

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-625

## 帯板構造模型の振動試験

安藤 泰勝 ・ 峯岸 正勝  
松崎 雄嗣 ・ 熊倉 郁夫

1990年7月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 目 次

1. まえがき .....	1
2. 供 試 体 .....	1
3. 振動解析 .....	2
4. 振動試験と結果 .....	6
4.1 ランダム1点加振法 .....	6
4.2 正弦波多点加振によるノーマルモード法 (MODAP) .....	7
4.3 正弦波多点強制加振による伝達関数法 (MODAT SINE) .....	19
5. 結果の比較と検討 .....	22
6. ま と め .....	24
参考文献 .....	25
付 録 1 .....	25
付 録 2 .....	28

# 帯板構造模型の振動試験\*

安藤 泰勝\*\* 峯岸 正勝\*\*  
松崎 雄嗣\*\*\* 熊倉 郁夫\*\*

## 1. ま え が き

1983年に導入されたフランス PRODERA 社の多点加振解析システムは、岐阜に於いて2期にわたるSTOL実験機「飛鳥」の全機地上振動試験<sup>1-3)</sup>に用いられた。試験完了に伴い1985年に実機振動試験設備として航空宇宙技術研究所調布飛行場分室に移設された。その後、本設備はH-II ロケットの1/5モデル<sup>4)</sup>、接着構造耐久試験、小型航空機、帯板構造模型、全機ACT模型<sup>5)</sup>および高アスペクト比複合材翼模型の振動試験<sup>6)</sup>等に部分的に有効利用された。

ここでは、実機振動試験設備の多点加振解析システムを用い、正弦波多点加振による振動試験法の研究を目的に、ノーマルモード法 (MODAP) と強制加振による伝達関数法 (MODAT SINE) を中心に、大型構造模型を模擬した帯板構造模型を製作し、振動試験を行った。この帯板構造模型は航空機のように多数の複雑な振動モードを有する柔

軟構造である。そのため、振動試験に先立って供試体の振動特性を把握しておくことが不可欠で、まず、振動解析を有限要素法によって行い、その情報を基に供試体は2本のコイルバネを用いて加振の高さまで吊上げ、自由な飛行状態に支持した。振動試験は最初に振動解析の概要を確かめるため簡単な方法で行い、その後、加振点の数、加振位置および加振軸方向等の加振法を振動モード毎に検討し、加振による影響を考慮したノーマルモード法 (MODAP)、強制加振による伝達関数法 (MODAT SINE) を行い、各振動モードの試験結果を得た。この振動試験を通して振動試験法の2、3の問題点について考察することができた。本報告は、航空機を模擬した帯板構造模型の振動試験で得られた知見と結果についてまとめたものである。

## 2. 供 試 体

供試体は大型航空機のように柔軟な構造で、低

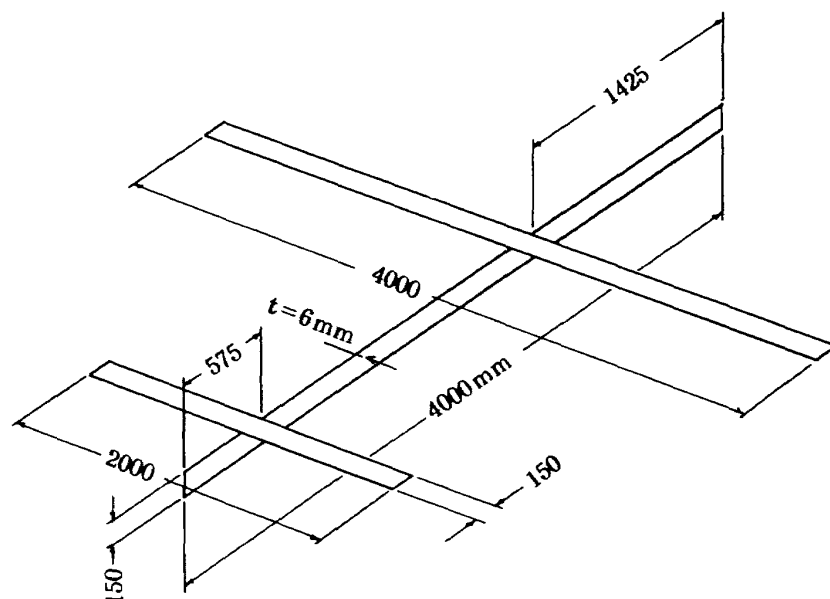


図1 供試体

\*平成2年6月5日受付

\*\*機体部

\*\*\*元機体第一部

次に於ける複雑な振動特性を有し、実機振動試験設備を用いて、実機のような地上振動試験が出来ることを目的に大きさや形態を設計した。供試体の概要を図1に示す。諸元は公称値の板幅が150mm、厚さが6mmである。構造は長さ4mの胴体と幅4mの主翼および2mの尾翼から成り、各翼は胴体に2組のL金具によってボルト・ナットで結合している。材質は帯板の鋼板で、総重量は約70kgである。

### 3. 振動解析

振動解析は有限要素法を用い、図2に示した構造を144の節点で要素に分割し、20のモード数について解析を行った。振動解析で得られた20モードの固有振動数を表1に、各振動モード形を図3に、また、144の節点座標のデータを表2に夫々示した。

図3より20モードのうち、初めの6つは固有振動数が非常に低い剛体モードである。対称モードは4つあり、うち主翼のモード(1つは振りモード)が3つ、尾翼のモードが1つである。また、逆対称モードは6つあり、主翼のモード(1つは振りモード)が4つ、尾翼のモードが2つである。そして、胴体の横振動モードは4つのモードがあ

る。これらのモードの傾向として胴体の振動と翼の逆対称の振動モードは次数が増すと相互に連成し、振動モード形が複雑になっている。

振動解析は振動試験との比較を容易にするために尾翼が無い場合についても解析した。この資料は付録1にまとめた。

表1 固有振動数(振動解析)

モード番号	固有振動数 (Hz)	モード番号	固有振動数 (Hz)
1	0.3308E-04	11	0.2804E+01
2	0.8294E-04	12	0.5422E+01
3	0.9315E-04	13	0.5926E+01
4	0.1218E-03	14	0.8498E+01
5	0.1497E-03	15	0.9812E+01
6	0.2453E-03	16	0.1467E+02
7	0.8765E+00	17	0.1564E+02
8	0.1441E+01	18	0.1569E+02
9	0.1532E+01	19	0.1577E+02
10	0.2663E+01	20	0.1873E+02

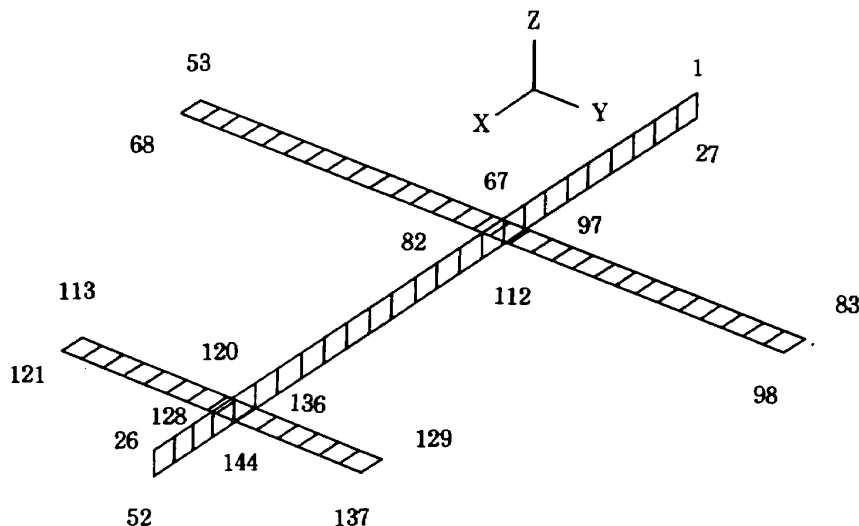


図2 要素分割と節点番号(振動解析)

表2 要素分割の節点番号と座標(振動解析)

座 標				座 標			
節点番号	X(m)	Y(m)	Z(m)	節点番号	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	0.000	0.000	0.000	73	1.575	-1.304	0.000
2	0.158	0.000	0.000	74	1.575	-1.164	0.000
3	0.317	0.000	0.000	75	1.575	-1.025	0.000
4	0.475	0.000	0.000	76	1.575	-0.886	0.000
5	0.633	0.000	0.000	77	1.575	-0.746	0.000
6	0.792	0.000	0.000	78	1.575	-0.607	0.000
7	0.950	0.000	0.000	79	1.575	-0.468	0.000
8	1.108	0.000	0.000	80	1.575	-0.329	0.000
9	1.267	0.000	0.000	81	1.575	-0.189	0.000
10	1.425	0.000	0.000	82	1.575	-0.050	0.000
11	1.575	0.000	0.000	83	1.425	2.000	0.000
12	1.743	0.000	0.000	84	1.425	1.861	0.000
13	1.911	0.000	0.000	85	1.425	1.721	0.000
14	2.080	0.000	0.000	86	1.425	1.582	0.000
15	2.248	0.000	0.000	87	1.425	1.443	0.000
16	2.416	0.000	0.000	88	1.425	1.304	0.000
17	2.584	0.000	0.000	89	1.425	1.164	0.000
18	2.752	0.000	0.000	90	1.425	1.025	0.000
19	2.920	0.000	0.000	91	1.425	0.886	0.000
20	3.089	0.000	0.000	92	1.425	0.746	0.000
21	3.257	0.000	0.000	93	1.425	0.607	0.000
22	3.425	0.000	0.000	94	1.425	0.468	0.000
23	3.575	0.000	0.000	95	1.425	0.329	0.000
24	3.717	0.000	0.000	96	1.425	0.189	0.000
25	3.858	0.000	0.000	97	1.425	0.050	0.000
26	4.000	0.000	0.000	98	1.575	2.000	0.000
27	0.000	0.000	-0.150	99	1.575	1.861	0.000
28	0.158	0.000	-0.150	100	1.575	1.721	0.000
29	0.317	0.000	-0.150	101	1.575	1.582	0.000
30	0.475	0.000	-0.150	102	1.575	1.443	0.000
31	0.633	0.000	-0.150	103	1.575	1.304	0.000
32	0.792	0.000	-0.150	104	1.575	1.164	0.000
33	0.950	0.000	-0.150	105	1.575	1.025	0.000
34	1.108	0.000	-0.150	106	1.575	0.886	0.000
35	1.267	0.000	-0.150	107	1.575	0.746	0.000
36	1.425	0.000	-0.150	108	1.575	0.607	0.000
37	1.575	0.000	-0.150	109	1.575	0.468	0.000
38	1.743	0.000	-0.150	110	1.575	0.329	0.000
39	1.911	0.000	-0.150	111	1.575	0.189	0.000
40	2.080	0.000	-0.150	112	1.575	0.050	0.000
41	2.248	0.000	-0.150	113	3.425	-1.000	0.000
42	2.416	0.000	-0.150	114	3.425	-0.861	0.000
43	2.584	0.000	-0.150	115	3.425	-0.721	0.000
44	2.752	0.000	-0.150	116	3.425	-0.582	0.000
45	2.920	0.000	-0.150	117	3.425	-0.443	0.000
46	3.089	0.000	-0.150	118	3.425	-0.304	0.000
47	3.257	0.000	-0.150	119	3.425	-0.164	0.000
48	3.425	0.000	-0.150	120	3.425	-0.025	0.000
49	3.575	0.000	-0.150	121	3.575	-1.000	0.000
50	3.717	0.000	-0.150	122	3.575	-0.861	0.000
51	3.858	0.000	-0.150	123	3.575	-0.721	0.000
52	4.000	0.000	-0.150	124	3.575	-0.582	0.000
53	1.425	-2.000	0.000	125	3.575	-0.443	0.000
54	1.425	-1.861	0.000	126	3.575	-0.304	0.000
55	1.425	-1.721	0.000	127	3.575	-0.164	0.000
56	1.425	-1.582	0.000	128	3.575	-0.025	0.000
57	1.425	-1.443	0.000	129	3.425	1.000	0.000
58	1.425	-1.304	0.000	130	3.425	0.861	0.000
59	1.425	-1.164	0.000	131	3.425	0.721	0.000
60	1.425	-1.025	0.000	132	3.425	0.582	0.000
61	1.425	-0.886	0.000	133	3.425	0.443	0.000
62	1.425	-0.746	0.000	134	3.425	0.304	0.000
63	1.425	-0.607	0.000	135	3.425	0.164	0.000
64	1.425	-0.468	0.000	136	3.425	0.025	0.000
65	1.425	-0.329	0.000	137	3.575	1.000	0.000
66	1.425	-0.189	0.000	138	3.575	0.861	0.000
67	1.425	-0.050	0.000	139	3.575	0.721	0.000
68	1.575	-2.000	0.000	140	3.575	0.582	0.000
69	1.575	-1.861	0.000	141	3.575	0.443	0.000
70	1.575	-1.721	0.000	142	3.575	0.304	0.000
71	1.575	-1.582	0.000	143	3.575	0.164	0.000
72	1.575	-1.443	0.000	144	3.575	0.025	0.000

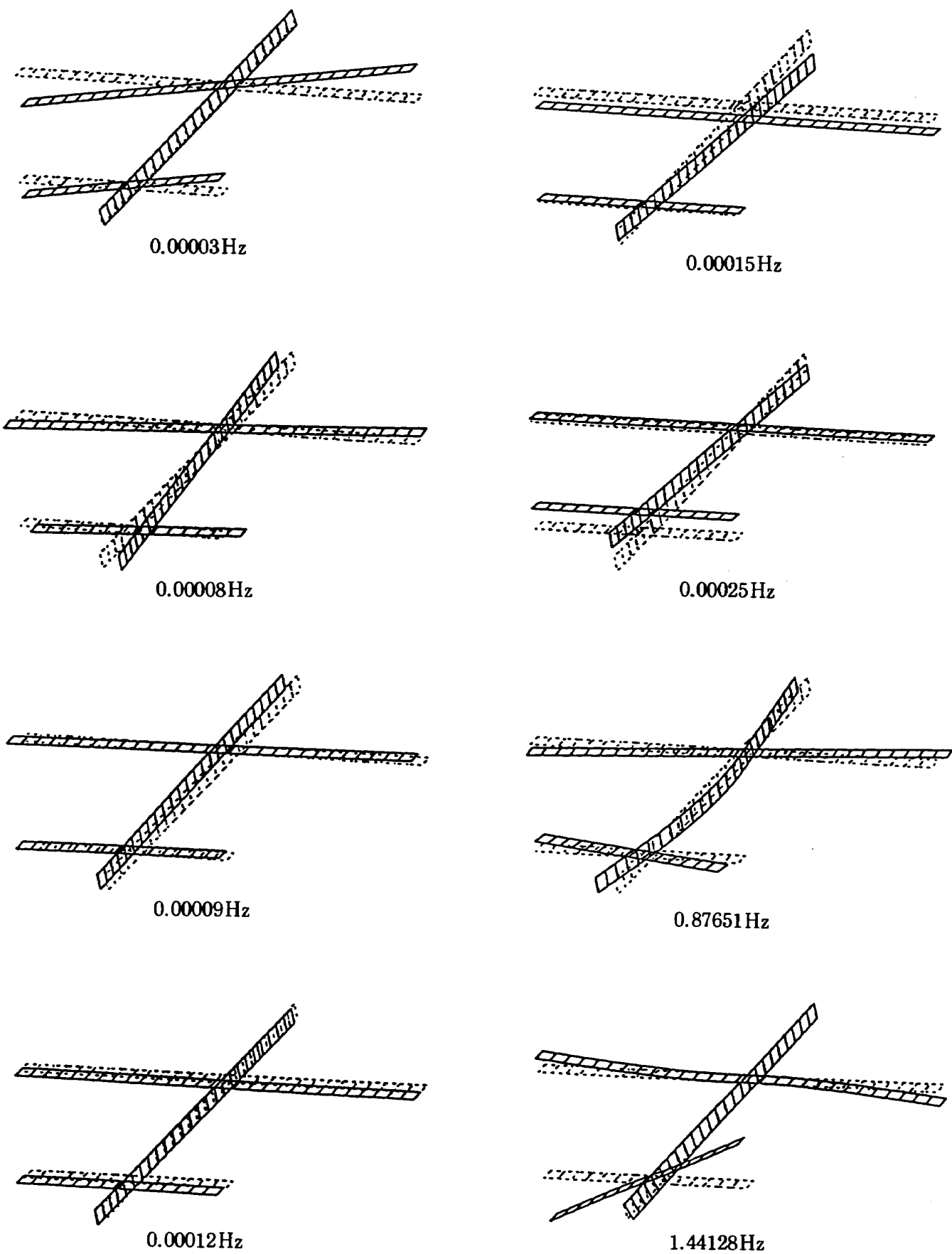


図3 振動モード形と固有振動数(振動解析)

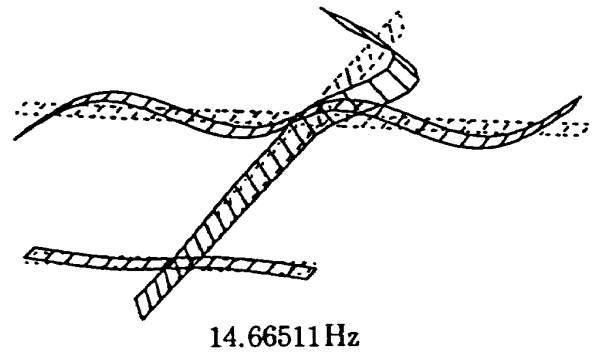
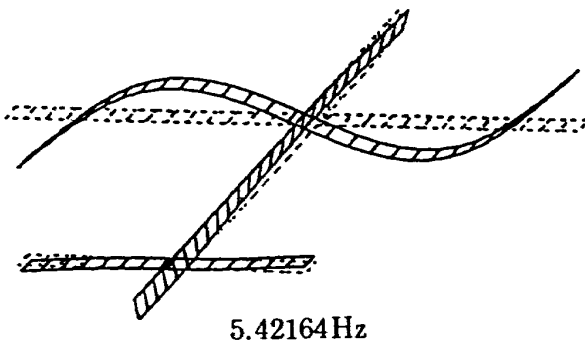
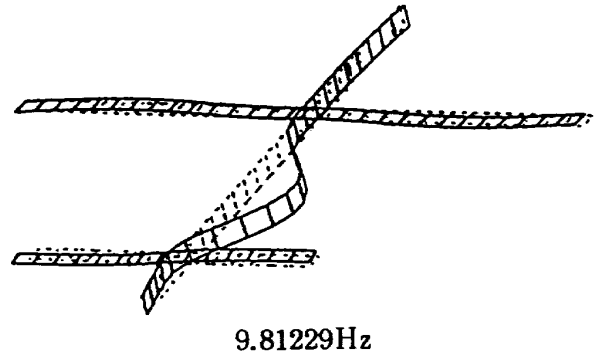
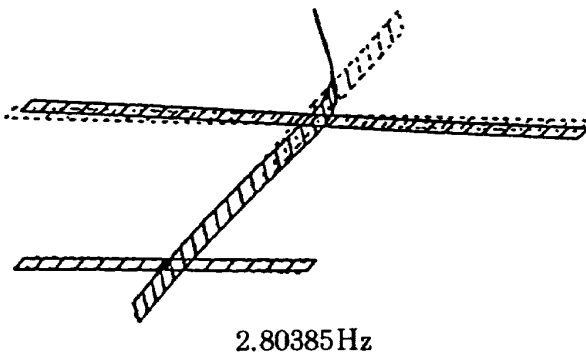
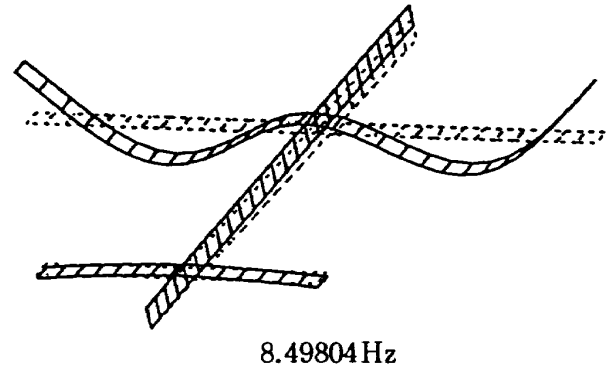
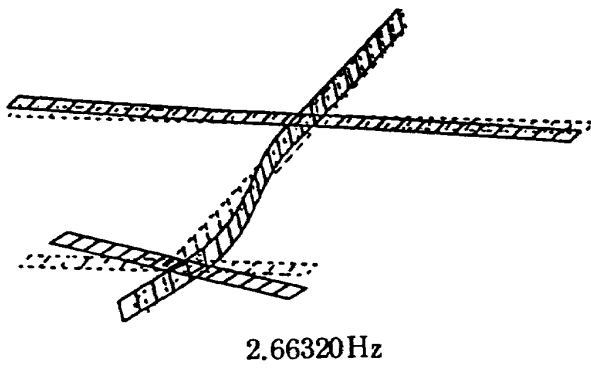
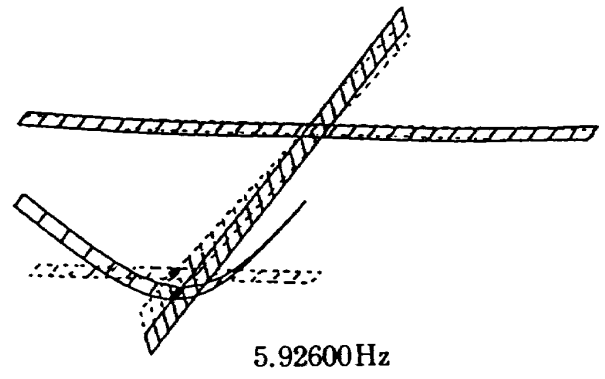
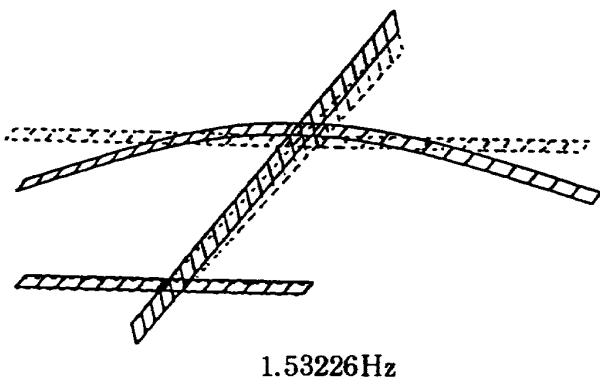


図3 (続き)

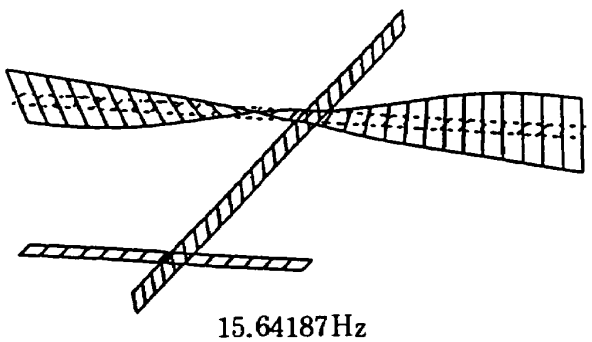
#### 4. 振動試験と結果

振動試験は振動解析の情報を基に、1)ランダム1点加振法、2)正弦波多点加振によるノーマルモード法(MODAP)、および、3)正弦波多点強制加振による伝達関数法(MODAT SINE)の3つを行った。その夫々の試験法と結果について述べる。

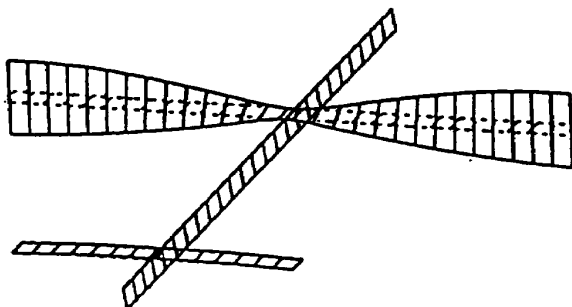
##### 4.1 ランダム1点加振法

実機振動試験設備を用いて振動試験を実施する前に、簡単な方法で振動試験を行い、振動解析の結果をあらかじめ確かめることを目的に、ランダム1点加振法を行った。

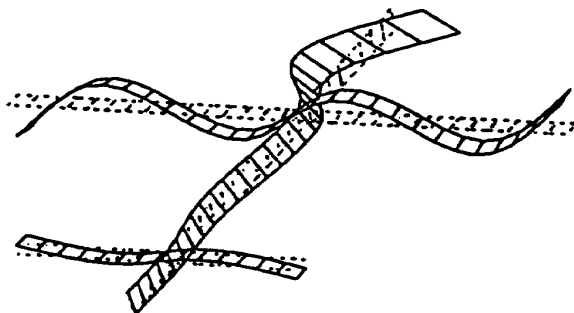
供試体は自由な状態で振動試験するため2個のコイルバネを用い、胴体重心を1.5mの間隔で吊上げた。また、加速度応答を検出する計測点は21点を選び、その各点に加速度計取付けブロック(20mm角のベークライト製)を両面接着テープで固定し、3軸方向の加速度を計測する3個の加速度計を取付けた。図4に21点の計測点を、また、表3に計測点と座標の関係を示す。加振点は胴体重心位置の1点を選び、加振方向は振動試験の目的によって翼の対称振動モードが主体の場合は上下方向、そして翼の逆対称振動モードと胴体の振動モードが主体の場合は横方向にそれぞれ加振軸を変えた。この振動試験の加振・計測・および解析の概要を図5に、また、振動試験の上下加振と横加振の例を図6と図7に夫々示す。ランダム加振の信号は2チャンネルFFTアナライザ(BK2034)の擬似ランダム信号を用い、電力増幅器(MSB-200)により加振力10kgの加振機(MSE-411)を駆動した。加振力の計測は加振機と供試体の間に力変換子(PCB-208B)を取付けその信号を、増幅器(480D06)で増幅し、入力信号としてデータレコーダ(RTP-600A)に収録した。一方、供試体の応答は63個の加速度計(AC565/II)の信号をシグナルコンデンショナ(DIV552)で増幅し、各点の応答信号をデータレコーダに収録した。解析に必要な記録の長さは余裕を含めて計測時間を60秒間にした。解析はあらかじめ作成した手順と座標データに基づいてデータレコーダを再生し、入力とそれぞれ



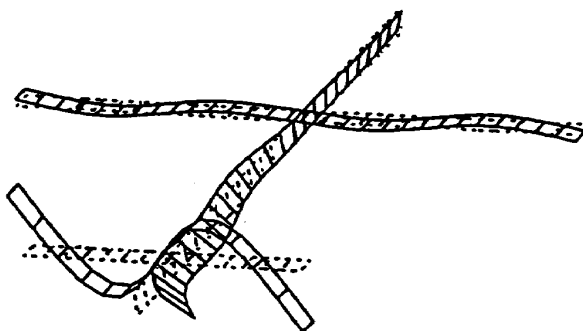
15.64187 Hz



15.69333 Hz



15.77265 Hz



18.72996 Hz

図3 (続き)



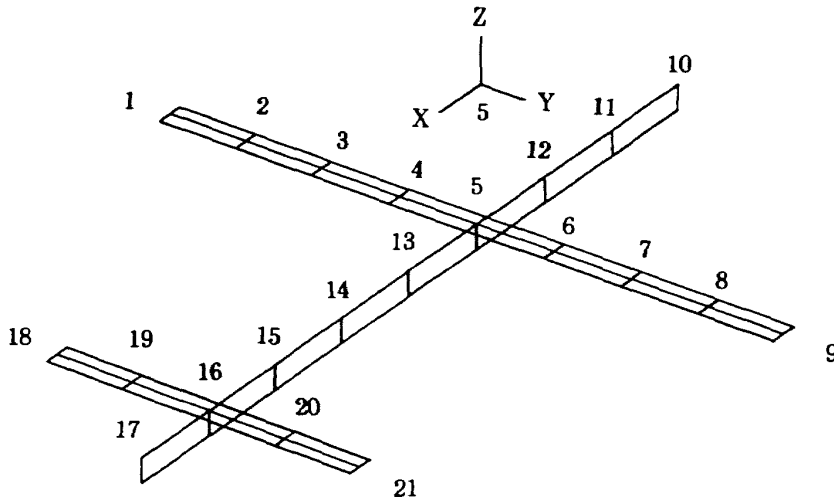


図4 計測点と番号(ランダム1点加振)

表3 計測点と座標(ランダム1点加振)

計測点番号	座 標		
	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	0.000	-200.000	0.000
2	0.000	-150.000	0.000
3	0.000	-100.000	0.000
4	0.000	-50.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000
6	0.000	50.000	0.000
7	0.000	100.000	0.000
8	0.000	150.000	0.000
9	0.000	200.000	0.000
10	-150.000	0.000	0.000
11	-100.000	0.000	0.000
12	-50.000	0.000	0.000
13	50.000	0.000	0.000
14	100.000	0.000	0.000
15	150.000	0.000	0.000
16	200.000	0.000	0.000
17	250.000	0.000	0.000
18	200.000	-100.000	0.000
19	200.000	-50.000	0.000
20	200.000	50.000	0.000
21	200.000	100.000	0.000

の応答の信号から平均回数50回の周波数応答関数を2チャンネルFFTアナライザで順次測定し、そのデータはGP-IBケーブルを通してパーソナルコンピュータ(PS-9000 310M)に転送し、モーダル解析ソフトウェア(MODAL 3.0 SYSTEM DISC)を用いて固有振動特性の同定を行い、結果をプリンタとプロッタに出力した。振動試験の形態は振動解析の形態に合わせて、尾翼の有る場合と、無い場合の2形態について行い、尾翼の無い場合の試験は付録2にまとめた。

次に、この振動試験で得られた結果を、上下方

向加振による対称振動モードと横方向加振による胴体横振動と逆対称振動モードの2つの場合に分けて示す。表4が上下方向加振によって得られた4つの対称振動モードの固有振動数と減衰比で、図8にその振動モード形をまとめて示す。また、横方向加振によって得られた8つの振動モードは胴体の横振動モードと翼の逆対称振動モードおよびその連成モードで、表5に固有振動数と減衰比、そして図9に振動モード形をまとめて示した。

#### 4.2 正弦波多点加振によるノーマルモード法(MODAP)

実機振動試験設備を使用し、このシステムによる正弦波多点加振によるノーマルモード法(MODAP)の振動試験を行った。また、取得した振動試験データを振動解析と比較・検討して試験法の問題点を研究した。ここではこの手法による振動試験について述べる。

供試体の支持は基本的には4.1と同じ2個のコイルバネを使用し、自由な状態にするため供試体を吊上げた。しかし、支持点、支持間隔、および支持方法は振動モードによってその都度適宜変更した。この支持方法の例を図10と図11に示す。実際には、クレーンとチェンブロックを用いてコイルバネと供試体を吊上げ、加振機の位置に供試体の高さを調整した。応答を測定する計測点は振動解析と比較のため図12に示した46点を選び、各点

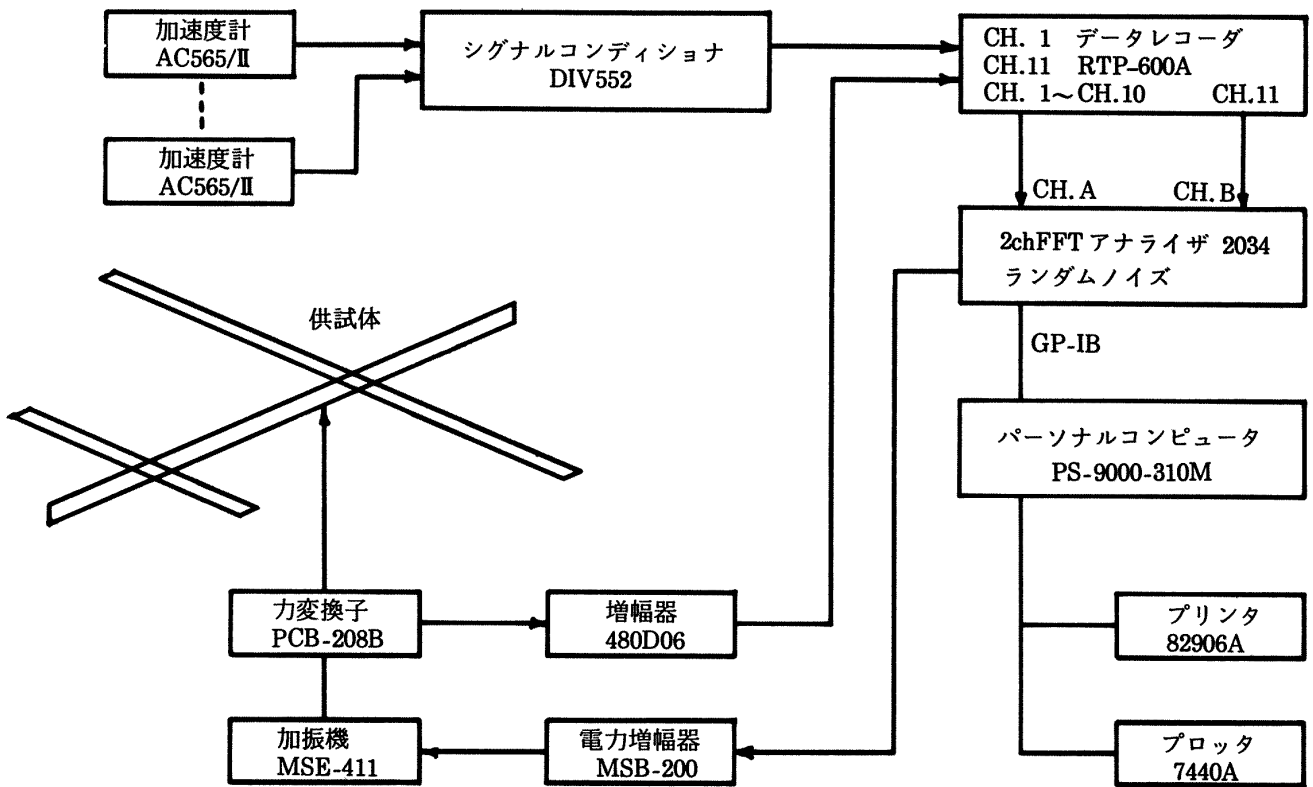


図5 振動試験の概要(ランダム1点加振)

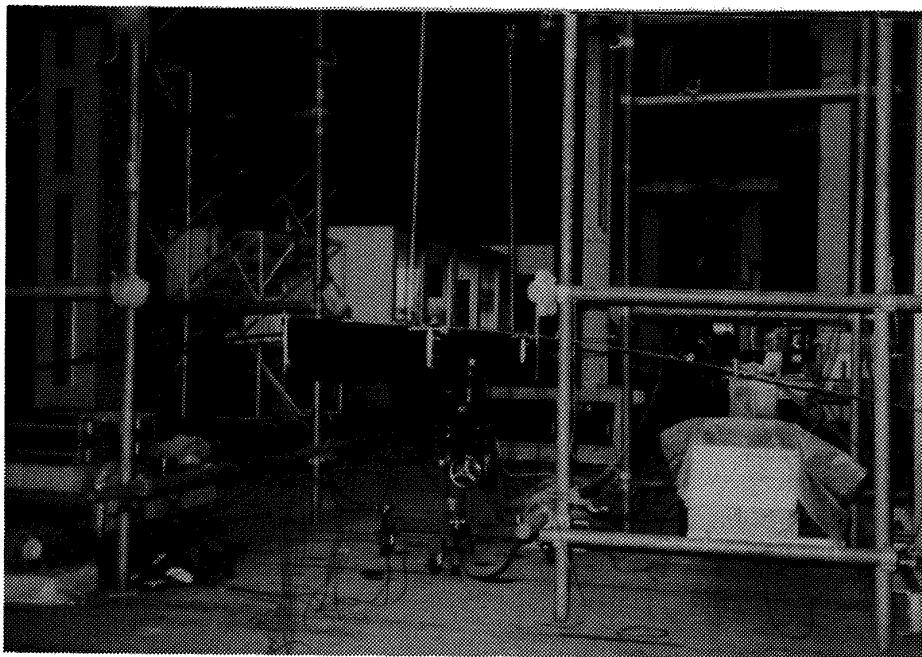


図6 重心の上下加振

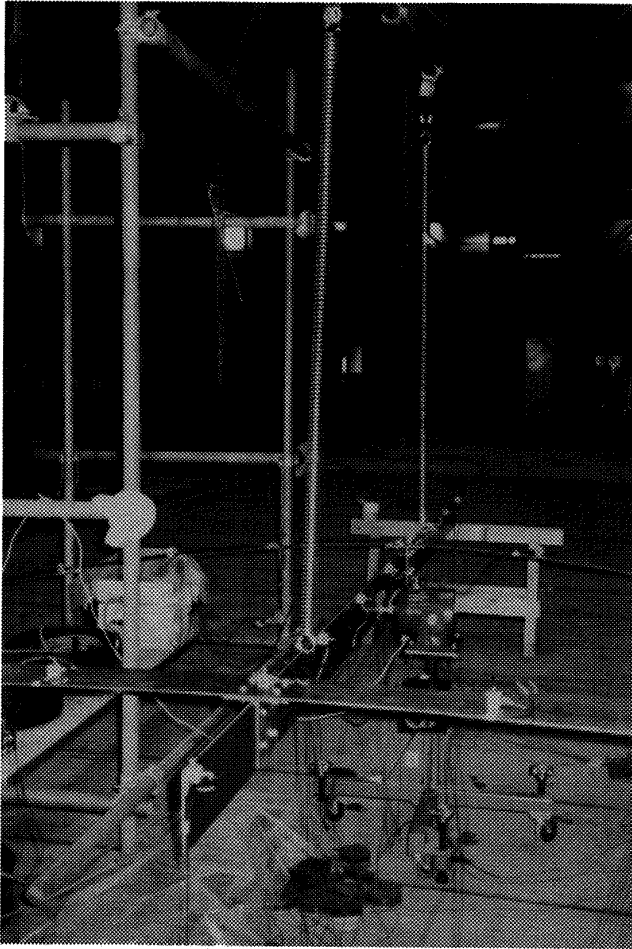


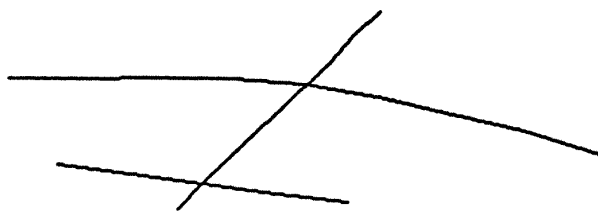
図7 重心の横加振

表4 対称振動の固有振動数と減衰比  
(ランダム1点重心上下加振)

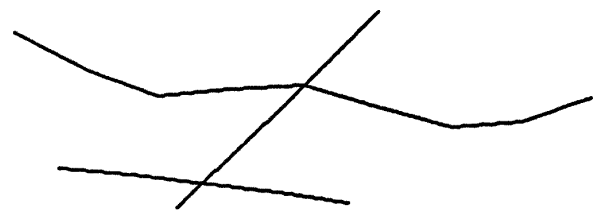
モード番号	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
1	1.52	0.26
2	6.02	0.18
3	8.37	0.20
4	22.25	0.15

表5 胴体の振動と翼の逆対称振動の固有振動数と減衰比(ランダム1点重心横加振)

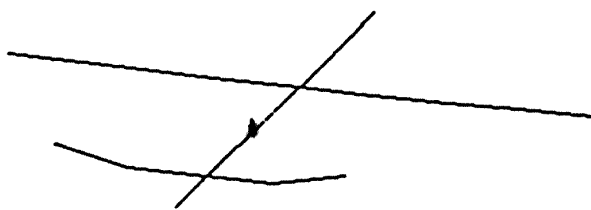
モード番号	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
1	0.82	-2.29
2	1.40	0.92
3	2.59	0.53
4	5.30	0.24
5	9.46	0.21
6	14.27	0.21
7	16.58	0.13
8	23.69	0.22



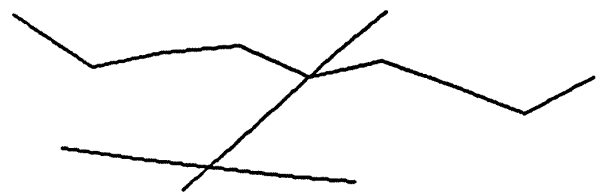
1.52Hz



8.37Hz



6.02Hz



22.25Hz

図8 対称振動のモード形(重心の上下加振)

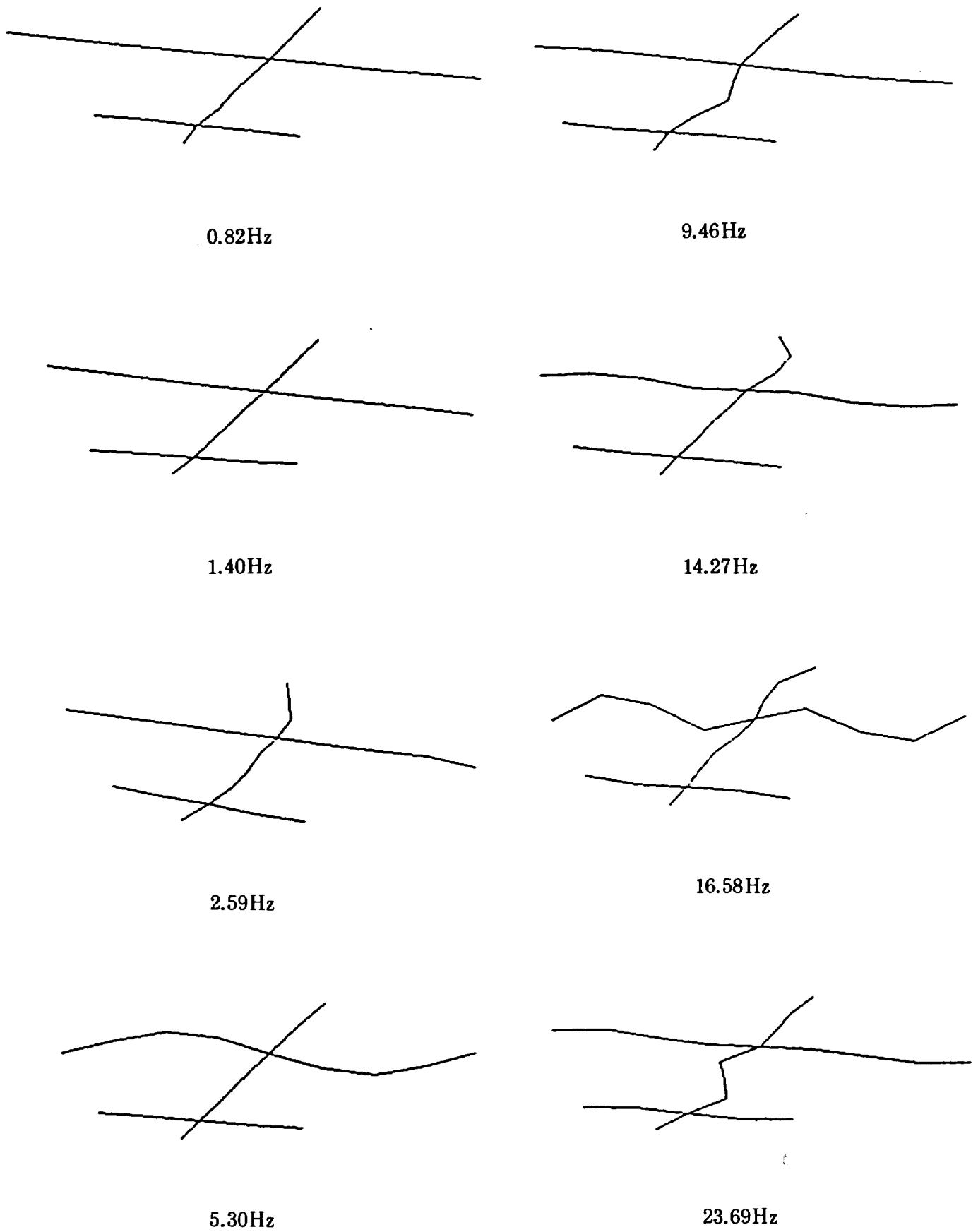


図9 胴体の振動と翼の逆対称振動のモード形(重心の横加振)

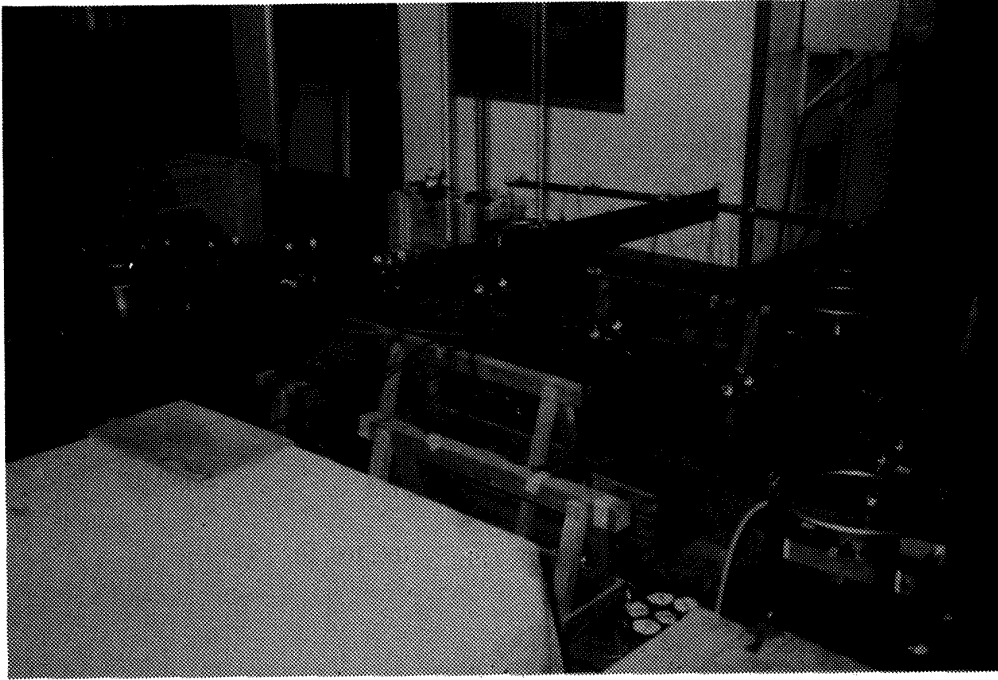


図10 支持方法の例（支持間隔600mm）

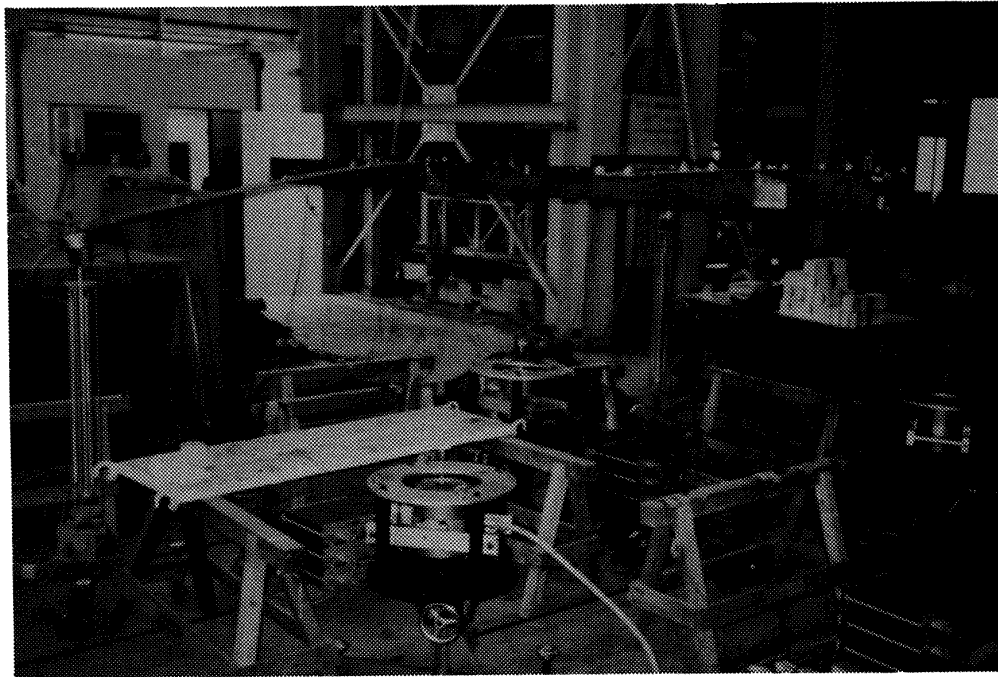


図11 支持方法の例（支持間隔1500mm）

に4.1と同じ方法で加速度計を3軸方向に取付けた。加振機と加振点は振動モードによって最適になるように、サイズミックサスペンションに取付けた加振機の種類、数、および加振軸方向を変えた。その例を図13に、また、加振機を取付けを図14と図15に夫々示す。正弦波多点加振によるノーマルモード法(MODAP)の振動試験はあらかじめ入力データとして計測点の座標を与える Coordinate ファイル、および線図に必要な情報を与える

Way ファイルを作成し、キーボードより入力しディスクに格納する。この Coordinate ファイルと Way ファイルのデータを表6と表7に示す。このシステムでは3次元の図形表示ができないため、表7のデータはそれぞれ2次元の図形表示に分けてデータを入力する。次に、一台のCRT上に20点のリサージュ図を同時に観察できるように、供試体の主要な20計測点を選び、パッチボード上の配線を行う。このリサージュ図は振動試験時に

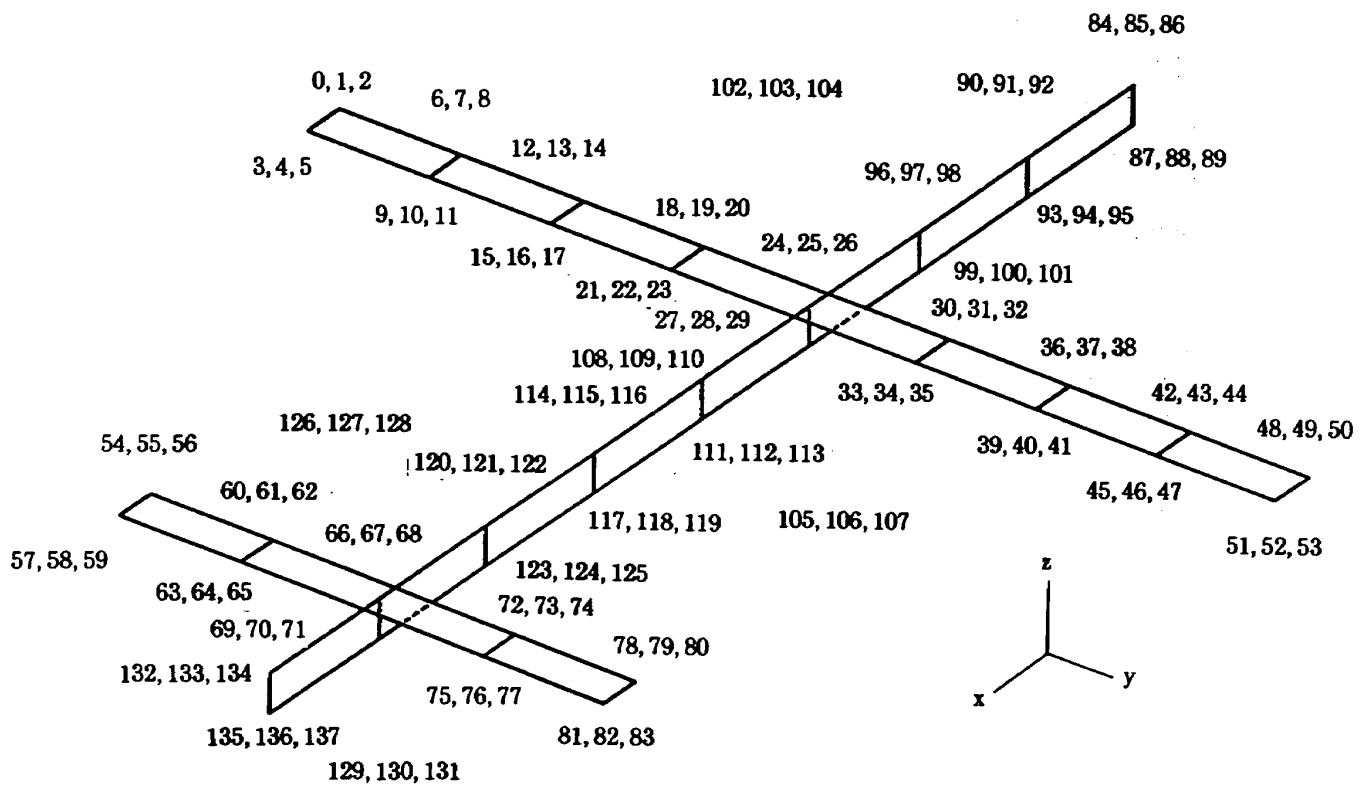


図12 加速度計の取付位置と方向(X, Y, Z)

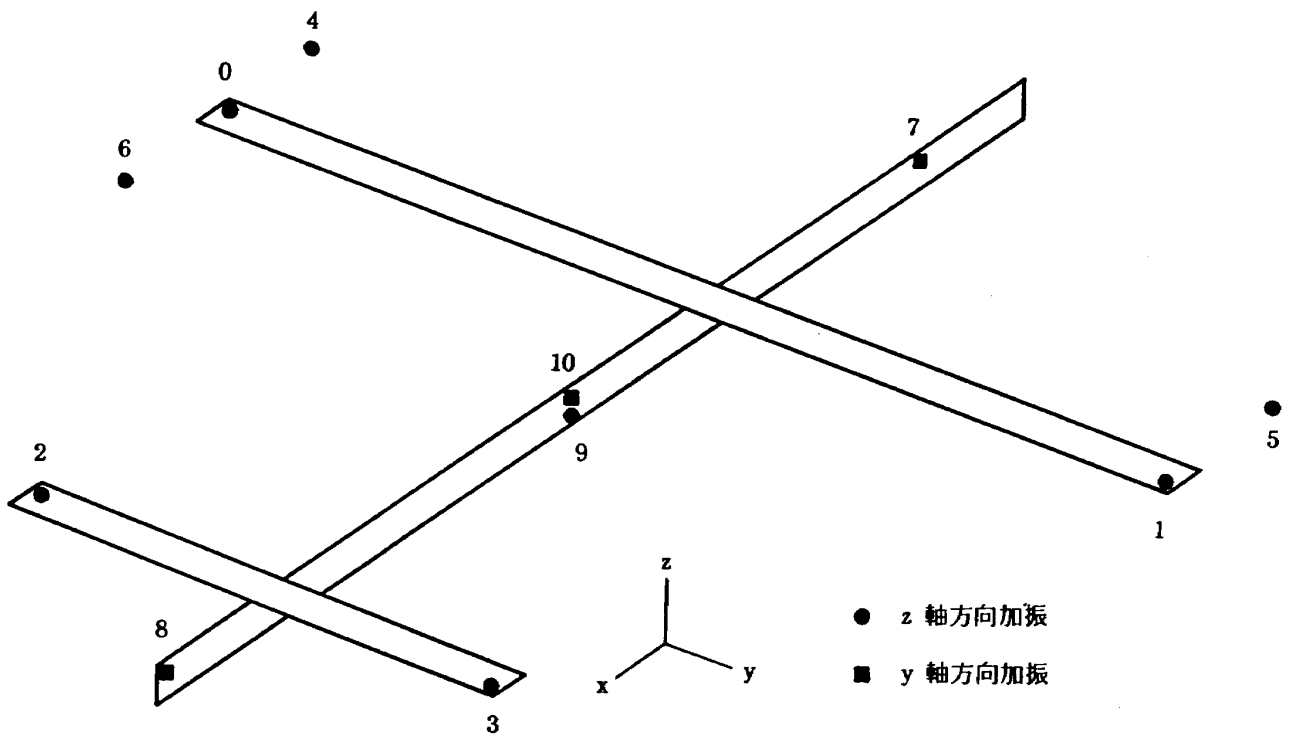


図13 加振機の加振位置と方向

画面を見て供試体の振動状態を把握しながらマニュアルで多点の加振力と加振位相をプリセットできる。ノーマルモード法による振動試験の特徴は、従来の手動で行う正弦波加振による振動試験と異なり、単一の固有モードでの試験条件を事前に取得し、必要な値をプリセットし、キーボード操作によって開始すると、システムは自動的に、加振、計測、解析、図形処理、結果の出力を行う。その

進行は試験担当者の判断によって順次進められる。従って、この事前情報を要領良く取得し、良い初期値を設定することが試験時間と試験結果に関係してくる。この試験手順は文献<sup>3)</sup>の付録1に詳しく記述されているので、ここでは概要を図16に示す。試験中の人数は、計測室と供試体の間が離れ

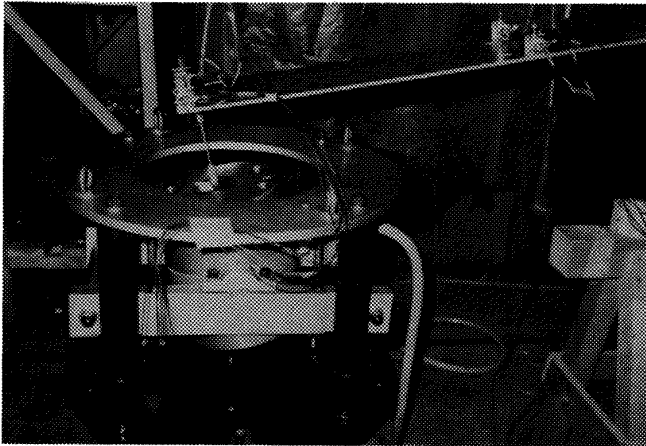


図14 200N 加振機の取付例

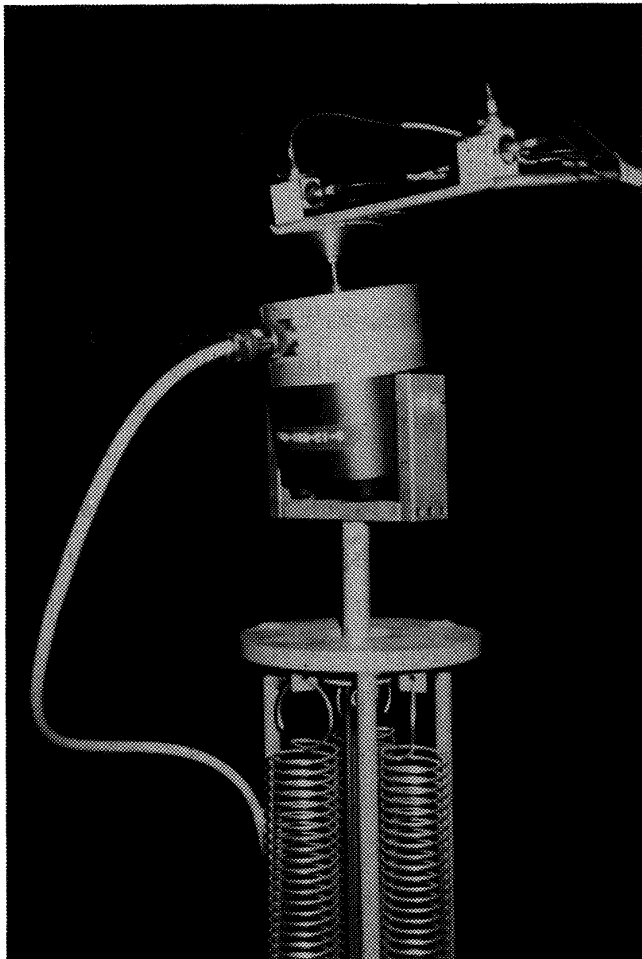


図15 10N 加振機の取付例

表6 Coordinate ファイル

計測点番号			座 標		
X	Y	Z	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
0	1	2	-7.5	-200	0
3	4	5	7.5	-200	0
6	7	8	-7.5	-150	0
9	10	11	7.5	-150	0
12	13	14	-7.5	-100	0
15	16	17	7.5	-100	0
18	19	20	-7.5	-50	0
21	22	23	7.5	-50	0
24	25	26	-7.5	0	0
27	28	29	7.5	0	0
30	31	32	-7.5	50	0
33	34	35	7.5	50	0
36	37	38	-7.5	100	0
39	40	41	7.5	100	0
42	43	44	-7.5	150	0
45	46	47	7.5	150	0
48	49	50	-7.5	200	0
51	52	53	7.5	200	0
54	55	56	192.5	-100	0
57	58	59	207.5	-100	0
60	61	62	192.5	-50	0
63	64	65	207.5	-50	0
66	67	68	192.5	0	0
69	70	71	207.5	0	0
72	73	74	192.5	50	0
75	76	77	207.5	50	0
78	79	80	192.5	100	0
81	82	83	207.5	100	0
84	85	86	-150	0	0
87	88	89	-150	0	-15
90	91	92	-100	0	0
93	94	95	-100	0	-15
96	97	98	-50	0	0
99	100	101	-50	0	-15
102	103	104	0	0	0
105	106	107	0	0	-15
108	109	110	50	0	0
111	112	113	50	0	-15
114	115	116	100	0	0
117	118	119	100	0	-15
120	121	123	150	0	0
123	124	125	150	0	-15
126	127	128	200	0	0
129	130	131	200	0	-15
132	133	134	250	0	0
135	136	137	250	0	-15

表7 Way ファイル

X		Y		Z	
000D	057L	001D	064L	002D	065L
000L	054L	001L	058L	002L	059L
006L	060D	007L	055L	008L	056L
012L	063L	013L	061D	014L	062D
018L	072D	019L	064L	020L	065L
024L	075L	025L	073D	026L	074D
030L	084D	031L	076L	032L	077L
036L	090L	037L	085D	038L	086D
042L	096L	043L	091L	044L	092L
048L	024L	049L	097L	050L	098L
051L	027L	052L	025L	053L	026L
045L	114L	046L	028L	047L	029L
039L	120L	040L	115L	041L	116L
033L	066L	034L	121L	035L	122L
027L	069L	028L	067L	029L	068L
021L	135L	022L	070L	023L	071L
015L	129L	016L	136L	017L	137L
009L	123L	010L	130L	011L	131L
003L	117L	004L	124L	005L	125L
000L	111L	001L	118L	002L	119L
009L	105L	010L	112L	011L	113L
012D	099L	013D	106L	014D	107L
015L	093L	016L	100L	017L	101L
018D	087L	019D	094L	020D	095L
021L	084L	022L	088L	023L	089L
030D	090D	031D	085L	032D	086L
033L	093L	034L	091D	035L	092D
036D	096D	037D	094L	038D	095L
039L	099L	040L	097D	041L	098D
042D	102D	043D	100L	044D	101L
045L	105L	046L	103D	047L	104D
054D	108D	055D	106L	056D	107L
060L	111L	061L	109D	062L	110D
066L	114D	067L	112L	068L	113L
072L	117L	073L	115D	074L	116D
078L	120D	079L	118L	080L	119L
081L	123L	082L	121D	083L	122D
075L	126D	076L	124L	077L	125L
069L	129L	070L	127D	071L	128D
063L	129D		130L		131L
			130D		131D

ているために計測室内の設備の運転操作に1名、供試体の振動状態の観察に1名、そして加振位置、軸方向、加振機の数、模型の形態変更等人力を必要とするとき1名の2~3名で試験を行った。この試験での所要時間は振動モードによって異なるが、約15~30分/1モードであった。試験での注意は、試験前に加速度計の接着剤が剥がれないこと。加振軸位置が加振機の中立位置にあり、加振パッドが供試体から剥がれていないこと。試験中は加振力が適性で、加速度計がケーブルの振動で剥がれ落ちないこと。加振機を保持しているサイズミックスサスペンションの支持バネが共振しないこと等を監視した。また、システムの各機能が正常であっても、加振機の力調整に計算時間を要するようであれば、原因を確かめ、対策を講じ、再起

動する必要があった。結果については、モードの分離が十分にできて、加振・計測に異常がなかったか判断した。このため振動解析や簡単な振動試験の結果を情報とし、試験中の観察を含めて試験結果を現場で比較、検討して振動試験を進めた。次に、この手法で得られた24の振動モードの固有振動数、減衰係数、および一般化質量を表8に、振動モード形を図17に、それぞれ加振条件毎にまとめて示す。加振条件は、表8のNo.1~5が200N加振機による主翼2点尾翼2点の4点加振、No.6~10が200N加振機による主翼2点加振、No.11~12が200N加振機による尾翼2点加振、No.13~16が10N加振機による主翼2点加振、No.17が10N加振機によるアームを使用した主翼2点加振、No.18~19が10N加振機による尾翼2点加振、No.20



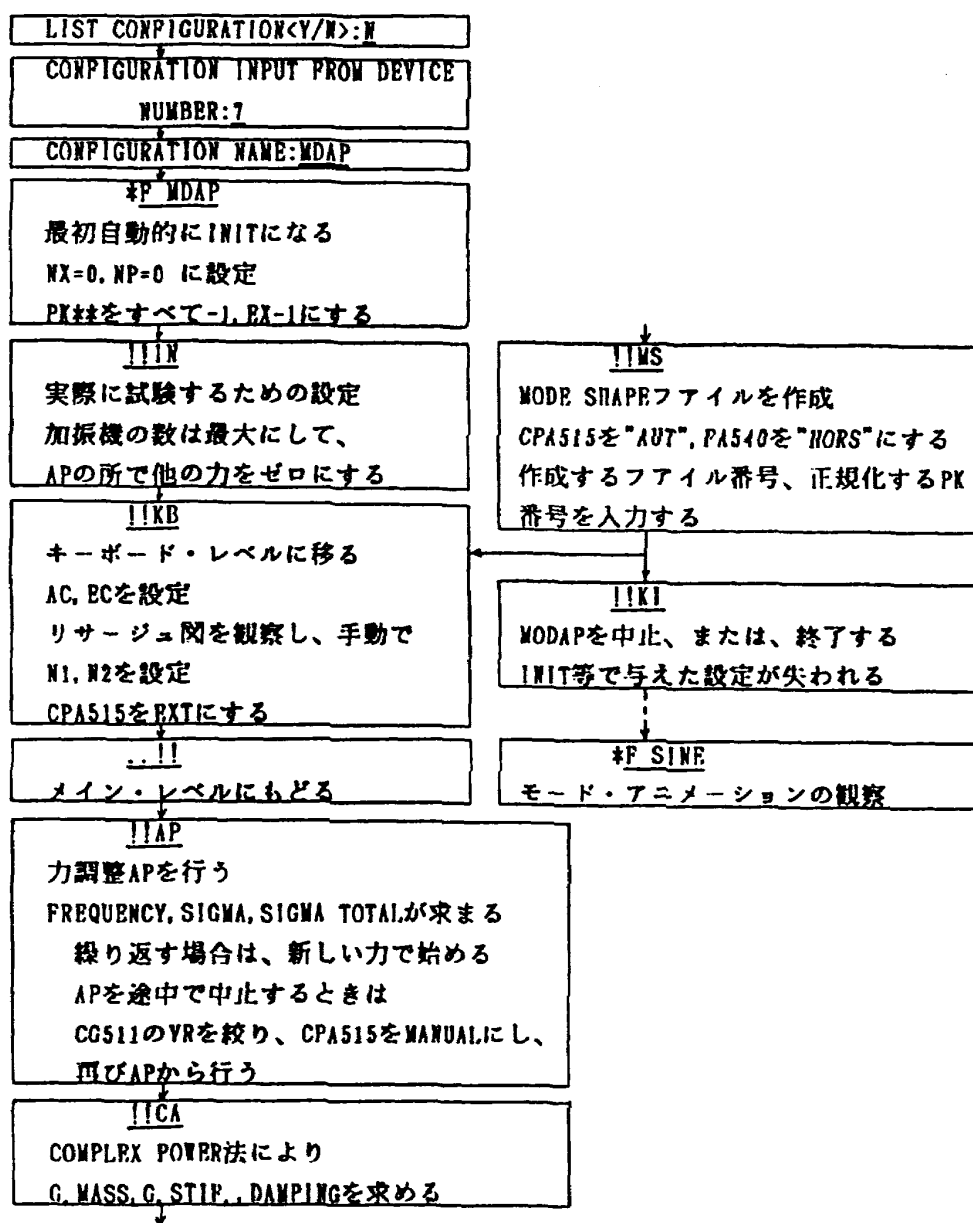


図16 MODAP 法の試験手順

表8 固有振動数, 減衰係数, および一般化質量 (MODAP 法)

番号	固有振動数 (Hz)	減衰係数	一般化質量 (KGM <sup>2</sup> )	加振
1	9.975	0.040		200N 加振機
2	8.111	0.02	0.926E1	主翼 2点
3	16.822	0.004	0.264E3	尾翼 2点
4	20.117	0.005	0.944E4	
5	22.145	0.004	0.140E2	
6	10.214	0.016	0.593E1	200N 加振機
7	8.218	0.019	0.890E1	主翼 2点
8	16.822	0.007	0.103E2	
9	22.116	0.005	0.133E2	
10	14.270	0.0001	0.465E4	
11	10.078	0.022	0.483E4	200N 加振機
12	19.957	0.014	0.524E1	尾翼 2点
13	22.118	0.003	0.124E2	10N 加振機
14	16.638	0.006	0.717E1	主翼 2点
15	8.654	0.009	0.256E2	
16	6.008	0.012	0.852E1	
17	18.611	0.030	0.200E2	10N 加振機主翼 2点 (アーム使用)
18	19.961	0.008	0.453E1	10N 加振機
19	6.971	0.011	0.489E1	尾翼 2点
20	23.77	0.004	0.768E1	10N 加振機
21	16.462	0.003	0.426E2	胴体 2点
22	9.385	0.002	0.932E2	
23	3.773	0.001	0.174E3	10N 加振機前部胴体 1点
24	2.554	0.0005	0.435E4	10N 加振機後部胴体 1点

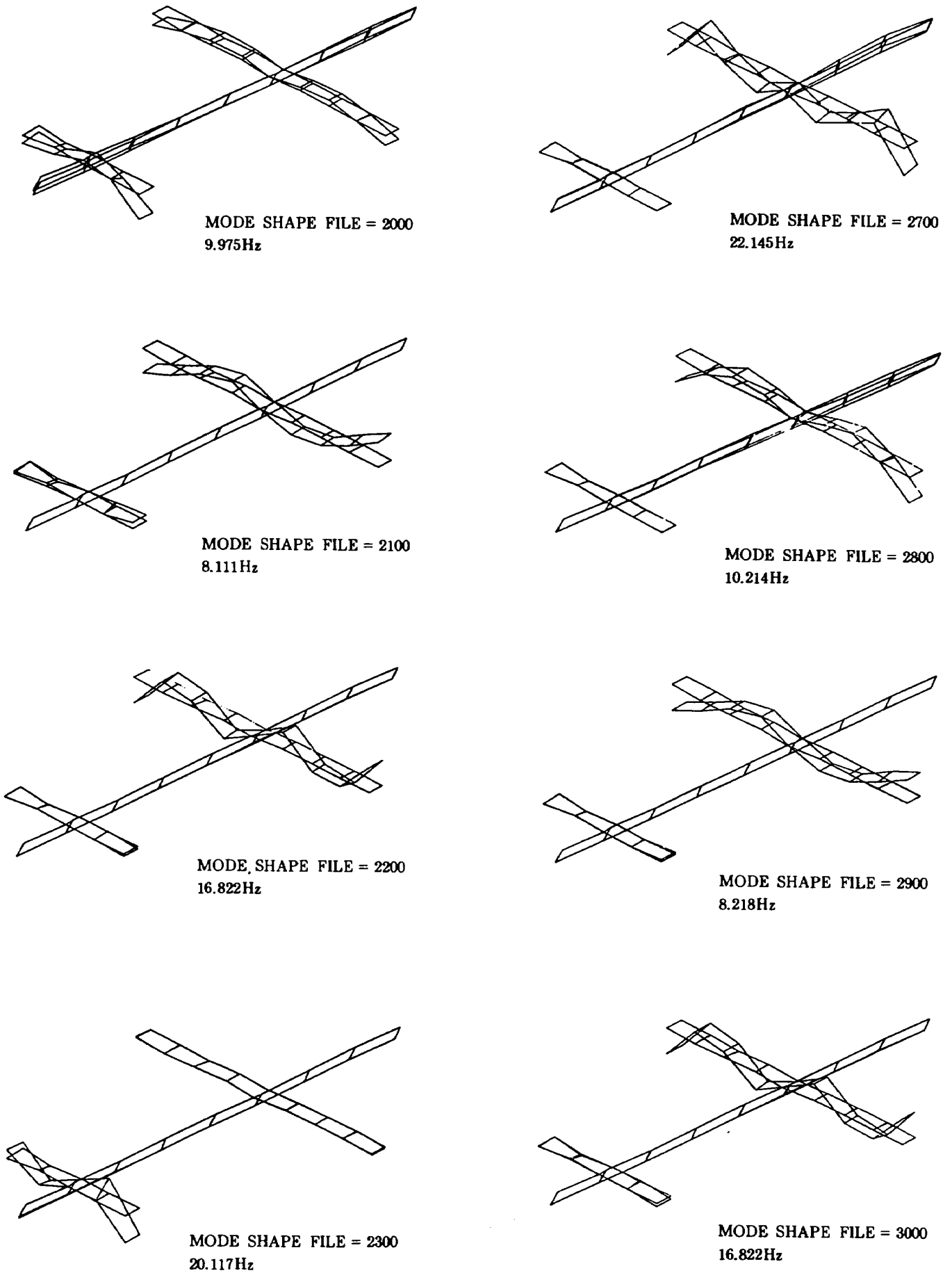


図17 振動モード形と固有振動数 (MODAP 法)

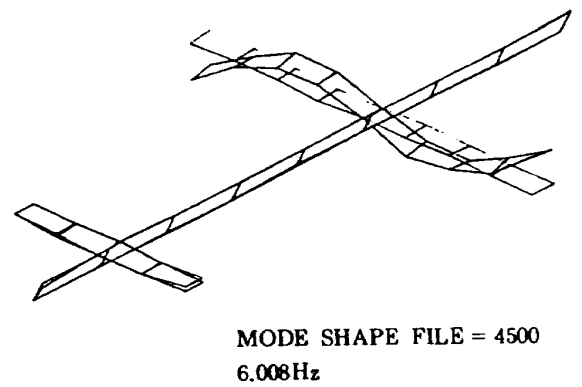
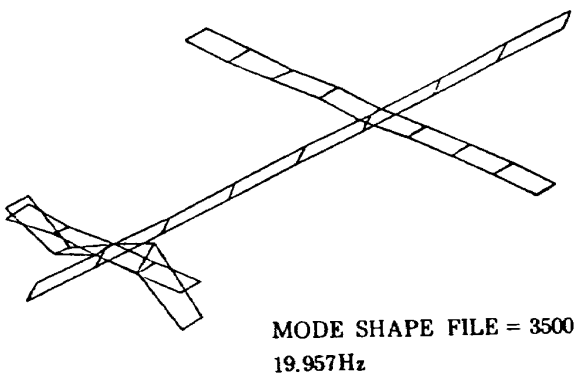
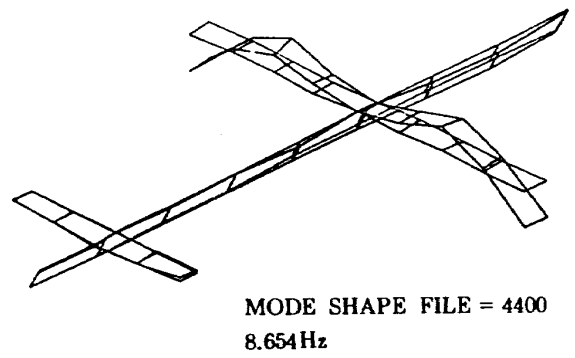
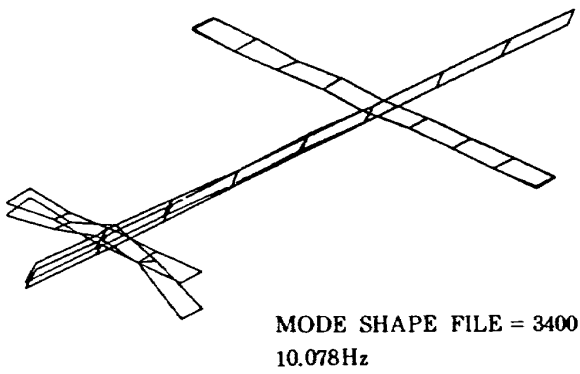
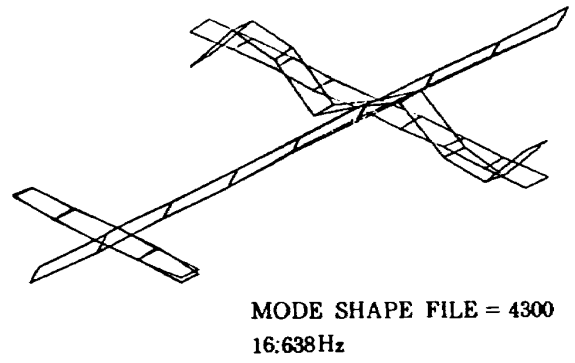
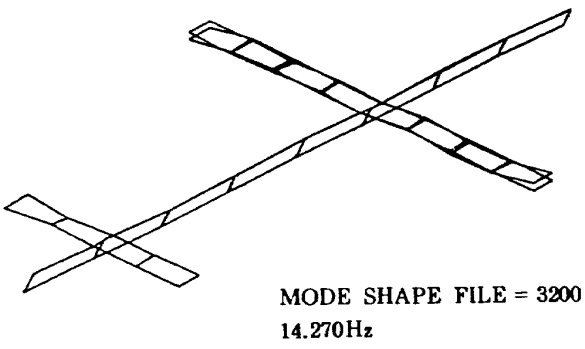
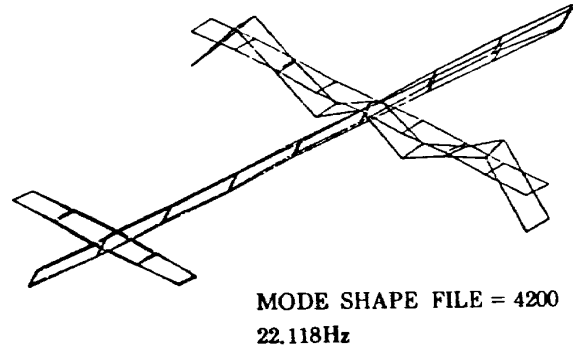
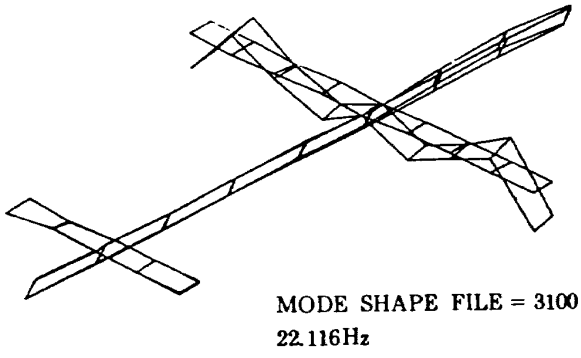
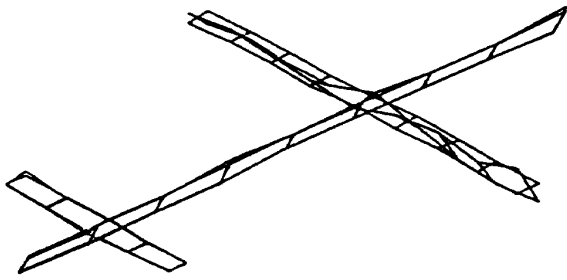
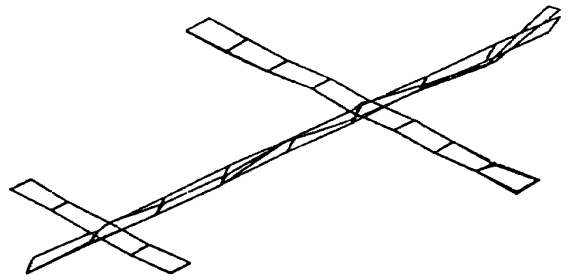


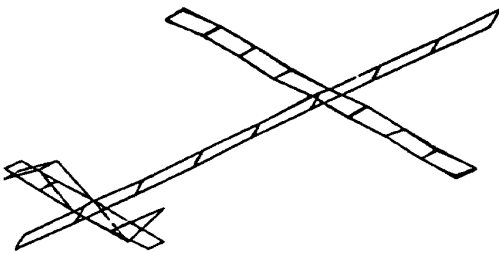
図17 ( 続き )



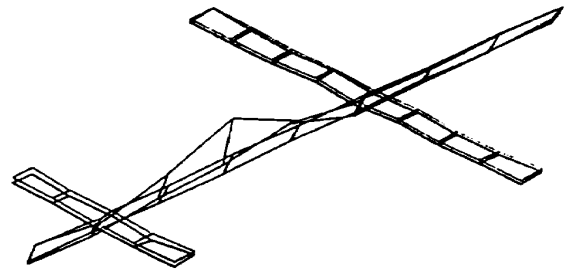
MODE SHAPE FILE = 5000  
18.611Hz



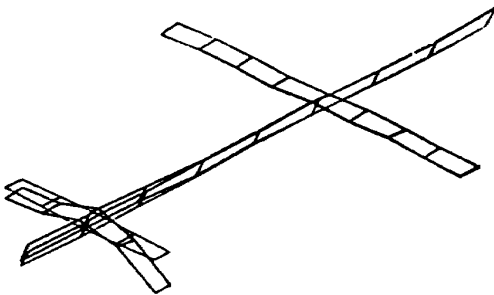
MODE SHAPE FILE = 6200  
16.462Hz



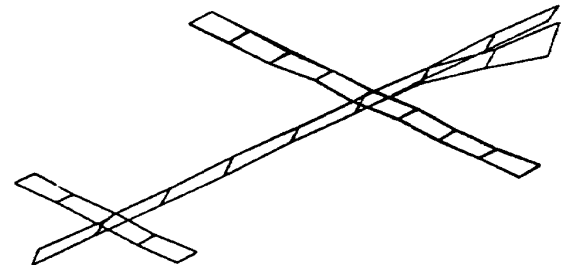
MODE SHAPE FILE = 5600  
19.961Hz



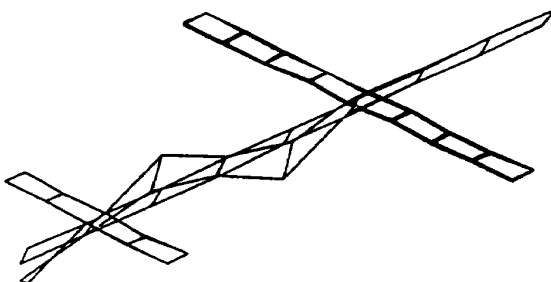
MODE SHAPE FILE = 6400  
9.385Hz



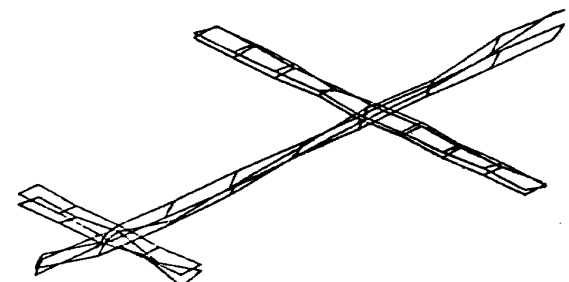
MODE SHAPE FILE = 5700  
6.971Hz



MODE SHAPE FILE = 6600  
3.773Hz



MODE SHAPE FILE = 6000  
23.77Hz



MODE SHAPE FILE = 6800  
2.554Hz

図17 ( 続き )

～22が10N加振機による胴体2点加振，No.23が10N加振機による前部胴体1点加振，そしてNo.24が10N加振機による後部胴体1点加振である。また，図17はこの加振条件によって実現されたモード形である。

### 4.3 正弦波多点強制加振による伝達関数法 (MODAT SINE)

正弦波多点強制加振による伝達関数法(MODAT SINE)は4.2のノーマルモード法(MODAP)と異なり，加振力の自動調整による最適化を行わないが，MODAPと同様に，事前に振動試験の設定条件を調べ，振動モードに適した初期値をプリセットする。一般的にRANDOMやIMPULSEによる伝達関数法よりも精度良く，また，MODAPより試験時間の短いことが特徴である。この試験の進め方は4.2と同様に，システムの手順に基づいて行う。そこで図18にMODAT SINEによる試験手順の概要を示した。このMODAT SINEの場合，あらかじめ着目したモードを狭帯域で掃引する正弦波のSTART振動数とSTOP振動数，およびSTEP振動数，そして共振点でモード形が正しく励起されるように加振力と位相をプリセットする。試験が開始され，途中でトラブルが発生した場合は再起動しなければならないが，この方法で一度に試験できるモードの数は1～数モードである。従って，精度良く試験を行うにはSTEP振動数を

細かく，1モードずつ狭帯域の振動数の設定を行う。一方試験時間を短縮する目的には，逆に近接した数モードを狭帯域のように振動数を設定し，一度に試験し，データ処理の段階でモードの分離を行う。これによって，全体の試験時間，試験日程をMODAPより短くすることが可能である。ま

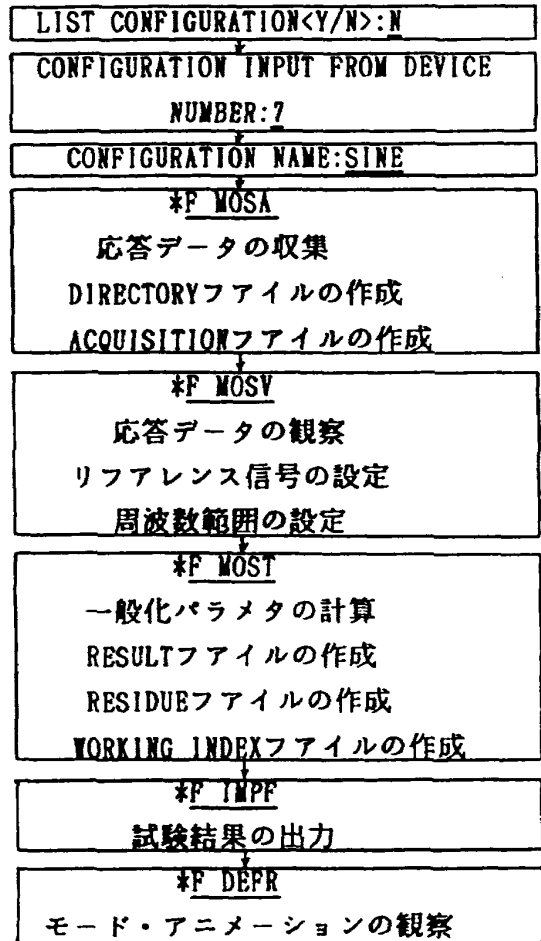
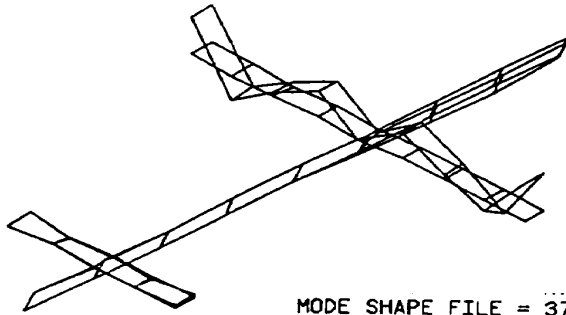


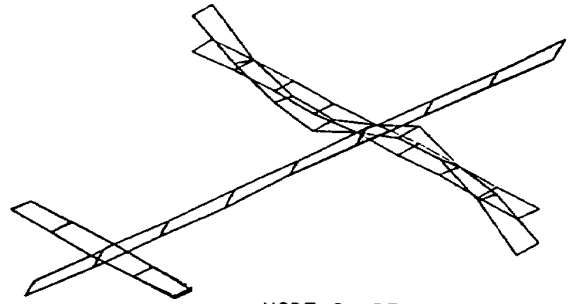
図18 MODAT SINE 法の試験手順

表9 固有振動数，減衰係数，および一般化質量 (MODAT SINE 法)

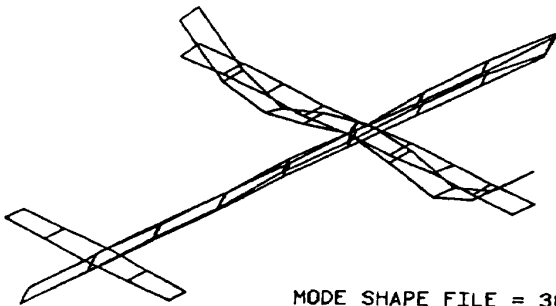
番号	固有振動数 (Hz)	減衰係数	一般化質量 (KGM <sup>2</sup> )	加振
1	22.121	0.002		200N 加振機
2	8.378	0.005	52.128	胴体重心1点
3	6.010	0.005	39.420	
4	1.562	0.005	180.006	
5	5.992	0.014	6.923	10N 加振機
6	22.141	0.004	13.617	主翼2点
7	16.645	0.006	8.670	
8	8.579	0.015	6.149	
9	18.682	-0.002	5204.198	10N 加振機主翼2点(アーム使用)
10	6.975	0.007	98.956	10N 加振機
11	19.923	0.008	52.424	尾翼2点
12	23.753	0.004	10.369	10N 加振機
13	16.476	0.003		胴体2点
14	9.386	0.002		
15	3.647	0.010	74.729	10N 加振機前部胴体1点
16	2.554	0.008	83.214	10N 加振機後部胴体1点



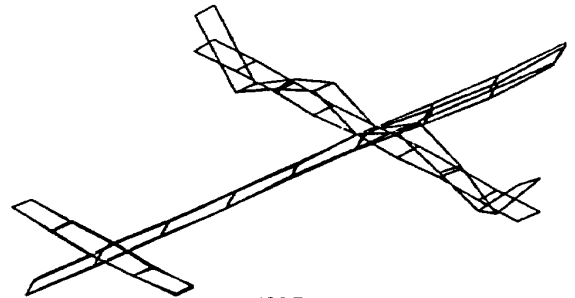
MODE SHAPE FILE = 3704  
 FREQUENCY = 22.121  
 DAMPING = 0.002  
 GEN. MASS = 0.000



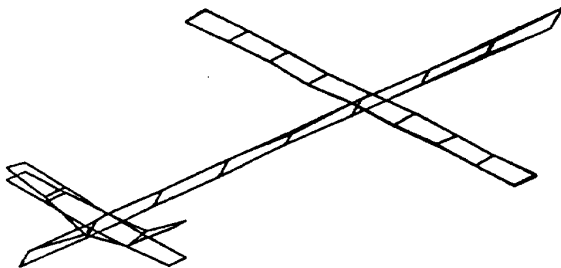
MODE SHAPE FILE = 4604  
 FREQUENCY = 5.992  
 DAMPING = 0.014  
 GEN. MASS = 6.923.



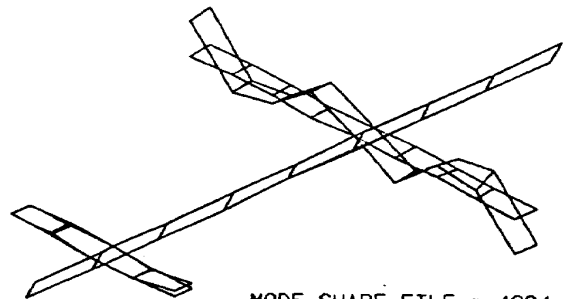
MODE SHAPE FILE = 3804  
 FREQUENCY = 8.378  
 DAMPING = 0.005  
 GEN. MASS = 52.128



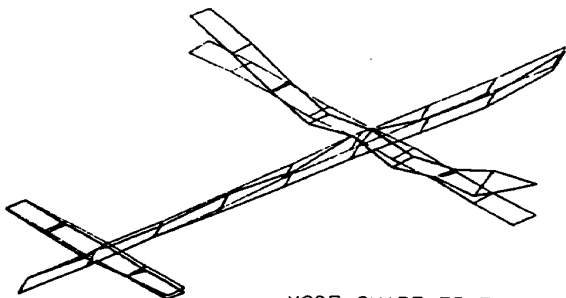
MODE SHAPE FILE = 4704  
 FREQUENCY = 22.141  
 DAMPING = 0.004  
 GEN. MASS = 13.617.



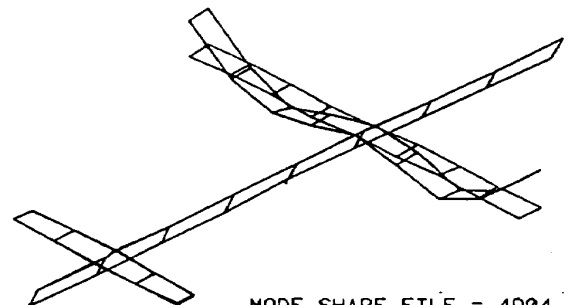
MODE SHAPE FILE = 4004  
 FREQUENCY = 6.010  
 DAMPING = 0.005  
 GEN. MASS = 39.420



MODE SHAPE FILE = 4804  
 FREQUENCY = 16.645  
 DAMPING = 0.006  
 GEN. MASS = 8.670.



MODE SHAPE FILE = 4104  
 FREQUENCY = 1.562  
 DAMPING = 0.005  
 GEN. MASS = 180.006.



MODE SHAPE FILE = 4904  
 FREQUENCY = 8.579  
 DAMPING = 0.015  
 GEN. MASS = 6.149.

図19 振動モード形と固有振動数 (MODAT SINE 法)

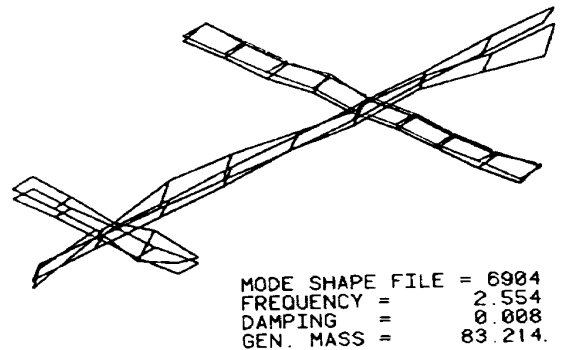
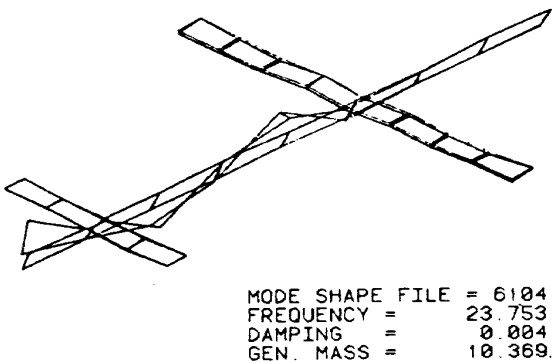
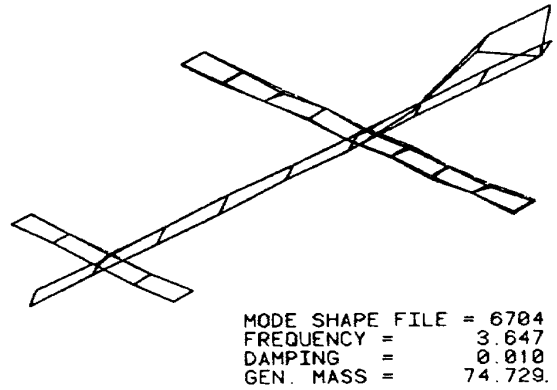
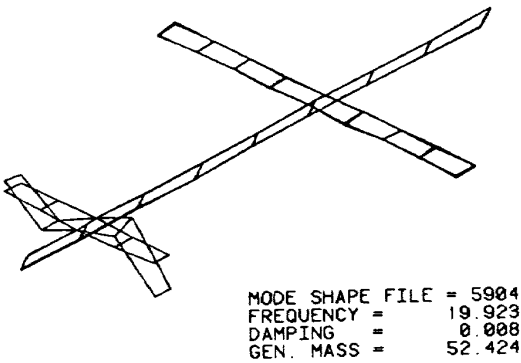
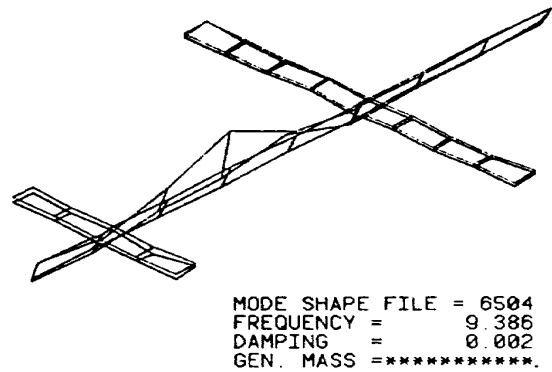
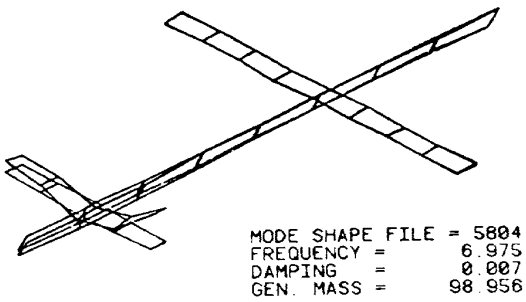
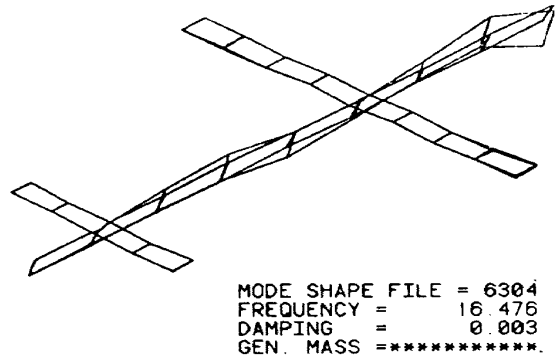
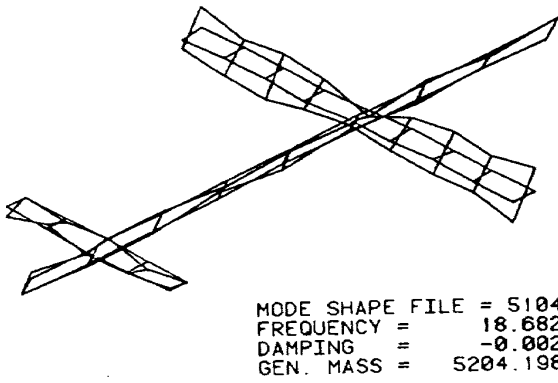


図19 ( 続き )

た、4.1のランダム1点加振法は、試験中の大部分の作業がデータ収集であり、加振中も不規則振動であるためモードの確認がでず、試験後の解析が完了した段階で、解析数だけ結果が得られる。これに対して、MODAPの試験は一つ一つのモードを現象として確認しながら進める。一方、MODAT SINEは狭帯域の正弦波を微細に掃引するため、その途中で視覚的にモードの観察が可能であり、振動試験の結果を試験と同時に、あるいは、別途まとめて取出せることから、この二つの方法の間とも言える相互の特徴を兼ね備えている。ここでのMODAT SINEの試験はMODAPの試験と比較することを主眼に行った。

次に、MODAT SINEによって得られた振動モードの固有振動数と減衰係数および一般化質量を表9に、また、振動モード形を図19に加振条件毎にまとめて示す。表9のNo.1~4は200N加振機

による胴体重心1点加振、No.5~8は10N加振機による主翼2点加振、No.9は主翼翼端に木製のアームを取付け、振り加振を行った10N加振機による主翼2点加振、No.10~11は10N加振機による尾翼2点加振、No.12~14は10N加振機による胴体2点加振、No.15は10N加振機による前部胴体1点加振、そしてNo.16は10N加振機による後部胴体1点加振の結果である。

## 5. 結果の比較と検討

表10に、有限要素法による振動解析と三つの振動試験によって得られた固有振動数と減衰係数をそれぞれ横のNo.1~19にまとめて示した。

表10について、振動解析のNo.1とランダム1点加振法のNo.2~3の結果を比較して、2つの加振方向による試験で、全部の振動モードは得られていない。また、この場合の図8と図9は計測点

表10 振動解析と3つの振動試験の結果

No.	振動解析 1	ランダム1点加振 胴体重心		MODAP 正弦波加振 主翼2点 尾翼2点 200N 4	MODAP	MODAP	MODAT SINE	MODAP	MODAT SINE
		10kg 2	10kg 3		主翼2点 200N 5	尾翼2点 200N 6	胴体重心 200N 7	主翼2点 10N 8	主翼2点 10N 9
1	0.87		0.82 (-0.022)						
2	1.44		1.40 (0.009)						
3	1.53	1.52 (0.002)					1.56 (0.005)		
4	2.66		2.59 (0.005)						
5	2.80								
6	5.42		5.30 (0.002)	8.11 (0.020)	8.21 (0.019)			6.01 (0.012)	5.99 (0.014)
7	5.92	6.02 (0.001)				10.07 (0.022)	6.01 (0.005)		
8	8.49	8.37 (0.002)		9.97 (0.040)	10.21 (0.016)		8.37 (0.004)	8.65 (0.009)	8.57 (0.015)
9	9.81		9.46 (0.002)						
10	14.67		14.27 (0.002)		14.27 (0.0001)				
11	15.64								
12	15.69								
13	15.77		16.58 (0.001)	16.82 (0.004)	16.82 (0.007)			16.63 (0.006)	16.64 (0.006)
14	18.73			20.11 (0.005)		19.95 (0.014)			
15		22.25 (0.0015)		22.14 (0.004)	22.12 (0.005)		22.12 (0.0001)	22.12 (0.003)	22.14 (0.003)
16			23.69 (0.002)						



が少ないため線図の振動モード形である。この図8と図9を図3の振動解析の結果と比較すると、線図では振りモードの表示は不十分であるが、この試験では振りの振動モードが得られなかった。しかし、得られた各固有振動数の値と振動モードは振動解析の結果と良く一致していることから、解析で得られた振動モードが実際に存在し、振動解析の結果を正弦波多点加振の加振情報として用いられることが確認された。

次に、MODAPによる振動試験結果はNo.4~6, 8, 10, 12, 14, 16と18にまとめられている。No.4の200N加振機による4点加振の場合は、対応する4つの振動解析のモードNo.1と固有振動数を比較すると、全体にこの振動数が6~50%高い値になっている。これはサイズミックサスペンションと加振機から成る4点の系が供試体に拘束、および付加質量と付加剛性の影響を与えることが

推測された。そこで検証のために、主翼の振動と尾翼の振動を分けて扱う。まず初めにそれぞれの加振機を外して影響の軽減を試みた。しかし、No.5, 6のように差が認められず、加振機の付加剛性の大きいことが分かった。この加振機の付加剛性の影響を軽減する方法として、200Nの加振機に替えて、バネ定数の小さい10Nの加振機を用いた。その結果をまとめたのが、No.8以降である。主翼の振動モードについてNo.8では、振動解析のNo.1の値に対して2~10%まで加振機の影響を軽減している。その結果にもとずいて以下の試験ではこの10Nの加振機を使用した。No.10では、振り振動モードの試験を行ったが、この主翼の振り加振は、供試体の翼弦に相当する長さが150mmであるのに対して、柔軟な翼幅は4mと非常に長く振り加振が励起されにくい構造になっている。そこで、この対策に木製の棒を翼端に固定し、実験的

振動数 (Hz) / (減衰係数)

MODAP 主翼2点 10N 10	MODAT SINE 主翼2点 10N 11	MODAP 尾翼2点 10N 12	MODAT SINE 尾翼2点 10N 13	MODAP 胴体2点 10N 14	MODAT SINE 胴体2点 10N 15	MODAP 胴体前部 10N 16	MODAT SINE 胴体前部 10N 17	MODAP 胴体後部 10N 18	MODAT SINE 正弦波加振 胴体後部 10N 19
								2.55 (0.0005)	2.55 (0.0008)
						3.77 (0.001)	3.64 (0.009)		
		6.97 (0.011)	6.97 (0.007)						
				9.38 (0.002)	9.38 (0.002)				
				16.46 (0.003)	16.47 (0.003)				
18.61 (0.030)	18.68 (-0.002)								
		19.96 (0.008)	19.92 (0.007)						
				23.77 (0.004)	23.75 (0.003)				

に約166mmのアームを出して加振点とし、対称と逆対称加振による振動試験を行った。対称の振動モードはそれによって得ることができたが、逆対称の振動モードは試験中に得ることはできなかった。また、No.12の尾翼2点加振では、7~18%の値が得られ、200Nの加振機による低次の振動モードの67%に対して影響が少なくなっている。No.14, 16, 18の胴体を2点、あるいは1点加振した場合は-4~12%、あるいは35%、-4%のようにモードによって、振動解析よりも低い値が得られた。他に、この振動試験法で5Hz以下の振動モードの場合に、加振機を弱いコイルバネで支持しているサイズミックサスペンションをロックし、加振機を固定した状態にして振動試験を行ったところ、MODAPの演算処理時間が異常に長く、処理の過程が収束しない現象がみられた。

MODAT SINEによる振動試験法の場合はNo.7に200N加振機による胴体重心1点加振の結果をまとめている。これは、MODAPの主翼あるいは尾翼2点加振による振動試験の場合には、一番振れる翼端に加振機を取付けるため、その点の検出器の値が他の検出器の振幅と位相の基準になる。最大振幅でないと処理結果に誤差を含み、また、翼端の加振機による付加質量や付加剛性および拘束の影響が大きく作用するので、これらの影響を避ける試みとして実際の航空機では難しいが、胴体に加振機を取付ける方法を試みた。その結果を振動解析の値と比較すると、この場合の固有振動数の各値は非常に精度の良い値が得られている。次に、No.9, 11, 13, 15, 17と19では、MODAPと同様の理由によって10N加振機を用いた。No.9では主翼2点加振を行い、MODAPと比較したところ、両者の値は良く一致している。この場合のMODAT SINEの設定は、事前に加振チェックを十分に行い、加振振動数の範囲を低次の振動モードで0.2Hz、高次の振動モードで1Hzと非常に狭帯域にとり、STEP振動数はこの間に20点のデータがとれるように選んだ。No.11の振り加振の場合は、固有振動数はMODAPの場合と一致しているが、負の減衰と過大な一般化質量にみられるように、加振が非常に難しく、更に、基準になる検

出器の位相に問題を残した。No.13の尾翼2点加振による結果は主翼の場合と同様にMODAPと良く一致している。その後のNo.15, 17そして19の胴体2点加振あるいは1点加振の結果もMODAPと良く一致した結果が得られた。

## 6. ま と め

帯板構造模型の供試体に3つの振動試験法を適用し、試験法の特徴を把握しながら試験を行うことにより、実機振動試験設備を用いた振動試験で下記の知見が得られた。

(1) 振動試験では精度の良い試験結果を得るため、供試体の振動現象を良く観察し、議論することは重要である。この点に関して実機振動試験設備のMODAPやMODAT SINEによる手法は、ランダム1点加振法に比べて現場での労力や試験に時間を要するが、優れた特徴をもっている。試験時間の短縮は課題であるが、事前の十分な準備と試験手順の慣熟によって設備の機能を発揮することである。

(2) 一般に、大型供試体の振動試験は試験設備以外に場所と労力と時間とそれに伴って費用がかかる。そしてこれらが精度の良い振動試験を行うための一つの要因にもなる。今回の振動試験を通して、精度の良い試験結果を得るため、事前に振動解析や予備試験によって十分に振動特性を把握し、その振動特性に最適な加振・計測を行うこと、そして得られた試験結果の検証として、複数の試験法を用いることの必要性を確認した。

(3) 供試体の自由な飛行状態を実現するために、ゴム紐とコイルバネを用いて支持の特性を調べた。ゴム紐は簡便であるが、経時変化が大きく支持位置を一定に保持できない。そのため金属製コイルバネを使用した方が簡便であった。

(4) 大きさや高さの異なる3種類の加振機は、使用毎に重い供試体を移動し、加振位置を調整しなければならなかったが、クレーンとチェンブロックを組合わせて使用することによって、供試体の支持枠を省略した。これによって供試体の高さ調整が自由に出来、加振機の軸方向と中立位置の微調整だけをサイズミックサスペンションで行い、

試験での効果的な省力化が出来た。

(5) 振動試験中のトラブルは、両面接着テープを用いて加速度計や加振機の加振パッドを供試体に貼付けたが、長時間使用していると徐々に剥がれた。また、サイズミックサスペンションに加振機を取付けて使用すると、バネの共振と付加剛性の影響があった。即ち、サイズミックサスペンションに用いた3～4本のコイルバネは僅かな特性の違いで試験中に音を発して別々に共振し、その近傍の試験を困難にし、付加剛性の影響は固有振動数を高くした。これに対する振動試験精度の確保は翼端加振をできるなら避ける、あるいは付加剛性の影響が少ないより小型の加振機を用いる、または加振方法について相当の努力をする必要がある。

終わりにあたり、本研究の遂行に際し松賀機器株式会社の方々に協力して戴いた。また、有限要素法による振動解析は名古屋大学古谷寛講師(当時助手)に行って戴いた。そして、助言協力を小野幸一部長、多田保夫部長、朝田洋雄室長に戴いた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) STOL プロジェクト推進本部振動試験装置開発チーム；低騒音STOL実験機の全機地上振動試験(第1報：試験装置の概要と一次試験)，航空宇宙技術研究所資料 NAL TM-542, 1985年3月。
- 2) 小松敬治, 佐野政明, 甲斐高志, 安藤泰勝, 峯岸正勝, 森田甫之；低騒音STOL実験機の全機地上振動試験(第2報：二次試験)，航空宇宙技術研究所資料 NAL TM-553, 1986年8月。
- 3) STOL プロジェクト推進本部振動試験装置開発チーム；低騒音STOL実験機の全機地上振動試験(振動データ管理システム)，航空宇宙技術研究所資料 NAL TM-576, 1987年10月。
- 4) 峯岸正勝, 佐野政明, 小松敬治, 森田甫之, 森野美樹, 富岡健治, 宇治野功；H-II ロケット 1/5 模型の振動試験(全体試験)，航空宇宙技術研究所報告 NAL TR-1061, 1990年4

月。

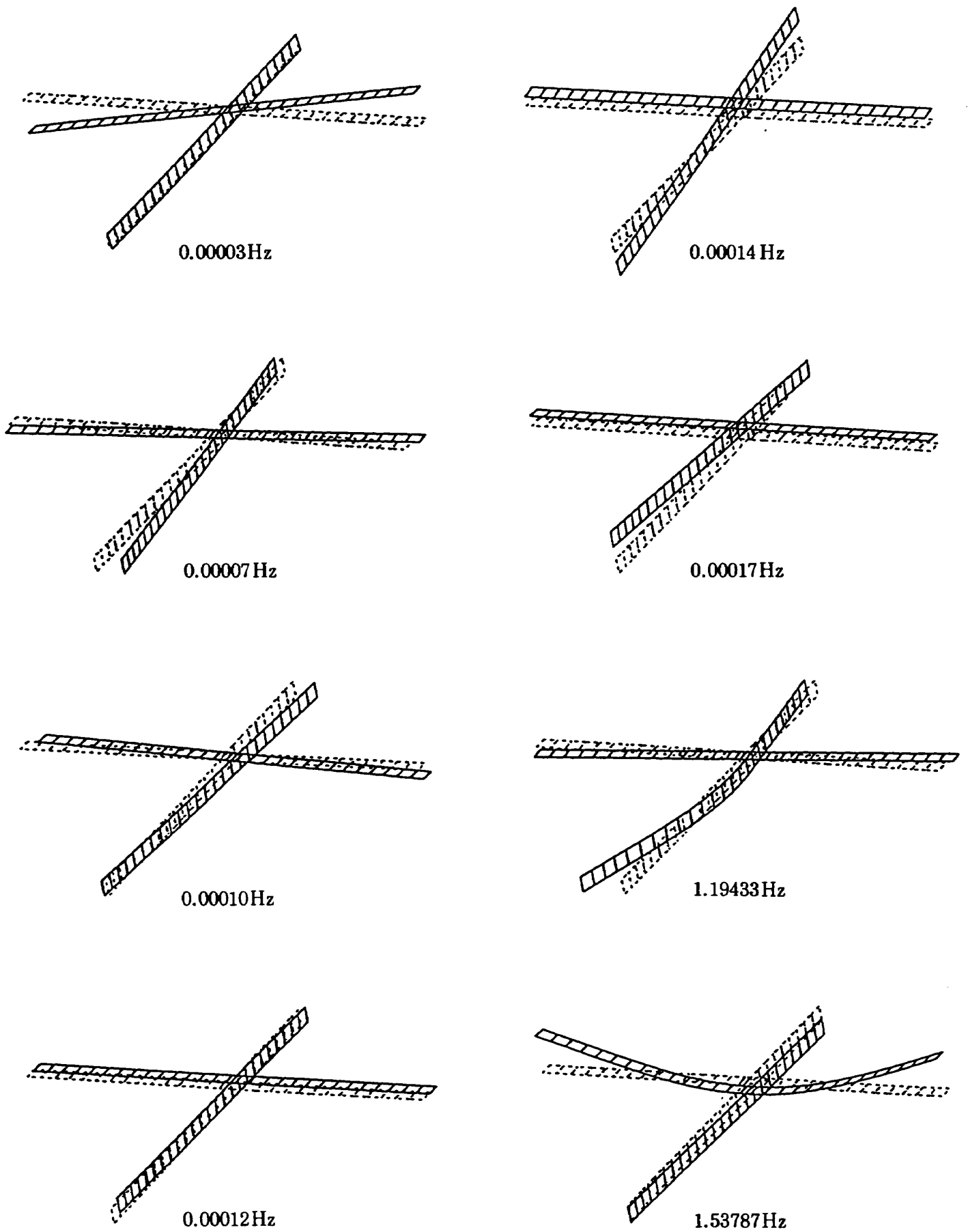
- 5) 上田哲彦, 藤井謙司, 安藤泰勝；ACT全機風試およびその数学モデル化について，日本航空宇宙学会第19期年会講演集，1988年4月，pp.83-84。
- 6) 磯貝紘二, 熊倉郁夫, 江尻 宏, 菊池孝男, 峯岸正勝, 石川隆司；空力弾性テラリングによる高アスペクト比翼の遷音速フラッタ特性の改善，日本航空宇宙学会第28回構造強度に関する講演会講演集，1986年7月，pp.294-297。

付 録 1

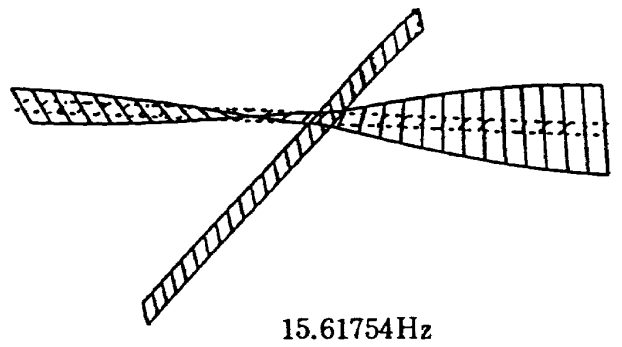
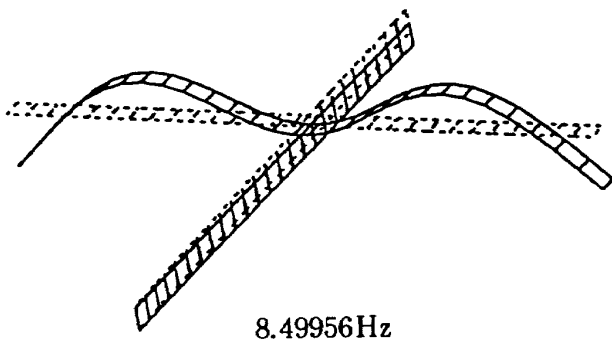
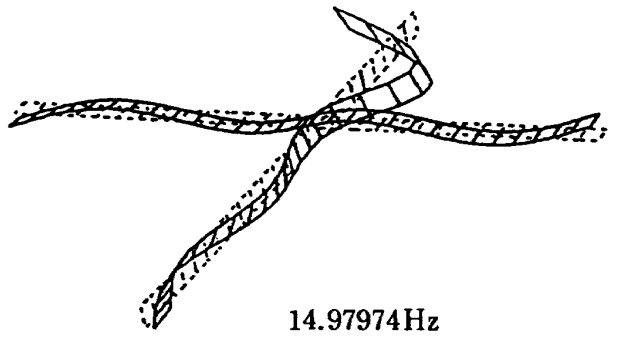
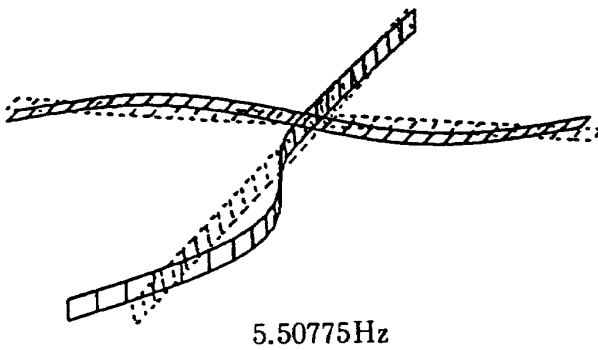
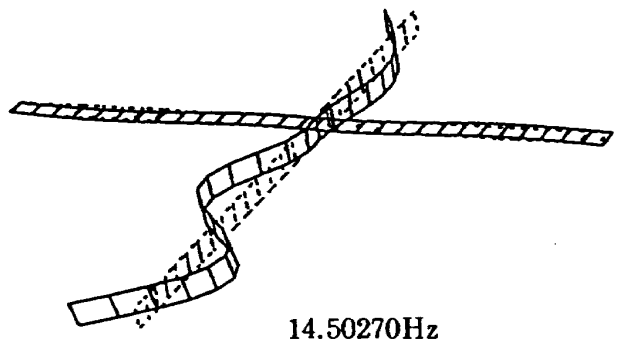
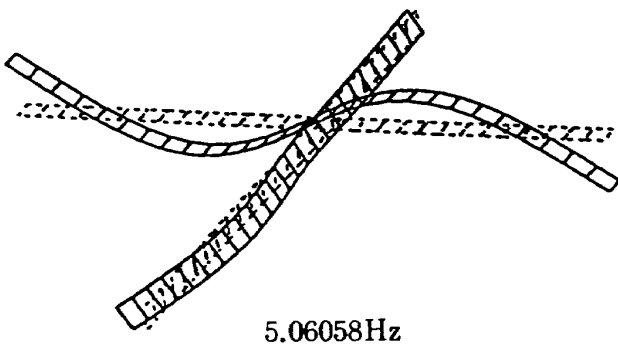
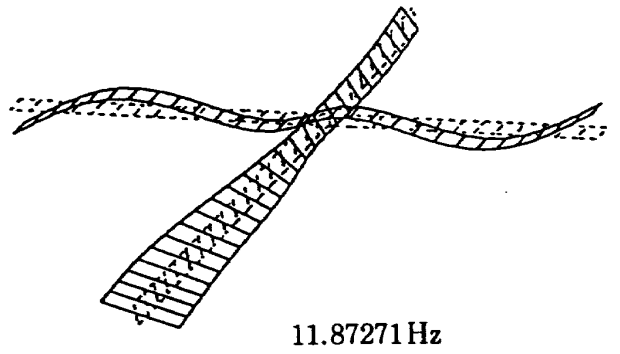
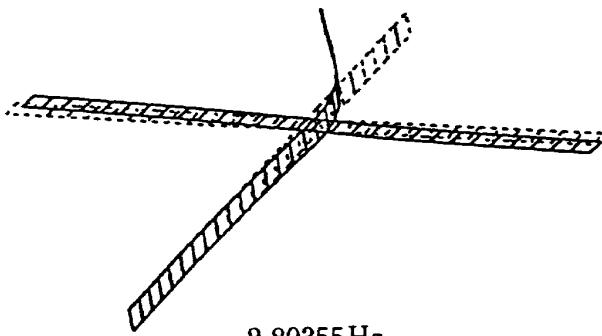
ここでの有限要素法による振動解析は図2に示した構造に対し、尾翼を除いた112の節点で表した要素について、振動解析と振動試験の結果を容易に比較できるように、20のモードについての解析を行った。振動解析で得られた20モードの固有振動数を付表1に、各振動モード形を付図1にまとめて示す。付表1と付図1より、20モードのうちの初めの6モードは固有振動数が非常に低い剛体モードである。その次に、1次の胴体と翼の振動モードがあり、翼の曲げ振動は対称振動が逆対称振動の固有振動数より低く、翼の逆対称振動と胴体の振動は連成モードになっている。また、翼の

付表1 尾翼のない場合の固有振動数 (振動解析)

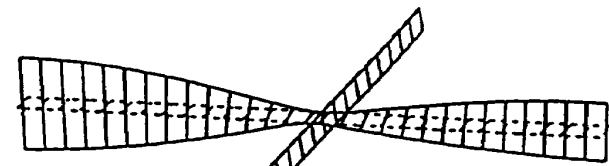
モード番号	固有振動数 (Hz)	モード番号	固有振動数 (Hz)
1	0.3451E-04	11	0.5508E+01
2	0.6731E-04	12	0.8500E+01
3	0.9870E-04	13	0.1187E+02
4	0.1160E-03	14	0.1450E+02
5	0.1443E-03	15	0.1498E+02
6	0.1665E-03	16	0.1562E+02
7	0.1194E+01	17	0.1569E+02
8	0.1538E+01	18	0.1657E+02
9	0.2804E+01	19	0.2196E+02
10	0.5061E+01	20	0.2225E+02



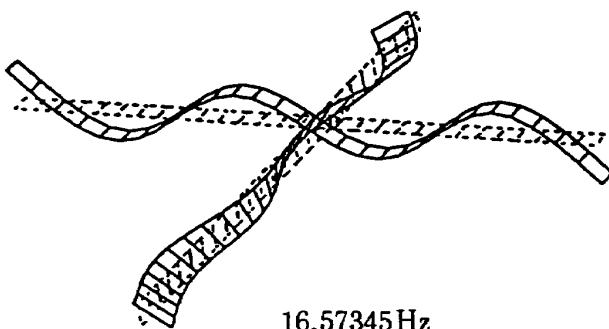
付図1 尾翼のない場合の振動モード形(振動解析)



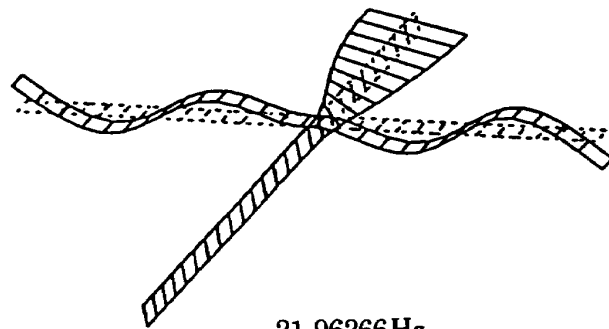
付図1 (続き)



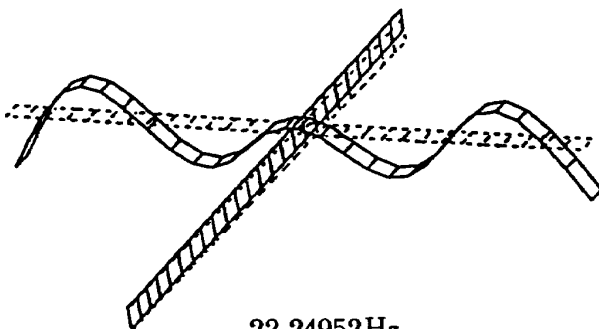
15.68784Hz



16.57345Hz



21.96266Hz



22.24952Hz

付図1 (続き)

振り振動は逆対称振動が対称振動の固有振動数より低くなっている。

付 録 2

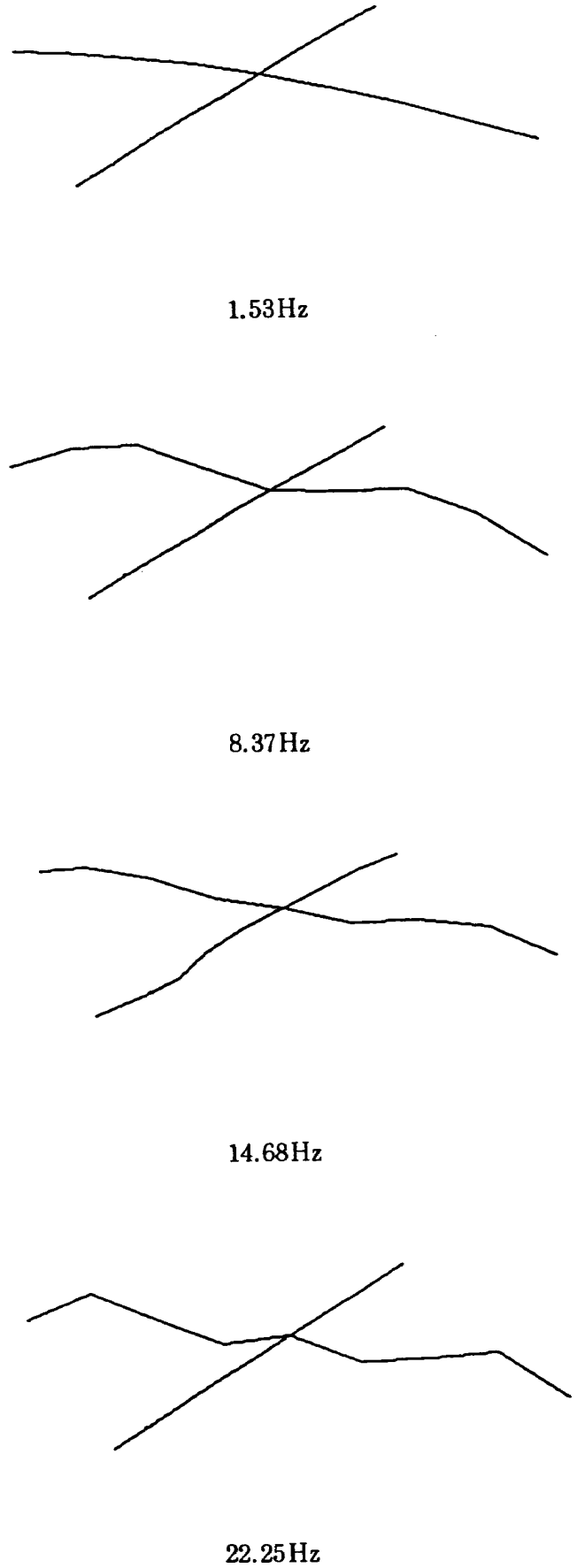
ランダム 1 点加振法を図 4 に示した構造に対して、尾翼を除き 4.1 節と同じ方法で行った。付表 2-1 と付図 2-1 に、胴体重心上下加振によって得られた対称振動の 4 つのモードの固有振動数と振動モード形をまとめて示す。また、付表 2-2 と付図 2-2 に、胴体重心横加振によって得られた胴体振動と翼の逆対称振動、およびその連成振動の 8 つのモードの固有振動数と振動モード形をまとめて示した。この場合の計測点は 17 点で、振動モード形は線図で表されている。そして 2 つの加振方法は翼と胴体の曲げ振動に着目した振動試験のものであるため、振り振動のモードの励起が弱く、翼の振動モードは得られていない。付録 1 の振動解析の結果と比較すると、この場合の曲げ振動の試験結果は非常に良く、解析と一致した結果が得られている。これに対して、振り振動を伴う場合はスペクトルの分布がモードの存在を表しているけれども、実際に抽出してみると加振力が不足したモードの結果になっている。

付表 2-1 尾翼のない場合の対称振動の固有振動数と減衰比 (ランダム 1 点重心上下加振)

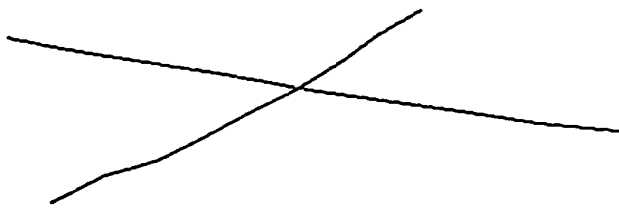
モード番号	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
1	1.53	0.78
2	8.37	0.27
3	14.68	0.04
4	22.25	0.15

付表 2-2 尾翼のない場合の胴体の振動と翼の  
逆対称振動の固有振動数と減衰比  
(ランダム 1 点重心横加振)

モード番号	固有振動数 (Hz)	減衰比 (%)
1	1.13	1.51
2	2.62	0.55
3	4.91	0.54
4	5.29	0.33
5	13.83	0.19
6	14.23	0.22
7	16.14	0.15
8	23.97	0.17



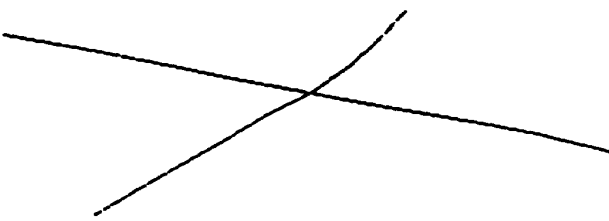
付図 2-1 尾翼のない場合の対称振動モード形  
(ランダム 1 点重心上下加振)



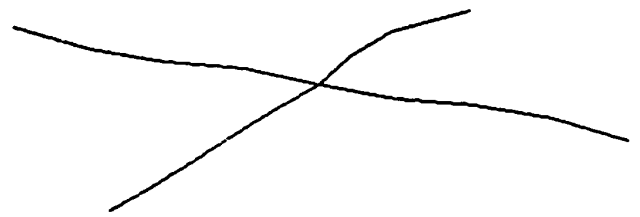
1.13Hz



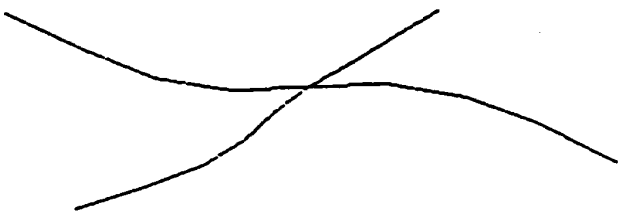
13.83Hz



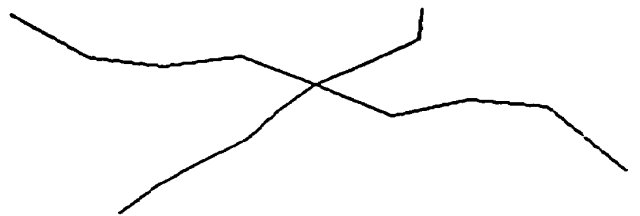
2.62Hz



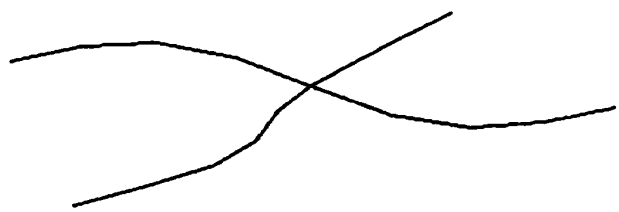
14.23Hz



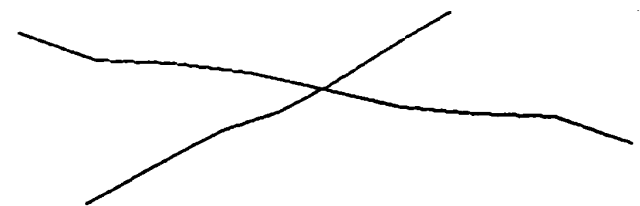
4.91Hz



16.14Hz



5.29Hz



23.97Hz

付図 2-2 尾翼のない場合の胴体の振動と翼の逆対称振動のモード形  
(ランダム 1 点重心横加振)



---

## 航空宇宙技術研究所資料 625号

平成2年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---

