

砕波連行気泡特性と乱流特性の関連性に関する実験的研究

土木材料及び河海工学分野 鈴木 琢磨

1. 緒言

外洋や沿岸砕波帯における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観点からいくつかの研究がなされている。著者もこれまでに、小規模スケールの水理実験（水槽スペック：高さ 0.6m × 長さ 20m × 幅 0.5 m、水深： $h=0.3\text{m}$ ）にて、DVP（ダブルポイドプローブ）という気泡特性測定用センサーを用いて気泡特性（ポイド率、気泡径）の測定を行い、小規模スケールでの砕波連行気泡特性の空間分布について把握することができた。

しかし、実海域での砕波連行気泡特性を解明するためには、考慮しなければならない課題がいくつか残されている。その一つとして考えられるのが、連行気泡特性に対する実海域と水槽内実験でのスケールの違いによる影響である。連行気泡特性のスケール効果による影響の重要性は、他の研究者からも指摘されているが（Chansonら²⁾）、連行気泡特性のスケール効果による影響を定量的に評価した研究事例は、著者の知る限りではほとんど見られない。

二つ目の課題は、気泡と乱れの関係である。気泡と乱れに関する研究事例は数々ある。例えば Lewis and Davidson³⁾は、パイプ中に乱れを伴った流れを生じさせ、そこに気泡を投入し、その中で気泡径を測定することで乱れによるせん断力と気泡径の関係性についての知見を得ている。このように気泡の径や挙動そして生成過程等は、その周辺流体の乱れに大きく依存しており、研究で気泡を取り扱う際には、気泡と乱れの関係は最も理解しておかなければならない事項の一つである。しかし、砕波帯での連行気泡を取り扱った研究事例の中で、砕波帯内の気泡特性と乱れの実測した例は、その現象の複雑さや測定の困難さ等の理由からほとんど行われていない。

以上のことから、本研究では以下のことを目的とする。

1. 過去に行った小規模実験よりもスケールの大きな砕波を対象として気泡特性の測定を行い、小規模実験での結果と比較検討することで、砕波連行気泡特性のスケール効果による影響について検討する。
2. 砕波連行気泡特性と乱流特性の関連性について検討する。

2. 実験概要

本実験は、図 - 1 に示すような高さ 1.5m、長さ 50m、幅 1.0m の側壁ガラス張りの中型 2 次元造波水槽にて実験を行った。また水深 $h=0.8\text{m}$ とし、過去に行った小規模実験の 8/3 倍スケールの実験条件で実験を行った。水槽の一端には勾配 1/30、高さ 1.0m、底面長さ 30m の緩斜面を設置し砕波を生じさせた。測定は、図 - 1 に示すような DVP と 3 次元超音波流速計（ADV）と 2 本の波高計を取り付けた、水平移動と垂直移動が可能な DVP-ADV アレイを用いて行った。2 本の波高計の内の後方の波高計は、測定点の波高を計測するためのもので、前方の波高計は DVP と ADV、後方の波高計それぞれの同期をとるためのものである。また、波高計のサンプリング周波数は 25Hz とした。

3. 測定方法

3.1 気泡特性の測定方法（DVP）

DVP の原理とは、まずプローブを水中の測定地点に固定し、プローブに電気的に接続された他端を同じ水域内の任意の地点に設置して水中を介して電気回路を構成する。そして、プローブ先端に気泡が接触したときには電気回路が切断され電圧が下がり、気泡がプローブを抜出するとまた電気回路が構成され電圧が上がるといった電気信号から、気泡の有無を判定するというものである。また、DVP は“front”と“rear”の 2 本のプローブを微小距離 ΔS で近接させて製作しており、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

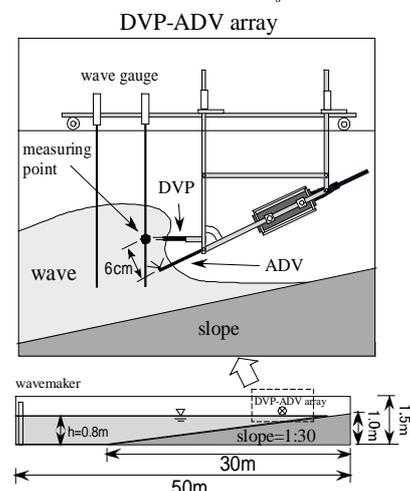


図 - 1 実験装置

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_g を乗じることによって気泡径 d を求めることができる (式 (2))。

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

$$d = v_b \cdot t_g \quad (2)$$

また、 t_{gi} を気泡通過時間、 t_l 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。また、本実験での DVP のサンプリング周波数は 5kHz とした

$$\phi'' = \sum t_{gi} / \sum t_l \quad (3)$$

3.2 流速の測定方法 (ADV)

図 - 2 に示すのは、本実験で使用した超音波流速計 (ADV (Nortek 社製品)) の先端プローブ部を拡大した図である。ここで ADV とは、流体内に浮遊する微小物体に対して音波を発生し、物体からの反射音を検知することで微小物体の速度 (流速) を 3 次元的に計測することができる計測器であり、実際の測定では、図 - 2 中の u' 、 v' 、 w 成分の流速を測定することができる。ADV の設置については、ADV と DVP が同一地点を測定すること及び、ADV 本体の波への影響を考慮して、DVP の下側に (図 - 1 参照) ADV プローブから測定地点までの距離が 6cm で、さらに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。なお、実際に解析を行う際は、生流速データ u' 、 v' を u 、 v に角度補正した。また、ADV のサンプリング周波数は 25Hz とした。

図 - 3 に示すのは、本実験の一測定地点において実際に得られる水面変動及び流速の 3 周期分のデータ例である。図 - 3 中の η [cm] は水面変動を表しており、0 が静水面である。 u 、 v 、 w [cm/s] は、図 - 2 に示すそれぞれの方向での流速であり、横軸は経過時間 t [s] を周期 T [s] で無次元化している。

また、砕波帯内のような気泡が多量に混在するような場で 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 (Goring and Nikora¹⁾)。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 [dB] (データ信号のノイズ信号に対する割合) と、COR (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 and Nikora¹⁾ による Phase-Space Thresholding 法を用いた。

4. 実験条件及び測定地点

実験は表 - 1 に示す 3 ケース行った。表中の L_0 は波

長、 H_0/L_0 は波形勾配、 H_b は砕波波高、 h_b は砕波水深、 X_{sb} は汀線から砕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 - 4 に示すのは、case1 での測定地点と水位の関係プロットした例である。縦軸 z [cm] は静水面からの距離、横軸 x_s [m] 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砕波点を表している。具体的には、鉛直方向に $z = 1.0, 0.0, 1.0, 2.7, 5.3, 8.0$ [cm] の地点を水平方向に数地点測定した。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 [cm] を、岸沖方向は x_b [cm] (測定地点の砕波点からの距離) を用いることとする。また各測定地点において 50 波づつ測定した (小規模実験では 10 波)。

5. 連行気泡特性のスケール効果による影響

5.1 ボイド率

図 - 5 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 ϕ'' の岸沖分布を表したものである。ここでボイド率 ϕ'' とは、各測定地点で得られたボイド率

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 |

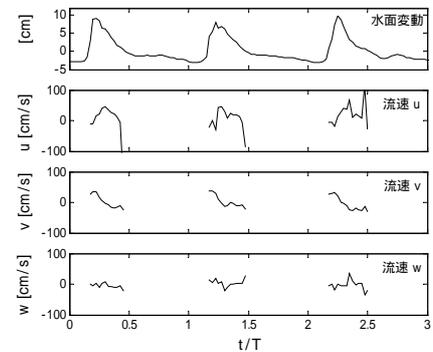
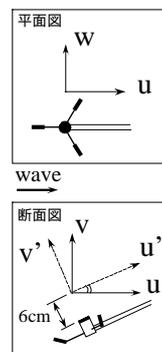


図 - 2 ADV 図 - 3 水面変動及び流速のデータ例

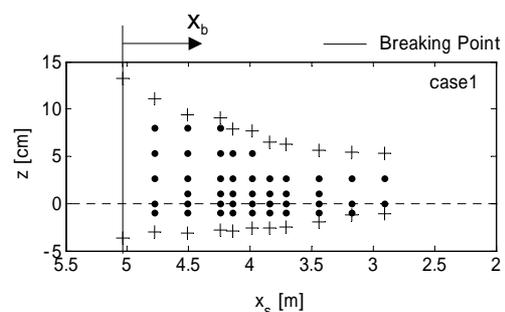


図 - 4 測定地点と最大・最小水位の関係 (case1)

+ : 水位 : 測定地点
 x_b : 測定地点の砕波点からの距離

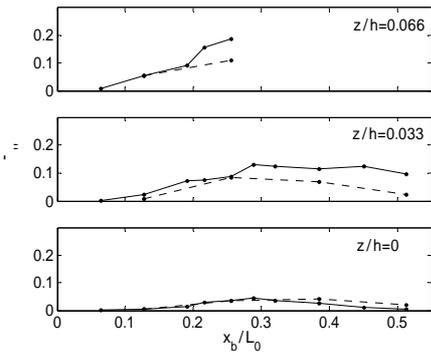


図 - 5 $\bar{\phi}'$ の岸沖分布 (case1)
(実線: $h=0.8[m]$ 点線: $h=0.3[m]$)

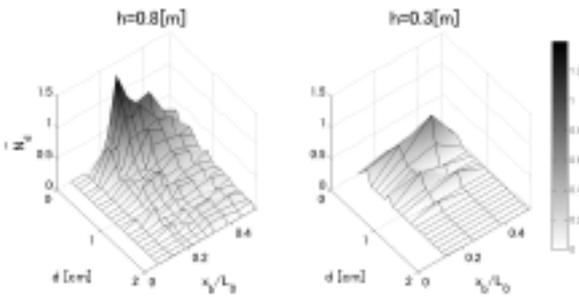


図 - 6 気泡径分布の岸沖分布 (case1 $z/h=0.033$)

の 50 波による一周期位相平均値を表している (小規模実験では 10 波)。また、各図中の実線は本実験 ($h=0.8[m]$) により得たボイド率 $\bar{\phi}'$ を、点線は小規模実験 ($h=0.3[m]$) において本実験と相似的同条件となる実験ケースでのボイド率 $\bar{\phi}'$ を表している。図 - 5 より、両実験結果とも碎波点から岸方向にある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減衰するという傾向が、どの水平断面においても見られ、その岸沖分布形状はほぼ同様であることが分かる。また小規模実験に比べ本実験で得られたボイド率 $\bar{\phi}'$ は、ほぼどの測定地点においても大きく約 2~5 倍となっていることが分かる。これらのことは、他の実験ケースにおいても同様に言うことができる。以上のことから、ボイド率に対してはスケール効果による影響は大きいと言える。

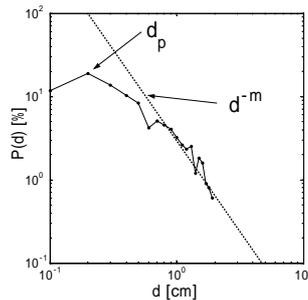


図 - 7 気泡径分布の例

5.2 気泡径

図 - 6 に示すのは、測定した気泡の、径の大きさによる個数分布 (ここからは単に気泡径分布と呼ぶ) の岸沖分布を表した一例である。図中の \bar{N}_d は各径での個数を一周期位相平均 (中規模実験では 50 波平均、小規模実験では 10 波平均) したものであり、各図の \bar{N}_d はコン

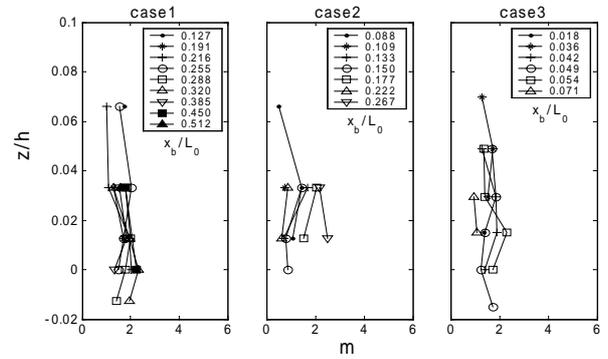


図 - 8 m の鉛直分布 (本実験結果のみ)

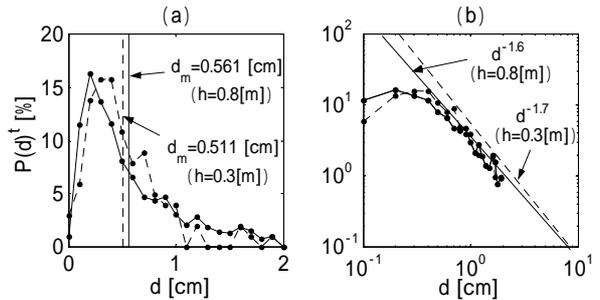


図 - 9 空間平均した気泡径分布と平均気泡径
(実線: $h=0.8[m]$ 点線: $h=0.3[m]$)

ターで色付けしてある。また、気泡個数の分布は、例えば気泡径 d が $0.15 \sim 0.25[cm]$ の間のもは $d=0.2[cm]$ として解析した。図 - 6 より本実験と小規模実験の結果を比較すると、 x_b/L_0 の大きさによらず気泡個数がピークとなる気泡径 (d_p と呼ぶ) は約 0.2 程度とほぼ同様であり、分布形状も全ての x_b/L_0 において同様に、径の増大に伴って気泡個数が指数関数的に減少するという形状となっていることがわかる。しかし、小規模実験では測定波数が 10 波と本実験に比べ少なかったため、気泡径分布にかなりのばらつきが見られ、正確な比較が行うことが出来ない。そこで、全測定地点で検知した気泡を空間平均した気泡径分布による比較が可能かどうか検討した。

図 - 7 に示すのは、一測定地点での気泡径分布の例である。図中の d [cm] は気泡径、 $P(d) [\%]$ はある径の気泡個数の全気泡個数に対する割合を表しており、両軸は対数表示している。本実験においては、どの測定地点においても図 - 7 のような d_p と d^{-m} を持った気泡径分布となっていたため、全測定地点における d_p と d^{-m} を求めた。つまり、 d_p と d^{-m} が測定地点によらず同様であるならば、空間平均した気泡径分布による比較が可能であることを示す。図 - 8 に示すのは、各実験ケースでの m の鉛直分布である。また小規模実験においては気泡個数が過小であり、適切な m を求めることが出来なかったため図示していない。図 - 8 より、全測定地点において $d^{-1 \sim -2}$ でほぼ一定の傾きとなっている。また d_p についても全測定地点で $0.2[cm]$ で一定となっており、測定地

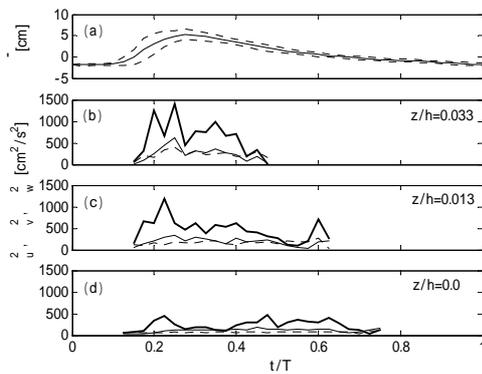


図 - 10 水面変動及び乱流強度の時間変化

(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

点によって気泡径分布の形状はほぼ変化しないことが分かった。

図 - 9 (a)(b) に示すのは、空間平均した気泡径分布を対数表示の有無で表したものである。図中の $P(d)^*$ [%] は空間平均したときの $P(d)$ で、 d_m [cm] は全測定地点で検出した気泡の平均気泡径を表している。図 - 9 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、気泡径分布についてはスケール効果による影響はほとんど無いと言える。

つまり、スケール効果により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ことがわかった。

6. 連行気泡特性と乱流特性の関連性

まず乱れの時間変化について述べる。図 - 10 に示すのは、一測定地点での水面変動及び乱流強度 σ_u^2 、 σ_v^2 、 σ_w^2 [cm²/s²] の時間変化を表したものである。ここで乱流強度とは、各成分の流速の分散と仮定する。図 - 10 (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 ($\bar{\eta} \pm \sigma_\eta$)。また図 - 10 (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 - 10 より、水面付近ほど乱れが強いことが分かる。また水面付近ほど、波の全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 - 11 に示すのは、乱流エネルギー k_{ave} [cm²/s²] とボイド率 $\bar{\phi}^n$ の岸沖分布である。ここで k_{ave} とは式 (4) によって表される乱流エネルギー k の時間平均値を表している。また図中の実線は k_{ave} 、点線は $\bar{\phi}^n$ を表している。

$$k = 1/2 \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \quad (4)$$

図 - 11 より、 k_{ave} 、 $\bar{\phi}^n$ とともに碎波点から少し離れた地点でピークとなり、その後減衰するという傾向が見られる。また k_{ave} 、 $\bar{\phi}^n$ の分布形状はほぼ一致しており、それ

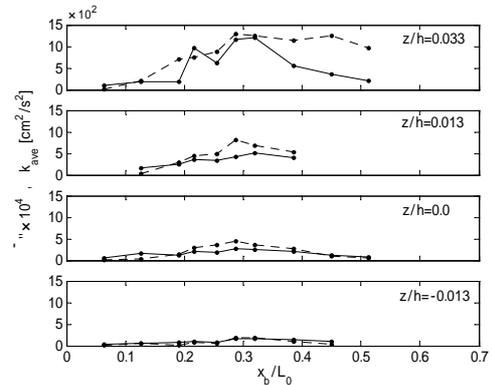


図 - 11 乱流エネルギー k_{ave} とボイド率 $\bar{\phi}^n$ の岸沖分布

(実線： k_{ave} 点線： $\bar{\phi}^n$)

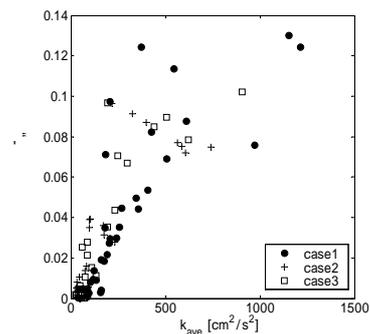


図 - 12 乱流エネルギー k_{ave} とボイド率 $\bar{\phi}^n$ の関係

らの間に相関があることが分かる。

最後に k_{ave} と $\bar{\phi}^n$ の関連性について述べる。図 - 12 に示すのは、各測定地点で得られた k_{ave} と $\bar{\phi}^n$ を、横軸に k_{ave} 、縦軸に $\bar{\phi}^n$ をとってプロットしたものである。図 - 12 より、 k_{ave} と $\bar{\phi}^n$ にはある程度線形的な関係があることが分かる。特に case1、3 においては、かなり相関性の高い線形関係があることが分かる。しかし、case2 の k_{ave} と $\bar{\phi}^n$ にはそれほど高い相関性が見られない。このことから、 k_{ave} と $\bar{\phi}^n$ には高い相関性があるが、実験条件によってその相関性は異なるということが分かる。

7. 結論

- ・ 碎波連行気泡特性のスケール効果について検討したところ、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ことが分かった。
- ・ 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ところ、ボイド率と乱れには強い相関があることが分かった。

8. 参考文献

- 1) D.G.Goring and V.I.Nikora (2002): Journal of Hydraulic Engineering, 128, pp117-126.
- 2) H.Chanson, S.Aoki and A.Hoque(1999): Coastal/Ocean Engineering Report, No.COE02-01.
- 3) Lewis, W. K. and Whitman, W. C.(1994): Industrial and Engineering Chemistry Vol.16, pp.1215—1220.