

ISSN 0389-4010
UDC 519.68.534
629.7

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-994

部分試験データに基づくモード合成法の
パドル構造への応用

小松敬治・佐野政明・三本木茂夫
甲斐高志・戸田勸

1988年8月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

部分試験データに基づくモード合成法の パドル構造への応用*

小松 敬治** 佐野 政明** 三本木 茂夫**
甲斐 高志** 戸田 勸**

Experimental Component Mode Synthesis Applied to the Solar Array Type Structure

Keiji KOMATSU, Masaaki SANO, Shigeo SANBONGI,
Takashi KAI and Susumu TODA

ABSTRACT

A component mode synthesis technique based on experimentally determined modal parameters is presented in this paper. The test structure is a solar array type plate, which is divided into three parts, and four flexible connective parts. In the synthesis, the measured modes are approximated in polynomials to produce rotational degrees of freedom. The results synthesized are in good agreement with the test results obtained from a combined structure.

I. 緒 言

衛星の大型化とともに電力要求が増大し、太陽電池パドルも大型化しつつある。太陽電池パドルは当面の宇宙柔軟構造物の代表的なものであり、軌道上での動特性を事前に明らかにしておくことが姿勢制御の側から要求されている。パドルの動特性を地上で予測するときの考え方を図1に示すが、信頼性のある予測を行うためには試験と解析との相互の援用が不可欠である。軌道上形態での地上動特性取得試験は構造が大きくなると重力と空気のため不可能に近いので、基本的な立場としては、種々の部分構造試験を行って数学モデル（有限要素モデル）にフィードバックし、計算によって軌道上の動特性を推定することとする。この流れの中でのモード合成法の役割は、部分構造

試験で修正された有限要素モデルを使っての全体解析をクロスチェックすることである。これは部分構造試験段階では供試体は軽く、表面積も小さいので重力と空気の影響は大きくはないと考えられるからである。

モード合成法についてはその使用目的によって4つに分けられる。1番めは固有値問題の自由度の低減を目的とするもので、計算時間の短縮と記憶容量を節約するものである。2番めは各部分構造の詳細有限要素モデル化をブラックボックスとし、部分構造のモーダルパラメータでインターフェイスをとって全体解析をするもので、部分的な設計変更や、部分ごとの製造者が異なるような場合の計算の分業化ができて便利であり、この場合も計算上のテクニックとみなせる。3番めは、ある部分は有限要素法モデルで、モデル化しにくい部分については試験でデータを取り、結合して全体の特性を知ろうとするものである。4番めはす

* 昭和63年7月22日受付

** 構造力学部

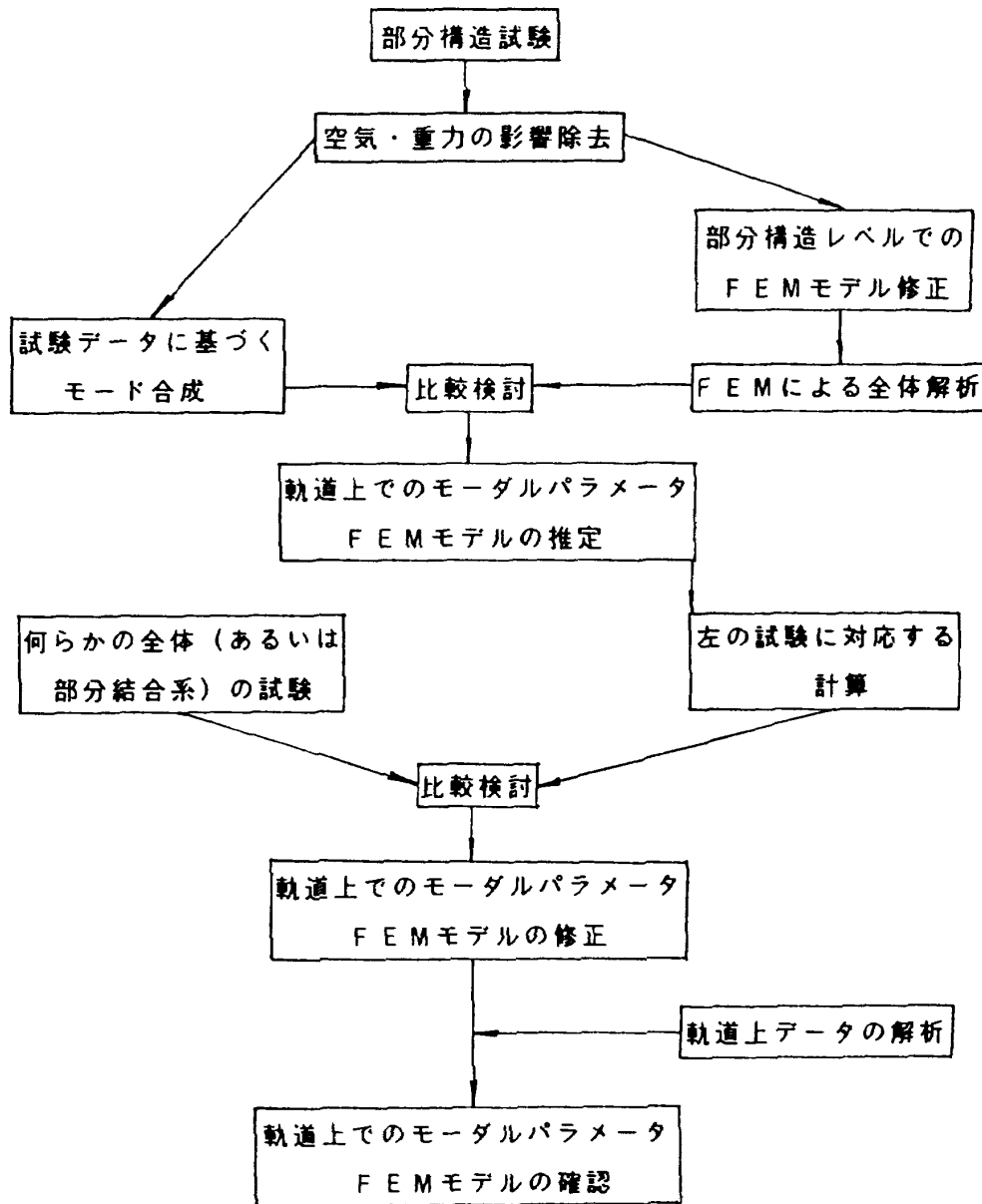


図1 パドルの動特性取得の中でのモード合成法の位置付け

すべての部分構造のモーダルパラメータを試験で取得して合成し、全体試験の代わりにしようというもので、本報告ではこの4番目の目的でモード合成法を採用する。

多くのモード合成法の論文が発表されているが、そのほとんどが1, 2番目に関するもので¹⁾、試験データと計算データを結びつける3番目のもの²⁾については、試験で扱われる部分構造というのがほとんどスカラー要素(バネ, 集中マス)であり、板や三次元構造として扱われた報告は数少ないし、その試験データも生データでなく、一度有限要素法にフィードバックされてから合成されているものが多い。モード合成法は数学的には確立されて

おり、有限要素法の中だけで使う分には問題ないが、部分試験データを使うことになると種々の問題が生ずる。それらは、部分試験段階での試験データの精度・結合部の評価・回転自由度・合成アルゴリズムの選択等の問題であり、対処の方法は構造物の種類により異なる。実用技術とするにはそれぞれの分野で経験の蓄積を行う必要がある。

本報告は部分試験データを使ったモード合成法をパドル構造用に開発し、その実用性を検討評価することを目的とする。ここでは例題としてオープンアイソグリッドパドルのみを示したが、ETS-Vのパドルにも適用³⁾してその実用性を確認している。

I. 合成の方針

モード合成法には多くの手法があるが、ここでは部分試験の試験データだけで合成するという立場をとり、不拘束モード法を採用する。この方法を採用した理由は

- ① 部分構造法を採用せねばならぬような構造に、部分構造とはいえ固定-固定の境界条件を課して振動試験を実行することは不可能に近いことで、自由-自由の境界条件で部分試験のできる不拘束モード法は都合が良い。
- ② 自由-自由の境界条件の部分構造の試験データは汎用性がある。

であり、特に①の長所は他の欠点を補って余りある。

また、②については、モード合成法が失敗した場合でも試験結果を有限要素法にフィードバック⁴⁾することにより試験結果を利用することができる。

不拘束モード法の欠点は収束性が悪いことで、この収束性を良くするため剰余剛性の付加¹⁾等の手法があるにはあるが、試験データから剰余剛性行列を求めることが困難なので、この短所についてはできるだけ多くのモード数を合成において採用することで実際的な解決を図る。

自由-自由の境界条件の場合、剛体モードが含まれるが、剛体モードは理論的に計算できるので、これについては試験データを使わず理論解を採用する。また、モード計測においては回転自由度は計測できないので、変位モードを部分構造単位で多項式近似し、その多項式を微分することにより回転変位(自由度)を生成し、部分構造を結合していく。

結合部分については結合部を含む部分構造の試験とそれに対応するモード合成を行って結合部を同定する。すなわち、パドル単体の試験データを用いて適当に初期値を与えた結合部を介してもう一つのパドルとでモード合成を行い、試験結果と比較して結合部の特性を決定する。

III. 計算式

説明のため図2のようにパドルをⒶⒷⒸの3つの部分構造に分割して結合部を自由(不拘束)の境界条件で試験を行い、その部分試験結果のモーダルパラメータを添字 a, b, c で表す。不拘束モード法による全体構造の解析式は

$$\begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\alpha}_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_a \\ c_b \\ c_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\alpha}_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_a \\ k_b \\ k_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_a \\ \alpha_b \\ \alpha_c \end{Bmatrix} + [\phi]^T [M_J] [\phi] \{\ddot{\alpha}\} + [\phi]^T [C_J] [\phi] \{\dot{\alpha}\} + [\phi]^T [K_J] [\phi] \{\alpha\} = \{0\} \quad (1)$$

である。ここに

$\{\alpha\}$; モード座標系 $\{\alpha\} = \{\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c\}^T$

$\{\alpha_a\}$ は部分構造Aの採用するモード個数の成分をもつ。

$[\phi]$; 各部分構造の固有モード $[\phi_a], [\phi_b], [\phi_c]$ から作られる行列

$$[\phi] = \begin{bmatrix} \phi_a & 0 & 0 \\ 0 & \phi_b & 0 \\ 0 & 0 & \phi_c \end{bmatrix}$$

$[\phi_a]$ は(モード計測点数) × (モード個数) の行列

$[K_J], [M_J], [C_J]$; 結合部の特性行列

$[m_a]$; モーダルマスを対角要素とする行列で

$$[m_a] = [\phi_a]^T [M_a] [\phi_a]$$

$$[k_a] = [Q^2] [m_a]$$

$[Q^2]$ は ω_i^2 を対角要素とする行列

ω_i は部分構造の第 i 番目の固有角振動数

$$[c_a] = 2[Q][Z][m_a]$$

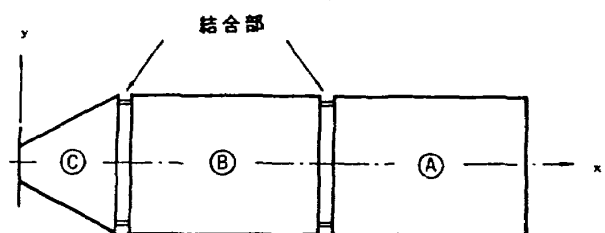


図2 パドルの部分構造への分割

[Z]は減衰比 ζ_i を対角要素とする対角行列

であり、式(1)の第1項から第3項まではすべて部分構造の試験結果により得られる。第4項から第6項までの結合マトリックスは図面あるいは試験により得られる。

結局この式から作られる小さな(部分構造で採用したモード数の和の)自由度の固有値問題となる。実際問題として[C_J]に何を採用すべきか問題であるので以下の議論では減衰項は除く。[C_J]に何らかの値を入れれば全体構造の減衰についても合成できるが、大きな仮定の上に立つ計算には疑問があるので今回は行わない。なお、説明の便宜上、3部分に構造を分割したが、部分構造への分割数に制限は無い。

IV. 回転自由度の生成

振動試験において得られるのは変位(加速度で計測)であり、各位置での回転角(回転変位)は計測できない。部分構造間の結合部はモーメントを伝えるので結合部で回転角の情報があれば合成が簡単に行える。この目的で、部分試験で計測されたモード形を多項式近似し、その多項式を微分することにより回転角を得ることとする。

今の例題ではパドル(板というより2次元体)であるのでモード形の変位を w として xy 平面上で

$$\begin{aligned} w(x, y) = & c_1 + c_2x + c_3y + c_4x^2 + c_5xy \\ & + c_6y^2 + c_7x^3 + c_8x^2y + c_9xy^2 + c_{10}y^3 \\ & + c_{11}x^4 + c_{12}x^3y + c_{13}x^2y^2 + c_{14}xy^3 \\ & + c_{15}y^4 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

と近似する。これを微分して回転角 $\partial w/\partial x$, $\partial w/\partial y$ を得る。 w は面外変位でもよいし面内変位でもよい。

実用の際には計測点と合成するための節点が異なってもよい。多項式の係数の数は計測点数と同じにしておけば計測モードを汚さない。実際にはモード計測点以下の項数の完全多項式(最大15項で4次の完全多項式)を採用する。後者の場合、 c_i は最小二乗法で決められることになり、このようにして計算されるモード形は計測ノイズによる誤差を減じる効果もある。

V. モード合成計算

合成の計算には式(1)を直接用いる。すなわち、 $[m_a]$, $[m_b]$, $[m_c]$ の対角項には試験により得られた部分構造のモーダルマスを入れ、モーダルマスに ω_i^2 を乗じた値を $[k_a]$, $[k_b]$, $[k_c]$ の対角項に入れる。 ω_i には試験により得られた固有角振動数を採用する。[ϕ]は前節での計測モードを多項式近似したモードで構成される。結合部の特性行列はビームとするが、その断面定数は試験により同定する。

具体的なアルゴリズムについては付録にプログラムリストを例題とともに示す。

VI. 合成例

例題として図3に示すようなオープンアイソグリッドリッドパドルをとりあげる。

6.1 方針

オープンアイソグリッドは全長3154 mm, 幅866 mm, 質量3.4kg(内、パネルは0.515と0.485kg)である。パドルは図4に示すような結合ヒンジ(実測値1個83gram)で4カ所で結合されている。この結合ヒンジをはずして図2のようにパドルを①②③の3つの部分構造に分割して結合部を自由(不拘束)の境界条件で部分試験を行いその試験結果を用いてモード合成を行う。まず、結合ヒンジの同定のため、①と②とをこのヒンジで結

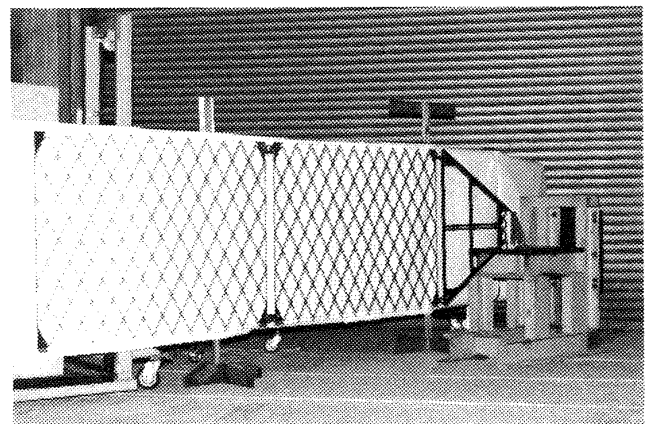


図3 水平に置かれたオープンアイソグリッドパドル

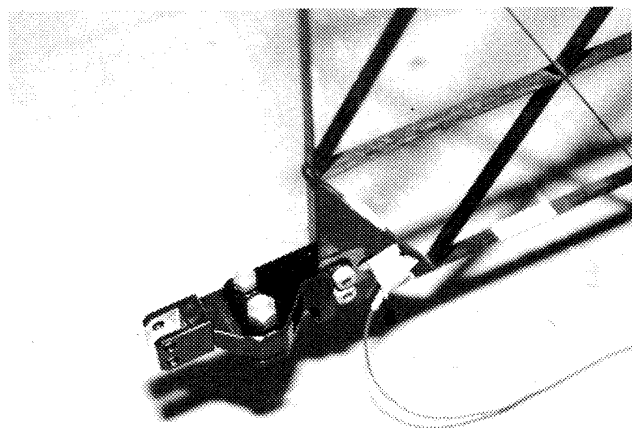


図4 結合部ヒンジ

合して試験を行う。一方でヒンジまわりを1本のビームとしてモデル化してビームの断面定数に初期値を与えてモード合成を行い、試験結果に合うように断面定数を修正して同定を行う。この試験により同定されたヒンジ部を式(1)の $[K_j]$ に組み入れて全体系の合成を行う。 $[M_j]$ については実測質量をビームの整合質量行列 (consistent mass matrix) としてわりふる。部分試験から合成までの流れを図5に示す。なお、この例題については図1の部分試験における「空気・重力の影響の除去」は行っていない。

6.2 部分構造試験

部分構造の試験については、**Ⓐ**部と**Ⓑ**部とは構造的に同じとみなして**Ⓐ**部のみを試験し、その結果を**Ⓑ**部にも使用した。**Ⓐ**部については図5に示すように十分に長いひも（モードに応じて1本吊りと2本吊りを適宜使った）で吊り下げて試験を行った。**Ⓒ**部については片持ち状態で試験を行った。加振法はいずれも1点ランダム加振法である。加振点は供試体の自由端隅部（角の部分）であるが、対称モードをきれいに出すため、自由端中央部でも加振した。部分試験結果のデータを**Ⓐ**部について図6に、**Ⓒ**部について図7に示す。

図6と図7の横に併記してあるモーダルマスは振動モードの最大変位を1と正規化したときの値であり、振動モードのデジタル値は付録に示す。このようにして得られた振動モードについて、**Ⓐ**、

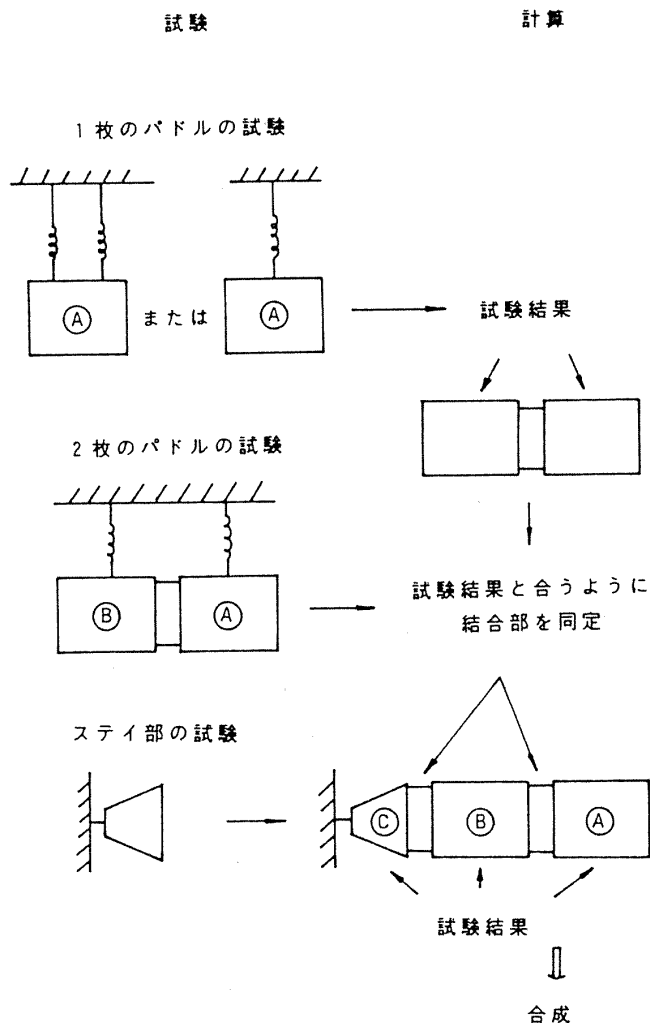


図5 モード合成の流れ

Ⓑ部（モード計測点25点）に15項，**Ⓒ**部（モード計測点9点）に6項の多項式近似を行った。多項式近似は $\partial w / \partial x$ ， $\partial w / \partial y$ を生成する目的で採用したのであり、計測された振動モードを整形する目的はないので、対称構造だからといって式(2)の多項式の係数を意図的に取捨してはいない。モード計測点数と多項式の次数に大きな差はないので、多項式近似されたモードは図6、図7に重ね書きすればほぼ一致する。

6.3 結合部ヒンジの評価

Ⓐ**Ⓑ**部を結合して自由-自由の境界条件で部分試験を行った結果と結合ヒンジ部をビームとしてモード合成した結果を比較して固有振動数について表1に示す。

この形態の試験では正弦波とランダム波で加振して試験しており、正弦波試験では吊り下げる位

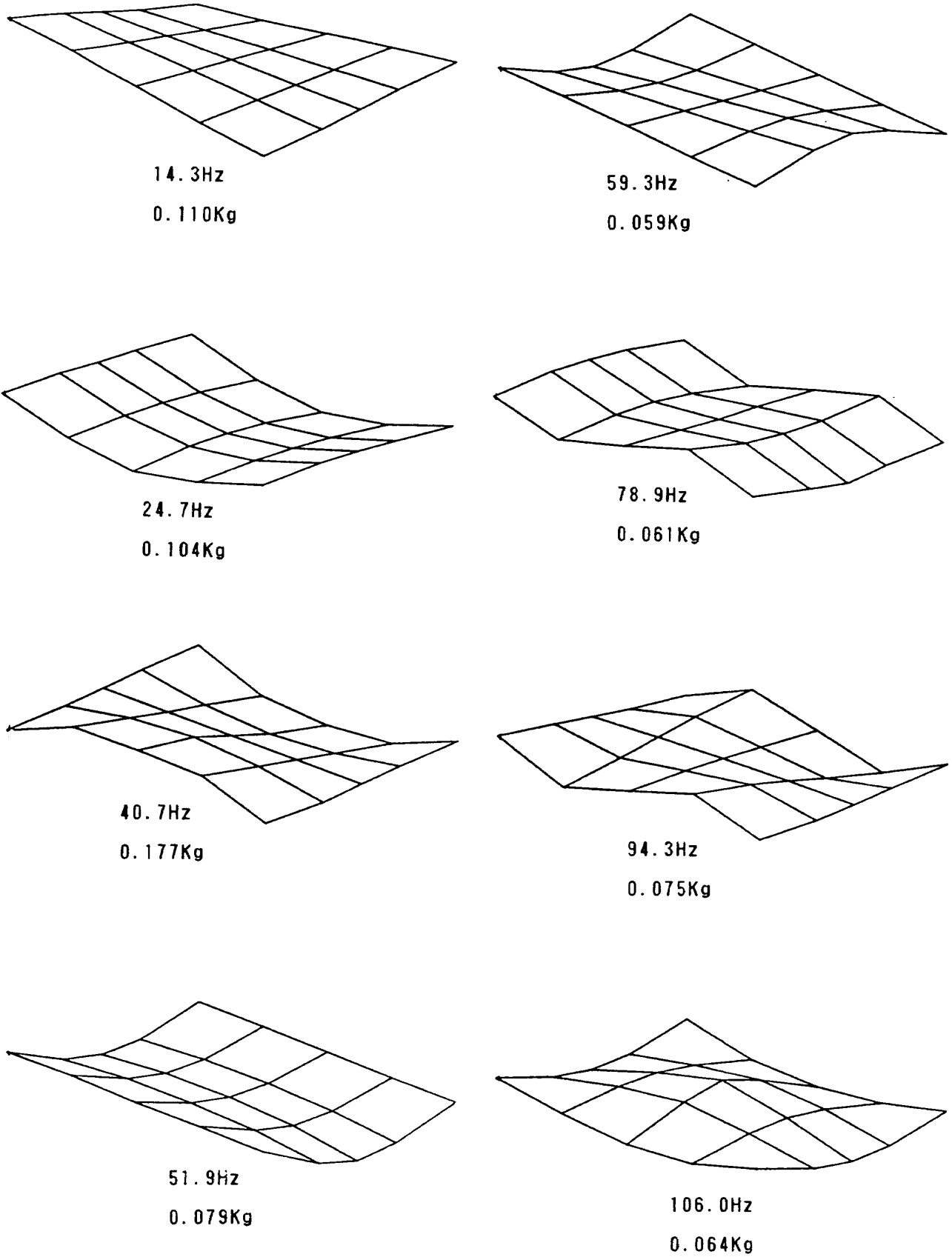


図6 ㊸部の試験結果(数字は固有振動数とモーダルマス)

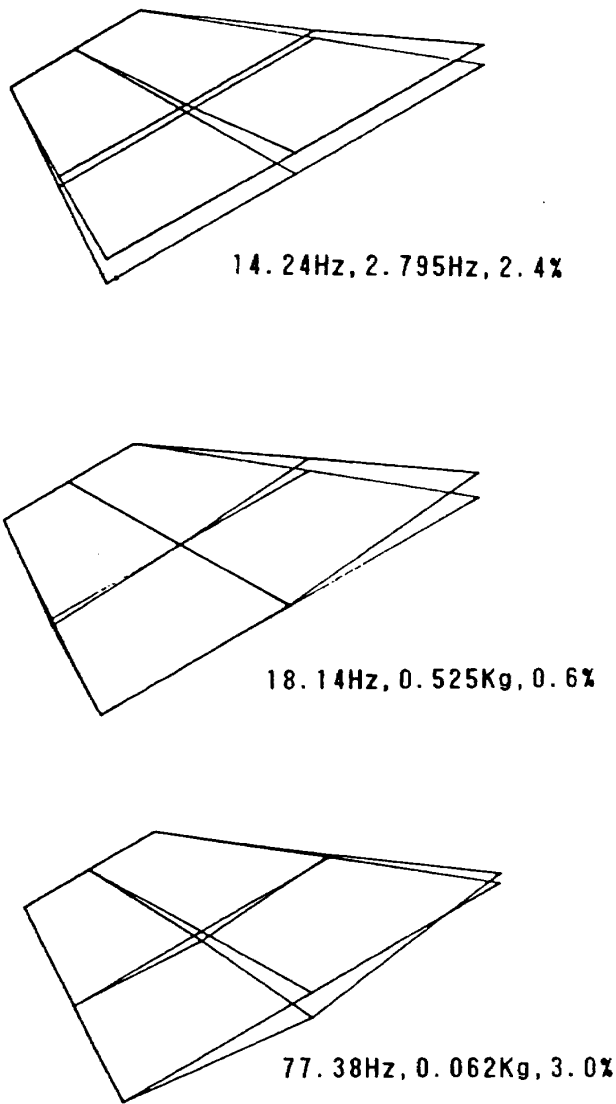


図7 C部の試験結果(数字は固有振動数, モーダルマス, 減衰比, 静止図との重ね書きをしている)

置をモードの節になるようモードごとに変えている。この表1ではヒンジの断面定数を色々変えて合成計算を行っているが、この形態では結合部の断面定数は固有振動数に敏感ではない。表1を検討して、結合部は断面 $20 \times 10 \text{mm}^2$ 、長さ60mm、ヤング率68.6GPa (7000kgf/mm^2)のビームとモデル化した。このときの曲げ剛性とねじり剛性が表1での EI_0 と GJ_0 である。このようにして同定された結合部の断面定数を採用して合成したときの固有振動モードを図8に示す。

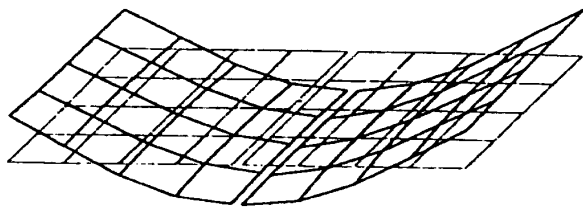
6.4 全体試験

全体系のモード合成の正解とするため、全体試験を図3の状態で行った。加振は1点ランダム加振であるが、最初に高帯域で周波数応答関数を計測して大まかな固有振動数を把握し、その後各モードについて狭帯域のランダム加振を行ってデータ処理し、図9に示すような結果を得た。全体構造としては左右(図3では上下)対称であるが、重力と固定治具(対称構造ではない)の影響できれいな対称/逆対称モードにはなっておらず、特に3.94Hzのモードにその影響が出ている。減衰比については17.37Hzのモードを除いてモード形によらず0.2~0.4%と計測されているのは興味深い。

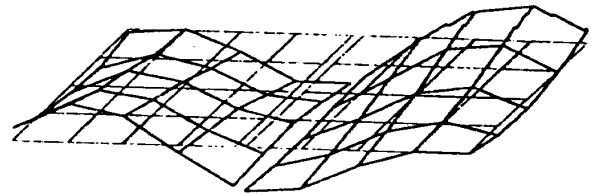
表1 結合部ヒンジをビームと置き換えた場合の固有振動数(単位Hz)の比較

$$\begin{pmatrix} EI_0 = 4.57 \times 10^{14} \text{ gram mm}^2 / \text{sec}^2 \\ GJ_0 = 6.86 \times 10^{14} \text{ gram mm}^2 / \text{sec}^2 \end{pmatrix}$$

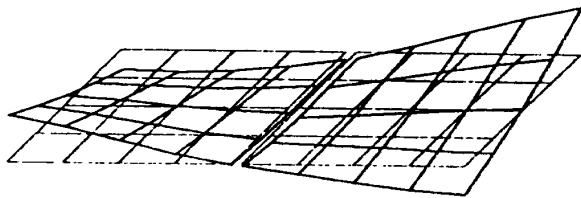
EI	0.1×EI ₀	0.5×EI ₀	EI ₀	2×EI ₀	10×EI ₀	試験結果	
						共振法	ランダム加振法
GJ	0.1×GJ ₀	0.5×GJ ₀	GJ ₀	2×GJ ₀	10×GJ ₀		
	4.51	4.57	4.57	4.58	4.58	4.53	4.43
	8.91	9.07	9.09	9.11	9.12	8.51	7.07
	12.89	12.95	12.95	12.96	12.96	13.59	12.94
	17.18	17.18	17.19	17.19	17.19	18.59	19.01
	30.56	30.91	30.91	30.96	30.96	29.0	28.67
	33.86	33.87	33.87	33.87	33.87	33.5	33.34
	45.77	45.88	45.84	45.92	45.84	44.2	44.16
	48.15	48.45	48.48	48.51	48.64		



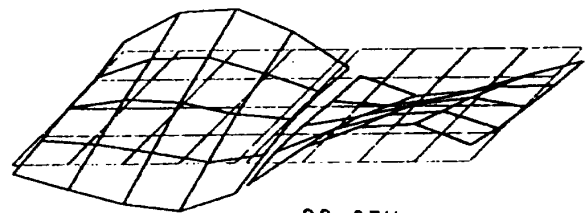
4.57Hz



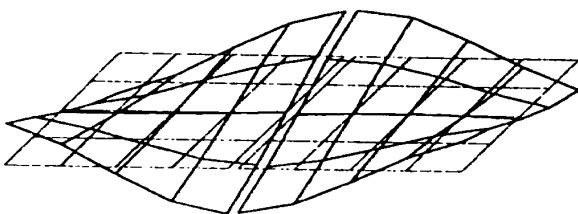
30.91Hz



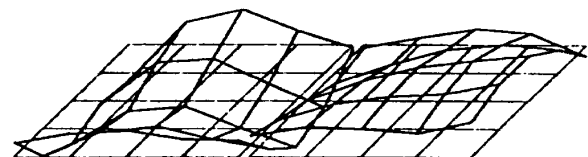
9.09Hz



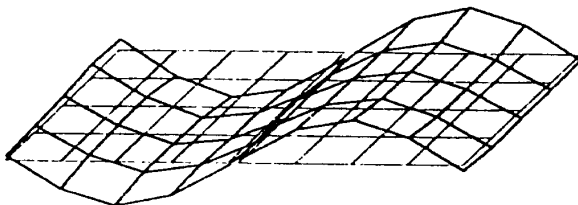
33.87Hz



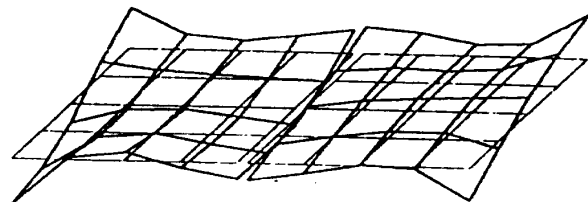
12.95Hz



45.84Hz



17.19Hz



48.48Hz

図8 ④⑤部のモード合成結果

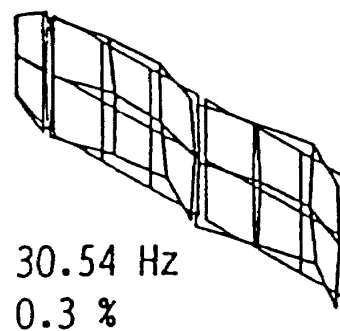
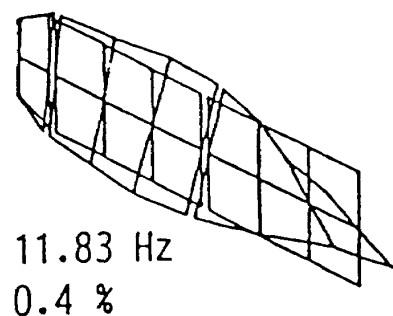
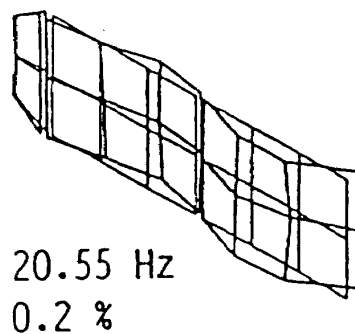
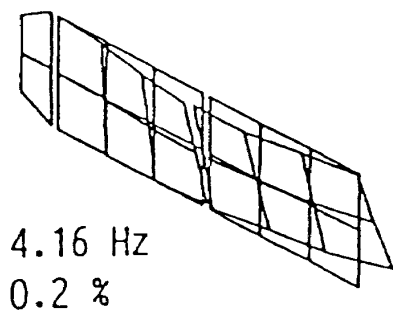
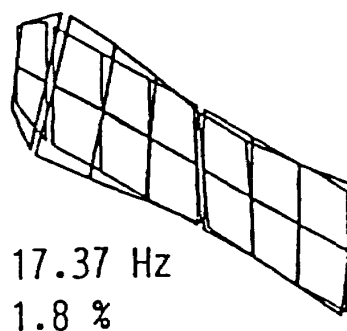
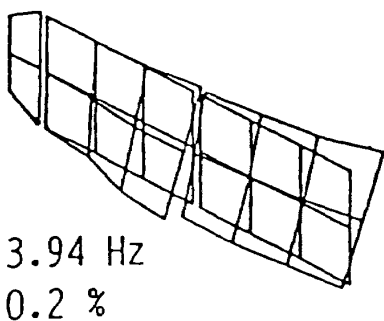
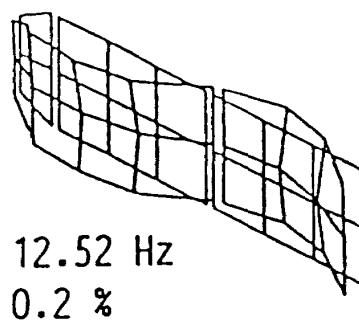
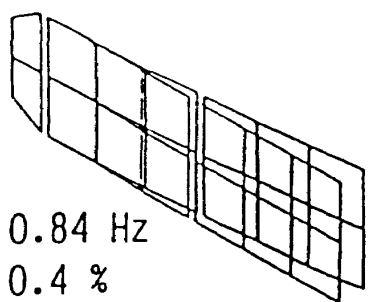


図9 全系の振動試験結果（数字は固有振動数と減衰比）

6.5 全体系のモード合成

6.3節で試験により同定したビームとしての結合ヒンジ部を介して全体のモード合成を行った結果を固有振動数について表2に、固有振動モードについて図10に示す。図9と図10とを比較すると8次の30.54Hz（全体試験での振動数）に対応する固有振動モードが異なるほかは良い一致を示している。試験結果がある程度の幅をもっていることは2枚の結合試験での結果（表1）でも明らかであるので、固有振動数が表2に示すように一致しておれば実用上十分であろう。次に、各部分構造の固有モードが全体系のモードにどの程度寄与しているかについてその成分の割合を表3に示す。表の列が一つのモードのなかの部分構造のモードの寄与を表す。部分構造での固有振動数の0.0Hzのものが剛体モードで、上からz方向並進、x軸まわり回転、y軸まわり回転である。固有モード

表2 モード合成結果の固有振動数についての比較
 （4次のモード以上は固有値計算においてALP=2000のシフトを行っている。ALPについては付録のプログラムに記述

モード番号	試験結果	モード合成計算結果
1	0.84Hz	0.88Hz
2	3.94	3.95
3	4.16	4.21
4	11.83	11.11
5	12.52	13.05
6	17.37	16.09
7	20.55	18.98
8	30.54	33.96
9		40.85
10		55.38

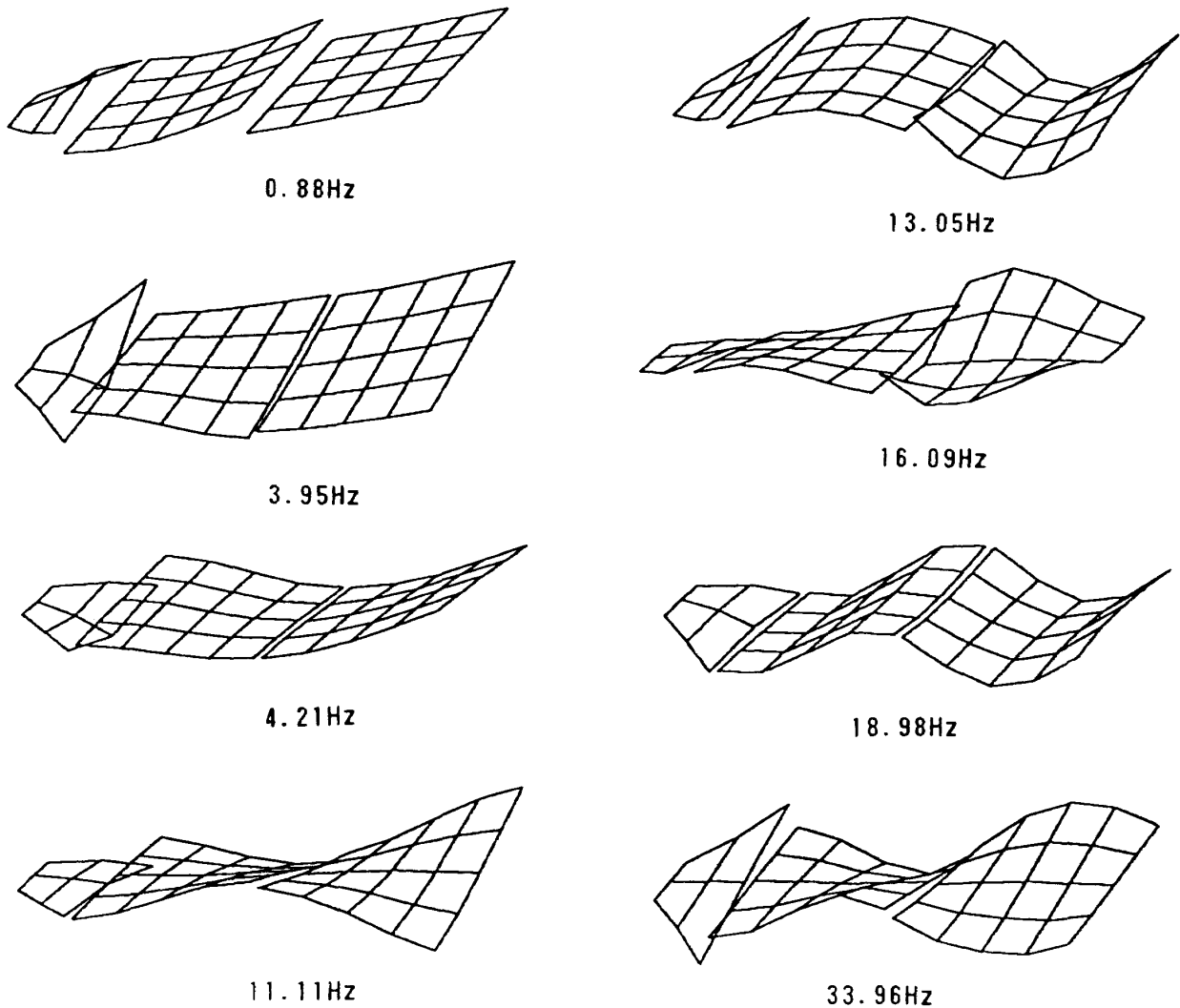


図10 全系のモード合成結果

表3 全体の固有振動モードへの各部分構造の固有振動モードの寄与度
(ⒶⒷの0.0Hzのモードが剛体モード)

全系の固有振動数	0.88Hz	3.95Hz	4.21Hz	11.11Hz	13.05Hz	16.09Hz	18.98Hz	33.96Hz
部分構造の振動数	部分構造の固有振動モードの寄与度(最大値1.00)							
0.0Hz	0.21	-0.02	-0.67	0.34	1.00	-0.14	1.00	0.51
0.0	0.26	-0.08	-0.63	0.05	0.20	0.11	-0.28	-0.28
0.0	0.00	0.38	0.04	1.00	-0.14	-0.65	-0.16	-0.09
14.3	0.00	0.37	-0.04	0.74	-0.10	0.36	0.11	0.96
24.7	0.07	-0.03	0.05	-0.17	-0.37	0.03	-0.43	-0.29
Ⓐ 40.7	0.00	0.04	0.00	0.08	0.00	-0.14	-0.04	-0.07
51.9	0.00	-0.08	0.00	-0.15	0.01	-0.11	-0.05	-0.26
59.3	0.00	0.01	-0.03	0.02	-0.01	-0.04	-0.06	-0.09
78.9	0.01	-0.01	-0.14	0.03	0.07	0.05	-0.12	-0.10
94.3	0.00	-0.01	0.00	-0.10	0.01	-0.07	-0.03	-0.19
106.0	0.01	0.02	-0.01	0.05	-0.03	0.01	-0.03	0.03
0.0	1.00	-0.06	-0.38	-0.06	0.08	-0.14	0.23	0.01
0.0	0.45	0.09	1.00	-0.15	-0.62	-0.10	-0.03	0.13
0.0	0.01	1.00	-0.12	0.64	-0.17	-0.16	-0.08	0.05
14.3	0.00	0.17	-0.04	-0.98	0.10	-0.04	-0.06	-0.79
24.7	0.01	0.03	0.21	0.08	0.16	0.00	0.12	0.06
Ⓑ 40.7	0.00	0.03	0.00	0.02	-0.01	0.05	0.02	0.01
51.9	0.00	-0.04	0.00	0.13	0.02	0.03	0.04	0.11
59.3	0.00	-0.02	0.01	-0.07	0.09	-0.04	0.05	-0.08
78.9	0.01	0.01	0.07	0.01	-0.01	-0.01	0.05	0.06
94.3	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01	0.05
106.0	0.00	0.00	0.03	-0.02	0.02	-0.02	0.03	-0.01
14.24	0.01	0.00	-0.03	0.06	0.52	-0.05	0.89	0.60
Ⓒ 18.14	0.00	-0.06	0.02	-0.28	-0.01	1.00	0.19	1.00
77.38	-0.01	0.00	0.04	-0.03	-0.01	-0.02	0.02	0.00

については最大値を1にしてある。たとえば、0.879HzのモードではB部の並進剛体モード成分が1で回転剛体モードが0.45、次にⒶ部の並進剛体モードが0.21、回転剛体モードが0.26で、この全体系1次のモードはほとんど部分構造の剛体モードから成り立っていることが判る。低次モードについてはⒶⒷ部分の剛体モードの成分が大きいことがこの例題での合成計算が成功している理由のひとつであろう。

固有振動モードについては図10に示すように結合部で不連続(特に0.88HzのモードのⒶⒷ間)がみられる。原因ははっきりしないが、式(1)に示すように結合剛性マトリックス $[K_j]$ を試験から求

めた直交性の保証されていない[\emptyset]でモード座標系に変換する過程で入りこんだ誤差かとも思われる。この問題については今後検討を要する。

VI. 考 察

オープンアイソグリッドのパドルについて部分試験に基づくモード合成を行い、全体試験と比較して良い結果が得られた。成功した要因として次のようなことが考えられた。

- (1) 部分構造の剛体モードのデータを理論的に与えている。全体のモードの中で個々の部分構造は剛体的な運動をしているので剛体モードのデータが良ければ合成結果に大きく効く。

(2) 結合部の剛性を試験によって同定している。

(3) 多項式近似を行って回転自由度の生成をしている。

等であるが、そもそも片持ち形態（剛体モードの役割が大きい）のパドル構造が不拘束モード合成法に適した構造であるように思える。

本報告で行ったモード合成では、部分構造のデータとして試験の生データを用いているが、各部分構造試験の段階で試験結果を部分構造の有限要素モデルにフィードバックして、部分構造データとして有限要素解析結果を使えば、もっと良い合成結果が得られることが期待できる。また、構造の対称性を考慮して、試験データの整形をしてやれば、合成されたモードはもっと洗練される。

参 考 文 献

- 1) 長松昭男：モード解析(1985)培風館, pp.189-274.
- 2) 鈴木保雄, 城戸一郎, 大津賀文雄, 嶋田重一：部分構造合成法の小型トラックへの応用, モード解析の基礎と応用(日本機械学会編)丸善(1986) pp.167-173.
- 3) 佐野政明, 小松敬治, 三本木茂夫, 甲斐高志, 三津間秀彦, 辻畑昭夫, 浅葉 誠：試験データに基づくモード合成法のパドル構造への応用(その2), 第30回構造強度に関する講演会講演集, (1988) pp.6-9.
- 4) 小松敬治：構造物のシステム同定, シミュレーション, Vol.7, No.3 (1988) pp.148-154.
- 5) 竹下 亨：プログラミング言語 APL(1981) 共立出版.

付 録

本文で展開した理論のプログラムリストをプログラム 1 に示す。言語は APL⁵⁾である。説明はプログラム中に細かく入れておいた。本文の例題であるオープンアイソグリッドについての入力データを、座標について付表 1, モーダルデータについて付表 2 に示す。これらのデータを APL の作業空間に置いてメインプログラム MAIN を実行すればモード合成された固有振動数が FRQ に, 固有モードが EIGENVEC に出力される。結合部の節点番号は付図 1 に示す通りで, この図を基にサブルーチン SPARKM がつくられる。

図形出力については「日本語 APL」(IBM 系の APL) 専用のモード図形表示プログラムをプログラム 2 に示す。MAIN 実行後, 表示させたいモードの次数を MODE として TRANSMODE を実行すればよい。図形表示に必要なオープンアイソグリッドでのデータを付表 3 に示す。

```

▽MAIN[0]▽
[0] MAIN
[1] A      メインプログラム
[2] DATAINPUT  Aデータ入力
[3] CREATEWXY  A計測された固有モードの多項式近似 (回転自由度の生成)
[4] MODEMAT    A各部分構造の固有モードによりモード行列を作る
[5] MKGEN      A結合前の全体特性行列
[6] HINGEMK    A結合ヒンジの特性行列
[7] EIGENVALUE A結合系の固有値計算
[8] EIGENMODE  A固有モードのモード座標から物理座標への変換
    
```

```

▽DATAINPUT[0]▽
[0] DATAINPUT
[1] AINPUT DXA,DXB,DXC,DYA,DYB,DYC モード計測時の座標系
[2] AINPUT CXA,CXB,CXC,CYA,CYB,CYC モード合成時の座標系
[3] AINPUT DFA,DFB,DFC      計測された固有振動数
[4] A      DMA,DMB,DMC      計測されたモーダルマス
[5] A      DSA,DSB,DSC      計測された固有振動モード
[6] A      (DDA,ddb,DDC)    計測された減衰比 (使用しない)
[7] AINPUT EI,GJ,RAL,LB    結合ヒンジの梁としての断面定数
[8] AINPUT MA,KA (IN SUBROUTINE SPARKM) (SPARKMで説明)
[9] AINPUT NEIG,ALP  欲しい固有モードの数, 固有値計算でのシフト量
[10] EI+4.573E14      A梁の曲げ剛性
[11] GJ+6.76E14      A梁のねじり剛性
[12] LB+60           A梁の長さ
[13] RAL+83         A梁の質量
[14] NEIG+8         A欲しい固有モードの数
[15] ALP+0          A固有値計算でのシフト量
    
```

```

▽SPARKM[0]▽
[0] SPARKM;KAA
[1] A結合部の特性行列の全体行列中での位置と値を入力する
[2] A [ ; x , y , z ] x : 行 , y : 列 , z : ( x , y ) 要素の値
[3] A [ 1,2,3,...,n; ] nは行列成分の総数
[4] A K A : 剛性行列 , M A : 質量行列
[5] KA+144 3p0
[6] KAA+(6p88),(6p89),(6p90),(6p1),(6p2),(6p3)
[7] KAA+KAA,(6p148),(6p149),(6p150),(6p61),(6p62),(6p63)
[8] KAA+KAA,(6p157),(6p158),(6p159),(6p76),(6p77),(6p78)
[9] KA[:1]+KAA,(6p151),(6p152),(6p153),(6p136),(6p137),(6p138)
[10] KAA+(36p88 89 90 1 2 3),(36p148 149 150 61 62 63)
[11] KA[:2]+KAA,(36p157 158 159 76 77 78),(36p151 152 153 136 137 138)
[12] MA+KA
[13] KA[:3]+(,KR),(,KR),(,KR),(,KR)
[14] MA[:3]+(,MR),(,MR),(,MR),(,MR)
    
```

```

▽CREATEWXY[0]▽
[0] CREATEWXY;ZAHYOUA;ZAHYOUB;ZAHYOUC;NJ;NODT
[1] ZAHYOUA+DXA,DYA,CXA,CYA
[2] NJ+pDXA
[3] CSA+ZAHYOUA SMOOTH DSA      AB部の多項式近似
[4] ZAHYOUB+DXB,DYB,CXB,CYB
[5] NJ+pDXB
[6] CSB+ZAHYOUB SMOOTH DSB      AB部の多項式近似
[7] ZAHYOUC+DXC,DYC,CXC,CYC
[8] NJ+pDXC
[9] CSC+ZAHYOUC SMOOTH DSC      AC部の多項式近似
    
```

```

      VSMOOTH [0] V
[0] HPWB←ZAHYOU SMOOTH HPVEC;N;M;NE;W;BX;BY;COEF;HXP;HYP;N3;NEIG;CXX;CYY
[1] HXP←ZAHYOU[1;NJ]
[2] HYP←ZAHYOU[NJ+1;NJ]
[3] NODT←0.5×ρZAHYOU←(2×NJ)↓ZAHYOU  Aモード合成時の節点数
[4] CXX←ZAHYOU[1;NODT]
[5] CYY←ZAHYOU[NODT+1;NODT]
[6] N3←3×NODT  A面外変形だから3
[7] NEIG←1↑ρHPVEC  A採用する部分構造のモード数
[8] HPWB←(N3,NEIG)ρ0
[9] NE←1
[10] LOOPN:WKEISOKU←HPVEC[:NE]
[11] COEF←HXP HPCOEF HYP  A近似多項式の係数
[12] W←CXX HPAPPR CYY  A近似された面外変位w
[13] BX←CXX HPBX CYY  A生成されたX方向回転角
[14] BY←CXX HPBY CYY  A生成されたy方向回転角
[15] HPWB[:NE]←, ρ(3,NODT)ρW,BX,BY
[16] →(NEIG≥NE←NE+1)/LOOPN

```

```

      VHPCOEF [0] V
[0] COEF←XX HPCOEF YY;CWMAT;X;Y;CW;I
[1] N←ρXX  A計測における座標点数
[2] M←6+((N>10)×4)+((N>20)×5)  ANに応じての多項式の項数の選択
[3] CWMAT←(N,M)ρ0
[4] I←1
[5] LOOPW:X←XX[I]
[6] Y←YY[I]
[7] CW←X FW Y  A座標点(X,Y)におけるwの計算
[8] CWMAT[I;]←CW
[9] →(N≥I←I+1)/LOOPW
[10] COEF←WKEISOKU←CWMAT
[11] WKEISAN←CWMAT+.×COEF  A最小自乗法による係数の決定

```

```

      VHPAPPR [0] V
[0] WKEISAN←XX HPAPPR YY;CWMAT;X;Y;CW;I
[1] N←ρXX
[2] CWMAT←(N,M)ρ0
[3] I←1
[4] LOOPW:X←XX[I]
[5] Y←YY[I]
[6] CW←X FW Y
[7] CWMAT[I;]←CW
[8] →(N≥I←I+1)/LOOPW
[9] WKEISAN←CWMAT+.×COEF

```

```

      VHPBX [0] V
[0] BX←XX HPBX YY;CXMAT;CX;X;Y;I
[1] CXMAT←(N,M)ρ0
[2] I←1
[3] LOOP:X←XX[I]
[4] Y←YY[I]
[5] CX←X FWX Y
[6] CXMAT[I;]←CX
[7] →(N≥I←I+1)/LOOP
[8] BX←CXMAT+.×COEF

```

```

      VHPBY[0]V
[0] BY←XX HPBY YY;CYMAT;CY;X;Y;I
[1] CYMAT←(N,M)ρ0
[2] I←1
[3] LOOP:X←XX[I]
[4] Y←YY[I]
[5] CY←X FWY Y
[6] CYMAT[I;]←CY
[7] →(N≥I←I+1)/LOOP
[8] BY←CYMAT+.×COEF

```

```

      VFW[0]V
[0] CW←X FW Y
[1] CW←1,X,Y,(X*2),(X*Y),(Y*2),(X*3),(Y*X*2),(X*Y*2),Y*3
[2] CW←CW,(X*4),(Y*X*3),((X*2)*Y*2),(X*Y*3),Y*4
[3] CW←M↑CW      ρ完全多項式のM項分を採用

```

```

      VFWX[0]V
[0] CX←X FWX Y
[1] CX←0,1,0,(2*X),Y,0,(3*X*2),(2*X*Y),(Y*2),0
[2] CX←CX,(4*X*3),(3*Y*X*X),(2*X*Y*Y),(Y*3),0
[3] CX←M↑CX

```

```

      VFWY[0]V
[0] CY←X FWY Y
[1] CY←0,0,1,0,X,(2*Y),0,(X*X),(2*X*Y),(3*Y*Y),0
[2] CY←CY,(X*3),(2*X*X*Y),(3*X*Y*Y),(4*Y*3)
[3] CY←M↑CY

```

```

      VMKGEN[0]V
[0] MKGEN:I;J
[1] ρ3つの部分構造の対角特性行列をベクトルとして作成
[2] ρGLOBAL ; KGEN , MGEN
[3] KGEN←((2*3.1415926*(DFA,DFB,DFC))*2)*MGEN←DMA,DMB,DMC

```

```

      VMODEMAT[0]V
[0] MODEMAT:JA;JB;JC;JABC
[1] ρGLOBAL ; FAI      3つの部分構造の固有モードから作られる
[2] ρ                      全体固有モード行列
[3] JA←ρCSA
[4] JB←ρCSB
[5] JC←ρCSC
[6] JABC←JA+JB+JC
[7] FAI←(JABC[1],JABC[2])ρ0
[8] FAI[(iJA[1]);(iJA[2])]←CSA
[9] FAI[(JA[1]+iJB[1]);(JA[2]+iJB[2])]←CSB
[10] FAI[(JA[1]+JB[1]+iJC[1]);(JA[2]+JB[2]+iJC[2])]←CSC

```

```

      VHINGEMK[0]V
[0] HINGEMK:KA;MA;A
[1] ρモード座標系におけるヒンジ部の特性行列
[2] KRMR
[3] SPARKM
[4] A←KA SOMITSU FAI ρヒンジ部の特性行列(物理座標)+.×FAI
[5] KGK←(ρFAI)+.×A
[6] A←MA SOMITSU FAI
[7] MGM←(ρFAI)+.×A

```



```

      V KRM R [0] V
[0] KRM R : L
[1] A 梁の要素特性行列
[2] L ← LB          A要素の長さ
[3] KR ← MR ← 6 6 ρ0  A節点自由度はW, BX, BY
[4] KR [1;1 2 4 5] ← 12, (6×L), -12, 6×L
[5] KR [2;1 2 4 5] ← (6×L), (4×L×L), (-6×L), 2×L×L
[6] KR [4;1 2 4 5] ← -12, (-6×L), 12, (-6×L)
[7] KR [5;1 2 4 5] ← (6×L), (2×L×L), (-6×L), 4×L×L
[8] KR ← KR × EI ÷ L × L × L
[9] KR [6;6] ← KR [3;3] ← -KR [3;6] ← KR [6;3] ← -GJ ÷ L
[10] MR [1;1 2 4 5] ← 156, (22×L), 54, (-13×L)
[11] MR [2;1 2 4 5] ← (22×L), (4×L×L), (13×L), (-3×L×L)
[12] MR [4;1 2 4 5] ← 54, (13×L), 156, (-22×L)
[13] MR [5;1 2 4 5] ← (-13×L), (-3×L×L), (-22×L), 4×L×L
[14] MR ← MR × RAL ÷ 420

      V SOMITSU [0] V
[0] C ← A SOMITSU B ; N ; NN ; J ; I ; II ; K
[1] A A : N × 3 MATRIX, N : NONZEROELEMENT
[2] A 疎な行列 × ベクトル
[3] C ← (ρB) ρ0
[4] NN ← -1 ↑ ρB
[5] N ← 1 ↑ ρA
[6] J ← 1
[7] LOOPJ : I ← 1
[8] LOOP : II ← A [I;1]
[9] K ← A [I;2]
[10] C [II;J] ← C [II;J] + A [I;3] × B [K;J]
[11] → (N ≥ I ← I + 1) / LOOP
[12] → (NN ≥ J ← J + 1) / LOOPJ

      V EIGENVALUE [0] V
[0] EIGENVALUE ; R ; TK ; I ; OM2
[1] NEIGABC ← 1 ↑ ρK GK          A採用した部分構造の固有モード総数
[2] TK ← KGK
[3] TM ← MGH
[4] I ← 1
[5] LOOP : TK [I;I] ← TK [I;I] + KGEN [I]
[6] TM [I;I] ← TM [I;I] + MGEN [I]
[7] → (NEIGABC ≥ I ← I + 1) / LOOP
[8] TK ← TK + TM × ALP          A固有値計算にシフト量ALPを導入
[9] TK ← (BTK) + . × TM
[10] R ← TK POWERN NEIG          Aパワー法による固有値計算
[11] OM2 ← R [1;] - ALP          Aシフト量の修整
[12] FRQ ← ((|OM2| × 0.5) ÷ 2 × 3.1415926)          A固有振動数
[13] VECG ← I 0 ↑ R          Aモード座標系での固有ベクトル(最大値1)

```

プログラム1 (続)

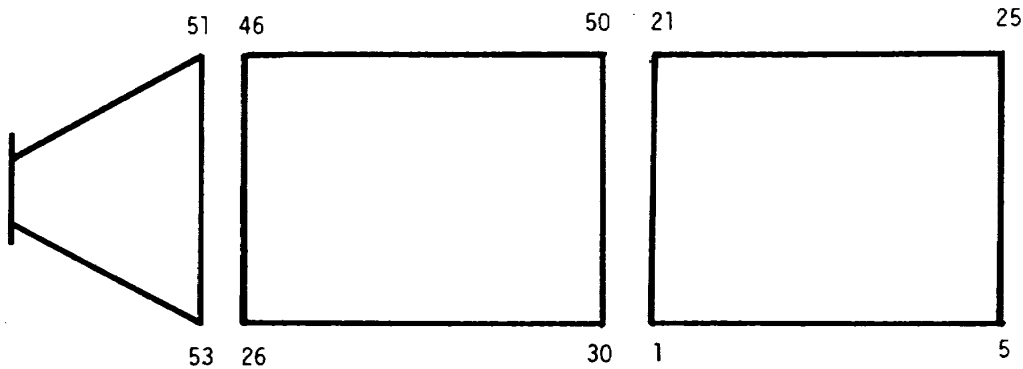
```

VPOWERN[D]V
[0] R←A POWERN NEIG;N;X;XK;XA;I;RM;RMK;E;J;NE;XKS
[1] nべき乗法による固有値/固有ベクトルの計算
[2] R←ρNE←1
[3] C3:RM←0
[4] I←1
[5] N←ρA
[6] X←N[1]ρ-0.5+(N[1]?N[1])÷N[1] n固有ベクトルの初期値を乱数で与える
[7] C2:J←XA1[r/XA←|XK←A+.×X
[8] XK←XK÷RMK←XK[J] n固有ベクトルの最大値を1とする
[9] E←|(RMK-RM)÷|RMK
[10] →(0.0001≥E)/C1 n収束性判定
[11] X←XK
[12] RM←RMK
[13] →(200≥I←I+1)/C2 n反復回数の上限
[14] C1:R←R,RMK,XK
[15] 'ITERATION = ',I
[16] XKS←XK÷(+/XK*2)*0.5
[17] A←A-RMK*(XKS°.×XKS) n固有ベクトルの抜き取り
[18] →(NEIG≥NE←NE+1)/C3
[19] R←R(NEIG,(1+I↓N))ρR n2行目以下が固有ベクトル
[20] R[1;I]←R[1;] n1行目が固有値(ω×ω)
    
```

```

VEIGENMODE[D]V
[0] EIGENMODE:I:I
[1] n固有モードVECGを物理座標に変換
[2] EIGENVEC←FAI+.×VECG
[3] II←ρEIGENVEC
[4] I←1
[5] LOOP:EIGENVEC[:I]←EIGENVEC[:I]÷(r/|EIGENVEC[:I])
[6] →(II[2]≥I←I+1)/LOOP
    
```

プログラム1 (続)



付図1 オープンアイソグリッドの結合部の節点番号

```

▽TRANSMODE[0]▽
[0] TRANSMODE MODE;SC;THETA;XC;YC;XGGG;YGGG;XGG;YGG
[1] 768 OSVO 'CBEAM'      A共用変数の申し込み
[2]  NELT←NELTA
[3]  NODT←NODTA
[4]  KAKOM←KAKOMA
[5]  XGG←CXA
[6]  YGG←CYA
[7]  CBEAM←101 1          Aグラフィックスモード
[8]  THETA←45
[9]  CON←500
[10] CX←500
[11] CY←700
[12] SC←2500
[13] SMODE←CSA+.×VECG[11;MODE]    AA部で11モード採用
[14] XGG←XGG+1260
[15] GOUSEI PLOT MODE
[16] SMODE←CSB+.×VECG[11+11;MODE] AB部で11モード採用
[17] XGG←XGG-1260
[18] GOUSEI PLOT MODE
[19] XGGG←XGG
[20] YGGG←YGG
[21] KAKOM←KAKOMC
[22] NELT←NELTC
[23] NODT←NODTC
[24] XGG←CXC-(509+60)
[25] YGG←CYC+433
[26] SMODE←CSC+.×VECG[22+13;MODE]
[27] GOUSEI PLOT MODE
[28] XGG←XGGG
[29] YGG←YGGG
[30] 'FOR TEXT MODE, INPUT CBEAM←101 3'
[31] ' '
[32] 'MODE NO. = ', #MODE
[33] 'FRQ = ', (#FRQ[MODE]), ' (HZ)'

```

```

▽LINE2[0]▽
[0] LINE2;P1;P2
[1] P1←10.5+(GGX[IJK[14;1]],GGY[IJK[14;1]])
[2] P2←10.5+(GGX[IJK[14;2]],GGY[IJK[14;2]])
[3] CBEAM←201 2,P1,P2

```

```

▽GOUSEI PLOT[0]▽
[0] GOUSEI PLOT MODE;GX;GY;WW
[1] CBEAM←303 1          A細線
[2] GX←XGG+YGG×200THETA÷180
[3] GY←YGG×100THETA÷180
[4] →(MODE=0)/C1
[5] ANIME 0
[6] WW←,(NODT,1)↑(NODT,3)ρSMODE
[7] GY←GY+(WW÷|WW|)×0.1×SC
[8] CBEAM←303 2          A太線
[9] C1:ANIME MODE
[10] →(MODE=0)/0

```

プログラム2 固有モード表示

```

▽ANIME[0]▽
[0] ANIME MODE:IJK4:IJK:I4
[1] GGX←((CON÷SC)×(GX-CX))+400
[2] GGY←384-(CON÷SC)×(GY-CY)
[3] NE←1
[4] LOOP:IJK4←KAKOM[NE;1 2 4 3]
[5] IJK←4 2P IJK4[1 2 2 3 3 4 4 1]
[6] I4←1
[7] C1:LINE2
[8] →(4≥I4←I4+1)/C1
[9] →(NELT≥NE←NE+1)/LOOP
    
```

プログラム 2 (続)

付表 1 オープンアイソグリッドの座標

7	0	10	1	10	1	3	25	P(125), DXA, DYA
1				.0				.0
2			300.0					.0
3			600.0					.0
4			900.0					.0
5		1200.0						.0
6			.0				216.5	
7			300.0				216.5	
8			600.0				216.5	
9			900.0				216.5	
10		1200.0					216.5	
11			.0				433.0	
12			300.0				433.0	
13			600.0				433.0	
14			900.0				433.0	
15		1200.0					433.0	
16			.0				649.5	
17			300.0				649.5	
18			600.0				649.5	
19			900.0				649.5	
20		1200.0					649.5	
21			.0				866.0	
22			300.0				866.0	
23			600.0				866.0	
24			900.0				866.0	
25		1200.0					866.0	
DXB←DXA								
DYB←DYA								

7	0	10	1	10	1	3	9	P(19), DXC, DYC
1			509.0					433.0
2			509.0					.0
3			509.0					-433.0
4			258.0					295.0
5			258.0					.0
6			258.0					-295.0
7			.0					151.0
8			.0					.0
9			.0					-151.0

付表2 オープンアイソグリッドの部分構造のモーダルデータ

7	2* DFA										
.00	.00	.00	14.30	24.70	40.71	51.89	59.32	78.85	94.30	106.04	
7	2* DMA										
516.00	258.00	258.00	110.00	104.00	177.00	79.00	59.00	61.00	75.00	64.00	
7	2* DSA										
1.00	-1.00		.98	.62	.89	.51	.53	.15	.46	.28	
1.00	.50	-1.00	.59	.46	.69	.61	.33	.86	.94	.32	
1.00	.00	-1.00	.03	-1.00	.73	.54	.05	.01	.08	.68	
1.00	.50	-1.00	.56	.42	.64	.62	.31	1.00	.82	.53	
1.00	1.00	-1.00	1.00	.56	.73	.63	.57	.19	.29	.32	
1.00	-1.00	.50	.41	.78	.43	.56	.63	.58	.17	.49	
1.00	.50	.50	.22	.23	.25	.26	.27	.45	.39	.15	
1.00	.00	.50	.01	.62	.54	.20	.01	.04	.04	.49	
1.00	.50	.50	.24	.22	.24	.29	.27	.48	.42	.09	
1.00	1.00	.50	.46	.79	.47	.65	.63	.63	.24	.48	
1.00	-1.00	.00	.02	.73	.01	.79	.94	.62	.04	.68	
1.00	.50	.00	.01	.17	.03	.47	.42	.35	.02	.28	
1.00	.00	.00	.01	.57	.02	.38	.01	.07	.06	1.00	
1.00	.50	.00	.02	.18	.01	.54	.45	.40	.03	.29	
1.00	1.00	.00	.01	.80	.03	-1.00	1.00	.90	.07	.69	
1.00	-1.00	.50	.45	.76	.42	.52	.56	.56	.24	.46	
1.00	.50	.50	.25	.22	.25	.27	.29	.48	.43	.09	
1.00	.00	.50	.01	.63	.55	.19	.01	.03	.02	.48	
1.00	.50	.50	.23	.24	.27	.31	.27	.49	.41	.16	
1.00	1.00	.50	.45	.73	.39	.59	.57	.57	.15	.48	
1.00	-1.00	1.00	.96	.69	.90	.57	.59	.22	.43	.40	
1.00	.50	1.00	.54	.46	.67	.61	.31	.94	.90	.46	
1.00	.00	1.00	.01	.97	1.00	.61	.02	.02	.04	.66	
1.00	.50	1.00	.53	.46	.66	.60	.30	.90	1.00	.38	
1.00	1.00	1.00	.98	.60	.89	.66	.56	.28	.44	.32	
	DFA										
	DMA										
	DSA										
7	2* DFC										
14.24	18.14	77.38									
7	2* DMC										
2795.00	525.00	62.40									
7	2* DSC										
.83	-1.00	.41									
.89	.09	-1.00									
1.00	.54	.00									
.31	.53	.12									
.32	.03	.39									
.42	.29	.02									
.02	.01	.00									
.01	.00	.02									
.02	.01	.00									

付表3 固有モード表示のためのデータ

NELTB←NELTA←16
NELTC←4
NODTB←NODTA←25
NODTC←9

KAKOMA
7 2 6 1
8 3 7 2
9 4 8 3
10 5 9 4
12 7 11 6
13 8 12 7
14 9 13 8
15 10 14 9
17 12 16 11
18 13 17 12
19 14 18 13
20 15 19 14
22 17 21 16
23 18 22 17
24 19 23 18
25 20 24 19

KAKOMB←KAKOMA

KAKOMC
1 2 4 5
2 3 5 6
4 5 7 8
5 6 8 9

航空宇宙技術研究所報告 994号

昭和63年8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 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18

Printed in Japan