

あだち こうし

氏 名 足 立 幸 志

授 与 学 位 博士 (工学)

学 位 授 与 年 月 日 平成10年3月13日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学位規則第4条第2項

最 終 学 歴 平成2年3月

東北大学大学院工学研究科機械工学専攻前期課程 修了

学 位 論 文 題 目 セラミックスの摩耗の基礎と応用に関する研究

論 文 審 査 委 員 主 査 東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 坂 真澄
東北大学教授 庄子 哲雄 東北大学教授 島田 昌彦

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒論

「摩耗の制御」は、省資源と省エネルギー及び21世紀の新しい工業技術のために必要不可欠な技術課題である。機械の寿命の原因の75%を占めるといわれる「摩耗」は、機械要素の交換から機械全体の廃棄、さらに不具合に対する保守管理を余儀なくさせる一方で、その制御が「10GB/in²のコンピュータ用ハードディスク」や「ナノメートルオーダの超精密位置決めを実現する超音波モータ」などの革新的技術を可能にするからである。

この様な技術課題に対し、従来の工業材料と比較し、より優れた耐摩耗材料として期待される材料が「構造用セラミックス (以後、セラミックスと称す)」である。事実、従来の工業材料では実現できない優れた耐摩耗性を示す。耐摩耗材としてのセラミックスの導入は、機械の寿命の延命及びこれに伴う巨額な損失の低減は勿論、従来の工業材料では実現困難であったフリクションドライブなどの新技術を実現させる得る。

しかしセラミックスは非常に優れた耐摩耗性を有する一方で、力学的条件、材料条件及び環境条件のわずかな変化により、非常に激しい摩耗が発生し信頼性に欠ける材料でもある。

そこで本論文では、セラミックスを優れた耐摩耗材料として高い信頼性のもとに使用するための定量的な「トライボシステム設計の指針」と「材料設計の指針」を基礎と応用研究により確立することを目的とする。

第2章 アルミナ及び窒化ケイ素同士の

転がり-すべり摩耗機構の解析

--- セラミックスの摩耗に及ぼす

初期表面あらしの影響 ---

本章では、本研究において材料の有する耐摩耗性を検討するために必要な初期表面仕上げに関する指針をアルミナ同士及び窒化ケイ素同士の転がり-すべり摩耗において明らかにした。即ち、初期表面あらし、材料特性(硬さ、破壊じん性値)と摩擦条件(接線力係数)が(1)式を満たす場合、摩耗は母材の材料特性のみに依存し、初期表面あらしの影響を受けないことを理論的及び実験的に明らかにした(図1)。

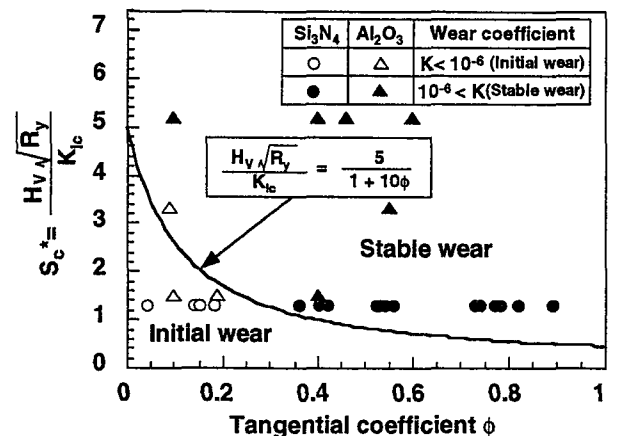


図1 初期表面に依存した摩耗(Initial wear)と依存しない摩耗(Stable wear)の発生条件

$$\frac{H_v \sqrt{R_y}}{K_{IC}} \geq \frac{5}{1+10\phi} \quad (1)$$

ここで、 H_v : ピッカース硬度, R_y : 初期表面の最大高さ (初期表面のポアサイズ), K_{IC} : 破壊じん性値, ϕ : 接線力係数(=F/W), F: 接線力, W: 荷重である。

第3章以降に使用する試験片の初期表面は、ここで得られた知見をもとに準備した。

第3章 アルミナ同士のすべり摩耗機構の解析

--- セラミックスのすべり摩耗に及ぼす荷重, すべり速度及び温度の影響 ---

摩耗は多因子敏感現象である。中でも荷重とすべり速度は接触状態を決める重要な因子であり、環境温度はセラミックスの特長を生かすために考慮すべき重要な影響因子である。

そこで本章では、過去に報告されている荷重, すべり速度及び温度条件のほとんど全てを満たす広範囲の実験条件下でのアルミナ同士の無潤滑すべり摩耗実験を行い、摩耗の総合的な把握のために発生する全ての摩耗形態の分類を行った。

その結果、アルミナ同士のすべり摩耗形態は表1に示す4つに分類されることを明らかにした。

Mode IIは粒界におけるき裂の伝播により摩耗粒子が形成される摩耗形態であることを摩耗面観察から明らかにし、Mode IとMode IIの臨界条件として(2)式で表される臨界荷重 W_c を導出した。そして摩擦発熱にともなう材料物性値の変化を考慮することにより、その有効性を実験結果において実証した(図2)。

$$W_c = \left[\frac{4\pi r^{2/3}}{3\{E(T)\}^{2/3}\sqrt{d}} \left\{ \frac{cK_{IC}(T)}{1+10\mu(v)} \right\} \right]^3 \quad (2)$$

ここで、 r : ピンの先端半径, K_{IC} : 破壊じん性値, E : ヤング率, d : 予き裂長さ(=1 μ m), μ : 摩擦係数, T : 温度($^{\circ}$ C), c : 定数(=7)。

一方、Mode I, III, IVの摩耗面は、いずれも微細な摩耗粒子に覆われていることを明らかにした。これは、摩耗モデル構築のために摩耗に及ぼす摩耗粒子の影響の解明が必要であることを示す結果である。

第4章 摩擦面内における摩耗粒子の挙動の解析

--- セラミックスの摩耗面形成に及ぼす摩耗粒子の影響 ---

本章では、接触面間における摩耗粒子の挙動を模擬化した2つのモデル実験を行い、前章におけるMode I, III, IVに代表される多くのセラミックスの摩耗面は、接触面内において圧縮及びせん断力が付加された摩耗粒子の凝集状態により決定されることを同条件下の摩耗面の状態と硬度の比較により明らかにした。

さらに、900 $^{\circ}$ Cかつ2GPa以上の接触応力条件下でのアルミナ同士のすべり摩擦により形成されるトライボフィルムは、摩耗粒子の焼結により形成されることをモデル実験により実証した。

表1 アルミナのすべり摩耗形態の分類

Mode	Friction coefficient	Specific wear amount	Surface roughness	Wear surface
I	$\mu > 0.65$	$w_s < 10^{-6}$ mm ³ /Nm	$R_y < 1\mu$ m	Smooth surface
II				Brittle fracture surface
III	$\mu > 0.7$	$w_s > 10^{-6}$ mm ³ /Nm	$R_y > 3\mu$ m	Scale-like rough surface
IV	$\mu < 0.65$			Partial surface layer

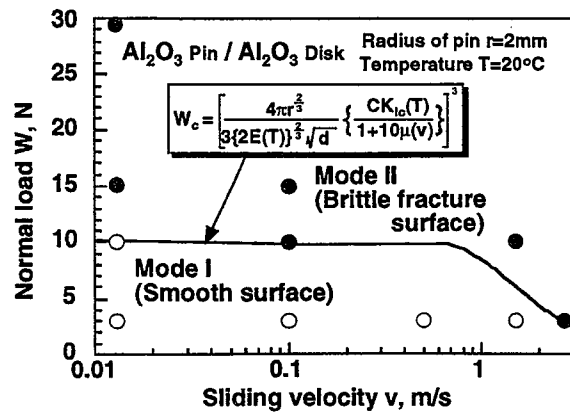


図2 Mode IとMode IIの遷移条件

第5章 アルミナの転がり-すべり及びすべり摩耗過程の解析

--- セラミックスの摩耗機構の分類 ---

本章では、アルミナ同士の転がり-すべり及びすべり接触における摩耗過程を解析するために、接触系外に排出された摩耗粒子及び摩耗面の観察を行った。

その結果、セラミックスの転がり-すべり及びすべり接触において接触系外へ排出される摩耗粒子は、Sub- μm オーダーのパウダー状摩耗粒子とトライボフィルムの部分的な脱落である数十～数百 μm オーダーの板状摩耗粒子及び結晶粒子の脱落による摩耗粒子の3種類に分類されることを明らかにした。さらに、これらは接触系外へ排出される摩耗粒子の発生が、主に母材の粒界に沿ったき裂の伝播に依存するものと、粒内の微小なき裂の伝播に依存するものの2種類に分類されることを明らかにした。

第6章 セラミックスの摩耗形態の分類とWear Map

本章では、第3章におけるアルミナ同士のすべり摩耗実験結果に炭化ケイ素同士及びジルコニア同士のすべり摩耗実験結果を加え、さらに第4、5章の知見をもとに、セラミックスの摩耗機構の解析を行った。

その結果、無潤滑すべりにおけるセラミックスの摩耗形態を新たに導入した摩耗面の幾何的状態を表すパラメータ R_y/D_g (平均粒子サイズ D_g に対する最大高さ R_y の割合) の値及び比摩耗量 $W_s (=V/WL)$ (V : 摩耗体積, W : 荷重, L : すべり距離) に基づき、次のようにマイルド摩耗とシビア摩耗の2種類に分類できることを明らかにした。

(I) マイルド摩耗

$$R_y/D_g < 0.2, W_s < 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

(II) シビア摩耗

$$R_y/D_g > 0.5, W_s > 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

ここに、セラミックスはマイルド摩耗形態において従来の工業材料と比較し優れた耐摩耗性を発揮する。さらに、それら2つの摩耗形態間の遷移機構を理論的に解析し遷移を支配する以下の2つの無次元パラメータ $S_{c,m}$, $S_{c,t}$ を新たに導いた。

$$S_{c,m} = \frac{(1+10\mu)P_{\max}\sqrt{d}}{K_{IC}} \quad (3)$$

$$S_{c,t} = \frac{\gamma\mu}{\Delta T_s} \sqrt{\frac{vWH_v}{k\rho c}} \quad (4)$$

ここで、 μ : 摩擦係数, P_{\max} : 最大ヘルツ応力, d : き裂長さ ($1/2D_g$), D_g : 平均粒子径, K_{IC} : 破壊じん性値, γ : 熱分配率 ($=1/2$), ΔT_s : 熱衝撃抵抗値, v : すべり速度, W : 荷重, H_v : ビッカース硬度, k : 熱伝導率, ρ : 密度, c : 比熱である。

これら2つのパラメータを用いることによりマイルド摩耗形態とシビア摩耗形態の発生条件を明示する「Wear Map」を世界で初めて提案した(図3)。

ここに導入した「Wear Map」は、セラミックスが優れた耐摩耗性を発揮し得る定量的条件(式(5),(6))を摩擦条件と材料特性を含む2つの無次元パラメータにより世界で初めて明示したものであり、今後セラミックスの耐摩耗設計の基本になるものである。

$$S_{c,m} = \frac{(1+10\mu)P_{\max}\sqrt{d}}{K_{IC}} \leq 6 \quad (5)$$

$$S_{c,t} = \frac{\gamma\mu}{\Delta T_s} \sqrt{\frac{vWH_v}{k\rho c}} \leq 0.04 \quad (6)$$

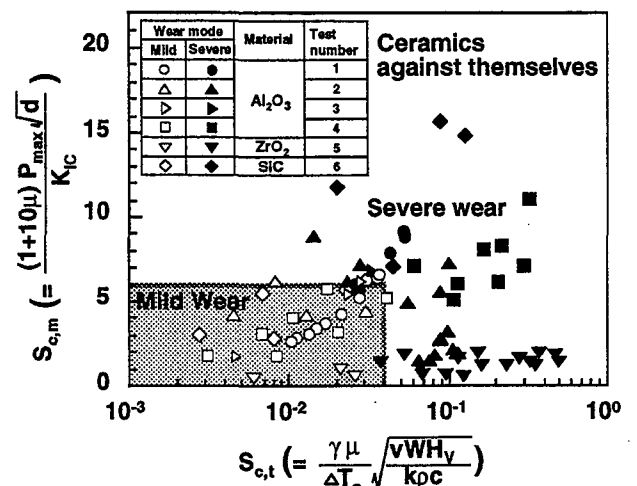


図3 セラミックスのWear Map

第7章 アルミナのポアフリー鏡面加工法の提案

本章では、セラミックスの無潤滑下のすべり摩擦を応用した加工技術として、前章で明らかにされたマイルド摩擦領域において発生した摩擦粒子をポア部において焼結させることにより実現できる「アルミナのポアフリー鏡面加工技術」を世界で初めて提案した。

これにより、マイルド摩擦及びサブミクロン粒子の焼結が可能な接触圧力と温度条件を満たす場合（図4）、アルミナ同士の無潤滑すべり摩擦の結果、最大高さ50nmのポアフリー鏡面が得られることを実証した。

これは、セラミック材料に存在する欠陥により表面あらさの限界が与えられる従来の鏡面加工の世界に新しいコンセプトを与えるものである。

第8章 窒化ケイ素のフリクシヨンドライブへの応用

本章では、窒化ケイ素の転がり-すべり接触における摩擦機構の解析を行い、第2章における摩擦機構の解析結果を加え、窒化ケイ素をフリクシヨンドライブの転動体として応用するための設計指針を「Friction Drive Map」として世界で初めて提案した（図5）。

ここに導入した「Friction Drive Map」は、セラミックスの優れた耐摩擦性を生かしたフリクシヨンドライブシステムの実現が可能な使用条件及び伝達精度を明示したものである。

これはセラミックスの導入が、従来技術では不可能な高精度な伝達を可能にする新しい技術（フリクシヨンドライブ）を実現できることを示すものである。

第9章 結論

本章では、第2章から第8章までに得られた結果を列記するとともに、セラミックスを耐摩擦の観点から用いるための「トライボシステム設計及び材料設計指針」を述べた。

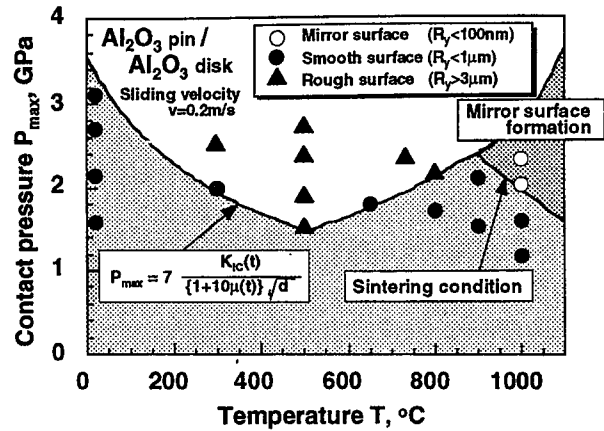


図4 アルミナのポアフリー鏡面仕上げのための加工条件

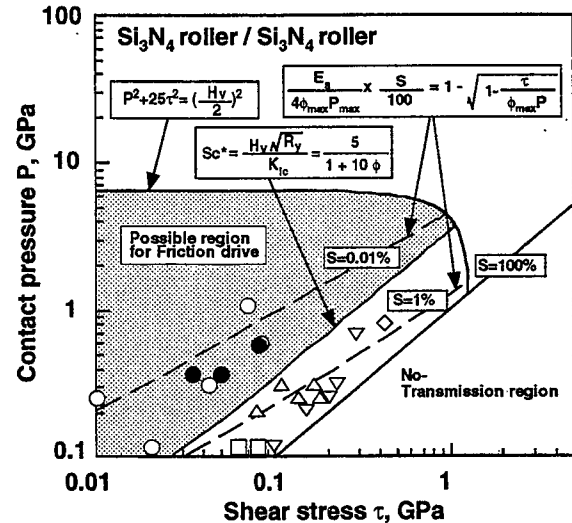


図5 窒化ケイ素の「Friction drive map」

審査結果の要旨

構造用セラミックスは機械の構造部材、特に耐摩耗を求められる機械要素部材として広い応用が期待されており、実用例も世界に先駆けて日本において徐々に増えつつある。しかし摩耗は材料因子、力学的因子及び環境因子により複雑に変化する多因子敏感現象であるため、セラミックスを耐摩耗部材として用いるための設計指針は得られていない。

本論文は、構造用セラミックスを用いたトライボシステムの耐摩耗設計のための基本指針を基礎と応用研究により提案したものであり、全編9章からなる。

第1章は、緒論である。

第2章では、セラミックスの初期摩耗に及ぼす初期表面あらさの影響について理論及び実験的検討を行い、材料の特性に依存した摩耗のみを考慮するための臨界初期表面あらさを摩擦条件と材料特性の関数として明らかにしている。これは、セラミックスの耐摩耗のための表面仕上げに対する重要な知見である。

第3章では、広範囲の接触圧力、すべり速度及び温度条件下において発生するアルミナのすべり摩耗形態が4種類に分類されることを明らかにしている。さらに摩耗面の多くは、摩耗粒子に覆われており、摩耗機構解明のためには、摩耗に及ぼす摩耗粒子の影響を明らかにすることが重要であることを指摘している。これは、セラミックスの摩耗機構を解明するための基礎知識として重要な知見である。

第4章では、前章で明らかにされた4種類の摩耗形態が、接触面における圧縮及びせん断応力下の摩耗粒子の凝集状態により決定されることを明らかにしている。さらに、高温環境下の摩擦により摩耗粒子の焼結が起り得ることを実験的に明らかにしている。これらは、摩耗機構の解明及び摩耗の応用技術のために重要な知見である。

第5章では、アルミナ同士のすべり摩耗における摩耗粒子と摩耗面の分析結果をもとに、主たる摩耗粒子は母材の粒界に沿ったき裂の伝播により形成されたものと粒内の微少なき裂の伝播により形成されたものに分類できることを明らかにしている。これは、セラミックスの摩耗機構を分類するための基礎知識として重要な知見である。

第6章では、アルミナ、炭化ケイ素及びジルコニアのすべり摩耗特性を調べ、比摩耗量と摩耗面の状態を表すパラメータを新たに導入することにより、3種類のセラミックスにおいて発生する摩耗形態を、マイルド摩耗とシビア摩耗の2形態に分類できることを明らかにし、マイルド摩耗形態においてセラミックスは優れた耐摩耗性を発揮し得ることを明確にしている。さらに、それら2つの摩耗形態間の遷移機構を理論的に解析し遷移条件を与える2つの無次元パラメータを新たに導出し、これらにより、上記2つの摩耗形態の発生領域を明示する「摩耗形態図(Wear Map)」を世界で初めて提案している。ここに導入した「摩耗形態図(Wear Map)」は、セラミックスを用いたトライボシステムの耐摩耗設計の指針を定量的に与えるものであり、実用上極めて重要かつ有益な知見である。

第7章では、無潤滑下のすべり摩擦においてマイルド摩耗と摩耗粒子の摩耗面内焼結を同時に進行させることにより「アルミナのポアフリー鏡面仕上げ」が可能であることを世界で初めて提案し、実証している。これは、従来の表面仕上げ法とは全く異なる概念に基づく仕上げ法であり、実用上有益な知見である。

第8章では、耐摩耗性に優れたフリクションドライブの転動体として窒化ケイ素を用いることのできる使用条件と伝達精度を実験と理論により明らかにしている。これは、セラミックスにより従来材料では不可能なフリクションドライブが実現できる可能性とそのための設計指針を与えるものであり、実用的に重要な知見である。

第9章は、結論である。

以上要するに本論文は、セラミックスを機械要素部材として広く用いるために、セラミックスの耐摩耗設計の指針を定量的に明示し、その有効性を実証したものであり、機械工学ならびにトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。