

砕波帯における高周波数成分の観測研究

柿沼忠男*・伊福 誠**・栗原 薫***

1. ま え が き

海岸に来襲する波浪は遂には砕けて、その組織的運動を消滅しようとする。海岸の地形性によって新たな組織的運動、沿岸流や長周期波のような、を形成しようとするが、こうした砕波帯においては高周波数成分からなりたつ非組織的運動が活発になり底質の輸送をもたらすなどさまざまな現象が生じている。

ここ数年、流速測定技術の進歩によりオイラー流速記録に基づいた砕波帯での乱れに関する研究が Battjes-Sakai¹⁾、Stive²⁾ らによってなされ、乱れ強度の空間分布構造などが明らかにされつつあり、また日野ほか³⁾はオイラー流速記録に加え、流れの可視化手法を組み合わせる砕波帯の水粒子運動、拡散機構と乱れの組織的渦構造との関連を見出している。

本研究は、現地観測によって砕波帯における高周波数成分の諸特性を、非砕波帯での観測結果とも比較検討して得ようとするものである。

2. 観測資料とデータ解析

(1) 観 測 資 料

非砕波帯（水深 4.8~7.2 m）で 1980 年、砕波帯（水深 1.1~2.8 m, 1.9~2.1 m, 0.9~3.4 m）で 1982~1984 年の冬冬季節風時に 1~3 台の 2 成分が測定可能な電磁誘導型流速計 MODEL 551 (MARSH McBIRNEY 社製) (内 1 台圧力計 MODEL 205-2, Setra Systems 社製、内蔵) によって岸沖方向や沿岸方向あるいは鉛直方向の流速成分と圧力変動の記録を得た。流速記録は、1980 年は海底より 85 cm の高さで岸沖—鉛直方向、1982 年は 60 cm の高さで岸沖—鉛直方向、100 cm の高さで岸沖—沿岸方向、1983 年は 7, 65, 98 cm の高さとも岸沖—沿岸方向、1984 年は 30 cm の高さで岸沖—鉛直方向、45 cm の高さで岸沖—沿岸方向、75 cm の高さで岸沖—沿岸方向のものである。圧力変動の記録は、1980 年は水圧式波高計用ケーブル破損のため得られなかったが、

1982~1984 年は海底より 76 cm, 73 cm, 49 cm の高さで得た。

1980, 1982 年の資料は愛媛県中予海岸 (図-1), 1983, 1984 年は愛媛県梅津寺海岸におけるものであるが、観測地点付近の平均海底勾配はそれぞれ 0.02, 0.1, 0.01, 0.01 である。

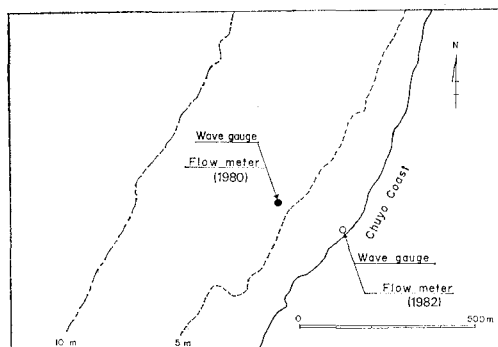


図-1 観測地点

(2) データ解析

流速と圧力変動の 15 分間の記録をサンプリング間隔 0.2 sec で AD 変換し、1 波ごとの解析はゼロ・アップ・クロス法で行い、圧力波高から表面波高を算出する際の補正係数 n は実験室で求めた式 $n=1.142-0.689(h/L)$ (ここに、 h : 水深, L : 波長)⁴⁾ によった。有義波高、有義波周期、時間平均流向・流速やパワースペクトル、方向スペクトルを算出した。次に高周波数成分分離法によって高周波数成分を抽出し、その root mean square などを求めた。この研究では、もっぱら中予海岸における観測結果について述べ、梅津寺海岸については高周波数成分の抽出についてだけ述べることにする。

得た有義波高と有義波周期は、1982 年: 0.49~1.22 m, 4.8~6.2 sec, 1983 年: 0.41~0.53 m, 4.5~4.7 sec, 1984 年: 0.23~0.80 m, 4.1~5.3 sec である。

3. 観 測 結 果

(1) 高周波数成分の抽出法

砕波帯における流速のパワースペクトルは低周波数領域 (20~30 sec) に大きなパワーと風波のピーク周波数付

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学教室

** 正会員 工修 愛媛大学講師 工学部海洋工学教室

*** 正会員 工修 日立造船株式会社

近 (4~5 sec) に比較的大きなパワーを有する (図-2)。

まず遮断周波数を風波のピーク周波数の2倍, 3倍, 4倍として流速記録をFFT法によってフーリエ級数展開し, 遮断周波数より低周波側の成分を再合成したものを平均流速とする方法によって高周波成分を抽出する。次にそうした高周波数成分のうち, その頻度分布が最もガウス分布に近いものをもってあらためて高周波数成分と定義することによって現地砕波帯における高周波数成分の諸特性を見出そうとする。

(2) 遮断周波数の決定

a) 非砕波帯

図-3は海岸より85cmの高さで得た岸沖, 鉛直方向流速の記録から遮断周波数を風波のピーク周波数 f_p の2倍, 3倍, 4倍として抽出した高周波数成分をガウス分布とともに示したものであり, 左図が岸沖方向流速 u' , 右図が鉛直方向流速 w' についてのものである。

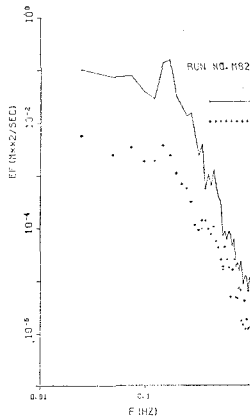
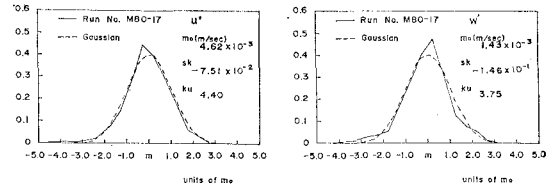
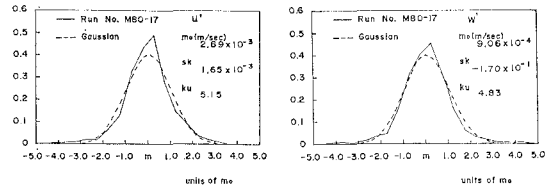


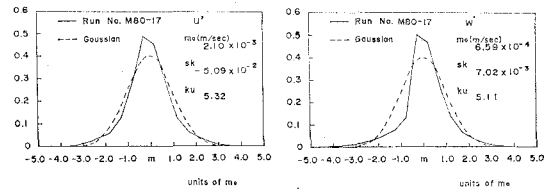
図-2 砕波帯における岸沖, 鉛直方向流速のパワースペクトルの代表例



(a) 遮断周波数 $2f_p$



(b) 遮断周波数 $3f_p$

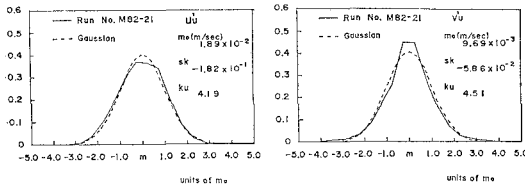


(c) 遮断周波数 $4f_p$

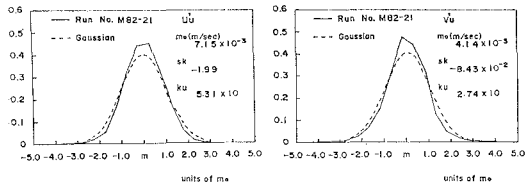
図-3 高周波数成分の頻度分布 (非砕波)

f_p : 風波のピーク周波数

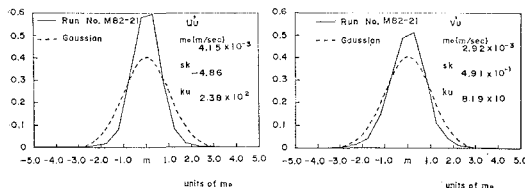
(a)をみると, 岸沖方向流速の高周波数成分は平均値のわずかに負の側で大きいことを除けばほぼガウス分布



(a) 遮断周波数 $2f_p$



(b) 遮断周波数 $3f_p$



(c) 遮断周波数 $4f_p$

図-4 高周波数成分の頻度分布 (砕波)

f_p : 風波のピーク周波数

と一致している。また鉛直方向流速の高周波数成分は平均値のわずかに正の側と負の裾付近で大きいことがわかる。

(b)をみると、岸沖、鉛直方向流速の高周波数成分は両者とも平均値のわずかに正の側と正、負の裾付近でガウス分布より大きく、尖度も(a)より大きくなっていることがわかる。

(c)をみると、岸沖、鉛直方向流速の高周波数成分は(b)よりもさらに平均値付近で尖り尖度も大きくなり、ガウス分布とはかなり異なることがわかる。

b) 碎波帯

図-4は海底より60cmの高さ(下部)と100cmの高さ(上部)で得た岸沖—鉛直方向流速と岸沖—沿岸方向流速の記録から遮断周波数を風波のピーク周波数の2倍、3倍、4倍として抽出した高周波数成分をガウス分布とともに示したものであり、左より上部の岸沖方向流速 u'_0 、上部の沿岸方向流速 v'_0 、下部の岸沖方向流速 u'_L 、下部の鉛直方向流速 w'_L についてのものである。

(a)をみると、上部の岸沖、沿岸方向流速の高周波数成分が平均値付近でわずかに小さいかあるいは大きいことを除けば上、下部の各方向流速の高周波数成分の分布はガウス分布に良く似ていることがわかる。

(b)をみると、下部の各方向流速の高周波数成分は(a)と同様ガウス分布に良く似ているが、上部の岸沖、沿岸方向は両者とも(a)よりも平均値付近で尖り尖度もかなり大きくなっていることがわかる。

(c)をみると、下部は岸沖方向流速の高周波数成分が平均値付近でわずかに尖っているが、鉛直方向流速の高周波数成分は(a)、(b)と同じくガウス分布に似ている。上部の岸沖、沿岸方向流速の高周波数成分は両者ともかなり尖度が大きくなりガウス分布とはかなり異なっている。

以上は有義波高1m、有義波周期5sec程度の中予海岸における流速資料(1980, 1982)の代表的解析例である。解析は数例について行ったが、非碎波帯、碎波帯の両者において遮断周波数は風波のピーク周波数の2倍の周波数となった。

一方、有義波高40cm、有義波周期4sec程度の梅津寺海岸における流速資料(1983, 1984)についても解析を行ったが、遮断周波数は風波のピーク周波数の3倍の周波数であった。

(3) 岸沖方向の高周波数成分 u' と鉛直方向の高周波数成分 w' の法 $u'w'$ の頻度分布

変数 u' および w' が互に従属であり、その確率分布がガウス分布に従う場合、2変数の積 $u'w'$ の結合確率密度分布関数は次式で与えられる⁹⁾。

$$f\left(\frac{u'}{\sqrt{u'^2}}, \frac{w'}{\sqrt{w'^2}}\right)$$

$$= \frac{1}{2(1-R^2)^{1/2}} \exp \left\{ \frac{-1}{2(1-R^2)} \left[\left(\frac{u'}{\sqrt{u'^2}} \right)^2 - 2R \frac{u'}{\sqrt{u'^2}} \frac{w'}{\sqrt{w'^2}} + \left(\frac{w'}{\sqrt{w'^2}} \right)^2 \right] \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 R は u' と w' の相関係数である。

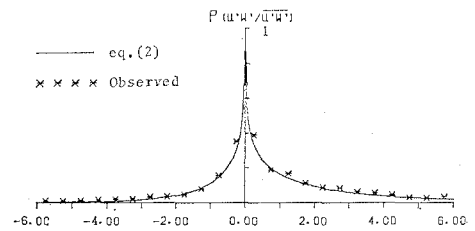
さらに、正規化した $u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}$ の確率密度分布は次式で表わせる⁹⁾。

$$P(u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}) = \frac{1}{\pi} \frac{|R|}{(1-R^2)^{1/2}} \exp \left(\frac{R^2 u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}}{1-R^2} \right) \times K_0 \left(\left| \frac{R u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}}{1-R^2} \right| \right) \dots \dots \dots (2)$$

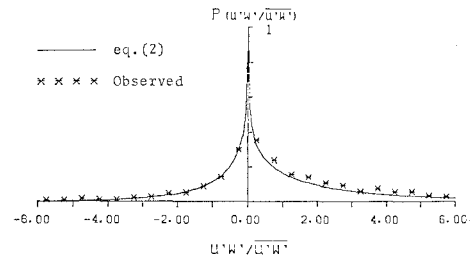
ここに、 K_0 は0次の変形ベッセル関数である。

図-5は図-4と同一資料について、 $u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}$ の頻度分布を示したもので、(a)、(b)、(c)は遮断周波数が風波のピーク周波数の2倍、3倍、4倍のものである。図中の実線は式(2)、*は実測値である。

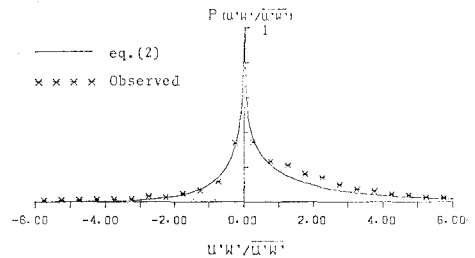
(a)をみると、 $u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}$ の確率分布は理論値と極め



(a) 遮断周波数 $2f_p$



(b) 遮断周波数 $3f_p$



(c) 遮断周波数 $4f_p$

図-5 $u'w'/\sqrt{u'^2 w'^2}$ の頻度分布

f_p : 風波のピーク周波数

て良く一致することがわかる。これは u' および w' の確率分布と最も良く合っていた場合である。

(b) をみると、正規化した値が 1~3, 4~5 にかけて実測値が理論値より幾分大きいことがわかる。

(c) をみると、正規化した値が 1~4 にかけて実測値は理論値より大きく、その差は (b) よりも大きいことがわかる。

(4) 高周波数成分の パワースペクトル

砕波帯における岸沖、沿岸および鉛直方向流速の高周波数成分のパワースペクトルは 1 Hz より高周波側において周波数のほぼ -1.5 乗に比例する (図-6)。

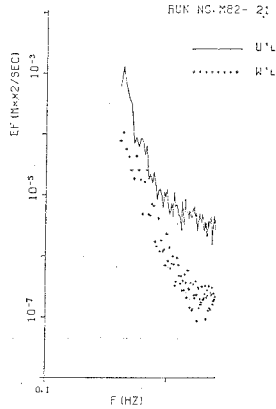


図-6 砕波帯における高周波数成分のパワースペクトルの代表例

(5) 岸沖、鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{w'^2}$ および平均積 $-\overline{u'w'}$

図-7 は砕波および非砕波の岸沖方向流速の高周波数成分の root mean square $\sqrt{u'^2}$ と鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square $\sqrt{w'^2}$ との関係を示したものである。砕波、非砕波とも $\sqrt{u'^2}$ が大きくなるにつれて $\sqrt{w'^2}$ も大きくなり、砕波の発生頻度が高いほど $\sqrt{u'^2}$ および $\sqrt{w'^2}$ の値は大きく、それらはグラフ上次式で示される一本の直線で近似しうる。

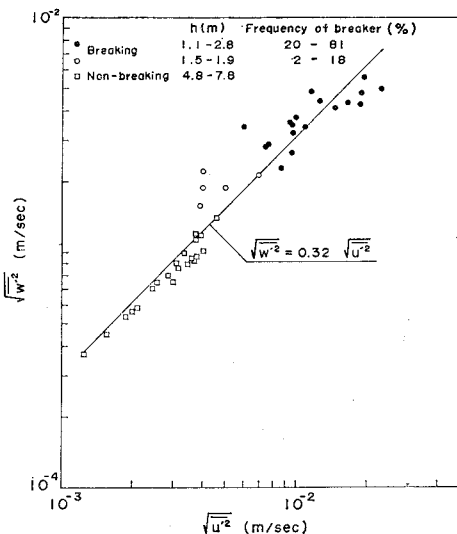


図-7 岸沖方向流速の高周波数成分の root mean square と鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square

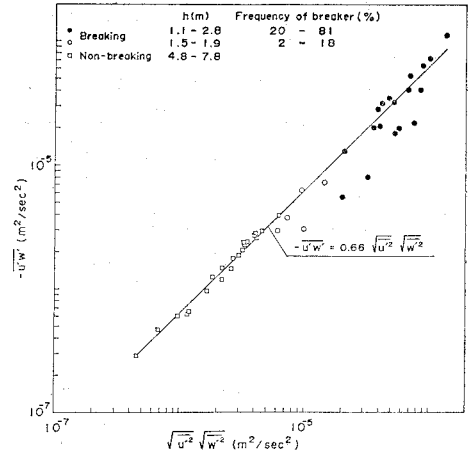


図-8 岸沖、鉛直方向流速の高周波成分の root mean square の積と平均積

$$\sqrt{w'^2} = 0.32\sqrt{u'^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この式から、非砕波、砕波にかかわらず鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square は岸沖方向流速の高周波数成分の root mean square のほぼ 1/3 であることがわかる。この関係は、方向スペクトルから求めた風波のピーク周波数成分波の入射方向がほぼ岸沖方向である⁷⁾ことから、水平方向と鉛直方向との関係とみなせる。

図-8 は岸沖方向流速の高周波数成分の root mean square と鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square の積 $\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2}$ と平均積 $-\overline{u'w'}$ との関係を示したものである。砕波、非砕波とも $\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2}$ が大きくなるにつれて $-\overline{u'w'}$ も大きくなり、砕波において砕波の発生頻度が高いほど $-\overline{u'w'}$ も大きくなり、それらは次式で示される一本の直線で近似しうる。

$$-\overline{u'w'} = 0.66\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

この式から、非砕波、砕波にかかわらず $-\overline{u'w'}$ は $\sqrt{u'^2} \sqrt{w'^2}$ のほぼ 2/3 であることがわかる。

4. 結 語

以上、著者らは愛媛県中予海岸の非砕波帯および砕波帯と愛媛県梅津寺海岸の砕波帯において流速と圧力変動の観測を実施して、種々の遮断周波数によって高周波数成分を分離し、得た高周波数成分の頻度分布がガウス分布に最も良く一致するものをもってあらためて高周波数成分とすることによって高周波数成分の諸特性を見出してきた。砕波型式はすべて spilling 型であったが、遮断周波数は中予海岸の非砕波、砕波帯において風波のピーク周波数の 2 倍の周波数、梅津寺海岸において 3 倍の周波数であった。また中予海岸において、鉛直方向流速の高周波数成分の root mean square は非砕波、砕波にかかわらず水平方向流速の高周波数成分の root mean

square の $1/3$ であり, 碎波の発生頻度が高いほどそれらの値が大きくなることなどを得た。

しかし, ここで解析した結果がどのような波高や周期あるいは碎波状況などに関係しているのか, またそうした関係がどのような理由で成立するのかは不明である。今後, こうした問題についてさらに梅津寺海岸における観測を通して明らかにしたいと考えている。

なお, 本研究における数値計算は愛媛大学情報処理センターの FACOM M-180 II AD を使用した。

参 考 文 献

- 1) Battjes, J. A. and T. Sakai: Velocity field in a steady breaker, J.F.M., Vol. 111, pp. 421~437, 1981.
- 2) Stive, M. J. F.: Velocity and pressure field of spilling breakers, Proc. 17th Conf. Coastal Eng., pp. 547~566, 1980.
- 3) 日野幹雄・瀬岡和夫・小俣 篤: 碎波帯内の乱れの組織的渦構造と水粒子運動について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1984.
- 4) 柿沼忠男・伊福 誠・藤原隆一: 碎波帯における波・流れの観測 (I), 愛媛大学工学部紀要, 第 10 巻, 第 3 号, pp. 279~303, 1984.
- 5) Ang, A. H-S. and W. H. Tang 著, 伊藤 学・亀田弘行訳: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善(株), pp. 138~139, 1977.
- 6) Lu, S. S. and W. W. Willmarth: Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer, J. F. M., Vol. 60, part 3, pp. 481~511, 1973.
- 7) 伊福 誠・柿沼忠男・油井秀人: 碎波帯における方向スペクトルの観測例, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 30~34, 1984.