

原 著

関節軟骨の潤滑に関する研究

第1報 軟骨小片と硝子面間の摩擦力に関する実験的研究

赤 岡 啓 二
信州大学医学部整形外科学教室
(主任: 藤本憲司教授)

STUDIES ON THE LUBRICATION OF THE ARTICULAR CARTILAGE

I. AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE FRICTIONAL FORCE BETWEEN THE CARTILAGE AND A GLASS PLATE

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. I. An experimental study on the frictional force between the cartilage and a glass plate.* Shinshu Med. J., 27: 723-736, 1979

In order to study the lubrication mechanism of the cartilage, frictional forces between small piece of the cartilage and a glass plate were measured continuously by using a reciprocating friction machine. Compressive deformation of the specimens which occurred through the application of weight during rubbing was measured by a dial gauge. The cartilage specimens, attached to the subchondral bone, were taken from the knee joints of pig cadavers.

The results were as follows:

1) When small specimen of the cartilage was rubbed against a glass plate, the frictional force was initially low and increased with time under weighting. The specimen was lifted clear of the glass plate, immersed in saline solution or synovial fluid, and then repositioned. After resumption of rubbing, the frictional force was at first reduced and then increased. After a while a sudden spontaneous reduction of the frictional force was observed without any treatment during rubbing movement.

2) This "spontaneous friction decrease phenomenon" appeared when the rubbing surface of the glass plate became dry. The longer the specimens were immersed in the fluid, the longer it took for the "phenomenon" to appear.

3) When the rubbing started under a certain weight, instantaneous deformation of the specimen was followed by a time-dependent creep deformation just as in indentation test. On lifting up the specimens from the glass plate, there was an instantaneous recovery of the deformation followed by a creep recovery phase. The changes in the frictional force were related not

only to the loading time but also to the amount of compressive deformation of the cartilage. When the "spontaneous friction decrease phenomenon" took place, however, there was no relationship between the frictional force and the amount of compressive deformation.

It is concluded that the "spontaneous friction decrease phenomenon" may be a characteristic property of the articular cartilage and may result from a film adhering to the surface of the cartilage and acting as a boundary lubricant.

(Received for publication ; August 28, 1979)

Key words: 関節軟骨 (articular cartilage)
潤滑 (lubrication)
摩擦係数 (coefficient of friction)

I 緒言

生体の関節においては低い摩擦力で運動が行われていることは知られているが、摩擦力はどのくらいであるのか、どのような潤滑様式が行われているのか、あるいは関節液のいかなる成分が潤滑性能に関与しているかなど不明の点が多い。

最近、人工関節の開発、臨床的応用と相まって関節の潤滑機構に関する研究は急速に進歩しつつある。低速度で往復運動が行われている生体関節において、高速度で回転運動をする機械的軸受におけると同様に、軟骨面間に流体膜が形成され流体潤滑が行われているのか、軟骨の表面特性や関節液中の hyaluronate-protein complex などの特性から一種の境界膜が形成され、境界潤滑作用が行われているのか、議論が別れている¹⁾⁻⁷⁾。Dintenfass¹⁾は軟骨の粘弾性変形と関節液の thixotropic で elastic な特性とが絡み合い、複雑な弾性流体潤滑が行われているのではないかと推論し、その考えが支配的になってきている。しかし、このような潤滑様式がたえず働いているとは考えにくく、ある条件下では一種の境界潤滑様式も作用するのではないかと推論されている⁸⁾⁴⁾。

関節の潤滑機構を解明する実験的手段として、関節全体を使用する方法と軟骨小片を使用する方法とがある。前者は生体に、より近い条件で実験を行おうという利点があるが、摩擦に関与する要因がきわめて多く複雑である。一方、後者は生理的条件からはかけ離れるが要因を単純化して軟骨の摩擦特性を追求し得るという利点がある。軟骨小片を硝子面上で滑動させ、その時の摩擦力を計測する実験は McCutchen²⁾以来多くの研究者によって行われてきた。

著者も、関節の潤滑機構を解明することを目的とし

て、軟骨小片と硝子面間の摩擦力を計測する本実験を行った。

II 実験材料と実験方法

A. 実験材料

屠殺場で屠殺され、4°C に48時間保存された生後10ヶ月、体重80kg前後の豚から関節包をつけたまま採取した膝関節を実験に用いた。採取した膝関節は実験開始まで4°C に保存し、24時間以内に実験を開始した。膝関節の大腿骨頸荷重面より半径2mm、厚さ5mmの円柱状に、軟骨下骨組織をつけた軟骨小片を採取し試料片とした。試料片採取には円柱打ち抜き器を使用し、軟骨表面が円柱の軸にできるだけ垂直になるように試料片を採取したが、実験目的にかなった試料片は、1膝関節標本から平均2~3個しか採取できなかった。この実験に用いた豚の膝関節は総計120個であり、試料片総数は290個であった。また滑動面には、市販されている厚さ5mmの板硝子を用い、全実験で同一の板硝子を使用した。

B. 実験方法

Leeds 大学グループの往復運動式摩擦測定装置に準じて作成した実験装置を使用した(図1)。その原理は軟骨小片を硝子面上で滑動させ、その時発生した摩擦力を磷青銅板のひずみ量として増幅記録する方法である。

この装置の往復行程は2cmで、速度は最高速度2cm/secまで変速可能である。使用した荷重量は9.8~19.6Nであり、面圧8~16kg/cm²の条件で行ったが、大部分の実験では9.8Nの荷重量を使用した。

図2は摩擦力の経時的変化を実際に記録したものであるが、縦軸には摩擦力が記録され横軸には時間的経過が記録される。記録紙の送り速度により、速度が速

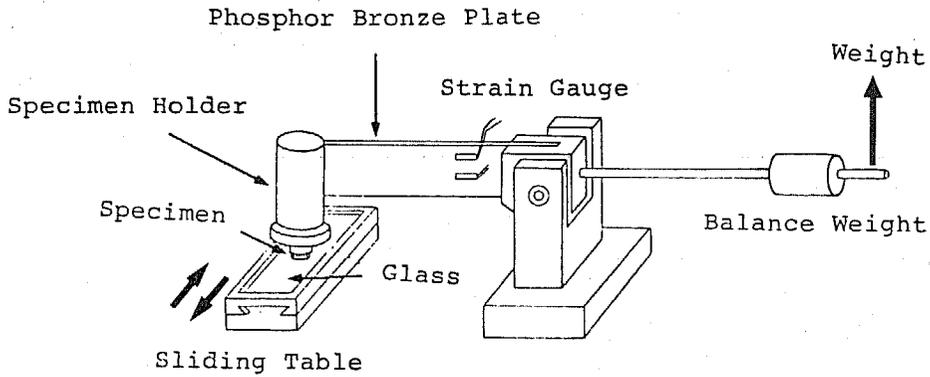


図1 試作した往復運動式摩擦測定装置

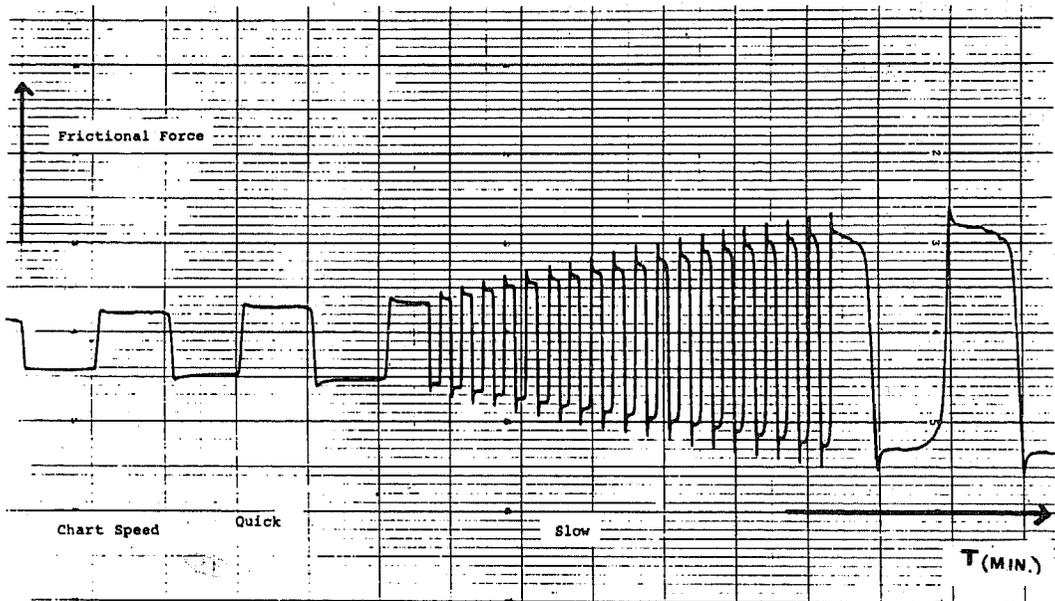


図2 記録された実験結果

縦軸には磷青銅板バネのひずみ量が記録され、それより摩擦力が読みとれる。
横軸には時間的推移が記録される。

い場合には個々の波形は明確に描出されるが、一方遅い場合には、摩擦力の経時変化が明らかになるので、本実験では比較的送り速度を遅くして(3cm/min)記録し主として摩擦力の経時変化を観察した。なお記録された摩擦力を荷重量で除して摩擦係数を算出して、 δ の処理を行った。また、摩擦力の経時変化と同時に、荷重による軟骨小片の圧縮ひずみ量の変化を試料ホルダーと台板との間にとりつけたダイヤルゲージによって計測した。ダイヤルゲージは0.01

mm まで測定可能なものを使用した。軟骨の滑動面が完全に平滑でないためか、滑動中に0.01~0.02mmのダイヤルゲージの変動がたえずみられたが、軟骨小片が硝子の中点を通過する時点でダイヤルゲージの値を読み取るようにした。軟骨の処理条件や滑動中の滑動面の各種条件により、6群に別けて摩擦力および圧縮ひずみ量の計測を実施したが、それぞれの実験群で行った実験回数は表1に示す通りである。表中に使用した load off という術語は、荷重を除去しただけで軟

表 1 実験内容および実験回数

実験群	軟骨の処理条件—滑動面および滑動中の条件	A. 摩擦係数の経時的変化の実験回数	B. 圧縮ひずみ量の変化の実験回数
実験 1	新鮮無処理軟骨小片—硝子面	270	80
実験 2	a. Load off としそのまま放置した軟骨小片—硝子面	20	10
	b. Load off としその周囲に生食水を滴下した軟骨小片—硝子面	20	10
	c. Load off としその周囲に関節液を滴下した軟骨小片—硝子面	20	10
実験 3	a'. Lift up し空气中に放置した軟骨小片—硝子面	10	10
	b'. Lift up し生食水に浸した軟骨小片—硝子面	80	20
	c'. Lift up し関節液に浸した軟骨小片—硝子面	40	20
実験 4	a''. 新鮮無処理軟骨小片—硝子面 (滑動中に生食水滴下)	10	—
	b''. 新鮮無処理軟骨小片—硝子面 (滑動中に関節液滴下)	10	—
実験 5	Lift up し生食水に浸した軟骨小片—硝子面 (再低下現象出現前に生食水滴下)	10	—
	(再低下現象出現前に関節液滴下)	10	—
	Lift up し関節液に浸した軟骨小片—硝子面 (再低下現象出現前に生食水滴下)	10	—
	(再低下現象出現前に関節液滴下)	10	—
実験 6	Lift up し生食水に浸した軟骨小片—硝子面 (再低下現象出現直後に生食水滴下)	10	—
	(再低下現象出現直後に関節液滴下)	10	—
	Lift up し関節液に浸した軟骨小片—硝子面 (再低下現象出現直後に生食水滴下)	10	—
	(再低下現象出現直後に関節液滴下)	10	—

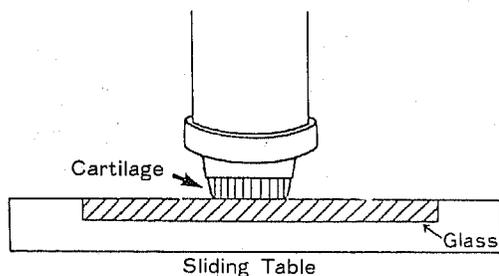


図 3 Load off の状態

荷重を除去するが、軟骨面と硝子面との接触は保つ。

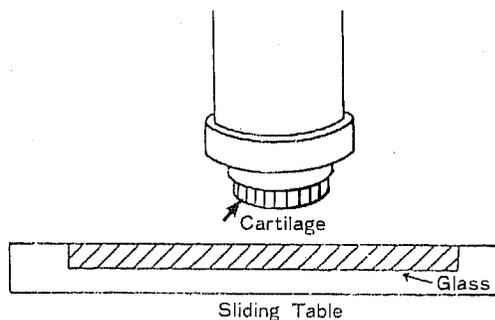


図 4 Lift up の状態

荷重を除去し、さらに軟骨面と硝子面とを完全に離した状態。

骨表面と硝子面との接触を肉眼的に保った状態(図3)、また lift up という術語は、荷重を除去し、さらに軟骨面と硝子面とを完全に離した状態を示すものとする(図4)。

Ⅲ 実験結果

実験 1—A: 新鮮無処理軟骨小片と硝子面間の摩擦係数の経時的変化

軟骨表面に付着している余分な関節液および血液をろ紙で吸い取り、これを新鮮無処理軟骨小片試料とした。新鮮無処理軟骨小片を特に潤滑液を使用せず硝子

軟骨小片と硝子面間の摩擦

面上で荷重をかけたまま滑動させると、滑動開始時の摩擦力は低く、摩擦係数で0.008~0.025の範囲でありその平均は0.01であった。以後経時的に摩擦係数は指数関数曲線に類似して増大し、30分後の摩擦係数は0.3程度になった。図5は実際に記録した摩擦力の経時的推移を示した1例であり、図6はそれを摩擦係数に換算したものである。

実験 1-B : 新鮮無処理軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時的变化

荷重負荷開始と同時に滑動を開始すると、一定の荷重が持続して試料片にかかっているわけであるが、圧縮ひずみ量は初期瞬間ひずみにひき続き経時的に増大していき、クリープ曲線を描いた(図7)。

実験 2-A : Load off とし、各種の処理を行った軟骨小片と硝子面間の摩擦係数の経時的变化

実験1の後、以下の3種の条件すなわち、(a) load off のみ、(b) load off 後軟骨周囲に生食水を滴下す

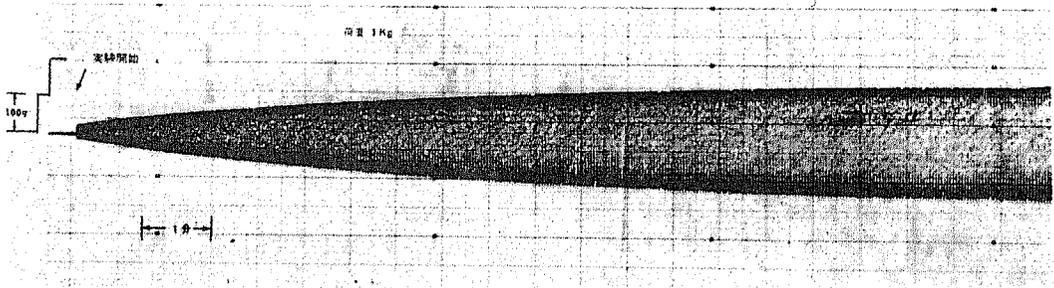


図 5 新鮮無処理軟骨と硝子面間の経時的摩擦力の変化を示す1例
滑動開始時の摩擦力は低く、指数関数曲線に類似して増大して行く。

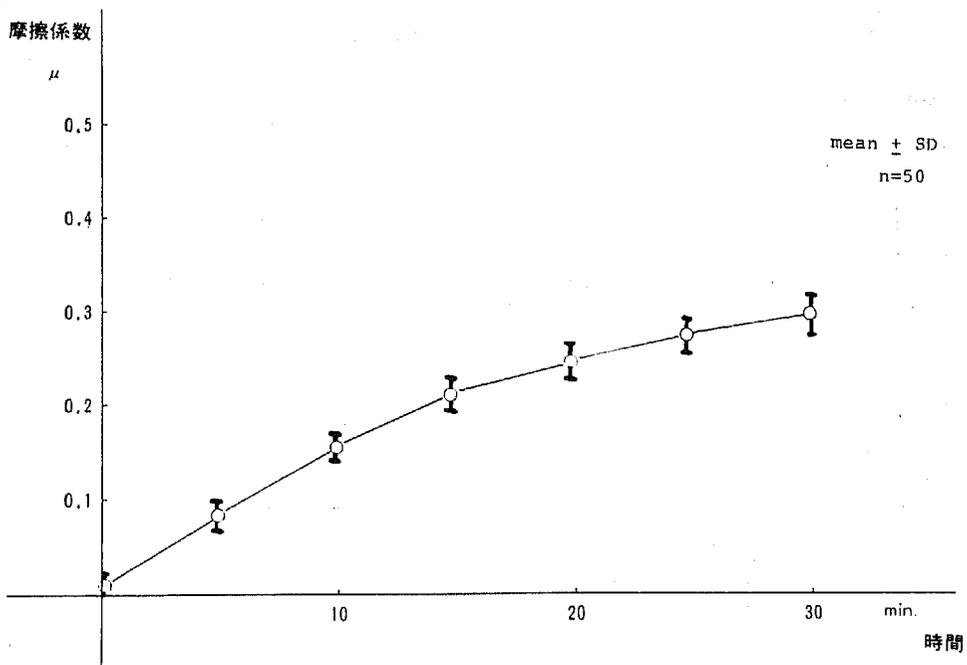


図 6 新鮮無処理関節軟骨と硝子面間の摩擦係数の経時的变化
滑動開始時の摩擦係数は0.01前後で、30分後のそれは0.3程度である。

る, (c) load off 後軟骨周囲にヒト関節液(以下関節液と略す)を滴下する, という処理で試料を一

定時間放置後, 再び荷重をかけ, 往復運動を再開させ摩擦力の経時的变化を観察した。

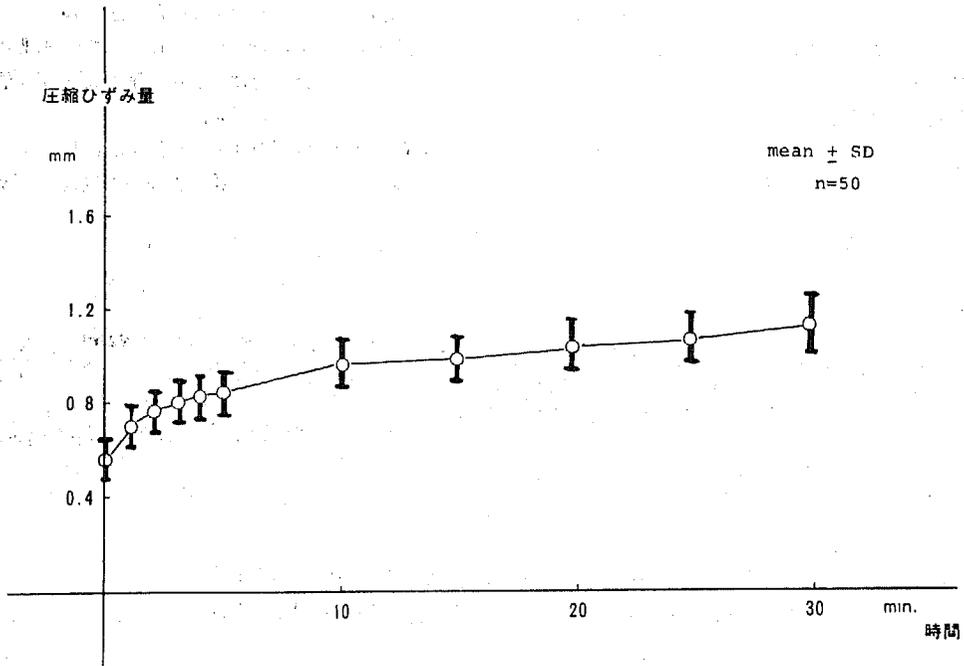


図 7 新鮮無処理軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時的变化

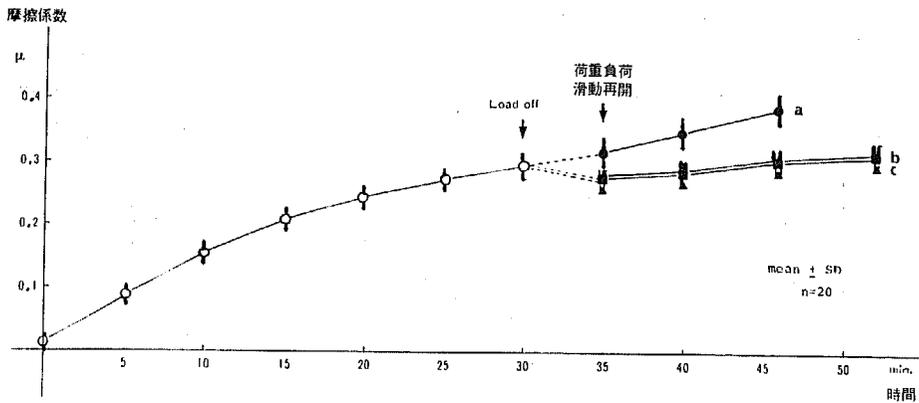


図 8 Load off とし, 各種の処理を行った軟骨小片と硝子面間の摩擦係数の経時的变化

- : 新鮮無処理軟骨小片の変化
- ……●: a) Load off のみ
- ……■: b) Load off 後生食水を滴下する
- ……▲: c) Load off 後関節液を滴下する
- : a) 処理後の変化
- : b) 処理後の変化
- ▲—▲: c) 処理後の変化

Load off としただけで軟骨周囲に液体が存在しない場合には、滑動再開時の摩擦係数は、荷重除去直前の摩擦係数に比べわずかに大きい値を示した ($P < 0.01$) (図8-a)。Load off とし軟骨周囲に生食水や関節液など液体が存在する場合には、滑動再開時の摩擦係数は滑動中止直前のそれに比し、常に小さかった ($P < 0.01$) (図8-b, c)。また、滑動再開時の摩擦係数は load off として液体に接する時間が長いほど小さい値を示すが、load off 時間を1時間以上行っても滑動再開時の摩擦係数は一定値 (0.02) 以上の低下は認められなかった。すなわち1時間前後で摩擦力の低下は極限状態に達することが明らかになった。なお本実験においては、load off として軟骨周囲に滴下する液体の種類、すなわち生食水かあるいは関節液かによって滑動再開時の摩擦係数の値に差は認められなかった。

実験 2-B : Load off とし、各種の処理を行った軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時的変化

Load off のみで軟骨周囲に液体が存在しない場合には、ひずみ量は、荷重を除去すると初期瞬間ひずみ近くまでただちに回復するがそれ以後は圧縮ひずみ量はほとんど同じであった。荷重を再び負荷すると、圧縮ひずみ量は荷重除去直前のそれにたちまち達してしまい、さらに滑動開始後、経時的に徐々に増大していった (図9-a)。

一方、load off として周囲に生食水あるいは関節液

が存在する場合には、荷重除去直後の瞬間的変形回復にひき続き、圧縮変形の回復がわずかにみられた。しかし、その回復速度は5分間で平均0.1mmと非常にゆっくりであった。再び荷重を負荷すると、瞬間的圧縮変形がみられるが、再負荷直後の圧縮ひずみ量は、荷重除去直前のひずみ量より小さく ($P < 0.01$)、滑動開始後非常にゆっくりしたクリープ曲線を描いて増大した (図9-b, c)。なお圧縮変形の回復曲線は生食水を滴下した時と関節液を滴下した時との間に差は認められなかった。

実験 3-A : Lift up して各種の処理を行った軟骨小片と硝子面間の摩擦係数の経時的変化

実験1の後、滑動を中止し、軟骨表面を lift up し、(a') 空气中に放置、(b') 生食水中に浸す、(c') 関節液中に浸すという3種類の条件下に一定時間 (5分間) 放置後、再び荷重をかけ滑動を再開させて摩擦力の経時的変化を観察した。なお滑動再開に際し、軟骨表面に付着する余分な液体をろ紙で吸い取り滑動を再開させた。

空气中に lift up した場合には load off のみの場合と同様に、滑動再開時摩擦係数は、滑動中止直前の摩擦係数よりもやや大きい値を示した ($P < 0.01$) (図10-a')。

Lift up して生食水や関節液などの液体に浸した場合の滑動再開直後の摩擦係数は、load off して周囲に液体を滴下した場合と同様に、荷重除去直前の摩擦係

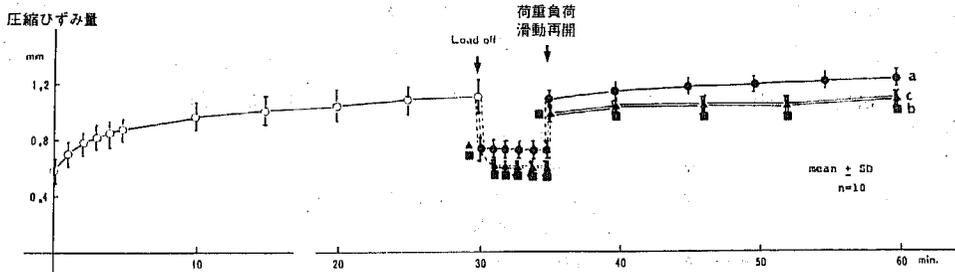


図9 Load off とし、各種の処理を行った軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時的変化

- : 新鮮無処理軟骨小片の変化
- ……● : a) Load off のみ
- ……■ : b) Load off とし生食水を滴下する
- ……▲ : c) Load off とし関節液を滴下する
- : a) 処理後の変化
- : b) 処理後の変化
- ▲——▲ : c) 処理後の変化

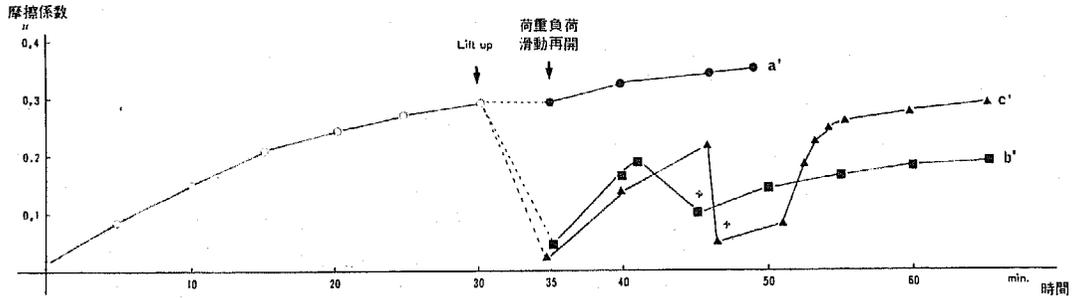


図10 Lift up して各種の処理を行った軟骨小片と硝子面間の摩擦係数の経時的变化

- ：新鮮無処理軟骨小片の変化
- ……●：a') Lift up のみ
- ……■：b') Lift up し生食水に浸す
- ……▲：c') Lift up し関節液に浸す
- ：a') 処理後の変化
- ：b') 処理後の変化
- ▲—▲：c') 処理後の変化
- ※：摩擦力の再低下現象

数よりもかなり小さい値を示した ($P < 0.001$)。しかし、摩擦係数の回復状況は両者間に大きな差が認められた。例えば lift up, load off 時間を5分間とした場合には、前者の場合の滑動再開時の摩擦係数は0.01~0.025であるのに対し、後者の場合のそれは0.25であり、lift up して液体に浸した方が、load off とした場合よりもはるかに潤滑性の回復がよかった ($P < 0.001$)。

Lift up 後滑動再開直後の摩擦係数は関節液に浸した場合には平均0.01 (± 0.004)であったが、生食水に浸した場合には平均0.025 (± 0.006)で、関節液に浸した場合の方が生食水に浸した場合に比べて低値を示した ($P < 0.001$) (図10-b', c')。

Lift up して生食水あるいは関節液に浸しておいた

後に荷重をかけて、滑動を続けていくと、滑動再開後数分~数10分後に摩擦力が自然に低下する現象(以下再低下現象と略し図10では※で示す)が認められた。滑動再開後1時間以内に本現象の出現を認めたものは、本実験施行試料数120例の内114例であった。図11は摩擦力の再低下現象を記録したものである。本現象出現までに要する時間は lift up し試料を液体に浸しておいた時間により異なり、例えば同一軟骨片を用いて実験すると、lift up して生食水に浸しておく時間が1分では再低下出現までの時間は4分、3分では7分、5分では11分、10分では12分となり、軟骨小片を液体に浸しておく時間が長ければ長いほど再低下現象が出現するまでに長時間を要した(図12)。硝子滑動面を観察していると本実験では滑動再開時に軟骨表

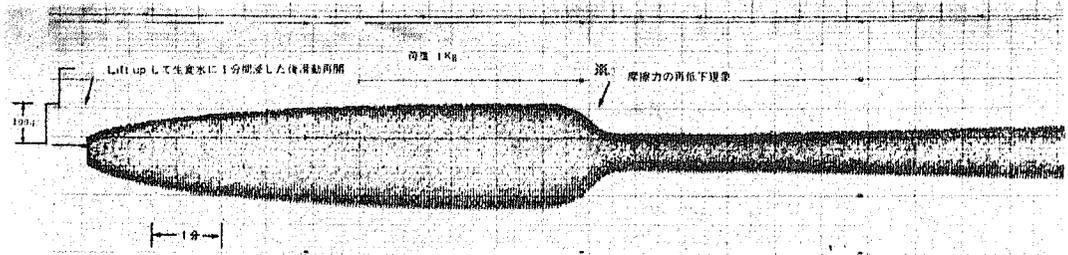


図11 Lift up し生食水に浸した軟骨と硝子面間の経時的摩擦力の変化を示す1例
滑動を続けていると摩擦力が自然に低下する、摩擦力の再低下現象が認められる。

軟骨小片と硝子面間の摩擦

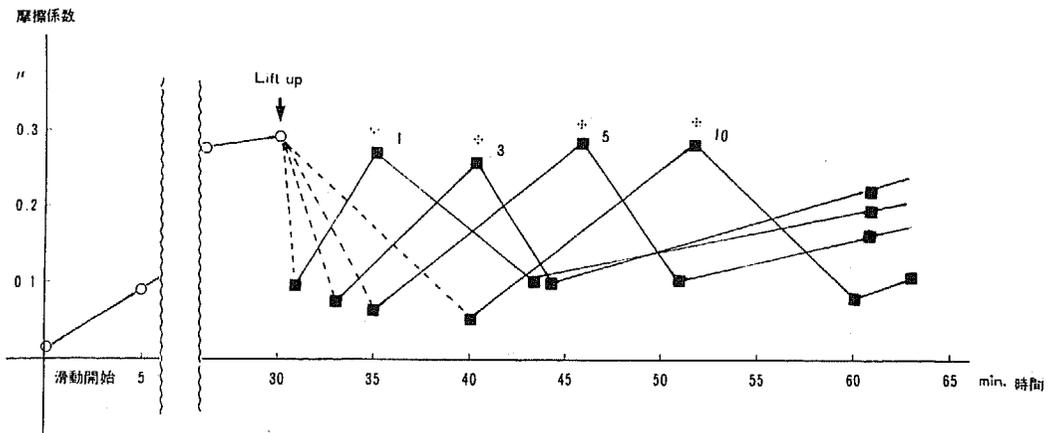


図12 Lift up し液体に浸す時間による摩擦係数の経時的変化

※：摩擦力の再低下現象の開始時点

1, 3, 5, 10はそれぞれ1, 3, 5, 10分間液体に浸した時間を示す。

液体に浸す時間が長いほど摩擦力の再低下現象開始までに要する時間が長い。

面の余分な液体をろ紙で吸い取ったにもかかわらず、荷重と同時に滑動面は軟骨内からしみ出て来る液体で湿潤する。しかし、摩擦力の再低下現象の出現は、滑動面から液体がほとんど消失する時期に認められた。また液体をろ紙で吸い取らずに滑動させる実験を5例につき行ったが、再低下現象出現までに長時間（1時間以上）を要し、やはり滑動面から液体がほとんど消失する時期に再低下現象が出現することが確認された。

再低下現象出現時の最小摩擦係数は0.05～0.15の範囲で、生食水に浸した際に出現する再低下現象出現時の最小摩擦係数 (0.093 ± 0.038 , $n=50$) は、関節液に浸した時のそれ (0.0845 ± 0.028 , $n=40$) よりやや大きい値を示す傾向がみられた。なお同一試料片を用いて lift up し生食水に浸し、その後滑動実験を行うという操作を繰り返し行っていると、再低下現象出現時の最小摩擦係数は次第に増大し、最後には再低下現象の出現が認められなくなった。図13にはその1例を示した。

実験 3-B：Lift up し、各種の処理を行った軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時の変化

空气中に lift up した場合の軟骨小片の圧縮ひずみの変動は load off として液体を滴下しない場合と同様であった (図14-a')。

Lift up し、軟骨を生食水や関節液などの液体に浸

した場合には、ひずみ量は荷重除去と同時にただちに初期瞬間ひずみの近くまで回復がみられ、その後短時間内にさらにひずみ量の回復が認められた。その回復速度は5分間に平均0.4mmで load off とした場合に比べてかなり速かった。さらに、再び荷重を負荷すると、瞬間的に圧縮ひずみがみられるが、それは荷重除去直前のひずみ量より小さく、ゆっくりとしたクリープ曲線を描いて増大した。しかし、その圧縮ひずみ量の増加速度は load off の時に比べ、再負荷から5～10分以内は急速であり、10分後にはほぼ load off の時に相当する圧縮ひずみ量に達した (図14-b', c')。

実験 3-A で lift up して液体に浸した場合には再低下現象が認められることは前述の通りであるが、その再低下現象前後において圧縮ひずみ量には特別の変化はみられなかった。

しかし lift up をして圧縮ひずみを計測する実験は、軟骨小片を硝子面から一旦離すためか、本実験計測値は load off した場合に計測した圧縮ひずみ値と比べ、ばらつきがやや大きかった。

実験 4：新鮮無処理軟骨を硝子面上で滑動させ、生食水、関節液を滑動面に滴下した場合のその後の摩擦係数の変化

新鮮無処理軟骨小片を硝子面上で滑動させている途中で生食水を滴下した場合には、摩擦係数は直ちに増大した ($P < 0.05$)。一方関節液を滴下した場合には

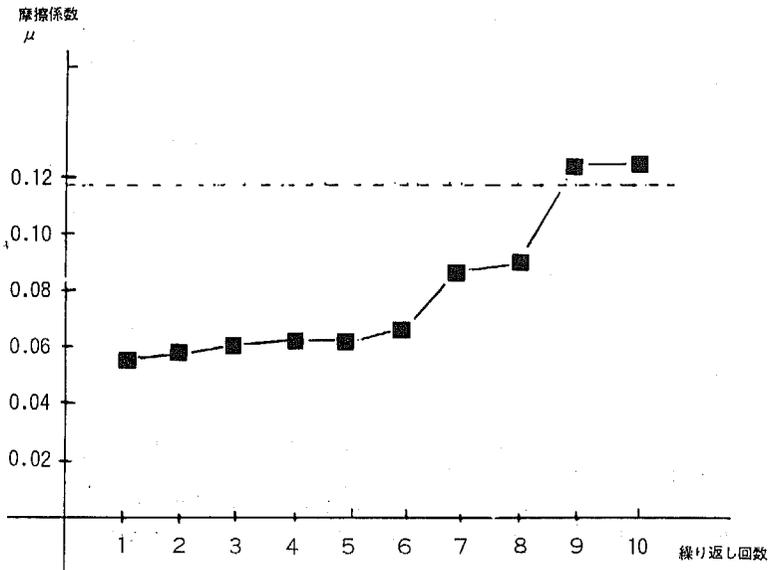


図13 同一試料片を用いて lift up し生食水に浸し、その後滑動を行うという操作を繰り返し行った時の再低下現象出現時の最小摩擦係数の変化の1例

.....: 摩擦力の再低下現象出現直前の摩擦力

上記操作を9回以上繰り返すと再低下現象の出現は認められない。

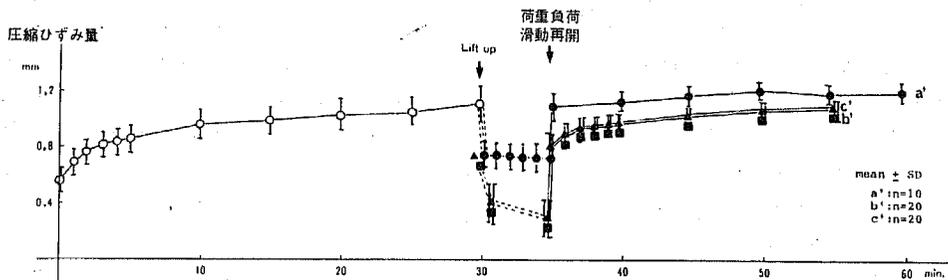


図14 Lift up し、各種の処理を行った軟骨小片の圧縮ひずみ量の経時的変化

- : 新鮮無処理軟骨小片の変化
-●: a) Lift up のみ
-■: b) Lift up し生食水に浸す
-▲: c) Lift up し関節液に浸す
- : a) 処理後の変化
- : b) 処理後の変化
- ▲—▲: c) 処理後の変化

摩擦係数は数10秒後より低下し始めるか、あるいはほとんど変化しないかであった(図15)。

実験 5: Lift up し液体に浸した後滑動を再開させ、摩擦力の再低下現象が出現する前の時期に生食水あるいは関節液を

滴下した場合の摩擦係数の変化

新鮮無処理軟骨小片を硝子面と滑動させた後、lift up し生食水に浸し、再び滑動を開始させ摩擦係数が増大して行く時期に生食水を滑動面に滴下すると摩擦係数はほとんど変化しないか、あるいはわずかに増大

軟骨小片と硝子面間の摩擦

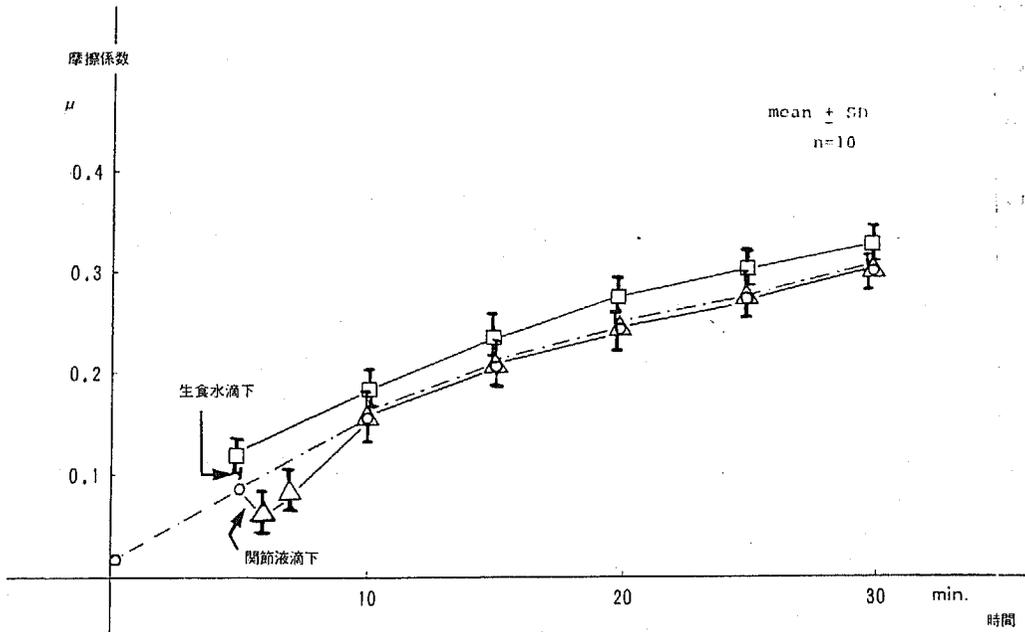


図15 新鮮無処理軟骨を硝子面上で滑動させて、生食水、関節液を滑動面に滴下した場合のその後の摩擦係数の変化

- ：液体の滴下なし
- ：生食水滴下後の変化
- △—△：関節液滴下後の変化

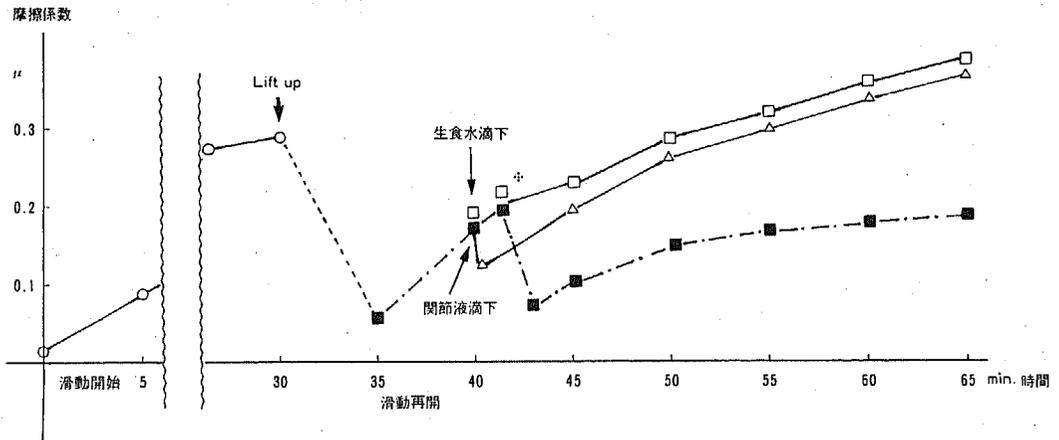


図16 Lift up し生食水に浸し滑動を再開させ、摩擦力の再低下現象が出現する前に生食水、関節液を滑動面に滴下した場合のその後の摩擦係数の変化

- ：液体の滴下なし
- ：生食水滴下後の変化
- △—△：関節液滴下後の変化
- ※：摩擦力の再低下現象の開始時点

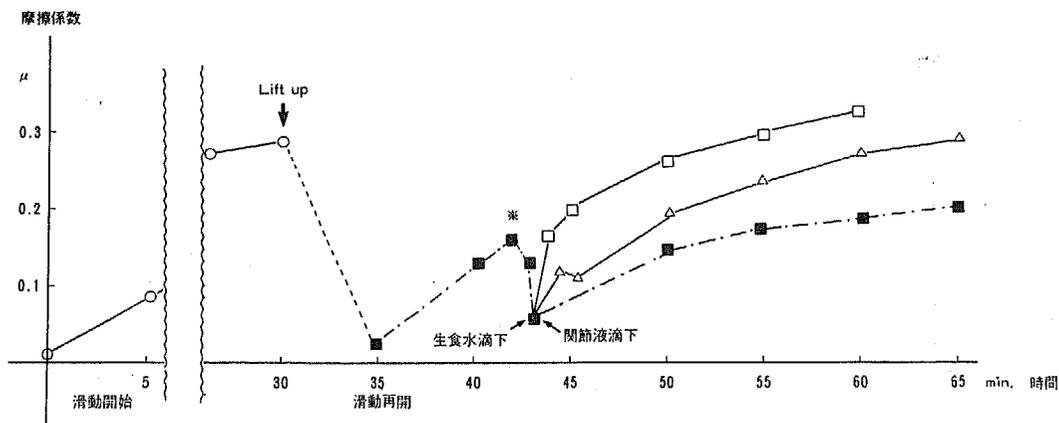


図17 Lift up し生食水に浸し、滑動を再開させ、摩擦力の再低下現象が出現した直後に生食水、関節液を滑動面に滴下した場合のその後の摩擦係数の変化

- ：液体の滴下なし
- ：生食水滴下後の変化
- △—△：関節液滴下後の変化
- ※：摩擦力の再低下現象の開始時点

した。しかし、滑動面に関節液を滴下すると摩擦係数は直ちに低下した ($P < 0.01$) (図16)。

新鮮無処理軟骨小片を硝子面と滑動させた後 lift up し関節液に浸し、滑動を再開させ摩擦係数が増大していく時期に生食水あるいは関節液を滑動面に滴下した場合には、実験4と同一の結果が得られた。すなわち生食水を滴下した場合には摩擦係数は直ちに増大し、関節液を滴下した場合には数10秒後より摩擦係数の低下がみられるか、ほとんど変化しないかであった。

実験6：Lift up し液体に浸し、滑動を再開させ、摩擦力の再低下現象が出現した直後に生食水あるいは関節液を滴下した際のその後の摩擦係数の変化

Lift up し生食水あるいは関節液に浸し、再低下現象が出現した直後に生食水あるいは関節液を滴下すると、いずれの組合せの場合でも、滴下直後直ちに摩擦係数は増大した ($P < 0.01$) (図17)。図17には lift up し生食水に浸し、摩擦力の再低下現象が出現した直後に生食水、関節液を滴下した結果の各1例を示した。

IV 考 察

生体の潤滑機構に関して現在までに多くの仮説がみ

られ、Charnley³⁾は境界潤滑説を、McCutchen²⁾は weeping lubrication theory を、Dintenfuss¹⁾は elastohydrodynamic lubrication 説を、Walker ら⁴⁾は boosted lubrication を唱えている。しかし、いずれの説も単独で生体の潤滑様式を十分に説明できず、最近では Radin と Paul⁵⁾、Wright と Dowson⁶⁾、Unsworth ら⁷⁾などが述べているように生体の関節ではいろいろな条件に応じて種々の潤滑様式が成立しているのではないかと考えられている。

1. 軟骨小片を用いた摩擦力計測に関する諸報告と本実験の結果との比較

潤滑機構を解明する目的で軟骨小片と硝子面間の摩擦力を計測する実験は McCutchen²⁾以来多数の研究者によって行われてきた。摩擦力は経時的に指数関数曲線に類似して増大すること、および滑動後に軟骨を硝子面より離し液体に浸した後滑動を再開させたときの摩擦係数は、滑動中止直前の摩擦係数よりも低い値を示すことが報告されている²⁾⁸⁾。

著者も新鮮無処理軟骨小片の摩擦力は経時的に指数関数曲線に類似して増大すること、および滑動後滑動面より離して液体に浸すことにより潤滑性能の回復がみられることなどについては同様な結果を得ている。

新鮮な軟骨を硝子面上滑動させると摩擦力が次第に

上昇するのは摩擦面間に存在する液体が squeeze out されることや軟骨の弾性変形の増大につれて軟骨組織中からしみ出す水分が減少し静圧流体潤滑効果が低下するため²⁾、あるいは軟骨の弾性変形により接触面が拡大することによるのではないかと⁸⁾などと考えられている。また一定時間滑動した後 lift up し、試料を液体に浸しておく、滑動再開時摩擦力は低い、これは軟骨が親水性を持つために膨潤し、静圧流体潤滑効果が回復するためであり、また軟骨の親水性により弾性変形の回復が起こり、真の接触面積が小さくなるためであると考えられている。

著者は軟骨小片として軟骨海綿骨複合体の圧縮ひずみ量を計測したが、宮永⁹⁾らの軟骨、海綿骨、軟骨海綿骨複合体のそれぞれの弾性率計測結果にもとづけば、著者の測定した軟骨小片軟骨海綿骨複合体の圧縮ひずみ量はほぼ軟骨の圧縮ひずみ量に一致すると考えられる。

さらに実験 1, 2, 3 の結果をみると、再低下現象出現前後の時期を除くと、摩擦力の変化と圧縮ひずみ量の変化はほぼ平行関係にある。それゆえ軟骨の摩擦特性が荷重時間依存性を示したり、滑動後液体に浸し、さらに滑動を再開させると摩擦力が低下するのは軟骨の弾性変形および液体による試料の膨潤によるという諸家の見解を支持することができる。

2. 摩擦力の再低下現象について

著者は滑動させた軟骨小片を lift up し、液体に一定時間浸して滑動再開後しばらくすると摩擦力が自然に低下するというこれまでに報告されていない現象を認め、これを摩擦力の再低下現象と名付けた。摩擦力の再低下現象出現前後において、圧縮ひずみ量には摩擦力の変化に対応する程の変化がみられず、また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などの事実により、上述した液体の squeeze out, weeping 現象、軟骨の弾性変形の回復などでは再低下現象は十分に説明できない。

摩擦力の再低下現象出現時の最小摩擦係数は 0.05~0.15 の範囲で一定値を示した。この値は新鮮軟骨小片の滑動開始時の摩擦係数の値に比較的近く、機械工学領域などで境界潤滑様式が作用したときに示す摩擦係数の値⁵⁾にほぼ一致している。再低下現象出現までに要する時間は lift up して液体に浸しておく時間に依存しており、液体に浸す時間が長ければ長いほど長時間を要した。さらに滑動面を観察していると往復運動面から液体がほとんど消失する時期に再低下現象は出

現した。

以上より、摩擦力の再低下現象は、摩擦面間に存在する低分子成分が squeeze out された後、軟骨表面に潤滑性能を有する被膜が形成されたために出現したのではないかと考えられる。

また再低下現象出現以前には滑動面への関節液の滴下は摩擦力を低下させる効果をもつが、再低下現象出現直後の生食水あるいは関節液の滴下は逆に摩擦力を増大させる作用を示した。これは曾田氏の解説書「摩擦の話¹⁰⁾」の内に引用されている、レーリー卿の紅茶茶碗の話にみられる現象と非常に類似している。すなわち軟骨表面にできた潤滑性能を有する被膜が、液体を滴下することにより破断されたためであると解釈される。

さらに同一軟骨小片を用いて滑動実験と、lift up して生食水に浸す操作を繰り返す行くと、再低下現象出現時の最小摩擦係数は次第に増大し、最後には再低下現象が出現しなくなる。これは軟骨表面が有している境界潤滑性の劣化が起こったためではないかと考えられる。以上より軟骨表面に潤滑性能を有する機構が再形成され摩擦力の再低下現象が出現したと考えられる。

Charnley³⁾らは関節を振子の支点として振動させ、振幅の減衰曲線から境界潤滑説を主張した。Walker⁴⁾は軟骨表面の陥凹部に取込まれた関節液が圧縮され濃縮し、粘稠な hyaluronate protein complex が残存して荷重面を押し上げて潤滑効果を増強するということを主張し、これを boosted lubrication theory と名付けた。しかし、Radin と Paul⁵⁾は生体の潤滑様式について論述し、impending contact の部分では boosted lubrication のみが起こっているのではなく、境界潤滑も働いていることは明らかであるので、boosted lubrication という名称は適切でないと述べ、また笹田¹¹⁾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言えると述べている。それゆえに両者の間を明確に区別することは現在のところ不可能であり、著者の発見した摩擦力の再低下現象が、そのいずれの機構により発現したかの決定はできなかった。

今回著者も軟骨小片を用いて関節軟骨の摩擦特性を追求した結果、軟骨の粘弾性変形が潤滑性に関与していることを確認した。なお、そのほかに、軟骨表面特性によると考えられる摩擦力の再低下現象という実験結果を得たが、これは特定の条件下では軟骨表面の

つ一種の境界潤滑性能が有効に働くことを示唆していると考えられる。関節の潤滑機構をさらに検索するためには、軟骨表面形態と潤滑性能とがいかなる関連にあるかを追求することが緊要であると考ええる。

V 結 語

関節軟骨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、経時的な摩擦力の変化、圧縮ひずみ量の変化を観察し、以下の結果を得た。

1) 従来報告されている摩擦力の荷重時間依存性の確認の他に、滑動させた軟骨小片を滑動面より離して、液体に浸した後滑動を再開させ往復運動を続けていると、一旦上昇した摩擦力が自然に低下するというこれまで報告されていない現象がみられ、著者はこれを摩擦力の再低下現象と名付けた。

2) 再低下現象出現時の最小摩擦係数は0.05~0.15であった。

3) 再低下現象出現までに要する時間は、軟骨小片を滑動面より離して液体に浸す時間に依存し、液体に浸す時間が長ければ長いほど長時間を要した。さらに再低下現象は、滑動面を観察していると往復運動面から液体がほとんど消失する時期に出現した。

4) 再低下現象は急激に起こるが、その前後で軟骨小片の圧縮ひずみ量にはそれに対応するほどの変化はみられなかった。

以上の事実より摩擦力の再低下現象は軟骨表面のもつ一種の境界潤滑性による現象と考えられ、機械工学領域の潤滑分野で類似の現象は認められず、関節軟骨に特有な現象であるといえる。すなわち本現象は軟骨表面の境界潤滑性能の特殊な表現形と思われるので、この現象の出現前後に軟骨表面の形態がどのように変化するかを追求して行くことが関節軟骨の潤滑機構を解明するために必要であると考えられる。

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生理学教室東健彦教授ならびに第一解剖学教室永田哲士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) Dintenfass, L.: Lubrication in synovial joints : A theoretical analysis. A rheological approach to the problems of joint movements and joint lubrication. *J. Bone Jt. Surg.*, 45-A : 1241-1256, 1963
- 2) McCutchen, C. W.: The frictional properties of animal joints. *Wear*, 5 : 1-17, 1962
- 3) Charnley, J.: The lubrication of animal joints in relation to surgical reconstruction by arthroplasty. *Ann. rheum. Dis.*, 19 : 10-19, 1960
- 4) 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
- 5) Radin, E. L. and Paul, I. L.: A consolidated concept of joint lubrication. *J. Bone Jt. Surg.*, 54-A : 607-616, 1972
- 6) Wright, V. and Dowson, D.: In "Current topics in connective tissue disease", Holt, P. J. L. (ed), pp. 115-136, Churchill Livingstone, Edinburgh, 1975
- 7) Unsworth, A., Dowson, D. and Wright, V.: Some new evidence on human joint lubrication. *Ann. rheum. Dis.*, 34 : 277-285, 1975
- 8) Walker, P. S., Dowson, D., Longfield, M. D. and Wright, V.: Rheological behaviour of human joints. *Rheologica Acta*, 8 : 234-239, 1969
- 9) 宮永 豊, 矢野英雄, 二ノ宮節夫, 長坂与一, 立石哲也, 白崎芳夫: 整形外科基礎科学 3. 骨・軟骨代謝の生理と病態, 骨・関節の基礎を語る会編, pp. 153-159, 骨・関節の基礎を語る会, 名古屋, 1976
- 10) 曾田範宗: 摩擦の話, 岩波新書, pp. 2-8, 岩波書店, 東京, 1975
- 11) 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)