

研究ノート

ファントムに温度変化を与えた時の踵骨骨評価指標の変動

岡野亮介*1

キーワード：温度変化、踵骨骨評価指標、ファントム、寒冷水による負荷、温暖水による負荷

I. 目的

骨強度を評価する上で精度の高い方法としては DXA (Dual X-ray Absorptiometry) が一般的である。しかし、DXA で測定する機器の使用においては資格上の制限があるため、極めて短時間で測定できる乾式の定量的超音波測定法 (QUS) で代用される場合が非常に多い (特に大人数を対象としたスクリーニングテスト等において)。ところが、乾式の QUS で求められる骨評価値については、湿式の QUS を含めて他の測定法と比較して、変動性がやや大きいという難点がある。乾式の QUS であるアロカ社製骨評価装置 AOS-100 で骨評価値である OSI (音響的骨評価値 ; Osteo Sono-Assessment Index) を 10 回測定した場合変動係数 (CV 値) は 1.857% (n=16) であった¹⁾。さらに、男児 1 例を対象として 2 カ月毎に 6 年間に亘って縦断的に OSI を観察した場合、経月的に発育することは理解されたが、同時に前述の CV 値に基づく変動幅を大きく超える範囲で凹凸を示すことも観察された²⁾。この大きな変動性をもたらす原因については、機器の特性によることを始めとして様々な要因が考えられたが、超音波で測定することから、測定時の室温における季節の変動が大きな要因の一つと推測された。

これらのことを背景として、温度の変化が乾式の測定装置で求められた骨評価の指標にどの程度影響を与えるのか、ということについて基礎的に追究する必要があると考えられ、本研究では、アロカ社製骨評価装置 AOS-100 でアクリル製のファントムを 10 日間連続測定して OSI の測定精度を求めると共に、温度変化を与え、その前後において踵骨骨評価指標である SOS

(踵骨部分を透過する超音波の音速 ; Speed of Sound、踵骨海綿骨の密度を反映すると考えられている)、TI (踵骨部分を透過する超音波の透過指標 ; Transmission Index、踵骨海綿骨の骨量を反映すると考えられている) および前述の OSI (TI×SOS² で算出、骨の弾性を反映すると考えられている) を測定し、それぞれのパラメーターがどの程度変動するのかについて検討することを目的とした。

II. 研究方法

ファントムについては、アクリルファントム STL-K004 S/N 33 (アロカ社製、図 1) を使用した。踵骨骨評価指標の測定についてはアロカ社製骨評価装置 AOS-100 (図 1) を用いた。ファントムの温度は、テクノ・セブン社製デジタル温度センサ DS100 をファントムの表面に貼り付けることにより計測した。以下の要領で 4 つの実験を行った。

1. 実験方法

①実験 1 (ファントムの精度を求める実験)

連続した 10 日間のほぼ同時刻に踵骨骨評価指標を連続して 12 回測定する。この場合実験室の室温はエアコンディショナーを利用してほぼ同一にする

②実験 2 (寒冷水による負荷実験)

無負荷状態 (安静時) に 12 回の測定を行い、その直後に 5°C の冷水に 5 分間浸漬し (負荷時)、寒冷水から取り上げた直後 (負荷終了直後) および 30 分後 (回復 30 分後) にそれぞれ 12 回の測定を行った。その間ファントムの温度を測定した。日を変えて同じ実験を再度行った。

*1 山口福祉文化大学 ライフデザイン学部

③実験3 (温暖水による負荷実験)

無負荷状態 (安静時) に 12 回の測定を行い、その直後に 45°C の温水に 5 分間浸漬し (負荷時)、温暖水から取り上げた直後 (負荷終了直後) および 30 分後 (回復 30 分後) にそれぞれ 12 回の測定を行った。その間ファントムの温度を測定した。日を変えて同じ実験を再度行った。

④実験4 (24 時間の冷却負荷実験)

冷蔵庫内の冷凍庫 (0°C で保温) に 24 時間保存し、取り出した直後から 1 時間毎 (14:30~18:30) にそれぞれ 12 回ずつ測定を行った。

実験 2 と実験 3 において 2 度同じ実験を行ったのは、影響の再現性を確認するためである。

実験を行ったのは 2010 年 6 月 28 日~7 月 29 日であった。実験時においては室温と室内の相対湿度も測定した。また、すべての測定において超音波の送受信部分 (振動子) 1 回ずつ開放しながら測定を行った。

2. 統計処理

一元配置分散分析を行い、F 値に有意な水準があれば、Tukey の HSD 法により多重比較検定を行った。危険率 5% 未満をもって有意とした。また、図中において OSI の値は 10^6 で除した値を用いた。さらに 12 回の測定を行った場合、最高値と最低値を除いた 10 回の測定値より平均値と標準偏差を求めた。

III. 結果

①連続した測定における OSI について

10 日間において測定した値 (1 日連続 12 回測定) を表 1 に示した。表中の◎印のある値が 12 回測定中の最高値であり、○印のある値が最低値である。

最高値は概ね 6 回目以降の後半に出現する傾向であったが、最低値は初回測定値に出現する傾向が強かった。

また、最高値と最低値を除いた 10 回測定の OSI の平均値、標準偏差、CV 値、室温、相対湿度およびフ

ァントム温度 (計測時の平均値) を表 2 に示した。室温は 24.0~26.0°C、相対湿度は 45.0~76.0% の範囲であった。1 日毎の CV 値の範囲は 0.040~0.426% であった。また、10 日間に亘る OSI の平均値に基づく CV 値は 0.291% であった。

②寒冷水 (5°C) による負荷のファントムへ及ぼす影響

1) SOS

2 度に亘る寒冷水による負荷を与えた時の結果を図 2~図 3 に示した。SOS は 2 度とも安静時から負荷終了直後は有意に上昇し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけては有意に低下した。また、安静時より回復 30 分後の方が有意に高い値であった。

2) TI

2 度に亘る寒冷水による負荷を与えた時の結果を図 4~図 5 に示した。1 度目は安静時から負荷終了直後にかけて有意に低下したが、負荷終了直後から回復 30 分後にかけてはやや上昇の傾向にあるものの有意な水準はなかった。一方 2 度目は安静時から負荷終了直後は有意に低下し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけては有意に上昇した。また、安静時より回復 30 分後の方が有意に低い値であった。

3) OSI

2 度に亘る寒冷水による負荷を与えた時の結果を図 6~図 7 に示した。OSI は 2 度とも安静時から負荷終了直後は有意に上昇し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけては有意に低下した。また、安静時より回復 30 分後の方が有意に高い値であった。

なお、ファントムの平均温度と標準偏差は安静時→負荷時→負荷終了直後→回復 30 分後の順で、1 度目は $25.93 \pm 0.069^\circ\text{C} \rightarrow 12.01 \pm 2.59^\circ\text{C} \rightarrow 19.05 \pm 2.39^\circ\text{C} \rightarrow 23.45 \pm 0.17^\circ\text{C}$ に対し、2 度目は同順で $25.97 \pm 0.073^\circ\text{C} \rightarrow 13.16 \pm 2.20^\circ\text{C} \rightarrow 20.21 \pm 1.53^\circ\text{C} \rightarrow 24.19 \pm 0.11^\circ\text{C}$ であった。

③温暖水による負荷 (45°C) のファントムへ及ぼす影響



図1 ファントムとアロカ社製超音波骨評価装置 AOS-100

表1 10日間に測定したOSIの各値

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
1回目	5.599○	5.620○	5.609○	5.657	5.547○	5.592○	5.656	5.633○	5.576○	5.597○
2回目	5.692	5.648	5.618	5.649○	5.624	5.675	5.694	5.644	5.672	5.688
3回目	5.710	5.667	5.665	5.678	5.641	5.675	5.717	5.689	5.669	5.692
4回目	5.693	5.686	5.674	5.698	5.637	5.670	5.719	5.684	5.700	5.695
5回目	5.690	5.694	5.672	5.707	5.668	5.682	5.715	5.697	5.697	5.700
6回目	5.702	5.683	5.698	5.710	5.664	5.698◎	5.703	5.686	5.692	5.706
7回目	5.700	5.699	5.695	5.712	5.684	5.629	5.711	5.701	5.689	5.702
8回目	5.700	5.686	5.703◎	5.716	5.617	5.666	5.631○	5.639	5.700	5.683
9回目	5.705	5.691	5.688	5.707	5.655	5.673	5.718	5.678	5.711	5.701
10回目	5.711◎	5.701◎	5.692	5.711	5.665	5.681	5.724	5.700	5.727◎	5.722◎
11回目	5.707	5.695	5.684	5.717	5.685◎	5.695	5.708	5.708◎	5.725	5.708
12回目	5.710	5.699	5.699	5.719◎	5.677	5.685	5.731◎	5.701	5.717	5.718

表2 OSIの平均値、標準偏差およびCV値ならびに室温、相対湿度およびファントムの温度

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目
平均値	5.701	5.685	5.679	5.701	5.653	5.673	5.707	5.682	5.697	5.699
標準偏差	0.0075	0.016	0.024	0.0192	0.0023	0.0176	0.0198	0.0227	0.0179	0.0103
CV値(%)	0.132	0.281	0.426	0.337	0.040	0.310	0.347	0.400	0.314	0.181
室温(°C)	25.0	26.0	26.0	24.0	25.0	25.0	25.0	24.0	25.0	24.0
相対湿度(%)	75.0	68.0	70.0	55.0	76.0	70.0	74.0	45.0	73.0	72.0
ファントム温度	25.0	26.6	26.7	26.2	26.1	26.0	25.8	27.1	25.9	25.4

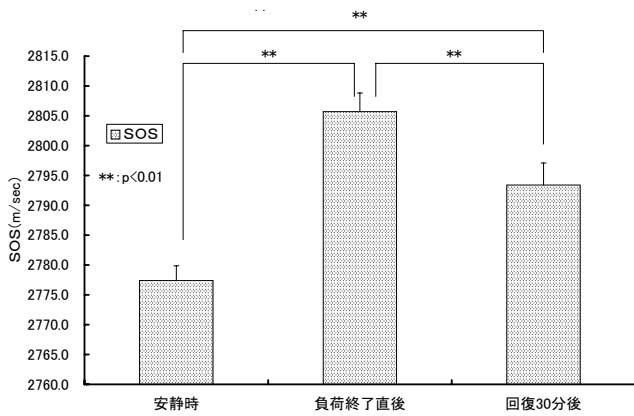


図2 寒冷水による SOS の変動 (1 度目)

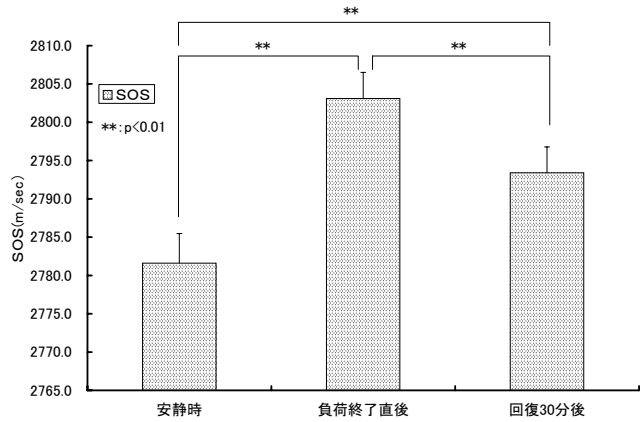


図3 寒冷水による SOS の変動 (2 度目)

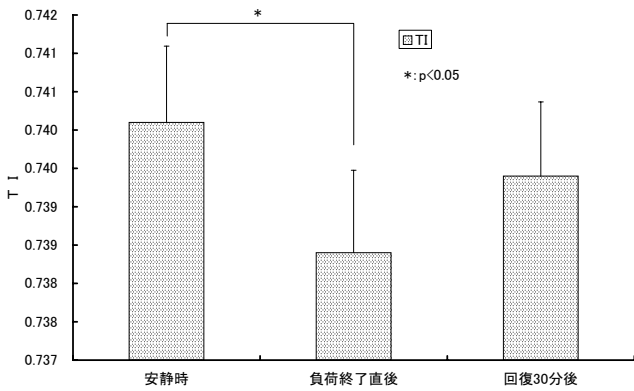


図4 寒冷水による TI の変動 (1 度目)

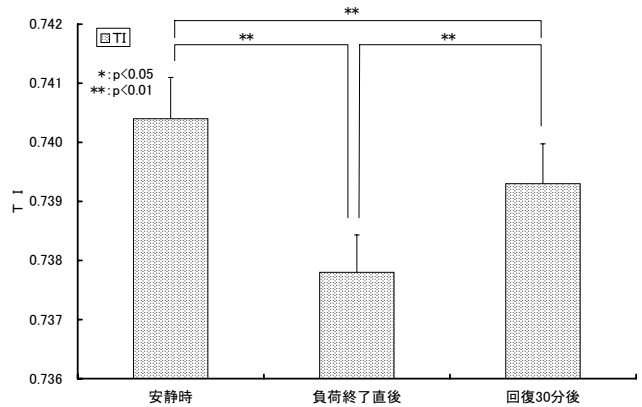


図5 寒冷水による TI の変動 (2 度目)

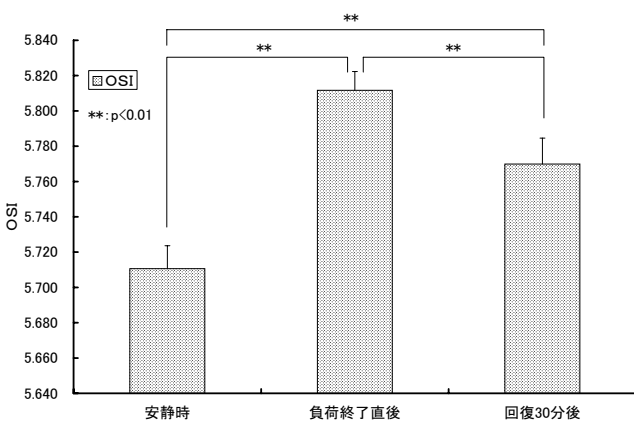


図6 寒冷水による OSI の変動 (1 度目)

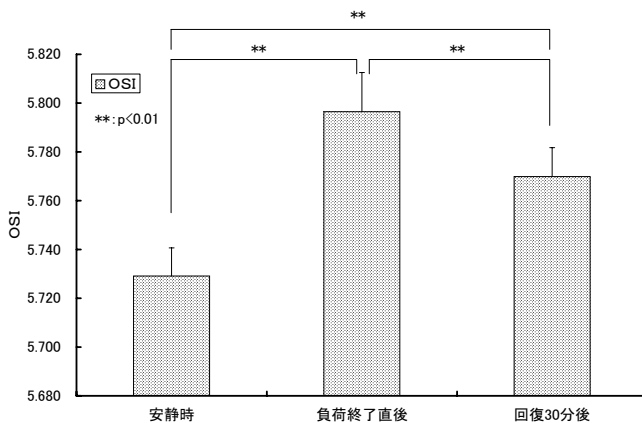


図7 寒冷水による OSI の変動 (2 度目)

1) SOS

2 度に亘る温暖水による負荷を与えた時の結果を図 8~図 9 に示した。SOS は 2 度とも安静時から負荷終了直後は有意に低下し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけては有意に上昇した。また、安静時より回復 30 分後の方が有意に低い値であった。

2) TI

2 度に亘る温暖水による負荷を与えた時の結果を図 10~図 11 に示した。1 度目は安静時から負荷終了直後にかけて有意に上昇し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけて有意に低下した。2 度目もほぼ同等の結果であったが、負荷終了直後と回復 30 分後の間には有意な水準はなかった。

3) OSI

2 度に亘る温暖水による負荷を与えた時の結果を図 12~図 13 に示した。OSI は 2 度とも安静時から負荷終了直後は有意に低下し、負荷終了直後から回復 30 分後にかけては有意に上昇した。

なお、ファントムの平均温度と標準偏差は安静時→負荷時→負荷終了直後→回復 30 分後の順で、1 度目は $25.80 \pm 0.036^{\circ}\text{C} \rightarrow 39.83 \pm 1.40^{\circ}\text{C} \rightarrow 32.70 \pm 1.20^{\circ}\text{C} \rightarrow 27.71 \pm 0.057^{\circ}\text{C}$ に対し、2 度目は同順で $25.74 \pm 0.045^{\circ}\text{C} \rightarrow 38.72 \pm 4.41^{\circ}\text{C} \rightarrow 31.46 \pm 1.50^{\circ}\text{C} \rightarrow 27.62 \pm 0.11^{\circ}\text{C}$ であった。

④24 時間冷却後の変動について

24 時間ファントムを冷凍庫で冷却した後の SOS、TI および OSI とファントムの平均温度の経時的変動を図 14~図 16 に示した。

ファントムの温度は経時的に上昇していった。SOS は、14:30 の値を基準にすればそれ以降の時間帯の値はすべて有意に低く、かつ経時的に徐々に低下するパターンを示し、有意な差がなかったのは 16:30 の値と 17:30 の値および 17:30 の値と 18:30 の値の間においてのみであった。TI は 17:30 までは経時的に徐々に増加傾向を示したが 18:30 では 17:30 の値より若干低下した。また 14:30 の値より他の時間帯の値の方が有意

に高かったが、その他の比較では 15:30 の値と 17:30 の値においてのみ有意な差が認められたに過ぎなかった。OSI は、14:30 の値を基準としてそれ以降の時間帯の値はすべて有意に低く、かつ経時的に徐々に低下するパターンを示し、有意な差がなかったのは 16:30 の値と 17:30 の値の間においてのみであった。

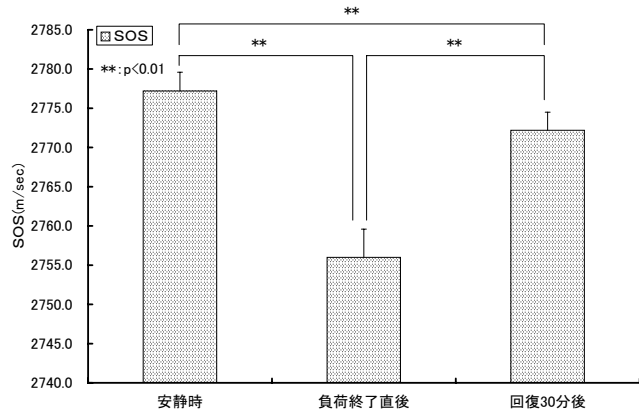


図 8 温暖水による SOS の変動 (1 度目)

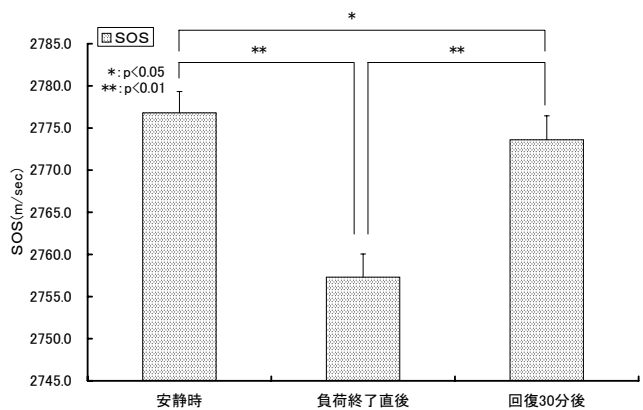


図 9 温暖水による SOS の変動 (2 度目)

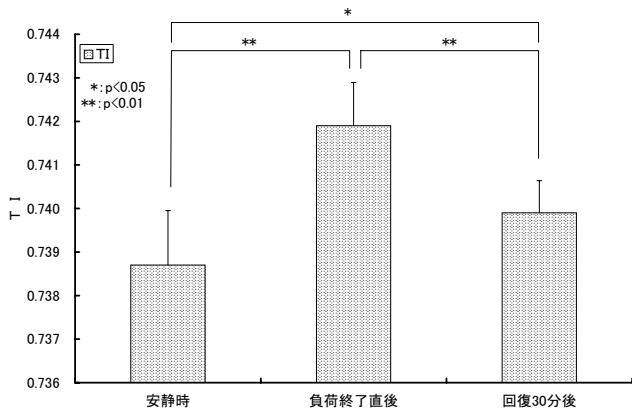


図10 温暖水による TI の変動（1 度目）

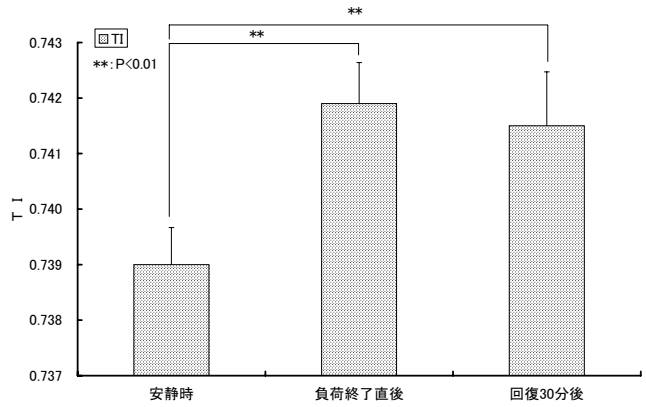


図11 温暖水による TI の変動（2 度目）

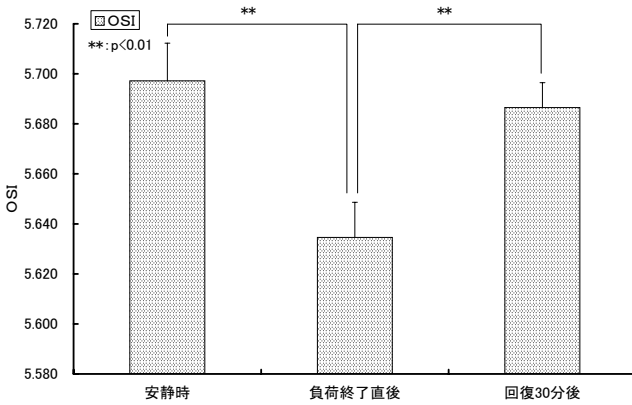


図12 温暖水による OSI の変動（1 度目）

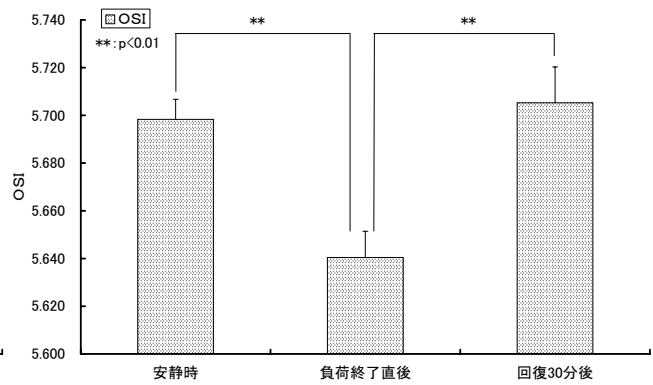


図13 温暖水による OSI の変動（2 度目）

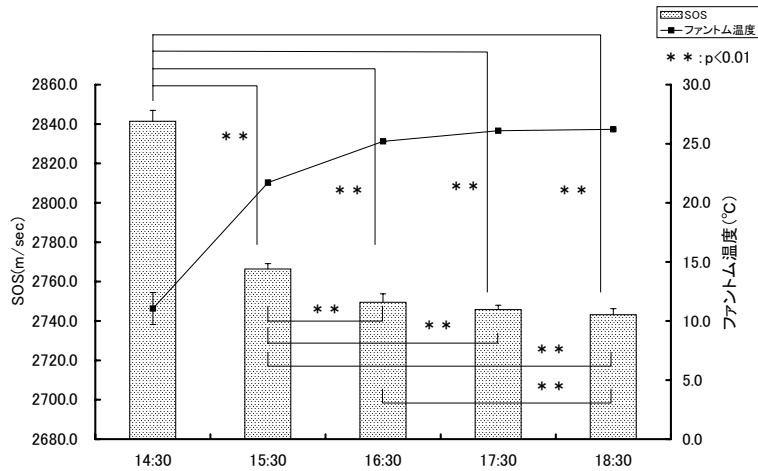


図 14 24 時間の冷却後のファントムの温度と SOS の経時的変動

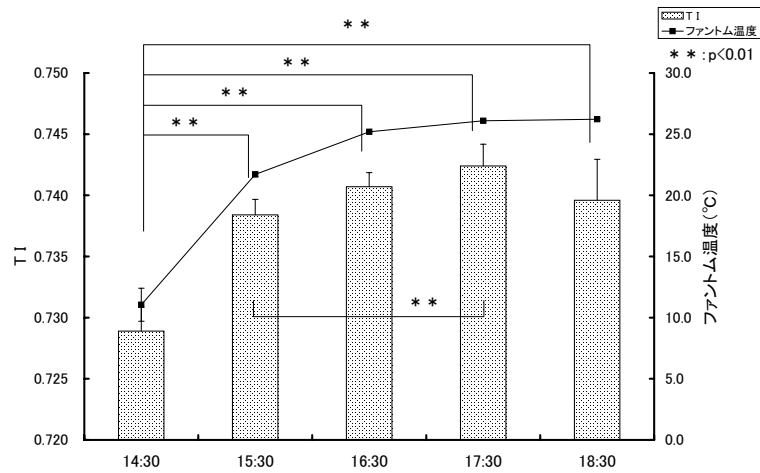


図 15 24 時間の冷却後のファントムの温度と TI の経時的変動

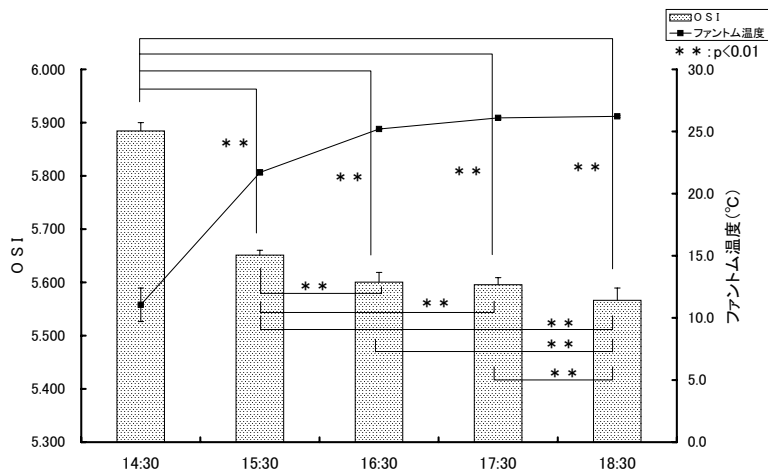


図 16 24 時間の冷却後のファントムの温度と OSI の経時的変動

IV. 考察

乾式の QUS による骨強度の測定は、極めて短時間で大多数の人間の評価が出来、骨粗鬆症の早期発見および予防対策に対して大きな貢献をなしている。一方で、測定値の変動性が大きいことがネックとなっており、値の信頼性に疑問が投げかけられる場合もあり、変動をもたらす原因を明らかにすることは、乾式の QUS による骨強度測定を推進する上で重要な課題であると考えられる。

本研究では、基礎的に追究するという主旨で、ファントムを用いていくつかの条件下で測定した。

10 日間の連続測定では、OSI における 1 日毎の CV 値は 0.040~0.426%で、人間の踵骨を対象とした場合 ($1.857 \pm 0.641\%$) よりかなり低く (精度が高い)、また 10 日間に亘る OSI の平均値に基づく CV 値も 0.291%で、同様に人間の踵骨を対象とした場合 ($2.463 \pm 0.405\%$, $n=5$) よりかなり低かった。これは、人間を対象とした場合と比較してファントムでは血液循環がないことや呼吸等による微小な体動がないこと等に基づく現象で当然の結果であるが、QUS も静止状態が保持できる固体に対しては測定値に高い精度を示すことを意味している。一方、原因は不明であるが、12 回測定の中で、第 1 回目の測定値に最低値が出現する可能性が高かった。これより、人間を測定する場合においても初回測定値は個人の代表値として利用しない方が良いことが示唆される。

寒冷水 (5°C) に浸漬させた場合の結果では、SOS はファントムの温度が低下することによって値が上昇し、温度が上昇することによって値が低下した。TI はその逆の方向に変化するが、再現性は SOS より低かった。また、SOS の変動の強さを反映して、OSI はファントムの温度が低下することによって値が上昇、温度が上昇することによって値が低下し、完全な再現性も確認された。SOS および OSI にこのような変化をもたらしたのは冷却によりアクリルの体積が収縮することによってその密度が増加した結果と推察された。

一方、温暖水 (45°C) に浸漬させた場合の結果は、SOS は寒冷負荷時とは逆方向に変化する結果で、ファントムの温度が上昇することによって値は低下し、温度が低下することによって値は上昇した。TI も逆方向に変動するが、寒冷負荷時と同様に再現性は SOS より若干低かった。また、OSI は、ファントムの温度が上昇することによって値は低下、温度が低下することによって値は上昇して、完全な再現性も確認された。

また、冷凍庫に 24 時間ファントムを冷却した実験結果からも、経時的にファントムの温度が上昇していくにつれて、明瞭に SOS は上昇、OSI は低下し、TI は前 2 者ほどの明瞭さはないが上昇する現象が認められ、前述の結果を補強した。

これらの結果より、ファントムは温度が低くなれば SOS と OSI は明らかに上昇し、温度が高くなれば明らかに低下し、TI についてはその反対方向に変化するがやや再現性は前 2 者よりも弱いことが証明されたわけである。この SOS の温度に基づく変動とその方向性については、湿式の QUS でファントムもしくは人間および死体を対象として行った先行研究結果^{3,4)}とも一致していた。

以上から、乾式の QUS によって踵骨骨強度を評価する場合においては、測定室内の温度を一定にした上で測定し評価することの重要性が示唆された。しかし、アクリル製のファントムは人体とは異なり血液循環や皮下組織 (脂肪や筋肉) が存在するわけではなく、また、呼吸運動等に基づく微細な足の動きに留意する必要はないので、本研究結果をそのまま人体の踵骨骨強度の測定に応用するわけにはいかないであろう。従って、人間を対象として踵部に対し温度負荷を与えて骨評価指標の変動を確認することが大切で、今後の実行すべき課題としたい。

V. 結論

アクリル製のファントムに寒冷及び温暖の負荷を与え、その前後でファントムを超音波骨評価装置

AOS-100 で計測することによって、SOS、TI および OSI の変動を観察した。その結果、ファントムの温度が低下すると SOS と OSI は上昇し、TI は低下した。ファントムの温度が上昇するとその逆の現象が生じた。再現性については SOS と OSI の方が TI より高かった。

参考文献

- 1)岡野 亮介; 超音波骨評価装置 AOS-100 による音響的骨評価値の妥当性、信頼性、再現性および測定精度, 萩国際大学論集, 4: pp.107-115, 2002
- 2)岡野 亮介; 踵骨骨強度の発育状態に対する縦断的観察—小学校1年生時から6年生時まで2カ月毎に測定した男児1例について—, 山口福祉文化大学研究紀要, 1: pp. 91-97, 2008
- 3)Ike, M.,Kajita, E.,Mitamura, S.,Nishino, H.,Yamagami, T.,& Nagahama, N.;Precision of quantitative ultrasound measurement of heel bone and effects of ambient temperature on the parameters. Osteoporos. Int.,10: pp. 462-467, 1999
- 4)Pocock, N.A., Babichev, A., Culton, N., Graney, K., Roone,J., J.,Bell,D., & Chu, J.;Temperature dependency of quantitative ultrasound. Osteoporos. Int.,11: pp. 316-320, 2000