

超高分子量ポリエチレンの摩擦摩耗特性

大住 剛, 高瀬博文, 羽多野正俊, 小原治樹

Tribological characteristics of ultra high molecular weight polyethylene
Tsuyoshi Ohsumi, Hirohumi Takase, Masatoshi Hatano and Haruki Obara

A high molecular weight material is frequently used as a material of mechanical elements. The reason is that its lubricating and frictional characteristics are great. Because of these characteristics, ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) has been normally used as a material of artificial joints. On the other hand, a harder material was stainless steel normally. Ceramics begins to be used recently. Therefore characteristics of friction and wear are needed in those combination. In this paper, the performances in combination between four kinds of ceramics and UHMWPE were widely researched concerning friction and wear.

Key Words:UHMWPE, Ceramics, Friction, Wear

1. はしがき

高分子材料は摩擦摩耗特性に優れ機械要素部品である歯車や軸受として摺動用要素に広く使用されている。特に、超高分子量ポリエチレンは上述の特長を活かし、人工関節要素材として広く使用されている。特に大腿関節における冠臼骨の代りや膝関節のコンポーネントに使用される。

一般に、人工関節に於いて、一方の摩擦面が変形し難い硬い材料とし、相手面が弾性変形を受けやすい材料とした方が潤滑効果が大きくなり摩擦摩耗の観点から必然的な組み合わせである。

また、弾性変形を受けやすい軟質材の方として生体中で安定であるためには分子構造がタンパク質とは似ていない材料とする観点からプラスチックで単純な分子構造を持つポリエチレンが使用される。このプラスチック摩耗粉が関節腔に沈着して肉芽腫(glanuloma)を作ったり人工関節ステムと骨を骨セメントで固定した部分に入り込み接着力を弱めることになり人工関節の寿命を縮める結果となる。⁽¹⁾このような状況にあってポリエチレンの摩擦摩耗特性の調査は必然で、そのコントロールが要求される。硬質材として代表的なものは生体適合性と耐摩耗

性が必要と考えられる。この観点から金属材料として耐食性のあるSUS材が古くから使用されている。Niは毒性を示しCr酸化膜は耐食性を示すが耐疲労強度を低下させる問題点がある。一方、セラミックス材は最近使用される⁽²⁾⁽³⁾ようになった材料であるが硬くて耐摩耗性が高く、成分が単独溶出しても生体に無害である点で優れているがもろく欠け易い欠点がある。

このような状況にあって、金属、セラミックスの硬質材と超高分子量ポリエチレン(UHMWPE)間の摩擦摩耗特性を調べることは人工関節寿命の点から重要である。特に最近使用が著しくなったセラミックス材料についてはアルミナが中心であったが、他のセラミックスについての特性データが少ない。そこで本研究では、従来のSUS、アルミナ、ジルコニア、窒化ケイ素の4種類の硬質材とUHMWPE間の摩擦摩耗特性を比較し、検討したことを述べることにする。

2. 摩擦試験機と摺動方法

歩行パターンの複雑さなるが故に人工関節の摺動形態は非常に複雑であるが大腿関節、膝関節におい

て摺動が異なることは言を待たない。それ故に本研究では、問題があるが単純化した一方向線形摺動による実験とした。また、ポリエチレンピンを硬質材のデスク上で摺動する試験が一般的に使用されているが本実験では硬材のボールをプラスチックに押し付けるボール・オン・デスク形とし、大腿部関節の形態に近いことを考えた。またこれによって摺動条件が極端に軽くなることも考えられるので摺動距離を大きくすることを心掛けた。

潤滑状態に関して人工関節の摩擦試験ではASTM規格F732-82によれば潤滑剤を牛血清としている。本研究においても牛血清を潤滑剤とした。高分子材料の摩擦試験の規格としてASTM-F732に規定されているがこれに準じた試験法で摺動試験を行った。

摩擦試験機の概要は図1に示すように円盤上に試験用UHMWPE板が固定されこれがサーボモータによって駆動される。この板にSUS材やセラミックス材のボールが押しつけられた状態となる。ボールを固定したアームの重錘の位置と重さを選ぶことによって実験条件による押しつけ圧力が得られる。ボールとポリエチレン間の摺動摩擦力は、アームの周方向の力を図の板バネの変位を歪みゲージで電圧に変換し記録計で記録する。摺動速度はボール接触半径と円盤の回転速度によって調節可能であるが、条件を一定にするために半径を比較的变化させることなく回転数で速度調節を行った。

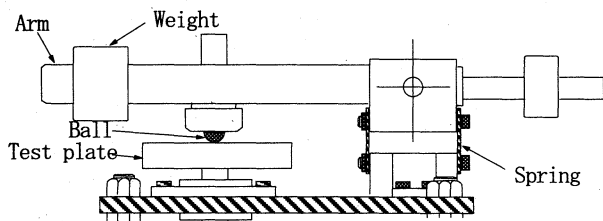


図1 摩擦試験機

3. 実験条件

3.1 摺動材料

はしがきで述べたように軟質材としてUHMWPE, 硬質材としてSUS316, アルミナ, ジルコニア, 窒化ケイ素の4種類の材料を使用した。それらの緒特性を比較する。材料の物理的性質を表1に示す。表にもとずいて注目すべき性質を簡単に説明する。

表1 摺動材の機械的性質
(a) UHMWPE

分子量	$\times 10^6$	5.5
密度	g/cm^3	0.94
融点	度	136
引っ張り破断点強度	kgf/mm^2	450
弾性係数	kgf/mm^2	100
曲げ初期弾性率	kgf/mm^2	8,000
砂摩耗損量	mg	13
熱変形温度	度	95
表面粗さ	μm	2.6

(b) 硬質材

	ステンレス SUS316	アルミナ Al ₂ O ₃ A9951	ジルコニア ZrO ₂ AYZ-3	窒化ケイ素 Si ₃ N ₄ ASN-2
製品名	-	-	白色	黒灰色
密度	g/cm^3	8	3.9	6
ビッカース硬さ	kg/mm^2	200	1800	1300
曲げ強さ(20°C)	kg/mm^2	-	45	120
圧縮強さ	kg/mm^2	-	250	>250
吸水率	%	-	0	0
弾性率	$kg/mm^2(\times 10^4)$	2	4	2.2
ポアソン比	-	0.3	0.24	0.31
最高使用温度	°C	-	1600	-
表面粗さ	μm	1	1.5	1

(a) UHMWPE

分子量が 5.5×10^6 で一般のポリエチレンに比べて著しく大きい。一方引っ張り弾性係数は $1 \times 10^9 N/m^2$ でありボール材の1/200~1/300倍である。また、同じ高分子材料であるゴムの $3 \times 10^6 N/m^2$ に比べて300倍で弾性係数の点では中間的存在である。

(b) 硬質材

金属材料は3種類のセラミックスに比べて密度は大きい。セラミックス間の比較で曲げ強さはジルコニア, 窒化ケイ素, アルミナの順で圧縮強さにおいてもアルミナが最も低い。しかし弾性係数はアルミナが最大で他はSUSを含め似た値である。以上よりアルミナは変形し難くもろいと考えられる。

3.2 摺動速度, 荷重および摺動距離

人の膝関節およびは股関節での摺動速度荷重に関して一般的には前者の荷重は大きい速度は小さい。本実験では前者を想定して2cm/s, 荷重を9Mpaとし後者を想定し5cm/s, 5Mpaの2種類の実験条件を選んだ。

摺動距離に関してはUHMWPE板を回転していることから、板自身の摺動とゆうよりはむしろボールによる繰り返し摺動荷重が加えられた事を意味するので摺動距離を考えるより回転回数を設定することになる。今回は5万回の摺動回数を選んだ。

4. 測定法と測定量

第1章で述べたように硬質材による摺動特性を比較することを目的としているので、摩擦係数、表面性状の観察比較を行った。また、摩耗量が非常に重要であるが、実験装置の都合上観察不可能なため摺動面形状を観察することによってこれに変えることにした。

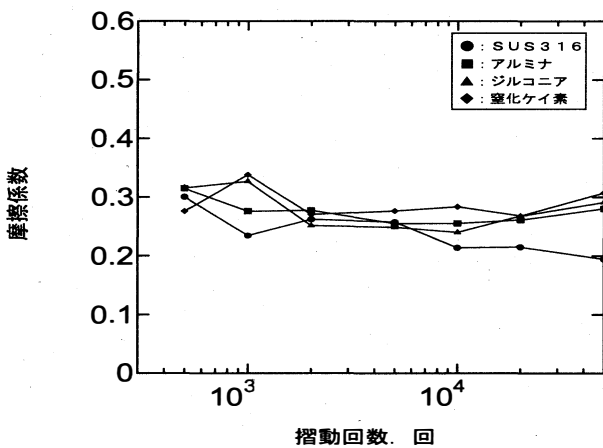
摩擦力に関しては前項の摩擦試験機の項で述べたがバネ変位を電圧変化に変換してオシロスコープにより表示し、時間変化として記録した。

摺動面は金属顕微鏡の観察によって考察する。また、押し付けや摩耗による表面凹形状はタリサーフ表面粗計により記録し考察を行った。

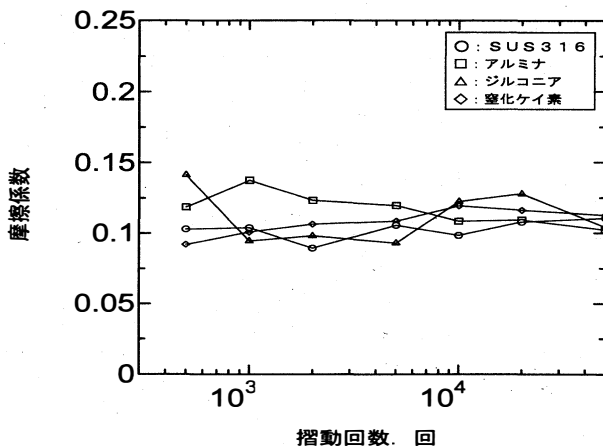
5. 実験結果

5. 1 摩擦係数

計測された摩擦力を荷重で割ることによって摩擦係数を得た。摺動条件による摩擦係数の摺動回数による影響を図2に示す。



(a)5Mpa,5cm/s



(b)9Mpa,2cm/s

図2 摩擦係数 (時間的变化)

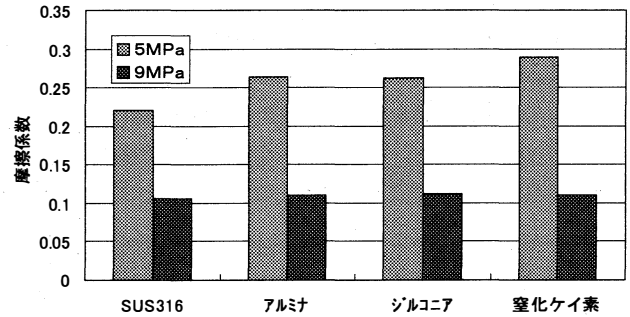


図3 摩擦係数 (平均値)

図(a)では摺動回数による変化はほとんど認められないが回数の増加につれて多少減少が認められる。一方図(b)ではやや増加の傾向にある。しかし両者ともほぼ一定の摩擦係数と考えられる。一方硬質材による影響はほとんど認められない。そこで500回以上の摺動回数の平均値を表すと図3が得られる。図から明らかなことは荷重による摩擦係数の影響が大きい硬質材の種類による影響は少ない。5MpaではSUS, アルミナ, ジルコニア, 窒化ケイ素の順に大きくなっている。9Mpaではほとんど同じであるが強いて言えば同じ順である。

5. 2 摺動痕

摺動によって得られるポリエチレン板の摺動痕のタリサーフ粗計による代表的断面形状は図4である。

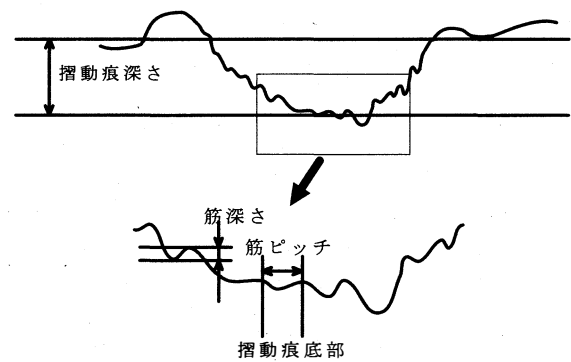
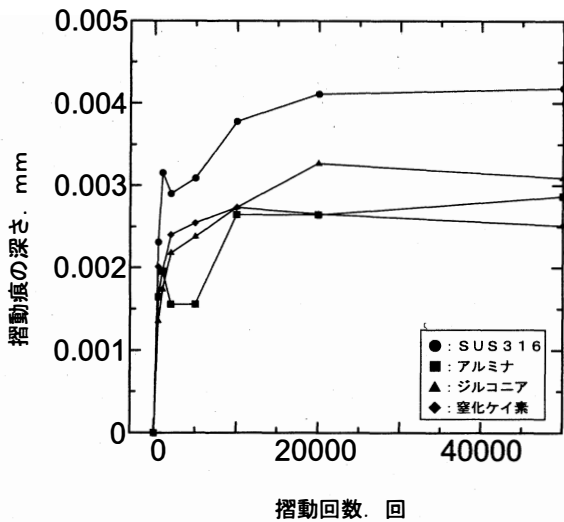
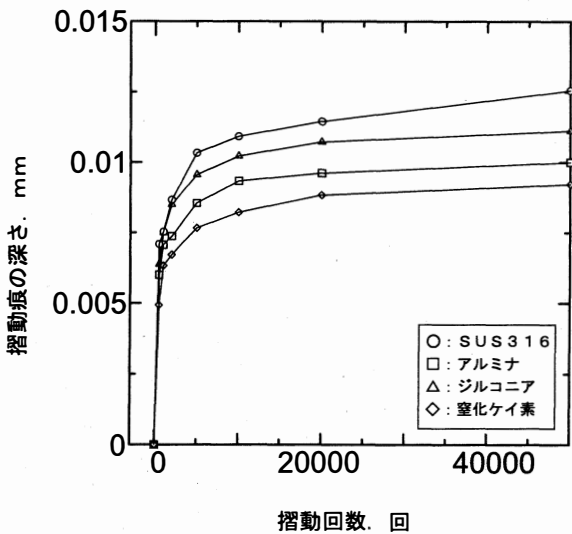


図4 摺動痕断面

押し付け荷重によって塑性変形が起こり素材が横に流動して盛り上がりが生じている。摺動部の詳細部は下図に示すが摺動によるアブレーション状態が見られる。これらの各部を図のように摺動痕深さ、摺動筋深さ、摺動筋ピッチと命名し、幾つかのグラフにまとめた。



(a)5Mpa,5cm/s



(b)9Mpa,2cm/s

図5 摺動痕深さ(時間的变化)

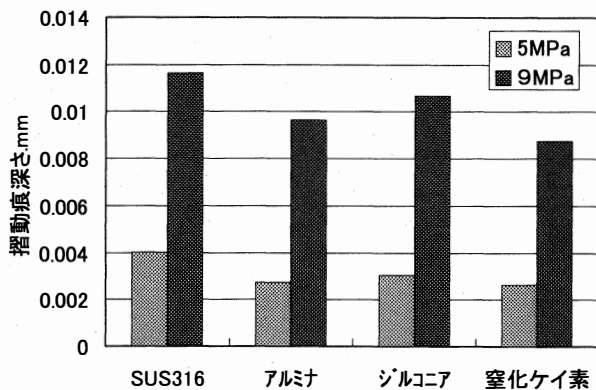
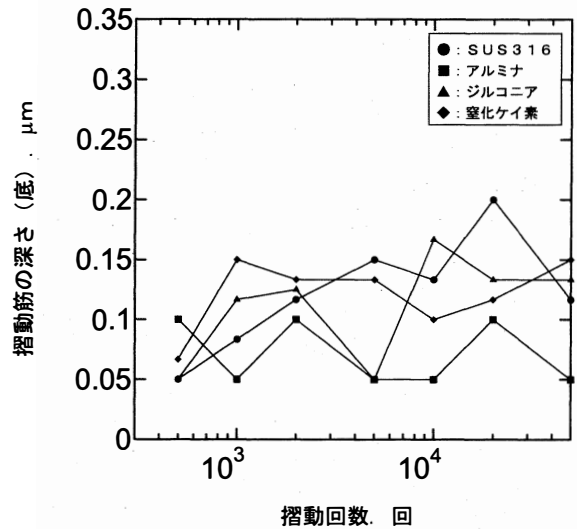
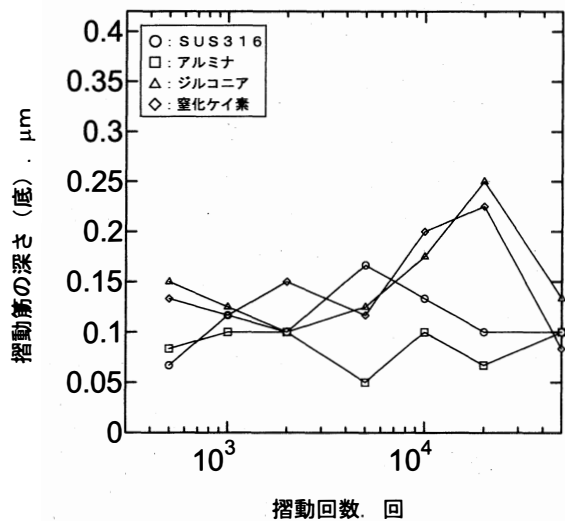


図6 摺動痕深さ(平均値)

図5によれば500回までの摺動では急激に摺動痕の深さが増加しているがその後は非常に遅い速度で徐々に増加する傾向にある。1000回以上の摺動による摺動痕の平均値をグラフにすると図6が得られる。この図によれば硬質材による差は著しくないが、アルミナがやや小さい。当然ながら高荷重の時、摺動痕深さが大きい。摺動痕に生じた細かな摺動筋の深さを計測した結果を示す図7によると、摺動回数と共に筋の深さは増加する傾向にあり摩耗が進行する。500回以上の平均筋深さをグラフにすると



(a)5Mpa,5cm/s



(b)9Mpa,2cm/s

図7 摺動筋深さ(時間的变化)

図8が得られる。図によればアルミナが他の硬質材に比べて著しく小さい。そのピッチは図9によれば、ほぼ同程度であり荷重が小さい方が時間の経過と共にわずかながらピッチが小さくなる傾向が認められ

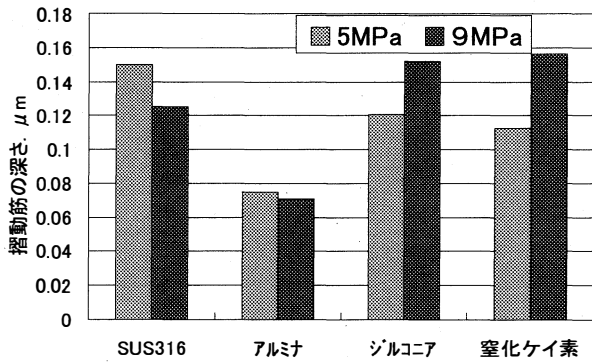


図8 摺動筋深さ (平均値)

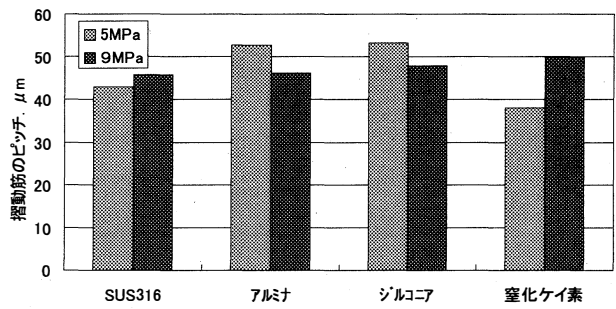
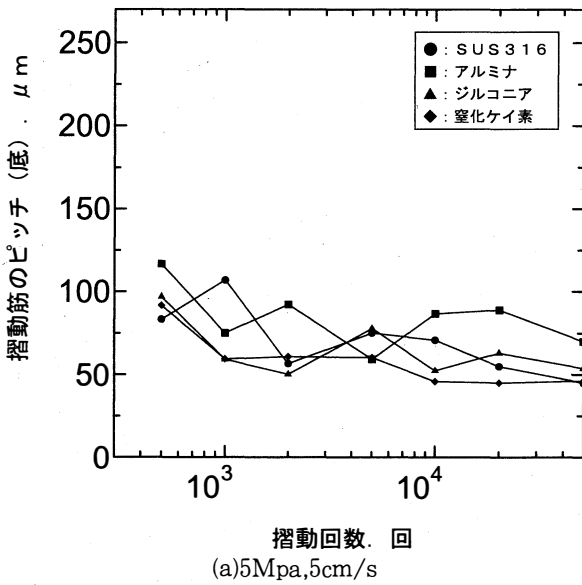
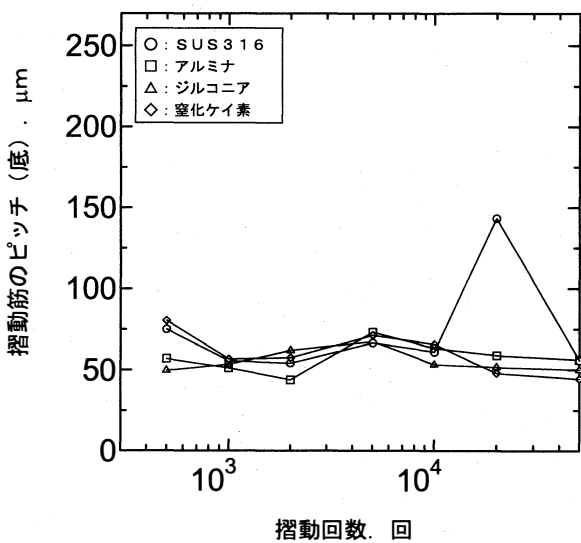


図10 摺動筋ピッチ (平均値)



(a)5Mpa,5cm/s



(b)9Mpa,2cm/s

図9 摺動筋ピッチ (時間的变化)

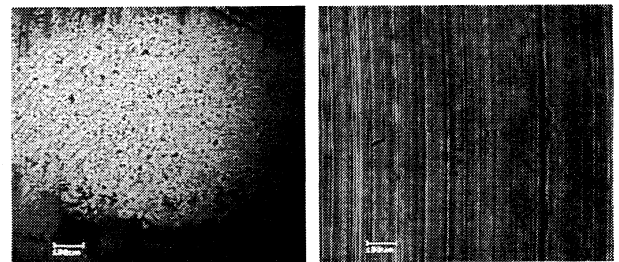


図11 顕微鏡写真 (アルミナ)

表2 フィルムの付着

SUS316	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
5MPa	1			○		○	○
	2		○		○	○	
	3	○	○	○		○	
SUS316	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	9MPa	1				○	○
	2						○
3	○					○	
アルミナ	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	5MPa	1	○	○	○		
	2		○				
3	○						○
アルミナ	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	9MPa	1	○	○			
	2						
3							
ジルコニア	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	5MPa	1	○		○	○	
	2	○	○	○	○		
3	○				○		
ジルコニア	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	9MPa	1		○	○	○	
	2					○	
3						○	
窒化ケイ素	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	5MPa	1					
	2						
3			○				
窒化ケイ素	500	1000	2000	5000	10000	20000	50000
	9MPa	1	○		○		
	2		○	○			
3	○			○		○	○

る。図10によれば硬質材による特別な変化はなく荷重による相関がない。

5. 3 摺動面の顕微鏡写真

UHMWPEの摺動表面状態を顕微鏡で観察した。

5万回摺動後の観察写真の一例を図11に示す。図は硬質材にアルミナを使ったもので写真中の目盛りは100 μm を示す。摺動方向に沿った傷が著しいがこの部分が図4のモデル図の摺動痕深さを表している。

摺動回転数毎の表面観察ではUHMWPEの摩擦粉がフィルム状又は粉になって硬質材に付着しているのが観察される。その様子を表したものが表2である。表中、回転毎に付着がある場合を○印で表した。アルミナ(9MPa)、窒化ケイ素(5MPa)には比較的フィルムの付着が少ない。

5.4 UHMWPE摺動痕の拡大写真

第5.3節で示したUHMWPEの顕微鏡写真の倍率を上げたものやSEM写真により、この摺動痕を観察すると摺動痕に直角にさざ波状の模様を観察される。この波パターンは実用の人工関節の模擬試験や臨床の結果においても発見されている。⁽⁴⁾ 5万回転後のUHMWPE表面の波パターン写真の一例を図12に示す。目盛りは20 μm である。硬質材の種類によるこの波パターンのピッチを図13に示す。

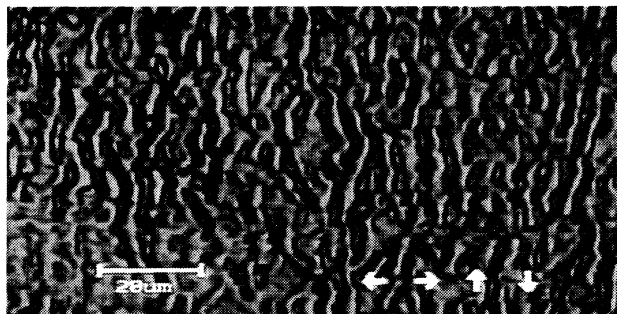


図12 波パターンの写真

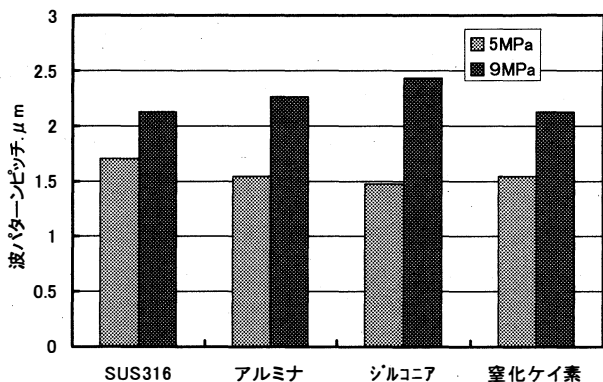


図13 波パターンピッチ

荷重の増加によってピッチは増加するが、硬質材間にはほとんど差が認められない。

5.5 硬度変化

摺動面の5万回摺動後の硬度を10カ所でマイクロビッカース硬度計で測定した。摺動前後の硬度差を図14に示す。いずれの硬質材においても硬度が上昇していることが観測された。従って材料が繰り返し応力を受けることにより硬化することが容易にうなずける。

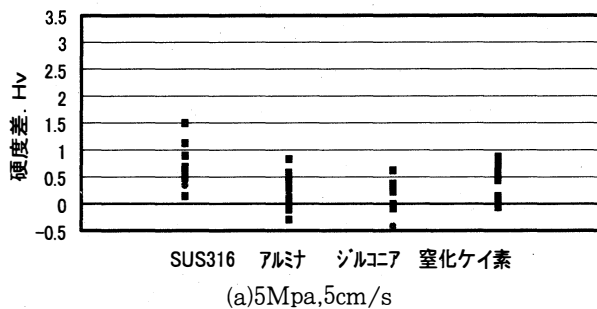


図14 摺動面の硬度変化

6. 結果の考察

第5章の実験結果を考察する。

6.1 摩擦係数、摺動痕、ピッチの関係

実験結果を表す図から次の(1)~(5)のことが言える。

(1) 図2によると摺動回数による摩擦変化は一般の摩擦の性質と同様に一定値に達した後はほとんど変化しない。

(2) 図3によると硬球による摩擦係数の平均値の差はほとんどなく荷重が大きいほど摩擦係数が減少している。

(3) 一方図6の摺動痕深さが荷重の増加によって大きくなっている。すなわち、荷重の増加によるプラスチックデフォーメーションが起こり摩擦の増大とも相まって窪みが大きくなっていることは納得できる。

(4) 図7より摺動筋の深さは時間の進行と共に増加の傾向にあるが深さは非常に小さくポリエチレン板の持っている粗さ $2.6\mu\text{m}$ より小さい。

(5) したがって、摺動によって粗さが減少している事が考えられる。事実、摺動によって摺動筋深さの平均値が図8より $0.1\mu\text{m}\sim 0.16\mu\text{m}$ である。

これら(1)～(5)を考慮すると時間と共に又は接触面積の増加と共に表面の粗さが減少しアブレーション的摩擦が減少する。また、荷重が増加し接触面積が大きい場合ほど摩擦が小となっている。その後摺動筋の深さの増大はあるものの板自身の粗さより増大しなく一定の摩擦係数となる。

図3によれば摩擦係数は硬質材の物性との関係はほとんど認められないのは、摺動痕深さが一定となった後はプラスチックデフォーメーションによって表面がならされ、その後は粗さに差が無くなるためと考えられる。

図6の摺動深さは荷重に関係なくSUS, アルミナ, ジルコニア, 窒化ケイ素の順に摺動痕深さが大きく摩擦係数と全く逆の順になっている。前述したように一定摺動後はプラスチックデフォーメーションによって粗さは均一化された後、粗さによるアブレーション摩擦の影響が無くなり硬質材の差に影響が出ていると考えられる。すなわち摩耗量が増加した方がマイルド摩耗状態となって抵抗が小さく摩擦係数が小さくなるため摩擦係数の順序と摺動痕深さの順が逆になる。しかし摩耗紛は複雑な形状をされると考えられ、その結果として摺動筋には規則性が見出せない結果となったと考えられる。また、図7によれば摺動筋深さは時間と共に増加していることから摩耗量も増加していると考えられる。

6. 2 硬度変化の影響

図14によれば摺動後は硬度が上昇している。しかし荷重の変化や硬質材の種類が大きく影響しているとは考え難い。また摺動痕深さ摺動筋深さとの関係が見出せない。

UHMWPE材の硬度変化の原因を探るため次の(1)(2)の簡単で単純な実験を行った。

(1) UHMWPE材の熱的影響

図15のように加熱した場合の硬度変化は図16となった。これによると熱による影響が大きいほど硬化が大きくなる。

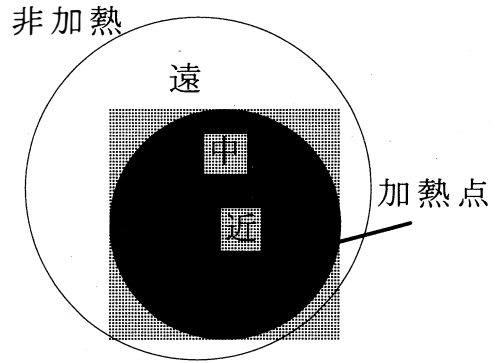


図15 加熱場所

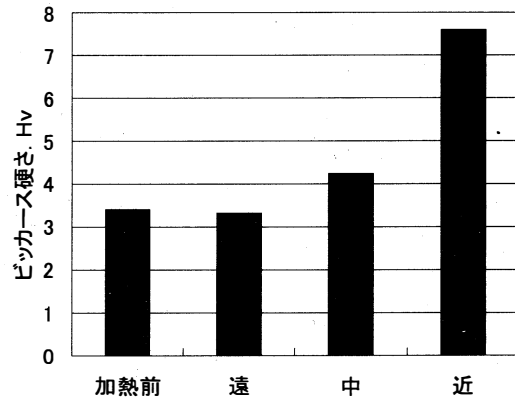


図16 加熱による硬度変化

(2) クリープ性

SUS材ボールをUHMWPEに押し込む事による変形と硬度変化を図17, 図18に示す。図17は比較的短時間のデータである。この場合、摺動はさせていない。さらに摺動を伴う場合を図19に示す。図18と図19を比較すると、図19で湿式(純水)摺動にもかかわらず摺動状態が加わる事によってさらに硬度変化が大きくなる。しかし深さの変形量およびその度合いが小さい。これは静止状態での荷重状態が摺動によって軽減されていることになる。

またクリープ性から押し込み変形後の回復状態を図20に示す。時間の経過と共に回復が見られる。

(1)(2)に示すUHMWPEの実験的基礎性質をもとに硬度変化の実験結果を考える。

荷重による硬度変化を図14が表しており荷重の増加によってその変化は大きい。これは潤滑状態にも関わらず摺動による熱の影響を受けている事も考える必要がある。また、常に押し付けられているより摺動は押し付け条件が軽くなり摺動痕深さが小さくなると考えられる。

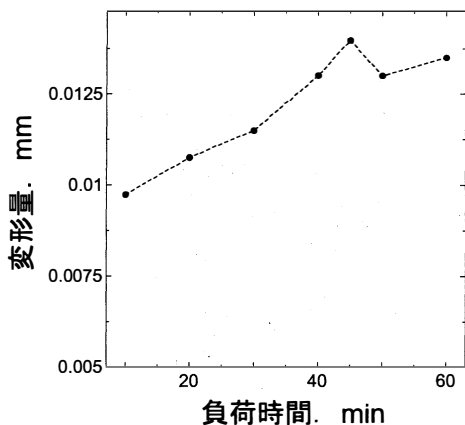


図 1 7 押し付け時間によるPEの変形量(19Mpa)

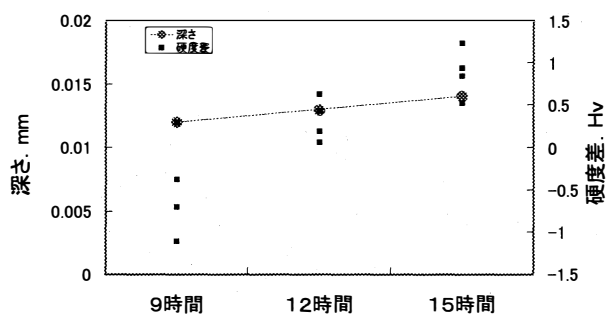


図 1 9 摺動による硬度変化 (9Mpa,2cm/s)

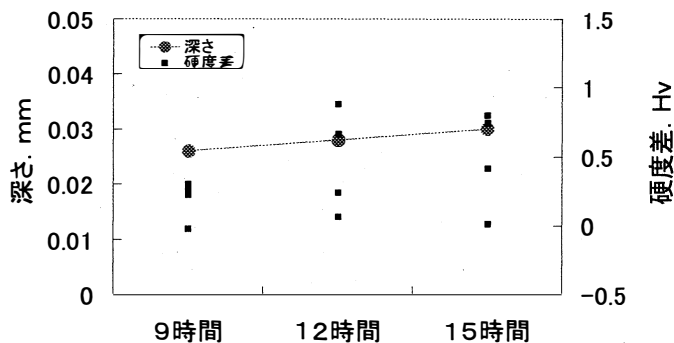


図 1 8 静荷重によるPE板の硬度変化(9Mpa)

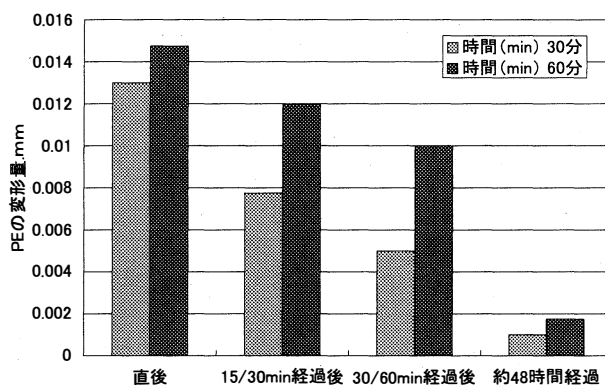


図 2 0 荷重除去後のPE板の変形量

6. 3 摩耗粉

用いられた摩擦試験機の限界から摩耗粉については推測にすぎないが表2でフィルムの付着がアルミナ (5Mpa) 窒化ケイ素 (9Mpa) が少ないことを述べた。図8の摺動筋深さが他に比べて小さく滑らかなことが付着を容易にしているかも知れない。

7. むすび

第6章で行った考察の結果について述べる。

(1) 硬質材において、摩擦係数と摺動痕深さの間に逆の関係があり粗さが摩擦と関係が濃厚と推測される。

(2) 硬度変化は加工硬化と熱による硬化の可能性が高い。

(3) セラミックス材の違いによるトライボロジー特性に著しい相関が見出せなかった。

なおSEM写真および顕微鏡写真によりさざ波状の波パターンが発見されたが、これについては次報で報告する。

実験データの採取に当たって協力下さった当時大学院生の前垣内智章君、学生の石出恭一君に深く感謝します。

本稿は機械学会北陸信越支部総会・講演会で発表(平成11年3月)したものをさらに研究し、加筆したものである。

参 考 文 献

- (1) 笹田直, バイオトライボロジー, 産業図書1988
- (2) D.Dowson, A comparative study of the performance of metallic and ceramic femoral head components in total replacement hip joints, *Wear*, 190(1995), pp171-183.
- (3) 池内, 他3名, セラミッカーセラミック人工関節の潤滑, 臨床バイオメカニクス学会誌, Vol.16.(1995), pp.381-384.
- (4) A.Wang, et.al., Wear mechanisms of UHMWPE in total joint replacements, *Wear*, 181-133 (1995), pp.241-249.