



1. はじめに

温血動物は昆虫大の大きさになるには無理があるということを以前に述べましたが、逆に恐竜のように大きくなった場合、何が問題になるのかという疑問がわいてきました。蝶とはあまり関係がありませんが、疑問に思ったらとことん追求してみましょう。そこで、恐竜についてちょっと考えてみます。



ジュラシックパーク第1作のブラキオサウルスのあの感動のシーンです。

恐竜は英語で Dinosaur (ダイナソー) といい、命名はイギリスの科学者 R. オーエンです。「Dino」が「おそろしい」、「Saur」が「トカゲ」を意味しますが、トカゲは爬虫類の一種です。したがって、私の若い頃は、恐竜は爬虫類であると言われていましたし、そう信じていました。つまり、20 年ほど前までは恐竜は現在の爬虫類のように「ノロノロと歩き、しっぽを引きずりながら歩くノロマな動物」と考えられていましたし、昔の恐竜の本や、恐竜映画などを見ると、ティラノサウルスなどもしっぽを引きずっていましたね。

ところが、最近の研究で、骨格の力学的な検証の結果、恐竜は俊敏で、活発な行動をしていたことが分かってきました。スピルバーグ監督の「ジュラシック・パーク」や「ロスト・ワールド」の世界的な大ヒットの裏には、最近の知見が大いに活用されて、恐竜たちが生き生きと描かれています。また、足跡化石に尾を引きずっている後がないなど、俊敏で、活発であったことを証明しています。

最近では、恐竜は温血動物であるとする学者も増えてきましたが、学会はまだその結論には慎重のようです。

そこで、以下ではアパトサウルスやブラキオサウルスなどの大型の草食獣に話を絞り、今生きている動物たちを参考にしながら、以下の4つの観点から「恐竜は温血動物か冷血動物か」について考えてみようと思います。

(その 1) : もし爬虫類だとしたら、活発に動くことができたでしょうか？

(その 2) : 17~18m にもなる体高で、頭まで血液を送ることができたでしょうか？

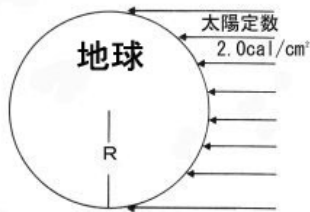
(その3):「肉食恐竜の攻撃を避ける為、あるいは重すぎる体重の為に水中で生活した」とありますが、水圧で呼吸ができたのでしょうか？

(その4):総合的に、エネルギー代謝率からみてみるとどう考えたらよいのでしょうか？

2. もし爬虫類だとしたら、活発に動くことができたでしょうか？

まず、(その1)はどうでしょう。

中生代の半ばジュラ紀の恐竜で、全長 25m、体重 30トンと標準的な大きさのアパトサウルスについて考えて見ましょう。



まず、日光を全身に浴びて、夜の下がった体温を高めるところから考えましょう。当時の日光の強さはどうだったかはよく分かりませんが、おおよその見当をつけるために、現在の赤道直下の日光の強さと同じだと仮定します。

そこで、太陽エネルギーの大きさを見積もっておきましょう。

太陽光線に直面した 1cm^2 あたり、1分間に約 2cal という太陽定数に恐竜が受ける投影面積を掛ければ、求めることができます。以下でやってみましょう。

太陽定数は $2\text{cal}/\text{cm}^2/\text{分}$ ですから、これを kcal 、 m^2 、秒に直せば $0.33\text{Kcal}/\text{m}^2/\text{秒}$ となります。

恐竜が太陽エネルギーを受ける投影面積はどのくらいなのでしょう。これを推定してみましょう。

(1)インターネットにある種々の図鑑から推定。

インターネットにある種々の図鑑から計算してみると、平均して 25m^2 前後の値が出てきます。ただし、首の部分と尻尾の部分は省略しました。

(2)身長 170cm、体重 60kg の人間から推定。

人間を円筒形として外挿して見ましょう。質量密度を ρ 、円筒の半径を R 、身長を h とすれば、

$$\rho \pi R^2 h = 60 \quad \text{より、} \quad \rho = 1\text{g}/\text{cm}^3 \text{ とすれば、}$$

$$R^2 = 60 / (10^{-3} \times 3.14 \times 170)$$

したがって $R=10.6\text{cm}$ が得られます。人間の皮膚の表面積は 1.5m^2 といわれていますから、円筒の表面積 $=2\pi R(R+h)=1.2\text{m}^2$ となり、ほぼ近い値が得られます。

これより、円筒形の人間が太陽エネルギーを受ける投影面積は

$$\begin{aligned}\text{投影面積} &= 2Rh \\ &= 2 \times 10.6\text{cm} \times 170\text{cm} \\ &= 3600\text{cm}^2 \\ &= 0.36\text{m}^2\end{aligned}$$

恐竜と人間の体重の比は $30\text{t}/60\text{kg}=500$ 倍ですから、これより恐竜の投影面積を求めると

$$\begin{aligned}\text{恐竜の投影面積} &= 0.36\text{m}^2 \times (500)^{2/3} \\ &\doteq 23\text{m}^2\end{aligned}$$

となり、図鑑で求めた面積とオーダー的には大体一致しています。そこで以下では、恐竜の投影面積を少し大きめの 30m^2 として計算を進めましょう。

熱量は、以下の式を用いることにします。すなわち、

$$Q = mct$$

この式は、比熱 $c(\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 、質量 $m(\text{g})$ の物体の温度を $t(^\circ\text{C})$ 上昇させるのに必要な熱量は $Q(\text{cal})$ であることを意味しています。

さて、全身を照らす日光の熱を 100% 吸収できたと仮定すれば、1 時間に受け取る熱量は

$$\begin{aligned}Q &= 0.33 \times 10^3 \text{cal}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \times 30\text{m}^2 \times 1\text{h} \times 60\text{m}/\text{h} \times 60\text{s}/\text{m} \\ &= 3.6 \times 10^7 \text{cal}/\text{h}\end{aligned}$$

となります。恐竜も人間と同じに体組織の大部分が水だと仮定しましょう。そうすると、アパトサウルスの比熱は水とほぼ同じ $1\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$ とみなせますから、全身の熱容量は

$$\begin{aligned}c &= 1\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C} \times 30\text{t} \times 1000\text{kg}/\text{t} \times 1000\text{g}/\text{kg} \\ &= 3.0 \times 10^7 \text{cal}/^\circ\text{C}\end{aligned}$$

となります。したがって、1 時間かけて上昇する体温は

$$\begin{aligned}t &= Q/c \\ &= 3.6 \times 10^7 / 3.0 \times 10^7 \\ &= 1.2^\circ\text{C}/\text{h}\end{aligned}$$

となります。

ただし、上の計算では、

1. 日光の熱吸収率を 100%とし、太陽は1日中真上から全身を照らしているとします。
 2. アパトサウルスの体表面から逃げる熱をないものとして無視します。
- などと仮定します。

結果が示すように、実際には1時間日光浴をしても、体温の上昇は 1°C 前後になります。これでは、体温を 10°C 上げようとしても、暖まりきれない内に1日は終わってしまいます。

この計算の妥当性を見るために、現在の普通の爬虫類に適用してみましょう。

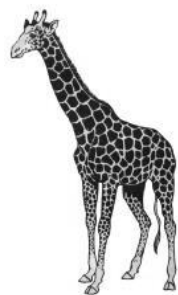
アパトサウルスの $1/10$ の爬虫類を考えて見ましょう。 $1/10$ だと、全長が $25\text{m}/10=2.5\text{m}$ 、体重は $30\text{t}/1000=30\text{kg}$ になります。この場合、日光の当たる体表面積は $1/100$ に減りますが、全身の熱容量は、体積に比例しますから $1/1000$ に減ります。 Q が $1/100$ 、 C が $1/1000$ になるわけですから、 T は10倍になります。

結局、1時間あたりの体温上昇は、アパトサウルスの10倍の 12°C になります。したがって、ワニなどが朝から川岸で甲羅干しをしていれば、1~2時間で活動が始められるというわけです。

以上より、アパトサウルスが冷血動物だとすれば、太陽熱で体を温め、温まったところで活動を開始するという事は不可能であったと考えられます。

3. 17~18mにもなる体高で、頭まで血液を送ることができたでしょうか？

では、(その2)はどうでしょうか。



皆さん、キリンが高血圧なのをご存じですか。キリンの血圧を測った人によると、最高血圧は 300mmHg にも達し平均血圧も $260/160\text{mmHg}$ と、人間の平均 $120/80\text{mmHg}$ より遙かに高い事が知られています。他の動物でこれだけ高くなると、血管系やリンパ系が破裂してしまいそうですが、キリンの場合はこんなに高い血圧のまま脳に血が行くわけではなく、頭に近づくにつれて、血圧がどんどん下がり、脳に入るときは人間や他の動物とほぼ同じくらいになっています。頭部の高さが 5m 近くありますから、厚い動脈壁と血液を頭部にまで圧送する強靱な心臓があるからこそ生きていけるわけです。

ここでちょっと問題なのは、キリンが水を飲むために頭を下げるときに、急速に血液が脳内に入らないだろうかという心配と今度が水を飲み終わって頭を急に上げるとき

は逆に血液がぐんと下がってしまわないだろうかということです。

現実には、キリンは何事もなかったようにケロッとしていますから、脳内の血圧をたくみに調節しているのでしょう。実際、脳の下には血液のネットがあるそうで、そのネットの中で血液がプールされ、急速に脳内に入出入りするののないような仕組みになっています(もう少し詳しく知りたい方は[こちらへ](#))。

さて、アパトサウルスの体高は 17~18m ありますから、長身のキリンの約3倍です。したがって、心臓は少なくともキリンの3~4倍の血圧を生み出さなければなりません。人間の場合の6倍くらいになります。

貧弱な冷血動物の心臓ではこんなことは不可能です。これからも、恐竜温血動物説は有力ですね。



人間の死亡原因のトップはガンですが、次に多いのが高血圧です。この高血圧は動物には見られない、人間だけの病気だといわれています。

というのも、四肢動物はいくら体が大きくても、キリンなどを除けば体が横長なので血圧は低くて済むわけです。人間は、四つ足から二本足へと進化したときから、血液を心臓から頭へと押し上げる必要が出て来たため、次第に体が改造され、血圧が高くなってきましたが、まだ、高血圧動物として肉体の構造が完璧に出来上がっているわけではないので、様々な病気が現れるというわけです。いわば、高血圧は、人間が人間として生きようとする過程で起こる病いなのです。

4. 重すぎる体重の為に水中で生活したとありますが、水圧で呼吸ができたのでしょうか？

では、(その3)はどうでしょうか。

ここではアパトサウルスから少し離れて、ジュラシックパークに出てきたブラキオサウルスについて考えて見ましょう。ブラキオサウルスは体重が 80 トンもあり、体重があまりに大きいため、4本足では不十分で、池や沼の中に棲んで、首だけを水面から突き出している想像図をよく見かけます。私の少年時代に読んだ山川惣治作・画の「少年王者」の中でも、プロントサウルスが湖中にひそむモンスターとして描かれていて、「わくわく」して読んだものです。

竜脚類が水中生活をしていたという考えは、1970 年代初めの、H. D. カールケや W. E. スウィントンの著書でも変わっていませんでした。

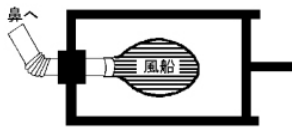
昆虫は重力の問題で大型化が不可能でしたが、恐竜も極端に大きくなると、重力の影響をもろに受けるわけですが、水の中に棲んでいて、本当に呼吸が出来たのでしょうか。つまり、水圧によって肺がすぼまって、息が自然に吐き出されてしまわないだろ

うかという疑問です。

いま、肺のある場所の平均の水深を h とし、水の密度を ρ とすれば、肺の位置での水圧は

$$p = \rho gh$$

で表すことができます。



恐竜の肺のモデル

恐竜の体の軟組織は、保存されていないので推測の域を出ませんが、肺は左図のように、風船とし円筒のピストンで呼吸すると仮定しましょう。肺の断面積(円筒の断面積)を S とすれば、肺に掛かる全圧力は

$$P = pS$$

$$= \rho ghS$$

となります。そこで具体的に数値を当てはめて見ましょう。

$\rho = 1\text{g/cm}^3$ 、またブラキオザウルスの体高から、 $h = 5\text{m}$ とします。つまり、5mの深さの水に潜ったことによる圧力の増加分は、

$$p = \rho gh$$

$$= 1\text{g/cm}^3 \times 9.8\text{m/s}^2 \times 5\text{m}$$

$$= 5\text{トン重/m}^2$$

となります。つまり 1m^2 あたり5トンの力がかかる訳です。

これだけの圧力が恐竜にとってどの程度のものかを知るためには、恐竜の肺の大きさを知る必要があります。ここでも、内臓の化石はないので、人間の呼吸から恐竜の肺の大きさを外挿して求めましょう。

人間は1回の呼吸で肺の空気の15%程度しか入れ替えません。ところが、大型の動物でもクジラなどは90%もの空気を入れ替えるといわれています。そこで、人間とクジラから恐竜の肺の大きさを推定してみましょう。

(1) 人間の肺活量から恐竜の肺の大きさを推定

人間の肺活量は3400~4000ml(3.4~4.0L)といわれています。そこで、人間の肺の大きさを4.0Lと仮定します。前記したように、恐竜の体積は人間の500倍ですから、

$$\begin{aligned}\text{恐竜の肺の体積} &= 500 \text{ 倍} \times 4L \\ &= 500 \times 4.0 \times 10^{-3} \text{m}^3 \\ &= 2.0 \text{m}^3\end{aligned}$$

となります。

(2)クジラの肺から恐竜の肺の大きさを推定

哺乳動物の場合、身体に占める肺の割合はどの種でも約 1.1% と一定であることから、体長 30m、体重 150tのシロナガスクジラから推定してみましょう。

シロナガスクジラを半径 R(m)、長さ L(m)、質量密度 $\rho = 1.0 \text{g/cm}^3$ の円筒と考えます。

$$\rho \pi R^2 L = 150 \text{t}$$

$$\begin{aligned}R^2 &= 1.5 \times 10^5 / (1.0 \times 10^3 \times 3.14 \times 30) \\ &= 1.59 \text{m}\end{aligned}$$

したがって

$$R = 1.26 \text{m}$$

が得られます。シロナガスクジラの体積は

$$V = \pi R^2 L$$

$$= 3.14 \times 1.26^2 \times 30 \text{m}^3$$

$$= 150 \text{m}^3$$

したがって、シロナガスクジラの肺の大きさは

$$V = 150 \times 0.011 (1.1\%)$$

$$= 1.65 \text{m}^3$$

となり、人間の肺から類推した値に近い値が出てきます。

そこで、以下では恐竜の肺の大きさを 2m^3 として計算を進めることにします。

円筒の断面積をS、長さをLとします。

例えば、断面積を $S=1\text{m}^2$ (半径 56cm の円) とすれば、 2m^3 の空気を吸い込む為には円断面を、 $SL=2\text{m}^3$ すなわち、 $L=2\text{m}^3/1\text{m}^2=2\text{m}$ だけ引かなければならないというわけです。

このために必要な仕事Wは

$$\begin{aligned} W &= \text{力} \times \text{動いた距離} \\ &= F \times L \\ &= \rho ghS \times L \\ &= 5\text{t}/\text{m}^2 \times 1\text{m}^2 \times 2\text{m} \\ &= 10\text{t}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

となります。これは 10tの重さの物体を1m 持ち上げるのと同じ仕事量です。いくら恐竜が大きいといっても、呼吸のたびにこれだけの仕事をしなければならないとなると大変です。

このように、大きな水圧にうち勝って呼吸するためには屈強な筋肉(図ではピストン)でなくてはなりません。こんな呼吸筋を備える位なら、むしろ陸上で足の筋肉を強くした方が合理的のようにも思えますね。

クジラやイルカの場合は息を吸い込む間は水面下せいぜい 1m くらいの深さでしかありません。したがって、水圧も小さく、肺は容易に拡がります。また、深海に潜水するクジラのような特殊な動物の場合、酸素の 90%を筋肉の中に貯蔵できるという特殊な機能を持っていますが、そういう機能がないと思われるブラキオサウルスが水中で生きていくためには大変な努力が必要だったのではないのでしょうか。本当に水の中で生活していたのでしょうか。

上記に関して、1971 年、コロラド大学博物館のロバート・バッカーが、次のような新説を発表しています。

「カバのような水中で生活する動物は足が短く、胸郭が薄く扁平である。ブラキオサウルスや象は足が長く、胸が厚い。……。ブラキオサウルスは象と同じような柱のような太い足を持っており、これは陸上を歩くのに使われたものに違いない。……。また、ブラキオサウルスの足は、泥の上に立つのに適していない。カバの足は柔らかい地面でも体重を支えられるように、指が広がっている。ブラキオサウルスや象の指は太く短く、肉厚の足の裏の中に入ってしまった」とあります(A・J・デズモンド「大恐竜時代」)。

したがって、今日ではこれが定説になっているようです。また、陸上で足跡も見つかっていますから、池や沼に棲んでいたという説は疑問ですね！

5. 総合的に、エネルギー代謝率からみてみるとどう考えたらよいのでしょうか？

さて、最後の(その4)はどうでしょうか。

以上の3つから、アパトサウルスに矛盾のないイメージを描くために、これらが温血だったとして話を進めてみることにしましょう。

まず、アパトサウルスの食物必要量を求めて見ましょう。体重 30トンのこの恐竜は、象に比べて体重は 5 倍(30t/6t)です。したがって、体表面積は $5^{2/3}=2.92$ 倍(5 の三乗根が長さで、その二乗が面積です)ということになります。

象の場合、「温血動物は昆虫のように小さくなれるか」で述べたように、

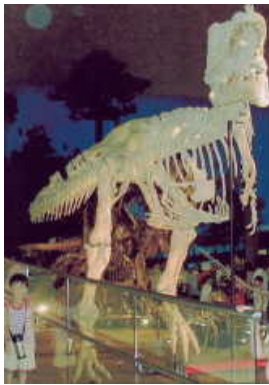
(1)活動のためには食べる量は、 $100 \times 2.92 \times 1/8.94=444\text{kg}$ 。

(2)体温維持のために食べる量は、 $100 \times 5 \times 7.94/8.94=32.8\text{kg}$ 。

となります。すなわち、毎日 460kg(=410+53)の食物を食べることになります。ここでは、アパトサウルスと象は

- ・同じ体温である。
- ・同じように活動している。
- ・ジュラ紀の植物は現在のものと同程度の栄養価がある。

と仮定しています。1日に 477kg 近くのを食べるという大変な量のように思われますが、体重の 1/63 程度でそれほど多くはありません。



孫と恐竜 福井の恐竜博にて

一般に、人間と同じ程度の大きさの動物の場合、「冷血動物」は「温血動物」の約 1/10 のエネルギーしか消費しないことが知られています。というのは、

- (1)体温維持のためにエネルギーを費やす必要がない、
- (2)動きが非常に鈍く、活動時間の大部分は腹を地面につけて休んでいる、

からです。

恐竜が「冷血動物」だとすれば、アパトサウルスの1日の食物量は約 53kg でよいことになります。温血のアパトサウルスでも必要エネルギーの 90%は活動のために消費されているのですから、冷血であれ、温血であれ、食物量はそのまま活動力に比例すると考えてもよいでしょう。すると、冷血のアパトサウルスは、体つきは象に似ているにもかかわらず、象の 1/10 くらいしか動かず、しかも、食べる量も象以下であるということになります。これはどう考えても疑問ですね。

以上より、恐竜のエネルギー代謝率が現在の冷血爬虫類に比べて、はるかに大きかったという意味で、恐竜温血動物説のほうが有利ではないでしょうか。

アパトザウルスやブラキオサウルスなどの大型の恐竜を見ていると、大型の建築構造物を思い出し、「強度的によく持っているな」と感心します。とくに、あの長い首や尻尾がポキンと折れもせずに、強度的に問題なく、よく動くものだと感心します。このことについては、また項を改めて述べてみようと思っています。



今日、プロントザウルスはアパトサウルスの体に、誤ってカマラサウルスの頭を取り付けてしまったもので、1979年にアパトサウルスの粗雑な復元形であったことが判り、名前も、「人を惑わすトカゲ」(アパトサウルス)という名前でも、衰れにも、どこかの会社のように、吸収合併されてしまいました。

恐竜が出てきたついでに、恐竜の名前を理解するのに便利な言葉(恐竜名の語源)を挙げておきましょう。

名前	語源	意味	名前	語源	意味
アナト	anato	カモ	アヴィス	avi, avis	鳥
アンキロ	ankylo	曲がった	アニューロ	anuro	尻尾がない
バリ	bary	重い	ブラキオ	brachio	腕
カウディア	caudia	尻尾	セントロ	centro	中央の
ケファロ	cephalo	頭	ケラト、ケロス	cerat, ceros	角の
カスモ	chasmo	穴	コエリ	coeli	中空の
コンプソ	compsa	かわいい	ディ、ディプロ	di, diplo	二つの
ディノ、ダイノ	dino	恐ろしい	ドクス	docus	幹
ドン、ドント	don, dont	歯	ドリオ	dryo	ブナなどの木の
グナーツス	gnathus	顎	ハドロ	hadro	大きな
ヒパクロ	hypacro	てっぺんの下	ヒプシ、ヒプシロ	hypsi, hypselo	高い
イクチオ	ichthyo	魚の	イグアノ	iguano	イグアナ
クリト	krito	選ばれた	ロフォ	lopho	うね、冠
リストロ	lystro	シャベル	マイア	maia	良い母

マツソ	masso	かさの大きな	メガ	maga	大きな
メトロ	metro	測定、ものさし	マイクロ	micro	小さな
ミンミ	minmi	ミンミ(地名)	ニコ	nycho	爪
オピスソ	opistho	後ろの	オプス	ops	顔
パキ	pachy	厚い	パクロ	pacro	うねのある
パラ	para	～の仲間	フィシス	physis	形
プラテオ	plateo	平らな	プレシオ	plesio	リボン
ポッド、ペッド	pod,ped	脚	プロト	proto	最初の
レックス	rex	王様	サウルス	saurus,sauro	トカゲ
セグノ	segno	ゆっくりとした	スピノ	spino	とげ
ステゴ	stego	屋根	ステノ	steno	細身の
スーパー	super	優れた	テロ	thero	夏
トリ	tri	三つの	トロオ	troo	傷つける
ティラノ	tyranno	暴君	ウルトラ	ultra	最大の
ウルス	urus	尻尾	ベロシ	veloci	速い
ブルカノ	vulcano	火山	-	-	-

いくつか例を挙げておきましょう。

名 前	英 語	読み方	名前の意味	備 考
ティラノサウルス・レックス	Tyrannosaurusrex	ティランノソーラス・レックス	乱暴なトカゲの王	体長 15m、背の高さ 6m、体重 6t
イグアノドン	Iguanodon	イグアーナドン	イグアナの歯	二脚歩行。世界中いたるところ。
ウルトラサウルス	Ultrasaurus	アルトラソーラス	最大のトカゲ	最も大きい恐竜。コロラドで発見。
ステゴサウルス	Stegosaurus	ステゴソーラス	屋根トカゲ	背中に2列の骨板。

などです。
