

成人女性におけるMRI法とADP法による全身の身体組成評価の差異

Differences in body composition assessments measured by air displacement plethysmography and magnetic resonance imaging in adult females

古田 なつみ, 船渡 和男

Natsumi FURUTA and Kazuo FUNATO

Abstract

Magnetic resonance imaging (MRI) and air displacement plethysmography (ADP) are widely used methods for reliable body composition analysis (BCA). This study aimed to compare the BCA assessments obtained between MRI and ADP methods in 14 adult females. BCA measurements such as whole-body mass, volume, density, fat mass and %fat mass were analyzed by both MRI and ADP methods.

The masses, volumes and body densities obtained MRI and ADP method were both absolutely and relatively equaled. However, the %fat masses obtained MRI and ADP method were highly correlated ($r=0.950$, $p<0.001$), while significant absolute differences in %fat mass were found between the two methods ($p<0.001$).

It was suggested that the MRI method equivalently evaluated in mass, volume and body density compared with ADP method. Also, MRI method can be relatively evaluated the fat mass and %fat mass but it overestimated absolute values.

Key words; Body composition, Air displacement plethysmography, Magnetic resonance imaging

I. 緒 言

身体組成は体脂肪量や筋量などの人体の組織構成を表す指標である。身体組成を直接測定する方法は解剖によって真値を測らなければならないため、身体組成は通常間接的に推定される。

間接的に身体組成評価方法として古くから用

いられている手法の一つに密度法¹⁾がある。古典的な密度法は水中体重秤量法と呼ばれ、身体²⁾の体積を実測するための様々な身体密度の評価方法の判断基準にされている。空気置換法 (Air displacement plethysmography: 以下、ADP法) は、密度計測法に基づく身体組成の推定法の一つであり、水中体重法を基準に正確な身体密度を測

定する方法として多く用いられている。ADP法は水中体重法よりも被験者への負担が少なく正確に身体組成を評価する方法として多くの報告がなされているが、部位別の組成を推定することにはできない³⁾。近年は大腿の筋量がサルコペニアの有病率を表す⁴⁾など局所組成が注目されていることから、今後は局所組成と全身組成の両者を正確に評価することが重要になると考えられる。

局所組成を推定する方法³⁾は、電気抵抗値を利用する生体インピーダンス法や医療画像を用いる二重エネルギー吸収法 (Dual X-Ray Absorptiometry: 以下、DXA法)、コンピューター画像法、磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: 以下、MRI法)がある。軟組織の定量に優れている利点を有することから、MRI法は全身の身体組成の40%程度を占める筋量の定量法のゴールドスタンダードとして用いられている⁵⁾。しかし、MRI法を用いた全身の身体組成評価については、前述した方法間との比較報告が少ない⁶⁾。Ludwigら(2014)は、白色人種の主に男性の肥満者 (BMI 25 kg/m²以上)におけるMRI法とADP法による体脂肪量について報告し、ADP法を基準としたMRI法の体脂肪量の精度は約±10% (総体重の±3.8%)であることを報告している⁶⁾。

身体組成は人種、性別といった先天的な要因および生活習慣や疾病の罹患状況などの後天的要因によって大きな個人差を示す⁷⁾ことから、身体的特徴の異なる日本人女性においても先行研究と同様の傾向がみられるか不明である。また、既に報告されているMRI法による局所組成に関する報告⁸⁾をより信頼性のあるものにするために、MRI

法による全身の身体組成評価の妥当性を検証する必要があると考える。これらの検証によって評価方法間で生じる差の傾向と被験者の形態的特徴に関係を見出すことは、MRI法による局所組成を評価する上で重要な報告になると考えられる。

本研究の目的は、MRI法による全身の身体組成評価に関して全身の身体密度評価法として確立されているADP法と比較し、その差異を検討することを目的とした。

II. 方法

被験者は、運動習慣のない健康な一般成人女性14名 (21.0±0.6歳、157.4±3.2cm、49.9±6.3kg、BMI 20.2±2.9 kg/m²)を対象とした (表1)。実験前に書面と口頭による説明を行い、インフォームドコンセントを行って同意を得た。本研究は国士館大学の倫理審査委員会の承認 (承認番号: 21022)を得て行った。各測定時は2時間以上絶食状態かつ水泳帽、スポーツ用下着およびスパッツを着用して計測した。

MRI法による身体組成値算出のためのMR画像は、1.5-T MRI スキャナー (EXCELART Vantage Powered by Atlas, 東芝メディカルシステムズ社)を用いて取得した。シーケンス設定は、T2 強調スピンエコーシーケンス、TE 90ms、TR 5600ms、フリップ角度 90°、マトリクス 480×480 mm、FOV 480×480 mm、スライス厚 10 mmとした。計測体位は仰臥位、上肢は体幹と平行に位置するようにした。

得られた各画像から、画像分析ソフトウェア

表1 被験者の身体的特徴

		Females (n=14)	
		Range	Mean ± SD
Age		20.1 - 22.3	21.0 ± 0.6
Height	(cm)	151.8 - 161.5	157.4 ± 3.2
Mass(M _{ADP})	(kg)	43.0 - 62.6	49.9 ± 6.3
BMI	(kg/m ²)	16.5 - 26.5	20.2 ± 2.9

(Fiji/Image J 2.0.0-rc-69/1.52p; Java 1.8.0_172、National Institutes of Health) を使用して組織領域を12種類(骨、筋、脂肪、内臓、脳、肝臓、肺、心臓、血液、軟骨、靭帯、体腔)に識別した。相同モデル支援ソフトウェア(HBM-rugle、メディックエンジニアリング社)を用いて組織領域から各組織面積を算出し、スライス厚を乗じて合算し、MRI法による体積(Whole-body volume by MRI method: 以下、 V_{MRI})を求めた。さらに、各組織に対応する密度値⁹⁻¹³⁾を乗じてMRI法による体重(Whole-body mass by MRI method: 以下、 M_{MRI})を算出した。 M_{MRI} を V_{MRI} で除し、MRI法による身体密度(Whole-body density by MRI method: 以下、 D_{MRI})を算出した。MRI法による体脂肪量(Whole-body fat mass by MRI method: 以下、 F_{MRI})を M_{MRI} で除して百分率とし、体脂肪率($\%F_{MRI}$)を求めた。

ADP法による身体組成値の算出には、体脂肪測定システム(Body Composition System Mab-1000、Life Measurement社、USA)を用いた。計測は機器のマニュアルに基づき、以下の手順で計測した。計測時の気温は22度前後に事前に保ち、暖気運転を行った。計測前に、体積と体重計の校正を行った。体積は、50Lの校正シリンダーを用い一連の5回の容量測定で50 mlの最大標準偏差以内であることを確認した。体重計は、10kgの校正錘を3つ用いて2回校正した。

身長を測定後、初めに被験者に測定の流れを説明し、必要に応じて練習を事前に行った。最初に

体重計(精度: ± 10 g)でADP法による体重(以下、 M_{ADP})を測定した。チャンバー内容積を測定し、被験者の容積を2回測定し、その差分を算出した。150 mlまたは体積が0.2%異なる場合、3回目の測定を行い、基準内の最も近い2つの測定値を平均したものを平均体積とした。被験者に外部に呼吸が漏れない状態にして、一定時間の自然な呼吸と数回に分けて最大呼気をするよう指示し、胸部ガス容量(TGV)を計測した。胸部ガス容量の計測は5回繰り返し、最大値と最小値を除いた3回の平均値と計測した平均体積からADP法による体積(以下、 V_{ADP})を算出した。ADP法による身体密度(以下、 D_{ADP})は、 M_{ADP} を V_{ADP} で除して求めた。Brozekの式¹⁴⁾を用いてADP法による体脂肪率(以下、 $\%F_{ADP}$)および体脂肪量(以下、 F_{ADP})を算出した。

統計解析はIBM SPSS Statistics v25を用いた。Shapiro-Wilkの正規性の検定によって正規性を確認後、対応のあるt検定を用いてADP法とMRI法で求めた全身の身体組成値を比較した。ピアソンの積率相関係数およびBland-Altman plot¹⁵⁾を用いて変数間の妥当性を検証した。全ての検定の有意確率は5%未満とした。

Ⅲ. 結果

表2にADP法およびMRI法による全身の身体組成値の比較を示した。 M_{MRI} 、 V_{MRI} 、 D_{MRI} は、 M_{ADP} 、 V_{ADP} 、 D_{ADP} と比較して体重、体積、身体

表2 ADP法およびMRI法による全身の身体組成値の比較

Whole-body Variables		ADP	MRI	t-test	Pearson' R
		Mean \pm SD	Mean \pm SD	P-value	
Mass	(kg)	49.9 \pm 6.3	49.8 \pm 6.1	0.27	0.999 ***
Volume	(L)	47.8 \pm 6.6	47.7 \pm 6.3	0.07	0.999 ***
Density	(L/kg)	1.044 \pm 0.013	1.047 \pm 0.012	0.12	0.911 ***
Fat mass	(kg)	12.0 \pm 4.5	13.8 \pm 4.5	***	0.981 ***
%Fat mass	(%)	23.6 \pm 5.7	26.9 \pm 5.5	***	0.950 ***

***: p < 0.001

密度に統計上有意な差は示されなかった。一方、 F_{MRI} は F_{ADP} よりも体脂肪量を過大評価した ($p < 0.001$)。% F_{MRI} も同様に% F_{ADP} よりも体脂肪率を過大評価した ($p < 0.001$)。また、全ての変数において相関係数が0.9以上の強い正の相関関係がみられた ($p < 0.001$)。

図1にADP法およびMRI法による体重のBland-Altman plotを示した。 M_{MRI} と M_{ADP} の差分は -0.1 ± 0.3 kgであった。一致限界 (Limitation of agreement: 以下, LOA) は0.4 kgから-0.6 kgであり、加算誤差は生じていなかった。 M_{MRI} は、 M_{MRI} と M_{ADP} の差分と M_{MRI} と M_{ADP} の平均体重に統計上有意な負の相関関係 ($r = -0.576$, $p < 0.05$) が認められたことから、MRI法による体重は、体重が軽い人を過大評価し、体重が重い人を過小評価する比例誤差を生じていた。この傾向はBMIによる分類においても同様であった。

図2にADP法およびMRI法による体積のBland-Altman plotを示した。 V_{MRI} と V_{ADP} の差分は -0.2 ± 0.3 Lであった。LOAは0.5Lから-0.8 Lであり、加算誤差は生じていなかった。 V_{MRI} は、 V_{MRI} と V_{ADP} の差分と V_{MRI} と V_{ADP} の平均体積に統計上有意な強い負の相関関係 ($r = -0.765$, $p < 0.01$) が認められたことから、体積が小さい人を過大評価し、体積が大きい人を過小評価する比例誤差を生じていた。この傾向はBMIによる分類においても同様であり、BMI 18.5未満は同一または過大評価、BMI 18.5以上は体積が約45 L以上になると-0.5 L程度過小評価される傾向を示した。

図3にADP法およびMRI法による身体密度のBland-Altman plotを示した。 D_{MRI} と D_{ADP} の差分は 0.002 ± 0.005 kg/m²であった。LOAは0.013 kg/m²から-0.008 kg/m²であり、加算誤差は生じていなかった。 D_{MRI} は、 D_{MRI} と D_{ADP} の差分と D_{MRI} と D_{ADP} の平均体積に統計上有意な相関関係が認められなかったことから、比例誤差は生じていなかった。

図4にADP法およびMRI法による体脂肪量の

△: BMI 18.5未満 ●: BMI 18.5以上 25.0未満
□: BMI 25.0以上

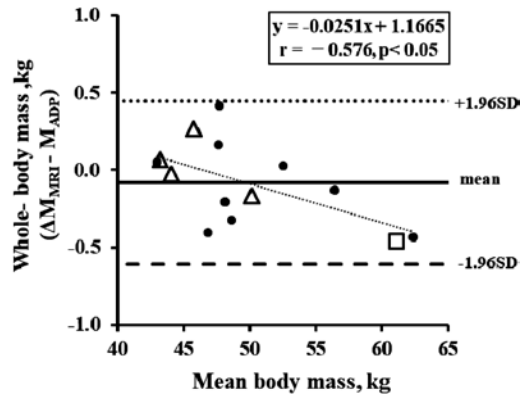


図1 ADP法およびMRI法による体重の比較 (Bland-Altman plot)

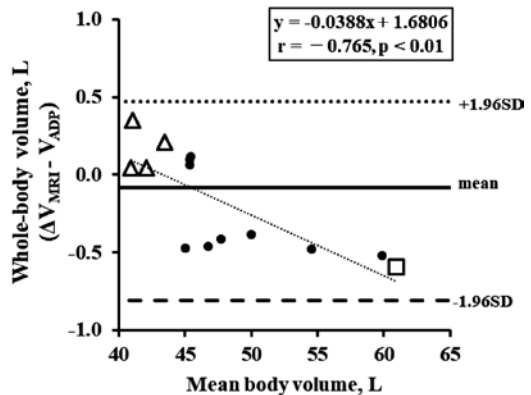


図2 ADP法およびMRI法による体積の比較 (Bland-Altman plot)

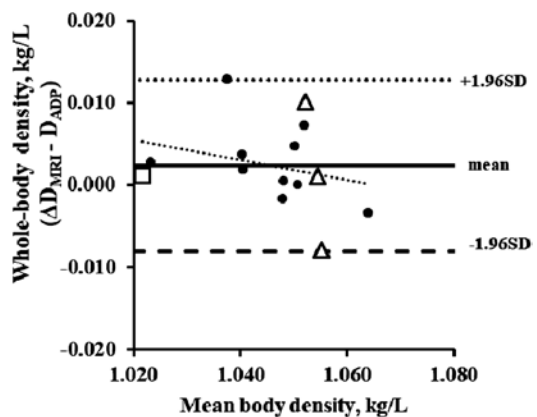


図3 ADP法およびMRI法による身体密度の比較 (Bland-Altman plot)

△ : BMI 18.5 未満 ● : BMI 18.5 以上 25.0 未満
□ : BMI 25.0 以上

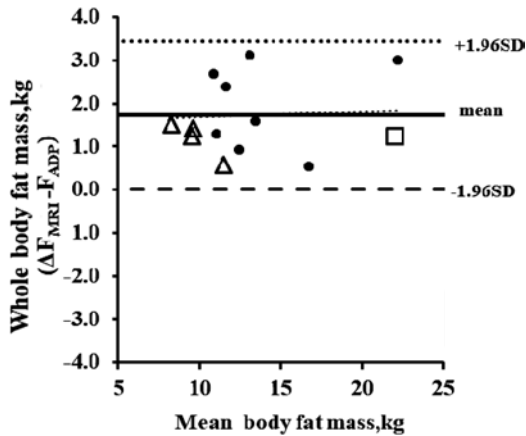


図4 ADP法およびMRI法による体脂肪量の比較 (Bland-Altman plot)

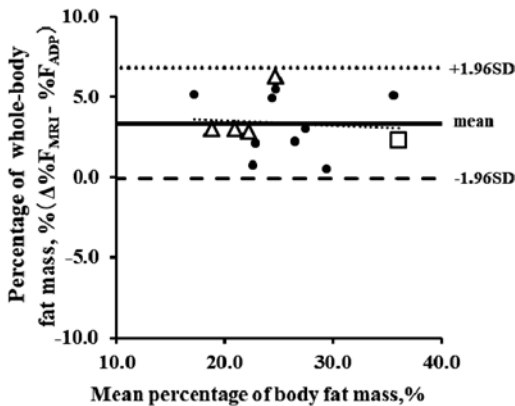


図5 ADP法およびMRI法による体脂肪率の比較 (Bland-Altman plot)

Bland-Altman plotを示した。 F_{MRI} と F_{ADP} の差分は 1.7 ± 0.9 kgであった。LOAは3.4kgから0.0 kgであり、加算誤差を生じていた。 F_{MRI} は、 F_{MRI} と F_{ADP} の差分と F_{MRI} と F_{ADP} の平均体積に統計上有意な相関関係が認められなかったことから、比例誤差は生じていなかった。

図5にADP法およびMRI法による体脂肪率のBland-Altman plotを示した。 $\%F_{MRI}$ と $\%F_{ADP}$ の差分は $3.3 \pm 1.8\%$ であった。LOAは6.8%から-0.1%であり、加算誤差を生じていた。 F_{MRI} は、

F_{MRI} と F_{ADP} の差分と F_{MRI} と F_{ADP} の平均体積に統計上有意な相関関係が認められなかったことから、比例誤差は生じていなかった。

MRI法による身体組成値はADP法を基準に比較を行うと、体重、体積、身体密度は変わらないが、体脂肪量や体脂肪率が過大評価されることが示唆された。この傾向は体重と体積において値が大きい者を過小評価する比例誤差を生じており、体脂肪量はわずかに加算誤差を生じていた。

IV. 考察

身体組成を評価する方法は、より簡便に評価が可能な汎用的な方法から正確な定量を目的とした方法まで多岐にわたる。測定原理が各々異なるため、方法間の差異に関して主に体脂肪量(体脂肪率)に着目して論じられることが多い。方法間の体脂肪率の差異に関する報告では、強い正の相関関係が認められることから相対的に同等の評価が可能であることが報告されている^{16, 17)}。一方、絶対値で比較をすると差異は約10%範囲内に収束することも報告されている^{6, 7)}。本研究では、MRI法による体脂肪率がADP法よりも $3.3 \pm 1.8\%$ 過大評価したが、強い正の相関関係($r=0.950$, $p<0.001$)を示した。従って、MRI法がADP法に準じた身体組成評価方法であることが示唆された。

一方で絶対的な体脂肪量や体脂肪率の差異が生じていることも事実である。これらの差異が生じる要因は、方法間の測定原理の違いが考えられる。ADP法は身体密度の評価法のゴールドスタンダードと称されるUWW法に類似した結果が得られることから、身体組成評価の基準として多くの報告がされている^{2, 6, 18)}。

ADP法は、人体を体脂肪量と除脂肪量の2成分であると仮定し、身体組成を評価する方法である。この方法の限界として、人体が質量や密度の異なる組織を有するかつ組織量や組織密度に性差や個人差が含まれていること^{8, 12)}、体脂肪率の精

度が身体密度から算出する式に依存することが挙げられる¹⁾。加えて、設楽ら(2017)は密度法から体脂肪率を算出したBrozekの式¹⁴⁾の問題点を指摘しており⁷⁾、前述した組織量や身体密度などによる個人差を反映できていない可能性も考えられる。

MRI法は、外部からの電磁波によって体内のプロトンから発生する電磁波を受信し、その差異から組織を特定して身体組成評価を行う方法である³⁾。MRI法は、MR画像取得条件(シーケンス設定)によって特定の部位や組織にフォーカスした画像について侵襲を伴わずに連続的取得できる。そのため、他の方法では難しい正確で詳細な身体組成の定量が多く報告されている^{6, 8, 10, 19, 20)}。

MRI法による身体組成評価の誤差を生む要因としてMR画像を取得する際の分解能および画像の幾何学的歪み、分析に用いた組織領域の定義、組織密度値が影響⁶⁾することが報告されている。ただし、ADP法をUWW法と同等に身体密度を正確に測定する方法²⁾と仮定するのであれば、本研究におけるMRI法は、前述の問題をできる限り最小限にとどめ体重、体積を正確に定量し、身体密度を算出したと推察した。

前述した身体組成評価の誤差の要因に身体的特徴の差異が関係するのかが検討するため、身体組成評価における2方法間の誤差についてBland-Altman plotによる分析を行った。その結果、体重や体積はBMIによって異なるが、体脂肪量や体脂肪率はBMIと独立して過大評価している可能性を示した。

Bland-Altman plotは、2つの手法による同一の変数間の差を分析する統計学的手法の一つとして確立されている¹⁵⁾。下井(2011)は、測定値の誤差には偶然誤差と系統誤差の2つがあり、系統誤差の中に加算誤差と比例誤差があることを述べている²¹⁾。下井の定義²¹⁾に従い本研究の結果を考えると、本研究におけるMRI法の全身の身体組成値はADP法と比較して加算誤差や比例誤差を生じている可能性がある。しかし、どの変数に

おいてもLOAの範囲内に分布していることから偶然誤差の範疇である可能性が示された。

Huangら(2022)は、DXA法とADP法による身体組成評価を比較し、BMIによって分布傾向が異なることを述べている²²⁾。この傾向は、MRI法とADP法を比較したLudwigら(2014)も同様の指摘をしていることから、BMIの違いは方法間誤差の要因となる可能性が示唆された。従って、BMIが極端なものを同様に分析する際には、体重や体積においてもこれらの誤差を生む可能性があることから、今後人種や性別などの身体的特徴が異なる集団を分析する際には、組織量や身体密度に個人差があることを加味して慎重に分析を行う必要性が示唆された。

V. ま と め

本研究はMRI法による全身の身体組成評価の妥当性を検証するため、基準法として多く用いられているADP法と比較を行い、その差異について以下の知見が得られた。

1. 成人女性におけるMRI法による身体組成値は、体重、体積、身体密度に関してADP法による値とほとんど同一であることが示された。
2. 体脂肪量や体脂肪率は、相対的に類似するため相互変換が可能であるが、絶対値はMRI法がADP法よりも過大評価をすることが示された。
3. 体重、体積は、BMIの増加とともに過小評価をする傾向が見られたが、加算誤差を生む可能性は低いと考えられる。体脂肪量や体脂肪率は、BMIとは独立して過大評価をする傾向が見られた。

以上のことから、成人女性におけるMRI法による全身の身体組成評価は、ADP法と比較し、体重、体積、身体密度において同等の評価が行えることが明らかになった。一方、体脂肪量や体脂

肪率に関しては、相対的に同等の評価を行えるが、絶対値ではMRI法が過大評価することが明らかになった。これらの傾向は、BMIによってわずかに異なる可能性を示した。MRI法はADP法に準じた正確な身体組成評価方法であることが示唆された。

参考文献

- 1) Lohman Timothy G., Advances in body composition assessment, Human Kinetics Publ., Champaign, Ill., 1992.
- 2) Ellis Kenneth J : Human Body Composition : In Vivo Methods, PHYSIOLOGICAL REVIEWS, 80 : 649-680, 2000.
- 3) Borga M., West J., Bell J. D., Harvey N. C., Romu T., Heymsfield S. B., Dahlqvist Leinhard O. : Advanced body composition assessment : from body mass index to body composition profiling, J Investig Med, 66 : 1-9, 2018.
- 4) Abe T., Thiebaud R. S., Loenneke J. P., Loftin M., Fukunaga T. : Prevalence of site-specific thigh sarcopenia in Japanese men and women, Age (Dordr), 36 : 417-426, 2014.
- 5) Müller Manfred J., Braun Wiebke, Pourhassan Maryam, Geisler Corinna, Bosy-Westphal Anja : Application of standards and models in body composition analysis, Proceedings of the Nutrition Society, 75 : 181-187, 2016.
- 6) Ludwig U. A., Klausmann F., Baumann S., Honal M., Hovener J. B., König D., Deibert P., Buchert M. : Whole-body MRI-based fat quantification : a comparison to air displacement plethysmography, J Magn Reson Imaging, 40 : 1437-1444, 2014.
- 7) Shitara Kayo, Hakamada Noriko, Ohnishi Takahiro, Ikeda Tatsuaki : Differences in body density and percent body fat found by different methods of evaluating body composition, Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine, 66 : 369-382, 2017.
- 8) Ian Janssen Steven B. Heymsfield, Zimian Wang, and Robert Ross : Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18-88 yr, Journal of Applied Physiology, 89 : 81-88, 2000.
- 9) H.K.Huanko, Wu S. C. : The evaluation of mass densities of the human body in vivo from ct scans., Comput Bio Med, 6 : 337-343, 1976.
- 10) Ho W. H., Shiang T. Y., Lee C. C., Cheng S. Y. : Body segment parameters of young Chinese men determined with magnetic resonance imaging, Med Sci Sports Exerc, 45 : 1759-1766, 2013.
- 11) Woodard H.Q., White D.R. : The composition of body tissues, The British journal of Radiology, 59 : 1209-1219, 1986.
- 12) Wlodzimierz S. Erdmann Tomasz Gos : Density of trunk tissues of young and medium age people, Journal of Biomechanics, 23 : 945-947, 1990.
- 13) P. W. Henson T. Ackland, and R. A. Fox : Tissue density measurement using CT scanning, Australasian Physical & Engineering, 10 : 162-166, 1987.
- 14) Keys Ancel, Brozek Josef : Body fat in adlt man, the american physiological society, 33 : 245-325, 1953.
- 15) Bland J. Martin, Altman Douglas G.: Statistical methods for assessing agreement between TWO methods of clinical measurement, The lancet, 8, 1986.
- 16) Lopez-Gonzalez Desiree, Wells Jonathan C. K., Parra-Carriedo Alicia, Bilbao Gladys, Mendez Martín, Clark Patricia : Body Composition Assessment in Mexican Children and Adolescents. Part 1 : Comparisons between Skinfold-Thickness, Dual X-ray Absorptiometry, Air-Displacement Plethysmography, Deuterium Oxide Dilution, and Magnetic Resonance Imaging with the 4-C Model, Nutrients, 14 : 1073, 2022.
- 17) Achamrah Najate, Colange Guillaume, Delay Julie, Rimbart Agnès, Folope Vanessa, Petit André, Grigioni Sébastien, Déchelotte Pierre, Coëffier Moïse : Comparison of body composition assessment by DXA and BIA according to the body mass index : A retrospective study on 3655 measures, PLOS ONE, 13 : e0200465, 2018.
- 18) Bailey Bruce W., LeCheminant Gabrielle, Hope Timothy, Bell Mathew, Tucker Larry A. : A comparison of the agreement, internal consistency, and 2-day test stability of the InBody 720, GE iDXA, and BOD POD®gold standard for assessing body composition, Measurement in Physical Education and Exercise Science, 22 : 231-238, 2018.
- 19) Pearsall D.J., Reid J.G., Ross R. : Inertial properties of the human trunk of males determined from magnetic resonance imaging., Annals of Biomedical Engineering, 22 : 692-706, 1994.
- 20) 岡田英孝, 横澤俊治, 高橋英幸 : MRI画像を用いた日本人アスリートの身体部分密度の推定, バイオメカニズム学会誌, 44 : 162-170, 2020.
- 21) Shimoi Toshinori : The Absolute Reliability of Evaluation, Rigakuryoho Kagaku, 26 : 451-461,

2011.

- 22) Huang Yiwen, Dong Hongbo, Cheng Hong, Shan Xinying, Yu Xiaoran, Xie Xianghui, Mi Jie : Differences in body composition measurements assessed by air displacement plethysmography and dual-energy X-ray absorptiometry in young and middle-aged adults, *Clinical Nutrition ESPEN*, 50 : 111-117, 2022.