

NAL TR-715

ISSN 0389-4010
UDC 546.28:
620.171.3

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-715

常圧焼結窒化珪素の常温強度評価試験

松末勝利・高原北雄・橋本良作

1982 年 6 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

常圧焼結窒化珪素の常温強度評価試験*

松末勝利** 高原北雄** 橋本良作**

Strength Evaluation Test of Pressureless-Sintered Silicon Nitride at Room Temperature.

Katsutoshi MATSUSUE, Kitao TAKAHARA and Ryosaku HASHIMOTO

ABSTRACT

In order to study strength characteristics at room temperature and the strength evaluating-method of ceramic materials the following tests were conducted on pressureless-sintered silicon nitride specimens: bending-tests, the three tensile-tests of rectangular plates, holed plates, and notched plates, and spin-tests of centrally holed disks.

The relationship between the mean strength of specimens and the effective volume of specimens was examined using Weibull's theory.

The effect of surface grinding on the strength of specimens was discussed.

概 要

セラミックスの強度特性と強度評価法を検討するために、常圧焼結窒化珪素を用いて、角棒の曲げ試験、板材の引張試験、円孔付およびノッチ付板材の引張試験および円輪の回転試験等を行い、ワイブル統計を適用して試験片の平均強さと有効体積との関係を調べた。また、試験片の強度に対する表面研磨の影響について検討した。

1 ま え が き

セラミックスが機械部品特に高温で使用される強度部品用材料として期待され、実用化を目指す開発研究が盛んに進められている。すでに国内においても小型熱機関への適用研究の状況が雑誌、新聞等で公表されるようになって来た。しかし、セラミック

ス本来の脆性の問題が部品の実用化に困難をもたらした。完成の見通しは未だ確立していないようである。

このような状況のもとに当所においても数年前からセラミックスの機械部品への適用性について検討を進めており、すでに、ホットプレス窒化珪素、常圧焼結炭化珪素および反応焼結窒化珪素等を用いて常温における強度試験として、曲げ強さ試験のほか引張試験、回転試験、ノッチ付角棒の曲げ試験およびリングの圧裂試験等を行い、セラミックスの強度に対する部品の形状・寸法、応力集中の影響および

* 昭和57年5月13日 受付

** 原動機部

負荷方式の相違による影響，ならびにワイブル統計解析の強度評価への適用性等について検討して来た。^{1)~4)}そしてホットプレス材から製作された部品については，ワイブル統計を用いた予測強度とよく一致することを確認したが，反応焼結材および常圧焼結材については，強度予測に不一致が生ずること，そしてその原因は材料の製造過程により多くの問題点が残されていることなどを指摘した。また，形状の複雑さと部品強度の関係についても前報²⁾で採用したリング状試験片の回転試験および圧裂試験等の結果が単純な曲げ試験の結果と対応しなかったことから，空孔部を有する小型部品の強度は形状の複雑さに関係することが推測された。

本報では現在実用機械部品に多用されようとしている常圧焼結窒化珪素を用いて，角棒の曲げ試験，円孔付およびノッチ付板材の引張試験および円輪の回転試験等を行い，各試験結果にワイブル統計解析を適用し，部品の強度評価について検討した。引張試験に採用した円孔およびノッチ部は実用部品には多く見られ，負荷を受けたときの応力集中が問題となる部分であるが，強度試験の結果，曲げ強度との対応はあまりよくない。その理由として，常圧焼結法で部品を製作するとき，部品の形状によって焼結時の炉内の雰囲気および焼結体の収縮等の影響が異なるのではないかと考察を行った。そのほか本報では，部品表面の研磨の影響を調べるために，前述の円孔およびノッチ付試験，回転試験片等について，表面加工の異なる試験片を用いて，表面研磨の有無，研磨方向等と部品の強度との関係を検討した。その結果，円孔およびノッチ部では強度に対する研磨加工の有無の影響は少なく，部品加工上研磨の効果はあまり期待できないことが推測された。

以上のように，複雑な機械部品に適用する際に検討すべき問題が多い中で，本報では応力集中と異形状の影響について調査し，部品の設計資料を得ることを目的とした。

2 供試材料と試験片

材料は常圧焼結された窒化珪素である。焼結助剤はアルミナ (Al_2O_3) およびマグネシア (MgO) を主成分とし，全体の約10%含まれている。焼結体

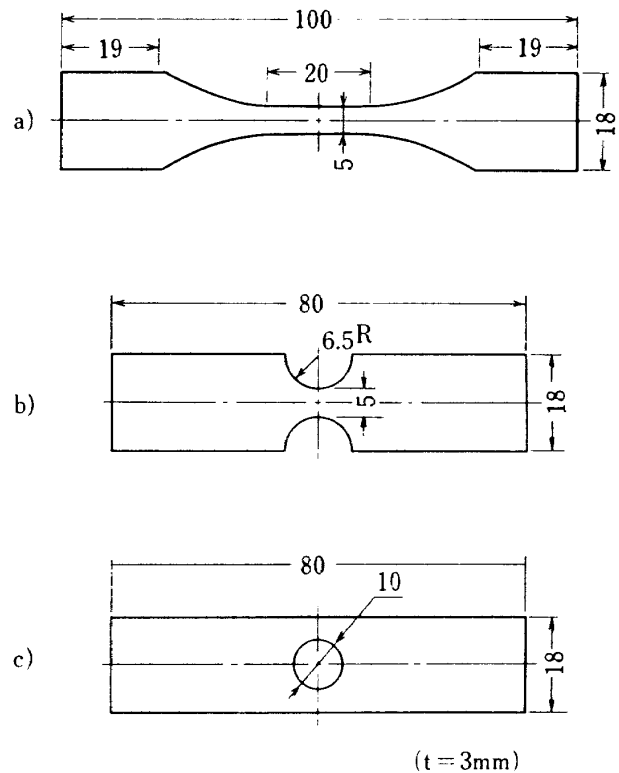


図1 引張試験片

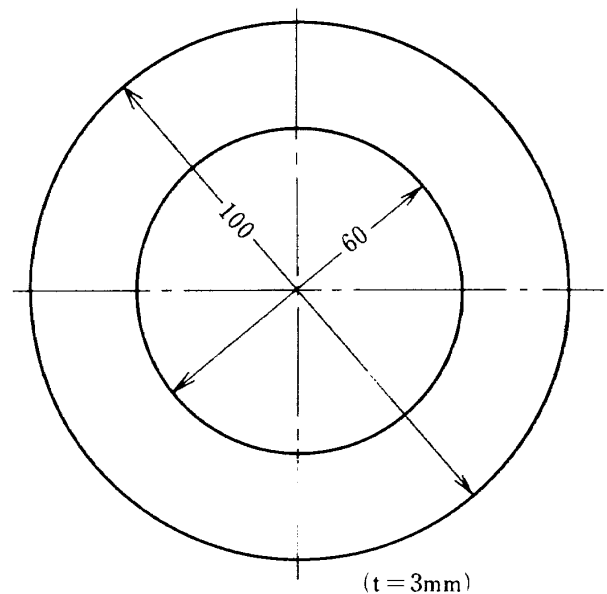


図2 回転試験片

の見かけ密度は $3.10 \sim 3.15 \text{ g/cm}^3$ (現論密度比約95%)である。

試験片としては，曲げ強さ試験に使用する $3 \times 3 \times 50 \text{ mm}$ の角棒，図1に示す三種類の引張試験片および図2に示す回転試験片等を製作した。上記試験片の中で曲げ試験に使用した角棒は板状の焼結体から切断および研磨加工によって製作したものであり，供試材料の強度試験の標準試験片である。また図1

の引張試験片の a) は板材から切断し研磨したものであるが、b) のノッチ付試験片および c) の円孔付試験片には、以下に述べるようにそれぞれ表面加工の異なる三種類の試験片を使用した。常圧焼結法の焼成には、仮焼成と本焼成の二回の焼成工程がとられる。そして仮焼成後所定の寸法に加工し、本焼成に入る。このとき15~20%の収縮を生ずるので、本焼成前の加工ではあらかじめ収縮を見込んだ寸法に加工しておく必要がある。本報で採用した三種類の試験片は、本焼成後全表面を研磨加工したもの、本焼成後円孔縁またはノッチ縁のみ表面研磨したものおよび本焼成後全く加工しないもの等の三種類である。また、回転試験片は内周縁のみ研磨したものおよびしないものの二種類である。

各試験片の研磨面の表面粗さは $1\mu\text{m}$ (R_{max}) であり、各エッジ部には $0.1\sim 0.3\text{mm}$ の面取りをした。

焼成のまま研磨加工しなかった試験片には焼成時の収縮に異方性があるため若干変形が生じた。この変形の影響は特に引張試験において荷重軸の偏心、曲げおよびねじれ等による試験強度の誤差として現われることが懸念されたが、後述の結果を見るかぎりその影響は殆んど現われていない。

3 実験方法

曲げ強さ試験としては、 $3\times 3\times 50\text{mm}$ 角棒の三点曲げ試験(支点間距離 30mm)を行った。この試験は供試材料の標準強度試験となるため試料数を多くした。

引張試験には、図3に示すように、試験片両端の両面に軟鋼製の治具を接着し、これにピンを通しさらにクロスピンを利用した継手を介して負荷する方法を用いた。各試験には島津万能試験機(RS-2型)を用い、負荷は手動で行った。試験機のクロスヘッド速度は大体 $0.02\sim 0.05\text{mm/分}$ の範囲である。室温中の試験の場合、負荷速度の強度に対する影響は殆んど無視できることが確認されている。⁵⁾ したがって本報のように手動により負荷する方法を用いても、破壊強度に対する影響は無いものと考えられる。

回転試験は前報¹⁾と同様に図4に示すように試験

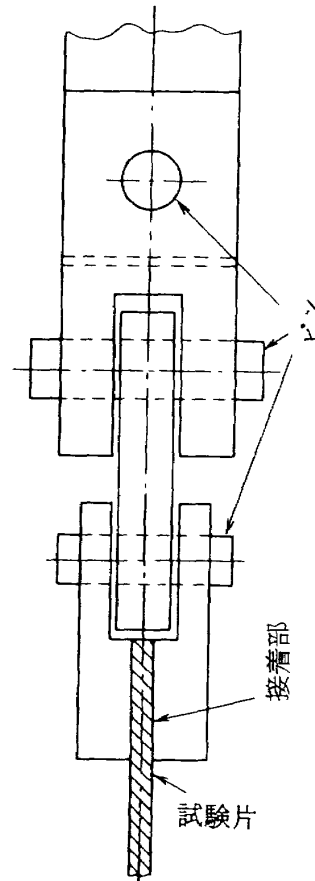


図3 引張試験

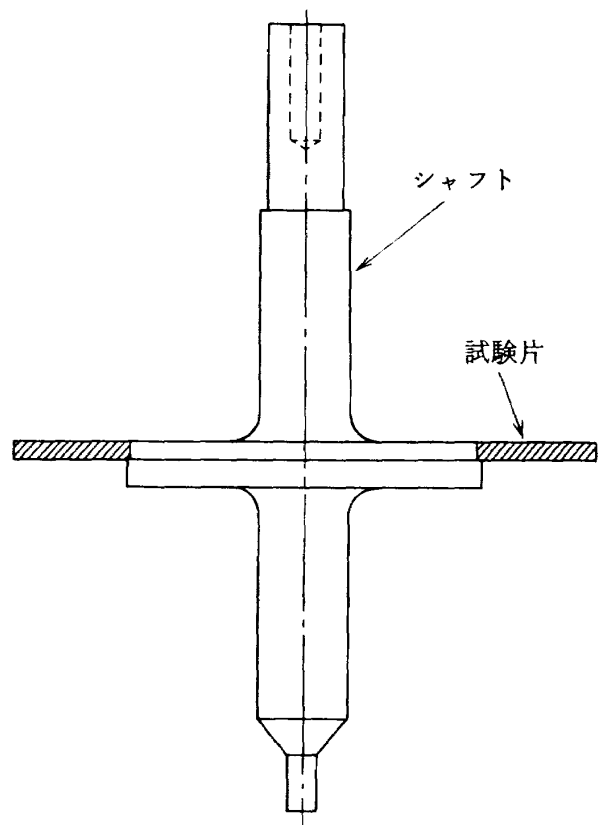


図4 回転試験

表 1 試 験 結 果

試 験		N	$\bar{\sigma}_b$	m	V_E	研 磨 方 向
三 点 曲 げ	全面研磨	40	55.4	9.2	1.3	=
引 張	〃	13	16.9	7.0	300.	⊥
引 張 (ノッチ付)	〃	10	32.6	7.4	13.2	⊥
	一部研磨	10	23.8	3.8		⊥
	研磨無し	9	28.8	9.1		
引 張 (円孔付)	全面研磨	10	31.4	6.9	2.9	=
	一部研磨	10	32.2	6.4		=
	研磨無し	10	36.7	7.3		
回 転	一部研磨	10	31.0	7.7	2050.	=
	研磨無し	8	27.6	11.0		

Notation

N ; 試験片の個数, $\bar{\sigma}_b$; 平均破壊応力 [kg/mm²]

m ; ワイブル係数, V_E ; 有効体積 [mm³]

研磨方向 ; (= ; 主引張応力に平行, ⊥ ; 主引張応力に直角)

片を軟鋼製の段付シャフトに取り付け回転試験を行い、破壊回転数を計測した。スピンプットの内部は約 0.1 mmHg に減圧されているので試験片とシャフトとの間のすべりは起きにくい、念のため接着テープですべりどめをした。回転試験の場合、良好な遠心破壊を実現させるためには、試験体の回転バランスが重要となる。今回使用した試験体は焼結後の表面加工を省略したため若干変形した試験片もあり、必ずしも回転バランスは良いとは考えられないが、特に試験中振動等の不具合を生じた試験片はなかった。これには、治具として用いたシャフトの質量が大きく、かつシャフト自身のバランスが良いため、質量の小さい試験片のアンバランスは回転体全体のバランスに対してあまり影響を与えなかったものと思われる。なお、回転中の試験体の挙動はスピンプット上部の監視窓から観察することができる。また、スピンプットの内部には破片の二次破壊防止と回収を容易にするため、紙とフェルトを積層した緩衝材を設置した。大部分の破片は緩衝材でキャッチされ、回収することができた。

4 実験結果

各試験の結果を一覧表にして表 1 に示す。表には

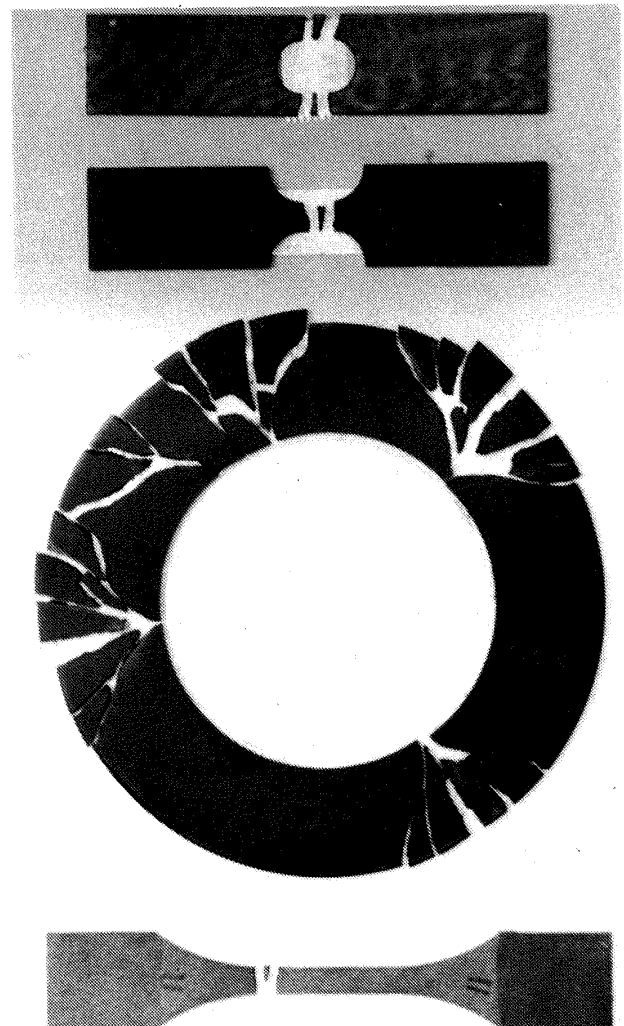


写真 1 破壊後の試験片

試験の種類、試験片表面の研磨状況、試験片の個数、強度の平均値、ワイブル係数、三点曲げ試験の結果を用いて算出した有効体積、試験片表面の研磨方向等を示した。また、破壊後の試験片を写真1に示す。

4.1 破壊強度

各試験の破壊強度には破壊時における試験片内の最大応力の値を採用した。セミラックスのような脆性材料の強度は部品表面および内部のき裂、空孔、不純物等の欠陥により左右されるので、最大応力の生ずる位置と破壊の起点は一致しないことが多い。しかし、通常は最大応力を破壊強さとして定義する。

曲げ試験の強度は $\sigma_b = 3\ell P / (2bh^2)$ により求めた。ただし、 ℓ 、 P 、 b 、 h はそれぞれ支点間距離、破壊荷重、試験片の巾および厚さである。引張試験の強さとしては、まず、通常の引張試験片(図1 a)では中央平行部の平均応力を取り、図1 b)、c) のような円孔付およびノッチ付試験片の場合は有限要素法によって応力分布を求め、円孔縁およびノッチ部の最大応力を破壊強さとした。回転試験の場合は次式により算出した。

$$\sigma_b = \frac{3 + \nu}{4} \rho \omega^2 (R_2^2 + \frac{1 - \nu}{3 + \nu} R_1^2) \quad (1)$$

ただし、 ρ : 密度、 ω : 角速度、 ν : ポアソン比、 R_1 : 内半径、 R_2 : 外半径。

各試験で得られた破壊強度を総ての試験片について表2に示す。試験結果の中で曲げ試験の結果は使用材料の代表的な強度である。したがって、曲げ強さの平均値とばらつきは材料の強度特性を調査するために基準となる結果である。

4.2 応力分布と有効体積

セラミック材料は元来材料内に欠陥が多く、各欠陥にはそれぞれ固有の強度が対応しているため、負荷を受けたとき、最初に強度の限界に達した欠陥から破壊が始まると考えられる。各欠陥の強度にはバラツキがあるので、応力の高い部分に最も危険な欠陥が対応するとは限らず低応力部にも破壊の危険は存在する。しかし、欠陥の種類、大きさおよび分布

状態は全くランダムであるから、一般的には応力が高く、かつその領域が広い場合にはより危険な欠陥が存在する確率が高いと考えるのが普通である。このようにセラミックスの強さは、応力の最大値のみでなく、その分布状態とも関係があり、また、応力分布と関連して応力領域の大きさも部品の強度に影響を及ぼす。

本試験で採用した二種類の引張試験および回転試験における応力分布を図5に示す。横軸は応力集中を生ずる断面の最大応力点からの距離を表わし、縦軸は応力とその断面の平均応力との比で表わした。縦座標軸上の黒丸印を示す数値は応力集中係数である。

曲げ試験の応力分布は中立面を境にして引張応力と圧縮応力に別れた直線分布であり、断面内の引張応力の領域は小さい。それに対して図1 a) の引張試験片では中央平行部の総てが一様な引張応力である。

応力分布の異なる試験片の強度を評価する方法として、前報でも検討したようにワイブルの統計解析が最も合理的であると思われる。ワイブルの破壊確率、分布関数は次式で与えられる⁶⁾

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left\{ - \int_v \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dv \right\} \quad (2)$$

ただし、 σ は領域内の応力を示し、 m および σ_0 は材料定数である。積分は引張応力の領域についてのみ行う。(2)式の [] 内は破壊の危険率を表わす。(2)式はワイブル統計の基礎式であり、応力分布および応力領域の異なる試験片の強度評価に利用される。

(2)式の [] 内を試験片内の最大応力 σ_b を用いて書き直すと次式の関係が得られる⁶⁾

$$V_E = \int_v \left(\frac{\sigma}{\sigma_b} \right)^m dv \quad (3)$$

V_E は破壊の危険率に比例しており、この値は小さい方が破壊は起り難い。(3)式から明らかのように、 σ が一定の場合は $\sigma = \sigma_b$ から V_E は積分領域の体積に等しい。また σ の分布が等しい二種類の試験片では積分領域即ち体積の大きい方が V_E は大きくなる。つまり(3)式は危険率に対する寸法効果を表わしてお

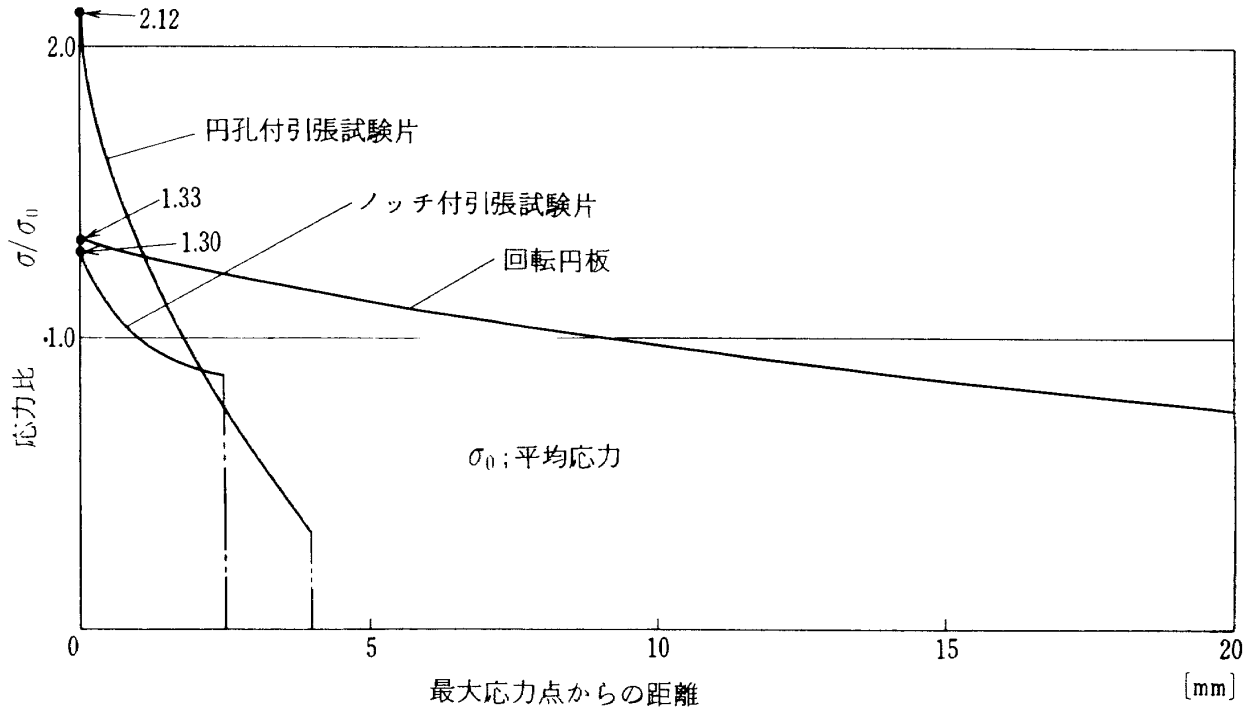


図5 引張試験片及び回転試験片の応力分布

り、体積が大きくなると破壊の危険率は高くなり強度は低下する。以上のように V_E は試験片内の応力分布および応力領域と破壊強度との関係を表わし、かつ試験片の寸法効果を破壊確率論的に説明できる特性値と見なされることから、この V_E は試験片の有効体積と呼ばれる。⁶⁾ 各試験片の有効体積の値は表1に示してある。三点曲げ試験の有効体積は、応力分布が座標の関数として与えられるので(3)式の積分を行うことにより、 $V_E = V / \{ 2(m+1)^2 \}$ が得られるので、これより算出できる。ただし、 V および m はそれぞれ試験片の支点間の体積および曲げ試験の結果から得られるワイブル係数である。なお、ワイブル係数 m は前報¹⁾と同様に(2)式を用いて、最ゆる推定法により求めた。曲げ試験のワイブル係数 $m = 9.2$ は本報で使用した焼結体の材料定数である。ところで、ノッチ付試験片および円孔付試験片の引張試験の場合と円輪の回転試験の場合には応力分布が複雑になり(3)式の積分が困難になるため有限要素法により有効体積を算出した。

4.3 強度評価

前節で述べたようにセラミックスの強度は、部品内に生ずる応力集中を考慮して求められる最大応力

のみで決まるものではなく、最大応力点付近の比較的応力の高い領域の広さにも影響される。したがって最大応力および応力領域の両者を考慮して導出された有効体積の概念を利用することは、各試験片の強度さらにはセラミック部品の強度を評価するために有効な手段と考えられる。

形状、寸法および負荷方式の異なる二種類の試験片強度と有効体積との間には、両者の破壊確率を等しいとすると次式の間係が成立する。⁶⁾

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \left(\frac{V_{E2}}{V_{E1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

(4)式は応力分布および大きさの異なる試験片または部品間の強度の関係を表わしており、代表的な標準試験の結果を用いて、他の試験片またはもっと複雑な形状の部品の強度を推定することができる。

(4)式のワイブル係数 m の値は表1に示すように各試験片によってばらつきがあるが、前節で述べたように曲げ試験のワイブル係数 9.2 を材料定数として使用する。

各試験結果について、有効体積と破壊強度の関係を示すと図6のようになる。それぞれ強度の平均値とばらつきを示す。図中●印は板材から削り出し全

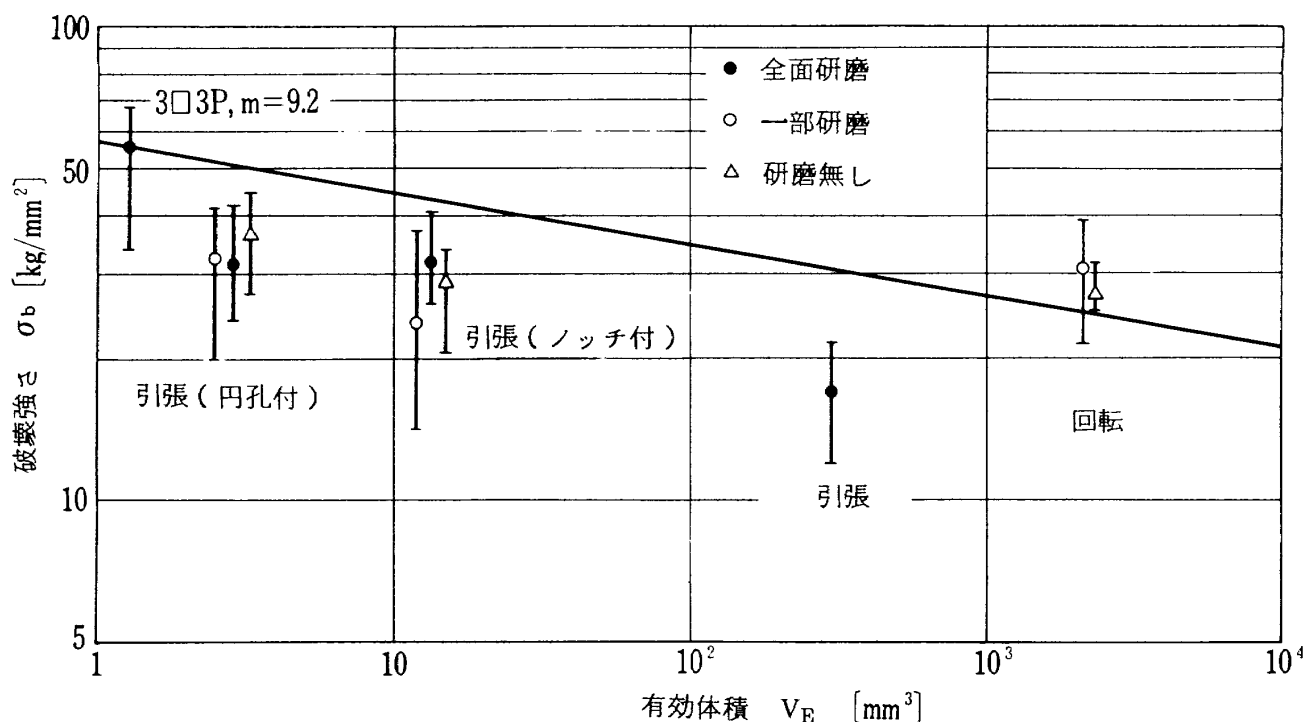


図6 有効体積と強度の関係

表面を研磨加工したものであり、○印は応力集中の生ずる部分の表面のみ研磨したもの、即ち、ノッチ付試験片のノッチ部側面、円孔付試験片の円孔縁および回転試験片の内周面等のみ研磨したものである。△印は焼成のままの試験片である。上記三種類の試験片は表面状態は異っても有効体積は等しい。図6ではそれぞれの強度のばらつきを明確にするために区別してプロットした。また、図中の3□3Pは3mm角棒の三点曲げ試験の結果である。そして3□3Pの平均値(黒丸印)を通る斜線は、標準強度試験として採用した曲げ試験の結果を用いて(4)式から求められた有効体積と平均強度の関係を表わす線である。斜線の勾配は(4)式から明らかなように $-1/m$ (ただし、 $m=9.2$)である。前述のように上記の3□3Pを通る斜線は他の試験片および同材質で製作される部品の強度を予測する線となっている。

図6より明らかなように、曲げ試験からの強度予測は、回転試験では若干安全側にあり、引張試験ではかなり危険側になる。強度予測に誤差を生ずる原因として種々考えられ、詳細は後述するが、現在は未だ材料開発の段階であり、素材から機械部品に至るまでには多数の最適加工条件の設定が必要となるので、現段階ではやむをえないことかもしれない。

4.4 表面研磨と研磨方向の影響

試験片の表面粗さの強度に対する影響は、表面粗さを種々変えて行われた曲げ強さ試験によって確認されている。⁷⁾⁸⁾そして高級密質セラミックスの場合は表面粗さ $1\mu\text{m}$ 程度までは強度の向上が見られるが、それ以上細かくしても強度は向上しないことも知られている。また、研磨の方向と強度の関係については、研磨方向と試験時の主引張応力の方向が平行の場合と直角の場合とでは強度に差が生ずることが曲げ試験により確認されており、直角研磨の場合は平行研磨の強度に比して約20%低下する。

上記の表面粗さと強度の関係は、総て角棒の曲げ試験により確認された特性である。曲げ試験では試験片断面内の応力勾配が大きく、破壊は殆んど引張側表面から起るので、表面粗さの影響が大きくなることは十分予想できる。しかし、断面内の応力が一様な引張試験の場合には、曲げ試験に比して表面粗さの影響を受けないと考えられる。このことは、引張破壊後の破面に見られる破壊の起点が試験片表面より内側に存在することが多いことでも推測できる。

以上のように、部品の表面粗さおよび研磨方向は負荷を受けたときの部品強度にかなり影響を与えることは確かであり、そのために機械部品の製作に

当り、表面の研磨加工が加工費用ともからんで重要な問題である。

本報で製作した円孔付およびノッチ付引張試験片には表面の加工条件が三種類異なる試験片を使用し、回転試験片には二種類用いた。加工条件の相違による強度の違いは表1および図6で明らかのように、二種類の引張試験の結果に関する限り、表面加工および研磨方向の強度に対する影響は明確に表われない。例えば、円孔付引張試験片は主引張応力方向に平行に研磨されているが、三種類の中で最も強度の大きいのは、研磨加工をしなかった試験片であり、ノッチ付試験片では、直角方向研磨であるが、三種類の中で全面研磨の試験片が最も強く、一部分研磨した試験片は他のものに比べて極端に弱い。

以上のように円孔付およびノッチ付引張試験では、研磨の方向または研磨の有無と強度は殆んど無関係のように思われるが、回転試験では平行研磨でもあり、明らかに研磨の効果が表われている。このような研磨効果の差が何に起因するののかは、加工法と合わせて今後検討すべきことと考えられる。ただ、本結果から判断するかぎり、比較的小さい曲率半径を有する部品では研磨の有無は部品強度にあまり影響を及ぼさないことが推測される。

5 考 察

曲げ試験の結果から得られたワイブル係数および平均強度を用い、他の試験片の強度を予測する方法が引張試験に対してかなり危険側になったことは、前報¹⁾のホットプレス窒化珪素および反応焼結窒化珪素²⁾での予測強度に対するばらつきの原因と違って、かなり重要な意味をもっているように思われる。ホットプレス材は焼結加工時の条件の設定が他の焼結法と比較して容易であると見られ、また反応焼結材の方は焼結時に収縮が起きないので形状の複雑さは、差程影響しないように思われる。しかし、本報で使用した常圧焼結材は焼結時に10~20%の収縮が起るので焼結体の形状によって強度が変化することが考えられる。常圧焼結材は原料粉末を形成した後、仮焼成と本焼成の二回の焼結工程が行われるが、本報の試験片は仮焼成後本焼成時の収縮を見込んだ寸法に加工され、本焼成後は表面の研磨のみ行

うことにしたので、本焼成後加工しなかった試験片には、寸法にばらつきがあり、若干の曲りやねじれを生じていた。このような焼成時の変形は、材料の不均質または材料固有の結晶異方性による収縮率の相違あるいは、焼成炉内の温度、雰囲気等のばらつきが原因と考えられ、焼成過程中的に一律な収縮を期待するのは現段階では無理のようである。このように異方性収縮をするとすれば、当然焼結時には内部応力を生じ、焼結後残留応力として内部に残るであろうことは予想される。また内部応力によってき裂の発生もあり得る。本試験に用いた円孔付およびノッチ付試験片の強度が表面研磨の有無や研磨方向に無関係になった原因として、上記の収縮異方性による残留応力の発生および異形状によるき裂の発生等が考えられ、単純形状の試験片には表われなかった大きい欠陥が導入され、もはや研磨加工では除去できないような固有の欠陥のために、研磨に無関係に予測よりも低い強度を示す結果になったものと思われる。引張試験片の中で単純な試験片(図1のa))の場合は、上記の試験片と異なり異形状による欠陥の発生は少ないと予想されるので研磨方向を直角にしたための影響が強く表われ、予測強度より低くなったものと考えられる。回転試験片の強度予測が良く合うことについては、円孔付およびノッチ付引張試験片に比べて寸法が大きいため、焼結時の異形状の影響が緩和されること、および研磨方向が主引張応力方向(円板の周方向)と平行であるなどのため、焼結加工によって生じた欠陥およびそれに対する表面研磨の効果が曲げ試験片と同様な状況になっていることが理由として考えられる。回転試験片には内周を研磨したものとしいないものを採用した。両者の強度を比較すると平均値は研磨した試験片の方が大きい、ばらつきは焼結のままの試験片の方が小さい。この場合、研磨加工は平均強度を上昇させることには役立っているが、逆に強度のばらつきを大きくさせている。

以上述べてきたように円孔付およびノッチ付試験片のように比較的小さい曲辺部をもつ試験片については、他の試験片と比較して試料内に潜在する欠陥の大きさおよび分布状態が異なっていることが予想される。即ち、ワイブル統計で対象とする材料内の

欠陥が単純試験片と異形状試験片とでは、種類が異なるため、同一の破壊確率分布関数を適用することには無理があると思われる。したがって形状の単純な曲げ試験片の結果から形状の複雑な部品の強度を予測することには本質的な矛盾があるのかもしれない。形状の複雑さと部品の強度の関係について系統的に行われた研究はないようであるが、複雑な形状のラジアルタービンロータの回転試験⁹⁾の結果において、ロータの回転強度を同材質の曲げ試験の結果を用いて予測することにはかなりの誤差を生ずることが報告されている。そしてロータ強度の破壊確率は一つのワイブル分布には従わず、低強度および高強度の二つのグループに弁別され、それぞれのグループでの破壊確率がワイブル分布に従うことが確認されている。このように常圧焼結法によって複雑な部品の製作を計画する際には、単純形状の試験片で行われる強度試験の結果をそのまま利用することには無理があるので、新たに部品の複雑さの影響が調べられる試験片を用いて強度試験を行うべきであろう。そのため、段付角棒の曲げ試験、本報で採用した円孔付あるいはノッチ付試験片の曲げまたは引張試験などは、試料の製作費および試験の容易さの面で比較的良い方法ではないかと思われる。勿論、今後材料開発が進み、焼結技術が改良されて複雑部品も単純部品と同様な強度特性が得られるようになれば上記のような問題はなくなるであろう。

6 あとがき

将来の複雑な機械部品材料として期待される常圧焼結の窒化珪素を用い、機械部品を対象とした強度試験を行った。本報で採用した円孔付およびノッチ付試験片は、実用機械部品には多数存在する応力集中部を対象としているが、ただ単に応力集中による強度変化を問題としたのではなく、焼結部品の強度に対する形状の複雑さの影響をも調査の対象とした。

各試験で得られた結果にワイブルの統計解析を適用し、曲げ試験を基準試験として強度評価を行った結果以下のような結論が得られた。

1) 円孔付およびノッチ付試験片の引張強度は曲げ試験の結果から予測される強度に比べてかなり低い。

2) 上記試験片の強度は試験片表面の研磨の有無および方向には無関係である。

3) 回転試験の結果は曲げ試験の結果と対応しており予測強度とよく合う。

4) 円孔付およびノッチ付試験片の引張試験と円輪の回転試験との比較から、窒化珪素の常圧焼結部品では、曲辺部の曲率半径の大きさによって強度を支配する欠陥の大きさあるいは分布が異なる可能性があることが推論される。本結果によれば、曲率半径5~6mmと30mmとでは明らかな相違が推測された。

5) 円孔とかノッチ等は形状変化としてはわずかであるにもかかわらず、そのような応力集中をもつ部品の強度が単純な曲げ試験の結果と対応しないことは、現在材料開発の段階とはいえ、今後の部品製作上かなり重要な研究課題を提供しているように思われる。

参 考 文 献

- 1) 松末勝利, 高原北雄, 橋本良作; 窒化珪素ホットプレス材の常温強度評価試験; 航空宇宙技術研究所報告, T R.676,(1981).
- 2) 松末勝利, 高原北雄, 橋本良作; 炭化珪素常圧焼結材および窒化珪素反応焼結材の常温強度評価試験, 同上T R.678,(1981).
- 3) 松末勝利, 高原北雄, 橋本良作; ホットプレス Si_3N_4 の常温強度試験, 窯業協会誌, Vol. 90, No.1040,(1982, 4), p.168.
- 4) 松末勝利, 高原北雄, 橋本良作, 常圧焼結 SiC 及び反応焼結 Si_3N_4 の常温強度試験, 窯業協会誌, Vol.90, No.1040,(1982, 5).
- 5) F.F. Lange; High-Temperature Strength Behavior of Hot-Pressed Si_3N_4 : Evidence for Subcritical Crack Growth, J.Am. Ceram. Soc., Feb. (1974), P. 84.
- 6) D.G.S. Davis; The Statistical Approach to Engineering Design in Ceramics, Proc. Bric. Ceram. Soc., No. 22, (1973).
- 7) M. Kawai, H. Abe, J. Nakayama; The

effect of Surface Roughness on the Strength of Silicon Nitride, Inter. Symp., 10 (1978), Hakone.

- 8) 落合俊彦, 中村清, 西田勝利, 小松通泰; 高強度窒化珪素焼結体, 東芝レビュー, Vol.34,

No. 9, (1979).

- 9) 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; 日本ガスタービン学会誌, Vol.9, No. 36, (1982, 3), p.48.

表2 各試験片の破壊応力

注 NO; 試験片の個数, ℓ ; スパン(mm)

$\bar{\sigma}_b$; 平均破壊応力(kg/mm²)

m; ワイブル係数

【三点曲げ】 3×4 , $\ell = 30\text{mm}$, $\bar{\sigma}_b = 55.4\text{kg/mm}^2$, $m = 9.2$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1-1	62.5	5-1	40.0	9-1	45.0	13-1	58.2	17-1	61.2
1-2	56.5	5-2	46.3	9-2	56.0	13-2	55.5	17-2	59.8
2-1	41.8	6-1	49.5	10-1	60.3	14-1	53.8	18-1	46.0
2-2	50.3	6-2	59.2	10-2	49.3	14-2	52.8	18-2	60.7
3-1	66.3	7-1	56.2	11-1	34.0	15-1	57.3	19-1	56.5
3-2	48.0	7-2	52.7	11-2	54.7	15-2	64.0	19-2	57.5
4-1	58.0	8-1	56.7	12-1	68.3	16-1	66.3	20-1	61.8
4-2	63.7	8-2	63.2	12-2	61.3	16-2	52.7	20-2	54.0

【引張】 $\bar{\sigma}_b = 16.9\text{kg/mm}^2$, $m = 7.0$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	17.9	5	11.9	8	21.5	11	18.1	14	14.9
2	19.2	6	15.1	9	17.3	12	19.1		
3	15.2	7	20.6	10	13.9	13	14.4		

【引張, 円孔付】(全面研磨) $\bar{\sigma}_b = 31.4\text{kg/mm}^2$, $m = 6.9$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	28.8	3	29.7	5	32.9	7	31.0	9	35.0
2	32.2	4	41.8	6	30.7	8	28.3	10	24.0

【引張, 円孔付】(一部研磨) $\bar{\sigma}_b = 32.2\text{kg/mm}^2$, $m = 6.4$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	19.9	3	36.3	5	26.5	7	30.7	9	26.5
2	33.4	4	33.5	6	41.1	8	39.2	10	35.1

【引張, 円孔付】(研磨無し) $\bar{\sigma}_b = 36.7\text{kg/mm}^2$, $m = 7.3$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	45.4	3	40.0	5	34.3	7	32.7	9	37.5
2	43.2	4	42.9	6	30.9	8	27.3	10	32.8

【引張，ノッチ付】（全面研磨） $\bar{\sigma}_b = 32.6 \text{ kg/mm}^2$ ， $m=7.4$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	39.5	3	40.6	5	30.9	7	34.8	9	28.0
2	35.6	4	27.2	6	32.8	8	30.3	10	26.0

【引張，ノッチ付】（一部研磨） $\bar{\sigma}_b = 23.8 \text{ kg/mm}^2$ ， $m=3.8$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	30.6	3	31.4	5	29.4	7	18.5	9	19.6
2	14.1	4	21.7	6	20.2	8	14.9	10	37.3

【引張，ノッチ付】（研磨無し） $\bar{\sigma}_b = 28.8 \text{ kg/mm}^2$ ， $m=9.1$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	28.7	3	32.0	5	30.0	7	23.2	9	27.6
2	20.7	4	34.2	6	30.5	8	31.9		

【回 転】（一部研磨） $\bar{\sigma}_b = 31.0 \text{ kg/mm}^2$ ， $m=7.7$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	35.5	3	34.5	5	30.0	7	21.6	9	29.1
2	29.5	4	34.0	6	25.9	8	31.0	10	38.8

【回 転】（研磨無し） $\bar{\sigma}_b = 27.6 \text{ kg/mm}^2$ ， $m=11.0$

NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b	NO	σ_b
1	25.0	4	31.5	6	27.7	8	25.4
3	26.8	5	26.8	7	32.0	9	25.9

航空宇宙技術研究所報告715号

昭和57年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)千182

印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12

Printed in Japan