

砕波帯における連行気泡のスケール効果と乱流特性に関する実験的研究

鈴木琢磨*・森 信人**・角野昇八***・大西祥久****

砕波帯において砕波により水中に連行される空気塊の特性について検討を行っている。2 次元造波水路を用いて、一様斜面上を入射する規則波の砕波についてボイド率、気泡径および流速の計測を行い、砕波波峰におけるボイド率および気泡径の空間分布、および気泡特性と乱れエネルギーとの関係を調べている。フルード則に基づいた 2 種類の大きさの水利実験結果から、ボイド率の空間変化に及ぼすスケール効果の影響は非常に大きいことを明らかにしている。ついで、連行された気泡径分布について調べ、混入する個数に差はあるものの、その分布形状は岸沖方向に殆ど変化しないことを示している。

1. 緒 言

外洋や沿岸砕波帯において、砕波により水中に取り込まれる気泡（砕波連行気泡）については、大気・海洋気液界面での気体輸送現象のほか、砕波におけるエネルギー逸散などの水利現象に広く関わるため、様々な観点からの研究が行われてきた。風波については、超音波やレーザーを用いた現地観測や室内実験などが行われ、モデル化が進んでいる（例えば Thorpe, 1982；森・今村, 2003）。

砕波帯における気泡については、風波ほどの知見は得られていないが、近年、いくつかの研究が行われている。砕波帯の気泡の時空間変化については、Chanson ら (2002) が室内における模擬実験によりボイド率の変化の時間スケールを、気泡径分布の変化については、Deane・Stokes (2002) が音響と画像を用いた室内実験により気泡径分布の時間変化を明らかにしている。また、ボイド率と乱れ強度が線形の関係を持つという報告もされている (Cox・Shin, 2003；Mori ら, 2005)。著者らもこれまでに、比較的小規模スケールの造波水路（水深 0.3 m）を使用し、ダブルボイドプローブ (DVP) を用いて気泡特性（ボイド率、気泡径）の測定を行い、砕波連行気泡特性の空間分布について研究を行ってきた（角野ら, 2003, 2004）。これらの成果により、砕波帯における空気塊の時空間特性が明らかにされつつある。しかし、淡水と海水の違い、砕波規模と気泡特性の関係、気泡の生成および移流と流体の乱れの関係など解明すべき点は非常に多い。

本研究では、以下に述べる 2 点に着目して解析を行う。まず始めに、2 種類の大きさの異なる造波水路を用いた実験結果より、気泡特性に及ぼすスケールの影響について検討を行う。ついで、気泡の生成過程において周辺流

体の乱れが大きく関連していることから、気泡と乱れの同時測定を行い、砕波連行気泡特性と乱流特性の関連性について明らかにする。

2. 実験の概要と条件

(1) 実験の概要

実験は、図-1 に示すような高さ 1.5 m、長さ 50 m、幅 1.0 m の側壁ガラス張りの中型 2 次元造波水路を用いて行った（以下、中規模実験）。水槽の一端に勾配 1/30 緩斜面を設置し、水深 $h = 0.8$ m で一様斜面上における砕波の計測を行った。気泡および流速の測定は、図-1 に示すように DVP と 3 次元超音波流速計 (ADV) および 2 本の波高計を水平移動と垂直移動が可能な架台（以下、計測アレイ）に取りつけて行った。2 本用いた波高計の内、後方の波高計は測定点の波高を計測するために使用し、前方の波高計は全ての測定機器の計測のトリガーとして使用した。DVP のサンプリング周波数は 5 kHz、波高計のサンプリング周波数は 25 Hz とした。また、過

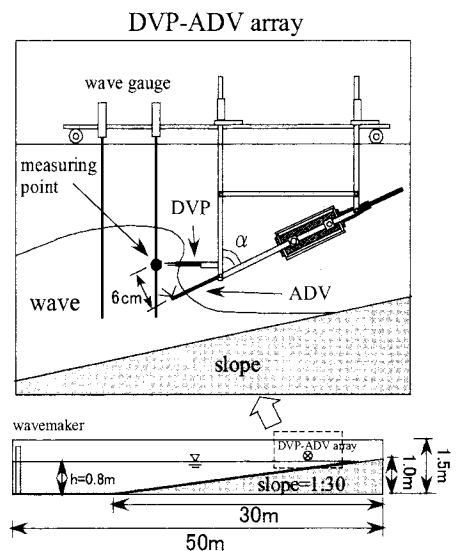


図-1 実験装置

* 学生会員 工修 国際航業(株)
** 正 会 員 博(工) 大阪市立大学講師大学院工学研究科
*** フェロー 工博 大阪市立大学教授大学院工学研究科
**** 学生会員 神戸高速鉄道(株)

去に行った小規模実験(中規模実験の3/8倍スケール)の結果も用いて、以下の議論を進める。

(2) 測定方法の概要

ボイド率および気泡弦長(以下、気泡径と表記)の測定にはDVPを用いた(角野ら, 2003)。DVPは微小距離 ΔS だけ離れた2本のボイドプローブにより構成され、1つの気泡が双方のプローブに接触する時間差 t_s とプローブ先端部の間隔 ΔS を式(1)に代入することにより、気泡移動速度 v_b を求めることができる。さらに、この気泡移動速度 v_b に気泡通過時間 t_s を乗じることによって気泡径 d が求められる(式(2))。

$$v_b = \Delta S / t_s \quad (1)$$

$$d = v_b t_s \quad (2)$$

原理的に今回用いたDVPの検出可能な最小径は0.3~0.5 mmである。 t_{gt} を気泡通過時間、 t_i を気液二相流の通過時間とすると、時間平均された局所的なボイド率 ϕ'' は式(3)で表される(Σ は時間積分を示す)。

$$\phi'' = \sum t_{gt} / \sum t_i \quad (3)$$

DVPのキャリブレーションは、所定の大きさの気泡を生成する装置を用い、画像計測結果と比較して行った。その結果、DVPを持ちいて計測された一方向に移動する気泡の測定誤差は約3%であった。DVPはその幾何学的な構成上、適用対象が主流が卓越する気液二相流であるため、本研究では、測定対象を波峰近傍に限定して行った。ADVは、斜面上においてDVPと同一地点の測定が可能となるように、DVPの下側にADVプローブから測定地点までの距離が6 cm、プローブの水平面からの角度が $\tan \alpha = 2/5$ となるように設置した(図-1参照)。実際に解析を行う際には、生データを角度補正した。図-2に示すのは、ある測点において実際に得られた水面変動及び流速の3周期分の時系列である。図中

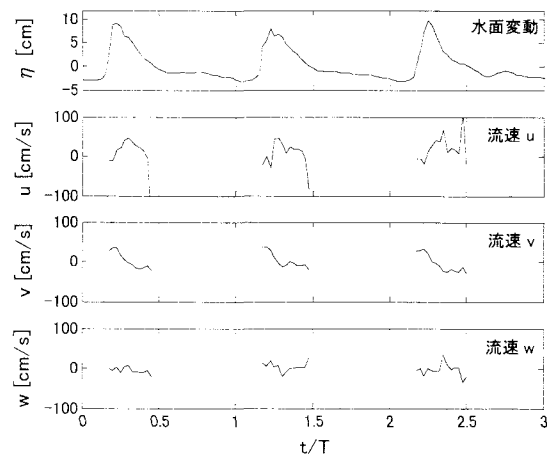


図-2 水面変動及び流速のデータ例

の η は水面変動を表しており、0が静水面である。 u , v , w は、流速の各成分であり、横軸は経過時間 t を周期 T で無次元化している。図に見られるように、碎波帯内のような気泡が多量に混在するような場を対象にADVによる流速の計測を行った場合、流速値にスパイク状の不規則なノイズが含まれることが知られている。そこでノイズ除去の一次処理として、ADVによって流速データと共に得られるSNRと、3成分の流速値の相互相関の平均値がそれぞれ10 dB、70%以下となるデータはノイズとして除去した。二次処理としては、Goring・Nikora(2002)によるPhase-Space法を基にした3D Phase-Space法を用いた(Mori・Kakuno・Suzuki, 2005)。

計測されたデータは、波高計データを元に、測点が水中にあると判断されたもののみを解析とした。

3. 実験条件および測定地点

実験は、規則波を入射波とし、表-1に示す3ケースを行った。表中の L_0 は波長、 H_0/L_0 は波形勾配、 H_b は碎波波高、 h_b は碎波水深、 X_{sb} は汀線から碎波点までの距離である。case1, 2については、スケール効果による影響を検討するため、小規模実験の実験条件からフルード相似則に基づいて決定した(小規模実験の8/3倍スケール)。図-3に示すのは、case1での測定地点と水位の関係のプロットした例である。縦軸 z は静水面からの距離、横軸 x_s は測定地点の汀線からの距離を表しており、図中の+印は波の上下の振幅値、●印は測定地点、横点線は静水面、縦実線は各実験ケースでの碎波点を表している。具体的には、鉛直方向に $z = -1.0, 0.0, 1.0, 2.7$,

表-1 実験条件

case	$T[s]$	$H_0[cm]$	$L_0[m]$	H_0/L_0	$H_b[cm]$	$h_b[cm]$	$X_{sb}[m]$	Breaking type
1	1.6	16.3	4.16	0.039	16.5	16.8	5.04	spilling
2	2.0	11.5	5.99	0.019	12.0	12.5	3.75	spilling/plunging
3	3.8	12.2	22.53	0.005	12.6	13	3.9	plunging

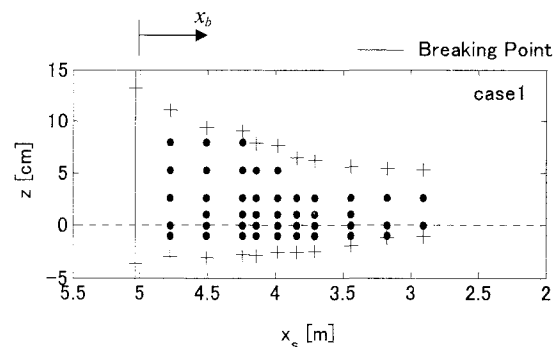


図-3 測定地点と最大・最小水位の関係(case1)

+ : 水位 ● : 測定地点
 x_b : 測定地点の碎波点からの距離

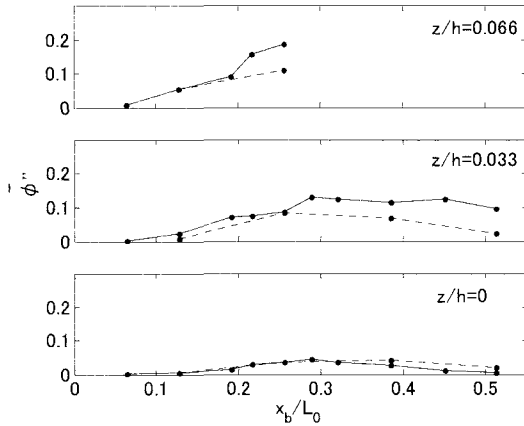


図-4 $\bar{\phi}$ の岸沖分布 (case1)
(実線：中規模実験，点線：小規模実験)

5.3, 8.0 cm の地点を水平方向に平行移動して数地点測定した。以降測定地点の位置を表すパラメータとして鉛直方向は z を，岸沖方向は x_b (測定地点の砕波点からの距離) を用いることとする。中規模実験におけるボイド率および流速は，各測定地点において50波測定し，小規模実験における DVP による計測は10波行った。

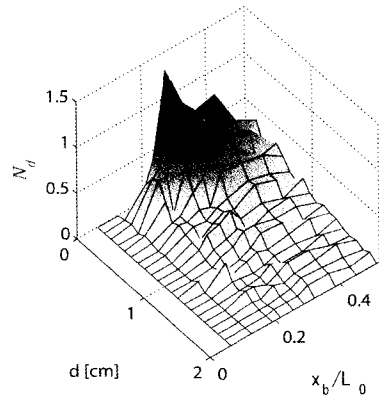
4. 結果と考察

計測アレイにより得られたボイド率，気泡径，位相平均流速および乱れの空間分布について調べた。ボイド率および気泡径分布については中規模実験 ($h = 0.8$ m) と小規模実験 ($h = 0.3$ m) の結果を比較し，スケール効果について明らかにする。ついで，連行気泡特性と流速，特に乱れエネルギーの関係について調べる。但し，計測器機の物理的な制約により，小規模実験では水の流速が計測不可能であったため，流速に対するスケール効果については検討を行わない。

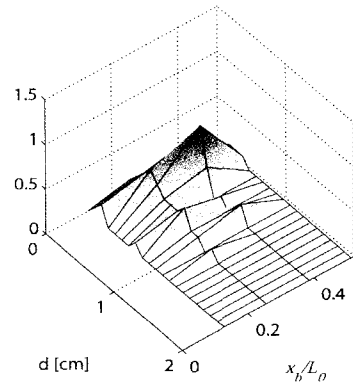
(1) 連行気泡特性のスケール効果による影響

a) ボイド率

まず初めに，図-4 に示すのは，case1 の各測定地点で得られた局所的なボイド率 $\bar{\phi}$ の岸沖分布である。ここで定義するボイド率 $\bar{\phi}$ は，各測定地点毎に得られた1周期平均ボイド率を表している。また，各図中の実線は中規模実験により得られたボイド率 $\bar{\phi}$ を，点線は小規模実験において得られたボイド率 $\bar{\phi}$ を表している。図-4 より，両実験結果とも砕波点から岸方向に0.2~0.3 x_b/L_0 程度離れた測定地点においてボイド率 $\bar{\phi}$ のピークがあり，その後緩やかに減衰するという傾向が見られる。 $z/h = 0.066$ の高さでは，波高減衰により0.25 x_b/L_0 以降のデータがないが，砕波後の着水以降に中規模実験のボイド率が0.2まで増加するのに対し，小規模実験では0.1



(a) 中規模実験結果 ($h=0.8$ m)



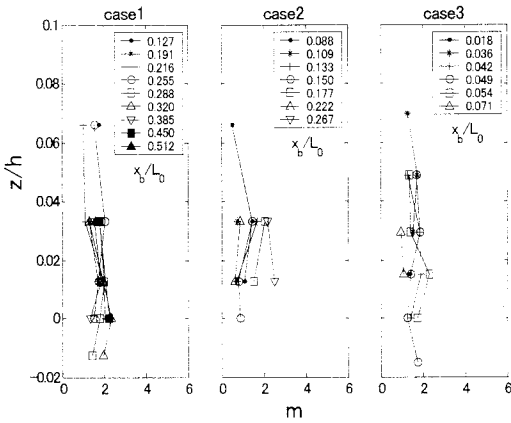
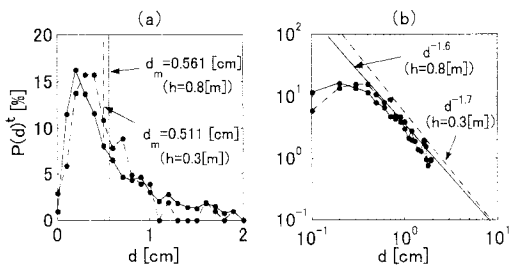
(b) 小規模実験結果

図-5 気泡径分布の岸沖分布 (case1 $z/h = 0.033$)

程度に留まっている。この傾向は， $z/h = 0.033$ の水平断面においても見られ，両スケールの岸沖分布形状はほぼ同様であるが，その絶対値が異なることがわかる。但し，静水面 $z/h = 0.0$ では両スケールに違いは殆どなく，ほぼ同じ空間分布形状となっている。静水面上に限った場合，小規模実験に比べて，中規模実験で得られたボイド率 $\bar{\phi}$ は，殆どの測点において約2~5倍大きかった。以上が case1 についての結果であるが，他の実験ケースにおいても同様な傾向が見られ，少なくとも静水面上におけるボイド率に対するスケール効果による影響は大きいことがわかった。

b) 気泡径分布の空間分布

図-5 に示すのは，case1 についての1周期当たりの気泡の径毎の個数分布（ここからは単に気泡径分布と呼ぶ）の岸沖分布である。図中の $\bar{N}_d$ は各径での個数を一周期位相平均したものである。図-5 より，小規模実験と中規模実験の結果を比較すると， x_b/L_0 の大きさによ

図-6 m の鉛直分布 (本実験結果のみ)図-7 空間平均した気泡径分布と平均気泡径
(実線: $h=0.8$ m 点線: $h=0.3$ m)

らず気泡個数がピークとなる気泡径 (d_b と呼ぶ) は約 0.2 程度とほぼ同じであり、分布形状も径の増大に伴って気泡個数が単調減少するという点では類似している。岸沖方向の変化について見ると、中規模実験の気泡径分布のピークが約 $0.3x_b/L_0$ に出現するのに対し、小規模実験はこれより岸側の約 $0.4x_b/L_0$ に出現している。しかし、小規模実験での測定波数が 10 波と少なく、統計的な変動が大きいため、これ以上の比較は困難である。

ついで、全測点における気泡径分布のピーク径と分布形状を調べた結果、個数で正規化した気泡径分布は、ほぼ全測点において類似した分布を持ち、ピーク径 d_b およびそこから大きい側の径は d^m で単調減少することがわかった。図-6 に示すのは、各ケースにおける気泡径スペクトルの勾配 m の鉛直分布である。小規模実験については気泡個数が十分でなかったため中規模実験の結果のみを示す。図より、ばらつきはあるものの、全測定地点において気泡径分布は $d^{-1 \sim -2}$ とほぼ一定の形状を持っている。これは、Garrett ら (2000) が気泡の分裂モデルをもとに提案した $d^{-10/3}$ より広いスペクトルとなっており、この違いが、実験スケールもしくは実験条件、あるいは計測器機に起因するものであるのかは判断できない。一方、紙面の関係上図は示さないが、気泡の d_b に

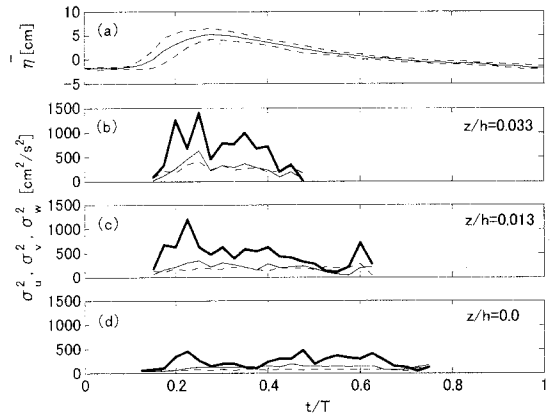


図-8 水面変動及び乱流強度の時間変化

(a) 実線: 平均値 点線: 標準偏差
(b,c,d) 太線: u 成分 実線: v 成分 点線: w 成分

いても全測定地点で 0.2 cm で一定となっており、DVP で計測可能な気泡径の範囲 ($d > 0.2 \sim 0.5$ mm) では、静水面上における気泡径分布の形状は岸沖方向および鉛直位置にほぼ無関係であり、大きく変化しないことが分かった。 d_b と d^{-m} が測定地点によらず同様であったため、碎波点より岸側の静水面上における全ての気泡について空間平均を行った。図-7 に示すのは、空間平均した気泡径分布を示したものである。図中の $P(d) [\%]$ は空間平均したときの $P(d)$ で、 d_m は全測定地点で検知した気泡の平均気泡径を表している。図-7 によると、 d_m の差は 0.05 cm 程度とほぼ一致しており、分布形状についても $d^{-1.6}$ ($h=0.8$ m), $d^{-1.7}$ ($h=0.3$ m) とほぼ同様の値となっている。以上のことから、気泡径分布に対するスケール効果による影響は顕著でないとと言える。

以上の結果、スケール効果により混入する気泡の絶対個数は変化するが、静水面上における気泡径分布の形状は岸沖方向に大きく変化しないことがわかった。

(2) 連行気泡特性と乱流特性の関連性

前節において気泡径の空間分布を調べた結果、気泡径の分布が空間的にそれほど変化しないことがわかった。これは、ある点における気泡の分布特性がボイド率で記述できる可能性を示している。言うまでもなく、空気塊は碎波により混入されるため、ボイド率と流況は密接な関係を持つ (例えば、Cox-Shin, 2003)。そこで、本節では、連行気泡特性と乱流特性の関連性について検討を行う。

図-8 に示すのは、ある測点における水面変動及び乱れ強度、 σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 [cm^2/s^2] の時間変化を表したものである。ここで乱流強度は、位相平均流速からの偏差と定義する。

図-8(a) 中の実線は水面変動の一周期位相平均で、点線はそれに水面変動の標準偏差を考慮したものである

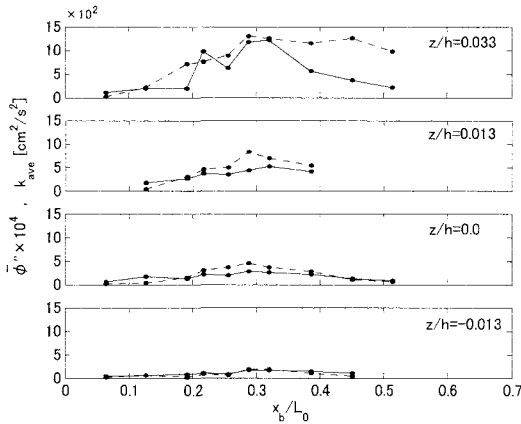


図-9 乱流エネルギー k_{ave} とボイド率 $\bar{\phi}^v$ の岸沖分布
(実線: k_{ave} 点線: $\bar{\phi}^v$)

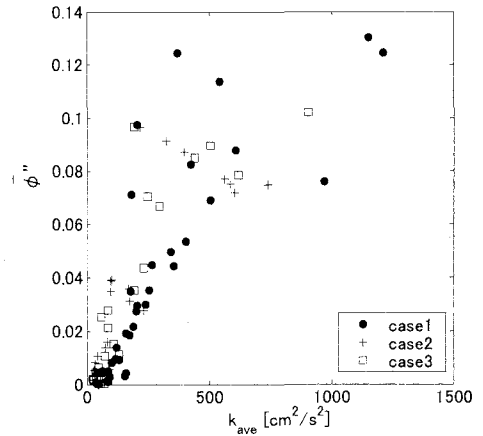


図-10 乱流エネルギー k_{ave} とボイド率 $\bar{\phi}^v$ の関係

($\bar{\eta} \pm \sigma_{\eta}$). また図-8(b)～(d)中の太線, 実線, 点線はそれぞれ, σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 を表している. 図より, 水面付近ほど乱れが強く, 波の前面に明確な乱れのピークがあることが分かる. 次に乱れの空間分布について述べる.

図-9に示すのは, 乱流エネルギー k_{ave} [cm^2/s^2] とボイド率の $\bar{\phi}^v$ 岸沖分布である. k_{ave} は乱流エネルギー k の時間平均値として定義する. 図中の実線は k_{ave} , 点線は $\bar{\phi}^v$ を意味する. 図-9より, k_{ave} および $\bar{\phi}^v$ とともに碎波点から少し岸側でピークを持ち, その後, 単調に減衰する傾向が見られる. また $\bar{\phi}^v$ に移流等の影響が見られ, 位相差があるものの, k_{ave} , $\bar{\phi}^v$ の分布形状はほぼ一致しており, 両者に相関関係が見られる.

最後に k_{ave} と $\bar{\phi}^v$ の関連性について調べる. 図-10に示すのは, 各測定地点で得られた k_{ave} と $\bar{\phi}^v$ を, 横軸に k_{ave} , 縦軸に $\bar{\phi}^v$ をとってプロットしたものである. 図-10より, k_{ave} と $\bar{\phi}^v$ には弱線形的な関係があることが分かる. 特に case1, 3においては, その線形相関は高く, 両者の関係は明瞭である. しかし, case2 の k_{ave} と $\bar{\phi}^v$ にはそれほど高い相関性が見られない. 以上の結果, 実験条件(碎波形式など)により変動が大きいものの, ボイド率と乱れには高い相関性が見られるがわかった.

5. 結 語

本研究では, 造波水路を用いた実験結果より, 碎波帯における連行気泡特性のスケール効果及び碎波連行気泡特性と乱流特性の関連性について検討した. その結果, スケール効果によって, ボイド率や混入する気泡個数は変化するが, 気泡径分布の形状は変化しないという結論を得た. また, ボイド率と乱れエネルギーには強い相関があることがわかった.

今後の課題として, 水槽内実験と実海域の大きな違い,

特に碎波連行気泡特性に及ぼす海水と淡水の違い, 規則波と不規則波の違いによる影響が残る.

最後に, 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金若手B(17760409, 代表者: 森 信人)によるものであることを付記する.

参 考 文 献

- 角野昇八・鈴木琢磨・関本武史・日引 俊(2003): 碎波連行気泡特性測定のためのダブルボイドプローブの開発とその適用性の検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1406-1410.
- 角野昇八・鈴木琢磨・大西祥久・日引 俊(2004): 現地小碎波の連行気泡特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 91-95.
- 森 信人・今村正裕(2003): 風波碎波の気泡分布特性について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 111-115.
- Chanson, H., S. Aoki, M. Maruyama(2002): Unsteady air bubble entrainment and detrainment at plunging breaker: Dominant time scales and similarity of water level variation, Coastal Engineering, No.46, pp. 139-157.
- Cox, D.T. and S. Shin(2003): Laboratory measurements of void fraction and turbulence in the bore region of surf zone waves, Journal of Engineering Mechanics, Vol.129, No.10, pp. 1197-1205.
- Deane, G.B., M.D. Stokes(1999): Scale dependence of bubble creation mechanisms in breaking waves, Nature, 418, pp. 839-844.
- Garrett, C., M. Li and D. Farmer(2000): The connection between bubble size spectra and energy dissipation rate in the upper ocean, J.P.O., 30, pp. 2163-2171.
- Goring, D.G. and V.I. Nikora(2002): Despiking acoustic velocimeter data, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.128, pp. 117-126.
- Mori, N., S. Kakuno and T. Suzuki, Y. Ohnishi(2005): Experimental study of air bubbles and turbulence characteristics in the surf zone, Proceedings of APAC2005, in press.
- Mori, N., S. Kakuno and T. Suzuki(2005): Noise of acoustic Doppler velocimeter data in bubbly flows, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, submitted.