

浅海域における長周期水理現象に関する総合的現地観測

栗山善昭* ・ 灘岡和夫** ・ 武若 聡*** ・ 岡安章夫****

片山裕之***** ・ 森 信人***** ・ 内山雄介***** ・ 中島 剛*****

田村 仁***** ・ 堀口敬洋***** ・ 澤田浩一*****

1. はじめに

浅海域における長周期水理現象は古くはエッジ波や斜面重複波との関連で、最近では shear wave などとの関連で数多く調べられてきている (例えば, Oltman-Shay et al., 1989)。しかしながら, 海浜流の長周期変動の面的分布, 砕波位置の変動との関係, あるいは沿岸流のせん断不安定によって発生すると考えられる渦については依然として明らかになっていない部分が多い。そこで, 本研究では水面変動と海浜流変動の面的分布を把握するための波高計, 流速計による観測と砕波位置の時空間変動などの面的情報を得るための上空からの係留ビデオシステムによる観測, ならびに渦度の経時変化を把握するための流速計の局所配置による観測を総合的に行うことにより, 浅海域における長周期の水理現象の把握を試みた。

2. 現地観測の概要

現地観測は, 合同現地観測プロジェクト HORS99 の一環として茨城県の鹿島灘に面する波崎海洋研究施設 (HORS) を中心とする沿岸方向 200m, 岸沖方向 400 m の範囲で 1999 年の 7 月下旬から 10 月上旬にかけて行った。流速・水位変動の観測では 17 台の流速計と 12 台の波高計を面的に配置した。図-1 は計測器の設置位置を 1999 年 7 月末の深淺図とともに示したもので, 右図は HORS に沿った断面を示している。なお, 沿岸方向距離の基準は HORS の位置であり, 高さの基準は L.W.L. に等しい波崎 D.L. である。また, 流速は南向きと沖向きを正, 波向は沖より反時計回りを正とする。観測は 2 時間

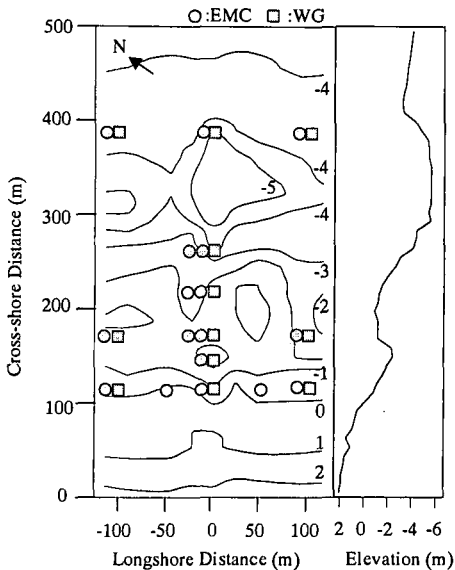


図-1 HORS 周辺の深淺図, 計測器の位置と HORS 沿いの断面 (EMC は流速計, WG は波高計。コンター横の数字の単位は m)

に 1 回, 40 分間, サンプリング周波数 2 Hz で行った。

係留ビデオシステムは前浜から沖方向距離 200 m までの範囲が入るようにセットし (武若ら, 2000), 渦度観測では HORS より 10 m ほど南側で砕波位置よりやや岸側の沖方向距離 90 m 付近に 4 台の流速計を岸沖方向 20 m×沿岸方向 15 m の長方形の頂点に設置した。

本論文では, 波高計・流速計による平面観測と係留ビデオシステム観測とが重なった 8 月 4 日 17:40~18:20 の観測 (ケース 1) と, 平面観測と渦度観測とが重なった 8 月 5 日 9:40~10:20 の観測 (ケース 2) で得られたデータを解析した結果を述べる。

3. 観測結果

3.1 8 月 4 日 17:40~18:20 (ケース 1)

図-2 はケース 1 における HORS 沿いの測線での有義波高, 沿岸流速, 水深の岸沖分布と砕波位置を示したものである。図中の周期は HORS 沿いの沖方向距離 380

* 正 会 員	運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室長
** フェロー 工 博	東京工業大学大学院 大学院情報理工学 研究科
*** 正 会 員 工 博	筑波大学助教授 機能工学系
**** 正 会 員 工 博	横浜国立大学助教授 大学院工学研究 科
***** 正 会 員 工 修	横浜国立大学助手 大学院工学研究科
***** 正 会 員 工 博	(財)電力中央研究所 水理部
***** 正 会 員 博(工)	運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室
*****	運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室
*****	東京工業大学大学院 修士課程
*****	(株)アイ・エヌ・エー 海岸部
*****	(株)アルファ水工コンサルタンツ 技 術部

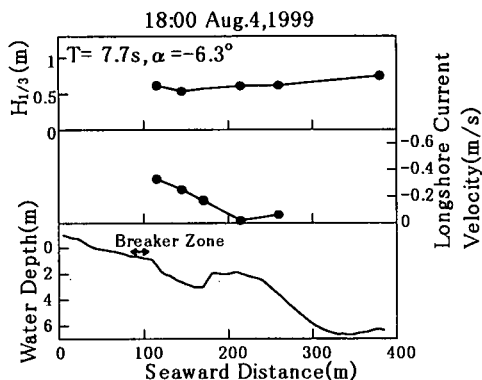


図-2 有義波高, 沿岸流速, 水深の岸沖分布と碎波位置

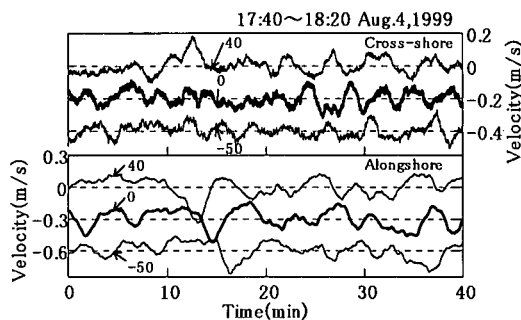
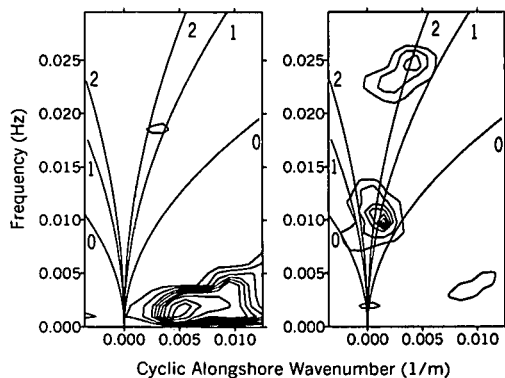


図-3 40秒移動平均の岸沖方向流速と沿岸流速

mの地点(P 380 m地点, 以下, HORS 沿いの地点はPに沖方向距離を付けて示す)における有義波周期を示しており, 波向はP 215 m地点における主波向を示している。碎波は沖方向距離90 m~105 mで生じており, 係留ビデオによって撮影された画像によると, 碎波位置は沿岸方向にほぼ一様であった。

図-3は碎波位置よりもやや沖側の沖方向距離115 m, 沿岸方向距離-50 m, 0 m, 40 mでの岸沖方向流速, 沿岸流速の40分間平均値からの差の40 s移動平均値を示したものである。沿岸流速には, 最大で40分間平均流速(0.35 m/s)と同程度の流速に達する周期数分程度の北へ向かう大規模な変動が存在している。

そこで, この長周期変動の沿岸方向への伝搬特性を調べるために, 沖方向距離115 m, 沿岸方向距離-50 m, 0 m, 40 m, 100 mでの流速データを用いて, 波数・周波数スペクトルをMLMによって計算した。図-4(1), (2)は沿岸流速, 岸沖流速に関しての計算結果を示したものであり, 正の波長は北向きの伝搬を示している。また, 図中の曲線は一樣勾配を仮定したときのエッジ波の分散関係曲線を示している。沿岸流速には周波数0.02 Hz, 波長300 m付近に小さなピークが存在するほか, 周波数0.0020 Hz, 波長180 m付近に非常に大きなピークが存



(1) 沿岸流速 (2) 岸沖方向流速

図-4 波数・周波数スペクトル (コンターは150 m²/sまで25 m²/s刻み, 以降, 200, 300, 400 m²/s, 横軸は1/波長)

在する。すなわち, 沿岸流速では周期500 sで沿岸流の方向に0.35 m/sで伝搬する変動が卓越している。一方, 岸沖方向流速には, 沿岸流速でピークが見られた周波数0.0020 Hz, 波長180 m近くでは周波数0.004 Hz, 波長110 m付近に小さなピークが存在する。それ以外には, 周波数0.010 Hz, 波長700 mと周波数0.024 Hz, 波長300 mの付近に比較的大きなピークが存在する。周波数0.01 Hz付近と0.025 Hz付近のこれらのピークはケース2でも観測されており, 水面変動のスペクトル解析結果や長周期重複波の計算結果を基にすると岸沖方向には長周期重複波が形成されていた可能性が高いと考えられるけれども, ここでは詳細な説明は省略し, 以後, 周波数0.005 Hz以下の領域に注目してさらに解析を進める。

周期500 sの長周期変動の岸沖分布を見るために, P 115 m地点の沿岸流速 u とP 145 m地点, P 170 m地点の沿岸流速とのクロススペクトルを計算した。図-5に示されているように, P 145 m地点ではP 115 m地点に比べると対象領域でのエネルギーが減衰しているものの両者の相関は高く, 位相差は $-\pi/2$ である。一方, 本論文では図面を載せないけれども, P 170 m地点でもやはりP 115 m地点との相関は高かった。ただし, 位相差は0に近かった。

沿岸流速 u と岸沖方向流速 v との相関を調べてみると, 図-6に示されているようにP 115 m地点では相関はそれほど高くなく, 位相差は $-\pi$ である。しかしながら, P 145 m地点になると相関がやや高まり, 位相差が $-\pi/2$ であった。P 115 m地点における沿岸流速, 岸沖方向流速と水面変動との相関を調べてみると, 両者ともに相関はそれほど高くなかった。

以上の結果をまとめると周波数0.005 Hz以下の変動の特性は以下になる。P 115 m地点(碎波位置よりもやや沖の地点)の沿岸流速には周波数0.0020 Hz(周期

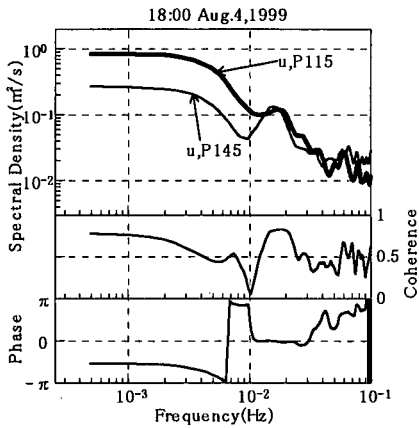


図-5 P115m地点とP145m地点の沿岸流速のクロススペクトル

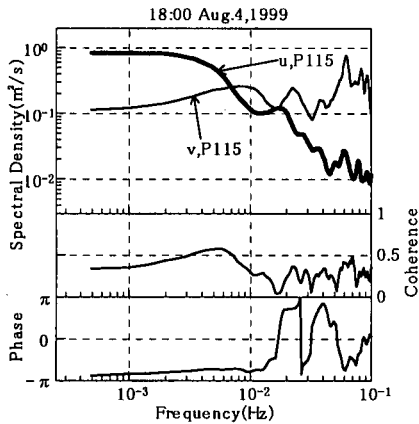


図-6 沿岸流速と岸沖方向流速のクロススペクトル

500 s)に大きなエネルギーのピークが見られる。これは、沿岸方向には約 180 m の波長を持って沿岸流の方向に 0.35 m/s で伝搬するものである。岸沖方向には 50 m 沖でも P115 m 地点の変動と高い相関を持つ変動が存在している。一方、P115 m 地点の岸沖方向流速には周波数 0.004 Hz 付近に上記の沿岸流速変動と同速度で移動する変動に小さなピークが存在するものの、0.0020 Hz 周辺にはピークが存在していない。よって、沿岸流速と岸沖方向流速との相関は高くなく、位相差は $-\pi$ である。

3.2 8月5日 9:40~10:20 (ケース2)

図-7 はケース2における有義波高、沿岸流速、水深の岸沖分布と碎波位置を示している。碎波は沖方向距離 205 m~185 m と 90 m~105 m の2カ所で生じている。

図-8(1), (2)は沖方向距離 115 m, 沿岸方向距離 -50 m, 0 m, 100 m での流速データを用いて、沿岸流速、岸沖流速の波数・周波数スペクトルを計算した結果を示したものである。沿岸流速には周波数 0.0050 Hz (周期

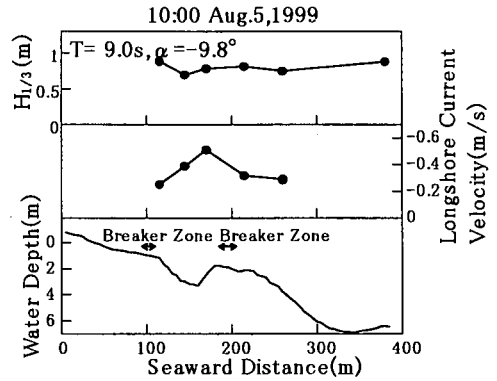


図-7 有義波高、沿岸流速、水深の岸沖分布と碎波位置

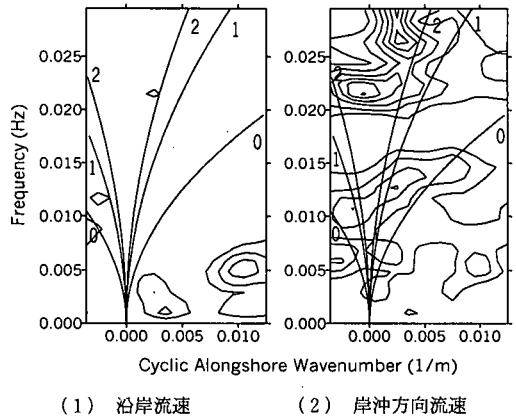


図-8 波数・周波数スペクトル

200 s), 波長 100 m の所に比較的大きなピークが存在する。周期 200 s で沿岸流の方向に 0.5 m/s で伝搬するこの変動は岸沖方向流速にも見られる。P115 m 地点における沿岸流速と岸沖方向流速との相関を調べてみると、図-9 に示されているようにケース1と異なり両者の相関は高いものの、位相差はケース1と同様に $-\pi$ に近い。

4. 考察

まず、ケース1における長周期変動(周期 500 s, 波長 180 m)の発生原因を検討する。図-4 から明らかなように、この長周期変動はエッジ波の分散関係式を満たしていないので、エッジ波は発生原因から除かれる。また、ビデオ画像から読みとった碎波位置の変動には周期 500 s の変動は見られなかった。すると、残る発生原因としては radiation stress S_{xy} のゆらぎと沿岸流のせん断不安定が考えられる。図-10 は P115 m 地点における $S_{xy}(=En\sin 2\alpha/2, E=\rho g\eta_{rms}, n$ は群速度と波速との比, α は波向, ρ は海水の密度, g は重力加速度, η_{rms} は水面変動

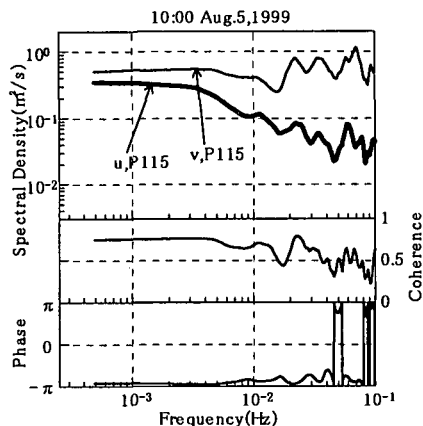


図-9 沿岸流速と岸沖方向流速のクロススペクトル

の標準偏差)と沿岸流速の40 s 移動平均値を比較したものであり、図-11は両者のクロススペクトルの計算結果を示したものである。Radiation stressにも長周期変動が存在するものの、沿岸流速の長周期変動との相関はさほど強くない。よって、周期500 sの長周期変動がradiation stressの変動によって生じたとは考えにくい。

次に、観測された沿岸流速の長周期変動が沿岸流のせん断不安定によって生ずる shear wave によるものであるか否かを検討する。Putrevu・Svendsen(1992)は shear wave の発達条件をいくつかの地形や初期沿岸流速分布などの条件の下で数値的に検討した。その結果、shear wave が存在する範囲としては $kx_0 < 7$ (k は波長, x_0 は碎波帯幅), $\sigma x_0 / V_{\max} = 0.6 \sim 0.7 kx_0$ (σ は角周波数, $V_{\max}$ は最大沿岸流速), 一様勾配斜面上で大きな発達率を有する shear wave の条件は $kx_0 = 1 \sim 3$ という結論を導き出した。ケース1の場合、碎波帯幅 x_0 は60 m程度であるので、波長180 mの長周期変動は $kx_0 = 2.1$ となり、shear wave として存在しうる条件内に入る。周期に関しては、最大沿岸流速 $V_{\max}$ を碎波位置よりもやや沖側の P115 m 地点の沿岸流速の1.5倍とすると、周期は510 s となり観測結果と一致する。また、大きな発達率を持つ shear wave としても数値解析の結果求めた値が $kx_0 = 1 \sim 3$ に対して観測結果が $kx_0 = 2.1$ なのでほぼ一致する。よって、Putrevu・Svendsen(1992)の結果を基にすると、ケース1の沿岸流速に現れた長周期変動は shear wave である可能性が高いことになる。

一方、Putrevu・Svendsen (1992)は Oltman-Shay et al. (1989)の現地観測結果を基に shear wave の特徴として以下の5つを掲げている。① Shear wave は沿岸流の方向に進行する。② Shear wave の進行速度は沿岸流速の0.5～1倍程度である。③ Shear wave の周波数と波数との関係は0点を通る直線で近似できる。④ 岸沖方向流

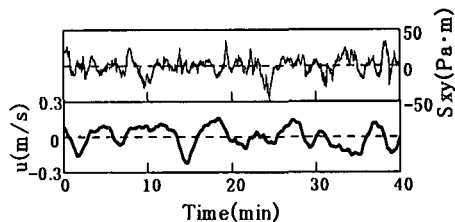
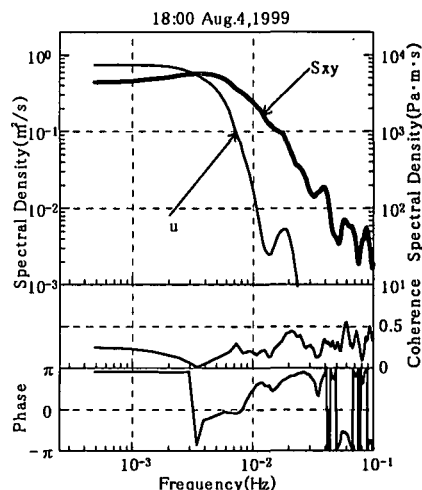


図-10 40秒移動平均の radiation stress と沿岸流速

図-11 40秒移動平均の S_{xy} と u のクロススペクトル

速と沿岸流速とは $\pi/2$ だけ位相がずれている。⑤ Shear wave が存在する波数の範囲は沿岸流速とは無関係である。

このうち、条件⑤は本観測の検討対象外であるので、残りの4つの条件を調べてみる。条件①、②についてはこの変動は沿岸流の方向に伝播するものであり(図-4)、P115 m 地点における沿岸流速0.35 m/s に対してその移動速度は0.35 m/s とほぼ同じ速度であることから、条件①、②は満たす。条件③に関しては、図-4を見るとほぼ満たしているように見える。しかしながら、条件④に関しては、沿岸流速と岸沖方向流速との位相差が $-\pi$ に近い(図-6)ことから shear wave の条件は満たしていない。さらに、Putrevu・Svendsen (1992)は shear wave の特徴に加えていないものの、Oltman-Shay et al. (1989)の観測結果を見ると沿岸流速成分と岸沖方向流速成分の両方において shear wave の領域でエネルギーが高くなっているのに対して、本観測では沿岸流速成分の shear wave 領域におけるエネルギーの大きさに比べると岸沖方向流速のそれは非常に小さい。

以上の検討結果を基にすると、周期500 s、波長180 mの長周期変動は shear wave の条件をいくつか満たすも

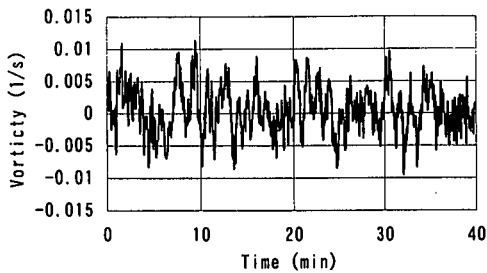


図-12 40秒移動平均の渦度

の、いくつかの点で今までの観測結果と異なる点があり、この長周期変動が shear wave 以外の現象である可能性がある。

続いて、ケース 2 における周波数 0.0050 Hz、波長 100 m の長周期変動の発生原因をケース 1 同様に検討する。Radiation stress にはやはり長周期変動が存在するものの、流速の長周期変動との明確な関連は見られなかった。一方、shear wave の可能性については、砕波幅として最終砕波位置から汀線までの距離を取って Putrevu・Svendsen (1992) の数値計算結果と比較すると、対象としている長周期変動は shear wave として存在しうる条件内に入り、周期も計算結果と観測結果がほぼ一致するものの、発達する shear wave の波数としては観測結果の方が大きめとなり計算結果とは一致しなかった。また、前述の shear wave の特徴と観測結果とを比較してみると、条件①、②、③は満たすものの、条件④はケース 1 同様満たしていない。ただし、沿岸流速と岸沖方向流速の shear wave 領域におけるエネルギーに関しては、ケース 1 と異なり両者はほぼ同程度であった。

ここで、ケース 2 における渦度の観測結果を図-12 に示す。渦度は、長方形の各頂点での流速データを基に、沿岸方向の辺に沿った岸沖方向流速の差の平均値と岸沖方向の辺に沿った沿岸流速の差の平均値との差として求めたものであり、正の値が時計回りの渦度となっている。図から分かるように、渦度は正負に対称な変動をしている。しかしながら、Özkan-Haller・Kirby (1999) の shear wave の数値計算結果では渦度は正負に非対称な変動を

しており、今回の観測結果とは異なっている。

以上の検討結果を基にすると、ケース 2 における周期 200 s、波長 100 m の長周期変動もケース 1 同様、shear wave 以外の現象の可能性がある。

5. おわりに

合同現地観測 HORS99 において、周期 200 s~500 s、沿岸方向の波長が 100 m~200 m の海浜流の長周期変動が観測された。海浜流の駆動力である radiation stress の長周期変動とこの長周期変動との相関を調べたところ、両者の間に明確な関連は見られなかった。次に、shear wave との関連を調べたところ、この長周期変動は shear wave の条件をいくつか満たすものの、沿岸流速と岸沖方向流速との位相差が $-\pi$ に近い点や沿岸流速のエネルギーが岸沖方向流速のそれに比べて非常に大きい点など今までの観測結果と異なる点があり、この長周期変動が shear wave 以外の現象の可能性があると言える。今後は、このような長周期周期変動の岸沖分布をより詳細に把握するとともに、沿岸方向の地形の変動が海浜流の長周期変動に与える影響などを検討する必要があると考えられる。

最後に、暑いなか現地観測にご協力いただいた皆さん、ならびに波数・周波数スペクトルの計算でお世話になった港湾技術研究所の橋本室長に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 武若 聡・中村 崇・三崎尚一 (2000): 係留ビデオシステムを用いた砕波帯水理現象の解析, 海岸工学論文集, 第 47 卷, (印刷中)。
- Putrevu, U. and I. A. Svendsen (1992): Shear instability of longshore currents: A numerical study, J. Geophys. Res., Vol. 97, No. C5, pp. 7283-7303.
- Oltman-Shay, J., P. A. Howd and W. A. Birkemeier (1989): Shear instabilities of the mean longshore current: 2. Field observations, J. Geophys. Res., Vol. 94, No. C12, pp. 18031-18042.
- Özkan-Haller, H. T. and J. T. Kirby (1999): Nonlinear evolution of shear instabilities of the longshore current: A comparison of observations and computations, J. Geophys. Res., Vol. 104, No. C11, pp. 25953-25984.