

伊勢湾における木曾三川洪水流の流出過程と残差流

Dispersion of Flood Water and Residual Current in Ise Bay seen on Landsat Image

和田 清*・杉山 陽一**

Kiyoshi Wada and Yoichi Sugiyama

Synoptic views from Landsat are useful to grasp hydrodynamic phenomena of large scale of water area. But, Landsat images can only show a temporal scene of the changing phenomena. To compensate this deficiency, numerical simulation should be introduced. This paper show an example to solve this problem through a case study of Ise bay. The authors investigate a relation between the residual current and dispersion of flood water seen on the Landsat image data. Circumstance of the current was examined by computer simulation with finite difference method. The results of this study are summarized as follows: 1) flood water are deflected to the right due to Coriolis force, 2) density current may have an important role for the management of water quality in Ise bay.

Key Words : dispersion of flood water, residual current, Coriolis force, Landsat

1. はじめに

閉鎖的な内湾を「持続可能な開発 (sustainable development) の場」とするためには、広域かつ長期的な海域環境の把握が必要不可欠であり、開発行為に付随して環境を積極的に現状以上のものにしていく日本型ミチゲーションの導入が検討されている¹⁾。このミチゲーション効果に関する生態学的な視点に立った評価をさらに充実したものにしていくためには、物理環境を含めたデータベース化や継続的なモニタリングなど、評価のための支援システムを構築する必要がある。

内湾は大気と海底、陸地と外海に囲まれており、それらの境界を通じて運動量、熱量、淡水などの物質や物理量の交換を行っている。一般に内湾の容量が小さいために、境界を通じたやりとりの影響を強く受け外部の変化に敏感に応答する。しかも、境界条件と内部構造は必ずしも独立ではなく、内部構造が逆に境界条件に影響を与えるなど相互作用を行っている²⁾。著者らは内湾の物理環境が外部の境界条件とどのように関わっているかといった観点から、伊勢湾を対象海域に取り上げ、外海の境界条件として黒潮蛇行変動による潮位偏差の影響を解析してきた³⁾。本研究では、河川水が内湾に与える影響、特に木曾三川洪水流のような多量の淡水が内湾でどのような挙動をして、どのように流出していくかといった非定常な応答特性の把握に主眼を置き、人工衛星画像データと気象・海象情報を整理・解析しながら、内湾における支配的な流動機構について数値解析結果から考察を行ったものである。

2. 木曾三川洪水流の流出過程

(1) LANDSATによる洪水流の流出経路

図-1および図-2は、LANDSATによって伊勢湾の河川水の分散状況を検知したMSS (1985年9月26日) およびTM画像 (1988年9月26日) を示したものである。ただし、図-1は河川水と海水の分離を行い懸濁物質 (SS) の濃度分布としてクラスター分析による解析結果を示したものであり⁴⁾、フルカラー画像の図-2に比べてSSの濃淡がわかりやすい表示となっている。図-3および図-4は、木曾三川 (木曾川: 起、長良川: 墨俣、揖斐川: 万石) の日平均流量の時間変化を示したものであり、両者とも木曾川の流量 (2000~3000m³/s) が最も多く、ピーク時において木曾三川全体の62~73%を占めている。

両図からわかるように、木曾三川からの洪水流は、知多半島の常滑沖に南下した後、伊勢湾西岸 (三重県側) に沿って流下しており、伊勢湾東部の知多半島沿いにはほとんど拡がっていない。つまり、河川水は右岸に沿って帯状に拡がり湾口に流出していくことがわかる。

古来、伊勢神宮では20年後ごとに新社殿が造営されているが、御用材の多くは木曾の御用林で調達して筏に組んで増水時に一気に木曾川に投入したと伝えられている⁵⁾。桑名沖からは伊勢湾西岸を南下する河川水を主体とする沿岸流によって伊勢市郊外の大湊沖に到達させる方法がとられてきた。洪水流の分散パターンからも、この意図が容易にくみ取れる。図-2には、木曾三川だけではなく、伊勢湾西岸に流入する櫛田川や宮川、三河湾においても矢作川や豊川からの洪水流の分散がうかがえる。木曾三川河口部を中心とした伊勢湾北部は、

* 正会員 国立岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科・建設工学専攻科 (501-04 岐阜県本巣郡真正町)

** 正会員 中部電力株式会社 電力技術研究所 水理グループ

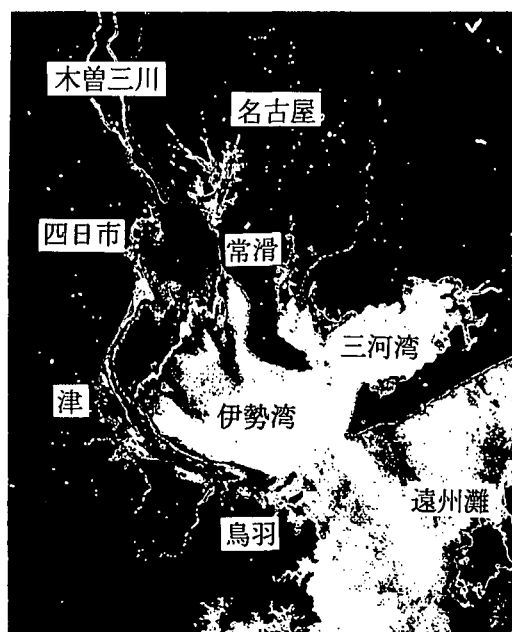


図-1 MSS 画像 (9/26, 1985)



図-2 TM 画像 (9/26, 1988)

蛤やアサリなどの好漁場として知られている。貝類や海苔の生産はほとんどが養殖に切り替えられているが、その養殖場は伊勢湾西岸においては、伊勢湾中部に位置する白子から伊勢湾口の鳥羽に至るきわめて広い範囲にわたって展開されている。伊勢湾西岸に沿って南下する木曾三川からの河川水に加えて、榑田川、宮川など伊勢湾中部から南部に流入する河川水の影響をうまく利用することで、好漁場が形成されていることがわかる。伊勢湾口西部に位置する答志島の桃取地区におけるノリ養殖は、その品質の高さでよく知られており、伊勢湾周辺ではもちろんわが国でも上位を競う最高級のノリの出荷が続けられており、ノリの生育に必要な栄養分を含む河川水と海水の調和が光合成を生み出すのによく対応しているものと推察される。

(2) 自動観測ブイデータによる洪水流の流出速度の推定

図-5は三重県水産技術センター1号ブイ(津市沖合い2km)における気温、水温および塩分の時系列データを示したものである(1985年6~10月)⁴⁾。気温は1日周期の短い変動を繰り返しながら季節的なトレンドを示している。水温は気温に比べて1日毎の変動幅は小さいものの長期的なトレンドは同様の傾向にある。一方、塩分に注目すると、6月~7月中旬にかけての梅雨時期と9月下旬の台風シーズンに顕著な塩分の低下が見られる。両時期の違いは降雨の継続時間に依存しており、台風期の塩分低下は急激に生じる点が特徴的である。また、これらの時系列データをスペクトル解析すると、気温および水温では1日周期が、塩分は1日周期の他にも約2日の周期成分が卓越することがわかっている。

さらに、LANDSAT通過時前後の水温および塩分について詳細に検討するために、図-5の時系列データを拡大して示せば図-6のようである。水温および塩分ともに、9月25日の11時50分から14時50分にかけて急激な変動を示している。水温は23.3℃から21.6℃へ、塩分は26.3‰から11.4‰へと急激に低下している。その後、水温は9月25日20時50分に20.8℃の最低値を示し、翌日14時50分に再び上昇して23.0℃を記録した。一方、塩分は9月25日23時50分に4.9‰の最低値となり、翌日8時50分に上昇して20.8‰を示した。LANDSAT通過時に着目すると、塩分は下降、水温は上昇期となっている。

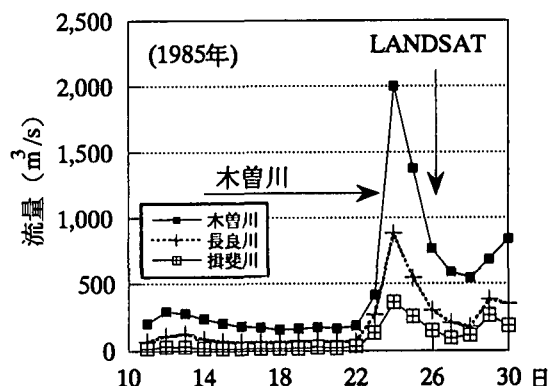


図-3 木曾三川の日平均流量 (1985)

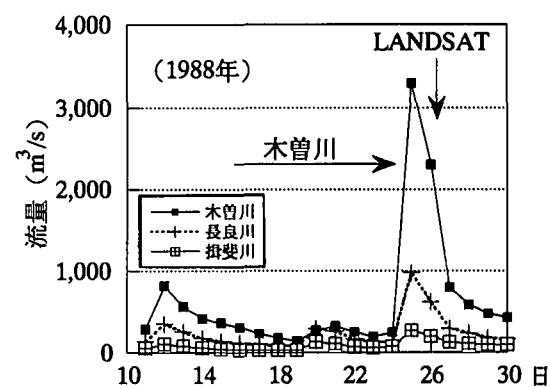


図-4 木曾三川の日平均流量 (1988)

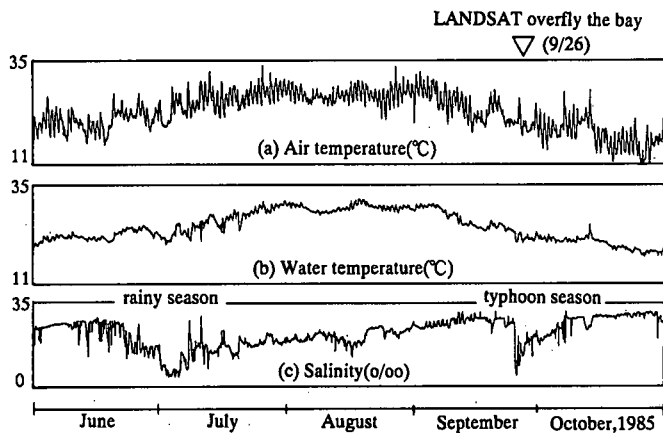


図-5 気温、水温および塩分の時系列データ (1985)

いま、洪水流の移動速度のオーダーを見積もるために、河川水の先端部の拡散状況に着目しよう。1号ブイにおいて塩分の著しい低下が生じた瞬間(図-6中矢印、9月25日11時50分)とLANDSAT通過時(9月26日9時50分)の間隔は22時間である。LANDSAT通過時には河川水の先端部は二見浦沖合いにまで達しているので、1号ブイが設置してある津市沖合いとの距離は約25kmとなる。図-7は図-6に対応する四日市の潮位変動を示したものである。小潮から大潮に向かう日潮不等の時期であったが、図中に示したように、LANDSAT通過時はほとんど干潮時、1号ブイにおいて塩分の著しい低下が生じた瞬間も干潮後の約2時間経過後であり、大きな潮流はなかったものと推察される。したがって、潮流などによるシア一拡散は無視すれば、河川水先端部の移動速度は約30cm/sと算出できる。

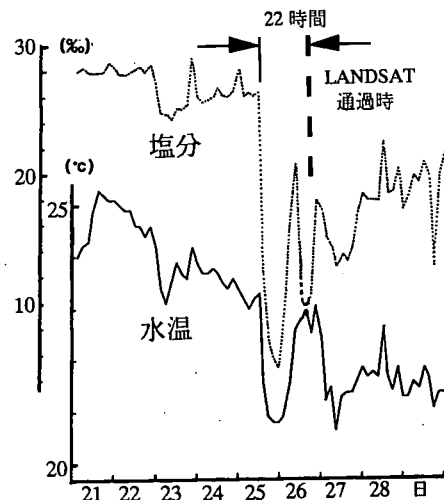


図-6 水温および塩分の時系列データ

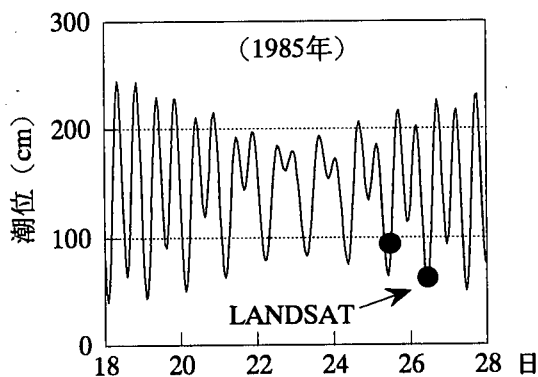


図-7 潮位変動(四日市)

3. 支配的な流動機構

一般に内湾での流動場は、潮汐運動に起因する潮汐振動流(潮流)が最も卓越している。潮汐周期よりも長い時間スケールの流動・拡散を考える場合には、潮流成分を取り除いた適当な期間の平均流(残差流)が移流成分として重要である。この残差流の主な成分として、潮汐運動の非線形性に起因する潮汐残差流、風による吹送流、密度偏差によって駆動される密度流がある。ただし、以下では風の影響は無視している。

(1) 洪水流の特性量とコリオリ力の効果

図-1および図-2からもわかるように、河川から供給された淡水は、内湾固有の海水と直接混合せず、沿岸に沿って帯状に拡がったり、パッチ状の分布を形成する。河川水の拡散領域が大きくなる場合には、地球自転のコリオリ力の効果を見捨てることはできないので、その空間スケールを判断することが必要になる。重力場中の回転流体に特有な水平スケールは、ロスビー変形半径 r_d と慣性半径 r_{if} であり、次式で定義される⁶⁾。

$$r_d = \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_s} g h \frac{(D-h)}{D}} \cdot \frac{1}{f} \quad \dots (1) \quad r_{if} = \frac{U}{f} \quad \dots (2)$$

ここに、 f : コリオリ係数、 $\Delta \rho (= \rho_s - \rho)$: 河川水の海水密度 ρ_s に対する密度差、 g : 重力加速度、 h : 河川水の層厚、 D : 海域の水深、 $U_0 (= Q/b_0 h_0)$: 河口の流速、 Q : 河川流量、 b_0 , h_0 : 河口の幅と水深である。これらのパラメータは、コリオリ力の効果が重力の効果と同程度になるような運動の水平スケールを与えるものである。

洪水時の河口水深 h_0 の実測値はないので、仮に2mあるいは4m程度を推定すれば、木曾三川洪水流の特性量は次のように求められる。 $\Delta \rho = 22 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_s = 1022 \text{ kg/m}^3$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $f = 8.363 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$ 、 $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $b_0 = 1000 \text{ m}$ 、 $D = 10 \sim 20 \text{ m}$ に対して、 $r_d = 6.9 \sim 7.4 \text{ km}$ 、 $r_{if} = 17.9 \text{ km}$ (for $h_0 = 2 \text{ m}$)； $r_d = 8.5 \sim 9.8 \text{ km}$ 、 $r_{if} = 9.0 \text{ km}$ (for $h_0 = 4 \text{ m}$)となる。

一方、洪水流の拡がりの範囲は、木曾川河口から湾口付近の鳥羽まで直線距離にして約60kmであり、ロス

ビー変形半径および慣性半径のスケールよりも大きく、洪水流は地球自転の影響に大きく支配されながら流動していたものと推察される。なお、木曽川河口と知多半島の区間は約10 kmであり、上記のロスビー変形半径および慣性半径とほぼ同スケールなので、知多半島付近に接近した洪水流はコリオリの力の影響を受けて三重県側に偏向したことも予想される。

(2) マルチレベルモデルによる流動場の解析

基礎式は連続方程式、静水圧近似とブーシネスク近似を用いた水平方向の運動方程式、および塩素量の輸送方程式である⁷⁾。また、状態方程式は Knudsen の式、鉛直方向の渦動粘性係数と拡散係数は、密度の鉛直安定度と流速の鉛直シアを考慮した Munk - Anderson の式を使用した。

計算メッシュは水平方向 1 km、鉛直方向は 0~2m、2~6m、6~10m、10m 以上の 4 層とした。離散化時間間隔は CFL の条件より 25 秒を採用した。潮汐は M_2 潮のみを対象とし、開境界の渥美半島赤羽根で振幅 44.94cm、位相 170.09°、志摩半島の矢で振幅 44.0cm、位相 171.0° を与えて、その間を線形補間して外海境界上のメッシュに設定した。塩分の初期値および境界値は日本全国沿岸海洋誌を使用した。水平方向の渦動粘性係数と拡散係数は $2.3 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ とした。

(3) 洪水流の拡がりに及ぼす密度流の効果

まず、河川水の拡がりに及ぼす密度流および地球自転の効果のみを検討するために、海水が静止した海域に河口から河川水を放流して数値計算を行った。計算では、潮流などの海域の流れを無視している。なお、河川流量は、平水時の $680 \text{ m}^3/\text{s}$ (木曽川 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 、長良川 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 、揖斐川 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 、庄内川 $30 \text{ m}^3/\text{s}$) を一定値に設定した。

図-8 は流れがほぼ定常状態になった時点における海域

の流速ベクトルを示したものである。ただし、水面付近の第 1 層 (0~2m) である。同図からわかるように、伊勢湾北部の木曽三川河口部付近では河川水流入に伴う時計回りの循環流が形成されている。また、その水平スケールは LANDSAT データ (図-1 および図-2) に類似して、知多半島の常滑沖に達していることがうかがえる。その後、三重県側への偏向も生じている。伊勢湾北部を除く海域の流速ベクトルはきわめて小さいことも指摘できよう。

室田・中辻ら⁶⁾は、洪水流の拡がりに及ぼす密度流効果を検討するために、地球自転効果の有無と河川流量の大小を考慮した数値解析を行っている。その結果によれば、地球自転効果は無視した計算では等密度差線が同心円を描いて扇状に拡がるのに対して、地球自転効果は無視した場合には、河川水は沖合いへあまり拡がらず西向きに海岸線に沿って拡がる傾向がある。それは北半球では河川水を右方向に傾けるという LANDSAT データの傾向とよく一致している。コリオリの力の効果は、運動方程式からも明らかなように、x 方向の流速成分によって冲向きの加速を与え、y 方向の流速成分によって西向きの流動を助長する。2. (1) で概算したように、ロスビーの変形半径は約 7~10km の範囲にある。このスケールの流動場では地球の自転効果と重力による浮力の効果が等しくなる。その結果、10km を越える沖への流れは地衡流バランスを受けてほとんど拡がらなくなる。一方、西向きの流れは幾分加速されて、等流速線や等密度差線はその方向に著しく引き延ばされる。このような地球自転効果は温排水の拡がりの数値実験によっても確認されている⁸⁾。

河川流量を一定値ではなく、図-9 のようなステップ状のハイドログラフとして与えた場合の流速ベクトルを示したものが図-10 である。ただし、潮流は無視したままである。同図 (a) (b) (c) は、それぞれ河川流量がピーク時の 2.5 日目、河川流量が平水時に戻っている 4.5 日目、9.5 日目の結果である。2.5 日目 (同図(a)) では河川流量は木曽三川と庄内川の合計で $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度である。河川水は常滑付近にまで南下した後、南西の流れとなっている。図-8 の河川流量が小さい場合に比べて、流速ベクトルの大きさは異なるものの、時計回りの循環流の空間スケールと南西向きの偏向は同様の傾向にある。4.5 日目 (同図(b)) では河川流量は平水時

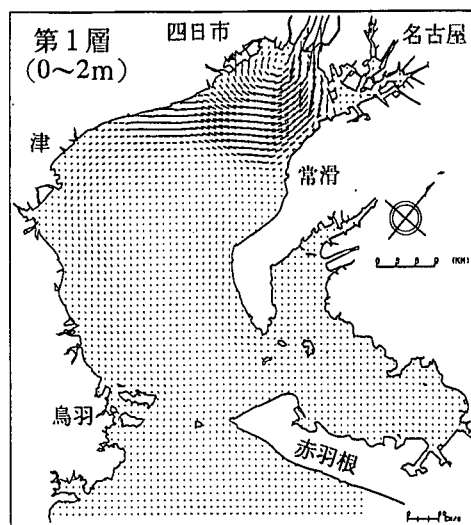


図-8 平水時の河川水の拡がり (潮流なし)

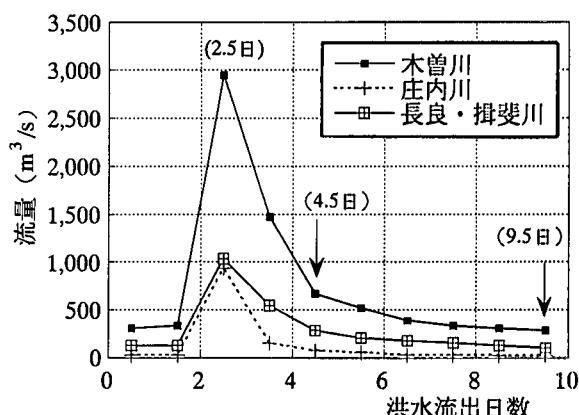
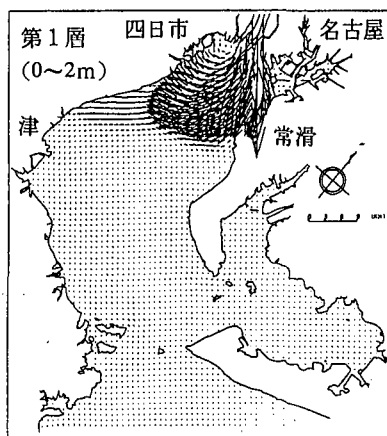
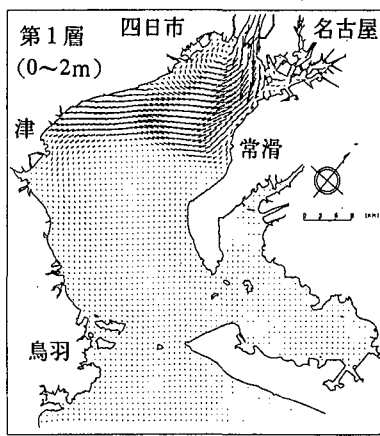


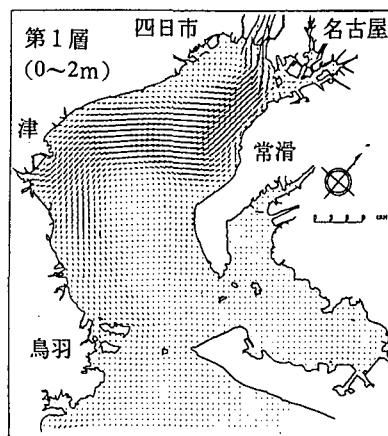
図-9 日平均流量 (数値計算条件)



(a) 2.5日目（洪水ピーク時）



(b) 4.5日目（平水時）



(c) 9.5日目（平水時）

図-10 洪水時のピークから平水時に至る河川水の拡がり（潮流なし）

に戻っており、河口付近にはこれまでによく見られた時計回りの循環流が形成されている。また、南下した河川水が南西に方向を変える傾向は2.5日目と同様であるが、三重県側で流速ベクトルが大きくなっていること、津市沖合いに反時計回りの循環流が確認される。さらに、9.5日目（同図(c)）では、流れ場の全体的な傾向は4.5日目の結果と類似しているが、南西向きの流れの幅が南北方向に広がっていることが示されている。河川流量が小さい場合には、河川水は海表面を滑るように河口から放射状に拡がる。このような流動は表層プルームで、浮力が支配的な流れ場である。一方、大きな河川流量では、図-10 (a) からも推察できるように、河口部では噴流的流動を示すものと考えられる。河口付近における混合形態には、河川水の拡がり方がプルーム的あるいは噴流的であるかの差異は大きい、ロスビー変形半径を越えた水平スケールでは、河川水の先端部はプルーム的な流動を示しながら海表面を拡がっていることを予想させる。

（4）潮流に起因する残差流の効果

図-11は木曾三川の河川流量を $500\text{m}^3/\text{s}$ の一定値とした場合において、 M_2 潮の潮流を付加した計算結果を示したものであり、数値的に安定した30潮汐周期目の結果を1潮汐間で平均した残差流である。同図から、上述した湾奥部の時計回りの水平循環流、津市沖合いの反時計回りの循環流の顕在化など、河川水が伊勢湾西岸沿いに偏向して流出する傾向をこの残差流分布は説明している。定量的な評価はともかく定性的にはLANDSATの画像データ（図-1および図-2）に示した河川水の分散状況を説明するものとして注目される。

伊勢湾に流入する木曾三川の流量は、河川全体の約8割程度にも達するので、このため湾奥部の主な流動は密度流としての性格が強いものと考えられる。伊勢湾潮流図によれば、木曾三川河口部の海域では、比較的明瞭な時計回りの循環流が存在することが指摘されている。また従来から言われている、伊勢湾中央部における反時計回りの循環流の存在は、木曾三川からの河川流量が大きい場合に顕在化するものと思われる。さらに、数値計算では流れの駆動力としての潮汐振動を規則的な半日周潮（ M_2 潮）で与えているが、図-7の潮汐変動からもわかるように日潮不等が大きい場合には、その時間平均値である潮汐残差流の影響は無視できないものがあるものと推察される。今後、日潮不等を考慮した潮汐残差流の定量的評価が望まれる。

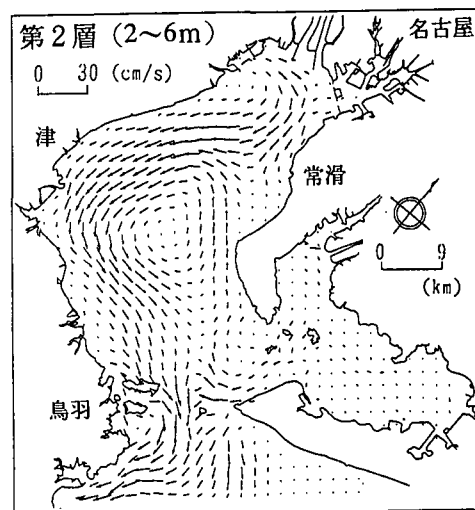
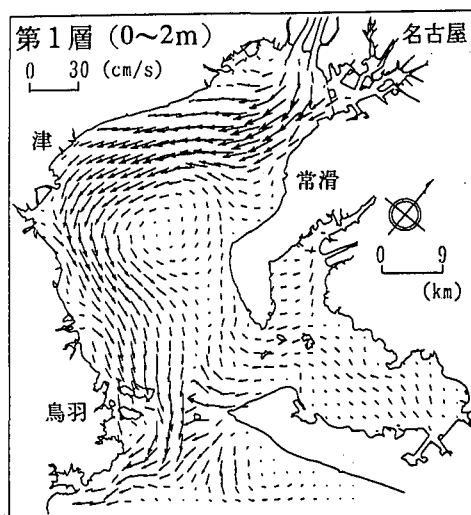


図-11 平水時の河川の拡がり（潮流あり）

4. おわりに

伊勢湾海域を対象として、LANDSATの画像データから木曾三川洪水流が伊勢湾西岸に沿って南下する流出経路が明らかにされた。洪水流の水平スケールがロスビーの変形半径に達すると沖方向への拡がりが増加され、海岸線に沿った右回りの流動が加速されることがわかった。その支配的な流動機構については潮流に起因する残差流の他に密度流や地球自転の効果（コリオリ力）が強く影響を及ぼすことが指摘された。これらのことは沿岸域での河川水と海水の混合・循環、物質の輸送過程を検討する上でも重要である。今後、多様な側面を覗かせる伊勢湾域の流動を、人工衛星による面的な情報と定点観測データとの整合性（シートルース）を高めつつ把握する必要がある。最後に、データを快く提供していただいた関係機関に深甚なる謝意を表すとともに、本研究の一部は安田株式会社の研究助成により行われたことを付記する。

【参考文献】

- 1)磯部雅彦：海岸におけるミチゲーション、海岸工学委員会・地球環境問題検討小委員会WG3資料、1994.
- 2)宇野木早苗：内湾の物理環境、内湾の環境科学・上巻（西條八束編）、培風館、pp.63-162、1984.
- 3)和田 清・松園昌久：黒潮流路変化に伴う伊勢湾周辺海域の潮位変動特性、海洋開発論文集、Vol.10、pp.91-95、1994.
- 4)運輸省第5港湾建設局：リモートセンシングによる伊勢湾奥部水質調査報告書、212p.、1986.
- 5)落合弘明：日本リモートセンシング学会誌、Vol.11、No.2、pp.137-151、1991.
- 6)室田 明・中辻啓二・許 再寧：大阪湾における淀川洪水流の動態に関する数値実験、海岸工学論文集、第36巻、pp.214-218、1989.
- 7)杉山陽一・藤原建紀・中辻啓二・水鳥雅文：伊勢湾北部海域の密度成層と残差流、海岸工学論文集、第41巻、pp.291-295、1994.
- 8)松野 健・永田 豊：温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究、第30回海岸工学講演会論文集、pp.536-540、1983.