

強風浪下の沖合い流れの3次元構造と発生機構

安田孝志*・加藤 茂**・十二正義***・山下隆男****

1. 緒 言

平均流速が0.5 m/sにも及ぶ碎波帯沖合いの強い流れが田中(1994)によって指摘され、これまで数多くの研究が行われてきた。その結果、発生原因も含めて不明な点が多かった沖合い流れの実態解明が進み、それが風による海面せん断力、コリオリ力および碎波を介して波から供給される運動量に原因した流れであることが明らかとなってきた(佐藤, 1996; 安田ら, 1996)。

この流れは、沖合い漂砂を始めとして沿岸域の輸送現象に広く関わっていると考えられ、広域的に海岸保全や沿岸域管理を進めて行く上で重要である。しかしながら、このような沖合い流れを海洋学的スケール(傾斜流)あるいは海岸工学的スケール(海浜流, 海岸流)のいずれで捉えるかによってそのモデル化は数値モデルまで含めて大きく異なる。このため、観測結果を基に沖合い流れの3次元構造や外力の変動に対する応答特性を明らかにし、その結果を踏まえてモデル化を進めることは、長期的・広域的に安定な海浜の保全を進め、総合的な沿岸環境の管理計画を策定する上で必須の課題と言える。

そこで本研究では、現地データを用いて沖合い流れの鉛直分布を含めた3次元構造と外力である風および波のベクトルの時間変化に伴う動的応答特性を明らかにするとともに、これを基に、風、波およびコリオリ力を考慮し、鉛直方向に σ -座標系を用いた平均流の準3次元モデルを導き、その適用性を検証する。ついで、このモデルを用いたシミュレーションにより、観測データだけでは不十分な沖合い流れの特性を明らかにしたい。

2. 観 測 概 要

ここで用いる波形、流速および風速データは建設省北陸地建金沢工事事務所によって1995年12月28日から翌年1月28日にわたって得られたものであり、その解析結果も一部既に報告されている(田中ら, 1996)。ここで

は、石川海岸徳光地先の汀線直角に沖に向かう3測点P1(水深15 m)、P2(20 m)およびP3(30 m)での波形および流速データを解析した。なお、3測点間の海浜勾配はほぼ1/100であり、測点P2およびP3での流速は底層(海底から約0.7 m)のみであるが、測点P1では底層に加えて中層(海底から約5.7 m)および上層(海底から約10.7 m)の流速も測定されている。風速データは徳光地先の陸上観測点におけるものであり、風向は観測点における吹き出し方向を示す。各観測データは毎正時20分間におけるものであり、これより毎正時の有義波高 $H_{1/3}$ 、平均スカラー流速 V および風速 U を求めた。

図-1は、観測期間中の測点P1での U と $H_{1/3}$ の経時変化を示している。この観測期間を主要な暴風期を含む区間I、II、IIIおよび静穏期IVに分け、全区間における平均流速と気象・海象諸量の関係について調べる。さらに、 V 、 U 、 $H_{1/3}$ を沿岸方向成分 V_s 、 U_s 、 H_s (北東向きを正)および岸沖方向成分 V_n 、 U_n 、 H_n (岸向きを正)に分け、これらの岸沖方向変化および測点P1での鉛直分布についても検討する。

3. 沖合い流れの特性

3.1 岸 沖 変 化

沖合い流れの沿岸方向成分 V_s だけでなく岸沖方向成分 V_n の岸沖変化については必ずしも明らかになっておらず、沖合い流れのスケールを明らかにし、その性質を理解するためにも検討が必要である。図-2は前述の3測点における V_s および V_n の区間I~IIの経時変化を比較したものである。全測点において V_s が V_n に比べて卓越しており、沖合い流れの実体は海岸に平行な流れにあると言ってもよく、特に北東向き(正)の場合に大きく発達することがわかる。この点では傾斜流と同じであるが、沖に向かうに従って流速は低下し、測点P3での V_s は

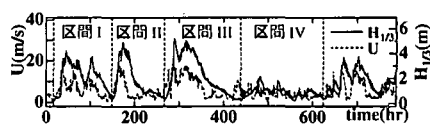


図-1 風速 U と測点P1での $H_{1/3}$ の経時変化

* 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)

*** 正 会 員 鉄建建設株式会社

**** 正 会 員 工 博 京大大学助教授 防災研究所

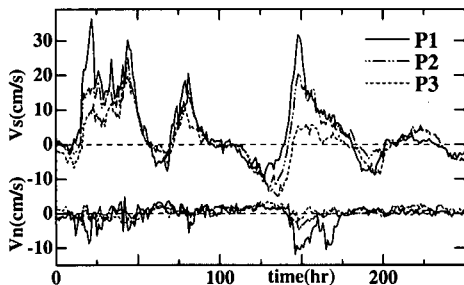


図-2 沖合い流れの沿岸方向成分 V_s および岸沖方向成分 V_n の経時変化 (区間 I-II) の測点間の比較

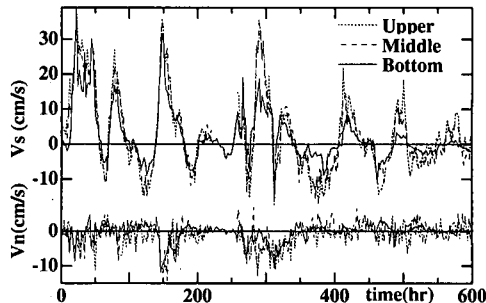
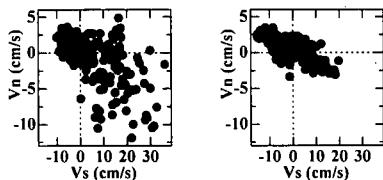


図-4 測点 P1 での沖合い流れの沿岸方向成分 V_s および岸沖方向成分 V_n の鉛直変化 (区間 I-II)



(a) 測点 P1

(b) 測点 P3

図-3 沖合い流れの V_s と V_n の関係 (区間 I-II)

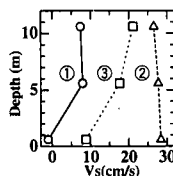


図-5 測点 P1 での波の①発達初期 (10 hr), ②最発達期 (20 hr) および③減衰期 (50 hr) における鉛直分布の比較

0.2 m/s 以下に留まっている。こうした流速が沖に向かうに従って急減する傾向は V_n においてより顕著に現れ、沖合い流れと言っても傾斜流のように海洋学的スケールを持つ流れとは異なり、沿岸域に局在した海岸工学的スケールの流れであると言える。

また、 V_s と V_n の方向変化は3測点同時に生じる傾向がある。すなわち、 V_s が南西方向 (負) のときは V_n は弱いながら岸向き (正) となっているが、 V_s が北東 (正) に方向を転じて流速を強めると、 V_n も沖向きに方向を反転させて流速を増大させている。こうした V_s および V_n の発達に岸側潮位の上昇による傾斜流の生成と同一の機構に基づくものとの推察は可能である。しかし、上述したような沖合い流れの局在性は、この推察に否定的である。むしろ、こうした流速の分布特性は沖合い流れを発達させる推力が沖に向かって単に減少している結果に過ぎないことを示していると考えられるべきであろう。

このような、 V_s と V_n の方向について検討するため、測点 P1 および P3 での区間 I~II における両者の関係を図-3 に示す。沖合い流れが北東向き ($V_s > 0$) に発達する場合に、同時に沖向き ($V_n < 0$) 流れが発達する傾向にある。しかし、 V_n が岸向き (正) のときも北東向きの沖合い流れ $V_s (> 0)$ が発生しており、北東向きの流れを全て傾斜流とは見せない場合もある。

3.2 鉛直分布

沖合い流れの鉛直分布は漂砂などの輸送現象に関わって重要であるが、流れの発生機構や鉛直混合などを解明する上でも重要である。

図-4 は測点 P1 での上中下層の V_s および V_n の区間 I~IV にかけての経時変化を示したものである。 V_n および V_s 共に鉛直分布の逆転はないものの上中層ほど流速の絶対値および変動幅が大きい。これは、底面摩擦の影響にもよるが、沖合い流れの主因が風や波から海面を通して供給される運動量にあることを示すものと考えられる。また、発達期には下層でも上層に近い流速が発生する場合があり、これについては強い鉛直混合を考える必要がある。逆に、沖合い流れが未発達の静穏期 (450~600 hr) においては上中層と下層の差異が大きく、その原因を鉛直混合の弱さにあると考えることができる。これらの結果は、沖合い流れを発達させる推力が同時に鉛直混合の促進に繋がっていることを示すものと言える。

この点をより明確にするため、波の発達状況と流速の鉛直分布の関係について検討する。図-5 は波の①発達初期、②最発達期および③減衰期における V_s の鉛直分布を示したものである。碎波の影響が顕著となる最発達期において流速はほとんど一様になっており、碎波に伴う鉛直混合によるものと考えられる。事実、碎波の影響が弱い発達初期および減衰期では下層流速は遅く、せん断流の分布となっている。こうした鉛直分布の差異は鉛直混合の強弱により、それは詰まるところ碎波の影響の程度によっていると考えられる。

3.3 応答特性

発達した沖合い流れがコリオリ力を主因とする傾斜流の性格を持つならば、岸向きの風速 $U_n (> 0)$ および波浪成分 $H_n (> 0)$ による岸側潮位の上昇に応じて発達するた

め、 V_s の時間変化は U_n および H_n に対応すると考えられる。逆に風や波の直接作用を主因とするなら、 V_s は U_s および H_s に対応すると考えられる。

図-6は、測点P1での V_s 、 U_n および H_n の区間Iにおける経時変化を示したものである。沖合い流れが北東向きに発達する場合に岸向きの U_n および H_n の値も増大している。しかし、これらによって傾斜流が生じる過程を考えると、 U_n および H_n と V_s の間に若干の応答遅れがあると考えられるが、実際にはむしろ V_s が U_n および H_n に先行し、事実は矛盾していることになる。

これに対し、 V_s と U_s および H_s の関係を示した図-7を見ると、時間的変化が互いによく連動し、時間差は小さいが風→波→流れの順に変化している。特に、 V_s と H_s の間に認められる対応は、波の作用が沖合い流れの主因となっていることを強く示唆するものと言える。

こうした沖合い流れの応答特性を相互相関関数 C によって評価するため、図-8に測点P1の区間Iでの V_s と U_s 、 H_s 、 U_n 、 H_n の各相互相関関数と遅れ時間の関係を示す。また、図中には各相互相関関数の極大値として定義される相関係数 ρ の値も示している。この図より、 V_s は U_s に5時間、 H_s に1時間遅れて発達・減衰することがわかる。これは、風によって流れと同時に波も発達するため、流れと波の発達時間の遅れが小さいことによっている。また、 H_s と V_s の相関係数の値自体も

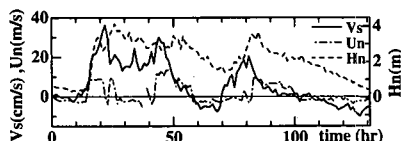


図-6 測点P1での沖合い流れの沿岸方向成分 V_s (下層)と岸側潮位上昇を引き起こす U_n および H_n の経時変化の比較

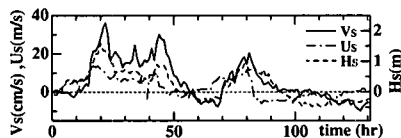


図-7 測点P1での沖合い流れの沿岸方向成分 V_s (下層)とその推力となる U_s および H_s の経時変化の比較

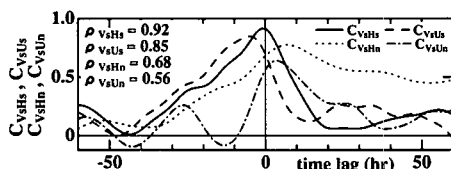


図-8 測点P1での V_s (下層)と H_s 、 U_s 、 H_n 、 U_n との相互相関関数

$\rho_{V_s H_s}=0.92$ となり、 U_s と V_s の相関係数 $\rho_{V_s U_s}=0.85$ を上回り、沖合い流れが応答時間も含めて H_s と極めて高い相関を持つことがわかる。これに対し、 V_s を傾斜流と捉えた場合、その原因となる U_n および H_n に V_s が先行し、因果関係の逆転が生じる。また、相関係数の値も $\rho_{V_s H_s}$ や $\rho_{V_s U_s}$ に比べて $\rho_{V_s H_n}=0.68$ および $\rho_{V_s U_n}=0.56$ と低く、北東向きの発達した沖合い流れを傾斜流と考えることに無理があると言える。

4. 準3次元数値計算モデル

4.1 基礎方程式

ここでは、静水圧近似に基づく準3次元モデルを用いる。海底地形や流速の鉛直分布の重要性を考慮し、鉛直方向には σ -座標系を導入し、高次の水平拡散項を無視すると、以下のような連続式および運動方程式を得る。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial u D}{\partial x} + \frac{\partial v D}{\partial y} + D \frac{\partial w \sigma}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f v \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(N \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \\ + N_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma} + f u \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(N \sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \\ + N_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 u 、 v 、 $w \sigma$ は x 、 y 、 σ 方向の流速、 ζ は静水面からの水位、 $D=h+\zeta$ は全水深、 h は静水深、 f はコリオリ係数、 ρ は水の密度、 p_a は大気圧、 g は重力加速度、 $N \sigma$ および N_h は鉛直および水平方向の渦動粘性係数を示す。以上の方程式を空間的にはスタッガード格子を用いて中央差分近似し、時間発展においてはリープ・フロッグ法を用いる。

海面および海底境界条件は、それぞれ海面および海底の摩擦係数を用いて風および流れの摩擦応力で与え、摩擦係数はそれぞれ 1.0×10^{-3} および 4.0×10^{-3} とした。

4.2 鉛直渦動粘性係数の推定

式(2)および(3)における $N \sigma$ は L_i & Zhang (1996)のものに波の影響を加えて、次式のように仮定する。

$$N \sigma = \alpha(x, y, t) \Psi(\sigma) + \mu_{\text{tide}} + \mu_{\text{wind}} + \mu_{\text{wave}} \quad (4)$$

ここで、 $\Psi(\sigma)$ は鉛直方向の分布関数、 μ_{tide} 、 μ_{wind} および μ_{wave} は潮汐、風および碎波による渦動粘性係数で、 $\mu_{\text{tide}}=2.5 \times 10^{-2}$ とした。また、 $\mu_{\text{wind}}=\lambda_{\text{wind}} \times W_*$ で、 λ_{wind} は有効粗度、 W_* は風の摩擦速度であり、 $\lambda_{\text{wind}}=0.03$ とし

た。

α は x, y, t に依存する係数であり、次式で表される。

$$\alpha(x, y, t) = k_2 (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{1/2} \Delta \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 k_2 は定数、 $\bar{u}, \bar{v}$ は鉛直断面の平均流速、 Δ は海底境界層の厚さを表し、経験定数 $C (=0.3)$ 、海底摩擦速度 U_*^2 、コリオリ係数 f より $\Delta = (CU_*^2)/f$ で与えられる。なお、 $f=0$ および $\Delta > h$ の場合には $\Delta = h$ とする。

$\Psi(\sigma)$ に関しては幾つかの分布形が考えられているが、ここでは簡単のために $\Psi=1$ (鉛直方向に一樣) とした。

5. 石川海岸における沖合い流れの計算

5.1 計算領域および境界条件

計算領域として、まず、加佐岬から金沢港までの約 40 km を想定し、沿岸方向 (Y) 40 km、岸沖方向 (X) 20 km とした。海底地形も現地海岸との対応を考えて $h=5\sim 50$ m の間を $1/100$ の一樣勾配部とし、それより沖側は一定水深とした。また、沿岸方向の境界条件の影響は大きいので、岸沖方向の境界条件は、沖側境界を水深 50 m の開境界、岸側境界を水深 5 m の固定境界とし、沿岸方向の境界条件の違いについて検討を行った。

加佐岬と金沢港を固定境界として沖側境界まで延長させた場合、それによる循環流が生じ、その影響が計算領域内の半分以上にまで及んだ。これは、加佐岬や金沢港は高々沖合い 2 km 程度までの障害物に過ぎず、これを沖合い 20 km までの固定境界として与えることは過大評価となることを示している。そこで、石川海岸は越前岬から能登半島根元までの約 100 km に及ぶほぼ直線状の海岸の一部と考え、沿岸方向に対する束縛が小さい周期境界を用いることにした。その結果、境界条件に原因する循環流が消えただけでなく、岸沖方向を 10 km、沿岸方向を 20 km とした場合とも差異は生じなかった。このため、ここでは計算領域を岸沖方向 10 km、沿岸方向 20 km と設定し、水平格子サイズを $dx=250$ m、 $dy=500$ m の長方形、鉛直方向は 4 層 (上層を第 1 層) とした。また、風の場合は領域内一樣として観測値を全域に与えた。

5.2 波の影響

波の影響としては、主に碎波による流れへの運動量輸送、碎波による鉛直混合の促進、ラディエーション応力による運動量輸送が挙げられる。しかし、碎波の影響については既に著者ら (1995) によって指摘されているが、その定量的評価法が依然として確立されていないため、ここでは、碎波率と波形勾配の関係 (安田ら, 1995) に着目して佐藤 (1996) によって導入された碎波による表面応力係数 C_w を次式のように修正した。

$$C_w = 5.0 \times 10^{-4} \times (H/L)_{1/3} \dots \dots \dots (6)$$

鉛直混合の促進については、前述の式 (4) の μ_{wave} を

$\mu_{\text{wave}} = 5.0 \times 10^{-2} \times (H_{1/3}/h)$ のように仮定した。

ラディエーション応力は微小振幅波理論より計算し、上層においてラディエーション応力が強くなること (信岡ら, 1995) を踏まえ、その水深平均量を第 1 層のみに考慮することにした。これらの計算で必要となる波の場は、沿岸方向に一樣とし、各測点での $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ および平均波向 θ_H の観測値を岸沖方向に線形補間して与えた。

5.3 数値計算結果

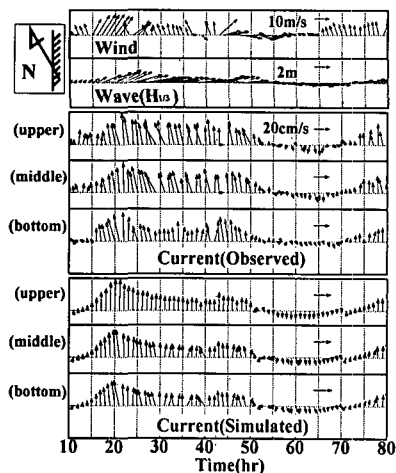
(1) 沖合い流れの再現性

上述の計算モデルの適用性を検証するため、区間 I における各測点での沖合い流れの流速ベクトルについて観測値と計算値の比較を行う。図-9 は、その結果を $H_{1/3}$ (測点 P1) および U のベクトルの時間変化とともに示したものである。これから、沖合い流れの岸沖方向の変化 (P1~P3) だけでなく、測点 P1 での鉛直方向の変化 (上中下層) についても計算値は観測値と全体的によく対応しており、特に輸送現象として重要な流向の逆転に対しても十分な再現性を有していることがわかる。ただし、観測値に現れている細かな流速・流向の変動については再現性に不十分な点が多く、外力としての風および波の影響評価におも問題を残しており、今後の課題である。

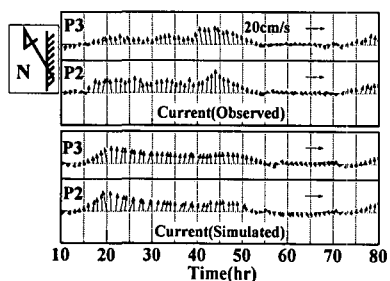
(2) 沖合い流れの支配因子

これまでの観測データに基づく検討によって、沖合い流れは風および波の沿岸方向成分を推力とした平均流であることが示されている。ここでは、上述の計算モデルを用いて沖合い流れの支配因子について検討を行う。

図-10 は、波、風およびコリオリ力の各因子をそれぞれ除いて計算した沖合い流れの沿岸および岸沖方向成分 V_s および V_n を測点 P1 の下層での観測値と比較したものである。ただし、計算値および観測値共に移動平均による平滑化を行っている。全因子を含めて計算した場合、 V_s のピーク値に差異はあるものの V_s および V_n 共に時間的変化の対応は良好である。ついで、波の作用を除き、風およびコリオリ力のみとした場合を見ると、 V_s の $\text{Time}=60\sim 70$ hr における南西方向への逆転 ($V_s < 0$) が再現されていないことに加え、 V_n の流速が小さくなっている。これに対し、風の作用を除き、波およびコリオリ力のみとした場合では、 V_s の南西方向への逆転が過大評価とはなっているものの再現されており、沖合い流れの方向変化に波の作用が大きな役割を果たしていることがわかる。このように、風の作用を除いた場合、 V_s が負の場合のみでなく、正の場合においても計算値が観測値を上回る結果となり、波の作用だけでは流速の変化が拡大される傾向にあることがわかる。このことは、風が沖合い流れを加速させるだけでなく減速もさせ、流速の変動を緩める役割も果たしていることを示すものと言える。コリオリ力の影響を除いた場合では、計算結果は風の作



(a) 風、波の実測値および流れの鉛直方向変化の比較(測点 P1)



(b) 流れの岸沖方向変化の比較(測点 P2 および P3)

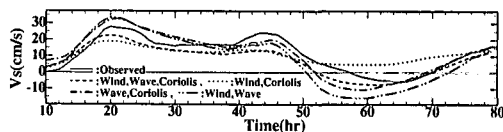
図-9 実測値と計算値のベクトルの経時変化の比較

用を除いた場合以上に V_s に対して過大評価となっている。しかし、上述の計算モデルではコリオリ係数 f は、 N_s の値(鉛直混合)にも影響を及ぼし、この結果にはその影響も含まれており、コリオリ力のみ影響とは言えない。したがって、コリオリ力は間接的な鉛直混合への影響も含めて、沖合い流れの沿岸方向成分を減速させる役割を果たしていることがわかる。

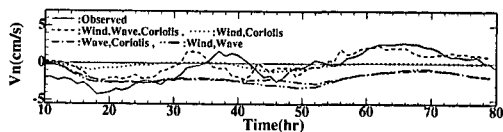
以上より、風および波の作用が沖合い流れの流速・流向に対する支配因子であり、コリオリ力はその沿岸方向成分を減速させる役割を果たしていることが明らかとなった。

6. 結 語

観測データを解析することにより、海岸線に平行に発達する沖合い流れは、沿岸域に局在した流れであり、風、波および流れの応答から、発達した沖合い流れは風および波の沿岸方向成分を主因としていることが明らかとなった。また、その鉛直分布は、波の発達状況により異なり、砕波の影響が顕著となる場合にはほぼ一様な分布



(a) 沿岸方向成分 V_s



(b) 岸沖方向成分 V_n

図-10 風、波およびコリオリ力の影響の比較

となるのに対し、砕波の影響が弱い場合ではせん断流の分布となり、砕波の影響の程度により鉛直分布の差異(鉛直混合の強弱)が生じることが明らかとなった。

石川海岸を対象とした数値計算においては、流速・流向共に全体的によく再現できた。さらに、風・波およびコリオリ力の各因子の影響について検討した結果、沖合い流れを発生させる支配因子は風および波の作用であり、コリオリ力は沿岸方向の流速を減速させる役割を持つことが明らかとなり、解析結果を裏付ける計算結果が得られた。そして、沖合い流れの方向変化には特に波の作用が重要であることが明らかとなった。

最後に、厳しい条件下で観測を実施された建設省北陸地建金沢工事事務所の諸氏に深謝するとともに、観測データの貸与に当たって格別の御配慮を賜った建設省土木研究所の佐藤慎司室長に謝意を表す。本研究は文部省科学研究費による成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 佐藤慎司 (1996): 強風と高波により発達する沿岸域の大規模流れに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 356-360.
- 田中茂信 (1994): 気になる話, 海岸, 34-1, pp. 20-27.
- 信岡尚道・加藤 始・三村信男 (1996): 海浜鉛直循環流の数値モデルと特性解析, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 376-380.
- 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砕波の影響について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 431-435.
- 安田孝志・森 信人・川口浩二・多田彰秀 (1995): 一方向波列の砕波率とそれを考慮した波高分布の推定法, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 91-95.
- 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.
- Li, Y. S. and M. Y. Zhang (1996): A semi-implicit three-dimensional hydrodynamic model incorporating the influence of flow-dependent eddy viscosity, bottom topography and wave-current interaction, Applied Ocean Res., 18, pp. 173-185.