

風波画像を用いた PIV 解析におけるダイナミックレンジの最適条件の検討

岩手大学 学生会員 ○下屋敷信, 正会員 小笠原敏記, 堺茂樹

1. はじめに

一般に、風からのエネルギー供給によって波が発達し、平衡状態に達すると白波を伴った砕波が発生して、海面は乱れを伴った気液混合境界層となる。その境界層内の正確な流速を得ることは、高潮の予測や波浪推算の精度向上において非常に重要である。現地観測の場合、気象状況に依存した不確定要素が多いため、観測データの整合性が求められる。一方、風洞水槽を用いた実験の場合、戻り流れの扱いに難点があるものの、一定条件下での風波海面下の現象を断面的に捕らえることができる。その流速の計測には、非接触型の PIV (Particle Image Velocimetry) 手法が主流であるが、気液境界混合層およびその直下の高精度な流速値を得るためには、風波画像に対する適切なダイナミックレンジの設定が要求される。

そこで本研究では、弱風から強風までの風波画像情報を基に、PIV 手法を用いた風波下の流速分布の最適な解析条件を検討する。特に、ダイナミックレンジの設定が正確な流速分布の取得を支配することから、風速条件に適した最適条件を明確にする。

2. PIV 手法の概要

PIV 解析には、局所的な輝度値パターンの類似度を相互相関で評価する直接相互相関法を用いる (PIV ハンドブック参照)。その測定原理の概要は次の通りである。最初に、微小時間 Δt だけ異なる 2 時刻の画像について、第 1 画像中の検査領域の輝度値パターンが、第 2 画像中のどの位置に移動したのかを次式の相互相関係数 R_{fg} を用いて評価する。

$$R_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\} \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{f(X_i, Y_j) - f_m\}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{g(X_i + \Delta X, Y_j + \Delta Y) - g_m\}^2}} \quad (1)$$

ここで、 f_m 、 g_m は第 1、2 画像における $N \times N$ の検査領域内の輝度値パターン f 、 g の平均値である。本研究では、第 1 画像の検査領域 N_f を 33pixel, 第 2 画像

の探查領域 N_g を 55, 65 および 99 の 3 通りとし、どの程度の計測精度が得られるのかを検討した。

PIV 解析に用いる風波画像は、二重床風洞水槽 ($H1.0\text{m} \times B0.4\text{m} \times L15.4\text{m}$; 岐阜大学所有, 上段水路水深 $h=30\text{cm}$) 内で風速 $U_f=6.7, 10.4$ および 15.1m/s の 3 通りの条件下の基で、高速度ビデオカメラ (撮影速度 60fps; $U_f=6.7, 10.4\text{m/s}$, 125fps; $U_f=15.1\text{m/s}$, 空間解像度 $480 \times 480\text{pixel}$) より撮影された定常状態のものである (小笠原ら, 2002)。各風速の撮影時間は 34.1 秒間であるが、本解析では有義波周期 1 周期分に相当する時間とした。

3. ダイナミックレンジの比較検討

2 時刻間における輝度値パターンの誤対応は、大きな誤差を含んだ速度ベクトルを算出することになるため、誤ベクトルの判定条件を次のように設定した。

- ① 水面の流速が風速の 3%程度と言われることから、風速の 5%以上の速度ベクトル
- ② 流体運動の連続性から検査領域の周り 8 近傍の平均速度ベクトルの 2 倍以上の速度ベクトル

図-1 は、上述の誤ベクトル判定条件の有無による風速 $U_f=6.7\text{m/s}$ および 15.1m/s での速度ベクトル分布を比較したものである。なお、探查領域 $N_g=55$ の解析結果である。非砕波条件の $U_f=6.7\text{m/s}$ では、水面近傍に見られる風向きとは逆向きの速度ベクトルが誤ベクトル判定条件によって除去される。一方、白波砕波条件の $U_f=15.1\text{m/s}$ では、処理される誤ベクトル (図中の丸で囲まれた箇所) もあるが、白波直下の異常ベクトルが適切に除去されないことがわかる。

図-2 は、ダイナミックレンジに相当する探查領域 N_g を 3 通りに変化させたときの誤ベクトルの割合を比較したものである。ただし、図-1 で見られる気流側の誤ベクトルは含まない。探查領域が大きくなるに連れて、誤ベクトルの発生する割合が高くなることがわかる。次に、風速 $U_f=10.4\text{m/s}$ および 15.1m/s における各探查領域 N_g での平均水平流速 u の鉛直分

風波, PIV, ダイナミックレンジ, 直接相互相関法

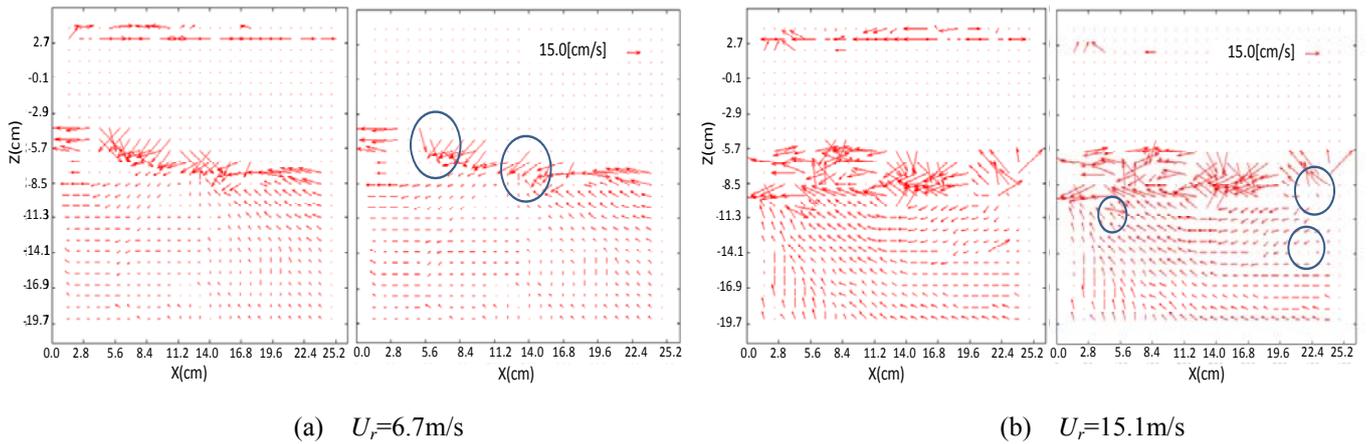


図-1 2時刻間の元画像および誤ベクトル処理条件なし(左)と有り(右)の場合における速度ベクトル分布の比較

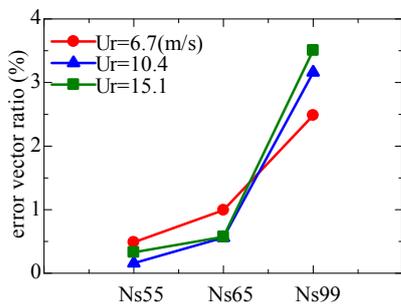


図-2 各ダイナミックレンジにおける誤ベクトルの割合

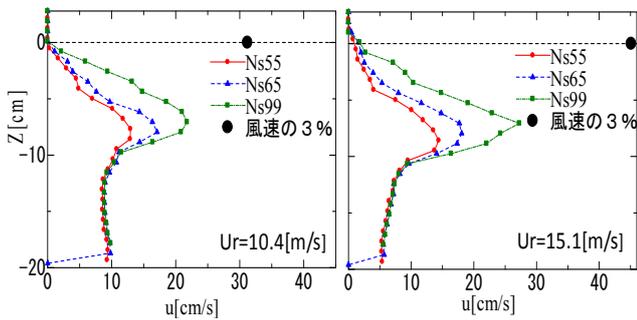
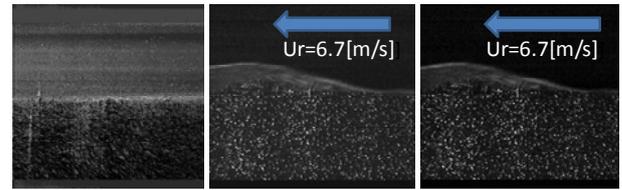
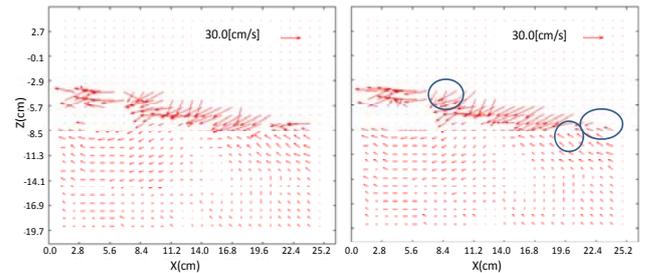


図-3 風速 $U_r=10.4$ および 15.1 m/s における平均水平流速の鉛直分布

布を図-3に示す。なお、静水面 ($z=0$) 上向きを正とし、 u の値は各鉛直位置 z における水平方向の速度ベクトルの平均値である。また、図中の二重丸は風速の3%の値を表す。水面から10cm以深では、 u の値に差は見られない。それ以浅になると、 N_s が大きくなるに連れて u の値も増大する。さらに、 N_s に関わらず水面近傍の速度は小さくなるのがわかる。以上より、誤ベクトルの発生を抑えるためには、風速に依らず検査領域の1.5倍程度の探索領域を適用すれば良いが、速度が過小評価されることがわかる。また、元画像からも確認できるが、強風下ではトレーサが伸びており、弱風下でも海面下にトレーサがない層が存在するため、速度が適切に算出できな



(a) 背景画像 (b) 元画像 (c) 背景除去画像



(d) 背景除去なし (e) 背景除去あり

図-4 背景除去の有無による速度ベクトル分布

いものと推察される。これらの問題は、画像の取得の工夫および解析手法の改善が必要と言える。

4. 背景除去の適用

ここでは、150枚の画像から各画素の最小輝度値を求めて作成した背景画像(図-4(a))を用いて、元画像への背景除去の有無によるベクトル分布の比較を図-4(d)および(e)に示す。輝度値パターンが低減されるため、検出速度ベクトルの精度向上に必要な前処理の一手法と言える。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金若手研究(B)による成果であることをここに付記する。

参考文献

- PIV ハンドブック, 可視化情報学会編, 森北出版, pp.69-71.
- 小笠原敏記・安田孝志・武田真典・大澤輝夫 (2002), 砕波を伴う強風下の吹送流の流速の鉛直分布と全流量について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.321-325.