

空気膜構造棟に作用する

風圧力に関する実験・研究

本間 義教*1 川口 彰久*2
岡田 宏*3 武田 寿一*4

概 要

空気膜構造物作用する風圧力の特性を明らかとするため、テニスコート1面を収容する空気膜構造棟を対象として、風洞実験および実測を実施した。この結果、風洞実験で得た風圧分布は、この種の屋根形状特有の風圧分布を示した。実測による風圧分布は、定量的には実験値より大きな値を示したものの、定性的には、実験と類似した傾向を示した。屋根面全体の挙動は、風圧変動に依存するものと考えられた。

1. はじめに

1970年大阪万国博覧会のアメリカ館は、世界で初めての大規模な空気膜構造物であった。空気膜構造物は、ケーブルで補強した膜屋根を空気圧で支持するため、大スパン構造物に適しており、更に透光性の良い膜材料を用いることにより、今までにない新しい空間が得られる。空気膜構造物は、万国博覧会以後、耐候性の良い4フッ化エチレンコーティングガラスクロスが開発されたため、アメリカで急速に発展し、今日までにポンチアック市のシルバードームを初めとする大規模スタジアムが数棟建設されている。

日本では、法的制限のため、空気膜構造物の発展は見られなかったが、1983年に法的制限が緩和され、恒久建築物として認められるようになった。

空気膜構造物は、構造特性上、支配外力である風圧力或いは雪荷重による膜屋根の挙動、密閉空間による防災・避難計画など種々の未解決の問題点を含んでいる。

当社では、万博アメリカ館の実施設計・施工を担当し、各種の実験を行ない報告して来た¹⁾。更に、現在は当技術研究所内に建設した空気膜構造棟を用いて諸

問題解決のため、施工、構造、防災、室内環境に関する一連の調査研究を実施し報告して来た。^{2~10)}

本報告は、屋根面に作用する風圧力の特性を明らかにすることを目的として行った、空気膜構造棟での実測結果並びに模型を用いた風洞実験結果について報告するものである。

2. 空気膜構造棟

調査の対象とした空気膜構造棟は、大阪万博アメリカ館の実施設計および施工した経験を生かし開発した、世界で初めての3方向ケーブルシステム空気膜構造物である。この空気膜構造棟の建物規模は、床面積8400 m²、スパン36 m×24 m、高さ9.5 mで、テニスコート1面を収容している(写真-1、図-1)。

ケーブルは、ストランドロープ(18φ、1×19)を使用し、3方向に配置している。膜材は、4フッ化エチレンコーティングガラスクロスを使用している。膜材は、取付金具(アルミ型材、ネオプレンゴム、取付けプレートで構成される、図-2)を介して短辺方向のケーブルのみに取付けている。なお、取付

*1 大林組技術研究所構造第二研究室 研究員 *2 同 副主任研究員 *3 同 室長 *4 同 副所長 工博

けプレートとケーブルは、緊結していない。ケーブル相互の固定は、クランプ金物を使用しボルトで緊結している。ケーブル端部は、鉛直方向の動きに対しピン支持とし、コンプレッションリングにアンカーされている。この状態での屋根面の平均重量は、約 3.5 Kg f/m^2 である。

3. 風洞実験

3.1 実験方法

(1) 風洞 実験は、当社所有のエッフェル型吸込式風洞（断面：W $1.83 \text{ m} \times \text{H} 1.22 \text{ m}$ ）で行った。

(2) 模型 模型は、縮尺 $1/100$ で作成した。

(3) 実験気流 実験気流は、境界層流を用い指数 $n = 4$ として行った。基準速度圧は、後述する実測に合せ、模型風上床面上 100 mm （地上 10 m 相当）高さの速度圧を用いた。風速は、同位置で 10 m/s とした。なお、屋根が曲面であることによるレイノルズ数の影響は無視した。

(4) 実験風向 実験風向は、空気膜構造棟の南面に正対する風向を 0 度とし、時計回りに 5 度ピッチで 90 度までの計 19 風向とした。

(5) 風圧測定 風圧は、屋根面上の測定孔（ 245 点）からビニールチューブを介して差圧型多点圧力変換器（スキャニバルブ社）で測定した。記録は、サンプリングタイム 0.08 秒、平均化時間 30 秒で行い、平均風圧係数として求めた。

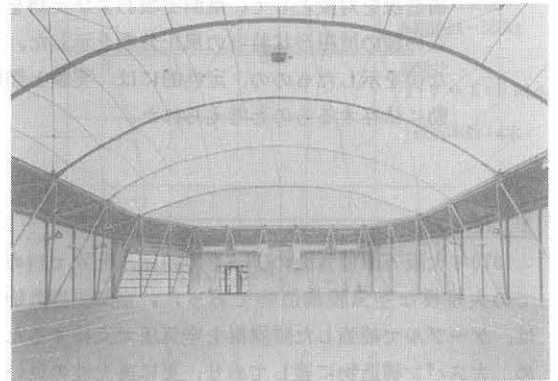
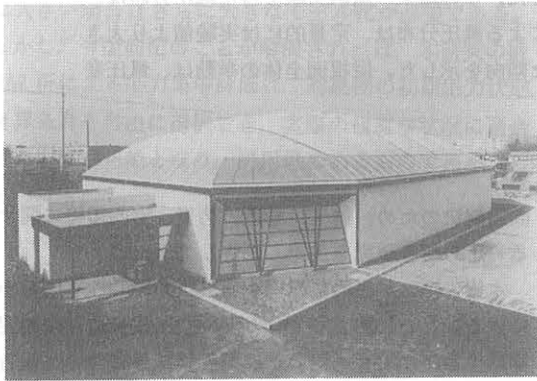


写真 - 1 空気膜構造棟

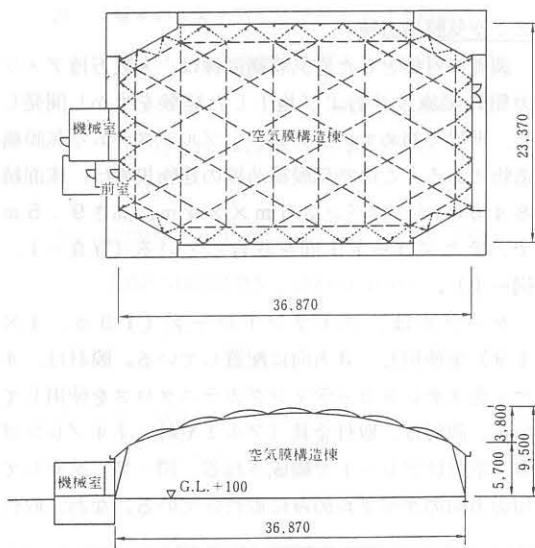


図 - 1 空気膜構造棟平面および断面

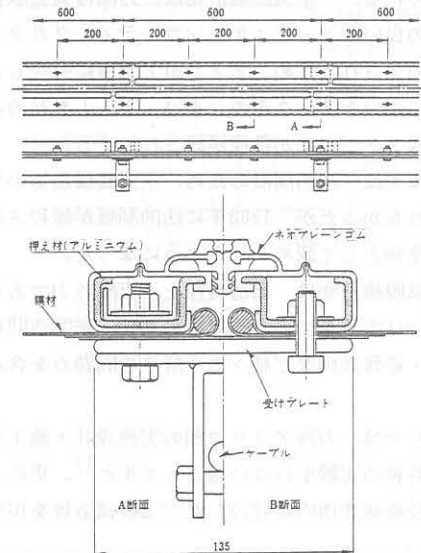


図 - 2 膜材取付部詳細

位とし、ピアノを介して床面上1 mに設置した変位計（共和電業）で測定した。

(5) 加速度測定 加速度測定は、加速度計により、膜面およびケーブルの鉛直加速度を測定した。

(6) ケーブル張力測定 ケーブル張力は、ケーブル端部のフォークエンド内に設置したロードセル（東京測器）で測定した。

(7) 記録・解析 データの集録は、サンプリングタイムを0.01秒とし、デジタルデータレコーダ（64ch、ティアック）で同時記録とした。解析は、解析時間を10分間、2分間および30秒間として行った。

測定項目および測定点は、表-1、図-4に、測定システムのブロック図は図-5に示した。

4.2 実測結果

(1) 平均風圧係数分布 ここでは、case-1の実測例として、昭和62年4月23日の実測結果を示した。解析には10分間平均風速11.8 m/s（風向：南）の記録を用いた。実測時の室内圧は、25 mm A qである。平均風圧係数は、平均化時間2分間として求めた。

実測で得られた平均風圧係数を、風洞実験結果と併せて、図-6に示した。図は、空気膜構造棟の対称性を利用し、対称位置にある測定点（2または4点）重

表-1 測定項目

測定項目		測点数	測定機器
膜面風圧力	動的	8	絶対圧型圧力計
	静的	36	差圧型圧力計
膜面鉛直変位		8	インダクタンス式変位計
膜面鉛直加速度		12	ゲージ式加速度計
ケーブル鉛直加速度		12	ゲージ式加速度計
ケーブル端部張力		18	センターホール型ロードセル

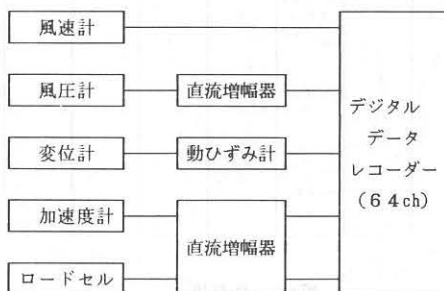


図-5 計測システムのブロック図

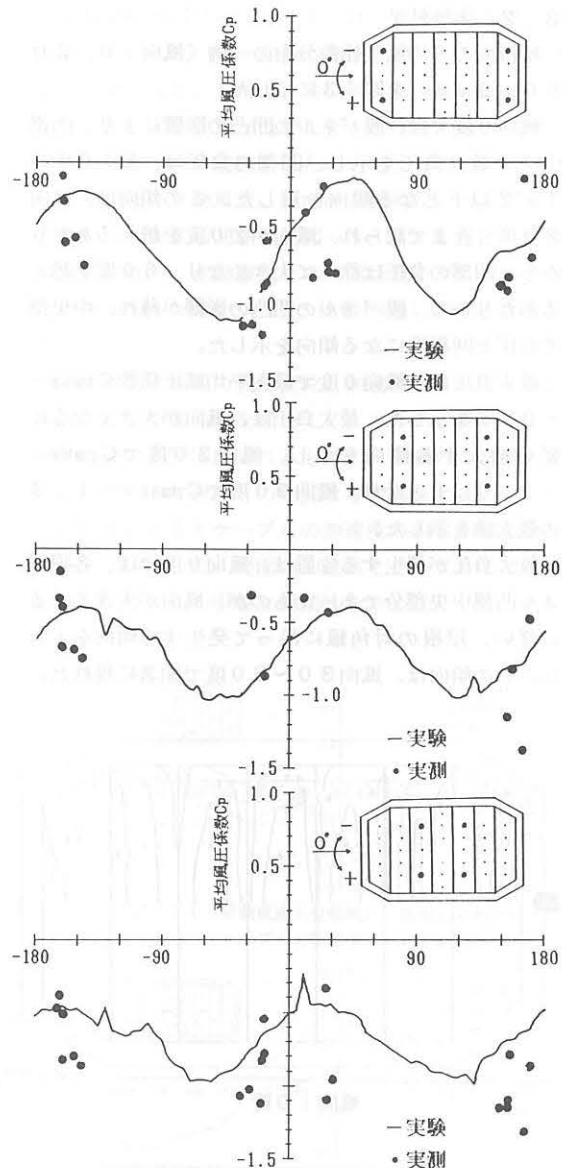


図-6 平均風圧係数分布(実測と実験の対比)

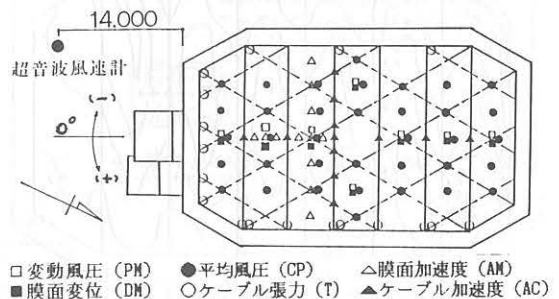


図-4 測定位置

3.2 実験結果

屋根面の平均風圧係数分布の一例（風向：0、30、60、90度）を図-3に示した。

風向0度では、膜パネルの凹凸の影響により、凸部中央で最大負圧を示し、凹部の負圧は、最大負圧の1/2以下となる傾向を示した。この傾向は、風向20度付近まで認められ、風向が20度を越えるあたりから、凹部の負圧は徐々に大きくなり、60度を越えるあたりから、膜パネルの凹凸の影響が薄れ、中央部の負圧と同程度になる傾向を示した。

最大負圧は、風向0度で最大平均風圧係数 $C_{pmax} = -0.7$ を示した。最大負圧は、風向が大きくなるに従い増大する傾向を示し、風向30度で $C_{pmax} = -1.0$ 以上となり、風向90度で $C_{pmax} = -1.3$ の最大値を示した。

最大負圧が発生する位置は、風向0度では、各膜パネル凸部中央部分であったものが、風向が大きくなるに従い、屋根の対角線に沿って発生する傾向を示した。この傾向は、風向30～60度で顕著に現れた。

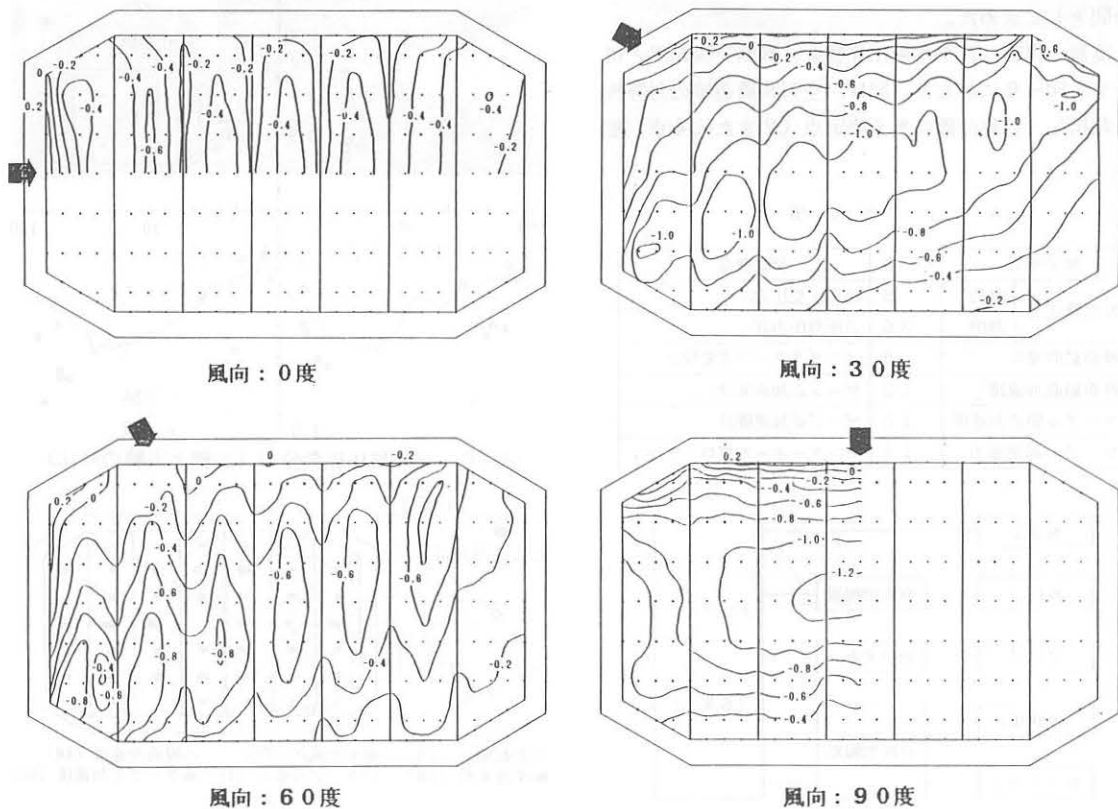


図-3 平均風圧係数分布（風洞実験）

4. 実測

4.1 実測方法

(1) 実測内容 実測は、屋根面の平均的な風圧分布の測定（case-1）と、屋根面全体の挙動を動的に捉える測定（case-2）に分けて実施した。

(2) 基準風速および基準静圧 基準風速および基準静圧は、空気膜構造棟南側約14m位置の電柱頂部（地上10m高さ）で測定した。風速の測定は、超音波風速計（海上電気）を用いた。静圧の測定は、手製の静圧円盤を用い、ビニールチューブを介して、差圧変換器に導いた。

(3) 風圧測定 風圧測定は、case-1では絶対圧型風圧計（8点、ティアック）を膜面に直付けし、風圧変動を直接測定した。case-2では、膜面に圧力孔（36点）を設け、ビニールチューブを介して差圧変換器（三計エンジニアリング）に導き、7点1組としてスキューニングを行い測定した。

(4) 変位測定 変位測定は、膜パネルの鉛直変

ねて表わした。実測値は、実験値と比較した場合、定量的には実測値のほうが大きな値を示ものの、定性的には実験値に類似した傾向を示した。

(2) 屋根面の挙動 ここでは、case-2の実測例として、昭和60年4月24日の実測結果を示した。解析には、10分間平均風速 8.1 m/s （風向：南）の記録を用いた。実測時の室内圧は、 25 mmAq である。

変動風速、膜面の変動風圧、変動変位と加速度、ケーブルの加速度と変動張力のパワースペクトルを図7~10に示した。膜面の変動風圧、変動変位と加速度は、同一測定位置のものである。変動風速および変動風圧のパワースペクトルの高周波側では、ピークもなくなだらかな減少傾向を示しており、その勾配は、夫々、 $-5/3$ 、 $-7/3$ であった。膜面およびケーブルの加速度のパワースペクトルは、両者とも、強制振動実験で得られた屋根全体の一次固有振動数である 1.6 Hz 付近でピークを示した。しかし、膜面

の変動変位のパワースペクトルは、なだらかな減少傾向を示しており、同一位置の加速度が示したピークは認められなかった。これは、変位測定がピアノ線を用いているため応答性が低いことと、膜面の振動が微小振動であることに起因するためと考えられる。

変動風速と変動風圧、膜面の変動変位、ケーブルの変動張力の相互相関係数を図-11に示した。変動風速と変動風圧、変動張力との相関は低いが、変動変位との相関は、それらと比べ比較的高い相関が認められた。

変動風圧と膜面の変動変位、加速度、ケーブルの加速度の相互相関係数を図-12に示した。変動風圧と変動変位の相関は認められるものの、膜面の加速度およびケーブルの加速度との相関は零であった。

膜面の加速度とケーブルの加速度の相互相関係数を図-13に示した。膜面の加速度とケーブルの加速度の相関は低いが、明瞭な周期性を示した。

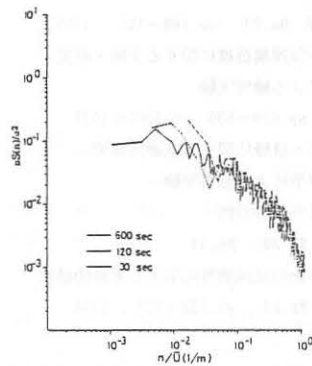


図-7 変動風速のパワースペクトル

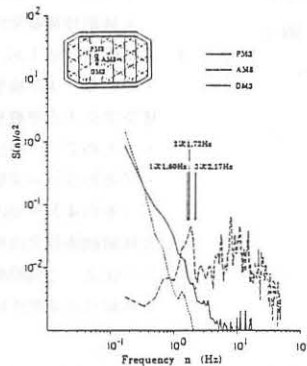


図-8 膜面の変動風圧、変動変位と加速度のパワースペクトル

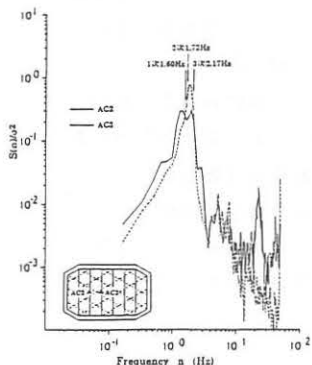


図-9 ケーブルの加速度のパワースペクトル

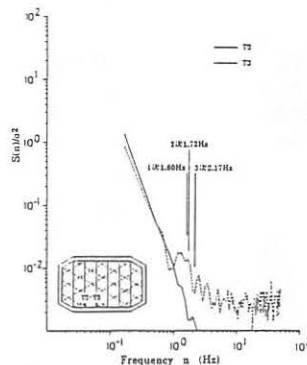


図-10 ケーブルの変動張力のパワースペクトル

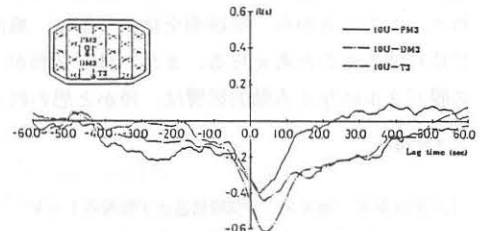


図-11 変動風速と変動風圧、膜面の変動変位、ケーブルの変動張力の相互相関係数

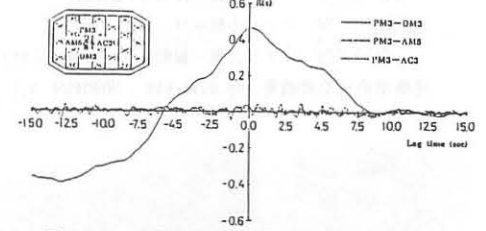


図-12 変動風圧と膜面の変動変位、加速度、ケーブルの加速度の相互相関係数

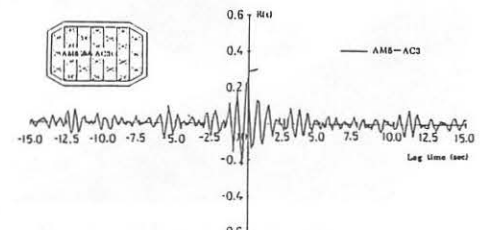


図-13 膜面の加速度とケーブルの加速度の相互相関係数

5. まとめ

以上、空気膜構造棟に作用する風圧力に関して、実験および実測で得られた知見を以下に述べた。

(1) 風洞実験で得られた屋根面の平均風圧係数分布は、この種の屋根形状の特徴である膜パネルの凹凸の影響を反映しており、特に、風向30～60度では、最大負圧の発生位置が、屋根の対角線に沿って発生する傾向を示した。このことは、設計上留意する必要がある。

(2) 実測で得られた平均風圧係数分布は、実験値と比較した場合、定量的には実測値のほうが大きな値を示すものの、定性的には実験値に類似した傾向を示した。

(3) 屋根面全体の挙動は、膜面およびケーブルの加速度が、屋根の1次固有振動数である1.6Hz付近で卓越を示したものの、風圧変動との相関性は低かった。逆に、膜面変位およびケーブル張力は、明瞭な卓越は示さなかったものの、風圧変動との相関性が認められた。このことから、屋根面全体の挙動は、風圧変動に依存するものと考えられる。また、風圧変動が、個々の膜パネルに与える動的影響は、僅かと思われる。

参考文献

1. 木田幸夫、他4名、空気膜構造の実験報告I～V
 - (EXPO '70 アメリカ館—構造計画概要)
 - (EXPO '70 アメリカ館—ケーブル張力測定)
 - (EXPO '70 アメリカ館—屋根形状測定)
 - (EXPO '70 アメリカ館—リング応力測定)
 - (EXPO '70 アメリカ館—振動性状と耐風安定性)建築学会大会梗概集、pp.609～618、昭和45年9月
2. 中川恭次、他3名、空気膜構造棟に関する実験・研究
 - その1 建物概要と積雪荷重
 - その2 音響特性
 - その3 煙流動、排煙に関する基礎的研究
 - その4 振動特性
 - その5 膜材料の物性と耐候性建築学会大会梗概集、昭和59年10月
3. 蔭山 満、他7名、空気膜構造物の振幅レベルとその特性に関する研究
 - その1 ケーブル張力について
 - その2 振動特性について建築学会大会梗概集、pp.427～430、昭和60年10月
4. 蔭山 満、他3名、空気膜構造棟に関する実験・研究 (その5) —振動特性—
大林組技術研究所報、No.33、1987
5. KAGEYAMA et al., EXPERIMENTAL STUDIES ON STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF A CABLE-REINFORCED AIR-SUPPORTED STRUCTURE, Proc. of IASS, Osaka, Japan, Sept., 1986
7. 本間義教、他2名、空気膜構造棟に関する実験・研究 その7 強風時の観測、建築学会大会梗概集、昭和61年8月
8. 真藤利孝、他2名、空気膜構造棟に関する実験・研究 (その1) —音響特性—
大林組技術研究所報、No.30、pp.188～192、1985
9. 宮川保之、他1名、空気膜構造棟に関する実験・研究
 - その6 大型模型による融雪実験建築学会大会梗概集、pp.629～630、昭和60年10月
 - (その2) —煙流動・排煙に関する基礎的研究—
 - (その3) —大型模型による融雪実験—
 - (その4) —室内温熱環境特性—大林組技術研究所報、No.30、No.33
10. 宮川保之、空気膜構造物の屋根融雪に関する実験的研究
大林組技術研究所報、No.28、pp.133～137、1984