

石狩湾沿岸の流動特性

山下俊彦* ・木下大也** ・多田彰秀***・福本 正****
橋本 剛*****・北原繁志*****・谷野賢二*****

1. はじめに

最近、砕波帯外の水深 30 m 程度までの海域における流動特性が注目されている。例えば佐藤 (1995) は、北陸沿岸の水深 15 m 地点で海岸線に沿う 1 m/s にも達する強い流れが存在し、この流れが風応力とコリオリ力によって維持されていることを報告している。また、安田ら (1995) はこのような砕波帯外の強い流れには、風応力の他に沖合い砕波による運動量輸送が重要であることを指摘している。さらに、山下ら (1996) は苫小牧沿岸の強い流速変動を伴った周期 4～7 日、位相速度約 2 km/h で西へ伝播する長周期流速変動の存在とその時空間特性を明らかにしている。以上のような流れは、砕波帯外の深い水深帯でも大きな流速を持つため、沖合いの漂砂現象や生物の浮遊幼生の移流・拡散などに重要な役割を果たしていると考えられる。しかし、このような流動の現地観測例も少なく、発生要因としては風応力、沖合い砕波、密度差、陸棚波など種々考えられるとともに、それらが複合的に作用するため、流動に関する物理機構が十分に把握されていないのが現状である。

そこで本研究では、石狩湾沿岸を対象として、流速及び水温、塩分の現地観測を実施し、湾内の流速変動の時間特性、鉛直分布特性及び平面分布特性を調べた。また、流速変動と水温、塩分及び風の変動を比較検討し、湾内の流動の物理機構を考察した。

2. 現地観測データ

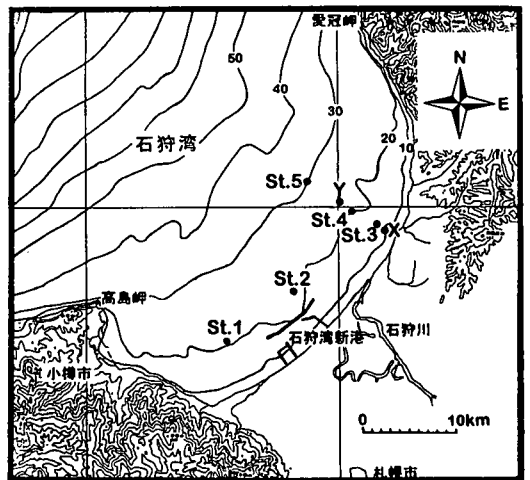
石狩湾沿岸の流速観測地点を図一に示す。観測期間はいずれも 1996 年 10 月の 1 ヶ月間である。st. 1 (離岸距離 5 km, 水深 21.5 m) と st. 4 (5 km, 21 m) では係留系に固定した ADCP を用いて水深 1 m ごとに 5 分間隔で連続観測した。st. 3 (2.5 km, 17.5 m), st. 5 (11.5 km,

30 m) では、電磁流速計を用いて海底上 0.6 m の流速を 2 時間おきに 0.5 秒間隔で 20 分連続観測した。st. 2 (4.9 km, 23 m) では、海底上 1 m の流速を 1 時間おきに 20 分平均したものを解析に用いた。st. 1, 2, 4 は、ほぼ汀線と平行になるよう選定した。また、st. 3, 4, 5 はほぼ汀線と直角になるように配置した。st. 1 では表層下 0.5 m から深さ 1 m ごとに 10 点で、水温を 10 分間隔で連続観測した。また、風速については、図一に示す石狩湾新港で測定されたものを用いた。また 10 月 11 日、12 日には図一の X (1 km, 11 m) - Y (7 km, 23.5 m) 線上を ADCP が舷側に取り付けられた船で 2 ノットあるいは 4 ノットで走航して流速を水深 1 m ごとに 3 往復測定した。さらに、st. 3, 4, X, Y において 10 月 11 日 12 時～13 時に STD を用いて水温、塩分の鉛直分布を測定した。

3. 流速変動特性

3.1 流速変動の時間特性

図二に、一例として st. 4 での ADCP による代表的な 5 水深における流速の時系列データに 20 分移動平均を施した結果を示す。最上段には、同期間の風速の時系列データを示す。水深は 21 m と深いにもかかわらず、30



図一 流速観測地点

* 正会員 工 博 北海道大学助教授 工学研究科資源環境工学専攻
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
*** 正会員 工 修 西松建設(株)技術研究所
**** 正会員 博(工) 西松建設(株)技術研究所
***** 正会員 水 修 西松建設(株)技術研究所
***** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
***** 正会員 工 博 北海道東海大学教授 海洋開発工学科

cm/sを超える強い流れが存在していることが分かる。表層付近の流速変動は、風速変動と比較的良好な相関があることが分かる。また、潮汐に起因する約12.5時間、25時間の周期に対応する流速変動とそれより短い周期の変動のほか、それらより大きなエネルギーを持つ3～5日程度の長周期の流速変動があることが分かる。

図-3に、st.1とst.4でのADCPによる水深3mにおける流速の時系列データに20分移動平均を施した結果を示す。同期間の風速の時系列データも図の最上段に示す。この図から、図-2と同様に流速変動は風速変動と比較的良好な対応を示していることが分かる。例えば、3日と6日の南東の風に対するst.1とst.4の流速変動は、少

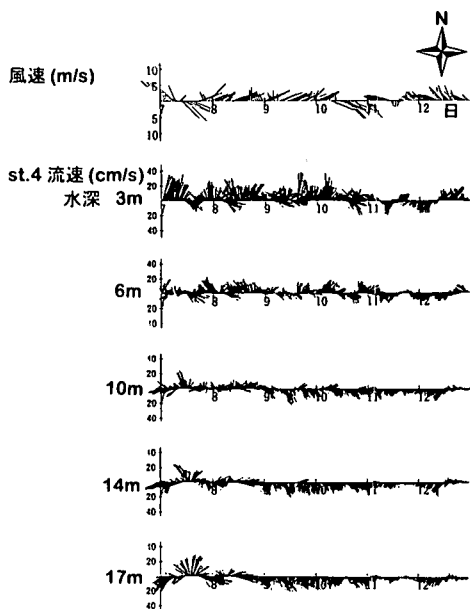


図-2 st.4での流速の鉛直分布と風速データ

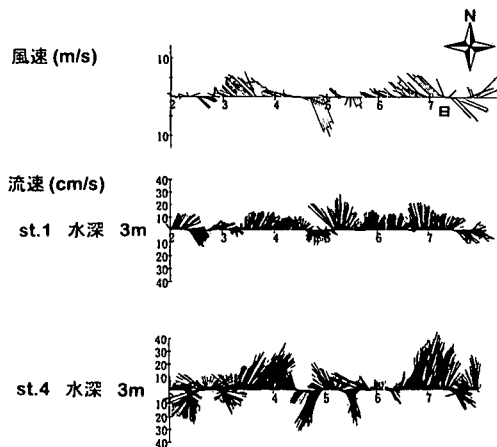


図-3 st.1, 4の表層の流速と風速データ

し遅れて3日～4日前半と6日～7日前半に表れ、その向きは北東流となっている。これは、コリオリ力によるEkman輸送が原因となり、風向に対して直角右向きに力が働いたために起こった流れと考えられる。このように、風速変動と流速変動には、Ekman輸送を介して高い相関があることが確認できる。また、図-2と同様に3～5日程度の長周期流速変動が存在することも分かる。

図-4に、st.2の1996年10月の1ヶ月間の流速生データを汀線に平行方向成分と直角方向成分に分け、パワースペクトルを計算した結果を示す。スペクトルの計算にはMEMを用い、約30日間に相当する毎正時の約700個のデータを使用した。この図を見ると、汀線に平行方向と直角方向の両成分ともに周期約100時間、すなわち周期4日付近でスペクトル密度が最大となり、潮汐に伴う約12.5時間、25時間周期の変動よりもかなり卓越していることが分かる。同期間における他の地点での流速のスペクトル解析結果においても、ほぼ同様に周期3日～6日程度でスペクトル密度が最も大きくなることが分かった。このような長周期流速変動は、今回10月に観測した流れの場合でもっとも支配的である。また、図-4において汀線に平行方向と直角方向の流速成分を比較すると、ここで着目している長周期流速変動を含む周期1日以上流速変動は汀線に平行方向の流速成分の方が卓越していることが分かる。

図-5に、図-4の流速と同期間の風速のスペクトルを計算した結果を示す。風速の汀線に平行方向の成分は、周期6日程度の変動が卓越しており、汀線に直角方向の成分は、周期4、5日程度の変動が卓越していることが分かる。これらの風速の卓越周期は、各地点での流速の卓越周期とほぼ同じ周期を有しており、風速変動と流速変動が良好な対応を示していることが分かる。また、海陸風によるものと推定される1日周期を持つ変動もかなり大きいことが分かる。汀線に平行方向と直角方向の両

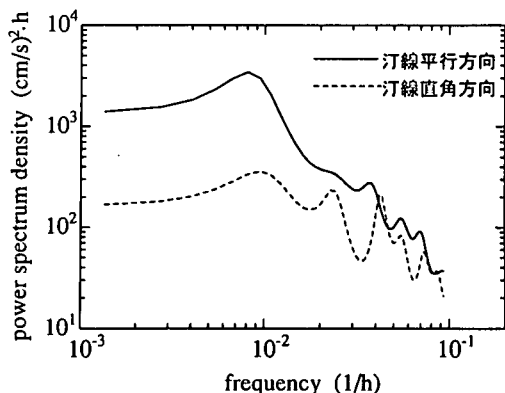


図-4 st.2における流速変動のパワースペクトル

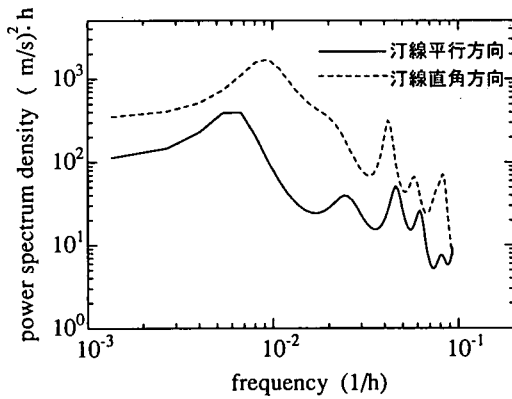


図-5 風速変動のパワースペクトル

成分を比較してみると、風速の場合は汀線に直角方向の成分の方が、汀線に平行方向の成分よりも卓越していることが分かる。

3.2 流速変動の鉛直分布特性

長周期流速変動成分の鉛直分布を調べるために、図-2と同じ期間の st. 4 における流速生データに 25 時間移動平均を施し、潮汐以下の短周期流速変動成分を取り除いたものが図-6 である。また、st. 1 において同期間、同様

に移動平均を施したものが図-7 である。これらの図からも、3 日～5 日程度の長周期流速変動の存在が確かめられる。図-6 で 9 日～10 日の鉛直分布特性に着目すると、水深 6 m までの浅い層では北向きの流れが卓越している。一方、水深 10 m～17 m までの深い層では逆に南向きの流れが卓越し、深い層ほど大きい流速になっていることが分かる。このように上層と下層で流れの向きが逆になるケースが他にもよく観測された。特に強い陸風が吹いた場合には上層が離岸方向に流れ、下層は岸方向に流れる（湧昇流）ことが多かった。これは、陸風によって上層の水が沖へ輸送され、それを補うために下層では上層と逆に流れる補償流が必要になるためと考えられる。一方、図-6 の 11 日～12 日では、上層で南向きである流れは下層においても向きを変えずに南向きのままとなっている。これは、上層の流れが沖から来る南向きの場合には、下層で補償流として上層の流れを補う必要がないために、下層でも向きを変えずに南向きのままであるものと考えられる。st. 1 の図-7 を見ると、st. 4 についての図-6 と同様に補償流が存在するのが分かる。例えば、7 日前半において上層北向きであった流れは下層では南向きに逆転している。また、12 日に上層で北向きであった流れは下層では南向きにはならな

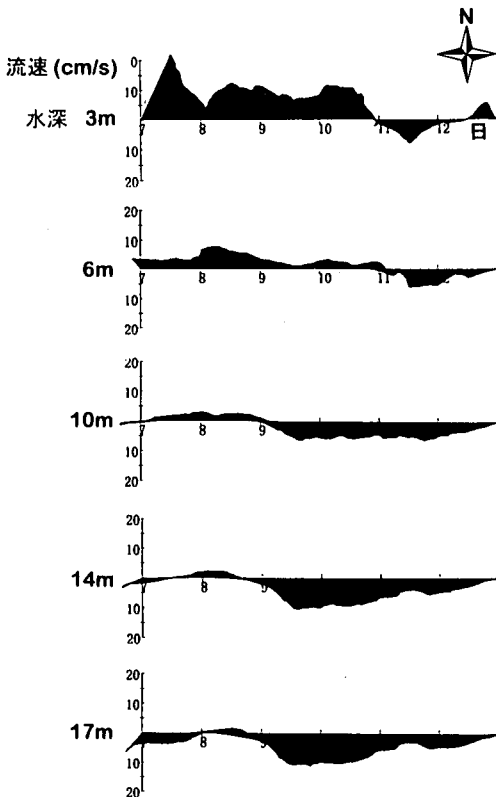


図-6 st. 4 の流速の 25 時間移動平均データ

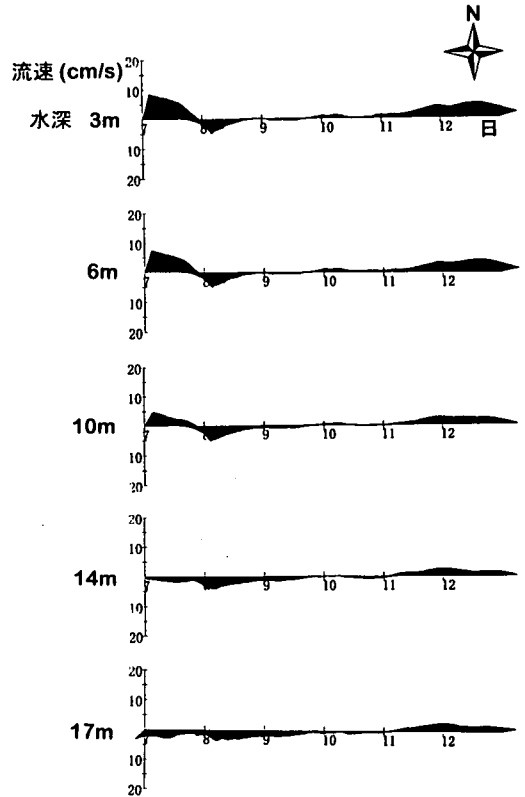


図-7 st. 1 の流速の 25 時間移動平均データ

いものの、かなり弱まる事が分かる。しかし、8日に上層で南向きである流れは下層でも南向きのままで、流速もほとんど弱まることはない。

図-6と図-7を比較してst.1とst.4における流速変動の違いを見ると、st.4の方がst.1より全体的に流速が大きいことが分かる。これは、図-3のst.1とst.4の比較においても明らかである。また、st.4の方がst.1よりも補償流が顕著に現れることも分かる。st.1とst.4では図-1に示すように地形的要因などが異なるため断定的なことは言いえないが、この原因の一つとして石狩川から流出した河川水の影響が考えられる。

図-8に、10月11日12時~13時にSTDで測定した各地点での塩分濃度の鉛直分布を示す。最も岸側のst.Xでは、塩分濃度が15‰程度の海水とあまり混合しない河川水が表層薄く広がっている。この河川水は、沖側にいくほど海水と混合して塩分濃度が低下する層の厚さが増し、表層の塩分濃度も増加していることが分かる。これは、図-2から分かる様に、10日午後から北西風により河川水が沿岸に吹き寄せられていたところに、11日午前中の南東風により、河川水が沖へ運ばれ、陸風による沖での高波浪により河川水と海水が混合したためと考えられる。一回の観測結果のみで断定的なことは言えないが、河川水と混合した比重の軽い上層の水の存在による成層の効果が前述の流速変動特性に関係しているものと推察される。

図-9に、図-2とほぼ同時期の10月5日~13日の午

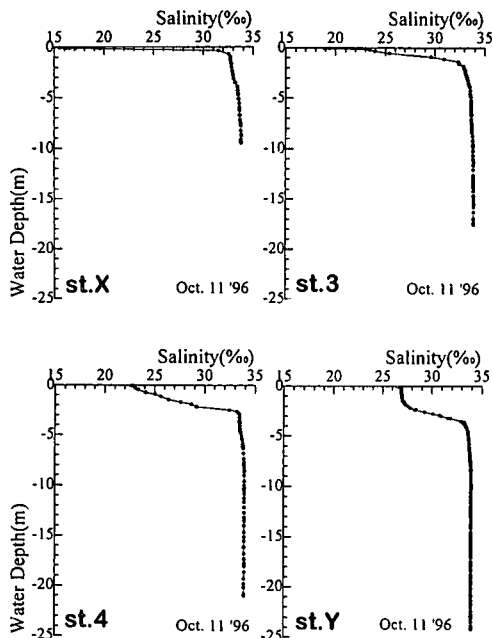


図-8 各地点における塩分濃度の鉛直分布

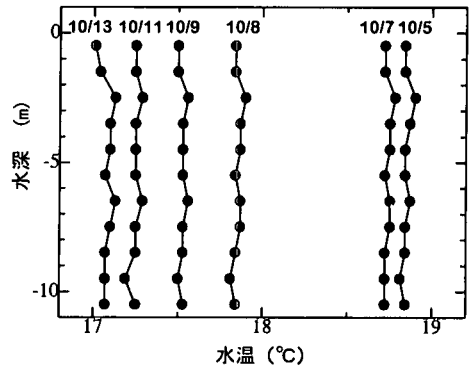


図-9 st.1での水温の鉛直分布の時間変化

前0時におけるst.1での水温の鉛直分布を示す。この図より、水深10mまでは水温はほぼ鉛直方向に一定で、10月7日から11日にかけて急激に水温が1.5℃低下していることが分かる。st.1は水深が21.5mで水深10.5m以深の水温分布は測定していないため不明であるが、少なくとも水表面下10mの表層部ではこの期間中に密度成層は存在していないものと考えられる。10月7日から11日にかけての水温の急激な低下は、低水温の水塊の移動と考えられるが、この点については今後平面的な水温分布等からさらに考察する必要がある。

3.3 流速変動の空間特性

図-10に、一例としてst.1~5での底層の流速データと風速データを示す。それぞれ、25時間移動平均を施したものである。この図からも、8日~10日の南風に対して岸に近いst.1~4の底層では補償流として風とは逆方向の南向きの流れが生じていることが分かる。それに対して、st.5の底層部の流速は南風に対しても逆方向にはならず、風と同方向の北向きの流れとなっている。これはst.5が沖合いに位置しているため、岸境界の影響に起因する補償流よりも吹送流の方が卓越していたため、風向とst.5の底層の流向が同方向になっているものと考えられる。このように、岸に近い地点において陸風が吹いた時は補償流が発生しやすいが、海風が吹いた時や沖合いの地点においては補償流の影響は受けにくいといえる。また、石狩川から最も遠いst.1では流速が弱く補償流も小さいことが、比較的石狩川に近いst.2~5では全体的に流速も大きくst.5を除いては補償流も顕著であることが確認できる。

ここで、st.1~4の補償流による南流に着目してみると、st.1~4にかけて順に少しずつ遅れながら伝播していく様子が分かる。そこで、流れの伝播の様子を調べるために、ほぼ同じ水深を持つst.2とst.4の2点間で図-10と同期間の流速の相関をとってみた。その結果、南北方向流速の相互相関係数が約0.9と高く、その場合約8時

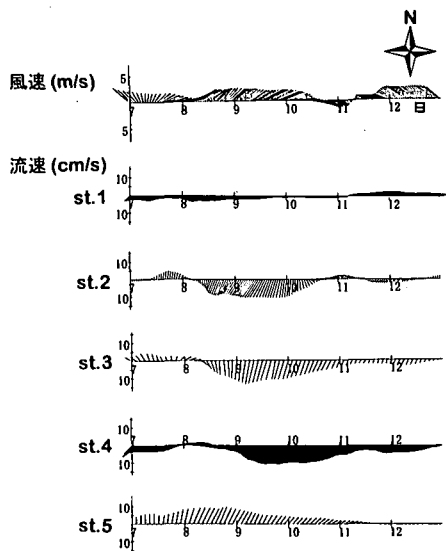


図-10 各地点における底層の流速と風速データ

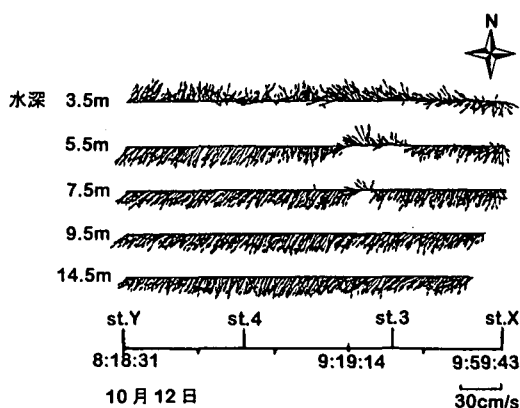


図-11 X-Y間の流速変動

伝播しているものと判断される。

図-11に、10月12日午前8時から10時の2時間でst.Yからst.Xまで走航観測しながらADCPで測定した結果の例を示す。この時、風は南東であり、水深3.5mの表層は北西から北向きの流れとなっていることが分かる。北向きの流れは前述した様にEkman輸送によるものと考えられる。水深5.5m及び水深7.5mのst.3より少し沖側の地点で表層と同じ北向きの流れが確認できる。この位置は石狩川の流出水の流軸に近いと考えられ、河川流出水の影響と思われる。この領域を除いた水深5.5m以深では、流れは岸沖方向にも鉛直方向にも一様で南南西に約20 cm/sの流れとなっていることが分かる。

4. おわりに

石狩湾沿岸の現地観測により、周期3～6日の長周期流速変動の存在と特性を明らかにした。流速の鉛直分布特性としては、陸風が吹くと岸境界の影響を受けやすい沿岸付近において、上層で陸風と同じ方向の流れが起こり、下層においては上層の流れを補う岸へ向かう逆向きの流れ(補償流)が起こることが分かった。また、石狩川の河川水の影響(成層効果等)が、水深20m程度の深い層の流動まで及んでいることが示唆された。

最後に、本研究を進めるにあたり、現地観測にご協力頂いた日本データサービス(株)調査設計部の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 佐藤慎司(1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 521, II-32, pp. 113-122.
- 安田孝志・森 信人・加藤 茂・佐藤慎司(1995): 石川海岸沖合いの流況特性と碎波の影響について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 431-435.
- 山下俊彦・金戸俊道・木下大也・関口信一郎・國田 淳・渥美洋一(1996): 苫小牧沿岸における長周期流速変動特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 201-205.

間遅れでst.2からst.4へ伝播していることが分かった。換言すれば、st.2とst.4は10.7 km離れていることから、約1.3 km/hの速度でst.2からst.4へ流れの変動が