高真空下における SUS 304 鋼のクリープ・疲労
相互作用の評価の試み*

森下正樹**, 朝田泰英***, 石川明克***

An Evaluation of Creep-Fatigue Behavior of 304 Stainless Steel
in a Very High Vacuum Environment

by Masaki MORISHITA, Yasuhide ASADA, Akiyoshi ISHIKAWA

A series of creep-fatigue tests conducted with SUS 304 stainless steel at 650°C in a very high vacuum environment of 0.1 μ Pa were subjected to evaluation based on damage concept relating to an inelastic deformation behaviors of the material.

In the model, a damage is separated into two components of time-independent and -dependent. An inelastic strain is separated into a time-independent and -dependent inelastic strain parameter. Damage components are related to inelastic strain parameters to give damage rate equations in which material constants are determined from experiments.

Key Words: Fatigue, Material Testing, Creep-Fatigue Interaction, Environmental Effect, Vacuum Environment

1. 緒 言

クリープ温度域において金属材料の疲労強度が顕著な時間依存性を示すことは知られており, その発生機構に関する平の考察より, この現象は一般に「クリープ・疲労相互作用」と呼ばれている。この問題は高温で使用される機器等の構造健全性評価に際して最も重要な点の一つであることから, 活発な研究が行われてきた。

通常, 高温疲労強度に関する材料データは大気環境中で行われる疲労試験により得られることが多いのであるが, そこから得られる速度効果, ひずみ保持時間効果等に関する種々の知見については, そこで生じている疲労寿命の低下現象が主として疲労サイクル中に発生するクリープ効果に起因するものであるとの観点から議論が展開され, 種々の強度評価法が提案されてきた^{(1)~(3)}。

一方, White⁽⁴⁾, Coffin⁽⁵⁾ の行った $1\sim 10^{-2}$ mPa の高真空中におけるクリープ・疲労試験によって, 高真空中においては大気中の試験結果と比較して疲労強度の向上が見られるばかりでなく, 速度効果が減少, あ

るいは消滅する事実が明らかにされ, 大気中で観察される速度効果の発生要因として環境の効果, 特に粒界酸化の効果の重要性が指摘された。Coffin⁽⁶⁾ は後に高真空中においても疲労寿命低下の生じる場合があることをこの歯状波(非対称三角波)の実験によって示し, 大気中における高温疲労強度は「クリープ・疲労・環境の相互作用」としてその現象をとらえる必要がある, との説を展開している。

著者らは, クリープ・疲労相互作用に及ぼす環境の効果を定量的に評価するための基礎資料を得ることを目的として, 0.1 μ Pa の高真空中でのクリープ・疲労試験を SUS 304 ステンレス鋼について実施し, ほぼ環境効果を排除したと思われる, クリープ・疲労試験を行った⁽⁷⁾。しかしながら, この高真空中においても波形効果, ひずみ保持時間効果は依然として存在していた。

本論文においては, ここで得られた現象を純粋なクリープと疲労との相互作用であるとしてとらえ, それを非弾性変形挙動と関連させて力学的立場から考察することを試みたので, その結果について報告する。

2. クリープ・疲労試験の概要

SUS 304 ステンレス鋼の溶態化処理材から製作した最小断面直径 10 mm の砂時計形試験片を用い, 650°C において 0.1 μ Pa の高真空環境下でひずみ制御低サイクル疲労試験を実施した。試験方法及び試験結

* 昭和 58 年 11 月 29 日 第 923 回講演会において講演, 原稿受付 昭和 58 年 5 月 25 日。

** 正員, 動力炉・核燃料開発事業団 (〒107 東京都港区赤坂 1-9-13)。

*** 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

果の詳細については前報⁽⁷⁾に詳しいのでそれを参照されたい。ここでは後述の損傷モデルに関する議論の参考とするため、試験結果の概要について述べるものとする。

図1に試験に使用したひずみ波形の一覧を示すが、これらは (i) 対称三角波, (ii) 非対称三角波, (iii) ひずみ保持波, の3種類に大別される。

図2~4にそれぞれ対称三角波, 非対称三角波, ひずみ保持波の試験結果を示す。図中, 参考のために大気中で得られた同一材料, 同一試験条件の結果⁽⁸⁾を破線で示す。また, 0.1mPa オーダの真空環境下における結果⁽⁹⁾も示されている。

これらの結果から明らかとなった高真空中における SUS 304 鋼のクリープ・疲労特性を以下に列挙すると,

(i) 真空中において, 疲労強度は大気中のそれと比較して明らかに向上しており, かつ実験を行ったひずみ速度の領域でひずみ速度効果は消滅している。

(ii) 圧縮負荷時のひずみ速度のみを低下させた, いわゆる Fast-Slow の非対称三角波において, 対称三角波に対する寿命低減は生じない。

(iii) しかしながら, 引張り負荷時のひずみ速度のみを低下させた, Slow-Fast 波の場合には明らかな寿命低減が見られ, この傾向は引張り過程のひずみ速度が低下するほど顕著である。

(iv) また, 引張ひずみ保持時間の挿入による寿命低下は高真空中でも依然として存在する。

(v) 引張りと圧縮の両ひずみピークに保持時間を挿入すると, 引張りのみの保持の場合と比較して寿命低下の度合いが緩和される回復現象が見られる。

図1 試験に使用したひずみ波形

(vi) Slow-Fast 波に引張りひずみ保持時間を重畳すると疲労寿命はさらに低下する。

(vii) ひずみ保持時間の効果と波形効果 (Slow-Fast) ではその現れ方が異なっており, 前者は低ひずみ範囲側ほど顕著であるが, 後者では寿命低下の程度はひずみ範囲によらずほぼ一定である。

上述のような観察結果から, 高真空中のクリープ・疲労相互作用の定性的特徴は次のようにまとめることができる。すなわち, ひずみ速度の速い対称三角波を

図2 対称三角波の試験結果

図3 非対称三角波の試験結果

図4 ひずみ保持波の試験結果

基準とした場合、これに対して寿命低下を生ずるひずみ波形と生じないひずみ波形とに大別することができ、引張応力の作用時間（または引張り過程での保持時間）が圧縮のそれよりも大きい場合に寿命低下が生じると言える。

SEM による破面観察を行ったところ、このようなひずみ波形による寿命低下の有無と破面の様相とは非常に良い対応を見せており、寿命低下が生じている場合は粒界破壊、寿命低下が生じない場合には粒内破壊が支配的であった。図 5, 6 に両者の代表例を示すが、このような傾向は従来報告されている多くの観察結果と一致するものである。

3. 損傷概念によるクリープ・疲労評価の試み

2章で述べた真空中におけるクリープ・疲労試験結果は損傷概念を用いると、引張応力の作用下でかつ非弾性ひずみ速度が小さいときに時間に依存する損傷が生じ、しかも次の反転負荷過程において回復されない場合に寿命低下が現れると考えることによって定性的に説明され得る。そこで、このような考え方に基づいて新しい損傷モデルを考案し、前述の試験結果に対して適用しその評価を試みた。

著者の一人⁽⁹⁾は以前に、ひずみ速度の速い対称三角波のくり返し応力ひずみ関係を基準として任意のひずみサイクルにおける非弾性ひずみ範囲を時間依存成分と非依存成分とを表すパラメータに分離し、それぞれを時間依存損傷と時間非依存損傷とに結びつけることによって寿命評価を行う方法を提案している。本報ではこれを拡張し、ひずみサイクル(ヒステリシス曲線)中の刻々の非弾性ひずみの値に対応して時間依存および非依存的非弾性ひずみパラメータを定義し、これに基づく損傷成長則を考えた。

三角波においてひずみ速度を低下させると図 7(a)に模式的に示すように、応力範囲も低下していく。そこで、ひずみ速度が $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の対称三角波のヒステリシス曲線を基準として任意のひずみ波形における負荷・除荷時の時間依存非弾性ひずみパラメータを図 7(b)に示すように定義した。すなわち、同一ひずみ範囲の基準ヒステリシス曲線と任意ひずみ速度のヒステリシス曲線とを平行移動によってひずみ軸(横軸)の切片が重なり合うようにする。この時、任意の応力レベルで両方のヒステリシス曲線を比較し、ひずみの差をその応力における非弾性ひずみの時間依存成分を代表するパラメータとし、記号 ϵ_{PD} で表すこととする(図では負荷過程における ϵ_{PD} の決定方法について模式的に示している。除荷過程についても同様である)。

図 5 粒内破壊の一例 ($\epsilon_{tr}=1\%$, $\dot{\epsilon}_t=1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $t_n=0 \text{ min}$ (対称三角波))

図 6 粒界破壊の一例 ($\epsilon_{tr}=1\%$, $\dot{\epsilon}_t=1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $t_n=10 \text{ min}$ (ひずみ保持波))

(a)

図 7 ϵ_{PD} 決定方法の模式図

ここで、くり返し負荷における応力ひずみ関係のひずみ速度依存性は基準として用いたひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ では十分飽和しており、その応力ひずみ挙動には時間依存成分は含まれないとの仮定を設けている。本研究で行った実験のひずみ速度条件 ($1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ではこの仮定を裏付けるのに必ずしも十分とは言い難いが、同一材料、同一試験条件の大気中の実験結果からみて、ほぼ妥当であろうと判断している。

図 8, 9 に Slow-Fast 波の引張負荷過程に生じていく ϵ_{PD} の様相を示す。これらの図で、横軸は有意な ϵ_{PD} が発生し始めるときの全ひずみを ϵ_t^* として、 $\epsilon_t - \epsilon_t^*$ をとっている。両図から、若干の例外は有るものの、 ϵ_{PD} と $\epsilon_t - \epsilon_t^*$ との間にはひずみ範囲にかかわらずよい直線関係の成立していることがわかる。

ひずみ保持時間中の ϵ_{PD} については、図 7(c) に模式的に示すように、上述と同じ方法でひずみ保持サイクルのシステリシス曲線と基準ヒステリシス曲線とを重ね合わせた上で、ある応力レベルにおける保持されるひずみと基準ループの負荷過程上のひずみ量の差として定義した。図 10 に保持時間中に発生する ϵ_{PD} と時間との関係を示す。

このようにして定義された非弾性ひずみの時間依存成分を代表するパラメータはひずみ量としての厳密な物理的意味を持つものではなく、単調、負荷中とひずみ保持中の定義も必ずしも一義的ではないが、あるいはくり返し応力ひずみ挙動においてひずみ速度が下がった時にある応力レベルで余分に出ているひずみをクリープひずみと見なす考え方からの類推によるものである。

次に上述の定義による時間依存と非依存との非弾性ひずみパラメータを用いて以下のような損傷成長モデルを仮定する。

ここでの基本的な考え方は、時間に依存しない損傷と時間依存の損傷とが存在し、両者の線形和がある臨界値に達したとき破壊が生じる、というものであり、クリープ・疲労相互作用概念と基本的に同じである。

$$\frac{1}{\phi_I} \frac{d\phi_I}{dn} = G(\Delta\epsilon_{PI})^\alpha \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{\phi_D} \frac{d\phi_D}{dt} = B \left| \frac{d\epsilon_{PD}}{dt} \right|^\beta |\sigma|^m \text{sgn}(\sigma) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_D \geq 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 ϕ_I , ϕ_D はそれぞれ時間非依存及び時間依存の損傷であり、 $\Delta\epsilon_{PI}$ は時間非依存の非弾性ひずみ範囲である。また、 n はくり返し数、 t は自然の時間、 G , B , m , α , β は材料定数である。

損傷成長則としては種々の形式を考え得るが、こ

では Majumdar⁽¹⁰⁾ の damage rate equation と同形式を仮定した。又、 ϕ_D は引張り過程では増加し圧縮では減少するが、 ϕ_D が負となる事は実験事実と矛盾するので式(3)の制限を設けている。

式(1)は時間非依存損傷の成長則であり、 $n=0$

図 8 負荷過程に生じる時間依存非弾性ひずみパラメータ ϵ_{PD} ($\dot{\epsilon}_{ti} = 1 \times 10^{-4} \text{ 1/s}$)

図 9 負荷過程に発生する時間依存非弾性ひずみパラメータ ϵ_{PD} ($\dot{\epsilon}_{ti} = 1 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$)

図 10 保持時間中に発生する時間依存非弾性ひずみパラメータ ϵ_{PD}

～ N_f で積分すると定数の置き換えによって周知の Coffin-Manson 則と同一表式となる。

$$N_f = C(\Delta \varepsilon_{PI})^{-\alpha} \quad (4)$$

ただし,

$$C = \frac{1}{G} \ln(\phi_{I1}/\phi_{I0}) \quad (5)$$

ここで ϕ_{I1} 及び ϕ_{I0} は破壊時及び初期の ϕ_I である。ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の対称三角波において ε_{PD} が発生しないものと仮定しているから、これらの実験結果より定数 α , C は定まる。本実験の場合, $C=0.67$, $\alpha=1.9$ である。

次に時間依存損傷の成長則について考える。まず、ひずみ速度の小さい負荷、除荷過程の場合、1 サイクルについて式(2)の積分を実行すると、

$$\ln\left(\frac{\phi_{D3}}{\phi_{D1}}\right) = B \left[\int_1^2 \left| \frac{d\varepsilon_{PD}}{dt} \right|^\beta |\sigma|^m dt - \int_2^3 \left| \frac{d\varepsilon_{PD}}{dt} \right|^\beta |\sigma|^m dt \right] \quad (6)$$

ここで、添字及び積分区間を表す数字 1, 2, 3 は圧縮

図 11 時間依存損傷 Φ_D と時間依存非弾性ひずみパラメータ ε_{PD} の関係 (Slow-Fast 波の場合)

図 12 時間依存損傷 Φ_D と $\varepsilon_{PD}\sigma^*$ の関係 [Slow-Fast 波および保持波 (10 分)]

ピークから始まり圧縮で終わる 1 サイクルの各ピークを表す。

式(6)中の指数 β と m を決定するために次の近似を行った。負荷反転直後において応力は急速に変化し、負荷過程の大部分の期間において応力はピーク応力 $\sigma_{\max}$ (引張り)又は $\sigma_{\min}$ (圧縮)にほぼ等しいから負荷過程において $\sigma = \sigma_{\max}$ 一定、又は $\sigma = \sigma_{\min}$ 一定とする。またひずみ保持時間、応力緩和が急激に生じ、この期間の大部分は緩和後応力 $\sigma_{\max}'$ (引張り)又は $\sigma_{\min}'$ (圧縮)にほぼ等しいので、 $\sigma = \sigma_{\max}'$ 一定又は $\sigma = \sigma_{\min}'$ 一定と仮定した。これより、式(6)は

$$\ln\left(\frac{\phi_{D3}}{\phi_{D1}}\right) = \begin{cases} B \left[|\sigma_t^*|^m \int_0^{\tau_t} \left| \frac{d\varepsilon_{PD}}{dt} \right|^\beta dt - |\sigma_c^*|^m \int_0^{\tau_c} \left| \frac{d\varepsilon_{PD}}{dt} \right|^\beta dt \right] & (\tau_t > \tau_c) \\ 0 & (\tau_t \leq \tau_c) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、引張負荷過程においては $\sigma_t^* = \sigma_{\max}$ 、引張り保持過程においては $\sigma_t^* = \sigma_{\max}'$ 、圧縮の場合は σ_c^* はそれぞれ $\sigma_{\min}$, $\sigma_{\min}'$ とし、 τ_t , τ_c はそれぞれ引張り過程、圧縮過程の時間である。本実験の大部分では $\tau_t \gg \tau_c$ であるので上式において $\tau_t > \tau_c$ の場合の右辺第 2 項は省略する。ここで、 $\beta=1$ と仮定すると、

$$\ln\left(\frac{\phi_{D0}}{\phi_{D1}}\right) = \begin{cases} B \varepsilon_{PD} |\sigma_t^*|^m & (\tau_t > \tau_c) \\ 0 & (\tau_t \leq \tau_c) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $m=0$ と仮定して実験との比較を行った。図 11 は実験より求めたサイクル当たりの時間依存損傷

$$\Phi_D = \frac{1}{N_f} - \frac{1}{N_{f0}} \quad (9)$$

N_{f0} : 時間依存損傷が無い場合の寿命

と ε_{PD} との関係を示す一例として Slow-Fast 波について示すもので、両者の間に良好な直線関係が成立し、かつそのこう配は 1.1 であって 1 に非常に近い。よって $\beta=1$ なる近似は妥当であると考えられる。

m については σ^* との関係を調べることによって決定出来るが、 $\sigma_{\max}$ 、あるいは $\sigma_{\max}'$ のひずみ速度、ひずみ範囲による差は極めて小さく実験誤差の混入が予想されるので $m=1$ と仮定して実験との比較を行った。結果を図 12 に示す。図は以上の近似の成立する Slow-Fast 波および $t_h=10 \text{ min}$ のひずみ保持波について示したもので、ばらつきは有るものの比較的良好な対応関係が成立することを示している。

以上よりとりあえず $\beta=1$, $m=1$ と仮定することとした。

以上、本損傷モデルを再記すると、

$$\frac{1}{\phi_i} \frac{d\phi_i}{dn} = G(\Delta\epsilon_{PI})^\alpha \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{1}{\phi_D} \frac{d\phi_D}{dt} = B \left| \frac{d\epsilon_{PD}}{dt} \right| |\sigma^*| \text{sgn}(\sigma) \dots\dots\dots(11)$$

$$\phi_D \geq 0 \dots\dots\dots(12)$$

ここに、定数 G 、指数 α は前述のとおりであり、定数 B の値は 0.11 である。

4. 結 言

本論文においては $0.1 \mu\text{Pa}$ の高真空中において実施したほぼ完全に環境効果を排除したものと思われる SUS 304 鋼のクリープ・疲労実験を非弾性挙動と関連させて力学的に評価することを試みた。本研究の要旨を述べれば以下のとおりである。

(1) 非弾性変形挙動を時間依存と非依存の成分に分離するために、 ϵ_{PI} 及び ϵ_{PD} なる非弾性ひずみパラメータを提案した。 ϵ_{PI} は応力ひずみ挙動に現れる時間依存効果がほぼ収束したものと思われる、ひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の応力ひずみヒステリシス曲線の非弾性ひずみによって表すものとした。また、 ϵ_{PD} は負荷行程においては基準となる応力ひずみ曲線からのひずみの差分として、ひずみ保持時間中においては保持ひ

ずみと基準応力ひずみ曲線との差として定義した。

(2) ϵ_{PD} と $\epsilon_i - \epsilon_i^*$ との間には良好な直線関係が成立し、同一のひずみ波形ならばひずみ範囲にはよらないことが明らかとなった。なお、この関係はひずみ速度には依存する。

(3) 損傷概念に基づいて実験結果を解析することとし、損傷を時間非依存成分 ϕ_i と依存成分 ϕ_D とに分離し、それぞれと ϵ_{PI} 、 ϵ_{PD} との対応関係を調査し、損傷成長則の記述式を与えた。なお、 β および m の値は暫定的なものである。

文 献

- (1) Taira, S. (Hoff, N.J. 編), *Creep in Structures*, (1962). Academic Press.
- (2) Manson, S.S., *Proc. Thermal and High Strain Fatigue, The Metals and Metallurgy Trust*, (1967), 154.
- (3) Manson, S.S., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 520 (1973), 744.
- (4) White, D.J., *Proc. I Mech.*, 184 (1969-70), 223.
- (5) Coffin, L.F., *G.E. Report*, 72 CRD005, (1971).
- (6) Coffin, L.F., *ASME MPC*, 3 (1977), 349.
- (7) 森下・ほか 2 名, 機講論, No. 810-11 (昭 56-10), 74.
- (8) 朝田・ほか 3 名, 機講論, No. 790-13 (昭 54-10), 130.
- (9) Asada, Y., ほか, *Proc. I. Mech. E.*, (1980), 199.
- (10) Majumdar, S., ほか, *ASME MPC*, 3 (1977), 323.

討 論

〔質問〕 大 谷 隆 一〔京都大学工学部〕

貴重な実験結果に興味をもって拝見した。解析について質問する。

本文中述べておられるように、図 7 の (b) と (c) の間には ϵ_{PD} のとり方に一義性がない。また、図 10 から明らかなように、ひずみ保持のない対称波 ($t_h=0$) の場合にもかなりの量の ϵ_{PD} が生じていることになる。このような ϵ_{PD} の決め方をされたのは、Slow-Fast 波と引張りひずみ保持波とを同一の損傷則、式 (11) で説明しようとされたためと考えられるが、Slow-Fast 波に比べてひずみ保持波における保持中 (リラクセーション中) のひずみ速度はかなり小さいと予想され、両波形の損傷機構に相違がある、とは考えられないか。

〔回答〕 ご指摘の点は次の 2 点であると考え、

(1) ϵ_{PD} の定義。

(2) ひずみ保持中と負荷過程の損傷機構の相違。

本研究の目的を改めて述べれば、本研究は損傷構成方程式を基本とした損傷モデル理論を取扱っているも

のであり、そこでは最終的な評価の簡潔さを考え、クリープ疲労損傷を時間依存項と非依存項とに分離し、それらの異積値によって破壊を予測しようとするものであって、各損傷の成長方程式によって累積を記述しようとしている。したがって第一の指摘点である ϵ_{PD} については、これが生じてそれによる損傷 ϕ_D の累積値が大きくならなければ結局 ϵ_{PD} は破壊には寄与しない。

次に、保持中と負荷過程の損傷機構 (ミクロメカニズム) に相違があるであろうことは著者らも予想している。本研究は仮にこれらの損傷を ϕ_i 、 ϕ_D の 2 量で記述するならばこのような取扱いをする必要があることを示したもので、結果として保持中と負荷過程において ϵ_{PD} のとり方に相違が生じたのはご指摘のとおり両過程における損傷のミクロメカニズムの相違もその一因であると十分考えることができる。しかし一方で本研究のような ϵ_{PD} の定義を行うと式 (11) により損傷成長則を統一的に扱えるものと考えている。

なお、これらの点については研究の発展段階である

ので貴指摘を十分参考にして今後も研究を進めていきたいと考えている。

〔質問〕 大 路 清 嗣〔大阪大学工学部〕

(1) 本論文で採用された損傷則は非弾性ひずみを時間非依存形と時間依存形のひずみ成分に分け、この二つのひずみ成分に基づいて損傷を取扱っている。ひずみの分離の仕方が図 7 (b) および (c) に示されているが、図でみる限り、時間依存形ひずみ ϵ_{pd} の内容が (b) の三角波の場合と (c) の保持時間のある場合とで異なっているように見える。適用の仕方が必ずしも明確ではないが、式 (2) で与えられる損傷成長則では ϵ_{pd} の損傷進行速度に対する寄与が ϵ_{pd} の時間変化率の関数として与えられており、本論文のひずみ波形に対してはあるいは問題が少ないのかもしれない。しかし損傷則は本来特定の波形の負荷のみを適用対象にするのではなく、できるだけ広範囲の負荷に疑義なく適用可能で、それらの条件下の破壊現象に対し、形式的でよいが、一定の定量秩序を与え、いくつかの単純な基礎資料に基づいて、可能な限り広範囲な負荷条件下の強度が、工学的に許容される程度の精度内で、定量的に予測できるものであることが要請される。このような観点に立てば ϵ_{pd} はもっと一般性のある、矛盾のない、真の時間依存形ひずみに密着した定義にかえる必要があるのではないか。現在の定義では ϵ_{pd} の中に時間非依存性ひずみ成分が含まれ得るので、負荷によっては問題が生じないといえないのではないか。

(2) 破壊条件を時間非依存損傷 ϕ_i および時間依存損傷 ϕ_D の線形和で与え、それぞれの損傷成長則を式 (1) および (2) のように仮定すれば、変動荷重波形下では、ひずみ幅の変動の順序効果が現れ、損傷の累積が線形でなくなるものと思われる。どのような理由でこのような効果を導入する必要があるのか。またこれに伴い導入された、式 (5) の初期損傷 ϕ_{i0} はどのような意味をもつ量と考えているのか。

(3) 式 (8) で β の評価に際して $m=0$ とおきながら、その後明確な記述なく $m=1$ としているが、定量的問題はないのか。

(4) 式 (9) の ϕ_D は何か。説明がないので明らかではないが、 $\ln(\phi_{Di+1}/\phi_{Di})$ に相当する量を ϕ_D とおき、破壊条件を、時間非依存損傷の場合も含めて、 ϕ の線形和におきかえているように見える。もしそうなら、この部分に関しては、式 (1) および (2) を中心とした本論文の非線形累積損傷則から、著者らのグループが文献 (8), (9) などで従来使用していた線形累積損傷則に戻ったことになっているのではないか。

(5) 著者らは文献 (8), (9) などでひずみ範囲分

割法や著者らはグループの提案になる、時間非依存形および時間依存形のひずみ成分に基づく、本論文とは別の、線形累積損傷則を検討している。本論文ではそれらの検討を行うことなく、新たに別の損傷則を導入しているが、これは著者らのグループが以前に検討した損傷則が高真空下のクリープ・疲労相互作用に対してうまく適用できないことを意味しているのか。また本論文で提案の損傷則によって、これまで採用されてきた損傷則では説明できなかったどのような事項が説明可能となり得るのか、もし見通しがあればご教示願いたい。

〔回答〕 (1) 第一のご指摘点は時間依存の非弾性ひずみパラメータ ϵ_{pd} のとり方に関するものと考えますが、本研究では時間非依存非弾性ひずみパラメータ ϵ_{pi} としてひずみ速度 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ の対称三角波における非弾性ひずみ成分をとっているため、 ϵ_{pd} の中に ϵ_{pi} は含まれない。ただし負荷中の ϵ_{pd} はひずみ保持中の ϵ_{pd} に含まれるが、これはひずみ保持直前と直後における ϵ_{pd} の連続性を満たすためにあえてこのようにしてある。また、負荷によって、例えばひずみ保持終了後再び同一方向に負荷のある場合などについては ϵ_{pi} , ϵ_{pd} のとり方は未検討である。最後に、本文中でも述べたように ϵ_{pd} はひずみ成分そのものではなく、時間依存のひずみ成分を代表するパラメータとして取扱っていることを再記しておく。

(2) 本研究では時間非依存損傷と時間依存損傷との線形和を破壊時においてとり、これを全損傷を与えることを前提としている。各々の損傷成分は式 (1), (2) で与えているが、これはある意味で Kachanov⁽¹⁾ の損傷理論と同じものであって、破壊時における損傷をとればそれは線形となる。

(3) 負荷中のひずみ硬化は小さく、また本実験を行ったひずみ範囲の領域で応力範囲はそれほど（ひずみ範囲によって）変わらないので式 (8) で $m=0$ としても 1 としても応力項の寄与は小さい。そこで Slow-Fast 波の解析を $m=0$ として行った。次に、ひずみ保持波と保持なしの結果を統一的に評価するために $m=1$ としたが、これは仮定であって必ずしも最適値とは考えていない。

(4) 本研究では時間依存損傷時間非依存損傷については線形和が成立することを仮定しており、従来の方法〔文献 (8), (9)〕と同一の思想の下に組立てられている。また、 ϕ_D はこの仮定に基づいて求められる実験値を表すが、これは本論文において式 (9) を与えるにあたって明記してある。

(5) 一般に大気中においても Slow-Fast と Fast

-Slow では強度は思なる。従来の方法では応力範囲に基づいて損傷則が組立てられておりその差が説明不可能であった。そこで引張応力と圧縮力の作用下での損傷の累積挙動に差があることを取り入れる必要があったが、本研究の損傷則はこのような観点から従来の手

法を拡張したものである。これでもご指摘のとおり複雑なクリープ・疲労相互作用の現象を完全に記述し得るかどうかについては未検討な部分も少なくない。より広範に使用可能な方法の開発は今後の課題であると考ええる。