

技術報告

長時間クリープ疲れ試験機の開発

山口弘二*・西島 敏*²・井島 清*³・金澤健二*

Development of Long-term Creep-fatigue Testing Machines

Koji YAMAGUCHI, Satoshi NISHIJIMA, Kiyoshi IJIMA and Kenji KANAZAWA

Synopsis:

Two types of long-term creep-fatigue testing system have been newly developed; one with a cam-and-lever driven by a servo-electric motor, and the other with a heat-actuator where the temperature is controlled in a closed loop circuit. Characteristics of the systems are summarized as follows:

- (1) Axial strain control is possible with in limited strain rate.
- (2) The mechanism is simple and compact.
- (3) Reliability is high and maintenance is easy.
- (4) The systems are suitable for the tests with long strain holds at high temperatures.
- (5) Simulation tests of actual thermal and strain histories for high temperature component are applicable.

1. 緒 言

高温機器のある要素が装置の起動と停止によつて受ける温度変化を Fig. 1(a) のように考えると、表面部には内部との温度差 ΔT と内部からの拘束で Fig. 1(b) のような熱応力が発生し、その繰り返しによつて熱疲れ損傷が生じ得る。表面部のこのような熱応力履歴を単純に模擬する方法の一つに、Fig. 1(c) のような全ひずみ幅が $\Delta \epsilon_t$ の引張側ひずみ保持台形波を温度一定下で繰り返し与える試験があり¹⁾、広く用いられている。

クリープ温度域における材料の疲れ寿命は、引張側に

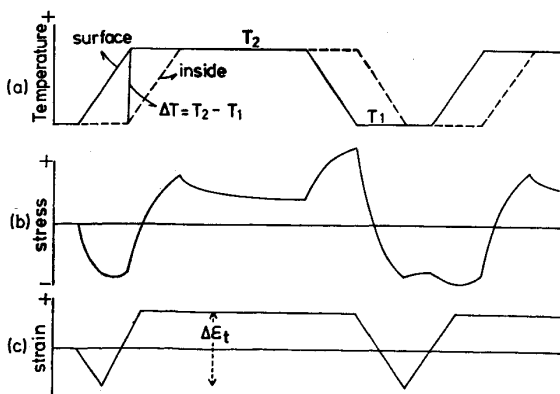


Fig. 1. Typical thermal history of high temperature component.

ひずみ保持が導入されることによつて著しく低下する²⁾ので、使用材料のクリープ疲れ特性を把握することは高温機器の設計、保守管理等で重要な問題である。

実機の稼働条件から考えられる熱ひずみの1サイクル当たりの時間は、たとえば火力発電プラントで半日、原子力発電プラントで約1週間といわれている³⁾。そのため、実用上はたとえば10hあるいは100h周期で数千サイクルに及ぶ長周期長時間クリープ疲れ寿命の評価が重要となる。しかし、現在広く使われているサーボ油圧式疲れ試験機でこのような長時間試験を実施することは、試験機の長期間安定性、維持管理、経済性などの点から現実的でない。すなわち、実機稼働条件を模擬した信頼性の高い材料データを得るためには、目的に合った長時間クリープ疲れ試験機の開発が必須である。

以上の背景のもとに、昭和58年度から開始された科学技術庁の科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価法の開発に関する研究」(産官学20機関参加)においては、高温機器のクリープ疲れ条件下の寿命、余寿命予測に必要な信頼性の高い長時間データを取得するための試験装置の開発が取り上げられた。このテーマにおいては、(株)東京衝機製造所が著者らとの密接な協議のもとに経済性も重視した試験機を設計したが、その具体化は著者らが引き継ぐことになった。また、著者ら自身

昭和60年4月本会講演大会にて発表 昭和60年11月8日受付 (Received Nov. 8, 1985)

* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

*² 金属材料技術研究所 理博 (National Research Institute for Metals)

*³ 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

は、同研究のなかで主としてクリープ疲れ損傷の定量的評価に関する研究⁴⁾を分担したが、その過程で着想を得て別途新形式の試験装置の試作に成功した。本報告では、これら2形式の新開発になる長時間クリープ疲れ試験機の構造、性能等について述べる。

2. 試験装置の仕様

開発すべき長時間試験機の仕様としては、以下のことを考えた。

- (1) 軸ひずみ制御の引張圧縮試験とする。
- (2) 標準的な直径 8 mm の中実丸棒試験片を用い、平行部ゲージ長さを 16 mm とする。
- (3) 試験温度範囲は当面 800°C 以下で、大気中試験とする。
- (4) 引張側ひずみ保持台形波試験を中心に考え、保持時間は 1 h から 100 h までとする。
- (5) 10 000 h までの連続無人試験が行えるようにする。
- (6) 水、空気等による強制冷却はしない。
- (7) 小型、軽量化し、低価格におさえる。
- (8) 停電時に試験片を保護する安全装置を備える。
- (9) 伸び計は、高温用で実績のあるものを用いる。

以上の仕様について若干補足説明する。(1)では、現状の標準的な軸ひずみ制御試験とすれば、サーボ油圧式試験機による短時間側の豊富なデータとのつぎ合わせができる。(2)では、高温酸化を考えると直径 10 mm の試験片としたいが、実情は 8 mm が多く、また 8 mm であれば試験機の荷重容量が ±30 kN で十分となり、大きさも手頃になる。ASTM E606⁵⁾に示されているように、バックリングを考慮すると試験片のゲージ長さは最低 $2d$ (d : 直径) となる。(3)からは、試験片温度分布、制御精度、長期間信頼性等が良好で実績のあるニクロム線電気抵抗炉が採用された。また、伸び測定のため炉は極力小形化を計ることとした。(4)では、サーボ油圧式試験機で実施が難しい領域をねらった長時間試験専用機とする。(5)については、高温機器の設計寿命は少なくとも数十万 h 以上であるが、試験は当面実行可能な 1 万 h 程度までを目標とするため、メンテナンスフリーとし故障等が生じにくいことが必要となる。そこで(6)では、特に水など冷却系に係わるトラブルが極めて多い現状を考慮した。(7)は見逃しやすい点であるが、敷地難から建物の上階に設置することが多い現状を意識しており、また多数台設置するためにも重要と考える。(8)は停電、故障等が起きたとき試験片を守り、回復後試験が続行できるようにするためである。(9)は、試験

精度を決定する最も重要な伸び計に関することであり、今回は開発期間の制約もあるため、実績のある市販品を採用することにした。

3. 試作機の概要

3.1 カム・レバー式長時間クリープ疲れ試験機

Fig. 2 に、カム・レバー式試験機のプロット図、Photo. 1 に外観写真を示す。荷重容量は ±30 kN、横型で、高さ 1.3 m、幅 0.8 m、奥ゆき 0.8 m である。

負荷形式は、サーボモータ駆動によるカム・レバー式で、サーボモータ 5 は直流 50 W、トルク 12 N·cm である。カム 8 の偏心量は 10 mm、レバー 9 のレバー比

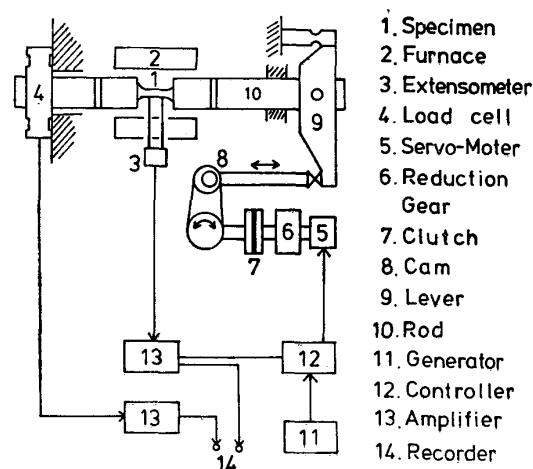


Fig. 2. Schematic view of cam-and-lever type testing system.

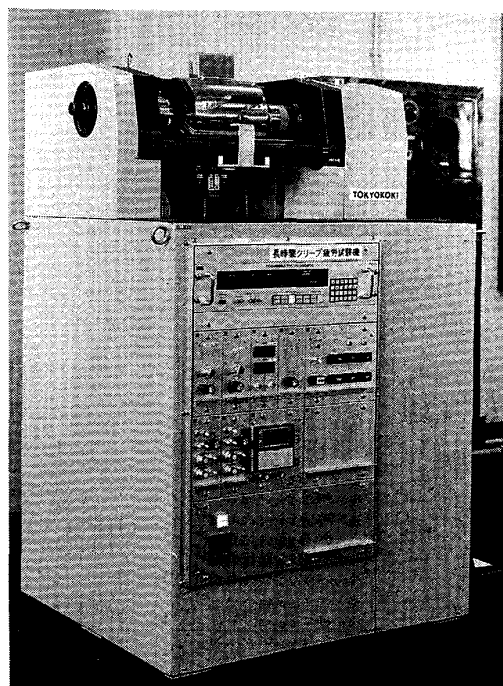


Photo. 1. Cam-and-lever type testing machine.

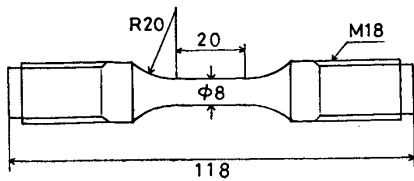


Fig. 3. Specimen (dimension in mm).

は 1:3, したがって荷重軸 10 のストロークは約 ± 3 mm である. 減速ギア 6 のギア比は 1/10 000 である. レバー 9 の両端はバックラッシュを避けるため板ばね支持とし, 荷重軸上の支点は円すいころ軸受けとした.

試験片 1 の形状寸法は Fig. 3 に示す. ひずみ検出には, 標点間距離 16 mm から直接検出できる石英ガラス棒, 板ばねヒンジ, ストレインゲージ等から成る押し当て式伸び計を採用した. この場合, Fig. 2 のように伸び計 3 を加熱炉 2 の下側に設置し, 対流による熱影響を少なくしている. 試験機を横型にした理由は, 伸び計の配置と荷重軸の冷却などを考慮したことと関係している.

加熱炉 2 は直径 180 mm, 長さ 200 mm の二つ割り管状炉 (2 kW) とした. また, ロードセル 4, 及びレバー 9 への熱絶縁のため, 荷重軸には厚さ 20 mm のセラミックスをはさみ込み, 水冷する必要をなくした.

停電時には, 電磁クラッチ 7 が作動し, カム 8 が自由回転して荷重を短時間に開放し試験片 1 を守る安全装置を設けている. なお, このような荷重解放機構としたことが, 当試験機をカム・レバー式にした理由の一つでもある.

試験に際しては, まず試験片を加熱炉で所定の温度に保持した後, カムの回転角が所要の中立位置になるように荷重軸 10 の端部ねじを調整し, レバー 9 の支点上に固定する. 制御は, 発振器 11 からの任意のひずみ波形と伸び計からの検出信号の偏差でサーボモーターをコントロールする閉回路方式となつている. そのため, 任意波形の軸ひずみ制御試験が可能である. ただし, ひずみ速度は, サーボモーターの利得 (ゲイン) から試験の安定性を考慮すると最大 $10^{-4}/s$ 程度となつた.

なおカム・レバー式は, サーボ油圧式試験機が普及される以前から平ら⁶⁾ によつて試作されている方法である. また, 河本ら⁷⁾ もギア式試験機を試作している. 最近では遠藤ら⁸⁾ や坂根ら⁹⁾ によつてもカム・レバー式やギア式の変位 (ストローク) 制御試験機が開発されている. しかし, 試験片平行部の軸ひずみを直接検出し制御するものはなかつた.

3.2 ヒートアクチュエータ式長時間クリープ疲れ試験機

著者らは, 前述したカム・レバー式とは別途に, かつほぼ同時期に Fig. 4 に示すような試験機を開発した. その外観写真は Photo. 2 に示す. 荷重容量, 試験片形状, 伸び計, 加熱炉, 熱絶縁対策などは前述したカム・レバー式のものと同じであるが, 全体の設置面積を狭くすることを配慮してたて型構造とした. 本体の大きさは高さ 1.8 m, 幅 0.6 m, 奥ゆき 0.5 m である.

負荷形式は, 金属棒 5 の熱変形を利用して直結した試

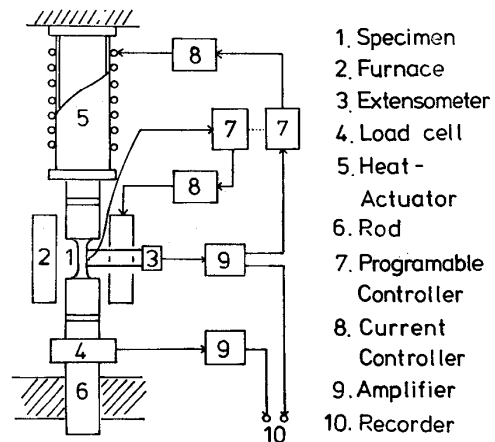


Fig. 4. Schematic view of heat-actuator type testing system.

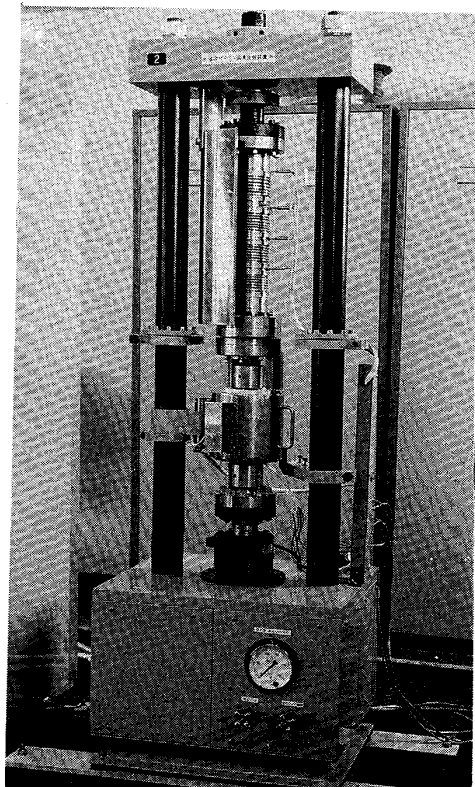


Photo. 2. Heat-actuator type testing machine.

試験片 1 に適切なひずみを与えるもので、金属棒 5 をヒートアクチュエータと名付けた。ヒーターには外径 3 mm のニクロム線シーズヒーターを用いた。電気容量は定格 1 kW である。また、ヒートアクチュエータの周りには外乱をさけるため円筒状のフードを取り付けた。

停電時には、下部荷重軸 6 の側圧ロック機構の油圧(ポンプは手動)を電磁弁により開放して荷重を瞬時に 0 にすることができる。

試験開始に当たっては、試験片及びヒートアクチュエータを所定の温度に保持した後、荷重軸 6 を測圧ロックで固定する。制御は、アンプ 7 で設定したひずみ波形と伸び計 3 からの信号の偏差でヒートアクチュエータ 5 のヒーター電流を電流制御器 8 でコントロールする閉回路方式となつている。試作機では、アンプ 7 として市販のプログラム温度調節器を使用した。

この試験機の負荷効率 k は、試験片の変位とヒートアクチュエータの熱変形量の比で与えられる。Fig. 4 に示した構造の試験機をヒートアクチュエータ(a)、試験片(s)、フレーム(f)、ロードセルやチャック部など(c)の四つに分け、() 内の記号を添字につけてそれぞれの長さを L 、コンプライアンスを C で表すと、効率 k は

$$k = \frac{\Delta \epsilon_t \cdot L_s}{\beta \cdot \Delta T \cdot L_a} = \frac{C_s}{C_s + C_a + C_f + C_c} \dots \dots (1)$$

となる。ただし $C = L/EA$ 、 A と E はそれぞれ各部の断面積とヤング率、また β と ΔT はヒートアクチュエータの熱膨脹係数と温度変化幅、 $\Delta \epsilon_t$ は試験片ひずみを表す。ヒートアクチュエータは、熱変形量を大きくするため SUS 304 鋼製とし、断面積が試験片の約 20 倍のパイプ構造とした。 C_c (ロードセル、チャック、試験片フィレット部等を含めた全体のコンプライアンス) の値は、計算で求めることは難しい。しかし、この部分の構造は従来の試験機とまったく同じであり、経験的には通常の場合 C_c は、塑性変形が生じる試験片の C_s の約 2 倍程度である。したがって、ヒートアクチュエータの温度変化幅が 100°C (300°C を中心に $\pm 50^\circ\text{C}$) のとき、試験片ひずみが 1% になるにはヒートアクチュエータの長さを約 350 mm とすれば良い。この時の負荷効率は約 0.25 である。

引張り、圧縮過程の所要時間を同一にするためには、ヒートアクチュエータの加熱冷却速度が同程度となるようにヒーターの電流と平均温度を選択すれば良い。実際の加熱冷却速度は定格電力 1 kW のヒーターを用い、自然空冷で約 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ になるように設計した。その結果、立ち上がりのひずみ速度は約 $2 \times 10^{-5}/\text{s}$ となり、波形制御を行う場合は最大 $10^{-5}/\text{s}$ 程度となつた。

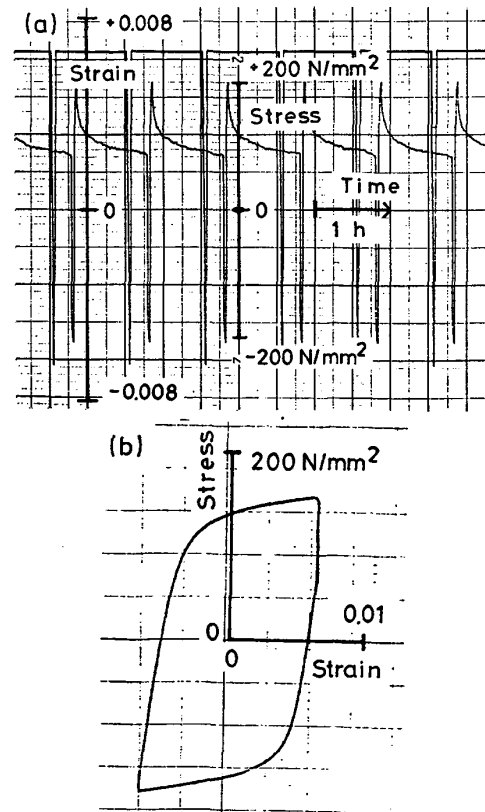
なお、後述するようにこの試験機では試験片加熱炉が小型で熱容量が小さいことを利用し、試験片ひずみを制御しつつ温度サイクルを加えることができるようにした。結果としての試験片温度の加熱冷却速度は 300°C と 600°C の間で約 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 程度である。

4. 試作機の性能

試作機の性能について若干の検討例を示す。

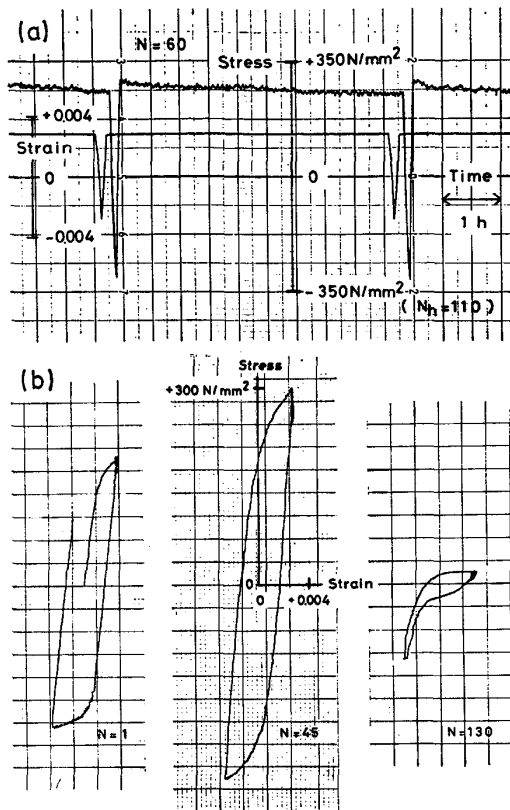
まず一定高温下で引張側ひずみ保持台形波試験を実施したときの応力とひずみの時間的変化、及びヒステリシスループを Fig. 5, 6 に示す。Fig. 5 はカム・レバー式で SUS 316 鋼、 700°C 、 $\Delta \epsilon_t = 1.3\%$ 、保持時間 1 h、ひずみ速度 $10^{-4}/\text{s}$ の条件の試験のものである。Fig. 6 はヒートアクチュエータ式で SUS 321 鋼、 600°C 、 $\Delta \epsilon_t = 0.57\%$ 、保持時間 5 h、ひずみ速度 $10^{-5}/\text{s}$ の条件の試験のものである。両者の応力緩和曲線を比べると、試験温度の高い Fig. 5 ではなめらかでリラクセーション量も大きく、温度のそれより低い Fig. 6 ではリラクセーションも顕著でないという差はあるが、共に試験中のひずみ制御精度は $\pm 0.001 \text{ mm}$ 程度であつた。

次に試験片に温度サイクルとひずみサイクルを与える



(a) Change in stress and strain with time
(b) Hysteresis loop

Fig. 5. Behavior of stress and strain in the test with cam-and-lever type testing machine.



(a) Change in stress and strain with time
(b) Hysteresis loop

Fig. 6. Behavior of stress and strain in the test with heat-actuator type testing machine.

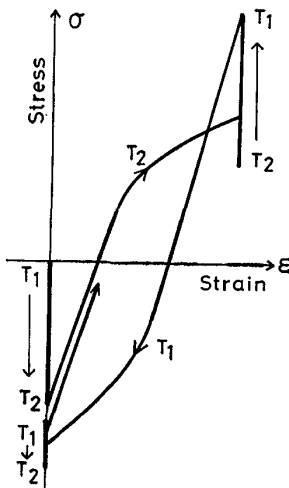


Fig. 7. Hysteresis loop of actual thermal and strain histories for high temperature component.

場合の例を示す. この試験モードは基本的にはどの形式の試験機でも行い得るが, 先述したようにヒートアクチュエータ式試験機ではプログラブル温度調節器を使用したので, この試験を実施しやすい利点がある. いま, Fig. 1(b) の応力履歴を忠実に模擬した試験をすると, 応力とみかけ上のひずみは Fig. 7 のようなヒステリシ

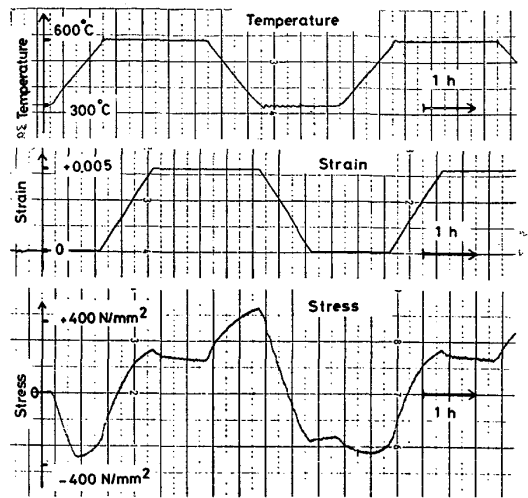


Fig. 8. Simulation test with heat-actuator testing machine.

スループを描く. すなわち, 試験片の温度が変動中は試験片ひずみを完全に 0 に拘束して熱応力を発生させ, 試験温度が一定の間に外からひずみを与えてやればこれを再現できる. この場合 Coffin タイプの拘束熱疲労試験¹⁰⁾や温度変動とひずみ変動を順または逆位相に与える温度-ひずみ変動疲労試験¹¹⁾ よりもデータの解析は容易と考えられる. Fig. 8 は, 1Cr-Mo-V 鋼 (タービンロータ材) についてヒートアクチュエータ式試験機でこれを実施したときの試験片温度, 応力, ひずみの時間的変化を示したものである.

高温機器用材料についてのこれとよく似た温度-ひずみ変動試験は, SKELTON ら¹²⁾¹³⁾によつても実機のシミュレーションとして重要性が指摘されている. このような実機シミュレーション試験は, 実用上有用と考えられるが, データの解析評価には一定温度下のひずみ制御試験データばかりでなく, 温度変動による熱疲労試験データも必要と思われ, 今後の検討が望まれる.

以上 2 形式の試験機は, その特徴からそれぞれ次のような適用が考えられる. カム・レバー式は試験精度が高く取り扱いが容易なことから, 短時間から長時間までの広範囲な試験に応用できる. 一方ヒートアクチュエータ式は機械的可動部が全くなく構造が簡単なことから, より長時間の試験や温度-ひずみ変動試験への応用に適している.

5. 結 論

10⁴ h 以上の連続運転を目標として開発された 2 種類の新形式の長時間クリープ疲労試験機について紹介した. 形式としては, 一つはサーボモーター駆動によるカム・レバー式, もう一つはヒートアクチュエータ式であ

る。これらの試験機の特徴として次の点をあげることができる。

- (1) 引張圧縮の軸ひずみ制御試験ができる。
- (2) 構造が簡単で、小型化され、経済的である。
- (3) 信頼性が高く、保守管理が容易であるため、長時間ひずみ保持台形波試験などに最適である。
- (4) 水、空気等による強制冷却を必要としない。
- (5) 停電等に対する安全回路がある。
- (6) 高温機器の熱応力履歴を模擬した温度-ひずみ変動試験にも応用できる。

本報告では、これらの試作機の仕様、性能等について述べた。現在まで、これら試作機の性能は一応所期の目標を満足するものと考えており、今後更にデータの蓄積を図る予定である。

最後に本研究は科学技術庁の 58-60 年度科学技術振興調整費による「構造材料の信頼性評価技術の開発に関する研究」の一環として行つたことを記して関係各位に感謝致します。

文 献

- 1) D. P. TIMO: Thermal Stresses and Thermal

- Fatigue (1971), p. 453 [Butterworths]
- 2) E. KREMPL and B. M. WUNDT: ASTM STP 489 (1971), p. 1
- 3) A. C. GANGADHARAN, D. H. PAI and I. BERMAN: Creep and Fatigue in Elevated Temperature Applications (1973), p. 215 [Inst. Mech. Eng.]
- 4) 山口弘二, 鈴木直之, 井島 清, 金澤健二: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1526
- 5) Annual Book of ASTM Standards, Part 10 (1982), p. 718
- 6) 平 修二, 大南正瑛, 小寺沢良一: 材料試験, 10 (1961), p. 104
- 7) 河本 実, 仲島 浩, 田中道七: 材料, 12 (1963), p. 43
- 8) 遠藤忠良, 西田 隆, 佐近淑郎, 富岡征四郎: 三菱重工技報, 18 (1981) 5, p. 1
- 9) 坂根政男, 大南正瑛, 阿波屋義照: 材料学会第 34 期講演会前刷 (1985), p. 73
- 10) L. F. COFFIN, Jr. and N. Y. SCHENECTADY: Trans. ASME, 76 (1954), p. 931
- 11) C. E. JASKE: ASTM STP 612 (1976), p. 170
- 12) R. P. SKELTON: CEGB Report, RD/L/N 74/77 (1977)
- 13) H. J. WESTWOOD and M. D. C. MOLES: Can. Metal. Quarterly, 18 (1979), p. 215