

# 膜加圧を利用した遮音構造に関する基礎的研究

## その 2 共振周波数の上昇要因と反力治具設置方法の検討

### A BASIC STUDY ON SOUND INSULATION STRUCTURE BY USING INFLATED MEMBRANE

#### Part 2 An examination of raising factors of resonance frequency and installation of counterforce jigs

小泉 穂高<sup>\*1</sup>, 松岡 明彦<sup>\*2</sup>, 小林 正明<sup>\*3</sup>, 石田 琢志<sup>\*1</sup>, 西村 正治<sup>\*4</sup>

*Hodaka KOIZUMI, Akihiko MATSUOKA, Masaaki KOBAYASHI, Takushi ISHIDA, and Masaharu NISHIMURA*

It is difficult to insulate facility noise which contains much energy at low frequencies because heavy and stiff insulation structure is required. We have researched combination structure of a steel plate and inflated membrane for the purpose of improving insulation performance at low frequencies of walls and doors. In the previous paper, inflated membrane raised first resonance frequency and increased insulation performance at low frequencies of the steel plate. This paper reports raising factors of resonance frequency of insulation structure by using inflated membrane and installation of counterforce jigs.

**Keywords :** *Inflated membrane, Insulation performance, Low frequency, Stiffness law*  
膜加圧, 遮音性能, 低周波, 剛性則

## 1. はじめに

送風機や空気圧縮機, ボイラー等の設備機器騒音やトンネル工事の発破音は低周波数成分が非常に大きく, 遮音対策が困難であることが多い。一般に遮音材の透過損失は質量則<sup>1)</sup>に従うため, 高い遮音効果を得るためには相応の質量が必要となる。一方で, 板材の透過損失は 1 次共振周波数において最小となり, それより低い周波数では剛性に依存し上昇することが知られる<sup>2)</sup>。従って, 遮音材の質量を増やさずとも剛性を十分に高めることができれば, 低周波騒音の対策は可能であると言える。西村<sup>3)</sup>は金網で挟み込んだ薄膜の袋に空気圧を与える遮音構造を提案している。これは拘束された膜に張力を発生させることで, 軽量でありながら高い剛性を得ようとする構造である。

これまで筆者らは, 遮音壁や扉の遮音性能向上を目的として, 膜加圧を利用し板材の剛性を高める手法について検討している。既報<sup>4)</sup>において, 金網等で拘束した袋状薄膜を鋼板に密着させ加圧することで, 鋼板の 1 次共振周波数が上昇しそれ以下の周波数の遮音性能が向上する結果が得られた。膜加圧によってこのような複合構造の 1 次共振周波数が上昇する要因として, 鋼板の曲げ変形による剛性向上や, 鋼板と膜および拘束部材の一体化が考えられる。本報ではこれらの要素を検証し, 膜加圧による低周波数の遮音性能向上についてより詳細な検討を試みる。

加えて, 膜加圧時の反力構造についても別途検討する。既報の実験では, 加圧された膜が鋼板を押すことで生じる反力は実験室壁体に固定された治具で受けることにより, 鋼板に確実に力が伝わるような試験体構造としていた。実際の壁や扉への応用を考えると, 反力の受け方には自由度が高いことが望ましい。本報では反力治具の設置場所として実験室壁体を利用せず, 試験体自体に取り付ける構造について有効性を検討する。

## 2. 実験内容

実験は戸田建設(株)音響実験棟<sup>5)</sup>内の隣接する残響室と無響室で実施した。実験状況を図-1 に示す。両室の界壁として施工された厚さ 150 mm のコンクリートブロック壁(以下 CB 壁)の開口部に試験体を設置し, 音圧レベルにおける挿入損失を測定した。開口部および試験体の寸法は 1.2 m 角, 測定点は試験体の正面 1 m である。低周波数の SN 比を確保するため音源は破膜による衝撃音<sup>4)</sup>とし, 動特性 Slow による最大値を測定した。SN 比が 10 dB 以上確保されない周波数帯域は挿入損失の算出対象から除外した。

また試験体の振動特性を検証するため, 試験体および CB 壁にサーボ加速度計を設置し, 常時微動時における面外方向の加速度を測定した。測定点を図-2 に示す。A0 を入力, A1 を出力として伝達関数を算出し試験体の共振周波数を確認する。A2~A5, B1 は一部実験条件で測定し振動モードを算出する。

\*1 戸田建設(株)技術開発センター 修士(工学)

\*2 戸田建設(株)技術開発センター

\*3 戸田建設(株)技術開発センター 博士(工学)

\*4 N ラボ 工学博士

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Ph. D.

N. Lab., Dr. Eng.

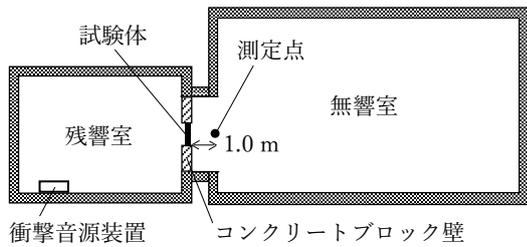


図-1 実験状況 (断面図)

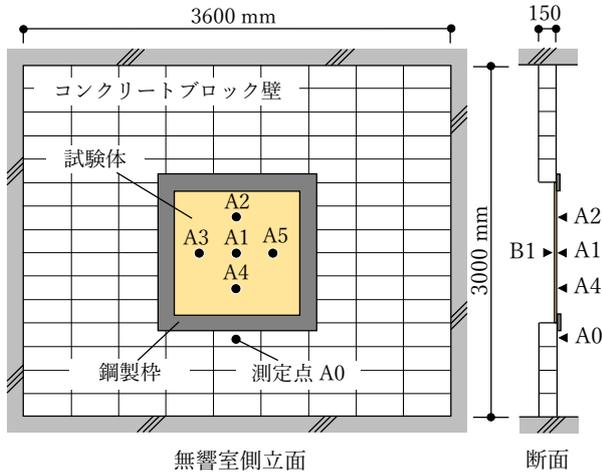


図-2 振動加速度の測定点

### 3. 実験 1：共振周波数上昇要因の検討

#### 3.1 試験体

試験体は表-1 に示す 9 条件である。袋状薄膜、溶接金網、鋼管、鋼板を CB 壁の開口部に設置する。構成イメージを図-3 に示す。条件 4～9 の鋼板は CB 壁に固定された鋼製枠に四周をボルト留めする。条件 1～3, 7～9 では CB 壁に固定治具を設置し、袋状薄膜に空気を注入して所定の内圧まで加圧する。条件 5, 6 は打ち出し加工によって膜加圧時の変形を模擬して成型した鋼板であり、鋼板中央の変位はそれぞれ 8.8, 14.2 mm である。条件 7～9 では通常の鋼板を用いて、中央変位が 8.8, 7.0, 5.0 mm となるように袋状薄膜を加圧した。なお鋼板は厚さ 1.6 mm, 鋼管は直径 48.6 mm, 長さ 1.2 m, 溶接金網は線径 5 mm, 網目間隔 50 mm である。

#### 3.2 実験結果

条件 1～3 の挿入損失を図-4 に示す。いずれも板材である鋼板を用いない構造であるが、条件 1 は 8 Hz, 条件 2 は 10 Hz, 条件 3 は 12.5 Hz を境にそれ以下の周波数で挿入損失が大きく上昇する。図-5 に示す伝達関数を見ると、これらの境となる周波数付近が 1 次共振周波数となっていることを確認できる。また既報<sup>4)</sup>の結果と同様に、袋状薄膜の内圧が同じ場合、薄膜の拘束に用いる部材の剛性が高いほど、1 次共振周波数は上昇し低周波数の挿入損失が向上する。加圧時の圧着により拘束部材の剛性が薄膜に寄与され、高剛性な複合構造体となることが考えられる。この結果から、構成部材に板材を用いない場合においても、袋状薄膜を溶接金網等で拘束し加圧することで

表-1 試験体 (実験 1)

条件	試験体の構成
1:	袋状薄膜 4k Pa
2:	袋状薄膜 4k Pa + 溶接金網
3:	袋状薄膜 4k Pa + 溶接金網 + 鋼管 2 本
4:	鋼板 1.6 mm
5:	曲げ鋼板 1.6 mm (変位 8.8 mm)
6:	曲げ鋼板 1.6 mm (変位 14.2 mm)
7:	鋼板 1.6 mm (変位 8.8 mm) + 袋状薄膜 9.3k Pa + 溶接金網
8:	鋼板 1.6 mm (変位 7.0 mm) + 袋状薄膜 4.3k Pa + 溶接金網
9:	鋼板 1.6 mm (変位 5.0 mm) + 袋状薄膜 1.1k Pa + 溶接金網

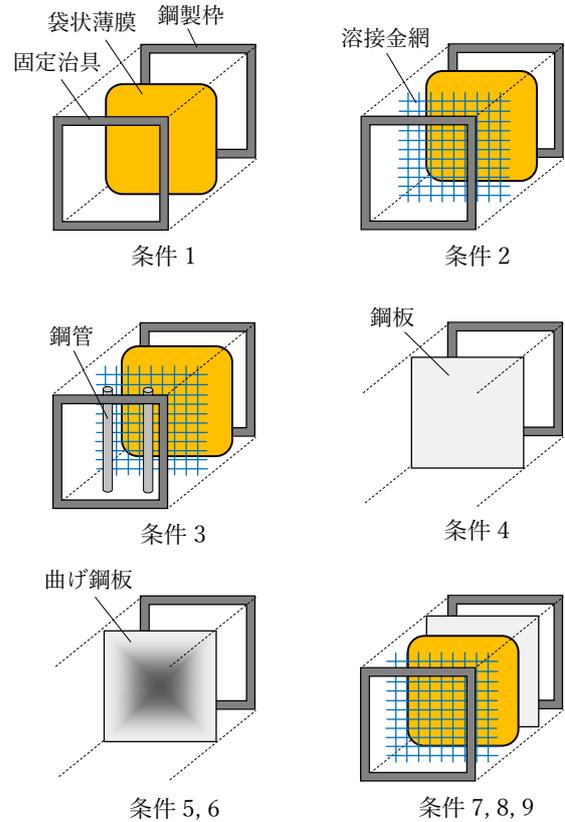


図-3 試験体の構成イメージ (実験 1)

ある程度剛な構造となり、低周波数の遮音性能が得られるものと言える。

条件 4～7 の挿入損失を図-6, 伝達関数を図-7 に示す。条件 4～6 は全て同厚の鋼板であるが、50 Hz 以下における挿入損失の傾向に違いが見られる。鋼板に変位を与える前の条件 4 は 16 Hz で最小となるが、条件 5 (変位 8.8 mm) は 25 Hz, 条件 6 (変位 14.2 mm) は 40 Hz で最小となり、それ以下の周波数における挿入損失が上昇する。伝達関数を見ると、条件 4～6 はそれぞれ約 16 Hz, 25 Hz, 37 Hz が 1 次共振周波数となり、挿入損失が最小となる周波数と対応する。なお条件 6, 7 の挿入損失は 16 Hz で顕著に低下しているが、試験体ではなく周囲 CB 壁の特性に起因すると思われる<sup>4)</sup>。これらの結果から、鋼板に曲げ変形を加えることで 1 次共振周波数が上昇し、低周波

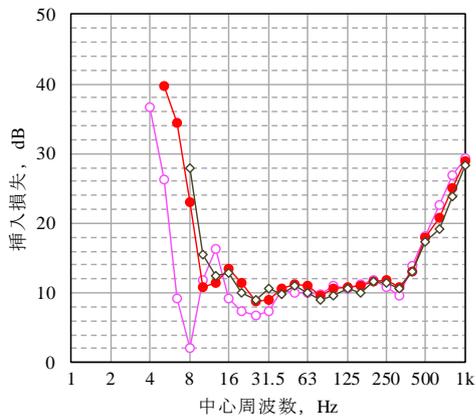
数の遮音性能が向上することを確認できる。条件 7 は鋼板と袋状薄膜の複合構造であり、挿入損失は 50 Hz を境にそれ以下の周波数で上昇する。加圧による鋼板変位は条件 5 と同じ 8.8 mm であるが、50 Hz 以下の挿入損失は条件 7 の方が明らかに高い。伝達関数を見ると、条件 7 は約 46 Hz に大きなピークが発生している。それ以下の周波数にも局所的にピークが見られるが、板と膜の複合構造であり単純板とはみなせないことが影響していると考えられる。

条件 7~9 の挿入損失を図-8、伝達関数を図-9 に示す。条件 7~9 は構成部材が同様であり、加圧量の違いによって鋼板変位および袋状薄膜の内圧が異なっている。50 Hz 以下の挿入損失は先程と同様に鋼板変位が大きい条件ほど高い。伝達関数を見ると条件 8 は 28 Hz 付近、条件 9 は 24 Hz が 1 次共振周波数であり大きなピークが発生しており、挿入損失が低くなる周波数と対応する。

条件 4, 7~9 の振動モードを図-10 に示す。条件毎に伝達関数で大きなピークが見られた周波数の振動

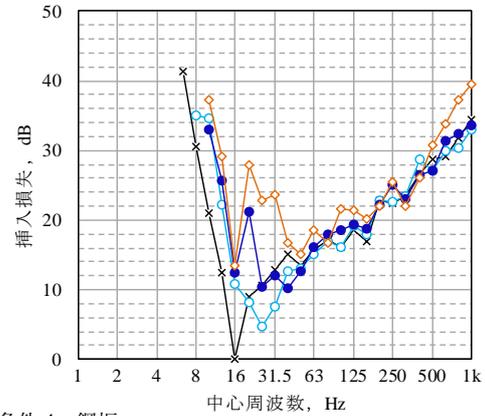
モードを示している。条件 4 のみ B1 の測定を省略している。振動モードはいずれも面外の同方向に並進する形状を示し、四辺支持された単一板の 1 次モードと同様の形状である。モード振幅は中央点 A1 で最大となり、反対面の B1 は A1 と同相かつ同程度の振幅幅であることから、膜加圧によって鋼板と拘束部材が連成した振動となっていることが考えられる。条件 7 の 46 Hz は 1 次共振周波数ではない可能性があるが、モード形状は他の条件と同様である。このことから、板と膜の複合構造では明確な 1 次共振周波数が表れるとは限らないものの、挿入損失は 1 次モードで見られるような面が同方向に並進する周波数において小さくなり、それ以下の周波数で上昇することが考えられる。

以上の結果から、鋼板と袋状薄膜の複合構造では鋼板が曲げ変形することに加え、溶接金網等の剛性が寄与された高張力の袋状薄膜および鋼板が連結されることで高剛性な構造となり、共振周波数が上昇するものと考えられる。



- 条件 1: 袋状薄膜 4k Pa
- 条件 2: 袋状薄膜 4k Pa + 溶接金網
- ◇ 条件 3: 袋状薄膜 4k Pa + 溶接金網 + 鋼管

図-4 挿入損失 (条件 1~3)



- × 条件 4: 鋼板
- 条件 5: 曲げ鋼板 (変位 8.8 mm)
- 条件 6: 曲げ鋼板 (変位 14.2 mm)
- ◇ 条件 7: 鋼板 (変位 8.8 mm) + 袋状薄膜 9.3k Pa + 溶接金網

図-6 挿入損失 (条件 4~7)

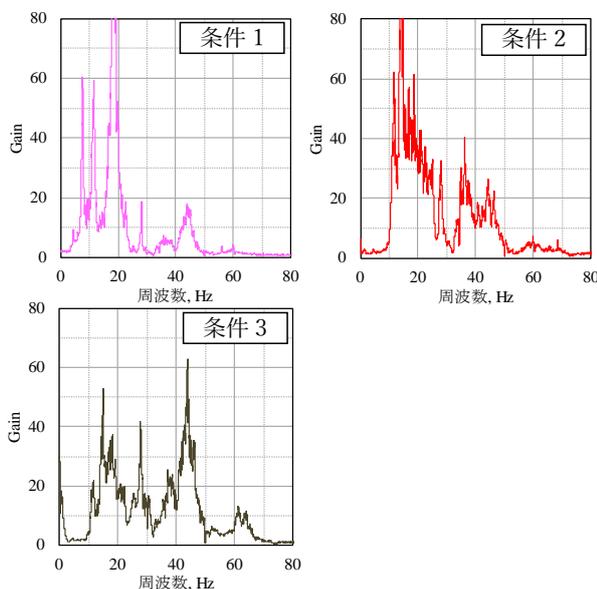


図-5 伝達関数 (条件 1~3)

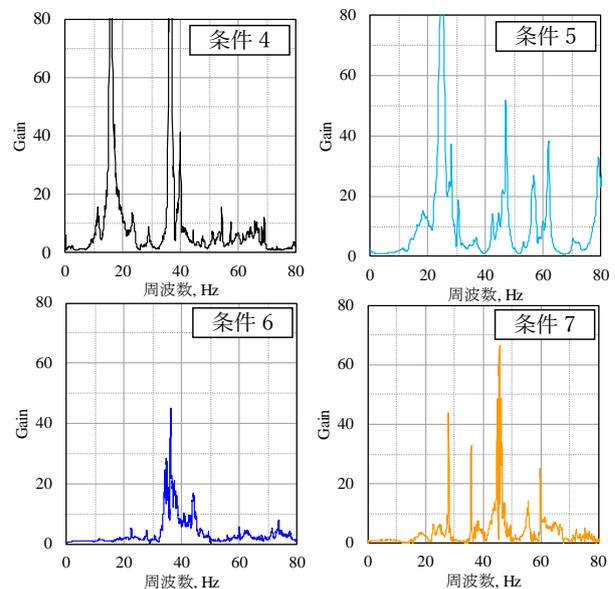
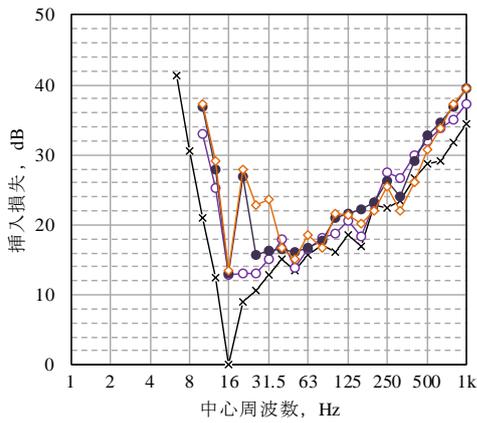


図-7 伝達関数 (条件 4~7)



- × 条件4：鋼板
- ◇ 条件7：鋼板（変位 8.8 mm）+ 袋状薄膜 9.3k Pa + 溶接金網
- 条件8：鋼板（変位 7.0 mm）+ 袋状薄膜 4.3k Pa + 溶接金網
- 条件9：鋼板（変位 5.0 mm）+ 袋状薄膜 1.1k Pa + 溶接金網

図-8 挿入損失（条件4, 7~9）

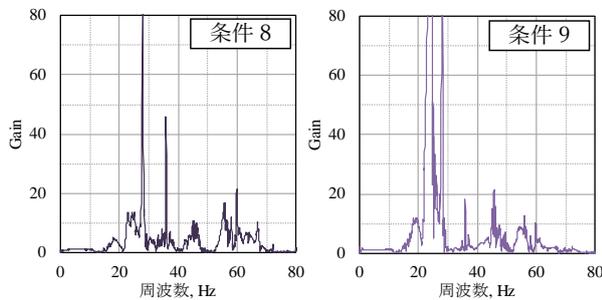


図-9 伝達関数（条件8, 9）

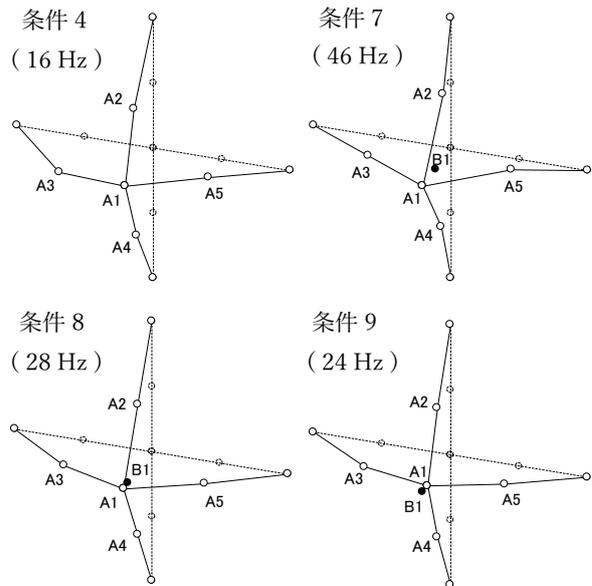


図-10 振動モード（条件4, 7~9）

表-2 試験体（実験2）

条件	試験体の構成
10	鋼板 1.6 mm（変位 8.8 mm）+ 袋状薄膜 6.7k Pa + 溶接金網 + 反力治具（間隔 70 mm）
11	鋼板 1.6 mm（変位 8.8 mm）+ 袋状薄膜 2.8k Pa + 溶接金網 + 反力治具（間隔 30 mm）

## 4. 実験2：反力治具設置方法の検討

### 4.1 試験体

試験体は表-2 に示す 2 条件である。構成イメージを図-11 に示す。実験 1 の試験体では加圧時に鋼板に作用する力に対し CB 壁に固定された治具が反力壁の役割を担っていた。一方、条件 10, 11 では曲げ変形する鋼板自体に取り付けられた反力治具によって抵抗する構造となる。袋状薄膜の寸法は 600×600 mm であり、設置範囲は鋼板面積に対し 1/4 である。反力治具は鋼板を貫通するボルトに断面 30×30 mm、厚さ 3 mm の山形鋼を固定する構造とした。袋状薄膜の設置スペースとなる反力治具と鋼板の間隔は 70 mm または 30 mm である。

### 4.2 実験結果

条件 10, 11 および比較のため条件 4, 7 の挿入損失を図-12 に示す。条件 10, 11 の挿入損失はいずれも 40 Hz で最小となり、それ以下の周波数では条件 7 と同様に大きく上昇する。条件 10, 11 の伝達関数を図-13 に示す。いずれも明確な 1 次共振周波数の判断は困難であるが、35 Hz 付近に大きなピークが発生しており挿入損失の傾向と対応する。従って、加圧時の反力を受ける部材は必ずしも試験体外部の剛な物体に設ける必要はなく、鋼板自体に取り付けた場合でも共振周波数は上昇し低周波数の遮音性能が得られるものと言える。

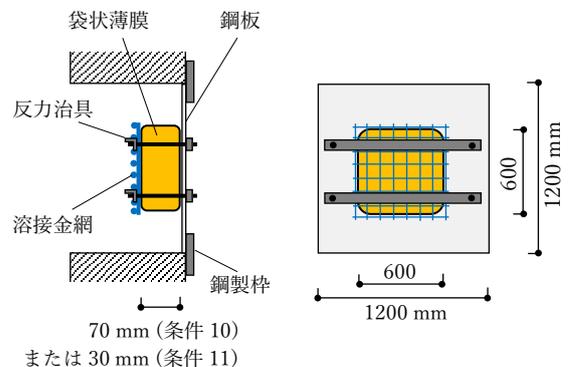
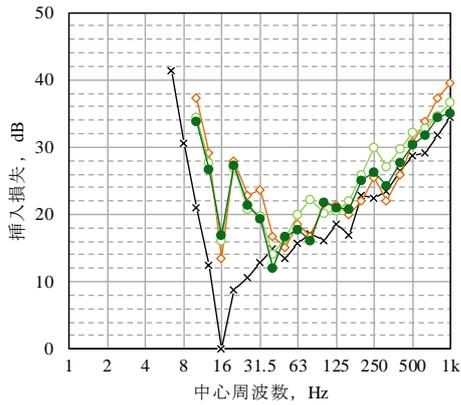


図-11 試験体の構成イメージ（実験2）

条件 10, 11 は膜設置スペースの違いにより、ふくらんだ膜の大きさや内圧は異なるが、鋼板変位および挿入損失、伝達関数の傾向は同様である。従って、加圧による共振周波数の上昇量は鋼板や拘束部材の変形量に大きく依存し、各部材が連結されていれば膜自体の状態はあまり影響を及ぼさないことが考えられる。なお条件 10, 11 の鋼板変位は条件 7 と同様であるが、伝達関数でピークが現れる周波数はやや低く、31.5~40 Hz の挿入損失も低くなっている。これは加圧範囲の違いにより鋼板変位の分布が異なるためと考えられる。



- × 条件 4 : 鋼板
- ◇ 条件 7 : 鋼板 (変位 8.8 mm) + 袋状薄膜 9.3k Pa + 溶接金網
- 条件 10 : 鋼板 (変位 8.8 mm) + 袋状薄膜 6.7k Pa + 溶接金網 + 反力治具 (間隔 70 mm)
- 条件 11 : 鋼板 (変位 8.8 mm) + 袋状薄膜 2.8k Pa + 溶接金網 + 反力治具 (間隔 30 mm)

図-12 挿入損失 (条件 4, 7, 10, 11)

条件 10, 11 の振動モードを図-14 に示す。実験 1 と同様に、伝達関数で大きなピークが見られた周波数において、面が同方向に並進するモード形状である。ただし、モード振幅が A1 に比べ A3, A5 の方が大きい点は実験 1 の結果と異なっている。これは膜の設置範囲が鋼板面積に対し 1/4 であることや、反力を受ける治具の固定点が鋼板面上に存在することに起因する圧力分布の違いによるものと考えられる。

### 5. まとめ

膜加圧を利用した遮音構造について、加圧時に共振周波数が上昇し低周波数の遮音性能が向上する要因、および膜が鋼板を押しこむことで生じる反力を受ける部材の設置方法について検証し、以下のことを明らかにした。

- 1) 鋼板に曲げ変形が生じることで、共振周波数が上昇し低周波数の遮音性能が向上する。
- 2) 加圧によって拘束部材の剛性が付加された高張力の膜および鋼板が連成されることで、共振周波数が上昇し低周波数の遮音性能が向上する。
- 3) 加圧時の遮音性能は鋼板面が同方向に並進する振動モードとなる共振周波数において低くなり、それより低い周波数では向上する。
- 4) 加圧された膜が鋼板を押しこむことで生じる反力を受ける部材は同じ鋼板上に設けることができる。

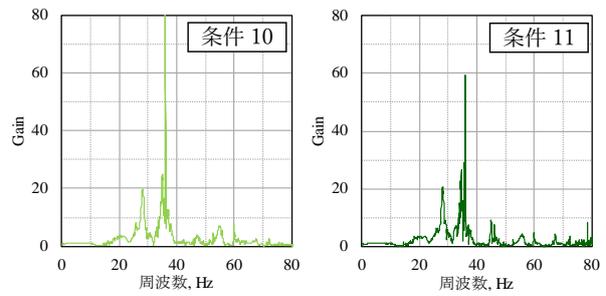


図-13 伝達関数 (条件 10, 11)

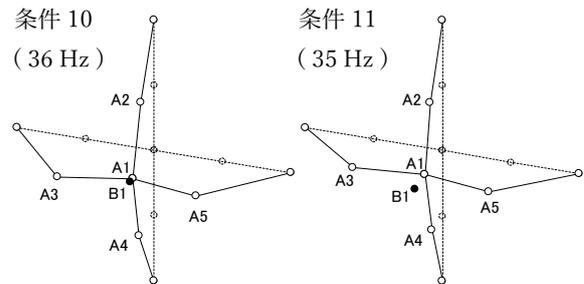


図-14 振動モード (条件 10, 11)

### 参考文献

- 1) 前川純一, 森本政之, 阪上公博, “建築・環境音響学,” 共立出版, 2000
- 2) 白木万博, “騒音防止設計とシミュレーション,” 応用技術出版, 1987
- 3) 西村正治, 薄膜と空気圧を利用した遮音可変型軽量遮音構造, 音響学会誌 vol. 71, 546-553, 2015
- 4) 小泉徳高ほか, 膜加圧を利用した遮音構造に関する基礎的研究, 戸田建設技術研究報告集 vol. 43, 2017
- 5) 土屋裕造ほか, 戸田建設新音響実験施設の音響特性, 日本音響学会講演論文集, 1263-1264, 2012. 9