

実海域における砕波に伴う気泡生成及び連行特性

渡部 靖 憲* ・大塚 淳 一** ・安原 幹 雄***
加藤 雅 也**** ・王 毅***** ・佐伯 浩*****

1. はじめに

砕波ジェットの水塊への突入により生成される大量の気泡は、その浮力及び抗力により流体運動に大きな影響を与えるだけでなく、沿岸域における酸素供給源として生物的にも重要な役割を有する。しかしながら、実海域における気泡生成に関する報告は殆どなく、波浪諸元あるいは砕波形態に応じて異なる気泡の生成機構が未解明であるため、気泡量、気泡径をはじめとする基本物理量と波浪との関係が予測できず、二相流問題としての気泡に関する初期条件さえ与えることができない。また、砕波帯での気泡の存在が海岸工学及び水産工学的な諸問題に与える影響を議論する必要がある。

著者ら (1999) は、定常 jet 下の気泡速度、気泡流中の水粒子速度を Particle Image Velocimetry により評価し、気泡生成機構を特定すると共に混入気泡の顕著な流体運動への影響を報告した。Chanson の一連の研究 (例えば Chanson・Brattberg, 1998) には、定常 jet 下の混入気泡の拡散過程における抗力について詳細に議論されている。しかしながら、これらの実験的研究は jet 及び気泡生成・輸送の定常性を仮定したもので、非定常 jet が非定常剪断流中に突入する砕波後の混入気泡とは明らかに異なる。

本研究は、実海域における気泡の生成・輸送・拡散過程及び砕波形態との依存性、連行特性を把握すると共に砕波後の渦構造と連行気泡との相互関係を明らかにすることを目的として、現地観測によって得られた水中からのビデオ映像を基にこれらを議論するものである。また、波動実験において観察され報告されている斜行渦を含む砕波後の大規模渦構造の発達過程が実海域のものとのように異なるのか連行気泡特性の比較を通して議論される。

2. 実験及び観測方法

現地観測は、1999 年 8 月、北海道白老町虎杖浜海岸、豊浦町大岸海岸そして古平町古平海岸で行われた (図-1 参照)。虎杖浜及び大岸海岸は砂浜海岸、古平海岸は岩礁海岸であり、それぞれの海岸に伝達する波浪の有義周期は 10.0 s, 8.5 s, 3.89 s, 平均砕波波高は 90 cm, 75 cm, 34 cm であった。虎杖浜海岸と大岸海岸については大部分が巻き波砕波であり、古平海岸では逆に崩れ波砕波が多く発生した。虎杖浜及び大岸海岸は両者共、砕波点から約 1:3 の一様勾配の海底地形をもち (砕波水深約 80~90 cm)、古平海岸は図-2 に示すようにリーフ型の海底地形であり砕波水深は約 50~80 cm であった。図-3 に示すように直径 6 cm の超小型水中カメラ (広和製) を重さ約 12 kg の鉄製錘に固定し、それぞれの海岸の砕波点背後に設置した。流体運動のスケールと比較して水中カメラは小さくまた深い位置に設置してあるため流体運動及び気泡運動に大きな影響は与えていないと考えられる。水中カメラからの映像は沖方向、岸方向、沿岸方向の 3 方向について撮影された。水面変動と水中画像を同期させるため、地上から同時にビデオカメラで観測点を撮影した。図-4 に表される観測風景から砕波及び入

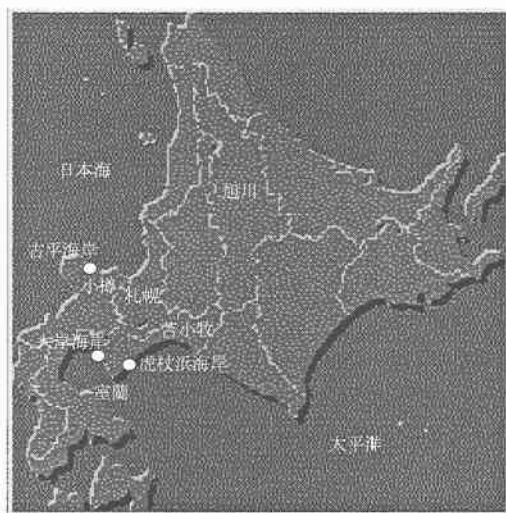


図-1 観測が行われた海岸

* 正 会 員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科
** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
*** 学生会員 北海道大学大学院工学研究科
**** 正 会 員 日本データサービス(株) 総合解析室
***** 正 会 員 工修 (株)北王コンサルタント
***** フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科

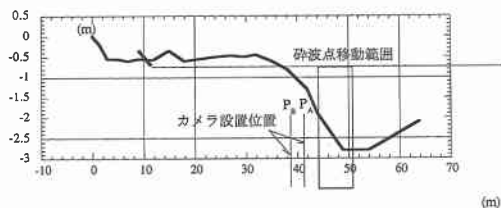


図-2 古平海岸の平均波向方向に沿う海底地形

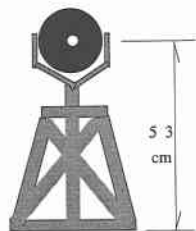


図-3(左) 水中カメラと設置台の概略図



図-4(右) 観測風景

射波のスケールを容易に想像できる。

実海域の気泡特性と実験水槽内のそれとを比較するため、現地観測と同様な方法で実験を行った。二次元波動水槽は長さ 24 m、奥行き 60 cm、高さ 1 m の大きさを持ち、吸収制御付のピストン型造波装置が設置されている。一樣海底勾配 1 : 20 の終端にはビーチ型の消波工が設置されている。現地観測に使用された同一の超小型水中カメラが砕波点背後に水槽上方から固定され、巻き波、崩れ波砕波のそれぞれについて水中映像が撮影された。なお、実験水槽内においては使用したカメラは入射波のスケールと比べ十分小さいとは言えないが、水中カメラは気泡の混入域から十分離れた位置に固定し観測したため、気泡の混入帯の流体運動にカメラの存在が直接は影響を与えていないと言える。

3. 結 果

3.1 ボアフロント下の組織的連行気泡構造

図-5 は、古平海岸における岸方向に向けられた水中カメラ（設置位置 P_A 、図-2 参照）からの連行気泡の画像である。砕波後のボアフロントは、カメラの背後からレンズの軸方向に進行する。各画像の位相間隔は 1/15 秒である。ボアフロント直下及びその背後において、連行気泡は雲状に分布し、フロントの進行と共に広がっていく。この連行気泡は局所的に大量の気泡が集中する気泡塊としてほぼ規則的に配列する組織的気泡連行構造が形成されていることがわかる。隣り合う気泡塊の間隔は、砕波波高のスケールと同程度であり、この波に関してはフロント近傍で 10 cm 程度からボア背後で 30 cm 程度まで変化した。

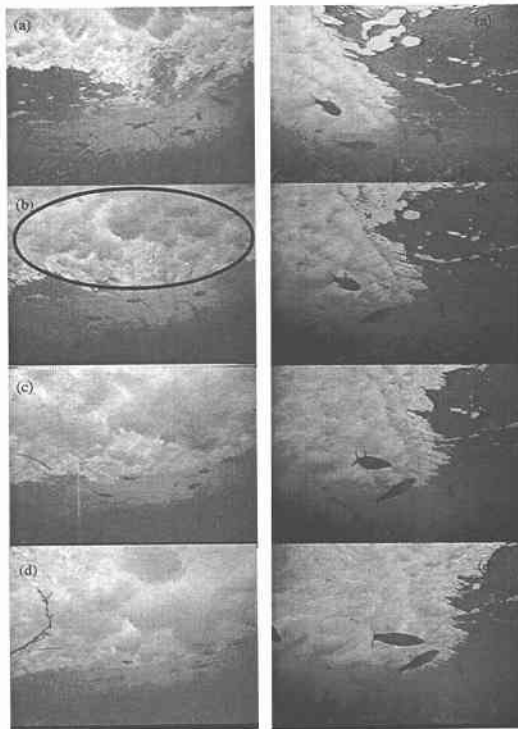
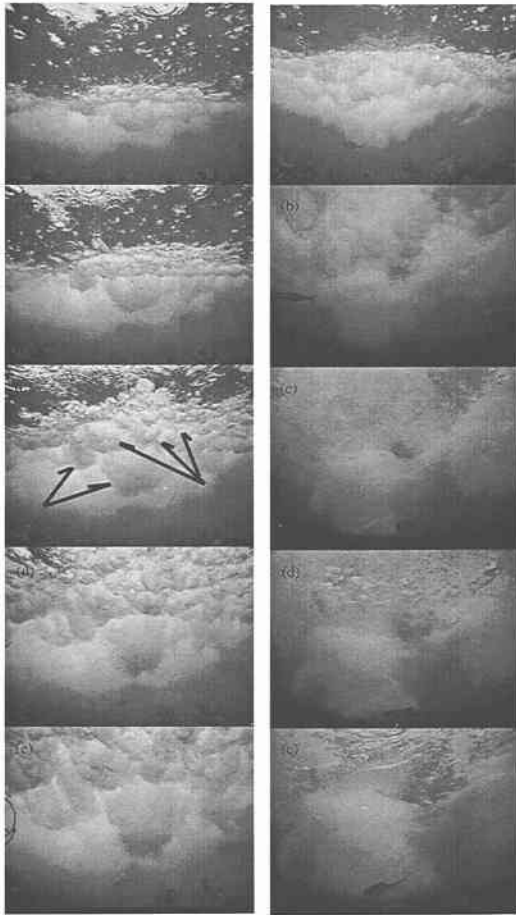


図-5(左) ボアフロント直下の典型的な気泡連行構造(古平海岸、撮影方向：岸方向、位相間隔：1/15 秒)

図-6(右) ボアフロント直下の典型的な気泡連行構造(古平海岸、撮影方向：沿岸方向、位相間隔：1/15 秒)

図-6 は、古平海岸における沿岸方向に向けられた水中カメラ（設置位置 P_B 、図-2 参照）からの連行気泡の画像である。波浪は左から右に進行する。ボアフロント先端では比較的小規模な気泡塊が狭い間隔で生成され、ボアフロントの進行と共に次々に同様な気泡塊が大量に生成されていく過程がわかる。この組織的気泡連行構造はボア領域においてはその規模は異なるがほぼ全ての波浪に対して確認されたことから、砕波形態及び入射波諸元に依存しないボア領域の特徴的な連行気泡構造であると考えられる。

図-7 は、古平海岸における沖方向に向けられた水中カメラ（設置位置 P_B 、図-2 参照）からの連行気泡の画像である。ボアフロントが前図と同様に大量の小規模気泡塊を生成させながら組織構造を構成していることがわかる。また、フロント通過後、この個々の気泡塊はそれぞれ次第に下方及び側方に大きく発達し、気泡塊間隔も広がっていく。水中深くまで到達する気泡の殆どは非常に径が小さく、十分な浮力を有しないため上昇しにくい。このため、一度下方に移動させられた気泡塊はほぼ同じ深さに停滞し対流を続ける傾向をもつ。この小気泡の移動対流過程は砕波後の大規模渦と密接な関係をもつと考



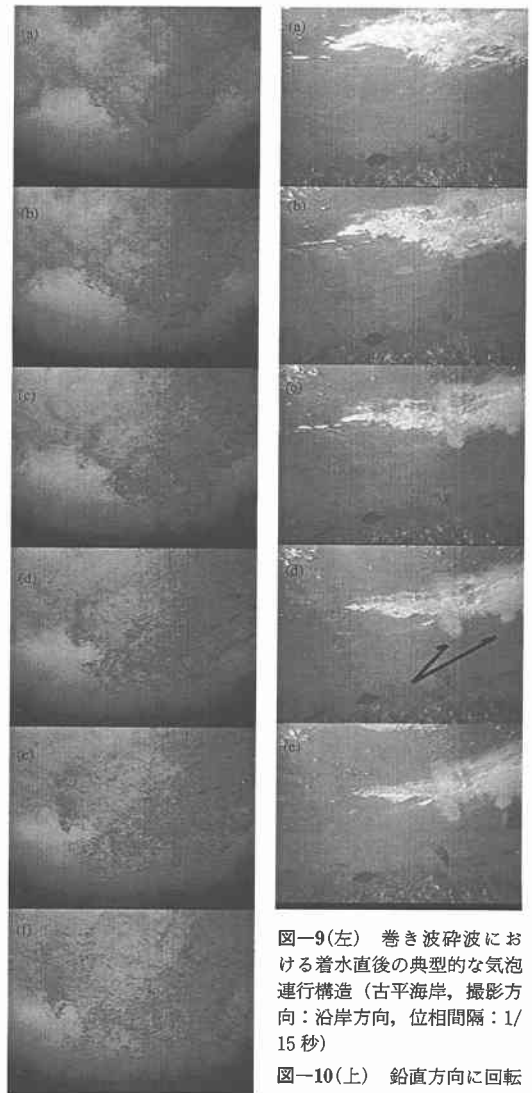
図一7(左) ポアフロント直下の典型的な気泡連行構造の発達過程(古平海岸, 撮影方向: 沖方向, 位相間隔: 1/15 秒)

図一8(右) ポアフロント直下の典型的な気泡連行構造(古平海岸, 撮影方向: 沖方向, 位相間隔: 1/3 秒)

えられる。これに関しては3.3でさらに議論される。

図一8は、前図と同一の観測点におけるさらに碎波波高の大きな波浪下でのポアフロント通過前後の連行気泡の発達の様子を表している。位相間隔は1/3秒である。フロント通過後、連行気泡塊は海底に達するが浮上せず長時間にわたって海底近傍に停滞しているのがわかる。多くのケースでは次の波浪の通過によってこの気泡塊は拡散されたが、この気泡塊が自然に浮上または拡散するまでには波浪周期より遙かに長い時間を要すると思われる。

生物学的意味において、酸素供給源である気泡のこの連行構造及び小気泡塊の輸送過程は重要な意味をもつ可能性がある。また、特に砂浜海岸では、海底に達する大量の気泡は海底砂の浮遊及び移動にも大きな影響を与える。



図一9(左) 巻き波碎波における着水直後の典型的な気泡連行構造(古平海岸, 撮影方向: 沿岸方向, 位相間隔: 1/15 秒)

図一10(上) 鉛直方向に回転軸をもち海底に向かって発達する渦中の連行気泡塊(古平海岸, 撮影方向: 岸方向, 位相間隔: 1/15 秒)

3.2 エアチューブ周りの連行気泡構造の発達

巻き波碎波において、着水点近傍の air tube 周りの気泡の生成は特有の性質を有する。

図一9は、古平海岸における沿岸方向に向けられた水中カメラ(設置位置 P_A , 図一2 参照)からの連行気泡の画像である。着水直後(a)の段階では、air tube 周りに気泡が混入した様子は観察できない。しかし、その直後(b)～(c)において、air tube に巻き付くように帯状の気泡塊が air tube の軸上の数カ所に現れる。その後この帯状気泡塊は厚く発達し(d)、それぞれの気泡塊が明らかに air tube 軸方向に配列する帯状連行気泡構造を形成する。最終的にこの構造は air tube の消滅と共に崩壊し、気泡塊

は無秩序な方向に拡散する。この気泡塊は移流することなく着水点近傍の水中に浮遊する。

3.3 大規模渦中の気泡運動

以前から碎波後の渦運動について混入気泡の軌道をもとに議論されてきた。Nadaoka et al. (1989) は、実験水槽内の気泡の観測により、碎波後、斜行渦を含む3次元大規模渦構造が形成され海底砂の巻き上げに大きく寄与することを指摘し、また気泡自体が大規模渦運動に影響を与えることを示唆した。灘岡ら (1987) は、実海域における海上からの観察により気泡がその浮力により海底砂の浮遊過程に大きく寄与していることを報告している。

特に、斜行渦はその回転軸が海底に向かう方向に伸張り発達する(渡部ら, 1999)と考えられ、この渦によって海底砂の浮遊に与える影響は顕著であると予測されるが、実海域におけるこの斜行渦の生成及び発達については明らかでない。

図-10 は、古平海岸における岸方向に向けられた水中カメラ(設置位置 P_A , 図-2 参照)からの崩れ波碎波に対する連行気泡の画像である。碎波フロントの通過後、その背後から2つの気泡塊が顕著に海底方向に進行し発達しているのがわかる。この深い位置まで輸送された気泡塊は図-8と同様に長時間顕著に移流することなく停滞した。

図-11 は、図-8のフロント通過後0.5秒後からの位相間隔 1/15 秒での気泡の画像である。3.1 で指摘されたフロントで発生した気泡塊の内部の状況が表されており、個々の気泡の軌道を追うことができる。気泡塊内部において、気泡は鉛直軸を軸とする回転性の軌道をもつことが明らかに確認できる。この結果は、碎波後、ボアフロント下において少なくとも鉛直方向に軸をもつ多数の渦塊が生成され発達し、気泡がこれらの渦塊に巻き込まれて輸送されていることを示している。

著者ら (1998) は、三次元 Large Eddy Simulation により、ジェットに着水直後から水平ローラー渦だけでなく比較的小規模の鉛直及び旋回渦成分が規則的に配列する大規模渦構造が生成されることを指摘したが、この観測結果は同様な特性をもつ渦構造が実海域の碎波帯においても存在することを表していると考えられる。

これらの観測結果以外にも異なる位相あるいは位置で生成される主に鉛直方向に回転する気泡軌道が観測されたが、この観測では3次元的な回転軸を特定できないため、どの渦塊が斜行渦であるのか特定はできなかった。実海域では、波峰の非一様性、流れ、海底地形及び波浪の不規則性により碎波帯に多様な渦構造が存在すると考えられる。

図-12 は、淡水を用いた実験水槽中の気泡を同様に撮

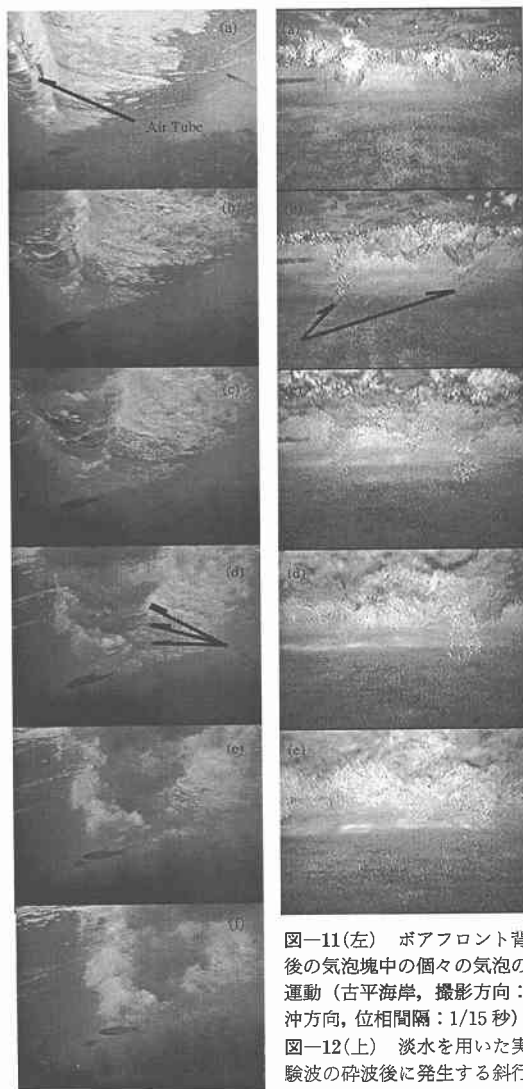
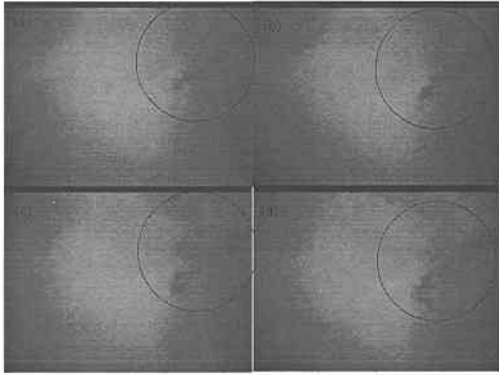


図-11(左) ボアフロント背後の気泡塊中の個々の気泡の運動(古平海岸、撮影方向: 沖方向、位相間隔: 1/15 秒)

図-12(上) 淡水を用いた実験波の碎波後に発生する斜行渦中の気泡運動(周期: 2.0 秒, 碎波波高: 16 cm, 海底勾配: 1/20, 位相間隔: 1/15 秒)

影した結果である(水中カメラは沖向きに固定されている)。実験波は周期 2.0 秒、碎波波高 16 cm であり、海底勾配も一樣であることから、単純に現地観測結果と比較できないが定性的な明白な差異を議論していく。顕著な2つの管状の気泡塊が主に鉛直軸を回転軸として時間と共に底面に向かって伸びている様子がわかる。淡水では特に、水中に巻き込まれる気泡の大きさは明らかに大きく、実海域における気泡の幾何学的特性と大きく異なる。連行気泡径は、表面張力に依存するため(例えば、渡部ら, 1999)、表面張力係数の小さい塩水は淡水と比べ小径の気泡を多く生成する。以前に議論されたように、実海域では水中深くに連行された気泡は小径のため抗力に対



図一13 大規模渦管に巻き込まれた気泡運動 (大岸海岸, 撮影方向: 沖方向, 位相間隔: 1/15 秒)

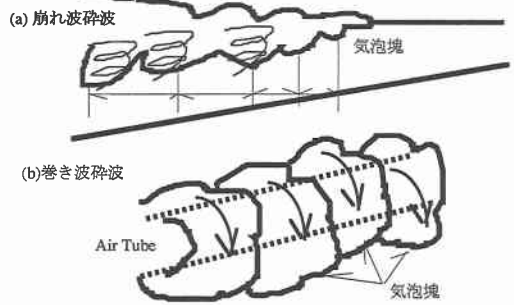
する十分な浮力がないため顕著に移動せずに停滞するが、淡水による実験結果は大径の気泡が有する大きな浮力により短時間で浮上する。気泡の到達深は塩水の方が大きく、水中に連行された気泡が流体運動に与える影響は淡水の方が大きいと考えられる。この観点から、淡水を用いた砕波後の気泡連行特性は、実海域の現象を再現しているとは言えない。

図一13は、大岸海岸における沖方向に向けられた水中カメラからの巻き波砕波後の連行気泡の画像である。図中右側に管状の高速に回転する気泡塊が確認される。この渦管に巻き込まれた気泡の軌道から、この一つの渦管が軸の向きを小さく変動させながら時間と共に二つの渦管に変化していることが確認された。この新たな渦管が分裂により発生したのか誘発されたか明確でないが、気液混相流下で複雑な渦干渉が存在していることは明らかである。

4. 結 論

ポアフロント直下において、気泡が集合した大規模な雲状の気泡塊が規則的に配列する組織的気泡連行構造(図一14(a)参照)が形成される。この構造は殆どの波浪下で確認され、ポアフロント先端の直下では比較的小規模な気泡塊が生成されるが、それらは徐々に気泡塊毎に海底に向かって発達していく。この気泡塊に巻き込まれて底面近傍まで連行される気泡の殆どは非常に小さい径をもち、浮上せずに非常に長い間対流し続ける。生物的な意味で酸素供給源としてこの気泡構造は重要な意味をもつ可能性がある。

巻き波砕波において、air tube 周りの気泡の生成は特有の性質を有する。着水直後には air tube 周りには気泡は観察できないが、砕波の進行と共に air tube に巻き付くように帯状の気泡塊が air tube 軸方向に配列する



図一14 典型的な組織的気泡連行構造の概略図

(図一14(b)参照)。その後、この帯状組織構造は air tube の消滅と共に崩壊し、無秩序な方向に広がる大規模な気泡塊に急速に発達する。この気泡塊は移流することなく着水点近傍の水中に浮遊する。

波動実験水槽内で観察された斜行渦中の気泡軌道と類似した軌道をもつ渦が実海域においても確認された。しかし、鉛直方向に軸をもつ渦は、数種類の異なる性質を持つ渦が存在するため、斜行渦としての特定はできない。実海域では、波峰の非一様性、流れ及び海底地形の影響により砕波帯に多様な渦構造が存在する。

淡水を使用した実験水槽内の気泡連行と実海域のものを比較すると、表面張力の違いから生成される気泡径が大きく異なる。実海域の気泡は砕波の規模が大きいのにもかかわらず、非常に細かな気泡が長時間水中に浮遊しゆっくり拡散する様子が頻繁に観察されたが、実験水槽内の気泡は比較的径が大きいためその浮力により容易に浮上し、実海域の現象を再現しない。

謝辞：本研究に対して文部省科学研究費(奨励研究A)の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987): 砕波帯内の三次元的な大規模渦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.
- 渡部靖憲・森 憲広・佐伯 浩 (1998): 砕波の3次元 Large Eddy Simulation, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 146-150.
- 渡部靖憲・安原幹雄・佐伯 浩 (1999a): 大規模旋回流, 斜行渦, 3次元砕波ジェットの生成及び発達機構, 海岸論文集, 第46巻, pp. 141-145.
- 渡部靖憲・大塚淳一・佐伯 浩 (1999b): 自由落下水塊に伴う気泡の生成・運動機構, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 116-120.
- Chanson, H., T. Brattberg (1998): Air entrainment by two-dimensional plunging jet, ASME Fluid Engineering Division Summer Meeting, 8 pp.
- Nadaoka, K., M. Hino and Y. Koyano (1989): Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, J.Fluid Mech., Vol. 204, pp. 259-387.