

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-900

構造用セラミックスの引張り強さ

藤 沢 良 昭 ・ 松 末 勝 利 ・ 高 原 北 雄

1986年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

構造用セラミックスの引張り強さ*

藤 沢 良 昭** 松 末 勝 利** 高 原 北 雄***

Tensile Strength of Engineering Ceramics

Yoshiaki FUJISAWA, Katsutoshi MATSUE

and Kitao TAKAHARA

ABSTRACT

Uniaxial tensile strength tests of engineering ceramics were carried out in air at temperatures ranging from room temperature up to 1600°C. The ceramic materials chosen for tensile tests were selected as representing existing and developing silicon nitride, silicon carbide and partially stabilized zirconia materials technology, suitable for gas turbine applications.

The tensile strength of silicon nitride rapidly decreased at temperatures above 800~1000°C. When the temperature increased to as high as 1300°C, the strength decreased to about 10 percent of room temperature strength. On the other hand, the strength of silicon carbide did not change appreciably with temperature. The strength of zirconia decreased with increasing temperatures. At 1000°C the strength was reduced to 8 percent of room temperature strength.

Observations of the fracture origin and of the crack propagation on the fracture surfaces were made and discussed.

1. ま え が き

窒化けい素、炭化けい素及びジルコニア等のセラミックスは高温構造材料として、ディーゼルエンジンあるいはガスタービンエンジン等の高温部品への適用が検討され、一部には、ディーゼルエンジンのホットプラグ、グロープラグおよび乗用車用のターボチャージャーとして既に実用化された部品もある。

セラミックスの強さは通常、曲げ強さで表わされることが多い。しかし、曲げ試験は一般に試料の試験領域が小さく、また、高温になると塑性変形の影響を受けるため、正確な材料の強さ（破壊応力）の評価が困難になる場合も予想される。従来、機械部

品の設計には引張り強さが用いられ、強度計算が行われている。従って、部品設計の現場では、材料の強度データとして曲げ強さより引張り強さへの要求が強いようである。

セラミックスを対象とした引張試験の方法については、現在、試験の標準化に関する調査研究が進められている段階であり¹⁾、試験片の形状、寸法、試験の方法等については規格化されておらず、各試験機関で独自の方法で行われているのが現状である。従って、本報では単に引張り強さを求めるのみでなく、試験片及び試験方法の最適化についても検討することを目的とし、将来の構造材料として期待されている窒化けい素、炭化けい素及びジルコニア等を対象とし、形状・寸法の異なる試験片を用いて室温から1600°Cまでの引張試験を行ったので、その結果について報告する。なお、本報告の中には、著者等の

* 昭和60年12月17日受付

** 原動機部

*** 航空機公害研究グループ

既報²⁾³⁾の結果が一部含まれているが、今回と同様に引張り強さを求めた試験なので本報で改めて比較検討することにした。また、これらのニューセラミックスは現在も開発が進められており、今後さらに強度の向上が見込まれているので、本報の結果についてはあくまでも現段階での評価である。

2. 実 験

2.1 供試材料及び試験片

供試材料はホットプレス窒化けい素 (HP. Si_3N_4)、常圧焼結窒化けい素 (S. Si_3N_4)、ホットプレス炭化けい素 (HP. SiC)、常圧焼結炭化けい素 (S. SiC) 及びホットプレスジルコニア (HP. ZrO_2) の 5 種類である。以上の材料の中で常圧焼結窒化けい素及びホットプレスジルコニアの 2 種類の材料は既報²⁾³⁾で用いた材料である。各材料の焼結助剤と主な物性値を表 1 に示す。試験には、各材料について、共通試料として $3 \times 4 \times 40\text{mm}$ の曲げ試験片及び図 1 a), b), c), d) に示すように材料毎に異なる引張試験片等を使用した。図 1 の引張試験片の形状及び寸法がそれぞれ異なっているのは、試験片製造設備の制約及び加工工数の簡略化、以下に述べる材料の高温強度特性及びぜい性との関連で改善を必要としたこと、などの理由によるものである。

セラミックスは材料内部の微細構造と関連して強度試験の結果にばらつきが多く、また、塑性変形を起さないため応力集中に敏感である。このような材料を対象とする強度試験は、試験片の形状を決める場合に特に注意が必要となる。引張試験片の場合は

試験領域の断面積と試験領域以外の断面積との差を大きくとり、試験の際、試験領域外で破壊が起こらないようにする必要がある。また、応力集中を軽減するため、断面積の変化する部分の曲率半径を大きくする必要もある。そのほか、本報では、試験に用いた炭化けい素は、高温になると強度が上昇することも予想されたので、試験領域外での破壊を防止するため、試験片の形状の決定には特に注意が必要であった。以上の事柄を考慮して、窒化けい素やジル

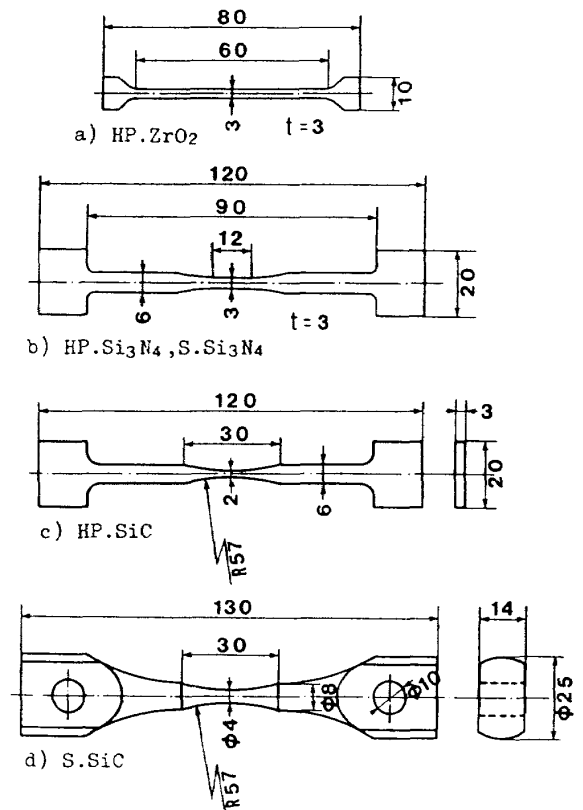


図 1 各種引張試験片

表 1 使用材料の焼結助剤と主な物性値

項目 \ 材料	HP. Si_3N_4	S. Si_3N_4	HP. SiC	S. SiC	HP. ZrO_2
焼結助剤	Y_2O_3 , Al_2O_3	MgO , CeO_2	AlN	B_4C	Y_2O_3
密度 kg/m^3 ($\times 10^3$)	3.27	3.0	3.2	3.12	6.04
ヤング率 MPa ($\times 10^5$)	3.14	2.65	4.1	3.96	2.94
線膨張係数 $1/^\circ\text{C}$ ($\times 10^{-6}$)	2.6	3.3	4.4	3.9	7.0
熱伝動率 W/m K	29.3	10.9	125.6	79.5	1.7
比熱 J/kg K ($\times 10^3$)	0.71			0.80	0.42
比抵抗 $\Omega \cdot \text{m}$	$> 10^8$	$> 10^{12}$			
破壊靱性 K_{IC} $\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$	8.3	5.9	4.6	5.6	6 ~ 9

コニアのように高温で強度低下を起こす材料の引張試験には図1 a), b) に示す試験片を採用し, 逆に高温で強度低下を起こさないと予想される炭化けい素には, 図1 c), d) に示すように中央に平行部を設けずに, 大きい曲率半径の試験領域を有する試験片を採用した。

2.2 実験方法

曲げ強さ試験は材料の基準強度試験として最も多用されている方法である。本報では支点間距離30 mmの3点曲げ強さ試験を室温にて行った。負荷速度としては, クロスヘッド速度約0.2mm/minで行った。この曲げ強さ試験方法は, JIS規格(JIS R1601)で定められた方法である。引張試験には図2 a), b) に示すように, 軟鋼製治具を用いて, 十字ピン継手を介して負荷する方法を採用した。図2 a) の方式では, 治具と試験片の接触部にアルミ箔をはさみ, 接触圧力の均一化を図った。この方式は図1 a), b), c) の3種類の試験片に適用した。この方

式を用いる場合は, 試験片は板材から削り出す方法で製作できるので, 加工は比較的容易であるが, 治具との接触部の寸法精度が要求される。また, 試験の際, 偏心荷重が掛からないように注意する必要がある。図2 b) の方式は図1 d) の試験片に用いた。この方式の場合は試験片のチャック部にピン穴を設けるため, その加工は寸法精度の面でかなり慎重に行う必要があり, 試験の際, 特に荷重の掛け方に注意が必要となる。試験時には負荷状態の適否を監視するため, 試験片表面4箇所のひずみを計測して, 一軸応力状態であることを確認した。

高温引張試験のための加熱装置は図3に示すように, 4本の赤外線ランプの光を金メッキを施した楕円反射面で中央に集光して加熱する赤外線イメージ炉(真空理工製)である。中央集光部の均熱領域は直径約10mm, 長さ約30mmである。試験片の温度は, 窒化けい素とジルコニアについては各試験片中央に熱電対(PR13)を巻きつけて計測した。この方法の計測精度については前報²⁾で確認した。一方, 炭化けい素の場合は, 高温になると熱電対と反応を起こし熱電対が切れたり, 試験片がダメージを受けたりするため, 試験片に巻きつける方法は採用でき

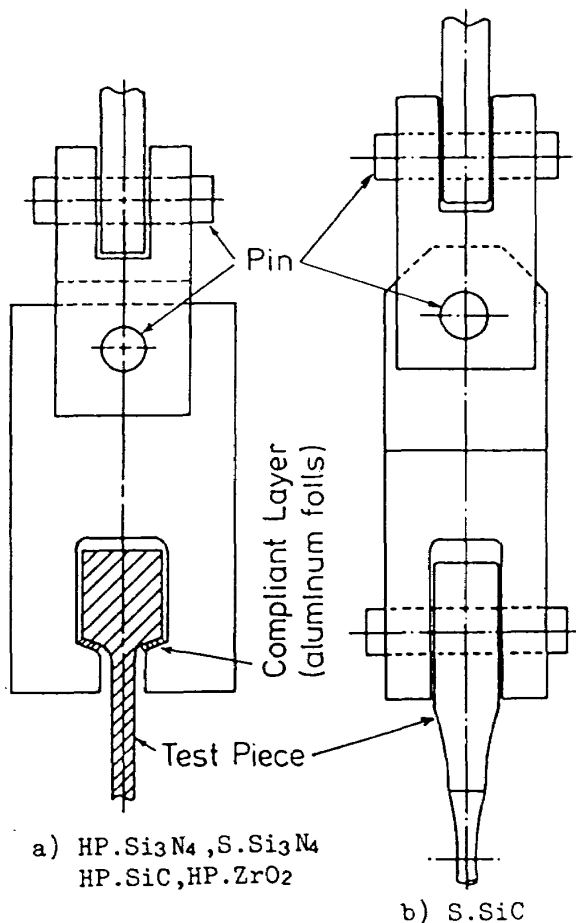


図2 引張試験方法

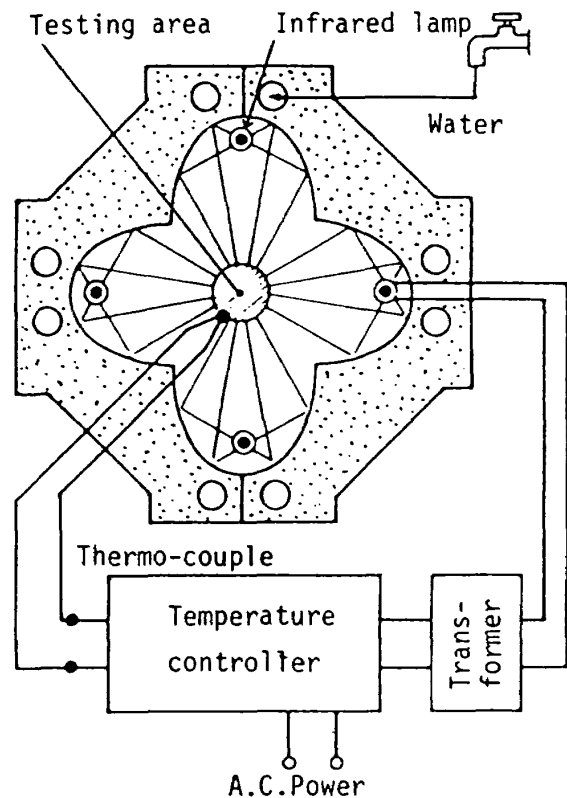


図3 加熱装置の断面及び接続図

ない。このため、炭化けい素試験片の温度は、前もって炉中の試験片温度の測定値と温度コントローラの設定値および電流値との関係を調べ、そのデータに基づいて制御した。この方法の計測精度は3%以下であった。昇温速度 200 ~ 300 °C/min で試験温度に達した後、約1分間保持し負荷を開始した。クロスヘッド速度は約 0.2 mm/min である。加熱開始から負荷終了までの所要時間は5 ~ 8分であった。これらの試験方法の詳細は既報²⁾を参照されたい。

3. 強度評価

引張り強さは破壊時の荷重(P)を試験部の断面積(A)を除いて求められ、曲げ強さ(σ_b)は3点曲げ試験の場合、 $\sigma_b = 3PL/2bh^2$ で計算される。ここで、 L 、 b 及び h はそれぞれ支点間距離、試験片の幅及び高さである。

セラミックスは強度に対する寸法効果が大きいいため、試験片の大きさ及び試験の種類によって、得られる強度の値は異なるのが普通である。従って、種々の試験結果を比較する場合には、試験片の試験領域の大きさを求め、その数値との関連で強度を評価する必要がある。ワイブル統計によれば、試験領域の大きさを表わす量として、次式の有効体積が定義されている。⁴⁾

$$V_e = \int_V \left(\frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^m dV \quad (1)$$

ここで、 σ 及び σ_{max} はそれぞれ試験片内の応力及び最大応力であり、 m はワイブル係数である。ただし、積分は $\sigma > 0$ の領域についてのみ行う。各材料のワイブル係数はそれぞれ曲げ試験の結果からワイブル破壊確率分布関数の形状パラメータとして求められた値である。

本報で用いた試験片について、引張試験片の有効体積は、図1 a), b)のように試験片中央に平行部を有する試験片の場合は、試験領域内の応力が一様であるため中央平行部の体積であるが、c), d)の場合は応力分布が一様でないため、試験片中央の30mmの範囲について(1)式を積分して求めた。具体的には有限要素法によって計算した。曲げ試験片(3点曲げ)の有効体積は(1)式を計算して得られる次式によって算出した。

$$V_{eb} = \frac{V}{2(m+1)} \quad (2)$$

ただし、 V は試験部の体積である。

ところで、形状・寸法あるいは負荷形式の異なる2種類の試験片間には、有効体積と強度の関係式として次式が成立する。⁴⁾

$$\sigma_1 = \left(\frac{V_{e2}}{V_{e1}} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_2 \quad (3)$$

ここで、添字1, 2は異種試験片を表わす。(3)式は異なる試験片間の強度評価に利用されるのみでなく、機械部品の強度予測法として、部品の強度設計にも広く利用されている。⁵⁾⁶⁾⁷⁾

4. 引張り強さに及ぼす偏心荷重の影響

セラミックスのようなぜい性材料に、正確に一軸引張り荷重を加えることは大変困難である。かなり慎重に試験を行っても、曲げ応力成分を零にすることは現実には難しい。本来、試験で得られる材料の強さは、試験片内の最大応力で評価するのが普通であり、そのためには、試験片内の応力分布を調べる必要があるが、通常、引張試験の場合は応力分布を調べないで、便宜的に荷重を試験片の断面積で除して求められている。従って、引張り強さとして得られたデータには、幾らかの誤差を含んでいることが予想される。また、セラミックスの場合は、寸法効果に関連して、応力分布の変化によって有効体積が変わるため、試験結果を整理する際の強度評価に対して影響が現われる。従って、本章では、ワイブル統計を用いて、引張り強さに対する曲げ応力成分の影響を試算し、試験の際、許容される曲げ応力成分の大きさについて検討する。

計算を簡単にするため、正方形断面の試験片について行う。図4に示すように、一辺 d の正方形断面をもつ長さ ℓ の試験片に、偏心引張り荷重が作用した場合について計算する。 e は偏心量である。

試験片の断面内には、通常の引張り応力

$$\sigma_t = \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

のほかに次式の曲げ応力が生じる。

$$\sigma_b = \frac{P}{d^2} \cdot \frac{6e}{d} \cdot \frac{2x}{d} \quad (5)$$

従って、断面内の応力は両者の和として次式で表わされる。

$$\sigma = \frac{P}{d^2} \left(1 + \frac{6e}{d} \cdot \frac{2x}{d} \right) \quad (6)$$

最大引張り応力は試験片の表面 ($x = d/2$) に生じ、次式で与えられる。

$$\sigma_{max} = \frac{P}{d^2} \left(1 + \frac{6e}{d} \right) \quad (7)$$

ところで、曲げ応力が生じた場合の引張試験片の有効体積としては、(1)式に(6)、(7)式を代入して計算し、次式が得られる。

$$\frac{V_e}{V} = \frac{(1+6e')^{m+1} - (1-6e')^{m+1}}{(1+6e')^m \cdot 12e'(m+1)} \quad (8)$$

ただし、 $e' = e/d$ であり、適用範囲は $0 < e' \leq 1/6$ である。 V は試験片の体積 ($d^2 \ell$) である。(8)式の V_e/V は 1 より小さい。即ち、偏心荷重のため試験片の有効体積は減少する。(3)式の有効体積と強度の関係式を用いて、偏心荷重を受けた場合の強さ σ_p は次式で与えられる。

$$\sigma_p = \left(\frac{V}{V_e} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \sigma_t \quad (9)$$

上式で、 σ_p は σ_t より大きいことがわかる。これ

は、偏心荷重によって有効体積が減少したため、強度が高く現われることを意味している。

以上の計算によって、以下の考察が可能となる。即ち、実際の試験では、曲げ応力のため、最大応力としては、(7)式で示される σ_{max} が生じているので、破壊時の最大応力は σ_{max} であり、この数値が破壊強さであるが、通常は、曲げ応力の影響を無視して平均応力 σ_t で破壊したと見なされるので、その場合の強度評価には $(1 - \sigma_t / \sigma_{max})$ の誤差が生じる。しかし、現実には有効体積の減少によって σ_p まで強度が向上しているので、曲げ応力を無視して引張り強さを算出した場合の評価誤差は、 $(1 - \sigma_p / \sigma_{max})$ である。

表 2 に計算結果を示す。表には偏心量、曲げ応力集中及び、その場合の σ_p / σ_{max} を $m = 5, 10, 15$ の場合について計算した結果について示す。図 5 は曲げ応力成分と σ_p / σ_{max} の関係である。図から明らかのように、偏心荷重による有効体積の減少によって強度が向上するので、評価誤差は幾分緩和されるが、その量はあまり大きくないので、依然として曲げの影響はかなり大きいことがわかる。従って、通常の方法で求める引張り強さの評価誤差を 3 % 以下に収めるためには、曲げ応力成分を 10 % 以下に抑える必要がある。実験の際、これを実現するためには、ひずみゲージを用いて応力状態を確認することが必要である。

表 2 引張強度評価に及ぼす偏心荷重の影響

偏心量 e/d	応力集中 σ_{max}/σ_t	σ_p/σ_{max}		
		$m = 5$	$m = 10$	$m = 15$
0.00001	1.00006	1.0	1.0	1.00003
0.0001	1.0006	1.0	1.0	1.00001
0.001	1.006	1.0	0.999	0.9999
0.01	1.06	0.997	0.995	0.992
0.02	1.12	0.991	0.980	0.971
0.03	1.18	0.980	0.958	0.942
0.04	1.24	0.965	0.933	0.911
0.05	1.30	0.948	0.905	0.879
0.10	1.60	0.844	0.772	0.738
0.15	1.90	0.745	0.665	0.631
0.16 ...	2.00	0.715	0.635	0.602

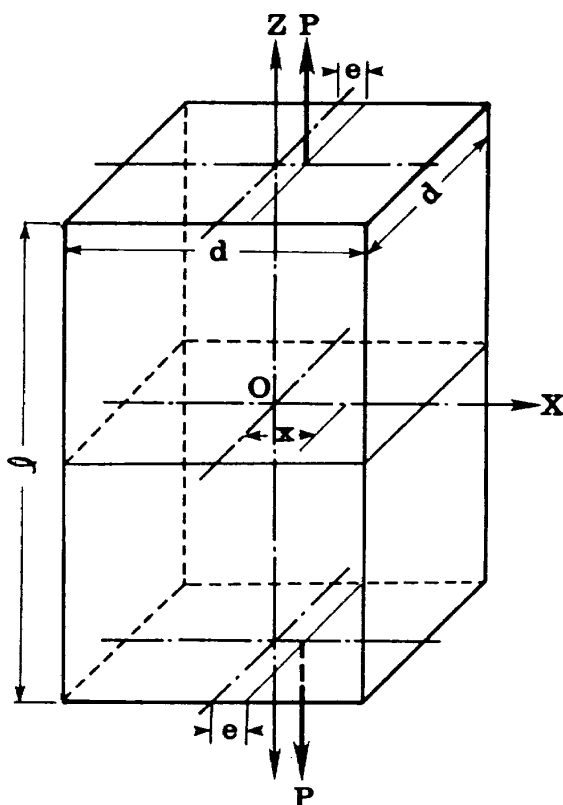


図 4 偏心荷重を受ける引張試験片の概念図

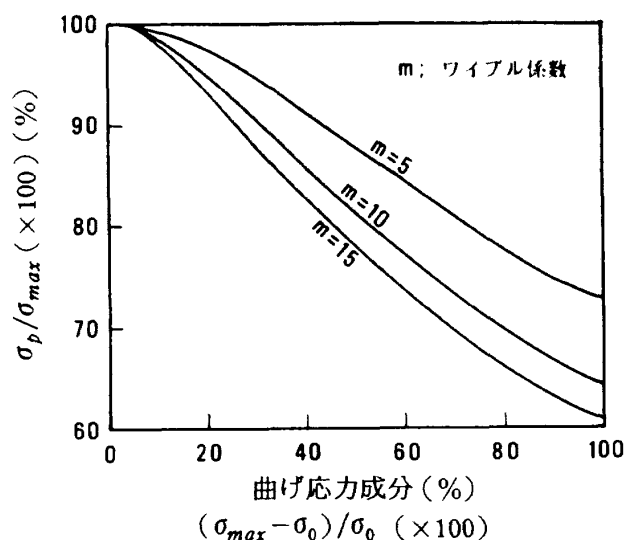


図5 引張り強さの測定結果に及ぼす曲げ応力成分の影響 (σ_0 : 断面内の平均応力, σ_{max} : 断面内の最大応力, σ_p : 偏心荷重を受けた場合の破壊応力)

5. 結果及び考察

表3に室温での曲げ強さ(σ_b), 引張り強さ(σ_t)及び1300℃での引張り強さ等を示す。表中の m はワイブル係数であり, V_{eb} 及び V_{et} はそれぞれ3点曲げ試験片及び引張り試験片の有効体積である。予測引張り強さ(σ_{tp})は曲げ強さ試験の結果及び有効体積を用いて(3)式から算出した。

本報では, 試験片形状として4種類, 試験方法として2種類を採用した。いずれの試験片, 方法が良いか, 断定できないが, 各方法とも正確な一軸引張り荷重を加えるためには, 試験片毎にひずみゲージを貼付して応力状態を監視し, 治具の調整が必要であった。治具の調整の容易さからいえば, 図1 a)の試験片が最も容易で, 逆に難しいのは図1 d)のピン結合方式の試験片であった。試験片の加工コス

ト, 試験の困難さの面からいえば, ピン結合方式は採用しない方がよいようである。いずれにしても, 精度の高い引張り試験を行うためには, 前章で述べたように, 引張り荷重の偏心を少なくして曲げの影響を極力抑えることが重要である。なお, 本報の場合は, 総ての試験片について曲げ応力成分を測定していないので断定は出来ないが, 少なくとも曲げ応力成分は20%以下に抑えられているものと思われる。従って, 強さに対する評価誤差は5%以下と考えられる。この誤差はセラミックス特有の強さのばらつきを考慮すると評価に与える影響は少ないものと思われる。

図6は各材料の温度と引張り強さの関係を示す。窒化けい素はホットプレス, 常圧焼結とも800~1000℃を超える温度で急激に強度が低下し, 1300℃では120MPa以下になる。炭化けい素の方は強度の低下は少なく, 1500℃の温度になっても200MPa以上の強度を保っている。ジルコニアは200℃から明らかに強度低下が起こり, 1000℃を超えると,

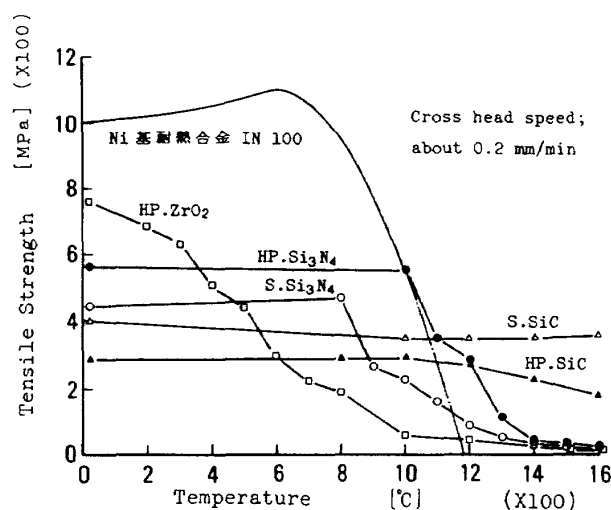


図6 温度と引張り強さの関係

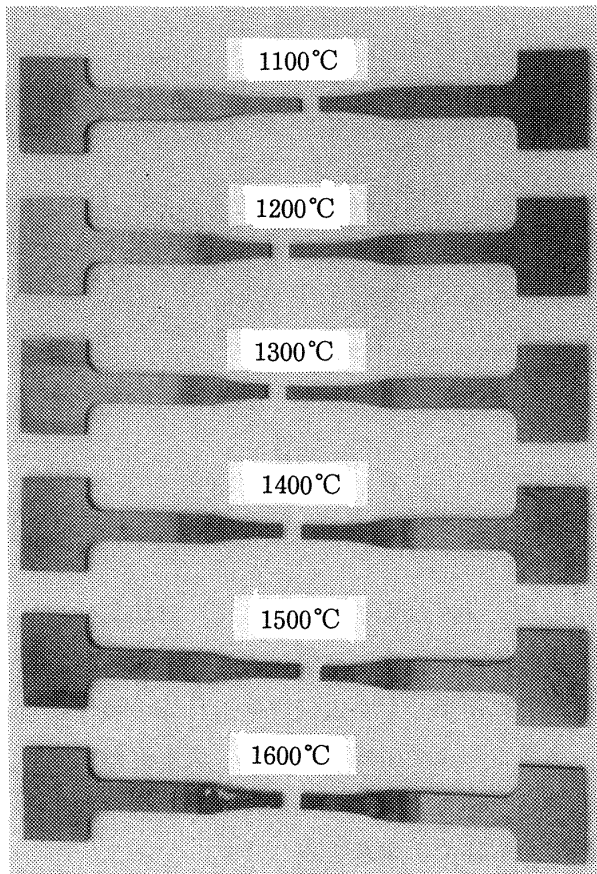
表3 各材料の曲げ強さと引張り強さ

材 料	σ_b (MPa)	m	V_{eb} (mm ³)	V_{et} (mm ³)	σ_t (MPa)	σ_{tp} (MPa)	1300℃ σ_t (MPa)
HP.Si ₃ N ₄	814	8.9	1.8	108	564	515	111
S.Si ₃ N ₄	708	11.5	1.2	108	443	478	53
HP.SiC	506	6.4	3.3	57	285	324	246
S.SiC	745	10.3	1.4	65	400	514	347
HP.ZrO ₂	1021	9.3	1.7	540	759	604	31

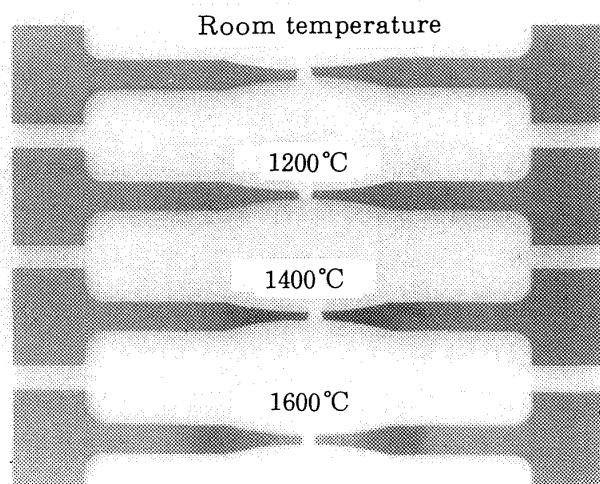
50 MPa 以下になる。そして、1400℃以上では10～20 %の塑性伸びを生ずる。各材料とも、強度のばらつきは室温で大きく、強度低下の起こる高温では小さくなる。ただし、高温で強度低下の少ない炭化けい素の場合は、高温になっても室温と同様にばらつきは大きい。

高温における強度の低下現象は、材料の焼結加工

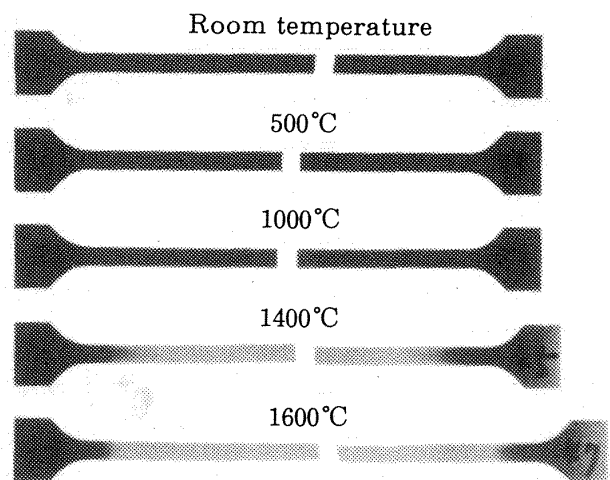
の際に使用される焼結助剤と大いに関係がある。⁸⁾ 焼結助剤は一般に結晶粒界に析出してガラス相を形成する傾向があり、このガラス相が高温下で軟化し、強度を低下させる原因となっている。窒化けい素系材料のように焼結助剤として酸化物を用いる場合は、800～1000℃の温度になると粒界の軟化が始まるようである。しかし、炭化けい素のように非酸化物を焼結助剤として用いる場合には強度低下は少ないか、あるいはもっと高温まで強度が低下しない場合もある。いずれにしても、焼結助剤を使用する限り、高温での強度低下は避けられない問題である。



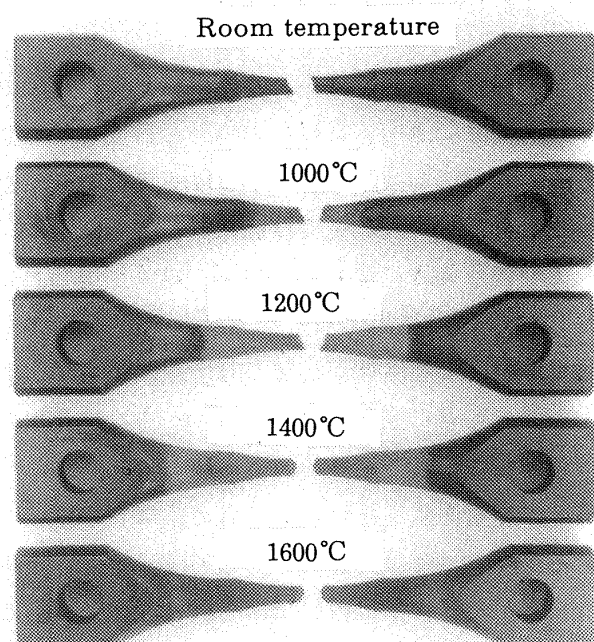
a) S.Si₃N₄



c) HP.SiC



b) HP.ZrO₂



d) S.SiC

写真1 破壊後の試験片

ジルコニアの強度低下現象は上述の粒界軟化とは異なり、部分安定化ジルコニア特有の結晶の変態とも関係しており、その原因については、現時点では十分解明されていないようである。

試料の表面は各材料とも 1000℃を超える温度から酸化のため白色化し、窒化けい素は 1500℃以上では酸化膜のはく離が起こる。この現象は炭化けい素では少ない。窒化けい素の破面は高温では粒界軟化のためスロークラックグロースの痕跡が見られるが、炭化けい素の方は室温、高温とも凹凸の激しいぜい性破面である。破壊後の試験片及び破面の代表例を写真 1 及び写真 2 に示す。

6. あとがき

将来の高温構造材料として期待されているセラミックスを対象として、室温から 1600℃までの引張り強さ試験を行った。試験には、ホットプレス窒化けい素、常圧焼結窒化けい素、ホットプレス炭化けい素、常圧焼結炭化けい素及びジルコニアの 5 種類の材料を使用した。

これらの材料の高温強度特性は、材料開発の初期から素材メーカを中心とし、主として曲げ試験によって調査されて来たが、高温での強度、特に 1300℃以上での強度については、必ずしも明確に調査されておらず、高温部材への適用性について不明な点が多かった。

本報の引張り試験で得られた結果は、これらの材料を実用部品に適用する場合の設計資料として有益であるのみでなく、開発段階における素材の高温強度特性の正確な情報として役立てることもできる。

高温引張り強さに関して、以下の結果が得られた。

窒化けい素は粒界の軟化のため、800～1000℃を超える温度で強度低下が起こり、ジルコニアは温度の上昇とともに強度は低下する。一方、炭化けい素は高温になっても強度の低下は少ない。

将来の高温部品用材料として考える場合、窒化けい素とジルコニアは高温材料としては、不向きと思われる。ただし、窒化けい素の高温強度は、製造段階で使用される焼結助剤に支配されているので、今後、助剤の適切な選択によって特性の改善が可能なかもしれない。炭化けい素は高温での強度低下は少な

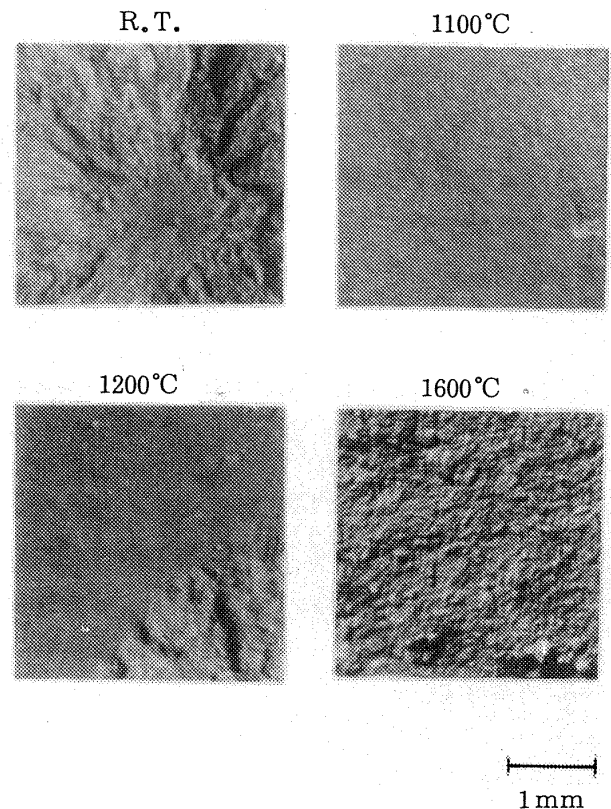


写真 2 S-Si₃N₄ の破面

いものの、強度は十分とはいえず、破壊靱性の低さも考慮すると、強度の大幅な向上が望まれる。

本研究に使用した引張り試験用治具等の製作に当たり、当所工作課の山崎亀義技官、坂本健技官、井上育三技官、納谷利憲技官に多大な協力をいただいた。末尾ながら各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) ファインセラミックスの標準化に関する調査研究報告書、(昭和60年3月)、ファインセラミックス協会。
- 2) 松末勝利, 藤沢良昭, 高原北雄; 常圧焼結 Si₃N₄ の高温引張り試験, 窯業協会誌, 91-7 (1983), P. 324., 又は; 常圧焼結窒化珪素の高温引張り試験, 航空宇宙技術研究所報告, TR-753 (1983-3)。
- 3) 松末勝利, 藤沢良昭, 高原北雄; ZrO₂-Y₂O₃ 系加圧焼結体の高温引張り強さ, 窯業協会誌, 91-1 (1983), P. 49。
- 4) D.G.S.Davis; The Statistical Approach to Engineering Design in Ceramics, Proc. Brit.

- Ceram. Soc., No.22 (1973), P.429.
- 5) 佐々木正史, 佐々木直人, 山崎慎一; セラミック回転体強度の評価, ガスタービン学会誌, 9-36 (1982-3), P.48.
 - 6) 小林茂人, 中沢則雄, 稲垣登治; セラミックタービンロータの開発, ガスタービン定期講演会講演論文集 (昭和 60 年 6 月), P.59.
 - 7) 佐々木正史, 和泉隆夫, 阿知波清次, 伊藤高根; セラミック・ラジアルタービンロータの回転強度評価, ガスタービン学会誌, 13-50 (1985-7), P.28.
 - 8) 猪股吉三; 耐熱高強度セラミックスの粒界, 日本金属学会会報, 22-2 (1983), P.10-1.

既 刊 報 告

TR-890	高アスペクト比翼の突風荷重軽減風洞実験と解析 Wind Tunnel Tests and Analysis on Gust Load Alleviation of High-Aspect-Ratio Wing	1985年11月	ACT 研究会
TR-891	熱荷重により生ずる円筒殻の軸対称および梁様曲げ変形 Axisymmetric and Beam-Like Bending Deformations in Thin Elastic Circular Cylindrical Shells Due to Thermal Loads	1985年11月	遠藤 修司
TR-892	空気吸込ロケット/ラムジェットを用いた宇宙輸送機の性能計算 Performance Calculation for a Space Launch Vehicle with Air Breathing Rockets/Ramjets	1985年11月	工藤 賢司、升谷 五郎 鎮西 信夫
TR-893	操縦系統機能試験におけるリミットサイクル An Analysis of the Limit Cycle Observed in the Functional Mockup Test of the NAL QSTOL Research Aircraft	1985年12月	大和 裕幸、内田 忠雄 岡田 典秋、小川 敏雄 多田 章
TR-894	ジェットとプルームの乱流特性 Turbulence Properties of Jet and Plume	1985年12月	石垣 博、望月 宗和
TR-895	高効率ガスタービンの制御に関する研究(1) 制御システム解析装置およびその性能 A Study on Control System of High Efficiency Gas Turbine AGTJ100-Control System Development Facilities and its Characteristics	1985年12月	杉山 七契、越沼 威 西尾 健二
TR-896	翼胴結合体まわり非粘性圧縮流の数値解析 Ⅲ. Euler 方程式による計算 Numerical Analysis of Inviscid Flows about Wing-Fuselage Combinations Ⅲ. Calculation Based on the Euler Equations	1985年12月	石黒登美子、小川 哲 小口 慶子
TR-897	溝構造ロケット燃焼器の応力解析 (第1報 弾性応力解析) Structural Analysis of High Pressure Slotted Wall Thrust Chamber (part 1. Results of the Elastic Analysis)	1986年 2 月	新野 正之、田村 洋 熊川 彰長、八柳 信之 佐々木正樹
TR-898	増速中の擾乱気流による非定常不規則応答からダイバージェンスとフラッタ限界値の推定 Estimation of Divergence and Flutter Boundaries from Locally Stationary Random Responses	1986年 2 月	安藤 泰勝、松崎 雄嗣
TR-899	N ₂ O ₄ /アミンインジェクタエレメントの実験。 その1 コールドフロー試験結果 A Study of N ₂ O ₄ /Amine Injector Elements Part I Cold Flow Test	1986年 2 月	佐藤 和雄、須藤 孝幸 只野 真、毛呂 明夫 小坂 勝明

航 空 宇 宙 技 術 研 究 所 報 告 900 号

昭和 61 年 2 月 発行

発行所 航 空 宇 宙 技 術 研 究 所
東京都調布市深大寺東町 7 丁目 44 番地 1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株 式 会 社 東 京 プ レ ス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12

