

No. 1

遷音速動安定試験

－その1 試験装置と動的天秤の開発－

○三輪 等、上野 真 航空宇宙技術研究所
米本浩一、志子田繁一 川崎重工業株式会社

Dynamic Stability Testing at the NAL 2m Transonic Wind Tunnel
－ Part1 Development of model drive apparatus and dynamic balance －
Hitoshi Miwa, Makoto Ueno(NAL)
Kouichi Yonemoto, Shigeichi Shikoda(KHI)

Key words: Dynamic Stability Testing, HOPE-X, Wind-tunnel testing, Pitch, yaw and roll balance systems

Abstract

To measure dynamic stability parameters of HOPE-X at the NAL 2m Transonic Wind Tunnel, new types of pitch/yaw and roll model drive apparatus and dynamic balance for forced oscillation techniques are developed. The drive apparatus applied cams are relatively longitudinally short, though they have to endure high load and high drive frequencies for the transonic region use. Pre-amplifier in the balance is utilized to get high level output signals because the dynamic balance have beams with high stiffness.

For the verification of performance of the apparatus, testing was conducted with the use of new data reduction technique to identify the dynamic stability parameters at the condition of tare.

Measurement of moments I_X and I_Y of a dummy model indicated good performance of the pitch/yaw and roll balance systems.

1. はじめに

遷音速における動安定試験法を確立し、宇宙往還実験機 HOPE-X の動安定微係数を求める目的で本研究を進めてきた。動安定風洞試験は航技研 2 m 遷音速風洞で行い、動安定微係数を求める方法は強制加振法を採用した。ここでは試験に用いる模型加振装置と動的天秤の開発・製作と動安定微係数の同定法と性能試験結果について報告する。

2. 技術課題

動安定微係数を求める方法は強制加振法を用いることとした。HOPE-X の帰還時の遷音速における HOPE 機体に作用するダンピング空気力は極めて小さいものと予想される¹⁾。この場合、動安定試験における技術課題を挙げると表 1 の様に表すことが出来る。

表 1 強制加振法による遷音速動安定試験の技術課題

項目	技術課題
1. 模型加振装置	<ul style="list-style-type: none"> ・ガタ及び摩擦の少ない加振機構 ・高剛性 ・高負荷加振 ・小型化 ・高い加振周波数
2. 動的天秤	<ul style="list-style-type: none"> ・高剛性 ・高精度検出 ・加振装置と一体化
3. 模型	<ul style="list-style-type: none"> ・高強度軽量模型の製作
4. 計測法	<ul style="list-style-type: none"> ・高い S/N 比の信号計測と高分解能計測
5. 安定微係数の推定	<ul style="list-style-type: none"> ・小さいダンピング空気力パラメータの同定法
6. その他	<ul style="list-style-type: none"> ・較正方法

3. 模型加振装置

模型加振装置は、航空宇宙技術研究所と川崎重工業株式会社で共同開発を行った。加振装置の製作は、装置の主要な部分であるカム装置を試作し、性能評価を行った後に製作した。加振装置は、Pitch（あるいはYaw、90度回転して用いる）加振と Roll 加振の振幅を $\pm 1\text{deg.}$ 及び $\pm 3\text{deg.}$ でそれぞれ行える装置を合計 4 本製作した。振幅 $\pm 3\text{deg.}$ 加振装置は、低速用（マッハ数 0.6 以下）、振幅 $\pm 1\text{deg.}$ 加振装置は高速用（高亜音速、遷音速及び超音速用）である。その性能は表 2 に示す通りである。

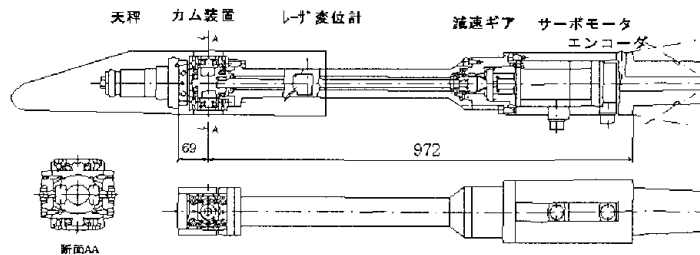
模型に pitch,yaw あるいは roll 運動を与える原理を、図 1 を参照して説明する。加振装置は、サーボモータ、回転駆動軸、カム装

置で構成されている。サーボモータはフィードバック速度制御を行い、模型の慣性力、静的あるいは動的な空気力による模型運動の変動が少なくなるようにする。カム装置は、pitch/yaw 加振の場合には立体カム、roll 加振の場合には共役カムをそれぞれ用い、サーボモータの回転運動を正確な正弦波状の Pitch/Yaw あるいは roll 運動に変換する。

Pitch 角（あるいは yaw 角）及び roll 角の測定は、レーザ変位計を用いスティングと模型内面の距離を正確に計測して求める方法を用いることとした。

写真 1 (a),(b) に加振装置の外観写真を、写真 2 に立体カム装置、写真 3 に共役カム装置をそれぞれ示す。

Pitch/Yaw 加振装置



Roll 加振装置

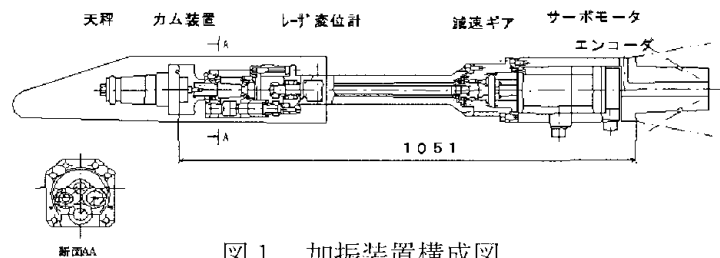


図 1 加振装置構成図



写真 1 (a) 加振装置外観

上から、Roll 1deg.、Roll 3deg.、Pitch/Yaw 1deg.用

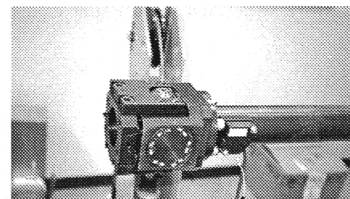


写真 1 (b) 加振装置カム部とレーザ変位計。Pitch/Yaw 3deg.用

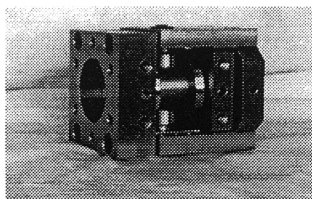


写真 2 立体カム装置

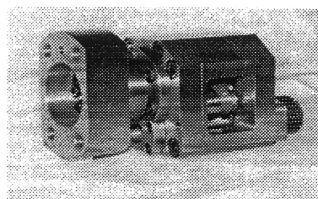


写真 3 共役カム装置

表 2 模型加振装置性能

	加振振幅、degree	最高加振周波数、Hz
Pitch/Yaw 加振装置	± 1	1 5
	± 3	8.7
Roll 加振装置	± 1	3 0
	± 3	1 7.3

4. 動的天秤

動的天秤は、剛性を高め、かつ歪みゲージを張り付けたビームの歪み量を大きくするために、図 2 に示すようにビームの長さを短くして、その数を増やした Multi-beam 方式とした。モーメントセンタと加振装置の加振中心の距離を出来るだけ短くなるよう設計した。歪みゲージは箔ゲージを用いた。また、一方ではそれでも高剛性ビームを用いるためにビームの歪み量は少なくなる。そのため、高出力の信号を得て、検出信号の S/N 比を高く

し、信号の長距離伝送を行えるようにするために、動的天秤内には、出力部に定電流出力回路を用いたプリアンプを内蔵し用いた。

動的天秤と模型加振装置とはフランジを介して取り付ける様になっている。模型への脱着は、コレットを用いて、容易、確実に出来るようにした。

写真 4 は動的天秤の外観を示し、表 3 は天秤容量を表す。

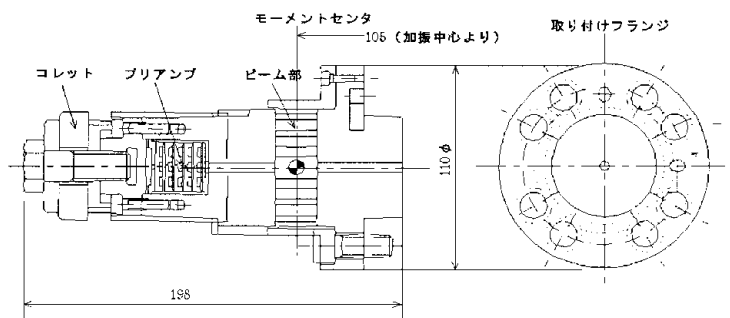


図 2 動的天秤断面図



写真 4 動的天秤の外観
模型取り付け用コレットと天秤本体

表 3 天秤容量

	Fy, N	Fz, N	Mx, N-m	My, N-m	Mz, N-m
Pitch/Yaw 用天秤	±2000	±8000	±200	±600	±300
Roll 用天秤	±2000	±8000	±300	±500	±200

5. 動安定微係数測定原理²⁾

動安定微係数を求めるための測定は、次の回転ベクトルの原理を用いた方法により行った。

カム回転中心軸周りの運動方程式は、(1)～(3)式で表すことが出来る。 I_X, I_Y, I_Z は、カム回転中心とする模型の X, Y 及び Z 軸周りの慣性モーメント、 ϕ, θ 及び ψ は模型の roll 角、pitch 角及び yaw 角である。

$C_{Xa} + C_{Xt}$ 、 $C_{Ya} + C_{Yt}$ 及び $C_{Za} + C_{Zt}$ は、wind-on の時のダンピング空気力係数をそれぞれ表す。

$K_{Xa} + K_{Xt}$ 、 $K_{Ya} + K_{Yt}$ 及び $K_{Za} + K_{Zt}$ は、空気力剛性(aerodynamic stiffness)である。ここで添え字 a 及び t は求める求める空気力係数及び風袋時の空気力係数を表し、真のダンピング空気力及び空気力剛性は、wind-on 時の測定値から風袋時の値を引いて求める。

M_X, M_Y, M_Z は加振項である。模型を角周波数 ω を持つ正弦波で加振すると、これらの加振項は(4)式で表される。このとき、(1)～(3)式の定常解は(5)式で示すことが出来る。(5)式の中の σ, ζ, λ は、加振項を基準とした位相遅れを表す。

ここで模型のピッチング運動を例に説明すると、カム回転軸中心周りの運動方程式は式(2)で示される。ピッチ角及びピッチングモーメントは、(4)及び(5)式から加振角周波数 ω で

・カム中心軸周りの運動方程式

$$I_X \ddot{\phi} + (C_{Xa} + C_{Xt}) \dot{\phi} + (K_{Xa} + K_{Xt}) \phi = M_X \quad (1)$$

$$I_Y \ddot{\theta} + (C_{Ya} + C_{Yt}) \dot{\theta} + (K_{Ya} + K_{Yt}) \theta = M_Y \quad (2)$$

$$I_Z \ddot{\psi} + (C_{Za} + C_{Zt}) \dot{\psi} + (K_{Za} + K_{Zt}) \psi = M_Z \quad (3)$$

・モーメント加振

$$M_X = M_X \cdot e^{j\omega t}, M_Y = M_Y \cdot e^{j\omega t}, M_Z = M_Z \cdot e^{j\omega t} \quad (4)$$

・定常解

$$\phi = \phi_0 e^{j(\omega t - \sigma)}, \theta = \theta_0 e^{j(\omega t - \zeta)}, \psi = \psi_0 e^{j(\omega t - \lambda)} \quad (5)$$

回転する回転ベクトルで表すことが出来る。

模型のピッチ角の回転ベクトルを基準とした動座標系を考えると、ピッチングモーメントは図3に示すように、大きさ M_Y 位相角 ζ のベクトルで表すことが出来る。ダンピング空気力は、このベクトルの \sin 成分から求めることが出来る。ちなみに、空気力剛性(aerodynamic stiffness)は、ピッチングモーメント M_Y の \cos 成分から模型の慣性モーメントを引いた値である。

6. 動安定微係数同定法

動安定微係数を同定する方法は、古くは電磁式回転リゾルバを用いた機械的方法、正弦波関数の直交性を利用しこれとローパスフィルタを用いた相関法、コヒーレンス³⁾等を挙げることが出来るが、ここでは次の様な数値フィルタを用いた手法でデータ処理を行うこととした。

処理手順：

- (1) 生データのフィルタ処理を行う。
- (2) 最小2乗法により、次式(6)の正弦波回帰曲線のあてはめを行う。

$$y = a_0 \sin(\omega t + \varphi) + d_0 \quad (6)$$

(3) 模型のピッチング運動ベクトルを基準座標系とした天秤出力の力、あるいはモーメントのベクトルの大きさと位相角からダンピング空気力を求める (図3参照)。

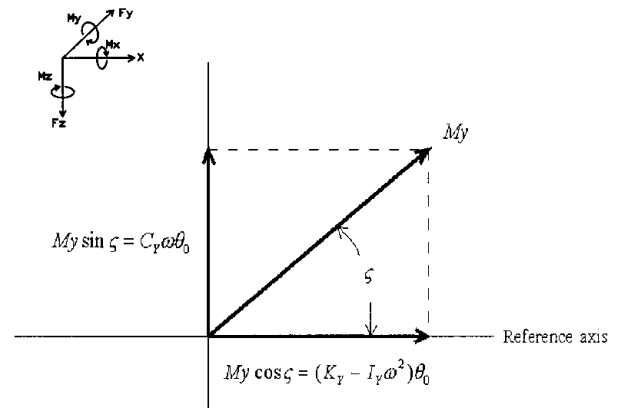


図3 ベクトル法の説明図

7. 加振装置の性能評価

加振装置の性能評価は、加振装置にダミー模型を取り付けた状態のみで行う風袋測定試験で実施した。写真 4 にその試験状況を示す。図 4 は、ピッチング運動時における天秤出力及びレーザ変位計出力波形を示す。上からローリングモーメント M_x 、ピッチングモーメント M_y の天秤出力波形、及び模型ピッチ角 θ を生の波形で示す。

図 5 は、信号のフィルタ処理後の波形を示す。フィルタ処理は、通過帯域のリップル 0.1% 以内、遮断帯域の減衰量が -60dB 以上の特性の直線位相をもつ FIR 数値フィルタを用いて行った。

図 5 に示すフィルタ処理後の波形は、ピッチングモーメントの波形を精度良く検出出来ていることを表している。

位相角及びモーメントの大きさは、まず加振周波数の 5 周期分のデータ区間について (6) 式で示す回帰曲線の当てはめを行い求めた。この操作を全データ区間にわたり行い、最終結果は各区間の値を平均して求めた。

図 6 はローリングモーメントベクトル M_x の位相角 σ とロール角の大きさ ϕ_0 を、図 7 はピッチングモーメントベクトル M_y の位相角 ζ とピッチ角の大きさ θ_0 を、模型加振周波数についてそれぞれ表したものである。天秤に作用するピッチングモーメントあるいは

ローリングモーメントは、ほとんどダミー模型の慣性モーメントによるものであるから、ほぼ位相角 σ 及び ζ は 180 度である。加振周波数が増すにつれてロール角 ϕ_0 及びピッチ角 θ_0 の大きさは僅か大きくなる。この原因は今の所不明である。

図 8 及び図 9 は、加振周波数の 2 乗とローリングモーメントの大きさ M_x 及びピッチングモーメントの大きさ M_y の関係をそれぞれ表す。ダミー模型の慣性モーメント I_x と I_y はこのグラフの傾きから求めることができる。これらの図から M_x 及び M_y は回帰直線にほぼ一致する。これは加振装置のガタ、外部加振による天秤出力の高調波成分及び信号系統に入る電氣的ノイズによる誤差はほぼ取り除かれていることを示す。 M_x 及び M_y 測定値の 95% 信頼区間は、図 8 及び図 9 の図中に示すように、 $2\sigma_{M_x} = 0.5379N - m$ 及び $2\sigma_{M_y} = 0.4022N - m$ である。

これらの値は、加振装置と天秤信号測定系の精度とパラメータ同定法の精度を含めた総合測定精度を表し、ほぼ満足出来る値である。

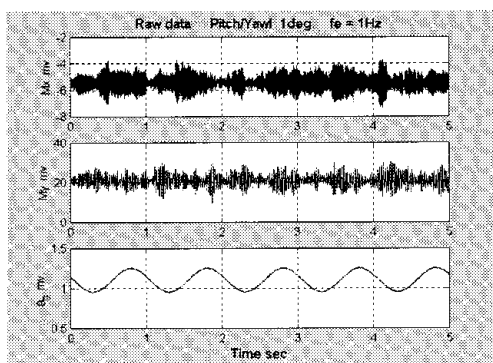


図 4 生データの時系列 (加振周波数 1Hz)

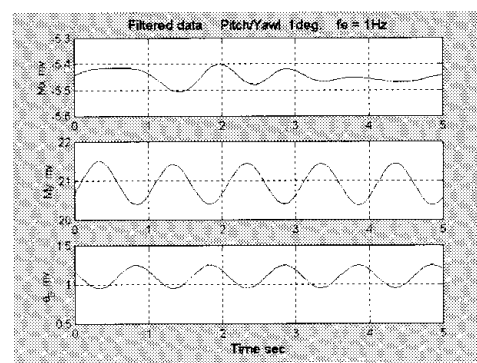


図 5 フィルタ処理後の時系列

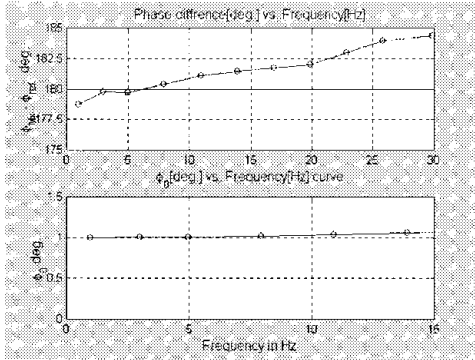


図6 加振周波数による
位相角 σ 及びロール角 ϕ_0 の変化

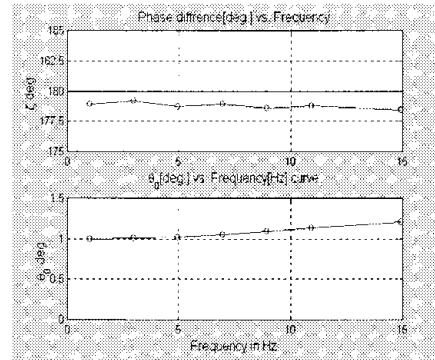


図7 加振周波数による
位相角 ζ 及びピッチ角 θ_0 の変化

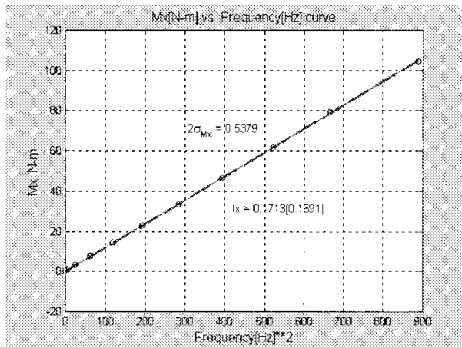


図8 ローリングモーメント M_x と
加振周波数の2乗の関係図

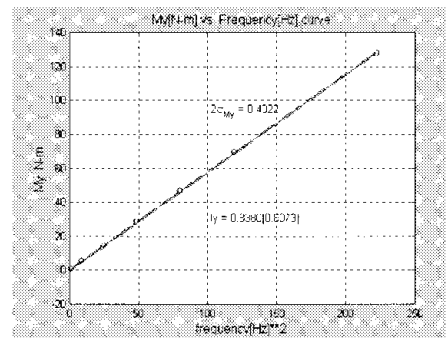


図9 ピッチングモーメント M_y と
加振周波数の2乗の関係図

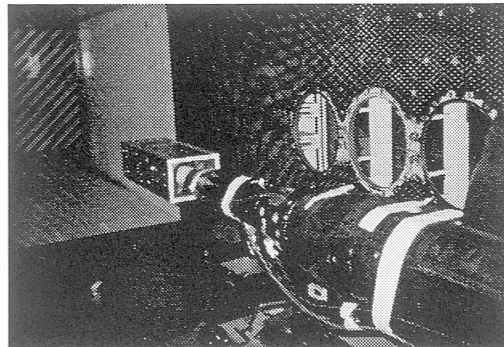


写真4 ダミー模型による加振装置性能試験状況

8. 今後の課題

HOPE-X の動安定微係数を求めるためには、表1に示すように加振装置及び動的天秤の開発の他に、いくつかの課題がある。とりわけその中で、遷音速において、比較的高い動圧の気流に耐える高い剛性を持った軽量化モデルを開発・製作する必要がある。

動安定風試は、まず最初に標準模型を製作して検定試験を行い、次いで HOPE-X 模型を用いた動安定試験を実施する予定である。

参考文献：

- 1) Richmond P. Boyden and Delma C. Freeman, Jr., Subsonic and supersonic

dynamic stability characteristics of a space shuttle orbiter. NASA TN D-8042 Nov. 1975

- 2) C.J.Shueler, L.K.Ward and A.E.Hodapp,Jr., Techniques for measurements of dynamic stability derivatives in ground test facilities. AGARDograph 121, Oct. 1967
- 3) E.S.Hanff, Direct forced-oscillation techniques for the determination of stability derivatives in wind tunnels. AGARD LS-114 Reference No.4 May 1981