

# 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

## Estimation of Effluent Diffusion through Satellite

### Remote Sensing with Personal Computer

大西外明\*・河合弘泰\*\*

By Sotoaki ONISHI and Hiroyasu KAWAI

A System for the analysis of river effluents using satellite data is developed. Effluents from the Shingu River are analyzed as an example to study the difference in diffusion areas detected by water temperature and water turbidity. When the effluent discharge is small, the turbidity distribution off the river mouth may be affected by the floating substances released from neighboring other rivers. But the water temperature is not affected significantly by the neighboring rivers. Thus the water temperature distribution is more proper parameter, in comparison with the turbidity distribution, to be employed in field surveys of the effluent diffusion.

Keywords: effluent, temperature, turbidity, remote sensing,

#### 1. 緒言

各種の排水を負荷された河川水,あるいは沿岸水域へ直接放出された汚染水等が,沿岸水域環境に及ぼす影響を予測するためには,現地調査等により当該水域における乱れ拡散等の水理特性を予め把握しておく必要がある。その際に調査項目に組み入れられる水質関連の指標としては透明度,濁度,塩分濃度,水温, BOD, COD等があるが,これらの内で水温と濁度あるいは塩分濃度の観測は,その海域における放流水の力学的特性を把握する上で特に重要であると考えられる。そこで,これらを媒介として放流水の拡散特性を観測しようとする場合,選定する媒介の如何により特定される拡散域に差異が出ることが予測される。しかし,この点に関して十分に解明されていないのが現状であると考えられる。

その理由として水温拡散域と濁質拡散域との関連を明らかにする為には水域全体にわたるこれらの水質指標の分布状態を瞬時に観測することが望まれるが,このような空間スケールの大きな水理現象を,従来の観測法によって瞬間的に観察することが不可能である事が挙げられる。その点,人工衛星リモートセンシングによれば,例えば本論文で用いたランドサットによれば,110km×110km程度の水域を一度に観察することができ,さらに同一地点での現象を過去に遡って解析することが出来るという利点もある。しかし,水理学へ

\* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

(〒278 千葉県野田市山崎2641)

\*\* 学生会員 東京理科大学大学院 理工学部土木工学科

(〒278 千葉県野田市山崎2641)

の人工衛星リモートセンシング利用に関する従来の研究<sup>1)2)</sup>は流れ分布の画像化--可視化--に重点が置かれており、そこで得られた結果は水理現象を感覚的あるいは定性的に捉えるためには有用であるものの、定量的把握のためには甚だ不満足な域に留まっていると考えられる。

以上の事を考慮して、本論文では沿岸水域における放流水調査時の媒介選定が拡散域評価に及ぼす影響を明らかにする観点から、人工衛星データを数値的に解析するプログラムを構築し、新宮川(熊野川)河口沖を例として解析を行なった。尚、この解析は従来の様に大型コンピュータは用いず、近年のパーソナル・コンピュータの技術進歩と普及を踏まえNEC PC-9801 クラスのパーソナル・コンピュータを用いて行なうこととした。

## 2. 解析に用いた人工衛星数値データ

### 2・1 ランドサット・データ

本研究ではデータ量が最も多く解像度の高いランドサット・データを用いて検討を行なう。ランドサットはTM (Thematic Mapper)と呼ばれるセンサによって地表の探査を行なっている。TMによって得られるデータは表-1に示すband 1~band 7の波長帯に分割された形で一般に提供されている。

### 2・2 放流水の影響範囲を算定する媒介

可視光データ(TM-band 1~band 3)の水面輝度(以後 CCT値と呼ぶ)は水域の色合いに関係するものである。そして、この水の色合いは濁度、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、本論文においては検討対象を洪水時の濁った河川放流水としているため、主として濁度によって支配されているものと見なすことができる<sup>3)</sup>。一方、熱赤外データ(TM-band 6)の CCT値は、水面温度に依存している。従って、TM-band 2 (TM-band 1,3 でも可)の CCT値の分布とTM-band 6の CCT値の分布を比較することにより、沿岸放流水の拡散域を濁度によって評価する場合と水温による場合との差異を定量的に知ることができる。

## 3. 人工衛星データによる放流水流軸の算定

### 3・1 放流水流軸に関する仮定

厳密には自然界での噴流やブリュームは空間的に見て三次元的現象であり、その流軸を正確に測定することは容易でない。また、速度分布、物質濃度分布、温度分布の何れに基づくかにより、その流軸に差異が生じるものと予想される。本論文においては、放流水の海域での挙動を二次元的なものとして扱えるものと仮定する。この仮定の下では放流水流軸は流れの断面内で CCT値が最大となる点を連ねた線となる。例えば、TM-band 2のデータからは物質濃度(濁度)の流軸を求めることができる。

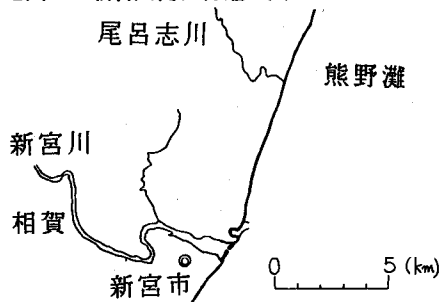
### 3・2 拡散域の抽出

写真-1(a),(b)は新宮川河口沖合いの1988年 9月26日のランドサットTM-band 2 及びband 6の画像である。

表-1 TMのband

| band | 波長帯域 $\mu\text{m}$ | 色 光 名 | 分解能    |
|------|--------------------|-------|--------|
| 1    | 0.45~0.52          | 可視・青色 | 30(m)  |
| 2    | 0.52~0.60          | 可視・緑色 |        |
| 3    | 0.63~0.69          | 可視・赤色 |        |
| 4    | 0.76~0.90          | 近赤外線  |        |
| 5    | 1.55~1.75          | 中間赤外線 | 120(m) |
| 6    | 10.4~12.5          | 遠赤外線  |        |
| 7    | 2.08~2.35          | 中間赤外線 | 30(m)  |

地図-1 新宮川河口付近地図



この日に先立つ 9月24日, 同河川流域には最大時間降雨量 225mmの降雨があり, 当26日朝 9時の相賀(河口から約10km上流)地点における河川流量は  $1,150(\text{m}^3/\text{s})$ であった。新宮川河口の北北東方向約8(kn)には尾呂志川が開口しているが, この日の新宮川からの放流水は尾呂志川の影響を受けていない。次に写真-2(a), (b)は同年 4月19日の画像である。この日は河川渇水時に相当し, 相賀地点における河川流量は $60(\text{m}^3/\text{s})$ であった。新宮川河口以北の沿岸流や尾呂志川放流水の影響が新宮川河口沖にまで達していることが明確である。この様な場合には, 注目する放流水の拡散域のみを抽出しなくてはならない。

そこでまず, 新宮川河口付近のシュード処理画像(512 Pixels×400 Lines)を画面に表示させ, 新宮川の河川放流水の拡散域が入るような長方形領域(M Pixels×N Lines)を切り出す。このとき, 尾呂志川等他の河川の拡散域が極力入らないようにする。流軸の計算はこの長方形領域内のデータを用いて行なえば良いが, 全データを解析に用いると長い計算時間を要することから4 Pixels, 8 Pixelsなど適当な間隔にデータを間引いて図-1に示すような横m個×縦n個のメッシュ・データで計算する。

### 3・3 流軸の算定方法

本論文では流軸の定義を「CCT値を重みとし最小自乗法によって回帰した曲線」と定める。この流軸がどのような種類の曲線であるか定かではないが, 式(1)に示す放物線を仮定する。

$$L = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad \text{----- (1)}$$

ここに,  $a_0, a_1, a_2$ は回帰係数である。尚,  $a_0$ に河口のL(Line)座標を与えて係数 $a_1, a_2$ を求める方法も考えられるが, 敢えて $a_0$ を変数として取り扱い自由度の高い回帰計算をした方が良好な結果を得ることが多い。その場合, 回帰曲線は河口から若干ずれた所を通る曲線となるが, 流れの全体的な傾向をよく掴んだ曲線となる。偏差(残差) $\delta_k$ は次式で表される。

$$\delta_k = L_k - (a_0 + a_1 P_k + a_2 P_k^2) \quad \text{----- (2)}$$

ここに添え字kは, メッシュ・データの左上から右下まで順に付けた要素番号である。

ここで, 各要素に付す重み $W_k$ を以下のようにして導入する。

ランドサットのTMのデータは各band毎にそれぞれ 0から 255までの CCT値になっている。この内可視領域のバンドでは一般に陸地の CCT値は水域の CCT値よりも遙かに大きく, 水域においては河口における CCT値が最も大きく, 沖合いに行くにつれて希釈混合が進み, CCT値は小さな値となる。従って, メッシュ・データの各要素の CCT値 $U_k$ に対応した重み $W_k$ を用いて陸地を水域から分離することを考えると,  $U_{M,N}$ を河口における CCT値として, 式(3)に示す条件が必要である。

写真-1 1988年9月26日

(a) TM-band 2

(b) TM-band 6

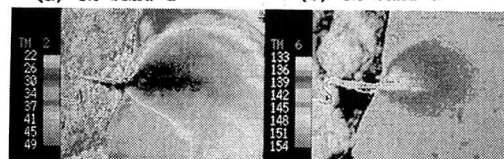


写真-2 1988年4月19日

(a) TM-band 2

(b) TM-band 6

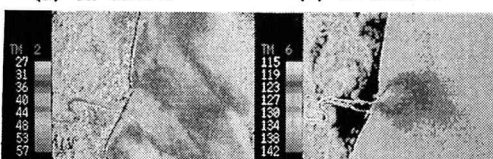


図-1 メッシュ・データの作製

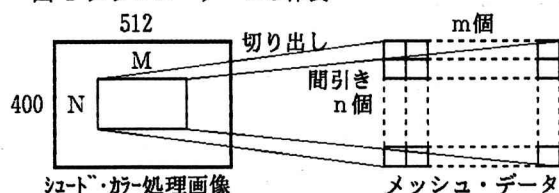
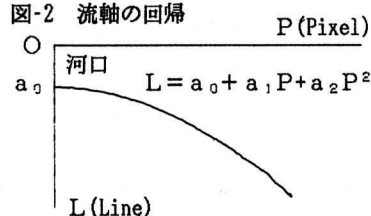


図-2 流軸の回帰



$$W_k = 0 \quad (U_{Mth} < U_k) \quad \text{----- (3)}$$

次に、他河川の放流水（尾呂志川など）や沿岸流の影響部分を除くため、その最大CCT値を $U_{sh}$ として式(4)の条件も必要である。

$$W_k = 0 \quad (U_k \leq U_{sh}) \quad \text{----- (4)}$$

尚、等濃度線が抽出した長方形領域のPixel方向の辺と交わる場合には、交わらない最低CCT値を $U_{Bnd}$ として式(5)の条件も必要である。これは当該河川の拡散域を長方形領域として抽出したとき、拡散領域がこの境界によって切断された影響を除くためである。

$$W_k = 0 \quad (U_k < U_{Bnd}) \quad \text{----- (5)}$$

以上の操作によって、陸域や他河川の拡散域を除去できた（図-3(c)）。最後に、当該河川の拡散域についてCCT値が大きくなるにつれて重み $W_k$ が大きくなるように定めると、結局、重み $W_k$ は次の様に定義できる。

$$W_k = 0 \quad (U_k < U_{Bnd}, U_{Mth} < U_k) \quad \text{----- (6)}$$

$$W_k = U_k - U_{Bnd} \quad (U_{Bnd} \leq U_k \leq U_{Mth})$$

水温の流軸もTM-band 6 を用いて同様に求める事ができる。ただし、季節によっては、河口でのCCT値が小さく（水温が低く）、沖に向かってCCT値が高く（水温が高くなる）場合がある。その場合には式(6)の代わりに式(7)の重み $W_k$ を用いる。

$$W_k = 0 \quad (U_k < U_{Mth}, U_{Bnd} < U_k) \quad \text{----- (7)}$$

$$W_k = U_{Bnd} - U_k \quad (U_{Mth} \leq U_k \leq U_{Bnd})$$

以上の様にして定めた重み $W_k$ と式(2)より、偏差2乗和 $S$ は次式で表される。

$$S = \sum W_k \delta_k^2 = \sum W_k \{L_k - (a_0 + a_1 P_k + a_2 P_k^2)\}^2 \quad \text{----- (8)}$$

この偏差2乗和 $S$ が最小になる条件は、

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = \frac{\partial S}{\partial a_1} = \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0 \quad \text{----- (9)}$$

である。この条件をもとに式(8)を計算し、整理すると以下の正規方程式に帰着する。

$$\sum \begin{bmatrix} W_k L_k \\ W_k P_k L_k \\ W_k P_k^2 L_k \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} W_k & W_k P_k & W_k P_k^2 \\ W_k P_k & W_k P_k^2 & W_k P_k^3 \\ W_k P_k^2 & W_k P_k^3 & W_k P_k^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{----- (10)}$$

この正規方程式を解くことにより、回帰係数 $a_0, a_1, a_2$ が定まる。

図-3(a) 解説図

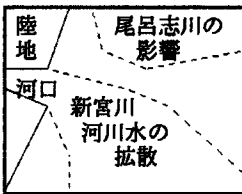


図-3(b) 元データ

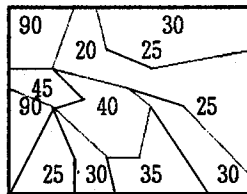


図-3(c) 他河川等の除去

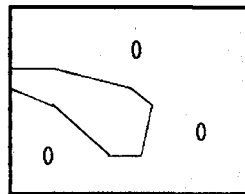


図-3(d) 重み $W_k$

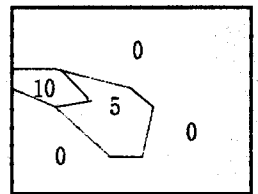


図-4(a) 重み関数 ( $U_{Mth} > U_{Bnd}$ )

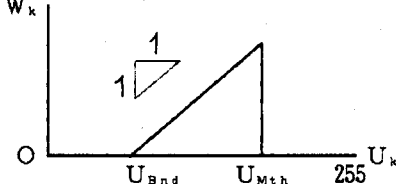
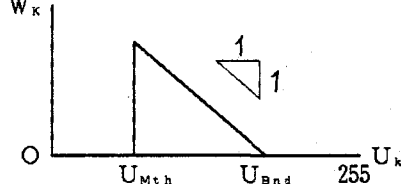


図-4(b) 重み関数 ( $U_{Mth} < U_{Bnd}$ )



#### 4. CCT値分布図を描く方法

図-1のメッシュの任意の格子に注目し、その4つの節点に図-5(a)の様に番号①～④をつけ、その点でのCCT値を $U_1, U_2, U_3, U_4$ とする。 $U_2$ と $U_3$ を比較して $U_2 \neq U_3$ の時には、点②と点③を結ぶ対角線と交差して等CCT値線を引くことができる。この例ではCCT値=25の等値線が対角線と交差するはずである。このCCTの等値線は辺①-②か辺①-③の何れかと、辺②-④か辺③-④の何れかの2箇所で見交差する。その内のどちらに交点が生じるかを $U_1, U_2, U_3, U_4$ と等CCT値の値 $U_w=25$ の5個の数値の大小関係で判定できる。図-5(b)の例では、

$$(U_w - U_1)(U_w - U_2) < 0, (U_w - U_1)(U_w - U_3) > 0 \quad \text{----- (11)}$$

であるから、辺①-②上に交点があり、

$$(U_w - U_2)(U_w - U_4) < 0, (U_w - U_3)(U_w - U_4) > 0 \quad \text{----- (12)}$$

であるから、辺②-④上に別の交点があることが分かる。この2交点を結べば等CCT値線が得られる。同様の事を対角線①-④についても行なったのが図5-(c)である。以上の操作を全格子について繰り返すことにより等CCT値分布図(CCT値コンターマップ)が得られる。

#### 5. 沿岸放流水調査時の媒介選定が拡散域評価に及ぼす影響

写真-1(a),(b)及び写真-2(a),(b)について、CCT値平面分布を求めた結果を図-6(a),(b)及び図-7(a),(b)に示す。図中には前で述べた方法によって求めた流軸線も併記されている。これらの図から、TM-band 2(濁度)とTM-band 6(水温)の流軸および等CCT値の水平分布は必ずしも一致しないことが明らかである。放流量が少ない時(図-7(a),(b))において、その差が特に顕著である。また、濁度分布は他の河川からの浮遊砂の影響を受けるが、水温分布の方は殆ど受けないことも分かる。以上のことから考えて、特定の放流水の拡散域を調査する場合には、水温を媒介として調査を行なう方が良いことが分かる。

また、上記の様なband間の相違を定量的に把握する為に、河口からCCT値がほぼ一定となる点までの距離を各観測日のband 2とband 6について求めた。両者の距離の差は、河川水と周囲の水との水温差や濁度差が、拡散によって消滅するのに要する距離の差に相当する。図-8は1988年9月26日の流軸上のCCT値変化を示したものであるが、band 6の方が河口近くで周囲の水に同化している。また、表-2に他の観測日の値を含めて

図-5(a)

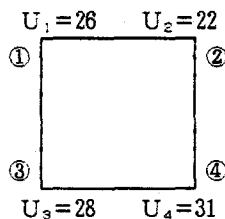


図-5(b)

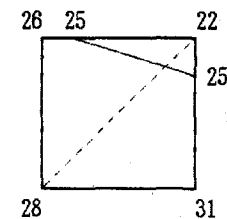


図-5(c)

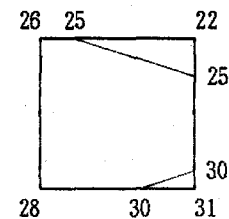


図-6 1988年9月26日の平面的分布

(a) TM-band 2

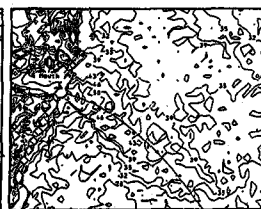


(b) TM-band 6

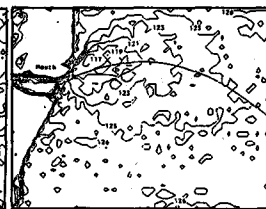


図-7 1988年4月19日の平面的分布

(a) TM-band 2



(b) TM-band 6



TM-band 2 と band 6 の比較を示すが、河口流量が大きく他河川の影響を受けていない日に関しては水温の方が早く周囲の水に等しくなる傾向がある。水温の場合、水面での熱収支がある為に濁度よりも狭い水域内で周囲の水に同化していく事は従来から定性的には指摘されて来ているが、本論文で提案した解析によれば表-2に記した様にそれを定量的に評価し得る。

尚、図-8中の相対輝度(相対 CCT値)とは、各bandについて「河口において1、十分沖で希釈された所において0」となるように CCT値を換算した無次元量であり、式(13)によって求められる。

$$U_{REL} = (U_K - U_{Off}) / (U_{Mth} - U_{Off}) \quad \text{----- (13)}$$

ここに  $U_K$ ,  $U_{Mth}$ ,  $U_{Off}$  は任意の位置、河口、十分沖における絶対輝度(CCT値)、 $U_{REL}$ はその位置における相対輝度である<sup>4)</sup>。

## 6. 結語

人工衛星データを用いて、放流水拡散域を数値的に解析する方法を提案した。その適用例として新宮川河口沖の解析を行なった。その結果、水温と濁度より評価される放流水拡散域は一致せず、特に、放流水の流量が少ない時にその差が大きくなることを定量的に示し、また、放流水拡散域の調査には水温の方が適している事を指摘した。なお、本論文にて構築した解析プログラムは、単に放流水拡散の解析のみでなく、他の水理現象を人工衛星データにより解明するためにも適用できる。

本研究は、1990年度文部科学研究「閉鎖性内湾における密度流現象に関する研究」(代表者：室田明)により行なわれたことを付記する。

図-8 流軸上のCCT値変化(1988年9月26日)

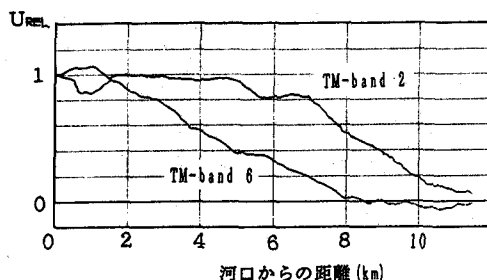


表-2 CCT値が一定となる点までの  
距離(温度と濁度の拡散距離)

| 日 付        | Band 2 | Band 6 | 流量 |
|------------|--------|--------|----|
| 1988.04.19 | 3.0 km | 6.8 km | 小  |
| 1988.06.06 | 14.6   | 4.0    | 大  |
| 1988.09.26 | 10.7   | 8.3    | 大  |
| 1989.05.08 | 5.2    | 15.4   | 小  |
| 1989.08.28 | 14.6   | 8.8    | 大  |

## 参 考 文 献

- 1) Onishi, S. : Roles of Large Scale Eddies in Mass Exchange between Coastal and Oceanic Zones, Physics of Shallow Estuaries and Bays edited by J. van de Kreeke (Springer-Verlag), pp.168~177, 1984.
- 2) 大西外明・西村 司 : リモートセンシングによる河口拡散調査と密度流論的検討, 土木学会論文報告集, 第289号, pp.75~87, 1979.
- 3) 宇田高明・古川博一・竹淵 勉 : ランドサットによる沿岸水理の観測, 第32回海岸工学講演論文集, pp.772~776, 1985.
- 4) 田中修三 : 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, 日本リモートセンシング学会出版委員会, pp.164~171.