— 原 著 —

正常胫骨内顆部関節面下における骨梁の定量解析

川村 晴也

日本医科大学第2内科学教室 (主任: 赫 彰郎教授)

日本医科大学理学診療科 (指導: 吉野楓一助教授)

A quantitative analysis of the bony trabeculae of the human medial tibial condyle

Seiya Kawamura

The Second Department of Internal Medicine, Nippon Medical School

The author has performed a quantitative analysis of the amount and distribution pattern of bony trabeculae so as to elucidate the dynamic motional character of the medial tibial condyle in the normal knee joint.

The undecalcified bony tissue of the tibial bone beneath the condyle joint was embedded in what one wonders. A contact microradiogram of the specimen was made and a computer-assisted image analysis was performed.

The results disclosed that the highest bone density and the maximum vertical trabeculae were visualized in the anterior region of the mid-medial condyle.

The bone density and amount of the bony trabeculae became lower in these areas: the mid-medial condyle, the denuded cartilage and the region covered by the medial meniscus.

A similar trend was also noted in the compressive strength test. Based on these observations, the appropriate functional adaptation to the load-bearing was substantiated in the bony structure of the tibial medial condyle, beneath the cartilage of any variation of bone density, the including trabeculae pattern as well as the compressive strength.

Key words: quantitative analysis, trabecular pattern, medial tibial condyle

緒 言

Wolff¹⁾により提唱された骨構築の機能的適応の法則は Koch²⁾や Pauwels³⁾によって追試され、その正当さが証明されている。軟骨下骨構築もこの法則に従うとするならば、その骨梁構造の定量的解析を行うことによって力学的分析が可能となり、また非常に意義のあることである。

骨梁の定量的解析の研究は、Frost⁴⁾によって非脱灰染色法が紹介されて以来、代謝性骨疾患について

Meunier⁵⁾, Villanueva⁶⁾, 高橋⁷⁾らによってなされている。

なお、骨梁構築を生体力学に応用した研究は、宮永⁸⁾により変形性関節症、関節リウマチの大腿骨頭について行われているにすぎない。

今回、著者は正常膝関節胫骨内側の骨梁構築と骨強度の相関を知る目的で、関節面下の骨組織を用いて contact microradiogram を作製し、コンピュータ画像解析を行い、同時に同部の骨強度を測定した。

実験材料および方法

本実験に用いた試料は12例の正常膝関節である。なおこれら試料は切断した下肢ならびに剖検時に得られたもので、肉眼的に軟骨面に異常の認められないもの

Correspondence to Seiya Kawamura, Department of Joint Diseases and Rehabilitation, Nippon Medical School First Hospital, 3-5-5, Iidabashi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102 Japan

Table 1 Age, sex and site of procured knee joint

No.	Age	Sex	Site
1	24	♂	lt
2	26	♂	lt
3	29	♂	rt
4	33	♂	lt
5	34	♂	lt
6	36	♀	lt
7	37	♂	lt
8	38	♂	lt
9	38	♂	lt
10	41	♂	lt
11	41	♂	rt
12	44	♂	rt

Fig. 1 Position on the medial tibial condyle from which bone block were taken

を用いた。年齢は24～44歳（平均35.1歳）、男女比11：1、9例が左膝、3例が右膝であった。年齢順にNo. 1～12とした（Table 1）。

これらの胫骨内顆部より軟部組織、半月板を除去して約3cmの厚さの骨組織を採取し、これを70%エタノールに固定後、矢状面で内側よりA、B、Cのブロックに三等分割した（Fig. 1）。

これらのブロックをエタノール系による脱水、脱脂後、アセトン置換法でマルトー硬組織樹脂に包埋した。

次に、これら各ブロックの中心から、正確に厚さ60 μm の薄切切片を作った。この切片に小泉製ソフトテックス超軟線装置を使って contact microradiogram を作製した（Photo 1）。なお、フィルムはフジソフトテックスフィルム FG、撮影条件は4 kV、10 mA、照射時

Photo 1 Contact microradiogram from specimen (Specimen No. 9, B block. see Table 2)

Fig. 2 Construction of computa quantitative analysis

Photo 2 Computa quantitative analysis was performed (Specimen No. 3, C block. see Table 2)

間5秒、距離25cmとした。

この contact microradiogram を柏木製作所製コンピュータ画像処理装置（NEXUS 5000 シリーズ）を用い解析した。この画像処理装置は物体をテレビカメラに撮り、その画像の濃淡、距離などをコンピュータに転写、解析していくものである。この原理を応用し、contact microradiogram の濃淡をコンピュータに読み取らせるプログラムを組んだ（Fig. 2）。

プロット点の数を骨梁量とし、軟骨下骨を関節面に沿って5mm平方の正方形マスで前方から後方に区切っていき、その中の各プロット数を求めた。さらにそのマスの総プロット数から骨梁密度を求めた（Photo 2）。

次に軟骨下骨の部位別骨梁の分布状態を知る目的で、その走行が縦方向（荷重方向）主体であることに注目し、軟骨下2mm、つまり正方形マス上縁から2mm下の単位線分にヒットするプロット数を求め、こ

Fig. 3 Distribution of vertical trabeculae

Fig. 4 Position of the medial tibial condyle from which computa quantitative analysis were performed

れを縦方向骨梁分布量とした (Fig. 3).

なお、テレビカメラのコントラスト、照度、距離などの撮影条件はすべて同一とした。

試料は個人差、性差によって大きさに 3 mm 程度の違いがあるものの、A ブロックでは 5 コ、B・C ブロックではそれぞれ 7 コずつの正方形マスで区切ることができた。測定した場所を分かりやすくするため、A ブロックでは前方からマスをそれぞれ b, c, d, e, f とし、B・C ブロックでは同様に a, b, c, d, e, f, g とした (Fig. 4)。

さらにこれに並行して、骨密度と骨強度の相関関係を確認する目的で、No. 6~12 の試料から各マスに相当する部位から直径 3 mm、高さ 3 mm の円柱形の標本を作り、インストロンタイプの試験機 TOM 500 を用いて、クロスヘッドスピード 1 mm/min で静的圧縮試験を行い、各部位の圧縮強度を求めた。

結 果

コンピュータ画像解析により得られた骨梁密度、縦方向骨梁分布量は Table 2 のごとくである。骨梁密度は個々の試料によって異なるが、おのおの部位別の

Fig. 5 Distribution of the bone density of the medial tibial condyle

Fig. 6 Schematic views of the bone density distribution patterns on the medial tibial condyle

平均値比較は脛骨内顆部関節面下の軟骨下骨の骨密度分布を示している。そこで部位別の骨梁密度平均値を Fig. 5 のようにグラフに表してみた。このグラフから前後方向での骨梁密度の分布をみると、最内側の A 列では前後で骨梁密度にあまり差はなかった。中央の B 列では中央より幾分前方の C 部分に 55.0% の最大骨梁密度を示し、これより前後になるに従い低下していた。最外側の C 列では、中央部の d 部分が 50.3% の最大骨梁密度を示し、これより前後になるに従い低下した。次に内外側方向での骨梁密度は B, C, A ブロックの順で低下した。すなわち、脛骨内顆部関節面下の最大骨梁密度を示した部分は、中央より幾分前方 (B ブロック, c 部分) にあった。

以上の骨梁密度分布をさらに分かりやすくするため、実際の関節面下の骨梁密度分布模式図を示す (Fig. 6)。本図から、骨梁密度が 34% 以下の部位をみると、

Table 2 The bone density and quantity of vertical trabeculae

No.	Position of specimen																		
	A					B							C						
	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g
1	27.3* (8)**	34.5 (11)	21.0 (7)	20.5 (9)	19.0 (8)	41.0 (16)	56.3 (19)	50.5 (22)	51.0 (20)	47.0 (18)	36.3 (7)	22.0 (7)	24.8 (9)	32.8 (13)	48.0 (19)	47.0 (17)	27.0 (10)	25.3 (9)	23.8 (12)
2	41.0 (17)	38.2 (11)	21.0 (9)	29.2 (10)	20.0 (8)	46.8 (19)	51.8 (22)	58.0 (22)	51.0 (24)	47.2 (18)	40.3 (14)	28.2 (9)	30.5 (11)	39.4 (14)	44.0 (18)	51.4 (21)	30.5 (13)	28.4 (9)	20.5 (4)
3	29.4 (9)	30.5 (11)	22.4 (7)	18.2 (4)	9.1 (3)	44.1 (18)	52.0 (24)	53.2 (24)	50.1 (22)	42.3 (17)	44.2 (17)	19.0 (7)	11.4 (4)	25.0 (9)	46.3 (14)	49.2 (19)	38.2 (15)	27.5 (9)	23.4 (8)
4	27.5 (12)	26.0 (12)	23.5 (11)	25.7 (11)	14.3 (8)	33.3 (11)	51.3 (23)	48.5 (24)	46.8 (18)	48.0 (19)	45.3 (20)	26.0 (11)	24.3 (9)	32.5 (13)	41.3 (18)	40.0 (14)	33.8 (11)	26.8 (9)	24.5 (9)
5	32.5 (14)	32.7 (13)	33.8 (13)	14.0 (8)	21.3 (9)	51.3 (22)	55.5 (25)	57.8 (25)	45.8 (18)	40.2 (16)	38.3 (13)	30.5 (11)	36.3 (15)	33.5 (13)	54.1 (19)	54.8 (23)	30.2 (12)	24.5 (9)	22.5 (7)
6	21.3 (8)	36.2 (14)	37.3 (14)	35.0 (13)	20.1 (9)	43.8 (15)	55.8 (23)	55.5 (25)	54.5 (23)	50.5 (24)	54.5 (21)	50.8 (23)	25.5 (11)	47.1 (19)	49.5 (18)	52.1 (19)	47.4 (20)	43.5 (15)	36.3 (12)
7	36.5 (14)	36.0 (15)	27.5 (11)	28.5 (11)	15.7 (7)	46.2 (18)	52.3 (23)	56.8 (25)	51.5 (22)	48.5 (17)	49.0 (17)	33.0 (9)	21.0 (7)	51.5 (23)	47.5 (18)	49.8 (18)	48.2 (18)	28.5 (9)	22.0 (7)
8	33.5 (15)	44.5 (17)	43.0 (14)	37.5 (13)	25.8 (8)	49.1 (20)	50.5 (20)	53.3 (22)	52.8 (23)	52.0 (22)	31.3 (14)	26.3 (11)	34.8 (15)	48.5 (19)	48.5 (21)	52.0 (24)	47.5 (18)	47.5 (16)	42.5 (16)
9	37.0 (14)	32.3 (12)	45.8 (18)	31.1 (13)	28.2 (10)	46.0 (18)	58.4 (25)	60.7 (26)	55.0 (21)	47.0 (18)	44.5 (18)	30.2 (13)	41.2 (18)	36.5 (13)	59.4 (25)	52.2 (21)	35.8 (14)	27.4 (9)	29.8 (10)
10	35.9 (15)	38.4 (14)	39.5 (17)	24.1 (9)	25.3 (11)	41.7 (18)	53.4 (23)	52.2 (21)	49.4 (19)	49.6 (21)	30.5 (11)	29.8 (9)	23.5 (9)	29.4 (11)	49.7 (19)	50.5 (21)	51.2 (22)	40.9 (17)	21.8 (9)
11	26.9 (11)	38.2 (15)	40.5 (15)	28.1 (13)	29.0 (11)	46.5 (18)	48.3 (18)	54.5 (22)	49.2 (20)	42.1 (18)	35.4 (14)	20.7 (9)	25.4 (11)	48.3 (18)	47.9 (19)	50.3 (25)	37.1 (15)	20.4 (7)	4.5 (8)
12	29.4 (11)	44.8 (18)	43.2 (18)	36.5 (14)	24.7 (8)	52.4 (23)	55.1 (23)	59.5 (23)	62.5 (25)	58.1 (21)	40.5 (16)	33.8 (13)	27.4 (11)	48.8 (18)	43.8 (18)	54.5 (23)	39.5 (14)	40.2 (16)	28.1 (9)
Mean	31.5 (12.3)	36.0 (13.6)	33.2 (12.8)	27.4 (9.8)	21.0 (8.3)	45.2 (18.0)	53.4 (22.3)	55.0 (23.4)	51.6 (21.3)	47.7 (19.1)	45.8 (16.8)	29.2 (10.0)	27.2 (10.8)	39.4 (15.3)	48.3 (18.8)	50.3 (20.2)	38.9 (15.2)	31.9 (11.2)	26.4 (9.2)
S.D.	5.5 (/)	5.4 (/)	9.6 (/)	7.3 (/)	6.0 (/)	5.1 (/)	2.9 (/)	3.7 (/)	4.4 (/)	4.8 (/)	7.1 (/)	8.3 (/)	7.8 (/)	9.0 (/)	4.8 (/)	4.9 (/)	8.0 (/)	9.0 (/)	6.8 (/)

*bone density (%), **quantity of vertical trabeculae

Fig. 7 Relationship of vertical trabeculae to bone density

Fig. 8 Relationship of compressive strength to bone density

ほぼ半月板で覆われている部位に一致していた。

次に縦方向骨梁分布量は骨梁密度と同様な分布傾向を示し、その相関は前者を x 軸に、後者を y 軸にとると、回帰直線 $y = 2.2x + 5.8$ ($r = 0.89$, $p < 0.001$) で正の相関を示した (Fig. 7)。

並行して行った圧縮強度試験 (Table 3) では、圧縮強度においても骨梁密度とはほぼ同様な分布傾向を示し、前者を z 軸に、後者を y 軸にとると、回帰直線 $y = 1.8z + 8.4$ ($r = 0.88$, $p < 0.001$) で正の相関を示した (Fig. 8)。

Table 3 The compressive strengths of the bone specimens (MPa)

No.	Position of specimen																		
	A					B							C						
	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g
6		18.3	17.2	14.7		20.7	25.2	24.6	24.2	20.5	21.2	19.8		23.4	24.2	25.0	22.4	19.0	10.3
7	17.4	16.8	14.3	12.7	8.9	23.4	26.7	28.5	24.9	20.5	22.2	13.0	9.4	24.5	25.3	26.4	18.9		
8	17.2	19.4	22.0				25.7	27.9	25.4	23.8			17.2	21.4	24.8	25.2	18.4		14.6
9	16.2	14.8	19.5	15.0	12.0	20.4	29.2	28.5	23.0	9.8	10.5	7.2			28.4	23.0	16.3	8.5	9.0
10		9.4	11.2	4.8	6.3	12.4	18.1	16.4	14.3	16.2	6.7	4.2	4.2	5.3	14.2	16.3	15.2		
11	14.5	18.2	17.8	16.4	13.2		23.5	25.4	22.9	19.8	17.0	11.4	15.2	24.5	23.9	21.9	18.1	9.9	11.4
12	13.2	22.4	21.5	17.2	9.8	21.4	24.3	32.9	24.2	22.1	10.4	8.0		21.5	24.8	24.6	17.4	17.8	12.0
Mean	15.7	17.0	17.6	13.5	10.0	19.7	24.7	26.3	22.7	19.0	14.7	10.6	10.6	20.1	23.7	23.2	18.1	13.8	11.5
S.D.	1.8	4.1	3.9	4.5	2.7	4.2	3.4	5.1	3.8	4.7	6.4		5.5	7.4	4.4	3.4	2.3	5.4	2.1

考 察

非脱灰標本を用いて大腿骨頭骨梁の定量解析を行った宮永ら⁸⁾は、その軟骨下骨構築を荷重部、非荷重部に分け比較している。その結果、骨梁密度は荷重部が非荷重部よりも高く、さらに骨梁数では荷重部、非荷重部とも関節面に垂直な骨梁数が水平骨梁数より多く、ともに荷重部が多いと述べている。また Weaver ら⁹⁾、Galante ら¹⁰⁾の脊椎骨での研究で強度と骨梁密度は相関があることが証明されている。

このことから、著者の研究における骨梁密度の高い部分と縦方向骨梁分布量の多い部分は、骨強度との相関もふまえると、高い荷重がかかっている部分と考えられた。

正常膝関節の力学的強度に関する研究は、Lereim ら¹¹⁾、Behrens ら¹²⁾、柚木¹³⁾、白崎ら¹⁴⁾、藤森¹⁵⁾らが報告している。Lereim はブリネル硬さ試験で内・外顆骨の比較をしている。Behrens は圧縮試験により膝関節各屈曲角度での接触部位の骨梁骨を比較し、各部位と荷重との関係を示している。柚木は骨軸方向の圧迫穿孔力に対する各部位の抵抗力を連続グラフに記録し、内部骨構築との関連性を示している。白崎は脛骨上端関節面の圧力分布、各部位における骨梁骨の粘弾性と圧縮強度を5カ所で測定し、内部構造との関連性を示している。藤森は脛骨内顆部全域にわたる力学的強度を測定し、その最も高い部分は関節面中央部前方にあること、そして灰化法で灰化濃度と圧縮強度は強い相関性があることを発表している。

一方、Walker ら¹⁶⁾は膝関節の各屈曲角度(0, 15, 30, 60, 90, 120°)での接触部位を求めた。各屈曲角度

ともその接触部位は著者の実験でのBブロックに位置し、屈曲0°位では中央より幾分前方、45°位では中央で接触することを報告した。Fukubayashi ら¹⁷⁾は屈曲0°位での膝関節の圧力分布を半月板切除前後で求め、脛骨内顆部関節面での最大圧力部位は中央より幾分前方にあることを示した。著者の実験での最高骨梁密度を呈した部位は、Walker らの示した屈曲0°位での接触部位、そしてFukubayashi らの示した屈曲0°位での最大圧力部位とはほぼ同一部位であると考えられた。Morrison¹⁸⁾によれば膝関節に作用する最大荷重は階段の昇降時(～60°屈曲)、あるいは椅子からの立ち上がり時(～90°屈曲)に体重の4～5倍となって加わる。しかし、このような動作は通常の歩行(～20°屈曲)時に作用する荷重(体重の3倍)の時間および頻度に比べ、極めて少ないものと考えられる。すなわち、著者の実験結果はそこに加わる荷重の大きさだけでなく、通常の使用に際しての荷重時間や頻度に影響されるものと考えられた。このことから、脛骨内顆部関節面下の骨梁密度は中央より幾分前方が最高値を示し、次いで中央部の順になっているものと考えられた。

次に半月板で覆われた部分が最も低い値を示したのは、Sheedhom¹⁹⁾によれば伸展位で内・外側半月板はそれぞれ荷重の50%, 70%を受け、Fukubayashi らは伸展位での接触面積は半月板切除後に半分以下になることを述べている。すなわち、半月板は大きな荷重を受けるにもかかわらず、その緩衝装置としての機能と広い面積への荷重分散能を有するため、半月板に伝達される応力は減少し、この部分の骨構築は強化されていないものと考えられた。

以上のように、膝関節の脛骨内顆部関節面下全域に

わたる軟骨下骨組織は高い荷重総量（荷重×頻度）がかかる部位で骨梁密度は高くなり，骨梁も荷重方向に密になり，骨強度も高くなり，そして Wolff が述べた骨構築の機能的適応の法則に従っていることがこの研究で明らかになった。

結 論

正常成人膝，計 12 関節を用い，その非脱灰切片の contact microradiogram をコンピュータ画像解析することで，胫骨内顆部関節面下の軟骨下骨の詳細な部分にわたる骨梁密度，縦方向の骨梁分布量を求め，並行して行った圧縮強度試験もふまえて以下の結果を得た。

- 1) 胫骨内顆部関節面下の軟骨下骨の骨梁密度は，最も高い部分が中央より幾分前方で，次いで中央部，前記 2 カ所を除いた軟骨露出部の順で低下し，半月板で覆われていた部分が最も低かった。
- 2) 縦方向の骨梁分布量と骨梁密度には，正の相関を認めた。
- 3) 圧縮強度と骨梁密度にも正の相関を認めた。

稿を終えるにあたり，ご校閲を賜った恩師石田肇教授に深謝致します。

本論文の要旨は，第 57 回日本整形外科学会総会（1984 年 6 月）にて発表した。

文 献

- 1) Wolff, J.K.: Über die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Form vom Knochenwachstum. Virchow's Archiv f. Patholog. Anatomie und Physiologie und f. Klinische Medizin, 50, 389~450, 1870.
- 2) Koch, J.C.: The laws of bone architecture. Am. J. Anat., 21, 177~208, 1917.
- 3) Pauwels, F.: Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates. Springer, Berlin, 1965.
- 4) Frost, H.M.: Preparation of thin undecalcified bone sections by rapid manual method. Stain Technol., 33, 273~277, 1958.
- 5) Meunier, P.J.: Les Ostéoses Décalfifiantes Diffuses de l'

- Adulte. Proceedings of the First Workshop on Bone Morphometry (Jaworski, Z.F.G. ed.), Univ. Ottawa Press, Ottawa, p. 100~105, 1976.
- 6) Villanueva, A.R. and Mehr, L.A.: Modifications of the Goldner and Gomori one-step trichrome stains for plastic-embedded thin sections of bone. Am. J. Med. Technol., 43, 536~538, 1977.
- 7) 高橋栄明: 腸骨骨梁の組織学的動態の解析法, “骨形態計測” p. 9~18, 医歯薬出版, 東京, 1981.
- 8) 宮永豊, 福林徹, 立石哲也, 白崎芳夫: 骨梁構造の定量解析, “骨形態計測”(高橋栄明 編), p. 59~66, 医歯薬出版, 東京, 1981.
- 9) Weaver, J.K. and Chalmers, J.: Cancellous bone; Its strength and changes with aging and an evaluation of some method for measuring its mineral content. J. Bone Joint Surg. [Am.], 48-A, 289~298, 1966.
- 10) Galante, J., Rostoker, W. and Ray, R.D.: Physical properties of trabecular bone. Calcif. Tissue Res., 5, 236~246, 1970.
- 11) Lereim, P., Goldie, I. and Dahlberg, E.: Hardness of the subchondral bone of the tibial condyle in the normal state and osteoarthritis and rheumatoid arthritis. Acta Orthop. Scand., 54, 614~627, 1974.
- 12) Behrens, J.C., Walker, P.S. and Shoji, H.: Variations in strength and structure of cancellous bone at knee. J. Biomech., 7, 201~207, 1974.
- 13) 柚木脩: 膝関節の内部構築と力学的強度に関する研究, 日整外会誌, 52, 537~549, 1978.
- 14) 白崎芳夫, 立石哲也, 福林徹: 膝関節の力学的特性と内部構造, 日本レオロジー学会誌, 9, 83~90, 1981.
- 15) 藤森十郎: 膝関節の胫骨内顆部関節面の力学的強度に関する研究, 日整外会誌, 56, 1687~1692, 1982.
- 16) Walker, P.S. and Hajek, J.V.: The load-bearing area in the knee joint. J. Biomech., 5, 581~589, 1972.
- 17) Fukubayashi, T. and Kurosawa, H.: The contact area and pressure distribution pattern of the knee. Acta Orthop. Scand., 51, 871~879, 1980.
- 18) Morrison, J.B.: The mechanics of the knee joint in relation to normal walking. J. Biomech., 3, 51~61, 1970.
- 19) Sheedhom, B.B., Dowson, D. and Wright, V.: The load-bearing function of the menisci, a preliminary study. “The Knee Joint, Recent Advances in Basic Research and Clinical Aspect”, p. 37~42, American Elsevier Publishing, New York, 1974.

(受付: 1987年 6月22日)