

傾斜海浜上における風波エネルギーと生成される平均流 についての実験的検討

馬場 康之*・山下 隆男**・加藤 茂*

1. 緒 言

近年盛んに行われている沿岸海域での現地観測結果より, 流れ場に及ぼす風の影響の大きいことが指摘されており, 吹送流として広範囲にわたって形成された流れは, 砕波帯近傍を含めた外浜帯のみならず沖浜帯における流動場にも, 影響を与えることが明らかにされつつある(八木ら, 1998, 山下ら, 1998)。

特に, 強風と高波浪が同時に生起する荒天時においては, 非常に強い流れ場が形成され, 流速の沿岸方向成分は, 海上風の沿岸方向成分と数時間程度の時間遅れを持ち高い相関を示す。この沿岸方向の流速値と風速値との関係から, 鉛直 2 次元におけるせん断応力のバランスの仮定に基づいて海面抵抗係数 C_D を算定した結果, 従来の観測や実験から得られた係数値 ($C_D=0.001\sim0.002$) よりも, かなり大きな値を持つ結果が得られた(馬場ら, 2000)。このような大きな海面抵抗係数が得られる要因として, 現地観測が実施されたような比較的水深の浅い海域においては, 浅水化に伴う波形勾配の増大や砕波の影響が問題となるため, 海面抵抗係数を海上風速とのみ関連づける従来のバルク公式では, 波浪の影響を十分に考慮できないことが挙げられる。

強風・高波浪時に発生する強い流れは, 風域場に対応した広い範囲内に発生し, 広域での海浜変形や環境変化に大きく影響するので, 波浪の状態を考慮した海面せん断応力特性の把握は, 数値モデルの適用性を向上させる上でも解決の待たれる重要な課題である(加藤ら, 1999, 山下ら, 2000)。しかしながら, 波浪の状態を考慮した海面せん断応力の特性, すなわち大気から流体へのエネルギー移流機構は, 次のような理由から現象の再現や計測が困難である。

- ・吹送距離に依存する現象である
- ・波速で移動する現象である。
- ・縮尺効果が無視できない(マイクロ砕波の発生)
- ・白波砕波は間欠的であるため, 平均量の把握が困難

このため, 風洞水槽を用いた実験から, 白波砕波現象の

影響による流量の変化を明らかにすることは非常に困難である。逆に, 実験から比較的容易に計測される平均量は戻り流れであり, 一様勾配の閉じた水路内に断面 2 次元の定常場を再現し, 戻り流れ流量を計測すれば, 白波砕波による波から流れへのエネルギー変換過程を定性的に調べることは可能であると考えられる。

本研究では, 上述の考え方から, 現地において強風・高波浪時に発生する非常に強い流れ場の生成メカニズムの解明を目的とした水理実験を実施した。実験では, 静水状態に風を作用させた条件と, 進行する波に風を作用させた条件の 2 種類を対象として, 風から波・流れ場へのエネルギー伝達, および形成される流れ場に関する差異の有無について検討した。

2. 実験装置および方法

実験は, 岐阜大学の 3 面ガラス張り吸い込み式造波風洞水槽(幅 0.4 m×高さ 1.0 m×長さ 15.4 m 図-1)を用いて行った。水槽の中央部に勾配 1/20 の一様斜面を設置し, 斜面上に 4 つの測線(水路中央断面内)を設定した。測線上では, 容量式波高計(KENEK 製)を風洞水槽仕様に改造した波高計による波高の計測, 1 成分レーザドップラ流速計(DANTEC 製 Flow Lite 1 D)による岸沖方向流速の計測を実施した。また, 風速については, 風洞内流入直後の位置に, ピトー管と微差圧計(柴田科学製)を設置し, ピトー管の動圧と静圧の圧力差を電気的に計測する方法で計測した。流速計測については, 計測時間を 180 s とし, 各測線の半水深および水面, 底面付近の 3 点での計測を行った(水面付近は, 計測中空気中に出ることのない最も浅い位置であり, 底面付近は水深の 10%程度の位置とした)。サンプリング周波数は, 計測点の流速や散乱粒子の濃度などにより異なるため, 流速データについては計測後の 1 次処理として, 40 Hz のリサンプリングを実施した。波高・風速計測は, サンプリング周波数 100 Hz, 計測時間 180 s の計測を, 1 つの実験ケースにつき 4 回行っている。

実験条件としては, 風速が 5 m/s, 10 m/s の 2 種類, 波の周期が 0.7 s, 1.0 s の 2 種類を対象として, 以下の組み合わせによる全 8 ケースの実験を行った。

* 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所

** 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所

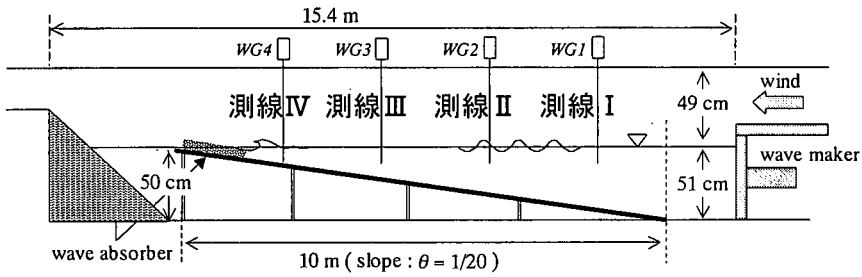


図-1 実験水路

- ・吹送流実験：①風速 5 m/s ②風速 10 m/s
- ・進行波実験：③波周期 0.7 s ④波周期 1.0 s
- ・風・波共存場実験：⑤風速 5 m/s・波周期 0.7 s
⑥風速 5 m/s・波周期 1.0 s
⑦風速 10 m/s・波周期 0.7 s
⑧風速 10 m/s・波周期 1.0 s

3. 実験結果

(1) 平均流速分布

図-2 は、レーザドップラ流速計で計測された縦断方

向の平均流速の鉛直分布である。図中の 3 測線は、図-1 の最も浅い測線を除いた 3 測線である。

風を作用させた場合は、波の有無に関係なく、沖側(図中右側)への戻り流れの発生が確認できる。風のみを作用させた吹送流実験の結果では、水面付近に岸方向の流れ、流速計測範囲の下側半分程度(半水深以深)の範囲に戻り流れが発生しており、戻り流れの規模は、風速に応じて変化している。

風・波共存の条件下においては、計測範囲のほぼ全体で戻り流れが発生するが、流速の大小は、風、波の条件

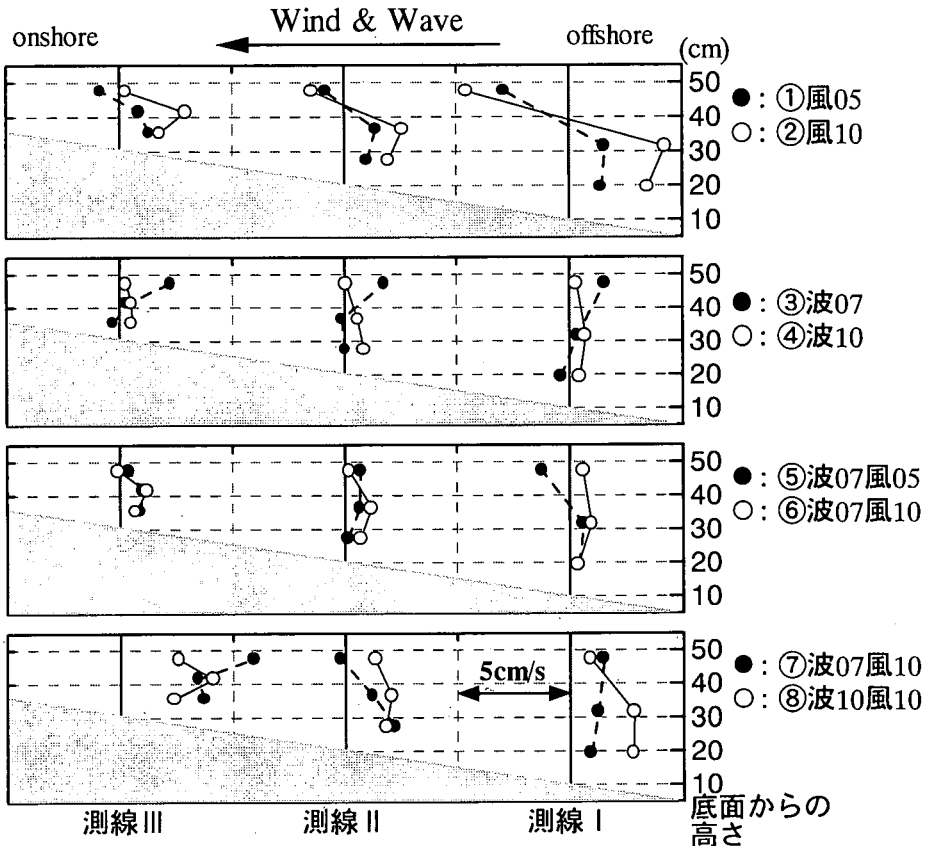


図-2 岸沖方向平均流速の鉛直分布

の組み合わせにより変化しており、⑧風速 10 m/s・波周期 1.0 s の場合に、戻り流れが最も強くなる。

波のみを作用させた進行波実験では、周期 1.0 s の場合はほぼ鉛直一様の流速分布となり、流速値はかなり小さい。周期 0.7 s においては、水面近くが沖側、底面付近がやや岸側に向かう流速分布となるが、流速値は小さい。流速分布から判断して、周期 1.0 s および 0.7 s とともに、吹送流実験の場合に比べて質量輸送が少ないことがわかる。

これらの流速分布から、岸から沖方向に戻る流れの流量を概算した結果が図-3 である。今回の流速計測は、鉛直方向に 3 点であり、流速分布を完全に把握できるには至っていないが、水面近くの測点はトラフレベルの直下にあつて、トラフレベル以下の流速分布の概略はとらえられており、戻り流れの規模は概算できると考えられる。なお、進行波実験の結果はここでは考慮していない。

戻り流れの流量は、風速により大きく 2 分されている。周期 1.0 s の結果では、風速 5 m/s の場合は風単独、風・波共存の場合には大きな差は見られないが、風速 10 m/s の場合には、風・波共存の場合の流量が風単独を上回る結果となった。このことは、一定以上の風速の下では、風・波共存した場合に非常に強い岸方向の流れが表層付近に発生し、その結果戻り流れの流量が増大することを表していると考えられ、風・波共存場におけるエネルギー伝達の促進を示唆する結果である。

また、周期 0.7 s の結果が、風単独、周期 1.0 s 単独もしくは共存の結果に対し、最も浅い測線を除いて全体的に小さくなる傾向がある。この傾向は、周期 0.7 s の進行波実験での流速分布 (図-2) の影響が考えられる。すなわち、風により水面近くで岸向き、底面近くで沖向きとなる流速分布が、周期 0.7 s の波により形成される流速分布 (水面：沖向き、底面：岸向き) により相殺され、

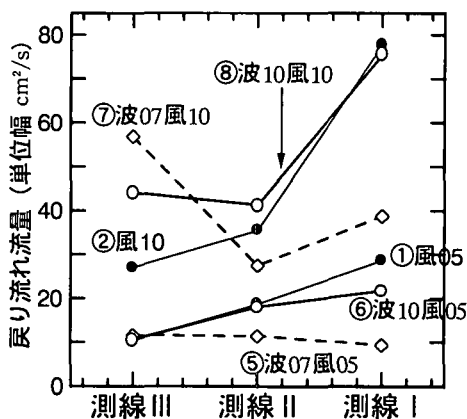


図-3 戻り流れ流量

結果的に沖側に移動する流量が減少するためと考えられる。

(2) 波浪・流速スペクトル

図-4 は、測線 II における波高計測結果および半水深の位置で計測された流速の結果から求められた波浪および流速のパワースペクトルである。それぞれ実験ケース ② (風 10 m/s), ④ (波周期 1.0 s), ⑧ (風 10 m/s, 波周期 1.0 s) の結果である。

流速のスペクトルにおいて、吹送流実験 (②) の結果

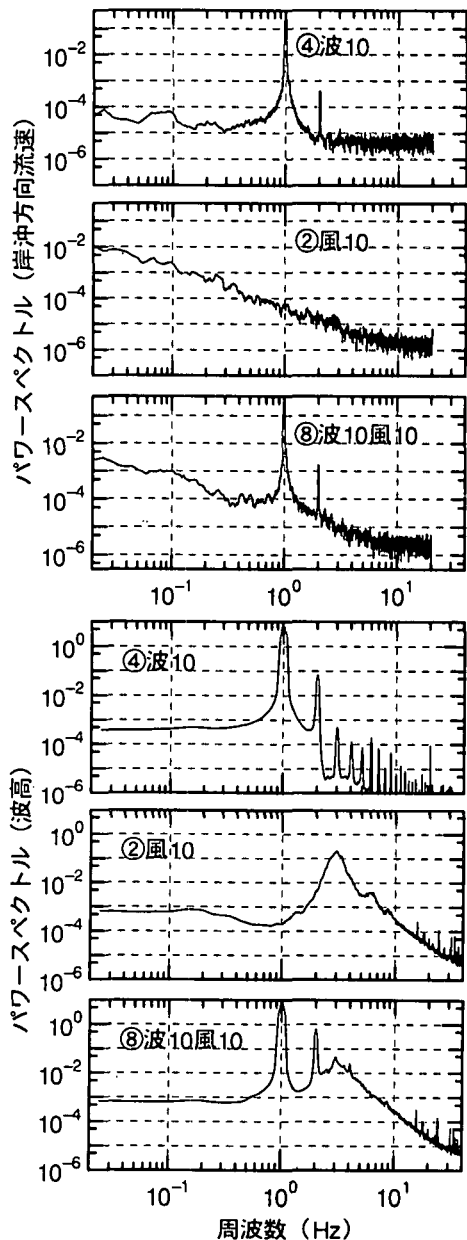


図-4 波浪・流速スペクトル

には、明確なピーク周波数は認められないが、低周波部分を除いて $-5/3$ 乗則に従って減衰している。

一方、進行波実験(④)においては、波の周期(1.0s)とその倍成分に相当する位置にピークが確認できるが、その他の領域におけるスペクトルは、吹送流実験に比べて小さい。

風・波共存場実験の結果は、上記2つのスペクトルを重ね合わせた形状を示しており、戻り流れの特性としては、風、波両方の特性を併せ持っていることがわかる。

波浪スペクトルに関して、進行波実験(④)では、流速同様、波の周期に対応する位置に最も大きなピークを持ち、他にも倍成分に相当する位置にピークが確認される。また、吹送流実験(②)においても、風波の周期に相当する位置(3 Hz 付近)にピークが認められる。風・波共存場実験(⑧)では、波の周期および倍成分に対応する位置のピークと、風波の周期に相当する3 Hz 付近のスペクトルが全体的に増加している様子がわかる。しかしながら、風・波共存の場合には風波の影響で増加するスペクトルの位置が、風単独の吹送流実験でのピークの位置よりもやや低周波側(2~3 Hz)に移動している様子が見られる。この結果に関しては、進行波と風波の干渉などの影響が表れていると考えられる。

図-5は、各測線における波浪エネルギー(パワースペクトルの積分値、最大周波数10 Hz)の分布を示したものである(なお、これらの結果のうち、波の周期0.7sのケース(③、⑤、⑦)の結果については、計測時にトラブルがあったことを書き加えておく)。図-3に示した流量の分布とは大きく異なり、吹送流実験における波浪エネルギーが、進行波実験、風・波共存場実験の結果と比較して、明らかに小さい。同様に流速に関するエネルギーも小さいことも確認されていることから、風によって沖側への負方向の平均流としての流れは形成されるもの

の、風波としての波運動、生じる流れ場としては弱いことがわかる。

進行波実験、風・波共存場実験に関しては、波浪エネルギーに差のないケースもあるが、全体として、波単独よりも風・波共存場の方が高い波浪エネルギーを有することが確認できる。特に、風速10 m/sにおいて、波浪エネルギーの増大が大きくなっており、風から波へのエネルギー伝達がより一層促進されていることがわかる。

(3) 流量、波浪エネルギーの変化と波形勾配の関係

上述のように、風・波共存の条件下では、風単独および波単独の場合よりも波浪エネルギーが増加すること、風速の条件によるが、風・波共存場において戻り流れの流量の増加、すなわち表層での流れが強化されることが確認された。これら波浪エネルギーと戻り流れの流量の変化量と波形勾配との関係を示したものが図-6である。図中、 $\Delta Q/Q(\text{wind})$ および $\Delta E/E(\text{wave})$ はそれぞれ、次のように算出されている。

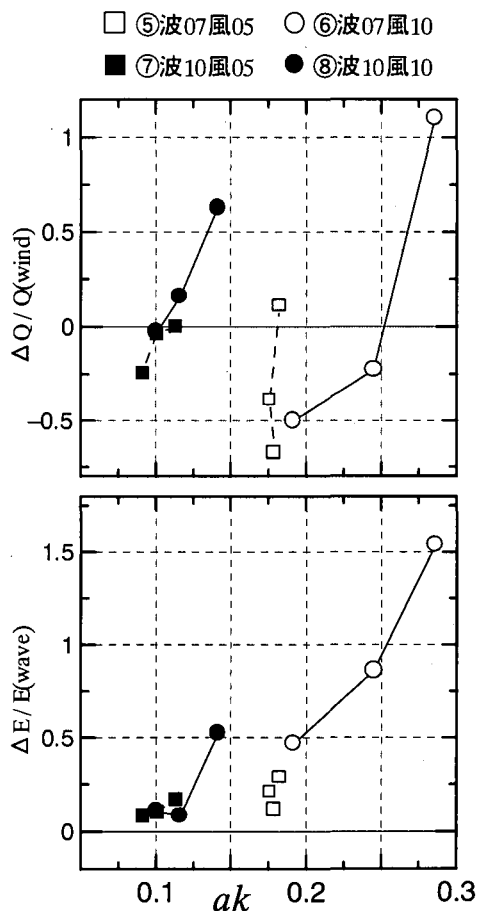


図-6 戻り流れ流量・波浪エネルギーの変化と波形勾配の関係

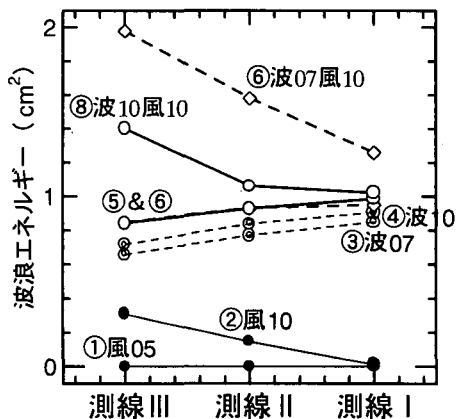


図-5 波浪エネルギーの分布

$$\Delta Q = Q(\text{wind \& wave}) - Q(\text{wind})$$

$$\Delta E = E(\text{wind \& wave}) - E(\text{wind}) - E(\text{wave})$$

各変化量は進行波実験時の波浪エネルギー $E(\text{wave})$ および吹送流実験時の戻り流れ流量 $Q(\text{wind})$ を基準として無次元化されている。

戻り流れ流量に関しては、風速の大きい場合に流量が大きく増加しており、風速 5 m/s と 10 m/s の間でかなりの差がある。また、波周期 0.7 s の方が、波周期 1.0 s の場合よりも波形勾配が大きく、風速 10 m/s の場合には、かなり大きく増加する傾向を示している。ただし、波周期 0.7 s の場合には、波形勾配が小さい（沖側の測点）における流量が、風単独の条件下の流量よりも小さくなっている。これは先に述べたように、風による流速分布と波による流速分布が互いに相殺する形になっているために、流量が減少していることによる。

波浪エネルギーについては、風速 5 m/s の場合にはほとんど増加しないが、風速が 10 m/s の場合には、波形勾配の増加に対応して波浪エネルギーが増大する傾向をしめす。また、同じ風速でも、より波形勾配の大きい波周期 0.7 s におけるエネルギーの増大が顕著である。このことは、波形勾配の増加により、風から波へのエネルギー伝達をより効果的になることを示しており、その結果風から流れ場へのエネルギー伝達が増加し、波形勾配の増加による白波砕波を介しての波から流れ場へのエネルギー伝達も行われ、流れ場が強化されるという機構が考えられる。

4. 結 言

以上、本研究では、強風・高波浪時に発生する非常に強い流れ場の生成メカニズムの解明を目的とした水理実験を行い、波浪、戻り流れに関する検討の結果、次のような結果を得た。

- 1) 風単独および波単独の条件下と風・波共存の条件下を比較した結果、波浪エネルギーは風・波共存の場合において、各単独条件の場合よりも大きくなる。すなわち、風、波の両者が共存することにより、風から波へのエネルギー伝達が促進されることが分かった。
- 2) 戻り流れの流量は、強風時において風・波共存の場合の流量が、風単独の場合の流量よりも増加する結果となった。戻り流れの増加は、表層付近での岸向きの流

れの増加に対応すると考えられ、風・波が共存することにより、風から流れ場へのエネルギー伝達が、波を介することによりより一層増大することが示された。

- 3) 風・波の共存により増加する波浪エネルギーおよび戻り流れの流量は、波形勾配の増加に伴い増大する傾向を示す。これは、波形勾配の増加により流れ場への風の影響がより強くなること、さらには波が砕波（白波砕波）しやすくなり、波から流れへのエネルギー伝達も促進されることが要因と考えられる。

このように、風・波共存場においては、波浪、流れ場ともに強化される傾向を持つことから、海面におけるせん断応力特性には、風速だけではなく波浪の状態を考慮する必要があり、波浪の発達、砕波（白波砕波）を介しての風から流れへのエネルギー伝達の機構が、荒天時の流れ場の強化にとって重要であると考えられる。また、現地を対象とした実用的な定式化には、観測に基づいた現地スケールでの検討が必要である。

謝辞：本実験の遂行においては、岐阜大学工学研究科環境エネルギーシステム専攻安田孝志先生をはじめ、研究室の先生方、学生諸氏に多大なるご協力を賜った。また、レーザドップラ流速計による計測に関しては、松下インターテクノ株式会社松本雅則氏のご助力を得た。ここに記して謝意を表する。

なお、本研究は運輸施設整備事業団、運輸分野における基礎的研究推進制度「高潮・高波の推算技術の高度化と防災に関する基礎的研究」の研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 加藤 茂・山下隆男・路 明 (1999): 3次元広域海浜流数値モデルの適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 211-215.
- 馬場康之・今本博健・山下隆男・加藤 茂 (2000): 浅海域における風域場と吹送流場の時間応答特性について—波崎海岸における共同観測結果より—, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 446-450.
- 八木 宏・日向博文・田岡幸司・久木幸二・灘岡和夫 (1998): 短波海洋レーダに基づく冬季日本海能登半島沖の流況解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 416-420.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦 (1998): ADCPにより長期連続観測した海浜流の鉛直分布とその強風、波浪応答特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 201-205.
- 山下隆男・路 明・榊原 弘 (2000): 砕波による海面せん断応力を導入した吹送流の数値解析モデル, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 121-125.