# 砕波直前の水面形状遷移の定量的評価

Quantitative description of wave shapes near breaking

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 三戸部佑太 (Yuta Mitobe) 北海道大学大学院工学研究院 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

## 1. はじめに

砕波直前の波浪は進行とともに刻々とその形状が変化 する。砕波直前の水面形状遷移は砕波形態を特徴づける ものであり砕波後の波高や乱れを含む流れなどを見積も る上で不可欠なパラメータとなる。砕波直前の変形に伴 い発達する波浪の非対称性は波浪が砕波に至る過程にお いて無視することのできない重要なパラメータであり、 例えば Kjeldsen and Myrhaug<sup>11</sup> (1980)は非対称性をもつ波 浪形状を評価するパラメータとして Crest front steepness  $\varepsilon = \eta'/L'$  (図-7 参照) など 3 つのパラメータを提案 している。しかしながら現在まで瞬時の水面形状を面的 に計測する方法がなかったため、Nepf et al<sup>20</sup> (1998)の研 究のように波高計による水位時系列から波速により推定 した波形をもちいて砕波時の水面形状遷移を評価してき たのが現状である。

一方、著者ら<sup>3)</sup> (2010)は水面の形状を面的に計測可能 な新たな画像計測法を開発し、これにより2次元造波水 槽における砕波時の水面形状を数値化することに成功し ている(三戸部・渡部<sup>4)</sup>、2011)。これにより砕波直前 から砕波ジェット着水、ボア形成に至るまで砕波時の水 面形状を定量的に評価することが可能となったが、その 計測対象は崩れ波と巻き波の中間形態となるものが多く サンプルが不十分であった。本研究では新たに典型的な 巻き波形態となる7ケースの波浪について砕波直前の水 面形状遷移を計測し、著者ら<sup>4)</sup> (2011)の計測結果と合わ せてその砕波に至るまでの水面変形の特徴について定量 的な評価を行う。

## 2. 計測方法

本研究では著者ら<sup>3)</sup>(2010)が開発した面的水面形状 計測法により砕波時の水面形状を計測する。この計測法 では白色微粉末を混合した水にプロジェクターからカラ ーグリッドを照射しその自由水面近傍における散乱光を 1 台のデジタルカメラで動画像撮影することでその水面 座標を面的かつ動的に特定する。図-1 に示すようにプ ロジェクターからのカラーグリッドの照射およびその物 体表面における反射光のカメラによる撮影の双方にピン ホールモデルを適用する。予めキャリブレーション撮影 により取得するプロジェクター座標系、カメラ座標系、 実座標系の幾何学的な関係に基づき、個々のカラーグリ ッドについてその物体表面における実座標を取得する。



図-1 ピンホールモデルと座標系



### 図-2 実験装置

#### 表-1 波浪条件

case	T (sec)	$H_{ heta}$ (cm)	θ	<i>H</i> <sub>b</sub> (ст)	<i>h</i> <sub>b</sub> (ст)	ξ		
1a	1.0	10	1/15	10.6	13.6	0.256		
2a	1.2	10	1/15	11.6	16.0	0.293		
3a	1.4	10	1/15	12.4	15.8	0.331		
4a	1.6	10	1/15	11.9	16.2	0.386		
5a	1.8	10	1/15	11.2	15.0	0.448		
6	1.8	11	1/15	11.8	15.1	0.436		
7	1.8	8	1/15	9.4	12.8	0.489		
$T$ : 周期 $H_0$ : 初期波高 $\theta$ : 海底勾配 $H_b$ : 砕波波高								
h <sub>b</sub> : 砕波水深 <i>ど</i> : Surf Similarity Parameter								

## 3. 実験方法

延長 24m,幅 0.6m,海底勾配 1/15 の 2 次元造波水槽 斜め上方にプロジェクター及び高速ビデオカメラを設置 し,水路端部に設置した造波板により発生させた規則波 の砕波点近傍における水面形状を計測した(図-2)。 表-2 著者ら<sup>4)</sup> (2011) の実験における波浪条件

case	T (sec)	<i>Н</i> <sub>0</sub> (ст)	θ	H <sub>b</sub> (cm)	h <sub>b</sub> (cm)	ځ
1b	1.0	10	1/20	11.6	16.4	0.183
2b	1.2	10	1/20	13.0	17.2	0.208
3b	1.4	10	1/20	14.2	17.8	0.232
4b	1.6	10	1/20	13.0	16.0	0.277
5b	1.8	10	1/20	14.3	16.6	0.297
8	2.0	10	1/20	14.5	15.3	0.328
9	1.0	13	1/20	13.0	22.2	0.173



図-3 計測時の撮影画像 (case5a:左 t = - 0.080 s、 右 t= - 0.040 s)



図-4 容量式波高計による水位時系列と画像計測 結果の同一地点における時系列の比較(赤:画像計 測、青:容量式波高計)

表-1 に今回計測した波浪の条件を、また海底勾配 1/20 の水路において三戸部・渡部<sup>4)</sup>(2011)が計測した波浪 の条件を表-2 に示す。ここで $\xi$ は Surf Similarity Parameter (SSP) であり、 $\xi = \tan \theta / \sqrt{H_b/L_0}$  (L<sub>0</sub> は深水 波波長、 $L_0 = gT^2/2\pi$ ) で定義される。本実験で対象と した波浪は0.26 < *ξ* < 0.49 であり、崩れ波と巻き波の中 間形態から巻き波形態の砕波が確認された。プロジェク ターからのカラーグリッドの投影面積並びに撮影領域は 約 0.4m×0.4m であり、カメラの撮影解像度 1280×1024 pixels、露光時間 1/150 s、撮影周波数 150 Hz で水面上 のカラーグリッドを撮影した(図-3)。なお本実験で は静水面におけるカラーグリッド間隔はおよそ7mmで ありそれ以下のスケールの水面変動は解像しない。計測 領域中央における水位の時系列を容量式波高計により周 波数 40 Hz で取得し、画像計測結果と比較することで計 測精度の確認を行うとともに、時系列から波速により推







図-6 各ケースの波峰方向に渡る平均水面形状の時間 変化. 図中の黒の破線は波高計による水位時系列から 波速により推定した波形を示し、他の色は画像計測波 形の時刻を表す

定した波形と画像計測により得られる波形を比較した。 ここで砕波点の静水面から波の進行方向に x 軸、側壁一 端から水路横断方向に y 軸、静水面から鉛直上向きに z 軸を定める。なお本計測法では照明光が水面において乱 反射される箇所や砕波ジェット下面等の投影カラーグリ ッドが撮影されない領域では水面座標が計測されず、欠 測箇所は含めずに解析を行った。

## 4. 結果

#### 4.1 波高計による水位時系列との比較

砕波点直前において容量式波高計により取得した水位 時系列と同一地点における画像計測結果を比較したもの を図-4 に示す。ここで本実験では画像計測波形におい

平成23年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第68号



表-3 画像計測波形から計算した波峰前面勾配 Em および水位時系列から推定した波峰前面勾配 Em



て波峰部の前面への飛出しを確認した時刻の波峰位置を 砕波点と定義し(図-5(c)参照)、時刻 t はその時刻か らの経過時間を示す。画像計測結果の容量式波高計によ る時系列に対する誤差の RMS 値は波高の 3%程度であ り概ね一致する結果が得られた。

図-5 に示す case5a の砕波前の水面形状の画像計測結 果にみられるように、砕波点(t = 0 s)までは波峰方向 にほぼ一様な水面形状となる。ここで、水中において 1、 それ以外では 0 となる関数 F(x,y,z,t)を定めると水面は F(x,y,z,t) = 0.5の等値面として表され、その波峰方向(y 方向)に渡る平均

$$\overline{F}(x,z,t) = \frac{1}{l} \int F(x,y,z,t) \,\mathrm{d}y \tag{1}$$

(1:計測領域の y 方向の幅)を計算することで、その 等高線として波峰方向に渡る平均水面形状が得られる。 これにより取得した波峰方向の平均水面形状の時間変化 を図-6 に示す。すべてのケースで砕波点に近づくにつ れ波の前面勾配が急となり波峰に対して非対称な波形が 発達する、典型的な波浪変形が確認された。また図-6 中の黒い破線は容量式波高計による水位の時系列を微小 振幅波理論に基づく波速で凍結した波形であり、最大水 位となる点が波高計設置位置に一致するように表示して いる。画像計測波形との比較から特に周期の大きいケー



図-9 波峰位置からの変位(x - x<sub>crest</sub>)に対する x 方向 水位勾配の変化.線の色は時刻を示す



る最大値 $\varepsilon_{max}$ 、 $\delta_{max}$ およびその比 $r=\varepsilon_{max}/\delta_{max}$ の時間変

スにおいて時系列から推定した波形の実波形からのずれ が大きくなっていることがわかる。Kjeldsen and Myrhaug<sup>1)</sup> (1980)は砕波に近づき非対称性が発達した波 浪の形状を示すパラメータの1つとして波峰の前面にお ける勾配  $\varepsilon = \eta'/L'$ を提案した(図-7 参照)。本実験 における各ケースの波浪について波峰が波高計の設置位 置を通過する際の波峰前面勾配 $\varepsilon$ を画像計測波形および 波高計による時系列から推定した波形のそれぞれで計算 した(表-3)。時系列から推定した波形による $\varepsilon$ は画 像計測波形より 5~25%程度小さな値となり、砕波に近 づき刻々と変形する波浪形状を適切に評価するためには 本実験で用いる計測法のように瞬時の水面座標を面的に 特定する必要がある。

## 4.2 水位勾配

本実験で使用する画像計測法では、カラーグリッド配 列に基づき各計測水面座標について隣接する水面座標を



図-11 case5aの水面曲率分布. プロットの色が水 面曲率の値を表す

特定可能であり、これにより各点における x 方向の水位 勾配 ∂ŋ/∂x および y 方向の水位勾配 ∂ŋ/∂y をそれぞれ 計算可能である。図-8 は図-5(a)(b)に示した case5 の 水面計測結果に対応する時刻の水位勾配の計算結果を示 している。前述したように砕波前の水面形状は波峰方向 にほぼ一様であり、v 方向には有意な勾配が生じていな い。x 方向の水位勾配は波峰の背面では大きな変化が見 られない一方で前面においては砕波に近づくにつれ勾配 が急になり、波形の非対称性が発達することが確認でき る。図-9 は波峰位置  $x_{crest}$  からの変位(x -  $x_{crest}$ )に対して x 方向水位勾配の波峰方向平均値  $\partial n/\partial x$ をプロットした ものである。x 方向水位勾配の大きさは波峰の背後(x xcrest<0) では 0~0.4 程度の値で安定している一方で波峰 の前面  $(x - x_{crest} > 0)$  では砕波直前に急激な上昇を示す。 ここで波峰の前面および背面における水位勾配の絶対値 の最大値をそれぞれ $\varepsilon_{max}$ 、 $\delta_{max}$ と定義し、さらに波形の 非対称性を表すパラメータとして  $r = \epsilon_{max}/\delta_{max}$  と定義す る。図-10 にこれら 3 つの値の時間変化を各ケースに ついて計算した結果を示す。なお図中には著者ら(2011) が計測した7ケースの波浪についても同様に解析を行っ た結果も示している。波峰背後の勾配の最大値 $\delta_{max}$ はす べてのケースで砕波点に向かい緩やかな上昇を示し、そ の値は崩れ波砕波となる case1b、case9 では 0.4 程度の 比較的大きな値をとるが、中間形態または巻き波砕波と なる他のケースでは 0.25~0.35 とやや小さな値をとる。 一方で波峰前面の勾配の最大値*Emax* はほとんどのケース で砕波直前に 1.0 程度から急激に上昇し、2.0~8.0 程度 の値で砕波する。波峰前後における最大勾配の比 r は εmax の増加に伴い砕波直前に上昇し砕波時には 8.0 以上 の値となる。case3a や case9 などのいくつかのケースで は他のケースに比べ早い段階から r および Emax が大きな 値をとる。これらの波浪についてはさらに前の時刻の水 面形状の計測を行いその特徴について調査を行う必要が ある。

#### 4.3 水面曲率

カラーグリッド配列に基づき直接計算できる水面の接 線方向ベクトルから水面の法線方向ベクトルnを算出し、 これにより法線方向ベクトルの発散として定義する3次 元的な水面曲率κを計算することができる。図-11は case5aの波浪について水面曲率を計算した結果をプロッ トしたものである。水面曲率は波峰部の前面において最 大となりまた砕波点に近づくにつれてその値は増加する。



図-12 波峰方向平均曲率の最大値の時間変化

この波峰部前面における水面曲率の変化をみるため、水 面曲率の波峰方向平均値を求め、その最大値の時間変化 を図-12に示す。著者ら<sup>4)</sup>(2011)は崩れ波から小規模な 巻き砕波について、砕波に近づくにつれ曲率が増加し、 またその増加速度は巻き波砕波のケースで大きくなるこ とを示したが、より大規模な巻き波砕波を計測した今回 の実験結果についても同様の傾向が確認された。

#### 5. まとめ

本研究では著者ら<sup>3)</sup>(2010)が開発した面的水面形状 計測法により規則波の砕波直前の水面形状を計測した。

画像計測波形から取得する波峰方向平均水面形状と波 高計による水位時系列から波速により推定した波形を比 較し、時系列から推定する波形では時々刻々と変化する 砕波直前の波浪形状を適切に評価することができず、特 に波の前面においてその差異が大きくなることを示した。

画像計測により取得した水面座標に基づき水位勾配を 計算し、その波峰方向平均値から波峰の前後それぞれに おける最大勾配 $\varepsilon_{max}$ 、 $\delta_{max}$ およびその比 r から砕波直前 における波浪変形により発達する非対称性について評価 を行った。 $\delta_{max}$ は 0.25~0.43 程度となりその値は時間と ともに緩やかに増加する一方で、 $\varepsilon_{max}$ および非対称性を 示すrはほとんどのケースで砕波点に近づくにつれその 増加率が大きくなる。

より詳細にケースごとの特徴を評価し、また砕波形態 を評価する水面形状パラメータを決定するためには、波 浪条件および試行回数を増やして実験を行う必要がある。

#### 参考文献

- Kjeldsen, S. P., and D. Myrhaug : Wave-wave interactions and resulting extreme waves and breaking waves, Proc.17<sup>th</sup> Conf. on Coastal Engineering, ASCE, Australia, pp. 2277-2303
- Nepf, H. M., C. H. Wu and E. S. Chan: A Comparison of Two- and Three-Dimensional Wave Breaking, J. Phys. Oceanogr., Vol. 28, pp. 1496–1510, 1998.
- 三戸部佑太・大島香織・渡部靖憲:面的波浪水面形 状計測法の開発と砕波への適用,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No. 1, pp. 086-090, 2010.
- 三戸部佑太・渡部靖憲:砕波水面形状遷移の定量的 評価,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.I\_86-I\_90, 2011.