

# 計算機制御疲労試験機

## Computerized Servo-controlled Hydraulic Fatigue Testing Machine

山下満男 \* Mitsuo Yamashita・北見 彰 \* Akira Kitami

### I. まえがき

材料試験に計算機を利用することは、単に省力化が図れるだけではなく、新たな試験あるいは従来得られなかつたような新たな情報を得るなど研究領域の拡大にもつながり、特に金属材料の疲労強度試験においては、そのメリットは大きく、近年活発に進められている。

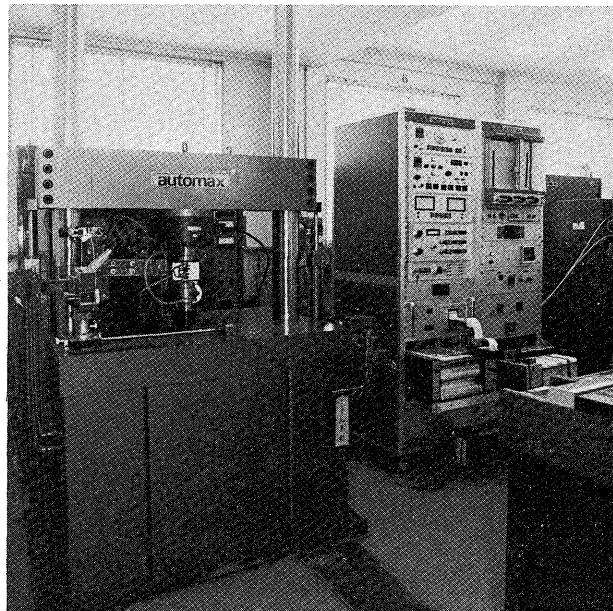
機械構造物構成材料の破損の多くは、繰返し荷重による疲労に起因しており、機器の安全性の確保や信頼性、性能の向上の上で材料の疲労強度設計は非常に重要である。ところが、疲労強度は繰返し荷重状況や環境の影響を著しく受けるため、有効な設計資料を得るには、できるだけ実働条件に近い疲労試験を実施する必要がある。疲労試験の内容が高度化し、また疲労強度設計の基礎データとして低サイクル疲労試験で繰返しサイクル中の応力-ひずみ挙動のような詳細なデータを得るために、データの処理、解析は複雑となる。更に、疲労試験が長時間にわたるため、オペレータは試験機に長時間拘束されるので、その労力は多大なものとなってくる。

計算機の導入は、より複雑な荷重設定が可能となるとともに、自動化によりオペレータの負担を軽減することができるので、これらの問題に対処できる。

我々は、動力炉・核燃料開発事業団原型炉構造材料試験の一環として富士電機に貸与されている電気油圧サーボ疲労試験機2台に、ミニコンピュータを装備して疲労試験技術の高度化と研究の効率化を図ってきたので、その機能の概要を紹介する。

### II. 疲労試験機及びハードウェアの構成

試験機本体の外観を第1図に、計算機を含めた全体の構成図を第2図に示す。疲労試験機は、10t容量電気油圧サーボ疲労試験機2台である。両試験機は、ほぼ同一の機能を有しており、それぞれ高周波誘導加熱装置を備えている。計算機のハードウェアは、中央処理装置としてPANAFACOM U-300、及び周辺機器として磁気ディスク、磁気テープ、グラフィックディスプレイ、ハードコピーライタから構成されている。試験機での発生データは計測ユニットでモニタされ、中央処理装置にサンプリングされる。中央処理装置(CPU)で処理された後、演算制御を行う場合には計算結果を試験機の波形発生器に出力



第1図 疲労試験機  
Fig. 1. Computerized fatigue testing machine

し、荷重あるいはひずみの設定値を修正することになる。

本システムでは、データサンプリングは2台の疲労試験機より行われるが、試験機の制御は1台に対してだけ行われる。これは、次の配慮による。

1台の中央処理装置で、数台の疲労試験機の処理を行う場合、特に問題となるのは、試験中発生するデータのサンプリング、演算制御する場合の計算機出力、及びタイピュライタのキーボードから入力のタイミングが1台の場合よりも一層難しくなることである。したがって、システムを設計する際、これらの点に注意し、試験機の使用状況に適したものとすることが重要となる。本システムでは、測定する荷重・ひずみデータのより高速のサンプリング、及び測定データ処理の省力化を優先し、計算機による制御を1台としている。

### III. 機能

#### 1. ソフトウェア

測定データサンプリングに関しては、富士通(株)のアプリケーションプログラム LAPACを採用している。LAPACの主な機能は、サンプリング定時間間隔処理、サンプリングデータのバッファリング及び磁気ディスクファイルへの転送、外部割込みとの同期、計算プログラ

\* (株)富士電機総合研究所 基礎研究所

第3表 試験項目一覧表

Table 3. Item of system function test

項目	備考
1 外観、構造チェック	
2 シーケンサ基本機能試験	PIO動作、基本演算機能など
3 テレコン基本機能試験	変・復調、制御・表示機能など
4 システム組合せ機能試験	プログラム動作、二重化機能運転・停止、故障検出機能など
5 電源電圧変動試験	DC 90~140 V
6 電源瞬断試験	許容瞬断時間 20 ms 以上
7 突入電流測定	
8 消費電力測定	
9 温度試験	-10~+50°C ただし、-10°C, +50°Cは参考
10 コールドスタート試験	0°C, -10°C (参考)
11 温度上昇測定	
12 電波ノイズ試験	27 MHz, 150 MHz, 400 MHz
13 耐ノイズ試験	ANSI規格 2,500 V 1 ns × 1 μs 1,000 V
14 振動試験	16.7 Hz, 複数幅 0.4 mm
15 ハンマショック試験	
16 衝撃耐電圧試験	1 × 40 μs 4.0 kV
17 絶縁抵抗試験	2 MΩ 以上
18 耐電圧試験	AC 2,000 V 1分間

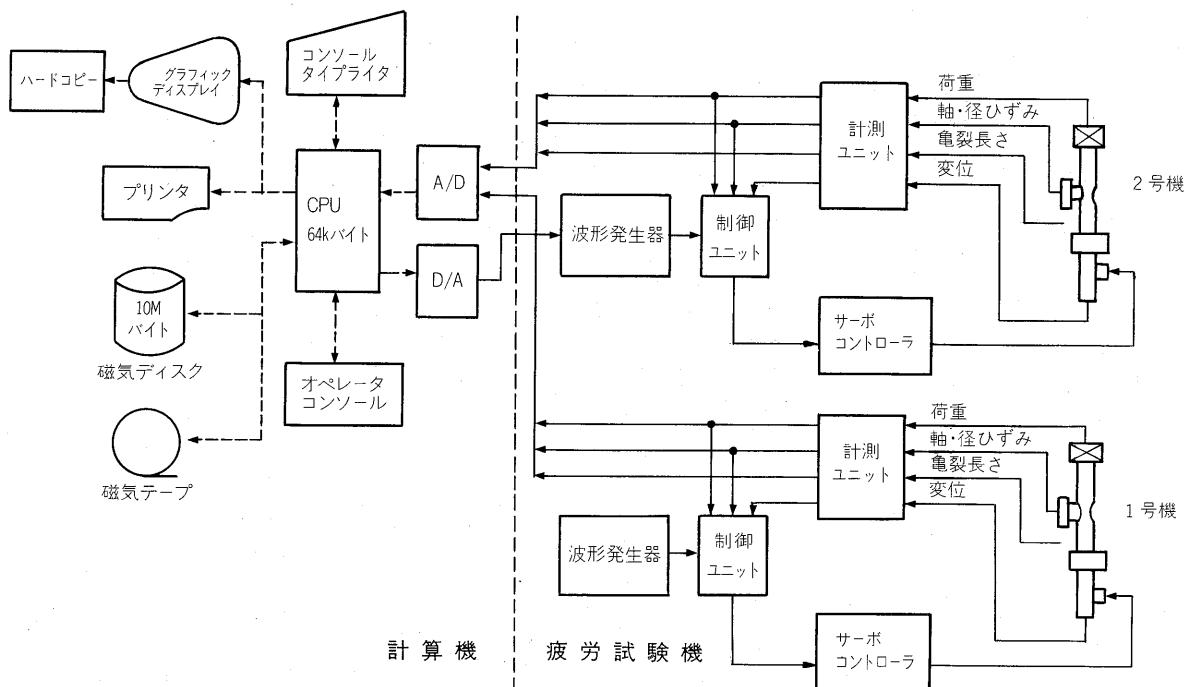
## X. あとがき

高機能、高信頼性が要求される電力設備の制御に主眼を置いて開発したシーケンス制御装置 PS システムについて概要を紹介した。

電力設備における制御装置の電子化、マイクロプロセッサ化は、この1、2年、信頼性の向上と機能分割の思想を織り込んで急速に発展したが、適用範囲の拡大に伴い、今後更に一層の高信頼度化と機能の拡充が進むものと考える。

富士電機では、既に過去10年間にわたって同分野に対するシーケンサの納入、運転実績を得てきたが、その経験と技術を生かす中で、今後とも最新のニーズに合致した信頼性の高い製品を開発していく所存である。

なお、最後に PS システムの1号機は、東京電力(株)須田貝発電所において好評裏に運転中であることを報告するとともに、本システムの開発に際して多大の御指導と御協力を頂いた東京電力(株)殿の関係各位に心から感謝の意を表する。



第2図 計算機制御疲労試験機のブロック図

Fig. 2. Block diagram of computerized servo-controlled testing machine

ムとの同期などである。サンプリング速度は試験機2台分8チャネルを1スキャン最高10ms間隔で行うことができる。プログラムの使用言語は、制御機能関係に一部アセンブリ言語を用いているが、多くは利用者の便を考えFORTRAN言語で作られている。

## 2. 初期設定の入力

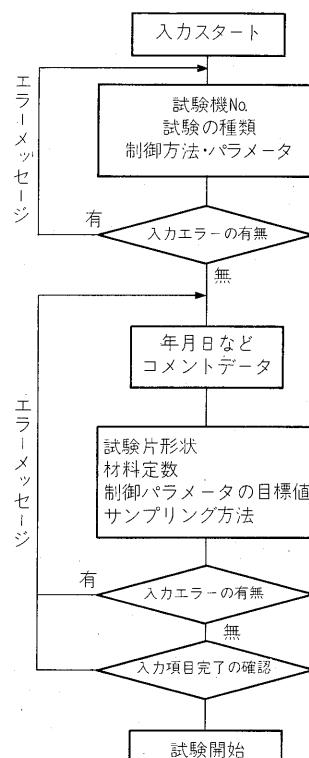
試験条件など初期設定の入力はタイプライタから行うが、入力操作の簡易化と入力操作を防止するため会話形式となっている。入力操作のフローチャートを第3図に示す。

まず、試験機No., 試験の種類、制御パラメータ〔荷重、ひずみ、応力拡大係数（後述）〕、更に計算機で波形発生器を制御するか否かを入力する。これら入力によって、初めてその試験内容に応じて試験条件に関する詳細な質問項目が決定される。これは、入力項目数を必要最小限にとどめ、オペレータの入力操作を容易にするためである。また、ここまでに入力データは以下の実行を決定づけるので、この段階でいったん、入力データに誤りがないかどうかを自動的にチェックするようになっている。

入力エラーがなければ、諸コメント項目、試験片形状、サンプリング方法、制御目標値など試験条件を入力する。入力終了後、再度、各項目のエラー有無がチェックされる。

## 3. サンプリング

サンプリングの設定は、各サイクルにおける最大・最小ピーク点及び1サイクル中における連続的な荷重-ひ



第3図 入力操作のフローチャート  
Fig. 3. Flowchart of input-operation

ずみ曲線とがある。

1サイクル中における荷重・ひずみ値をサンプリングする際、対象とするサイクル数の間隔、サンプリングのきざみ時間間隔、及び繰返しサイクル中最大・最小ひずみ（あるいは荷重）で一定時間保持する場合の保持時間中のサンプリング間隔は任意に指定することができる。

#### 4. 試験内容

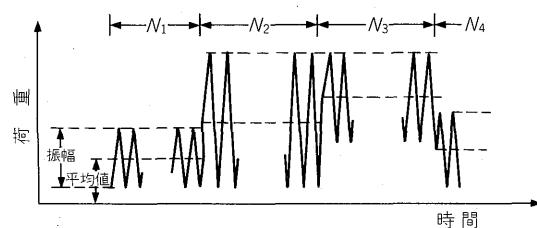
試験項目としては、試験機単体でできる一定振幅荷重（あるいはひずみ）の繰返し試験のほかに、計算機で制御するプログラム波形、演算制御試験（低サイクル疲労試験における軸方向ひずみ換算制御及び破壊力学的パラメータ応力拡大係数制御試験）の機能が準備されている。

本システムの制御波形の計算機による制御方法は、試験機本体の波形発生器の出力波形における振幅と平均値レベルを修正することによって行っている。この際、周波数は波形発生器の設定値のままであり固定である。波形発生器は、非対象三角波、台形波がデジタル設定できるのでかなり多様な用途が考えられる。

以下に、プログラム波形及び演算制御試験について紹介する。

##### 1) プログラム波形試験

実機の構成材料に繰り返し加わる荷重は、単一の荷重レベルという場合は少なく、多くは異なる荷重レベルの組み合せがあったものである。このような繰り返し荷重の変動は、疲労寿命に影響を及ぼす。したがって疲労寿命の評価も例えば、多段荷重に対するマイナ則、ランダム荷重に対するレンジペアカウント法、レインフロー法などで行われている。ミニコンピュータで波形を制御すれば基本的には任意の波形の負荷が可能であるが、本システムでは第4図のように設定される。ある設定荷重を  $N_1$  サイクル繰り返した後、次に異なる設定荷重を  $N_2$  サイクル繰り返す。以下、同様にして最大10とおりのパターンを設定可能としている。指定パターンを終えると、1番目の設定荷重に戻って繰り返すことになる。ひずみ制御の場合も同様である。



第4図 多段荷重制御

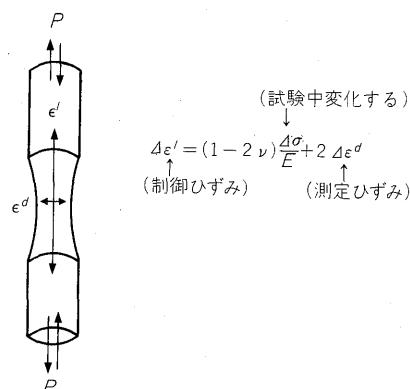
Fig. 4. Programming method for variable amplitude fatigue test

##### 2) 演算制御

疲労試験において、計算機を演算制御する目的として、試験の精度の向上及び新たな制御パラメータ試験がある。本システムでは現在のところ、前者の部類に入る軸方向ひずみ換算制御、後者にあたる応力拡大係数制御のプログラムを備えている。

##### (1) 軸方向ひずみ換算制御試験

低サイクルひずみ制御試験で引張り-圧縮両振り試験を行う場合には、圧縮時の座屈を防ぐために砂時計形試験片が用いられる（第5図）。このような試験片においては、ひずみの測定は直径変化を検出、測定することになる。したがって、正確に軸方向ひずみ制御試験を実施するためには、検出された直径ひずみを計算機により軸方向ひずみに換算して目標の軸方向ひずみ値となるように直径ひずみを修正する必要がある。問題は、この場合に、直径ひずみ-軸方向ひずみ関係式が発生する応力に依存し、更にこの応力が繰返しサイクルとともに材料の加工硬軟化により変化するため、毎サイクル監視制御せねばならないことである。本システムでは、試験中全サイクルについて各サイクルの最大・最小応力値をもとに直径ひずみ設定値を修正している。

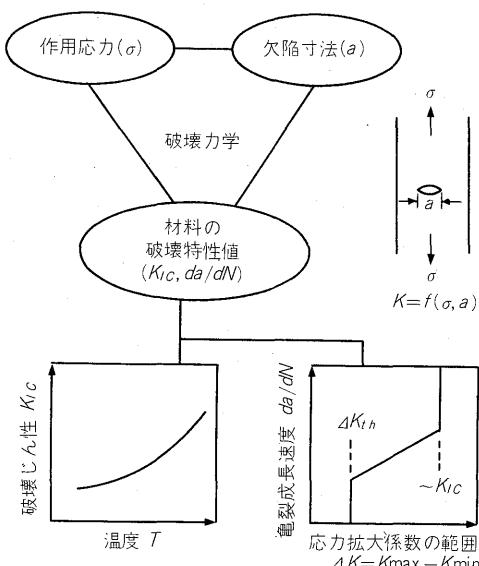


第5図 直径ひずみと軸方向ひずみの関係

Fig. 5. Relation between diametral strain and axial strain

##### (2) 応力拡大係数制御試験

構造材料の中に欠陥亀裂がある場合には、材料の強さ



第6図 破壊力学を適用した欠陥評価の系統図

Fig. 6. Fracture mechanics approach for evaluating crack characterization

は作用応力と亀裂長さとで定まる破壊力学的パラメータ応力拡大係数  $K$  で評価される。亀裂は、繰返し荷重により成長し(応力拡大係数範囲  $\Delta K$  は大きくなる),最終的にはある限界値  $K_{IC}$  で破断するが,ある応力拡大係数範囲以下では亀裂は成長しないという下限値  $\Delta K_{th}$  が存在する。以上の概念図を第6図に示す。下限値  $\Delta K_{th}$  は,定期的非破壊検査時に微小欠陥が見いだされた場合に,その欠陥が実機負荷荷重下で成長し得るかどうか,すなわち許容大きさか否かを判断するのに重要な基準値となる。

本システムでは,応力拡大係数範囲を徐々に下げることにより(試験上は荷重を下げる事になる)求めている。

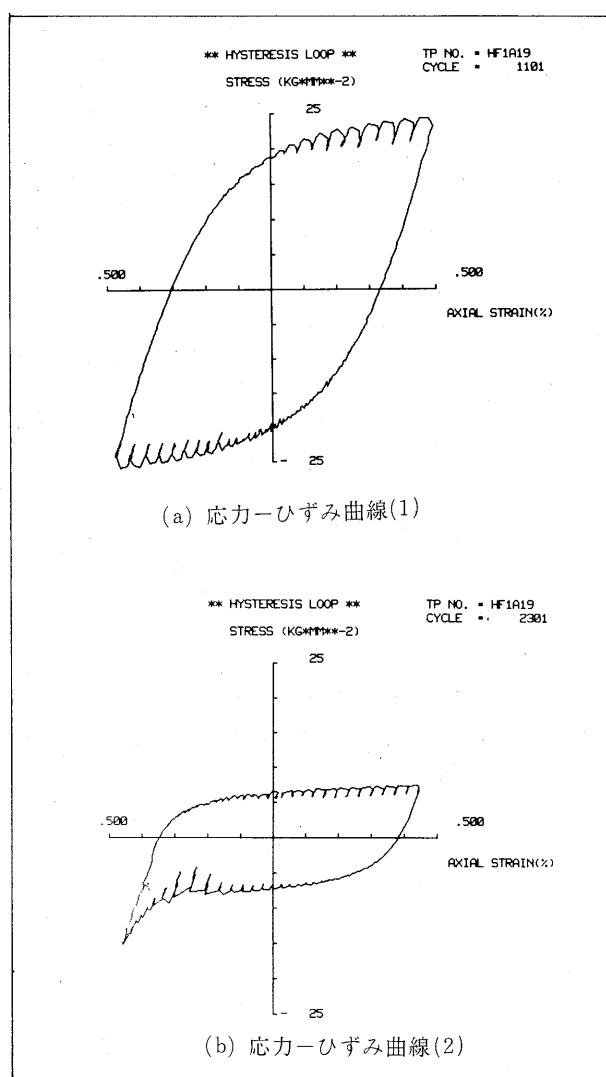
## 5. 出力例

ステンレス鋼(SUS 304)の高温低サイクルひずみ制御疲労試験を行い,入力データ及び試験結果をハードコピー,シリアルプリンタに出力した例を以下に示す。

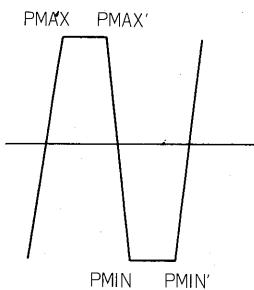
INPUT DATA				PAGE. 1
*UNIT*	*KIND OF EXAMIN.*	*CONTROL METHOD*	*CONTROL WAVE*	
1	STRAIN CONTROL	DIA.	DFG	
**COMMENT DATA**				
* DATE *	* TP NO.*	* DATA SHEET NO. *	* MATERIAL *	
81.12.03	HF1A19	HF01551A19	SUS 304 FORGING	
*SITUATION*				
1/4T THICK	*TEMP*	*CONTROL PARA.*	* TP TYPE *	
550 C	DIA CONT	SOL ARC		
**COMMON DATA**				
SAMPLING	YES			
IDEAL VALUE	* MAX *	* MIN *		
	4.200 V	-4.200 V		
FULL SCALE	* LOAD *	* Dia. Disp.*	* Axial Disp.*	* CRACK GAGE*
	5000.0 Kg	.050 mm	.000 mm	.000 V
TP DATA	* G.L. *	* Dia. *	* WIDTH *	* THICKNESS *
	.000 mm	9.998 mm	.00 mm	.000 mm
* YOUNG Modu.* *POISSON *				
	15700.0 Kg/mm <sup>2</sup>	.30600		0.1833E 02
INPUT RANGE	* MESSAGE *	* ALLOWABLE *	* ERROR SORI *	
	5.000 %	5.000 %	CONTI	

第7図 入力データ

Fig. 7. Input data

第8図 応力ーひずみ曲線  
Fig. 8. Stress-strain curves

( MAX , MIN ) S T R E S S L I S T						
INF =	0 HR	7 MIN 20 SEC	CYCLE =	22		
NO.	CYCLE	FMAX	FMAX'	FMIN	FMIN'	(KG)
1	1	952.5	952.5	-652.5	-652.5	
2	2	882.5	882.5	-940.0	-940.0	
3	3	1210.0	1210.0	-1282.5	-1282.5	
4	4	1020.0	1020.0	-1427.5	-1427.5	
5	5	1307.5	1307.5	-1482.5	-1482.5	
6	6	1402.5	1402.5	-1490.0	-1490.0	
7	7	1480.0	1480.0	-1475.0	-1475.0	
8	8	1205.0	1205.0	-1680.0	-1680.0	
9	9	1152.5	1152.5	-1632.5	-1632.5	
10	10	1217.5	1217.5	-1617.5	-1617.5	



注) 三角波形なので,  
PMAXとPMAX', PMINと  
PMIN'は同一の値が  
印字されている。

第9図 各サイクルにおける最大・最小応力値出力例

Fig. 9. List of maximum and minimum stress values at each loading cycle

第 7 図は、入力データの一部である。第 8 図(a), (b)はそれぞれ最大・最小応力が比較的安定している  $1/2 N_f$  近傍 ( $N_f$ : 破断繰返し数) 及び破断繰返し数に近いサイクルでの応力-ひずみヒステリシス曲線である。引張り、圧縮側にて波状の一時的に応力が低下している現象は、本鋼種にて特に顕著に生じるセレーションといわれるものである。なお、この図は約 20 ms 間隔でサンプリングしたものである。(a)図より(b)図にて最大・最小応力が小さいのは破断直前のためである。また、(b)図で引張り側応力が圧縮側応力より小さいのは、亀裂が生じているためである。第 9 図は、繰返しサイクルに伴う最大・最小応力値の変化を示している。

#### IV. あとがき

以上、富士電機に設置されている計算機制御疲労試験機の機能の概要を紹介した。2 台の電気油圧サーボ疲労試験機にミニコンピュータを装備することにより、研究の効率的運営と同時に演算制御機能を付加するなど多く

の点で改善を図ることができた。今後、更にミニコンピュータの機能を有効に利用し、より有益な疲労データの取得、疲労寿命評価の検討を進めて行きたいと考えている。

なお、紹介した疲労試験機及び計算機ハードウェアは、前述したように動力炉・核燃料開発事業団殿から貸与されたものである。ここに、関係各位の御助言と御協力に深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- (1) 長井哲郎：コンピュータ制御による疲労試験、金属、No. 10, p. 13 (1981)
- (2) 菊川真ほか：ミニコンピュータの利用による疲労試験における計測の高精度自動化、29, 327, p. 86 (1980)
- (3) Wayne D. Cooper : Materials Testing and Automation, Journal of Metals, 32, 7, p. 17 (1980)
- (4) 遠藤ほか：「Rain Flow Method」の提案とその応用、九州工業大学研究報告 No. 28, p. 33 (1974)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。