

PIV 画像解析手法を用いた浮遊漂砂量計測

田中正博* ・磯部雅彦**・渡辺 晃***
岡本孝司****・植村勇仁*****

1. はじめに

現地海域の粒径よりも大きい粒径砂を用いた養浜工が、海岸侵食対策の一つとして注目されている中、分級機構や移動形態を反映させた混合粒径砂の漂砂量則を構築する必要がある。現地の海域においては、細砂は通常シートフロー状態で移動しており(清水, 1996), このうち岸沖方向の正味移動は正負前後非対称流によって引き起こされる。シートフロー状態における1周期間の砂移動としては、振動流速によって運ばれる高濃度の掃流砂のほかに、沖向き流速反転時に巻き上がった浮遊砂が沖向き流れに乗じて運ばれる寄与がある(渡辺ら, 1999)。従って、岸向きの掃流砂量と沖向きに運ばれる浮遊砂量の差し引きが、ネットの岸沖漂砂量ということになる。混合粒径砂の場合には、粗砂のアーマリング効果により浮遊漂砂がある程度抑制されることなどが、事前に行われた移動形態観察実験で確認されている(渡辺ら, 1999)。

本研究では、シートフロー条件下での1周期間の浮遊漂砂量を求めるために、非対称振動流装置を用いて現地で起こりうる程度の流速を発生させ、そのとき生ずる浮遊砂の移動流速をPIV法(Particle Image Velocimetry: 粒子画像速度計測法)を用いて計測した。さらにこれを輝度から求めた浮遊砂濃度と組み合わせることにより、濃度×速度として時々刻々の浮遊漂砂量(断面通過量)を求めた。ここでPIV法とは、2時刻の画像間での局所的な濃度パターンの相互相関を取り、相互相関係数が最大となる位置での移動量より速度ベクトルを求める手法である。

2. 実験内容

実験に用いた非対称振動流装置(流水断面: 深さ24 cm, 奥行き8 cm), ハイスピードビデオカメラ(Photolon社製 FASTCAM-Rabbit-2) および照明(ハロゲンラ

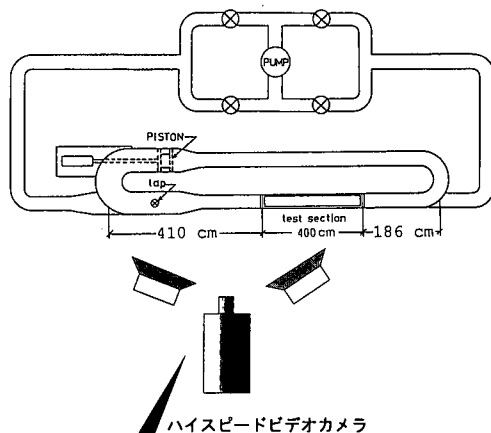


図-1 非対称振動流装置と機器配置

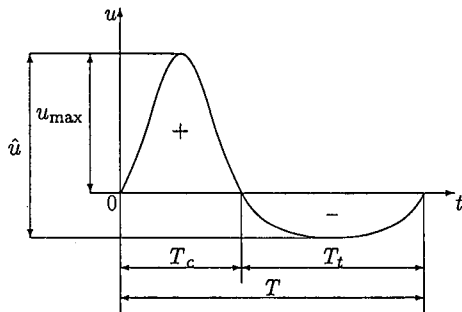


図-2 流速波形

ンプ2台)の配置を図-1に示す。底質として用いた材料砂は珪砂で、粗砂0.8 mm, 細砂0.2 mm(ともに中央粒径)を使用し、細砂混合率を30%, 70%, 100%と変化させた。今回は浮遊砂のみの計測のため、浮遊しにくい粗砂は水槽背面と同じ黒に染色している。流速波形は図-2に示す通り一次のクノイド波相当(正負非対称性0.6)で、周期は3 s, 流速最大値1.6 m/sである。

3. 画像解析手法

(1) 画像取得

ハイスピードビデオカメラで撮影した画像は白黒で、走査線読み出し時の奇数・偶数フレームに時間ずれのな

* 正会員 修(工) 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻
** フェロー 工 博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
*** 正会員 工 博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
**** 工 博 東京大学助教授 原子力工学研究施設
***** 正会員 修(工) 清水建設(株)

いノンインターレース画像である。画像取得間隔は、最大流速時のPIV計測可能範囲を考慮し、1/400sとした。シャッタースピードは1/10,000sである。データ取得時間は、内蔵メモリを最大使用して約5.4s(>周期3s)間である。ハイスピードビデオカメラで撮影した画像データは、アナログ信号としてデジタルビデオ(SONY社製RX-900)に取り込んだ。照明はハロゲンランプ2台を背景の輝度が一樣になるように配置し、水槽の側面から照射した(図-1参照)。

デジタルビデオテープから解析用画像をPCにアップロードする際には、1枚の画像(640×480画素)を(640×240)×2に分割し、奇数・偶数フレームに同じデータを割り当てた。1画素の大きさについては、今回は浮遊しない粗砂をマスクングするため、粗砂粒径0.8mmよりも小さい0.36mm(28pixelで1cm)とした。これは細砂粒径の約2倍であり、レンズの回折による像ぼけの影響も無視できる。

ここで注意すべき点は、得られた画像は壁面近傍を撮影したものであるということである。壁面の影響が懸念されることから、実験中の流速分布ならびに実験後の地形変化を調べ、奥行き方向の濃度の様性を随時確認した。ハロゲン光の配置に際しては、輝度から濃度への換算が可能なることを適宜確認した(背景が明るすぎると低濃度を認識できない)。

(2) PIV手法の概要

今回用いたPIVの原理は、浮遊砂の存在による濃淡(輝度)パターンが2枚の画像の撮影時間間隔の間ではほとんど変形しないことを利用して、濃淡パターンの移動速度を求めるものである。本研究では画像解析に2種類の手法を用いた。主に次に示すa)の輝度差累積法を用いたが、b)の相互相関法でも解析を行い、両者の比較を行った。

a) 輝度差累積法：1時刻目および2時刻目の画像をそれぞれ $f(i, j)$, $g(i, j)$ の2次元マトリックスと考える。微小領域(A)内における、画像輝度差の絶対値の累積 $D_{f_g}(k, l)$ を式(1)で計算し、これが最小値を与える点 (k_m, l_m) に濃淡パターンが移動したとする方法である。累積計算途上において、累積値が非常に大きくなる点は明らかに移動候補点ではないと考え、計算を途中で省略するという逐次棄却法を用いることで計算の高速化を図っている(図-3参照)。

$$D_{f_g}(k, l) = \frac{1}{N_A} \sum_A |f_{(i+k, j+l)} - g_{(i, j)}| \dots \dots \dots (1)$$

b) 相互相関法：2時刻の画像同士の相互相関係数 R_{f_g} を式(2)で計算し、その相関係数が最大となる点を移動候補と考える手法である。

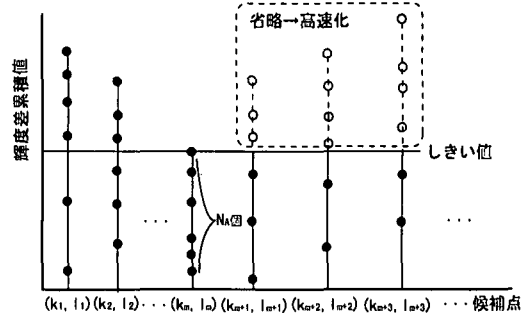


図-3 輝度差累積法の考え方

$$R_{f_g}(k, l) = \frac{\sum_A (f_{(i+k, j+l)} - \bar{f})(g_{(i, j)} - \bar{g})}{(\sum_A (f_{(i+k, j+l)} - \bar{f})^2 \cdot \sum_A (g_{(i, j)} - \bar{g})^2)^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 \bar{f} , \bar{g} は領域A内の平均値である。相互相関値は各画素(pixel)単位で算出される。そこで、相互相関係数の最大値を与える点の近傍における相互相関係数をガウス分布で近似し、その最大値を与える点を求めることにより、解析精度をサブピクセル精度に向上した。

4. 画像解析結果と考察

主に浮遊砂の漂砂現象について考察を加えるが、画像解析手法についても適宜ふれることとする。

PIV計測の測点間距離は、画像の性質に強く依存する。ここでは、底面より5mm間隔で流速ベクトルを算出した。なお、得られるベクトルは、画像解析対象領域(A)の平均的な代表流速と考えられる。この領域(A)の大きさを小さくすると得られるベクトルの空間解像度が良くなるが過誤ベクトルも増加する。本研究では、4~5mm程度の領域を対象領域とした。図-4(a), (b), (c)は、画像中の照明むらが特に少ない、ある測線上の底面から0.5cm, 1cm, 1.5cmにおける水平流速の計測結果である。ここでは、振幅と位相を変化させて入力波形のクノイド規則波との相関をとった。その結果、底面から0.5cm, 1.0cm, 1.5cmと離れるにつれて、振幅は入力波形の0.6倍, 0.8倍, 0.9倍と1に近づき、位相の進みが小さくなるといった境界層理論と適合することがわかった。ここで、流速冲向き反転時(1.5s付近)を除いてPIV流速値に誤差(過誤ベクトル)が見られるが、この理由として、底面から離れるにつれて、掃流砂および浮遊砂ともに少量になること並びにピクセル単位の精度での追跡では不十分で、サブピクセル単位の精度が要求されることが挙げられる。流速図中に記載のクノイド波形と計測値を比べると、どの図にも共通して、流速冲向き反転時(図中1.5s付近)で計測値の方がより急に岸向き流速が減少している。これには反転時の渦の影響が大きく関

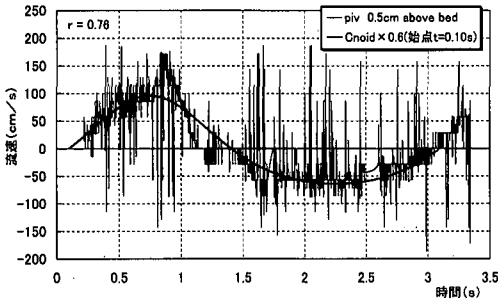


図-4(a) PIV 流速と入力流速 (細砂 70%, 底面上 0.5 cm)

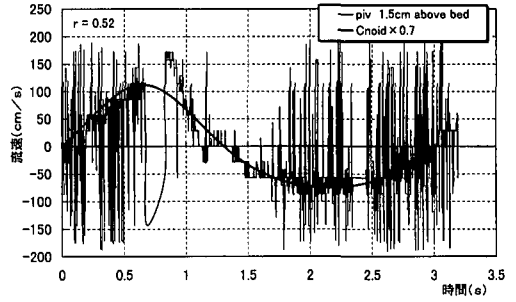


図-5(a) PIV 流速と入力流速 (細砂 30%, 底面上 1.5 cm)

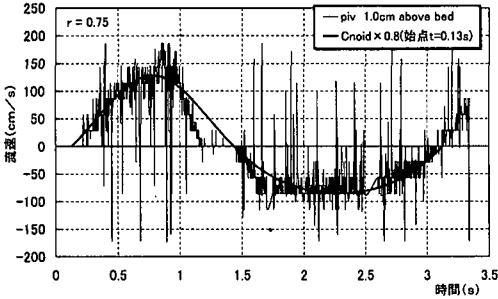


図-4(b) PIV 流速と入力流速 (細砂 70%, 底面上 1.0 cm)

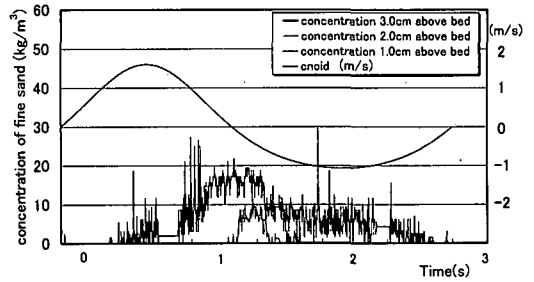


図-5(b) 浮遊砂濃度の1周期変化 (細砂 30%)

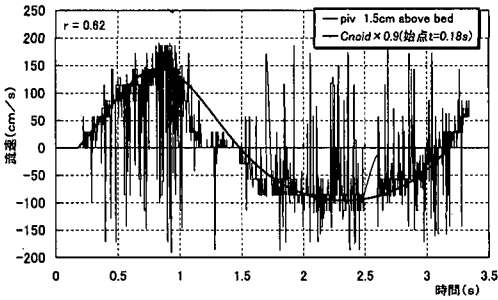


図-4(c) PIV 流速と入力流速 (細砂 70%, 底面上 1.5 cm)

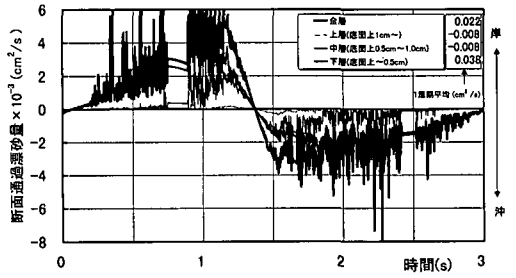


図-5(c) 断面通過細砂漂砂量の1周期変化 (細砂 30%)

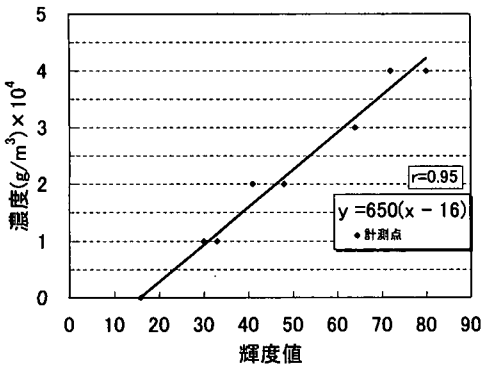


図-8 キャリブレーション結果

わっていると考えられる。鉛直流速も計測すればもっと明瞭にこのプロセスを解釈できたであろう。

図-5(a), 6(a) および 7(a) は、それぞれ細砂混合率を 30%, 70% および 100% と変化させた場合の PIV 流速である。底面上 1.5 cm では砂は浮遊状態であることが多いため、これにより浮遊砂の存在の有無がわかる。3枚の図全てにおいて流速沖向き反転時には誤差が少なく計測されており、PIV 法により流速を計測する場合には、ある程度の濃度をもつトレーサの存在が必要である。

次に、画像解析ソフト (Image Hyper 2) を用いてこの測線上の輝度値の鉛直分布を求めた。また同じ照明条件で 5 段階の浮遊砂濃度 ($y = 1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^5$ [g/m³]) についてキャリブレーションを実施し、画像輝度値 (x) との関係を図-8 に示すように、 $y = 650(x - 16)$ で

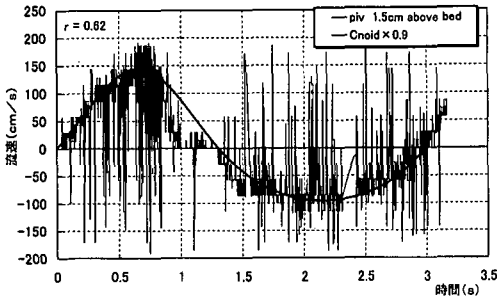


図-6(a) PIV 流速と入力流速(細砂 70%, 底面上 1.5 cm)

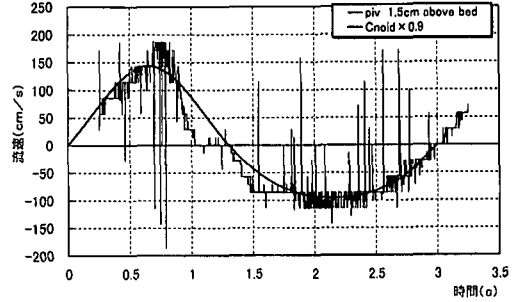


図-7(a) PIV 流速と入力流速(細砂 100%, 底面上 1.5 cm)

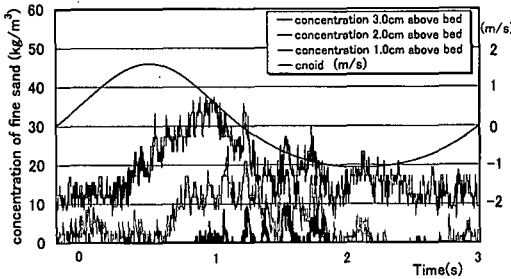


図-6(b) 浮遊砂濃度の 1 周期変化 (細砂 70%)

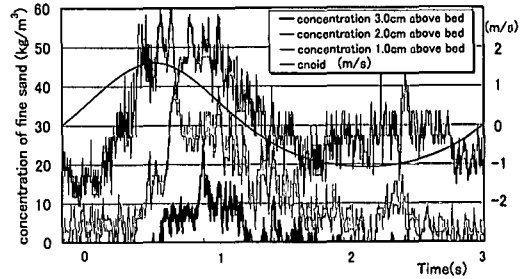


図-7(b) 浮遊砂濃度の 1 周期変化 (細砂 100%)

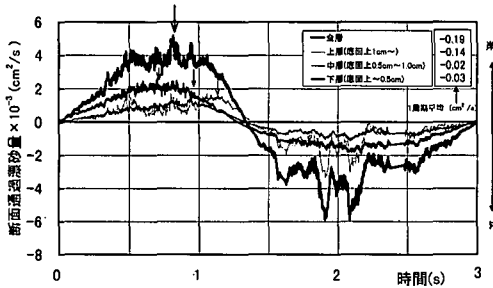


図-6(c) 断面通過細砂漂砂量の 1 周期変化 (細砂 70%)

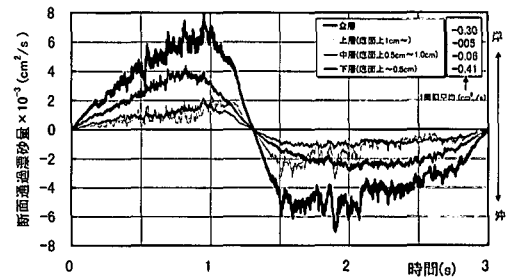


図-7(c) 断面通過細砂漂砂量の 1 周期変化 (細砂 100%)

直線近似(相関係数 0.95)することとした。5 段階の浮遊砂濃度 ($1.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$) についてキャリブレーションを実施し、 $y = 650(x - 16)$ で直線近似(相関係数 0.98)することとした。図-5(b), 図-6(b)および7(b)は、それぞれ混合率を 30%, 70%および 100%と変化した場合の浮遊砂濃度の 1 周期中の動きである。細砂混合率が大きくなると、より高いところまで浮遊砂が存在し、浮遊砂濃度のピーク値は底面付近から先に現れることから、浮遊による砂供給であることがわかる。また、砂の供給源に近い高さ(底面上 1.0 cm)でこれらの図を比較すると、粗砂の割合が増すほど浮遊砂濃度の立ち上がりが遅れ、濃度の最大値が小さくなっている。この濃度の最大値は、流速位相と大きく関わっていると思われる。さらに浮遊砂が上方に拡散し最高点まで到達するのが、

混合率によらず、流速沖向き反転時直後になっていることも興味深い。

ある断面上の通過浮遊砂量の算定に際しては、本来は PIV 法により求められた水平流速値(5 mm 間隔)を深さ毎に補間し、濃度の鉛直分布を掛け合わせることで、断面通過浮遊砂量とすべきであるが、輝度差累積法による今回の流速推定結果ではノイズの処理が難しかった。これまでの結果から入力波形と大きさ、位相に違いがあるものの、波形そのものは十分近似しうと思われることから、今回は入力波形(ただし、境界層内での振幅の減少および位相差を考慮)で代替させることとした。

図-5(c), 6(c)および7(c)は、それぞれ混合率を 30%, 70%および 100%と変化した場合の断面通過浮遊砂量の 1 周期中の動きである。3 つの図を比較すると、細砂

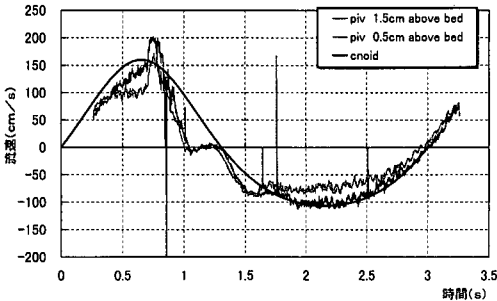


図-9 相互相関法による PIV 流速と入力流速 (細砂 100%)

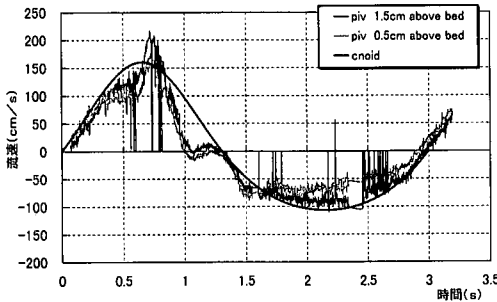


図-10 相互相関法による PIV 流速と入力流速 (細砂 70%)

30%の図-5(c)では大きな動きがあるものの、全体の傾向は同様である。図-6(c) および 7(c) では、断面通過量波形には底面に近いところから先にピークが現れるという特徴もよく出ている。

図中の凡例の脇に 1 周期中の平均通過浮遊砂量を掲載した。細砂含有量が多いほど冲向き通過量(負)が大きくなっている。細砂混合率 70% の場合、断面通過浮遊砂量の 1 周期の平均(全層)は冲向きに $0.19(\text{cm}^2/\text{s})$ で、上層(底面上 1 cm 以上)のそれとほぼ一致する。この場合には浮遊砂がネット漂砂量を左右すると言える。一方、細砂混合率 30% の場合(図-5(c))は、1 周期で見た平均漂砂量(全層)は岸向きに $0.022(\text{cm}^2/\text{s})$ となり底層(底面上 0.5 cm 以下)のそれとほぼ一致する。この場合、浮遊砂は微少で、ネットの細砂漂砂量には寄与しない。以上より、細砂混合率が低い場合には、浮遊砂が抑制される効果を考慮する必要があると思われる。また、図-5(c)、6(c) とともに、グロスの通過量に比べて平均漂砂量は 1 オーダー小さくなっていることがわかる。細砂 70% の場合で実施した漂砂量測定結果(約 100 周期分)では、ネットの細砂漂砂量は冲向きに $0.162(\text{cm}^2/\text{s})$ であったのに対し、図-6(c) では $0.30(\text{cm}^2/\text{s})$ と良く整合したことから、画像解析は漂砂量測定に有効な手段であると思われる。

特に、画像計測においては、時系列の変化を捉えることが可能であり従来の手法に比して、大量の情報を提供

することができる。

最後に、PIV 計測の原理にかかわる輝度差累積法と相互相関法との比較検討について述べる。図-9 および図-10 はそれぞれ均一砂と混合砂(細砂 70%) の場合である。相互相関法においては、移動量のサブピクセル精度を算出しているため、より精度の高い流速変動が得られている。やはり混合砂になると、一様性がほとんど期待できないため、PIV の誤差は消えにくい。しかし図-9 の均一砂の場合には、図-7(a) と比べても相互相関法によりある程度精度が向上していることがわかる。しかし依然として消えない誤差が多少残ったことから、さらに精度向上を目指そうと考えている。

5. おわりに

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ・約 100 周期分の波を作用させた前後での、ある断面の左右の砂量変化を直接測定し求められたネットの細砂漂砂量は画像解析結果と良く整合したことから、今後も画像解析は有効な手段として利用できると考えられる。画像解析では外力(波形流速)と漂砂量を時々刻々関係づけられる大きな利点がある。
- ・PIV で流速を測る場合のパターン追跡法としては、サブピクセルまで考慮できる相互相関法を用いるのがよいと思われる。輝度差累積法では過誤ベクトルが多く出る恐れがある。

PIV 手法に関する今後の課題を以下に列挙する。

- ・今回は流れの様子から 2 次元水路の奥行き方向は一樣であると仮定したが、流れおよび砂移動の 2 次元性をできるだけ保てるよう工夫する必要がある。
- ・PIV 計測の精度を高めるために、入力波形流速と PIV 流速の同期を図る。
- ・実海域を想定して 2 種類以上の粒径砂を混合した場合、小粒径砂が大粒径砂の背後に隠れてしまうことが予想され、濃度のキャリブレーション、PIV 測定に支障を来すおそれがある。1 画素の大きさと砂粒径の関係を適切に設定する必要がある。
- ・鉛直流速についても検討を加えることにより、浮遊の過程や渦の挙動をさらに明確にできよう。

参考文献

- 清水琢三 (1996): 海浜変形シミュレーション, 水工学に関する夏期研修会, pp. B-5-1-26.
- 渡辺 晃・磯部雅彦・Dibajnia, Mohammad・田中正博・植村勇仁 (1999): 非対称振動流作用下における混合粒径砂の移動機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 521-525. (社)可視化情報学会: PIV の要点, 可視化情報学会講習会テキスト.
- (財)画像情報教育振興協会: Image Processing 画像処理標準テキストブック.