

衛星画像ならびに現地データに基づいた石狩川河口周辺の沿岸水理解析

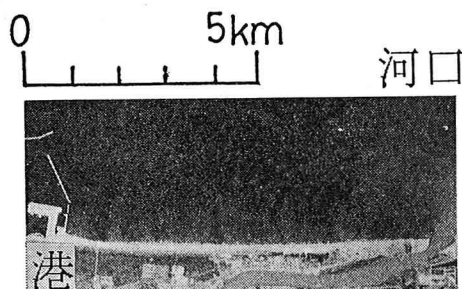
灘岡 和夫*・山下 俊彦**・蒲田 浩久***
佐藤 尚稔****・牧野 有洋****

1. はじめに

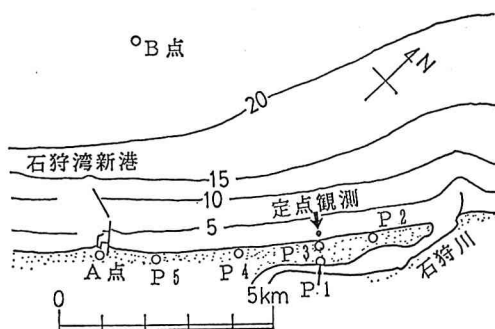
土砂や汚濁水が河口から流出したとき、そのうちのどれくらいの量がどのようなメカニズムで周辺の海岸へ輸送されるのか、そしてそれがさらに周辺海岸からどのようにして沖に流出するのかがという問題は、沿岸域での全体的な土砂収支や汚濁負荷を考える上で解明すべき非常に重要な課題である。しかしながら、現象が広域にわたるうえさまざまな要因が絡み合っているため、この問題はほとんど未解明の状態のまま残されている。

この種の現象は、一般に室内実験で再現することが困難なため、その解明には現地データに基づいた何等かの発見的なアプローチが必要となる。そのような考え方に基いて灘岡ら(1988)(以下前報と言う)は、全国の主要な河口周辺の海岸の衛星画像や航空写真を調査し、その中で、石狩川河口周辺海岸にきわめて特徴的な筋状の濁水流出パターンが現れることを見いだしている。写真—1はその一例で1986年10月1日のSPOTの衛星画像であるが、海岸付近の濁水が400~500m程度のほぼ周期的な間隔でかなり沖(1~2km)までヒゲ状に流出している様子がわかる。沿岸水の沖流出に関しては、特にここで対象とする緩勾配海浜の場合、従来 rip current が主たる原因としてとらえられているが、調査時点での波浪データを調べてみたところ、ほとんどベタ凧に近い状態であったことから rip current の可能性はきめて小さく、むしろ沖向きの風の作用の可能性が示唆された。しかし、前報の段階では明確な結論を得るには至らなかった。

そこで本論文では、昨年9月に7日間にわたり実際に現地観測を行い、あわせて衛星画像の解析を行うことによって、この現象の発生機構を解明することを試みた結果について述べる。具体的には、①石狩川が起源と思われるこの濁水がどのようにして対象海岸に運ばれてきた



写真—1 1986年10月1日 SPOT 画像
(BAND 1~3 に対応)



図—1 対象海岸ならびに測定地点

のか、そして②上述のヒゲ状の沖向き流出パターンの発生原因は何か、ということに焦点をあてて解析した。

2. 対象海岸の地理・海象・気象条件の概要

(1) 地理条件

石狩湾の湾奥部は約27kmにわたる緩弧状の砂浜海岸となっている。今回対象としたのは図—1に示す石狩川河口と石狩湾新港の間の全長約8kmの海岸である。図に示すように、この海岸は、水深10~15mまで等深線が海岸線にほぼ平行に走っており、平均1/120というかなりの緩勾配になっている。底質は、平均粒径0.15mmのよく淘汰された細砂である。

(2) 海象・気象条件

この海岸の波浪は海岸線に対してほぼ直角であり、1

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 土木工学科
** 正会員 工博 北海道大学助教授 土木工学科
*** 学生会員 東京工業大学大学院 土木工学専攻
**** 学生会員 北海道大学大学院 土木工学専攻

m 以下の有義波高が約 70% 程度を占めるきわめて穏やかな状態である。潮差もたかだか 0.4 m 程度で、潮汐流の大きさは 5~6 cm/s 以下である。湾外の海流は、対馬海流が北海道西岸に沿って北上しているが、冬期にはリマン海流の影響で弱まる。一方沿岸付近の流れについては漂流瓶による調査が行われており、それによると夏期には北上傾向であるが、冬期には北西の季節風の影響を受けて弱まることが知られている。

3. 現地観測の概要

観測は MOS-1 の撮影日 (1988 年 9 月 18 日) を挟んだ 9 月 15 日から 21 日までの期間に行い、図-1 に示した地点 (河口から約 3 km, 汀線から沖合い 77 m, 水深 120 cm) での定点観測と、河口内の P₁ 地点および海岸沿いの P₂~P₅ 地点での計 5 地点での多点観測を実施した。

観測項目としては、定点観測では電磁流速計による平面二成分流速と水温の計測を 20 分間ずつ 2 時間おきに、そして多点観測では採水による濁度と塩分濃度ならびにフロートによる流況調査を 6 時間おきに行った。また現地観測期間中の気象・海象データとしては、石狩湾新港の A 地点で観測された気圧・気温・風向・風速の気象データと、B 地点に設置してある超音波波高計による有義波高・有義周期・平均流向ならびに平均流速のデータを用いた。

4. 河口から対象海岸への濁水輸送メカニズムについて

写真-2 は 9 月 18 日午前 10 時の MOS-1 画像で、主として濁水に反応している BAND 1 の輝度分布を示したものである。これを見ると、河口流出水の主流は北上しているが、写真-1 と同様に河口から新港へ向かって岸づたいに濁水が現れているのがわかる。この濁水は、現地海岸で 18 日の朝から午後にかけて肉眼でも確認されており、さらに 21 日の午後にも同様な濁水の発生が確認されている。そこでまず、このような海岸沿いでの

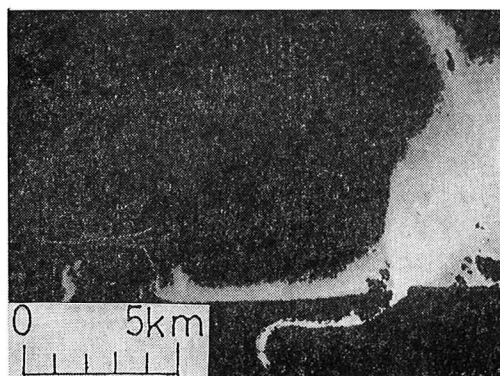


写真-2 1988 年 9 月 18 日 MOS-1 の画像 (BAND 1)

濁水の発生メカニズムについて検討してみた。

図-2 は、定点観測による流速ベクトルとその絶対値、そして P₃ 地点での塩分濃度の経時変化を示したものである。(ただし 17 日から 18 日の正午あたりまでの流速は計測機器をマウントした架台が波で転倒したため欠測となっている。) これを見ると、濁水が発生する一日前あたりに、新港向きの大きな流速が発生しているのがわかる。またそれと同期する形で塩分濃度の低下も見られる。紙面の都合上ここには図示していないが、このような P₃ 地点に現れた塩分濃度の低下は、ほぼ同時期に他の P₂, P₃, P₄ 地点でもみられ、その時いずれの地点でも新港向きの比較的大きな流れが観測されている。さらに、採水された濁質はごく軽量のけん濁物質で、石狩川の河川水の濁質とほぼ同じであることが確認されている。これらのことは、濁水が新港向きの流れによって河川から岸づたいに輸送されてきていることを示唆している。(ただし 15 日午後の塩分濃度の減少の原因は不明)

そこでつぎに、この新港向きの沿岸流の発生原因について考えてみる。可能性としては、a) 海浜流、b) 潮流、c) 吹送流、d) 河口流、e) 密度流、f) 海流、が考えられるので、それぞれについて以下に検討してみた。

a) 海浜流: 通常、海岸付近の流れは、波によって起こされる海浜流(沿岸流)が支配的と考えられている。しかし、観測期間中の海象・気象条件を示した図-3 中の

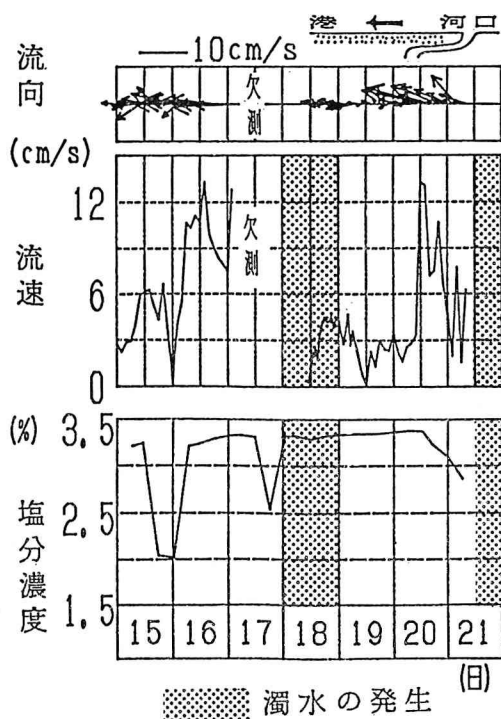


図-2 定点観測での流速データと P₃ 地点での塩分濃度の経時変化

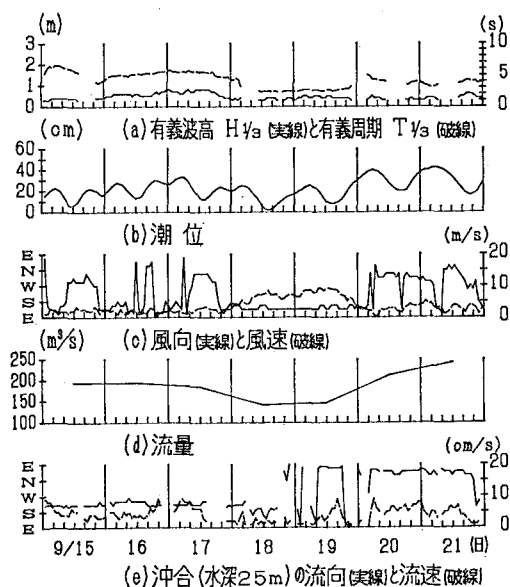


図-3 観測期間中の海象・気象データ

(a)を見ると、16, 17日は沖合い有義波高で70~80 cmと比較的大きな波であるものの、20~21日は約20 cmとかなり穏やかであった。このことから図-2に示した定点観測点での平均流の経時変化は、必ずしも海浜流のみによるものとは考えにくい。

b) 潮流: 図-3(b)によれば、潮位変動は高々20~30 cmであり、潮汐流は小さいと考えられる。また潮位変動パターンと流速変動パターンはほとんど一致していない。

c) 吹送流: 風の方向はほとんどがNW(海風)とSE(陸風)であり、河口から新港へ方向(NE)と一致しない。さらに風速の絶対値も沿岸流速の最も小さい18~19日に最大となっている。(図-3(c))

d) 河口流: 図-3(d)は石狩川の流量を示したものであるが、期間中の流量変動は非常にゆるやかであり、このような短時間の流速変動を生み出すとは考えられない。

e) 密度流: 海底付近の濁水が何らかの機構で岸付近に現れるという可能性もありうるが、今回はそれを検討し得る三次元的な密度・流速分布構造に関するデータを持ち合わせていないので、この点に関しては不明である。

f) 海流: 図-3(e)は新港の沖合い4.9 kmのB地点で観測された平均流速と平均流向を示したものである。これを見ると、流向に関しては必ずしも常に一致していないが、流速の変動と図-2に示した沿岸流速の変動との相関は比較的良好いことがわかる。

通常、海岸線ごく近傍の海域での流れを論じる際には、沖の海流からの影響は無視できるものとして扱われるこ

とが多い。しかしながら、上記の検討結果によると、通常の波の作用による沿岸流だけでなく、海流の影響も無視しえない場合があることがわかった。しかしながら、今回のデータの範囲内では、この点に関する確定的な結論を得るには至らなかったため、今後より詳細に検討する必要がある。

5. 筋状濁水パターンの発生メカニズムについて

(1) 衛星画像データによる解析

つぎに、対象海岸からどのようなメカニズムで濁水が筋状に沖へ流出するかという点について考えてみた。ここでは現地観測期間だけでなく、1985年から88年までの衛星画像(LANDSAT, MOS-1, SPOT)を多数(計11シーン)調べるによりこの点に関する検討を加えた。具体的には、各衛星画像をその中に濁水流出パターンが現れているものとそうでないものに分類し(それらの一部を写真-3に示す)、石狩湾新港での海象・気象データと照らし合わせてそれぞれの対応関係を調べた。そしてその結果に基づいて、沖方向流出の原因として考えられる a) 離岸流, b) 密度流, c) 潮流, d) 海流, e) 吹送流についてそれぞれの可能性を調べてみた。各々の写真の中には撮影時間の約4時間前までのA地点での平均風速・風向(黒矢印)とB地点での平均流速・流向(白矢印)が平均有義波高・有義周期とともに示されている。これより以下のことがわかる。

a) 離岸流: 有義波高との相関があまりないこと、濁水がかなり沖まで流出していることなどから考えてにくい。

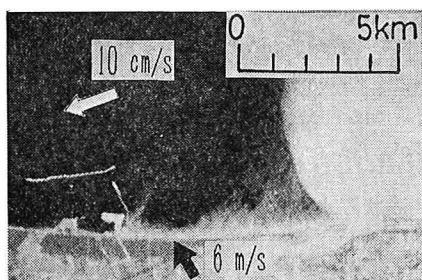
b) 密度流: 最近、灘岡ら(1987)によって高波浪時において濁水と沖の海水との密度差による沖流出の可能性が示唆されたが、ここでは、先ほど述べたようにかなり軽量の濁質で密度差はほとんどないと考えられるので密度差による沖方向流出の可能性は少ない。

c) 潮流: 先に述べたようにここでの潮差はたかだか20~30 cmで、これによる水粒子のexcursion lengthのオーダーからは沖合い2~3 kmにおよぶ濁水の移動は説明できない。

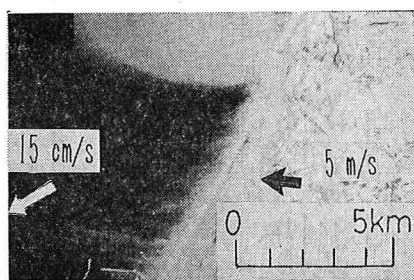
d) 海流: B地点での平均流向と筋状パターンの発生方向はほとんど対応していない。

e) 吹送流: 平均風速・風向を見ると筋状に沖流出があるときはほぼ陸風(沖向き)になっているのがわかる。また、Keulegan(1951)によれば吹送流の表面流速は風速の約3.3%であるので、例えば5 m/s程度の風速の沖向きの一様な風が4時間程度吹き続けたとして水表面粒子の移動距離を見積ってみると約2.4 kmとなり、筋状パターンの長さと同程度の値が得られる。

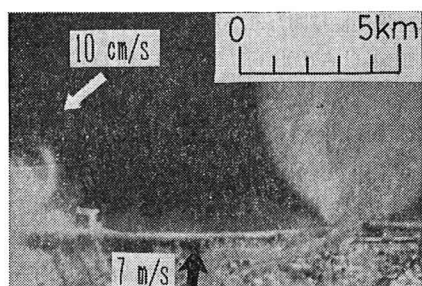
(a) 筋状パターンが見られるケース


 $H_{1/8} \div 50 \text{ cm}, T_{1/8} \div 5 \text{ s}$

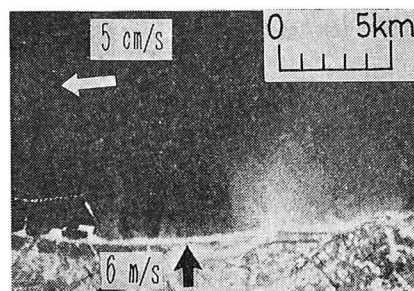
1985年9月11日のLANDSAT画像 (BAND 3)


 $H_{1/8} \div 50 \text{ cm}, T_{1/8} \div 6 \text{ s}$

1985年10月29日のLANDSAT画像 (BAND 3)

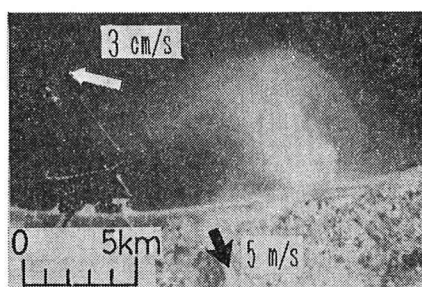

 $H_{1/8} \div 40 \text{ cm}, T_{1/8} \div 4 \text{ s}$

1988年4月18日のMOS-1画像 (BAND 1)

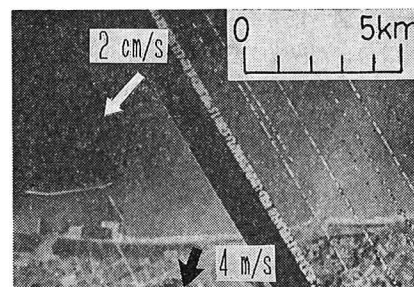

 $H_{1/8} \div 80 \text{ cm}, T_{1/8} \div 5 \text{ s}$

1988年10月5日のLANDSAT画像 (BAND 3)

(b) 筋状パターンが見られないケース


 $H_{1/8} \div 20 \text{ cm}, T_{1/8} \div 3 \text{ s}$

1988年5月30日のLANDSAT画像 (BAND 3)


 $H_{1/8} \div 100 \text{ cm}, T_{1/8} \div 6 \text{ s}$

1987年8月7日のLANDSAT画像 (BAND 1)

写真-3 対象領域の衛星画像

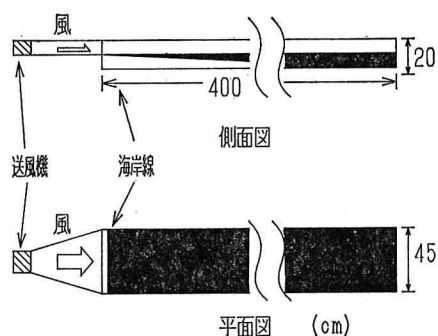
このようなことから、筋状の沖方向濁水流出パターンの発生原因としては、沖向きの風の可能性が最も高いものと考えられる。ただし、現地観測中の濁水発生日（18日）のように、陸風でも筋状パターンが見られなかった場合があり、多少の疑問点が残る。そこで次にこの推論（風による吹送流）の検証を兼ねて、風による筋状パターンの発生メカニズムを探るための風洞を用いた室内実験を行った。

(2) 室内実験による風による効果の検証

実験装置としては、図-4のように可変勾配の斜面を

設置し、風速の均一性を確保するため送風ファンと風洞入口にフィルターを設けた風洞水槽を用いた。この中に海水の代わりに塩水を入れ、流動パターンを可視化するためにポスターカラーないしはアルミ粉を注入した。

写真-4は、海岸近傍の濁水を模擬する形で海岸線に沿って帯状にポスターカラーを注入しておき、0.6 m/sの様な風を沖向きに作用させたときの約40秒後の平面写真である。これを見ると、現地のパターンと類似して、沖に延びる筋状のパターンがある間隔で現れることがわかる。



図—4 実験装置の概略

さらにこの現象を詳しく調べると、このパターンは表層近傍で発生しており、岸側から徐々に成長する沖向きと岸向きの流れから成る平面的循環流であることがわかった（詳細は、蒲田ら, 1989）。またこれは、風速の空間的不均一等による室内実験の不備に起因するものではないことも確認された。よってこの現象の原因は、風の不均一等による外因的なものではなく、何らかの不安定性に起因する内因的なものである可能性が高いものと考えられる。

現段階では、この循環流の具体的な発生メカニズムを明らかにするまでには至っておらず、したがって相似則も不明であることから、この実験結果からただちに現地の筋状の濁水パターンも同様の不安定メカニズムによるものと断定することはできない。しかしながら対象海岸の背後地は平坦で様な地形であることから風速分布に極端な非一様性があるとは考えにくく、同種の内因的な不安定機構が関与している可能性は高いものと考えられる。

6. 結 論

衛星画像解析や現地観測の結果から、通常海浜流が支配的と考えられている海岸付近の流れにも、海流が関与する可能性があることを具体的に示した。また風の作用



写真—4 可視化された平面流動パターン

によって極めて特徴的な筋状のパターンが現れることを示した。

最近、同様な筋状の流出パターンが駿河湾においても見いだされた。しかしながらこれについては、今のところまだ検討材料となる現地データを持ち合わせていないため、風によるものとは断定できない。今後検討を進めていきたいと考えている。

なお、本研究を行うにあたっては、データ提供等の面で北海道開発局の方々の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 蒲田浩久・灘岡和夫・佐藤尚稔 (1989): 石狩湾において見いだされた海岸からの特徴的な濁水パターンについて II, 第 44 回年次学術講演会講演概要集 II.
- 灘岡和夫・渋谷慎一・広瀬文人 (1987): LANDSAT データを用いた高波浪時の沿岸水理解析の試み, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 217~221, 1987.
- 灘岡和夫・蒲田浩久・田中総太郎 (1988): 石狩湾において見いだされた海岸からの特徴的な濁水パターンについて, 第 43 回年次学術講演会講演概要集 II, pp. 748~749.
- 日本海洋学会沿岸海洋研究部会編 (1985): 「日本全国沿岸海洋誌」.
- Keulegan, G. H. (1951): Wind tides in small closed channels, J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol. 46, pp. 358~381.