メカニカルシールにおけるアルミナしゅう動リングのき裂発生機構* (第2報, き裂発生熱応力と曲げ強度との関係)

小宮 誠^{*1}, 松田 健次^{*2}, 兼田 楨宏^{*2}

Mechanism of Surface Cracking of Alumina Ring in Mechanical Seals (2nd Report, Relationship between Thermal Stresses and Bending Strength)

Makoto KOMIYA, Kenji MATSUDA and Motohiro KANETA

In a previous paper, the authors proposed, on the basis of experiments and thermoelastic analyses, a mechanism of cracking characterized by deep through-cracks formed on the surface of an alumina ceramic ring of mechanical seals, and discussed preventive methods. That is, cracking is caused by thermally induced tensile circumferential stresses. Cracks originate at the edge of the seal face that is wet by the liquid being sealed, and propagate in the radial and axial directions through the alumina ceramic ring. However, bending strengths of alumina ceramics measured at room temperature were two to three times larger than the calculated values. In this study, the cause was investigated. As a result, it has been clarified that the strength of the alumina ceramic ring is decreased by boiling water and surface defects produced during the finishing process.

Key Words: Tribology, Thermocracking, Mechanical Seal, Alumina Ceramics, Thermal Stress, Bending Strength, Finite-Element Method

1. 緒 言

回転機器に使用されている代表的な接触式密封装置であるメカニカルシールの硬質材料しゅう動面に発生するき裂は、漏れの増大、相手材料の摩耗、さらにはシールリングの破損をもたらすため、その発生機構ならびに発生防止方法の確立が要望されている。

著者ら⁽¹⁾は、水を密封液とするアルミナとカーボンで構成されるはん用性の高いメカニカルシールを対象として、アルミナしゅう動リングを半径方向に貫通するき裂の発生機構を、著者らの考案したき裂発生検知システムを装備したメカニカルシールを用いた詳細な実験事実と非定常熱応力解析によって明らかにし、き裂発生の力学的主原因は、しゅう動発熱によって密封液側しゅう動面端部に発生する円周方向引張熱応力であることを示した。しかし、き裂発生時のデータに基づいて計算された引張熱応力の最大値は、アルミナ材料の三点曲げ強度の1/2~1/3程度であった。

ところで、アルミナの強度は、雰囲気依存性が高く、

特に水の存在は強度低下をもたらすことが知られている⁽²⁾⁽³⁾。また、セラミックスのようなぜい性材料の加工端面には加工きずやかけといった欠陥が存在することが多く、強度はこれらの欠陥に対してきわめて敏感であることも判明している⁽⁴⁾。その結果、回転しゅう動状態にあるアルミナの強度は、必ずしも標準試験片で計測された曲げ強度に一致しないことが予測される。

本研究は、上記視点に立脚して、メカニカルシールしゅう動実験および非定常熱応力解析結果をアルミナ材料の四点曲げ強度と詳細に比較検討することによって、き裂発生時の熱応力と材料強度の関係を明らかにして、第1報⁽¹⁾で提案したき裂発生機構を再確認したものである。

2. アルミナの四点曲げ強度の測定

2・1 強度測定装置および測定方法 図1は、四点曲げ試験装置の試験片の装着状態を示す模式図である。支点間距離は、JIS R 1601に準じ、外側30 mm、内側10 mmとした。各支点のピンはSiC、上下部支点固定ジグはSUS 304で作成した。容器内の流体は帯状ヒータおよび液中に浸せきした棒状ヒータによって加熱することができる。

沸騰水中での測定は、試料をジグにセット後、試料

* 原稿受付 平成5年6月14日。

^{*1} 正員、イーグル工業(株) (〒716 高梁市落合町阿部1212)。

^{*2} 正員、九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

上部約 10 mm まで蒸留水をいれ、ヒータにより加熱し、沸騰後、予想破断荷重の 50~70% 程度の荷重を与えたまま 1 時間保持した後、約 10 N/min の定負荷速度で行った。この間、容器内で水位がほぼ一定に保たれるように蒸留水を滴下補給した。密封液の影響を調べるために流動パラフィン 100°C 中での測定も同様の方法で実施した。また、比較基準データを得るために大気中での測定を実施したが、この場合には途中の 1 時間保持は行わず、約 10 N/min の速度で負荷した。

試験片としては 3 種類のアルミナを用いた。それらの熱・機械的特性を表 1 に示す。試験片の形状寸法は JIS R 1601 に準じ、3×4×50 mm のく形とした。加熱りん酸による各材料のエッチング組織および引張応力作用面の長手方向の表面粗さを図 2 に示す。

図 1 四点曲げ試験装置の試験片装着状態の模式図

表 1 セラミックスの熱・機械的特性

	Symbol	Alumina A	Alumina B	Alumina C
Composition	(wt%)	Al ₂ O ₃ 99%	Al ₂ O ₃ 95%	Al ₂ O ₃ 93%
Apparent density	[ρ] (kg/m ³)	3.92×10^3	3.75×10^3	3.59×10^3
Bending strength	※1 [σ_b] (MPa)	410 ~ 438	386 ~ 453	335 ~ 372
Elastic modulus	※2 [E] (GPa)	342	307	246
Poisson's ratio	[ν]	0.27	0.26	0.27
Hardness	[Hv]	1480 ~ 1500	1210 ~ 1250	990 ~ 1030
Thermal expansion coefficient	[α] (K ⁻¹)	6.49×10^{-6}	6.40×10^{-6}	6.59×10^{-6}
Thermal conductivity	※3 [k] (W/m·K)	27.9	16.1	13.4
		473K 18.2	11.1	10.3
		673K 11.2	7.6	6.7
Specific heat	[Cp] (J/kg·K)	916	815	771
Surface roughness	[Ra] (μ m)	0.02 ~ 0.06	0.04 ~ 0.08	0.05 ~ 0.11
※1 JIS R1601 Three point bending method		※2 JIS R1602 Pulse echo method		
※3 JIS C214 Laser flush method				

図 2 曲げ試験片のエッチング組織と表面粗さ

2.2 強度測定結果

2.2.1 四点曲げ強度の雰囲気依存性 図 3 に、大気中(○印)および沸騰水中(●印)での測定結果を示す。大気中での曲げ強度(○印)は、アルミナ A > アルミナ B > アルミナ C の順に低下している。沸騰水中では、いずれのアルミナの強度も低下し、大気中に比べ沸騰水中では 15~25% 曲げ強度が低下している。なお、図 3 中に示した■印は、流動パラフィン 100°C 中での測定結果である。この場合には、沸騰蒸留水中でみられたような強度低下は全く現れず、大気中での測定強度と同等かそれ以上の値を示している。また、測定結果をワイブル統計で解析すると、ワイブル係数はアルミナ A では大気中での測定結果に対して $m_a=12.1$ 、沸騰水中での測定結果に対して $m_{bw}=13.6$ 、同様に、アルミナ B では $m_a=11.6$ 、 $m_{bw}=10.6$ 、アルミナ C では $m_a=10.6$ 、 $m_{bw}=13.4$ であり、アルミナ材料間および雰囲気の違いによるワイブル係数の顕著な違いは確認されなかった。

2.2.2 ビッカース圧こんき裂付与の影響 メカニカルシール試験片の強度は、加工時に生成されたきずやかけの影響によって、四点曲げ試験より低下していると予想される。しかし、加工きずやかけの寸法・形状は多種・多様であること、また、欠陥寸法が小さくなると破壊じん性値 K_{Ic} は一定とならず低下すると報告

されている⁽⁴⁾ ことなどから、きずや欠陥の観察結果から直接強度の程度を定量的に推定することは現時点では困難である。そこで、四点曲げ試験片とメカニカルシール試験片に同寸法のビッカース圧こんを付与し、それぞれの試験片の強度の低下の程度を比較するという方法によってきず・かけの影響の程度の評価を試みた。

図4は、その測定結果を示したものである。ビッカース圧子押し込み荷重 $W=9.8\text{ N}$ (1 kgf) の場合のアルミナ B, C は、ビッカース圧こんき裂以外の場所から破断するものもあり(図4中で*を付したもの)、大気中および沸騰水中いずれの場合も圧こん付与による強度の低下は認められない。これに対し、アルミナ A

の強度の低下は沸騰水中で顕著である。その結果、 $W=9.8\text{ N}$ の圧こん付与試験片の沸騰水中での強度は、アルミナ A, B, C で大差なく 180~250 MPa の値となっている。また、 $W\geq 29.4\text{ N}$ (3 kgf) では、すべての試験片において、破断は圧こんき裂から起っており、大気中・沸騰水中における強度レベルはアルミナの種類によらずほぼ同一であることがわかる。

3. メカニカルシール実験

3・1 実験装置および方法 実験装置の系統図を図5に、試験片の形状寸法を図6に示す。実験方法は第1報⁽¹⁾と同様である。固定側試験片としてアルミナ A および C を用い、第1報⁽¹⁾で得たき裂発生限界に近いしゅう動条件下で実験を行った。

アルミナ試験片としては、最大引張熱応力の作用するしゅう動面内周端部に存在する加工きずの影響に着目して、加工きずの残存する状態のもの(きず残存品)および、大きい加工きずをダイヤモンド砥石(#400)で注意深く取り除いたもの(追加工品)を準備した。また、追加工品のしゅう動面の内周端から 0.2 mm 離れた位置にビッカース圧こんを付与した試験片を用いた実験も実施した。

3・2 実験結果 図7はアルミナ A を用いた場合の代表的実験結果であり、起動後き裂発生までのアルミナしゅう動面近傍温度としゅう動トルク変化の計測例を示したものである。Temp A, B はそれぞれしゅう動面中央直下 1 mm および 2 mm の温度を示す。き裂は、Temp A が 210°C を超えたところで発生している。図8は実験後の試験片のしゅう動面内周端近傍の拡大写真である。図8(a)はきず残存品の例を示して

図3 四点曲げ強度の環境依存性

* : Cracking originates at the other part than Vickers indentation

//// : $(\sigma\theta)_{\max}$ calculated on the threshold of cracking

//// : $(\sigma\theta)_{\max}$ calculated on the threshold of cracking occurred in refinishing ring

図4 ビッカース圧こんき裂付与によるアルミナ強度の低下

いる。き裂は、加工きずを起点として発生し、カーボンとのしゅう動部内で伝播を停止している [図 9(a)]。一方、追加工品で発生したき裂 [図 8(b)] は、すべてしゅう動面を貫通していた [図 9(b)]。

図 5 メカニカルシール実験装置の系統図

図 6 試験片の形状・寸法

図 7 温度、トルクの計測例(アルミナ A)

図 10(a)は、横軸に PV 値(P :しゅう動面押付圧力, V :平均しゅう動速度)をとって実験結果をまとめたものである。き裂は PV 値の大きい領域で発生している。追加工品のき裂発生下限界 PV 値はきず残存品に比べて明らかに上昇しており、大きな加工きずを取り除くことによってき裂が発生しにくくなっていることがわかる。図 10(b)は PV 値に実験における最大

(a) きず残存品の例 (b) 追加工品の例

図 8 き裂発生部の拡大(アルミナ A のしゅう動面内周端近傍)

(a) きず残存品の例 (b) 追加工品の例

図 9 実験で現われたき裂の形態(アルミナ A のしゅう動面)

(a) しゅう動面内周近傍のきずによるき裂発生限界 PV 値の低下

(b) しゅう動面内周近傍のきずによるき裂発生限界 fPV 値の低下

図 10 しゅう動条件とき裂の関係(アルミナ A)

摩擦係数 f を掛け合せたしゅう動発熱量に相当する fPV 値を横軸にとって表したものである。図10(a)と同様に、追加工品のき裂発生下限界 fPV 値はきず残存品より大きく、き裂発生時のしゅう動発熱量が大きいことがわかる。アルミナCを用いた場合のき裂発生限界の結果はアルミナAの場合と同様で、き裂形態も追加工することによってしゅう動面を貫通する形態に変化した。なお、図10(a), (b)には追加工品の内周から0.2 mmの位置にピッカース圧こんを付与した試験片を用いた場合の結果も示されている。

4. 熱応力解析

4.1 熱応力解析の方法 第1報⁽¹⁾と同様に有限要素法を用いて軸対称の非定常熱伝導解析によってしゅう動状態にあるアルミナ内部の温度分布を計算後、軸対称熱応力解析によってアルミナ内部に発生する熱応力を算出した。図11に解析対象の要素分割を示し、図12に熱伝導計算に用いた熱伝達率を示す。本解析では熱伝達率の温度依存性はないと仮定し、雰囲気温度は一定とした。図13はアルミナの熱伝導率の測定結果であるが、各材料とも比較的低温域で大きな温度依存

性を示している。そこで、アルミナの熱伝導率は、実線で示すように、実測値を温度の二次関数で近似して計算に用いた。

4.2 解析結果 摩擦係数を実験で得られたトルクの平均的時間変動(図7)を参考に、時間の三次増加関数(図14参照、定常時の摩擦係数=0.35)で近似することによって得られた計算結果を図15に示す。しゅう動面下1 mmの温度(Temp A)の変化は、小さい変動を考えなければ、実験結果(図7)をよくシミュレートしているといえる。実験では駆動開始後45秒でTemp A=210°Cに達してき裂が発生したが、数値解析で得られた210°Cに対応する時間は40秒であり、実

図13 アルミナの熱伝導率の温度変化

図14 摩擦係数の時間変化

図11 要素分割

図12 計算に用いた熱伝達率

図15 アルミナ内の最大熱応力としゅう動面下1 mm 温度の経時変化(しゅう動材料:アルミナA, 液温:90°C, 荷重:104.9 N, 回転数:6 000 rpm)

験結果にほぼ一致している。Temp A=210°Cにおける円周方向熱応力の最大値(σ_θ) max は、半径方向熱応力の最大値(σ_r) max および軸方向熱応力の最大値(σ_z) max に比べて非常に大きい。図 16(a)および(b)は、Temp A=210°Cにおけるアルミナ内の円周方向熱応力 σ_θ の分布およびしゅう動面下 0.05 mm の位置での半径方向に沿う各熱応力の分布を示したものである。 σ_θ はアルミナ内周部の大部分で引張応力状態を示し、その値はしゅう動面に近づくにつれて大きくなり、しゅう動面内周端部で最大値 174 MPa に達している。しかし、カーボンとのしゅう動部では大きな圧縮応力を示している。

さて、実験で得られた摩擦係数の時間依存性を忠実に解析に取り入れることは可能であるが繁雑である。本実験範囲内ではすべての実験において、しゅう動トルクおよびしゅう動面近傍温度がほぼ定常に達した状態でき裂が発生することを考慮し、定常状態での平均摩擦係数を用いて実施した非定常熱応力解析の定常状態下での熱応力値は前述の結果と同一であった。つまり、き裂発生までの時間の長短を問題にしなければ摩擦係数一定の計算で熱応力の算定は十分可能であるといえる。そこで、以下では摩擦係数を一定とした駆動

後 60 秒(定常状態)における熱応力値を用いて議論する。

図 17 は実験で得られたき裂発生の下限界 fPV 値に対応する円周方向最大引張熱応力(σ_θ) max を実験結果とともに示したものである。図 4 のハッチング線は、上記の(σ_θ) max の値および追加工品で得られたき裂発生下限界に対応する(σ_θ) max 値を示している。いずれのアルミナにおいても、き裂発生下限界しゅう動条件に対応する円周方向引張熱応力は、最大引張応力作用面に $W=9.8\text{ N}$ のビッカース圧こんを付与した場合の沸騰水中でのアルミナの四点曲げ強度にほぼ等しいことがわかる。

5. 考 察

5.1 四点曲げ試験の妥当性 セラミックスのようなぜい性材料の強度は、材料内に存在する欠陥に依存し、試験片の形状および大きさ、さらには試験方法の違いにより異なる。このことは、一般に、ワイブル統計を用いて $Ve = \int_v (\sigma/\sigma_R)^m dv$ (σ : 引張応力, σ_R : 最大引張応力, m : ワイブル係数) で定義される有効体積 Ve に依存した強度の考え方によって説明されている。すなわち、異なった有効体積 Ve_1 , Ve_2 に対する材料の平均強度 σ_1 , σ_2 との間にはワイブル係数 m を用いて $\sigma_1/\sigma_2 = (Ve_2/Ve_1)^{1/m}$ の関係が与えられ、有効体積の大きいほど平均強度は低いとされている⁽⁵⁾。アルミナ A の回転しゅう動試験片について前述の定義に従い、 $m=12.5$ として近似的に計算した引張熱応力に対する有効体積は 2.8 mm^3 となる。これに対し、曲げ試験(JIS に準じた寸法による)における引張応力に対する有効体積は、三点曲げ試験の場合が 1.0 mm^3 、四点

(a) 熱応力(σ_θ)の分布

(b) しゅう動面下 0.05 mm 位置での半径方向に沿う熱応力分布

図 16 しゅう動面下 1 mm の温度が 210°C に達したときの熱応力分布

図 17 き裂発生下限界 fPV 値に対応する熱応力計算値(起動後 60 秒における最大熱応力)

曲げ試験の場合が 5.1 mm^3 となる。上述の考えによれば、メカニカルシール試験片の強度は三点曲げ強度より約9%低く、また四点曲げ強度より約5%高いことになり、有効体積の観点からはメカニカルシール試験片と四点曲げ試験の強度の差は小さいといえる。

5・2 材料強度の雰囲気依存性 メカニカルシール試験片に最大引張熱応力が作用している雰囲気に近いと考えられる沸騰水中で測定した強度は、いずれのアルミナにおいても大気中での測定強度に比べて低下した。特に、アルミナ B, C ではき裂発生下限界の熱応力に近い値を示した。また、 $W=9.8\text{ N}$ のビッカース圧こんを付与したアルミナの沸騰水中での強度は、アルミナ B, C では圧こんの影響をほとんど受けなかったが、アルミナ A では顕著な低下を示し、その結果き裂発生下限界の熱応力に近い値となっている。これに対し、 100°C に加熱した流動パラフィン中での強度は大気中での値と同等もしくはそれ以上の値を示した。この実験事実は、沸騰水中での強度の低下はアルミナと水との化学反応によることを示唆する^{(6)~(8)}。つまり、メカニカルシール試験片の強度は大気中で計測された曲げ強度よりも低下することになる。

5・3 材料強度に及ぼす欠陥の影響 アルミナのようなぜい性材料の強度は微小な欠陥に極めて敏感であるため、試験片の強度は、最大引張応力作用部に存在する最大欠陥寸法に依存すると考えられる。そこで、欠陥寸法を評価する幾何学的パラメータとして、欠陥を最大主応力方向へ投影した投影面積の平方根

$\sqrt{\text{area}}$ を採用し、四点曲げ試験片の最大引張応力作用部に存在する最大欠陥の $(\sqrt{\text{area}})_{\text{max}}$ を画像処理および極値統計⁽⁹⁾を用いて推定した。その推定値は、アルミナ A では $(\sqrt{\text{area}})_{\text{max}}=41\text{ }\mu\text{m}$ 、アルミナ B では $43\text{ }\mu\text{m}$ 、アルミナ C では $65\text{ }\mu\text{m}$ であった。欠陥の占める面積率は、アルミナ A が6%、アルミナ B が14%、アルミナ C が19%であるので、近隣する欠陥の干渉効果を考慮すれば、アルミナ B, C の $(\sqrt{\text{area}})_{\text{max}}$ の推定値はさらに大きくなると予測される⁽¹⁰⁾。したがって、図3に示したように圧こんを付与しない場合にアルミナ A の四点曲げ強度が最も高いのは、材料固有の欠陥寸法の相違が一因となっているものと考えられる。

一方、メカニカルシール試験片におけるき裂発生下限界の熱応力の値は3種のアルミナで大差は認められないため、アルミナ A で作製されたメカニカルシール試験片の強度と四点曲げ試験片の強度との間には大きな差が存在することになる。この原因は、図8に示すようにメカニカルシール試験片においては、内周端部に存在する加工きずからき裂が発生していること、およびこの加工きずを小さくした試験片ではき裂発生下限界の熱応力は上昇し、沸騰水中の四点曲げ強度にかなり近づいていることから、回転しゅう動試験片の内周端部に存在する加工きずがアルミナ A の材料固有の欠陥に比べてかなり大きいためであると考えられる。

追加工を施し加工きずを小さくした後、圧こんを付与したメカニカルシール試験片の結果と、追加工を行

図 18 ビッカース圧こん($W=9.8\text{ N}$)による材料変質部の深さ方向変化

わななく残存品の結果を比較すると(図10参照), $W=9.8\text{ N}$ の圧こんは強度にはほとんど影響を与えず, き裂発生限界 fPV 値はきず残存品より高い値を示している。一方, $W=29.4\text{ N}$ の圧こんを付与すると, きず残存品と同等もしくはそれ以下まで強度は低下している。圧こん付与部の熱応力は最大引張熱応力より1割程度低いので, 同一圧こんを最大応力部に付与した場合に比べ強度に及ぼす圧こんの影響は若干小さくなると考えられるが, 図10より加工きずの影響は $W=9.8\text{ N}$ と $W=29.4\text{ N}$ の間の圧こんと同程度であろうと推定される。ところで図4より, 上記荷重の圧こんを付与した沸騰水中での四点曲げ強度はそれぞれ3種の材料間で大差はなく, き裂発生下限界の熱応力計算値にかなり近い値を示していることがわかる。したがって, 強度に及ぼす環境や加工きずの影響を正しく考慮した材料強度試験を行えば, メカニカルシール試験片におけるき裂発生の下限界熱応力をかなりの精度で推定することが可能になるものと考えられる。

なお, 図18は, $W=9.8\text{ N}$ の圧こん付与がアルミナ組織に与える影響を, 表面層を徐々に除去しながら観察したものである。圧こんき裂の表面長さはアルミナAが $69\text{ }\mu\text{m}$, アルミナBが $83\text{ }\mu\text{m}$, アルミナCが $85\text{ }\mu\text{m}$ 程度であったが, 圧こん下に図18に示すような材料の変質部(結晶粒が破碎された部分⁽¹¹⁾)がアルミナAでは深さ $20\text{ }\mu\text{m}$ まで観察されたのに対し, アルミナB, Cでは約 $10\text{ }\mu\text{m}$ の研磨でほとんどわからなくなった。したがって, 図4において圧こんが強度に寄与するか否かは, このような圧こん付与が材料組織に及ぼす影響の程度と材料固有の欠陥寸法ならびに加工きずとのかねあいによって決定されているものと考えられる。

5・4 き裂の発生機構 以上の実験事実から, メカニカルシールの硬質しゅう動材料としては用いられているアルミナ材料の強度は, ①沸騰水との化学反応, ②材料欠陥を含む加工きずの存在によって低下することが判明した。すなわち, 最大引張熱応力の発生するメカニカルシールしゅう動面の密封液側端面には, $W=9.8\text{ N}$ と 29.4 N の間のビッカース圧こんと同程度の欠陥が存在し, 沸騰水の存在と合まって, その強度が大気中での曲げ強度と比較して大きく低下しているとみなされる。これらを考慮した四点曲げ強度は, 図4からわかるように, き裂発生下限界 fPV 値に対応して計算された熱応力の最大値と測定値のばらつきの範囲で一致しているといえる。つまり, しゅう動発熱によってアルミナしゅう動リングに生じた円周方向引張熱応力が材料強度をりょうがしたときにき裂は発生す

ると結論される。したがって, き裂発生の防止は, ①材料強度を高める, ②しゅう動発熱によって発生する熱応力を低くすることによって達成されることになる。①に関しては, 雰囲気との反応性を考慮した材料選択, 最大熱応力が発生する近傍に加工傷などの出現しにくい形状および加工方法の選定が必要になる。特に, 材料強度評価を実環境に近い状態で実施することが肝要といえる。すなわち, 通常材料試験は極めて危険側の強度を与える可能性が高いといえる。なお, ②に係る設計の要点に関しては第1報⁽¹⁾で述べたので省略する。

6. 結 言

アルミナとカーボンで構成されるはん用性の高いメカニカルシールを対象として, メカニカルシールしゅう動実験ならびにアルミナ材料の四点曲げ強度試験を行い, 通常材料試験から得られる強度は極めて危険側になる可能性が高いことを指摘するとともにその理由を明らかにした。すなわち, アルミナ材料の強度は欠陥や雰囲気に極めて敏感であり, 加工時に生じた材料固有の欠陥より大きなきずやかけ, 沸騰水雰囲気は, 強度を大幅に低下させることを示した。また, これらの欠陥や雰囲気の影響を考慮して得られた四点曲げ強度は, 非定常熱応力解析で求められたメカニカルシールにおけるき裂発生時の円周方向引張熱応力にほぼ一致した。つまり, メカニカルシールのアルミナしゅう動材料にみられる半径方向に直線的なき裂は, しゅう動発熱と密封液の冷却に起因して発生する円周方向引張熱応力が材料強度をりょうがすることによって発生すると結論できる。

最後に, 実験に協力された平成4年度九州工業大学卒論生・川添正則君に深く感謝する。

文 献

- (1) 小宮・松田・兼田, 機論, 58-551, C(1992), 2171.
- (2) Bansol, G. K., Duckworth, W. H. and Niesz, D. E., *J. Am. Ceram. Soc.*, 59(1976), 472.
- (3) Freiman, S. W., *J. Am. Ceram. Soc.*, 69(1986), 721.
- (4) 例えば, 高橋・ほか4名, 窯業協会誌, 93-4(1985), 186.
- (5) 窯業協会編, セラミックスの機械的性質, (1979), 21, 窯業協会.
- (6) Michalske, T. A. and Freiman, S. W., *J. Am. Ceram. Soc.*, 66(1983), 284.
- (7) Michalske, T. A., Bunker, B. C. and Freiman, S. W., *J. Am. Ceram. Soc.*, 69(1986), 721.
- (8) Sasaki, S., *Wear*, 134(1989), 185.
- (9) 村上, 微小欠陥と介在物の影響, (1993), 233, 養賢堂.
- (10) 鳥山・村上, 材料, 42-481(1993), 1160.
- (11) 上野・岸本・河本, 材料, 41-461(1992), 253.