



フレキシブル継手の2 段設置による
配管振動の低減メカニズムに関する一考察

メタデータ	言語: jpn 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-10-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 寺原, 大雅, 盆子原, 康博, 濱畑, 貴之, 近藤, 孝広, Terahara, Taiga, Hamahata, Takayuki, Kondou, Takahiro メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/00010070

フレキシブル継手の2段設置による 配管振動の低減メカニズムに関する一考察

寺原 大雅^{a)}・盆子原 康博^{b)}・濱畑 貴之^{c)}・近藤 孝広^{d)}

A Study on the Reduction Mechanism of Piping Vibration by Using Two Flexible Joints

Taiga TERAHARA, Yasuhiro BONKOBARA, Takayuki HAMAHATA, Takahiro KONDOU

Abstract

A vibration reduction method that involves installing two flexible joints in series has been found to be useful for countermeasures against structure-borne sound in pump piping system. This technique is very useful compared to the general noise reduction which installs many vibration isolators in the whole system. However, the reduction mechanism of pipe wall vibration has not been completely explained yet. In this study, the simple apparatus having the straight-line piping and silicon tubes is treated, and the reduction of pipe wall vibration by installing flexible joints is verified experimentally and analytically. In addition, the effect of the location of the flexible joints on the pipe vibration modes is examined to consider the vibration reduction mechanism. The numerical analysis results confirm that the vibration reducing effect using two flexible joints is caused by optimizing the vibration mode in the upstream piping and by adjusting the installing position of the second joint.

Keywords: Vibration control, Noise control, Structure-borne sound, Flexible joint

1. 緒言

日本では、十数年前から商業施設等をリノベーションして居住施設など別の用途で再利用することが増えている。その一方で、商業施設と居住施設とは騒音に係る環境基準が異なるため、施工後に騒音問題が生じる事例も多い。その原因の一つとなっているのが、空調や給排水等の目的で設置されているポンプ配管系である。通常、ポンプは機械室に設置されているが、ポンプに接続した配管系は建物の広範囲に設置されている。ポンプを運転する際に発生する音や振動は、配管や水中を伝わり、さらには配管支持部などから建築躯体を伝搬して居室にまで到達する。その結果、居室内に固体伝搬音¹⁾と呼ばれる騒音が放射される。固体伝搬音に対しては、ポンプ配管系に防振床や防振支持などを設置して建物躯体への振動伝搬を低減する対策が講じられているが、リノベーションでは現状の設備を再利用することが多く、建物の構造上対策が難しい場合もある。

このようなポンプ配管系の固体伝搬音対策として、著者らの一部は、2個の配管用フレキシブル継手（以下、単に継手と呼ぶ）を用いる方法を提案している²⁻⁴⁾。この方法

では、ポンプ近傍配管の適切な位置に2個の継手を直列に設置することで、継手よりも下流側の配管振動を低減することができる。既報では、配管系の振動モードの実測値を指針とする継手の適切な設置方法を提案した^{2,3)}。また、より簡単で実用的な方法として、継手については2個とも任意の位置に設置し、その代わりに剛体円板を適切な位置に設置することで最良の振動低減効果を得る方法を提案した⁴⁾。ただし、これらの方法によって配管振動が低減されるメカニズムについては十分に検討されていない。

そこで本報では、既報⁴⁾と同様の直線状配管を対象として、継手の2段設置による配管振動の低減メカニズムについて考察する。本検討では、継手の代わりにシリコンパイプを用いた小規模で簡易的な実験装置を用い、継手の2段設置による配管振動の低減効果を実験と数値計算の両面で検証した。さらに、継手を設置することによる配管振動モードの変化が振動伝達に及ぼす影響について調べた。

2. 直線状配管を対象とした振動低減効果の検証

2.1 実験装置

本報では、ポンプ配管系の代替として、図1に示すような直線状配管を対象として実験を行った。既報⁴⁾では、実際の配管系で使用される呼び径100Aの炭素鋼配管(SGP)を用いたが、本実験では、簡便のために呼び径E25の炭

a)工学専攻機械・情報系コース大学院生

b)機械設計システム工学科准教授

c)教育研究支援センター技術職員

d)九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授

素鋼電線管を使用した。図1に示すように、配管の全長は3.6 mであり、途中4箇所をワイヤーと円盤状のフランジで鉛直方向に吊り支持している。一方、フレキシブル継手については、実際に使用されているゴム製の継手ではなく、シリコンパイプを代用した。図2に示すように、配管をシリコンパイプ内に差し込み、配管とシリコンパイプ間に滑りが生じないようにホース用クランプで固定した。また、既報の結果と同様の振動特性が得られるようにシリコンパイプの長さを調整した。以下では、このように設置したシリコンパイプを単に継手と呼ぶ。配管および継手に関する諸元を表1に示す。

本検討では、図1の実験装置において配管の左端が加振されるときの水平面内曲げ振動を対象とする。継手は、配管の左端から0.6 mの位置から1.6 mまでの1.0 mの範囲内に最大2個設置する。以下では、右側の継手を第1継手、左側の継手を第2継手と呼び、2個の継手の設置位置 L_1, L_2 を図のように定義する。また、第2継手よりも左側の配管を上流側配管、第1継手よりも右側の配管を下流側配管と呼ぶ。

2.2 実験方法および数値計算方法

本実験では、図1の配管における水平方向(Y軸方向)に対する打撃実験および加振実験を行った。打撃実験では、加速度センサ(小野測器社製 NP-3418)を配管の右端に設置して、配管の左端をインパルスハンマ(小野測器社製 GK-3100)で打撃した。そして、配管の右端における水平方向の振動加速度信号をFFTアナライザ(小野測器社製

DS-3200)を用いて周波数分析を行い、伝達関数(イナータンス、基準値 1.0 m/Ns^2)を求めた。また、固有モードを測定する場合は、配管の左端から右端に掛けて0.1 m間隔で打撃点を移動させながら合計37箇所で行った。そして、各点における伝達関数から固有振動数毎の振動振幅を求めた。また、加振実験では、加振器(B&K社製 Type 4809)を配管の左端から5 mmの位置に設置して、任意波形発生器(IWATSU社製 SG-4321)からピンクノイズ信号を入力して配管を加振した。図3に示すように、加振器と配管とは全ねじボルトを介して接合した。

一方、数値計算を行うにあたり、継手も含めて直線状配管を258自由度の集中系にモデル化した。配管と継手はすべて一様な中空丸軸として扱い、減衰については構造減衰のみを考慮して、縦弾性係数 $E' = E(1 + i\eta)$ (ここに、損失係数 $\eta = 0.005$)とした。また、境界条件および支持条件は自由端および自由支持とした。振動解析手法には、伝達剛性係数法⁹⁾を用い、水平面内曲げ自由振動および強制振動解析を行って固有ペアおよび伝達関数を求めた。

2.3 実験装置の妥当性について

本節では、実験装置および数値計算モデルの妥当性について検証する。ここでは、図4に示すように継手を設置しない場合(No joint, NJ)、継手を1段設置する場合(Single joint, SJ)、2段設置する場合(Double joints, DJ)の3種類のモデルを取り扱う。そして、それぞれのモデルに対して、上流側配管の左端を加振したときに下流側配管へ伝達する振動の大きさを比較する。

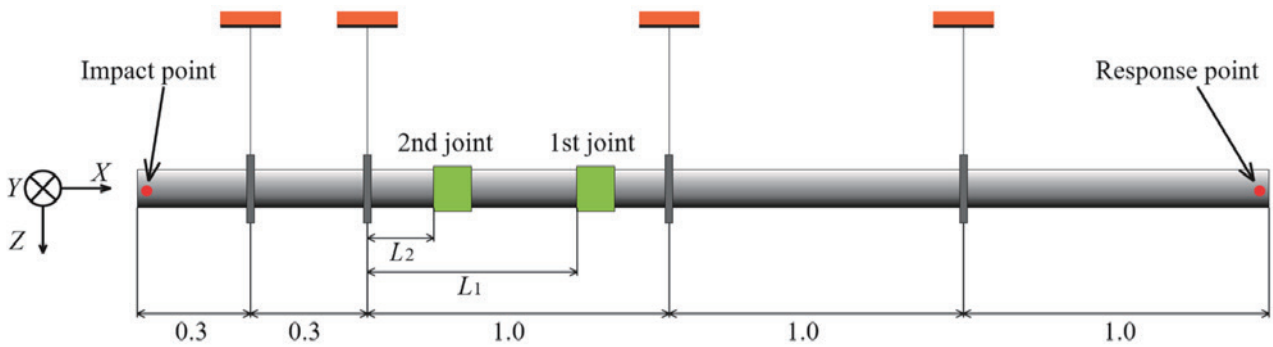


図1. 直線状配管モデル

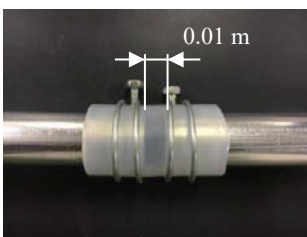


図2. 継手の代替として用いたシリコンパイプ

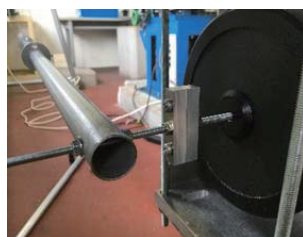


図3. 配管と加振器の接合部

表1 系パラメータ

	Pipe	Joint
Outside diameter [m]	0.0254	0.033
Inside diameter [m]	0.023	0.025
Total length [m]	3.6	0.01
Mass density [kg/m ³]	7800	2330
Young's modulus [GPa]	188	2.5×10^{-5}

初めに、継手の設置位置を決めるために次のような数値計算を行った。まず、継手の設置範囲内において2個の継手の設置位置を総当たりに変更しながら、周波数応答解析を行った。そして、応答点（下流側配管の右端）における伝達関数 G （イナータンス、基準値 1.0 m/Ns^2 ）を求めた。また、固体伝搬音の発生周波数とされる 100 Hz から 500 Hz までの範囲における振動低減効果の評価値として G の最大値 A を求めた。評価値 A は式(1)より求められる。

$$A = \text{Max} \left[20 \log \|G\| \right] \quad (1)$$

$$\|G\| = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_{yi}^2}$$

図5に、 L_1, L_2 毎に求めた評価値 A をプロットした分布マップを示す。凡例に示すように、評価値 A が大きい（振動低減効果が小さい）領域を黒色で、評価値 A が小さい（振動低減効果が大きい）領域を白色で示している。

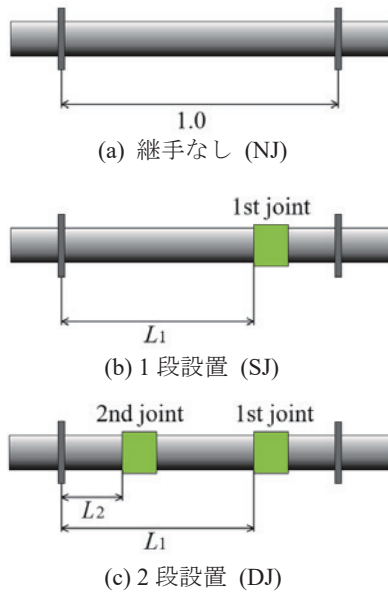


図4. 継手の設置方法

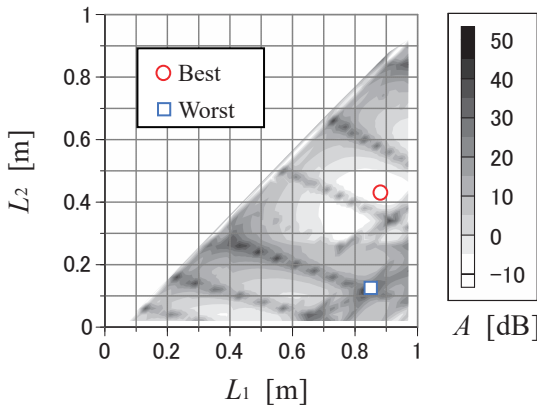
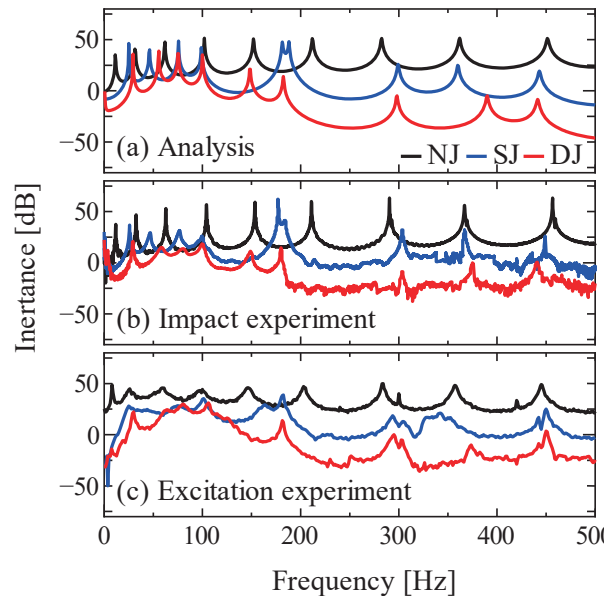


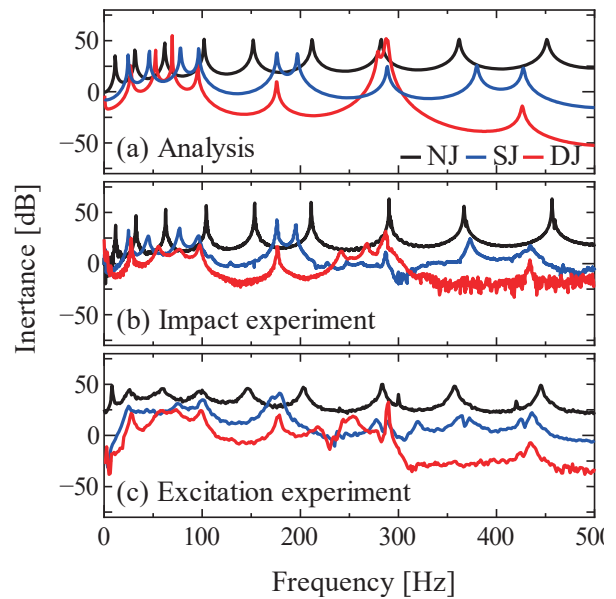
図5. L_1, L_2 ごとにおける評価値 A の分布図

この結果から、振動低減効果が最も大きくなる継手の設置位置を調べると、 $L_1=0.89 \text{ m}$ 、 $L_2=0.42 \text{ m}$ のとき（図5中の丸印の点）であった。以下、この位置に継手を設置した場合を最良モデルと呼ぶ。同様に、振動低減効果が最も小さくなる継手の設置位置を調べると、 $L_1=0.85 \text{ m}$ 、 $L_2=0.12 \text{ m}$ のとき（図5中の四角印の点）であった。以下、この位置に継手を設置した場合を最悪モデルと呼ぶ。

図6(a)および(b)は、それぞれの設置条件で数値計算と打撃実験により求めた伝達関数の結果である。数値計算結果と実験結果を比較すると、両者は定量的に一致していることがわかる。最良モデルの結果を見ると、1段設置時には



(a) 最良モデル



(b) 最悪モデル

図6. 伝達関数の数値計算結果および実験結果、並びに加振実験結果

182 Hz 付近に大きなピークが現れているが、2 段設置にすることでそのピークが小さくなり、伝達関数が対象領域全体で小さく抑えられている。一方、最悪モデルの結果を見ると、2 段設置にしたことで 289 Hz 付近にかえって大きなピークが現れていることがわかる。このような特徴は、既報で示した結果とも一致している。また、図 6(c)は、それぞれのモデルに対して配管の左端をピンクノイズ信号を入力して加振して、配管の右端の振動加速度を測定した結果である。この結果からも、伝達関数の結果と対応するように、2 個の継手の設置位置によって振動低減効果が異なることが確認できる。

以上より、2 段継手による振動低減メカニズムを検証する上で、本報の実験装置および数値計算モデルが妥当であるといえる。

3. 振動の低減メカニズムに関する考察

本章では、継手を最良な位置に設置する場合（最良モデル）と最悪な位置に設置する場合（最悪モデル）を対象として、継手の 2 段設置による振動低減メカニズムについて考察する。まず、それぞれのモデルに対して自由振動解析を行い、対象領域内に存在する固有ペアを求めた。図 7 および図 8 に最良モデルと最悪モデルの固有ペアを示す。それぞれ左側の SJ1~SJ5 が 1 段設置時の結果であり、右側の DJ1~DJ5 が 2 段設置時の結果である。また、図中の破線は継手の設置位置を示している。固有ペアについては、打撃実験によっても測定を行った。得られた結果の一部を図 9 に示す。一部の固有振動数に多少の差異が生じているものの、数値計算結果と実験結果とは定量的に一致していることが確認できる。

図 7 および図 8 の結果を見ると、固有モードの特徴として、上流側もしくは下流側の配管にだけ振動モードが現れているものがあることがわかる。図 6(a)の最良モデルの結果において、1 段設置では 182 Hz 付近に大きなピークがあり、それに対応する図 7 の SJ1 の固有モードを見ると、配管全体に振幅の大きなモード形状が現れている。これに対して、182 Hz に近い DJ2 の固有モードでは、下流側配管のモード形状は SJ1 と変わっていないものの、上流側配管のモード形状は全体的に節のような状態に変化している。また、図 6(b)の最悪モデルの結果においては、1 段設置では 289 Hz 付近のピークは大きくないが、2 段設置では大きなピークが現れている。これらに対応する固有モードを比較すると、図 8 の SJ3 の固有モードでは、上流側のモード形状が全体的に節となっているものの、289 Hz に近い DJ3 の固有モードでは、下流側配管だけでなく上流側配管にも振幅の大きなモード形状が現れている。このように、2 段設置の振動低減効果はモード形状の変化によるものと推察される。

提案している方法では、第 1 継手を設置した後、それより上流側に第 2 継手を設置する。このため、第 2 継手は特

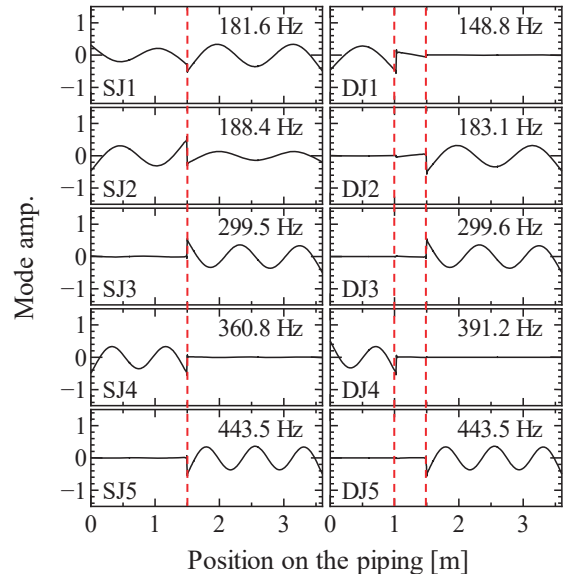


図 7. 最良モデルに対する固有ペアの計算結果

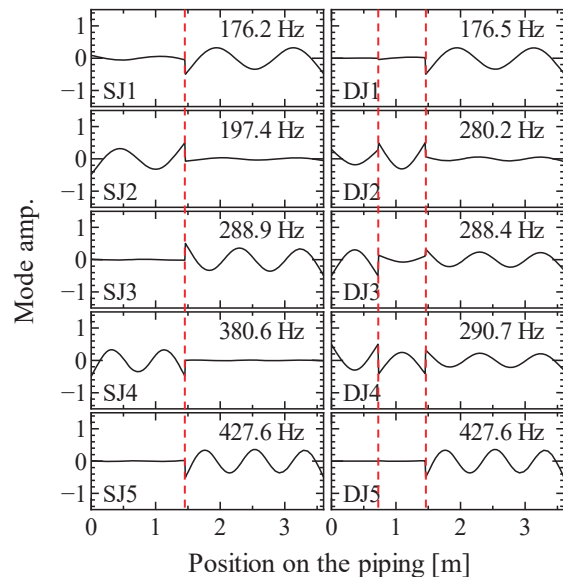
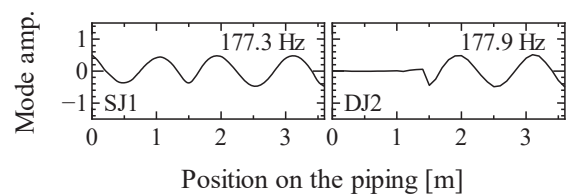
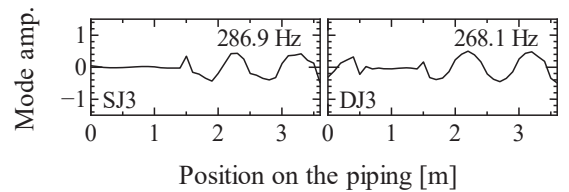


図 8. 最悪モデルに対する固有ペアの計算結果



(a) 最良モデル



(b) 最悪モデル

図 9. 固有ペアの実験結果

に上流側配管の振動特性に影響する。また、継手の縦弾性係数は配管に比べて非常に小さいので、上流側配管と下流側配管の連成の度合いは弱いと考えられる。このことを踏まえて、継手を2段設置した後の上流側配管を分離した上で伝達関数を求め、モード形状との関係について調べた。

最良モデルの場合、上流側配管の長さは1.02 mであり、最悪モデルの場合は0.72 mである。左端を加振したときの上流側配管全体の伝達関数の平均を数値計算によって算出した。図10に継手の最良および最悪設置位置の下流側右端の伝達関数と2段設置時の上流側配管のみの伝達関数を示す。図10の上段は図6に示した伝達関数の数値計算結果と同一のものであり、下段は上流側配管単体に対して伝達関数を求めた結果である。上流側配管単体に対する伝達関数は、数値計算モデルの全節点で求めた伝達関数を周波数毎に平均して求めたものである。

図10(a)の最良モデルの結果を見ると、1段設置の伝達関数SJで大きなピークの存在する182 Hz付近では、上流側配管単体の伝達関数が極小値をとっており、反共振点と一致している。一方、図10(b)の最悪モデルの結果を見ると、2段設置の伝達関数DJで大きなピークが存在する289 Hz付近では、上流側配管単体の伝達関数が極大値をとっており、共振点と一致している。このことから、継手の2

段設置による振動低減効果のメカニズムは、次のように考えることができる。

まず、第1継手を設置して配管系が上流側と下流側に分けられる。次に、下流側配管に振幅の大きいモード形状が現れる共振点の振動を抑えるために、上流側配管に第2継手を設置する。その際、最良モデルのように下流側が共振する振動数が上流側配管の反共振点と一致するように第2継手の位置を調節する。これにより、上流側配管が加振されても、上流側配管の振動は小さく抑えられるので、結果として下流側配管に伝達する振動エネルギーも抑制できる。反対に、最悪モデルのように下流側が共振する振動数が上流側配管の共振点と一致すると、上流側配管に大きな振動が発生して、下流側配管に振動エネルギーが伝達してしまう。

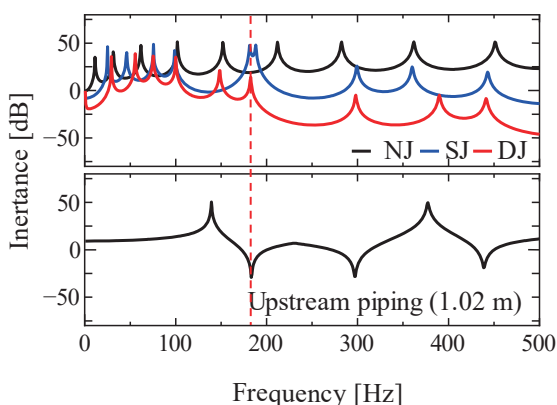
なお、最良モデルにおいて150 Hz付近と390 Hz付近に上流側配管単体の共振点が存在しているが、これらの振動数に対応する2段設置の固有モードDJ1とDJ4を見ると、下流側配管のモード形状は全体的に節のような状態となっており、上流側配管が共振しても下流側配管に振動エネルギーが伝達しにくいと考えられる。

4. 結言

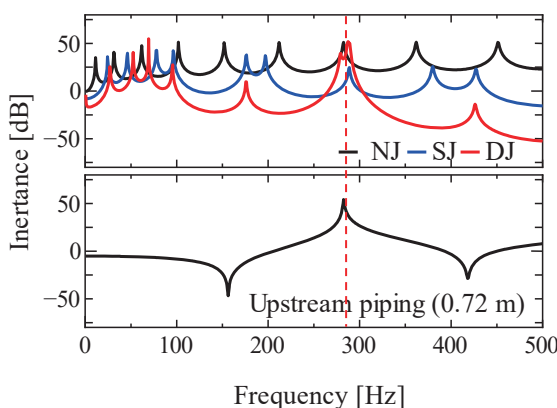
フレキシブル継手の2段設置による配管振動の低減メカニズムを解明するため、直線状配管を対象として実験と数値計算の両面から検証を行った。本実験では、フレキシブル継手としてシリコンパイプを利用した簡易的な実験装置を用いたものの、継手の2段設置による振動低減効果を再現することに成功した。そして、この直線状配管を解析的に取り扱い、継手を設置することによる振動特性の変化について調べた。その結果、第1継手を設置することで上流側配管と下流側配管の連成の度合いが小さくなり、上流側配管と下流側配管とが別々の振動特性を有することがわかった。第2継手を設置した場合も、上流側配管の振動特性のみが変化した。このとき、下流側配管が共振する振動数で上流側配管が反共振するように第2継手の設置位置を調整することで、上流側配管の振動が抑えられ、下流側配管に振動が伝達しにくくなることを示した。このように上流側配管の振動特性を調整して振動伝達を抑制することが、フレキシブル継手の2段設置による配管振動の低減メカニズムであると考えられる。

参考文献

- 1) 日本騒音制御工学会編, 建設設備の騒音対策2(配管系の騒音対策), 技報堂, 1999.
- 2) 白木 秀児, 田辺 恵一, 盆子原 康博, 近藤 孝広: “配管系の振動低減に関する研究(第3報, フレキ2段挿入による配管振動低減効果の検証)”, 新菱冷熱中央研究所報, Vol.13, pp.1-9, 2006.



(a) 最良モデル



(b) 最悪モデル

図10. 配管全体および上流側配管単体に対する伝達関数の比較

- 3) 白木 秀児, 田辺 恵一, 盆子原 康博, 近藤 孝広:
“配管系の振動低減に関する研究 (第 4 報, フレキ 2
段挿入設置法を用いた現場対策事例)”, 新菱冷熱中央
研究所報, Vol.14, pp.27-33, 2007.
- 4) 盆子原 康博, 近藤 孝広, 白木 秀児, 坂本 裕一
郎: “フレキシブル継手と剛体円板を用いたポンプ配
管系の振動低減対策 (直線状配管を対象とした検討)”,
日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.769, pp.2232-2239,
2010.
- 5) 近藤 孝広, 綾部 隆, 末岡 淳男: “部分構造合成法
を援用した伝達剛性係数法の提案 (直線状はり構造物
の線形自由および強制振動解析)”, 日本機械学会論文
集 C 編, Vol.62, No.596, pp.1277-1284, 1996.