

## 建築床振動の実験的モーダル解析 その2 実構造物とその模型の実験結果の比較

### Experimental Modal Analysis of the Floor Vibration.

- PART 2 -

Several Comparisons of some results between actual experiment and model experiment.

成瀬治興\*, 鈴木裕久\*\*, 佐野泰之\*\*

NARUSE Haruoki,

SUZUKI Hirohisa,

SANO Yasuyuki

**Abstract** This paper describes several comparison of some results between an actual experiment and a model experiment by the modal analysis. The results are summarized as follows. Some modal characters of floor vibrations were shifted by littal differences of modal dampings. Therefore it is required further investigation in the future.

#### 1. はじめに

環境振動に関する研究及び報告は、対象となる振動と呼ばれる事象そのものが多様性故に非常に多岐にわたっているが、地盤から建築基礎部分を経て躯体に至る過程の振動伝搬性状を総合的に検討、考察した研究の報告は多くないと考える。

建築躯体を媒体とし構造各部を伝搬する振動のうち、人体が振動として感じることのできる領域では、設備機器や人の歩行などの内部振動源や、交通機関、風力などの外部振動源から発生する振動が、主な原因となる場合が多い。近年、こうした振動障害に対する対策として、制振技術が適用されはじめているが、その共振特性把握の有効な手段となるモーダル解析と呼ばれる手法とそれによる研究が必要であると考える。

モーダル解析による研究は、有限要素法に代表される、完全に数値的な理論計算によるものが多く、構造物の加振及び測定による実験的モーダル解析による研究はあまり報告されていない。しかし、実験的モーダル解析は、その構造の動的な応答特性が測定により直接求められ、その結果を基にモードの解析を行うため、振動の減衰特性やその他の特性が高

精度で得られる利点がある。

そこで本研究では、屋外に振動源を有する場合のおもな伝搬経路となる、地盤より基礎構造を経て建築躯体に至る、振動伝搬の過程を総合的に検討するための基礎として、実験的モーダル解析を適用することにより建築躯体における振動の伝搬性状を把握しようと試み、特に問題とされる有感振動領域での躯体の動的な特性を解析、評価している。

本報では、屋内に振動源を想定した床の鉛直振動について、既存の鉄筋コンクリート造建築及びその模型に実験的モーダル解析を適用することにより、模型実験による振動伝播性状の予測について考察している。

#### 2. 本報の概要

本報における実験は、既存の実物建築の床振動についての現場加振実験とその50分の1アクリル模型についての模型実験とからなる。

対象となる建築物は、愛知工業大学7号館（実験・教室棟、鉄筋コンクリート造3階建）であり、そのうち2階西端の2教室（西より順に204、203教室）及びその廊下を測定範囲としている（図1）。測定範囲の下階には外壁及び階段室の壁以外に壁はなく、北側の大半は1階からの吹き抜けとなっている。

\* 愛知工業大学建築学科（豊田市）

\*\* 愛知工業大学大学院（豊田市）

- ① 既存建築の現場加振実験は、上記範囲について実験を行い、床鉛直振動の伝搬性状を実験的モード解析により解析している。
- ② 模型加振実験は、対象建築物の上記の範囲について模型化し、床鉛直振動の伝搬性状を実験的モード解析により解析している。
- ③ 最後に、現場加振実験と模型実験の結果を比較し、模型実験による床振動の伝搬性状の予測に関して考察している。

### 3. 模型の相似則

各種現象の予測に模型実験を適用する際には、対象となる現象を支配する物理法則について、模型系と実物系の相似的实现が必要である。

実物系の長さを $L_r$ 、模型系の長さを $L_m$ とすると、長さの縮尺比 $\pi_1$ は次式のようになる。

$$\pi_1 = \frac{L_r}{L_m}$$

本研究では、建築躯体の波動伝搬を扱うことから、固体中の波動伝搬（横波、縦波、表面波など）に関する基本的相似則の成立が必要となる。躯体振動の振動数に関する相似関係は、伝搬速度の相似関係に重力の相似関係を緩和することにより求められ、相似比は以下のようになる。

$$\pi_2 = \frac{f_r}{f_m} = \frac{k}{\pi_1}$$

$$k = \sqrt{\frac{E_r \rho_m}{E_m \rho_r}}$$

$f$  : 振動数、 $E$  : 弾性係数、 $\rho$  : 密度

添字  $r$  : 実物、 $m$  : 模型

なお、模型材料にはメタクリル酸樹脂（ポリメチルメタクリレート）を使用している。メタクリル酸樹脂とコンクリートの物性値の比較を表1に示す。

表1. 材料物性値の比較

	実構造物	模型
材質名	コンクリート	ポリメチルメタクリレート
ヤング率 ( $N/m^2$ )	$2.3 \times 10^{10}$	$3.4 \times 10^9$
密度 ( $kg/m^3$ )	2300	1170
縮尺	----	1/50

従って、本研究における実構造物加振実験と模型加振実験における振動数の相似比は27.0となる。

## 4. 実構造物の加振実験

### 4.1. 実験構造物

対象となる建築物は、愛知工業大学7号館（実験・教室棟、鉄筋コンクリート造3階建）であり、そのうち2階西端の2教室（西より順に204、203教室）及びその廊下を測定範囲としている（図1）。測定範囲の下階には外壁及び階段室の壁以外に壁はなく、北側の大半は1階からの吹き抜けとなっている。

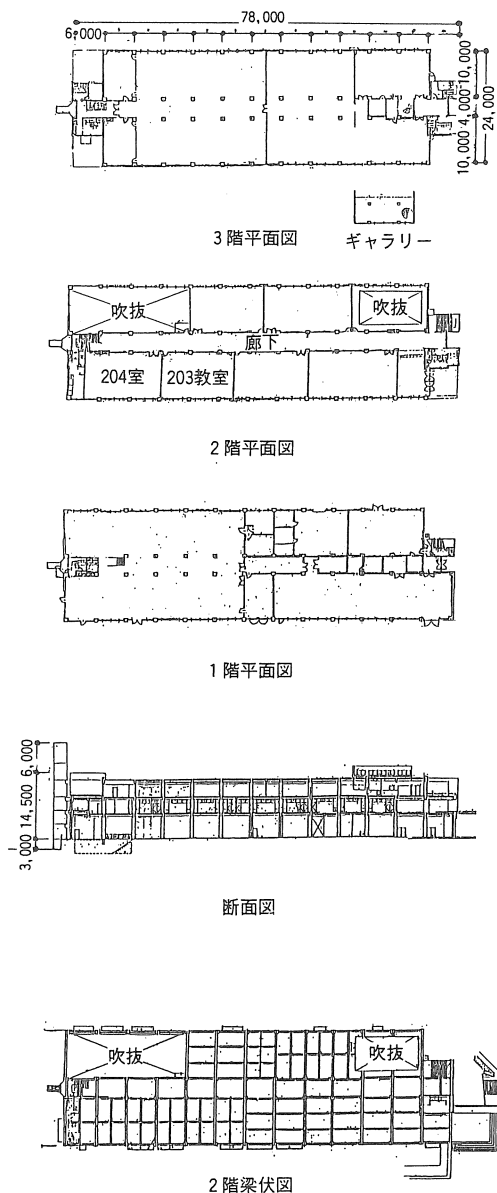


図1. 対象構造物（実構造物）

4.2. 実験方法

加振は1点加振とし、加振位置は図2のように選定している。長方形床板の強制励振では、その対角線上に位置する励振点が最も数多くの共振モードを励振するといわれていることから、加振位置は、教室の2つの角を結んだ対角線付近に位置するように選定している。

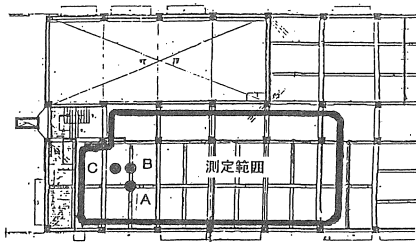


図2. 測定範囲及び加振位置

受振点は、格子状（実構造物で約1m間隔）に453点設定している。実験に用いた測定装置を図3に示す。

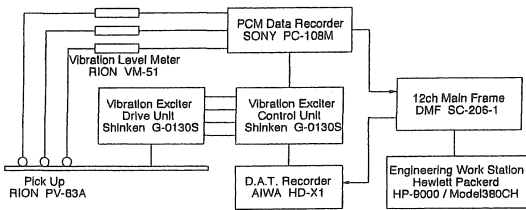


図3. 実験装置（実構造物実験）

加振機による振動数帯域5～85Hzの1点バーストラングム加振を5回行い、加振点入力（力単位）と受振点応答（加速度単位）を測定し、受振点毎の振動数応答関数を求めている。

求めた振動数応答関数について実験的モーダル解析を適用し、最小二乗複素指数法により各モードの固有振動数、減衰比を推定し、その後、最小二乗周波数領域法により共振のモード形状を推定している。順次、モードの精度を確認し、高精度なモードが得られるまで、解析を繰り返している。なお、解析の振動数帯域は10～55Hzとしている。

5. 模型構造物の加振実験

5.1. 模型構造物

実験対象構造物は、愛知工業大学7号館（実験・教室棟、鉄筋コンクリート造3階建）であり、そのうち2階西端の2教室（西より順に204、203教室）及びその廊下を測定範囲とし、その50分の1模型を製作し、実験的モーダル解析を行っている（図4）。なお、柱下面は厚さ9mmのベニヤ合板に固定し、ベニヤ上部に厚さ20mmの軽量気泡コンクリートを敷き、基礎及び地盤面の模型としている（図5）。

（図4）。なお、柱下面は厚さ9mmのベニヤ合板に固定し、ベニヤ上部に厚さ20mmの軽量気泡コンクリートを敷き、基礎及び地盤面の模型としている（図5）。

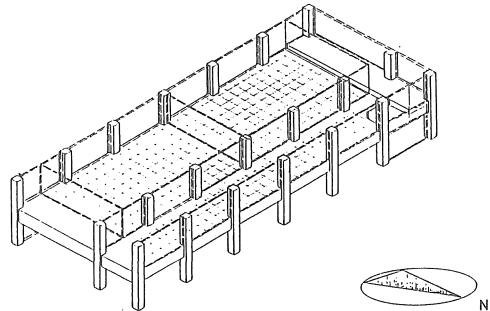


図4. 対象構造物（模型）

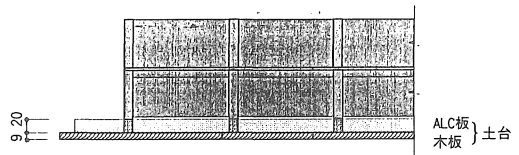


図5. 対象構造物（模型・基礎部分）

5.2. 実験方法

加振は1点加振とし、受振点は、格子状（2cm間隔）に、現場加振実験と同様、453点設定している。実験に用いた測定装置を図6に示す。

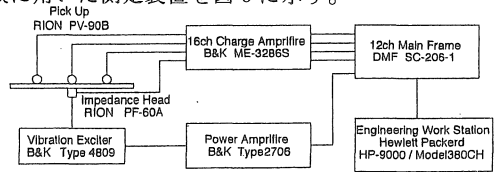


図6. 実験装置（模型実験）

測定では、加振器による振動数帯域10～1800Hzの1点バーストラングム加振を15回行い、加振点入力（力単位）と受振点応答（加速度単位）を測定し、受振点毎の振動数応答関数を求め、実験的モーダル解析を適用している。

6. 実験結果

模型の各実験の振動数応答関数を図7に示す。また、各モードの固有振動数及び減衰比の比較を表2に示す。各段階でのモード形状の推移を図8に示す。

表2. 固有振動数及び減衰比の比較

モード No.	模 型			実 構 造 物			振動数比
	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	重要度 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	重要度 (%)	
2	378.5	3.79	12.1	----	---	---	---
3	470.9	3.53	15.8	15.8	2.05	29.8	29.8
4	547.0	5.27	28.9	18.0	1.53	25.4	30.3
5	732.8	2.38	13.6	21.3	2.85	7.1	34.4
6	755.0	2.97	10.8	27.8	3.35	10.8	27.1
7	878.3	3.42	6.4	30.6	3.05	8.3	28.7
8	956.1	3.90	8.2	35.1	4.68	8.9	27.2
9	1110.7	3.73	4.2	37.9	4.87	9.8	29.3

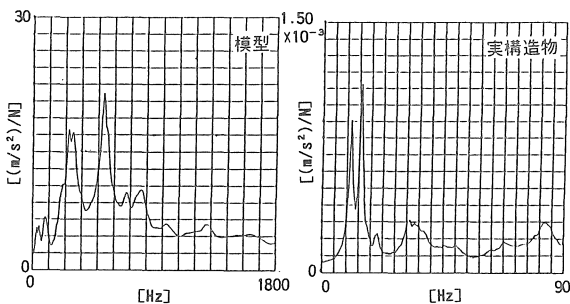


図7. 振動数応答関数の比較

7. RC造建築床振動の模型化に関する考察

7.1. 実構造物と模型構造物のモード性状の比較

実構造物の応答では、15 Hz（後述モード3に相当）及び18 Hz（モード4に相当）付近での卓越が強くとめられる。一方、模型構造物の応答では、755 Hz（モード6に相当）付近の卓越が強くとめられ、各共振の卓越の度合いに若干の相異がみとめられる。

表2の重要度とは、特定の振動数帯域の励振力の各応答モードへの分配の割合を示している。ここでこの振動数帯域はモード2～9に相当する帯域に設定している。

また、模型構造物の各モード形状の相関を表3

(a)に、実構造物の各モード形状の相関を表3 (b)に示す。

モード2の存在は、模型の解析結果にはみとめられるが、実構造物の場合にはみとめられない。モード形状を比較してみると、模型の場合のみに現れる

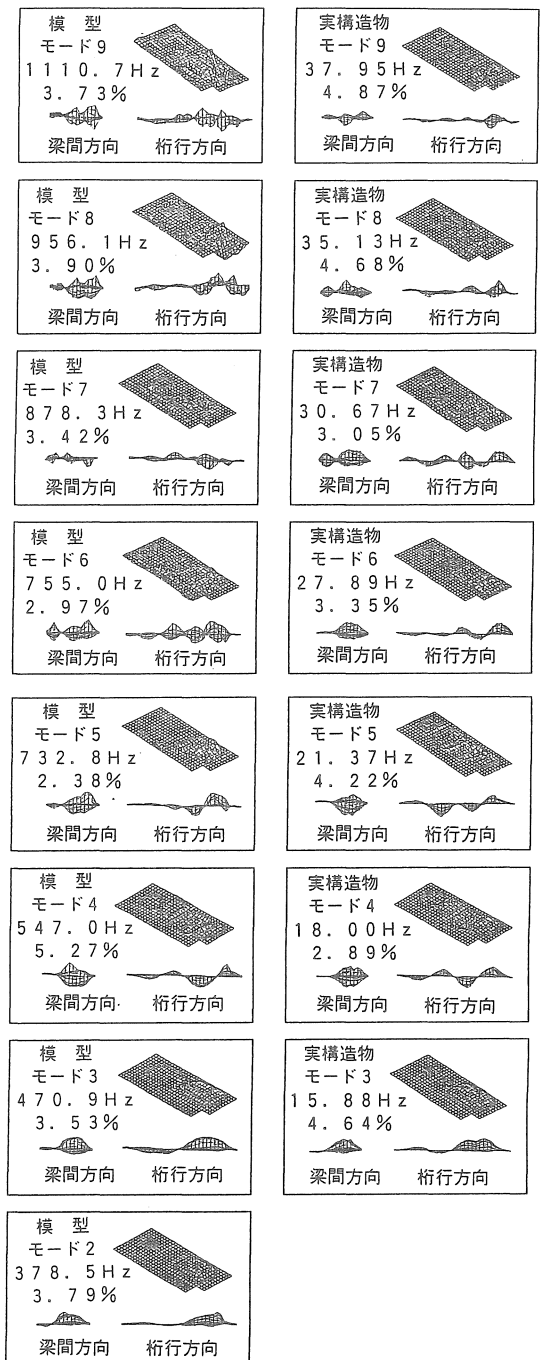


図8. モード形状の比較

モード2の形状は、付近のモード3の形状と相関が強くとめられる。実構造物の解析過程では、模型のモード2に相当するモードはみとめられなかったことから、実構造物でのモード3は、模型ではモード2と

モード3に分離されて卓越していると考えられる。

以上のことから、模型加振実験における、モード2のモード重要度は12.1%、モード3は15.8%であり、その和は27.9%となり、実構造物加振実験結果のモード3の場合の29.8%に近い値となる。また、他のモードについては、模型と実構造物で比較的近い値を示している。従って、模型と実構造物のモード重要度の分布は、近い対応を示しているといえる。

表3 (a) . モード相関 (模型)

モード No.	モーダル・アジャランス・クライテリアン (MAC)							
	モード2	モード3	モード4	モード5	モード6	モード7	モード8	モード9
2	100.0							
3	85.0	100.0						
4	21.6	18.8	100.0					
5	11.2	11.9	6.0	100.0				
6	8.0	10.5	0.5	34.2	100.0			
7	1.4	1.0	0.5	4.8	1.2	100.0		
8	2.2	2.5	1.2	9.3	6.0	19.0	100.0	
9	11.9	9.2	7.9	8.2	5.1	3.9	1.6	100.0

表3 (b) . モード相関 (実構造物)

モード No.	モーダル・アジャランス・クライテリアン (MAC)							
	モード2	モード3	モード4	モード5	モード6	モード7	モード8	モード9
2	----	----	----	----	----	----	----	----
3	----	100.0						
4	----	0.1	100.0					
5	----	0.2	3.2	100.0				
6	----	2.9	0.8	11.1	100.0			
7	----	4.2	1.5	7.6	13.4	100.0		
8	----	9.7	5.3	15.6	10.1	13.4	100.0	
9	----	6.6	2.5	10.9	9.1	11.4	50.7	100.0

また、模型実験結果と実構造物実験のモードの分布を振動数についてみる。対応するモードの固有振動数の分布を図8に示す。

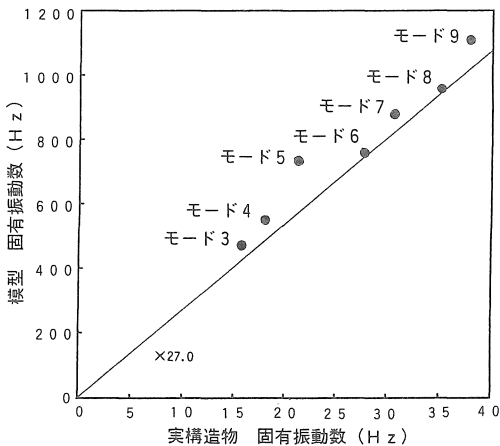


図9. モードの固有振動数の分布

図中の直線は、模型の相似則より求めた振動数の相似比27.0を示している。各モードとも、理論的な相似比よりもやや高い振動数比(約29倍)を示し、モードの次数が高くなると理論値に近くなる傾向がみとめられる。モード5とモード6についてみると、モード5では、34.4倍となっており、他のモードの場合に比べ高い振動数比を示しているのに対し、モード6では、27.1倍と比較的低い振動数比を示しており、模型の場合は、実構造物の場合に比べ、モード5とモード6の固有振動数が近くなっている。また、模型のモード5とモード6の相関をみると、実構造物の場合の11.1%に対し34.2%と、強い相関を示している。模型加振実験において、壁部材の追加によるモード5とモード6の固有振動数の推移をみると、互いに近付くように推移していることがみとめられ、互いのモードの連成が強まり、卓越のピークが高くなっているものと考察している。

7.2. 1自由度モデルによるモード性状の適正化

モード法と呼ばれる解析手法は、互いのモードの直交性が成り立ち、その連成が解除できるという数学的な事実が基礎であり、モーダル解析に推定された各モードはそれぞれ質量(モーダル質量)、剛性(モーダル剛性)、減衰(モーダル減衰)をもつ独立した1自由度の振動モデルとして表現される。

各モードのモーダル質量、モーダル剛性、モーダル減衰を表4(a)(b)に示す。なお、各モードのモーダル質量がそのモード重要度と等しくなるように正規化し、励振時における各モードの占有度を考慮している。

複数のモードが完全に合成されて現れると仮定した際につくられる合成モードの固有振動数及び減衰比を算定する場合は、合成される各モードの1自由度モデルの質点が剛に連結され、合成モードの1自由度モデルを構成するものとみなし、その固有振動数及び減衰比を算定している。従って、合成モードのモーダル質量は、合成される各モードのモーダル質量の和となる。同様に、合成モーダル剛性、合成モーダル減衰も合成される各モードのモーダル剛性、減衰の和となる。

表4 (a). モーダル質量等の比較 (模型)

モード No.	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	重要度 (%)	モーダル質量 (kg)	モーダル減衰 (kg/s)	モーダル剛性 (kg/s <sup>2</sup> )
2	378.5	3.79	12.1	0.121	21.7	$6.86 \times 10^5$
3	470.9	3.53	15.8	0.158	33.0	$1.38 \times 10^6$
4	547.0	5.27	28.9	0.289	104.9	$3.41 \times 10^6$
5	732.8	2.38	13.6	0.136	29.7	$2.88 \times 10^6$
6	755.0	2.97	10.8	0.108	30.4	$2.43 \times 10^6$
7	878.3	3.42	6.4	0.064	24.1	$1.95 \times 10^6$
8	956.1	3.90	8.2	0.082	38.4	$2.96 \times 10^6$
9	110.7	3.73	4.2	0.042	21.8	$2.04 \times 10^6$

表4 (b). モーダル質量等の比較 (実構造物)

モード No.	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	重要度 (%)	モーダル質量 (kg)	モーダル減衰 (kg/s)	モーダル剛性 (kg/s <sup>2</sup> )
2	---	---	0.0	0.000	0.000	0.00
3	15.8	2.05	29.8	0.298	1.21	$2.96 \times 10^3$
4	18.0	1.53	25.4	0.254	0.881	$3.25 \times 10^3$
5	21.3	2.85	7.1	0.071	0.543	$1.27 \times 10^3$
6	27.8	3.35	10.8	0.108	1.26	$3.31 \times 10^3$
7	30.6	3.05	8.3	0.083	0.979	$3.08 \times 10^3$
8	35.1	4.68	8.9	0.089	1.84	$4.34 \times 10^3$
9	37.9	4.87	9.8	0.098	2.28	$5.58 \times 10^3$

7.2.1. 模型モード2とモード3の合成

前記の模型におけるモード2、モード3では、その卓越のピークが分離しており、単一モードとして解析することが難しいため、これらを合成し、その固有振動数及び減衰比を算定したものを表5に示す。模型の合成モード2+3と実構造物のモード3の固有振動数比は、31.1倍となり、合成前の模型モード3と実構造物モード3の固有振動数比29.8倍よりも4%強高くなる。

表5. モードの合成 (モード5+6)

模型 (モード5+6)		実構造物 (モード5+6)		振動数比
固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	
742.8	2.64	25.5	3.15	29.1

7.2.2. モード5とモード6の合成

モード5とモード6は、連成の程度が模型と実構造物では相異なり、固有振動数の分布に影響を及ぼしていると考えられるため、その影響を相殺する目的で、合成モード5+6を考える。合成モードの固有振動数及び減衰比の比較を表6に示す。模型の合成モード5+6の固有振動数は742.8Hz、実構造物の場合は25.5Hzを示し、その振動数比は29.1倍となり、他のモードの振動数比と比べ、平均的な値となる。

表6. モードの合成 (モード2+3)

模型 (モード2+3)		実構造物 (モード3)		振動数比
固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)	
492.5	3.17	15.8	2.05	31.1

7.3. まとめ

実構造物と、模型構造物の振動性状を比較すると、  
 ① 模型構造物の方が、より連成の強いモード性状を示すために、双方の応答の卓越の度合いに若干の相異がみられるが、モードの重要度と呼ばれる指数で比較すると双方は近い対応を示す。  
 ② モードの重要度とは、励振力の各モードへの分配の割合を表しており、モードの減衰や、それを原因とするモード連成には関わりのない指数であることから、模型実験において、模型・実物に用いられる材料の振動減衰特性に相異のある場合には適用するとよいものと思われる。  
 ③ また、各モードの連成の影響を考慮する場合には1自由度モデルを用いて適正化することが可能であると思われる。

8. おわりに

本研究では、2つのモードを合成し、互いの相関や連成を相殺することにより、連成がモードの固有振動数に及ぼす影響を考察し、模型実験の有効性を再認識したが、共振の振動数については高精度な予測が可能であると思われる。また、固有振動モードの連成性状とそれに伴う共振性状の変化は、振動障害で評価の目安となること多い応答の卓越性状に大きな影響を及ぼすことから、模型実験による共振性状と振動応答の予測には、モードの連成性状を考慮したモード性状の相似化が望まれる。

最後に、模型の製作及び実験の遂行に惜しみない協力を頂いた本学工学部建築学科平成5年度卒研生の廣見好亮、舟橋聖宣、古橋直幸の諸君に感謝します。

参考文献

1) L. マイロヴィッチ; 振動解析の理論と応用, プレイン図書出版.  
 2) 松田由利, 橘秀樹; 固体音に関する模型実験の手法, 騒音制御, Vol. 6, No. 5 (1982.10)

(受理 平成7年3月20日)