

PIV 解析を用いた現地海浜流の計測システムの開発

有 川 太 郎*・鈴 木 高 二 朗**

1. はじめに

砕波帯内の流れの計測は、広範囲で面的な流れを捉えることは難しい。また、数値計算を用いた現象の把握も未だ困難な状況にある。一方、砕波帯内の海底地形変化に関しては、近年、ビデオ画像処理を用いたモニタリングにより、面的で長期的な観測が行われるようになってきている。Symonds ら (1997) は、ビデオ画像解析を用いて、沿岸流の計測を行っている。これは岸に平行な 1 測線の画像を時系列で並べることで、砕波後の泡の移動速度を求めようとするものである。また、武若ら(2000)は、係留気球を用いたビデオ画像解析と既存の接触式の流速計等との比較により、ビデオ画像を用いた沿岸流計測が非常に有用であることを示している。

しかし、Symonds らや武若らの方法では、ある 1 方向の線的な流れ成分しか追跡できず、さらに、岸沖方向の流れ（例えば、離岸流）については、波速成分と海浜流成分との分離が困難となるために、事実上計測ができない。

そこで本研究では、面的で精度の高い流速の計測方法の開発を目的として、近年、面的な流れ計測の一般的な手法の一つである PIV 解析を用いた海浜流計測システムの開発を行い、その妥当性を検討する。

2. PIV 海浜流計測システム

(1) システムのフロー

本システムのフローを図-1 に示す。詳細については次項以下で解説を行う。

(2) 座 標 変 換

図-2 のように高所からビデオを撮影すると、画像は斜めに撮影されるために、CRT 座標から物理座標に変換する必要が生じる。ここで、CRT 座標系を (X, Y) 、物理座標系を (x, y) とする (図-3)。

本研究では、高さ方向の情報は無視し、2 次射影補正式 (藤田・中島, 2000) を用いて、

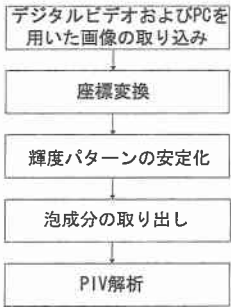


図-1 PIV 海浜流計測システムのフロー

$$X = \frac{A_1x + A_2y + A_3}{C_1x + C_2y + 1} \dots\dots\dots (1a)$$

$$Y = \frac{B_1x + B_2y + B_3}{C_1x + C_2y + 1} \dots\dots\dots (1b)$$

とする。変換係数 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2$ は両座標系における N 点の標定点座標を用いて最小自乗法により求める。物理領域を定め格子に区切り、各格子上的物理座標を CRT 座標に変換し、その CRT 座標での輝度値を求める。CRT 座標は整数で定義されているが、座標変換して求められる CRT 座標は整数ではないことが多い。そこで、CRT 座標上 (X_0, Y_0) の輝度値 $f(X_0, Y_0)$ は、

$$f(X_0, Y_0) = \sum_K \sum_L f(X_K, Y_L) C(X_K - X_0) C(Y_L - Y_0) \dots\dots\dots (2)$$

のように、周りの格子の輝度値より補間して求める (図-4(a))。ここに、 (X_K, Y_L) は (X_0, Y_0) の周囲の格子点座標、 $C(s)$ は、

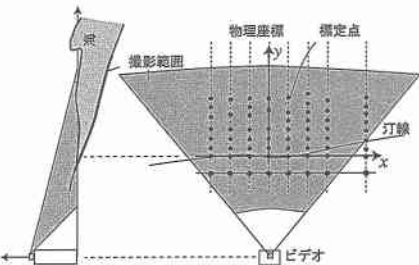


図-2 ビデオ撮影の概要

* 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
** 正会員 修(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部

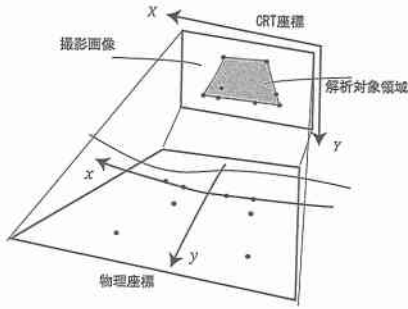


図-3 CRT座標と物理座標

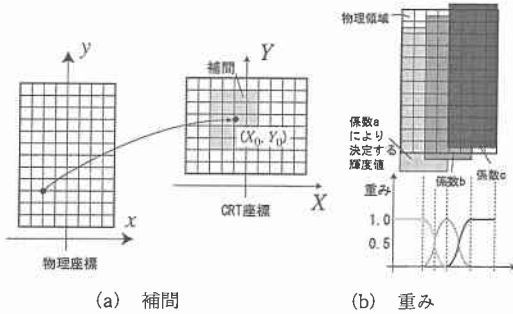


図-4 物理領域への変換

$$C(s) = \begin{cases} 1-2|s|^2+|s|^3 & , 0 \leq |s| < 1 \\ 4-8|s|+5|s|^2-|s|^3 & , 1 \leq |s| < 2 \cdots (3) \\ 0 & , 2 \leq |s| \end{cases}$$

とする。

このようにすると、物理座標で定められた各格子の輝度値が求められるが、同一の式を用いて画像全体を変換すると精度が悪くなるために、領域を分割し、その領域ごとに係数を求める。ただし、領域の境界のところでの連続性がなくなるため、図-4(b)のように3つの領域に分け、重なっている領域では、各領域の係数を用いて求められた輝度値に重みをつけて求めるものとする。重みは正弦関数を用いた。原画像(図-5)に黒い円を施し、変換後の違いを示したものが図-6である。これを見ると、図-6(a)で接続部において連続的でなかったものが、図-6(b)ではそれが修正されているのがわかる。

(3) 輝度パターンの安定化

海浜流を1.0 m/sとして考えると、ビデオは1秒間に30コマ撮影するので、1コマで約0.03 m移動することになる。したがって画像での1ピクセルあたりの物理的な距離がそれより大きい場合、その動きを追跡するためには、画像と画像の時間間隔 Δt を大きくしなければならない。しかし一方で、PIV解析は、濃淡パターンつまり輝度分布がほとんど変化しないことを前提とした解析であるので、 Δt を大きくすると泡の変形が大きくなってしまい動きの追跡が不可能となる。

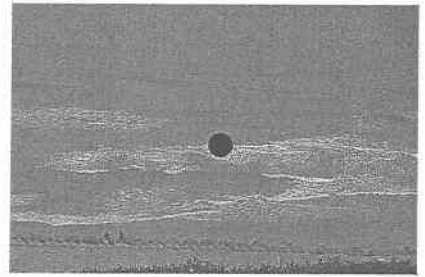
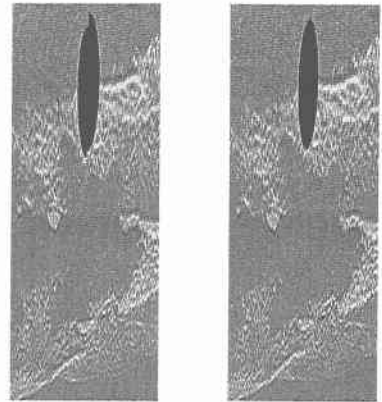


図-5 原画像



(a) 重みなし

(b) 重みあり

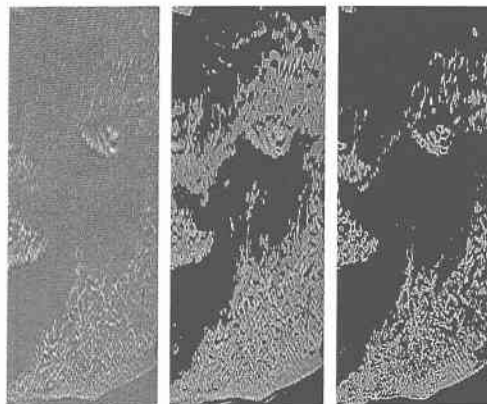
図-6 座標変換後

また、砕波することにより、砕波場所付近に泡を供給しているが、砕波そのものも泡を含んで波速程度で移動している。従って砕波と共に動く泡の速度は、海浜流などに比べて数倍程度になり、 Δt ごとの画像を用いた場合、その泡がPIV解析における探索領域に進入し、海浜流と共に動く泡の輝度パターンを乱す要因となる。そこで、 Δt 間の平均画像を用いることにより画像を平滑化し、輝度パターンの変化を少なくすることとした。 Δt の値に関しては4節で議論することとする。

(4) 海浜流と共に動く泡成分の取り出し

物理領域に変換された画像では、さまざまな情報が含まれている。波の谷では少し暗く、波の峰では明るくなる。PIVは画像の濃淡パターンの相関をとるために、今回のように海浜流と共に動く泡のみを追跡する場合は、必要のない情報となる。したがって、画像の輝度値に上限値、下限値を設け、それ以外の部分を黒くするという閾値処理を施す。

輝度値の上限値の設定の目的は、砕けた波の速度で進行する泡の除去、および波の峰からの強い乱反射による濃淡の除去である。砕けた波は泡が多く集まり、波の峰の強い乱反射同様、海面上でもっとも光る点となる。下限値の設定は波の谷の濃淡の除去のためである。図-7



(a) 処理無し (b) 50%-90% (c) 60%-80%

図-7 閾値による画像の違い

(a) は、モノクロ 256 階調の 2 節 (3) の平均処理を施したものである。ここでは、0.5 s の平均をとっている。今回の観測で輝度の最大値は 255 すなわち白であった。同図 (b) は、上限値をその 90%、下限値を 50% としたものである。同図 (c) は上限値を 80%、下限値を 60% としたものである。これらを見比べると同図 (c) が泡の形状をよくとらえていることがわかる。また上限値を 90% とすると、碎波の影響が大きく残った。さらに、上限下限の幅を 10% にして試したが、狭すぎるためにうまく濃淡パターンをとらえることができなかったために、本研究では、上限値を 255 の 80%、下限値を 60% とすることとした。

(5) PIV 解析

PIV 解析は市販のソフトを用いた。PIV 解析は、ある時刻の画像上の参照フレームの持つ輝度分布に近い輝度分布を次の時刻の画像上で探索し、もっとも相関の大きい場所を移動点と定義する (図-8)。したがって、1 ピクセルあたりの物理座標での長さを l とすると、速度分解能は

$$V_{\min} = \frac{l}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となるが、藤田・河村 (1994) に従い、そうして決定した格子が持つ相関値を、局所的に X 軸、 Y 軸方向に 2 次元関数分布していると仮定し、その最大値の場所を移動点と定義する。それに伴い、速度分解能は、

$$V_{\min} \approx 0.2 V_{\max} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。この様にして移動点を求め各格子での速度を求める。決定すべきパラメタは参照フレームの大きさと探索領域であるが、参照フレームの大きさは泡の塊の大きさによるが、泡の塊の大きさはおおよそ 2 m~3 m であると見ることができたために、今回は 2.4 m 四方とした。探索領域は泡が移動する距離の最大値が含まれるよ

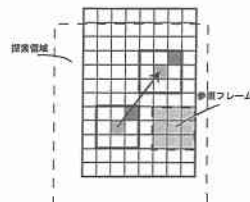


図-8 PIV 解析の概念

うに設定すればよいが、大きすぎると別の泡の塊を選ぶおそれがある。そこで、探索領域は着目している格子を中心として ± 2 m 四方とした。試行錯誤の結果、この大きさがもっともよい相関をとった。

3. 現地計測および概況

(1) 計測場所

現地における計測は、茨城県日立市東多賀町にある河原子海岸を対象にした。近くのビルの屋上から海岸をビデオにより録画する。図-9 は河原子海岸周辺の様子とビデオの位置関係を示すものである。図-10 は、標定点として用いるために測量した点を示す。図の中の数値は距離を示す。また、表-1, 2 は測量点の座標値である。測量は海岸の中で反射板を持ち、レーザー測距器を使用して、水平距離等を測定した。ビデオで標定点を決定するときには、波の峰が通過するときでないことに注意を払った。 $x=0$ を通る y 軸は図-10 に示すところに設定し、ビデオはその軸の延長線上に設置した。測線は x 方向にはほぼ 5 m 間隔でとった。 y 方向には汀線付近からほぼ 10 m ピッチで測量したが、55 m を過ぎたあたりから波の作用が激しく安定に測量するのが難しくなったために、適当な間隔とした。また、図-11 に深浅測量した結果を示す。ビデオ画像は、720×480 画素で 30 コマ/s で取り込んだ。

(2) 流れの概況

鈴木ら (2000) に従い、ビデオで撮影した 5 分間の画像を 1 秒間隔で取り出し、その後、各画素について輝度値の平均処理をしたものを図-12 に示す。白黒画像では水深の浅い部分が白く、深い部分は碎波しにくくなるた



図-9 現地観測場所 (茨城県, 河原子海岸)

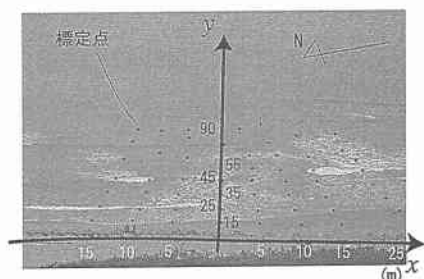


図-10 測量した点の位置

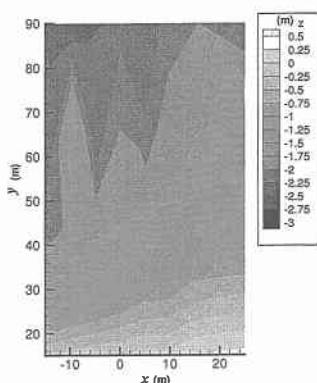


図-11 深浅測量結果



図-12 5分間の平均画像

めに黒くなる。また、その黒い部分がリップチャネルとなり、そこに沖向きの流れが発生する。図でも沖側にその部分があり、後述するが浮き輪を浮遊させると沖に向かって流れていく様子が確認できた。図-13は全体的な概況を模式的に示したものである (Komar, 1998)。図に示すように、その場所ではカスプが発達しており、岸近くでは矢印のような沿岸方向流れが生じていることを確認した。

4. 本システムの適用と妥当性の検討

解析フローに従い、流れを解析する。

(1) 座標変換

物理領域の格子間隔は x 方向, y 方向ともに 0.079 m/dot とした。これは、もっとも岸側における CRT 領域の情報をできるだけ有用に使用するために、そこでの CRT

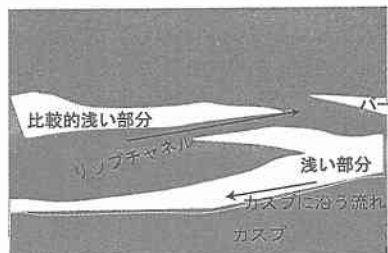


図-13 流れの概況

座標の格子間隔を採用した。図-14は座標変換を施したものである。画像サイズは横 378 dot, 縦 997 dot であり、物理値に直すと、横 29.93 m, 縦 78.89 m となっている。黒い菱形をしたものが図-10中の標定点である。見やすいように原画像上の標定点の大きさを一定としたために遠方に行くに従い、菱形が大きくなっているのがわかる。図-14と表-1, 2を見比べると良い精度で座標変換していることがわかる。

(2) PIV 解析の適用

Δt を 1/6 s, 1/3 s, 1/2 s, および 1 s として、PIV 解析を行った。そして、30 秒間の平均速度をとったものが図-15である。背景は 5 分間の平均画像となっている。また、黒円で示しているのが浮き輪の位置である。浮き輪を浮遊させると図-15のように移動し、その速度は平均すると約 0.5 m/s であった。各 Δt における、10 s 後の浮き輪の場所での平均流速の x 方向および y 方向の合成値は、 $\Delta t=1/6$ s のとき 1.14 m/s, $\Delta t=1/3$ s のとき 0.61 m/s, $\Delta t=1/2$ s のとき 0.55 m/s, そして $\Delta t=1$ s のとき 0.36 m/s であった。これより言えることは、 Δt を小さくしたときは速度分解能が落ち、そのために比較的大きな値が得られることがわかる。

さらに、これはすべての Δt の場合について言えるこ

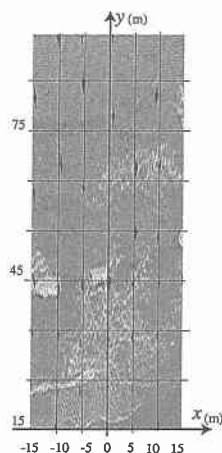


図-14 物理座標

表-1 標定点の座標 1 (m)

x	y	x	y	x	y	x	y
0.0	15.29	-5.0	14.87	-10.0	14.95	-15.0	14.90
0.0	24.82	-5.0	25.01	-10.0	25.08	-15.09	25.01
0.06	34.94	-5.0	35.20	-9.88	35.32	-15.06	35.19
0.0	45.07	-4.84	45.31	-10.0	43.51	-14.84	44.52
0.14	78.10	-4.77	64.56	-9.53	67.73	-15.11	60.22
0.0	94.18	-4.71	81.71	-9.52	91.81	-15.0	78.22
		-4.84	93.39			-15.0	92.73

表-2 標定点の座標 2 (m)

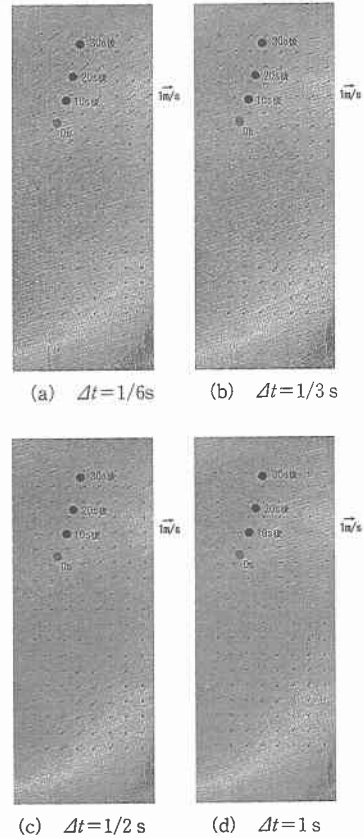
x	y	x	y	x	y	x	y
5.0	14.99	10.03	14.99	15.0	15.11		
5.0	24.89	9.69	25.20	15.09	25.29	25.04	24.92
4.88	34.99	9.94	35.29	15.06	35.29	25.0	34.86
5.0	44.77	10.16	45.30	15.07	45.05	25.0	45.21
5.19	54.86	10.0	55.87	15.19	54.95	25.0	55.04
5.23	66.52	10.12	68.31	15.35	67.59	25.22	64.80
4.83	95.06	9.58	81.14	15.32	90.48	24.87	74.72
		10.0	102.09			25.49	94.24

とだが、全体的には浮き輪の移動ベクトルの方がより y 軸に平行となっていた。すなわちこれは、沿岸方向の流速が実際より小さくでているということとなるが、これは碎波の影響が完全に除去しきれていないことが原因であると思われる。ただし、全体としては、カスプに沿う流れや、リップチャネルから流出する流れがうまく表現されており、本システムにより得られた計測結果が沿岸の海浜流の計測に対して妥当であることがわかる。

5. 結 論

高所から撮影されたビデオ画像から PIV 解析を基にした本システムを用いて、これまで困難であった海浜流の面的な把握が可能であることを確認した。そこから得られた流況は、ビデオ平均画像等を用いた流況とよく一致し、流速についてもある程度定量的に得られている。ただし、沿岸方向の碎波成分が完全に除去できていないことが今後の課題となる。

本研究を行うにあたり、高橋重雄海洋・水工部長ならびに下迫健一郎耐波研究室室長に貴重なご意見をいただいた。また黒田豊和研究員には現地計測を手伝っていただいた。ここに深く感謝の意を表する。

図-15 Δt による平均流速の違い

参 考 文 献

- 鈴木高二朗・高橋重雄・近藤充隆・小林雅彦・岩上淳一 (2000): ビデオ画像処理の離岸流事故防止への適用性に関する予備的検討, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 1256-1260.
- 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碎波帯水理現象の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 126-130.
- 藤田一郎・河村三郎 (1994): ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 733-738.
- 藤田一郎・中島丈晴 (2000): 実河川流計測における LSPIV の汎用化と水制間流れへの適用, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 443-448.
- Symonds, G., R. A. Holman, and B. Buruno (1997): Rip Currents, Coastal Dynamics '97, pp. 584-593.
- Komar, P. D. (1998): Beach processes and sedimentation, Second edition, Prentice Hall, p. 544.