

# 超高分子材料（UHMWPE）の摩擦摩耗特性

大住 剛, 池内 健\*\*, 小原 治樹  
高瀬 博文, 花谷 智則, 栗原 晋典

## The Friction and Wear Characteristics of UHMWPE

Tsuyoshi OHSUMI, Ken IKEUCHI, Haruki OBARA  
Hirofumi TAKASE, Tomonori HANAYA, Shinsuke KURIHARA

UHMWPE is often used as the materials in artificial joints. In this paper, the friction and wear characteristics of UHMWPE are studied. The UHMWPE used in this investigation is the material used in real artificial joints. This experiment involves the tribological research between this material and a stainless steel ball. As a result, part of UHMWPE melts and adheres to the steel ball even though it is in a wet condition. This phenomenon should be avoided in the usage of this material in artificial joints.

Keywords : Friction coefficient, Wear, Adherence, UHMWPE

### 1. 緒 言

高分子材料は化学的に安定なことから医療分野で注目され、人工関節など生体置換部品に利用されている。この場合問題となるのは過酷な条件下において生じた摩耗粉が人体に悪影響を及ぼすことである。またその寿命は決して長いとは言えず、15年ほどで緩みが生ずる例も少なくない<sup>1)</sup>。ところで、高分子材料のなかでも超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）が最近特に有望であり、使用されている。そこで、この材料の摩擦、摩耗特性を把握することが非常に重要であると考えられる。

一般に高分子材料の特性として摩擦係数が負荷荷重や摩擦速度の影響を受けることが挙げられ、これは金属の摩擦挙動と大きく異なるところである<sup>2)</sup>。本研究では人工関節材料として実際に使用されている分子量300万以上の超高分子量ポリエチレン板とステンレス球を実験試料とし、ピンオンディスク型摩擦試験機を用いて摩擦摺動を行い、試料上の摺動痕の挙動観測と測定から垂直負荷荷重や摩擦速度と潤滑状態や摩擦摩耗挙動の関係を考察した。

---

\* 機械学会北陸信越支部講演会（1996年3月）にて内容の一部発表

\*\* 京大学生生体医療工学研究センター

## 2. 実験装置

### 2. 1 実験装置

摺動試験はピンオンディスク型摩擦試験機により行う。この試験機は、回転する平板ディスクに球状のピンを押し付けたときのピンの変位から摩擦力を測定する装置であり、構造が単純で測定範囲が広いので金属材料をはじめとする固体材料の摩擦に使用される<sup>3)</sup>。

図1にピンオンディスク型摩擦試験機の測定原理を示す。質量 $m$ の球をバネ定数 $k$ のバネを介して壁面に固定し、球の下には移動可能な底板をおく。球に垂直荷重 $W$ の負荷を与え球が接する底板を速度 $v$ で移動させることによって底板と球の間に摩擦力を生ずる。高分子材料の場合、クーロン摩擦の性質を示さずに摩擦力は垂直負荷荷重と摩擦速度の関数となるため、摩擦速度を $v_0$ として摩擦力を $F(V_0, W)$ と表す。球と底板間の力の平衡から運動方程式(1)を得る。式(1)において $d^2x/dt^2=0$ 、さらに $V_0=V-dx/dt$ を一定速度 $V_0$ 、一定荷重条件下での摩擦力 $F(V_0, W)$ は球の絶対変位量 $x$ とバネのバネ定数 $k$ から算出することが可能となる。すなわち摩擦力は変位 $x$ に比例し式(2)で表される。金属材料などクーロン摩擦において摩擦力は荷重の一元関数と仮定すると $F=\mu \cdot W$ で与えられる( $\mu$ は一定値)。すなわち摩擦力は変位を測定することによって式(2)より求まる。また平均的摩擦係数を式(3)のように摩擦力 $F$ を荷重 $w$ で除した値として定義する。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = F\left(V - \frac{dx}{dt}, W\right) \quad (1)$$

$$F(V_0, W) = kx \quad (2)$$

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (3)$$

図2に本研究で使用したピンオンディスク型摩擦試験機を示す。図1における球は銅球①に、バネは板バネ②に、底板は高分子の摩擦板③にそれぞれ対応する。銅球をアーム④に固定し摩擦板に押し付け、アームは板バネを介して試験機本体の天板⑤に固定する。高分子の摩擦板をサーボモータにより回転させると摩擦板に接触している銅球に摩擦力が生ずる。その摩擦力によりアーム変位が生じこれを測定する。床等からアームへの振動の影響をなくするためにアーム変位はアームの支持部において歪みゲージにより測定する。

摩擦板はカップリングを介して接続されるサーボモータにより回転し、回転数をサーボモータにより制御する。また銅球は摩擦板の中心に対してある程度偏心して押し付け偏心量と摩擦板の回転数により摩擦速度の調節が出来る。

押し付け荷重の調節はアームに重錘を取り付け、この重錘取り付け位置により、この原理で0～約98Nの範囲で調節が可能である。非常に小さな押し付け荷

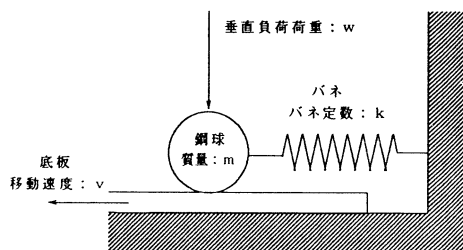


図1 摩擦試験機測定モデル図

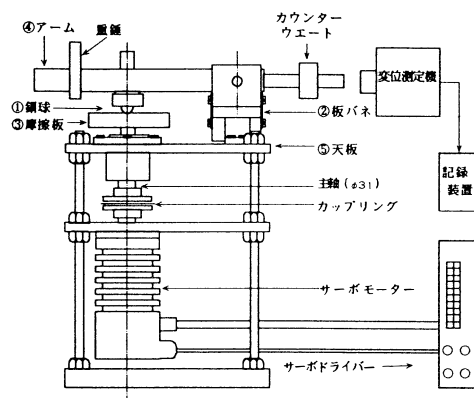


図2 摩擦試験機概要

重の場合はアーム後端にカウンターウェイトを取り付ける。なお重錘の重さと位置により与えられる荷重関係は予備実験により次の式で得られる。

$$\text{荷重 } W = 0.784m d + 9.8 \text{ [N]} \quad (4)$$

ただし重錘の重さを  $m$  [N] , 支点からの位置を  $d$  [cm] とする。

## 2. 2 実験試料

ピン試料としてマルテンサイト系ステンレス球 (A I S I 440 C 直径12,700mm 硬度  $HRC \cong 62$ ) を用いた。

摩擦板として実際人工関節材料に使われている超高分子量ポリエチレン (分子量300万~500万) の板材を直径100mmの回板に加工して用いた。材料は京セラ (株) から得たものであるが、企業秘密からその他の性質はわからない。

## 2. 3 実験条件

2. 3. 1 荷重条件 接触圧力はアームに取り付ける重錘を交換することにより自由に設定できる。人間の膝または股関節荷重は  $5 \sim 30MPa$  であるとされており<sup>1)</sup>、本実験の接触圧力は  $9MPa$  ,  $15MPa$  ,  $19MPa$  とした。

2. 3. 2 速度条件 摩擦速度はサーボモータの回転数を変えることにより自由に設定できる。人間の歩行サイクルは  $4 \sim 6 \text{ cm/s}$  とされており<sup>1)</sup>これに合わせて、本実験の摩擦速度は  $2 \text{ cm/s}$  ,  $10 \text{ cm/s}$  ,  $20 \text{ cm/s}$  とした。

また、実験摺動距離は実用条件に即し、材料の耐久レベルまで必要となる。しかし本研究では摺動距離は150mとした。これは摺動開始後、試料に変化が表れた後、この距離になるとほぼ定常状態がかなり保たれることが認められるからである。

また摺動実験は潤滑剤として水潤滑を用いた場合と無潤滑とについて行った。水潤滑の場合水道水と純水について比較実験したところ、その差は認められなかったが潤滑液には正確を期するため純水を用いた。この純水のイオン濃度は比抵抗  $106 \Omega \cdot \text{cm}$  である。実験中の室温、潤滑液の温度は共に  $28^\circ$  を保つようにした。

## 3. 摩擦係数、摩耗量の測定方法

### 3. 1 摩擦力の測定方法

第2・1節で説明したように歪ゲージを用いて板バネひずみをアーム変位として測定し、式(2)より摩擦力を求める。板バネのバネ定数はアームの軸方向に荷重を加え、板バネひずみとアーム変位を測定することによりあらかじめ求める。その値  $k$  は  $1.274 \text{ N/cm}$  である。

### 3. 2 試料の形状変形の測定法と表面観察法

球と板の摺動後、ポリエチレン試料板上には図3のように摩耗と圧力によって輪型の溝が生じる。この溝をここでは摺動痕、摺動痕の溝幅を摺動痕幅と呼ぶ。実際の摩耗は質量の総変化量を測定し、それが他の部分に移動することを確認することにより得られるだろう。しかし本実験装置はそのような対応ができていないので摺動面の形状変化の測定と観察を

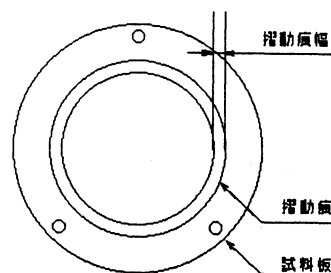


図3 摺動痕

行い摺動状態を考察する。すなわち摺動痕形状はタリサーフ表面測定機を用いて測ると盛り上がった凸部と溝状の凹部に分けられ、凹部面積および凸部面積を使って考察する。

超高分子量ポリエチレン (UHMWPE) 試料とステンレス球の摺動面を金属顕微鏡を用いて観察する。特にステンレス球は比較検討のため、数種類の表面観察を行った。その表面の種類を次に示す。

表面1：鋼球表面 表面2：エーテルで付着した摩耗粉を洗い流した表面 表面3：摺動後、バーナーで付着した摩耗粉を燃焼除去した表面 表面4：E PMA観察を容易にするために先端を1 mm  $\phi$  程削った鋼球の摺動表面 表面5：軽荷重、低速度で摺動した表面

摺動前後はもちろん摺動走行中、一定摺動毎に観察を行う。これにより、超高分子量ポリエチレン試料とステンレス球の摺動面の成長過程を知ることが出来る。

さらにE PMA電子線マイクロアナライザ (島津電子線マイクロアナライザE PMA1500型) によって球表面や摩耗粉の成分の分析と分布状態を測定する。

## 4. 実験結果と考察

### 4. 1 摩擦係数

図4 (a) (b) (c) は垂直荷重の変化に対する摩擦係数と摩擦距離の関係図である。各図には潤滑剤による違いも同時に示されている。摺動初期においては摩擦係数が大きい、次第に一定値に近づく。また湿式では乾式に比べて摩擦係数が小さく純水が潤滑剤の働きをしていることがわかる。垂直荷重の影響に注目すると低荷重 (9 MPa) では15 MPa, 19 MPa に比べて摩擦係数が著しくばらついている。また図4 (b) (c) の値が比較的近いことより荷重の増加とともに摩擦係数が小さくなり、かつ一定値に近くなる傾向にあるといえる。

図5によれば摩擦速度の影響が小さい。

以上のことからUHMWPEの摩擦係数は特に荷重への依存が大きく、高荷重や潤滑により減少・安定化するが、摩擦速度の影響を受けない。これは低荷重で摩擦面が弾性領域にあり摩擦係数は安定しないが、高荷重になると圧力増加により接触面は塑性変形をおこし摺動面が一定となり摩擦係数が安定するためと考えられてる<sup>4)</sup>。

### 4. 2 UHMWPE材の変形

摩耗量を直接求めることは困難な上、本実験装置では測定不可能である。そこで表面の変形量を測定し、摺動状態を考察する。すなわち摺動痕断面を溝部・盛り上がり部にわけ面積を近似計算し、荷重・速度・潤滑条件との関係を検討する。

図6は摺動速度2 cm/sにおける摺動痕断面形状と垂直荷重の関係を示す。図7は19 MPaにおける摺動痕断面形状と摺動速度の関係を示す。両図によれば摺動痕断面形状

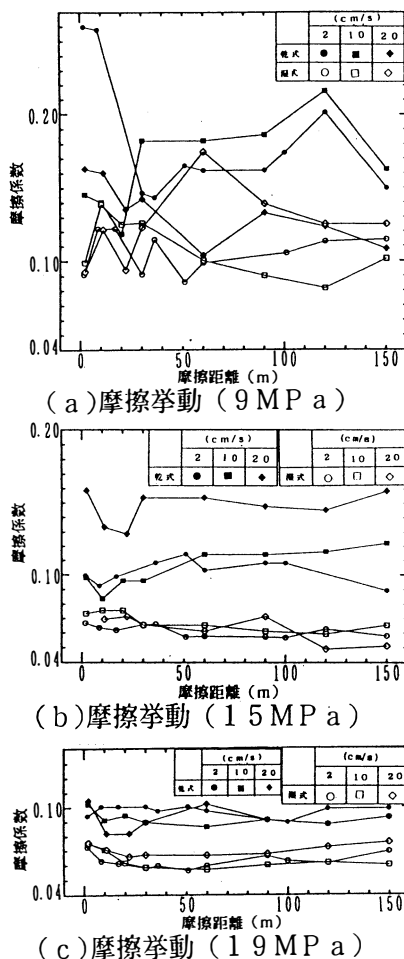


図4 摩擦係数の挙動

は溝部と盛り上がり部に分けられ、図6の低荷重条件(9MPa)では大きな変形はみられず、接触圧が大きくなるにつれて次第に変形が大きくなることがわかる。図7によれば湿式の方が変形が小さく、速度の大きい20cm/sの方が10cm/sに比べて盛り上がり部、溝部の変形が小さい傾向にある。そこで図6、図7に示す溝部断面積(a)と盛り上がり部断面積(b)より断面変形面積(a-b)および総変形断面積(a+b)を計算し図8に示す。荷重の増大によって(a)(b)共増大し総変形断面積(a+b)が増加する。2cm/sでは断面変形量(a-b)はほとんど0のままであり、20cm/sでは断面変形量(a-b)も増加している。これらの図からUHMWPEの総変形断面積(a+b)は荷重により変化し高荷重ほど大きな値を取るが、断面変形量(a-b)はほとんど0に近い値となるが20cm/sでは増加している。また湿式の場合の方がいずれの変形量(aおよびb)も乾式に比べて小さい。

図9は摺動痕断面の形状変化と摩擦速度の関係を接触圧19MPaについてまとめたものである。図7の摺動痕断面は摺動速度の増加により変形し、特に高速度20cm/sでは盛り上がり部がなくなっていることが図9によってもわかる。図より摺動痕断面積(a+b)は多少の変動はあるものの速度による影響をほとんど受けていないが(a-b)値は速度の増加によって増加する。図6～図9より摩擦量には単に機械的材料の移動のみでなく摩擦熱が大きく関係しており、接触圧・速度による接触点の摩擦熱の違いが変形量に現れ、潤滑剤(水)により摩擦熱が減少する影響が複雑である。

#### 4. 3 表面観察

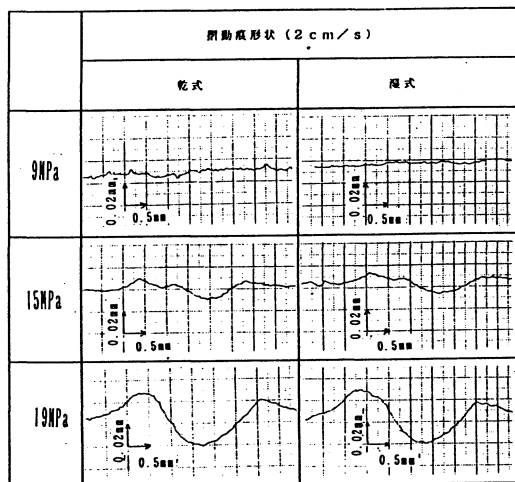


図6 摺動痕断面形状

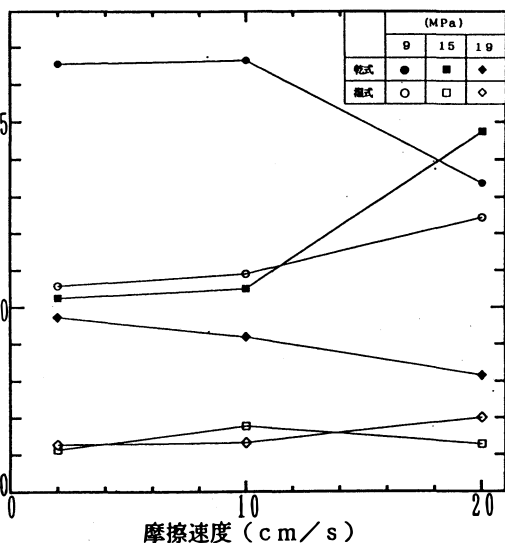


図5 摩擦係数の速度特性

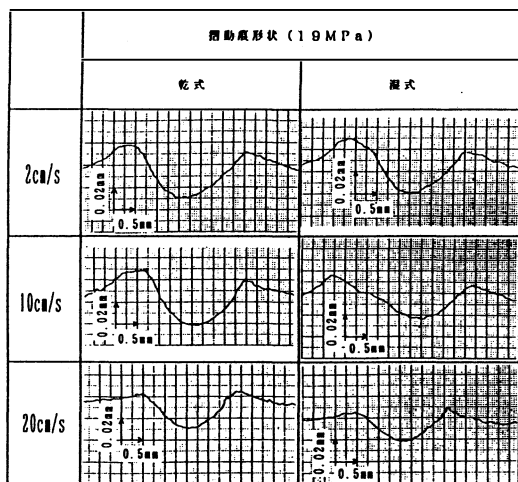
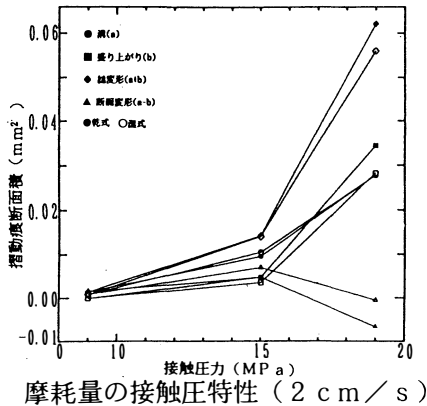
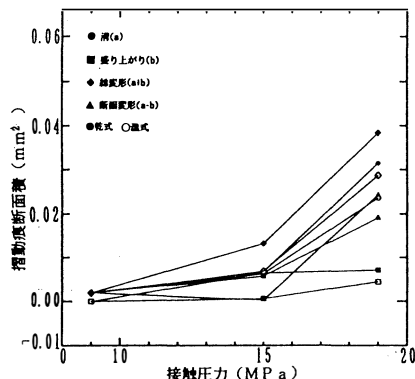


図7 摺動痕断面形状



摩耗量の接触圧特性 (2 cm/s)



摩耗量の接触圧特性 (20 cm/s)

図8 摩耗量の接触圧特性

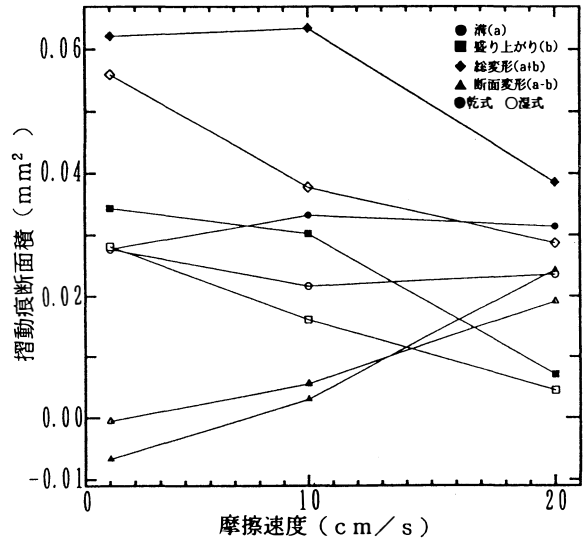


図9 摩耗量の速度特性

4. 3. 1 試料表面 図10(a)は乾式実験におけるUHMWPEの摺動面の顕微鏡写真である。摺動痕内部には多数の細く、深いすじが走っている。これらのすじは摺動痕の両側に集中してみられる。また図には示されていないが低荷重では摺動面形態は摩擦速度の影響が大きく、低速度の場合すじが摺動痕全体に分散する傾向がある。高荷重の場合は速度による影響は余り認められない。また乾式実験の場合のみ試料表面上に脱落的した摩耗粉を多く見つけることができる。この摩耗粉については後ほど述べる。

図10(b)は湿式実験におけるUHMWPEの摺動面の顕微鏡写真であるが、摺動痕内部に多数のすじがみられ、乾式実験同様、摩擦面形態が速度の影響を受ける。図には示していないが低荷重では低速度の場合すじが摺動痕全体に分散する傾向がある。高速度の場合は速度による影響は小さくなっている。試料表面にはもともとある程度の粗さがあるが摩擦過程の初期にその表面あらさが消され、その後摺動痕内にすじ状の傷が現れる。また湿式実験に限り低荷重で長時間摺動した場合、理由はわからないが摩擦面形態が時間を追って周期的な変化をする特徴ある現象があった。

4. 3. 2 ステンレス球表面 摺動後ステンレス球表面を金属顕微鏡で観察すると摩擦面上に摺動方向に平行なすじが観察される。未使用のステンレス球の表面は平滑であることは確認済みであり、このすじは試料との摩擦によってできた傷か又はポリエチレン材の移着と考えられる。またこのすじはポリエチレン試料の摺動痕中のすじに似ており両者は互いに関係あると思われる。図11(a)(b)は15MPa, 2 cm/sの乾式および湿式のステンレス球摩擦面の顕微鏡写真である。両者ともに摺動進行方向に直線のすじや摩耗粉の付着がみられる。また乾式摺動の場合の方が周囲への摩耗粉の

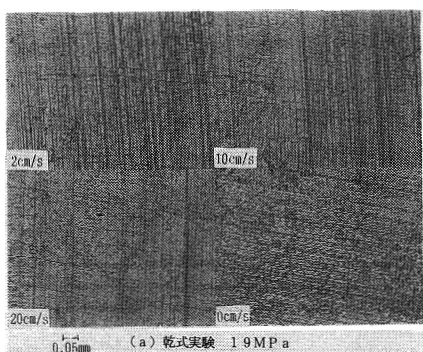


図10 (a) ポリエチレン試料表面

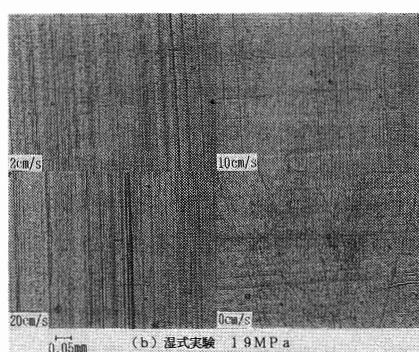


図10 (b) ポリエチレン試料表面



図11 (a) ステンレス球表面

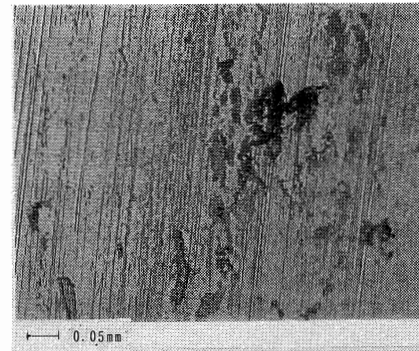


図11 (b) ステンレス球表面

飛散量が多く観測された。

そこでステンレス球表面の傷がポリエチレン材の移着かを調べるために第3.3節で記したステンレス球表面の観察を行った。

図11 (a) (b)によればその表面には摩耗粉が付着して、すじも見つけられることは前述した通りである。このすじは摩擦過程で付いたことは明かである。図12は球表面のE PMAによる定性分析の結果である。これよりステンレス球表面には炭素(C)があることがわかるが、球上に融けたポリエチレンが膜状に付着しているものか金属の成分かは判断できない。

摺動後、ステンレス球上の摺動痕が傷であるかポリエチレン付着物かを判断するためポリエチレン材を溶かした表面2には摺動傷が観測された。

表面2では完全にポリエチレンが除去できない可能性があるので表面を燃焼し付着した摩耗粉を完全に除去した表面3では摺動傷が認められた。従って観測のすじがステンレス上の傷と付着物の両者であることが確認できた。

前述したE PMA電子線アナライザによる表面観測では平坦表面が必要であり、正確な結果を得るため表面4を使い、E PMAによるマッピング分析の結果よりステンレス球表面には炭素(C)があることがわかり、摩耗粉中には融けたポリエチレン中の炭素が含まれ、摺動面の状態に影響を与えていると考えられる。しかし完全に断定するためには他の試験が必要である。HR c ≒ 62の硬度を持ちながらステンレス球表面にポリエチレン摩耗粉による傷が生ずることについて、ステンレス球表面の部分的軟化による硬度低下も疑われるので摺動前と摺動後に硬度を測定したが変化がなかった。

本研究で定めた実験条件は実際の人間の関節にかかる負担に比べてやや厳しいものであり実際の関

節にこのような変化が生ずれば問題となる。そこで補足として軽荷重条件で実験を行った。表面5には、やはり摩耗粉やすじを見つけることができた。

これらの観測からステンレス球の表面傷の深さを調べるためテイラー・ホブソンの表面粗さ計で傷を調べた。その粗さは約 $0.2\mu\text{m}$ 以下で肉眼でみるよりはるかに浅い。以上からステンレス球の摩擦面には摩擦により摩耗粉やすじ状の摺動痕が付くが実際にステンレス球上に付いている傷は極めて小さく、ほとんどは摩耗粉がすじ状に付着したものであることがわかった。

**4. 3. 3 摩耗粉** 特に乾式摺動の場合にはステンレス球上同様にポリエチレン試料上の摺動表面にも脱落した摩耗粉を多く見つけることができる。接触面の摩擦熱はかなり高いものであると思われる、摩耗粉はポリエチレンが融けたもので構成され、特にその中のカーボン成分が炭化して黒く見えたり、高硬度化して摩擦面の状態に影響を与えていると考えられる。高分子材料は熱伝導性が低いため接触点は極端的にかなり高温になると予想され、摩擦熱が銅球・ポリエチレン試料面の摩耗状態を進行させていると考えられる。また湿式では完全に潤滑膜ができるわけではなく、摩擦挙動は乾式のものと同じであるが程度の差があると考えられる。そこでさらにこの摩耗粉の成分分析が必要である。

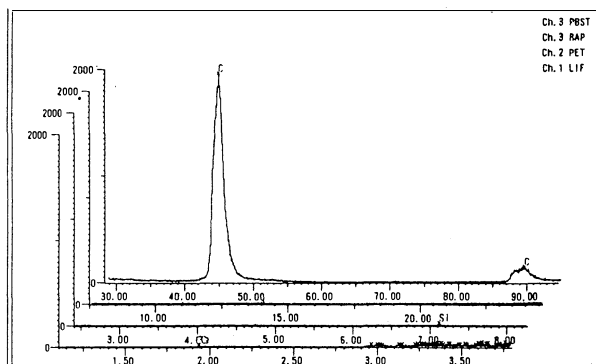


図12 ステンレス球表面定性分析

## 5. 結 言

本研究では超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）について摩擦試験をおこない摩擦係数、摺動面の变形および表面の状態が荷重・速度・潤滑条件（湿式・乾式）によってどのような影響を受けるのかを調べた。その結果をまとめると次のようになる。

1. 超高分子量ポリエチレン（UHMWPE）の摩擦係数は高荷重や潤滑により減少・安定化し、特に荷重への依存は大きく低荷重では接触面が弾性領域にあり摩擦係数は安定しないが、高荷重になると接触圧力増加により接触面は塑性変形をおこし安定すると考えられる。しかし、摩擦速度の影響は小さい。
2. 摺動痕断面形状は高荷重・高速度で変形を起こす。しかし潤滑液（純水）により変形量は小さくなる。
3. ポリエチレン試料表面には乾式・湿式を問わず摺動方向に平行な直線すじ状の摺動痕が付く。とくに乾式実験の場合、摺動痕内部に脱落した黒色の摩耗粉を見つけることができる。ただしこの摩耗粉の成分の特定は本研究の範囲ではできなかった。
4. ステンレス球の摩擦面にも摺動により摩耗粉やすじ状の摺動痕が付く。しかし実際に球表面上に付いている傷は極めて小さくて浅く、ほとんどは摩耗粉がすじ状に付着したものである。あるいはこれがポリエチレン試料上で剪断されてポリエチレン試料上のすじになっていると考えられる。

いずれの摩擦挙動にも摩擦熱が大きく影響していると考えられ、摩擦熱が銅球・ポリエチレン試料面の摩耗状態を進行させていると考えられる。

最後にE PMA電子線アナライザによる観察に関し、助力を得た本工学部蓮学寺聖一助教授に深く感謝する。



#### 参考文献

- 1) 笹田直, バイオトライボロジー-関節の摩擦と潤滑-, 産業図書
- 2) 高分子学会, 高分子の物理学, 地人書館
- 3) 松原清, 摩擦試験, 工業材料第16巻第6号
- 4) 高分子学会, 高分子材料の試験法, 地人書館