の平均であるBIAS値で見ると、表-2に示すようにNOAA, 塚本らの係数を用いた場合の1.30, 1.33から大幅に改善されて0.05となっている。また、ばらつきを示すRMSDも若干であるが改善され、1.39, 1.56から1.34となっている。統計学的に残差のほとんどはRMSD±BIASの間に存在することから、RMSD±BIASを比較すると、その値は最大で2.89, 2.69から1.39となっており、推定精度が改善されている。

#### 4. 海面温度の時系列解析

##### (1) 成分分離

水温の変動には年周期の変動と日々の気象、海象等による小さな変動が重畳しており、年間の変動を議論する場合にはこれを分離する必要がある。そこで、NOAA 画像から得られた水温データを有限 Fourier 級数展開し、年平均水温、年間変動成分とその他の成分を分離して考察を行う。

NOAA の画像は雲の影響等により毎日とは揃わないため、最小二乗法により Fourier 係数を求めた。得られたデータ数を  $m$ 、時刻  $t_j$  に得られた水温を  $T_{sj}$ 、Fourier 級数の展開数を  $N$ 、Fourier 係数を  $a_n$ 、 $b_n$ 、基本周期(365 日)を  $T_0$  とすると、残差の二乗和  $S$  は次のようになる。

$$S = \sum_{j=1}^m r_j^2 \quad (7)$$

$$r_j = T_{sj} - \sum_{n=0}^N \{ a_n \cos \sigma_n t_j + b_n \sin \sigma_n t_j \} \quad (8)$$

$$= T_{sj} - \sum_{n=0}^N \{ A_n \sin(\sigma_n t + \phi_n) \}$$

$$\sigma_n = \frac{2\pi n}{T_0} \quad (9)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (10)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \quad (11)$$

この  $S$  を最小にするような  $a_n$ 、 $b_n$  を最小二乗法により決定した。本研究では  $N=4$ 、すなわち 1 年、半年、4 ヶ月、3 ヶ月周期までの展開を行い、対象領域の全ピクセルに対して Fourier 係数の計算を行った。

##### (2) 計算結果および考察

有明海、島原湾の湾奥部(有明海北部)、湾中央部(島原湾)、湾口部(早崎瀬戸)、および八代海の湾奥部(北部)、湾口部(南部)のそれぞれ 1 ピクセルにおける Fourier 解析結果を図-4 に示す。いずれの地点においても水温の年間の変動をよく再現しており、基本的な変動と残差とに分離されていると考えられる。また、基本的な変動

は年平均値と一年周期成分とでほぼ支配されており、その波形は各地点により、振幅、位相に特徴が認められる。年間の変動特性を議論する際には各 Fourier 成分の特徴、中でも年平均成分(年平均水温、 $n=0$ )、一年周期成分( $n=1$ )が重要であり、これらを考察することが必要である。

図-5(a)、(b)に年平均成分  $A_0$ 、一年周期成分の振幅  $A_1$  の分布を示す。有明海、島原湾において、年平均水温は湾中央の島原湾で若干大きくなっているが、全体としては湾口の早崎瀬戸で大きく、湾奥の有明海北部に向かって減少し、 $19.0^\circ\text{C} \sim 18.0^\circ\text{C}$  の間に、振幅は逆に湾口で小さく、湾奥に向かって増加し、 $6.0^\circ\text{C} \sim 9.0^\circ\text{C}$  の値となる。平均水温、一年周期成分振幅の分布に見られるこれらの傾向は八代海においても認められ、湾奥、湾口における年間の水温変動特性を表しているものと考えられる。すなわち、年間で見ると湾口は平均水温が高く変動が小、湾奥は平均水温が高く変動が大きいという特徴を持つ。

この傾向は外洋を流れる黒潮系暖流と太陽放射による熱供給のバランスにより生じるものである。研究対象領域は外洋を流れる黒潮系暖流に面しており、湾口部は一年を通して暖かく変動の小さい暖流の影響を強く受けるが、湾奥に向かうにつれてその影響が減少する。さらに、湾奥ほど水深が浅くなるため熱容量が減少し、逆に年間の変動が激しい太陽放射の影響を強く受ける、という熱構造となっている。

図-5(c)、(d)に(年平均成分)+(一年周期成分)の最低水温( $A_0 - A_1$ )、最高水温( $A_0 + A_1$ )の分布を示す。最低水温では湾口部が高く湾奥で低くなっているが、最高水温では水温分布が逆転していることが確認できる。最低水温の出現する冬季には太陽放射が弱いため湾奥で低温となるが、最高水温の出現する夏季では、黒潮からの熱供給の少ない湾奥に太陽放射が熱を補う形で水温分布が逆転する熱構造が確認できる。

図-5(e)に最低水温( $A_0 - A_1$ )の出現する位相を示す。有明海、島原湾、八代海ともに、湾奥部では太陽放射の最も少なくなる冬至から約 5 週間の遅れが見られ、湾奥部では更に約 3 週間の遅れが見られる。湾口ほど冬至、夏至にピークを持つ太陽放射の変動に引きずられるためであると考えられ、ここからも対象海域の熱構造が確認できる。

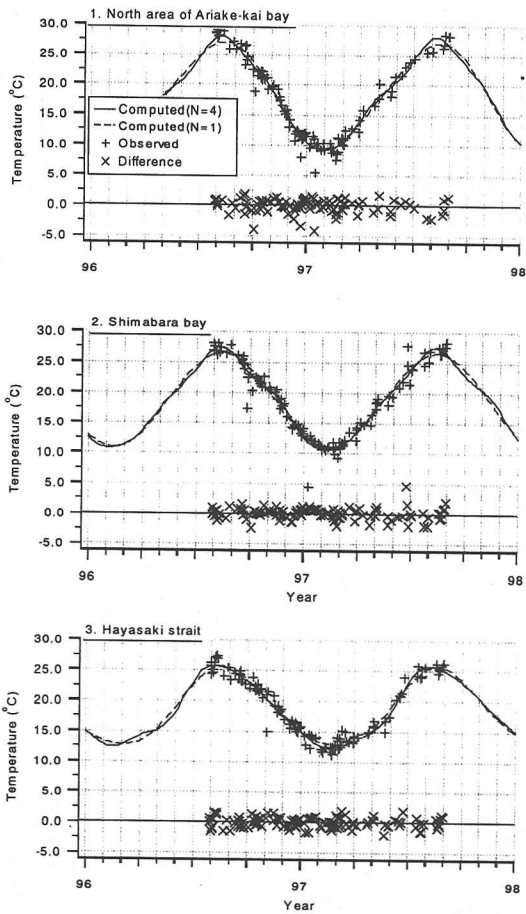
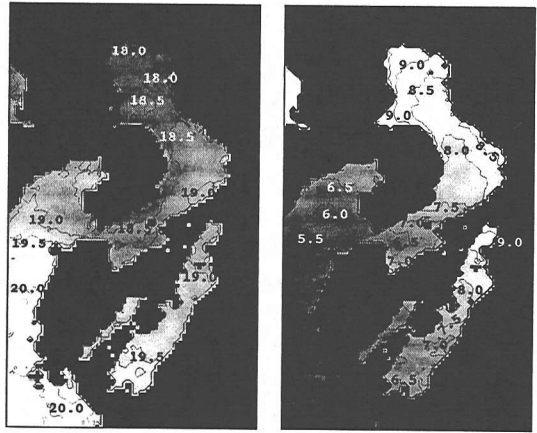
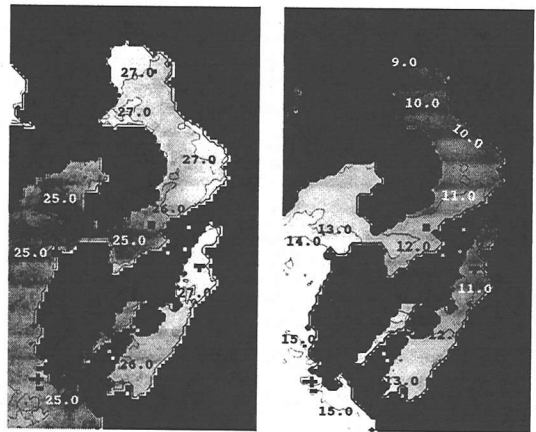


図-4 1点における Fourier 解析結果



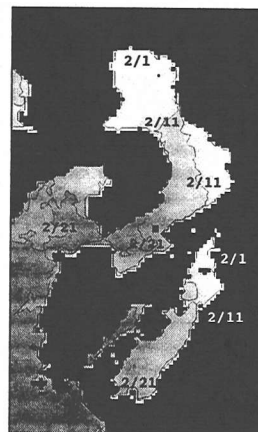
(a) 年平均水温 (°C)

(b) 年変動成分振幅 (°C)



(c) 最高水温 (°C)

(d) 最低水温 (°C)



(e) 最低水温出現の位相 (日)

図-5 Fourier 係数の分布

## 5. 湾内熱環境の解析

### (1) 海面の熱収支

海面温度の年間変動特性が理解されたが、空間分布はそれぞれの位置における熱的環境の相違によって生じるものであると考えられる。

ここでは、対象領域における大気・海洋間の熱の交換を算定し、移流による熱交換を考慮した熱収支モデルを用いて湾内水温を支配する熱収支の計算を行うことにより、対象海域の熱の動きについて考察する。

海面フラックスの算定法にバルク法を用いた。バルク法はパイ等の限られたデータから海面フラックスを求めることが可能であり、現在最もよく用いられている実用的な手法である。各海面フラックスのバルク式を次に示す<sup>9,10)</sup>。

$$H_s = (1 - \alpha)H_0 \quad (12)$$

$$H_b = \left\{ \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{e_a}) - \epsilon \sigma T_s^4 \right\} (1 - cn) \quad (13)$$

$$H_h = \rho_a C_{pa} C_h U_{10} (T_s - T_a) \quad (14)$$

$$H_e = \rho_a L C_e U_{10} (q_{sat} - q_a) \quad (15)$$

$$H_f = H_s + H_b + H_h + H_e \quad (16)$$

ここで、 $H_s$ は短波放射( $W m^{-2}$ )、 $H_b$ は長波放射( $W m^{-2}$ )、 $H_h$ は顕熱フラックス( $W m^{-2}$ )、 $H_e$ は潜熱フラックス( $W m^{-2}$ )、 $H_f$ は海面フラックス総量( $W m^{-2}$ )、 $\alpha$ は海面のアルベド(0.06)、 $H_0$ は全日射量( $W m^{-2}$ )、 $T_s$ は海面温度(K)、 $\epsilon$ は海面の射出率(0.97)、 $e_a$ は大気の水蒸気圧(hPa)、 $n$ は雲量(0~1)、 $\rho_a$ は大気密度( $kg m^{-3}$ )、 $C_{pa}$ は大気の定圧比熱( $J kg^{-1} K^{-1}$ )、 $U_{10}$ は海面上10mの風速( $m s^{-1}$ )、 $T_a$ は気温(K)、 $L$ は水の蒸発の潜熱( $J kg^{-1}$ )、 $q_a$ は大気比湿、 $q_{sat}$ は海面温度における空気飽和比湿、 $\sigma$ はステファンボルツマン定数( $5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ )、 $C_p$ 、 $C_h$ はバルク係数( $1.5 \times 10^{-3}$ )である。また、比湿は水蒸気圧より次式で計算される<sup>9)</sup>。

$$q = \frac{0.622(e/p)}{1 - 0.378(e/p)} \quad (17)$$

ただし、 $e$ は水蒸気圧(hPa)、 $p$ は大気圧(hPa)である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は係数であり、それぞれ0.51、0.066、0.75を用いている。

これらのバルク式により、海面温度 $T_s$ にNOAA/AVHRR

による推定水温を用いて、1996年8月1日から1997年7月31日までの期間において海面フラックスの算定を試みた。なお、NOAA画像の得られない日には、Fourier展開による補間値を利用した。気象条件である全天放射 $H_0$ 、水蒸気圧 $e_a$ 、雲量 $n$ 、風速 $U_{10}$ 、気温 $T_a$ のデータには、気象庁気象年報による佐賀観測点における観測値を用い、 $e_{sat}$ は式(18)に示す Tetens の近似式<sup>11)</sup>により求めた。

$$e_{sat} = 6.1078 \times 10^{7.57 / (237.3 + T_s)} \quad (18)$$

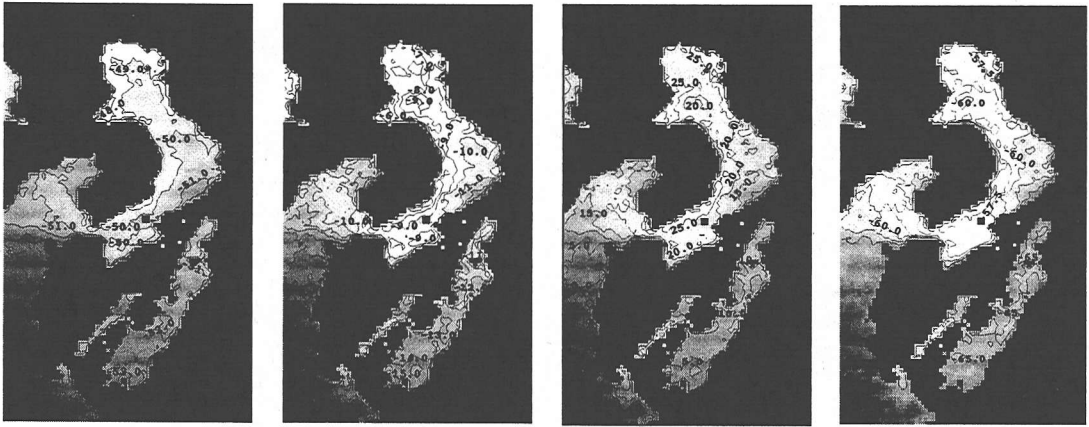
ここで、 $e_{sat}$ は海面温度における空気飽和比湿(hPa)である。また、 $U_{10}$ には佐賀観測点において観測された風速に、風速の対数分布則を適用して高度10mの風速とした。大気の密度は次式により求めた<sup>11)</sup>。

$$\rho_a = 1.293 \frac{273.15}{T_a} \times \frac{p}{1013.25} \left( 1 - 0.378 \frac{e_a}{p} \right) \quad (19)$$

### (2) 計算結果および考察

図-6に各海面フラックスおよび総和の年平均値分布を示す。なお、短波放射の年平均値は $139.0(W m^{-2})$ である。年平均で見ると、湾に熱を供給する成分は短波放射のみであり、放出の成分としては長波放射、潜熱フラックスが大きく効いていることがわかる。また、総和で見ると、湾内の海面フラックスは年間では熱供給の方向にあり、外洋に比して熱の吸収が大きくなっている。また八代海に顕著に見られる傾向として、湾口より湾奥のほうが吸収が大きい。これらのことから、対象海域では海面フラックスから得た熱が湾内の水平方向の移流、拡散等の効果により湾外へと輸送される熱構造と考えられる。湾内に複雑な三次元流動が存在するが、熱収支計算によって包括的な熱の季節輸送を知ることができる。

また、図-7に島原湾の1ピクセルにおける各海面フラックスの変動を示す。一年を通して海面への短波放射は熱供給、長波放射、顕熱フラックス、潜熱フラックスは放出として働いていることがわかる。ただし、熱の放出において支配的なのは冬季には長波放射、夏季には潜熱フラックスであり、この傾向は地点によらず似通ったものとなっている。これらのバランスにより海面フラックスの変動が決定され、海面フラックスの総量としては図-7の $H_f$ のように、3月上旬、10月の下旬頃に境に冬季は海面からの放出、夏季は供給の方向に働いていることがわかる。



(a)長波放射 (b)顕熱フラックス (c)潜熱フラックス (d)海面フラックス総和  
 図-6 各海面フラックスの年平均値の分布 ( $W/m^2$ )

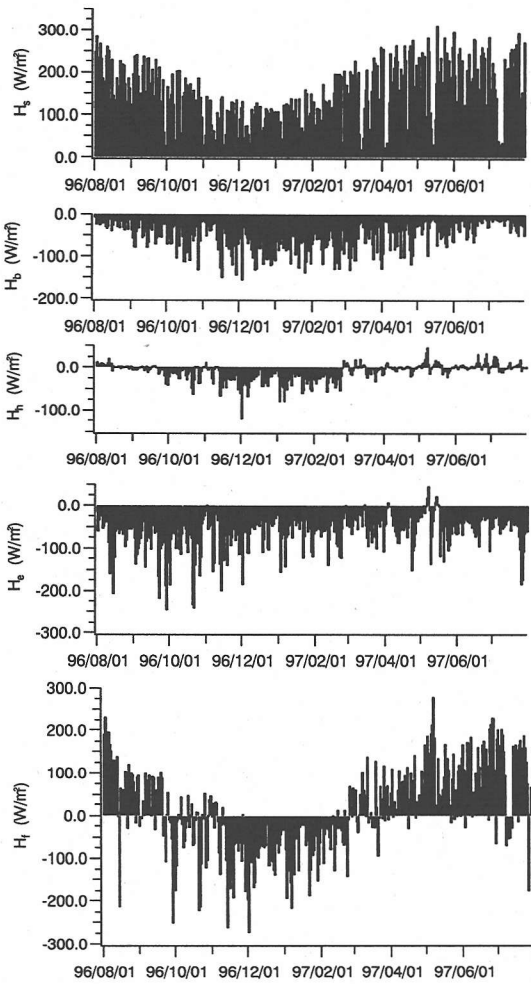


図-7 湾内の1点における海面フラックスの変動

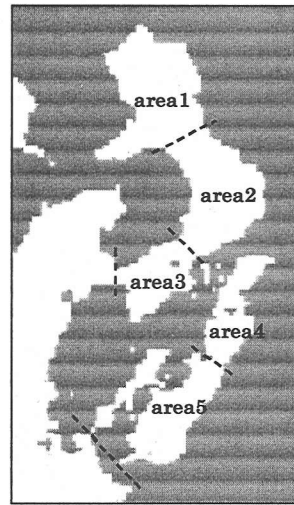


図-8 熱収支の計算領域

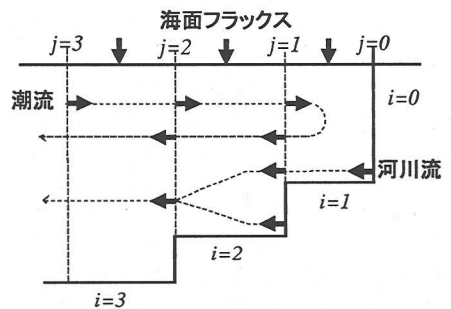


図-9 熱収支モデル

## 6. 熱収支モデルによる熱の移動の解析

### (1) 計算方法

図-8 に示すように、有明海、島原湾を3領域に、八代海を2領域に分け、単純化した熱収支モデルにより各領域を出入りする熱量、および水温の推定を行った。

領域を出入りする熱としては水平境界面である海面を出入りする海面フラックスのほかに、鉛直境界面を出入りする熱量として潮流による交換熱、河川からの流入熱を考えた。図-9 に示すような鉛直境界面  $j$  を時間  $\Delta t$  秒間に通過する熱量は、湾奥方向を正として次式で示される。

$$Q_{idj} = \begin{cases} \rho_{si} C_{psi} T_{si} dt_d \sum_{n=1}^i A_n & (dt_d < 0) \\ \rho_{si} C_{ps(i+1)} T_{s(i+1)} dt_d \sum_{n=1}^i A_n & (dt_d \geq 0) \end{cases} \quad (20)$$

$$Q_{rj} = -\rho_{si} C_{psi} T_{si} \Delta t \sum_{n=1}^i q_n \quad (21)$$

ここで、 $Q_{idj}$  は  $\Delta t$  間の潮流による鉛直境界面  $j$  の通過熱量(J)、 $Q_{rj}$  は  $\Delta t$  間の河川流による鉛直境界面  $j$  の通過熱量(J)、 $\rho_{si}$  は領域  $i$  の海水の密度( $\text{kg m}^{-3}$ )、 $C_{psi}$  は領域  $i$  の海水の定圧比熱( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )、 $T_{si}$  は領域  $i$  の水温(K)であり式(27)から得られる。 $A_i$  は領域  $i$  の面積( $\text{m}^2$ )、 $dt_d$  は  $\Delta t$  間の潮位差(m)、 $q_j$  は鉛直境界面  $j$  から流入する河川流量( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )である。よって、海域  $i$  が持つ熱量の時間  $\Delta t$  間の変化量  $\Delta Q_i$  は次式で示される。

$$\Delta Q_i = \Delta Q_{fi} + \Delta Q_{idi} + \Delta Q_{ri} \quad (22)$$

$$\Delta Q_{fi} = A_i H_f \Delta t \quad (23)$$

$$\Delta Q_{idi} = Q_{idj} - Q_{id(j+1)} \quad (24)$$

$$\Delta Q_{ri} = Q_{rj} - Q_{r(j+1)} \quad (25)$$

ここで、 $\Delta Q_{fi}$ 、 $\Delta Q_{idi}$ 、 $\Delta Q_{ri}$  はそれぞれ海面フラックス、潮流、河川流による  $\Delta t$  間の領域  $i$  の熱変化量(J)である。また、 $H_f$  は海面フラックスであり、式(16)で示される。したがって、時刻  $t$  に領域  $i$  の持つ熱量  $Q_i$ 、 $\Delta t$  間の領域  $i$  の熱量変化  $\Delta Q_i$  を用いて、時刻  $t + \Delta t$  に領域  $i$  の持つ熱量  $Q_{i(t+\Delta t)}$ 、水温  $T_{si(t+\Delta t)}$  は次式で計算される。

表-2 計算に用いた各領域の諸量

area	面積( $\text{km}^2$ )	水深[平均水深](m)	塩分(‰)
1	$6.23 \times 10^2$	10.0[7.4]	30.0
2	$5.38 \times 10^2$	20.0[22.5]	33.0
3	$2.67 \times 10^2$	30.0[29.1]	35.0
4	$2.23 \times 10^2$	10.0[11.5]	30.0
5	$4.56 \times 10^2$	30.0[33.8]	33.0
外洋	--	--	35.0

$$Q_{i(t+\Delta t)} = Q_i + \Delta Q_i \quad (26)$$

$$T_{si(t+\Delta t)} = \frac{Q_{i(t+\Delta t)}}{C_{pi} \rho_{si} V_{i(t+\Delta t)}} \quad (27)$$

$$Q_i = \rho_i C_{pi} T_{si} V_i \quad (28)$$

ここで、 $Q_i$  は時刻  $t$  における領域  $i$  の持つ熱量(J)、 $T_{si}$  は時刻  $t$  における領域  $i$  の水温(K)、 $V_i$  は時刻  $t$  における領域  $i$  の体積( $\text{m}^3$ )である。

以上の式を用いて、1996年8月1日から1997年7月31日の一年間について毎日の熱移動量、水温変動の計算を行った。計算に際して水温の初期条件、河口、湾口における境界条件として、NOAA/AVHRRによる推定値およびFourier解析による補間値を利用した。河口の水深は浅いため表面温度を水塊の代表温度とした。湾口は、黒潮の厚さが100m近くまで及ぶこと、潮流が早いことから湾内は湾外の躍層上であり混合が進んでいると考え、表面水温を境界条件として用いた。同様に鉛直温度勾配が小さいものとして海底面での熱交換も無視している。これらの仮定は、後に述べる水温の再現結果が年間を通して良好なことから有効であると考えられる。潮位には気象庁観測の長崎県大浦港における実測潮位を使用し、満潮と干潮の間の時間を上記の  $\Delta t$  とした。気象データについては前節と同じである。なお、計算に用いた各領域の諸量は表-2に示す通りである。深淺図から計算した平均水深の精度が不明であったので、計算では概算値を用いている。

海面フラックス、河川流、潮流によるそれぞれの熱量変化を、水温変化に寄与する交換熱量として評価する際に、海面フラックス、河川流による交換熱量には  $\Delta Q_{fi}$ 、 $\Delta Q_{ri}$  をそのまま採用した。しかし、潮流による交換熱量に関しては、潮汐による効果を考慮しているため各領域の体積に変化が生じる。この影響を除くため、潮流による交換熱量として次の量を導入した。

$$\Delta Q'_{idi} = \Delta Q_{idi} - \rho_{si} C_{psi} T_{si} dt_d A_i \quad (29)$$



## (2) 計算結果および考察

図-10 に水温の計算結果を示す。area1 の最低水温が下がりきらず、3℃から4℃の誤差が見られるが、他の領域の計算結果はその最低水温や傾き等、よく再現されていると考えられる。area1 は4領域の中では最も浅く、海底の熱の出入は今回無視しているが、極めて浅い領域では短波放射が直接海底で吸収されるため、その分は誤差となっている。

図-11 に各海域における単位体積あたり交換熱量の月平均値を示す。まず、海面フラックスによる熱量に着目すると、湾奥部の area1、area4 と湾口部の area3、area5 ではその変動幅が大きく異なり、湾奥部の方が海面フラックスの影響を大きく受けていることがわかる。海面フラックスは地点による変動特性の相違をそれほど持たないことから、これは水深の差によるものであると考えられる。すなわち、熱容量の差が大きい。

また、潮流による交換熱量に着目すると、湾奥部では海面フラックスと同程度のオーダーで、位相をほぼ反転して変動している点が特徴的である。海面フラックスが湾へ熱を供給する夏季には潮流が熱を領域外へ流出させ、海面フラックスが熱を放出する冬季には潮流が熱を供給しており、海面フラックスによる水温変動を潮流の交換熱量が緩和する構造になっている。

それとは対照的に、湾口部、特に area3 では潮流による交換熱量にははっきりとした周期性が確認できず、変動量そのものも小さくなっている。図-12～図-16 に各海域における単位体積あたり交換熱量の日平均を示す。図-14、図-16 によると、area3、area5 においては日々潮流により激しく熱が出入りしており、日単位の変動では海面フラックス、河川流に比して潮流が圧倒的に卓越している。すなわち、湾口部の熱環境は外洋の境界条件に大きく左右されると考えられ、area3、area5 とともに潮流による交換熱量の日平均に多数認められる単発的な多量の熱交換は、黒潮の蛇行等の外洋における海象に起因するものと考えられる。

また、河川流による交換熱の影響は、いずれの領域においても非常に小さく、特に湾口部においては、ほぼ皆無である。ただし、湾奥部では平常時の基本的な水温変化は海面フラックス、潮流のバランスにより支配されているが、河川からの流入熱量も夏季の出水時には海面フラックス、潮流に匹敵する熱量を供給している。出水時は悪天候のため、短波放射による熱供給が減少することとあいまって、河川流は水温変化に大きな影響を与えらる。

図-17 に計算期間の海面フラックスおよび交換熱の一年間の総和を示す。有明海、島原湾の area1、area2、area3、八代海の area4、area5 とともに海面から熱を吸収しており、湾奥ほど吸収が多くなっている。上潮時には潮流によ

て湾口側の隣接領域から負の交換熱量、下げ潮時には湾奥側の隣接領域から正の交換熱量を受け取っており、湾水が海面フラックスから受け取った熱量を潮流が外洋へと輸送する構造が見て取れる。図-5(a)で示される年平均水温では湾奥の方が湾口より低く、計算の熱輸送の向きと逆になることが推察される。しかし、湾奥では気温と水温の差が大きいため、海面で受け取る熱量は潮流によって湾口に輸送される結果となっている。

湾奥ほど海面フラックス、河川流の影響が強く、潮流、海面フラックス、河川流が同オーダーでバランスを保っているが、湾口部はほぼ潮流の交換熱に支配されていることがわかる。

## 7. 結論

本論文では、閉鎖性の高い有明海、島原湾、八代海の湾内熱環境の解明を目的として、NOAA/AVHRR のデータを用いて海面温度の推定を行い、海面温度の時系列解析、海面フラックスの算定、熱収支モデルによる海面温度の計算と交換熱の算定を行った。本論文で得られた結論は以下の通りである。

- 有明海、島原湾に特有の split-window MCSST 係数を得た
- Fourier 解析による海面温度の時系列解析を行い対象海域の海面温度の年間変動特性が把握された。
- パルク法により海面フラックスの算定を行い、大気・海洋間の熱のやり取りが把握された。
- 熱収支モデルを用いた計算により、湾外との熱交換、および湾内の熱の動きが解明された。

謝辞：本研究で用いた衛星データは東北大学大型計算機センターの工藤純一助教授および東北大学理学部付属大気海洋変動観測研究センター川村宏教授に提供して頂いた。また、熊本県水産研究センターから海水温度データの提供を受けた。ここに併せて謝意を表す。

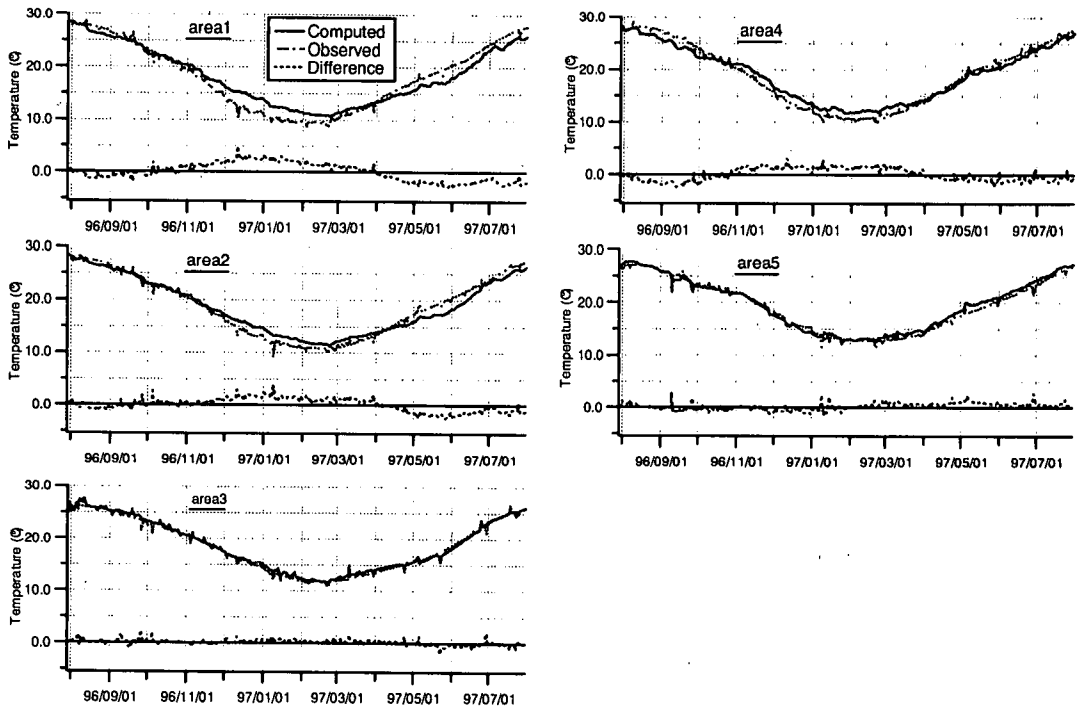


図-10 水温計算結果

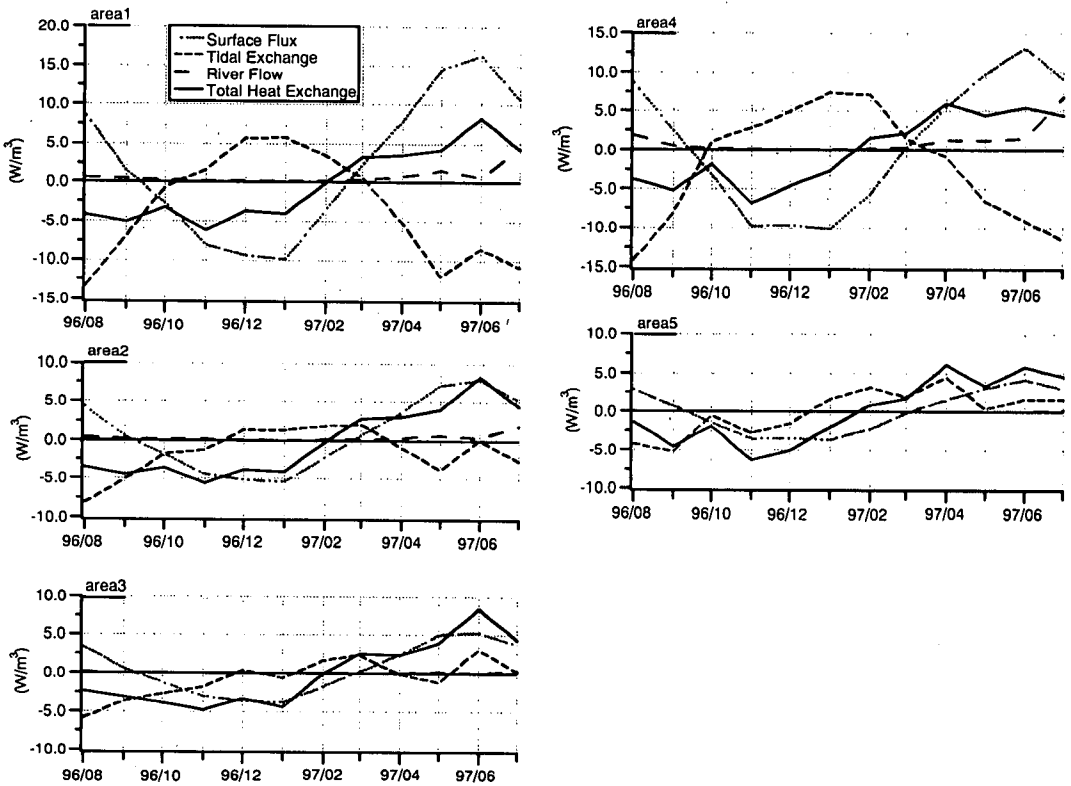


図-11 単位体積あたり交換熱量の月平均値

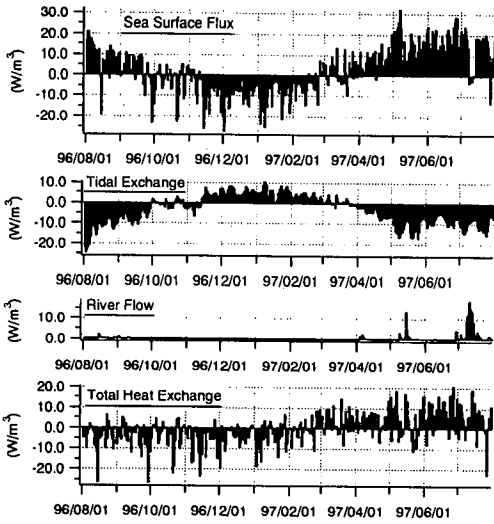


図-12 単位体積あたり交換熱量の日平均 (area1)

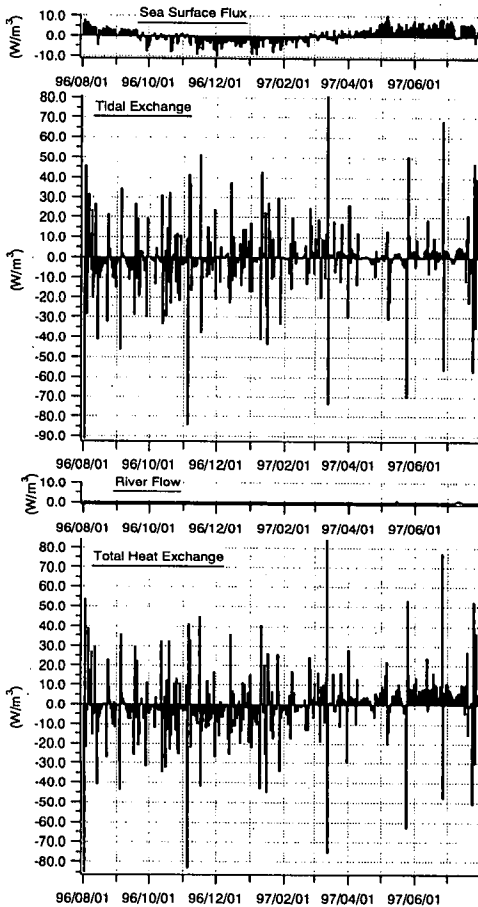


図-14 単位体積あたり交換熱量の日平均 (area3)

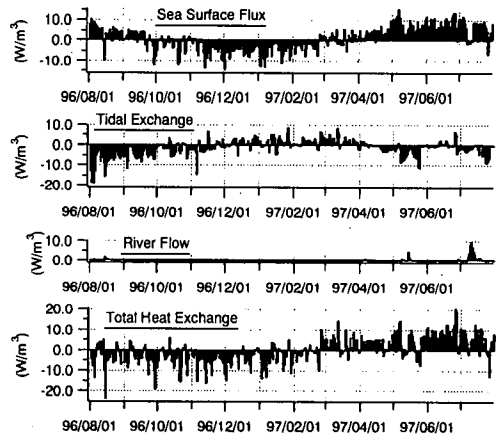


図-13 単位体積あたり交換熱量の日平均 (area2)

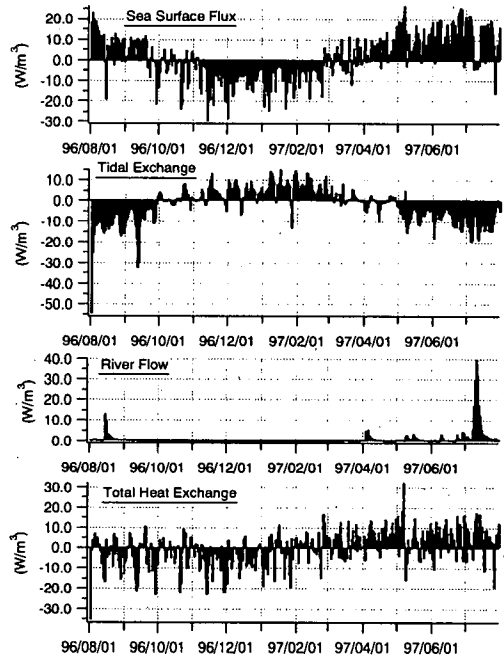


図-15 単位体積あたり交換熱量の日平均 (area4)

参考文献

- 1) 上野成三, 灘岡和夫, 石村明美, 勝井秀博: NOAA-AVHRR データを用いた東京湾の風に起因する湧昇現象の解析, 海岸工学論文集, Vol.39, pp.256-260, 1992.
- 2) 福波淳一, 張旭紅, 田中仁, 首藤伸夫: NOAA 赤外画像を用いた三陸沖表層流速の推定, 海岸工学論文集, Vol.41, pp.286-290, 1994.

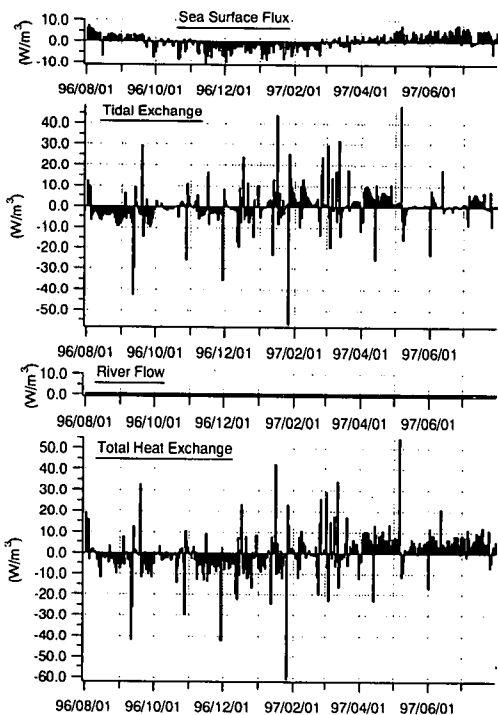


図-16 単位体積あたり交換熱量の日平均 (area5)

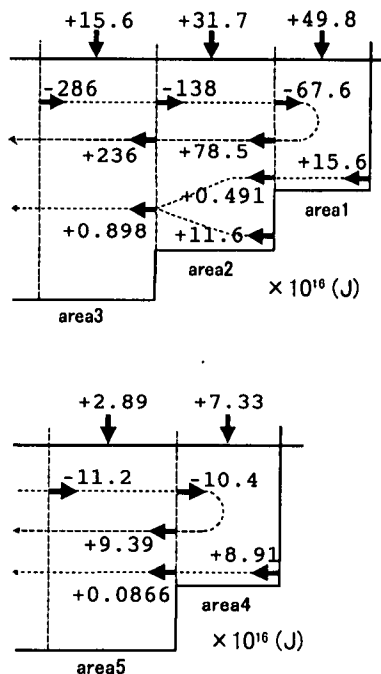


図-17 年間の熱収支

- 3) 坂井信一, 水島雅文: NOAA/AVHRR データによる広域流動推定手法の適用性, 海岸工学論文集, Vol.39, pp.925-929, 1992.
- 4) 児島正一郎, 風間聡, 沢本正樹: 黒潮系暖水の遠州灘~熊野灘への流入と挙動, 海岸工学論文集, Vol.42, pp.421-425, 1995.
- 5) 中野渡新一, 風間聡, 沢本正樹: 熱収支モデルによる東京湾の熱環境評価, 海岸工学論文集, Vol.43, pp.1131-1140, 1996.
- 6) NOAA/NESDIS: NOAA polar orbiter data user's guide. (2000.6.8 受付)
- 7) 塚本秀史, 柳哲雄, 境田太樹, 川村宏, 原島省: NOAA/AVHRR による瀬戸内海の海面水温の季節変動, 海の研究, Vol.6, No.5, pp.279-292, 1997.
- 8) Llewellyn-Jones, D. T., Minnet, P. J., Saunders, R. W. and Zavody, M.: Satellite multichannel infrared measurements of sea surface temperature of the N.E. Atlantic Ocean using AVHRR/2, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 110, pp.613-631, 1984.
- 9) 新井正, 西沢利栄: 水文学講座 10 水温論, 共立出版株式会社, 1974.
- 10) 鳥羽良昭: 大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 1996.
- 11) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, 1994.

## AN ANALYSIS ON HEAT ENVIRONMENT AROUND THE ARIAKE-KAI BAY USING NOAA/AVHRR DATA

Daisuke FUKUSHI, So KAZAMA and Masaki SAWAMOTO

Estimation and observation of SST by NOAA/AVHRR were carried out in the Ariake-kai bay and the Shimabara bay that are located in the west of Kyushu island to understand the heat movement. Local coefficients of estimation equation (MCSST) for SST in the Ariake-kai bay were calculated. The Fourier analysis of SST from NOAA/AVHRR was done to obtain the spatial distribution of annual variation of SST. Results show meteorological and geographical effects on heat environment of shallow and closed bay. A calculation of heat exchange using heat balance model gave us the results, which express the interesting movement of heat.