

ランドサットデータを導入した本州周辺の河川水拡散状態の研究(I)
Study on dispersion of waters effluented from rivers in
Honsu with Landsat data

東京理科大学理工学部 正員 大西 外明
東京理科大学大学院 学生員 須山 治
(株)大東設計コンサルタント 正員 村上 龍一

1. はじめに

陸上での人間活動もしくは産業活動が海域環境に及ぼす影響を評価する上で、陸岸から沿岸水域に出す緒々の排水の水理学的挙動を知ることは重要な事項である。この問題に関連して、従来の密度流理論では低密度の陸水の海域での拡散現象は、沖合に向って滑らかに濁度や水温を減少させていく過程として解析されている。しかし、海域における実際の現象は、いくつかの面でそれと異なった様相を呈する様に考えられる。その第一点は、例えば海域へ放出された河川水の流れを航空写真で観察すると、放流水塊の中に幾重にもフロントが重なる、いわゆる多重フロント(大西ら¹⁾(1981))が形成されている点である。このような多重フロントは、Scarspace²⁾らにより、ミシガン湖畔のポイントビーチ原子力発電所からの温排水流でも存在することが報告されている。さらに、我が国においても三村・堀川³⁾は、福島第一原子力発電所からの温排水でも多重フロントの存在を報告している。このような多重フロントの形成機構に関しては、三村・堀川は放流海域の沿岸流の時間的・空間的変動性によるものと予測し、大西・田中は内部境界面上の擾乱波の不安定性に発生原因を求めているものの、未だ十分に説明しえていないのが現状と考えられる。

従来の低密度表層水の拡散現象の解析上の第2の問題点は、超遠方領域における取り扱い方の曖昧さにある。すなわち、放水源から十分に遠く離れた領域(ここでは、超遠方領域と呼ぶこととする。)では、密度差を0に漸近させる等の方法を用いているが、超遠方領域の定義そのものが容易ではないし、さらに重要なことは、自然海域の乱れ特性が対象水域によって変化するにもかかわらず、解析上その特性が考慮されていない点である。発電所温排水の場合、自然海域と温排水との水温差が2℃ないし1℃以下となれば、水域環境に及ぼす影響は無視しうることが多いと思われるが、例えば放射性廃液等の被曝評価を行う場合には、廃液濃度が極く低くても、放射線量が時間の関数であるために、その影響は必ずしも無視しえないこともありえよう。したがって、陸側からの諸々のインパクトと海域環境とのかかわりを評価するに際しては、沿岸近くの沿岸流特性だけでなく、さらに沖合における、地球物理学でいわれるメゾ・スケールの流動特性をも把握しておくことが重要であると考えられる。一方、そのような大スケール流動特性を観測する立場から考えると、従来の観測手法や航空機上からのリモートセンシングでは困難であり、この場合は、人工衛星によるリモートセンシングの適用が期待される。しかしながら、NOAA等の衛星からのリモートセンシングは、黒潮や対馬海流のような地球スケールの現象の観察には有用であることが示されているものの、本論文で対象とするスケールの流動特性の観察には精度上で不十分である。その点、ランドサットは地表上185km²の範囲を同時に観察しているので、ここでいうメゾ・スケール流動の観察にはスケールの面からは適していると考えられる。しかし、ランドサットデータは温度に関する情報を欠いているために、水域の流動特性を濁りやクロロフィル濃度等の相対的差異をパラメーターとして認識することになるが、その可能性あるいは認識可能な程度については、従来は、十分に検討されていないように思われる。

以上の観点から、著者らは本州周辺のいくつかの海域を対象にランドサットデータの画像解析を行ない、そこでの流動特性の解明を試みることにした。

2. ランドサットデータ解析により得られる流れの映像と水質指標との関連の検討

本論文では、海へ放出される河川水を一種の“流れの可視化のためのトレーサー”に見立てて、沿岸海域

における水理学的特性を観察する方法を用いる。ランドサットMSSデータは、地表から反射される電磁波の強弱を電気信号に変換した後に地上に送られてくるので、水中に反射率の高い物質が多く含まれている時ほど、白黒映像では輝度が高くなる。本論文では、輝度分割法とカラー合成映像法を用いて解析を行なったが、前者は特定の現象を浮かび上がらせるために、コンピュータに輝度範囲を取捨選択させる方法であり、また、カラー合成映像は特定のカラーを各輝度範囲を持つ映像に割り当てる方法であり、共にリモートセンシングデータからの画像解析に際して従来から用いられている。しかし、水域での流動現象と関連づけるためには、画像解析により求めた水面輝度と実際の水質指標との関連を明確にしておくことが必要であるにもかかわらず、従来のリモートセンシング利用に関する研究では、この問題に関して具体的に検討した報告は少ない様に思われる。そこで本論文では、まず九頭竜川河口水域を対象にして、ランドサットデータから求めた流動パターン映像と、海上で観測した代表的な水質指標－塩分濃度、透水性、SS、クロロフィル、水温等－との関連につき検討を加えた。Photo.1はランドサットデータから求めた1979年4月18日の九頭竜川河口付近の映像を示す。Photo.1上のそれぞれの色採（又は輝度）と水質指標との関連を見るために、Fig.1に示した測点1～13において求めた水質指標の観測値との対比を試みた。Table.1は1979年4月17日における水質調査により得られた、水温、透明度、Cl、SS、濁度、COD、DOの値を示す。また、Fig.2, Fig.3はTable.1の結果から画いた水温および塩素量の水平分布状態を示す。浮遊懸濁物質の濃度分布についても類似した結果が得られており、これらの分布形はさらにPhoto.1上の水面輝度分布と極めて高い相関を示している。このことはこれらの水質指標分布は、主として九頭竜川からの流出水により支配されていることを示唆するものと考えられる。一方、COD、DOの分布形状は上記の諸指標とは一致していないことから、COD、DOの分布は九頭竜川以外のインパクトに起因しているものと判断される。

以上の検討から、少なくとも九頭竜川に関してはランドサットデータから求めた画像上の輝度分布は、同河川から放出される浮遊土砂の濃度、水温、塩素量の分布と高い相関をもっていることがわかる。

3. 若狭湾～山形に至る日本海海域

若狭湾から以北の日本海側には、九頭竜川、手取川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川、信濃川、阿賀野川、最上川等の我国の代表的な大河川が開口している。これらの諸河川は陸側においてそれぞれの流域を擁していると同様に放流先の海域においても、それぞれの影響領域一本論では海域内河川流域と呼ぶこととする－をもっていると考えられる。この海域内河川流域は、陸側流域内での各種計画や人間活動が海域環境、たとえば海岸形態や水質等に及ぼす影響を評価する上で重要な意味を持ってそるが、従来は現在のところ十分に明確にされていない。このような観点から本論文では、ランドサットデータを用いて海域内河川流域の範囲について以下考察を行なう。

(1) 九頭竜川と手取川

Photo2 と Photo 3 は、ランドサットのMSS Band 4のデータを基に求めた 1981年5月13日の九頭竜川および手取川からの放流水の分布状態を示す。また、Fig.4とFig.5は同年5月21日に、九頭竜河口付近で行なわれた測流板追跡結果および5月15日～5月29日の間の流向別流速出現頻度の測定結果を示す。これらの図から明らかなように、日本海の沿岸ぞいに北上する対馬海流の等三分流は、九頭竜川河口付近では、沿岸部にまで達し、Photo.2とPhoto.3に示す流れの状態を得られた時点では、海岸線ぞいに最大40cm/sの流速の沿岸流を形成していると考えられる。この様な海域へ放出された手取川の河川水は、陸側に張り付けた形で北上し、流体力学的には、平板ぞい境界層内流れを受ける噴流の様相を示し、その海域内流域は、河口により北方約50kmの羽咋市付近にまで達している。このことから、手取川はこの海域の漂砂源、したがって内灘砂丘の形成に大きく寄与していることを明確に知ることができる。なお、手取川の海域内流域に関して注目されているのは、金沢湾防波堤の影響である。浮遊粒子を含んだ手取

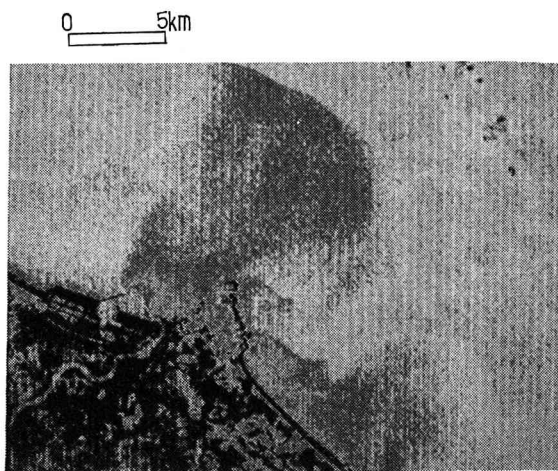


Photo.1 1974年4月18日の九頭竜河口

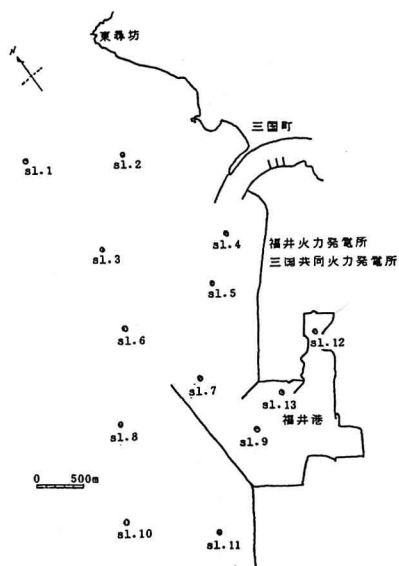


Fig.1 水質指標の測点

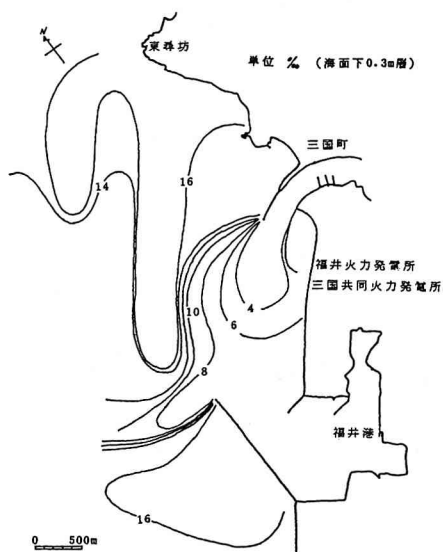


Fig.2 塩素量の水平分布

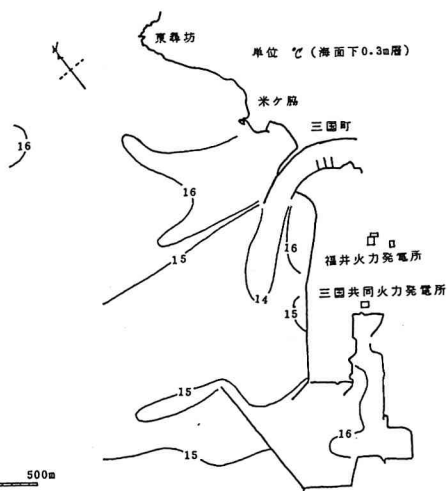


Fig.3 水温の水平分布

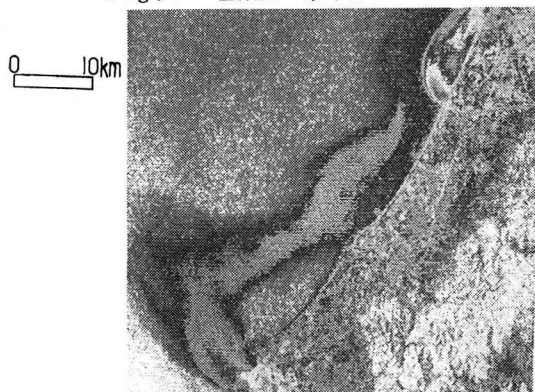


Photo.2 九頭竜河口のMSS 4映像(13May,'81)

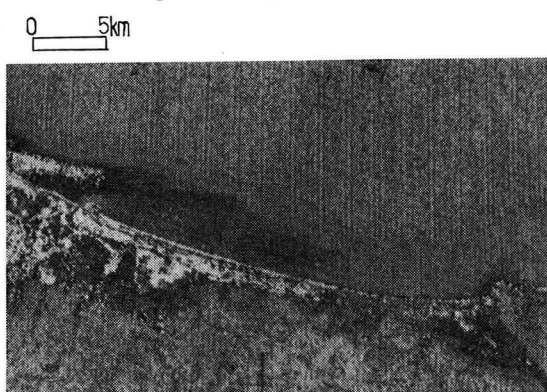


Photo.3 手取河口のMSS 4映像(13.May,'81)

Table.1 九頭竜河口水域での水質の測定値 (1979年4月27日)

測点 st.	水深 (m)	採水 時刻 (a)	水温 (℃)	透明度 (m)	DO (ppm)		BOD (ppm)	pH	SS (ppm)	T-S (ppm)	PO4-P (ppm)		T-P (ppm)						
					手読値	酸素計 O ₂ (ppm)					PO4-P (ppm)	T-P (ppm)							
1	27.0	10:35	0	19.0	2.1	12.88	0.41	1.0	5.87	92.1	9.09	6.2	3.8	25.6	0.1588	0.23	0.0087	1.23	0.0281
		10:45	5	19.2		19.06	0.73	1.5	6.02	100.1	9.20	10.6	11.8	0.1662	0.26	0.0091	0.66	0.0285	
2	13.0	11:00	0	19.2	3.8	18.64	0.43	1.3	6.78	92.3	9.19	2.9	1.6	36.1	0.1776	0.32	0.0099	0.93	0.0288
		11:15	5	19.3		18.49	0.57	0.5	5.96	99.9	9.21	1.3	0.8	9.88	0.1783	0.09	0.0028	0.65	0.0171
3	11.5	11:30	0	19.5	3.5	18.81	0.45	1.8	6.99	98.9	9.24	8.5	1.8	2.7	0.1808	0.37	0.0121	0.76	0.0236
		11:40	5	19.7		18.98	0.37	0.9	5.96	100.5	9.21	1.4	0.6	8.80	0.1776	0.08	0.0012	0.80	0.0198
4	6.0	11:45	0	19.7	1.0	13.7	1.78	3.2	5.89	812	7.83	7.1	5.5	51.8	0.1792	0.80	0.0088	2.10	0.0641
		12:45	5	19.7		10.35	0.62	1.8	6.00	101.5	9.19	1.8	0.6	22.1	0.1792	0.22	0.0088	0.50	0.0155
5	2.8	12:10	5	19.3	15	11.04	0.87	1.6	5.99	92.8	9.21	7.9	3.9	2.8	0.1772	0.48	0.0211	1.17	0.0363
		12:40	9	19.3		18.39	0.29	1.0	5.83	97.5	9.20	1.3	2.0	1.92	0.1707	0.15	0.0087	0.65	0.0202
6	21.0	12:30	0	19.1	1.6	18.48	2.87	3.0	5.87	98.6	9.21	3.3	1.6	97.1	0.1776	0.58	0.0180	0.63	0.0195
		12:45	5	19.8		10.00	1.02	1.6	6.06	91.6	9.21	9.5	4.5	30.8	0.1832	0.48	0.0211	1.70	0.0547
7	10.5	12:45	0	19.8	12	18.50	0.36	0.9	5.98	99.0	9.21	1.8	0.5	8.12	0.1772	0.09	0.0028	0.85	0.0190
		12:55	5	19.9		7.7	1.50	2.6	6.03	92.8	9.09	9.6	6.1	37.0	0.1860	0.87	0.0270	1.68	0.0621
8	28.0	11:45	0	19.2	12	18.43	0.31	0.7	5.88	97.5	9.19	1.8	0.9	9.90	0.1792	0.28	0.0097	0.56	0.0198
		12:00	5	19.3		13.3	0.48	1.7	6.17	87.3	9.21	8.5	2.8	28.4	0.1776	0.38	0.0118	1.15	0.0377
9	8.0	12:00	5	19.2	12	18.45	0.37	1.2	5.93	98.8	9.21	2.8	0.6	12.7	0.1778	0.09	0.0028	0.32	0.0099
		12:40	0	19.1		7.9	1.23	2.1	6.08	92.8	9.10	7.2	6.1	41.3	0.1802	0.84	0.0260	1.63	0.0585
10	35.0	12:55	5	19.1	12	16.47	0.90	1.8	5.83	98.7	9.19	2.5	2.6	19.3	0.1782	0.25	0.0088	0.79	0.0246
		11:15	0	19.3		17.12	0.48	0.7	5.96	98.2	9.21	1.3	1.3	17.7	0.1777	0.22	0.0088	0.51	0.0188
11	13.0	11:35	5	19.3	5.7	18.52	0.29	1.0	5.95	99.7	9.21	1.3	1.0	13.7	0.1792	0.10	0.0021	0.62	0.0161
		11:45	0	19.2		18.33	0.82	1.0	5.82	98.8	9.19	1.7	0.9	19.4	0.1792	0.09	0.0028	0.55	0.0189
12	5.5	11:45	0	19.1	1.0	18.41	0.38	0.7	5.98	99.2	9.20	1.5	0.8	15.1	0.1792	0.10	0.0021	0.87	0.0186
		11:25	0	19.2		7.10	1.60	2.5	5.98	86.9	9.08	8.1	5.3	23.0	0.1820	0.87	0.0270	1.59	0.0597
13	12.0	11:40	0	19.5	1.1	18.11	0.37	1.2	5.89	93.5	9.20	4.1	2.4	15.3	0.1782	0.23	0.0071	0.94	0.0249
		11:55	5	19.1		7.96	1.62	1.9	6.45	91.6	9.01	12.0	6.0	17.7	0.1868	1.13	0.0350	1.80	0.0688
14	13.0	11:55	5	19.1	1.1	18.30	0.48	1.1	6.70	98.9	9.20	3.1	1.5	12.3	0.1722	0.33	0.0182	0.79	0.0285
		12:05	0	19.2		7.96	1.62	1.9	6.45	91.6	9.01	12.0	6.0	17.7	0.1868	1.13	0.0350	1.80	0.0688

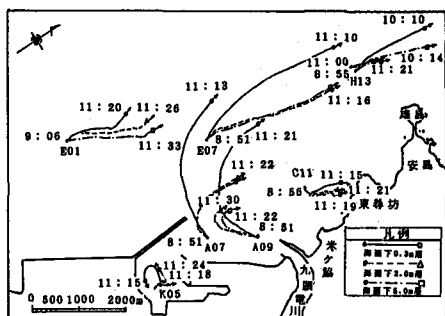


Fig.4 九頭竜河口水域での浮標の軌跡 (21,May,1981)

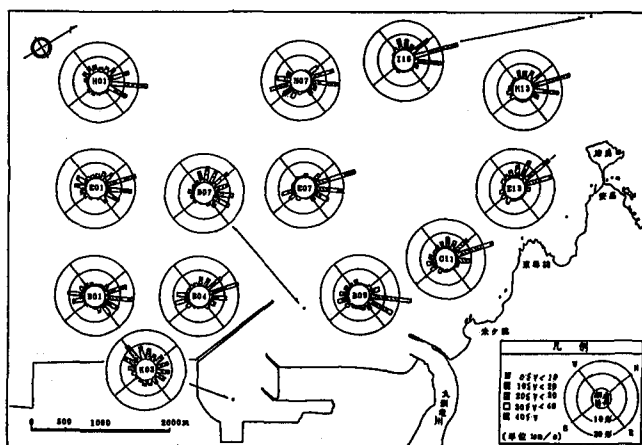


Fig.5 流向別流速出現頻度 (15~29,May,1981)

川放流水は、金沢港防波堤により沖向きに偏向させられて、同港の下流、沿岸流域の濁りは急激に減少している。このことは比較的小規模な沿岸構造物であっても、それが海岸線変形に及ぼす影響範囲は、予想以上に遠方に及ぶことを示唆していることと考えられる。

つぎに、九頭竜川についてであるが、同河川の河口部は、Fig.1 に示す様に右岸堤防が、沿岸流の卓越方向に逆う方向に設置されていることと、東雄島と安島の影響を受けて、一旦沖合に出たのち、北側に大きく彎曲し、加賀市加佐の岬付近で陸岸に接近している。したがって東尋坊と加佐の岬の間の沿岸流域は東尋坊の後流領域に相当し、外側水域との質量交換性は比較的小さいと推測される。Photo.2によれば、九頭竜川の海域内流域は、河口より北方の手取川河口に至る約40kmの範囲である。Photo.2における九頭竜

川放流水形態にみられる特徴的な点は、(i)放流水中の濁質濃度の分布は、従来の拡散理論から導かれる様な連続的低減分布形とは様相を異にして、高濁度水塊が不連続に分布すること、(ii)超速方領域での噴流が波状をなしている点である。このような分布形態の発生原因としては、河川流量の時間的変動や組織構造をもった渦の存在等が考えられる。前者については、沿岸流の流速を 20cm/s とすると、河口から 20km 離れた加佐の岬沖の高濁度水塊は約 28 時間前の出水に相当することになり、許されうる推論である。しかし、映像上にみられる流動パターンの特徴、たとえば、波状をなした噴流の波長が下流部ほど増加していくこと等を考慮すると、九頭竜川の海域内流域にみられる上流の特徴は組織構造をもつて渦群に起因するものとする方が妥当と思われる。なお、このような渦群の形成要因としては、突起部-雄島-先端で発生する渦の合体によるとする考えや横流れをうける噴流の“肝ぞう形断面”の発達と分離にあるものとする考え等があるが、この点については別の機会に論じることとする。

(2) 最上川

Photo.4は1981年4月23日の最上川河口部の5バンド映像である。この時の流量は約 $1352\text{ m}^3/\text{sec}$ であり、最上川からの流出水は九頭竜川・手取川と同様に対島海流の第3分岐流により北東方向に偏向して、河口より約 20km 北寄の三崎付近で再び陸岸に衝突している。すなわち、河口から三崎にいたる沿岸水域は外海から隔離された大きな渦領域を形成している。また、九頭竜の場合と同様に、最上川においても超速方領域では、濁り濃度の高い水塊が断続的に分布しているのが注目される。

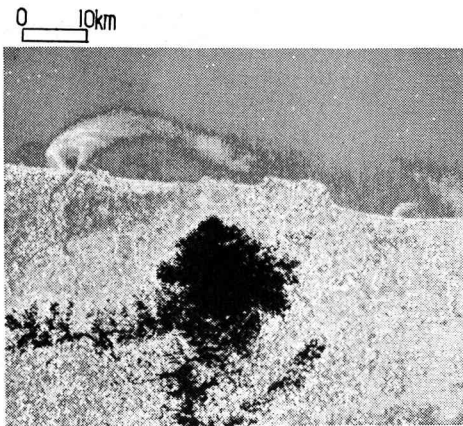


Photo.4 最上川河口水域のMS S Band5
映像(23, Apr.1981)

4. 東日本の太平洋沿岸海域

(1) 福島県沖

Photo.5は1982年4月26日のランドサットのMSS4のデータに濃度分割を施した結果であるが、(i)沿岸部には海岸線にほぼ平行して幅 $3\sim 5\text{ km}$ の高濁度の水塊が分布していること、(ii)諸戸川河口沖合およびその南方の木戸川河口付近において、中程度の濁度の水塊が海岸線と直交方向に $20\sim 30\text{ km}$ の沖合いまで張り出している事が認められる。Photo.6は木戸川河口付近の張り出し水塊の特性をより明確化するための画像処理結果であるが、その水塊の先端は直径約 30 km の反時計回りの回転流となっていることが認められる。また、この海岸沿いには、現在諸戸川河口南方に福島第一原子力発電所が、木戸川河口南方には広野火力発電所が設置され

ており、さらに、その中間位置には福島第二原子力発電所が運転中である。そこで、発電所設置の影響を観る目的で、陸岸近傍の濁り分布を特に強調した画像処理を行った。Photo.7はその一例で、MSSバンド5のデータから求めた福島第二原子力発電所と広野火力発電所付近の状態を示す。この写真により、福島第二原子力発電所では南北2本の防波堤の両側には相対的に高い濁りの水塊が、それぞれ沿岸約 1.5 km の範囲に分布しており、また、広野火力発電所では濁った水塊の規模は福島第一原子力発電所よりも大きく、その分布は防波堤の両側それぞれ $4\sim 5\text{ km}$ の範囲に及び、また、防波堤の先端を超えて沖合にまで達している。なお、広野火力発電所の場合、濁り水塊は北側に開口した港口より内部にまで浸入していることからこの港内は沿岸漂砂による堆砂が生じ易い傾向を有していることがわかる。

Fig.6は、1982年4月17日から23日までの表面水温分布図であるが、この図から親潮第一分枝($5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下の水)の先端が諸岡～広野付近の沖合い約 50 海里まで達し、そこで北上してきた $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 台の黒潮

系水との間に強い潮境を形成しており、Photo.5 に示す回転流は、この2系水相互間の強いせん断力により形成されたものであると理解できる。Photo.6 は、そのような渦が沿岸に接近すると、沿岸ぞいの水塊を渦中心部に吸込む形で沖合へ移動させていく様子を示しており、その挙動は、濁り物質や水温が沖合いに向って滑らかに減少していくとする従来の密度流理論とは著しく異なった様相を呈しているのが興味深い。

以上の検討の結果、この海域における水域環境影響評価に際しては、単に陸岸近傍での沿岸流特性のみでなく、より空間的・時間的スケールの大きな外洋での海流の分布特性をも考慮に入れた検討が必要となることがあると判断される。

0 10km

(3) 茨城県沖

茨城県沖については、主として日立市から那珂湊市に至る海域に注目してランドサットデータの解析を行なった。Photo.8 は1981年4月22日の久慈川河口から那珂川河口に至る約20kmの海岸ぞい水域における濁りの相対的濃さが、沖合い方向に変化していく状態を示したものである。また、Fig.7 は1981年4月18～24日の海流の分布を示している。これによれば、陸岸近くには親潮系水が強勢に南下しており、その陸側の114.5°E以西の海域は、金華山を始点とした殿み域を形成している。

Photo.8 では、久慈川および那珂川から放出された比較的高い濃度の河川水は海岸線に付着するように南向きに流れ、久慈川の場合には約7km南方の動燃事燃事業団東海事業所付近にまで達しており、また、那珂川からの河川水は約15km南方の銚田町付近にまで及んでいることから、観測時には海岸線近くで南向きの沿岸流が卓越していたものと推論される。また、久慈川からの中程度の濁り水塊が約7～8km 沖合いで向きを変えて磯崎付近に達しているが、内部に5km×3km スケールの低濁度の水塊(Photo.8中のA部)を残した形となっている。

このことは、陸岸から約8km 沖合いには南向きの沿岸流が分布していることを示しており、Fig.7 における南下する親潮の存在とも符号する。なお、磯崎北方の阿字ヶ浦沖の流れに関しては、宇多が1979年8月に調査を行ない、このような流れのパターンが存在していることを報告しているが、Photo.8 中のA部は、それに類似した流動パターンを示している。また、さらに沖合の超遠方領域では、Photo.8 に見られるように沿岸水塊は、久慈川河口で約20km沖まで、また、那珂川河口では約30km沖合にまで、それぞれの河口からほぼ真直ぐに延び、外洋水との間にはPhoto.7のように先端が北向きにノコギリ刃状のフロントを形成している。一方、Fig.7 に注目すると、7℃の等温泉は沿岸ぞいに波状の形で分布し、Photo.7中のフロントと類似した形状特性を示している。この事は、茨城県沖へ放出された陸側からの濁り物質の超遠方領域における拡散現象は、前述した福島県沖と同様に親潮および黒潮の分布に支配されていることを示唆しているものと考えられる。

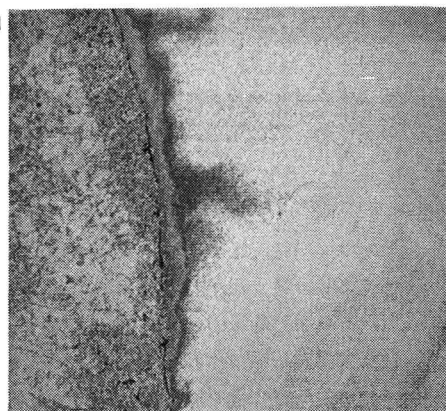


Photo.5 福島沖のMSS Band4の映像(26.Apr.82)

0 10km



Photo.6 福島沖のメゾスケール回転流(26.Apr.82)

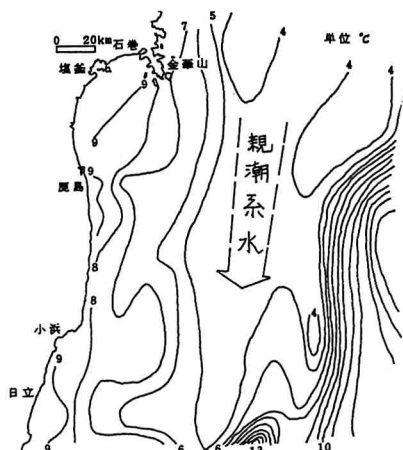


Fig.6 福島沖の水温分布 (Apr.17 to 23, 82)

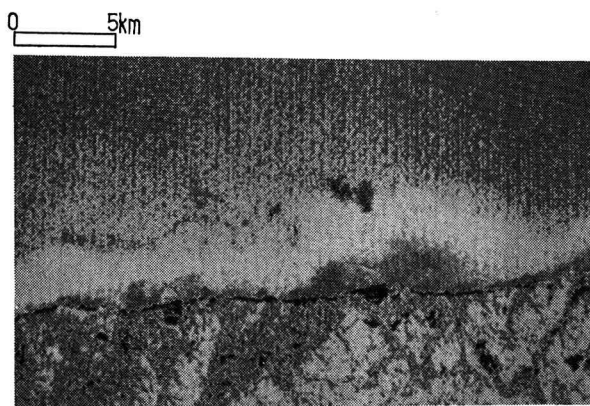


Photo.7 福島沿岸水域のMSS映像 (26.Apr.82)

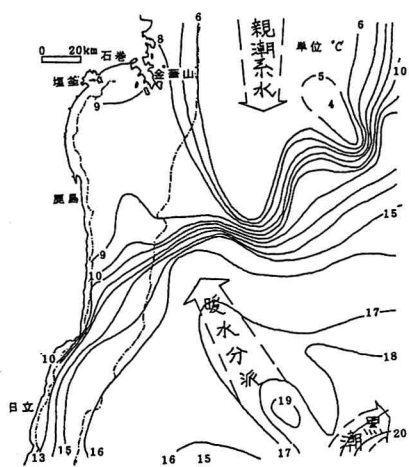


Fig.7 茨城沖の水温分布 (Apr.18 to 24, 81)

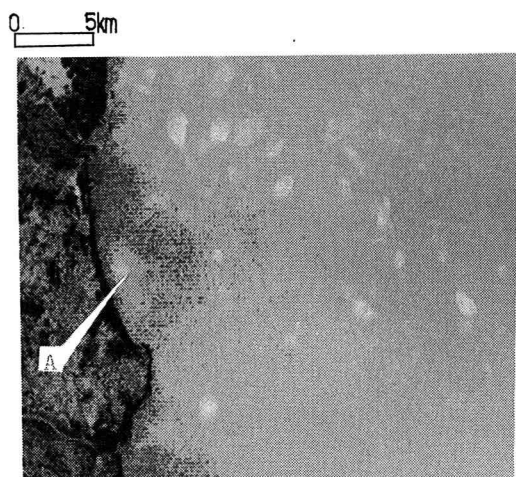


Photo.8 茨城沖のMSS Band 5映像 (Apr.22, 1981)

5. む す び

以上、福井県および房総半島以北の本州沿岸水域における河川放流水の挙動についてランドサットデータを用いて検討を加えた。その結果、海洋へ放出された河川の拡散現象は黒潮、親潮、対島海流といった大規模な海流に支配され、各河川の海域内流域は河口より数10km以上の速方にまで及ぶことを示した。本論文では紙面の都合上、各河川放流水の挙動についての解析的・実験的考察や日本列島周辺のその他の海域での画像解析については報告できなかった。これらについては、別の機会に改めて報告することとする。

参考文献 1) 大西・田中：二成層密度流における多重フロント現象の観測とそれに基づく連行量算定法，第27回海講論文集（1980）。 2) Scarpance, F.L.: Scanning the thermal plumes, Proc. of 19th. Symp. of Remote sensing of Environment (1974)。 3) 三村，堀川：熱排水の滞留と水塊形成，沿岸水域における環境保全のあり方に関する研究報告（1982）。