

# 切欠部を有する窒化けい素セラミックスの非弾性解析

大下 賢一 (理工学・幡中 憲治)

## 研究の目的

エンジニアリングセラミックスを高温機器用構造材料として安全に使用するためには、高温下におけるこの材料の力学的特性、特に切欠等の応力集中部における変形挙動を把握しておくことが重要である。特に、窒化けい素セラミックスは1000℃を超える高温下において非弾性変形挙動を呈し、これは負荷速度の減少とともに顕著になることが知られている。切欠材においてこのような負荷速度が非弾性変形挙動に及ぼす影響は平滑材におけるより複雑になることが予想される。このため、この材料の実用化に際しては非弾性変形の負荷速度依存性を導入することにより、切欠部の引張およびクリーブ変形を解析する手法を確立しなければならない。

そこで本研究では、1300℃のもと、アルゴンガス雰囲気中において窒化けい素セラミックス平滑材および切欠材の引張試験を実施した。そして、平滑試験片の試験結果に基づきこの材料の構成式を構築し、これを用いて切欠部の有限要素法による解析を実施した。そして切欠部を有する試験片を用いて得られる試験結果と有限要素法による解析結果を比較・検討することにより1300℃におけるこの材料の切欠部の非弾性変形挙動に検討を加えた。

## 研究成果

供試材料は、窒化けい素(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)セラミックス[日本セラテック(株)製]である。これは91wt.%の窒化けい素粉末に9wt.%のイットリアおよびアルミナ粉末を焼結助剤として添加したものを1700℃下で常圧焼結することにより得た。図1に本研究で使用した切欠試験片の形状および寸法を示す。高温引張試験は、Arガス雰囲気中、試験片に設けた標点間(10mm)の軸方向変位速度を制御することにより実施した。

この材料の非弾性変形挙動のひずみ速度依存性を考慮した有限要素法プログラムを作成し、これを実行することにより、非弾性解析を実施した。

まず、非弾性有限要素法<sub>ins</sub>プログラムを作成するにあたり、各要素のひずみ増分を与える式として以下の式を用いた。

$$d\epsilon = \frac{d\sigma}{E} + B(\sigma - \alpha)^n dt \quad (1)$$

$$\dot{\alpha} = C \dot{\epsilon}_{ins}$$

$\dot{\epsilon}_{ins}$ の添字<sub>ins</sub>は非弾性成分を示す。式中、B、Cおよびnは平滑試験片を用いた引張試験結果に基づき決定される。

非弾性有限要素法解析には、山田氏の提案した弾・塑性有限要素法プログラムを本研究で用いたモデルに拡張したものをを用いた。また、本解析では試験片の対称性を考慮して平滑試験片および切欠試験片の1/4部分に対して、二次元三角形ひずみ要素を用いた。

図2に平滑試験片を用いて実験より得た応力-ひずみ関係と有限要素法解析より得たそれとを比較した結果を示す。図中、破線は各試験条件のもとで実験により得た応力-ひずみ関係を、また、実線は解析より得たそれを示している。なお、図中、応力-ひずみ関係は $\dot{\epsilon} \leq 6.0 \times 10^{-3}$ の範囲について示してある。 $\dot{\epsilon} = 2.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ のもとで実施した引張試験において試験片は $\sigma_f = 70 \text{ MPa}$ 、 $\epsilon_f = 8.94 \times 10^{-3}$ にて破断したので、このひずみ範囲の応力-ひずみ曲線はこの材料の応力-ひずみ応答の全体像をほぼ捉えていると考えられる。実験結果によると、この材料の応力-ひずみ関係は1300℃下において顕著なひずみ速度依存性を呈し、ひずみ速度の減少に伴い、非弾性変形が生じやすく引張強度が低下する傾向にあることがわかる。一方、解析結果はそれぞれのひずみ速度下において実験結果と定性的には十分に、定量的にも比較的良好に一致していることがわかる。

続いて、同様の比較を切欠試験片の荷重-変位応答に対して試みた。図3(a)~(c)にそれぞれ、Type A、BおよびC切欠試験片の荷重-変位関係に関する実験結果と有限要素法解析結果との比較を示す。これらによると、Type AおよびC切欠試験片に関する解析結果は実験結果と定性的かつ定量的に比較的良好に一致している。一方、Type B切欠試験片に関する解析結果は実験結果に比し高応力側に外れるが定性的には実験結果の傾向を捉えている。このように一部、解析結果と実験結果との間に差異が生じる場合があるが上述した荷重-変位関係に関する解析結果と実験結果との比較は、本研究で提案した解析手法に基づき窒化けい素セラミックス切欠材の高温引張変形挙動を大略推定できることを示唆している。

## 産業技術への貢献

本研究で提案した窒化けい素セラミックスの高温下における切欠部の非弾性変形解析は、この材料を高温機器・構造材料へ適用する際の強度設計上、資するところが大きいと思われる。さらに、モノリシックセラミックスの力学的諸特性を正確に把握することは、近年、盛んに研究が行われている、これらの材料の複合化を促進するうえで欠かすことができない要素の一つである。

## 研究発表

- 1) 大下賢一, 幡中憲治: 高温下における常圧焼結窒化けい素セラミックス切欠材の非弾性解析; 日本機械学会年次大会講演会, 2000.8.2.
- 2) 大下賢一, 幡中憲治: 窒化けい素セラミックス切欠材の非弾性変形の評価; 日本機械学会材料力学部門講演会, 2000.10.7.
- 3) 幡中憲治, 大下賢一, 外山央: 超高温下における窒化けい素セラミックスの時間依存型変形; 日本機械学会第8回機械材料・材料加工技術講演会, 2000.11.27.
- 4) 幡中憲治, 石賀裕輔, 外山央, 大下賢一: 高温下における窒化けい素セラミックスの非弾性応力-ひずみ応答; 日本機械学会論文集, 67, (2001).
- 5) 大下賢一, 幡中憲治: 高温下における窒化けい素セラミックス切欠材の非弾性解析; 日本機械学会論文集投稿中.

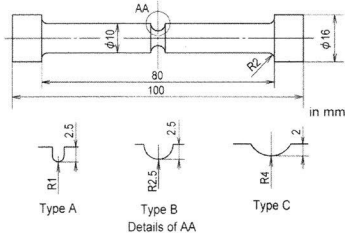


図1 切欠試験片の形状および寸法

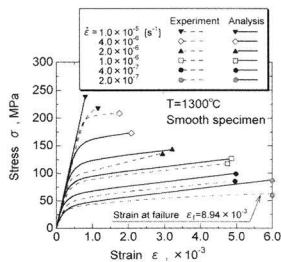


図2 平滑試験片を用いて実験より得た荷重変化関係と解析より得たそれとの比較

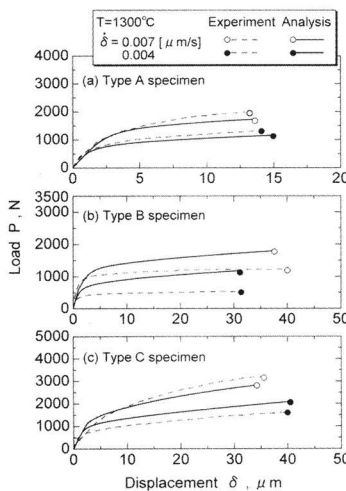


図3 切欠試験片を用いて実験より得た荷重-変位関係と解析より得たそれとの比較

## 連絡先

電話 0836-85-9100 (内線8134)  
 FAX 0836-85-9101 (学科事務室)  
 E-mail: oshita@mx1.freemail.ne.jp