

機能構造用セラミックスの開発 (摺動部材への応用開発)

R&D on Functional Engineering Ceramics (Application to Sliding Parts)

植 木 正 憲⁽¹⁾
Masanori UEKI

抄 録

構造用セラミックスの商品化に有用な機能として、硬さ、比剛性 (ヤング率/密度)、低熱膨張そして耐摩耗性に注目し、ホットプレス法による単純 (板状) 形状焼成体に限定した応用開発例として、ロータリーエンジンに用いられる摺動部材であるアベックスシールへの高強度窒化けい素セラミックスそして通電摺動部材への炭化チタン-グラファイト系材料の適用について述べた。又、機能構造用セラミックスの摺動部材への適用に際して重要な摺動特性改善の例を、炭化けい素ウイスキーを複合化した窒化けい素セラミックスと軸受鋼の摩擦、摩耗に関して述べた。

Abstract

High hardness, high specific stiffness (Young's modulus divided by specific gravity), low thermal expansion coefficient and high wear resistance are indispensable for the commercialization of engineering ceramics. As examples of commercialization of ceramic parts with simple plate-like shape which can be prepared by the hot-pressing method, the application of high-strength silicon nitride ceramics to a sliding part of the rotary engine, called "apex seal", and the application of titanium carbide-graphite system composites to an electroconductive sliding part are described. Moreover, the improvement of the sliding property which is important for the application of engineering ceramics to wear parts is described, taking the case of sliding and wear of silicon carbide whisker reinforced silicon nitride ceramics against bearing steel.

1. 緒 言

約10年前の熱狂的な新素材ブームの中で、“第二期石器時代の到来”などと一際大きく取り上げられたファインセラミックスフィーバーも去り、ファインセラミックスの適用はある部分では定着したものの、構造用途への適用は依然として伸び悩んでいると見るのが妥当であろう。この原因は耐熱衝撃性の欠如を中心とした材料性能の不足と製造技術 (特に形状付与技術) の未熟さにあると思われる。一方で、研究開発面での取り組みも、上述した材料性能と製造技術の両者を同時に解決しようとする高い目標に挑戦するあまり、両方とも達成度合いが低いという傾向が世の中全般にあることは否めない。

このような社会環境の中で、新日本製鐵における、ある特定のファインセラミックス開発プロジェクトにおいては、形状付与技術を一時的に棚上げし、材料性能の向上を徹底的に志向した研究、開発を実行してきた。すなわち、これらの開発においては、一軸加圧焼成法であるホットプレスにより、単純形状 (板状) 部材を製造し、主として機械加工により、(仮想) 商品及び評価用試験片を切り出す方法を用いている。そして、このような開発においては製造した材料の特定の用途への適用を目指して、最終評価をそれらのユーザーに委ね、材料開発・改善への直接的なフィードバックデータを得るよう

な研究・開発努力を重ねてきている。その結果として、それらのうちのいくつかはユーザーより極めて高い評価を受け、実機化あるいはそれに近い段階にまで到達しつつある。

構造用途におけるセラミックスに最も期待された機能は、本来“耐熱性”であったが、このような用途は、前述したような耐熱衝撃性の不足により実現の道は遠く、靱性の低さから機械的衝撃を受ける用途も難しい。すぐにも応用 (商品化) 可能な残された機能として、硬さ、比剛性 (ヤング率/密度)、低熱膨張そして耐摩耗性などが挙げられる。このうち低熱膨張性は、室温近傍及びそれ以下の温度で用いられる精密機器用部品として好適な性質であり、これと硬さ、剛性そして耐摩耗性を兼備するににより、各種の電子・半導体製造装置用部品への応用が可能である。しかし、このような用途の場合、部品の大型化と形状付与も同時に重要な課題となることも銘記せねばならない。

本報は、素材の特性のみで勝負でき、部品の大型化と形状付与を考えなくて良い用途に限定した機能構造用セラミックスのうち摺動部材への応用開発例を、前述したような良好なユーザー評価を得ている例としてロータリーエンジン用アベックスシールへの窒化けい素セラミックスの適用、そして通電摺動部材としての炭化チタン-グラファイト系材料の開発について述べ、セラミックスの摺動特性改

⁽¹⁾ 技術開発本部 先端技術研究所 セラミックス・新金属研究部
主幹研究員 工博

善手法の例として窒化けい素セラミックスへの炭化けい素ウイスカの添加による軸受鋼との摺動特性の改善について述べる。

2. 高強度窒化けい素セラミックスの開発とロータリーエンジン (RE) 用アベックスシールへの適用^{1,2)}

2.1 ロータリーエンジンとアベックスシール

ロータリー (回転式) エンジンは、名前のとおり、ピストンに相当する部分が回転運動するエンジンで、レシプロエンジン (往復ピストンエンジン) のようなピストンやバルブの往復運動によるパワーのロスや振動が少ない上、機構的にも簡単、軽量にできるので、回転もスムーズで騒音が少ない特長がある。

その構造は、図 1(a) に示すように三角形のおむすび型をしたローターがまゆ (蔀) 型をしたケース (ローターハウジング) の中を回転するものである。このエンジンでは、ガソリンと空気の混合気を図に示す吸気ポートより吸入し、圧縮して電気点火し、燃焼時の膨張ガス圧力によってパワーを発生する。そこで爆発ガスや圧縮混合気を洩らさないためのガスシールとしてローターの 3 つの頂点にあるアベックス (頂点の意) シール、ローター側面からのガス洩れを防ぐサイドシール、そしてこれらの接合部に配置されたコーナースールの三つがある³⁾。

このうちアベックスシールは図 1(b) に示すような形状であり、レシプロエンジンのピストンリングに相当する主要部品である。これはローターハウジング内周面と高速で摺動し、燃焼時の膨張ガス圧力、回転による慣性力、スプリング力により内周面に強く押しつけられる部品である。従って、アベックスシール用の材料に要求される特性は、上述したような種々の力に耐える“機械的強度”とハウジング内周面に適用されている硬質 Cr めっきとの“摺動特性”に優れることである。

2.2 高強度窒化けい素セラミックスの開発

表 1 に、新日本製鐵で開発中のいくつかのホットプレス窒化けい素セラミックスの機械的諸特性を一覧表として示している。曲げ強さの欄に注目すると、種々の焼結助剤を用いる窒化けい素セラミ

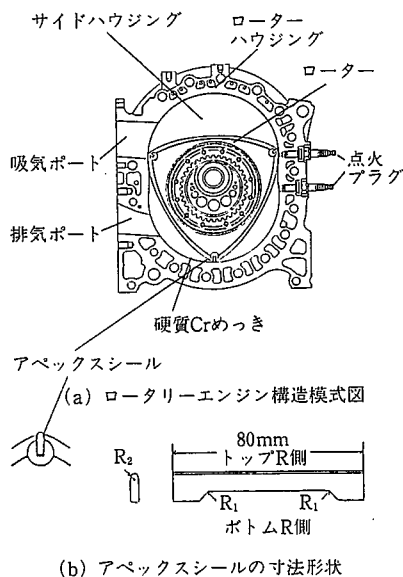


図 1 ロータリーエンジンの構造模式図とアベックスシールの形状

表 1 各種ホットプレス窒化けい素セラミックスの機械的特性

材料記号	組成 (助剤系)	密度 (% TD)	曲げ強さ (MPa)				硬さ (HV)	破壊靱性値 K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
			室温	1000°C	1200°C	1400°C		
A	YMC	99.1	1450	970	300	変形	1513	6.7
B	YZ	99.9	1000	1030	920	560	1602	7.2
C	YC	99.6	1080	950	1080	640	1706	6.9
D	YCZ	99.2	990	880	820	220	1437	7.9
E	YH	99.6	1220	1040	850	770	1733	8.5

TD:理論密度, 曲げ強さ:JIS R 1601及び1604に準拠, K_{Ic} :JIS R 1607に準拠

ックスの場合、室温強度と高温強度の両立が困難であることがわかる。つまり表中 A に示す材料は室温強度が約1450MPa と極めて高いが、1200°C以上の高温でその強度低下は著しい。一方表中 B~E に示す各材料の室温強度はいずれも1000~1200MPa と、さほど高くないが、高温での強度低下が少なく、中でも E は1400°Cでも約800MPa 程度の高強度を維持している。これらの相違を考える場合、窒化けい素セラミックスが、窒化けい素結晶粒とそれらをバインドする粒界相からなるいわゆる多相材料であることを念頭におかねばならない。

アベックスシールへの適用に際して、ユーザーより求められたのは、まず“室温強度”であった。アベックスシールの使用環境から想像してむしろ高温での特性が重要のように思われるが、後述するように、使用時にシール全体が高温 ($\geq 1000^\circ\text{C}$) に曝された形跡は見当たらない。ユーザーの要求に従って提出した材料 A は、極めて高い室温強度を有するためセラミックス製造各社からの提出材も含めた競争に勝ち残り、レース車用アベックスシール材として適用されることになった。

ここで、材料 A の微細構造を写真 1(a)及び(b)⁴⁾ に、それぞれ透過型電子顕微鏡の明視野像と暗視野像として示しているが、顕著に針状化した $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 結晶粒と粒界ガラス相のみから成ることがわかる。更に、針状粒はホットプレス軸 (紙面と垂直方向) と垂直に配向し、機械的特性においても明らかに異方性⁵⁾ を呈している。

2.3 ルマン24時間レース走行車への適用—使用済アベックスシールの回収と解析—

これまで、新日本製鐵が製造した窒化けい素セラミックス製アベックスシールを採用したエンジンを搭載した“マツダ767B”は、1989

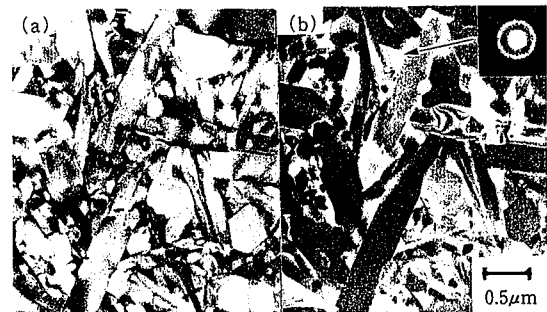


写真 1 ホットプレス窒化けい素セラミックス [材料 A] の透過型電子顕微鏡写真 (a) 明視野, (b) 暗視野 (粒界相の電子線回折はハローパターンを示すことから粒界相は非晶質 (ガラス))

年4月の鈴鹿ジャパンレース⁶⁾を皮切りに同年6月の'89ルマン24時間耐久レースにも3台投入され、全車とも完走、更に'90ルマン24時間耐久レースにも1台投入され、完走しており、セラミックス製アベックスシールの耐久性、信頼性の高さが実証されてきた。

上述の'89ルマン24時間耐久レースでマツダ26B レース用エンジンに搭載され、約5,300km 走行した後に回収したアベックスシールの目視、ルーペ及び光学顕微鏡による外観調査によると、シールの摩耗は、図2に示すようにリーディング側(A面)で4か所、その反対側(図2に示すB面)で2か所に認められる。そして、それら各部分は、摩耗の原因により次のように分類できた。1) ローターハウジング内面との摺動(真の摺動摩耗)によるもの(図2に示したa部)、2) コーナー溝との擦れ合いによる摩耗(図2に示したb, c, d部)、そして3) 板ばねとの擦れ合いによるボトムコーナーR部の摩耗である。

これらを更に詳細に観察したところ、シールの端から中央部に向かうほど摺動による擦過摩耗痕は顕著になり、特に中央部では二段階の摺動擦過摩耗痕が観察された。この階段の発生は、ローターハウジング断面形状であるトロコイド曲線(蘭型)の上部と下部において接触するアベックスシールの角度が若干異なることによるものと思われる。しかし、シールトップR部は顕著な摩擦痕が見られるごく一部を除いて摩耗は極めて軽微で、研磨したようなきれいな鏡面を呈していた。

シールに深刻なダメージを与える真の摺動摩耗は、トップR中央部に生ずるいわゆる“肩削ぎ摩耗”のみに限定されていた。これは、ローターハウジング内面に、図1(a)の紙面と垂直の深さ方向(ローターハウジングの厚さ方向)の中央部に存在する吸気ポート及び排気ポートをアベックスシールが通過するとき、シール中央部(各ポートの径分)はトップR側からの抑えが無くなり、弾性変形により、ポート中に突出することによって生じると考えられる。ローターの回転と共に突出箇所はやがてポートエッジ部と衝突することになり、これにより、リーディング側トップR中央部に顕著な摩耗を引き起こす原因となる。

前述したように摩耗が二段階となるのは、吸気、排気それぞれのポートを通過する時のアベックスシールの接触角度が異なるためである。代表的な肩削ぎ摩耗を示すマクロ光学顕微鏡写真(トップR

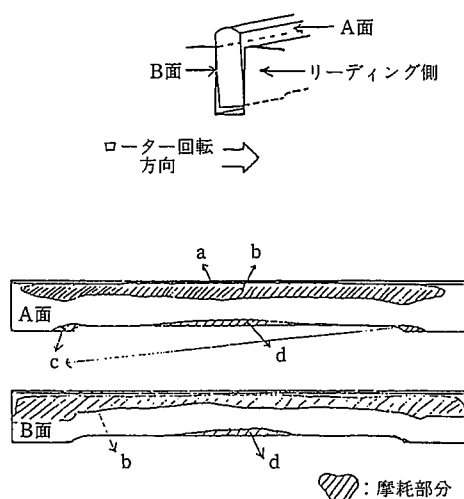


図2 アベックスシールの摩耗状況(スケッチ)

頂部より撮影)を写真2に示す。次に摩耗部を走査型電子顕微鏡で観察すると、写真3(a)に部位1及び2で示すような金属光沢を呈する凝着物が見られた。それら各部をそれぞれ拡大した同写真(b)及び(c)には凝着に伴う微細な割れが見られる。又、同写真(c)に示す部位A及びBのエネルギー分散型電子分光分析(EDS)の結果、金属凝着物はハウジング内面からのCrを主体とするものであることが判明した。

肩削ぎ摩耗部に見られたセラミックスの欠損状況の典型的な例を写真4に示す。写真に見られるようにアベックスシールの局部欠損(広い意味での摩耗)にはCrの凝着が原因している。つまり凝着物はCr同士の摩耗となり、摩擦係数及び抵抗が増大する。

一方、ローター回転・摺動と共に凝着界面は局部的に繰り返し加熱・冷却されることになり、Crと窒化けい素セラミックスの熱膨張係数の相違により、熱膨張係数の小さい窒化けい素側の表面に引張り応力が作用する。これがシール表面層を剝離するような形態で窒化けい素セラミックスに欠損(摩耗)を与える。相対的に硬いセラミックス(Si_3N_4 , HV:1500)と柔らかい金属(硬質Crめっき, HV:1000)が摺動して硬い側が摩耗(損耗)する機構は、まさにこれによるものと考えられる。

アベックスシール表面層は、前述のように確かに顕著なダメージを受けるが、それは極めて局部的であるように思われる。アベックスシールとして使用され、何千kmも走行したあとの窒化けい素セラミックスが全体として受けるダメージを調査するために実体曲げ破壊試験を行い、同一の形状に加工した未使用材の破壊荷重と比較

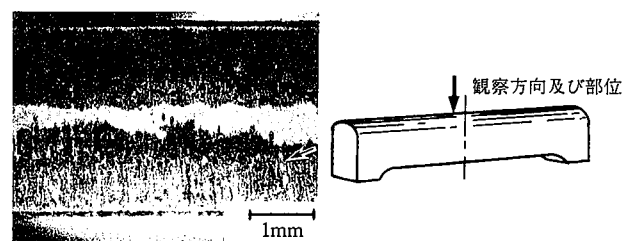


写真2 アベックスシールトップR部の“肩削ぎ”摩耗部位(矢印は段付きを示す)の光学顕微鏡写真

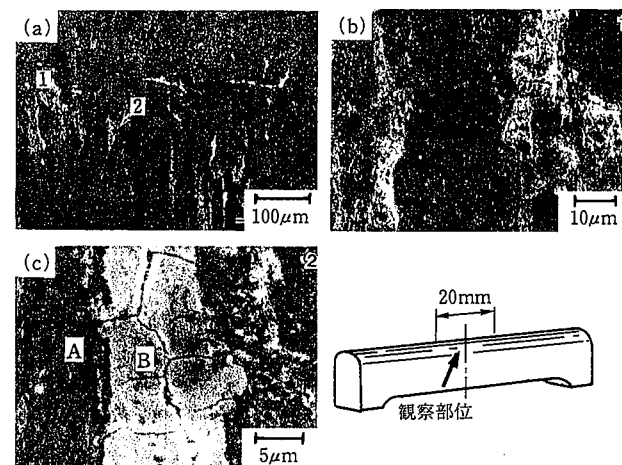


写真3 アベックスシールトップR部摩耗部位の走査型電子顕微鏡観察。比較的低倍率の写真(a)における部位1及び2の高倍率写真をそれぞれ(b)及び(c)に示す

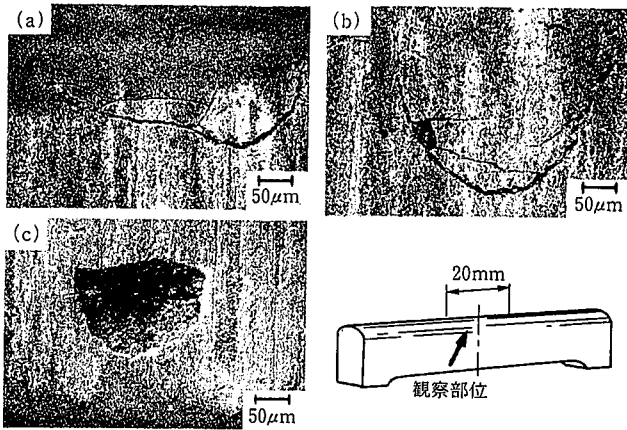


写真 4 アベックスシールトップR部摩耗部位の走査型電子顕微鏡観察。摩耗部におけるCrの凝着と割れの発生を示す

して劣化の程度を調べたところ、使用済アベックスシール材の破壊荷重は、未使用材に比べて低い値を示すことはなく、使用によるバルクとしてのダメージはほとんど無いと診ることができた。尚、前述したトップR側の微細な割れもR頂部ではなく、側面に近い“肩部”に多く見られ、表面と平行に近い角度に入っているため、殆ど影響が無かったものと判断できた。

以上にことから、当初のアベックスシールとしての使用時にバルク全体が高温環境下に曝され、熱的ダメージによる材質劣化が起こるのではないかと懸念はまさに杞憂であり、粒界相を結晶化した高温強度に優れる窒化けい素セラミックス適用の必要も無いようである。

2.4 実機使用結果に基づく新材料の開発

前述したようなレース車エンジンに使用された後回収したアベックスシールの調査、解析の結果として、摺動特性の更なる改善が必要であることが明らかとなった。つまり硬質Crめっきとの凝着を起こし難い材料に対するニーズが高まったことになる。詳細な観察によると、凝着は主として酸化物からなる粒界相で顕著であり、窒化けい素結晶粒それ自体に対しては殆ど起こらないことが判明したので、このような実験事実に基づいて酸化物助剤の低減を企図した。

通常の方法では、助剤の低減はそのまま窒化けい素セラミックス焼結体の強度の低下を意味するため、ここではゾルゲル法を応用して予め混合製造した助剤粉末を用いる方法⁷⁾を採用したところ、図3に示すように従来の約半分の助剤量でほぼ同等の室温強度を有する材料の製造に成功した。この方法で製造した材料の硬質Crに対する摩耗特性を調べたところ、ほぼ同等の強度を有する組成(助剤添加量8~12wt%)で比較した場合、助剤量が少ない程摩耗量も少ないことが判明した。

3. 炭化チタン-グラファイト系複合材料の開発と通電摺動部材への適用

3.1 材料開発指針

炭化チタンは(TiC)は、共有結合性材料の特徴である高融点、高硬度を有すると共に、金属に匹敵する高い導電性を示すユニークなセラミック材料である⁸⁾。しかしながら、焼結したTiC単体の靱性は低く⁹⁾、その用途はサーメット工具材料の主成分やセラミックス基複合材料における分散材、あるいはコーティング用の薄(厚)膜などに限

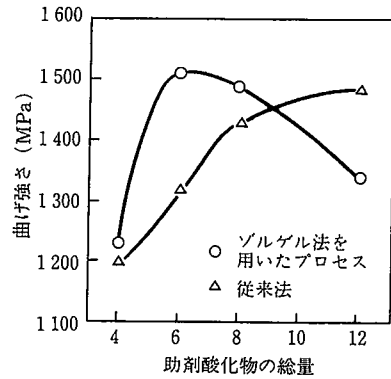


図3 ホットプレス窒化けい素セラミックスの室温曲げ強度に及ぼす助剤酸化物量の影響

定されてきた。TiCの特性を改善し、機能構造用セラミックスとしての用途を拡大するために、種々の第二相を複合化することが試みられている^{8),10),11)}。それらのうちここでは、特にグラファイト(黒鉛、炭素)を第二相として分散させたTiC-グラファイト系複合材料について述べる。これらの材料の特徴は、TiC単体に比べて、強度、靱性¹¹⁾、被加工性などにおいて性能改善をもたらされたばかりでなく、新たな機能として摺動部材に用いた場合に自己潤滑性を発揮することが期待される点である¹²⁾。

本材料系は、通電摺動部材としての実用化を目指して将来のユーザーと共に共同開発(新日本製鐵が材料開発、ユーザー社が材料評価を担当)を実行中であるが、ここでは、その機械的諸特性を述べると共に、乾燥空気中の銅(Cu)との摺動特性をピンオンディスク法によって調べることで、TiCへのグラファイト複合化による摺動特性改善効果を評価した結果を述べる。

3.2 摺動特性評価¹³⁾

評価に用いたピンオンディスク型摩耗試験機の摺動部分の試験原理と試験条件を図4¹⁴⁾に示す。ピンは固定され、ディスクが一定速度で回転する機構である。ディスクの回転駆動力は直流モーターで与え、試験荷重は挺子の作用点部分に取り付けたピンに真空ペローズを介して試験チャンバー外から与える。摩擦力と荷重は挺子のピン支持部近くに貼りつけた歪ゲージにより検出可能である。ここでは、ピン試験片として銅(OFHCCu)を用い、ディスク試験片とし

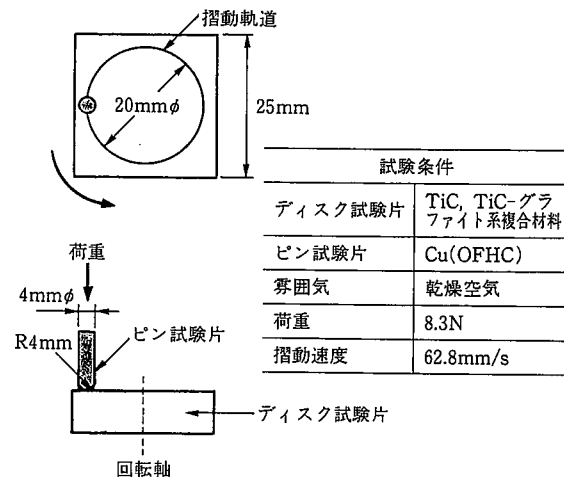


図4 ピンオンディスク試験の模式図と試験条件

てTiC-グラファイト系複合材料を用いた。試験方法の詳細な記述は他¹⁴⁾に譲るとして、評価は他の代表的構造用セラミックスと銅との摺動における摩擦係数と比摩耗量を比較した。尚表2に、用いたTiC-グラファイト系複合材料の組成と機械的諸特性をまとめて示す。

3.3 摩擦係数と比摩耗量

図5(a)~(d)¹²⁾に各材料の摺動試験中の摩擦係数の経時変化を示す。まず、(a)に示すTiC単体では、試験開始後約400sから摩擦係数に変動を生じ、その平均値は5000s後もなお増加傾向にあることがわかる。これと対称的に、(b)~(d)に示すTiC-グラファイト系複合材料では、摩擦係数の変動は全般にわたって小さく、グラファイト添加量の増大と共に摩擦係数の平均値も低下する傾向にあることが明らかである。

次に、本評価結果を他の構造用セラミックスにおける結果と比較することを試みた。比較に用いた材料は、窒化けい素^{*1}、炭化けい素^{*2}、

表2 TiC及びTiC-グラファイト系複合材料の組成と機械的諸特性

		TiC	TiC-グラファイト系複合材料		
炭素量	(wt%)	0	10	15	20
	(vol%)	0	19.6	27.9	35.4
密度	(g/cm ³)	4.85	4.35	4.09	3.81
	(%TD)	98.2	98.6	97.6	95.6
曲げ強さ (MPa)		376	520	373	272
K _{IC} (MPam ^{1/2})		3.4	3.6	4.2	3.5
ピッカース硬さ (HV)		2200	1450	700	250

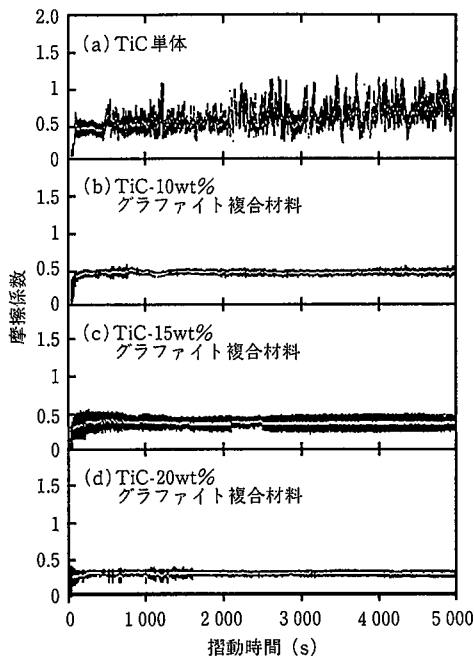


図5 乾燥空気中でのTiC及びTiC-グラファイト系複合材料の銅に対する摺動における摩擦係数の経時変化

*1 Si₃N₄: 東芝タンガロイ製 FX950 常圧焼結+HIP品
 *2 SiC: イビダン製 SC850 常圧焼結品
 *3 Al₂O₃: 東芝セラミックス製 ADS-11 常圧焼結品
 *4 ZrO₂: PSZ 東ソー製【粉体】常圧焼結品

アルミナ^{*3}そしてジルコニア^{*4}である。これらの材料の乾燥空気中での銅に対する摺動特性をTiC-グラファイト系材料のそれと比較した。その指標として、次に述べるようにピン材の比摩耗量を用いた。

$$\text{比摩耗量 (mm}^2/\text{N)} = \frac{\text{摩耗量 (mg)} / \text{密度 (mg/mm}^3\text{)}}{\text{摺動距離 (mm)} \times \text{荷重 (N)}}$$

図6¹³⁾に評価結果を示すように、TiC単体の比摩耗量はAl₂O₃のそれとほぼ同等で他の3種類のセラミックスより低く10⁻⁸mm²/Nのオーダーであるが、グラファイトの添加により10⁻⁹mm²/Nのオーダーにまで比摩耗量を低減できることが明らかである。

写真5(a)及び(b)¹²⁾にTiC-20wt%グラファイト複合材料の高分解能走査型電子顕微鏡による表面観察例を示す。(a)において全般的には黒く見える部分がグラファイトであり、白く見える部分がTiCであるが、グラファイトの端部は白く見えるように薄片化しており、層状のグラファイトがTiC粒を覆うように分散していることがわかる。(b)に示す高倍率観察では、グラファイトの層間剥離が見られ、微細な層状グラファイトの一部がTiC粒の表面に付着している。このような微細構造形態から、前述したように本材料が自己潤滑性を有し、優れた摺動特性を発揮することが判る。

4. 窒化けい素セラミックスへの炭化けい素ウイスキーの添加による軸受鋼との摺動特性の改善¹⁵⁾

4.1 摺動における適合性

多くの摺動対における摩耗機構として支配的である凝着の問題を

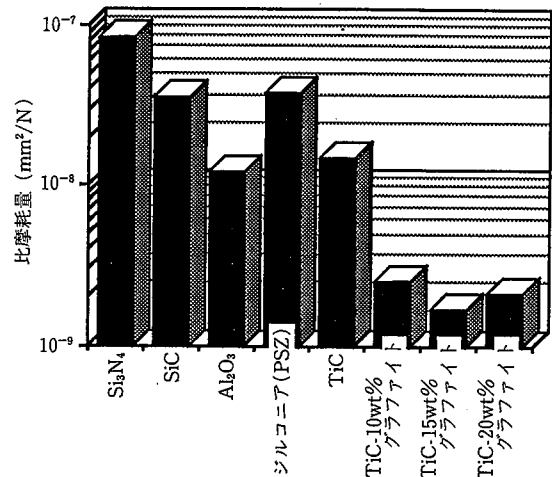


図6 種々のセラミックス及びTiC-グラファイト系複合材料と摺動した銅ピンの比摩耗量の比較

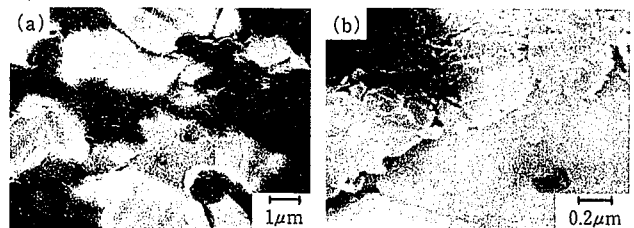


写真5 TiC-20wt%グラファイト複合材料の研摩表面の高分解能走査型電子顕微鏡写真

考えるとき、摩耗量の低減を計るには摺動対を構成する材料の強度を高めるか、あるいはそれらの間の凝着力を低減し、剪断破壊が接触界面で生じるようにすればよい。つまり、凝着による摩耗に影響を与える因子として材料強度と摺動対を構成する材料間の適合性(Compatibility)^{16,17)}の二つがある。このうち、適合性は特に重要であり、このことは、いかに機械的諸特性に優れた材料であっても、化学反応や界面での凝着を起こし易ければ摩耗抵抗や摩耗量の増大を導き、逆に適合性が良好な場合はその摺動対を構成する材料の強度や硬さが高くなくても良好な摺動特性を示し、少ない摩耗を呈することからも判る。このように適合性が良好な摺動対の例として、銀(Ag)/鉄(Fe)¹⁷⁾そして前出の銅(Cu)/アルミナ(Al_2O_3)¹⁸⁾などがあげられる。

材料間の摺動適合性に関する支配要因を明らかにする努力として、純金属同士の摺動における状態図¹⁷⁾による説明、そして純金属とアルミナ(Al_2O_3)の摩耗における金属の酸化活性による説明¹⁸⁾などが試みられているが、残念ながら現在のところ、それぞれに対する特殊解にすぎない。ここでは摺動適合性に着目し、炭化けい素ウイスキーを複合化した窒化けい素セラミックスの軸受鋼に対する摺動特性を調査した結果を述べる。

4.2 試験条件と供試材料

試験に用いた装置は、さきに3.2節で示したピンオンディスク型摩耗試験機である。試験条件を表3に、そして各試験材料の化学組成と機械的諸特性をそれらの製造方法と共に表4に示す。供試材料は、焼結剤としてイットリア(Y_2O_3)及びアルミナ(Al_2O_3)を添加し、ホットプレス法により製造した窒化けい素(Si_3N_4)セラミックスと、それをマトリックスとして炭化けい素(SiC)ウイスキーを10~30wt%添加した3種類の複合材料、そして比較のために用いた市販の炭化けい素(SiC、イビデン製SC850)である。相手材である軸受鋼は、JIS SUJ2規格材料であり、実使用と同様の条件で熱処理したもので硬さはHV870であった。これらの材料間の摺動対において、軸受鋼をピンに、各種セラミックスをディスクとして試験を行った。

4.3 摺動特性に及ぼす炭化けい素ウイスキーの影響

図7(a)及び(b)に、それぞれセラミックスピン試験片そして軸受鋼ディスク試験片の摩耗量をセラミックスピンに含有される炭化けい素(SiC)の量の関数として示している。同図(b)に示す軸受鋼ディスク試験片の摩耗量は、ウイスキーの添加量による明確な変化を示し

表3 SiCウイスキー強化 Si_3N_4 セラミックス
対軸受鋼の摺動試験条件

摺動速度 (mm/s)	100
荷重 (N)	28
摺動距離 (m)	1000
試験雰囲気	乾燥空気

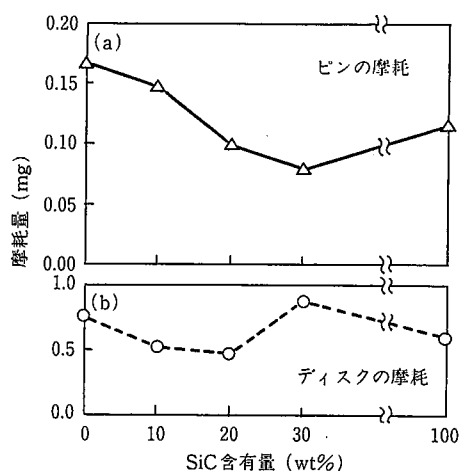


図7 窒化けい素系セラミックスピンと軸受鋼ディスクの摺動摩耗に及ぼす窒化けい素へのSiCウイスキー添加量の影響

ていないが、セラミックスピンの摩耗量は炭化けい素ウイスキーの添加量の増大と共に減少していることが明らかである。

各セラミックスピンの摺動面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、全般的に軸受鋼からの移着が観察されるが、その程度は炭化けい素ウイスキーの添加量が少ない材料では大きな塊状であるのに対し、ウイスキーの添加量が多い材料では凝着の単位が小さくかつ量も少ないことが分かった。又、炭化けい素においては、摺動面は荒れているものの凝着は少なかった。軸受鋼からの鉄(Fe)を主成分とする移着は、炭化けい素ウイスキーを避けて母相である窒化けい素セラミックスの部分に優先的に生じていることも観察された。

このような摺動面の観察結果と図7に示した摩耗試験の結果から、炭化けい素は鋼との適合性が良く、凝着が少ないのに対して、窒化けい素セラミックスは相対的に見て鋼との適合性が悪く、大規模な凝着を起こす。炭化けい素ウイスキーの添加により、摺動面への炭化けい素の部分的露出により鋼との凝着を妨げ、結果としてマクロな意味での適合性を改善し、摩耗量の低減を達成できたものと考えられることができる。

以上のような実験事実に基づいて、金属材料との摺動を目的として耐摩耗セラミックスを開発する場合、強度、靱性そして硬さなどの機械的諸特性のみならず、摺動の相手材料との適合性からのアプローチが肝要である。

5. 結 言

セラミックスの特性の内、硬さ、比剛性(ヤング率/密度)、低熱膨張そして耐摩耗性に特に注目して部品の大型化と、機械加工以外

表4 セラミックス試験片の組成と機械的諸特性

マトリックス	SiCウイスキー (wt%)	焼結方法	密度 (g/cm^3)	曲げ強さ (MPa)	破壊靱性値 (MPa $m^{1/2}$)	硬さ (HV)
Si_3N_4	0	ホットプレス	3.24	1029	5.5	1540
	10		3.24	1025	6.7	1820
	20		3.22	989	6.9	1990
	30		3.23	940	7.7	1790
SiC (イビデンSC850)	0	常圧焼結	3.11	850	2.5	2400

の形状付与を考慮しなくてもよい応用開発例としてアベックスシールと通電摺動部材について述べた。

セラミックスの需要の伸び悩みは、緒言で述べた材料性能の不足と製造技術の未熟さのみではなく、材料製造者（メーカー）と材料使用者（ユーザー）の好連携の欠如も原因しているように思われる。新しい材料を機械、構造物の部品として適用する場合、従来の設計概念を根本的に変えなければならないと言われるが、残念ながら、前述した両者の好連携の下にこれが実行されている例は少ない。新材料が一番欠如しているのは実は使用実績の乏しさであり、これが悪循環となって適用に二の足を踏むケースが多い。本報で述べたようなユーザーとメーカーの好連携は極めて稀な例の一つであり、本文中で述べた使用済アベックスシールの回収と調査、解析を材料製造者の立場として実施できたことは大きな意義があり、これによって得られた知見は計り知れない。

6. 謝 辞

共同開発にかかわる秘密保持契約の範囲内で、本報の内容を公表することをご承認頂きましたマツダ(株)に謝意を表します。

参 照 文 献

- 1) 植木正憲：新素材, 3 (9), 68 (1992)
- 2) Yamaguchi, Y. : Automotive Eng. 98, 93 (1990)
- 3) RE Rotary Engine. MAZDA Technical Information, Nov. 1986, p.23
- 4) 三島昌昭 ほか：日本セラミックス協会第3回秋季シンポジウム講演予稿集, 1990, p.512-513
- 5) 佐藤 裕 ほか：日本セラミックス協会第3回秋季シンポジウム講演予稿集, 1990, p.514-515
- 6) 日経メカニカル. (1989. 7. 24), p.71
- 7) Sato, Y. et al. : Proc. MRS Fall Meeting, Boston. 1992, MRS (in press)
- 8) Ueki, M. et al. : ISIJ Int. 32 (10), 943 (1992)
- 9) 神谷 晶 ほか：日本セラミックス協会学術論文誌, 98, 1146 (1990)
- 10) Endo, H. et al. : J. Mater. Sci. 26, 3769 (1991)
- 11) Ueno, K. et al. : J. Ceram. Soc. Japan. 97, 507 (1989)
- 12) 小野 透 ほか：材料システム, 11, 57 (1992)
- 13) 小野 透 ほか：日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, 盛岡, 1992-10, p.405
- 14) 福田応夫 ほか：日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, 東京, 1990-5, p. 325
- 15) 福田応夫 ほか：第11回高温材料基礎討論会, 箱根, 1992-12, 日本セラミックス協会
- 16) Rabinowicz, E. : ASLE Trans. 14, 198 (1971)
- 17) Sasada, T. et al. : Proc. 20th Jap. Congr. Mat. Res. 1977, p.99
- 18) Enomoto, A. et al. : Proc. 5th Int. Congr. on Tribology (EUOTRIB '89), 1, 1989, p.111