

II-132 低圧による気泡発生と水撃圧

山梨大学工学部 正員 萩原能男

1. まえがき 筆者は1974年2月、土木学会第18回水理講演会において本研究の概要を既に発表した¹⁾。

ここでは具体例を示し、多少の補足をして理論の一端を紹介する。水撃現象の研究は19世紀末より始まり、Allieviの代数的計算法および1935年に公表されたSchnyder-Bergeronの図解法によりほぼ完成されたといわれている。1960年以降は電算機の利用が普及し特性直線法による数値計算が用いられるようになった。しかし、今日でも表題に示す低圧時の自己蒸発とともなる水撃現象については水柱分離理論が存在するのみである。筆者はここに圧力低下にともない気泡が発生して、流体系の弾性係数が低下し水撃圧波速が急激に小さくなることを考慮した計算方法を提案する。

2. 気泡混入と波速の低下 気液二相流は図-1に示すように気泡流、スラグ流、環状流、噴霧流に大別される²⁾。気泡流はボイド率が20~30%以下の場合に生ずる³⁾。気体を含まない水における水撃圧波速を a_0 、気体を含む水における波速を a とすると

$$m = \frac{a}{a_0} = \sqrt{\frac{\rho_w / (1 + D K w / (b E))}{\rho / (K w / K + D K w / (b E))}} \quad (1)$$

$$K w / K = 1 + (K w / K_g - 1) f_g \quad \rho / \rho_w = 1 - (1 - \rho_g / \rho_w) f_g$$

$$K_g / K_w = 0.000639 P \text{ (断熱変化)} \quad \rho_g / \rho_w = 0.00186 P \quad (P \text{ in kg/cm}^2)$$

なる関係がある。筆者の用いた実験装置の $D K w / (b E) = 0.225$ を用いて

$m = a/a_0$ の値を圧力 P 、ボイド率 f_g の関数として示すと図-2のようになる。この図よりわかるように20℃の水の場合、圧力が蒸気圧まで低下して気泡が発生し $f_g = 1/1000$ に達すると波速は約1/20に低下する。また、気泡流からスラグ流に変わる限界の f_g を10~30%とみなすと図-3のような波速低下になる。このとき水柱分離が生ずるものと判断される。

表-1 記号表

	気体を含む水	水のみ	気体のみ
密度	ρ	ρ_w	ρ_g
体積弾性係数	K	K_w	K_g
水撃圧波速	a	a_0	
A : 管路流積 b : 管肉厚 D : 管内径 E : 管枝の弾性係数 f : 摩擦損失係数 f_g : ボイド率 g : 重力の加速度 H : 動水こう配線高			
HVP : 水の蒸気圧 m : a/a_0 P : 絶対圧力 (kg/cm ²) Q : 流量 t : 時間 V : 管内平均流速 X : 管路距離軸			

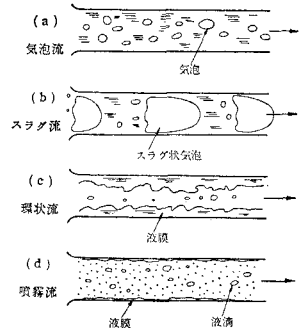


図-1 気液二相流
(2)の文献より引用)

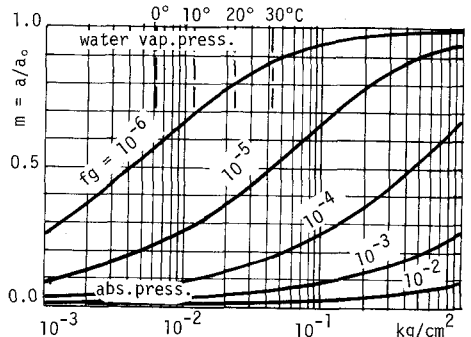


図-2 ボイド率・圧力と波速の関係 (1)

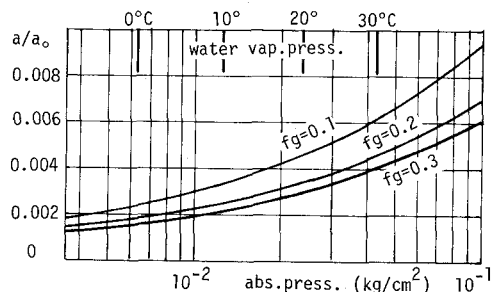


図-3 ボイド率・圧力と波速の関係 (2)

3. 計算基本式 水撃圧に関する特性方程式は式 (2) , (3) であてえられる¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= Q/A + a \\ dH &= -BdQ - R|Q|Q \end{aligned} \right\} \cdots (2) \quad \left. \begin{aligned} dx/dt &= Q/A - a \\ dH &= BdQ + R|Q|Q \end{aligned} \right\} \cdots (3)$$

ただし, $B = a/(gA)$, $R = f dx / (2gDA^2)$

この2組の特性方程式と初期条件, 境界条件とを組合せて計算をすすめる。

4. 波速変化と水柱分離の具体例

ここでは貯水池より単一水平様管路で流出する図-4 (a) を例にとり説明する。 <1> 簡便な説明をするため説明図においては諸損失水頭を無視し, 波速 a は流速 $V = Q/A$ に比較して十分大きいものとする。 <2> 初期定常状態における流量を Q_0 , 動水こう配線高 (以下圧力と呼ぶ) を H_0 とする。 <3> 管路入口 (図-4 の ②) の弁を瞬間閉塞すると ② における流量 Q_2 は 0 になり, 圧力 H_2 はすでに ① より出発してこの時刻に丁度 ② に (3) 式の条件を満足しながら到着した観測者により計算される。すなわち, 図-4 (c) , (d) の ② に t_2 , H_2 が定まる。 <4> H_2 がその時の蒸気圧 HVP より大きいときには, 図-4 (b) あるいは図-6 (a) のように気泡は発生せず水が膨張し, 管が縮小した ② の状態が波速 a_0 で下流に伝播することになる。 <5> H_2 が HVP より小さくなると, 図-5 (b) の状態になる。② の位置は物理的に不可能な絶対圧力 0 よりも低い圧力を要求することとなりうる。このとき, 水が自己蒸発し管内に気泡が発生して波速が低減し ma_0 となり図-5 (a) , (b) の ④ に諸量が定まる。 <6> 従来からある水柱分離理論では図-5 (b) における ③ に諸量が定まるとした。すなわち水撃圧の波速は変化せずに水柱が ③ の流速をもって分離すると考えた。 <7> 水の自己蒸発により波速が ma_0 と低下し図-5 (a) , (b) の ④ に諸量が定まるとする考え方が自然である。 m の値が図-3 に示すように 0.002 ~ 0.006 に低下すると, ボイド率 f_g が 10 ~ 30 % になり, 気泡流からスラグ流に移行する。 <8> 図-6 (b) は気泡流, (c) はスラグ流である。スラグ流になると波速 a は流速 V のオーダーまで低下し, いわゆる水柱分離現象に類似した状態になる。

5. あとがき

本研究は上記の考え方を拡張して, 一様管路下流端の弁を急閉塞する実験により理論の妥当性を確かめた¹⁾。

この研究は東洋大学本間教授, 故埼玉大学嶋教授, 東工大吉川教授他多数の先輩諸兄の助言を頂き, 筆者が数年間にわたって行ったものである。ここに深甚なる謝意を表し, 今後とも御忠告御指導をお願いする。

6. 引用文献

- 1) 荻原: 水柱分離前の水撃現象の計算法, 水理講演会 昭49. 2
- 2) 一色, 内田他: 応用熱力学 コロナ社 昭44 初版 p. 209
- 3) 小林清志: 移動論 朝倉書店 昭48 初版 p. 176

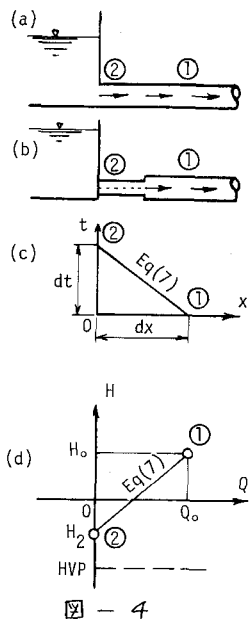


図 - 4

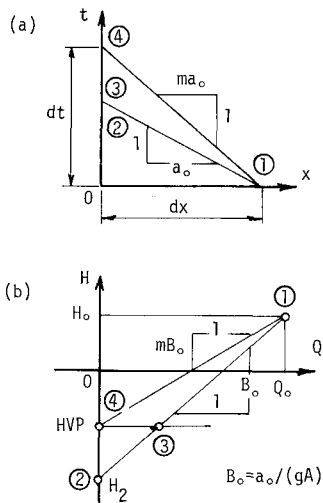


図 - 5

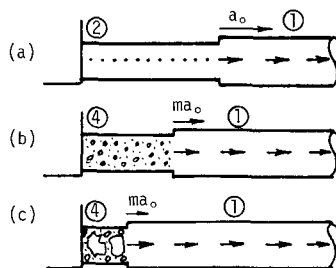


図 - 6