

# 超高温用引張試験装置および光学式伸び計を用いた 材料強度計測システム\*

祖父江 靖\*<sup>1</sup> 小河 昭紀\*<sup>1</sup> 森本 哲也\*<sup>1</sup>

## Material Strength Measurement System using High-temperature Tensile Test Apparatus and Optical Extensometer\*

Yasushi SOFUE\*<sup>1</sup>, Akinori OGAWA\*<sup>1</sup> and Tetuya MORIMOTO\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

This paper describes a high-temperature test system to evaluate high-temperature elongation and tensile strength of heat-resistant composites in the atmosphere.

High-temperature tests on heat-resistant composites were conducted as calibration tests of the extensometer device to clarify the high-temperature deformation behavior of heat-resistant materials.

The performance of a non-contact (optical) extensometer was confirmed over 1580 .

In the preliminary test that examined the measurement situation of the optical extensometer, tensile tests were performed at room temperature, 500 and 600 using stainless steel (SUS 304) specimens.

Experiments on tensile tests using a ceramic composite material specimen at 1200 are described.

### 概 要

超音速機や宇宙往還機用エンジンの開発には、1500 以上の超高温下で安定した強度を有する材料を開発することが重要な課題になっている。先進耐熱材料であるセラミック材、セラミック系複合材およびC / C複合材は、超高温下で使用可能な材料として期待されている。これらの先進耐熱材料を構造部材として適用するためには、超高温下での材料特性を調べる必要がある。原動機材料構造研究室では、大気中超高温環境下での先進耐熱材料の引張材料特性を調べる目的で、超高温用引張試験装置および光学式伸び計を用いた計測システムを構築した。

SiC / SiC 複合材試験片を用いて行った本計測システムの加熱予備試験では、1580 まで加熱できることを確認した。なお、光学式伸び計による計測状況を調べるため、予備評価試験として光学式伸び計の測定誤差を調べると共に、ステンレス鋼 (SUS 304) 試験片を用いて、室温 (25 )、500、600 の引張試験を行った。また、セラミック系複合材のSi-Ti-C-O 繊維結合型複合材 (宇部興産製、以後チラノヘックスと記述する) 試験片を用いた大気中 1200 の超高温環境下で行った引張試験<sup>(1)</sup> の計測例を示す。本報では、計測システムの機器構成内容、光学的変位計測精度および本計測システムを用いた予備評価試験結果について述べる。

---

\* 平成9年11月18日受付 (received 18 November 1997)

\*<sup>1</sup> 原動機部 (Aeroengine Division)

## 1. まえがき

超高温引張試験装置および光学式伸び計を用いた本計測システムは、先進耐熱材料の大気中の超高温環境下での引張材料特性を調べる目的で構築された。その構成内容は(1)引張負荷装置、(2)加熱装置、(3)光学式伸び計、(4)加熱装置取付け架台等である。(1)引張負荷装置は、INSTRONの万能試験機(以後、引張試験機と記述する)を用いた。(2)加熱装置は、大気中の超高温環境下で引張試験を行うため、酸化の影響をできるだけ少なくする加熱方法として、昇温速度が早く(本試験では、1分間に試験片温度を100 昇温した)、局部的加熱が可能な赤外線ランプ集光加熱式の赤外線ゴールドイメージ炉(真空理工のE44VHT型;以後、赤外線加熱炉と記述する)を用いた。(3)光学式伸び計は、非接触で試験片の伸びを計測するため、コンピューター制御式エクステンソメーター(ZIMMERの200XF型;以後、光学式伸び計と記述する)を用いた。光学式伸び計は、試験片の垂直方向と水平方向の変位を測定するため、2台設置した。(4)加熱装置取付け架台(以後、炉取付け架台と記述する)は、試験片の取付け準備作業が容易に行えるように赤外線加熱炉を垂直に上下、前後に調整できる構造の架台を製作した。本報では、これら各装置の詳細について述べる。また、本計測システムを用いた(A)光学式伸び計の較正評価試験、(B)ステンレス鋼試験片を用いた室温、500、600 における光学式伸び計の伸び測定許容範囲までの引張試験、(C)超高温下の計測例としてチラノヘ

ックス試験片を用いた1200 の引張試験等を行い、計測状況を調べた。なお、上記(B)の引張試験は、光学式伸び計の伸び測定許容範囲までの広範囲の変形計測状況を調べる試験であり、耐熱材料試験片では伸びが小さいため、ステンレス鋼試験片を用いて引張試験を行った。

## 2. 超高温引張試験装置の計測システムの構成内容

図1に計測システムの外観を示す。計測システムは(1)引張試験機、(2)赤外線加熱炉、(3)光学式伸び計、(4)炉取付け架台等で構成されている。その内容について以下に述べる。

### (1) 引張試験機

引張試験機としてINSTRONの1185型万能試験機を用いた。この引張試験機で用いたステンレス試験片の形状を図2に示す。試験片は、図3に示す試験片取付具で支持し、ピン接合した継手、試験機取付具を介して引張試験機のグリップで固定した。ステンレス鋼試験片の室温、500 および600 の引張試験およびチラノヘックス

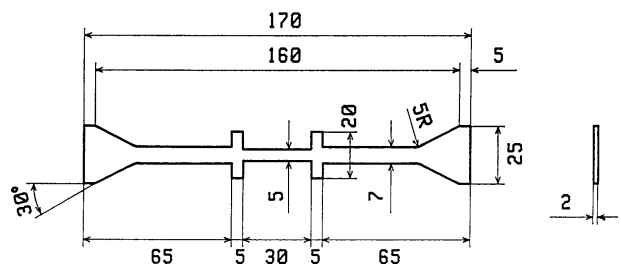


図2 ステンレス試験片の形状

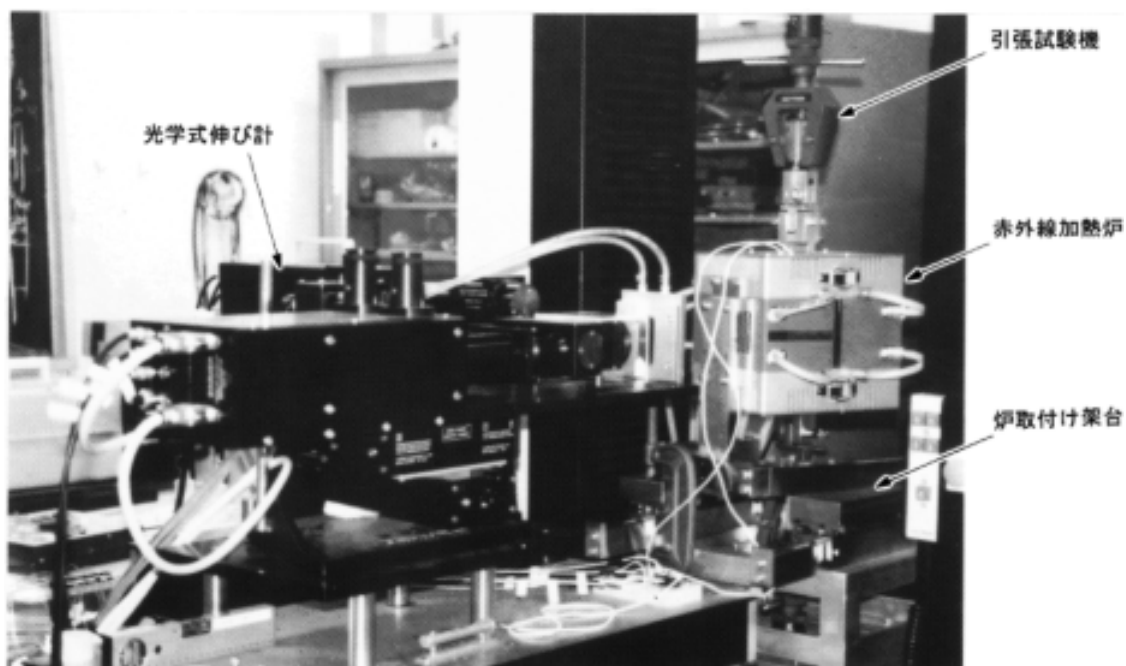


図1 計測システムの外観

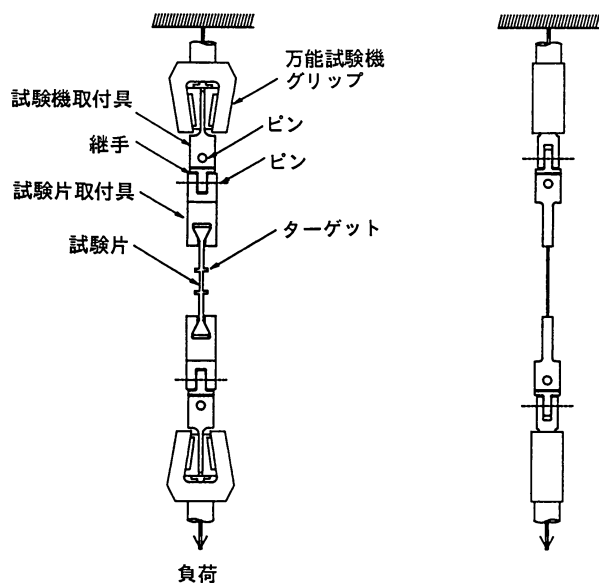


図3 試験片取付具

試験片の1200 の引張試験では、引張試験機の荷重のフルスケールレンジを5 KNに設定した。クロスヘッドスピードは0.5mm / minで行った。なお、引張試験機の最大引張負荷容量は100KNである。

#### (2) 赤外線加熱炉

赤外線加熱炉は、幅190mm、奥行240mm、高さ216mmの直方体で、先進耐熱材料試験片を短時間で1500 の超高温まで加熱する。この炉は、炉の中央部にある試験片を直径10mm、均熱長25mmの範囲でほぼ一定温度に加熱することができる。

図4に赤外線加熱炉および炉支持具を示す。赤外線加

熱炉は、炉支柱に片持ち支持状態で固定した。また、炉支柱はコの字形の炉支持具に取付けた。赤外線加熱炉の上下中央部には、試験片取付具で支持した試験片を通すため、直径52mmの穴がある。また、光学式伸び計で試験片の伸びを計測するため、炉壁に幅18mm、長さ56mmの観測窓を軸対称に二箇所明けた。観測窓の位置は、赤外線加熱炉内部に赤外線ランプ、冷却用水用パイプおよび冷却空気用パイプがあるため、これ等を選んで直方体の中心線から22.5°の角度をつけた位置に明けた。

赤外線加熱炉の熱源は、4本の赤外線ランプ(P2-10-200)を使用する。この赤外線ランプは、ふく射効率が高く、電力密度250W / cmの高い放射エネルギーを持っている。

赤外線加熱炉は、図4に示すように4つの楕円面の焦点に赤外線ランプを配置し、他の一方の焦点である炉の中央に試験片を取付け、金コーティングした楕円内壁の赤外線反射壁で赤外線光を反射し、試験片に赤外線を集光して加熱するふく射加熱炉である。

赤外線加熱炉の炉体は、試験中常に水冷却されている。加熱を終了し、電源を切ると1分程度の短時間で室温まで冷却する。なお、試験片および試験片取付具には冷却機構を特に設けていないため、次の試験準備作業を行うには2時間以上放置し冷却する必要がある。加熱中の赤外線ランプには、冷却乾燥圧縮空気を吹きつけている。これは、赤外線ランプを熱損傷から防止するためで、炉内の熱気を強制的に排気している。なお、冷却乾燥圧縮空気による試験片の熱損失を防ぐため、石英ガラス管で試験片を覆う構造にした。炉の中央部に直径55mmの

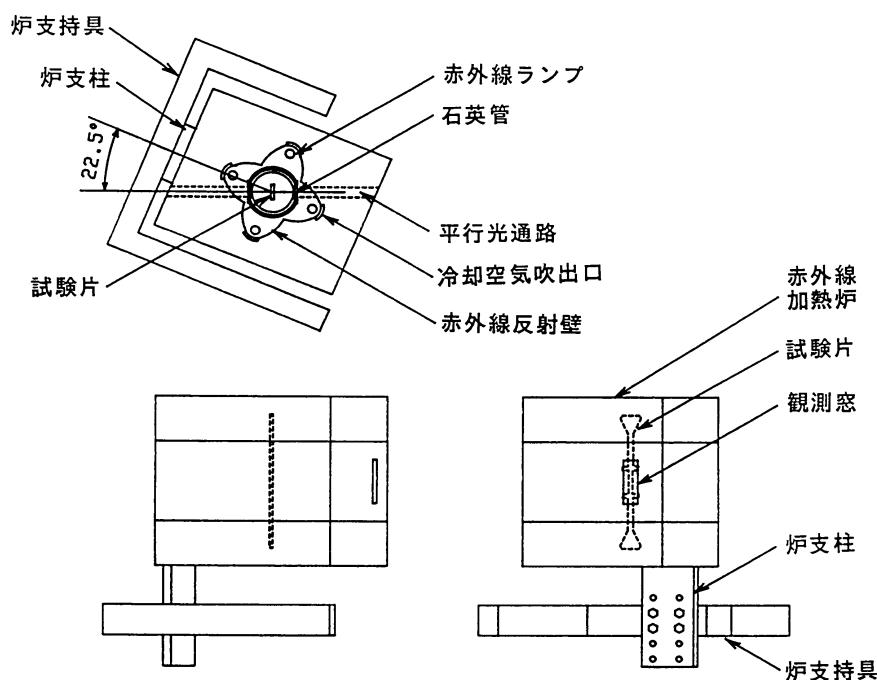


図4 赤外線加熱炉および炉支持具

二つ割の透明石英ガラス管(以後、石英管と記述する)を取付け、冷却乾燥圧縮空気が試験片に直接当たらないようにした。石英管には、後述の光学式伸び計で使用するキセノンランプの平行光が円筒面の曲率で屈折するおそれがあるため、観測窓に相当する位置の曲面を二箇所切除し、透明石英ガラス板を平行に溶接して平行光が直進できるようにした。

赤外線ランプに吹きつける冷却乾燥圧縮空気は、既存の空気圧縮機から配管で導き供給した。空気圧縮機からの圧縮空気を清浄な冷却乾燥圧縮空気にするため、空気圧縮機と赤外線加熱炉の間に (a) 空気圧縮機からの圧縮空気に含まれるゴミを除去する Clean filter (日立の HAF-8A), (b) 圧縮空気に含まれる水と油を排出し冷却乾燥させる Air drier (日立の HDN-15BX), (c) Air drier からの冷却乾燥圧縮空気の圧力を調整して赤外線加熱炉に供給する Air transformer (日立の TF-20B) を設置した。

赤外線加熱炉の温度制御は、高速加熱および精密制御に対応した安定した加熱制御を行うため、プログラム温度制御器 (真空理工の TPC1000-62-1 型) を用いた。試験片温度を計測する熱電対は、ステンレス鋼試験片の高温引張試験では 600 まで、チラノヘックス試験片は 1200 の超高温引張試験を行ったので、0 ~ 1600 まで測定できる R 熱電対を用いた。高温引張試験での温度計測は、試験片の温度測定部表面に R 熱電対の测温接点を接触させ、耐熱接着剤 (東亜合成化学製アロンセラミック) で R 熱電対を接着して測定した。なお、耐熱接着剤の耐熱温度は 1300 であるが、SiC / SiC 複合材試験片を用いた加熱予備試験では耐熱温度以上の 1580 までの温度測定が行えた。

### (3) 光学式伸び計

光学式伸び計 (ZIMMER の MODEL200XF) は、明暗コントラストを持つ境界をターゲットエッジとした二カ所のターゲットエッジの変位とターゲットエッジ間の変位を測定する。このため、各々のターゲットエッジの変位を測定する二つの光学系レンズユニットで一对の光学式伸び計として構成されている。従って、試験片の変位計測には、二ヶ所にターゲットエッジを設ける必要がある。本装置では、試験片の垂直方向の変位を測定する伸び計と水平方向の変位を測定する伸び計の二台の光学式伸び計を設置した。試験片の垂直方向変位測定用のターゲットエッジは、図 2 に示した試験片の 30mm 離れた突起部の内側を標定部とした。また、水平方向変位測定用のターゲットエッジは、試験片の幅 5 mm の両端を標定部とした。光学式伸び計のレンズは、最大測定レンジの大きさに応じて最適なレンズを選択する交換レンズ式である。本装置では二台の光学式伸び計とも最大測定レン

ジ 5 mm のレンズ (MODEL ; 200XF-5L) を使用した。光学式伸び計の分解能は、メーカーの仕様によると、レンズの最大測定レンジの 0.005% と記載されている。従って、本光学式伸び計の分解能は 0.25 $\mu$ m である。

一对の光学式伸び計に組み込まれている二つのレンズユニットの標準光軸間距離 (ゲージレンジ) は 75mm であるが、測定対象によってレンズの前にゲージレンジアダプターを取付けて光軸間距離を変更する。垂直方向測定用光学式伸び計 (以後、垂直用光学式伸び計と記述する) の場合、25 ~ 125mm まで可変のアダプター (MODEL ; 203XB) を取付け、光軸間距離 30mm に設定し、試験片ターゲット間の 30mm の変位を計測した。水平方向測定用光学式伸び計 (以後、水平用光学式伸び計と記述する) の場合、1 ~ 15mm まで可変のアダプター (MODE ; 203XA/1-15) を取付け、光軸間距離を試験片の幅に合せ、ステンレス鋼試験片では 5 mm、チラノヘックス試験片では 4 mm に設定し、試験片幅の変位を計測した。光学式伸び計の最大出力電圧は 10V で、変位に比例したアナログとデジタルの電圧が出力される。垂直用光学式伸び計および水平用光学式伸び計とも最大測定レンジ 5 mm のレンズを使用したので、測定値の変位は 10V = 5 mm の関係で換算した。

図 5 にキセノン水銀照明器 (以後、照明器と記述する)、赤外線加熱炉および光学式伸び計の配置図を示す。照明器、赤外線加熱炉内の試験片、水平用光学式伸び計は直線上にあるが、垂直用光学式伸び計は、この直線に対し 90° の交叉方向に配置した。このため、水平用光学式伸び計のレンズの前に、直進する光と 90° 方向の光に分ける 90° 分岐ミラーを取付けた。照明器には、キセノンランプ (L2482 150W) を用いて円形の平行光 (直径 60mm) を照射する照明器 (MODEL : 1070A) を使用した。試験片のターゲットエッジは、照明器の平行光を白

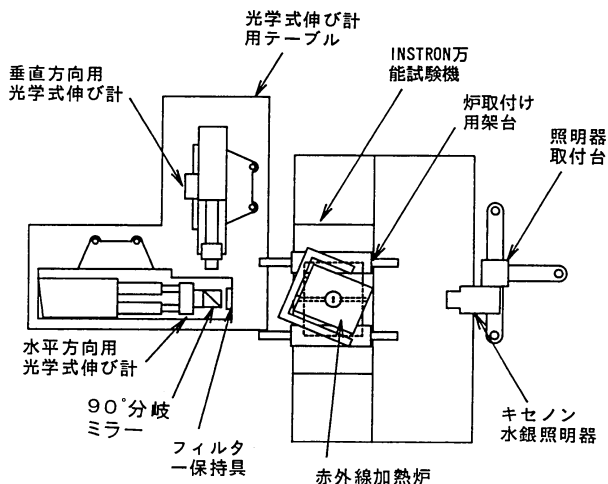


図 5 計測システムの配置図

色部とし、平行光をさえぎる試験片部を黒色部とする明暗コントラスト部とした。

光学式伸び計はX、Y、Z方向に $\pm 30\text{mm}$ 可動できる三方向微動台に据え付けられている。試験片の伸び計測では、試験片のターゲットエッジである標定部を光学式伸び計のビューアで観察し、試験片の標定部がビューア内にある十字線マークの中心線上に一致するように三方向微動台で調整した。

光学式伸び計のレンズユニットを赤外線加熱炉の高温ふく射熱による熱損傷から防止するため、 $90^\circ$ 分岐ミラーの前に水冷のフィルター保持具を取付ける必要があった。フィルター保持具には、熱線カットフィルター1枚と赤色成分変換色フィルター2枚を装着した。赤色成分変換色フィルターは、高温によって生じる試験片の赤色成分の光を黒色に変換して、試験片のターゲットエッジのコントラストを鮮明にするフィルターである。

#### (4) 炉取付け架台

炉取付け架台は、赤外線加熱炉を上下および前後に移動させ垂直に保持する機能を持つ。炉取付け架台は、赤外線加熱炉を用いて高温引張試験を行う場合、試験片保持具への試験片取付け、熱電対の試験片への取付けおよび試験片装着位置に応じた赤外線加熱炉の位置調整等、試験準備作業を容易にする目的で製作した。図6に炉取付け架台の据付け状態を示す。炉取付け架台は、炉支柱、

炉支持具、前後可動部、上側架台、下側架台から成る。赤外線加熱炉の炉支柱への取付けは、赤外線加熱炉を前後に移動するとき引張試験機の中央部にある負荷用治具に接触しないように、片持ち支持状態で固定した。また、炉支柱は、赤外線加熱炉を安定に保持するため、赤外線加熱炉の外周より大きいコの字形の炉支持具で支持した。赤外線加熱炉の上下移動は、上側架台と下側架台の間隔をボルトで動かすことで行った。赤外線加熱炉の前後移動は、溝付きのレールと軸受を車輪とした前後可動部で行った。前後可動部は、炉支持具に取付けた2枚の板に4個の軸受を取付けた部分と、軸受の入る溝を付けた2本のレールを上側架台に取付けた部分で構成されている。

### 3. 超高温引張試験装置の計測システムを用いた予備試験

この章では、超高温用引張試験装置および光学式伸び計の機能確認予備試験について述べる。光学式伸び計の機能確認予備試験では、図7に示す引張試験機に付属のクリップゲージ較正用のマイクロメータ式較正器を用いて、(A) 水平方向および垂直方向計測用の二台の光学式伸び計の較正評価試験を行った。また、超高温用引張試験装置の機能確認予備試験では、(B) ステンレス鋼試験片を用いた室温、 $500^\circ\text{C}$ 、 $600^\circ\text{C}$ の引張試験および(C)セ

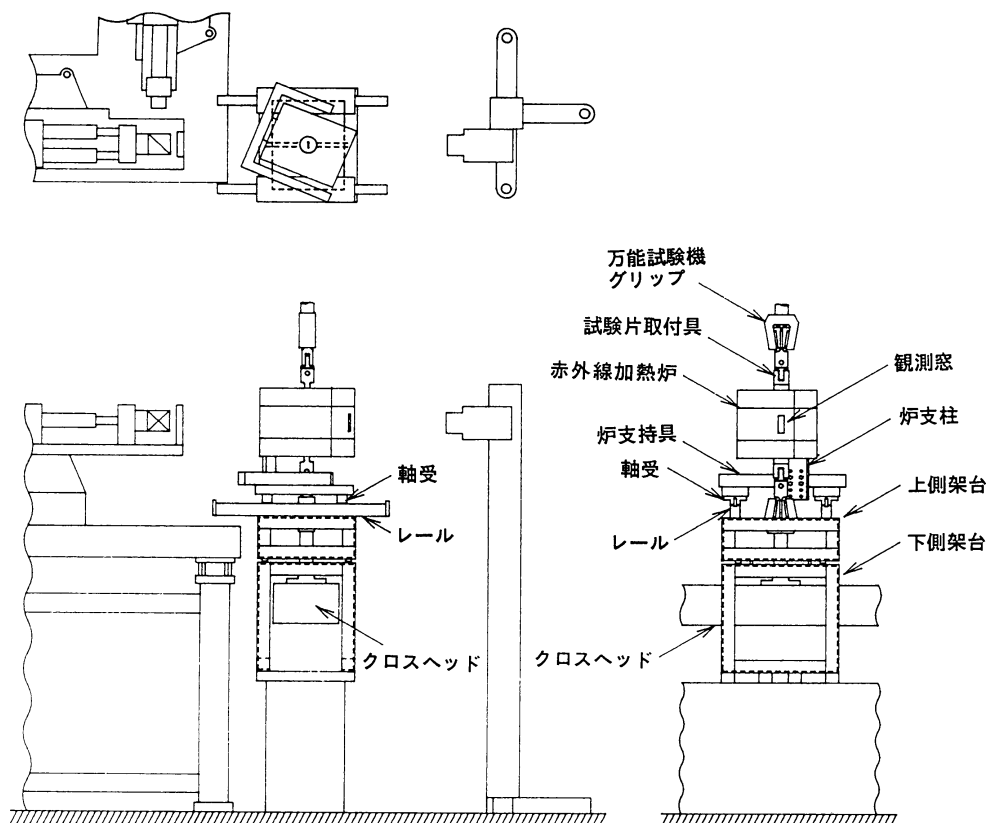


図6 炉取付け架台への赤外線加熱炉の据付け状況

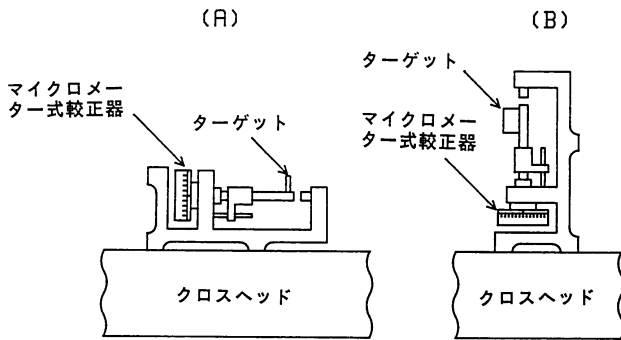


図7 光学式伸び計の較正評価試験方法

ラミック系複合材のチラノヘックス試験片を用いた1200の超高温引張試験を行い、室温および高温環境下での伸び計測例を示した。

#### (A) 光学式伸び計の較正評価試験

光学式伸び計は、試験片の二カ所のターゲットエッジに対応した二つのレンズユニットで変位を計測し、ターゲットの変位に比例した出力電圧を測定する。光学式伸び計の試験片の伸びに応じた出力電圧は、アンプ部の配線基盤の抵抗を調整することで較正されている。光学式伸び計の最大出力電圧は10Vであり、レンズの最大測定レンジは5mmであるため、5mmの変位に対して10Vの電圧が出力するように調整されているが、測定値の信頼性を調べるため、実際の変位と光学式伸び計の測定値を比較する較正評価試験を行った。図7の(A)は水平用光学式伸び計の較正評価試験方法である。較正評価試験ではマイクロメータ式較正器を横向きに置き、長さ15mm、幅5mm、厚さ2mmのターゲットをスピンドルに両面テープで接着して、幅5mmのターゲットの左右の動きを測定した。なお、較正評価試験における照明器および光学式伸び計の配置は図5と同様とし、マイクロメータ式較正器を引張試験機のクロスヘッド上に置いて照明器、ターゲット、光学式伸び計を直線上に配置した。図8に水平用光学式伸び計の試験状況を示す。図7の(B)は垂直用光学式伸び計の較正評価試験方法である。マイクロメータ式較正器を縦に置き、長さ30mm、幅15mm、厚さ2mmのターゲットをスピンドルに両面テープで接着して、長さ30mmのターゲットの上下の動きを測定した。

図9と図10は、水平用光学式伸び計の較正評価試験結果である。二つのレンズユニットの内、ターゲットの右側計測用のレンズ系で測定した変位をB、左側計測用のレンズ系で測定した変位をAとして示す。試験片の伸縮に相当するLの値はAとBの差から求めるが、AとBの測定値は厳密には同時でないため、時間遅れの処理をして同時に測定したと同等な値を求める処理が行われている。このようにして時間遅れの処理をしたAとBの差をLとして示す。図9は、光学式伸び計のビューアで観察して、ビューアの中央にある十字線マークの中心線上に合わせたターゲットを、右横方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動した時の光学式伸び計で測定した変位A、B、Lを縦軸に、マイクロメータ式較正器に接着したターゲットの移動を横軸に示した。なお、Lの値はA、Bに比べ小さいので、A、Bのスケールは右縦軸に、Lのスケールは拡大して左縦軸に示した。図10は、ターゲットを左横方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動

図9と図10は、水平用光学式伸び計の較正評価試験結果である。二つのレンズユニットの内、ターゲットの右側計測用のレンズ系で測定した変位をB、左側計測用のレンズ系で測定した変位をAとして示す。試験片の伸縮に相当するLの値はAとBの差から求めるが、AとBの測定値は厳密には同時でないため、時間遅れの処理をして同時に測定したと同等な値を求める処理が行われている。このようにして時間遅れの処理をしたAとBの差をLとして示す。図9は、光学式伸び計のビューアで観察して、ビューアの中央にある十字線マークの中心線上に合わせたターゲットを、右横方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動した時の光学式伸び計で測定した変位A、B、Lを縦軸に、マイクロメータ式較正器に接着したターゲットの移動を横軸に示した。なお、Lの値はA、Bに比べ小さいので、A、Bのスケールは右縦軸に、Lのスケールは拡大して左縦軸に示した。図10は、ターゲットを左横方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動

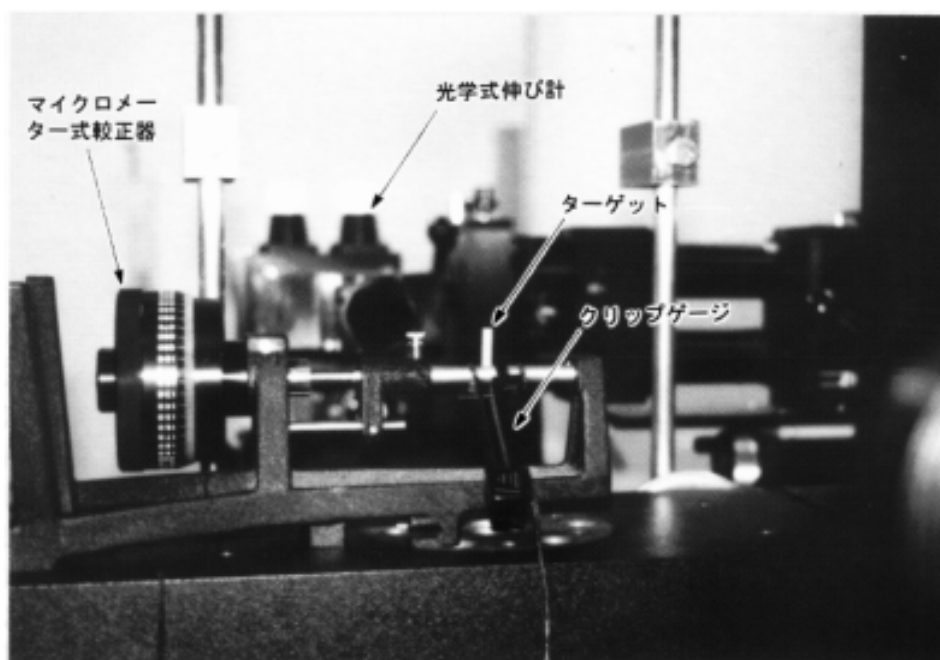


図8 水平用光学式伸び計の較正評価試験状況

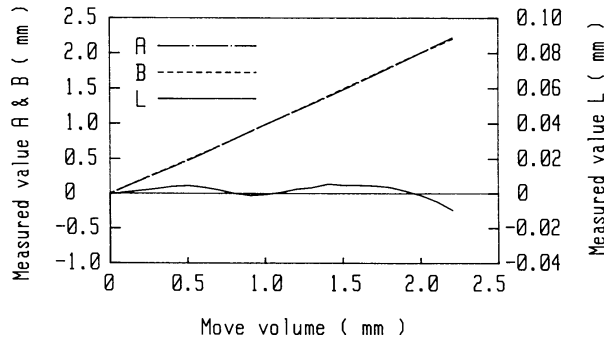


図9 ターゲットを右横方向に移動したときの水平用光学式伸び計の測定結果

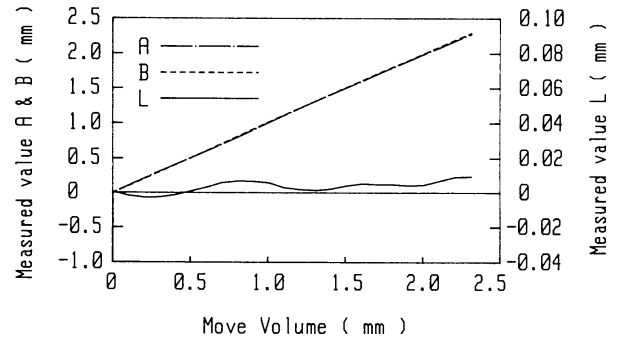


図11 ターゲットを下方向に移動したときの垂直用光学式伸び計の測定結果

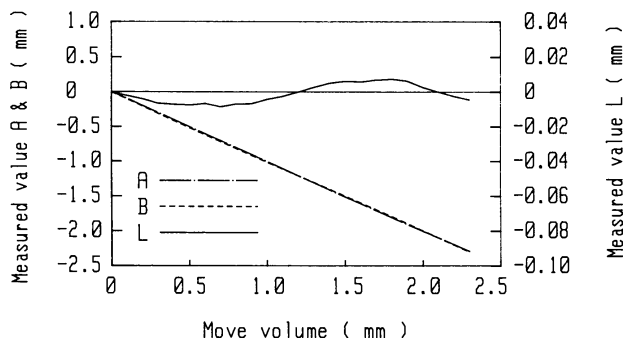


図10 ターゲットを左横方向に移動したときの水平用光学式伸び計の測定結果

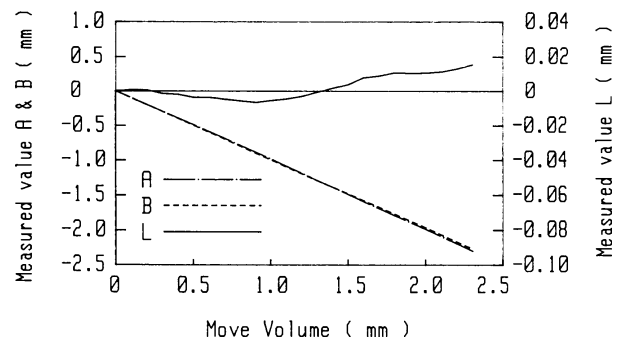


図12 ターゲットを上方向に移動したときの垂直用光学式伸び計の測定結果

した時の光学式伸び計の変位A, B, Lを示したもので、図9と同様な表示方法で示した。なお、2.5mm以上動かすとターゲットエッジがレンズの視野から外れ測定不能になる。

図11と図12は、垂直用光学式伸び計の較正評価試験結果である。二つのレンズユニットの内、ターゲットの下側計測用のレンズ系で測定した変位をA, 上側計測用のレンズ系で測定した変位をB, 試験片の伸縮に相当する時間遅れの処理をしたAとBの差をLとして示す。図11は、光学式伸び計のビューアの中央にある十字線マークの中心線上に合わせたターゲットを下方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動した時の光学式伸び計の変位を縦軸に、ターゲットの移動を横軸に示したもので、図9と同様な表示方法で示した。図12は、ターゲットを上方向に0.1mm毎に動かして2.3mmまで移動した時の光学式伸び計の変位を縦軸に、ターゲットの移動を横軸に示したもので、図9と同様な表示方法で示した。

光学式伸び計の較正評価試験は、ターゲットを移動するだけの試験であるが図9, 図10, 図11, 図12で示すように、各レンズユニットとも僅かな誤差による変動があるため、ターゲットエッジの実際の移動に対する光学式伸び計の測定値(変位)の関係は、正確な比例的挙動にはなっていない。被測定物の伸縮に相当する時間遅れ

の処理をしたAとBの差であるLは、ターゲットを2.3mm移動した範囲では、0.01mm以内の非線形の誤差が生じることがわかった。なお、この誤差は、光学式伸び計の仕様で定められた許容範囲内にある。

#### (B) ステンレス鋼試験片を用いた引張試験

ステンレス鋼試験片を用いて室温, 500, 600 の引張試験を行った。室温の引張試験では、試験片のひずみを光学式伸び計, クリップゲージおよび三軸口ゼットひずみゲージ(共和電業のKFG-1-D17-16)の三種類の方法で計測し、ひずみの挙動を比較した。図13に室温での引張試験状況を示す。試験片は、図2に示す形状のステンレス鋼試験片を用いた。試験片のターゲットは、中央から15mm振り分けた標点間長さ30mmの位置に突起部として設けた。垂直用光学式伸び計による試験片の伸び計測では、標点間長さ30mmの片側突起部の上下内側標定部2カ所をターゲットとして試験片の伸びを測定してひずみを求めた。クリップゲージによる試験片の伸び計測では、試験片のターゲットの標点間内に、標点間長さ12.5mmにセットしたクリップゲージを輪ゴムで試験片に取り付け、試験片の伸びを測定してひずみを求めた。三軸口ゼットひずみゲージによるひずみ計測では、試験片中央部より上に5mmずらせた位置に、ひずみゲージを接着剤(共和電業のCC-33A)で接着してひずみを測定

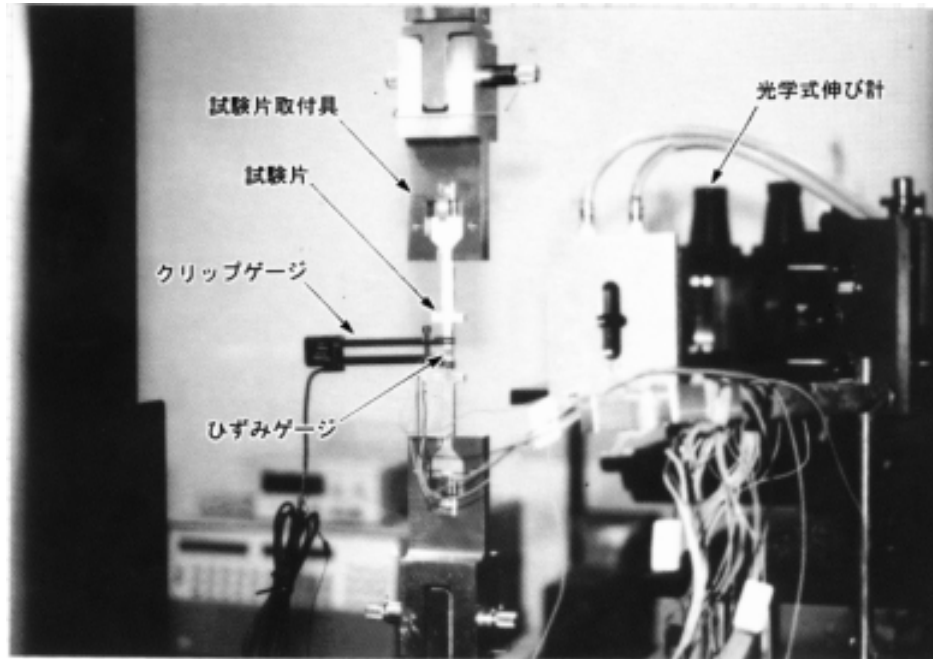


図 13 ステンレス試験片の室温での引張試験状況

した。なお、ひずみゲージを中央部より上にずらせて接着したのは、試験片中央部の水平方向の変位を測定したためである。水平方向の変位は、水平用光学式伸び計を用いて、試験片中央部の幅 5 mm の両端の標定部をターゲットとして測定した。

図 14 に室温の引張試験で垂直用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の A は下側ターゲットの上端標定部の変位、B は上側ターゲットの下端標定部の変位、L は時間遅れ処理をした A と B の差で試験片の伸びを示す。図 15 に室温の引張試験で水平用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の A は試験片幅の左側標定部の変位、B は右側標定部の変位、L は時間遅れ処理をした A と B の差で試験片の縮みを示す。なお、試験片が図 3 に示すように 30° 傾斜のダブルテイル形の溝にはめこむ方法で取付けられ、固定されていないため、負荷の初期の引張試験過

程で試験片が左側に動いた。このため、A、B の挙動は左側にずれている。しかし、試験片の変位 L は妥当な挙動を示している。図 16 にクリップゲージで測定した伸びと引張応力の関係を示す。図 17 に三軸口ゼットひずみゲージで測定したひずみと引張応力の関係を示す。図中の Strain 0°, Strain 45°, Strain 90° は、試験片の長手方向を 0° 方向としたときの各方向のひずみの挙動である。なお、試験途中の引張応力 314 MPa で、歪ゲージが剥離した。この時の 0° 方向のひずみは 1.72% である。応力 314 MPa を越えると測定値は低下し、計測不能になった。

図 18 に光学式伸び計（図中では Extensometer と示す）、クリップゲージおよび三軸口ゼットひずみゲージ（図中では Strain Gauge と示す）の三種類の 방법으로測定したひずみの挙動と引張応力の関係を示す。応力 261 MPa のときのひずみ 0.3% 程度までは、三種類の測定結果はほぼ一致していた。しかし、塑性変形によってひ

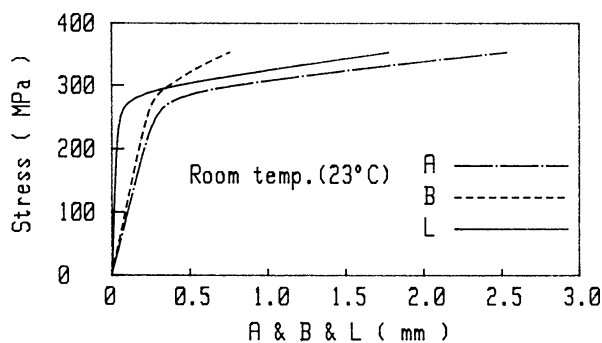


図 14 垂直用光学式伸び計（標点間長さ 30mm）で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

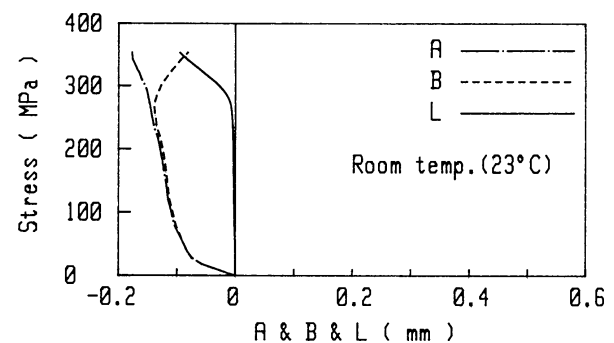


図 15 水平用光学式伸び計（標点間長さ 5mm）で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係



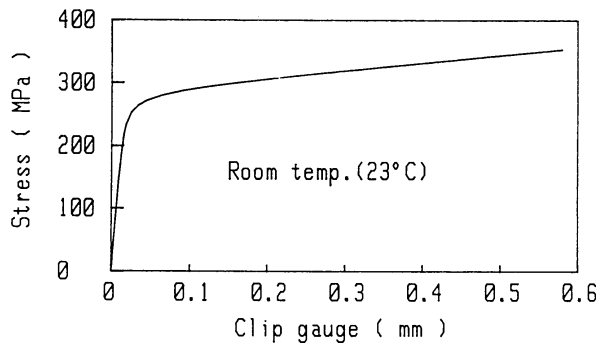


図16 クリップゲージ(標点間長さ12.5mm)で測定したステンレス鋼試験片伸びと引張応力の関係

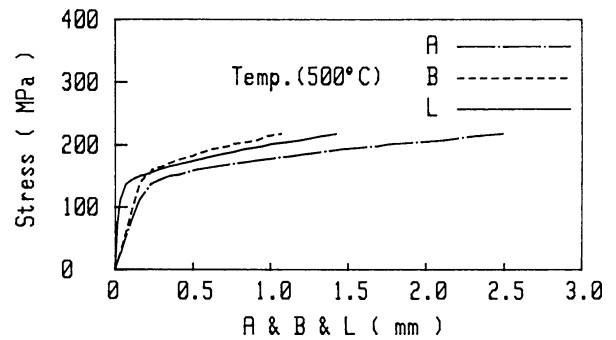


図19 垂直用光学式伸び計(標点間長さ30mm)で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

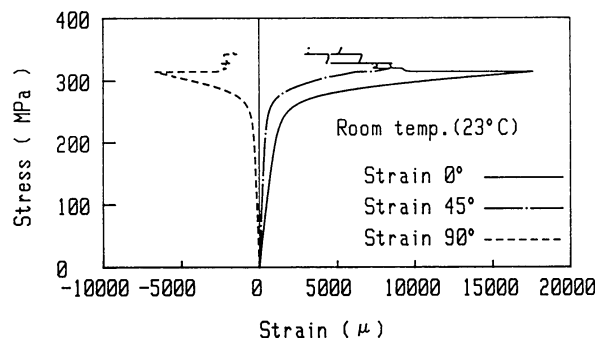


図17 三軸ロゼットひずみゲージで測定したステンレス鋼試験片のひずみと引張応力の関係

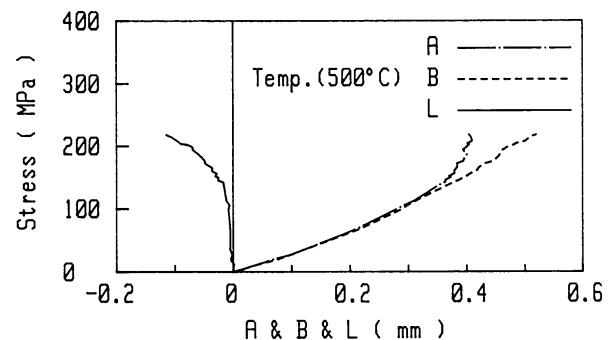


図20 水平用光学式伸び計(標点間長さ5mm)で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

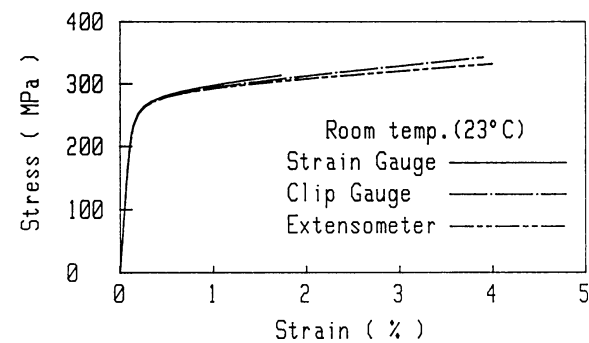


図18 垂直用光学式伸び計,クリップゲージ,三軸ロゼットひずみゲージで求めたステンレス鋼試験片のひずみの比較

ひずみが大きくなると、応力に対するひずみの増加率は測定方法の違いにより、異なる挙動を示した。この原因は、各々のひずみ測定範囲(ひずみゲージの場合接着部,クリップゲージの場合試験片中央部長さ12.5mm,光学式伸び系の場合応力集中の影響のある部分を含む長さ30mm)が異なるため、計測条件の違いによる影響で差異が大きくなったと考えられる。

高温における光学式伸び計の測定許容範囲までの計測状況を確認するため、500 と600 の高温引張試験を行った。図19に500 の引張試験で垂直用光学式伸び計を

用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動A, B, Lの表示方法は図14と同様である。図19でAの変位が2.5mmで打ち切られているのは、試験片の下側ターゲットの標定部が、光学式伸び計のビューア内の十字線マークの中心線から下側に2.5mm移動したため、標定部が測定範囲から外れて計測不能になったためである。図20に500 の引張試験で水平用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動A, B, Lの表示方法は図15と同様である。AとBの挙動が右にずれているのは、試験片の支持方法がはめ込み式で固定されていないため、試験片が右に動いたためである。

図21に600 の引張試験で、垂直用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動A, B, Lの表示方法は図14と同様である。図22に600 の引張試験で、水平用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動A, B, Lの表示方法は図15と同様である。これら温度が異なる引張試験の試験片変位測定状況を比較すると、試験片温度が高くなるに従って光学式伸び計の測定値の変動が大きくなる傾向がある。

光学式伸び計の測定値の変動を調べる目的で、垂直用光学式伸び計の場合について測定値の挙動を比較した。

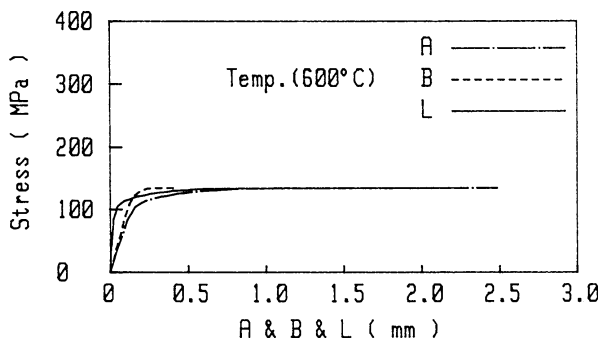


図 21 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

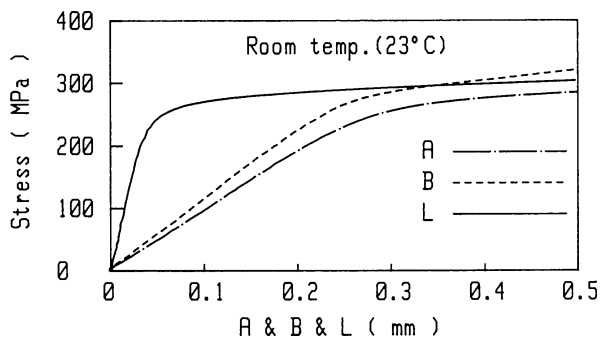


図 23 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

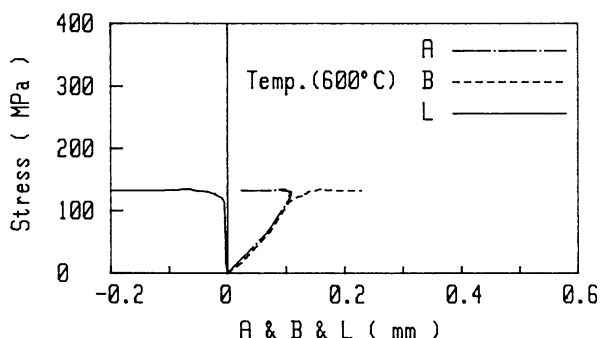


図 22 水平用光学式伸び計 (標点間長さ 5mm) で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

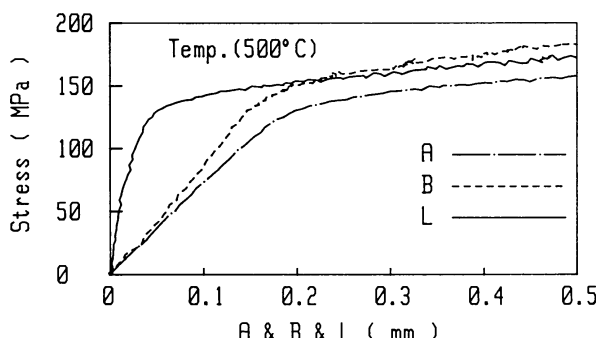


図 24 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

図 23 に室温, 図 24 に 500 , 図 25 に 600 の測定値の挙動を示す。図の横軸は, 後述のチラノヘックス試験片の 1200 の測定値の挙動と比較しやすいように, 最大スケールを図 31 と同じ 0.5mm とした。図の縦軸は, 引張応力値に違いがあるため, 図 23 だけ異なるが他は同じにした。図 23 に示すように室温では測定値の変動はないが, 図 24 の 500 では僅かな変動が生じた。図 25 の 600 の場合には, 変動は 500 よりやや大きい。このように, 光学式伸び計の測定値の変動は, 室温での測定では生じないが, 温度が高くなるにしたがって大きくなった。測定値の変動は, 高温による試験片周りの空気の「ゆらぎ」が影響して生じたと考えられる。

(C) セラミック系複合材のチラノヘックス試験片の引張試験

一般にセラミック系材料は, 耐熱性に優れているが, 脆性が高くき裂が発生すると直線的に伸展するため, 構造部材として適用するには不利な特性を持つ材料が多い。チラノヘックスは, この欠点を軽減するため靱性の高いセラミック系チラノ繊維とマトリックスの界面強度を適度に弱めて, 高い破壊靱性を有する耐熱複合材料を作る目的で開発されたセラミック系複合材料である。

チラノヘックス試験片の形状を図 26 の (A) に示す。この試験片には, ターゲット部を設けていない。超高温引

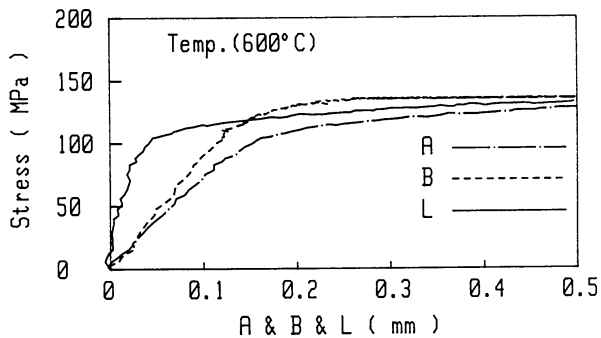


図 25 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したステンレス鋼試験片の変位と引張応力の関係

張試験に際しては, 図 26 の (B) に示すように長さ 20mm, 幅 5 mm, 厚さ 2 mm の小切片をターゲットとして, ターゲット間 30mm になるように小切片 2 個を耐熱接着剤で接着した。なお, ターゲット用の小切片は, チラノヘックス試験片の残材を加工して用いた。チラノヘックス試験片の引張試験例として, 大気中 1200 の超高温環境下で行った時の試験状況を図 27 に示す。なお, 耐熱接着剤で接着した小切片は, 引張試験過程では附着していたが, 破壊した時その衝撃で 2 個とも剥離した。

図 28 に試験片の昇温時間および保温時間の温度経過を示す。試験片は, 12 分間で 1200 の超高温まで加熱

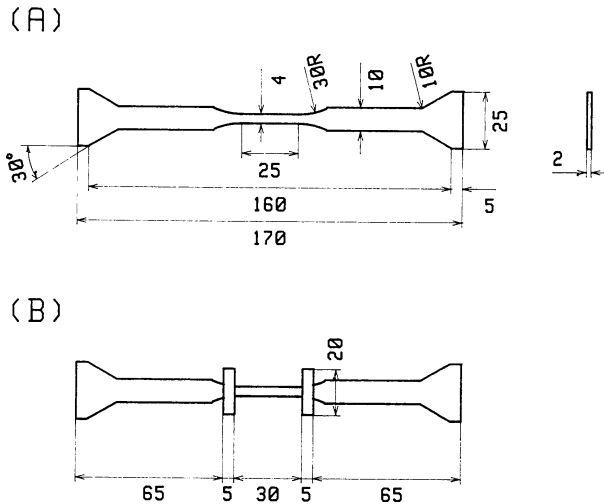


図 26 チラノヘックス試験片の形状

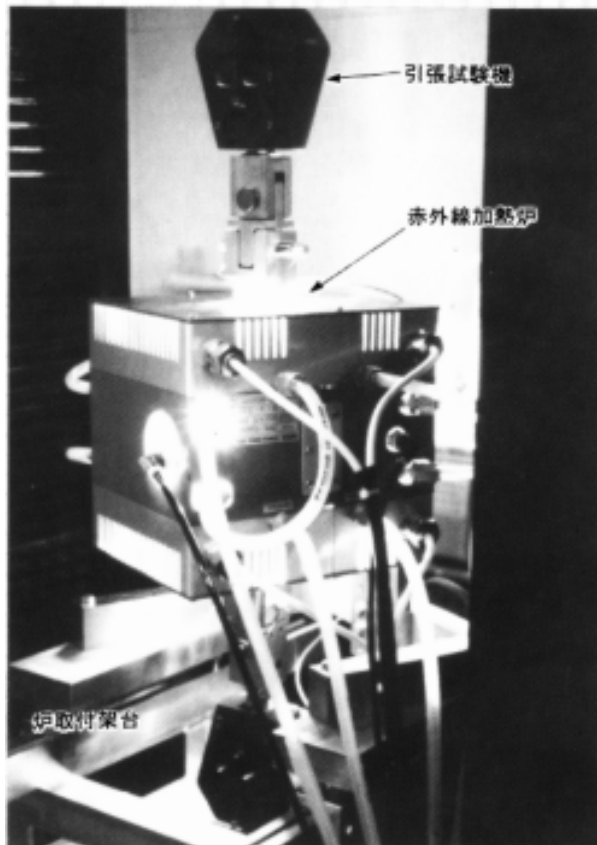


図 27 チラノヘックス試験片の 1200 °C での試験状況

した。設定温度到達直後の温度は不安定であるが、約 2 分間経過すると安定した。なお、本引張試験では試験片の設定温度到達後、5 分経過した後試験を開始した。熱電対は、試験片に 3 本耐熱接着剤で接着し、温度コントロールおよび温度測定を行った。図中の Tempe(2) の挙動は、試験片中央部に接着した温度コントロール用の熱電対の挙動である。Tempe(1) の挙動は、Tempe(2) より上に 5mm 離れた位置に接着した熱電対の挙動である。

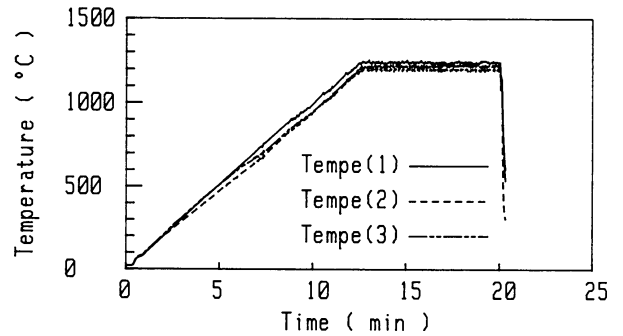


図 28 チラノヘックス試験片の高温 (1200 °C) 試験の温度経過

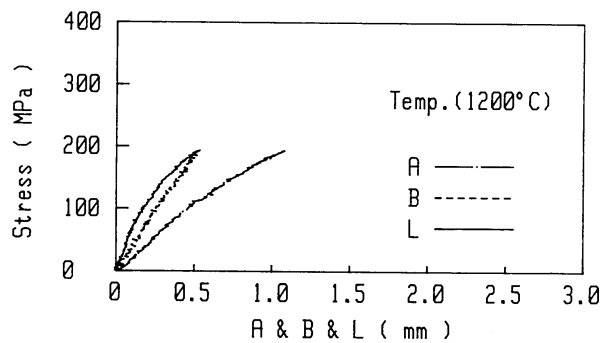


図 29 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したチラノヘックス試験片の変位と引張応力の関係

Tempe(1) の温度は Tempe(2) よりやや高め温度が測定された。これは、空気の対流の影響と考えられる。なお、Tempe(3) の挙動は、Tempe(2) より下に 5mm 離れた位置に接着した熱電対の挙動である。

図 29 に 1200 °C の引張試験で、垂直用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動 A, B, L の表示方法は図 14 と同様である。図 30 に 1200 °C の引張試験で、水平用光学式伸び計を用いて測定した変位と引張応力の関係を示す。図中の変位の挙動 A, B, L の表示方法は図 15 と同様である。図 31 は、温度の違いによる測定値の変動を他の温度条件の測定値と比較するため、図 29 を図 25 と同じスケールで表示したものである。図 31 に示すように測定値 A, B, L の挙動は、図 23, 図 24, 図 25 のステンレス鋼試験片の場合に比べると変動が著しく大きい。しかし、測定値の変動は、超高温引張試験における試験片の変形伸びの挙動を充分認識できる程度である。本計測システムは、以上の結果から、超高温引張試験の変位計測方法として適当な性能を有していると考えられる。なお、超高温引張試験で試験片の伸びを求める場合、測定値の変動について最小自乗法等の演算処理によって近似値を求める必要があると考えている。

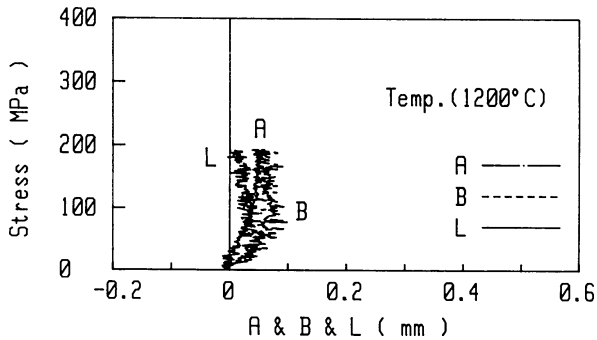


図 30 水平用光学式伸び計 (標点間長さ 4mm) で測定したチラノヘックス試験片の変位と引張応力の関係

注記 ; 図 30 は試験片の幅方向の変位を測定したものである。変位の挙動は初期に膨らみが生じ、その後、元に戻ったと推定できる挙動を示した。ステンレス鋼試験片の場合の縮みが生じるのとは異なる挙動である。

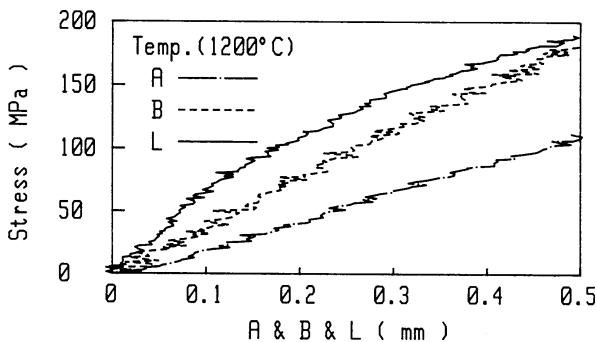


図 31 垂直用光学式伸び計 (標点間長さ 30mm) で測定したチラノヘックス試験片の変位と引張応力の関係

#### 4 . あとがき

本報告では、装置の紹介と予備的評価試験を行った結果を記述した。予備的評価試験では、以下のことが明らかになった。光学式伸び計の較正評価試験では、ターゲットを左右、上下に 2.3mm 移動した場合、一対のレンズユニットの誤差の影響で 0.01mm 以内の非線形の誤差が生じる。ステンレス鋼試験片を用いた室温の引張試験では、光学式伸び計、ひずみゲージ、クリップゲージの三種類の方法でひずみを求め比較した。ひずみ 0.3% 程度までは 3 方法とも同様な測定値が得られたが、塑性変形によってひずみが大きくなると計測領域の違いで測定値に差異が生じた。また、光学式伸び計の測定値について、試験片温度の差異による変動を調べたが、室温で行ったステンレス鋼試験片の引張試験では変動は生じなかった。しかし、500 で行った引張試験では僅かな変動が生じ、600 の引張試験ではやや大きな変動が生じた。1200 の超高温環境下で行ったチラノヘックス試験片の引張試験では、さらに大きな変動が生じた。光学式伸び計の測定値の変動は、温度が高くなるにしたがって変動が大きくなる傾向がある。この測定値の変動は、高温による試験片周りの空気の「ゆらぎ」の影響によって生じたと考えられる。今後、先進的な耐熱複合材料、セラミックス系材料等の超高温環境下における引張材料特性を調べる目的で、本装置を使用する予定である。

#### 参考文献

- (1) 森本哲也, 小河 昭紀, 祖父江 靖, 橋本 良作, Si-Ti-C-O 繊維結合型複合材の高温強度試験, 日本ガスタ-ピン学会 (第 11 回秋期講演会)