

304 ステンレス鋼の多軸変動応力クリープ構成式  
に対する実験的検討\*村上澄男\*\*, 大野信忠\*\*\*, 田上均†  
Sumio MURAKAMI, Nobutada OHNO, Hitoshi TAGAMI**Key Words:** Strength of Materials, Creep, Constitutive Equation, Experiment, High Temperature, Multiaxial Stress, Variable Stress, Type 304 Stainless Steel

## 1. 緒 言

高温原子力プラントを対象とする ASME ボイラおよび圧力容器規格 N-47 では、非弾性変形の存在を前提として設計基準が定められており<sup>(1)(2)</sup>、したがって各機器要素の設計には適切な非弾性解析を行わなければならない。近年、このための非弾性解析用クリープ構成式の研究が促され、現象論的あるいは金属物理学の観点からすでにいくつかの理論が提案されている<sup>(1)~(4)</sup>。このうちでも、特に米国オークリッジ国立研究所(ORNL)の修正ひずみ硬化理論<sup>(4)</sup>は概念の簡単さと材料定数の決定の容易さのために、実用構造解析用のクリープ構成式として現在のところ最も広く用いられているが、解析結果にみられる若干の不整合さと数理的取扱いの繁雑さがその構成式の難点として指摘されている<sup>(5)</sup>。

このため著者ら<sup>(5)</sup>は、上述の ORNL の理論の難点を除く目的から、ひずみ空間内に一つの閉曲面を導入することによってクリープ変形中の材料の内部状態を表現し、これによってクリープの進行に伴うひずみ硬化と応力変動の際にみられる過渡的軟化を記述する新しいクリープ構成式理論を提案した。その後この理論は、これらの現象のほかには除荷時のクリープ回復をも表し得るように拡張され、600°C での 304 ステンレス鋼に対して、比較的短時間範囲での繰返しねじり応力、あるいは一定引張りと繰返しねじり応力の組合せ応力実験の結果と比較されている<sup>(6)</sup>。しかし、この構成式の妥当性を確かめるには、より長時間範囲にわたり、しかも十分広い範囲の応力変動様式に対して検証

実験を行わなければならない。

この論文では、600°C での 304 ステンレス鋼に対して、試験時間と応力変動周期をそれぞれ 960 時間(40 日)および 48 あるいは 96 時間に選び、応力の大きさ、方向並びに応力変動時間が不規則に変化する場合を始めとするいくつかの典型的な応力変動様式について引張り-ねじり組合せ応力クリープ試験を行い、著者らの前述の理論を含む二、三の代表的なクリープ構成式による解析結果と比較し、それらの力学的特性と実用構造解析用クリープ構成式としての有用性を詳細に検討する。

## 2. 多軸クリープ構成式

これまでの応力反転クリープ試験あるいは多軸変動応力クリープ試験の結果によれば、多くの金属材料では、クリープひずみの進行に伴ってクリープ速度が減少するとともに、応力の作用方向の変化によって過渡的にクリープ速度が増加することが確かめられている。このようなクリープ硬化あるいはクリープ軟化は、ひずみ履歴に伴う材料の内部構造変化によってもたらされ、したがって従来、変動応力下のクリープ速度を規定するクリープ構成式は、このような内部構造変化を適当な巨視的変数で表現することによって定式化されてきた<sup>(3)</sup>。このような巨視的変数は通常、クリープ硬化変数と呼ばれている。

はじめに、以下の議論の便宜上、この論文で検討するクリープ構成式の概要について述べる。

**2.1 ひずみ硬化理論** 上述のクリープ硬化変数として、材料が過去に受けたクリープひずみ量を考えればひずみ硬化理論となる。温度を一定とすれば、ひずみ硬化理論に基づく多軸クリープ構成式は次式で与えられることが多い<sup>(1)~(3)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (3/2)f(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}_c)(s_{ij}/\bar{\sigma}) \cdots \cdots (1 \cdot a)$$

\* 昭和 58 年 3 月 18 日 東海支部第 32 期総会講演会において講演。原稿受付 昭和 58 年 10 月 20 日。

\*\* 正員、名古屋大学工学部 (〒464 名古屋市千種区不老町)。

\*\*\* 正員、豊橋技術科学大学 (〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘)。

† 正員、日本電装(株) (〒448 刈谷市昭和町)。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \left( \frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2} \\ \bar{\epsilon}^c &= \int_0^t \left( \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^c \dot{\epsilon}_{ij}^c \right)^{1/2} dt \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1\cdot b)$$

ここで  $\epsilon_{ij}^c, s_{ij}, \bar{\epsilon}^c, \bar{\sigma}$  はそれぞれクリープひずみテンソル, 偏差応力テンソル, 相当クリープひずみ, 相当応力であり, また ( ) は時間  $t$  に関する偏導関数を表す。さらに  $f(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^c)$  は, 単軸一定応力クリープひずみ速度を

$$\dot{\epsilon}^c = f(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^c) \dots\dots\dots (2)$$

の形に表すような関数である。

特に単軸クリープ表示式が Bailey-Norton の式

$$\epsilon^c = A \bar{\sigma}^n t^m \quad (A, n, m \text{ は材料定数}) \dots\dots (3\cdot a)$$

で与えられる時, 関数  $f$  の具体的な形は次のようになる<sup>(1)(3)</sup>。

$$f(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^c) = m A^{1/m} \bar{\sigma}^{n/m} \bar{\epsilon}^{c(m-1)/m} \dots\dots\dots (3\cdot b)$$

一方, クリープ表示式として Blackburn の式

$$\epsilon^c = a(1 - e^{-rt}) + b(1 - e^{-st}) + ct$$

$$(a, b, c, r, s \text{ は応力の関数}) \dots\dots\dots (4\cdot a)$$

を用いれば

$$f[\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^c(t)] = a r e^{-rt^*} + b s e^{-st^*} + c \dots\dots (4\cdot b)$$

$$\bar{\epsilon}^c(t) = [a(1 - e^{-rt^*}) + b(1 - e^{-st^*}) + ct^*] \dots\dots\dots (4\cdot c)$$

となる<sup>(1)(3)</sup>。ここで  $t^*$  は, 時間  $t$  までに累積した相当クリープひずみ  $\bar{\epsilon}^c(t)$  に対して, 式(4・c)から求めた仮想的な時間であり, 通常数値計算によって求められる。

**2・2 ORNL 修正ひずみ硬化理論** 式(1・b)で与えられる硬化変数  $\bar{\epsilon}^c$  は単調増加関数であるから, ひずみ硬化理論は応力の作用方向の変化に伴うクリープ速度の過渡的増加を記述することはできない。このため, ORNL の Corum ら<sup>(4)</sup>はひずみ空間内に二つのひ

ずみ原点を導入し, これを基準として応力反転の際の材料軟化を表現するような硬化変数  $\bar{\epsilon}^H$  を定義することにより, 式(1)のひずみ硬化理論を

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = (3/2) f(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^H) (s_{ij} / \bar{\sigma}) \dots\dots\dots (5\cdot a)$$

$$\bar{\epsilon}^H = \left[ \frac{3}{2} (\epsilon_{ij}^c - \epsilon_{ij}^0) (\epsilon_{ij}^c - \epsilon_{ij}^0) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5\cdot b)$$

のように修正した<sup>(1)~(4)</sup>。ここで  $\epsilon_{ij}^0$  は, 二つのひずみ原点のうち該当する一方であり, それは過去のひずみ履歴と現在の応力およびひずみ状態によって定められる。

クリープ表示式が式(3・a), あるいは式(4・a)で与えられる時, 関数  $f$  の具体的な形は, それぞれ式(3・b)あるいは式(4・b), (4・c)の  $\bar{\epsilon}^c$  を式(5・b)の  $\bar{\epsilon}^H$  で置き換えて得られる。しかしこの ORNL の理論は, 二つのひずみ原点の設定と応力反転の判定条件が解析的な形に表現されず, したがって数理的取扱いが不便であるだけではなく, 過去のひずみ履歴あるいは応力変化のわずかな違いによって, 新しく定められる原点が不連続に変化し, 一意的な解析結果を与えないという難点をもつ。

**2・3 クリープ硬化面理論** 著者ら<sup>(5)</sup>は, 上述の

ORNL の理論の難点を除く目的から, 応力方向の変化による材料軟化の主な機構は不動化した転位の再可動化にあると考え, 式(1)のひずみ硬化理論を拡張して, 新しい変動応力クリープ構成式を定式化した。そのとき著者らは, 不動転位が再可動化する際に, 不可逆な転位配列を形成しないようなあるひずみ範囲が存在するものと考え, これをひずみ空間内の球

$$g = (2/3) (\epsilon_{ij}^c - \alpha_{ij}) (\epsilon_{ij}^c - \alpha_{ij}) - \rho^2 \leq 0 \dots\dots (6)$$

によって近似した。ここで球の中心  $\alpha_{ij}$  と半径  $\rho$  の発展式は次のように与えられる。

$$\dot{\alpha}_{ij} = \begin{cases} (1-\lambda) \dot{\epsilon}_{kl}^c n_{kl} n_{ij} & g=0, \text{ かつ } (\partial g / \partial \epsilon_{ij}^c) \dot{\epsilon}_{ij}^c > 0 \\ 0 & g < 0, \text{ あるいは } (\partial g / \partial \epsilon_{ij}^c) \dot{\epsilon}_{ij}^c \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (7\cdot a)$$

$$\dot{\rho} = \begin{cases} \sqrt{2/3} \lambda \dot{\epsilon}_{ij}^c n_{ij} & g=0, \text{ かつ } (\partial g / \partial \epsilon_{ij}^c) \dot{\epsilon}_{ij}^c > 0 \\ 0 & g < 0, \text{ あるいは } (\partial g / \partial \epsilon_{ij}^c) \dot{\epsilon}_{ij}^c \leq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (7\cdot b)$$

$$n_{ij} = (\epsilon_{ij}^c - \alpha_{ij}) / [(\epsilon_{kl}^c - \alpha_{kl}) (\epsilon_{kl}^c - \alpha_{kl})]^{1/2} \dots\dots\dots (7\cdot c)$$

ただし, 式(7)の  $\lambda$  はこのように考えたひずみ範囲の発達程度を表す材料定数である。この時, 材料の内部構造状態, つまり与えられた変形履歴の下でのクリープ硬化状態は, 式(7)の  $\alpha_{ij}$  と  $\rho$  によって記述でき, したがって応力変動に伴う材料軟化を考慮したクリープ構成式は, 式(1)を次のように拡張して定式化できる<sup>(5)</sup>。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = (3/2) f(\bar{\sigma}, q) (s_{ij} / \bar{\sigma}) \dots\dots\dots (8\cdot a)$$

$$q = (1/2\lambda) \rho + (1/2\lambda) (\epsilon_{ij}^c - \alpha_{ij}) (s_{ij} / \bar{\sigma}) \dots\dots\dots (8\cdot b)$$

ここで  $f$  は式(1)と同じ関数であり, また  $q$  は上に述べたクリープ硬化変数である。今後, 球面  $g=0$  をクリープ硬化面といい, また構成式(8)をクリープ硬化面理論と呼ぶことにする。

単軸引張応力下では、 $q = \epsilon^c$  となる。したがって、単軸一定応力クリープ曲線が式(3・a)あるいは式(4・a)で与えられる時、式(8・a)の関数  $f$  の具体的な形は、式(3・b)あるいは式(4・b)、(4・c)の  $\bar{\epsilon}_c$  を式(8・b)の  $q$  で置き換えることによって与えられる。

**2・4 修正クリープ硬化面理論** クリープ変形を受ける金属材料では、応力を除去するとそれまでに生じたクリープひずみの一部分が擬弾性的に回復することが知られている。この回復ひずみは、全クリープひずみに比べて必ずしも大きくはないが、高温低応力クリープでは無視できない場合が少なくない。

その後著者ら<sup>(6)</sup>は、この現象も記述するように式(8)のクリープ硬化面理論を修正した。その際著者らは、除荷後回復するクリープひずみ  $\epsilon_{ij}''$  は回復しないクリープひずみ  $\epsilon_{ij}'$  とは変形の微視的機構が異なると考え、全クリープひずみ  $\epsilon_{ij}$  がこれら両者の和として

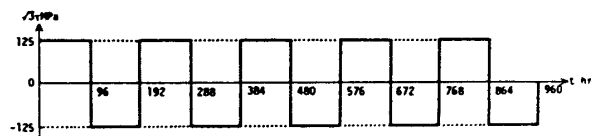
$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}' + \epsilon_{ij}'' \dots\dots\dots (9 \cdot a)$$

のように表現できると仮定した。このうち、回復するひずみ成分  $\epsilon_{ij}''$  については、遷移クリープひずみに対する McVetty の式<sup>(7)</sup>を多軸状態に拡張し、

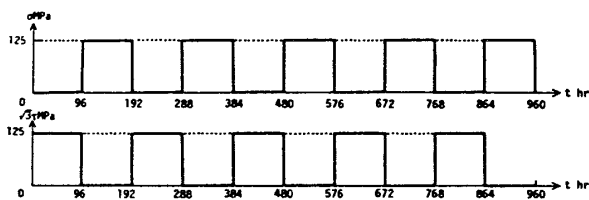
$$\epsilon_{ij}'' = C_1 [(3/2)C_2 s_{ij} - \epsilon_{ij}''] \dots\dots\dots (9 \cdot b)$$

( $C_1, C_2$  は材料定数)  $\dots\dots\dots$

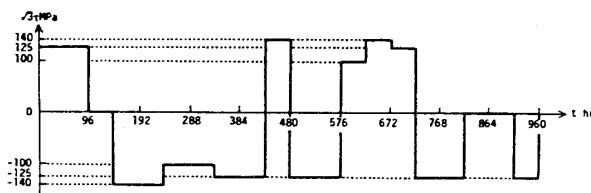
のように表現した。一方、式(9・a)の回復しないひずみ成分を  $\epsilon_{ij}'$  は、式(8)によって与えられるものとする。



(a) 繰返しねじり変動



(b) 引張り-ねじり繰返し



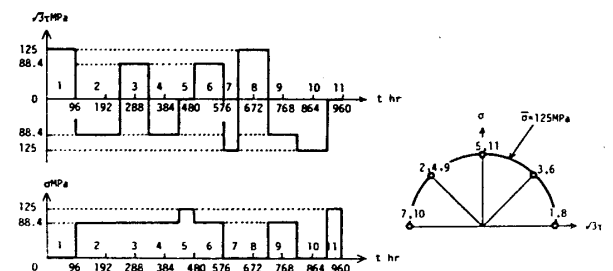
(c) ねじり応力、変動時間不規則変動

3. 実験条件および実験方法

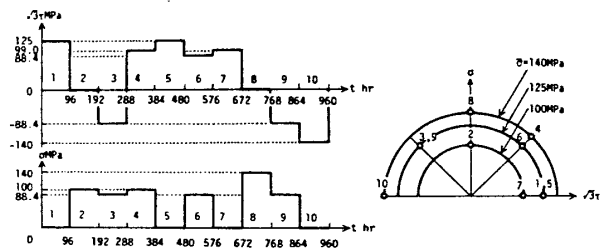
**3・1 実験条件** この研究ではまず、代表的な高温構造材料として、600°Cでの304ステンレス鋼を選び、非定常クリープ段階からの応力変動だけでなく、クリープが十分進行した定常段階での応力変動効果も検討する目的から、応力変動周期を48および96時間、試験時間を960時間に選んだ。また負荷応力には、前述のASME規格N-47の許容ひずみ1~5%を考慮し、これらの試験時間中に1%程度のクリープひずみを生じさせる応力100, 125および140MPaを選んだ。さらに、応力変動様式としては、引張り-ねじり組合せ応力の下での規則的な変動負荷のほか、応力の大きさ、応力の作用方向並びに応力変動周期が不規則に変化する場合も考え、図1に示す五つの様式を選んだ。なお図1(c)~(e)の不規則な応力変動様式は、3種類の応力の大きさ、5種類の応力方向、2種類の変動時間の中から乱数表を用いて選択し、決定した。

**3・2 実験方法** 実験には、前報(6)と同一ロットに属する304ステンレス鋼引抜き丸棒( $\phi 32$ )から削出した内径19mm、外径21mm、標点距離50mmの薄肉円管試験片を用いた。ただしこの実験では、引抜きの際の異方的加工硬化を除くため、試験片加工前に再度溶体化処理(1100°C, 30分, 空冷)を施した。

試験は、600±1°Cの下で2台の引張り-ねじり組合せクリープ試験機を用い、真応力を所定の大きさに規定して行った。試験片の温度測点は、試験片の標点間に取付けた2本のP-PR熱電対(0.25級)によって行



(d) 主応力方向、変動時間不規則変動



(e) 相当応力、主応力方向不規則変動

図1 負荷様式

った。また、試験開始前の昇温並びに均熱時間は、それぞれ2時間および16時間とした。最後に、試験片のひずみの検出には、アーム・ショルダー形変位計を用い、その変位をこれに取付けたダイヤル・ゲージと差動変圧器によって測定並びに記録した。この時、変位計の精度は、軸ひずみとねじりひずみに対して、それぞれ $10 \times 10^{-6}$  および  $5 \times 10^{-6}$  であった。

4. 実験結果ならびに  
計算結果とその比較

4.1 一定応力クリープ試験

4.1.1 瞬間弾塑性ひずみ 材料の弾塑性的特性とクリープ表示式を決定するため、はじめに一定引張りおよび一定ねじりクリープ試験と、その後の除荷によるクリープ回復試験を行った。まず、試験機へ荷重を負荷する際には、試験荷重まで重錘を段階的に、できるだけ速やか、かつ滑らかに加え、各瞬間のひずみをダイヤルゲージと、同時に使用した差動変圧器によるひずみ記録計の両方から測定した。この時の負荷時間は、例えば降伏後140 MPa まで約20秒であった。この試験の結果、600°Cにおけるこの材料の縦弾性係数  $E$  と0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$  の平均値は

$$E = 1.37 \times 10^5 \text{ MPa}, \sigma_{0.2} = 126 \text{ MPa} \dots\dots\dots (10)$$

であった。また図2は、このようにして求めた相当応力-相当塑性ひずみ曲線である。全ひずみからのクリープひずみの分離は、式(10)と図2の結果を用いて行った。

4.1.2 クリープ曲線とクリープ表示式 以上のクリープ試験結果から求めた引張りおよびねじりクリープ曲線と、その後のクリープ回復曲線を図3に丸印で示す。なお、この較正試験における実験結果のばら

つきの大きさを検討するため、相当応力  $\bar{\sigma} = 125 \text{ MPa}$  の場合につき、後述の変動応力試験を含め、本研究で行ったすべてのクリープ試験結果(引張り3本、ねじり6本)の96時間までの実験結果を比較したところ、この実験条件でのクリープひずみのばらつきは、最大±10%程度の大きさであることが確かめられた。また図3とこれらの実験結果によれば、試験片材料は、ここで議論する応力空間内で十分に等方とみなし得ることがわかった。

材料定数  $\lambda$  を除き、構成式(1), (5), (8), (9)のすべての材料定数と材料関数は、クリープ表示式(3・a), (4・a), (9・b)を図3のクリープ曲線にあてはめることによって求めることができ、ここではそれぞれ次のように決定した。

ひずみ硬化理論, ORNL 修正ひずみ硬化理論, クリープ硬化面理論

$$A = 1.19 \times 10^{-13}, m = 0.22, n = 5.7 \quad \text{〔式(3)〕}$$

..... (11)

$$\left. \begin{aligned} a &= 1.44 \times 10^{-16} \bar{\sigma}^{7.2}, b = 1.8 \times 10^{-11} \bar{\sigma}^{4.7} \\ c &= 6.23 \times 10^{-15} \bar{\sigma}^5, r = 8.3 \times 10^5 \bar{\sigma}^{-3.3} \\ s &= 1.41 \times 10^2 \bar{\sigma}^{-2} \end{aligned} \right\} \text{〔式(4)〕}$$

..... (12)

修正クリープ硬化面理論

$$A = 1.10 \times 10^{-13}, m = 0.23$$

$$n = 5.7 \quad \text{〔式(3)〕} \dots\dots\dots (13)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= 8.5 \times 10^{-17} \bar{\sigma}^{7.3}, b = 1.8 \times 10^{-11} \bar{\sigma}^{4.7} \\ c &= 6.23 \times 10^{-15} \bar{\sigma}^5 \\ r &= 8.3 \times 10^5 \bar{\sigma}^{-3.3}, s = 1.41 \times 10^2 \bar{\sigma}^{-2} \end{aligned} \right\} \text{〔式(4)〕}$$

..... (14)

$$C_1 = 9.69 \times 10^{-2}, C_2 = 1.03 \times 10^{-4} \quad \text{〔式(9・b)〕}$$

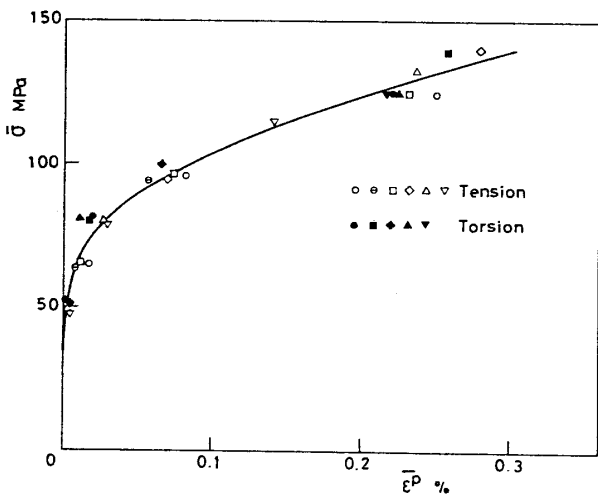


図2 相当応力-相当塑性ひずみ曲線

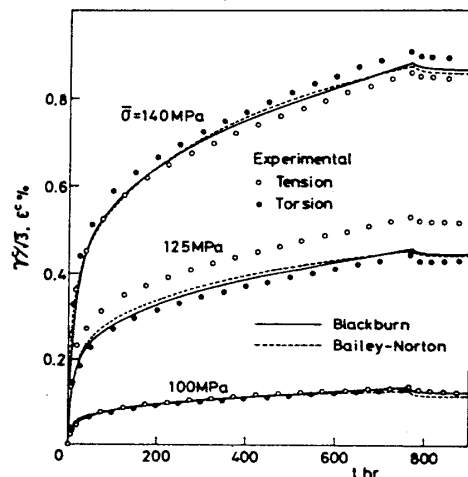


図3 一定引張りおよび一定ねじりクリープ曲線と回復曲線

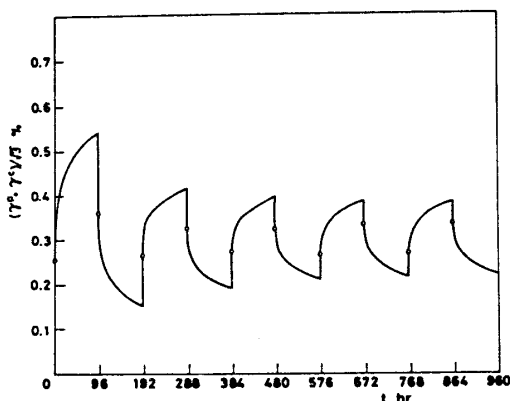
.....(15)

なお以上の値はすべて、 $\epsilon^c$ (%),  $t$ (hr),  $\bar{\sigma}$ (MPa) のような単位に対して定められたものである。

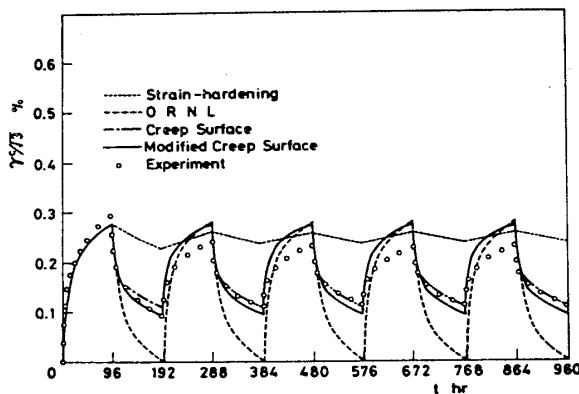
図3の実線と破線は、式(11)~(15)の材料定数を用い、式(3), (4)に示す Bailey-Norton の式と Blackburn の式を実験結果にあてはめたものである。図から、いずれのクリープ表示式も、すべてのクリープ段階にわたり、実験結果を精度よく記述することがわかる。

特に、Bailey-Norton の式は、その形が簡単であり、しかも含まれる材料定数の数が少ないため、工学的なクリープ解析によく用いられるが、定常クリープ段階が十分長く現れる場合には適用できない欠点がある。クリープ構成式の検討には、クリープ表示式の正確さが前提となるため、以下の議論ではもっぱら、このような欠点を持たない Blackburn の式を用いることにする。

**4.2 多軸変動応力クリープ試験** はじめに図4は、図1(a)の繰返しねじり反転クリープ試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化を示す。図4



(a) 非弾性ひずみ



(b) クリープひずみ

図4 繰返しねじり反転試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化

(a)に示す非弾性ひずみの測定値からの塑性ひずみの分離は、初期負荷に対しては図2を用いて行うことができる。しかし、応力反転後の塑性ひずみは、塑性異方性のため、もはやこの図からは求まらない。したがってここでは、図2の場合と同様、重錘負荷完了直後の非弾性ひずみの値をダイヤルゲージと変位記録計から読み取り、これを応力反転時に生ずる塑性ひずみとみなした。このようにして求めた塑性ひずみの変動量を図4(a)の丸印で示す。以後の変動応力試験において、塑性ひずみはいずれもこれと同様にして決定した。

図4(b)の丸印はこのようにして求めたクリープひずみの時間的变化を示す。これらの図からわかるように、クリープひずみと塑性ひずみの振幅は、いずれも最初の数サイクルの間に減少し、その後ほぼ一定値を保つ。これは、クリープひずみの振幅が繰返し数の増加とともにほとんど変化しなかった以前の報告<sup>(6)(8)</sup>とは異なる傾向にある。応力反転後の材料の過渡的軟化は、反転直後には顕著であってもしばらくすると消失することを考慮すると、この原因の一つとして、本実験の応力変動周期は文献(6), (8)よりも4~12倍大きく、したがってこのような過渡的軟化の効果がこれらの実験におけるほど著しくないことがあげられる。このほか文献(6)とは異なり、試験片加工前に材料を再度溶体処理したことも一つの原因と考えられる。

図4(b)にはまた、構成式(1), (5), (8), (9)による計算結果も示す。ただし、クリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論の計算における材料定数 $\lambda$ の値としては、図の実験結果をよく記述する一つの値として $\lambda=1/4$ を選んだが、この値は以後のすべての解析で使用する。図のように、 $\lambda=1/4$ とするクリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論は、上述のクリープひずみ振幅の減少を厳密には表すことができないが、材料のクリープ挙動を他の二つの理論と比べて非常によく記述する。特に ORNL の理論は、応力反転のたびごとに式(5・b)の硬化変数 $\bar{\epsilon}^H$ が零に減少し、反転後のクリープひずみが処女材のそれと等しくなるため、図の試験結果に対しては、クリープひずみ振幅を2倍程度大きく見積る。一方、ひずみ硬化理論は、応力反転後のクリープ速度の増加を全く記述できないため、このような変動応力クリープには適用できない。

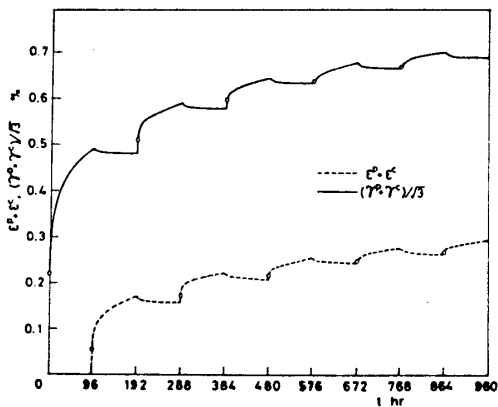
次に、図1(b)の引張り-ねじり繰返し試験に対する同様な結果を図5に示す。特に図5(b)のねじりクリープひずみの変化に対しては、ひずみ硬化理論がやや小さめの値を与えるほかは、各理論とも実験結果を精度よく見積り、その差は最大10%程度である。さらに修正クリープ硬化面理論は応力変動時の瞬間的なク

リーブひずみの増加とクリープ回復を非常によく記述している。各構成式による計算結果の差異は、図5(c)の引張りクリープひずみにおいて、いっそうはっきりと認められる。クリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論は、全クリープ段階にわたり、この材料のクリープ挙動を精度よく見積っている。これに対して、ORNLの理論では、このようなひずみ履歴に対して2・2節で述べた応力反転条件が成立せず、ひずみ硬

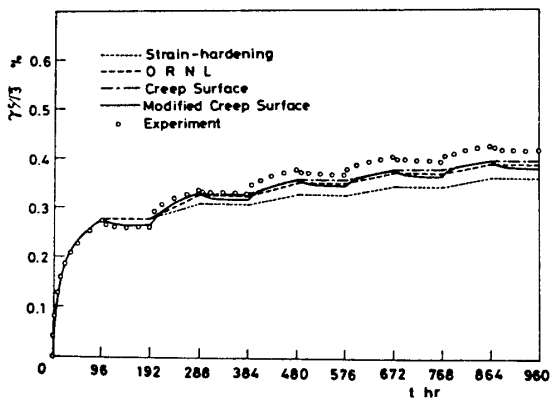
化理論とともに、実験値よりもかなり小さな引張りクリープひずみを与える。

図6は、応力の大きさと変動時間が不規則に変化する場合、すなわち図1(c)の負荷変動様式に対する非弾性ひずみとクリープひずみの変化を示す。図6(b)にみられるように、この場合もクリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論が材料挙動を最もよく表している。しかしこれら二つの理論とも、全体的にクリープひずみの変化量をやや大きめに見積っているが、これは、 $\lambda$ の値を決定した図4においても、非弾性変形が十分に進行した段階では $\lambda=1/4$ とした両理論がクリープひずみの変化量を大きめに見積っていることに起因するものと考えられる。

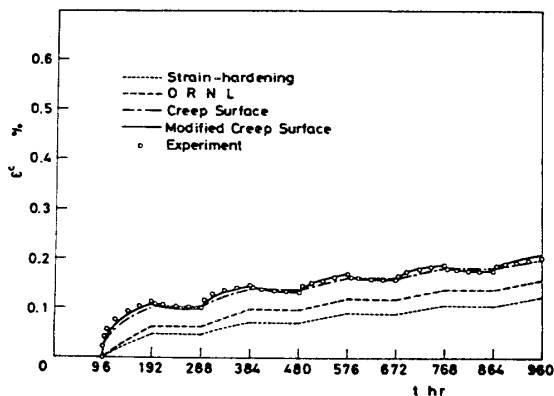
これに対して、図6(b)のORNLの理論は、図4の場合と同様に、クリープひずみの変動を実験結果と比較して大きく見積る傾向にあり、それは3番め、6番めおよび9番め( $144 \leq t \leq 240$ ,  $432 \leq t \leq 480$ ,  $624 \leq t \leq 672$  hr)の負荷において特に著しい。これは、これらの応力反転後の応力値が十分大きいのに加え、ORNLの理論では応力反転のたびごとに硬化変数  $\varepsilon^H$  が零に



(a) 非弾性ひずみ

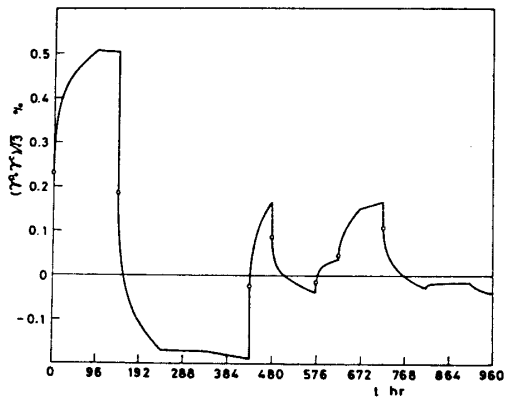


(b) ねじりクリープひずみ

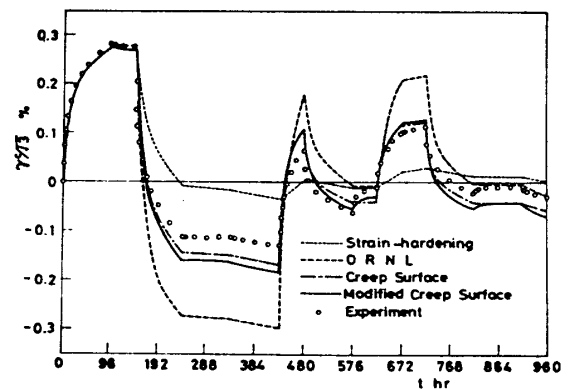


(c) 引張りクリープひずみ

図5 引張り-ねじり繰返し試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化



(a) 非弾性ひずみ



(b) クリープひずみ

図6 不規則ねじり変動試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化

減少し、処女材と同様なクリープ挙動を示すことに起因する。これに対して、クリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論では、式(7)のひずみ範囲を規定する定数 $\lambda=1/4$ の寄与により、応力反転によっても材料は処女状態に戻ることはなく、実験結果に近い挙動を予測している。

次に相当応力が一定で、主応力方向とその変動時間が不規則に変動する場合[図1(d)]の実験結果と、それに対応する計算結果を図7に示す。まず、ORNLの

理論は応力反転条件が成立する場合と、成立しない場合の応答が大きく異なるため、図7(b)の2番めの負荷(96 $\leq t \leq 240$  hr)と8番めの負荷(624 $\leq t \leq 720$  hr)に見られるように、実験結果とは大きく異なった傾向を示すことがある。これらの両場合、応力反転条件と原点の移動条件が満足され、その後は処女材と同じクリープ挙動を与えるが、実験ではこのように急激なクリープ速度の増加は生じていない。この図にみられる

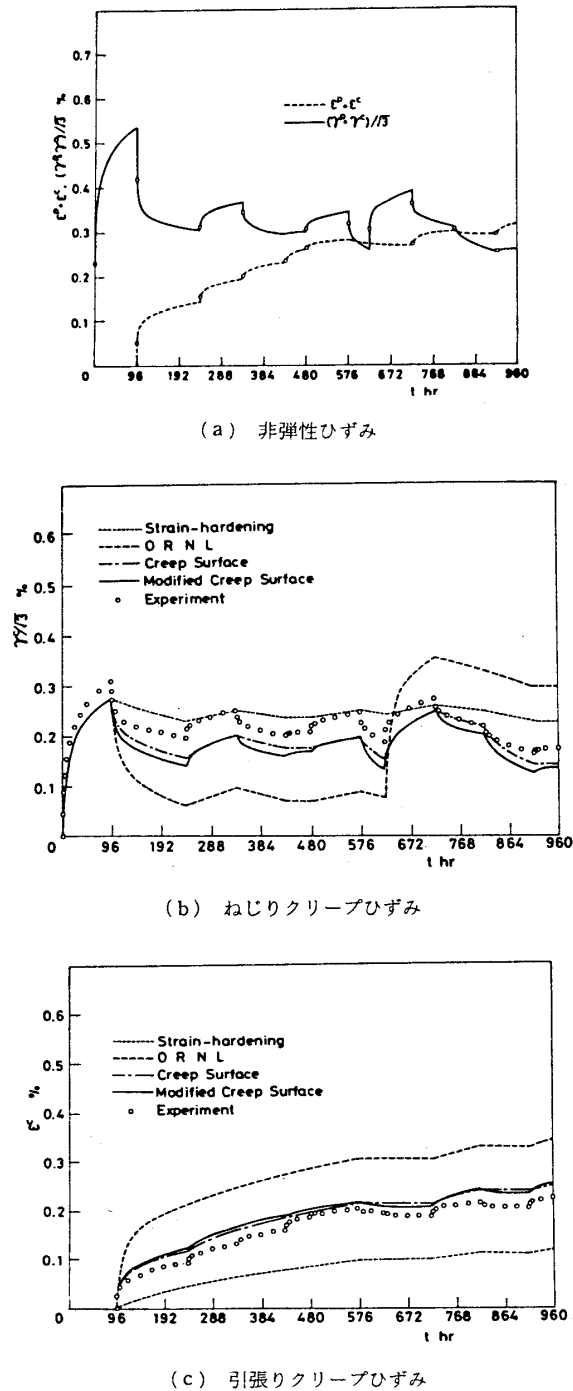


図7 相当応力一定、主応力方向不規則変動試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化

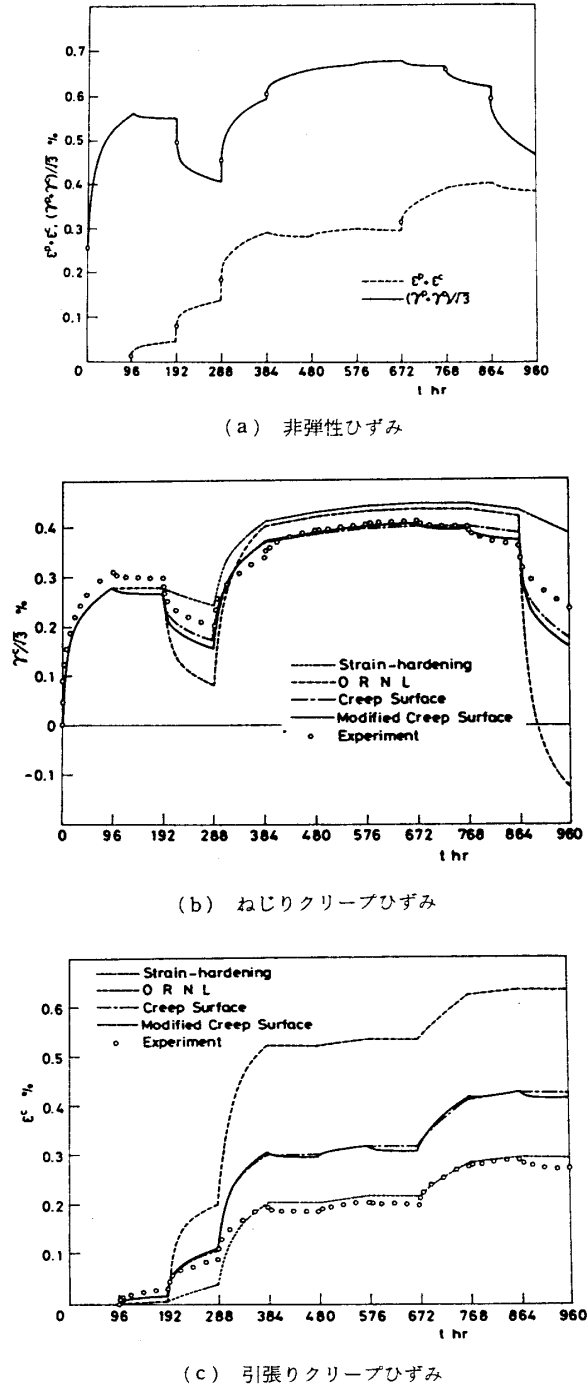


図8 相当応力、主応力方向不規則変動試験における非弾性ひずみとクリープひずみの変化

ように、多軸応力状態で応力変動が激しい場合には、ORNL の理論はひずみ硬化理論よりも優れた予測をするとは限らないことに注意する必要がある。これに比べてクリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論は 20% 以内の精度で実験結果を記述している。図 7 (c) に示す引張りクリープひずみについても同様な傾向がある。

最後に図 8 は、いっそう不規則な応力変化として、相当応力と主応力方向がともに不規則に変化する負荷様式(図 1 (e))に対する結果を示す。同図(b), (c) のように、この場合もクリープ硬化面理論と修正クリープ硬化面理論は、試験材料の全体的なクリープ挙動をよく記述するが、部分的にはひずみの変化量を実験結果よりも若干大きく見積っている。このような食い違いは主に同図の 4, 8, 10 番めの負荷 ( $288 \leq t \leq 384$ ,  $672 \leq t \leq 768$ ,  $864 \leq t \leq 960$  hr) にみられるが、これらの段階の相当応力はいずれも 140 MPa であり、しかもひずみの計算値は実験値の 1.3~1.5 倍の大きさを示している。これらの食い違いの原因の一つとして、図 4 に認められるように、材料定数  $\lambda=1/4$  が応力繰返しに伴う材料硬化の進行を必ずしも適切に表現しておらず、その上応力値が大きいことによってこの傾向が強調されたことが考えられる。

一方、ひずみ硬化理論は、図 8 (c) の軸ひずみの変化については、4 番めの負荷に対する実験値が小さかったことにより、結果的にそれ以降のクリープ挙動をよく表している。しかし同図(b)における 10 番めの負荷の計算値のように、一般にクリープ変形が進行した段階での応力変動に伴うクリープ速度の大きな増加は全く記述できない。これに対して、ORNL の理論は、この実験においても実験結果と極端に異なった見積りを与える場合があり、ひずみ硬化理論に対する優位性は必ずしも認められない。これは、図 6, 図 7 の結果とともに、ORNL の理論を不規則な変動応力に適用する場合には十分な注意の必要なことを意味する。

## 5. 結 言

この研究によって明らかになった事柄を要約すると、次のようになる。

(1) 修正クリープ硬化面理論は、応力変動後の材料の過渡的応答とクリープ回復をよく表し、ここで検討した構成式の中で実験結果を最もよく記述する。

(2) クリープ硬化面理論は、クリープ回復などの微細な材料挙動は記述できないが、おおむね実験結果とよく一致する。回復クリープひずみ量は、一般の高温構造物に許容されるひずみ量と比較して十分小さいので、この理論は構造解析用クリープ構成式として有望である。

(3) ORNL 修正ひずみ硬化理論は、応力反転条件が成立する場合と成立しない場合とでは大きく異なった応答を示すため、応力変化が大きく、しかも不規則な場合には実験結果とは著しく違った結果を与えることがある。

(4) ひずみ硬化理論は、応力変動後の材料軟化を全く記述できないため、一般的な応力変動がある場合には適用できない。

最後に本研究は、昭和 57 年度文部省科学研究費補助金(一般研究 C, 課題番号 57550064)の助成による研究の一部であることを付記し、謝意を表す。

## 文 献

- (1) Kraus, H., *Creep Analysis*, (1980), John-Wiley.
- (2) 宮・矢川, 原子炉構造工学, (昭 51), 東京大学出版会.
- (3) 日本材料学会編, 固体力学の基礎, (昭 56), 日刊工業新聞社.
- (4) Corum, J.M. ほか 4 名, *ORNL-5014*, (1974), Oak Ridge Nat. Lab.
- (5) 村上・大野, 機論, 48-428, A (昭 57), 431.
- (6) 大野・ほか 2 名, 機論, 49-446, A (昭 58), 1200.
- (7) McVetty, P.G., *Mech. Eng.*, 56-3 (1934), 149.
- (8) 大橋・ほか 2 名, 機論, 48-435, A (昭 57), 1398.

## 討 論

〔質問〕 池上 皓三〔東京工業大学〕

実験の困難な長時間変動応力クリープ実験を行いクリープ構成式の検討をされたことに敬意を表す。下記の点ご教示願いたい。

(1) 式(7)に含まれる  $\lambda$  の値は、実験結果から直接決めることができるのか。また、この値は実験条件にかかわらず一定値となるべきなのか。

(2) 式(9・a)の回復するクリープひずみの量は、どの程度の大きさか。

〔回答〕 本論文に対し、ゆき届いたご検討をいただき、厚くお礼申し上げます。ご質問については、著者らは以下のように考えている。

(1) 式(7)の  $\lambda$  の値は、応力の方向反転後に見られるクリープ速度の変化を最もよく記述するようにし



て、実験結果から定めることができる。

本論文、並びに文献(5)で述べてあるように、この $\lambda$ はクリープ変形が進行する時に式(6)のひずみ範囲 $g \leq 0$ がどの程度の割合で発達するかを規定するパラメータであり、一般には、材料、温度、応力水準、ひずみ硬化状態等に依存するものと思われる。しかし本論文の結果に見られるように、応力反転を伴う代表的な応力変動様式の下での実験結果〔例えば図4(b)〕を最もよく記述するように $\lambda$ の値を定めておけば、この値は十分広い範囲の応力変動様式に対してそのまま用いることができる。

なお、単軸引張りクリープにおいては、式(8)の $q$ は $\lambda$ の値とは無関係に $q = \epsilon^c$ となることにご注意いただきたい。したがって材料定数の決定においては、まず $\lambda$ 以外の定数を単軸引張りクリープ試験によって定め、次に $\lambda$ の値を上述のような代表的応力反転試験結果から決定することができる。

(2) 式(9・a)の回復ひずみの量は、式(9・b)に規定したように、先行クリープ変形の際に加えた応力の大きさにほぼ比例する。本実験の場合、この回復ひずみの大きさは図3のクリープ回復曲線で与えられ、0.015%~0.02%である。