

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

青 木 伸 一*・Ashabul Hoque**

1. ま え が き

荒天時に海岸に行くと、気泡で真っ白になった海面を目にする。しかしながら、この気泡が砕波帯内の水理現象にどのように影響しているのかについては、まだほとんど明らかになっていない。砕波によるエネルギー逸散には気泡の連行が重要な役割を果たすことは、すでに多くの研究者によって指摘されているが、直接これを気泡量や気泡の連行深さなどの諸量と結びつけて定式化した研究は、著者の知る限り Führeböter (1970) 以外見当たらない。また、気泡が水中に連行されると、気泡の体積分だけ水面が上昇するが、これも無視できない大きさになる場合がある。さらにこの水面の変動が伝播することにより、新たな波動運動をもたらす可能性もある (Aoki et al., 2000)。また、海底付近まで連行された気泡が放出される際、強い上昇流を伴うことがあるが (ボイリング)、これによって底質が巻き上げられ、水面近くまで運ばれることも指摘されている (Nielsen, 1984)。このような現象は、気泡の連行・放出過程に関係するため、一般にフルードの相似則に従わない。例えば、水塊の突入による連行気泡の流量は、ジェットの突入速度のべき乗に比例することや、気泡の上昇速度はスケールによらずほぼ等しいことなどがわかっている (例えば、Wood, 1991; Chanson, 1996)。したがって、小さなスケールの模型実験では、気泡の連行量が少なく、かつその放出が早いいため、相対的に気泡の影響が小さくなり、実験室ではその重要性が見出せていない可能性がある。近年、計測機器や計測法の発達などもあって、気泡に対する研究が注目されてきており、国内でもいくつかの研究例がみられる (例えば、松田ら, 1998; 渡部ら, 1999; 角野ら, 2000)。また、気泡量を現地で測定しようという試みもなされている (Stanton, 2000)。

本研究は、砕波によって水中に連行された気泡が、どの程度波エネルギーの逸散に寄与しているのかを調べることを最終の目的として行った、基礎的な研究である。Führeböter (1970) は、砕波によって水塊が水面に突入す

る際、そのエネルギーの一部がまず気泡連行によってポテンシャルエネルギーに変換され、これが気泡の放出とともに逸散されるものとして、砕波後の波高変化モデルを提案した。ただし、気泡によるポテンシャルエネルギーの増加を決める気泡濃度の鉛直分布については、単純な仮定を用いて検討しているにとどまっている。Lamarre and Melville (1991) は、造波水路で砕波を発生させ、砕波時の気泡濃度分布を測定している。彼らは、砕波による全エネルギー逸散量の 30~50% が気泡連行のためのエネルギーとして消費されていると述べている。また、Hwung et al. (1992) も、砕波時の気泡濃度分布を実験で測定することにより、気泡によるポテンシャルエネルギー成分を算出しているが、その寄与率はそれほど大きくは見積られていない。また、Chanson and Lee (1997) は、砕波によるエネルギー逸散と気泡の侵入面積や侵入深さなどを比較している。

上記の研究で取り扱っているような非定常な波動下では、気泡の時空間的な変動をとらえるのが難しい。そこで本研究では、鉛直プランジングジェットを水面に連続的に作用させることにより、準定常な気泡連行状態を発生させて実験を行い、電極型ボイド率計を用いて気泡濃度や気泡量の分布を測定した。このような実験はすでに数多くなされているが (例えば、Bin, 1993)、エネルギー的な考察を行ったものはあまり多くない。本論文では、気泡連行に伴うポテンシャルエネルギーの増大やエネルギーの逸散率について検討を加えたものである。

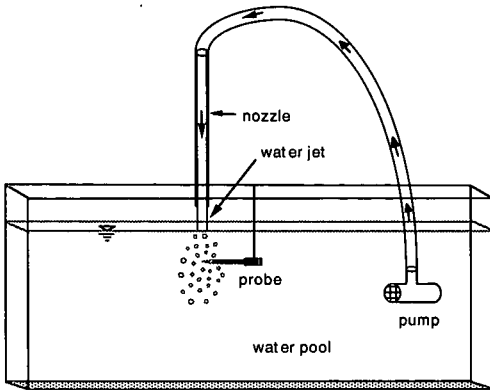
2. 水 理 実 験

(1) 実験装置および方法

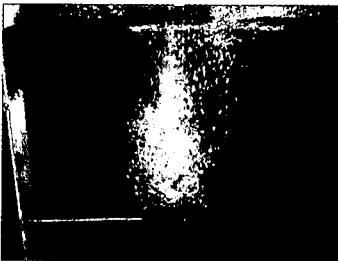
水理実験は、長さ 200 cm、幅 10 cm、深さ 74 cm の両面ガラス張りの水槽に水深 50 cm で水を張り、図-1 に示すように、内径 $d_0=1.285$ cm、長さ 100 cm の円形の塩ビパイプを水面上数 cm の高さに鉛直に設置した。パイプの下端はテーパをつけ、放出するジェットの乱れを極力小さくするようにした。プランジングジェットは、水槽内の水をポンプで汲み上げ、パイプ上端に送り込むことによって発生させた。これにより、水槽内の水位は常に一定に保たれる。ポンプの揚水量 (流量) は 1

* 正 会 員 工 博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
** 豊橋技術科学大学大学院 環境生命工学専攻

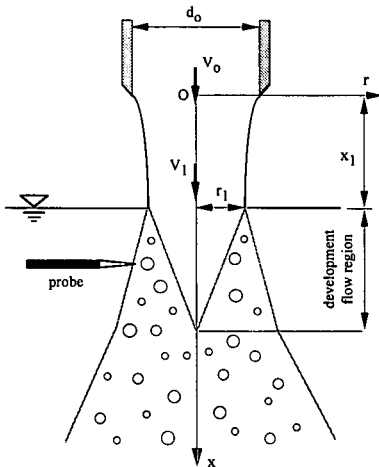
時間ごとに容積を量ってチェックしたが、誤差は2%以内であった。ジェット突入点下の気泡濃度および気泡数の測定には、先端がL型のプローブを有する電極式ボイド率計（日本カノマックス）を用いた。これは、水と空気の抵抗の違いを利用して、気泡がプローブ先端を通過するときの電圧値の時間波形から、気泡が通過する時間の割合を計算して平均気泡濃度を算出するものである（Chanson, 1996）。今回の実験では1測点毎に5分間計測



図一1 実験装置



写真一1 プランジングジェットによって連行された気泡



図二2 プランジングジェットの概念図

することにより平均的な気泡濃度を求めた。気泡濃度の分布を見るために、プローブは設置深さをいくつか変え、ジェットの中心点を通るように水平方向に最小0.2 mm 間隔でスキャンさせた。写真一1に、実験での気泡連行の様子を示すが、ある程度ジェット高さが確保できれば、連行された気泡は突入地点の下で気泡雲となり、準定常な状態で存在する。

(2) 記号の定義および実験ケース

図一2にジェットによる気泡連行の様子と記号の定義を示す。実験では、ジェットの流量 Q_w とパイプ下端の水面上の高さ x_1 を数種類変化させた。 V_1 および r_1 は水面位置でのジェットの流速と半径であるが、これらはベルヌーイの定理により x_1 と Q_w から求めることができる。したがって、同一流量であっても、 x_1 の異なるケースでは、 V_1 は異なった値をとることになる。なお、 x 座標はジェット放出口（パイプ下端）を原点として下向きに、 r 座標はジェットの中心を原点として外向きにとるものとする。実験ケースは表一に示す通りである。表中、 V_a 、 D_a については後述する。

3. 実験結果

(1) 気泡濃度の分布

Chanson (1996) によれば、図一2に示すように、気泡はジェットの表面と水面が交差する点から連行され、せん断層の拡大と気泡の拡散によって下方にひろがっていくことがわかっている。したがって、水面下ある深さまではジェットの中心線には気泡が到達せずここでの濃度がほぼゼロとなる。この領域は development flow region と呼ばれている。図一3は、Run-1 に対する濃度分布を示したものである。ジェットの中心線を境に気泡分布は左右対象になっている。 $x-x_1=3.5$ cm まではほぼジェットの中心線上で濃度がほぼゼロになっており、 development flow region に属することがわかる。気泡濃度の大きさについては、水面に近い $x-x_1=1$ cm の測線上では最大値が30%以上にも達しているが、この領域では、気泡濃度のピーク値は x の増加とともに低減している。 $x-x_1=7.5$ cm 以上の測線上ではジェットの中心付

表一1 実験ケース

Run No.	Q_w (cm ³ /s)	V_0 (cm/s)	x_1 (cm)	V_1 (cm/s)	r_1 (cm)	V_a (cm ³)	D_a (%)
1	270	208.5	10	251.0	0.585	13.4	2.15
2	270	208.5	5	231.0	0.611	9.49	3.20
3	270	208.5	2.5	220.0	0.626	5.80	3.90
4	350	272.0	5	289.0	0.623	16.7	3.00
5	370	286.0	5	303.0	0.625	23.5	3.35

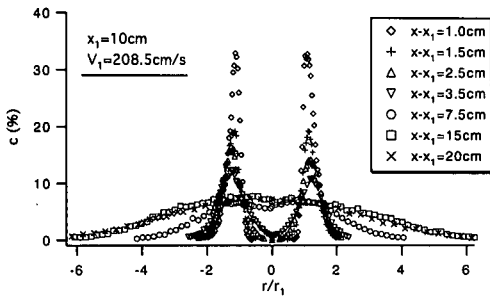


図-3 気泡濃度の分布 (Run-1)

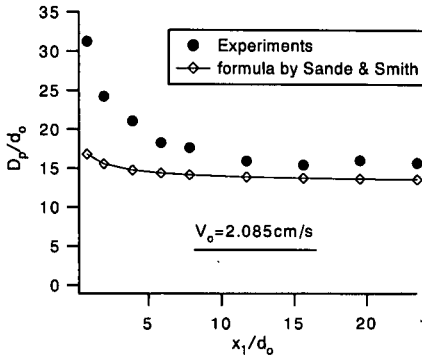


図-4 ジェット高さによる気泡侵入深さの変化

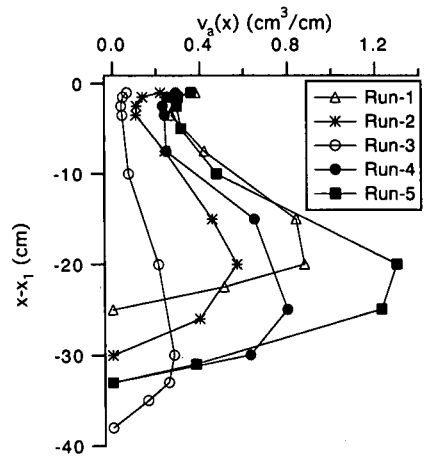


図-5 気泡量の鉛直分布

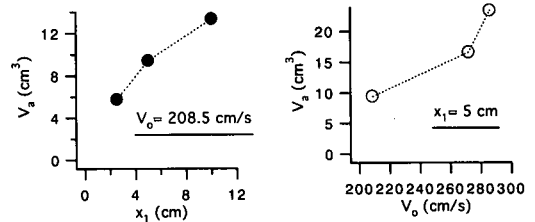


図-6 総気泡量とジェット高さ、流量の関係

近でピークを示しており、気泡濃度の最大値はほぼ等しい。以上のような傾向は、他の実験ケースについてもほぼ同様であった。

(2) 気泡の侵入深さおよび気泡領域

写真-1 に示すように、非常に微小な気泡を除けば、浮力の影響で気泡の大部分はある深さまでしか到達しない。ここではこれを侵入深さ (D_p) と定義する。気泡雲の下端は若干上下変動するため厳密に侵入深さを決めることは難しいが、今回行った実験条件ではその境界が比較的にはっきりしていたので、目視により平均的な侵入深さを決定した。図-4 は、今回の実験結果を、Bin(1993) に紹介されている Sande & Smith (1975) の実験式 (ただし、単位は m, s で与える) :

$$D_p = 1.20 V_1^{0.77} d_0^{0.625} x_1^{-0.094} \dots\dots\dots (1)$$

と比較して示したものである。我々の実験結果では、ジェット高さが小さい領域での侵入深さの増大が過大に現れているが、この領域では連行される気泡量が少ないので、観察者によって判断が異なることも原因しているものと思われる。

(3) 連行気泡量

図-5 は、各実験ケースの気泡濃度の分布図 (図-1) をもとに、異なる水深における単位深さ当たりの気泡量

$v_a(x)$ を求めてその鉛直分布を描いたものである。ただし、その下限 (気泡量ゼロの水深) は目視による侵入深さとしている。いずれの実験ケースにおいても、気泡量は表面近くよりも少し深いところで多くなっていることがわかる。これはジェットによって誘起される渦によって気泡が閉じ込められているためと考えられる。図-6 は、図-5 の分布を水深方向に積分して求めた、水中に存在する総気泡量 V_0 (表-1 に記載) を x_1 、 V_0 に対してプロットしたものである。総気泡量は、ジェット高さ、ジェット流量の増大とともに増加することがわかるが、今回は実験ケースが少なく、その依存性を議論するまでには至っていない。

4. エネルギーとしての評価

(1) 気泡連行に伴うポテンシャルエネルギーの変化

いま、図-7 に模式的に示すように、水底から鉛直に立てた単位底面積の水柱を考える。この水柱に気泡が混入することによって水深が h から Δh に増大したとする。水底から鉛直上方に z 軸をとり、気泡の濃度分布を $c(z)$ と表すと、 Δh は次式で表される。

$$\Delta h = \int_0^{h+\Delta h} c(z) dz \dots\dots\dots (2)$$

このときのポテンシャルエネルギーの増大分 ΔPE は、空気密度を無視すると次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\Delta PE &= \int_0^{h+\Delta h} \rho(1-c)gzdz - \int_0^h \rho g z dz \\ &= \rho g \int_0^{h+\Delta h} c \left(h + \frac{\Delta h}{2} - z \right) dz \approx \rho g V_a h_c \cdots (3)\end{aligned}$$

ここに、 V_a は連行気泡の体積、 h_c は水面から下向きに測った気泡の重心距離である。ただし、 Δh は h_c に比べて十分小さいものとしている。これより、ポテンシャルエネルギーの増加量は、気泡量だけでなく、連行深さに比例することがわかる。

(2) 気泡の放出に伴うエネルギー逸散率

連行された気泡は、浮力の作用で上昇し、やがて水面を通して空気中に放出される。つまり、気泡の放出過程では、気泡によって蓄えられたポテンシャルエネルギーが失われていくことになる。(3)式より、このポテンシャルエネルギーの逸散率は、水面から気泡までの距離の変化率、つまり気泡の上昇速度に比例する。気泡上昇速度 W_r が z によらず一定であるとする、エネルギー逸散率 E_d は次式で与えられる。

$$E_d = \rho g \int_0^{h+\Delta h} c \frac{dz}{dt} dz = \rho g V_a w_r \cdots (4)$$

すなわち、エネルギー逸散の割合は、気泡の侵入深さに無関係で、気泡量と気泡上昇速度に比例することになる。本研究で取り扱うような準定常現象では、この放出されるエネルギーは連行される気泡によって常に補充されていると考えればよい。目視観測によると、気泡の上昇速度は水深方向に必ずしも一様ではないが、大まかな議論をする上では上昇速度を一定として取り扱っても差し支えないものと思われる。ただし、上昇速度の与え方が問題であるが、本研究では Chanson (1996) を参考に、 $w_r = 25 \text{ cm/s}$ とした。

一方、ジェットによって単位時間に水槽内にもたらされるエネルギーは次式で表される。

$$E_j = \frac{1}{2} \rho Q w V_j^2 \cdots (5)$$

定常状態では、このエネルギーはすべて水槽内で失われている。そこで、 E_d の E_j に対する比を気泡のエネルギー逸散寄与率 D_a と定義した。

$$D_a = E_d / E_j \cdots (6)$$

これを用いて、プランジングジェットの全エネルギー逸散に対して、気泡のポテンシャルエネルギーがどの程度寄与しているかを調べた。

(3) 実験結果とその考察

まず、エネルギー逸散率 E_d については、(4)式からも明らかのように、連行される気泡の体積に比例する。

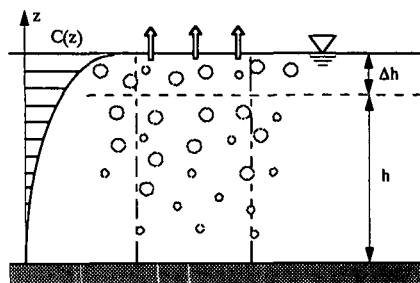


図-7 気泡の連行と水位上昇

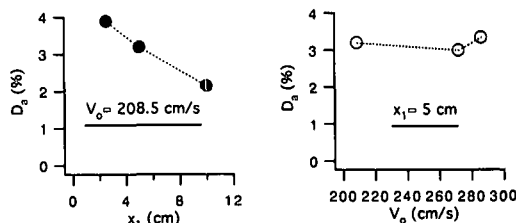


図-8 エネルギー逸散寄与率とジェット高さ、流量の関係

したがって、ジェット高さやジェット流量の影響は、図-6と同様の図となり、これらの増加に伴って逸散率も大きくなる。一方、各実験ケースに対する D_a の値については表-1に示してある。これより、気泡の寄与率は高々2～4%程度であり、今回対象とした実験では、ジェットエネルギーの逸散を気泡のポテンシャルエネルギーを介して説明するのは難しいことがわかる。図-8は、 D_a とジェット高さおよびジェット流速（流量）の関係をみたものである。気泡のエネルギー逸散寄与率は、ジェット高さが高いほど低減し、ジェット流量にはあまり関係しないといった傾向がみられる。

5. あとがき

本研究は、気泡の連行がどの程度エネルギー逸散に寄与しているのかを調べるために、円形断面のプランジングジェットを用いた準定常な気泡連行実験を行った。さらに、測定された気泡濃度分布からエネルギー逸散率を求める簡単なモデルを提案し、ジェットのエネルギー逸散に及ぼす気泡の寄与率について検討した。その結果、本実験のような小スケールの実験では、気泡のポテンシャルエネルギーを通して逸散するエネルギーは、全エネルギー逸散に比べて数%程度に過ぎず、連行気泡の諸量を用いて説明することは困難であることがわかった。ただし、前述したように、縮尺影響のために実スケールの現象に比べて連行される気泡量がかなり小さくなっていることが予想されるので、実現象についてもあてはまるかどうかは疑問である。また、今回取り扱ったような

準定常状態ではなく、短時間に一気に多くの気泡が連行されるような碎波現象に対してはなお不明である。今後は、実際の碎波を用いて、非定常な気泡濃度を測定するとともに、大スケールの実験を行ってさらに検討を加える予定である、

最後に、本研究を行うにあたり、Dr. Hubert Chanson (Univ. of Queensland) には多くの助言と協力をいただいた。実験では岩田武則君 (豊橋技術科学大学) に尽力いただいた。また、本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C), No.12650511, 代表者: 青木伸一) を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

角野昇八・館川徹也・竹村健治・山岸達也 (2000): 沿岸碎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.
 松田博文・陸田秀実・板野誠司・安田孝志・多田彰秀・福本 正 (1998): 突入ジェットと気泡混入を伴う碎波後の内部特性の関係, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 116-120.
 渡部靖恵・大塚淳一・佐伯 浩 (1999): 自由落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.
 Aoki, S., H. Chanson and M. Maruyama (2000): Water level

rise caused by entrained air bubbles at plunging breakers, Book of Abstracts of 27th ICCE, vol. 1, poster 3.
 Bin, A. K. (1993): Gas entrainment by plunging liquid jets, Chemical Eng. Science, vol. 48, No. 21, pp. 3585-3630.
 Chanson, H. (1996): Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows, Academic Press, 348 p.
 Chanson, H. and J. F. Lee (1997): Plunging jet characteristics of plunging breakers, Coastal Engineering, vol. 31, pp. 125-141.
 Führböter, A. (1970): Air entrainment and energy dissipation in breakers, Proc. 12th ICCE, ASCE, pp. 391-398.
 Hwung, H. H., J. M. Chyan and Y. C. Chung (1992): Energy dissipation and air bubbles mixing inside surf zone, Proc. 23rd ICCE, ASCE, pp. 308-321.
 Lamarre, E. and W. K. Melville (1991): Air entrainment and dissipation in breaking waves, Nature, vol. 351, pp. 469-472.
 Nielsen, P. (1984): Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, vol. 8, pp. 51-72.
 Stanton, T. P. and E. B. Thornton (2000): Profiles of void fraction and turbulent dissipation under breaking waves in the surf zone, Proc. 27th ICCE, vol. 1, pp. 70-79.
 Sande, van de E. and J. M. Smith (1975): Mass transfer from plunging water jets, Chemical Eng. J., vol. 10, pp. 225-233.
 Wood, I. R. (1991): Air Entrainment in Free-Surface Flows, A. A. Balkema, 142 p.