

# 第15回 セラミックばね

日本発条株式会社 齋藤 慎二

## 1. セラミックスの特徴

陶磁器、ガラス、耐火物、研磨材などに代表されるセラミックスは、金属やプラスチックと並んで、日常生活に欠かすことのできない身近な材料である。金属材料やプラスチック材料にはない、セラミックスならではの特長には、耐熱性、耐摩耗性、耐食性(化学安定性)、電気絶縁性などがあり、このような性質が求められる様々な環境で、耐火物、摺動部品、コーティング材、碍子などの様々な形態で用いられている。

一方、皿を床に落としたことのある誰もが身をもって知っているように、セラミックスは硬く脆い。セラミックスでできた品物に外力を加えた場合、ほとんど、あるいはまったく変形せずに破壊にいたる。このような材料を大きな変形を利用するばねに用いるなど、とうてい不可能なことに思われる。

しかし、人工的に合成した高純度の原料とよく制御された製造法によって、強度と信頼性を飛躍的に向上させた、いわゆるファインセラミックスの登場により、セラミックスをばねにすることも可能になった。

## 2. ばね材料用セラミックス

セラミックスにはアルミナに代表される酸化物、窒化けい素やサイアロンなどの窒化物、炭化けい素などの炭化物など多くの種類があるが、強度が高く、弾性変形域が広い、というばねに適した性質をもつ材料は限られたものとなる。これまで、セメントやアルミナではばねが作られたこともあるようだが、現在のところ、実用的なばねの材料として用いられているセラミックスは、ジルコニア(PSZ)と窒化けい素( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )の2種類のみである。図1にこれら2種類のセラミックスの高温強度を示す。比較のために、金属材料(ステンレス、インコネル)の強度も併記した。

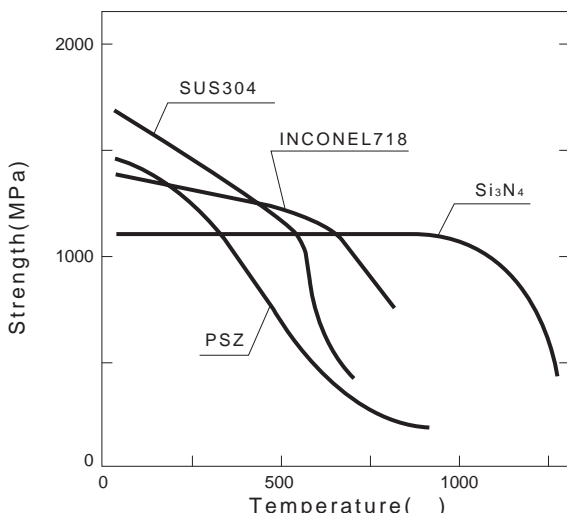


図1 各種材料の高温強度

## (1) ジルコニア (PSZ)

PSZは部分安定化ジルコニアの略称で、一般にジルコニアという場合はこのセラミックスをさすことが多い。白色で高強度のセラミックスであり、20年ほど前に流行したセラミック包丁やセラミックはさみなどはすべてこの材料で作られていた。

PSZは、ジルコニウム( $\text{Zr}$ )の酸化物であるジルコニア( $\text{ZrO}_2$ )に、イットリア( $\text{Y}_2\text{O}_3$ )、カルシア( $\text{CaO}$ )などを微量に添加して得られるセラミックスである。 $\text{Zr}$ と $\text{O}$ だけからなる純粋なジルコニアは、1100 付近と2300 付近とに変態点をもち、低温相、中温相、高温相の3種類に変態する。このうち、中温相から低温相への変態は体積膨張を伴うので、焼結時の高温から室温への冷却の際にばらばらに破壊してしまい焼結体が得られない。そこで、安定化剤と呼ばれるマグネシア( $\text{MgO}$ )、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ などを添加し室温まで高温相のままとなるようにした、いわゆる安定化ジルコニアとして耐火物や酸素センサーなどに使用されてきた。しかし安定化ジルコニアは強度が低いため、ばねに限らず構造部材として使用するのには適さない。

これに対し、製造法の工夫によって、高温相中に中温相粒子を分散させるように調製した材料がPSZである。PSZ中の中温相は外力が加わると低温相へと変態し、この変態によって外力のエネルギーを吸収するので、1000~1500MPaというセラミックス材料としては非常に高い強度をもつ。

このように強度が高いことと、セラミックスとしては弾性率が低い(約200GPa)ことから、PSZはばねに適した材料となっている。しかし、図1に示すように、PSZの強度は温度の上昇とともに急激に低下してしまう。これは上述の相変態による強化機構が高温では働かなくなることによる。このため、PSZ製のばねは、セラミックスが最も求められる高温環境下で用いられることはあまりなく、耐化学薬品性や電気絶縁性が求められる分野で主に使用されているようである。

## (2) 窒化けい素 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

非酸化物系セラミックス中で最も高い1000MPa程度の強度をもつ材料が $\text{Si}_3\text{N}_4$ である。焼結体は暗灰色で、とくに耐熱性と耐摩耗性に優れる。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ は単体では非常に焼結しにくいので、適当な焼結助剤を添加して液相焼結を行うのが一般的である。これまでに数多くの系が焼結助剤として開発されてきたが、現在は $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 系が広く用いられている。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ には型、型の2種類の結晶型があるが、焼結体の原料として用いられるのは型- $\text{Si}_3\text{N}_4$ である。これに $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 系の焼結助剤を添加して焼結を行うと、球状の型- $\text{Si}_3\text{N}_4$ が柱状の型- $\text{Si}_3\text{N}_4$ に変態し、この結晶粒が相互に絡み合った微構造が得られる。この形状の効果

によって高い強度と靱性がもたらされる。

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の弾性率は約300GPaであり、金属材料に比べ大きい。強度が高いために弾性変形できる領域が広く、ばねとして使用することが十分可能である。また、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の最も優れた特性は、図1にみられるように1000 程度の高温まで強度が保たれることである。さらに、熱伝導性が高く熱膨張率も小さいことから、耐熱衝撃性にも優れる。したがって、金属材料やPSZが使用できない700 以上から1000 程度の高温での応用に極めて適している。

しかし、1000 を超える高温では、結晶粒界の軟化が起こるといった欠点がある。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の結晶粒界には、焼結助剤がガラス相として残存し、このガラス相が高温で軟化してしまうため、図1にみられるように約1200 以上では強度が大きく低下する。つまり、ばねとして用いた場合にはへたりが発生することになる。

### 3. 窒化けい素セラミックばね

前述のように、インコネルなどの耐熱合金でも対応できない、約700 以上の高温での使用を目的として開発されたのが窒化ケイ素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) セラミックばねである。

セラミックばねは、他のセラミック製品と同様に、原料粉末を成形し、それを焼結することによって作られる。図2にセラミックばねの製造工程を示す。原料粉末を焼結助材とともに混合、可塑性のある線材に押し出し成形し、これを金属ばねと同様にコイルリング、焼結することによりコイルばねができる。必要に応じて両端末を平面にする加工が施される。

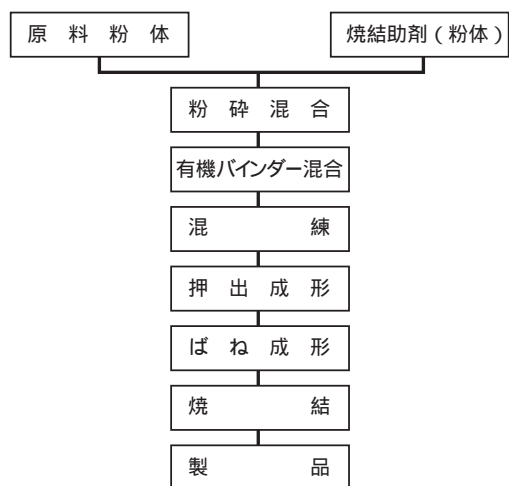


図2 セラミックばねの製造工程

セラミック部材の強度は欠陥感受性が高く、また、ばねでは変形時の最大応力が表面に作用するので、セラミックばねにおいては表面の欠陥を極力小さくかつ少なくすることが特に重要になる。押出工程での欠陥導入を抑制すること、焼結時の熱分解による表面荒れを抑制すること、研削加工による微小き裂の発生を抑制

制すること、などが必要とされる。

セラミックばねの高温強度特性を図3に示す。1000 (1273K)まで破壊強度の低下はみられず、室温と同等の強度が保たれることが示されている。また、疲労特性に関しても、大気中1000 での10<sup>7</sup>サイクルの繰返し疲労試験において250 ± 130MPa程度の疲労強度を有する。これらの結果は、セラミックばねは使用条件に応じて安全率を十分に考慮すれば約1000 の高温までばねとして完全に機能するというを示している。

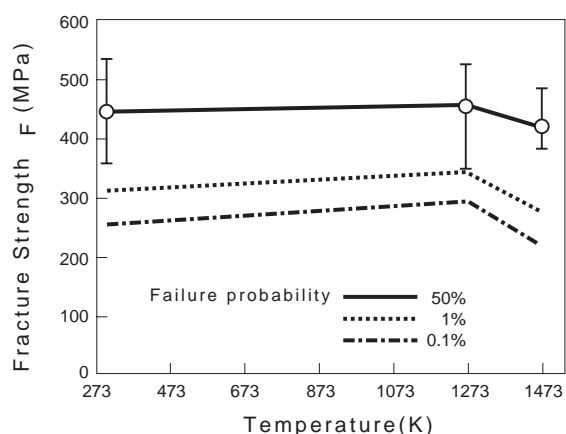


図3 セラミックばねの高温強度

セラミックばねは、主にろう付熱処理やガラス融着処理の部品固定用治具として用いられてきた。ばねによって接合部に適当な荷重が付加されるため、接合率が向上し不良率が低減される効果がある。同様の効果はおもりの用いた治具によっても得られるが、セラミックばねを用いた場合、治具全体の熱容量をはるかに小さくすることが可能で、加熱に必要なエネルギーと時間が低減され生産性が向上する。図4に、セラミックばねを用いたろう付治具の一例を示す。また、その他の用途として、ガスタービンエンジン、燃料電池、高周波関連機器など耐熱性や耐食性を活かした用途への応用も検討されている。



図4 セラミックばねを用いたろう付治具