

砕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

角 野 昇 八*・鈴 木 琢 磨**・関 本 武 史***・日 引 俊****

砕波連行気泡容積特性のみならず、気泡移動速度も同時に測定が可能なダブルボイドプローブ(DVP)を新たに開発した。本研究では、その原理と構造を紹介するとともに、それから得られる気泡移動速度の精度の確認結果について報告する。また、造波水槽内に設置された緩斜面上の砕波連行気泡について、DVP を用いてボイド率、容積、表面積、水平移動速度の分布を測定するとともに、その結果より気泡径分布の特性を解明して適用性を確認した。さらに、それらの特性を高速ビデオカメラで撮影された砕波 cavity の容積特性と比較し、両者の間には強い相関があることを見出した。

1. 緒 言

海洋上や沿岸砕波帯における砕波連行気泡特性については、大気/海洋気液界面での気体輸送現象解明(Jahne・Monahan, 1995; Donelan ら, 2002)のほか、エアロゾルの発生要因(Monahan ら, 1986)や、光の散乱(Stramski, 1994)、水中雑音(Urick, 1986)などの観点からいくつかの研究がなされている。また、砕波におけるエネルギー逸散の観点(Hwung ら, 1992; 青木ら, 2001)からの研究もある。解明の手法には大別してレーザー光による方法(Hwung ら, 1992)、カメラ画像やビデオ画像による方法(Bonmarin, 1989; Deane・Stokes, 1999; 角野ら, 2000)やボイドプローブなどのセンサーによる方法(青木ら, 2001; 角野ら, 2001)がある。ところが前二者は、波動をゆがめたりあるいは3次元現象を2次元画像で見ることの難点がある。この理由から、最近、著者らは後者の方法を採用し、専用のシングルボイドプローブ(SVP)を開発して模型緩斜面上で発生させた砕波による連行気泡特性についてさまざまな知見を得た(角野ら, 2001)。その際、気泡の容積特性などはSVPのみの測定量で評価が可能であるが、気泡径を評価するためには気泡移動速度を評価する必要がある、その測定のために別の計器による必要があった。著者らの例では、造波水槽のガラス壁越しに撮影した高速ビデオ画像の解析によりそれを求めていた。しかしながら、この気泡移動速度測定手法の現地での適用はきわめて困難であり、現地での気泡特性の測定を考えた場合にはそれが大きな障壁となっていた。

本論文では、それ自体で気泡移動速度の測定も可能なダブルボイドプローブ(DVP)を新たに開発するとともに、その信頼性と適用性について検討を加え、さらにそれによる種々の連行気泡特性の解析結果についてまとめた。

2. ダブルボイドプローブの原理と製作

(1) ダブルボイドプローブの原理

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、プローブに電氣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により気泡の存在を感知しようとするものである。このときDVPでは、2本のプローブ部を近接させて製作し、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。図-1はDVPの概念図を示し、また図-2は、DVPと気泡の位置関係とそのときの回路内の電圧変化の様子を示している。図-2に示すように、一つの気泡が二つのプローブに時間差をもって貫入することにより各々の回路内電圧変化にも時間変化が現れ、その時間差 t_s 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、一つの気泡通過時間 t_b にこの速度を乗じることにより、気泡弦長 d を求めることができる。すなわち、

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

(2) ダブルボイドプローブの製作

今回開発したDVPは、できる限り小さな気泡に貫入するように、鍼灸に使用する胴部直径0.12mmのステンレス製針を採用した。その先端部はほぼ21度の鋭利な角度に製作されている。それに銅線を接合した回路を2本作成して束ね、内径0.6mmのステンレスチューブに通

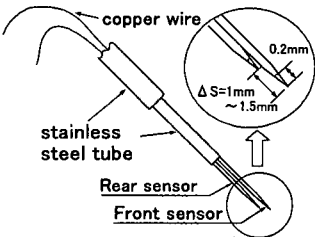


図-1 DVP 概念図

* 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
*** 正 会 員 修(工) 大阪府寝川水系改修工営所
**** 工 博 京都大学原子炉実験所助教

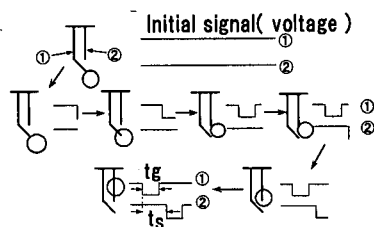


図-2 DVP の原理

し、さらにそれを内径 1.2 mm のステンレスチューブに挿入して 1 本の DVP とした(図-1 参照)。それぞれのステンレスチューブの結合部はシリコンを充填した。針の先端部は、先端の 0.2 mm 部分を除いて樹脂で絶縁するとともに、2 本を長さ方向に ΔS だけずらして製作した。この ΔS は、

$$N_s \cdot v / f < \Delta S < d_m \quad (3)$$

の関係 (Hibiki ら, 1998) を満足するように設定した。ここに N_s は気泡 1 個あたりのサンプリングデータ数、 f はサンプリング周波数、 d_m は平均気泡径である。今回の実験では、 $N_s=2.5$ 程度、 $v=100$ cm/s 程度、 $f=5000$ Hz、 $d_m=5$ mm 程度であったため、 $0.5 \text{ mm} < \Delta S < 5 \text{ mm}$ となる。したがって、今回製作の DVP の ΔS は、 $\Delta S=1.18$ mm と 1.49 mm のものを製作した。Deane・Stokes (1999) の開発したカメラの対象気泡径はほぼ 1 mm 以下とされ、それ以上の気泡径には適当ではないとされているが、広い気泡径スペクトルの気泡を対象とするためには DVP とカメラなどの種々の測定機器を併用する必要があることになる。なお本研究では、気泡は球形であって、しかも球の中心に針が貫入していると仮定した。このことで、式 (2) で求められる d は気泡径と考えることが出来る。

(3) 校正実験

気泡が DVP に貫入して検知される回路電圧変化は図-3 のようになる。図示のように、DVP が気泡に接触・貫入する際の電圧低下は緩やかであるので、そのどの時点が接触した瞬間かをあらかじめ校正実験を行って正確に知っておく必要がある。その瞬間の電圧値(閾値)を求めるこの校正実験方法は SVP に対するのと同様の方法で行った (角野ら, 2001)。

3. 気泡移動速度の精度の基本的確認

既述のように、DVP の最大の特徴は、気泡速度の算定の際に高速ビデオカメラを用いることなく、DVP のみで気泡速度を求めることが出来ることである。しかしながら、DVP によって求められた気泡速度が実際の気泡速度に等しいかどうかを確認しておく必要がある。本研究では、内部が 3 cm×3 cm×25 cm (高さ) のプラスチック

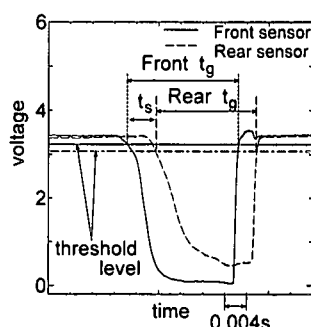


図-3 気泡貫入の際の電圧変化

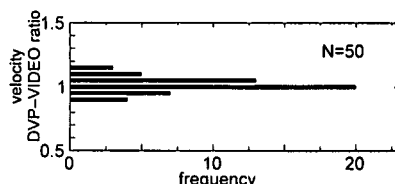


図-4 DVP とビデオ画像による気泡移動速度の比較 (度数分布)

製水槽中(水深 25 cm)に底から気泡を発生・上昇させて、気泡上昇速度を DVP で測定すると同時に、それを高速ビデオカメラで撮影し、両者の気泡上昇速度を比較して精度を確認した。気泡の上昇速度はほぼ 10 cm/s~30 cm/s 程度であった。図-4 は、全 50 個のデータについて、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が、両者の値が一致する度数が最多であり、全データの 80% が 95%~105% に収まっていた DVP の精度を確認することができる。

4. 砕波連行気泡の移動速度の精度確認

造波水槽の緩斜面上で発生させた砕波によって連行された気泡の移動速度をすでに高速ビデオカメラ画像によって解析していたので (角野ら, 2001)、本研究では、それと同条件の波を発生させて DVP によって気泡移動速度を測定し、既得のビデオ画像の結果と比較した。なお、一部の条件では今回、ビデオ撮影と DVP による計測の両方を行った。用いた造波水槽は高さ 60 cm、幅 50 cm、長さ 20 m で、その端部に 1/30 の木製勾配を設け、周期と波高の条件を全 10 ケース変えて実験を行った。使用した水は真水である。その条件を表-1 に示した。

図-5 は、DVP による砕波連行気泡速度の岸沖空間分布を高速ビデオ画像観察結果と比較した例である。値をその地点での波速 ($C=\sqrt{gh}$) で正規化している。なお、DVP、ビデオ画像とも、速度は波 10 波分についての平均値をとった。これらの図によれば、速度の基本的確認のときと同様に、両者の値はほぼ一致していて DVP の精度が確認できる。ただし、DVP による値が若干小さく出

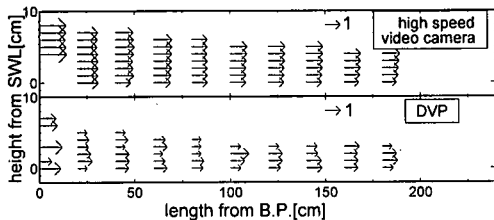


図-5 気泡移動速度の空間分布 ($T=2$ s, $H_0=8.3$ cm)

るのは、プローブを水平に設置しているために鉛直成分を捉えていないこと、また高速ビデオ画像の目視観察では移動速度を平均化して捉えてしまうことなどが考えられる。

5. 砕波連行気泡特性

DVPのデータにより、連行気泡に関する種々の特性量を求めることができる。これらについてもSVPによる結果との比較を行ってその適用性の検証を行った。

(1) 空間局所ボイド率 ϕ'' および平面局所ボイド率 ϕ'

図-6は、2波の砕波における砕波連行気泡に関するDVPの回路電圧変化の一例である。このデータより、気泡通過時間 t_{gi} (i は気泡番号) および気液二相の一波の通過時間 t_{ij} (j は波番号) を求めることができる。またそれより、時間平均された空間局所 (DVP設置位置) ボイド率 ϕ'' を

$$\phi'' = \sum_i t_{gi} / \sum_j t_{ij} \quad \dots\dots\dots (4)$$

より求めることができる。また、同様にして、ある平面位置でのボイド率 ϕ' を t_{gi} の鉛直方向和と t_{ij} の鉛直方向和より求めることができる。このようにして求めた平面局所ボイド率の砕波線から汀線までの分布の例を図-7に示した。図中には比較のためにSVPによる値も示した。図-7に見られるように、平面局所ボイド率は砕波点直後に最大となり、その後減少する傾向を示す。また、SVPによるデータとの整合性はよい。

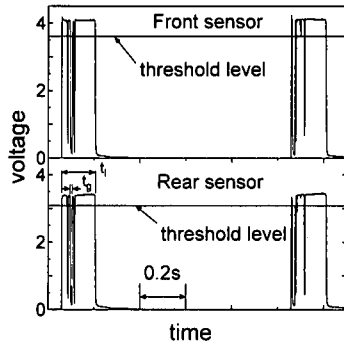


図-6 DVPによる砕波連行気泡に関する回路電圧変化 ($T=1$ s, $H_0=11.8$ cm)

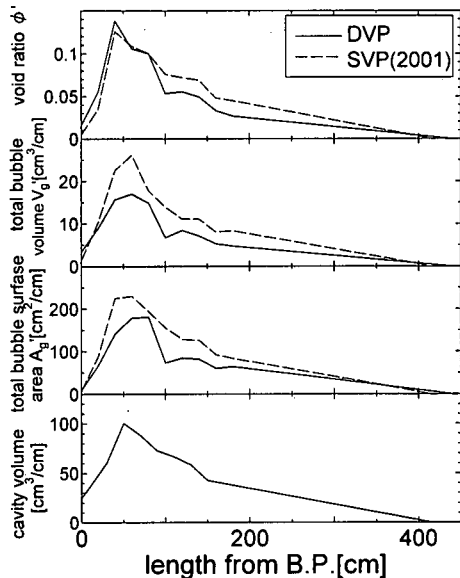


図-7 連行気泡特性 ($T=2.0$ s, $H_0=8.3$ cm)

(2) 平面局所気泡容積 V_g'

DVP設置点での空間局所ボイド率 ϕ'' および気液二相の一波の通過時間 t_i を求め、さらにそれにその地点での波速 ($C=\sqrt{gh}$) を乗じることにより、DVP設置点での気液二相の一波の通過距離 l_i を求めることができる (図-8参照)。この l_i はまた、水槽幅方向の単位幅、単位高

表-1 実験条件と実験結果

水底勾配 $\tan\theta$	周期 T [s]	沖波波高 H_0 [cm]	波形勾配 H_0/L_0	砕波波高 H_b [cm]	砕波水深 h_b [cm]	砕波形式	平均径 d_m [mm]	連行気泡容積 V_g [cm ³ /cm]	連行気泡表面積 A_g [cm ² /cm]
1/30	1.0	11.8	0.076	12.0	18.0	崩れ波	5.67	17.57	177.28
	2.0	8.3	0.013	12.2	14.0	巻き波	5.34	13.05	138.89
	1.0	7.8	0.050	8.0	11.7	崩れ波	6.29	6.10	53.71
	1.2	7.0	0.031	9.0	16.4	崩れ波	5.80	16.18	130.68
	1.2	4.3	0.019	6.0	8.4	巻き波	5.55	3.74	26.56
	1.0	6.1	0.039	7.0	8.5	崩れ波	5.07	2.56	19.56
	1.0	9.2	0.059	9.5	13.0	崩れ波	5.50	7.70	69.61
	1.1	7.6	0.040	8.8	13.0	崩れ波	5.02	7.99	74.7
	0.9	8.5	0.067	8.7	15.0	崩れ波	5.05	15.12	165.13
	1.0	10.7	0.068	10.4	17.7	崩れ波	4.94	17.22	166.05

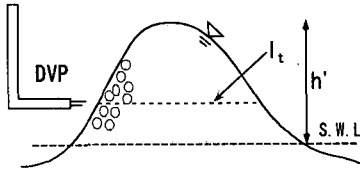


図-8 DVPと砕波

さあたりのその高さでの気液二相一波の筒状容積 V_i でもある。このようにして得られた V_i に、先に求めた空間局所ポイド率 ϕ'' を乗じることにより、空間局所的な気泡容積 $V_{g''}$ を求めることが出来る。すなわち

$$V_{g''} = \phi'' \cdot V_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

この空間局所気泡容積 $V_{g''}$ を鉛直方向に積分することにより、平面局所気泡容積 V_g' を求めることが出来る。すなわち、

$$V_g' = \int_0^{h'} V_{g''} dz \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、静水面以下には気泡部はほとんど認められなかったもので、積分は静水面以上水面までの高さとしている。このようにして得た平面局所総気泡容積の砕波点から汀線までの分布の例も図-7にSVPによる値とともに示した。平面局所気泡容積の分布は平面局所ポイド率の分布とほぼ同じ傾向を示しており、またこの場合にも、DVPとSVPのデータの対応は良いことが認められる。

(3) 平均気泡径 d_m

既述のように、気泡通過時間 t_g と気泡移動速度の積から、球と仮定し、かつその中心を貫入するとした気泡の径を式(2)より求めることができる。図-9には、全ての測定地点で観測された全ての気泡の径について、気泡径の1mm増分ごとの気泡個数の全個数に対する割合の例を示した。ただし、気泡個数と移動速度の算定には各測定点での10波分の平均値を用いている。またこのとき、たとえば0.05mm以上0.15mm未満を0.1mmとしている。さらに、目視観測では直径約20mm以上の気泡は認められなかったため、この大きさ以上のものは棄却した。図中にはSVPとビデオカメラ画像から求めた同様データも示した。図示のように、最多は3mm付近にあるが、平均値は5.8mmであり、SVPによる値5.3mmとほぼ同じとなっている。また、DVPおよびSVPにおける個数割合の分布はほぼ同じとなっていて、DVPの信頼性と適用性がここでも示されている。なお、図-9に示す以外のケースでも、表-1に示すように、平均径はほぼ5.4mmであった。

(4) 平面局所気泡表面積 A_g'

空間局所気泡容積 $V_{g''}$ の容積は気泡のみから成っていて、また全気泡は平均径 d_m の球形と仮定すれば、空間局所気泡表面積を求めることができる。また、それを鉛

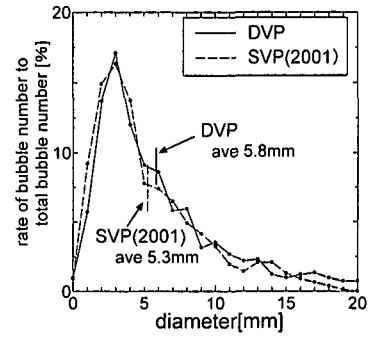


図-9 気泡個数分布

直方向に積分することにより、平面局所気泡表面積 A_g' を求めることも出来る。求められた平面局所気泡表面積の岸沖方向分布の例も図-7にSVPによる値とともに示した。平面局所気泡面積の分布も平面局所ポイド率などの分布とほぼ同じ傾向を示しており、またこの場合にも、DVPとSVPのデータの対応は良い。

6. 砕波前面 cavity 容積特性

(1) 砕波前面 cavity 容積特性に関する実験

Peregrine (1983) は、巻き波砕波における空気取り込みに重要な役割を果たす様相が2つあるとし、それらは巻き込む峰頂で形成されるジェットとそのジェットが水面に突っ込む地点で発生するスプラッシュによるとしている。また Bonmarin (1989) は、深海巻き波砕波を対象として高速ビデオ画像による解析により同様のことを確認している。一方、崩れ波砕波に対しては、Longuet-Higgins (1992) が“crushing air cavity”モデルを提唱し、主たる気泡生成は気泡ブルーム形成後の気泡分裂で生ずるとしている。

このようなことをふまえ、本研究でも砕波を高速ビデオカメラでガラス越しに10cmあるいは20cm間隔で追跡撮影し、そのcavity容積(2次元的には面積)をDVPによるデータと比較した。使用の水槽は既述のものであり、波の条件は、表-1のうちの計8条件を基本とした計10条件とした。撮影速度は500コマ/秒である。写真-1に $T=1.7$ s, $H_0=4.33$ cmの巻き波の砕波後0.70 s後の状況を示す。ジェットの突っ込みによってスプラッシュが発生し、激しい空気取り込みの可能性を示している。また、写真-2は $T=0.9$ s, $H_0=7.6$ cmの崩れ波の砕波後0.65 s後の状況を示す。崩れ波ではこのような状況がこの前後に継続し、砕波面前面から背面にわたる全面で長時間・長距離にわたる空気取り込みがあることがうかがえる。

(2) DVPによる気泡特性との関係

写真-1あるいは写真-2に示されるcavityの前面部

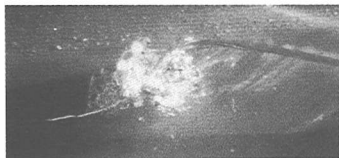

 写真-1 巻き波のスプラッシュ ($T=1.7$ s, $H_0=4.33$ cm)

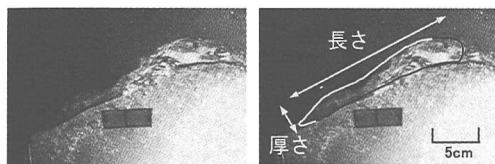
 写真-2 崩れ波の気泡部 ($T=0.9$ s, $H_0=7.6$ cm)


写真-3 cavityの長さsと厚みhの取り方

長さsと厚みhの積でcavity容積(面積)とし(写真-3参照)、図-7に結果の沖岸方向の分布を示す。DVPによる気泡特性の分布の結果と画像によるcavityの解析結果の対応は良いことが示されている。ここに示した条件以外のいずれのケースでもその対応はよく、DVPによる気泡特性の妥当性が示されているとともに、それらはcavity容積と密接な関係をもつことが示されている。さらに、これらの気泡特性から大気/海洋気体輸送の説明がほぼ可能であることから(角野ら, 2003), cavity容積特性と大気/海洋気体輸送の強い相関も示唆されることになる。

7. 結 言

砕波連行気泡容積特性のみならず、気泡移動速度も同時に測定が可能なダブルボイドプローブ(DVP)を新たに開発した。小容器内の水中を上昇する気泡の速度および造波水槽内の緩斜面上で発生させた砕波連行気泡の移動速度について、DVPから得られる速度と高速ビデオカメラ画像からの速度を比較することによってその精度を確認した。また、造波水槽内に設置された緩斜面上の砕波連行気泡について、DVPを用いてボイド率、容積、表面積、水平移動速度の分布を測定するとともに、その結果より気泡径分布の特性を解明して、適用性を確認した。さらに、それらの特性を高速ビデオカメラで撮影された

砕波cavityの容積特性と比較し、両者の間には強い相関があることを見出した。DVPの完成により、実験室内とは異なって気泡移動速度の同時測定が困難な現地においても気泡特性の詳細で精密な解明が可能となるものと期待できる。今後の課題としては、塩水中之でのDVPの機能の確認とともに、砂粒子などの衝突などにも耐えうる現地用DVPの開発がある。

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

- 青木伸一・Ashabul Hoque (2001): プランジングジェットによる気泡連行とそのエネルギー的評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 51-55.
- 角野昇八・館川徹也・竹村健治・山岸達也 (2000): 沿岸砕波における混入気泡容積特性とその再曝気現象に与える効果, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 136-140.
- 角野昇八・山岸達也・日引 俊・関本武史 (2001): ボイドプローブを用いた砕波連行気泡特性の解析とそれに基づく気体輸送現象の解析, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 71-75.
- 角野昇八・関本武史・日引 俊 (2003): 気体流量輸送係数による沿岸砕波帯気液界面での気体輸送評価法の提案, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 106-110.
- Bonmarin, P. (1989): Geometric properties of deep-water breaking waves, J.F.M., Vol. 209, pp. 405-423.
- Deane, G.B. and M.D. Stokes (1999): Air entrainment processes and bubble size distributions in the surf zone, J. Physical Oceanography, Vol. 29, pp. 1393-1403.
- Donelan, M. A., W.M. Drennan, E.S. Saltzman and R. Wanninkhof (2002): Gas transfer at water surfaces: American Geophysical Union, 383 p.
- Hibiki, T., S. Hogsett and M. Ishii (1998): Local measurement of interfacial area, interfacial velocity and liquid turbulence in two-phase flow, Nuclear Eng. and Design, Vol. 184, pp. 287-304.
- Hwung, H. H., J. M. Chyan and Y.C. Chung (1992): Energy dissipation and air bubbles mixing inside surf zone, Proc. 23rd ICCE., pp. 308-321.
- Jahne, B. and E. C. Monahan, Eds. (1995): Air-water gas transfer: Selected Papers from the Third Intl. Sympo. on Air-Water Gas Transfer, Aeon Verlag, 900 p.
- Longuet-Higgins, M.S., (1992): The crushing of air cavities in a liquid, Proc. Roy. Soc. London A, Vol. 439, pp. 611-626.
- Monahan, E.C., and G. MacNiocaill, Eds., (1986): Oceanic whitecaps and their role in air-sea exchange processes, Kluwer Academic, 294 p.
- Peregrine, D.H. (1983): Breaking waves on beaches, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 15, pp. 149-178.
- Stramski, D., (1994): Gas microbubbles: An assessment of their significance to light scattering in quiescent seas, The Intl. Society for Optical Eng., J.S. Jaffe. Ed., pp. 704-710.
- Urlick, R. J., (1986): Ambient noise in the sea, Peninsula Pub., 205 p.