

Title	足アーチ構造の機能
Sub Title	
Author	橋本, 健史(Hashimoto, Takeshi)
Publisher	慶應医学会
Publication year	2004
Jtitle	慶應医学 (Journal of the Keio Medical Society). Vol.81, No.1 (2004. 3) ,p.17- 21
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	講座
Genre	Journal Article
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00069296-20040300-0017

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

講 座

足アーチ構造の機能

慶應義塾大学月が瀬リハビリテーションセンター整形外科

橋本健史

Key words : foot, arch, flatfoot, biomechanics

はじめに

最近、遺伝子研究が進み、ヒトとサルの違いは、遺伝子としてはごくわずかであり、ヒトとチンパンジーではその約99%までは同一であるという報告があった¹⁾。ヒトとサルを分けるものは何か？それはやはり直立二足歩行を常時、日常的に行うかどうかにあるのではないか。サルは一時的には二足歩行を行うが、あくまでも短時間である。ヒトのように常時二足歩行することはできない。それはなぜか、様々な原因をあげることができるが、私は足の構造とくにアーチ構造の違いを強調したい。

サルの足部は扁平で、足アーチ構造は存在しない。それではいつ頃、ヒトは足部アーチ構造を持つに至ったのか。タンザニアのラエトリで約350万年前の猿人の足跡がみつかり、その足跡にはすでに土踏まず一足アーチ構造が存在した²⁾。人類史を約500万年としてそのかなり初期の段階である猿人の足跡にすでに足アーチ構造が存在した事実は、足アーチ構造が直立二足歩行にかなり重要な要素であることをうかがわせる。

実際、足部アーチ構造は、全体重を支え、また力を効率的に地面に伝え、歩行のためのエネルギーを非常に小さくしていることがわかってきた。また最近、扁平足障害が注目を浴び、それについての診断、治療が進歩してきている。われわれは、これら足アーチの構成要素の中で足底の靭帯と筋の働きに注目してバイオメカニク的手法を用いて研究をおこなってきた。本稿では、足アーチ構造についての最近の知見とそのアーチが消失する新しい病気が最近注目を浴びてきているのでその最新の診断、

治療について報告する。

足アーチの機能

足アーチは、足部の距骨以下中足骨までの12個あまりの骨、それらをつなぐ靭帯、力源となる筋、腱および全体を制御する神経系より構成されている(第1表)。矢状面でのアーチである踵骨、距骨、舟状骨、楔状骨、中足骨からなる内側縦アーチと、冠状面でのアーチである楔状骨、立方骨、中足骨からなる横アーチが存在する。ヒトの二足歩行を支える足の機能として求められていることは、重い体重を支えること、移動に際して力を地面にうまく伝達することおよび接地時の衝撃を和らげることである。体重を支えるためには頑丈であればよいが、力の伝達という面では不利になる。矛盾するこの問題を解決したのが足アーチであった。

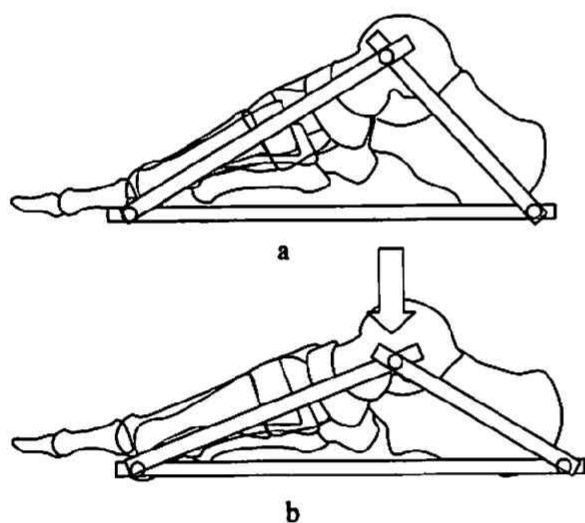
足アーチは Truss mechanism, Windlass mechanism という2つの機能を持っている。Truss mechanism というのは、足アーチが示す三角構造の働きのことである。足アーチは三角形とみなすことができ、上辺の2辺は、足根骨とそれらを結ぶ関節と強力な靭帯から作られる。底辺は、足底腱膜である。足アーチの2つの上辺が骨性構造で伸縮できない構造であるのに対して底辺が腱あるいは腱膜といった伸縮性に富む軟部組織であるため、三角形がつぶれることによって体重を支持し、かつ足接地時の衝撃を吸収する機能のことを Truss mechanism いう(第1図)。

Windlass mechanism とは、踵骨を起始として足趾基節骨に停止する足底腱膜が踵離地時に足趾背屈とともに巻き上げられることにより足アーチが高くなり、rigidな足となって踵離地から趾離地での蹴り出しの力をスムーズに地面に伝えることができるようになる機能である(第2図)³⁾。しかもこれらの mechanism は、

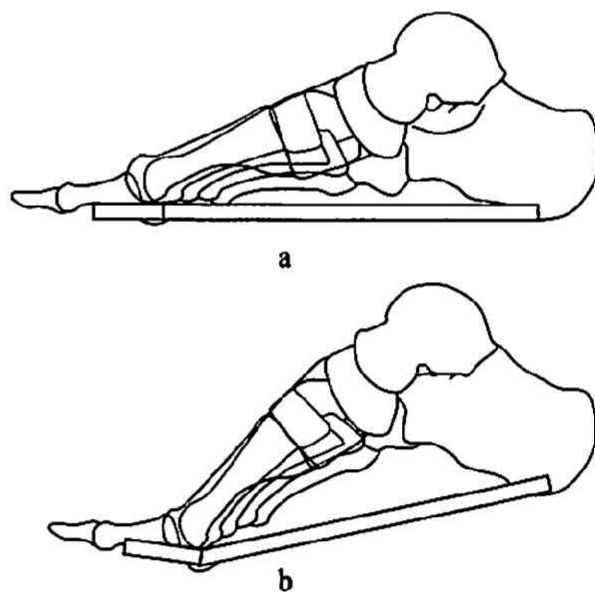
The function of the arch of the foot
Takeshi H ashimoto, MD
Department of Orthopaedic surgery, Keio university
Tsukigase Rehabilitation Center

第1表 足アーチ構造を形成する組織

	Medial longitudinal arch	Transverse arch
Bone	Talus Calcaneus Navicula bone Cuneiform bones Metatarsal bones	Cuneiform bones Cuboid bone Metatarsal bones
Ligament	Plantar aponeurosis Spring lig. Plantar cuneonavicular lig. Plantar tarsometatarsal lig.	Plantar aponeurosis Spring lig. Plantar intercuneiform lig. Plantar cuneocuboid lig. Plantar metatarsal lig.
Muscle	Tibialis posterior muscle Peroneus longus muscle Peroneus brevis muscle Flexor hallucis longus m.	Tibialis posterior muscle Peroneus longus muscle Peroneus brevis muscle
Nerve	Control nerve system	Control nerve system



第1図 Truss mechanism. 足部は三角形のトラス構造とみなすことができる。a: 非荷重時。b: 荷重時。荷重時には、トラス構造が沈み込み、力の分散と吸収を行う。



第2図 Windlass mechanism. a: 歩行相における立脚中期。b: 歩行相における踵離地時。線は足底腱膜を示す。踵離地時では母趾が背屈して足底腱膜が巻き上げられ、足アーチは高まる。

制御神経系によって歩行時の各期において適切にその働きを変化させていくことができるためにヒトは、おどろくほど少ないエネルギーで直立二足歩行を続けることができるのである。

筋、腱のはたらき

足部には、アキレス腱など何本かの筋、腱が走行しているが、足アーチ機能に対する筋、腱の重要性は最近まであまり指摘されることはなかった。近年、後脛骨筋腱

が非常に重要な働きをしていることが報告され、注目を浴びてきている⁴⁾。足部は歩行時に rigid な状態と flexible な状態をくりかえして、荷重の分散と力の伝達を巧妙に行っている。まず踵接地の直前に rigid な状態となり踵接地時の衝撃を吸収しやすくする。踵接地後しばらくして flexible な状態となり Truss mechanism によって体重を足底全体に分散する。その後再び rigid な状態となってけりだしの動力をうまく前足部に伝えるのである。足部の底屈、回外の働きをしていると考えられてきた後脛骨筋腱は、このとき重要な役割を演じていることがわかってきた⁵⁶⁾。

足部が rigid であるか、flexible であるかは、中足部の距舟関節、踵立方関節（ショパール関節）が大きな役割を持っている。すなわち、この2つの並んだ鞍状関節は運動軸が直交するとショパール関節はロックされて動きにくい rigid な足となり、逆に運動軸が平行になるとショパール関節はロックが解除されて動きやすい flexible な足となる。後脛骨筋腱は前足部を回内することによって運動軸を直交させ、ショパール関節をロックして rigid な足を作っていることがわかってきた。最近、この後脛骨筋腱が機能不全におちいって有痛性の後天性扁平足を作ることがあることが報告され、注目を集めている。これについては後述する。

われわれは、足アーチ構造の働きに関与している腱は後脛骨筋腱だけではないと考え、この後脛骨筋腱と対称的位置にある長腓骨筋腱に注目してバイオメカニクスの実験を行った。その結果、長腓骨筋腱も重要な働きをしていることがわかってきた。後脛骨筋腱は、脛骨および下脛骨間膜後面に起始して舟状骨、内側、中間、外側楔状骨、立方骨、第2、3、4中足骨底面などほとんどすべての足根骨底部に停止する。これに対して、長腓骨筋腱は、脛骨、腓骨の上方2/3に起始して内側楔状骨、第1中足骨底部に停止し、足底では、後脛骨筋腱と交叉する腱である。とくに興味深いことは、その走行であり、立方骨底面には深い長腓骨筋腱溝があり、それまで遠位方向に伸びていた腱がこの部で、急激に内側へ方向を変えられて、内側楔状骨、第1中足骨基部にいたる。したがってこの腱が牽引する力の分力は、かなり矢状面よりも冠状面に大きいといえる。

われわれは、Cadaver を用いて後脛骨筋腱と長腓骨筋腱の足アーチに対するはたらきを調べる研究を行った。皮膚と皮下組織を取り除いた Cadaver を固定し、各足根骨に3個ずつのマーカーを埋め込み、3次元座標計測器（Microscribe, Immersion co.）を用いて足根骨の動きを計測した。後脛骨筋腱と長腓骨筋腱を牽引して足アー

チの変化を調べた結果、長腓骨筋腱の牽引時に横アーチが高まることがわかった。そしてさらにその作用は後脛骨筋腱の牽引が伴うと強まることがわかった。長腓骨筋腱は歩行時に踵接地時に強く収縮することが筋電図上分かっている。踵接地時に長腓骨筋の働きによって横アーチが増強され、Truss mechanism がより有効に機能するのではないかと考えている

後脛骨筋腱機能不全について

最近、この後脛骨筋腱の機能障害によって生じる成人の後天性扁平足が注目を集めている。これについて述べたい。

病態：後脛骨筋腱は、内果の約1cm 遠位で、約15mm にわたって血管分布の少ない領域があり、この部位が何らかの原因で血行不良に陥り、腱が壊死、断裂をおこすにいたる⁷⁾。すると後脛骨筋腱が機能しなくなり、ショパール関節がロックされない状態すなわち足が flexible な状態で踵荷重をしてしまうため、体重の負荷が骨関節部分ではなくスプリング靭帯などの靭帯部分により多くかかってしまう。そのため、靭帯がその負荷に耐え切れず破断したりして後天性の扁平足を作る。足部は扁平、外反変形をおこして足部内側の舟状骨部に疼痛を訴える。また外側で腓骨外果と踵骨が impingement をおこして疼痛を生じ、さらに距骨頭部が内方へ脱臼して距骨下脱臼となる場合もある。

診断：視診で扁平足を確認することが重要で、とくに患者を立たせて後方から観察した時に通常は下腿に隠されているはずの足趾が、扁平外反変形があるために外側へはみだしてみえる too many toes sign を認める。ま

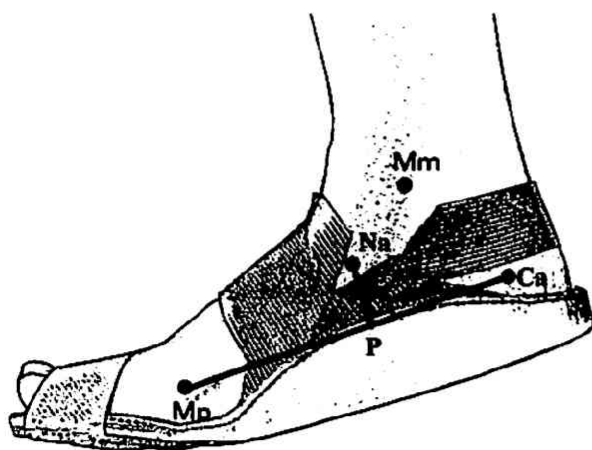


第3図 後脛骨筋腱機能不全症例の立位単純X線側面像。67歳、女性。著明な扁平足を示している。距舟関節は脱臼している。

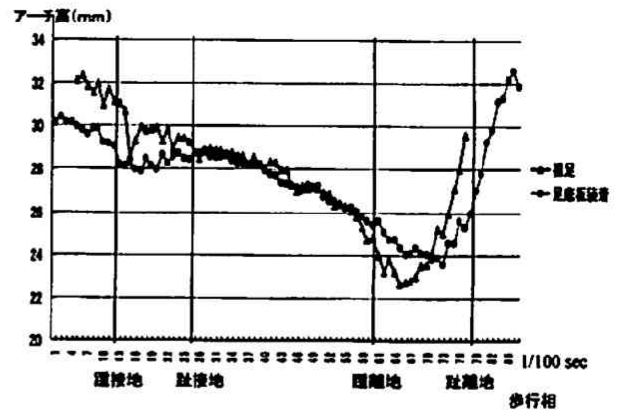
た、後脛骨筋腱が機能せず足をロックできないために片足での爪先立ちができない (single heel rise test 陽性)。単純 X 線写真では、外反扁平足を認め、ときに距骨下脱臼を認めることもある。特に距舟関節での垂脱臼が特徴的である (第3図)。MRI では、初期の段階から冠状断で後脛骨筋腱周囲に炎症性の滲出液貯留像と考えられる high signal density の像を認める。病期が進むと膨化した腱に断裂が生じ腱の low signal density 中の high signal density 像を形作る。さらに病期が進むと完全に断裂したり、消失したりする。

治療：治療は病期によって異なる。病期分類は Johnson のものが一般的である^{5,9)}。Johnson 分類では、病期を3期に分ける。Stage 1 は、扁平足が認められないか、あっても軽度で、主に後脛骨筋腱周囲に腫脹、疼痛を認め、爪先立ちが可能なものをいう。この場合は、保存的治療が中心となり、鎮痛消炎剤の内服、局所塗布、アーチサポートをつけた足底板の装着などである⁹⁾。

この足底板の作用機序についてはあまり詳細な報告は今までなかったが、われわれは、その動的機能について調べた。ボランティアの裸足内側の第1中足骨内側部、舟状骨内側部、踵骨内側部に赤外線反射マーカを貼り付けて、裸足の場合と足底板を装着した場合とで歩行させた。このマーカを3次元座標を3次元動態解析装置 (Elite, Milan, Italy) を用いて計測した。第1中足骨内側部と踵骨内側部のマーカ間の距離を足アーチ長とし、この線分への舟状骨内側部からの距離を足アーチ高とした (第4図)。裸足歩行の場合には踵接地時と踵



第4図 足底板を装着した足部内側。Mp：第1中足趾節間関節内側部。Ca：踵骨内側部。Na：舟状骨内側結節部。P：Naから直線 Mp-Ca に下ろした垂線の足。Mm：内果。足アーチ長：線分 Mp-Ca。足アーチ高：線分 Na-P。



第5図 足底板の足アーチに対する効果。横軸が時間軸であり歩行相を示す。歩行相における踵接地直後、裸足歩行では急激な足アーチ高の低下が起こったのに対して、足底板装着歩行では観察されなかった。また、踵離地直後、裸足歩行では急な足アーチ高の低下が起こったのに対して、足底板装着歩行では観察されなかった。

離地時に足アーチ高の急な減少と足アーチ長の増大が観察された。これに対して足底板装着時はこの急な変化が緩和された (第5図)。後脛骨筋腱機能不全の症例では、後脛骨筋による前足部のロック機構が消失してしまうため、踵接地時の足アーチへの衝撃が強まる。足底板はこの衝撃を緩和する働きがあることが解明された。

Stage 2 は、明らかな外反扁平足が認められるが徒手によって矯正可能で、爪先立ちが不可能な場合である。この場合、足底板を中心とした保存的治療に抵抗するときは、観血的治療をおこなうがその方法についてはいまだコンセンサスは得られていない。いくつかの方法が報告されているが、大きく、腱の再建、靭帯の再建、骨切り術とに分けられる。腱の再建では後脛骨筋腱を長趾屈筋腱、長母趾屈筋腱で再建する方法、また前脛骨筋腱を腱移行する方法が報告されている。靭帯再建では spring 靭帯を再建する方法が報告されている。骨切りは踵骨を踵骨体部で骨切りして内方移動を行って踵骨外反を矯正する方法が報告されている。これらは、いくつかを組み合わせる場合も多い。われわれは、stage 2 には、長趾屈筋腱を遊離、反転して、舟状骨に開けた骨トンネルを通して後脛骨筋腱を再建する腱移行法と踵骨を踵骨体部で骨切りして遠位骨片を約 1 cm 内方移動して外反を矯正する踵骨骨切り術とを併用して好成績を得ている。足趾の底屈に関しても長趾屈筋腱は長母趾屈筋腱と交通枝を持つので、問題は少ない。

Stage 3 は著明な外反扁平足を呈して後足部は、rigid で徒手でも矯正不可能な場合である。距骨頭部が内方へ

脱臼することもある。治療は関節固定術が基本となる。
距踵関節、踵立方関節、距舟関節が対象となる¹⁰⁾。

文 献

今後の課題

足アーチの機能は2つの分野で未解明な部分が多い。
1つ目は、アーチの動的機能の運動学的解明である。歩行時に筋、腱がどのようなタイミングで機能し、骨、関節にどのように働いて足アーチを保っているのかは詳しくは解明されていない。われわれは、長腓骨筋について横アーチに対する効果を解明してきたが、今後さらに短腓骨筋、腓腹筋などその他の筋についても検討していきたい。

2つ目は、足アーチの制御神経系についてである。この点に関しては、ほとんど報告がない。足アーチに動的な機能があるからには、それを制御する神経系があるはずで、足底圧、靭帯の張力、関節内圧を総合して足に加えられた力、足の位置を即座に情報収集して足アーチをどう変えていくかの指令が出されているはずである。足根部には、距骨と踵骨の間に足根洞という自由神経終末の集まった箇所があり、ここが情報集積センターではないかといわれているが、いまだ解明されていない。われわれはこの問題にも電気生理学的手法を用いてアプローチを行う計画を立てている。

これらの問題が解明されると後脛骨筋腱機能不全の治療法に画期的な改善がなされるばかりでなく、将来 tissue engineering によって作られた足の組織に真の機能を付帯させることができると考えられるのである。それは、歩くことも走ることもでき、取り替える必要のない真の義足の完成を意味するのである。

- 1) Navarro A, Barton NH : Chromosomal speciation and molecular divergence-accelerated evolution in rearranged chromosomes. *Science* 300 : 321-324, 2003
- 2) Cappecchi V : Reflections on the footprints of the hominids found at Laetoli. *Anthropol Anz* 42 : 81-86, 1984
- 3) Kappel-Bargas A, et al : The windlass mechanism during normal walking and passive first metatarsalphalangeal joint extension. *Clinical Biomechanics* 13 : 190-194, 1998
- 4) Johnson KA, Strom DE : Tibialis posterior tendon dysfunction. *Clin Orthop* 239 : 196-206, 1989
- 5) Kitaoka HB, Luo ZP, An KN : Effect of the posterior tibial tendon on the arch of the foot during simulated weightbearing : biomechanical analysis. *Foot Ankle Int.* 18 : 43-46, 1997
- 6) Sharkey NA : Biomechanical consequence of plantar fascial release or rupture during gait : part 1- disruption in longitudinal arch conformation. *Foot Ankle Int.* 19 : 812-820, 1998
- 7) Frey C, Shereff M, Greenidge N : Vascularity of the posterior tibial tendon. *J Bone Joint Surg.* 72-A : 884-88, 1990
- 8) Chao W, Wapner KL, Lee TH, Adams J, Hecht PJ : Nonoperative management of posterior tibial tendon dysfunction. *Foot Ankle Int* 17 : 736-741, 1996
- 9) Myerson MS : Adult acquired flatfoot deformity-treatment of dysfunction of the posterior tibial tendon. *J Bone Joint Surg* 78-A : 780-792, 1996
- 10) O'Malley MJ, Deland JT, Lee KT : Selective hindfoot arthrodesis for the treatment of adult acquired flat-foot deformity : An *in vitro* study. *Foot Ankle Int* 16 : 411-417, 1995