

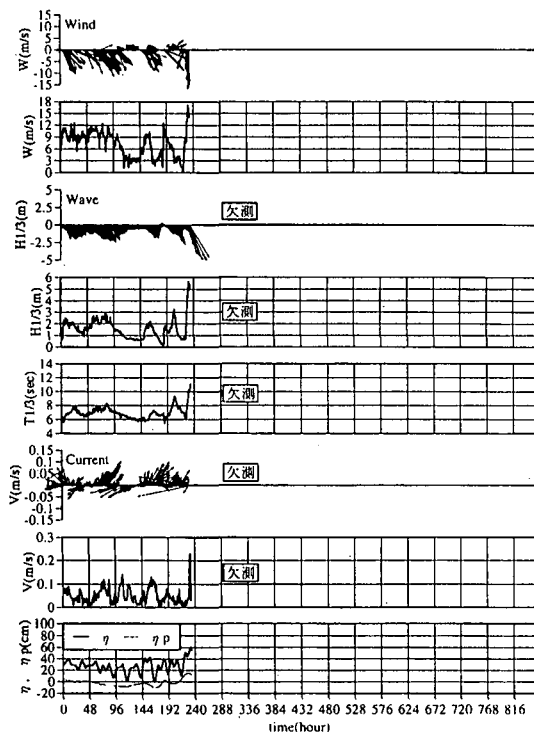
れる。にもかかわらず、水深 8 m に設置された波高計を砂中に埋没させるほどの流速が現に存在しているという事実は、先の考え方を裏付けると同時に、このような水深帯においても活発な砂の移動を生じさせていることを示している。こうした事実から、土砂収支を考える上で碎波帯沖合の流れを考慮することは必要不可欠であると言え、その特性と発生要因の解明は急務かつ重要な問題として位置づけられるものである。

このように本研究では St. 1 が測定不能になったことから、St. 2 を中心に解析を行った。解析は有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、平均波向 θ_n 、平均流速 V 、平均流向 θ_v について調べ、同時に石狩湾新港において測定された風速 W 、風向 θ_w 、平均水位 η 、気圧 p_a についても調べた。このうち気圧 p_a については水面変動 η_p に換算を行った。また、風向 θ_w 、波向 θ_n 、および流向 θ_v は、それぞれの進行方向を N 方向からの時計回りで表した。さらに、用いた座標系については添字 x, y はそれぞれ E 方向、N 方向を正とし、 s, n については沿岸方向成分の NE 方向と岸沖方向の岸方向をそれぞれ正とした。なお、大浜海岸は緩い弧状の海岸であるため、St. 1 での汀線方向は N 方向から時計回りで $\theta_s = 63^\circ$ 、St. 2 で $\theta_s = 53^\circ$ である。

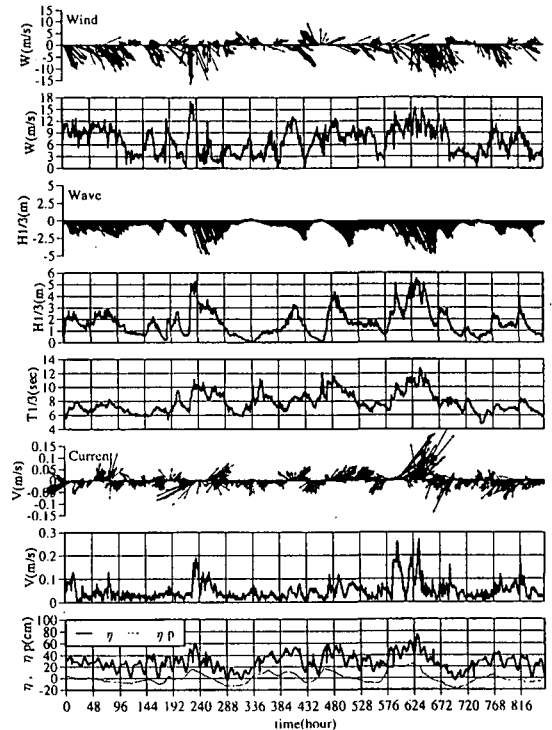
2.2 観測結果

図-3 に観測期間中の St. 1 および St. 2 における風、波、流れ、平均水位および気圧による水位変動の経時変化を示す。このうち風、平均水位および気圧による水位変動のデータについては両者同一のものであるが、比較のために併記した。先に述べたとおり、St. 1 は 11 日目の時化によって測定不能となったためそれ以後のデータが採れていない。しかし、データの採れている期間の有義波高について比較すると波向、波高ともほぼ同じ変化を示しており、局所的な変化は見られない。したがって、少なくとも St. 1 と St. 2 を含む海域においてはほぼ同一の海象条件下にあったことが推察できる。

St. 2 における観測結果を見ると風については NW 方向からの勢力が強く、汀線に対してほぼ直角方向で風速 10 m/s を超える強風が断続的に吹いている。観測期間中の最大風速は 17 m/s を超えており日本海における冬季の気象特性を顕著に表していると言える。一方、有義波高は風の変動に対応しており、期間中の最大有義波高は 5 m を超えている。また、入射方向は汀線に対して若干右入射の割合が多くなっている。これらの風、波の特性に対して流れの特性を見ると、汀線に対してほぼ平行な往復流であることがわかる。このような汀線に平行な流れ



(a) St. 1



(b) St. 2

図-3 観測記録

の特徴は潮汐による流れに見られる。しかし、平均水位 η の変化を見ると 12 時間および 24 時間周期の水位差は高々 0.2~0.4 m 程度であり、この地点における潮流成分が 0.05 m/s 以下であることから、流速の絶対値に見られるような最大で 0.25 m/s を超える流速を説明することはできない。また、流れの変動周期を見ると潮汐の変動周期よりは明らかに長い変動周期を示しており、気圧による水位変動や有義波高の変動周期によく対応している。佐藤 (1995) は新潟海岸の水深 15 m における流れの特性として、気圧の低下とそれに伴う平均水位の上昇、その後の波、流れ、風の発達について示唆しているが、ここでも、そのような傾向を読みとることができる。

次に、碎波帯沖合の流れに対するさらに沖合の海流の影響について簡単に述べておく。灘岡ら (1989) は、石狩川河口より流出する濁水について衛星画像データの解析と現地観測からその流出パターンの解明を行っている。それによると、沖合 77 m、水深 1.2 m において観測された流速データと沖合 4.9 km、水深 25 m 地点における海流のデータがよく対応していることを示しており、沿岸域の流れに対して沖合の海流の影響を示唆している。しかし、詳細な検討は行われておらず、明確な応答関係については言及していない。観測が行われた時期が 9 月であり、この時の海象条件は風の状態で、沖合の有義波高が 0.7~0.8 m と今回観測された海象条件とはあまりに異なっている。また、吉田ら (1977) は、石狩湾の海洋構造を次のように言及している。積丹岬沖を通過した対馬暖流の本流の一部は積丹半島沿いに湾内に流入し、湾奥部に達する 7 月には湾内の水深 30 m 以浅は対馬暖流で覆われ、8~10 月には冷水が沖合域に後退して水温と塩分が最高値を示す。この時期が暖流域として最も安定した状態となり、その後 10 月下旬から 11 月下旬になると対流による上下層の混合が起こり、水温・塩分ともに均一化され、翌年の 5 月頃までこの状態が続く。

これらの結果から推察すれば、今回行われた観測は 12~1 月にかけて行われたものであり、対馬暖流の影響は少ないものと思われる。しかし、観測データを用いた詳細な検討が行われていないため、定量的に判断することはできず、今後、検討する必要があると思われる。

3. 流れと風および波との関係

図-4 に St. 1 および St. 2 における流速の平面分図を示す。図中の破線はそれぞれの地点における汀線の方角を示しているが、先に述べたように両地点における流れはどちらも汀線にほぼ平行な流れが生じており、流れの特性が局所的なものではなく、大浜海岸全域において発生していることが推察できる。また、原点からの長軸の長さの差から両地点とも若干 NE 方向が優勢であると思

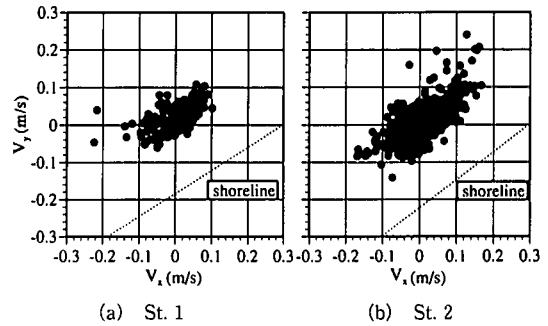


図-4 流速の平面分布

われる。

次に流れの発生機構と風・波との関係について検討する。安田ら (1996) は、石川海岸および新潟海岸における沿岸方向の流れが風および波の沿岸方向成分と密接に関わっていることを示している。そこで図-5 に St. 2 における平均流速 V と波向 θ_h および有義波高 $H_{1/3}$ との関係を図-6 に平均流速 V と風向 θ_w および風速 W との関係を示す。これらの図において汀線に対して直角入射となる方向は $\theta_h = \theta_w = 143^\circ$ である。まず、波との関係を見ると、観測期間中の高波浪は汀線直角方向より右入射の割合が高くなっていることがわかる。また、強い流れが発達する条件として高波浪であることがあげられるが、有義波高 $H_{1/3} \geq 3.0$ m であっても流速がそれ程発生していない場合もあり、十分条件にはなり得ていない。一方、風との関係を見ると、風向にある程度の範囲を持つものの汀線に向かって吹き込む向岸風で、風速が 10 m/s を超えるような強風の場合に強い流れが生じている。しかし、波との関係と同様に向岸風で強風が吹いているにも関わらず、強い流速が生じていない場合があり、風との関係においても十分条件にはなり得ていないことがわかる。

次に平均流速の発生と風、波との関係をさらに詳しく

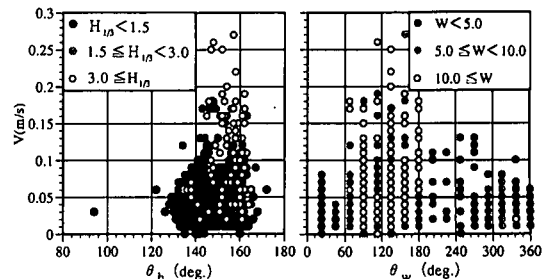


図-5 平均流速 V と波向 θ_h および有義波高 $H_{1/3}$ との関係

図-6 平均流速 V と風向 θ_w および風速 W との関係

見るために、風速、有義波高、平均流速を汀線に対してそれぞれ余弦および正弦をとることによって沿岸方向成分(添字 s)と岸沖方向成分(添字 n)に分解した。

$$\left. \begin{aligned} V_s &= V \cos(\theta_v - \theta_s) \\ H_s &= H_{1/3} \cos(\theta_h - \theta_s) \\ H_n &= H_{1/3} \sin(\theta_h - \theta_s) \\ W_s &= W \cos(\theta_w - \theta_s) \\ W_n &= W \sin(\theta_w - \theta_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 θ_s は N 方向からの汀線の方向を示す。

これらの分解した諸量についてオーダーを揃えて比較するため、それぞれの標準偏差を用いて基準化を行った。

$$\left. \begin{aligned} V'_s &= V_s / \sigma_{V_s} \\ H'_s &= H_s / \sigma_{H_s} \\ H'_n &= H_n / \sigma_{H_n} \\ W'_s &= W_s / \sigma_{W_n} \\ W'_n &= W_n / \sigma_{W_n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ は標準偏差を表す。

図-7 に基準化した平均流速、有義波高および風速それぞれの沿岸方向成分 V'_s 、 H'_s 、 W'_s の時間変化を示す。この図から、それぞれの諸量の変動周期は概ね一致していることがわかる。砕波帯外とはいえ水深 8.0 m とそれほど深くないために、それぞれの応答に大きな時間差は生じていない。さらにここでわかることは、高流速発生時において平均流速の沿岸方向成分 V'_s と有義波高の沿岸方向成分 H'_s の符号が一致していないということである (time=250, 420, 500, 620 付近)。これは、流れの作用方向と波浪の作用方向とが一致していないことを示すものであるが、水深 8.0 m は今回観測された海象条件下において、波高 5 m、周期 11 sec 程度の波浪が来襲した場合にほぼ砕波帯の外縁部に当たると思われる。そのような波浪の影響を大きく受ける水深帯であるにも関わらず、流れが波浪外力の影響を受けていないという事実は日本海沿岸で観測された事例とは異なる結果である。一方、 W'_s と V'_s との関係を見ると、高流速発生時においてかなりの一致を見ることができる。逆に言えば W'_n との対応がよいのは H'_s よりむしろ V'_s に対してであり、風が波浪を介して流れに運動量を与えることを考えると、この点については説明がつかない。

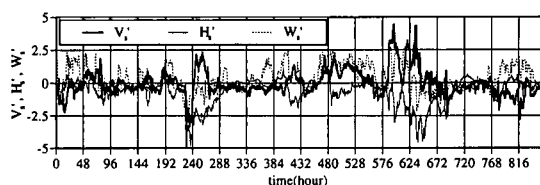


図-7 基準化された平均流速、有義波高、風速それぞれの沿岸方向成分 V'_s 、 H'_s 、 W'_s の経時変化

次に図-8 に基準化された平均流速の沿岸方向成分 V'_s と有義波高および風速の岸沖方向成分 H'_n 、 W'_n の経時変化を示す。図-7 と比較すると各諸量の変動周期に加え増減のパターンもよく対応していることがわかる。特に V'_s と H'_n の対応がよく、NE 方向の強い流れが発達している時には波浪、風ともに岸沖方向成分が増大している。作用方向が 90° 異なる運動が対応するには運動を媒介する要素が必要であるが、ここではそれを水位の上昇量と仮定した。石狩湾は冬季の風向に対して湾口が大きく開いた形状を有しており、大浜海岸はその湾口に正対した位置関係となっている。このため、内湾と言えども吹送距離は比較的長く、吹き寄せによる汀線付近の水位上昇は相当量あるものと推定することができる。この吹き寄せによる汀線付近の水位上昇と波浪の砕波によるセットアップが原因となって沿岸域に NE 方向への強い流れを生じさせていると考えられる。日本海沿岸における大規模砂浜海岸とは異なり、砂浜海岸の両側に切り立った海崖を有する地形なため、吹き寄せられた海水は逃げ場を失う。一般的にこのような汀線付近の水位上昇は離岸流の発達とともに水位のバランスをとるが、石狩湾の NE 端には石狩川が流入しており、河口における流量、流速は離岸流の比ではない。また、その主流方向は N 方向 (浜益方向) を向いており (大嶋ら, 1985)、その流れの影響は湾全体におよんでいると思われる。そうしたことから、沿岸域における水位上昇が石狩川からの流入水とともに石狩湾全体でバランスしており、強風、高波浪時における NE 方向への強い平均流の発生が推察できる。

4. 相互相関係数

これまでの検討で、平均流速の発生に風、波浪の発達が大きく関与していることが明らかとなった。しかし、平均流速の沿岸方向への発達には波浪の沿岸方向成分よりむしろ岸沖方向成分が大きく関与しており、それが内湾の沿岸部における水位上昇量を媒介とした現象であると考えられることを示した。ここでは、それらの諸量の関係を定量的に見るため、図-9 に平均流速の沿岸方向成分 V'_s と各諸量との相互相関係数 $R(\tau)$ を示す。

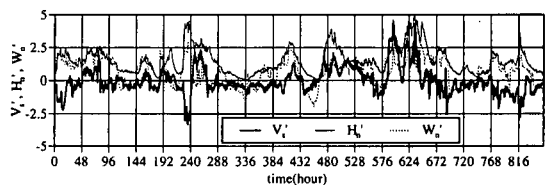


図-8 基準化された平均流速の沿岸方向成分 V'_s と有義波高、風速それぞれの岸沖方向成分 H'_n 、 W'_n の経時変化

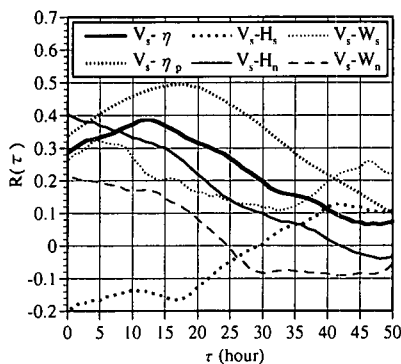


図-9 平均流速の沿岸方向成分 V_s と各諸量との相互相関係数 $R(\tau)$

この図から、 V_s と最も対応関係の強いものは気圧による水面変動 η_p であることがわかる。また、それに続いて波浪の岸沖方向成分 H_n との関係も強く、このことから、沿岸方向の流れの発生に水位上昇が大きく関わっていることが推察できる。一方、風との関係では W_n よりも W_s の方が関係が強く、吹き寄せの効果が現れていない。これについては、図-7 からも V_s' と W_s' の対応がよく、吹送流的な要素も十分に考えられる。しかし、 V_s' と H_s' との対応が悪いため、運動量の伝達について不明な点が依然として残る。

5. 結 語

石狩湾大浜海岸沖合 1 km、水深 8.0 m 地点における流速および波浪のデータを同時に観測された風、気圧、平均水位のデータとともに解析を行った。観測では最大で 0.25 m/s を超える流速が発生しており、St. 1 が砂中に埋没するというトラブルまで発生した。これは、砕波帯沖合でも実際に砂が活発に移動していることを実証するとともに、今後漂砂の問題を考える上でこうした砕波帯沖合まで含めて考えなければならないことを示すものであった。以下に主要な結果をまとめる。

① 砕波帯沖合における流れは、汀線に対して平行な

往復流であり、NE 方向への流れが強風、高波浪時に発生することを明らかにした。

② NE 方向への強い平均流の発生は波浪の入射方向に依存せず、沿岸方向成分の勢力に対応していることを明らかにした。このことから、内湾の地形的要因に波浪の碎波による沿岸域での水位上昇が風の吹き寄せとあいまって、NE 方向への強い流れを発生させているという推察に至った。

③ また、流れと風の沿岸方向成分の関係から吹き寄せの効果に加えて吹送流的要素も関係していることを明らかにした。しかし、流れの沿岸方向成分と波浪の沿岸方向成分との対応が悪いことから、運動量の伝達に不明な点が残った。

今後は、石狩湾全体の流動特性を明らかにするため、数値計算による検討を行う予定である。

最後に、貴重な観測記録を提供していただいた北海道小樽土木現業所および北海道開発局小樽開発建設部小樽港湾建設事務所の各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 松山優治 (1988): 駿河湾及び相模湾の循環流と潮流, 沿岸海洋研究ノート, 第 26 巻, 第 1 号, pp. 21-32.
- 田中茂信 (1994): 気になる話, 海岸, 第 34 巻, 第 1 号, pp. 20-27.
- 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.
- 灘岡和夫・山下俊彦・蒲田浩久・佐藤尚稔・牧野有洋 (1989): 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, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 219-223.
- 吉田喜一・土門和子・渡辺智視 (1977): 石狩湾沿岸漁場の物理・化学環境, 北水試月報, 34(4), pp. 1-6.
- 安田孝志・加藤 茂・岩田 宏・佐藤慎司 (1996): 砕波帯沖合い流れの特性とその成因について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 366-370.
- 大嶋和夫・横田節哉・井内美郎・鈴木泰輔・松本英二・池田国昭・村瀬 正・羽坂俊一 (1985): 開口性沿岸海域開発に伴う底質汚染予測技術に関する研究, 昭和 59 年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 64, pp. 1-32.