

熱収支モデルによる東京湾の熱環境評価

中野渡新一*・風 間 聡**・沢 本 正 樹***

1. はじめに

閉鎖性湾においては、環境を支配する因子である熱の動きが重要である。観測の方法として海面の水温分布を解析する方法が数多く用いられている。最近では人工衛星によるリモートセンシングを用いた研究も盛んに行われているが、それらの解析は定性的な評価が多く、ある特徴的な現象に着目して扱っているものに限定されており、長期にわたり広い範囲で用いられることはない。

本研究では、広域観測に適した衛星リモートセンシングの画像データベースの有効な利用法として、長期にわたる多くの画像を用いて、東京湾の表層水温分布のパターン分類、統計解析を行い、東京湾の水温分布パターンと気象データ等との季節的一貫性を見だし考察した。また、衛星データを境界条件とした熱収支モデルを考え、東京湾の水温変化を推算し、熱の動きを定量的に把握した。

2. 使用データについて

本研究では観測人工衛星 NOAA/AVHRR-ch. 4 (輝度温度) の画像を使用した。東北大学大型計算機センターでは NOAA 衛星の日本の領域の画像データベース JAIIDAS (Japan Image Database) を無料で開放している。昼頃観測される JAIIDAS の東日本側の画像 JAIIDAS-E の画像データを入手し、利用した。対象としたデータは東京湾の 1990 年 7 月から 1994 年 12 月までのデータ 244 日分である。

また、得られた衛星データから大気の変動の影響を取り除くために実測水温を用いて温度補正を行った。ある 1 地点の衛星観測による水温と実測水温との差を衛星データと実測水温との差と考え、画像全体をその温度で補正した。補正には神奈川県水産総合研究所により 1 日 1 回観測されている観音崎の実測水温を使用した。実測水温データは 1991 年 4 月から 1994 年 12 月までである。

フーリエ解析、熱収支の計算には補正した水温を、水

温勾配の計算には補正していない水温を使用した。

3. フーリエ解析による水温分布の変動特性

3.1 解析方法

表層水温のデータの基本的なパターンを知る手段として、年基本周期の成分を求める。もし毎日鮮明な画像が得られたならば、得られた画像は時系列データとなるためフーリエ変換が可能であり、年基本周期も容易に求めることができる。しかし、実際には雲の影響などにより毎日画像が得られるということはないため、離散データとなってしまう。そこで、最小自乗法を用いて離散データから年基本周期となるフーリエ係数を求めた。近似関数として定数項、1 年周期、半年周期、4 ヶ月周期の 4 成分からなるフーリエ級数を採用し、回帰曲線を求めた。

3.2 計算結果

フーリエ係数は定数項と年周変動成分が他の係数に比べて大きく、ほとんどの成分が定数項と年周変動成分となることが分かる。定数項すなわち平均水温は、図-1 のように湾口が最も高く、湾央が最も低くなっている。湾奥では湾口よりも低く湾央よりも高くなっている。湾奥が湾央よりも年平均水温が高いのは、湾奥の方が水深が浅く熱容量が小さいので水温が上昇しやすいためと考えられる。江戸川河口付近で局所的に低い値を示しているのは、冬期に江戸川から冷たい河川水が常時流入するた



図-1 平均水温の分布

* 正 会 員 工 修 鹿島東北支店 (元 東北大学大学院)

** 正 会 員 工 博 筑波大学講師構造工学系

*** フェロー 工博 東北大学教授大学院工学研究科 土木工学専攻

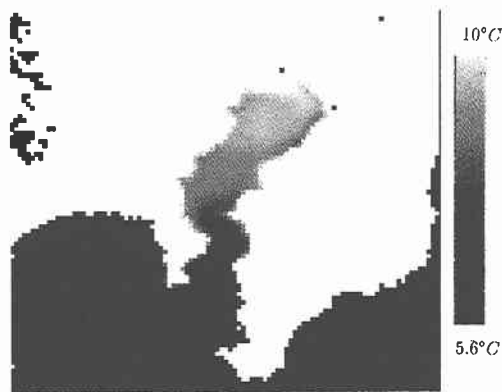


図-2 1年周期成分の分布

めと考えられる。

1年周期成分の分布は、図-2のように湾奥で年周変動幅が大きく湾口で小さくなっている。湾口では温度変動の少ない外洋と接し、また湾奥は水深が浅いために熱容量が小さく熱しやすく冷めやすいために変動幅が湾奥のほうが湾口に比べて大きくなるものと考えられる。

以上から、年基本周期成分の分布は湾奥の熱容量が小さいために、比較的平均水温が高く温度変動も大きくなることがわかった。

4. 水温分布パターンの分類

4.1 分類方法

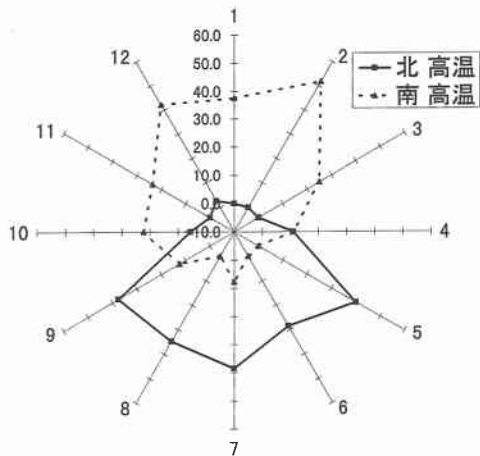
次に、画像を1枚ずつ見ていき、表層水温分布パターンが季節的にどのような傾向があるのかを調べた。分布パターンの種類としては、温度勾配の方向(南北、東西)、全体的に見ての分布パターン、主要河川の河口付近における水温分布、港湾の周辺における水温分布といったものがあげられる。

以上のような点が相対的に水温が高いあるいは低いかに着目して、1990年7月から1994年12月までの244シーンについて見ていった。

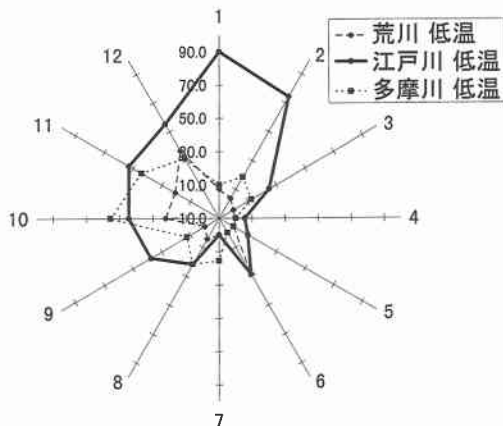
4.2 分類結果

図-3に、特徴的事象についての月別の出現率を示す。

温度勾配において夏期には北側が高く、冬期には南側が高くなっている。このことから湾奥から湾口にかけて温度勾配が季節的に生じていることがわかる。また、江戸川は冬期にはかなりの出現率で河口部が低温となっている。前述のように、水深の小さな北側では熱容量が小さく、熱しやすく冷めやすいためにこのようなパターンが現れる。また、冬期に江戸川からの冷たい河川水が湾に流入し、北側の水温を低下させていることも考えられる。



(a) 北高温, 南高温



(b) 河口部低温

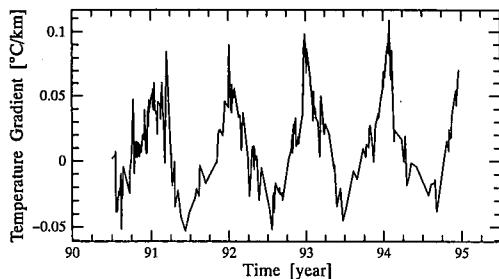
図-3 分布パターンの出現率 [%]

5. 水温勾配と気象データ等との比較

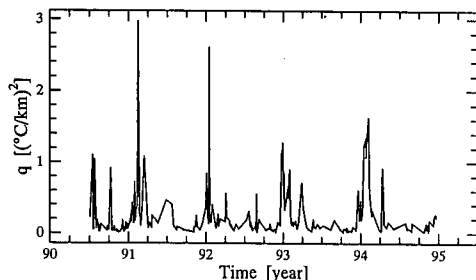
5.1 使用データについて

衛星データの水温分布を代表するものとして、衛星データの水温分布から最小自乗法(直線)により求めた湾軸方向の水温勾配とその残差分散(以下分散とよぶ)を使用して、気象データ、河川流量データとの比較をし、相関性を調べた。本研究では、湾軸を湾の東西方向のピクセルの中央部にとり、湾奥を原点として湾口に向けて軸の正の方向をとっている。

比較した気象データとしては、東京都江東区新木場のアメダスデータの毎時データを使用した。期間は1990年7月から1994年12月までのものを使用した。比較した気象データは、日平均風速(南北方向)、7時と12時との気温差、衛星画像が得られた日の前日の降水量、日射量

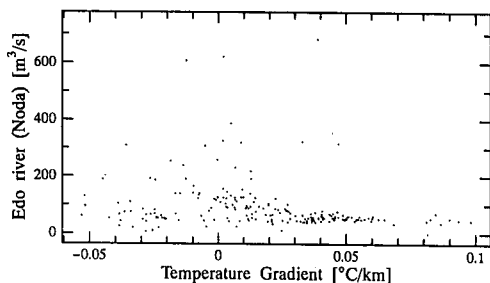


(a) 水温勾配

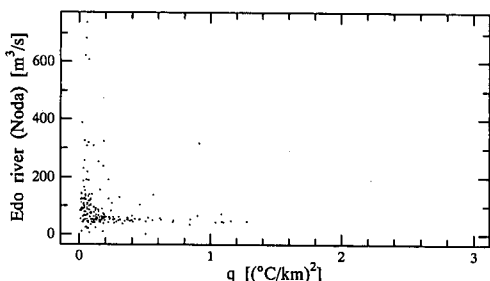


(b) 分散

図-4 水温勾配とその分散の時間変化



(a) 水温勾配



(b) 分散

図-5 日平均流量との比較

である。また流量データとしては、建設省河川局による流量年表から江戸川の野田流量観測所での日平均流量データを用いた。この観測地点は、江戸川で欠測日数が最も少ない地点であるため採用した。期間は1990年7月から1993年12月までのものを使用した。

5.2 河川流量との比較

図-4に水温勾配とその分散の時間変化を示す。いずれも冬期に比較的大きな値を示しているため、冬期には熱容量の小さい湾奥のほうが水温が低く、一様な水温勾配ではなくなっている。逆に夏期には湾口の方が水温が高く、水温勾配が一様になっていることがわかる。

次に水温勾配、分散と江戸川の日平均流量を比較した結果を図-5に示す。分散との比較の図を見るとほとんどの点が軸のそばに寄っていることがわかる。すなわち、河川からの流入量が多い時には、一様な水温勾配になることが予想できる。逆に水温勾配やその分散が大きい日、湾奥と湾口の温度差が大きい日や一様な水温勾配でない日には河川流量が小さくなっていることが予想される。河川からの流入量だけでは湾の全水深の水温を変化させるほどにはならない。このことは降水時、日照の影響が少ないことや、河川流入水が湾の表層に薄く広がっていることなどを反映しているものと予想される。

6. 熱収支モデルによる東京湾の水温の推定

海域における熱量の変動は、海底がほぼ断熱であることを考えると、海面と外洋や河口部などの水平境界を通しての熱の出入りにより起こると考えられる。熱収支モデルを考え、水温の推定を行う。

6.1 熱収支

海面を通しての熱の出入りには、太陽からの短波放射による熱の吸収 Q_A 、海洋からの長波放射 Q_B 、海水の蒸発による潜熱の輸送 Q_e 、海水と大気の接触面における対流や伝導による顕熱の輸送 Q_h による熱の放出がある。

日照時間を考慮し、また日照が無くとも多少（2割程度）の短波放射があることを考えると、短波放射による熱の吸収 Q_A [cal/cm²/day] は次のようになる。

$$Q_A = Q_0 \left(\frac{\text{day}}{\text{day}_{\max}} \times 0.8 + 0.2 \right)$$

day: 日照時間

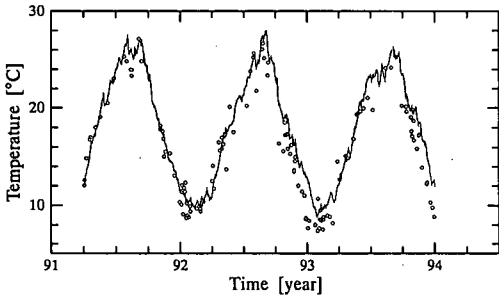
day_{max}: 最大日照時間

長波放射 Q_B は Stefan-Boltzman の法則と、Brunt の実験式に山本の提案する係数を用いた式との差が正味の長波放射熱フラックス Q_B [cal/cm²/day] となり、次式であらわされる。

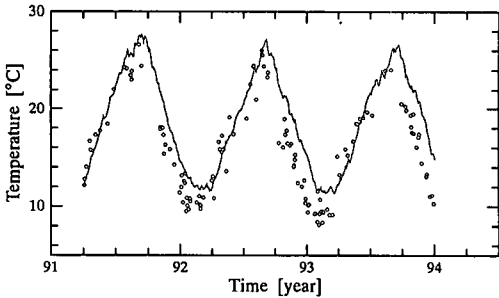
$$Q_B = \varepsilon \sigma T_w^4 - \varepsilon \sigma T_a^4 (0.51 + 0.066 \sqrt{E_a})$$

表-1 分割した水域

	水深 [m]	面積 [km ²]	体積 [km ³]
湾奥側	10	500	5
湾口側	20	675	13.0



(a) 湾奥側



(b) 湾口側

図-6 水温の時間変化

$\varepsilon=0.97$

σ : Stefan-Boltzman の定数

$=1440 \times 8.128 \times 10^{-11} \text{ [cal/cm}^2\text{/day/K}^4\text{]}$

T_w : 海面温度 [K]

T_a : 気温 [K]

E_a : 大気の水蒸気圧 [hPa]

潜熱と顕熱の輸送による熱の放出 Q_e, Q_h [cal/cm²/day] はそれぞれ空気力学的に次のようになる。

$$Q_e = 0.622 \rho_a L C_E (E_s - E_a) \frac{W}{P}$$

$$Q_h = \rho_a C_p C_H (T_w - T_a) W$$

ρ_a : 空気密度 ($=1.2 \times 10^{-3} \text{ [g/cm}^3\text{]}$)

L : 水の蒸発の潜熱 ($=585 \text{ [cal/g]}$)

C_E, C_H : 潜熱, 顕熱輸送係数 (いずれも 1.1×10^{-3})

E_s : 飽和水蒸気圧 [hPa]

W : 風速 [m/s]

P : 大気圧 [hPa]

C_p : 定圧比熱 ($=0.24 \text{ [cal/g/K]}$)

これらの総和が、海面を通しての正味の熱フラックスとなる。

湾における水平境界を通しての熱の出入りとしては、主に河口などからの淡水の流入と潮汐による外洋の海水の流入がある。いま、ある水域へ水平境界から単位時間当たり体積 q 、水温 t の水が流入してきたとすると、単位時間当たりの熱量の変化量 ΔQ は、

$$\Delta Q = C_p \rho(t) q t$$

C : 水の比熱 ($=1.0 \text{ [cal/g]}$)

のようになる。

6.2 熱収支モデル

本研究では、東京湾をおおよそ表-1のような湾奥側と湾口側の2つの水域に分割して、熱収支を考えた。これは、水深30mの等深線の北限である横浜一袖ヶ浦間で2分割したものと考えて設定したものである。

海面を通しての熱フラックスに必要な気温と風速は新木場のアメダスデータから、大気圧、水蒸気圧は気象庁による気象月報の東京の値を使用した。

水平境界としては、湾奥側では、江戸川、荒川、多摩川からの河川水の流入と潮汐による湾口側との海水の出入り、湾口側では潮汐による湾奥側との海水の出入りと外海との海水の出入りを考えている。潮汐は東京港の晴海における実測潮位を用い、連続性(体積)が保存されるような湾への流入量を与えた。水温は河川、潮汐ともに衛星画像による水温を与えた。水温に関して衛星データがない日には、衛星データの水温の時間変化に最も合うような1年周期関数で補間して与えた。対象とした期間は、データが全てそろっている1991年4月から1994年12月までである。

6.3 計算結果

図-6に計算により得られた水温を示す。おおよそ観測値と一致していると考えてよい。図-7に、湾奥と湾口の温度差を示す。観測値では冬にピークが見られるが、計算値では秋期にピークが見られる。熱の供給の大部分は日射による短波放射であるが、図-8から夏期よりも

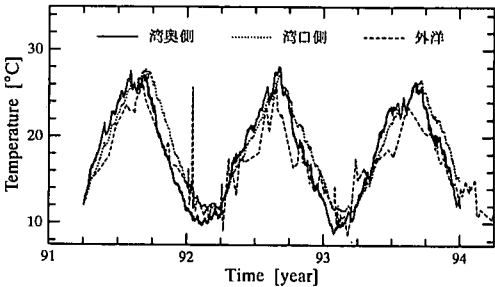


図-7 湾奥側、湾口側、外洋の水温の時間変化

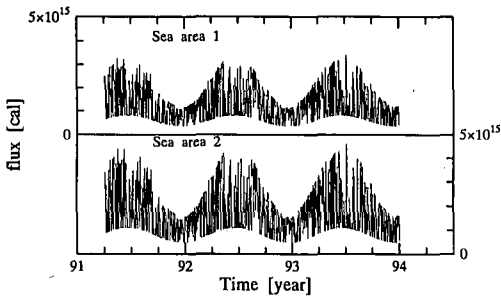


図-8 短波放射熱フラックスの時間変化

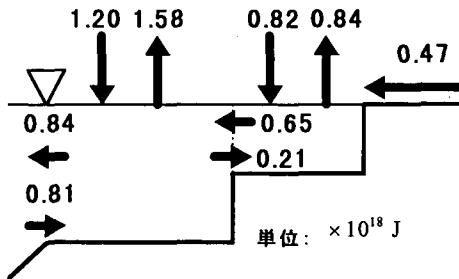


図-9 熱収支

むしろ秋期に値が大きくなっていることから、水温低下に遅れが現れると考えられる。実際の海域では、夏期には成層して混合される深さが制約され、上層で温度変化の反応が比較的速いために、水温低下の遅れが現れるとも考えられる。

図-9に熱収支を示す。

この結果からいえることは、湾口側の海面から大気へ放出する熱エネルギーを河川からのエネルギーの流入が補っているのが分かる。

7. ま と め

多数の衛星画像データを用いた東京湾の水温分布をフーリエ解析、分布パターンで分類して、南北方向の温度分布に年周変動の成分が大きいことがわかった。南北方向の温度勾配、残差分散と気象データ、河川流量を比較し、河川流量が大きいときには温度勾配は小さくなり分散も小さくなることがわかった。

熱収支モデルを考え、東京湾の水温を推測し、年変動パターンを表現することができた。

謝辞：本研究は（財）日産科学振興財団の補助を得て行われた。実施にあたり、神奈川県水産総合研究所より水温データの提供を受けた。また、公表に際し、小川基金の援助を得た。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 新井 正・西沢利栄 (1974): 水温論, 共立出版, pp. 27-45.
- 中辻啓二・尹 鐘星・湯浅泰三・村岡浩爾 (1995): 東京湾における残差流系に関する三次元数値実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1066-1070.
- 和田 明・高野泰隆・穂積照雄 (1994): 湾内水の滞留時間の推定, 水工学論文集, 第38巻, pp. 331-336.