



ハドロサウルスの2足走行可能性

宇佐見 義之* 衣笠 竜太** 渡辺 祐佳那**

On a possibility of bipedal running of Hadrosaurus

Yoshiyuki USAMI* Ryuta KINUGASA** Yukana WATANABE**

1. はじめに

草食恐竜のひとつのグループとして、ハドロサウルスと呼ばれるグループがある。本稿では、まずハドロサウルスの紹介から入り、次に、ハドロサウルスの一種であるパラサウロロフスの走行可能性について検討する。

2.1 ハドロサウルスとは

ハドロサウルスは大きなグループで、一般にもかなり良く知られている。この名前の由来であるがハドロというのは古代ギリシャ語で $\acute{\alpha}\delta\rho\acute{o}\varsigma$ (*hadrós*, “thick”)と書き、厚い・かさばった・重いという意味がある。*sauros* はトカゲという意味なので、骨格からの復元からの推測として重いトカゲという程のニュアンスを持つ言葉であろう。日本語の文献では丈夫なトカゲと紹介されている場合が多い。ところで、筆者が所属する物理学の世界ではハドロロンという言葉がある。もちろん、ハドロロンと言えば物理学では重い粒子を指す言葉として有名であるが、恐竜のハドロサウルスと物理学のハドロロンとは語源が同じであることはなかなか一般には認識されていないであろう。

ハドロサウルスは4足歩行の草食恐竜であり、鳥盤目・鳥脚下目・ハドロサウルス科に属する。鳥盤目はステゴサウルスなどの草食恐竜を含むグループであり、ブラキオサウルスやスーパーサウルスなどの首の長い大型の草食恐竜を含む竜盤目とは異なるグループに属する。

ハドロサウルスの化石は世界中の白亜紀層に多産する。例えばカナダのプリティッシュ・コロンビア州、アメリカのモンタナ州などでは、ハドロサウルス科の一種エドモントサウルスの化石は非常に多く見られるようだ。

2.2 日本のハドロサウルス類

日本におけるハドロサウルスとしては1934年、当時の日本領、樺太豊栄郡川上村からかなりまとまったハドロサウルス属の化石が見つかり、ニッポノサウルス・サハリエンシスと命名されて記載された。また、北海道のむかわ町で、後部大腿骨周辺のまとまったハドロサウルス類がごく最近発見された。北海道においては白亜紀の地層が露出する。川の周辺部に行けばイノセラムスが多産し、海棲の貝類をすぐに見つけることができる。また、アンモナイトも多産し化石コレクターが多くのアンモナイトを発掘し収集している。脊椎動物では、むかわ町でモササウルスの化石が見つかった。むかわ町の博物館が提供する標本を元に新種のモササウルスとして記載し発表された(1)。このように、北海道の白亜紀の地層からは海棲生物の化石がみつかるので、脊椎動物でも海棲の動物しか見つからないと思われていた。

この状況を変えたのが佐藤たまきである。佐藤はむかわ町博物館の保管庫にある脊椎の骨を見て、恐竜の特徴である血管弓があることを見出し、これが陸棲の恐竜の化石であることを発見した。その後、むかわ町学芸員櫻井和彦と北海道大学の小林次次らが共同で研究を行い、これがランベオサウルス亜科のオロロティタン属に最も近いという見解を出した(図1、図2)。

*准教授：物理学教室

Associate Professor, of Institute of Physics

**准教授：人間科学部

Associate Professor, Dept. of Human Science

***学部学生、総合工学プログラム

Undergraduate student



図1 むかわ町博物館による2013年第一次発掘の様子(むかわ町徳別博物館)。



図3 Faro レーザースキャナーによるParasaurolophusの3次元スキャン計測

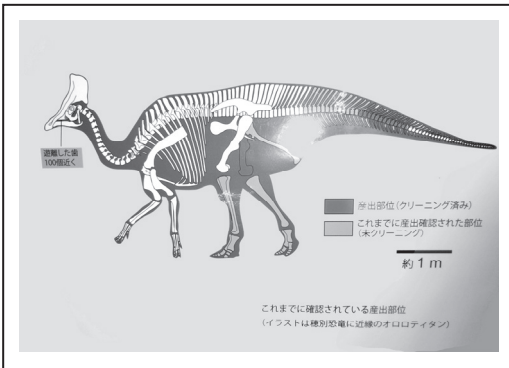


図2 近縁と思われるオロロティタンの骨格図に、発掘した部位の骨格を示したもの(むかわ町徳別博物館)。



図4 シカゴ・フィールズ博物館にマウントされているハドロサウルス類 Parasaurolophus. 頭骨が最大 1.2m にもなるのが特徴。音を出す器官としての機能があるとの研究報告がある。

2.3 ハドロサウルスは走行時に2足になるか?

一般によく知られているハドロサウルス類としてパラサウロロフスがいる。パラサウロロフスは属名であり、1922年に Parks により *Parasaurolophus walkeri* として記載されたのがこのグループの最初の記載となる。一般によく知られているパラサウロロフスであるが、他に *P. tubicen*, *P. cyotocratus* の2種が記載されているだけであり、化石産出としては珍しいグループである。この恐竜は頭部の長い頭骨が特徴で、良く知られており、映画ジュラシックパーク III の群れのシーンにも登場している。ここで問題となるのが、パラサウロロフスの歩行・走行の歩容である。一般にハドロサウルスの四肢は、前肢と後肢が非対称であるのが大きな特徴である。ハドロサウルスの後肢は前肢に比べて大きく発達している。他方で前肢は後

後肢に比べると非対称にかなり小さい。とは言えティラノサウルスほどになんの役にも立たなかったと思われる程には退化していない。このような後肢と前肢の非対称は何故生じたのであろうか? また、実際のところ、どのように歩いたり走ったりしたのであろうか?

歩行に関しては足跡の生痕化石が見つかっていて、4足で歩いた痕を遺す生痕化石が残されている。一方で、走る様子はどうか、というと、何も明らかになっていないのが現状である。映画「ジュラシックパーク I I I」では危機的な状況では後肢2脚で立つ様子が描かれている。しかし、学術的には後肢のみで立てたか、また、後肢2脚で走ったかどうかの検討はなされていない。

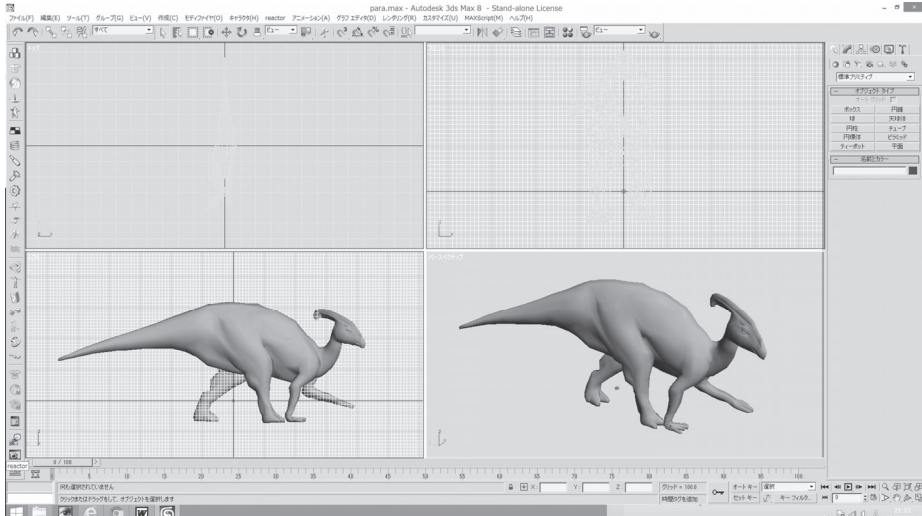


図5 3次元レーザースキャンをしたパラサウロロフスの骨格データを元に、3次元CGソフト 3dsmax 上で3Dのモデル化を行った様子。

本研究ではこの点を調べる為にまずパラサウロロフスの三次元計測を行った。標本としてはシカゴ・フィールズ博物館のマウント標本を用いた。三次元測定装置はFARO社のレーザー三次元測定装置を用いた。FARO社のレーザー三次元測定装置は位置のキャリブレーションとして3つの基準点を置く。これだけで、専用ソフト上でスキャンした物体の3次元形状がデータ化される(図3、4)。

FARO社製の三次元スキャナーでキャプチャした三次元形状をソフトウェアで加工する為に、xyz三次元上のデータポイントにまず変換した。そのデータを三次元

CGソフト 3dsmax 上で3Dのモデリング作業を行った(図5)。次に後肢のみにて立つ可能性を探る為、図6のような姿勢をとるようにパラサウロロフスのモデルを変形した。このような正確な体重分析の際に必ず必要な作業が密度0、すなわち空気の部分を筋・骨格・内臓などの密度1g/ccの器官から減じることである。肺、気管などの部分をモデリングして、このような空気部分の体積を図6のように減じた。この時点で、重心の位置を探ると、後肢の先端にあることがわかった。この図の表示では矢状面の表示となるので、重心を鉛直のラインとして表現してある(図7)。

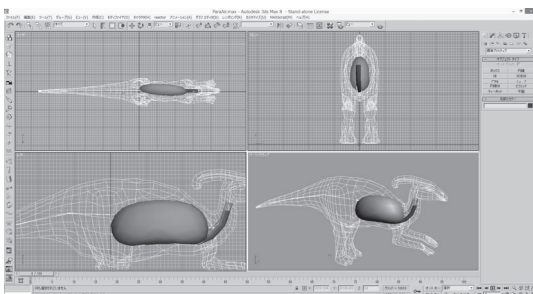


図6 肺、気管など、密度ゼロの部分モデリングし、全体の容積から減ずる作業を行った。

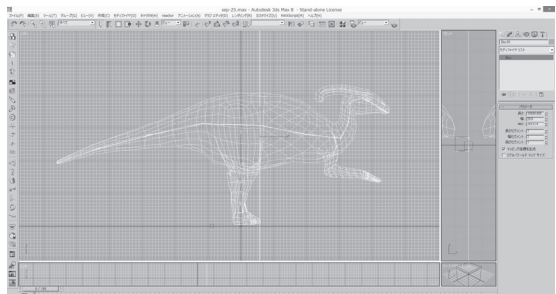


図7 パラサウロロフスの重心がどこにあるか?この姿勢においても重心が後肢の先端にあることがわかった。矢状面での記述の為、重心位置は鉛直のラインとして表現してある。

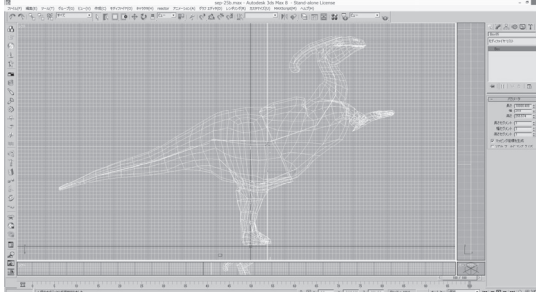


図8 立ち上がった姿勢におけるパラサウロロフスの重心。図4の状態よりわずかに後方に重心が移動する。矢状面での記述の為、重心位置は鉛直のラインとして表現してある。

更に、立った姿勢の重心位置を探るため、CG作成上のボーンを作成し、その周りでCG用のエンベロープを設定し、ボーンを動かすとパラサウロロフスのモデルの姿勢が変わるように 3dsmax のアニメーションを設定した。

CG上のボーンは図7ではパラサウロロフスの体幹と首、頭部に入っていることがわかる。このボーンを回転させて、パラサウロロフスの姿勢が立つようにアニメーション設定を作成した。このようにして、パラサウロロフスのモデルを立った姿勢にしたのが図8である。このような姿勢の変化をつけて分かったことは、上半身を立てる動作だけでは重心の前後位置はわずかにしか変わらないということである。他方において、わずかに変化した重心の前後位置をみると、後肢の足の位置に重なるように重心位置があることが分かる。この図から、パラサウロロフスは、上体を反らすことにより、後肢の2脚で立つことが可能であることが分かった。

3 恐竜の2足走行能力

3.1 動的運動計算

予備的な結果であるが、パラサウロロフスの2足での走行性能の力学計算を行った。計算手法はこれまでの筆者が行ってきた手法と同様であるが、改めてここに手法を記述する。まず、2足走行の運動を純粋に数理的に作るのは非常に難しい。そこで、予め人間の2足走行のモーションキャプチャを行った。Vicon Motion Systems 社製の VICON システムを用いて人間の2足走行の足の動きをデータ化した。次に、この動きは周期的な運動なので、

フーリエ級数として表す。

$$\theta_i(t) = a_i^0 \sin(0t + \delta_i^0) + a_i^1 \sin(\omega t + \delta_i^1) + \dots + a_i^5 \sin(5\omega t + \delta_i^5) \quad (1)$$

フーリエ級数の時間に関して5次までの項を取り入れることにより、誤差が1%以内でモーションキャプチャのデータを再現することができた。この(1)式において、係数 a は回転する角度の大きさ、 δ が運動の違いを表す。係数 a も本来は最適計算の内のパラメーターとみなすべきであるが、本計算では、ある範囲で変化させて最適な運動を見つけることにした。最適な運動とは、床反発力が過大にならない範囲で速く前進することを指す。次に、 δ が運動の違いを表すので、 δ について最適化の計算を行うことにした。

2足の動力学として、本来は各関節を動かす5自由度×2程度のラグランジアンを作り、ラグランジュ運動方程式を解くことが正道である。しかし、本研究では、10自由度のラグランジアンを解く煩雑さを避け、1体近似を行って簡略に走行運動の様子を探ることにした。

1体近似においては、動物の重心の併進運動と回転運動のみを考える。

$$m_{body} \frac{d^2 \bar{X}}{dt^2} = -m_{body} g \Big|_y + \bar{F}(\bar{r}) \quad (2)$$

$$I \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \bar{r} \cdot \bar{F}(\bar{r}) \quad (3)$$

ここで \bar{X} と Φ は重心位置と回転角である。運動は矢状面の2次元面内に限るとする。 I , g and \bar{r} は慣性モーメント、重力加速度、重心から接地位置へのベクトルである。 $-m_{body} g \Big|_y$ は鉛直方向の重力の作用を表す。

2足の後肢の各セグメントの力学は次のようなものになることが良く知られている。

$$\bar{F}_1 - \bar{F}_2 - m_1 g \Big|_y = m_1 \bar{a}_1 \quad (4)$$

$$\bar{x}_{1g} \times \bar{F}_1 - \bar{x}_{2g} \times \bar{F}_2 + M_1 - M_2 = I_1 \dot{\omega}_1 \quad (5)$$

\bar{F}_1 , \bar{F}_2 , \bar{a}_1 はセグメントの下部からの力と上部からの力、セグメント全体が動く加速度を表す。 \bar{x}_{1g} , \bar{x}_{2g} セ

グメントの中心からの力の働く方向への位置ベクトル、 $M_1, M_2, \dot{\omega}_1$ は回転モーメント力、角速度の時間微分を表す。ここで、足先が接地している状態では、ほとんど力が鉛直方向にかかるので、角速度の時間微分はこれに比べてごく小さい。そこで、(5) 式の右辺をゼロとする近似を行う。この近似は水平方向の加速度があまり変化しない走行運動では妥当な近似であると考えられる。

また接地の条件式として以下を考える。

$$F_y(y) = -ky - \gamma y \quad (6)$$

ここで y, v_y, F_y は鉛直方向の位置と速度ベクトル、鉛直方向の力を表す。 k と γ が接地の力学を決めるパラメーターとなる。本研究では $k=1.0 \times 10^7$ N/m $\gamma=2.0 \times 10^5$ Ns/m と置いた。このパラメーターには不定性があり、これが唯一最適であるという保証は無い。しかし、シミュレーションを多数行うことにより、この値を含む広い領域で最終結果はさほど変わらないことが計算上確認された。

3.2 進化アルゴリズム

1 式の δ を決めれば最適な運動、すなわち、より速い速度で、かつ小さな鉛直方向の床反発力の運動が得られる。このパラメーター δ を決めるのに如何なる方法が良いかということが問題となる。ここで、この δ の最適値を求める方法として、まずシミュレーテッド・アニーリング法と進化計算法で比べてみたのが図9である。ここでは2足走行のテストとしてティラノサウルスの場合で進化アルゴリズムの検証を行った。

ここでの進化アルゴリズムは最も単純なものを使っている。すなわち、2000 個のランダムな δ からスタートして、最上位の δ を動力学シミュレーションにより選び、それを親として、また 2000 個のランダムな個体 δ を作り出す方法を繰り返した。図9からわかることは、最適化手法として非常に優れた近似法であるシミュレーテッド・アニーリングより単純な進化アルゴリズムの方が小さな鉛直加速度を得られることが分かった。

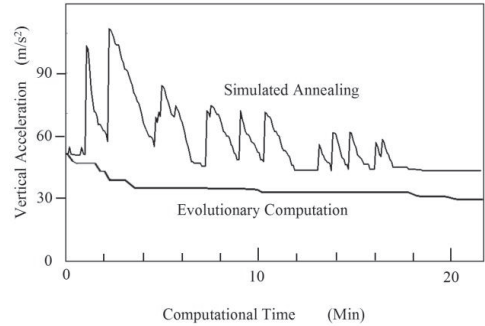


図9 シミュレーテッド・アニーリング法と、進化アルゴリズム法の比較。計算時間が経った時、垂直の加速度がどの位低減できるかを示した。

次に、遺伝的アルゴリズムで良く出てくる進化計算法の比較をおこなった(図10)。ルーレット法、ルーレット法+エリート保存、比例選択法である。

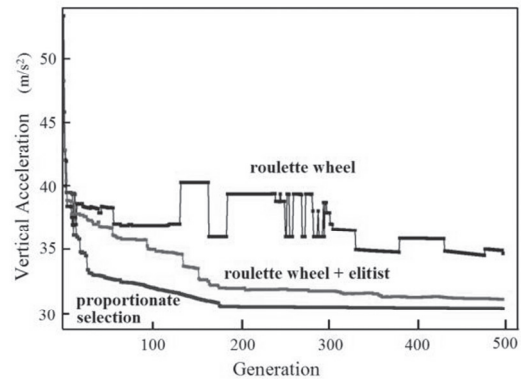


図10 シミュレーテッド・アニーリング法と、進化アルゴリズム法の比較。計算時間が経った時、垂直の加速度がどの位低減できるかを示した。

これらの結果として進化アルゴリズムにより走行運動の準最適解が近似的に求まることが分かった。

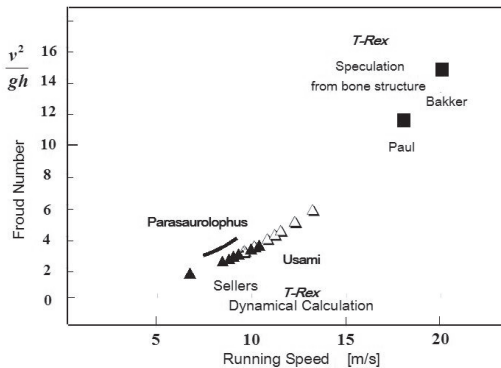


図1 1 ティラノサウルスの走行速度と今回パラサウロロフスの2足走行を並置した図。横軸は走行速度、縦軸はFroud数を表す。

この結果を元に、パラサウロロフスの2足走行に適応した予備的な計算結果を図1 1に示す。計算では走行速度として6m/s~8m/sの走行速度が得られた。一方、ティラノサウルスの走行速度としては筆者の計算により14m/s程度までの可能性が示されている(2)。PaulやBakkerらによる1980年代の評価としては、骨の形状から速度18~20m/sまでの速さで走れるのでは、という推測がなされていた。他方で2002年以来Hutchinsonらが静的計算により、速くは走れないとの学説が提案された。この学説は、その後、Sellersらの動力学の計算により速度10m/s程度まで可能との結果や、筆者の14m/sまで可能との結果と対立した状況にある。

パラサウロロフスに関しては、2足での走行が可能かどうか、これまで検証はなされていなかったが、静的な計算(図6-8)により、体重に質量分布として2足で立つ姿勢が可能との結論が今回得られた。また、非常に予備的な計算ながら、筆者の動力学の計算により、パラサウロロフスは速度6~8m/sで走行可能との結果が得られた。今後は、より数値計算の妥当性を高める作業が必要とされる。

これらの結果を表示する為に、研究室に液晶80インチ3面のディスプレイセットを構築した。現在、コンテンツとして、2K3面の解像度の映像を作り、この大型表示装置に映し、古代の生態系をリアルに感じ取れる装置作りを構築中である。

4 人間の4足走行能力の可能性

宇佐見は人間科学部の衣笠と共同で、人間の4足走行の可能性について研究を進めている。これは、いとうけんいち氏が4足走行の時間短縮記録に挑戦する過程で、1年に1度の4足走行大会が開かれるようになり、その走行速度上昇の短時間における急速な改善という結果を基に進められている研究である。いとうけんいち氏はこの分野のただ一人のパイオニアであり、過去数年間に渡って、記録の更新を続けギネスレコードにも登録されていた。ところが2014年玉腰活末氏により王座を奪還される事件が起きた。いとうけんいち氏はめげずに練習に励み、ついに2015年、世界王者のタイトルを奪還した。

さて、これらの記録を時系列的に並べ、更に将来の記録の進化を予想した。2足走行の世界記録保持者は、本原稿執筆時ではウサイン・ボルトの100mを9.57秒で走行したのが最速である。100mの2足走行の記録を時系列的に並べてみた。それを見ると1900年代の10秒台から100年かけて9秒台への進化を遂げていることがわかった(4)。ところが、4足走行では、ここ数年で、1.8秒台から1.5秒台へと劇的進化が達成されている。単純に外形的な速度(100mの時間)の年代ごとの推移を計算して、ここ数年の劇的な4足走行のスピードアップを延長すると2030年代から2070年代には2足走行の速度を上回る可能性があることが示唆された。いつの日か、人間が4足で走る競技に、世界最速の人間が集まって競技する時代が来るかも知れない。

参考文献

- (1) Takuya Konishi, Michael W. Caldwell, Tomohiro Nishimura, Kazuhiko Sakurai & Kyo Tanoue, "A new halisaurine mosasaur (Squamata: Halisaurinae) from Japan: the first record in the western Pacific realm and the first documented insights into binocular vision in mosasaurs insights into binocular vision in mosasaurs". J. Sys. Palaeo, Online: 07 Dec 2015. DOI:10.1080/14772019.2015.1113447
- (2) Yoshiyuki Usami, "Biomechanics of Bipedal Dinosaur: How Fast Tyrannosaurus Could Run? ", CREATSPACE (2015).
- (3) Yoshiyuki Usami and Ryuta Kinugasa, "A POSSIBILITY OF FAST RUNNING OF TYRANNOSAURUS". Submitted to Natural Science, in 2016.
- (4) Ryuta Kinugasa and Yoshiyuki Usami, "How Fast Can a Human Run? –Bipedal vs. Quadrupedal Running", Front. Bioeng. Biotechnol., 30 June 2016. <http://dx.doi.org/10.3389/fbioe.2016.00056>.