

# 風洞気流中の懸垂膜のフラッター挙動とその振動特性

南 宏和\*1

奥田泰雄\*2

川村純夫\*3

## 梗概

風洞実験の結果、サグをもって両端支持された懸垂膜は、乱れの小さい一様気流をうけると、正弦波形に似た単純な進行波形をもつフラッター状態を安定にとることがわかった。そして、このフラッター振動数は気流速度と線形関係をもつことがわかった。その気流速度・振動数直線の傾きに膜支持間隔を乗じた無次元パラメータは、質量比との間で一つの関数関係にあると推測された。さらに、このフラッター状態において測定した波形進行速度の気流速度に対する比は0.4~0.7であった。この比は重い膜ほど小さくなる傾向がみられた。

## 1. はじめに

PTFE (Polytetrafluoroethylene) コーティング ガラス繊維平織物 (膜材料 A 種) は、膜構造建築物に現在盛んに使用されている。この膜を風洞の上流および下流側で水平バーによりサグ (Sag) をつけて支持して懸垂状態におき、乱れの小さい水平気流をあて、徐々に気流速度をあげていった。すると、気流速度がある臨界気流速度に達したときに、膜は急に浮き上がって大きく波打ち、支持間隔を波長にもつ単純な進行波形をもつ振動状態に移った。著者らはこの振動現象を懸垂膜のフラッターとよびすでに報告した<sup>1)-3)</sup>。これらの報告では他に、このフラッターの臨界気流速度を支配する無次元パラメータを抽出し、これらがつくる関数関係の存在を推論した<sup>2)3)</sup>。

著者らは引き続きいて各種の布と薄いフィルムを膜試料にして同様の実験を行い、同様のフラッターが生起することを報告した<sup>4)-5)</sup>。これらの報告ではほかに、懸垂状態およびフラッター状態にある膜の上流端で測定した支持力を考察した。そして、支持力の時刻歴がフラッター振動周期の間に一つのインパルスを示すこと、しかしこのインパルスをのぞけば支持力はほぼ一定と見なすことも可能で、この一定支持力は予想していたほど大きくならないことを述べた。

以上の報告に加えて、著者らはこのフラッターの近似理論解析法を報告した<sup>7)8)</sup>。この解析法を応用して、膜のサグ、

質量、伸長および曲げ剛性、支持間距離および気流速度とフラッター安定性との関係を調べて報告している<sup>9)</sup>。さらに、前述の既報<sup>2)3)</sup>で予測した、臨界気流速度を支配する無次元パラメータとそれらの関数関係を、理論的に導いている<sup>10)</sup>。

本論は、風洞実験のこのような懸垂膜のフラッター挙動を解説し、その振動数と波形進行速度に現れた特性を調べた結果を報告するものである。前述の一連の報告と同様に、本論は、膜構造設計・施工のために、膜のフラッター特性の一つの基礎資料を得ることを目的としており、特に振動特性の面につき追究するものである。

著者らの以上の研究の以前に、川村らは、このようなフラッター実験および無次元振動数の形での臨界気流速度の解析を行っており、実験の波形モードについての所見と解析結果に対する考察結果を述べている。この研究での懸垂膜は支持間距離が41cm<sup>11)</sup>および50cm<sup>12)</sup>であって、前述の著者らの場合に比べて一段と小さく、膜試料は紙あるいはビニールシートであった。同様の臨界気流速度の解析は吉村らも後に行っている<sup>19)</sup>。

なお、懸垂曲線形状をもつ吊屋根を対象にして、膜試料に紙、ビニールシート、ゴム膜あるいはポリエステルフィルムを用いた模型をつくり、風洞気流中での膜の挙動を研究した報告が多い<sup>13)-15)</sup>。これらの模型は24~50cmと小さく、かつ膜の模型の風上面と風下面には壁が設けられており、さら

\*1 太陽工業 (株) 空間技術研究所 南研究室、\*2 京都大学防災研究所耐風構造研究部門 助手、\*3 大阪市立大学名誉教授

表1 膜試料

Fabric	Mass per unit area, Warp extension m[N·sec <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	Bending stiffness per unit width, D[N·m]*	Thickness [mm]
CFAB1268 PTFE-coated glass fiber	1.268	369	0.78
FAB251 Aramid fib.	0.251	14.7	----
FAB140 Aramid fib.	0.140	10.1	----
FAB48 Polyest. fib.	0.048	51.0	----
FAB47 Aramid fib.	0.047	19.7	----
FIL19 Polyes. film	0.019	13.8	0.012

\* Measured with a KES-FB2<sup>5)</sup> device

に膜に下向きの引っ張りを加えて実験を行った研究もある。これら報告の膜の波動現象は、本論のフラッターとは異なるものである。

## 2. フラッター挙動

本報告のフラッター実験で取り上げた膜試料を表1に示す。CFAB1268は既報<sup>1)~3)</sup>で試料としたPTFEコーティングガラス繊維布で、膜構造建築物の実用膜材料である。FAB251、FAB140は鞆用の布、FAB47はパラグライダー用の布、FAB48は衣料用高密度繊維布である。FIL19は薄いフィルムである。表1には、縦糸方向(FIL19はロールの巻き取り方向)の1軸伸長曲線の初期伸長部分を線形化して算定した伸長剛性(伸長曲線の傾き)と、同様に縦糸方向の純曲げ試験<sup>16)</sup>による曲率-曲げモーメント曲線を線形化して算定した曲げ剛性を参考に示す。膜の単位面積あたりの質量(m)も示す。試料名に付した数字は、このmをg(グラム)単位で表わした数値を示している。

風洞測定部に設置した懸垂膜を図1に示す。上段の装置はCFAB1268に、下段のそれはその他の試料に用いた。膜試料をサグをつけて同じ水平レベルにある支持バーに支持間隔*l*で取り付けた。*l*はCFAB1268は1.780mまたは1.378m、他の試料は0.70mまたは0.35mとした。支持バーは測定部高さのほぼ中央部にある。2次元流れの状態にできるだけ近づけるために、図1上段の装置では試料の幅方向の端部と風洞内に立てた端板とのすきまを小さく3.9cmとし、図1下段の装置では試料端部と風洞側板とのすきまを0.75cmとした。このようにして、試料幅は図1上段の装置で40cm、下段の装置で28.5cmであった。支持バーは、厚さと断面の幅はできるだけ寸法を小さくして、図1上段の装置でそれぞれ3.0cmと4.6cm、下段の装置でそれぞれ0.3cmと1.5cmとした。支持バーは断面が流線型に近い形になるように仕上げた。

これら装置の懸垂膜に、水平方向の一樣気流が膜面の両側に入り込む。フラッター実験中に前線支持バーの上流にある、図1の上段の装置では75cm、下段の装置では8.4cmの位置の熱線風速計で気流速度を計測した。その平均気流速度を*U*と表わし、以下で代表気流速度に用いる。一樣気流の乱れの強さは1%以下(図1の上段の装置で*U*=5m/sec、下段の装

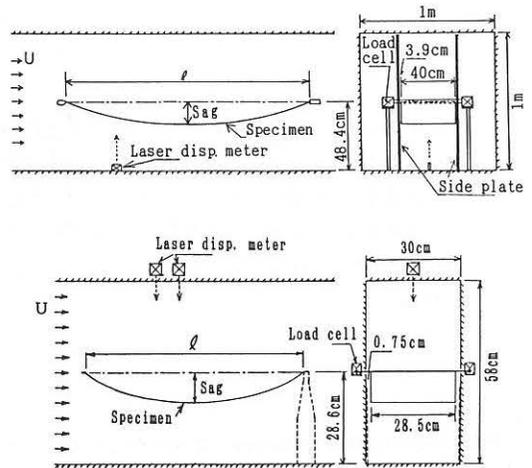


図1 風洞中のフラッター実験装置(上段はCFAB1268用、下段はその他試料用)

置で*U*=3m/secの時)であった。ここに、ある位置の乱れの強さは、その気流速度の平均値からの変動の標準偏差の、その平均値に対する割合である。

図1に示した懸垂膜に対して*U*を徐々に上げていくと、膜はしばらくはほぼ初期の懸垂曲線形状を維持した静的状態、すなわち上流側では上方にやや変形するものの全体的には下に凸に孕んだ状態(下凸状態とよぶ)が続いた<sup>5)6)</sup>。この状態へは、次に述べる上凸状態あるいはフラッター状態において、下流端近くで板などで気流をさえぎるようにして外乱を与えることで容易に転移させることができた。

一方、この状態とは形状がほぼ上下逆の、上に凸に孕んだ形状の静的状態(上凸状態とよぶ)が存在した<sup>2)5)6)</sup>。この状態へは、下凸状態あるいは次に述べるフラッター状態において外乱を与えることで容易に転移させることができた。水平気流をうけてこのように上凸あるいは下凸状態で懸垂膜が安定になることは、気流にたいして迎角0でも帆の膜は安定に孕み得ることが解析<sup>17)18)</sup>で示されていることに対応する。ただし帆の解析では重力は考慮されない。

そして、既報にも述べたが、支持バー間に浮かびつつ進行波形をもって振動するフラッター状態が存在した、これは膜各部の上下振動の中心がほぼ支持バー間を結んだ水平線にある振動である。この状態が、試料の種類やサグ大きさにより、 $U$  を徐々に上げていくときに下凸状態から自然に現れる場合と、 $U$  を十分な大きさにしておいて上凸状態または下凸状態をつくり外乱を与えることで現れる場合があった。

$U$  を徐々に上げていく途上で、下凸状態にあった膜がフラッター状態に自然に移るときの  $U$  が存在し、逆に、フラッター状態にある膜が  $U$  を徐々に下げていく途上で下凸状態に自然に移る  $U$  が存在した。しかし、計測結果によるとこれらの  $U$  の相違は小さく、両者を区別なく臨界気流速度と定義して扱うことにし  $U_{F2}$  とかく。

サグ比を支持間隔 ( $l$ ) に対するサグ (支持間中央の初期たるみ) の比で定義し  $S_a$  とかく。  $l=0.7m$ 、 $S_a=0.164$  の FAB140 が臨界気流速度 ( $U_{F2}=2.9m/sec$ ) をうけてフラッター状態にあるときの 1 周期間の波形の変化を写真 1 に示す。また  $l=0.7m$ 、 $S_a=0.164\sim 0.175$  の FAB251、FAB47、FAB48

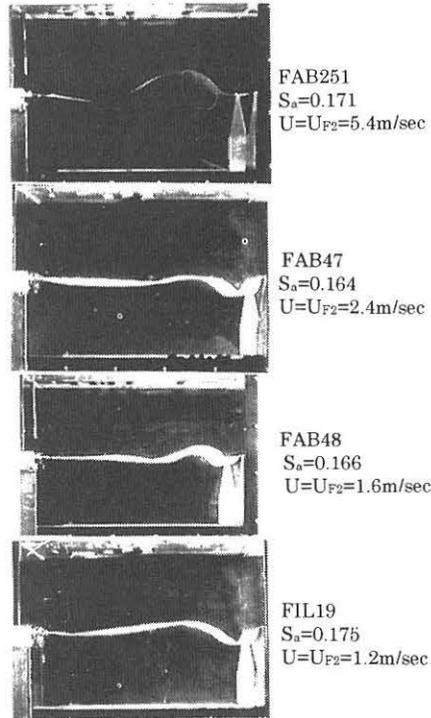


写真 2 臨界気流速度 ( $U_{F2}$ ) でのフラッター波形

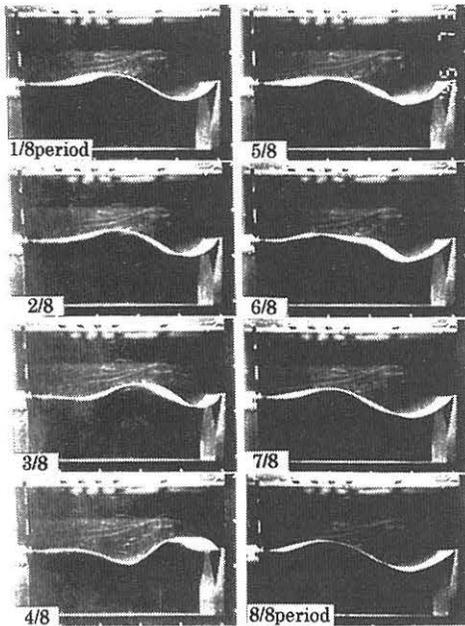


写真 1 1 周期間のフラッター波形の変化 (FAB140.  $U=U_{F2}=2.9m/sec$ ,  $S_a=0.164$ )

および FIL19 のやはり臨界気流速度におけるフラッター状態の波形を写真 2 に示す。そして、写真 1 のフラッター状態 ( $U=U_{F2}$ ) から  $U$  を大きくし、 $U=6m/sec$  に達した時の 1 周期間の波形の変化を写真 3 に示す。

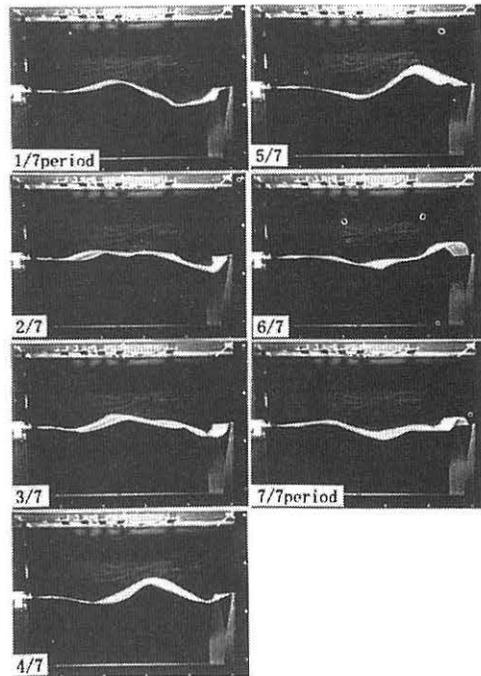


写真 3 1 周期間のフラッター波形の変化 (FAB140.  $U=6m/sec$ ,  $S_a=0.164$ )

これらの写真をみると、FAB140 や FAB251 の  $U_{F2}$  でのフラッター波形は  $l$  を波長とする単純な正弦進行波形の近似も可能な形状とみられる。U が大きくなり、 $U=6\text{m/sec}$  ともなると、依然として単純な正弦波モードが卓越しているものの波形は高次モードの波が重なって角ばったものとなっている。これらより軽い FAB47、FAB48 および FIL19 の波形は、同様の単純な正弦波形が気流に流されたように複雑さを増している。膜が軽くなると波形がこのようになる傾向があることは理論的考察を行った既報<sup>9)</sup>でも述べている。なお CFAB1268 の同様のフラッター波形は既報<sup>24)</sup>に示しており、ここでは省略する。この波形は FAB251 あるいは FAB140 のものと同様であった。

### 3. フラッター振動特性

#### 3.1 振動数特性

前節に解説したフラッター状態にある膜がどのような振動特性をもつものであるか、まず振動数にみられる特性を調べる。

フラッター振動数を  $f$  とする。その測定のために、図 1 に示したロードセルで計測した上流端での膜支持力の時刻歴、あるいは同図に示したレーザー変位計で計測した膜の変位の時刻歴を用いた。これら膜支持力と膜変位の時刻歴ははっきりと周期性を示し、それぞれから平均周期が読み取れるものである。そして両者の平均周期はよく一致した。図 1 上段の装置 (CFAB1268 用) でのフラッター振動数は、こうして読み取った平均周期から求めた。ただし、図 1 下段の装置 (その他試料用) でのフラッター振動数は、サンプリング周波数 100Hz でとった 20 秒間の膜支持力あるいは膜変位の時刻歴からこれらの周波数スペクトル密度を計算しその最大ピークを与える振動数として定めた。この場合も、両者の振動数はよく一致した。

このようにして測定した各試料のフラッター振動数  $f$  とその時の  $U$  をプロットして図 2 に示す。この図では、 $S_a$  と  $l$  のいろいろな組み合わせの条件での実験で得た  $U-f$  関係を各試料について示している。各条件の実験値のプロットの最も  $U$  の小さな位置にあるものは、 $U_{F2}$  でのフラッターの振動数を示している。どの試料のどの  $S_a$  と  $l$  の条件の実験結果も、かなりはっきりした線形関係を示している。この実験結果から、本論の対象としている懸垂膜の一樣気流中のフラッターでは、 $U-f$  関係が線形になる特性をもつと判断される。著者らはこの特性が、前節で調べたようにフラッター波形が単純であることからこれを正弦進行波形に近似して行った理論解析の結果にも認められることを報告している<sup>79)</sup>。以上の考察結果に従い、 $S_a$  と  $l$  をもつ懸垂膜が乱れの小さい一樣気流をうけてフラッター状態にある時の振動数は

$$f = \alpha U + \beta \quad (U_{F2} < U) \quad (1)$$

で表わし得る。 $\alpha$  は  $U-f$  直線の傾きで、 $\beta$  はこの直線が  $f$

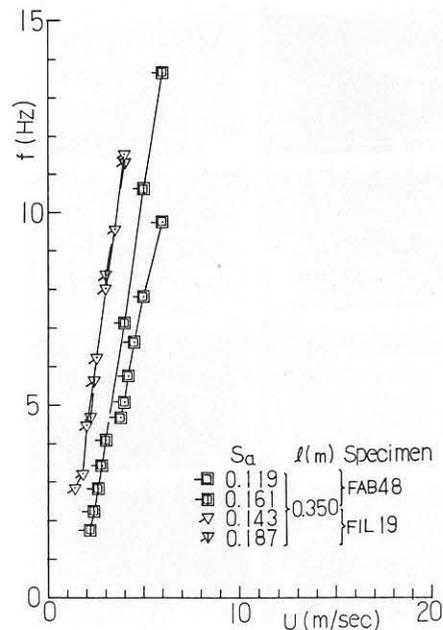
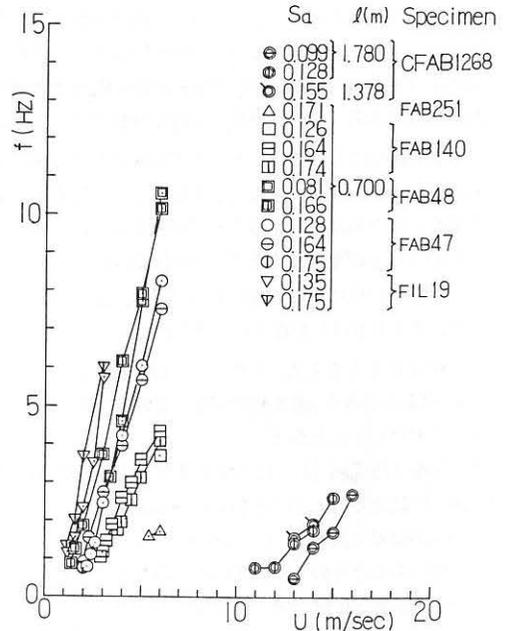


図 2 気流速度 ( $U$ ) とフラッター振動数 ( $f$ ) の関係

軸と交わる切片である。これらは、図 2 の実験結果をみると、膜の種類 (質量) や  $l$  などによって異なる値をとるとみられる。

ここで無次元振動数を、代表気流速度  $U$  を用い代表寸法に

1を用いることにして

$$S_n = f l / U \quad (2)$$

と表わす。この無次元パラメータは、例えば振動変位に比例する力を流体からうけて振動する質点の運動モデルを考えると、慣性力項の係数で除して運動方程式の各項を無次元化すると流体力項の係数として得られる。従って物理的にはこのパラメータは、流体中の振動に関与する慣性力に対する変位比例型の流体力の比に関係するものとも解釈できる。

(2)式に(1)式を代入すると、

$$S_n = \alpha l + \beta l / U \quad (3)$$

となる。無次元振動数はこのように二つの無次元パラメータ、すなわち U-f 直線の傾きに関係する項  $\alpha l$  と切片に関係する項の和の形で表わされる。

一方、膜は表 1 に示したように種類に応じて異なる単位面積質量  $m$  をもつ。この  $m$  を用いて質量比

$$M_r = m / (\rho l) \quad (4)$$

なる無次元パラメータが定義できる。ここに  $\rho$  は気流密度である。例として前述の質点運動モデルでいえば、このパラメータは振動速度の 2 乗に比例する流体力項の係数で除して運動方程式を無次元化すると慣性力項の係数として得られる。あるいはこのパラメータは、膜全体でフラッター振動に関与する気流の質量(付加質量)に対する膜全長の質量の比を与える式からも定めることができる。

図 2 に示した各試料の  $S_n$  と  $l$  の各条件での実験による U-f 関係を直線化し、その傾きから  $\alpha$  を算出し(3)式の  $\alpha l$  を求めた。このパラメータとその試料の  $M_r$  とでプロットした結果を図 3 に示す。 $\alpha l$  は  $M_r$  と  $S_n$  の関数になると予想されるが、今回のこの実験結果では、その関数を大まかにはこの図に示した破線で近似できよう。これによると  $\alpha l$  は、 $M_r < 0.2$  では  $M_r$  に依存してかなり変化するが、0.2 からおよそ 1.0 の間の  $M_r$  ではほとんど変化なくほぼ 0.3 とみられる。

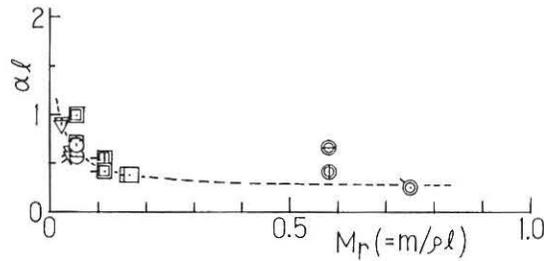


図 3 質量比 ( $M_r$ ) と  $\alpha l$  の関係  
(試料の記号は図 2 に同じ)

参考に、実用膜である CFAB1268 の場合、 $M_r > 0.2$  に対応する支持間距離は  $l < 5.2m$  となる。つまりこの膜の場合、

$l$  がおよそ 5m 以下であればどの大きさであっても、 $\alpha l$  はほぼ一定値であって、いまその値を 0.3 と定めると  $\alpha$  は

$$\alpha = 0.3 / l \quad (5)$$

で定まることになる。

なお、U-f 直線の切片  $\beta$  を含む(3)式右辺第 2 項の無次元パラメータは、図 2 に明らかなように  $\beta$  は 0 ではないので、0 でない何等かの値をとる。このパラメータが  $\alpha l$  と同様に他の無次元パラメータと何等かの関係をもつものであるか、次に調べる必要がある。しかし本論では、それは今後の課題とした。

### 3.2 波形進行速度

次に、フラッター状態にある膜の波形進行速度が、U に比べてどの程度にあるかを調べてみる。膜は気流からエネルギーを吸収してフラッターを起こしている。直観的には、波形進行速度が U と同じであれば気流からのエネルギー吸収はなし得ないように思われる。

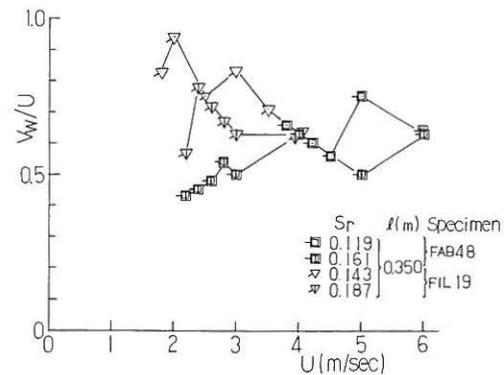
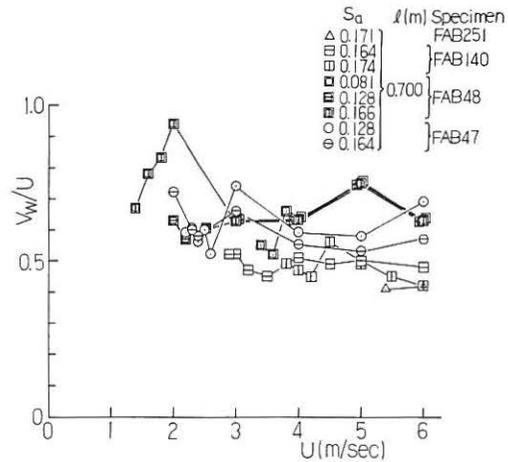


図 4 波形進行速度 ( $V_w$ ) の気流速度 (U) に対する比と気流速度の関係

波形進行速度はCFAB1268以外の試料について計測した。図1下段に示した二つのレーザー変位計の上流側のは膜の上流端から30cmの位置にあり、両者の変位計の間隔は7.5cmである。上流側と下流側の変位計の時刻歴(それぞれ $h_1(t)$ 、 $h_2(t)$ とする。 $t$ は時間。)の相互相関関数

$$R_{12}(\tau) = E[h_1(t)h_2(t+\tau)] \quad (6)$$

を求めると、これが最大となる $\tau$ (Separation time)が得られる。 $E[\ ]$ は時間平均値を表す。二つの変位計の間隔をその $\tau$ で除したものが波形進行速度になりこれを $V_w$ とかく。これは両変位計の中間の位置での値であると考えられよう。

実験のフラッター波形の観察によれば、振動ははっきりと周期的であるものの一つの周期の時間内で波形進行速度は変動していた。従って、上述の $V_w$ は変位計中間位置での波形進行速度であり、これは位相速度(波形を波長 $l$ の正弦波と近似するときは $lf$ である)とは異なる。

このようにして測定した各試料の $V_w/U$ の $U$ に対する比をとり、これと $U$ との関係を図4に示す。各試料とも $V_w/U$ は、臨界気流速度 $U_{F2}$ 近くの $U$ では値がかなり変動する傾向を示し、 $U_{F2}$ から少し離れたより大きい $U$ においては、 $U$ に関係なくほぼ一定値になる傾向を示している。その $V_w/U$ の一定値は、試料の中で軽いFIL19、FAB47、FAB48は0.5~0.7であり、重いFAB140、FAB251は0.4~0.5である。 $V_w/U$ は重い膜ほど小さくなっている。図4には二つの支持間距離についての実験結果が示されており、この限られた結果だけでは定かには判断できないが、 $V_w/U$ には $l$ は無関係のようにみられる。

#### 4. 結論

風洞実験で、サグをもって両端支持された懸垂膜が乱れの小さい一様気流を受けると、正弦波に似た単純な進行波形をもつフラッター状態を安定にとることを示した。そのほかに安定状態として、下凸および上凸形の孕んだ静的状態もとることを示した。そのフラッター波形は臨界気流速度の近くでは単純であるが、気流速度がさらに大きくなると高次モードが重なった角ばったものの変化する。そして、膜が非常に軽いものであれば、臨界気流速度近くであっても波形は気流に流されてくずれた形になりやや複雑なものになる。

このようなフラッターの振動数を調べた結果、振動数は気流速度に対してははっきりと線形になることが判明した。そしてその振動数-気流速度直線の傾き $\alpha$ を含む無次元パラメータ $\alpha l$ を定義して、これと他の無次元パラメータすなわち質量比 $M_r$ との間には、一つの関数関係が存在することが推測された。その関係は、 $M_r > 0.2$ のフラッターであればほぼ $\alpha l = 0.3$ で一定になるものである。この $M_r \cdot \alpha l$ 関係を用いれば、膜の質量と支持間距離が与えられたときに $\alpha$ が予測できることになる。

さらに、実験によるとフラッター波形の進行速度はフラッ

ター振動周期間に変動する。設置したレーザー変位計の位置で測定した波形進行速度を調べた結果、それは気流速度に対して、大まかには0.4~0.7であった。波形進行速度は膜が軽いほど大きく重いほど小さくなる傾向がみられた。

#### 謝辞

実験遂行で大阪市立大学工学部主査 中井重行氏の負われたところが大きい。ここに感謝を申し上げる。

#### 参考文献

- 1) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫、“風洞気流中の膜材料のフラッター挙動実験”、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992、pp.155-156
- 2) Minami.H, Okuda.Y and Kawamura.S., "Experimental Studies on the Flutter Behaviour of Membrane in a Wind Tunnel", Space Structures 4, Thomas Telford, London, Vol.1, 1993, pp.935-945
- 3) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫、“風洞気流中に両端支持された膜材料のフラッター特性”、日本建築学会大会学術講演梗概集、1993、pp.605-606
- 4) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫、“風洞気流中に懸垂した布のフラッター挙動”、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994、pp.65-66
- 5) Minami.H, Okuda.Y and Kawamura.S., "Experimental Study and Analysis on the Fluttering of a Membrane Suspended in a Uniform Air Flow (Part I :Experimental Investigation on the Behavior and the Bearing Force of Membrane Fluttering)", Memories of the Faculty of Engineering, Osaka City Univ., 35, 1994, pp.65-76
- 6) 奥田泰雄、南宏和、川村純夫、“風洞気流中に懸垂した膜の挙動”、日本風工学会誌、63、1995、pp.189-190
- 7) Minami.H, Okuda.Y and Kawamura.S., "Experimental Study and Analysis on the Fluttering of a Membrane Suspended in a Uniform Air Flow (Part II :An Approximate Analysis on the Fluttering)", Memories of the Faculty of Engineering, Osaka City Univ., 35, 1994, pp.77-78
- 8) Minami.H, Okuda.Y and Kawamura.S., "An Approximate Analysis on Fluttering of Membrane in Uniform Air Flow", Proc.IASS, Int. Symp., Milano, 1995, pp.843-850
- 9) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫、“一様気流中に懸垂した膜のフラッターの近似解析”、日本風工学会誌、64、1995、pp.29-38
- 10) 南宏和、奥田泰雄、川村純夫、“一様気流中の懸垂膜のフラッターの実験とその限界条件”、日本風工学会誌(印刷中)
- 11) 川村純夫、辻英一、“吊屋根面の風による振動について(1)天幕の一様流れのなかでの振動”、日本建築学会大会

学術講演梗概集(北海道)、1969、pp.737-738

12) Kawamura,S. and Cermak,J.E., "Aerodynamic Behavior of Suspension Roofs(Second Report), Colorado State Univ., CEP70-71SK-JEC-26B,1970

13) 川村純夫、木本英爾、"一方向吊屋構造の耐風安定性 その1現象"、日本建築学会論文報告集、275、1979、pp.9-14

14) Matumoto,T., "An Investigation on the Response of Pretensioned One-Way Type Suspension Roofs to Wind Action", J. Wind Eng. and Ind. Aerod., 13, 1983, pp.383-394

15) 内山和夫、山田大彦、植松康、"吊屋根の風による動的

挙動"、風工学シンポジウム、1982、pp.327-333

16) Kawabata,S."The Standardization and Analysis of Hand Evaluation", The Hand Evaluation and Standardization Committee, The Textile Machinery Society Japan, 1980

17) Thwaites,G."The Aerodynamic Theory of Sails I", Proc. Royal Soc. London, A261, 1961, pp.402-422

18) 山本恭二、石丸一豊、"流れの中の帆の振動"、日本航空宇宙学会誌、36[412]、1988、pp.233-241

19) 吉村健、鹿庭和史、"一方向吊屋根のフラッタについて"、日本風工学会風工学シンポジウム、1980、pp.255-262

---

THE BEHAVIOR OF FLUTTERING OF MEMBRANE SUSPENDED  
IN WIND TUNNEL AIR FLOW AND THE PROPERTIES OF THE FREQUENCY

Hirokazu Minami\*1

Yasuo Okuda\*2

Sumio Kawamura\*3

SYNOPSIS

As result of experiments, it was proved that a suspended membrane took stable fluttering condition with a simple wave configuration when the membrane was subjected to uniform air flow in a wind tunnel. And it was proved that the membrane had a linear relation between the frequency of the fluttering and the air flow speed. It was supposed that a nondimensional parameter,  $\alpha l$ , was connected with a function of another nondimensional parameter, mass ratio. Where  $\alpha$  is the slope of the linear air flow-frequency line, and  $l$  is the distance between supports of the membrane specimen. Further, the ratios of the measured speed of the progressive wave shape to air flow speed were between 0.4 and 0.7. It was found that the ratio was smaller for heavier membrane.

---

\*1 Center for Space Structure Research, Taiyo Kogyo Corp., \*2 Research Assoc., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., \*3 Prof. Emeritus, Osaka City Univ.