付加質量の付いた有限膜の遮音特性

SOUND INSULATION CHARACTERISTICS OF FINITE RECTANGULAR MEMBRANE WITH ADDITIONAL WEIGHTS

橋本典久*, 桂 充宏**, 安岡正人***, 藤井弘義****

Norihisa HASHIMOTO, Mituhiro KATURA, Masahito YASUOKA and Hiroyosi HUIII

Through experiments concerned with the transmission of sound under conditions of normal incidence of plane wave, it has been confirmed that attaching weights on a membrane improves the sound insulation ability in a frequency range from natural frequency of the whole membrane to that of the partial area divided by the additional weights. This mechanism is as follows :

The additional weights act on the membrane to form divided modal shapes with the same phase, and that modal shapes interfere with the normal mode of the whole membrane. As a secondary effect, the additional weights prevent high-order vibrations of the membrane. By these total effects, a great deal of attenuation of sound occurs and the transmission loss is over thirty or forty decibels in the most efficient case. This method is simple, light-weight, possible to tune, and effective in a lower frequency range and hence the authors think that this method has the possibility of developing into a useful one in the field of noise control.

Keywords : membrane, additional weight, sound insulation, lower frequency range

1. 序

音響分野における膜の研究は、主に振動性状の評価が興味の対象であり、かつ工学的により重要な板の振動に対する数学的取り扱いの前段的な意味合いが強い。この膜振動の基礎理論に関しては小平¹⁾の書物に詳しい。実用的な見地からの膜の研究としては、マイクロホンに関して過去幾多の研究があり、早坂²⁾や鈴木³⁾など現在もなお種々の条件下での研究が進められている。しかし、騒音防止や音響調整といった面からの膜の利用に関しては、吸音材としての研究⁴⁾は散見されるものの、遮音材としての研究はほとんど見当たらない。この理由としては、実用周波数帯域における制御の困難さもさることながら、基本的には軽量さゆえの遮音性能の欠如にその原因があることは明白であり、遮音材としては実用的な利用価値がないというのが一般的な認識であった。当研究ではこの逆の観点から膜を見直し、振動制御が可能である点あるいは軽量である点などの特質に着目し、遮音材としての利用を計ろうというものである。

張力を与えて張った膜の遮音特性を実験的に検討している段階で、この膜に付加質量を取り付けて面的に分割してやると、低周波数領域での遮音性能が向上すること

が確認された。しかもこの性能は、膜と付加質量を合わせた場合の質量則による遮音量より遥かに大きく、またその効果の生じる周波数範囲もかなりの広帯域にわたるものであった。図-1はこの方法の模式図であるが、付加質量を取り付けた膜（以下これを付加質量膜と呼ぶ）のこの効果は、膜の大きさ、面密度、材料種別、張力などにより変化し、また付加質量の配置や数、質量の影響により種々の変化を示すことがわかった。本報告では、まず付加質量膜の基本的な遮音特性と効果の呈示を行い、上記要因の変化により生じる遮音性能への影響を実

図-1 付加質量膜の例

当研究の一部は、平成元年度音響学会秋季研究発表会にて発表。

* 鴻池組技術研究所 研究員

** 鴻池組技術研究所 研究員

*** 東京大学 教授・工博

**** 東洋大学 講師

Konoike Construction Co. Ltd, research engineer
Konoike Construction Co. Ltd, research engineer
University of Tokyo, professor, Dr. of engineering
Toyo university, lecturer

験的に究明するとともに、低音域で遮音性能が向上する機構を膜振動と音響放射に関する実験的・解析的考察により明らかにしている。

2. 付加質量膜の遮音効果に関する実験

2.1 実験方法および試験体

遮音実験は図—2に示す簡易無響室内において実施した。開口部の大きさは最大20 cm×30 cmであり、平面波垂直入射条件での実験となる。音源にはホワイトノイズを用い、音の入射側(P_i)と透過側(P_r)の2点にマイクを設置して同時測定を行い、FFT分析と多数回平均を行った後に(1)式によりレベル差を算出した。

$$\Delta L = (L_{i1} - L_{r1}) - (L_{i0} - L_{r0}) \dots \dots \dots (1)$$

L_{i1}, L_{r1} : 試験体が有る時の音圧スペクトルレベル (dB)

L_{i0}, L_{r0} : 試験体が無い時の音圧スペクトルレベル (dB)

この実験方法により得られたレベル差を、本論文では遮音効果量と記すこととするが、これは基本的に垂直入射時の音響透過損失に相当するものとなる⁵⁾。参考としてアルミ板の測定結果を図—3に示したが、有限板の遮音特性を良く表しており、また値自体も垂直入射の音響透過損失に良く一致しており妥当な結果となっている。

実験に用いた膜は市販の塩化ビニールシートであり、厚さ0.14 mm、面密度0.256 kg/m²と薄いものである。

図—2 遮音実験の方法・機器構成

図—3 アルミ板の遮音効果測定例
(厚み0.3 mm, 大きさ10 cm×15 cm)

膜の張力に関しては、実験実施中は極力一定に保ったが、経時的な緩和や張りむらのため、時間的あるいは面的に若干の変化を生じている場合もある。

なお当報文においては、遮音機構究明のため、条件が明確な平面波垂直入射条件での実験ならびに解析について述べているが、この他に残響室—残響室における拡散入射時の遮音実験も一部行っており、この場合にも同様の効果が得られることを確認している。

2.2 付加質量膜による遮音効果の基本特性

遮音実験により得られた付加質量膜の遮音性能について示す。図—4(a), (b)は膜のみの場合および付加質量膜の場合の遮音特性の測定結果である。図—4(a)の膜だけの場合の結果においては、膜の大きさが有限であることからその遮音特性は固有振動モードのピークを持ち、図中の171 Hzは(長辺, 短辺)に関する(1, 1)モード、288 Hzは(3, 1)モードの固有振動モードである。この膜に付加質量が付くと、図—4(b)に示すように膜全体の(1, 1)モードの固有振動数は付加質量の質量の影響により105 Hzへと移行し、一方、新たに付加質量により区切られた膜の部分【分割部分】の固有振動数によるピークが現れてくる(354 Hzまたは393 Hz)。この2つの固有振動数で挟まれた周波数範囲においては、膜のみの場合の反共振点でのdipなどと比べて遥かに大きな遮音効果が得られ、当研究ではこの帯域での効果を対象として“付加質量膜の遮音効果”あるいは略して遮音効果と呼ぶ。

図—4 付加質量膜の遮音効果の基本特性
[(a) 膜のみの場合, (b) 付加質量膜の場合]

2.3 各種条件変化の遮音効果への影響

この付加質量膜の遮音効果を規定すると考えられる膜および付加質量の条件を抽出して、その影響を実験的に究明した。測定条件および測定試験体の概要は図—5に示すとおりである。まず図—6は膜の分割寸法を変化させた場合の結果である。分割を細かくするに依じて付加質量の数が増すことになるため、膜全体の1次の固有振動数は徐々に低下し、分割部分の固有振動数はその寸法が小さくなるため高周波数側に移行する。したがって遮音効果の生じる周波数帯域は分割が細くなるに依じて広がるが、遮音効果の大きさ自体はほとんど変化しない。このような特性を示す理由は、分割部分の固有振動数から遮音効果のdipに至る傾きが分割が細くなるにしたがって緩くなっていくとともに、同時に膜全体の固有振動数のピークが尖鋭でなくなってくるため、すなわち減衰が大きくなっていくためである。分割寸法の変化に対するこれらの傾向は、膜の大きさを変えた場合の実験においても同様の結果となっている。

膜の大きさ、分割寸法の条件は変えずに付加質量の質量のみを0.7 g, 1.4 g, 2.8 gと重くしていった場合の結果が図—7である。この場合には、付加質量の質量の

図—5 付加質量膜の測定条件と試験体

図—6 付加質量による分割寸法の変化の影響
(膜面積 10 cm × 15 cm, 付加質量 0.7 g)

影響で膜全体の固有振動数は低音側に移行するが、分割部分の固有振動数はほとんど変化しないため、遮音効果の周波数帯域は低周波数側に広がってゆくことになる。またこの場合には分割寸法を変化させた場合とは異なり、遮音効果は付加質量の質量の変化とともに増大してゆく結果となる。分割部分の特性に関しては、付加質量の質量の違いによりその部分の拘束の度合いが変化するため、固有振動数がわずかに変化するとともに、dipへの傾きが質量が大きくなるとともに緩くなる。そのため遮音効果のdip周波数位置は低音側に移動する形となる。

膜の大きさを変えた時の結果の1例を図—8に示した。この場合には張力の張りむらがあるためあまり明確ではないが、これ以外の測定結果も含めて全般的に、膜の大きさが大きくなると付加質量膜の遮音効果が減少する傾向が見られた。

図—9には参考として張力がない場合の測定結果を示した。膜だけの場合、付加質量が付いた場合の特性とほとんど平坦となっており、膜としての遮音特性は全く見られなくなる。

以上より、平面波垂直入射条件での結果ではあるが、

図—7 付加質量の質量変化による影響
(膜面積 10 cm × 15 cm, 分割寸法 3.54 cm × 3.54 cm)

図—8 膜の大きさによる影響
(分割寸法 3.54 cm × 3.54 cm, 付加質量 0.7 g)

付加質量膜の遮音効果に関する基本的な特性を明確化することができた。また、これらの結果により、各種条件による付加質量膜の遮音特性の変化を定性的に推定することも可能であると考ええる。

3. 付加質量膜の遮音機構の究明

前章で示された付加質量膜の遮音効果について、その遮音機構の詳細を究明するため膜の振動性状および音響放射性状に関して検討した結果を示す。

3.1 付加質量膜の振動モード

図—10(a), (b), (c) は、膜の中央に付加質量が1個付いた状態において、その付加質量の重さを順次重くしていった時の遮音効果の測定結果である。これらの結果において特徴的な点を挙げると次のようになる。付加質量の重さを重くしてゆくとまず図—10(a) における膜の

図—9 張力がない場合の膜の測定結果
(膜面積 10 cm×15 cm, 付加質量 0.7 g)

みの場合の f_{21} のピークが徐々に小さくなり、0.18 g で一旦完全に消えた後に再びピークが現れ [円内拡大説明図参照]、このピークが再び大きくなり振動数が低下してきた f_{31} のピークと一つになり、分割部分のピークを形造る。そして図—10(c) の 0.97 g 以上になると、この周波数はほとんど変化しなくなる。これらのスペクトルの変化が生じる状況を膜の振動モードとしてとらえると、図—11 のような状態が考えられる。付加質量の重さが軽い場合には振動モードがあまり変化せず、膜だけの場合の M1～M3 に近い形で振動しているが、付加質量の重さが重くなるにしたがい M2, M3 のモードは M2' のモードに移行して一つのモードになるものと考えられる。このモードはちょうど、付加質量により膜を分割した形であり、またこれらの一連の変化により、付加質量膜の遮音効果が膜全体の 1 次の固有振動数と分割部分の固有振動数の間で生じていることは明らかである。

図—11 付加質量による膜の振動モード変化の推定図

図—10 付加質量の重さを順次増していった時の遮音特性の変化

円内拡大
説明図

る。なお図一10によれば付加質量による分割の効果が明確に現れてくるのは約0.5gであり、これは膜の面密度で換算すると2cm²分の重さとなり、かなり軽量なもので十分な効果が生じていることになる。

3.2 モード間の干渉効果

付加質量膜の遮音効果は膜全体の固有振動数と分割部分の固有振動数の間の周波数帯域で生じる。この帯域に対する両振動モードの影響を、膜だけの場合と付加質量膜の両方についての1次元モードに関するモデル計算を用いて考察する。ただし、これはあくまで現象説明のための単純化した取り扱いであり、実際の振動状態や音響放射機構を記述したものではない。

いま膜だけの場合を考えて、1次モードと2次モードの影響を仮に(2)式のように表す。

$$\zeta(x) = (1-r) \sin \frac{\pi x}{a} + r \sin \frac{2\pi x}{a} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $0 \leq r \leq 1$

これに対し付加質量の膜の場合には、図一11のモードを参考にして以下の2通りについて計算する。

$$\zeta(x) = (1-r) \sin \frac{\pi x}{a} + r \left| \sin \frac{2\pi x}{a} \right| \dots\dots\dots (3)$$

$$\zeta(x) = (1-r) \sin \frac{\pi x}{a} - r \left| \sin \frac{2\pi x}{a} \right| \dots\dots\dots (4)$$

これらの3式について r の変化に対する振動モードおよびモード全体についての実効値 (rms) を算出したものが図一12、図一13である。この図一13のモデル計算結果から推測されるように、付加質量膜が膜だけの場合より実効値が小さくなるためには、分割部分の振動モードが全体の膜の振動モードを打ち消すような干渉的な働きがなくてはならないことになる。実際の現象は、振動数や振幅、減衰などの要因や音響放射条件が入ってくる

図一12 パラメーター r の変化による1次モードから2次モードへのモード変化 (左より (2) 式, (3) 式, (4) 式の場合)

図一13 1次モードから2次モードへのモード変化時の実効値計算結果

図一14 振動モードの比較 ((a) 付加質量膜, (b) 膜のみの場合)

ためこのように単純ではないが、その基本的な機構としてはここで示した形と同様なことが音響放射について成立しているものと考えられる。このモード間の連成による干渉的な働きの存在は図一10(c) に示される鋭い dip の形成からも伺える。

3.3 分割モードの遮音特性

図一14は、膜のみの場合と付加質量膜の場合の高次モードの比較図である。これらの振動数は共に等しくなる。付加質量膜のモード(a)に関して、振動モードの半波長に相当する部分を一つの音源と見なすと、音源間の距離に比べて音の波長は遥かに長く、またすべての音源が同位相で動くことになるから、これらの音源からの音響放射においては指向性や音源間の干渉は生じず、その遮音特性は一つの音源が単独に存在している場合の特性と相似になる。一方、モード(b)の場合にはこのような単純な形とはならず、各部からの位相干渉を考慮した膜全体の特性としてとらえねばならない。以上のことから、付加質量膜の遮音特性は次のようになる。付加質量膜の分割部分の特性は、膜のみの場合の遮音特性を膜の大きさが小さくなった分だけ高周波数側へシフトした特性となり、また膜全体の特性は付加質量による質量増加分だけ低周波数側へシフトした形となる。付加質量膜全体の特性はこれらが組み合わされたものとなり、両者の1次の固有振動数間の周波数帯域においては、先に示した干渉的な働きにより付加質量膜の遮音効果が生じることになる。図一4(b)の付加質量膜の基本特性はこのように形造られていると考えられる。また副次的な効果ではあるが、付加質量が離散的に取り付けられているため1次モード以外の高次モード振動が出にくくなり、その帯域の放射音が抑えられることも要因の一つとして挙げられる。以上が付加質量膜の遮音効果の機構であり、遮音特性の決定要因であると考えられる。

4. 遮音機構の解析的検証

これまで考察した付加質量膜の遮音機構を検証する目的で、この機構を解析的に表現して計算を実行し、その結果が実測結果の傾向とよく対応し得るかどうかの検討を行った。

まず最初に、解析の基本となる膜のみの場合の音響透過損失の計算方法について示した。次に、付加質量膜の遮音特性は、前章の遮音機構の検討結果をもとに以下の方法により計算した。

1) 付加質量により分割された部分の音響透過損失

は、面積が小さくなった膜のみの状態として扱えることから、膜の音響透過損失計算方法をそのまま用いて、これを計算する。

2) 付加質量の付いた膜全体に関する遮音特性は、付加質量と膜の質量を均した均一な膜としてこれを取り扱い、かつ高次モードの影響を除き1次モードのみを対象とする。したがって、これも上記の計算方法に準じて計算が可能である。

3) 付加質量膜の遮音特性は、これら2つの遮音特性を組み合わせ、かつ膜全体の固有振動数と分割部分の固有振動数の間の帯域で、両固有モード間の連成による放射音の打ち消し合いが生じているとしてこれを計算する。

4.1 平面波垂直入射時の膜の遮音計算

付加質量膜の遮音特性評価の基本として、実験条件と同様に平面波垂直入射時の音響透過損失を計算する。入射平面波の音圧を p_i 、膜の透過側の膜面放射音圧を p_r とすると、この時の膜の変位は、図-15の座標系に関して、

$$\xi(x, y) = \frac{1}{\gamma} \sum_m \sum_n \frac{1}{\Gamma_{mn}} \cdot \frac{\int \int q(x', y') \phi_{mn}(x', y') dx' dy'}{\omega^2 - (\omega_{mn} + ik_{mn})^2} \cdot \phi_{mn}(x, y) e^{i\omega t} \dots (5)$$

となる⁶⁾。ここで、 $q(x', y')$ は膜に対する加振力であり $2p_i - 2p_r$ となり⁷⁾、 ω は入射波の角周波数、 ω_{mn} 、 k_{mn} は膜の (m, n) モードの固有角周波数と制動係数であり、各々

$$\omega_{mn} = \pi \sqrt{\frac{gT}{\gamma} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)} \dots (6)$$

T : 単位長さ当りの張力 (kg/m)

γ : 膜の面密度 (kg/m²)

$$k_{mn} = h_{mn} \omega \dots (7)$$

h_{mn} : 固有モードの減衰定数

である。また ϕ_{mn} は波動関数、 Γ_{mn} はその基準化因数であり

$$\phi_{mn}(x, y) = \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \dots (8)$$

$$\Gamma_{mn} = \int_0^b \int_0^a \phi_{mn}^2(x, y) dx dy = \frac{ab}{4} \dots (9)$$

と表される。ここで簡便のため、加振力に関してのみ膜面上の音圧を一定として取り扱うものとする

図-15 膜の計算座標

$$\int_0^b \int_0^a 2(p_i - p_r) \phi_{mn}(x', y') dx' dy' = 2(p_i - p_r) A_m A_n \dots (10)$$

$$\text{ただし } \begin{cases} m, n \text{ が偶数の時 } A_m = 0, A_n = 0 \\ m, n \text{ が奇数の時 } A_m = \frac{2a}{m\pi}, A_n = \frac{2b}{n\pi} \end{cases}$$

となる。この取り扱い、今回のように膜の寸法に比して音の波長が長い低周波数域では十分に成立すると考えられる。これらの結果より膜の振動速度 $\dot{\xi}$ は

$$\dot{\xi}(x, y) = \frac{2i\omega(p_i - p_r)}{\gamma} \sum_m \sum_n \frac{1}{\Gamma_{mn}} \cdot \frac{A_m A_n \phi_{mn}(x, y)}{\omega^2 - (\omega_{mn} + ik_{mn})^2} e^{i\omega t} \dots (11)$$

となる。膜からの放射音による膜面上の音圧は、

$$p_r(x, y) = \frac{i\omega\rho}{2\pi} \int_0^b \int_0^a \frac{e^{i(\omega t - kr)}}{r} \cdot \dot{\xi}(x', y') dx' dy' \dots (12)$$

$$\text{ただし } r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

であり、膜の放射パワーは、

$$W_r = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a p_r^*(x, y) \cdot \dot{\xi}(x, y) dx dy \dots (13)$$

となる。 ρ は空気の密度、 $*$ は共役複素数を表す。当計算におけるこの放射パワーの計算は、膜面を仮想的に分割しその代表点の音圧と振動速度により計算した。(13)式に関しては周知のように

$$\dot{\xi}^*(x', y') \dot{\xi}(x, y) = -\dot{\xi}(x', y') \dot{\xi}^*(x, y) \dots (14)$$

なる関係があるから、これを考慮して放射音圧の(12)式を整理すると

$$p_r(x, y) = -\frac{i\omega^2\rho(p_i - p_r)}{\pi\gamma} \sum_m \sum_n \left[\frac{1}{\Gamma_{mn}} \cdot \frac{A_m A_n}{\omega^2 - (\omega_{mn} + ik_{mn})^2} \times \int_0^b \int_0^a \frac{\sin kr}{r} \sin \frac{m\pi x'}{a} \cdot \sin \frac{n\pi y'}{b} dx' dy' \right] \dots (15)$$

となる。これより放射音圧 p_r を求め、この p_r を(11)式に代入すれば膜面の振動速度 $\dot{\xi}$ も決定することができる。

膜の透過損失は、入射パワー W_i と放射パワー W_r により

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_r}{W_i} \right) \dots (16)$$

として求められる。ここで入射パワーは

$$W_i = \frac{1}{2} \int_0^b \int_0^a \frac{|p_i|^2}{\rho c} dx dy = \frac{|p_i|^2 ab}{2\rho c} \dots (17)$$

である。また(15)式の2重積分の計算に関しては、特異点を除いて数値計算の精度を高めるため、

$$\frac{\sin kr}{r} = \frac{k}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \cos \{k\sqrt{1-s^2}(x-x')\} \cos \theta \times \cos \{k\sqrt{1-s^2}(y-y')\} \sin \theta ds d\theta \dots (18)$$

なる関係⁸⁾を用いて変換を行ったのち、Ledendre-Gaussの積分公式(4点公式)を用いて計算した。

4.2 付加質量膜の遮音効果の計算

分割部分の遮音特性は、先に述べたように膜のみの場合の上記の計算方法により求められる。ただし付加質量による分割は4点のみの拘束となることから、(8)式で与えられる四周を支持された振動モードとは異なり、付加質量部分および四周部分で変位を生じている。そのためこの固有振動数は(6)式で与えられる値より小さくなり、ここではこれを考慮して(6)式で与えられる固有振動数の0.6倍として計算している。これは、第1章の実験結果から求めた平均的値である。次に、膜全体の遮音特性は付加質量の総質量を膜面全体に均した均一値と考えて計算する。ただし、この場合には1次モードのみが卓越するという特徴を表現するため、(11)式に相当する振動速度を

$$\dot{\xi}(x, y) = \frac{2i\omega(p_i - p_r)}{\gamma} \cdot \frac{A_1 A'_1}{\Gamma_{11}} \cdot \frac{\phi_{11}(x, y)}{\omega^2 - (\omega_{11} + ik_{11})^2} e^{i\omega t} \quad (19)$$

$$A_1 = \frac{2a}{\pi}, \quad A'_1 = \frac{2b}{\pi}, \quad \Gamma_{11} = \frac{ab}{4}$$

$\phi_{11}, \omega_{11}, k_{11}$: (1, 1) モードの波動関数, 固有角周波数および制動係数

とした。これを用いた放射音圧, 放射パワーの計算手順は分割部分の場合と全く同じである。

付加質量膜の全体の周波数特性については、膜の振動速度および放射音に関する厳密な解析は困難であるので、ここでは遮音機構の検討結果を参照し、上記で計算された2つの遮音特性を組み合わせる形で、簡便的に放射パワーに関する差をとって、

$$W = |nW_p - W_0| \quad (20)$$

として計算した。ここで W_p は膜の分割部分について計

算される放射パワー, n はその分割総数, W_0 は膜全体に関して計算した放射パワーである。なお分割部の固有振動数以上の遮音特性は、分割部の特性をそのまま用いている。

4.3 計算結果と実測結果の比較

まず基本となる膜だけの場合の解析結果について示す。解析条件は第1章の実験試験体の条件に基づき、膜面積 $10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 面密度 0.256 kg/m^2 , 張力 21.2 kg/m とした。図—16(a)~(d) は減衰定数を変化させた場合の解析結果であり、実測結果は既に示した図—4(a) である。(a)~(c) は全周波数帯域とも減衰定数一定とし、その値を各々 $h=0.01, 0.03, 0.05$ とした場合の結果であり、(d) は減衰定数の周波数特性を仮に

$$h = 5.14/f + 1.61 \times 10^{-5} f \quad (21)$$

として計算したものである。この値は 0.63 g の軽量ピックアップを膜に取り付け、衝撃法により振動減衰を測定した結果を参考にしたものであり、膜に対するピックアップの重さやコードの影響を含むため正確なものとは言えず、単なる設定値にすぎない。これら4ケースの結果では、全体的な特性として (b), (d) の結果が比較の実測結果に近いものとなっている。第一共振点におけるピーク値が実測に比べやや大きくなっているが、これは減衰定数が明確でないことにあわせ、実測膜の張力に張りむらがあるため実測のピークの方が小さくでていることが考えられる。なおこれと同様に、実測値の高次モードの固有振動数は(6)式に与えられる理論値より小さくなっており、ここでの計算においてはこれを考慮して(6)式から得られる高次振動数の値を0.9倍して用いている。これら膜のみの場合の結果から、4.1で示した計算方法はほぼ妥当であると言え、これを用いて以下の付加質量膜の解析を行った。減衰定数の値は膜全体に関しては(21)式の値、分割部分に関しては全周波数域とも一率0.03として計算した。

図—17は、膜の分割寸法を変化させた時の結果である(実測結果は図—6)。計算結果の周波数特性は実測結果の特性を良く表しており、特に遮

図—16 膜のみの場合の計算結果(振動減衰定数の変化)

図—17 分割寸法の変化の影響(計算結果)

(膜面積 $10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 付加質量 0.7 g)

図一18 付加質量の質量変化の影響（計算結果）
（膜面積 10 cm×15 cm, 分割寸法 3.54 cm×3.54 cm）

図一19 膜の大きさによる影響（計算結果）
（分割寸法 3.54 cm×3.54 cm, 付加質量 0.7 g）

音効果の dip 周波数位置の現れ方は良く一致している。また値自体もほぼ妥当なものとなっている。図一18は付加質量の質量のみを変化させた場合の結果（実測結果は図一7）であるが、質量が増すことにより性能が向上する様子が良く表されており、また dip 周波数位置の変化も良く対応している。図一19は膜の大きさを変化させた時の結果（実測結果は図一8）である。膜の大きさが大きくなると遮音効果が小さくなる傾向が見られるが、これには膜の減衰定数の周波数特性設定値の影響も含まれ、また張力の差など実測結果の方の条件も明確でないため厳密な比較は出来ない。

これらの結果において、解析結果の傾向は実測結果と良く対応しており、また遮音効果の値自体と全般的にはほぼ近いものとなっている。したがって、解析的に検証したこれらの内容からも第3章で示した付加質量膜の遮音機構に関する考察はほぼ妥当なものであると言えよう。なお解析結果と実測結果の差となって表れている主な点は、分割部分の固有振動数付近の特性によるものであり、これは膜と付加質量の連成的な動きによるものであると考えられ、ここで示した簡便的な方法ではその表現に限界がある。

5. 結 語

張力を与えて張った有限な膜に付加質量を取り付けた

場合の遮音特性を実験的に究明し、低周波数領域において生じる付加質量膜の遮音効果の機構を実験的および解析的検討により明確化した。この効果は、付加質量膜全体の固有振動数と付加質量による分割部分の固有振動数の間で生じることから、数オクターブ程度の広帯域での遮音効果も期待でき、また質量則の遮音機構とも全く異なることから、軽量であるにもかかわらず大きな遮音効果を得ることができる。例えば図一7の実験結果の付加質量 2.8 g の例では面密度 1.8 kg/m²でありながら 125 Hz 近辺で 40 dB の遮音効果が得られている。ただし、拡散入射条件での測定も一部実施してはいるが、基本的な部分は小試料を対象とした平面波垂直入射時の結果であり、解析的にもその条件に基礎を置いているため、より一般的な拡散入射条件での遮音特性の評価も今後検討してゆく必要がある。実用的な観点から当方法を眺めると現状では対処すべき問題点が山積している点は否めないが、低周波数領域で大きな遮音性能が得られる可能性があること、低減効果およびその周波数を自由にチューニングできること、あるいは軽量で簡易な構造とすることができるとなど、騒音防止工法に適した特質を有している。騒音の制御・防止に関しては、低音域での改善を図れば格段に性能が向上するものが多数あり、これらに関して質量則に基礎をおく従来の遮音工法とは異なった、新たな利用方法が可能ではないかと考える。

謝 辞

実験および研究遂行に協力頂いた東洋大学・上野研究生（当時）および（株）鴻池組・伝法研究所の諸氏に、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小平吉男：物理数学・第一巻，現代工学社，pp. 236～431，昭和 49 年
 - 2) 早坂寿雄：円形振動膜の振動特性，日本音響学会誌，Vol. 32，No. 11，pp. 693～702，1976
 - 3) 鈴木久喜ほか 3 名：コンデンサーマイクロホンの膜振動の数値シミュレーション，日本音響学会騒音研究会資料，N88-5-20，1988
 - 4) 松井昌幸ほか 3 名：膜振動を利用した吸音器について，日本音響学会講演論文集，pp. 77～78，昭和 39 年 10 月
 - 5) 坂田展甫，大鶴 徹，山岸豪敏：円筒型遮音板の基礎的特性解析，日本建築学会計画系論文報告集，第 351 号，pp. 1～10，昭和 60 年 5 月
 - 6) P. M. Morse："Vibration and Sound"，ASA，pp. 172～209，1976
 - 7) 川井孝雄：一重板の遮音機構の解析，一円形板への平面波垂直入射一，日本音響学会誌，Vol. 29，No. 4，pp. 186～198，1973
 - 8) 田中 洪：矩形中空壁の垂直入射波に対する透過損失の解析，日本音響学会誌，Vol. 31，No. 7，pp. 441～448，1975
- （1989 年 8 月 10 日原稿受理，1990 年 1 月 20 日採用決定）