

水撃負圧部のボイド率と伝播速度との相互作用について

東北学院大学 学生会員 ○下浅 雄大

東北学院大学 正会員 河野 幸夫

1. 序論

上流側に水槽があり、その水を管路で下流に自然に流下させて通水している場合、下流側に取り付けられた弁を急激に閉鎖すると、管内に急激な圧力上昇が発生する。これは一般に水撃現象（Water Hammer）と呼ばれている。

圧力上昇が上流方向へ伝播し水槽側で反射すると大きな圧力降下が起こる。そして負圧部が臨界圧（ゲージ圧で約-10 m）に達すると、気泡が発生する。この為、管内は気液混相流になる。流速が遅い場合には液体のみの単相流となり、流速が速い場合は液体と多数の気泡からなる気液混相流である。また、この時の伝播速度は正圧の伝播速度とは異なる。

そこで本研究では、まず BNC-box を用いて圧力とカメラでの映像、ボイド計センサーの電圧の3つを同期させた状態での測定と、それを元に伝播速度とボイド率との関係を明らかにする。

2. 気泡測定用実験装置

水面高 12.1 (m)、全長 60.1 (m)の管路がある。その管路の中を水槽の水をオーバーフローさせる事により、水面 H の高さを一定とし、安定した流量で水を自然流下させる。流速は下部水槽の近くに設置してある流量調節弁を使い、電磁流速計にて流速を決定する。本実験では流速 1.0 (m/s)から 0.0 (m/s) まで、0.1 (m/s) 刻みで流速を変化させて計測した。

水撃実験の圧力水頭の降下から気泡の気化が推測されるので、管路の途中に挿入した透明アクリル管を通して瞬間的に確認される発生気泡を捕らえる為に、管内の様子を二台の高速度カメラを用いて気泡の撮影を行う。カメラはBNC-Boxを経由し、Windows-PCに接続する。またボイド率を算出するため、管路の透明なアクリル管の下流側のすぐ近くにオプティカルプローブボイド計を挿入した。(Fig.1 参照)

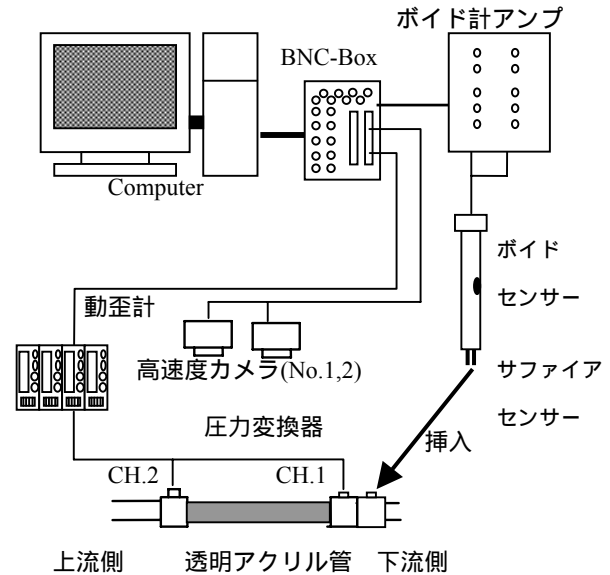


Fig.1 気泡計測用実験装置

3. 単層流の伝播速度 a_1 と気液混相流の伝播速度 a_2 の算出

伝播速度 a は一般的に管内が水のみ単相流の状態では以下の式を用いて計算される。

$$a_1 = \sqrt{\frac{\frac{k}{\rho}}{1 + \left(\frac{k}{E}\right) \times \left(\frac{D}{e}\right) \times (1 - \mu^2)}} \quad (1)$$

$$= \sqrt{\frac{\frac{2.07 \times 10^8}{101.937}}{1 + \left(\frac{2.07 \times 10^8}{2.0 \times 10^{10}}\right) \times \left(\frac{5.3 \times 10^{-2}}{3.9 \times 10^{-3}}\right) \times (1 - 0.3^2)}}$$

$$= 1341.7 (\text{m/s})$$

k : 水の弾性係数 $= 2.07 \times 10^8$ (kgf/m²)

ρ : 水の密度 $= 101.937$ (kgf・sec²/m⁴)

E : 管の弾性係数 $= 2.0 \times 10^{10}$ (kgf/m²)

D : 管の内径 $= 5.3 \times 10^{-2}$ (m)

e : 管の肉厚 $= 3.9 \times 10^{-3}$ (m)

μ : ポアソン比 $= 0.3$

キーワード：水撃負圧部、気液混相流、ボイド率、伝播速度、相互作用

連絡先（宮城県多賀城市中央1丁目13-1・022-368-1116）

したがって、管内が水の状態における圧力の伝播速度は 1341.7 (m/s)である事が分かる。

しかし、本研究では水撃圧が-10 (m)に到達すると管内が臨界圧となり水が気化し相転移する事によって、水と気泡の混相流である気液混相流となる。従って、負圧になった際の伝播速度はそれとは別のものになる。

$$a_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_w - (\gamma_w - \gamma_a)V_a/V}{g} \left[\frac{1 + (K_w/K_a - 1)V_a/V}{K_w} + \frac{D(1 - \mu^2)}{eE} \right]}} \quad (2)$$

γ_w : 水の比重量=999 (kgf/m³)

γ_a : 気泡の比重量=2.372 (kgf/m³)

V : 水と気泡の混合体の体積 (m³)

V_a : 気泡の体積 (m³)

K_w : 水の体積弾性係数 = 2.07×10^8 (kgf/m²)

K_a : 気泡の体積弾性係数 = 2.8×10^4 (kgf/m²)

μ : ポアソン比=0.3

e : 鋼管の厚さ= 5.3×10^{-2} (m)

E : ヤング係数= 2.0×10^{10} (kgf/m²)

Equation (2)により負圧における伝播速度 a_2 が計算される。この式中において水と気泡の全体の体積 V と気泡のみの体積 V_a は未知数であるが、これらは高速度カメラによる画像から求められる。また、式中の V/V_a はボイド率と呼ばれている。

4. 実験結果

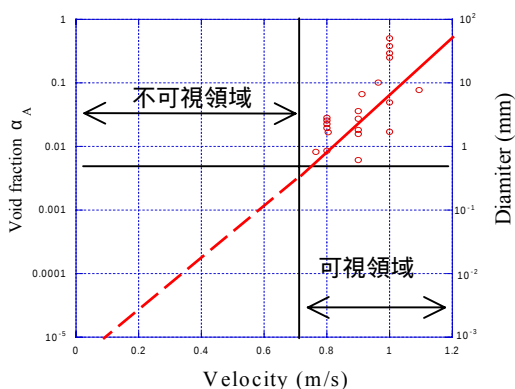


Fig.2 ボイド率と流速の関係

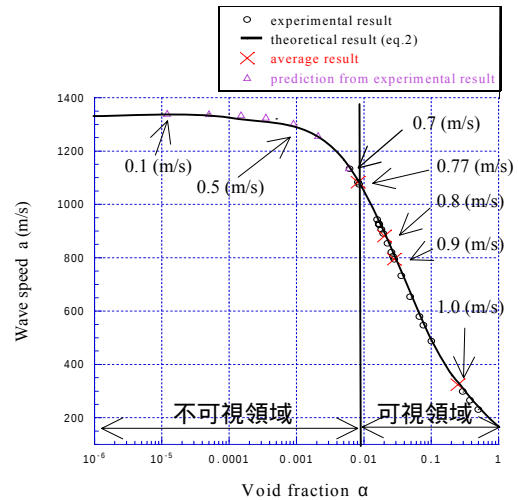


Fig.3 伝播速度とボイド率の関係

5. 結論

理論値上での伝播速度は、equation (2)においてボイド率が 0 の時は 1342.40 (m/s)に、ボイド率が 1 の時は 165.40 (m/s)となり、ボイド率が高い時は一般的な音速の 340 (m/s)よりも遅くなる事が分かった。

本実験での最小の伝播速度は、流速が 1.0 (m/s) でボイド率が 0.311 の時に 234 (m/s) であった。また、ボイド率が 0.005 から 0.5 までの範囲(可視領域)でのボイド率と伝播速度との関係は、Fig. 3 の様に分布する事が分かった。それとは反対に、ボイド率が低い時、つまり伝播速度が 1341.7 (m/s) に近い時(不可視領域)のボイド率は 10^{-5} 程度と非常に微細な気泡で存在しているのではないと思われる。

参考文献

- 1)横山重吉：水撃入門，日新出版，p154，(1979).
- 2)渡辺雅二，河野幸夫：管路における気液 2 相流のモデル解析について 環瀬戸内応用数理研究部会 第一回論文集、応用数理学会、pp.42 ~ 46，(1998).
- 3)田嶋大樹，河野幸夫：水撃負圧部の気化現象におけるオプティカルプローブボイド計による発生気泡計測について，土木学会東北支部技術研究発表会，pp.260 ~ 261，(2002).