

氏名	Kim 金	Seock 石	Sam 三
授与学位	工学博士		
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 25 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) 機械工学専攻		
学位論文題目	セラミックスのころがり摩耗機構とその破壊力学的 考察		
指導教官	東北大学教授 阿部 博之		
論文審査委員	東北大学教授 阿部 博之	東北大学教授 北條 英典	
	東北大学教授 高橋 秀明	東北大学教授 平井 敏雄	
	東北大学助教授 加藤 康司		

論文内容要旨

第 1 章 序 論

近年開発されつつあるセラミックスは、金属に比べて、低密度、高縦弾性係数、高硬度、高耐熱性、高耐食性、低熱膨脹率などの特徴を有する。このような特徴を生かした耐摩耗部材として従来金属では応えられなかった過酷な環境下あるいは新しい用途への利用が試みられつつある。例えば、ガスタービンエンジンの高速化・軽量化のためにセラミックスがころがり部材として注目されている。しかし、セラミックスをころがり部材として使用するための基礎となるころがり摩耗機構は、これまでにほとんど明らかにされていない。

そこで本研究においては、5種類のセラミックスについてころがり摩耗の巨視的摩耗特性を求め、摩耗面と摩耗粒子の微視的な観察によりころがり摩耗モデルを導入し、破壊力学的考察を行い、セラミックスのころがり摩耗機構を明らかにする。

第 2 章 セラミックスのころがり摩耗における巨視的摩耗特性

本章では、セラミックスの中で機械構造材料として期待されている窒化けい素，サーメット，炭化けい素，チタニア，アルミナの 5 種類のセラミックスについて無潤滑下のころがり摩耗実験を行

った。実際のころがり条件を考慮し、点接触と線接触の両方に対して実験を行い、それぞれのセラミックスに対する摩耗進行曲線と比摩耗量と摩耗係数を求めた。図1は荷重392Nの点接触の場合の摩耗進行曲線を示したものである。この図より分かるようにセラミックスのころがり回転数にほぼ比例して摩耗量が増加する。表1は定常摩耗における比摩耗量と摩耗係数を求めたものである。表1により窒化けい素の摩耗係数が 10^{-7} オーダーで一番小さいことが分かる。

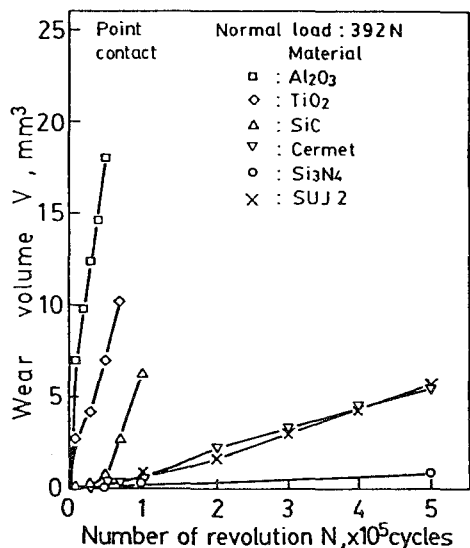


図1 荷重392Nの点接触の摩耗進行曲線

表1 定常摩耗における比摩耗量 (W_s) と摩耗係数 (K)
(a) Point contact

Materials	Specific wear rate $W_s, \text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{N}$		Wear coefficient K	
	392N	980N	392N	980N
Si_3N_4	4.0×10^{-8}	4.7×10^{-8}	6.0×10^{-7}	7.0×10^{-7}
Cermet	3.1×10^{-7}	5.9×10^{-7}	4.3×10^{-6}	8.3×10^{-6}
SiC	2.9×10^{-6}	4.0×10^{-6}	7.3×10^{-5}	9.9×10^{-5}
TiO_2	4.1×10^{-6}	1.3×10^{-5}	2.4×10^{-5}	7.7×10^{-5}
Al_2O_3	7.6×10^{-6}	8.9×10^{-5}	1.3×10^{-4}	1.5×10^{-3}
SUJ2	3.1×10^{-7}	3.1×10^{-7}	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}

(b) Line contact

Materials	Specific wear rate $W_s, \text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{N}$		Wear coefficient K	
	980N	1960N	980N	1960N
Si_3N_4	2.48×10^{-8}	5.81×10^{-8}	3.72×10^{-7}	4.36×10^{-7}
Cermet	3.61×10^{-8}	7.94×10^{-7}	5.04×10^{-7}	5.55×10^{-6}
SiC	4.89×10^{-8}	2.10×10^{-5}	1.22×10^{-6}	2.61×10^{-4}
TiO_2	4.55×10^{-8}	3.07×10^{-5}	2.64×10^{-7}	8.89×10^{-5}
Al_2O_3	2.22×10^{-5}	-	3.89×10^{-4}	-

表2 SEM観察によるセラミックスのころがり摩耗形態

Material	Contact condition	Load L, N	Specific wear rate $W_s, \text{mm}^3/\text{m}\cdot\text{N}$		Roughness $R_{\text{max}}, \mu\text{m}$	Wear type
			980N	1960N		
Si_3N_4	Line	980	2.5×10^{-8}		2.5	S
		1960	5.8×10^{-8}		4.2	S
Cermet	Point	392	4.0×10^{-8}		4.5	S
		980	4.7×10^{-8}		5.3	S
Cermet	Line	980	3.6×10^{-8}		2.1	S
		1960	7.9×10^{-8}		3.5	S
SiC	Point	392	3.1×10^{-7}		3.3	S
		980	5.9×10^{-7}		5.8	S
SiC	Line	980	4.9×10^{-8}		2.0	S
		1960	2.1×10^{-5}		22.8	L
TiO_2	Point	392	2.9×10^{-6}		8.5	L
		980	4.0×10^{-6}		9.9	L
TiO_2	Line	980	4.6×10^{-8}		4.7	S
		1960	3.1×10^{-5}		18.4	L
Al_2O_3	Point	392	4.1×10^{-6}		7.2	L
		980	1.3×10^{-5}		18.6	L
Al_2O_3	Line	980	2.2×10^{-5}		25.0	L
		980	8.9×10^{-5}		34.0	L

(注) S: Small Scale Wear, Plate (大きさ: 数 μm ~数 $10\mu\text{m}$
厚さ: $0.5 \sim 4 \mu\text{m}$)
L: Large Scale Wear, Plate (大きさ: 数 $100 \mu\text{m}$
厚さ: $\sim 25 \mu\text{m}$)

第3章 セラミックスのころがり

摩耗の微視的機構

本章では、第2章で行った5種類のセラミックスのころがり摩耗面と摩耗粒子に対して走査型電子顕微鏡(以下SEMと呼ぶ)を用いて微視的観察を行った。SEM観察のためにセラミックスの摩耗面と摩耗粒子にはイオンコータを用いて金蒸着を施した。SEM観察結果より次のことが明らかになった。すなわち、比較的小さい荷重の場合は摩耗粒子の大きさが数 μm から数 $10 \mu\text{m}$ で厚さが数 μm の小規模摩耗粒子のみが発生する。これに対し比較的大きい荷重の場合には小規模摩耗粒子に加えて摩耗粒子の大きさが数 $100 \mu\text{m}$ で厚さが約 $25 \mu\text{m}$ の大規模摩耗粒子が多く発生する。前者の場合

を小規模摩耗 (Small Scale Wear), 後者の場合を大規模摩耗 (Large Scale Wear) と定義し, それぞれを S と L で表せば表 2 のようにまとめられる。セラミックスのころがり摩耗は表面に存在する表面き裂の伝ぱによるぜい性破壊によって, 薄片状摩耗粒子が形成されることにより進行することと, 摩耗面の表面あらさの大きさと摩耗粒子の厚さはよく対応することが明らかになった。

第 4 章 ころがり接触における表面き裂挙動の破壊力学的解析

本章では, 第 3 章で行った微視的観察に基づいたセラミックスのころがり摩耗モデルに対して, 破壊力学に基づいて理論解析を行った。き裂面間の摩擦を考慮した理論解析においては, き裂を刃状転位の連続分布で置換し, 転位密度分布関数に関する特異積分方程式を誘導して Erdogan-Gupta¹⁾ の手法を用いて解を得た。き裂伝ぱ条件は混合モード荷重下におけるぜい性材料中のき裂伝ぱを対象とした Erdogan-Sih²⁾ のクライテリオンを採用した。ここではき裂先端の引張応力を最大にする応力拡大係数を有効応力拡大係数と定義し, この有効応力拡大係数の大小関係に注目してき裂の伝ぱについて解析した。理論解析結果により次の結果を得た。ヘルツ圧力分布下における垂直表面き裂は, き裂面間の摩擦係数が大きい場合はモード I 型のき裂から伝ぱする可能性が高い。これはき裂面間の摩擦を無視してモード II 型のき裂から伝ぱする可能性が高いことを示した従来の考え方と異なる。ヘルツ接触部とき裂面間の摩擦係数が小さい場合はモード II 型のき裂から伝ぱする可能性が高い。また表面き裂先端の Erdogan-Sih の有効応力拡大係数は特定の深さの表面き裂について最大になる。有効応力拡大係数を最大にする表面き裂の深さは, ころがり摩耗面およびき裂面間の摩擦係数に依存する。

第 5 章 セラミックスのころがり摩耗機構の破壊力学的考察

第 4 章のころがり接触における垂直表面き裂の挙動の破壊力学的解析結果に基づいて, セラミックスのころがり摩耗理論を提案する。ここで, 図 2 のような分布関数を表面き裂の分布関数として導入する。図 2 の $\phi(x)$ は表面き裂長さ x の確率密度関数であり, d_{\max} は伝ぱ可能な表面き裂の

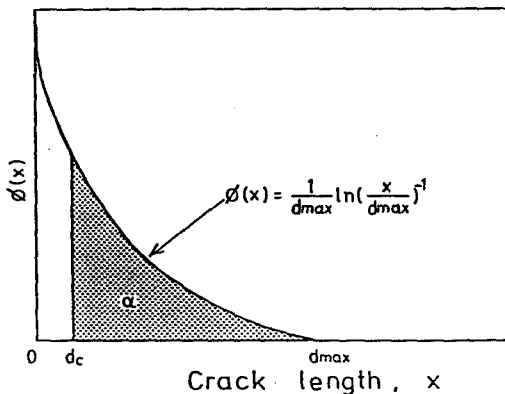


図 2 表面き裂分布関数

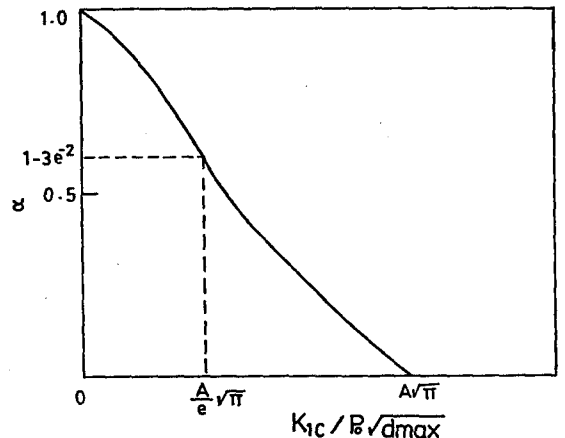


図 3 α と $K_{IC} / P_0 \sqrt{d_{\max}}$ の関係の概形

長さの最大値である。セラミックスの摩耗面に存在する表面き裂の中で摩耗粒子になる確率 α は $K_{IC}/P_0\sqrt{d_{max}}$ の関数であり、その概形は図3のようになる。したがって $K_{IC}/P_0\sqrt{d_{max}}$ の大小は摩耗量を左右する。そこでセラミックスの摩耗量を評価するために次のような無次元パラメータ Sc (Severity of Contact) を定義する。

$$Sc = \frac{P_0 \sqrt{d_{max}}}{K_{IC}} \quad (1)$$

ここで、 P_0 は接触部の接触条件と材料の縦弾性係数により求められる最大ヘルツ圧力であり、 d_{max} は表面に存在する表面き裂の最大長さである。また、 K_{IC} は材料の破壊じん性である。ここで、第3章の摩耗面の微視的観察により摩耗粒子の厚さと表面あらさが対応することから $d_{max} \approx$

R_{max} とすれば、セラミックスのころがり摩耗における摩耗率 w は Sc パラメータを用いて図4のように表わされる。図4より分かるように、セラミックスのころがり摩耗における摩耗率 w は無次元パラメータ Sc によって次のように表わされる。

$$w = \alpha \cdot Sc^n \quad (2)$$

ただし、 α と n は常数である。また理論解析と実験結果によりセラミックスのころがり摩耗形態の遷移条件は、線接触条件下においては次のように与えられる。

- (i) $Sc \leq 0.8$: 小規模摩耗
- (ii) $0.8 < Sc < 1.6$: 遷移領域
- (iii) $Sc \geq 1.6$: 大規模摩耗

第6章 アルミナの境界潤滑下のすべり摩擦における摩耗特性と焼付き特性

本章では、アルミナに対して四球式摩擦試験機を用いて境界潤滑下の摩耗特性と焼付き特性を調べ、無潤滑下のアルミナのころがり摩耗特性と比較・検討した。タービン油の場合境界潤滑下のアルミナの摩耗係数は 10^{-4} オーダであり、これは無潤滑下のアルミナのころがり摩耗係数とほぼ同じ

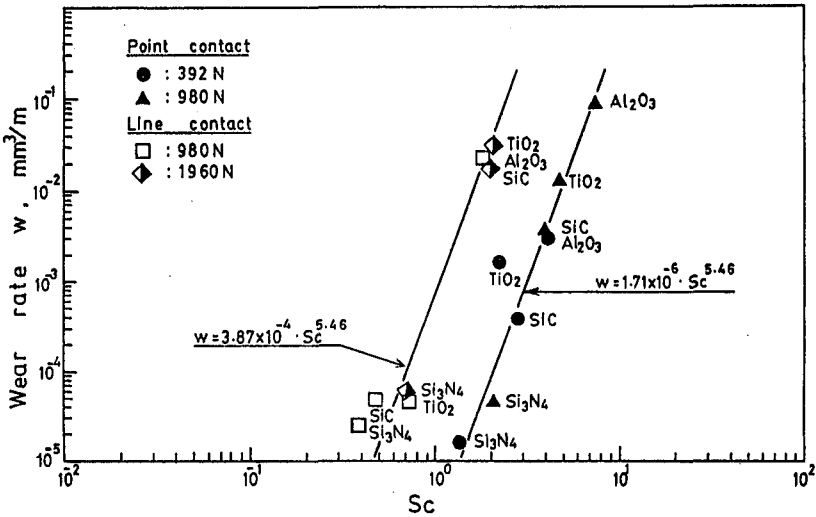


図4 摩耗率と Sc ($P_0 \sqrt{R_{max}} / K_{IC}$) の関係

オーダーである。ただし、焼付き状態における摩耗係数は 10^{-3} オーダーである。また境界潤滑下のすべり摩耗機構も第5章で導入されたセラミックスのころがり摩耗理論で説明されることが示された。

第7章 結 論

5種類の構造用セラミックスに対して、無潤滑下の線接触と点接触の条件においてころがり実験を常温大気中で行い、巨視的摩耗特性を求めた。次いで、摩耗面と摩耗粒子の微視的観察を行い、セラミックスのころがり摩耗モデルを導入した。導入したころがり摩耗モデルのために、ヘルツ接触圧力下のころがり摩耗面の表面き裂について、その伝ば挙動を破壊力学により求めた。その結果に基づき、セラミックスのころがり摩耗機構を理論的・実験的に明らかにし、摩耗率を表示するための新しい無次元パラメータを提案した。第2章から第6章までに得られた結果をまとめて本章に列記した。

参考文献

- 1) Erdogan, F. and Gupta, G. D., Quarterly of Applied Mathematics, 32(1972) 525-534.
- 2) Erdogan, F. and Sih, G. C., Trans. ASME, J. Basic Engineering, 85(1963) 519-527.

審査結果の要旨

セラミックスを、ころがり軸受など、ころがりを主体とした耐摩耗部材として導入するためには、ころがり摩耗機構を理解することが不可欠である。

しかるに、セラミックスのころがり摩耗機構はこれまでほとんど解明されておらず、摩耗特性に基づいた設計基準も明らかにされていなかった。

本論文は、窒化けい素，サーメット，炭化けい素，チタニアおよびアルミナの5種類のセラミックスをとりあげ、それらに共通する無潤滑下のころがり摩耗機構を、実験観察と理論解析に基づいて明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、5種類のセラミックスについて、巨視的ころがり摩耗特性を実験的に求め、窒化けい素が最も優れた耐摩耗材料であることを示している。また各セラミックスの摩耗面最大あらさの大小が、摩耗係数の大小に対応することを示している。これらは従来にない新しい知見である。

第3章では、走査型電子顕微鏡観察により、ころがり摩耗の微視機構が、表面き裂の伝ばを主とした脆性破壊による表面層の薄片状剥離であること、および、小規模摩耗と大規模摩耗の2種類であることを明らかにしている。これらはセラミックスのころがり摩耗機構の基礎的知見として重要である。

第4章では、ころがり接触下における表面き裂が、モードI型で伝ばする可能性を、破壊力学に基づいて明らかにしている。これは、き裂面間の摩擦を考慮することにより初めて得られた新知見である。

第5章では、前章までに明らかにされた、ころがり摩耗の微視機構とき裂の伝ば挙動に基づいたころがり摩耗モデルを新たに導入し、巨視的摩耗特性を説明するために有効な新しいパラメータSc (Severity of Contact) を提案している。Scは、材料の破壊靱性、表面き裂の大きさおよび接触圧力を含むパラメータである。Scにより、種々の荷重下におけるセラミックスの摩耗率の変化および、小規模摩耗—大規模摩耗の遷移を説明することができる。Scの導入は、ころがり部材の設計指針として極めて有効である。

第6章では、アルミナの境界潤滑下におけるすべり摩耗係数が、無潤滑下のころがり摩耗係数とほぼ同じオーダーになることを示している。また、境界潤滑下と焼き付き状態における摩耗も、前章のころがり摩耗モデルを適用することにより説明されることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、5種類のセラミックスに共通するころがり摩耗機構を実験観察と理論解析により初めて明らかにし、また耐摩耗の観点から、ころがり部材として使用するために有効なパラメータを提案したもので、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。