

超音波を用いた四肢欠損パラアスリートの 新たな体組成評価の基盤研究

広島大学病院	鳥山 実
(共同研究者) 同	伊藤 創
同	居倉 怜央
同	廣田 智弘
同	三上 幸夫

A Foundational Study on Novel Body Composition Assessment Using Ultrasound in Para-Athletes with Amputee

by

Minoru Toriyama,
Hajime Ito, Yukio Mikami
*Department of Sports Medical Center,
Hiroshima University Hospital*
Reo Igura, Tomohiro Hirota
*Department of Rehabilitation,
Division of Clinical Practice and Support,
Hiroshima University Hospital*

ABSTRACT

Purpose

The purpose of this study was to examine the validity of subcutaneous fat thickness (SFT) and qualitative muscle assessment using ultrasound, and to further investigate their relationships with phase angle (PhA) derived from bioelectrical impedance analysis (BIA).

Methods

Twenty-one individuals (16 males and 5 females) who underwent CT scans at our institution were included. Subcutaneous fat thickness was measured at the thigh, upper arm, and waist using ultrasound (US-SFT) and CT images (CT-SFT). At the thigh, echo intensity (EI) from ultrasound and CT attenuation values were obtained to assess muscle quality, and their correlations with PhA were analyzed. Pearson's or Spearman's correlation coefficients were used for statistical analyses.

Results

A very strong positive correlation was observed between US-SFT and CT-SFT, confirming the validity of ultrasound for measuring subcutaneous fat thickness. A significant negative correlation was also found between lower-limb PhA and both US-SFT and CT-SFT, indicating a localized relationship between subcutaneous fat and PhA. Regarding muscle quality, CT values showed a significant positive correlation with PhA, whereas EI demonstrated only a limited association.

Conclusion

Ultrasound-derived subcutaneous fat thickness (US-SFT) provides an accurate estimate comparable to that of CT and may serve as a useful alternative indicator, especially for individuals such as those with limb amputation, in whom BIA is difficult to apply. Conversely, for qualitative muscle assessment, CT demonstrated superiority, highlighting the importance of selecting assessment modalities based on specific evaluation goals.

キーワード

フェーズアングル 皮下脂肪厚 超音波 CT

Keyword

Phase angle; Subcutaneous fat thickness; Ultrasound; Computed tomography (CT)

要 旨

目 的

本研究は超音波を用いた皮下脂肪厚および筋の質的評価の妥当性を検証し、さらにそれらと生体電気インピーダンス分析 (Bioelectrical Impedance Analysis : BIA) による Phase Angle (PhA) との関連性を明らかにすることを目的とした。

方 法

対象は当院においてCT検査が施行された21名 (男性16名, 女性5名) とした。大腿部, 上腕部, 腰部において超音波画像による皮下脂肪厚 (US-SFT) およびCT画像による皮下脂肪厚 (CT-SFT) を測定した。大腿部ではエコー輝度 (Echo Intensity : EI) およびCT値を算出し, PhAとの関連性を検討した。統計解析にはピアソンまたはスピアマンの相関係数を用いた。

結 果

US-SFTとCT-SFTとの間には非常に強い正の相関が認められ、超音波による皮下脂肪厚測定の妥当性が確認された。また、下肢PhAとUS-SFTおよびCT-SFTの間には有意な負の相関が認められ、局所的な皮下脂肪厚とPhAの関連が明らかとなった。筋の質的評価では、CT値はPhAと有意な正の相関を示した一方、EIとの関連は限定的であった。

結 論

US-SFTはCTに近い精度で皮下脂肪厚を評価可能であり、特にBIAが使用困難な四肢切断者などにおいて有効な代替指標となる可能性が示された。一方で、筋の質的評価においてはCTの優位性が示唆され、目的に応じた評価手法の選択が求められることが明らかとなった。

1. 背 景

アスリートにとって自身の体組成を的確に把握することは、パフォーマンスの最適化や傷害予防、効果的なトレーニング・コンディショニング戦略の立案において極めて重要な要素である。特に、骨格筋量や脂肪量、筋質といった体組成の構成要素は、種目特性や競技レベルに応じて変化するため、定期的かつ精度の高い評価が求められる。現在、体組成の評価には二重エネルギー X線吸収測定法 (Dual Energy X-ray Absorptiometry : DXA) やコンピュータ断層撮影 (Computed Tomography : CT)、生体電気インピーダンス分析 (Bioelectrical Impedance Analysis : BIA) などが用いられており、中でもBIAは簡便かつ非侵襲的に評価が可能であることから、競技現場における実用性が高いとされている¹⁾。

BIAは、四肢末端 (通常は両手・両足) に電極を装着し、体内に微弱な電流を流すことで、組織間の電気抵抗やリアクタンス (容量性成分) を測定し、体水分量や筋量を推定する手法である²⁾。

しかしながら、この手法は四肢の形態が標準的であることを前提としており、切断や変形のある者には適用が困難である。特に四肢欠損を有するパラアスリートにおいては、末梢に電極を装着することができない場合や、身体が電氣的に左右非対称となることで、BIAの基礎となる筒状モデルが成立せず、推定精度が著しく低下することが報告されている³⁾。Choiらは片下肢切断を有する男性を対象とした検証において、標準的なBIA式が切断者の除脂肪体重を正確に推定できず、切断者専用の予測式が必要であることを示している⁴⁾。そのため、このような切断者を対象とした体組成評価には、CTやMRIなどの高精度の画像診断装置が必要となるが、これらは高コストかつ被曝や閉所恐怖などの問題を伴うため、競技現場や定期モニタリングには適さない。

こうした背景から、近年注目されているのが超音波を用いた筋量・脂肪量評価法である。超音波は非侵襲的かつ可搬性に優れており、筋肉の厚さ、断面積、さらには筋内脂肪や結合組織の沈着など、筋質を視覚的に評価できる点が特徴である⁵⁾。これまでに、高齢者やサルコペニア患者、さらには健常アスリートを対象とした研究において、超音波で得られる筋厚やエコー輝度とCT・MRI・DXAで得られる体組成との間に有意な相関が報告されており^{6,7)}、代替的评价法としての可能性が示唆されている。

一方で四肢切断者の多くは、運動量が著しく低下し、週150分以上の中等度～強度運動を継続している者は全体の30%程度という報告がある⁸⁾。またKorean全国規模のコホート研究では、切断者は2型糖尿病リスクが全体で1.11倍、重度障害者では1.77倍高いことが報告されている⁹⁾。したがって、四肢切断者においては、運動不足に起因する内科的合併症の併発リスクが高く、体組成や筋・脂肪の量的、質的評価は、これらのリスク管理上も重要な意味を持つと考えられる。

本研究では、BIA法の限界を補完しうる代替手段として、超音波による体組成評価法を確立することを目的とする。具体的には、大腿部における皮下脂肪厚や筋厚などの超音波指標を計測し、CTやBIAとの比較・検証を通じて、その妥当性と臨床的応用可能性を検討する。これにより、従来評価が困難とされてきた四肢切断パラアスリートの体組成モニタリングにおいて、新たな標準的評価手法の構築を目指す。

2. 方法

2.1 対象者

当院に通院もしくは入院中であり、周術期においてCT撮影が実施され、本研究について同意が得られた21名(男性16名,女性5名)を対象とした。本研究は広島大学病院臨床研究倫理審査委員会の承認の下で施行した。

2.2 測定

超音波による評価は、超音波診断装置(コニカミノルタ社製 MX-1, 日本)にリニアプローブを接続して使用し、以下の3部位で撮像を行った:

- 1) 大腿: 大腿長(上前腸骨棘~膝蓋骨上縁)の中点,
- 2) 上腕: 肩峰から遠位方向に20 cmの部位,
- 3) 腰背部(第4腰椎レベル): 第4腰椎棘突起より有症状側外側方向に5 cmの部位

大腿および上腕の撮像は被験者を背臥位とし、腰背部の撮像は腹臥位で行った。各部位に対してプローブを垂直に接触させ、最小限の圧迫下で横断面画像を取得した。画像取得時のゲインや深度などの機器設定はすべて一定条件で統一し、取得画像は機器内に保存した。CT画像は術前評価を目的として撮像された臨床画像データを用いた。撮像は64列マルチディテクタCT装置(VCT: GE Medical Systems社, 米国)を用いて実施された。同一被験者に対し、大腿・上腕・腰椎レベルの断面画像から、超音波画像と同部位である大腿中点、

上腕20 cm部、腰椎L4横断像と一致するレベルを選定し解析を行なった。

BIAの評価指標としてフェーズアングル(Phase Angle: PhA)を採用した。PhAは生体電気インピーダンス分析装置(InBody社製 InBody S10, 韓国)を用いて、全身セグメント別に測定を行った。測定は仰臥位安静5分後に実施し、電極は標準の8電極法に従って左右の手首および足関節に装着した。得られたセグメント別データのうち、下肢疾患を有する対象者の患側下肢PhAを解析対象とした。

2.3 データ解析

皮下脂肪厚については、取得した超音波画像から皮下脂肪厚(Ultrasound Subcutaneous Fat Thickness: US-SFT)を計測した。大腿部は測定部位における皮膚表面から大腿直筋の最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、上腕部は測定部位における皮膚表面から上腕二頭筋最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、腰部は測定部位における皮膚表面から脊柱起立筋の最大径での筋膜上縁までの垂直距離を、それぞれ計測した。CT画像においても同様に、皮下脂肪厚(CT Subcutaneous Fat Thickness: CT-SFT)を計測した。

筋内脂肪については、超音波画像は画像解析ソフトウェア ImageJ (version 1.53, National Institutes of Health, 米国)を用いて解析を行った。大腿直筋の筋膜内に含まれる筋組織全体を対象とする関心領域(region of interest: ROI)を手動で設定し、ROI内の画素輝度の平均値(0~255階調)を大腿エコー輝度(Echo Intensity: EI)として算出した。CT画像においても大腿部における超音波と同部位の画像を用い、ROIを設定して大腿CT値(Hounsfield Unit: HU)を算出した。US-SFT, CT-SFT, ROIの設定, 大腿EI, 大腿CT値の算出は、評価者2名により独立して実施し、平均値を代表値とした。

2. 4 統計解析

大腿部と上腕部と腰部のUS-SFTと、大腿部と上腕部と腰部のCT-SFT、および各変数と下肢PhAの関連性、大腿EI、大腿CT値のそれぞれと下肢PhAの関連性について、ピアソンの積率相関係数 (Pearson's r) を算出した。正規性の検定にはShapiro-Wilk検定を用い、正規性が確認されない変数についてはスピアマンの順位相関係数 (Spearman's ρ) による補足解析を行った。統計解析は、統計ソフトウェアR version 4.3.2を用いて実施し、有意水準は5% ($p < 0.05$) とした。

3. 結果

対象者の詳細を表1に示す。この中で、CTは21名の解析が実施できたが、超音波は画像が不明瞭であった3名が除外され、PhAは金属製イン

表1 対象者の詳細

性別	男性16名	女性5名
年齢 (歳)	34.6 ± 23.1	
身長 (cm)	165.1 ± 8.6	
体重 (kg)	62.3 ± 12.4	
BMI (kg/m ²)	22.8 ± 3.8	
疾患	前十字靭帯損傷	16名
	脊柱管狭窄症	2名
	変形性肩関節症	3名

(mean ± SD)

プラントが留置されていた5名のデータが除外された。

その結果、CT-SFTは、大腿CT-SFTは16例、上腕CT-SFTは3例、腰部CT-SFTは2例が解析対象となった。US-SFTは大腿US-SFTは13例、上腕US-SFTは3例、腰部US-SFTは2例が解析対象となった。大腿CT値は16例、大腿EIは13例、PhAは16例が解析対象となった。結果を表2に示す。

各変数の関連性について、US-SFTとCT-SFTとの間にはスピアマンの順位相関にて非常に強い正の相関が認められた ($\rho = 0.95, p < 0.001$, 図1)。下肢PhAと各評価指標との関連性を検討したところ、CT-SFT ($r = -0.57, p = 0.022$, 図2)、US-

表2 皮下脂肪厚, CT値, エコー輝度, Phase angleの結果

CT-SFT(mm)	
大腿部	9.4 ± 5.0
上腕部	8.0 ± 2.9
腰部	7.9 ± 3.2
US-SFT(mm)	
大腿部	9.3 ± 4.7
上腕部	5.8 ± 0.7
腰部	8.1 ± 3.0
大腿CT値 (HU)	56.7 ± 4.8
大腿EI (a.u.)	54.5 ± 15.6
PhA (degree)	6.6 ± 1.0

(mean ± SD)

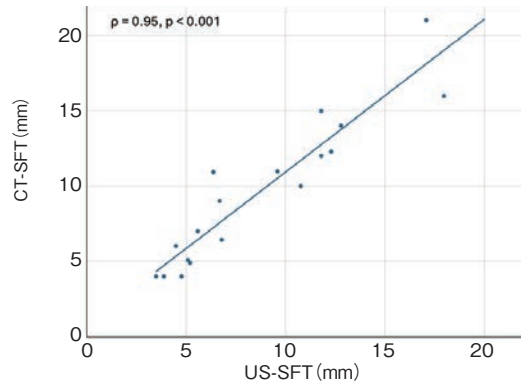


図1 CT-SFT (CTによる皮下脂肪厚) とUS-SFT (超音波による皮下脂肪厚) の関係

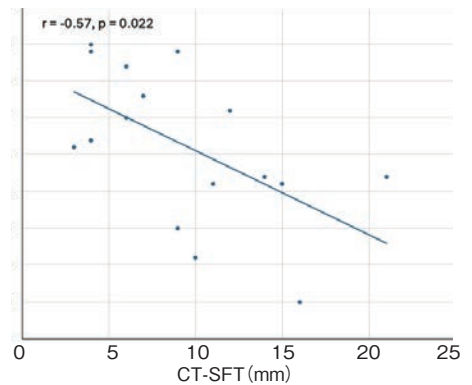


図2 下肢PhA (フェーズアングル) とCT-SFT (CTによる皮下脂肪厚) の関係

SFT ($r = -0.69, p = 0.009$, 図3) との間には有意な負の相関が認められた。下肢PhAと大腿CT値は有意な正の相関が確認された ($r = 0.67, p = 0.004$, 図4)。EIの間にも負の相関がみられたが、有意水準には達しなかった ($r = -0.49, p = 0.087$, 図5)。

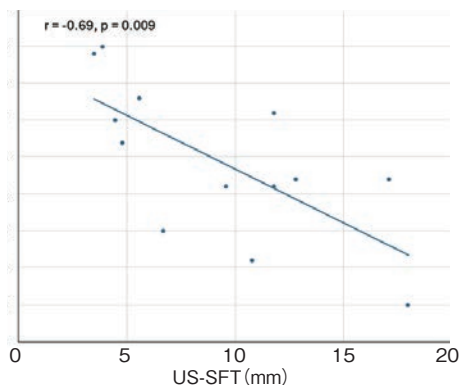


図3 下肢PhA (フェーズアングル) と US-SFT (超音波による皮下脂肪厚) との関係

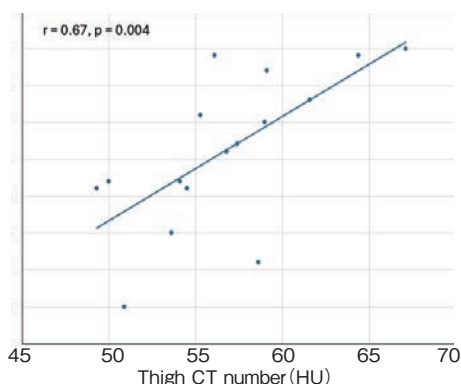


図4 下肢PhA (フェーズアングル) と 大腿CT値との関係

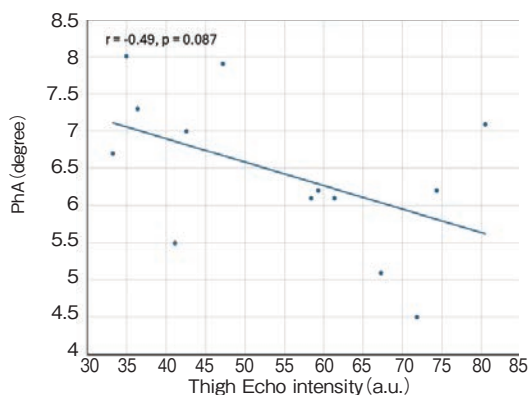


図5 下肢PhA (フェーズアングル) と 大腿EI (エコー輝度) との関係

4. 考 察

本研究では①超音波による皮下脂肪厚の測定精度をCTによる評価と比較し、妥当性を検証、②

インピーダンス法による下肢のPhAとUS-SFT、CT-SFT、筋エコー輝度、および筋のCT値との関連性を検証した。

US-SFTとCT-SFTの比較では、強い相関関係が認められ、超音波による皮下脂肪厚の測定がCTに匹敵する妥当性を有することが示された。この結果は、腹部や体幹部で報告されている過去の報告と一致している。Störchleらは8部位における標準化された超音波皮下脂肪厚測定法がCT・MRIと極めて高い一致性を示したと報告しており¹⁰⁾、またOrphanidouらも腹部における超音波とCTの測定が高い一致性を示すことを示している¹¹⁾。本研究は下肢における検証であるが、体幹と同様に、US-SFTがCT-SFTの代替手段として十分信頼に足ることを示した点で、新たなエビデンスを提供していると考えられる。

さらに、下肢におけるUS-SFTおよびCT-SFTとPhAの関連を詳細に検討した結果、US-SFTおよびCT-SFTともにPhAと有意な負の相関を示した。PhAと脂肪量の関連性については、これまでに体脂肪率や内臓脂肪と負の相関を示す報告が存在している。Ferrazらの心臓病患者105名を対象とした研究では、PhAが腹部超音波で測定された内臓脂肪厚(VAT)と逆相関し、PhAが低いほどVATが多いことが確認された¹²⁾。さらに、青年男女324名を対象とした調査では¹³⁾、PhAと体脂肪率との間に有意な負の相関が確認されており、脂肪量の増加に伴いPhAが低下する傾向が指摘されている。これらの結果は、PhAが脂肪組織の蓄積、特に内臓脂肪や総脂肪量の増加に伴って低下するという生理学的特性と一致している。本研究では、局所的な皮下脂肪厚との関連を検討した結果、PhAとUS-SFTおよびCT-SFTには明確な負の相関が存在し、局所的な評価の有用性を示した。またCTに劣らない精度で局所皮下脂肪を評価可能であり、インピーダンス法やCTに代わる新たな局所脂肪の評価として超音波による局所脂

筋量の定量化指標となりうる可能性が示された。このことは全身の体脂肪評価に限定されていたPhAと脂肪量の関連を、下肢局所にも適用できることを示す新たなエビデンスとなり、PhAの測定が困難な四肢切断者や電極装着制限がある症例に対して、US-SFTが実用的かつ信頼性の高い代替評価指標になり得る可能性を示している。

一方で、筋の質の評価指標については差が認められた。CT値はPhAとの間に整合性の高い関連を示したのに対し、EIとの関連は限定的であり、筋質評価においてはCTの有用性が示された。これは、CTによる筋密度評価が脂肪浸潤などを反映した高精度な構造情報を提供できるのに対し、EIは装置特性や被験者間変動の影響を受けやすいことと関連する可能性がある。今後は超音波の機器を変更した評価を検討する必要がある。

これらの結果の意義は次の通りである。PhAは細胞の健全性や筋量・筋質を反映する総合的指標である一方、四肢切断者などでは測定が困難であることが知られている。皮下脂肪の評価において、US-SFTという非侵襲的で簡便な測定法が、PhAと同様の情報を提供しうることは、現場への応用可能性を高める重要な知見である。現場や測定環境によってはCTを使用できない場合が多い中、超音波による局所的な体組成評価は臨床評価やトレーニングモニタリングへの応用が期待される。一方で、筋質評価を重視する場面では、CTによる評価の導入も考慮する必要がある。

本研究の限界としては、サンプル数の制限や測定部位の限定、測定者間信頼性のさらなる評価の必要性が挙げられる。また、筋力や機能的アウトカムとの連関評価が未実施であるため、今後はPhAおよび超音波やCTに加えて筋力や機能指標を取り入れた多変量解析の実施が望まれる。

5. 結 論

本研究により、US-SFTはCT-SFTに代わる信

頼性の高い皮下脂肪厚指標であることが確認され、PhAとの関連性においてもCTと遜色ない情報を含む可能性が示された。また筋の質評価においてはCTによる評価の方が、信頼性がより高いことが明らかになり、目的に応じた機器選択と評価指標選定の重要性が示唆された。将来的には、四肢切断者などPhAが測定しづらい対象へUS-SFTを用いた評価法を標準化する取り組みが、臨床的価値を持つと考えられる。

謝 辞

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念 デサントスポーツ科学振興財団様に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) de la Cruz Marcos S., Redondo del Río M.P., de Mateo Silleras B., Applications of Bioelectrical Impedance Vector Analysis (BIVA) in the Study of Body Composition in Athletes., *Applied Sciences*, 11 (21): 9781 (2021)
- 2) Going S., Nichols J., Loftin M., Stewart D., Lohman T., Tuuri G., Ring K., Pickrel J., Blew R., Stevens J., Validation of bioelectrical impedance analysis (BIA) for estimation of body composition in Black, White and Hispanic adolescent girls., *International Journal of Body Composition Research*, 4 (4): 161-167 (2006)
- 3) Goosey-Tolfrey V.L., Keil M., Brooke-Wavell K., de Groot S., A Comparison of Methods for the Estimation of Body Composition in Highly Trained Wheelchair Games Players., *International Journal of Sports Medicine*, 37 (10): 799-806 (2016)
- 4) Choi H.-J., Ko C.-Y., Chang Y., Kim G.-S., Choi K., Kim C.-H., Development and validation of bioimpedance prediction equations for fat-free mass in unilateral male amputees., *PeerJ*, 9: e10970 (2021)
- 5) 三秋泰一, 超音波検査法を用いた筋の評価, *J. Wellness Health Care*, 47 (2): 1-8 (2023)
- 6) Becchetti C., Berzigotti A., Ultrasonography as a diagnostic tool for sarcopenia in patients with cirrhosis: Examining the pros and cons., *European Journal of Internal Medicine*, 116: 27-33 (2023)
- 7) Wang J.-C., Wu W.-T., Chang K.-V., Chen L.-R.,

- Chi S.-Y., Kara M., Özçakar L., Ultrasound Imaging for the Diagnosis and Evaluation of Sarcopenia: An Umbrella Review., *Life*, 12(1) : 9(2022)
- 8) Sederberg M.A., Tarkhan A., Ray L.S., Lee E.S., Lin C., Physical Activity in Adults With an Amputation as Assessed With a Self-Reported Exercise Vital Sign., *PM&R*, 12(9) : 861–869(2020)
- 9) Yoo J.E., Lee D., Kim B., Chang W.H., Jin S.-M., Han K., Shin D.W., Increased risk of type 2 diabetes after traumatic amputation: a nationwide retrospective cohort study., *Front. Endocrinol.*, 15: 1437860(2025)
- 10) Störchle P., Müller W., Sengeis M., Lackner S., Holasek S., Fürhapter-Rieger A., Measurement of mean subcutaneous fat thickness: eight standardised ultrasound sites compared to 216 randomly selected sites., *Scientific Reports*, 8: 16268(2018)
- 11) Orphanidou C., McCargar L., Birmingham C.L., Mathieson J., Goldner E., Accuracy of subcutaneous fat measurement: comparison of skinfold calipers, ultrasound, and computed tomography., *Journal of the American Dietetic Association*, 94(8) : 855–858(1994)
- 12) Ferraz A.M., Filho G.A., Silva M.L., Freitas L.P., Lima N.K.C., Souza D.D., Alves P.T.S., Lira N.B., Rocha E.E., Is phase angle associated with visceral adiposity and cardiometabolic risk in cardiology outpatients?, *Clin. Nutr. ESPEN.*, 47: 341–347(2022)
- 13) Tyagi T., Singh K., Tyagi R., Correlation of body fat percentage with phase angle in young adults using bioelectric impedance analyzer - A cross-sectional study., *Natl. J. Physiol. Pharm. Pharmacol.*, 13(11) : 2319-2322(2023)