

画像解析による砕波変形過程の内部特性と砕波形式および空間波形との関係

山田文彦*・滝川 清**・高山浩介***

1. 序 論

本研究は、砕波形式が異なる場合での内部諸量（速度場・運動エネルギーなど）の時間・空間分布を比較することで、砕波変形のメカニズムを実験的に解明しようとするものである。ここで、流れの可視化手法(画像解析)は流速の空間分布が容易に得られるうえ、最近では、気泡混入後の解析例(長尾ら, 1997)も報告され、波動場の内部特性を解明するうえで非常に有効な手法となっている(例えば、西村・武若, 1988)。そこで、今回は一様斜面上での非砕波、崩れ波砕波、巻き波砕波を対象とした可視化実験及び画像解析を行い、砕波変形過程(水平床～砕波点)での内部特性を調べるとともに空間波形との関係などについても検討を行った。

2. 実験方法および実験結果

可視化実験には、図-1に示す長さ30.0m、幅50.0cm、深さ80.0cmの片面ガラス張り2次元造波水槽を用いた。水路中央部より1/20勾配の斜面を設置し、入射部水深(水平床)は48.0cmとした。実験条件は、斜面の始点(S)から岸側380.0cmの地点が砕波点となるように、表-1の様に決定した。また、可視化画像は、水中にポリスチレン樹脂球(三菱化学, HP-20:平均粒径400 μm ,比重1.02)を投入し、水路側方よりデジタルビデオカメラ(VICTOR, GR-DV1:シャッタースピード1/100秒)で撮影した。なお、画像の再生時間間隔は1/30秒である。また、撮影は斜面始点より沖側200.0cm(断面①, 水平床), 斜面始点より岸側80.0cm(断面②, 斜面上), 岸側230.0cm(断面③, 斜面上), および砕波点(断面④)の4カ所で行った。次に、可視化画像から速度場を算出するために画像解析を行い、速度場の計測手法としては、PIV (Particle Image Velocimetry, 濃度相関法)を用いた。なお、この一連の作業は、流れの汎用可視化システム(Current, カノマックス社)を用いて行った。

ところで、従来の画像解析においては、任意の点で計

測された流速値を線形補間することで、解析領域全体の流速場を算出していた。しかしこの方法では、自由表面付近や底面近傍において質量保存則を満足しないことが指摘されており、このような流速場から内部諸量を求め、内部特性を比較することには問題が残る。そこで、最小限の補正で質量保存則を満足するように、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を提案し、従来の画像解析結果と比較して、定性的・定量的に流速の計測精度を向上できることを確認している。なお、これらの結果およびマスコンモデルの具体的な適用方法などについては、山田ら (1998) に詳しい。

図-2~4は、画像解析により得られた断面④(砕波点)での内部諸量の空間分布を比較したものである。なお、これらは、マスコンモデルにより流速場の補正を行った結果であり、流速場発散の絶対値の最大値は、非砕波: $4.70 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, 崩れ波砕波: $3.72 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, 巻き波砕波: $1.30 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ と、解析領域全体で質量保存則をほぼ満足している。図-2は、水平方向の流速分布を等値線と色分けによって示したもので、水平方向流速(u)を入射位置での波速($C; C = \sqrt{gh_i}$)で除した無次元量(u/C)

表-1 実験条件

実験ケース	周期 T (s)	入射波高 H_i (cm)	砕波水深 h_b (cm)	備考
Run 1	2.0	2.0	—	非砕波
Run 2	1.0	15.0	24.7	Spilling
Run 3	2.0	16.5	24.7	Plunging

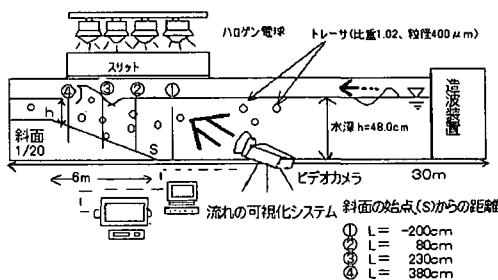


図-1 実験装置

* 正会員 博(工) 熊本大学助手 大学院自然科学研究科
 ** 正会員 工 博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
 *** 正会員 鹿児島市役所

の空間分布である。なお、進行方向流速を正值で表している。図より、非碎波・崩れ波碎波では、波峰を中心として、波の進行方向にほぼ左右対称な分布をしているが、巻き波碎波では、波峰前面付近に高速度部分が集中する非対称な分布となり、さらに、崩れ波碎波に比べてより底面付近まで水平方向の運動が顕著である。

図-3は、同様に鉛直方向の流速分布を等値線と色分けによって示したもので、鉛直方向流速(v)を波速(C)で除した無次元量(v/C)の空間分布である。なお、鉛直上向き流速を正值で表している。各ケースとも、波峰前面で鉛直上向き、波峰後面で鉛直下向きの運動を行っており、非碎波・崩れ波碎波ではその最大流速の絶対値および空間分布はほぼバランスしているが、巻き波碎波では波峰前面部における鉛直上向きの運動が卓越することが示されている。

図-4は、運動エネルギーの空間分布であり、運動エネルギーは、速度水頭(u^2+v^2)/ $2g$ を入射波の振幅(a_0)で除した無次元量として表示した。崩れ波碎波では、運動エネルギーは波峰部に集中し、その分布は水平流速と同様に進行方向にほぼ左右対称である。一方、巻き波碎波でも波峰部に集中するが、その範囲は崩れ波碎波よりも広く、特に、波峰前面に高い運動エネルギーが集中している。これは、切り立った水面が前方へ飛び出す、“巻き込みjet”というこの碎波形式特有の現象を良く説明する結果である。

以上の画像解析結果より、碎波直前での内部諸量は、碎波形式により異なった空間分布を呈することがわかった。そこで次に、この内部諸量が碎波変形過程において場所的にどのように変化しているのかを比較した結果を示す。図-5の各図は、相対水深(h/L_0)と無次元内部諸

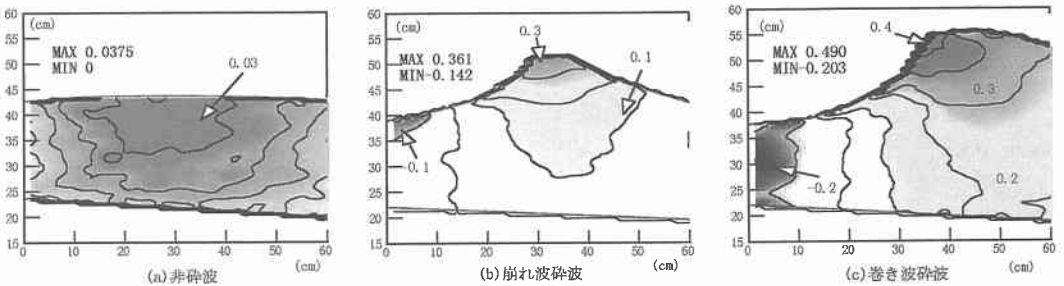


図-2 無次元水平流速の空間分布 (断面④)

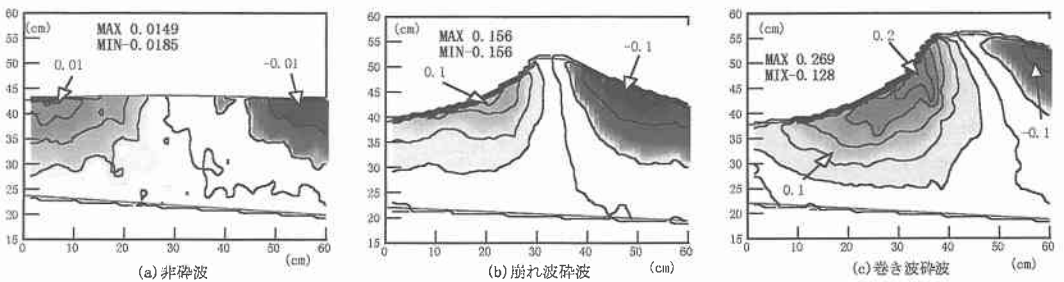


図-3 無次元鉛直流速の空間分布 (断面④)

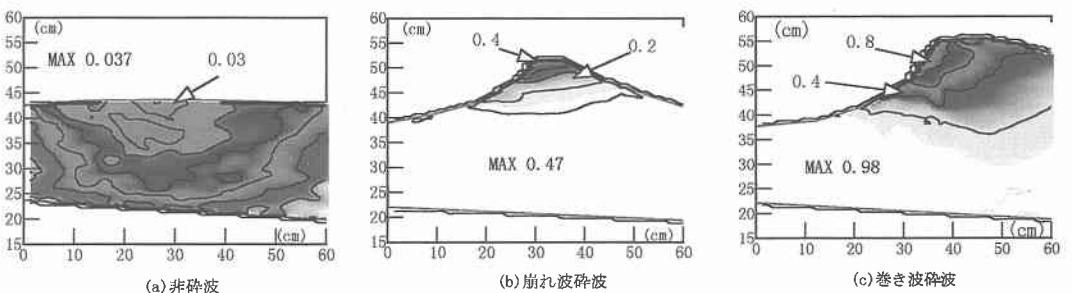


図-4 無次元運動エネルギーの空間分布 (断面④)

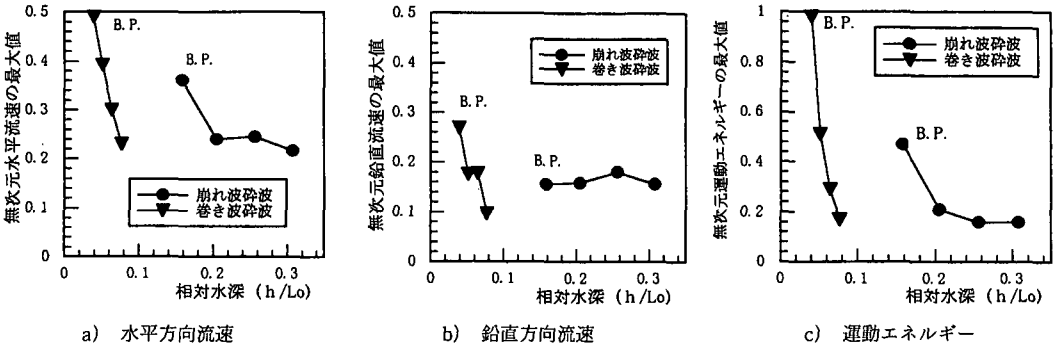


図-5 相対水深と無次元内部諸量との関係

量の最大値との関係を示したものであり、各断面で波峰通過時の結果をプロットしたものである。a) 図より、崩れ波砕波に比較して巻き波砕波では、浅水化に伴う無次元水平流速の最大値増加の勾配が急激であること、また、両砕波形式ともその最大値が入射位置での流速の0.4~0.5倍程度で砕波することがわかる。これは砕波水深での流速を用いて換算すると流速波速比が0.5~0.7で砕波することに相当し、片山・佐藤(1993)が示した砕波条件を支持する結果となる。ただし、砕波限界付近は非常に過渡的な現象であるため、高速カメラを用いた詳細な検討が今後必要である。次にb) 図より、巻き砕波では、浅水化に伴い無次元鉛直流速の最大値が水平流速と同様に増加するものの、崩れ波砕波では、浅水化によらず、ほぼ一定であることが分かる。さらにc) 図では、崩れ波砕波は浅水化に伴い無次元運動エネルギーの最大値はゆるやかに増加し、入射波振幅の0.5倍程度の速度水頭で砕波に至るが、巻き砕波では急激に運動エネルギーが増加し、入射波振幅程度の速度水頭で砕波に至ることがわかる。これらの結果より、砕波変形過程においても内部諸量は砕波形式により異なった分布特性を有し、特に、流速の分布特性により両砕波形式の相違をよく表現しうることがわかった。

そこで、この砕波形式による内部特性の相違の原因を調べるために、せん断変形の空間分布を比較した結果を次に示す。図-6は、砕波変形過程でのせん断変形の空間分布であり、符号は進行方向のせん断変形を負として表示している。非砕波において、浅水化に伴うせん断変形は底面付近以外ではほとんど見られない。また、崩れ波砕波では、一定水深部ですでに水表面付近に岸向きのせん断変形が生じ、砕波変形過程でも常に波峰部には岸向きのせん断変形が生じている。特に、砕波点ではその発生部分が波峰部全体に及んでいることから、崩れ波砕波では、砕波変形過程において波峰部に広くせん断応力が作用する。

一方、巻き波砕波では、斜面上を進行する過程で徐々

に岸向きのせん断変形が発生し、砕波点では崩れ波砕波に比べると波峰前面付近に集中した分布となる。なお、せん断変形の最大値は砕波形式による顕著な相違は見られないが、このような砕波形式によるせん断変形の時間・空間分布の相違というものが前述した流速場などに大きく影響しているものと考えられる。

ところで、砕波変形過程での内部特性を考える場合、空間波形との関係を明らかにすることも重要である。画像解析では空間波形の記録も同時に行えるので、次に内部諸量と空間波形との関係について検討する。

3. 砕波変形過程での内部諸量と空間波形の関係

空間波形の1波長分を含む可視化画像の撮影は、速度場の解析精度の低下に繋がるため、ここでは比較的至近距離での撮影を行い、静水面から上の空間波形のみに着目し、空間波形を無次元パラメータで表現することを考える。図-7において、静水面と水表面との交点をA・B点、水位最高点をC点、C点からの垂線が静水面を切る点をD点、底面との交点をE点とし、 $L_1 = \overline{AB}$ 、 $L_2 = \overline{AD}$ 、水位： $\eta_1 = \overline{CD}$ 、静水深： $h_1 = \overline{DE}$ とする。この値を用いて空間波形の左右対称性を表す“前傾度 S_1 ”および空間波形の尖り具合を表す“尖度 S_2 ”，水位水深比である“相対水位 S_3 ”を次式で定義した。

$$\left. \begin{aligned} \text{前傾度} : S_1 &= L_2/L_1, \\ \text{尖度} : S_2 &= \eta_1/L_1, \\ \text{相対水位} : S_3 &= \eta_1/h_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

図-8は、相対水深と無次元パラメータの関係を示したものである。(1) 図は、崩れ波砕波がほぼ対象な波形を保ったまま砕波に至るのに対して、巻き波砕波は急激な波形の前傾化を伴って砕波に至るという両砕波形態の特徴を良く表している。また(2) 図では、浅水化に伴い波形の尖度はともに増加し、両砕波形式とも0.2程度で砕波するが、その傾きは巻き波砕波のほうが急勾配である。よってこれらの結果より、今回提案した空間波形

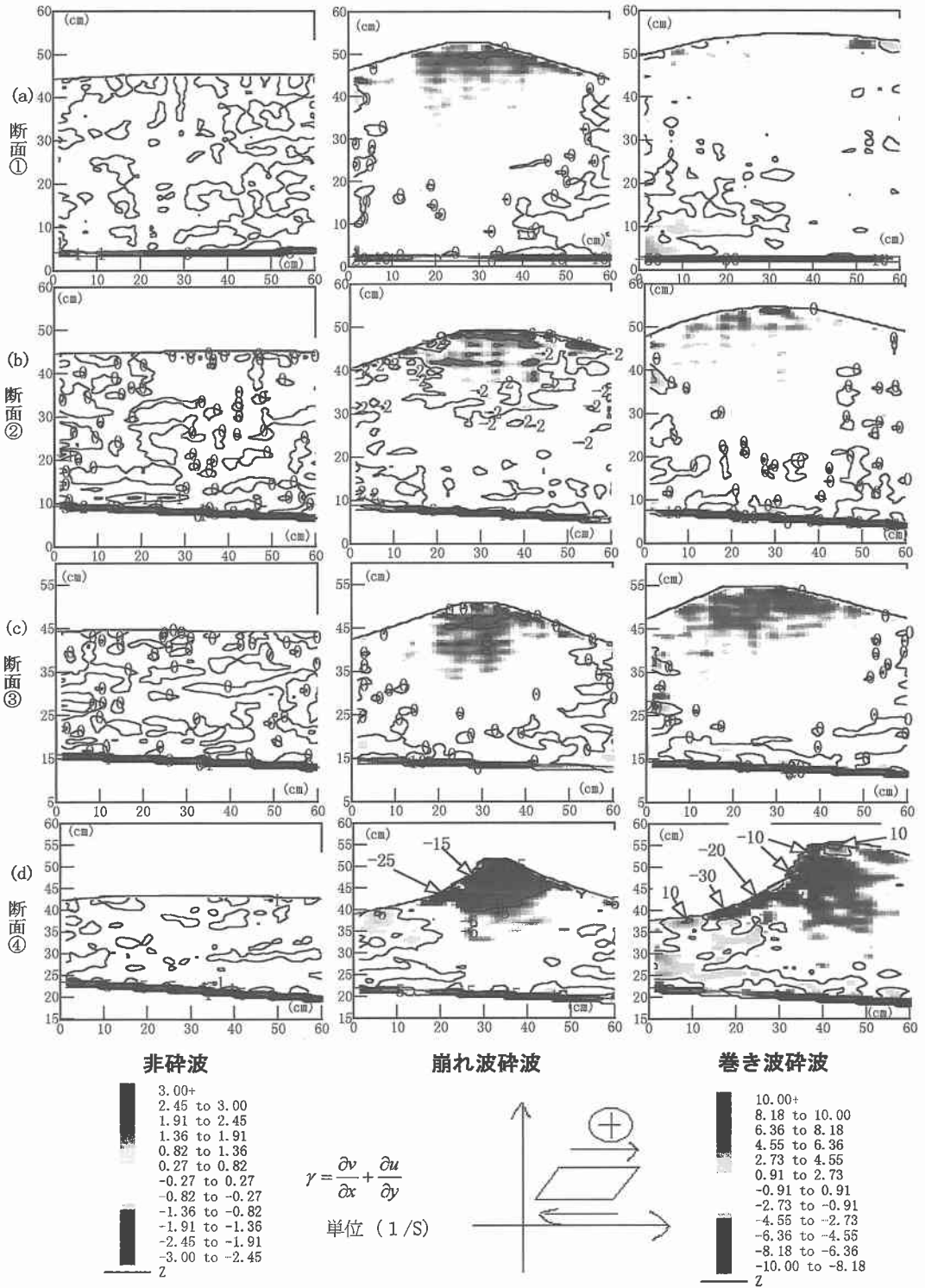


図-6 せん断変形 (γ) の空間分布

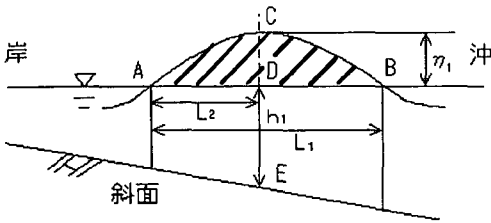
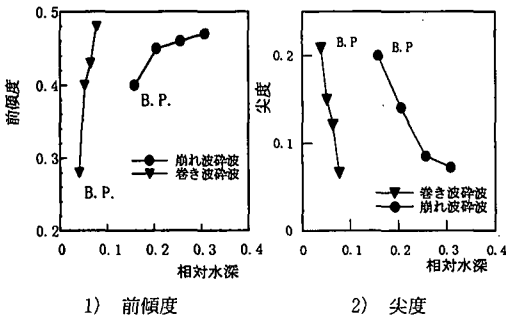


図-7 空間波形の無次元パラメーターの定義



1) 前傾度 2) 尖度

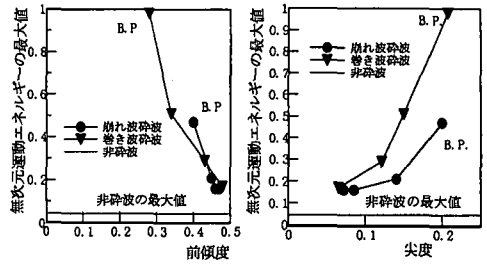
図-8 相対水深と空間波形との関係

の無次元パラメーターを用いても碎波形式が判別可能であることがわかる。

そこで次に、この無次元パラメーターを用いた空間波形と運動エネルギーとの関係を図-9に示す。両図とも縦軸は無次元運動エネルギーの最大値である。(1)図は、前傾度との関係を示したものであり、両碎波形式とも無次元運動エネルギーの最大値は前傾度と反比例の関係、つまり空間波形の左右対称性が崩れるとともに増大することがわかる。また、その関係はほぼ直線的である。次に、尖度との関係を(2)図に示すが、両碎波形式とも運動エネルギーの最大値は尖度とともに指数的に増加し、この傾向は巻き波碎波のほうがより顕著であることがわかる。これらの結果より、内部諸量の分布は空間波形とも密接に関係しており、特に、その最大値は空間波形の前傾化(非対称性)とともに増加することが確認できた。

4. 結 論

本研究では、質量保存則を満足するように改良した画



1) 前傾度 2) 尖度

図-9 空間波形と運動エネルギーとの関係

像解析を用いて碎波変形過程での内部特性を調べるとともに、空間波形との関係などについて検討を行った。本研究で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 碎波形式によりその内部諸量は、空間的に異なった分布特性を有する。また、その要因の一つとして、波峰部に働くせん断応力の分布特性の相違が考えられることを指摘した。
- 2) 内部諸量の分布は空間波形とも密接に関係しており、特に、空間波形の非対称性は重要なパラメーターであることを示した。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費(基盤研究B:代表 山田文彦)より援助をいただきました。記して感謝の意を表わします。

参 考 文 献

片山裕之・佐藤慎司(1993): Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・碎波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第40巻(1), pp. 16-20.
 長尾昌朋・新井信一・上岡充男(1997): PTV と PIV を組み合わせた碎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碎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.
 山田文彦, 滝川 清, 柿木哲也, 白木原圭太(1998): 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, 海岸工学論文集, 第45巻(2), pp. 1281-1285.
 Sherman, C. A. (1978): A mass-consistent model for wind fields over complex terrain, J. Appl. Meteor., Vol. 17, pp. 312-319.