

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-423

ランダム荷重用疲労試験システムの開発

薄 一 平 ・ 飯田宗四郎

1980 年 10 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ランダム荷重用疲労試験システムの開発*

薄 一 平** 飯田宗四郎**

1. 結 言

航空機は安全性と軽量化という相反する要求を常に厳しく求められてきた構造物のひとつである。近年における設計手法の進歩とともに、構造物の強度に関しては、き裂の発生、進展（安定成長）、最終破壊（不安定破壊）への移行という破壊の各段階における材料の挙動や特性をより精密に把握することが必要とされていると良い⁽¹⁾

一般に、航空機の受ける荷重は多種多様の複雑なランダム波であり、これらの荷重が負荷された時の部材の各段階における挙動を推定することはきわめて重要な研究課題である。

本試験システムは疲労き裂進展を主たる対象とし、広範囲のランダム荷重に対して高い精度の試験を確実に、能率良く行なうことを目的に開発されたものである。

疲労寿命推定に関しては古くより多くの研究があり、データも多数蓄積されている。線形破壊力学の確立以来、疲労き裂進展挙動に関しても精力的に研究が進められている。近年、各国において飛行荷重や運用荷重に対する新しいデータ収集システムが開発されており、多くの情報が得られつつある⁽²⁾ これらをモデル化した種々のスペクトル荷重、プログラム荷重も既に提案されており、多くの実験も行なわれている⁽²⁾ したがって、広範囲のランダム荷重下におけるき裂進展挙動を系統的に明らかにすることが期待されており、より精密なモデル化のためにも不可欠な研究といえる。

これらのためには容量の大きい疲労試験機が必要であり、(1)荷重ドリフトが小さい、(2)広い周波数領域で良好な動特性を有する、(3)高精度の制御機器、計測装置を備えている、(4)迅速なデータ処理機能を有する、等の諸条件を満足する疲労試験システムの開発が研究を進めるにあたってまず必要であった。

システム細部についての改良や性能向上は今後も実験

と並行して継続されるが、基本的な開発は一応終了し、所期の目的を達したので以下に報告する。

2. 疲労試験システム

2.1 概 観

本システムは負荷容量±10 ton の電気油圧サーボ式疲労試験装置を中核として、入力信号発生装置、出力信号計測・処理装置から構成されている。システムの構成図および外観を図1、図2に示す。ランダム荷重を対象とする場合は、前述のような試験装置本体に要求される諸性能に加えて、出力信号の処理速度、機能が重要な因子となる。換言すれば、処理装置の性能如何によってシステム全体としての実験精度、実験能率が大きな影響を受けるといえる。本システムではマイクロプロセッサを内蔵するオンラインデータ処理装置を開発し、必要なデータ処理、記録、解析はすべてソフトウェアで行なうこととした。したがって処理機能は多様性、柔軟性、拡張性に富んでおり、大量データの高速処理を可能にしている。

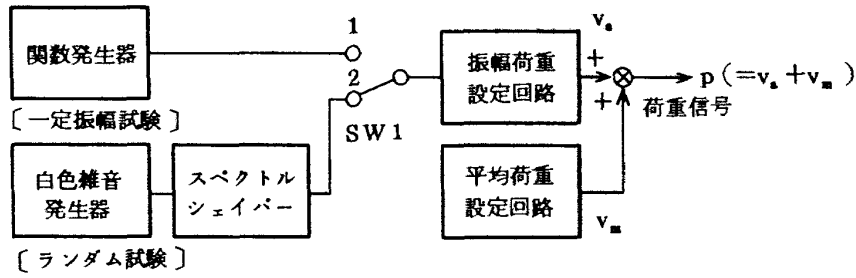
2.2 入力信号発生装置

疲労試験装置への入力である荷重指令信号を発生させる部分で、平均荷重設定回路と振幅荷重設定回路から成る。現時点では、制御特性の検定用に矩形波を発生させる他、正弦波による一定振幅荷重波と所要のパワースペクトル密度を有するガウス性定常ランダム荷重波を主として発生させている。

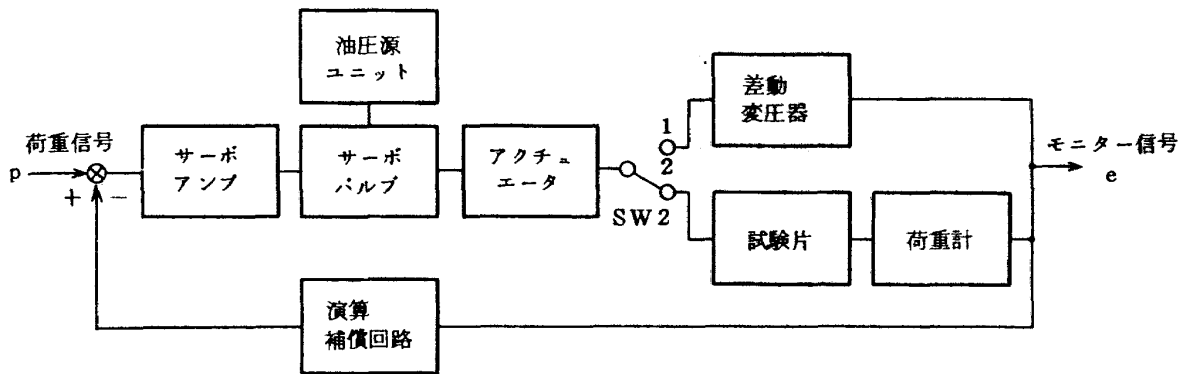
図1-(a)に示したように、一定振幅試験は正弦波、矩形波、三角波の発生が可能な低周波関数発生器の出力を用い、ランダム試験は非周期性低周波白色雑音をスペクトルシェイパーと呼ばれるアナログ回路による線形フィルタを通過させた出力を用いる。対象となるランダム荷重波の周波数帯域は、中心周波数でたかだか20 Hz程度であるのに対し、上記白色雑音発生器は最大DC~20 KHz (-3dB)の帯域でガウス性白色雑音を発生することが保証されており、本実験システムの雑音源として白

* 昭和55年9月2日 受付

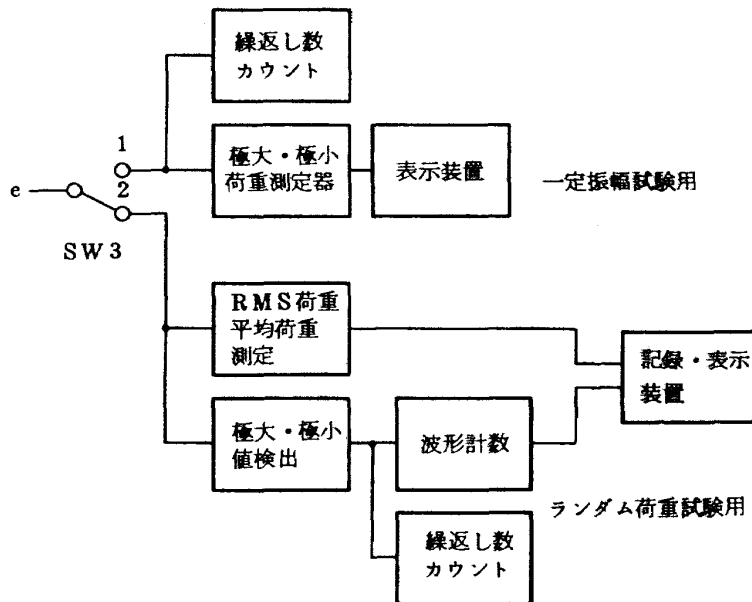
** 機体第二部



(a) 入力信号発生装置



(b) 試験装置本体



(c) 出力信号計測・処理装置

図1 疲労試験システムブロック図

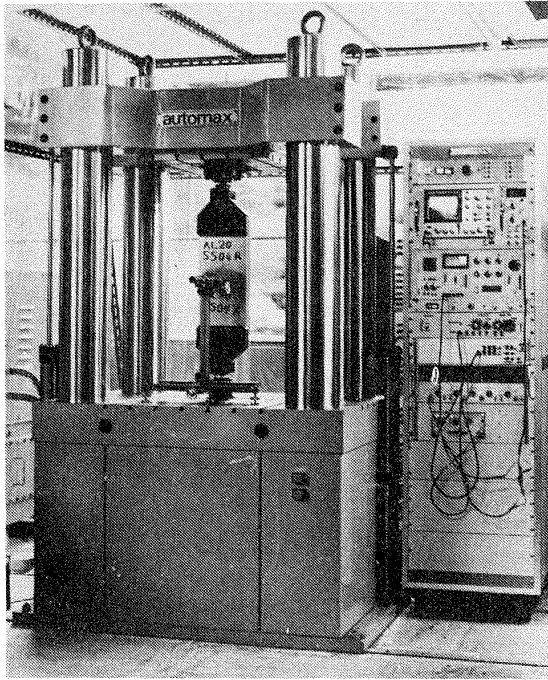


図2 疲労試験システム外観

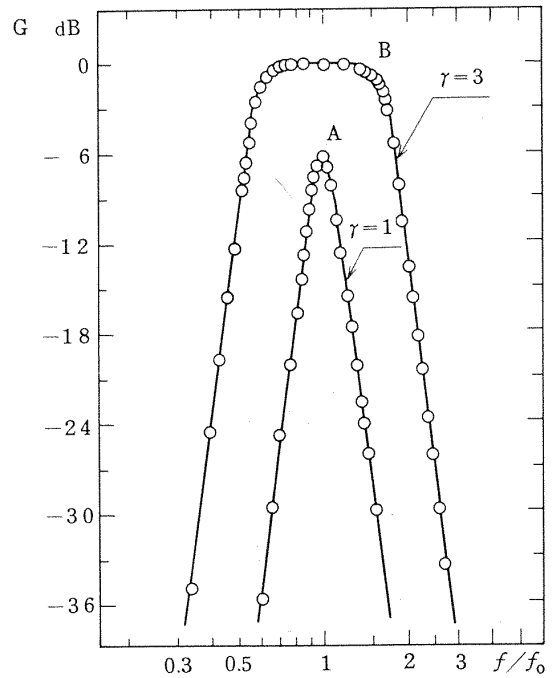
色性，ガウス性とも十分である。

図3はスペクトルシェイパーとして用いた，両側-48 dB/oct の減衰特性を有するバターワース型バンドパスフィルタの周波数特性を検定した例である。実線は計算値を示している。 $\gamma = 1$ の帯域幅をA， $\gamma = 3$ をBとする時の各々のランダム波形の例を図4に示す。Aの中心周波数 $f_0 = 15\text{Hz}$ ，Bは $f_0 = 8.9\text{Hz}$ で実際に実験に用いられた波形である。

前述のように荷重信号は平均荷重設定回路と振幅荷重設定回路の電気的出力を加算して発生する方式であるので，振幅荷重設定回路で扱う信号の平均値は $\bar{v}_a = 0$ であることが望ましい。さらにランダム波の場合は設定感度がスペクトル密度関数の形状や f によらず一定であること，すなわちRMS値が一定であることが望ましい。これらの要求を満足させるために，安定性能に特に留意した専用の演算増幅器が必要であった。試作した増幅器の回路図を付図1に示す。

2.3 疲労試験装置

本体は図2に外観を示したように下部定盤，支柱，天板から成る。試験片は荷重計を介して天板に一端が固定され，他端は下部定盤内に収納されたアクチュエータ（油圧サーボシリンダ）に取り付けられる。これをサーボバルブを用いて上下方向に駆動して所定の荷重を負荷する。負荷荷重に対し試験機の剛性を十分確保し，ランダム波に含まれる高周波成分に対しても共振を防止し，



$$\gamma = f_{CH} / f_{CL}$$

$$f_0 = \sqrt{f_{CH} \cdot f_{CL}}$$

f_{CL} : 低周波側遮断周波数
 f_{CH} : 高周波側遮断周波数

図3 用いたスペクトルシェイパーの周波数特性

試験片の揺動を極力小さくするために支柱は直径200 mmの円柱4本構成とした。試験片取付部，き裂観察部周辺の空間を十分とり，天板についても支柱の任意の高さに固定できるようにして，試験の作業性を改善するとともに各種センサや環境疲労試験用の装置の取り付けを容易にした。

油温は水冷方式で温度制御されているが，従来のオン・オフ形式ではなく比例制御形式に改めた。熱交換器の冷却水水量が連続的に制御されているため油温変動が小さくなり，疲労試験の安定性を向上させている。

非常停止装置については手動の他に油温上昇，油圧異常，フィルタ目づまり等8項目について原因を表示して自動的に試験を中断するように設計されている。これらが感知された場合，あるいは制御系自身の電源が故障した場合であっても過渡的な大荷重が試験片に負荷されない機構になっている。また試験片の最終破断時においては両破面が互いに接触しないよう設計されている。

試験装置の性能を十分活用して実験を行なうためにはループゲインを試験片の剛性を考慮して，最適になるように設定しなければならない。疲労き裂進展実験ではき裂の進展とともに試験片のみかけの剛性が低下するが，

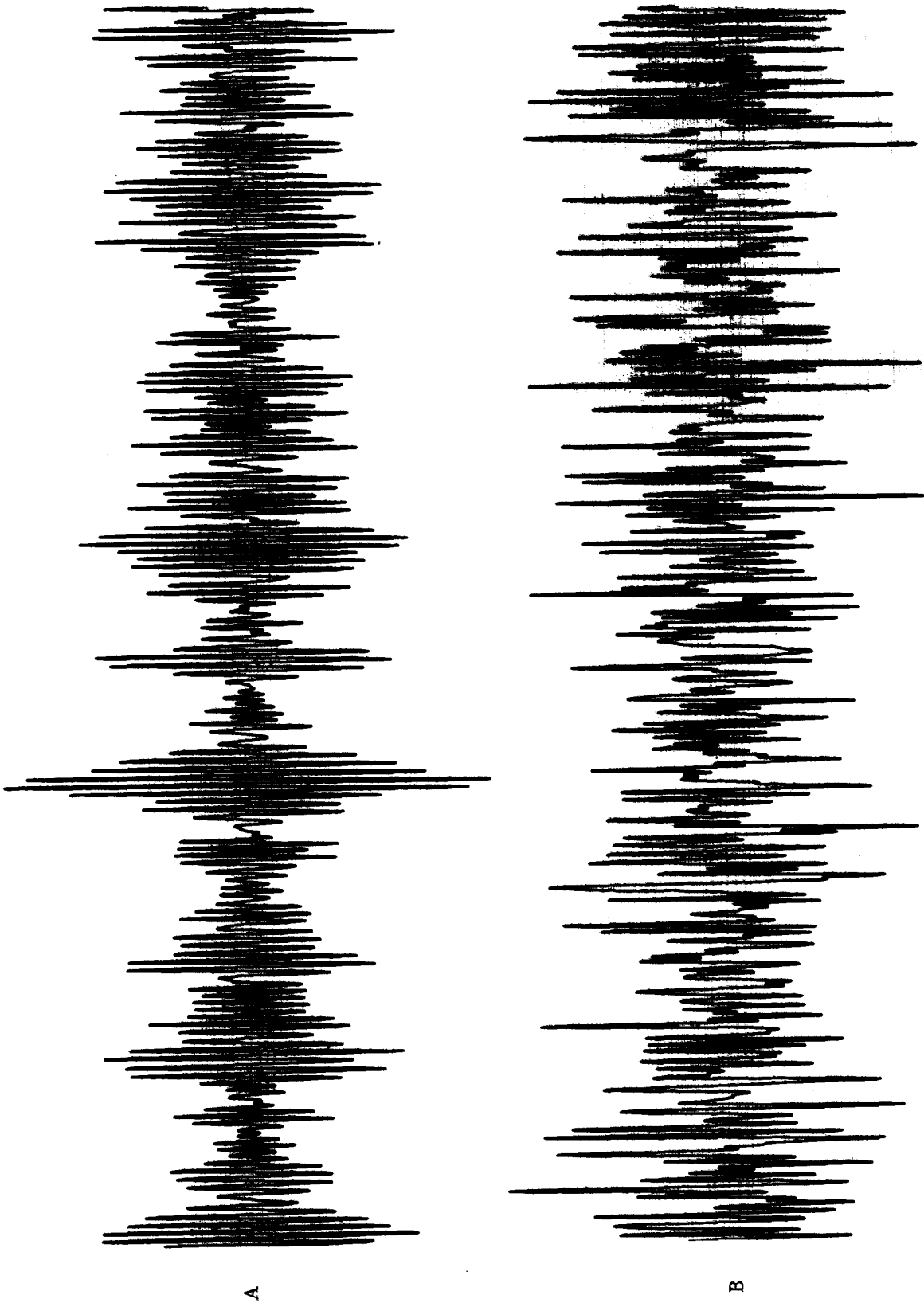


図4 ランダム波形状例

表1 変位精度

変位モニタ 電圧 e v	想定変位 d mm	実変位 d' mm	誤差 $\frac{d'-d}{100} \times 100\%$
10.00	-50.00	-50.03	-0.03
8.00	-40.00	-40.18	-0.18
6.00	-30.00	-30.06	-0.06
4.00	-20.00	-19.82	0.18
2.00	-10.00	- 9.79	0.21
0.00	0.00	0.00	0.00
- 2.00	10.00	9.71	-0.29
- 4.00	20.00	19.55	-0.45
- 6.00	30.00	29.72	-0.28
- 8.00	40.00	40.24	0.24
-10.00	50.00	50.73	0.73

表2 荷重精度

荷重モニタ 電圧 e v	想定荷重 P ton	実荷重 P' ton	誤差 $\frac{P'-P}{20} \times 100\%$
0.004	0.004	0.000	+0.02
1.993	1.993	2.000	-0.02
3.982	3.982	4.000	-0.09
5.976	5.976	6.000	-0.12
7.967	7.967	8.000	-0.17
9.958	9.958	10.000	-0.21

従来のフィードバック回路ではこれを補償出来なかった。本システムでは図1-(b)に示したようにフィードバック回路を専用の演算回路で構成することによって試験中の剛性変化を補償して、油圧源の能力の限度内で常に最適制御を行なうようにした。

表1, 表2に本試験装置の静特性を示す。表1は変位モニタ電圧の精度を求めたものである。通常の試験においては±50mmのアクチュエータ変位量に対し±10V出力を持つ差動変圧器の出力電圧(変位モニタ電圧)を変位量(想定変位量)とみなしている。表1の実変位は0.01mmの分解能を有するハイトゲージを用いた測定結

果である。表2は荷重モニタ電圧の精度を求めたものである。通常の試験においては±10tonに対し±10V出力を持つ荷重モニタ電圧を荷重値とみなしている。表2の実荷重はループテスタの測定結果である。これらの表より概略誤差は±0.5%以内であることが認められる。

図5に荷重制御で行った試験機の動特性の測定例を示す。DC~120Hz(-3dB)の帯域幅を有し、DC~30Hzの周波数領域ではゲインが平坦で位相遅れも許容できる特性である。試験周波数領域で十分な精度が期待できる。荷重ドリフトも定常状態ではほとんど認められなかった。予備試験時の測定によれば、2週間ないし1ヶ月の試験に対し±0.2%以下であった。

本試験装置は以上のような静特性、動特性、安定性を有しており、これらの特性を持つ高性能試験装置によって初めて広範囲のランダム試験が可能となった。

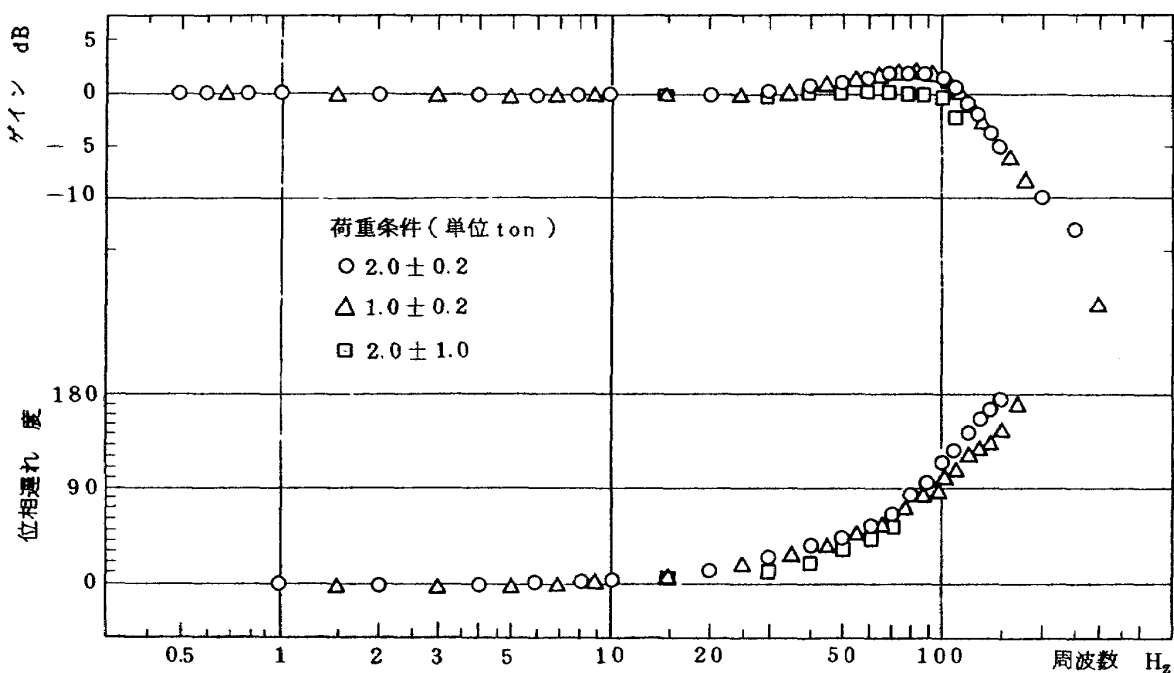


図5 疲労試験装置動特性

2.4 出力信号計測・処理装置

表1, 表2より明らかなように, 変位, 荷重いずれのモニタ信号もフルスケールが±10Vの電圧に直線的に変換されて出力される。したがって変位制御で試験を行う場合も荷重制御試験と全く同様に計測, 処理される。

一定振幅荷重試験において最も重要な情報は, 正弦波の山の値(極大値)と谷の値(極小値), すなわち極大荷重値と極小荷重値およびそれらの安定性である。

本システムでは, 荷重繰返し数をカウンタで計数するとともに, 動的零位法を応用した⁽³⁾極大・極小荷重測定器を用いて, これらの値を常時計測できるようにした。

図6に示すように, アナログ回路部とブラウン管オシロスコープで構成されている。荷重モニタ信号に精密基準電源から分圧された安定度の良い直流電圧 P_{max} , P_{min} を差し引いた電圧をオシロスコープの入力とする。 P_{max} , P_{min} は可変で, 直接計測できるので,

図6に示すようにオシロスコープ上で山および谷がそれぞれ零電位となるように調節すれば, その時の P_{max} , P_{min} は荷重モニタ信号 e の山および谷値に相当する電圧を示しており, これより各荷重値が求められる。現在使用しているオシロスコープの感度は最大 $1mV/div$ であるので, 0.005% 以上の分解能を有しており, 本システムの荷重計測として十分な精度を持っているといえる。アナログ部分の回路図を付図2に示す。

ランダム荷重試験では, 従来出力波形の一部をデータレコーダ等に記録しておき, 後に大型計算機等を用いて必要なデータ処理を行なう方式が多かった⁽⁴⁾⁽⁵⁾しかしこの方式は不便な場合が多く, 労力と時間を要するという欠点があった。長時間持続してデータ収集, 処理を行なう目的には汎用の大型計算機は明らかに不向きである。

本システムではアナログ回路, A/D変換器, マイクロコンピュータから成る専用の波形計測・処理装置を開

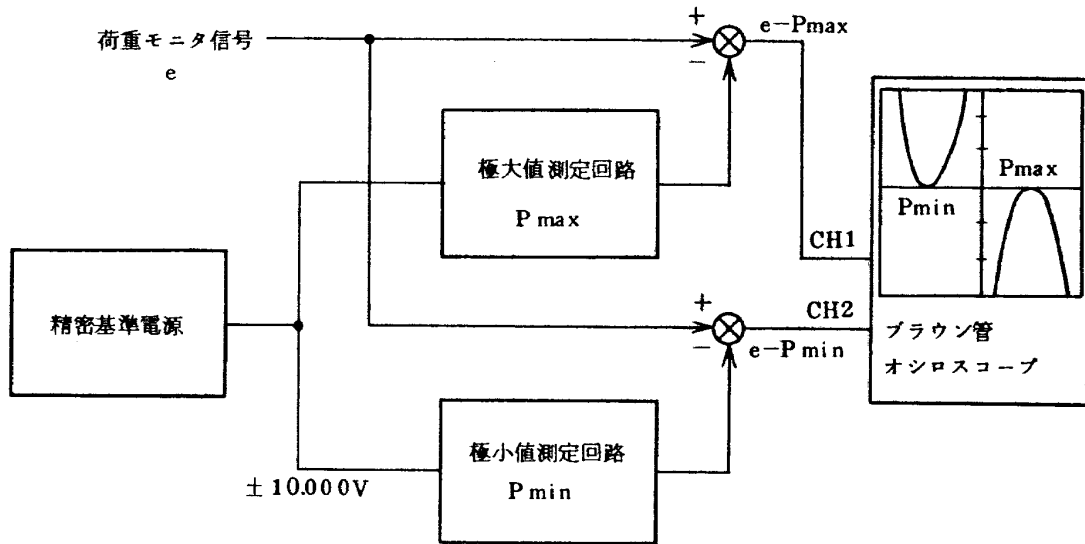


図6 極大・極小荷重測定器説明図

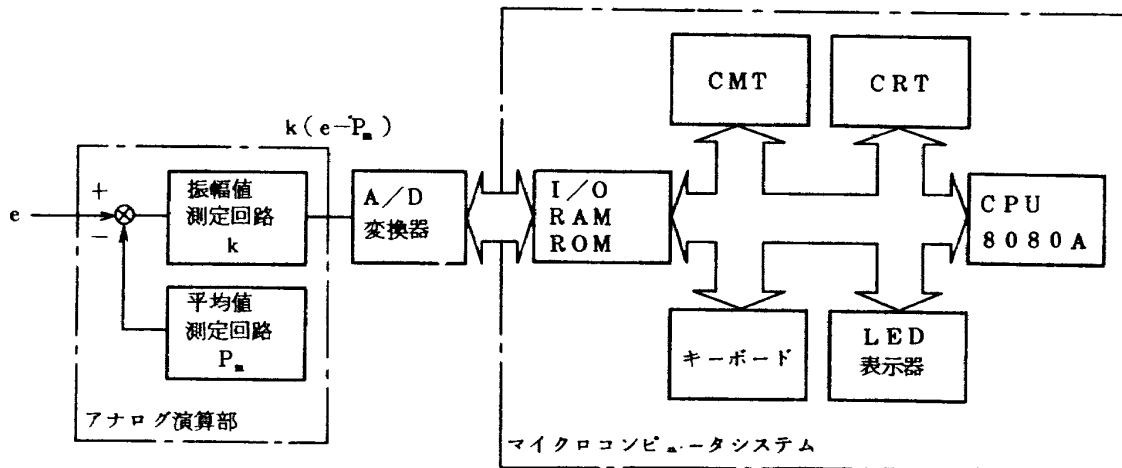


図7 ランダム波計測・処理装置ブロック図

発し、これを直接接続して必要とされる多くのデータをオンラインで収集、処理できるようにした。図7に装置の概略を示す。データ処理はすべてソフトウェアで行なう方式とし、実験目的に応じた改良、変更が容易であるよう配慮した。図1に示したように、主にランダム荷重波のRMS値、平均値の計算、繰返し数の計数、疲労損傷評価のための各種波形計数処理、およびこれらの結果の表示、記録に使用されている。装置の中核であるマイクロコンピュータは市販のモジュールを組み合せ、一部回路を付加、修正したシステムである。CPUは8080Aタイプである。これにBASICモジュール(NEC社製, TK-80BS), I/Oおよびメモリーボード(NEC社製, TK-M20K)を加え、入力装置としてキーボード, A/D変換器(MN社製, 5150), 外部記憶装置としてカセット磁気テープ装置(TEAC社製, MT-2-04), 表示装置としてLED表示器, CRTを有している。ユーザー使用領域は約16KBで, BASIC言語と機械語が利用できる。現在は多くのプログラムは処理速度を優先して機械語で書かれ、これらのプログラムをBASICプログラムで管理している。A/D変換器の主な仕様を表3に示す。CPUの演算速度に対して変換速度は十分であるが、分解能については±5Vのフルスケールに対して8bitに固定されているので、種々のDC成分を含む荷重モニタ信号を直接入力する方法では精度要求を満足できない。図7におけるアナログ演算部はA/D変換器の分解能を最大限に活用するための一種の出力変換回路であって、荷重モニタ信号の平均値成分(DC成分)を打ち消し、適当なRMS値となるように増幅する回路である。現在はすべての入力信号を平均値0V, RMS値1.25Vに変換するように設定される。したがってマイクロコンピュータは荷重モニタ信号をその平均値レベル、振幅レベルの如何にかかわらず常にRMS値の±4倍をフルスケールとするランダム波としてデータ処理することができる。付図3に回路図を示す。荷重モニタ信号の平均値成分に相当する電圧、および

RMS値1.25Vを得るための増幅率はモニタ端子に出力されているので、これらの値から試験片に負荷されているランダム荷重の平均値, RMS値を計算できる。

本システムではアナログ演算部の上記機能を利用して、あらかじめ負荷したい平均荷重値とRMS荷重値を設定しておき、試験時のマイクロコンピュータの計算結果が平均値0V, RMS値1.25Vになるように入力信号発生装置の振幅設定回路および平均値設定回路の微調整を行ない、常に所定のランダム荷重が試験片に負荷されるように監視・制御する。表4に試験時の平均値, RMS値について、設定誤差(すなわち実際の荷重の設定値からの誤差)の記録例を示す。1回の計算は $16^4 (=65536)$ 回のサンプリングごとに行なわれる。

本装置の波形処理のフローチャートを図8に示す。PEAK, RM, HLはいずれも波形計数法の名称であって詳細は別に報告する。1巡に要する処理時間は約1mSecである。A/D変換器のサンプリング速度は可変であるが、現在は十分余裕をとって2mSecに設定されている。

以上述べたように、本装置を用いて平均荷重値, RMS値を常時精度良く計測するとともに種々の波形計数もオンラインで同時に処理しながらランダム荷重下の疲労試験を行なうことができるようになった。

表4 ランダム荷重設定誤差測定例

	平均値 誤差 %	RMS値 誤差 %
1	.0137	-.0840
2	.0061	-.0397
3	.0076	-.0504
4	-.0199	-.0550
5	0	.1434
6	-.0123	-.0077
7	-.0107	-.0504
8	-.0245	-.2015
9	-.0214	-.0199
10	-.0367	.0255
11	-.0062	-.1328
12	.0350	.0045
13	.0549	.0076
14	.0442	.0640
15	.0503	.0839
16	.0610	.0579
平均	.0088	-.0159

表3 A/D変換器の主な仕様

変換方式	逐次比較方式
分解能	8bit
入力範囲	±5V
変換時間	2.5 μSec
出力	トライステート パラレル, シリアル
消費電力	680mW

3. 結 言

広帯域ランダム荷重を含む種々の荷重条件下において、主として疲労き裂進展実験を行なうためのシステムを開発した。以下に主な特長を列記する。

(1) DC~120Hzの試験周波数領域を持ち、特にDC~30Hzにおいては良好な動特性を有する。

(2) 油圧配管系、冷却系統の改良により高い荷重安定性を得るとともに、如何なる場合にも試験片に意図しない過荷重が加わらないようにした。

(3) き裂進展実験に特有の試験片剛性低下に対してはこれを自動的に補償する演算回路を制御系に組み込むことにより、常に最適制御下で試験を行なえる。

(4) 独自の計測装置により、実験目的に応じた高精度の荷重(あるいは変位)設定、計測が可能である。

(5) ランダム波に含まれる高周波成分に対する揺動を極力減少させるため、4本支柱構成である。この構成により試験機剛性を高くするとともに、実験の作業性についても向上した。

(6) 特にランダム試験に対しては、マイクロプロセッサを内蔵した専用のオンライン計測、波形処理用機器を備えており、データ処理をソフトウェアで行なうことが可能である。

今後本疲労試験システムを用いて信頼性の高い試験データを蓄積し、更にシステムを発展、充実させる予定である。

参 考 文 献

- (1) 日本航空宇宙工業会編；航空技術水準の向上に関する研究調査 Ⅱ ； 1979. 3
- (2) 日本航空宇宙工業会編；航空宇宙技術動向 Ⅱ 7 ； 1980. 3
- (3) 内藤良弘；各種構造用材料の疲れき裂進展に関する研究；東京大学学位論文，1974. 3
- (4) 宮本博，福田収一，ランダム荷重下の巨視的疲れき裂伝ばシミュレーション；日本機械学会講演論文集，Ⅱ 730-7，1973
- (5) 薄一平，岡村弘之；定常ランダム荷重下の疲労き裂進展(第1報，試験システムおよびS45Cの実験結果)；日本機械学会論文集386号，1978. 10

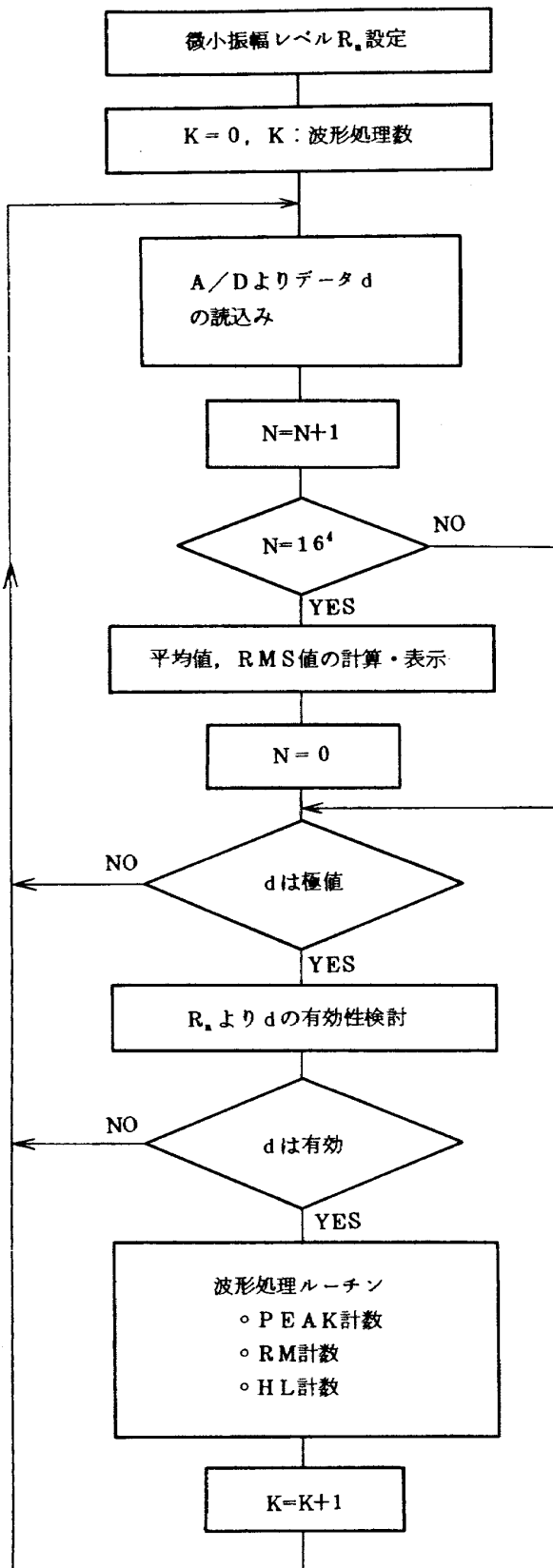
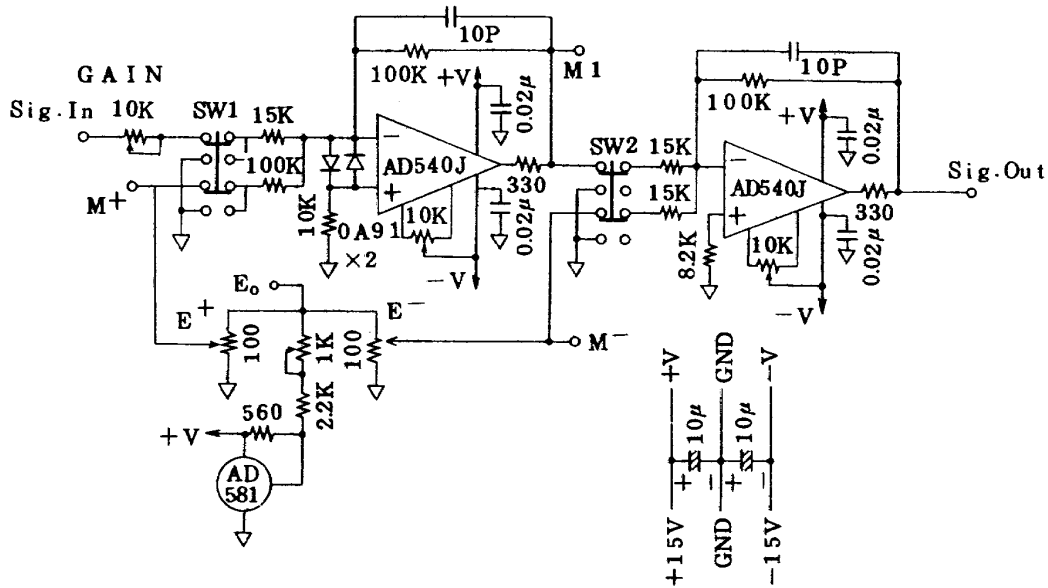
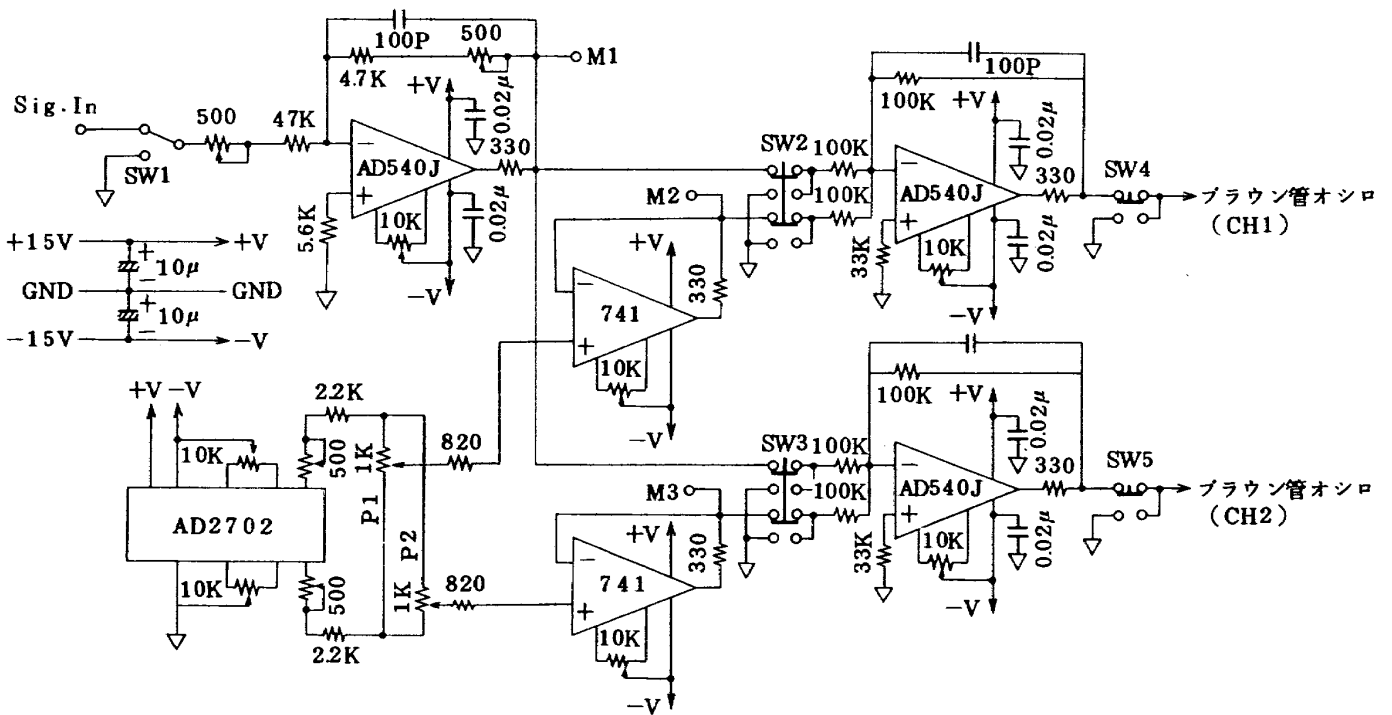


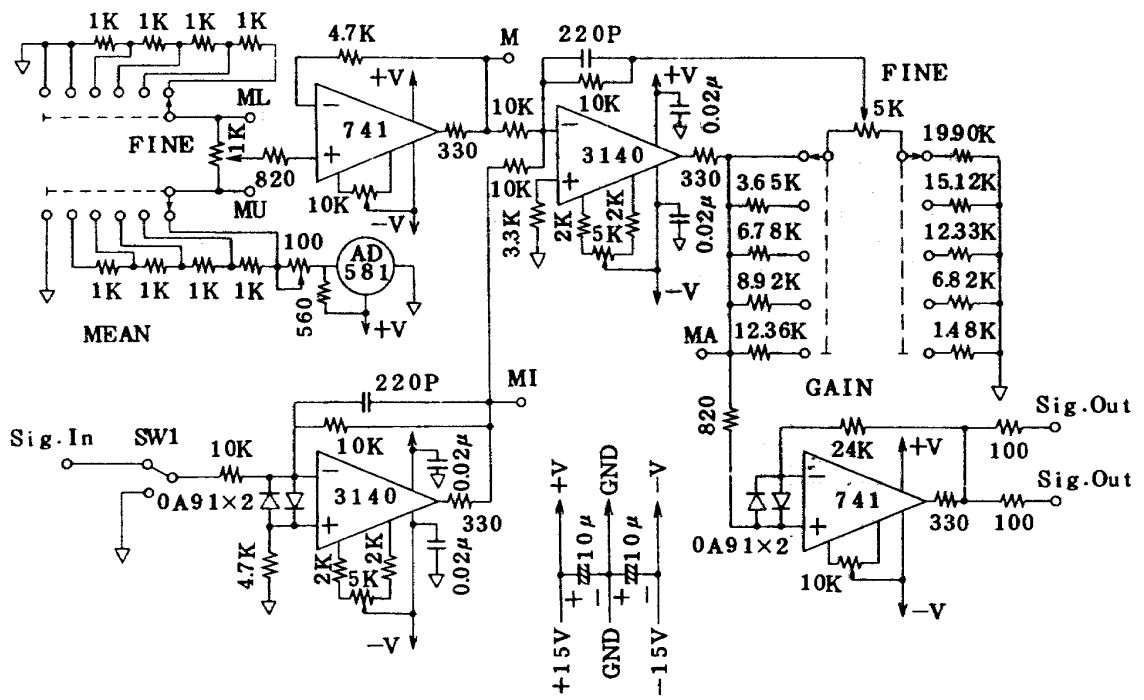
図8 波形処理手順



付図1 入力信号調整用演算増幅器



付図2 極大・極小荷重測定器



付図3 ランダム波計測・処理装置
(アナログ演算部回路図)

航空宇宙技術研究所資料 423 号

昭和55年10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 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
