

報告日 2013年(平成25年) 9月 2日
報告者 九州大学大学院 工学研究院 准教授
石川 諭

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

集中系モデルを用いた非線形圧力波に関する研究

(2)研究者氏名

石川 諭 九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 准教授

(3)研究概要 (日本文)

水中超音波や流体機械から発生する圧力波では、振幅が大きい場合、波形が伝播する間に次第に変形し、波形が切り立つ衝撃波が生じることが知られている。このような非線形圧力波に対する差分法を用いた解析手法は、高精度のスキームが必要となり、取扱いが煩雑となる問題がある。本研究では、これまで、流体が空気の場合の非線形圧力波に対して、空気を集中系にモデル化し、取扱いが容易で計算精度の高い解析手法を提案してきた。本報では、この集中系モデルを様々な流体で取り扱えるようにする。さらに、液柱分離現象や気液二相流中の圧力波現象に対しても新たなモデル化手法を提案する。また、各提案モデルの解析結果と実験結果の比較を行い、モデルの妥当性を検証する。

(4)キーワード

非線形圧力波, 解析モデル, 集中系モデル, 液柱分離, 気液二相流

(英文)

(1) Research title

Research on nonlinear pressure wave by concentrated mass model

(2) Name of researcher with title of position

Satoshi Ishikawa, Associate Professor, Kyushu University

(3) Summary

A pressure wave generated by a fluid machine often changes to a shock wave because of the nonlinear effect of fluid. The treatment of analyzing this phenomenon by the finite difference method is cumbersome. In order to overcome this problem, we proposed a concentrated mass model in case the fluid is air. In this report, we propose the treatment of the model for various fluids. Furthermore, new models in the case of a pressure wave in Gas-liquid two-phase flow, and in the case of liquid column separation phenomenon. To confirm the validity of the models, the numerical results obtained from the concentrated mass model are compared with the experimental results.

(4) Key Words

Nonlinear pressure wave, Analytical model, Concentrated mass model,
Liquid column separation, Gas-liquid two-phase flow

2. 本研究の意義・特色

水中を伝わる超音波では，振幅が大きい場合，圧力波が伝播する間に次第に変形し，圧力波形が切り立つ衝撃波が生じることが知られている．これは，流体の非線形性により生じる現象であり，腎臓結石や胆石に対する破碎療法に適用されている．このような波形が変形する非線形圧力波は，ポンプや圧縮機のような流体機械から発生する圧力波においても振幅が大きくなる場合に発生する．また，弁急閉時の水撃において発生する液柱分離現象も非線形現象である．以上のような非線形圧力波を解析するために，これまで流体の基礎式を差分法を用いて解析する試みがなされてきた．しかしながら，差分法で衝撃波を解析するためには，圧縮性流体解析用の高精度のスキームが必要となり，取扱いが煩雑で計算時間がかかる問題がある．

著者らはこれまで，流体が空気の場合の非線形圧力波に対して，流体を図 1 のような集中系モデルにモデル化し，取扱いが容易で計算精度の高い解析手法を提案してきた．本報では，この集中系モデルを空気以外の流体の場合に拡張し，様々な流体で取り扱えるようにする．また，液柱分離現象や気液二相流中の圧力波現象に対しても新たなモデル化手法を提案する．さらに，弾性管を用いた液中の圧力波低減手法を提案する．

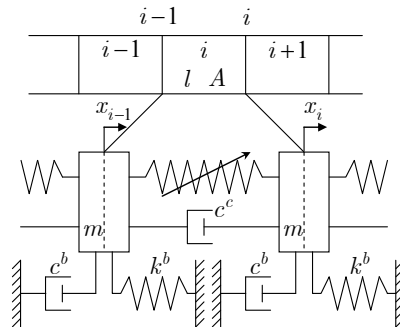


図 1 集中系モデル

3. 実施した研究の具体的内容，結果（本文）

3.1 空気以外の流体の非線形圧力波解析手法の開発

著者らはこれまでに，流体が空気の場合の非線形圧力波を図 1 のような集中系にモデル化し，取扱いが容易で計算精度の高い解析手法を提案してきたが，今回，熱物性値プログラムを用いて非線形ばね部分の計算を可能にし，水やフロンなどの様々な流体中の非線形圧力波の取扱いを可能にした．モデルの概要を以下に示す．

断面積 A の管内流体を N 個の要素に分割（要素長さ l ）して，分割点（節点）に質量を集

中させる．節点 i の変位を x_i ，要素 i の圧力変動量を dp_i とする．各節点の質量 m と結合減衰係数 c^c は，平衡状態の密度を ρ_0 ，粘性係数を μ_c とすると，次式のようになる．

$$m = \rho_0 Al \quad (1)$$

$$c^c = \frac{4\mu_c A}{3l} \quad (2)$$

層流の場合，基礎支持線形ばね k^b ，基礎支持線形減衰 c^b は，

$$k^b = -2\mu_b Al\omega \operatorname{Im}[\Gamma(R)] \quad (3)$$

$$c^b = 2\mu_b Al \operatorname{Re}[\Gamma(R)] \quad (4)$$

$$\Gamma(R) = \frac{\lambda^2 J_1(j\lambda R)}{j\lambda R J_0(j\lambda R) - 2J_1(j\lambda R)}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{j\omega}{\nu}} \quad (5)$$

ここに， R は管路の半径， μ_b は粘性係数， ω は圧力波の角振動数， ν は動粘性係数， $j = \sqrt{-1}$ ， $J_n(z)$ は n 次の第一種ベッセル関数である．乱流の場合，基礎支持線形ばね，基礎支持減衰の代わりに，非線形基礎支持減衰として，管摩擦による圧力損失から減衰力 f_i^{bc} を導出し，次式とする．

$$f_i^{bc} = -\lambda \frac{\rho_0 Al}{D} \frac{\dot{x}_i |\dot{x}_i|}{2} \quad (6)$$

各要素の流体の圧力と体積の関係を節点間の非線形結合ばねで表現するが，様々な流体を取り扱えるように熱物性値プログラムを用いて非線形ばね特性を求める方法を提案する．熱物性値プログラムには，媒質ごとに 2 つの物性値から他の物性値が求められる関数がある．この関数を用いてまず平衡状態の圧力 p_0 ，温度 T_0 から，平衡状態の密度 ρ_0 ，エントロピー s_0 を算出する．次に節点 $i-1, i$ の変位 x_{i-1}, x_i を用いて要素 i の密度 ρ_i を ρ_0 より計算する．

$$\rho_i = \frac{\rho_0 l}{(l + x_i - x_{i-1})} \quad (7)$$

断熱変化の仮定より平衡状態のエントロピー s_0 は一定とする．密度 ρ_i ，エントロピー s_0 のときの圧力 p_i を熱物性値プログラムの関数から算出する．このときの圧力変動量 dp_i は，

$$dp_i = p_i - p_0 \quad (8)$$

となり，ばねの非線形復元力は，次式のようになる．

$$f_i^k = -A dp_i \quad (9)$$

このモデルの妥当性を確認するために，エアコンの圧縮機から発生する配管内圧力波を測定する実験装置（図 2）を製作し，フロン（気相単相）中の圧力波の実験結果と集中系モデルによる解析結果を比較する．熱物性値プログラムには National Institute of Standard and Technology 製の REFPROP を使用し，R410A の物性値を用いて解析を行った．流れは乱流であり，式(6)の非線形減衰力を用いる．

図 3 に，実験結果と解析結果の比較を示す．圧縮機回転数が 16rps, 22rps, 28rps, 44rps の場合のセンサー①，③の圧力の時系列波形であり，実験結果と解析結果が非常によく一致していることが分かる．これより，フロンガス単相内の圧力波現象に対して提案したモデルが妥当であるといえる．

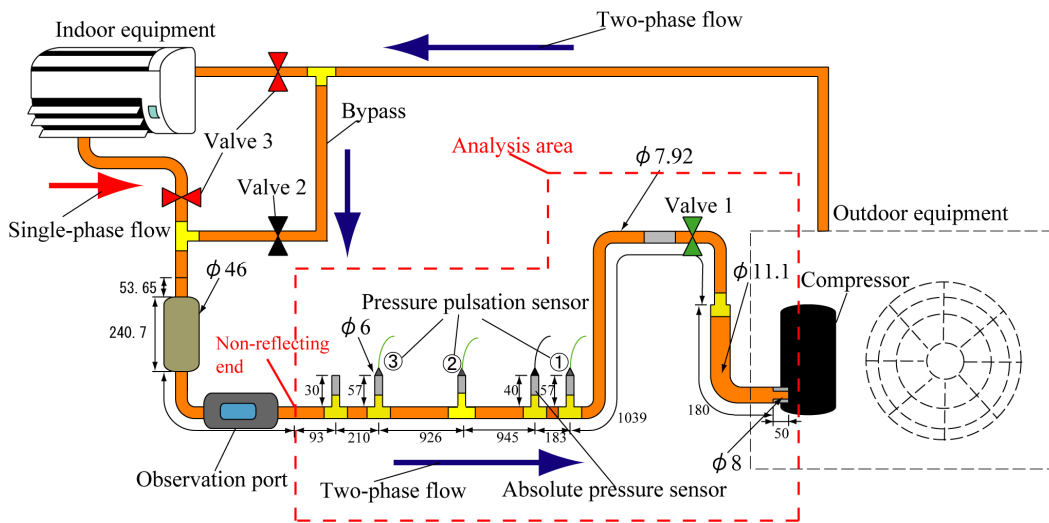


図2 空調機配管系実験装置

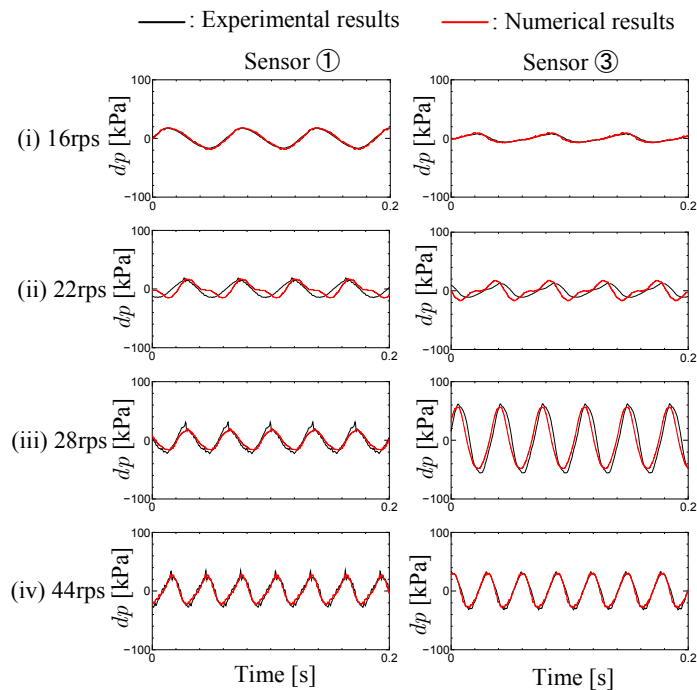


図3 実験結果，解析結果比較（フロンガス単相）

3.2 水中超音波の解析

水中を伝播する超音波の振幅が大きい場合、衝撃波に推移することが知られており、腎臓結石や胆石を非観血的に破碎除去する医療法に応用されている。3.1節の熱物性値プログラムを用いた集中系モデルにより、水中衝撃波現象に対する解析を行う。

Burov ら⁽¹⁾が行った超音波の実験結果と集中系モデルによる解析結果の比較を行った。Burov らは、油で満たした容器内に水晶振動子を置き、1MHzの超音波を発生させている。

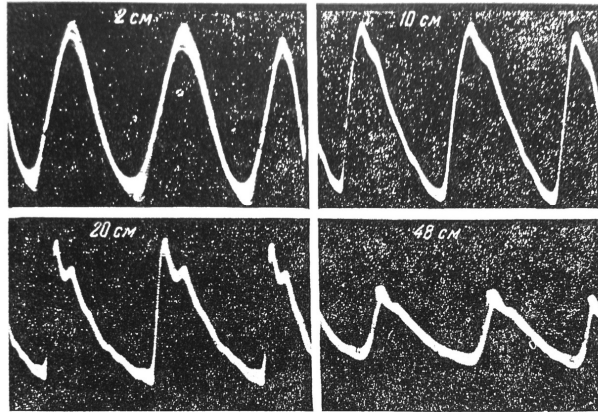


図4 超音波実験結果⁽¹⁾

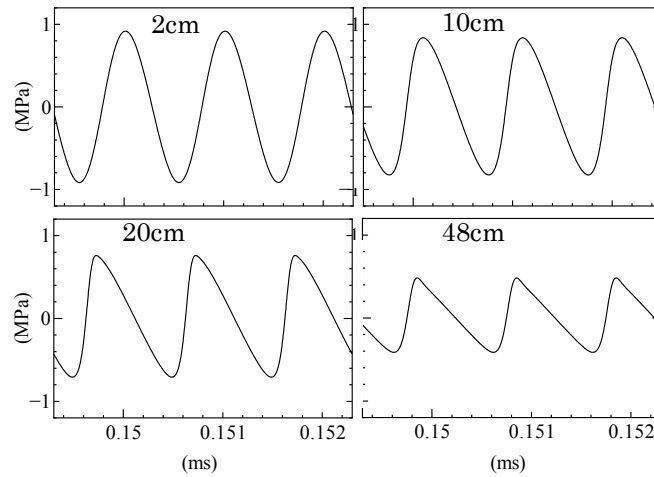


図5 超音波解析結果

そして、音源からの距離が 2cm, 10cm, 20cm, 48cm の位置における圧力変動を計測している。超音波は指向性が高いものとして、音源前方を 1 次元の集中系でモデル化し、解析を行う。

図4に Burov らによる実験結果⁽¹⁾，図5に集中系モデルによる解析結果を示す。2cm では波形が正弦波であるが，10cm, 20cm に伝播するにつれて波形が徐々に切り立っていき，48cm では振幅が小さくなっているが，解析でもその様子が再現できている。以上より，液中の非線形超音波現象においても，提案した集中系モデルが妥当であることが分かる。

3.3 水撃における液柱分離現象の解析

水中圧力波の圧力が飽和蒸気圧よりも下回った場合，水が気化して液柱分離現象が発生する。この現象に対する既存の解析法としては，気泡が存在するときに音速が低下することに着目した溶存ガス析出モデルなどがあるが，取扱いが煩雑になる問題がある。

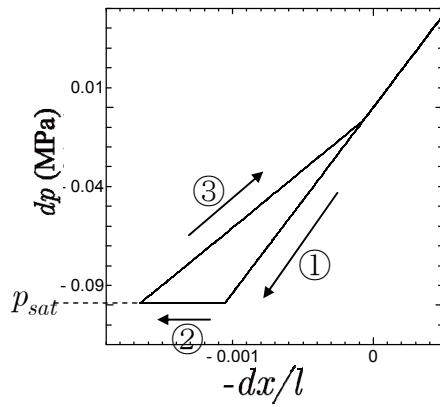


図6 液柱分離現象に対するヒステリシスばね

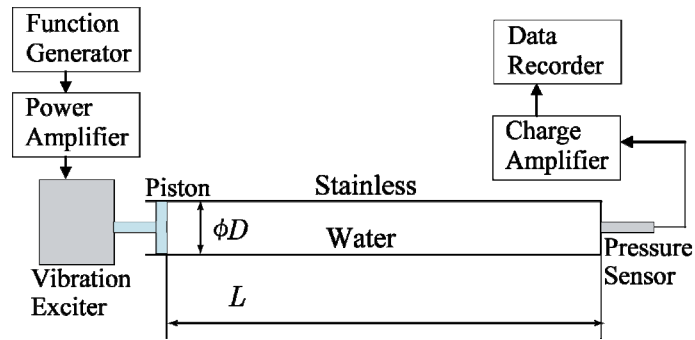


図7 音響管実験装置

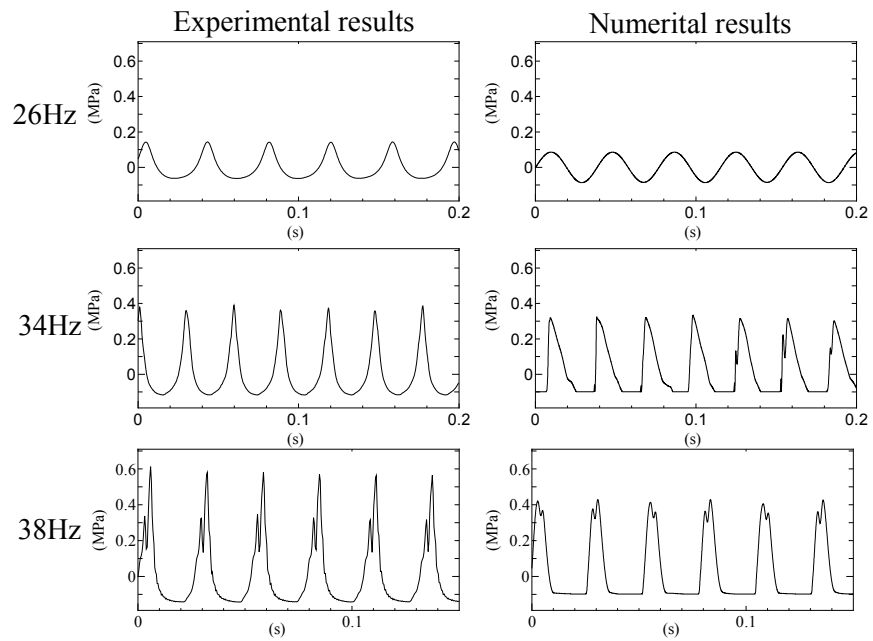


図8 液柱分離現象の実験結果および解析結果

図 1 の集中系モデルの非線形結合ばねを図 6 のようなヒステリシスばねに置き換えて、液柱分離現象をモデル化する．飽和蒸気圧を p_{sat} とすると，①の $dp_i > p_{sat}$ のとき， dp_i は，

$$dp = -\frac{K(x_i - x_{i-1})}{l} \quad (10)$$

ここで， K は水の体積弾性率である．②の $dp_i \leq p_{sat}$ のときには， $dp_i = p_{sat}$ とし，③で再び $dp_i > p_{sat}$ となるときは，①よりも緩やかな傾きで式(10)のラインに戻っていくものとする．

モデルの妥当性を確認するために，図 7 のような水を充填した音響管の実験装置を製作した．全長 $L=1.982\text{m}$ ，内径 34mm のステンレス管の左端をピストンで加振し，右端の固定端に圧力センサを設置している．図 8 に実験結果と解析結果の比較を示す．ピストン加振振動数が 26Hz ， 34Hz ， 38Hz のときの圧力の時系列波形を示している．各振動数とも波形は異なるものの，振幅はよく一致しており，振幅の予測には，集中系モデルが適用可能であることが分かる．

3.4 気液二相流中の圧力波の解析

図 2 のようなエアコン配管系では，配管内の流れが気液二相流になることがある．この場合，蒸発・凝縮を伴う一成分気液二相流である．一成分気液二相流中を圧力波が伝播する場合，質量輸送の影響により減衰が大きいことが知られている．ここでは，一成分気液二相流中の圧力波現象に対して，図 9 のような質量，線形結合ばね，線形結合減衰，非線形基礎支持減衰の集中系にモデル化する．液相を非圧縮性，気相を圧縮性とみなし，質量輸送の影響と気相の圧縮性から結合ばねと結合減衰を導出すると，ばね定数と減衰係数は，

$$k = \frac{\omega^2 \tau_b^2 p_0^2 K_g}{\alpha (\omega^2 \tau_b^2 p_0^2 + K_g^2)} \frac{A}{l} \quad (11)$$

$$c = \frac{\tau_b p_0 K_g^2}{\alpha (\omega^2 \tau_b^2 p_0^2 + K_g^2)} \frac{A}{l} \quad (12)$$

ここで， α はボイド率， τ_b は緩和時間， K_g は気相の体積弾性率を示す．非線形基礎支持減衰は，管摩擦の圧力損失より式(6)と同様の式となる．

図 2 の空調機配管系の実験装置において，室内機をバイパスさせて気液二相流中の圧力

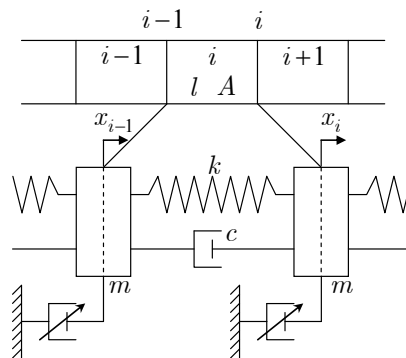


図 9 集中系モデル（一成分気液二相流）

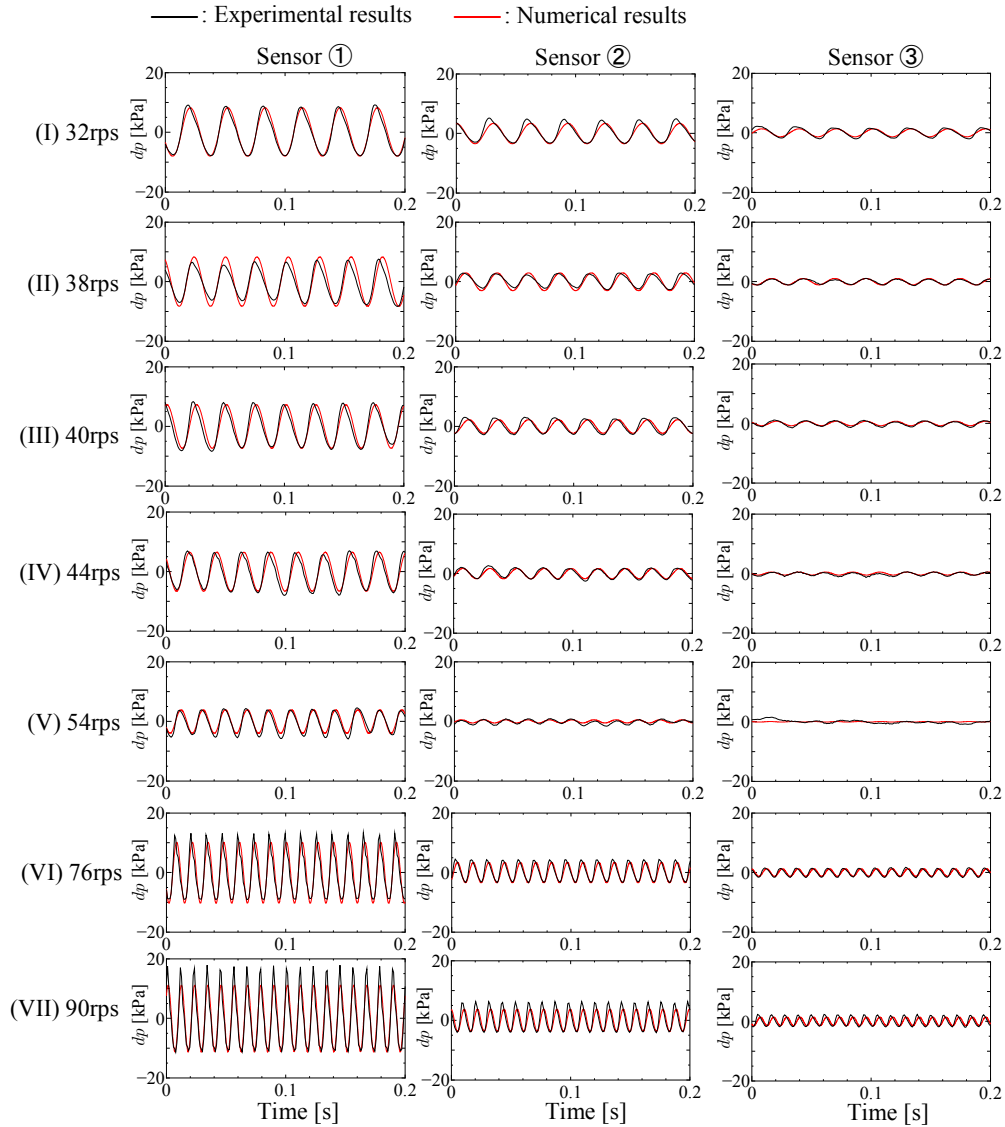


図 10 実験結果，解析結果（気液二相流）

波の実験を行い，モデルの妥当性の検証を行う．解析では，全条件に対して緩和時間 $\tau_d = 3.95[\text{ms}]$ のみを適当に与えており，他は物性値および計測した値を用いる．図 10 に実験結果と解析結果の比較を示す．圧縮機の回転数が 32rps, 38rps, 40rps, 44rps, 54rps, 76rps, 90rps の場合のセンサー①，②，③（図 2）の圧力の時系列波形であり，圧縮機から遠ざかる①，②，③の順に圧力波の振幅が小さくなっているが，その現象も含めて解析結果が実験結果を非常によく再現していることが分かる．以上より，提案した集中系モデルが一成分気液二相流中の圧力波現象に対して妥当であることが分かる．

3.5 弾性管による液中の圧力波低減手法の開発

配管内の液体中（水や油など）を圧力波が伝播する場合，図 11 のように硬い配管の途中

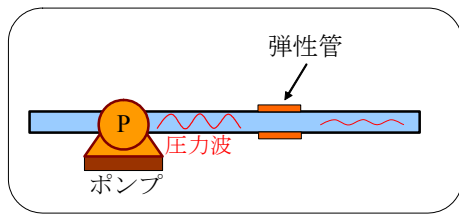


図 11 弾性管による圧力波低減手法

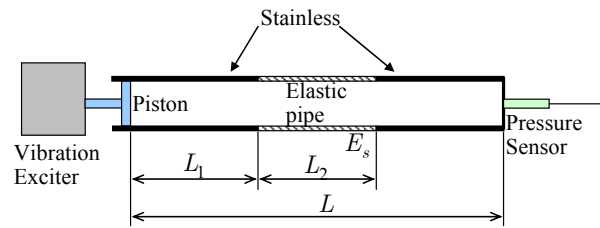


図 12 解析モデル

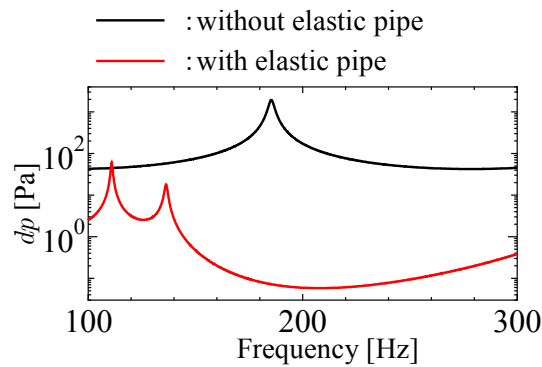


図 13 弾性管による圧力波低減手法

に柔らかい弾性管を挿入すると圧力波振幅が低減されることが予想される．そこで，流体が液体の場合の弾性管の解析モデル（弾性管が膨らむ影響を考慮）を提案し，弾性管によって圧力波低減の効果を確認する．図 1 に示す集中系モデルの非線形結合ばねを線形結合ばねで置き換える．圧力変動により弾性管の断面積が変化する効果を考慮すると，線形結合ばねのばね定数 k は，次式のようになる．

$$k = \frac{KA_0}{l + K \frac{D_0 l}{Eh_0}} \quad (13)$$

ここで， K は液体の体積弾性率， D_0 は平衡状態における弾性管の内径， E は弾性管のヤング率， h は弾性管の肉厚である．

図 12 のように，音響管の途中に弾性管を挿入した場合の解析を行う．管内には水が満たされているものとする． $L = 4\text{ m}$ ， $L_1 = 1\text{ m}$ ， $L_2 = 0.3\text{ m}$ ， $E = 1.0\text{ MPa}$ ， $h = 10\text{ mm}$ とする．解析結果を図 13 に示す． $100 \sim 300\text{ Hz}$ の周波数領域にわたって，弾性管を設置した場合の方が，弾性管無しに比べて圧力波振幅が大幅に低減している．これより，弾性管設置が圧力波低減手法として有効であることが分かる．

引用文献

- (1) V. A. Burov and V. A. Krasil'nikov, "Direct Observation of The Deformation of Intense Ultrasonic Wave in Liquids", *Soviet Physics Doklady*, Vol. 3, pp.17-176.

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

石川 諭 九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 准教授
近藤 孝広 九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 教授
松崎 健一郎 鹿児島大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 教授

5. 研究実施時期

2011年（平成23年）4月1日から 2013年（平成25年）3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

長野翔太, 石川諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 「集中系モデルによる水中圧力波の解析」,
日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 2011

榎元啓允, 石川諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 「空調機配管内圧力波の集中系モデルによる解析」,
日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 2012

石川諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 榎元啓允, 「空調機配管内圧力波の集中系モデルによる解析」,
日本機械学会 機械力学・計測制御部門講演会 2013

7. 内外における関連研究の状況

国内外で報告されている非線形圧力波の解析手法としては、流体の基礎式（質量保存、運動量保存、エネルギー保存）を差分法を用いて解析するものが主である。しかしながら、差分法で解析するためには、圧縮性流体解析用の高精度のスキームが必要となり、取扱いが煩雑で計算時間がかかる問題がある。本研究で提案した簡易なモデルであるにもかかわらず高精度の計算結果を得ることが可能であり、流体中を伝播する非線形脈波現象に対して非常に有効なモデル化手法であるといえる。また、一成分気液二相流中で、質量輸送の効果を考慮した解析モデルの報告は見当たらないが、本研究では、一成分気液二相流中の圧力波に対しても高精度の解析モデルを提案することができた。

8. 今後の発展に対する希望

今回報告した解析モデルは、配管内の1次元の非線形圧力波に関するものであるが、今後は2次元、3次元の問題を取り扱えるように解析モデルを拡張していく予定である。液柱分離現象の解析モデルに関しては、定量的には実験結果と一致しているものの、波形などは合っていないため、今後物理現象に対してより詳細な検討を行い、定性的にも一致する解析モデルに改良していきたい。