

No.20

有翼往還機打上げ形態におけるピッチングモードフラッタ

○神田 淳、上田 哲彦（航空宇宙技術研究所）

Flutter of a full configuration model for HOPE using sting support system with finite pitching rigidity
Atsushi Kanda and Tetsuhiko Ueda (NAL)

Abstract

A project of winged space-reentry vehicle "HOPE" is now proceeding. Elastic pitching modes may be involved in the dynamic characteristics in case of the launching configuration for this vehicle which will be mounted atop to the booster rocket. We should take this kind of modes into consideration in the flutter analysis since the flutter can be critical at the launching phase. A sting-support-system with controllable pitching rigidity was innovated and tested in a transonic wind tunnel. As the results, a pitching mode flutter occurred. Further, we observed the other type of flutter in anti-symmetric mode occurred in a certain range of dynamic pressure which was lower than that for the pitching mode flutter.

1. 序論

有翼往還機の打上げにおいてロケットの先端に搭載される形態が想定されており、ピッチング弾性変形自由度を有することが考えられる。

今回、ピッチング弾性変形自由度を有し、その剛性を制御し変化させることのできるステイング型の支持装置を開発した。支持装置の機能の有効性を確認するために平板翼を有するダミー全機模型を取り付け、航技研の遷音速風洞においてフラッタ実験を行った。その結果、ピッチングモードが関与する対称フラッタモードが通常の翼の曲げ振りフラッタよりフラッタ動圧が低くなり得ることが分かった。さらに低い動圧で逆対称モードフラッタの発生を観測し、これが機体の搭載形態における振動特性によっては危険となる可能性を持っていることがわかったので報告する。

2. 支持装置と模型

2.1. 支持装置

図1にステイング支持装置の概略を示す。ステイングは筒状になっており、長さ 927mm （取り付け部除く）で、先端の直径は 120mm である。質量は 58kg である。内部に板バネおよび制御機構を有しており、ホストコンピュータからの外部指令でサーボモータの制御によりボールネジを回転させ、そのリードによって板バネの支持部分を移動させることができ、ピッチの回転中心を移動させること無く、バネ剛性 K を 20000 から 50000Nm/rad まで 7.4 秒で変化させることができる機構を備えている。この機構を用いてピッチングモードの振動特性を変化させてフラッタ特性への影響を調べると共に、ばね剛性の違いによるフラッタ動圧の差異を利用してフラッタ停止を図ることができる。

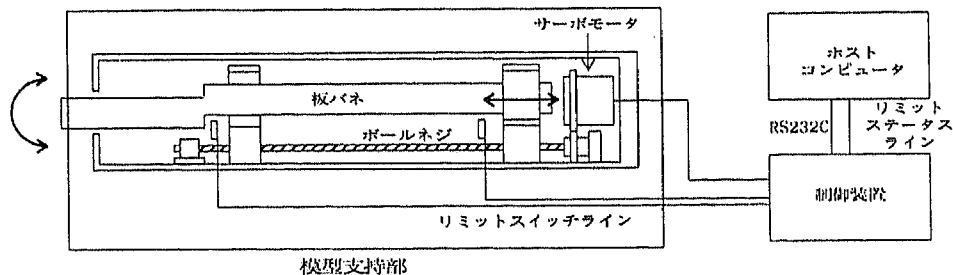


図1 模型支持装置

2.2. 全機模型

全機模型は支持装置の機能確認用であり、GFRPの胴体部と厚さ 2mm のアルミ板翼から成る。両翼根にはフラッタ振動計測用の曲げ・捩り歪ゲージを貼付してある。質量は胴体部が 2.79kg、翼部が 0.54kg である。翼はアスペクト比 2.75、1/4 翼弦において後退角 27.6°、テーパ比は 0.56 である。形状および寸法を図 2 に示す。また、風洞に設置した模型を写真に示す。

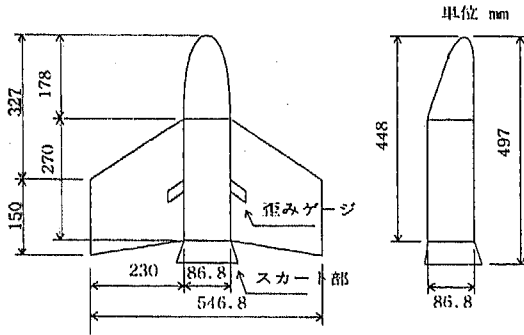


図 2 全機模型



写真 全機模型 (風洞内)

3. 振動特性

3.1. 振動実験

胴体下面をシェーカで加振し、両翼面に 37 点ずつ、胴体に 10 点の合計 84 点に対し非接触型レーザー速度振動計の出力を用いて伝達関数法により固有振動モードを計測した。加振点位置がほぼ機軸上にあるため対称モードのみが励起されている。ばね剛性 $K=20000\text{Nm/rad}$ での結果を表 1 に示す。表中のモード図は点線が基準線、実線がモード形状である。後に示す解析結果と整合をとったためここではモード番号は不連続となっている。なおモード 4 は上記の方法では励起されないため、別途、加速度計を使ってハンマーインパクト法により計測を行った。

振動実験条件 (モード 4 を除く) :

- Input: 0-400Hz 帯域の 50%BurstRandom
- Averaging: 20 回
- Window: Uniform Window (入力・出力共に)
- Time Base: 0.00125 秒

表 1 モード形

モード 2	モード 3
32 [Hz]	47 [Hz]
モード 4	モード 6
64 [Hz]	97 [Hz]
モード 8	
179 [Hz]	

3.2. 振動解析

PATRAN/FEA を用いてバネ剛性 $K=20000, 35000, 50000\text{Nm/rad}$ の全機モデルの振動解析を行った。解析モデルは翼を平板要素、板バネをビーム要素とスプリングで、胴体は質量特性を合わせたダミー要素で構築し、8 モードを解析した。図 3 に構築モデルを示す。表 2 に結果を示すが、モード形・振動数とも実験値と良く一致している。

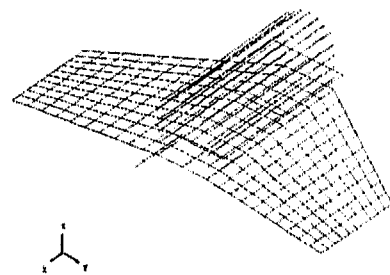


図 3 有限要素モデル

表2 固有振動数

モード	モード形	固有振動数 [Hz]	
		実験	解析
1	逆対称1次曲げ		32
2	対称1次曲げ	32	32
3	ピッチ	47	48
4	逆対称	64	
5	逆対称1次振り		96
6	対称1次振り	97	98
7	逆対称	120	
8	対称2次曲げ	179	187

	固有振動数 [Hz]	
	ピッチ	
バネ剛性 K	実験	解析
20000	47	48
25000	52	
30000	56	
35000	60	61
40000	62	
45000	66	
50000	69	70

4. フラッタ特性

4.1. フラッタ実験

航技研の遷音速風洞（測定部 2m×2m）でフラッタ実験を行った。実験概要を図4に示す。図5には模型支持図を示す。

実験は基本的にはマッハ数 M を固定し総圧 P₀

をスイープさせる方法である。得られた結果のうち代表的なものを表3に示す。表中、振動数が90Hz付近のフラッタポイントが逆対称モードフラッタ、50Hz 付近のフラッタポイントはピッチと曲げが連成する対称モードフラッタである。

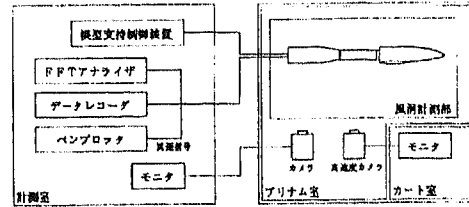


図4 風洞実験概略図

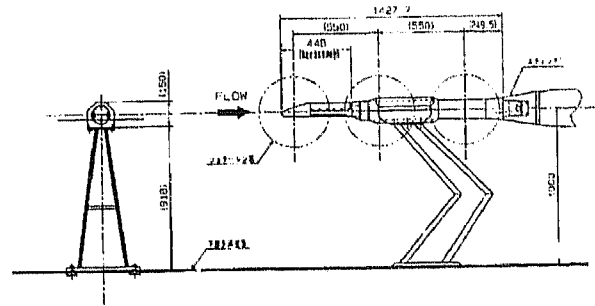


図5 模型支持図

表3 フラッタポイントの状態量

マッハ数 M	バネ剛性 [Nm/rad]	総圧 P ₀ [kPa]	動圧 Q [kPa]	総温度 T ₀ [K]	流速 U [m/s]	振動数 f [Hz]	フラッタモード
0.30	50000	70.1	4.1	296	102	91	逆対称
0.47	50000	44.3	5.9	291	157	91	逆対称
0.55	35000	122	21.1	308	188	57	対称
0.80	30000	65.0	19.0	312	266	51	対称
	35000	67.9	19.9	312	267	52	対称
	45000	70.1	20.6	312	266	53	対称
1.03	50000	51.2	19.4	313	332	45	対称
1.10	50000	52.7	20.9	313	350	45	対称
1.20	35000	59.7	24.8	313	375	48	対称
	40000	62.8	26.1	313	375	49	対称
	45000	65.0	27.0	312	374	49	対称
1.30	25000	63.1	26.9	313	398	47	対称
	30000	67.0	28.6	313	399	48	対称
	35000	72.0	30.8	313	399	50	対称

4.2. フラッタ解析

DPM(Doublet-Point Method)と p-k Method によりフラッタポイントを求めた。非定常空気力解析には機体の対称性を利用して 200 Elements, 286 Nodes から成る右半分の空力面 (図6) を用い、モード形は FEM モデルの 1~8 モード、振動数は実験値を使用し、無次元化振動数 $k=0.0\sim 3.0$ で 0.1 刻みに 31 ケースの一般化空気力を求めた。フラッタ解析条件はマッハ数 $M=0.4, 0.6, 0.8, 1.1, 1.3, 1.5$ で、バネ剛性 $K=20000, 35000, 50000\text{Nm/rad}$ のそれぞれについて総圧 $P_0=0\sim 170\text{kPa}$ で解析を行った。気体条件は理想気体、定常非粘性、等エントロピー流を仮定しているが、これは航技研の遷音速風洞に対して整合性がとれている現実的な仮定である。表4にフラッタ解析の結果を総圧 $P_0[\text{kPa}]$ 、振動数 $f[\text{Hz}]$ について示す。図7、図8にはそれぞれピッチングモードフラッタの実験・解析結果、実験で得られた逆対称フラッタポイントを示す。横軸はマッハ数 M 、縦軸は動圧 $Q [\text{kPa}]$ で、図中に等総圧線を併せて示した。

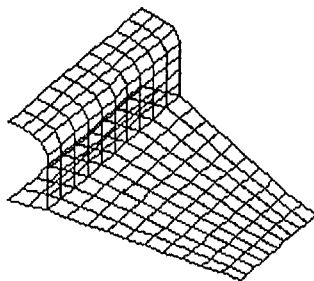


図6 解析空力面

表4 解析フラッタポイント

M	ピッチングモードフラッタ (対称モード)					
	K=20000		K=35000		K=50000	
	総圧	振動数	総圧	振動数	総圧	振動数
0.40	150	45	-----	-----	-----	-----
0.60	74	44	96	54	107	58
0.80	50	43	66	51	71	53
1.10	44	40	54	44	57	45
1.30	56	43	68	50	74	53
1.50	78	44	83	53	91	57

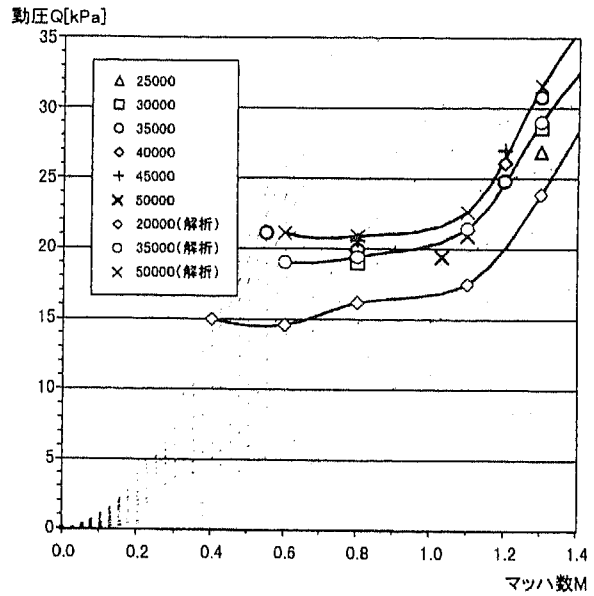


図7 ピッチングモードフラッタポイント

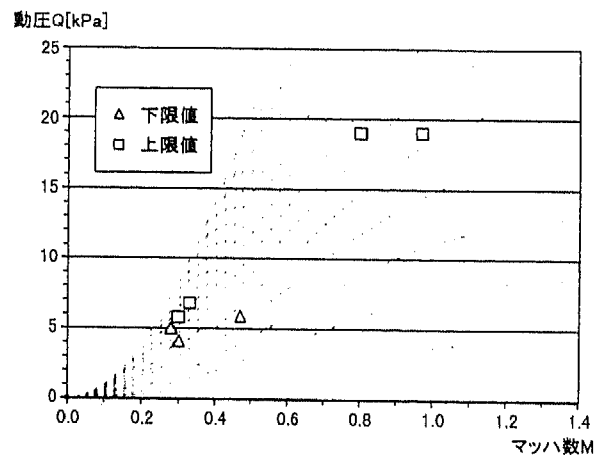


図8 逆対称モードフラッタポイント

5. 結論

ピッチング弾性自由度を有する支持装置を用いた実験・解析の結果、以下が結論された。

- ピッチが連成するフラッタが曲げ振りフラッタより低い動圧で発生することがあることを確認した。
- 製作した支持装置はピッチが連成するフラッタの停止装置としても有効であった。
- 逆対称モードが連成するフラッタが低い動圧で発生した。解析では連成するモードが特定されておらず解明できていない。
- DPM を用いたフラッタ解析が亜音速および超音速域で実験と良く一致した。