伝承すべき高温材料試験とその現状

3. 多軸クリープ疲労試験—必要性とその試験技術—†

坂根 政男* 伊藤 隆基*

Material Tests at High Temperatures to Be Maintained in Future and Their Present State of Affairs

III: Multiaxial Creep-Fatigue Testing – Necessity and Technique –

by

Masao SAKANE* and Takamoto ITOH*

Key words: Testing, High temperature, Creep-fatigue, Multiaxial loading

1 緒 言

本講座では、多軸クリープ疲労試験の必要性和試験技術について述べる。高温では、機械的応力と熱応力が重畳負荷される場合が多い。たとえば、内圧を受ける管は、内圧によって管の長手方向の応力と周方向の応力（応力比は前者：後者＝1：2）の多軸クリープ損傷を受ける。また、このような管が内外面からの加熱・冷却を受けると多軸応力下での熱疲労損傷を受ける。温度変化が周期的に発生すると、内圧を受ける管は多軸応力下でクリープ疲労損傷を受けることになる。多軸応力を受けるその他の例は、ガスタービンや蒸気タービンのディスク・ローターや動・静翼切欠き部、溶接による材料不連続部等がよく知られている。

これまで、多軸応力を考慮した高温低サイクル疲労やクリープ強度設計については、ミーゼス型の相当ひずみや同相当応力が幅広く使用されてきている。しかし、これらのミーゼス相当量はせん断ひずみエネルギーを表す物理量であり、き裂の発生や伝ぱが主要な要因となる高温疲労損傷や、粒界ボイドや析出物が主要な要因となるクリープ損傷を適正に表示できていない可能性が懸念され、多軸応力下での低サイクル疲労やクリープ疲労の研究が行われてきた。これらの研究の最新の成果については、文献1)～5)を参照されたい。このように、多軸クリープ疲労は高温機器の設計の高精度化に密接に関係している研究課題でもある。

多軸クリープ疲労寿命評価の研究は、理論的に解決できる課題ではなく、実際に多軸負荷の試験結果に基づいて、経験的に寿命評価法を開発する必要がある。その意味では、経験の学問と言っても過言ではなく、多軸クリープ疲労の試験技術が重要となる。以下では、主な多軸クリープ疲労の試験技術について概説する。

2 多軸クリープ疲労試験法の分類

多軸クリープ疲労試験としてよく使用されている方法の模式図を図1⁶⁾に示す。同図でタイプIAは中空円筒試験片に軸荷重とせん断荷重を負荷する方法であり、多軸疲労試験では最も多く用いられる方法である。同図のタイプIBの試験では、タイプIAの試験片にさらに内外圧を負荷する方法である。この試験方法では、後述するように実現できる負荷の多軸度の範囲が大幅に広がる。同図のタイプIIは十字型試験片を用いる試験であり、後述する主応力比と主ひずみ比の広範な範囲での試験が可能となる。同図タイプIIIの立方体にx, y, zの三方向から軸荷重を負荷する試験法も提案されている。

多軸クリープ疲労試験を論ずる際には、応力やひずみの多軸度の定義をしておく必要がある。この定義には種々のものがあるが、最も簡便な表示方法としては、主応力比(λ)や主ひずみ比(ϕ)を用いる方法であり、次式で表される。

$$\lambda = \frac{\sigma_{II}}{\sigma_I} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_I} \quad (2)$$

ここで最大、中間および最小主応力をそれぞれ σ_I , σ_2 および σ_3 とすると、 $|\sigma_I|$, $|\sigma_2|$ および $|\sigma_3|$ のうち最大および中間の値の絶対値を外したものをそれぞれ σ_I および σ_{II} とする。たとえば、 $\sigma_I=100\text{MPa}$, $\sigma_2=50\text{MPa}$ および $\sigma_3=-200\text{MPa}$ の場合、 $|\sigma_3|>|\sigma_I|>|\sigma_2|$ なので、 $\sigma_I=-200\text{MPa}$ および $\sigma_{II}=100\text{MPa}$ となる。

一方ひずみについては、 ε_I および ε_{II} はそれぞれ式(1)の σ_I および σ_{II} の主応力の主軸と同一方向またはそれに近い方向に作用する主ひずみ(ε_I , ε_2 または ε_3)である。

† 原稿受理 平成 27年 4月 14日 Received Apr. 14, 2015 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 立命館大学 理工学部 〒525-8577 草津市野路東, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577

図1 試験片形状と試験方法の分類

ϕ	-1	-0.5	0	0.5	1	3軸
λ	-1	0	0	0.5	1	
多軸ひずみ状態						
多軸応力状態						
タイプ	試験可能な多軸応力・ひずみ状態の範囲					
I A						
I B, II						
III						

図2 多軸負荷状態と多軸試験

図3 中空円筒試験片

多軸負荷では、応力とひずみの主軸方向が常に固定された比例負荷と同主軸方向が時間的に変化する非比例負荷に分類される。比例負荷では、応力とひずみの主軸方向は一致する。非比例負荷では応力とひずみの主軸方向は異なる場合があるが、その差はあまり大きくない。

図1に示した試験方法で可能な多軸負荷状態を示したのが、図2である。なお、同図で主応力比(λ)と主ひずみ比(ϕ)の値が、それぞれ式(1)および式(2)での定義に従うと一致していない場合がある。この不整合は、直感的には理解しにくい。単軸引張においては応力が一軸のみに生じるがひずみは三軸に生じることを考えるとやむを得ない不整合であり、受け入れざるを得ない。

図2において、タイプIAの試験では、平面応力状態での主応力比が $-1 \leq \lambda \leq 0$ 、主ひずみ比が $-1 \leq \phi \leq -\nu$ の試験が可能である。ここで、 ν は弾性域ではポアソン比となるが、本稿では単軸応力で引っ張ったときの弾性ひずみと非弾性ひずみの両者の和で表示した縦ひずみと横ひずみの比をポアソン比と呼ぶことにする。 ν は弾性域や非弾性域では0.3~0.5の値をとる。タイプIAの試験に内外圧を負荷したタイプIBの試験では、主応力比および主ひずみ比が-1から+1の全範囲での試験が可能となる。また、十字型試験片を用いるタイプIIの試験でも、全範囲の主応力比および主ひずみ比の試験が可能となる。さらに、タイプIIIの試験では、三軸応力およびひずみ状態での全主応力比および全主ひずみ比の範囲の試験が可能となる。しかし、タイプIIの十字型試験片やタイプIIIの立方形状の試験片を用いた試験では、応力やひずみの主軸方向が常に試験片の腕の方向に固定されるために、比例負荷の試験のみが

実施可能である。一方、タイプIAやタイプIBでは、軸負荷とねじり負荷の比を変化させることにより、応力やひずみの主軸方向が時間的に変化する非比例負荷の試験を実施できる。

多軸応力下でのクリープ疲労試験を実施する際には、その目的に合わせて、図2の必要な主応力比や主ひずみ比の範囲を決定し、試験方法を図1から決めることになる。

3 多軸クリープ疲労試験方法

3・1 引張・圧縮-繰返しねじり試験

この試験は前述したように中空円筒試験片に軸荷重とトルクを負荷する試験方法である。図3にこの試験に用いられる試験片の一例を示す。軸方向の垂直応力は断面で一様となるが、せん断応力は円筒肉厚部で勾配を持つことになる。中空円筒試験片の直径に比べて肉厚が十分に薄い場合には、肉厚部でのせん断応力は近似的に一定と見なしよく、実験的にトルクからせん断応力を算出することができる。せん断ひずみはせん断角から幾何学的関係を用いて算出できるので、この実験手法では、軸荷重、トルク、試験片標点部の軸方向の伸び、標点部のせん断角を計測すれば、下記の式から、軸方向応力とひずみ、軸方向に垂直なせん断応力やひずみをすべて実験的に検出できる。それがこの試験方法の大きな特徴である。

軸応力(σ)およびせん断応力(τ)と軸ひずみ(ϵ)およびせん断ひずみ(γ)の各算出式を示す。

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T}{Z_p} \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{L_G} \quad (5)$$

$$\gamma = \tan(\Delta\theta) = \frac{\Delta l'}{L_G} \cong \Delta\theta \quad (6)$$

ここで、 P 、 T および A 、 Z_p はそれぞれ、試験片に負荷される軸荷重、トルクおよび試験片の断面積、ねじり断面積係

図4 引張・圧縮-繰返しねじり試験機

数である。また、 Δl および $\Delta l'$ は伸び計から検出された垂直方向変位およびねじれ方向変位、 L_G は伸び計を取付けた標点間距離、 $\Delta\theta$ は標点間距離でのせん断角である。

また、主応力 (σ_1 , σ_3) および主ひずみ (ε_1 , ε_3) の算出式をそれぞれ式(7)および式(8)に示す。

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad (7)$$

$$\left. \begin{matrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_3 \end{matrix} \right\} = \left(\frac{1-\nu}{2} \right) \varepsilon \pm \frac{1}{2} \sqrt{(1+\nu)^2 \varepsilon^2 + \gamma^2} \quad (8)$$

図3に示した試験片を用いて引張・圧縮-繰返しねじり試験を実施する場合の、試験片の設計に際しては下記について注意をする必要がある。

- ・試験片にトルクを负荷した場合の内面と外面でのせん断応力とせん断ひずみの差異について事前に検討しておく必要がある。
- ・中空円筒試験片に過大な軸荷重を负荷すると、バレーリングやバルジング（座屈）が起きやすい。とくに、低耐力の材料ではこの傾向が顕著であるので、上述した肉厚部でのせん断応力分布を過度に配慮しすぎるとバレーリングやバルジングを引き起こすことになる。比例负荷の場合には比較的問題とならない場合が多いが、複雑なひずみ経路での非比例负荷ではこの種の問題が発生しやすい。
- ・試験片の標点距離を過度に短くすると、フィレット部の影響から軸方向负荷に対して肉厚部内面での応力が外面でのそれよりも大きくなる場合がある。試験片を設計する際には、有限要素法解析等で内外面での応力の差を検討しておく必要がある。
- ・中空円筒試験片の内面の表面粗さについても十分な注意が必要である。内面はリーマで最終仕上げをすることが多いが、多くの高温材料ではNiを含んでおり、加工手順によっては内面に深い加工傷が残っている場合がある。場合によっては、この傷がき裂の発生源となり、データにバラツキが生じる原因となる。試し加工を実施し、内面の傷の有無の確認と場合によっては内面研磨が必要である。

図5 試験片グリップの種類

図4に引張・圧縮-繰返しねじり試験に用いられる試験装置の機構図を示す。ほとんどの試験装置は電気油圧サーボ方式を採用している。図の例では、下部クロスヘッドに軸荷重とトルク负荷用の油圧アクチュエーターが配置されている。軸荷重とトルク計測用のロードセルは、アクチュエーター側に取付けると上下や回転運動をするため、通常はアクチュエーターと反対側の上部クロスヘッド側に取付けられる。ただし、高温試験では試験片加熱によりロードセルの温度上昇を防ぐために何らかの冷却方法が必要である。多くの場合には、プルロッドが水冷される。また、ロードセルは、軸荷重とトルクを分離して計測する必要があるため、軸荷重とトルクのカロスワーク量（軸荷重を负荷した場合にトルク側に出力が発生する現象およびその逆の現象）を事前に検査しておかなければならない。

試験片のグリップは、図5(a)に示すようにボタンヘッドを上下からボルトで締め付ける方法が良く用いられる。ねじり负荷に対しては摩擦力を利用することになるが、中空円筒試験片であることからトルクはそれほど大きくないので経験的にこのグリップ方式で十分である。また、図5(b)に示したストレートなグリップ部を有する試験片に対しては油圧グリップが用いられるが、グリップする部分に変形しないように中空部には中子を入れる必要がある。

中空試験片の加熱には高周波誘導加熱装置を用いるのが簡便である。電気炉で試験片を加熱することも可能であるが、電気炉の場合にはひずみ計測のために試験片標点部の変位を炉外に取り出す必要があるため、変位計測はやや困難となる。

低サイクル疲労では、ひずみ制御の試験が一般的であることから、試験片標点部の軸方向変位とねじれ角を同時に検出できる伸び計が必要である。図6にこの伸び計

図6 軸-ねじり変位計測用の伸び計

図7 単軸および多軸負荷のひずみ波形

の一例を示すが、伸び計の先端を試験片標点部の両端に押しつけ、2本の石英棒またはセラミック棒で二方向の相対変位をセンサーで検出する方式のものである。センサーには渦電流センサーやひずみゲージを用いる方式のものがある。伸び計についても、軸方向変位とねじれ角とのクロストークが小さいものを使用する必要がある。

引張・圧縮—繰返しねじり試験では、比例負荷および非比例負荷の両者の試験が可能であり、両負荷での研究結果が数多く報告されている。

図7に引張・圧縮—繰返しねじり試験でよく使用されるひずみ波形を示す。図の縦軸は軸方向の垂直ひずみ（軸ひずみ、実線）および垂直な面でのせん断ひずみ（せん断ひずみ、破線）であり、横軸は1サイクル中の時間である。図7(a)および図7(b)はそれぞれ、軸ひずみのみの引張・圧縮負荷およびせん断ひずみのみの繰返しねじり負荷を示している。図7(c)は軸ひずみとせん断ひずみが同位相で負荷される比例負荷、図7(d)は軸ひずみとせん断ひずみが1サイクルごとに交番負荷されるひずみ波形であり、1サイクルごとに主ひずみ軸方向が45度変化する非比例負荷である。図7(e)は軸ひずみとせん断ひずみとが90度の位相差を有するひずみ波形であり、主ひずみ軸方向は1サイクル中に連続的に変化する非比例負荷である。図7(e)の波形では、SUS304 ステンレス鋼では比例負荷と比べて大きく寿命低下することが報告されている^{9), 7)~10)}。多軸クリープ疲労試験では、これらの波形のどこかでひずみ保持が導入される。

3・2 引張・圧縮—繰返しねじり—内外圧試験

図3で示した中空試験片に対して、引張・圧縮に加えて内圧および外圧を付与することにより $-1 \leq \lambda \leq +1$ の主応力比範囲において比例負荷の試験が可能となる。さらに、ねじり負荷も付与することによって、応力とひずみの主軸方向が変化する非比例負荷の試験も可能となる。しかし、内外圧を負荷する実験は技術的に難度が高いために、実際に行われている試験は内圧負荷のみに限定されている。以下では引張・圧縮—繰返しねじりに内圧のみを負荷した試験手法について述べる。なお、外圧を付与しない場合は、中空試験片に周方向に負の応力を発生させることはできない。

図8 引張・圧縮—繰返しねじり—内圧試験機

内圧を負荷する場合、試験片のバリリングやバルジングがさらに発生しやすくなることに注意が必要であり、また、ラチェット変形が生じない試験に限定される。さらに中空試験片の肉厚部にき裂が貫通すると試験は継続できなくなる短所を有している。

図8には、引張・圧縮—繰返しねじり—内圧試験装置の概略を示す¹¹⁾。同試験装置では、引張・圧縮—繰返しねじり試験装置を基本に、円筒試験片に内圧を付与するための油圧アクチュエーターを上部に設けて、試験片内部とロッド内に開けた管に動作油を充填している。この内圧負荷の機構の特徴として、圧力制御性向上および漏洩時の安全性のために動作油の量を極力少なくしている。内圧を付与するためのこれ以外の機構として、油圧ポンプ等に油圧源を別に設けて油圧配管を介する方法もあるが、装置が大掛かりとなるという欠点がある。また、内圧の制御特性が悪くなる可能性もある。この装置の最大の短所は、与圧に作動油を利用する場合には昇温の制限があり、高温試験は不向きであることである。

3・3 十字型クリープ疲労試験

タイプIIは十字型試験片を用いる試験であり、図2の主応力・主ひずみ比範囲では $-1 \leq \lambda$, $\phi \leq +1$ の多軸クリープ疲労試験が可能となる。図9に十字型試験片の例を示す。4方向から引張・圧縮の荷重を負荷するが、試験片中央の標点部で応力が一定になるようにする必要がある。そのため、図9(b)のように試験片標点部の板厚をその他の部分

図9 十字型試験片

図 10 十字型試験片用の伸び計の一例

図 11 高周波誘導加熱された十字型試験片

より薄くする必要がある。十字型試験片の形状にはそれほど自由度がなく、ほぼ図 9(b)に示す形状が使用されている。その理由は、

- ・試験片標点部に所定の応力を発生しようとする、図 9 でのフィレット部も変形させる必要がある。フィレット部の応力も標点部の応力と同程度になることが多く、標点部の板厚、フィレット部の曲率半径と板厚の三者について、標点部の応力がフィレット部応力よりも大きくなる組合せを各主応力比とひずみ比で求める必要がある。とくに、 $\lambda=\phi=1$ の等二軸引張・圧縮条件下での試験片形状の設計が難しい。

- ・試験片標点部の板厚減少の R 部止端からき裂が入る場合があり、試験片加工時に R 部でのアンダーカットが生じないように注意する必要がある。

- ・試験片のグリップは、油圧グリップとボルト等で機械的につかむ方法とがある。油圧グリップを用いる方法ではグリップ部直径が比較的大きいことから、グリップ間の距離を大きく取る必要がある。このことに伴って、試験片の腕の長さが長くなることもあり、長い試験片は板厚方向に面外曲げや座屈を生じる恐れがあり、注意が必要である。

十字型試験片では標点部の x および y 方向のひずみを伸び計で計測・制御する必要がある。高温クリープ疲労試験を実施する場合には、試験片の一方は温度上昇用の高周波コイルが設置されることから、もう一方から x および y 方向のひずみを同時に計測する必要がある。図 10 に示すように、4 本のロッドを持つ両方向の伸び計で両方向

図 12 三軸クリープ疲労試験片

図 13 三軸クリープ疲労試験機

のひずみが計測・制御される方法がよく用いられる。

応力は、図 9 に示すいずれの試験片についても標点部の応力を直接計測することができないため、有限要素法等の数値解から推定する必要がある。

十字型試験片の加熱には高周波誘導加熱装置が用いられることが多い。図 11 に示すように渦巻き状のコイル形状が良く用いられる。高周波誘導加熱によって標点部のみを加熱すると、4 本の腕部から熱が逃げることに、腕につながっている部分の温度が相対的に低くなることがあるため、注意が必要である。

十字型試験片を用いるクリープ疲労試験では、制御方法に工夫が必要である。伸び計から検出される信号のみでアクチュエーターの制御を行うと、4 本のアクチュエーターの動作特性がまったく同じでないため、試験片の中心が移動する可能性がある。試験片の中心が移動せずに設定のひずみを負荷できる制御方式をとる必要がある。

ひずみ波形としては、台形波や slow-fast 波がクリープ疲労試験に用いられる。 x および y 方向のひずみに位相差を与えたりや逆位相にすることによって、主応力比と主ひずみ比が変わる試験が可能となる。

3・4 三軸クリープ疲労試験装置

タイプ III の三軸クリープ疲労試験装置も開発され、研究が続けられている¹²⁾。タイプ I および II の試験片では、試験片標点部が薄板になるため、平面応力状態での試験のみが可能となるが、タイプ III の試験では三軸応力および三軸ひずみ状態での試験が可能となる。現時点では、クリープ試験のみが実施されていることから、クリープ試験についてのみ本稿では紹介する。

三軸引張クリープ疲労試験装置で用いる試験片形状を

図 12 に示す．試験片中央部の約 10mm の立方体部で等三軸引張状態を実現するためには，6 本の腕部から切り込みを設ける必要がある．

試験装置は図 13 に示すように 6 個のアクチュエーターを備えたものである．試験片に曲げが負荷されないように試験装置の軸心には十分注意が必要である．試験片中央部の変形量の測定には，試験片に設けた切り込みに伴び計を挿入し，標点部立方体の 6 辺の変形量から標点部のひずみを求める．たとえば， z 軸方向の垂直ひずみ (ε_z) は，立方体内で一様な変形と仮定すると次式となる．

$$\varepsilon_z = \frac{D_z}{L_G} \quad (9)$$

ここで， L_G は標点間距離， D_z は図 14 に示すように伸び計より計測される標点部の z 軸に対して 45° 傾いた方向の変位 D_{yz} および D_{zx} から次式で与えられる．

$$D_z = \frac{1}{2} \left(\frac{D_{yz}}{\cos 45^\circ} + \frac{D_{zx}}{\cos 45^\circ} \right) \quad (10)$$

$$D_{yz} = D_{yz-1} + D_{yz-2}$$

$$D_{zx} = D_{zx-1} + D_{zx-2}$$

D_{yz-1} および D_{yz-2} と D_{zx-1} および D_{zx-2} はそれぞれ yz 方向および zx 方向の向かい合った変位計の測定値である． x 軸方向および y 軸方向に垂直ひずみも同様に求めることができる．一方，標点部に作用する応力は，十字型試験片と同様に直接求めることができないので，有限要素法等の数値解析から推定する必要がある．

試験片の加熱には，4 分割した電気炉が用いられる．発熱体の長さを余り大きくとれないので，太い発熱体を用いて大電流を流す方法がとられている．

三軸試験片では試験片標点部は試験片中央部の約 10mm の立方体部である．クリープ試験ではこの立方体部から破損することはないので，途中までクリープ試験を実施し，三軸試験片中央部からミニチュアクリープ試験片を切り出し，ミニチュア試験片の破損時間を用いて，三軸クリープ損傷を評価，また中断試験した三軸試験片から直接ボイド損傷計測等の研究が進められている^{13), 14)}．

3・5 他の多軸クリープ疲労試験方法

上述した以外の多軸クリープ疲労試験方法としては，切欠き材を用いてクリープ疲労試験を実施し，切欠き底近傍での応力多軸性を利用するものがあるが，試験装置が単軸装置であるため，本稿では触れなかった．また，曲げ負荷とねじり負荷との組み合わせも多軸クリープ試験法として考えられるが，実施例があまりないために触れなかった．長方形板や円形板の曲げ負荷によって多軸応力を負荷される試験もあまり高温試験としては実施されていないために触れなかった．

4 結 言

数種類の多軸クリープ疲労試験で実施可能な応力やひずみの多軸度の範囲を概説した．その後，多軸クリープ疲

図 14 三軸クリープ疲労試験片の変位計測

勞試験方法としてよく用いられている，引張・圧縮-繰返しねじり，引張・圧縮-繰返し内外圧，十字型試験片および三軸試験片による試験方法や試験片，試験実施上の注意点について述べた．

参 考 文 献

- 1) D.F. Socie and G.B. Marquis, "Multiaxial fatigue" (2000) Society of Automotive Engineers, Inc.
- 2) A. Carpinteri, L.P. Pook and C.M. Sonsino, "Special Issue on 'Multiaxial Fracture': Selected papers from the 9th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF9)", International Journal of Fatigue, Vol. 33, Issue 8 (2011).
- 3) A. Carpinteri, L.P. Pook and A. Spagnoli, "Special Issue on 'Multiaxial Fracture': Selected papers from the 9th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF9)", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 78, Issue 8 (2011).
- 4) A. Fatemi, L.P. Pook, A. Spagnoli and S.T. Tu, "Special Issue on 'Multiaxial Fatigue 2013': Selected papers from the 10th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF10)", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 123 (2014).
- 5) A. Carpinteri, T. Itoh, T. Palin-Luc, M. Sakane and L. Susmel, "Special Issue on 'Multiaxial Fatigue 2013': Selected papers from the 10th International Conference on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF10)", International Journal of Fatigue, Vol. 67 (2014).
- 6) T. Itoh and M. Sakane, "High temperature strength of materials", JSMS Committee on High Temperature Strength of Materials, The Society of Materials Science, Japan. pp.325-353 (2008).
- 7) D.F. Socie, "Multiaxial fatigue damage models", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 109, No. 4, pp.293-298 (1987).
- 8) A. Nitta, T. Ogata and K. Kuwabara, "The effect of axial-torsional straining phase on elevated-temperature biaxial low-cycle fatigue life in SUS304 stainless steel.", The Society of Materials Science, Japan, Vol. 36, No. 403, pp.376-382 (1987).
- 9) T. Itoh, M. Sakane, M. Ohnami and D.F. Socie, "Non-proportional low cycle fatigue criterion for type 304 stainless steel", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.117, No. 3 pp.285-292 (1995).
- 10) T. Itoh and T. Yang, "Material dependence of multiaxial low cycle fatigue lives under non-proportional loading", International Journal of Fatigue, Vol. 33, No.8, pp.1025-1031 (2011).
- 11) T. Itoh, L. Quan and Z. Bao, "Development of low cycle fatigue testing machine for various multiaxial loading conditions", Proc. of the 13th Int. Conf. on Pressure Vessel Technology, London, UK, May 20-23, CD-ROM, S7-MF6-P1 (2012).
- 12) S. Mukai, Y. Komatsu, D. Ueda, M. Sakane, M. Ohnami and T. Tsurui, "Development of triaxial tension creep test machine", The Society of Materials Science, Japan, Vol. 46, No. 12, pp.1374-1380 (1997).
- 13) D.R. Hayhurst and I.D. Felce, "Creep rupture under tri-axial tension", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 25, Issues 5-6, pp.645-664 (1986).
- 14) M. Sakane and T. Hosokawa, "Biaxial and triaxial creep testing of type 304 stainless steel at 923K", IUTAM Symposium on Creep in Structures, Kluwer Academic Publishers, pp.411-418 (2001).