

リモートセンシングによる沿岸流動と 沖合海流の干渉の可視化と考察

大西 外明*・大浦 丈輝**・ツァリン・ジャブ**

1. 緒 言

本研究は、河川水拡散という大スケールの水理現象を瞬時に観測する方法として衛星リモートセンシングを用いて、海へ放流された河川水の超遠方海域における挙動を検討し、それを通して従来から明確にされていない、“陸岸に近い水域の沿岸流”等と“沖合の海流”との関わり方を明らかにする事を目的として実施するものである。検討の対象とする水域として、互いに水理特性を異にすると予測される“福井から石川にいたる日本海側水域”と“紀伊半島沖の太平洋側水域”を選んだ。また流れの可視化には、主として LANDSAT による衛星リモートセンシングデータを用いた。また、リモートセンシングデータを水理学的に検討するために、これらの水域における流速や水質等の分布特性を地上データにより把握した。

2. 流れの可視化手法としてのリモートセンシング

太陽から放射される光は、 γ 線からマイクロ波のような長い波長のものまでの広い範囲のものを含んでいる。太陽の光は物体にあたって反射するが、我々の肉眼は $0.4\mu\text{m}\sim 0.7\mu\text{m}$ の波長をもつ反射電波により、事象を識別している。現代のリモートセンシングは、我々の肉眼の代わりに、センサーによって、可視領域よりも広い範囲の電磁波により、地表の物体や現象を見分けようとするものである。表-1 はランドサットのセンサー MSS と TM のスペクトル帯域である。これらのセンサーにより得られる反射電磁波強度の観測結果をコンピュータにより画像化することにより流れの可視化が可能となる。可視化のパラメータとして“水の濁り”を用いる場合には MSS の 4, 5 バンドと TM の 1~3 バンドが適している事が従来の研究により知られている¹⁾。また、TM6 バンドにより得られる画像は水温をパラメータとした可視化画像である。

表-1 ランドサットの MSS と TM のスペクトル帯域

MSS			TM		
バンド	電磁波の種類	波 長 (μm)	バンド	電磁波の種類	波 長 (μm)
4	可視：緑	0.5~0.6	1	可視：緑	0.45~0.52
5	可視：赤	0.6~0.7	2	可視：赤	0.4~0.7
6	近赤外	0.7~0.8	3		0.63~0.69
7	近赤外	0.8~1.1	4		0.76~0.90
			5		1.55~1.75
			6	熱赤外	10.4~12.5
			7		2.08~2.35

3. 日本海における沿岸流動と海流の干渉

本州の日本海側の沖合には、陸岸に沿って北東に流れる対馬海流の分岐流が分布している事が知られている。一方、現地観測によれば、海岸近傍の水域では、風や潮汐等により、海水の流れの方向は、周期的もしくは不規則に変動している。図-1 は1981年5月15日~5月29日の間に海面下2mで測定した九頭竜川河口沖の沿岸流の流向別の流速の出現頻度である。この図によってこの沿岸水域では、北東向きの流れが卓越するものの、沿岸流の流向は潮汐、風向き等により、変化することが分かる。この様にして沿岸部近くでは、河川放流水や漂砂等の移動方向は多様に変化するが、海岸線より遠く離れた沖合い水域では、むしろ対馬海流の分岐流等の海流の影響が卓越していると予測される。そこで沿岸流動と海流のそれぞれの卓越限界を知る目的で、ランドサットデータを用いて、九頭竜川河口から手取川河口に至る間の沖合い水域の流れの可視化を行った。Plate 1 は、1981年5月13日の MSS 4 バンドのデータにより得た画像であり、海における両河川流を、濁度をパラメータとして可視化した結果と考えることが出来る。なお、当日の九頭竜川と手取川の流量は、各々 $750\text{m}^3/\text{s}$ と $405\text{m}^3/\text{s}$ である。Plate 1 の場合、九頭竜川からの放流水は、はじめは海岸線にはほぼ直交する方向に移流するが、沖合いに行くに連れて右側に偏向し始め、東尋坊の約15km沖で、海岸線とはほぼ平行して北東方向に流れている。また、沖合いに出た九頭竜川からの放流水の幅はほぼ一定

* 正会員 工博 東京理科大学 土木工学科 教授

** 東京理科大学 土木工学科 大学院

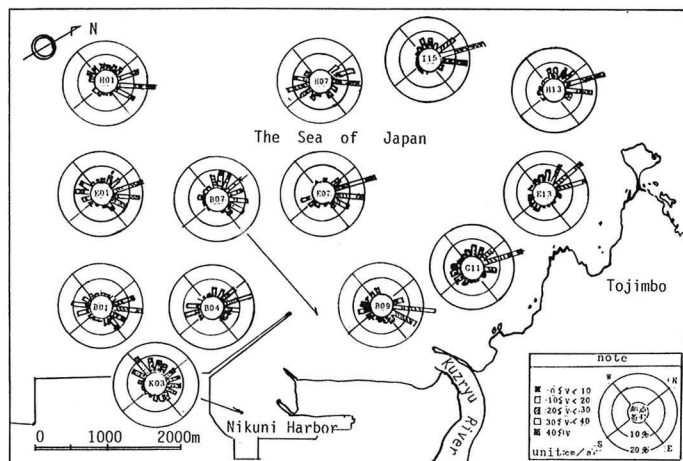


図-1 九頭竜川河口沖の沿岸流の流向別の流速出現頻度 (1981年5月15日～5月29日)¹⁾

九頭竜川からの河川放流水は東尋坊の約15 km 沖付近ではほぼ消散し、Plate 1 に認められる様な海岸線とほぼ平行した流れは観察出来ない。次に、Plate 3 は TM 2 バンドのデータ、即ち、水の濁りをパラメータとして可視化した1984年10月8日の同じ水域での流動状態を示す。この場合には、九頭竜川河口と手取川河口の間の沿岸水は海岸線に接触しながら南西方向に流動するが、東尋坊沖で沖向きに方向を変え、さらに、海岸から15 km ないしは 20 km 沖合では北東方向に流動している。

上記の可視化の結果から、九頭竜川～手取川の間では、潮汐等により流向が変

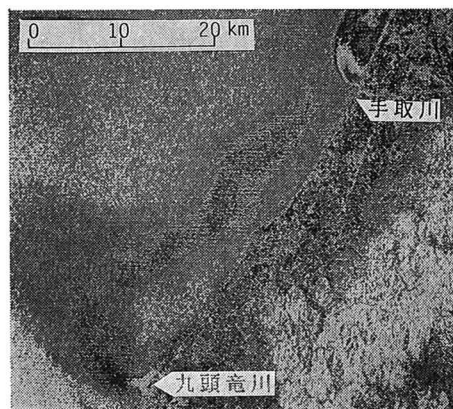


Plate 1 九頭竜川河口沖の MSS 4 バンド画像 (1981年5月13日)

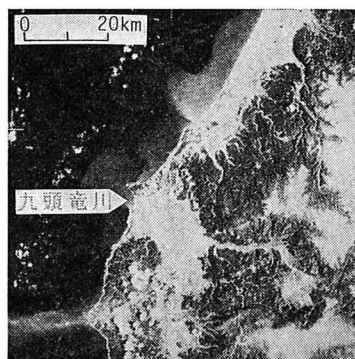


Plate 2 九頭竜川河口沖の MSS 4 バンド画像 (1979年4月18日)

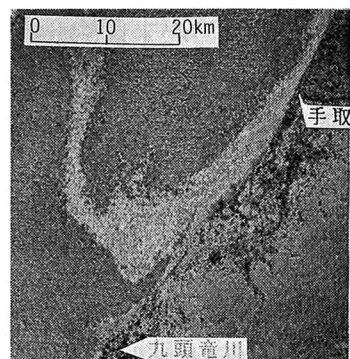


Plate 3 九頭竜川河口沖の TM 2 バンド画像 (1984年10月8日)

である。即ち、沖合いにおける九頭竜川からの放流水の流れは非分散性であると考えられる。同様の傾向が、日本海沿岸水域へ放流された最上川や十三湖からの河川水においても認められている²⁾。次に手取川からの放流水に注目すると、それは、海岸線に接触しながら北東方向に流れており、同河川が海岸線沿いに分布している砂丘の形成に大きく寄与していることを示唆している。また、海域における九頭竜川の影響範囲は手取川河口の手前辺までに限られており、海域においても各々の河川の流域があることを、Plate 1 が示唆していると考えられる。同様の事が、富山湾内の庄川と神通川のランドサット画像においても認められる³⁾。Plate 2 は同じ水域の1979年4月18日のランドサット MSS 4 バンド画像である。この日の流量は、九頭竜川が $175 \text{ m}^3/\text{s}$ 、手取川が $118 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、Plate 1 の場合よりも放流水の量はかなり少ない。Plate 2 における手取川からの河川水は、高流量時の Plate 1 の場合と同様の流動状態を示している。しかし、流量が少ない場合 (Plate 2) には、

動する沿岸流が卓越するのは海岸から 15 km ないしは 20 km の水域迄であり、それより沖合いでは、恒流である海流の影響が卓越する様になるものと考えられる。

4. 太平洋における沿岸流動と海流の干渉

紀伊半島東側の流況は、黒潮の変動の影響を強く受けており、本州南方の黒潮流路は熊野灘および遠州灘で大

きく蛇行する時期(冷水塊発達期)と東へ直進する時期(接岸期)の間を, 数年ないし数10年の周期で変動している事が一般に知られている. 一方, 陸岸に近い沿岸水域の流れに注目すると, 沿岸流の流向は数時間オーダの周期で変動すると考えられる. 図-2 は1980年に三重県により観測された, 熊野川河口の北側沿岸水域((a) 図中の測点1と2)で観測された流向別流速階級頻度図である⁴⁾. なお, 図中の流速の階級を示す数値の1~4は各々“1以下”=7~8 cm/s 以下, “2以下”=10 cm/s 前後, “3以下”=20 cm/s 前後, “4以上”=25 cm/s 以上を意味している. この様に黒潮と沿岸流とが関わりあう水域を, 航空機とランドサットによるリモートセンシングデータにより可視化する事を試みた. 用いたデータの収集期間は1982年10月20日と1979年10月23日~30日の場合についてである. なお, 1979年10月には海上観測も同時に行った.

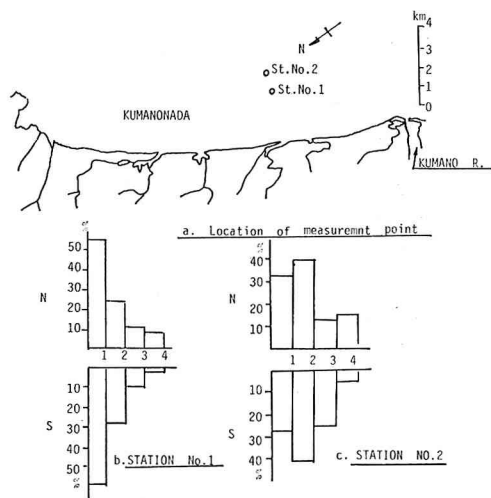


図-2 熊野川北側沿岸水域の流向別流速階級頻度⁴⁾

1) 1982年10月20日の状態

Plate 4 は1982年10月20日の熊野川河口部の沖合水域の流動状態を, ランドサット MSS4 バンドデータを用いて可視化したものである. また河川からの流出水や沿岸水の拡散状態をより明確にするために, 河口部をクローズアップして示したのが **Plate 5** である. この可視化画像において注目されるのは, イ) 熊野川の河口部からはほぼ直線状に南下する明確なフロントがあり, ロ) 河川水は始めは陸岸に接触するようにして南南西方向に移流するが, ハ) 河口から遠く離れた超遠方水域では, 沿岸水は上記のフロント沿いに沖合方向に移動し, かつそのフロントを横断しない事等である.

2) 1979年10月の状態

1979年10月には, 海上での流速, 水温等の水質示標の測定, ランドサットによる衛星リモートセンシングと

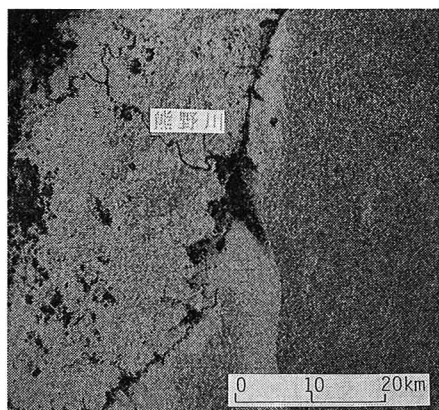


Plate 4 熊野灘沿岸水域の流動状態の可視化(1982年10月20日のランドサット MSS4)

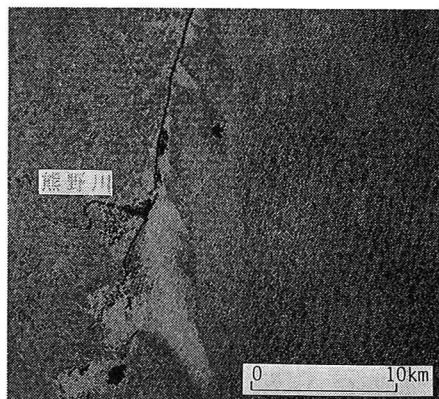


Plate 5 熊野川河口部付近の可視化(1982年10月20日のランドサット MSS4)

航空機リモートセンシングを同時に行う事を試みた. しかし, 気象条件等の為に衛星リモートセンシングは10月23日に, また航空機リモートセンシングは10月30日となった.

A) ランドサットデータによる可視化

Plate-6 は **Plate-3** と同じ水域の流動状態を, ランドサット MSS4 バンドデータにより可視化したものである. さらに, **Plate-7** は同日の熊野川からの流出水と河口部付近の沿岸水の流動をクローズアップして可視化したものである. **Plate-6** (1979年10月23日) においても **Plate-4** (1982年10月20日) と同様に, 潮岬の沖合いには南東方向に延びるフロントが分布しており, 高濁度の沿岸水塊がそのフロント沿いに移動しているのが認められる. ただし, 1979年10月23日の場合には, 潮岬の沖合い約45kmの所に大規模渦が存在しており, 潮岬から熊野川河口部付近にかけての沿岸水塊がこの大規模渦の中に巻き込まれる様相を呈しているのが注目される. また, 潮岬の西側沿岸水域には右回転の旋回流があり, 紀伊水道側から紀伊半島沿岸に沿って移動する沿岸流は, 潮岬付近で更に東へ移動する事を阻止されてい

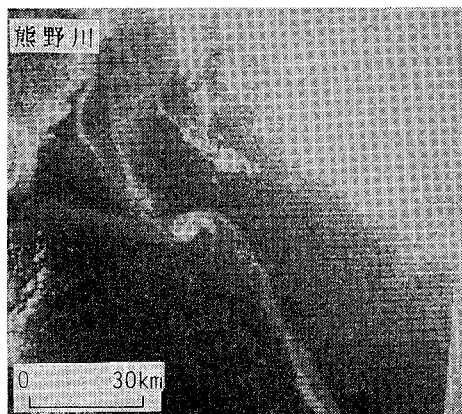


Plate 6 熊野灘沿岸水域の流動状態の可視化 (1979年10月23日のランドサット MSS4)

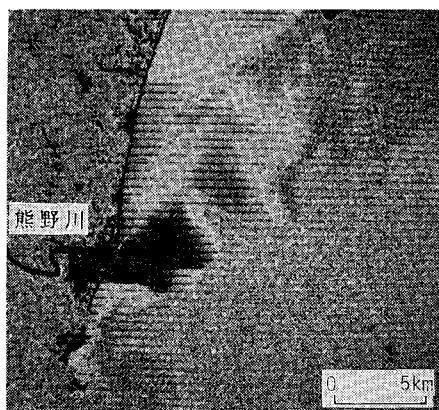


Plate 7 熊野川河口部付近の可視化 (1979年10月23日のランドサット MSS4)

る事、即ち、潮岬付近を境としての東西水域では、沿岸流は不連続となっている事がうかがわれる。

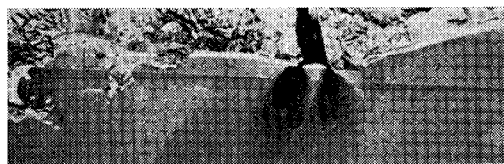
次に Plate-5 と Plate-6 を比較すると、熊野灘へ放流された熊野川からの流出水の方向は、前者では南南東の方向であるのに対して、後者では北東方向であり、図-2 に示したように沿岸流は往復流となることがこれらの可視化結果からも知り得る。

B) 航空機リモートセンシングデータによる可視化

Plate-8 は高度 2000 m の機上に搭載したスキャナ IRA-301 (検知波長 8~14 μm) により、1979年10月30日の (a) 8:55~9:51 と (b) 13:02~14:05 の各時間に撮影した熊野川河口部の熱映像である。また、図-3 は、熊野川河口部で測定した1979年10月30日当日の潮位の時間的变化である。なお、当日の相賀測水所での流量は 81 m^3/s である。

図-3 を参照すると Plate-8 の (a) は干潮時の状態、(b) は満潮時の状態を示している。

上に示した Plate-8 (a) の干潮時には、砂州の両側から低温の河川水が流出し、河口から沖合いに移流すると



(a)



(b)

Plate 8 高度 2000 m の機上からの熱映像 (1979年10月30日)

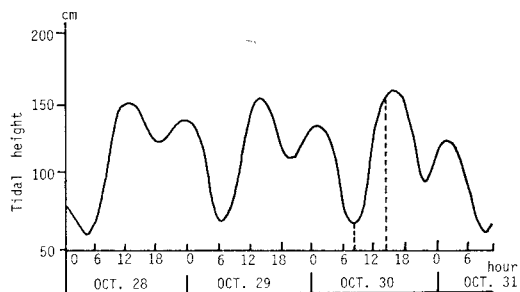


図-3 1979年10月30日の潮位の時間的变化

共に、拡散しながら南西方向に偏向して行くのが認められる。しかし、満潮時になると (Plate-8(b)) 低温の河川水は、北東方向へ拡散方向を転じている。上ではこの水域の沿岸流は北東と南西の方向に反転する往復流である事を述べたが、河川水からの流出水は、満潮時には熊野灘内へ押し込まれるようにして北東の方向に流れ、一方、干潮時には熊野灘外へ押し出されるように南西へ流れることを Plate-8 と 図-3 より具体的にみる事が出来る。

C) 海上観測および可視化結果に関する考察

ランドサットと航空機による可視化結果を比較すると、前者は極めて高い高度から観察しているのに関わらず、河川からの流出水等の分布を、航空機リモートセンシングに劣らないほど明確に示している。その上に海流と沿岸流の干渉といった、航空機リモートセンシングでは探知し得ない大スケールな水理現象をも明確に把握する事が出来る。リモートセンシングは水面の極く近傍の流れを可視化するのには有用であるが、水面下の諸現象

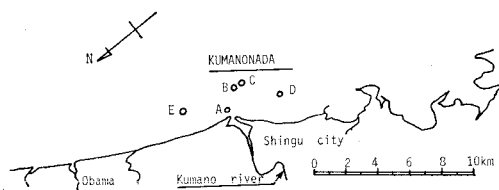


図-4 水質の測定点の配置

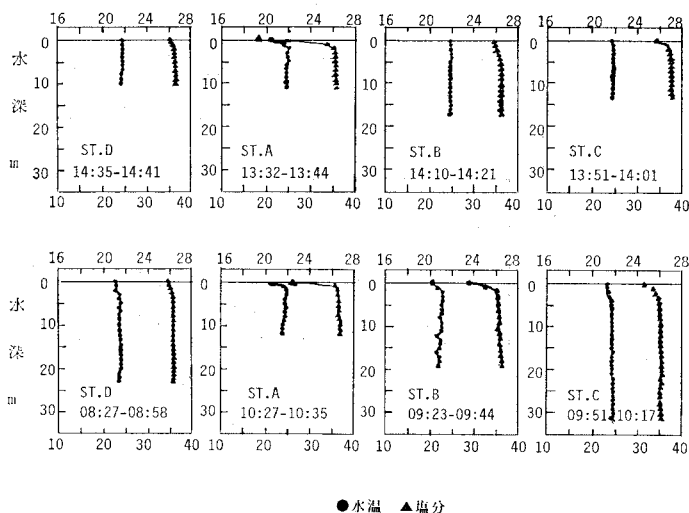


図-5 水温、電気電導度の鉛直分布

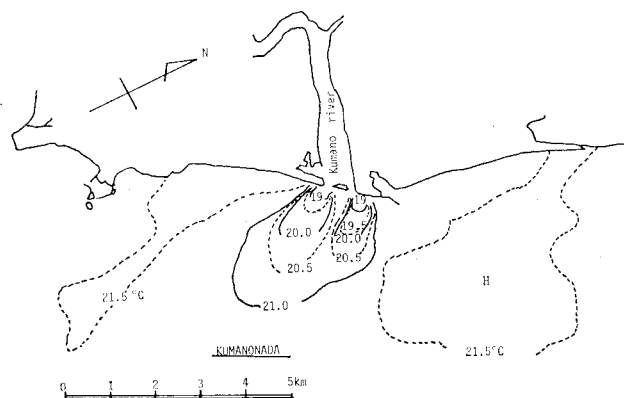


図-6 河口付近等温図 (Plate 8 (b) に相当)

の解明と可視化画像を定量化するためには、若干の地上視測が必要である。そこで上記の航空機リモートセンシング時における沿岸水域での流速、水温、濁度、塩分濃度（電気電導度）を求める事とした。図-4 は測定点の配置を示し、図-5 は測定より得られた午前と午後の水温、電気電導度の鉛直分布を示す。これらの視測結果から、河川水の水温は海水に比べて低いが塩分濃度差によって、河川水の密度は海水より小さく、その結果、流出水は河口の近くでは厚さ約 2.5 m の表層流となっていることが分かる。

3) 沿岸流と海流との干涉

以上に記した 1982 年 10 月 20 日と 1979 年 10 月 23 日のランドサットデータによる可視化、および 1979 年 10 月の航空機リモートセンシングと海上調査の結果、日本海側の九頭竜川河口沖におけると同様に、海岸線より約 10 km 以内の沿岸水域では、潮汐等により流れの方向が反転する沿岸流が卓越していると推察される。しかし、この海域には黒潮の影響によって生じると推測される大

規模なフロントが 1982 年 10 月 20 日と 1979 年 10 月 23 日の両日とも存在し、熊野川からの流出水を含む沿岸水は、超遠方領域ではそのフロントに沿うように沖合に移流している。特に、1979 年 10 月 23 日の場合には、潮岬の沖合い約 45 km の所に分布する大規模渦に沿岸水が巻き込まれている。しかし、この事を基にして熊野川からの流出水の拡散領域に上記のフロントや沖合の大規模渦をも含める事には、適切ではない様に思われる。例えば、Plate-7 の場合は河川水の分散、拡散は、往復沿岸流が卓越する沿岸水域の内部ではほぼ終息しており、したがって、その領域より遙かに沖合いでの海流と沿岸水域の関わりは河川水の分散・拡散現象とは無縁と考えられる。また、Plate-8 (a) にみられる河川水は衛星リモートセンシングによれば、超遠方領域では上記のフロントに接続していくものと推論されるが、この熱映像と水温の実測値とを用いて河口付近の水温分布を描くと図-6 の様になる。この図に見られるように、この場合の流出水の水温拡散域は河口から 2~3 km の沖合までに限られており、境界条件として超遠方領域の海流を取り入れる必要はない様に考えられる。

5. むすび

日本海へ放流される九頭竜川と手取川、および紀伊半島沖における熊野川からの流出水をリモートセンシングデータを用いて可視化し、河川放流水に及ぼす沖合海流の影響につき考察した。これらの流出水の拡散解析に、境界条件として超遠方領域の海流を取り入れる事の必要性は、解析対象となる物質に依存すると考えられ、この点につき今後さらに研究を続ける必要がある。

参考文献

- 1) Onishi, S. and Baba, K.: Study of hydraulic behaviors of river effluent at Coriolis force dominating field by remote sensing, Jour. of Hydroscience and Hydraulic Eng., Vol. 5/No. 1, pp. 39~45, 1987.
- 2) 1)と同じ。
- 3) 大西外明: 自然災害科学におけるリモートセンシング技術の応用, 自然災害科学総合シンポジウム論文集, pp. 115~133, 1985.
- 4) 三重県, 熊野川河口周辺海域の環境と漁業に関する調査報告書, 1980.