

砕波後の流れ場の 3 次元特性に関する実験的研究

水谷 夏樹*・安田 孝志**・武田 真典***

1. 緒 言

砕波後の流れ場が基本的に 3 次元的事であることは、鉛直方向に軸を持つ斜降渦の存在が指摘されていることから明らかであるが、2 次元的な運動が支配的な大規模水平渦の発生から 3 次元流れ場への遷移過程を含めて、その特性は明らかになっておらず、砕波のモデル化に際してもその特性を明らかにすることは重要である。

2 次元造波水槽による砕波後の 3 次元性に関する研究はあまり多くなく、Chang and Liu (1998) が砕波直後のある断面について PIV により水路横断方向の流速場を計測し、渦度について示している。岡安ら (1998) は 2 成分ファイバー・レーザー流速計 (FLV) を 2 回に分けて 3 次元計測を行っているが、水路の制約から鉛直方向と水路横断方向の各流速成分は同一点による計測ではない。また現地における砕波の 3 次元性について灘岡ら (1987) が 2 台の電磁流速計を用いて行っているが、この場合もそれぞれの電磁流速計の設置水深は約 50 cm 離れている。また、数値計算による砕波後の 3 次元性については陸田 (1999, 2000)、渡部 (1998, 1999) などがあるが、計算結果の評価には実験事実の評価が前提となる。

そこで本研究では、PIV を用いて 2 次元造波水槽における砕波後の流れ場の 3 次元特性について明らかにする。特に表層付近に着目し、水平断面内における渦の挙動について検討を行う。

2. 実験方法および条件

水理実験は、岐阜大学所有の $0.4 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 15.4 \text{ m}$ の 3 面ガラス張り 2 次元造波水槽 (伊勢屋機械製作所製) を用い、その中にリーフ高 $R=9.0 \text{ cm}$ のアクリル製のリーフを設置した。水深 h を 15.0 cm とし、沖側端のピストン式造波機によって $H=7.67 \text{ cm}$ (実測平均波高) の孤立波を入射させた。

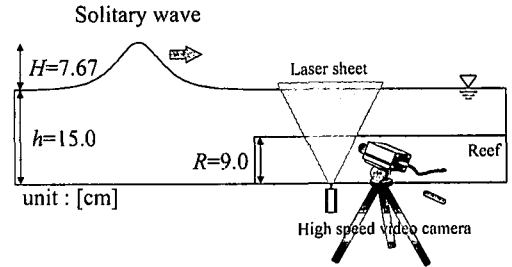


図-1 実験水槽の概要

側方からの画像の撮影は、図-1 に示すように最大出力 5.0 W の半導体レーザー (Millennia, Spectra-Physics 製) を底面よりシート状にして水路中央に照射し、側方より高速度ビデオカメラ (Motion scope, Radlake Imaging 製) を用いて行った。この時、造波信号をトリガーとして時間制御を行うことにより全ての撮影断面で画像の時間的同期を取った。それぞれの画像に対して PIV 法 (VISIFLOW, AEA Technology 製) により 56×56 の瞬間の速度ベクトルを得て、渦度分布を中心差分により求めた。1 断面の画像の撮影範囲を約 $16 \times 16 \text{ cm}$ としたため、流下方向に画像を適度にオーバーラップさせながら合計 14 断面の撮影を行った。

次にレーザーシートを側方より静水面下 5 mm のところに照射し、底面より撮影を行うことで水路横断方向の速度成分についても合計 8 断面の計測を行った。いずれの場合もフレームレートおよびシャッタースピードはそれぞれ 250 fps, $1/750 \text{ s}$ とした。

鉛直断面の撮影については同一条件で造波を 10 回行い、同一地点で 10 回の撮影を行った。そのため同一時刻、同一地点での瞬時ベクトル分布を 10 回分取得し、これらのデータにアンサンブル平均を施し速度場の平均成分と変動成分に分離した。また、水平断面については水路横断方向の平均流速は極めて小さいとし、横断方向に 40 点の空間平均を取ることで乱流成分の分離を行った。

画像の撮影にあたって水面や気泡界面から強い散乱光が生じる。このためトレーサー粒子 (ナイロン 12, 比重 1.02, 平均粒径 $50 \mu\text{m}$) を蛍光染料 (Rhodamine-B) で着色し、光学フィルター (S76-O56, 駿河精機製) を用い

* 正会員 博(工) 国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部 沿岸域システム研究室

** 正会員 工 博 岐阜大学教授 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻

*** 岐阜大学大学院 工学研究科 環境エネルギーシステム専攻

て、強い散乱光をカットして励起光のみを撮影した。

また、予備実験においてレーザーシートの高さを 1 mm 程度にした場合、大規模渦が発生している領域では、流体の強い 3 次元性のためにシート層厚内にトレーサー粒子を保持できず、ベクトルを算出できない場合が多かった。そこで本実験ではシート厚を 5 mm に設定し 3 次元運動にもある程度対応できるように行った。

画像撮影の他に、容量式波高計によって時間波形の記録も併せて行った。画像撮影時には波高計が邪魔になるため、時間波形と空間波形の同時記録は行っていない。このため時間波形の記録は、各ケースを 10 回造波し、最も沖側の波高計 (W01) によって時間的同期を取った後、各時刻のデータの 10 回のアンサンブル平均をとって求めた。なおサンプリング周波数は 100 Hz で記録した。

3. 鉛直断面における乱れ特性

まず、リーフ上の砕波の全体的な傾向を述べるため、延べ 20 本設置した波高計のデータを示す。

図-2 は、平均の波頂高の最大値と変動強度の最大値の空間的変化である。横軸はリーフ法先をゼロとした岸沖方向の距離を示しており、左側縦軸が平均の波頂高の最大値、右側縦軸が変動強度の最大値である。各波高計ともに 10 回の造波を行い、時間的同期を取った上でアンサンブル平均を施し、平均の波頂高 $\langle \eta \rangle$ と変動強度 $\langle \eta'^2 \rangle^{1/2}$ に分離した。入射波 (W01: $X=260$ cm) における平均波高と変動強度の比は 1/100 以下であり、造波の再現性が極めて高いことを示している。

平均の波頂高について見ると W05 ($X=90$ cm) の砕波点付近で最も波頂高が高くなり、その後は徐々に低下している。変動強度については突入点を過ぎた W07 ($X=150$ cm) 付近で最も大きくなっており、その後のボアの形成に対応する形で推移している。また、平均成分、変動強度共に、W10 ($X=240$ cm) を境界にしてその傾向が明瞭に分かれることから、W10 を境界に outer region と inner region とに分けて考えることができる。

次にジェット突入直後の鉛直断面におけるアンサンブル平均渦度の空間分布を示したのが図-3 である。図中

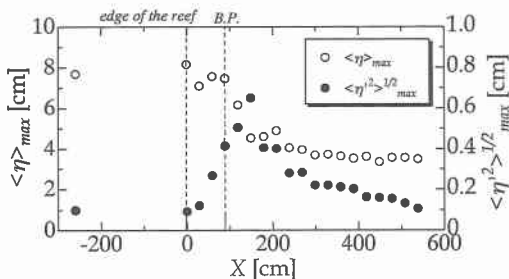


図-2 平均の波頂高と変動強度の最大値の空間分布

の実線は、液相領域と気泡混入領域との境界をそれぞれの断面における第一回目の撮影画像に基づいて目視により定めたものである。 $t=4.48 \sim 5.08$ s においては、ジェット突入に伴って大量の気泡が水中に混入し、その領域においてトレーサー粒子が視認できなくなることから、水面下に渦度が表示されない領域が存在する。図を見るとほぼ全領域で負の渦度 (時計回り) が分布しており、波のフロントからくさび状に分布している。水谷ら (2000) は、砕波後の乱流場においてジェット突入による組織渦構造を瞬間の渦度の分布において示しているが、アンサンブル平均された渦度の分布からそうした組織渦構造は確認できず、乱流層としての取り扱いが合理的であることを示している。この原因について幾つか要因が挙げられるが、一つは初期条件の僅かな差異が本来不安定である砕波後の乱れ場において大きな差異となり、それらをアンサンブル平均することによって全体に平滑化された分布となることが挙げられる。

さらに、図中においても示されているが、ポアフロント付近では実線以下の液相領域においても渦度が示されていない領域が存在する。これは流体の 3 次元性が極めて強い領域を示すものであり、1/250 s という極めて短い時間にも関わらず水路横断方向の流速成分が大きく、トレーサーをレーザーシート内に保持できないために速度場を算出できなかったことによるものである。ポアフロント背後におけるこうした強い 3 次元性は、組織渦をより小規模な渦へとカスケードさせ、それらの小規模な渦はランダムに生成されることから平均操作によって全体が平滑化されたものと考えられる。

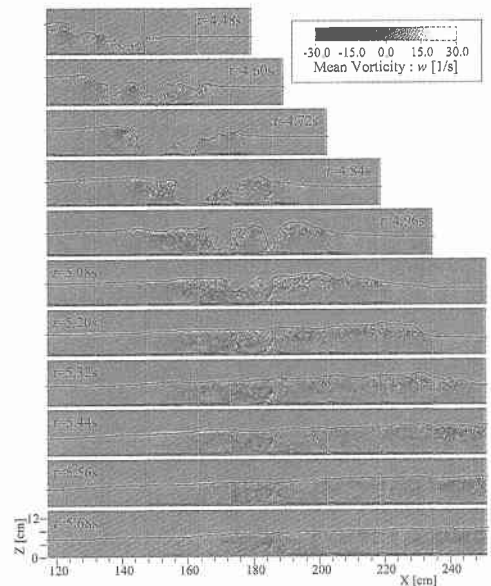


図-3 アンサンブル平均された渦度の空間分布

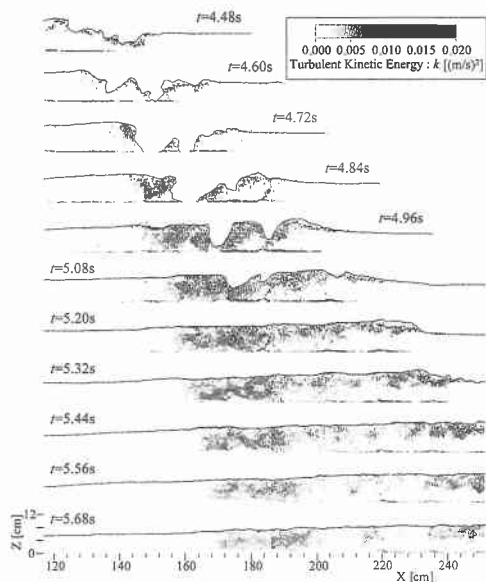


図-4 乱流エネルギーの空間分布

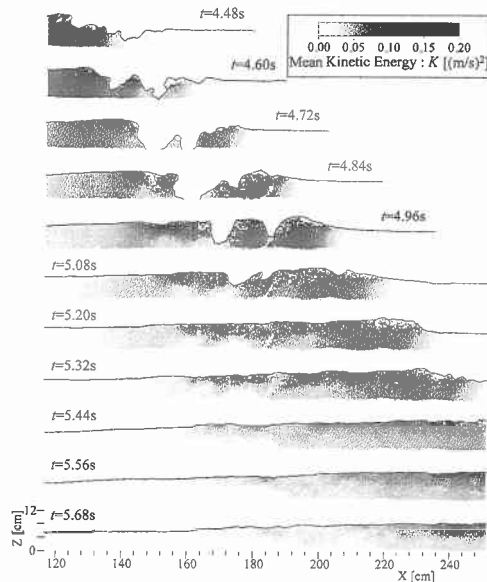


図-5 平均の運動エネルギーの空間分布

次に乱れ場のオーダーについてみると、図-4は図-3に対応した乱流エネルギー k の空間分布である。ここで鉛直断面における乱流エネルギーは、 $k=1/2(\bar{u}^2+\bar{w}^2)$ で表しており、 $\bar{u}$ と $\bar{w}$ はアンサンブル平均操作により求めた岸沖及び鉛直方向の速度の変動成分である。

乱流エネルギーの空間分布は渦度分布とほぼ一対一の対応を示しており、ジェット突入及びボアフロントから生成された渦にトラップされる形で移流し、拡散が生じていることが分かる。しかし、乱流エネルギーのオーダーは波速の2乗値 $(1/2(\sqrt{gh})^2)$ の高々数%でしかなく、波動場の持つエネルギーに対してあまりにも小さい。これに対し、図-5の平均場の運動エネルギーについて同様に見てみると、同じく渦の拡散に応じた分布を示していることが分かる。平均場の運動エネルギーのオーダーは乱流エネルギーのそれより一桁大きく、波の進行と共に拡散領域が広がっていることから、波のフロント域に保有されるエネルギーが渦を介して流れ場へ遷移することで波高を低下させるプロセスを説明することができる。これは、水谷ら(2000)が示したように、平均場から乱流場というカスケードプロセスを経ることなく、流れの平均場と波動場との隔離が波高低下の主要因であることを示すものである。

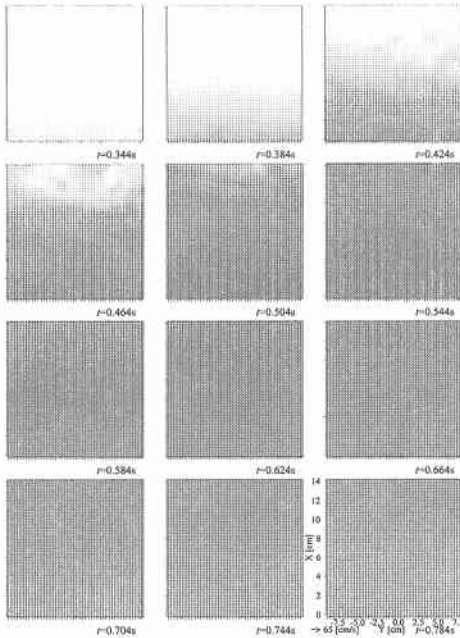
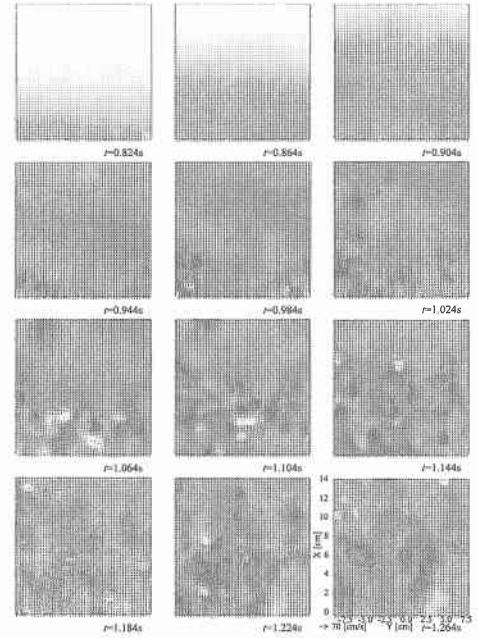
4. 水平断面における乱れ特性

次に水平面内における流れ場に対し、特に水路横断方向の速度成分と渦の生成の関係について考察する。

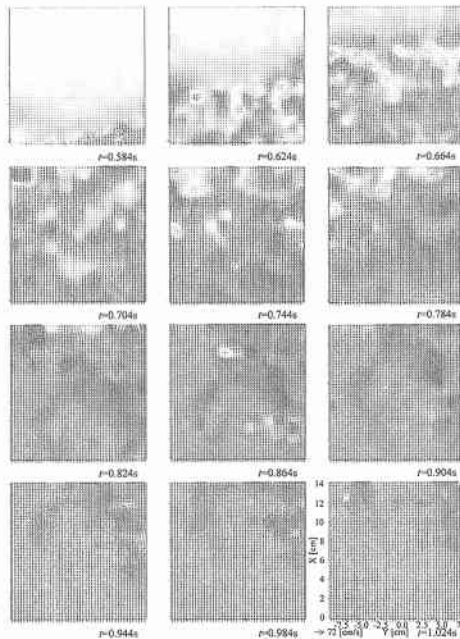
図-6はouter regionにおける波のフロントの通過前後の速度ベクトルの分布である。座標軸(X, Y)はそれ

ぞれ岸沖方向および水路横断方向を示し、 $Y=0$ cmが水路中央に相当する。水槽の実際の幅が40 cmであるのに対して撮影範囲は横断方向に約16 cmしかない。したがってベクトル図の両端は水槽のガラス壁の位置ではなく、さらに10 cm以上離れてガラス壁があるため、撮影範囲における側壁の影響は小さいものと考えられる。一方、縦軸は岸沖方向を示しており、波は下から上に向かって進行する。それぞれのケースの撮影範囲は、(a)が $X=138\sim154$ cm、(b)は $X=168\sim184$ cm、(c)は $X=198\sim214$ cmである。

(a)のケースを見ると $t=0.384\sim0.464$ sで波のフロントが通過しているのが分かる。撮影範囲が $X=146\sim162$ cmであることから、図-3と対応させると、ここでは第一スプレイ突入による混入気泡渦が通過し、その後ジェット突入によって生成される大規模組織渦が通過している。しかし、図中において速度の横断方向成分はほとんどなく、水平面内における乱れはほとんど生じていない。(b)になると、波のフロントからすでに乱れが発生しており、全体を通していても最も乱れているのがフロント域であることが分かる。発生している渦の大きさは数 cmのオーダーであるが、水平方向に軸を持つ組織渦の大きさが水深程度(6 cm)であることを考えるとおよそ1/2である。波のフロント通過後はフロントにおける乱れに比べて低周波の乱れとなり緩やかな蛇行となって進行している。さらに(c)になると、波のフロント部分にはほとんど乱れは発生していない。この地点ではouter regionの終端となり、気泡を混入する領域および強い渦を伴う波のフロントは静水面より上の部分とな


 (a) $X=138\sim154$ cm

 (c) $X=198\sim214$ cm

図一 水平断面内の流速ベクトル分布 (静水面下 5 mm)


 (b) $X=168\sim184$ cm

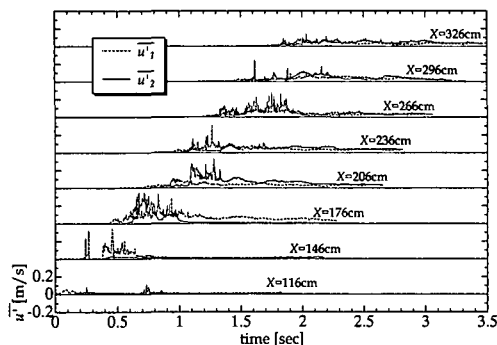
図一 水平断面内の流速ベクトル分布 (静水面下 5 mm)

的低周波の乱れとなっており、これらの乱れが側方から観測されている組織渦(水谷ら, 2000)がボアフロントから分離・残留し、その過程で 3 次元化が進行して水平断面内に渦が現れているものと推測できる。

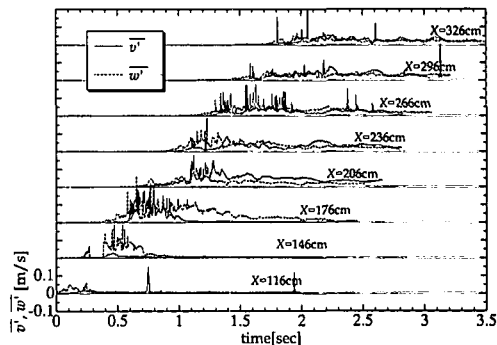
(b), (c)を通して横断方向の最大速度はおおよそ 70 cm/s である。この値は静水面下 5 mm での値であるため静水面より上の強い渦領域ではこの値よりも大きいことが予想される。仮に最大値が 100 cm/s であったとすると撮影間隔 1/250 s の間に横断方向に 4 mm 程度流体が移動するため、予備実験で行った 1 mm 以下のレーザーシートの厚さではその運動を捉えることができないのは当然の結果である。

inner region におけるボアフロント通過前後の速度ベクトルの分布特性は、どの断面においても (c) に見られたようにボアフロント通過時にはほとんど乱れは生じていない。フロント通過後に間欠的に乱れが生じており、その様子は日野ら (1984) が示した斜降渦の可視化実験に極めて類似している。この水平面内の渦は前述したように水平方向に軸を持つ組織渦が 3 次元化したものと推測できるが、(a) の $t=1.864\sim1.944$ s に見られるように水路横断方向に局所的に速い部分が存在し、水平方向に軸を持つ渦がここに存在するとするとその一部はねじ曲げられていわゆる ‘ヘアピン状の渦管’ が発生すると考えられる。ねじ曲げられた渦管は水面より下に向かって延びていき、最終的には渦管はちぎれて細かな乱れとなる。

る。したがって静水面下 5 mm での水平面内には乱れがほとんど確認できず、波のフロント直下にも関わらず、この領域がポテンシャル流れの領域であることが分かる。しかしながら、フロント通過後には (b) と同様に比較



(a) 岸沖方向成分



(b) 鉛直及び水路横断方向成分

図-7 乱れ強度の時空間変化

これが水平面内に発生している渦の発生メカニズムではないかと考えられる。

5. 乱れの等方性と時空間変化特性

図-7は、鉛直断面及び水平断面の撮影断面が重なる計測から、同一点における速度の時系列を抽出し、鉛直断面における撮影では、10回のアンサンブル平均を、水平断面における撮影では水路横断方向に40点の空間平均を求めて各変動成分の時系列を求めたものである。鉛直断面における撮影からは、 $\overline{u'}$ (岸沖方向成分) と $\overline{w'}$ (鉛直方向成分) が、水平断面からは $\overline{u'}$ (岸沖方向成分) と $\overline{v'}$ (水路横断方向成分) の各乱れ強度が求まる。

岸沖方向の乱れ強度は、2方向の撮影断面からそれぞれ求められ、かつ平均操作が異なるものの全体的に良く一致している。ただし $X=146\text{ cm}$ に見られるように、ジェット突入直後の波のフロント通過時においては差異も存在する。これはアンサンブル平均を施した鉛直断面の計測において、初期条件の差異が乱れの生成に鋭敏に反映されたことに加え、ジェット突入による大量の気泡混入によって、主に鉛直断面の計測時において計測不能領域が出てしまったことから、結果としてノイズのような時系列特性を有しているものと考えられる。しかし、これらを考慮しても時系列特性には大きく2つの傾向に分かれており、比較的高周波の変動を有するフロント通過時と、その後の緩やかに変動している領域が存在する。

鉛直及び水路横断方向成分についても岸沖方向成分と同様の変動特性を有しているが、フロント通過時における各成分のオーダーは、岸沖方向成分のみが約2倍と著しく大きい。しかし、フロント通過後の緩やかに変化する領域においてはほぼ同じ値となっており、前述の水平方向に軸を持つ組織渦の3次元化による乱れの生成過程が、乱れ強度の非等方から等方への変化傾向からも推測

することができる。

6. 結 語

砕波後の流れ場の3次元特性について、PIVを用いた水理実験によって検討を行った。その結果、ジェット突入によって生成される水平方向に軸を持つ組織渦が、波のフロントから分離・残留されることによって急速に3次元化し、比較的低周波、かつ小規模な乱れへと遷移する過程を明らかにした。またこれらの過程を乱れ強度の時空間特性からも明らかにすることができた。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費（特別研究員奨励費）による成果であることを付記し謝意を表す。

参 考 文 献

- 岡安章夫・鈴木崇之 (1998): 砕波帯内の3次元乱れ特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 126-130.
- 澁岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 21-25.
- 日野幹雄・澁岡和夫・小俣 篤 (1984): 砕波帯の乱れの組織渦構造と水粒子速度場について, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 1-5.
- 水谷夏樹・安田孝志・武田真典 (2000): 砕波後の組織渦構造とエネルギー散逸の関係について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 156-160.
- 陸田秀実・安田孝志 (1999): 砕波後の気液混相流体場の力学的運動機構に関する数値的研究, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 161-165.
- 陸田秀実 (2000): 大規模砕波による気液混相流体場における高精度数値計算法の開発, 岐阜大学博士学位論文, 198 p.
- 渡部靖憲・森 憲広・佐伯 浩 (1998): 砕波の3次元Large Eddy Simulation, 岸工学論文集, 第45巻, pp. 146-150.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (1999): 大規模旋回渦, 斜行渦, 3次元砕波ジェットの生成及び発達機構, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 141-145.
- Chang, K and P.L.-F. Liu (1998): Velocity, acceleration and vorticity under a breaking wave, Phys. Fluids, 10(1), pp. 327-329.