

UDC 531.15.66
534.14
536.58

航空宇宙技術研究所資料

TM-99

搭載機器用環境試験装置の特性

大月正男・鈴木孝雄
田畑浄治・円居繁治

1967年2月

航空宇宙技術研究所

既 刊 資 料

TM-30	二段式ロケット飛しょう体の揚力および圧力中心推定法	1964年3月	小橋安次郎, 宮沢政文
TM-31	亜音速ジェット輸送機の遷音速風洞における試験	1964年3月	河崎俊夫, 竹内理
TM-32	遷音速風洞の防音	1964年4月	牛田健二, 高橋宏
TM-33	非定常境界層の遷移の研究に使用された定温度型熱線風速計について	1964年4月	榎並敬之, 山本稀義
TM-34	極超音速風洞ノズルの境界層補正について	1964年5月	長洲秀夫
TM-37	気体の不完全性を考慮した極超音速風洞ノズルの設計計算法	1964年5月	毛利浩
TM-38	AGARD-A 標準模型の超音速三分力試験	1964年6月	高木廣治, 斎藤秀夫
TM-39	相似極超音速流におかれた半球面上の境界層の遷移に及ぼす粗さと冷却の結合影響	1964年7月	高石原久蔵, 石井孝雄
TM-40	国産中型輸送機 YS-11 胴体疲労試験 (I)	1964年9月	竹内和之, 川島矩郎
TM-41	抵抗線歪ゲージのゲージ率測定	1964年10月	田畑浄治, 大坪孔治
TM-42	実在着氷条件の測定について	1964年10月	滝沢昌次, 田寺木一
TM-44	高負荷燃焼器 (アニュラ模型) の実験結果	1964年12月	大塚貞吉, 鈴木邦男
TM-46	翼洞結合金具の疲労特性	1964年12月	松本宏, 石井浅五郎
TM-47	ローター後流中のヘリコプター胴体の抵抗について	1965年1月	広木内和, 山中国雅俊一
TM-48	極超音速風洞用ペブル加熱器の予備実験	1965年2月	幸尾治朗, 岡遠一
TM-49	Queen-Air 機の失速特性について	1965年2月	平林一, 橋本登崇
TM-50	LS-A 型ロケットの曲げ剛性および振動試験について	1965年2月	山口富夫, 岡遠一
TM-51	超音速風洞空力データ表示記録装置	1965年5月	幸井祐之, 鎌田幸武
TM-53	ベクトルのノルムと行列のノルム	1965年5月	中井咲夫, 堀高島明史
TM-54	熱衝撃試験用風洞整備試験	1965年5月	谷原亘利, 近藤洋
TM-55	ロケット模型風洞試験における超音速相似則の応用	1965年5月	板垣芳雄
TM-56	2024-T4 アルミニウム合金平滑丸棒の常温回転曲げ疲労試験	1965年5月	武藤洋治郎, 池田為治
TM-57	極超音速における軸対称物体の前面抵抗	1965年5月	坂元思無邪, 光山敏雄
TM-58	試験用飛しょう体の超音速風洞試験	1965年7月	河崎俊夫, 石田誠
TM-59	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験 (I)	1965年7月	曾我男
TM-60	吹出式超音速風洞における実験データの処理方式について (II)	1965年8月	斎藤秀夫, 木村友昭
TM-61	クイーンエア機の風洞試験	1965年9月	近藤博, 増田惣平
TM-62	高温歪ゲージの温度特性試験	1965年9月	原亘利, 高島明夫
TM-63	2024-T3アルミニウム合金の有孔補強平板の軸荷重による疲労特性	1965年9月	関根英夫, 中一正
TM-64	応力集中による材料の疲れ強さに関する一実験 (I)	1965年10月	戸川保子, 矢沢健司
TM-65	ジェットエンジンの翼の固有振動に関する実験	1965年10月	塚野雄一, 田村征一
TM-69	質量分析計による水蒸気を含む試料のガス分析	1965年10月	佐野四郎, 能村
TM-71	可動アイアンバードの構造および機能	1965年10月	別府信安, 江川幸一郎
TM-72	地上付近の風の影響による小型ロケットの姿勢角変化	1965年10月	飯田宗四郎
TM-73	固定端を有する薄肉円筒殻の自由振動について	1965年11月	池田為治, 坂元思無邪
TM-74	回転振動試験装置の計画, 構造および特性	1965年11月	光山敏雄, 宮地敏雄
		1965年12月	武内澄夫, 堀内正司
		1965年12月	星谷昌二, 計測部
		1965年12月	斎藤浩子, 石黒登美子
		1966年1月	中村第一, 田寺木一
		1966年2月	戸川準人, 泉日出夫
		1966年2月	武内澄夫, 宮地敏雄
		1966年2月	星谷昌二

搭載機器用環境試験装置の特性*

大月正男** ・ 鈴木孝雄**

田畑浄治** ・ 円居繁治**

1. ま え が き

当所に設備されている環境試験装置は航空機搭載用のみならずロケット搭載用の各種の機器の試験に実用されているが、装置の能力を明らかにして、環境試験を実施する際の基礎とし、あるいは将来新しい設備を整備する際の参考データーを提供するため、各装置の諸特性の測定を行なった。測定の結果ならびにそれに対する考察をまとめて報告する。

所有している環境試験装置は次の4基である。

1. 高度・温度・湿度試験槽
2. 振動試験機（動電式）
3. 衝撃試験機（落下形・砂・鉛式）
4. 加速度試験機（回転遠心式）

これらはいずれも搭載機器専用として選定したもので、容量は比較的小形であるが、動作性能がすぐれかつ取り扱いが容易という点に重点をおいた。

また環境試験の規定として広く採用されているものに、MIL-STD-202B と MIL-E-5272Cがあり、各試験装置とも、この規定の実施可能な能力を持つよう考慮した。

以下に、それぞれの装置について特性を述べるとともに、参考として、航空機器についての一般的な環境条件、および主としてMILによる試験法の概略を付録として記した。

2. 高度，温度，湿度試験槽

2.1 構成および能力

(1) 構成

本試験槽は、試験槽本体と制御記録装置からなり、その外観を図2.1に、系統を図2.2に示す。

* 昭和41年9月21日

** 計測部

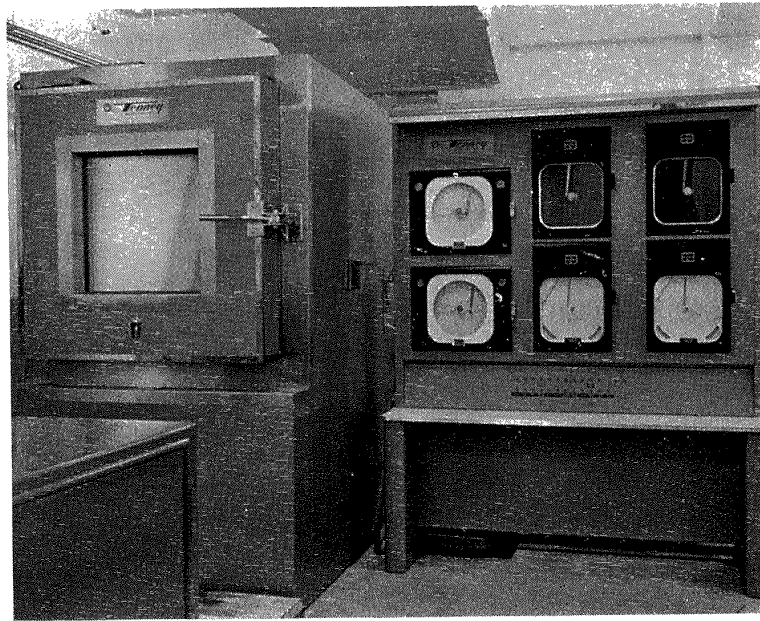


図2.1 高度・温度・湿度試験槽外観

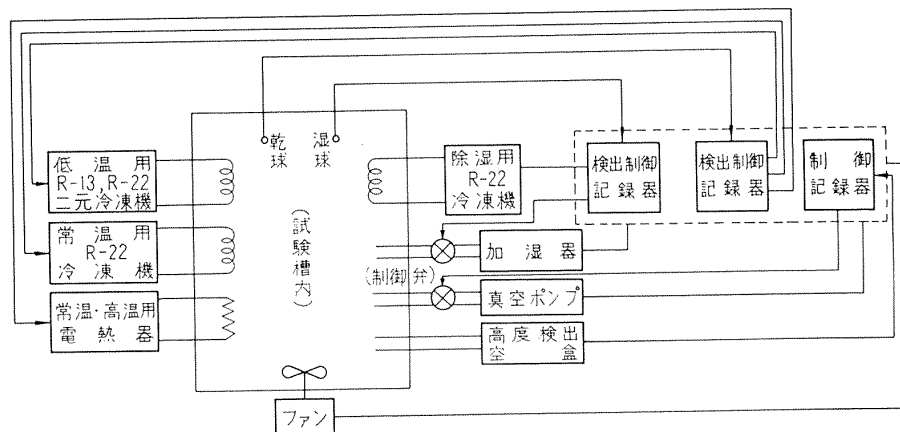


図2.2 高度・温度・湿度試験槽構成図

本試験槽の制御方式は、空盒、熱電対等の検出要素、レバー、ノズル、ダンパー用空盒等の比例要素からなる空気式比例制御系を用いて、空気圧で最終制御素子（空盒とマイクロ・スイッチの組合せ）を動作させ、電熱器、冷凍機、真空ポンプ用制御弁と加湿器（蒸気発生器）用制御弁をオン・オフ制御するものである。

(2) 能力

試験槽内容積： $90\text{cm} \times 90\text{cm} \times 120\text{cm} = 0.972\text{m}^3$

高度： 海面上～45,450m (150,000ft)

温度： $-73^\circ\text{C} (-100^\circ\text{F}) \sim +149^\circ\text{C} (+300^\circ\text{F})$

相対湿度： 最低湿度 $+26.7^\circ\text{C} (+80^\circ\text{F}) \sim +85^\circ\text{C} (+185^\circ\text{F})$ で20%。ただし 71°C 付近では5%が可能

最高湿度 $+3.3^\circ\text{C} (+38^\circ\text{F}) \sim +85^\circ\text{C} (+185^\circ\text{F})$ で95%

低温度平衡を維持できる発熱量

温度	発熱体電力
-53.9°C(-65°F)	: 2,000W
-65°C(-85°F)	: 1,500W
-73.3°C(-100°F)	: 1,000W

本試験槽は、MIL-STD-202B および MIL-E-5272C に基づく高度、温度、湿度試験、およびそれらの組合せサイクル試験を行なうことを目的としたものである。

2.2 高度設定特性

高度に応じた大気圧を実現するため、容量 40ft³/min の回転型真空ポンプが用いられている。海面から高度 45,450m (150,000ft) の状態に達するに要する時間は図2.3に示すように25分以内である。

高度制御記録装置は、海面から 60,000ft (18,300m) ままで、60,000ft から 150,000ft までの二範囲に分けてプログラム設定および指示記録を行なうようになっている。検出要素として測定空盒が用いられており、温度湿度の影響をさけるため槽から約 1 m離れた場所にパイプで接続されているので、応答はあまりよくなく、また制御弁がオン・オフ動作であるため、プログラム制御の場合

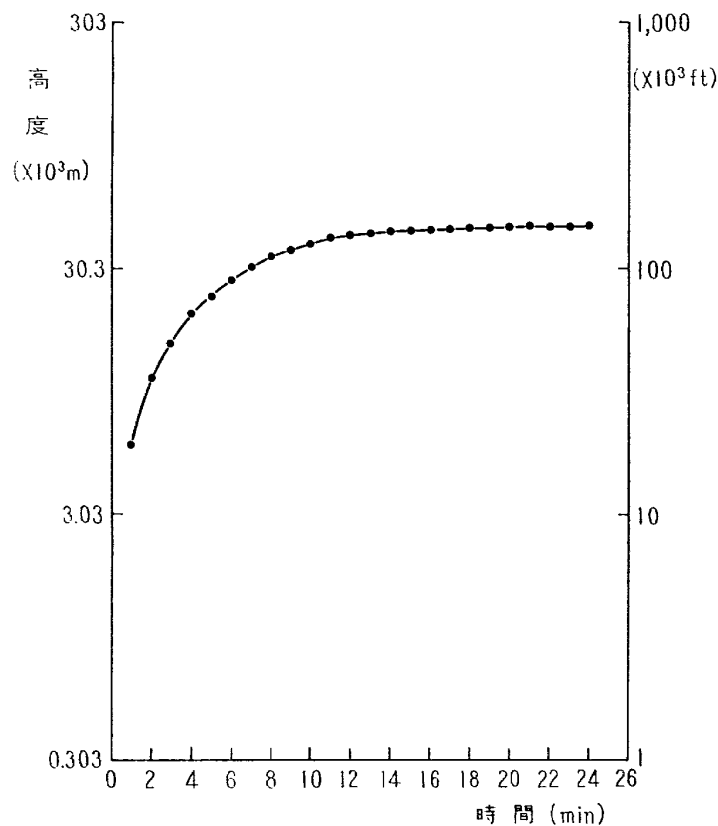


図2.3 設定高度に対する応答

は制御値の変動が大きい。しかし外気の漏洩に対して一定気圧に制御する場合は、動作は円滑である。図 2.4 はプログラム制御の場合の記録チャートを示す。

高度指示計の誤差チェックは、高度指示値に対応する標準大気を用いた圧力換算値と、水銀マンメータで測定した槽内圧力値とを比較して行なった。その結果を表 2.1 に示す。

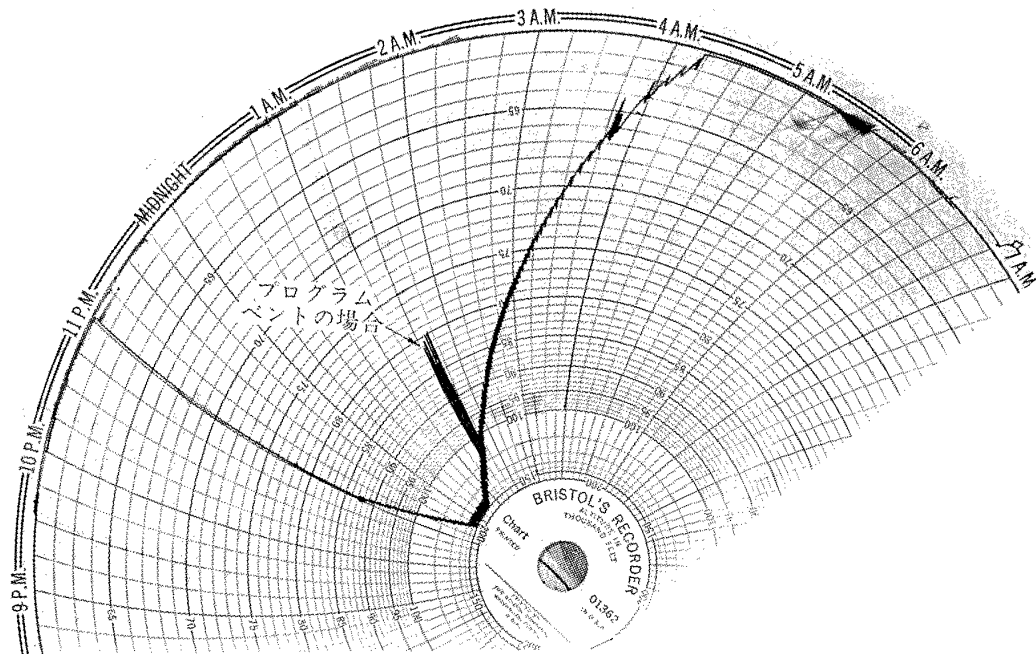


図2.4 高度プログラム制御記録チャート

表2.1 高度指示計誤差

指示計の読み ×1000m(×1000ft)	圧力換算値 mmHg	測定圧力 mmHg	指示計の読み ×1000m(×1000ft)	圧力換算値 mmHg	測定圧力 mmHg
0 (0)	759.93	760	25.7 (85)	16.46	17
12.1 (40)	141.18	141	27.3 (90)	13.03	13
13.6 (45)	111.13	112	28.8 (95)	10.37	10
15.1 (50)	87.49	88	30.3 (100)	8.29	8.3
16.7 (55)	68.88	70	33.3 (110)	5.37	5.4
18.2 (60)	54.24	53	36.4 (120)	3.53	3.5
19.7 (65)	42.91	43	39.4 (130)	2.36	2.5
21.2 (70)	33.64	33	42.5 (140)	1.60	1.5
22.7 (75)	26.50	26.5	45.4 (150)	1.10	1.0
24.2 (80)	20.87	21.5			

2.3 温度設定特性

温度調節は、常温以上に対しては 8kW 電気ヒータの 3 段切換えで制御し、低温はフロン R—22 および R—13 の二次元冷凍方式で制御する。検出要素として熱電対を用いて冷凍機とエア・ヒータを交互にオン・オフ制御する。制御公差は約 $\pm 2^{\circ}\text{F}$ ($\pm 1.1^{\circ}\text{C}$) であって、かつプログラム制

御が可能である。指示記録計は、熱電対式平衡型で、全温度範囲を通して精度が $\pm 0.5^{\circ}\text{F}$ ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$) 程度である。

図2.5に常温から -100°F (-73.3°C) に下げる場合および -100°F (-73.3°C) から $+210^{\circ}\text{F}$ (98.9°C) に上げる場合の応答を示す。

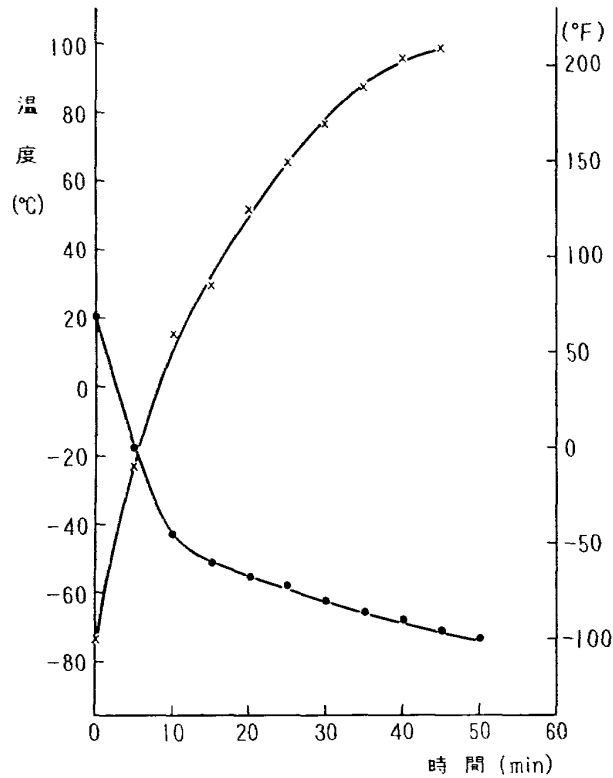


図2.5 構内温度降下，上昇応答

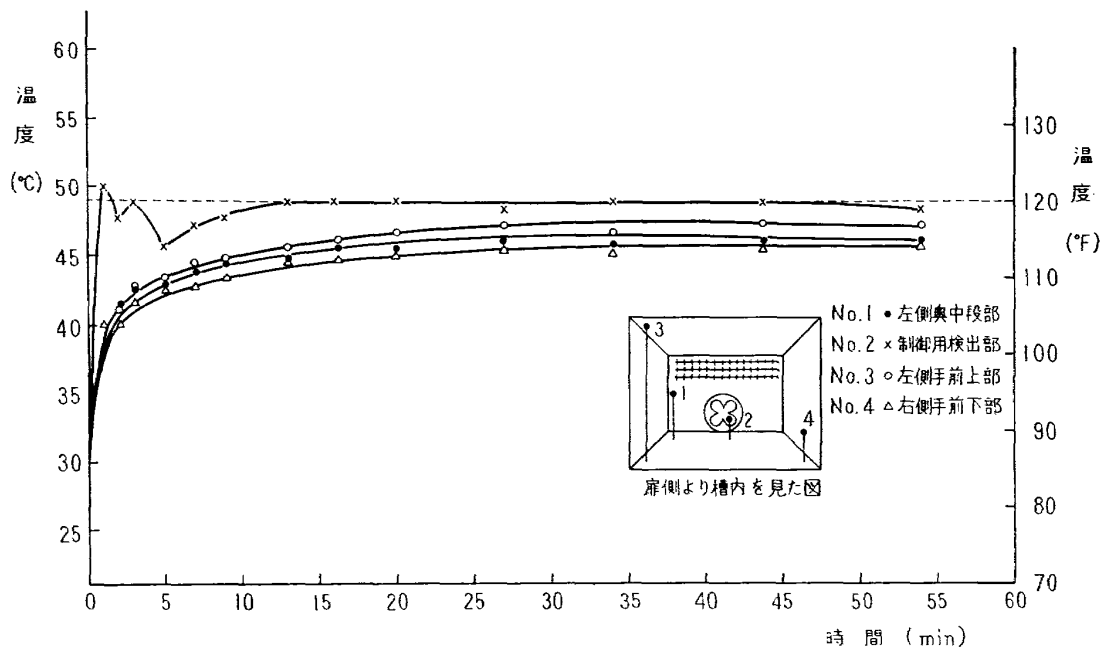


図2.6 槽内各点の温度応答（準高温域）

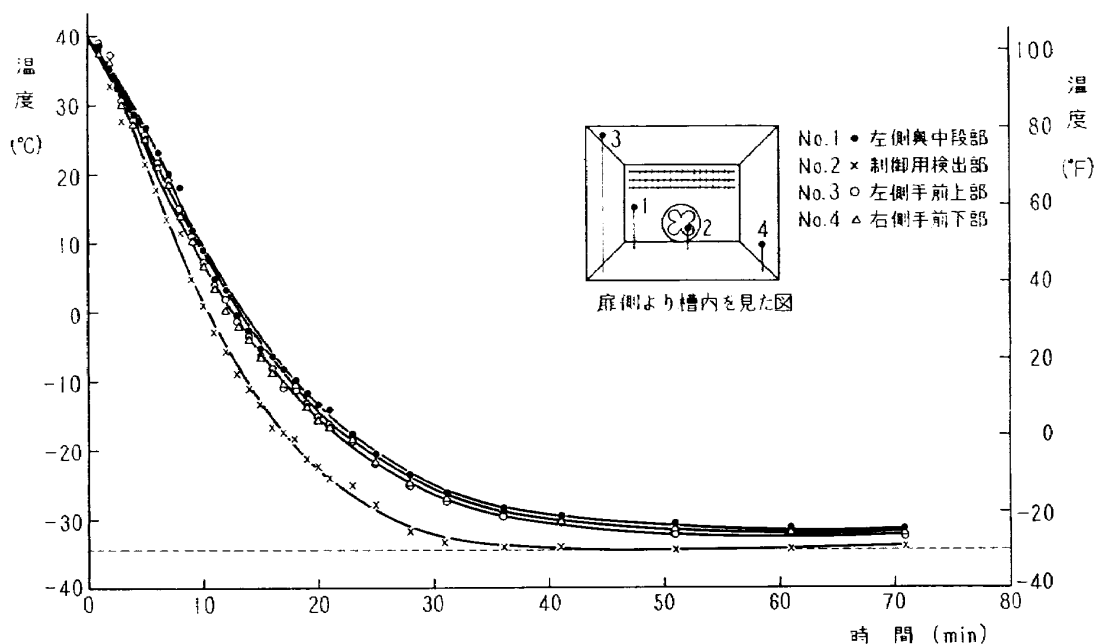


図2.7 槽内各点の温度応答（低温域）

温度試験をする槽の最も重要な点は、応答の速さとともに槽内温度の均一性である。それゆえ、同時に槽内各点の応答を調べれば、槽内温度の均一性もわかるので、槽内4点について、 $+80^{\circ}\text{F}$ (26.7°C) から $+120^{\circ}\text{F}$ (48.9°C)、 $+104^{\circ}\text{F}$ ($+40^{\circ}\text{C}$) から -30°F (-34.4°C) へ変えた場合の温度応答を測定した。その結果を図2.6と図2.7に示す。準高温域においては、応答は速いが槽内温度の均一性に多少不満足な感があるが、低温域においてはかなりよい特性を示している。

2.4 湿度設定特性

本試験槽の調湿装置は、乾式直接加湿除湿方式と呼ばれ、槽内湿度が設定湿度より高い場合は、除湿用冷却器、また槽内湿度が低い場合は、加湿用蒸気発生器を動作させるものである。この方式は、湿度制御範囲がきわめて広くかつ応答が速いので、温度サイクルを含む湿度環境試験に適している。なお検出要素として、熱電対の乾湿球が用いられている。

湿度の応答については、槽内温度を 50°C に維持して、相対湿度 100% のステップ入力に対する加湿応答を槽内2点について測定した結果を図2.8に示す。制御用検出部付近では、除湿用冷却器ならびに加湿用蒸気発生孔に近いので、むだ時間がほとんどないが、中央部においては多少のむだ時間がある。過渡的な状態では槽内中央部に遅れがあるが、調湿装置としては比較的良い特性といえる。

一定温度で相対湿度の高低制御は容易に行なうことができるが、高相対湿度状態を一定に保って温度サイクリングを行なうときの湿度制御はかなり困難である。相対湿度 100% における温度サイクル実験の結果を図2.9に示す。この図で温度を降下させた場合に湿度の低下がみられるが、これは過凝縮が起こって、湿球に余分な水滴が付着して、湿球の機能が低下するものと推定される。し

かし MIL-STD-202B における湿度試験プログラムにおいては、温度サイクルの温度降下領域における相対湿度は80%~98%の許容範囲があり、実際上、不つごうはない。

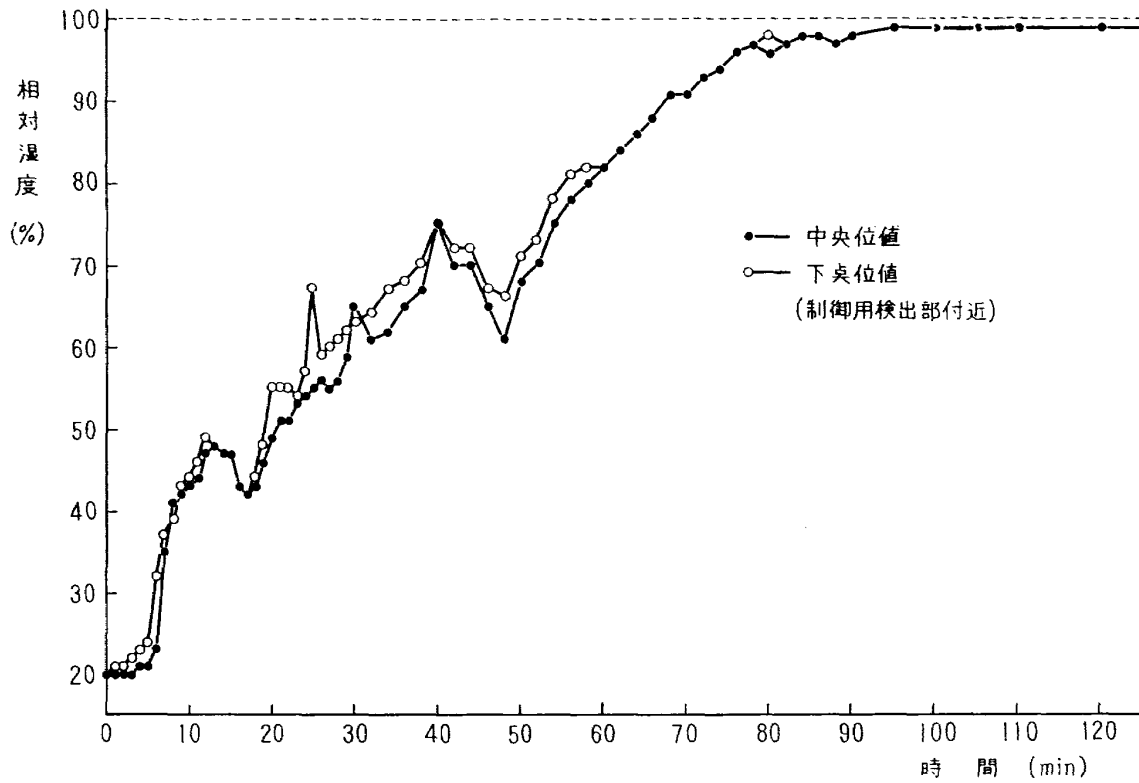


図2.8 槽内湿度応答

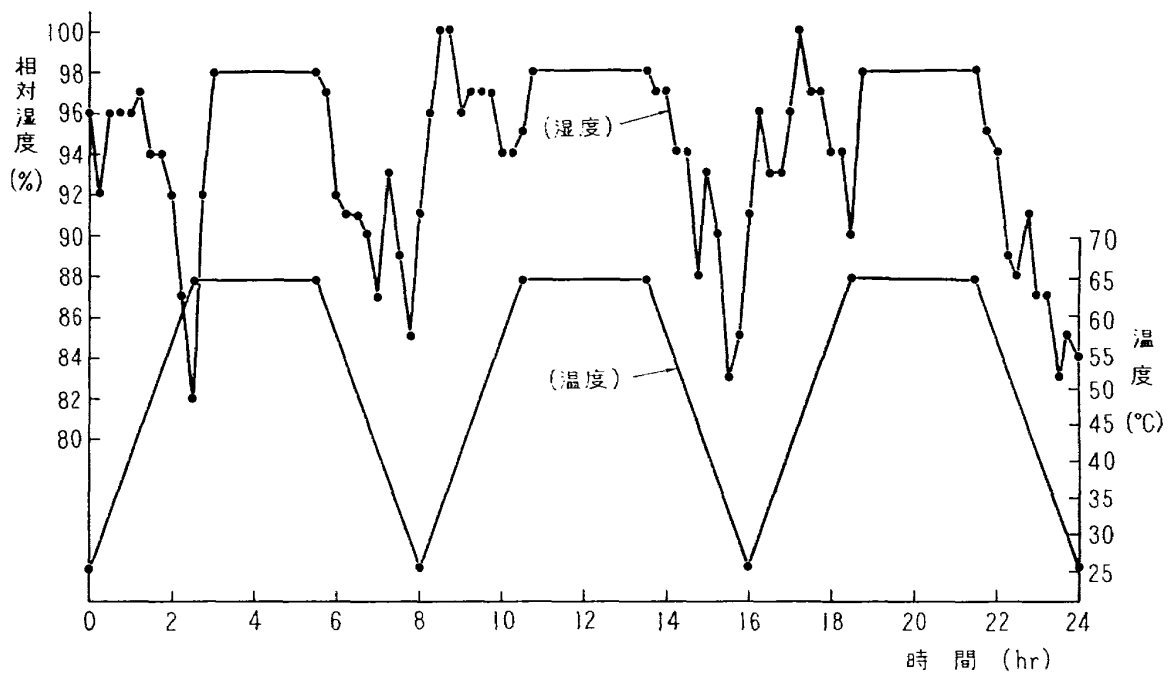
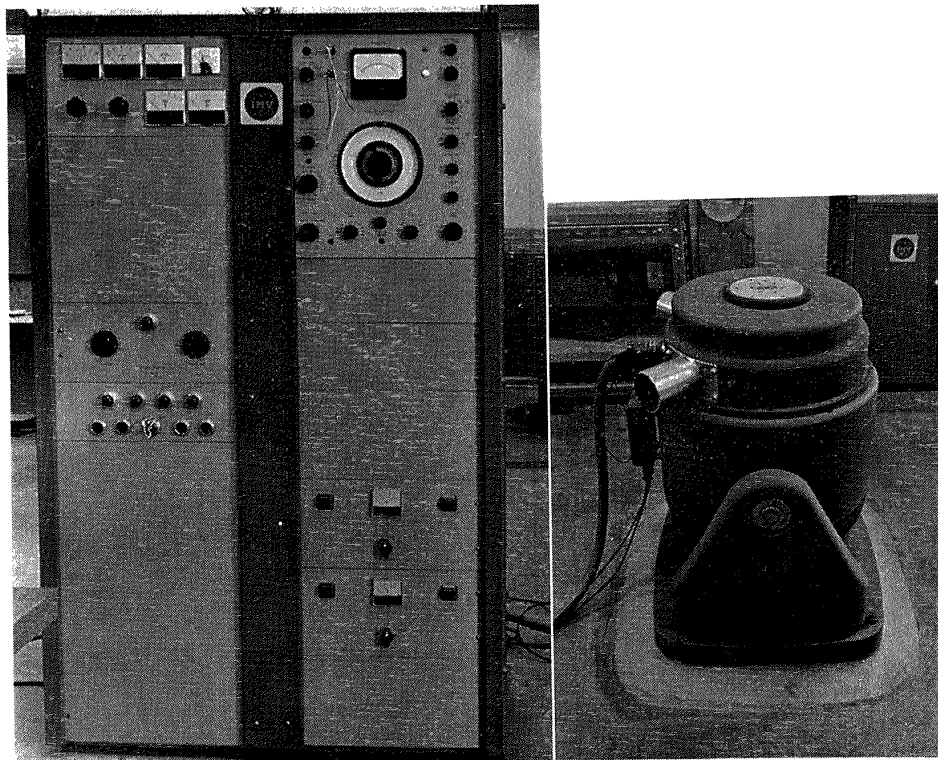


図2.9 定相対湿度にプログラムした温度サイクリング試験結果

3. 振 動 試 験 機

3.1 構成および能力

本振動試験機は図 3.1 に示す外観で、図 3.2 のような構成の動電型のものであって、搭載用機器の環境試験を目的とするために、小動力をもって高加速度が得られるように設計されている。



(a) 励振機

(b) 加振機

図3.1 振動試験機外観図

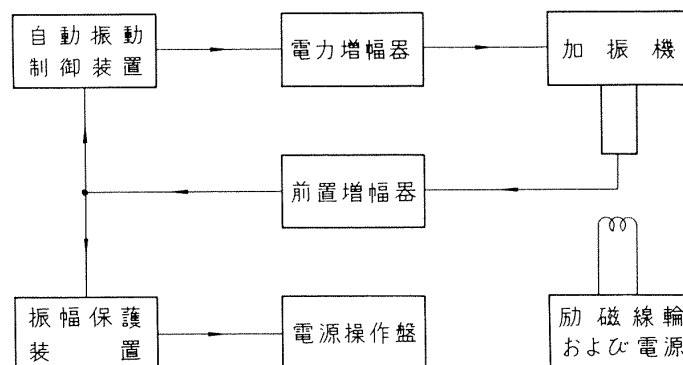


図3.2 振動試験機の構成

本試験機の主仕様は次のとおりである。

振動周波数範囲	5～2,000c/s
振動波形, 歪率	正弦波, 7%以下
振動加速度	0～40g (無負荷時)
加振力, 周波数特性	120kg重, 5c/sと2,000c/sで－3 dB

加振機

可動部実効質量 約3kg, 振幅 10mm

加振機的能力はその最大出力加速度 Gg で表わす

$$G = a/g = \frac{F}{W_L + W_T} \quad (3.1)$$

ここに

a = テーブルの最大加速度

g = 重力加速度

F = 加振力

W_L, W_T = 負荷およびテーブルの重量

励振機

電力増幅部 パワートランジスタ

電源部 シリコン3相全波整流

振動制御装置

周波数自動掃引装置 周波数範囲, 掃引時間

5～5,000c/s 0.5～100分間任意

振動制御装置

定振幅動作, 定速度動作, 定加速度動作, 定振幅一定加速度 自動切換, 定速度一定加速度 自動切換

自動切換周波数 8～1,000c/s

振動検出および制御用ピックアップ

速度型, 加速度型いずれも可

周波数ダイヤル較正精度 $1\% \pm 0.25\text{c/s}$

振動レベル指示精度 $\pm 4\%$

3.2 加振機特性の理論的解析

振動試験機において最も重要な問題は, 電気振動信号を機械振動に変換する電気—機械変換装置, すなわち加振機の特性である。この種の電気—機械系の解析にはモビリティ・アナログ¹⁾法を用い

る。その際次のことを仮定しておく。駆動コイルに電氣的動力を供給する電力増幅器は、動作周波数範囲において入力電圧に比例した出力電圧を得るように設計され、かつ回路定数は集中定数とし周波数によって変化しないものとする。また駆動コイルと周囲導体間の相互誘導は無視する。

加振機の運動方程式は

$$1/C_m \int v dt + R_m v + M \frac{dv}{dt} = F \quad (3.2)$$

複素数表示では

$$(R_m + j\omega M + 1/j\omega C_m) \dot{v} = \dot{F} \quad (3.3)$$

ここに

M : 可動部質量

v : テーブル速度

F : 力

R_m : 機械抵抗

C_m : 可動部支持のコンプライアンス

加振機は無負荷（または、共振しない負荷をテーブル上にしっかり固定し、負荷の質量をテーブルの質量に含めて考える）であって、全周波数範囲にわたり一様な出力特性をもつ増幅器で駆動されるものとする。この時加振機の電気機械回路は図 3.3 のように考えられる。したがってこれにモ

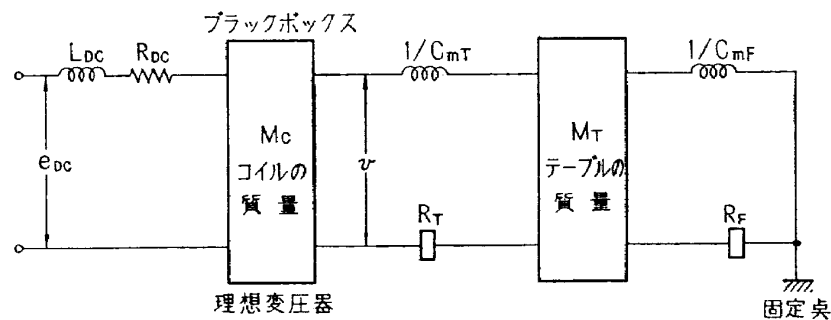


図3.3 加振機の電気機械回路（無負荷時）

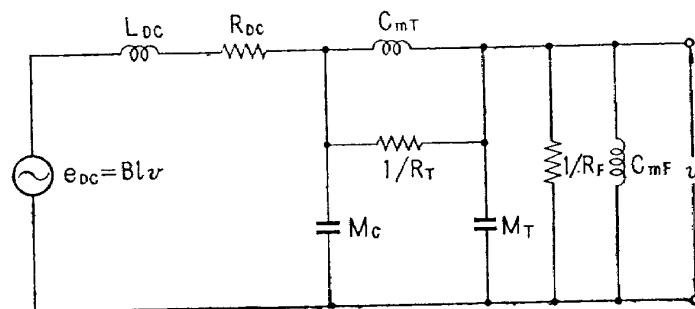


図3.4 加振機のもビリティ・アナログ

ビリティ・アナログを応用して図 3.4 のように書替えが可能である。

- L_{DC} : 駆動コイルのインダクタンス
- R_{DC} : 駆動コイルの抵抗
- e_{DC} : 駆動コイルの電圧
- M_C : 駆動コイルの質量
- C_{mT} : テーブルとコイル間のコンプライアンス
- R_T : テーブルとコイル間のダンピング
- M_T : テーブルの質量
- C_{mF} : フレキシャのコンプライアンス
- R_F : フレキシャのダンピング
- v : テーブルの速度

なお図 3.3 のブラックボックスは次式の Bl に相当する捲線比を有する理想変圧器と考える。

$$e_{DC} = e = Blv$$

ここに

- e : 誘導起電圧
- B : 空隙磁束密度
- l : 磁場内の導線の長さ
- v : 駆動コイルの速度

さて図 3.4 を用いて加振機の理論的特性解析を行なうのに、このままでは複雑で解析が困難であるので、これを適当ないくつかの周波数帯に分けて考えることとする。

(i) きわめて低い周波数 $f_1 (\neq 0)$ の場合

$$\left. \begin{aligned} \omega L_{DC} \ll R_{DC}, \quad \frac{1}{\omega M_C} \gg \omega C_{mF} \\ \omega C_{mT} \ll R_{DC}, \quad \frac{1}{\omega M_T} \gg \omega C_{mF} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

と考えられるので、図 3.4 を簡略化して図 3.5 のようになる。 $1/R_T$ はこれと並列にはいる ωC_{mT} がきわめて小さいので無視できる。ゆえに

$$\frac{v}{e_{DC}} = \frac{j\omega}{(R_{DC}/C_{mF}) + j\omega(1 + R_{DC}R_F)} \quad (3.5)$$

$$\approx j\omega C_{mF}/R_{DC} \quad (3.6)$$

$$\left| \frac{v}{e_{DC}} \right| \propto \omega \quad (3.7)$$

$$\left| \frac{a}{e_{DC}} \right| \propto \omega^2 \quad (3.8)$$

ここに a はテーブルの加速度である。

(ii) $f_1 < f < f_e$ (=電気的共振周波数) の場合

$$\left. \begin{aligned} \omega L_{DC} &\ll R_{DC} \\ \omega C_{mT} &\ll R_{DC} \\ \omega C_{mF} &\ll R_{DC} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

と考えられるから, L_{DC} , C_{mT} , C_{mF} は省略できる。すなわちフレキシャとテーブルおよびコイル質量との並列共振の影響はあまり大きくない。またフレキシャのダンピングは小さいので $1/R_F$ を省略する。ゆえに図 3.6 を得る。したがって

$$\frac{v}{e_{DC}} = (1/j\omega M_{CT}) \{R_{DC} + (1/j\omega M_{CT})\} \quad (3.10)$$

$$\simeq 1 \quad (\because R_{DC} \ll 1/\omega M_{CT}) \quad (3.11)$$

ただし $M_{CT} = M_C + M_T$

$$\left| \frac{a}{e_{DC}} \right| \propto \omega \quad (3.12)$$

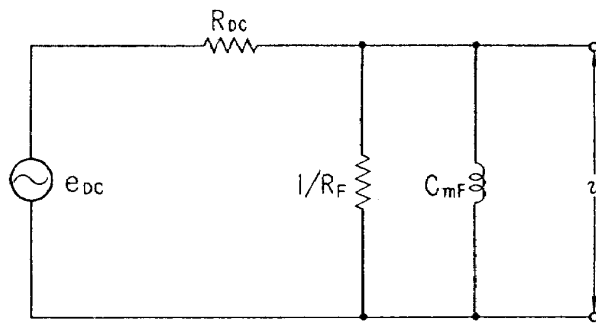


図3.5 $f = f_1 (\neq 0)$ における等価回路

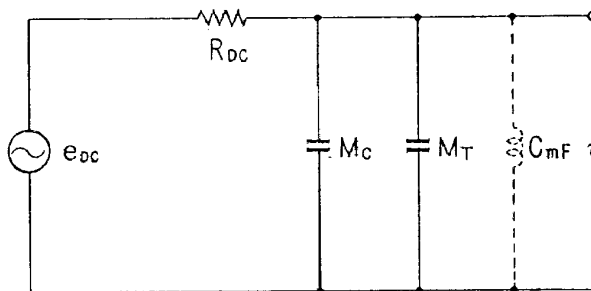


図3.6 $f_1 < f < f_e$ における等価回路

(iii) $f_e < f < f_a$ (=軸共振周波数) の場合

周波数が高くなるため、 L_{DC} の影響が大きくなり、 M_C 、 M_T と共振することになる。したがって図 3.7 のごとく表わせる。振動振幅はダンピング (R_{DC}) のために発散せず、一定の大きさにおさえられる。

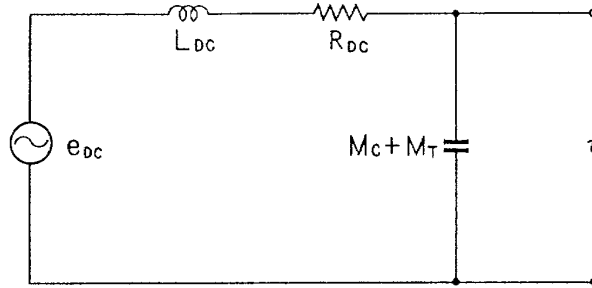


図3.7 $f_e < f < f_a$ における等価回路

$$v/e_{DC} = (1/j\omega M_{CT}) / \left\{ R_{DC} + j \left(\omega L_{DC} - \frac{1}{\omega M_{CT}} \right) \right\} \quad (3.13)$$

ここに

$$\omega_e = 2\pi f_e = (1/L_{DC} M_{CT})^{1/2} \quad (3.14)$$

$\omega_e \ll \omega$ では

$$v/e_{DC} \approx - (1/\omega^2 L_{DC} M_{CT}) \quad (3.15)$$

ゆえに

$$|a/e_{DC}| \propto \omega^{-1} \quad (3.16)$$

(iv) $f \approx f_a$ の場合

今までの解析は、コイルとテーブルは一体となった剛体として運動すると仮定してきた、周波数が高くなり軸共振周波数に近くなると、もはやこの仮定はなりたたなくなる。それゆえ二者は相互にスプリングで接続されて運動するものと考えなければならない。この周波数範囲における等価回路は図 3.8 のようになる。それゆえ軸共振は、

$$j\omega C_{mT} + (1/j\omega M_T) + (1/j\omega M_C) = 0 \quad (3.17)$$

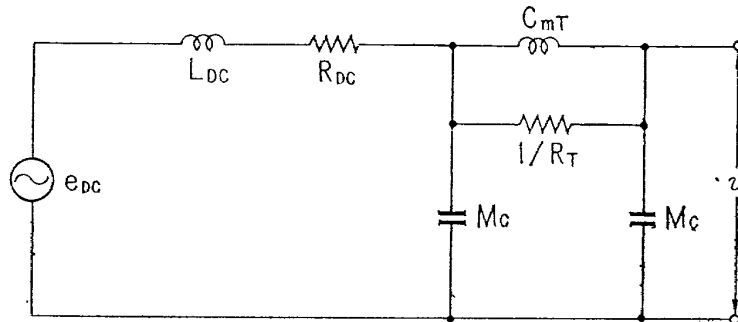


図3.8 $f \approx f_a$ における等価回路

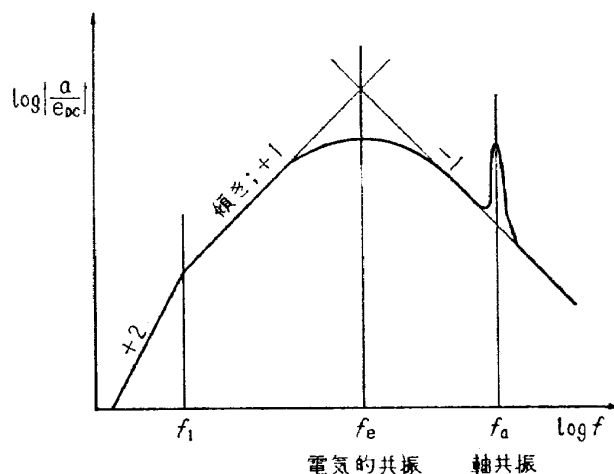


図3.9 加振機テーブル加速度の周波数特性

のときに起こる。上式より共振周波数 f_a は、

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \left\{ (M_c + M_T) / M_c M_T C_{mT} \right\}^{1/2} \quad (3.18)$$

ここで注意することは、軸共振が全体の系の一部分の共振であるという点である。

以上の考察から全周波数範囲にわたる加振機のテーブル加速度に関する周波数特性を図3.9に示すことができる。

3.3 特性の測定結果

本試験装置を主要構成要素、すなわち自動振動制御装置、電力増幅器、加振機の三部に分けて測定した結果を次に示す。

(1) 自動振動制御装置

自動振動制御装置から供給される信号が増幅され加振機を動作させるので、その出力信号波形歪はきわめて小でなくてはならない。次の条件で歪率を測定した結果を図3.10に示す。

周波数範囲 20～3,000c/s

出力電圧 12V r. m. s.

全周波数範囲にわたり歪率は0.8%以下で規準信号波形として満足すべきものである。

(2) 電力増幅器

電力増幅器の諸特性について測定した結果を次に示す。

(i) 入出力直線性

加振機の400c/s付近のインピーダンス1.5Ωを負荷としたときの周波数をパラメータとした入力電圧に対する出力電圧は、図3.11のごとくである。本電力増幅器は出力段にパワートランジスタを使用しているため、高い周波数ではクリッピングレベルが比較的低い。

(ii) 出力周波数特性

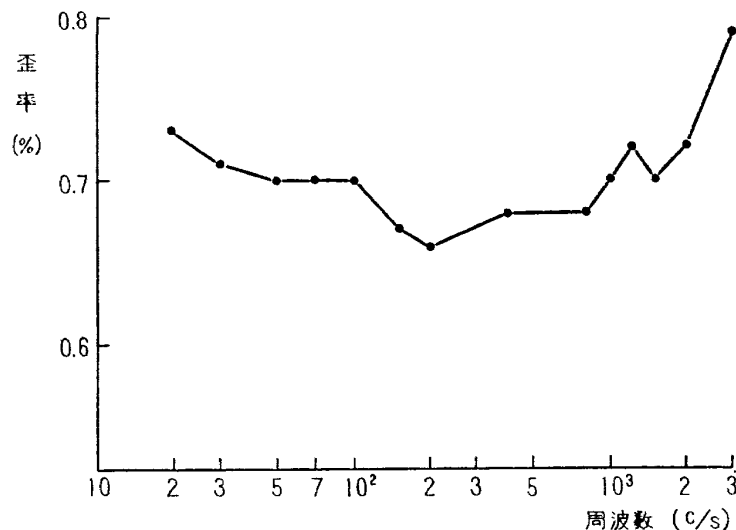


図3.10 自動振動制御装置波形歪

入力電圧をパラメータとして周波数対出力電圧と電力を示したものが図3.12であり，上限周波数（−3dB）は2,000c/s以上である。歪率3%で出力電圧は約20Vで，この電圧で加振機を駆動したとき，400c/s付近で約35gの加速度出力を得る。

(iii) 負荷インピーダンス特性

図3.16が示すように加振機の電氣的インピーダンスは周波数とともに大幅に変化し，その値は約1.5Ωから80Ωに達する。それゆえ，電力増幅器の負荷抵抗をこの範囲で変えた場合の無歪最大出力特性（周波数1,200c/s）を図3.13に示す。この結果によれば約3Ωが最適負荷となり500W以上の出力が得られる。また負荷抵抗1.5Ωから8Ωの間では400W以上の出力が得られる。

(3) 加振機

(i) 実効質量の算出

加振機可動部の実効質量 M を算出するのに，式 (3.3) より

$$\left. \begin{aligned} \dot{v} &= \dot{F} / \left\{ R_m + j \left(\omega M - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

また $M = M_0 + M_T$

共振角周波数（この場合フレキシャの共振周波数） $\omega = \omega_0$ では $|\dot{v}|$ が最大となり，このとき次式がなりたつ。

$$\omega_0^2 M C_m = 1 \quad (3.20)$$

今テーブル上に共振しない剛体負荷（質量 M' ）を堅く取り付けたとき，共振角周波数が ω_0' になり，

$$\omega_0'^2 (M + M') C_m = 1 \quad (3.21)$$

$\omega_0' < \omega_0$ である。

式 (3.20) と (3.21) より

$$\left. \begin{aligned} M &= M' f_0'^2 / (f_0^2 - f_0'^2) \\ f_0 &= \omega_0 / 2\pi, \quad f_0' = \omega_0' / 2\pi \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

テーブルの共振特性は図3.14で、これより $f_0 = 22\text{c/s}$, $M' = 3\text{kg}$ を付加したときの共振周波数 $f_0' =$

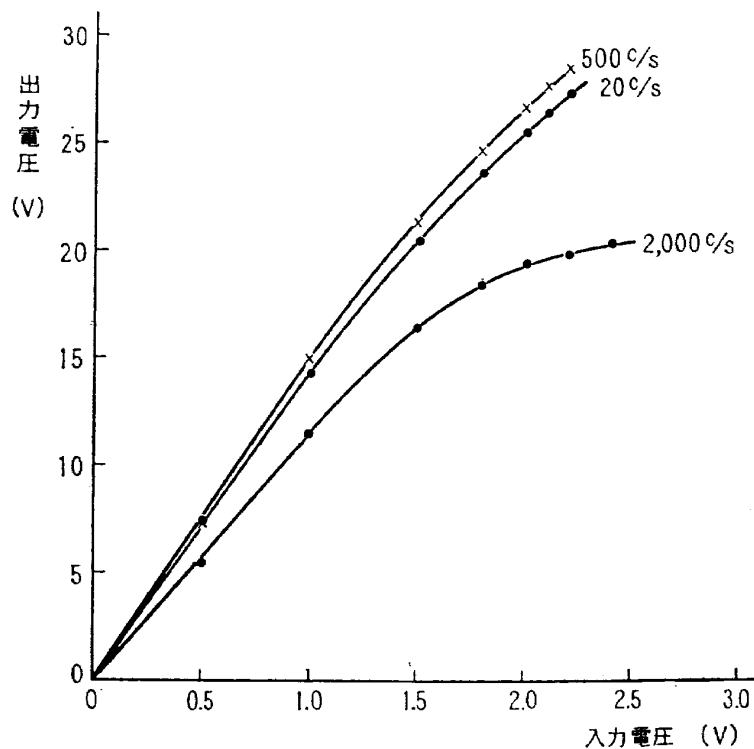


図3.11 電力増幅器入出力特性 (1.5Ω負荷)

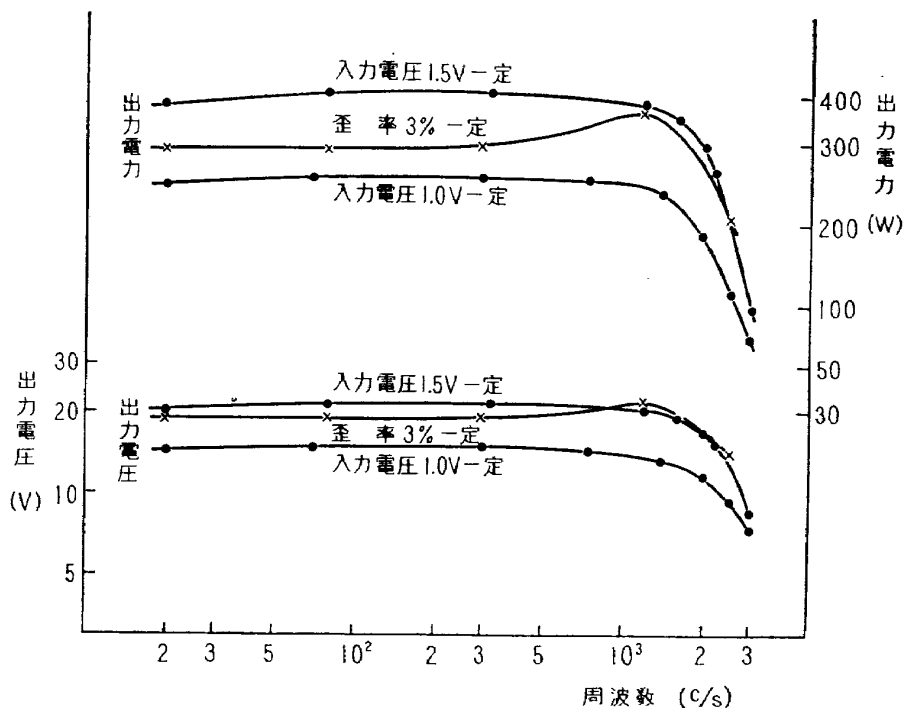


図3.12 電力増幅器周波数特性

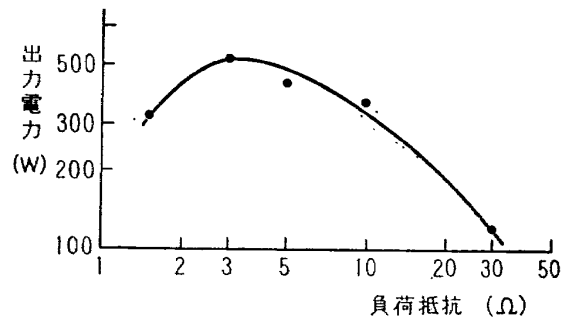


図3.31 電力増幅器負荷特性
(歪率 3 %以内, 周波数 1, 200c/s)

15c/s を得る。式 (3.22) により M を計算すると

$$M = 3 \times 15^2 / (22^2 - 15^2) = 2.6(\text{kg})$$

となる。

弾性支持（フレキシャ）の非直線性のため振動振幅の大きさにより C_m の値が異なり、したがって同一の負荷に対しても共振周波数 f_0' が振幅によって異なる。この結果を図3.15に示す。実効質量の算出においてもこのように振幅の影響を考慮に入れる必要がある。

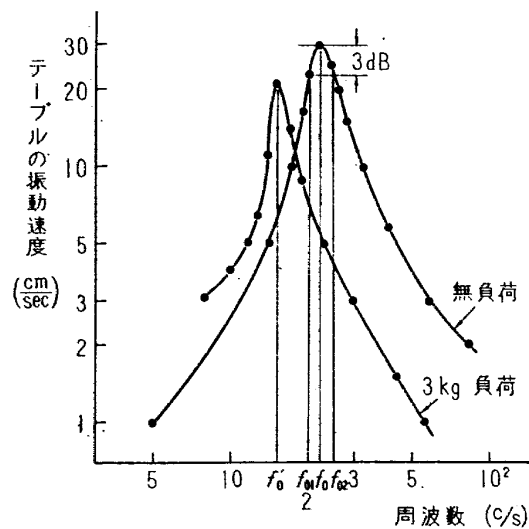


図3.14 加振機・最低共振特性

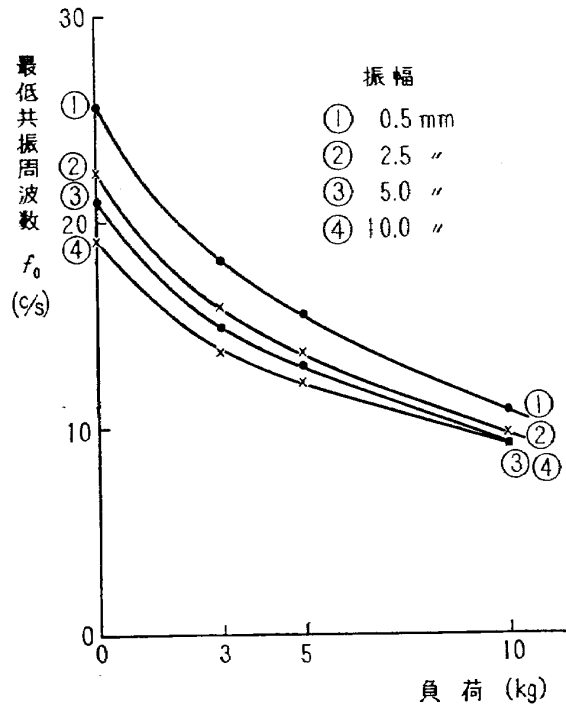


図3.15 加振機最低共振周波数

(ii) 機械的インピーダンスの算出

共振曲線 図3.14 を用いて、加振機の機械的インピーダンスを算出する。

式 (3.20) より

$$C_m = 1/\omega_0^2 M$$

これに (i) で求めた値 $M=2.6\text{kg}$, $f_0=22\text{c/s}$ を代入すると

$$C_m = 2.0 \times 10^{-5} (\text{m/N})$$

Q の定義より

$$Q = f_0 / (f_{02} - f_{01}) = f_0 / \Delta f$$

f_{01} , f_{02} は $|v|$ がその最大値から 3dB 下がったところの周波数で図3.14から $f_{01}=20\text{c/s}$, $f_{02}=25\text{c/s}$ を得る。また加振機の Q は式 (3.3) より次式のごとく書ける。

$$Q = 2\pi f_0 M / R_m$$

ゆえに

$$\begin{aligned} R_m &= 2\pi M \Delta f \\ &= 2\pi \times 2.6 \times (25 - 20) \\ &= 81.5 \text{ N/(m/sec)} \end{aligned} \tag{3.23}$$

したがって f_0 付近におけるインピーダンス Z_{m0} は

$$Z_{m0} = R_m + j\left(\omega M - \frac{1}{\omega C_m}\right)$$

$$=81.5+j\left(2.6\omega-\frac{1}{2.0\times 10^{-5}\omega}\right) N/(m/sec)$$

(iii) 電氣的インピーダンス

加振機の設定電圧インピーダンスの周波数特性を図3.16に示す。測定方法は抵抗置換法による。5 kg の剛体負荷を取り付けた場合は、無負荷の場合よりフレキシャの共振周波数（ f_0 ）は低くなっている。

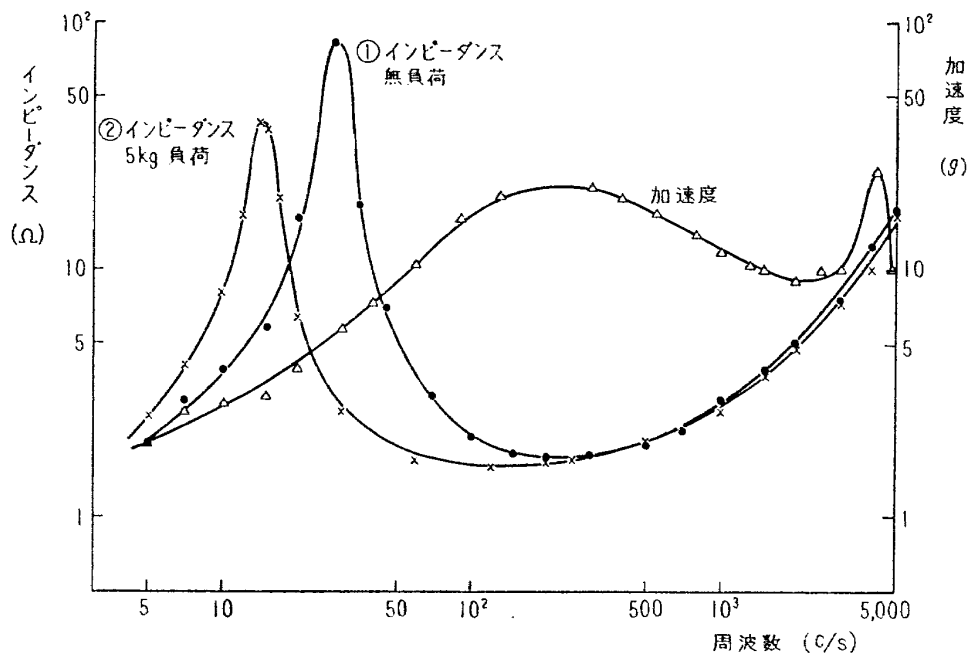


図3.16 加振機定電圧インピーダンスおよび定電圧加速度特性（駆動コイル電圧10V一定）

(iv) 定電圧加速度特性

入力周波数をかえ、一定電圧で加振機を駆動したときの出力加速度特性を図3.16に示す。これを加振機特性の理論的解析で得た図3.9と対応させると、 f_1 、 f_e 、および f_a がそれぞれ約 15 c/s、200 c/s および 4,000 c/s に現われ、実測結果は理論的解析結果と良く一致する。

このように加振機の出力加速度特性は周波数に対して一様でないので、自動振動制御装置により出力加速度一定な特性をもたせ、また周波数が低くなるに従って定速度、定変位（定振幅）となるように制御するわけである。

(v) 駆動電圧対出力加速度特性

周波数をパラメータとした無負荷時の加振機駆動電圧と、出力加速度特性を図3.17に示す。各周波数とも50gぐらいまでは直線性がよく、したがって振動波形歪が少ない。しかし30 c/sのような低い周波数では、許容変位の関係上20gが限界である。

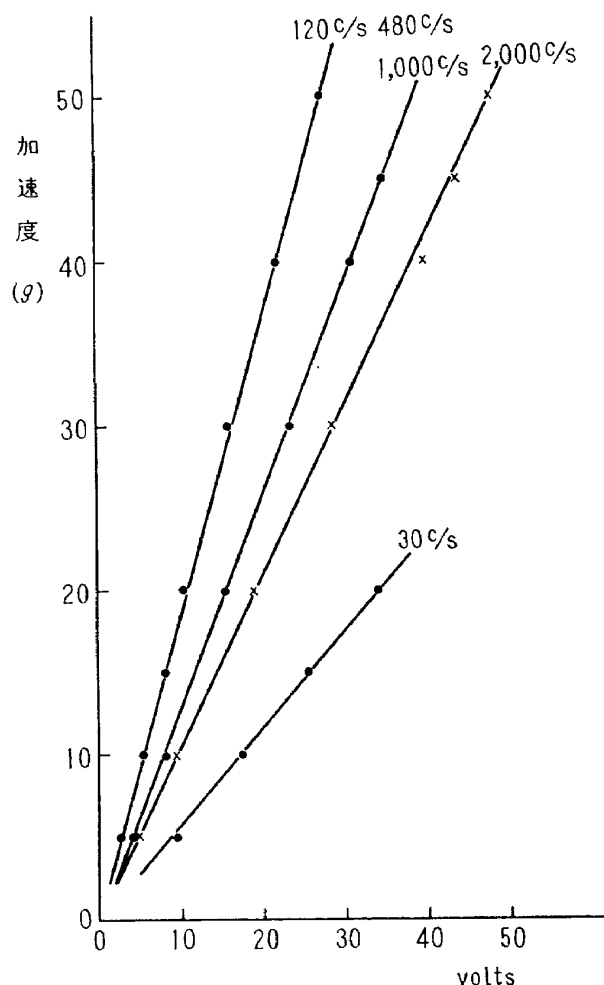


図3.17 振動子駆動電圧と出力加速度（無負荷）

(vi) 出力加速度対波形歪率

出力加速度をしだいに大きくしていったとき、振動波形の歪率がどの程度になるかを周波数をパラメータとして測定したものが、図3.18および図3.19である。歪率を6%以下におさえると無負荷で40g、3kg、負荷で20g程度が得られる。無負荷の場合、低い周波数（30c/s）で歪率が大きいのは、大加速度を得るため振幅が大となり弾性支持（フレキシャ）の非直線性の影響が大きく現われるためとみられる。すなわち図3.16よりわかるように30c/sという測定周波数が無負荷の場合のフレキシャの共振周波数（ f_0 ）に近いためである。3kg負荷の場合は f_0 が30c/sよりもずっと低くなるので、出力加速度を大としても歪率の増加はさほどでもない。きわめて高い周波数（2,065c/s）ではテーブルの組合せ構造物のそれぞれの共振が顕著に現われ、波形歪率が大きくなる場所がある。

以上の結果をまとめると

- (i) 無負荷では周波数が100~2,000c/sの範囲で波形歪率6%以内で40gの加速度が得られる。
- (ii) 負荷時は最低共振周波数 f_0 が低下するため、より低い周波数まで一定の加速度が得られる

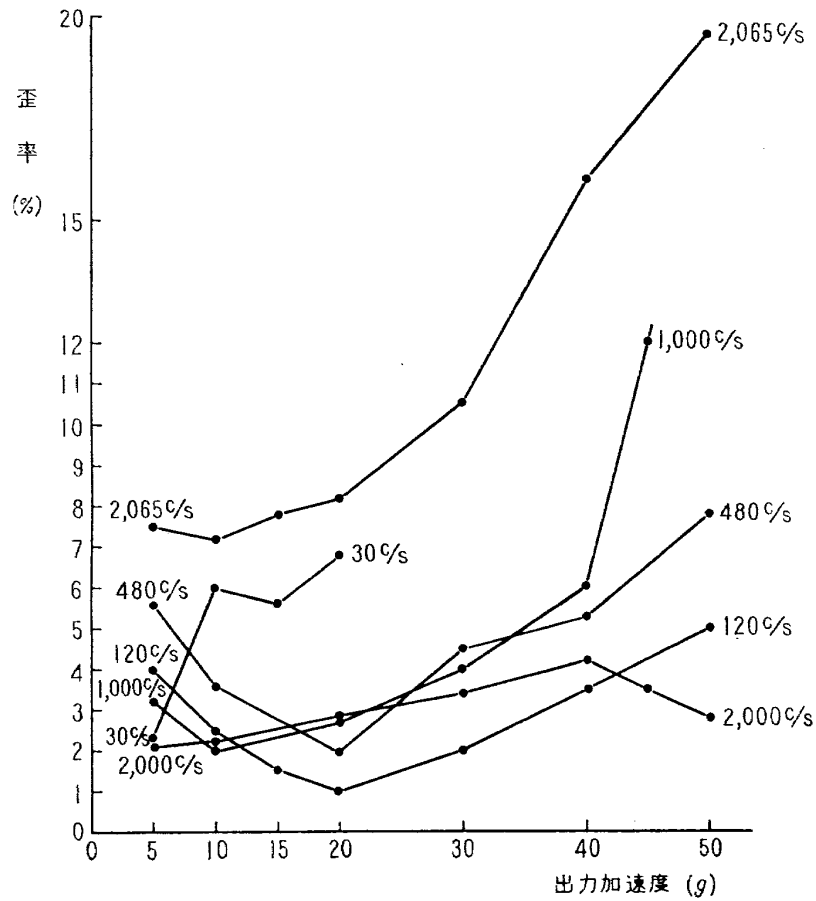


図3.18 加振機振動波形歪率（無負荷時）

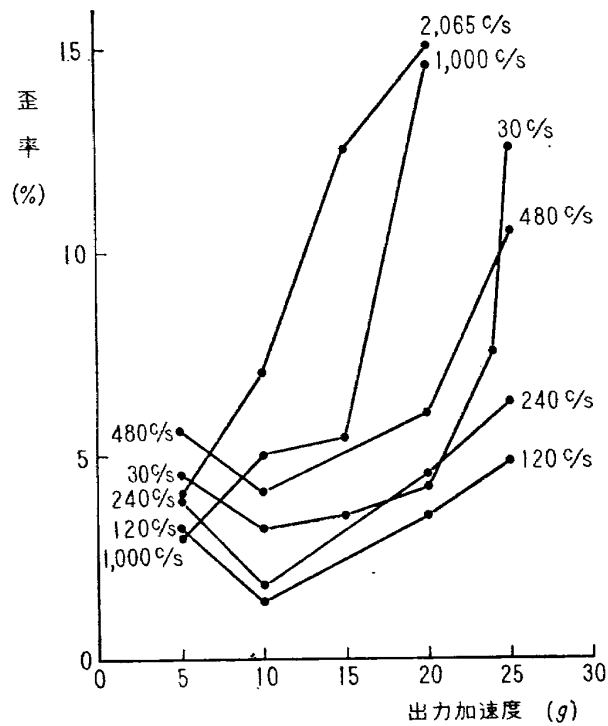


図3.19 加振機振動波形歪率（3kg負荷時）

が、高い周波数（1,000c/s以上）では、波形歪が大となり、出力加速度 20g では歪率15%にも達する（図3.19参照）。

(iii) 波形歪率を一定におさえた場合、最大出力が得られるのは周波数が 120c/s付近で、この時の加振力は波形歪率 5% 以内で 130kg である。

4. 衝撃試験機

4.1 構成および能力

衝撃試験機は MIL-S-4456 および MIL-STD-202B に基づいて設計された垂直落下式のもので、約22.7kg (50lb) までの供試品に対して100g前後の試験を行なうことができる。

この試験機の衝撃発生法は、供試品をのせる落下台の下面に木片（アレスティング・ブロック）を数個並べて取り付けて砂の上に落下させる木片—砂形と、落下台の下側に鉄パンチ1個を取り付けて鉛ブロックの上に落下させる鉄パンチ—鉛形の二種類があり、その組合せを各種変えることによって広範囲の衝撃を与えることが可能である。図4.1は試験機の全体図で、供試品を取り付けた

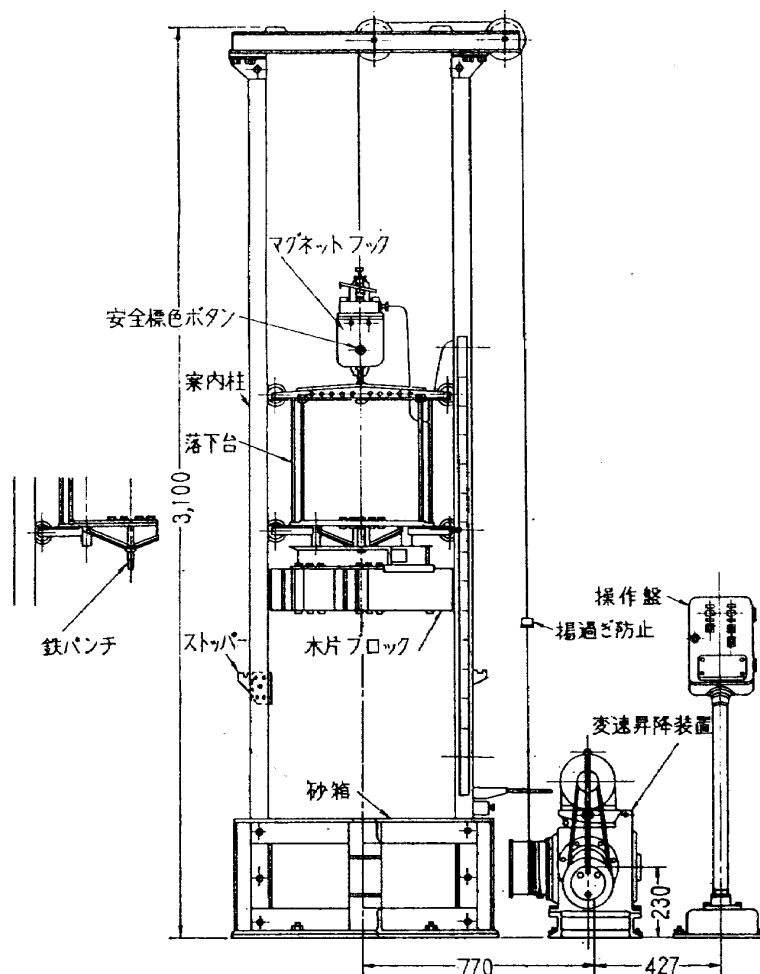


図4.1 4456—20型 落下衝撃試験機概略図

落下台は、変速昇降装置により所定の落下高まで揚げられ、マグネット・フックの切り放しにより砂箱の砂または鉛ブロックの上に落とされる。最大落下高は木片砂形の場合で140cm、鉄パンチー鉛形で150cmである。落下台は150cm以上上げると自動的に停止し、鋼索の巻きすぎによる事故を防ぐようになっている。

表4.1 木片ブロックの種類

木片（アレステイング・ブロック）の種類	木片（アレステイング・ブロック）の大きさcm	底面積 cm ²	枚数
長型木片	巾 長 高 3.8×43.2×13.7	164.2	6
短型木片	3.8×25.4×13.7	96.5	6

表4.2 木片ブロックの組合せ


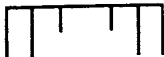
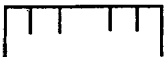
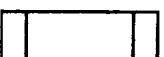

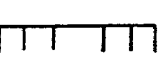

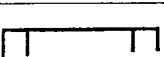
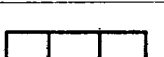
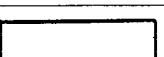
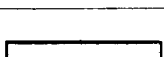
記号	組合せ	組合せ略図	特殊の取付け	総底面積 cm ²	落下高 cm
6 L	長型 6			987	最 高 140
4 L 2 S	長型 4, 短型 2			852	
2 L 4 S	長型 2, 短型 4			716	
4 L	長型 4			658	
6 S	短型 6			581	
2 L 2 S	長型 2, 短型 2			523	
4 S	短型 4			387	
2 L	長型 2			329	
2 S	短型 2			194	

表4.3 鉄パンチの種類

記号	鉄パンチ直径 cm	鉄パンチ底面積 cm ²	落下高 cm
P ₁	2.54	5.06	最 高
P ₂	1.91	2.87	
P ₃	1.43	1.61	
P ₄	1.11	0.97	
P ₅	0.93	0.74	

本試験機に用いられる木片の種類と組合せを表 4.1 と表 4.2 に、また鉄パンチの種類を表 4.3 に示す。落下台を受ける砂は、粒度30~40メッシュの珪砂を用いる。鉛ブロックは、純度の高い鉛を5cm×5cm×25cm の角棒状に鋳造したものである。なお本試験機には、衝撃値を測定するための加速度型ピックアップと測定回路が付属している。測定回路はピックアップ出力を増幅して蓄積型オシロスコープで観測するためのもので、衝撃波の基本波成分のみを検出するために3種類の低域炉波器が含まれている。

衝撃環境試験は、供試品の各軸（X，Y，Z）方向に沿っておのおの数回の衝撃をあたえるわけであるが、ここで最も重要なことは供試品にあたえる衝撃値の再現性である。MIL規格においては、衝撃値について±15%以内の偏差が許されている。本試験機において、同じ条件で試験を行なっても、供試品の重量の大小によって衝撃値が異なるので、供試品の重量が9.1kg, 15kg, 22.7kg の場合についておのおの校正曲線を得ることにした。

4.2 衝撃値の定義

衝撃値は、衝撃波形の最大値と持続時間（衝撃時間）をもって表わす。衝撃波形の最大値は、一般にそこに生じる最大加速度 a の重力加速度 g に対する倍数 $G=a/g$ で示す。衝撃時間は、JIS では衝撃が加わって最大加速度に達するまでの時間として定義され、ASA では衝撃波形の立上がりのある一定値から最大値を経て、その一定値に減少するまでに要する時間として定義されている。JIS の定義によれば、衝撃波形が三角波の場合にのみ、衝撃を力積として考えることができる。しかし本試験機においては、木片一砂およびおおよび鉄パンチ—鉛の種々な組合せや、搭載荷重、落下高などの条件によって、三角波に近い波形に限らず、矩形波または正弦波に近い波形が生ずるので、JIS の定義を採用する場合は、衝撃試験機の使用法について特定の条件を定めておかなければならない。れわれが行なった性能試験においては、波形が零基線から立上がりはじめてから最大値を経て減少して零基線をよぎるまでの時間、すなわち衝撃の持続期間を衝撃時間と定義した。

4.3 測定系の特性

測定系で重要なのは、低域炉波器の特性とピックアップの特性である。試験の際、同じ高さから落下させても、木片一砂、鉄パンチ—鉛の組合せの種類によって最大加速度と衝撃時間が異なり、それぞれ 5.5g から 140g の間、3ms から 15ms の間にあって、かつ衝撃時間が短かければ最大加速度は大きく現われる。これに対して、測定回路は、そう入される低域炉波器の三つの種類に応じて図 4.2 に①②および③で示す周波数特性をもっているため、必要とする衝撃値によってこの3種類の特性を使い分けなければならない。ここで用いるピックアップは加速度型で、最高応答周波数特性は約 2,000c/s である。図 4.3 と図 4.4 に加速度ピックアップの出力特性と周波数特性を示す。この種のピックアップは、非常に直線性が良いので、この図に示す範囲外についても、衝撃測定用と

して使用可能である。以上の諸特性から、衝撃時間 3mS 以下の場合は図 4.2 の①, 3mS から 7mS 前後では②, それ以上長い衝撃時間については③の特性を増幅器に持たせれば, 不必要な高調波成分を取り除いて基本波のみを適確に測定しうる。

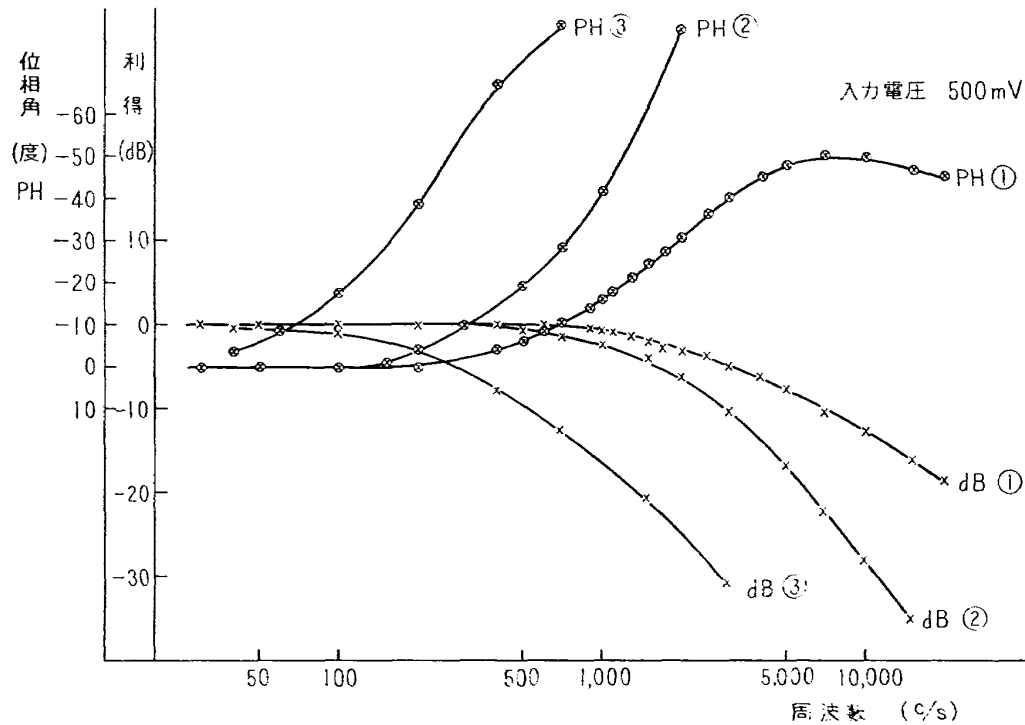


図4.2 衝撃測定回路の周波数特性

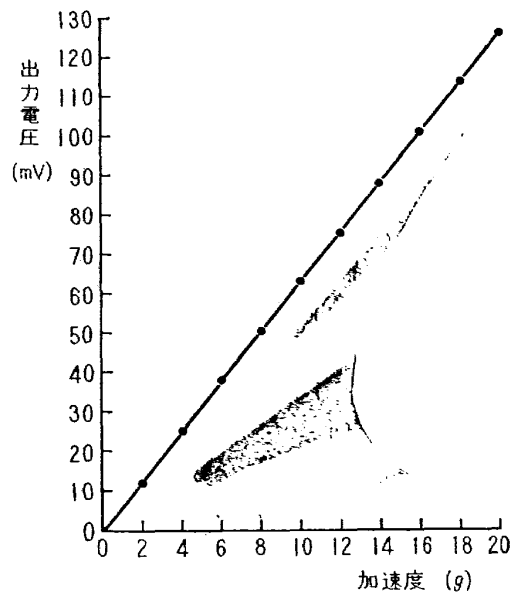


図4.3 加速度型ピックアップの出力特性

4.4 衝撃特性の測定結果

航空機搭載用機器の衝撃試験では, 100g 以上の衝撃を与えることはほとんどないので, この特

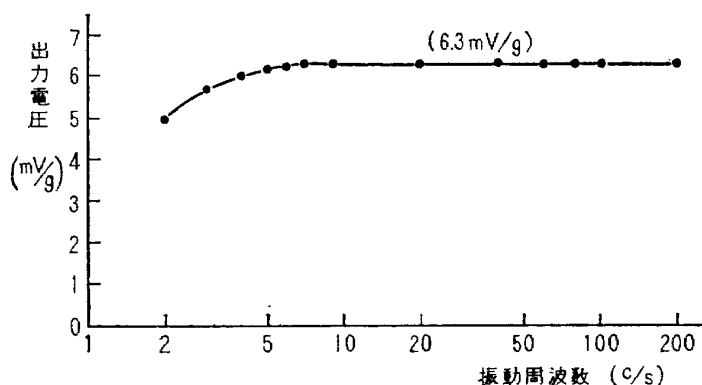


図4.4 加速度型ピックアップの周波数特性

性試験では、落下高の最高を120cmとした。数百回にわたる落下実験で得られた衝撃値の上限値と下限値を表4.4と表4.5に示す。次に鉄パンチと木片の各種組合せについて、搭載荷重別に測定した結果を示す。

表4.4 鉄パンチ—鉛衝撃値範囲

搭載荷重	上 限 値		下 限 値	
9.1kg	140g	3.3mS	65g	3.5mS
	50 "	10 "	28 "	5 "
15kg	90g	4mS	40g	3.5mS
	30 "	14 "	17 "	6 "
22.7kg	100g	5mS	38g	4.5mS
	30 "	17 "	18 "	6.5 "

表4.5 木片—砂衝撃値範囲

搭載荷重	上 限 値		下 限 値	
9.1kg	140g	8mS	30g	10mS
	30 "	11 "	9 "	15 "
15kg	110g	7.6mS	35g	10mS
	33 "	10.5 "	8 "	14 "
22.7kg	105g	7mS	30g	9mS
	20 "	12 "	5.5 "	16 "

4.4.1 鉄パンチ—鉛

搭載荷重 9.1kg, 15kg, 22.7kg について、落下高と鉄パンチの種類をパラメータとした、衝撃加速度と衝撃時間の関係を図4.5～図4.7に示す。図4.5における P_1 の点線の部分は、衝撃波形が乱れ、試験機として用いるのは不適當である。また鉄パンチの底面積と衝撃加速度および衝撃時間の

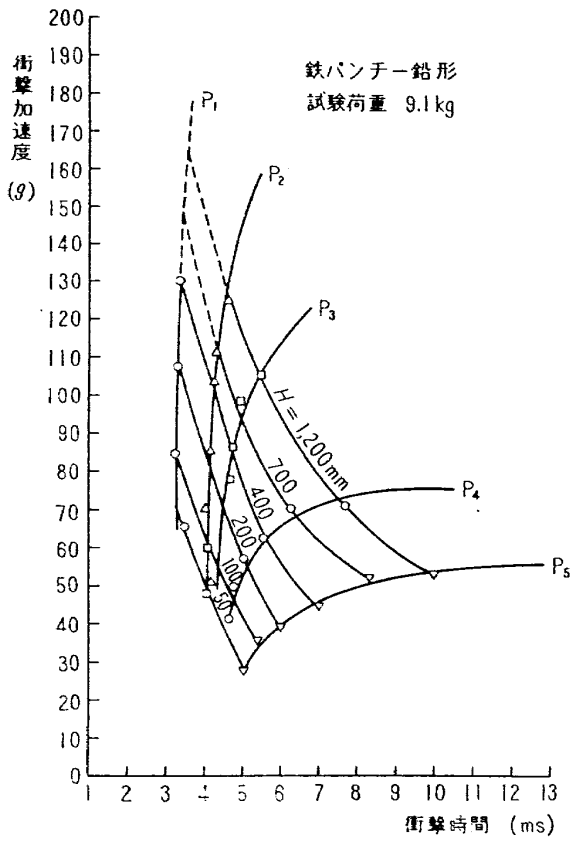


図4.5 衝撃値校正図

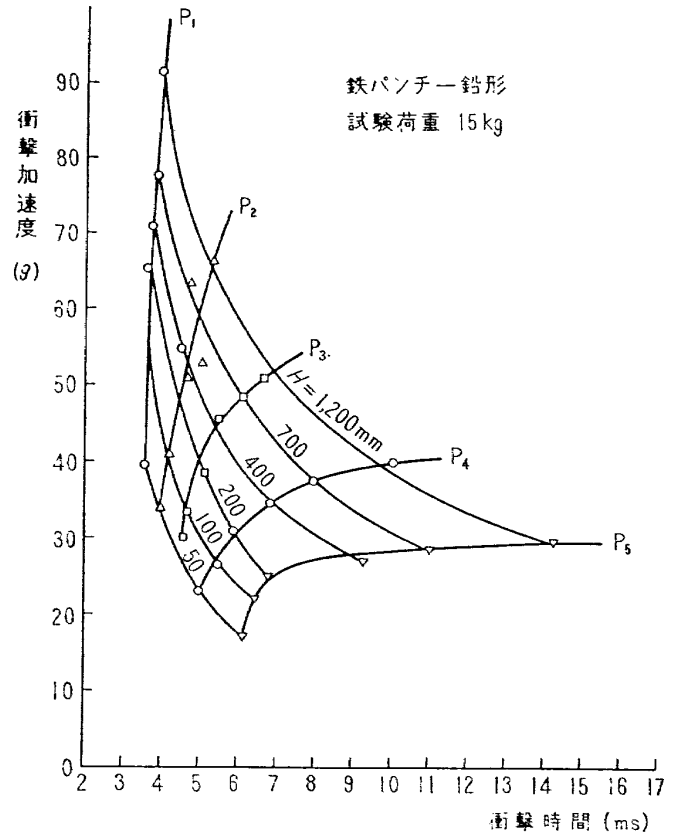


図4.6 衝撃値校正図

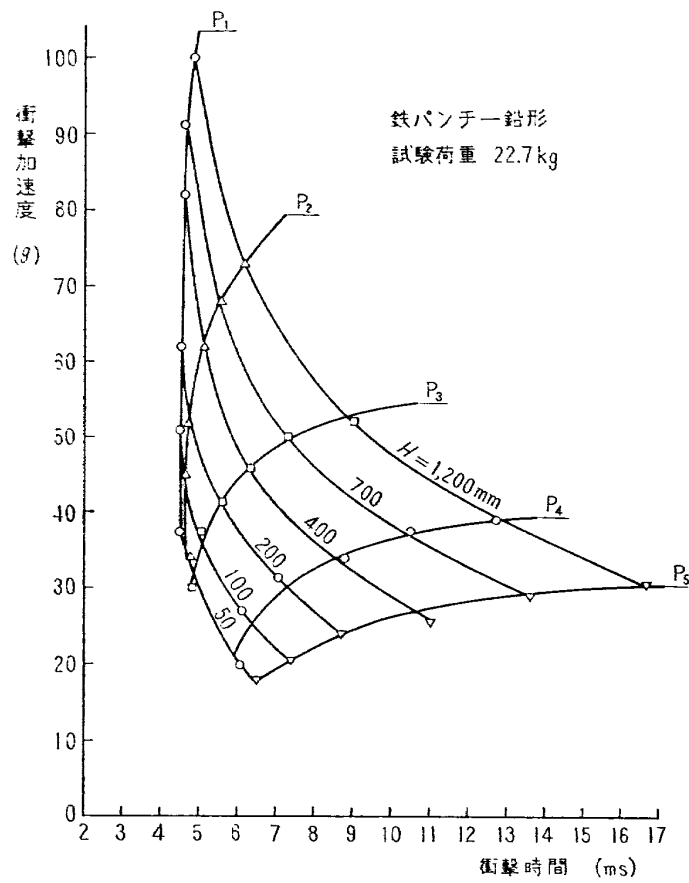


図4.7 衝撃値校正図

関係を落下高をパラメータとして示したものが図4.8と図4.9である。図4.10(1)～(4)は、代表的な衝撃波形を示したもので、これから明らかなように、鉄パンチの種類はもとより、搭載荷重および落下高の種々な値に対して波形が異なる。図中に波形が2個または3個記録してあるのは、再現性をみるため一画面に2回または3回の衝撃波形を記録したものである。

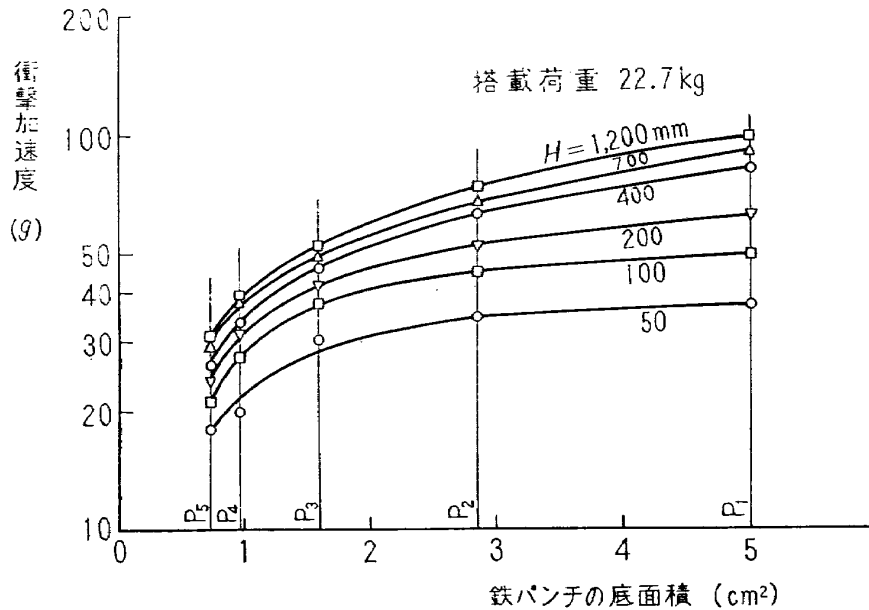


図4.8 鉄パンチの底面積に対する衝撃加速度

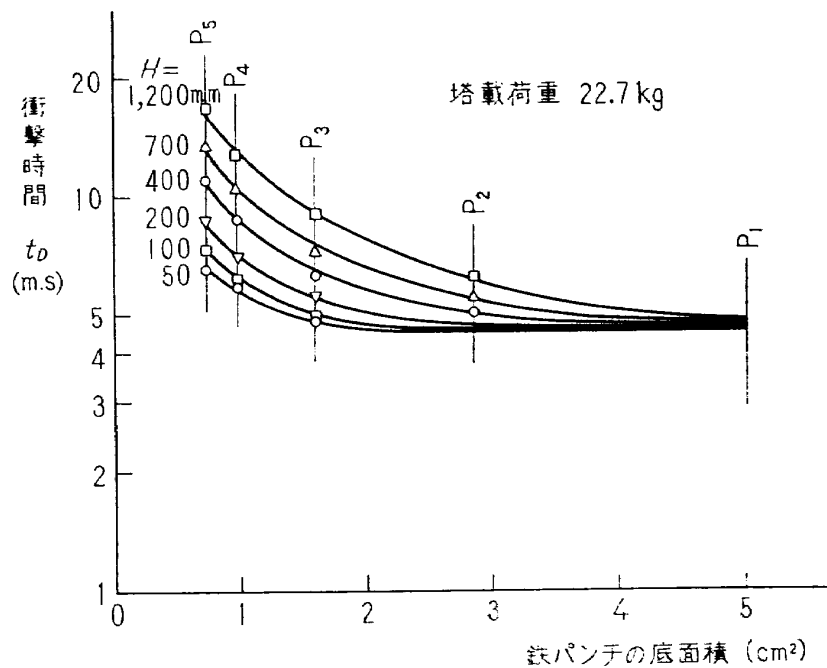
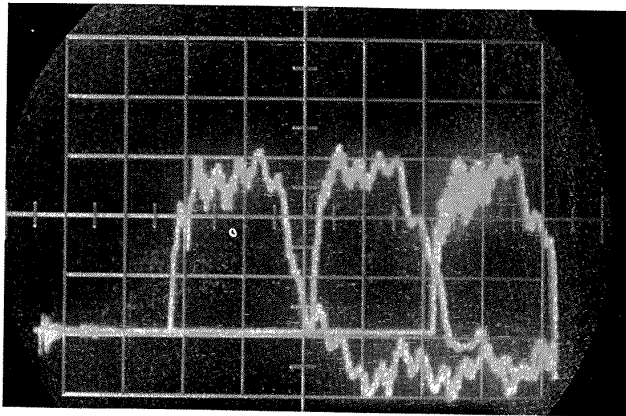


図4.9 鉄パンチの底面積に対する衝撃時間



①

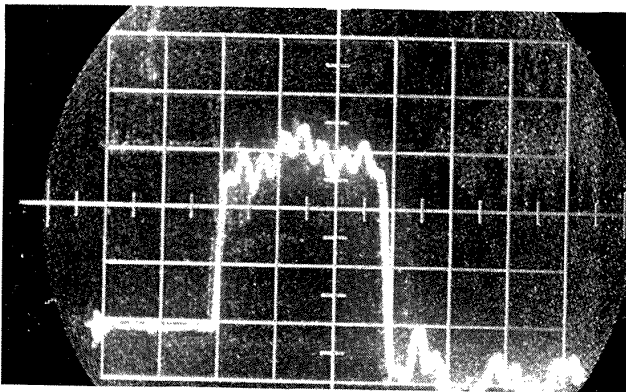
鉄パンチ：P₁

落下高：200mm

搭載荷重：22.7kg

目盛：20g. 2mS

以下この順に従って条件を記す



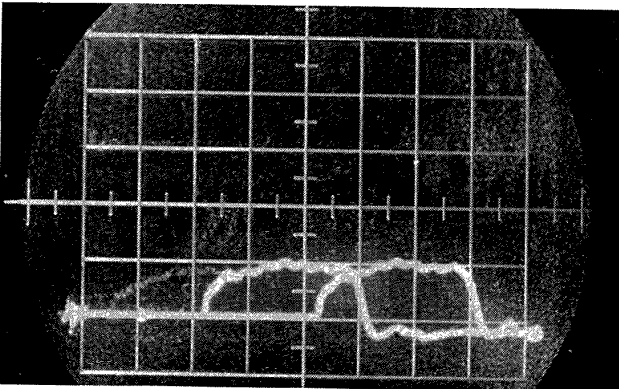
②

P₂

1200mm

22.7kg

20g. 2mS



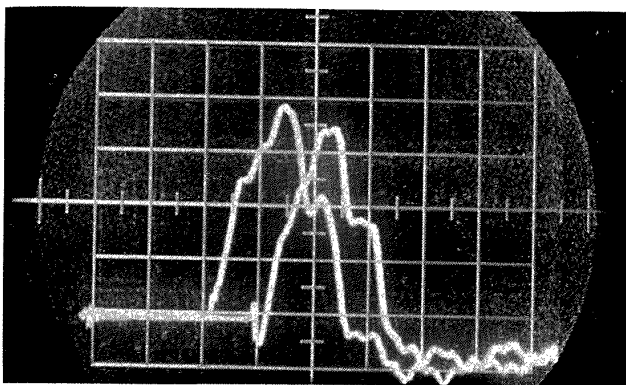
③

P₄

50mm

22.5kg

20g. 2mS



④

P₂

400mm

9.1kg

25g. 2mS

図4.10 鉄パンチ—鉛代表的衝撃波形

4.4.2 木片一砂

木片一砂の場合は、表 4.2 のうち、代表的な組合せ 6 L, 4 L, 2 L, 6 S, 4 S, 2 S について特性試験を行なった。その結果を搭載荷重別に落下高対衝撃加速度および衝撃時間について示したものが図 4.11 から図 4.16 である。また落下高をパラメータとして、木片の総底面積に対する衝撃加速度を示したものが図 4.17 で、鉄パンチ—鉛の場合の図 4.8 と同様な一定の関係があることが現

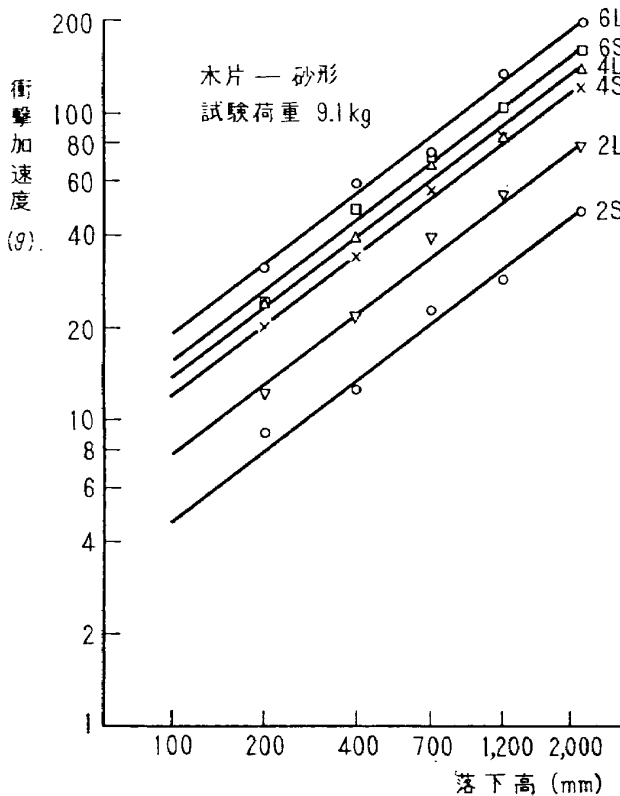


図4.11 落下高対衝撃加速度

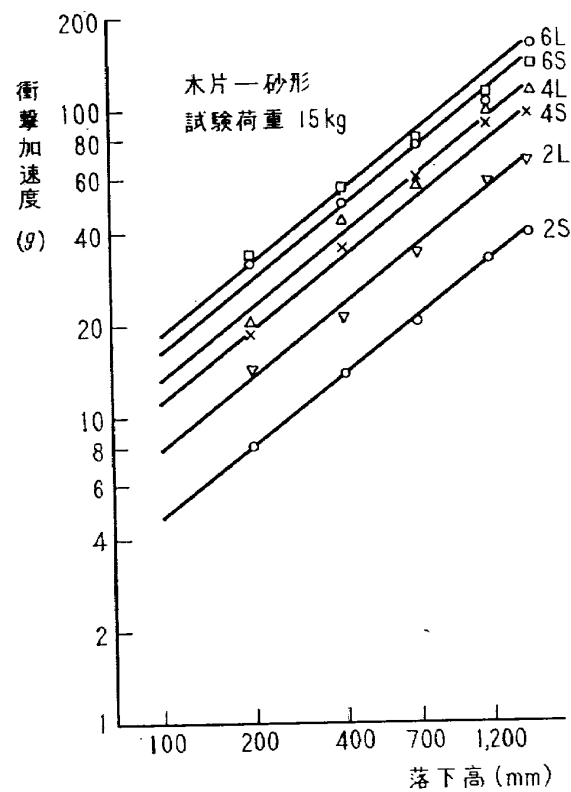


図4.13 落下高対衝撃加速度

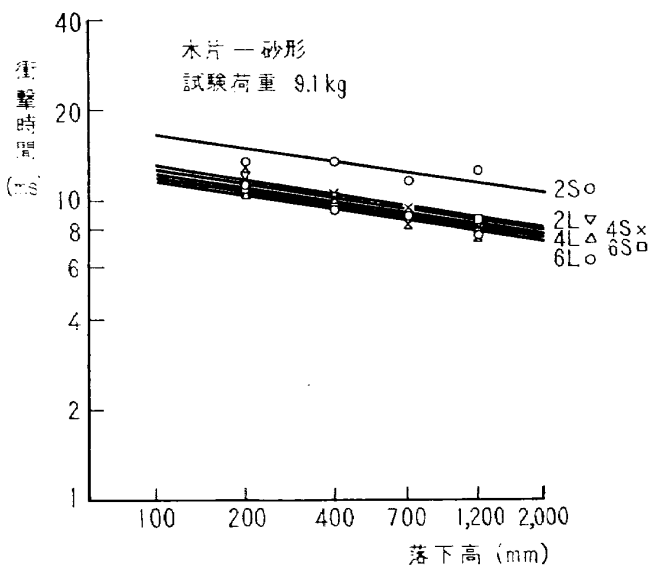


図4.12 落下高対衝撃時間

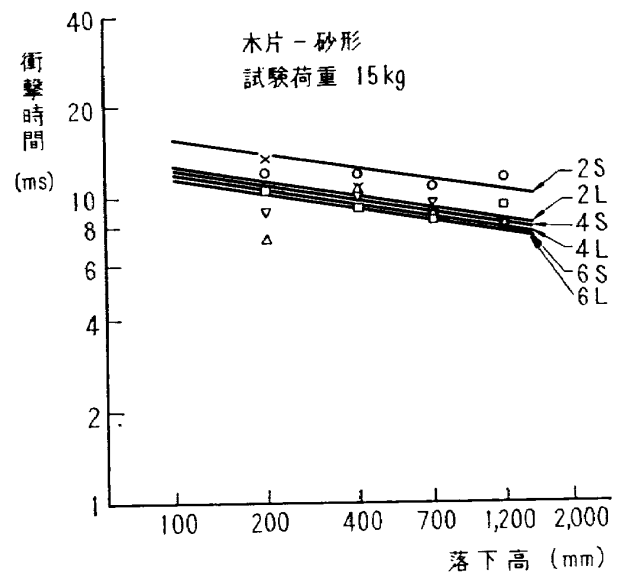


図4.14 落下高対衝撃時間

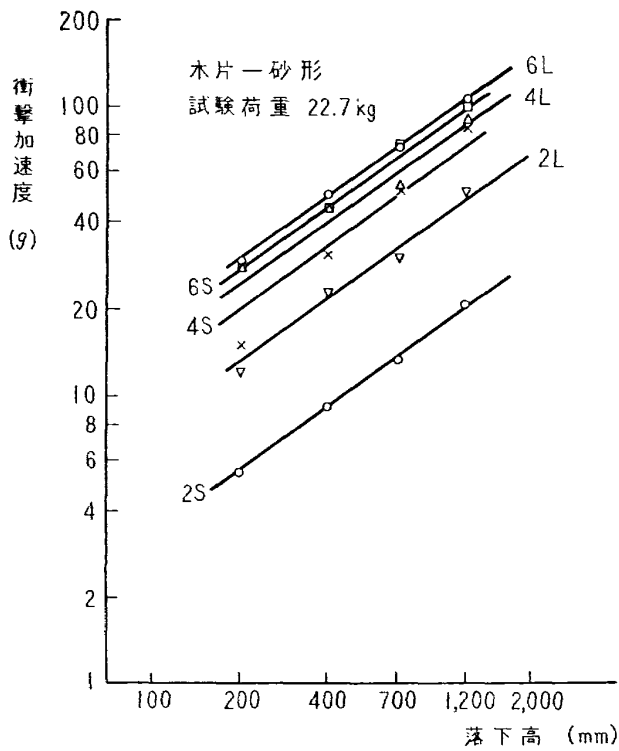


図4.15 落下高対衝撃加速度

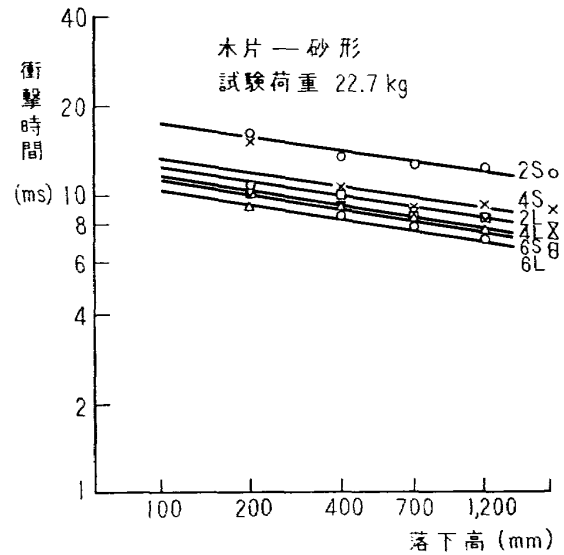


図4.16 落下高対衝撃時間

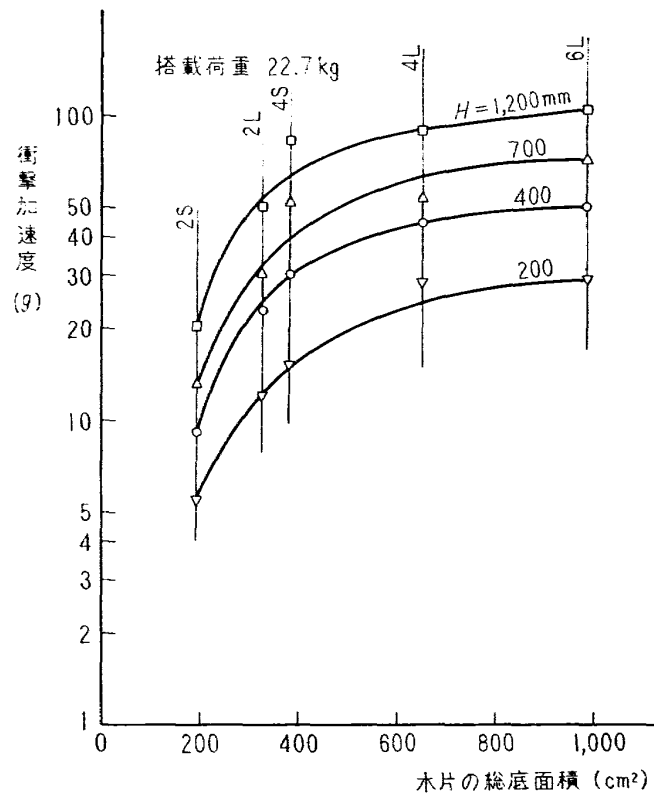
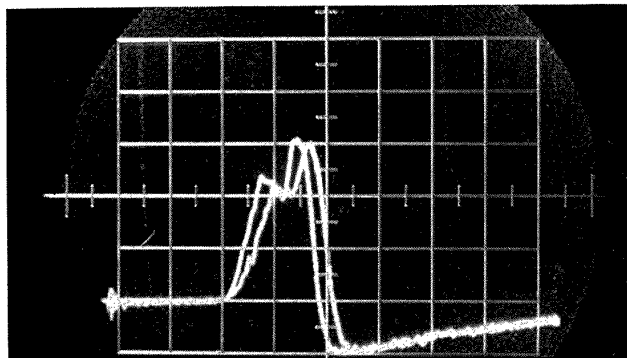


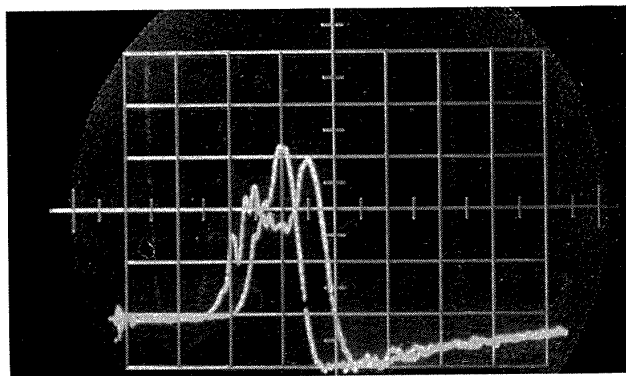
図4.17 木片の総底面積に対する衝撃加速度

われている。しかし木片の総底面積と衝撃時間の関係については、明りょうな規則性が得られなかった。図4.18は木片・砂の場合の代表的な衝撃波形を示す。



①

木 片 6 S
落下高 700mm
搭載荷重 9.1kg
目盛 25g, 5mS



②

6 S
700mm
22.7kg
25g, 5mS

図4.18 木片・砂の代表的衝撃波形

4.4.3 運動方程式との比較

最も一般的な形で落下衝撃試験機の運動方程式を考察することとする。実際には、塑性力学的な考察を必要とするような複雑な現象があるが、ここでは弾性体として扱った。

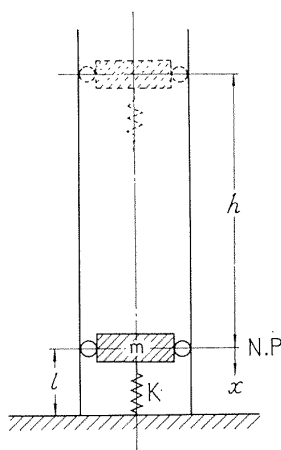


図4.19 落下衝撃略図

図4.19のごとく、物体の質量 m [$\text{kg} \cdot \text{S}^2 \cdot \text{m}^{-1}$], ばね定数 K [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$], 自然長 l [m] の固有振動系が有効落下高 h [m] から落ちた場合、落体の受ける最大加速度は、次のように簡単に求められる。

x 軸の原点は、ばねが接地する瞬間 ($t=0$) の重心の位置にとる。ばねが圧縮を受けはね上がらない間の時間を t ($0 < t < t_1$) とすば、 $u(t)$ を単位ステップ関数として、

$$m\ddot{x} + Kx = mg u(t) \quad (4.1)$$

$$t=0 \text{ で } x=0, \dot{x}=\sqrt{2gh} \text{ として解けば}$$

$$x(t) = \sqrt{\frac{2gh}{\omega_n^2} + \left(\frac{g}{\omega_n^2}\right)^2} \sin(\omega_n t - \phi) + \frac{g}{\omega_n^2} \quad (4.2)$$

ただし

$$\phi = \tan^{-1} g/\omega_n \sqrt{2gh}, \quad \omega_n^2 = \frac{K}{m} \quad \text{かつ} \quad t < t_1$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} g/\omega_n^2 &= mg/K \equiv x_s \text{ (静変位)} \\ \sqrt{\frac{2gh}{\omega_n^2}} &= \sqrt{\frac{2mgh}{K}} \equiv x_d \text{ (動変位)} \\ x_s &\ll x_d \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

加速度は式 (4.3) より,

$$\ddot{x}(t) = -\sqrt{2gh\omega_n^2 + g^2} \sin(\omega_n t - \phi) \quad (4.4)$$

衝撃波形は正弦波となる。最大加速度 $\ddot{x}(t)/g$ (g) と、落下高対静変位の比 $h/x_s = h\omega_n^2/g$ との関係を図4.20に示す。この図と比較するために、鉄パンチ—鉛、木片—砂の落下高対衝撃特性を図4.21, 図4.22に示す。これらは、横軸のディメンジョンは異なるが、物理的特性を比較することは可

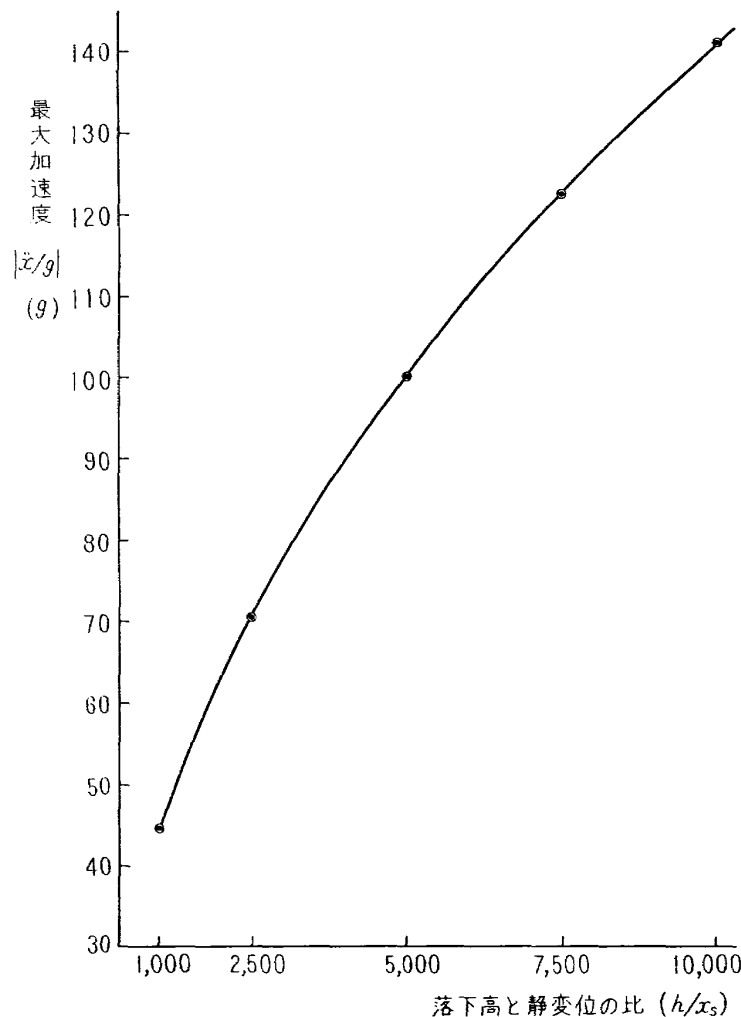


図4.20 落下衝撃試験機の運動方程式による落下高と静変位の比に対する最大加速度

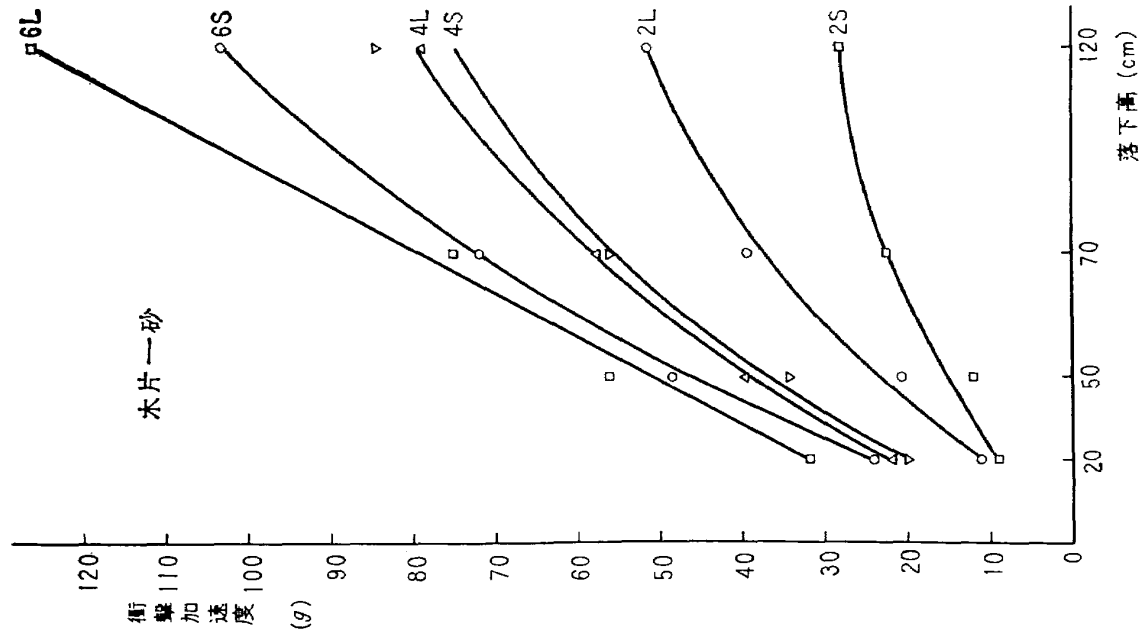


図4.22 落下高対衝撃加速度 (搭載荷重9.1kg)

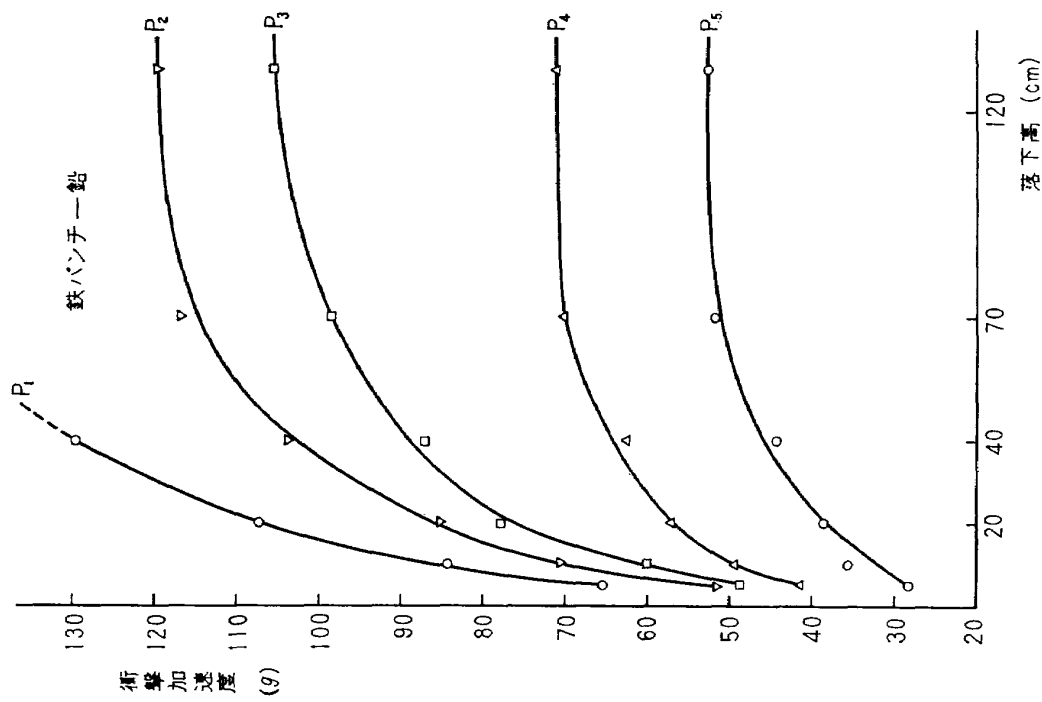


図4.21 落下高対衝撃加速度 (搭載荷重9.1kg)

能である。図をみると、落下高が低い範囲では、運動方程式から得た結果と同じような傾向を示しているが、落下高が高くなるに従って、鉛ブロックでは塑性変形が著しくなるため、弾性的に取り扱った場合と大きく異なる。しかし木片では組合せ 6 L 以外は、傾向がよく一致している。

4.4.4 再現性

本試験機における衝撃値の再現性は、鉄パンチー鉛、木片ー砂のいずれの場合も衝撃波形が示すごとくかなりよい。衝撃値のばらつきは、落下高をパラメータとして鉄パンチの種類および木片の組み合わせのおおのについて、各 3 回の落下実験を行なって得た平均衝撃値からの各最大差（絶対値）を全組み合わせについてとって平均したものを、ばらつきの平均として算出した。その値は約 6 % であった。

5. 加 速 度 試 験 機

5.1 構成および能力

本試験機は、油圧ポンプと油圧モータからなる油圧駆動装置で供試体を載せた回転アームを回転させて、遠心力により加速度を与えるもので、比較的小型であるが高加速度を発生させることができ、かつプログラム運転が可能である。しかも電動機による駆動と異なり、多少の電源電圧変動に影響されず、安定な回転、すなわち安定な加速度が得られる。図 5.1 はその外観で、図 5.2 は動作系統を示す。設定回転数に相当する規準電圧を手動、またはプログラムによりサーボ増幅器に与えると、サーボバルブとアクチュエータが動作して油圧ポンプの油の流量を制御し、これにより油圧モータで駆動される回転アームの回転を制御する。回転数のフィードバックは高精度のタコジェネで行なわれる。

本試験機の各部の能力は次のとおりである。

(1) 加速度範囲

標準回転半径 610mm において 0~250g (0~600rpm)

(2) 許容遠心力

6,750g·kg

(3) 最大搭載荷重および容積

67.5kg, 46cm×46cm×46cm

(4) スリップ・リング

350V, 5A, 16接点

220V, 10A, 8接点

スリップ・リングの雑音は、これに 0~500rpm の間で、直流 10mA を流したときの電圧降下変動を測定した。その結果 5A 用リングは 0.42mV 以下、10A 用では 0.3mV 以下であった。直流抵抗は、

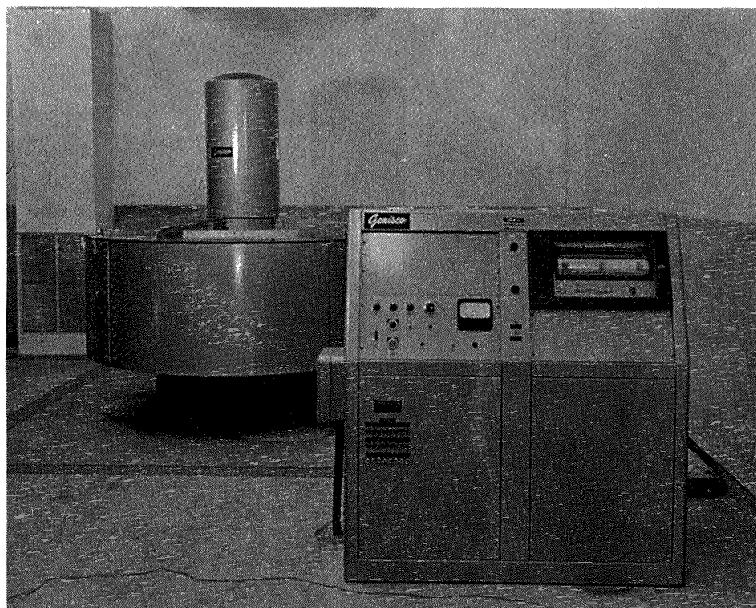


図5.1 加速度試験機外観図

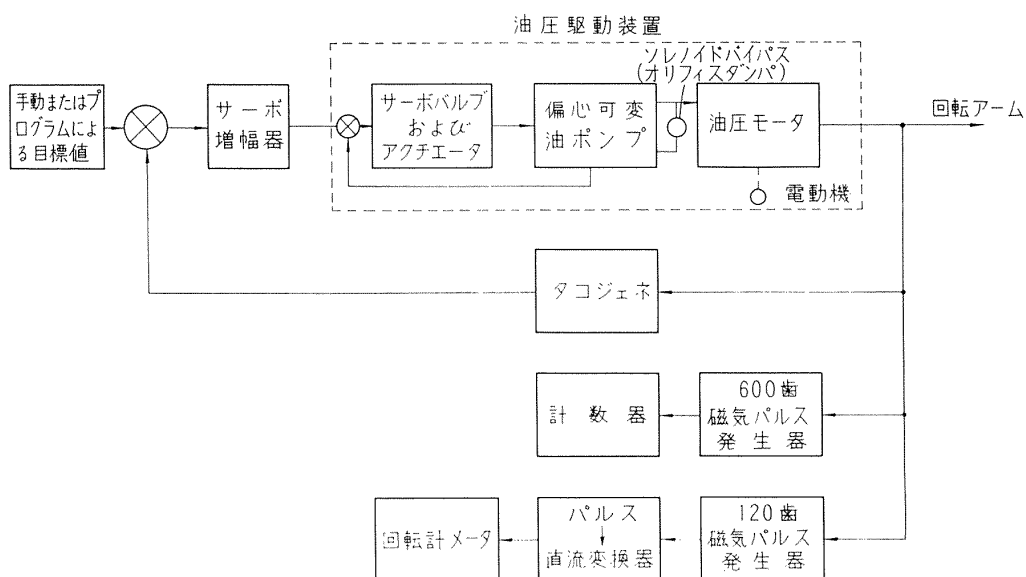


図5.2 加速度試験機動作系統図

5A用のもので、静止、回転時とも 0.3Ω 以下、10A用では、 0.15Ω 以下である。

(5) 流体供給装置

試験される機器に動作状態を与えるため油圧または空気圧を供給する回転流体供給継手で、 $\frac{1}{2}''\phi$ のパイプ6本からなり、油圧の場合は、最高 420kg/cm^2 (6,000psi)、真空の場合は 0.2mmHg が可能である。

(6) 高周波同軸ケーブル

特性インピーダンス 50Ω

(7) 磁気信号発生装置

回転数の精密計測のために1回転600パルス、したがって、 n rpm においては $10n$ パルス/秒を発する。

(8) 油圧ポンプ駆動電動機

7½HP 3相50サイクル。

(9) 安全装置

安全装置としては、ドアー・スイッチのほかに、振り子共振型の動的不平衡検出器がシーケンス回路に組み込まれ、試験中に不平衡状態による振動が発生したときは、回転を自動的に停止させる。振り子共振型検出器は、振り子の相当長を変えることによって検出感度を調整しうるもので、3.2kgの荷重を回転半径760mmの位置に取り付けたとき、170rpmで自動的に停止する。この荷重は、最大搭載荷重の約5%，遠心力は許容遠心力の1.2%にあたり、安全性からの要求を十分満足している。

(10) プログラマー

最大追従速度 117mm/S (7"/S),

精度 76mm/S (3"/S) で0.33%以上。

プログラマーの動作原理は、次のようである。片面に錫箔をはった導電性の一枚の紙を電気ペンでエッチングして、二つの絶縁された領域に分ける。これをドラムに巻いて回転させると、プローブが、二つの領域に対する容量が常に等しくなるようにエッチングされた境界線上を進行し、プローブの運動と連動したサーボ・モータにより、ポテンショメータが回転して直流電圧が発生する。これが設定規準電圧となって、タコ・ジェネの出力と比較されサーボ増幅器にはいる。

加速度試験機は、静特性としては設定精度の良いこと、動特性としては安定性が良いこと、かつ安全に試験を行なえることが要求される。

5.2 静特性

加速度を精度よく設定するためには、回転数が正確に指示され、かつ回転が安定なものでなければならない。それゆえ、回転数指示計の精度および試験機の回転むら、回転速度再現性などが設定精度を定める重要な要素となるので、それらについて測定を行なった。基準の回転計としては「5.1 (7)」の磁気信号発生装置を用いて、発生するパルスを計数する。計数誤差が±1あるので、 $n=100$ rpmのときは1,000パルス/秒であるから測定精度は0.1%となる。回転数が小さければそれだけ誤差は大きくなるが、MILによる加速度試験は、6g以上が普通で、回転数が100rpm以上となることが多いから精度は0.1%以上と考えてよい。

(1) 回転指示計の精度

回転指示計は、回転アームから1回転に120のパルスを発生させてこれを直流電圧に変換し指示

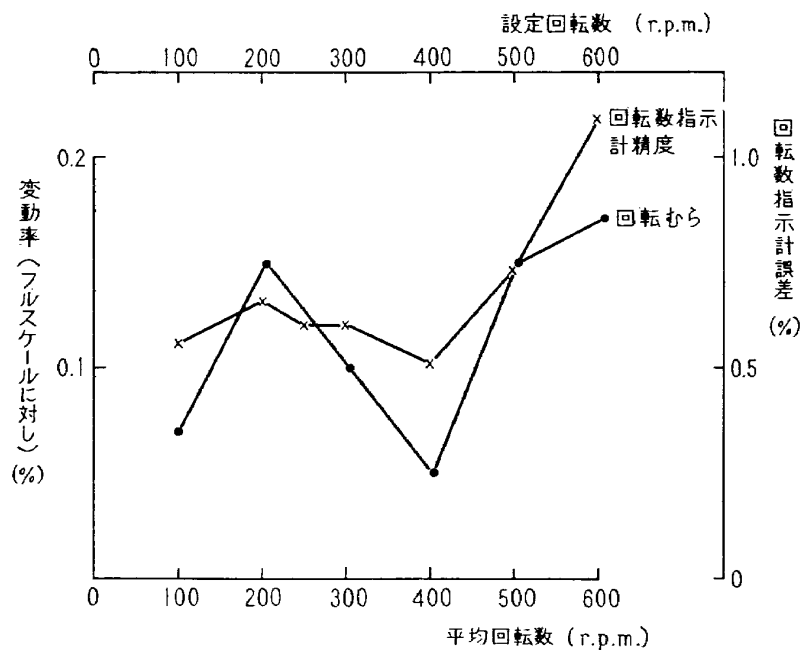


図5.3 回転数指示計精度と回転むら

するもので、上記磁気信号発生装置出力に対する誤差は、図 5.3 に示すようにほとんど 1 % 以下である。

(2) 回転むらと回転速度再現性

回転むらは、回転数を 15 秒おきに 6 回測って、その平均値に対する最大偏差をフルスケールに対する割合で表わすと、図 5.3 に示すように 0.1 ~ 0.2 % におさまっている。

回転速度再現性は、100rpm に設定して回転させてから一たん停止させ、30 秒後ふたたび始動させた場合の回転数の変化で表わすと、約 0.9 % である。

5.3 動特性

加速度試験機の動特性を支配するものは、油圧駆動装置の特性である。その内部の各部分の常数を知り得ないので定量的な特性を求めることは困難であるが、系全体の定性的な特性は次のように知られる。

図 5.2 の油圧駆動装置において、ソレノイドバイパスに組み込まれているオリフィス型ダンパによる流量の増減により、系のダンピングを増減することができる。図 5.4 ~ 図 5.6 に、ダンパ用バルブに目盛られた数字をパラメータとしてステップ入力に対する応答を示した。バルブ目盛②の場合は、図 5.4 から明らかなように過制動で、目盛⑤の場合は図 5.5 により、ほぼ臨界制動、目盛⑦の場合は、図 5.6 により不足制動と見ることができがいずれも動作は安定である。また図 5.7 はバイパス目盛④の場合のプログラム制御の一例を示すもので、プログラム設定電圧に対する応答のぐあいが見られる。また図 5.8 に、ダンパ用バルブ目盛をパラメータとして負荷と時定数の関係を示した。

以上のように本試験機は、精度が良好でかつ安定であるので、加速度環境試験に有用であるばか

りでなく、一般の加速度計の検定にも利用しえるほどである。しかし、安定性、安全性の点から応答をあまり速くしないほうがよいので、急激な加速度変化を与える必要があるときは、衝撃試験によるのがよい。

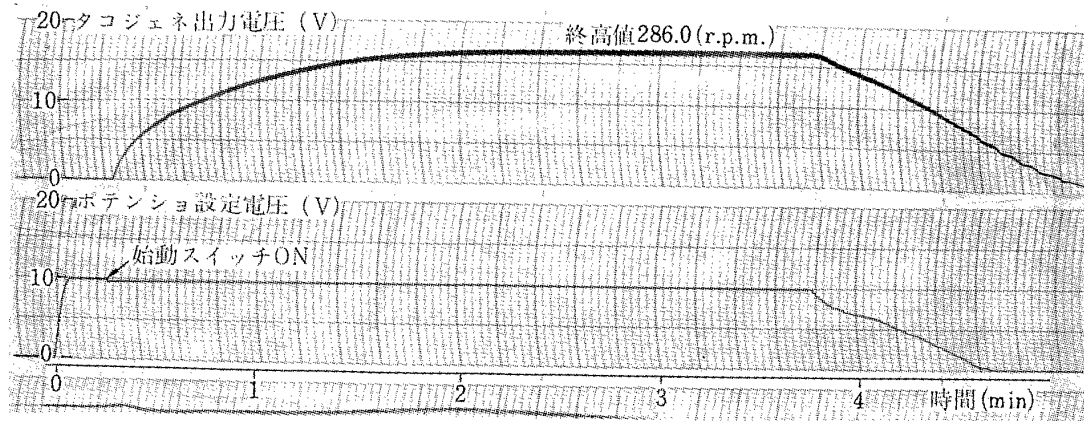


図5.4 応答特性 [バイパス目盛②, 負荷16.31kg]

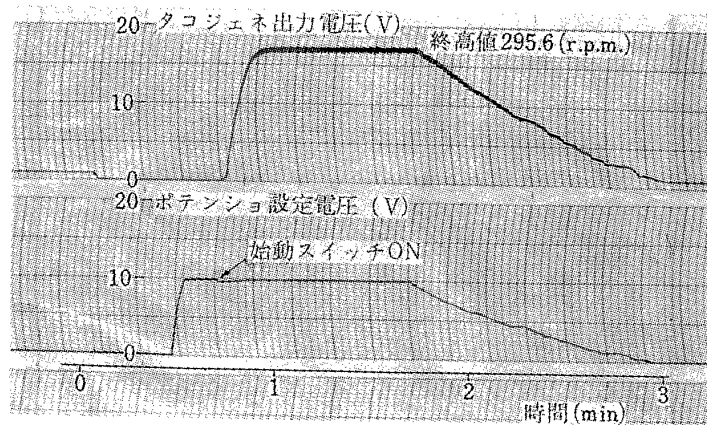


図5.5 応答特性 [バイパス目盛⑤, 負荷16.31kg]

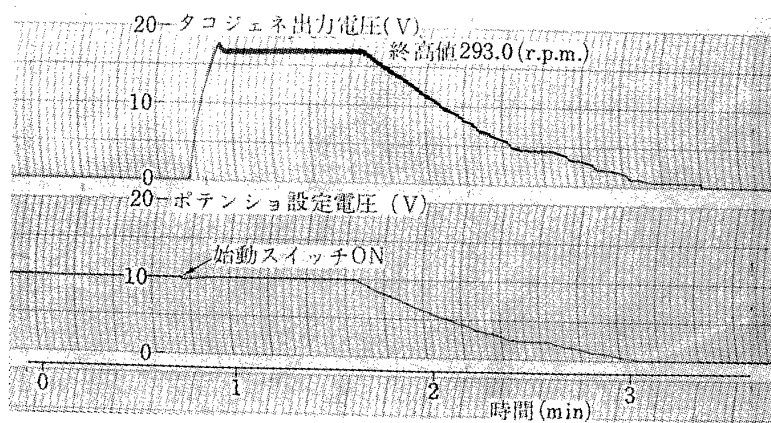


図5.6 応答特性 [バイパス目盛⑦, 負荷16.31kg]

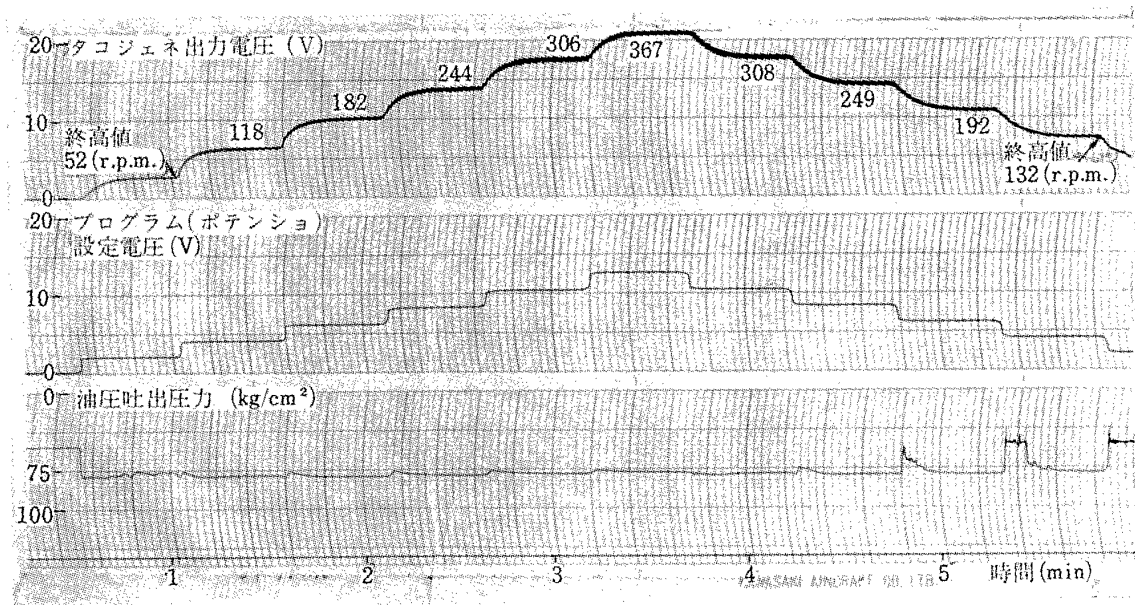


図5.7 プログラムによる応答特性〔バイパス目盛④, 無負荷〕

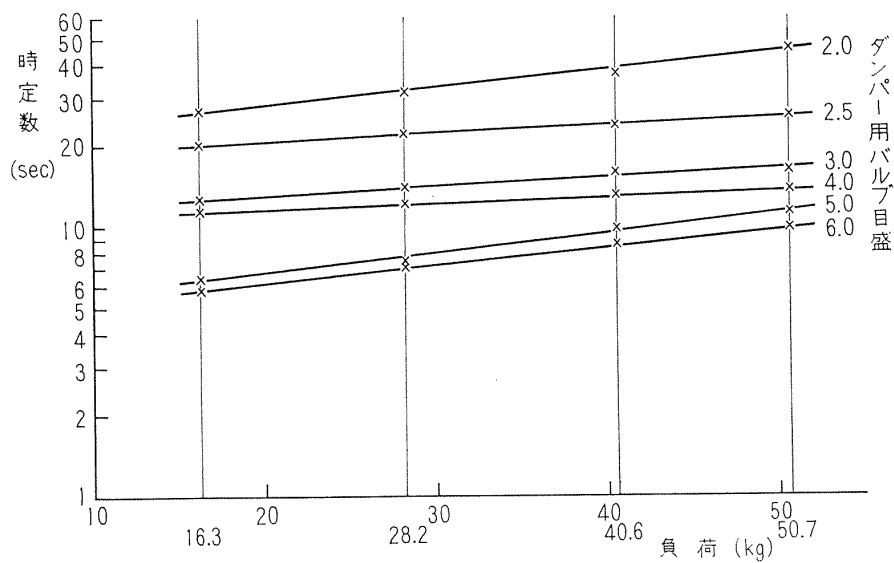


図5.8 負荷と時定数の関係

6. あとがき

以上、環境試験装置について調べた特性を述べた。各装置とも、MILに基づく試験を十分行ない得ることが明らかであり、さらに広範囲な試験にも使用が可能である。

航空機搭載用機器に対する要求事項として、性能、重量、形状等のほかに、特に耐環境性が重視される。機器の研究開発に当っては、常に環境特性の向上が基本的な課題であって、環境試験が必須の過程である。ここに得られた資料が、機器の試験研究のために本装置を活用する場合に、役だちえるであろうと考えている。

付録

A 航空機器の環境条件

A.1 気候的環境

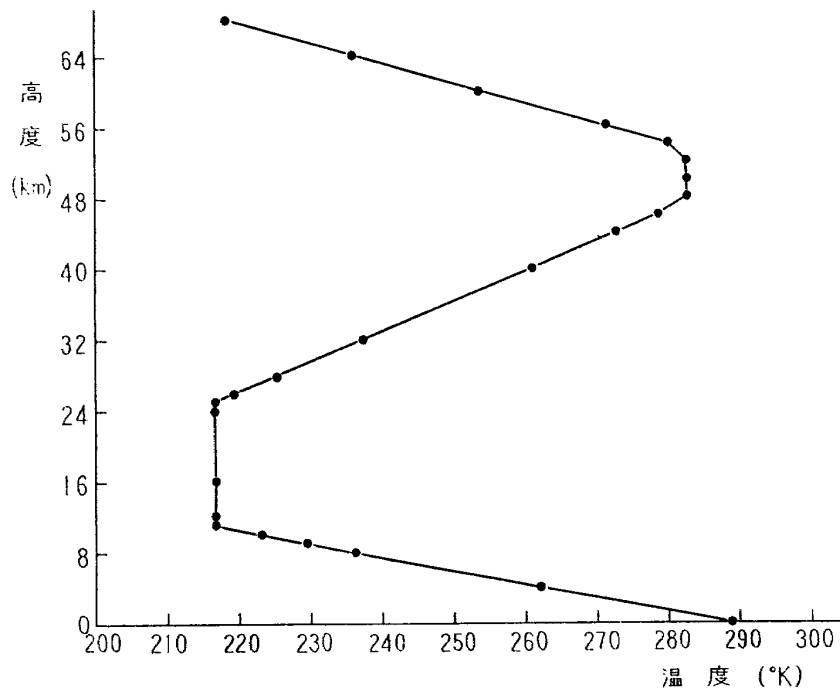
気候的環境とは、温度、湿度、高度（大気圧）および潮風などをいう。ここで初めの三つについて述べる。

(1) 大気温度

地球表面の温度分布は、想像以上に変化が大きく、最近までに記録された最高最低の気温は、それぞれ 63°C (145°F) および -68°C (-90°F) に達している。緯度の比較的高い地域で製作さ

表A.1 最高最低温度に達する地表面積の全地表面積に対する割合

温 度 $^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{F}$)	全地表面積に 対する割合%	温 度 $^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{F}$)	全地表面積に 対する割合%
49 (120°)以上	1.5	$-51(-60^{\circ})$ 以上	7.5
46 (115°)以上	6.0	$-46(-50^{\circ})$ 以上	15
43 (110°)以上	11	$-40(-40^{\circ})$ 以上	23
40 (105°)以上	16	$-35(-30^{\circ})$ 以上	30



図A.1 ARDCの大気表における高度対温度

れた機器が、赤道付近または極地に近い地域で使用されたり、また輸送中にそのような地域を通過することは当然ありうることで、地表面温度の实在範囲を把握することが必要である。表A.1はその一部を示すもので²⁾、最高最低の両極端の温度に達する地表面積の全地表面積に対する割合を表わす。

高度に対する大気温度は、標準大気について次のように定められている。

$$h < 11,000 \text{ m} \quad t = (15 - 0.0065h)^\circ\text{C} \quad (\text{A.1})$$

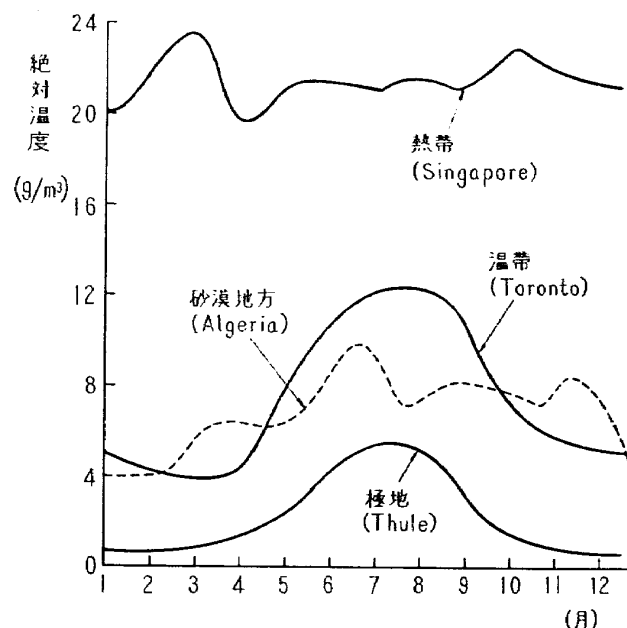
$$25,000 \text{ m} > h > 11,000 \text{ m} \quad t = -56.5^\circ\text{C} \quad (\text{A.2})$$

ここに t は、高度 h (m) における気温で、 $h=0$ m で $t=15^\circ\text{C}$ である。図A.1はARDC (Air Research and Development Command) の大気表³⁾ から引用したもので、高度68kmまでの気温を示す。さらに高高度については、NASA の U. S. standard Atmosphere に⁴⁾、700 km までの温度が記載されている。

(2) 湿度

機器に及ぼす湿度の影響は、大気中に含まれる水蒸気の量、すなわち絶対湿度 (g/m^3 、以下湿度という) が問題になる。たとえば、湿度が $15\text{g}/\text{m}^3$ のとき周囲温度が 25°C では、相対湿度は65%であるが、 17°C では100%になり、それ以下の温度では水滴を生ずる。飽和蒸気圧における絶対湿度は、温度が高いほど高くなるため、高温高湿の状態、またはそれから急に温度が下がったような場合には機器に悪影響をもたらす。

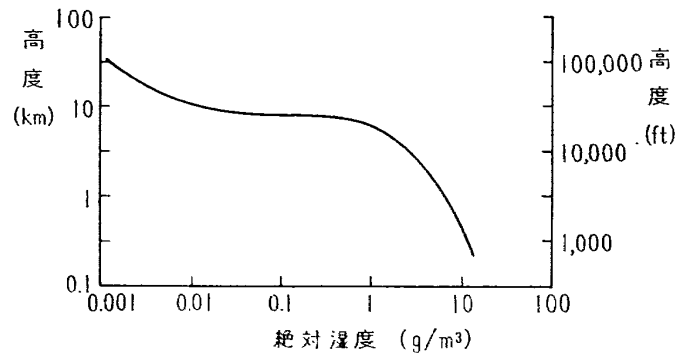
熱帯、温帯、砂漠、極地を代表する各地区 (Singapore, Toronto, Algeria, Thule) について年間の月平均湿度を示したものが図A.2である²⁾。この4地域で最も湿度の高い地区 (Singapore) の夏季における1日間の最高相対湿度は、83%にも達する。地球上における最高および最低の湿度



図A.2 各地方の年間湿度

は、赤道直下付近で 27g/m^3 、極地付近で 0.1g/m^3 と、極端な差がある。

湿度と高度の関係について論じている文献は非常に少ない。図A.3は、温帯地域における高度と湿度の関係を示したもので²⁾、約 30km 付近の湿度は約 0.002g/m^3 で、高度数 km においては、地表面に比較して約 $1/10$ 程度である。しかし航空機に搭載される機器は、すべて地上で組立調整が行なわれるから地上大気の湿りを吸収し、上空に上がれば温度が下がって機器内部は露点またはそれ以下となり、これが航空機の離着陸に伴って繰り返され、障害の原因となる。

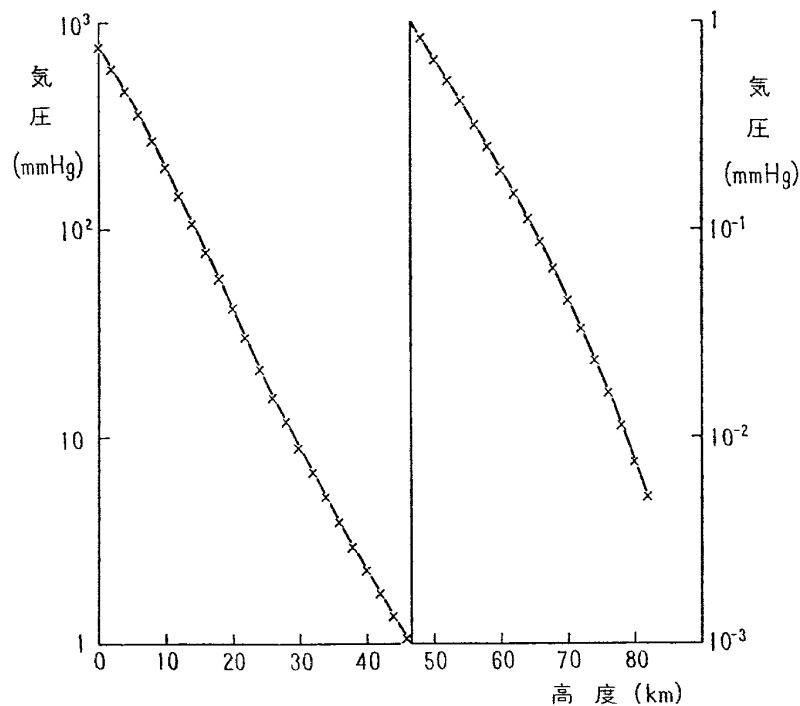


図A.3 温帯地域における高度対絶対湿度

(3) 高度

高度と気圧の関係は、比較的低い高度において、標準大気について次のように定められている。

$h < 11,000\text{m}$ では



図A.4 ARDCの大気表における高度対気圧

$$p = 760 \left(\frac{288 - 0.0065h}{288} \right)^{5.253} \text{ mmHg} \quad (\text{A.3})$$

$h > 11,000\text{m}$ では

$$\log_{10} \frac{P_{11000}}{p} = \frac{h - 11000}{14600} \text{ mmHg} \quad (\text{A.4})$$

ここに p は高度 h (m) の気圧, P_{11000} は 11,000 m の気圧を表わし, その値は 169.75mmHg である。(A.4) 式は高度 50km 付近までなりたつが, それ以上になると, 実測値と比較して, 誤差がだんだん大きくなり, 80km 以上では全く適用できない。図A.4に ARDC の大気表³⁾における 82km までの高度と気圧の関係を示したが, これ以上の高度については NASA の U. S. Standard Atmosphere⁴⁾ に 700 km まで示している。

A.2 動的環境

動的環境とは, 衝撃, 振動, 加速度をいう。

(1) 衝撃

機器は, 輸送中にしばしば, 破壊的な衝突や粗雑な取り扱いによる衝撃を受けることがあり, それは航空機に搭載されて動作中受けるものよりもか酷なことさえある。機器に加えられる衝撃について測定された値の例では²⁾, 輸送時の衝撃として, 道路輸送 6g, 鉄道輸送 20g, 航空輸送 3.7g, また動作中の衝撃として, 航空機の激しい運動の場合 ±10g, 離着陸時 6g, 飛しょう体の発射, 推力停止で 50g, 飛しょう中 8g~20g 等がある。

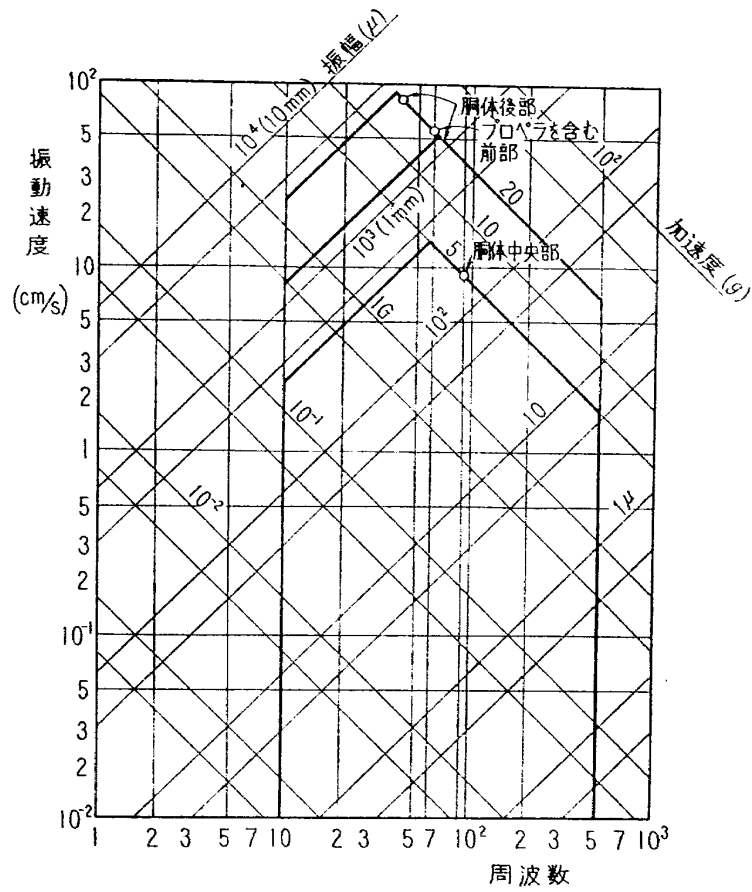
(2) 振動

振動は, 輸送あるいは機器の動作中に起こり, 周波数と振幅は機器によって変化するため, 衝撃よりも複雑である。機器が受ける振動について測定された値の例は²⁾, 輸送時の振動として, 道路輸送 1c/s~3c/s で 3g と 15c/s~40c/s で 1g, 鉄道輸送 2c/s で 1.5g, 100c/s 付近で振幅 ±0.05 mm, 航空輸送 3c/s~500c/s で振幅 ±0.3mm, 動作時には, 航空機の場合 3c/s~500c/s の周波数のうち数 10c/s で振幅 ±3.8mm, 飛しょう体においては, 飛しょう中 30c/s~5,000c/s で 5g~40g 等がある。なお航空機 (レシプロ・エンジン) の位置別の振動例を図A.5に示す⁵⁾。

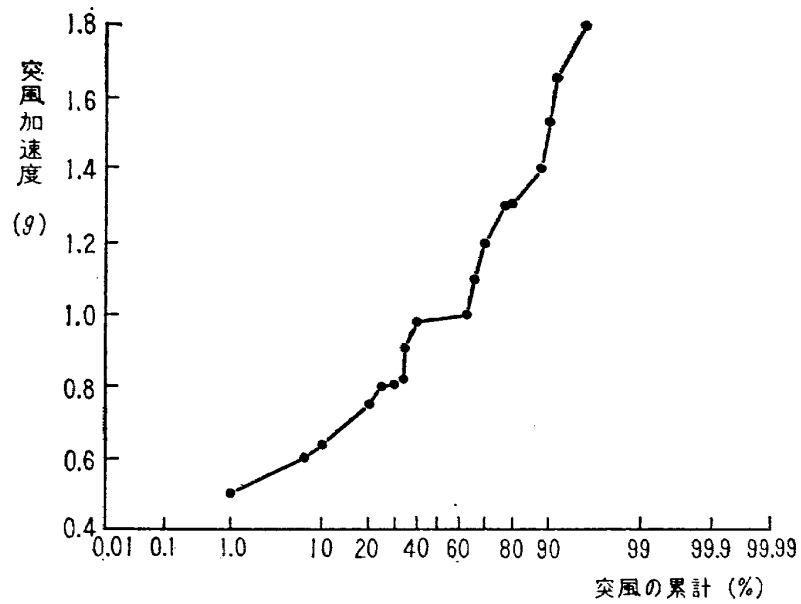
(3) 加速度

航空機に搭載する機器に加速度が及ぼす影響は, 衝撃, 振動と比較してかなり小さい。一般航空機の旋回時の加速度は, 最大 3g 以下で, また突風では 3.5g を越えるものは少ない。図A.6は突風の起こる確率を示したもので²⁾, ほとんど 2g 以内である。

機器が遭遇する環境については, これがすべてではなく, ほかにたとえば砂塵, 塩水等も問題となることがあるが, いずれも特殊な場合と考えられ, 当所において試験の必要性を考慮すべき一般的かつ重要なものとしては上述のものに限ることとした。



図A.5 レシプロ・エンジン航空機の位置別振動例



図A.6 航空における突風確率分布

B 航空機器の環境試験法の概要

航空機器の環境試験法として定められている MIL-E-5272C におけるおもな試験法の概要について述べる。

B.1 高度、温度、湿度試験法

(1) 高度試験

高度試験は、その高度状態における温度と気圧を組み合わせる行なわなければならない。MIL の試験プログラムを図 B.1 に示す。図中の段階 7 以降の点線は、対象機器が 71°C で連続動作するように設計されている場合に適用するものである。

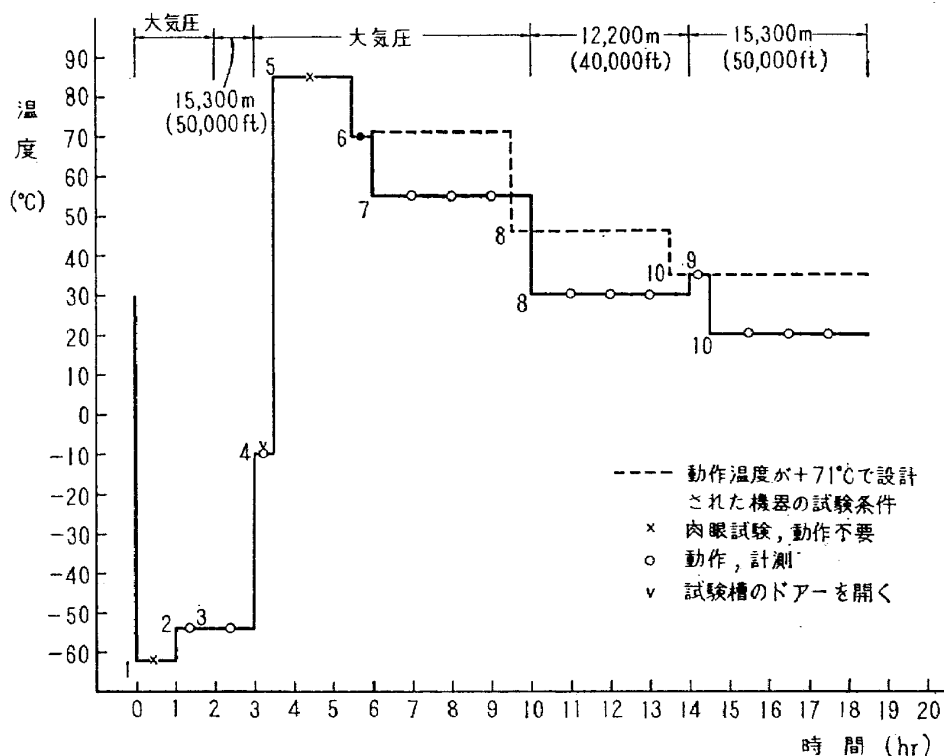


図 B.1 高度—温度試験プログラム

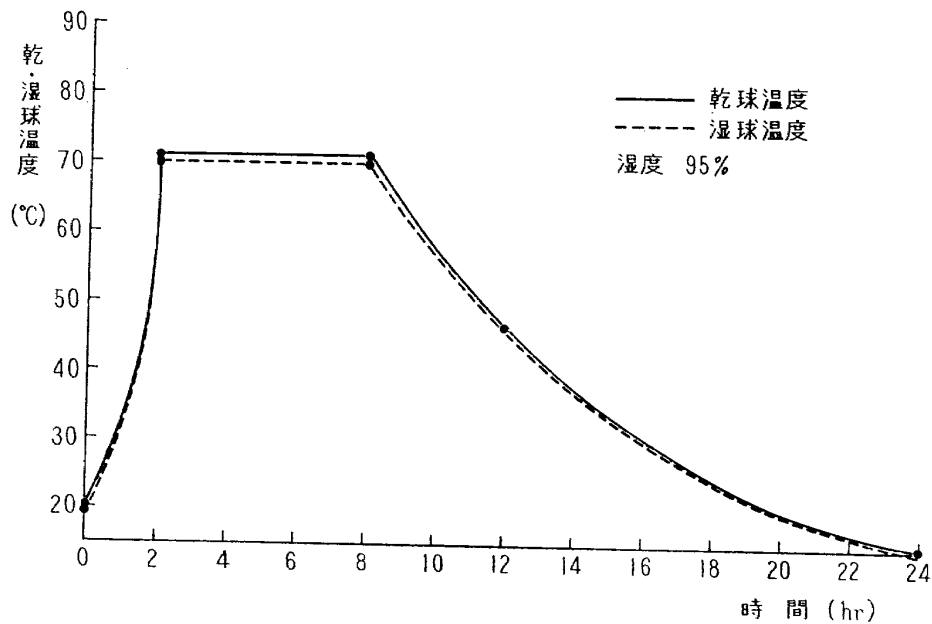
(2) 温度試験

環境試験としての温度試験は、高温低温における定常的な状態で行なうものと、温度サイクリングを行なうものとある^{6),7)}。機器の仕様に特に指定がなければ、 85°C の温度に4時間さらし、その後5分間以内に -40°C に下げて、この温度に4時間さらし、これを3サイクル行なう。当所の試験槽では、 85°C から5分以内に -40°C に冷却することが不可能であるから、このような温度試験を単独で行なうことはできず、別個に簡単な乾燥炉程度のものが必要となる。

(3) 湿度試験

湿度試験は、温度サイクリングを行なって一定の相対湿度状態を維持するものが最も効果的であ

る。図B.2に試験プログラムの1サイクルを示すが、これを10サイクル行なうように定められている。



図B.2 湿度試験プログラム

B.2 振動試験法

(1) 共振試験

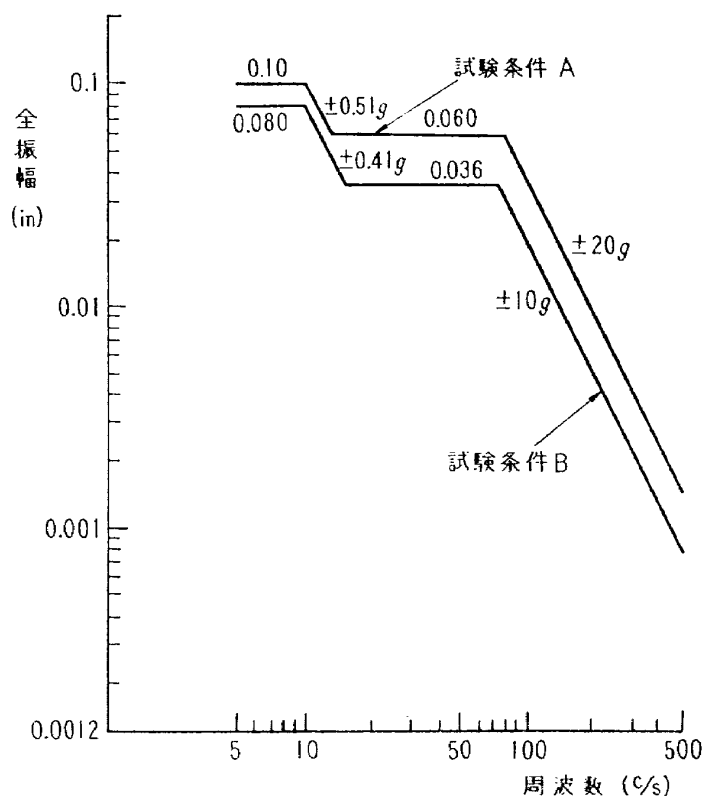
MIL-E-5272C の振動試験法の中で、最も一般的に用いられる方法は次のようなものである。

機器の共振試験は、図B.3に示す振動加速度と周波数範囲について行なう。特に航空機エンジンに直接取り付けられるような激しい振動条件におかれる機器については、その共振周波数において同図の試験条件Aに示す加速度で、互いに直交する3軸方向にそれぞれ連続4時間の振動を与える。その際1箇所以上の共振周波数を有する場合は、最も顕著な共振を示す周波数で行なう。また図の周波数範囲に共振点がない場合は、全振幅 0.018in 周波数 150c/s の振動を直交3軸に12時間ずつ与える。

一般の機器については、同図の試験条件Bに定める加速度と周波数範囲をもって行なうが、共振点が1箇所以上の場合は、表B.1上欄の試験プログラムに従い、共振点が4箇所以上の場合は最も顕著な4箇所を選んで行なう。

(2) 掃引試験

掃引試験は図B.3の試験条件Bに示すごとく、全振幅 0.036in または $\pm 10g$ の加速度のいずれか小さいほうをもって周波数 5c/s~500c/s の間を15分間で掃引する。掃引全時間は表B.1下欄に示す。これは機器の1軸あたりのもので、直交する3軸について同様の試験を繰り返す。



図B.3 振動試験プログラム

表B.1 振動試験プログラム

共振点の数	0	1	2	3	4
共振点で振動させる全時間		30min	1hr	1½hr	2hr
数全掃引時間	3hr	2½hr	2hr	1½hr	1hr

B.3 衝撃試験法

MILでは、機器に対しては 15g, 11±1mS の衝撃値を各軸方向に 3 回, 計18回与え, また緩衝装置などには, 30g, 11±1mS を各軸方向に 2 回, 計12回与えるように規定されている。しかし, 特定の重要な機器 (ジャイロ機器等) については, 一般には 50g, 10~11mS が普通で, なかには 100g, 5mS のような場合もある。

B.4 加速度試験法

航空機搭載機器の加速度試験は, 一般に, その機器の取り付け方向に制限がある場合は垂直方向に 14g, 他の方向に 6g を 1 分間ずつ与える。しかし, 特定の方向に加速度の影響が大きい場合には, 特に定められた規定に従う必要がある。

文 献

- 1) C. M. Harris & C. E. Crede; Shock and Vibration Handbook vol. 2 (1961) pp. 25-36
- 2) G. W. A. DUMMER & N. B. GRIFIN; Environmental Testing Techniques for Electronics and Materials, International Series of Monographs on Electronics and Instrumentation. vol. 15 (1962) Pergamon Press
- 3) Dr. E. A. WOLFF; Spacecraft Technology (1962) pp. 20-64, Spartan Books
- 4) NASA, USAF, USWB; U. S. STANDARD ATMOSPHERE (1962)
- 5) C. M. Harris & C. E. Crede; Shock and Vibration Handbook, vol. 3 (1961) pp. 47-48
- 6) MIL-E-5272C (1959)
- 7) MIL-STD-202B (1960)

TM-75	高マッハ数風洞の消音装置について	1966年2月	牛田健二, 清水福寿
TM-76	コーティングの断熱効果のアナログシミュレーション	1966年2月	小川 敏一
TM-77	テレメータ電波の偏波面の回転を利用したロケットのスピン測定について	1966年3月	田畑浄治, 桜井善雄
TM-78	昇降舵の操舵力特性に関するシミュレータ解析	1966年3月	三浦勇男, 森 幹彦
TM-79	テレメータ機上装置の小型化の研究	1966年3月	堀中野佳直, 慶治
TM-80	安定制御のための一計算法	1966年3月	新田慶治, 二藏
TM-81	吹出式超音速風洞の起動時および停止時における過負荷防止装置	1966年3月	石崎哲久, 斎藤秀夫
			外原政隆, 榎原盛三
TM-82	ビトー管による境界層速度分布の測定について	1966年4月	宗美均, 柏原登喜子
TM-83	ジェットリフトエンジン空気取入口の実験(II)	1966年4月	近藤 博, 増田惣平
TM-84	二段ロケットの低速風洞試験	1966年7月	毛利浩, 田村敦宏
TM-85	航空機の滑走路走行時の振動に関する実験的研究	1966年8月	佐野四郎, 能村 実
TM-87	極小型超音速機用姿勢制御装置の特性解析	1966年8月	小野 幸一
TM-88	プロペラ後流偏向型STOL機の風洞試験(I)	1966年9月	池谷光栄, 畑山茂樹
TM-89	有孔板の振動について	1966年9月	犬丸矩夫, 岡部祐二郎
TM-90	地上付近の横風の影響による小型ロケットの方位角変化	1966年9月	北村清美, 川幡長勝
TM-91	高速タービン翼列二次元試験	1966年9月	木村友昭, 泉 日出夫
TM-92	リフトジェットエンジン試験設備(I) 一台上運転設備一	1966年9月	戸川 隼人, 石黒登美子
TM-94	J-3ジェットエンジン用タービン動翼の固有振動特性	1966年10月	近藤 博, 蓑田光弘
TM-95	超軽量軸流圧縮機動翼の固有振動特性	1966年10月	山崎紀雄, 吉田 晃昇
TM-96	2024-T4および7075-T6有孔平板の曲げ疲労試験と2024-T4平滑丸棒の軸荷重疲労試験	1966年11月	大中山耕一, 菅原 昇
TM-97	高マッハ数風洞について(II)	1966年11月	五味光男, 宮地敏雄
TM-98	40kWプラズマ発生装置の諸特性	1966年11月	武内澄夫, 宮地敏雄
		1966年11月	星谷昌二, 宮地敏雄
		1966年11月	佐野政明, 菰岡一洋
		1967年1月	吉永 崇, 井上建二
		1967年1月	広田正行, 楯 篤彦
		1967年1月	野村茂昭, 相原康彦

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99号

昭和42年2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)44-9171(代表)

印刷所 奥村印刷株式会社
東京都千代田区西神田1-10

