

# 生物のかたち

## ゾウの時間ネズミの時間は正しいか？

2、3年前に、インターネットで見つけたダーシー・トムソンの「生物のかたち」(東京大学出版)は思考が一貫しており、なんともいえない面白さに惹かれ一気に読んでしまいました。トムソンは「相似原理こそニュートン哲学の真髄である」として、生物学において、いかに相似則が普遍的であるかを述べています。

生物学もサイエンスですから、数学的な思考はつきものですね。勿論、生物の法則は物理学の法則のよう働くわけではありません。物理学のように因果関係がはっきりしていないという点では生物学には物足りないものを感じます。

実は、この本を取り上げたのは以前に読んだ『ゾウの時間ネズミの時間』のことを思い出したからです。ここには以下のようなことが書かれています。ちょっと長くなりますが一部を引用してみます。

「…重い方はゾウから、軽い方ではネズミまで、いろいろなサイズの恒温動物の標準代謝量を調べ、横軸に体重、縦軸に標準代謝量をとって、グラフに書き表してみよう。……。対数グラフ用紙を用いて「ネズミ-ゾウ曲線」を書いたのが図3-1である。……。

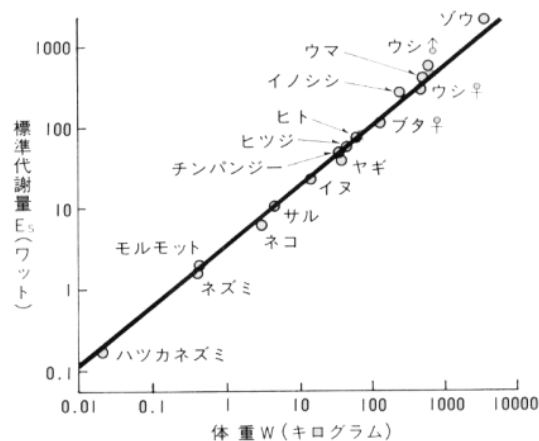


図3-1 代謝量と体重の関係(哺乳類)。標準代謝量の単位はワット。1ワットとは1秒間に1ジュールのエネルギーを使うことに相当する。(Schmidt-Nielsen,1984をもとに描く)

ゾウの時間ネズミの時間から引用

さて、この「ネズミーゾウ曲線」を式で書いてみる。 $W$  を体重(単位kg)、 $E_s$  を標準代謝量とする。

$$E_s = 4.1W^{0.751}$$

つまり標準代謝量は体重の 0.751 乗に比例する。0.751 は 0.75、すなわち 3/4 と統計的に差はないので、「標準代謝量は体重の 3/4 に比例する」と簡潔に言い表している。……。代謝が表面積に比例するのなら 2/3 の傾きになるはずだが、そうはならない。0.75(3/4)とは、あまり差がないように見えるけれど、統計的には有意な差があり、違うということは厳然たる事実である。体表面積の法則は成り立たないという結論になった。……。

いままでの話は安静にした状態でのエネルギー消費だった。活動している場合はどうなるのだろうか。ふつうにめしを食い、うろついて寝た場合のエネルギー消費量を一日を通して測り、単位時間あたりの平均値に換算してみる。そうすると、動物により、また測定者により違いはあるが、標準代謝量の 1.3~3.0 倍になる。平均的には、標準代謝の 2 倍の量のエネルギーを使う。ふつうに活動した場合のエネルギー消費量が標準代謝量に比例しているということは、これもやはり体重の 3/4 に比例していることを意味する。……。

この章では、エネルギー消費が体重の 3/4 乗に比例することを見てきたが、こんなに広く、どんな動物にも当てはまる経験則は、生物学を見わたしても、めったにお目にかかれるものではない。その割には、あまり教科書に出てこないのは、なぜ 3/4 乗なのかの、よい説明がないからだろう。説明できなければ学問ではない、という考えは、ごもつともだと思うけれど、理屈をこねない学問も、もう少し幅をきかせてもいいのではないかと、私は感じている。……」。

さて、先ほどのトムソンの話に戻しましょう。トムソンは「熱の損失量は体表面積に比例する」といっており、図では示していませんが、表 1 のような「種々の動物の大きさと代謝活性」を示しています。

表 1 種々の動物の大きさと代謝活性.

動物	体重 (kg)	カロリー/kg 体重
モルモット	0.7	223
ウサギ	2	58
ヒト	70	33
ウマ	600	22
ゾウ	4,000	13
クジラ	150,000	約 1.7

D. トムソンの「生物のかたち」より

この表だけではよく判りませんので、両対数グラフで表わしてみましょう。

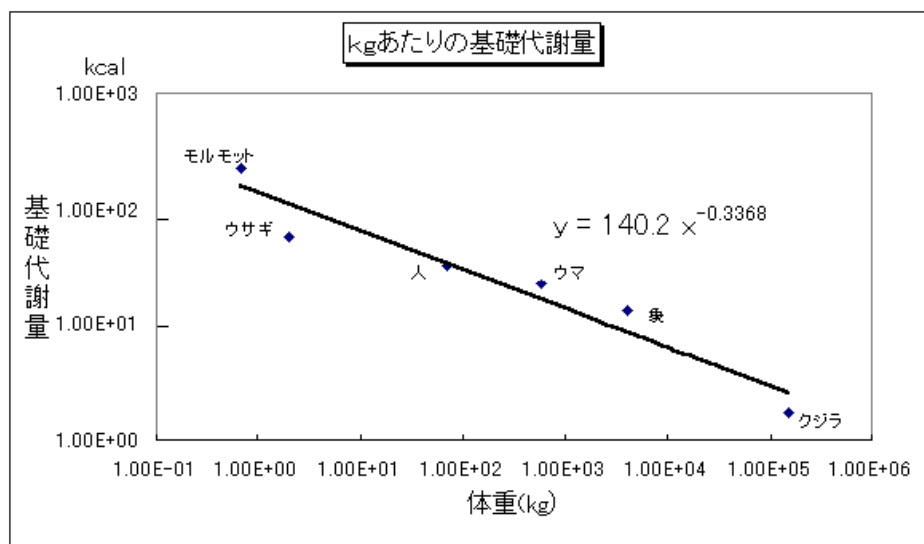


表1を両対数方眼紙で示す。

図は Excel で描いたもので、最小二乗法を用いた近似曲線を利用すると、数式は  $y = 140.2x^{-0.3368}$  となります。 $x$  の累乗の  $-0.3368$  は  $-0.3333$  ( $-1/3$ ) の 3%程度の誤差ですから、 $-1/3$  と考えても良いでしょう。

体重を  $x$  とすれば、グラフから

$$\frac{\text{基礎代謝量}}{x} = 140.2 x^{-\frac{1}{3}} \dots (1)$$

が得られます。

この式を変形すると、

$$\text{基礎代謝量} = 140.2 x^{-\frac{1}{3}} \cdot x = 140.2 x^{\frac{2}{3}} \quad \dots \quad (2)$$

つまり、体重あたりの基礎代謝量が体重の 1/3 に反比例する(式(1))ということは、基礎代謝量が体重の 2/3 に比例する(式(2))ことを意味します。すなわち、 $x$  は体重ですから、 $x^{1/3}$  は長さになり、その 2 乗である  $(x^{1/3})^2 = x^{2/3}$  は面積ですから、基礎代謝量は表面積に比例するという結果になります。

生物学の本を開くと、いたるところに「体熱は体の表面から逃げるので、体温維持のためのカロリーは体の表面積に比例し、活動のためのエネルギーは組織の量に比例すると考えれば、体重に比例する」と書かれています。

ところが、「ゾウの時間ネズミの時間」では色々な動物で標準代謝を測ってみたら直線の傾きが 3/4 になったから、体表面積の法則は成り立たないことになったと結論付けています。一方、トムソンの例では直線の傾きは 2/3 になっています。どう考えればよいのでしょうか。

両者は両対数目盛を用いていますが、これは実験による散らばりを上手くまとめる(ごまかす)ためによく用いられる手法です。これらの図の特徴は、両者ともデータ量が少ないこと。哺乳動物 4500 種のうち前者が 16 種類、後者が 6 種類と少ないのは気になるところです。もっとも、記入されていないものの方が多いということも考えられます。また、前者が両対数目盛にも拘らずデータの散らばりが殆どなく計測結果らしくないのに対して、後者は計測結果らしい散らばりを見せているところなどです。いずれにせよ、前者は文献の引用で、参考文献もないので調べようがありません。生のデータが欲しいところです。

「体温維持は表面積、活動は体重に比例する」という考えは、例外もあり成り立たないと門前払いを食っていますが、この考えをとことん突き詰めて行ったらどんな結果が得られるのでしょうか。面白いのでちょっとやってみましょう。

表 1. は「[温血動物は昆虫のように小さくなれるか](#)」のところで計算した大きさの異なる動物達のカロリー計算の結果です。表中 1.6cm の小動物とあるのは居そうにない超小型の動物を想定したものです。

まず、図 1. は基礎代謝量と体重を両対数グラフで表わしています。基礎代謝量は体表面積に比例すると仮定していますから、傾きは当然 2/3 になっています。

表1. 体温維持は表面積、活動は体重に比例するとした場合のエネルギー

動物	体重(kg)	基礎代謝(kcal) 体温維持	活動(kcal)	全体(kcal) 基礎代謝+活動
小動物	0.00006	0.12	0.0012	0.121
チビトガリネズミ	0.00153	1.03	0.0305	1.06
シマリス	0.06	12	1.2	13.2
人間	60	1200	1,200	2,400
象	6,000	25,800	120,000	145,800

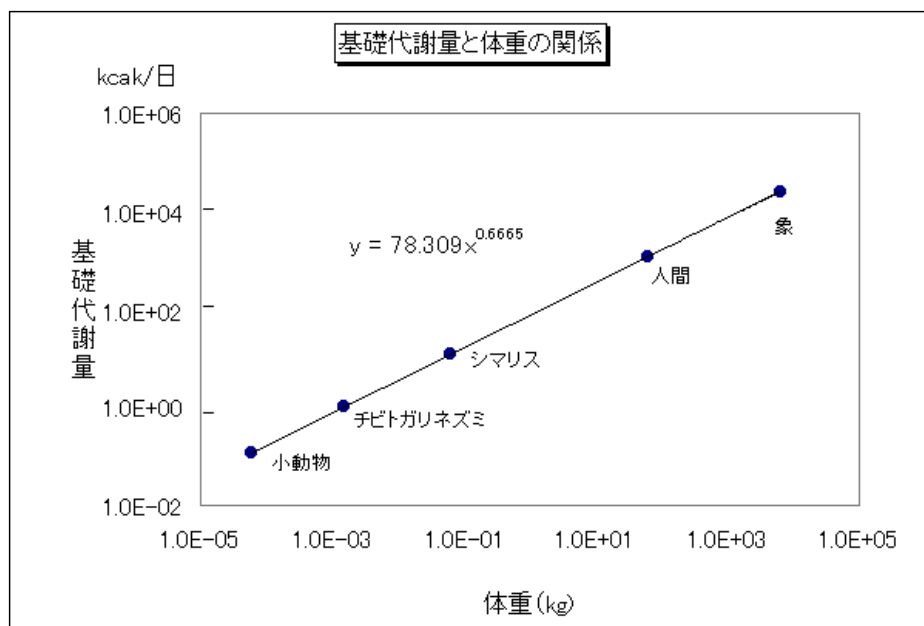


図1. 基礎代謝量(kcal)と体重の関係

(表面積に比例するとしていますから当然勾配は0.6666(2/3)になります。)

図2. は活動に必要なカロリーと体重の関係を両対数グラフで示したものです。これも活動のエネルギーは体重に比例すると仮定していますので、勾配は1になっています。

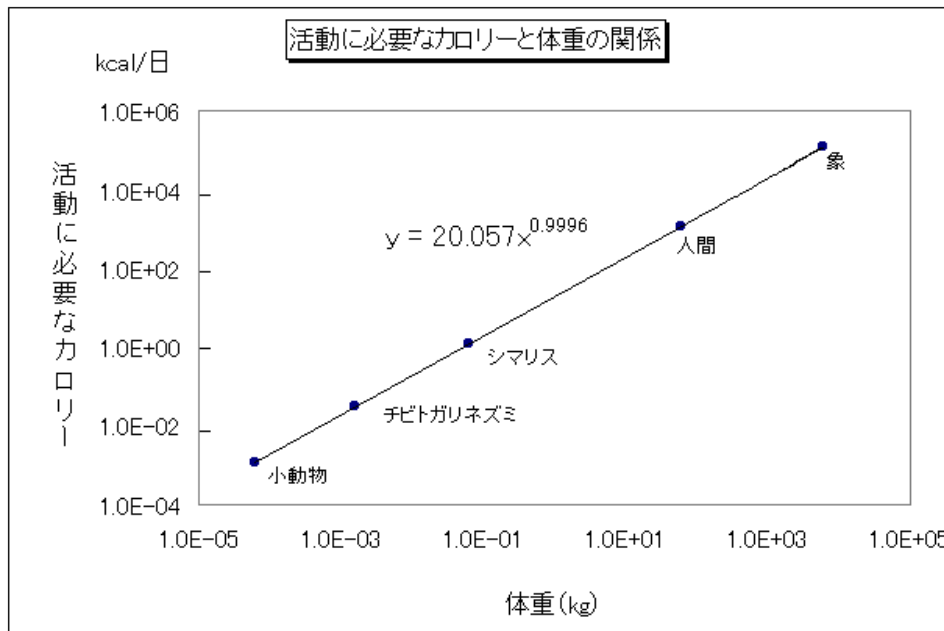


図2. 活動に必要なカロリーと体重の関係  
 (ここでも体重に比例するとしていますから勾配は1になります。)

さて、これらの動物達が生活で必要とされる総カロリーは基礎代謝量と活動に必要なカロリーの和です。これを図3. に示しました。

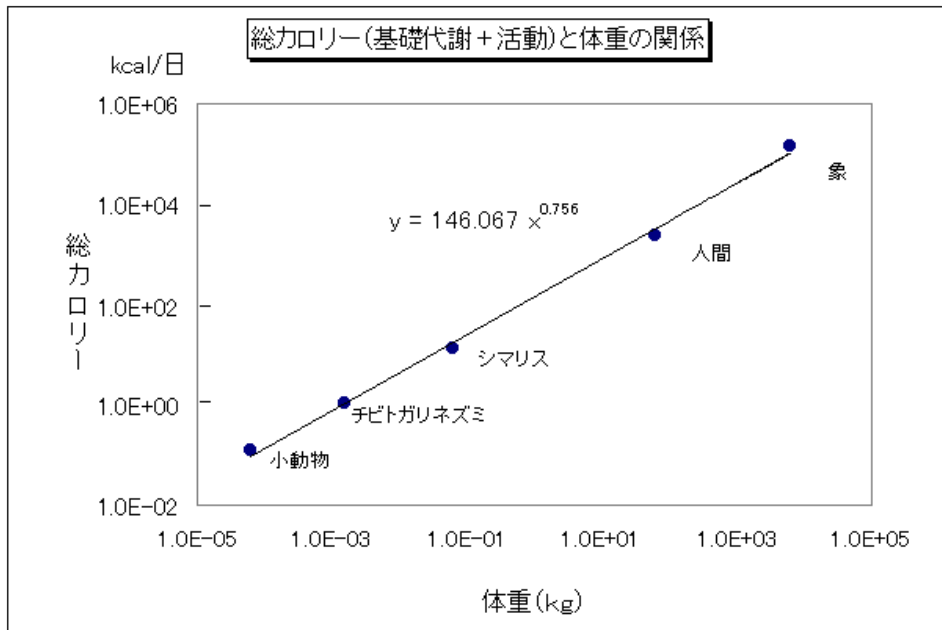


図3. 総カロリー(基礎代謝量+活動によるエネルギー)

この結果、総カロリーの勾配は 0.756 となり、 $0.75(3/4)$  に対して 1% 程度の誤差なので、総カロリーは体重の  $3/4$  に比例すると考えても良いでしょう。このように、「体温維持は表面積に、活動は体重に比例する」という考えをとことん議論を進めていくと、総カロリーは「ゾウの時間ネズミの時間」と同じ、体重の  $3/4$  に比例するという結果が得られました。

さて、「基礎代謝量が面積に比例する」というトムソンの考えを受け入れ、「ゾウの時間ネズミの時間」が結論付けたように「総エネルギーは体重の  $3/4$  に比例する」とすれば、「活動のエネルギーは体重に比例しなければならない」という結果になりました。

すなわち、「ゾウの時間ネズミの時間」とは異なる結果になってしまいました。この問題はどうか考えたら良いのでしょうか。

2004.11.6

---