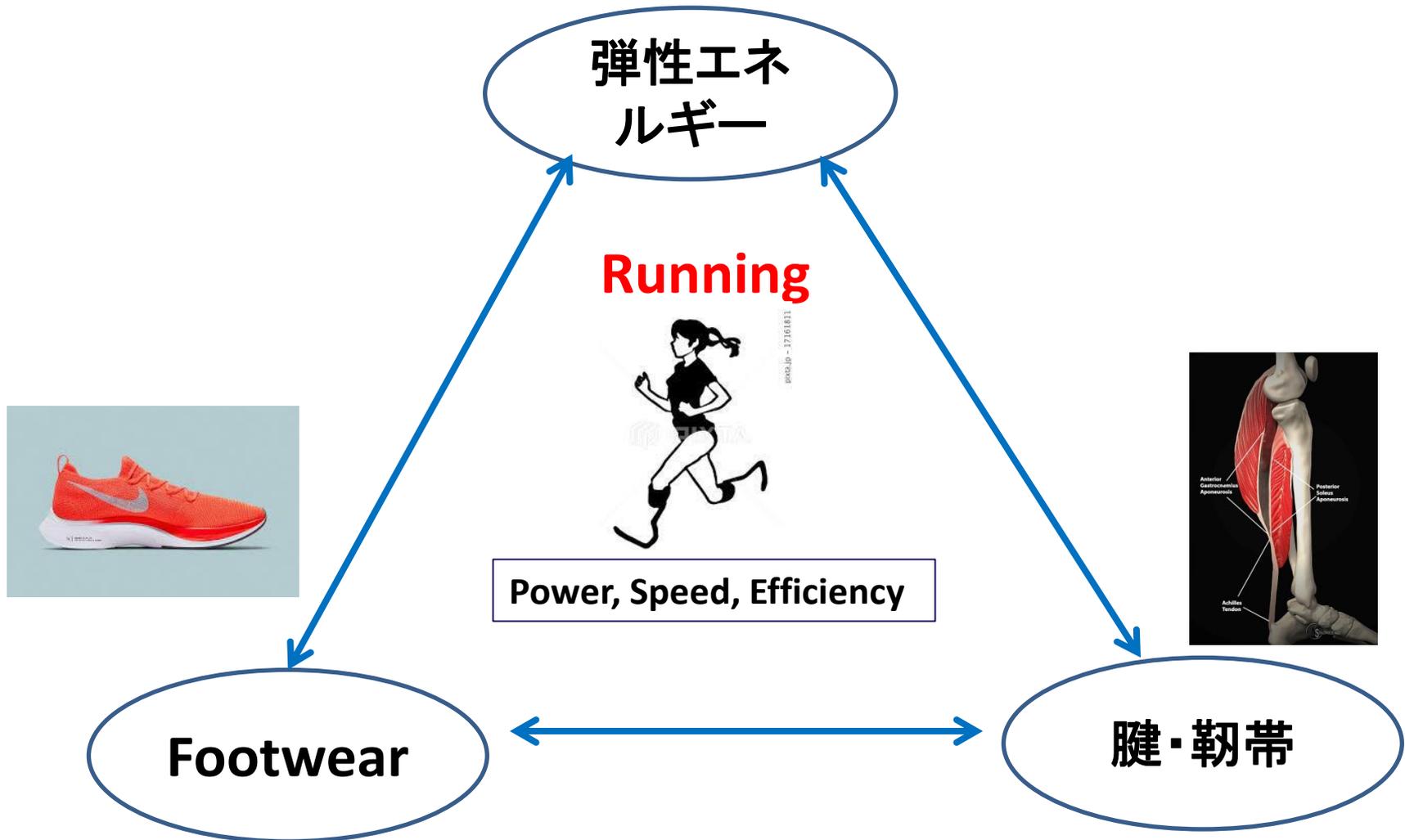


Zoom 会議： ランニングと弾性エネルギー

話題提供者： 安田 好文（昭和46年卒）





2018 ベルリンマラソンで世界記録
(2°01' 39 ")を樹立したE. キプチョゲ



東京マラソン 2019 スタートの1コマ
選手が履いている靴に注目！

神戸OB会
2019.4.21

最近の陸上界のTopics

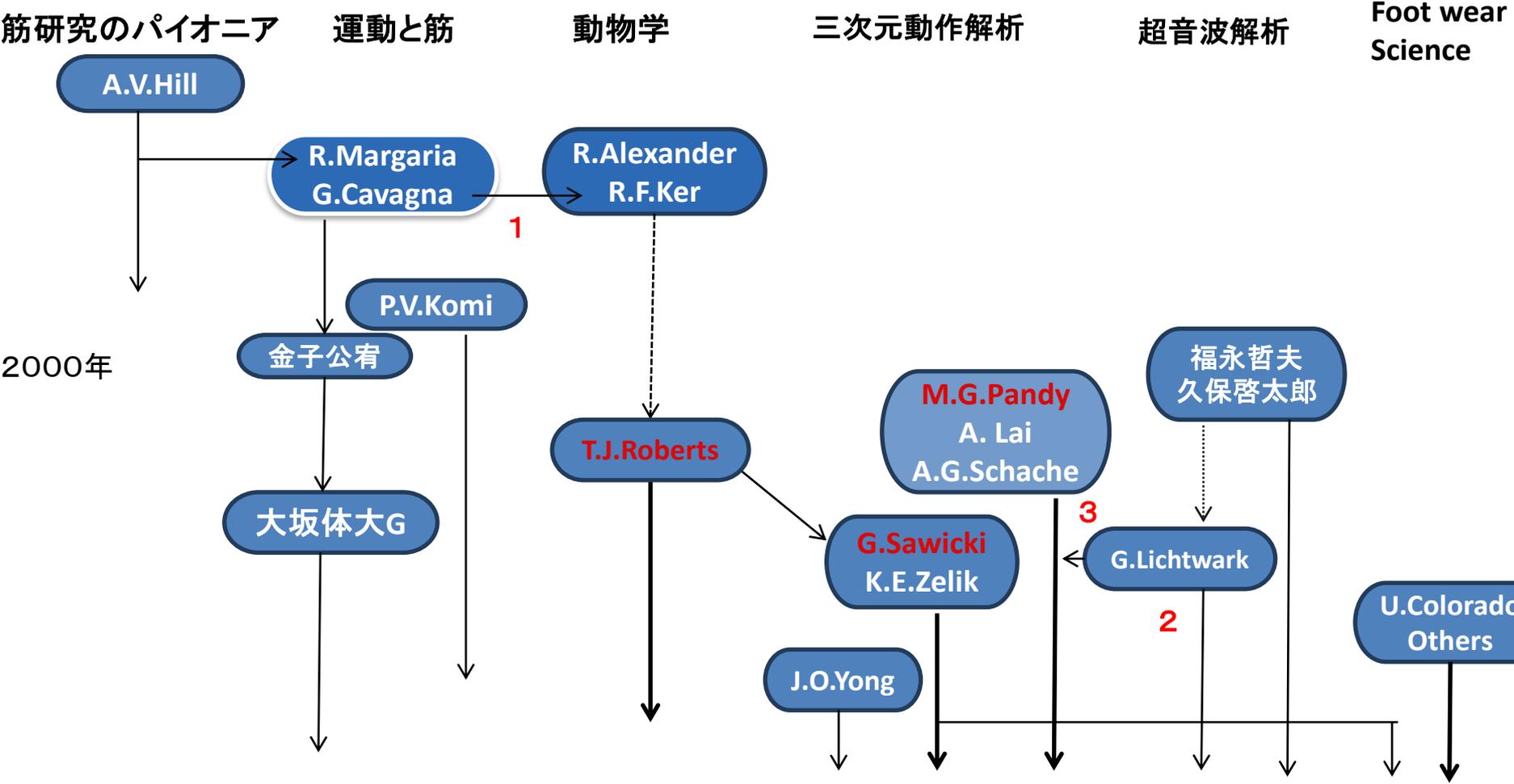
- (1) Nike 厚底シューズの爆発的な普及 (2019.5～)
各種駅伝・マラソン大会、社会人・学生だけでなく高校生も
- (2) MGCの盛り上がり(2019.9.15～2020.3.8)
- (3) 厚底シューズの使用規制(WA: 2020.1.31)
ソールの厚さ40 mm以下、プレートは1枚以内 (想定内?)
- (3) 新型コロナウイルスによる大会の延期・中止(2020.3～)
- (4) 東京オリンピックの延期決定(2020.3.24)
- (5) シューズ使用に関する規則(TR5)の改定(WA:2020.7.28より施行)
靴底の厚さを800 m以上の種目では25 mm以内(それ未満の種目では20 mm)
- (7) 日本陸上競技大会・長距離種目の開催(2020.12.4)
好記録の続出(相沢、伊藤、新谷、田中選手)
シューズ問題の再燃?(Carbon plate使用のspike shoes)



Nike Zoomx Dragonfly

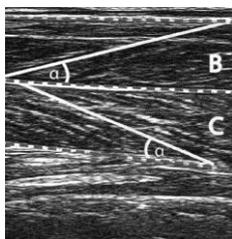
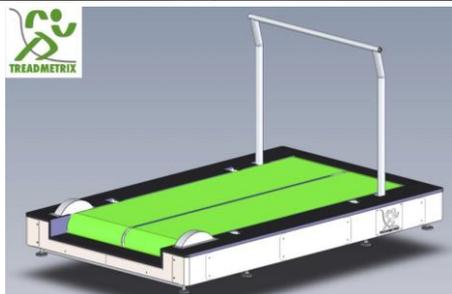
* **ナイキの戦略勝ち 着想の妙、企業展開の優、アカデミズムの利用**

ランニングと弾性エネルギー研究の流れ



課題: **SSCの意義?** **kineticsの導入** **方法論の開発 (joint数、自由度、粘弾性体)** **kineticsとenergeticsの一致**

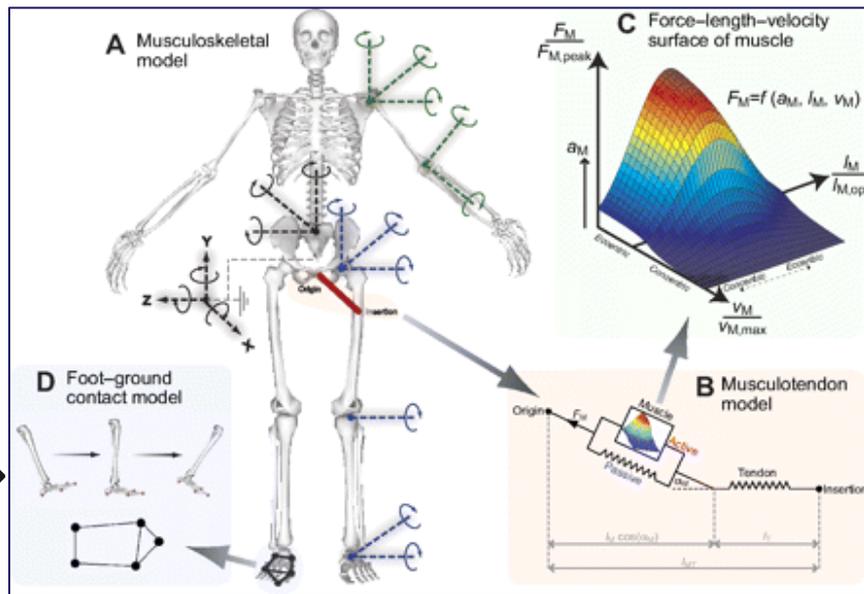
[一次測定系]



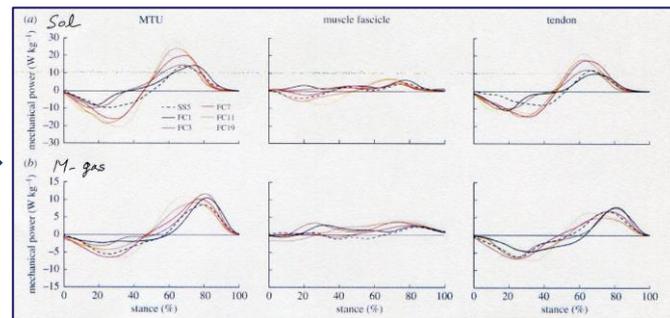
※写真のリックワックとマスクはオプションです

既定値
身体特性
筋・腱弾性値
etc

[各種モデル]



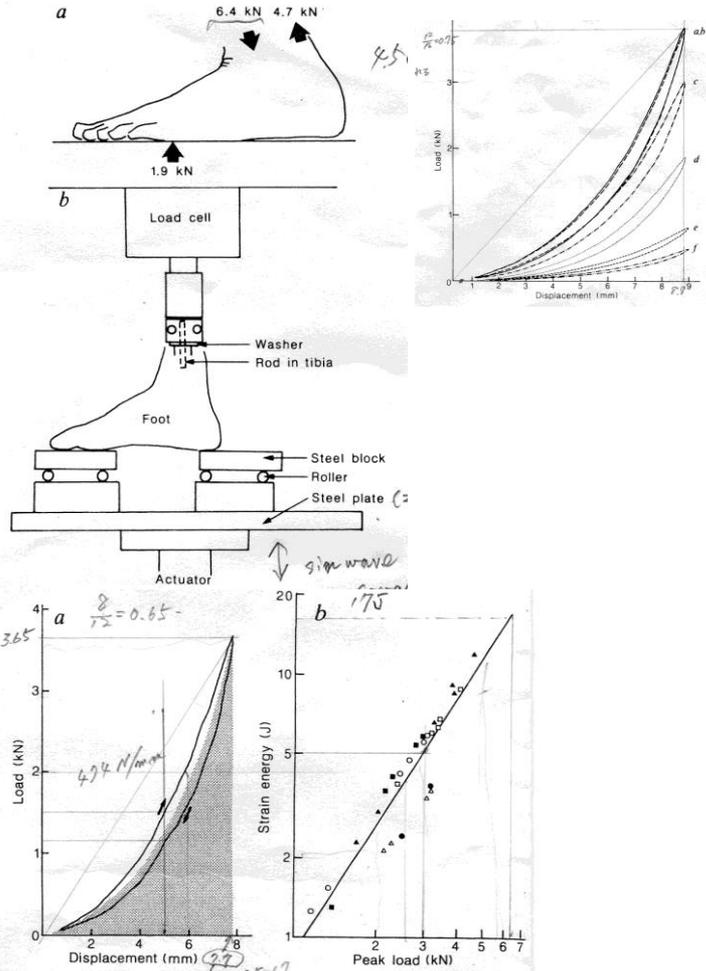
各種演算algorithm
(OpenSim, Visual 3D)



The spring in the arch of the human foot

足のアーチ

R. F. Ker*, M. B. Bennett*, S. R. Bibby†, R. C. Kester†
& R. McN. Alexander* **Nature (1987)**

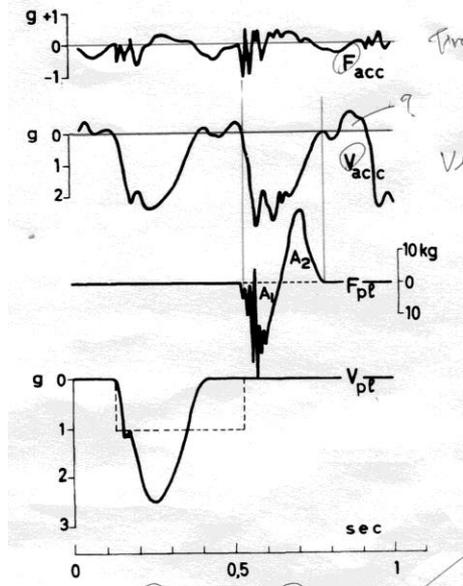


結果: 切断肢を用いて、圧縮実験を行い、足部の応力-ひずみ曲線を求めた。これと右図のランニングデータより、アキレス腱の弾性エネルギー貯蔵量を35J、アーチ構造の弾性エネルギーを17Jと推定した。

Mechanical work in running¹

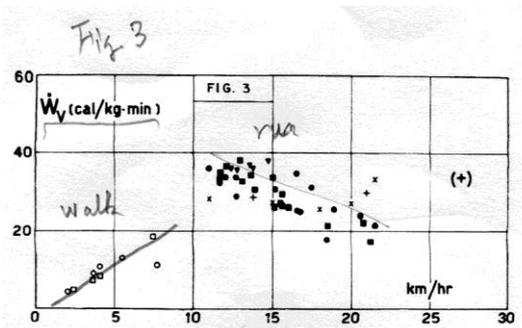
J Appl Physiol, 1964

G. A. CAVAGNA, F. P. SAIBENE, AND R. MARGARIA
Istituto di Fisiologia Umana, University of Milano, Milano, Italy

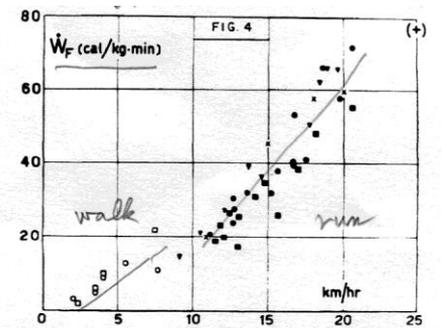


上2段は加速度計、下2段は床反力計からのデータを示す。

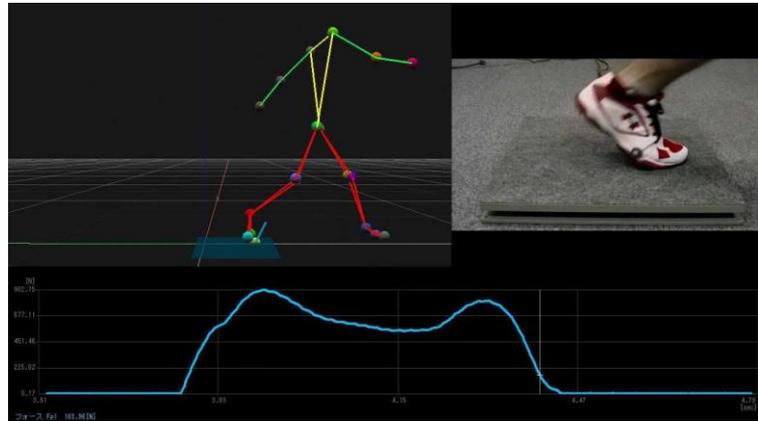
加速度計と床反力計を用いて、それぞれ重心の変化量、および慣性の仕事を算出した。1 Km当たりの外的仕事は、0.25 kcal/kg/kmで一定。これは現在のCoTに相当か？ランニングに費やされるエネルギーの約半分は収縮した筋の弾性エネルギー由来と判定された？。



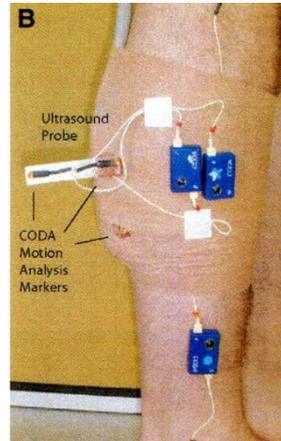
左図は加速度計から推定した垂直方向の仕事。おそらくMGHの変位から算出。右図は床反力計から算出した慣性の仕事。



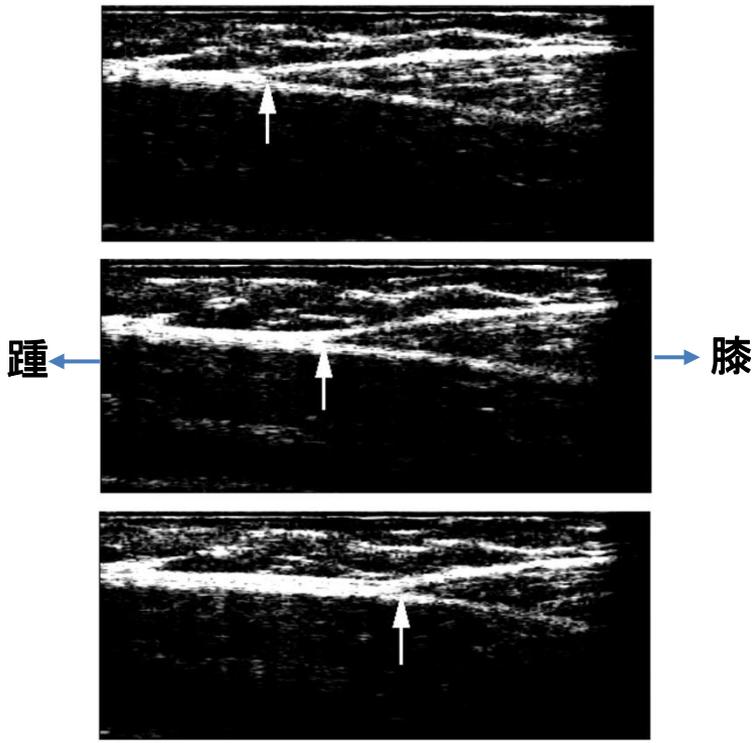
Lichtwark GA & Wilson AM の実験結果 (J Exp Biol, 2005), 1/2



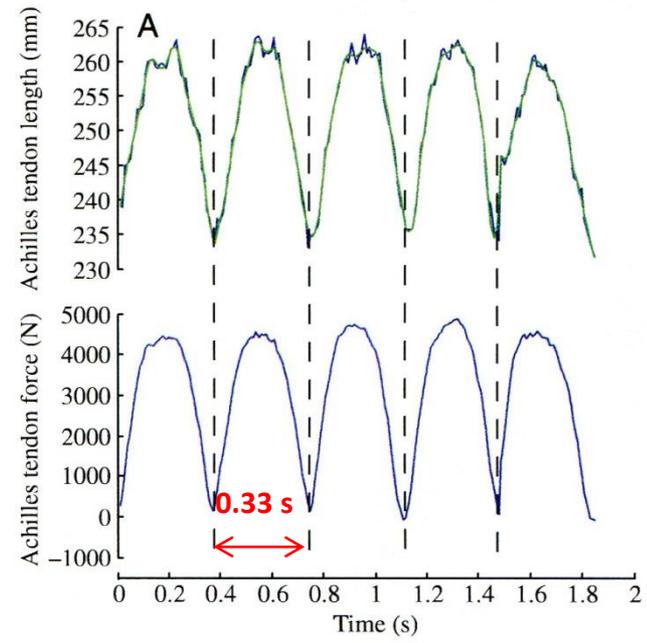
+



- 【方法論】**
- ・ 10 人男性被験者
 - ・ 連続その場片脚跳び
 - ・ MC+FP+US測定
 - ・ 腱の長さ、トルクの算出
 - ・ stress-strain curve作成
 - ・ 重心の仕事と腱の仕事の比

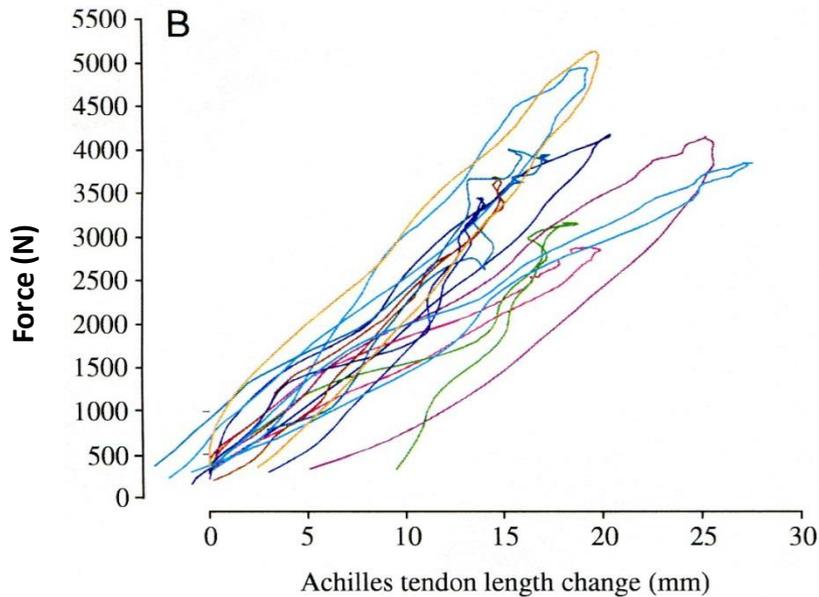


超音波法によるアキレス腱と腓腹筋接合部

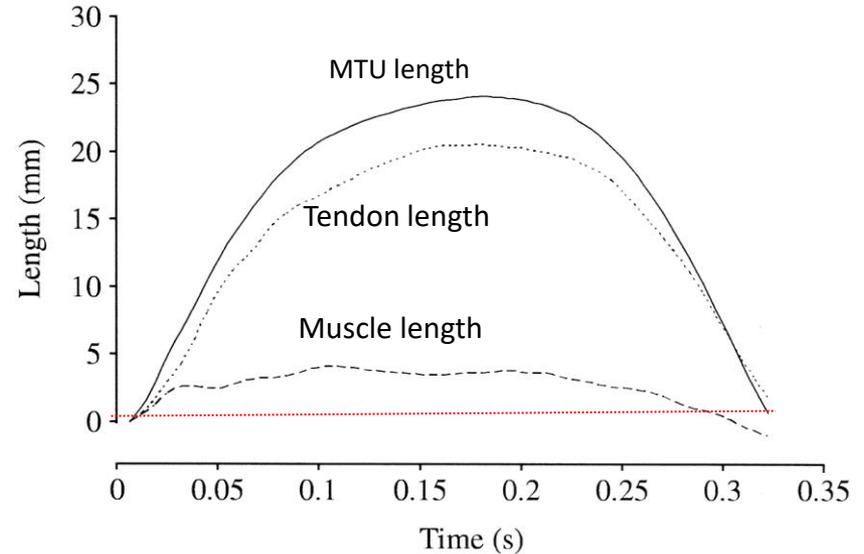


アキレス腱腱長と荷重の時間的变化

Lichtwark GA & Wilson AM の実験結果 (J Exp Biol, 2005), 2/2



全被験者のアキレス腱応力歪み曲線
被験者により傾きが異なることに注意.



着地相における筋節長(破線)、アキレス腱長
(点線)、腱腱複合体(実線)の平均的变化.

結果とまとめ

- ・剛性 145~231 N/mm, ヤング率 0.67~1.07 Gpa, ヒステリシスは17~35%であった。
- ・一歩あたりの仕事の平均は 254 J、そのうち腱による弾性エネルギーのrecoilは 38 J (16%)であった。これには大きな個人差も認められた(8~24%)。
- ・腱の歪みは平均 8%であり、hoppingの連続は、腱障害を発生させる危険性あり？

疑問点

- ・弾性エネルギー利用率の個人差の原因は？
- ・ヒラメ筋と腓腹筋の貢献度の違いは？

Muscular strategy shift in human running: dependence of running speed on hip and ankle muscle performance

Tim W. Dorn, Anthony G. Schache, Marcus G. Pandy

Journal of Experimental Biology 2012 215: 1944-1956; doi: 10.1242/jeb.064527

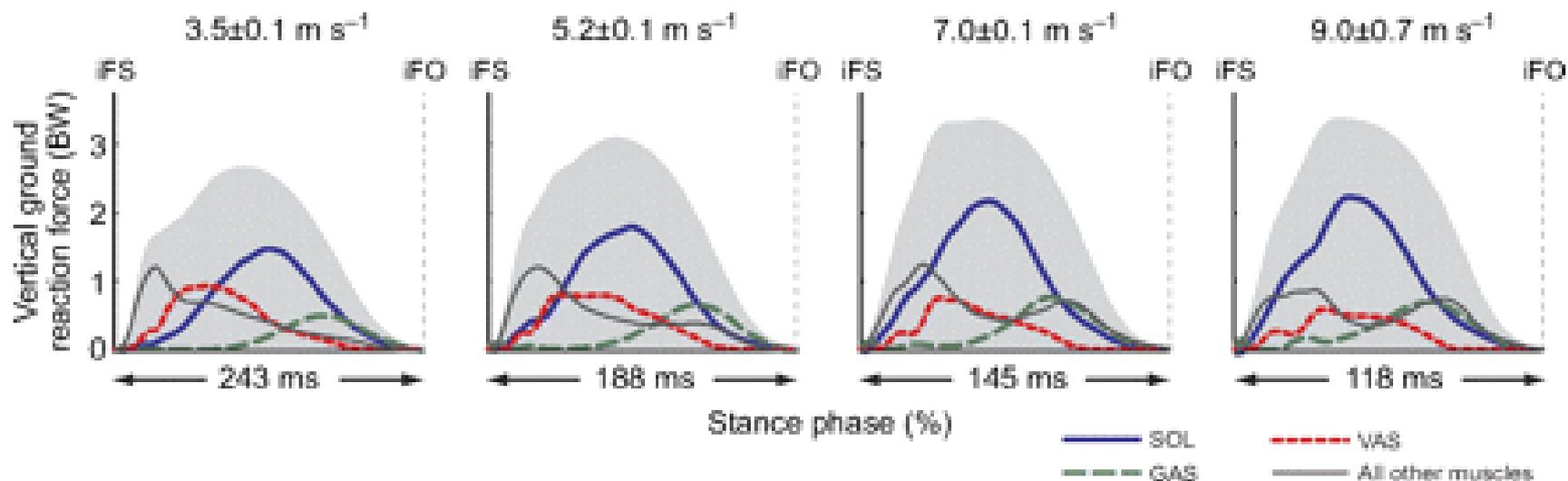
目的: ランニング速度の上昇にともなう地面反力と脚筋群の協調性を調べる。

方法: 被検者男女9名. 走速度3.5, 5.2, 7.0, 9.0 m/sの4段階で直走路を走る課題.

地面反力(3次元)および下肢筋群の張力(モデル計算)を推定.

結果: 地面反力の最大値は、走速度の上昇に伴い増大。着地時間は、走速度の上昇に伴い短縮。ヒラメ筋の活動パターンは地面反力に近く、また走速度の上昇に伴い張力を増大させた。大殿筋、腸腰筋、ハムストリングなどの腰部の筋は飛脚期の腰および膝関節の加速に貢献した。

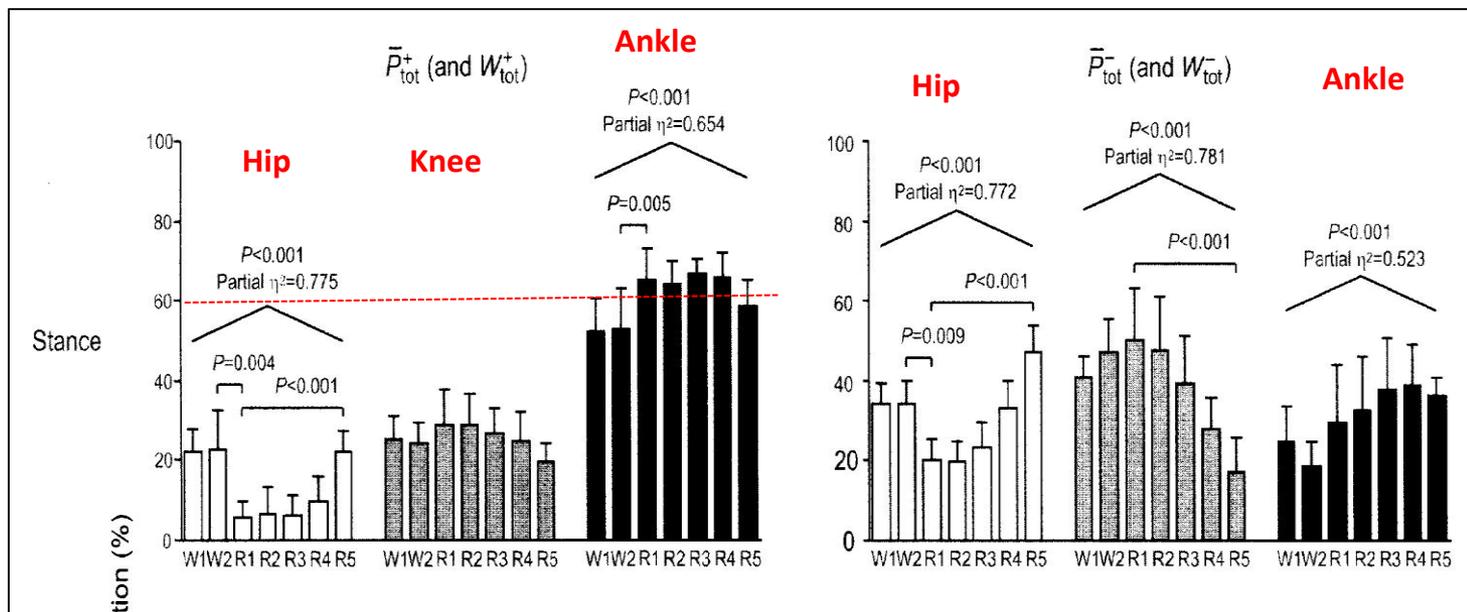
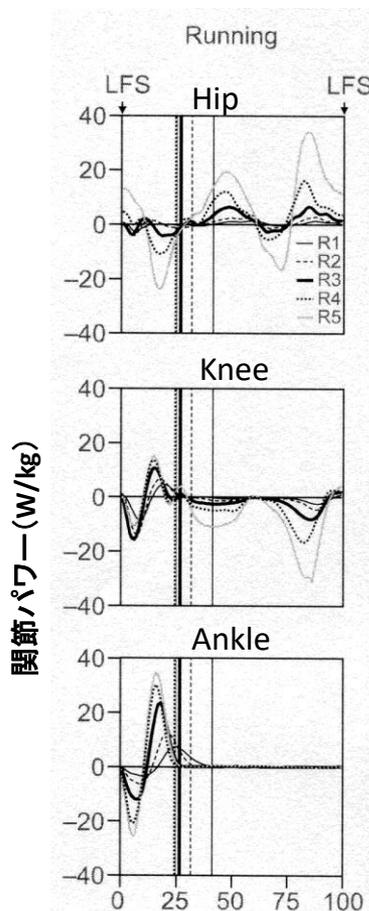
考察: ランニング速度への対応策として、3.5から7.0m/sまではストライド長を延ばし、9.0 m/s時にはストライド頻度を上げる戦略が想定される。



Modulation of work and power by the human lower-limb joints with increasing steady-state locomotion speed

Anthony G. Schache, Nicholas A. T. Brown, Marcus G. Pandy

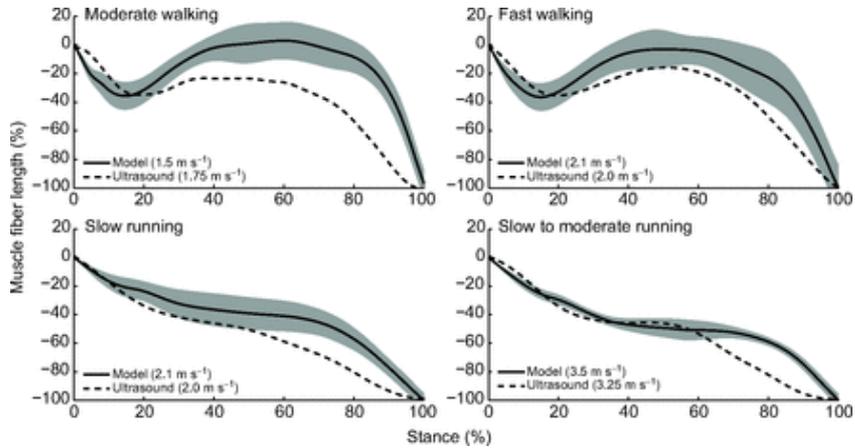
Journal of Experimental Biology 2015 218: 2472–2481; doi: 10.1242/jeb.119156



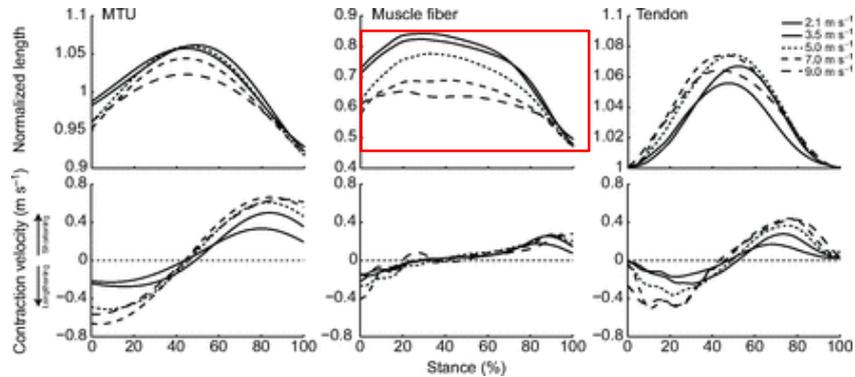
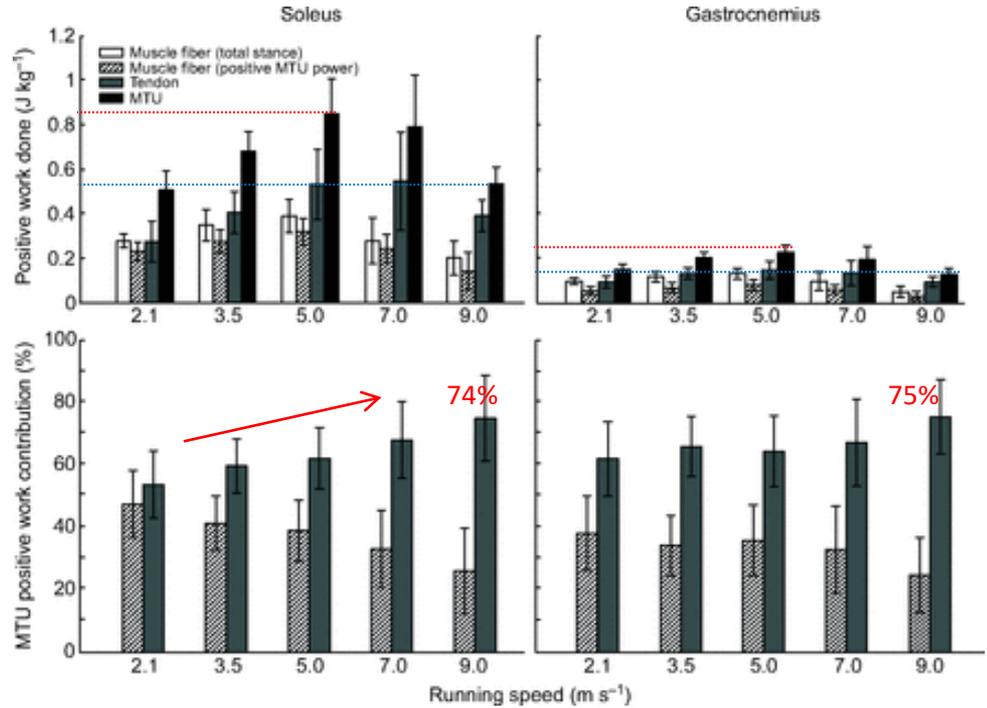
目的: 移動速度の変化に対し、各関節、筋はパワーや仕事をどう出力しているか
方法: 被検者7名. 歩行から全力疾走までの7段階の等速運動. 腰、膝、足関節のパワー、仕事を算出。

結果: 着地時における正の総仕事のおよそ60%が足関節に由来した。膝関節は着地時においておよそ20~30%の貢献度を示した。腰関節は、全力疾走時に貢献する。ランニングにおいては、パワー、仕事において相対的に**足関節の貢献度が大きい**。

Lai A et al. による定常走行時の弾性エネルギー評価 ① (J Exp Biol, 2014)



歩行(上段)および走行(下段)時の腓腹筋の筋線維長の実測およびモデル推定値の比較. 走行時において着地前半では両者は高い一致を示す.

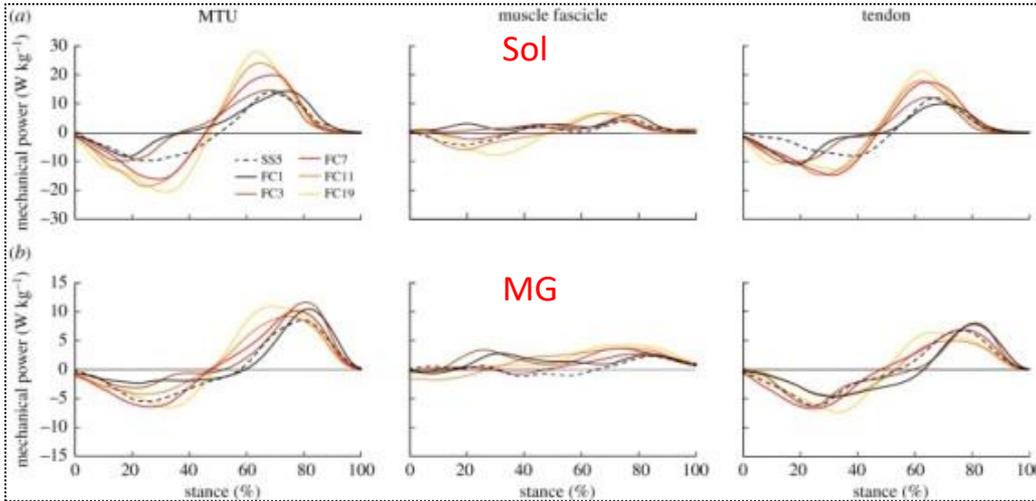


5種類の疾走速度条件下におけるヒラメ筋のMTU, 筋線維、腱の長さ変化. 高速になるに伴い、筋線維の伸びは抑制され、腱の伸展が増大する.

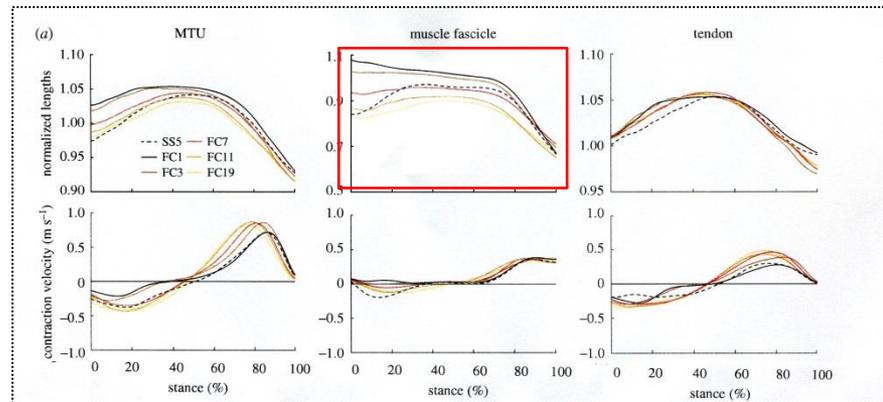
5種類の疾走速度条件下のMTU,筋線維,腱が為した正の仕事の比較. 左図はヒラメ筋、右図は腓腹筋を示す. 正の仕事は腓腹筋にヒラメ筋が数倍多い. MTUによる正の仕事は、両MUTともに5 m/s時が最大で、それより高速時には低下する. 腱による正の仕事は、両MTUともに5.0, 7.0 m/s時が多い. MTUの仕事に対する腱の仕事の貢献度は疾走速度の上昇に伴い増大した. 9.0 m/s時の腱の貢献度は、両筋ともおよそ75%であった.

これより、5.0 m/sの疾走時の両筋による正の仕事は、およそ0.6 J/kgであり、その75%, すなわち0.45 J/kgは腱の弾性エネルギーに拠るものと推定される.

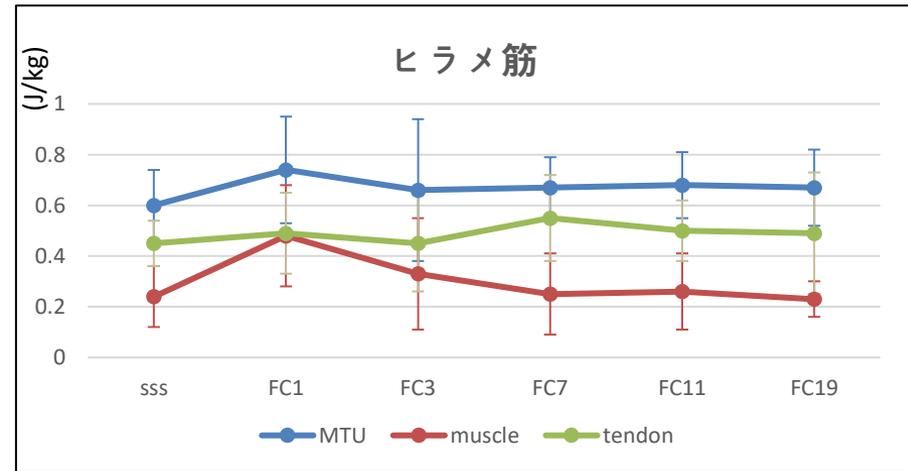
Lai A et al. によるダッシュ時の弾性エネルギー評価 ② (J R Soc Interface, 2016)



5 m/sの一定速度時およびダッシュ時1, 3, 7, 11, 19歩時のヒラメ筋(上段)、内側腓腹筋(下段)の着地相における筋腱複合体(左)、筋束(中)、および腱(右)の発揮パワーの時間変化. パワー値は体重で正規化した. 筋束のパワー発揮は腱に比べて相対的に低い. また内側腓腹筋に比べ、ヒラメ筋のパワー値が高い. 筋腱複合体のパワー発揮は腱によると考えられる.

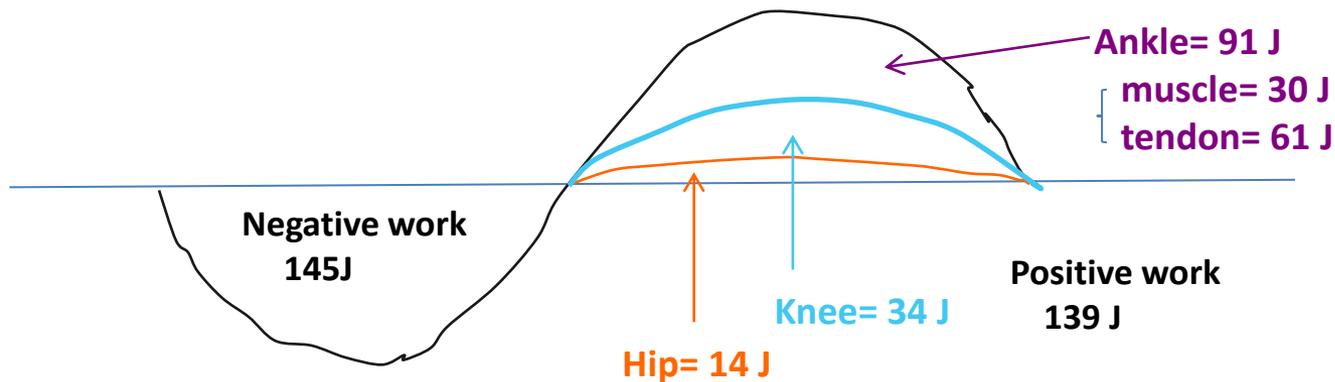


5 m/sの一定速度時およびダッシュ時1, 3, 7, 11, 19歩時の着地相におけるヒラメ筋の筋腱複合体(左)、筋(中)、腱(右)の長さ(上段)、速度変化(下段). 全力ダッシュ時の着地相前半において筋の長さは変化せず、着地相後半において急速に短縮した、

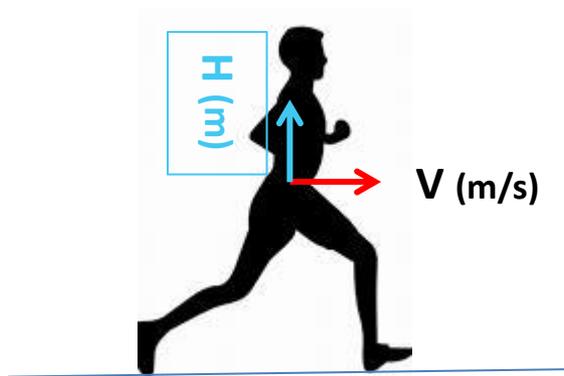


5 m/sの一定速度時およびダッシュ時1, 3, 7, 11, 19歩時の着地相におけるヒラメ筋の筋腱複合体(黒)、筋(黄)、腱(青)の正の仕事の比較. 腱の仕事は大きな変化は認められないが、ダッシュ1歩目で筋の仕事の大幅な増加が確認された.

Schache, Laiらのデータからの推定 (V=7 m/s、Wt=70 kgを想定)



Cavagna(1964)によるランニング時の力学的仕事の推定方法 (V= 7 m/s, Wt=70 kg)



等速度ランニングにおいて1歩内で

速度変化: 7.0 m/s → 6.5 m/s → 7.0 m/s

重心の高さ変化: 10 cm

から推定される一歩における力学的エネルギーの増減は、

307 J (運動エネルギー 237 J +

位置エネルギー 70 J)

でいいのか？

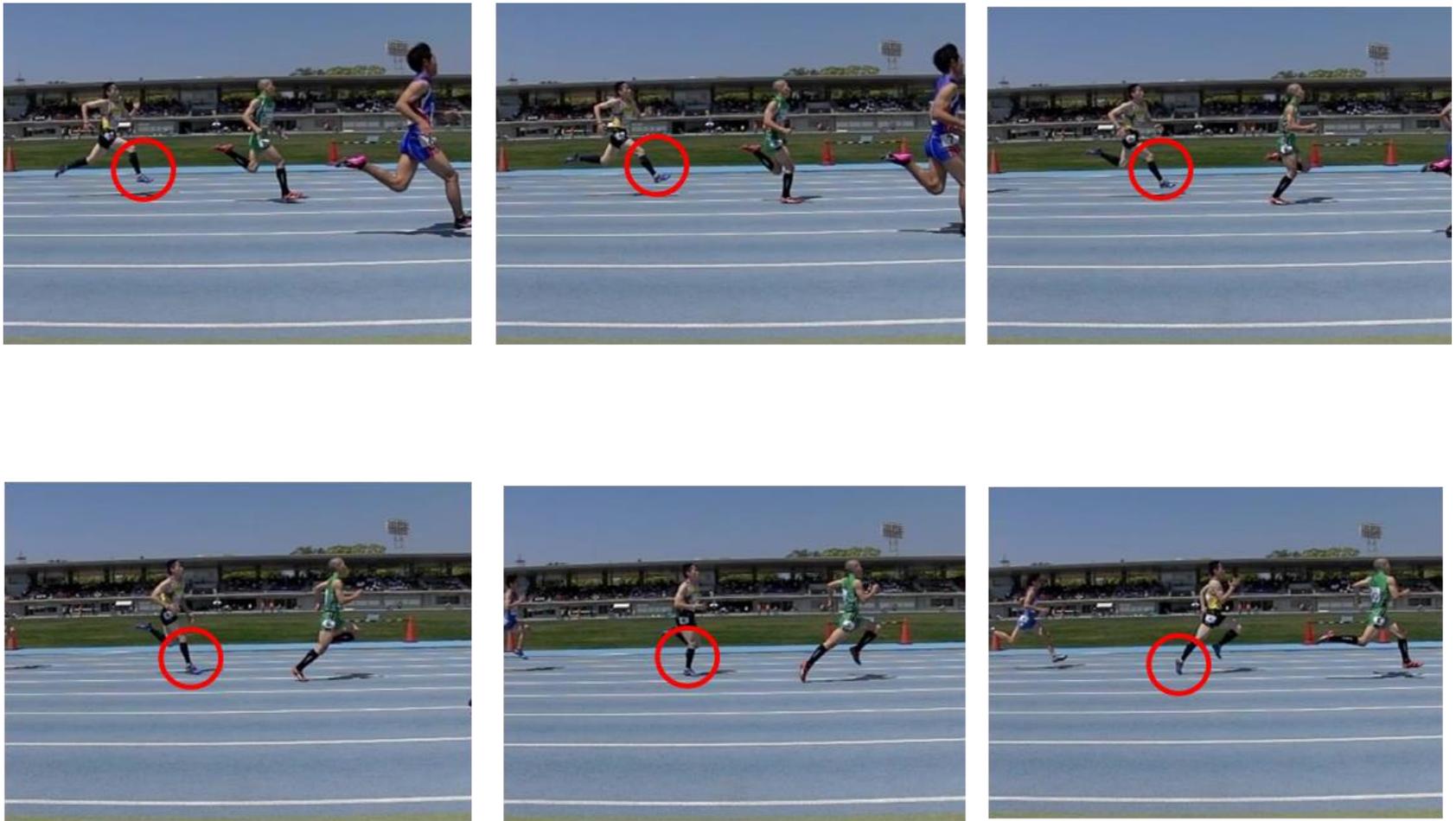
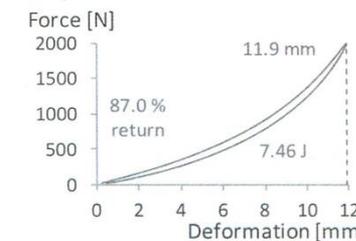
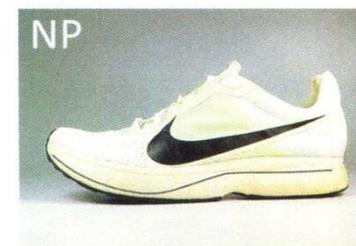
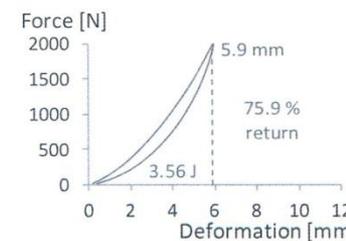
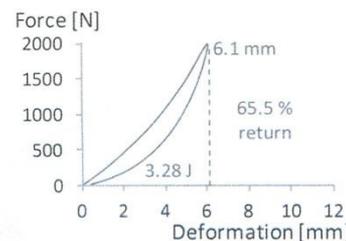
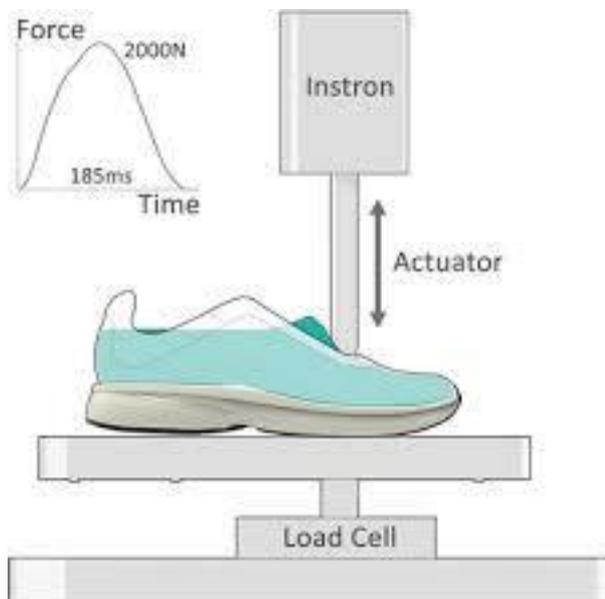


図9. 第72回愛知県高等学校総合体育大会陸上競技大会東三河予選会男子400 m予選の着地方法に関する調査画像. 東三河陸上競技協会の許可を得て撮影した. 選手当たり2歩分のデータを画像より分析し,着地方法を判定した. ○印は典型的なFFSの着地パターンを示す. (使用カメラ: Casio EX-F1, フレームレート: 300 fps, 撮影日: 2018年4月28日)

NIKE Zoom Vaporfly に関する補足資料



Fig. 1 Exploded view of the Nike prototype shoe that incorporates a newly developed midsole material and a full-length carbon-fiber plate with forefoot curvature, embedded in the midsole



(Hoogkamer W, et al, Sports Med, 2018 より)

先のデータからVoporfly 使用時のエネルギー利得を推定する

右図より、加圧時に靴の粘弾性体に貯蔵されたエネルギー(a+b)は、8.57 Jとなり、減圧時に1.11 Jが熱として放出され、弾性エネルギーとして再利用される(recoil, return)エネルギーが7.46 Jであることが分かる。NSおよびABシューズの場合だと、この値が、それぞれ3.28, 3.56 Jであるために、NPシューズに比べるとエネルギーreturnが少ないことになる。

今、マラソンを歩幅175 cmで走るとすると、総歩数は24,111歩、従って総弾性エネルギーのreturnは96,446 Jと推定される。

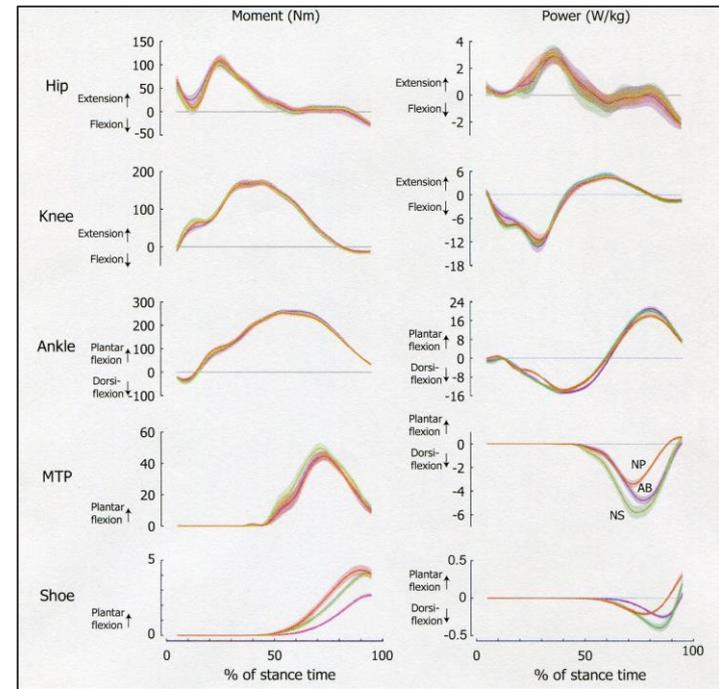
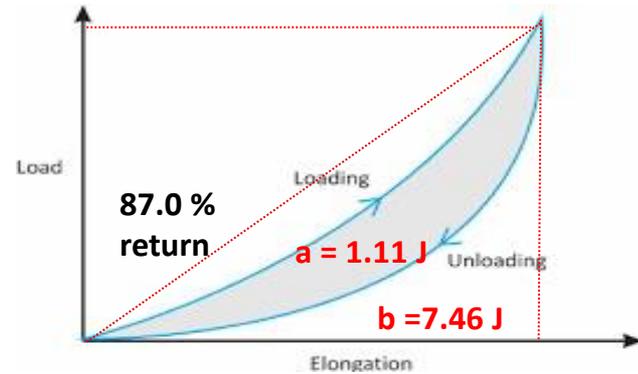
これをカロリー単位に変換すると、

$$96,446 \times 0.2388 = 23,036 \text{ cal}$$

となる。マラソン時の、総エネルギー消費量を2,100 kcal (3 L/min × 5 kcal/L/min × 140 min より)とすると、靴によるエネルギー消費量の節約はおよそ**1.0%** (23 ÷ 2,100 × 100 より)と推定される。

この値は、NPシューズ着用が酸素摂取量を**4%**減少させた、との話とは一致しない。

となると、その違いの原因は？



ランニングシューズ内にカーボンプレートを加えて剛性を高めても、エネルギー消費量は変わらない。
Beck O et al. (2020); Flores N et al. (2019)

3種類の靴着用時の各関節トルクとパワー値。腰、膝、足首、MTP関節の仕事に有意差なし。
Hoogkamer W (2019) Sports Med

ランニング、弾性エネルギーを改めて考える

ランニングって何なの？

- ・ランニング／ウォーキング／ホッピング／ジャンピング／スキッピング（どう違うの？）
- ・馬：walk/trot/gallop
- ・Kangarooの動きは何になるの？（連続ジャンプ or 両足ホッピング）
- ・サル／チンパンジーは走れるの？
- ・ネアンデルタール人は走れたの？
- ・バウンディングは跳躍？
- ・大股走は？
- ・単なるlocomotionの一手段？
- ・動物って面白い！
多様性、

弾性エネルギーって何なの？

- ・弾性エネルギーの定義？
バネやゴムなど弾性体の変形に伴うエネルギー。位置エネルギーの一種。
- ・弾性エネルギーの単位？
上記から、力×長さ(N/m)、あるいはジュール(J)で表される。
- ・生体のどこが弾性体なの？
皮膚、骨、筋、腱、靭帯、--- すべて
- ・腱はどのように進化したの？
筋膜から？ECMTXの変形？
- ・運動との関係
運動において欠かせられない器官？
Why?