

—日本における競走馬医療の現状 (Ⅳ)—

競 走 馬 の 蹄 に か か る 力

高橋敏之[†] (特日本中央競馬会競走馬総合研究所運動科学研究室室長)

1 はじめに

競走に向けた調教(トレーニング)を行っているサラブレッド競走馬において、最も多くみられる疾患は運動器系のものである。そのなかでも、四肢の骨折、腱靭帯の損傷が大部分を占める。軽度～重度の骨折及び重度の腱靭帯損傷は、競走に出走した約50,000頭のうち、約1.7%に発症していた(2016年)。競走馬に運動器疾患が多い理由としては、体重が約500kgと重く、高速で走行するのに比較して四肢が細いためであると考えられてきた。このことから、四肢にかかる力(=各肢の蹄にかかる力)に対する関心は高く、この力を低下させる馬場を作ることが四肢の運動器疾患の予防につながると考えられていた。しかし、小さな蹄に大きな力がかかり、しかも高速走行時には蹄も高速で動くために、蹄にかかる力の測定は困難であった。そのため過去には、“一肢にかかる力は、4tだ、いや2tだ”などと想像されていた。しかし、近年の測定装置の発達と小型化により、全力疾走に近い速度でも蹄にかかる力の測定が可能となった。

2 蹄にかかる力を測定する方法

馬の蹄にかかる力を測定するには、人と同様に床反力計を使用するのが一つの方法である。床反力計は、床に埋め込まれた大きな体重計のようなものであり(図1)、体重計と異なるのは床面に対して垂直方向の力のみでなく、前後(制動、推進力)方向、左右方向の力を測定できることである。床反力計にかかる力と蹄にかかる力は作用反作用の関係となるため、等しい力が加わることになる。この床反力計の上を1つの蹄で踏ませることにより、蹄にかかる力を測定できる。最も遅い速度の歩法である常歩(1.7m/s)ならば、助走距離を変えて床反力計の上を数回歩かせれば、少なくとも1回は床反力計を1つの蹄で踏み、蹄にかかる力を測定できる。競走馬は走行速度により、走り方を遅い方から常歩、速歩、駈歩、襲歩と変化させるが、この方法ではゆっくりとした駈歩

(約6m/s)までしか測定することができない。これは、速度の上昇に比例してストライド長が、常歩の約1.8mから、速歩の約2.5m、ゆっくりとした駈歩の約3.6mと伸びるため床反力計を踏むことが困難になるためである[1]。そこで、これ以上の速度では、蹄に装着するタイプの測定装置である荷重計が用いられる(図2)。このタイプの装置は、体重計または床反力計を小型化して蹄底に装着するため、速い速度でも測定可能である[2]。

3 速度と蹄にかかる力

力の単位はN(ニュートン)であり、地球上で質量1kgの物体を支えるのに必要な力は、約10Nである。静止時に四肢にかかる垂直方向の力は、馬では体重心が、後肢よりも前肢に近いので、前肢に6割、後肢に4割の力がかかる。体重500kgの馬では、体を支えるために必要な力は約5,000Nであり、前肢に約1,500N(両側では約3,000N)、後肢に約1,000N(両側では約2,000N)の垂直方向の力がかかる。常歩からゆっくりとした駈歩までの蹄にかかる力は床反力計により測定されている[3, 4]。常歩(約1.7m/s)では、垂直方向の力の最大値は、前肢では約3,600N、後肢では約2,000Nである。また、着地時間中にピークが2つみられ、中間

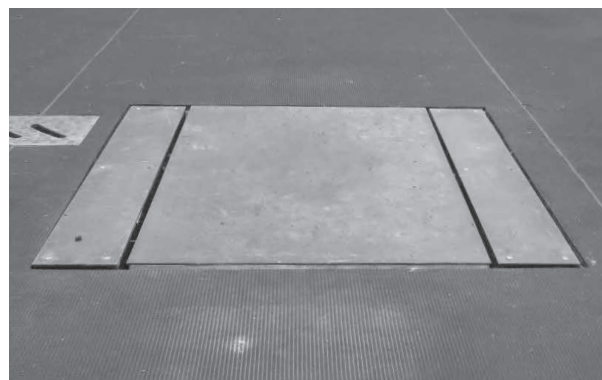


図1 床面に設置された床反力計(中央長方形部分)
(幅60cm, 縦90cm)

[†] 連絡責任者: 高橋敏之(特日本中央競馬会競走馬総合研究所運動科学研究室)

〒329-0412 下野市柴1400-4 ☎0285-39-7414 FAX 0285-40-1064

E-mail: toshiyuki_takahashi@jra.go.jp

時点では一時的に力が低下する(図3)。速歩(約3.5m/s)では、垂直方向の力の最大値は前肢では約5,500N、後肢では約4,800Nである。速歩より速い速度では、着地時間の中間時点でピークがみられるようになる(図3)。駢歩になると、左右肢の動きが非対称となり、早く着地する側の肢を反手前、遅く着地する側の肢を手前と呼ぶ。垂直方向の力の最大値は、前後肢及び反手前、手前肢で異なる。ゆっくりとした駢歩(約5.2m/s)のときにかかる垂直方向の力の最大値は、反手前前肢では、約8,000N、手前前肢では約7,400N、反手前後肢では約6,200N、手前後肢では約5,800Nである。

また、前後方向の力は、常歩においては、前肢、後肢においてほぼ同様であり、着地している時間の前半は制動力で最大値は約500N、後半は推進力で最大値は約500Nである(図3)。この力は、速歩となっても常歩とほとんど変化しない。しかし、ゆっくりとした駢歩では、四肢の役割が異なるため、前後方向の力はそれぞれで大きく異なる。反手前前肢では、前半は制動力を發揮し、おもなピークは約1,300N、後半は推進力を發揮し、おもなピークで約1,000Nである(図4)。手前前肢では、着地から2/3の時間は制動力を發揮し、おもなピークは約1,500N、残り1/3の時間は推進力を發揮し、おもなピークで約300Nである(図4)。反手前後肢では、着地から1/3の時間は制動力を發揮し、おもなピークで約500N、残り2/3の時間は推進力を發揮し、おもな

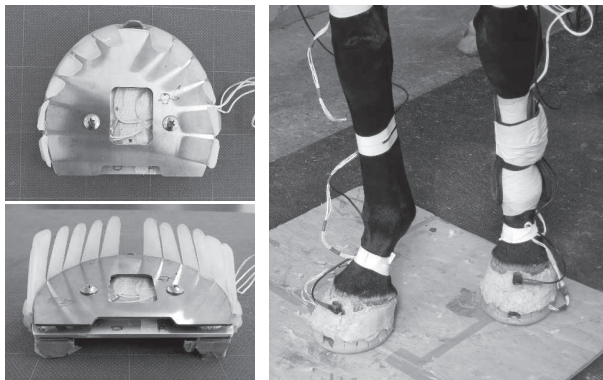


図2 蹄装着型荷重計(左上:上方から,左下:後方から,右:蹄に装着した状態)

ピークで約1,000Nの力である(図4)。手前後肢では、着地から2/3の時間は制動力を發揮し、おもなピークで約1,300N、残り1/3の時間は推進力を發揮し、おもなピークで約300Nである(図4)。このように四肢にかかる力から考えると、駢歩時には、前肢はおもに体を支える垂直方向の力を發揮するとともに、制動力も多く發揮して進む方向を制御する働きを持ち、後肢は、推進力をおもに發揮するが、特に反手前後肢の役割が大きいのことがわかる。

ゆっくりとした駢歩よりも速い速度になると、ストライドの長さは3mを超えるため、床反力計を踏ませることは非常に困難になる。そのため、人では靴の中敷きに垂直方向の力や圧力を測定するシートを挿入して足にかかる力を測定するように、馬では蹄底と蹄鉄の間に装着する小さな体重計である荷重計を作製することにより、より速い速度でも蹄にかかる垂直方向の力を測定できるようになった[2]。硬い鉄板の上をゴムベルトが回っているトレッドミル(馬用ルームランナー)上を、9m/sの駢歩で走行する体重約500kgのサラブレッドの前肢には、最大で約6,500N、後肢には最大で約5,000Nの力がかかる。これが、12m/sの駢歩に増速すると、前

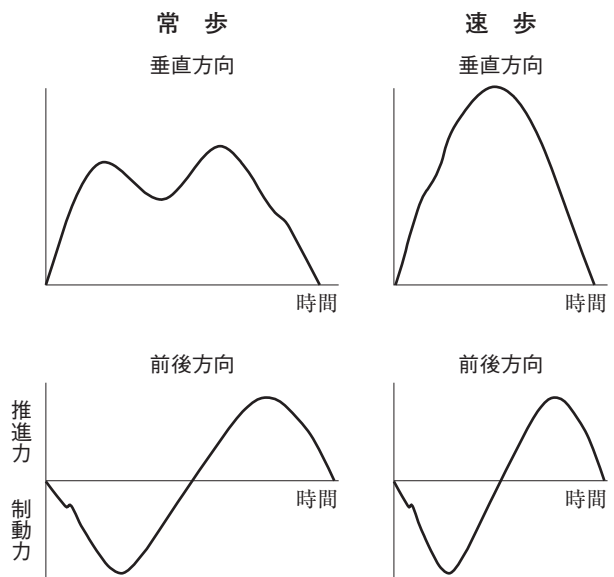


図3 蹄にかかる垂直方向及び前後方向の力(イメージ)

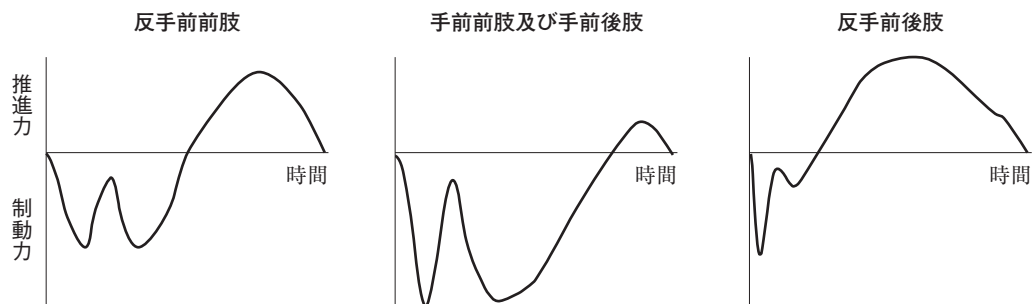


図4 駢歩時における蹄にかかる前後方向の力(イメージ)

肢では最大で約7,500N、後肢には最大で約5,500Nの力がかかる。競馬では、最高約20m/sの速度で走行するので、これらの値から推定すると、前肢では最大で約10,000N、後肢には最大で約7,000Nの垂直方向の力がかかると推定される。

4 各種馬場の走行時及び障害飛越時に蹄にかかる力

荷重計を使用すると種類の異なる馬場において蹄にかかる力を測定することができる。中央競馬では、競走は芝及びダート（砂）馬場で行われ、トレーニングである調教では木屑を敷き詰めたウッドチップ馬場をおもに使用する。それぞれの馬場において、約13m/sの駆歩で走行している馬の前肢蹄にかかる垂直方向の力は、芝馬場で最も高く約8,000N、ウッドチップ馬場では約6,000N、ダート馬場では約5,800Nであった。蹄にかかる垂直方向の力は、平均走行速度に関係し、同一速度での走行時に蹄にかかる力が最も高い芝馬場において平均走行速度が最も速く、蹄にかかる垂直方向の力が低いウッドチップやダート馬場では平均走行速度が遅い。

全力走行時と同様に障害物を飛越して着地した際にも、蹄には大きな力がかかると考えられる。障害を飛ぶ際には、全力走行時と異なり、大まかな着地点が決まっているので、その地点に床反力計を設置することにより力を測定できる。総重量500kgの馬が高さ1.3mの障害を飛んで着地したとき、反手前前肢から着地するが、そのときにかかる垂直方向の力の最大値は約10,000Nであったと報告されている [5]。このことから考えても馬の前肢にかかる力の最高値はこの値を大きく超えないと考えられる。

5 着地時の衝撃加速度と蹄にかかる力

着地時の衝撃加速度は、芝では高く、ウッドチップ、ダートでは芝よりも低い。この衝撃加速度は、硬さの指標とされ、芝馬場で最も高く、他の馬場と比較して硬いことを示している。しかし、この衝撃加速度の高さが蹄にかかる力の大きさに直接関係しているわけではない。着地時の衝撃加速度は着地直後にみられるが、蹄にかかる力のピークは同じ時点でみられるわけではない。図5には、芝馬場の駆歩時における蹄に装着した加速度計及び荷重計のデータを示す。加速度計のデータから着地した瞬間に蹄の加速度は約200G（重力加速度の約200倍）となっていたことがわかる。しかし、荷重計のデータは約1,400Nを示し、垂直方向の力の最大値（7,000N）は加速度の最大値と異なり、着地時間の中に現れている。これは、馬では蹄よりも近位に球節があるため、着地直後に体重が蹄にかかるわけではなく、球節がクッションのような役割をしているために起こる現象である。そのため、着地の瞬間には、蹄のみが地面とぶつ

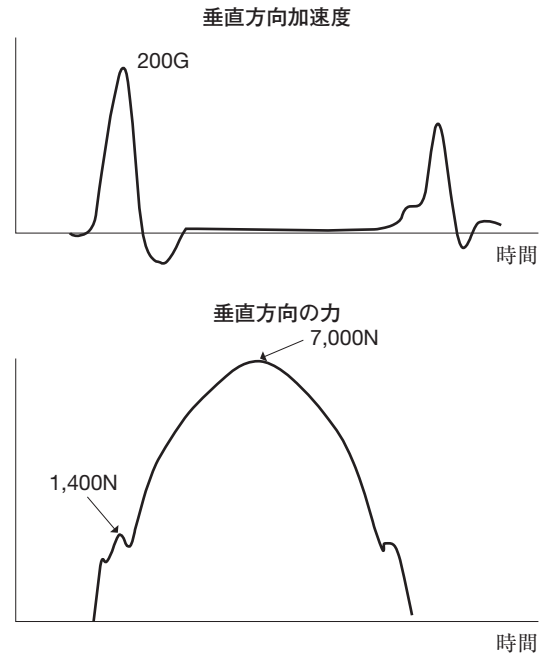


図5 駆歩時の蹄衝撃加速度（上）及び垂直方向の力（イメージ）

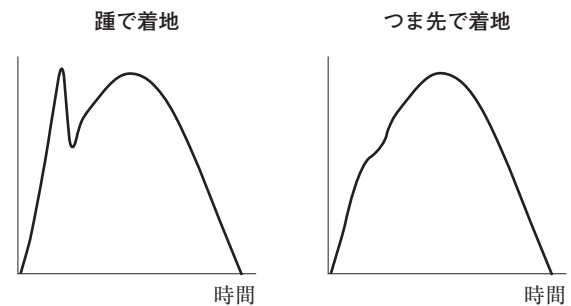


図6 駆歩時に人の足にかかる垂直方向の力（イメージ）

かっているような状態になり、蹄の部分の質量は約0.7kgであることから、着地時にかかる力は公式から計算すると、 $F=0.7\text{kg} \times (200 \times 10)\text{m/s}^2$ から約1,400Nとなり、荷重計によるデータとほぼ同じ値となる。人においても踵で着地したときとつま先で着地したときでは、着地した瞬間の力は大きく異なる。踵からの着地では、着地直後に力のピークがみられるが、つま先着地では足首がクッションの役割を果たすため、着地時の力は小さくなり、着地時間中間のピークのみとなる（図6）。馬では、球節が人の足首のように働くため、常につま先着地で走っているような状態となっている。

公式： $F=ma$ [Fは力(N)、mは質量(kg)、
aは加速度(m/s/s)]

6 蹄にかかる力と四肢の骨折

全力走行時に前肢にかかる力である10,000Nは大きい、馬の体重が500kgのとき、体重を支えるのに必

要な力の2倍である。人では、ゆっくりと走っていても片肢にかかる垂直方向の力は約2,000Nとなり、体重が90kgの場合、体重を支える力の約2.2倍である。体重比で考えた場合、馬の蹄にかかる力は過剰ではなく、10,000Nの力がかかるだけでは、骨折を起こすことはほとんどないと考えられる。過大な力により骨折や腱靭帯損傷が起こるのは、不整地への着地により関節を捻転させたときやバランスを崩した着地により異常な力が四肢にかかったときのみであると考えられる。そのため、馬に起こる骨折の大部分は、疲労骨折によるものだと考えられている [6, 7]。調教により骨に繰り返し大きな力が加わり、その力に適応するために骨硬化が起き、硬化していない部分との境界部に歪みが集中して微小な骨折が起こり、微小骨折の蓄積により大きな骨折につながると考えられている。

馬の蹄にかかる力を測定する目的は、蹄にかかる力が大きいほど骨折などの四肢の損傷を起こす危険性が高いと考えていたからである。しかし、蹄にかかる垂直方向の力が、芝馬場よりもダート馬場で低いにもかかわらず、骨折や重度の腱靭帯損傷を起こす危険性はダート馬場において高い。また、トレーニングである調教において、ウッドチップ馬場とダート馬場では、蹄にかかる垂直方向の力はほぼ同じであるにもかかわらず、速度の速い調教を行った馬が損傷を起こす危険性はダートの方が2~3倍高かった。これは、蹄にかかる垂直方向の力のみでは損傷の危険性を予測することはできず、滑りや推進力に関係する前後方向の力なども含めて馬場の特性を把握する必要があることを示している。

7 おわりに

このように競走馬の蹄にかかる力については、骨折などの損傷の発生を減少させる目的で測定方法が発達してきた。その結果、蹄にかかる垂直方向の力のみを測定するだけでは、損傷を予防することができないことがわかってきた。また、蹄にかかる力は測定可能となったが、関節面や骨に加わる力については、直接測定する方法はない。そのため、関節面や骨に加わる力を推定するには、すべての骨や関節の構造、靭帯や腱を含んだモデルを作

製し、床反力計の測定と同時に画像による動作データを測定し、このようなデータから各靭帯にかかる力を推定する必要がある。このようなモデルは作製されているが [8]、馬場の硬さの影響などのシミュレーションなどは始まったばかりであり [9]、今後の発展が期待されている。

参 考 文 献

- [1] Back W, Clayton HM : *Inter-limb Coordination, Equine Locomotion*, 77-94, WB Saunders, Philadelphia (2001)
- [2] Kai M, Aoki O, Hiraga A, Oki H, Tokuriki M : Use of an instrument sandwiched between the hoof and shoe to measure vertical ground reaction forces and three-dimensional acceleration at the walk, trot, and canter in horses, *Am J Vet Res*, 61, 979-985 (2000)
- [3] Niki Y, Ueda Y, Masumitsu H : A force plate study in equine biomechanics 3: The vertical and fore-aft components of floor reaction forces and motion of equine limbs at canter, *Bull Equine Res Inst*, 21, 8-18 (1984)
- [4] Niki Y, Ueda Y, Yoshida K, Masumitsu H : A force plate study in equine biomechanics 2: The vertical and fore-aft components of floor reaction forces and motion of equine limbs at walk and trot, *Bull Equine Res Inst*, 19, 1-17 (1982)
- [5] Back W, Clayton HM : *Performance in Equestrian Sports, Equine Locomotion*, 193-226, WB Saunders, Philadelphia (2001)
- [6] Martig S, Chen W, Lee PV, Whitton RC : Bone fatigue and its implications for injuries in racehorses, *Equine Vet J*, 46, 408-415 (2014)
- [7] Riggs CM : Fractures — a preventable hazard of racing thoroughbreds?, *Vet J*, 163, 19-29 (2002)
- [8] Swanstrom MD, Zarucco L, Hubbard M, Stover SM, Hawkins DA : Musculoskeletal modeling and dynamic simulation of the thoroughbred equine forelimb during stance phase of the gallop, *J Biomech Eng*, 127, 318-328 (2005)
- [9] Symons JE, Hawkins DA, Fyhrie DP, Upadhyaya SK, Stover SM : Hitting the ground running: Evaluating an integrated racehorse limb and race surface computational model, *J Biomech*, 49, 1711-1717 (2016)