

砕波帯の波・流れ・乱流構造に及ぼす風速の影響

井坂 健 司*・安田 孝 志**・米倉 誠 司***・大澤 輝 夫****

1. 緒 言

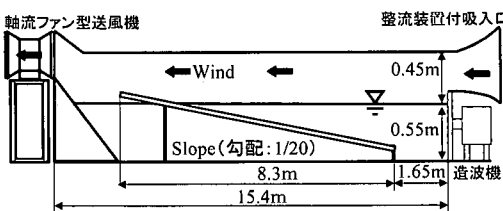
強風域が沿岸海域に及ぶ場合、砕波帯の水理現象は浅水砕波と風の複合作用に支配されるようになるため、砕波帯内の流れや乱れに及ぼす風の影響を明らかにし、その結果を基に砕波帯モデルの構築を行う必要がある。しかしながら、これまで、風の影響評価の難しさもあって砕波帯では砕波に起因する流れや乱れが支配的であると考へ、砕波帯の水理現象に及ぼす風の影響を無視した取り扱いがなされてきた。

然るに、最近の実験（カン・佐藤, 1996）や現地観測（山下ら, 1998）によって、風が砕波帯流れや水位上昇に無視できない影響を及ぼすことが示され、強風時の砕波帯の水理現象を扱う上で風の影響を正しく評価した砕波帯モデルの必要性が広く知られるようになってきた。また、強風時の砕波帯内外の輸送・拡散現象や曝気現象の評価においても、斜面上の砕波特性や水粒子速度場に及ぼす風の影響を明らかにすることが必要となつて来ている。これまで、斜面上の風波砕波や風によって駆動される流れや乱れの特性に関する研究がなされて来ているものの（松永ら, 1996）、斜面上の砕波に及ぼす風の影響を含めて砕波帯の水理現象に及ぼす風の影響は依然として未解明な状況にある。

そこで本研究では、水理実験により、浅水領域および砕波帯での波形およびその変化特性に及ぼす風の影響を時間波形や波形スペクトルだけでなく砕波を含めた空間波形に関して明らかにするとともに、砕波帯の水粒子速度場や乱流特性に及ぼす風の影響を流速スペクトルや平均流速、乱流エネルギーの鉛直分布について明らかにする。

2. 実験装置と方法

実験は、図一に示す 3 面ガラス製吸込式風洞水槽（ $0.4\text{ m}\times 1.0\text{ m}\times 15.4\text{ m}$ ）を用い、水槽内に勾配 1/20 のアクリル床板製一様斜面を設置して行った。規則波をピストン式造波機により発生させ、これを無風下で伝搬させるとともに、これと同一方向の基準風速 $U_r=10.7\text{ m/s}$ の一様風を作用させて実験を行った。このとき造波された規則波の風洞入口から 2.0 m の距離における波高 H_1 および周期 T_1 は、それぞれ 8.4 cm および 0.83 s であった。時間波形は、特製の風洞用容量式波高計によってサンプリング周波数 100 Hz で計測した。空間波形の撮影においては高速度ビデオカメラを用い、フレームレートおよびシャッタースピードをそれぞれ 1/250 fps, 1/2500 s とした。水粒子速度の計測には、5 W 半導体レーザーと 480×480 pixel の高速度カメラを組み合わせた PIV を用いた。この時、高速度カメラのフレームレートを 1/250 fps, シャッタースピードを 1/500 s に設定して行った。また、粒子画像の撮影には砕波等により混入される気泡等による強い散乱光をカットするために、トレーサー粒子に蛍光染料（Rhodamine-B）を着色させて行った。これにより、トレーサー粒子は波長 532



図一 風洞水槽の概略

表一 計測位置と水深の関係

測点	X=	h=	測点	X=	h=
WS01	5.45 m	14.9 cm	WS05	6.53 m	10.5 cm
WS02	5.70 m	13.8 cm	WS06	6.64 m	9.4 cm
WS03	5.93 m	12.7 cm	WS07	6.81 m	8.3 cm
WS04	6.14 m	11.6 cm	WS08	6.99 m	7.2 cm

* 学生会員 工 修 岐阜大学大学院 工学研究科 環境エネルギーシステム専攻
** 正 会 員 工 博 岐阜大学 教授 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻
*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科 環境エネルギーシステム専攻
**** 正 会 員 博(理) 岐阜大学 助手 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻

nm のレーザー光によって励起され、波長 590 nm 程度のオレンジ光を発光する。そして、高速度カメラのレンズの前に臨界波長 560 nm の光学フィルターを取り付けることにより強い散乱光をカットし、励起光のみを撮影した。風洞入り口を $X=0$ m として計測位置と水深の関係を表-1 に示す。

3. 砕波帯での波形特性に及ぼす風の影響

図-2 は無風時 ($U_r=0.0$ m/s) と一様風下 ($U_r=10.7$ m/s) で規則波をそれぞれ伝播させたときの測点 WS01 から WS08 における各測点での時間波形を比較したものである。また、写真-1 はこの時の砕波限界後の各測点での波峰部の空間波形をそれぞれ示している。風の作用下では、風からのエネルギー供給により波が発達し、測点 WS01 での波高が無風時のそれよりも上回っているだけでなく、写真-1(b) から分かるように測点 WS01 は既に砕波帯に入っている。これに対し、無風時の場合は写真-1(a) から分かるように測点 WS05 において微小砕波が始まっているに過ぎず、風の有無による同一測点での波形の差異は大きく、風が浅水波の発達・砕波に大きな影響を及ぼしていることが分かる。しかし、時間波形に関する限り、測点 WS05 以浅では両者の波形はよく似ており、水深による砕波を介した波高の規定が時間波

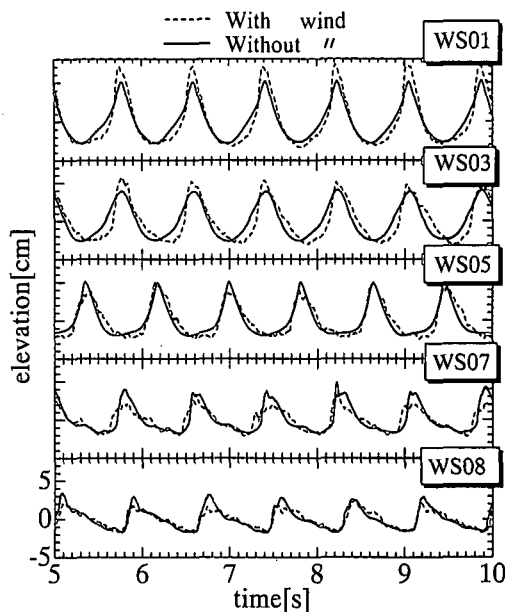
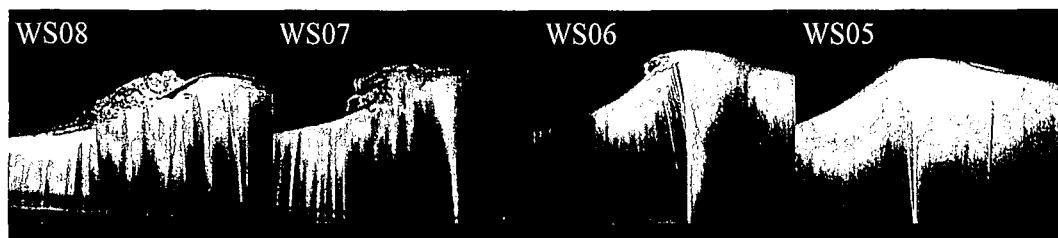
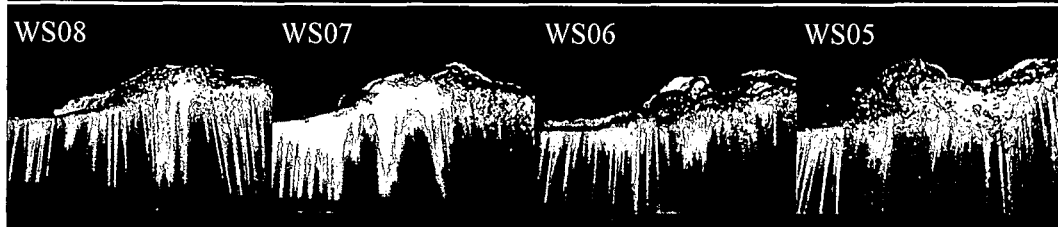
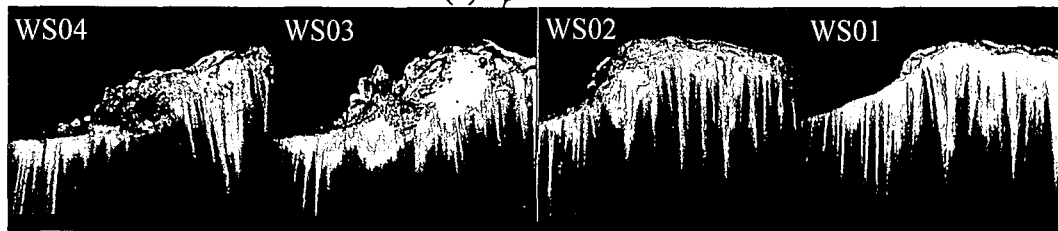


図-2 時間波形に及ぼす浅水化と風の影響

形をも規定していることが分かる。このため、無風時の砕波帯では、波高が水深によって規定され、風が吹いても波高の増幅はなく、時間波形に対する風の影響も、無視できるようになる。これは、時間波形が砕波の規模の



(a) $U_r=0.0$ m/s

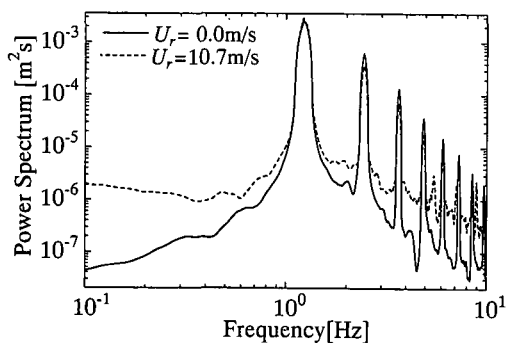


(b) $U_r=10.7$ m/s

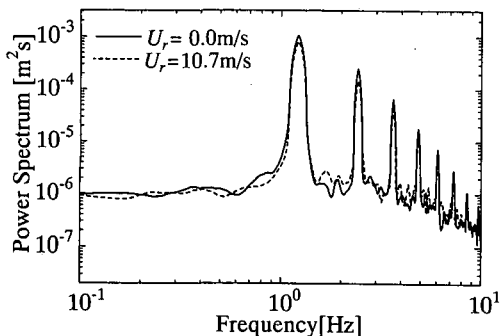
写真-1 風の作用の有無による一様斜面上の砕波波形の差異

影響をほとんど受けないためではあるが、空間波形には砕波の規模の影響がそのまま現れるため、写真-1 から分かるように風の有無によって砕波規模が大きく異なる測点 WS05 以浅では空間波形も風の有無によって大きく異なっている。しかし、ボア領域となる測点 WS08 まで浅水化が進むと、砕波規模は水深のみで決まるようになり、写真-1 の測点 WS08 での波形から分かるように風の有無による差異はなくなり、空間波形に対する風の影響も無視できるようになる。

図-3 は測点 WS05 および WS08 での波形の周波数スペクトルに及ぼす風の影響を示したものである。前述の図-2 に示したように測点 WS05 での時間波形は風の有無に関係なく両者よく一致していたが、砕波規模には大きな差があり、風の作用下での発達した砕波による水面の擾乱等がスペクトルの低周波および高周波成分の発達として現れ、それが、スペクトルにおける無風時との差異となっている。しかし、両者ともボア領域となる測点 WS08 では、波形スペクトルは全周波数帯でほぼ一致するようになる。これは、写真-1 に示したように測点 WS08 では風の作用に関係なく砕波規模がほぼ一致することの結果と見ることができる。



(a) WS05



(b) WS08

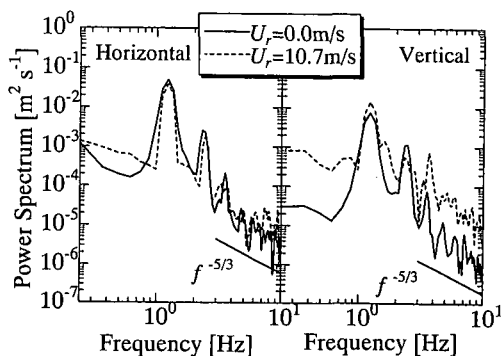
図-3 波形スペクトルに及ぼす浅水化と風の影響

以上より、風の波形への影響は砕波規模の差異として現れ、浅水化によって砕波規模が同程度となれば、波形スペクトルはほぼ一致するようになり、風の波形スペクトルへの影響は無視できる程度になると言える。

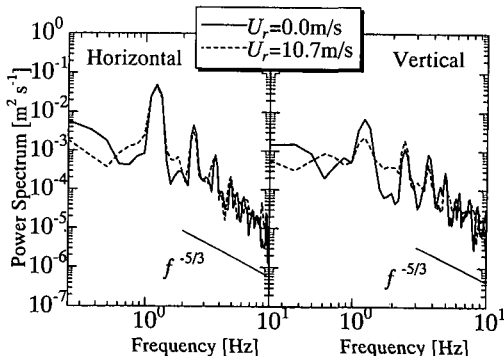
4. 砕波帯での水粒子速度場に及ぼす風の影響

ここでは、砕波帯の水粒子速度場に及ぼす風の影響を流速スペクトルや平均流に関して検討する。

図-4 は、測点 WS05 および WS08 の底面から 5.7 cm における水平および鉛直流速スペクトルの風の有無による違いを示したものである。測点 WS05 では、水平流速スペクトルの風の有無による差異が前出の図-3 に示した水面波形スペクトルよりも小さく、無風下でも風と砕波の作用下と同程度の高周波成分が生成されている。これに対し、鉛直流速スペクトルの風の有無による差異は大きく、風の作用下では水平流速の場合と同程度の乱流成分の発達があるが、無風下ではそうした発達は見られない。このように、風の作用下では砕波による擾乱が加わって水平・鉛直方向ともに同程度の乱流成分が生成されているが、無風下では水平方向が卓越する非等方性乱流となっている。一方、両者ともにボア領域となり、波

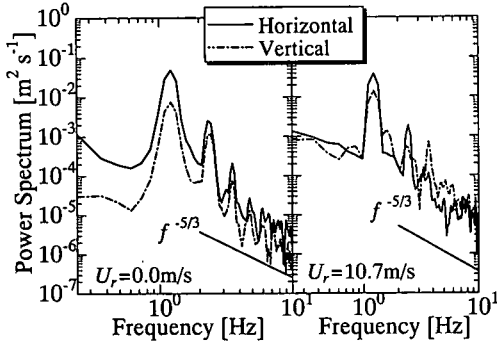


(a) WS05

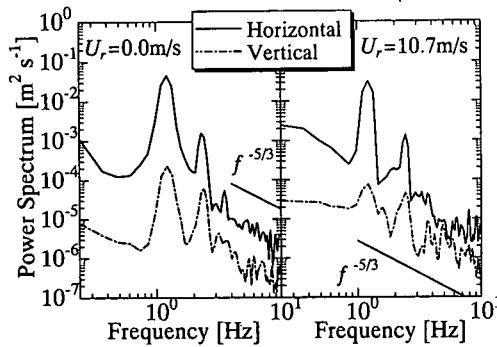


(b) WS08

図-4 測点 WS05 および WS08 の底面から 5.7 cm での水平および鉛直流速スペクトルと風速の関係



(a) 底面から 5.7 cm

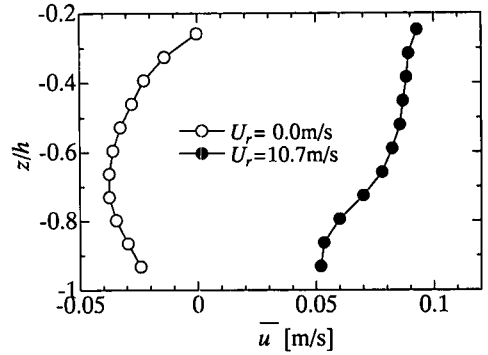


(b) 底面から 0.9 cm

図-5 測点 WS05 における水平および鉛直流速スペクトルの比較と風速の関係

形・碎波規模共にほぼ一致する測点 WS08 での流速スペクトルは、測点 WS05 の場合とは異なり、水平・鉛直流速ともに全周波数帯でほぼ一致するようになることが分かる。このように、碎波帯における水粒子速度場に及ぼす風の影響は風応力による碎波規模の増大として現れ、風の有無によって碎波規模が異なれば、流速スペクトルにも差異が現れるが、水深によって碎波規模が等しくなる場合では風の有無による差異はほとんど無くなることが分かる。

図-5 は、こうした無風時の高周波乱流成分の非等方性の原因を明らかにするため、風の有無による水平および鉛直流速スペクトルの比較を測点 WS05 の底面から 5.7 cm (中層) と 0.9 cm (低層) の位置においてそれぞれ行ったものである。無風下での流速スペクトルの非等方性は、下層に向かって増大しており、浅水化に伴う波動運動の非等方性に起因していると考えられる。風の作用下でもスペクトルの非等方性が認められるが、低層での高周波スペクトルの方向依存性は無風時に比べて縮小している。これは、風の作用下で発達した碎波によって生成される等方性乱流が低層まで及んで来たことの結果と考えられる。無風時の場合、こうした碎波による乱流

図-6 測点 WS08 における平均流速 $\bar{u}$ の鉛直分布と風速の関係

の生成がなく波動運動に起因して乱流成分が生成されるため、乱流成分は浅水波動の非等方性を引き継ぎ、低層での乱流成分に非等方性がそのまま現れると考えられる。

図-6 は、測点 WS08 における岸向きを正とする水平方向の 8 秒平均流速の代表的な鉛直分布を比較したものである。無風時での平均流は、岡安ら (1987) の実験結果に対応した鉛直分布を持つ沖向きの流れとなっている。これに対し、風の作用時には平均流の鉛直分布に風の影響が明瞭に現れ、ほぼ全断面にわたって岸向き流れに転じている。この結果は、風の影響が波形や流速スペクトルにほとんど現れないボア領域でも、平均流の流速およびその鉛直分布には風の有無による影響が顕著となることを示しており、碎波帯の水理現象に及ぼす風の影響は平均流に集積されて現れることが分かる。それゆえ、平均流の流速は風速に第一義的に支配され、波形諸量や碎波特性量の影響は二義的となるため、カン・佐藤 (1996) が言うように、波浪の状況が似たようなものであっても平均流の流況は風の作用の有無によって大きく異なったものになる。

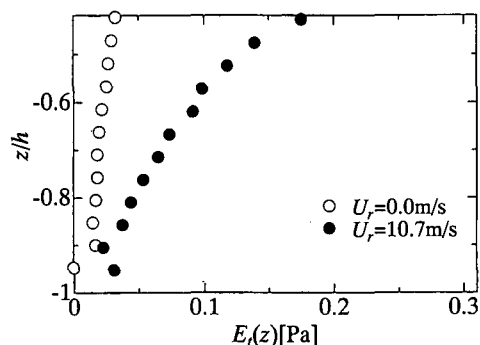
5. 碎波帯の乱流特性に及ぼす風の影響

無風時でも碎波帯では強い乱れが生成されるが、その乱流特性に風が及ぼす影響は不明である。ここでは、碎波帯内の乱流特性に及ぼす風の影響について検討する。乱流特性を乱流エネルギーによって評価するため、各鉛直点での水平および鉛直流速スペクトル $S_{uu}(f, z)$ および $S_{ww}(f, z)$ より、乱流エネルギー $E_t(z)$ を次式によって定義する。

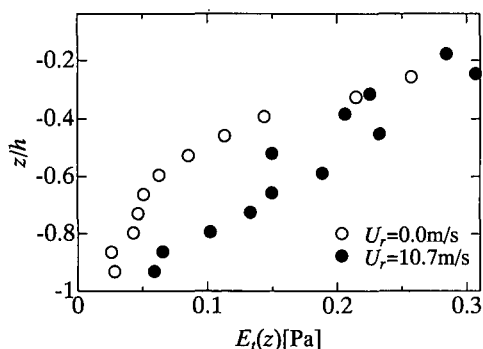
$$E_t(z) = \frac{\rho_w}{2} \int_{f_{ch}}^{\infty} [S_{uu}(f, z) + S_{ww}(f, z)] df \quad \cdots (1)$$

ここで、 f_{ch} は $f^{-5/3}$ 則に従う高周波スペクトルと f^{-4} 則に従う波動スペクトルとの交差周波数である。

図-7 は、風がある場合 ($U_r = 10.7$ m/s) と無い場合



(a) WS05



(b) WS08

図一 測点 WS05 および WS08 での乱流エネルギーの鉛直分布と風速の関係

($U_r=0.0$ m/s) の測点 WS05 および WS08 における乱流エネルギー $E_t(z)$ の鉛直分布を示す。測点 WS05 では、そこが無風時の碎波限界付近となるためもあり、乱流エネルギーはほとんど生成されていない。しかし、 $U_r=10.7$ m/s の風の作用下では大規模碎波が発生しているため、その影響が水面に向かって増大する乱流エネルギーの生成として現れている。一方、両者ともにボア領域となる測点 WS08 では、風の有無による碎波規模の差異はなくなり、無風時の乱流エネルギーは風の作用下にある $U_r=10.7$ m/s のものと同程度となっている。これらの結果は、水面に向かって急増する乱流エネルギーの生成が碎波によっており、その強さも碎波の規模に第一義的に支配され、風速の直接的影響は二義的であることを示している。これは、平均流が風速に第一義的に支配されているのとは大きく異なり、乱流特性は碎波規模に支配され、風速の影響は碎波規模への影響を介して間接的に現れることを示している。

6. 結 語

風洞水槽内に一樣斜面を設置し、これに規則波を無風時と一樣風下の両方の場合に入射させ、浅水領域および碎波帯での波形および水粒子速度に及ぼす風の影響について検討した。

浅水領域における風の影響は浅水効果と同様な波高の増幅効果とその結果としての碎波規模の増大にあり、これによって碎波帯が浅水領域まで大きく広がることになる。また、波高の上限が水深によって規定される碎波帯の時間波形には風の影響はほとんど現れないが、空間波形や波形スペクトル、流速スペクトル、乱流エネルギーは碎波規模によって大きく変化するため、風の有無によって碎波規模が異なる場合には、碎波規模の差異を介して風の影響がこれら諸量に現れてくる。これに対し、風の有無に関係なく碎波規模が同程度となるボア領域では、これら諸量においても風の有無による差異はほとんど見られなくなる。

このように、碎波帯の水理現象に及ぼす風の影響は、風による波の発達の結果としての碎波規模の拡大とそれによって生成される乱流エネルギーの増大として現れてくるため、浅水過程における入射波に対する風の影響評価が重要となる。

一方、平均流は、碎波の影響が支配的となるボア領域においても風の影響下にあり、その流速は風速によって第一義的に決定される。これは、平均流が風の広域的集積効果に支配されていることを示し、強風下の碎波帯流れについては広域的取り扱いが必要となることを示唆するものと言える。

最後に、本研究の実施において実験およびデータ解析に熱心に協力頂いた当時本学学生であった森山大樹氏に深謝するとともに、本研究が日本学術振興会科学研究費基盤(C)(2)12650509 による成果であることを付記し、謝意を表明する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司 (1987): 碎波帯内定常流速場の鉛直分布に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- カンアケミ・佐藤道郎 (1996): 強風下における近岸帯の水理に関する実験, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 381-385.
- 松永信博・植田 操・川上裕史・八尋正信 (1996): 風応力下で生ずる傾斜海岸モデル上の波と流れ, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 386-390.
- 山下隆男・加藤 茂・路 明・安田孝志・飯野智彦 (1998): ADCP による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. 191-195.