

本州沿岸に発生する孤立渦が沿岸水拡散現象に及ぼす 影響についての考察

大 西 外 明*・ 須 山 治**

1. 緒 言

河川等の陸側からの放出水の挙動を解析する際、これらの放出水を直接に受け入れる沿岸水塊と外洋水の流動特性の関わりを考慮に入れる必要があるのかかわらず、従来、現地観測に基づいたこの分野の研究はあまりなされていないように思われる。その原因の一つとして、対象となる流動現象の空間スケールが大きいため、従来の手法では観測が極めて困難であることが挙げられよう。しかし、近年において応用技術の発展が著しいリモートセンシングは、その困難を克服するための活路を与えてくれる様に考えられる。

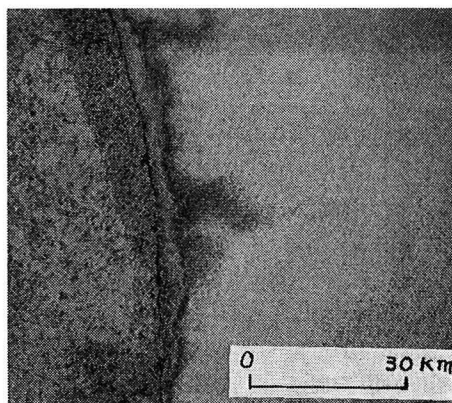
以上の見地から筆者らは、ランドサットやレア等の人工衛星からのデータを利用して、本州周辺の沿岸水理現象の解明を試みつつあり、いくつかの成果を報告してきた¹⁾。すなわち、若狭湾～山形に至る日本海海域に関しては九頭竜川、手取川、最上川からの放出水を“流れの可視化”用トレーサとして、ランドサットデータにより映像化し、この海域へ放流される河川水は、陸側に張り付いた形で北上し、その到達距離は従来の拡散理論による予測よりも遠方に達しうること示した。

本論文では、黒潮や親潮が陸岸に接近し易い東北地方沖と潮岬沖を対象にランドサットデータと現地観測データを用いて考察を加え、これらの海域に発生する直径数10kmの渦が沿岸水/外洋水の混合に重要な役割を果たすことを示す。

2. 東北地方沖の大規模渦の影響

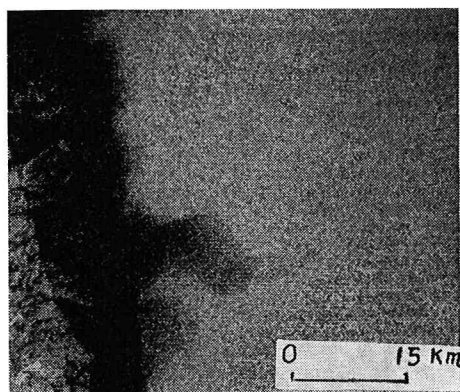
(1) ランドサットおよび船からの大規模渦の観測

本州東北地方の大平洋沿岸水域は黒潮水系/親潮水系間の混合水域と境を接しており、陸側からの各種の放出水の超遠方領域における挙動特性は、混合水域の流動特性の影響をうけて複雑な様相を呈すると予測される。筆者らは、その海域における流動状態をランドサットデータを基にしたリモートセンシングにより可視化するこ



写真—1 Landsat MSS4 image of Tōhoku off
(Apr. 26, 1982)

とを試みた。写真—1は、ランドサット MSS4 データに輝度分割を施して求めた、水中の濁りをパラメータとした海面の状態であり、1982 年 4 月 26 日における北緯 $37^{\circ}\sim 38^{\circ}30'$ 附近沿岸水域の流動状態を示す。これにより、(i) 沿岸部には海岸線にほぼ平行して、幅が約 5km の比較的高い濁りをもつ沿岸水が分布していること、(ii) 北緯 $37^{\circ}20'$ 地点付近において、中程度の濁りを示す水塊が海岸線と直交する方向に 20~30km の沖合にまで張り出しているのが認められる。写真—2 は、北緯 $37^{\circ}20'$ 付近の張り出し水塊の特性をより明確化するために処理



写真—2 MSS4 image of eddy around N. $37^{\circ}20'$
off (Apr. 26, 1982)

* 正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

** 学生員 東京理科大学大学院

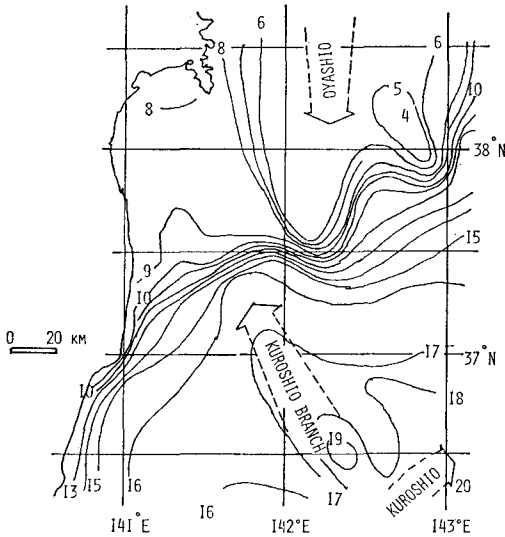


図-1 Temperature distribution at sea surface in Tōhoku off (°C): Apr. 17 to 23, 1982.

をした結果であるが、これにより、その水塊の先端は直径約 30km の反時計回りの渦となっているのが認められる。このランドサットデータに同調した地上観測データとして、福島県水産試験場の「いわき丸」によるものを用いる。図-1 は 1982 年 4 月 17 日から 23 日までの間の表面水温の分布を示す。この図から水温 5°C 以下の親潮系水塊の先端は北緯 37°20′ 付近の沖合約 80 km に達し、そこへ北上してきた水温 15°C の黒潮系水の間に明確なフロントを形成していることがわかる。また図-2 は、陸岸に近い海域の水温分布をより明確にするために、1982 年 4 月 13 日午前 3 時 30 分～7 時 57 分の間に観測された水温測定結果を基に作成した水面近傍の水温分布、および、海流の流速測定結果を示す。

これらの船上観測結果を考慮に入れたら、写真-1 がえられた時点では、北緯 37°20′ 地点沖合には、黒潮系水と親潮系水によって海岸線に直交するフロントが形成されており、そこまで北上した黒潮系水は向きを変えて 0.3～0.9 m/s の速さで、等温線に沿うように沖合へ流動していたことがわかる。すなわち、この黒潮系の沖向きの流れは地衡流的挙動を示している。次に、上記の流れの鉛直面内での構造をみるために、北緯 37°45′, 37°20′,

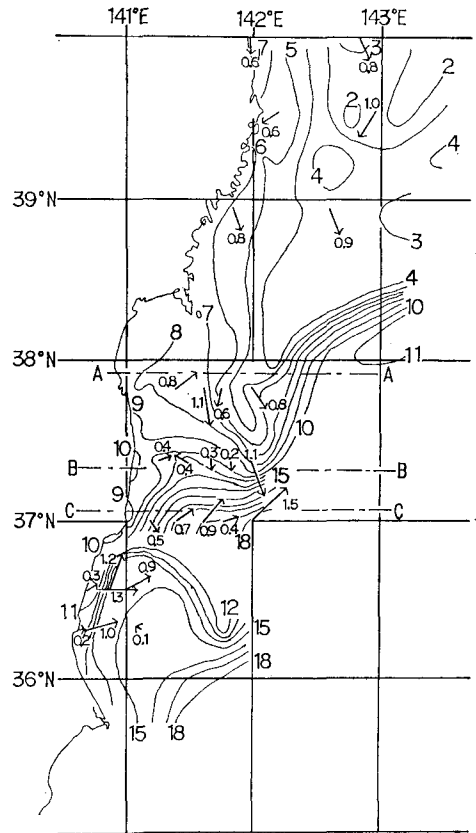
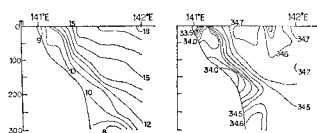


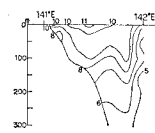
図-2 Horizontal distributions of water temperature (°C) & velocity at sea surface (Apr. 13, 1982) (福島水試による)

37° の各地点を通る東向きの測線 A, B, C 沿いの水温と塩分濃度の鉛直分布の測定結果を図-3～5 に示す。

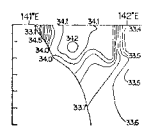
図-2, 4 および写真-2 を対比することにより、写真-2 にみられる直径約 30km の反時計回りの渦の内部には、親潮系水塊（表面水温 15°C 以上）よりも比較的高温、高塩分濃度（水温 10°C～11°C、塩分濃度 34‰ 以上）の厚さ約最大 30m の水塊が水温 8°C 以下の低温水の上に浮んだ形を呈しているものと考えられる。さらに図-4 (b) によれば、渦の下端が水深約 200m の海底に到達していることがわかる。友定²⁾ は三陸沖水域に発生する暖水渦の鉛直断面形状を観測して、渦の下端が約 1 000m 以深には達しないと報告しているが、本論で対



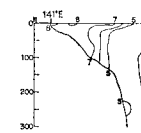
(a) Temperature (b) Salinity
図-3 Profiles of temperature (°C) and salinity (‰) (Sect. A-A)



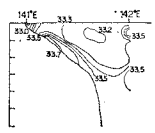
(a) Temperature (b) Salinity
図-4 Profiles of temperature (°C) and salinity (‰) (Sect. B-B)



(a) Temperature (b) Salinity
図-5 Profiles of temperature (°C) and salinity (‰) (Sect. C-C)



(a) Temperature (b) Salinity
図-5 Profiles of temperature (°C) and salinity (‰) (Sect. C-C)



(a) Temperature (b) Salinity
図-5 Profiles of temperature (°C) and salinity (‰) (Sect. C-C)

象としている沿岸に近い水域における渦は、模式的には水面と海底を連結する二次元的な断面形状を有するものと仮定しようと考えられる。

(2) 東北沖に観測された大規模渦の水理特性

図-4 に示した渦の下端付近の等温線と等塩分濃度線は上向きに膨んでおり、それは海底部から渦内部に向う上昇流の存在を示唆していると考えられる。一般に渦の内部領域の流れが、その流体を含む容器に対して相対的な渦度をもつ場合、上昇流のスケールは渦度と境界層厚さにより支配されることが知られている。

いま、水平な海面上で南向きに x 軸、東向きに y 軸をとり、また鉛直上向きに z 軸をえらび、それぞれの方向の流速成分を u, v, w とすると、渦がもつ渦度 ζ 、および境界層厚さ δ は、それぞれ次の式 (1) (2) で与えられる。

$$\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\delta = \sqrt{2\nu / f} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ν は渦動粘性係数、 f はコリオリパラメータである。

また、境界層から渦内部に向う z 軸方向の上昇流の流速 w_0 は、次式で表わされる⁹⁾。

$$w_0 = \frac{1}{2} \delta \cdot \zeta \quad \dots\dots\dots (3)$$

この様な上昇流は渦のエネルギーを弱め、沿岸水と外洋水との間の混合の時間スケールを支配すると予測される。いま、上昇流により内部領域の質量を増した渦の半径が、 t 時間に R から $R + \Delta R$ に増加し、一方、角速度が $\omega + \Delta\omega$ から ω に減少する場合を想定すると、角運動量の保存則から

$$(\omega + \Delta\omega)R^2 = \omega(R + \Delta R)^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\Delta R \ll R, \Delta\omega \ll \omega$ とすると、上式より

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta\omega}{2\omega} \quad \dots\dots\dots (5)$$

水深を H とすると、 t 時間における渦内部の容積の増分 ΔV は

$$\Delta V = 2\pi R \cdot \Delta R \cdot H \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、 ΔV は、 t 時間に境界層縁を越えて流入する上昇流による供給流量に等しい。すなわち

$$2\pi R \cdot \Delta R \cdot H = \pi R^2 w_0 t \quad \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) に式 (3), (4) を代入すると

$$t = \frac{2H}{\delta \cdot \zeta} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

上式に $\zeta = 2\omega$ を代入すると

$$t = \frac{\Delta\omega \cdot H}{\delta \cdot \omega^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

写真-1 に示した東北地方沖の渦の場合、 $H = 200$ m, $\omega = v_0/R = 0.5$ (m/s)/ 10^4 (m) = 5×10^{-5} /sec, $f = 8.8 \times 10^{-5}$ /sec, また、海水の渦動粘性係数: $\nu = 10^{-4}$ m²/s とする

と、式 (2) より $\delta \approx 1.5$ m をうる。

したがって、渦の角速度が初期値から $1/2$ だけ減少するのに要する時間 $t_{1/2}$ は、式 (9) において $\Delta\omega = \omega/2 = 2.5 \times 10^{-5}$ /sec とおいて

$$t_{1/2} = \frac{2.5 \times 10^{-5} \times 200}{1.5 \times 25 \times 10^{-10}} \approx 133 \times 10^4 \text{ 秒} \approx 15 \text{ 日}$$

渦のエネルギーは指数関数的に減衰すること、および、この海域では水深は沖合方向に急激に増加することを考慮に入れると、写真-2 渦の寿命は、上の推算よりもはるかに長くなるものと予測される。なお、本海域における渦の寿命に関連して、斉藤らは⁴⁾、1979 年～1981 年の間に水深 1 000 m のオーダの三陸沖に発生した渦の寿命を追跡し、その結果、「三陸沖の渦の持続時間は少なくとも 9 ヶ月はあった。」と報告している。

以上の考察から、この地方の沿岸部沖合には、写真-1 に示すように、直径数 10 km の渦が分布することがあり、その場合、沿岸水塊が水平面内で移流して渦内部にとり込まれるとともに、海底部にそって分布する境界層から上昇流が発生し、それらを含む渦内部の水塊は、相当に長期間にわたり渦の内部に保持される可能性があることがわかる。なお、写真-1 の渦の循環は、渦の半径を R を 1500 m, 円周方向の流速を $v = 0.5$ m/s とすると 47×10^8 m²/sec となる。

3. 潮岬沖の沿岸水/外洋水の混合現象

(1) 潮岬沖の大規模な渦

本州太平洋側海域の大規模な渦と沿岸水との関わりを示す興味ある他の例として、潮岬沖のものを挙げる事ができる。写真-3 は、1979 年 10 月 23 日のランドサットデータを解析して求めた潮岬沖の映像である。この映像にみられる沿岸付近の濁りの分布状態から、(i) 潮岬西側の沿岸ぞいに東向きの流れがあり、その流れが岬に

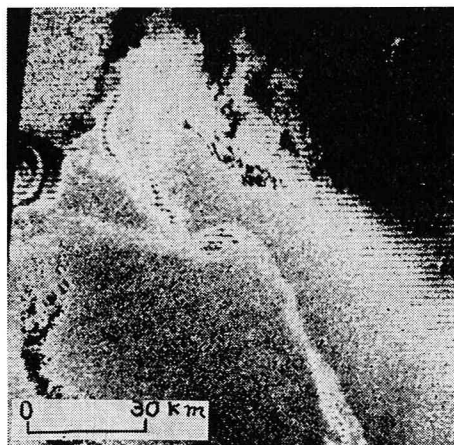


写真-3 MSS4 image of Kumano-Nada (Oct. 23, 1979)

達して、沖向きに流向を転じる、(ii) また、その沖合には、黒潮の一部とみられる東向きの流れが分布して、**図-6** に模式的に示したBに相当する位置にフロントを形成すること、(iii) 新宮川からの海岸近くでは北向きに流れ、(iv) 勝浦から潮岬に至る海岸ぞいには、幅 5km 程度の沿岸流が北東方向に流れるが、その沖合では、南西方向に反転して、**図-6** 中のAに相当するフロントに連なっていること、(v) 潮岬南東の約 60km 沖合のフロントABとの交点付近に直径 20~30km の反時計回りの孤立した渦がある等のことが認められる。この渦の鉛直断面形状は本研究では直接に測定しえなかったが、黒潮の岸側の遠州灘から熊野灘にかけての海域に発生する反時計回りの冷水塊は、黒潮よりも深い数 1 000m に及ぶ深部に達することを考慮すると、**写真-3** に示す渦は海底に達する順圧的な性状を有しているものと推論される。したがって、この渦を水面から水深 H を連結する二次元的な渦と考えると、次式で表わされるポテンシャル渦度の保存則が成り立つ。

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{\zeta + f}{H} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

孤立渦が位置する **写真-3** 上の地点は、水深 1 000m 以上の熊野舟状盆地にあることから、黒潮の岸側の比較的浅い水深のフロントBぞいで発生した渦度は、フロントAとBの交点付近に達すると、式 (10) の関係に従ってその強さを増し、フロントAぞいに移流する沿岸水塊を取り込むことがありうると考えられる。この渦による沿岸水塊と外洋水との混合現象の時間スケールを評価する上で、渦の強さを知ることは興味のある事項であるが、**写真-3** がえられた 1979 年 10 月にはそれを測定しえなかった。そこで、ここでは、1983 年 10 月に得られた和歌山水域のデータにより、渦の強さの評価を行う。1982 年 10 月 26 日には、潮岬とその南方約 130 km の点を結ぶ測線ぞいに、船上から海面近傍の海流の流向・流速分布および鉛直面での海水の水温と塩分量の測定

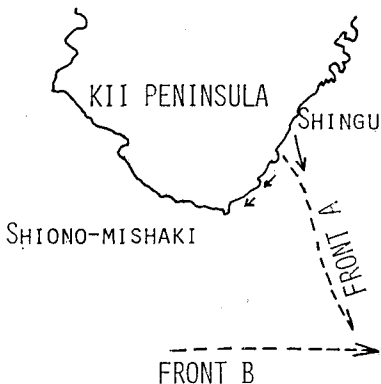


図-6 Schematic diagram of front distribution in Kii Pen. off

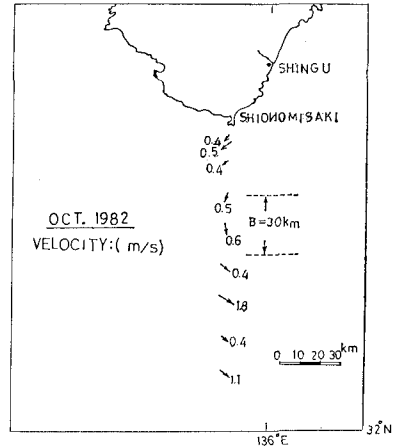


図-7 Velocity distributio in Kii Pen. off (Dec. 21, '82)

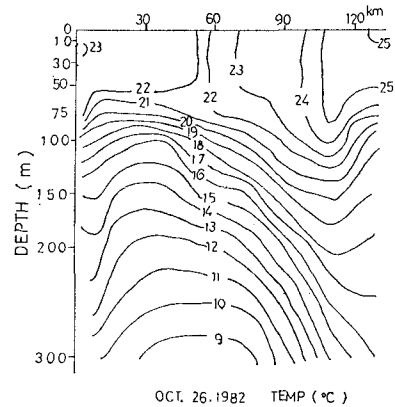


図-8 Distribution of water temperature (Dec. 21, '82)

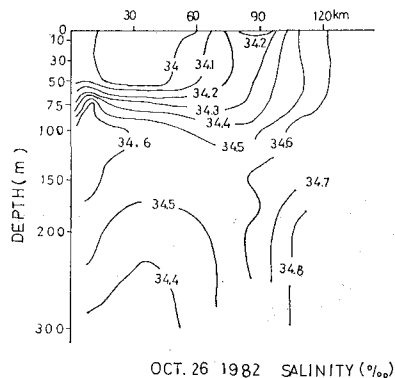


図-9 Distribution of salinity (Dec. 21, '82)

が和歌山水試により行われた。**図-7~9** にその結果を図示する。これらの図から、(i) 岸側に分布する水温 22°C~23°C、塩分量 34‰ 以下の沿岸水塊は幅約 30 km、深さ約 50 m で南西方向に約 0.4~0.5 m/s の流速で流れ、(ii) 一方、その沖合では、黒潮の一部とみられる水温 32°C 以上、塩分濃度 34.3‰ 以上の流速

0.4~1 m/s の南東流が分布していることがわかる。図—7を参照して、せん断層幅を $B \approx 30$ km, その間での流速差 ΔU を $\Delta U \approx 0.5$ m/s とすると、前出のフロントBに相当するフロントぞいの渦度 ζ ($=\Delta U/B$) は 1.7×10^{-5} sec と評価される。また、同じ海域における1982年12月21日の測定結果からは、 $B=13$ km, $\Delta U=1$ m/s, したがって、 $\zeta \approx 8 \times 10^{-5}$ sec となる。これらの結果を参考にして、フロントBぞいの渦度 ζ を 10^{-4} /sec と考え、その渦度がそのまま保存されるものと仮定すると、前述の孤立渦が持つ循環 Γ は、 $\Gamma = \pi R^2 \zeta = 7 \times 10^4$ m²/s となる。すなわち、潮岬沖の孤立渦は東北地方沖の渦の約2倍の強さをもつものと評価できる。

(2) フロントAについて

次に、図—6に記したフロントAの形成機構につき考察する。本州南方の黒潮は、四国沖から潮岬をかすめて三宅島や八丈島に向う直進型流路をとる場合と、潮岬の東から遠州灘を大きく迂回する大蛇行型流路をとる場合があることが、宇田等⁵⁾により明らかにされている。また、後者の流路をとる場合には、川辺⁶⁾によれば、遠州灘中には反時計回りの大冷水塊が発生し、その際の紀伊半島的那智勝浦町浦神の水位が高まり、一方、潮岬のすぐ西側の串本の水位はほとんど上昇しなく、僅か15kmしか離れていない両地点内には、水位の不連続点があるとされている。筆者らは、フロントAがその水位不連続現象と関連があるとの想定のもとに、ランドサットデータを用いて、その可視化を試みた。写真—4は図—7~9がえられた時点の1982年10月22日のランドサットのMSS5データから求めた同海域の映像である。写真上では、フロントAに相当する位置に明確な潮境をみることができる。同様の潮境は1983年10月24日のランドサットデータによっても認めることができる。写真—4に示す可視化の結果によれば、この日の水位不連続点の陸岸での位置は従来からいわれている串本と浦神の間ではなく、浦神の東北約15kmの新宮川河口付近にあ

る。また、同河川からの放出水は南向きにのびるフロントに沿って移流し、その拡散形状は、従来の理論から予測される拡散パターンとは著しは様相を異にしている。

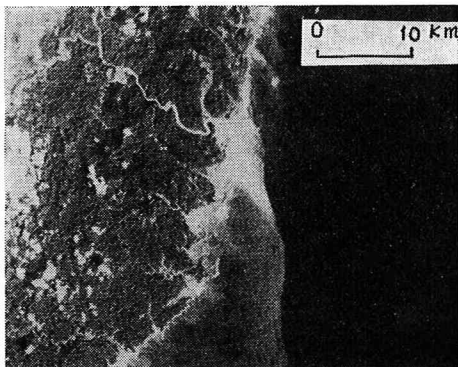
写真—4をさらに詳細にみると、新宮川およびその北方において開口する諸小河川からの放出水は、河口付近では海岸線とほぼ直交する方向へ移流するが、約10km以上沖合に達すると、その向きを南へ転じて、上記のフロントぞいを沖合に流れているのが認められる。1982年10月の写真—4にみられる河口付近での流向は、1979年10月の状態を示す写真—3のものとは異なっている。しかし、外洋におけるフロントの位置には、両者間にそれほど大きな差は認められない。このことは、この海域における潮汐の影響は海岸線から5~10km程度の沿岸水域内に限られ、一方、超遠方領域でのフロントとそれに沿う海流の分布は、潮汐よりもはるかに長周期をもつ黒潮の流路変動に支配されることを示唆していると考えられる。

4. 結 語

海域へ放出される河川水等の拡散現象については、従来、検討の重点を放出口近傍領域およびそれに隣接した比較的狭い領域での水理現象の解明におかれてきており、放出口から十分に遠く離れた領域(超遠方領域)における外洋の乱れとの関係については、曖昧なままになっているように思われる。しかし、例えば低密度の表層水の拡散現象の解析に際しては、超遠方領域の流動状態は解析上では境界条件として重要であることから明らかに、従来よりも一層広い海域を対象として、拡散現象を検討することが必要であろう。本論では、本州沿岸沖に発生する大規模な渦が沿岸水塊の挙動に及ぼす影響の解明を試み、東北地方沖の場合、沿岸水は直径数10kmの渦内部にとり込まれ、長期間にわたって渦内部に保持されうること論じた。また、潮岬沖では、新宮川河口付近から沖合にのびる水位不連続線と大規模な孤立渦が、超遠方領域での沿岸水の挙動を支配することを示した。

参 考 文 献

- 1) 大西外明・須山 治: ランドサットデータを導入した本州周辺の河川水拡散の研究(1), 第28回水講演文集, pp. 105~111, 1984.
- 2) 友定 彰: 本州東方海域で黒潮から切離する暖水塊の海洋構造, 海洋科学, pp. 141~154, 1978.
- 3) Greenspan, H. P.: The theory of rotating fluids, p. 36. (Cambridge Univ. Press).
- 4) 斉藤誠一・三島清吉・飯坂讓二: 日本海洋学会年次講演会予講集, pp. 46~47, 1983.
- 5) 宇田道隆: 水産試験場報告, 6, pp. 1~130, 1935.
- 6) 川辺正樹: Sea level variations along south coast of Japan and large meander in the Kuroshio, Jour. of Oceanogr. Soci. of Japan. Vol. 36, pp. 97~104, 1980.



写真—4 MSS 5 image of Kumano-Nada (Oct. 22, 1982)