

ランドサットTMデータによる河口流出の解析法の提案——新宮川への適用*

大西外明**・河合弘泰***

ランドサットTMデータを用いて、河口流出水の流軸を回帰し、相対輝度を指標として流軸上の拡散距離および拡散面積を評価する。また、可視域のバンドの比または差により水域を分類する方法を提案する。新宮川を例として解析した結果、水温により評価される拡散域が濁度のそれよりも狭く、平水時においては濁度分布が河口砂洲等の影響により水温分布と全く異なる分布パターンを成すことが分かった。

Keywords: river effluent axis, diffusion area, water turbidity, water temperature, salinity

1. 緒言

人工衛星リモートセンシングを利用した河口流出の解析は、ランドサットMSSデータの利用を中心として行われてきた。大西・西村は富山湾に注ぐ庄川・小矢部川¹⁾、田中・荻原は石狩川²⁾を対象とし、模型実験との併用により、リモートセンシングによっては得られない水深方向の挙動についての考察も行っている。宇多・古川らは大井川³⁾・安倍川⁴⁾、大西・馬場は新信濃川他日本海側の河川⁵⁾、神田・小山田らは木曾三川の伊勢湾への流出⁶⁾、大西・大浦らは九頭竜川・手取川⁷⁾について、水質指標の現地観測データを積極的に活用した考察を行っている。しかし、これらの研究の多くは、流れの可視化、画像の観察による流れの定性的な把握に大きな部分を割いており、人工衛星データをデジタルのまま活用するという面においては未開拓な可能性を残している。それに対して、沢本・村越らは富士川・天竜川⁸⁾、田中・荻原は石狩川²⁾を対象として、バンド間の相関分析、主成分分析、流軸上の濁度の遞減パターン、河口流量と拡散面積の関係について検討を行っている。

以上のような背景を踏まえ、著者らはランドサットMSSより解像度の優れたランドサットTMデータを用い、河口流出の定量的な解析手法についてさらに検討を加えるものである。まず、重み付き最小2乗法により流出水の流軸を求める。この方法により研究者の主観の入らない一意的な流軸の決定が可能である。次に流軸上における各bandのCCT値の変化により河口から流軸に沿った拡散影響距離を評価する。また、拡散影響面積の

計算も行い、河口流量との関係についても考察を行う。流軸上の変化と拡散影響面積については、ランドサットMSSデータの第1主成分値を濁度に結び付くものと仮定して解析された例^{2),8)}が報告されているが、本研究においてはランドサットTMデータを用いているために、遠赤外域による水温の観測も併せて可能である。従って、濁度と水温を用いて拡散域を評価した際に生ずる差についても検討を行うことができる。また、河道域、拡散域、環境水域といった水域の分類についても、従来の研究⁸⁾においては1つのクラスターを n (n :着目するbandの数)次元的な広がりを持つ等確率長円として扱っているが、本研究においては、1本の傾向線として扱う方法を提案する。

その解析例としては新宮川(熊野川)を取り上げる。新宮川は紀伊山地に源を發し熊野灘へ流出する河川であり(図-1参照)、河口幅は約600(m)、流域面積は2360(km²)、相賀地点(河口から約10km上流)における年平均流量は156(m³/s)である。

尚、リモートセンシングにより得られる情報は水面の極近傍における平面的な分布であり、密度流現象である河川水の流出を厳密に理解するためには、水深方向を含めた3次元的な検討が必要である。この点については今後研究を行う予定であり、本論文においてはリモートセンシング・データの解析についてのみ扱うものとする。

2. ランドサット・データ

ランドサットは高度705(km)で準極軌道を周回する地上探査衛星である。1972年に打ち上げられた1号に始まり、現在は5号が使用されている。この衛星にはTM, MSSの2種類のセンサが搭載されているが、本論文においては表-1に示すTMデータを用いる。

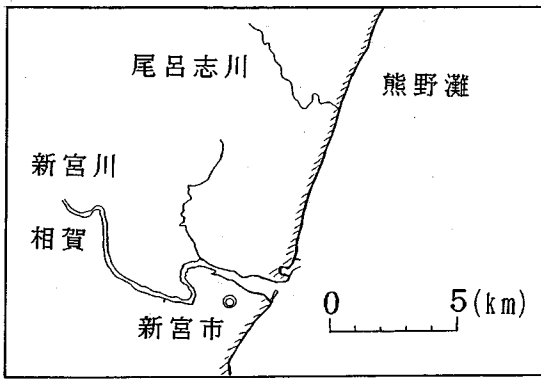
(1) 地上空間分解能

TMセンサの地上空間分解能は、band 6が120(m)

*本研究の一部はすでに発表しており^{9),10)}、本編はこれにその後の成果を加筆したものである。

**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)

***学生員 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (現)運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室



図—1 新宮川地図

表—1 TM センサの band

電磁波名	band	波長帯(μm)	分解能(m)	用途
可視	青	1	0.45-0.52	濁度
	緑	2	0.52-0.60	
	赤	3	0.63-0.69	
近赤外	4	0.76-0.90	30	加74μ
中間赤外	5	1.55-1.75	30	なし
	7	2.08-2.35	30	
遠赤外	6	10.4-12.5	120	水温

であるが、その他の band は 30 (m) である。従って、本論文で取り上げる新宮川の拡散域 (10~500 km²) の観測は勿論、それよりも小規模な拡散域の観測も可能である。しかし、河口付近の河道域を併せて観測する場合には、比較的大規模な河川に限られる。これは、流水幅が少なくとも地上空間分解能の3倍程度以上確保されないと、水中の懸濁粒子による散乱に対して、川原や川底における反射光が卓越してしまうためである。

(2) ラジオメトリック分解能

センサで感知された電磁波強度は、CCT 値 (輝度) と呼ばれるデジタル・データに変換される。TM のラジオメトリック分解能 (輝度階調) は 256 階調 (8 bit) である。水域における CCT 値は、この全階調に満遍なく分布するのではなく、ある一定の範囲に分布する。この分布幅は可視領域で大きく、赤外領域では小さい。

(3) スペクトル分解能

ランドサット TM は 7 つの波長帯に分けて電磁波強度を観測している。本研究においては可視領域の band 1~3 および遠赤外領域の band 6 のみを用いる。

可視領域の CCT 値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、河口付近河道域および河口流出水の拡散域においては、一般に濁度の変動による影響が十分卓越しており、大気による散乱光 (パスラジアンズ)、水面における反射光についても、この

表—2 band 間の相互係数
(左下：洪水時, 右上：平常時)

	band 1	band 2	band 3	band 6
band 1		+0.972	+0.967	-0.030
band 2	+0.878		+0.990	-0.033
band 3	+0.860	+0.957		+0.057
band 6	-0.664	-0.779	-0.891	

程度の小スケールの領域内においては一般にその変動は小さい。可視領域の CCT 値と濁度 (SS) との間に比例関係の成り立つことは宇多・古川ら^{3),4)}, Engman・Gurney¹¹⁾により報告されている。但し、この関係式は対象とする 1 シーン内において成立するものであり、異なる日時や異なる河川に適用する場合には、太陽高度、大気の状態に関連した補正が必要である。

遠赤外領域は別名熱赤外領域とも呼ばれており、水面温度はこの領域の CCT 値の 2 次関数で表わされることが知られている。ただし、河口流出に関しては CCT 値のとり得る範囲が狭いため、1 次関数として十分近似し得る。

3. 流れのパターン

(1) band 間の相関性

ここで、濁度と水温分布パターンの相関性を定量的に評価するために、拡散域の相関係数を計算する。

表—2 は、洪水時 (1988 年 9 月 26 日) 及び平常時 (同年 4 月 19 日) の直線相関係数を示したものである。可視領域同士の相関係数は、いずれの日においても高い値を示している。一方、濁度と水温との相関性については、洪水時には両者の分布に相似性が保たれるために相関係数は高いが、平常時は河口砂洲の連行による影響が相似性を大きく乱すため、相関係数は低くなっている。

濁度と可視領域の band の CCT 値との間には近似的に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、相関係数は高くなる。但し、相関係数はあくまで直線性の度合いを示すものであるもので、着目する 2 つの band の関係が若干弧を描いた曲線である場合には相関係数は低くなり得る。(拡散域において band 間の関係が必ずしも直線でないことについては、後ほど図—15 においても示す。)

河川放流水の挙動を水面のみの現象として扱った場合の濁度 C と水温 T の支配方程式は次式で示される¹⁴⁾。

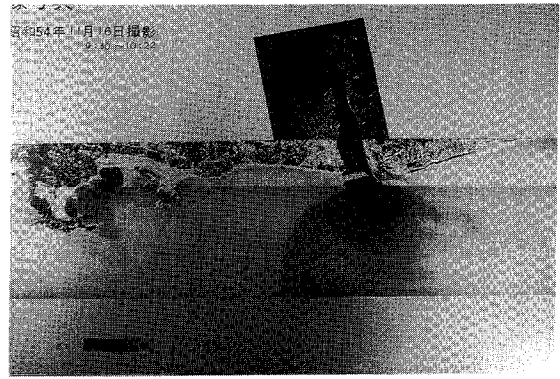
$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} - D \nabla^2 C + C_{sin} = 0 \dots \dots \dots (1-a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} - \chi \nabla^2 T + E_{surf} = 0 \dots \dots \dots (1-b)$$

ここに t は時刻, x, y は平面の座標系, u, v はそれぞれ x, y 方向の流速, D は濁質拡散係数, χ は熱拡散係数,

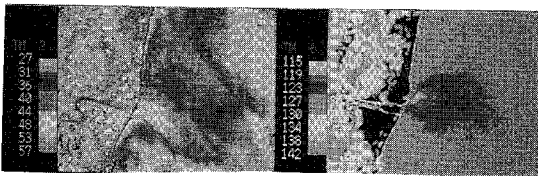


(a) 1979年10月5日



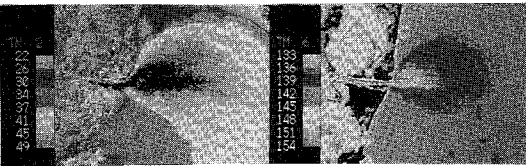
(b) 1979年11月16日

写真一 河口に発達した砂洲 (熱映像)



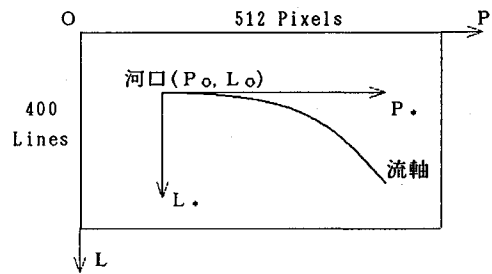
(a) TM-band 2 (b) TM-band 6

写真二 1988年4月19日の流れのパターン



(a) TM-band 2 (b) TM-band 6

写真三 1988年9月26日の流れのパターン



図二 P-L 座標系

C_{sin} は土粒子沈降に関する項, E_{Srf} は水面における大気との熱収支である。これら2式は、左辺第5項を除いて類似しており、拡散域の濁度分布と水温分布の相似性を示唆している。

(2) 河口砂洲の影響

写真一 (a), (b) は新宮川河口付近の航空写真 (熱映像)¹³⁾ である。河口には砂洲が発達しており、上流からの河川水はこの砂洲の切れた狭い隙間を通して熊野灘へ流出している。この砂洲が濁度分布と水温分布の相似性に関与しているものと考えられる。

写真二 (a), (b) は1988年4月19日のCCT値分布を示したものである。その日の相賀地点における流量は、397 (m³/s) と中程度である。濁度分布 (band 2) からは河口右岸方向へ、水温分布 (band 6) からは直進若くは左岸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に向かって岬状に延びており、この砂洲の先端と河口左岸との間を通過する河川水の右側部分のみがこれを連行して高濁度になっている可能性が

ある。

写真三 (a), (b) は1988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、流量は1234 (m³/s) に達した。濁度分布と水温分布との間に明確な相違はみられない。洪水時には上流から多量の土砂を含有しており、砂洲連行の影響がほとんどきかないほど高濁度になっていたものと考えられる。

この河口砂洲の影響の有無に関しては、沿岸流 (潮汐に起因する往復流)、コリオリ力の影響を含め、模型実験および数値解析により今後検証する予定である。

4. 放流水流軸の算定法

河川放流水の流軸を求めることは、放流水の挙動を把握する際の、最も基本的な事項の一つである。人工衛星データを用いて流軸を求める場合には、研究者個人の主観に左右されない方法によることが望まれるが、従来の研究^{11)~13)}においてこれに関する検討は見受けられない。そこで、著者らは以下に論じる方法を提案する。

(1) 重み付き最小2乗法

自然界における噴流やプルーム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、水面および水面付近の情報のみが得られるリモートセンシングの特性によるものである。そして、流軸を「河口流出水拡散域の各ピクセル (画素)

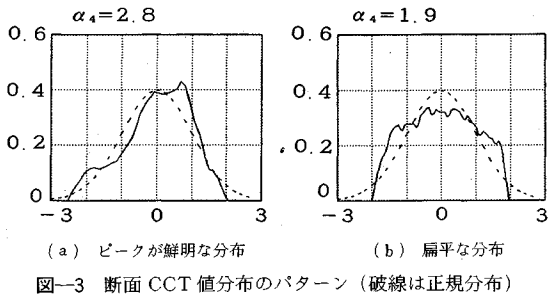


図-3 断面 CCT 値分布のパターン (破線は正規分布)

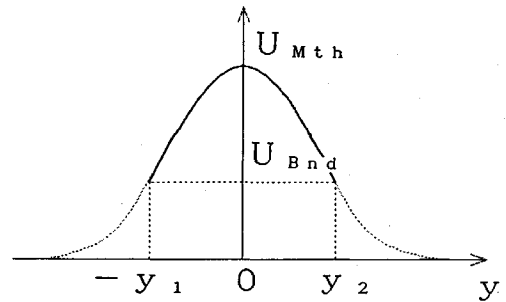


図-4 計算の仮定

に対し、その点の CCT 値に対応する適当な重みを与え、最小 2 乗法により回帰した 3 次曲線^{9),10)}と定義する。band 1~3 からは濁度の流軸, band 6 からは水温の流軸が得られる。

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・データで構成されている。しかし、この 204,800 個のデータ全てをパソコンで扱うことは、流軸に要求される精度から考慮して無意味であり、元データを適当な間隔で間引き、1 辺が 20~30 要素程度のメッシュ・データを再構成して計算に用いることにする。

図-2 に示す P (Pixel)- L (Line) 座標系において、放流水流軸を次式に示す 3 次放物線で近似する。

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

ただし、 P_* および L_* は河口 (P_0, L_0) を原点とする座標系である。

$$P_* = P - P_0 \dots (3-a)$$

$$L_* = L - L_0 \dots (3-b)$$

あるメッシュ要素 k と回帰放物線との偏差を δ_k , 重み関数を W_k とすると、偏差 2 乗和 S は次式で定義できる。

$$S = \sum W_k \delta_k^2 \dots (4-a)$$

$$\delta_k = L_{*k} - (a_1 P_{*k}^3 + a_2 P_{*k}^2 + a_3 P_{*k}) \dots (4-b)$$

この偏差 2 乗和 S が最小になる条件より、次式で示す正規方程式に帰着する (ただし、添え字 k は省略する)。

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

以上の式は、河川放流水が P 方向 (東西方向) に流出する場合であり、 L 方向 (南北方向) に流出する場合は以上の式の P と L とを入れ換えれば良い。

(2) 重み関数の定義

ここで、河川放流水の拡散域以外の部分を除去するために、メッシュ要素 k の CCT 値 U_k に対応する重み関数を考える。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する¹¹⁾ことを考慮し、重み関数 W_k を次式によって定義する。

$$W_k \equiv \begin{cases} 0 & (U_k < U_{Bnd}, U_{Mth} < U_k) \dots (6) \\ (U_k - U_{Bnd})^\beta & (U_{Bnd} \leq U_k \leq U_{Mth}) \end{cases}$$

ここに U_{Mth} は河口付近の最大 CCT 値, U_{Bnd} は隣接河川放流水または沿岸漂砂影響域の最大 CCT 値, β は着目する河川, 撮影日時, band の CCT 値の分布型により定める係数である。この係数については次節以降でも触れる。

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場合は、次式の重み関数を用いる。

$$W_k \equiv \begin{cases} 0 & (U_k < U_{Mth}, U_{Bnd} < U_k) \dots (7) \\ (U_{Bnd} - U_k)^\beta & (U_{Mth} \leq U_k \leq U_{Bnd}) \end{cases}$$

一方、河口の水温の方が高い場合には、可視領域の重み関数である式 (6) を用いる。

(3) 放流水の断面 CCT 値分布

流軸に対して直交方向の断面における CCT 値分布は、静水域における放流水の場合、噴流理論から正規分布になることが予想される。しかし、実在の河川放流水では、沿岸流, コリオリ力, 複雑な地形条件, 隣接河川の影響等のために必ずしも正規分布を成さない。図-3 は、横軸に流軸からの距離, 縦軸に $(U_k - U_{Bnd})$ をそれぞれ標準化して示したものであるが、図-3 (a) のようにピークが比較的鮮明で正規分布に近い場合 (1988 年 4 月 19 日の band 2) もあり、また図-3 (b) のように扁平となる場合 (1988 年 9 月 26 日の band 2) もある。

ピークが明瞭な場合、ピークとなる点を連ねて流軸を求めれば良いわけであるが、 β を大きな値 ($\beta \geq 5$) とすればピーク付近の重みが周りと比較して卓越するので、これに近い結果が得られるものと予想される。

他方、扁平な分布型の場合には β を小さな値 ($\beta = 0$) とすれば、放流水拡散域の重みが 1, その他の領域は 0 となり、これは厚さ一様な板の重心を求めることと同等である。この場合には、ピークとなる点を連ねるよりはむしろ重み付き最小 2 乗法の方が安定性がある。

(4) 係数 β と流軸の計算精度

この係数 β が流軸の計算精度に及ぼす影響について調べてみる。実際、放流水流軸に直角方向の CCT 値分

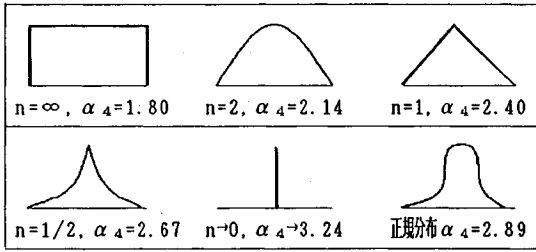


図-5 様々な分布型の尖度

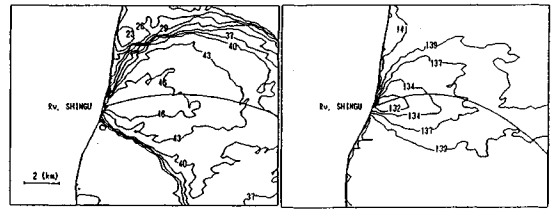


図-8 1988年9月26日の CCT 値分布と流軸

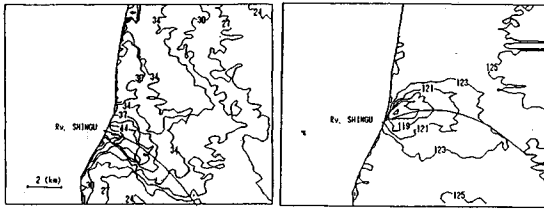


図-6 1988年4月19日の CCT 値分布と流軸

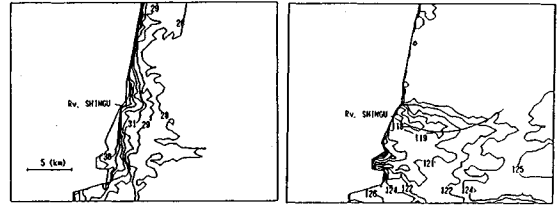


図-9 1989年5月8日の CCT 値分布と流軸

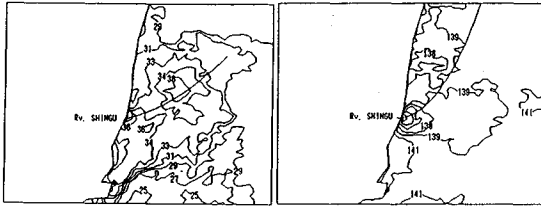


図-7 1988年6月6日の CCT 値分布と流軸

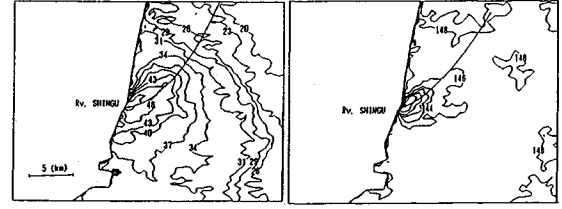


図-10 1989年8月28日の CCT 値分布と流軸

分布は図-4に示すように左右非対称であることが多い。また、隣接する河川放流水の拡散域や沿岸漂砂の影響を除くために、境界 CCT 値 U_{Bnd} を高い値に設定するが、この U_{Bnd} は断面曲線の変曲点より上部にあるとし、これより上部の曲線を次式で示す 2 次曲線 $u(y)$ で近似する。

$$u(y) = \begin{cases} U_*(y_1 - y)^2 / y_1 & (-y_1 \leq y \leq 0) \\ U_*(y_2 - y)^2 / y_2 & (0 \leq y \leq y_2) \end{cases} \quad (8-a)$$

$$U_* = U_{Mth} - U_{Bnd} \quad (8-b)$$

ここに、 y は流軸に対して直交方向にとった座標系であり、流軸上を $y=0$ とする。重み付き最小 2 乗法で得られる流軸の y 座標 y_{AXS} は以下のように計算される。

$$y_{AXS} = \frac{\int_{-y_1}^{y_2} u(y) \cdot y^2 dy}{\int_{-y_1}^{y_2} u(y) dy} = \lambda_\beta \cdot \delta_y \quad (9-a)$$

$$\lambda_\beta = \frac{\Gamma(\beta + 3/2)}{\pi \cdot \Gamma(\beta + 2)} \quad (9-b)$$

$$\delta_y = y_2 - y_1 \quad (9-c)$$

ここに、 Γ はいわゆるガンマ関数である。従って、軸対称な分布型の場合 ($\delta_y=0$) は係数 β にかかわらず真の流軸に一致するが、非対称な場合は左右の幅の差 δ_y に

比例して誤差が生じる。この誤差の対処としては、誤差係数 λ_β を小さくする方法、 U_{Bnd} の値を U_{Mth} に近づけて δ_y の値を小さくする方法の 2 つがある。

係数 λ_β は、次式に示す漸化式によって表わされる。

$$\lambda_0 = 1/2 \quad (10-a)$$

$$\lambda_{\beta+1} = R_\beta \cdot \lambda_\beta, \quad (\beta=0, 1, 2, \dots) \quad (10-b)$$

$$R_\beta = (2\beta + 3) / (2\beta + 4) \quad (10-c)$$

ここに、公比 R_β は条件 $0 < R_\beta < 1$ を満たしており、 $\beta \rightarrow \infty$ において $\lambda_\beta \rightarrow 0$ に収束することが分かる。

最後に、この係数 β を実際にどのように設定するかという問題が残るが、断面分布型の尖度 (裾引き度) を指標としてピーク型、扁平型を判別することが考えられる。そこで、関数 $u(y)$ を式 (8-a) において軸対称 ($y_1 = y_2$) な曲線であると仮定し、次式で再定義する。

$$u(y) \equiv U_* \cdot (y - y_1)^n / y_1, \quad (n > 0, -y_1 \leq y \leq y_1) \quad (11)$$

このとき、尖度 α_4 は次式によって表わされる。

$$\alpha_4 = \frac{\int u(y) \cdot y^4 dy / \int u(y) dy}{\left[\int u(y) \cdot y^2 dy / \int u(y) dy \right]^2} = \frac{9(n+3)^2}{5(n+5)(n+1)} \quad (12)$$

表-3 拡散影響距離 (km)

日付	濁度			水温	第1主成分値
	band 1	band 2	band 3	band 6	
1988.04.19	4.3	3.0	1.3	6.8	2.6
1988.06.06	14.6	14.6	11.9	4.0	14.6
1988.09.26	9.6	10.7	10.2	8.3	10.5
1989.05.08	11.5	5.2	4.4	15.4	4.6
1989.08.28	15.0	14.6	12.1	8.8	14.2

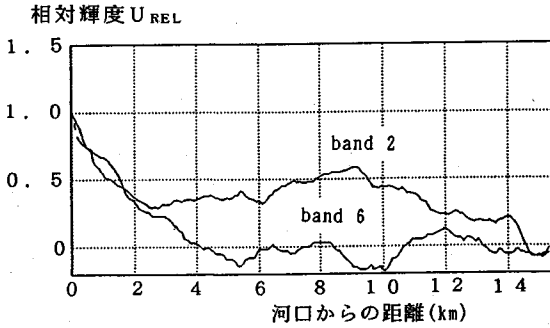


図-11 (a) 1988年6月6日の相対輝度変化

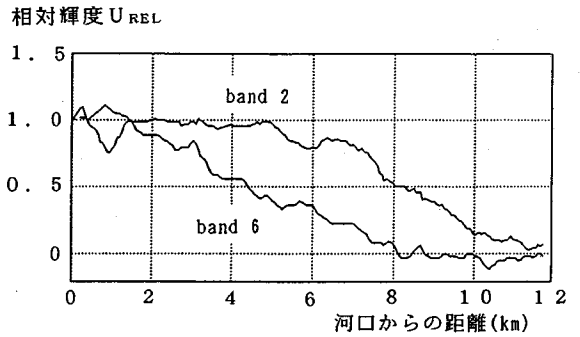


図-11 (b) 1988年9月26日の相対輝度変化

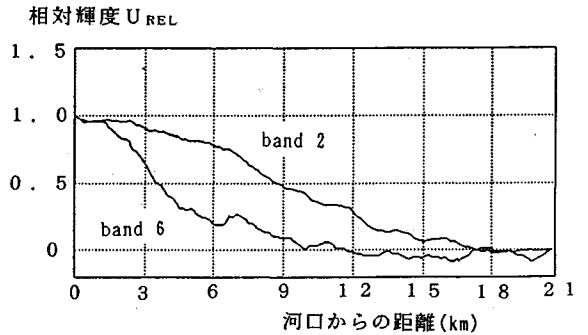


図-11 (c) 1988年8月28日の相対輝度変化

図-5は典型的な断面型とその尖度 α_4 を示したものである。尖度 α_4 がおよそ2より小さい場合は断面型はほぼ扁平であり、係数 $\beta=0$ とすれば良い。一方、それより大きい場合はピークが鮮明であるので、係数 β を適当に大きな値 (例えば $\beta \geq 5$) とすれば良い。

(5) 解析例

図-6~10 (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 band 2, 6 の CCT 値分布及び流軸を示したものである。図-6 (b) については $\alpha_4=1.98$ と扁平な分布であるので $\beta=0$, それ以外については $\beta=5$ で計算した。

河口流量の多い図-7, 8, 10の3日に関しては、濁度と水温の流軸がほぼ一致しているが、河口流量の少ないその他の日においては明確に異なっている。なお、図-9 (a) のように海岸線に付着したまま流れるような拡散域形状の場合、流軸の計算は困難である。

これらの図から見るように流軸の向きに定常性はなく、主に潮汐に起因する往復流が拡散域の方向を支配しているものと考えられる。また、図-7, 10において放流水の先が2又に分岐しているのは興味深い。

5. 拡散影響域の評価法

拡散影響域を定義する方法として、濁度または水温そのものの値を用いる絶対的な基準によるものと、希釈度を用いる相対的な基準によるものの2通りがある。CCT 値自体は太陽光線の強度や大気の状態に左右され

ており、河口や沿岸水域における濁度や水温も時々刻々と変化する。また、絶対的基準を用いる場合には現地観測データも不可欠であることを考慮して、本論文では相対的な基準を採用する。そして、希釈度を表わす量として次式で与える相対輝度 U_{REL} を用いる⁸⁾。

$$U_{REL} = (U_k - U_{off}) / (U_{Mth} - U_{off}) \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 U_k はその点の CCT 値、 U_{Mth} 、 U_{off} はそれぞれ河口および十分沖合における CCT 値である。

新宮川の河口付近と沖合いにおける CCT 値の差 ($U_{Mth} - U_{Bnd}$) は、band 2 において 25~30、band 6 において 10~15 程度である。拡散域と環境水域とを分ける相対輝度のしきい値は、低く設定するほど拡散域に該当する画素数が増えるので画素数そのものに対する精度は良くなるが、あまり低くすると水域の区別の精度に問題が生じるので、本論文においては 0.1 とする。

(1) 拡散影響距離

本論文においては、拡散影響距離を「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、1/10 に希釈されるのに要する距離である。この距離は、河川放流水の影響がどの程度沖まで及んでいるかを評価する上で特に重要な指標と言える。

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日と 1989年5月8日を除けば、濁度より水温の方が

表一4 河口流量と拡散面積の関係

指標 日付	河口流量 (m ³ /s)	拡散面積 (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

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、従来から定性的には指摘されてきたことであるが、CCT値から算出した相対輝度を用いることにより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の順に、すなわち電磁波長の短い順に、大きな値で評価される傾向が見られるが、第1主成分値で評価された値に最も近いのがband 2である。これが、著者らが濁度の指標として可視領域の内でband 2を主に用いている理由でもある。

次に、図一11 (a), (b), (c) は流軸上の相対輝度変化を示したものである。噴流理論から、相対輝度が沖合いに行くにつれて急激に0に収束するものと予想されるが、解析結果は必ずしも連続的な遞減曲線を描いていない。濁度分布 (band 2) について見ると、図一11 (a) では河口から8~9 (km) の地点にピークを有しているが、この原因としては、潮汐に起因する往復流の向きの変化、河口における流量及び水質の非正常性が考えられる。図一11 (b) では河口から5 (km) を過ぎてから低下し始めており、高濁度域においてはCCT値が濁度の対数に比例して変化することも示唆している。一方、水温分布 (band 6) はいずれの日も指数連続遞減型の変化を示している。

なお、従来^{2), 8)}の研究はラジオメトリック分解能の低いMSSデータで行われており、相対輝度が0に近い領域での変化についての検討は困難であった。

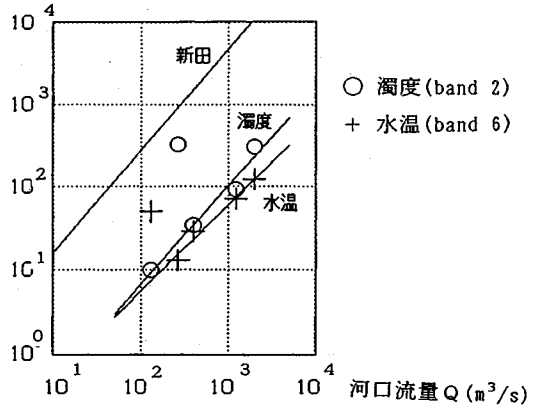
(2) 拡散影響面積

河口流量と拡散影響面積の関係を定式化することは、これまで重要な研究課題の一つとされて来た。本論文においては、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水域と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。

表一4及び図一12に河口流量 (相賀) Q (m³/s) と濁度の拡散面積 S_c (km²)、水温の拡散面積 S_T (km²) の関係を示す。両者の間には次式に示す関係がある。

$$S_c = 0.0296 Q^{1.18}, \quad (r^2 = 0.96) \dots\dots\dots (14-a)$$

拡散面積 S (km²)



図一12 河口流量と拡散面積の関係

$$S_T = 0.0483 Q^{1.03}, \quad (r^2 = 0.97) \dots\dots\dots (14-b)$$

ここに、 r は直線相関係数である。これらの式より、同一流量の場合、水温によって評価される拡散面積の方が、濁度による評価面積よりも狭いことが明らかである。

次式は、希釈度の基準を1/100とした拡散面積 S_N を示す新田の式¹⁵⁾を変形したものである。

$$S_N = 0.965 Q^{1.23} \dots\dots\dots (15)$$

基準希釈率を1/100とした式 (15) と、1/10とした式 (14-a) の場合の面積比は、次式で表わされる。

$$S_N/S_c = 32.6 Q^{-0.07} \dots\dots\dots (16)$$

従って、相対輝度1/10で評価される拡散域面積は、新田の式で評価される面積の1/20~1/30程度になることが分かる。しかし、拡散面積が河口流量 Q の約1.2乗に比例している点では共通している。

6. 水塊のカテゴリー分類

(1) 河口流における卓越要素

前章においては、河口流出水の影響範囲を拡散影響距離によって評価したが、本章においては土地被覆分類において盛んに用いられているカテゴリー分類法 (クラスター分析法) の応用を検討する。

カテゴリー分類には、セル法、最短距離法、最尤法、群平均距離法等の手法が提案されている。河口流出の解析においては、河道域、希釈混合域、環境水域の3つのカテゴリーを設定すれば良い。水域の分類はCCT値の差を媒介として行うが、CCT値を支配する要素は陸域のように複雑ではなく、濁度、水温、塩分濃度の3つが卓越要素としてあげられる。さらに、可視域のみで考えれば濁度と塩分濃度の2つとなる。

(2) 水質変化の単純化モデル

そこでいま、band 1, 3のCCT値 U_1, U_3 を次式に示す濁度 C 、塩分濃度 S の一次結合で仮定する。

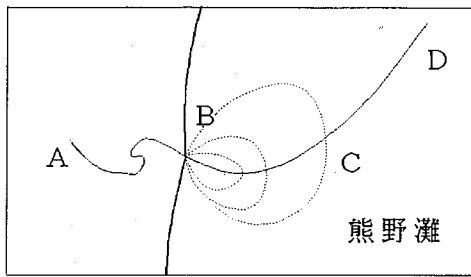


図-13 河口付近の略図

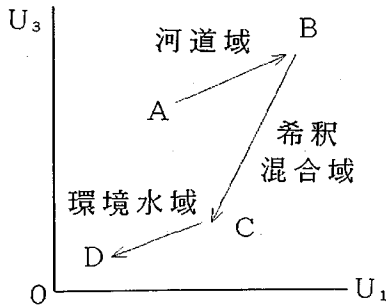


図-14 河口付近の水質変化モデル

$$U_1 = a_1 + b_1 \cdot C + c_1 \cdot S \dots\dots\dots (17-a)$$

$$U_3 = a_3 + b_3 \cdot C + c_3 \cdot S \dots\dots\dots (17-b)$$

ここに、 b_1, b_3, c_1, c_3 は定数、 a_1, a_3 は濁度、塩分濃度以外の要素である。上式は実測によって導かれた物理的関係式ではなく、著者らが仮定したモデルである。なお、上式では塩分濃度を可視領域の2つの band の関係により表わしているが、MSS の4つの band の一次結合で回帰したモデルも提案されている^{11), 12)}。上式から濁度 C を消去すると以下の関係式が得られる。

$$U_3 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{b_1} + \frac{b_3}{b_1} \cdot U_1 + \frac{b_3 c_1 - b_1 c_3}{b_1} \cdot S \dots\dots\dots (18)$$

まず、相質地点 (A) から河口 (B) に達するまでの河道域では $S \approx 0$ と考えて良いので、次式が得られる。

$$U_3 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{b_1} + \frac{b_3}{b_1} \cdot U_1 \dots\dots\dots (19)$$

すなわち、 U_1 と U_3 との間には濁度 C に依存しない固有な直線関係がある。

次に、希釈拡散域 (B→C) では濁度、塩分濃度は指数関数的に環境水に同化すると考えられる。河口における濁度を C_{Mth} 、環境水域における塩分濃度を S_{off} とすると、濁度 C 、塩分濃度 S は以下の式により近似される。

$$C \approx C_{Mth} \cdot \exp(-D_c x) \dots\dots\dots (20-a)$$

$$S \approx S_{off} \cdot \{1 - \exp(-D_s x)\} \dots\dots\dots (20-b)$$

ここに D_c, D_s は定数、 x は河口からの流軸上の距離である。式 (17-a, b), (20-a, b) より、 U_1 と U_3 との関係は以下の式で表わされる。

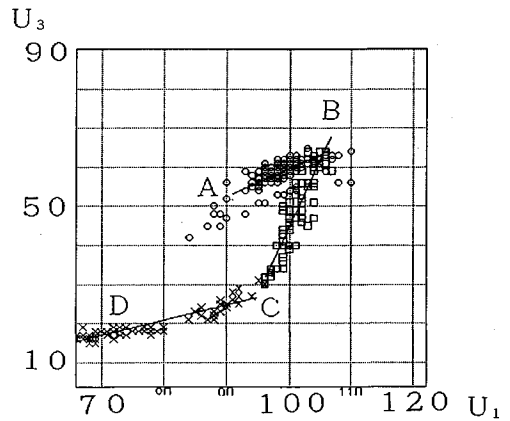


図-15 河口付近の変化の例 (1989年8月28日)

$$U_3 = \frac{b_3 C_{Mth} - c_3 S_{off}}{b_1 C_{Mth} - c_1 S_{off}} \cdot U_1 + \frac{(a_3 b_1 - a_1 b_3) C_{Mth} + (a_1 c_3 - a_3 c_1) S_{off}}{b_1 C_{Mth} - c_1 S_{off}} + \frac{(b_1 c_3 - b_3 c_1) C_{Mth} S_{off}}{b_1 C_{Mth} - c_1 S_{off}} \dots\dots\dots (21)$$

すなわち、河道域 (A→B) の傾向線とある角度で交わる直線となる。

最後に、環境水域 (C→D) では、 $S \approx S_{off}$ と考えて良いので、式 (18) より以下の関係式で表わされる。

$$U_3 = \frac{a_3 b_1 - a_1 b_3}{b_1} + \frac{b_3}{b_1} \cdot U_1 + \frac{b_3 c_3 - b_3 c_1 \cdot S_{off}}{b_1} \dots\dots\dots (22)$$

従って式 (17) の仮定の下では河道域 (A→B) と平行な直線となる。

(3) 解析例

図-15 は1989年8月28日のTMデータを用いて解析した結果を示す。図-15において、河道域 (A→B) は環境水域 (C→D) と厳密には平行ではなく、また、河道域 (A→B)、拡散域 (B→C)、環境水域 (C→D) はどれも直線ではなく、若干弧を描いた曲線となっている。このことは式 (17-a, b) の仮定が厳密には成立していないことを示唆している。また、拡散域の外縁 (C) は河口から約9 (km) 沖に相当するが、これは相対輝度1/10で評価された拡散影響距離14.6 (km) よりもかなり短い。

従来の研究においても河口周辺水域のカテゴリ分類は行われている。これらにおいては、1つのカテゴリを n (n : 着目する band の数) 次元的な広がりをもつ等確率長円とみなしている。この方法によっても分類は可能であるが、図-15に示す解析結果を考察すると、1つのカテゴリを1本の傾向線として扱った分類の方が有利であることが分かる。

表-5 相関係数・分散・共分散行列
(左下:共分散, 対角:分散, 右上:相関係数)

	band 1	band 2	band 3	band 6
band 1	+126.1	+0.965	+0.877	+0.640
band 2	+111.0	+104.8	+0.959	-0.687
band 3	+169.1	+168.6	+294.7	-0.708
band 6	- 27.4	- 26.9	- 46.4	+ 14.6

表-6 固有ベクトルと累積寄与率

主成分	1st	2nd	3rd	4th
band 1	+0.511	+0.340	-0.658	-0.437
band 2	+0.530	+0.264	+0.013	+0.806
band 3	+0.519	+0.143	+0.742	-0.399
band 6	-0.435	+0.891	+0.128	-0.008
累積寄与率	0.859	0.969	0.998	1.000

(4) 水域における比演算の意味

比演算処理により水塊の違いを可視化できることが経験的に知られている。比演算処理画像とは、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するものである。図-15 の場合、河道域の CCT 値比が 0.6 程度であるのに対し、環境水域の CCT 値比は 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には、第 1 主成分である濁度の変動の影響を除去する効果があると言える。

7. 主成分分析

水質変化を知るための媒介として、band 1~3, 6 を用いたが、これらのデータによりもたらされる水質に関する情報が、異なった性質のものであってはならない。このことを確かめる目的で主成分分析を行った。

主成分分析とは、多くの変量の値をできるだけ情報の損失なく、少数個の総合的指標(主成分)で代表させることである。従来の河口流の研究^{5), 8)}においては、MSS の band 4, 5 (可視), band 6, 7 (近赤外) の 4 つを組み合わせて主成分分析が行われている。それに対して著者らは、TM の band 1, 2, 3 (可視)に加え、水温と比例関係にある band 6 (遠赤外) の計 4 つの band を用い、放流水流軸上の水質変化の解析を試みる。

表-5 は 1989 年 8 月 28 日の相関係数・分散・共分散行列、表-6 は固有ベクトルと累積寄与率を示す。解析に使用したデータは、河道域が 210 個、海域(流軸上)が 170 個、計 380 個である。

第 1 主成分は、band 1~3 の係数(固有ベクトルの要素)がいずれも正值でかつ 0.5 程度の値を示しており、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の関係が深いものと考えられる。図-16 に示

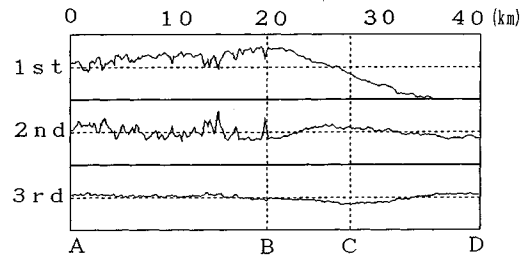


図-16 CCT 値変化

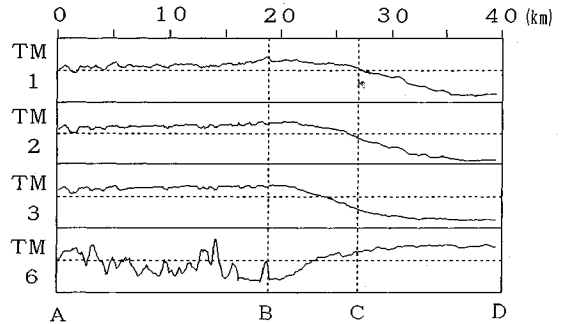


図-17 主成分値変化

す band 1~3 の CCT 値変化グラフの波形は、図-17 に示す第 1 主成分値変化グラフの波形と似ており、これらを平均した波形と考えることができる。また、この主成分の寄与率は 86 (%) と比較的高い。

第 2 主成分は band 6 の係数のみが卓越しており、水温を代表する主成分であることは明らかである。図-16 に示す band 6 と図-17 に示す第 2 主成分値変化グラフは似た波形となっている。

第 3 主成分は係数が band 1 と 3 で異符合をとり絶対値で卓越しており、両 band の差または比によって支配される成分と考えることができる。しかし、図-17 に示すこの主成分値変化グラフの波形は塩分濃度変化をそのまま表わした波形にはなっておらず、今後、現地観測データの取得を含めて検討していく予定である。

8. 結 語

地球環境問題に対する関心の高まりとともに、河川放流水が沿岸水域環境に及ぼす影響を明らかにすることの重要性も増している。

このような背景の下で、ケース・スタディという形式で解析される河川の数、増加の傾向を保つものと思われる。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重要な役割を果たし得るものと考えられる。

これに対応していくためには、人工衛星データがデジタル・データであることを生かした、客観的かつ定量的な解析手法の確立が必要と考えられる。本論文において

著者らは人工衛星データによる拡散域の評価法を提案し、新宮川を例として解析したが、この方法は新宮川以外の河川にも適用し得ると考える。

最後に、本論文の結論は、以下に掲げる3点に要約することができる。但し、これらは新宮川の解析結果に基づくものであり、他の河川については別途に検討が必要であると考ええる。

(1) 従来の河口流出の研究は、Landsat MSS の可視、近赤外領域の4つの band の第1主成分値を濁度の指標として行われているが、本論文で対象とした新宮川河口部においては第1主成分と band 2 との相関性が高く、band 2 を単独で濁度の指標として用いることができる。

(2) これまで、水温の拡散面積は濁度の拡散面積より狭いと定性的に言われてきたが、相対輝度を指標とした面積計算により、このことが定量的に示された。また、拡散域外縁の希釈率を1/10とする本論文の方法では、希釈率1/100とする新田の式によって算出される拡散面積の1/20~1/30程度の面積で評価される。

(3) 可視領域の band 1 と band 3 の比または差によって塩分濃度の検出の可能性を示すと共に、比演算により水塊の違いが明示される潜在的根拠についても触れた。尚、濁度、水温、塩分濃度の3つは、密度流としての河口流現象を扱う上で特に重要である。

参 考 文 献

- 1) 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，土木学会論文集，第289号，pp.75~87，1979.
- 2) 田中修三・荻原国広：パソコンによるランドサットデータを利用した河川流出の研究，日本リモートセンシング学会誌，第5巻，第1号，pp.69~75，1985.
- 3) 宇多高明・古川博一・竹淵勉：ランドサット・航空機・船の同時観測による沿岸海域特性の把握，第31回海岸工学講演会論文集，pp.690~694，1984.
- 4) 宇多高明・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回海岸工学講演会論文集，pp.772~776，1985.
- 5) Onishi, S. and Baba, K. : Study of Hydraulic Behaviors of River Effluent at Coriolis Force Dominating Field by Remote Sensing, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.5, No.1, pp.39~48, 1987.
- 6) 神田勝己・小山田字孝・高原千秋：リモートセンシングによる伊勢湾奥部水質調査，第34回海岸工学講演会論文集，pp.680~685，1987.
- 7) 大西外明・大浦文輝・ツァリン・ジャブ：リモートセンシングによる沿岸流動と沖合い海流の干渉の可視化と考察，第35回海岸工学講演会論文集，pp.782~786，1988.
- 8) 沢本正樹・李立亜・村越潤：駿河湾および天竜川の河口流出の解析，第32回海岸工学講演会論文集，pp.767~771，1985.
- 9) 大西外明・河合弘泰：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.173~178，1991.
- 10) 大西外明・河合弘泰：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，第38回海岸工学論文集，pp.196~200，1991.
- 11) Engman, E.T. and Gurney, R.J. : Water Quality, Remote Sensing in Hydrology, pp.175~192, 1985.
- 12) Khorram, S. : Development of Water Quality Models Applicable throughout the Entire San Francisco Bay and Delta, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp.53~62, 1985.
- 13) 電源開発株式会社関西支社・アジア航測株式会社：新宮川河口付近海域海域調査工事報告書，1980.
- 14) 水理公式集昭和60年度版，p.590~592.
- 15) 新田忠雄：海洋域における工場排水の希釈と拡散について，用水と排水，第5巻，第6号，pp.2~8，1963.

(1991.7.23 受付)

ESTIMATION METHODS OF RIVER EFFLUENT BEHAVIOR THROUGH LANDSAT TM DATA—APPLICATION TO THE SHINGU RIVER

Sotoaki ONISHI and Hiroyasu KAWAI

We propose analytical methods using satellite data to regress effluent axis with the weighted least squares method, and estimate the influence of river effluent on the ambient sea through the distance along the axis in arange between the river mouth and the downstream boundary of diffusion area. As examples the effluents from the Shingu river are analysed and show that the diffusion area estimated through water temperature may differ from that through water turbidity, especially when the discharge rate at the mouth is small. It is considered that turbidity distribution is under the influence of suspended soil particles washed out at the sand bar or beach near the mouth. The salinity is also one of indispensable parameters demonstrating the behaviors of density currents such as the river effluent, and we estimate it through the ratio of TM-band 1 to band 3.