

プランジングジェットによる気泡連行とその縮尺影響に関する研究

豊橋技術科学大学建設工学系 ○木田 千尋、岩田 武則、Ashabul Hoque

豊橋技術科学大学建設工学系 正会員 青木 伸一

1. はじめに

本研究では、砕波によって水中に連行される気泡をプランジングジェットのスケール模型を使ってモデル化させ、気泡の連行に及ぼす縮尺影響に関する基礎的な研究を行うことを目的とする。模型実験では、原型(prototype)と模型(model)とで起る二つの現象が幾何学的に相似であるばかりでなく、力学的にも相似でなければならない。自由表面を有する流体の運動やプランジングジェットの模型実験のように、重力に支配される現象においては、それらを規定する無次元積として、フルード数があげられる。しかし、本研究で対象とするような気泡の連行・放出過程に関係する現象は、一般にフルード則には従わないことが予想される。

そこで、本研究では、ジェットの半径を2倍比ごとに変化させた三種類の円形パイプを用い、フルード則に従って流量、流速、長さ等の縮尺を決定した実験ケースのもとで、気泡連行における縮尺影響を考察するための模型実験を行った。次に、塩分やその他の不純物が、気泡連行の現象に与える影響を明らかにするために、同一の円形パイプで水槽内に、海水、淡水(水道水)、塩水(水道水+塩)を張り、鉛直プランジングジェットをそれぞれの水面に連続的に作用させ、実験を行った。

2. 水理模型実験

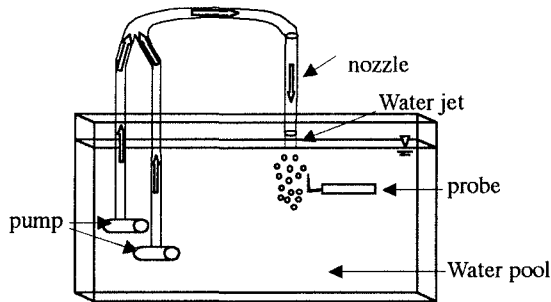


図-1 実験装置概念図

実験は、長さ2m、幅10cm、深さ75cmの両面ガラス張りの水槽に水を張り、図-1に示すように、鉛直プランジングジェットを水面に連続的に発生させた。実験の円形パイプの内径を以下の3つのMODELに設定した。そして実験では、developing flow region(ジェットの中心線上において気泡が到達せず濃度がほ

ぼゼロとなるような、水面下ある深さまでの領域)の範囲内でプローブの設定深さを変えた。

- ① MODEL-1; $d_o=25\text{mm}$
- ② MODEL-2; $d_o=12.8\text{mm}$
- ③ MODEL-3; $d_o=6.833\text{mm}$

実験ケースは表-1に1例を示す。表中の Fr, Re, We に

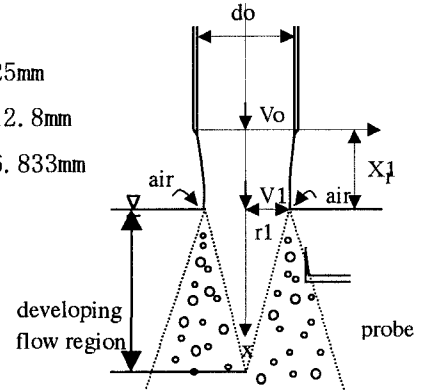


図-2 プランジングジェット概念図

については後述する。

表-1 実験ケース(CASE-3)

d_o (mm)	Q_w (L/s)	d_i (m)	r_1 (m)	X_1 (mm)	V_o (m/s)	V_1 (m/s)	$X-X_1$ (mm)	Fr	Re	We
MODEL-1 (25mm)	2.06	0.024	0.012	100	4.188	4.415	20	9.04	100673	6520
							30			
							50			
MODEL-2 (12.8mm)	0.37	0.012	0.006	50	2.86	3.027	10	8.66	35200	1572
							15			
							25			
MODEL-3 (6.833mm)	0.08	0.007	0.003	27.3	2.178	2.298	5.5	9	14323	482
							8.2			
							14			

3. 実験結果

a) 気泡連行に及ぼす縮尺影響

フルードの相似則が、気泡連行においても適用されるならば、3つのMODELにおいて、測定した気泡濃度や気泡数について同じような結果が得られるはずである。

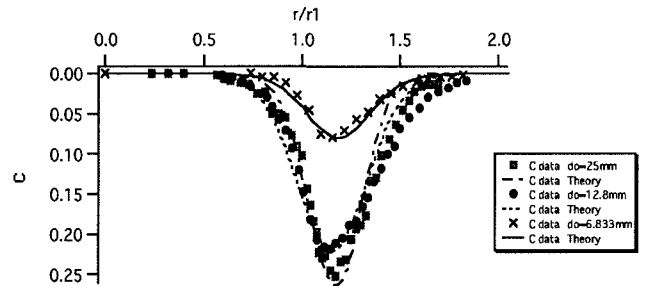


図-3 CASE3におけるMODEL1~MODEL3における気泡濃度分布

このグラフから、特にスケールの小さなMODEL-3において、フルード数のみによる縮尺では、相似性が保たれていないことがわかる。そこで、他の力学的相似条件としてあげられるレイノルズ数(Re)とウェーバー数(We)から、スケール影響について考察する。包括的に説明するためにChanson(1997)によって表された理論値(式(1))のパラメーターを用いる。

$$C = \frac{Q_{air}}{Q_w} * \frac{1}{4 * D^* * \frac{X - X_1}{r_1}} * \exp\left(-\frac{1}{4 * D^* * \frac{X - X_1}{r_1}} * \left(\frac{r}{r_1}\right)^2 + 1\right) * Jo\left(\frac{1}{2 * D^* * \frac{X - X_1}{r_1}}\right) \quad (1)$$

Qair/Qw は、気泡流量をジェット流量で除した無次元量を表し、D*は、気泡拡散係数を表す。Qair/Qw は、気泡濃度 C のピークの大きさを規定し、D*は、グラフの広がり の程度を決定する。気泡濃度の分布に対して、理論式によって Best Fit させるように定めた、Qair/Qw および D*における相違から、気泡濃度分布に及ぼす Re および We の影響をみることにする。別の無次元積としてモートン数 (Mo=We³/Fr²*Re⁴) を用いると、今回の実験では一定値(Mo=3.5E-7)になるので、ここでは We のみを用いて考察する。

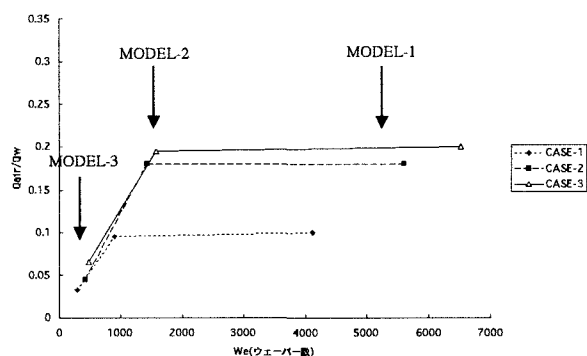


図-4 We と Qair/Qw の関係

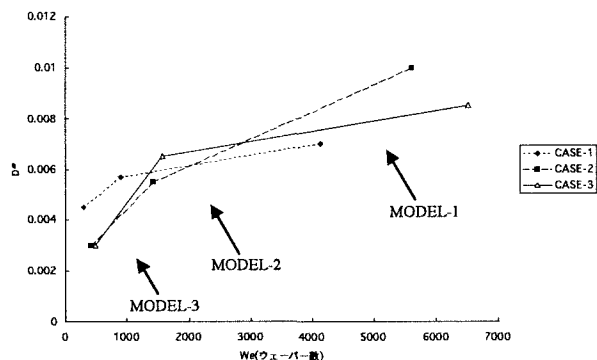
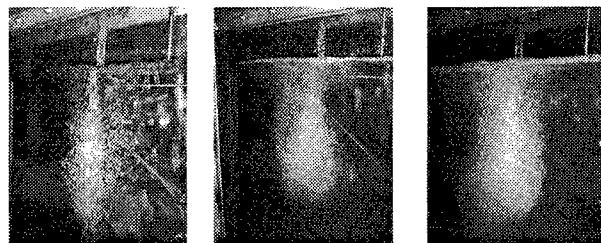


図-5 We と D# の関係

(図-4)からは、1000 < We < 2000 の範囲内から、Qair/Qw の値があまり変化していないことが読み取れる。つまり、この範囲以降では、We の影響をあまり受けず、縮尺影響は少ない。それに対し気泡拡散 D*は、We の増大とともに大きくなる傾向を示しており、We の影響を受けている。縮尺影響が表れる理由としては、実験において、連行される気泡の大きさが縮尺できないことが考えられる。すなわちスケールが変わっても気泡径が同じであるとするならば、ジェットの流速が小さくなるほど、気泡が連行されにくくなるのではないかと考えられる。

b) 気泡連行に及ぼす塩分の影響

気泡連行は、海、川、滝など自然環境のあらゆる場面に存在するが、塩分が混ざった流体において起る気泡連行の現象と、川のように塩分が殆ど含まれていない流体とで起る気泡連行の現象は異なることが予想される。実験によると、目視する限りでも、淡水 < 塩水 < 海水の順で細かな気泡が多く連行されていた。



淡水(水道水) 塩水(水道水+NaCl99.5%) 海水

写真-1 CASE-3(淡水 V1=3.0m/s, 塩水 V1=2.96m/s, 海水 V1=2.97m/s) ただし、(図-6)に示すように実際にそれぞれの気泡濃度分布 C を測定してみると、淡水 > 塩水 > 海水の順であった。

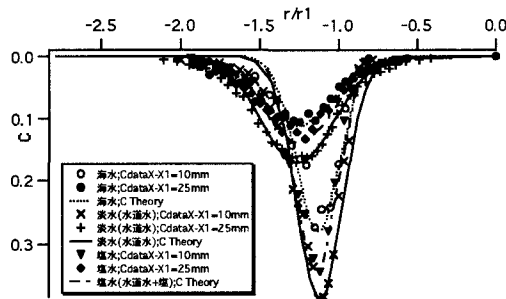


図-6 CASE-3における淡水、塩水、海水の気泡濃度分布 ただし、海水の実験では気泡が細かすぎて、今回用いたプローブでは十分に取れきれていないという問題も考えられる。

4. 結論

本研究では、プランジングジェットによる気泡連行において、縮尺影響と塩分の影響という視点から実験を行った。フルード数を一定にして縮尺を行ったが、径の一番小さい MODEL-3 に最も縮尺影響があらわれていた。しかし、これよりさらに大きなスケールの実験を行ってさらに検討を加える必要があると思われる。次に、塩分による影響は、連行された気泡が非常に細かくなると考えられる。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。ここに記して謝意を表す。

参考文献 Chanson, H (1996) : Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Shear Flows, Academic press.