

# 六本木庁舎屋上ドームを利用した実大振動実験

——結果のまとめと考察——

Vibration Tests of Tension Truss Dome on The Top of Former Institute Building

— Summary of the Test Results and Discussion —

西田 明美\*・劉 鵬\*・手島 嘉隆\*・内海 良和\*\*  
荒木 直人\*\*\*・金山 敬\*\*・小田 憲史\*\*\*・川口 健一\*

Akemi NISHIDA, Peng LIU, Yoshitaka TESHIMA, Yoshikazu UTSUMI,

Naoto ARAKI, Takashi KANAYAMA, Kenshi ODA and Ken'ichi KAWAGUCHI

## 1. はじめに

立体トラスなどの軽量立体架構の実大実験例は数少なく、その振動特性など動的性状に関する報告例はさらに少ない。今回、東京大学生産技術研究所の旧六本木庁舎屋上ドームを試験体とした実大実験を行う機会を得た。この屋上ドームは張力安定トラスユニット<sup>1,2)</sup>を集積した構造システムで、屋根材としてC種膜材を用いた骨組み膜構造である。前報<sup>3)</sup>では振動実験速報として実験概要と全体モデルの実験結果について報告した。本報では、屋上ドームから膜を除去し2分割した架構の動特性、膜の有無や振動モードの違いが減衰特性に与える影響、および、骨組み構造物における卓越周波数と減衰、振幅との関係について考察する。

## 2. 試験体

屋上ドームの妻面の支柱を外し屋根膜撤去前の状態を全体モデル（膜あり）と呼び（写真1）、屋根膜を撤去した状態を全体モデル（膜なし）と呼ぶ。さらに、中央部分のユニット2列分および北側端部2ユニットを撤去することで2つの同等な架構へと分割した試験体をそれぞれモデルA、Bと呼ぶ。モデルAの初期状態をモデルA<sub>0.0</sub>と呼ぶ。試験体の骨組みを図1に示す。材料は全て構造用鋼材で、トラス材およびポスト材にはパイプ材、ケーブル材には鋼棒が用いられている。実験はおもりによる初期変位を解放する方法を採用した。実験内容の詳細は文献4)に示されている。加速度計の設置位置とジョイント番号を図2に示す。加速度計は全て法線方向外向き正となるように設置した。



写真1 張力安定トラスドーム：全体モデル（膜あり）  
（妻面撤去後振動実験を実施）

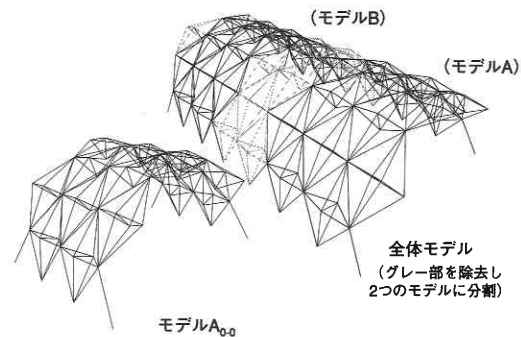
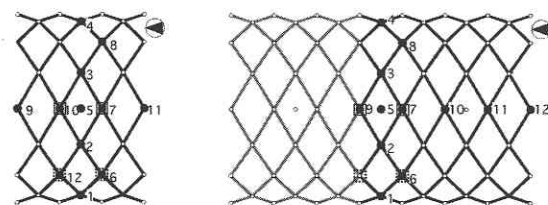


図1 試験体



(a) モデルA<sub>0.0</sub> (b) 全体モデル（膜あり、膜なし）  
図2 加速度計配置図（図中では起振1、起振2のケーブル取り付け位置を表し、番号はジョイント番号を表す）

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

\*\* (株)大林組

\*\*\*太陽工業 (株)

3. 考 察

3.1 モデル A<sub>0.0</sub> の動特性

(1) 起振 2 の実験結果

図 3(a) に、モデル A<sub>0.0</sub> の起振 2、おもり 200 kgf のときのジョイント 8 における加速度のフーリエ振幅スペクトルを示す。このフーリエ振幅スペクトルは 3 回の試行を平均したものである。ジョイント 8 はアーチ断面の 45 度位置にあたり、起振 2 のケーブル取り付けジョイントのひとつでもある。この加速度は 4.5 Hz の周波数が卓越し、加速度フーリエ振幅スペクトルより  $1/\sqrt{2}$  法を用いて算定された減衰定数は 1.1% となった。各ジョイントの加速度を 2 回積分し 4.3-4.8 Hz の周波数範囲でバンドパスフィルター (BPF) 処理して得られた変位を用いて変形モードを求めると、図 4(a) のようになる。太線は初期形状、細線は変形モードを表している。図よりこのモードはアーチの逆対称モードを表していることが確認できる。

(2) 起振 1 の実験結果

図 3(b) に、モデル A<sub>0.0</sub> の起振 1、おもり 200 kgf のときのジョイント 7 における加速度のフーリエ振幅スペクトルを示す。ジョイント 7 はアーチ断面の頂部にあたり、起振 1 のケーブル取り付けジョイントのひとつでもある。13 Hz および 14 Hz 近傍の周期が卓越し、加速度フーリエ振幅スペクトルより得られる減衰定数はそれぞれ 0.71% および、0.48% である。12.7-13.3 Hz の周波数域で BPF 処理した変位による変形モードを図 4(b) に示す。このモードは対称モードであることが確認できる。

(3) モード剛性とモード質量

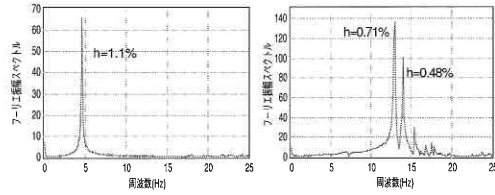
あるモードの固有角振動数  $\Omega$  とモード剛性  $K$ 、モード質量  $M$  は、減衰がない場合次式の関係にある。

$$\Omega = \sqrt{K / M} \dots\dots\dots (1)$$

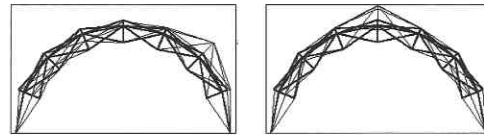
本振動実験結果のように減衰が 1 よりずっと小さい場合には卓越角振動数に対して (1) 式が適用できる。本振動実験では入力不確定であるため周波数応答関数からモード剛性を求める方法を採用することはできないが、モード剛性とモード質量のいずれかが評価できれば他方も評価可能となる。

ところで、図 3(a) に示すジョイント 8 の加速度時刻歴を 2 回積分することにより求めた変位の時刻歴より、法線方向に約 0.09 cm の初期変位が得られた。同ジョイントに吊るしたおもりの重さ 100 kgf を法線方向に換算して剛性を算定すると、剛性  $K_1 = 770 \text{ kN/m}$  となる。

一方、モデル A<sub>0.0</sub> と同形のモデル B に対しては載荷実験が実施された<sup>5)</sup>。風荷重を想定して 45 度方向のジョイントを加力点とし、鋼棒を介してジャッキを用いてドーム中心に向かって載荷を行った。載荷実験の詳細は文献 5) に



(a) 起振 2・ジョイント 8 (b) 起振 1・ジョイント 7  
図 3 モデル A<sub>0.0</sub> の加速度のフーリエ振幅スペクトル (200 kgf)



(a) 4.3-4.8 Hz (b) 12.7-13.3 Hz  
図 4 モデル A<sub>0.0</sub> の変形モード

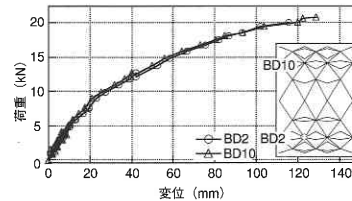


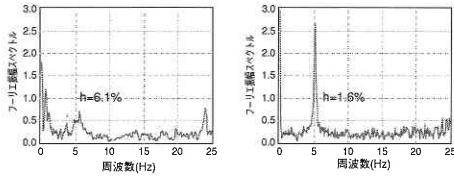
図 5 ジョイント BD2 とジョイント BD10 の荷重変位関係 (モデル B)

示されている。加力は部材が降伏しトラス材が座屈するまで行われた。モデル B の 45 度位置にあたるジョイント BD 2 と BD 10 の荷重変位関係を図 5 に示す。ジョイント BD 10 は載荷点のひとつである。このときの弾性時の剛性をふたつのジョイントの平均として求めると、剛性  $K_2 \approx 500 \text{ kN/m}$  となる。

これらの剛性は起振 2 で卓越している振動モードにおけるモード剛性と異なるものではあるが、仮に起振 2 の卓越周波数 4.5 Hz に対応するモード剛性としてモード質量を算定すると、 $K_1$  に対応するモード質量  $M_1$  は約 950 kg、同じく  $K_2$  に対応するモード質量  $M_2$  は約 615 kg となり、それぞれ試験体全質量の約 66% および 42% となる。

3.2 全体モデル (膜あり) と全体モデル (膜なし) の減衰特性

全体モデル (膜あり) と全体モデル (膜なし) は形態は異なるが、起振 1 起振 2 ともにはほぼ同じ周波数が卓越していることが確認されている<sup>7)</sup>。これは、膜の有無が卓越周波数に大きく影響しないことを表している。一方、減衰については、膜ありは膜なしの数倍の減衰が生じることが報告されている<sup>7)</sup>。膜ありの試験体における減衰は内包される空気起因する減衰に大きく依存するものと予想される。また、減衰は起振位置によって異なる結果となっている。これは、起振位置により励起される振動モードが異なるた



(a) 全体モデル (膜あり) (b) 全体モデル (膜なし)  
図6 加速度フーリエ振幅スペクトル  
(起振2, 100 kgf, ジョイント8)

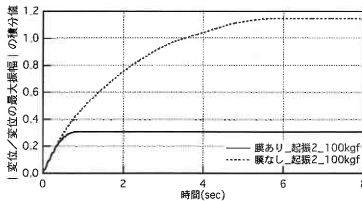


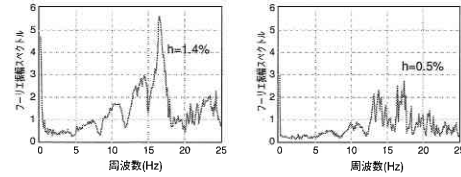
図7 起振2における内包空気の変化量  
(ジョイント8の5 Hz 近傍のBPF 変位の積分値として算定)

め、内包空気による減衰の影響も異なるものと予想される。ここでは、各起振で励起される振動モードを代表するジョイントの変位量の絶対値を積分し、それが内包される空気がどの程度動かされているかを知るひとつの目安となるものと仮定し、膜ありと膜なしの違いについて考察する。

図6に全体モデル (膜あり) と全体モデル (膜なし) の起振2, おもり 100 kgf 時のジョイント8の変位の時刻歴を示す。この変位は得られた加速度時刻歴を2回積分し、卓越周波数である 5 Hz 近傍で BPF 処理したものである。それぞれの変位が最大となる時点から振動が終了するまでの変位の絶対値を積分し、図7に示す。比較のため、変位はそれぞれの最大振幅で基準化されている。図7より積分値の最終値を比較すると、膜があることにより空気の抵抗を受け、動かされた空気量は約 1/4 になっていると推測できる。

一方、図8に全体モデル (膜あり) と全体モデル (膜なし) の起振1, おもり 100 kgf 時のジョイント7の変位の時刻歴を示す。前段同様卓越周波数である 16.5 Hz 近傍で BPF 処理した変位の絶対値を積分し、図9に示す。図9の積分値の最終値を比較すると、膜があることにより動かされた空気量は約 1/2 になっていると推測できる。すなわち、起振2の方が起振1よりも内包空気による減衰の効果が倍程度大きいと推測できる。

また、膜なしの減衰定数は起振1で 0.5%, 起振2で 1.6% であり、約 3 倍になっている。卓越周波数はそれぞれ 16.5 Hz と 5.16 Hz であり約 1/3 となっていることから、全体モデル (膜なし) の減衰特性は周波数と反比例の関係にあり、質量比例型の特性に近い性質を示している。一方、膜ありの減衰定数は起振1で 1.4%, 起振2で 6.1% であ



(a) 全体モデル (膜あり) (b) 全体モデル (膜なし)  
図8 加速度フーリエ振幅スペクトル  
(起振1, 100 kgf, ジョイント7)

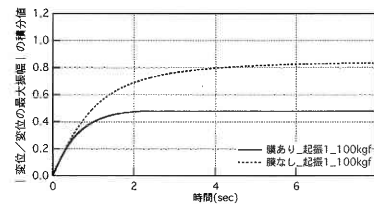


図9 起振1における内包空気の変化量  
(ジョイント7の16.5 Hz 近傍のBPF 変位の積分値として算定)

り、約 4 倍になっている。卓越周波数は膜なしとほとんどかわらず約 1/3 となっているため、この差は内包空気による減衰が膜ありの起振2で特に大きいことと符合する。

### 3.3 卓越周波数、振幅と減衰定数

載荷後の結果を除いた全振動実験の結果をまとめて、横軸に卓越周波数、縦軸に減衰定数としてプロットしたものを図10に示す。図中直線で結ばれたデータは同一条件で行われた試行によって得られたデータであることを示している。減衰定数は、卓越周波数によって異なり、周波数が高くなると減衰が小さくなる傾向がある。一方、卓越周波数が高くなると加速度フーリエ振幅は明らかに小さくなる傾向がある (図11)。起振1でも 8 Hz 近傍のデータを除けばほぼ右下がりの傾向がみられる。しかしながら、加速度フーリエ振幅と減衰定数の関係をみると、振幅の増大に伴う減衰定数の増大という傾向ははっきりとは認められない (図12)。したがって、本実験結果においては減衰の周波数依存性は認められるが、振幅依存性は顕著には認められなかったといえる。

## 4. ま と め

- (1) モデル  $A_{0,0}$  において、起振2でアーチの逆対称モードが、起振1で対称モードが出現した。その他の試験体でも同様の結果が得られている。さらに、初期変位から剛性を推定し、また、載荷実験の結果から弾性剛性を推定した。
- (2) 全体モデルにおいて、起振2では起振1の数倍の減衰が生じ、低次モードが励起される起振の方が大きな減衰を生じている。この違いを励起モードの違いによる内包空気による減衰の違いに依存していると考え、空

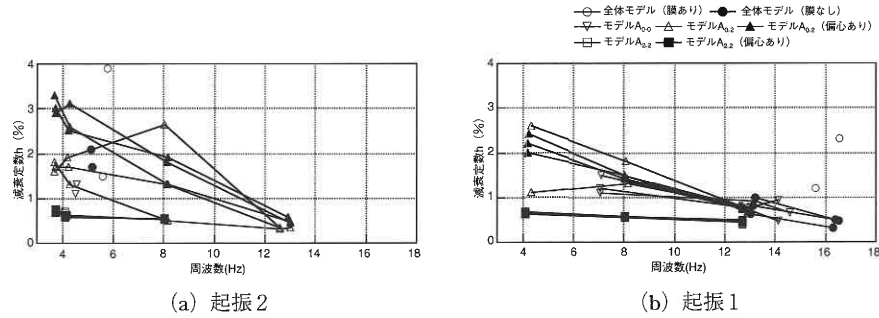


図 10 減衰定数と卓越周波数

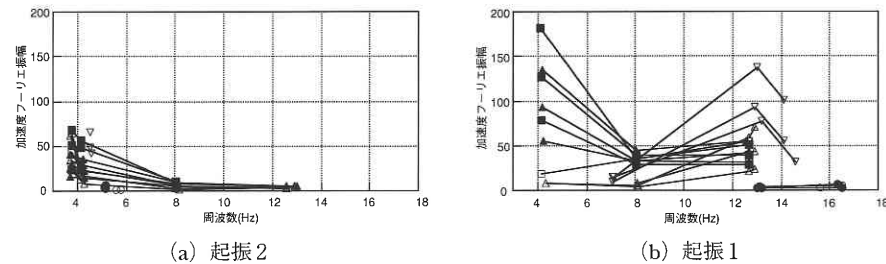


図 11 加速度フーリエ振幅と卓越周波数

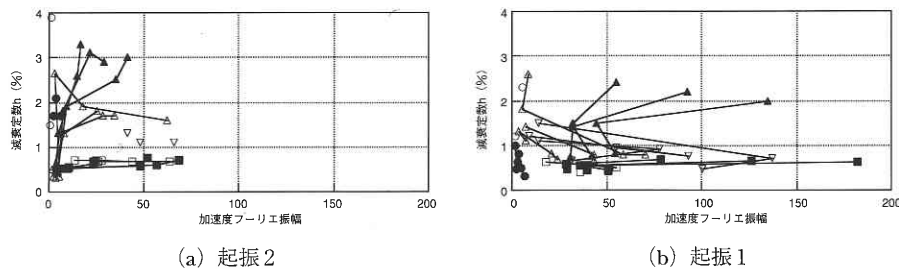


図 12 減衰定数と加速度フーリエ振幅

気を動かした変位量の積分値を比較した。その結果、起振 2 では内包空気による減衰の効果が起振 1 の約 2 倍であるという結果が得られた。

- (3) 卓越周波数と減衰の関係に着目すると、本実験結果においては卓越周波数が高くなると減衰は小さくなる傾向にあり、質量比例型の減衰特性に近い傾向を示している。
- (4) 今回の実験では加速度フーリエ振幅の違いによる減衰定数の差は顕著には認められなかった。振幅の増加につれ減衰定数が一定値に収束する傾向があるとの報告 6) もあるため、今後振幅のオーダーと減衰の関係については詳細に検討する予定である。

(2002 年 11 月 6 日受理)

参 考 文 献

- 1) K. Kawaguchi, K. Oda and Y. Hangai: Experiments and Construction of Truss Structure Stabilized by Cable Tension,

Proc. of International Symposium on Shell & Spatial Structures, Vol 1, pp. 421-429, 1997. 11.

- 2) 半谷裕彦, 川口健一, 小田憲史: 張力安定トラス構造の構造挙動と構造設計, 東京大学生産技術研究所報告, 第 36 巻, 第 2 号, 1991.5
- 3) 西田明美, 劉 鵬, 川口健一, 内海良和, 荒木直人, 金山敬, 小田憲史: 六本木庁舎屋上ドームを利用した実大振動実験速報, 生産研究, 53 巻, 11・12 号, pp. 45-48, 2001. 11
- 4) 東京大学生産技術研究所川口研究室・(株)大林組・太陽工業(株), 張力安定トラスドーム及びパーツ補剛によるハイブリッドトラスドーム実大実験報告書, 2001.12
- 5) 川口健一, 金山 敬, 小田憲史, 内海良和, 荒木直人, 手島嘉隆: 張力安定トラスドームを用いた実大実験報告—その 1: 存在張力測定実験と載荷実験—, 日本建築学会技術報告集, 第 16 号 (掲載予定)
- 6) 日本建築学会, 建築物の減衰, 2000.10
- 7) 西田明美, 川口健一, 劉 鵬, 内海良和, 金山 敬, 荒木直人, 小田憲史: 張力安定トラスドームを用いた実大実験報告—その 2: 振動実験—, 日本建築学会技術報告集, 第 17 号 (投稿中)