

# ランドサットTM データによる河川放流水拡散域の定量的解析

大 西 外 明\*・河 合 弘 泰\*\*

## 1. 緒 言

地球環境問題に対する関心が高まりつつある今日において、河川放流水が沿岸水域環境に及ぼす影響を調査することは重要であり、また我々の日常生活にとっても比較的身近な問題と言える。この際の水質関連指標としては、透明度、濁度、SS、BOD、COD、塩分濃度、水温等を挙げることができるが、これらの内で水温及び濁度あるいは塩分濃度の観測は、放流水の密度流としての力学的特性を把握する上で特に重要である。

近年、水理分野における人工衛星データの利用は盛んになりつつあるが、大規模な現象の定性的把握、模型実験及び数値シミュレーションの結果との比較を目的とした利用が多く見受けられる(宇多ら, 1984; 大西ら, 1979; 田中, 1985)。フォールス・カラー合成、比演算、ラプラス演算等、流れの効果的な画像化法は種々提案されており、画像を表示するソフトの一部は市販されている。しかし、これらの多くは「流れの可視化」という面においては有用であるが、定量的解析という面においては未だ不満足な域に留まっている。

以上のような背景を踏まえ、著者らは先に人工衛星データを水理学的見地から定量的に解析する手法を提案した(大西ら, 1991)。本論文においては、この解析手法の一部に改良を加え、河川放流水の拡散域をランドサット・データにより評価することを試み、新宮川(紀伊半島南部)を例として解析を行なった。ランドサット・データはデジタル・データであり、定量的解析に適している。尚、本論文で紹介する解析には NEC の PC-9801 VX、RAクラスのパソコン(オプションなし)を使用している。

## 2. ランドサット・データ

本論文においては、表-1に示すランドサット TM データを用いる。TM センサの地上空間分解能は 30 (m) または 120 (m) であり、新宮川程度の規模を有する河川であれば、河口付近の河川水の観測も可能である。

可視領域の band 1~3 の CCT 値(水面輝度)は水域

の色合いに依存しており、濁度、水中浮遊物質の色、塩分濃度等多くの物理的、化学的要素に支配されている。しかし、河川放流水に関しては、一般に濁度に比例することが従来の研究により報告されている。一方、熱赤外領域の band 6 の CCT 値は水面温度に比例している。

表-1 TM センサの band

| band | 波長帯(μm)   | 電磁波名  | 分解能(m) |
|------|-----------|-------|--------|
| 1    | 0.45~0.52 | 可視(青) | 30     |
| 2    | 0.52~0.60 | 可視(緑) |        |
| 3    | 0.63~0.69 | 可視(赤) |        |
| 4    | 0.76~0.90 | 近赤外   |        |
| 5    | 1.55~1.75 | 中間赤外  | 120    |
| 6    | 10.4~12.5 | 熱赤外   |        |
| 7    | 2.08~2.35 | 中間赤外  | 30     |

## 3. 流れの定性的把握

### (1) 新 宮 川

新宮川(熊野川)は紀伊山地に源を発して熊野灘へ流出する河川であり(図-1 参照)、流域面積は 2,360 (km<sup>2</sup>)、相賀地点(河口から約 10 km 上流)における年平均流量は 156 (m<sup>3</sup>/s)である。近年、森林開発に伴う濁水の流出が指摘されている。

### (2) 流れのパターン

写真-1(a), (b) は 1988 年 4 月 19 日の CCT 値分布を示したものである。この日の相賀地点における流量は 397 (m<sup>3</sup>/s) と中程度である。濁度分布(band 2)からは河口右方向へ、水温分布(band 6)からはむしろ左方向へ流れているように観察される。砂洲が河口右岸側から中央部へ向かって岬状に延びており、河川水の右側部分のみがこれを連行して高濁度になり、そのままの状態で熊野灘へ流出しているものと考えられる。

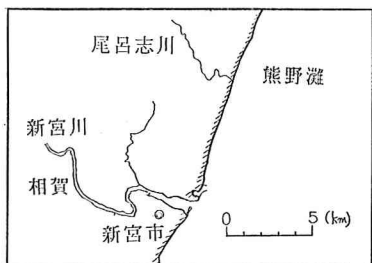
写真-2 (a), (b) は同年 9 月 26 日の状況を示したものである。この日は台風通過後に相当し、相賀地点における流量は 1,234 (m<sup>3</sup>/s) に達した。流れのパターンとしては、濁度と水温との間に明確な差は見られない。洪水時

\* 正 会 員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

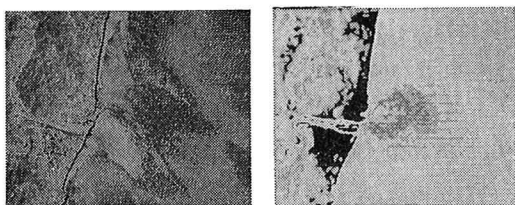
\*\* 学生会員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

においては、河口到達前に多量の土砂を含有しており、砂洲連行の影響がほとんど効かないほど高濁度になっているものと考えられる。

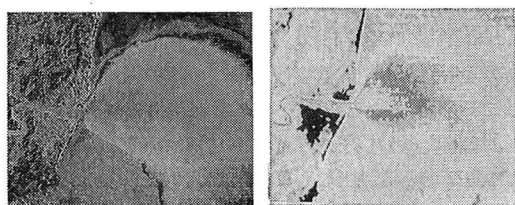
見られるが、濁度と水温の流れパターンが異なる中程度の流量時においては当然相関性は低い。



図—1 新宮川地図



(a) band 2 (b) band 6  
写真—1 1988年4月19日のCCT値分布



(a) band 2 (b) band 6  
写真—2 1988年9月26日のCCT値分布

#### 4. 濁度分布と水温分布の相関性

##### (1) 可視領域同士の相関性

濁度と可視領域の band の CCT 値との間にはそれぞれ直線関係があるので、結果としてこれらの band 間の関係も直線関係になり、直線相関係数は一般に 0.9 程度以上と高くなる。しかし、厳密には少し弧を描いた曲線係にあるため、相関係数が低い値を示すこともある。

##### (2) 可視と熱赤外領域の相関性

濁度（物質濁度）と水温の支配方程式は、濁度に土粒子の沈降、水温に水面において熱収支がある他は類似している。そのため、放流水拡散域の濁度分布と水温分布は相似になると言われて来た。

表—2 は、洪水時（1988 年 9 月 26 日）及び中程度の流量時（同年 4 月 19 日）の直線相関係数を示したものである。洪水時には濁度と水温との間に高い相関性が

表—2 band 間の相関係数

（左下：洪水時，右上：中程度の流量時を示す）

|        | band 1 | band 2 | band 3 | band 6 |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| band 1 | —      | +0.972 | +0.967 | −0.030 |
| band 2 | +0.878 | —      | +0.967 | −0.033 |
| band 3 | +0.860 | +0.957 | —      | +0.057 |
| band 6 | +0.664 | −0.779 | −0.891 | —      |

#### 5. 流れの「方向」としての放流水流軸

##### (1) 流軸に関する仮定

自然界における噴流は厳密には空間的に三次元的現象であるが、本論文においては平面的なものとして扱う。これは、水面付近の情報のみが得られるというリモートセンシング利用上の不可避な限界である。

そこで、流軸を「CCT 値と重みとし、最小 2 乗法により回帰した曲線」と定義すると、band 1~3 より濁度の流軸、band 6 より水温の流軸が得られる。

##### (2) 流軸の算定方法

パソコン用ランドサット・データは、横 512 (Pixel または Column) × 縦 400 (Line) のメッシュ・データから成っている。図—2 に示す  $P$ - $L$  座標系において放流水流軸を式(1)に示す 3 次放物線で近似する。

$$L_* = a_1 P_* + a_2 P_*^2 + a_3 P_*^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し、 $P_*$  および  $L_*$  は次式で表される。

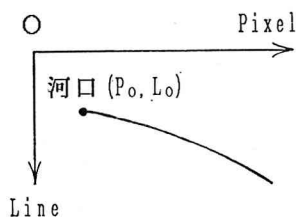
$$P_* = P - P_0, \quad L_* = L - L_0 \quad \dots\dots\dots (2-a, b)$$

ここに  $(P_0, L_0)$  は河口座標である。回帰放物線との偏差  $\delta_k$  ( $k$ : 要素番号) は、式(3)で表される。

$$\delta_k = L_{*k} - (a_1 P_{*k} + a_2 P_{*k}^2 + a_3 P_{*k}^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、新宮川放流水拡散域に含まれない部分を除去するために、CCT 値  $U_k$  に対応する重み関数  $W_k$  を考える。可視領域の band の場合、CCT 値は陸域より水域の方が低く、水域においては濁度に比例していることを考慮して、重み関数  $W_k$  を次式によって定義する。

$$W_k \equiv \begin{cases} 0 & (U_k < U_{Bnd}, U_{Mth} < U_k) \\ (U_k - U_{Bnd})^\alpha & (U_{Bnd} \leq U_k \leq U_{Mth}) \end{cases} \quad (4)$$



図—2  $P$ - $L$  座標系

ここに  $U_{Mth}$  は河口付近最大 CCT 値,  $U_{Bna}$  は隣接河川放流水または沿岸流の最大 CCT 値,  $\alpha$  は通常 1 とする. 一方, band 6 については CCT 値が河口から沖に向かって高くなっているため, 重み関数として次式を用いる.

$$W_k \equiv \begin{cases} 0 & (U_k < U_{Mth}, U_{Bna} < U_k) \\ (U_{Bna} - U_k)^\alpha & (U_{Mth} \leq U_k \leq U_{Bna}) \end{cases} \quad (5)$$

そして, 偏差 2 乗和  $S$  を式 (6) で定義する.

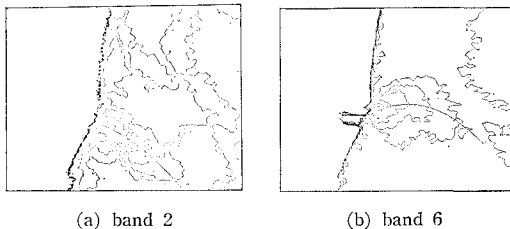
$$S \equiv \sum W_k \delta_k^2 \\ = \sum W_k \{L_{*k} - (a_1 P_{*k} + a_2 P_{*k}^2 + a_3 P_{*k}^3)\}^2 \quad (6)$$

この偏差 2 乗和  $S$  が最小になる条件より, 式 (7) で示す正規方程式に帰着する (添字  $k$  は省略).

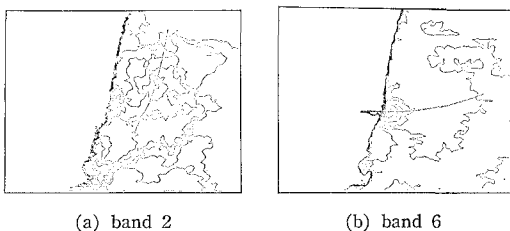
$$\sum \begin{bmatrix} WP_{*k} L_* \\ WP_{*k}^2 L_* \\ WP_{*k}^3 L_* \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} WP_{*k}^2 & WP_{*k}^3 & WP_{*k}^4 \\ WP_{*k}^3 & WP_{*k}^4 & WP_{*k}^5 \\ WP_{*k}^4 & WP_{*k}^5 & WP_{*k}^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### (3) 解析例

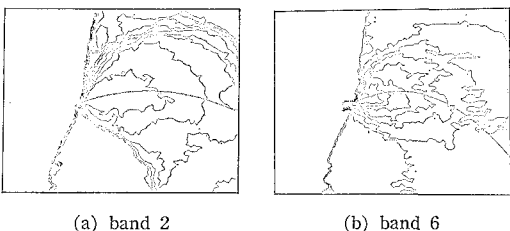
図—3~7(a), (b) は, 1988 年 4 月 19 日, 同年 6 月 6 日, 同年 9 月 26 日, 1989 年 5 月 8 日, 同年 8 月 28 日の新宮川放流水拡散域における band 2, 6 の CCT 値分布及び流軸を示したものである. 尚, 拡散域の形状によっては流軸の回帰計算が困難な場合もある.



図—3 1988 年 4 月 19 日の CCT 値分布及び流軸



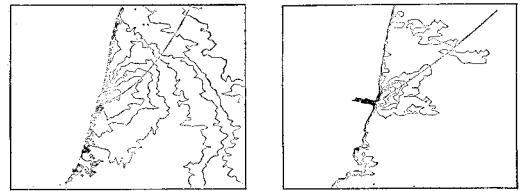
図—4 1988 年 6 月 6 日の CCT 値分布及び流軸



図—5 1988 年 9 月 26 日の CCT 値分布及び流軸



(a) band 2 (b) band 6  
図—6 1989 年 5 月 8 日の CCT 値分布及び流軸



(a) band 2 (b) band 6  
図—7 1989 年 8 月 28 日の CCT 値分布及び流軸

## 6. 流れの「距離」としての拡散影響距離

### (1) 拡散影響距離の定義

CCT 値は太陽光線の強度にも左右されるので, その影響を除去するために次式の相対輝度  $U_{REL}$  を用いる.

$$U_{REL} = (U_k - U_{OFF}) / (U_{Mth} - U_{OFF}) \quad (8)$$

これは「河口で 1, 十分沖で 0」となるように換算した無次元量である. 拡散影響距離は, この相対輝度が低下してほぼ 0 となる点までの距離と考えることができるが, 本論文においては「河口から相対輝度が 0.1 に低下する点までの流軸上の距離」と定義する. すなわち, 放流水が 1/10 に希釈されるまでの距離である.

### (2) 解析例

表—3 に拡散影響距離の計算結果を示す. 流量が比較的少なく濁度と水温の流軸が明確に異なる 1988 年 4 月 19 日, 1989 年 5 月 8 日を除けば, 濁度より水温の方が拡散影響距離が短い. 水面における熱収支のために水温の方が早く周囲の水に同化することは, 従来から定性的に指摘されて来たことであるが, 相対輝度を用いることにより客観的かつ定量的な比較が可能である.

また, 濁度の指標として用いる可視領域の band においては, band 1, 2, 3 の順, すなわち電磁波長の短い順に大きな値となる傾向が見られる.

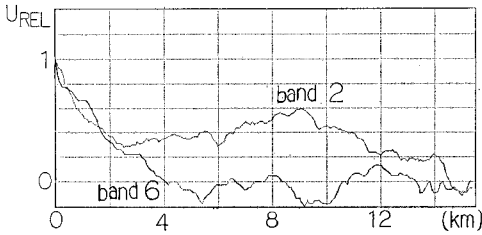
図—8(a), (b) は流軸上の相対輝度変化を示したものである. 噴流理論によれば, 相対輝度が指数関数的に 0 に漸近するものと予想されるが, 解析結果は必ずしもそのような曲線を描いてはいない. この原因としては, 河口における流量及び水質が非定常であること, また濁度が非常に高くなると CCT 値は濁度の対数に比例することになること, 以上の 2 点が考えられる.

表—3 拡散影響距離  $L$  (km)

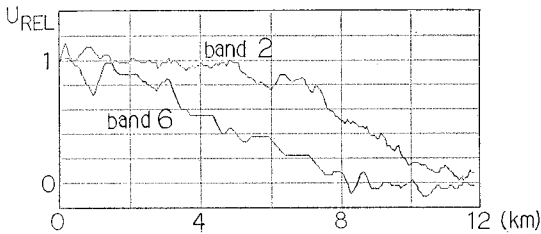
| 日 付          | 濁 度    |        |        | 水 温  |
|--------------|--------|--------|--------|------|
|              | band 1 | band 2 | band 3 |      |
| 1988, 04, 19 | 4.3    | 3.0    | 1.3    | 6.8  |
| 1988, 06, 06 | 14.6   | 14.6   | 11.9   | 4.0  |
| 1988, 09, 26 | 9.6    | 10.7   | 10.2   | 8.3  |
| 1989, 05, 08 | 11.5   | 5.2    | 4.4    | 15.4 |
| 1989, 08, 28 | 15.0   | 14.6   | 12.1   | 8.8  |

表—4 河口流量と拡散影響面積の関係

| 日 付          | 河口流量<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 拡散影響面積 ( $\text{km}^2$ ) |        |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------|--------|
|              |                                   | band 2                   | band 6 |
| 1988, 04, 19 | 397                               | 34                       | 29     |
| 1988, 06, 06 | 267                               | 324                      | 13     |
| 1988, 09, 26 | 1,234                             | 92                       | 70     |
| 1989, 05, 08 | 131                               | 10                       | 50     |
| 1989, 08, 28 | 1,970                             | 309                      | 121    |



図—8(a) 1988年6月6日の相対輝度変化



図—8(b) 1988年9月26日の相対輝度変化

## 7. 流れの「規模」としての拡散影響面積

### (1) 拡散影響面積の定義

拡散影響面積を「相対輝度が0.1以上の領域の面積」と定義する。新宮川の放流水拡散域と他の領域を区別する境界の相対輝度は、低い値に設定するほど該当するピクセル数が増えるという意味において、評価面積の計算精度は向上するが、あまり下げ過ぎると隣接河川の放流水や沿岸漂砂との区別が困難になるという問題もある。

### (2) 河口流量と拡散面積の関係

表—4に河口流量(相賀地点における流量で代用)  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )と拡散影響面積  $S$  ( $\text{km}^2$ )を示すが、両者の間には次式に示す関係がある。

$$\text{band 2: } \log_e S = -3.52 + 1.18 \log_e Q \quad \dots\dots\dots (9-a)$$

$$\text{band 6: } \log_e S = -3.03 + 1.03 \log_e Q \quad \dots\dots\dots (9-b)$$

同一流量の場合、濁度より水温によって評価される拡散面積の方が狭いことが明らかである。これは前章において述べた通り、濁度より水温の方が周囲の水に早く同化することを示している。

## 8. 水質のカテゴリー分類

### (1) 塩分濃度の検出

可視領域の band 1, 3 の CCT 値  $U_1, U_3$  は、式(10-a), (10-b)に示す濁度  $T$  の一次式で近似できる。

$$U_1 = a_1 + b_1 T \quad \dots\dots\dots (10-a)$$

$$U_3 = a_3 + b_3 T \quad \dots\dots\dots (10-b)$$

ここに、 $b_1, b_3$ は定数、 $a_1, a_3$ は濁度以外の要素であり、河口流においては主として塩分濃度に依存する変数と見なすことができる。これら2式から濁度  $T$  を消去すると式(11)が導かれる。

$$U_3 = (b_3/b_1) \cdot U_1 + (a_3b_1 - a_1b_3)/b_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

図—9(b)において、河川水が相賀地点(A)から河口(B)に達し、海水に希釈混合して塩分濃度が同化し(C)、濁度も同化が終了する(D)までの CCT 値変化を示す。 $U_1$ 及び $U_3$ の正の方向に濁度、それと直交する方向に塩分濃度の座標系をとることにより一連の水質変化を説明することができる。A→B, C→Dにおいては塩分濃度はそれぞれ一定であり、式(11)の右辺第2項がそれぞれ定数になるため、互いに平行な線となる。また、B→Cにおいては、塩分濃度と同時に濁度も低下するので、結果的にこれらの線とある一定の角度を成す線となる。

### (2) 水域におけるカテゴリー分類

水塊の区別を明示する画像処理法の一つとして比演算がある。これは例えば band 3 と band 1 の CCT 値の比をパラメータとして画像化したものである。今、図—9(b)において、河口到達前の CCT 値比は0.6程度、環境水のこの比は0.2~0.3程度であるので、両者は明確に分離される。このように可視領域の band の比をとるということは、濁度変動の影響を除去する効果がある。

陸域のカテゴリー分類(クラスター分析)である土地被覆分類には、セル法、最短距離法、最尤法等の手法が提案されており、どの「群れ」に属するかを判断している。本論文で扱う水域においては、どの「傾向線」に近いかを判別すれば良い。

## 9. 主成分分析

放流水の水質変化がどのような潜在的要素によって支

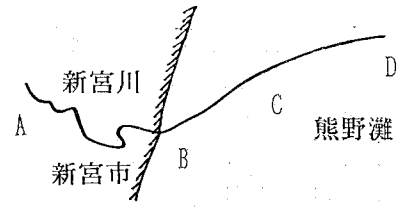


図-9(a) 河口付近の略図

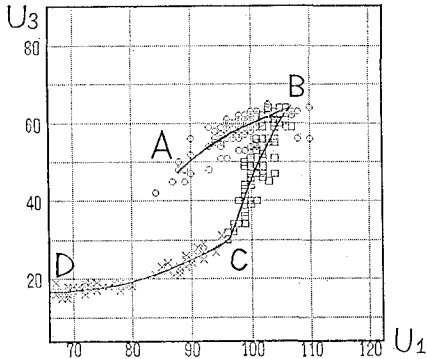


図-9(b) band 1 と band 3 の関係

配されているか、どのような成分によって代表できるかを調べるために、流軸上の CCT 値を用いて主成分分析を行なった。

表-5 は 1989 年 8 月 28 日の計算例を示す。第 1 主成分は、係数 (固有ベクトルの要素) がいずれも正値でかつ 0.5 程度の値を示している。従って、可視領域の各 band の CCT 値とそれぞれ比例関係にある濁度と関係が深いものと考えられる。第 2 主成分については、係数が band 1 と band 3 で異符号であり、電磁波長の相違で生ずる成分である前章でも指摘したように、塩分濃度の変化と関連性があるものと思われる。この第 2 主成分までの累積寄与率は 0.997 である。

band 1, 2, 3, 6 の 4 つの band を用いて主成分分析を行なうと、第 1 主成分に濁度、第 2 主成分に水温、第

表-5 固有ベクトルと累積寄与率

| 主成分    | 1st    | 2nd    | 3rd    |
|--------|--------|--------|--------|
| band 1 | +0.572 | -0.694 | -0.437 |
| band 2 | +0.589 | -0.024 | +0.808 |
| band 3 | +0.571 | +0.720 | -0.395 |
| 累積寄与率  | 0.957  | 0.997  | 1.000  |

3 主成分に塩分濃度と関連性があると思われる成分が現れる。

10. 結 語

河川放流水の挙動を定量的に評価する方法を種々提案した。これらの評価基準は、新宮川以外の河川にも適用して相互に比較できる汎用性がある。

河川放流水の拡散域の特定は、濁度、水温の何れを指標とするかによって異なることがあるが、水温の方が適している。これは、流量が少なく河口に達する前の濁度があまり高くない場合は、沿岸漂砂、河口における砂洲の連行等が、当該河川放流水の濁度分布に小さからぬ影響を及ぼすためである。

河川放流水の拡散域は一辺が数〜数十 (km) のオーダーに及ぶため、今後もランドサット等の人工衛星による観測が主流であると考えられる。しかし、従来の利用は定性的把握に終始する傾向が見られ、今後は定量的解析を織り交ぜて行く必要性を痛感している次第である。

参 考 文 献

宇多高明・古川博一・竹淵 勉 (1984): ランドサット、航空機、船の同時観測による沿岸域特性の把握, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 690-694.  
大西外明・河合弘泰 (1991): パソコンによる人工衛星データを用いた放流水拡散域評価法の提案, 水工学論文集第 35 巻, pp. 173-178.  
大西外明・西村 司 (1979): リモートセンシングによる河口拡散調査と密度流的検討, 土木学会論文集第 289 号, pp. 75-87.  
田中修三 (1985): ランドサットデータによる河口流出の解析, パソコンによるリモートセンシングデータ解析, pp. 164-171.