

# CT 画像を用いて算出した Hip Structural Analysis (HSA) 指標の検討

北山 彰<sup>1</sup>, 友光 達志<sup>1</sup>, 三村 浩朗<sup>2</sup>,  
曾根 照喜<sup>3</sup>, 福永 仁夫<sup>4</sup>, 村中 明<sup>1</sup>

## Study of Indices of Hip Structural Analysis Calculated with CT Image

Akira KITAYAMA<sup>1</sup>, Tatsushi TOMOMITSU<sup>1</sup>, Hiroaki MIMURA<sup>2</sup>,  
Teruki SONE<sup>3</sup>, Masao FUKUNAGA<sup>4</sup> and Akira MURANAKA<sup>1</sup>

キーワード：骨粗鬆症, dual-energy X-ray absorptiometry, hip structural analysis, 脆弱性骨折

### 概 要

骨粗鬆症に伴う脆弱性骨折を起こすか否かは、骨量、骨構造、骨の石灰化、ダメージの蓄積および骨代謝などに依存するとされているが、近年、骨量測定に臨床で広く用いられている DXA 装置に大腿骨近位部の構造力学的解析が可能な Hip Structural Analysis (HSA) のプログラムが組み込まれ、骨強度の評価に用いられている。

そこで我々は、CT 画像から HSA 指標の算出が可能か否か、また、その手法による指標の計算精度について、DXA 装置で得られた指標と比較することによって検討した。

その結果、CT 画像から HSA 指標の算出は可能であったが、その計算精度に若干の問題があり、撮影時の整位および計算位置の解剖学的なズレ等を補正する必要があることがわかった。

### 1. 緒 言

骨粗鬆症に伴う脆弱性骨折を起こすか否かは、主に骨量の多少に依存するが、骨構造、骨の石灰化、ダメージの蓄積および骨代謝などにも依存するとされている<sup>1,2)</sup>。近年、骨量測定に臨床で広く用いられている dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) 装置<sup>3,4)</sup>に、大腿骨近位部の構造力学的解析が可能な Hip Structural Analysis (HSA) のプログラム<sup>5)</sup>が組み込まれ、骨強度の評価に用いられている<sup>6)</sup>。

そこで今回我々は、大腿骨近位部の CT 画像を用いて HSA 指標の算出が可能か否か、また、その手法の

計算精度について、DXA 装置で得られた指標と比較することによって検討した。

### 2. DXA における HSA 指標の算出方法

DXA における HSA 指標の算出は、図 1 上部に示すように、大腿骨頸部 (narrow neck; a)、転子間部 (intertrochanter; b) および大腿骨骨幹部 (femoral shaft; c) の 3 部位でなされる。HSA 指標を算出するためには骨の外径や皮質骨幅の値が不可欠となるが、DXA で得られるのは図 1 下部左に示すプロファイルカーブのみである。そこで、Beck らの HSA 指標の算出法<sup>7)</sup>では、図 1 下部右に示す種々の仮定を行っている。つまり、骨の形状を頸部と骨幹部では円、転子間部では楕円と仮定し、皮質骨と海綿骨の比率を頸部では 60%/40%、転子間部では 70%/30%、骨幹部では皮質骨 100% と仮定している。さらに、骨の平均密度は、骨ミネラルの密度を 3.0g/cm<sup>3</sup> とし、骨に占める骨ミネラルの比率を 35% として、1.05g/cm<sup>3</sup> (3.0 × 0.35) と仮定している。

そして、プロファイルカーブの面積から骨面積 (cross sectional area, CSA) が、これらの仮定から、

(平成25年10月23日受理)

<sup>1</sup>川崎医療短期大学 放射線技術科

<sup>2</sup>川崎医科大学附属病院 中央放射線部

<sup>3</sup>川崎医科大学 放射線医学教室 (核医学)

<sup>4</sup>川崎医科大学

<sup>1</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

<sup>2</sup>Department of Radiological Technology, Kawasaki Medical School Hospital

<sup>3</sup>Department of Nuclear Medicine, Kawasaki Medical School

<sup>4</sup>Kawasaki Medical School

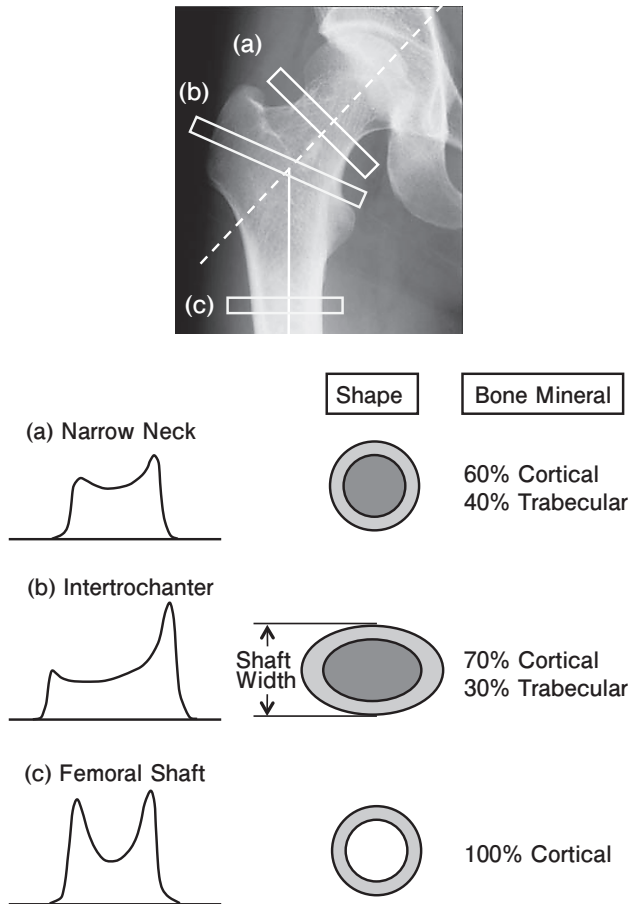


図1 DXAにおけるHSA指標の算出部位(図上部)とそれらの部位でのプロファイルカーブ(図下部左)および骨の形状や皮質骨と海綿骨の比率についての仮定(図下部右)  
 (a) 大腿骨頸部 (b) 転子間部 (c) 大腿骨骨幹部

骨外径に相当する骨膜下幅(subperiosteal width), 骨内径に相当する皮質骨下幅(endcortical width)および皮質骨厚(cortical thickness)が以下によって算出される。

①骨膜下幅

大腿骨頸部, 転子間部, 骨幹部ともに  
 プロファイルデータから bone edge を決定して算出

②皮質骨下幅

大腿骨頸部  

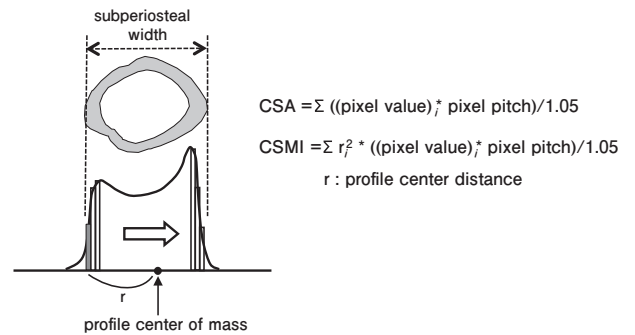
$$\text{皮質骨下幅} = 2 \times \text{SQRT}(((\text{骨膜下幅} / 2)^2 \times \pi - (0.6 \times \text{CSA})) / \pi)$$

転子間部  

$$\text{皮質骨下幅} = \text{骨膜下幅} \times k$$

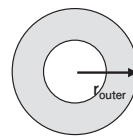
$$k = \text{SQRT}(((\text{転子間部の骨膜下幅} / 2 \times \text{骨幹部の骨膜下幅} / 2) \times \pi - 0.7 \times \text{CSA}) / (\text{転子間部の骨膜下幅} / 2 \times \text{骨幹部の骨膜下幅} / 2) \times \pi)$$

1) Cross Sectional Area (CSA) & Cross Sectional Moment of Inertia (CSMI)



2) Section Modulus (SM)

$$\text{SM} = \text{CSMI} / r_{\text{outer}}$$



$$r_{\text{outer}} = (\text{endcortical width} / 2) + (\text{cortical thickness})$$

$$t = (\text{cortical thickness})$$

3) Buckling Ratio (BR)

$$\text{BR} = r_{\text{outer}} / t$$

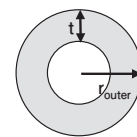


図2 骨面積(CSA), 断面2次モーメント(cross sectional moment of inertia; CSMI), 断面係数(section modulus; SM)および座屈比(buckling ratio; BR)の算出方法

骨幹部

$$\text{皮質骨下幅} = 2 \times \text{SQRT}(((\text{骨膜下幅} / 2)^2 \times \pi - \text{CSA}) / \pi)$$

③皮質骨厚

大腿骨頸部, 転子間部, 骨幹部ともに

$$\text{皮質骨厚} = (\text{骨膜下幅} - \text{皮質骨下幅}) / 2$$

次に, 算出されたそれらのデータを基として, HSA指標である断面2次モーメント(cross sectional moment of inertia, CSMI), 断面係数(section modulus, SM)および座屈比(buckling ratio, BR)が図2に示す計算式によって算出される。ここで, 断面2次モーメントとは構造的な剛性の大きさを表す数値で, 物体の変形しにくさを表す指標として用いられ, 断面係数は断面形状の曲げやねじりのモーメントに対する最大応力を計算するための係数で, 曲げに対する強度を表す指標に用いられ, 座屈比は相対的な皮質骨厚で, 圧縮力を受けたときの折れ曲がりや破壊に対する剛性の指標として用いられる。

3. 対象および方法

3.1 対象と使用機器

対象には, HSA 研究として川崎医科大学 倫理審査

委員会の許可を得て募集したボランティアのうち、19～32歳の19例（男性4例，年齢：23.0±6.0歳，女性15例，年齢：20.4±1.4歳）を用いた。

全対象例に対して，DXA 装置による大腿骨近位部の HSA 指標の取得と，PET/CT 装置による同部位の CT 検査を施行した。CT 画像の取得は，被検者と quantitative computed tomography (QCT) ファントムを対象に，管電圧120kV，ビームピッチ1.35，DFOV 35cm，スライス厚1.25mmの撮影条件で同時に撮影した。そして，得られた CT 画像を基にして，HSA 指標の解析部位である大腿骨頸部 (narrow neck)，転子間部 (intertrochanter) および骨幹部 (femoral shaft) の計3部位の断面像を再構築した。

使用機器として，DXA 装置には Hologic 社製 QDR-Discovery を，CT 検査には GE 社製 PET/CT 装置 Discovery ST Elite をそれぞれ使用した。また，CT 画像を用いた HSA 指標の算出には，アプリケーション・ソフトとして Image J と Microsoft Office Excel を用いた。

### 3.2 CT 画像を用いた HSA 解析

CT 画像を用いた HSA 解析は，まず QCT 法を用いて QCT ファントム中にある骨等価物質 ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) の CT 値 (Hounsfield unit) と密度 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ ) との関係を求め，CT 画像の CT 値を密度値に変換することによって，密度値による断面像を得た。次いで，CT 画像から骨部を抽出するために密度データを2値化し，プロファイルカーブを作成して，前述の HSA 指標の算出法に基づいて骨の断面積 (CSA) を算出した。そして，算出された CSA のデータを基として HSA 指標である断面2次モーメント (CSMI)，断面係数 (SM) および座屈比 (BR) を算出した。

### 3.3 算出された指標の検討

検討として，(1)CT 画像における2値化の閾値の決定と，(2)DXA での HSA 指標を基準として CT 画像による HSA 指標の計算精度の計2項目を行った。

2値化の閾値の決定については，上記対象例から無作為に抽出した3例のデータを用いて，密度値に変換された CT 画像に対して，300，350，400，450，500  $\text{mg}/\text{cm}^3$  の5段階の閾値を定め，それぞれの閾値で算出された骨の断面積 (CSA) について DXA で得られた CSA に対する誤差を求めた。そして，2値化の閾値に使用された密度値を X 軸に，CSA の誤差を Y 軸にとつ

て2次回帰曲線を描き，X 軸との交点を2値化の閾値とした。

CT 画像による HSA 指標の計算精度の検討は，全例を対象として HSA の3指標 (CSMI，SM，BR) について，DXA による値と CT 画像による値の相関性と推定値の標準誤差を算出することによって行った。

## 4. 結 果

図3に被検体と QCT ファントムが同時に撮影された CT 画像 (図上部) と QCT ファントム中にある骨等価物質 ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) の密度と CT 値 (Hounsfield unit) との相関関係 (図下部) を示す。骨等価物質の密度と CT 値との間には非常に高い相関関係が認められたことによって CT 画像の CT 値は密度値に変換された。

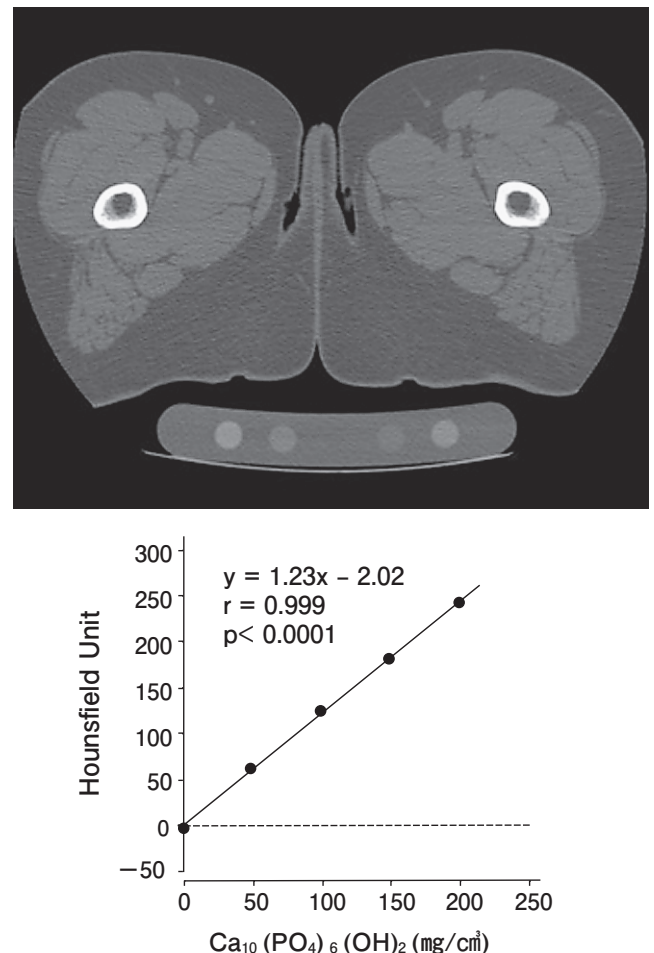


図3 被検体と QCT ファントムが同時撮影された CT 画像 (図上部) と QCT ファントム中にある骨等価物質 ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) の密度と CT 値 (Hounsfield unit) との関係 (図下部) この相関関係によって CT 画像の CT 値が密度値に変換された。

図4に5段階の閾値と、その閾値によって2値化されたCT画像から求めた骨の断面積(CSA)とDXAで得られたCSAに対する誤差の関係を示す。算出された2次回帰曲線とX軸との交点は365.3mg/cm<sup>3</sup>となり、この値を2値化の閾値として採用した。

図5に大腿骨頸部におけるDXAによって求められたHSA指標とCT画像から算出された指標との相関関係を示す。図左(a)が断面2次モーメント(CSMI)、図中(b)が断面係数(SM)、図右(c)が座屈比(BR)である。また、表1に3部位(大腿骨頸部、転子間部、大

腿骨骨幹部)におけるCT画像とDXAによって得られたHSA指標の相関係数と推定値の標準誤差を示す。

### 5. 考 察

CT画像から骨部を抽出するために必要な2値化の閾値については、QCTファントムの骨等価物質を用い、CT画像とDXAから求めた骨の断面積(CSA)を比較することによって有効に決定することが可能であった。

CT画像から算出したHSA指標(断面2次モーメント、断面係数、座屈比)とDXAによって得たHSA指標との間には、相関係数が大腿骨頸部で0.851~0.900、転子間部で0.845~0.871、骨幹部で0.833~0.882のそ

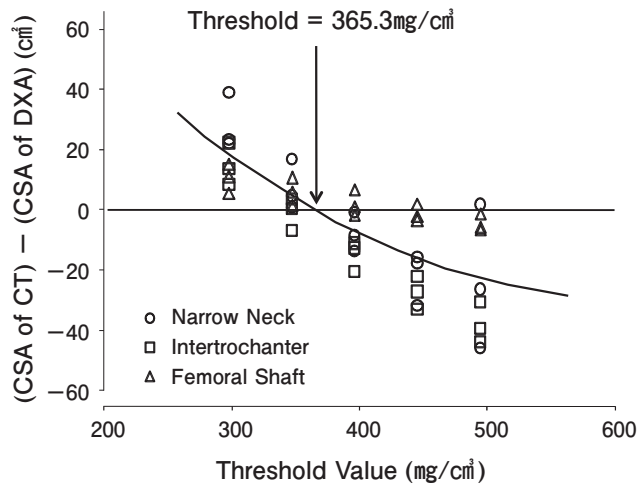


図4 5段階の閾値とその閾値によって2値化されたCT画像から求めた骨の断面積CSAとDXAで得られたCSAに対する誤差の関係  
2次回帰曲線とX軸との交点は365.3mg/cm<sup>3</sup>となり、この値が2値化の閾値として採用された。

表1 CT画像とDXAで得られたHSA指標の相関係数と推定値の標準誤差

		r*	SEE** (%)
Narrow Neck	CSMI	0.900	18.6
	SM	0.890	16.6
	BR	0.851	19.8
Intertrochanter	CSMI	0.845	18.8
	SM	0.871	14.5
	BR	0.851	12.8
Femoral Shaft	CSMI	0.833	14.3
	SM	0.839	14.3
	BR	0.882	13.1

\* : correlation coefficient  
\*\* : standard error of estimate

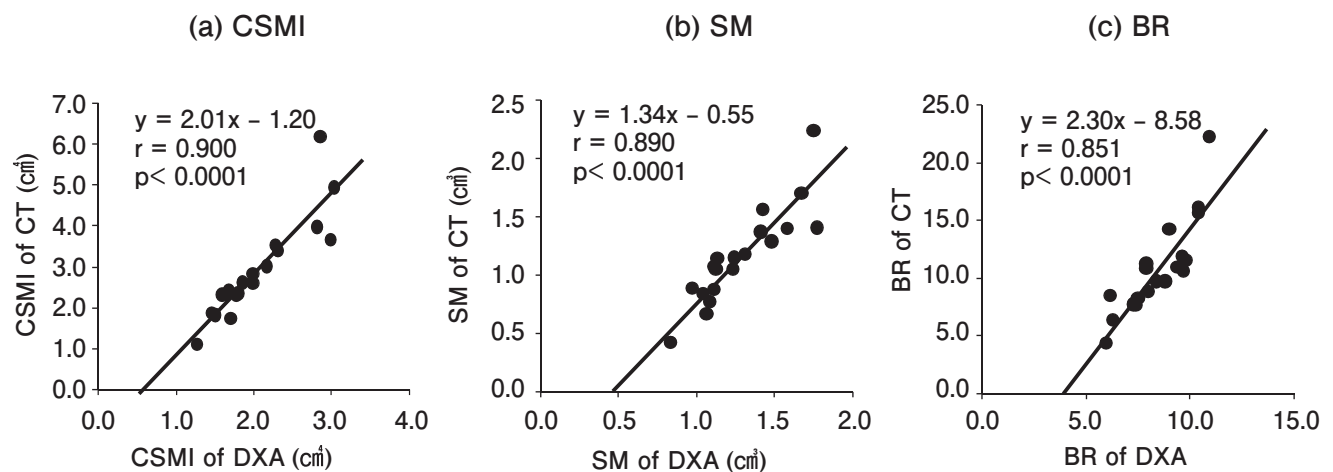


図5 DXAによって求められたHSA指標とCT画像から算出された指標との相関関係(大腿骨頸部)  
(a) 断面2次モーメント (b) 断面係数 (c) 座屈比

れぞれ有意な相関性が得られ、CT画像からHSA指標の算出が可能であることが示された。また、推定値の標準誤差については、大腿骨頸部で16.6~19.8%、転子間部で12.8~18.8%、骨幹部で13.1~14.3%であったが、この誤差の大きさは、CT画像とDXAの撮影時における整位のズレ、計算位置の解剖学的なズレ等が起因していると推察された。

## 6. 結 語

今回の結果から、CT画像からHSA指標を算出することは可能であったが、その計算精度に若干の問題が残った。今後は、撮影時の整位および計算位置の解剖学的なズレ等を補正する検討を行いたいと考える。

## 7. 文 献

- 1) NIH Consensus development panel on osteoporosis prevention, diagnosis, and therapy : Osteoporosis prevention, diagnosis, and therapy. JAMA 285 : 785—795, 2001.
- 2) 福永仁夫 : 骨粗鬆症の診断と鑑別 — 骨密度測定と脊椎画像診断 —, 東京 : 医薬ジャーナル社, pp. 18—23, 2005.
- 3) 小塚隆弘, 稲邑清成, 土井 司, 隅田伊織 : 診療放射線技術 (上巻), 第13版, 東京 : 南江堂, pp. 384—385, 2012.
- 4) 折茂 肇, 須田立雄, 井上哲郎, 森田陸司, 森井浩世, 藤田拓男 : 最新骨粗鬆症, 東京 : ライフサイエンス出版, pp. 328—339, 1999.
- 5) Beck TJ, Morgan RH : Hip Structural Analysis (HSA) Program — BMD and Structural Geometry Methodology — : the 3rd National Health and Nutrition Examination Survey dataset, Baltimore : Johns Hopkins University, School of Medicine, 2002.
- 6) DiVasta AD, Beck TJ, Petit MA, Feldman HA, LeBoff MS, Gordon CM : Bone Cross-Sectional Geometry in Adolescents and Young Women with Anorexia Nervosa : a Hip Structural Analysis Study, Osteoporos Int 18 : 797—804, 2007.
- 7) Beck TJ, Looker AC, Ruff CB, Sievannen H, Wahner HW : Structural trend in the aging femoral neck and proximal shaft : analysis of the Third National Health and Nutrition Examination Survey dual-energy X-ray absorptiometry data, J Bone Miner Res 15 : 1297—1304, 2000.

