

Mass-Consistent モデルの画像解析への適用と その解析精度に関する研究

山田 文彦*・滝川 清**・柿木 哲哉***・白木原圭太***

1. 序 論

波から流れへと運動形態が移行する砕波変形機構の解明にあたっては、自由表面の位置や内部流速等の時間・空間分布を正確に把握する必要がある。流速の測定に關して、レーザー流速計は高精度を有するものの、空間分布を得るためには、点計測であるために、多数回の造波を繰り返しながら計測を行う必要があり、多大な労力と砕波変形の再現性には問題が残る。

これに対して、流れの可視化手法（画像解析）は多点同時計測が可能のため、流速の空間分布が容易に得られるうえ、自由表面の形状も同時に計測でき、非常に有効な手法である。しかし、画像解析はレーザー流速計に比較して流速の計測精度が低いという欠点を有していたため、従来の画像解析の研究においては、計測アルゴリズムの改良や高質な可視化画像の撮影方法などに関心が集中している（Adrian, 1991；江藤・竹原, 1996）。

海岸工学においても、砕波直前および砕波後の気泡を伴った流体運動の画像解析手法として、西村・武若（1988）のビデオ画像の濃度相関関数を用いる相関法、長尾ら（1991）の PTV（Particle Tracking Velocimetry：トレーサー追跡法）、小林ら（1992）の可視化画像の輝度の局所的な空間分布を用い、フーリエ変換から流速を求める方法、渡部・佐伯（1995）の空間相関係数を時間方向に発展させ、空間的に連続した流速場をとらえる方法、長尾ら（1997）の画像の状態に応じて特性の相反する PTV と PIV（Particle Image Velocimetry：濃度相関法）を使い分ける方法などが提案されている。

これらの研究成果によって、空間的にランダムに存在する点での計測精度は著しく向上したが、規則格子点上での流速については、現状では、線形補間により算定しており、画像解析で得られた流速場が、解析領域においてどの程度、質量保存則を満足しているかについては、ほとんど議論されておらず、その精度も不明である。このため、砕波限界や砕波形式の解明に重要な要因となる

内部諸量（渦度・歪み度など）が、質量保存則を満足しない流速場から算定される可能性があり、メカニズムの解明にあたっては非常に問題である。

そこで本研究では、PIV を用いて底面波動乱流境界層付近や自由表面を含んだ砕波直前の波動場の画像解析を行い、流速場の発散を空間的に調べ、解析領域において質量保存則がどの程度満足されているのか、また、発散の最大値や質量保存則が満足されにくい場所などについて検討を行った。さらに、最小限の補正で質量保存則を満たすように、Sharman (1978) が提案した Mass-Consistent (マスコン) モデルを画像解析結果に適用する方法についても検討した。

その結果、画像解析で得られた流速場にマスコンモデルを適用することで、解析全領域において、質量保存則がほぼ満足され、さらに、定性的・定量的にも十分な精度を確保できることがわかった。

2. 可視化実験

実験には、長さ 30 m、幅 50 cm、深さ 80 cm の片面ガラス張り 2 次元造波水槽を用いた。水中にトレーサー粒子（三菱化学、HP-20：平均粒径 400 μ 、比重 1.02）を投入し、側方よりデジタルビデオカメラ（VICTOR、GR-DV 1、シャッタースピード 1/500 秒）で撮影した。また、鮮明な画像を記録するために、スリット光を用いた。

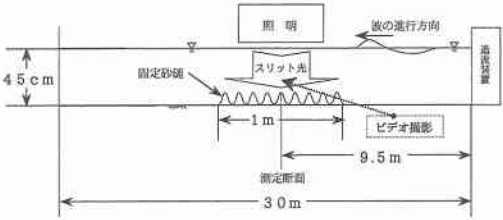
画像解析には、流れの可視化システム（Current, カノマックス社製）を用い、計測手法としては PIV を用いた。実験条件を、表-1 に示しているが、自由表面が存在するとマスコンモデルにおける境界条件等の検討が別途必要となるため、まず固定砂連上に形成される乱流境界層付近の流れを対象に画像解析を行った（図-1）。なお、実験に用いた固定砂連の形状を図-2 に示す。

マスコンモデルの画像解析への適用性とその有効性を確認した後、自由表面を含む砕波直前の波動場の画像解析を行った（図-3）。さらに両ケースとも、流速の計測精度検証のためレーザー流速計により流速の鉛直分布も測定した。

* 正 会 員 工 修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
** 正 会 員 工 博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
*** 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科

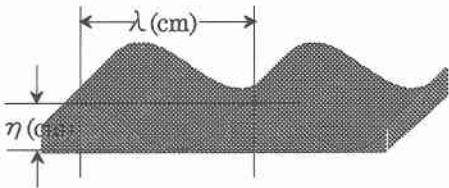
表一 実験条件

ケース	周期 (s)	入射波高 (cm)	水深 (cm)	備考
1	2.0	11.5	45.0	非砕波
2	2.0	18.5	48.0	巻き波

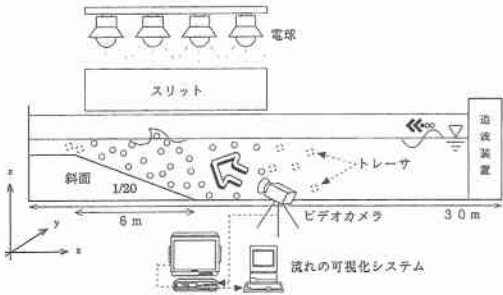


図一 可視化実験の概要 (ケース1)

λ : 砂漣の長さ 7.2 cm
 η : 砂漣の高さ 1.0 cm



図二 固定砂漣の形状



図三 可視化実験の概要 (ケース2)

3. 質量保存則を満たす画像解析結果の補正方法

3.1 マスコンモデルの概要

このモデルは、質量保存則を満足する3次元流速場を、観測結果に基いて算定するもので、海岸工学の分野においても、小林 (1991) が直立円柱まわりの流れ場の空間分布推定に、また、後藤ら (1993) は海上風の推算に用いている。マスコンモデルでは、初期条件として与える流速場が最良推定値であると仮定するので、その補正量は出来る限り小さくすることが望ましい。このためには、

補正量の2乗和が最小となるように、ラグランジェの未定乗数 λ を導入して、汎関数 $E(u, v, w, \lambda)$ を (1) 式のように置き、これを最小とするとよい。

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V [\alpha_1^2 (u - u^0)^2 + \alpha_2^2 (v - v^0)^2 + \alpha_2^2 (w - w^0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy dz] \dots (1)$$

ここで、 u, v, w は質量保存則を満たすように補正された流速成分、 u^0, v^0, w^0 は初期流速成分、 α_1, α_2 は重み係数であり、この2数の比 (α_1/α_2) が水平成分と鉛直成分との補正量の相対的な大きさを規定する。

次に、 E の変分がゼロとなる条件を各変数について求めると、(2)~(5) 式のオイラー-ラグランジュ方程式を得る。

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \dots (2)$$

$$v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \dots (3)$$

$$w = w^0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \dots (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots (5)$$

(5) 式に (2)~(4) 式を代入することにより、 λ についてのポアソン方程式 (6) 式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 \left(\frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{\partial w^0}{\partial z} \right) \dots (6)$$

ここで、境界条件は、流体の流入出を許す場合には $\lambda=0$ 、許さない場合には、 $\partial \lambda / \partial n = 0$ である。ただし、 n は境界外向きの単位法線ベクトルである。この境界条件のもとに (6) 式を解き、求めた λ を (2)~(4) 式に代入すると、補正後の流速成分 (u, v, w) が求まる。

3.2 離散化

図一4のスタガード配置に従って、ポアソン方程式 (6) を離散化し、 λ_{ijk} についてまとめると (7) 式となる。

$$\lambda_{ijk} = \frac{\frac{\lambda_{i+1,j,k} + \lambda_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{\lambda_{i,j+1,k} + \lambda_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{\lambda_{i,j,k+1} + \lambda_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} - D^0}{2 \left\{ \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{1}{\Delta z^2} \right\}} \dots (7)$$

ここで、

$$D^0 = -2\alpha_1^2 \left(\frac{u_{ijk}^0 - u_{i-1,j,k}^0}{\Delta x} + \frac{v_{ijk}^0 - v_{i,j-1,k}^0}{\Delta y} + \frac{w_{ijk}^0 - w_{i,j,k-1}^0}{\Delta z} \right)$$

ラグランジュの未定乗数 λ は、SOR 法 (Successive Over-Relaxation method) により決定する。

くなり、解析領域全体で質量保存則がほぼ満足されている。

図-9は砂漣の峰における、波峰通過時の水平流速の鉛直分布を示し、一点鎖線がレーザー流速計、破線がマスコンモデル適用前、実線がマスコンモデル適用後の結果である。図より、画像解析結果にマスコンモデルを適用することで、定量的にも高い精度で流速場を把握できることが分かる。これらの結果より、マスコンモデルの画像解析への適用性および有効性を確認した。

b) 自由表面を含む巻き波砕波直前の波動場(ケース2)

次に、自由表面を含んだ画像解析への本手法の適用性

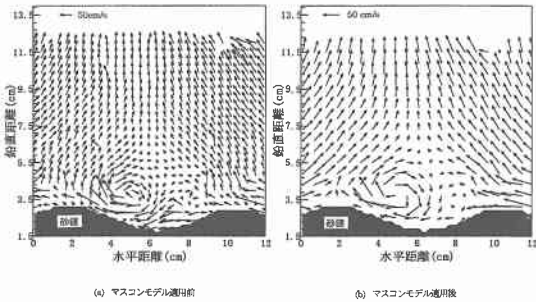


図-7 流況図の比較(固定砂漣上)

を検討する。図-10は、マスコンモデル適用前後での流速の発散を空間分布で示している。なお、解析では、 x 方向に34分割、 z 軸方向に55分割とし、セル幅は1.5 cm、1.0 cm、 y 軸方向は水路幅の50.0 cm、 $\alpha_1/\alpha_2=0.5$ とした。マスコンモデル適用前では、自由表面および底面付近で質量保存則を満足しない部分が多く存在し、発散の絶対値の最大値は20で、底面付近に存在している。一方、マスコンモデルを適用すると、その最大値は 2.0×10^{-9} と小さくなり、さらに、解析領域全域でほぼ質量保存則を満足している。

次に、定量的な精度を検証するために、図-10のA断面($x=24$ cm)において波峰通過時の水平方向流速の鉛直分布についてレーザー流速計の結果と比較を行った(図-11)。図からわかるように画像解析結果にマスコンモデルを適用した結果は、定量的にも、精度が高いことがわかる。

図-12(a)に巻き波砕波直前の渦度分布を示す。渦度は、反時計回りを正とする。波の切り立つ部分と底面付近では大きな渦度が分布し、さらに、この部分では符号の異なる渦度が混在している。波峰付近の最大値は進行方向に11(1/s)である。また、流体内部では、ポテンシャル領域、非ポテンシャル領域が混在していることも確認できる。

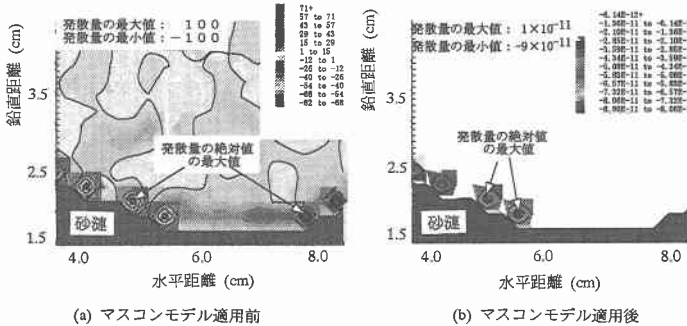


図-8 発散 ($D=\nabla \cdot u$) の空間分布の比較(ケース1)

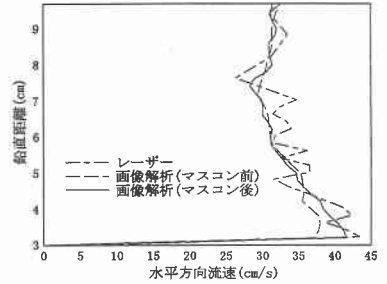


図-9 水平方向流速の鉛直分布の比較(ケース1)

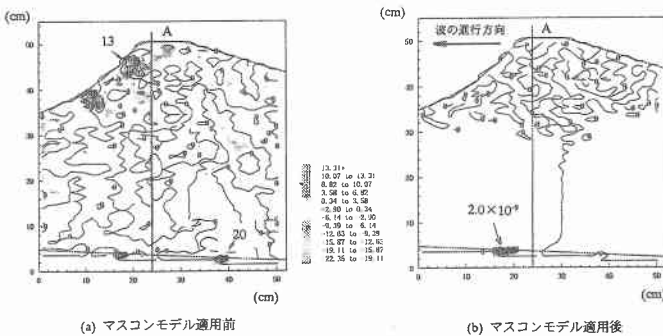


図-10 発散 ($D=\nabla \cdot u$) の空間分布の比較(ケース2)

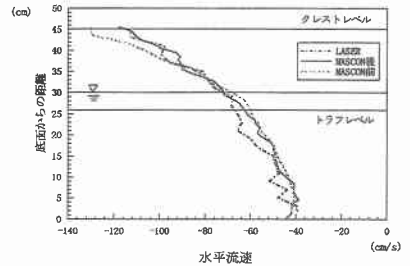


図-11 水平方向流速の鉛直分布の比較(ケース2)

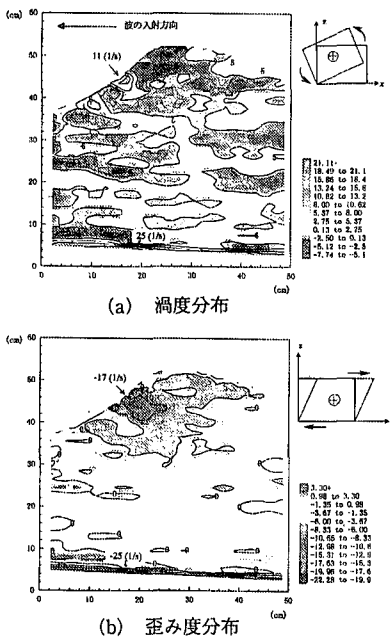


図-12 内部諸量の空間分布 (ケース2)

図-12(b)は歪み度分布を示す。歪み度は沖側へのせん断変形を正とした。波の切り立つ部分ではマイナス方向、つまり、波の進行方向に大きなせん断力が働いていることがわかる。波峰付近の最大値は進行方向に17(1/s)である。また、流体内部では、ほとんどせん断力が働いていないこともわかる。

4. 結 論

本研究の結論を要約すると以下のとおりである。

a) 画像解析による流速場の発散を空間的に調べた結果、流体内部に比較して底面境界や自由表面付近において質量保存則が満足されにくいことが分かった。

b) マスコンモデルの適用により、流速場の発散を最大で $1.0 \times 10^{-9} \sim 10^{-11}$ 程度に押さえることができ、解析領域全体で質量保存則をほぼ満足できる。

c) マスコンモデルの適用により、レーザー流速計と比較しても定量的に高い精度を有することが分かった。

d) 巻き波砕波直前では、回転方向の異なる渦度が水表面付近に存在すること、および非ポテンシャル領域とポテンシャル領域の混在が確認できた。また、水表面の切立つ付近に岸向きの大きなせん断力が働き、水表面および底面付近以外ではせん断力はほとんど作用していないことが分かった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、近畿大学理工学部竹原幸雄講師には、測定装置の借用ならびに可視化画像の撮影等に関して懇切な御教示を賜りました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 後藤智明・柴木秀之 (1993): 陸上地形の影響を考慮した海上風推算, 港研報告, 32巻, 3号, pp. 65-97.
- 小林智尚 (1991): 局所洗掘底面上の直立円柱まわりの流れに関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第38巻(1), pp. 446-450.
- 小林智尚・日野幹雄・疋田賢七・荻原秀規 (1992): フーリエ変換を用いた画像処理による砕波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第39巻(1), pp. 56-60.
- 江藤剛治・竹原幸生 (1996): 研究展望, 高速ビデオカメラの現状と水工学への適用, 土木学会論文集, No. 533, II-34, pp. 9-20.
- 長尾昌朋・片岡曉彦・沢本正樹 (1991): VTR 画像処理とトレーサ追跡法を組み合わせた砕波内部流速場の測定, 海岸工学論文集, 第38巻(1), pp. 56-60.
- 長尾昌朋・新井信一・上岡充男 (1997): PTV と PIV を組み合わせた砕波帯の流速分布測定, 海岸工学論文集, 第44巻(1), pp. 116-120.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988): VTR 画像の相関解析による砕波時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.
- 渡部靖彦・佐伯 浩 (1995): 画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 116-120.
- Adrian, R. J. (1991): Particle-image techniques for experimental fluid mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261-304.
- Amsden, A. A. and F. H. Harlow (1970): The SMAC method: a numerical technique for calculating incompressible fluid flows, Los Alamos Scientific Lab., LA-4370.
- Sherman, C. A. (1978): A mass-consistent model for wind fields over complex terrain, J. Appl. Meteor., Vol. 17, 312-319.