

恐竜の歩行時の地面にかかる 圧力について

群馬県立高崎女子高校 1年 津田葉里

研究動機

博物館で大型恐竜の足とその大きな足跡化石を見て、どのくらいの圧力が働いているのか興味を持った。そこで、今回は以前から興味を持っていた肉食恐竜の中でも、代表的な種類の一つである獣脚亜目アロサウルス科のアロサウルスに焦点をあてて調べた。

研究目的

歩行時の足の地面への着き方の変化と、それに伴って地面にかかる圧力の変化について明らかにする。

研究方法

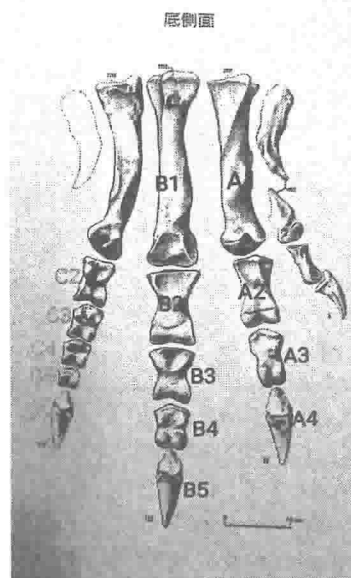
- ①最初にアロサウルスの骨格（特に足）に関する文献を調査して、研究の参考となる図の有無、推定体重について調べた。
- ②次に、アロサウルスの足の面積を化石から推定した。（今回は実物化石やレプリカの測定ができなかったため、「*Allosaurus fragilis* a revised osteology (Madsen, 1993)」に掲載されていた図とその縮尺、ならびに足跡化石から推定されている足跡の形状を元に右後ろ足の面積を計算した。
- ③推定体重と②で求めた面積から圧力を算出した。

アロサウルスについて

1億5400万年前から1億4400万年前に北米とヨーロッパに生息していた。ジュラ紀後期に生息していた肉食恐竜では最大である。二足歩行をし、単独でも、集団でも狩りを行ったと考えられている。(ティム・ヘインズ&ポール・チェンバーズ,2006)

アロサウルスの右後ろ足の骨には前を向いたゆびが3本あり、人差し指は3個、中指は4個、薬指は5個の骨で構成されている。人差し指の骨のうち足首に近い中足骨から、A1、A2、A3、A4とし、中指も同様にB1、B2……B5、薬指も同様にC1、C2……C6とした。面積はそれぞれの骨を長方形とみて考え簡略化して求めた。図は左足である。

(伊藤恵夫、1994)



足の指の面積

人差し指

	長さ(cm)	幅(cm)	面積(cm ²)
A1	34	9	306
A2	13	7	91
A3	10	6	60
A4	12	4.5	54

中指

	長さ(cm)	幅(cm)	面積(cm ²)
B1	36	9	324
B2	13.5	9	121.5
B3	9.5	7	66.5
B4	7.5	6	45
B5	13	4	52

薬指

	長さ(cm)	幅(cm)	面積(cm ²)
C1	34	7.5	255
C2	8	5	40
C3	6.5	5	32.5
C4	5	4	20
C5	4	3	12
C6	10.5	3.5	36.75

足の着き方

アロサウルスの足裏中央部には、すでに知られている足跡化石と近縁現生鳥類、特にエミューや大型の歩行性鳥類との比較から、パッドのような軟組織があったと考えられている。これは軟組織なのでほとんど化石として残らない。そのため、歩き方が最も恐竜に近い鳥といわれるエミューとアロサウルスの右後ろ足中指の骨の長さ (B1~B5) の比から、アロサウルスのパッドの面積を推定した。パッドの形は円形と仮定した。

$$\text{エミュー} : \text{アロサウルス} = 14.5(\text{cm}) : 79.5(\text{cm}) = 29 : 159$$

$$29 : 159 = \text{エミューのパッドの半径}(\text{cm}) : \text{アロサウルスのパッドの半径}$$

$$29 : 159 = 2.52 : \text{アロサウルスのパッドの半径}$$

$$\text{アロサウルスのパッドの半径} = 13.816\cdots \approx 13.82$$

よって、アロサウルスのパッドの推定面積は

$$(13.82)^2 \times \pi = 190.9924 \approx \underline{191.0 \text{ (cm}^2\text{)}}$$

足の着き方の変化

足の地面への着き方の変化はエミューの歩き方を参考にして考えた。

左足のみで立っている時から右足のみで立っている時までの間を4つに区切った。

①左後ろ足→接していない

右後ろ足→A3、A4、B3、B4、B5、C3、C4、C5、C6、パッドが接している。

②左後ろ足→A3、A4、B3、B4、B5、C3、C4、C5、C6が接している。

右後ろ足→人差し指が離れている。→B3、B4、B5、C3、C4、C5、C6、が接している。

③左後ろ足→A3、A4、B3、B4、B5、C3、C4、C5、C6、が接している。

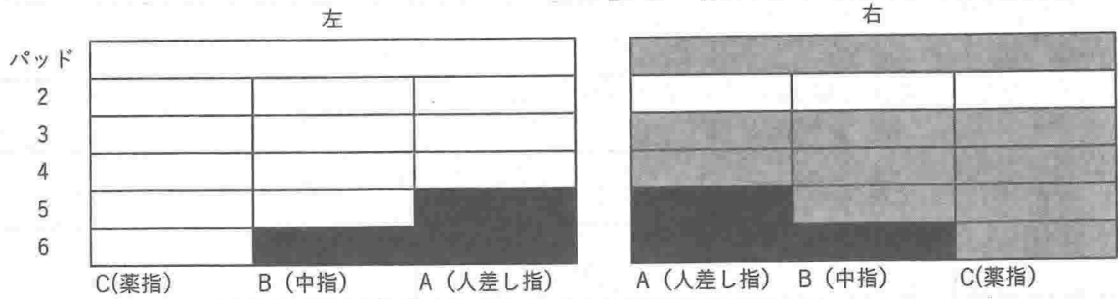
右後ろ足→薬指と人差し指が離れている。→B4、B5が接している。

④左後ろ足→A3、A4、B3、B4、B5、B6、C3、C4、C5、C6、パッドが接している。

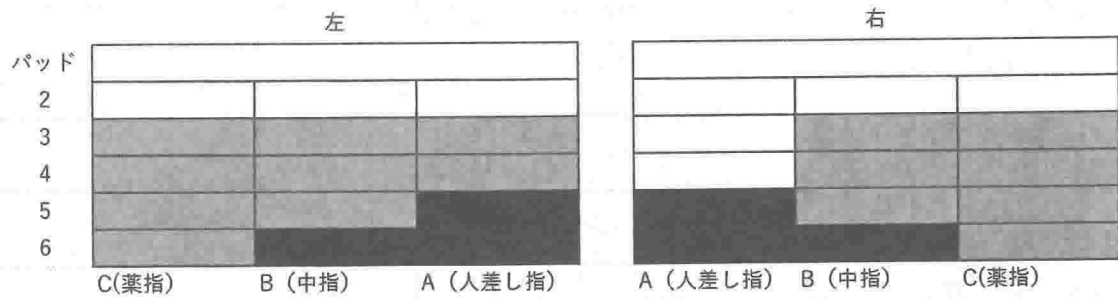
右後ろ足→接していない

これらを図示すると次の表のようになる。

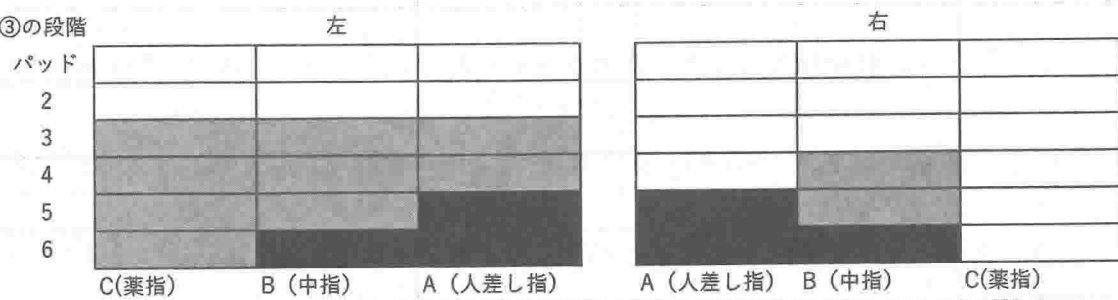
①の段階



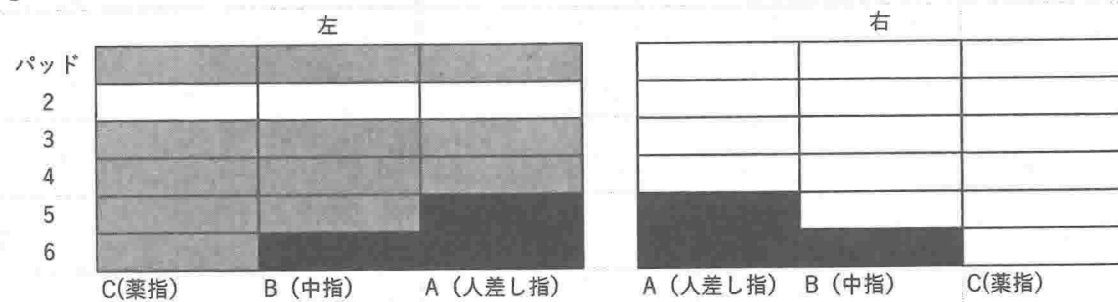
②の段階



③の段階



④の段階



オレンジ色に塗ってあるところが、地面に接している部分である。

それぞれの場合に地面に接している面積

上記の表より合計した。

- ① の時……左足→0 cm² 右足→569.75 cm²
- ② の時……左足→378.75 cm² 右足→264.75 cm²
- ③ の時……左足→378.75 cm² 右足→97 cm²
- ④ の時……左足→569.75 cm² 右足→0 cm²

アロサウルスの足にかかる荷重とその変化

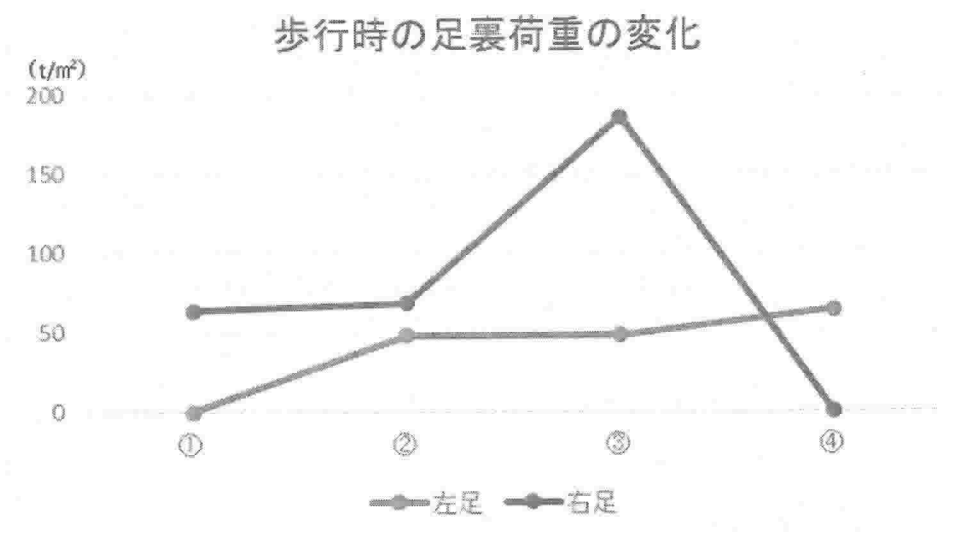
推定体重

アロサウルスの推定体重は現在も議論が進められている。そこで調べた中で最も重い3.6tと、最も軽い1.5t (Bates et al, 2009) の2つの場合で計算した。また今回は重心移動を考慮せず、体重は2本の足で等しく支えられていると仮定した。すなわち、片足の状態にはその足に全体重が、両足状態では、片方の足に全体重の二分の一かかったものとした。

(1) 体重 3.6t の場合

	①	②	③	④
左足 (t/m ²)	0	47.53	47.53	63.19
右足 (t/m ²)	63.19	67.99	185.57	0

(t/m²)



①の時……左足→接していない

$$\text{右足} \rightarrow 3.6(\text{t}) \div 0.056975(\text{m}^2) = 63.18560 \dots \approx 63.19 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

これを 1 cm²あたりに換算すると、6.319 kg/cm²

②の時……左足→ $1.8(\text{t}) \div 0.037875(\text{m}^2) = 47.534752475 \dots \doteq 47.53 (\text{t}/\text{m}^2)$

これを 1 cm^2 にあたりに換算すると $4.753 \text{ kg}/\text{cm}^2$

右足→ $1.8(\text{t}) \div 0.026475(\text{m}^2) = 67.988668555 \dots \doteq 67.99 (\text{t}/\text{m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると、 $6.799 \text{ kg}/\text{cm}^2$

③の時……左足→ $1.8(\text{t}) \div 0.037875(\text{m}^2) = 47.534752475 \dots \doteq 47.53 (\text{t}/\text{m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると、 $4.753 \text{ kg}/\text{cm}^2$

右足→ $1.8(\text{t}) \div 0.0097(\text{m}^2) = 185.56701031 \dots \doteq 185.57 (\text{t}/\text{m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると $18.557 \text{ kg}/\text{cm}^2$

④の時……左足→ $3.6(\text{t}) \div 0.056975(\text{m}^2) = 63.18560 \dots \doteq 63.19(\text{t}/\text{m}^2)$

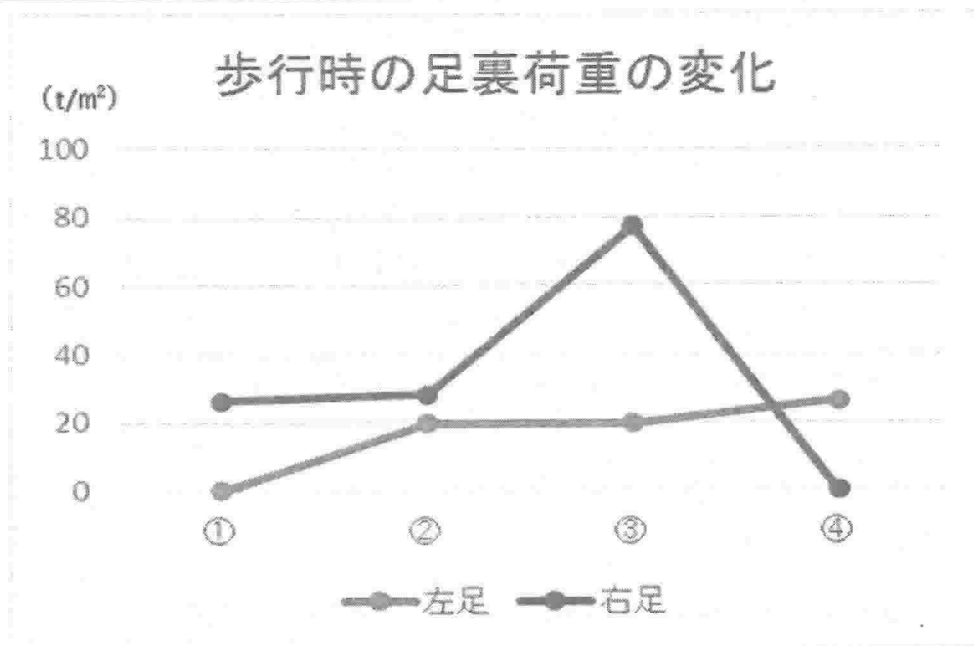
これを 1 cm^2 あたりに換算すると $6.319 \text{ kg}/\text{cm}^2$

右足→接していない

よって、体重 3.6 t の場合の足の裏への最大荷重は、左足で④の時の $63.19(\text{t}/\text{m}^2)$ 、右足で③の時の $185.57 (\text{t}/\text{m}^2)$ だった。

(2) 体重 1.5t の場合

	①	②	③	④
左足 (t/m ²)	0	19.8	19.8	26.33
右足 (t/m ²)	26.33	28.33	77.32	0



①の時……左足→接していない。

$$\text{右足} \rightarrow 1.5(\text{t}) \div 0.056975(\text{m}^2) = 26.327336551 \dots \approx 26.33 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

これを 1 cm²あたりに換算すると 2.633 kg/cm²

②の時……左足→ $0.75(\text{t}) \div 0.037875(\text{m}^2) = 19.801980198 \dots \approx 19.80 \text{ (t/m}^2\text{)}$

これを 1 cm²あたりに換算すると 1.980 kg/cm²

$$\text{右足} \rightarrow 0.75(\text{t}) \div 0.026475(\text{m}^2) = 28.328611898 \dots \approx 28.33 \text{ (t/m}^2\text{)}$$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると 2.833 kg/cm^2

③の時……左足 $\rightarrow 0.75(\text{t}) \div 0.037875(\text{m}^2) = 19.801980198 \dots \approx 19.80 \text{ (t/m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると 1.980 kg/cm^2

右足 $\rightarrow 0.75(\text{t}) \div 0.0097(\text{m}^2) = 77.319587629 \dots \approx 77.31 \text{ (t/m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると、 7.731 kg/cm^2

④の時……左足 $\rightarrow 1.5(\text{t}) \div 0.056975(\text{m}^2) = 26.327336551 \dots \approx 26.33 \text{ (t/m}^2)$

これを 1 cm^2 あたりに換算すると、 $2,633 \text{ kg/cm}^2$

右足 \rightarrow 接していない

よって、体重 1.5t の場合の足の裏への最大荷重は、左足で④の時の $26.33 \text{ (t/m}^2)$ 、右足で③の時の $77.31 \text{ (t/m}^2)$ だった。

考察・まとめ

・今回は重心移動を考慮しなかったもので、本来ならば今回の結果よりも左足と右足の足の裏への荷重差が大きくなり、特に蹴り出す方の足が地面に与える圧力が大きくなると考えられる。

・今回は、左足のみで立っている時から右足のみで立っている時までを考えて計算しているため、左足にかかる圧力の変化が小さく、右足にかかる圧力の変化が大きく見えるが、次の一步では左足にかかる圧力の変化が大きく、右足にかかる圧力の変化が小さくなると推定される。そして、歩いているときにはそれが交互に繰り返されると思われる。

謝辞

今回の研究を行うにあたり、高桑祐司先生には調査方法から報告書の作成に至るまで丁寧に指導して頂きました。群馬県立自然史博物館の長谷川喜和名誉館長、第一研究室の先生方は、研究中に親切にいただき、大変お世話になりました。群馬県立高崎女子高等学校の野崎真史先生ならびに高女科学研究クラブの先生方には研究検討会の開催や研究の進め方などを教えてくださり、効率的に研究を進めることができました。

皆様、大変ありがとうございました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

参考文献

Karl T. Bates, Peter L. Falkingham, Brent H. Breithaupt, David Hodetts, William I. Sellers and Phillip L. Manning (2009): HOW BIG WAS 'BIG AL'? QUANTIFYING THE EFFECT OF SOFT TISSUE AND OSTEOLOGY UNKNOWNNS ON MASS PREDICTIONS FOR *Allosaurus* (DINOSAURIA: THEROPODA). *Palaeontologia Electronica*, 12(3);14A:33p.

Lewis S. Brown (1957): ANIMALS IN MOTUON EDWERD MUYBRIDGE. DOVER
p.179-183

- Peter L. Falkingham and Stephen M. Gatesy (2014): The birth of a dinosaur foot print: Subsurface 3D motion reconstruction and discrete element simulation reveal track ontogeny. PNAS,111(51):18280-18284
- Stephan M. Gatesy, Kevin M. Middleton, Farish A. Jenkins Jr. and Neil H. Shubin (1999)
Three-dimensional preservation of foot movements in Triassic theropod dinosaurs. Nature,399;141-144
- James H. Madsen, Jr. (1993): *ALLOSAURUS FRAGILIS*: A REVISED OSTEOLOGY, UTAH GEOLOGICAL SURVEY. p.159-163
- Noble S. Proctor and Patrick J. Lynch (1993): Manual of Ornithology Avian Structure & Function. Yale University Press, p.118-121
- Matt A. White, Alex G. Cook, Ada J. Klinkhamer and David A. Elliott (2016): The pes of *Austroraptor wintonensis* (Theropoda: Megaraptoridae): analysis of the pedal range of motion and biological restoration. PeerJ, 4:e2312.
- 石垣忍 (2008) 恐竜と歩こう！足跡化石の発掘と研究. 童心社 40p.
- 伊藤恵夫 (1994) 恐竜の骨学 *Allosaurus* の骨学. In 恐竜学最前線7、学研、p.104-113.
- ティム・ヘインズ & ポール・チェンバーズ (2006) よみがえる恐竜・古代生物
超ビジュアルCG版. SoftBank Creative, p.98-99