● 研究論文 -

幼児の発育にともなうアキレス腱長の変化

山田一典 (福岡こども短期大学 准教授) 怡十ゆき絵 (福岡こども短期大学 講師) 浦田達也 (神戸医療福祉大学 講師) 吉塚亮一 (城南スポーツ整骨院 院長)

要約

本研究は効児の発育にともなうアキレス腱長の変化について調査し、その特性について明らかにすることを目的とした。本研究で測定を実施した項目は、身長、体重、下腿長(左右)、腓腹筋腱長(左右)とヒラメ筋腱長(左右)の5種類8項目であった。これら全ての項目は加齢とともに増加する傾向を示した。また、下腿長、腓腹筋腱長、ヒラメ筋腱長は左右の差および男女の差を示さなかった。これらの結果から、幼児は身長や体重の発育と同様に、アキレス腱長を増加させるものと考えられる。アキレス腱長と月齢の関係をみると、腓腹筋腱長は12ヶ月頃から30ヶ月頃にかけてと48ヶ月頃から60ヶ月頃にかけて急激に増加し、ヒラメ筋腱長は12ヶ月頃から30ヶ月頃にかけて急激に増加した。さらに各アキレス腱長を下腿長で除した腓腹筋腱長割合とヒラメ筋腱長割合それぞれと年齢の関係を見ると、腓腹筋腱長割合では0歳と1歳、ヒラメ筋腱長割合では0歳と1歳、0歳と2歳で有意に増加した。これらの研究結果と乳児・幼児の歩行に関する先行研究を合わせて考えると、乳児型歩行(12ヶ月頃)から幼児型歩行(21ヶ月頃)に変化をする時期に腓腹筋腱長、ヒラメ筋腱長ともに増加がみられ、さらに成人型歩行(36ヶ月頃)を獲得した後、腓腹筋腱長の増加がみられるものと考えられた。したがって幼児期のアキレス腱長の増加には歩行など口コモーションに大きく関与し、その獲得状況から変化を引き起こされるものと考えられた。

キーワード:腱の可塑性、超音波組織断層撮影法、ロコモーション

緒言

腱は筋から骨にかけて繋がっており、関節での力の 伝達を行い、全ての運動に関与することから、その役 割やトレーニングなどの負荷による特性の変化は注目 を集めている。近年、超音波組織断層撮影法を用いた ヒト生体における筋腱の動態計測の確立 8) 13) により 生体外部からの情報(関節の角度やトルク)だけでな く生体内部の筋束・腱組織の形態や動態の情報も利用 し、ヒト身体運動中の骨格筋メカニクスが探索されて いる。これら腱に関する研究は、ヒト身体運動中の動 態 9) 10) 11) や一定期間のトレーニング負荷に対する特 性の変化1)2)を調査するなど様々な方向から行われて いるものの、腱の発育発達に関する報告は少ない。し かし、身体運動における腱はヒト身体の重要な効果器 であることから、その発育発達に関する知見は腱の動 態やトレーニングについて考察する際の基礎データに 成り得ると考えられる。

超音波画像診断装置を用いて腱の形態的特性について調査した研究として、双生児間のアキレス腱の形態的特性について比較した團野と石川 5 は、環境的要因によって変化することを報告している。また、久保 14 は、児童のアキレス腱の力学的特性について調査し、成人と比較して児童のアキレス腱は柔らかい(伸びやすい)ことを報告している。これらの研究報告に合わせ、幼少期は伏臥位、仰臥位、座位、四つん這い、立

位を獲得し、その後二足歩行を可能とする²⁴⁾ ため、 目まぐるしくこれらの動作を獲得していくことから、 その環境下でアキレス腱長も大きく変化させられると 考えられる。

そこで本研究は、幼児の発育にともなうアキレス腱 長の変化について調査し、その特性について明らかに することを目的とした。

方法

(1) 被験者

被験者は、保育園に在籍する園児 52 名(0歳児:2名、1歳児:5名、2歳児:8名、3歳児:15名、4歳児:16名、5歳児:6名;平均3.9±1.5歳;男児:29名、女児:23名)とした。すべての被験者とその保護者は、研究に参加する前に本研究の目的、実験内容の説明を受け、保護者はそれを理解した上で本研究に参加するための承諾書を提出した。なお、本研究はヘルシンキ宣言の趣旨に従うとともに、福岡こども短期大学倫理委員会に申請し、承認を得た。

(2) アキレス腱長の測定と分析

アキレス腱長の測定は、山田と谷端²⁵⁾ と山田ら²⁶⁾ の方法を参考にした。被験者は安静立位の状態で、超音波画像診断装置(Noblus、日立製作所社製、日本)を用いて測定した。なお、本研究に参加したすべての

被験者は、自立可能であった。アキレス腱長(cm)は、腫骨隆起とのアキレス腱付着部から腓腹筋遠位部まで(腓腹筋腱長、以下 MG とする)と、腫骨隆起とのアキレス腱付着部からヒラメ筋遠位部まで(ヒラメ筋腱長、以下 SOL とする)をそれぞれ画像で確認し皮膚上のポイントから長さを巻尺で測定した(図 1)。下腿長(cm、以下 Shank とする)は、大腿骨外側上顆点から外果最突出点までの長さを巻尺で測定した。腱比率は Shank に対する MG と SOL の相対値(%)とした(それぞれ、% MG、% SOL)。なお、これらの測定は左右脚ともに実施した(以下、右脚を R、左脚を L とする)。

(3) 統計処理

本研究によって示された測定の値は、平均値±標準偏差として示した。平均値の差の有意性について、各測定項目と年齢の比較には反復測定の一元配置分散分析を行った。その後、主効果が認められた場合は、Scheffeの方法を用いて多重比較検定を行った。各測定項目における左右脚の比較には対応のないt-testを行った。各被験者の月齢とMGおよびSOLそれぞれの関係については、決定係数を基に、当てはまりの良さから3次の曲線回帰式を用いた。なお、統計的有意水準は危険率5%未満とし、p<.05で表示した。

結 果

本研究の測定で得られた全ての項目の値は、表 1 に示す。絶対値で示された R-MG、L-MG、R-SOL、L-SOL、R-Shank および L-Shank は年齢の増加とともに増加した。 3 次の曲線回帰式からみると、各被験者の月齢と MG および SOL それぞれの関係は、MG においては 12 ヶ月頃から 30 ヶ月頃にかけて、48 ヶ月頃から 60 ヶ月頃にかけて増加する傾向を示した。SOL

においては、12 ヶ月頃から 30 ヶ月頃にかけて増加する傾向を示した(図 2)。これらの傾向から、各被験者の年齢と相対値で示された腱比率の関係性をみたところ、R-%MG、L-%MG は 0 歳から 1 歳にかけて有意に増加した後、1 歳から 5 歳までは大きな変化を示さなかった(図 3、p<.05)。R-%SOL、L-%SOL は 0 歳から 2 歳にかけて有意に増加した後、3 歳から 5 歳までは低下する傾向を示した(図 3、p<.05)。なお、各測定項目における左右の差は示されなかった。さらに、各測定項目における男児と女児の差は示されなかった。

考 察

本研究は、幼児の発育に伴うアキレス腱長の変化に ついて調査し、その特性について明らかにすることを 目的とした。その結果、年齢の増加とともに MG およ びSOL共に長さを増加させる傾向を示したが、特に MG は 12 ヶ月頃から 30 ヶ月頃にかけてと 48 ヶ月頃 から 60 ヶ月頃にかけて急激に増加し、SOL は 12 ヶ月 頃から30ヶ月頃にかけて急激な増加を示した。さら に本研究は年齢と各腱長を下腿長で除した% MG およ び% SOL との関係についてみた。% MG では 0 歳か ら1歳にかけて有意に増加した後、定常状態を示し、% SOLでは0歳から2歳にかけて有意に増加した後、定 常状態を示した。これらの結果から、12ヶ月頃から 30ヶ月頃にかけての乳児型歩行から幼児型歩行への移 行期に MG、SOL 共に長さを増加させ、さらに成人型 歩行を獲得した48ヶ月頃から60ヶ月頃にかけてMG の長さを増加させるものと考えられた。したがって幼 児の発育に伴うアキレス腱長の増加は、歩行発達過程 に依存するものと考えられる。腱は筋の収縮によって 産み出されたエネルギーを骨に伝え、関節運動を引き 起こす4007。特にアキレス腱は下腿の腓腹筋ならび

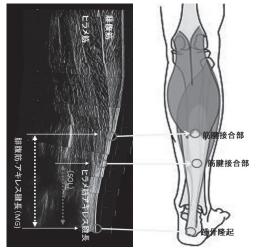


図 1: 下腿三頭筋における超音波撮影画像とイラスト

表 1: 各年齢における測定値

	Age					
	0	1	2	3	4	5
Height (cm)	71.3±0.7	77.4±2.1	96.1±2.5	102.5±3.3	107.7±3.6	115.2±3.1
Body mass (kg)	9.1±0.6	10.1 ± 1.0	13.9 ± 1.2	16.3±1.3	17.0±1.5	19.8±1.1
R-MG (cm)	4.8±0.05	6.4 ± 0.5	9.1 ± 0.9	10.1±1.0	10.6±1.4	12.4±1.2
L-MG (cm)	4.9±0.1	6.4±0.7	8.9±0.6	10.0±1.1	10.6±1.2	12.4±1.3
R-SOL (cm)	1.7±0.3	2.2 ± 0.4	3.7 ± 0.4	4.1±0.8	4.2±0.5	4.2±0.5
L-SOL (cm)	1.6±0.1	2.2 ± 0.2	3.7 ± 0.3	4.2±0.8	4.1±0.4	4.2±0.5
R-Shank (cm)	12.1±0.1	12.7 ± 0.8	17.8±0.6	19.3±1.4	20.8±1.0	22.6±0.8
L-Shank (cm)	12.1±0.1	12.7 ± 0.8	17.7±0.8	19.2±1.3	20.7±1.0	22.4±0.9
R- % MG (%)	39.4±0.1	50.3 ± 2.9	51.1 ± 5.3	52.4±3.5	50.9±6.0	55.0±4.1
L- % MG (%)	40.3±0.9	50.2 ± 3.4	50.6 ± 3.7	51.9±3.7	51.3±5.0	55.3±3.8
R- % SOL (%)	13.7±2.2	17.3 ± 2.6	20.8±1.6	21.4±3.7	20.0±2.5	18.7±2.3
L- % SOL (%)	13.3±1.0	17.6±0.6	21.1±1.3	22.0±3.6	19.7±2.1	19.0±2.5

全ての値は, 平均値±標準偏差で示す.

にヒラメ筋から踵骨隆起に付着している腱であり、ヒトが歩行や跳躍などの移動運動(ロコモーション)の際に必要である。アキレス腱の可塑性を調査した先行研究では、トレーニングに伴う変化1020、一卵性双生児間の比較50や競技種目間の比較120など様々な検討が行われているものの、これら一連の先行研究は成人を対象としたものがほとんどである。また、機能的および力学的な特性について久保140は児童のアキレス腱は大人と比較して柔らかいことを明らかにしているが、発育にともなうアキレス腱の形態的特性の変化については明らかにしていない。そこで本研究は疫学的研究の手法から、幼児の発育に伴うアキレス腱長の変化について調査した。その結果、以下の傾向が明らかになった。

アキレス腱が長いということは短いものに比べて、 筋の収縮に伴う伸長(strain や elongation)を少量にし、 少しの伸長で足関節の底屈動作を可能にする。これは エネルギー効率の観点や疲労軽減の観点から見ても効 果的であることが明らかにされている 2)23)。また近年、 アフリカ人選手による陸上競技、特に中・長距離種目 の活躍は記憶に残されていることかと思われるが、黒 人選手のアキレス腱長は日本人と比較して長いことも 明らかにされている150。つまり、アキレス腱が長いこ とは、効率の良い運動を可能にするものである。一般 的に0歳から1歳にかけて乳児は伏臥位、仰臥位、座 位、四つん這い、立位を獲得し、その後、独立した二 足歩行を獲得する 24)。独立した二足歩行を獲得した1 歳頃の乳児は1歳9ヶ月頃にかけて幼児型歩行を獲得 し、さらに3歳頃には成人型歩行を獲得する 3) 17) 18) 19) 20) 21) 22)。これらの歩行パターンを筋電図の変化か らみた先行研究 3) 17) 18) 20) 22) によると、アキレス腱の 付着する腓腹筋は、歩行動態を発達させることで筋放 電を減少させている。つまり、幼児は発達にともない 筋の収縮を最小限に抑え、アキレス腱の伸縮を用いて

歩行しているものと考えられる。したがって、本研究の結果で12ヶ月頃から30ヶ月頃にかけてMG、SOL共に腱長を増加させたのは、乳児型歩行から幼児型歩行へ移行していく中で変化し、さらに48ヶ月頃から60ヶ月頃にかけてMGの腱長を増加させたのは幼児型歩行から成人型歩行へ移行していく中で変化したものと考えられる。しかしながら、これらアキレス腱長の変化は、歩行動態の変化に伴って引き起こされたものなのか、それともアキレス腱の変化が歩行動態を変化させたものなのかは明らかになっておらず、さらなる検討が必要と考えられる。

月齢と腱長の関係から傾向を明らかにした後、年齢 と腱長割合の関係から統計学的有意な差についても調 査した。その結果、% MG はお歳から1歳にかけて、% SOL は 0歳から 2歳にかけて有意な増加を示した。そ の後、2歳から5歳にかけて% MG および% SOL は 定常状態を保った。さらに% MG は50%から60%の 間を推移した。成人の日本人について調査した先行研 究 15) 25) 26) によると、% MG は 46%から 61%の間で あったと報告されている。したがって、本研究で得ら れた幼児の値は、成人と変わらないものであった。ま た、成人の日本人の% SOL について調査した先行研 究 15) 25) 26) によると、10%から 15%の間で報告されて いる。本研究で得られた% SOL は3歳時の22.0 ±3.6% を最長に、その後減少傾向である。腱長は筋の肥大に 伴う羽状角の増加によっても、その長さに大きく影響 を及ぼされる16)。しかしながら、本研究ではヒラメ筋 における羽状角の測定を実施していなかったため、% SOLの減少に関するメカニズムは解明できなかった。 そこで本研究のリミテーションおよび今後の展望とし て、腓腹筋およびヒラメ筋の筋部に関する形態的特性 とアキレス腱の関係性についてさらに測定を行う必要 があると考えられる。また% MG についても、2歳の 段階で成人と変わらない値になっていることも、歩行

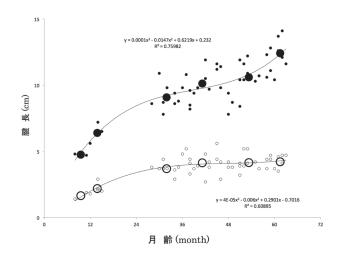


図 2:腱長と月齢の関係 黒丸は MG の腱長を示し、白丸は SOL の腱長を示す。大きく示された黒丸と白丸は、 各年齢の平均値を示す。

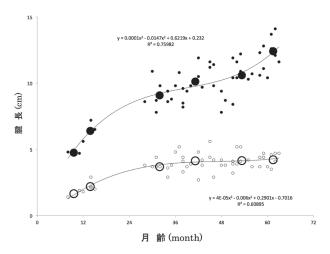


図3: 下腿長で除されたMG, SOLそれぞれのアキレス腱長割合と各年齢の関係 % MG のアスタリスクは 0 歳から 1 歳にかけての有意な差を示す. % SOL のアスタリスクは 0 歳から 1 歳, 0 歳から 2 歳それぞれの有意な差を示す (* p<.05)

以外の運動の影響を受けているのか、それとも% SOL 同様、腓腹筋の筋肥大に伴う羽状角の増加に影響を受けているのか、個人差も含めて、こちらについても今後調査を深めていく必要があると考えられる。また、幼児を対象とした研究であることから被験者の確保が非常に困難ではあるが、各年齢および月齢にバランスよく測定を実施できるよう、継続的な調査を進めていかなくてはならないと考えられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費(JSPS KAKENHI Grant Number JP 17K13176)の助成を受けたものである。また、本研究を遂行するにあたり大阪体育大学教授・石川昌紀先生ならびに石川研究室に所属するスタッフの皆様に多大なご支援をいただいた。さらに、実験および調査には福岡こども短期大学附属だいいち幼稚園・保育園にご協力を得た。ここに感謝の意を表し御礼申し上げる。

〈文献〉

- Arampatzis A, Karamanidis K and Albracht K. (2007)
 Adaptational responses of the human Achilles tendon by
 modulation of the applied cyclic strain magnitude, The Journal of
 Experimental Biology 210, 2743-2753.
- Arampatzis A, Peper A, Bierbaum S and Albracht K. (2010)
 Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain, Journal of Biomechanics 43, 3073-3079.
- 3)Burnett CN and Johnoson EW. (1971) Development of gait in childhood, part 2. Dev Med Child Neurol 13, 207-215.
- 4) Butler D.L., Grood E.S., Noyes F.R. (1978) Biomechanics of ligaments and tendons. Exercise & Sport Sciences Reviews, 6 (1), 125-182.
- 5) 團野亮人, 石川昌紀. (2010) 腱を鍛えるための要因を探る~遺伝的・環境的要因の影響~. 大阪体育大学体育学部卒業論文.
- 6) Dunn M.G. and Silver F.H. (1983) Viscoelastic behavior of human connective tissues: Relative contribution of viscous and elastic components. Connective Tissue Research, 12, 59-70.
- 7) Elliot D.H. (1965) Structure and function of mammalian tendon. Biological reviews, Cambridge Philosophical Society 40 (3), 392-421.
- 8) Fukunaga T et al. (2002) Muscle and tendon interaction during human movements, Exerc Sport Sci Rev 30, 106-110.
- 9) Ishikawa M, T Finni and P.V. Komi (2003) Behavior of vastus lateralis muscle-tendon during high intensity SSC exercise in vivo, Acta Physiol Scand 178, 205-213.
- Ishikawa M, J Pakaslahti, P.V. Komi (2007a) Medial gastrocnemius behavior during human running and walking, Gait & Posture 25, 380-384.
- 11) Ishikawa M and Komi PV (2007b) The role of the stretch reflex in the gastrocnemius muscle during human locomotion at various speeds, J appl physiol 103, vol3, 1030-1036.
- 12) 池田隼人, 伊藤陽介, 石川昌紀. (2009) 下肢腱形態のスポーツ 特性と左右差. 大阪体育大学体育学部卒業論文.
- 13) Kawakami Y and Fukunaga T. (2006) New insights into in vivo human skeletal muscle function, Exerc Sport Sci Rev 34, 16-21.
- 14) 久保啓太郎. (2011) 発育に伴う筋・腱特性の変化. 体育の科学 61, 191 - 194.

- 15) Kunimasa Y, Sano K, Oda T, Nicol C, Komi P.V., Locatelli E, Ito A, Ishikawa M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. Scand J Med Sci Sports 24, 269-274.
- Lieber R.L. (2010) Skeletal muscle structure, function, and plasticity. Wolters Kluwer, USA.
- McGraw MB. (1940) Neuromuscular development of the human infant as exemplified in the achievement of erect locomotion. J Pediat 17, 747-771.
- 18) Okamoto T and Kumamoto M. (1972) Electromyographic study of the learning process of walking in infants. Electromyogr 12, 149-158.
- 19) Okamoto T and Goto Y. (1985) Human infant pre independent and independent walking. In: Kondo S ed, Primate Morphophysiology, locomotor analyses and human bipedalism. Pp25-45, University of Tokyo Press.
- Okamoto T and Okamoto K. (2001) Electromyographic characteristics at the onset of independent walking in infancy case. Electromyogr Clin Neurophysiol 41, 33-41.
- 21) Okamoto T et al. (2003) Electromyographic developmental changes in one individual from newborn stepping to mature walking. Gait posture 17, 18-27.
- 22) 岡本勉, 岡本香代子 (2004) ニューエクササイズウォーキング. pp51 121, 歩行開発研究所.
- 23) Sano K, Ishikawa M, Nobue A, Danno Y, Akiyama M, Oda T, Ito A, Hoffr' en M, Nicol C, Locatelli E, Komi P.V.. (2013) Muscletendon interaction and EMG profiles of world class endurance runners during hopping. Eur. J. physiol, 113, 1395-1403.
- 24) 佐々木玲子 (2003) 乳幼児の発達段階と運動遊び. 子どもと発育発達 1, 50 52.
- 25) 山田一典, 谷端真帆. (2011) 筋と腱の形態的特性とドロップジャンプパフォーマンスの関係, 総合人間科学研究 第5号, 119-128.
- 26) 山田一典, 曽根裕二, 竹内亮, 金子勝司, 岩岡研典. (2013) 下 肢に障がいを有する者と健常者の比較から筋・腱形態の発育発達 を探る. 総合人間科学1号, 129 - 135.