

# 定量的超音波法による脛骨皮質骨の骨量測定：末梢骨定量的CT法との生体および屍体計測での相関

野上 利香

定量的超音波法 (QUS) は被曝を伴わず簡便に超音波の伝播速度 (SOS) から骨量を評価できる方法として知られている。Sound Scan 2000 (Omron Myriad, イスラエル) は他の QUS 装置が海綿骨主体の踵骨を測定部位とするのに対し、脛骨皮質骨を測定部位とするユニークな QUS 装置である。しかし、その測定の正確度については、十分解明されていない。そこで、脛骨皮質骨の骨密度 (BMD) 測定が可能で既に測定の正確度が確立している末梢骨 CT 法 (pQCT) (Densiscan-1000, Scanco Medical AG, スイス) を併せて使用し、Sound Scan 2000による骨量測定の意義を検討した。

屍体計測での検討には解剖用屍体下肢 (N=10) を用いて Sound Scan 2000による脛骨中央部 (5 cm) 長皮質骨の SOS と、pQCT により得られた脛骨遠位骨幹端部 (遠位端から 19~33.5 mm)、遠位骨幹部 (遠位端から 62~70.5 mm) と骨幹中央部について骨量に関するパラメータとの相関を検討した。SOS は、骨幹中央部皮質骨の BMD、体積や厚さと良好な相関を示すことが認められた。

生体計測での検討には健康女性 46 名を用いて Sound Scan 2000による脛骨骨幹中央部皮質骨の SOS と、pQCT により得られた右脛骨遠位骨幹端部と遠位骨幹部について骨量に関するパラメータとの相関を検討した。SOS は、(1) 遠位骨幹端部よりも遠位骨幹部の皮質骨 BMD との相関が良好であること、(2) 皮質骨の骨面積や厚さと良好な相関を示すことが認められた。

今回の検討の結果、脛骨皮質骨の SOS は皮質骨の BMD や厚さを反映することが示された。  
(平成12年10月20日受理)

## Bone Mass Measurement of Cortical Bone of the Tibia with Quantitative Ultrasound: Correlation with Peripheral Quantitative CT in Clinical and Cadaveric Subjects

Rika NOGAMI

Quantitative ultrasound (QUS) is a well-known method with good precision which can be used to evaluate bone mass simply from the speed of sound (SOS) without radiation. The Sound Scan 2000 (Omron Myriad, Israel) is a unique QUS device for which the tibial cortical bone has been adopted as a measurement site. Other QUS devices measure SOS in the calcaneus which is composed mainly of trabecular bone. However, the accuracy of measurement with Sound Scan

2000 has not been clarified sufficiently. Combined measurements with peripheral quantitative computed tomography (pQCT) (Densiscan-1000, Scanco Medical AG, Switzerland), with which bone mineral density (BMD) in the tibial cortical bone can be measured and whose accuracy of measurement has already been established, and the Sound Scan 2000 were made.

For the study with cadaveric subjects, 10 lower legs were used, and correlations between the SOS of cortical bone in the middle diaphysis of the tibia with the Sound Scan 2000, and the parameters of bone mass in the distal metaphysis (19–33.5 mm below the distal end), distal diaphysis (62–70.5 mm below the distal end), and middle diaphysis of the tibia with pQCT were studied. It was shown that the SOS correlated with BMD, volume and thickness in the middle diaphysis of cortical bone.

For the study with clinical subjects, measurements were performed in 46 normal women, and correlations with the SOS of cortical bone in the middle diaphysis of the tibia with the Sound Scan 2000, and the parameters of bone mass in the right distal metaphysis and distal diaphysis of the tibia with pQCT were studied. The SOS showed higher correlation with BMD in the distal diaphysis than in the distal metaphysis, and strong correlation with cortical area or thickness.

Thus, it was shown that the SOS of the cortical bone reflected BMD and the thickness of cortical bone. (Accepted on October 20, 2000) *Kawasaki Igakkaishi* 26(4): 259–266, 2000

**Key Words** ① Quantitative ultrasound (QUS) ② Tibial cortical bone  
③ Speed of sound (SOS) ④ Bone mineral density (BMD)  
⑤ Accuracy of measurement ⑥ Peripheral quantitative CT (pQCT)

## はじめに

骨粗鬆症は骨の強度が低下した病態であり、その主たる合併症である骨折は患者のQOLを著しく低下させ、予防や治療の対策が社会的急務とされている。周知の如く、加齢とともに骨密度 (bone mineral density, BMD) は減少し、骨折の頻度が増加するが、骨折者のBMDと年齢および性で補正した非骨折者のBMDとの間には重なりも多く、比較的高いBMDでの骨折発生もみられる<sup>1), 2)</sup>。これは、BMDのみでは骨粗鬆症患者の骨折リスクの評価が十分でないことを意味し、他の骨評価指標の開発が望まれている。基礎実験の結果からも、骨強度の70～75%はBMDのみで説明できるが、残りの25～30%は骨構造、疲労ダメージ、骨リモデリングの状態などにより規定されている可能性が示されている<sup>3), 4)</sup>。

従来から、超音波は構造や力学的強度を評価

するのに使われている。そこで、超音波を利用した骨量測定法である定量的超音波法 (quantitative ultrasound, QUS) ではBMD、構造、弾性などを総合した情報が得られることが期待されている<sup>5), 6)</sup>。現在、市販されているQUS装置は、測定部位が海綿骨主体である踵骨の骨量指標を測定するものが大部分であるが<sup>7)</sup>、近年、皮質骨が主体である脛骨の骨量指標の測定が可能なQUS装置 (Sound Scan 2000, Omron Myriad, イスラエル) が開発されている<sup>8)</sup>。骨量測定法においては、良好な測定精度と測定の正確度の確立が必須であり、本装置の測定精度に関しては既に著者が基礎的検討から良好であることを報告している<sup>9)</sup>。

そこで本研究では、Sound Scan 2000によるSOS測定の正確度の検討を行った。Sound Scan 2000で得られる骨量指標は、その測定原理からBMDの他に骨形態などの構造要素も反映した総合的指標であることが予想されるため、正確度の評価は、脛骨皮質骨のBMD測定と断



面形体の測定が可能な末梢骨定量的CT (peripheral quantitative CT, pQCT)<sup>10)</sup>による測定結果とを対比することにより行った。詳細な検討は測定上の制限から屍体骨を対象として行い、生体計測を加えることにより臨床使用と同じ測定条件での評価も実施した。Sound Scan 2000により密度と形態を反映した指標が測定できれば、pQCTに比べ被爆や機器管理の面で有利であり、広い利用が期待される。

## 対象と方法

### 屍体計測での検討

対象は解剖用屍体10体(男性3体と女性7体、年齢：55～90歳)の10下肢である。

Sound Scan 2000による脛骨皮質骨の超音波の伝播速度(speed of sound, SOS)の測定は、脛骨長の1/2部(骨幹中央部)にプローブの中心を密着させ一定距離間(5 cm)のSOSを測定した<sup>9)</sup>(Fig. 1)。

pQCT装置にはDensiscan-1000(Scanco Medical AG, スイス)を使用し<sup>10)</sup>、スライス厚1 mm、スライス間隔1.5 mmでスキャンした。

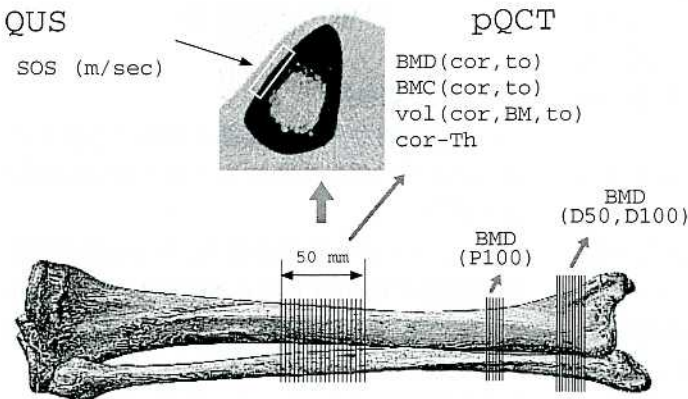


Fig. 1. Measurement sites in the tibia in cadaveric subjects. The middle diaphysis was used for the determination of SOS, BMD, BMC, volume and cor-Th. The distal diaphysis was used for the determination of BMD (P 100). The distal metaphysis was used for the determination of BMD (D 50 and D 100). QUS, quantitative ultrasound; pQCT, peripheral quantitative computed tomography; SOS, speed of sound; BMD, bone mineral density; BMC, bone mineral content; Th, thickness; cor-, cortical; to-, total; BM-, bone marrow; P 100, total BMD in distal metaphysis; D 50, trabecular BMD in distal diaphysis; D 100, total BMD in distal diaphysis.

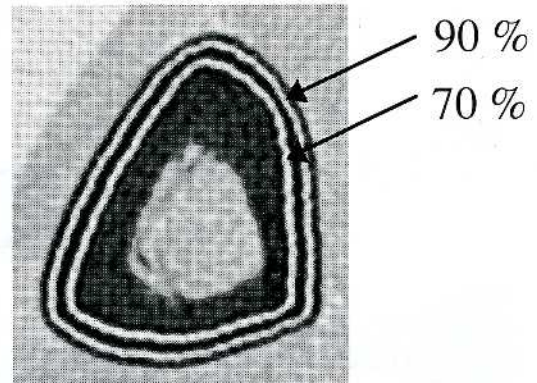


Fig. 2. Area for the measurement of cortical bone mineral density in cadaveric subjects. The region defined by the difference between the 90% and the 70% core area was used.

測定部位は脛骨骨幹中央部(5 cm長の領域)、遠位骨幹端部(脛骨遠位端から19～33.5 mm)と遠位部骨幹部(脛骨遠位端から62～70.5 mm)であり、それぞれ20, 10と6スライスでスキャンした(Fig. 1)。測定には標準(SD)モード(画素径450 μm)を用いた。遠位骨幹端部では、全領域(D 100)および中心部50%海綿骨領域(D 50)、遠位骨幹部では全領域(P 100)のBMDを、臨床使用と同様の方法で測定した。

骨幹中央部では皮質骨(cor)および全体(to)のBMDと骨塩量(bone mineral content, BMC)、皮質骨、骨髓腔(BM)および全体の体積(vol)を測定した。なお、cor-BMDは、CT画像で脛骨全体の70～90%に相当する面積領域のBMDを算出した(Fig. 2)。平均皮質骨厚(cor-Th)は、circular ring model<sup>11)</sup>により

$$\text{cor-Th} = \sqrt{(\text{Ac} + \text{ABM}) / \pi} - \sqrt{\text{ABM} / \pi} \quad (\text{Ac: 皮質骨面積, ABM: 骨髓腔面積})$$

屍体計測におけるSound Scan 2000によるSOSと、pQCTのこれらパラメータとの相関を求め、脛骨皮質骨の骨量測定の正確度などを検討した。

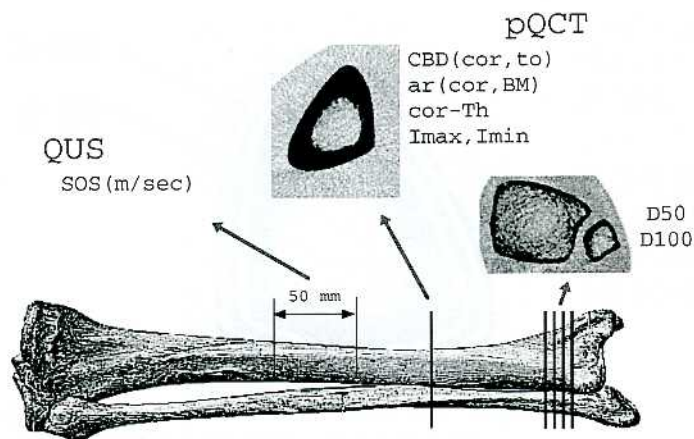


Fig. 3. Measurement sites in the tibia in 46 women. The middle diaphysis was used for the determination of SOS. The diaphysis 10 cm proximal from ankle joint was used for the determination of, BMD, ar, cor-Th, Imax and Imin. The distal metaphysis was used for the determination of BMD (D 50 and D 100). QUS, quantitative ultrasound; pQCT, peripheral quantitative computed tomography; SOS, speed of sound; BMD, bone mineral density; ar, area; Th, thickness; Imax and Imin, maximal and minimum cross-sectional second moment of inertia; cor-, cortical; to-, total; BM-, bone marrow; D 50, trabecular BMD in distal diaphysis; D 100, total BMD in distal diaphysis.

### 生体計測での検討

対象は女性46名（年齢：43～67歳，53.9 ± 5.6歳（平均 ± SD））で，閉経前は15名，閉経後は31名である。なお，被検者には本研究の意義，方法を説明し全員文書で同意を得た。

脛骨皮質骨のSOS測定はSound Scan 2000を用いて行い，測定部位は右脛骨骨幹中央部（脛骨遠位端から15.6 ± 2.3 cm）とし，脛骨5 cm長のSOSを測定した（Fig. 3）。

pQCTによる脛骨BMDの測定は，Densiscan-1000により行った。測定部位は，遠位骨幹端部では右脛骨遠位端から近位19，23.5，28，32.5 mmの4スライスであり，スクリーニング（SC）モード（画素径450～500 μm）で測定した。遠位骨幹端部では4スライスをスキャンし，D 50とD 100を求めた。生体計測ではpQCTのガントリーに下肢が挿入できず，Sound Scan 2000と同じ測定部位領域（骨幹中央部）での測定が行えないため，それに近い足関節から10 cm近位をHRモードで1スライス測定した（Fig. 3）。遠位骨幹端部では4スライスをスキャンし，D 50とD 100を求めた。遠位骨幹端部では皮質骨骨

密度（cor-BMD），皮質骨面積（cor-ar），平均皮質骨厚（cor-Th），全骨密度（to-BMD）および骨髓腔面積（BM-ar）を求めた。さらに，慣性断面二次モーメント（cross-sectional second moment of inertia, CSMI）のパラメータ（ImaxとImin）を算出した<sup>12)</sup>。なお，CSMIは $\Sigma (A_i \cdot d_i^2)$ から求めた（ $A_i$ ：骨断面面積内の個々のボクセル面積， $d_i$ ：重心の中心からボクセルまでの距離）。

生体計測におけるSound Scan 2000によるSOSと，pQCTのこれらのパラメータとの相関を求め，脛骨皮質骨の骨量測定の意義を検討した。

### 統計学的解析

SOSとpQCTにより得られるパラメータの間の単相関係数を求めた。相関係数は両側確率 $p < 0.05$ を有意水準とした。また相関係数の差は，標準正規分布表（両側確率）で検定した。

## 結 果

### 屍体計測での検討

1. 脛骨骨幹中央部皮質骨のSOSとpQCTによる脛骨遠位骨幹端部および遠位骨幹部BMDとの相関

SOS，遠位骨幹端部のD 50，D 100および遠位骨幹部のP100の平均 ± SDをTable 1に示す。SOSとD 50，D 100およびP 100の相関係数はそれぞれ $r = 0.424$ ， $0.330$ と $0.532$ であり，有意な相関を認めなかった（Table 2）。

2. 脛骨骨幹中央部皮質骨のSOSとpQCTによる脛骨骨幹中央部の各種パラメータとの相関  
骨幹中央部の（1）皮質骨および全体のBMD，（2）皮質骨のBMC，（3）皮質骨，骨髓腔および全体の体積，（4）cor-Thの平均 ± SDをTable 1に示す。BMDについては，



**Table 1.** Bone parameters of the tibia measured with QUS and pQCT in cadaveric subjects.

Site of measurement	Parameters	Mean $\pm$ SD
Middle Diaphysis	SOS (m/sec)	3346 $\pm$ 285
Distal Metaphysis	D50 (mg/cm <sup>3</sup> )	76 $\pm$ 82
	D100 (mg/cm <sup>3</sup> )	220 $\pm$ 118
Distal Diaphysis	P100 (mg/cm <sup>3</sup> )	490 $\pm$ 248
Middle Diaphysis	cor-BMD (g/cm <sup>3</sup> )	1.56 $\pm$ 0.39
	to-BMD (g/cm <sup>3</sup> )	0.93 $\pm$ 0.45
	cor-BMC (g)	16.7 $\pm$ 9.29
	cor-vol (mm <sup>3</sup> )	984 $\pm$ 422
	BM-vol (mm <sup>3</sup> )	942 $\pm$ 452
	to-vol (mm <sup>3</sup> )	1931 $\pm$ 308
	cor-Th (mm)	3.45 $\pm$ 1.60

QUS, quantitative ultrasound; pQCT, peripheral quantitative computed tomography; SOS, speed of sound; BMD, bone mineral density; BMC, bone mineral content; P100, total BMD in distal metaphysis; D 50, trabecular BMD in distal diaphysis; D 100, total BMD in distal diaphysis; vol, volume; Th, thickness; cor-, cortical; to-, total; BM-, bone marrow.

**Table 2.** Correlations between SOS and parameters measured with pQCT in cadaveric subjects.

Site of measurement	Parameters	r
Distal Metaphysis	D50(mg/cm <sup>3</sup> )	0.424
	D100(mg/cm <sup>3</sup> )	0.330
Distal Diaphysis	P100(mg/cm <sup>3</sup> )	0.532
Middle Diaphysis	cor-BMD(g/cm <sup>3</sup> )	0.840*
	to-BMD(g/cm <sup>3</sup> )	0.831*
	cor-BMC(g)	0.897*
	cor-vol(mm <sup>3</sup> )	0.900**
	BM-vol(mm <sup>3</sup> )	-0.701*
	to-vol(mm <sup>3</sup> )	0.174
	cor-Th(mm)	0.868*

Abbreviations are same as in Table 1.

\*p<0.01, \*\*p<0.001.

SOS と cor-BMD および to-BMD との間の相関は各々 r = 0.853 と 0.831 であり、SOS は cor-BMD または to-BMD との間に有意 (ともに p < 0.01) な正相関を認めた (Table 2)。BMC については、SOS と cor-BMC の間の相関は r = 0.897 であり、有意 (p < 0.01) な正相関を認めた。体積については、SOS は cor-vol と有意の正相関 (r = 0.900, p < 0.001)、BM-vol と有意な負相関 (r = -0.701, p < 0.05) を示したが、to-vol (r = 0.174) とは有意な相関を認めなかった。cor-Th との相関については、SOS と cor-Th の両者の間には r = 0.868 の有意 (p < 0.01)

な正相関が認められた。

## 生体計測での検討

1. 脛骨骨幹中央部の SOS と pQCT による脛骨遠位骨幹部の BMD との相関

46例の SOS, D 50 および D 100 の平均 $\pm$ SD を Table 3 に示す。SOS と D 50 または D 100 の相関係数はそれぞれ r = 0.482 と 0.492 であり、ともに弱い正相関を認めた (p < 0.001) (Table 4)。

2. 脛骨骨幹中央部の SOS と pQCT による脛骨遠位骨幹部のパラメータとの相関

46例の cor-BMD, to-BMD, cor-ar, BM-ar, cor-Th, Imax および Imin の平均 $\pm$ SD を Table 3 に示す。SOS と cor-BMD または to-BMD の相関は、r = 0.688 と 0.545 であり、ともに有意 (p < 0.001) な正相関を認めた。

SOS と cor-ar または BM-ar との相関については、前者は r = 0.312 の有意 (p < 0.05) な正相関を認めたが、後者は r = -0.248 であり、有意な相関を認めなかった。cor-Th については、SOS と r = 0.372 の有意 (p < 0.05) な正相関

を認めた。Imax と Imin については、SOS との間の相関は r = 0.106 と 0.079 であり、有意な相関を認めなかった。

## 考 察

種々の骨量測定法のうち、QUS は被曝を伴わず、かつ簡便に骨量指標を測定出来るため<sup>13)</sup>、骨粗鬆症の検診に広く使用されている。QUS 装置の大部分は、海綿骨が主体の踵骨が測定部位で、しかも踵骨を透過する SOS を求めるものである<sup>7)</sup>。脛骨などの長管骨では、海綿骨の

**Table 3.** Bone parameters of the tibia measured with QUS and pQCT in clinical subjects.

Site of measurement	Parameters	Mean±SD
Middle Diaphysis	SOS (m/sec)	3450±10.6
Distal Metaphysis	D50 (mg/cm <sup>3</sup> )	198±58.4
	D100 (mg/cm <sup>3</sup> )	490±90.3
Diaphysis	cor-BMD (g/cm <sup>3</sup> )	1.19±0.08
	to-BMD (g/cm <sup>3</sup> )	1.91±0.14
	cor-ar (mm <sup>2</sup> )	211±19.2
	BM-ar (mm <sup>2</sup> )	120±27.3
	cor-Th (mm)	4.12±0.44
	Imax (mm <sup>4</sup> )	1.35±230
	Imin (mm <sup>4</sup> )	270±460

QUS, quantitative ultrasound; pQCT, peripheral quantitative computed tomography; SOS, speed of sound; BMD, bone mineral density; BMC, bone mineral content; D 50, trabecular BMD in distal diaphysis; D 100, total BMD in distal diaphysis; cor-, cortical; to-, total; ar, area; BM-, bone marrow; Th, thickness; Imax and Imin, maximal and minimum cross-sectional second moment of inertia.

**Table 4.** Correlations between SOS and parameters measured with pQCT in clinical subjects.

Site of measurement	Parameters	r
Distal Metaphysis	D50(mg/cm <sup>3</sup> )	0.482**
	D100(mg/cm <sup>3</sup> )	0.492**
Diaphysis	cor-BMD(g/cm <sup>3</sup> )	0.688**
	to-BMD(g/cm <sup>3</sup> )	0.545**
	cor-ar(mm <sup>2</sup> )	0.321*
	BM-ar(mm <sup>2</sup> )	-0.248
	cor-Th(mm)	0.372*
	Imax(mm <sup>4</sup> )	0.106
	Imin(mm <sup>4</sup> )	0.079

Abbreviations are same as in Table 3.

\*p<0.05, \*\*p<0.001.

比率は遠位部が高く、骨幹部に移行するほどその割合が低くなり、中央部では殆んど認めず、専ら皮質骨が占める。Sound Scan 2000は脛骨中央部の前面に沿って長軸方向のSOSを測定することが可能な装置である<sup>8),9)</sup>。脛骨骨幹中央部皮質骨が測定部位に選択された理由は、全身の骨の80%は皮質骨よりなることや、中央部は直線で、表面が平滑なことのほか、軟部組織が殆んどないことによる<sup>14)</sup>。SOSは皮質骨の厚さ、弾性やporosisの程度などにより影響される<sup>15)</sup>。

骨量測定装置では、良好な測定精度と測定の正確度の確立が必須である。測定精度については、基礎的検討から日差変動のCVは0.99%

(RMS)と良好であることが報告されている<sup>9)</sup>。そこで今回 Sound Scan 2000によるSOS測定の正確度を検討した。測定の正確度は測定値と真値の一致性から評価されるが、QUSによる骨量指標測定の直接の評価は通常困難である。そこで、既に測定の正確度が確立しているpQCTによる測定<sup>10)</sup>とSound Scan 2000によるSOS測定との相関性を検討した。pQCTは橈骨や脛骨の末梢骨を測定部位とする骨量測定法であり、DXAとは異なり、海綿骨と皮質骨を分離してBMDを求めることができ、同時に骨断面の幾何学的情報も得られる<sup>10)</sup>。pQCT装置の測定用ガントリーの大きさは、生体では下肢中央部までの挿入が不可能であるので解剖用屍体下肢を用いて脛骨遠位骨幹端部、遠位骨幹部と骨幹中央部をpQCTで測定し、脛骨骨幹中央部のSOSとの相関性から、屍体計測でのQUSによるSOS測定の正確度を検討した。

その結果、SOSは脛骨遠位骨幹端部(D50:r=0.424とD100:r=0.330)や遠位骨幹部(r=0.532)よりも骨幹中央部皮質骨(r=0.853)のBMDとの相関が良好であることが認められた。これは、各測定部位での皮質骨の比率が関係しているものと思われる。また、脛骨骨幹中央部では、SOSは皮質骨のBMC(r=0.897)とも相関が良好であり、皮質骨のBMCを反映することが認められた。このように、Sound Scan 2000によるSOS測定は皮質骨のBMCに関して良好な測定の正確度をもつことが示唆された。さらに、SOSは皮質骨の体積(r=0.900)や厚さ(r=0.868)と良好な相関を示すことが認められた。加齢に伴い皮質骨BMDは低下するが、pQCTでの検討によるとその原因は皮質骨のporosis



よりも面積と厚さが減少することが主因とされている<sup>11)</sup>。SOSがpQCTによる皮質骨の体積や厚さと良好な相関を示したことは、SOSの低下は皮質骨の菲薄化も関与していることを示唆している。

生体計測での検討は46例の女性を用いて行い、SOS測定による皮質骨の骨量測定が可能か否かを検討した。SOSはpQCTによる遠位骨幹端部( $r=0.482$ )よりも遠位骨幹部( $r=0.688$ )のBMDとの相関が良好であった。屍体計測での結果と同様、SOSは皮質骨の割合が多い部位のBMDを反映していることが認められた。また、骨幹中央部でもSOSは皮質骨( $r=0.688$ )のBMDを反映していること、皮質骨の骨面積( $r=0.312$ )や厚さ( $r=0.372$ )とも相関を示すことが認められた。長管骨骨幹部の骨強度は幾何学的形状に依存する部分が多い。曲げに対する強度指標としてCSMIが知られている<sup>12)</sup>。CSMIは骨面積と基準線からの距離の2乗との積の和であり、pQCTによって得ることができる。今回の検討では、SOSとCSMIと

の間には有意な相関が得られなかった。その理由として、SOSは、皮質骨の材質としての指標を主に表しているため、曲げの強度指標としては不適であることが示唆された。

Sound Scan 2000による脛骨中央部皮質骨のSOSは、今回の屍体計測および生体計測での検討の結果、脛骨皮質骨のBMD、厚さ、体積や面積を反映することが明らかになり、皮質骨の骨量検診に使用しうることが示された。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、ご指導とご校閲を賜りました川崎医科大学核医学教室福永仁夫教授に深甚なる謝意を表します。そして直接ご指導いただきました同教室の曾根照喜助教授、研究の遂行にご協力頂いた教室員の方々に深謝いたします。なお、本論文の要旨は第17回日本骨代謝学会(1999年7月29日～31日、大阪)および第18回日本骨代謝学会(2000年7月29日～31日、広島)で発表した。

## 引 用 文 献

- 1) Cummings SR, Kelsey JL, Nevitt MC, O'Dowd KJ: Epidemiology of osteoporosis and osteoporotic fractures. *Epidemiol Rev* 7: 178-208, 1985
- 2) Melton LJ III, Wahner HW, Richelson LS, O'Fallon WC, Riggs BL: Osteoporosis and the risk of hip fracture. *Am J Epidemiol* 124: 254-261, 1986
- 3) Kleerekoper M, Villaneuva AR, Stanciu J, Rao DS, Parfitt AM: The role of three-dimensional trabecular microstructure in the pathogenesis of vertebral compression fractures. *Calcif Tissue Int* 37: 594-597, 1985
- 4) Mosekilde L: Sex differences in age-related loss of vertebral trabecular bone mass and structure-biomechanical consequences. *Bone* 10: 425-432, 1989
- 5) Kaufman JJ, Einhorn TA: Perspective: Ultrasound assessment of bone. *J Bone Miner Res* 8: 517-525, 1993
- 6) Hans D, Schott AM, Meunier PJ: Ultrasonic assessment of bone: a review. *Eur J Med* 2: 157-163, 1993
- 7) Morita R, Yamamoto I, Yuu I, Hamanaka Y, Ohta T, Takada M, Matsushita R, Masuda K: Quantitative ultrasound for the assessment of bone status. *Osteoporosis Int* 7: S 128-S 134, 1997
- 8) Foldes AJ, Rimón A, Keinan DD, Popovtzer MM: Quantitative ultrasound of the tibia: a novel approach for assessment of bone status. *Bone* 17: 363-367, 1995
- 9) 野上利香: 定量的超音波法による脛骨皮質骨の骨量測定の基礎的検討。川崎医会誌 25: 203-210, 1999
- 10) Imai Y, Sone T, Mikawa Y, Watanabe R, Fukunaga M: Precision and accuracy for peripheral quantitative computed tomography evaluated using cadaveric radii. *J Clin Densitometry* 2: 165-172, 1998
- 11) 曾根照喜, 今井義之, 友光達志, 福永仁夫: 加齢に伴う皮質骨の菲薄化と密度低下-高分解能pQCT装置を

用いた検討－. *Osteoporosis Jpn* 5 : 194–196, 1997

- 12) Ferretti JL : Peripheral quantitative computed tomography (pQCT) for evaluating structural and mechanical properties of small bone. *Practical Guide for Mechanical Testing of Bone*, ed by An YH, Draughn RA, USA, CRC Press. 1999, pp 385–406
- 13) Genant HK, Engelke K, Fuerst T, Gler C-C, Grampp S, Harris ST, Jergas M, Lang T, Lu Y, Majumdar S, Marthur A, Takada M : Non-invasive assessment of bone mineral and structure : state of the art. *J Bone Miner Res* 11 : 707–730, 1996
- 14) Hans D, Fuerst T, Güglielmi G, Genant HK : Quantitative ultrasound for assessing bone properties. *Bone Densitometry and Osteoporosis*, ed by HK Genant, Guglielmi, M Jergas, Berlin, Springer. 1998, pp 379–405
- 15) Lee SC, Coan BS, Bouxsein ML : Tibial ultrasound velocity measured in situ predicts the material properties of tibial cortical bone. *Bone* 21 : 119–125, 1997