UDC 629.73.018.4:
629.735.7

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-231

フライングテストベッド全機振動試験

渋谷昭義・岡田典秋
丸山　茂・川崎純男

1972 年 8 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

This document is provided by JAXA.

既　刊　資　料

TM-181	航空機の乗り心地について	1970年6月	幸尾治朗
TM-182	排気系障害板の模型実験	1970年9月	田辺義一
TM-183	ロケット模型の大型低速風胴試験	1970年9月	近藤洋史，高橋　宏 桑野尚明
TM-184	金属線へ衝突する液滴の現象	1970年9月	田丸　卓，乙幡安雄
TM-185	推進エンジン用空気取入口の予備実験	1970年9月	近藤　博，石賀保正
TM-186	NAL-25·31 型ロケットの試作と飛しょう試験	1970年11月	宇宙研究グループ
TM-187	推力 300 kg ジンバル液体ロケットエンジンの揺動特性（I）	1970年11月	楢崎哲二，中野富雄 橋本亮平，竹花真一郎
TM-188	自由飛行模型 FFM-10 の空力微係数におよぼす機体弾性変形の影響について	1970年11月	河崎俊夫，河本　巖 戸田　勧
TM-189	燃料蒸発管に関する研究（III） —管内の燃料・空気二相流への熱伝達—	1970年12月	田丸　卓，乙幡安雄 鈴木邦男
TM-191	大型電子計算機プログラム・ライブラリ	1970年12月	戸川隼人，磯部俊夫
TM-192	極超音速風胴M9ノズル較正試験	1971年1月	長洲秀夫，橋本　登 穂積弘一，松崎貴至
TM-194	航空機の STOL 性に関する一考察	1971年1月	田辺義一
TM-195	曲面壁上の噴流に対する噴出孔形状，配列の効果について	1971年1月	西村英明，臼井　弘 井上重雄，三村富嗣雄
TM-196	NAL-16H 型ロケットの研究試作	1971年1月	宇宙研究グループ
TM-197	二次元煙風胴について	1971年1月	高橋　宏，戸田亘洋 白井正孝
TM-198	等高線を描かせるプログラム	1971年1月	磯部俊夫
TM-199	航空機用ヒータの燃焼器の開発実験	1971年2月	堀内正司，本間幸吉 矢萩恵一
TM-202	単発 STOL 実験機に関する研究 —テレメータ実験局の電界強度測定—	1971年6月	幸尾治朗，小野孝次 矢沢健司，塚野雄吉
TM-203	固体ロケットの比推力測定の標準化	1971年6月	五代富文，岡部祐二郎 清水昭紀，伊藤克弥 西村久男
TM-204	サーボ機構の過渡応用改善用ディジタルコントローラについて	1971年7月	小川鉱一，島村正人
TM-205	自由飛行模型 FFM-10 の動安定微係数の推定について	1971年7月	河崎俊夫，河本　巖
TM-206	静止衛星の軌道保持シミュレーションシステムの構成（I） —地球の重力場による摂動—	1971年8月	松島弘一
TM-207	対称スピン衛星用ニューテーション・ダンパの解析	1971年9月	村上　力，狼　嘉彰
TM-208	薄板継手構造の強度についての実験 —接着およびリベット継手—	1971年11月	池田為治，熊倉郁夫 竹内和之
TM-209	試作接着面応力センサの較正試験	1971年11月	大竹邦彦，遠藤修司 野口義男
TM-210	小型加速度計による風胴模型姿勢角の測定	1971年12月	原　亘利
TM-211	軽量ジェットブースト STOL の一検討	1971年12月	西村博史
TM-212	原動機部要素試験設備用消音装置の特性試験	1972年1月	鳥崎忠雄，小林　実
TM-213	フライングテストベッド空気系統試験	1972年2月	田辺義一，小暮泰之 川崎純男
TM-214	フライングテストベッド燃料系統試験	1972年2月	田辺義一，小暮泰之 川崎純男

This document is provided by JAXA.

フライングテストベッド全機振動試験*

渋谷昭義**・岡田典秋**
丸山　茂***・川崎純男***

1. まえがき

この報告はフライングテストベッド (Flying Test Bed: 略称 FTB) の振動試験について述べたものである。この試験は FTB による各種実験，および飛行に先立って FTB の振動特性を把握しておくことを目的として実施した。

FTB は VTOL 機の垂直離着陸およびホバリング飛行の研究を主目的とした一人乗りの実験機[1]である。主要諸元を表1に，見取図を図1に示す。機体構造は十字平面形をなす骨組構造で，中央フレームと，それに取付けられた前後および左右フレームからなる。中央フレームは操縦席，リフトジェットエンジン，その他の機能部分の大部分を収納する部分であり，特殊鋼管の骨組構造である。前後および左右フレームはそれぞれの先端に姿勢制御用の空気ジェットノズルが装備されており，アルミ合金の薄板を成形したアングル材からなる骨組構造である。

FTB の振動実験およびその解析を行なう場合には，振動に関連して如何なる技術上の問題が生じる可能性があるかを，あらかじめ検討しておく必要がある。

表1　フライングテストベッド諸元

全　長	約 10 m
全　幅	約 7 m
全　高	約 3 m
最大全備重量	約 1,840 kg
空虚重量	約 1,282 kg
搭載燃料	約 480 kg
乗　員	1名
エンジン	JR 100 F×2 基
飛行時間	約 10 min

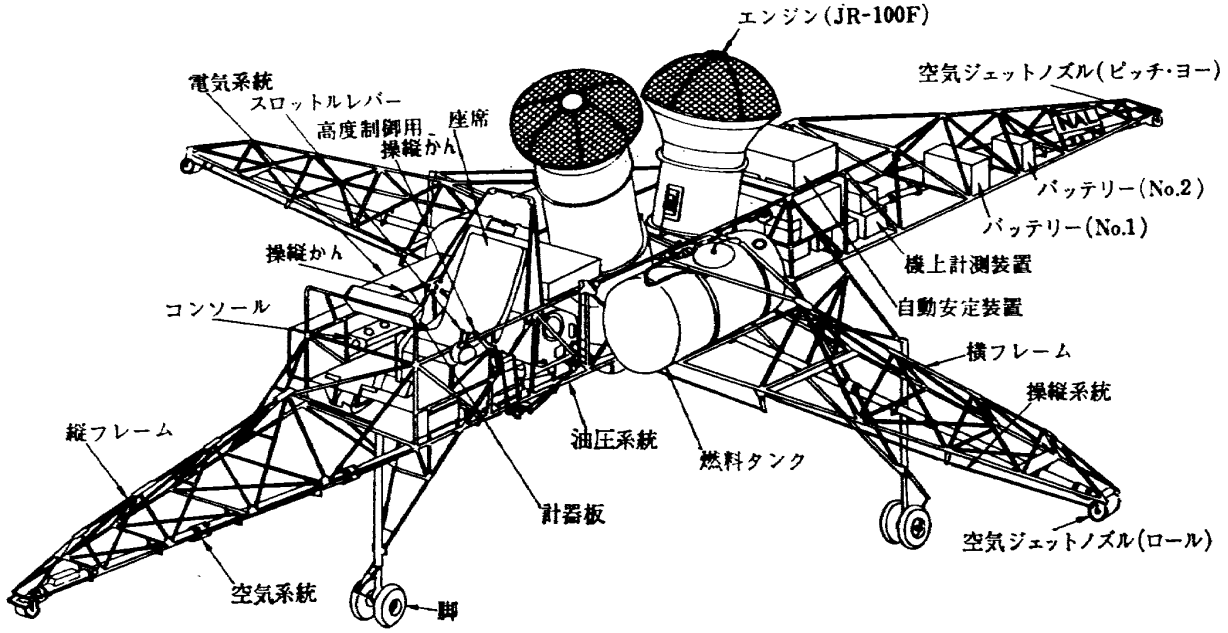


図1　フライングテストベッド

* 昭和47年2月8日受付
** 新型航空機部
*** 富士重工業株式会社

This document is provided by JAXA.

FTB では翼および舵面のような空気力を発生させることを目的とした構造が無く，またその運動も垂直離着陸・ホバリング飛行中の速度の小さい運動に限られているので，普通機におけるようなフラッタ振動等の空力弾性振動に対する配慮は必要でない。したがって，FTB で機体振動が問題となるのは，つぎにあげる場合が主要なものとなる。第一は，飛行中にリフトジェットエンジン，空気タービン等の機能部分が振動源となって，機体が振動する場合である。第二は，着陸時の接地衝撃等の外力によって機体が振動する場合である。第三は，パイロットの操縦操作と FTB の姿勢・位置制御システムの特性に関連して，リミットサイクル振動等*が発生し，それに応じて機体が振動する場合である。

振動試験では前記の場合を想定して，できる限り詳細に機体構造を中心した FTB 各部の固有振動の特性（固有振動数，振動形および構造振動減衰係数 g）を求めた。

2. 試験方法

機体は正規の装備状態で 3 車輪接地の姿勢とし，燃料空（状態 A）および燃料満（状態 B）のケースと，脚固定で燃料空（状態C）の合計 3 ケースについて振動試験を行なった。

図 2 に加振装置，計測装置をも含めた試験装置ブロック図を示す。試験では操縦席にパイロットの重量に相当する重錘（77 kg）を固定して，機体重量を飛行状態に合わせた。

飛行中の機体の振動特性を 3 車輪接地状態の振動試験で模擬するには，車輪による支持の影響を最小限に押える必要がある。3 車輪接地状態で振動試験を行なう場合，脚のオレオはオレオ内外筒間に働く摩擦力で固着された状態にあるので，支持特性は主としてタイヤのばね常数のみに依存することとなる。飛行中の機体の固有振動でもっとも振動数の低いものは 5 Hz 程度と考えられるので，地上に機体を支持したために生じる振動の振動数を前記振動数の 1/4 程度以下（大略 1 Hz 以下）に押えることが望ましい。タイヤの空気圧を正規の 34 lb/in² とした場合の機体上下振動数は 1～2 Hz 程度であり，前記の希望値より高い。振動試験ではタイヤ空気圧を 14 lb/in² とし，機体の上下振動数を 1 Hz 以下に下げて支持の影響を小さくするようにした。

振動試験に用いた加振機は電磁型加振機であり，フレーム曲げ振動測定の場合には図 3 のように 1 台の加振機をロッドを介してフレーム先端に接続して加振した。フレーム捩り振動測定の場合には，図 4 のように 2 台の加振機を地上に置き，ロッドを介してフレーム先端に取付けた横棒の両端をたがいに逆相に加振して捩りモーメントを与える方式を採用した。加振点および振動振幅計測点を図 5，6 に示す。

振動測定に用いた振動検出子は片持梁の先端に接触子を取り付けた接触型変位計であり，片持梁に接着した歪ゲージの出力を動歪計で読み取って接触子の振幅を測定するものである。この振動検出子の使用可能範囲は振動数 100 Hz 以下（検出子の固有振動数約振幅

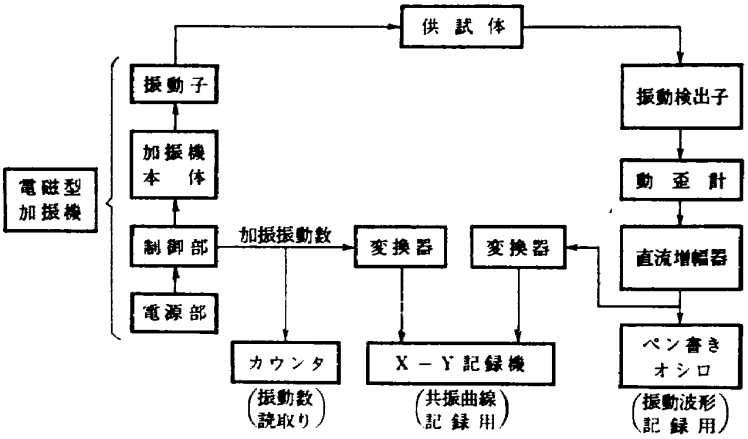


図 2 試験装置ブロック図

* 姿勢制御システムの姿勢角フィードバックにより姿勢安定に関して生ずるリミットサイクル，さらにこれにパイロット操縦操作によるフィードバックが関与して発生する自励振動 (Pilot induced oscilltion) 等がこれに当る。

This document is provided by JAXA.

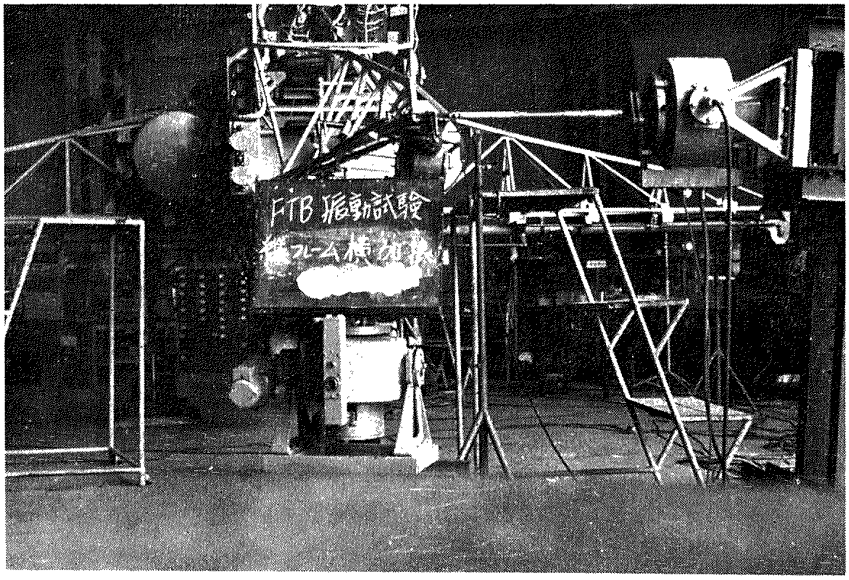


図 3　縦フレーム水平加振

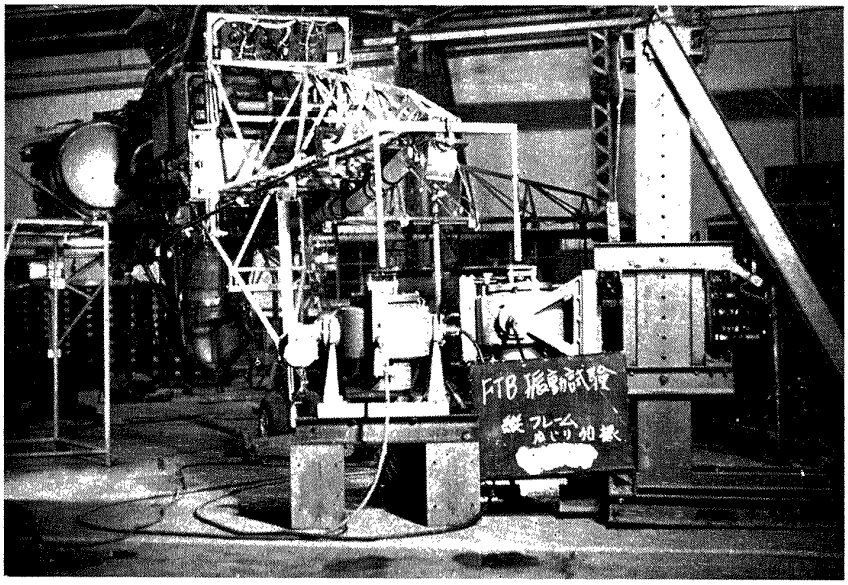


図 4　縦フレーム捩り加振

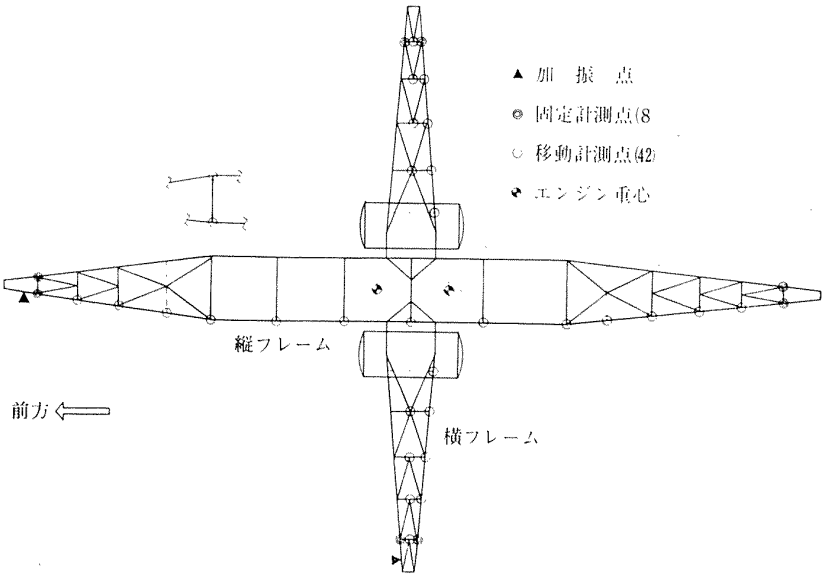


図 5　水平加振点および計測点

This document is provided by JAXA.

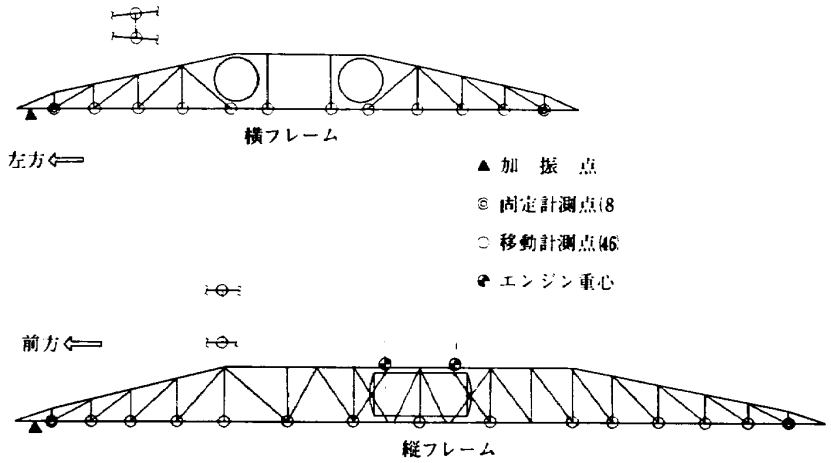


図 6 上下および捩り加振点および計測点

表 2 試験項目

加振方法	機体の状態
縦フレーム水平加振	A, B
縦フレーム上下加振	A, B, C
縦フレーム捩り加振	A, C
横フレーム水平加振	A, B
横フレーム上下加振	A, B, C
横フレーム捩り加振	A, B, C

A：燃料空状態
B：燃料満状態
C：燃料空，脚固定状態

±7 mm 以下である。

振動試験は表2の試験項目に応じて加振点を変えて行なった。各加振方法について，まず加振力一定*で加振振動数を 2～100 Hz の範囲内で連続的に変えて共振曲線（振幅の周波数応答曲線）を求めた。図7以下に示した共振曲線は，図2の試験装置ブロック図に示したように加振振動数および動歪計出力を変換器を通してそれぞれに比例する直流出力に変換し，X-Y記録機で記録することによって求めたものである。固有振動数は共振曲線の振幅ピーク値の振動数で示されるものとした。固有振動数における構造減衰係数 g は共振曲線における振幅ピーク値 A_{max}，および振動数 ω より次のように求めた。

$$g=\frac{(\text{振幅が } A_{max}/\sqrt{2} \text{ となる } \omega \text{ の幅})}{(A_{max} \text{ となる } \omega \text{ の値})}$$

共振曲線上の二つの固有振動数が接近していて前記の式で g を求めるのが困難な場合（図 10 の 12.3 Hz, 13.8 Hz の振動のような場合）には次式から求めた。

$$g=\frac{(\text{振幅が } A_{max}/\sqrt{2} \text{ となる } \omega \text{ の半幅})\times 2}{(A_{max} \text{ となる } \omega \text{ の値})}$$

つぎに共振曲線測定で得られた各固有振動について，一定振動数，一定加振力で加振し，各計測点の振幅と位相を計測し振動形態を求めた。

3. 試験結果

試験結果の一覧表（表3～5），各試験で求めた共振曲線（図 7～21），振動形態（図 22～39）を付録に示す。

結果を要約すれば次の通りである。

(1) 脚による支持の影響を小さくするように努めたが，ヨーイング等，支持の影響による振動が測定された。

(2) 水平方向に加振した場合にも上下方向の振動が発生する等，振動形態は複雑である。これは本機の形状および装備品の配置が軸対称でないためである。したがって，振動形態も曲げ，捩れ等が連成している場合が多い。

(3) 燃料重量が大きい（機体全備重量の 25% 以上）ので，燃料空（状態A）と燃料満（状態B）で共振振動数および振動形態が大幅に変化する。

(4) 縦フレーム，横フレームの最低次の曲げ振動数は 10 Hz 以上であり，上下曲げの振動数は横曲げ（水平面内の曲げ）振動数より高い。

(5) 横曲げ振動は機体のローリング，あるいはフレ

* 共振曲線を求める場合には加振力は大略 5 kg の値として一定値に保持した。加振力は直接には測定せず，加振機駆動電流に加振機が比例するという関係を用い，駆動電流を一定に保って試験を行なった。

This document is provided by JAXA.

ームの捩れと連成して生じる場合が多い。

(6) 自動安定装置用のジャイロテーブルは緩衝用のマウントを用いて取付けているので，11 Hz で共振する。姿勢制御システムの機能におよぼす影響を検討する必要がある。

(7) 操縦系統のロッドの共振は 31 Hz 以上で認められたが，十分に高い値でありパイロットの操縦操作に悪影響は無いと考えられる。

4. あとがき

この試験は富士重工業（株）宇都宮製作所航空機工場で行なった。試験に際しては同社宇都宮製作所の方々に全面的な御協力をいただいた。厚く御礼申し上げる。

文　献

1) 新型航空機部；フライングテストベッドの計画——本体のシステムデザイン，航技研報告，TR-154 (昭和 43/5)

2) 滝沢直人，田辺義一，渋谷昭義，小川敏雄，藤枝郭俊，甲斐忠夫，西村博史，小野幸一，後藤芳夫；フライングテストベッドの機体総合実験——エンジンを除く本体の機能，航技研報告 TR-276 (昭和 46/12)

This document is provided by JAXA.

表 3 振動試験結果一覧表
状態A（燃料：空）

加振方法		共振特性			振動形態	
加振点	加振方向	振動数, Hz	減衰率, g	図	形態	図
縦フレーム	水平	3.3			ヨーイング	22
		7.7			ロール・ヨーカップリング	23
		9.0			計器板横振れ	
		9.8	0.13	7	曲げ1次	22
		11.0			ジャイロテーブル共振	
		14.0	0.044	7	曲げ2次	22
		18.8	0.048	7	曲げ3次	22
		21.8			曲げ4次	22
		23.7	0.036	7	曲げ5次	22
		31.0			ロッド共振	
	上下	8.0			ピッチ・ロールカップリング	24
		15.2	0.046	8	曲げ1次	24
		17.4	0.018	8	曲げ2次	24
		19.7			曲げ3次	24
	捩れ	20.8	0.152	9	捩れ	25
横フレーム	水平	3.3	0.067	10	ヨーイング	26
		12.3	0.042	10	曲げ1次	26
		13.8	0.157	10	曲げ2次	26
		15.7	0.073	10	曲げ3次	26
	上下	8.3	0.042	11	ローリング	27
		12.0			テレビカメラ共振	
		17.2	0.061	11	曲げ1次	27
		18.0		11	バッテリ共振	
		27.3	0.051	11	曲げ2次（捩れ連成）	28
	捩れ	24.4	0.094	12	捩れ	29

This document is provided by JAXA.

表 4　振動試験結果一覧表
状態B（燃料：満）

加振方法		共振特性			振動形態	
加振点	加振方向	振動数，Hz	減衰率，g	図	形態	図
縦フレーム	水平	13.5	0.031	13	曲げ1次	30
		18.0	0.041	13	曲げ2次（捩れ連成）	31
		24.2	0.040	13	曲げ3次	30
		31.0			ロッド共振	
	上下	6.35	0.073	14	ピッチング	32
		13.9	0.036	14	曲げ1次	32
		15.3			曲げ2次（前方エンジンピッチング）	32
		17.0			曲げ3次（エンジンピッチング）	32
		25.0	0.025	14	曲げ4次（捩れ連成）	32
		29.3	0.029	14	曲げ5次（捩れ連成）	32
横フレーム	水平	11.7	0.032	15	曲げ1次	33
		13.3	0.030	15	曲げ2次	33
		14.8	0.038	15	曲げ3次	33
		17.5	0.035	15	曲げ4次	33
		32.5			抽気配管共振	33
		43.0			抽気配管，ロッド共振	
		49.0			抽気配管，ロッド共振	
	上下	6.9	0.027	16	ローリング	34
		16.7	0.130	16	曲げ1次	34
		28.8	0.044	16	抽気配管共振	34
		70.0			燃料排出管共振	
		90.0			トラス部分的共振	
	捩り	22.8	0.016	17	捩れ1次	35

This document is provided by JAXA.

表 4 振動試験結果一覧表
状態C（脚固定，燃料：空）

加振方法		共振特性			振動形態	
加振点	加振方向	振動数，Hz	減衰率，g	図	状態	図
縦フレーム	上下	10.5	0.087	18	曲げ1次	36
		16.8	0.072	18	曲げ2次（横フレーム曲げ連成）	36
		17.3	0.059	18	曲げ3次（横フレーム曲げ連成）	36
		19.8			曲げ4次	36
	捩り	27.7	0.072	19	捩れ1次	37
横フレーム	上下	11.3	0.035	20	ローリング	38
		16.5	0.039	20	曲げ1次	38
	捩り	23.7	0.081	21	捩れ1次	39
		28.6	0.032	21	捩れ2次	39

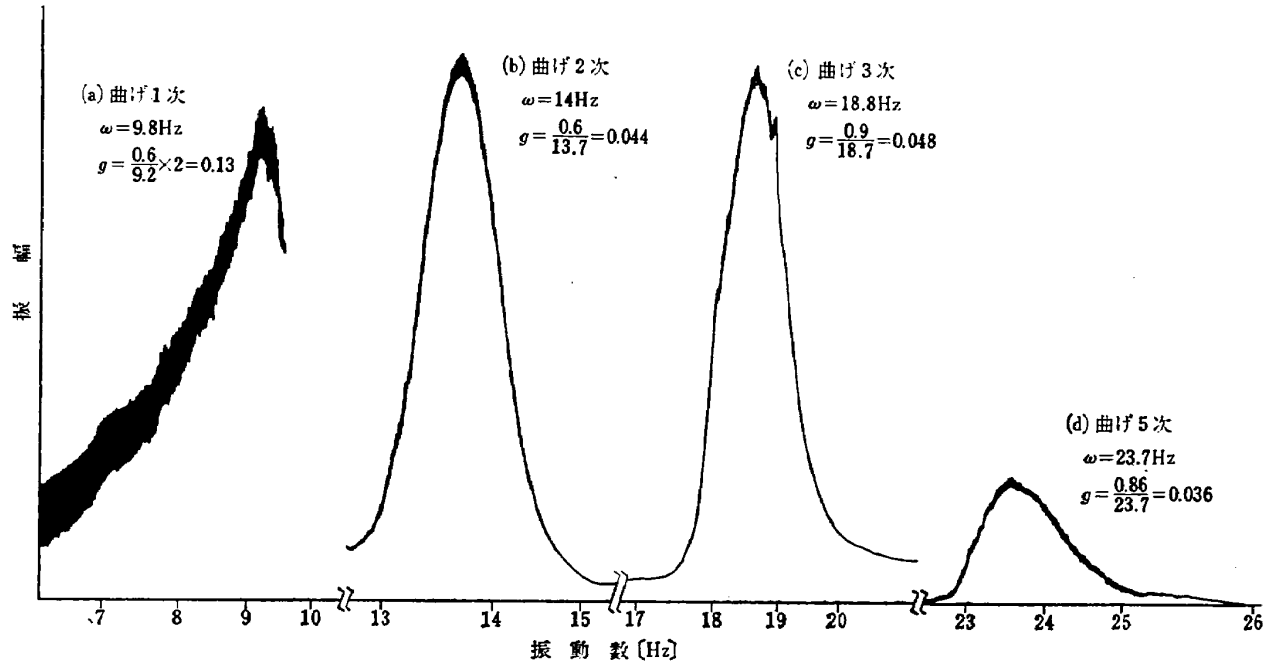


図 7 縦フレーム水平加振共振曲線（状態A）

This document is provided by JAXA.

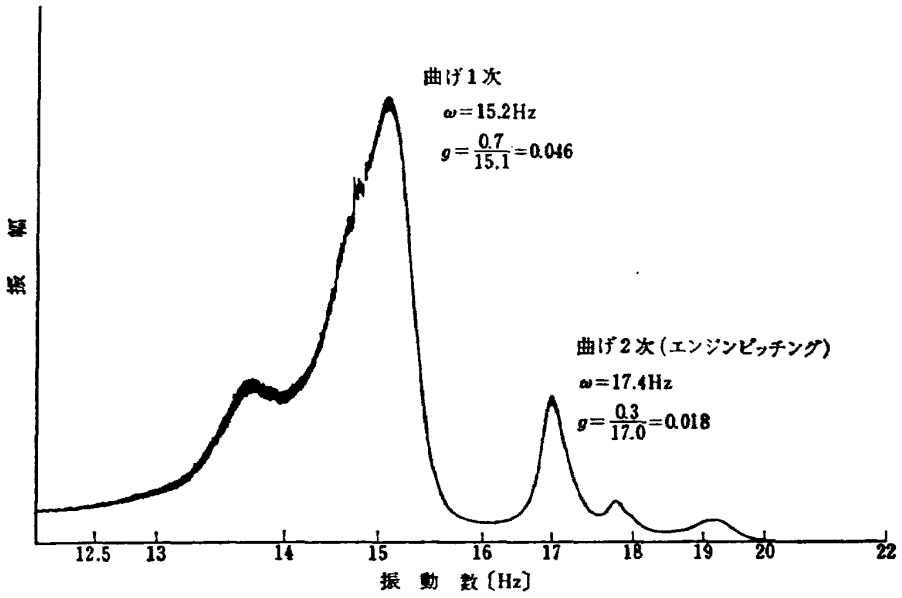


図 8 縦フレーム上下加振共振曲線（状態A）

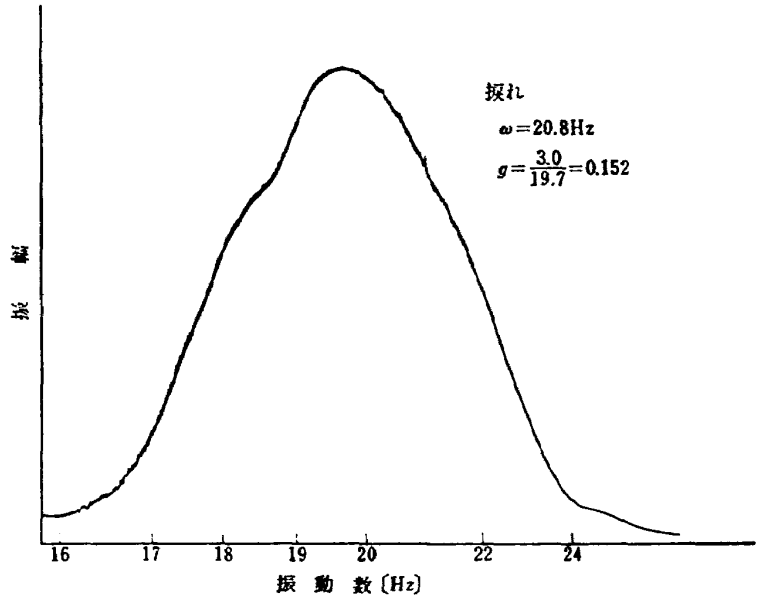


図 9 縦フレーム捩り加振共振曲線（状態A）

This document is provided by JAXA.

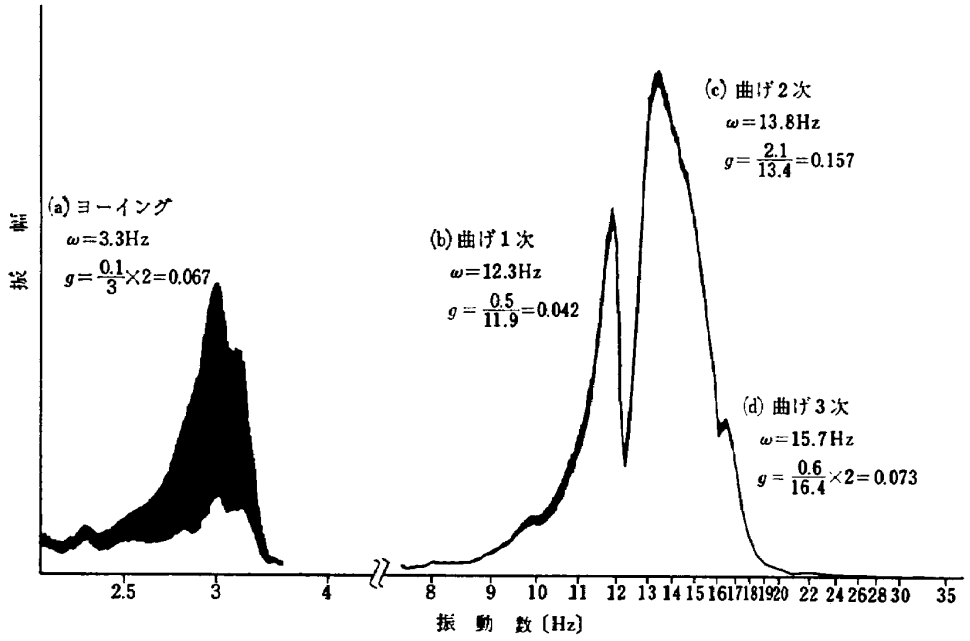


図 10 横フレーム水平加振共振曲線（状態A）

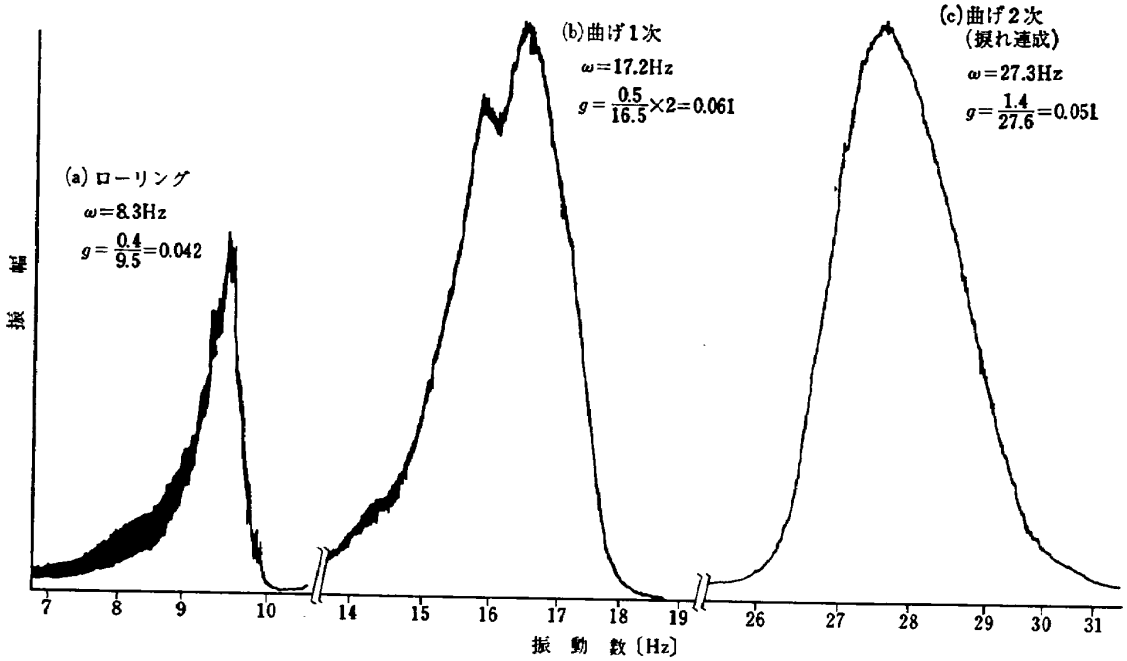


図 11 横フレーム上下加振共振曲線（状態A）

This document is provided by JAXA.

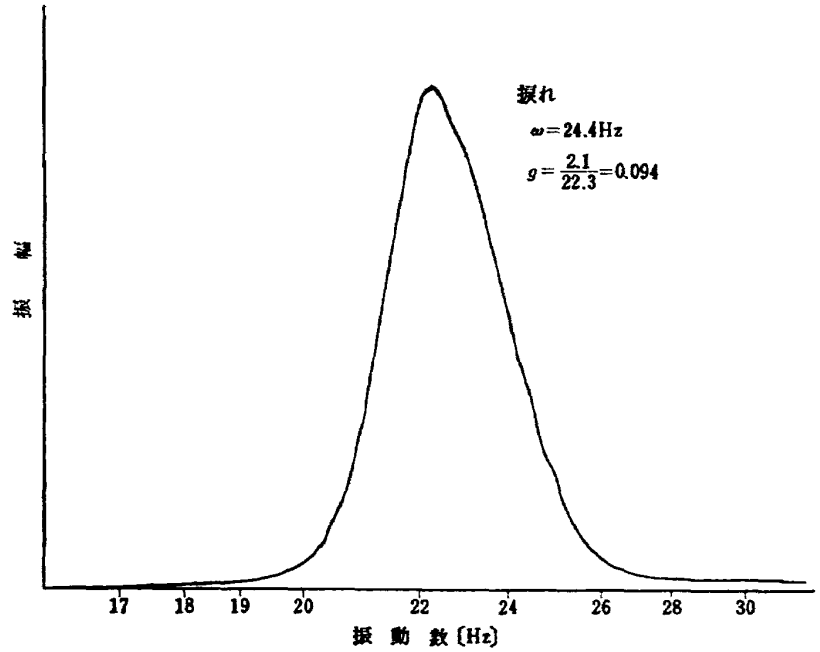


図 12 横フレーム捩り加振共振曲線（状態A）

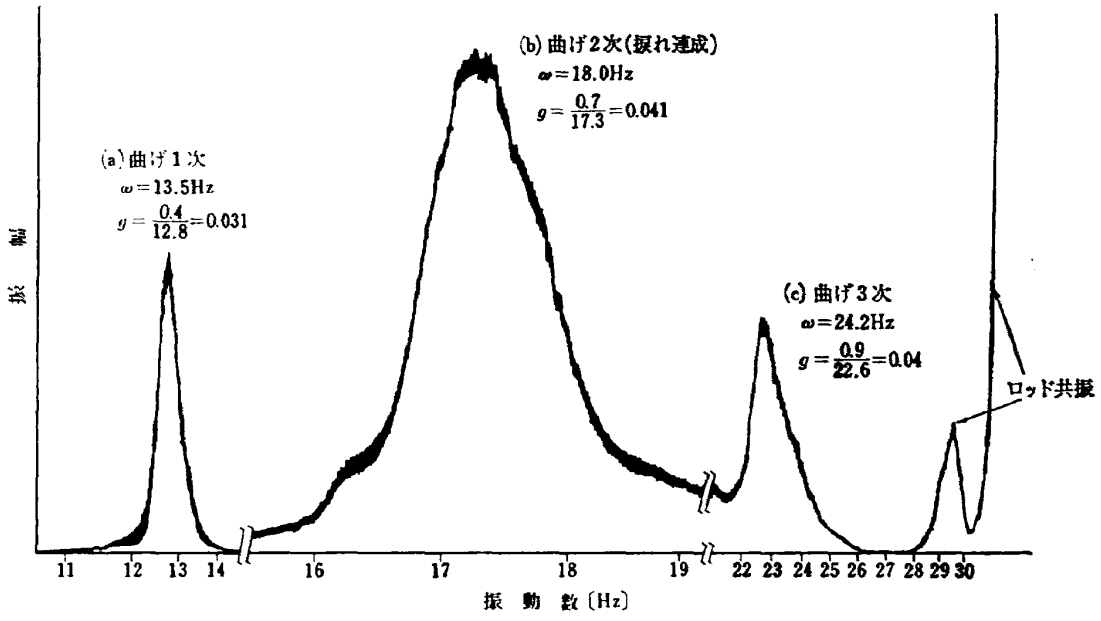


図 13 縦フレーム水平加振共振曲線（状態B）

This document is provided by JAXA.

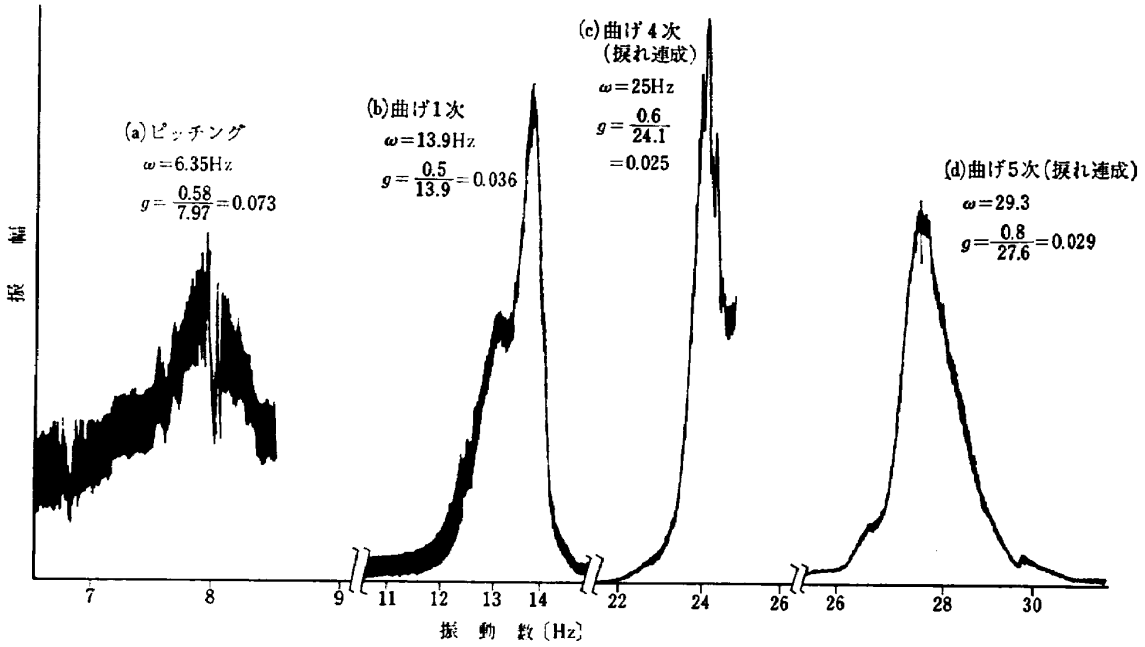


図 14 縦フレーム上下加振共振曲線（状態B）

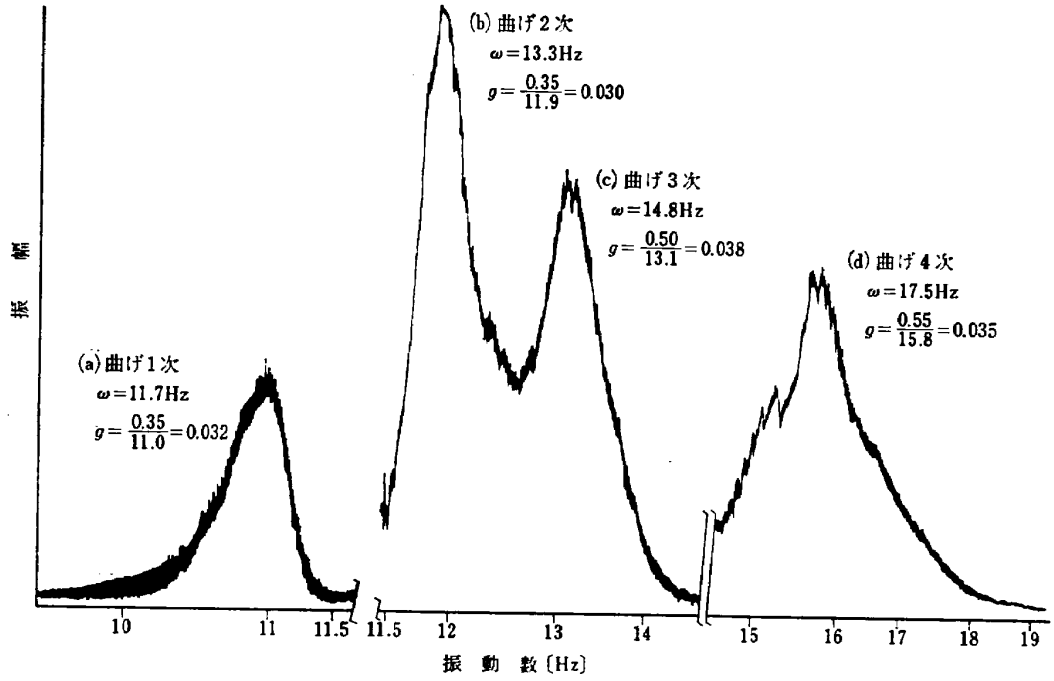


図 15 横フレーム水平加振共振曲線（状態B）

This document is provided by JAXA.

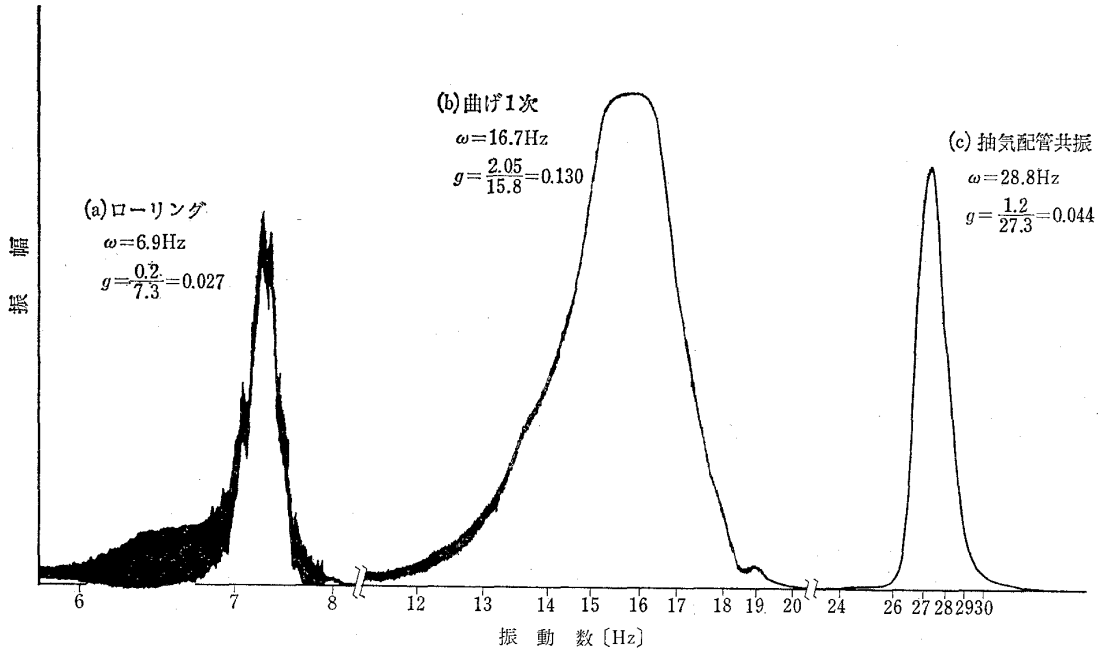


図 16 横フレーム上下加振共振曲線（状態B）

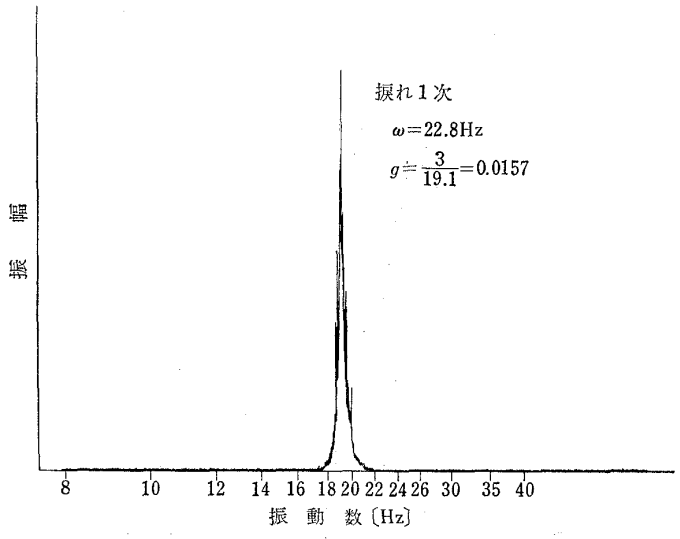


図 17 横フレーム捩り加振共振曲線（状態B）

This document is provided by JAXA.

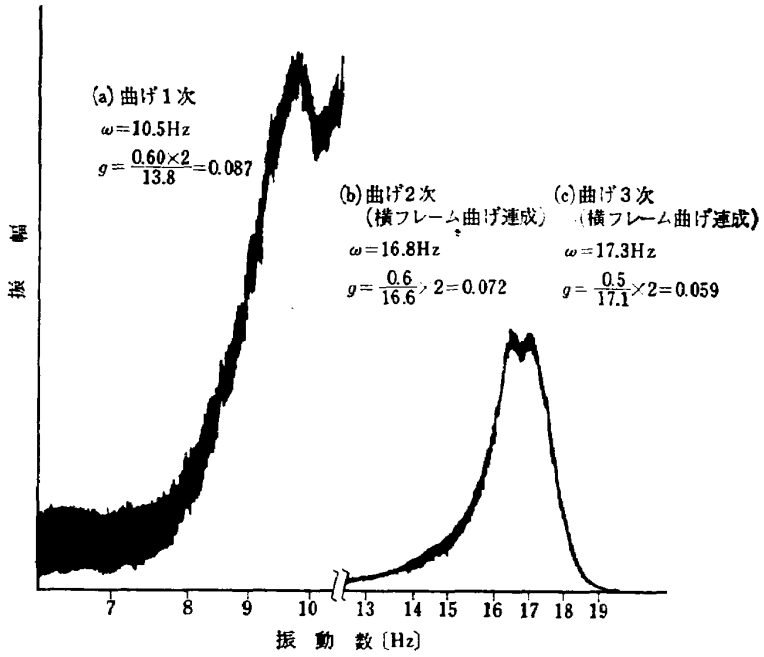


図 18 縦フレーム上下加振共振曲線（状態C）

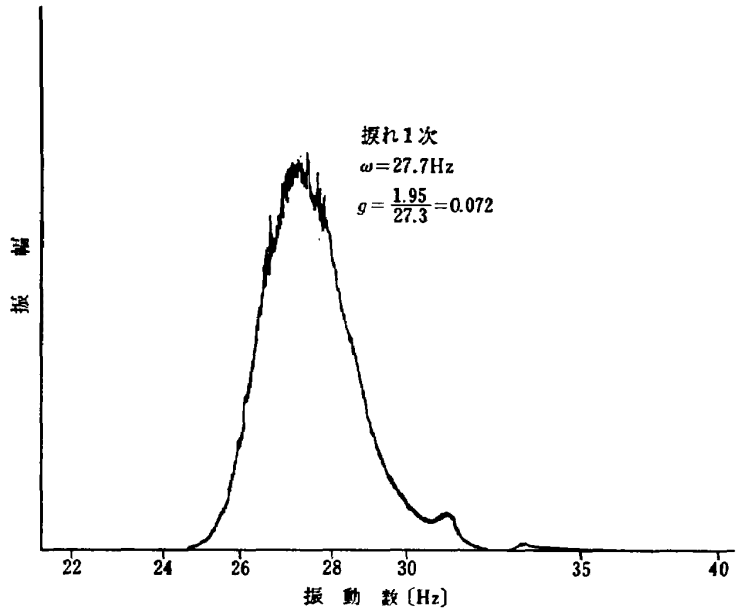


図 19 縦フレーム捩り加振共振曲線（状態C）

This document is provided by JAXA.

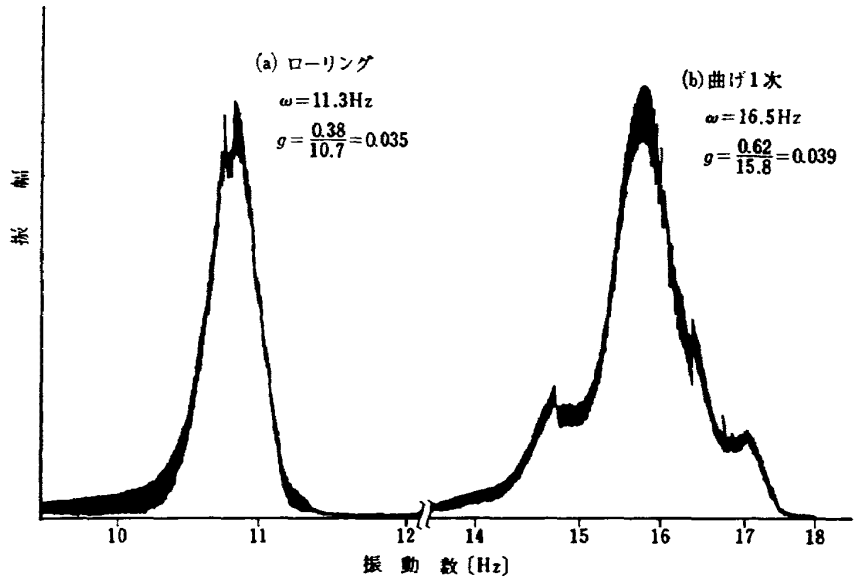


図 20 横フレーム上下加振共振曲線（状態C）

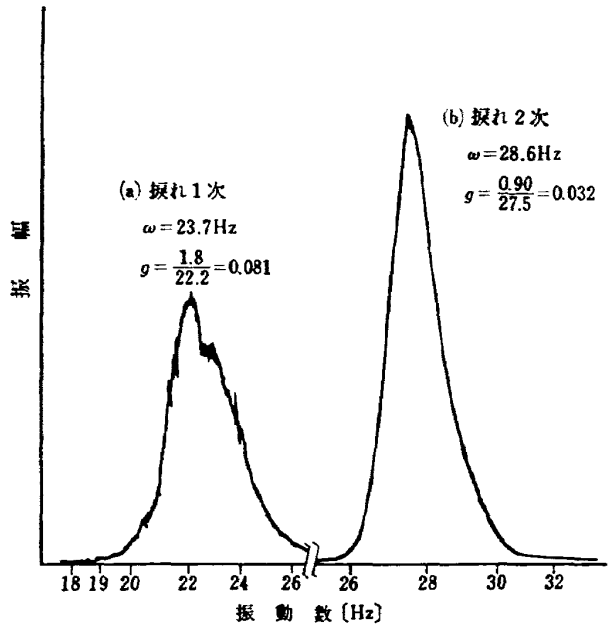


図 21 横フレーム捩り加振共振曲線（状態C）

This document is provided by JAXA.

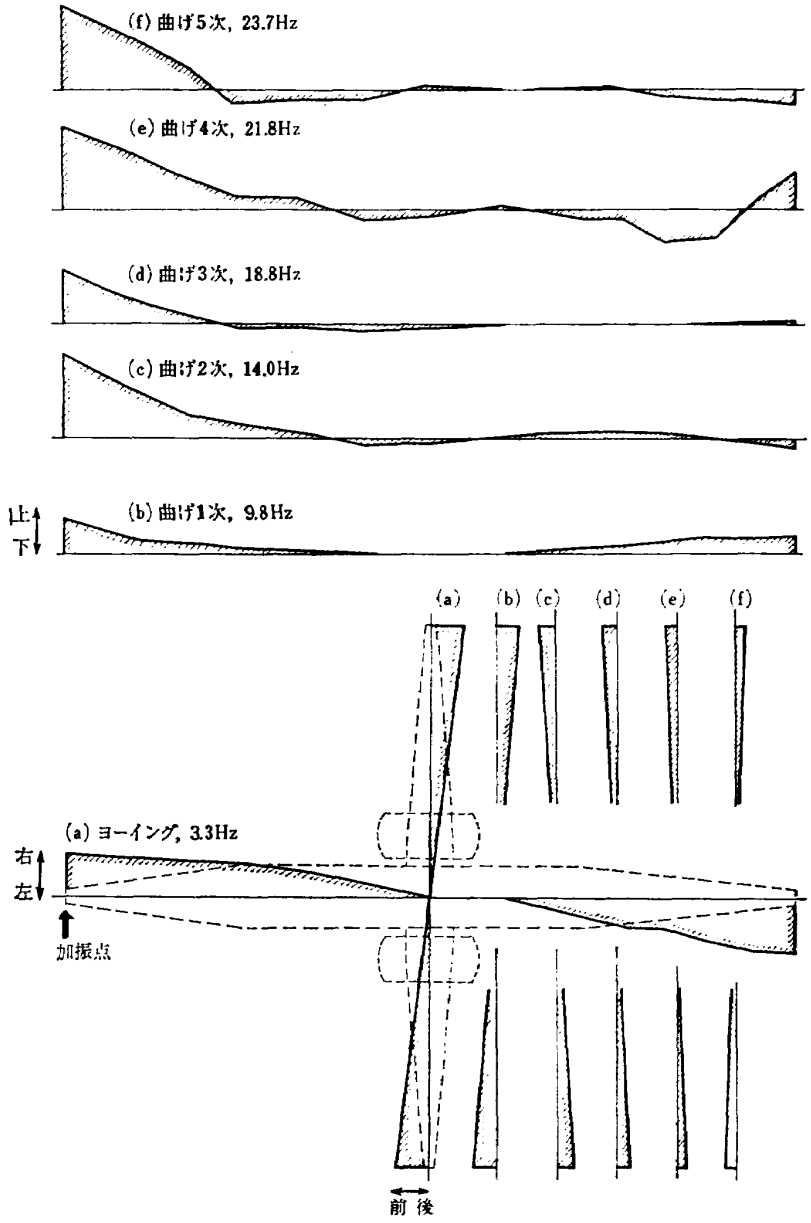


図 22 縦フレーム水平加振振動形態-1（状態A）

This document is provided by JAXA.

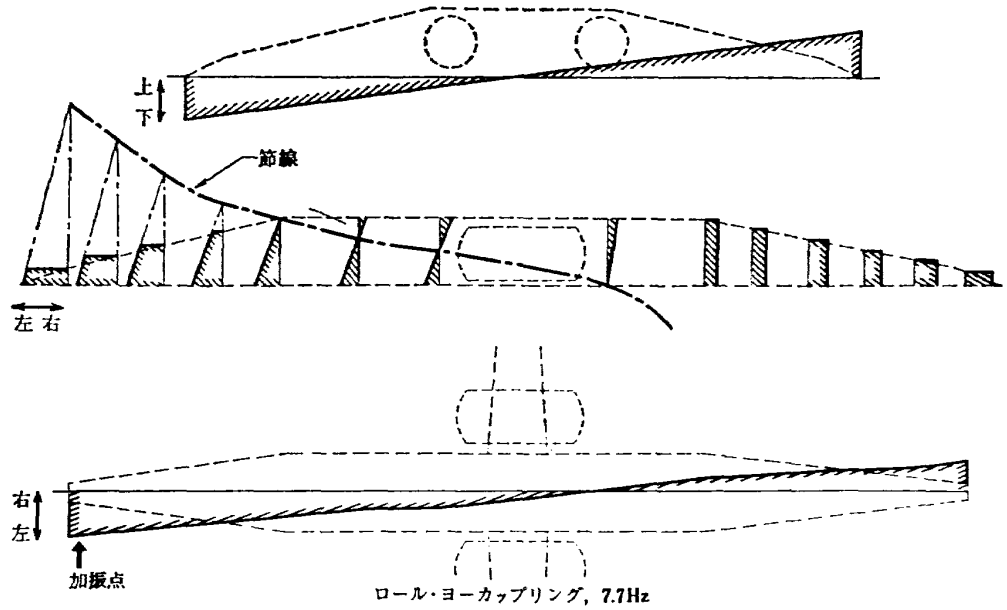


図 23 縦フレーム水平加振振動形態-2（状態A）

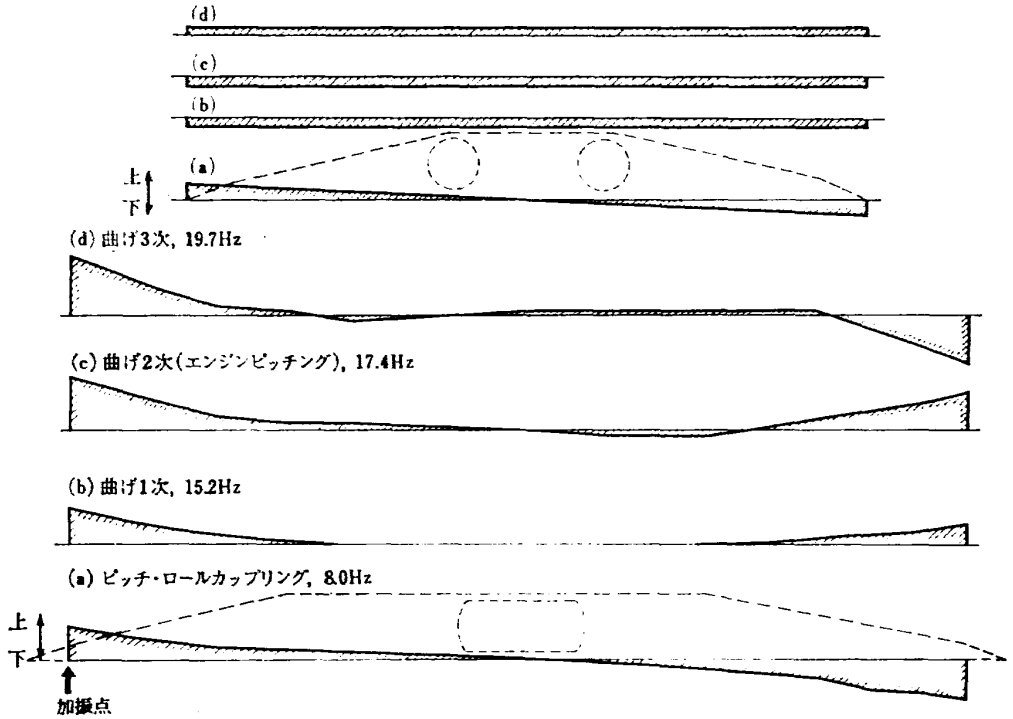


図 24 縦フレーム上下加振振動形態（状態A）

This document is provided by JAXA.

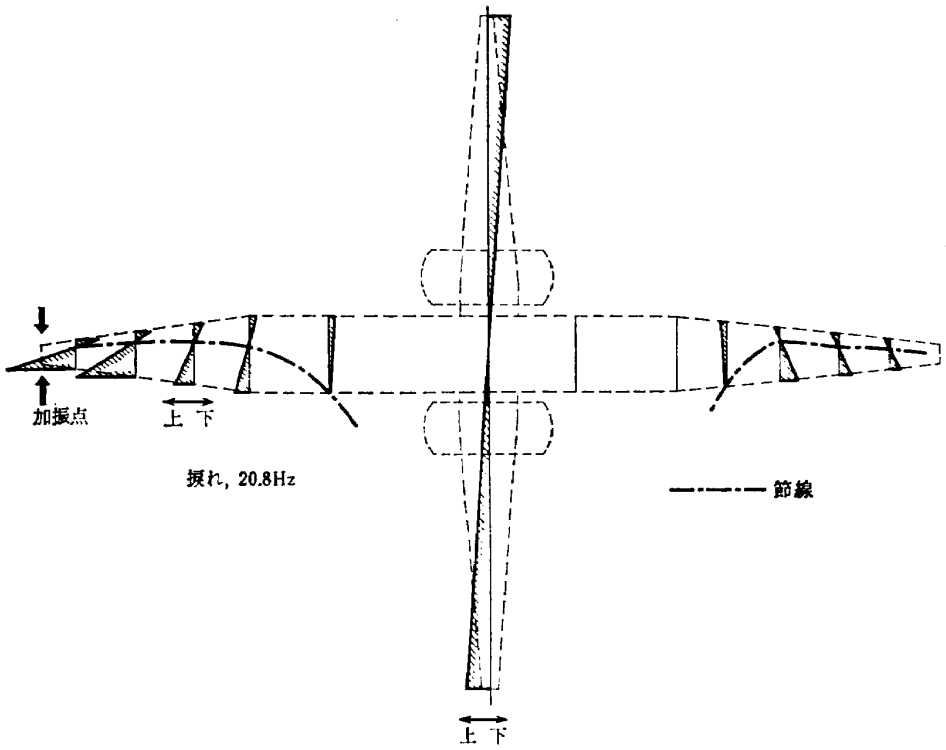


図 25 縦フレーム捩り加振振動形態（状態A）

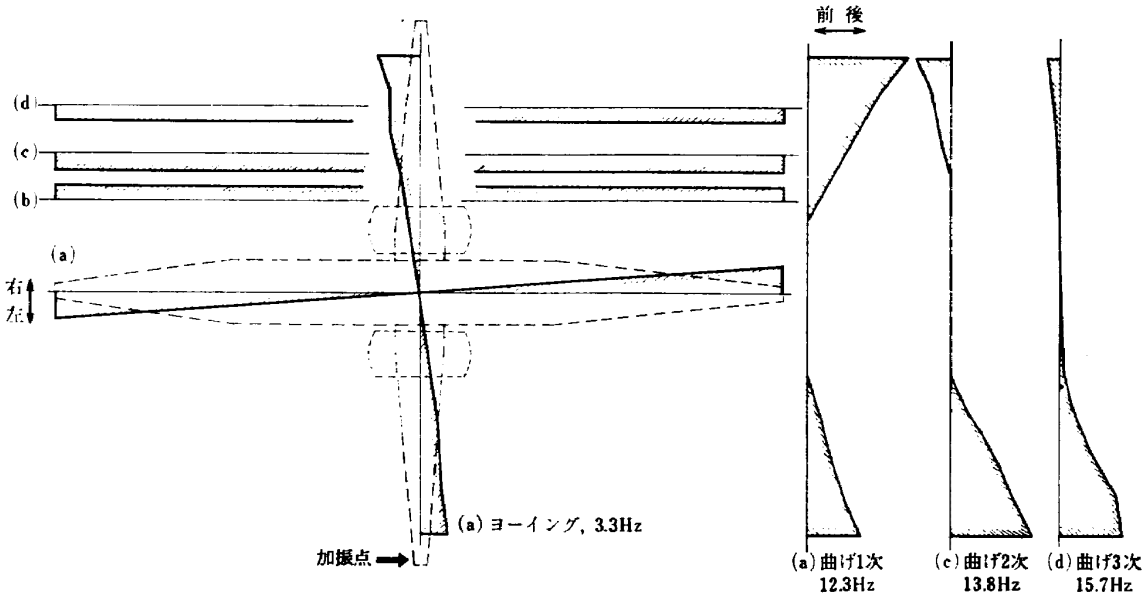


図 26 横フレーム水平加振振動形態（状態A）

This document is provided by JAXA.

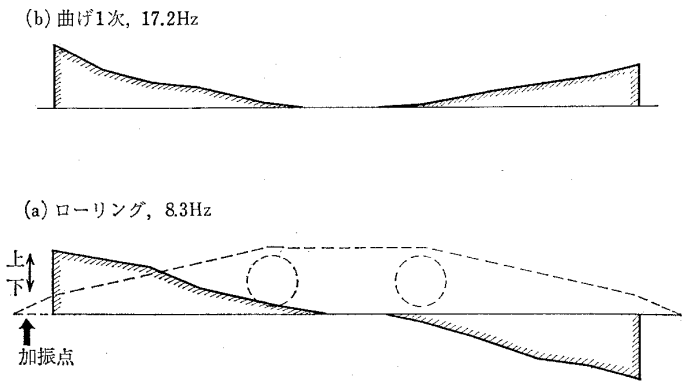


図 27 横フレーム上下加振振動形態-1（状態A）

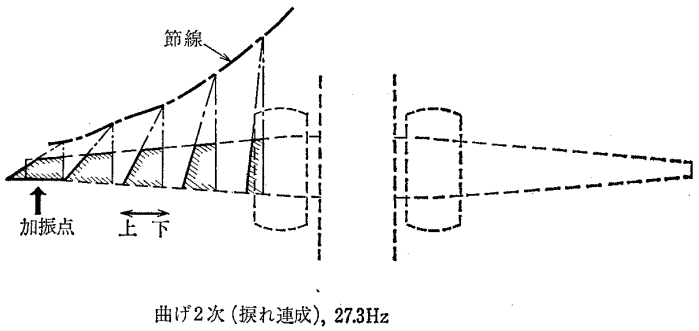


図 28 横フレーム上下加振振動形態-2（状態A）

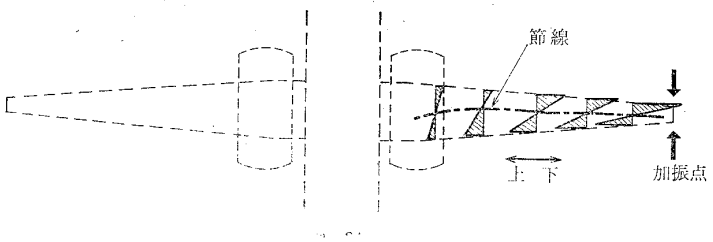


図 29 横フレーム捩り加振振動形態（状態A）

This document is provided by JAXA.

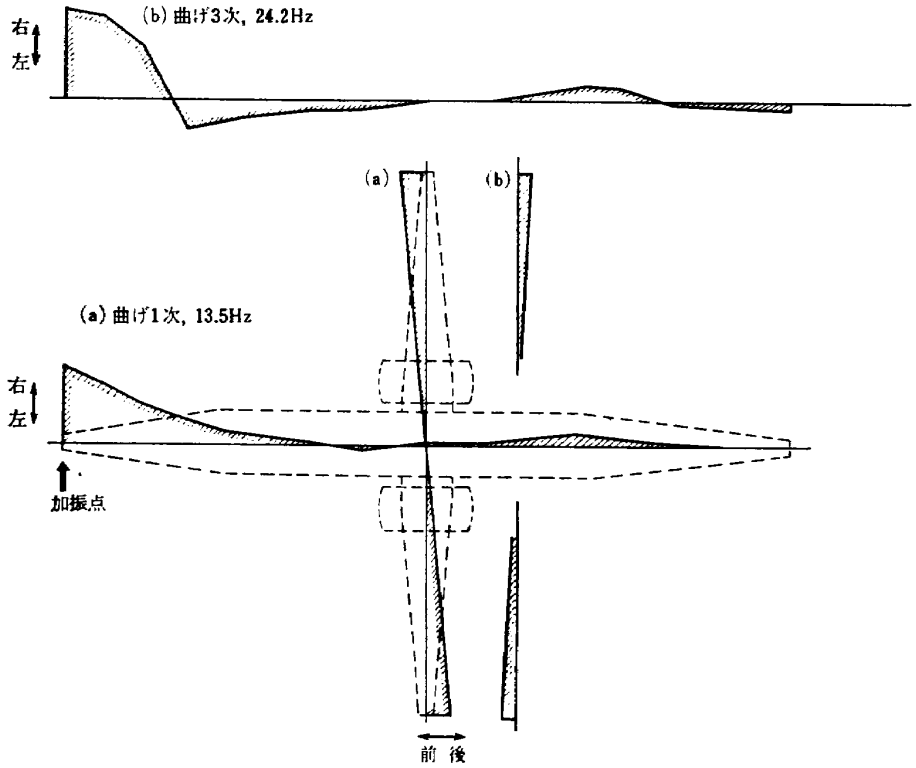


図 30 縦フレーム水平加振振動形態-1（状態B）

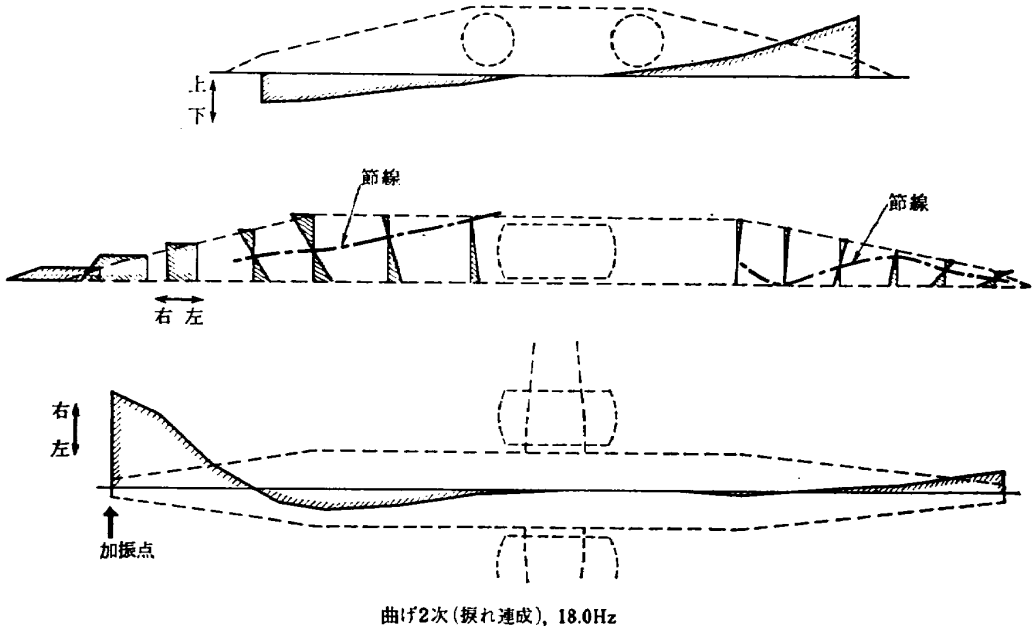


図 31 縦フレーム水平加振振動形態-2（状態B）

This document is provided by JAXA.

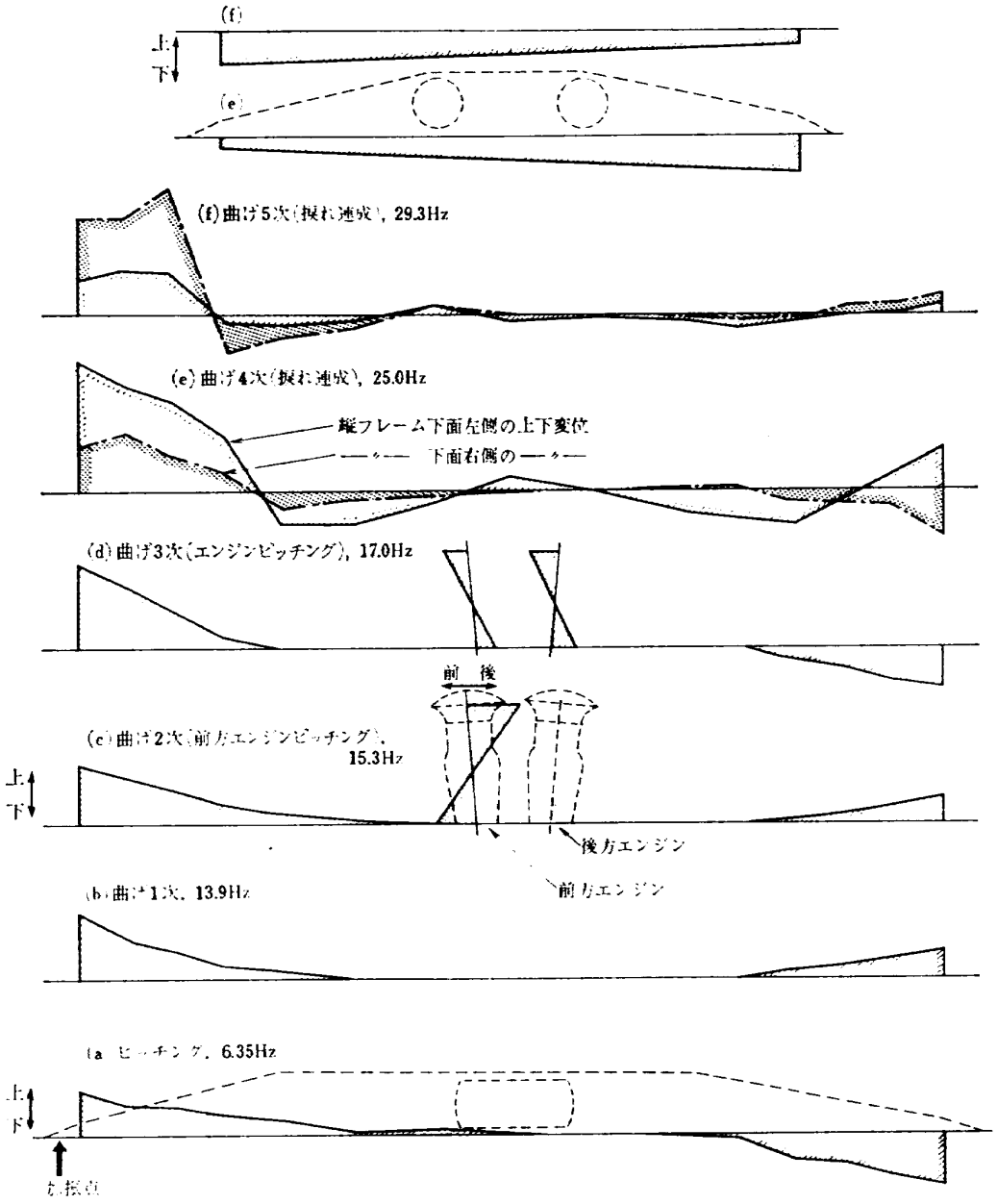


図 32 縦フレーム上下加振振動形態（状態B）

This document is provided by JAXA.

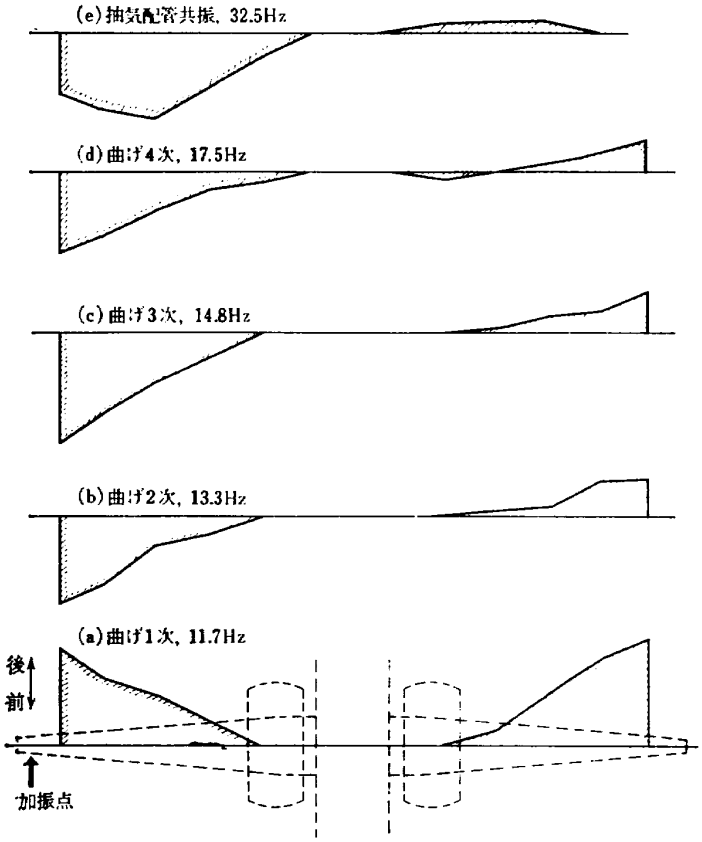


図 33 横フレーム水平加振振動形態（状態B）

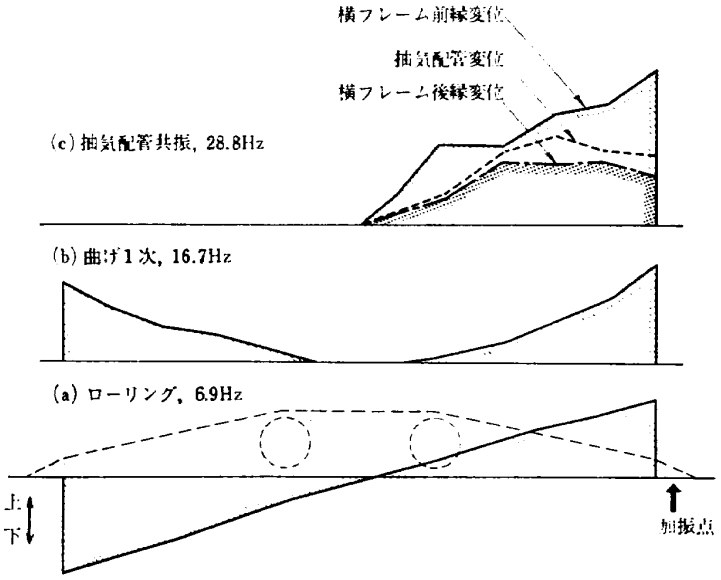


図 34 横フレーム上下加振振動形態（状態B）

This document is provided by JAXA.

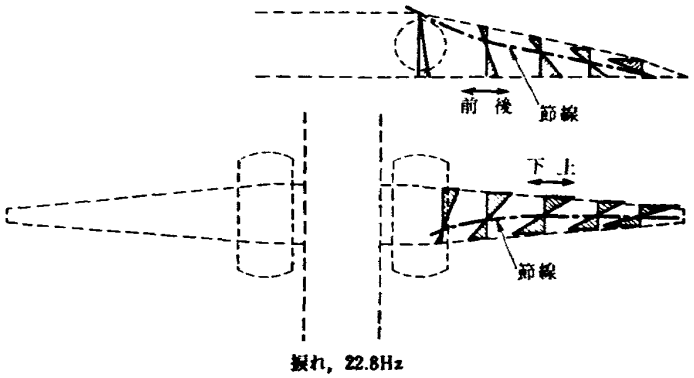
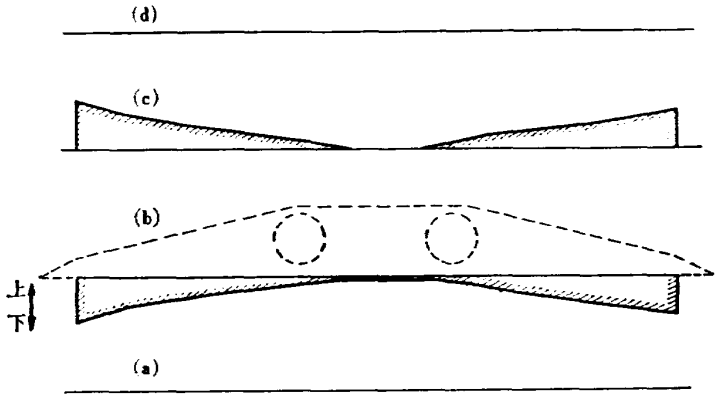


図 35 横フレーム捩り加振振動形態（状態B）



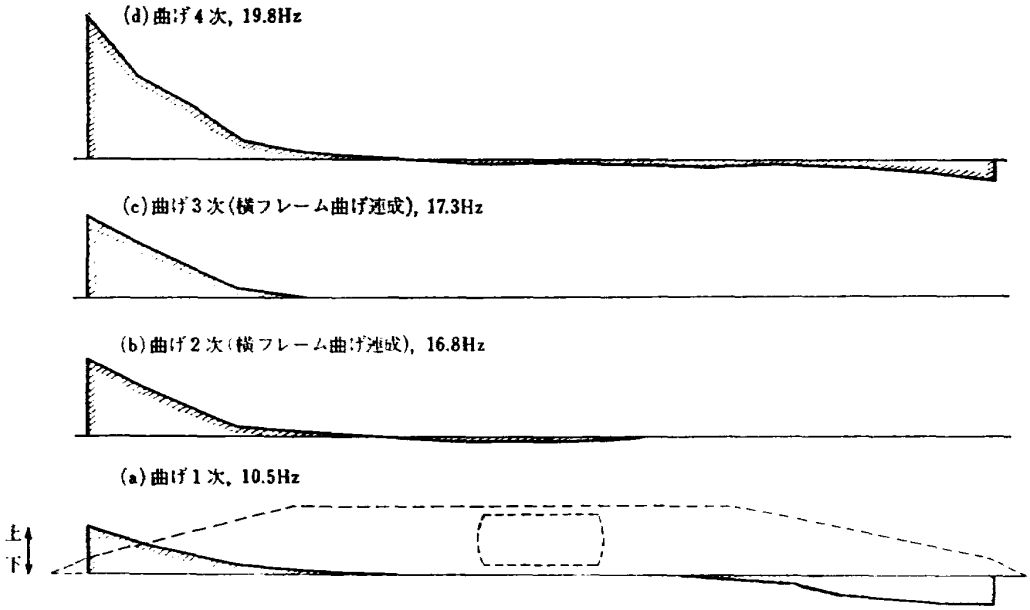


図 36 縦フレーム上下加振振動形態（状態C）

This document is provided by JAXA.

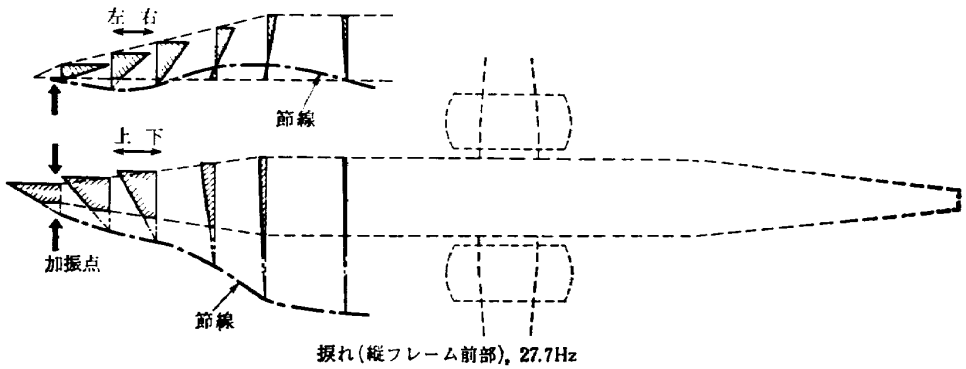


図 37 縦フレーム捩り加振振動形態（状態C）

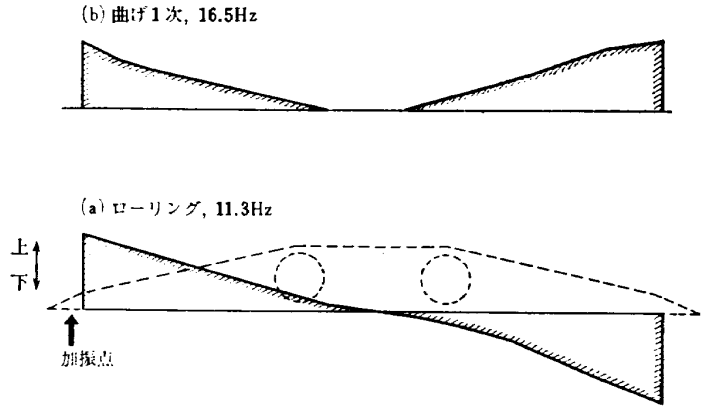


図 38 横フレーム上下加振振動形態（状態C）

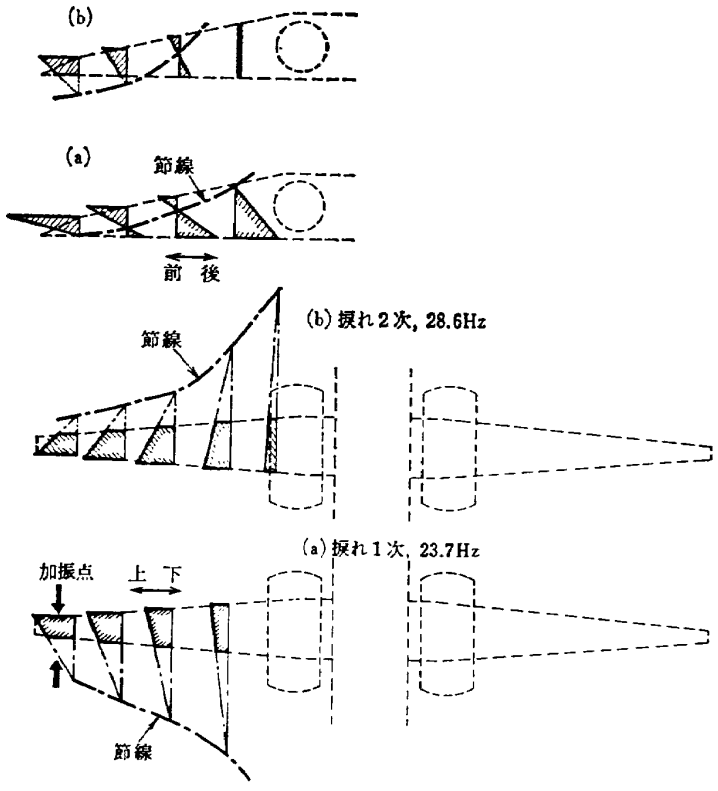


図 39 横フレーム捩り加振振動形態（状態C）

This document is provided by JAXA.

TM-216	安定板を有する固体ロケットの操舵要求軽減法	1972年2月	大石　晃，山中龍夫 冠　昭夫
TM-217	フライングテストベッド自動安定装置性能試験（I） —製作時性能試験—	1972年7月	小川敏雄，甲斐忠夫 十河　弘，増原　恢
TM-218	フライングテストベッド自動安定装置性能試験（II） —実験前性能試験—	1972年7月	小川敏雄，甲斐忠夫 十河　弘，増原　恢
TM-219	フライングテストベッド脚性能試験	1972年5月	渋谷昭義，川崎純男
TM-220	フライングテストベッドテレメータ性能試験	1972年5月	小野幸一，十河　弘 池上　博
TM-221	ロケット模型の動安定微係数の測定	1972年5月	谷　　番，高島一明 関根英夫，中村正剛
TM-223	自由飛行模型 FFM-10 の強度について	1972年5月	河崎俊夫，斎藤秀夫 塙　武敏，多田保夫 林　洋一，戸田　勧 日下和夫，越出慎一 築地恒夫，中井暎一 森田甫之，菊地孝男 高橋　実，東久保正年
TM-224	フライングテストベッド油圧系統試験	1972年5月	藤枝郭俊，十河　弘 川崎純男，中村公昭
TM-225	ストラップダウン方式の慣性機器誤差によって生ずる飛しょう径路誤差の一考察	1972年5月	大月正男，新宮博公 鈴木孝雄
TM-226	フライングテストベッドの機体強度剛性試験	1972年7月	渋谷昭義，丸山　茂 川崎純男
TM-227	フライングテストベッドの操縦系統試験	1972年7月	藤枝郭俊，牧野　健 川崎純男
TM-228	航空用ガスタービンの高圧形燃焼器の予備実験	1972年7月	鈴木邦男，石井浅五郎
TM-229	液体酸素中におけるころがり軸受の性能	1972年7月	宮川行雄，関　勝美
TM-230	航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究（2）	1972年7月	斎藤　隆，鈴木邦男

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料231号

昭和47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町1880
電話武蔵野三鷹(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

This document is provided by JAXA.

Printed in Japan

This document is provided by JAXA.