

重複性碎波の内部機構に関する研究

西村 仁嗣*・武 若 聡**

1. 緒 言

海岸域の諸問題を解明するにあたって碎波現象の把握は必要不可欠である。従来の研究においては、水深、波高および波長などの巨視的観点から現象を捉え、碎波指標の形で碎波位置、形態などを整理してきたが（例えば合田, 1973）、その普遍性には問題が残されているようである。合成波の碎波についての知見はさらに乏しく、こうした碎波に関する研究の遅れは、例えば、近年確立されつつある波の場の解析の弱点となっている。碎波現象に関する理解を深めるためには、その内部機構に立ち入った研究を避けて通ることはできない。

本研究では孤立波が鉛直壁の前面で形成する重複性の碎波を対象として実験による内部流速の推定および数値計算を行い、碎波の発生を特徴付ける特性量を追求する。重複波では碎波の発生位置は限定され、進行波の碎波に比して実験および数値計算の実施が容易である。従来、実験的、数値的研究はそれぞれ独立して行われることが多く、両者の議論は必ずしも噛み合わなかった感があるが、ここではこれら2つのアプローチを互いの欠点を相互に補う形で用いることとする。

2. 実験的研究

実験においては波の場にポリスチレンの微小粒子を散乱させ、鉛直壁前面に形成される孤立波の重複性碎波の様子を高速度 VTR を用いて撮影した。これから各時間における水面形を求め、また VTR 画像の平面相関解析によって個々の粒子の運動を追跡し、内部流速の推定を行う。

2.1 実験の概要

実験は全長約 14 m、幅 40 cm の 2 次元水槽を用いて行った。静水深は 7.8 cm に設定し、鉛直壁は水路端から約 7.5 m の位置に設けた。現象の 2 次元性を高め、かつ撮影の便宜を図る目的で水路幅は途中から 10 cm に狭められている。孤立波は圧搾空気によってピストン式造波板を 1 回駆動する形で発生させた。

図-1 は鉛直壁から 30 cm の地点での入射波高 a_e と鉛直壁での遡上波高 r_e の関係を示したものである。図中の実線は Byatt-Smith (1971) が理論的に与えた入射波高と遡上波高の関係式である。おおよそ図中の破線で示した値より入射波高が大きくなると、後述するような形で波動は碎波する。ここでは数値計算とのかねあいから入射波高が 5.25 cm、波高水深比 0.67 のケースをとり上げた。可視化、画像解析等、実験方法の詳細については前報（西村・武若, 1988a）を参照されたい。

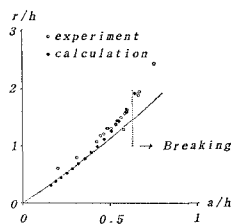


図-1 入射波高と遡上波高の関係
(実線: Byatt-Smith, J. G. B. (1971))

2.2 現象の記述

鉛直壁に入射した孤立波は壁面を遡上し、入射波高が大きい場合には下層部の流体が下降を始めても波頂部の水塊は遡上を続ける。この時点で、波動が碎波状態にある否かを外見から判断することは困難である。波頂部水塊の運動はほぼ非拘束の自由放体状になり、落下時には通常の波動運動を続ける下部の流体に突っ込み、渦を形成する。ここで観察者は初めて碎波を認識する。水塊の自由放体運動は進行性碎波に見られる jet と類似したものと考えられる。

図-2 には VTR 画像から読み取った 30 ms 毎の水面形を示す。最後の波形は下降中のものである。落下時に

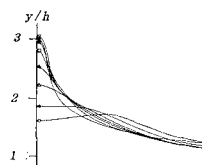
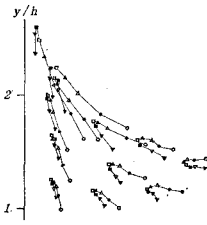


図-2 水面波形の時間変化
(実験, 時間間隔 30 ms, ○-●-△-□-■-▽-▼ の順)

* 正会員 工博 筑波大学教授 構造工学系

** 学生会員 工修 筑波大学大学院 工学研究科



図—3 粒子の軌跡

(実験、時間間隔 30 ms, ○-●-△-▲-□-■-▽-▼ の順)

波頂部が痩せる傾向は、入射波高が大きいくほど顕著になる。

図—3 には一連の画像から得られたいくつかの粒子の軌跡を示す。波動の上部に在った粒子ほど長い軌跡を残し、波動の下部の粒子が下降を始める時点においても上昇を続けることが分かる。これらの粒子がほぼ自由放体運動にあることは確認されている。

2.3 オプティカルフローによる流速場の推定

動画像処理の分野で研究が進められているオプティカルフロー (例えば Horn・Schunck, 1981) は、画像の明暗データの時空間的な勾配を利用して画面全体の速度ベクトル分布を求めるものである。画面内 (x, y) 、時刻 t における画像の輝度を G とし、その空間的な勾配を G_x , G_y , 時間的な勾配を G_t とする。流体塊の移動によってその輝度変化しないものとすれば、これらの時空間勾配の間に次式が成立する。

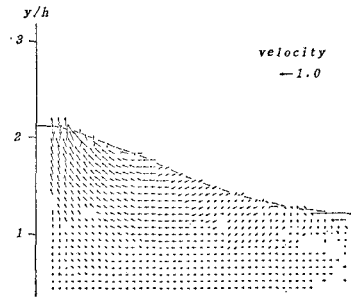
$$G_t + U \cdot G_x + V \cdot G_y = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 U , V は流体塊の移動速度である。1 次元の場合では一方の流速成分が存在しないので、この方法により簡単に流速が求められるが、2 次元の場合には上式は (U, V) に関する一つの制限条件を与えるに過ぎず、その確定にはさらに別の条件式が必要である。画像処理の分野では、速度分布の滑らかさを前提として、速度成分の局地的な各方向勾配の自乗和を最小とするように速度を定めた例が報告されている。しかしながら、こうしたとり扱いかいには水理学的な根拠は全く認められない。上式と独立な条件式としては、むしろ連続式を想定すべきであろう。その場合にも閉鎖域全体の速度分布を同時に扱かわざるを得ず、さらには領域縁辺で速度の境界値を与える必要が生じる。以上から明らかなように、速度場の推定に輝度勾配法を直接利用することは当面困難である。ここでは、式 (1) が流体塊の一定時間後の移動先を一本の直線上に制限する情報を提供している点に着目する。これを利用すれば、平面相関解析において必ずしも流体塊の移動先の面的検索が必要ではなくなる。最も単純には制限直線に沿う相関値のピークを検出し、流れの方向を知ることによって局地的に速度ベクトルを決定することができる。ただし、われわれの解析の対象

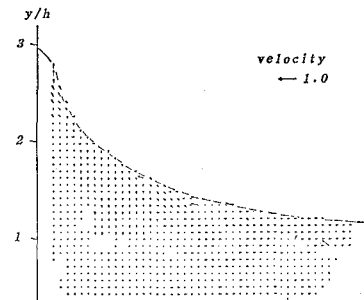
は水中に不規則に分散した微小な固形トレーサの撮影画像であり、従ってミクロ的には滑らかな輝度の分布は期待できない。適切なフィルター処理による画像データの平滑化がこの問題を解決する実用的な手段と思われる。最適なフィルターは画素とトレーサ個体画像の大小比率、ならびに輝度読み取りの分解度によっても異なるので、現時点で一般的に指摘することは困難である。当面試行錯誤により経験的に移動平均幅、重み分布等を定めざるを得ない。

2.4 実験結果

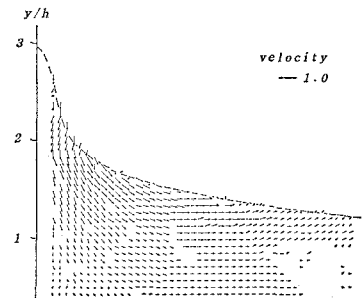
ここでは VTR 画像の平面相関解析により内部流速分布の推定を行う。本実験で対象とする砕波現象は極めて急激な流れの変化を伴うので、撮影には高速度 VTR カメラを使用し、毎秒 500 コマの割合で得られた画像を用いて速度場の推定を行った。図—4 (1)~(3) にはそれぞれ (1) 波動が遡上する段階、(2) 遡上水位が最大と



図—4 (1) 推定された内部流速分布 ($t=250$ ms)



図—4 (2) 推定された内部流速分布 ($t=342$ ms)



図—4 (3) 推定された内部流速分布 ($t=428$ ms)

なる直前、および (3) 波頂部の水塊が落下する時点での流速分布の推定結果を示す。流速値は、重力加速度を g 、静水深を h として、 $\sqrt{gh}$ で無次元化されている。図中、空白となっている位置では流速の推定が不可能であった。また、 $\bullet$ で示された位置では流速がほとんど 0 であった。いずれの図においても明らかに推定の誤まりと思われる流速ベクトルが散見されるが、全般的には上述の観察結果と合致している。特に、図-4 (2) では波動下層の流体が下降を始めているが、波頂部では遡上が続いている様子が捉えられている。

波頂部の粒子運動が自由放体のそれに近づくと、内部の圧力勾配が低下し、圧力は大気圧に近くなる。このとき流体粒子相互間の拘束は非常に小さくなることが予想される。得られた流速データから運動方程式を積分し、圧力分布の算定を試みたが、現状では流速データの精度が不足しており、信頼に足る結果は得られなかった。これを実現するには、測定系のハードウェアおよびソフトウェアの両面の改善が必要である。

3. 数値解析

ここでは非圧縮、非粘性の仮定のもとに、Lagrange 表記された方程式系に基づき (西村・武若, 1988b)、実験水槽内で観察された現象の数値的再現を試みる。

3.1 数値計算の概要

水平床の水路を想定し、一端の鉛直壁を水平方向に一度だけ変位させることにより孤立波を発生させる。水路長は静水深の 12 倍とし、格子線数は水平方向に 85 本、鉛直方向に 10 本とした。

水路中央の計算点で得られた入射波高 a_0 と水路終端の鉛直壁における遡上波高 r_0 の関係を 図-1 に示す。図中の破線よりも入射波高が大きくなると計算上の不安定が生じるが、これは実験で観察された碎波限界にほぼ対応している。

3.2 碎波内部の流体運動

図-5 は、入射波の波高水深比が 0.64 のケースについて、遡上水位がほぼ最大となる時点までの計算波形を時間間隔 $0.2 \cdot \sqrt{h/g}$ (約 18 ms) 毎に示したものであ

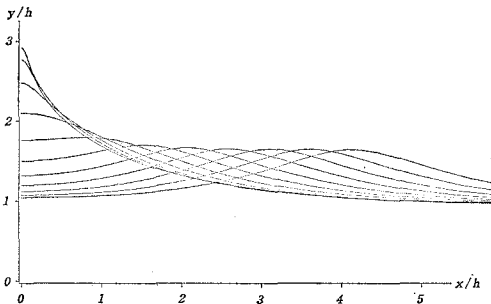


図-5 水面波形の時間変化 (計算、時間間隔 約 18 ms)

る。実験結果と類似の波形が得られている。

計算で得られる直接の物理量は各粒子の位置と速度であり、これらから加速度と圧力を算出することができる。遡上部先端で (1) 鉛直上向きに最大の加速度が生じた時点、(2) 鉛直上向きに最大の速度を生じた時点、また (3) 遡上水位がほぼ最大となった時点での速度場、加速度場、圧力場を 図-6 (1)~(3) に示す。ここで速度は $\sqrt{gh}$ 、加速度は g 、圧力は ρgh (ρ : 水の密度) を用いて無次元化されている。図-1 に示される入射波高と遡上波高の関係、また 図-6 に示される水面波形、流速場はいずれも実験で得られた結果と類似のものであり、計算は実現象を良好に再現していると判断される。

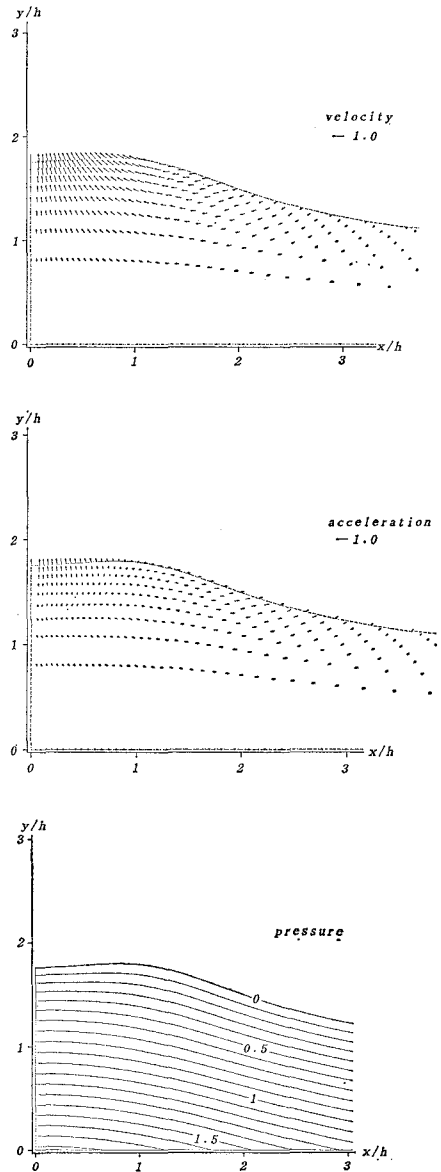


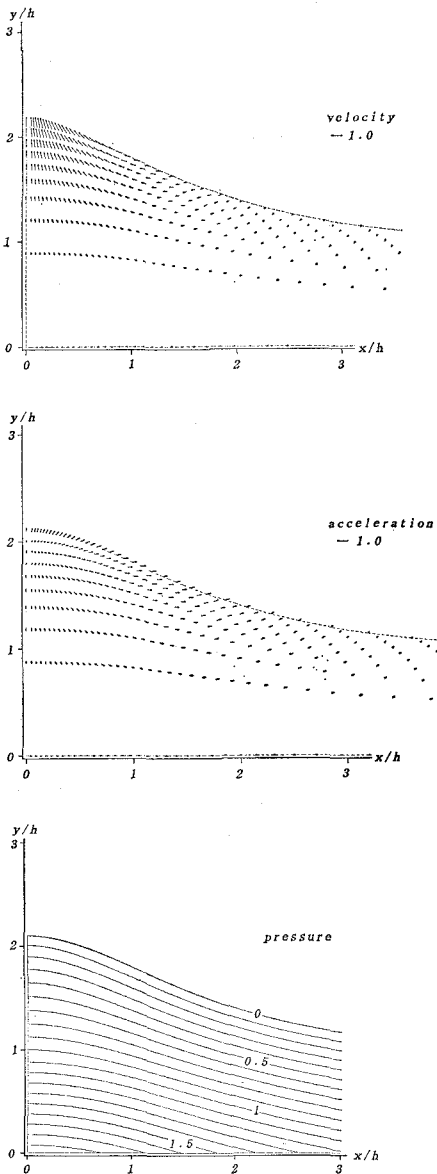
図-6 (1) 速度場、加速度場、圧力場 (計算、700 step)

図—6 (3) の速度場では波動の下層が下降を開始しているにもかかわらず、上層に遡上を続ける速度成分が残存している。また同図の加速度場では、波頂部近傍の粒子の加速度はほぼ $-g$ に等しく、運動は自由放体状になっていると判断される。圧力場全体はほぼ静水压分布に近いが、波頂部近傍では圧力勾配が非常に小さく、局所的に圧力が大気圧に近くなっている。これらの事実はいずれも実験上の知見もしくは推測を裏付けるものである。

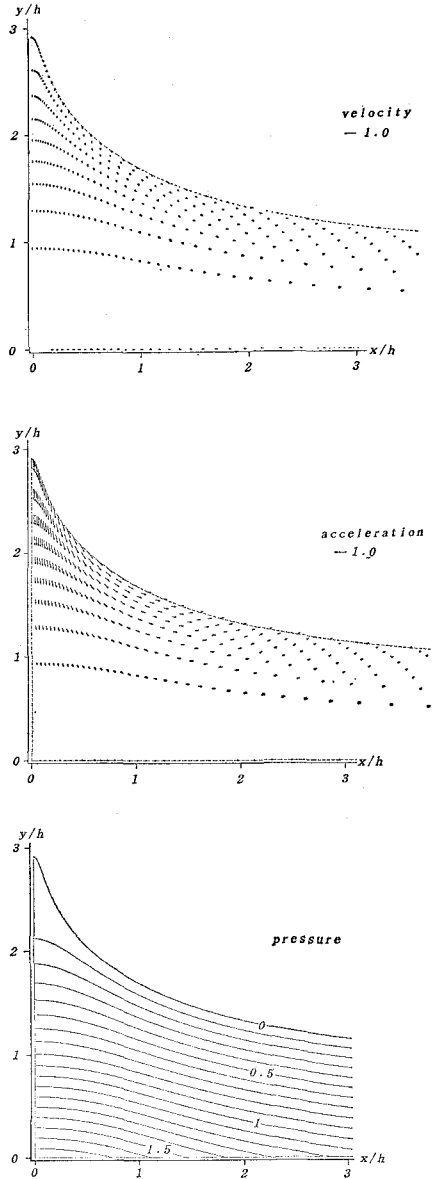
図—6 (3) に示した時点以降は計算上の不安定のために、その続行が不能となる。現時点ではこの不安定が物理的な不安定に対応するものか否かは確信できない。

類似する計算上の破断は深海波の重複波を境界積分法により数値計算した Saffman・Yuen (1979) の研究においても報告されている。また、Taylor (1953) は重複波の実験的研究において波頂部の加速度が $-g$ を超えると、その微小な擾乱が発達する可能性があることを指摘している。波動がこのような状態に達したときには、波頂部の水粒子が強く加速され、計算格子の変化が極端になるという数値解析技術上の問題が生じ勝ちである。

図—6 (1) および (2) は波頂部が全体から遊離する以前の状態を示しているが、前者における鉛直方向の最大加速度は $0.63g$ 程度、後者における鉛直方向の最大速度は $1.05 \cdot \sqrt{gh}$ 程度である。一部の流体が自由放



図—6 (2) 速度場，加速度場，圧力場（計算，720 step）



図—6 (3) 速度場，加速度場，圧力場（計算，780 step）

体運動に達することはこれらの値からは類推し難い。

図-6 (1) の圧力場では波頂部の圧力勾配が静水圧分布の約1.5倍と大きくなっており、先端の流体塊が全体の波動から突出して遡上する下地を作っている。図-6 (2) の圧力場を見ると、波頂部と波動下層部で静水圧分布に近くなっているが、その間の領域では圧力勾配が小さくなり始めている。

4. 結 語

孤立波が形成する重複性砕波においては、一部の流体が非拘束の自由放体運動をすることが実験および計算を通じて確認された。また、これを力学的に裏付ける圧力分布は計算によって得られた。このような砕波の初期段階を特徴付ける一つの因子として、圧力勾配の局所的な低下が挙げられる。今後、進行波、不規則波さらには重合波といったさまざまな波の砕波について考える上で、運動学的な観点のみならず、圧力分布という力学的な観点から研究を進めることが望まれる。

謝 辞: 実験データの解析にあたっては、筑波大学第

三学群基礎工学類 篠田昌久君の御協力を得た。ここに記して謝意を表する。なお、この研究は文部省科学研究費補助金によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 合田良実 (1973): 不規則波の砕波指標について, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 571~577.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988a): 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.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988b): Lagrange 表記による二次元波動の数値解析, 土木学会論文集, No. 393/II-9, pp. 203~211.
- Byatt-Smith, J. G. B. (1971): An integral equation for unsteady surface waves and a comment on Boussinesq equation, J. Fluid Mech., Vol. 49, pp. 625~635.
- Horn, B. and B. Schunk (1981): Determining optical flow, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 185~203.
- Saffman, P. G. and H. C. Yuen (1979): A note on numerical computations of large amplitude standing waves, J. Fluid Mech., Vol. 95, pp. 707~715.
- Taylor, G. I. (1953): An experimental study of standing waves, Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 218, pp. 45~59.