

氏 名	足 立 岳 志
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 3 月 28 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	無機系構成材料の疲労挙動に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 前川 一郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 阿部 博之 東北大学助教授 横堀 寿光

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

セラミックス材料の力学特性の解明には、動疲労、静疲労、繰返し疲労試験が主に行われている。本論文では、同一材料でこれらの試験を系統的に行い、力学特性を明らかにした。また、セラミックス材料の加工性の向上、強度特性の解明には、変形機構を調べることも重要である。そこで、従来行われていない、応力緩和試験、内部摩擦の測定を新たに行い、強度特性のみならず、変形機構も明らかにした。さらに、繊維強化複合材料として用いられったり、PZT バイモルフのような機能材料として使用された時の力学特性についても検討し、強制外力によるセラミックス単体の力学特性との相違を明らかにした。

第 2 章 アルミナセラミックス材料の疲労特性

アルミナセラミックス平滑材の動疲労特性は図 1 のように得られた。応力速度の増加と共に強度は増加するが、水中の方が強度は低く、応力速度依存性も小さくなっている。一般に、セラミックス材料の破壊挙動は水分による腐食作用によって説明される。しかし、腐食作用であるならば、水中の方が顕著な応力速度依存性を示し、本結果とは異なる特性でなければならない。この特性の相違を調べるために、応力緩和試験、内部摩擦の測定を行った。その結果、図 2 に示すようにアルミナセラミックス材料は明らかに応力緩和を生じ、水中の方が顕著な緩和を示し、緩和時間は短くなっ

た。さらに、内部摩擦の測定結果からも、大気中よりも湿潤空気の方が緩和時間は短くなり、アルミナセラミックス材料は粘弾性的性質をもつと考えられた。図3に示す粘弾性モデルを用いた解析結果からも、緩和時間を短くすると、すなわち、応力-歪の応答において歪の遅れが小さくなると、応力速度依存性が減少することが示され、図1の結果と一致した特性を導くことができた。したがって、アルミナセラミックス材料は粘弾性的性質を有し、平滑材の力学特性は粘弾性効果によって説明できることを示した。したがって、従来指摘されている水分の腐食作用はき裂材についてあてはまるものの、本来はアルミナセラミックス材料は粘弾性的性質を有し、平滑材では後者に律速されることがわかった。

また、繰返し疲労試験を行った結果、高繰返し速度条件ではアルミナセラミックス材料においても繰返しの効果が明らかに存在し、繰返し疲労寿命は遷移領域を経て、時間依存機構から繰返し数依存機構へ遷移することがわかった(図4)。

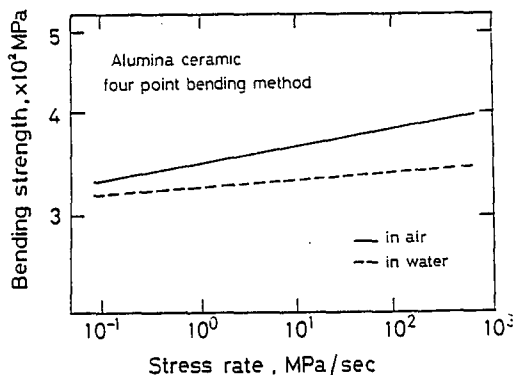


図1 曲げ強度の応力速度依存性

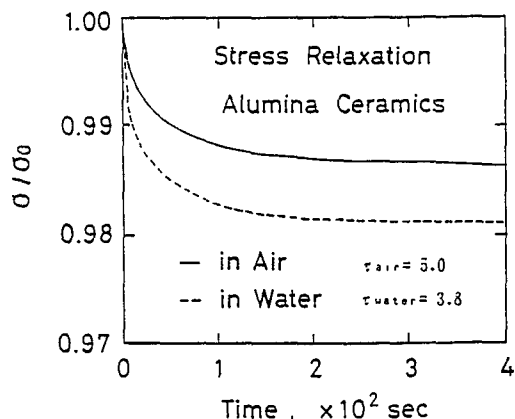


図2 応力緩和特性

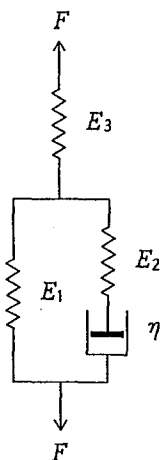


図3 粘弾性モデル

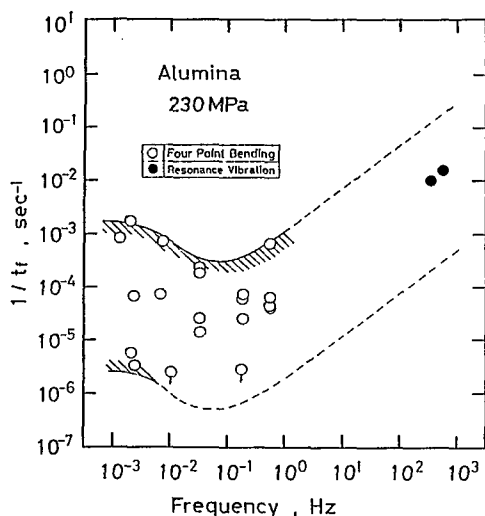


図4 繰返し疲労特性

第3章 炭化珪素の疲労特性

大気中の動疲労特性は、アルミナセラミックス材料と異なり、応力速度の増加とともに強度が減少する(図5)。この特性は脆いとされる材料に見られる。ところで、応力緩和試験、内部摩擦の測定を行っても、粘弾性的性質は得られなかった。SEM観察によると、低応力速度では破壊起点の近傍は凹凸が多い破面となっているのに対し、高応力速度では破壊起点以外は平坦なファセット状の破面となっていた。このような破面の相違は図5に示す動疲労特性に対応しており、破壊形態の違いが強度特性に影響を及ぼしたものと考えられる。ところで、大気中の静疲労及び繰返し疲労実験においては、有限時間で破壊を生じたものは少なかった。したがって、炭化珪素の破壊には時間依存型機構及び繰返し数依存機構のどちらも影響を及ぼさないと考えられる。以上より、炭化珪素は静疲労及び繰返し疲労を起こしにくい材料であり、強度的ばらつきも大きいことから、アルミナセラミックス材料のように寿命評価を行うのは困難である。しかし、破断歪は環境、応力速度の影響を受けず一定であり、しかもばらつきは強度に比べて小さいことがわかった(図6)。したがって、本材料を工学的に应用する際は、応力制御ではなく、歪を制御する形で用いることが適切であるといえる。

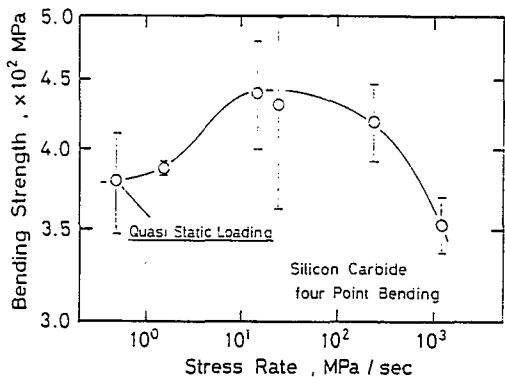


図5 曲げ強度の応力速度依存性

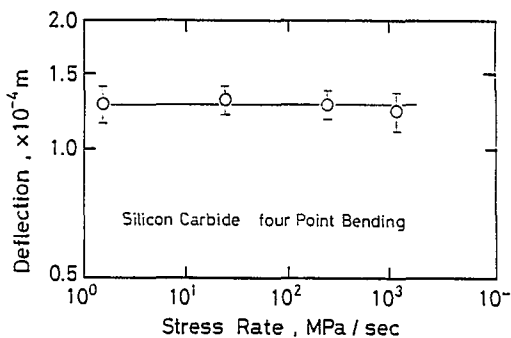


図6 破断時のたわみの応力速度依存性

第4章 ガラスおよびガラス繊維強化複合材料の疲労特性

本章では、ガラスを短繊維強化材として用いた場合の疲労特性を調べた。ガラス短繊維強化複合材の繰返し疲労試験結果を図7に示す。ガラス繊維が荷重方向に対して平行な0°試験片は母材に比べて疲労寿命が長く、ガラスによる補強効果が顕著となる。また、0°の破壊は繰返し数依存機構に律速される。それに対して45°、90°は繰返しの効果はあまり顕著ではなかった。ところで、本章でガラスそのものの繰返し疲労試験を行い、ガラス材料は時間依存型の破壊を起こすことを示した。また、母材であるポリカーボネイトは若干繰返し数依存機構がある程度で、0°試験片のような顕著な繰返しの効果は現れなかった。したがって、0°の破壊はガラスおよび母材の破壊機構に律速されるのではなくガラス繊維の引き抜けによる界面の剥離に律速されるものと考えられ、これが繰返し効果の影響を受けることがわかる。このことは、破面観察、FEMによる弾塑性応力解析からも確かめられた。すなわち、繊維強化複合材料はその効果により、補強効果は顕著であるが、

破壊機構は母材と繊維間の界面強度の影響をうけることを示した。

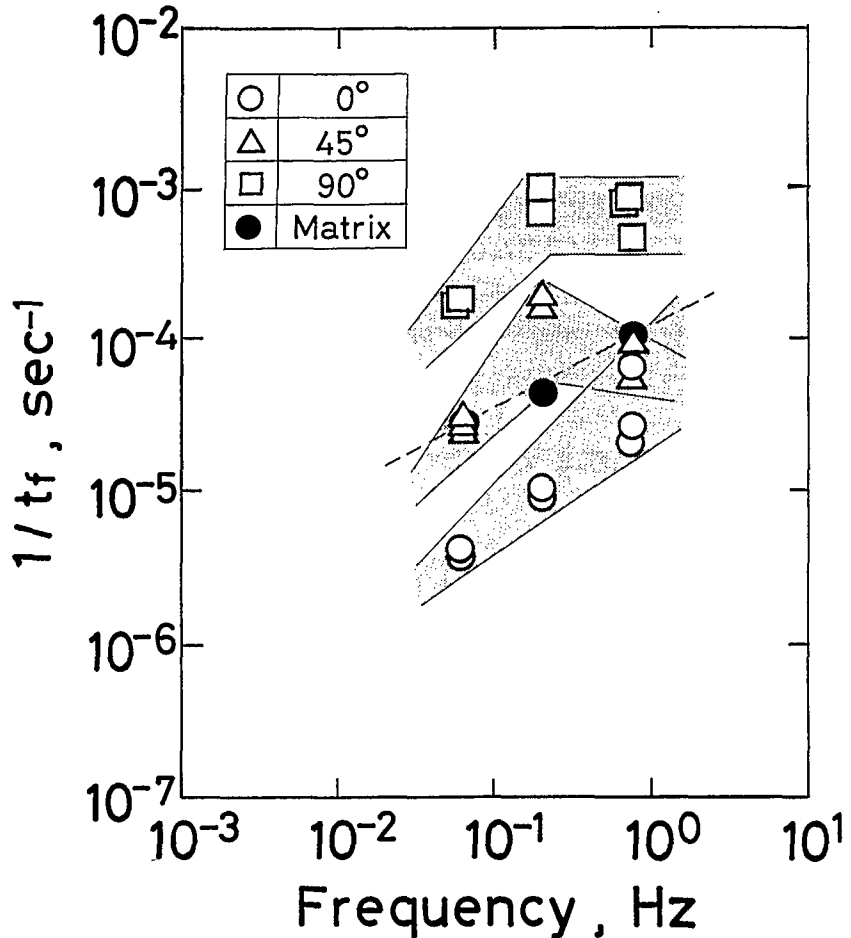


図7 繰返し疲労寿命特性の繊維方向による影響

第5章 PZT 材料の疲労特性

圧電セラミックス材料 PZT は前章までの材料とは異なり、圧電効果により PZT バイモルフの形で電氣的に駆動されるものである。このような機能材料として PZT を用いた PZT バイモルフの繰返し疲労寿命特性は、PZT 単体を力学的に強制振動させた場合と異なり、長寿命側に位置するのがわかった (図8)。ところで、PZT バイモルフの効率は内部摩擦特性によって特徴づけられるが、内部摩擦は力学試験である応力緩和特性と密接に関連していることを明らかにした。しかし、強度特性としての動疲労特性はこの様な緩和特性の相違による影響をうけず、破壊は等しく粒界割れであった。このため、上述した応力緩和特性は圧電効果をうけ持つ結晶自体の時間依存型変形特性に関わるものと考えられ、強度はこの様な特性とは関連しない粒界割れであることを示した。また、PZT 及び PZT バイモルフの疲労破壊も同じく粒界割れであった。したがって同じ様な破面である

にもかかわらず PZT と PZT バイモルフにおいて疲労寿命特性が異なった理由は、PZT が強制振動で粒界割れを起こしたのに対し、PZT バイモルフは電歪効果による結晶そのものの繰返し変形により粒界割れを起こしたためであり、このような負荷条件の相違に起因するものと考えられる。

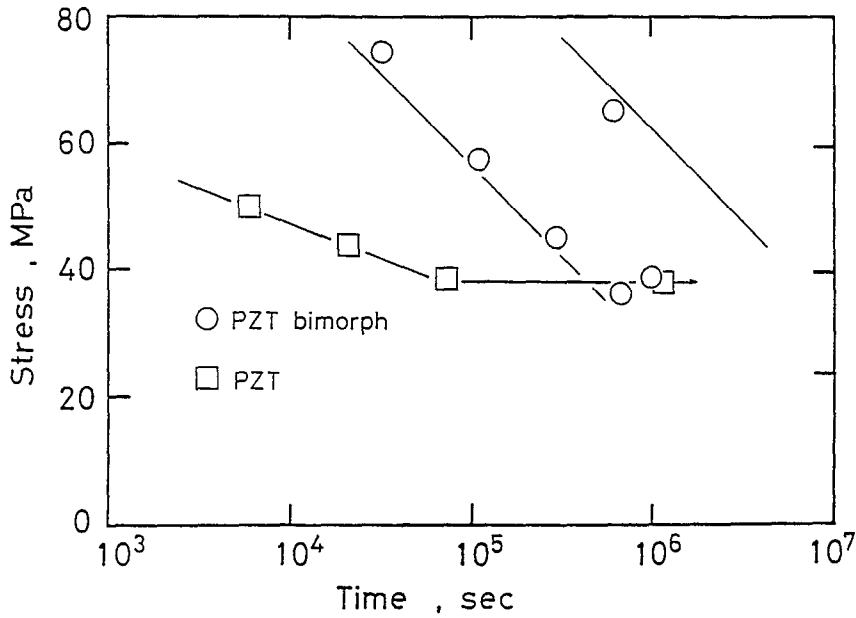


図8 PZT および PZT バイモルフの繰返し疲労特性

第6章 緒言

本章は結言であり、第2章から第5章までの主要な結果を要約したものである。

審査結果の要旨

無機系構成材料としてのセラミックス・ガラス材料は機能材料としてばかりではなく、構造材料としても広い利用が期待されている。しかし、脆性材料であるためその強度特性を明らかにしておくことは極めて重要である。

そこで本論文では、セラミックス単体及びその複合材料に対して、各種負荷形式の下での力学特性を系統的に研究して、力学的支配因子を解明したもので全編6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章は、アルミナセラミックスについて各種負荷形式下での実験を行い、アルミナセラミックスには粘性の効果が存在し、それが平滑材の時間依存型破壊機構の支配因子となっていることを明らかにしている。また繰返し応力下での破壊寿命特性は繰返し速度の増加とともに時間依存型機構から時間及び繰返し数の双方に依存する機構を経て、繰返し数依存型機構へ遷移することを明示した。これは寿命予測評価上重要な知見である。

第3章では、脆い材料で寿命予測が困難とされている炭化珪素について各種負荷の下で実験を行い、破断時の歪は実験環境及び力学条件によらず一定であることを明らかにしている。このことから炭化珪素は応力制御ではなく、歪制御の負荷形式で使用することが適切であるという新しい知見を得ている。

第4章では、ガラス材料が複合材料の繊維強化材として用いられた場合の繰返し疲労特性について実験的研究を行っている。その結果、疲労破壊寿命特性はガラスあるいは母相の疲労特性とは異なり、ガラス繊維の引き抜けに関した界面の疲労特性に支配され、ほぼ繰返し数依存型機構に従うことを示している。これは無機系材料を複合材料の繊維強化材として用いる場合の疲労寿命予測に対する重要な知見である。

第5章では、PZT パイモルフを用いることによって圧電効果に基づく負荷形式の検討を行っている。その結果、このような機能材料として繰返し応力が作用する疲労試験結果は、強制外力によるいわゆる材料力学的疲労実験の結果と異なることを示している。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、セラミックスの各種負荷の下での強度特性を明らかにして、強度の安全性評価に対する重要な知見を与え、さらに、繊維強化複合材料や機能材料として用いた場合の疲労機構を明らかにしたもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。