

石狩湾沿岸の冬期の三次元流動特性

山下俊彦* ・星 秀樹** ・新山雅紀***
長谷部隆光**** ・福本 正***** ・多田彰秀*****

1. はじめに

従来, 海岸工学では海岸付近の流れとして砕波帯内に発生する海浜流が主に研究されてきた。しかし, 最近現地観測などにより砕波帯外にも風応力などを推力とした強い流れが存在していることが指摘されている。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。山下ら (1997) は, 水深 20 m 程度の石狩湾沿岸では秋期に主に風応力に起因する数日程度の長周期流速変動が卓越し, その時空間特性を明らかにしている。また, 山下ら (1998) は夏期に石狩湾新港周辺に形成される防波堤に沿う流れと港背後の循環流の三次元構造を定量的に明らかにしている。このような砕波帯外の深い水深帯でも大きな流速を持つ流れは, 沖合いの底質移動機構や, 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はまだ少なく, 発生要因としても風応力, 沖合い砕波, 密度差, 陸棚波, 海流など種々考えられるため, 流動に関する物理機構は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, 北西の季節風の強い冬期に現地観測を行い, 湾内の流動の時間特性及び空間特性を把握する。次に, 流動特性と風等の気象, 海流データ等及び数値計算結果と比較検討することにより, 湾内の流動の物理機構を明らかにする。

2. 現地観測データ

1998 年冬期の石狩湾での現地観測地点を図-1 に示す。現地観測は, 1998 年 1 月 17 日～3 月 11 日の期間で行った。図-1 に示す St. 1 (水深 21 m, 離岸距離 5 km), St. 2 (26 m, 10 km), St. 3 (21 m, 5 km) には ADCP を海底に設置し, 水深方向に 0.5 m または 1.0 m おきに

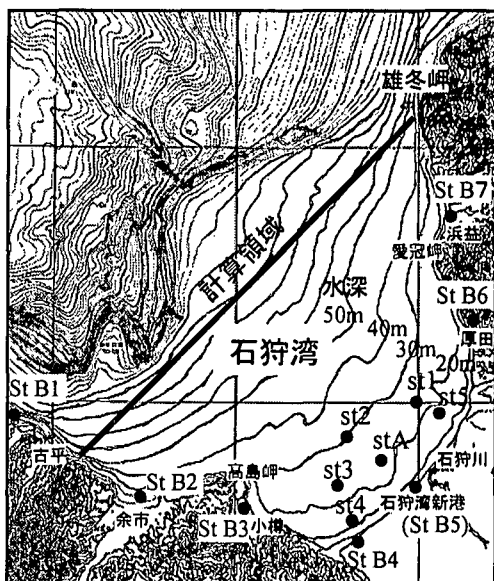


図-1 現地観測地点及び計算領域

10 分ごとに流速を測定した。St. 4 (15 m, 2 km), St. 5 (15 m, 1.4 km) には, wavehunter を海底設置し海底上 1 m の流速を 1 時間おきに 0.5 秒間隔で 20 分連続観測した。しかし, St. 5 の wavehunter は故障のためデータは得られなかった。さらに St. 1～3 には, 塩分計を上中下層に設置し, 5 分間隔で塩分濃度を測定した。St. 1～5 では水温計を水深方向に 6～8 個設置し, 10 分間隔で連続観測した。また, St. A (水深 23 m, 離岸距離 4.9 km) の海底上 1 m で観測された北海道開発局小樽港湾建設事務所観測資料の 1 時間ごとの 20 分平均流速データを用いた。また, 風速などの気象データは石狩湾に面する St. B1～B7 (順に美幌, 余市, 小樽, 山口, 石狩湾新港, 厚田, 浜益) の 7 地点の 1 時間ごとの時系列データを用いた。

3. 流速変動の時間特性

図-2(a), (b) に, St. A と St. B5 における 1998 年 1 月 15 日～2 月 15 日の流速・風速時系列データを示す。石狩湾沿岸の冬期の特徴的な流動として, 第一に強い北西

* 正会員 北海道大学助教授 大学院工学研究科環境資源工学専攻
** 正会員 北海道電力(株)
*** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
**** 正会員 日本データサービス(株) 調査設計部
***** 正会員 西松建設(株) 技術研究所
***** 正会員 長崎大学

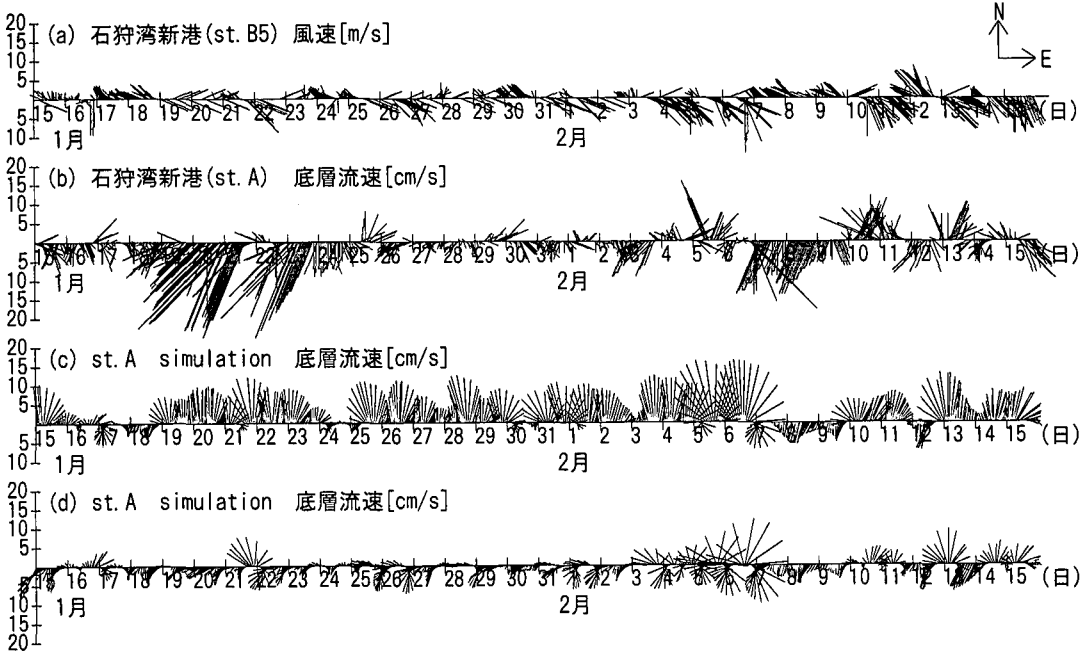


図-2 St. B5の風速とSt. Aの底層流速データおよびsimulation結果

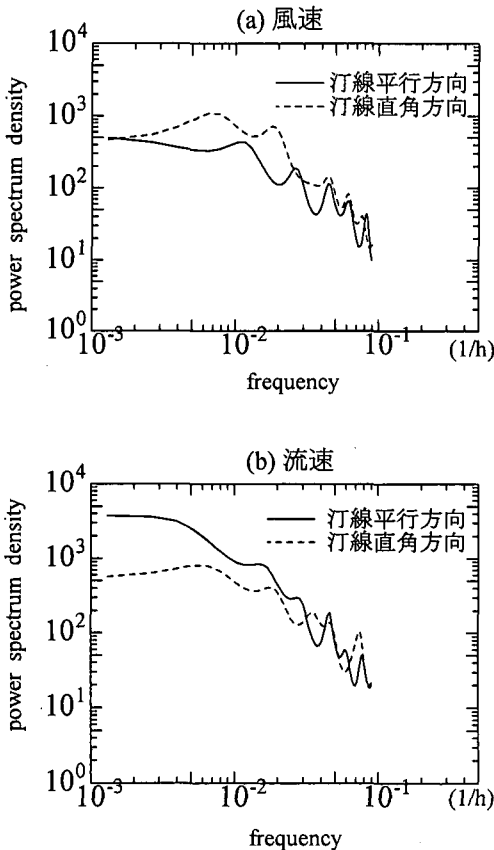
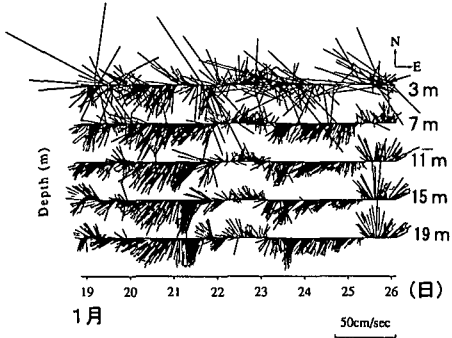


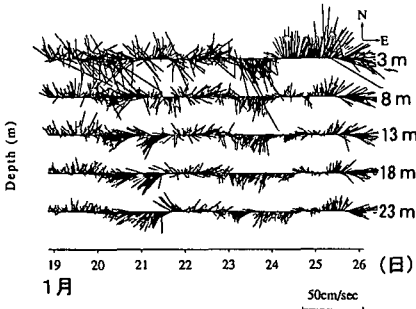
図-3 風速と流速のスペクトル

方向の季節風に対する補償流の発生がある。図-2(a), (b)を見ると2月4~5日, 10~11日, 13日において10 m/s越える強い海風(北西風)に対して底層流速は風向きと逆方向でコリオリ力により少し右に曲げられた補償流が生じている。また, 2月7~9日, 12日には陸風(南東風)に対しても同様に補償流が発生している。もう一つの特徴的な流動として, 10 m/s越える強い西風に対して補償流は起こらずに1月19~23日に見られる強い南西方向(汀線に平行方向)の流れが発生(ただし, 21日の午後には北西の風が吹いているため, 一時的に補償流が発生している)することがわかる。この流れは水深が23 m地点にもかかわらず30 cm/sを越える強い流れとなっている。ここには示していないが, St. Aでの流速変動を調べてみると, 西風に対する強い南西流の発生は石狩湾沿岸では冬期に比較的よく起こることがわかった。流速と風速の時間変動特性を見てみると, 2月4~15日では低気圧の通過に伴い数日周期程度の風速変動が卓越し, それに対応して流速も数日周期程度の風速変動が卓越している。この期間の潮汐以下の短周期の変動は小さく, 底層での流れにそれほど影響を与えていない。

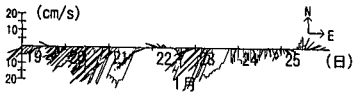
図-3(a), (b)に, St. B5とSt. Aの1998年1月15日~2月15日の約1ヶ月の風速・流速時系列データを汀線に平行方向成分と直角方向成分に分け, パワースペクトルを計算した結果を示す。スペクトルの計算にはMEMを用い, 約30日間に相当する毎正時の約700個のデータを使用した。図から風速は汀線直角方向, 流速は汀線平



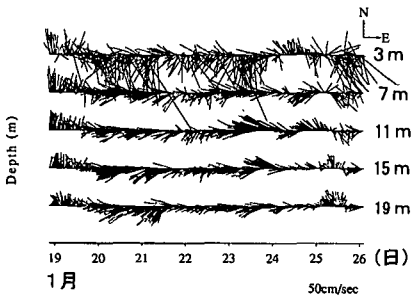
(a) St. 1



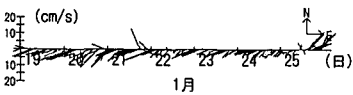
(b) St. 2



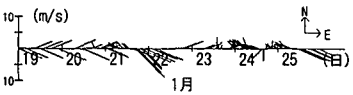
(c) St. A



(d) St. 3

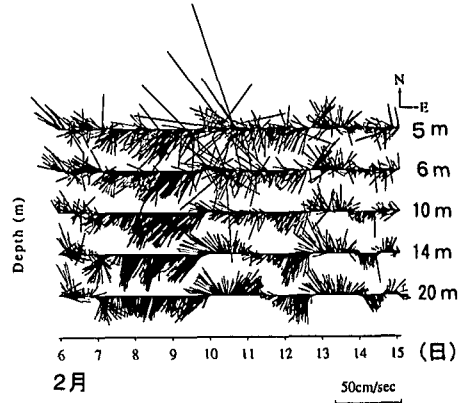


(e) St. 4

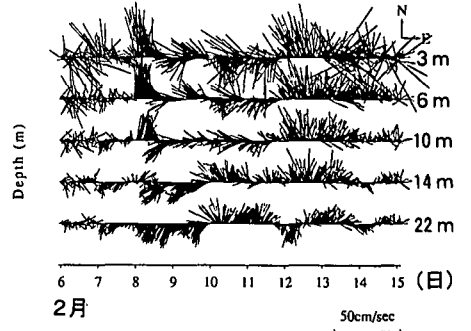


(f) St. B5

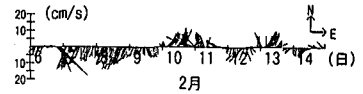
図-4 流動の三次元特性 (1月19~25日)



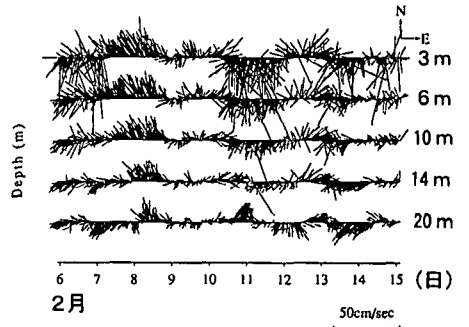
(a) St. 1



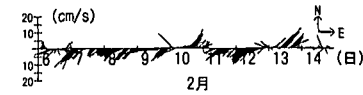
(b) St. 2



(c) St. A



(d) St. 3



(e) St. 4



(f) St. B5

図-5 流動の三次元特性 (2月6~14日)

行方向がそれぞれ卓越していることがわかる。風速は、低気圧の通過にともなう周期数日程度の変動が卓越している。それに対応して、汀線と直角方向の流速は周期数日程度の変動が卓越している。一方、汀線と平行方向の流速は、周期数日程度から大きくなっているが、それよりも長い周期の変動が卓越している。これについては、石狩湾内の冬期の風の場所的分布に関係していると考えられるので5.で述べる。

4. 流速変動の三次元特性

ここでは、前述した石狩湾沿岸の冬期の2つの特徴的な流れについて三次元流動特性を調べる。

図-4(a)~(f)に、St. B5での強い西風に対するSt. Aでの南西方向の強い流れが発生している1月19~25日のSt. 1~3のADCP流速データ、St. AとSt. 4の底層流速とSt. B5での風速を示す。St. 1では20~21日、23日にかけてSt. B5での西風に対して全水深にわたり40 cm/sを越える南西の流れになっていることがわかる。St. 2~4、St. Aでもほぼ全水深にわたり、岸境界の影響を受けた汀線に平行な強い南西~西向きの流れとなっていると考えられる。以上のことから、St. B5での強い西風に対して湾奥にほぼ全水深にわたって時計回りの強い流れが発生することがわかる。

図-5(a)~(f)に、St. B5での北西風と南東風に対してSt. Aでの補償流が発生している2月6~14日のSt. 1~3のADCP流速データ、St. AとSt. 4の底層流速とSt. B5での風速を示す。2月7日~9日のSt. B5の南東風に対して、St. 3では全水深に、St. 2では水深10 mより浅い領域に風によって湾外に出て行く南東の流れがあり、その水を補償するように北東側のSt. 1から全水深にわたって、St. 2では14 m以深、St. Aの底層に南流が発生している。10~11日のSt. B5の北西風に対しては、全地点にわたって上層で南向きの流れ、下層で北向きの流れとなりどの地点でも鉛直断面内での補償流の発生がみられる。12日のSt. B5の南東風に対しては、全地点で2月7~9日とほぼ同様の流れが発生している。13日のSt. B5の北西風に対しては、全地点で2月10~11日とほぼ同様の流れが発生していることがわかる。以上より、強い北西風に対しては全地点で鉛直断面内で補償流が発生し、南東風に対しては湾西部から湾口へ流出する水を補償する形で湾北東部から水が流れ込みSt. A地点では風に対する補償流として現れていると考えられる。

5. 石狩湾沿岸の風速分布特性

冬期の石狩湾沿岸の特徴として強い北西の季節風があげられる。図-6に一例として石狩湾沿岸の多地点の風速を示す。湾北部のSt. B6, B7においては強い北西風が

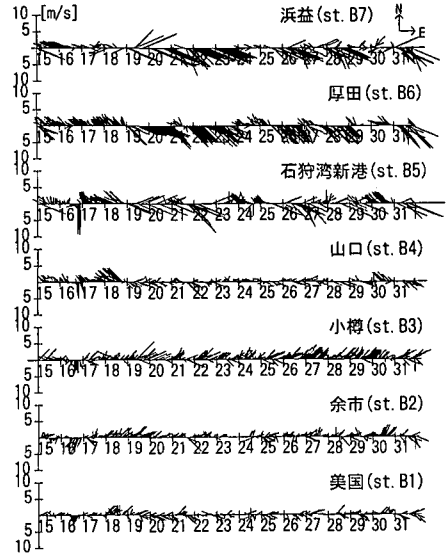


図-6 多地点の風速データ

卓越しており南東風は小さい。湾中央のSt. B5では主に西風が吹いている。一方、積丹半島のつけねにあたるSt. B4では風速がかなり小さくなっている。背後に積丹半島のあるSt. B1, B2, B3でもSt. B6, B7に比べて風速は小さくなっている。St. B2, B3では風向も大きく変り南西の風が卓越している。したがって、冬期には湾北東部では北西~西の季節風が強く、湾西部においては積丹半島の影響で風速がかなり小さく、ある地点では南西向きの風となっていることがわかる。以上より、積丹半島の影響を受けた冬期の北西の季節風は湾内に時計回りの流れを発生させやすいことがわかる。このことは前述したSt. B5での強い西風に対して湾奥に時計回りの強い流れが発生すること、図-3(b)でSt. Aの汀線平行方向の流速のスペクトルが周期10日以上で卓越していることと関係している。

6. 流動の数値解析

石狩湾沿岸の冬期の流動は、次のマルチモデルレベルを用いて解析した。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U + w \frac{\partial U}{\partial z} + fk \times U = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu_h \Delta U + \nu_v \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot U + \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、U: 水平2次元流速ベクトル、w: 鉛直流速、∇: 水平微分演算子、f: コリオリパラメータ、k: 鉛直単位ベクトル、ρ₀: 密度、p: 圧力、ν_h, ν_v: 水平、鉛直渦動粘性係数、Δ: 水平2次元ラプラシアン、g: 重力加速

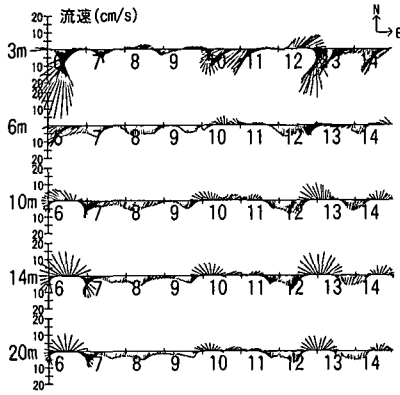


図-7 St. 1 流速の数値計算結果 (2月)

度である。格子分割は、図-1に示す計算領域を水平方向には1.5 km間隔で、鉛直方向には10層に分けた。計算の時間間隔 Δt はC.F.L基準から30秒とした。外力としては、対馬暖流と密度流の影響は海流や現地観測データより小さいと判断されたので、時々刻々のSt. B5での流速のみを与えた。

図-3(c)に積丹半島の影響を無視、(d)に積丹半島の影響を考慮(西風の時、計算領域の南西半分を無風)した数値計算結果を示す。19~24日付近では(c)は西風に対して南西方向の流れではなく北向きの補償流が起こってしまう。一方、(d)は西風に対して補償流が起こらず、南西方向の流れが再現できている(ただし、強い流れとはなっていない)。また、積丹半島の影響を考慮した方が、1月25日~2月6日までの西風に対して補償流の北流とならず、2月7日~15日の南東-北西の風の変化に対

する流動の変化もよく再現していることがわかる。

図-7に、積丹半島の影響を考慮した場合のSt. 1での計算結果を示す。図-5(a)と比較すると、2月10~11日と13日のSt. B5での北西風に対する上層での南流、下層での補償流としての北流を、流速の大きさは数値計算の方が小さめであるがよく再現していることがわかる。2月7~9日と12日のSt. B5での南東風に対する全層的な南流もほぼ再現できている。

7. おわりに

石狩湾沿岸の広域にADCP等による流動、塩分、水温の現地観測を実施し、多地点の風速などの現地観測データと比較検討することにより、北西風に対する補償流の三次元構造と湾の場所的な風速の違いによる時計回りの強い南西流の発生がわかった。また、風速変動と流速変動は比較的良好に対応し、どちらも4日以上長周期の変動が卓越していることが確認できた。さらに数値計算では、積丹半島の影響による風速分布を考慮することにより、石狩湾沿岸の冬期に特徴的な北西風による補償流、西風時の強い南西流の発生をほぼ再現できた。

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.
- 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(1997): 石狩湾沿岸の流動特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 371-375.
- 山下俊彦・木下大也・星秀樹・鳴海日出人・橋本剛・福本正・多田彰秀(1998): 石狩湾新港周辺の三次元流動特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 391-395.