

学位論文の要旨

防音カバーの吸遮音性能把握と構造最適化

Analysis for Sound Absorption and Insulation Performance of Noise Proof Cover and Its Optimization

氏名 武藤 大輔 印

近年、機械製品の付加価値の追求が進んでおり、「静音化」も付加価値のひとつとして重要視され、具体的な施策としては音源を外側から覆う「防音カバー」が最もよく用いられている。防音カバーの性能を示す尺度として一般に遮音性能と吸音性能があるが、遮音性能に関しては空気層や吸音材を挟んだ複数の積層板の遮音構造の検討がなされている。しかし、窓のように薄さや透光性が求められる遮音構造の検討は十分ではない。一方、吸音性能に関しては適用周波数に対して最適な積層構成の材料が広く市販されており、材料単体での性能向上に関する知見が多数ある。しかし、これらの材料を複合させた多層積層吸音構造に対する体系的な知見が纏められた文献は確認できない。このほか、通常の防音カバーは換気や排熱、あるいはケーブルや配管を通す都合上、孔や隙間が無数に開けられている場合が多いが、このような場合に遮音を重視した「吸音材内封二重壁構造」とするべきか、あるいは内部の吸音性を重視した「内側吸音単層壁」とするべきか、その判断材料を示す文献は見当たらない。さらに、カバーの設置によってカバー内部音響定在波の発生も懸念され、これに対する吸音材の最適配置に関する検討もなされているが、最近注目を浴びている共鳴器型吸音構造を適用した場合のカバー内への最適配置の検討や、定在波の特性をうまく活用した干渉波導入孔の検討は見当たらない。また、アクティブノイズコントロールを用いた一般的な定在波抑制方法を纏められた文献も少ない。

本研究は、防音カバー構造の吸遮音性能把握と構造最適化を対象として、①防音部材の単体の遮音性能改善、②開口を有する防音構造全体の吸遮音性能を最大化する防音部材構成の判定、③防音構造内の音響定在波の抑制の3つの項目を目的としたものである。

はじめに、第2章では、防音カバー構造の防音部材単体の吸遮音性能改善方法として、気体を用いた中空二重壁の遮音性能改善方法と、繊維型吸音材料の積層構造最適化による吸音率改善についてそれぞれ伝達マトリクス法による吸遮音計算と残響室無響室による遮音試験および音響管2マイクロフォン法による吸音試験により検討した。その結果、気体を用いた遮音性能改善については、実験により二酸化炭素は空気に比べて高周波で遮音性を改善し、ヘリウムではさらに低周波でも遮音性が改善することを発見し、これらの現象を伝達マトリクス法の遮音性計算で説明した。また、より現実的な透過損失の尺度として

JIS A 1419-1 で定められる重みつき透過損失 R_w を導入した場合、常温大気中の気体の中では平均分子量が小さく、比熱比が大きい気体が R_w を増大させやすいことを理論的に説明した。一方、繊維型吸音材料の積層構造最適化に関しては、多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective Genetic Algorithm : MOGA) による最適解探索手法を導入し、これが3種3層で構成される全27通りの積層パターンについて最適な積層構造を判定できることを音響管2マイクロフォン法での実験で確認した。その上で、全厚さ120mm、32層の場合に拡張し吸音率の周波数特性を任意に設定した場合の最適な積層構造の判定を可能とし、例えば250Hz~2kHzの平均吸音率であるNRCを最大化させる流れ抵抗の分布は、吸音材表面では流れ抵抗が大きく、吸音材内部に向かって一旦小さくなった後、再び吸音材内部に向かって流れ抵抗が徐々に大きくなりその分布はギリシャ文字の「 ν 」のようであるという従来の経験則を論理的に説明した。

次に、第3章では、開口を有する防音構造全体の吸遮音性能を最大化する防音部材構成の判定として、非吸音単層壁、吸音材内封二重壁、および内側吸音単層壁の3種類の吸遮音構造について、それらの挿入損失を建築音響学的アプローチによるエネルギー平衡計算と伝達マトリクス法を用いた吸遮音計算をもとに算出した。これにより、カバー内吸音の不足によるカバー内音圧上昇（ビルドアップ効果）と開口を考慮したカバーの遮音性（総合透過損失）の観点で隙間の開口率とカバー内部構造物の吸音率への依存性を調査した。その結果、開口率が小さくカバー内部構造物の吸音が大きき場合は、吸音材内封二重壁の方が優位であるが、逆に開口率が大きくカバー内部構造物の吸音が小さい場合には内側吸音単層壁のほうの方が優位であると判断できることがわかった。

最後に、第4章にて、防音構造内の音響定在波の抑制について、カバー内に音響管を用いた構造や、カバーに干渉波導入孔を設けた構造、およびカバー内の音をアクティブに制御するアクティブノイズコントロールについて検討を行った。その結果、音響管の適用については、最も効果的な音響管の配置パターンは、カバー長手方向1/4の長さの管を、このカバー長手方向の両端と中央部にそれぞれの開口部がくるような配置であり、カバー中央の音圧低減効果は元の音響定在波発生周波数の前後50%の周波数範囲でのパーシャルオーバーオールでおよそ6dBであることが分かった。また、干渉波導入孔については、カバー長手方向中央部に初期開口と同じの大きさの干渉波導入孔を設けるのがもっともよく、その場合、元の定在波に起因する周波数ピークの周辺のパーシャルオーバーオールはおよそ4dB低減することを実験で確認した。最後に、カバー内で発生する定在波を打ち消す音場を積極的に作り出す「アクティブノイズコントロール」を適用することを検討し、その効果を残響室を用いた拡散音場加振実験で検証した。その結果、音響定在波に起因するピークを約5dB低減できることを確認した。

Demands for the additional value of the product have been increasing recently. One such additional value is “noise reduction,” for which a noise proof cover that covers the noise source from the outside is used most often. Noise insulation and noise absorption are used as the criteria that describe the performance of noise proof cover. Studies have been conducted on the noise insulation structures composed as an air or absorber inserted multi-layered plate. However, noise insulating structures like a window, which requires thinness and/or translucency, have not been studied enough. For the noise absorption, optimal materials for the demanded applying frequency have been widely distributed. Studies have been conducted on improving single-layer sound absorption materials. However, systematic knowledge for the multi-layered composite materials has not been discussed enough. Meanwhile, general noise-proof covers have many holes, gaps, or apertures for the air ventilation, heat exhaust, and duct /cable layout, which induces the noise leakage. In this case, two structures are considered usually. One is an “absorber inserted double plate,” which prioritizes the noise insulation, and the other is a “single plate with inside absorption,” which prioritizes the noise absorption. However, there are no studies indicating the standard to judge which structure is better. Moreover, installation of the cover causes the inner cover acoustic modes. The setup of sound absorbing materials inside the cover and their optimal layout have been discussed, but the use of resonator-type sound absorbing structures or active noise control (ANC) has not been sufficiently investigated.

This study relates to comprehension of performance and the structural optimization of the noise proof cover and aims to solve the three following issues. 1) Improvement of sound absorption / insulation performance for simplex noise proof structure. 2) Judgement of the best composition that maximizes sound absorption / insulation performance of the total noise proof cover structure including the apertures. 3) Prevention of the acoustic standing wave occurring inside the cover.

First, chapter 2 describes a method to improve the sound insulation performance of an air inserted double wall using gases and a method to optimize composition for the multi-layered fabric noise absorption materials. Investigation is conducted by experimental measurement using an anechoic room, reverberant room, and acoustic tube (two-microphone method), and also numerical calculation using the transfer matrix method (TMM). For the sound insulation improvement method using gases, results of an experimental measurement shows that carbon dioxide (CO₂) improved the sound insulation performance rather than the air at high frequencies and helium (He) improved the sound insulation performance more than the these two gases (air and CO₂) especially at low frequencies. Next, it was confirmed that the calculation using TMM explains the phenomena obtained by the measurement. Then, the weighted transmission loss R_w that is prescribed by JIS A 1419-1 was introduced as the

realistic criterion of noise insulation performance. It was explained theoretically that the gases that have low average molecular weight or a large specific heat ratio tend to improve R_w . For composition optimization for the multi-layered fabric materials, a multi-objective genetic algorithm (MOGA) was introduced as a method for mining optimum solutions. It was confirmed that this algorithm could find out the optimum composition from three-layered-three-kinds compositions (total 27 patterns). After that, by expanding to a 32-layered 120-mm-thick composition, optimum flow resistivity distributions for the given frequency characteristics of sound absorption are obtained. For example, the optimum flow resistivity distribution for NRC (average sound absorption from 250 Hz to 2 kHz) was explained as a ν -shape, which was known by a conventional rule of thumb.

Second, chapter 3 discusses the judgment of the best composite structure with apertures. Insertion losses of three noise insulating / absorbing structures ("bare single plate", "absorber inserted double plate", and "single plate with inside absorption") were examined by energy balance calculation using architectural acoustic and noise proof performance calculation using TMM. These calculation results are discussed from the view point of a rise of acoustic pressure caused by the lack of interior sound absorption (build-up effect) and noise insulation of the total cover structure including the apertures (total transmission loss), and the dependency on the open area ratio of the aperture and interior inherent sound absorption was obtained. From the discussion, it is concluded that the absorber inserted double plate is best for a short open area ratio and large interior inherent sound absorption. On the other hand, the single plate with inside absorption is the best for a large open area ratio and short interior inherent sound absorption.

Finally, chapter 4 discusses the prevention of the acoustic standing wave occurring in the cover. Three proposals are discussed: installation of an acoustic tube inside the cover, installation of the interference wave inducing additional aperture, and application of active noise control (ANC). For installation of an acoustic tube, its optimum arrangement is explained by calculation using 1-dimensional analysis and examined by 3-dimensional analysis and experimental measurements. The results show that the noise reduction effect is approximately 6 dB. For an interference wave inducing additional aperture, its location and size are discussed by a calculation using 3-dimensional analysis and examined by experimental measurements. The results show that the noise reduction effect is approximately 4 dB. Moreover, experimental measurement of the application of ANC to prevent an internal acoustic mode is discussed. The results show that the noise reduction at the peak caused by an internal acoustic mode is approximately 5 dB.