

White Noise を用いた膜構造物の膜張力測定装置の開発

—測定装置の改良と検証実験—

陳 商煜*¹

大森博司*²

梗 概

著者らは、膜構造物の膜面に生じる膜張力を定量的に、二方向別々に、高い精度で測定でき、かつ現場で簡易に利用できる測定方法として音波を用いた方法を提案し、実験により精度の検証を行っている。その原理は長方形の境界面を持つ膜面を可聴域の振動数を持つ音波で加振し、膜面の持つ共振振動数近傍で起こる励起振動を測定することで、間接的に膜面に作用している張力を測定するものである。膜張力を精度よく測定するためには、空気の付加質量の影響を考慮する必要があり、膜の振動面積に等価な円形板を用いて理論的に評価している。本論では、既往の膜張力測定実験で用いたスイープ加振に代わり、White Noise を加振音源とした膜張力測定実験を行い、その有効性を検証する。また、装置の実用化を目標としているので、低張力から高張力の広い範囲で 90% 以上を目標精度とし、精度向上のための装置改良およびその検証実験を行ったので報告する。

1 序

膜構造物は、本来圧縮あるいは曲げに対しては抵抗できない材料である膜材料を、適切な引張状態に保持することにより安定化し、膜構造物全体を雪や風による荷重に耐えられるようにするものである。こうした膜構造物は、張力の正確な維持管理が重要であるが、一般には困難である。竣工後に膜構造物に生じている膜張力の大きさを知ることは、維持管理の観点から大変重要で、これを可能とする技術に大きな期待が寄せられている。

筆者らは、音波を用いた膜張力測定技術を提案しており、正弦波スイープを加振音源とした膜張力測定実験を行っている^{1)–3)}。その原理は、図 2 に示すような長方形の境界面を持つ膜面を、図 1 のように可聴域の振動数を持つ音波で加振し、膜面の持つ固有振動数近傍で起こる共振振動数を測定することで、間接的に膜面に作用している張力を測定するものである。提案している膜張力測定方法は、既述のように膜面に生じる振動の固有振動数を測定することをその基本原理としているが、筆者らのこれまでの研究により膜の固有振動に対する空気の影響が大きいことが分かっている。これは振動体である膜が非常に軽く、振動中に空気の影響を受けるためである。膜の固有振動数を理論的に予測するためには空気による付加質量の影響を考慮することが必要となり、膜の振動面積に等価な円形板を用いて理論的に評価している^{3)–5)}。

本論では、既往の膜張力測定実験で用いた正弦波スイープ加振が、スイープの速度や時間に応答振幅が依存する可能性があるため所定の精度を確保するために測定時間を長く必要とするので、これに代わり、有限振動数領域を持つ

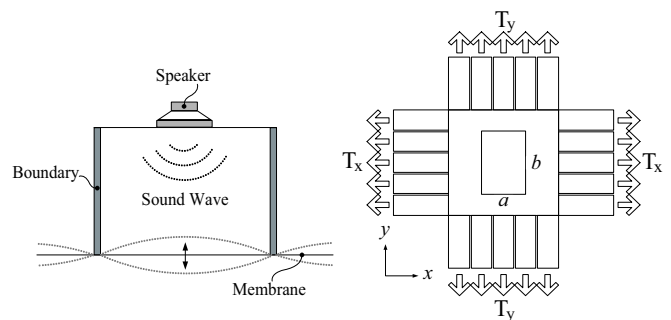


図 1 測定装置の概略図

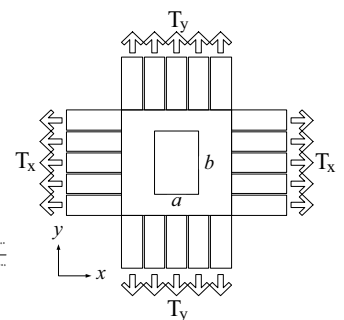


図 2 膜面の境界部

White Noise を加振音源とした膜張力測定実験を行い、その有効性を検証する。また、装置の実用化を目標としているので、低張力から高張力の広い範囲で 90% 以上を目標精度とし、精度向上のために行った装置改良およびその過程において行った検証実験について報告する。

2 White Noise 加振膜張力測定実験

既述の膜張力測定実験で用いた正弦波スイープ加振は、スイープの速度や時間に応答振幅が依存する可能性があるため所定の精度を確保するために測定時間を長く必要とする。このことを解消するために、0~500Hz の振動数領域を持つホワイトノイズを加振音源とした膜張力測定実験を行った。測定装置の浮き上がりにより、想定した膜面の振動の節が境界面の外側に生じる可能性を防ぐため、3.3kg の質量を持つ装置の上部に約 5kg(1208g × 4 個) の重りを載せて実験を行い、重りを載せなかった実験の結果と比較した。図 3 は重りを付加していない既往の測定方法を、図 4 は重り付加による測定の概略を示しており、図 5、6 それぞれには、重りなしと付加時の実験の様子を示している。

*1 名古屋大学大学院環境学研究所 大学院生 修士(工学)

*2 名古屋大学大学院環境学研究所 教授 工学博士

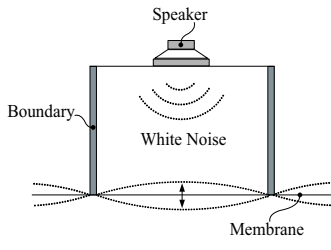


図 3 重りなしの測定概略図

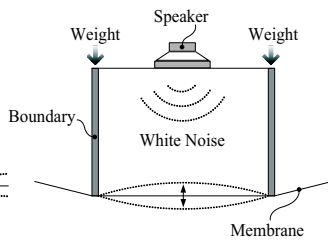


図 4 重り付加の測定概略図

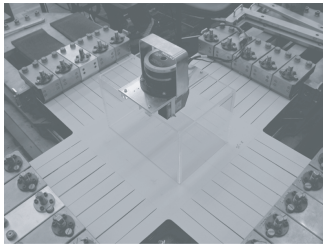


図 5 重りなしの実験様子

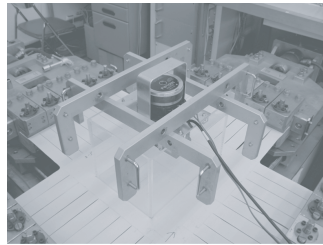


図 6 重り付加の実験様子

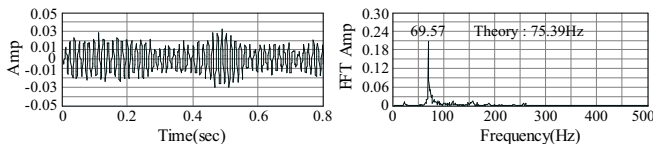


図 7 波形データと FFT 解析結果

表 1 に示す導入張力は、測定装置を膜面に載せてある程度の時間が経ち、膜の応力変化が止まったときの二軸引張装置のロードセルから読み取った張力値である。表 2 に示す導入張力はさらに約 $5kg$ の重りを装置の上部に載せて同様にして記録した張力である。パターン 1 は等張力状態を目標に行ったものであるが、表から分かるように、実際の張力には多少のずれが見られる。パターン 2 では例えば $T_x/T_y = 1/2$ のように、 T_x と T_y との間に一定の比を持つような異張力状態を目指しており、この場合にも、表から分かるように多少のずれが生じている。各々の実験時には、ここに示されている張力が導入された状態になっている。

図 7 は測定例で、X、Y 方向の導入張力 ($1.03, 0.75$) kgf/cm 時の測定データと FFT 解析結果を表しており、導入張力下の共振振動数の理論値 $75.39Hz$ に対して、 $69.57Hz$ の共振振動数が求められていることを示す。

表 1 重りなしの張力パターン (単位: kgf/cm)

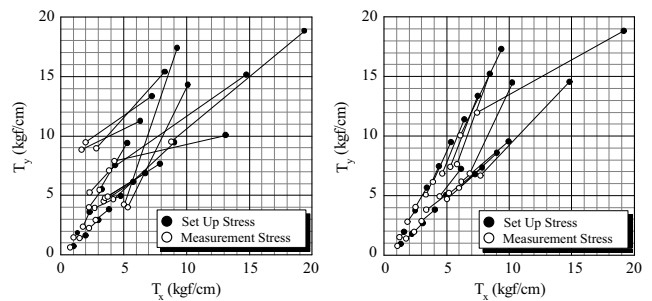
Pattern1	T_x	1.03	1.99	3.01	3.84	4.78	5.78	6.74	7.90	9.05	13.13	14.75	19.36
	T_y	0.75	1.66	2.96	3.86	4.98	6.15	6.88	7.66	9.49	10.06	15.15	18.84
Pattern2	T_x	1.38	2.29	3.29	4.34	5.31	6.33	7.26	8.29	9.26	10.11	—	—
	T_y	1.85	3.64	5.53	7.54	9.43	11.29	13.35	15.41	17.41	14.29	—	—

表 2 重り付加時の張力パターン (単位: kgf/cm)

Pattern1	T_x	1.34	2.21	3.08	4.04	4.95	6.13	7.29	7.84	9.01	9.95	14.84	19.15
	T_y	0.95	1.78	2.70	3.83	5.06	7.25	6.81	7.38	8.61	9.56	14.56	18.85
Pattern2	T_x	1.58	2.48	3.43	4.38	5.34	6.40	7.49	8.44	9.38	10.25	—	—
	T_y	1.96	3.75	5.65	7.46	9.49	11.40	13.39	15.23	17.31	14.48	—	—

測定実験から求められた、重りなしと付加時の結果をそれぞれ図 8 の (a)、(b) に示す。図の中の T_x は導入張力であり、 T_y と結ばれている T_y がその張力時に実験から求められた測定張力である。図 9 の (a)、(b) はそれぞれパターン 1 と 2 で行った実験の測定誤差 (測定誤差 = 導入張力 - 実測定張力 (kgf/cm)) を表しており、XY 平面上に立っている棒 \blacksquare (黒色) と \blacksquare (灰色) が、X、Y 方向のそれぞれの導入張力に対する誤差の大きさを表す。XZ 平面上の \bullet は X 方向の誤差を同平面上に射影したものであり、YZ 平面上の \circ は Y 方向の誤差を射影したものである。重り付加の場合、誤差は張力レベルの増加にほぼ比例的に増大していることが分かる。この傾向はスイープ加振実験と同じである。

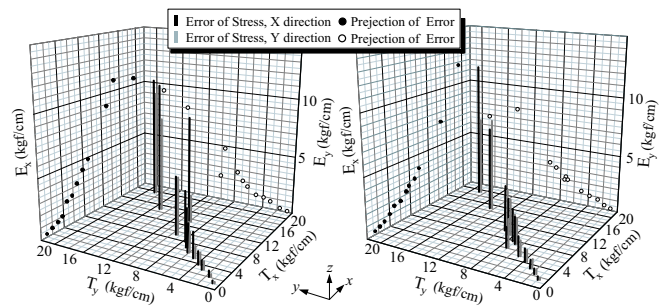
図 10 は、図 9 の誤差に空気の付加質量の影響を取り入れた誤差を示している。前報³⁾で明らかにした空気の付加質量は、ここで問題としている振動数領域では振動数に関係なく一定であり、スイープ加振による測定実験と同じく約 20% の誤差低減が確認できた。



(a) 重りなし

(b) 重り付加

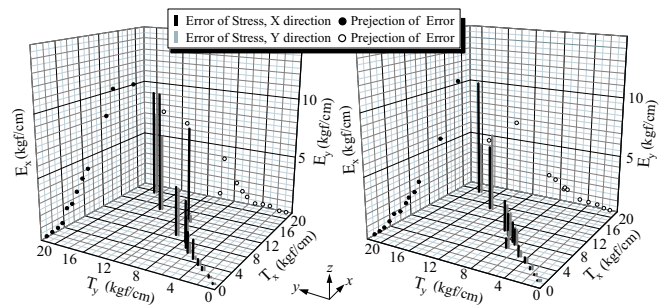
図 8 White Noise 加振測定実験結果



(a) 重りなし

(b) 重り付加

図 9 White Noise 加振測定実験誤差



(a) 重りなし

(b) 重り付加

図 10 付加質量を考慮した White Noise 加振測定実験誤差

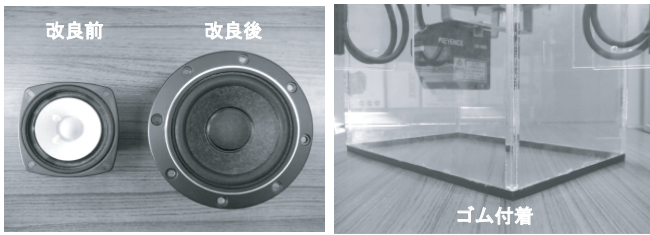


図 11 スピーカー能力向上 図 12 境界底部にゴム付着

3 測定装置の改良および検証実験 その1

White Noise 入力測定実験から、スピーカーの能力不足による高張力時の応答振幅の不十分、アクリルボックス境界部と膜面との密着性の不十分、装置の浮き上がりによる膜面の正確な振動境界の形成不足、重り付加による張力の変化などの改善すべき点が明らかとなった。これらを受けて、高張力時に十分な応答振幅を確保できるようにスピーカーの性能をアップし、膜との密着性を高めるために測定装置の底部にゴムを付着した。その改良の様子を図 11、12 に示す。また、重りを付加することにより装置の浮き上がりはある程度収まり、精度のよい結果が得られたが、導入張力量が変化し、求められた張力が真の値ではないことから、重り付加による張力の変化量を把握する必要があった。

White Noise 音源と改良した装置を用い、自重約 4.7kg になった装置のみを載せた実験、それに約 2.5kg の重りを装置の上部に付加した実験、さらに、約 5kg の重りを装置上部に付加した実験を行うことにより、重り付加による張力の変化量と共に、重りの重さによる精度の変化を把握することを目的として実験を行った。以後、それぞれの実験を 1、2、3 段階の実験と呼ぶことにする。

図 13 に、1、2、3 段階の実験における等張力パターンの X 方向の張力変化量をその時の導入張力量で割った割合を示す。横軸の数字は右上のグラフで示す各段階の設定張力パターンに相当し、図の中の □(白) は、1 段階の、▨(灰色) は 2 段階の、そして、■(黒) は 3 段階の張力変化量の割合を示している。低張力時には張力の変化が大きく、40% の張力変化が見られるものもあるが、高張力になるに従って変化は急激に減少し、誤差範囲内に収まることが分かる。

測定装置において、スピーカーの交換と装置底部のゴム付着の大きな 2 点の改良を行った 1、2、3 段階の実験結果を図 14、15、16 の (a) に示す。装置改良前の結果である図 10 の (b) と同様に重り付加による高張力時の精度の向上が

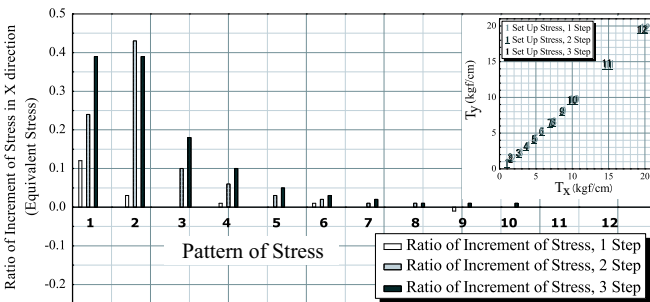


図 13 等張力時の X 方向増分張力の割合

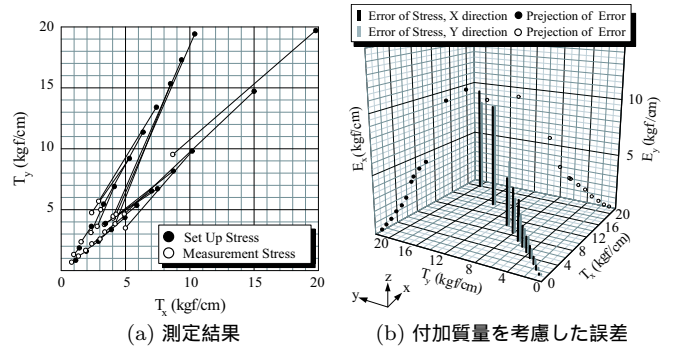


図 14 装置自重 (1 段階)

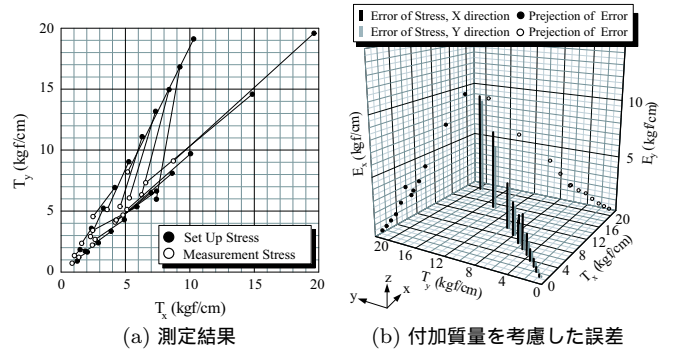


図 15 装置 +2.5kg 付加 (2 段階)

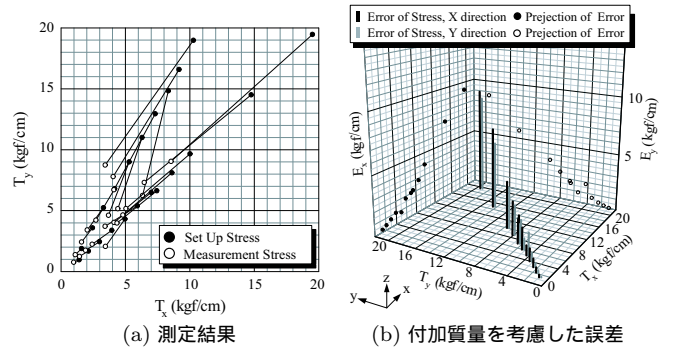


図 16 装置 +5kg 付加 (3 段階)

確認できた。スピーカーの容量の増強により応答振幅は大きくなり、共振振動数のピーク値を検出しやすくなったが、ゴム付着による向上は見られなかった。むしろ、緩衝作用をするゴムを付着することにより、高張力になるに従って固くなった膜面に境界面を作りにくくなったと考えられる。また、重りの重さの変化による精度の向上もほとんど見られなかった。

図 14、15、16 の (b) に付加質量の影響を取り入れた各段階の誤差はを示している。前述のように、空気の影響を考慮することにより、全体の誤差が約 20% 低減される。

4 測定装置の再改良および検証実験 その2

前章で既述した、スピーカーのパワーアップと装置底面のゴム付着とした二つの改良の下に行った測定実験から、膜面に接する装置の境界として柔らかいゴムは適していないこと、測定装置にレーザー変位計を固定させる金属の金具が音波によって振動することが明らかになった。それらを受けて、膜面と接する境界部を境界箱の素材であるアクリルを用い、その接する面積を減らして鋭くし、レーザー変

位計固定金具を新しく設計した。さらに、実験の方法において、膜面からの音波の反射や散乱を吸収させるための吸音材を付けることと、振動境界を強制的に決め、より正確な誤差補間用のデータを得るために膜面の下に境界固定用フレームを設置したサンドイッチ型の実験を同時に行った。

図 17 は既述した問題点を改善するため設計した装置の詳細である。装置の境界を鋭い線接触にすると測定時に膜が破れる恐れがあるので、約 1mm の幅を持たせた面接触にした。レーザー変位計を測定装置に固定する金具は音波の放射による振動を抑えるよう剛性の高い設計になっている。膜の下側に設置する境界固定フレームにはアジャストボルトを設け、その回転により高さの調整が自由にでき、膜面の上部に乗せた測定装置と膜面を密着させるようになっている。また、装置からレーザー変位計が着脱できるようになっており、境界固定フレームにも取り付けて実験を行うことにより、レーザー変位計による音波の妨害の有無を確認する。

測定実験のパターンを図 18 に示す。図の中の A-1 は既往と同じ方法、B-1 は膜下面に境界固定用フレームを設置し、装置に取り付けたレーザー変位計から膜面の振幅を測定する方法、C-1 は膜下面に設置した境界固定フレームにレーザー変位計を設けて、膜面の振動を測定する方法で、スピーカーから放射された音波が妨害されずに膜面に到達することを目的としている。さらに、B-2、C-2 は B-1、C-1 それぞれに F-4LF⁷⁾ の吸音材をつけた実験パターンを示す。

導入張力は、A タイプにおいて、X、Y 方向それぞれに 0 から 20kgf/cm の間を 1kgf/cm 幅の間隔で増分させた、X、Y 方向の張力比 1:1 の等張力と、1:2 と 2:1 の異張力にした。一方、B、C タイプの実験においては膜下面に設けたフレームや吸音材の影響を調べる実験なので、X、Y 方向の張力比 1:1 の等張力のみを導入張力とした。

図 19 に各パターンの実験によって求められた共振振動数の割合を示す。共振振動数の割合 E_f/T_f は、実験から求められた共振振動数 E_f を、導入した張力下の共振振動数の理論値 T_f で割った値である。膜面の下に境界固定フレームを設置した B タイプの実験、フレームにレーザー変位計を取り付けた C タイプ共に、吸音材をつけることによる測定精度が向上は見られない。さらに、A-1 と C-1 との間に

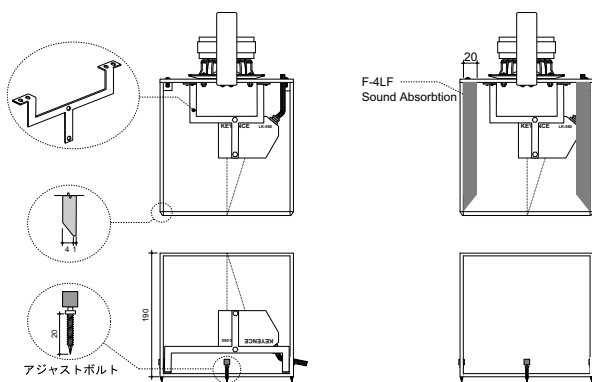


図 17 新しい装置の設計

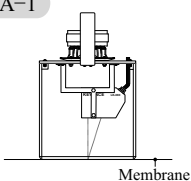
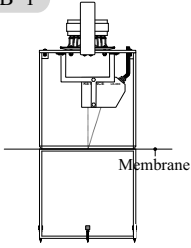
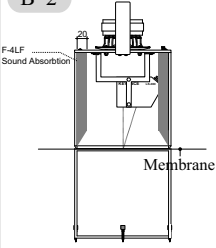
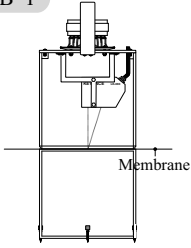
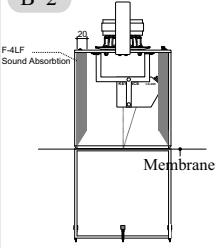
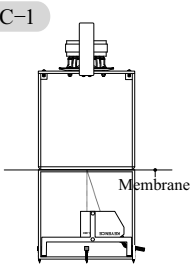
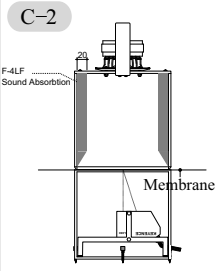
		Sound Absorption (F-4LF)	
		Non Sound Absorption	With Sound Absorption
The Past Method		A-1 	—
		B-1 	B-2 
Fixed Membrane's Boundary	Measurement over the Membrane	B-1 	B-2 
	Measurement Under the Membrane	C-1 	C-2 

図 18 実験のパターン

も共振振動数の精度の差がほとんどないことが分かる。これらから、膜面の下に設けたフレームおよびレーザー変位計の位置による精度の向上は期待できず、既往の方法である A タイプの方法で十分満足できる測定結果が得られることが明らかになった。

図 20 は A-1 パターンの実験誤差を示している。誤差は、スイープ加振、White Noise 加振実験および検証実験その 1 と同じく、張力レベルの増加にほぼ比例的に増大している。また、図 21 は A-1 タイプの重り付加による張力の増分を導入張力で割った張力増分の割合である。5kgf/cm 以下の低張力時には増分が激しいので十分考慮しなければならないことが分かる。

5 誤差補間

図 20 に示すように、誤差は張力レベルの増加にほぼ比例的に増大しているため、誤差の傾向を表すために多項式を用いたフィットを行った。図 22 の中の図形は、実験で導入したすべての張力レベルの X、Y 方向の誤差をプロットしたのであり、曲線は、2 次の多項式を用いて誤差データにフィットさせた結果を示している。表 3 に得られた多項式の係数を示している。決定係数は、回帰分析で得られる相関係数の二乗を示し、回帰曲線によって総変動のうちどれくらい説明できているのかを表す数値である。したがって、決定係数 0.99662 はその回帰式で目的変数の変動全体の 99.662% を説明していることを示す。

導入張力レベルの全組み合わせの領域で実験が行われ、誤

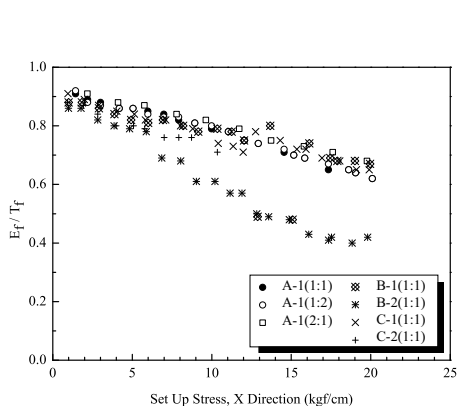


図 19 共振振動数の割合

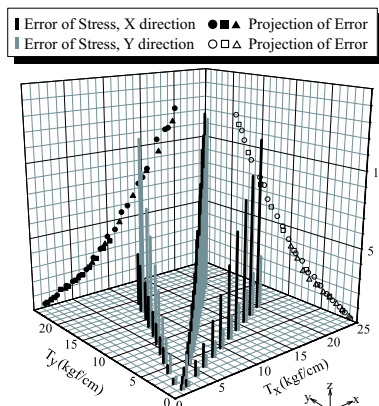


図 20 測定誤差

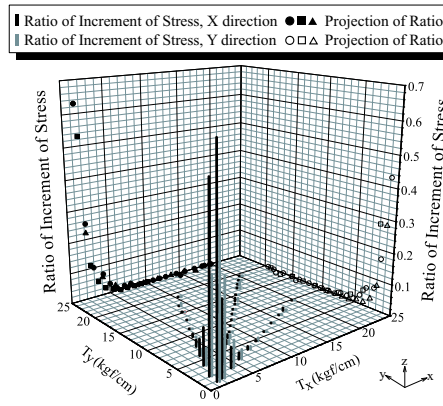


図 21 増分張力の割合

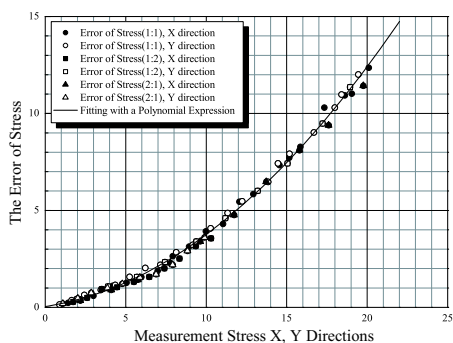


図 22 多項式によるフィット

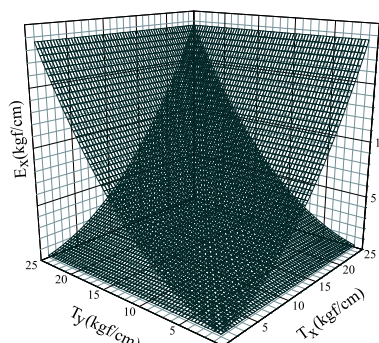


図 23 多項式フィットで得られた誤差曲面

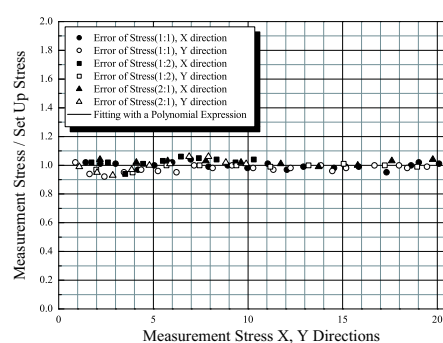


図 24 多項式フィットによる誤差補間

差が図 22 のように補間できたとしたら、図 23 のように誤差曲面を描くことができ、XY 平面上の全てのポイントで誤差の補間が可能になる。図 24 に誤差を補間することによって得られた結果を示す。全導入張力領域で 100% ± 10% の精度が得られている。

6 結

本研究では、膜張力を定量的に、二方向別々に、高い精度で測定でき、かつ現場で利用できる膜張力の測定方法として、White Noise を用いた方法を提案し、実験によりその有効性の検討を行った。重りを付加することにより装置の浮き上がりを防ぎ、精度の良い結果を得た。

精度向上を目標とした装置改良検証実験その 1 では、高張力時に十分な応答振幅を持たせるために、スピーカーの性能をアップし、装置と膜面の密着性を高めるため、装置の底部にゴムを付着して実験を行った。スピーカーの性能アップによる効果は検証された反面、ゴムによる装置浮き

表 3 多項式フィット

$$y = A + B_1x + B_2x^2$$

パラメータ	値	標準誤差
A	0.03845	0.07636
B ₁	0.12371	0.01766
B ₂	0.02475	8.37855E-4
決定係数	標準偏差	N (データポイント数)
0.99662	0.21089	80

上がりの防止効果は見られなかった。

装置改良検証実験その 2 では、境界をゴムの代わりに固く鋭くし、吸音材をつけたり、膜面の下に境界を決めると期待したフレームを設けて実験を行ったが、吸音材やフレームによる精度の向上は期待できず、既往の方法で十分良好な結果が得られることを確認した。

誤差は張力レベルの増加にほぼ比例的に増大しており、2次の多項式を用いて補間することにより、導入張力全領域において 100% ± 10% の精度が得られた。今後、以上の成果を基に、実膜構造物の張力測定実験を行う計画である。

謝辞：本研究の実験には (株) 太陽工業空間技術研究所の全面的な協力を得た。記して深謝する。

参考文献

- [1] 大森博司, 呉 明児: 膜張力の非接触測定法の開発に関する実験的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (北陸), B-1, pp.847-848, 2002
- [2] S.W. Jin, H. Ohmori: Development of Measurement Equipment of Membrane Stress - Evaluation of Added Mass of Air, Proceedings of the International Symposium on Shell and Spatial Structures, Vol.1, pp.29-36, 2005
- [3] 陳 商煜, 大森博司: 膜構造物の簡易膜張力測定装置の開発, 膜構造研究論文集 2005, No.19, pp.35-40, 2006
- [4] 陳 商煜, 候 興国, 呉 明児, 大森博司: 空気の付加質量を考慮した簡易膜張力測定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), B-1, pp.917-918, 2004
- [5] 陳 商煜, 大森博司: 膜張力測定法における空気の付加質量の理論的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), B-1, pp.915-916, 2005
- [6] 陳 商煜, 大森博司: White Noise を用いた膜張力測定方法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), B-1, pp.809-810, 2006
- [7] <http://homepage.mac.com/aranobi/images/flex/f-4lf.html>

Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures Using White Noise Sound Wave

–Improvement of Measurement Equipment and Verification Experiment–

Sang Wook JIN*¹
Hiroshi OHMORI*²

SYNOPSIS

A new method is proposed by authors to measure membrane stresses in two different directions separately, where instead of measuring the membrane stresses directly, the natural frequencies of the membrane within fixed rectangular region resonated by sweep external excitation induced by sound is utilized. The new method makes use of the resonance phenomena of the membrane which is induced by sound excitation given through audio speaker, where the effect of the added mass of surrounding air can not be ignored for high accuracy measurement, and added mass of air was theoretically evaluated by using an equivalent circular plate. In this paper, the white noise which has the frequency fields of 0 to 500Hz is used as the external excitation instead of sweep excitation, because it has possibility that response amplitude depends on speed and time of sweep. In the verification experiment, the boundary of vibration is kept by adding the weight, and the good accuracy is obtained. It is clearly shown that the white noise excitation is quite effective to obtain the resonance frequency of the membrane and suitable for the measurement equipment of membrane stress. Moreover, the process of the device improvement toward high accuracy and the result of experimental test carried out are presented.

*1 Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., M. Eng.

*2 Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.