U.D.C 534.883

錘を付加した二重空気膜構造の遮音特性に関する実験的検討
―付加した錘の設置間隔および膜内の空気圧が音響透過損失に及ぼす影響―

貝瀬　智昭*

要　約：　付加質量膜は張力が与えられた膜に一定の間隔で錘を付加することで低音域の遮音性能が向上できる機構であり，普通膜と組み合わせることで遮音性能の広帯化が可能である。しかし，その機構は膜面に張力を与えるための器具や装置等を膜の端部に設置する必要があり，パネル化して利用することは難しい。筆者は空気を注入することで膜面に張力が与えられる二重空気膜構造に錘を付加することで上記課題の解決を試みた。本研究では錘を付加した二重空気膜構造の遮音特性を明確にすることを目的とし，錘を付加したクッション形式およびタイ形式（エアマット）それぞれの二重空気膜構造について錘の設置間隔および膜内の空気圧をパラメータとした音響透過損失を評価した。その結果，以下の知見が得られた。

（1）　錘を付加した二重空気膜構造はいずれの形式も付加質量膜と同様に低音域において遮音量が上昇し，錘の設置間隔および内圧を調整することで遮音量がピークとなる周波数のチューニングが可能となる。

（2）　エアマットは錘の有無によらず，内圧をかけた状態では落し糸の拘束により面的に分割された固有振動数が影響し高音域において遮音性能の低下が生じる。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　音響透過損失，二重空気膜構造，付加質量膜，空気圧，錘の設置間隔，タイ形式，クッション形式

目　次：

1. はじめに
2. クッション形式二重空気膜構造の遮音特性
3. タイ形式二重空気膜構造の遮音特性
4. まとめ

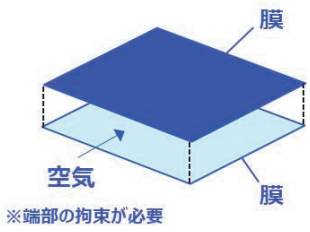
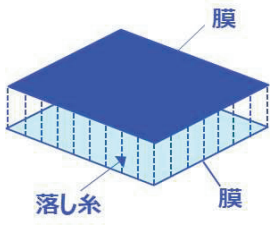
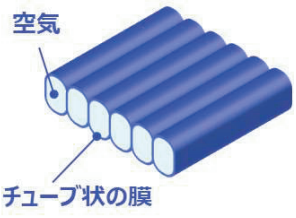
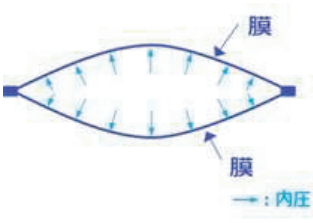
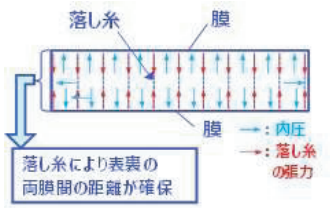
1. はじめに

質量則に依存せず，膜等の軽量な材料を用いて低音域の遮音性能を得ることができる機構として，橋本らが考案した付加質量膜[1) 2)]がある。その機構は，張力が与えられた膜に一定の間隔で錘を設置し，膜が面的に分割されることで低音域の遮音性能が向上する。さらに錘の重さや設置間隔，張力を変化させることで遮音特性をチューニングすることもできる。橋本らは，この応用として，付加質量膜と錘が設置されない普通膜を組み合わせ二重膜とすることで遮音特性の広帯域化が可能となることも報告している[2)]。

しかし，上述した膜機構を利用する場合には膜端部を引っ張り膜に張力を与える器具や装置等が必要となるため，パネル化して利用することは難しい。

上述した器具や装置等を利用せずとも膜面に張力を与える膜構造として，袋状の膜を空気圧で膨らませて形状を保持する二重空気膜構造[3)]がある。その構造は主に表１に示

表１　二重空気膜構造の種類

形式	クッション形式 （エアクッション）	タイ形式 （エアマット）	チューブ形式 （エアビーム）
概念図			
断面			

＊技術研究所　振動・音響グループ

すタイ形式，クッション形式，チューブ形式の 3 つの構造形式に分類される[3]。クッション形式は袋状の膜の端部を拘束し，空気を注入することで 2 枚の膜が独立した構造である。タイ形式はエアマットとも呼ばれ，表裏の膜どうしを落し糸と呼ばれる部材でつなぎ，空気圧をかけるとその糸に張力が働き，表裏の両膜間の距離が確保される構造である（以後，エアマットと記す）。チューブ形式は管状にした膜体に空気を注入しエアビームを形成し，それを平面的に連結させることでマット状に成形することができる。

これらの二重空気膜構造の片面に錘を付加することで，端部に張力を与える器具等がなくとも膜内に空気を注入するだけで普通膜と付加質量膜を組み合わせた軽量かつ広範な周波数範囲に有効な遮音性能を有する機構が見出せる可能性がある。特にエアマットは膜に張力を与える際に膜端部を剛な材料で拘束し反力を得るための拘束材を必要としないため，膜全体の重量の軽量化も期待できる。

そこで筆者は，錘を付加した二重空気膜構造の遮音特性を明らかにすることを目的とし，クッション形式およびタイ形式それぞれの二重空気膜構造単体とそれに錘を付加した条件の音響透過損失を比較した。また，付加した錘の設置間隔および二重空気膜内の空気圧（以後，内圧と記す）をパラメータとした音響透過損失を評価した。なお，本報告は既に発表の文献[4]に一部加筆しまとめたものである。

2. クッション形式二重空気膜構造の遮音特性

2.1 試験体

試験体の概念図を図 1 に示す。本試験体は袋状の膜と錘で構成され，膜の片面に錘が設置されている。袋状の膜は 0.07 mm 厚のポリエステルとナイロンの合成樹脂材である。本実験では橋本ら[1]の付加質量膜を構成する錘の重さ（5 g）を参考に選定し，磁石を直径 25 mm の円板状に加工した 1 個あたり 5.4 g の錘を使用した。試験体の四周端部には空気の注入で膜材の膨張による試験体端部の変形を防止するために強固な木枠（幅 80 mm，厚さ 24 mm）を設け，膜端部を拘束した。試験体のサイズは縦 0.92 m × 横 0.98 m である。

2.2 実験方法

実験では，RC 壁（厚さ 200 mm）に設けられた縦 0.94 m × 横 1 m の開口に図 1 の試験体を設置した。試験体と開口の間に生じた隙間には油粘土を充填し，その影響を排除した。本実験の測定ブロックダイアグラムを図 2 に示す。実験では，JIS A 1416：2000「建築物及び建築部材の空気音遮断性能の測定方法」に準拠した方法により，図 2 に示す試験装置を用いて音響透過損失を求めた。試験音源には広帯域雑音を使用し，音源室と受音室のそれぞれに定めた測定点において 15 秒間の等価音圧レベルを計測した。また，受音室の等価吸音面積は音圧レベルの計測と同様に試験音源に広帯域雑音を使用し，ノイズ断続法により受音室に定めた測定点の残響時間を計測し算出した。本実験条件を表 2 に示す。実験条件は試験体の内圧および設置間隔をパラメータとした。

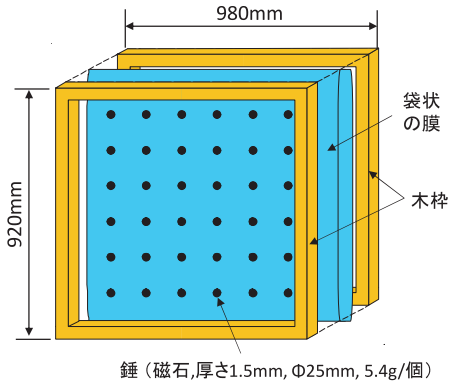


図 1　クッション形式二重空気膜構造の試験体概念図

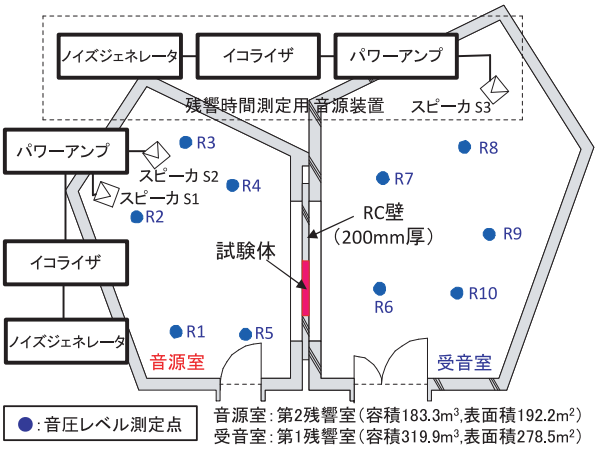


図 2　測定ブロックダイアグラム

表 2　実験条件

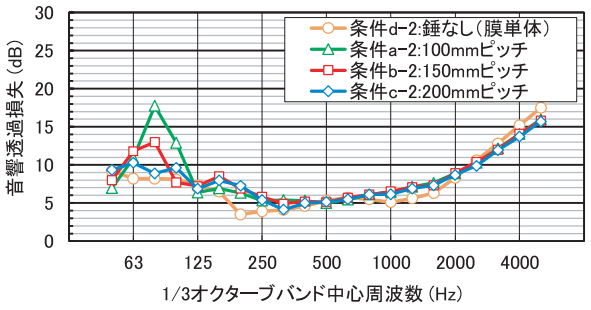
条件	加圧条件	錘の設置条件			試験体の面密度 (kg/m²)
		錘の有無	設置間隔 (mm)	設置個数	
a-1 a-2 a-3	0pa 500Pa 1kPa	錘あり 材質：磁石 直径：25 mm 厚さ：1.5 mm 重さ：5.4g/個	100	49 個	0.549
b-1 b-2 b-3	0pa 500Pa 1kPa		150	25 個	0.343
c-1 c-2 c-3	0pa 500Pa 1kPa		200	16 個	0.269
d-1 d-2 d-3	0Pa 500Pa 1kPa	錘なし(膜単体)			0.137

2.3 実験結果

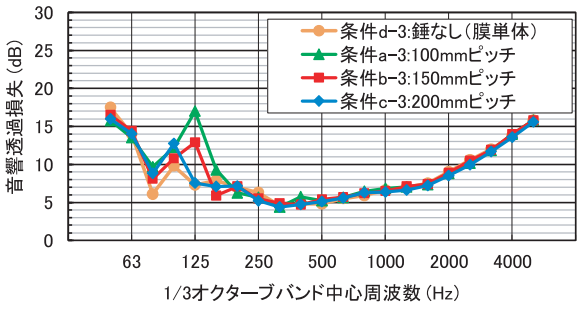
2.3.1 錘の有無と設置間隔が及ぼす影響

錘の設置間隔が遮音性能に及ぼす影響度を把握することを目的とし，内圧（500 Pa，または 1000 Pa）を一定とし錘の設置間隔の異なる条件の比較結果を図 3 にまとめて示す。

図 3（1）より，500 Pa 加圧時における錘を付加したクッション形式の音響透過損失は錘の設置前の条件 d-2 と比較して設置間隔 200 mm の条件 c-2 では 63 Hz と 100 Hz 帯域で遮音量が 2 dB 程度と若干高いが他の周波数帯ではほとんど変化が確認されず付加質量膜[1]のような遮音特性が確認されなかった。次に条件 c-2（設置間隔 200 mm）より細かく錘を配置した設置間隔 150 mm の条件 b-2 を

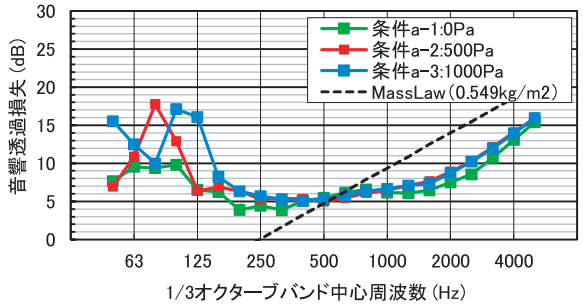


(1) 500Pa 加圧時
(条件 a-2, 条件 b-2, 条件 c-2, 条件 d-2 の比較)

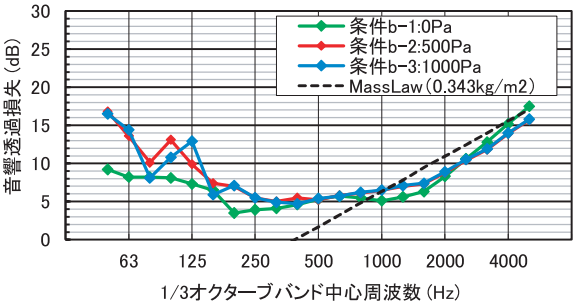


(2) 1000Pa 加圧時
(条件 a-3, 条件 b-3, 条件 c-3, 条件 d-3 の比較)

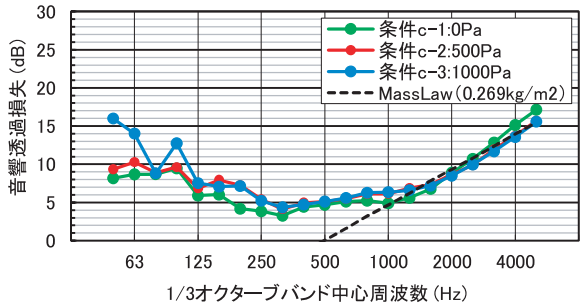
図 3　クッション形式二重空気膜構造における錘の設置間隔の影響



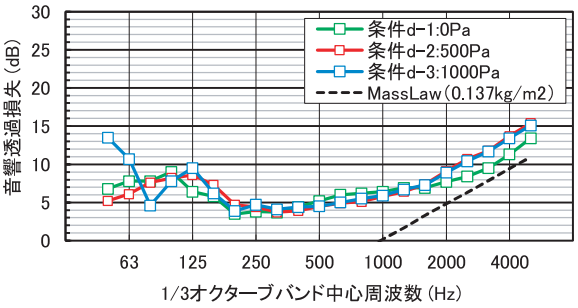
(1) 条件 a-1～条件 a-3 の比較



(2) 条件 b-1～条件 b-3 の比較



(3) 条件 c-1～条件 c-3 の比較



(4) 条件 d-1～条件 d-3 の比較

図 4　クッション形式二重空気膜構造における内圧の影響

見ると 80 Hz 帯域に遮音量がピークとなる周波数（以後，fp と記す）が顕著に確認され，その遮音量は錘の設置前の条件 d-2 と比較して 5 dB 程度の高い。さらに細かく錘を配置した設置間隔 100 mm の条件 a-2 は設置間隔 150 mm の条件 b-2 と fp が同じ周波数帯ではあるが，その遮音量が錘の設置前と比較して 10 dB 程度と大幅に上昇していた。一方，図 3 (2) より，さらに内圧を上昇させた 1000 Pa 加圧時の音響透過損失は 500 Pa 加圧時と比較すると fp が 80 Hz 帯域から 125 Hz 帯域にシフトするものの，その遮音量の上昇傾向はほぼ同程度であった。以上の結果から，錘の設置間隔が狭くなるに従い，fp の遮音量が大きくなる傾向にあることが分かった。ただし，錘の設置間隔が広く内圧が低い場合では付加質量膜と同様の遮音特性が成立しないことも示唆された。

また，遮音効果の得られる周波数範囲は錘の設置間隔が 150 mm の条件と比較して間隔が狭い 100 mm の方が 500 Pa および 1000 Pa 加圧時のいずれもピーク周波数を中心に高周波側に若干広がる傾向にあった。これは，錘の間隔が狭くなることで，錘で分割されたエリアの固有振動数（以後，f_{0m} と記す）が高周波側に移行した効果が寄与したためと考えられる。

2.3.2　内圧が及ぼす影響

内圧の影響度を確認するため，錘の設置間隔（150 mm）を一定とした条件の音響透過損失を比較した。錘の設置条件ごとに内圧を比較した結果を図 4 にまとめて示す。各図にはランダム入射時の質量則（膜と錘の面密度の合算値より算出）を合わせて示す。

図 4 (4) より錘なしの各加圧条件の結果を見ると，1000 Pa 加圧時の 50 Hz 帯域において加圧前の条件 d-1 と比較して 5 dB 程度の遮音量の上昇が確認されたが，他の周波数帯では加圧の有無に関して音響透過損失に変化は現れなかった。50 Hz 帯域において遮音量が上昇した要因として，加圧により膜面に張力が与えられ剛性が高まり，膜の外形寸法に依存する固有振動数（以後，f_{0M} と記す）が

80 Hz 帯域までシフトしたことで剛性則領域の遮音性能が得られたためと考えられる。

一方，図 4（1）～（3）より錘を付加した各条件を見ると，内圧をかけることで fp が 50～125 Hz 帯域の低周波領域に現れ，内圧が倍上昇するに従い，高周波側に 1/3 オクターブバンド程度シフトする傾向が確認された。その遮音量は錘の設置条件によって異なるが，遮音量が最大となる条件 a-2（内圧 500 Pa，設置間隔 100 mm）および条件 a-3（内圧 1000 Pa，設置間隔 100 mm）において 8～10 dB 程度であり，最小となる条件 c-3（内圧 1000 Pa，設置間隔 200 mm）では 3 dB 程度であった。

以上の結果より，クッション形式二重空気膜構造に錘を付加した場合でも橋本らが考案した付加質量膜[1] と同様に低周波領域の遮音性能を向上させる効果があり，錘の設置間隔や内圧を調整することで遮音量がピークとなる周波数をチューニングできることが分かった。

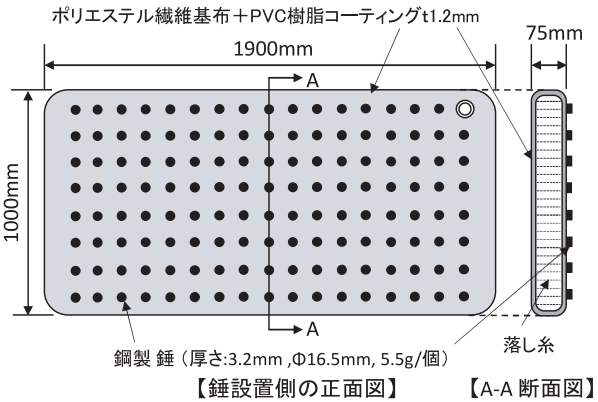


図 5　タイ形式二重空気膜構造の試験体概念図

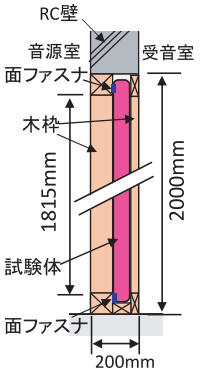


図 6　試験体の設置方法

3. タイ形式二重空気膜構造の遮音特性

3.1　試験体

試験体の概念図を図 5 に示す。試験体のサイズは縦 1.9 m × 横 1.0 m であ空気を注入した際の厚さは 75 mm である。本試験体はエアマットと錘で構成され，エアマットの片面には錘が設置されている。エアマットは表面材が 1.2 mm 厚の PVC 膜（ポリエステル繊維基材＋PVC 樹脂コーティング）であり，その膜の表面と裏面を連結している落し糸で構成される。落し糸は 10 mm 程度の間隔で多数配置されている。本実験では前章と同様に 5 g 程度の錘を選定した。実験に使用した錘は 3.2 mm 厚の鋼板を直径 16.5 mm の円板状に加工したものであり，1 個あたり 5.5 g である。

3.2　実験方法

本実験では，RC 壁（厚さ 200 mm）に設けられた縦 2 m × 横 1 m の開口に図 5 の試験体を設置した。開口内に試験体を設置するために，図 6 のように試験体の音源室側と受音室側のそれぞれに木枠を配置し，試験体を音源側の木枠に面ファスナで貼付した。RC 壁と木枠および木枠と試験体それぞれの隙間には油粘土を充填し，隙間の影響を排除した。本実験では，前章と同様に JIS A 1416：2000 に準拠した方法により，図 2 に示す試験装置を用いて音響透過損失を求めた。実験条件を表 2 に示す。実験では，前章と同様に試験体の内圧と錘の設置間隔をパラメータとした。

表 3　実験条件

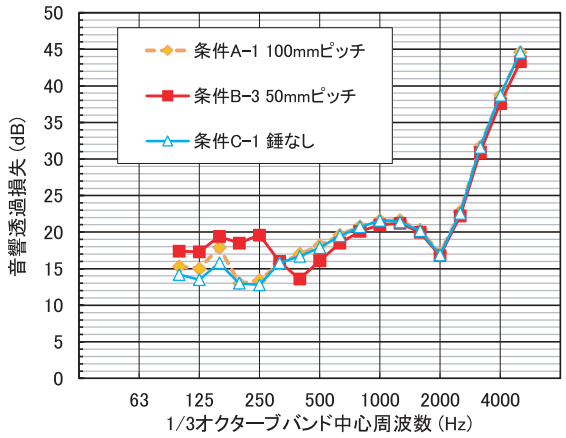
条件	加圧条件	錘の設置条件		試験体の面密度
		錘の有無	錘の間隔と設置数	
A-1 A-2	20kPa 35kPa	錘あり （5.5g/個）	設置間隔：100mm 設置数：135 個	3.74kg/m^2
B-1 B-2 B-3 B-4	0Pa 10kPa 20kPa 35kPa		設置間隔：50mm 設置数：506 個	4.95kg/m^2
C-1 C-2	20kPa 35kPa	錘なし	-	3.3kg/m^2

3.3　実験結果

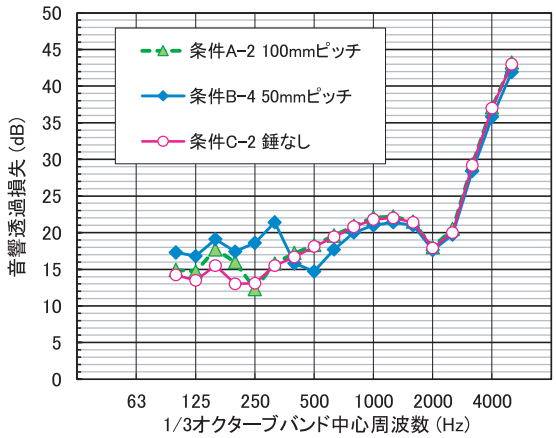
3.3.1　錘の有無および設置間隔の影響

錘の有無および錘の設置間隔の影響度を確認するため，内圧（20 kPa または 35 kPa）を一定とした条件を比較した結果を図 7 にまとめて示す。

図 7（1）より 20 kPa 加圧時の錘を付加したエアマットは，錘を設置する前の条件 C-1 と比較して設置間隔 100 mm の条件 A-1 では 100～160 Hz 帯域で遮音量が 2 dB 程度若干高いが他の周波数帯ではほとんど変化が見られなかった。また，設置間隔を 50 mm に細かく錘を設置した条件 B-3 では 250 Hz 帯域に生じていたディップ周波数が 315 Hz 帯域へシフトするとともに，遮音性能が向上する周波数範囲が 250 Hz 帯域まで拡張し，その遮音量は 4～5 dB 程度高い。一方，図 7（2）よりさらに内圧を上昇させた 35 kPa 加圧時は，錘を設置する前の条件 C-2 と比較して設置間隔 100 mm の条件 A-2 では 20 kPa 加圧時と同様に 160 Hz と 200 Hz 帯域の一部の周波数帯で遮音量が 2～3 dB 程度若干高いが他の周波数帯ではほとんど変化がない。また，設置間隔を 50 mm とした条件 B-4 では遮音性能が向上する周波数範囲が 20 kPa 加圧時よりもさらに拡張し，250 Hz 帯域に生じていた遮音量が極小となる周波数が 315 Hz 帯域へシフトするとともに，300 Hz 帯域まで拡張した。その周波数帯の遮音量は錘を設置する前の条件 C-2 と比較して 4～5 dB 程度高い。以上の結果より，エア



（1）20kPa 加圧時
（条件 A-1, 条件 B-3, 条件 C-1 の比較）



（2）35kPa 加圧時
（条件 A-2, 条件 B-4, 条件 C-2 の比較）

図 7　エアマットにおける錘の有無および設置間隔の影響

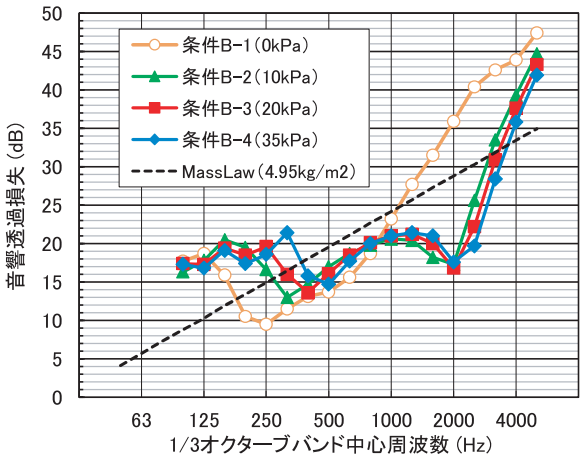


図 8　錘を付加したエアマットの内圧の影響
（条件 B-1～条 B-4 の比較）

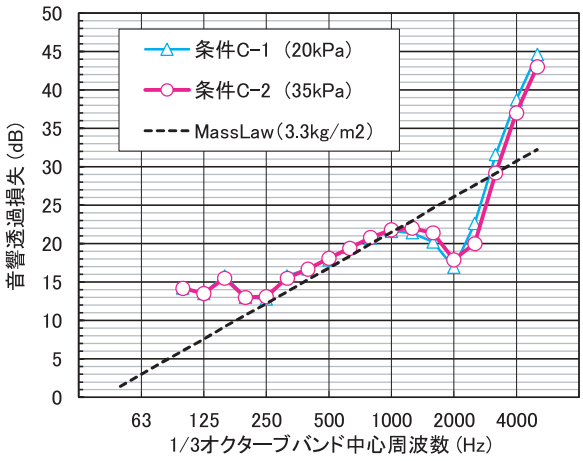


図 9　錘なしエアマットの内圧の影響
（条件 C-1 と条 C-2 の比較）

マットに錘を付加した場合でもクッション形式の場合と同様に橋本ら[1]の考案した付加質量膜と同様の遮音効果が現れ，設置間隔の調整により遮音特性のチューニング可能であることが分かった。

3.3.2　エアマット内の空気圧の影響

内圧の影響度を確認するため，錘の設置間隔（50 mm）を一定とした条件 B-1～条件 B-4 を比較した結果を図 8 に示す。また，内圧を変化させた錘なしの条件 C-1（20 kPa）と条件 C-2（35 kPa）を比較した結果を図 9 に示す。両図には，表 3 に表記した面密度をもとに算出したランダム入射時の質量則計算値を併記した。内圧有無による影響を確認するため，条件 B-1 と条件 B-2～条件 B-4 を比較すると内圧をかけた状態の遮音特性は，内圧をかけない状態の条件 B-1 と比較すると低音域では条件 B-1 で生じていた 200～250 Hz 帯域のディップ周波数において遮音量が 5～10 dB 程度高く，付加質量膜の遮音効果が確認された。

一方，高音域では，2000 Hz 帯域にディップ周波数が生じ，条件 B-1 と比較すると 1250～4000 Hz 帯域において遮音量が 6～18 dB 程度低い。この要因として，エアマットに内圧がかかると，落し糸の張力が膜に対して点荷重として働き，それにより膜面が拘束されることで面的に分割される部分の共振が生じたためと考えられる。また，上述した現象とともに，落し糸に張力が働くことで落し糸が裏表の膜の結合部となり，そこを振動が伝搬し，遮音欠損となるサウンドブリッジが生じたためと推察される。また，内圧変化の影響を確認するため，図 8 より内圧の異なる条件 B-2～条件 B-4 を比較すると，内圧を変化させた際の錘を付加したエアマットの遮音特性は，低音域では条件 B-2（10 kPa）で 300 Hz 帯域に生じたディップ周波数が内圧を倍上昇させるに従い 1/3 オクターブバンド程度ずつ高域側にシフトする傾向が確認され，遮音量が得られる周波数範囲の拡張が認められた。これより前章にて示したクッション形式と同様に内圧を調整することで遮音特性のチューニングが可能であることが分かった。一方，高音域の遮音特性は，ディップ周波数が 2000 Hz 帯域に生じ質量則の計算値と比較して大幅に低下していた。また，内圧を倍上昇させるに従い，2500 Hz 帯域以上では 2～3 dB 程度低

下する傾向が見られた。この傾向は，図 9 に示す錘を設置しない条件 C-1 と条件 C-2 でも同様の傾向であった。この要因として上述した落し糸により面的に分割された部分の固有振動数が内圧の上昇とともに高域側へシフトしたことがあげられる。

4. まとめ

本稿では，錘を付加したクッション形式およびタイ形式それぞれの二重空気膜構造について錘の有無，錘の設置間隔および内圧の異なる条件の音響透過損失を比較した結果を示した。その結果，以下に示す知見を得た。

（ⅰ） クッション形式およびタイ形式ともに錘を付加することで，橋本ら[1)] の考案した付加質量膜と同様に低音域の遮音性能を向上させることができ，錘の設置間隔を狭めると，遮音量が上昇するともに遮音量が得られる周波数範囲も拡張する。ただし，錘の設置間隔が広く膜内の空気圧が小さい場合には付加質量膜の遮音特性が成立しない可能性がある。

（ⅱ） 内圧の上昇に伴い，錘により分割された部分の固有振動数が高域にシフトし，低音域における遮音量が得られる周波数範囲を拡張させることができる。

（ⅲ） タイ形式二重空気膜構造の場合，錘の有無に関係なく内圧をかけると，落し糸に張力が働き，その糸の拘束により面的に分割された部分の固有振動数が生じるため，高音域において大幅な遮音性能の低下が生じてしまう。

謝　辞

謝本実験を遂行するにあたり，サンプルをご提供いただいた太陽工業株式会社　関係各位にはこの場を借りて深く感謝の意を表す。

参考文献

1）橋本典久・桂充宏・安岡正人他：付加質量の付いた有限膜の遮音特性，日本建築学会計画系論文集，第 410 号，pp. 1-8，1990 年 4 月
2）橋本典久・桂充宏・西川嘉雄他：付加質量の付いた膜の遮音特性―ドーム用膜材料への適用に関する遮音実験―，日本建築学会計画系論文集，第 475 号，pp. 1-7，1995 年 9 月
3）河端昌也・石井一夫：落し糸間の膜面に曲率がある二重空気膜構造板の有効剛性評価，日本建築学会構造系論文集，第 499 号，pp61-67，1997 年 9 月
4）貝瀬智昭・井上諭：錘を付加した二重空気膜構造の遮音特性に関する実験的検討―二重空気膜構造に付加した錘の設置間隔および膜内の空気圧が音響透過損失に及ぼす影響―，日本建築学会学術講演梗概集，pp 311-312，2023 年 7 月

EXPERIMENTAL STUDY ON SOUND INSULATION CHARACTERISTICS OF AIR-INFLATED DUAL MEMBRANES STRUCTURE WITH ADDITIONAL WEIGHTS

—Influence on Sound Transmission Loss due to the Difference in Distance between Two Weights and in Air Pressure of Air Inflated Dual Membranes

T. Kaise

The membrane with additional weights（MAW）is a mechanism that improves sound insulation performance at low-frequency range by attaching weights at regular distance on a tensioned membrane and can be combined with ordinary membranes to widen the frequency range in which sound insulation performance is achieved. However, it is difficult to use such a mechanism as a panelized form because it requires devices or instruments to tension the membrane surface at the edge of the membrane. The author tried solving the above problem by using air-inflated dual membranes structure which can be tensioned by injecting air into the membranes and attaching weights on them. In this paper, the air-inflated dual membranes structure of the cushion type and the tie type（air mat）evaluated the sound transmission loss as parameters of the distance between two additional weights and the air pressure applied to the membrane. As a result, the following findings were obtained.

(1) In both types of double air membrane structures with additional weights, the sound insulation performances increased at low-frequency range as in the MAW, and it is possible to tune the frequency at which the sound insulation value peaks by adjusting the distance between two weights and internal pressure of membranes.

(2) In the tie-type double air membrane structure, with or without additional weights, when internal pressure was applied, the sound insulation performance in the high frequency range decrease. This is because the natural frequency of the areas that were divided by the restraints of the drop cord was affected.