

## ランドサット TM データの処理画像から見た 東京湾の水塊構造

安藤 晴夫

### 要 旨

ランドサット TM のバンド 6 熱赤外データを処理し、1984-88年の 9 シーンについて東京湾の海表面温度パターン画像を作成した。これらの解析結果から、①東京湾の水温は夏季には湾奥部、冬季には湾口部が高いこと、②湾内の温度差は、2-5℃程度であること、③潮時と流動パターンには、明確な関係が認められないこと、④冬季の江戸川河口域の水温は荒川、多摩川河口に比べて 3℃前後低いこと、⑤冬季には千葉県沿岸の発電所付近から、温排水の流入状況が良く把握できること、などが分かった。

### 1 はじめに

東京湾湾奥部のような沿岸海域の水質は、赤潮などの生物・化学的要因や、河川水の流入、潮汐、気象条件などの物理的要因によって支配され、時間的にも空間的にも変動が大きい<sup>1)</sup>。

今日、こうした海域の水質は、主に、船舶による定点観測で調査されている。東京湾でも、湾岸の自治体が多数の定点を設け、月 1 回程度、定期観測を行なっている。しかし、この方法では、個々の海水試料について多項目で精度の高いデータは得られるが、河川水や外洋水の湾内への拡散状況などを面的に把握することは難しい。

現在では、海洋調査に人工衛星リモートセンシングデータの利用が考えられるようになってきた。衛星データから得られる主な海洋情報には、可視光の放射輝度から推定する水質(クロロフィルや濁り)と、赤外放射計により測定できる表面水温があるが、現状では水温データのみが実用化段階にあると言われている<sup>2)</sup>。実際、漁業分野では衛星データにもとづいて、日本周辺海域の温度分布図が作成され、速報として一般に提供されている<sup>3)</sup>。この場合に使用されている NOAA 衛星の AVHRR データは、同一地域の撮影データが 1 日 2 回得られるが、画像分解能が、1 km 程度であるため、東京湾のような内湾部の解析には適さない。これに対してランドサット TM の熱赤外データでは、後述するように画像分解能が比較的高いため、こうした閉鎖性海域の水温分布パター

ンの解析に利用されている<sup>4)</sup>。しかし、同一地域の撮影頻度が低く、また、天候にも左右され易いため、解析に適したデータの数は、年間数件程度とあまり多くない。

本報では、東京湾の広域的な海況を把握するために、ランドサット TM 熱赤外データの処理画像が利用可能であるか、また、それからどのような情報が読み取れるか、について検討した。その結果について報告する。

### 2 ランドサット TM データについて

ランドサット 5 号は、米国の地球観測衛星で、飛行高度は約 700 km、16 日間で地球全表面を観測し、同じ地点の上空に戻る。東京湾を含む関東地方(パス 107: ロー 35)の撮影時刻は午前 9 時半ごろで毎回ほぼ一定である。TM (セマティックマッパー)は、この衛星に搭載されているセンサーで、可視部(赤、緑、青)3種、近赤外部 1 種、中間赤外部 2 種、熱赤外部 1 種の計 7 波長帯(バンド)で観測することができ、その解像度は熱赤外部で約 120 m、それ以外のバンドでは約 30 m である。

### 3 画像処理の手順

処理の流れを図 1 に示す。このうち、画像データの切り出しは、前報で述べた処理プログラム(FORTRANで作成)を一部修正し、FACOM M760 で実行した。それ以外は、画像解析用 PDS (パブリックドメインソフト) Image1.31n を用いて Mac II で処理を行なった。

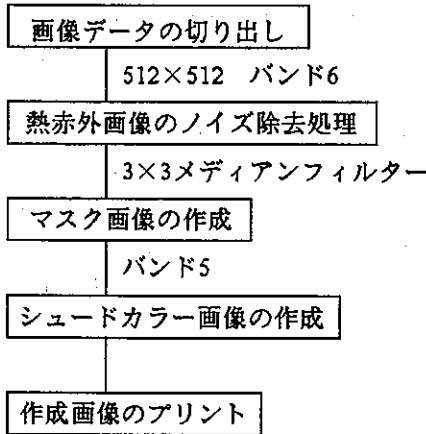


図1 画像処理の手順

(1) 画像データの切り出し

画像処理には、環境保全局環境情報管理システムに登録されているランドサット TM フルシーン CCT (Computer Compatible Tape : パルク補正済, BIL フォーマット) のうち、東京湾地域に雲のない 9 シーンを使用した。

このテープには、関東周辺 (約185×170km) の観測結果が、横6920×縦5965個の画素データに記録されている。画素データとは、地表面28.5m×28.5mの領域の平均放射輝度が、強さに応じて0~255に数値化されたものである。そして、この数値はCCT値、あるいはデジタル値と呼ばれている。東京湾は、このうち約1500×1500個の画素データで構成されている。しかし、ディスプレイの表示領域 (640×480) の大きさや処理に必要なメモリ容量を考慮して、ここから512×512個の画素データをフロッピーディスク上に切り出した。

なお、東京湾の領域の切り出し開始座標の位置決めには、縮尺1/100万のクイックルック写真を利用し、その位置から縦横とも3画素から1画素の割合で画素値を間引いてサンプリングした (図2)。

(2) ノイズの処理

ランドサット TM の熱赤外部バンド6のデータをそのまま画像表示した場合には、センサーのスキャン方向に沿った横縞ノイズやその他のノイズが観察される。そこで、ノイズを除去するためにメディアンフィルターで処理を行なった。メディアンフィルター処理は、画質改善によく用いられる方法で、もとの画像から処理対象の画

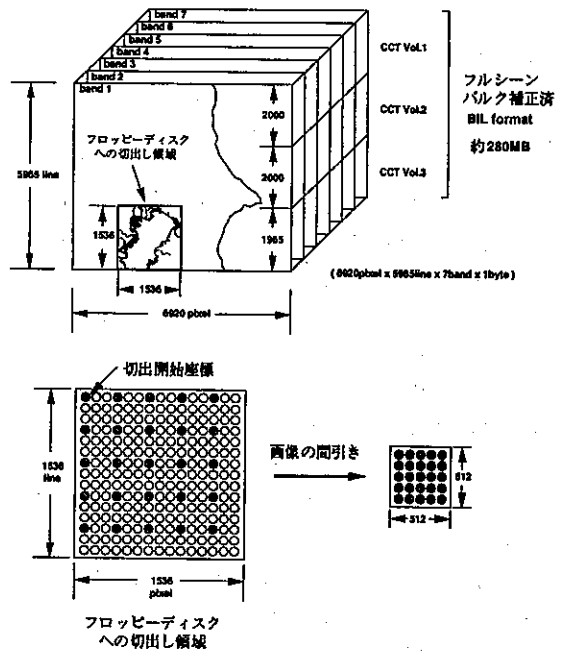
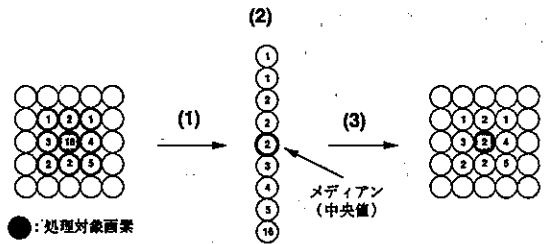


図2 ランドサット TM フルシーンテープの構造とデータの切り出し方法



- (1) 処理対象画素を中心に9画素 (3×3の場合) を取り出す
- (2) メディアン (大きさ順で中央の値) を求める
- (3) 元の処理対象画素をメディアンで置き換える

図3 メディアンフィルターの原理

素値とその周囲の画素値を取り出し、その中央値 (データ値を大きさの順にならべたときに、真中に位置するデータ値のこと。データ数が奇数個のときには、中央の1個の値、偶数個のときは、中央の2個のデータの平均値を示す) を求め、処理対象の画素値をそれと置き換える処理である (図3)。この処理により、周囲と極端に差のある画素値は除去される。ここでは、3×3のメディアンフィルターを使用した。

(3) マスク画像の作成

海域を対象として画像処理を行なう場合、陸域の情報は、解析の妨げになる。そのため、水に強い吸収特性を持つ近赤外部バンド5のデータを用いて陸域と水域を分離した。分離方法は、まず、バンド5の画像を表示して、水陸を分けるしきい値を変化させ、目視により最もよく区分される値を定め、その値より放射輝度の高い領域を陸域、低い領域を水域とする2値画像を作成した。つぎに、この2値画像で、明らかに陸域、水域の区分が違う画素を、ディスプレイ上で修正した。

こうして作成した画像をバンド6の熱赤外画像に重ね、陸域の部分を白くマスクした。

(4) シュードカラー画像の作成

フィルタリングとマスキングの処理を行なった熱赤外画像の海域(一部河川も含む)の各画素にデジタル値(表面水温)に応じた色付けを行なった。このとき、夏冬を含む9シーズンすべての画像に対して、同じ温度に同じ色を割り当てると、画像間の温度の比較は容易だが、温度範囲が大きいため色数が多くなり、各画像内の温度分布が判別し難くなる。そこで、各画像内で温度の高低を示すように色付けをした。したがって、画像が異なる場合には、同じ色でも異なった温度を示している。

(5) デジタル値の温度への換算

前述のように、TMで観測された放射輝度データは、地上局で補正後0~255のデジタル値としてCCTに記録され、提供されている。しかし、この数値自体は直接温度を示してはいない。そこで次の方法でデジタル値を温度に変換した。なお、水温の絶対値が問題とされる場合には、さらに地上の観測データから回帰式を求めたり、大気による影響を補正したりする必要があるが、今回の処理では、主に温度差について検討したため、これらの補正はおこなわなかった。

デジタル値は、式①で絶対放射輝度に変換できる。

$$R = (V/D_{max}) \cdot (R_{max} - R_{min}) + R_{min} \quad \text{①}$$

R : 絶対放射輝度 (mW/cm<sup>2</sup> · sr · μm)

V : 補正済 CCT デジタル値 (0~255)

D<sub>max</sub> : 最大デジタル値 (=255)

R<sub>max</sub> : 検出器の最大放射輝度 (TM Band 6: =1.530)

R<sub>min</sub> : 検出器の最小放射輝度 (TM Band 6: =0.1238)

絶対放射輝度Rと絶対温度T(K)の関係は、式②で与えられる。

$$R = 5.1292 \times 10^{-5} T^2 - 1.7651 \times 10^{-2} T + 1.6023 \quad \text{②}$$

この2次方程式を解くことにより、最終的には式③が得られる。

$$t(°C) = -100.94 + \sqrt{107.532 \times V + 781.003} \quad \text{③}$$

式③によりCCTデジタル値Vから温度を求めた。

式③によれば、デジタル値0は-73℃、255は67℃に対応する。また、V<sub>1</sub>=131とV<sub>2</sub>=132のように、デジタル値が1だけ異なる場合の各温度差を式③で計算し(この場合、T<sub>1</sub>=21.0℃、T<sub>2</sub>=21.4℃)、温度(T<sub>1</sub>)に対する温度差(T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>)を求めて図4に示す。図4によれば、デジタル値1の差は、20℃付近では、約0.44℃に相当し、高温になるほど温度分解能が良くなるのが分かる。なお以下で使用する“水温”とは、これまでに述べてきた、デジタル値からの換算水温を表わす。また、これは表面水温であり、採水調査で測定する水温とは若干異なる。

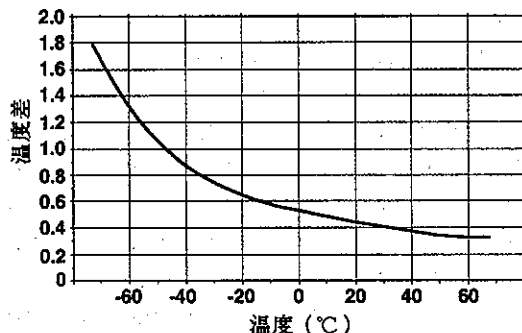


図4 各温度領域の測定精度

3 結果と考察

図5は処理結果の海表面温度パターン画像であり、図6は、前述のマスク画像を利用して作成した東京湾沿岸の略図である。

今回処理したTMデータの内訳は、1984-88年に撮影された、夏季4シーズン、冬季3シーズン、秋季2シーズンである。各画像の撮影日の気象状況を表1に示す。

(1) 水温分布の季節的な特徴

各シーズンの放射輝度のヒストグラムを作成し、相互の温度比較を行なった(図7)。グラフの横軸はデジタル値(水温)を、縦軸は、そのデジタル値を有する画素の出現頻度を表わす。また、各ヒストグラムの右上の

1, 3行目の数値は、その両者の間に全画素の90%が含まれる温度の範囲を示し、2行目の数値は、出現頻度の最も高かった温度を表わしている。また、4行目の $\Delta t$ は、1行目と3行目の数値の差で、各画像内の温度差を意味している。

図7によれば、湾内の水温は、夏季は30℃前後、冬季は3-5℃程度の温度域にある。

また、1987年7月24日(⑦)の水温は、22.7℃前後で、他の夏の値よりも低めのデータになっている。表1の気象データによれば、この日の気温や日射量が他の年の夏季に比べて、特に低い傾向は認められず、原因は明らかでない。

各シーンで湾内の高温部と低温部の温度差はおおよそ2~5℃であるが、1986年1月10日(⑤)のデータでは、ヒストグラムの広がりが大きく、湾内の温度差が約8.3℃と大きかったことが分かる。

次に、図5の各画像から湾内の水温分布パターンについて検討した。

夏季4シーン(①, ④, ⑥, ⑦)のうち、1986年8月6日(⑥)を除いては、湾口部の水温が、湾奥部に比べて低い傾向にある。一方、冬季は逆に、湾口部の水温が湾奥

部より高くなっている。1986年8月6日については、2日前に降水量185.0mm/日の豪雨が記録された特異日<sup>17)</sup>で、流入河川の水量が急増したために(図8)、通常とは異なる水温分布を示したものと考えられる。秋季の10, 11月のシーン(②, ⑨)では、温度の高い海域が千葉県側に、それより温度の低い海域が神奈川県寄りに形成されている。

(2) 潮汐と流動パターン

海域では、太陽や月等の天体の運行にともなって海水面が上下する、潮汐現象が起こる。東京湾では、日に2回、潮の干満が観測される(図9)。潮位変動にともなって潮流が発生するが、潮時(干潮時、満潮時といった潮汐現象における時点)と水温分布から見た流動パターン<sup>18)</sup>の間に何らかの特微的な関係が認められるかを検討した。

図9は、衛星データが撮影された時点(⑩)の前後1日の芝浦<sup>9)</sup>における潮位変動で、潮汐調和定数を用いて計算した。さらに、撮影時刻における東京湾湾口(第三海堡付近:画像下端のさらに南側で、画像にはこの海域は入っていない)の流速を、潮汐表<sup>19)</sup>:「任意時の流速を求める表」によって計算し、結果を、各グラフの右下に示した。この数値が負の場合は、湾口部周辺の海水が外洋

表1 画像データのリストと撮影時の気象条件

番号	撮影年月日	切出開始座標		気温 (℃)	湿度 (%)	日射量 (MJ/m <sup>2</sup> )	風向	風速 (m)
		Pixel	Line					
1	1984.07.31	2580	4432	29.6	69	3.72	S	2.4
2	1984.11.04	2240	4432	12.2	55	2.07	NNW	2.8
3	1985.01.23	2245	4432	4.7	51	0.92	NNW	4.1
4	1985.08.03	2420	4432	29.9	72	4.01	S	4.2
5	1986.01.10	2420	4432	3.4	33	1.05	NNW	3.0
6	1986.08.06	2555	4432	29.1	51	4.55	NNW	3.8
7	1987.07.24	1990	4432	32.1	58	4.97	SSE	3.7
8	1988.03.04	2310	4432	3.9	37	1.88	NNW	4.7
9	1988.10.14	2280	4432	15.6	41	2.75	S	2.6

- \*気象データは、東京管区気象台での値
- \*気温、湿度は午前9時のデータ
- \*日射量は、当日の午前9時までの積算値
- \*風向、風速は当日の日平均値

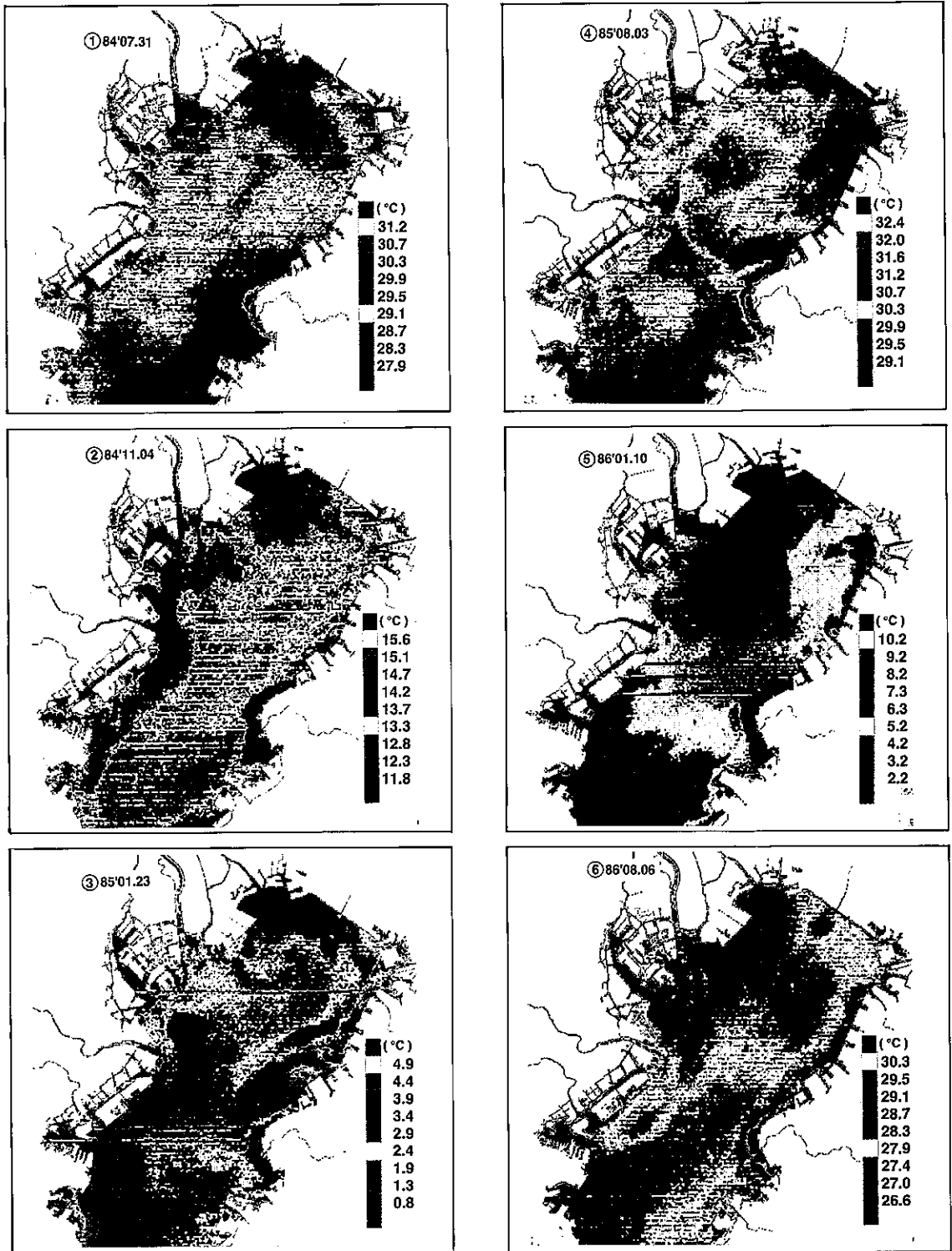


図5 東京湾の海表面温度パターン画像

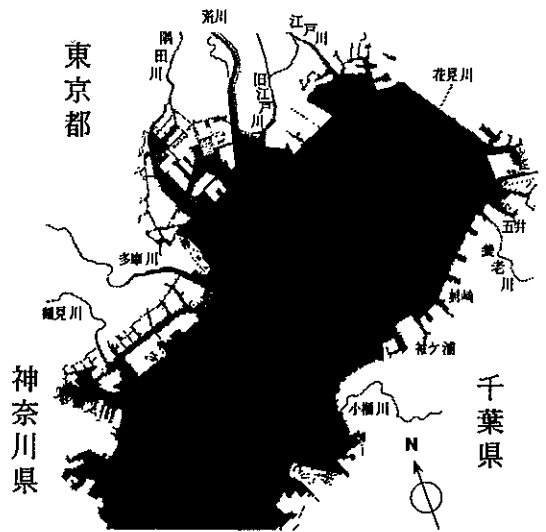
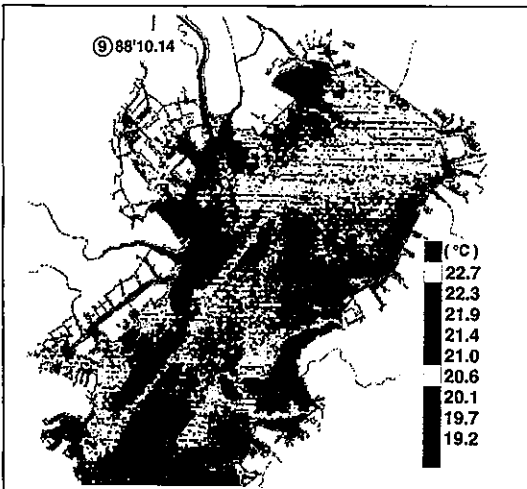
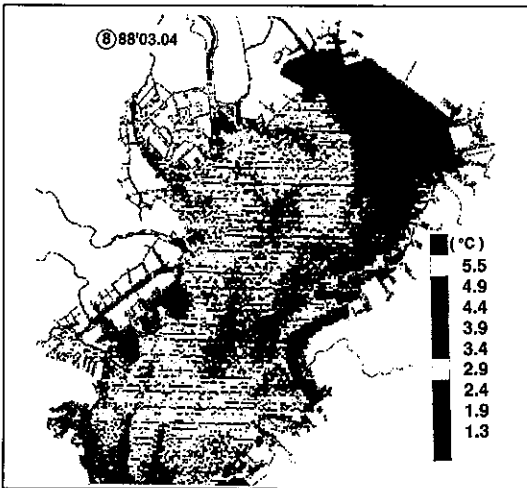
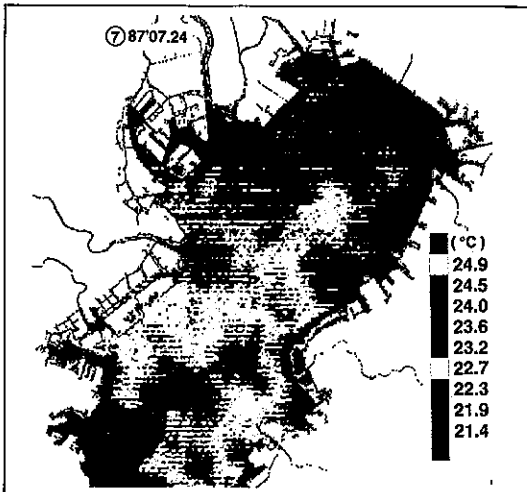
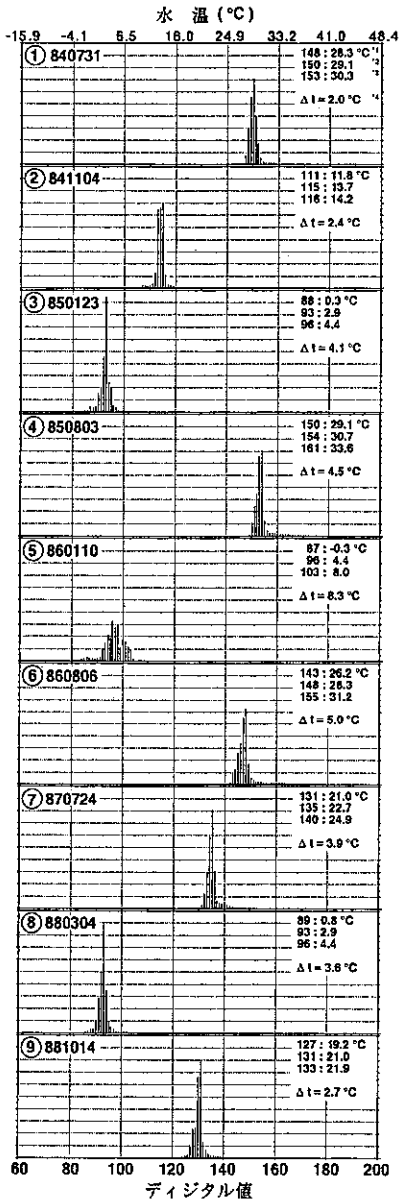


図6 東京湾沿岸略図

に向かって流れ出す南東流であること、正の場合は、湾内に流入する北西流を表わす。

東京湾では、上げ潮流時に、主流は神奈川県側に沿って北上し、下げ潮流は、湾内ほぼ一様に湾口に向かって流れるので、神奈川県側では上げ潮流が下げ潮流よりも強く、千葉県側では、上げ潮流は下げ潮流よりも弱いと言われている。

9シーンのうち1984年11月4日のシーン(②)が唯一上げ潮時のもので、その他の画像はすべて下げ潮時のものである。しかし、これらの画像からは、上げ潮時と下げ潮時のパターン上での差異は明らかではない。すなわち、各画像を水温分布パターンだけから、これは上げ潮時、これは、下げ潮時と判別することは困難である。東京湾多摩川河口域を例にとれば、潮流速度は、最大で0.5ノット(約0.9km/h)程度である。1日に2回ずつ干潮、満潮があるとすれば、継続して一方向に流れる時間は最大6時間程度である。その間に流速は、 $0 \rightarrow 0.9 \rightarrow 0$  km/hと変化するので、平均的には、0.45km/hで6時間流れることになり、この海域の水塊は、約2.7km移動して、また押し戻されることになる。実際の水塊移動では、恒流や河川流量などの影響を受けるが、潮汐の効果だけを考慮した場合には、多摩川河口で下げ潮時にすぐ河川水の流入パターンが湾口に向くことはないと考えられる。したがって水温分布パターンから、潮時を読み取



<注> \*1: 5%値、\*2: 最頻値、\*3: 95%値、\*4: 90%温度範囲

図7 放射輝度ヒストグラム

ることは困難であると考えられる。

(3) その他の特徴

画像データから、流入河川水の水温について比較した。方法は、江戸川、荒川、多摩川の各河口域に20×20画素の領域を区切り、水温のヒストグラムをとって、出現頻

表2 各河口域の水温 (°C)

番号	撮影年月日	江戸川	荒川	多摩川
1	1984.07.31	29.5	28.3	29.1
2	1984.11.04	10.4	12.8	12.3
3	1985.01.23	0.3	2.9	2.9
4	1985.08.03	30.3	30.7	30.3
5	1986.01.10	-0.3	3.9	5.5
6	1986.08.06	26.2	27.0	27.4
7	1987.07.24	22.7	23.2	22.7
8	1988.03.04	0.3	3.4	2.9
9	1988.10.14	20.1	19.7	19.2

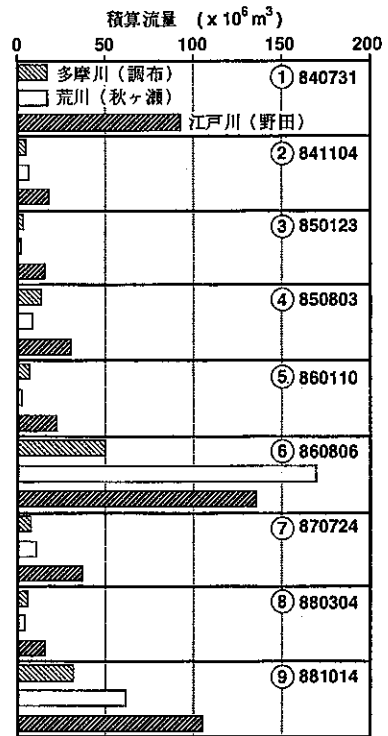


図8 撮影日前7日間の積算流量 (×10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>)

度の最も高い水温で各河口域を代表させた (表2)。表2によれば、船橋付近に流入する江戸川河口域の水温は、冬季には荒川、多摩川に比べ、常に3°C前後低いことが特徴として挙げられる。また、その低温の水塊は、1985年1月23日 (③) や1988年3月4日 (⑧) のように

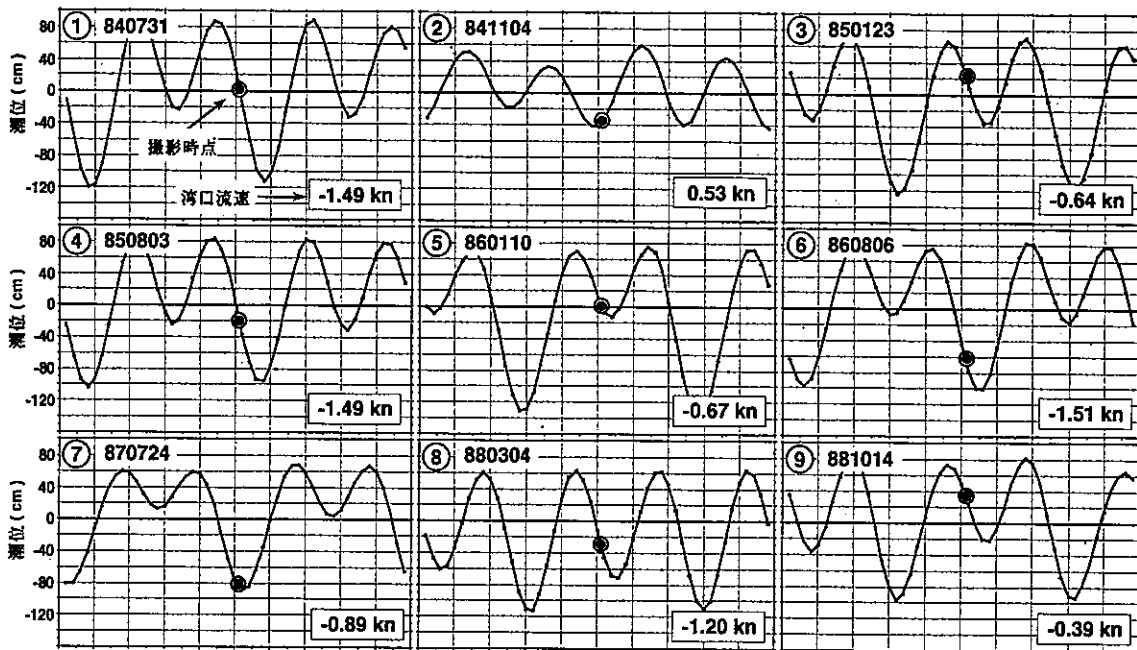


図9 芝浦の潮位および東京湾湾口の流速

千葉県側に沿っている場合と、1986年1月10日(⑤)のように湾の中央部へ広がっていく場合が認められる。このほかに、冬季のデータでは、袖ヶ浦、姉崎、五井の発電所所在地付近から温排水の流入する様子(黒く表示されている)が、はっきりと確認でき、その拡散の仕方から周囲の流れが推定できる。

#### 4 まとめ

ランドサットTMデータで東京湾の海表面温度パターン画像を作成した。各画像のヒストグラムや水温分布パターンを比較することにより、以下の点が明らかになった。

- ① 東京湾では、季節に特有の温度分布が認められる。すなわち、夏季には、湾奥部が湾口部より水温が高く冬季は、逆に湾口部の方が高い。
- ② 画像化した領域内では、温度差は2-5℃程度である。
- ③ 潮時と流動パターンには、明確な関係が認められなかった。
- ④ 冬季の江戸川河口域の水温は、荒川、多摩川河口域にくらべて3℃前後低い。

⑤ 冬季には、千葉県沿岸の発電所付近から、温排水の流入状況が良く把握できる。

はじめに述べたように、内湾部の海洋環境の解析に利用できる衛星リモートセンシングデータは、気象上の制約などから、比較的数量に限られ、今後もさらに解析シーンを蓄積していくことにより内湾部における水温等の経年の変動傾向なども把握できるよう研究を進めていきたい。

本研究を行なうに当たっては、一部の処理を東京都立工業技術センターに設置された試験研究機関等共同利用電子計算システムにより行なった。利用に際してご指導下さった同センターの榎本氏に感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 安藤晴夫ら：東京湾の富栄養化機構の研究(その10) -水質変動要因に関する解析-, 東京都環境科学研究所年報1991, p.111-118.
- 2) 杉原滋彦：海洋分野におけるリモートセンシングの現状と将来, 日本リモートセンシング学会誌, 11, 1, (1991), p.90-94.
- 3) 高橋英雄ら：「ノア」を利用して回遊魚を追う-



- NOAA 衛星による漁場探索システムー，熱赤外線リモートセンシングの技術と実際，鹿島出版会，p.22 (1986).
- 4) 岡本晴人ら：「TM」が捉えた，閉鎖的な大阪湾の海流ーランドサットTMによる大阪湾表面温度パターンー，熱赤外線リモートセンシングの技術と実際，鹿島出版会，p.22 (1986).
  - 5) 安藤晴夫ら：ランドサットTM画像処理システムの開発について，東京都環境科学研究所年報，1989，p.152-155.
  - 6) 宇宙開発事業団地球観測センター：地球観測データ利用ハンドブックーランドサット編・改訂版ー，リモートセンシング技術センター，p6.1-6.2 (1986).
  - 7) 気象庁：東京気象月報.
  - 8) 水資源開発施設等管理年報：水資源開発公園.
  - 9) 安藤晴夫：潮汐調和定数表を利用した潮高計算プログラムについて，東京都環境行政交流会誌，13，p56-64 (1989).
  - 10) 海上保安庁：1984~1988年潮汐表
  - 11) 海上保安庁：東京湾潮流図，(1972).

---

Characteristics of Sea Surface Water Temperature Distribution Patterns in Tokyo Bay Observed by LANDSAT-TM Data.

Haruo Ando

(Abstract)

By using LANDSAT-TM thermal infrared data in the period of 1984-1988, sea surface water temperature distribution images of Tokyo Bay were made. By comparison those images with weather, seasonal and tidal condition, the following results were obtained;

- (1) In summer the sea surface water temperature in the head area of Tokyo Bay is higher than that of its entrance area. But in winter the sea water of the entrance area is warmer than that of the head area.
- (2) The range of sea water temperature in the whole Tokyo Bay area is about 2-5 °C.
- (3) The flow pattern has no significant relation to the tidal hour.
- (4) In winter the water temperature in the river mouth of Edogawa is approximately 3°C lower than that of Arakawa and Tamagawa.
- (5) By LANDSAT-TM's winter images the inflow states of warm water discharged from power plants are clearly detected.