

原 著

関節軟骨の潤滑に関する研究

第2報 滑動軟骨表面の形態学的変化

赤 岡 啓 二

信州大学医学部整形外科科学教室

(主任: 藤本憲司教授)

STUDIES ON THE LUBRICATION OF THE ARTICULAR CARTILAGE

II. MORPHOLOGICAL INVESTIGATION OF RUBBING SURFACES OF THE ARTICULAR CARTILAGE

Keiji AKAOKA

Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine,
Shinshu University

(Director: Prof. Kenji FUJIMOTO)

AKAOKA, K. *Studies on the lubrication of the articular cartilage. II. Morphological investigation of rubbing surfaces of the articular cartilage.* Shinshu Med. J., 27: 737-754, 1979

As part of a study of the mechanism of joint lubrication the author examined and reported on the behavior of the frictional forces between a small piece of the cartilage and a glass plate. In this second study, the rubbing surfaces of the cartilages from pig knee joints were observed at various stages of the rubbing experiments with a scanning electron microscope and a differential interference contrast microscope to analyse the correlation between the frictional behavior and surface morphology of the cartilage.

1) Scanning electron microscopy revealed distinct differences between the surfaces of the cartilages under low and high frictional forces. That subjected to a low force was covered with a film composed of 0.3-0.8 μm particles, whereas that subjected to a high force had only filamentous bits of the film.

2) Differential interference contrast microscopy revealed that the surfaces of the cartilages without treatment or those rubbed and immersed in saline solution were covered with flat films containing a lot of water. With the lapse of time the films showed a muddy appearance. When the frictional force became high, the rubbing surface was covered with a film having linear tracks along the direction of the rubbing movement.

3) In the previous paper, the "spontaneous friction decrease phenomenon" was reported as a characteristic property of the cartilage. When the phenomenon appeared, the surface of the cartilage was covered again with a mottled muddy film. However, this film did not present any changes in appearance with time, in contrast to the initial film.

These findings suggest that the film covering the cartilage surface with a muddy appearance has an important role in joint lubrication, and the "spontaneous friction decrease phenomenon"

results from a renewed film formed after squeezing out low molecular fluid from the rubbing surface. The "spontaneous friction decrease phenomenon", therefore, is considered to be a specialized form of boundary lubrication of the cartilage surface.

(Received for publication ; August 28, 1979)

Key words : 関節軟骨 (articular cartilage)

潤滑 (lubrication)

走査電顕 (scanning electron microscopy)

反射型微分干渉顕微鏡 (differential interference contrast microscopy)

I 緒 言

著者はさきに生体関節の潤滑機構を解明する目的で、軟骨小片を硝子面上で滑動させ、摩擦力の経時的変化、および試料片の圧縮ひずみ量の変化を計測する実験を行った。その結果、摩擦力の荷重時間依存性および滑動後に軟骨を硝子面より離し、液体に浸すと潤滑性能の回復がみられることなど、従来報告されている事実が確認された。さらに、著者は軟骨の処理条件によっては、一旦上昇した摩擦力が滑動中に自然に低下するという従来知られていなかった現象を発見し、これを摩擦力の再低下現象と名付けて第1報として報告した¹⁾。

摩擦力の再低下現象は持続往復運動下に急激に出現することや、出現前後において軟骨小片の圧縮ひずみ量には摩擦力の変化に対応する程の変化はみられないことなどの事実から、軟骨表面のもつ特異的な境界潤滑性能に由来する現象ではないかと推論した。

機械工学領域の潤滑分野では摩擦力の再低下現象に類似した現象は認められず、関節軟骨特有の現象であるので、摩擦力の再低下現象の発現機序を解明することにより、関節軟骨の潤滑機構の一側面が解明されることが考えられる。そこで本研究では硝子面上を滑動させた軟骨小片の摩擦力の変動と滑動軟骨の表面形態にいかなる関係が存在するかを追求し、摩擦力の再低下現象の出現機序を解明することを目的として、各種の滑動条件下における軟骨表面の形態学的研究を行った。

II 実験材料と実験方法

屠殺場で屠殺され4℃に48時間保存された生後約10カ月の豚から、関節包をつけたまま膝関節を採取し、膝関節の大腿骨顆荷重面より円柱打ち抜き器を使用して軟骨下骨組織を付けた軟骨小片を作成して実験材料とした。試料片の大きさは半径2mm、厚さ5mmの円柱で、その軟骨表面と硝子面との間で滑動実験を行った。滑動実験中は継続的に摩擦力を計測し目標とする条件になったとき滑動を中止して軟骨の表面形態を走査電子顕微鏡(日本電子JSM-S1を使用)および反射型微分干渉顕微鏡(オリンパス光学・反射型ノマルスキー微分干渉装置使用)により観察した。記録された摩擦力の経時的変化の典型例を図1に示したが、図中に示したaよりhまでの8種の処理条件の時期に観察試料を作成した。1つの処理条件の時期につき20試料の観察を行った。

また軟骨試料に trypsin および hyaluronidase 処理を行って表面形態にいかなる変化が起こるかについても各々5つの試料標本を観察したが、その処理条件は表1に示す通りである。

走査電顕での観察試料は2.5% glutaraldehyde に2時間浸し cacodylic acid buffer で洗浄後1% osmic acid に1時間浸して2重固定を行い buffer で再び洗浄後 alcohol 系列による脱水, amyl acetate による置換, 臨界点乾燥(日立臨界点乾燥装置 HCP-1型使用), sputter coating (Hummer II 装置使用) による Au-Pd の被覆という手順で作製された。微分

表 1 酵 素 の 処 理 条 件

略 称	酵 素 名	単 位	pH	温 度	処理時間
T. 処理	trypsin	5,000 unit/ml	7.5	37°C	2 hrs.
H. 処理	hyaluronidase	500 unit/ml	5.5	37°C	2 hrs.

干渉顕微鏡での観察試料は固定、乾燥などの処理を行わずに生の状態で観察した。

Ⅲ 実験結果

A. 滑動軟骨表面の形態変化

1. 新鮮無処理軟骨の表面形態

(図1 a, 図2)

微分干渉顕微鏡で観察すると、採取直後はほとんど平滑でなんらの凹凸も観察されないが、数秒後にはわずかの陥凹が観察されるようになり(図2-(1)), 顕微鏡下で刻々、表面形態は変化し、数分~数10分放置後の軟骨表面では一定の構造をとらない不規則な陥凹がみられ、泥状被膜が全体をおおっているのが観察された(図2-(2))。なお、背景色が灰色の場合には陥凹部は暗灰色に観察されるが、背景色を青色に変化させると、陥凹部は黒く、陥凹部の辺縁は黄色に観察された。

採取直後に作製した標本を走査電顕で観察すると、径20~40 μ mの楕円形あるいは円形の隆起がところどころにみられ、さらに軟骨表面全体を径0.3~0.8 μ mの顆粒状物が平面的に連結して被膜状構造を形成しているのが観察された(図2-(3)(4)(5))。

2. 採取後生食水で表面を洗浄した軟骨の表面形態(図1 b, 図3)

微分干渉顕微鏡では観察開始直後はなんらの凹凸も認められないが、数分後には径10~30 μ mの多数の楕円形あるいは円形の隆起あるいは陥凹がみられた(図3-(1))。なお、背景色が灰色の場合には陥凹部は暗灰色に観察されるが、背景色を黄土色に変化させると、陥凹部の辺縁が薄青色を呈し陥凹部の辺縁がはっきりと描出された。

走査電顕で観察すると、新鮮無処理軟骨の表面形態に類似して、ところどころに径20~40 μ mの楕円形あるいは円形の隆起がみられ、さらに不規則な形の径0.3~0.8 μ mの顆粒状物からなる被膜が表面全体をおおっていた(図3-(2)(3)(4))。

3. 採取後、荷重を数分間かけた直後の軟骨の表面形態(図1 c, 図4)

新鮮軟骨標本を滑動させることなく、荷重のみを数分かけた試料を微分干渉顕微鏡で観察すると、不規則な波紋状の縞模様が全体にみられ、泥状物が表面をおおいところどころに径10~30 μ mの楕円形あるいは円形の隆起あるいは陥凹が認められた(図4-(1))。なお、背景色が灰色の場合には波紋状の模様は薄黄色を

呈し、背景色を赤桃色に変化させると波紋は黄色になるのが観察された。

走査電顕で観察すると、表面をおおう被膜は不規則な島状を呈し、その辺縁では線維様構造物および顆粒状物が互いに融合したようにみえる所見であった(図4-(2)(3)(4))。

4. 滑動を数10分間行い摩擦力が増大し、摩擦係数が0.2~0.3となった時期の軟骨の表面形態(図1 d, 図5)

微分干渉顕微鏡で観察すると滑動方向に一致して、線状痕がみられ、その間に泥状物が残存して幅約10 μ mを有するうね状の隆起が認められた(図5-(1))。なお、背景色を灰色から暗黄色に変化させても線状痕は黒色を呈してほとんど変化しなかった。

走査電顕で観察すると、表面をおおっていた被膜は破断し、幅1~3 μ m、長さ5~30 μ mに細片化し、糸くず状となり、その下層にはほぼ平行配列をとり、ところどころで束をなしている幅0.1~0.3 μ mの線維様構造物がみられた(図5-(2)(3)(4))。

5. 滑動後 lift up し生食水に数分間浸した直後の軟骨の表面形態(図1 e, 図6)

微分干渉顕微鏡で観察すると、無処理標本と同様に初めはなんらの凹凸も観察されないが、表面形態は刻々、変化し、1~2分後には滑動方向に一致する不鮮明な樹枝状隆起とそれらの間に陥凹が認められた(図6-(1))。なお、背景色(樹枝状隆起部)が灰色の場合には樹枝状隆起の辺縁は黄色を呈し、陥凹部は暗灰色に観察された。背景色を青色に変化させると辺縁は黄色、陥凹部は黒色に観察された。

走査電顕で観察すると幅2~3 μ mのうねりがみられ、それらの表面を径0.3~0.8 μ mの顆粒状物が無構造な物質で互いに結合されて被膜を形成し、さらにその上に幅1~3 μ m、長さ3~20 μ mの糸くず状となった被膜の断片が散在していた。しかしその下層の線維様構造は認められなかった(図6-(2)(3)(4))。

6. Lift up し生食水に浸して滑動を再開させ、摩擦力が上昇していく時期で、再低下現象出現前の時期の軟骨の表面形態

(図1 f, 図7)

微分干渉顕微鏡で観察すると顕微鏡下に表面形態はわずかに変化するが、運動方向に一致して幅約10 μ mの線状隆起が認められ、さらにそれに交叉するような小さな隆起も観察された(図7-(1))。なお、背景色が灰色の場合には隆起の辺縁は黄色を呈し、陥凹部

は暗灰色に観察された。背景色を青色に変化させると辺縁は黄色、陥凹部は黒色に観察された。

走査電顕で観察すると径 $0.3\sim0.8\mu\text{m}$ の顆粒状物は無構造な物質で互いに結合され被膜を形成し、表面全体をおおっているが、ところどころで不規則に径 $5\sim10\mu\text{m}$ の円形に膨隆していた(図7-(2)(3)(4))。

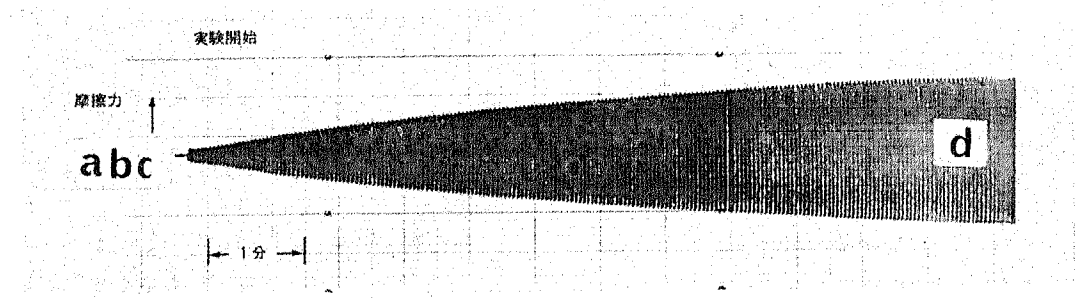
7. 再低下現象出現直後の軟骨の表面形態
(図1g, 図8)

微分干渉顕微鏡で観察すると不規則な斑紋様の泥状

被膜で表面はおおわれていた。この表面形態は前述の標本とは異なり、観察中にほとんど変化しなかった(図8-(1))。なお、背景色が灰色の場合は斑紋は暗灰色を呈し、背景色を青色に変化させると斑紋は黄色に変化した。

走査電顕で観察すると、採取直後の標本ほど密ではないが、径 $0.3\sim0.8\mu\text{m}$ の顆粒状物が被膜を形成し表面全体をおおい、ところどころで径 $5\sim15\mu\text{m}$ の島状形態をとっていた(図8-(2)(3)(4))。

新鮮関節軟骨-硝子との摩擦 <dry condition>



<Lift up して生食水に浸した処理関節軟骨と硝子>との摩擦

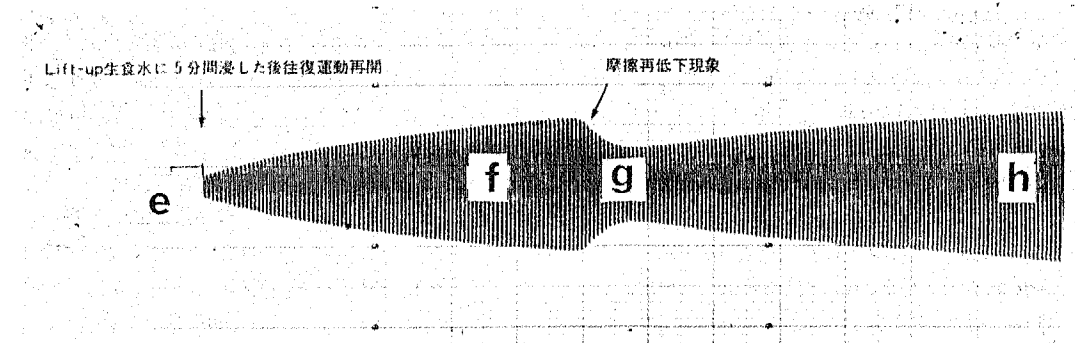
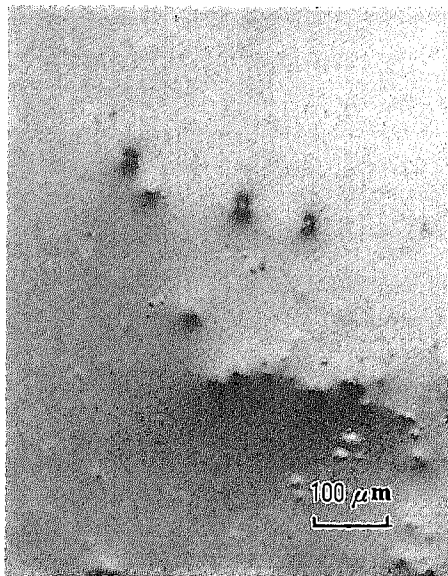
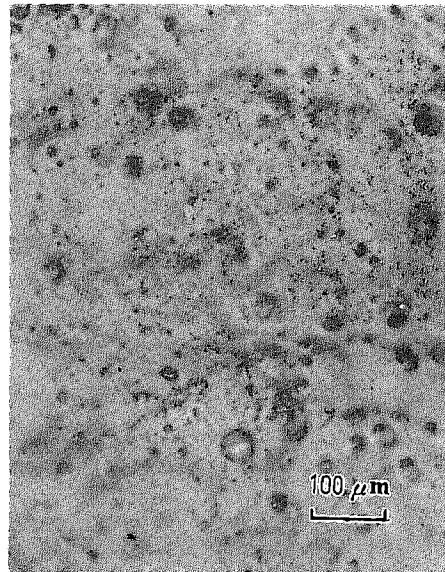


図 1 表面観察を行った試料の処理条件の時期

- a : 新鮮無処理
- b : 採取後生食水で表面を洗浄した後
- c : 採取後滑動は行わず、荷重を数分間かけた直後
- d : 滑動を数10分間行わせ、摩擦力が増大し、摩擦係数が $0.2\sim0.3$ となった時期
- e : 滑動後、試料を硝子面から離して(lift up と略す)生食水に数分間浸した後
- f : Lift up し生食水に浸して、再び滑動を再開させ摩擦力が上昇していく時期で再低下現象出現前の時期
- g : 再低下現象出現直後
- h : 再低下現象出現後も滑動を継続し摩擦力が増大し、摩擦係数が $0.2\sim0.3$ となった時期



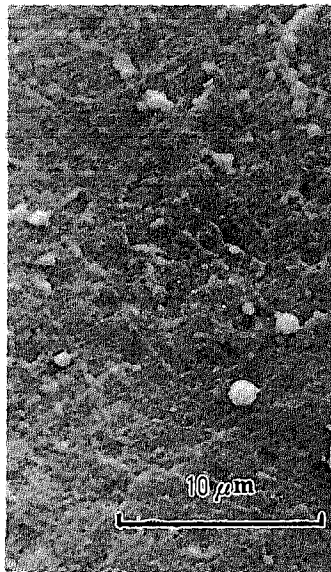
(1)



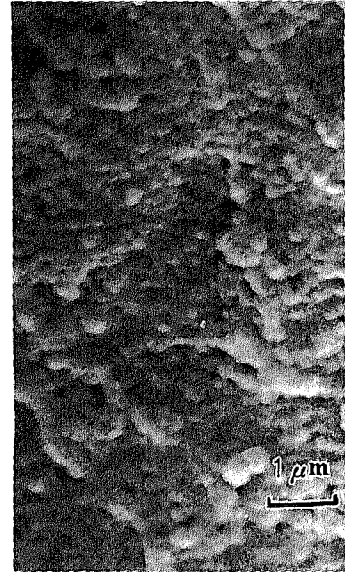
(2)



(3)



(4)



(5)

図 2 新鮮無処理軟骨の表面形態

(1), (2): 微分干渉顕微鏡像, 採取数秒後(1)および数分～数10分後(2)の所見

数秒後にはわずかの陥凹が観察されるようになり, 数分～数10分後には泥状被膜が表面をおおう。

(3), (4), (5): 走査電顕像

径0.3～0.8μmの顆粒状物からなる被膜が全体をおおう。

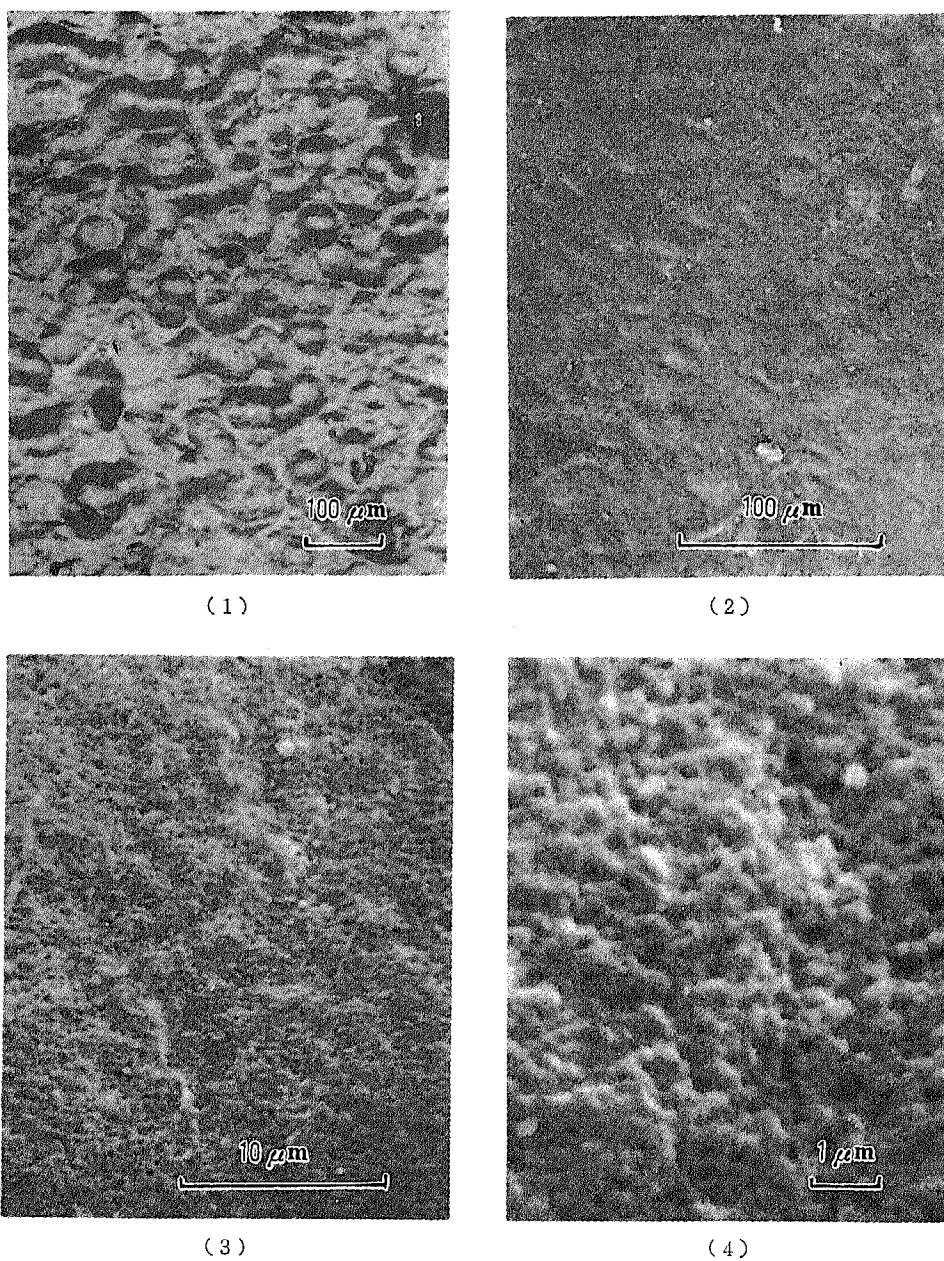


図 3 採取後生食水で表面を洗浄した軟骨の表面形態
 (1): 微分干渉顕微鏡像, 数分後の所見
 多数の円形あるいは楕円形の隆起あるいは陥凹がみられる。
 (2), (3), (4): 走査電顕像
 不規則な形の顆粒状物からなる被膜が全体をおおう。

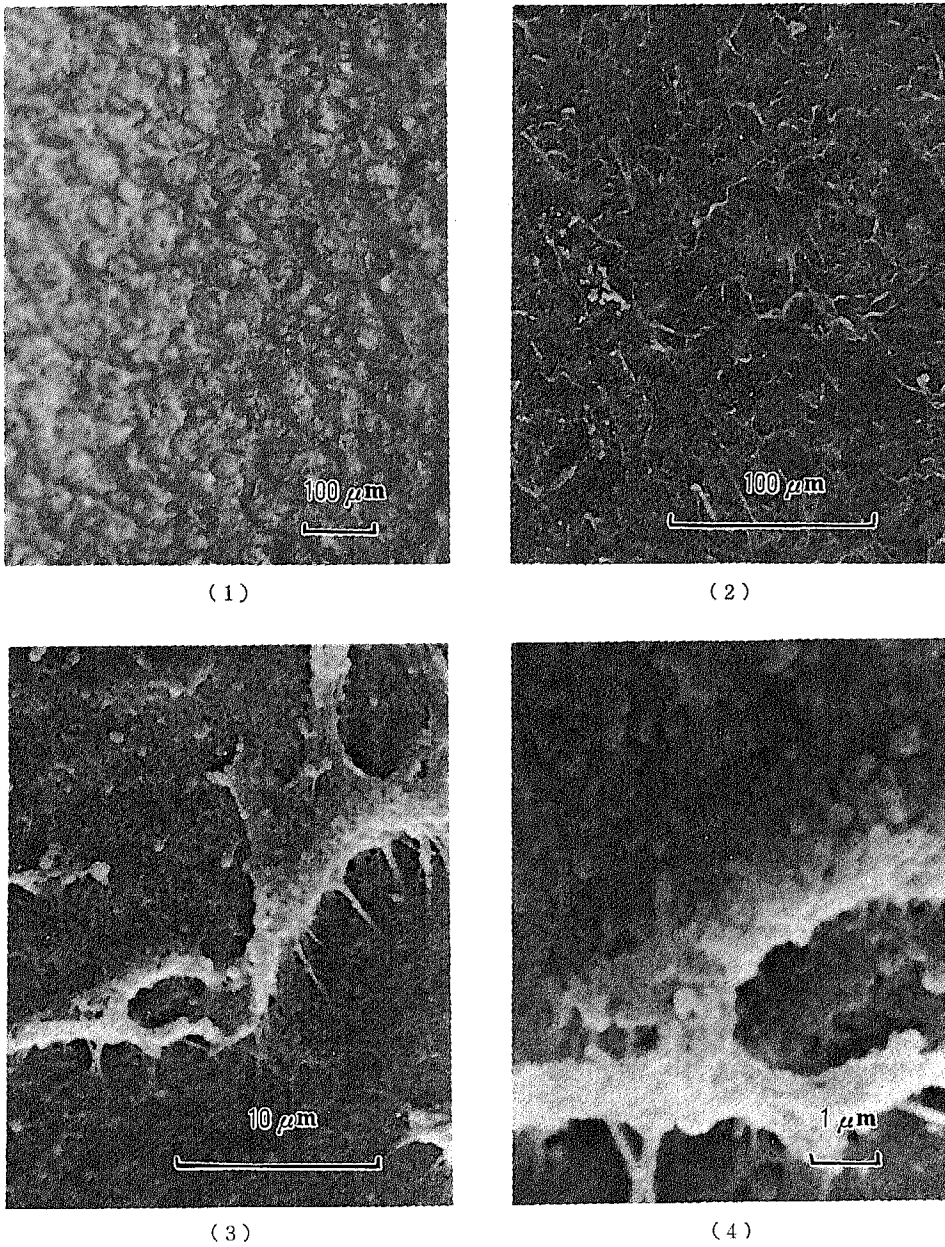


図 4 滑動は行わず、荷重を数分間かけた直後の軟骨の表面形態

(1): 微分干渉顕微鏡像

不規則な波紋状の縞模様が全体にみられ、泥状物が表面をおおう。

(2), (3), (4): 走査電顕像

不規則な島状の被膜を形成し、その辺縁では顆粒状物が互いに融合したようにみえる。

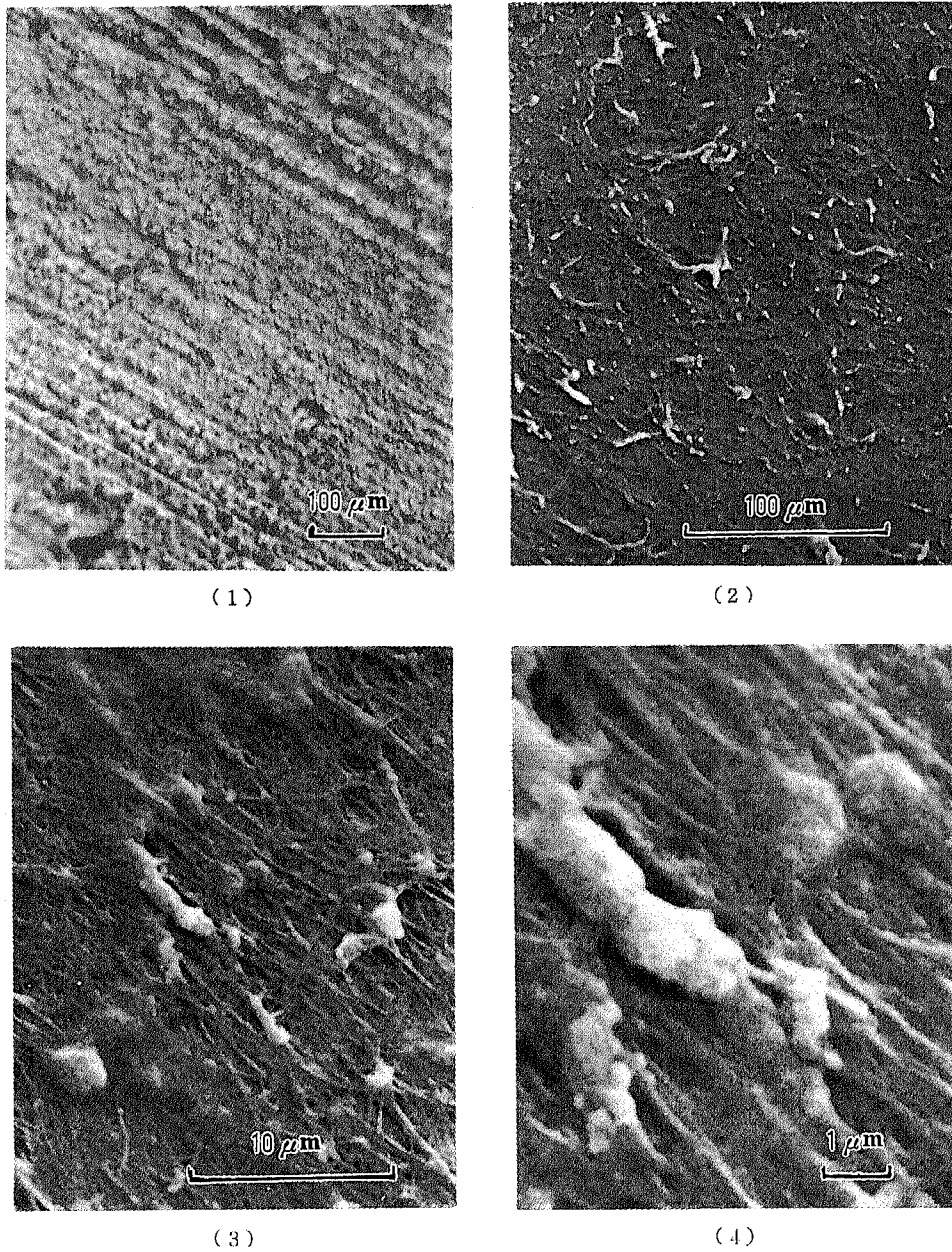


図 5 滑動を行い、摩擦力が増大し摩擦係数が0.2~0.3となった時期の軟骨の表面形態

(1): 微分干渉顕微鏡像

運動方向に一致して線状痕がみられ、その間に泥状物が残存する。

(2), (3), (4): 走査電顕像

表面をおおっていた被膜は破断し、下層に線維様構造物がみられる。

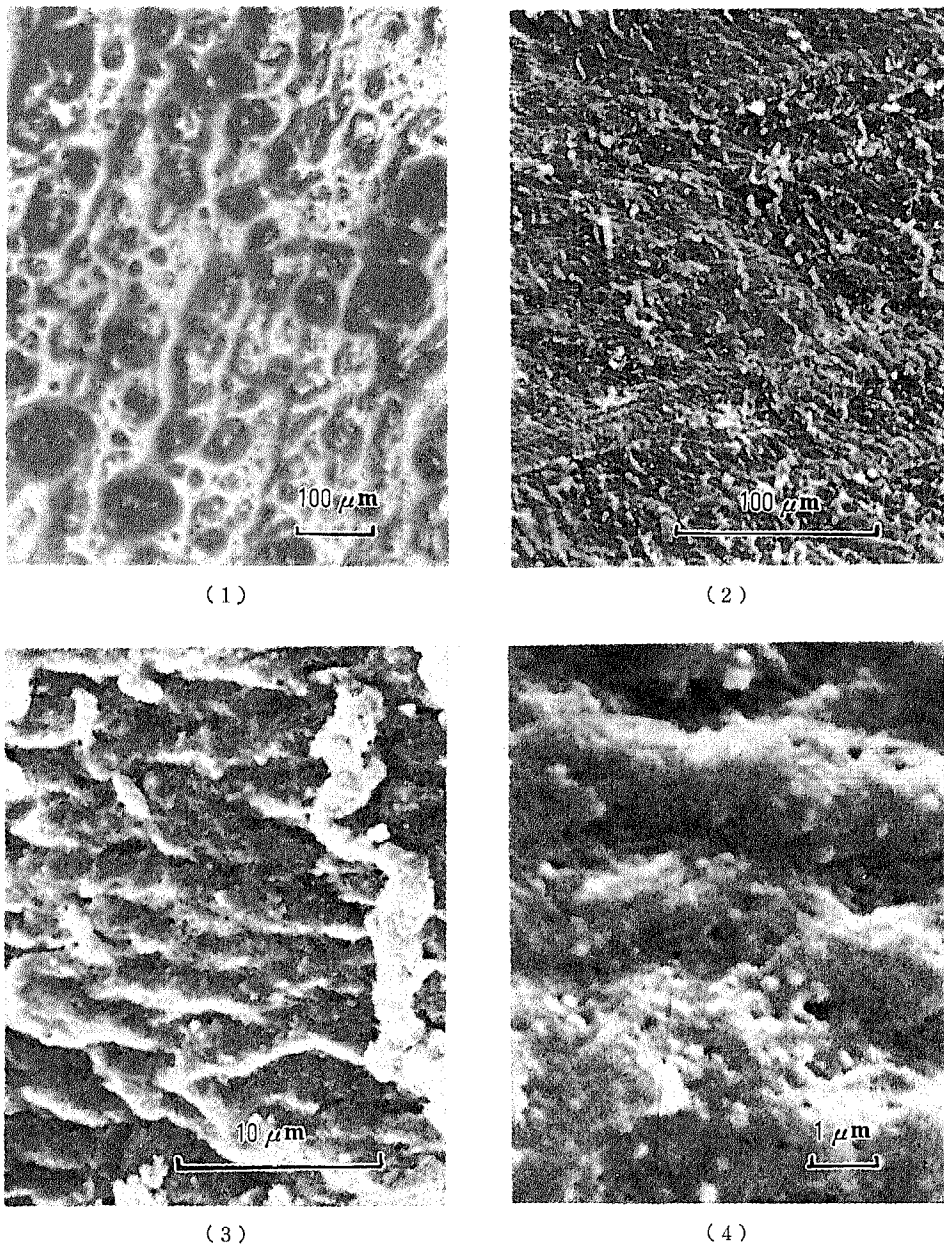


図 6 滑動後, lift up して生食水中に数分間浸した後の軟骨の表面形態
 (1): 微分干渉顕微鏡像, 数分後の所見
 泥状物が不鮮明な樹枝状隆起を形成する。
 (2), (3), (4): 走査電顕像
 顆粒状物が無構造的な物質で互いに結合されて, うねりを有する被膜を形成し
 全体をおおう。

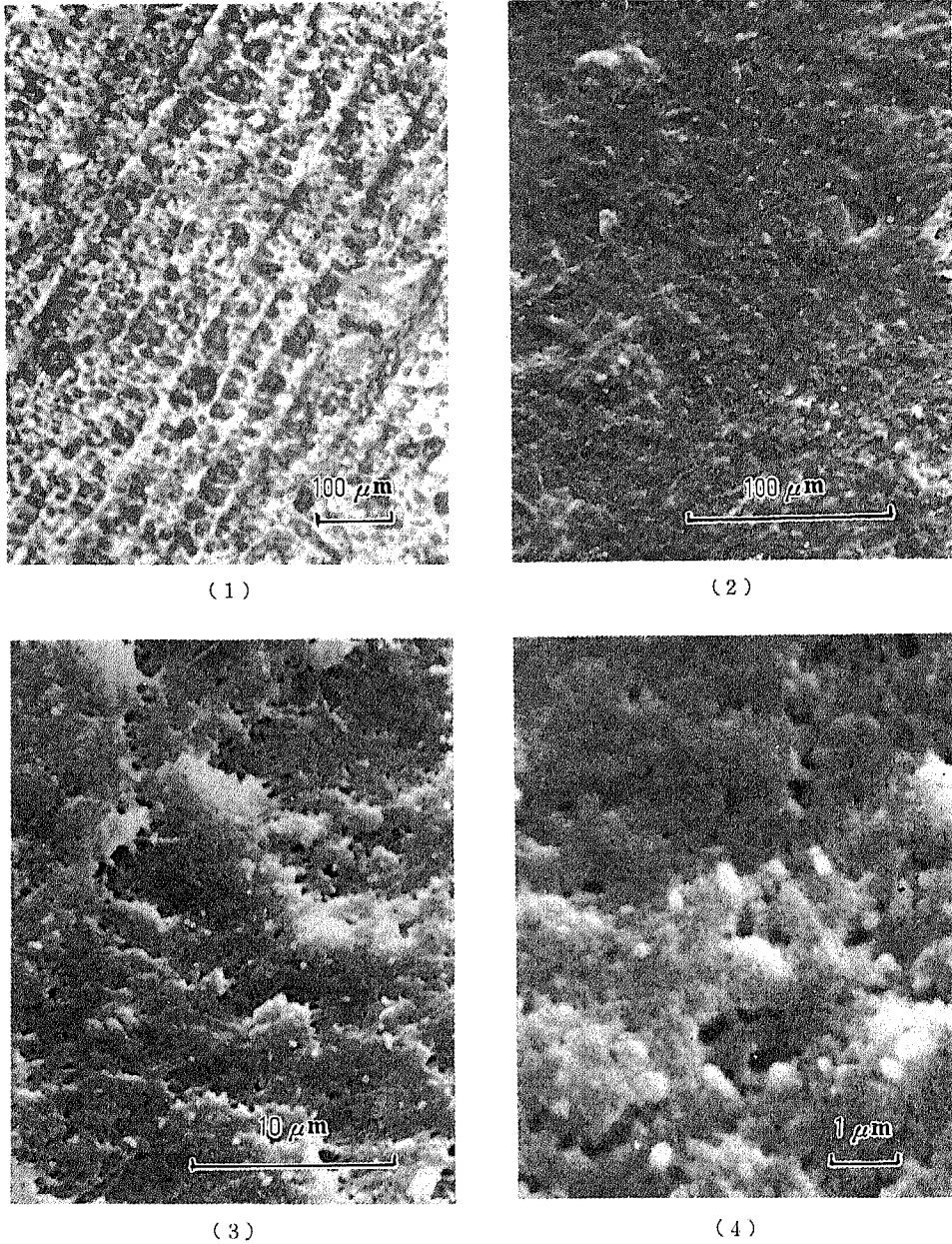


図 7 Lift up し生食水に浸し滑動を再開させ摩擦力の再低下現象が出現する前の摩擦力が上昇していく時期の軟骨の表面形態

(1): 微分干渉顕微鏡像

運動方向に一致して線状隆起が認められ、さらにそれに交叉するような小さい隆起がみられる。

(2), (3), (4): 走査電顕像

無構造な物質で互いに結合された顆粒状物が被膜を形成して表面全体をおおう。

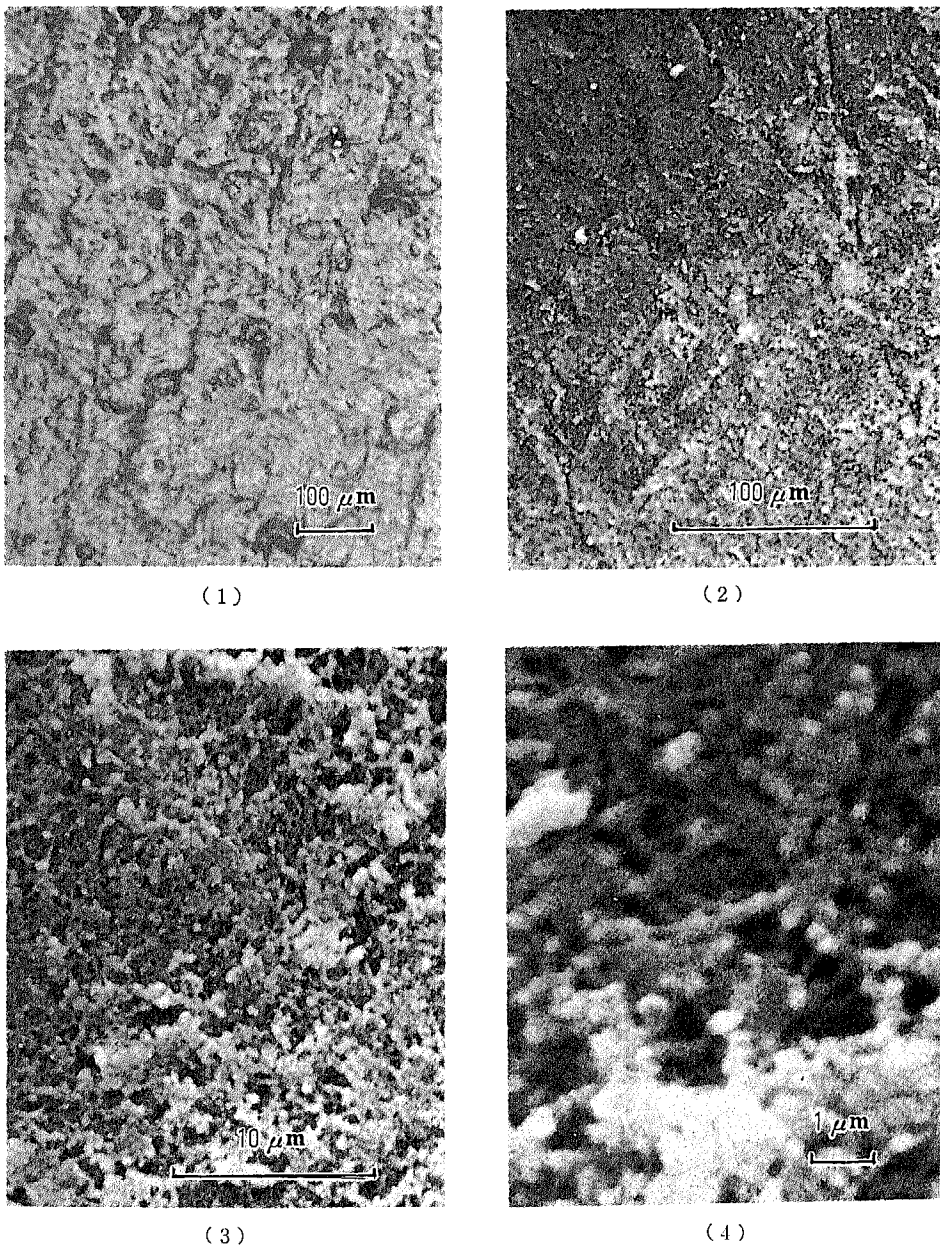


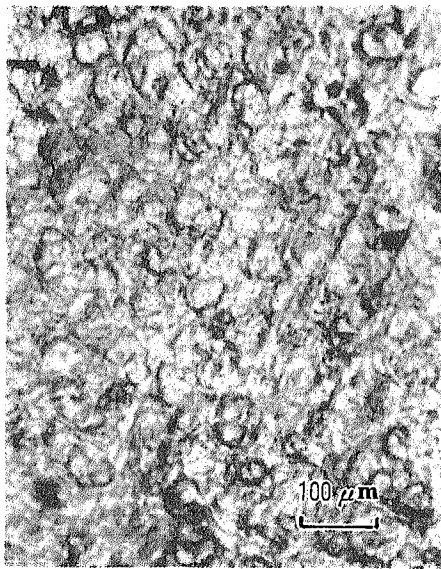
図 8 再低下現象出現直後の軟骨の表面形態

(1): 微分干渉顕微鏡像

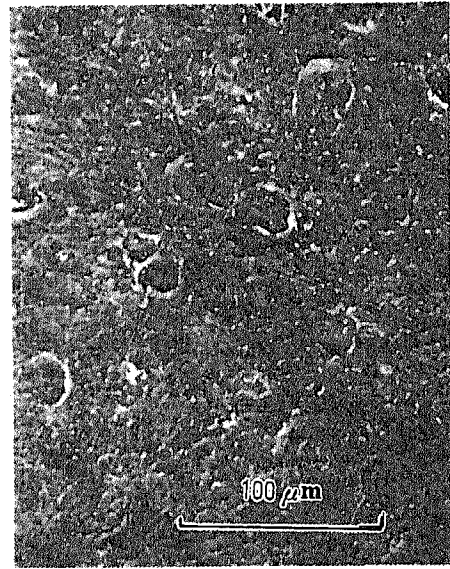
観察中に表面形態の変化のほとんどない不規則な斑紋様の被膜でおおわれる。

(2), (3), (4): 走査電顕像

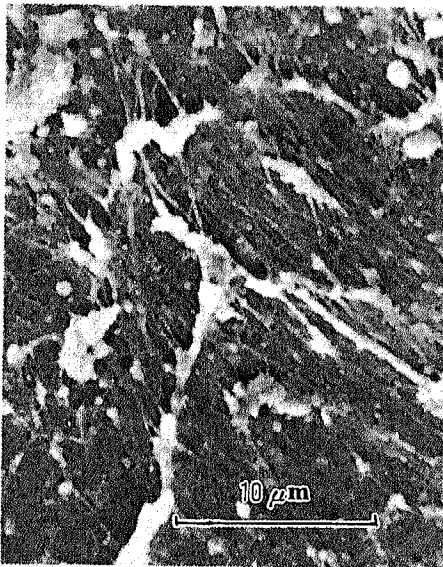
顆粒状物質からなる被膜によって表面全体がおおわれている。



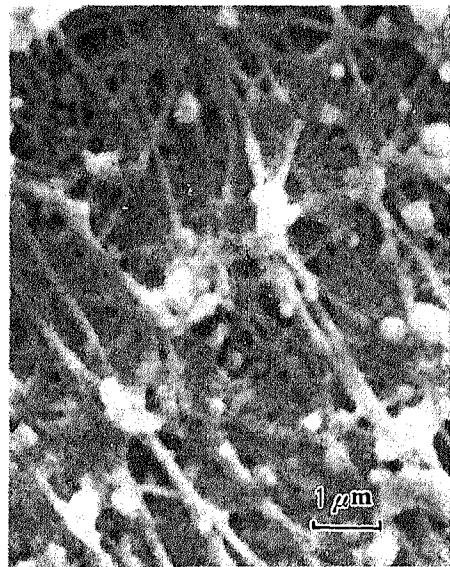
(1)



(2)



(3)



(4)

図 9 再低下現象出現後も滑動を継続し摩擦力が増大して摩擦係数が0.2~0.3となった時期の軟骨の表面形態

(1): 微分干渉顕微鏡像

運動方向に一致して線状痕がみられる。

(2), (3), (4): 走査電顕像

表面をおおっていた被膜は破断し、下層に線維様構造物がみられる。

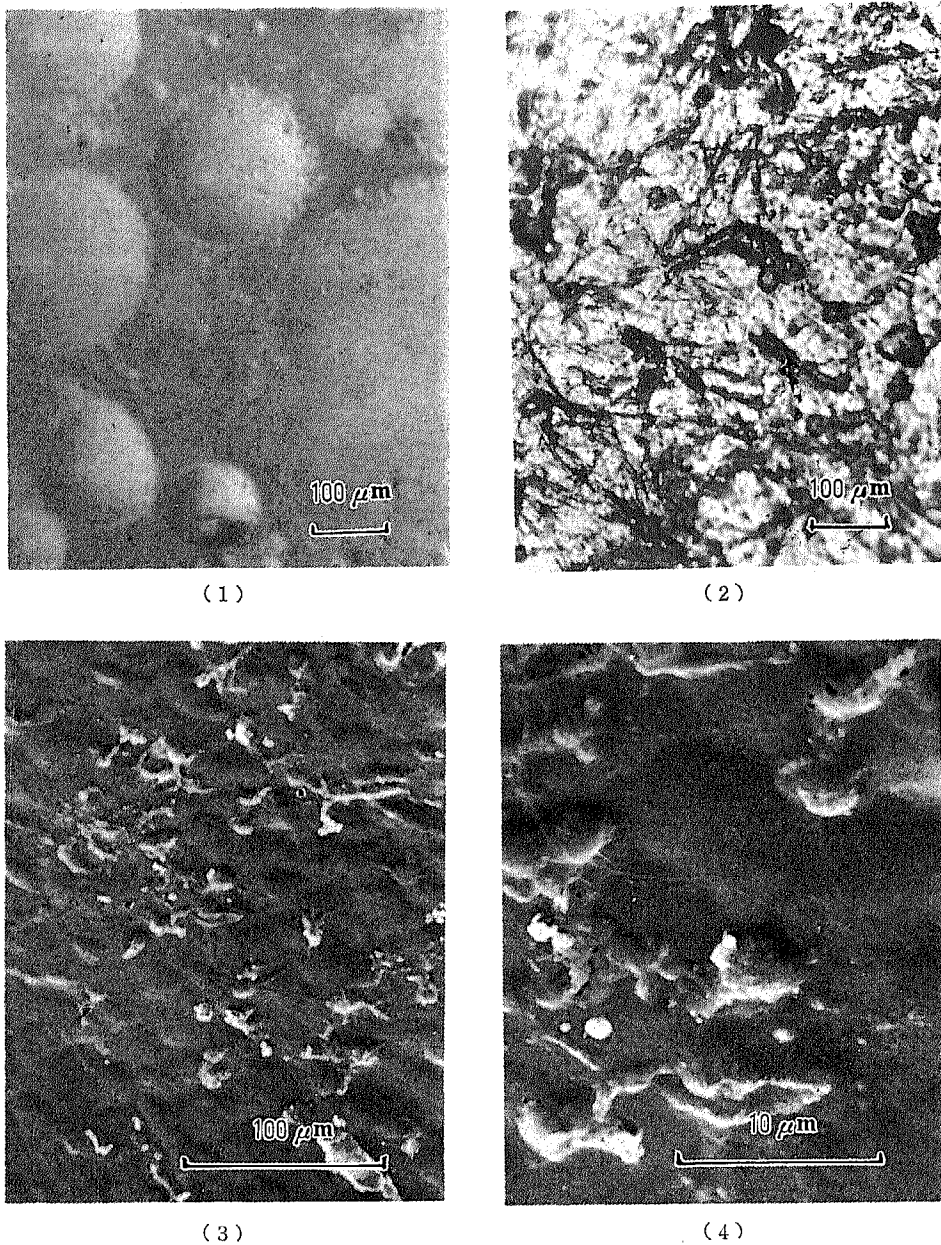
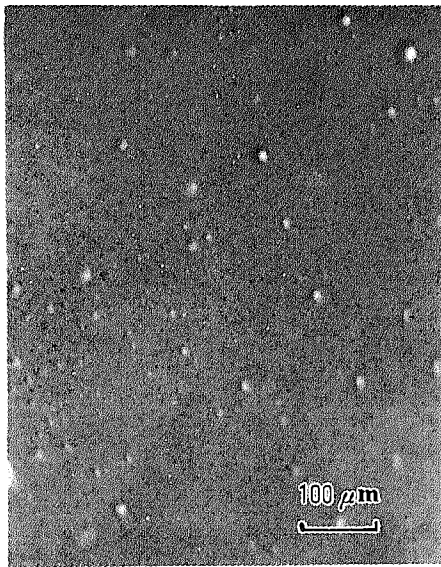
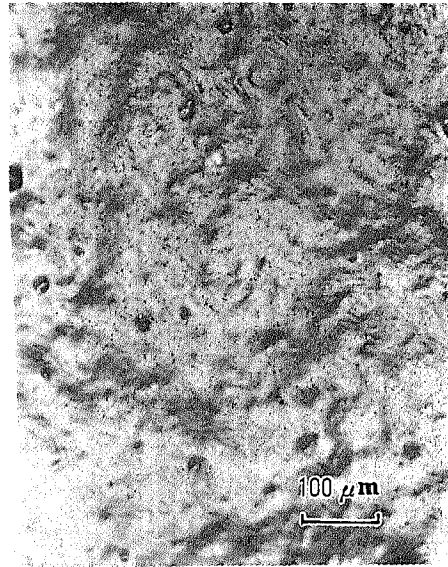


図10 trypsin 処理を行った軟骨の表面形態

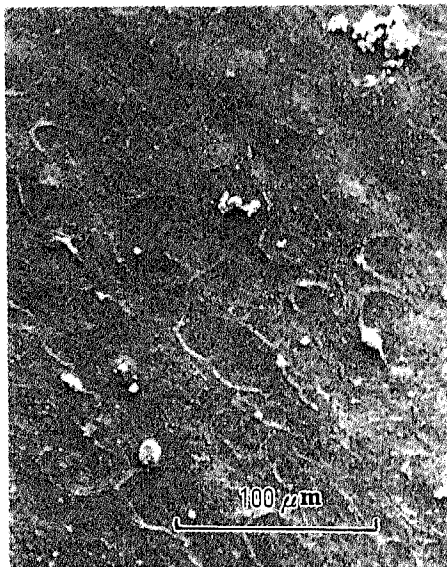
- (1), (2): 微分干渉顕微鏡像, 採取直後(1)および数分～数10分後(2)の所見
 採取直後には大小さまざまな円形の隆起物がみられ水面に浮いている油のような所見を呈した。数分～数10分後には方向性のない線状痕がみられ, ところどころに陥凹が認められた。
- (3), (4): 走査電顕像
 顆粒状物からなる被膜は破断し, 糸くず状になって散在している。



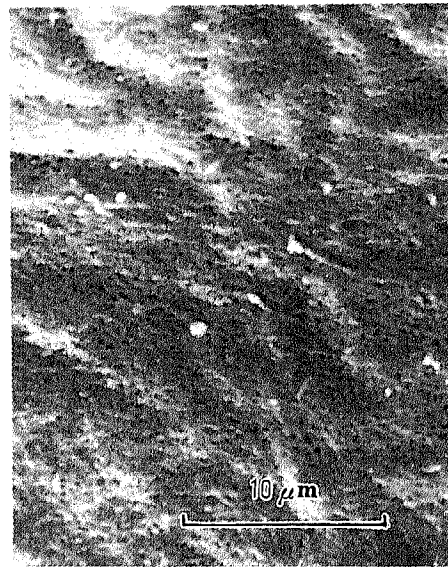
(1)



(2)



(3)



(4)

図11 hyaluronidase 処理を行った軟骨の表面形態

- (1), (2) : 微分干渉顕微鏡像, 採取直後(1)および数分~数10分後(2)の所見
採取直後には水面に浮く油に類似した径5~30 μ mの大きさの円形隆起物が
みられた。数分~数10分後には泥状被膜がおおう。
(3), (4) : 走査電顕像
顆粒状物よりなる被膜が表面全体をおおう。

8. 再低下現象出現後も滑動を継続し、摩擦力が再び増大して摩擦係数が0.2~0.3となった時期の軟骨の表面形態(図1 h, 図9)

微分干渉顕微鏡で観察すると、斑紋様の被膜が表面をおおっているが、さらにところどころで運動方向に一致して線状痕が認められた(図9-(1))。なお、背景色が灰色の場合には斑紋は黒色で線状痕は暗灰色を呈し、背景色を青色に変化させると斑紋の辺縁は黄色に変化するが、線状痕はほとんど暗灰色を呈し、ほとんど変化しなかった。

走査電顕で観察すると、表面をおおっていた被膜は破断し、糸くず状となり、その下層に幅0.1~0.3 μ mの線維様構造物がみられた(図9-(2)(3)(4))。

B. 酵素処理を行った関節軟骨の表面形態

Trypsin 処理後の標本を微分干渉顕微鏡で観察すると、径20~600 μ mの大きささまざまな円形の隆起物がみられ、それは水面に浮く油のごとく、ある方向に移動していくのが観察された(図10-(1))。背景色が灰色の場合には円形の隆起物は灰白色に観察され、背景色を青色に変化させると円形隆起物は薄青色を呈し、その辺縁が黄色になるのが観察された。上記所見は観察中に刻々と変化し、数分~数10分後には、方向性のない線状痕がみられ、ところどころに幅20~30 μ m、長さ150 μ mの陥凹が認められるようになった(図10-(2))。背景色が灰色の場合には陥凹部は暗灰色を呈し、背景色を青色に変化させても陥凹部は暗灰色からほとんど変化することはなかった。

走査電顕で観察すると、表面をおおっていた顆粒状物よりなる被膜は破断し、糸くず状のものが表面に散在している所見が観察された(図10-(3)(4))。

Hyaluronidase 処理後の標本を微分干渉顕微鏡で観察すると、径5 μ m~30 μ mの大きさの円形隆起物がみられ、その隆起物はT. 処理後の標本と同様に、ある方向に移動していくのが観察された(図11-(1))。

背景色が灰色の場合には円形の隆起物は白色に観察され、背景色を青色に変化させると円形の隆起物は黄色になるのが観察された。上記所見は観察中に刻々と変化し、数分~数10分後には、採取直後の無処理軟骨表面に類似した泥状被膜が表面をおおう所見が観察された(図11-(2))。背景色が灰色の場合には陥凹部は暗灰色を呈し、背景色を青色に変化させると陥凹部は黒色に観察された。

走査電顕所見では径0.3~0.8 μ mの顆粒状物は不規則な形となるが、表面を一樣におおう被膜を形成していた(図11-(3)(4))。

IV 考 察

走査電顕で滑動軟骨表面を経時的に観察したところ、採取直後の軟骨表面では径0.3~0.8 μ mの顆粒状物からなる被膜が表面全体をおおっていた。しかし、この被膜は荷重が加わると地図状を呈したり、滑動により破断し糸くず状となったり、滑動後、硝子面から離して生食水に浸したりした場合にはうね状となったり、種々の条件でその形態が非常に変化しうるものであることがわかった。

関節軟骨の表面構造を走査電顕を用いて観察した報告は数多くあるが²⁾³⁾、軟骨表面は種々の形態を示し、一定した結論は得られていない。Gardner と Woodward⁴⁾は関節の種類および同一関節においてさえも場所により表面構造が異なると述べているが、機能構造上種々分化し、異なった形態をとることは理解される。しかし著者が観察したごとく、軟骨表面は種々の条件で非常に変化しやすい被膜によりおおわれているので、試料作成の瞬間にこの被膜が、種々形態を変えることが、走査電顕で観察したとき表面形態が一定した pattern を示さない原因となりうる。著者は、この被膜は MacConaill⁵⁾が位相差顕微鏡で観察して報告した lamina splendens に、また Balazs ら⁶⁾が透過電顕で軟骨を観察して軟骨表面には filamentous-amorphous な物質からなる厚さ0.7~1.0 μ mの surface layer が存在すると報告したものに一致するのではないかと考えている。この被膜が軟骨表面に属するものであるか、あるいは関節液に属するものかを厳密に決定することは困難であるが、生食水で表面を洗浄してもなかなか洗い流すことができないことより、軟骨表面に比較的強く結合しているものではないかと考えられる。

被膜の変化と摩擦力との関係をみると、潤滑性の良好な条件の標本、すなわち、①新鮮無処理軟骨表面、②lift up し生食水に浸して滑動を再開させた時、③再低下現象出現時などの軟骨表面はいずれも0.3~0.8 μ m径の顆粒状物からなる被膜でおおわれていた。一方、硝子面上で滑動させ摩擦力が増大した時期の軟骨表面では、表面をおおっていた被膜は破断され、下層の線維状構造物が露呈していた。以上より軟骨表面形態と潤滑性能との間に一定の関係があること

が明らかになった。

McCutchen⁷⁾は関節液を microfilter を用いて分画し、0.22~0.65 μ m の大きさのものが潤滑作用を有していることを述べている。また Linn と Radin⁸⁾や Wilkins⁹⁾は関節液を酵素処理して摩擦力の変化を測定し、trypsin 処理で摩擦力が増大し、hyaluronidase 処理では摩擦力はほとんど変化しないことを報告している。著者は軟骨表面を trypsin および hyaluronidase を用いて酵素処理をした標本を走査電顕で観察して、径 0.3~0.8 μ m の顆粒状物からなる被膜は、trypsin で簡単に消化されるが、hyaluronidase では消化されにくい結果を得た。この事実も軟骨表面に存在する被膜が潤滑性能に関連することを支持するものと考えられる。さらに Walker ら¹⁰⁾は潤滑性能を付与する物質として、hyaluronate protein complex を考え、Radin ら¹¹⁾は glycoprotein の protein が重要であると考えているが、著者が行った酵素処理後の表面形態の観察結果から、潤滑性能を付与する被膜は蛋白と恐らく多糖類の複合体であると考えられる。

微分干渉顕微鏡によって軟骨表面を観察した所見は Gardner¹²⁾、馬淵ら¹³⁾、Longmore と Gardner¹⁴⁾によって報告されているが、この方法の利点は試料に乾燥固定などの処置を加えることなく観察できることである。Longmore と Gardner¹⁴⁾は生食水で洗浄した軟骨表面形態を微分干渉顕微鏡で観察して陥凹が存在することを報告しているが、著者も同様な処理をした軟骨では彼らの観察像と類似した観察結果を得た。また Clarke¹⁵⁾は金属顕微鏡を用いて、生食水に浸した後の軟骨表面を観察し、著者が示した、滑動後に生食水に浸した軟骨表面像に似た所見を報告している。しかし、著者はそれ以外に種々の条件で軟骨表面を観察した。すなわち採取直後には水分を含んでいるためか平坦にしかみえないが、数10分後には泥状になり、荷重が加わると波紋状を呈し、硝子面上を滑動した後には線状痕を有するようになり、生食水に浸して数分後には不鮮明な樹枝状を呈する。また摩擦力の再低下現象が出現した直後には斑紋様を呈するといったように、条件によりその形態を種々に変化しうる被膜が軟骨表面に存在することが確認できた。

このように種々に変化しうる被膜が軟骨表面をおおうことは走査電顕像でもわかるが、脱水されていない標本を観察できる微分干渉顕微鏡所見の方がより明瞭である。① 新鮮無処理軟骨の標本、② lift up して生食水に浸し滑動を再開させた時の標本、③ 再低下

現象出現時の標本の3者間には走査電顕で観察する限り、それほど明瞭な差は認められなかったが、微分干渉顕微鏡で観察すると、次のような差異が認められた。すなわち、前2者の場合には表面形態は観察中に刻々変化していき、数分後には泥状被膜でおおわれるようになるのに対し、後者の場合には観察中にほとんど表面形態が変化することのない、不規則な斑紋様を呈する被膜でおおわれていた。以上の結果は、摩擦力の再低下現象が出現した時の軟骨表面の斑紋様の被膜は、滑動により摩擦面間および被膜内からも水分が squeeze out され、被膜内に含まれる水分が減少したものであることを示唆している。すなわち、硝子面上を数10分間滑動させると、軟骨表面をおおっていた被膜は糸くず状に破断するが、除荷して生食水に浸すことにより、線維間に残存している glycoprotein および糸くず状に破断した被膜が、その親水性により水分を吸収して膨潤し、滑動再開後に、それから水分が squeeze out され、その後軟骨表面に潤滑性能を有する被膜が再形成されたと考えられる。この再形成された被膜が潤滑効果を発現した時に摩擦力の再低下現象が出現するのではないかと考えられる。

Charnley¹⁶⁾は遅い速度で往復運動をする生体関節では流体潤滑は形成され難いので、境界潤滑が主役をなしていると考え、Walker ら¹⁷⁾は boosted lubrication 説を述べている。笹田¹⁸⁾は boosted lubrication とは連続体力学の立場に境界潤滑を組み入れたものと考えることができると述べている。再低下現象は軟骨表面の境界潤滑性能の特殊な表現形と考えることができる。すなわち、ある条件下では軟骨表面のもつ1種の境界潤滑機構が有効に働くことを示唆している。

以上より正常の軟骨表面は親水性を有する一定の形態をとらない泥状の被膜によっておおわれており、関節の荷重滑動時には関節液の squeeze 膜により流体潤滑がまず働くが、水分がほとんど squeeze out されるような極限状態においては境界潤滑膜が形成され、2重3重に軟骨表面の間の摩擦上昇を防止する機構が存在すると考えられる。

V 結 語

関節軟骨の潤滑機構を解明するために、著者はさきに軟骨小片を硝子面上で滑動させ、摩擦力の経時的変化を計測する実験を行った。その結果、従来報告されている事実以外に軟骨の処理条件によっては、一旦上昇した摩擦力が滑動中に自然に低下するという従来知

られていなかった現象を発見し、著者はこれを摩擦力の再低下現象と名付けて報告した。今回、これら硝子面と軟骨表面との間の特異的な摩擦力の変動が、軟骨の表面形態といかなる関係にあるかを追求する目的で、滑動実験途上の各段階における軟骨表面を走査電顕および微分干渉顕微鏡を用いて観察した。

(1) 走査電顕による観察所見では、潤滑性の良好な状態の軟骨表面と摩擦力が増大した時期のそれとは著明な差が認められた。前者では径 $0.3\sim0.8\mu\text{m}$ の顆粒状物が平面的に集合して被膜を形成し、軟骨表面全体をおおっているが、後者ではその被膜は破断され、糸くずのようになっていた。

(2) 微分干渉顕微鏡で観察すると、潤滑性能の良好な新鮮無処理軟骨表面およびある時間滑動後試料を硝子面から離して生食水に浸した軟骨表面においては、顕微鏡で観察中に表面形態は刻々変化するが、数分～数10分後には変化の少ない泥状被膜が全体をおおうようになった。硝子面上を滑動させて摩擦力が増大した時の軟骨表面には、運動方向に一致した線状痕が観察された。摩擦力の再低下現象出現直後の軟骨表面は斑紋様の被膜でおおわれていたが、これは顕微鏡下の観察中にほとんど変化することがなかった。

以上より軟骨表面をおおう泥状被膜が関節の潤滑機構に関与しており、摩擦力の再低下現象は、滑動面から水分などの低分子成分が squeeze out された後に軟骨表面に潤滑性能を有する被膜が再形成された結果発現した現象であると考えられる。このような現象は機械工学の潤滑領域ではみられず、軟骨表面の特異な境界潤滑性能に由来するものと考ええる。

稿を終るに臨み、御指導、御校閲をいただいた藤本憲司教授に深甚の謝意を捧げるとともに、直接御指導下さった本教室寺山和雄助教授に深謝いたします。また御助言いただいた本学第一解剖学教室永田哲士教授ならびに第一生理学教室東健彦教授に感謝いたします。

本論文の要旨は第51回(1978年5月)および第52回(1979年4月)日本整形外科学会総会において発表した。

文 献

- 1) 赤岡啓二：関節の潤滑に関する研究，第1報 関節軟骨と硝子面間の摩擦に関する実験的研究，信州医誌，27：723-736，1979
- 2) Clarke, I. C. : Surface characteristics of hu-

- man articular cartilage, a scanning electron microscope study. J. Anat., 108 : 23-30, 1971
- 3) Inoue, H., Kodama, T. and Fujita, T. : Scanning electron microscopy of normal and rheumatoid articular cartilage. Arch. histol. jap., 30 : 425-435, 1969
- 4) Gardner, D. L. and Woodward, D. : Scanning electron microscopy and replica studies of articular surfaces of guinea-pig synovial joints. Ann. rheum. Dis., 28 : 379-391, 1969
- 5) MacConaill, M. A. : The movements of bones and joints, 4 The mechanical structure of articulating cartilage. J. Bone Jt Surg., 33-B : 251-257, 1951
- 6) Balazs, E. A., Bloom, G. D. and Swann, D. A. : Fine structure and glycosaminoglycan content of the surface layer of articular cartilage. Fed. Proc., 25 : 1813-1816, 1966
- 7) McCutchen, C. W. : Boundary lubrication by synovial fluid : demonstration and possible osmotic explanation. Fed. Proc., 25 : 1061-1068, 1966
- 8) Linn, F. C. and Radin, E. L. : Lubrication of animal joints. 3. The effect of certain chemical alterations of the cartilage and lubricant. Arthr. and Rheum., 11 : 674-682, 1968
- 9) Wilkins, J. F. : Proteolytic destruction of synovial boundary lubrication. Nature, 219 : 1050-1051, 1968
- 10) Walker, P. S., Sikorski, J., Dowson, D., Longfield, M. D., Wright, V. and Buckley, T. : Behavior of synovial fluid on surfaces of articular cartilage, a scanning electron microscope study. Ann. rheum. Dis., 28 : 1-14, 1969
- 11) Radin, E. L., Swann, D. A. and Weisser, P. A. : Separation of a hyaluronate-free lubricating fraction from synovial fluid. Nature, 228 : 377-378, 1970
- 12) Gardner, D. L. : The influence of microscopic technology on knowledge of cartilage surface structure. Ann. rheum. Dis., 31 : 235-257, 1972
- 13) 馬淵清資，塚本行男，森田真史，二見俊郎，山本

真, 笹田 直: 微分干渉コントラスト顕微鏡による関節の表面観察. 第6回骨・関節の基礎を語る会抄録集, 34-34, 1978

14) Longmore, R. B. and Gardner, D. L.: Development with age of human articular cartilage surface structure. A survey by interference microscopy of the lateral femoral condyle. *Ann. rheum. Dis.*, 34: 26-37, 1975

15) Clarke, I. C.: Human articular surface contours and related surface depression frequency studies. *Ann. rheum. Dis.*, 30: 15-23, 1971

16) Charnley, J.: The lubrication of animal

joints in relation to surgical reconstruction by arthroplasty, *Ann. rheum. Dis.*, 19: 10-19, 1960

17) Walker, P. S., Dowson, D., Longfield, M. D. and Wright, V.: "Boosted Lubrication" in synovial joints by fluid entrapment and enrichment. *Ann. rheum. Dis.*, 27: 512-520, 1968

18) 笹田 直: 関節における摩擦と潤滑. 潤滑, 23: 79-84, 1978

(54. 8. 28 受稿)