

膜屋根より発生する降雨騒音の制御

井上 諭* 羽染 武則** 杉野 潔**

要約： 膜構造建築物では、降雨の衝撃によって大きな騒音が放射され、音楽やスピーチの聞き取りが妨害されるなどの問題が生ずる。しかし、膜を対象とした降雨騒音の低減対策事例はきわめて少ないため、膜の性質や施工性、コストを考慮した新たな対策工法を考案することが求められている。

本研究では、簡易な水滴落下装置を使用し、雨滴が屋根面に落下したときに生じる音の放射特性を評価することにより、有効な対策工法について検討した。検討の結果、既存膜の屋外側に開口寸法1mm～5mm程度のメッシュ（網）を敷設することによって、中・高音域の放射音を20dB程度低減させることが明らかとなった。また、メッシュは既存膜屋根の外側から簡易に施工できるため、既存物件への対策として有効な工法であることを示した。

キーワード： 降雨騒音、膜、膜構造、室内騒音、大空間

- 目次：**
- | | |
|-------------------|----------------|
| 1. はじめに | 4. 対策効果の検証実験 |
| 2. 膜構造における降雨騒音の特徴 | 5. 実験結果 |
| 3. 対策工法の検討 | 6. メッシュ膜の適用と効果 |

1. はじめに

近年、膜材料を屋根や外壁部分に使用した膜構造建築物は、イベント用の仮設建造物に留まらず、スポーツ、文化、商業施設等、幅広い用途の建物にみることができている。膜材料がこの種の建築物に採用されるのは、軽量故に大空間建築に適するという構造的理由に拠るところが大きい。その他にも、形態の自由度が高い、透光性に富む、耐久性が高い、などの優れた性質を有することから、恒久建築物にも適用可能な建材として今後も多く利用されるものと考えられる。

しかしながら、膜材料は音響透過損失が低く、また、外部からの衝撃が加えられた際に音を放射しやすいという性質があり、騒音防止の観点からは適当な建材とは言い難い。特に張力が導入された膜材は、雨滴の落下衝撃によって大きな放射音を発生するため、降雨の際には、屋内騒音を著しく増大させる可能性がある。

よって、ホールや会議場等に膜構造を適用する際には、降雨騒音が音楽やスピーチの聞き取りを妨げないように事前に遮音対策を講じなければならない。

膜屋根の降雨騒音対策を行うにあたっては、構造的、意匠的な多くの制約を受ける。例えば、ダンピング材を膜にとりつけるなどの対策は、膜材にかかる荷重が大きいために膜が撓むなどの問題が生じる。また、光の透過を妨げるような材料は膜本来のトップライト

としての機能を損なうことになるため使用できない。

その他、既往の研究においても膜屋根の降雨騒音を検討した例はきわめて少なく、現状において参考とすべき有効な対策工法を見いだすことが困難といえる。

そこで、本研究では、膜の構造的、意匠的な要求を満たしつつ、降雨騒音を低減できる遮音対策工法について検討を行った。検討では、人工的な水滴落下装置を用いて、水滴が屋根面に落下したときに発生する放射音特性を比較し、対策の有効性について評価した。

本稿は、ケーススタディとして、膜構造屋根をもつ町議会の議場を対象に問題発生後の対策検討結果をまとめたものであり、膜屋根からの降雨騒音の特徴を紹介するとともに、対策工法の検討過程、降雨を模擬する実験装置の概要を述べ、対策工法の騒音低減効果の検証結果を論ずる。

2. 膜構造における降雨騒音の特徴

2.1 建物の仕様

検討の対象となった屋根構造は、ドーム型の骨組み膜構造で、膜材としてA種膜材料（四ふつ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維）が使用されている。膜材は図1に示すように2重構造となっており、外膜は風荷重、積雪荷重等外部荷重に耐えうように1960N/m以上の張力が加えられている。

建物の仕様、および、室内音響性能の概要を表1に示す。

本建物の室内音響性能（残響時間等）については、議場としての用途に耐えうるよう、十分な量の吸音材料が配置され、適度な残響を保っている。一例を挙げれば、議場内の残響時間は0.6秒（平均吸音率0.36）、音声伝達指標・STI(=Speech Transmission Index)は約0.7であり、騒音の影響を受けなければ音声によるコミュニケーションには支障はない。

2.2 発生騒音の計測例

降雨時に発生する騒音の大きさは、降雨量（強度）によって変化するため、絶対的な値を示すことはできないが、一例として小雨時（1時間平均0.5～1.0mm）の計測結果を図2に示す。

図2より、降雨騒音は100Hz以上の帯域において観測され、特に中音域（250Hz～1,000Hz）における発生騒音が大きい傾向が読みとれる。降雨時の騒音レベルは55 dB(A)を超え、空調騒音(31.6 dB(A))や暗騒音(27.2dB(A))と比較して遙かに高い。

日本建築学会が定める規準²⁾では、議会（議場）の騒音レベルについて「やむを得ない場合に許容される性能水準」を「45dB(A)」としているが、これと比較しても、本空間における降雨騒音は許容される水準にない。したがって、現状の騒音値を少なくとも建築学会の最低基準以下、望ましくは空調騒音と同等程度まで低減させる必要があり、そのためには、少なくとも10dB～20dB程度の遮音対策を行う必要があるといえる。

3. 対策方法の検討

降雨騒音を低減させるには、(1)発音体に制振材を貼り付け、音を放射しにくくする方法、(2)室内側に防音層を設けて発生騒音を遮断する方法、(3)屋外側に衝撃緩衝層を設ける方法、等が有効であると考えられる。実際、膜と同様に降雨騒音がしばしば問題となる金属屋根（スチール、ステンレス、チタン等）の場合は、上述の(1)に対応する対策として、金属板の裏側に剛性の高い材料や多孔質材料で裏打ちする工法などがよく用いられる³⁾。

しかし、膜屋根については、膜自体に大きな荷重をかけたり、膜を通した自然光の透過を妨げるような対策を講ずることができないため、透光性のある材料を用いて、上述(2)(3)の対策の原理に基づいた対策をとらざるを得ない。よって、本ケースでは図3に示す(a)、(b)、(c)の3通りの対策工法の候補を挙げ検討した。

以下にそれぞれの工法の特徴についてまとめて示す。

(a)室内側への遮音天井の施工

図3(a)は室内側の骨組み下端にガラス板やアクリル板等の遮音材料として用いる対策例であり、3つ

表1 検討対象となった建物概要

床面積	160㎡
室内表面積	626㎡
容積	1,073m ³
天井高（最大）	約8.8m
座席数	議員席他41席、傍聴席36席
膜屋根の規模	13m×9m 約120㎡
膜屋根の構造	骨組み膜構造
膜材	四フッ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維（A種膜）
膜屋根の仕様	2重膜 外膜t0.6mm 内膜t0.4mm
残響時間	約0.6秒（500Hz）
平均吸音率	0.36（座席を含む(500Hz)）

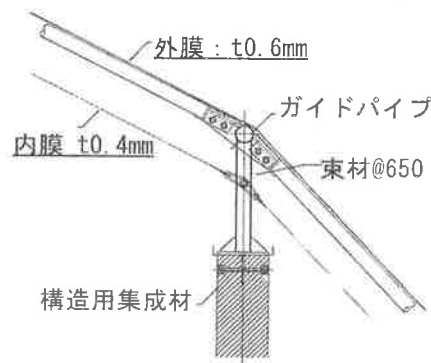


図1 膜構造断面図

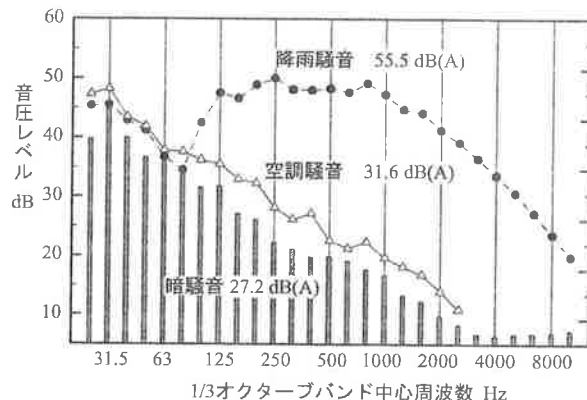


図2 対策前の降雨騒音実測例

の対策工法の中で唯一、その遮音効果を机上検討によって予測できる工法である。ガラス板やアクリル板が隙間を生じないように施工できれば最も効果の高い工法と考えられるが、3次元曲面を形成する骨組みに精度よく板材を施工することは非常に多くの労力を要する作業となることが予想される。また、改修時には屋内側に足場を儲ける必要があるため長期間に渡り室が利用できなくなることが懸念される。

(b)ガラスによる屋外衝撃緩衝層の施工

(b)は既存膜の外側にガラス屋根を設けることによって、膜へ雨粒が直接当たることを防ぐものであ

る。ただし、ガラス面自体も降雨によって騒音が発生する可能性があるため、それを事前に確認する必要がある。また、ガラスを設置する工事は、場合によっては既存膜の一部を撤去する必要があるなど工事期間、コストともに課題の多い工事となる。

(c)メッシュによる屋外衝撃緩衝層の施工

(c)は(b)と同じ目的でガラスの代わりにメッシュ(網)状の膜を被せる対策例である。これは、既往の研究¹⁾で「漁網」を用いた対策例があることから手掛かりを得たもので、網目による水滴の分散作用と線材自体の緩衝作用によって、下層の膜に当たる水滴の衝撃力を弱める効果に期待するものである。ただし、その効果や施工性について知見に乏しく、騒音低減効果の検証のみならず、メッシュの形状や材質の選択、施工方法について検討する必要がある。

以上の各対策候補について、施工性、コスト、工事期間等を検討した結果、建物の内部における対策は(工法(a))は議場の運用を妨げるという理由により採用が見送られた。したがって、対策は膜の外側から行えるものに限定し、どのような材料が最も効果が高いかを検証する方針とした。以降に人工降雨装置を使用した実験検証結果を記す。

4 対策効果の評価実験

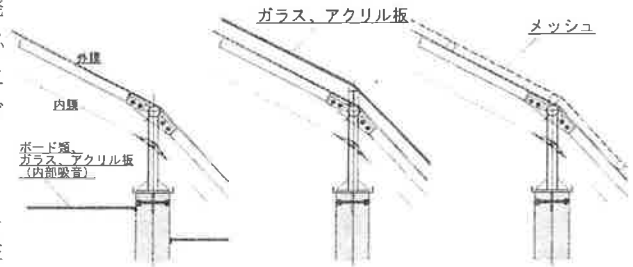
4.1 自然降雨の特性と模擬方法

降雨による衝撃は落下する水滴の径(質量)、個数、速度によって依存するため、実験においてはこれらについて自然降雨を模擬した降水発生装置を使用する必要がある。

自然降雨の水滴の粒径分布はMarshall-Palmer⁴⁾がモデルを提案しており、図4に示すように降雨量(強度)をパラメータとした分布が得られる。また、水滴の落下速度(終端速度)については、図5に示すBest⁵⁾による実験式が知られている。

これらを元にBallagh⁶⁾は、自然降雨の衝撃によって放射される全音響パワーを試算し、降雨強度80mm/hの激しい雨の場合の降雨騒音は径の大きい水滴によるパワーが支配的であり、粒径直径2~6mmの水滴に依存するとしている。また、菅ら⁷⁾は、加振力スペクトルを試算し、粒径直径4mmと5mmの水滴の放出時間間隔を調整することで、降雨強度1.0mm/min~2.5mm/min(60mm/h~150mm/h)の極めて強い雨の加振力を模擬することが可能としている。

本研究では、これらの知見を参考に、降雨騒音が問題となる激しい雨の状態を想定し、降雨騒音発生に有意に影響を及ぼす水滴として等価直径2mm以上6mm以下の水滴を利用した。実験では、それらを一滴ずつ、終端速度が得られる高さより落下させ、降雨状態を模



(a)内部遮音層設置 (b)透明材料の敷設 (c)メッシュ

図3 膜構造に対する降雨騒音対策案

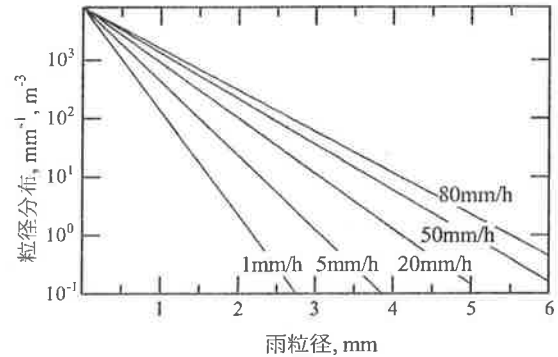


図4 Marshall-Palmerによる雨滴の粒径分布計算結果

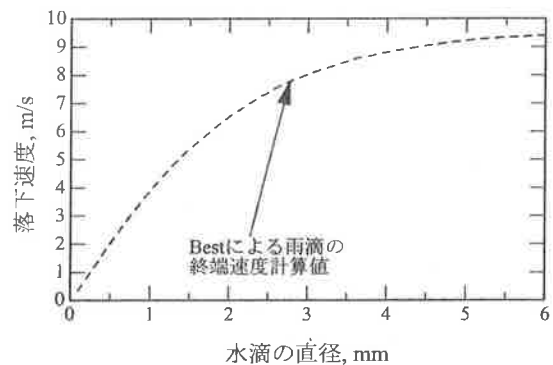


図5 Bestの式による水滴の落下速度(終端速度)

擬することとした。

4.2 実験方法の概要

実験では、人工的に水滴を発生させるノズルとそれより約8m下に設けた試験体と一体の簡易測定箱を使用し、一粒ずつの水滴が試験体に衝突した際に発生する音圧と振動加速度レベルを計測した。表2に実験方法の概要を、図6に実験装置のブロックダイアグラムを示す。

4.2 試験体

試験体の種類と仕様を表3、および、図7に示す。

基準試験体とした膜は、検討対象物件の外膜と同じもの(A種膜材料厚0.6mm)とし、現場での施工状態を

模擬するために2方向に2,840N/m(300kgf)程度の張力をかけて固定された。

対策工法の試験体に使用した材料は、主に径と開口率の異なる3種のメッシュ膜(条件1~3)、ガラス屋根(条件4)、グラスウールをサンドイッチした膜(条件5)とし、その他、仮設的な対策として、養生用メッシュシート(エアキャップ挿入)(条件6)についても試験を行った。

メッシュ膜は、耐久性や強度を考慮して、A種膜と同じ素材でできた既製品を使用し、表3に示すように開口小(径1mm,開口率20%)、中(径2mm,開口率15%)、大(径5mm,開口率61%)の3種類を準備した。

メッシュ膜の設置は、図7条件1,2,3に示すように、既存膜との間に20mm程度の空気層を設け、メッシュより既存膜に伝わる振動を絶縁することを意図した。

4.3 計測・評価方法

実験では、径の大きさの異なる大小2種類の水滴(等価直径3.6mm、5.0mm)のそれぞれを落下させた際の最大音圧レベルと最大振動加速度レベル(時間重み特性F)を計測し、膜のみの条件(条件0)における計測値を基準にした騒音・振動レベル低減量を評価した。なお、低音域における音圧レベルの計測値は室容積が十分に大きくないため信頼性に欠く。よって参考値としたい。

5 実験結果

5.1 メッシュ径の違いによる改善効果の比較

メッシュ径の異なる3条件の音圧レベル低減量を比較した結果を図8に示す。開口小(径1mm,開口率20%)、中(径2mm,開口率15%)のメッシュは、いずれも同等の性能を示し、中音域において20~25dB程度の低減効果が得られている。一方、開口大(径5mm,開口率61%)のメッシュは他と比較して中音域で10dB程度効果が劣ることを確認した。

5.2 水滴の大きさの影響

開口小と大のメッシュについて、水滴の大きさを変えたときの音圧レベル、振動加速度レベルの低減量の比較結果を図9、図10にそれぞれ示す。図9より、開口が大きいメッシュは、水滴径の違いによって音圧レベル低減量に差が現れ(▲と△印比較)、水滴径が小さいと改善効果が5dB程度低下する傾向が読みとれる。同様に図10に示すように、その傾向は膜面振動加速度レベル低減量にも見られる。

ただし、メッシュ開口が小さい場合(図9、10●)は水滴径の大きさの影響は小さい。

5.3 その他の対策材料との比較

他の対策材料について音圧レベル低減量の比較結果

表2 実験方法概要

水滴発生方法	内径3.5mmおよび0.6mmのノズル先端より発生
ノズル個数	1個
水滴の等価直径	大:5.0mm 小:3.6mmの2種類(ノズルの交換による)
水滴落下高さ	7.9m
水滴落下地点	各試験体(1.3m×0.9m)内の5地点
測定室	不整形の簡易測定箱(アクリル製、内部吸音)1.3m×4.0m×0.9m
測定量、測定点	音圧レベル:測定箱内5地点、振動加速度レベル:膜表面3地点
評価量	最大音圧レベル、最大振動加速度レベル(時間重み特性F)

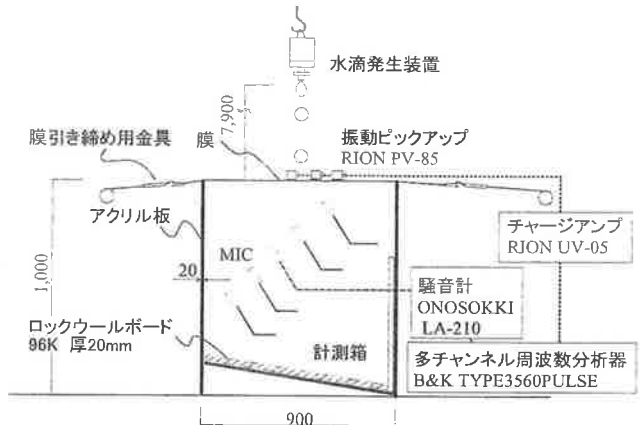


図6 実験装置及び測定ブロックダイアグラム

表3 試験体の仕様

No.	仕様	材料
0	基準条件 膜のみ	四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維 厚0.6mm
1	膜+空気層約26mm+メッシュ膜 開口小	メッシュ膜 厚0.55mm メッシュ径寸法1mm角 開口率20%
	膜+空気層約26mm+メッシュ膜 開口中	メッシュ膜 厚0.75mm メッシュ径寸法2mm角 開口率15%
	膜+空気層約26mm+メッシュ膜 開口大	メッシュ膜 厚0.95mm メッシュ径寸法5mm角 開口率61%
4	ガラス 膜+空気層+15mm+網入りガラス	網入りガラス 厚6.0mm (610×810mm)
5	ガラスウール+膜	膜はいずれも四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維 厚0.6mm
6	仮設メッシュ 養生用メッシュシート+エアキャップ(2重)+膜	防災1種メッシュシート:ポリエステル製 開口寸法1mm、開口率約30%

注)条件1~3のメッシュ膜はいずれも四ふっ化エチレン樹脂コーティングガラス繊維製

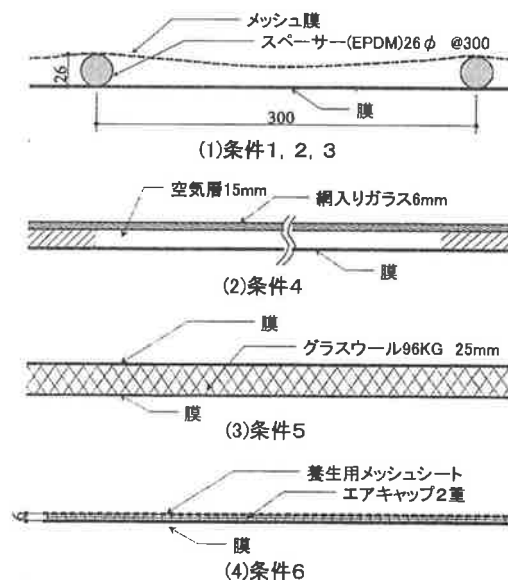


図7 試験体の概略図

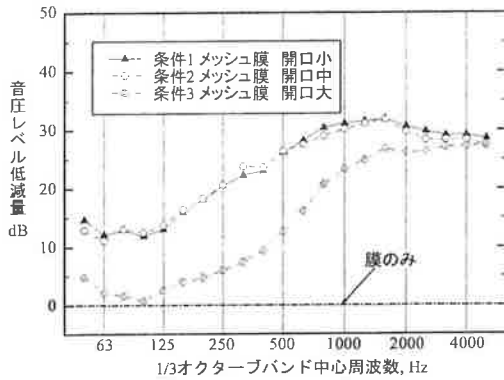


図8 メッシュによる音圧レベル低減量比較結果

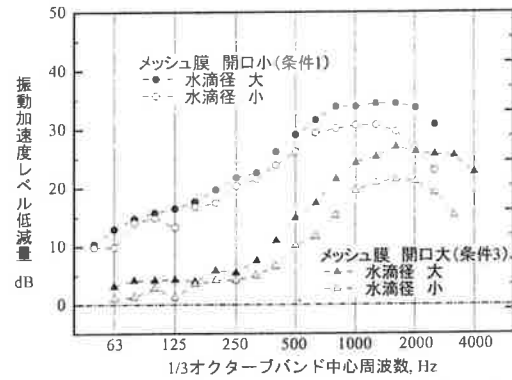


図10 水滴径の影響比較結果（振動加速度レベル）

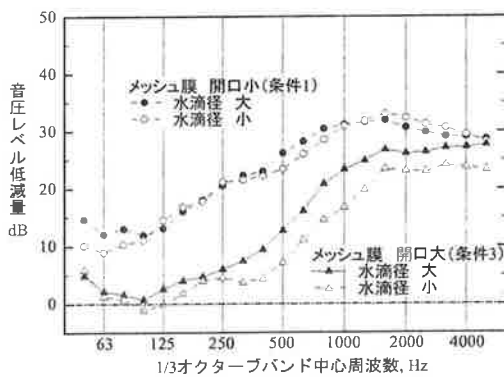


図9 水滴径の影響比較結果

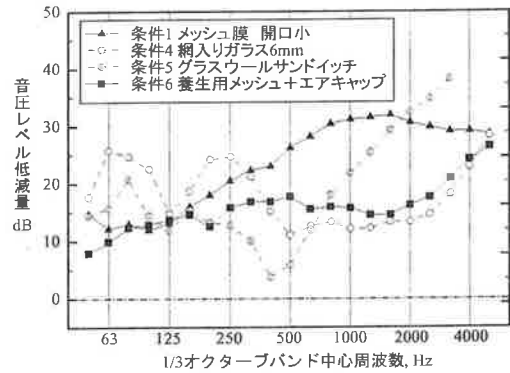


図11 対策方法の違いによる改善効果の比較結果

を図11に示す。開口小のメッシュ（条件1▲）は他と比較して全般的に低減量が大きく、エアキャップを挿入した養生用メッシュ（条件6■）よりも1000～2000Hzの帯域で15dB程度性能が勝っている。これは、既存膜との絶縁（空気層）が遮音上重要であることを示す結果と判断できる。

その他、ガラス（条件4○）は中・高音域で10dB程度しか低減効果がなく、メッシュと比較して10dB以上性能が劣る。また、グラスウールをサンドイッチした材料（◎）については、振動低減効果は大きいことが確認されたが、上に取り付けた膜自体より発生する音が大きく、その音が空気伝搬音として透過するために、音圧レベルの低減効果は低く止まっている。

5.5 実験結果のまとめ

メッシュは、網目による水滴の分散作用と線材自体の緩衝作用によって、下層の膜に当たる水滴の衝撃力を弱める効果があるものと予想される。以上の実験結果をまとめると次のとおりとなる。

- ①メッシュの開口の大きさが水滴の径に対して十分小さければ低減効果は大きい。
- ②メッシュの開口が2mm角以下の条件では、効果はほぼ同

じである。

- ③ガラスによる対策はメッシュと比較して15dB以上効果が小さい。
- ④衝撃緩衝作用のある材料（グラスウール等）を敷いても、材料の表面で発生する音の大きい場合は、空気が伝搬するために効果は小さくなる。

6. メッシュ膜の適用と効果

以上の実験結果、および、施工性を考慮し、本建物ではメッシュの開口中（径2mm,開口率15%）の材料を対策材料として選択した。

メッシュ膜を現場に適用するにあたっては、風によるメッシュ膜の剥離・暴れが起きない等の工夫が必要である。実際の施工にあたっては、メッシュ膜は幅約1mの带状にし、事前にスパーサーと溶着してから既存膜上に載せた。（既存膜とスパーサーは直接固定せず、端部のみ溶着固定した）

メッシュ膜施工前、施工途中（膜の周縁部幅30mm程度を残して施工）、施工後における降雨騒音の比較結果を図12にまとめて示す。降雨の強さは、時間帯においてかなりのばらつきがあり、風速の影響等を受けるために正確な比較を行うことはできないが、ここで

は、各条件における測定時における降雨量がほぼ同じ (0.5mm/h~2.0mm/h) になる時間帯を選んで比較している。

図12より、メッシュ膜による対策後 (●印) の発生音は空調騒音 (---印) に近づき、対策前の条件 (▲印) と比較して、中・高音域の音圧レベルが15~20dB減少していることが読みとれる。また、観測時間帯の全平均値は55.5dB(A)から37.9dB(A)まで減少し、約20dB(A)の減衰効果があることを確認した。

7. まとめ

本稿では、膜構造建築物における降雨騒音のクレーム事例を挙げ、その対策工法について検討した結果をまとめた。

膜構造は、仮設的なイベント施設等に使用される限りにおいては、その降雨騒音が問題視されることは少ないが、恒久建築物や静寂を求められるような空間に適用される場合は、騒音対策を十分に実施することが不可欠になると考えられる。

対策には、図3に示した幾通りかの工法があるが、

謝 辞

実験試験体製作、および、測定を行うにあたり、太陽工業株式会社には多大なるご協力をいただいた。関係諸氏に深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 菅、橘、「人工降水装置を用いた各種屋根構造の降雨騒音遮断性能の実測 - 降雨による軽量屋根構造の騒音発生に関する研究 その2-」、日本建築学会計画系論文集、第461号、9-15、1994.7
- 2) 日本建築学会編、「建築物の遮音性能基準と設計指針 第2版」、技報堂出版、1997.12
- 3) 久我、伊藤、「人工降水による屋根構造の発音性状- その2 亜鉛鉄板葺木造屋根の測定例」、日本建築学会論文報告集号外1967.10
- 4) J. S. Marshall and W. Mck. Palmer : The Distribution Raindrops with Size, Journal of Meteorology, 5(1948), 165-6
- 5) A.C. Best : Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling the atmosphere, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 76(1950), 302-311
- 6) K.O. Ballagh : Noise of simulated Rainfall on Roofs, Applied Acoustics 31(1990), 245-264
- 7) 菅、橘、「自然降雨をシミュレートするための降水装置の製作 - 降雨による軽量屋根構造の騒音発生に関する研究 その1-」、日本建築学会計画系論文集、第454号、1-6、1993.12

Reduction of Rain Noise with Membrane Roofs

S.Inoue, T. Hasome, K. Sugino

The noise produced inside buildings by rainfall impacting on membrane roofs is significant problem. It can deteriorate speech intelligibility and listening to music, even if the rainfall is moderate. It is required, so, to devise a measure to reduce the noise, considering the working efficiency, the cost, and physical properties of the membrane material as well.

In order to find useful measures, radiated noise by artificial rain drops is measured and its characteristics is evaluated for several devise materials. As a result of investigation, the follows are become clear;

- (1) A net with meshes attached outside membrane roofs is effective in reducing the sound pressure level and vibration acceleration level in mid-frequency by about 20dB.
- (2) Each segment of a mesh has to be small, for instance, an under 2-mm mesh has the effect of reducing the noise equally.
- (3) A Mesh-net has to be isolated from roofs when it is attached to avoid the direct impact on roofs by rainfall.

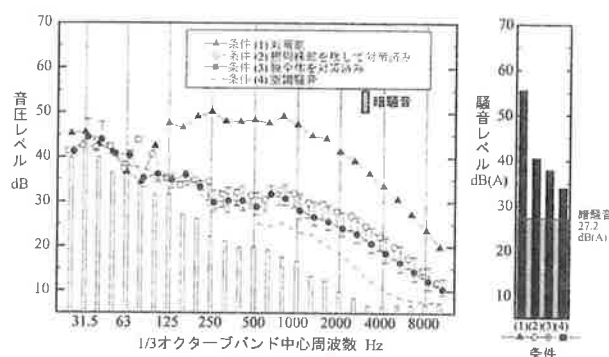


図12 メッシュ膜対策前後の降雨騒音比較結果

その中でメッシュ膜を使用した対策工法は、降雨騒音の低減効果が大きく、また、建物の運用を妨げることなく工事ができるという利点がある。よって、アフター工事において選択できる有用な対策工法の一つといえる。

今後は、降雨の粒径と降雨強度とを制御できる装置を開発し、自然降雨に近い状態での検証を行うことが課題である。