

原 著

静荷重時におけるヒト股関節の軟骨および
関節裂隙の形態変化

中 田 和 義

信州大学医学部整形外科学教室

(指導: 藤本憲司教授)

信州大学医学部第一病理学教室

DEFORMATION OF THE ARTICULAR CARTILAGE
AND JOINT SPACE OF THE HUMAN HIP JOINT
UNDER STATIC LOADING

Kazuyoshi NAKATA

Department of Orthopaedic Surgery,

(Director: Prof. Kenji FUJIMOTO)

and

Department of Pathology, Faculty of Medicine,
Shinshu University

NAKATA, K. *Deformation of the articular cartilage and joint space of human hip joint under static loading.* Shinshu Med. J., 27: 514-528, 1979

In order to study the deformation of the articular cartilage and joint space of human hip joint under static loading, serial slices of 35 joint specimens which were frozen under application of a load were observed. Without loading, crescent-shaped joint spaces up to 3mm were detected, and there was an incongruity between articular surfaces. In the loaded specimens with more than 60kg, congruent surfaces were observed. In normal joints, the articular surfaces did not come into direct contact each other leaving a space approximately 0.1~0.5mm in thickness filled with fluid, even under loading more than 110kg. The synovial fluid which was inoculated with Indian ink was squeezed out from the joint space of the acetabular roof by loading, but the space was filled automatically with another new fluid without Indian ink particles. In osteoarthrotic hip joints in which defect of articular cartilages was evident, the joint surfaces came into direct contact each other when they were subjected to a load. The space between the limbus and the femoral head was narrower than that between cartilage surfaces under loading. The above facts suggest that the new fluid in the space exudated from articular cartilages by the mechanism such as weeping may play an important role to maintain joint function and the limbus may play similar to a valve to regulate the fluid in the joint space.

(Received for publication; August 7, 1979)

Key words: 関節軟骨 (articular cartilage)
関節裂隙 (joint space)
荷重凍結法 (freezing method under static loading)

I 緒言

股関節は下肢と体幹を結ぶ継手である。常に体重の数倍の荷重下での運動を強いられているにもかかわらず、関節は機械の軸受けと比べて摩擦、摩耗等による障害がほとんどない。股関節の機能を分析する方法として、股関節の軟骨表面の不適合性 (incongruity) や接触面積 (contact area) についての研究が、古くから行われてきた¹⁾⁻³⁾。これらの研究の意図することは、股関節のいかなる部分に荷重がかかり、それがいかなる機序で軟骨の摩耗が起り、さらに変形性関節症に結びつくかということであった。これまでは関節構成体を個々の成分に分離した資料についての研究が多く、実際に体重がかかった状態では関節表面がどのようになっているかということについてはまったく未解決であった。生体関節の関節裂隙を直接的に観察することは実際には不可能であろう。これまで casting method⁴⁾ や roentgenographic method や dyeing technique⁵⁾⁻⁸⁾ などによって、関節の接触面積が追求されてきたが、いずれも間接的な方法であったと考えられる。信州大学整形外科学教室では、荷重時における関節面間の接触状況について、より生理的で、より直接的に観察できる方法を検討し続けてきたが、武井ら⁹⁾⁻¹¹⁾ は荷重凍結法を用い、荷重時の膝関節の関節裂隙と関節面の形状について新知見を与えることができた。この研究は、変形性関節症の成因解明に関する研究の一環として行われたものであるが、著者は荷重時における股関節の適合性や関節裂隙について研究することを目的として、武井らの方法をヒト股関節に応用した。そして荷重時の関節の表面構造と関節裂隙についての肉眼レベルでの観察を行い、さらに新しい観察法として、弱拡大写真や、微分干渉顕微鏡による観察を加えたので、その結果を報告する。

II 実験材料ならびに方法

実験に使用した股関節は35関節で、男性21例、女性12例であり、全例剖検屍体より採取した。年齢は0才から76才である。内訳は、0~10才4例5関節、11~20才2例、21~30才1例、31~40才3例、41~50才4例、51~60才10例11関節、61~70才6例、71~80才3例である (表1)。これらの股関節を、病理解剖時、腸骨は上前腸骨棘より下後腸骨棘に向かって水平に切断し、大腿骨は骨頭より遠位10cmにて切断、骨盤の下部は恥骨上枝、坐骨枝で切断し、採取した。その際

皮膚以外の軟部組織はすべて温存した。これらの資料のX線所見では、定型の変形性股関節症を示した症例が2例3関節で、他はすべて病的所見を認めなかった。採取した股関節はポリエチレン袋に入れ、deep freezer (-75°C) にて保存した。5例は採取後直ちに実験に使用した。実験当日、凍結した股関節をポリエチレン袋に入れたまま、流水 (15°C) で解凍した。完全に解凍するまでに約4時間を要した。完全に解凍した後、資料の腸骨側をレジンにて12cm×12cm×4cmの箱に入れ固定した。さらに予め作った高さ10cmの受け台に腸骨側を入れ、大腿骨は止め金を髓腔内に挿入し、レジンで固定した。この股関節を上下逆にして小型の荷重負荷装置にのせ、股関節前方の関節包が緊張の加わる状態で固定した。この荷重装置は武井¹⁰⁾ が考案したもので、荷重はスプリングコイルでかけられるようになっており、大きさは、36cm×36cm×60cmで、資料とともに全体を deep freezer に入れることができる (図1)。

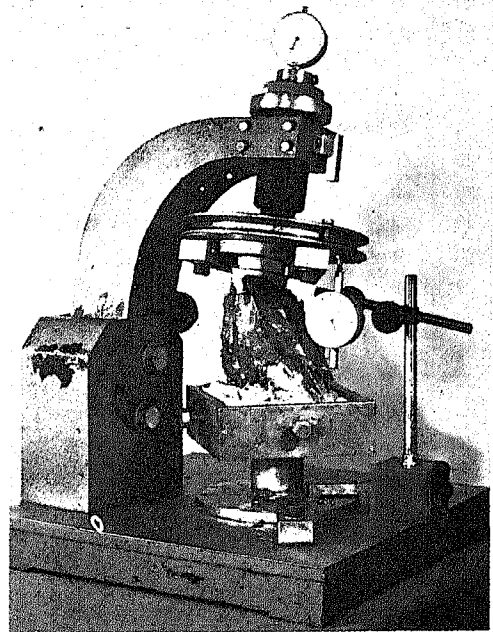


図1 荷重負荷装置。股関節を上下逆にして固定。

A. 荷重凍結試験

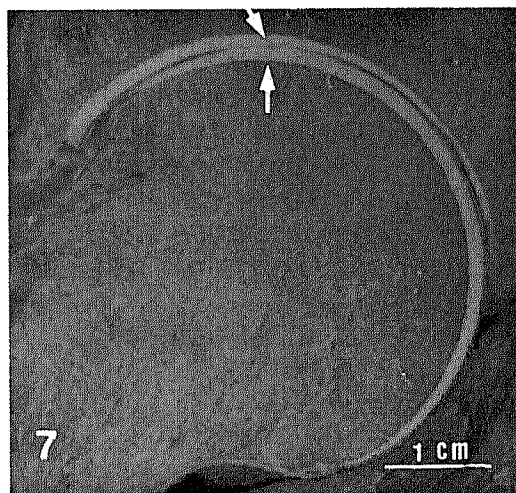
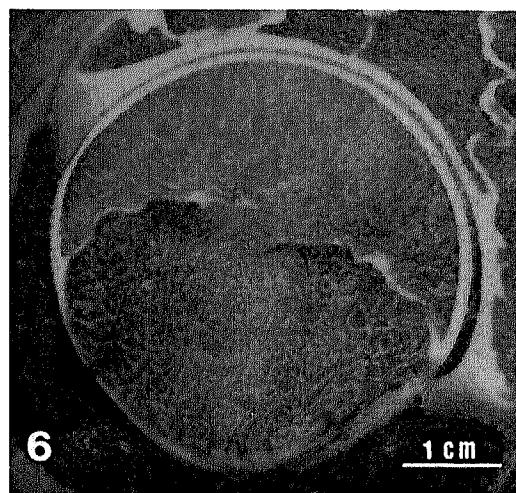
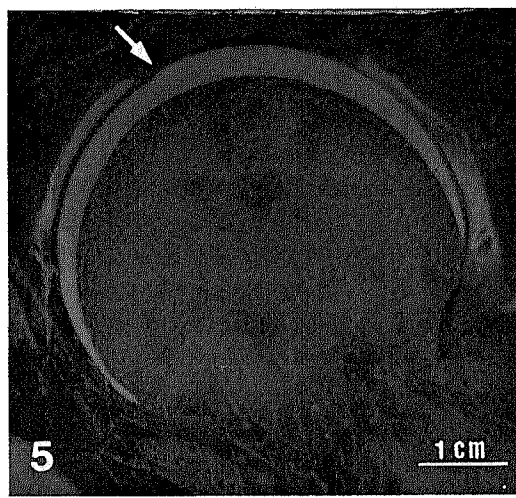
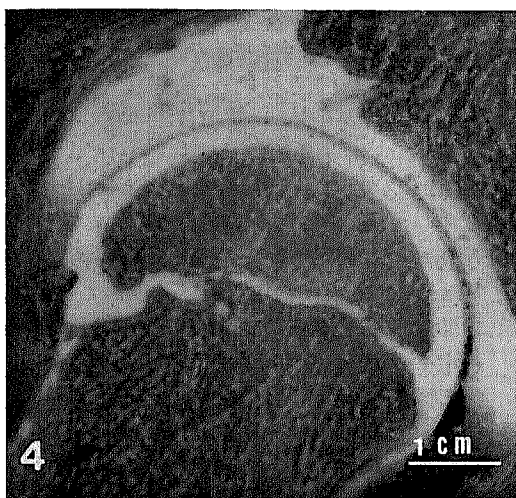
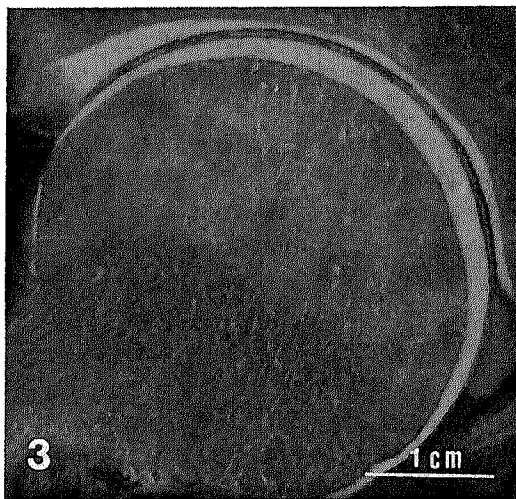
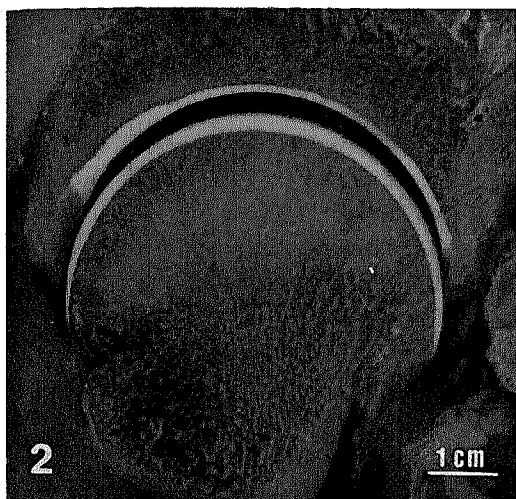
股関節前方より注射器にて、関節内に3~5ccのIndian inkを注入し、股関節を屈伸することによ

表 1 実 験 材 料

No.	Age	Sex	Pathological diagnosis	Amount of load	Procedure	Thaw Test	Comment
1	67	M	Leukemia	110 kg			
2	74	M	Diabetes mellitus	110 kg			
3	49	F	Gastric cancer	110 kg			
4	46	F	Apoplexy	no load			
5	57	F	Gastric cancer	110 kg			
6	73	M	Pancreas cancer	110 kg			
7	56	M	Leukemia	120 kg			
8	54	F	Dermatomyositis	no load			
9	61	F	Lung cancer	150 kg			
10	64	M	Gastric ulcer	no load			
11	11	M	Malignant lymphoma	130 kg			
12	60	M	Unclear	110 kg			
13	8	M	Malignant lymphoma	110 kg			
14	7	M	Subacute encephalitis	110 kg			
15	69	M	Hepatoma	110 kg	immediate		
16	58	F	Rectum cancer	150 kg	immediate		
17	40	M	Malignant lymphoma	110 kg		+	
18	6	M	Hodgkin's disease	110 kg		+	
19	15	F	Leukemia	140 kg	immediate	+	
20	76	M	Lung cancer	110 kg		+	
21	52	M	Hepatoma	150 kg		+	
22	52	M	Liver cirrhosis	60 kg		+	
23	37	M	Hepatoma	110 kg	immediate	+	
24	41	M	Lung cancer	150 kg			
25	0	M	Myelomeningocele (rt)	30 kg			
26	0	M	(lt)	no load			
27	54	F	Polycystic kidney (rt)	110 kg			Osteoarthritis
28	54	F	(lt)	110 kg			Osteoarthritis
29	56	F	Myoclonus epilepsy	110 kg			
30	54	F	Neuroblastoma	60 kg		+	
31	43	M	Hepatoma	no load			
32	40	M	Leukemia	60 kg	immediate	+	
33	70	M	Reticulum cell sarcoma	150 kg			
34	23	F	SLE	110 kg			
35	62	F	Epilepsy	110 kg			Osteoarthritis

- 図 2 非荷重凍結標本 (No. 8, 54才) 前頭面。最大 3mm の三日月状の関節裂隙が認められる。
- 図 3 60kg 荷重凍結標本 (No. 32, 40才) 前頭面。関節の適合性は良好で、しかも関節裂隙ははっきりと残っている。
- 図 4 110kg 荷重凍結標本 (No. 13, 8才) 前頭面。Indian ink は荷重面より押し出されている。
- 図 5 110kg 荷重凍結標本 (No. 6, 73才) 矢状面。大腿骨頭の軟骨は寛骨臼窩縁によって圧縮されている (矢印)。
- 図 6 150kg (降伏点を越える) 荷重凍結標本 (No. 11, 11才) 矢状面。関節唇と大腿骨頭との間の裂隙は両軟骨表面間の裂隙より狭い。
- 図 7 150kg (降伏点を越える) 荷重凍結標本 (No. 21, 52才) 前頭面。この標本のみ、寛骨臼軟骨と大腿骨頭軟骨とが一部接触に近い状態になっている (矢印)。

荷重時の股関節の形態変化



り, Indian ink を拡散させた。荷重負荷装置で, 0 kg, 30kg, 60kg, 110kg, および降伏点の荷重をかけた資料を, 荷重負荷装置とともに deep freezer に入れ, -75°C の条件下にて凍結固定した。12時間後, 資料を荷重負荷装置よりはらずし, X線写真で股関節の位置を確かめ, 切り出し面を固定するために予め作った木箱に資料を置き, その周囲に氷水を少しずつ入れて凍らせながら, 24時間で資料を完全に氷詰めの形にした。この氷詰め標本を特製の骨平面切削器¹⁰⁾の支持台に乗せ, 前頭面あるいは矢状面にて1mm毎に削り, 削り面を写真撮影した。非荷重例5例, 30kg荷重1例, 60kg荷重3例, 110kg荷重18例, 120kg, 130kg, 140kg荷重各1例, 150kg荷重5例の実験を行った。130kg以上の荷重例はすべて降伏点に達していた。

文中の関節裂隙の計測は便宜上, 明瞭に白色を呈する大腿骨頭および寛骨臼軟骨表面間の距離とした。また静的荷重負荷を単に荷重とよぶこととする。

B. 解凍除荷試験

高速帯ノコギリで, 3mmの厚さの切片に切り, この切片を生食水を入れたポリエチレン袋に入れ, 流水(15°C)中に2時間放置し, 資料を解凍した。解凍することにより, 凍結前に負荷された荷重が除かれ, 軟骨は非荷重時の元の状態にもどる。同一資料の荷重時と非荷重時の軟骨の変形量を比較した。この実験を行ったのは9例であった。

C. 拡大写真による観察

荷重凍結標本の関節裂隙を拡大撮影し, 関節裂隙と軟骨表面の構造を観察した。この観察は5例に行った。

D. 微分干渉顕微鏡による観察

高速帯ノコギリで3mmの厚さに切った凍結切片から, 軟骨表面と関節裂隙にある液体を調べるために, 軟骨と関節裂隙の部分を作り出した。この状態のままクリオスタットにて薄切片を作り, グリセリンで封入した標本を, 透過型微分干渉顕微鏡で観察した。また, 無処置の新鮮軟骨表面を反射型微分干渉顕微鏡で観察した。

Ⅲ 実験結果

A. 荷重凍結試験

非荷重標本では図2のように大腿骨頭関節面と寛骨臼関節面との間に Indian ink で満たされた関節裂隙が認められた。この関節裂隙は辺縁では関節唇が大

腿骨頭軟骨と接触しており, 中央の部分で広く, 最大3mm程度の三日月状の形をしていた。両関節面は完全な適合状態ではなかった。

60kg荷重実験は3例に行い, 大腿骨頭軟骨と寛骨臼軟骨は接触しておらず, 軟骨表面間に0.5~0.6mmの最小関節裂隙が存在した。図3は, No.32, 40才の男性で最小関節裂隙は一様に0.6mmであって, 適合性は良好であった。

110kg荷重標本では, 軟骨表面間に0.1mm以上の関節裂隙が存在し, 軟骨同志接触していなかった。厚さ1mm間隔の連続削り面で観察すると, 関節裂隙の狭い部分には Indian ink は存在せず, それに代る液体によって関節裂隙を作っていた。寛骨臼窩には Indian ink の貯留が認められた。関節唇は骨頭軟骨とほとんど接触していた。適合性は前頭面あるいは矢状面でも, 若年例も老人の例でもほぼ良好になった。No.13の8才男性の場合, 図4のように0.5mmの最小関節裂隙が存在し, 関節裂隙の狭い部分では Indian ink が消失し, それに代る液体によって関節裂隙を作っていた。寛骨臼上外縁の関節唇は大腿骨頭軟骨にほとんど接触していた。荷重による軟骨の圧縮変形は, 骨頭側は中央から外側に向かった荷重部に認められた。適合性は良好であった。図5は No.6の73才男性例の矢状切断面であるが, 最小関節裂隙は0.2mmであり, 寛骨臼窩縁に一致して大腿骨頭軟骨の圧縮変形が見られた。No.23の37才男性例では, 最小関節裂隙は0.35mmであり, 適合性は良好であった。この110kg荷重実験は15例の正常股関節について行ったが, その年齢別の内訳は, a) 0~20才, 3例, b) 21~50才, 5例, c) 51才以上, 7例であった。軟骨の厚い若年者の a) 群では平均0.5mmの最小関節裂隙があり, 成人の b) 群では0.34mmの裂隙が認められ, 老人の c) 群では平均0.3mmで, 年齢とともに関節裂隙が狭くなる傾向があった(図8)。a) 群と b) 群, c) 群の関節裂隙を比較すると明らかに有意差があったが, b) 群と c) 群の関節裂隙の比較では有意差はなかった。また大腿骨頭軟骨の最も厚い部分の幅と最小関節裂隙の幅の相関関係を見ると, 明らかに軟骨の厚い方が裂隙は広がった。

130kg以上の降伏点を越える荷重凍結標本では, 7例中1例を除き, 全例, 軟骨同志接触しておらず, 関節裂隙が存在した。連続削り面で見ると, 寛骨臼状面の軟骨のほぼ全域と, それに対応する大腿骨頭軟骨との間には Indian ink は消失しており, それに代る

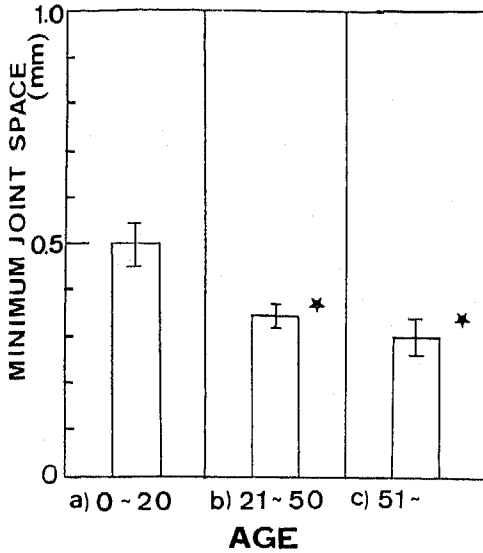


図8 110kg 荷重凍結標本における最小関節裂隙の年齢別比較 (I: 標準誤差, ★: a 群と b 群, c 群との間に有意差がある。t 検定。P<0.005)

液体によって関節裂隙を作っていた。荷重による軟骨の圧縮変形は、大腿骨頭側、寛骨臼側とも圧縮応力が、より大きく働いたと考えられる部位に顕著であった。荷重時、適合性は良好であった。関節唇は大腿骨頭とほとんど接触していた。No.11の11才男性、130kg 荷重例の矢状切断面では0.4mmの最小関節裂隙が存在し、図6のように前上方部の関節唇と非荷重部の後下方部の関節唇は、大腿骨頭軟骨とほとんど接触していた。No.21の52才男性、150kg 荷重例では、図7のように一部大腿骨頭軟骨と寛骨臼軟骨とがほとんど接触する部分(矢印)があったが、連続削り面で観察すると、接触部分は非常に少なく、他の領域においては、0.3mmの最小関節裂隙が存在した。

資料採取後直ちに荷重凍結実験を行った5関節は deep freezer で凍結保存後解凍して実験を行った例と同様に、軟骨が圧縮変形し、関節裂隙が存在した。

変形性関節症3関節についても荷重凍結実験を行った。No.28, 54才女性の股関節症のX線像では、図9-aのように臼蓋形成不全と亜脱臼を伴う二次性股関節症を認めた。すなわち荷重部の関節裂隙は狭小化しており、脱臼性外反股や骨頭荷重部にやや硬化像があるものの、嚢包や osteophyte は認められなかった。110kgの荷重凍結実験後では、図9-bのよう

に、寛骨臼関節面と大腿骨頭関節面の荷重部では軟骨は欠損しており、互いに接触していた(矢印)。内側の部分には軟骨が存在し、幅広い裂隙を作っていた。他の2例は骨頭の茸状変形や、osteophyte を伴う重度の股関節症であるが(図10-a)、110kgの荷重凍結標本では軟骨はほとんど全部欠損しており、露出した骨組織同士が完全に接触していた(図10-b)。

B. 解凍除荷試験

解凍除荷試験は9例に行い、その内訳は60kg 荷重例が3例、110kg 荷重例が4例、140kg 荷重例1例、150kg 荷重例1例であった。荷重時と解凍時の、同一部位の軟骨の厚さを比較すると、寛骨臼軟骨とそれに対応する大腿骨頭軟骨は、ほぼ全体にわたって圧縮変形が見られた。成人例では60kg 荷重例に比べて、110kg 以上の荷重例の方が軟骨の圧縮変形は大きく、また軟骨の圧縮変形は若年例の方が老人の例に比べて顕著であった。

No.19, 15才女性の140kg 荷重例で、荷重凍結時と解凍時の同一部位の軟骨の厚さを比較すると、図11-aのように荷重凍結時、寛骨臼軟骨が1.4mm(矢印)、大腿骨頭軟骨が1mm(二重矢印)であったものが、解凍時、寛骨臼軟骨が2.3mm(矢印)、骨頭軟骨が1.6mm(二重矢印)になった(図11-b)。

No.21, 52才男性、150kg 荷重例では荷重凍結時、荷重部の寛骨臼軟骨が0.9mm、大腿骨頭軟骨が1.1mmであったものが、解凍時、同一部位の軟骨の厚さは、寛骨臼軟骨が1.1mm、大腿骨頭軟骨が1.4mmになった。

No.32, 40才男性、60kg 荷重例では荷重凍結時、荷重部の寛骨臼軟骨が0.7mm、大腿骨頭軟骨が1.6mmであったものが、解凍時、同一部位の軟骨の厚さは、寛骨臼軟骨が0.8mm、大腿骨頭軟骨が1.6mmで、軟骨の圧縮変形は少なかった。

No.20, 76才男性、110kg 荷重例では図12-aのように荷重凍結時、寛骨臼軟骨が0.9mm(矢印)、大腿骨頭軟骨が1.5mm(二重矢印)であったものが、解凍時、同一部位の軟骨の厚さは、図12-bのように寛骨臼軟骨が1.2mm(矢印)、大腿骨頭軟骨が1.8mmとなった(二重矢印)。

C. 拡大写真による観察

5例の荷重凍結標本の削り面を拡大写真で観察すると、軟骨の表層に、Indian ink を含まない薄く黒い層があり、その中央に白くぬけた層があって、サンドウィッチ構造になっていた。その中央に白くぬけた層



a)

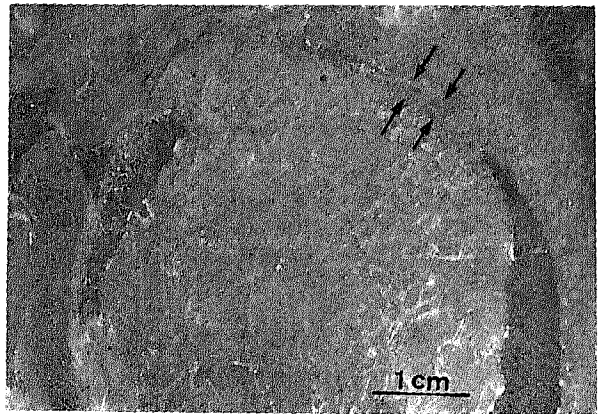


b)

図 9 a) 股関節症症例のX線像 (No.28, 54才)。
b) 同症例の110kg 荷重凍結標本, 前頭面。軟骨が欠損した関節面は接触している (矢印)。



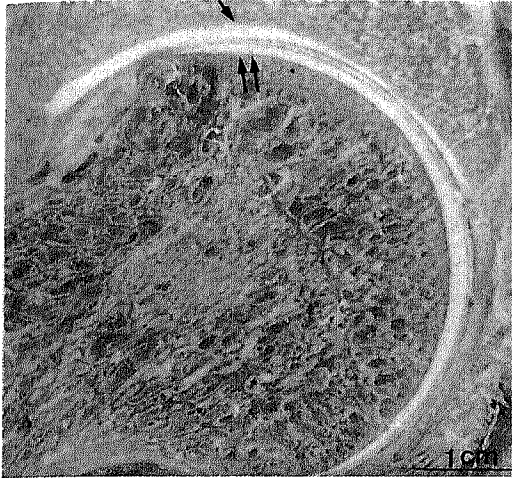
a)



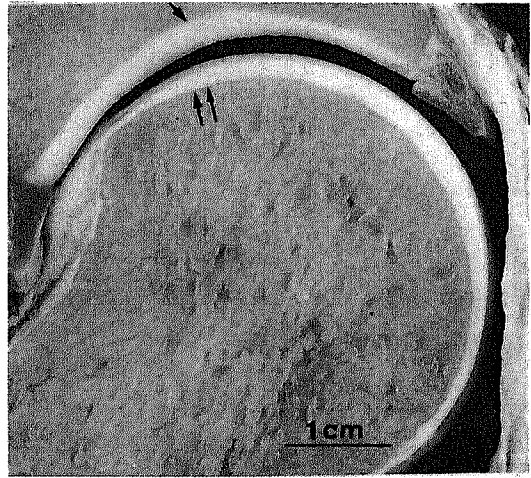
b)

図10 a) 重度股関節症症例のX線像 (No.27, 51才)。
b) 同症例の110kg 荷重凍結標本, 前頭面。露出した骨組織同士が接触している (矢印)。

荷重時の股関節の形態変化

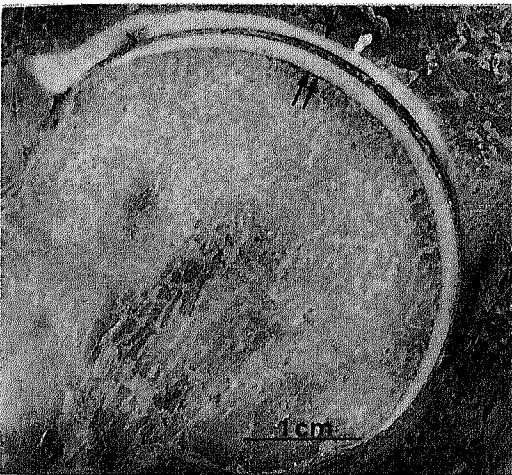


a)

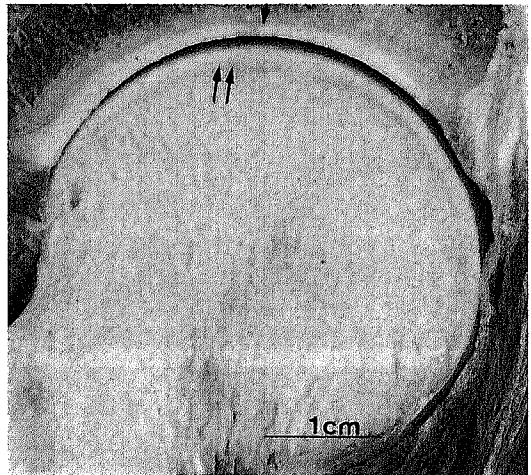


b)

図11 a) 140kg 荷重凍結標本 (No.19, 15才) 前頭面。
b) 同一例の解凍除荷標本。荷重によって圧縮変形した軟骨は元通りの状態となっている (矢印)。



a)



b)

図12 a) 110kg 荷重凍結標本 (No.20, 76才) 前頭面。
b) 同一例の解凍除荷標本。荷重による軟骨の圧縮変形は若年例のそれより少ない。

にも Indian ink が認められなかった (図13)。関節唇と大腿骨頭軟骨の接触部分を拡大写真で観察すると、前上方の関節唇は大腿骨頭軟骨と完全には接触しておらず、わずかな間隙が見られた (図14-a)。後下方の関節唇と大腿骨頭とはほとんど接触していた (図14-b)。

D. 微分干渉顕微鏡による観察

大腿骨頭軟骨と関節裂隙の部分を取り出した凍結切片を透過型微分干渉顕微鏡にて観察すると、図13に見られたサンドウィッチ構造の中央の部分は溶けてなくなったが、軟骨表層に光る層 (矢印) が認められ、不定型膜状物が軟骨表面を被っていた (図15)。軟骨表面には Indian ink の細粒子 (図16) は認められなかった。

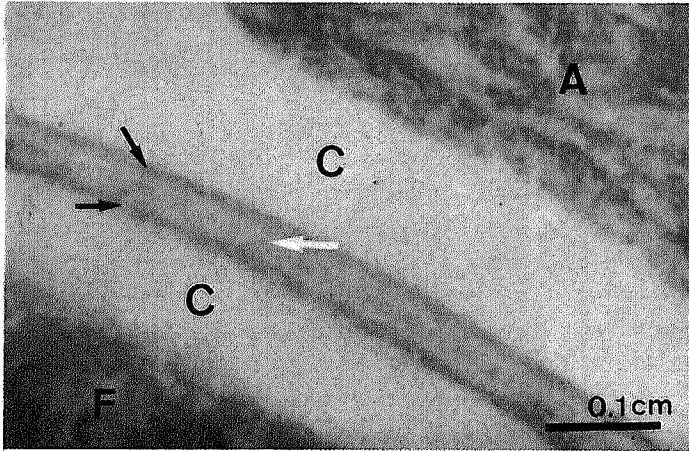
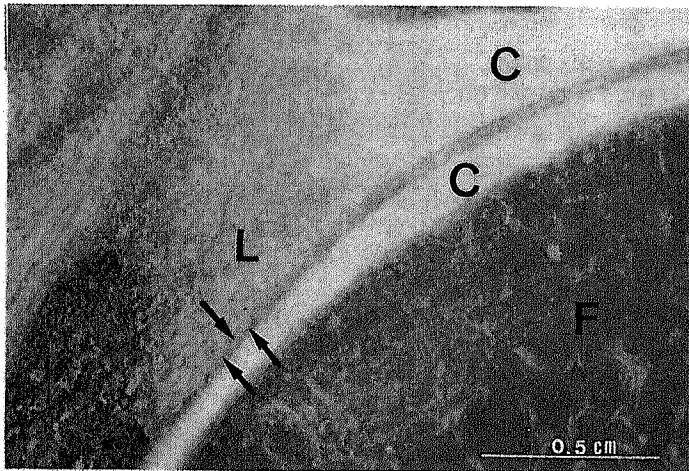
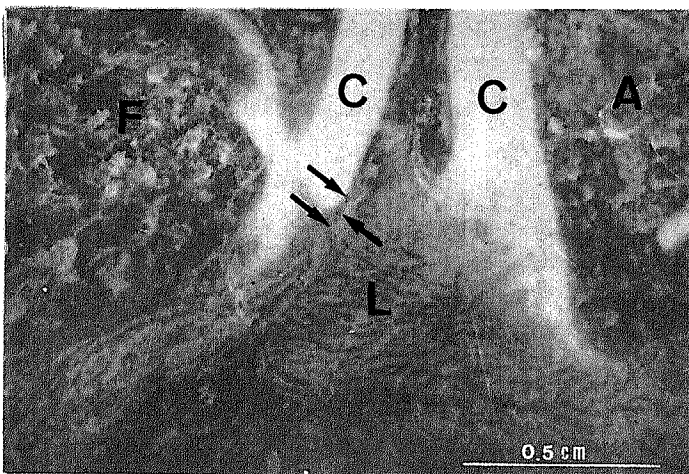


図13 関節裂隙の拡大写真 (No. 11, 11才, 荷重凍結標本)。両軟骨表面に淡黒色の層が見られ (黒矢印), 中央に白く抜けた層が認められる (白矢印)。サンドウィッチ構造。C: 軟骨, A: 寛骨臼, F: 大腿骨頭。



a)



b)

図14 関節唇部の拡大写真 (No. 11, 11才, 荷重凍結標本)。L: 関節唇, C: 軟骨, A: 寛骨臼, F: 大腿骨頭。

a) 前上部の関節唇と大腿骨頭軟骨との間の裂隙は非常に狭い (矢印)。

b) 後下部の関節唇と大腿骨頭はほとんど接触している (矢印)。

荷重時の股関節の形態変化

反射型微分干渉顕微鏡にて無処置の新鮮軟骨表面を観察すると、軟骨表面に凹凸がほとんど認められず、輪郭不明瞭な不定型の膜状物が表面を被っているが(図17-a)、乾燥するに従って軟骨表面に凹凸が認められるようになった(図17-b)。

Ⅳ 考 察

A. 荷重凍結試験法の利点と欠点

ヒト股関節の接触面を求めるために今まで dyeing technique⁵⁾⁻⁸⁾ や casting method⁴⁾ が用いられてきた。これらの方法は関節面を開いて行ったり、フォルマリン固定材料を使ったり、染色液やレジンのような介在物を押し出して接触面を求める、いわば間接的な方法であった。われわれの方法は、凍結による人工

産物が入り得る可能性があるとはいえ、はるかに直接的な方法である。

完全凍結までに約2時間を要することから、内部の凍結までに時間的ずれがあり、そのため関節裂隙に結氷するのではないかという問題がある。同一資料で凍結スピードに対する関節軟骨と関節裂隙の変化は比較できないが、control として行ったイヌ股関節の30kg 荷重試料を、液体窒素で固定した例にも関節裂隙が存在したので、単なる人工産物とは考えられない。もし関節裂隙に結氷するとすれば、関節裂隙すべてに間隙が見られなければならない。われわれの例では、関節唇と大腿骨頭軟骨の部分は接触到近い状態であり、また関節症の症例では露出した両関節面の骨組織同志が完全に密着していたから、硝子軟骨間のみ、氷が発

図15 新鮮軟骨表面の透過型微分干渉顕微鏡による観察。軟骨表層に光った層が見られる(矢印)。

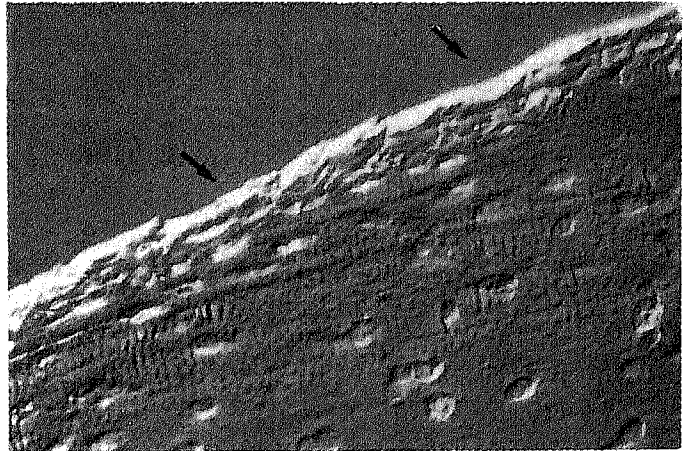
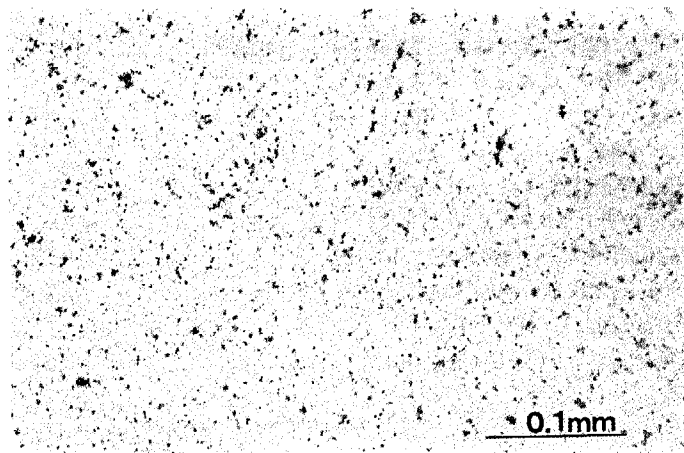
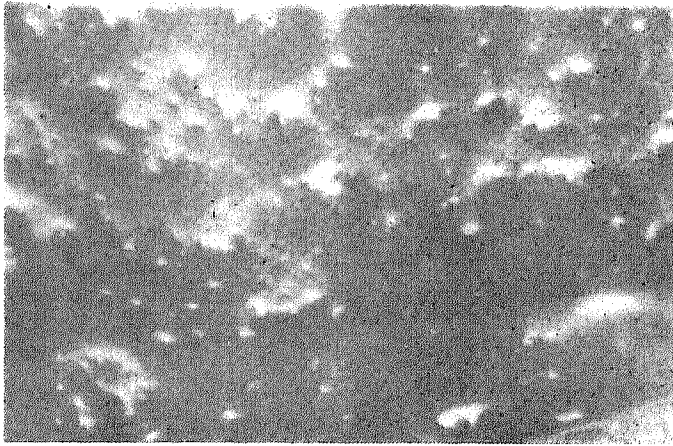
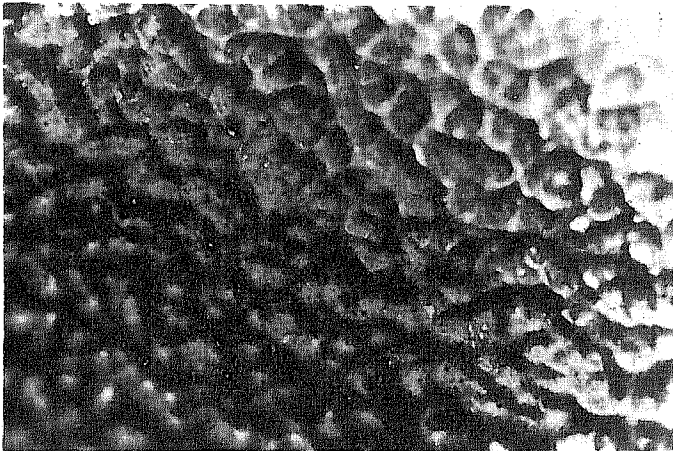


図16 Indian ink 粒子。





a)



b)

図17

- a) 大腿骨頭新鮮軟骨表面の反射型微分干渉顕微鏡による観察(×100)。軟骨表面に凹凸がほとんど認められない。
- b) 乾燥した大腿骨頭新鮮軟骨表面の反射型微分干渉顕微鏡による観察(×100)。軟骨表面に凹凸が見られる。

生したとは考えにくい。

また凍結保存した材料を一度解凍して実験に使用すれば、軟骨自体の弾力性が変わってしまうのではないかという疑問があるが、われわれの例では材料採取後すぐ実験した例と、凍結保存した例とを比較するに、成績に特に違いを認めなかった。

この方法の欠点としては、①同一位置に固定するのが困難、②同一面で切削するのが困難、③接触面積を求めるのが困難、④凍結による軟骨の量的変化が起こり得る、⑤同一材料をいろいろな位置に固定しての実験はできない、⑥静荷重実験に限定される、などである。しかし、生体関節の適合性は関節面の形状、軟部組織の張力、さらに関節の粘弾性変形により微妙に制御されているので、軟部組織を除去したり、関節面間

に casting material を入れる実験では、生理的荷重状態とは言えない。とくに荷重状態のまま関節裂隙を観察した報告はこれまでほとんどない。荷重時の股関節の関節裂隙と関節面の形状については、この実験法は、より直接的な方法であると考えられる。

B. 関節の適合性

ヒト股関節において寛骨臼と大腿骨頭の形態が完全適合状態でないことは、古くから多くの研究者に指摘されている。Walmsley¹⁾の記載によるとすべての荷重関節は伸展位で適合しており、屈曲位では不適合になる。とくに股関節は伸展位では大腿骨頭が、寛骨臼の一番深い位置に入るために screw home しており、屈曲位では大腿骨頭が unscrewed の状態にな

り、寛骨臼から出ようとしている。また大腿骨頭は完全な球形ではないことを指摘している。一方 Hammond と Charnley²⁾ は、10例の60才以上の症例で、大腿骨頭はほぼ球形で荷重時は完全に適合すると述べている。また Bullough ら³⁾ は、病理解剖から得られた53股関節を用いて大腿骨頭と寛骨臼の曲率を求め、その結果、大腿骨頭と寛骨臼とは完全な球形ではなく、寛骨臼に対して大腿骨頭の方が、より球形に近い形状であり、加齢とともに寛骨臼の非球形性が減じてくるという。この寛骨臼と大腿骨頭の曲率半径が異なることから、荷重の大小によって、その接触部分に変化すると述べている。Simon ら¹²⁾ はフォルマリンで固定したイスの関節を用い、荷重をかけたまま castlite で包埋し、軟骨の厚さと関節の適合性の間の相関関係を研究した。彼らによると軟骨の一番薄い足関節が最も適合性は良好で、軟骨の厚い膝、股関節では適合性は低いという。

Walmsley の論文には実際の実験データが少なく、Hammond と Charnley の論文では老人例であって、若年者の例が少ない。Bullough の実験は関節包が除かれ、非荷重状態のものであって、荷重状態のものを観察したわけではない。Simon らの研究はフォルマリン固定材料の動物実験であるから、そのままヒトの関節の適合性の実験とは比較できない。

著者の実験では、非荷重凍結例(図2)において、大腿骨頭関節面と寛骨臼関節面との間に最大3mm程度の三日月状の関節裂隙が認められ、両関節面は完全適合状態ではなかった。しかし60kg以上の荷重凍結標本では、関節軟骨、軟骨下組織が変形して軟骨表面全域に一様に、0.1mm以上の関節裂隙が残っていた。

C. 関節の接触面

ヒト股関節の関節表面のいかなる部分で荷重を受けるかについては多くの研究が行われている。Goodfellow と Bullough¹³⁾ は、染色実験から、若い人の場合、寛骨臼上方部で底辺を関節唇側におく三角形部分が非荷重部となるが、老人になると、寛骨臼全関節面が完全に接触することを示した。Greenwald ら⁶⁾⁻⁸⁾ は、ヒト股関節について、歩行分析に基づいた負荷運動時における関節面の染色実験を行っている。それによると、歩行の立脚期では寛骨臼の全関節面が体重負荷に関与するが、大腿骨頭関節面は、大腿骨頭窩周囲から骨頭下方部へかけて帯状の非接触部分があり、さらに大腿骨頭周辺部は通常の歩行では寛骨臼の関節軟骨とは接触せずに、関節唇と接触しているという。

彼らの実験では、関節包を切除しており、関節に入れた染色液が押し出されたところを接触面としている。彼らはいかなる荷重に対しても常に、接触部分は寛骨臼軟骨の前、後面であり、大腿骨頭の接触部分もこれに一致している。軽い荷重では寛骨臼の dome が非接触部分であるが、重い荷重では dome を含めて寛骨臼軟骨のほぼ全域が接触すると述べている。そしていかなる位置においても、いかなる荷重においても常に非接触部分となるのは大腿骨頭の、寛骨臼窩(fossa acetabuli)に一致する部分であると述べている。

著者の実験では、降伏点を越えた荷重でも寛骨臼軟骨と大腿骨頭軟骨は非接触状態であった。荷重時、関節の適合性が増し、間隙が均一になった。関節内に注入された Indian ink が、荷重時、硝子軟骨が相対する面から消失しており、その部分が従来、dyeing technique や casting method でえられた関節の接触面と一致していた。

前述のように著者の実験では荷重面積を計算することは不可能であったが、厚さ1mm間隔で撮影された標本の削り面の写真を立体的に復元してみると、若年例も老人例も110kg以上の荷重時には、寛骨臼の硝子軟骨と大腿骨頭軟骨との間の Indian ink はほぼ全域にわたり押し出されているのに反し、寛骨臼窩の部分には Indian ink の貯留が認められている。この所見から、Goodfellow と Bullough の言う若年者における寛骨臼の三角形の非接触部分は、明らかでなかったが、Greenwald らのいう帯状の非接触部は寛骨臼窩に相対する大腿骨頭表面であり、寛骨臼月状面の硝子軟骨と大腿骨頭軟骨はいわゆる接触面となるといえる。このように著者の実験では、軟骨同志の接触面はなかったが、軟骨表面に保持された液体を介して荷重伝達が行われていると思われる。

D. 関節液の流動に関する関節構成体の機能

1. 関節包の役割

股関節の関節包は屈曲外旋時に弛緩し、伸展内旋時に緊張する。歩行の荷重相においては股関節が伸展内旋方向にその肢位を変換していくが、このときに一致して関節包は緊張する。荷重がかかると、関節表面間が接近し、その間にあった関節液は押し出されて行くわけであるが、関節包内の内圧が高いほど関節表面間の圧を高くすることが可能である。そして最大荷重状態においても軟骨表面同志間に真の接触がなく、流体で分離されていけば、潤滑、摩耗の観点からは理想的であろう。事実、著者の実験によって、110kg以上の

荷重を行っても軟骨表面間に 0.1 mm 以上という液体層が温存されていることが証明されたわけであるが、関節包の緊張がその役割の一部を担っていると考えた。

2. 寛骨臼窩の役割

寛骨臼窩は直接接合面でないが、常に Indian ink が貯留されていることから、荷重によって荷重面から押し出された関節液をためておき、非荷重運動時にはこの関節液を再び関節表面間に流動させるという重要な役目があると思われる。

3. 関節唇の機能

関節唇の形態学的研究は古くから先天性股関節脱臼、経年性変化などとの関連において行われているが、その機能についてはよく知られていない。著者の実験では、荷重時、関節唇と大腿骨頭軟骨間の裂隙が非常に狭く、ほとんど接触していた。このような事実から関節唇が単に大腿骨頭を脱臼させないためばかりでなく、一種の弁の役目をなして、関節液を軟骨面に保持するのに役立っていると思われる。

4. 軟骨およびその表面の役割

弱拡大写真でみられるように、0.1~0.5mm の残存関節裂隙には、注入された Indian ink の大部分の粒子は認められず(図11)、それにおきかわって黒染されていない細い帯状の部分が存在している。さらに詳細にみると、軟骨表面に接して Indian ink の粒子が認められないやや黒みがかったうすい層が認められた。

軟骨は機能的に多孔性なので荷重と除荷に際し、軟骨組織内の水分は、関節腔に出入する。荷重に際して軟骨から関節腔内にしみ出した液体が関節の潤滑に役立っているという McCutchen¹⁴⁾¹⁵⁾ の weeping lubrication theory は有名である。著者が観察した残存裂隙の黒染されていない細い帯状のものは、Indian ink の粒子を含まない液体から成ることから軟骨組織内からしみ出した液体と考えるのが妥当であろう。

一方、軟骨表面には定型構造をとらない hyaluronate protein complex¹⁶⁾¹⁷⁾ がカバーしていることが知られている。MacConaill,¹⁸⁾ は位相差顕微鏡にて軟骨の最表層に薄く光る線を Lamina splendens とし、この層にはコラーゲンはなく、純粋な hyaline から成ると述べているが、Weiss ら¹⁹⁾ は、電顕学的にはこの層は厚さ約 3 μ で、細い線維とフィラメントから成ると述べている。

著者は反射型微分干渉顕微鏡による観察で、新鮮

時には軟骨表面に凹凸がほとんど認められず、輪郭不明瞭な膜状物が表面を被っており、それが乾燥するにしたがって、従来走査電顕像にみられた表面の凹凸が認められるようになることを述べた。また軟骨表層に垂直な切片の透過型微分干渉顕微鏡による観察では、不定形膜状物が軟骨表面を被っていることを証明できた。すなわち従来の形態学的観察法では、脱水標本を主体としてきたために、あまり注目されなかったものであるが、水分を含んだ状態では無視できない軟骨表面の特性構造があることが判明した。恐らくこれは諸家が報告している hyaluronate protein complex であろう。hyaluron 酸はきわめて親水性であるとされている。著者が観察した、軟骨表面のやや黒みがかったうすい層は、hyaluronate protein complex の非脱水標本における 1 つの表現形であろう。武井²⁰⁾²¹⁾ の実験結果を検討して寺山¹¹⁾ は、静圧荷重時に残された膝関節の関節裂隙は、上下の軟骨表面に存在する不定構造物と、weeping の機序によってしみ出した液体によって構成されるサンドウィッチ構造のもので占められ、それが膝関節の荷重伝達や潤滑に重要な役割を果すのであろうと述べた。この実験は股関節においても、膝関節と同様に荷重時の関節裂隙が、より明瞭に証明され、軟骨表面の特殊構造および軟骨よりしみ出した Indian ink を含まない液体によって、関節の潤滑機能が保たれているといえる。

5. 股関節全体の機能

関節包、関節唇、寛骨臼窩や関節軟骨らの関節構成体を総合してみると、ヒト股関節は機械構造上すぐれた軸受けである。さらに生体股関節では筋肉の働きがあり、絶えず動的荷重負荷がかかっており、そのメカニズムは複雑である。著者の静的荷重凍結実験においては、関節軟骨同志が接触しておらず、関節はよいわば floating の状態であった。このような理由でヒト股関節は常に荷重下での運動を強いられているにもかかわらず、摩擦、摩耗等による障害が少ないと考えられる。一旦、軟骨表面に液体が保持できなくなり、軟骨同志接触するようになると、軟骨の摩耗が簡単に起こり、変形性関節症になるとと思われる。

V 結 語

未固定の35例のヒト股関節を使用し、静荷重をかけ、冷凍庫内で凍結固定し、股関節の前頭面あるいは矢状面を削り出すことにより、静荷重における股関節

の軟骨の変形と関節面の性状を調べた。

A. 非荷重標本では大腿骨頭関節面と寛骨臼関節面との間に最大 3 mm 程度の三日月状の関節裂隙が認められ、両関節面は完全適合状態ではなかった。しかし 60kg 以上の荷重凍結標本では、大腿骨頭関節面と寛骨臼関節面はほとんど完全な適合状態となった。

B. 正常股関節では 110kg 以上の荷重をかけても、大腿骨頭軟骨と寛骨臼軟骨との間に接触は認められず、肉眼でははっきりと裂隙が見られた。関節軟骨面間に残存した裂隙の幅は年齢による差が認められた。

C. 荷重による軟骨の圧縮変形は、大腿骨頭側、寛骨臼側とも、圧縮応力がより大きく働いたと考えられる部位に、より顕著にあらわれた。また、若年例の軟骨の圧縮変形は老人例のそれに比べて顕著であった。

D. 硝子軟骨が完全消失状態であった変形性股関節症の標本では、圧縮荷重により関節表面間には完全な接触状態となった。

E. 弱拡大写真では、関節裂隙はサンドウィッチ構造になっており、そこには Indian ink の粒子は認められずそれにかわる液体で裂隙を作っていた。

F. 微分干渉顕微鏡にて無処置の新鮮軟骨を観察すると、軟骨表面は不定型な膜状物に被れていた。

G. 一方、荷重時関節唇と大腿骨頭軟骨との間の裂隙は非常に狭く、肉眼的接触状態となっていた。

以上の知見から、正常股関節では関節液が荷重によって荷重面から押し出されても、関節軟骨から滲出したと考えられる水分が関節面間に残存し、大腿骨頭軟骨と寛骨臼軟骨が互いに接触しないようになっていることが推論された。なお、関節唇と大腿骨頭軟骨間の裂隙が狭く、肉眼的接触状態を示した事実には、関節唇が一種の弁の役目をなして、関節液を関節裂隙内に保持するのに役立っていることが考えられた。

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寺山和雄助教授、武井経憲助手に深謝し、御協力いただいた第 1 病理学教室の諸氏に感謝の意を表します。また、御助言をいただいた順応生理学教室上田五雨教授、第 2 解剖学教室志水義房教授に感謝致します。

本論文の要旨は、第 51 回 (1978 年 5 月) 日本整形外科学会総会シンポジウムにおいて、寺山助教授が発表し、第 11 回 (1979 年 7 月) 日本結合織学会総会において著者が発表した。

文 献

- 1) Walmsley, T. : Articular mechanics of the diarthroses. *J. Bone Jt Surg.*, 10 : 40-45, 1928
- 2) Hammond, B. T. and Charnley, J. : The sphericity of the femoral head. *Med. Biol. Eng.*, 5 : 445-453, 1967
- 3) Bullough, P., Goodfellow, J., Greenwald, A. S. and O'Connor, J. J. : Incongruent surfaces in the human hip joint. *Nature*, 217 : 1290, 1968
- 4) Walker, P. S. : In "Human joints and their artificial replacement". pp. 173-176, Charles C Thomas, Springfield, 1977
- 5) Bullough, P., Goodfellow, J. and O'Connor, J. : The relationship between degenerative changes and load-bearing in the human hip. *J. Bone Jt Surg.*, 55-B : 746-758, 1973
- 6) Greenwald, A. S. and O'Connor, J. J. : The transmission of load through the human hip joint. *J. Biomech.*, 4 : 507-528, 1971
- 7) Greenwald, A. S. and Haynes, D. W. : Weight-bearing areas in the hip joint. *J. Bone Jt Surg.*, 54-B : 157-163, 1972
- 8) Greenwald, A. S. : Joint congruence. A dynamic concept. In "The Hip" Harris, W. H. (ed.), pp. 3-21, C. V. Mosby, Saint Louis, 1974
- 9) 武井経憲, 寺山和雄, 大内悦雄, 柳沢源内 : 荷重時における膝関節面の性状. *整形外科基礎科学*, 5 : 211-215, 1978
- 10) Takei, T. : Deformation of the articular cartilage and joint space of the human knee joint under static load. *J. Jap. Orthop. Ass.*, 53 : 577-593, 1979
- 11) 寺山和雄, 武井経憲, 大内悦雄, 赤岡啓二 : 関節の潤滑に関する研究. *日整会誌*, 52 : 1143-1146, 1978
- 12) Simon, W. H., Friedenberg, S. and Richardson, S. : Joint congruence and thickness of articular cartilage in dogs. *J. Bone Jt Surg.*, 55-A : 1614-1620, 1973
- 13) Goodfellow, J. W. and Bullough, P. G. :

- Studies on age changes in the hip joint. *J. Bone Jt Surg*, 50-B : 222, 1968
- 14) McCutchen, C. W. : The frictional properties of animal joints. *Wear*, 5 : 1-17, 1962
- 15) McCutchen, C. W. : Cartilage lubrication. In "Human joints in health and disease", Simon, W. H. (ed.), pp. 81-87, Univ. of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1978
- 16) 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 : 1813-1818, 1966
- 17) Walker, P. S., Unsworth, A., Dowson, D., Sikorski, J. and Wright, V. : Mode of aggregation of hyaluronic acid protein complex on the surface of articular cartilage. *Ann. Rheum. Dis.*, 29 : 591-602, 1970
- 18) MacConaill, M. A. : The movement of bones and joints : 4. The mechanical structure of articulating cartilage. *J. Bone Jt Surg.*, 33-B : 251-257, 1951
- 19) Weiss, C., Rosenberg, L. and Helfet, A. J. : An ultrastructural study of normal young adult human articular cartilage. *J. Bone Jt Surg.*, 50-A : 663-674, 1968

(54. 8. 7 受稿)