

現地小碎波の連行気泡特性に関する実験的研究

角野昇八*・鈴木琢磨**・大西祥久***・日引 俊****

大気-海洋気液界面での気体輸送現象のうち、沿岸碎波帯気液界面における気体輸送現象には碎波連行気泡特性が大きく関わっているとの立場から、ボイド率のみならず気泡移動速度などの特性を単独で測定可能なダブルボイドプローブを開発し、淡水でその有効性を確認している。本研究では、電気回路を改良して塩水中でも使用可能なようにしたものを新たに製作するとともに、その精度を確認し、さらにそれを現地砂浜の小碎波中に設置して現地塩水碎波の連行気泡特性を測定するとともに解析した。

1. 緒 言

碎波帯における碎波連行気泡は、大気-海洋気液界面での気体輸送現象のほか、エアロゾルの発生要因としてや、短波長波間のエネルギー的干渉の観点からいくつかの研究がなされている。また、碎波で巻き上げられた砂粒子の運動と移動にも大きく関わっていることが考えられ、碎波連行気泡特性の解明は今後ますます重要な課題になると思われる。著者らは、昨年、ボイド率のみならず気泡移動速度などの特性を単独で測定可能なダブルボイドプローブ (DVP) を開発し、実験水槽内の淡水碎波でその有効性を確認し、碎波連行気泡特性の解析を行っている (角野ら, 2003)。しかしながら、現地での使用を想定してそれを塩水中で使用したところ、不具合があることが判明した。本研究では、電気回路を改良して塩水中でも使用可能なようにしたものを新たに製作するとともに、その精度を確認し、さらにそれを現地砂浜の小碎波中に設置して現地塩水碎波の連行気泡特性を測定するとともに解析した。

2. DVP の塩水中での適用性の検討

(1) DVP の原理と DVP を用いた塩水実験

ボイドプローブの原理は、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地点に設置して水中を介して電気回路を構成し、プローブ先端への気泡の貫入・拔出による回路切断の有無の電気信号を得るものである。この電気信号から非通電 (気泡貫入) 時間の通電 (水中) 時間に対する比より気泡のボイド率をまず求めることができる。ダブルボイドプローブ (DVP) では、“front” および “rear” の 2 本のプローブ部を微小距離近接させて製作し、一つの気泡がその双方に貫入する時間差とプローブ先端部間隔とから気泡移動速度を求めようとする。すなわち、一つの気泡が二つのプローブに時間差 t_s をもって貫入した

とき、それとプローブ間隔 ΔS より

$$v = \Delta S / t_s \dots\dots\dots (1)$$

の関係から気泡移動速度 v を求めることができる。また、一つの気泡の通過時間 t_0 にこの速度を乗じることにより、気泡弦長 d を

$$d = v \cdot t_0 \dots\dots\dots (2)$$

より求めることができる。さらに、以上の基本量より気泡容積、気泡表面積の気泡特性を求めることもできる。ここで DVP の塩水中での適用性を考えた場合、電気回路を構成させることによって水の電気分解が著しく生じ、気泡特性測定に問題が生じる恐れがあることが考えられる。そこで著者らは、DVP の塩水中での適用性を確認するための実験を行った。実験概要は、水を入れた容器の下方から強制的に発生させた気泡に接触するように DVP を設置し、それによって得られる電圧変化のデータを、淡水・塩水を用いた場合でそれぞれ比較するものである。図-1 はその実験装置および電気回路の概要を示す。実験に用いた塩水の濃度は 3% とした。図-2 は、淡水中・塩水中それぞれにおいて得られた電圧変化のデータの例を示す。

図-2 から分かるように、気泡接触の際、淡水中の実験では十分に回路切断の有無が判定できるのに対して、塩水中では、それが不十分で不明確となっていて、この DVP では塩水中での使用に問題があることがわかる。このような現象が生じた原因として、水の電気分解によ

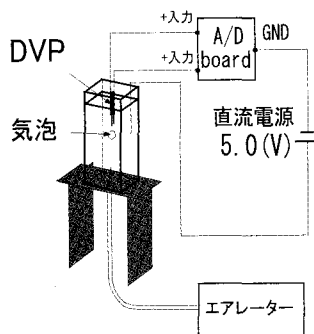


図-1 従来の DVP 装置

* 正 会 員 工博 大阪市立大学教授大学院 工学研究科都市系専攻
** 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
*** 学生会員 大阪市立大学工学部土木工学科
**** 工博 京都大学原子炉実験所助教

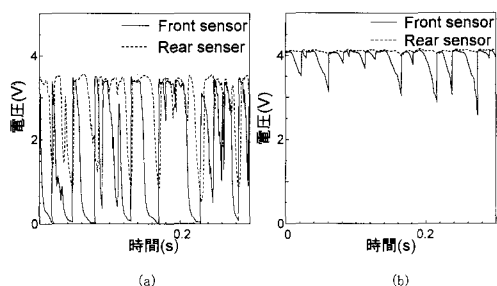


図-2 淡水中 (a) あるいは塩水中 (b) での電圧変化 (従来型)

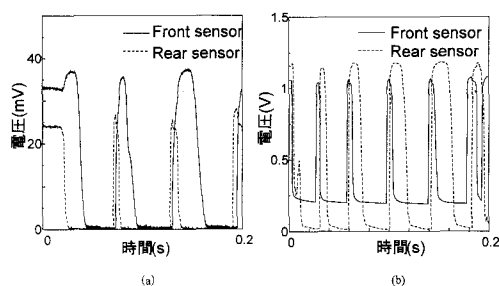


図-4 淡水中 (a) あるいは塩水中 (b) での電圧変化 (改良型)

りセンサー表面にイオンが付着すること, またそれによって生じる回路内での電流の回り込みなどが考えられた。

(2) 電気回路の改良

既製作のDVPでは, このように塩水中での使用に問題があり, またその原因は電気回路にあることが判明したため, 電気回路を改良することとした。改良したDVPを図-3に示す。その改良点は, 従来のDVPではfrontとrearの2つのセンサーに対して1つの電極を設けていたために, 2つのセンサー間に電流の回り込みが生じていたものであったのに対して, 改良のDVPでは, frontとrearそれぞれに独立した電気回路を構成させ, またそれぞれに抵抗を設けることで, その抵抗での電位差を出力させることにした。このことで回路内での電流の回り込みを防止することもできる。このように改良したDVPを用いて, 従来のDVPでの実験と同様の実験を行った。それによって得られた電圧変化のデータを図-4に示す。

図-4から分かるように, 改良したDVP装置を用いることで, 淡水中と同様に, 塩水中においても気泡接触に際して鋭敏な電圧変化のデータを得ることが可能となっている。なお, 図-2および図-4を比較して, 改良後のDVPで得られた電圧変化データが従来のDVPで得られたものに比べ小さいのは, 2つの回路の電源電圧

が異なること, および改良後のDVPでは抵抗を設けたためである。また図-4中において淡水中と塩水中とで示す電圧の値が異なるのは, 塩水の電気伝導率が淡水に比べて極めて高いためである。

(3) 気泡移動速度の精度確認実験

気泡特性の算出には, 電圧変化のデータから算出する気泡移動速度が基本となるため, DVPの塩水中での適用性の可否の最終確認として, DVPによって得られる気泡移動速度が実際の気泡移動速度と等しいかどうかを確認する必要がある。そこで, 改良した電気回路を構成させたDVPによって算出した気泡移動速度の精度確認実験を行った。この精度確認実験は昨年の研究(角野ら, 2003)でのものと同様の方法によるもので, 図-1に示す塩水を入れた容器中の気泡上昇速度をDVPで測定するとともに, それを側面から高速ビデオで撮影した画像からの速度と比較するものである。図-5はその実験により, 全50個の気泡データについて, ビデオ画像による値に対するDVPによる値の比の度数分布を表したものである。全データの80%が0.95~1.05の範囲に収まっていることから, 改良した電気回路で構成したDVPの精度を確認することができた。

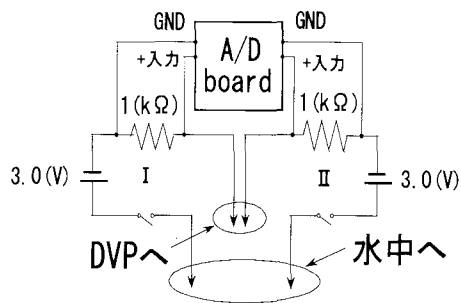


図-3 改良後の電気回路

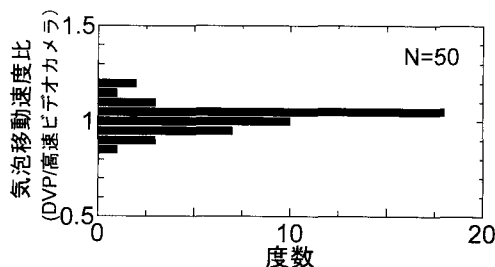


図-5 DVPとビデオ画像による気泡移動速度の比較 (度数分布)

3. 現地小碎波における DVP を用いた気泡特性測定

改良した電気回路を DVP に構成させることで、塩水中においても気泡特性測定が可能であることを確認できたので、現地小碎波を対象として DVP を用いた気泡特性測定を行い、その気泡特性と淡水を用いた水槽内実験によって得た特性との比較検討を行うこととした。

実験場所としては、実験場所へのアクセスの容易さを考えて大阪近傍とし、また DVP の設置の容易さから、その設置に便利な突堤を有する兵庫県須磨海水浴場を選定した。測定は 2004 年 1 月 16 日の 10 時～18 時までの約 8 時間行った。また測定時の天候は曇り、現地海岸の海底勾配はほぼ $\tan\theta=1/7$ 、碎波波高 $H_b=3\sim60$ cm、碎波水深 $h_b=3\sim42$ cm、波の周期はほぼ $T\approx 2\sim3$ s であり、解析可能全波数は全 96 波であった。

実験は図-6 に示すような装置で行った。実験方法は、St1 でビデオカメラによって定規とともに撮影された水面および波の画像より波の周期 T 、静水面位置を決定し、St3 ではビデオカメラによって St2 に設置した碎波波高・碎波点位置測定用定規（複数）と DVP を撮影し、その画像解析から碎波波高 H_b 、碎波水深 h_b 、碎波点位置、DVP 設置位置を決定するものである。

図-7 に示すのは、その現地測定によって得られた時間的電圧変化の一例である。実験に際しては、DVP が現地碎波に耐えうる強度を持っているかどうか、および砂の巻き上げが激しいと思われる現地碎波帯に設置しても気泡特性の測定が可能かどうかなどが懸念されたが、今回のこの場所の碎波の規模は小さかったこともあり、測定結果では鋭敏な電圧変化のデータを安定して得ることができていて、その問題は無かった。

淡水の造波水槽内実験（角野ら、2003）では、碎波点

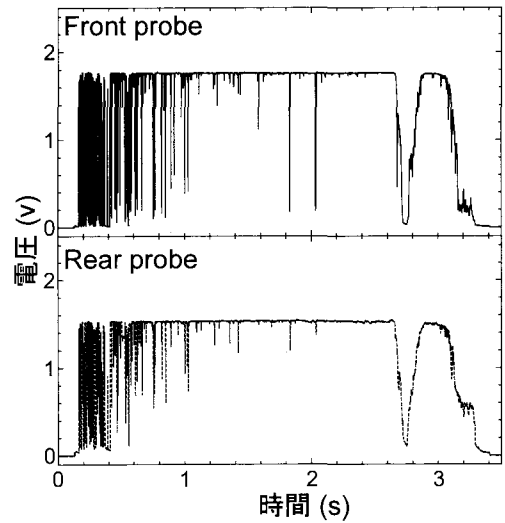


図-7 DVP によって得られた時間的電圧変化（1 波）

から沖側の水平方向に 20 cm 間隔で、また静水面から上向きの鉛直方向に 1 cm 間隔でとったメッシュポイントで DVP による測定を測定していた。しかし現地の碎波帯では、ウェーブセットアップやセットダウン、あるいはサーフビートなどが起因となって平均水面の非定常的な変化が生じ、正確な静水面位置（鉛直方向の測定地点）を決定することがきわめて困難であった。それゆえ、造波水槽内実験と同様の測定地点の採り方は今回の現地実験ではできず、そのままでは気泡特性の比較を行うことが出来ない。そこで、造波水槽内実験も現地実験とも、鉛直方向には碎波峰から下方向に 1 cm 間隔で測定地点を採ることとし、水平方向には昨年（角野ら、2003）と同様とすることとした（図-8 参照）。そうすることで造波水槽内実験と現地実験で測定した気泡特性の比較を行うことができるようになる。

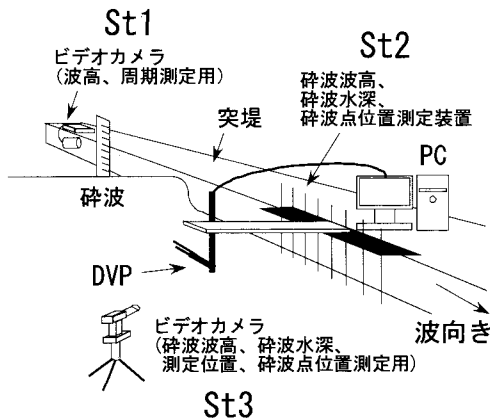


図-6 現地実験用装置

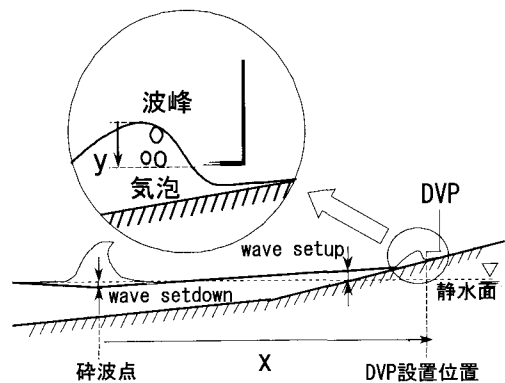


図-8 測定地点及び平均水面の変化

4. 碎波連行気泡特性

以下では、現地実験で得られたデータより算定した気泡特性（気泡径、ボイド率、気泡容積、気泡表面積）の結果を示す。その算定については水槽内実験とほぼ同様の方法で行った。ただし、水槽内実験では波は規則波であったので、気泡特性の算定は各測定地点での10波分の平均値を用いていた。これに対して今回は不規則波であるので、測定可能であった測定地点において観測された波において、同じ碎波高、碎波水深、測定位置（図-8での (x, y) ）を持つ波について平均した。したがって、水槽内実験と現地実験での気泡特性の比較は、今回の実験で測定可能であった地点のみについてのみ行った。

(1) 気泡径 d と平均気泡径 d_m

図-9には、 $H_b=6$ cmの碎波波高の波（ただし周期、碎波形式は異なる）において観測された気泡の径 d について、気泡径1 mm増分ごとの気泡個数の全個数に対する割合と平均径の値の例を示した。なお、ここでの議論は他のケースについてもほぼ共通である。またこのとき、例えば0.05 mm以上0.15 mm未満を0.1 mmとしている。

さらに、今回の現地実験でも昨年の研究（角野ら, 2003）と同様に直径約20 mm以上の大きさのものは空隙であって気泡ではないものとして棄却した。同図には、淡水の水槽内実験の結果も示してある。

図-9によると、気泡径分布の形状はほぼ同様の形を示しているが、淡水の水槽内実験では0.2~0.4 cmのものが卓越して存在しているのに対し、塩水の現地実験では0.1~0.3 cmのものが卓越し、淡水の水槽内に比べて径の小さい気泡が多く存在していることが分かる。また

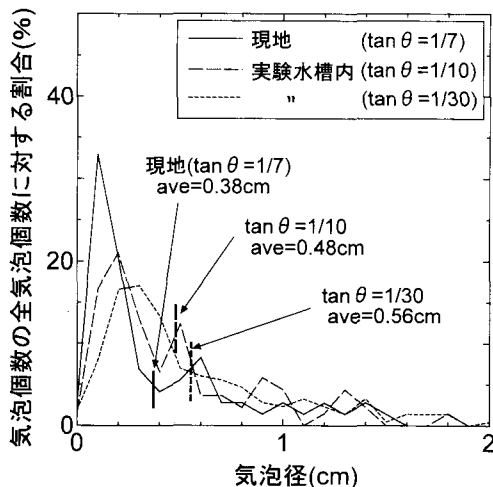


図-9 $H_b=6$ cmでの気泡径分布

このことは、平均径についても同様に結論づけることができる。図-9での気泡径分布の形は、水（海）底勾配による変化の仕方が一様であることから、平均気泡径と水底勾配との間に一定の関係があるように見える。そこで両者の関係について検討した。

(2) 平均気泡径と水底勾配との関係

図-10に示すのは、塩水の現地実験で得られた平均気泡径 d_m の結果を淡水の水槽内実験での値とともに碎波波高別に、水（海）底勾配の関数として表したものである。なお、水底勾配が1/10, 1/20, 1/30のものは水槽内実験結果であり、1/7のものが今回の現地実験結果である。また、図中の「総平均」は、碎波波高 $H_b=6.0, 9.0, 10.0, 11.0$ cmで得られたすべての気泡の径についての平均値を示している。

図-10より、平均気泡径についても、平均0.38 cmの現地海水中での気泡は同0.58 cmの淡水中の気泡よりも小さいことが分かる。また、水槽内実験結果では、平均気泡径は水底勾配の増加とともにわずかに線形的に減少する傾向が認められたことから、現地海水中においては、淡水中での気泡より小さい平均径の気泡が水底勾配と線形的な関係を持って分布していることが考えられる。この点を明らかにするためには、今回の海岸とは勾配の異なる現地での実験が必要となる。

(3) ボイド率 ϕ 、気泡容積 V_g 、気泡表面積 A_g

図-11に示すのは、 $H_b=6$ cm, $y=1$ cmでの局所的なボイド率、気泡容積、気泡表面積の値を碎波点からの水平距離 x を横軸にとって、比較可能であった水槽内実験結果とともに表した例である。なお、ここでの議論は他のケースについてもほぼ同様にいうことができる。データの整理方法は水槽内実験の時と同様であり、また既述のように、水槽内実験では規則波を対象としていて10波

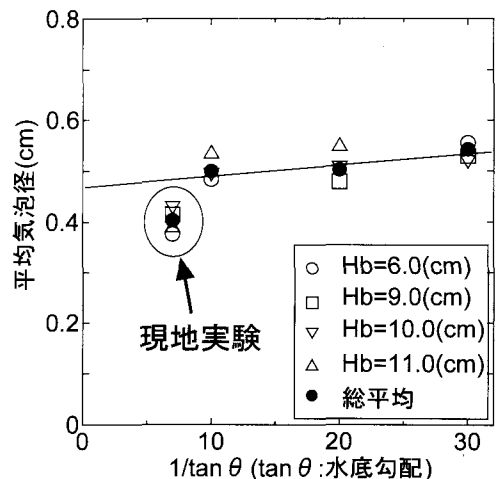
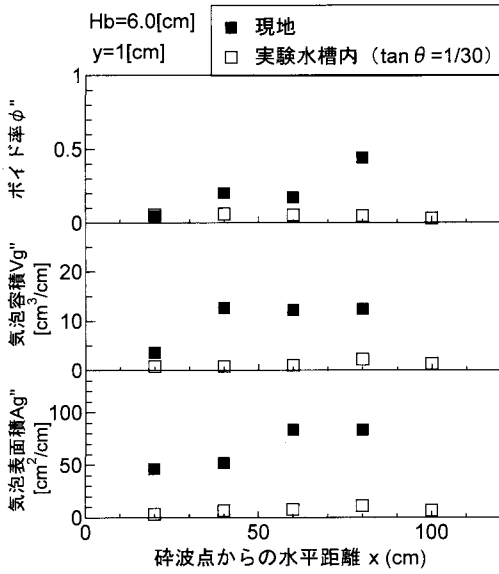


図-10 平均気泡径と水底勾配との関係



図一11 連行気泡特性

分の平均値を用いていたが、今回の現地実験では不規則波であったため算定可能であった波についての平均値を用いた。

図一11によると、ボイド率、気泡容積、気泡表面積のいずれのデータについても、淡水の水槽内実験結果に比べて全体的に値は非常に大きく、ボイド率、気泡容積については約4～10倍、気泡表面積については約8～15倍となっている。このことと、現地海水中の気泡の径が淡水中のものに比べて小さいことを考えると、現地碎波帯では淡水中に比べて小さい径の気泡が数多く存在することが結論づけられる。また水槽内実験の結果では、碎波峰からの鉛直距離 y が同じであれば、碎波点からの水平距離 x に関係なくほぼ同じ値であったのに対して、現地碎波帯では x の増加に伴ってボイド率、気泡容積、気泡表面積は増加する傾向にあることがわかる。ただし、既述のように今回の実験では、波が不規則波であったために水槽内実験と比較可能なデータを数多く得ることができなかった。また、ボイド率、気泡容積、気泡表面積の平均値を求める際の平均回数も同じでない。今後、さらに数多くの測定データを得ることが必要である。

5. 結 言

淡水中で有効性を確認したDVPの塩水中での適用性を検討した結果、そのままのDVPの状態では塩水中における気泡特性の測定は困難であることが判明した。そこで、改良した電気回路で構成した新たなDVPを製作し、その塩水中での使用の可能性を確認するとともに、気泡移動速度の精度を確認した。さらに、そのDVPを用いて現地小碎波を対象として連行気泡特性の測定を実施した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 現地海水中での気泡(平均径0.38 cm)は淡水実験(同0.58 cm)よりも小さい径のものが多く存在していることが確認できた。
- (2) 現地海水中でのボイド率、気泡容積、気泡表面積は淡水実験の結果に比べ、非常に大きいことを確認した。また淡水実験の結果では、碎波峰からの距離 y が同じであれば、碎波点からの水平距離 x に関わらずほぼ同じ値であったのに対し、現地海水中では x の増加に伴い値は増加することも確認できた。
- (3) 平均気泡径とボイド率、気泡容積、気泡表面積の結果より、現地小碎波帯では淡水実験での碎波帯に比べ小さい径の気泡が数多く存在することを結論づけることができた。

以上より、従来、碎波連行気泡特性やそれを介した気液界面気体輸送現象は、淡水と塩水とでは特性が大きく異なることが指摘されてきているが、本研究でもそのことが明確に示されている結果が得られた。

本研究におけるDVPを構成する電気回路の改良には、大阪市立大学大学院工学研究科化学生物系専攻の小槻研究室に多大のご支援とご協力をいただいた。ここに記して深甚の謝意を表する。また、本研究は文部科学省科学研究費補助金(課題番号12305031)の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

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, 1406-1410。