

セラミックスの低速トライボロジー特性

1998年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-1393, Japan.

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

セラミックスの低速トライボロジー特性

林 和範*、加納 茂機*

要旨

高速炉の中間熱交換器等の大型重量機器のサポート構造部を、熱応力を回避するスライド型サポート構造とすることの可能性を考え、スライド部に適用可能と考えられるセラミックス材料および超硬材料について、常温大気中および高温窒素雰囲気中の低速のトライボロジー試験を行い摩擦特性の調査を行なった。その結果、

- ①常温大気中の低速の摺動において、セラミックスおよび超硬合金はステンレスよりも低い摩擦係数を示すこと、表面あらさが大きいと摩擦抵抗が大きいこと、ラップ仕上面では炭化ケイ素同士の組み合わせが低い摩擦係数を示すことが確認された。
- ②同種材料での相対変位速度を変えて行った摩擦試験から、セラミックスおよび超硬合金は、ステンレスに比して広範な速度域で安定に低い摩擦係数を示すこと、セラミックスの中でPSZが最も小さい摩擦係数を示すこと、また炭化ケイ素はどの相対変位速度でも安定した摩擦挙動を示すことが明らかとなった。
- ③高温窒素雰囲気中ではステンレス同士の摩擦係数は1より大きくなるのに対し、セラミックス（炭化ケイ素、窒化ケイ素）同士では常温大気中とほとんど変わらない摩擦係数を示すことが明らかとなった。
- ④高温窒素雰囲気中の往復摺動試験においても、ステンレスの摩擦係数は1より大きい値を持続するのにに対し、セラミックスでは欠けに代表されるような激しい損傷が発生してもこのような大きな摩擦係数には達しないことが明らかとなった。

Tribological properties of ceramics evaluated at low sliding speeds

Kazunori Hayashi*, Shigeki Kano*

Abstract

Low speed tribological properties of stainless steel, ceramics and hard metals were investigated in air at room temperature and in nitrogen atmosphere at high temperature for the consideration of sliding type support structure in intermediate heat exchanger of fast reactor. The following results are obtained.

1. In low speed friction measurements in air at room temperature, friction coefficients of ceramics and hard metals were smaller than that of stainless steel. Surface roughness of the specimens increased the friction force and silicon carbide showed the smallest friction coefficient among the specimens with mirror polished surface.
2. From the results of friction measurements at various sliding speeds in air at room temperature, friction coefficients of ceramics and hard metals were always stable and lower than that of stainless steel. Among ceramics, PSZ showed the smallest friction and silicon carbide showed the most stable friction at any sliding speeds.
3. Friction coefficients of silicon carbide and silicon nitride in nitrogen atmosphere at high temperature showed low values as measured at room temperature. On the contrary, friction coefficient of stainless steel measured in nitrogen atmosphere at high temperature were higher than that measured at room temperature, over 1.
4. In the reciprocal sliding tests in nitrogen atmosphere at high temperature, friction coefficient of stainless steel were over 1. On the contrary, the friction coefficients of ceramics were less than 1 instead of chipping during the slidings.

*Frontier Technology Section, Advanced Technology Division, OEC, PNC.

目次

1. 緒言	1
2. 本研究の内容	1
3. 従来研究の調査	2
3. 1. 微小変位による接触挙動	2
3. 1. 1. 真実接触面積	2
3. 1. 2. 微小変位が作用する場合：すべり出し時の挙動	2
3. 1. 3. すべり出し時の接触状態：静止摩擦から動摩擦への遷移過程	4
3. 1. 4. 表面の硬度差が小さい場合	4
3. 2. セラミックスの摩擦特性	4
4. 室温大気中での摩擦挙動	5
4. 1. 試験片	5
4. 2. 実験装置と実験条件	5
4. 3. 実験結果	6
4. 3. 1. 同種材料の摺動試験	6
4. 3. 2. 異種材料の摺動試験	7
4. 3. 3. 相対変位速度の影響	8
4. 4. 本章のまとめ	9
5. 高温窒素雰囲気中での摩擦挙動	10
5. 1. 実験方法	10
5. 1. 1. 起動摩擦係数および動摩擦係数の測定	10
5. 1. 2. 往復摺動による摩擦係数変化の測定	10
5. 2. 実験結果	11
5. 2. 1. 高温での摩擦係数	11
5. 2. 2. 高温往復摺動による摩擦係数変化	12
5. 2. 3. 摩耗量および接触についての考察	13
5. 3. 本章のまとめ	14
6. まとめ	15
謝辞	15
参考文献	16

図表リスト

表1. セラミックスの摩擦係数と比摩耗量.	1 7
表2. SUS316の機械的性質.	1 8
表3. 各種セラミックスの機械的性質.	1 8
表4. WC-Co系超硬合金の機械的性質.	1 8
表5. 常温大気中での摩擦係数測定条件.	1 9
表6. 高温窒素雰囲気中での摩擦係数測定条件.	1 9
表7. 高温窒素雰囲気中での往復摺動試験条件.	1 9
図1. 中間熱交換器支持部の模式図.	2 0
図2. 真実接触面積の模式図.	2 1
図3. 硬質な単一円錐突起と軟質平滑面の微小変位における接触状態の変化.	2 2
図4. 軟質突起と硬い平滑面と接触状態の模式図.	2 3
図5. 接触状態の模式図.	2 3
図6. 試験片の形状.	2 4
図7. 試験装置の概要.	2 4
図8. ラップ仕上のステンレス同士の摩擦係数と相対変位の関係.	2 5
図9. ラップ仕上の超硬合金同士の摩擦係数と相対変位の関係.	2 5
図10. ラップ仕上の窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.	2 6
図11. ラップ仕上の同種材の摩擦係数の比較.	2 6
図12. 研削仕上の超硬合金同士の摩擦係数と相対変位の関係.	2 7
図13. 研削仕上の窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.	2 7
図14. 研削仕上の同種材の摩擦係数の比較.	2 8
図15. ラップ仕上の超硬合金/ステンレスの摩擦係数と相対変位の関係.	2 8
図16. ラップ仕上の窒化ケイ素/ステンレスの摩擦係数と相対変位の関係.	2 9
図17. ステンレスに対する各材料の摩擦係数.	2 9
図18. ステンレスにおける摩擦係数と相対変位の関係.	3 0
図19. ステンレスにおける摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 0
図20. 窒化ケイ素における摩擦係数と相対変位の関係.	3 1
図21. 窒化ケイ素における摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 1
図22. 炭化ケイ素における摩擦係数と相対変位の関係.	3 2
図23. 炭化ケイ素における摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 2
図24. アルミナにおける摩擦係数と相対変位の関係.	3 3
図25. アルミナの摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 3
図26. PSZにおける摩擦係数と相対変位の関係.	3 4

図27. PSZにおける摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 4
図28. 超硬合金における摩擦係数と相対変位との関係.	3 5
図29. 超硬合金における摩擦係数の相対変位速度依存性.	3 5
図30. 高温での摩擦係数測定用試験片保持治具の概要.	3 6
図31. 高温での往復摺動試験用の実験装置の概要.	3 6
図32. 高温窒素雰囲気でのステンレス同士の摩擦係数と相対変位の関係.	3 7
図33. 高温窒素雰囲気での窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.	3 7
図34. 高温窒素雰囲気での炭化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.	3 8
図35. 常温大気中または高温窒素中での同種材の摩擦係数の比較.	3 8
図36. ステンレス同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.	3 9
図37. ステンレス同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.	4 1
図38. 窒化ケイ素同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.	4 5
図39. 窒化ケイ素同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.	4 7
図40. 炭化ケイ素同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.	5 1
図41. 炭化ケイ素同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.	5 3

1. 緒言

高速炉の中間熱交換器等の大型重量機器のサポート構造部は、従来固定方式を採用してきたため、熱過渡条件等からサポート部に厳しい熱応力が生じ、機器が破壊、破損するのを防止するための対策を講ずる必要があった。そのため、サポート部が複雑な構造となったり、冷却方式の採用等により、設計が必ずしも合理的になされず、設備が大型化していた。

熱過渡時の熱応力の発生を回避し、サポート構造部を単純な構造とする合理的設計を実現するための方法として、熱過渡時に自在に変形することにより、熱応力の発生を回避するスライド型サポート構造が考えられる。この場合、サポートフランジ部分には、中間熱交換器の全重量が負荷され、かつその表面には熱膨張変形に伴う超低速の往復摺動が作用する。

そこで本研究は、スライド部に適用可能と考えられるセラミックス材料および超硬材料について、高温・窒素雰囲気・超低速でのトライボロジー試験を行い摩擦特性の調査を行なうと共に、候補材料の絞り込みに資するデータを取得することを目的とした。

セラミックスは金属材料に比して、硬度が高く、耐熱性や耐腐食性に優れた材料である。このような特性は、耐摩耗材として要求される特性と合致することから、セラミックスは耐摩耗材料として非常に魅力のある材料といえる。同材料が構造材料として注目されるようになったのは1980年代からであるが、同材料の摩擦摩耗に関する研究も時を同じくして精力的に行われるようになった。

これまでに報告された成果から、セラミックスの摩擦摩耗の挙動は金属材料と同様な分類（アブレシブ摩耗，凝着摩耗，疲労摩耗）が適用可能なことが見いだされている^{1, 2)}。しかしながら、その摩擦摩耗挙動の詳細は金属と異なることも指摘されている。例えば、アブレシブ摩耗においては、摩擦摩耗に対する抵抗（耐摩耗性）に硬さよりも破壊靱性値が影響することや³⁾、シリコン基セラミックスに関しては水^{4, 5)}や有機溶媒⁶⁾が潤滑剤として適用可能なこと等である。これらの特性はいわゆる動摩擦試験で評価されたもので、相対変位速度の極めて小さい準静的な条件下でのセラミックスの摩擦摩耗特性を検討した例は皆無である。

2. 本研究の内容

本研究は、熱膨張に起因した微小変位が作用する中間熱交換器支持部用摺動部材等へのセラミックス材料の適用可能性を明らかにすることを目的としている。従来、同容器支持部はステンレス鋼で構成され、スライド型サポート構造にした場合、窒素雰囲気の中に位置し、炉の起動・停止に伴う温度変化で生じる温度差（約300℃）によ

って熱膨張・収縮を起こし、微小変位が発生する環境となる。同容器支持部の相対変位速度は極めて小さく、かつ温度変化による相対変位は昇温過程でも降温過程でも発生するため、同一接触面内で変位はほぼ同じ往復行程をとる。図1は研究対象となる中間熱交換器支持部の模式図である。フランジ部の大きさとステンレス鋼の線膨張係数から推定すれば、相対すべりの距離は概ね1mm以下と推定される。また、接触面に作用する平均面圧は 0.24kgf/mm^2 ($=2.5\text{MPa}$) 程度（これら数字の根拠は後述する）で、ステンレスの降伏応力に比して非常に小さい。したがって、本研究の対象は、比較的軽微な荷重の作用する微小領域での往復動における接触挙動に限定される。

本研究では、まず第一ステップとして、大気中、室温での低速摺動試験による予備データ取得実験を行ない、種々の材料の起動摩擦係数および動摩擦係数の測定を行った。この結果、摩擦係数の小さい材料に対し、窒素雰囲気中、約500℃での低速摺動による起動摩擦係数および動摩擦係数の測定を行った。さらに窒素雰囲気中、約500℃での往復摺動試験により、繰り返し摺動を行ったときの摩擦係数の変化について調べた。

3. 従来研究の調査

3. 1. 微小変位における接触挙動

3. 1. 1. 真実接触面積

一般に、構造部材の表面は機械加工によって創成される。この表面を微視的にみれば必ず凹凸が存在する。よって、二つの個体表面を接触させ接触面に荷重を負荷しても、接触を支持しているのは、荷重が甚だしく大きくない限り接触面の極く一部の領域に限定される。このような接触領域は真実接触面と定義される。2表面の接触状態の模式図を図2に示す。この真実接触面積の大きさは表面の永久変形（金属であれば塑性変形に相当する）に対する抵抗によって定まる。同図は2表面間に十分硬度差が存在する場合で、軟質側表面の凹凸が変形し接触荷重を支持している様子を示したものである。

3. 1. 2. 微小変位が作用する場合：すべり出し時の挙動

真実接触面積の概念に基づいた微小変位における接触面の挙動に関しては、1960年から1970年にかけて多くの研究者によって精力的に研究された^{7~10)}。この場合、微小変位が作用すると、接触状態は表面の硬度差に大きく影響される。すなわち、2表面に十分な硬度差が存在する場合には、軟質側表面の変形に依存する。これに対して硬度差が十分でない場合には、接触状態に関して両表面の変形挙動を評価する必要がある。また、金属材料のように、加工硬化あるいは加工軟化によって変形前後で表面部の硬さが変化する場合には、接触挙動は非常に複雑なものとなる。

一般に微小変位における接触挙動の解析には、表面上の凹凸を半球ないしは円錐形状の突起群でモデル化される。久門らは半球形状突起を用いた解析を試みた^{11, 12)}。円錐形状突起を用いた解析は石塚¹³⁾や船橋ら^{14, 15)}によって検討されている。図3は船橋らの計算結果である。これは、ひとつの硬質な円錐突起が軟質な平滑表面と特定の垂直荷重で接触し相対変位を受けた場合の結果である。同図(a)は接線方向変位に対する垂直方向変位、すなわち突起の食い込み深さを示したものである。垂直方向変位は最初、接線方向変位の増加に伴い増加していくが、その上昇率は減少していく。特に突起の半頂角(=β)が大きい場合にはその傾向は顕著である。接線力比(垂直荷重と接線力の比)も同様な傾向を示し、接線方向変位が特定値に達すると以後の増加はほとんどない。(c)はこれらの結果から、接線力比と垂直方向変位の関係を示したものであるが、突起の半頂角によらず垂直方向変位の増加に伴い接線力比は増加する傾向を示す。ただし、突起の半頂角が小さい、すなわち'尖った'突起では、垂直方向変位が大きくなっている。(d)は凝着摩擦係数を変化させた場合の結果である。この凝着摩擦係数は平滑な表面に作用する静止摩擦係数である。凝着摩擦係数μの増加に対して接線力比は大幅に増加する。

このように、単一の硬質突起が軟質表面に食い込んだ状態で相対変位が付与されると、突起の食い込み深さが増大する。また、摩擦抵抗は突起の鋭さよりも2表面間の凝着力に大きく影響される。この凝着力は2表面間の化学的親和性に対応するものであり、金属の場合には相互溶解度に対応する。また、彼らは超硬合金の円錐と無酸素銅平滑面を用いた実験を行い、これらの計算結果の妥当性を検討している。上記のような硬質表面の食い込みは、一般に2表面間の硬さの差異が3倍以上必要である。この条件を満足しない場合での接触状態は軟質突起と硬質平滑面の接触として代表することができる。その接触状態は図2のようで、突起が相手側表面に食い込むことはなく、接触によって突起が変形し荷重を支持する。この場合、真実接触面積 A_r は軟質側表面の流動圧力 P_m と接触荷重 W によって次式のように定まる。

$$A_r = W/P_m$$

一般に、 P_m は材料の降伏応力の3倍程度である。実際に接触面における拡がり電気抵抗の測定結果より、上式の妥当性は確認されている。

次に相対変位が生ずる場合、接触面には図4のように摩擦抵抗 F が作用する。真実接触面積 A_r は表面の流動応力によって一義的に定まるので、摩擦抵抗の発生によって拡大する¹⁶⁾。しかし、接線力比(=摩擦係数, μ)は、

$$\mu = F/W = \tau_{Ar}/\sigma_{Ar} = \tau/\sigma$$

となるため真実接触面積によらず一定となる。ここで、 τ は軟質側の剪断応力、 σ は単位面積当たりの垂直応力である。

3. 1. 3. すべり出し時の接触状態：静止摩擦から動摩擦への遷移過程

前節では巨視的すべりに至るまでの過程、いわゆる静止摩擦状態での接触挙動について示した。本節では静止摩擦から動摩擦に至る過程での接触面の挙動を検討する。この場合も突起の食い込みの有無によって接触の挙動は異なる。図5は突起が相手表面に食い込む場合の模式図である。静止状態では、接触荷重は突起の食い込んでいる表面全域で支持される（I）。この状態で相対変位が付与されると、接触領域は突起の前方のみに限定されるので、接触荷重を支持するためにはさらに接触面積を増加させる必要がある（II）。このため、突起は相手表面側に沈み込む（III）。突起の食い込みによる相手表面周囲の盛り上がりを見れば、動摩擦も突起の前方のみが接触に関与することになる。

突起の食い込みが無視できる場合、微小変位領域では接線力の発生によって真実接触面積が増加するため、摩擦係数は変化しない。したがって、接触面の凝着係数が変化しない限り、動摩擦状態では摩擦係数の増加はない。むしろ、変位速度が大きいと両表面が完全に凝着できないため、動摩擦係数は低下する。硬質突起と軟質表面の接触においても同様である。

3. 1. 4. 表面の硬度差が小さい場合

同種材料同士の接触において、真実接触面積の大きさは、硬質表面との接触と同様に表面の材種の流動圧力と負荷荷重の大きさの比によって定まる。また、軟質表面側の凹凸が硬質表面側よりも激しい場合も、真実接触面積の大きさは軟質側表面の変形、すなわちその流動圧力と負荷荷重によって求められる。

さて、これらの組み合わせの接触面に相対変位が作用すると、接触面（突起）の変形によって真実接触面積は増大する。この真実接触面積の増大によって、すべり出し時の摩擦抵抗（静止摩擦係数）は上昇する。非常に清浄な同種金属同士を接触させた場合、その摩擦抵抗は無限大に到達することも実証されている。しかし、実際の表面には酸化膜や吸着膜が存在し、摩擦抵抗は有限の値を示す。この有限値は2表面間の親和性に対応する。

3. 2. セラミックスの摩擦特性

セラミックスはその特質から耐摩耗材料として非常に魅力的な材料である。このため、同材料の摩擦摩耗特性については数多くの研究成果が報告されている^{17, 18)}。各種セラミックスの摩擦摩耗特性を表1に示す¹⁸⁾。同表に掲げた摩擦係数は同種材同志の組み合わせにおける動摩擦係数の値である。試験方法は概ねピンオンディスク型摩擦試験装置によって行なわれたものである。大気中での摩擦係数の大きさは概ね0.4から0.9程度である。表中に記載されている値は、実験条件から摩擦係数は動摩擦係数を示し、比摩耗量は実験前後における試験片の形状変化より算出された体積摩耗

量を摩擦距離と負荷荷重で除した値と推定される。

4. 室温大気中での摩擦挙動

4. 1. 試験片

本実験では高速炉の構造材料であるステンレス (SUS316FR) を基準として用いた。評価する材料として、各種セラミックス、すなわち窒化ケイ素、炭化ケイ素、アルミナ、部分安定化ジルコニア (PSZ) および超硬合金 (WC-Co) を選択した。表2から表4にそれぞれの材料の諸特性を示す。

これらの材料を図6のような形状に加工し、試験片として用いた。なお、試験片表面については研削方向を規定して加工を行った。また、一部の試験片にはダイヤモンドスラリーを用いてラップ仕上げを行い鏡面とした。これは、材料のトライボロジー特性には表面粗度の影響も無視できないため、異なる材料間での摩擦摩耗特性を比較するためには、表面粗度は統一することが望ましい。現状の機械加工で最も平滑な表面が得られる方法はラップ仕上げによるものであることから、これを基準とした。一方、実用を考慮した場合、実機に用いられる表面仕上げは研削仕上げ面であると考えられることから、この評価も必要である。よって、ラップ仕上げ面 (表面あらさ： $<0.1\mu\text{m}$) と研削仕上げ面 (同： $\sim 1.0\mu\text{m}$) の2種類の表面仕上げを行った試験片を用意した。

4. 2. 実験装置と実験条件

従来から摩擦摩耗特性評価に用いられている直線往復摺動試験装置 (Bowden-Leben型試験機) や一方向回転摺動試験装置 (Pin on Disk型試験機) では、その最低の相対変位速度が数 mm/min .と、本研究の対象としている相対変位速度よりはるかに大きい。そこで、超低速での摺動試験を行うために、万能引っ張り圧縮試験機を用い、これに治具を取り付けることにより、試験を行うこととした。すなわち、引っ張り圧縮試験機では、そのクロスヘッド速度が数 mm/hr .に設定出来ることから、試験できる相対変位速度は、従来の摩耗試験機に比較して一桁以上小さい。また、高温および窒素雰囲気での試験を行う方法として、摺動部を覆うような雰囲気調整用ボックスを設けることとした。

実験装置の概要を図7に示す。同装置は固定側試験片 (円板試験片) で挟み込みんだ可動側試験片 (平板試験片) を一定の変位速度で垂直方向に変位させるものである。可動側試験片と固定側試験片の間の接触面への荷重は、接触面の中心位置を同一軸上に配置されたバネによって負荷される。装置は万能試験装置に固定され、試験片の上面より変位を加える。実験中の負荷荷重と摩擦力は、荷重変換器で測定した。なお、同装置は高温環境の試験に対応するように試験部周囲を箱形構造とし、外部雰囲気と遮蔽できるようにした。

実験は最初に所定の負荷荷重で固定側試験片を挟み込み、相対変位を加えるものである。実験条件を表5に示す。この条件設定の根拠を以下に示す²¹⁾。Naを含めた中間熱交換器(IHX)の重量は、約122tonであるが、20%の余裕をみて150tonと仮定する。このとき、フランジ接触圧力は以下に示すように、 0.116kgf/mm^2 (1.14MPa)となる。

$$\text{接触面圧} = \text{IHX重量}(W) / \text{接触面積}(A0) = 0.116\text{kgf/mm}^2$$

接触面外径(Do)	: 3540mm
接触面内径(Di)	: 3300mm
接触面積(A0)	: $1.29 \times 10^6\text{mm}^2$
IHX重量(W)	: $1.5 \times 10^5\text{kg}$

ただしフランジ形状の最適化およびボルト穴等による接触面積減少を考慮して、自重による面圧の約2倍である 0.24kgf/mm^2 を試験圧力として設定した。今回用いた試験片直径が8mmであることから、その接触面積は約 50mm^2 である。試験片の面取りによる実効接触面積の減少を考慮し、試験圧力を満足するため、押し付けの設定荷重を10kgfとした。また、熱膨張・収縮により生ずるすべり速度は、0.数mm/Hrであるが、現実の試験機で実験可能なすべり速度の最小値は、0.005mm/minである。実験においては、現実的なすべり速度として0.05mm/minを選定し、一部、相対変位速度の影響をみるために0.005および0.5mm/minでの挙動も調べた。相対変位は最大0.5mmとしたが、これは予備実験から、0.5mm程度摺動させれば安定な動摩擦係数を示すことが確認できたためである。なお、試験雰囲気は常温大気中(18~23℃, 40~60%)であった。

4. 3. 実験結果

4. 3. 1. 同種材料の摺動試験

①ラップ仕上材料の摩擦係数

ラップ仕上の同種材料同士を摺動させたときの摩擦係数の変化例を図8~10に示す。相対変位速度が0.05mm/min.のときのラップ仕上を行ったステンレス同士の相対変位に対する摩擦係数の変化(摩擦係数の経時変化)を図8に示す。摩擦係数は摺動開始直後ではほとんど変化しないものの、0.02mmの地点から0.25程度まで急増し0.2mmまで一定の値をとる。さらに変位が増加すると摩擦係数は再び急増し最大値を示した後、僅かに減少し特定値に収斂する。図9はラップ仕上の超硬合金同士の結果である。この場合、摩擦係数は最初、変位の増加に伴い急増し、約0.07mmの地点で0.3程度に達し以後の上昇は観察されなかった。図10はラップ仕上の窒化ケイ素同士の結果である。摩擦係数は最初、急増し最大値を示した後は緩やかに減少し最終的には変動を繰り返すようになる。このように、摩擦係数の経時変化は材種の差異に大きく影響を受けるものの、その最終的な値の差異は比較的小さい。

図1 1にラップ仕上の各種材種の静止摩擦係数と動摩擦係数の値を示す。静止摩擦係数は各試験における摩擦係数の最大値であり、動摩擦係数は実験終了直前の値である。なお、摩擦係数に変動がみられる場合には、変動が開始する直前値とした。図示のごとく静止摩擦係数、動摩擦係数ともに、窒化ケイ素同士が最も高い。これに対して炭化ケイ素で0.3程度で最小である。ステンレス同士の結果が0.42（静止摩擦係数）、0.36（動摩擦係数）であることから、他の3種の材料（アルミナ、超硬合金、PSZ）はステンレスと同程度である。今回の実験は相対変位速度一定の下での実験であるが、静止摩擦係数と動摩擦係数の差異が小さいほどすべり出し時の挙動が穏やかになる。換言すれば、摩擦係数が大きいということは、荷重負荷速度を一定とした場合、巨視的すべりに遷移する際に相対変位は急激に増大することになる。したがって、今回、評価した材料の中では炭化ケイ素が最も優れた性質を有するものと考えられる。

②研削仕上材料の摩擦係数

研削仕上の同種材料同士を摺動させたときの摩擦係数の変化例を図1 2および図1 3に示す。図1 2は超硬合金における研削仕上面同士の結果である。この場合、摩擦係数は0.35程度に収斂する。同経時変化は相対変位が0.15から0.2mmの間で摩擦係数の減少が観察されるが、これは試験装置と可動側試験片の間のすべりによるものと推定される。図1 3は窒化ケイ素の研削仕上面同士の結果である。摩擦係数は実験開始直後から急増するが、その勾配は一様でない。

図1 4に研削仕上の各種材種の静止摩擦係数と動摩擦係数の値を示す。各材種における摩擦係数の大きさはラップ仕上の場合と異なり、炭化ケイ素やアルミナの値が非常に大きい。特に炭化ケイ素の静止摩擦係数は、ラップ仕上の場合の2倍程度となっている。他の3種類（超硬合金、窒化ケイ素、PSZ）では、静止摩擦係数、動摩擦係数ともに0.4程度と比較的低く安定した値を示す。この中でアルミナや炭化ケイ素の破壊靱性値は他の3種に比して小さい。一般に破壊靱性の低い材料では、加工による表面の凹凸が激しくなることを考慮すれば、このような摩擦係数の差異は表面の凹凸による影響を推定される。すなわち、凹凸の激しい表面では、その噛み合いによって、摩擦係数に及ぼす表面あらかさの影響が大きくなるためである。

4. 3. 2. 異種材料の摺動試験

ステンレスと各種材料を組み合わせたときの摩擦係数の経時変化例を図1 5および図1 6に示す。この場合、固定側試験片を各種材料とした。図1 5はラップ仕上のステンレスと超硬合金の結果である。摩擦係数は0.2mm付近の変位で最大値を示した後、急激に減少し変動を繰り返すようになる。この変動幅は比較的小さいものであるが、0.35mmまでの相対変位では収斂する様子はみられなかった。図1 6はラップ仕上のステンレスと窒化ケイ素の場合である。摩擦係数は実験初期に一度最大値を示すが、

再び上昇を続け最終的に0.45程度に達する。

以上のように摩擦係数の経時変化は材種やその組み合わせによって特徴的な挙動を示すが、その大きさは概ね0.3から0.6程度である。しかし、巨視的なすべりに移行していると判断されるような変位距離では、一部を除いて摩擦係数は非常に安定した値を示す。

図17に相手材をステンレスとした場合の静止摩擦係数と動摩擦係数の値を示す。これらの結果はラップ仕上面で得られたものである。図11の同種材同士の結果に比して摩擦係数は全体的に低いが、超硬合金のみが高い値を示す。これは、超硬合金の場合、粒界層にはコバルト (Co) が存在し、これがステンレスと強く凝着する。他の材種はセラミックスの多結晶体であり、粒界層はガラス相であることから、ステンレスに対する凝着力は小さい。よって、超硬合金の摩擦係数が大きいのは、凝着力の差異によるものと推定される。セラミックスの場合を比較すると、僅かではあるが窒化ケイ素が静止摩擦係数、動摩擦係数ともに低い値を示す。

4. 3. 3. 相対変位速度の影響

研削仕上に試料で測定した摩擦係数はラップ仕上の試料と異なったため、材料本来の摩擦挙動を測定するため、ラップ仕上を行った試料を用い、摩擦係数の相対変位速度依存性を調べた。

ステンレス同士の相対変位速度を変化させたときの摩擦係数の経時変化を図18に示す。相対変位が0.03mm以下の実験初期において、摩擦係数は相対変位速度の大小に拘らず変位の増加に伴いほぼ直線的に上昇する。相対変位が0.03mmを越えた地点から、摩擦係数の挙動は相対変位速度の差異による違いが観察される。特に、相対変位が0.03mmから0.2mmの間で摩擦係数の差異が顕著に表れる。例えば相対変位速度が10mm/minの場合では、実験初期における摩擦係数の増加は0.05mm程度まで維持され、この後の相対変位の増加に伴う摩擦係数の増加率は小さくなる。相対変位が0.2mmに達すると、いずれの相対変位速度においても摩擦係数の挙動は変位の増加に伴い緩やかに上昇する傾向を示す。図19はステンレスの場合の摩擦係数と相対変位速度の関係を示したものである。この場合、各相対変位速度における摩擦係数の大きさは、相対変位が0.3mm付近の時の値で代表した。摩擦係数の大きさは0.6から0.8程度の値を示すが、変位速度が0.01mm/minと0.5mm/minの時に大きな値を示すものの、概ね相対変位速度の増加に低下する傾向にある。

セラミックス（窒化ケイ素、炭化ケイ素、アルミナ、PSZ）及び超硬合金の摩擦挙動（相対変位と摩擦係数の関係、摩擦係数の相対変位速度依存性）を図20から図29に示す。これらの材料については、相対変位が0.2mmの地点で実験を打ち切り、同地点における値で各条件における摩擦係数とした。

窒化ケイ素の場合（図20と図21）、摩擦係数の増加は0.03から0.05mm以下の

相対変位で観察され、これ以上では、摩擦係数はほぼ一定となる。また、摩擦係数の大きさは0.3から0.5の範囲に分布するが、相対変位速度の上昇に伴い僅かではあるが減少する傾向を示す。

炭化ケイ素の場合（図2 2と図2 3）、摩擦係数の増加は0.03mm以下の相対変位で観察され、これ以上では、摩擦係数の変化はほとんど観察されない。また、摩擦係数の大きさは相対変位速度によらず、0.4程度であった。

アルミナの場合（図2 4と図2 5）、摩擦係数の増加が0.1mm程度まで維持される条件（10mm/min, 0.1mm/min）も存在し、この増加過程においても、その勾配が一樣でない場合も存在する。摩擦係数の大きさは0.35程度であるが、相対変位速度の増加に対する摩擦係数の減少がみられない。

PSZの場合（図2 6と図2 7）、摩擦係数の上昇は0.2mm程度まで維持され、これ以後の上昇はみられない。摩擦係数の大きさは0.2から0.3の間であるが、この場合にも相対変位速度に関する摩擦係数の減少傾向は明確ではない。

超硬合金の場合（図2 8と図2 9）、相対変位速度による摩擦係数の挙動の差異は0.1mm以下の相対変位で観察され、これ以後において摩擦係数の変化はみられない。また、摩擦係数の大きさは0.2から0.3程度に分布しているが、相対変位速度の増加による摩擦係数の減少傾向は観察される。

以上の5種類の材料を比較すると、PSZの場合に最も低い摩擦係数が得られ、超硬合金、アルミナ、窒化ケイ素については相対変位速度による差異が比較的大きい。また、炭化ケイ素については、相対変位速度の変化に対して摩擦係数が非常に安定している。

相対変位速度依存性を測定した実験で得られた摩擦係数と3. 2. 1節に示した摩擦係数の大きさとの差があるが、材種間での摩擦係数の大小関係の傾向は同じであった。同種材の接触において、最も摩擦係数が安定しているのは炭化ケイ素であった。摩擦係数の大きさから判断すれば、PSZのほうが炭化ケイ素に比べて低い摩擦係数を示すことになるが、500℃付近における高温強度を考慮すれば、PSZの場合、強度低下によって掘り起こしの効果が現れ摩擦係数が上昇することが予想される。

4. 4. 本章のまとめ

ステンレス鋼（SUS316FR）、窒化ケイ素、炭化ケイ素、アルミナ、部分安定化ジルコニア（PSZ）および超硬合金（WC-Co）を用い、常温大気中での摩擦実験を行った。その結果、セラミックスおよび超硬合金は低速の摺動においてもステンレスよりも低い摩擦係数を示すこと、表面あらかが大きいと摩擦抵抗が大きいこと、ラップ仕上面では炭化ケイ素同士の組み合わせが低い摩擦係数を示すこと等が確認された。ステンレスと他の材料と組み合わせた場合、窒化ケイ素やアルミナが低い摩擦抵抗を示した。また、同種材料での相対変位速度を変えて行った摩擦試験から、セラミックス

および超硬合金は、ステンレスに比して広範な速度域で安定に低い摩擦係数を示した。セラミックスの中でPSZが最も小さい摩擦係数を示し、また炭化ケイ素はどの相対変位速度でも安定した摩擦挙動を示した。

5. 高温窒素雰囲気中での摩擦挙動

室温大気中でのステンレス、セラミックスおよび超硬合金の摩擦係数を調べた結果、セラミックス及び超硬合金は金属材料（ステンレス）に比して低い摩擦係数を示すことが明らかとなった。この中で、最も低い摩擦係数を示したのがPSZで、炭化ケイ素は比較的広範囲な相対変位速度で安定した摩擦係数を示した。

個々の材料の機械的性質、特に高温強度を考慮した場合、稼働環境（500℃）において、常温時と同程度の強度が維持される材料は窒化ケイ素と炭化ケイ素であるので、高温摩擦試験の評価対象材料として、これらの材料を選択した。

5. 1. 実験方法

5. 1. 1. 起動摩擦係数および動摩擦係数の測定

高温環境（500℃，N₂中）における試験を実施するために、前章で示した試験装置にヒーターを内蔵した取り付け治具を用いて試験片を固定し、摩擦係数を測定した。取り付け治具の概要を図30に示す。本試験治具は、可動側試験片保持具と発熱体（ヒーター）から構成される。発熱体は治具内に2本挿入されており、試験片は発熱体の間に位置し高温環境は治具ごと可動側試験片を加熱することによって達成される。

試験方法は基本的に常温における試験と同一であり、可動側試験片を固定側試験片で挟み込み相対変位を与えるものである。なお、雰囲気の置換（大気中からN₂中）は試験部周囲にN₂ガスを連続的に供給（約100cc/min）することによって行った。

本実験では、試験片の加熱は局所的なものであり、試験治具全体としては長時間の加熱に対し安定しない。常温の試験結果より摩擦係数の相対変位速度依存性はそれほど大きくない。そこで、試験治具の安定性を考慮して比較的大きな相対変位速度（0.5mm/min）を設定した。実験条件を表6に示す。なお、同一の条件で3回実験を行った。実験に先立ち発熱体に通電し治具ごと可動側試験片を加熱する。試験片の温度は接触式の温度計で随時測定した。試験片表面の温度が所定の値（500℃）に達した後、固定側試験片を所定の荷重で接触させ実験を開始した。

5. 1. 2. 往復摺動による摩擦係数変化の測定

これまでの実験では、一方向に1回摺動させたときの起動摩擦係数および動摩擦係数の測定を行ったが、熱膨張収縮による往復摺動を評価する必要がある。そこで、往復摺動試験を行ったときの摩擦係数変化を測定することとした。これまでは、万能引

っ張り圧縮試験機を用いて摩擦係数の測定を行ってきたが、同試験機で多数回の往復摺動を行うのが困難であったため、図3-1に示すような往復摺動試験機を用いることとした。ここで、可動側試験片はホルダを介して装置の往復運動部に、固定側試験片はフレームに固定される。このフレームの中にはヒーターが内蔵されており、これに通電することによって試験片表面の温度を調整することができる。実験中の摩擦面の温度状態は固定側摩擦面端部に位置する熱電対によって測定、制御される。

試験片の形状は可動側試験片が $\phi 4\text{mm} \times 10\text{mm}$ の円筒であり、その一端面を摩擦面とした。固定側試験片は $10 \times 25 \times 5\text{mm}$ （幅 \times 長 \times 板厚）ないしは $\phi 25 \times 5\text{mm}$ の平板である。固定側試験片の摩擦面はラップ仕上によって鏡面とした。可動側試験片の摩擦面は、円筒研削盤によって仕上げた後、 $6\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ を用いてラップ仕上を施し、#800番および#1500番のダイヤモンドペーパーを用いて端面の糸面取を実施した。これは、端面のかけの発生を防止するためである。

実験条件を表7に示す。往復摩擦試験においては、負荷荷重を 0.25kgf とした。これは起動摩擦に用いた試験片形状に比して接触面積が $1/4$ となるためである。摩擦の振幅も起動摩擦の結果を考慮して 0.2mm とした。摩擦の回数は500回とし、雰囲気条件は大気中乾燥状態と高温窒素中（ $500 \sim 510^\circ\text{C}$ ）とした。試験片の組み合わせは同種材料とし、同一の条件と組み合わせで複数回実験を行った。

実験は、試験片を所定の位置に固定した後、両試験片を静かに接触させ摩擦させるものである。実験中の摩擦力は可動側試験片より測定した。なお、高温環境で実験を行う場合には、両試験片を接触させる前に所定の温度に加熱し、接触後には約2分の保持時間を設けた。可動側試験片は摩擦方向に対して振幅が 0.2mm 、周波数 1Hz の単振動をすることになるが、その最高速度（最大摩擦速度）は、約 $20\text{mm}/\text{min}$ となる。このような摩擦速度では、接触面に作用する摩擦発熱に起因する温度上昇は極めて小さく、無視しうるものである。よって、今回の実験においては、摩擦面の温度上昇は考慮していない。

5. 2. 実験結果

5. 2. 1. 高温での摩擦係数

ステンレス同士の摩擦曲線を図3-2に示す。摩擦係数は実験初期の数十 μm の相対変位の間に急激に増加する。その後、摩擦係数は変動を伴いながら緩やかに上昇し、明確な極大値はみられなかった。

窒化ケイ素および炭化ケイ素同士の摩擦曲線をそれぞれ図3-3と図3-4に示す。窒化ケイ素の場合、摩擦係数の極大値が観察されたのは1回のみである。中には、摩擦係数が非常に緩やかに増加する場合もあった。しかし、最終的には 0.4 程度の値に達し飽和するようである。炭化ケイ素の場合、摩擦曲線には極大値が明確に観察される。また、3回の実験においても結果のばらつきが非常に小さい。

今回の実験では、摩擦曲線に極大値が観察されない場合もあったので、各条件での摩擦係数を実験中に記録された最大値で代表した。常温の結果と比較したものを図35に示す。常温における摩擦係数は、各速度条件で得られた値の平均値である。ステンレスの場合、高温の摩擦係数は常温に比して非常に大きな値を示す。これに対して、炭化ケイ素および窒化ケイ素では摩擦係数の差は常温と高温でほとんどない。

500℃の温度状態の下では、ステンレスの強度は常温に比してかなり低下しているものと判断され、この結果として表面の降伏応力も低下し真実接触面積も増大する。また、高温環境では表面も化学的に活性な状態となり、接触面は常温に比して凝着力は大きくなる。加えて、雰囲気を窒素に置換しているため表面は酸化しにくい状態である。以上から、高温環境においてステンレスの摩擦係数が非常に大きくなるのは、温度上昇に伴う凝着力の増大によるものと判断される。

一方、窒化ケイ素および炭化ケイ素の場合、500℃程度の温度では材料の機械的性質は常温とほとんど差異はない。凝着力に関しても、これらのセラミックスの表面に存在する酸化膜は800℃程度まで安定であるから、常温と500℃の環境では差異はないものと判断される。したがって、機械的性質や凝着力に差異が無いことから、高温環境においても摩擦係数に変化が生じなかったと判断される。

5. 2. 2. 高温往復摺動による摩擦係数変化

①ステンレス同士の場合

ステンレス同士の結果を図36に示す。常温における摩擦係数の経時変化は約0.7から0.8程度で推移する。高温では実験初期に1を越えるような非常に高い摩擦係数が記録された。特に1回の試験(500℃-1)では高い摩擦回数が200回程度の摩擦回数まで維持された。摩擦面の観察結果を図37に示す。常温の場合、接触に関与しているのは、摩擦面の端部の一領域だけであって、片側の摩擦面には凝着の痕跡が、他方の摩擦面には凹みが観察される。高温で試験した場合にも同様な傾向を示した。

ステンレスの場合、常温と高温における差異は主として実験初期に表れ、高温では非常に大きな摩擦係数を示す。このような摩擦係数の大きさは起動摩擦の結果に対応しており、その大きさは1を越えていることから、接触面では激しい凝着が発生しているものと考えられる。

②窒化ケイ素同士の場合

窒化ケイ素同士の結果を図38に示す。常温においても高温においても摩擦係数の挙動は実験毎大きな差異を示す。特に高温では0.8程度の非常に高い摩擦係数が測定される場合もあれば、0.2を下回るような低い値も測定された。窒化ケイ素同士の摩擦面の観察結果を図39に示す。窒化ケイ素の場合には、摩擦面の観察結果と摩擦係数の間には、次のような関係が認められる。常温において実験初期から中期にかけて

非常に高い摩擦係数を示す場合（室温-1）、可動側摩擦面の端部には”欠け”の発生が認められる。これに対応する固定側摩擦面の上には、白色の摩耗粉が観察される。一方、摩擦係数が非常に低い場合（室温-3）には、摩擦面の損傷はほとんど認められない。高温環境においても摩擦面の損傷と摩擦係数の対応は同様であり、比較的高い摩擦係数を示した場合には摩擦面上に損傷が観察され、摩擦係数が低い場合（500℃-2）では損傷は観察されない。

窒化ケイ素において最も大きな摩擦係数を示した場合では、摩擦面で激しい損傷が確認された。特に常温の場合では、摩擦面の巨視的な欠けも観察された。逆に常温、高温共に摩擦係数が小さい場合には摩擦面の損傷は小さい。このことから、損傷による摩擦表面の凹凸が摩擦係数の大きさに影響しているものと考えられる。一方、高温において起動摩擦係数よりも非常に小さい摩擦係数（0.15～0.2）が測定された場合もあったが、これについては、今後の検討が必要である。

③炭化ケイ素同士の場合

炭化ケイ素同士の摩擦係数の結果を図40に示す。4回の実験ともに摩擦係数は実験中安定しており、各1回の実験で高温と常温共に0.6程度の値が測定されたが、他の実験結果では低い値が測定された。特に高温では非常に低い値（0.1程度）が測定された。摩擦面の観察結果を図41に示す。この場合、窒化ケイ素のような摩擦面端部の欠けの発生は確認されなかったが、摩耗の痕跡は摩擦面の一部で確認された。この中で興味深いのは、高温において中央部に損傷が生じた場合であり、このときには非常に低い摩擦係数が確認された。

炭化ケイ素でも窒化ケイ素と同様に、損傷が激しい場合には摩擦係数が大きい。この場合にも高温において起動摩擦よりも低い摩擦係数が測定されたが、これについては今後の検討が必要である。

5. 2. 3. 摩耗量および接触についての考察

供試材料の比摩耗量（単位摩擦距離、単位負荷荷重に対する体積摩耗量）は大まかに、セラミックスで 10^{-8} mm²/N、ステンレスで 10^{-6} mm²/Nである¹⁸⁾。本実験の条件は負荷荷重が25N、摩擦距離は往復0.2 mmの行程を500回繰り返すことから、 $2 \times 0.2 \times 500 = 200$ mm = 0.2 mである。したがって、予想される体積摩耗量は

$$\text{セラミックス} : 10^{-8} \times 25 \times 200 = 5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$$

$$\text{ステンレス} : 10^{-6} \times 25 \times 200 = 5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$$

となる。

比重を考慮して重量摩耗量に換算しても、その大きさは

$$\text{セラミックス} : 3 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-5} = 1.5 \times 10^{-7} \text{ g、}$$

$$\text{ステンレス} : 8 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^{-3} = 4 \times 10^{-5} \text{ g}$$

と非常に小さいので、本実験においては摩耗量を測定することはできなかった。しかし、セラミックスの摩擦係数は摩擦面の様子に対応し、摩擦面の損傷が大きいほど大きいことになる。特に可動側摩擦面端部で欠けが発生した場合には実験初期に非常に大きい値を示した。

今回は面接触状態での往復摩擦試験を試みたが、大部分の実験結果において接触は可動側摩擦面の端部に集中したが、セラミックス同士の場合には欠けが発生し結果として非常に高い摩擦係数となった。この欠けの発生に関しては、接触面近傍に精密な曲率を設けることによって回避可能であると考えられる。すなわち、接触が摩擦面端部に集中する問題については、一方（本実験の場合には可動側）の表面に応力集中を回避するような曲率を付与することで十分対処可能と推定される。今回の実験では摩擦距離が非常に短い（0.2m）であったため摩耗量が測定できず、セラミックスとステンレス間の摩耗特性の差異を評価できなかったが、摩擦面の形状に工夫を凝らし摩擦距離を延長することによって同評価は可能となる。しかしながら、摩擦面の損傷挙動と摩擦係数の結果から、常温および高温のいずれの条件においてもセラミックスは従来材料であるステンレスに比して非常に優れた摩擦特性を有すると考えられる。

5. 3. 本章のまとめ

ステンレス鋼（SUS316FR）、窒化ケイ素、炭化ケイ素、アルミナ、部分安定化ジルコニア（PSZ）および超硬合金（WC-Co）を用い、常温大気中での摩擦実験を行った。その結果、高温環境での摩擦曲線の挙動は、常温で試験した場合と類似した傾向を示し、摩擦係数は実験初期に急激に増加しその後の変化は小さい。ステンレス同士を組み合わせた場合、摩擦係数は1を超える大きな値を示し、急増した後も上昇する場合も見られた。セラミックス（炭化ケイ素、窒化ケイ素）同士では、摩擦係数は実験初期に極大値を示した後に緩やかに減少し特定値に収束する傾向が観察され、常温とほとんど差異はみられなかった。特に炭化ケイ素は非常に安定した摩擦挙動を示した。

往復摩擦試験においても摩擦係数の挙動と同様に、セラミックスは摩擦面の損傷が小さい限り、ステンレスに比して低い摩擦係数を示す。往復摺動においてもステンレスでは高温で、1を超えるような非常に大きい摩擦係数を示すが、セラミックスでは欠けに代表されるような激しい損傷が発生してもこのような大きな摩擦係数には達しない。

6. まとめ

高速炉の中間熱交換器等の大型重量機器のサポート構造部を、熱応力を回避するスライド型サポート構造とすることの可能性を考え、スライド部に適用可能と考えられるセラミックス材料および超硬材料について、常温大気中および高温窒素雰囲気中の低速のトライボロジー試験を行い摩擦特性の調査を行なった。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 常温大気中での低速の摺動において、セラミックスおよび超硬合金はステンレスよりも低い摩擦係数を示すこと、表面あらかさが大きいと摩擦抵抗が大きいこと、ラップ仕上面では炭化ケイ素同士の組み合わせが低い摩擦係数を示すことが確認された。
- ② 同種材料での相対変位速度を変えて行った摩擦試験から、セラミックスおよび超硬合金は、ステンレスに比して広範な速度域で安定に低い摩擦係数を示すこと、セラミックスの中でPSZが最も小さい摩擦係数を示すこと、また炭化ケイ素はどの相対変位速度でも安定した摩擦挙動を示すことが明らかとなった。
- ③ 高温窒素雰囲気中ではステンレス同士の摩擦係数は1より大きくなるのに対し、セラミックス（炭化ケイ素、窒化ケイ素）同士では常温大気中とほとんど変わらない摩擦係数を示すことが明らかとなった。
- ④ 高温窒素雰囲気中の往復摺動試験においても、ステンレスの摩擦係数は1より大きい値を持続するのに対し、セラミックスでは欠けに代表されるような激しい損傷が発生してもこのような大きな摩擦係数には達しないことが明らかとなった。

本研究では、高温での往復摺動試験を連続して行ったが、実際の炉の場合、起動から停止までの長時間の運転で接触部が高温に保たれることになるため、圧着の影響などが懸念される。今後は、スライド型サポートの構造も含め、運転条件に則した条件でのセラミックスの適用性を評価していく必要がある。

謝辞

本実験を遂行するにあたり、試験治具の作製から実験まで（財）ファインセラミックスセンター 客員研究員 宇佐美初彦博士（名城大学講師）および同センター 鈴木章平部長のご助力を頂きました。記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) K. G. Bundinski, 'Surface engineering for Wear Resistance' (1988) 15 Oxford.
- 2) I. Iluic, 'Tribology of Thin Layer', (1988) 22 Oxford.
- 3) 石垣博行, 日本潤滑学会北陸大会予稿集 (1984) 89.
- 4) H. Tomizawa & T. E. Fisher, ASLE Trans., 29 (1986) 481.
- 5) H. Tomizawa & T. E. Fisher, ASLE Trans., 30 (1986) 41.
- 6) S. Sasaki, Proc. Japan Int. Trib. Conf., (1990) 1431 Nagoya.
- 7) 久門 輝正 他, 機論第3部529, 383 : 621 (1976) 2080.
- 8) Nadir Patir & H. S. Cheng, ASME Trans 100 (1978) 12 .
- 9) Y. C. Chou et al, J. Trib. 107 (1985) 491.
- 10) K. Kato et al, Wear, 80 (1982) 307.
- 11) 久門輝正 他, 機論C編 46 (1980) 137.
- 12) 久門輝正 他, 機論C編 46 (1980) 781.
- 13) 石塚静夫, トライボロジスト, 35 (1990) 122.
- 14) 船橋釘一 他, 潤滑, 29 (1984) 613.
- 15) 船橋釘一 他, 潤滑, 29 (1984) 657.
- 16) F. P. Bowden & D. Tabor, 'The Friction and Lubrication of Solids', (1986) Oxford .
- 17) 加藤康司, トライボロジスト, 34 (1989) 102.
- 18) 木村次 編, ' トライボロジーデータブック' (1991) 361 (株) テクノシステム.
- 19) リファセラムカタログ (財団法人ファインセラミックスセンター) .
- 20) 京セラカタログ.
- 21) 一宮正和、私信.

表1. セラミックスの摩擦係数と比摩耗量¹⁷⁾

セラミックス	真 空		空 気		v:速度、W:荷重、p: 圧力、R:ピン半径
	μ	Ws,mm ³ /N·m	μ	Ws,mm ³ /N·m	
ダイヤモンド	0.3~0.5		0.05~0.15	4.5×10^6	v=8400mm/s W=5N R=0.05mm
サファイア (0001) [1120]	0.5~0.75 0.75		0.15~0.26 0.75		v=0.13mm/s W=2.5~15N R=3/16inch
Si ₃ N ₄ (a)HIP	0.85	15×10^4 乾燥Ar,板	0.75	1.3×10^3 98%湿度,板	v=1mm/s W=10N p=0.6GPa R=3mm
(b)HP	0.68	6.5×10^5 乾燥N ₂ ,ピン	0.44	3.0×10^6 90%湿度,ピン 平面	v=150mm/s W=10N p=3.1MPa 平面
SiC (a)	0.84	4.9×10^5 (ピン) 4.5×10^5 (板) 乾燥,N ₂			v=300mm/s W=9N R=6.4mm
(b)			0.80	1.5×10^5	v=20mm/s W=40N p=0.1MPa 平面
Al ₂ O ₃ (a)	0.98	1.17×10^4 (ピン) 1.67×10^4 (板) 乾燥,N ₂	0.7	3×10^7	v=300mm/s W=9N R=6.4mm
(b)			0.5	8×10^6 20~70%湿度	v=400mm/s W=10N p=0.8MPa R=4mm
ZrO ₂ (a)			0.9	7×10^4	v=20mm/s W=40N p=0.1MPa 平面
(b)			0.6	7×10^4 20~70%湿度	v=400mm/s W=10N p=0.8MPa R=4mm

表2. SUS316の機械的性質

材料記号	耐力 MPa	引張り強さ MPa	伸び %	絞り %	硬さ Hv
SUS316	205以上	520以上	40以上	60以上	200以下

表3. 各種セラミックスの機械的性質

材料種	窒化ケイ素 ¹⁹⁾ Si ₃ N ₄ (リファセラム SN-1)	炭化ケイ素 ²⁰⁾ SiC (京セラ, SN220)	アルミナ ¹⁹⁾ Al ₂ O ₃ (リファセラムAL-1)	PSZ ¹⁹⁾ ZrO ₂ (リファセラムZR-1)
密度 (g/cm ³)	3.21	3.15	3.92	6.07
熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	3.7 (RT~1000°C)	4.8 (RT~1500°C)	8.6 (RT~1000°C)	11.1 (RT~1000°C)
熱伝導率 (Wm/k)	43.2 (293~1273K)	52 (RT)	30 (RT)	3.1 (RT)
縦弾性係数 (GPa)	314 (RT)	402 (RT)	392 (RT)	206 (RT)
4点曲げ強度 (MPa)	900 (RT) 320 (1200°C, N ₂)	441 (RT) 441 (1200°C) 421 (1600°C)	350 (RT)	1100 (RT)
破壊靱性値 (MPam ^{0.5})	7.0	4.0	4.3	5.0
硬さ (Hv)	1400 (RT)	2800 (RT)	1600 (RT)	1300 (RT)
焼結方法	<u>HIP</u>	<u>HIP</u>	<u>HP</u>	<u>HP</u>

表4. WC-Co系超硬合金の機械的性質

組成 (mass%)		硬さ Hv	抗折力 MPa	圧縮強さ MPa	弾性係数 GPa
WC	Co				
94.5~95.0	5.5~6.0	1500~1600	1568~1764	4900	607

表 5. 常温大気中での摩擦係数測定条件.

負荷荷重 Kgf	変位速度 mm/min	相対変位 mm	表面あらさ Rmax, μm	試験雰囲気
10	0.05(0.005~10)	~0.5	<0.1, ~1.0	常温大気中

表 6. 高温窒素雰囲気中での摩擦係数測定条件.

負荷荷重 Kgf	変位速度 mm/min	相対変位 mm	表面あらさ Rmax, μm	試験雰囲気
10	0.5	~0.5	<0.1	500°CN ₂ 中

表 7. 高温窒素雰囲気中での往復摺動試験条件.

材種	摩擦条件	温度条件	実験回数 (常温)	実験回数 (高温)
SUS同士	0.25kgf 1Hz	常温 : 20 ~ 22 °C大気中	2回	2回
窒化ケイ素同士	500回	高温 : 500 ~ 510°CN ₂ 中	3回	3回
炭化ケイ素同士			2回	2回

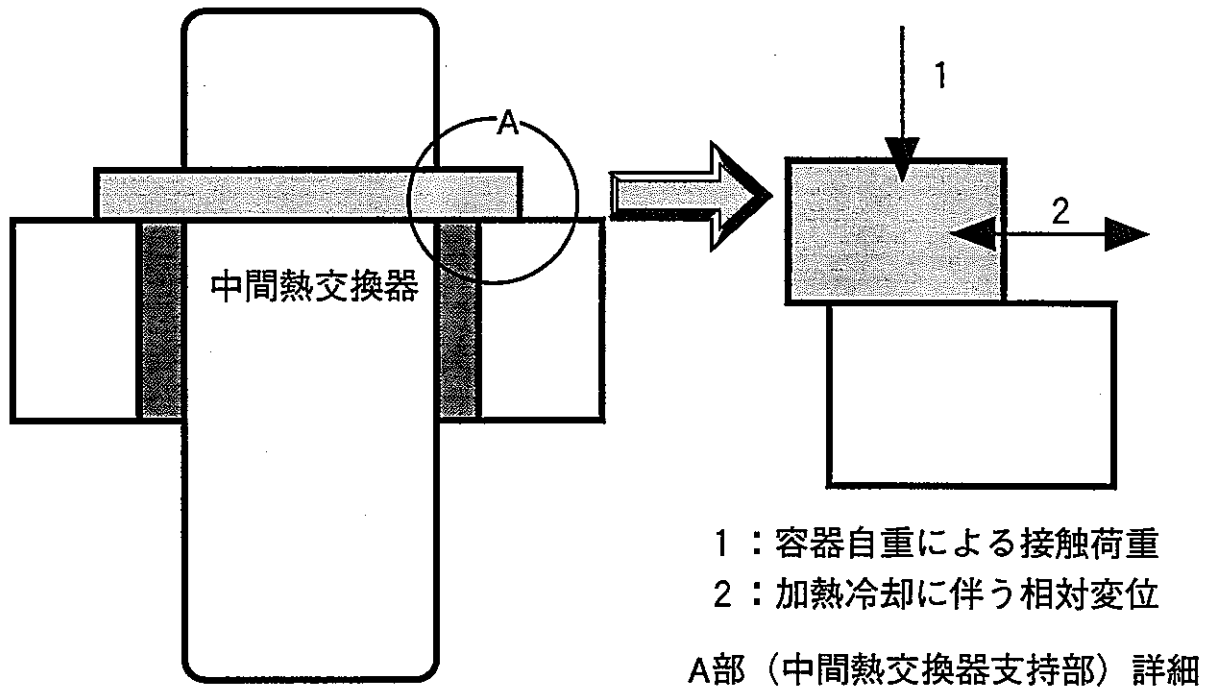


図 1. 中間熱交換器支持部の模式図.

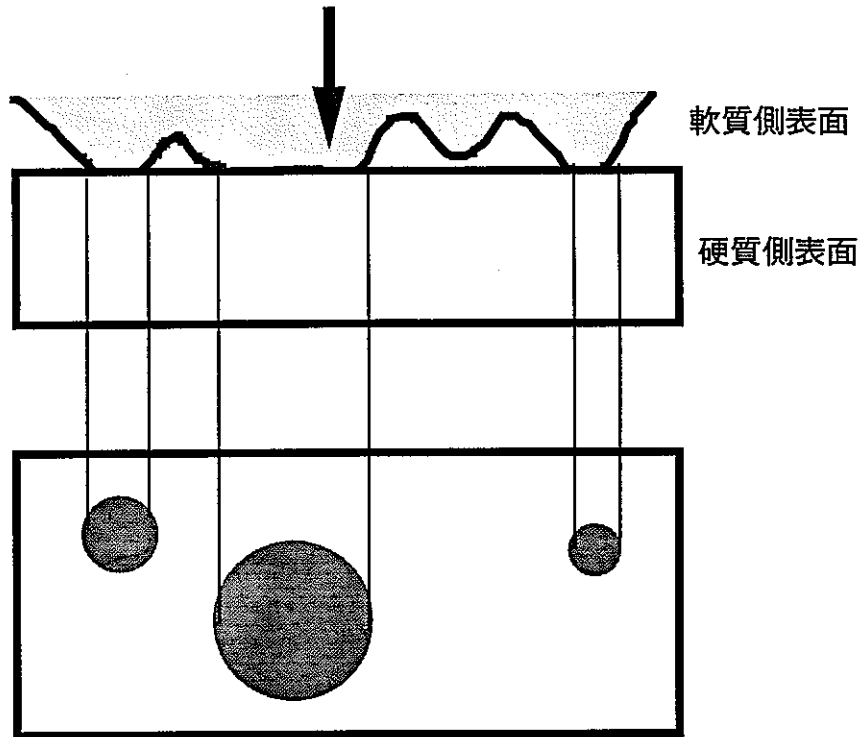
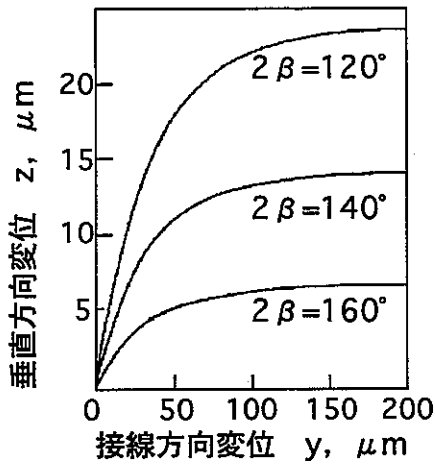
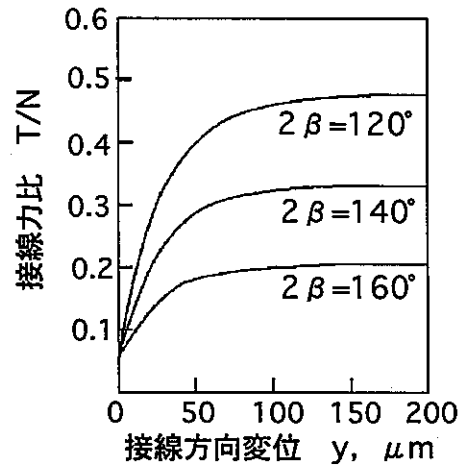


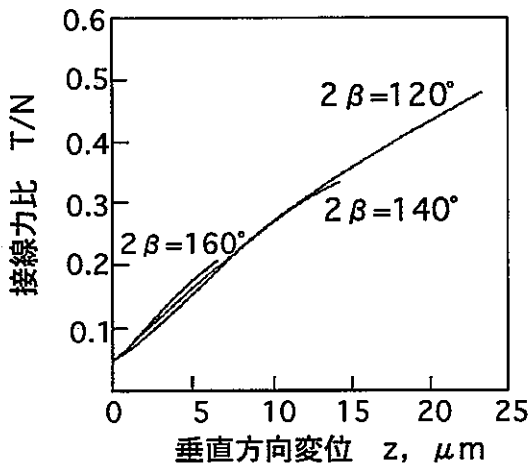
図 2 . 真実接触面積の模式図.



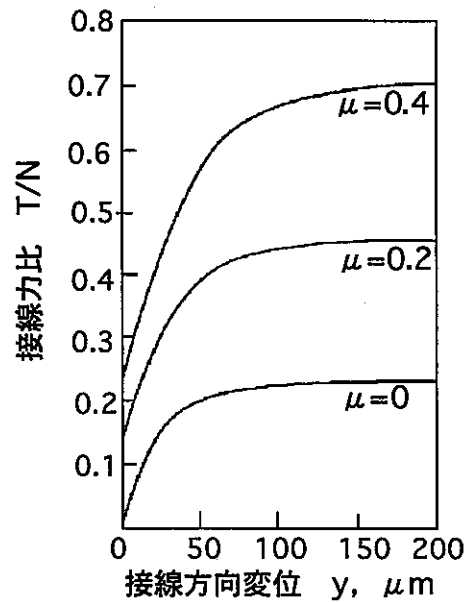
(a) 接線方向変位と垂直方向変位



(b) 接線方向変位と接線力比



(c) 垂直方向変位と接線力比



(d) 接線方向変位と接線力比

(解析条件, a~c: 垂直荷重=21.1N, 流動圧力=890MPa, 凝着摩擦係数=0.09
d: 円すい頂角: 140°)

図3. 硬質な単一円錐突起と軟質平滑面の微小変位における接触状態の変化^{14, 15)}

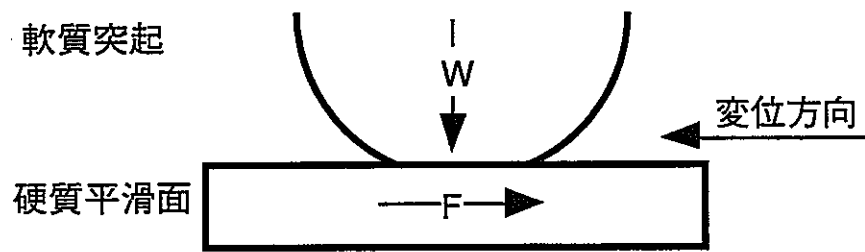


図4. 軟質突起と硬い平滑面と接触状態の模式図.

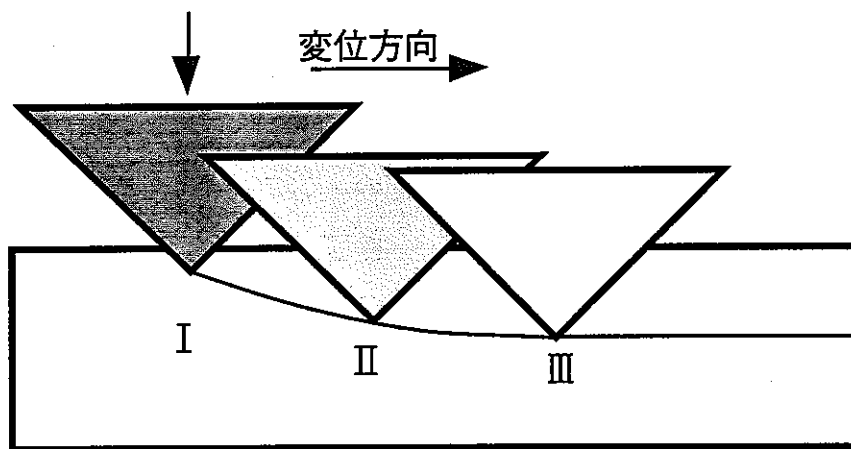


図5. 接触状態の模式図 (硬質突起が相手表面に食い込む場合).

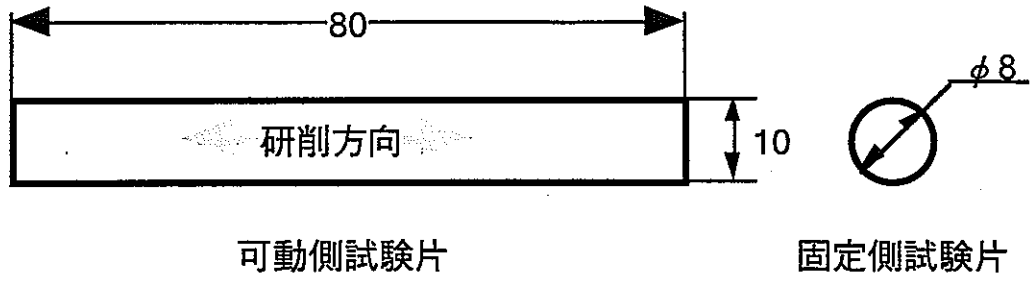


図6. 試験片の形状.
(板厚はいずれも5mm)

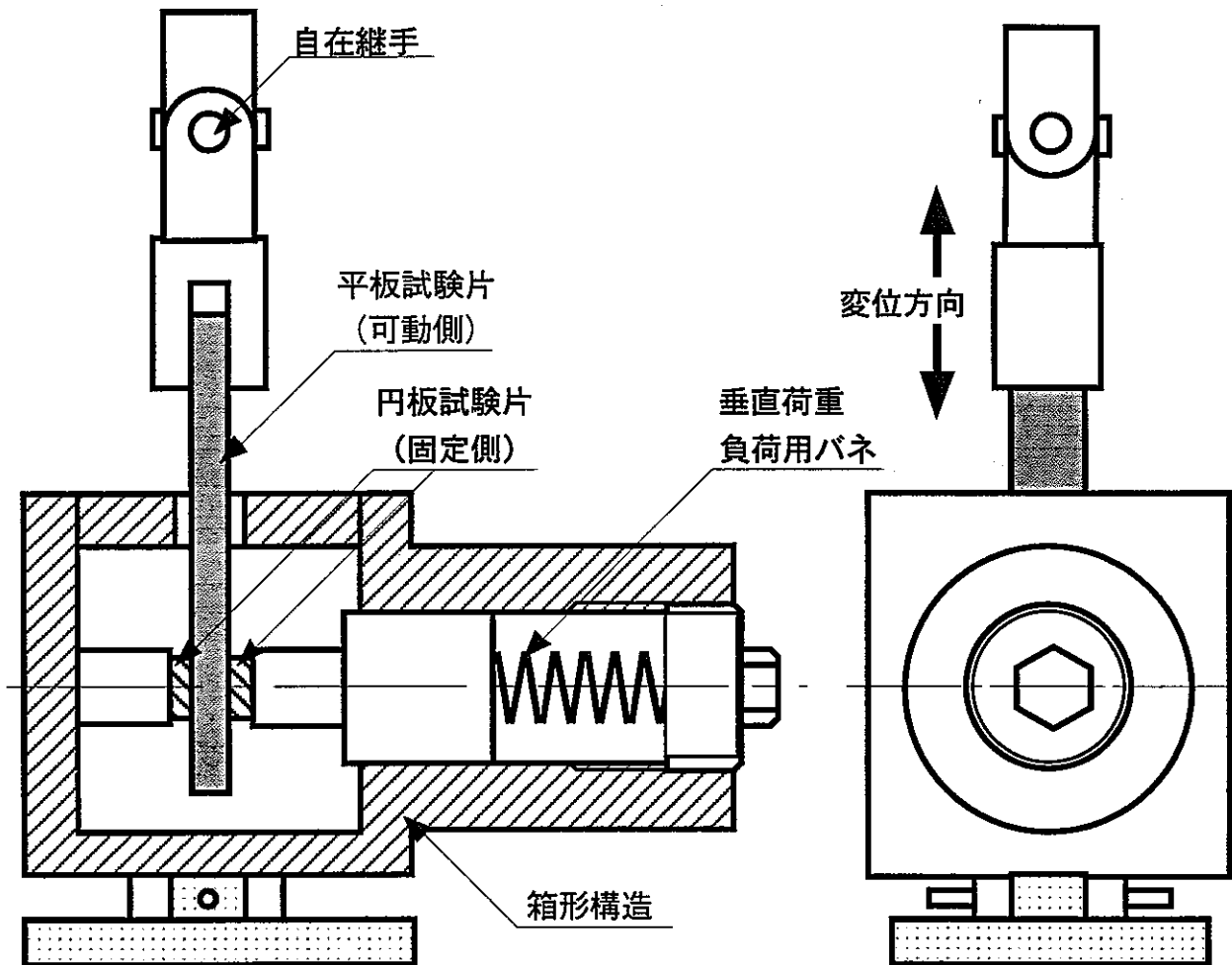


図7. 試験装置の概要.

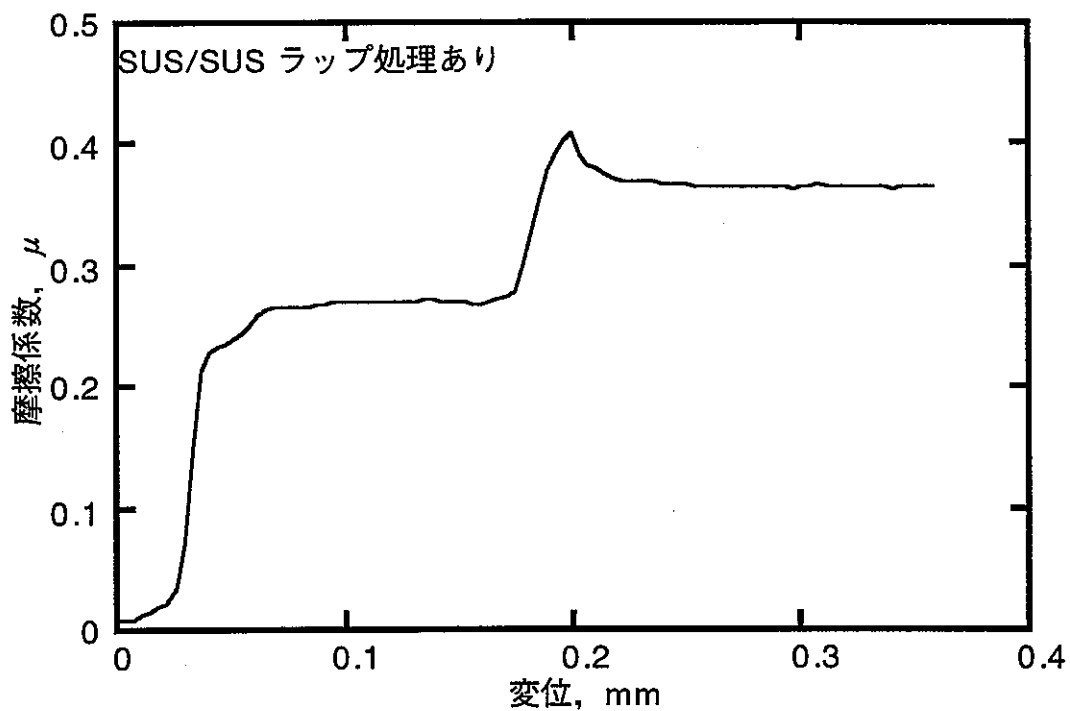


図8. ラップ仕上のステンレス同士の摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

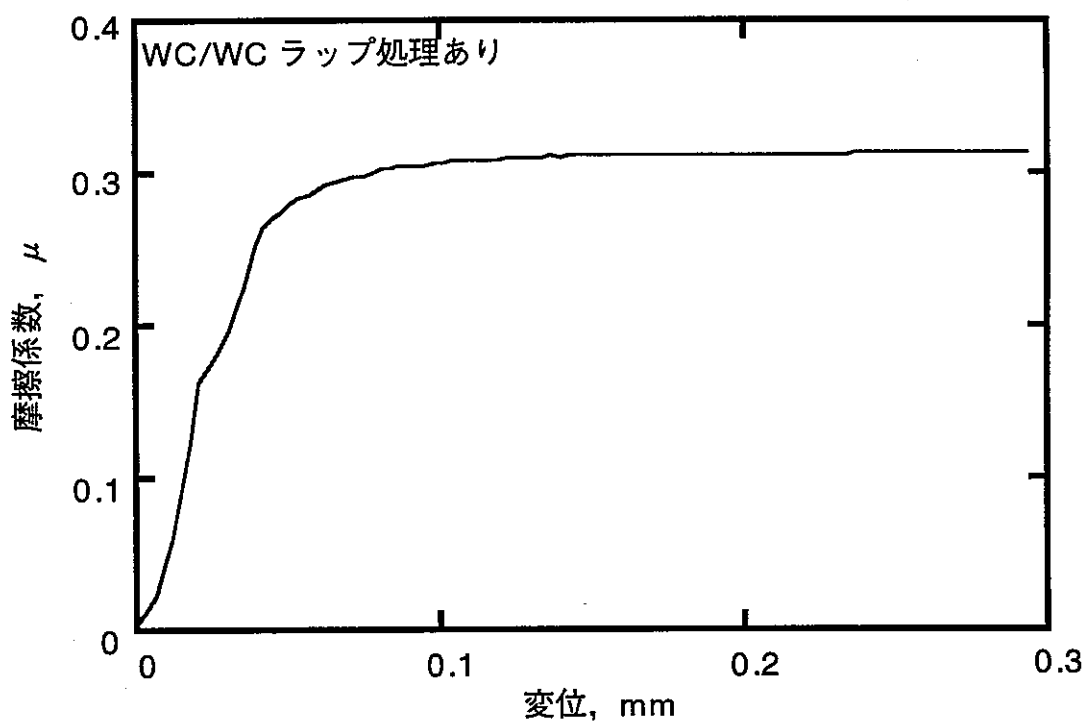


図9. ラップ仕上の超合金同士の摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

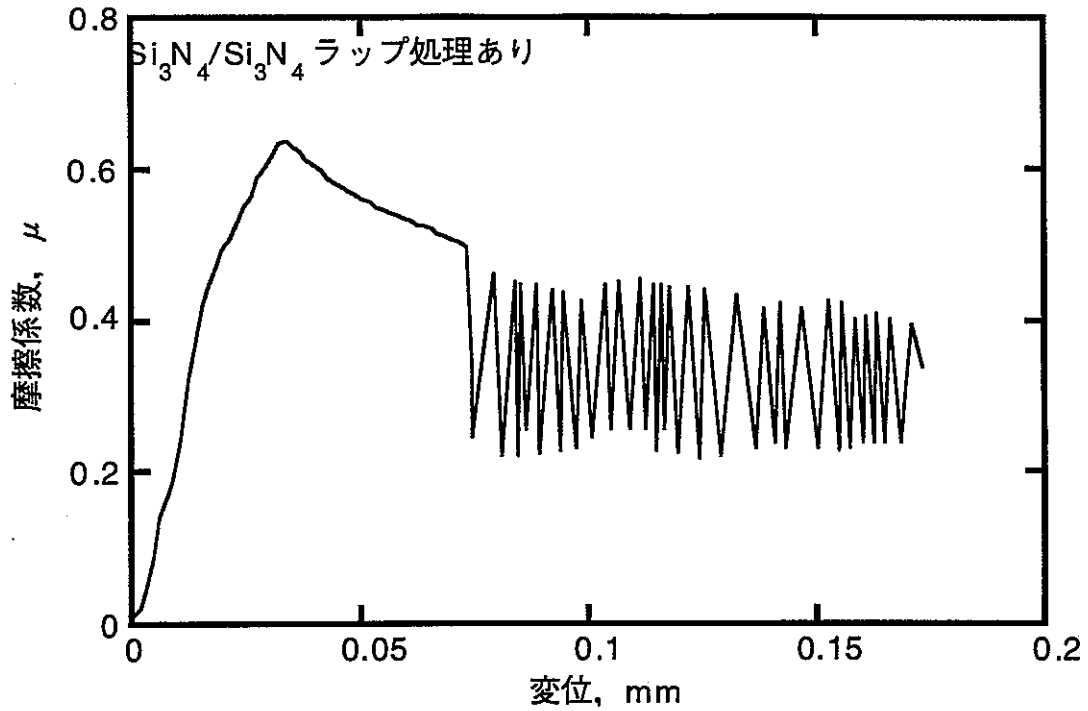


図10. ラップ仕上の窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

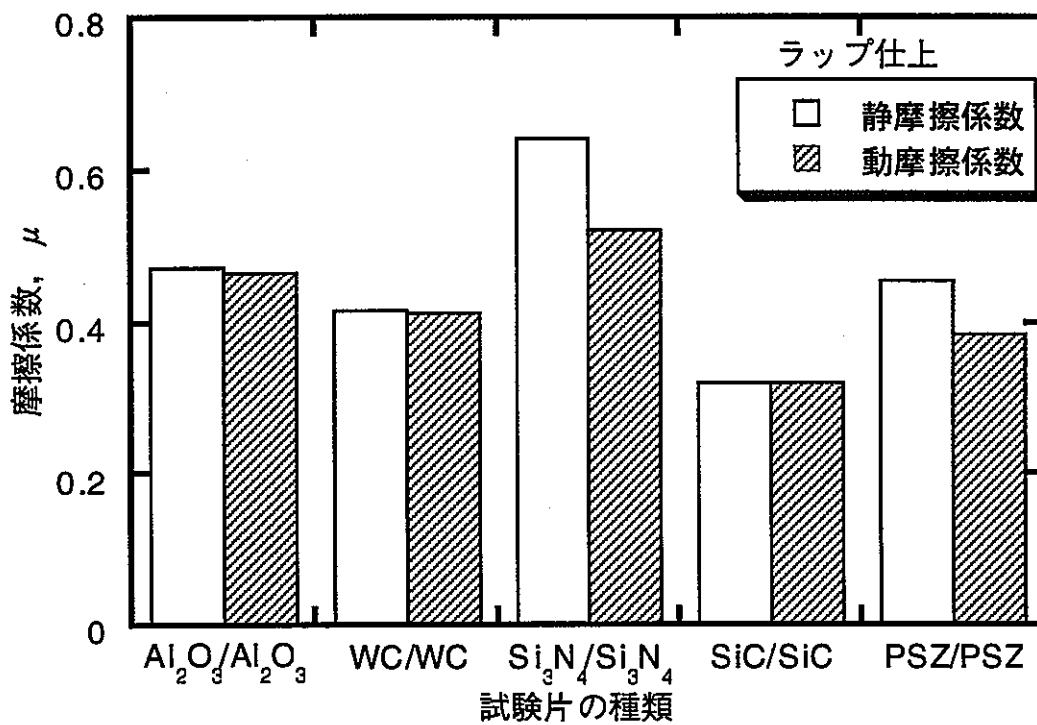


図11. ラップ仕上の同種材の摩擦係数の比較.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

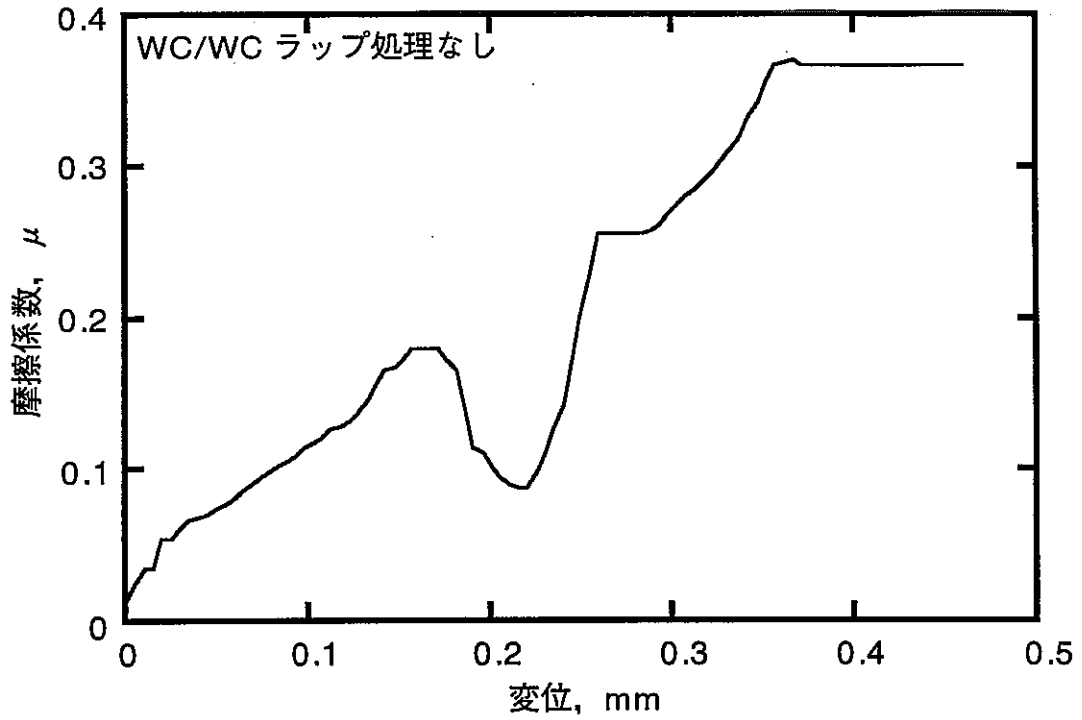


図 1 2. 研削仕上の超硬合金同士の摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

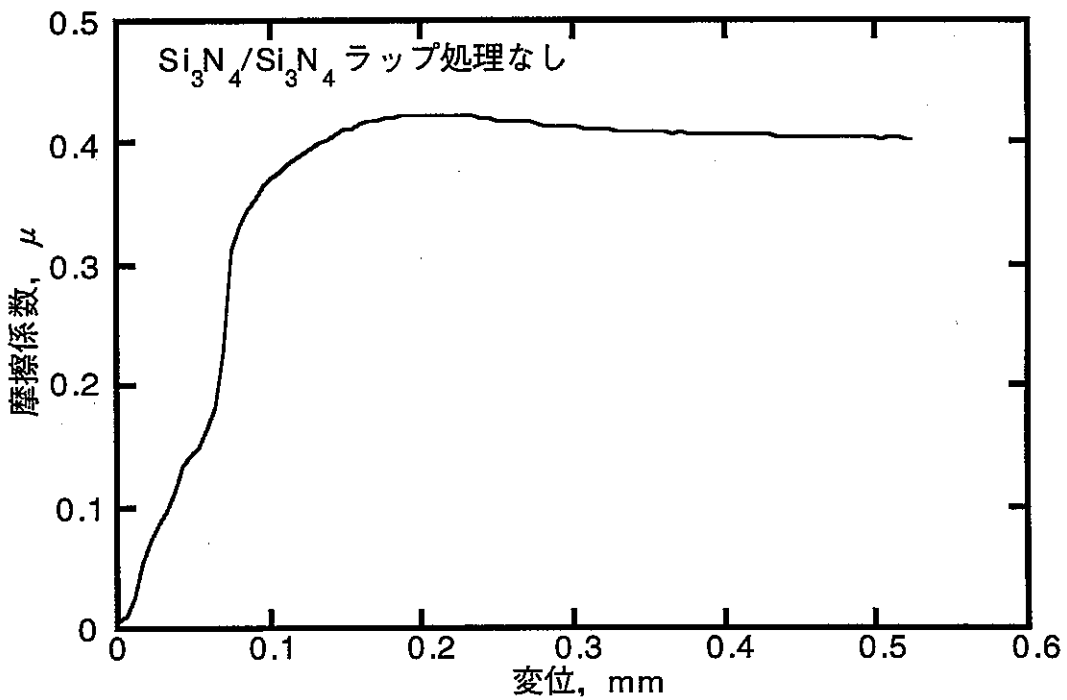


図 1 3. 研削仕上の窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

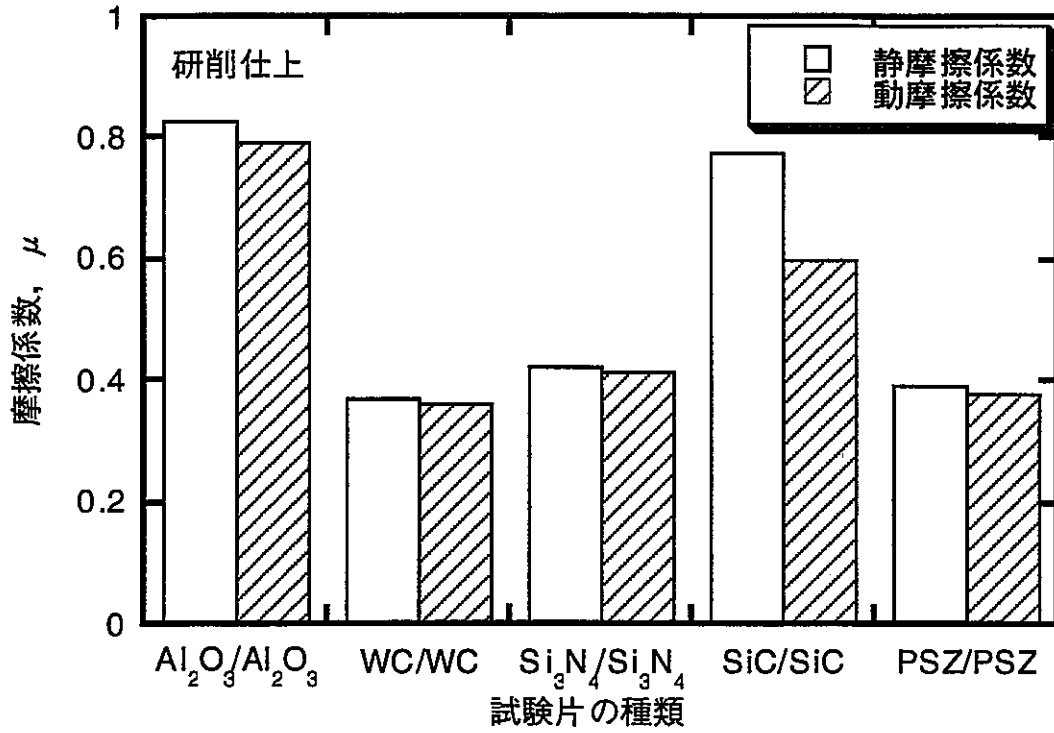


図14. 研削仕上の同種材の摩擦係数の比較.
(常温大気中、相対変位速度: 0.05mm/min.)

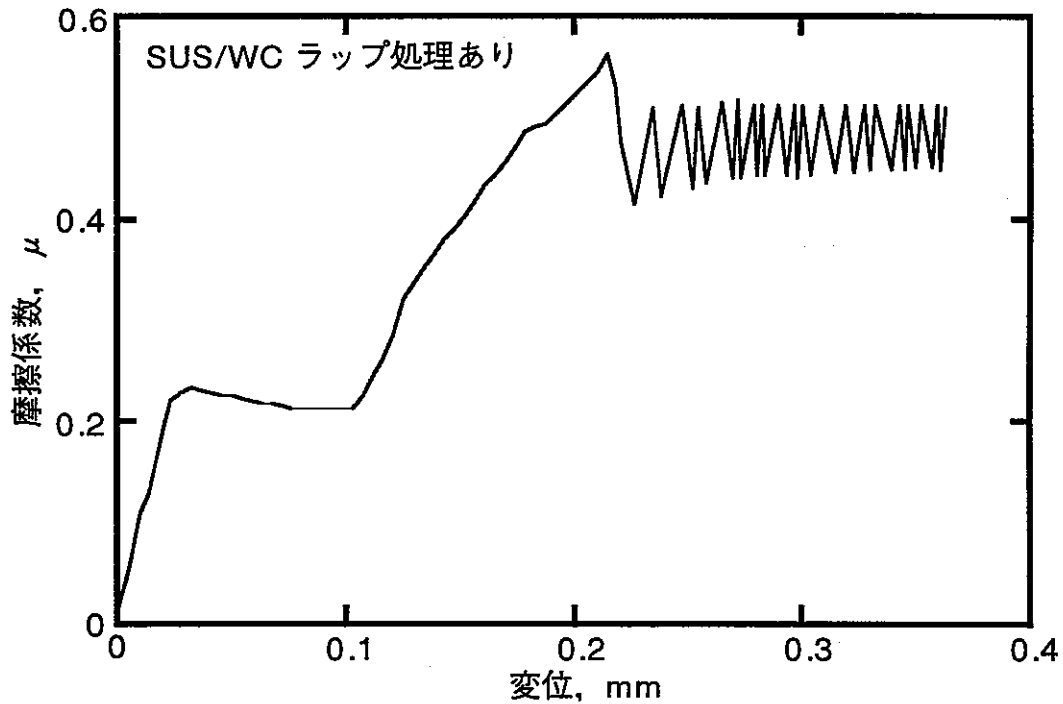


図15. ラップ仕上の超硬合金/ステンレスの摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度: 0.05mm/min.)

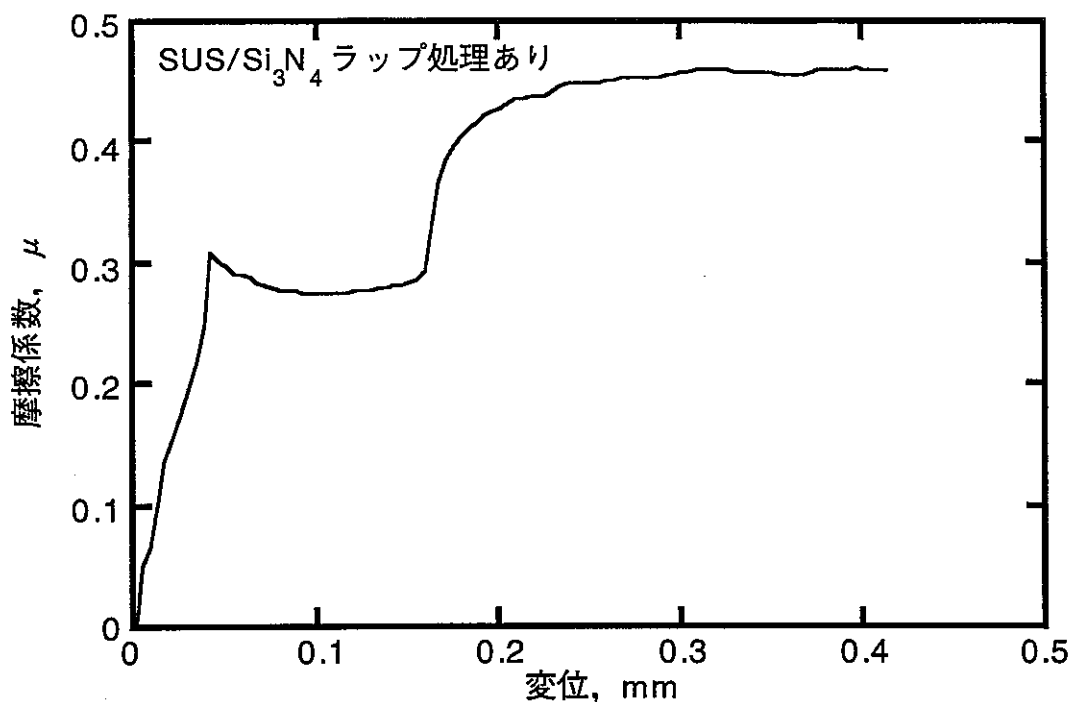


図16. ラップ仕上の窒化ケイ素/ステンレスの摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

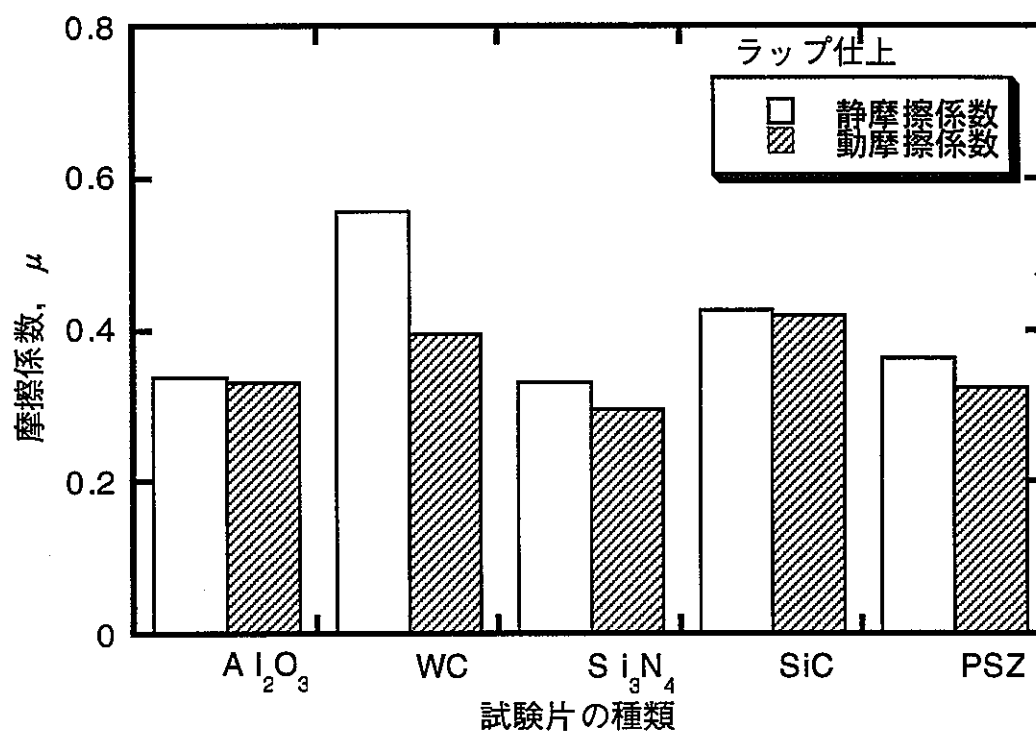


図17. ステンレスに対する各材料の摩擦係数.
(常温大気中、相対変位速度：0.05mm/min.)

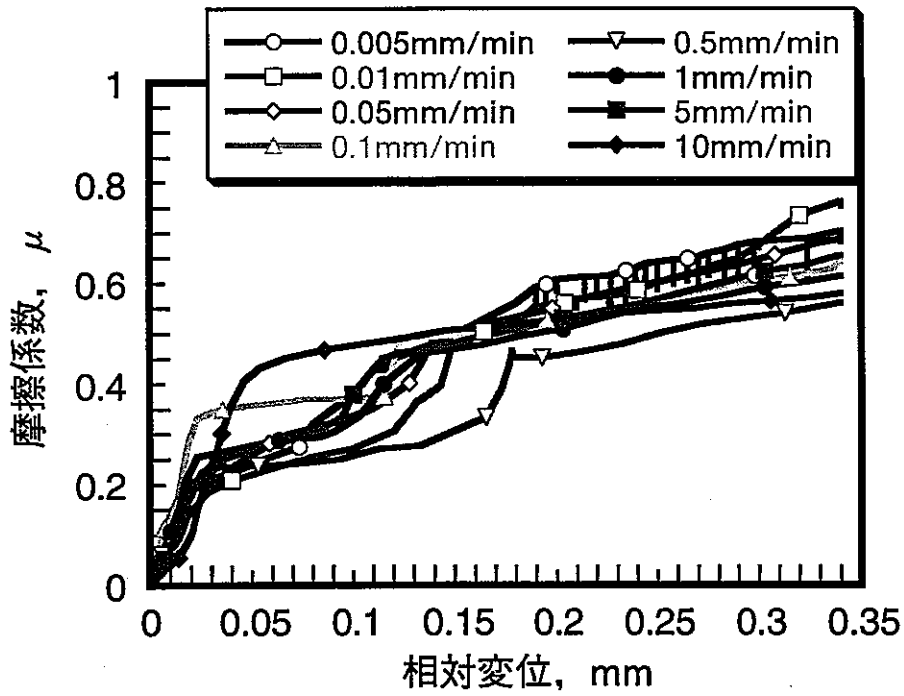


図18. ステンレスにおける摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中)

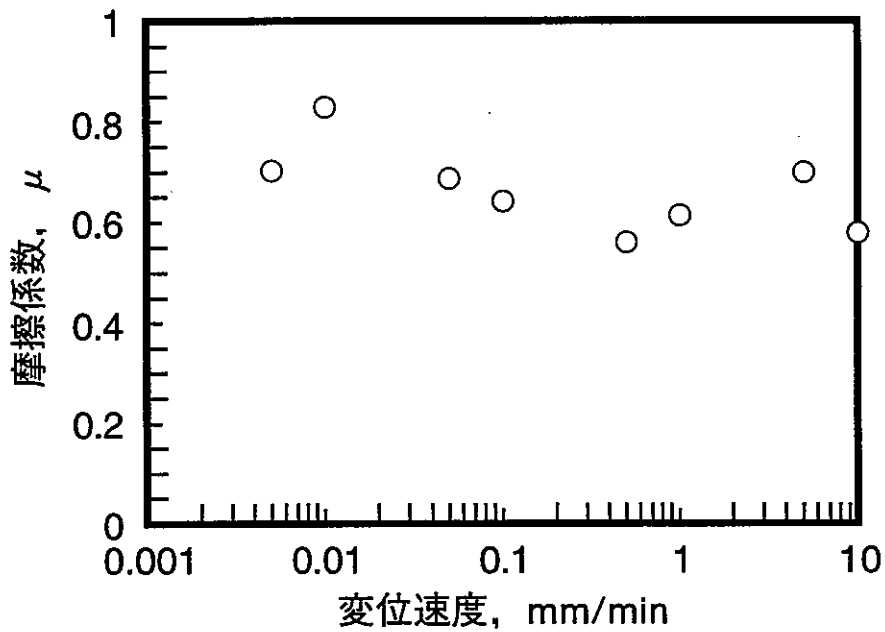


図19. ステンレスにおける摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

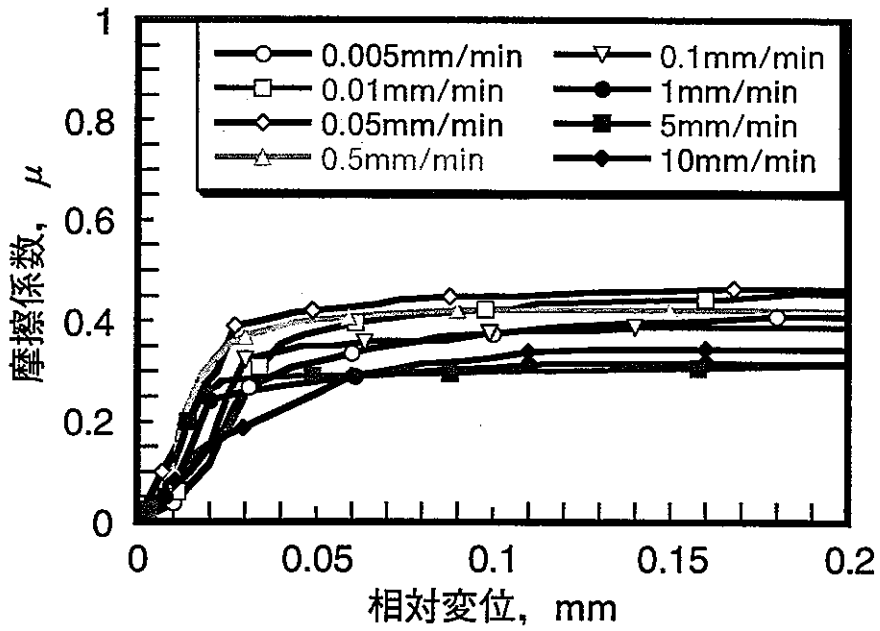


図 20. 窒化ケイ素における摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中)

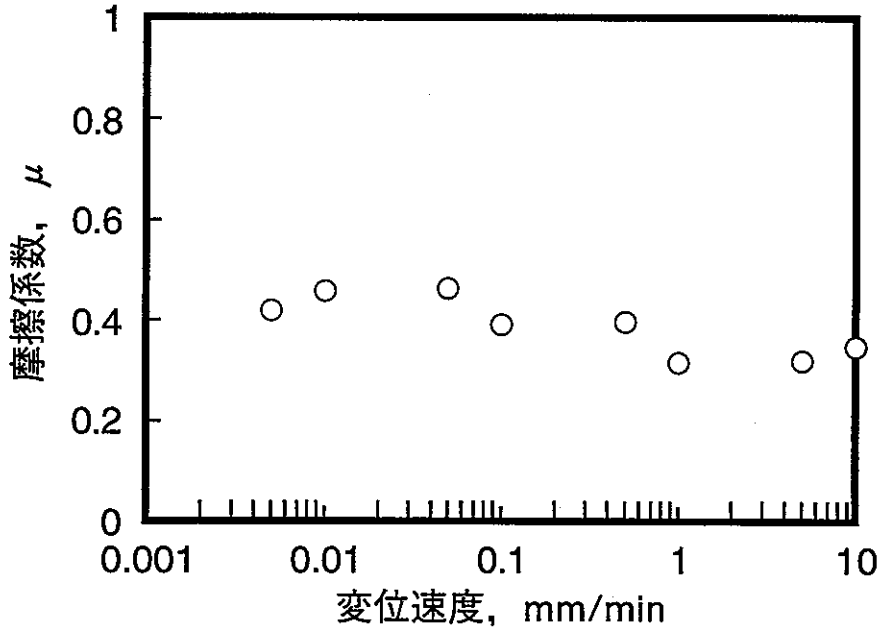


図 21. 窒化ケイ素における摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

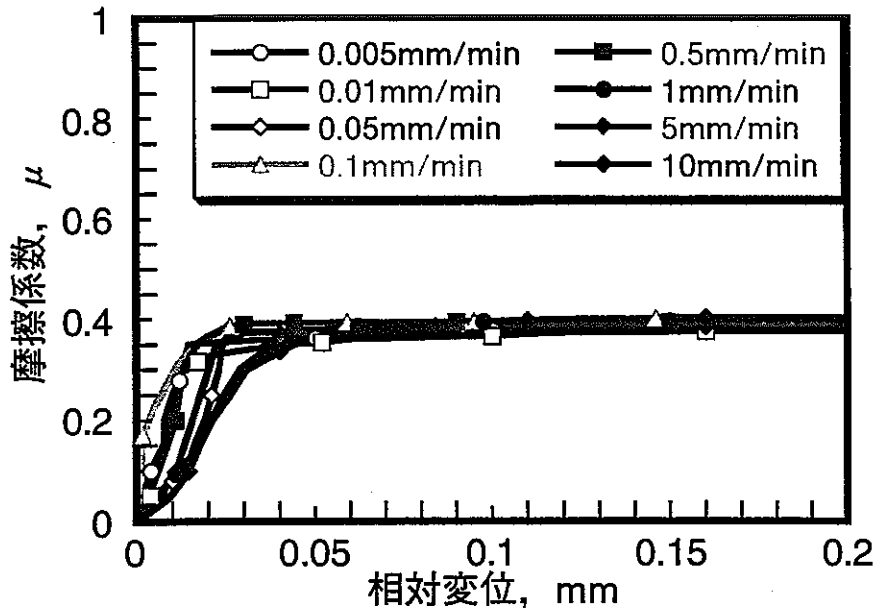


図 2.2. 炭化ケイ素における摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中)

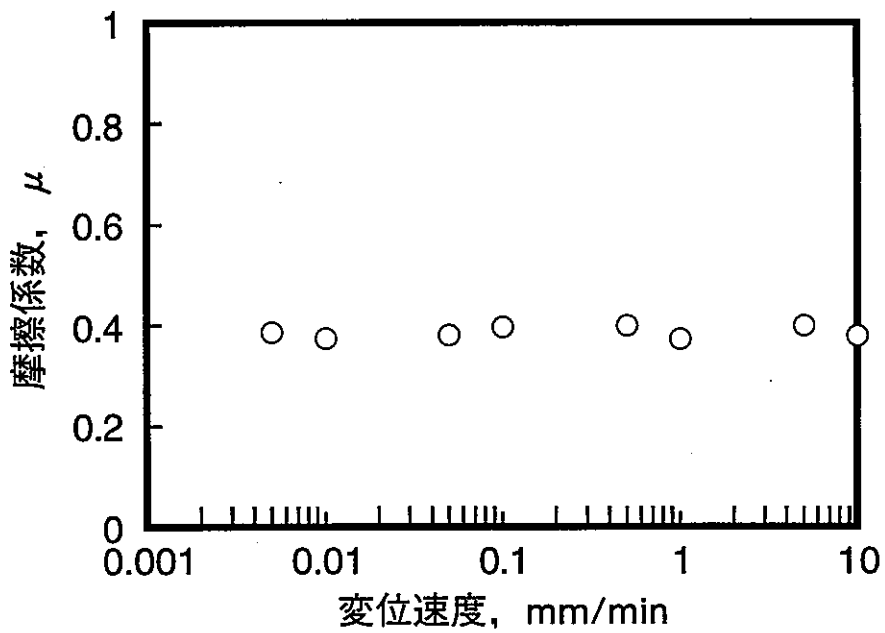


図 2.3. 炭化ケイ素における摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

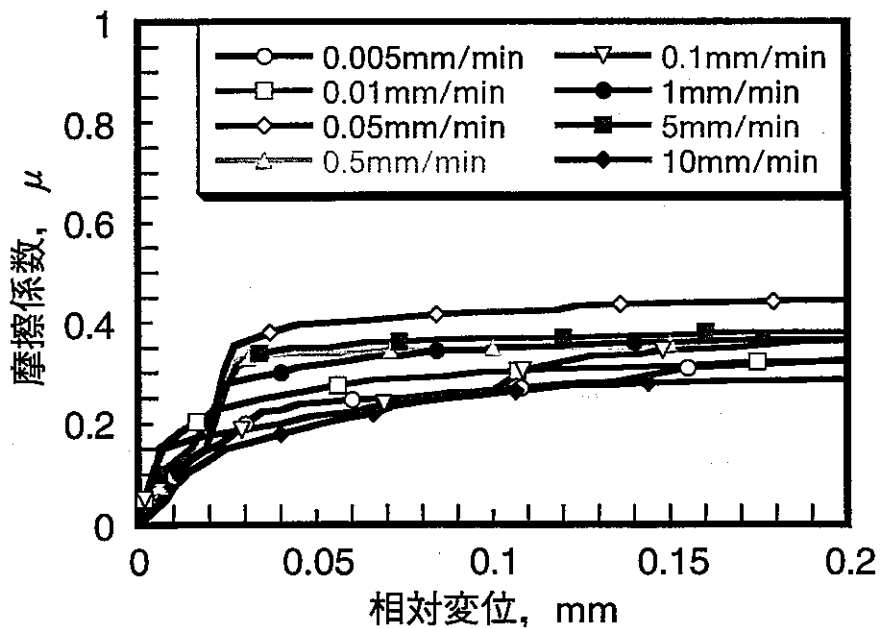


図 2 4. アルミナにおける摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中)

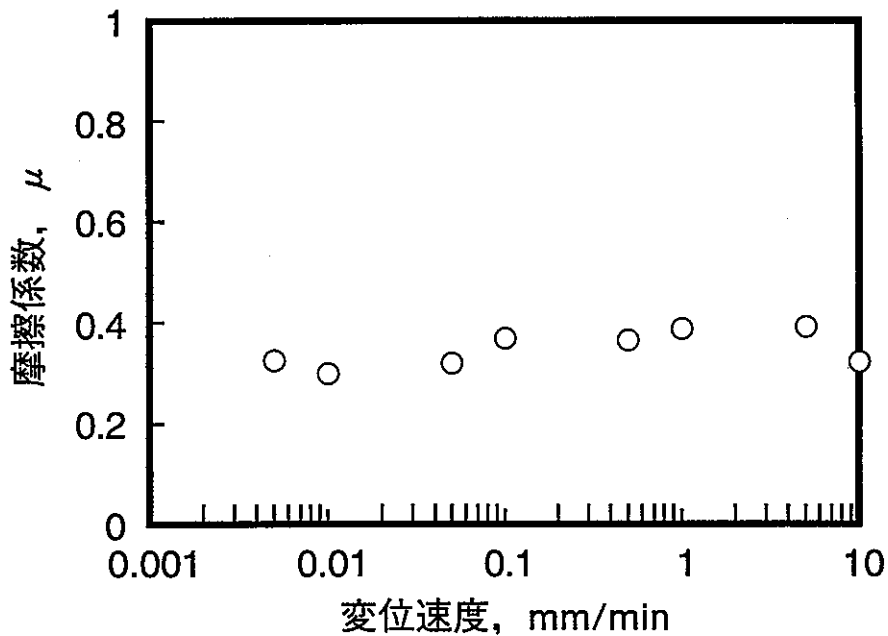


図 2 5. アルミナの摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

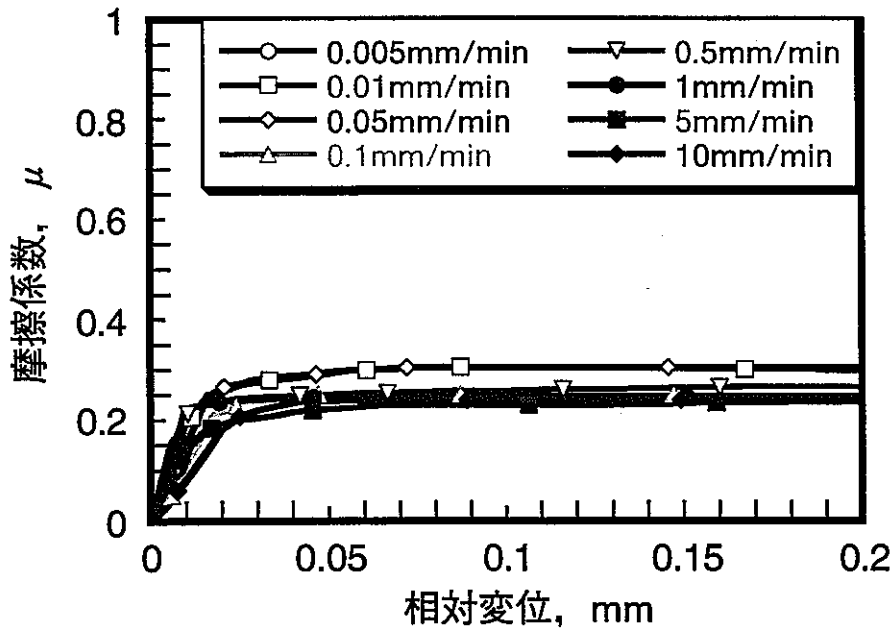


図 2 6 . PSZにおける摩擦係数と相対変位の関係.
(常温大気中)

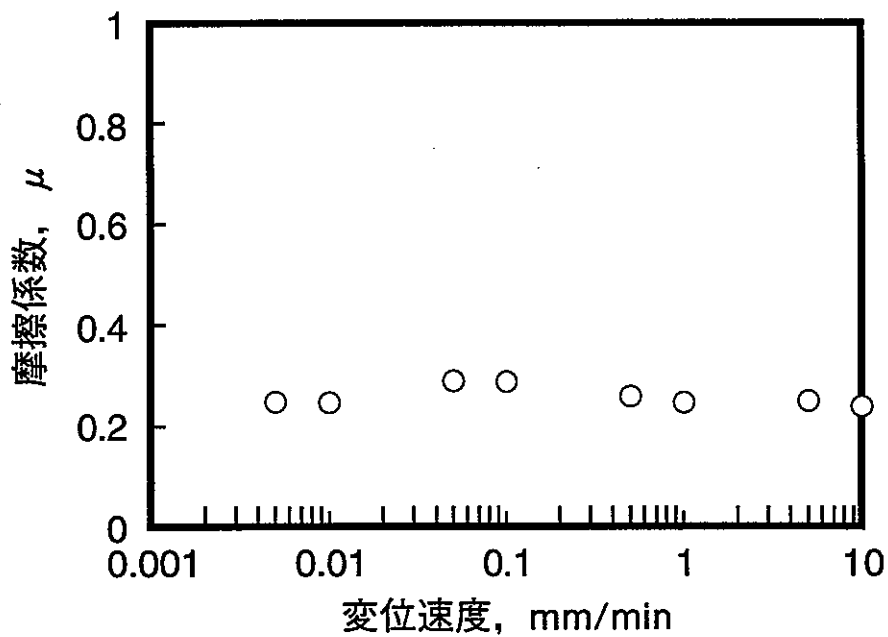


図 2 7 . PSZにおける摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

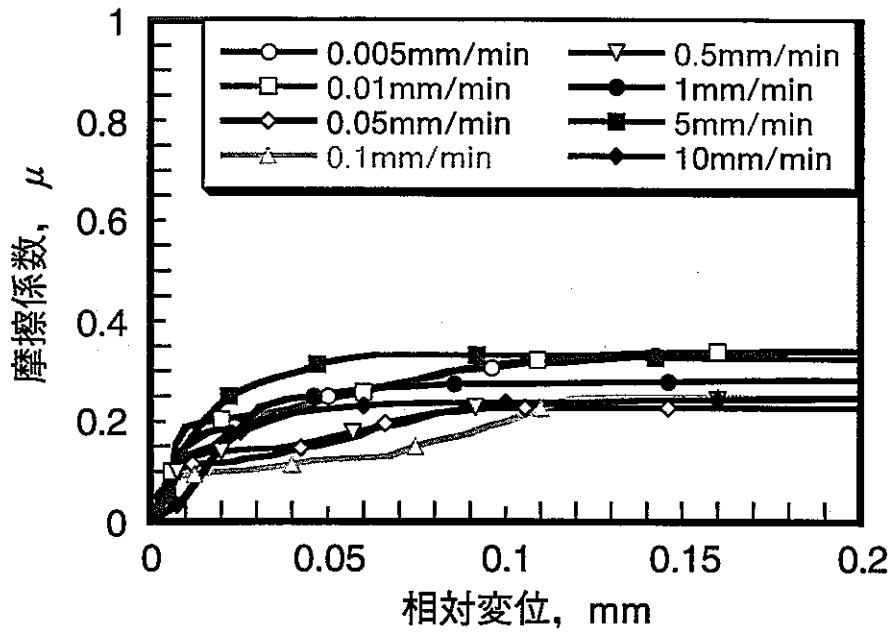


図 28. 超硬合金における摩擦係数と相対変位との関係.
(常温大気中)

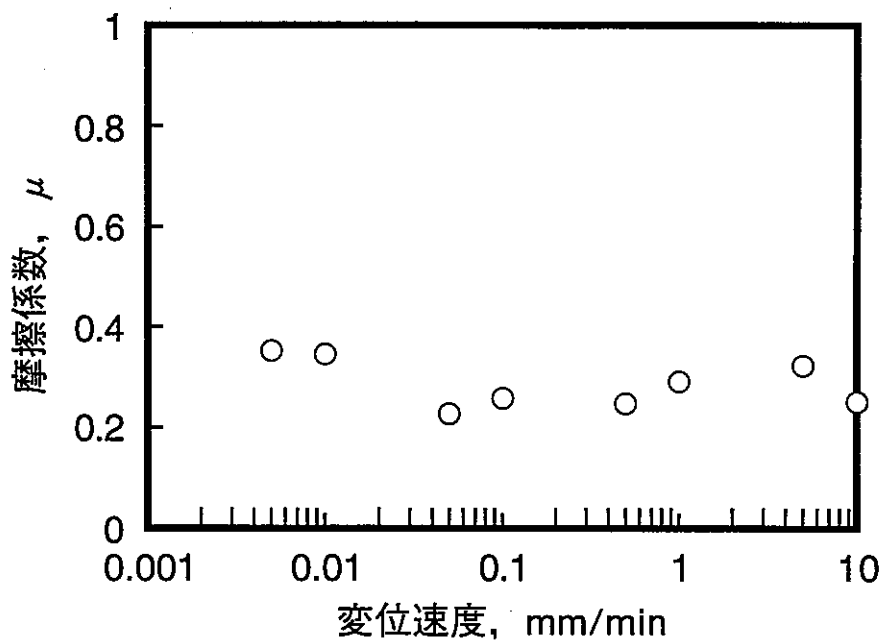


図 29. 超硬合金における摩擦係数の相対変位速度依存性.
(常温大気中)

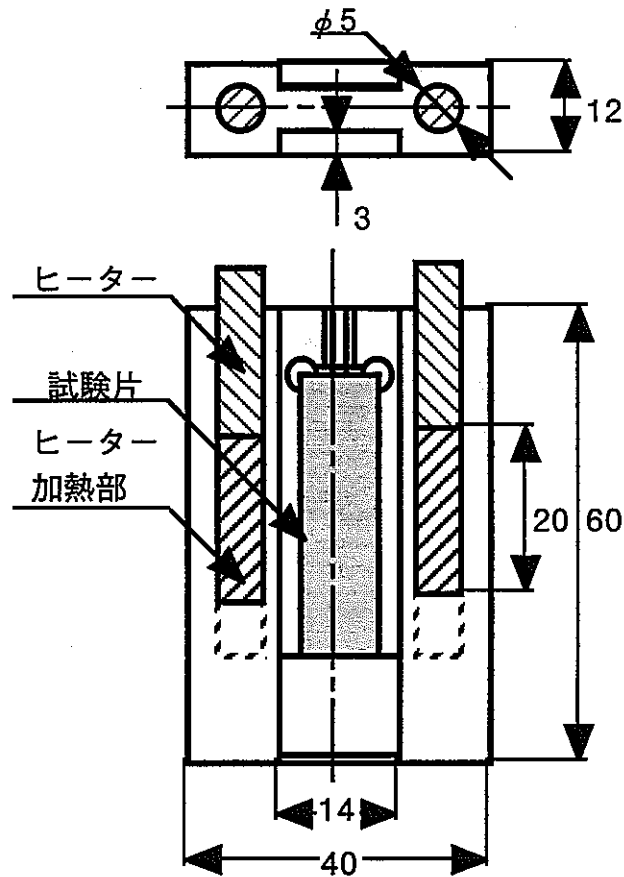


図 3 0 . 高温での摩擦係数測定用試験片保持治具の概要.

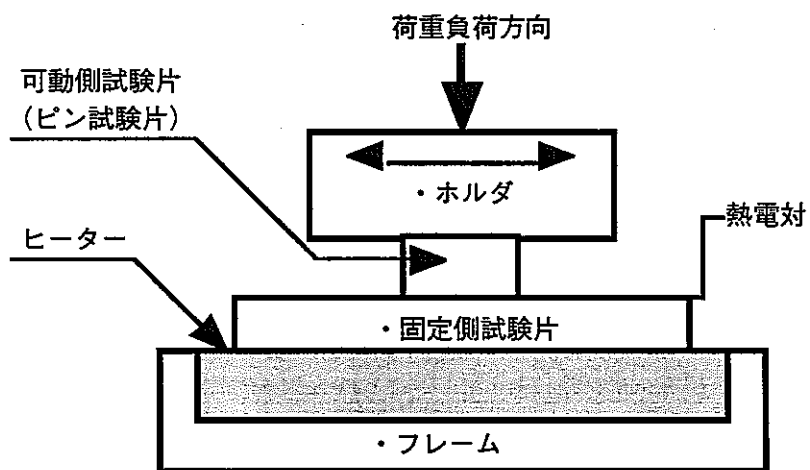


図 3 1 . 高温での往復摺動試験用の実験装置の概要.

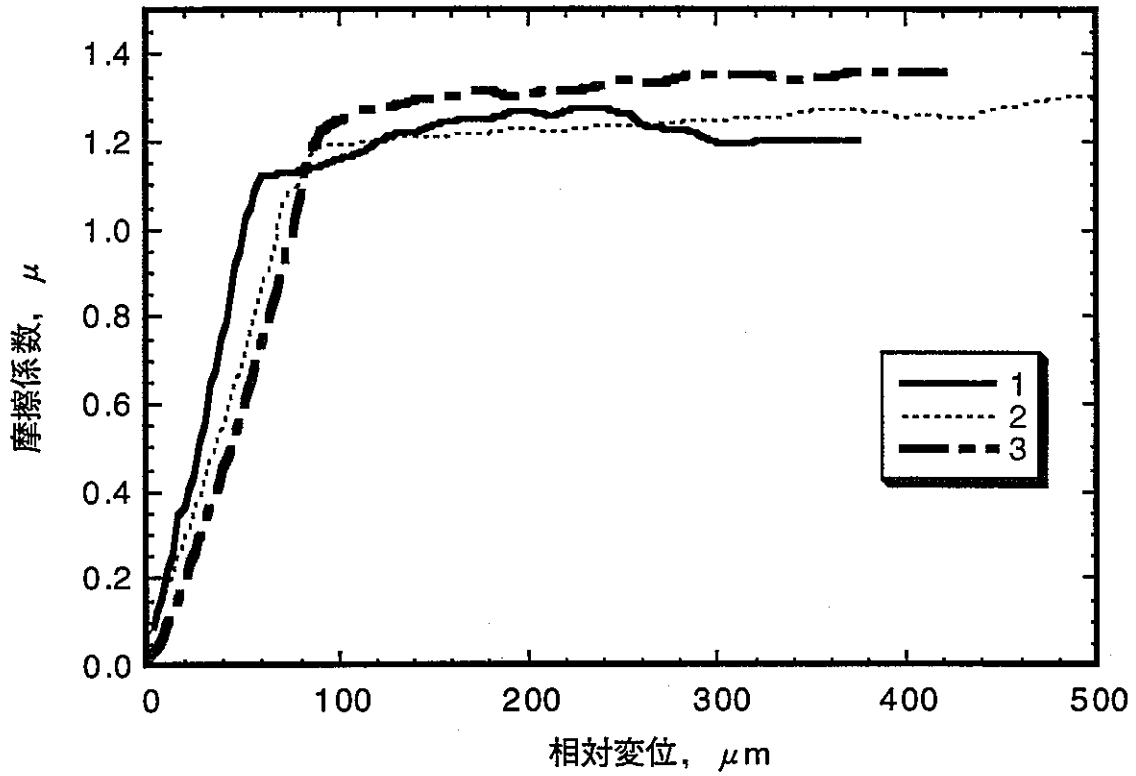


図 3 2. 高温窒素雰囲気でのステンレス同士の摩擦係数と相対変位の関係。

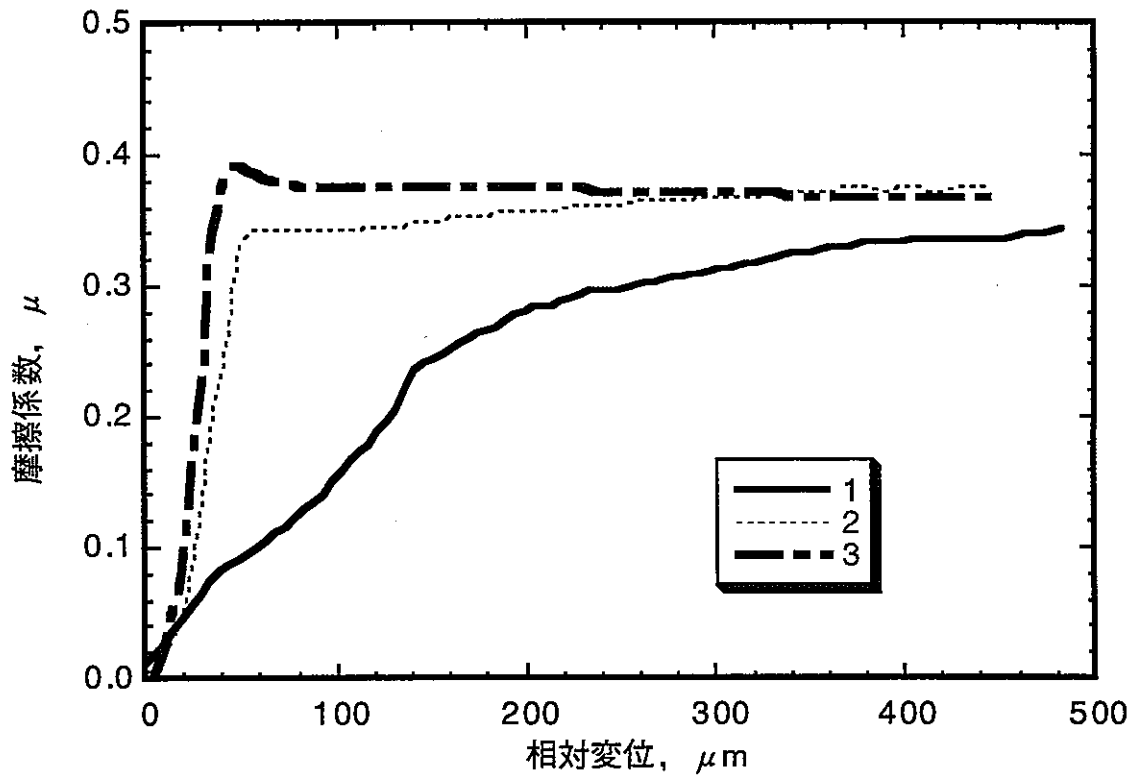


図 3 3. 高温窒素雰囲気での窒化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係。

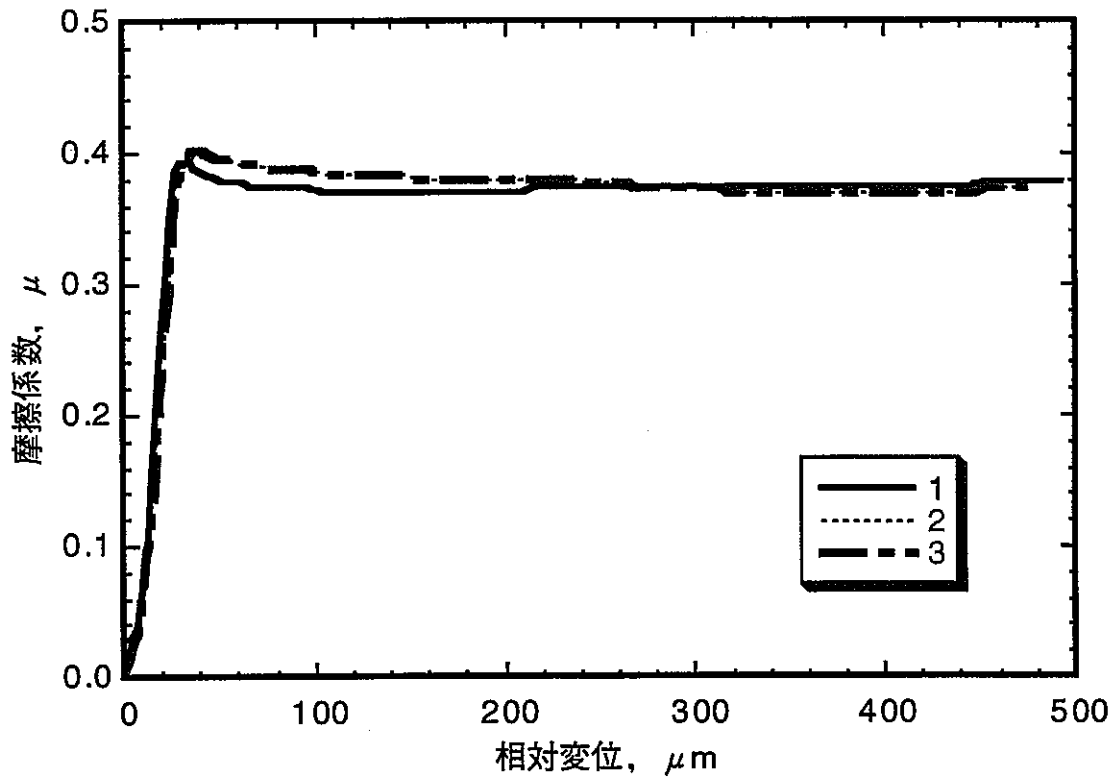


図 3 4 . 高温窒素雰囲気での炭化ケイ素同士の摩擦係数と相対変位の関係.

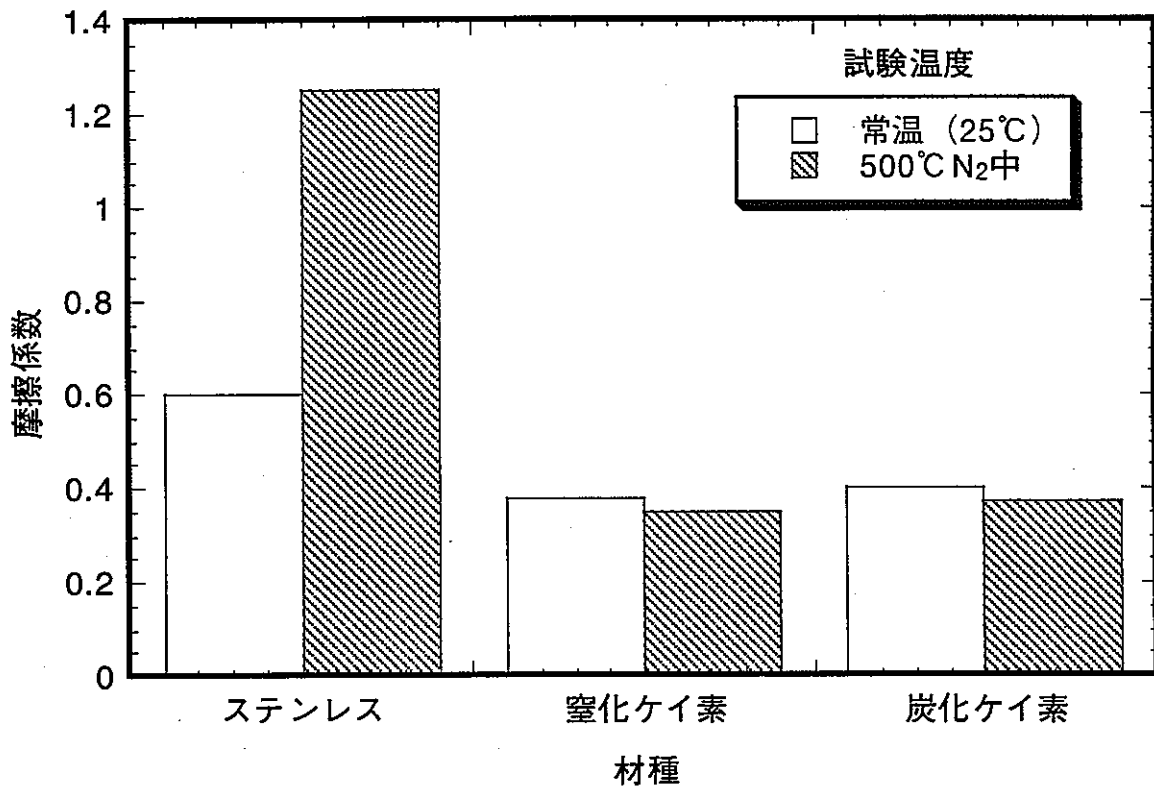


図 3 5 . 常温大気中または高温窒素中での同種材の摩擦係数の比較.

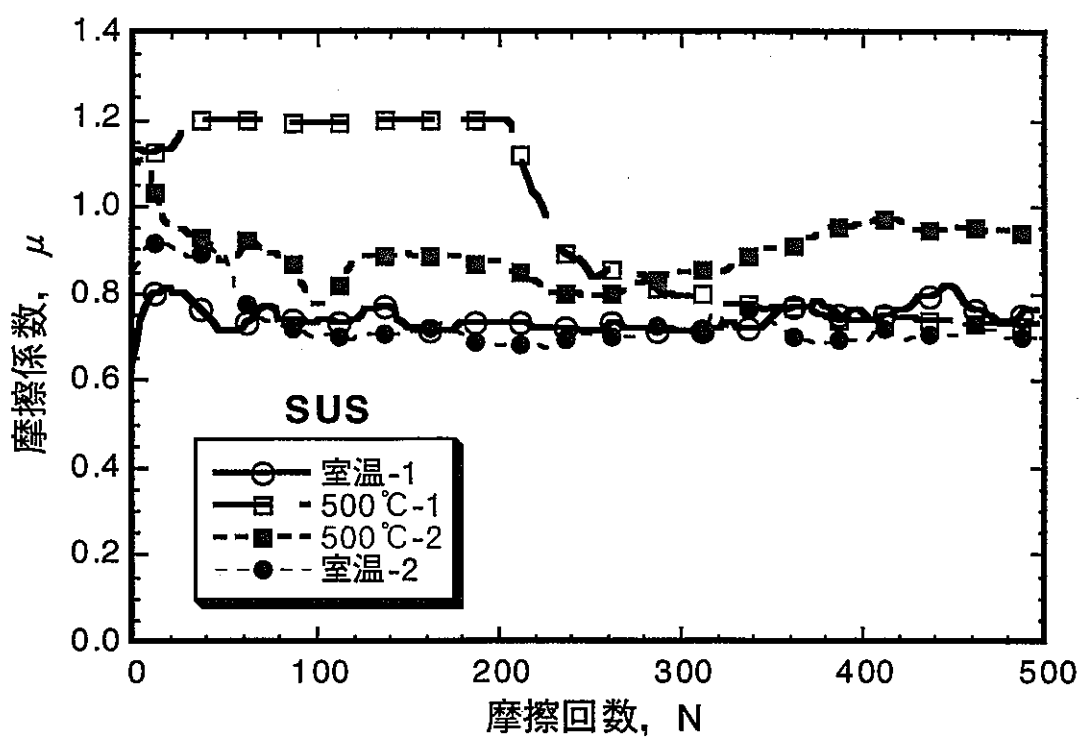
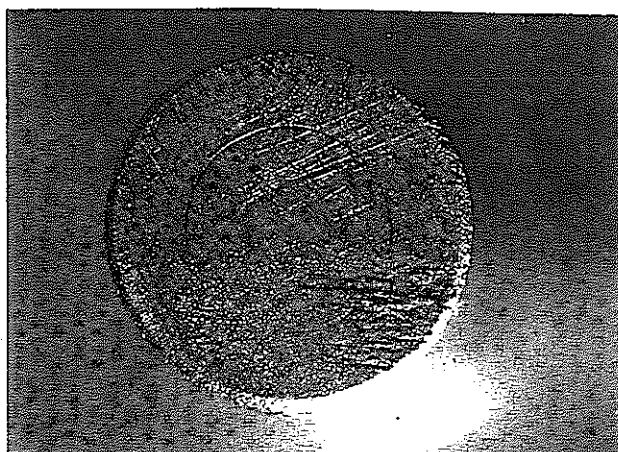


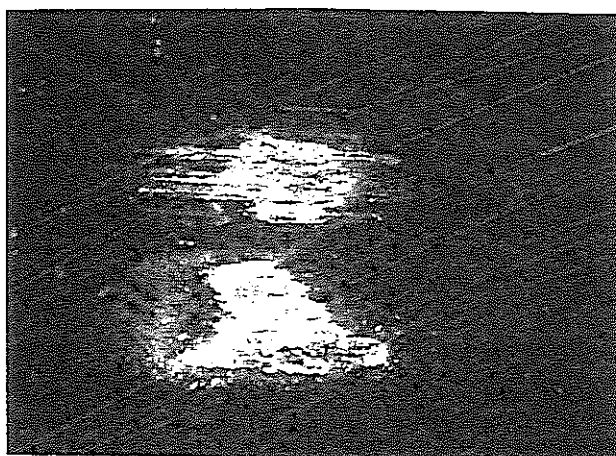
図3.6. ステンレス同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.
(常温大気中および高温窒素雰囲気中)



可動側 (室温-1)



可動側 (室温-2)



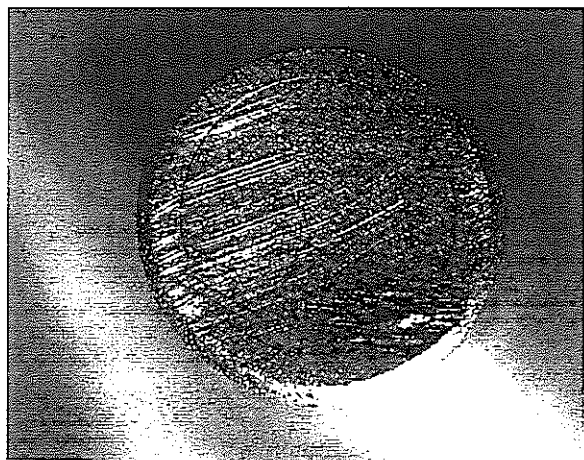
固定側 (室温-1：上段／室温-2：下段)

摩擦方向：←→

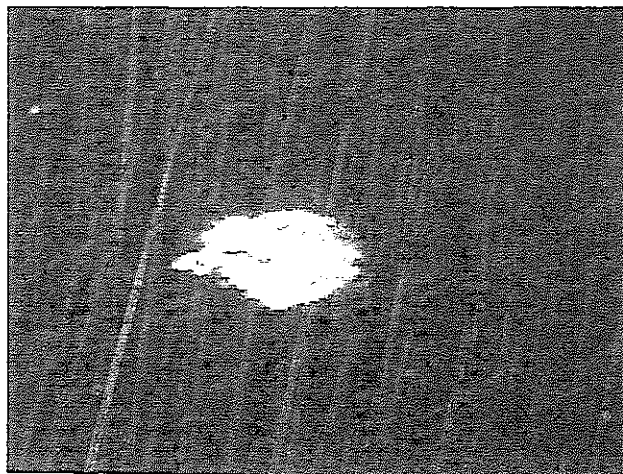
2mm

(a)常温試験

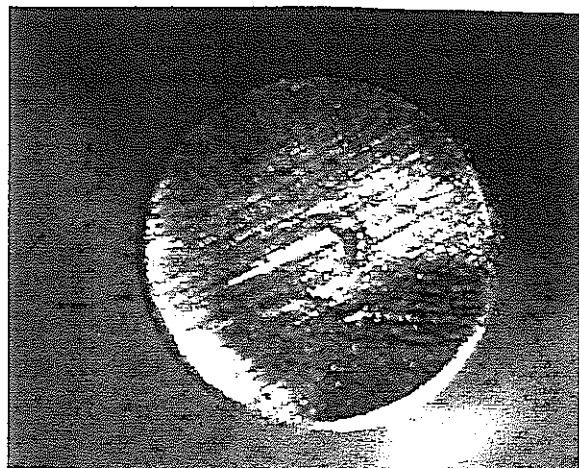
図37. ステンレス同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.



500°C-1 可動側



固定側



500°C-2 可動側



固定側

摩擦方向：←→

2mm

(b)高温試験

図37. Cont.

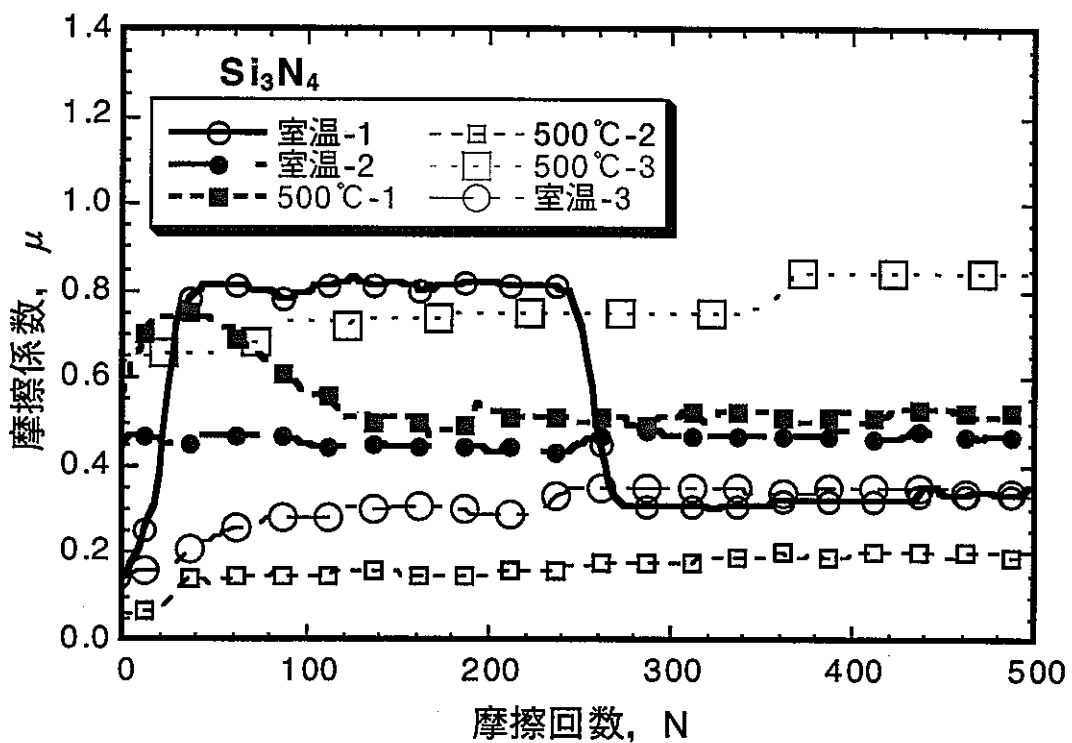
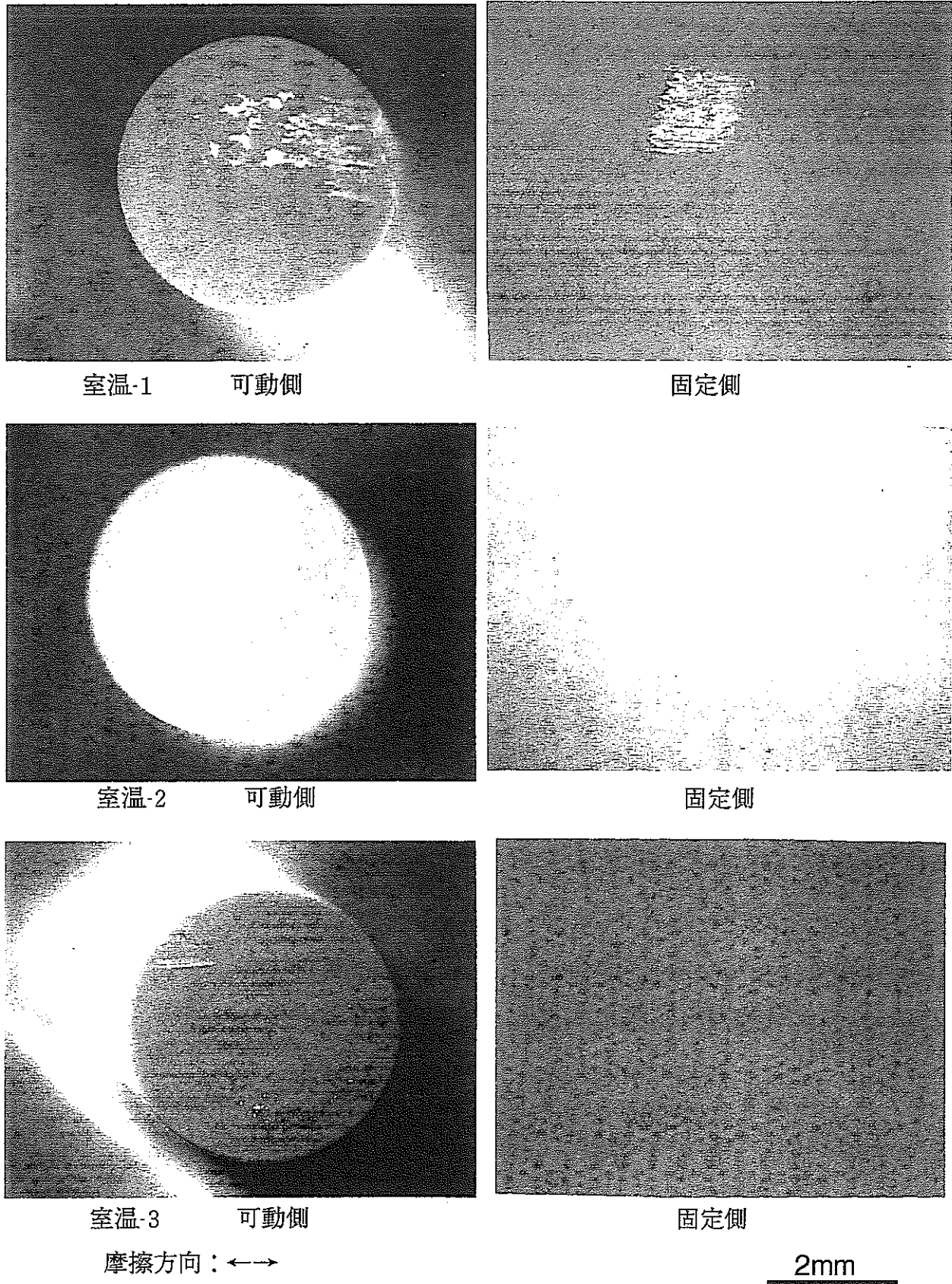
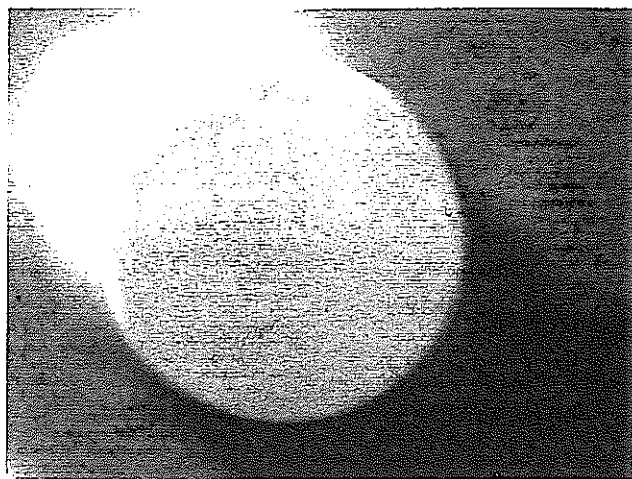


図 3 8. 窒化ケイ素同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.
(常温大気中および高温窒素雰囲気中)

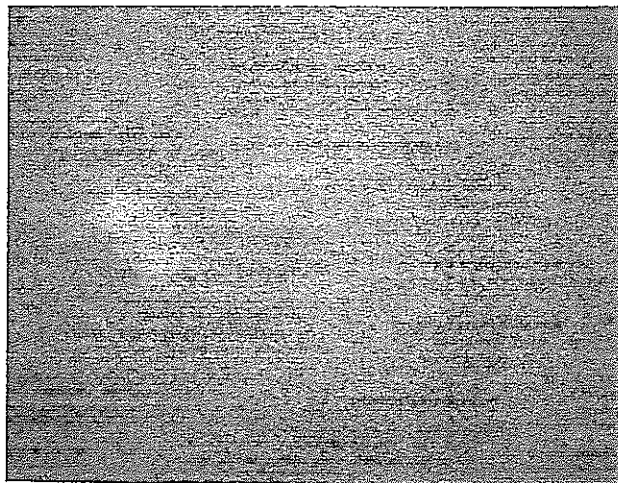


(a)常温試験

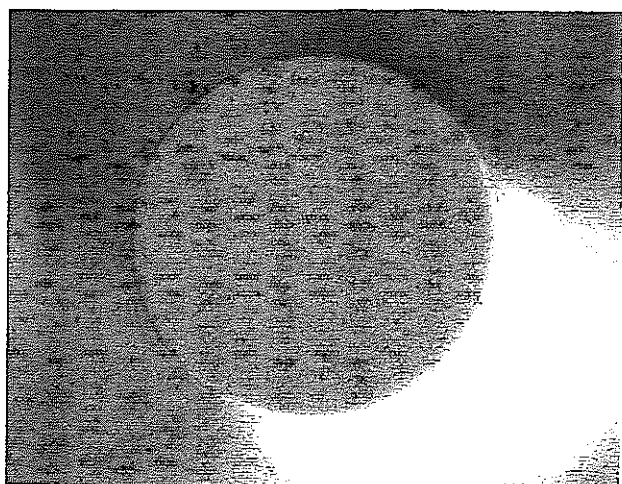
図3 9. 窒化ケイ素同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.



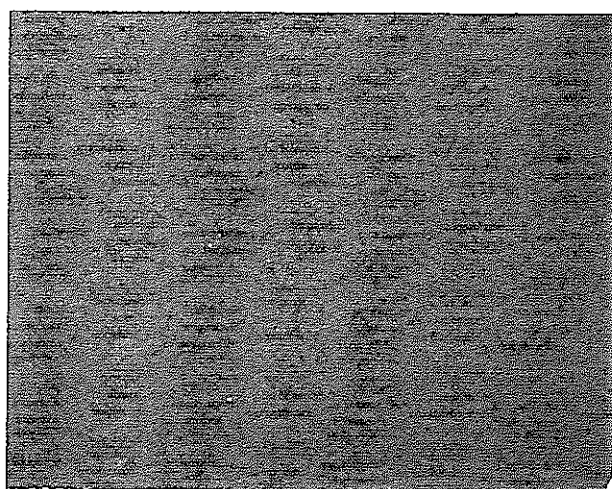
室温-1 可動側



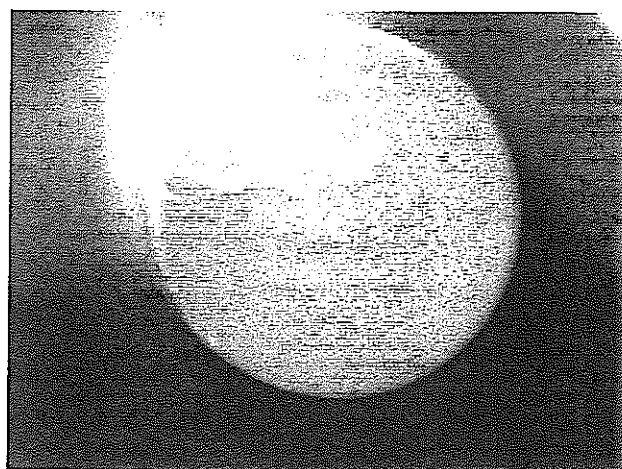
固定側



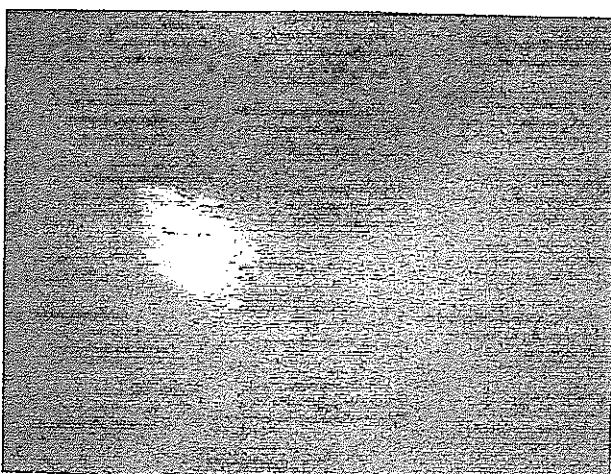
室温-2 可動側



固定側



室温-3 可動側



固定側

摩擦方向：←→

2mm

(b)高温試験

図39. Cont.

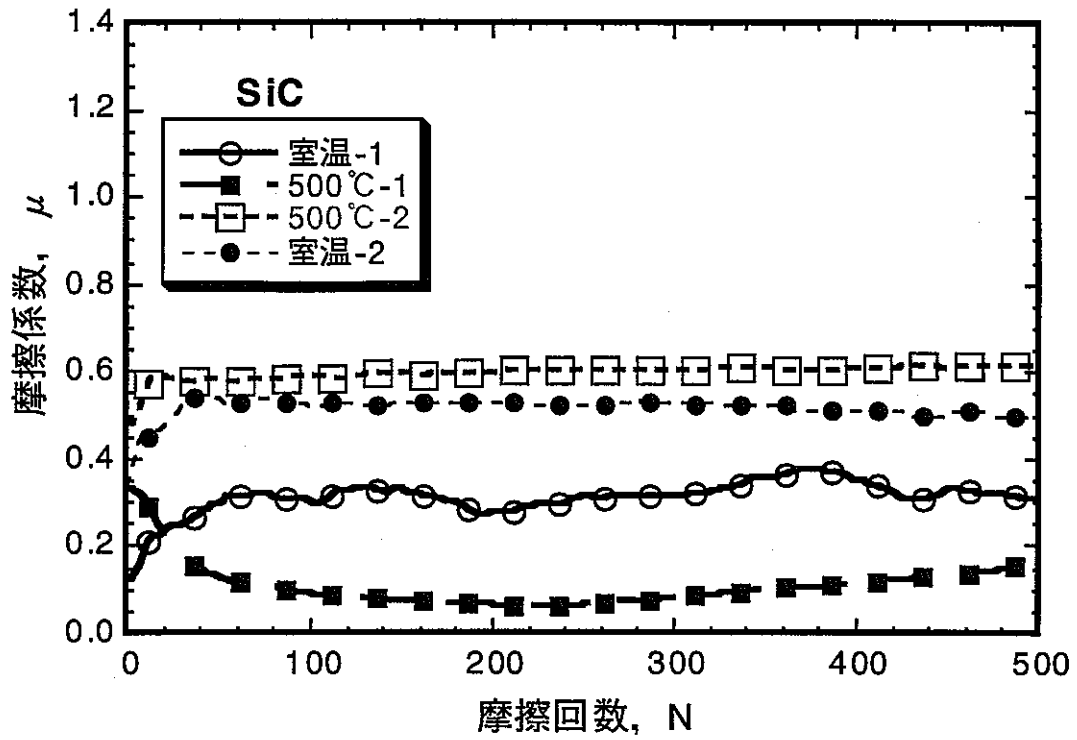
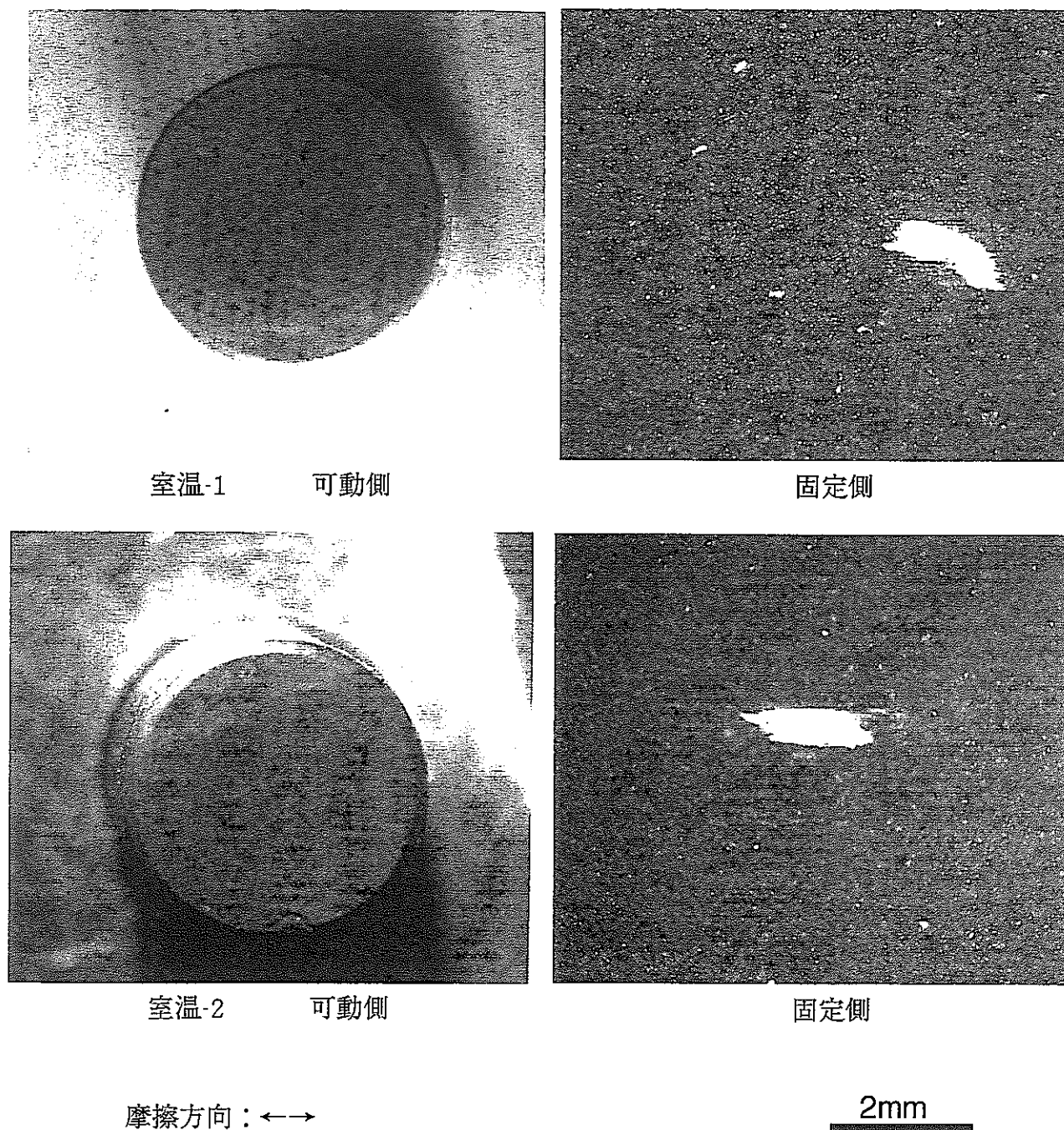
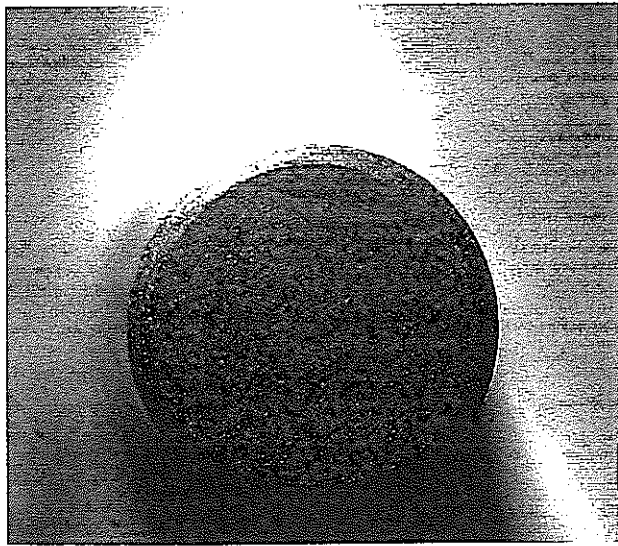


図40. 炭化ケイ素同士の摩擦係数の摩擦回数依存性.
(常温大気中および高温窒素雰囲気中)

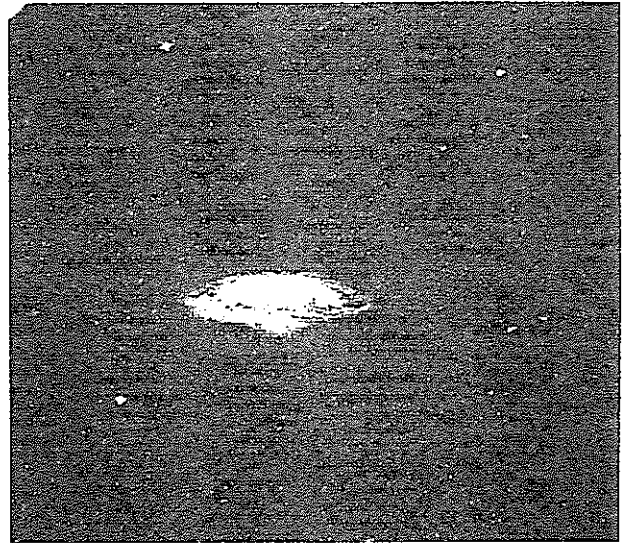


(a)常温試験

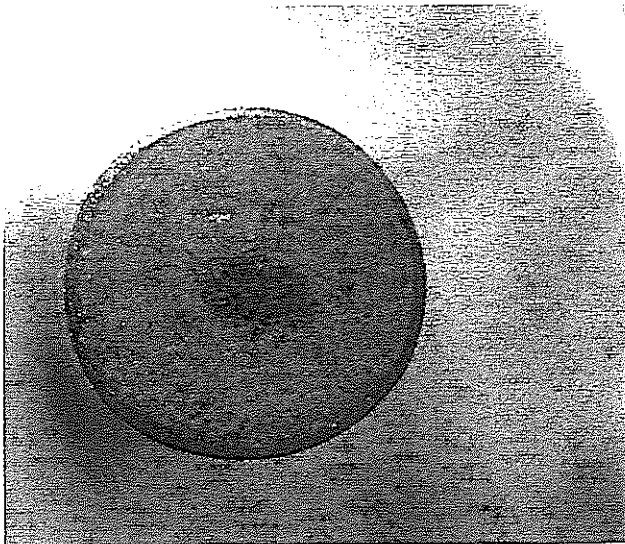
図4 1. 炭化ケイ素同士を500回往復摺動させたときの摩擦面の光学顕微鏡像.



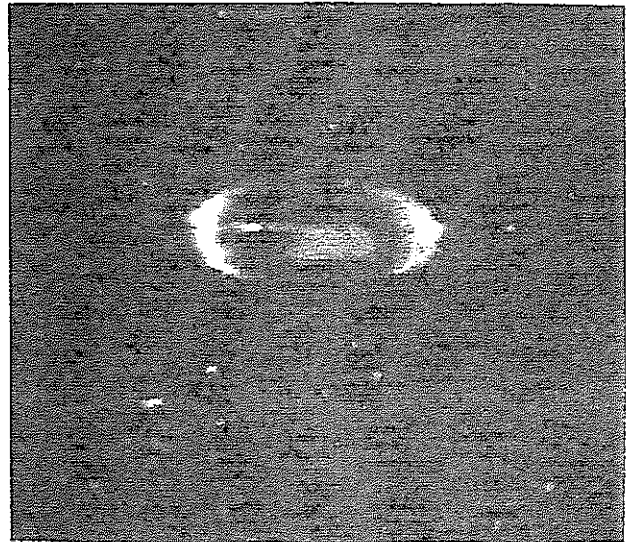
室温-1 可動側



固定側



室温-2 可動側



固定側

摩擦方向：←→

2mm

(b)高温試験

図 4 1 . Cont.