# 音波を用いた膜張力測定装置の実用化

― 小型・軽量化と多様な張力比への対応 ―

陳 商煜<sup>\*1</sup> 大森博司<sup>\*2</sup>

#### 梗 概

著者らは、膜構造物の膜面に生じる膜張力を高精度を持ちながら、定量的に、二軸別々に測定でき、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。膜の共振振動数を理論的に予測するため空気による付加質量の影響を考慮しており、装置の実用化 を目標とし、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ている。さらに、本測定装置が A 種膜だけではなく、B, C 種膜などの多様な 膜構造物にも適用できることを示し、実在する 3 件の膜構造物を対象に張力測定を行なうことにより、 現場で十分利用できることを確認している。本論では、測定装置の実用化に向け、装置の小型・軽量化 の過程で生じる諸問題を実験を通じて解決し、膜構造物に生じうる様々な張力比に対応できることを示 した上で、試作した小型の測定装置を用いて実膜構造物の張力測定を行なったので報告する。

#### 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、時間の経過と ともに張力の緩和が起き、フラッタリングやポンディングな ど破断につながる致命傷になることもあり、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 点から大変重要であり、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、矩形境界で区画された膜面に音波を照射するこ とにより膜を加振し、選択的に共振する膜面の持つ固有振動 数を測定することで、理論的間接的に張力を測定する原理の 提案を行い、二軸引張装置による実験により、提案する測定 原理の検証と精度の検討を行なっている<sup>1)-3)</sup>。そこでは、音 波加振により環境外乱に対して安定的な計測が可能である ことを確認するとともに、膜の固有振動数を正確に予測する ためには空気による付加質量の影響が無視できないことを 理論的に示した上で、これを考慮することにより格段の測定 精度の向上に成功している<sup>4)-8)</sup>。その他、測定装置の実用化 の過程で生じる諸問題を、理論的、実験的に検討、解決し、 最終的には 90% 以上の測定精度を持つ第一世代の装置を試 作し、これにより実在する 3 件の膜構造物を対象に測定を行 ない、開発された測定装置が十分実用的であることを明らか にしている<sup>9)-15)</sup>。

本論では、本装置が現場で容易に使用できるよう小型・軽 量化する過程で生じる諸問題を実験を通じて解決し、竣工後 の膜構造物に生じうる様々な張力比に対応できることを示 した上で、試作した小型の測定装置を用いて実在する A 種 骨組膜構造を対象に膜張力測定を行なったので報告する。

2 測定装置の境界箱の小型化

### 2.1 膜の振動境界と共振振動数との関係

開発した測定装置は図1に示すように、境界箱で区画された矩形境界の膜面に、スピーカーから音波を照射すること により膜を加振し、選択的に共振する膜面の持つ固有振動 数を測定する測定部と、音源のソースを作成する音源部、測 定したデータを記録・解析し、膜の共振振動数により膜張力 を特定する記録・解析部から構成されている。本研究の目的 は高精度を有する測定装置の現場への提供にあり、小型で 容易な操作は現場で測定を行う際に欠かせない条件となる ので、膜の振動境界と共振振動数との関係を検討し、既往の 20cm×30cm の境界箱の小型化を行なう。

<sup>\*1</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 日本学術振興会特別研究員 PD・博士(工学) \*0 タナ屋ナ学士学院環境学研究科 教授、工学博士

<sup>\*2</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工学博士



図1 膜張力測定装置の全体

表 1 膜の振動境界の変化に伴う固有振動数の変化

振動境界の	共振振動数の	張力 1kgf/cm の A 種
長さの増加率 (%)	増加率 (%)	膜の共振振動数 (Hz)
-50	100.00	165.05
-40	66.67	137.54
-30	42.86	117.89
-20	25.00	103.15
-10	11.11	91.69
0	0.00	82.52

ー次共振した矩形膜の一次共振振動数 *f*<sub>11</sub> と振動境界と の間には次式が成り立つ<sup>1)-3),6)</sup>。

$$f_{11} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho_k}} \cdot \sqrt{T_x \frac{1^2}{a^2} + T_y \frac{1^2}{b^2}} \tag{1}$$

ここで、 $\rho_k$  は膜の単位面積当たりの質量、 $T_x, T_y$  はx, y 方 向それぞれの膜張力、a, b は振動境界の各辺の長さを示す。

表1は、既往の境界箱の各辺の長さ20cm×30cmを基準 として、各辺の長さの短縮に伴う共振振動数の増加率と、 膜面密度1.3kg/m<sup>2</sup>を有するA種膜材のX,Y両方向に 1kgf/cmの張力を導入した時の理論的共振振動数を示して いる。例えば、グレイ色のついた振動境界の各辺長さの増 加率-30%の行は、基準の20cm×30cmに対し、各辺の 長さを共に30%短縮することになるので、各辺の長さが 14cm×21cmになることを示す。さらに、辺の長さが減少す るに従って膜の振動境界は小さくなり、理論的共振振動数は 42.86%増加するため、A種膜材のX,Y両方向に1kgf/cm の張力を導入した場合は、理論的共振振動数が117.89Hzに 上昇することを示している。

20cm×30cm の境界箱を用いて行なった A 種膜の検証実 験では、X,Y 方向それぞれに導入した張力が 5kgf/cm 以 下の場合、すなわち理論的共振振動数が約 200Hz 以下の場 合においては、誤差補間がなくても 80% 以上の精度を持 つことが分かっているので、各辺の長さを 30% 減らした 14cm×21cm の境界箱を用いると、X,Y 方向それぞれの張 力 3kgf/cm (理論的共振振動数: 204.19Hz) までは安定した 結果が得られると予測できる。



図 2 実験の様子(測定装置) 図 3 制御・記録・解析部

# 2.2 14cm×21cm の境界箱を用いた検証実験

既往の 20cm×30cm の境界箱の代わりに、両辺の長さ を 30% 減らした 14cm×21cm の境界箱を用いて検証実験を 行った。導入張力は、X,Y方向それぞれに1から10kgf/cm の間を 1kgf/cm 刻みで設定し、X, Y 方向の張力比 1:1の 等張力と、X,Y方向の張力比をそれぞれ2倍し、最大導入 張力が 10kgf/cm を超えないようにした 1:2,2:1 の異張 力の三つのケースとした。張力値は測定装置を膜面に載せ、 ある程度の時間が経過して膜の応力変化が止まった時に、二 軸引張装置から読み取った。実験は、約 3.3kg の質量を持 つ測定装置の上部に、振動による浮き上がりを防ぐため、約 2.4kg (1.2kg×2 個) の重りを付加して行なった。実験に用 いた膜材は、A種膜(太陽工業製、品名;シィヤフィル-II, 以下 SF-II と略す) であり、膜の面密度は 10cm×10cm の膜 材料の重量を5回測って平均を取った値1.3kg/m<sup>2</sup>にした。 図 2,3 のそれぞれに、14cm×21cm の境界箱を用いて行っ た実験の様子と測定装置の制御・記録・解析部を示す。

#### 2.3 測定結果

測定結果を図4に示す。横軸は導入張力を、縦軸は測定か ら求められた測定張力を示している。例えば、横軸の設定張 力5kgf/cmの記号 は、X,Y方向の導入張力比を1:1に したときの、X方向の導入張力5kgf/cmに対し、3.5kgf/cm の張力が得られたことを示しており、直上の記号 × は空気 の付加質量を考慮した測定張力を示している。図の中の対 角線上は目標とする張力であり、この線に近いほど精度がよ いことになる。また、目標精度を中心とし、グレイの明暗に より誤差±10,20,30%の領域を定めており、空気の付加質 量を考慮する<sup>5)-8)</sup>ことにより、誤差は減少し、全張力レベル において約15%の精度の向上が図られている。一方、目標 張力を越える張力が測定された場合、空気の付加質量の考慮 は測定誤差を広げ、過度評価された測定張力が得られる可能 性がある。多少のばらつきは生じているものの、全導入張力 レベルにおいて安定した測定ができている。

図5に、多項式による誤差のフィットを示す。横軸は導入 した張力を、縦軸は空気の付加質量の影響を考慮した測定誤 差(測定誤差=導入張力-実測定張力(kgf/cm))を表してお



表 2 測定張力の誤差と測定張力の関係

$y = A + B_1 x + B_2 x^2$					
y:測定張力の誤差 $,x:$ 測定張力					
パラメータ	值(X,Y)	標準誤差(X,Y)			
A	0.031, -0.002	0.121,0.172			
$B_1$	0.169, -0.057	0.048,  0.077			
$B_2$	0.023,  0.041	0.004,  0.007			
決定係数(X,Y)	標準偏差(X,Y)	N (データー数)			
0.990,  0.966	0.127,  0.220	20			

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 せた結果を示しており、実線がX方向、破線がY方向を示 す。既往の20cm×30cm境界箱を用いた測定実験では見ら れなかった、X,Y方向の測定誤差が分離される結果が得ら れた。X方向に比べ、Y方向の測定誤差が小さいことから、 膜の振動境界の縮小により、Y方向の測定においてX方向 の張力が分離されず、影響を与えるため、比較的柔らかいY 方向(横糸)の張力が大きめに測定されたと考えられる。

表2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ぐらい説明できているのかを表す数値 であり、標準誤差はデータからの推定結果が本当の値に対し てどの程度の誤差を持つかを表すものである。したがって、 X方向の決定係数0.990はその回帰式で目的変数の変動全 体の99.0%を説明していることを示す。X,Y方向の誤差 は共に張力レベルの増加にほぼ2次関数的に増大しており、 全データに対してX,Y方向を別々に2次多項式により補 正することにより、図6に示すように、誤差±10%以内の 精度が得られていることが分かる。

#### 3 計測時間の短縮

ホワイトノイズを加振音源とした張力測定実験において、 音波を放射し、膜の振動データをレーザー変位計が読み取 る測定時間として約 10 秒を設けていた。振動データの解析 上、測定時間を長くすることにより、卓越する共振振動数の



図 8 導入張力 X:5.05, Y:4.35kgf/cm の場合

スペクトルの大きさが大きくなり、ピーク値が検出しやすく なる。一方、現場での測定は、装置を測定者が手で持ち、膜 面に与えて行なう場合が多いため、測定者の手ぶれや振動境 界のずれなどが生じる可能性が高くなる。このような不具 合を防ぐため、既往のホワイトノイズ入力加振実験の測定 データを用い、測定の時間について検討し、短縮を図る。

図7の(a)は、膜面に導入したX,Y方向の張力が、それ ぞれ1.73kgf/cmと1.98kgf/cmの場合における10秒間の 測定データをフーリエ変換した結果を示しており、図7の (b)は同じ10秒間のデータの内、計測開始から2秒間のデー タのみを取り出し、フーリエ変換した結果を示している。X, Y方向の導入張力が1.73,1.98kgf/cmの場合、20cm×30cm で区画された膜面は110.78Hzの理論的共振振動数を持つ に対し、(a)の10秒間の結果では、96.18Hzが卓越してお り、(b)の2秒間の結果においては96.0Hzがピーク値を持 つことが分かる。図8には、それぞれのX,Y方向に5.05, 4.35kgf/cmをそれぞれ導入した時の、10秒間と2秒間の フーリエ変換の結果を示す。図7,8 共に(a)に比べ(b)の 方がスペクトルの大きさは多少小さくなっているものの、十 分ピーク値が特定できるほど卓越しており、ほぼ同じ共振振 動数が特定されている。いずれの場合においても小数点以 下の差が生じているが、次節で共振振動数の増減が測定張力 に及ぼす影響について検討する。

#### 4 共振振動数の増分による測定張力の感度

本研究の膜張力測定手法は、導入張力の相違によって膜面 が選択的に持つ共振振動数を測定するものである。そのた め、測定張力は検出される共振振動数の精度に依存するの で、共振振動数の増減によって生じる膜張力の変動幅につい て検討する。

X,Y方向それぞれの単位長さ当たりの張力 $T_x, T_y$ は次式によって求められる $^{1)-3), 6)$ 。

$$\{T\} = [A]^{-1}\{f\}$$
(2)

ここで、

$$\{T\} = \begin{cases} T_x \\ T_y \end{cases}, \quad [A] = \begin{bmatrix} \frac{m_1^2}{a_1^2} & \frac{n_1^2}{b_1^2} \\ \frac{m_2^2}{a_2^2} & \frac{n_2^2}{b_2^2} \end{bmatrix}, \quad \{f\} = 4\rho_k \begin{cases} f_1^2 \\ f_2^2 \end{cases}$$

を示し、m,n は振動モードの波の数を、 $a_1$ ,  $b_1$  は振動数  $f_1$ の、 $a_2$ ,  $b_2$  は振動数  $f_2$ の、それぞれ加振音源境界の各辺の長さを、 $\rho_k$  は膜の単位面積当りの質量を表す。振動モードは通常 1 次モードが卓越するするので、 $m_1, m_2, n_1, n_2$ は 1になり、式 (2)の X 方向張力は次式のように表される。

$$T_x = \frac{4\rho_k a_1^2 a_2^2 (b_1^2 f_1^2 - b_2^2 f_2^2)}{a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2}$$
(3)

両辺を  $T_x$ ,  $f_1$  および  $f_2$  で偏微分することにより、X 方向の 張力の増分  $\Delta T_x$  は次式で与えられる。

$$\Delta T_x = A_1 (2f_1 \Delta f_1) + A_2 (2f_2 \Delta f_2)$$
(4)

ただし、 $A_1 = \frac{4\rho_k a_1^2 a_2^2 b_1^2}{a_2^2 b_1^2 - a_1^2 b_2^2}, \quad A_2 = \frac{4\rho_k a_1^2 a_2^2 b_2^2}{a_1^2 b_2^2 - a_2^2 b_1^2}$ である。式 (4) により、共振振動数の増分による張力の変動幅は次式で表現できる。

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta f_1} = 2A_1 f_1$$

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta f_2} = 2A_2 f_2$$
(5)

式(5)により、共振振動数の増分による膜張力の増分は振動 数と比例関係にあることが分かる。

図 9 に、振動境界面 20cm×30cm を持ち、膜面密度 1.3kg/m<sup>2</sup> を有する A 種膜の振動を想定した、膜の共振 振動数と張力の関係を示す。図の中の右上のグラフは周波 数領域 50Hz から 100Hz の間を拡大したものである。例え



ば、測定実験から 80Hz の共振振動数が測定されたとした ら、膜面の X 方向に導入されている張力は 0.94kgf/cm で あることを示す。

図 10 は、振動境界面  $20 \text{cm} \times 30 \text{cm}$  を有する A 種膜の共振振動数の増分  $\Delta f$  を 1 Hz と固定した場合の、0 Hz から 400 Hz の間における膜張力の増分を示しており、図中の右上のグラフは 50 Hz から 100 Hz の間を拡大したものである。例えば、80 Hzの理論的共振振動数を持つ X 方向の張力 0.94 kgf/cmの膜面において、測定から  $\pm 1 \text{Hz}$ の誤差が生じた場合、23 gf/cmの張力の増分が生じることを示す。

膜種によって張力の増分値は多少異なるが、共振振動数 ±1Hz の誤差による張力の変動幅は小さいので、感度は低 く、検出される共振振動数の小数点以下の誤差は無視可能で あり、2 秒の測定時間を設けても測定精度上問題のないこと が分かる。

5 記録部・解析部の小型・軽量化

膜張力測定装置は図 1, 2, 3 に示したように、測定を行な う測定部と、音源を作成し転送する音源部、測定したデー タの記録および解析を行なう記録・解析部により構成され





図 12 表示パネル

る。張力は、記録・解析部で記録した膜面の振動データをパ ソコンで解析することにより卓越振動数が検出されてから 初めて知ることになるため、測定時に張力を知るのには所 要の時間が必要となる。現場での測定においては可搬性と ともに、張力をリアルタイムで表示し、必要に応じては何 回かも測定を行なう場合があるため、記録・解析部を一体 化し、図11に示すように、2秒間の測定時間を有する寸法 39cm×23cm×9.9cm である軽量の解析装置を製作した。図 12は新記録・解析装置の表示パネル部分を示しており、タッ チパネルであるため、スタート表示部分を指で押すことによ り測定が始まるようになっている。

#### 6 多様な張力比への対応

竣工された膜構造物における膜面の両繊維方向には、通常 等張力を導入するのが一般的であるが、時間の経過に伴って 起きる応力緩和により、その張力比は導入時の状態を保つ場 合は少なく、様々になる可能性が高い。そのため、竣工後膜 面に起こりうる多様な張力比を設定し、測定実験を行なうこ とにより、装置の拡張性を検証する。

設定張力は、X,Y方向それぞれに1kgf/cmから6kgf/cm の間を1kgf/cm刻みで増加させ、表3に示すように組合わ せた36ケースとした。導入張力値は二軸引張装置の設定に より、膜の応力変化に関わらずリアルタイムで設定張力を保 つようにした。実験に用いた膜材は、膜面密度1.3kg/m<sup>2</sup>を 有するA種膜(太陽工業製、品名;SF-II)である。

誤差補間<sup>9)-11)</sup>を行なった X, Y 方向の測定結果を図 15 の (a), (b) に示す。両方ともに横軸は導入張力を、縦軸は測 定から求めた測定張力を示している。なお、グラフの中の 記号は横軸に示す導入張力とペアに、直交方向に導入した 張力を示しており、その値は各々の方向の測定張力を示し ている。例えば、図 (a) の横軸に示す導入張力 5kgf/cm 上 の記号 は、膜面の X 方向に 5kgf/cm の張力を、Y 方向 に 1kgf/cm の張力を導入した場合の、測定から求められた X 方向の張力を示している。導入張力が 6kgf/cm の場合、 多少誤差の大きいところが見られるが、5kgf/cm 以下の場 合は、導入した全ての張力の組み合わせにおいて、誤差約



図 13 軽量コーン型スピーカー 図 14 フラットパネルスピーカー

表 3 導入張力の組合せ

X Direction Y	1.0 (kgf/cm)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
1.0 (kgf/cm)	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6
2.0	2:1	2:2	2:3	2:4	2:5	2:6
3.0	3:1	3:2	3:3	3:4	3:5	3:6
4.0	4:1	4:2	4:3	4:4	4:5	4:6
5.0	5:1	5:2	5:3	5:4	5:5	5:6
6.0	6:1	6:2	6:3	6:4	6:5	6:6

表 4 使用したスピーカーの重量

スピーカー	既往	軽量コーン型	フラットパネル
重量 (gf)	1695	500	85

±10% 以内の精度を持つことが確認できる。

7 スピーカーの小型・軽量化

膜張力測定装置に装着したスピーカー (フォステック社 製、品名; FW108N) は、膜の応答振幅を大きくするため、装 置に装着できる範囲で最大のパワーを持つものにしたため、 重量やサイズが大きい。測定装置の小型・軽量化を試みるた め、軽量かつ小型な2種類のスピーカーを用いて性能の検 証を行なった。実験は、既往のスピーカーと同じスペックを 持ち、小型・軽量であるコーン型スピーカー (Alpine 社製、 品名; DLC-109X) と、フラットな形により小型化が期待さ れる軽量のフラットパネルスピーカー (金子コード社製、品 名; NCFR) の2種類のスピーカーを、20cm×30cm の境界 箱に装着して行なった。表4に使用したスピーカーの重量 を示す。

導入張力は、表3に示している多様に組合わせた36ケースにし、二軸引張装置の設定により、膜の応力変化に関わらずリアルタイムで保つようにした。実験に用いた膜材は、面密度1.3kg/m<sup>2</sup>を持つA種膜(太陽工業製、品名;SF-II)にした。図13,14に軽量コーン型スピーカーおよびフラットパネルスピーカーを用いた実験の様子を示す。

図 16 の (a), (b), 図 17 の (a), (b) それぞれに軽量コーン 型スピーカーおよびフラットパネルピーカーを用いた測定 結果を示す。フラットパネルスピーカーの Y 方向の結果に



より、6kgf/cm の導入張力時に多少誤差の大きいところが 見られるが、図 15 に示した既往のスピーカーと同等の誤差 ±10% 以内の精度を持つことが確認できる。

8 実構造物への適用

#### 8.1 概要

以上の検証実験の結果を受けて、愛・地球博記念公園(旧・ 愛知青少年公園)に位置する愛知県児童総合センターの張 力測定を行った。1996年7月竣工のこの建物の屋根に用 いられた膜材はA種膜(品名;SF-II)であり、1.30kg/m<sup>2</sup> の面密度を有する。図18に示すように、28個のパネルに よって構成されている膜屋根は、さらに、それぞれ6枚の 膜材が溶着されて1つのパネルとなっている。実測定にお いて境界箱の大きさによる影響を検討するため、文献[13] で用いた20cm×30cmの境界箱の代わりに、大きさだけを 14cm×21cmに変えた小型の境界箱を用い、両境界箱を取り 替えながら行なった。測定は図20,21に示すように、膜上 面から測定者が装置を持ち、傾斜を形成している膜面に装置 が安定できかつ、測定者の力加減が最小限になる力で押す方 法で測定した。各測定ポイント1ケ所に対して3回の測定 を行うことにより測定ミスを防ぐようにした。



図 18 愛知県児童総合センターの測定位置<sup>16)</sup>

#### 8.2 測定結果

図 22 に、表 2 の誤差係数を用い、補正を行なった測定 結果を示す。横軸が図 18 に示した測定位置を、縦軸が測 定値を示しており、黒色の記号それぞれは 3 回分の測定張 力を、灰色の記号は既往の 20cm×30cm の境界箱を用いた



図 22 小型の 14cm×32cm の境界箱を用いた測定結果



図 19 愛知県児童総合センターの立面<sup>16)</sup>



図 20 測定の様子

図 21 14cm×21cm 境界箱

測定結果<sup>13),14)</sup>を示している。測定値は、測定位置によって 20cm×30cm の境界箱を用いた場合と多少異なるところは あるものの、ほぼ同じ傾向で測定されており、3回分の測定 にばらつきが少なく、安定した結果が得られていることが分 かる。一方、20cm×30cm の境界箱の場合と同じく、G,H パネルの測定結果が他のパネルより多少高く測定されてい る。規模が大きかったため、測定は3日に分けて行なわれて いる。Gパネルは測定日2日目に行った最初の測定パネル であり、未明まで雨が降っていたため、測定開始時には膜が 完全に乾いておらず、湿気を含んでおり、その分、膜の面密 度に影響を与えた可能性が考えられる。

愛知県児童総合センターの膜構造の設計張力は、縦、横の 両軸共に目標張力が2kgf/cmになるように施工されている。 測定を行った結果、全パネルにおいて1.3から2.3kgf/cmの 間に張力が求められており、設計張力を若干下回るところが 多いが、竣工後11年が経っているのにもかかわらず、設計 どおりの張力が維持されていると判断された。 9 結

本報では、測定装置の実用化へ向け、現場で容易に使用 できるよう既往の 20cm×30cm の境界箱の代わりに、両辺 をいずれも 30% 減らした小型の 14cm×21cm の境界箱を採 用し、実験を通して精度と使用性を検証した。検証実験に おいて、多項式を用いた回帰分析を行うことにより、誤差 ±10% 以内の既往の境界箱と同等な精度が得られることを 確認した。

現場の測定において、測定者の手ぶれや振動境界のずれな どの不具合を防ぐために、2秒間の測定時間でも共振振動数 の特定が可能であることと、共振振動数の増分による測定張 力の感度の検討により、精度上問題ないことを示した。さら に、記録・解析部の小型・軽量化を行い、リアルタイムで張 力が確認できるようになった。

竣工された膜構造物の膜面に生じうる多様な張力比に、本 測定装置が対応できることを実験を通じて検証しており、新 たな2種類のスピーカーを用いた検証実験より、測定装置の 小型・軽量化の可能性を示した。

14cm×21cm の境界箱を用いて行なった愛知県児童総合 センターの実測定結果においては、測定に偏差が少なく、安 定した結果が得られており、装置の現場利用性や小型化の可 能性が確認できた。今後さらに測定装置の小型・軽量化を進 め、実用化を図る予定である。

## 謝辞

本研究の一部は国土交通省の平成20年度建設技術研究開発 助成(実用化研究)により行なわれた。検証実験は(株)太 陽工業空間技術研究所の石津信彦氏の、実測定においては、 愛知県庁の越山信氏および愛知県児童総合センターの関係 者の全面的な協力を得た。ここに記して深謝する。

#### 参考文献

- [1] 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. 2
- [2] 陳 商煜, 大森博司: 膜構造物の膜張力測定方法の提案とその検証実験,
   日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp. 105–108, 2006.12

- [3] 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
- [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] S.W. Jin and 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, Sep. 2005
- [7] 陳 商煜, 大森博司: 音波を用いた膜張力測定手法における空気の付加 質量の影響の評価, 日本建築学会構造論文集, 第 612 号, pp. 111–116, 2007.2
- [8] S. W. Jin and H. Ohmori : Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures –By Using White Noise Sound Wave, Proceedings of the International Symposium on Shell and Spatial Structures, MB11(CD–ROM), pp. 170–171, Oct. 2006
- [9] 陳 商煜, 大森博司: 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, 膜構造研究論文集 2006, No. 20, pp. 65–70, 2007.2
- [10] 陳 商煜, 大森博司: White Noise を加振音源とした膜張力測定装置 を用いたサスペンション膜の張力測定実験, 日本建築学会大会学術講演

梗概集 (九州), B-1, pp. 909-910, 2007

- [11] 陳 商煜,大森博司: White Noise を用いた膜張力測定装置の開発 装置の改良、検証実験および実構造物への適用,日本建築学会技術報告集,第 26 号, pp. 511–516, 2007. 12
- [12] S. W. Jin and H. Ohmori: Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Membrane Structures by Using White Noise Sound Wave –Improvement of Measurement Equipment, Verification Experiment and Practical Measurement of Actual Suspension Membrane Structure, Proceedings of the International Symposium on Shell and Spatial Structures, International Association for Shell and Spatial Structures, PAP354(CD– ROM), pp. 175–176, Venice, Italy, Dec. 2007
- [13] 陳 商煜,大森博司: White Noise を用いた膜構造物の膜張力測定装置の開発 膜材の相違への対応と実膜構造物の張力測定実験, 膜構造研究論文集 2007, No. 21, pp. 35–42, 2008. 2
- [14] S. W. Jin, H. Ohmori and J. Y. Kim: Development of Measurement Equipment of Membrane Stress Using White Noise Sound Wave, Journal of the Korean Association for Shell and Spatial Structures, Vol. 8, No. 2, pp. 63–72, Apr. 2008
- [15] 陳 商煜,大森博司: 膜張力測定装置の小型化および骨組膜構造の張力 測定実験,日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), B-1, pp. 945-946, 2008
- [16] 愛知県児童総合センター,新建築社,9月号, pp. 234-236, 1996

Development of Measurement Equipment of Membrane Stress for Practical Use — Downsizing, Weight Saving and Improvement of Adaptability for Various Stress Level —

> 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 white noise excitation is utilized. In this paper, various problems in the downsizing of measurement equipment for practical application are examined, and clarified both theoretically and experimentally. As a result, the equipment with the measurement accuracy up to 90% or above is developed, and it is clarified that the downsized equipment can be used on the site more easily through the practical range of the membrane stress which exists in the membrane material of the actual membrane structures.

<sup>\*1</sup> JSPS Research Fellow, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

 $<sup>^{\</sup>ast}2$  Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.