

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760071

研究課題名(和文) 水撃の流体 構造連成におけるバンドギャップ効果の検証

研究課題名(英文) Examination of band gap effect in water hammer with fluid-structure interaction

研究代表者

因幡 和晃 (Inaba, Kazuaki)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00408725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：ポンプの急停止や弁の急閉鎖により管内の圧力が上昇することを水撃作用とよび、管の弾性率、直径、肉厚が水撃波の伝播速度が変化することが知られている。本研究では、水撃波の被害低減を目指して管の肉厚や材質を繰り返し変化させてバンドギャップ効果(特定波長の波が伝播できず遮断される効果)に類似した現象が現れることを期待して、実験と数値解析を行った。飛翔体を液面に衝突させて水撃波を生成し、波面の周波数成分はウェーブレット解析で分析した。ポリカーボネート製円管に鋼鉄製クランプを設置して繰り返し構造を構築した結果、水撃波面の高周波成分が減衰するとともに最大値が20%程度減衰することを確認した。

研究成果の概要(英文)：A water hammer occurs by a sudden closing of a valve or an accidental stopping of a pump. The difference in Young's modulus and dimensions of the tube results in the change of the propagation speed of the water hammer. Recently, a periodic structure of a rod with periodic weights is known to cut wave components as known to be the band gap effect. In the present study, we examined whether the tube with periodic weights can decrease impact tube responses in water hammers. Water hammer experiments were conducted with a polycarbonate tube and steel clamps. The periodic structure with more than 5 clamps attenuated the peak of water hammers about 20% in experiments. High frequency components (3-5 kHz) were attenuated with the repeated structure in the Wavelet analysis. Numerical simulations revealed that the interval of clamps similar to the frontal averaged wavelength indicated similar attenuation as the experimental results.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：流体 構造連成 連続体力学

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の東日本大震災に起因した福島第一原子力発電所の事故により、今後数十年間にわたり除染物質も含めた大量の放射性廃棄物の処理が必要となった。放射性廃棄物は、再処理工場などで水と硝酸を用いて処理が施されるが、放射線で水が分解されると可燃性の酸水素混合気が発生して水素爆発の恐れがある。2001年11月に浜岡原子力発電所1号機で発生した水素爆発による配管破断事故は、放射線による分解で生成した可燃性酸水素混合気が何らかの原因により着火し爆燃・爆轟にいたったことが原因であると報告されている。配管内には可燃性混合気と水が存在しており、水素爆発による衝撃が水撃波として伝播して被害が拡大した可能性もある。

研究代表者(因幡)は、2007-2009年までカリフォルニア工科大学において博士研究員として、管内での爆発を模擬した水撃波の伝播挙動、弾塑性水撃波の伝播挙動、さらには、水と空気の2相流における水撃波伝播挙動を研究してきた。また、2009年に東京工業大学に着任後は、上記研究課題の発展として、スラリー円管による流体-構造連成問題の実験的研究により、水やスラリーにおける水撃波の実験的・数値解析的研究を行い水撃の研究を精力的に行ってきた。

2. 研究の目的

配管内で爆発事故が発生した最悪の事態を想定して水撃波による被害低減を目指し、学術的観点から管壁を伝わるたわみ波と水・スラリーを伝わる圧力波とが連成しながら伝播する流体-構造連成の周波数特性と分散特性を明らかにする。さらに繰り返し構造を有する管を用いて水撃被害の低減効果と特定の周波数帯の波が伝わらないバンドギャップ効果についての検証を本研究の目的としている。

3. 研究の方法

水撃波の実験的研究では、全長100mなどの長い管を用いて、水撃波が反射を繰り返しながら伝播する挙動を観測することが一般的である。本研究では、1m程度の短い管を用いて、水撃波が1回伝播する様子を観測して、水撃波面の詳細な機構を明らかにした。さらに、水撃波の生成方法も、流体を流して弁を急に閉じて生成するのではなく、管内の水にピストンを衝突させて発生させている。この方法を用いることで、ピストン衝突時に管内の圧力が最大となり、その後ピストンの減速に伴い圧力が減衰することで、配管内爆発の圧力履歴を模擬している。

水撃実験に用いた装置を図1に示す。繰り返し構造を有するポリカーボネート(PC)製の円管(外径60mm,肉厚4mm)に水を充填し、250mmの高さから飛翔体を円管上部のバッファに自由落下させ、円管内に水撃波を

生させる。g1からg8のひずみゲージを貼り付け、S45C製のクランプ(外径95mm,内径60mm,幅22mm)を円管に取り付け、繰り返し構造を構築した。周方向ひずみ時間履歴から水撃減衰率と周波数変動を解析する。

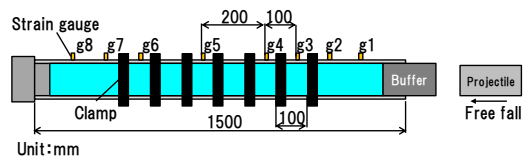


図1 実験装置の概要(クランプ間隔100mmの場合)。

4. 研究成果

図2は、クランプを設置していないポリカーボネート管において、ゲージg1からg8で測定された周方向ひずみの時間履歴をg1からの距離に比例させてシフトしてプロットしたものである。周方向ひずみの立ち上がり時刻とゲージ間隔から各ゲージ間における水撃波面の伝播速度を算出し、g1からg8までの伝播速度を平均化すると、水撃波面の伝播速度は、401m/sであった。一方、図3はクランプを100mm間隔で7個設置した場合の周方向ひずみ時間履歴であり、繰り返し構造により、水撃波面の伝播速度は437m/sと10%増加した。

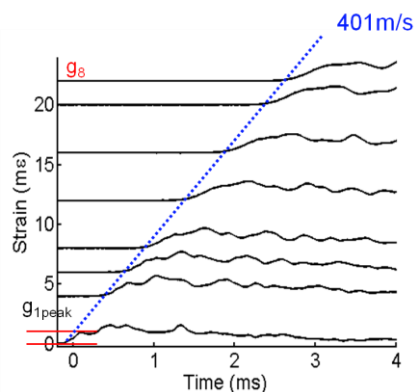


図2 クランプを設置していない場合における周方向ひずみ時間履歴。

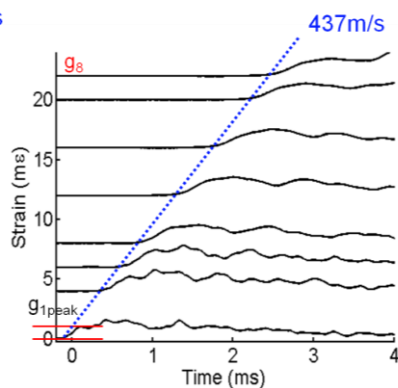


図3 クランプ7個を100mm間隔で設置した場合における周方向ひずみ時間履歴。

水撃波が繰り返し構造を通過することによる減衰効果を調べるため、クランプ数を 0 個から 7 個まで変化させた際にゲージ g8 で測定された周方向ひずみの時間履歴をゲージ g1 での最大ひずみで無次元化した結果を図 4 に示す。水撃波は飛翔体の衝突により生成するため、最大ひずみは実験毎に異なるため、入射波の強さで無次元化してクランプ数の影響を比較した。図 4 より、クランプを 5 個以上設置した繰り返し構造では、水撃波における最大周方向ひずみが 20%減衰する効果が確認された。この効果は、繰り返し構造におけるバンドギャップ効果の他に、水撃波が伝播する媒体の音響インピーダンスが繰り返し変化することで、反射・透過を繰り返したことが原因として考えられる。

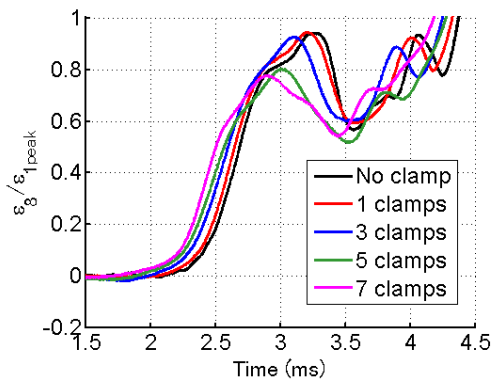


図 4 クランプ数を変化させた場合の最大ひずみの変化: g8 の周方向ひずみ時間履歴を各クランプ数における g1 での最大周方向ひずみで無次元化。

水撃波面減衰効果の一つの理由として考えられる繰り返し構造による媒体の音響インピーダンスの周期的変化の影響を検討した。図 5 は媒体の音響インピーダンスが繰り返し変化する様子の模式図である。ここで媒体 1 はクランプを設置していない部分で、媒体 2 はクランプ設置個所を示している。N 個のクランプによる繰り返し構造の減衰効果は、媒体 1-媒体 2-媒体 1 における 2 回の境界での透過率を計算して、式(1)のように計算できる。

$$1 - \frac{P_t}{P_i} = 1 - \prod_{n=1}^N \frac{2C_n \rho_n}{C_n \rho_n + C_{n+1} \rho_{n+1}} \quad (1)$$

ここで P_i は入射圧力、 P_t は透過圧力、 C_n は水撃波伝播速度、 ρ_n は水の密度である。クランプ部の水撃波速度は、クランプなしの場合の水撃波速度 $C_1 = 401 \text{ m/s}$ とクランプを 7 個設置した場合の速度増分とクランプ幅を考慮して、 $C_2 = 947 \text{ m/s}$ とした。クランプ 1

個による減衰率は 16.4%で、クランプを 7 個設置すると 71.4%になる。しかし、実験で観察されている減衰率は、20%程度であり、両者が異なる原因としては、クランプの軸方向長さが短いことや、境界で反射された波が最終的に前方に透過して重畳したことなどが原因として考えられる。

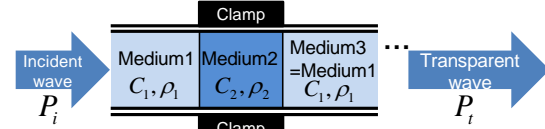


図 5 伝播媒体における音響インピーダンスの周期的変化。

繰り返し構造が円管の振動に及ぼす効果を調べるため、ひずみゲージから得られたひずみ時間履歴をウェーブレット変換し、水撃波面近傍における周波数を観察する。図 6、図 7 はクランプを設置しなかった場合における g1 と g8 のひずみ時間履歴をウェーブレット変換したものをそれぞれ示している。図上部の等高線は、ウェーブレット変換によって得た周波数時間線図であり、縦軸は周波数を、横軸は時間を示し下部のひずみ線図と共有している。等高線図において赤色の部分の周波数成分が多く含まれていることを示している。

図 6 下部の 0-3 ms の範囲が水撃の主要波であり、これに対応する等高線図において 1 kHz 程度の周波数成分を示し、3-7 kHz の周波数が主要波における高周波成分であることが分かった。図 7 下部をみると、2 ms 以降が主要波による成分であり、図 6 と同様に 1 kHz 程度の範囲が主波の周波数を示し、3-5 kHz の範囲が主波における高周波成分を示している。図 6、図 7 の間には 5 kHz 以上の高周波成分において減衰は確認されたが、5 kHz 以下に大きな変化は確認されなかった。

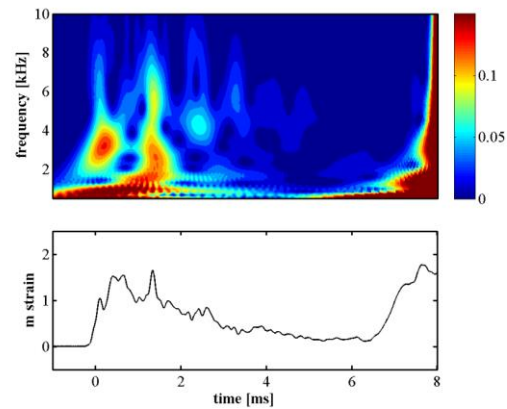


図 6 g1 における周方向ひずみ時間履歴とウェーブレット解析結果 (クランプなし)。

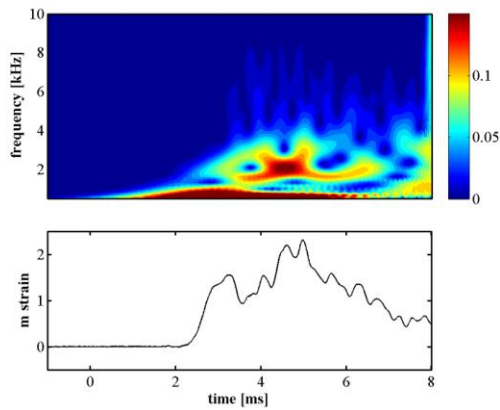


図7 g8における周方向ひずみ時間履歴とウェーブレット解析結果(クランプなし).

図8, 図9はクランプを7個設置した場合における, ひずみ時間履歴をウェーブレット変換したものである. 図8では図6と同様に1 kHz程度の主波の周波数と, 3-7 kHzの高周波成分を含んでいることが分かる. これと図9を比較すると, 3 kHz以上の高周波成分が減衰している. この変化は, 図7と図9を比較することでより顕著な差として確認できる. 以上のように, 繰返し構造の構築により水撃波の高周波成分が減衰する様子が確認できた.

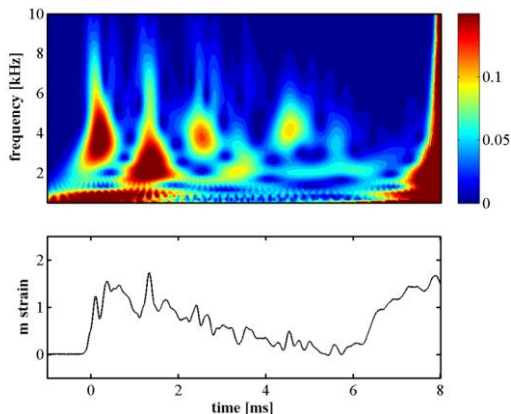


図8 g1における周方向ひずみ時間履歴とウェーブレット解析結果(クランプ7個設置).

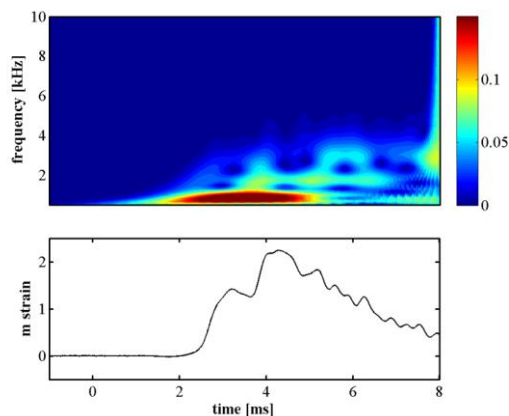


図9 g8における周方向ひずみ時間履歴とウェーブレット解析結果(クランプ7個設置).

水撃波の高周波成分の減衰についてより詳細を調査するため, ANSYS AUTODYN を用いて流体-構造連成を考慮した数値解析を実施した. 図10に2次元軸対称モデルの概要を示す. 本解析では管にクランプを設置せずに, 管壁がポリカーボネートから鋼へと繰返し変化するものとし, クランプ間隔を λ として変化させた.

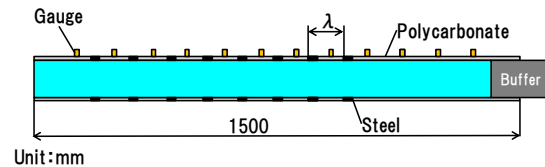


図10 数値計算モデルの概要.

実験や数値解析を実施するにあたり, クランプ間隔は Skalak の理論 (R. Skalak, Transactions. ASME (1956), pp.105-116) における水撃波面近傍の周波数に関する式(2)を参考にした.

$$f(t) \approx 0.36 \frac{c_s}{\sqrt[3]{dt}} \quad (2)$$

ここで, c_s は Skalak の水撃主要波伝播速度で, d は分散性に関する定数である. 水撃波面近傍の周波数は, 伝播時間の増加とともに徐々に減少する. バッファと最初の鋼部までの距離は 500 mm で, 水撃波の理論伝播速度は 416 m/s であるから, 水撃波が到達するまでに 1.2 ms を要する. この時間における水撃波面の平均周波数は 4.8 kHz であり, これに相当する波長 88 mm を標準の鋼部の間隔(クランプ間隔)とした.

図11は, 鋼管部を7か所 88 mm 間隔で設置した場合の, 数値解析による g1 での周方向時間履歴とウェーブレット解析結果を表しており, 図6や図8と同様に水撃波面が波面に 3-9 kHz の高周波成分を有している様子が確認できる. 一方, 図12は g8 において鋼管部を通過した後の周波数成分とひずみ時間履歴を表しているが, 3 kHz 以上の高周波成分が減衰している様子が確認できる.

図13は実験と数値解析における水撃波面の減衰率である. 数値解析結果より, 鋼管部の間隔を長くしていき, 水撃波面近傍の平均波長程度にすると, 大きく減衰の様子が確認できる. また数値解析で予想した結果は実験とおおむね一致していることが確認できる. 今回の数値解析では, バッファとして実験で飛行体として用いた 150 mm の鋼円柱を衝突させているが, 600 mm のポリカーボネート円柱へ変更したところ, 間隔 100 mm の場合よりも 88 mm の場合の方が増加しており, 水撃波面の立ち上がり方に依存して減衰効果に変化することが予想される. 以上のように減衰率に関しては, 飛行体やバッファの形

状を変化させることで、バルブ閉鎖などの状況を模擬した実験や数値解析を行うことでより高い減衰率を得るための方法を模索していくことが今後の課題である。

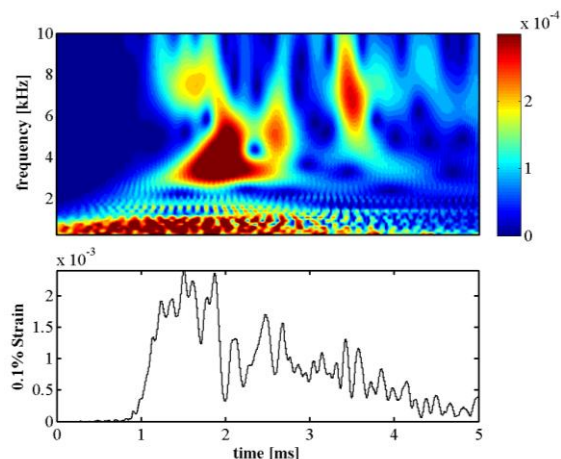


図 1.1 数値解析による g1 での周方向ひずみ時間履歴 (鋼管部 7 か所, 88 mm 間隔).

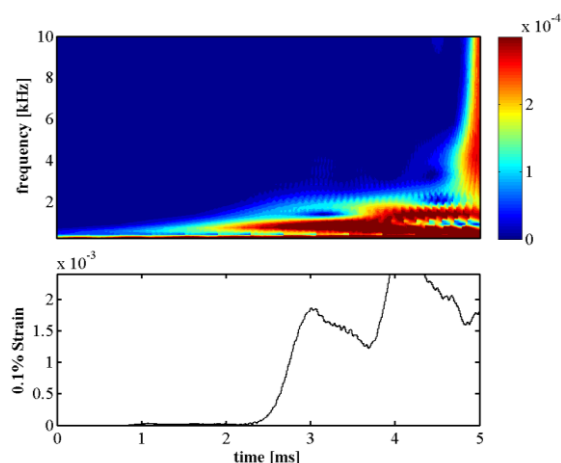


図 1.2 数値解析による g8 での周方向ひずみ時間履歴 (鋼管部 7 か所, 88 mm 間隔).

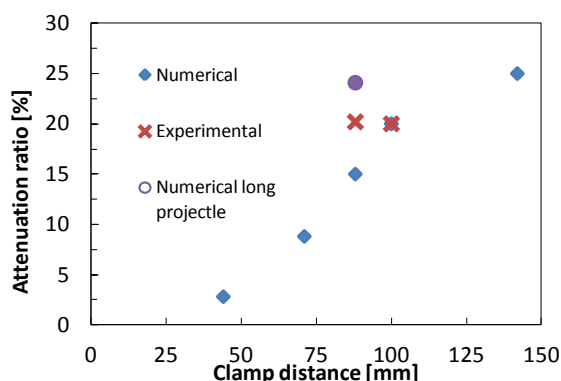


図 1.3 実験と数値解析による水撃波面の減衰率.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① M. Nagai, K. Inaba, K. Takahashi, K.

Kishimoto, Filtering Effects of Periodic Structure in Water Hammer, Applied Mechanics and Materials, 査読有, 印刷中

[学会発表] (計 3 件)

- ① K. Inaba, M. Kamijukkoku, K. Takahashi, K. Kishimoto. Transient behavior of water hammer in a two-pipe system, ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Conference, 2013 年 7 月 16 日, France
 ② 永井 稔, 因幡 和晃, 高橋 航圭, 岸本 喜久雄, 水撃波面における繰り返し構造を有する円管のフィルタ効果, 第 62 回理論応用力学講演会, 2013 年 3 月 8 日, 東京
 ③ K. Inaba, H. Takahashi, Y. Kurokawa, K. Kishimoto. Wavelet analysis of flexural wave fronts in water/slurry hammer, ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Conference, 2012 年 7 月 18 日, Canada

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.titech.ac.jp/~koubutsu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

因幡 和晃 (INABA, Kazuaki)

東京工業大学・大学院理工学研究科・

准教授

研究者番号 : 00408725