

# 水撃負圧部の気液混相流中を通過する水撃波の伝播速度について

|     |   |
|-----|---|
| 著者  | 今泉 良明, 河野 幸夫, 石川 和己, 芳賀 昭, 加藤 和夫  |
| 雑誌名 | 東北学院大学工学部研究報告   |
| 巻   | 46  |
| 号   | 1・2   |
| ページ | 33-38   |
| 発行年 | 2012-02   |
| URL | <a href="http://id.nii.ac.jp/1204/00024658/">http://id.nii.ac.jp/1204/00024658/</a> |

## 水撃負圧部の気液混相流中を通過する水撃波の伝播速度について

### Wave Propagation of Water Hammer in a Liquid-gas Mixture Flowing under Negative Surge Pressure

今泉良明 河野幸夫 石川和己 芳賀昭 加藤和夫

Yoshiaki Imaizumi Yukio Kono Kazumi Ishikawa Akira Haga Kazuo Kato

#### ABSTRACT

The pressure rises suddenly in a pipeline liquid flow when a valve is closed rapidly. This is generally called the water hammer phenomenon. Wave speed of plus pressure in the water phenomenon is theoretically 1341.7 m/s. The value of wave speed confirmed by experimental research supports such theories. We consider two cases: (1) when the wave speed is assumed to be simultaneous between propagation to upper reservoir and returning to a valve of downstream ; and (2) when the wave speed is not the same between propagation to upper reservoir and returning to a valve of downstream. When bubbles occur during wave front propagation, the front of the wave is water itself. After returning from the upper reservoir, however the wave front propagates through a water and bubble mixture-flow the smashing the bubbles. Thus, the wave speed of the water and bubble mixture-flow is decreased with respect to the void fraction. In other words, in order to calculate wave speed under the negative surge pressure, the void fraction must be determined experimentally.

**Keyword :** water hammer, wave speed , void fraction , negative surge pressure , two-phase mixture flow

#### 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 (ゲージ圧力水頭で-10m) 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相中に小気泡が発生して流れる。これは液体と多数の気泡から

なる気液混相流であり、この時の伝播速度は正圧の伝播速度とは異なる。これまでの研究では、水撃負圧部が上流端に到達する地点が明らかにされていなかった<sup>(1)</sup>。そこで本研究では 1/10000 秒オーダーで水撃圧を計測すると同時に、高速度カメラにより 1/2000 秒オーダーでボイドをとらえることで、水撃現象の負圧部における後ろに気泡を発生させながら上流部へ進む場合と、気泡を潰しながら下流部に戻ってくる場合の伝播速度を明らかにする。

## 2. 水撃圧実験装置および実験方法

図 2.1 は水撃圧実験装置を示している。水面高 12.1m に貯水槽があり、全長 58.1m 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。流速は遮断弁の近くに電磁流量計と超音波流量計を設置し、これらにより流速を決定している。また、遮断弁から 0.55 m、1.95 m、36.75 m、52.75 m の四箇所に圧力センサーを取り付け、管内に発生する圧力を測定する。

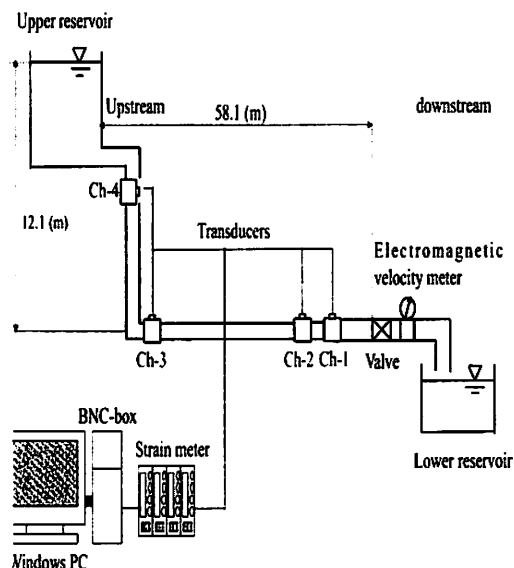


図 2.1 水撃圧実験装置

実験は流速の測定から始める。流速は流量調節弁の近くにある電磁流量計、超音波流量計および手動の3つの方法により測定し、その平均を流速として用いる。

次に水撃圧を発生させ、その圧力を測定する。図 2.1 のように圧力変換器を管路に Ch-1、Ch-2、Ch-3、Ch-4 として取り付ける。圧力は圧力変換器にひずみを生じさせる。ひずみは動歪計の回路で電圧に変換される。電圧は動歪計で増幅され出力される。これを BNC-box でデータとして取り込み、WindowsPC へと出力される。

## 3. 水撃圧の発生とその伝播

水撃圧の伝播過程について、図 3.1 から図 3.9 までの水撃圧の伝播、および圧力波形を用いて説明する<sup>(2)</sup>。この水撃波形は遮断弁の直前にある圧力計での計測結果とする。

まず弁閉鎖前の状態において管内は流速が 0 m/s なので、エネルギーはベルヌーイの方程式における位置水頭(上部水槽の高さ分)のみの状態である。それから水を通水させ、水圧が動水圧で表される状態から急閉鎖する事により、管内に水撃圧  $\Delta H$  を発生させる。発生した水撃圧は管壁を内部から押しながらかつて伝播速度 1341.7m/s で上部水槽側へ伝播する。(図では分かり易くする為に明らかに管径を誇張して描いた) この圧力波の先頭が(管長を  $L$ 、伝播速度を  $a$  とすると)  $L/a$  秒かけて上部水槽に到達すると、水撃圧が発生する前の圧力  $H$  へと戻りながら下部水槽へと同様に  $L/a$  秒かけて進行する。 $2L/a$  秒かけて下部水槽へと到達した圧力波は、今度は負の圧力波  $H - \Delta H$  となり管壁を内側に引っ張りながら上部水槽へと進行する。水撃圧はこのように正と負の圧力波がどちらも  $2L/a$  秒かけて往復し、このような現象を繰り返しながら減衰する。しかし、負の圧力波が絶対 0 気圧(水頭で  $-10$  m)に到達した場合は、管内の流体が気化現象を起こし、液体と気化液体の混相流となる。気化減少を起こさない場合の伝播速度  $a$  は 1341.7m/s であるが、圧力波  $H - \Delta H$  が気化圧に到達し、気化現象を起こした場合の伝播速度  $a$  は気化気体の割合に応じて 100 m/s から 1341.7m/s まで変化する。この圧力波は減衰しながら繰り返し、最後には静水圧となる。以下に示すものが基本的な水撃現象の概要である。本研究では、負圧部が気化圧に達して気化現象を起こし、流体が気液混相流となる場合の研究を行う。

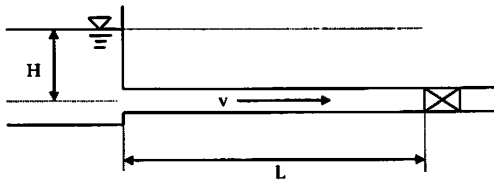


図 3.1 水撃圧とその伝播  $t=0$ (s)

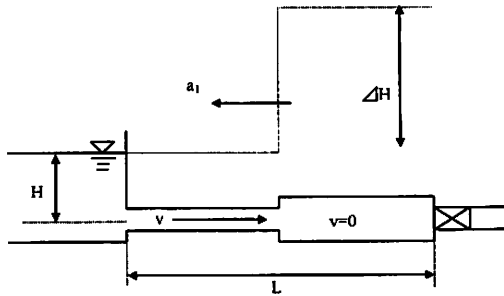


図 3.2 水撃圧とその伝播  $t=L/2a=0.023$  (s)

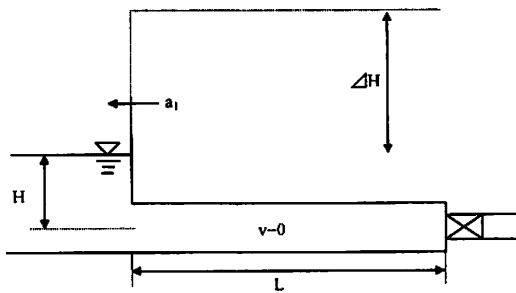


図 3.3 水撃圧とその伝播  $t=L/a=0.046$  (s)

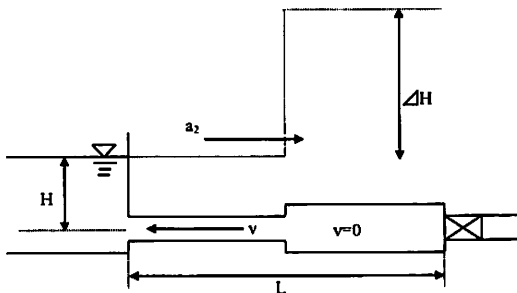


図 3.4 水撃圧とその伝播  $t=3L/2a=0.067$  (s)

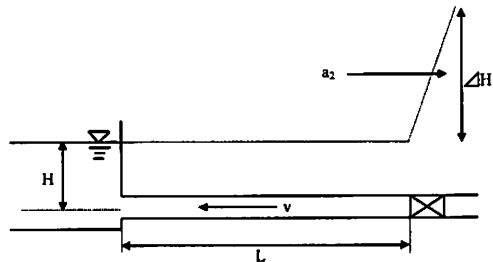


図 3.5 水撃圧とその伝播  $t=2L/a=0.092$  (s)

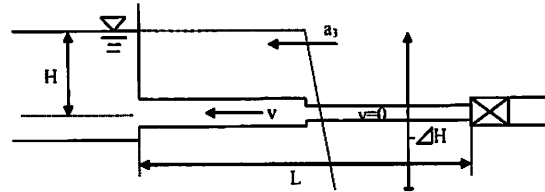


図 3.6 水撃圧とその伝播  $t=5L/2a=0.115$  (s)

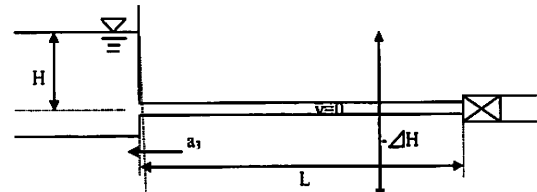


図 3.7 水撃圧とその伝播  $t=3L/a=0.138$  (s)

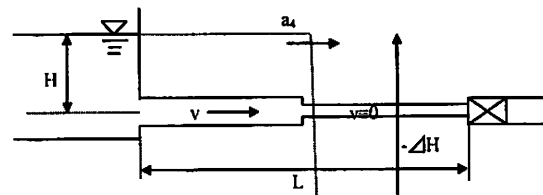


図 3.8 水撃圧とその伝播  $t=7L/2a=0.162$  (s)

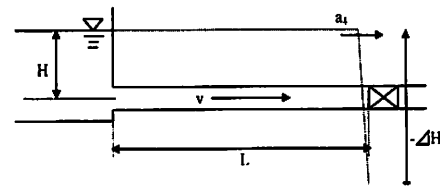


図 3.9 水撃圧とその伝播  $t=4L/a=0.185$  (s)

#### 4. 水撃圧と伝播速度 a の理論値

水撃圧の理論値は Joukowsky の定理を用いて算出される<sup>(4)</sup>。

$$\Delta H = \frac{a}{g} V \quad (1)$$

$\Delta H$  : 水撃圧

a : 圧力の伝播速度 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

V : 流速 (m/s)

この式中で V は流量計などから求められる実験値である。また、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<sup>(3)</sup>。

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

$k_w$ : 水の弾性係数= $2.07 \times 10^9$  (N/m<sup>2</sup>)

$\rho_w$ : 水の密度= $1019.37$  (N · s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

$E$ : 管の弾性係数= $2.0 \times 10^{11}$  (N/m<sup>2</sup>)

$D$ : 管の内径= $5.3 \times 10^{-2}$  (m)

$e$ : 管の肉厚= $3.9 \times 10^{-3}$  (m)

$\mu$ : ポアソン比=0.3

上記の式は正圧の時の伝播速度であり、負圧になった際の伝播速度はそれとは別のものになる。

### 5. 気液混相流における伝播速度 $a$ の算出

微小な気泡が水中に一樣に分布して含まれている場合の伝播速度の値は次式で計算される<sup>(3)</sup>。

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_w - (\gamma_w - \gamma_a)V_a/V}{g} \left[ \frac{1 + (K_w/K_a - 1)V_a/V + D(1 - \mu^2)}{K_w} + \frac{D(1 - \mu^2)}{eE} \right]}} \quad (3)$$

$\gamma_w$ : 水の比重量= $9.99 \times 10^3$  (N/m<sup>3</sup>)

$\gamma_a$ : 気泡の比重量= $23.72$  (N/m<sup>3</sup>)

$V_a$ : 気泡の体積 (m<sup>3</sup>)

$V$ : 水と気泡の混合体の体積 (m<sup>3</sup>)

$K_w$ : 水の体積弾性係数= $2.07 \times 10^9$  (N/m<sup>2</sup>)

$K_a$ : 気泡の体積弾性係数= $2.8 \times 10^5$  (N/m<sup>2</sup>)

$D$ : 管の直径= $5.3 \times 10^{-2}$  (m)

$\mu$ : ポアソン比=0.3

$e$ : 管の厚さ= $5.3 \times 10^{-2}$  (m)

$E$ : ヤング係数= $2.0 \times 10^{11}$  (N/m<sup>2</sup>)

式(3)により負圧における伝播速度  $a$  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映像から求められる。また、式中の

$V_a/V$  はボイド率と呼ばれている。ボイド率とは、ある流路部分に瞬間的に存在している気液混相流体全体を 1 としたときの気相の割合のことである<sup>(6)</sup>。ボイド率は流速が大きくなるとそれに伴って大きくなる。また、ボイド率 1.0 とは管内の水が完全に泡となる時のことである。

ここで例として、流速が 1.0 m/s の時のボイド率が 0.43 であった時の伝播速度を計算すると、式(3)より  $a=249.1$ m/s と求められる。また、ボイド率が 0 の時の伝播速度は  $a=1341.7$ m/s であり、正圧の伝播速度  $a_1$  と同じ値となっている。また、ボイド率が 1.0 の時の伝播速度は  $a=164.4$ m/s であり、管内が全て気泡となった場合は、一般的な音速である約 340 m/s よりも遅くなる事が分かる。

### 6. 水撃圧実験結果および伝播速度算出結果

実験で得られたグラフについて、時間を図 6.1 と図 6.2 のように四つの領域に分けて考え、それらを  $T_1, T_2, T_3, T_4$  と定義する。 $T_1, T_2, T_3, T_4$  はそれぞれ図 3.1 から図 3.9 における  $a_1, a_2, a_3, a_4$  に対応する時間である。 $T_1$  と  $T_2$  では管内が単相流であると考えられる為、それらの時間を同じ値とする。しかし  $T_3$  と  $T_4$  では管内が混相流になると考えられる為、伝播速度は水撃圧が発生している間減少する。そこで二つのケースに分けて伝播速度を計算した。

ケース 1 では、 $T_3$  と  $T_4$  を図 6.1 のように同じ時間と考えた。この場合、 $T_1=T_2=0.0433$ s である。管長が  $L$  の時、伝播速度  $a_3$  及び  $a_4$  は以下の式によって計算される。

$$a_3 \text{ and } a_4 = 2L / (T_3 + T_4).$$

ケース 2 では、 $T_3$  の伝播速度は図 6.2 のように正圧の伝播速度と同じであると仮定した。この場合、 $T_1=T_2=T_3=0.0433$ s である。しかし  $T_4$  の伝播速度は混相流下での伝播速度となるため、伝播速度  $a_4$  は以下の式によって計算される。

$$a_4 = L / T_4.$$

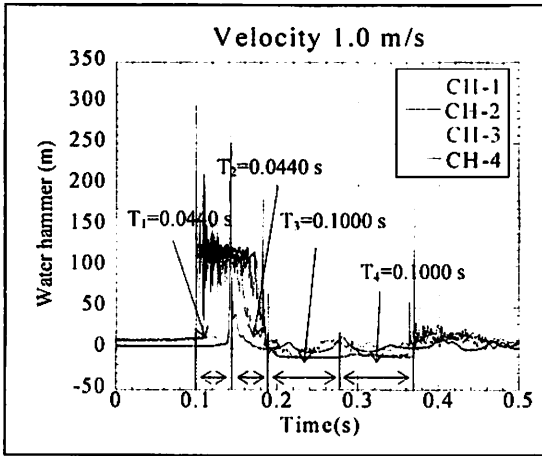


図 6.1 ケース 1 における時間の分け方

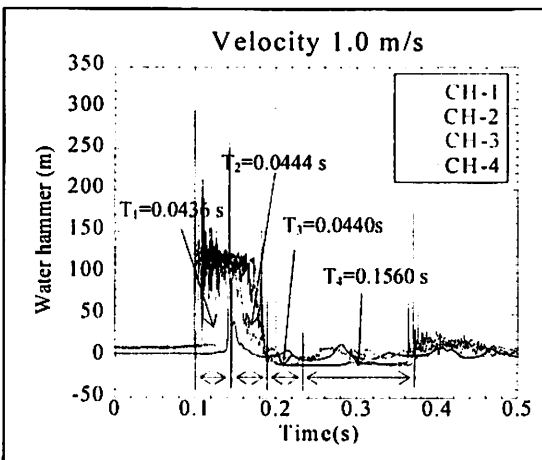


図 6.2 ケース 2 における時間の分け方

本研究では、後ろに気泡を発生させながら上流部へ進む場合と、気泡を潰しながら下流部に戻ってくる場合の伝播速度が同じなのかということを検討する。

図 6.3 は流速 1.0m/s における 1/10000 秒オーダーで計測した水撃圧のデータである。この図で正圧が最大の点に達するのは 0.181 s である。この点が正圧が上部水槽に到達した地点である。

図 6.4 は負圧が上部水槽に到達した地点を探すために、図 6.3 の 0.27 s から 0.29 s までを拡大したものである。この図で、負圧が最小の点に達するのは 0.282s である。この点が負圧が上部水槽に到達した地点である。この  $T_3$  における伝播速度は 1320.5m/s となった。これは  $T_1$ ,  $T_2$  における伝播速

度とほぼ一致した。

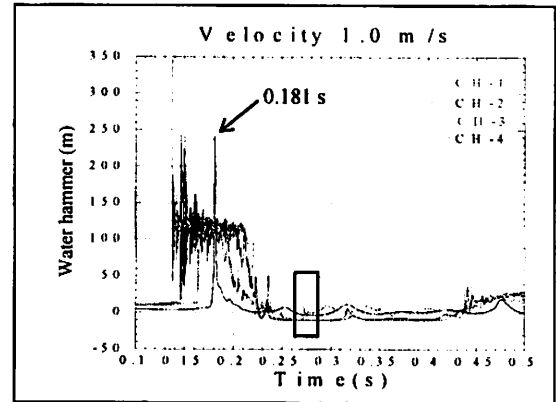


図 6.3 流速 1.0m/s における 1/10000 秒オーダーで計測した水撃圧のデータ

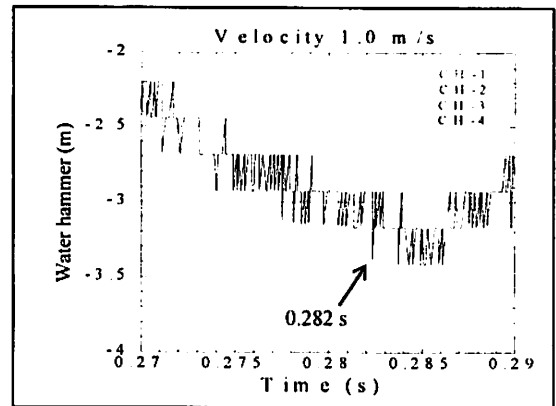


図 6.4 図 6.3 の 0.27 s から 0.29 s までを拡大したものの(負圧が上部水槽に到達した地点)

表 6.1 は流速 1.0m/s における正圧の理論値と実験値を示している。

ケース 1 の伝播速度は  $a_1=a_2=1320.5$  m/s、ケース 2 の伝播速度は  $a_1=1332.6$  m/s、 $a_2=1308.6$  m/s、 $a_3=1320.5$ m/s となった。

表 6.1 正圧部の伝播速度の実験結果および理論値

|        | $a_1$         | $a_2$         | $a_3$         |
|--------|---------------|---------------|---------------|
| case 1 | 1320.5<br>m/s | 1320.5<br>m/s | —             |
| case 2 | 1332.6<br>m/s | 1308.6<br>m/s | 1320.5<br>m/s |

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| Theoretical Result | 1341.7m/s |
|--------------------|-----------|

表 6.2 はケース 2 における負圧部の伝播速度を示している。

ケース 1 の伝播速度は  $a_3 = a_4 = 581.0 \text{ m/s}$  となった。  
 ケース 2 の伝播速度は  $a_4 = 372.4 \text{ m/s}$  となった。

表 6.2 負圧部の伝播速度の実験結果

|        | $a_3$     | $a_4$     |
|--------|-----------|-----------|
| case 1 | 581.0 m/s | 581.0 m/s |
| case 2 | —         | 372.4 m/s |

### 7. 理論値と実験値の比較

図 7.1 は式 (3) で計算した伝播速度とボイド率の実験結果の関係を表わしたグラフである。流速 1.0 m/s、ボイド率 0.311 の時の伝播速度の理論値は 373.7 m/s となった。流速 1.0 m/s、ボイド率 0.311 の時の伝播速度の実験値はケース 1 で 549.1 m/s、ケース 2 で 372.6 m/s となった。ボイド率 1.0 つまり、管内の水が完全に泡となる時の伝播速度の理論値は 164.7 m/s となった。ボイド率 1.0 の時の伝播速度の実験値はケース 1 で 532.5 m/s、ケース 2 で 342.7 m/s となった。

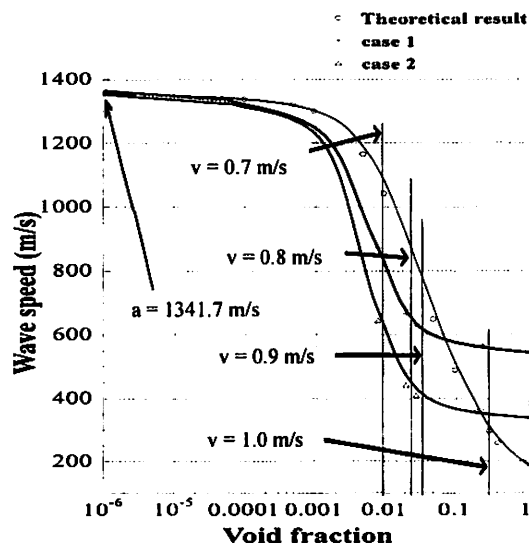


図 7.1 伝播速度およびボイド率の実験結果

### 8. 結論

本研究では水撃負圧部の水撃波が上流端に到達する地点を明らかにし、負圧部の伝播速度のメカニズムについて明らかにした。

後ろに気泡を発生させながら上流部へ進む場合と、気泡を潰しながら下流部に戻ってくる時間が同じであると仮定したものをケース 1、そうでないものをケース 2 とし実験を行った。

1. 水撃負圧部の水撃波が上流端に到達した地点を明らかにしたところ、後ろに気泡を発生させながら上流部へ進む場合と、気泡を潰しながら下流部に戻ってくる時間が同じではなかった。これはケース 2 の仮定に近いものであった。
2. ケース 1 での伝播速度の実験値は正圧部で  $a_1 = a_2 = 1320.5 \text{ m/s}$ 、負圧部で  $a_3 = a_4 = 581.0 \text{ m/s}$  であった。
3. ケース 2 での伝播速度の実験値は正圧部で  $a_1 = 1332.6 \text{ m/s}$ 、 $a_2 = 1308.6 \text{ m/s}$ 、 $a_3 = 1320.5 \text{ m/s}$ 、負圧部で  $a_4 = 372.4 \text{ m/s}$  であった。

### 参考文献

- 1) 下浅雄大, 河野幸夫, 芳賀昭, 石川和己, 加藤和夫: 水撃負圧部の気泡発生と計測方法について, 東北学院大学工学部研究報告, Vol.43No.1-2, pp.41-46, (2009).
- 2) GARY Z. WATTERS: MODERN ANALYSIS AND CONTROL OF UNSTEADY FLOW IN PIPELINES, ANN ARBOR SCIENCE, pp.251, (1979).
- 3) 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会 第一回論文集, 応用数理学, pp.42-46, (1998).
- 4) 横山重吉: 水撃入門, 日新出版, pp.154, (1979).
- 5) 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).