

# 二重ケーブルネット膜構造の振動特性に関する研究

宋 浩<sup>\*1</sup>  
石井 一夫<sup>\*2</sup>

## 梗 概

二重ケーブルネット膜構造は、新しい構造形式であり、その動的特性はまだ不明である。本論文は二重ケーブルネット膜構造の振動実験の振動解析を行い、二重ケーブルネット膜構造の動的特性を把握することを試みた。まず、振動波形の振幅スペクトルから卓越振動数を決め及び振動波形から減衰定数を決め、その卓越振動数と減衰定数を使って、モード解析と非線形解析を行う。解析によって実験供試体の振動性状を把握するための適切な減衰定数の設定方法を探っていく。特に、サスペンション膜構造の振動における空気の付加質量の影響について検討した。

### 1. はじめに

二重ケーブルネット膜構造は、主構造となるケーブルネット部分が二層構成となっており、その間をポスト材で連結し、膜面は上部ケーブル構造に取り付け、全体として構造的に一体として挙動する複合ケーブル膜構造である。

この二重ケーブルネット膜構造は、新しい構造形式であり、大空間を効率よく覆い、しかも膜構造の柔らかな内部空間を持つ構造システムである。この構造形式では、膜部分とケーブルネットを独立して形成し、それぞれポスト材で連結している。そのためにいくつかの特徴をもっている：

a) 一般に膜構造物においては、膜部分の経年劣化によって張力が緩むのに対して、膜材の再緊張はしにくい。二重ケーブルネット膜構造では、膜面とケーブルネットを密着しておらず、それぞれについて再緊張が容易である。

b) 比強度の高いケーブル材をテンション材として使用することより、高い幾何剛性を有していると同時に、大空間を無理なく覆うことができる。

e) ポスト材の長さを調節することによって、構造の曲率を変えることも可能である。

d) ポスト材端部はユニバーサルジョイントまたは球面軸受けを用い、変形にたいする追従性がよく、膜面に加わった外力をスムーズにケーブルネットに伝達することができる。

e) 膜面補強用のアンダーケーブルは、積雪荷重等の膜面から流れてくる荷重を負担して直接外周境界へ流して行く。これにより、膜面を補強するのみならずケーブルネットに過大な外荷重が流れる事を防止する。したがって、ケーブルネットの押さえ側ケーブルの初期張力の消失が起こりにくくなり、従来よりも小さな初期張力で安定形態を得ることができる。

f) 膜部分とケーブルネット部分の振動性状が異なるので、共振現象が起きにくく、各々が減衰として働くので、全体として大きな減衰が期待できる。

膜構造のような軽量構造においては、風による振動等の動的な検討が必要となる。振動波形は大体高次振動がのっていて、複雑なモードとなっている。そのため、膜構造の振動実験が必要となっている。膜構造の振動実験の報告例は、今まではまだ少ない。

\*1 横浜国立大学 工学部建設学科博士課程

\*2 横浜国立大学 工学部建設学科 教授

特に、膜構造の減衰に関する資料及び空気と膜の相互作用に関する資料は少ない。二重ケーブルネット膜構造は、新しい構造形式であり、その動力学特性はまだ不明であるので、二重ケーブルネット膜構造の振動実験の価値は非常に高い。

構造計算する際、自由振動をいくら解析しても実際面の利用価値は少なく、膜構造の動力学特性を把握するため、減衰を考慮した振動解析が必要となっている。

本論文は二重ケーブルネット膜構造の振動実験の振動解析を行って、二重ケーブルネット膜構造の動的特性を把握することを試みた。まず、振動波形の振幅スペクトルから卓越振動数を決め及び振動波形から減衰定数を決め、そして、その卓越振動数と減衰定数を使って、モード解析と非線形解析をする。解析によって実験供試体の振動性状を把握するための適切な減衰設定方法を探っていく。膜構造はサスペンション型軽構造だから、ほかの種類の構造と違って、空気の影響も構造の振動に影響があるので、その影響について調べてみた。

## 2、実験の概要

膜部分の概要図は図 2.1 に示す。二重ケーブルネット膜構造の概要図は図 2.2 に示す。



図 2.1 膜部分モデル

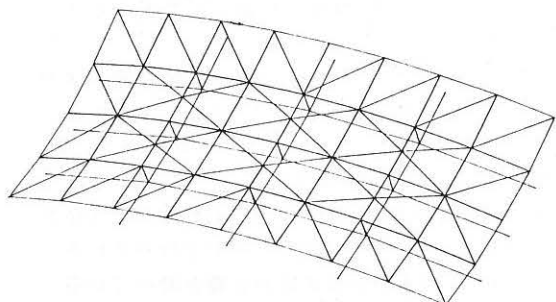


図 2.2 二重ケーブルネット膜モデル

供試体は 3 m、6 m の長方形で、膜材はポリエステル繊維布とする。初期張力の導入は、重りを膜端部の引込みボルトに吊下げるにより行った。二重ケ

ーブルネット膜構造の振動実験はケーブルネット交点を下方に引っ張って、これを離し自由振動をさせ、ケーブル各交点と膜面の点における垂直方向変位を測定した。変位の測定には、レーザービーム変位計を用いた。ちなみに膜部分（下層ケーブル、ポストなし）とケーブル単体（下層ケーブル、膜なし）の振動実験も行った。引込み点が三つあるが、本研究では主に中央点が引込み点である場合の二重ケーブルネット膜構造と膜部分の振動性状を把握していく。膜部分は膜初期張力 50kg/m と 25kg/m の場合について考察した。二重ケーブルネット膜構造は膜初期張力 50kg/m 一定とし、押さえケーブル初期張力 500kg、吊ケーブル初期張力 250kg の場合と押さえケーブル初期張力 250kg、吊ケーブル初期張力 125kg の場合について考察した。なお、中央点に与えた強制変位は共に 4.2 mm である。

本研究使用した膜材、ケーブル材、及びポスト材の材料特性は表 2.1(a),(b),(c) に示す。

表 2.1 (a) 膜材料の材料特性

材料名 (C 種膜材)	引張剛性 Et(kg/m)	ポアソン 比 $\mu$	せん断 剛性 Gt (kg/m)	自重 (kg/m <sup>2</sup> )
ケ	30,478	0.4589	682.0	0.64
コ	18,334	0.2761		

C 種膜材：P V コーティング ポリエステル繊維織布

表 2.1 (b) ケーブル材料の材料特性

材料名	引張弾性率 E(kg/mm <sup>2</sup> )	標準断面積 mm <sup>2</sup>	自重 (kg/m)
ストラップ <sup>®</sup> ロープ <sup>®</sup> 6 × 19 - $\Phi$ 6.3 G 種	10,500	15.8	0.144

表 2.1 (c) ポスト材料の材料特性

材料名	引張弾性率 E(kg/mm <sup>2</sup> )	標準断面積 mm <sup>2</sup>	自重 (kg/m)
PSターンバックル M8	21,000	50.3	1.2

各供試体における測定点は図 2.3 及び図 2.4 に示

す。図 2.3 では、L1-L6 は膜面点 1-6 である。図 2.4 では、L1-L3 はケーブル点 1-3 であり、L4-L6 は膜面点 4-6 である。引込み点はともに中央点である。供試体はほとんど対称で、中央点以外の測定点もほぼ対称である。

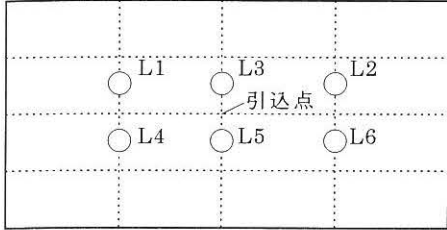


図 2.3 膜部分の測定点

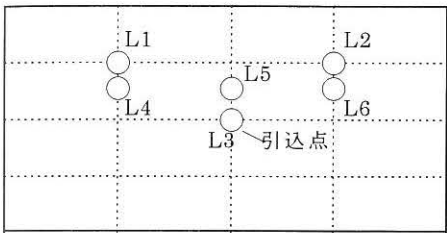


図 2.4 二重ケーブルネット膜の測定点

### 3. 供試体の解析

#### 3.1. 振動方程式

ある構造物が振動する様子は、振動方程式によって数学的に表示される。多自由度系の振動方程式は、以下のように表わされる：

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = 0 \quad (3.1)$$

[M] : 質量マトリックス

[C] : 減衰マトリックス

[K] : 剛性マトリックス

$u$  : 変位ベクトル

モード解析に使う剛性マトリックスは、静的解析におけるものと同じ剛性マトリックスを用いているが、非線形解析を行うとき、幾何学的非線形性を考慮した剛性マトリックスを使う。膜構造特有のリンクリング現象も非線形解析の剛性マトリックス中に考慮した。

減衰マトリックスは一般的につきの三種類がある。

イ) 質量比例型減衰

$$[C] = \alpha_0 \cdot [M] \quad \alpha_0 = 2 \cdot h \cdot \omega \quad (3.2)$$

ロ) 剛性比例型減衰

$$[C] = \alpha_1 \cdot [K] \quad \alpha_1 = 2 \cdot h / \omega \quad (3.3)$$

ハ) レーリー型減衰

$$[C] = \alpha_0 \cdot [M] + \alpha_1 \cdot [K] \\ \alpha_0 = 2 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot (h_1 \cdot \omega_2 - h_2 \cdot \omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (3.4) \\ \alpha_1 = 2(h_2 \cdot \omega_2 - h_1 \cdot \omega_1) / (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

質量比例型減衰は振動数が高くなるにつれて減衰定数が小さくなる傾向があり、剛性比例型減衰は振動数が高くなるにつれて減衰定数が大きくなる傾向がある。本解析に使った減衰マトリックスの効果はその中間であるレーリー型減衰である。

#### 3.2. 解析方法

解析方法はモード解析と非線形解析二つに分けている。それぞれ長所と短所を持っている。モード解析は、計算時間は格段に短くてすむということである。一方、短所というと、線形問題にしか適用できないことである。非線形解析は、微小な時間間隔ごとに常に運動方程式を数値的に積分して解を定めて行く、正確さという長所を持っている。しかし、十分微小な時間間隔を設定しなければ、正確な解を得られない。そのために、膨大な時間を使うという短所である。

##### 3.2.1 モード解析

モード解析は、自由度系の固有振動モードの重ね合わせによって動の応答を求める方法である。現在コンピュータの発展にともない、モード解析の基本的な考え方である直交性、重ね合わせ、モード分離等、複雑な構造物でも、また実験の分野においてもこのモード解析の考え方をを使うことにより、非常に簡単に動的解析ができる。

減衰振動の場合、具体的に以下のように解析する。

多自由度系の振動方程式  $[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = 0$  の解を  $\{u\} = \{u\}e^{u}$  とすると、

$$[\lambda^2[M] + \lambda[C] + [K]]\{u\} = 0 \quad (3.5)$$

これが  $\{u\} \neq 0$  の根を持つためには

$$|\lambda^2[M] + \lambda[C] + [K]| = 0 \quad (3.6)$$

にならなければならない。

式 (3.6) から 2 n 個の複固有振動数が得られそれを式 (3.5) に代入することにより 2 n 個の複固有振動モードが求められる。(n は自由度数)

固有振動モードを重ね合わせるより、素早く構造物各点の変位の時刻歴を求めることができる。

### 3.2.2 非線形解析

非線形解析は振動方程式を微小な時間間隔ごとに数値的に積分して解を定めていく数値積分法によって計算する。数値積分法は各種の方法があり、例えば、線形加速度法、ウィルソンの  $\theta$  法、フォーボルド法、ルンゲクッタ法、ニューマークの  $\beta$  法等。本研究はニューマークの  $\beta$  法を用いる。

ニューマークの  $\beta$  法は、普通、次のように書かれる。

$$\begin{aligned}
 u(t + \Delta t) &= u(t) + \Delta t \dot{u}(t) + \left\{ (\Delta t)^2 / 2 \right\} \ddot{u}(t) \\
 &\quad + \beta (\Delta t)^2 \{ \ddot{u}(t + \Delta t) - \ddot{u}(t) \} \\
 \dot{u}(t + \Delta t) &= \dot{u}(t) + \Delta t \{ \ddot{u}(t) + \ddot{u}(t + \Delta t) \} / 2
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

$\beta$  は公式の性格を調節するためのパラメータで、 $0 \leq \beta \leq 1/2$  の範囲の値を与える。実際には  $\beta = 1/6$  に固定して用いる。

解析の手順は式 (3.7) と振動方程式の三本の式を使って、時刻  $t$  における既知数 ( $u, \dot{u}, \ddot{u}$ ) から、 $\Delta t$  秒後の時刻  $t + \Delta t$  における未知数 ( $u_{t+\Delta t}, \dot{u}_{t+\Delta t}, \ddot{u}_{t+\Delta t}$ ) を計算していく。

## 4. 実験波形及びフーリエ変換

### 4.1 膜部分の実験波形及びフーリエ変換

#### 4.1.1 高張力の時 膜部分の実験波形及びフーリエ変換

実測点は図 2.3 に示された 6 点であるが、対称性のため膜面 2 点と 3 点だけに注目すればいいであろう。

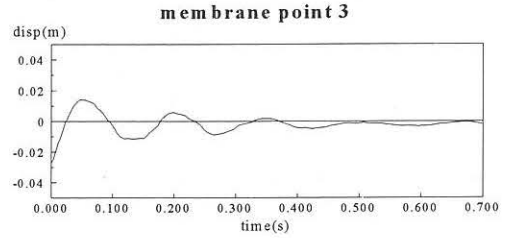
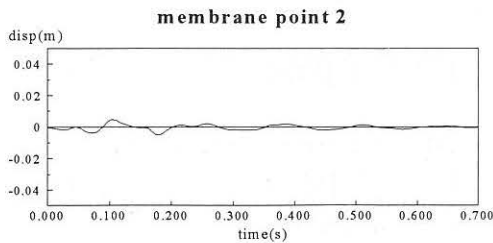


図 4.1 膜初期張力 50kg/m の測定波形  
膜部分モデルの振幅スペクトル図は以下に示している。

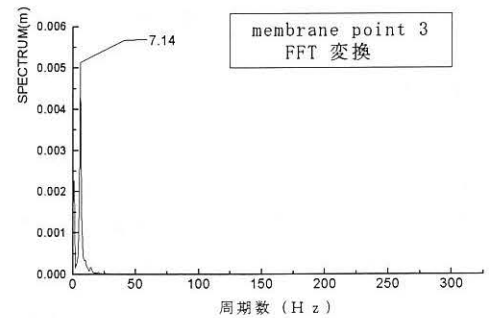
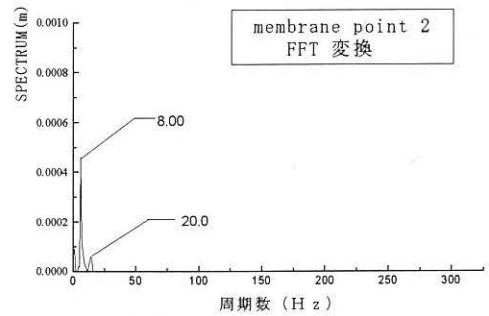
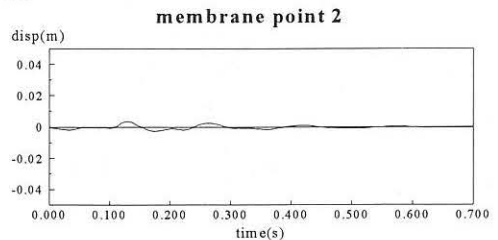


図 4.2 膜初期張力 50kg/m の測定波形の振幅スペクトル

高張力の時、膜部分モデルでは約 7.14 Hz の振動数が卓越していることは明らかである。

#### 4.1.2 低張力の時膜部分の実験波形及びフーリエ変換



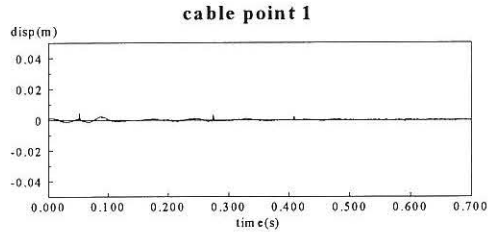
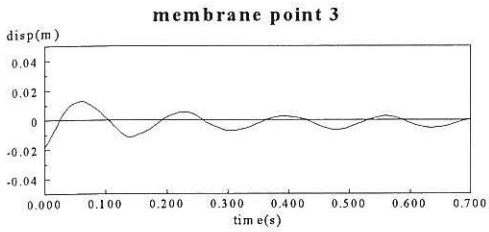


図 4.4 膜初期張力 25kg/m の測定波形

振幅スペクトル図は以下に示している.

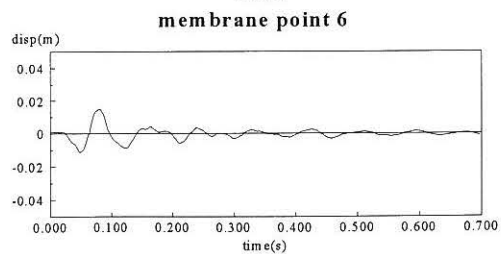
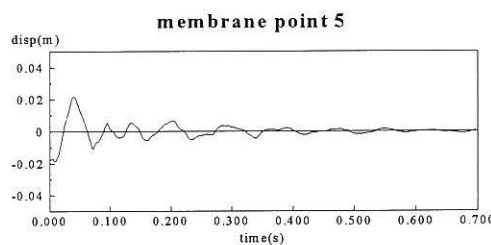
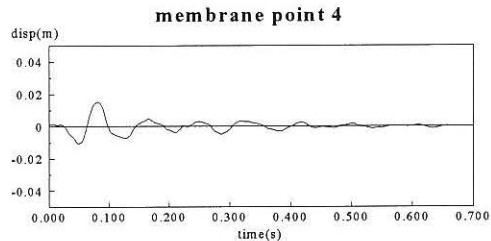
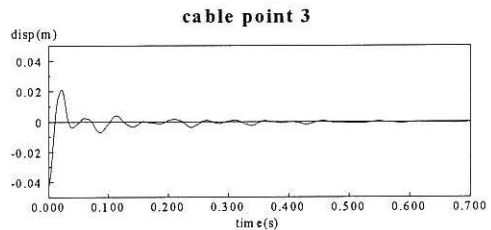
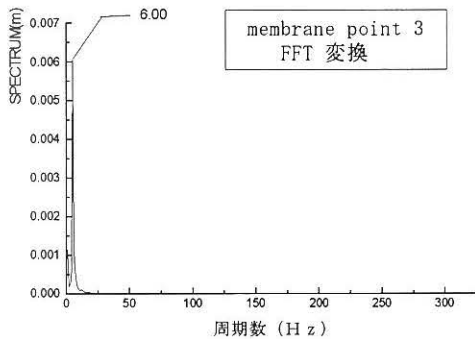
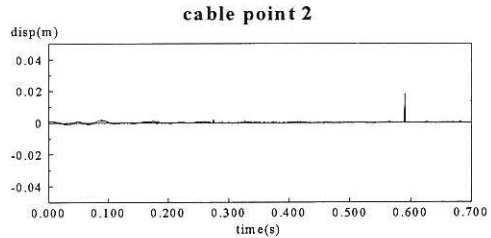
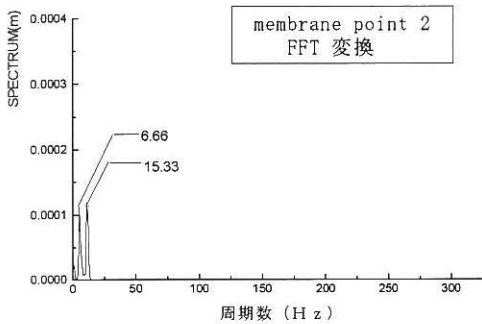


図 4.4 膜初期張力 25kg/m の測定波形の振幅スペクトル

低張力の場合膜面の卓越振動数は高張力の場合より少し低めの数値になっている。高張力の場合の 7.14Hz に対して、低張力の場合膜面の卓越振動数は 6.00Hz である。これによって膜面張力の減少につれて膜面の卓越振動数が減っていくという結論を得られる。

## 4.2 二重ケーブルネット膜構造の実験波形及びフーリエ変換

### 4.2.1 高張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形及びフーリエ変換

図 4.5 高張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形

実験波形からフーリエ変換して卓越振動数を捉える試みをして、二重ケーブルネット膜構造の卓越振動数は以下で示している。

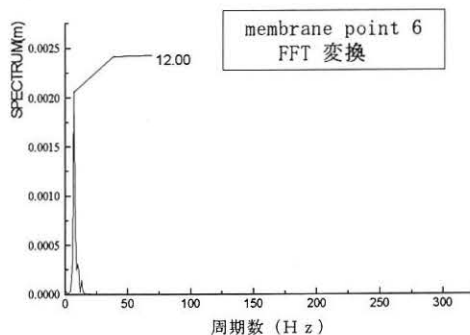
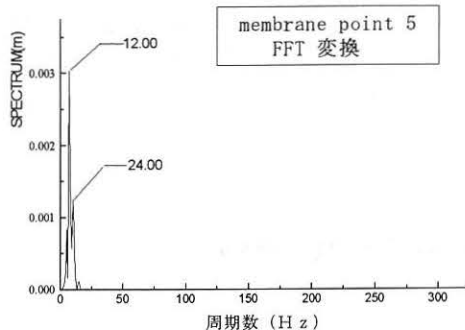
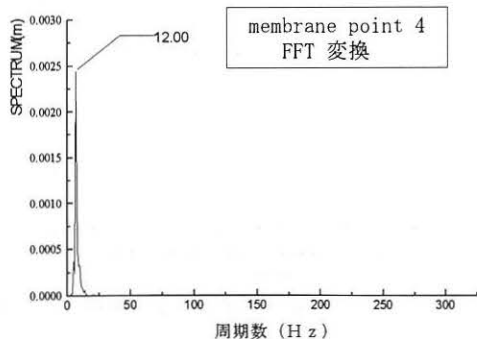
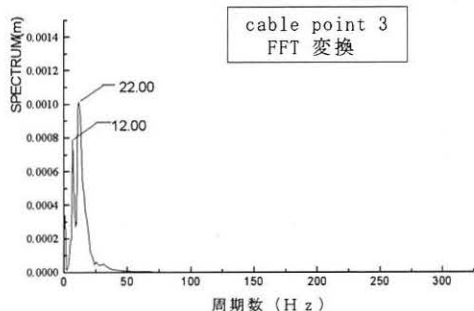
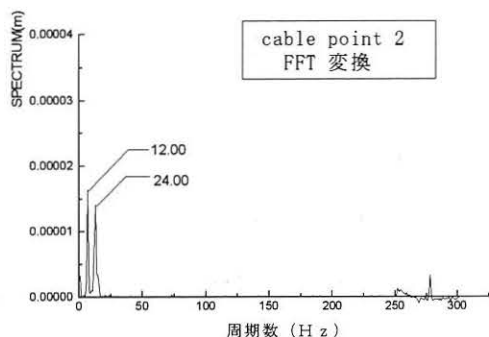
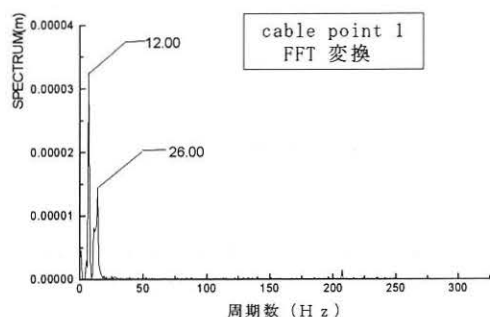


図 4.6 高張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形の振幅スペクトル

二重ケーブルネット膜構造は、10-30Hzの卓越振動数が存在しているということは明らかである。振動波形では、1、2、3ケーブル交点の振動は細かく、高い振動数の成分はおおい。4、5、6膜面点の振動は低い振動数が多く、サスペンション型軽構造の振動特徴が現れる。振幅スペクトル図では、1、2、3ケーブル交点のピークは12.00Hzと24.00Hz位であり、4、6膜面点は12.00Hzが主なピークで、単純な低次振動と思われる。膜面点5の振幅スペクトルから見ると、高次振動の成分もあるということは明らかである。これは膜面点5が引っ張ったケーブル点3に近いので、ケーブル点の高次振動に影響され易いと考えられる。膜面点5の波形を見ると、最初短い周期で振動しているが、後はやや長めの周期で振動し、複雑な様相を現している。

実測波形を高速フーリエ変換し振幅スペクトルを求めることによって、二重ケーブルネット膜モデルの卓越振動数は10-30Hz台ということが分かった。文献1より、ケーブルネット単体の卓越振動数は30Hz前後である。二重ケーブルネット膜モデルは膜部分モ

デルの卓越振動数（6-10Hz）とケーブルネット単体の卓越振動数（30Hz）の両方の成分を持つことは、膜部分と二重ケーブルネット一体になって振動していると思われる。

#### 4.2.2 低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形及びフーリエ変換

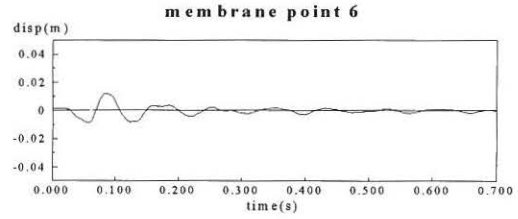
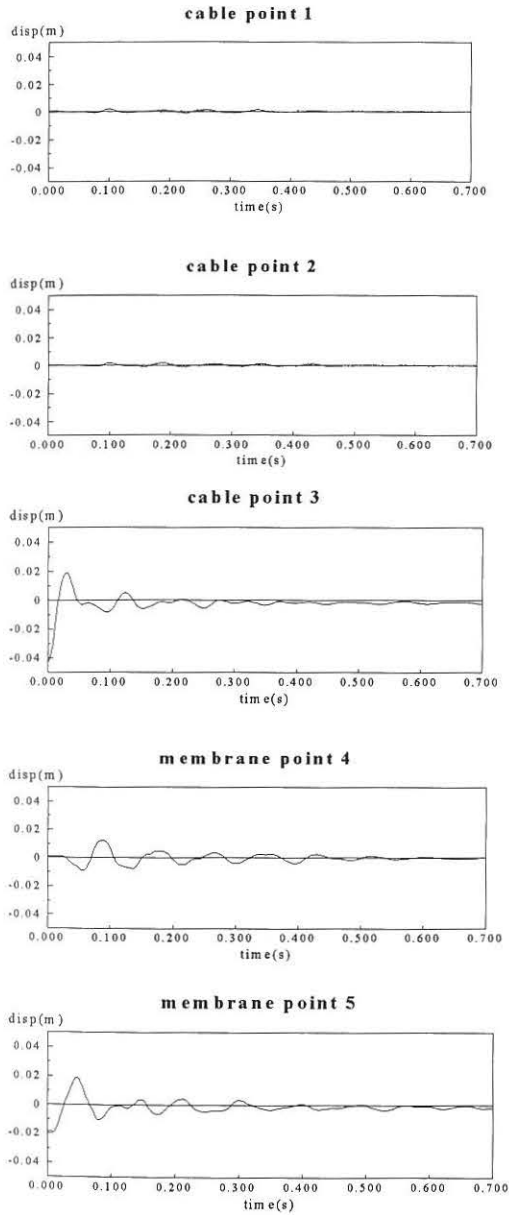
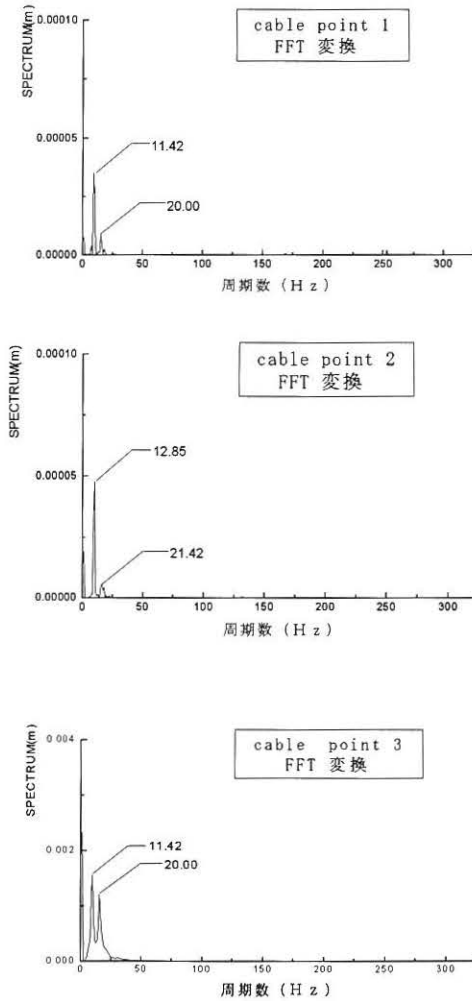


図 4.7 低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形

低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形の振幅スペクトル以下に示している。



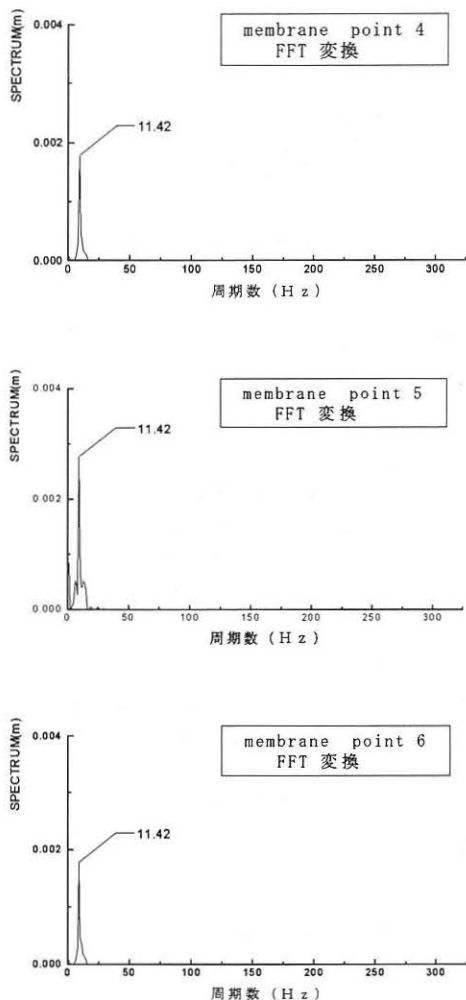


図 4.8 低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の実験波形の振幅スペクトル

低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の卓越振動数は高張力の場合に比べてやや低めの数値になっている。高張力の場合二重ケーブルネット膜構造の卓越振動数が 12.00Hz で、低張力の場合二重ケーブルネット膜構造の卓越振動数 11.42Hz であり、大きい差はない。高張力の場合、ケーブル点 3 と膜面点 5 の振動波形は最初の 2、3 波がもっと激しく振動しているようだが、他の測定点の波形はあまり大きい差はなく、振幅や減衰傾向も似ている。低張力の場合と高張力の場合、ケーブル初期張力だけが違っているのに対して、膜面の初期張力が一定の数値である。構造の振動特性が大きく違わないのは、膜面の初期張力が、構造の振

動特性に大きく影響するためであり、ケーブル初期張力が違っても、構造の振動特性があまり大きく影響されなかった。

## 5. 膜部分モデルと二重ケーブルネット膜モデル実験波形の減衰の設定.

### 5.1 周波数分析

複雑そうな振動は、実際、いくつか振動数が異なる、振幅が様々の周期波成分から合成されている、だが、加振をした振動応答波形は一見しただけでは其中にどのような周期成分がどのような割合で含まれているかを知ることは、非常に難しい。フーリエ解析はこのような複雑な波形を単純な周期関数に分解し、その周期性を調べるものであり、時間領域のデータを周波数領域へ、またその逆を行うものである。全観測時間  $T$  で、等時間間隔  $\Delta t$  に関して観測された離散的なデータには、一般的に有限フーリエ変換を適用する。

$N$  個のデータ点を通る波形を、 $N$  個の未定定数を含む次のような有限フーリエ変換で表わす。

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2-1} (a_n \cos 2\pi f_n t + b_n \sin 2\pi f_n t) + \frac{a_{N/2}}{2} \cos 2\pi f_n t$$

$$f_n = f_0 \cdot n \quad (5.1)$$

$$f_0 = 1/T$$

式(5.1)にオイラー公式(5.2)

$$e^{\pm i\omega t} = \cos \omega t \pm i \sin \omega t \quad (5.2)$$

を使うと、次のようになる

$$\begin{cases} y(t_k) = \sum_{n=0}^{N-1} F(if_n) e^{i2\pi f_n t_k} f_0 \\ F(if_n) = \sum_{k=0}^{N-1} y(t_k) e^{-i2\pi f_n t_k} f_0 \end{cases} \quad (5.3)$$

これは有限フーリエ変換の複数表現である。式(5.3)で、 $F(if_n)$  を  $y(t_k)$  のフーリエ変換と呼び、 $y(t_k)$  を  $F(if_n)$  の逆フーリエ変換という。

ここで

$$F(if_n) = c_n / f_0 \quad (5.4)$$

とすると、式(5.1)は

$$y(t_k) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{i2\pi f_n t_k} \quad (5.5)$$

と変形できる。 $c_n$  はフーリエ振幅スペクトルと呼ばれ、



各振動成分の強さ（あるいは、寄与分）を表す値である。

## 5.2 卓越領域成分の合成

フーリエ解析結果から、膜面モデルでは5-10 Hzの振動が卓越しており、二重ケーブルネット膜モデルでは10 Hz台と20 Hz台の振動成分が振動に大きく影響する。各振動成分の減衰特性を把握するため、逆フーリエ変換によって卓越振動数の波形をそれぞれ合成することを試みた。卓越している波形の減衰定数は、以下のように算出する。

まず、それぞれの波形の振幅比  $d$  を計測する、その平均値  $\bar{d}$  は平均振幅比とする、次に、求めた平均振幅比から減衰定数を算出する。

$$h = \frac{\left(\frac{\ln \bar{d}}{2\pi}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\ln \bar{d}}{2\pi}\right)^2}} \quad (5.6)$$

$h$  は減衰定数。

公式(5.6)を使って、卓越している振動数領域の成分を逆フーリエ変換した波形の減衰定数を決定する(図5.1)。各卓越振動数の波形から合成された波形は図5.2に示している。

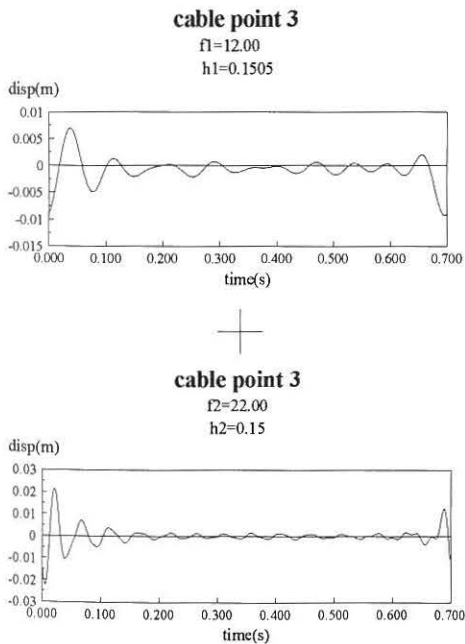


図 5.1 各卓越振動数の振幅スペクトルの逆フーリエ変換



**cable point 3**  
 $f1=12.00$      $f2=22.00$   
 $h1=0.1505$     $h2=0.15$

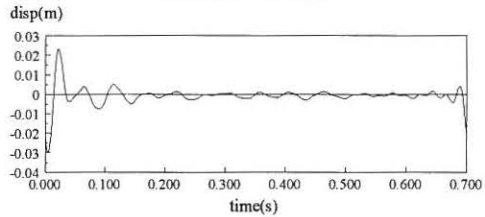


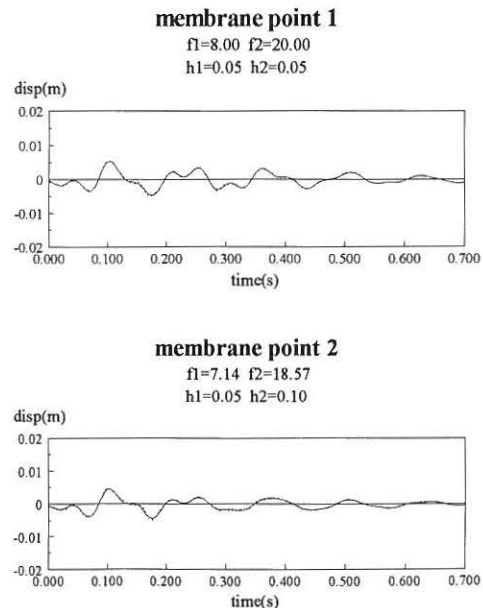
図 5.2 各卓越振動数の波形から合成された波形

合成された波形と実測波形の比較は5.2、5.3に示す。各測定点の各卓越振動数における減衰定数もいっしょに示されている。各卓越振動数の成分から逆フーリエ変換した波形の減衰定数を決めながら、各卓越振動数領域の成分が振動に与えた影響の度合も把握する。

本文以下の図では、特別の説明がある限り、……は実測波形、——は解析波形である。

## 5.3 膜部分モデル実験波形の減衰の設定

### 5.3.1 高張力の場合：



### membrane point 3

f1=7.14  
h1=0.10

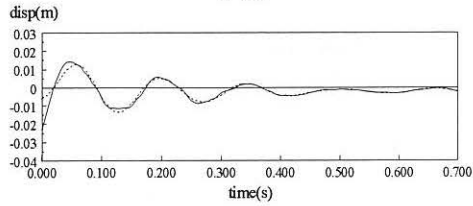
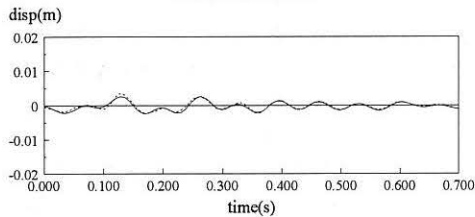


図 5.3 高張力の場合各卓越振動数の波形から合成された波形と実測波形の比較

### 5.3.2 低張力の場合 :

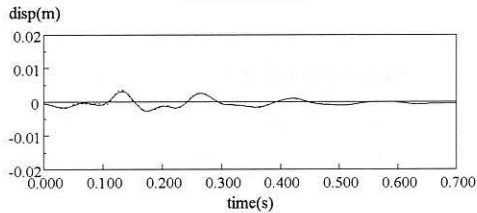
#### membrane point 1

f1=6.66 f2=14.66  
h1=0.075 h2=0.036



#### membrane point 2

f1=6.66 f2=15.33  
h1=0.11 h2=0.09



#### membrane point 3

f1=6.00  
h1=0.11

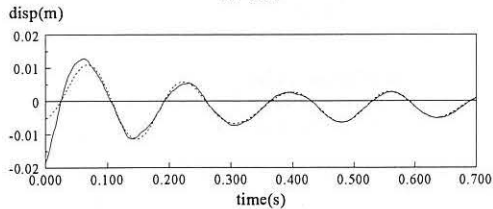


図 5.4 低張力の場合各卓越振動数の波形から合成された波形と実測波形の比較

両方の場合とも減衰定数が主に 0.05-0.1 くらい

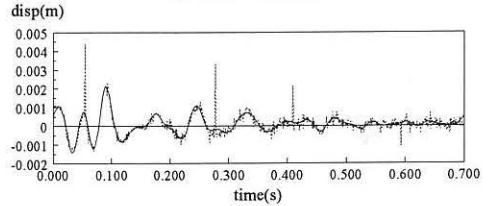
であるということが分かる。中央点から遠くなれば、減衰も小さくなるという傾向もある。

### 5.4 二重ケーブルネット膜モデル実験波形の減衰の設定.

#### 5.4.1 高張力の場合 :

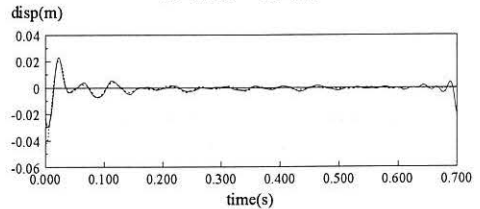
#### cable point 1

f1=12.00 f2=26.00  
h1=0.10 h2=0.10



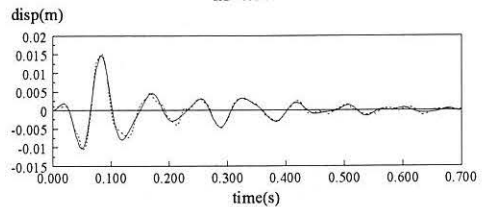
#### cable point 3

f1=12.00 f2=22.00  
h1=0.1505 h2=0.15



#### membrane point 4

f1=12.00  
h1=0.04



#### membrane point 5

f1=12.00 f2=24.00  
h1=0.10 h2=0.10

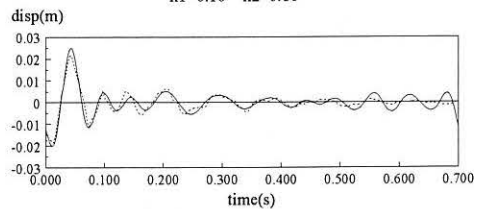


図 5.5 高張力の場合各卓越振動数の波形から合成された波形と実測波形の比較

#### 5.4.2 低張力の場合：

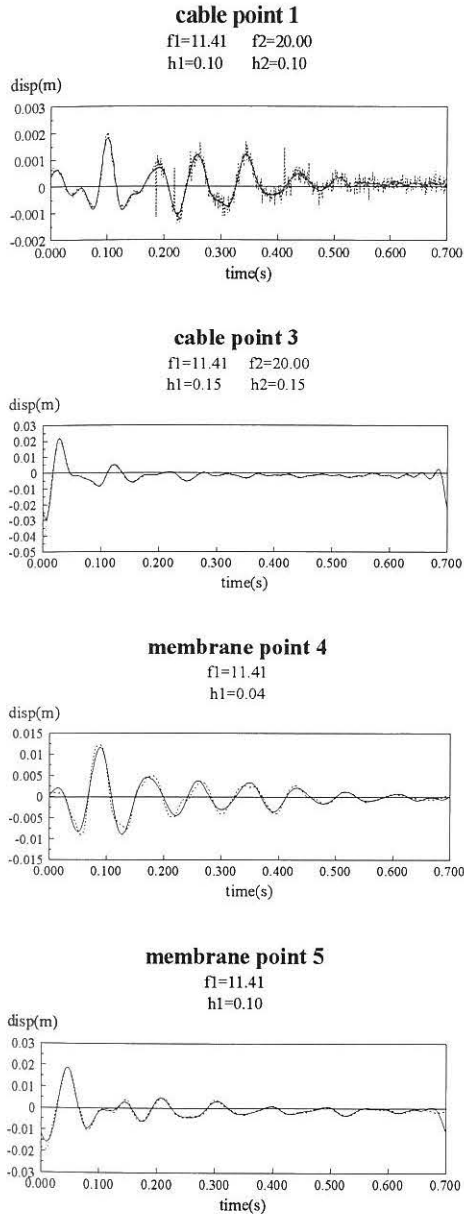


図 5.6 低張力の場合各卓越振動数の波形から合成された波形と実測波形の比較

低張力の場合も高張力の場合も、減衰定数はほとんど同じで、引込点の減衰は大きく、減衰定数は約 0.15 くらい、ほかのケーブル点は約 0.1 である。膜面点の減衰について、引込点に近い膜面点の減衰が大きく、減衰定数は約 0.1 くらい、引込点に遠い膜面点の減

衰が小さく、減衰定数は約 0.04 くらいである。中央点から遠くなれば、減衰も小さくなるという傾向がある。

#### 6 膜部分モデルと二重ケーブルネット膜モデル波形のシミュレーション。

##### 6.1 膜部分モデル波形のシミュレーション。

###### 6.1.1 付加質量

膜面は空気のなかで振動するとき、空気は膜面の振動に影響するか？その影響は大きいか、小さいか？どのくらい影響するか？膜は本来、軽量で剛性の小さいものであることから、膜面に空気の影響を音響工学では以前より注目されているが、膜構造においてこれはあまり注意されなかった。音響工学の研究対象は、受話器、マイクなどの振動板のような小さいものであり、膜構造と違うけれど、理屈は共通であろう。音響工学の理論によって、膜面は媒体中振動するとき、膜面両側の媒体は膜面に押しされ、引かれ、付加質量として作用している。結果として、振動系統の自然振動数は低減される。正岡氏“サスペンション膜構造の振動性状に関する研究”（文献 2）の模型振動実験結果から見ると、かなり影響すると考えられる。とくに HP 形状の膜構造においては、空気は膜構造の中に存在して、膜面と一体となって振動している。その影響は数値面ではかなり難しい。一つだけ言えることは、その影響は平面膜面の場合に比べて、非常に大きい。本実験モデルでは、ケーブルの重量は軽い（膜面重量  $0.64\text{Kg/m}^2$  に対して、ケーブルの重量は膜面重量に換算して、約  $0.20\text{Kg/m}^2$  である。）ので、空気の付加質量の影響はある程度存在すると思われる。二重ケーブルネット膜構造の場合、ケーブルとポストの重量は膜面重量と大体相当する。最初は二重ケーブルネット膜構造の振動には空気の付加質量の影響があまり関係ないと考えたが、実際に解析すると、やはり空気の付加質量に影響されているようだ。膜部分モデルのほうが、その影響はもっと明らかである。

高初期張力の場合膜面の固有値では、空気の付加質量を考慮する前に得た第一固有値は  $8.83\text{Hz}$  である。実験波形の振幅スペクトルのピークは、 $7.14\text{Hz}$  位である。明らかに膜面部分の固有値範囲は実験からの  $7.14\text{Hz}$  のピーク値を含んでない。もし固有値解析が正確であれば、実験からの  $7.14\text{Hz}$  のピーク値つまり構造の卓越振動数を含んでいると考えられる。ただ、空気の付加質量を考慮しようとする、どのくらい影

響するかを知るのにはかなり難しい。本論文では、試算で膜面部分の自由振動波形を得て、フーリエ変換でその特定質量の場合、卓越振動数を求める。卓越振動数は 7.14 Hz になる付加質量を使って、膜面部分の振動波形を復元することを試みた。非線形解析も同じ手順で付加質量を決め、解析する。付加質量考慮前及び付加質量考慮後の波形と実測波形の比較は、例として、二重ケーブルネット膜モデルの非線形解析を示した。

空気の付加質量の計算公式は、研究課題として残っている。

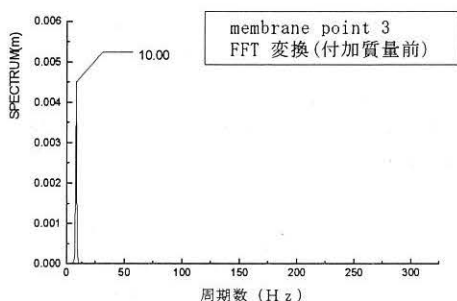


図 6.1 付加質量考慮前の振幅スペクトル

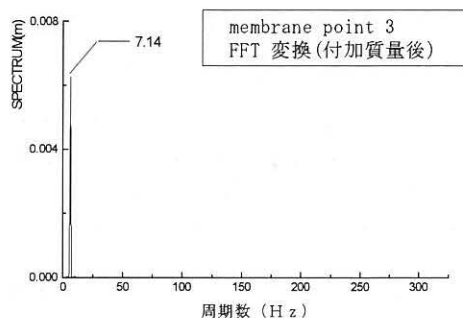


図 6.2 付加質量考慮後の振幅スペクトル

### 6.1.2 膜部分モデルのモード解析

#### 1. 膜面初期張力 50kg/m の場合

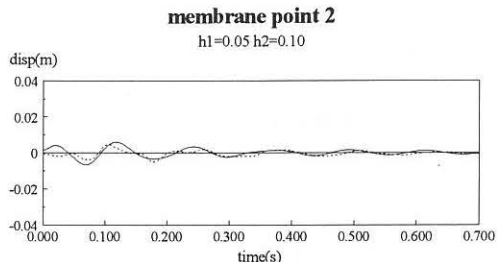
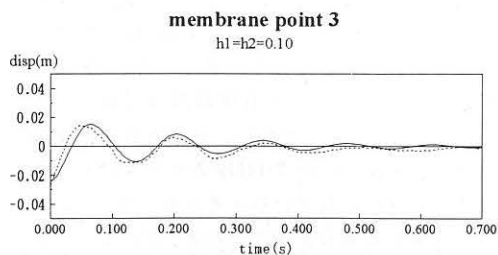


図 6.3 膜面初期張力 50kg/m の場合のモード解析

既に分かったことだが、膜面点 2 の卓越振動数は 8.00Hz で、中央の膜面点 3 の卓越振動数の 7.14Hz に比べて、やや高めの数値になっている。膜面点 3 は単純な低次振動で、膜面点 2 は 20Hz 台の卓越振動数もあり、高次振動の成分もあると思われる。付加質量で振幅スペクトルを合わせるため、2 点の付加質量を小さくしなければならぬ。2 点は微小振動なので、微小振動のとき空気の付加質量の影響は少ないということが考えられる。

#### 2. 膜面初期張力 25kg/m の場合

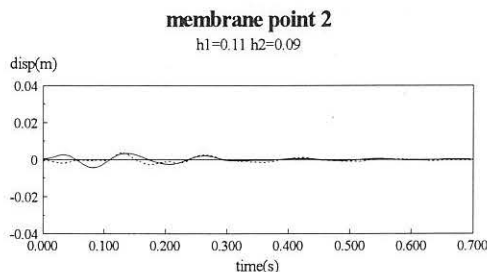
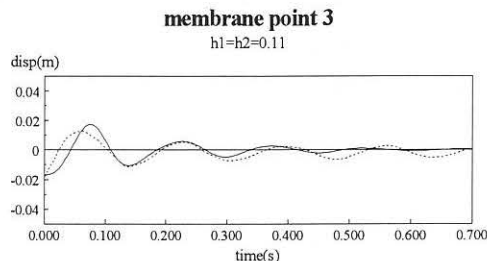


図 6.4 膜面初期張力 25kg/m の場合のモード解析 (付加質量考慮)

膜面初期張力 50kg/m の場合と同様に、膜面点 2 の付加質量は膜面点 3 の付加質量に比べて少し低めの数値を使っている。

### 6.1.3 膜部分モデルの非線形解析

試算で膜面部分の自由振動波形から得た振幅スペクトルと実測波形から得た振幅スペクトルが合うときの付加質量を使って、モード解析と同じ減衰定数を使って膜部分モデルの非線形解析を行う。

#### 1. 膜初期張力 50kg/m の場合

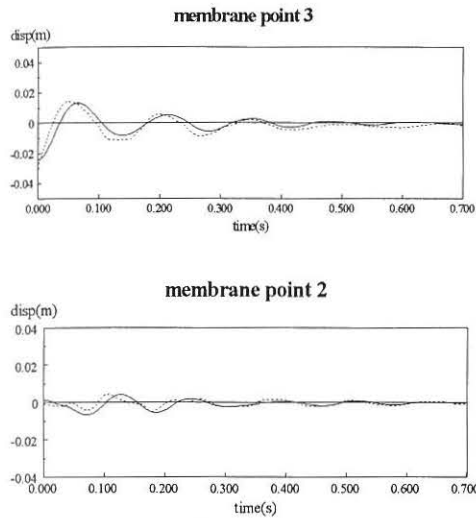


図 6.5 膜面初期張力 50kg/m の場合の非線形解析 (付加質量考慮)

#### 2. 膜初期張力 25kg/m の場合

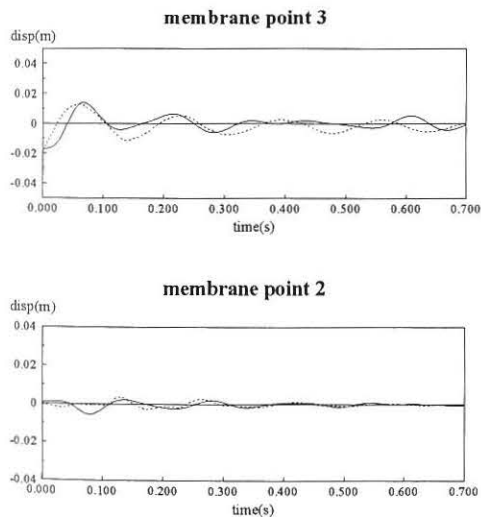


図 6.6 膜面初期張力 25kg/m の場合の非線形解析 (付加質量考慮)

### 6.2 二重ケーブルネット膜モデル波形のシミュレーション.

付加質量の考慮方法は膜部分モデルの解析と同じなので、ここでは省略する。6.2.2 で、非線形解析の場合付加質量考慮前及び付加質量考慮後の波形と実測波形の比較を示した。非線形解析をするとき、全体モデルが収束し難く、ほぼ対称なモデルであるため、4分の1モデルを使って解析する。固有値解析では、4分の1モデルからの解析値と全体モデルからの解析値を比較し、両者の値をよく一致する事を確認し、4分の1モデルを用いた。

#### 6.2.1 モード解析

#### 1. 押さえケーブル初期張力 500kg、吊ケーブル初期張力 250kg の場合

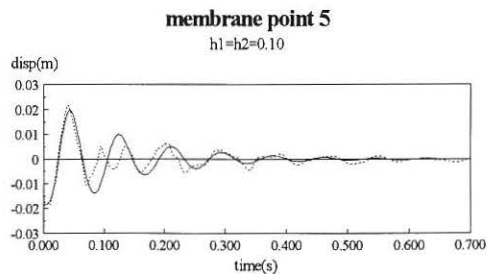
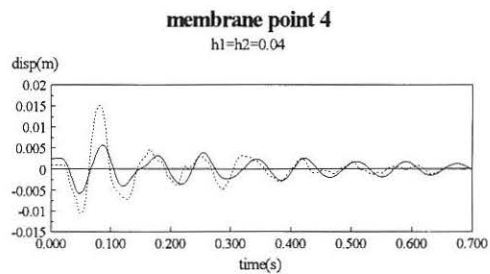
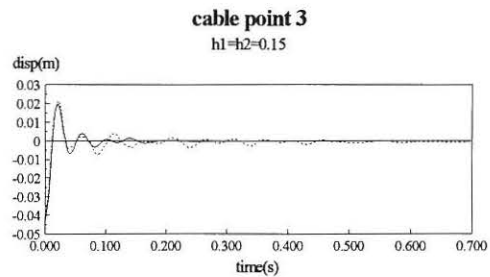


図 6.7 ケーブル初期張力 500kg/250kg で、二重ケーブルネット膜モデルのモード解析 (付加質量を考慮)

2. 押さえケーブル初期張力 250kg、吊ケーブル初期張力 125kg の場合

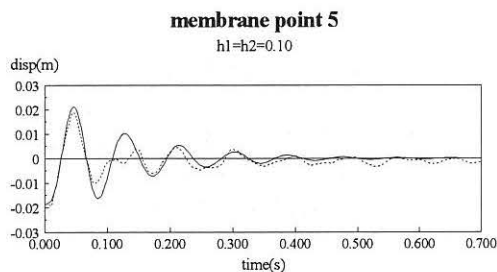
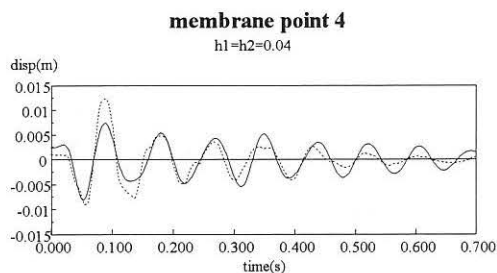
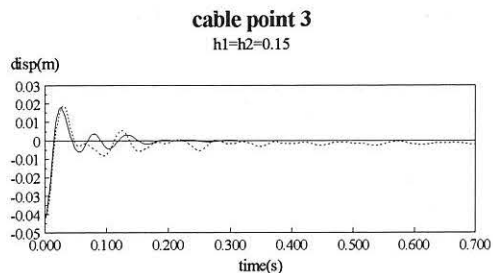


図 6.8 ケーブル初期張力 250kg/125kg で、二重ケーブルネット膜モデルのモード解析（付加質量を考慮）

### 6.2.2 非線形解析

1. 押さえケーブル初期張力 500kg、吊ケーブル初期張力 250kg の場合

a) 付加質量考慮前：

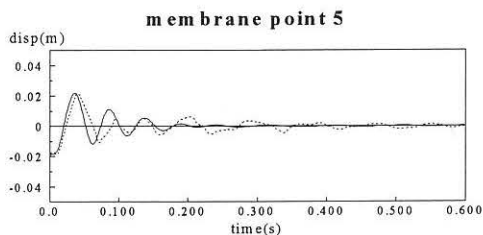
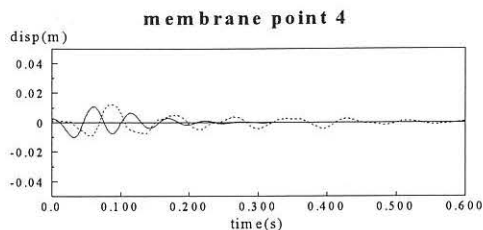
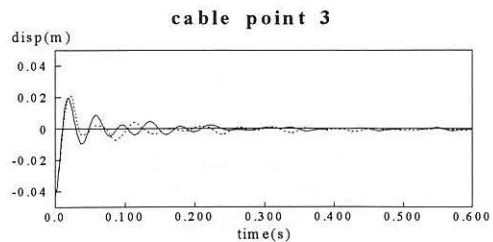


図 6.9 ケーブル初期張力 500kg/250kg で、二重ケーブルネット膜モデルの非線形解析（付加質量考慮前）

b) 付加質量考慮後：

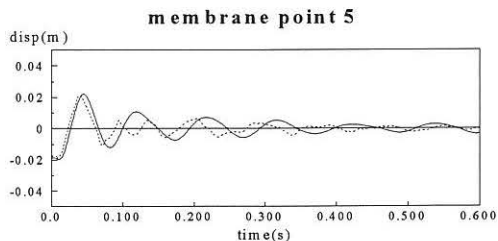
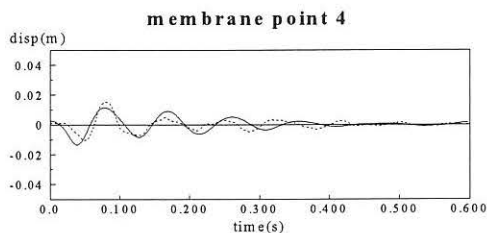
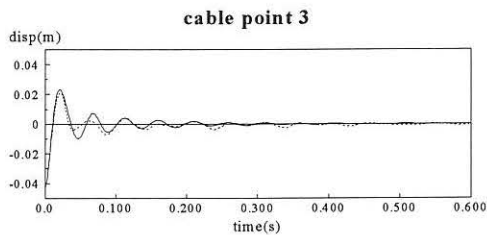


図 6.10 ケーブル初期張力 500kg/250kg で、二重ケーブルネット膜モデルの非線形解析（付加質量考慮後）

2. 押さえケーブル初期張力 250kg、吊ケーブル初期張力 125kg の場合

a) 付加質量考慮前 :

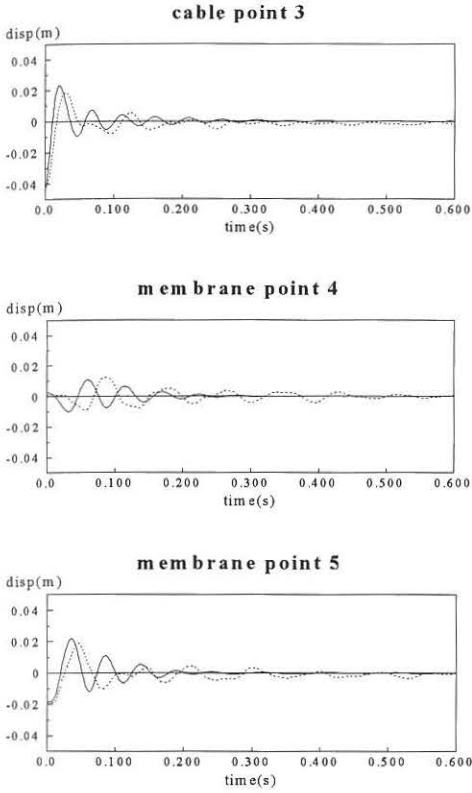


図 6.11 ケーブル初期張力 250kg/125kg で、二重ケーブルネット膜モデルの非線形解析 (付加質量考慮前)

b) 付加質量考慮後 :

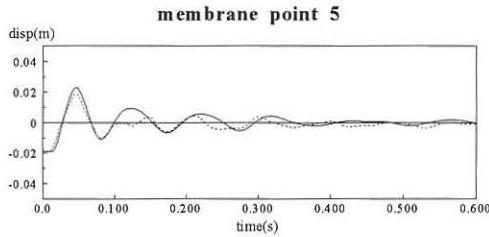
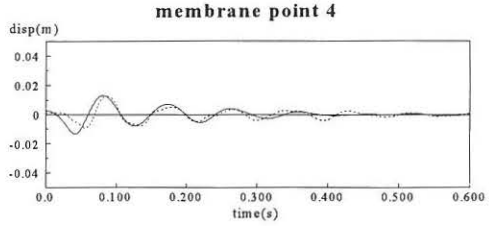
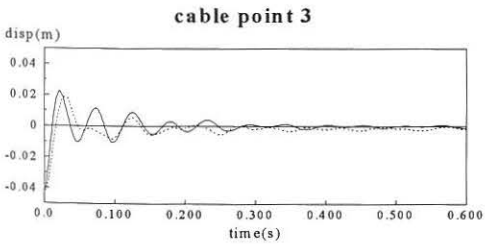


図 6.12 ケーブル初期張力 250kg/125kg で、二重ケーブルネット膜モデルの非線形解析 (付加質量考慮後)

6.2.3 付加質量についての考察 :

高張力の場合と低張力の場合ともに、ケーブル点3と膜面点4、5の振動は付加質量の考慮が必要となるという結論が得られる。ケーブル点1、2の振動は微小振動なので、空気の付加質量の影響は少ない。解析では、空気の付加質量を考慮しないで実測波形に合う波形が得られる。高張力の場合ケーブル点2のモード解析の波形は図 6.13 に示す。実際の実験体は完全に対称ではなく、初期形状解析後のケーブルと膜の張力も完全に対称ではない。よって、非線形解析では、4分の1モデルを使っているので、小さい変位の振動においては多少誤差があり、全体モデルのモード解析では、より実際に近い結果を得られるだろう。

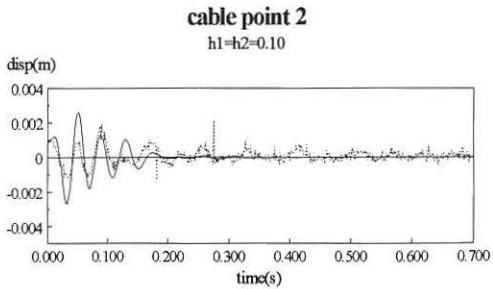


図 6.13 ケーブル点2のモード解析の波形

## 7. 結論:

本論文は膜部分モデルと二重ケーブルネット膜モデルの振動性状について考察を行い、振動波形のシミュレーションも試みた。主に以下の結論を得られる。

- 1) 膜部分モデルの卓越振動数は 6-10Hz 台で、二重ケーブルネット膜モデルの卓越振動数は 10-30Hz 台ということが分かった。文献 1 により、ケーブルネット単体の卓越振動数は 30Hz 前後である。二重ケーブルネット膜モデルは膜部分モデルの卓越振動数 (6-10Hz) とケーブルネット単体の卓越振動数 (30Hz) の両方の成分を持つことは、膜部分と二重ケーブルネット一体になって振動していると思われる。
- 2) 文献 1 に示した通り、ケーブルネット単体の減衰定数は 0.01-0.03 くらい。膜面をつけた二重ケーブルネット膜モデルは減衰定数は大きく増え、引込点では減衰定数は 0.15 くらいで、ほかのケーブル点でも減衰定数は 0.1 くらいである。膜部分モデルの減衰定数 (0.05-0.10) に比べても大きい。二重ケーブルネット膜構造は減衰の面からみて望ましいであろう。
- 3) 減衰のメカニズムは非常に複雑であり、本研究はレーリー型減衰を使って、実際振動の減衰性状をある程度で把握することができた。
- 4) 膜部分モデルでは、低張力の場合は高張力の場合より実際の全時間領域の減衰が小さいが、最初の 2、3 波の減衰はほぼ同じなので、本論文では、波形のシミュレーションを重点に置き、場合によって最初の 2、3 波の平均減衰から減衰定数を決め、解析を行う事もある。減衰定数の決め方法について、通常の波形は時間経過と共に減衰の勾配が異なるので、普通平均的な勾配で減衰を評価するが、人によって評価が違っても有り得る。精密な決定方法は最小二乗法、回帰分析などを挙げられる。
- 5) 膜構造は比較的剛性の低い構造であり、ほかの種類と違って、空気の影響を膜の振動に与えそう。特に、軽量でかつ剛性の小さい膜に空気の影響の度合いは、板などに比べて遥かに大きくなる。空気の影響は振動している膜面の質量、剛性および減衰に及ぶ。本論文では初めて、膜と他の材料を組み合わせた場合の空気の影響を取り上げた。空気の影響を付加質量として考慮する。付加質量考慮前、固有振動数の解析値が実測値より大きいのは、実際の実験で張力導入による誤差のためと考えられるが、高張力の場合と低張力の場合の供試体の卓越振動数からみると、張力

の変化より卓越振動数はあまり大きい差がなかった。特に、膜部分モデルにおいては、空気の付加質量の影響を考えなければならない。本論文では付加質量を荷重として膜面の重量と一緒に考慮して解析する、実際波形に近い解析波形を得た。今後は、大型膜構造、空気膜構造等について、空気の影響の研究も必要だろう。

6) 膜部分モデルに使った空気の付加質量は大体膜面重量の一倍に相当するが、二重ケーブルネット膜モデルでは、空気の付加質量も大体膜面重量の一倍に相当する。二重ケーブルネット膜モデルの全体重量を考えると、付加質量の相対重量は小さいので、二重ケーブルネット膜モデルの振動には空気の影響が膜部分モデルより少ないと考えられる。膜構造の実物実験では、もしケーブル、ポスト等の重量が大きければ、空気の付加質量の影響が小さいと予想されているが、ケーブル等の重量は小さい場合 (とくにケーブル補強膜構造において)、空気の付加質量の影響を無視できないだろう。

7) 微小振動では付加質量を小さく考慮する必要がある。膜部分モデルでは、中央点から遠い膜面点は中央点に近い膜面点よりやや小さい付加質量を使っている。二重ケーブルネット膜モデルでは、ケーブル点 1 及び点 2 の微小振動に対して、空気の付加質量を考慮しないで実測波形に合う波形が得られる。微小振動のとき、空気は膜面の振動に影響が少ないと思われる。

8) モード解析と非線形解析したとき、各々の自由振動波形から得た振幅スペクトルで付加質量を決めるので、両方とも実際波形に近い解析波形を得たが、特定の付加質量を使うと、モード解析から得た波形は非線形解析から得た波形より遅れる傾向があり、振動は既に非線形振動の範囲である。膜部分モデルと二重ケーブルネット膜モデルの強制変位はケーブルネット単体と同じであるが、ケーブルネット単体のモード解析と非線形解析した結果 (文献 1 より) は、大きく違わず、線形振動として考えてよいであろう。膜面をつけた後、膜面振動中にリンクリング現象の発生の影響があり、非線形解析ではその影響を剛性マトリックス中に考慮したので、モード解析より実際の振動状況を正確に把握することとなる。同じ強制変位に対して、膜構造はケーブル構造より非線形振動範囲に入り易いという結論が得られる。

同一の付加質量を使って、二重ケーブルネット膜モデルにおけるモード解析と非線形解析の解析結果の比較は図 7.1 に示す。

-----はモード解析結果、——は非線形解析結果である。



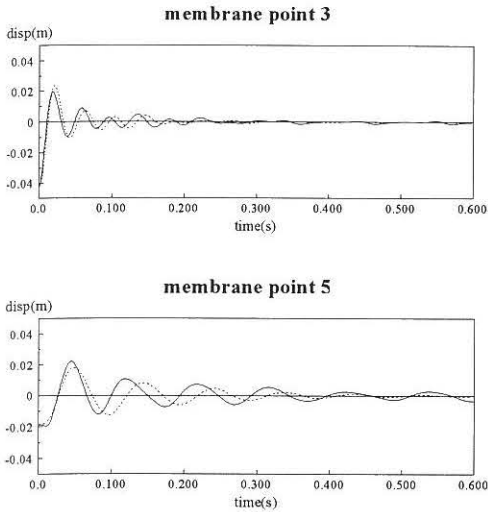


図 7.1 モード解析と非線形解析の波形比較

9) モード解析は解析時間が少なく済むのに対して、非線形解析は膨大な時間を要し、解析時間の間隔を小さくしなければならない。本解析では膜面モデルの解析時間の間隔が2万分の1秒で解析したが、二重ケーブルネット膜モデルを解析するとき、同じ時間間隔ではなかなか収束できなかった。今回のモデルはほとんど対称なものであったが、4分の1モデルを使って非線形シミュレーションをおこなった。解析の時間間隔10万分の4秒である。今回は小さいモデルであったが、もし実際の二重ケーブルネット膜構造を解析するときは、非線形解析がなかなか適用しにくいと思われる。前に示していたモード解析は非線形解析より小さい付加質量を使って、実際波形に近い解析波形を得られるので、モード解析は二重ケーブルネット膜構造の振動性状の分析に有効であろう。

本研究は実験波形の卓越振動数と減衰定数を既知値として使い、空気の付加質量は実験波形の卓越振動数より決めたが、あくまでも二重ケーブルネット膜構造の振動性状を把握する目的の基礎研究資料であり、今後、さらに詳細に事前に二重ケーブルネット膜構造の減衰定数と付加質量の決定方法を深く研究する必要があるだろう。

## 8 謝辞 :

本実験は、東畑建築事務所、(株) 鴻池組、太陽工業(株) および横浜国立大学建築学科石井研究室の四者による共同で実施されました。実験データの提供等の御協力頂いた関係者の方々に深く感謝します。御指導して頂き石井一夫先生に心より感謝を申し上げます。振動に関して御助言をくださった正岡典夫氏、河端昌也氏に深く御礼を申し上げます。コンピューターの利用について、小松助教授には御助言を数多く頂きました。同研究室の大学院生達の面々等からの御協力にも御感謝致します。

## (参考文献)

- 1) 有竹剛、石井一夫：ケーブルネット構造の振動特性に関する研究 一主に減衰性状について；膜構造研究論文集' 9 3、日本膜構造協会, No.7, 1993
- 2) 正岡 典夫：サスペンション膜構造の振動性状に関する研究一剛境界で支持された膜構造の自由振動特性について、日本建築学会構造系論文報告集、第471号、1995年5月
- 3) 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' 9 1、日本膜構造協会, No.5, 1991.
- 4) Iving B. Crandall: Vibrating Systems and Sound, London Macmillan and Co., Limited, ST. Martins Street, 1926.
- 5) O.C.ツイエンキービッツ：マトリックス有限要素法、培風館、1975.

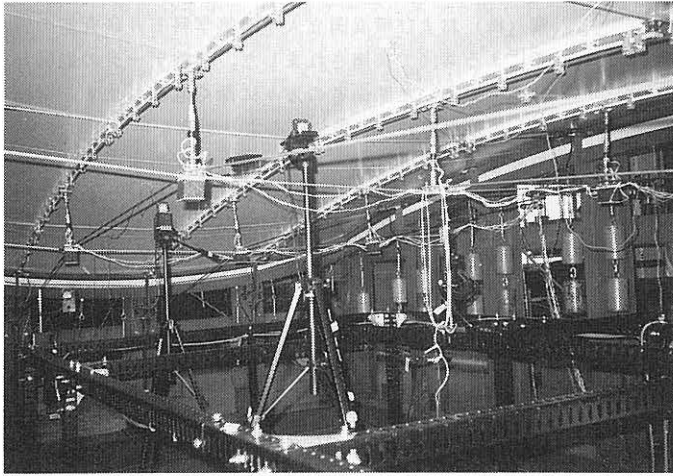


写真.1 実験供試体内部

---

## VIBRATION CHARACTERISTICS OF DOUBLE CABLE-LAYERED MEMBRANE STRUCTURE

Hao SONG<sup>\*1</sup>

Kazuo ISHII<sup>\*2</sup>

### SYNOPSIS

The double cable-layered membrane structure is one type of newly-developed structure form. It has many advantages such as able to adjust the length of post to discharge water, re-pretensioning of membrane, high damping, etc. In order to grasp the vibration characteristics of this new kind of architectural form, author tried to simulate the vibration of both single cable-layered membrane structure and double cable-layered membrane structure. The emphasis is put on the damping characteristics and the influence of air. From the vibration waves obtained from experiment, using techniques such as Fast Fourier Transformation, the resonance frequency and damping values are obtained. Using the values obtained, author tried to simulate the vibration using modal analysis and non-linear analysis method. The affect of air to vibration is found quite significant as reported in the area of sound vibration subject. Conclusions are made such as the damping effect of double cable-layered membrane structure is greater than that of single cable-layered membrane structure, Raleigh damping can be used to predict the vibration characteristics, added mass of air should be considered, etc.

---

\*1 Graduate Student of Doctor Course, Graduate School of Yokohama National University

\*2 Professor, Dr.-Eng, Yokohama National University