

画像計測による沿岸流速分布の推定

武 若 聡*・三崎尚一郎**・岡本 宴徳***

1. 研究の目的

砕波帯内外の波動・流動場を空中から撮影した動画画像を解析することにより、沿岸流速分布を推定する手法について検討した。通常の計測機器を用いた観測手法では、計測点で精度の高い流速データが得られるものの、機器を広範に設置することは一般的に難しいため、砕波帯内の流速場の構造を詳細に捉えることは難しい。これに対して、画像計測による測定では、取得される流速データの精度はやや劣るものの、流れ場を面的に調べることが可能である。本研究では、画像解析から沿岸流速場を推定することの妥当性、有用性などについて検討し、観測された沿岸流速変動が生じる原因についての考察を試みた。

2. 観測の概要

本研究で解析されたビデオ画像データ、水理データは 1999 年の夏期に運輸省波崎海洋研究施設の観測機橋周辺で実施された合同現地観測 HORS99 で取得されたものである。本研究で解析したビデオ画像は 1999 年 8 月 4 日 17 時 37 分 12 秒から約 50 分の間収録された。観測方法、ビデオ画像の解析方法と結果、その他の水理量観測などについては参考文献(武若ら, 2000; 栗山ら, 2000; 岡安ら, 2000) に詳しく説明されている。

図-1 に本論文内の説明で用いる座標系と 40 分間の平均画像を合わせて示す。機橋上の沖向き方向に 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。図中の矢印は、計測された沿岸流速と波向であり、これについては後に説明する。図中の黒点は、水位と流速変動が測定された地点であり、以降では、例えば $S-115-50$ のように表記して測定位置($S-x$ 座標- y 座標)を示すこととする。機橋先端($x=380$ m)で計測された水位記録から求めた有義周期は 9.1 s、有義波高は 0.56 m であった。この時間帯では、一部の波が $x=170$ m 付近で砕波し、その後再生域を経て、 $x=100$ m 付近で最終的に砕波していた。図-1 中の縦方向に延びる白い帯

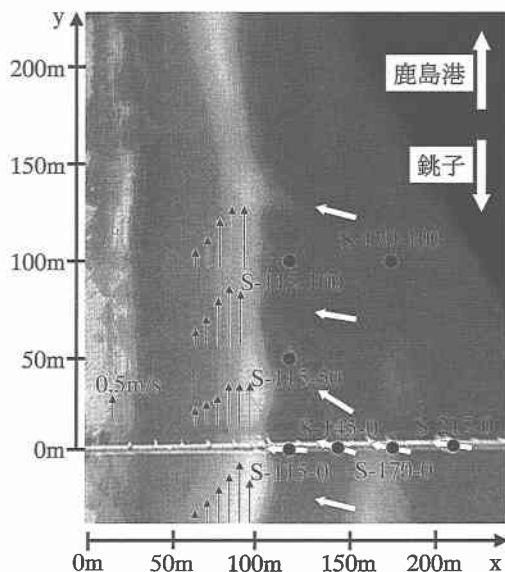


図-1 座標系と平均画像、●：計測器の設置位置
矢印(白)：平均波向、矢印(黒)：沿岸流速

($x \sim 170$ m, 100 m) がこれらの砕波位置に対応している。波の最大遡上位置の平均は $x \sim 40$ m であった。波は、 $x=145$ m $\sim$ 170 m の範囲で海岸線に対して銚子寄りの方向から斜め入射しており、沿岸方向の流れは鹿島港に向かっていった。

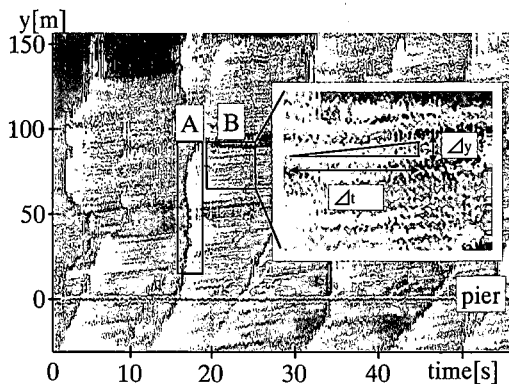
3. 画像計測による沿岸流速分布の推定

海表面にある気泡の平均的な移動方向が鹿島港方向であったことは、観測中における機橋からの目視、あるいは、ビデオ画像の再生から確認された。この移動状況を定量的に捉えることにより、沿岸流速分布を推定することを考える。

画像で捉えた範囲内に存在する気泡は、砕波により発生したものである。人間が、フィールドにおいて、あるいは、ビデオ画像を再生した時に、流れの存在を認知するプロセスは、海表面にある程度の時間にわたって存在する気泡の移動を追跡・認識することによりなされる。この際、波の通過に伴う往復的なモーションは適宜除外

* 正 会 員 工 博 筑波大学助教授 機能工学系

** 学生会員 筑波大学大学院理工学研究科

図-2 沿岸方向ライン画像 ($x=90$ m)

A: 砕波ボア, B: 気泡の沿岸方向の移動, Δy : 沿岸方向移動量, Δt : 移動時間

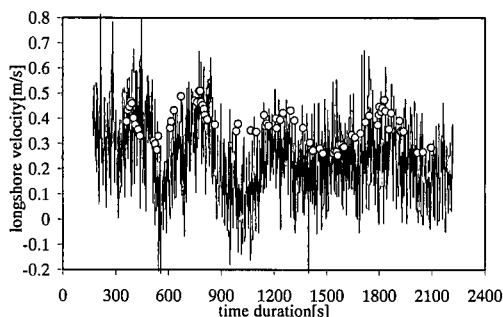


図-3 ライン画像から求めた沿岸方向流速(○)とS-170-0で計測された沿岸流速変動(細線)の比較

され、平均的な動きのみを意識・抽出して、沿岸方向の流れがあることを認識する。

本研究では海表面の気泡の平均的な移動を捉える、すなわち、波の通過に伴う往復的な動きを除くことを意図した解析を行い、波の周期よりも長いスケールで変動する沿岸流速を求めることを考える。これに向けて、沿岸方向ライン画像を作成し、この解析から沿岸流速分布を求めた。

(1) 沿岸方向ライン画像の解析

沿岸方向ライン画像とは、各画像から沿岸方向の1ラインを抜き出し、これを時間経過に沿って並べたものである。図-2には砕波帯内に設定された測線($x=90$ m)で得られた一例を示す。画像中に示したパターンAは、砕波ボアが設定した測線をクロスした時に生じ、続いてBで示す斜線状のパターンが現れる。これは、砕波ボアの進行に伴って発生した気泡が、海中に取り込まれた後に波峰の背後に浮かび上がってきたものであり、次の砕波ボアが接近するまでは、沿岸流に乗って移動する。この流れに追随している部分を抽出し、ライン画像内での傾き、すなわち沿岸方向移動量 Δy と移動に要した時間 Δt

の比を求めることで、海表面の沿岸方向流速を推定した。

ライン画像内に現れた斜線状パターンの傾きはマニュアル操作で読み取った。砕波帯内では、砕波ボアが通過する度に一つの流速データが取得されるので、波の周期程度の時間が、ここでの解析の時間分解能となる。また、斜線状パターンを読み取る沿岸方向間隔が空間分解能となる。

以上に説明した手法は、砕波帯内外に適用可能である。しかしながら、砕波帯外では気泡の発生量が少なく、時間的に密にデータを収集することが難しかったため、本研究では、充分な数のデータが得られた砕波帯内の結果を示す。

連続画像から流体の運動を解析する手法の一つに、画像内に設定したテンプレートの次時刻画像における移動箇所を検索する相関解析がある(例えば、西村・武若, 1988)。ここでも、相関解析を得られた画像に対して適用することは可能であり、実際に解析を試行した。しかしながら、次に説明する理由から、沿岸流速を求める解析にはライン画像の解析が有利である判断した。一つの問題は、本研究で対象とする画像には、波峰の移動と海表面の流動を代表する気泡の運動の両者が捉えられており、機械的に相関解析を適用した場合、得られる速度推定値がいずれのモーションを代表するのか、その解釈が難しくなることである。別の問題点は、画像の位置合わせを行う際に発生する誤差(1~3画素程度)と、画像の空間分解能(0.44 m/画素)・時間分解能(1/15 s)と計測対象の沿岸方向流速(〜0.5 m/s)から予想されるテンプレートの移動量が同程度となることである。ここで、後者の問題は、本研究の撮影状況に依存した問題で、改善の余地はある。相関解析を注意深く行ったら、ライン画像で推定された沿岸方向流速と相関解析で得られた値はおおよそ一致することが確認された。

図-3にはS-170-0で記録された沿岸方向流速変動とこの近傍の画像から推定した流速変動を示す。この地点では砕波が間欠的に発生していたために、気泡が十分に存在していない時間帯があり、データの得られた時間帯も間欠的となった。画像計測で得られた値は、計測された沿岸流速の、波の周期よりも長い時間平均的な変動に追随している。また、画像計測値は海表面での評価なので、海中で計測された流速値を全般的に上回っている。

(2) 砕波帯内の沿岸流速分布

図-4にはライン画像解析から求めた砕波帯内の30分平均の沿岸流速分布と変動強度を示す。ここで得られた速度値は図-1に矢印で表示した。沿岸流速値の最大値は砕波位置から岸側に寄った位置に現れている。砕波帯の幅は、図-1に見られるように、沿岸流の流下方向に若干が狭まっている。これに伴い、沿岸流速が最大とな

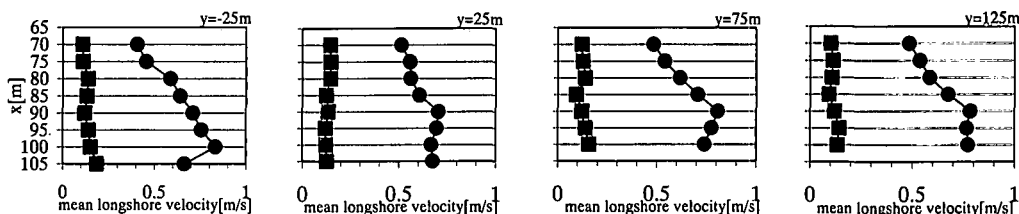


図-4 ライン画像から求めた砕波帯内の平均沿岸方向流速 (●) と変動強度 (■) の岸沖分布

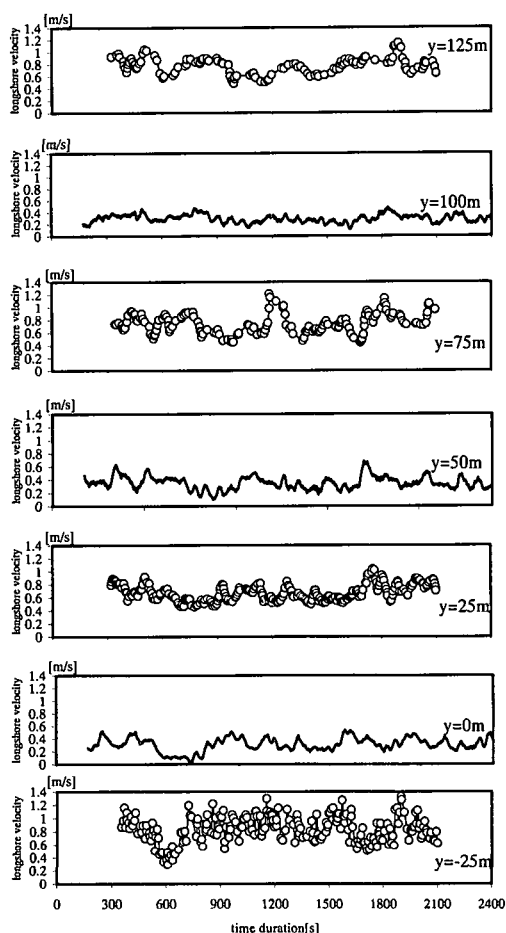


図-5 $x=100$ m 上の沿岸方向流速変動

$y = -25, 25, 75, 125$ m : ライン画像からの計測, $y = 0, 50, 100$ m : $x=115$ m 上の流速測定結果

る地点も岸方向にシフトしている。沿岸流速の変動強度は、砕波帯内の各位置で同程度であった。なお、砕波帯外 (およそ $x > 100$ m) では、気泡移動の追跡が可能なサンプルが極端に少なかった。

図-5 には $x=100$ m 上の沿岸流速変動の移動平均 (平均時間: 約 25 s) を示す。同図には S-115-0, S-115-50, S-115-100 で計測された流速変動 (移動平均幅 25 s で平

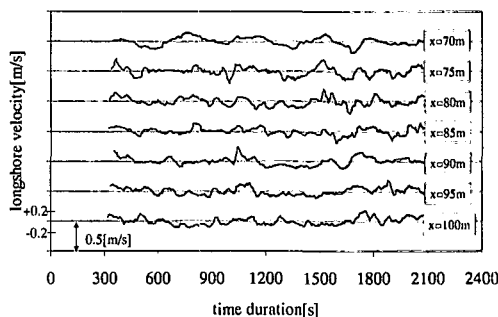


図-6 沿岸方向流速変動 ($y=25$ m) の岸沖分布変動成分を表示

滑化) もあわせて示した。先にも説明したように、画像から求めた値は、流速計で計測した値を上回っている。沿岸流速は平均値周りに変動しており、その中でも長周期 (数 100 s のオーダー) の変動が、流下方向に減衰しながら伝わっている状況が捉えられている (栗山ら, 2000)。

図-6 には砕波帯内の $y=25$ m 上の沿岸流速変動成分 (平均値からの変動) を移動平均 (平均時間: 約 25 s) した結果の岸沖分布を示す。先に説明した、長周期 (数 100 s のオーダー) の沿岸流速の変動は、おおむね砕波帯内で同規模かつ同位相で生じているようである。

(3) 長周期の沿岸流速変動に関する考察

前節に示したように、沿岸流速には長周期の変動が含まれていた。栗山ら (2000) は沿岸流に含まれていた長周期 (オーダー ~ 500 s) の変動が沿岸流の流下方向に伝播していたことを報告し、その発生原因を shear wave の特性と比較することにより考察しているが、明確な結論は得られていない。以下では、桟橋で記録された水理量とビデオ画像から読み取った情報の時間変動を示し、沿岸流に見られた長周期の変動について考える。

桟橋で計測された 2048 秒間の水位 η 、流速変動 (岸沖方向 u 、沿岸方向 v) を分離周波数 0.03 Hz の数値フィルタにより、波動成分 (η_w, u_w, v_w) と長周期成分 (η_L, u_L, v_L) に分離した。

図-7 に 2048 s 間の η_w, u_w, v_w の変動から求めた平均波向 (例えば、合田, 1981), η_w の rms 値、沿岸流速 v_L の平均値、ならびに桟橋に沿っての海底地形の形状を示

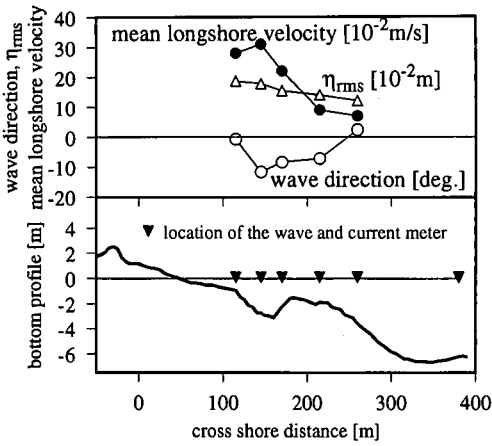


図-7 棧橋に沿っての平均波向(○), 平均沿岸方向流速(●), 水位変動強度(△), 水深の分布(実線)

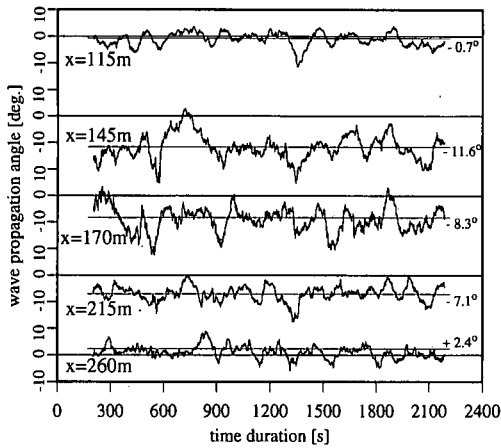


図-8 棧橋に沿っての平均波向の時間変動

す。

観測を行った時間帯では、一部の波が $x=170$ m 付近で砕波し、その後再生域を経て、 $x=100$ m 付近で最終的に砕波していた。これにより、 $40 < x < 170$ m の領域にかけて沿岸流が発達していたと考えられる。

平均的な波向は、 $x=260$ m 地点では棧橋にほぼ平行にであり、 $x=145$ m 地点までは浜に対する入射角を深め、その後 $x=115$ m 地点では再び浜にほぼ直角となっていた。この平均波向の岸沖変化を、沿岸方向に平行な等水深線分布をもつ海浜上の屈折現象で説明することは難しい。観測日の数日前に行われた深浅測量結果には、沿岸方向に非一様な水深分布があることが捉えられていたが、ここに見られた波向の岸沖変化を合理的に説明することはできなかった。また、沿岸流が屈折をもたらした可能性もあるが、波向が顕著に偏向した地点と沿岸流速が増大している地点が合致しない。

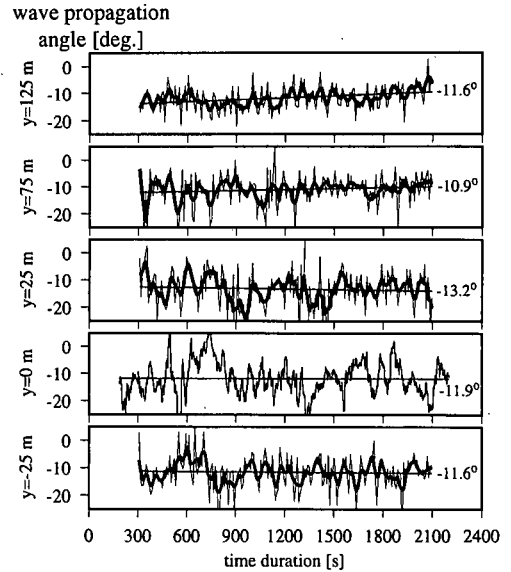


図-9 沿岸 ($x=145$ m) に沿っての波向の時間変動
 $y=-25, 25, 75, 125$ m : 画像データ. $y=0$ m : 流速計

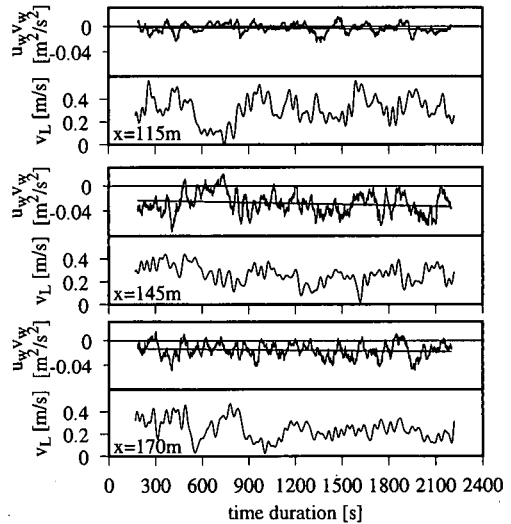


図-10 沿岸流速 v_L と 60 s 平均 $u_w v_w$ の変動

図-8 には 60 s 間の η_w , u_w , v_w のから求めた平均波向の時間変動を示す。各位置で平均波向は変動していた。特に $x=145, 170$ m での変動幅が大きく、直角入射に近い状況となる時間帯もあった。

図-9 には、ビデオ画像から読み取った $x=145$ m 上の $y=-25, 25, 75, 125$ m 地点の波向の時間変動を示す。ここでの波向は、画像中で確認された波峰線の傾きから定めた。波向の平均値は沿岸方向にほぼ一定であるが、変動は $-25 < y < 25$ m の領域で相対的に大きかった。

沿岸流を駆動する外力の一つは radiation stress S_{xy}

の x 方向勾配である。 S_{xy} の岸沖分布を考えるために $u_w v_w$ の変動を調べた。図-10には $u_w v_w$ を 60 s 間平均した量の時間変動と a_L の変動を示す ($x=115$ m, 145 m, 170 m 地点)。60 s 平均 $u_w v_w$ は、図-8に見られる波向と類似の特徴を持つ時間変動となった。

沖合い砕波地点 ($x=170$ m) の沿岸流速、最終砕波領域の縁端の $x=115$ m における沿岸流速の加減速は、60 s 平均 $u_w v_w$ ($\sim S_{xy}$) の変動、あるいは、平均波向の変動に同調しているように見える。沿岸流速の変動が外部的な要因によるものとすれば、波動場の変動が限られた領域と時間帯に生じ、これに沿岸方向流れが、限られた領域と時間帯にて応答したと見れる。

$115 \text{ m} < x < 170 \text{ m}$ の領域における S_{xy} の x 方向勾配の向きと大きさの概略は、計測点間の距離がやや大きいものの、S-145-0 と S-115-0, S-170-0 と S-145-0 で計測された 60 s 平均 $u_w v_w$ の差から伺える。時間平均的には、S-145-0 と S-115-0 で y の正方向に、S-170-0 と S-145-0 で y の負方向に radiation stress が作用していたことになる。このことから、沿岸方向に一樣な状況を想定して、棧橋に沿っての v_L の分布を説明することは難しい。先にも記したように、着目している領域では沿岸方向に非一樣な状況があったと考えられ、現時点でこれ以上の議論を進めることは難しい。

4. 結 語

砕波帯内外の流動状況を捉えた画像を解析し、沿岸方向の流速を推定する手法について検討した。画像計測により求めた砕波帯内の流速変動パターンは、流速計で計測された流速変動パターンと一致していた。長周期の沿岸流速の変動が沿岸方向に伝播する状況、その岸沖方向の分布などを明らかにした。長周期の沿岸流速の変動は、局所的な波向が変動する時間帯において発生していた。

謝辞：本研究の一部は日本学術振興会科学研究費、財団法人漁港漁村建設技術研究所研究助成金の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 岡安章夫・鈴木崇之・片山裕之 (2000): 斜降渦による底質浮遊と流体運動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 546-550.
- 栗山啓昭, 他 10 名 (2000): 浅海域における長周期水理現象に関する総合的現地観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 231-235.
- 合田良実 (1981): 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻, 第 3 号, pp. 53-92.
- 武若 聡・中村 崇・三崎尚一郎 (2000): 係留ビデオシステムを用いた砕波帯水理現象の観測, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 126-130.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988): VTR 画像の相関解析による砕波帯内部流速分布の推定, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 45-48.