

# サスペンション膜構造の振動特性

正岡典夫\*1

村中良\*1

## 梗概

サスペンション膜構造や骨組膜構造の基礎的な振動特性の把握を目的に、模型振動実験を実施した。本報では、平面矩形膜と近似のHP曲面形態の膜試験体による自由振動実験の概要について説明し、各モデルの実験結果から、振幅量が增大すると減衰力が増大し、減衰特性に大きく影響を与えることを報告する。また、近似HP形態は、形状の影響から平面矩形膜に比べて減衰力が大きいことを述べる。数値解析例として、実際の骨組膜構造物に対して実施された自由振動解析結果より、基本振動性状はHP形態の実験結果に近いことを示す。

## 1. 序

サスペンション膜構造や骨組膜構造は、ケーブルあるいは骨組みの境界部から膜面に張力を導入することにより成り立つ軽量の構造であり、外力により面外方向に大変形を生じ易い。最近、これらの膜構造物に対して、変動する風荷重下でどのような非線形挙動を示すかを解明することが、設計上重要な課題となってきた。しかし、材料特性や風荷重等の不確定な要素が多いため、非常に難しい問題と考えられている。

これらサスペンション膜構造の動的挙動の解明には、まず膜面の振動特性を把握しておくことが重要と考えられるが、実際にはあまり研究が行われていないのが現状である。著者は、既に文献5において有限要素法によるHP曲面膜の自由振動応答解析を実施して、膜面が振幅に依存した振動特性を示すことや仮定する比例減衰の種類により、得られる変位応答波形が異なることを報告した。

本研究ではこれら膜構造の実際の振動特性を把握するため、模型による自由振動実験を実施したので報告

する。また、数値解析例として、既に建設された体育館の骨組膜屋根の自由振動解析結果を示し、得られた振動特性について検討する。

## 2. 模型振動実験の概要

本研究で実施した膜構造の模型振動実験の概要図をFig.1に示す。模型振動実験は、剛境界の試験フレームに張られた平面矩形膜と近似HP形態の2種類の膜試験体を用いて、中央部の振幅量を数段階に変化させた自由振動試験とした。

平面矩形膜はA種とC種の2種類の膜材料を用いて、それぞれ単一の生地で作成された膜試験体の端部を引張った状態で、剛境界の試験フレームに設置した。一方、近似HP形態の膜試験体はC種膜材料を用いて、生地幅の制限から溶着線が主要の振動部分に影響しないように配慮した平面形状の試験体を作成して、HP剛境界の試験フレームに、試験体の端部を引張った状態で強制変位させて設置した。

試験体は初めに引張強度の3%の張力を導入して約

\*1 楠巴コーポレーション 建設技術開発室

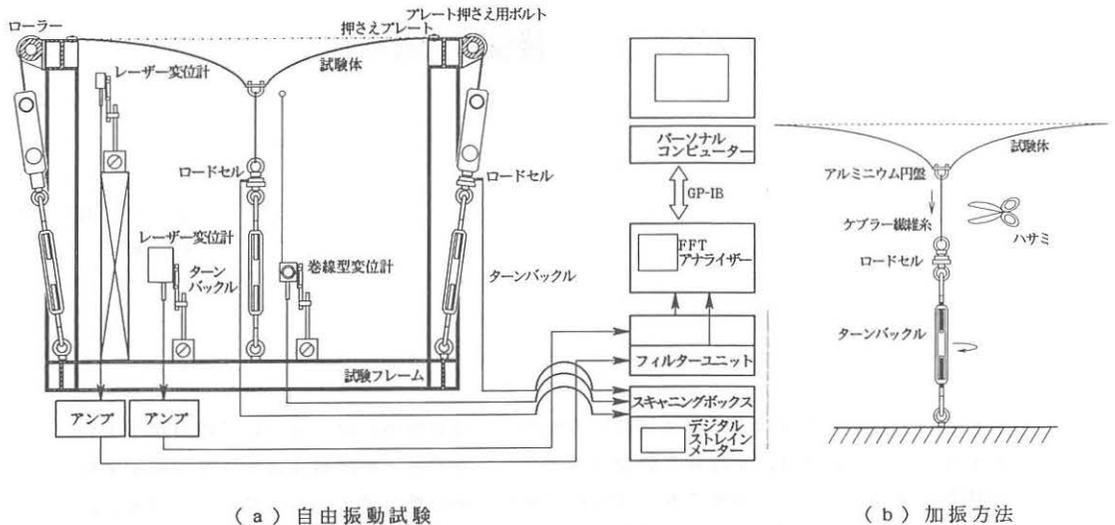


Fig. 1 模型振動実験の概要

40時間放置し、膜材の初期のびを除去した後、規定の初期張力に調整して、押えプレートとボルトを用いて試験フレームに固定した。平面矩形膜への初期張力の導入は、試験体の周辺部をターンバックルで引張る方法で行い、ロードセルにより張力管理を行った。HP形態は均一な張力導入が難しいため、同様の方法で張力を導入して近似的な初期張力を設定した。

Photo.1は各試験体の設置状況を示している。試験体寸法と実験条件は、それぞれFig.2とTable1の通りである。

設置した試験体は、微小振動時の振動特性を把握するためにインパクトハンマーを使用してインパルス加振実験を行い、固有振動数と減衰定数を計測した。

自由振動実験は、Fig.1(b)に示すように試験体中央をケブラー繊維糸を介して規定の振幅量まで強制変位させた状態で、繊維糸を切断する方法を用いた。試験体中央部は載荷時に応力集中を生じるため、それを緩和する目的で円形のアルミ円盤(φ50X3mm)の引張金物を使用した。この引張金物の取付の有無による振動への影響は、平面矩形膜PL-Aの試験体を用いて検討した結果、1次固有振動数に対して2.5%程度の誤差であった。膜面の応答変位は、非接触型のレーザー変位計を用いて計測し、4chのFFTアナライザーにより解析した。

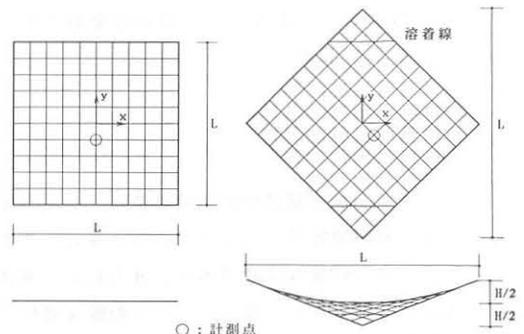
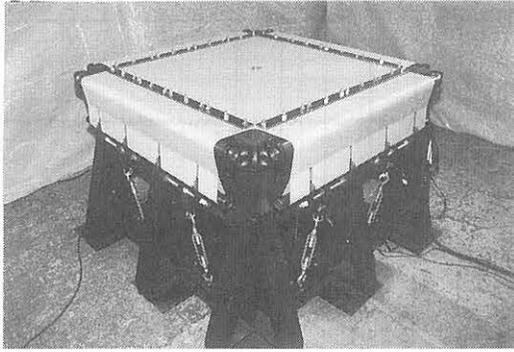


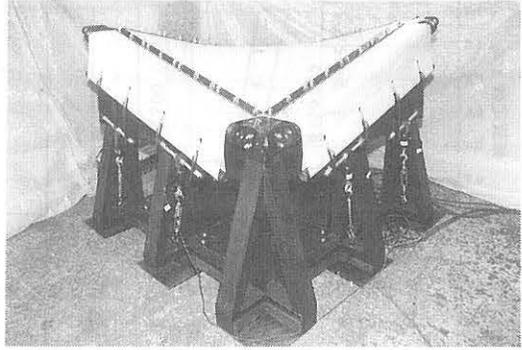
Fig. 2 試験体寸法

Table 1 実験条件

試験体	平面矩形膜		HP形態膜
	PL-A	PL-C	HP-C
形状 (m)	L = 1.00		L = 1.41 H/2 = 0.14
種類	A種認定品		C種認定品
材料定数	ヤング率 (kg/cm)	Ext = 827.84 Eyt = 617.64	Ext = 163.27 Eyt = 100.14
	ポアソン比	vx = 0.570 vy = 0.425	vx = 0.796 vy = 0.488
	剪断剛性 (kg/cm)	Gt = 51.20	Gt = 10.00
	引張強度 (kg/cm)	Tcx = 160.00 Tcy = 133.33	Tcx = 47.33 Tcy = 47.00
	重量 (kg/m <sup>2</sup> )	w = 1.20	w = 0.66
初期張力 (kg/m)	To = 200.00	To = 100.00	



(a) 平面矩形膜試験体



(b) 近似HP形態の膜試験体

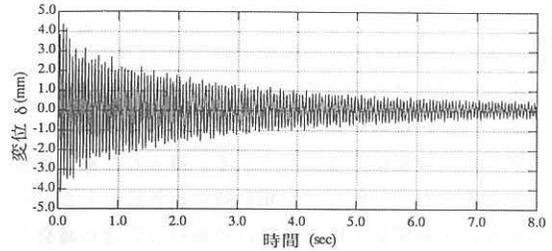
Photo. 1 試験体の設置状況

### 3. 自由振動実験結果と考察

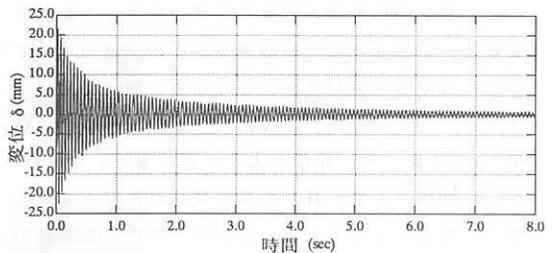
#### 3.1 平面矩形膜の振動実験

平面矩形膜の中央部の振幅量を数段階に変化させて、中央点近傍の変位応答波形を比較する。Fig. 3 (a)(b) は試験体PL-Aの振幅量  $\delta = 10 \text{ mm}$  と  $\delta = 50 \text{ mm}$  の変位応答波形である。振幅量の小さい  $\delta = 10 \text{ mm}$  の応答波形に対して大振幅となる  $\delta = 50 \text{ mm}$  の応答波形は、振動の開始と同時に急勾配で減衰し、定常的な応答に移行する様子が示されている。また、高次振動の影響も少なく、応答解析で得られる剛性比例型またはレーリー型の減衰性状を示している。Fig. 4 は振幅量  $\delta = 10 \text{ mm}$  時の応答波形に対するパワースペクトルであるが、卓越振動数は  $18.4 \text{ Hz}$  となっており、自由振動試験の前に実施したインパルス加振実験で計測された1次固有振動数  $19.2 \text{ Hz}$  にはほぼ一致している。このことから、膜面は中央点の強制変位により、1次モード以外の変位モードから加振されるが、1次モードが卓越して振動していることがわかる。以上は、材料定数の異なる試験体PL-Cでも同様の結果が得られている。

Fig. 5 は、振幅量  $\delta$  を数段階に変化させて得られる各変位応答波形の包絡線に対して、対数減衰率を求めて計算された減衰定数  $h$  と、スパン  $L$  で無次元化した振幅量  $(\delta/L)$  の関係を示している。インパルス加振実験で得られた減衰定数は、振幅量  $\delta/L = 0$  で示している。この図から減衰定数は、大振幅の振動時に大きい値となり、振幅が減少するに従って微小振動であるインパルス加振実験の値に漸近していく傾向にあ



(a) 振幅量 10 mm



(b) 振幅量 50 mm

Fig. 3 平面矩形膜試験体の変位応答波形

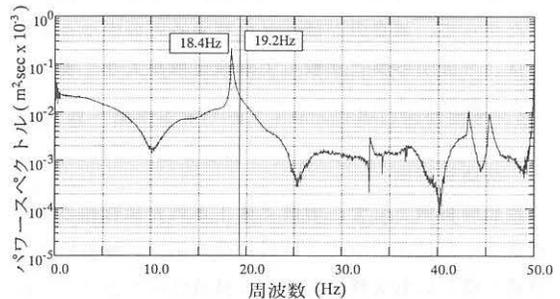


Fig. 4 変位応答波形のパワースペクトル (振幅量 10 mm)

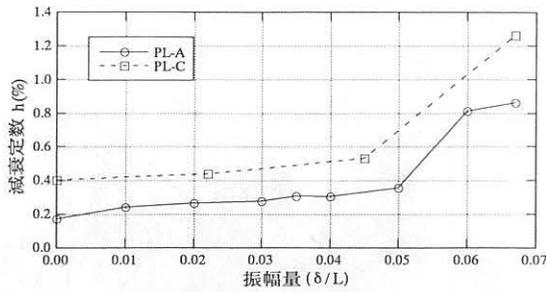


Fig. 5 平面矩形膜試験体の減衰定数と振幅量の関係

ることがわかる。また、材料定数の影響は、材料剛性の低い試験体PL-Cの方が全体的に減衰定数が大きく現れている。

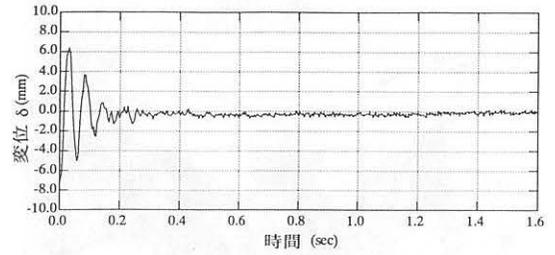
### 3. 2 近似HP形態の振動実験

次に近似HP形態の膜試験体の自由振動実験結果を示す。Fig. 6は試験体HP-Cの振幅量 $\delta = 15\text{ mm}$ と $\delta = 35\text{ mm}$ の変位応答波形である。得られた変位応答は、どちらも明らかに平面矩形膜の応答波形と異なっており、振動開始と同時に数回の振幅で急速に減衰している。

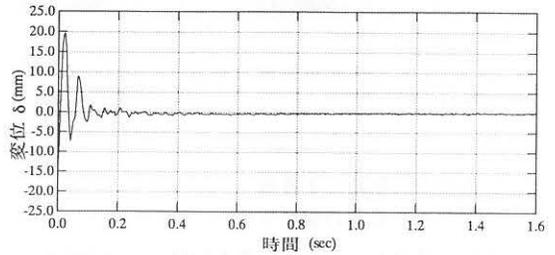
Fig. 7は平面矩形膜と同様の方法で計算された減衰定数 $h$ と、無次元化した振幅量 $\delta/L$ の関係を示している。減衰定数は振幅量が大きくなると増大する傾向にあるが、その値は同一の膜材料の平面矩形膜の実験結果Fig. 5と比べて、非常に大きい値であることがわかる。この理由として、HP形態の膜面は、ガウス曲面が負の形状であることから、振動時に作用する減衰力のメカニズムが平面矩形膜と大きく異なることが考えられる。一般にHP形態は平面矩形膜に比べて、形状の影響から面外方向の復元力に関係する剛性が大きい。したがって、減衰力が剛性に比例すると仮定できるならば、平面矩形膜と比較して減衰定数が大きく現れることが説明できる。

### 4. 数値解析例

数値解析例として、実際に施工された体育館の骨組膜構造の屋根部分の応答解析結果を示す。解析結果は、前述の模型振動実験で得られた減衰特性を参考に、振動性状について検討する。Fig. 8は、体育館の膜屋根部分の形状と解析の対象部分を示している。Table2に



(a) 振幅量 15 mm



(b) 振幅量 35 mm

Fig. 6 近似HP形態の膜試験体の変位応答波形

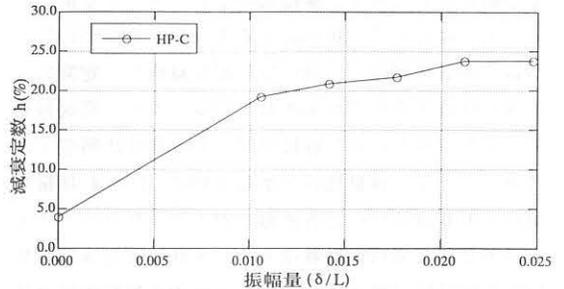


Fig. 7 近似HP形態の膜試験体の減衰定数と振幅量の関係

Table 2 解析条件

種類		A種認定品
材料定数	ヤング率	Ext = 1183.4 kgf/cm Eyt = 1028.0 kgf/cm
	ポアソン比	$\nu_x = 0.769$ $\nu_y = 0.668$
	剪断剛性	Gt = 33.0 kgf/cm
	引張強度	Tcx = 160.0 kgf/cm Tcy = 133.3 kgf/cm
	重量	w = 1.20 kgf/m <sup>2</sup>
初期張力		To = 200.0 kgf/m

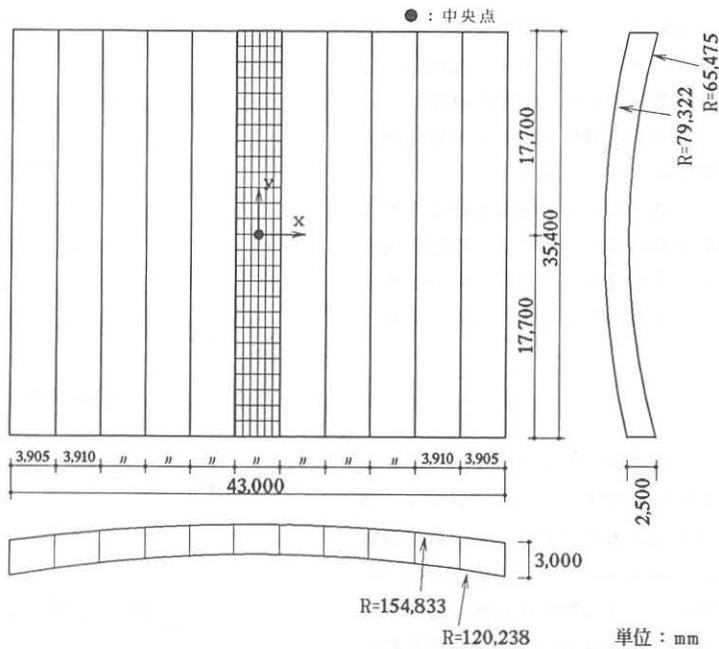


Fig. 8 体育館の膜屋根部分の解析モデル形状



Photo. 2 実際に施工された体育館の骨組膜屋根の外観

[建物概要]

名称	立川市柴崎市民体育館
建築主	立川市
設計	株式会社 佐藤総合計画
施工	西松建設 株式会社
規模	延床面積 6,433m <sup>2</sup>
	敷地面積 10,280m <sup>2</sup>
	体育室屋根面積 1,522m <sup>2</sup>

解析条件を示す。Photo. 2 は骨組膜屋根の外観である。解析はアーチ状の中央部の膜パネルに対して、全面吹き上げの風荷重 ( $100 \text{ Kg f / m}^2$ ) を作用させて、最大変形状態から自由振動させて行った。この時の膜面中央部の最大変位は、短辺方向のスパン  $L$  に対して  $1/30$  程度である。有限要素法による応答解析手法は、数値時間積分にニューマークの  $\beta$  法 ( $\beta = 1/6$ ) を用いて、幾何学的非線形性を考慮している。また、膜構造特有のリンクリングの影響も考慮している。減衰力は、内部粘性減衰と外部粘性減衰の両者を考慮し

たレーリー減衰として、1次と2次のモードに対して  $h_1 = h_2 = 3\%$  の減衰定数を仮定した。使用する要素は、双一次アインパラメトリック四辺形要素である。解析は演算時間を短縮するため、 $1/4$  対象モデルを用いた。

はじめに、基本的な振動特性を把握するために実施した固有値解析結果をFig. 9 に示す。ここでは、1次から5次までの固有振動数と固有モードを示しているが、本解析モデルの固有値は各次が非常に近接していることがわかる。

次に自由振動解析結果を示す。Fig. 10は、中央点の変位応答波形を示している。変位応答波形は、HP曲面の自由振動実験で得られた応答波形に比較的似ており、振動開始と同時に数回の振幅で急激に減衰している。この応答波形の振幅の絶対値を用いて対数減衰率より算出した減衰定数は19.4%であった。このことから、本解析モデルは、レーリー減衰を仮定するとHP形態の模型振動実験結果に比較的近い振動性状を示し、偏平な曲面であるが負のガウス曲面を有する形状であることから大きな減衰性を示したものと思われる。

## 5. 結言

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 膜構造模型自由振動実験より、サスペンション膜構造の減衰特性は振幅に大きく依存する。特に振幅が増大すると、減衰力が大きくなることが解った。
- 2) 平面とHP形態の膜では振動性状が全く異なり、負のガウス曲面形状となるHP形態は平面矩形膜に比べて減衰力の大きい振動波形となる。また、膜の減衰特性は剛性比例型またはレーリー型で仮定が可能と考えられる。
- 3) レーリー減衰を仮定した場合の骨組膜構造の応答解析結果は、HP形態の模型振動実験結果に比較的近い振動性状を示した。
- 4) 実際の膜屋根の振動性状は、計測していないので不明であるが、膜材の減衰定数を正確に算定することで非線形応答解析により振動特性の把握が可能と考えられる。

## 謝辞

本研究において実施した膜構造模型振動実験は、横浜国立大学石井研究室、小川テント(株)と(株)巴コーポレーションの共同研究により実施されました。実験に協力頂いた関係者の方々に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) Benzley, S. E. and Key, S. W.: Dynamic Response of Membranes with Finite Elements, Journal of the Engineering Mechanics Div., ASCE, EM3, 1976.
- 2) Uematsu, Y. and Uchiyama, K.: Aeroelastic behavior of an H.P. shaped Suspended Roof, Proceedings of

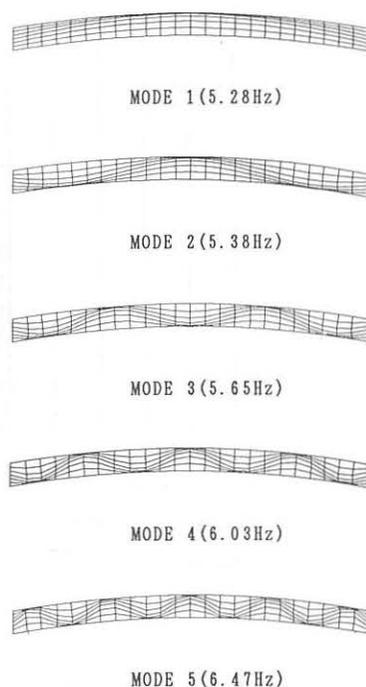


Fig. 9 膜屋根の固有振動数と固有モード

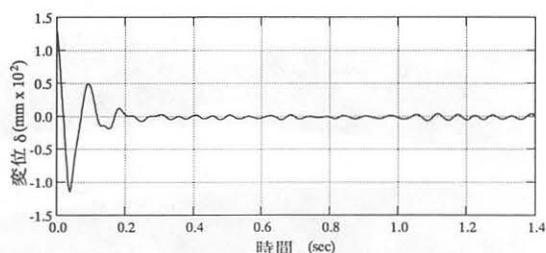


Fig. 10 解析モデルの中央点の変位応答波形

the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, Vol. 2, 1986.

- 3) 佐々木直也: 部材のたるみを考慮した膜構造の動的応答, 膜構造研究論文集'89, 日本膜構造協会, No. 3, 1989.
- 4) 藤井淳一: 膜面のしわ波発生を考慮した振動解析, 膜構造研究論文集'91, 日本膜構造協会, No. 5, 1991.
- 5) 正岡典夫: 低次四辺形膜要素による振動解析, 膜構造研究論文集'92, 日本膜構造協会, No. 6, 1992.
- 6) 柴田明德: 最新耐震構造解析, 最新建築学シリーズ9, 森北出版, 1981.

---

## VIBRATION CHARACTERISTICS OF SUSPENSION MEMBRANE STRUCTURES

Norio MASAOKA<sup>1</sup>

Ryo MURANAKA<sup>1</sup>

### SYNOPSIS

The present paper specifies fundamental vibration characteristics obtained from experiment on the model of the suspension or the framed membrane structure. The first paragraph describes outline of the free vibration tests on plane quadrilateral and approximate hyperbolic parabolic shaped membrane models. The second paragraph shows influence of vibration amplitude to damping characteristics. Specially, it is clarified that damping force becomes larger according to larger vibration amplitude, and that damping force of the approximate hyperbolic parabolic membrane model is larger than that of the plane quadrilateral membrane model because of different geometrical configuration. In the last paragraph, results of free vibration analysis on the framed membrane structure which was already completed as a roof of the gymnasium is compared with the experimental results of approximate hyperbolic parabolic shaped membrane models. Consequently, fundamental vibration characteristics of the real framed membrane structure is considered to be predicted by assuming stiffness proportional damping or Rayleigh damping.

---

<sup>1</sup> Construction Engineering Sect., Research & Development Dept., TOMOE CORPORATION.