

ワニ類後肢にみられる筋系の Y 字構造に基づいた 立位姿勢維持ロボット

伊東和輝^{*1}, 衣笠哲也^{*2}, 奥田ゆう^{*3}, 千葉謙太郎^{*4},

檜田沙耶香^{*5}, 高崎竜司^{*4}, 林良太^{*2}, 吉田浩治^{*2}, 大須賀公一^{*1}

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科, ^{*2} 岡山理科大学工学部, ^{*3} 岡山理科大学獣医学部,

^{*4} 岡山理科大学生物地球学部, ^{*5} 岡山理科大学大学院工学研究科

1. はじめに

ワニ類は、四足動物が示す多くの歩容を用いるという生物機械学的に興味深い特徴を持ち⁽¹⁻³⁾, その歩行メカニズムが注目されている。このような背景から、骨格や個々の筋の解剖学的かつ生物機械学的知見に着目したワニ類の歩行に関する研究がなされてきた⁽³⁻⁹⁾。

一方、ウマなど蹄行性哺乳類は、巧みな筋腱構造によって受動的に関節を拘束することで歩行を実現する⁽¹⁰⁾。我々は、個別の筋の機能だけでなく、地面との力学的相互作用に基づいて骨格や筋、腱によって生み出される受動的運動が歩容を生成するための本質と考える。つまり、脊椎動物の歩行メカニズムを理解するためには、四肢を構成する筋骨格系が地面との相互作用を伴う受動的運動によって肢内協調することでどのように歩容を生成するのか明らかにする必要がある。ワニ類は腹部を地面に接触させない姿勢で歩行（ハイウォーク）⁽¹⁾する。この時、地面反力との相互作用を伴う筋系の受動的な運動にもとづいて効果的に自重を支持するメカニズムの存在が予想される。この受動的運動メカニズムを明らかにすることができれば、ワニ類のロコモーションの解明につながるだけでなく、これを応用することでロボットによって効率的で自然な歩行を実現できるかもしれない。

そこで本研究は、環境との相互作用を考慮した解剖によってイリエワニ後肢に内在するハイウォークのための筋系の受動的運動メカニズムを明らかにし、これを物理モデルによって再構成することでハイウォーク時の立位姿勢維持が可能かどうか実証したことについて述べる。

2. 長尾大腿筋の牽引力と立位姿勢維持仮説

解剖では、自然死したイリエワニ（メス成体、年齢不明、体長 2.775 m, 体重 106.3 kg）を検体とし、腹ばい姿勢で左後肢（写真は反転している）足底部に踏み台を配置することで、地面反力（GRF）が作用する状況を再現しながら立脚期に寄与している筋を同定した。

骨、筋などの名称は解剖学の記載^(2,5)に従っている。図 1 にイリエワニの体幹・左後肢外側（頭部、尾部および表皮を除いた状態）と立位姿勢維持に関わる主要な骨、筋、腱の名称と配置を示す。また、図 2 にその模式図と本稿で仮定する筋や腱に作用する張力および各関節に作用するトルクを示す。

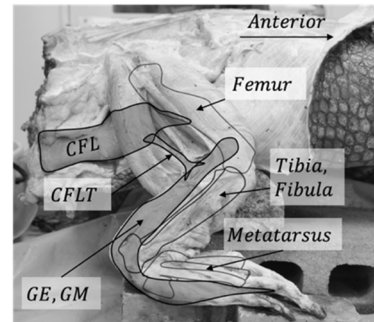


Fig.1 Dissected hindlimb of the *Crocodylus porosus* and the assignment of the muscles and bones

2.1 長尾大腿筋と Y 字構造および股関節の力学

ワニ類大腿骨の後退（股関節の伸展）は、尾椎を起始として大腿骨中上部後方（第四転子 P_1 ）に停止する後肢まわりで最大の長尾大腿筋（CFL）の収縮によって主に実現されるものと考えられている^(2,4,5)。また図 3A に示すように、CFL は停止位置 P_1 の手前 P_2 で腱 CFLT が分岐し、腓腹筋外側頭（GE）の起始 P_4 （大腿骨外側上顆）直後の P_3 に合流し Y 字構造を成す（図 4）。したがって、図 3B において CFL が収縮すると停止位置 P_1 を牽引することで股関節を伸展させ、同時に分岐した CFLT によって Y 字分岐点 P_3 に対し上後方へ牽引力 F_1 を発生する。股関節の伸展トルク（実際のワニでは CFL 以外の股関節伸展作用を持つ筋による牽引力との和）は重力によって生じる股関節の屈曲トルクと釣り合って立位姿勢を維持するもしくはこれを超えて股関節を伸展させる。

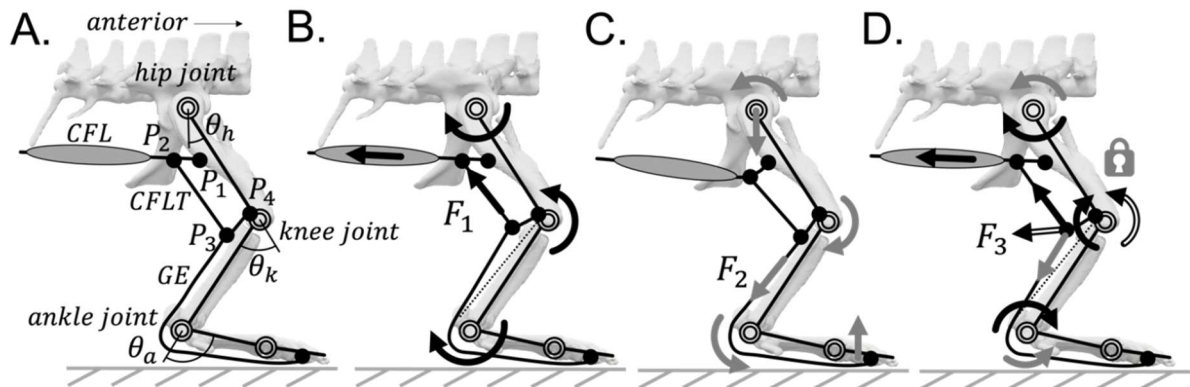


Fig.2 Expected mechanisms for maintaining the stance posture in the hindlimbs of crocodilians.

2.2 環境との相互作用と腓腹筋による Y 字分岐と足関節の力学

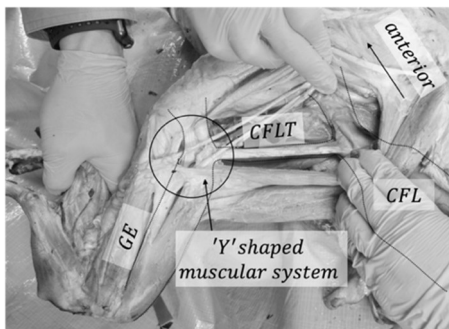


Fig.3 The 'Y' shaped muscular system formed by CFLT and GE

腓腹筋は外側頭 (GE) と内側頭 (GM) で構成される。GE は Y 字分岐 P_3 から脛骨に沿って下降しアキレス腱として踵骨を迂回しながら足底に停止し、GM は脛骨頭後部より起始し GE と合流して足底に停止する。GE と GM が立位姿勢において緊張して長さを保持する受動的な要素として作用すると、自重によって生じる足関節の屈曲 (背屈) トルクに対抗して GE が Y 字分岐 P_3 を下後方へ牽引し、膝関節を屈曲させ足関節を底屈させる方向の張力 F_2 を発生する。また、同時に GM も重力に対抗して足関節を底屈させるトルクを発生する (図 2C)。GE と GM により受動的に生じる底屈トルクが重力による背屈トルクと釣り合うことで足関節の姿勢を維持される。また、GE は CFL による牽引に対して Y 字分岐 P_3 が引き上げられることで張力 F_2 を増加させ、 F_1 と釣り合う位置で分岐点 P_3 を停止させる。

2.3 Y 字分岐と膝関節における力学

CFL の収縮により生じる膝を伸展させる力 F_1 と GE の張力により生じる屈曲力 F_2 が Y 字分岐点に作用するため (図 2D)、その合力 F_3 が CFLT の停止かつ GM の起始である大腿骨外側上顆を後退、つまり膝関節を伸展

させる方向に働く。また、CFL の収縮に伴って分岐点 P_3 が上昇するが、3つの力が釣り合う点で停止、つまり膝関節の伸展方向の可動域が制限され姿勢が保持される。

2.4 立位姿勢維持と推力発生

後肢が接地して環境と相互作用を受ける場合、以上の力学的作用が連動することで CFL を収縮するだけで立ち上がり動作が実現され、立位姿勢を維持することが可能となる。CFL がさらに収縮すると大腿骨は後退し (股関節伸展、図 4) 膝関節がロックされる。踵が地面に近いときには足関節もその姿勢を維持し、股関節の進展に伴って足底圧力中心がつま先に移動し踵が浮くと足関節は GE と GM の弾性力によって底屈しようとするために、足部には後方に蹴り出そうとする力 F_4 が生じる。この反力 F_5 は股関節に作用し、ハイウォーク時の推進に寄与すると考えられる。

以上が解剖により示唆されたワニ類の後肢におけるハイウォーク時の立位姿勢維持および推力発生メカニズムの仮説である。

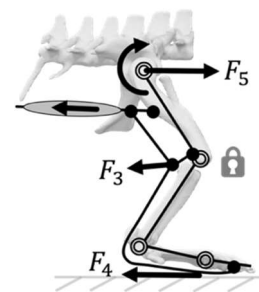


Fig.4 Generation of the propulsive force

3. ワニ類後肢ロボットの設計

イリエワニの解剖から得られた後肢におけるハイウォーク時の立位姿勢維持メカニズムが実現可能かどうかを検証するためのロボット (図 5) を作成した。ロボ

ットの骨格は解剖した検体を CT スキャンすることで得られた 3 次元骨格データを用いた。ハイウォークは parasagittal 面内の運動とみなせるため股関節、膝関節、足関節は 1 自由度の回転関節とした。各筋や腱は解剖で確認された配置を可能な限り再現した。CFL は脊椎を模したフレームの後部（尾椎に相当）から起始して大腿骨第四転子に停止し、GE は大腿骨外側上顆から起始して中足骨の遠位底部で停止させ、GM は、脛骨頭内側から起始したのちに GE と同様に中足骨遠位底部で停止させた。また、CFLT は CFL の停止位置手前で分岐し、GE の起始の直後で結合した。収縮の必要がない筋 GE、GM と腱 CFLT は耐荷重性に優れたポリエチレン製の編紐で再現し、CFL の収縮作用は McKibben 型空気圧人工筋肉 (MPA) で実現した。MPA は自然長が 205mm であり、内部圧力が 500kPa で約 50mm 収縮可能である。本ロボットは右後肢のみであり、左右への転倒を防ぐために、前後方向と鉛直方向に摺動可能なガイド機構を設けて parasagittal 面内の運動に拘束している。ロボットの移動部の総質量は 4.78kgf である。

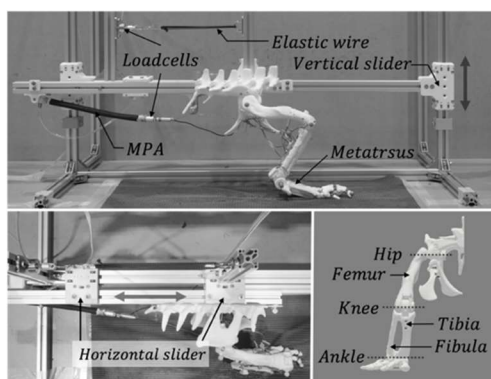


Fig.5 Crocodilians hindlimb robot

4. 実験

ワニ類後肢ロボットを用いて、後肢裏側の筋腱構造

により立位姿勢を維持するメカニズムの仮説の実現可能を検証するために、後肢がかがんだ状態から MPA の内圧を 0~500 kPa の範囲で連続的に上昇させ、500kPa に到達したところで圧力を保持する実験を行い、その間の肢姿勢の変化を確認した。図 6 に MPA の内圧上昇に伴い CFL の筋長と張力が変化することで、かがんだ状態から立位姿勢へと遷移する様子を連続写真で示す。MPA の圧力上昇に伴い立位姿勢を維持しながら徐々に股関節と膝関節が伸展する様子が確認できる。さらに、立ち上がった後に MPA の内部圧力を 500kPa に保持すると各関節の相対角度の変化も停止し、立位姿勢を維持していることがわかる。したがって、CFL の収縮のみで CFLT と GE および GM で構成される筋系が受動的に連動することで、股関節と直接的に駆動されない膝関節、足関節の関節間協調が実現され、立位姿勢を維持しながら後肢全体が後退する後肢立脚期の運動が生成されることが確認された。また、CFL の収縮と筋系の連動は立位姿勢の維持だけでなく、腰椎を前方に向かって押し出すように推進力を発生させていることが確認できる

5. おわりに

本報告は、ワニ類のハイウォークにおける立位姿勢の維持が、地面反力と筋、腱、靭帯を含む筋系の受動的な連動に基づくものであるかを明らかにすることを目的とし、イリエワニの後肢の解剖を行なうとともに、後肢骨格標本を用いたロボットによりその妥当性を検証したことについて述べた。結果として、長尾大腿筋 CFL の収縮のみによって分岐した腱 CFLT を介して GE と連動することでハイウォーク時の立位姿勢の維持できる可能性を解剖によって確認した。また、ロボットによってこの機能再現し、CFLT と GE による分岐構造が CFL の牽引力と地面との相互作用によって膝関節と足関節をロックし、CFL の収縮による股関節の伸展が大腿骨だけでなく脚全体を後退させるため推力が得られることを示した。

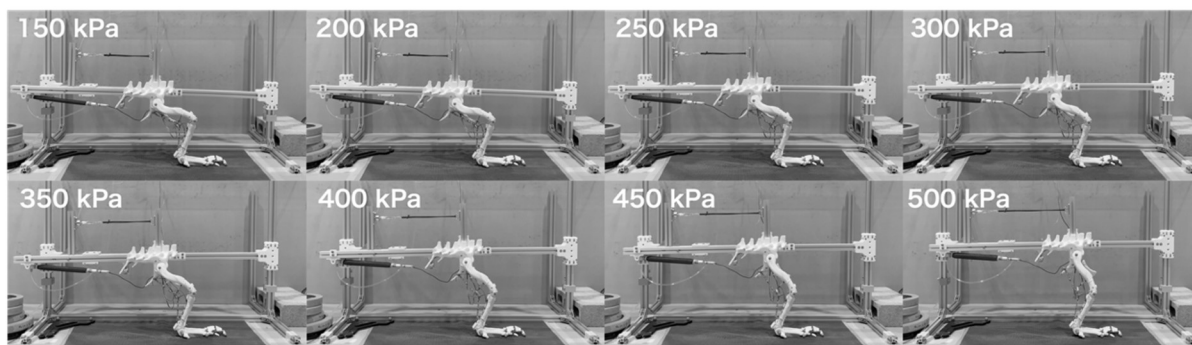


Fig.7 Posture of hindlimb during continuous increase of pressure of MPA

謝 辞

本研究は、JST 次世代挑戦的研究者育成プロジェクト (J219713007), および、JSPS 科研費 (20K04390) の助成を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) S.M. Gatesy : Hind limb movements of the American alligator (*Alligator mississippiensis*) and postural grades,” J. Zool., Vol. 224, No.4, pp. 577-588 (1991)
- 2) 鈴木大輔ら, “ワニの筋学 -古脊椎動物学者に必要な解剖-III 腰帯・後肢”, 化石, Vol.90, pp.37-60 (2011).
- 3) A.L.A. Wiseman et al., “Musculoskeletal modelling of the Nile crocodile *Crocodylus niloticus* hindlimb: Effects of limb posture on leverage during terrestrial locomotion,” J. Anat., Vol.293, No.2, pp.424-444 (2021).
- 4) A. Otero et al., “Pelvic musculature and function of *Caiman latirostris*,” Herpetol. J., Vol.20, pp.173-184(2010).
- 5) V. Allen et al., “Comparative architectural properties of limb muscles in Crocodylidae and Alligatoridae and their relevance to divergent use of asymmetrical gaits in extant Crocodylia,” J. Anat., Vol.227, No.6, pp.569-582(2014).
- 6) R.W. Blob, et al., “In vivo locomotor strain in the hindlimb bones of *Alligator mississippiensis* and *Iguana iguana*: implications for the evolution of limb bone safety factor and non-sprawling limb posture,” J. Exp. Biol., Vol.202, No.9, pp. 1023-1046 (1999).
- 7) A.R. Cuff et al., “Relating neuromuscular control to functional anatomy of limb muscles in extant archosaurs,” J. Morphol., Vol.280, No.5, pp.666-680(2019).
- 8) S.M. Reilly et al., “Hindlimb function in the alligator: integrating movements, motor patterns, ground reaction forces and bone strain of terrestrial locomotion,” J. Exp. Biol., Vol.208, No.6, pp. 993-1009(2005).
- 9) M. Iijima et al., “Ontogenetic changes in limb posture, kinematics, forces and joint moments in American alligators *Alligator mississippiensis*,” J. Exp. Biol., Vol.224, No. jeb242990 (2021).
- 10) M. Hildebrand, “The mechanics of horse legs,” Am. Sci., Vol.75, No.6, pp. 594-601(1987).