

係留ビデオシステムを用いた碎波帯水理現象の解析

武 若 聡*・中 村 崇**・三崎尚一郎***

1. 緒 言

係留ビデオシステム(武若・中村, 1999)によって得られた碎波帯の動画像を解析し, 碎波位置の空間的な分布, 表層海浜流構造, などの観測に応用した. 計測器を用いた観測では, 計測点では精度の高いデータを得られるものの, 計測点の設定数には限りがあり, 対象とする現象の空間構造の理解に際しては制約が生じる. 本研究では, 面的なデータであるビデオ画像を解析することにより, 点計測では全体像を捉えることが難しい現象の時間空間的な構造を把握することの可能性を示す.

2. 係留ビデオシステム

係留ビデオシステムの基本的な構成は, 1998 年に実施された合同現地観測 HORS98 (例えば, 片山ら, 1998)において用いたものと同等である(武若・中村, 1999). 画像処理方法は前年に開発された手法を基本的に踏襲しているが, 一部の処理に改良を加え, 画像データベースの作成効率と精度を高めた. 例えば, 撮影範囲内に標点を可能な限り多数配置し, これらの画像内の位置を求め, 単写真標定(日本写真測量学会, 1983)を正確に行い, 画像の位置合わせ, 合成などを行った(三崎ら, 2000).

3. 観測の概要

観測は 1999 年 8 月から 9 月にかけて, 運輸省波崎海洋研究施設の観測棧橋周辺を中心に行われた合同現地観測 HORS 99 の中で行われた. 係留ビデオによる撮影観測は 8 月 4, 5 日, 9 月 28, 29 日の間に随時行い, 1 回の観測で 1 時間弱の画像を取得した. 気球の係留は全て棧橋上から行い, 沿岸方向に幅広い画像を取得することを意図としたカメラセッティングで観測した. 一部の観測時には染料を棧橋あるいは汀線付近から投入した. 係留ビデオによる観測を行った時間帯では, 複数の計測機による水理量の測定を同時に行った(栗山ら, 2000).

4. 解析結果

本論文では 1999 年 8 月 4 日 17 時 37 分 12 秒から撮影を開始した画像の解析結果を中心に説明する. 図-1 に本論文内の説明で用いる座標系と後に説明する平均画像を合わせて示す. 棧橋上の冲向き方向に x 軸を, これに直交する沿岸方向(鹿島港方向)に y 軸を設定する. 図中の黒点は, 本研究内の解析にて参照された水位と流速変動が測定された地点であり, 以降では S115-50(S x 座標- y 座標)のように表記して測定位置を示す.

上記の時間帯に撮影された全画像から毎秒 1 枚, 総計 2400 枚を取り出し, 必要な画像処理を行った後に水理現象についての解析を行った.

(1) 海象の概要

棧橋先端($x=380$ m)で計測された 1999 年 8 月 4 日 17 時 40 分から 18 時 20 分にかけての水位記録から求めた有義周期は 7.5 s, 有義波高は 0.42 m であった. この時間帯では, おおよそ $x=100$ m の地点でほとんどの波が碎波していた. 波の入射方向は, 目測あるいはビデオで確認したところ, 海岸に対して直角よりもやや小さい角度(銚子寄りの方向から入射)であり, 沿岸方向の流れは鹿島港に向かっていった.

(2) 平均画像

図-1 に毎秒の画像 2400 枚(40 分間)の画像を単純平均して作成した画像(=平均画像)を示す. 画像の左側にある縦方向の直線は棧橋であり, 画像横方向に伸びる白い帯($x \sim 100$ m)は先に説明した最終碎波域である. 画像の右上($x \sim 30$ m, $170 \text{ m} < y < 250 \text{ m}$)には波長約 27 m のビーチカプスが形成されており, この位置がこの時間帯の平均的な波の遡上高さである.

観測日の数日前に行われた深浅測量の結果と平均画像のコントラストを強調して重ね合わせ表示した結果を図-2 に示す. 碎波帯の沖側境界の位置は, ある海底地形の等高線の沿岸方向分布とほぼ一致している. 碎波帯の沖側境界の分布を詳細に眺めると, 沿岸方向に若干の不均一性が認められる. 例えば, 碎波帯は $y=145$ m 付近で沖側に突出しているが, これは波が海底地形の影響を受け, ここに集中するように浅水変形していた結果である

* 正 会 員 工 博 筑波大学助教授 機能工学系

** 正 会 員 工 修 鹿島建設(株) 九州支店

*** 学生会員 筑波大学大学院理工学研究科

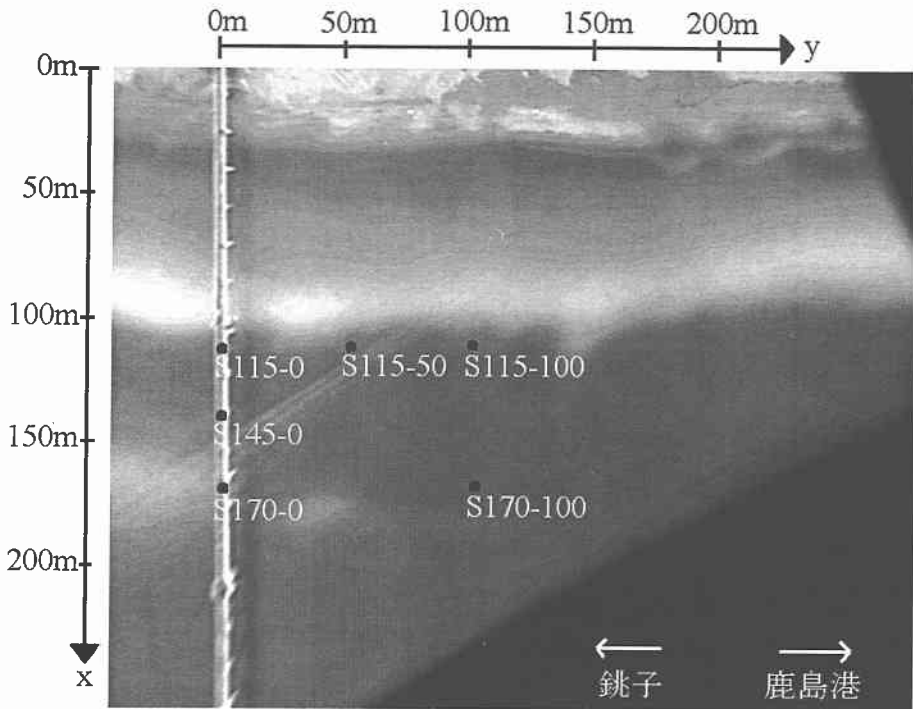


図-1 座標系と平均画像 ● 計測器の設置位置



図-2 平均画像と深浅測量結果の重ね合わせ
海底地形等高線間隔：0.5 m

と推察される。類似の要因で、棧橋付近の碎波帯は岸寄りに分布していると考えられる。また、棧橋の左側に見られる白い領域 ($x \sim 170$ m) には浅瀬が存在し、ここを通過した波は沖側で一旦碎波していた。

(3) 碎波位置と水位変動の関連性

ここでは画像から読み取った個々の波の碎波位置と測定された水位変動の関連性について説明する。

各画像内から棧橋に沿っての岸沖方向のライン画像を取り出し、これの時間変化を調べた。図-3 に $y=100$ m の地点のライン画像を取り出した結果を示す。図中の横軸は時間経過、縦軸は岸沖方向の位置である。同図からは、個々の波が岸に向かって進行する際に碎波を開始した地点、碎波した波がボアとなって伝播する状況（斜状の線）、波が遡上して到達した最高点、などが読み取れる。

碎波点位置は、観測中に潮位が上昇していたため、時間の経過とともに平均的に岸方向に移動しており、これに加えて、周期数十秒程度で岸沖方向に変動している。

図-3 から碎波点位置の時間変動を読み取った X_{6100} , S115-100 で計測された水位の変動記録 η , それぞれの移動平均波形（移動平均幅 = 60 s）を図-4 に示す。本来であれば、碎波点は個々の波に対応して時間方向には離散的に存在するが、水位記録との比較を行う便宜上、ここでは碎波により発生した気泡の位置が存在していた最も沖側の位置を読み取った。この図より、長周期の碎

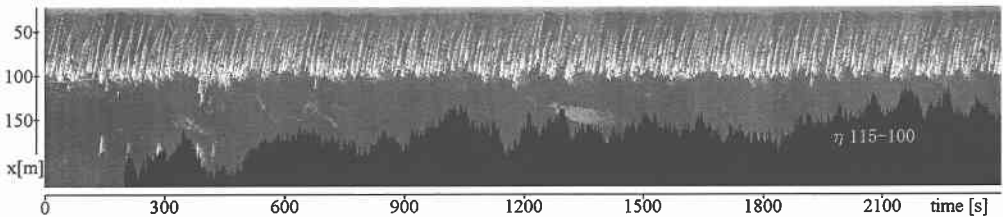


図-3 岸沖方向ライン画像 ($y=100$ m) と水位変動 (移動平均幅 60 s)

縦軸：岸沖方向距離，横軸：経過時間，下段の棒グラフは長周期の水位変動に対応

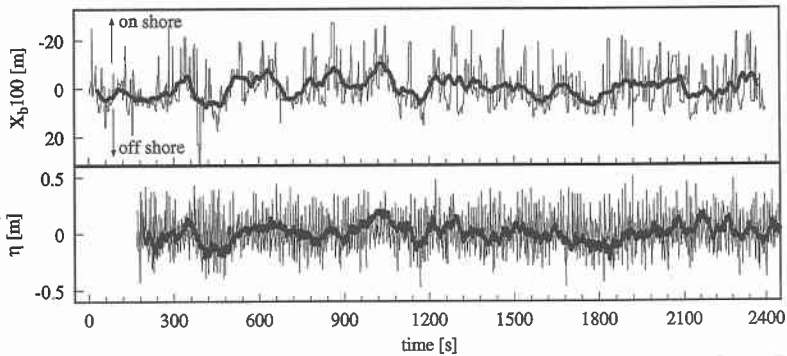


図-4 砕波点位置の岸沖方向変動 $X_{b,100}$ と水位 η の生記録と移動平均波形 (平均幅 60 s)

$X_{b,100}$ ：砕波点位置の岸沖方向変動。平均砕波位置 ($x=97$ m) からの変化を表示。潮位の変化に伴う変動は除去。
 η ：S115-100 で計測された水位変動記録。細線：生記録，太線：移動平均波形 (平均幅 60 s)

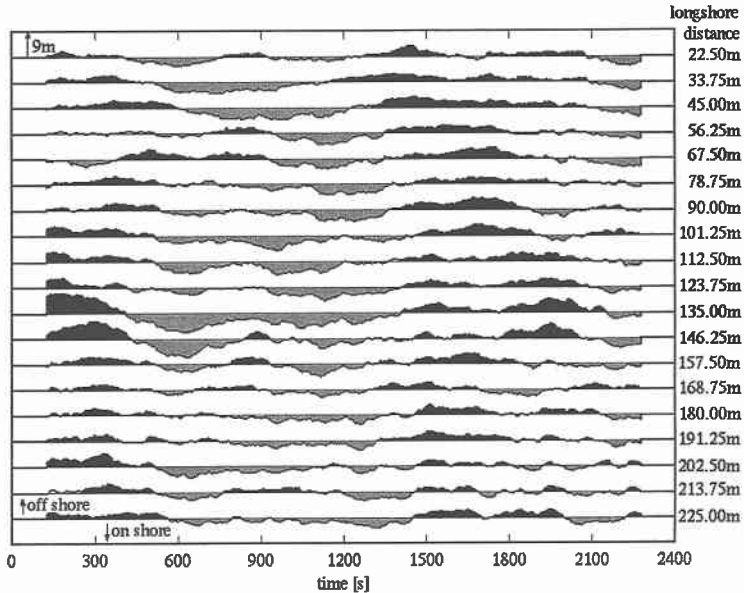


図-5 砕波点位置の平均位置からの変位：長周期変動成分 (移動平均幅：250 s)

横軸：経過時間，縦軸数値：沿岸方向位置，黒：砕波点が平均位置より沖側，灰：砕波点が平均位置より岸側

波点位置変動は長周期の水位変動が低下時に沖側へ，上昇時に岸側へ移動していたことが読み取れる。この変動の全振幅は約 10 m であった。図-3 下には，水位変動の移動平均 (移動平均幅 60 s) から求めた長周期成分を棒状

に表して記入した。

$X_{b,100}$ と η のスペクトルを求め両者のコヒーレンスと位相を求めた。コヒーレンスは周波数 0.1 Hz までのおおむね 0.65 以上の値を示した。位相は 0.02 Hz 以下の

周波数帯でほぼ π となっていた。これは、上に説明した X_{b100} と η の長周期的な変動特性を裏付ける結果となっている（平均水位の上昇： η の増加 $\Leftrightarrow$ 碎波点の岸側への移動： X_{b100} の減少）。一方、0.02 Hz から 0.1 Hz の周波数帯の位相は連続的に変化していた。これは、短周期の碎波点位置変動が個々の波の大小のみで定まるのではなく、波の連なり状況の影響もを受けていることの現われであると考えられる（磯辺ら, 1980）。

碎波位置の変動を沿岸方向 20 m $< y < 225$ m の範囲で求め、その時間変化と空間分布特性を調べた（図-5）。その結果、移動平均によって求めた解析対象領域内の長周期的な碎波位置は、おおよそ様に同位相で岸沖方向に変動していたと見なせる。これは、前述の結果から考えると、長周期水位変動の沿岸方向の大局的な構造が一様であることを示唆している。

（4）沿岸方向流速の時空間分布

海表面にある気泡をトレーサーとして棧橋周辺の表層の流況を調べた。図-6 には、画像計測で得られたデータを沿岸方向（0 $< y < 225$ m）と時間方向（0 ~ 2400 s）に平均して求めた平均沿岸流速の岸沖分布を示す。図には $x=115, 145, 170$ m の測線上にあった流速計の沿岸方向流速を平均した値も表示した。沿岸流速が碎波帯の沖側

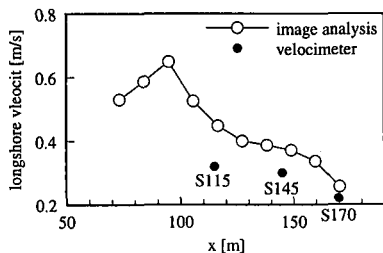


図-6 気泡の流動から求めた沿岸方向流速の岸沖分布（時間・沿岸方向平均値）

先端位置からやや岸側に寄った地点で最大となっていることが捉えられている。

図-7 には画像から求めた $y=50$ m 上の $x=84, 95, 106, 110$ m 地点の流速変動と S115-50 で計測された流速変動を示す。画像計測の結果は平均的な流れを捉えているのに対して、流速計は個々の波の通過に伴う変動をも含めて捉えている。両者の時間平均的な変動パターンはほぼ一致しており、画像計測結果の妥当性を示している。S115-50 の観測結果には周期 7 ~ 8 分スケールの変動が鮮明に捉えられている。これは、栗山ら（2000）が、碎波帯外の流速測定結果を解析して見出した、沿岸方向に伝播する周期 7 ~ 8 分程度の変動の一部である。碎波帯の中にも不明瞭ではあるが、類似の変動が捉えられているようである。画像計測のアルゴリズムを改良し、より鮮明な流速場の像を得ることが今後の課題である。

（5）染料の流跡解析

海水に色素（フローレスセンナトリウム）を溶かし、17 時 53 分に棧橋上の $x=155$ m 地点から投入した。染料パッチは、図-8 に示すように、変形しながら沿岸方向に流下した。同図には、流速シアと拡散の効果が存在する場合の瞬間点源染料拡散の特徴（例えば、柳, 1989）、例えば、染料パッチの分布形状が速度勾配の効果により扁平になること、その重心位置が速度の速い領域へシフトすること、などが観察される。

各時間の画像から染料の存在が認められた領域を画像解析により抽出し、その重心位置を求めた結果を図-9 に示す。染料パッチは沿岸方向にほぼ一定の速度約 0.2 m/s で流下していた。海表面近くに設置された S170-0 の流速計が示した y 方向の平均流速が 0.29 m/s であったことから、投入された染料パッチの主要部は海中に沈んで沿岸方向に流下していたと推測される。染料パッチの沿岸方向の流下に伴う岸沖方向の位置の変動には、

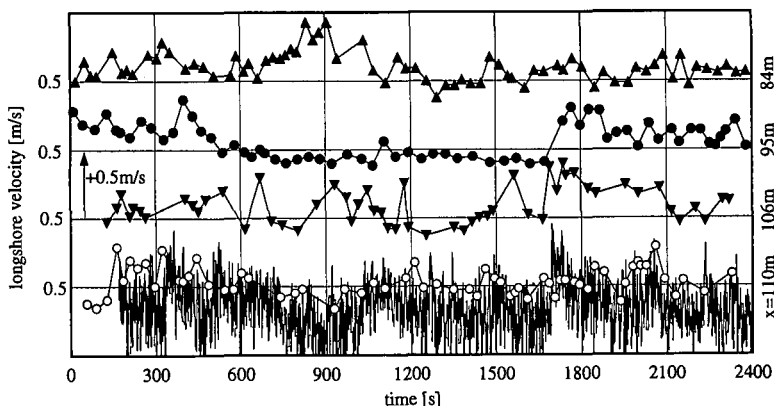


図-7 画像計測により求めた沿岸方向流速変動（ $y=50$ m 上）

○： $x=110$ m, ▼： $x=106$ m, ●： $x=95$ m, ▲： $x=84$ m, 実線：S115-50

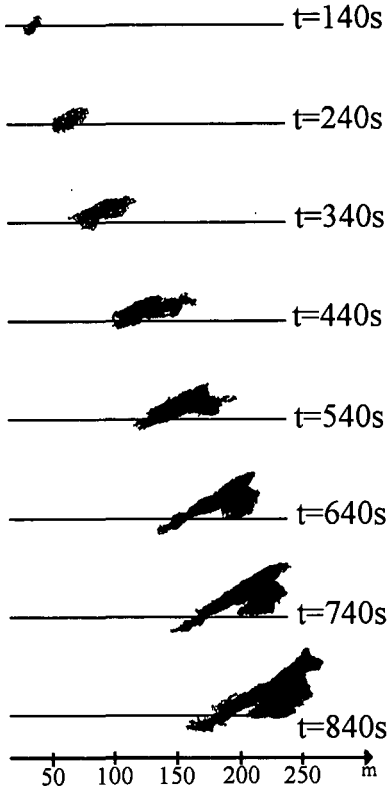


図-8 染料パッチの沿岸方向流下に伴う分布変化

色素の存在が認められた範囲を抽出して表示。
時間：染料投入後の経過時間，横軸：沿岸方向距離

個々の波の通過に伴う短い周期の岸沖方向の位置変動，これよりもスケールの大きい周期約 30 s～50 s の岸沖方向変動，平均的な岸方向への移動，が見られる。S170-100, S115-100 で計測された流速の岸沖方向成分の記録を調べたところ，周期 30 s～50 s の成分は小さく，この周期の岸沖方向変動が生じていた原因は不明である。

染料パッチの沿岸方向流下に伴う岸沖方向への拡がり幅 X_{pd} を求め，岸沖方向の拡散係数 K_x の見積もを行った（柳，1989）。正確には，沿岸流の水平・鉛直方向の速度勾配と沿岸方向の拡散効果，のそれぞれを積算した分散効果を評価した上で K_x を見積もらなければならないが，これらを評価する情報が全てそろわなかった。従って，ここでは岸沖方向の拡がりには単に水平拡散の効果による，と仮定して X_{pd} の時間変化を調べたところ $K_x = 0.04 \text{ m}^2/\text{s}$ という値を得た。砕波帯外の水平拡散係数の合理的な与え方については定まった見解が得られていないが，参考までに Larson and Kraus (1991) が提案している水平拡散係数の式

$$K_x = (0.15 \sim 0.3) u_b H \dots \dots \dots (1)$$

に測定された水理量を与えると $K_x = 0.018 \sim 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$

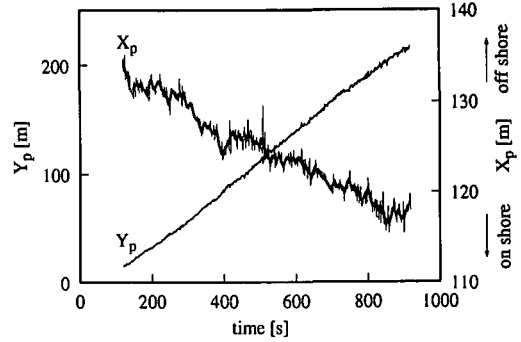


図-9 染料パッチの重心変化

X_p ：岸沖方向位置， Y_p ：沿岸方向位置

が得られた。ここで， H と u_b は局所的な波高と底面流速振幅である。

5. 結 言

係留ビデオシステムを用い，砕波帯内外に生じる水理現象の解析を行った。平均砕波位置の分布，個々波の砕波位置変動，海浜流構造の時空間的な変動などを調べ，面的なデータを解析する有効性を示した。

謝辞：本研究を進めるにあたり，港湾技術研究所漂砂研究室，合同現地観測 HORS99 参加メンバーの諸氏から様々な支援，アドバイスを頂いた。また，筑波大学水工研の森本佳緒里，稲葉徹の両氏には観測実施の際に協力を得た。ここに記して謝意を表します。なお，本研究の一部は文部省科学研究費，前田記念工学振興財団研究助成金の支援を受けて行われた。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦 (1980)：不規則波の砕波変形に関する実験的研究，第 27 回海岸工学講演会論文集，pp. 139-142.
- 片山裕之，岡安章夫，永田達也 (1999)：連続採水による現地砕波帯浮遊砂濃度および粒径分布の時系列変化，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 571-575.
- 栗山善昭，他 10 名 (2000)：浅海域における長周期水理現象に関する総合現地観測，海岸工学論文集，第 47 巻。
- 武若 聡・中村 崇 (1999)：係留ビデオシステムによる砕波帯の水理現象観測の試み，海岸工学論文集，第 46 巻，pp. 151-156.
- 日本写真測量学会編 (1983)：解析写真測量，日本写真測量学会。
- 三崎尚一郎・中村 崇・武若 聡 (2000)：係留ビデオシステムの画像処理に関する研究，第 55 回土木学会年次学術講演会講演概要集（印刷中）。
- 柳 哲雄 (1989)：沿岸海洋学，恒星社厚生閣，pp. 102-104.
- Larson, M. and N. C. Kraus (1991)：Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. WPCOE, ASCE, Vol. 117, pp. 326-347.