

ランドサットによる凸型底面水路における密度流の観察と解析的考察

Observation of Stratified Currents over Convex Bottom by Remote Sensing

東京理科大学 理工学部 大西 外明

1. はじめに

海域へ放出された河川水や沿岸水塊の流れは、自然界での密度流の典型的な例の一つであり、現在に至るまでに数多くの調査研究の成果が報告されてきている。しかし、その多くは放水口に比較的近い、河川放流水の慣性力あるいは浮力が卓越する領域を対象としたものである。しかし、例えば、濁質や非減衰性もしくは半減期の長い汚染物質を含む放流水が沿岸水域環境に及ぼす影響を評価する場合には、放流口から著しく遠方の流動特性を知る必要がある。この様な観点から、著者等は人工衛星を用いて本州周辺の水域を対象としてそれ等の検討をすることを試み、その成果の一つとして、先に、福島沖と紀伊半島沖の大規模な渦が沿岸水の流動に及ぼす影響について報告し（1984¹⁾）、また前回の水理講演会では、日本海へ放出される九頭竜、手取川、最上川からの河川水の超遠方領域における流動特性をランドサットデータによって可視化して、密度流論の立場からの解析を行った。その結果、超遠方領域の流れの解析においては、地球の自転効果を見逃さないこと、その場合、河川放流水は一般に非発散性を帯びること、とくにコリオリパラメータに等しい振動数の波動的変化は発散しにくいことを示した（1986²⁾）。しかし、一般に沿岸水域の水深は比較的浅くて底地形の影響を見逃さないと予測されるのに拘らず、その効果を考慮にいれなかった。そこで、本論文では、底地形が凸型に急変する断面部を通過する密度流をランドサットデータをもちいて可視化することを試み、その結果について、現地での海上観測データと対比しながら密度流論の見地から解析して流れの混合条件を明らかにする。

2. リモートセンシングによる津軽海峡水域を通過する流れの観察

津軽海峡は日本海と太平洋を結ぶ水路であり（図1）、海水の塩分濃度及び水温がその両水域で互いに異なることが知られている。また、津軽海峡の海峡内外での海水交換においては、西口（日本海）から東口（太平洋）へ流れる海流が支配的であること、日本海からの流入水塊の東口への張出しの度合いは、海峡の両端の潮汐の位相、潮位の相対値により支配されることが知られている。しかし、東西両水塊の接点となる海

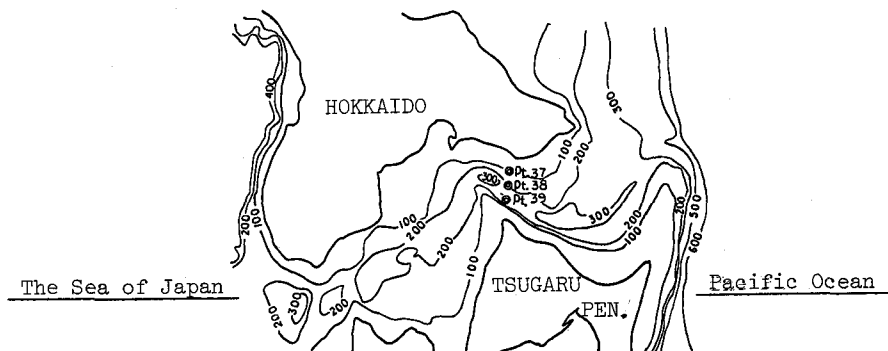


図1 津軽海峡の地形

峡内断面の位置を現地で実際に観測する試みは今までになされた事はなく、また、両者の混合の度合いを支

配する水理条件についても十分に議論された事がないように考えられる。いま、各種の人間活動が海峡内の水域環境にあたる効果を評価しようとする時、これらについて知ること重要と思われる。そこで、先ず、西口からの流入水の分布状態をランドサットを用いて可視化することを試みた。

Plate 1は、1982年5月15日のランドサットMSS 5バンドにより可視化した津軽半島周辺水域の流れを示す。この場合、十三湖と日本海を結ぶ唐川からの放出水を含む沿岸水は、竜飛岬沖を経て津軽海峡内へ流入し、竜飛岬先端付近で消えている。また、日本海からのこの流入沿岸水塊を除けば、海峡全水域はほぼ一様な輝度の水塊にしめられており、一方、北海道亀田半島沖合を始点として北東方向に延びる明確なフロントが存在しているのが認められる。

次にPlate 2は、1982年7月8日の津軽半島から下北半島付近の水域水面のMSS 5バンド映像である。この場合は、イ) 海峡西口から中央部へ侵入する幅約30kmの水塊(図2に記した水塊A)が津軽半島高野岬沖付近に達して、周囲水との間に明確なフロントを形成していること、ロ) 水塊Aは下北半島の手前で阻止されて、それと接して西岸沿いに海峡部から陸奥湾へ流入して北海岬に達する水塊B(図2)が

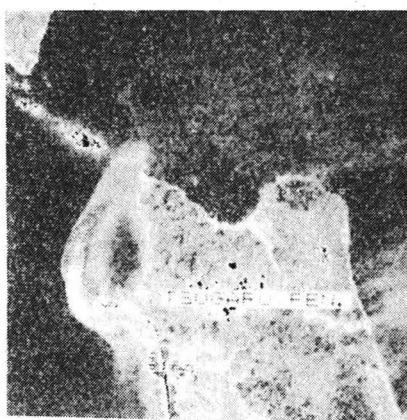


Plate 1 津軽半島付近の沿岸流
(1982年5月12日)

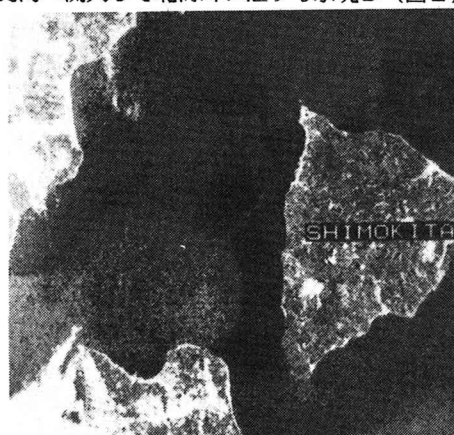


Plate 2 津軽海峡西口の状態
(1982年7月8日)

存在すること、ハ) 汐首岬と大間岬を結ぶ位置に海峡を横断するフロントが存在すること、ニ) 西口から海峡に入った日本海からの水塊は、大間岬をこえて沿岸沿いに流れて風間浦付近に達し、そこで沖合方向に向

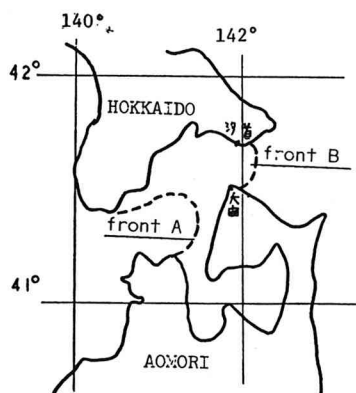


図2 フロントの分布(7月8日)

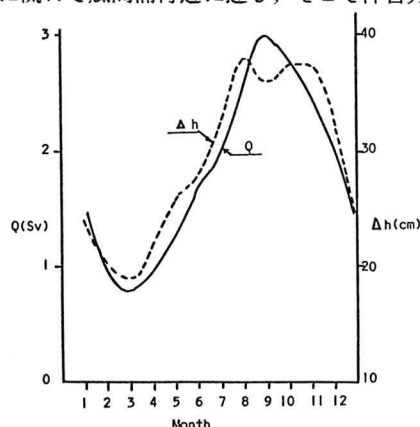


図3 季節毎の海峡通過流量³⁾

きを転じているのが認められる。図3は、Toba等により求められた津軽海峡を通過する月別の海流流量である。Plate 2(7月)の場合はPlate 1(5月)のものに比べて海峡の通過流量が大きく、その分だけ日

本海から流入する水塊が海峡深部にまで入り込みやすくなるものと判断される。いま、図2のフロントBが西口からの侵入水先端と考えると、Plate 2が得られた状態では、大間岬と汐首岬を結ぶ断面より西側水域は日本海水域の水理特性の制御下にあるものと推測される。さらに、Plate 1の沿岸水塊およびPlate 2のフロントの分布状態から、密度を異にする日本海からの水塊と海峡内の水塊および太平洋側水塊は、潮汐等の乱れによって互いに混合する度合いが少ないものと推察される。

3. 現地観測結果

以上では、Plate 2において見られる大間岬と汐首岬とを結ぶ水面映像の輝度の不連続線を、日本海側水塊と太平洋側水塊を分かつフロントであると推定した。その事の妥当性をたしかめるために、図2に記した不連続線の西側pt. 1と東側pt. 2の位置でえられた現地観測値を検討した。図4は、両測点における水深3mの位置での、1984年2月13日から27日までと同年5月23日から6月6日までの間の流速の測定値から求めた流速の変動スペクトルをしめす。また、図5は1985年の水深7mにおける両点間での流速と流向の季節毎の分布をしめす。これらの図より明らかなように、pt. 1では北向きと南向きの流れが卓越して、日周期で変動し、その平均流速が約20cm/sであるのに対して、pt. 2では、平均流速約が25cm/sの半日周期で変動する北西向きと南東向きの流れが卓越する。

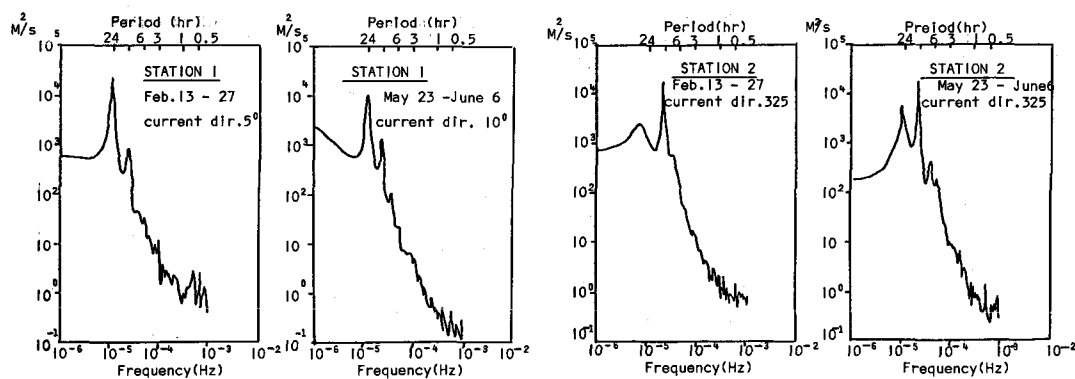


図4 Pt. 1とPt. 2における速度の変動スペクトル

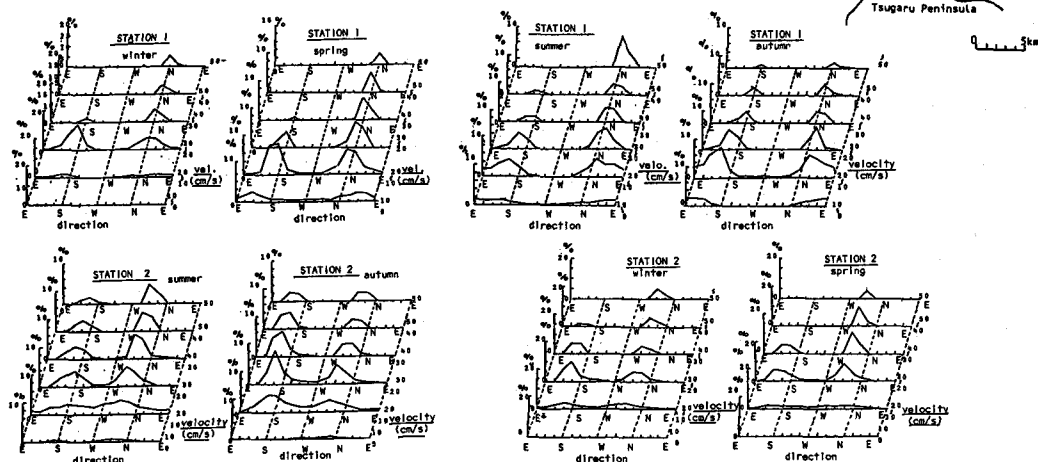


図5 Pt. 1とPt. 2での流速と流向の季節的変動

以上の現地観測結果を考慮に入れると、図2またはPlate 2に示したフロントBを境として、その東西水

域は流動特性を異にするとした前記の推論は妥当と考えられる。さらに、フロントAとBは、海峡西口より侵入した水塊の先端であり、その間には約24時間の位相差があると推論される。

4. 凸型底面水域における成層密度流の混合条件についての解析的考察

つぎに、上記の二測点の水深7mの所の水温と塩分濃度を1984年2月22日から27日の間に連続的に観測した結果を図6に示す。この図から、大間岬を境とする潮目が存在し、低密度の西側からの水塊

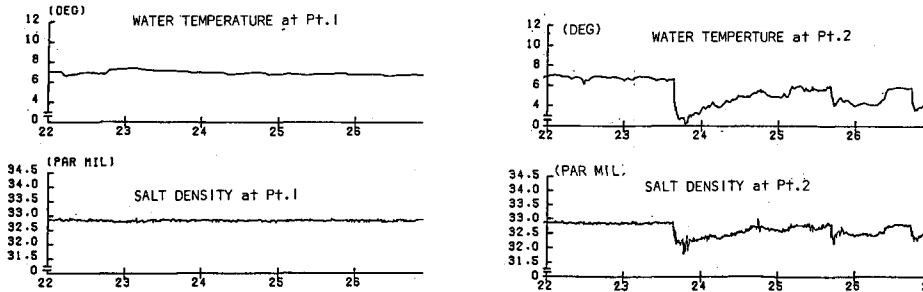


図6. 水温と塩分濃度の変動

が高い流体密度の太平洋側水塊の上を表層流としてしていくものと予測される。その付近の水域は、図1に示すように海底地が急激に隆起しており、その隆起高あるいは流下流量の如何によっては、両水塊の間に混合が生じる。その混合条件を見出すための解析モデルとして、図7のような凸型底を通過する二成層流場を想定する。

いま、水平な底面部上に原点を選び、流れの方向にx軸、鉛直上向きにy軸をとり、 $y = b(x)$ で表される水路底上を流れる二層流の下層と上層の流速、水深、密度をそれぞれ (u_1, h_1, ρ_1) と (u_2, h_2, ρ_2) とする。流体の粘性を無視すると、上層流と下層流の比エネルギー E_1 と E_2 は、それぞれ次式で与えられる。

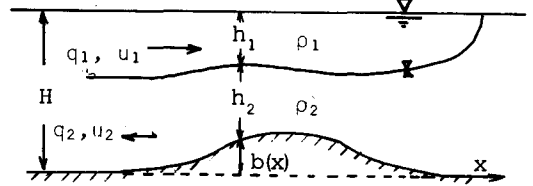


図7 解析モデル

$$E_1 = \rho_1 g H + \rho_1 q_1^2 / 2 h_1^2 \quad (1)$$

$$E_2 = \rho_1 g H + (\rho_2 - \rho_1) g (h_2 + b) + \rho_2 q_2^2 / 2 h_2^2 \quad (2)$$

ただし、Hは全水深、 q_1 と q_2 はそれぞれ上層と下層の単位幅あたりの流量である。(1)と(2)の差を E^- とすると

$$E^- = E_2 - E_1 = (\rho_2 - \rho_1) g (h_2 + b) + \rho_2 q_2^2 / 2 h_2^2 - \rho_1 q_1^2 / 2 h_1^2 \quad (3)$$

両辺を $g(\rho_2 - \rho_1)H$ で割ると

$$E^* = h_2 / H + b(x) / H + (1/2) Fr_2^2 (h_2 / H) - (1/2) \epsilon Fr_1^2 (h_1 / H) \quad (4)$$

ただし、

$$E^* = E^- / g(\rho_2 - \rho_1)H \quad (5)$$

$$Fr_1 = q_1 / (g^- h_1^3)^{1/2} : \text{上層流の内部フルード数} \quad (6)$$

$$Fr_2 = q_2 / (g \cdot h^3)^{1/2} : \text{下層流の内部フルード数} \quad \text{----- (7)}$$

$$g^* = (\rho_2 - \rho_1) g / \rho_2 \quad \text{----- (8)}, \quad \varepsilon = \rho_1 / \rho_2 \quad \text{----- (9)}$$

式(4)の E^* は、上層流のエネルギーを基準としてあらわした下層流エネルギーである。

非粘性の二成層流の場合、内部境界面が底頂点より下にある場合には、上層流が射流状態で常流状態であれ、上下層間の混合がおこりうるが、境界面が水路の底頂点の上にある時には、混合の有無は下層流の特性により支配されると考えられる。図8は、図1に示した測点37～39において1984年4月26日に測定した海水密度の鉛直分布である。これによれば、上層流の厚さは50～70m程度であるので、岸に極く近い水域を除けば、層間の混合は下層流により支配されるものとする。即ち、均等質な流体の流れの場合と同様に、流れが射流から常流へと変化することにより混合が生じると考える。その際、与えられた q_1 に対し下層流が限界流となる条件として、式(4)より次式が得られる。

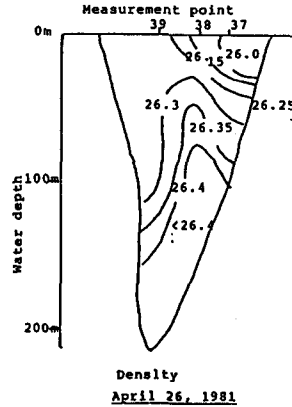


図8 流体密度の鉛直分布(測点37～39)
----- (10)

$$Frc^2 = Fr_1^2 + Fr_2^2 (1 - Fr_1^2) = 1$$

フロントB付近の海峡断面の流れに上式を適用してみる。図5を参照して、 $u_1 = 0.3 \text{ m/s}$ 、また、図8より $\rho_1 = 1.0260 \text{ gr/cm}^3$ 、 $\rho_2 = 1.0264 \text{ gr/cm}^3$ すると $g^* = 0.00382 \text{ m/s}^2$ 、 $\varepsilon = 0.9996 = 1.0$ と推算できる。また、図1と図8を参照して、 $H = 200 \text{ m}$ 、 $b_{\max} = 100 \text{ m}$ とし、かつ、突起部から十分上流で水路底が水平と考えられる位置での上層水深を $h_1 = 50 \text{ m}$ すると、 $q_1 = 15 \text{ m}^3/\text{s/m}$ となる。また、その断面において $u_1 = u_2$ と仮定すると $q_2 = 45 \text{ m}^3/\text{s/m}$ となる。その場合、式(4)より次の関係式をうる。

$$E^* = (h_2 + b) / 200 + 1325 / h^2 - 29450 \{1 - (h_2 + b) / 200\} / \{1 - (h_2 + b) / 200\}^3 \quad \text{----- (11)}$$

上式を用いて、 b/H をパラメータとして、下層流エネルギー E^* と内部境界面高 $(h_2(x) + b(x)) / H$ の関係を求めた結果を図9に示す。図に見られる様に、 b/H が小さい場合には、エネルギー曲線は二つの極限值をもつが、 b/H が大きいと(今場合、 $b/H > 2$ の時)は極限值がなくなる。この極値の点を結ぶ線は式(10)で与えられる $Frc = 1$ の条件を示しており、その右側は射流領域、また、左側は常流領域である。上下層間で混合が起こる際は、界面は必ず $Fr = 1$ の線を横切る。上記の数値計算の条件下では、下層流が上流部(海峡入口)で持つエネルギーは $E^* = 0.75$ であるから、上流での流の状態が常流の場合は、突起部を通過する際にも常流の状態が保たれて、上下層間で混合は生じない。しかし、上流での流れが射流の場合、突起部において

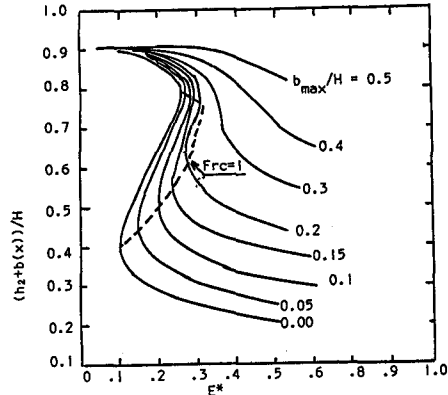


図9 凸型底水路内の二層流のエネルギー曲線

常流となり、そのさいに内部跳水をともなって混合する。現実には、流れが射流状態で流れることが多く、上記のフロントは比較的不安定な状態にあると推察される。

6. 結語

ランドサットMSSデータから得られた津軽海峡の水面映像(Plate 2)と海上観測データを総合して、大間岬と汐首岬を結ぶ断面で、日本海側と太平洋側からの水塊間のフロントが形成され、その左右の水域で流速の変動スペクトル、水温、塩分濃度等の特性が異なることを示した。また、その断面付近で底の突起が顕著なことから、海峡を凸型底水路に見立て、図7に示した様な単純な解析モデルを導入して、両水塊の混合性について考察して、このフロントは比較的不安定な状態にあると推測した。しかし、以上の解析は単純化した条件のもとで行われたものであり、明確な結論を得るためには、更に調査検討をくわえる必要がある。

参考文献

- 1) 大西 外明, 須山 治 : "海洋の大規模渦が沿岸水の物理的挙動に及ぼす影響", 土木学会論文集, No. 351, pp 183 ~ 192 (1984-11).
- 2) 大西 外明, 馬場 恭平 : "ランドサットデータを導入したコリオリ力卓越場の河川水の拡散特性の解析的考察", 第30回水理講演会論文集, pp. 733 ~ 738 (1986-2).
- 3) Toba, Y., Tomizawa, K., Kurosawa, Y. and Hanazawa, K. : "Seasonal and year to year variability of the Tsushima-Tsugaru warm current system with its possible cause", La. mer., 20, 41-51. (1982).