

石川海岸沖合いの流況特性と碎波の影響について

安田 孝志*・森 信人**・加藤 茂***・佐藤 慎司****

1. 緒 言

石川海岸は金沢市の西北に位置する長さ約 100 km の直線状砂浜海岸であり、手取川河口を中心として侵食が進んでいる。このため、これまで 107 基の離岸堤が設置され、前浜地形の回復と安定化は果たされた。しかしながら、離岸堤沖側の侵食はなお続き、過去の深浅測量結果との比較から、これまで 28 年間に 2 km 沖（水深 20 m）までの広い範囲で水深が 2 m 近く増加する侵食が進んでいることが判明した。

このような海岸の長期的保全を図るには、沿岸域の漂砂のみに着目した従来型の保全対策では不十分であり、沖合い漂砂の動態の解明が要求されるが、それにはまず漂砂の原因となる沖合いでの流況特性の解明から始める必要がある。こうした沖合いでの流れの原因としては、まず風によるせん断力が考えられるが、碎波による波から海流への運動量輸送の重要性を示した Melville・Rapp (1985) の実験結果や沿岸流の生成における碎波の役割に着目するなら、碎波の影響についても検討が必要である。

そこで、本研究では石川海岸沖合い約 1500 m 地点（水深 15.1 m）で得られた波形および流速記録を風速・風向データとともに解析し、そこでの流況特性を明らかにするとともに、そのような沖合いでの流れの発生条件および原因、特に碎波の影響を明らかにしたい。

2. 観測概要

ここで解析する観測記録は、建設省北陸地建金沢工事事務所によって平成 6 年 12 月 14 日から翌年 1 月 13 日までの約 1 ヶ月間にわたって実施された石川海岸における連続観測によるものである。波形および流速の測定には、図-1 に示す石川海岸徳光地先の水深 15.1 m 地点の海底に設置された超音波式波高計および水平 2 方向電磁流速計（センサー位置は海底 1.2 m 上）を用いて行われた。また、風速・風向は徳光海岸地点において同時に測

定されている。

時間波形データから Wavelet 解析（森・安田，1994）によって碎波の有無を判定し、このときの流れに及ぼす碎波の影響について検討するため、波形および流速データ共にサンプリング周波数を 10 Hz とした。

風向 θ_w 、波向 θ_p および流向 θ_v については、極座標上のそれぞれの進行方向を真北 N から時計回りの角度によって与えた。これより、この海岸の沿岸方向およびそれに直角の岸向き方向は上述の図-1 からわかるようにそれぞれ 37° および 127° となる。

まず、これらのデータより観測期間中の気象・海象特性を知るため、連続データを 30 分単位に分割し、各単位ごとの平均風速 U および有義波高 $H_{1/3}$ を求め、その経時変化を図-2 に示す。観測期間中に落雷による停電やノイズなどがあって若干の欠損はあるが、風速と有義波高とはよく対応しており、風と連動した日本海での冬期波浪の特徴が明瞭に現れている。

これを基に、発達期から平衡期までの海象状況に対応

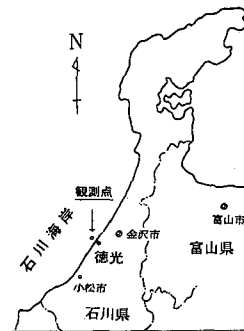


図-1 石川海岸と観測位置

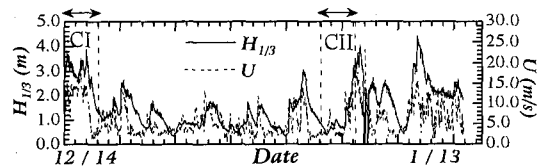


図-2 連続観測期間中の有義波高 $H_{1/3}$ および平均風速 U の経時変化

* 正 会 員 工 博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工 修 岐阜大学大学院 工学研究科（日本学術振興会特別研究員）

*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科

**** 正 会 員 工 博 建設省土木研究所 海岸研究室

し、かつノイズのない2区間(図中のCIおよびCII)を選び、各区間ごとの風速・風向、有義波高 $H_{1/3}$ と平均波向 θ_0 および流速の各ベクトルの経時変化を調べた(図-3)。これより、CIでは、10 m/sを超えるE方向の風が吹き続ける間は波は海岸にほぼ直角に入射し、0.3 m/s程度の海岸に平行なNE向き流れが維持されているが、風向がNNE方向に振れると、それに合わせたように流速は急減し、方向も大きく変動するようになることがわかる。これとは逆にCIIでは、風速が10 m/sを超え、風向がENEからESEの間に安定化するようにになると、 $H_{1/3}$ が増大し始め、それに10時間程度遅れてNE向きの0.2 m/sを超える流れが形成される。

このように、沖合い1500 mにおいて流速が0.2 m/sを超える流れが存在し、それが風や波と密接に関わっていることは示されたが、定量的関係は不明のままであり、以下はこの点の解明を図る。

3. 流れと風・波の関係

3.1 スペクトル

上述の図-3に示したように、この海岸ではNE方向の流れが卓越してくるが、その流れの原因は不明である。そこで、まず長周期波との関係を明らかにするため、波形と流速のスペクトルについて検討する。

図-4はCIIの波形 η とN向きの流速成分 V_N のスペクトルを示したものである。両者のスペクトル形状はよく似ており、観測点での流速と水面変動とが密接に関わっていることがわかる。ただし、 V_N のスペクトルの勾配が0.002 Hz付近から急になっており、これよりも低周波側の流速成分と水面変動の関係に何らかの変化が生じていることがわかる。

3.2 周波数帯と流速の関係

上述の図-4の破線で示すように周波数帯を3領域 $f < 0.002$ Hz, $0.002 \text{ Hz} \leq f < 0.06$ Hz および $0.06 \text{ Hz} \leq f$ に分け、それぞれの領域での流況特性について調べる。

図-5は、CIIについて各周波数領域における1秒毎の水平水粒子速度を(V_x , V_y)平面にプロットしたものである。 $0.06 \text{ Hz} \leq f$ の周波数帯では風波の平均波向に対応した岸一沖方向の流速成分が卓越し、原点からの長軸の長さの差から岸向きの流速が若干優勢である。

これに対して中間周波数帯では流速のオーダーが1桁近く低く、卓越方向も見られないが、 $f < 0.002$ Hzの低周波数帯では岸にほぼ平行なNE方向の流速成分が卓越し、その大きさも0.4 m/s近くに達することがわかる。このNE方向の卓越成分が前述の図-3(b)に示したNE方向の流速ベクトルを与えたと推定される。

図-6は V_N の低周波成分 ($f < 0.002$ Hz) と水面変動 η の時間変化を示したものであり、流速は水面変動と何

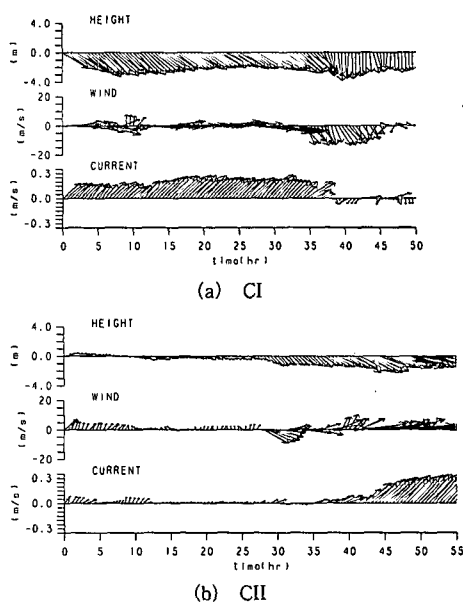


図-3 観測区間 CI および CII における風、波および流れの大きさと方向

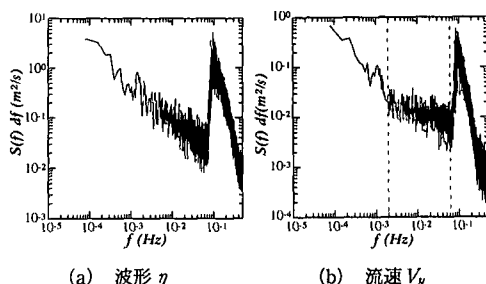


図-4 区間 CII における波形 η と流速の N 方向成分 V_N のスペクトル

ら関係せず、水面変動には約12時間周期の潮汐の影響が明瞭に現れているが、流速にはそのような影響は何ら認められない。これは、潮汐による流速が高々0.06 m/s程度であり、ここで問題にしている0.3 m/s前後の流速に対して無視できることを示すものと言える。

3.3 平均流と風・波の関係

ここでは、30分単位データの各種平均諸量の関係を基に平均流の実態の解明を図る。図-7は平均流速 V と流向 θ_v の関係を示したものである。流速が0.2 m/sを超える場合の流向は、海岸線に平行方向の37°より若干沖向きの20°から40°範囲に固定され、海岸線に沿ったNNE向きの強い流れが存在していることがわかる。

図-8は、平均流速 V と平均風速 U 、有義波高 $H_{1/3}$ 、平均風向 θ_u および平均波向 θ_0 との関係を示したものである。これから、CIでは流速と風速は必ずしも対応しておらず、流速が風速以外の因子にも依っていることがわか

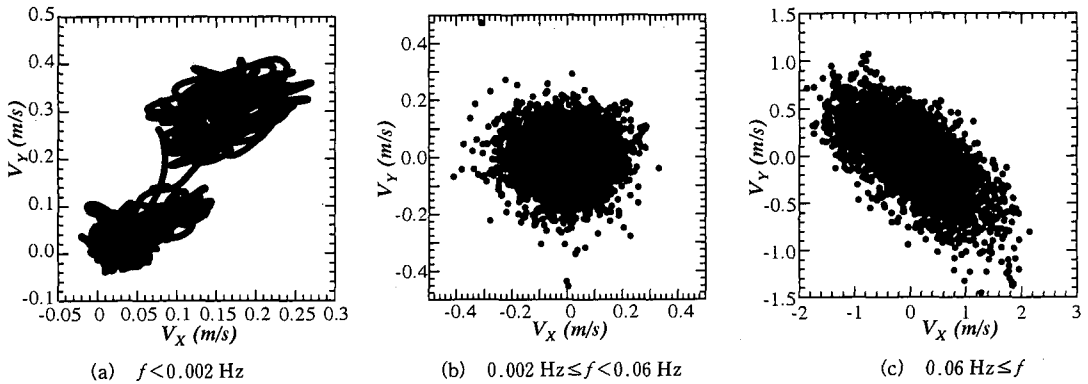
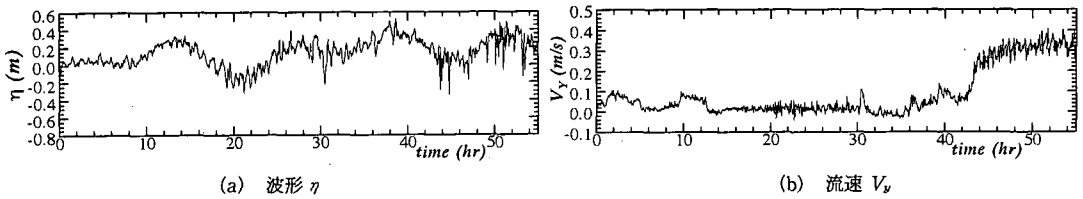
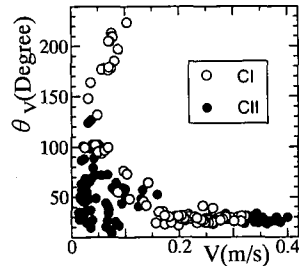


図-5 区間CIIにおける各周波数帯の流速分布

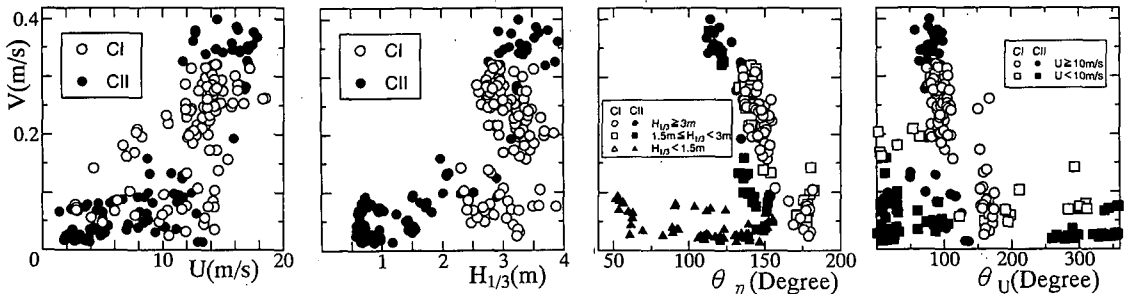

 図-6 区間CIIにおける η および V_y の低周波成分($f < 0.002 \text{ Hz}$)の時間変化

る。しかし、CIIでは風速の増大とともに流速も増し、特に風速が12 m/sを超える付近から流速も一気に0.3 m/s以上に上昇していることがわかる。ただし、流速が0.2 m/sを超えるのはいずれも風速がほぼ10 m/sを超える場合であり、0.2 m/sを超える平均流の生成には10 m/s以上の風速が必要と言える。

ついで、 $H_{1/3}$ との関係で見るとCIとCIIで際立った差異があり、CIでは流速は $H_{1/3}$ にほとんど無関係であるのに対し、CIIでは V の値は $H_{1/3}$ とともに増大し、0.2 m/sを超える平均流は $H_{1/3}$ がほぼ3 mを超える高波浪時に発生することがわかる。このように、CIとCIIでは平均流の風速や波高への依存性に大きな差異があるが、0.2 m/sを超える流れは共に平均風速が10 m/sを超え、かつ有義波高が2 mを超えるような気象・海象条件下で生


 図-7 平均流速 V と流向 θ_v の関係

じている点では共通している。ただし、CIIでは $H_{1/3} > 3$ mの高波浪下においても V の値は0~0.3 m/sの範囲に分布しており、流速が $H_{1/3}$ や U 以外の因子にも支配されていることがわかる。


 図-8 平均流速 V と各種平均諸量の関係

そこで、流速 V と風向 θ_U の関係について見ると、0.2 m/sを超える流速は風向がほとんど80°から120°の範囲にある場合に生じており、流速が風向と密接に関わっていることがわかる。特に、 $U \geq 10$ m/sであっても風向がこれから外れている場合には流速は0.1 m/s程度に留まっているが、逆に $U < 10$ m/sであっても風向がこの範囲内であれば0.2 m/s近い流速が生じており、風向が平均流の流速を支配していることがわかる。

同様に、 V と入射波の平均波向 θ_r の関係について見てみると、両ケースとも流速が0.2 m/sを超えるのは波向が105°から150°、すなわち海岸線に直角方向の約127°をはさんで約±20°の範囲内に収まる場合であることがわかる。この場合、 $H_{1/3}$ が3 mを超えていても θ_r が160°以上であれば流速は0.1 m/s程度に留まり、逆に $H_{1/3} < 3$ mであっても θ_r が110°から150°の範囲内であれば0.3 m/s近い流速が生じている。ただし、 $H_{1/3} < 1.5$ mでは θ_r が110°から150°の範囲内にあっても流速は0.1 m/s程度に留まっており、0.2 m/sを超える平均流が生じるには、 $H_{1/3} > 1.5$ mの波の平均波向が110°から150°の範囲に収まる場合と考えられる。

4. 平均流の発生機構

これまでの検討によって、NE方向の平均流を発生させる風および波浪条件は明らかになったが、風や波の作用がどのように流れの生成につながっているかは不明のままである。そこで、ここでは風や波の沿岸方向成分および砕波率との関係について検討し、平均流の発生機構の解明を図る。

4.1 風および波の沿岸方向成分の影響

上述したように、0.2 m/sを超える平均流の流向は沿岸方向($\theta_s = 37^\circ$)から若干北に向けた20°から40°の間に集中しているのに対し、このとき風向 θ_U はほぼ80°から120°、波向 θ_r は少し南向きのほぼ110°から150°の間にそれぞれ分布し、これらの沿岸方向成分が平均流と関わっているものと推察される。そこで、平均流速、風速および波の沿岸方向成分 V_s 、 U_s 、 H_s をそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} V_s &= V \cos(\theta_v - \theta_s) \\ U_s &= U \cos(\theta_U - \theta_s) \\ H_s &= H_{1/3} \cos(\theta_r - \theta_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

によって計算し、平均流速が十分に発達した $V \geq 0.2$ m/sの場合の V_s と U_s および H_s の関係について図-9に示す。ここで、 H_s は波高 $H_{1/3}$ の波の作用の沿岸成分に相当するものと考えられる。

V_s と U_s の関係について見ると、両者の方向は一致しており、 U_s が増大するに従って V_s の値も増し、平均流の推力として風によるせん断力の沿岸方向成分が考えられる。これに対し、 V_s と H_s の関係で見るとCIの場合の

波の沿岸方向成分はすべて負となり、波の作用方向は平均流と逆向きとなって流れの発達を抑えることがわかる。しかし、CIIの場合は大半の H_s が正となり、波の作用方向は平均流の向きと一致して流れを発達させる。

このように、波の作用という点ではCIとCIIで方向が逆転しているが、平均流自体はともにNE方向となっており、第1義的には風に支配されていることがわかる。

4.2 風のせん断力の影響

風のせん断力を平均流の推力とした場合、沿岸方向の定常等流仮定の下で次式の関係が成立する。

$$\rho_a C_a U U_s = \rho_w C_f V V_s \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ_a は空気密度で1.20 kg/m³、 ρ_w は海水の密度で1.03×10³ kg/m³、 C_f は海底の摩擦係数であり、ここでは潮流や高潮の計算に一般に用いられる3×10⁻³を採用。 C_a は海面の摩擦係数であり、 C_f に準じた値となる。

いま、CIおよびCIIにおいて $V \geq 0.2$ m/sとなる場合の風速および流速の平均値を求めると、表-1のようになる。これらの値を式(2)に代入して C_a の平均値を求めると、CIおよびCII共に1.70×10⁻³となる。この値は、ここで用いた上述の $C_f = 3 \times 10^{-3}$ にほぼ準じており、このときの平均流の沿岸方向成分が風のせん断力によって示すものと言える。ただし、前述したように、CIとCIIでは波の作用の沿岸方向成分は正反対の方向であり、CIの波の作用方向は平均流と逆向きである。これは、CIの風向と波向の沿岸方向成分が逆転していることを示し、海面の摩擦係数を増大させ、逆に風向と波向の沿岸成分の方向が一致するCIIでは摩擦係数の値を減少させるものと予想される。しかしながら、実際には上述したように C_a の値は共に1.70×10⁻³と一致しており、若干ではあるがCIでは摩擦係数が過小、CIIでは過

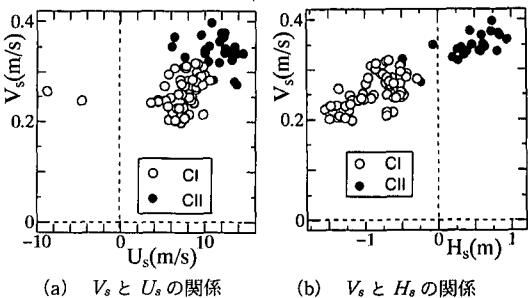
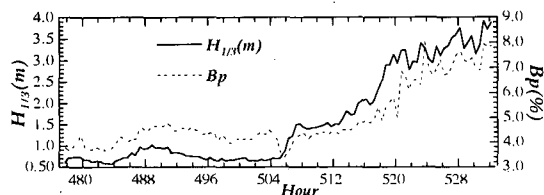
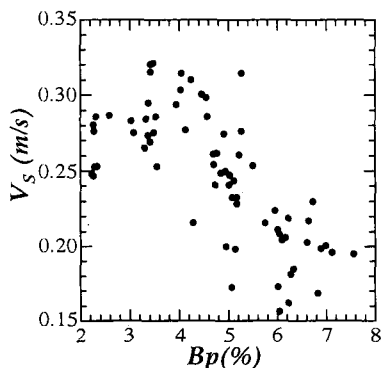


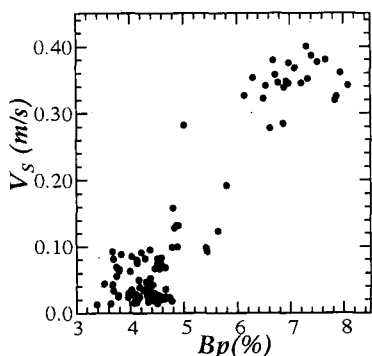
図-9 平均流速、風速および沿岸方向成分 V_s 、 U_s および H_s の関係

表-1 $V \geq 0.2$ m/sとなる場合の風速(U 、 U_s)および流速(V 、 V_s)の平均値

case	$\bar{U}$ (m/s)	$\bar{V}$ (m/s)	$\bar{U}_s$ (m/s)	$\bar{V}_s$ (m/s)
CI	13.8	0.260	7.16	0.257
CII	15.6	0.346	11.2	0.341

図-10 観測区間CIIでの平均流速 V と碎波率(%)の経時変化

(a) CI



(b) CII

図-11 平均流速の沿岸方向成分 V_s と碎波率(%)の関係

大にそれぞれ評価されていると考えられる。

これが事実とすれば、その原因は波の作用の差異にあり、CIでは波の作用によって風のせん断力の効果が減殺され、それが摩擦係数の過小評価に現れたと推測される。逆にCIIでは、波の作用によって平均流が加速され、これが風のせん断力の効果に加わって摩擦係数が過大評価される結果となり、 C_d の値がCIのものと同じしたと考えられる。風と波の作用の関係では以上のように考察されるが、このときの流れを地衡流の岸側境界流として捉える視点も必要であり、今後の検討課題である。

4.3 碎波の影響

波の作用は、実際には碎波を介して平均流に及ぶため、このときの碎波率を推定する必要がある。そこで、森・

安田(1994)による時間波形からの碎波率(Bp)の推定法を用い、このときの Bp (%)の推定を行った。

図-10はCIIの $H_{1/3}$ と碎波率の経時変化を示し、波の発達と共に碎波率が増加していく様子がよくわかる。

図-11はCIとCIIでの平均流の沿岸方向成分 V_s と碎波率の関係を示す。波の作用方向と流向とが一致するCIIでは、碎波率の増加と共に流速も増大しており、碎波を介した波の作用が平均流の発達と密接に関わっていることがわかる。これに対し、波の作用方向が流向と逆のCIでは、碎波率の増加にともなって波の作用は流れを阻止する方向に働くため、流れは減速されることになる。このように、両ケース共、流速の変化が碎波率によってうまく説明でき、碎波を介した波の作用は平均流の流速を正しく評価する上で無視できないことがわかる。

5. 結 語

石川海岸沖合い1500m(水深15.1m)地点での流速および波形データを解析し、海岸線に直角方向からE方向にかけて平均風速が10m/sを超える風が吹き、 $H_{1/3} \geq 1.5$ mの有義波の平均波向が海岸線に直角方向の $\pm 20^\circ$ の範囲内に安定する気象・海象条件下において、海岸線にはほぼ平行なNNE向きの0.2m/sを超える流速の平均流が発生することを明らかにした。この流れは方向が海岸線に平行で一定しており、風や波の条件によっては0.4m/s近い流速に達する。

その発生に関わる第1次的要因は風による海面のせん断力の沿岸方向成分であるが、これに碎波を介した波の作用が加わり、波の作用方向(平均波向の沿岸方向成分)が流向に一致した場合には流れを加速し、逆転した場合には減速するため、流速を正しく算定するには碎波の影響評価が必要となる。特に、 $H_{1/3}$ が3m近くになると H_{max} も6m近くになるため、水深15mであっても碎波による攪乱の海底への影響は無視できず、これに0.4m/s程度の平均流が加わると沖合い漂砂やこれによる海底地形変化の可能性は極めて高いと推察される。

最後に、石川海岸での現地観測の遂行および観測データの収集にあたられた建設省北陸地建金沢工事事務所の諸氏に深謝する。

参 考 文 献

- 森 信人・安田孝志(1994): ウェーブレット解析による時間波形データからの碎波頻度の推定法, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 181-185.
- Melville, W. K. and R. J. Rapp (1985): Momentum flux in breaking waves, *Nature*, Vol. 317, pp. 514-516.