

## 二足歩行時に足底に作用するモーメントの謎

萩原 直道  
(生物科学専攻 教授)

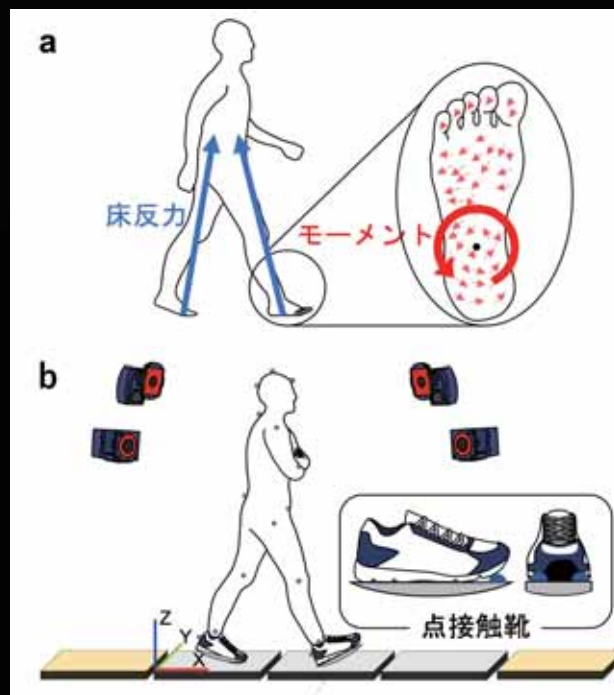
我々は、いともたやすく坂道でも砂地でも自由自在に二足で歩き走ることができる。しかし、これと同じことをロボットにやらせようとすると、これが実は極めて難しい問題であることに気づかされる。時々刻々と変化する環境の中を、ヒトはなぜ二足で転ばずに歩くように進化してきたのだろうか。

歩行は、足底が地面から受ける反力を適切にコントロールして、身体を空間のある位置から別の位置に移動させる力学現象である。したがって、二足歩行の成否は端的に言えば足底に床面から作用する反力（床反力）をいかに適切に作用させるかにかかっている。このため古くから、ヒトの二足歩行中の床反力を分析し、その運動原理を探る研究が、工学、医学、生物学などの分野で行われ、数多くの知見が蓄積されてきた。しかし二足歩行研究の長い歴史の中で、なぜか今までほとんど無視されてきたのが「足底に作用するモーメント」である。我々が歩くとき、足底は地面と面で接触するため、床反力は足底全体に分布して作用し、その水平方向成分によって足底には鉛直軸周りのモーメント（回転を生じさせる力）が作用する(図a)。しかし、ヒトの二足歩行においてこのモーメントは十分小さく無視できる、となぜか広く信じられており、それが二足歩行の力学・制御に与える影響を明らかにしようとする試みは全く行われてこなかった。

このモーメントは、二足歩行中の足底に水平方向の床反力が分布して作用することにより発生する。したがって、このモーメントが作用しないようにするためには、歩行中の足底が床面と点接触すれば良い。そこで我々のグループでは、運動靴の靴底に金属球面を接着させた「点接触靴」を製作し、通常の二足歩行と比較した(図b)。その結果、通常の二足歩行では胸郭と骨盤は体の鉛直軸まわりにそれぞれ反対向きに回旋するが、点接触靴では、同じ向きに回旋し、またその振幅が大きくなることが明らかとなった。胸郭と骨盤の逆相の回旋は、体幹節間の角運動量を打ち消すことで、

歩行効率の向上に寄与する。また胸郭と骨盤が大きく回旋することは、歩行が相対的に不安定であることを示している。したがって、足底に作用するモーメントは、安定かつ効率的な二足歩行を生成する上で、実は重要な役割を担っていることが明らかとなった。ただし、点接触靴による歩行でも、腕振りを行えば、体幹の回旋が逆相で振幅の小さい通常と同様な歩行が可能であった。すなわち、モーメントの作用は、腕振りを体幹の回旋運動の制御に使えない、上肢による物などの運搬を伴う二足歩行の安定化・効率化に特に寄与していることが明らかとなった。

ヒトの祖先がなぜ二足で歩くようになったのか、その理由は未だ明らかになっていないが、有力な仮説の一つに食物供給仮説がある。この説は、二足歩行によって空いた両手で食料を運搬し、パートナーのメスやその子供に食料を供給するオスに対して選択圧が作用したため、直立二足歩行が進化したと考える。今回の結果は、ヒトは運搬、特に食料の運搬を伴う二足歩行に適応して進化してきた可能性を強く示唆しており、本仮説を支持する。ヒトの直立二足歩行の起源と進化の謎の解明に、一石を投じることができればと期待している。



a. ヒトの二足歩行中に足底に作用する床反力（合力）とモーメント  
b. アルミ球面（直径1000mm）を運動靴の靴底に接着させた点接触靴と、それを着用して行った二足歩行実験の様子。体の各部位の動きは、体表につけた反射マーカーの動きをモーションキャプチャーカメラで撮影して計測した

### 参考文献

T. Negishi, N. Ogihara *et al.*, Functional significance of vertical free moment for generation of human bipedal walking, *Sci Rep* 13, 6894 (2023) .