

## Dual-energy X-ray Absorptiometry (DXA) 用全身ファントムの評価

友光 達志<sup>1,2</sup>, 三村 浩朗<sup>2</sup>, 石川 哲也<sup>2</sup>  
北山 彰<sup>1</sup>, 板谷 道信<sup>1</sup>, 曾根 照喜<sup>3</sup>  
福永 仁夫<sup>3</sup>

### Evaluation of a Whole Body Phantom for Dual-energy X-ray Absorptiometry

Tatsushi TOMOMITSU<sup>1,2</sup>, Hiroaki MIMURA<sup>2</sup>, Tetsuya ISHIKAWA<sup>2</sup>,  
Akira KITAYAMA<sup>1</sup>, Michinobu ITAYA<sup>1</sup>, Teruki SONE<sup>3</sup>  
and Masao FUKUNAGA<sup>3</sup>

キーワード: 全身ファントム, dual-energy X-ray absorptiometry, 体組成, 体脂肪率, 精度管理

#### Abstract

In a dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) system for axial bone, the measurement of body composition (fat mass, lean mass) is possible as well as bone mineral density in a measurement mode of whole body.

We evaluated whole body phantom developed for use in quality assurance.

In this study, six whole body phantoms were used and measured with DXA system (QDR-2000).

We evaluated measured value provided by a difference of setting position of phantom, a difference of scan mode and a difference of phantom in itself. Furthermore, reproducibility of measured value was studied.

As a result, by evaluation in six phantoms, significant difference was recognized between phantoms in each index. As for the reproducibility assessed by CV, CV value for in-vitro was better than that for in-vivo in body composition indices (fat, lean, % fat).

From these results, we concluded that this whole body phantom was available for internal quality control for the measurement of body composition with DXA.

#### 1. はじめに

脂肪量の計測には体密度法, 体水分法, 皮脂厚法, 生体インピーダンス (bioelectrical impedance analysis, BIA) 法などさまざまな方法があるが, 計測手技の煩雑さや得られる計測精度の問題から, 現在では BIA 法が多用されている<sup>1,2)</sup>.

一方, 骨塩定量を目的として開発された dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) 装置は, 骨密度のみならず体組成量を精度良く計測することが可能である。

(平成18年9月28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>川崎医科大学核医学教室

<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

そして, BIA 法との比較研究などからその有用性が評価され, 脂肪量計測法として臨床に徐々に応用されている<sup>3~6)</sup>.

近年, ヒト成長ホルモン分泌不全症などに対して成長ホルモン療法が行われており, 体脂肪量の減少や除脂肪量の増加などの効果と安全性が認められている<sup>7~9)</sup>. そして, 海外ではこれらの体脂肪量や除脂肪量の評価には DXA 装置が使用されている. 本邦においても体組成計測に DXA 装置が応用され始めている. そして, 計測値の精度管理を目的として全身ファントムが導入された。

全身ファントムの評価は, 欧米では既になされているが<sup>10,11)</sup>, 本邦では全くなされていないのが現状である. そこで, 本論文では, 全身ファントムを体組成計測の精度管理に用いるための評価を行ったので報告する。

## 2. 全身ファントムの概要

全身ファントム (Hologic) は大 (下層), 中 (中層), 小 (上層) の 3 組から構成されており, それぞれが厚さ約 2.4cm の脂肪層の平板と斜めに縁取りされた除脂肪層の平板の 2 枚からなっている. なお, 骨は下層の脂肪層の平板内に埋め込まれている. 合計 6 枚の平板には 1 対の穴が開けられており, そこに円柱状の棒を通すことによって固定される. 外形は下層が横 36.1cm, 縦 76.2cm であり, 中層が横 25.9cm, 縦 66.5cm, 上層が横 18.5cm, 縦 36.6cm である. そして, 合計の高さは 14.4cm であり, 総重量は 28.1kg である (Fig. 1 左). 材質は, 脂肪該当物質には高密度のポリエチレン, 除脂肪該当物質にはポリ塩化ビニール, 骨該当物質にはアルミニウムがそれぞれ用いられている. Fig. 1 右に DXA 装置で計測した全身ファントムの画像を示す. そこでは, 骨塩該当物質が白くはっきりと, ファントムの輪郭が薄い灰色で表示されている.

## 3. 方 法

使用機器として, DXA 装置には QDR-2000 (Hologic) を, 計測対象には全身ファントム 6 体をそれぞれ使用した. QDR-2000 の全身用のスキャンモードには pencil と array の 2 種類があり, 前者は細い X 線線錘と単一検出器の組み合わせで, 後者は扇型の線錘と線状に配列された多検出器の組み合わせで全身のスキャンが行われる. また, スキャンは, pencil では体軸に直角に, array では袈裟懸け状になされる (Fig. 2). なお, データ収集ラインの間隔は pencil では 13mm で, array では 39mm であり, 全身の計測時間は pencil では約 15 分, array では約 5 分である.

検討として, ①検査台上のファントムの設定位置による計測値の差, ②スキャンモードによる計測値の差, ③計測精度, および④6体のファントム間の計測値の差の計 4 項目について検討した.

なお, 基本的な計測条件は, ファントムは同一ファントムを使用して, 設定位置は上方部に, スキャンモードは Array を使用した.

ファントムの設定位置による計測値の差の検討は, 全身ファントムの設定位置を Fig. 3 に示すように上方部 (upper : U), 中央部 (central : C) および下方部 (lower : L) 3 箇所を設置した. そして, 上方と下方部は 5 回, 中央部は 10 回それぞれ計測し, 得られた計測値を比較することによって評価した.

スキャンモードによる計測値の差は, スキャンモードとして array と pencil の 2 つのスキャンモードを使用した. そして, それぞれのスキャンモードについて 20 回ずつ計測し, 得られた計測値を比較することによって評価した.

計測精度は, 全身ファントムを計測対象とした in-vitro と, 口頭による同意を得た健常男性ボランティア (診療放射線技師 : 21~55 歳, 平均 32 歳) 6 例を計測対象とした in-vivo について行った. 計測は, in-vitro は 5 日間に計 50 回, in-vivo については 1 例について 3 日間に計 3 回それぞれ計測した. そして, 計測精度は得られた計測値の変動係数 (coefficient of variation, CV) で評価した. なお, 本検査による被曝線量は, 胸部 X 線検査 (50  $\mu$ Sv (シーベルト)) や胃の X 線検査 (4mSv) に比して約 2  $\mu$ Sv と極めて微量である.

ファントム間の計測値の差は, 6 体のファントムについてそれぞれ 20 回計測し, 得られた計測値を比較することによって評価した.

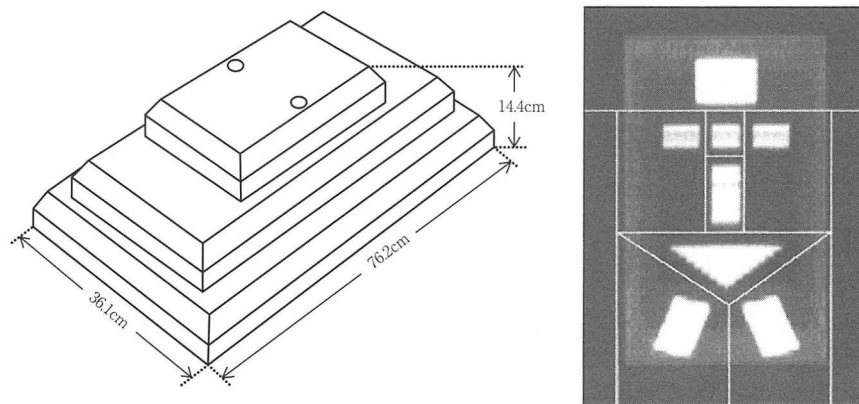


Fig. 1 Hologic whole body phantom  
Left : external view, Right : scanning image

なお、すべての検討において、骨塩量 (bone mineral content, BMC), 骨密度 (bone mineral density, BMD), 脂肪量 (fat), 除脂肪量 (lean), total (BMC+fat+lean) および % fat の 6 つの指標について評価した。

#### 4. 統計解析

統計解析については、検査台上のファントムの設定位置による計測値の差とスキャンモードによる計測値の差の評価には paired t 検定を用いた。また、6 体のファントム間の計測値の差の評価については Sheffe 検定を用いた。そして、解析ソフトウェアには Stat View (Abecus) を使い、有意水準は  $p < 0.05$  とした。

計測精度については、得られた 6 つの計測値の CV 値と、Gluer ら<sup>12)</sup>の報告に基づいて 90% 信頼上限値を算出した。

#### 5. 結果

Table 1 に、ファントムの設定位置による計測値の差の検討結果を示す。lean を除く 5 つの指標は、ファントムを上部に設定した場合が最も高値を示した。計測値の有意差は BMD と total で認められ、BMD では設定位置が上部と中央部の間に (paired t-test,  $p = 0.042$ ), total ではすべての設定位置間において有意

差が認められた  $p = 0.0107 \sim p < 0.0001$ 。しかし、BMC, fat, lean および % fat の 4 つの指標では、ファントムの設定位置による計測値の差は認められなかった。また、計測値の CV は、BMC, BMD および fat については下部が、lean については上部が、total と % fat については中央部と下部がそれぞれ最も優れていた。

スキャンモード間差は、BMC, BMD および fat の 3 指標では pencil と array の間に有意差を認めたのに対して (paired t-test,  $p < 0.0001$ ), lean, total および % fat の 3 指標では有意差を認めなかった (Table 2)。また、計測値の CV は、BMC, BMD および total については pencil の方が、fat, lean および % fat については array の方がそれぞれ優れていた。

Table 3 に in-vitro と in-vivo で検討した計測精度として、CV 値と 90% 信頼上限を示す。In-vitro の計測精度は、すべての指標において CV 値 1.7% 以下の優れた値を示した。それに対して in-vivo は、BMC, BMD, lean および total の 4 指標については CV 値 1.37% 以下の優れた測定精度を示したが、fat と % fat の 2 指標は 4% 台とやや不良であった。

ファントム間の計測値の差は、6 体のファントム間の組合せ計 15 組について計測値を比較した (Sheffe test)。その結果、total が 14 組と最も多くの組合せで有意差を認め、次いで fat と % fat の 13 組、lean の 10 組、BMC の 8 組、BMD の 7 組の順に有意差を認めた (Fig. 4)。

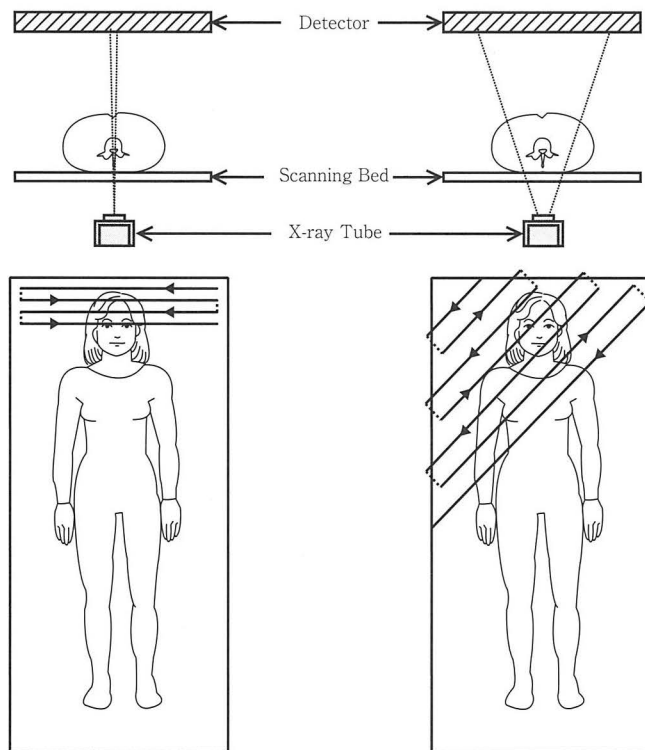


Fig. 2 Schematic diagram of the scanning mode for whole body  
Left : pencil mode, Right : array mode

Table 1 Effect of a setting position of phantom on the examination bed

	Measured values*		
	Upper (n=5)	Center (n=10)	Lower (n=5)
BMC(g)	688.95±7.53 (1.09)	682.84±17.34 (2.53)	685.99±5.43 (0.79)
BMD(g/cm <sup>2</sup> )**	1.123±0.019 (1.68)	1.102±0.013 (1.18)	1.114±0.007 (0.63)
Fat(g)	15682.3±88.8 (0.57)	15603.8±91.0 (0.58)	15531.9±86.2 (0.55)
Lean(g)	11616.1±69.7 (0.60)	11659.2±92.9 (0.80)	11685.8±93.9 (0.80)
Total(g)***	27987.7±37.6 (0.13)	27945.8±13.9 (0.05)	27903.7±15.2 (0.05)
% fat(%)	56.0±0.3 (0.54)	55.8±0.3 (0.54)	55.7±0.3 (0.54)

\* : mean±S. D.

\*\* : upper vs center ;  $p = 0.042$

\*\*\* : upper vs center ;  $p = 0.0107$ , upper vs lower ;  $p < 0.0001$ , center vs lower ;  $p = 0.0106$

( ) : coefficients of variation(%)

Table 2 Comparison of the measured values obtained by pencil-beam and fan-beam in QDR-2000

	Measured values*		p value**
	Pencil(A)	Array(B)	
BMC(g)	648.58±4.25 (0.66)	685.16±12.94 (1.09)	<0.0001
BMD(g/cm <sup>2</sup> )	1.223±0.010 (0.82)	1.110±0.016 (1.45)	<0.0001
Fat(g)	15798.6±128.1 (0.81)	15605.5±100.6 (0.64)	<0.0001
Lean(g)	11752.0±127.8 (1.09)	11655.1±87.3 (0.75)	N. S.
Total(g)	28192.2±13.7 (0.05)	27945.7±37.0 (0.13)	N. S.
% fat(%)	56.0±0.5 (0.89)	55.8±0.3 (0.54)	N. S.

\* : mean±S. D.

\*\* : (A)vs(B), paired t-test

( ) : coefficients of variation(%)

Table 3 Comparison of precision data between in-vitro and in-vivo study

	In-vitro*		In-vivo**	
	CV(%)	90%UCL***	CV(%)	90%UCL
BMC	1.44	1.73	0.97	1.47
BMD	1.72	2.06	0.98	1.48
Fat	0.90	1.08	4.76	7.21
Lean	1.35	1.62	1.37	2.08
Total	0.17	0.20	0.99	1.50
% Fat	0.92	1.10	4.67	7.08

\* : whole body phantom, duration : five days, df=49

\*\* : 21-55y.o., 6 men, duration : three day, df=12

\*\*\* : 90% upper confidence limit

## 6. 考 察

検査の精度管理が重要なことは周知の事実である。しかし、放射線を用いた検査では、検体検査とは異なり放射線被曝を伴うため、精度管理の対象としてヒトではなくファントムを用いるのが通例である。そのため、ファントムの形状や組成によっては、得られる結果がヒトを対象とした場合と大きく乖離する可能性がある。したがって、精度管理や実験に使用するファントムについては、その性能を評価することが重要となる。そこで今回、DXAによる体組成計測の精度管理用に開発された全身ファントムについて評価した。

検査の精度管理については、検査の全工程における管理とその運営をも組み込んだ quality management (QM) として捉えられている<sup>13, 14)</sup>。そして、その QM

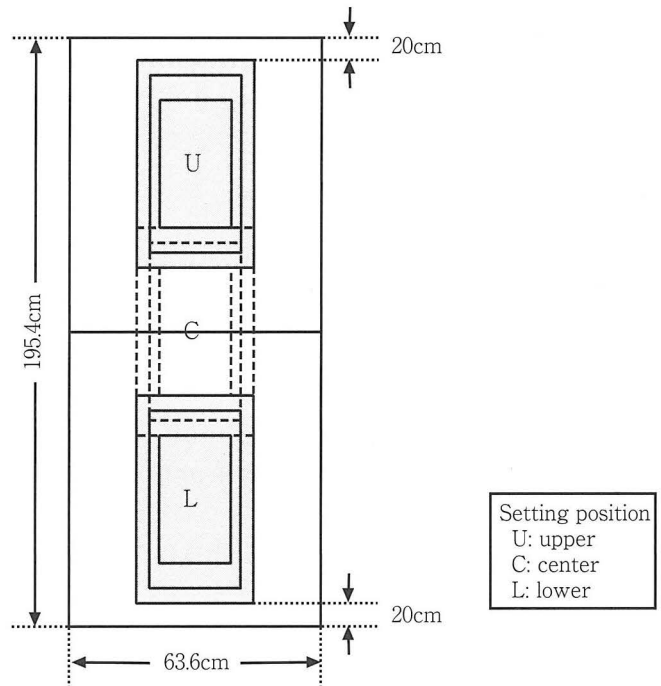


Fig. 3 Setting position of phantom on the examination bed

は quality assurance (QA) と good laboratory practice (GLP) に分かれ、QA は total quality control に相当するものであり、GLP は予算、人材、在庫などの管理運営に関するものとされている。また、QA の構成要素は、熟達度の継続的チェック、標準化、内部精度管理 (internal quality control, IQC) および外部精度管理 (external quality assessment, EQA) の 4 項目からなる。

全身用ファントムを DXA による体組成計測の精度管理に使用する場合には、QA の熟達度を除く 3 項目に対応した検討が必要となる。今回の検討を当てはめると、計測方法の確立を目的としたファントムの設定位置とスキャンモードの検討は標準化に、計測精度の評価は IQC に、ファントム間差は多施設での検討において問題となるので EQA にそれぞれ相当すると考えられる。

計測方法の標準化につながるファントムの設定位置とスキャンモードの選択は、得られた指標の絶対値と変動係数の比較では、一定の傾向が認められず、いずれの条件を選択すべきかの判定は困難であった。しかし、計測の精度管理を実施する場合には、ファントムの設定位置とスキャンモードを決定する必要がある。そこで、短時間の計測が可能な条件、つまりファントムの設定位置についてはスキャンが上方から下方へ行われるので上部に、スキャンモードについては pencil よ

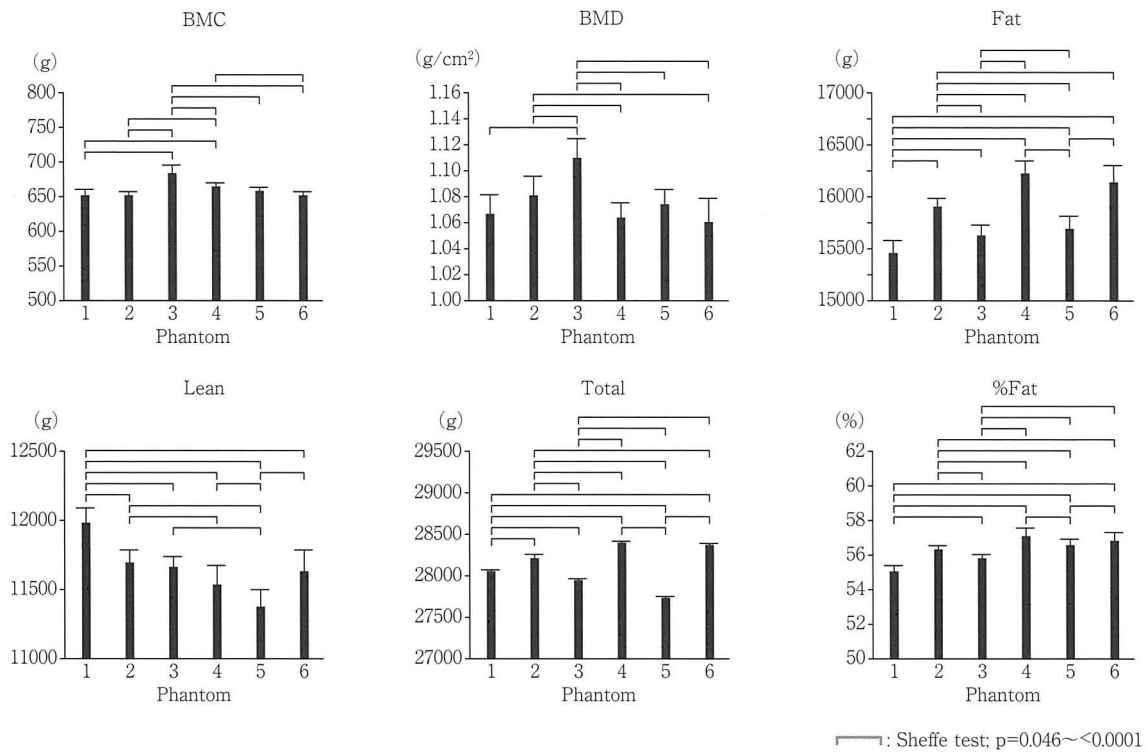


Fig. 4 Comparison of the measured values in six phantoms

りもスキャン速度の速い array にそれぞれ決定した。

計測精度の検討では、ファントムを対象とした in-vitro では fat, lean, total, % fat の4つの指標が、ヒトを対象とした in-vivo では BMC と BMD の2つの指標がより優れた CV 値を示した。この結果から、本ファントムは fat, lean などの体成分計測の精度評価には適しているが、BMC や BMD といった骨量指標には適さないと考えられた。

一般にファントムでは、計測中の呼吸に伴う体動などが一切生じないため、in-vivo よりも優れた計測精度が得られる<sup>15)</sup>。しかし、今回の結果では、fat や lean などの体成分指標では予想通り in-vivo よりも in-vitro の方が測定精度に優れていたのに対し、BMC や BMD などの骨量指標では逆に in-vivo の方が優れていた。この原因の1つとして、全身スキャンでは短時間測定を実現するため、腰椎や大腿骨近位部などの特定部位のスキャンに比してデータ収集ラインの間隔などが広く設定されていることに起因していると考えられた。つまり、全身スキャンでは粗いデータサンプリングによって分解能が低下し、測定対象の面積が小さい場合には測定精度の低下を招くと推察された。公表されているスキャンデータの point resolution は、腰椎や大腿骨近位部などの特定部位のスキャンでは0.8mmである

のに対し、全身スキャンでは2.2mmと明らかに分解能が劣る。そして、fat や lean の測定対象部位である全体の2次元面積については測定値が得られないが、ファントムではその外形から2750.8cm<sup>2</sup> (76.2cm×36.1cm) という2次元面積が算出可能であり、この値はヒトの2次元面積の50%程度と推測される。それに対して、骨の2次元面積は測定値が得られ、ファントムでは619.5cm<sup>2</sup>であり、ボランティア6名の平均値2238.9cm<sup>2</sup>の約1/4と小さかった。これらにより、ファントムの全身スキャンにおいて、ヒトに比してファントムの骨面積が小さかったことが、BMD や BMC の測定精度の低下に影響していると思われる。

ファントム間の計測値の差は、6つの指標の全てにおいて有意差が認められた。これにより、ファントム毎に得られる計測値が異なることが明らかとなった。EQA は、計測値の施設間の差を縮小することや施設間の校正を目的としている。多施設を対象として EQA を行う場合、必然的に多くのファントムを必要とするが、本ファントムは1体毎に得られる値が異なるのでこの目的には不向きといえる。したがって、本ファントムを精度管理に使用する場合、施設内で使用する IQC に限定すべきである。

## 7. ま と め

DXA による体成分測定の精度管理用として開発された全身ファントムを評価した結果、本ファントムは外部精度管理には適さないが、内部精度管理用として十分使用可能であると認められた。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、全身用ファントムをご提供頂いたファイザー株式会社、住友製薬株式会社および日本イーライリリー株式会社にお礼申し上げます。

## Reference

- 1) Cugini P, Salandri A, Celli V, De Rosa R, Pandolfi C, Lucidi V and Castro M : Circadian rhythm of some parameters of body composition in the elderly investigated by means of bioelectrical impedance analysis, *Eat Weight Disord.* 7 : 182—189, 2002.
- 2) Casanova RM, Rodriguez RI, Rico de CS and Casanova BM : Body composition analysis bioelectrical and anthropometric parameters, *An. Pediatr.* 61 : 23—31, 2004.
- 3) Ito H, Ohshima A, Ohto A, Ogasawara M, Tsuzuki M, Takao K, Hijii C and Tanaka H : Relation between body composition and age in healthy Japanese subjects, *Europ. J. Clin. Nutr.* 55 : 462—470, 2001.
- 4) Salamone LM, Fuerst T, Visser M, Kern M, Lang T, Dockrell M, Cauley JA, Nevitt M, Tylavsky F and Lohman TG : Measurement of fat mass using DEXA : a validation study in elderly adults, *J. Appl. Physiol.* 89 : 345—362, 2000.
- 5) Wang J, Thorton JC, Holick M, Formica C, Wang W and Pierson RN Jr : Dual X-ray absorptiometry in pediatric studies. Changing scan modes alters bone and body composition measurements, *J. Clin. Densitom.* 2 : 135—141, 1999.
- 6) Eisenkolbi J, Kartasurya M and Widhalm K : Underestimation of percentage fat mass measured by bioelectrical impedance analysis compared to dual energy X-ray absorptiometry method in obese children, *Europ. J. Clin. Nutr.* 55 : 423—429, 2001.
- 7) Rodriguez-Arno J, Jabbar A, Fulchet K, Besser GM and Rose RI : Effects of growth hormone replacement on physical performance and body composition in GH deficient adults, *Clin. Endocrinol.* 51 : 53—60, 1999.
- 8) Hansen TB, Gram J, Jensen PB, Kristiansen JH, Ekelund B, Christiansen JS and Pedersen FB : Influence of growth hormone on whole body and regional soft tissue composition in adult patients on hemodialysis. A double-blind, randomized placebo-controlled study, *Clin. Nephrol.* 53 : 99—107, 2000.
- 9) Jeppesen PB, Szkudlarek J, Hoy CE and Mortensen PB: Effect of high-dose growth hormone and glutamine on body composition, urine creatine excretion, fatty acid absorption, and essential fatty acids status short bowel patients, *Scand. J. Gastroenterol.* 36 : 48—54, 2001.
- 10) Diessel E, Fuerst T, Njeh CF, Tylavsky F, Cauley J, Dockrell M and Genant HK: Evaluation of a new body composition phantom for quality control and cross-calibration DXA devices, *J. Appl. Physiol.* 89 : 599—605, 2000.
- 11) Diessel E, Shepherd JA, Fuerst T, Gonzalez m, Genant HK, Carew B and Looker A : Comparison of two phantom for body composition with dual-energy X-ray absorptiometry, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 904 : 107 — 110 , 2000.
- 12) Gluer CC, Blake G, Lu Y, Blunt BA, Jergas M and Genant HK : Accurate assessment of precision errors : How to measure the reproducibility of bone densitometry techniques, *Osteoporosis Int.* 5 : 265—271, 1995.
- 13) 河合 忠 : 臨床検査の — 世界の動向 —, *臨床検査* 39 : 505—509, 1995.
- 14) 桑 克彦 : 精度保証と内部精度管理, *臨床検査* 41 : 373—379, 1997.
- 15) 友光達志 : 最新骨塩定量法, 「測定原理と各測定法の概要」 (福永仁夫監修), 大阪 : メディカルレビュー社, 19—55, 2004.