

# 温血動物は昆虫のように小さくなれるか

昔、生物の時間に「温血動物(恒温動物)」「冷血動物(変温動物)」という区分を習いました。

○「魚類、両生類、爬虫類」が「冷血動物」

○「鳥類、ほ乳類」が「温血動物」

と習ったのを覚えています。

この名称、どうも人間中心的でしっくりしません。私たちには体の中を血液が流れていますから、爬虫類や昆虫などをさわると、ひやりとするため、「冷血」と言われるようですが、これは体温が一定か、そうでないかの違いです。

哺乳類や鳥類では、間脳に体温を調節するところがあり、ここが体温を調節し一定に保つ仕組みが出来ています。昆虫類にはこのシステムがありません。したがって、あなた任せの体温になるというわけです。周りの温度が上下すれば、体温も上下します。厳密には、体内の器官の運動がありますから、体温＝周りの温度というわけではありませんが、ほぼそう考えても良いようです。

さて、昆虫は犬や猫ぐらいの大きさにはなれないということを書いてるうちに「じゃあ温血動物はどれくらい小さくなれるのだろうか」という疑問がわいてきました。確かに、昆虫の世界を眺めていると、昆虫大の温血動物がいないことに気づきます。

なぜでしょう。これらに関して、私が知っていることと言えば、

(1)動物は、小さくなるにしたがって体重に比べ、表面積が大きくなる。(このことについて、もう少し知りたい方は[こちらへ](#))。

(2)体重 60kgの人間がかなりの肉体労働をする場合、1日に 2400kcal のカロリーが必要である。1日中寝て暮らすのであれば、1200kcal、つまり基礎代謝量は半分ですむ。

(3)象は1日に 100kgほどの木の葉や植物を食べる。

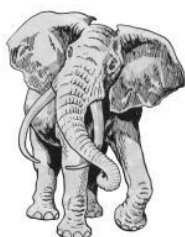
ということぐらいでしょうか。これだけの知識を使って、高等学校の生物や物理のレベルで、話をすすめてみることにします。

科学の法則には二つのタイプがあり、一つは沢山の事実関係から作った経験則です。もう一つは理論から導かれた理論法則で、ニュートンの万有引力の法則などがそれにあたります。経験的な法則は大抵の場合当てはまる範囲が狭いという欠点があります。

生き物によく用いられるものに、次のような経験則があります。「熱を作り出す能力は組織の量に比例するので、それは体積に比例する。一方、逃げていく熱量は表面

積に比例する」というものです。後者は、ベルクマンの規則として有名ですが、例外も多いとして議論がそこで止まってしまう、読者は消化不良を起こしてしまいます。

例外はあるにしても、この考えをどんどん進めて行けばどんな結果にたどり着くかについては述べられていません。中学や高校で習う生物のように科学的事実の羅列はつまらなくても、一貫性のあるストーリーになると人は無性に興味をそそられるものではないでしょうか。間違いを恐れていては少しも先には進みませんので、強引にそれをやってみたのが以下の議論です。



1. まず象を人間と比較することから始めましょう。

象の体重を6トンとしましょう。すると、人間の体重は60kgですから、 $6\text{トン}/60\text{kg}=6000\text{kg}/60\text{kg}=100$ 、つまり象の体重は人間の体重の100倍です。

体重は質量密度×体積ですから、質量密度が人も象も同じと仮定すれば、 $100^{1/3}$ は長さになります。その2乗は面積ですから、象の体の表面積は人間と比較すると $100^{2/3}=21.5$ 倍になります。

すなわち、象は体の表面積は人間の21.5倍、体重は100倍というわけです。

(1) 体熱は単純に体の表面から逃げると仮定すると、体温維持のためのカロリーは人間の21.5倍必要になります。

(2) さらに、象の歩く速さや行動の時間帯が人間と同じである仮定すると、活動のためのカロリーは、単純に体重に比例すると考えれば、象は人間の100倍の活動エネルギーを要することになります。

したがって、象の体温維持と活動のためのエネルギーの比率は人間の21.5倍と100倍、すなわち1対4.65になります。毎日食べる100kgの植物のうち、 $100 \times 1/5.65 \doteq 18\text{kg}$ は体温維持に、 $100 \times 4.65/5.65 = 82\text{kg}$ は活動用に割り当てられるわけです。ここでも、象と人間は同じ体温であると仮定しています。

したがってカロリーの面では、

○体温維持に必要なカロリーは人間の21.5倍、すなわち、 $1,200 \times 21.5 = 25,800\text{kcal}$ 。

○活動に必要なカロリーは人間の100倍、すなわち、 $1,200 \times 100 = 120,000\text{kcal}$ 。

これより、

$$\begin{aligned}\text{○体重 } 1\text{kg あたりの必要カロリー} &= (25,800 + 120,000) / 6,000 \\ &= 145,800 / 6,000 \\ &= 24.3\text{kcal/kg}\end{aligned}$$

となります。

2. 一応、人間についても、まとめておきましょう。

○体重 1kg あたりの必要なカロリー＝2,400/60  
＝40kcal/kg

3. 次に、人間に比べて 1/10 程度の動物を考えてみましょう。170cm/10＝17cm、つまり、シマリス(体長 12～17cm、体重 60～120g)程度の動物を想定してみましょう。

象の場合と同じように、体表面積は $(1/10)^2=1/100$  より  
○体温維持に必要なカロリー＝1,200/100＝12kcal  
体重は人間の $(1/10)^3=1/1,000$  ですから、60/1,000＝0.06kg となります。



○活動のために必要なカロリー＝1,200/1,000  
＝1.2kcal

これより

○体重 1kg あたりの必要カロリー＝(12+1.2)/0.06  
＝13.2/0.06  
＝220kcal/kg

となります。



4. 次に、哺乳動物では最も小さいといわれているチビトガリネズミ(体長 4.5～5cm、体重 2g 未満)について、調べてみましょう。

人間の身長を 170cm ですから、チビトガリネズミは人間の  
 $5/170=1/34$  となります。

したがって、体表面積は人間の $(1/34)^2=1/1,160$  となり  
○体温維持に必要なカロリー＝1,200/1,160  
＝1.03kcal

体重は人間の $(1/34)^3=1/39,300$  より、60/39,300＝0.00153kg(1.53g)となります。

○活動のために必要なカロリー＝1,200/39,300  
＝0.0305kcal

これより

○体重 1kg あたりの必要カロリー＝(1.03+0.0305)/0.00153  
＝1.06/0.00153  
＝693kcal/kg

5. 最後に、人間の 1/100 位の温血動物を想定してみましょう。体長が 1.7cm ほどの大きさです。

体表面積は人間の $(1/100)^2=1/10,000$

$$\begin{aligned} \text{○体温維持に必要なカロリー} &= 1,200/10,000 \\ &= 0.12\text{kcal} \end{aligned}$$

体重は人間の $(1/100)^3=1/1,000,000$ より、 $60/1,000,000=0.00006\text{kg}$ となります。

$$\begin{aligned} \text{○活動のために必要なカロリー} &= 1,200/1,000,000 \\ &= 0.0012\text{kcal} \end{aligned}$$

これより

$$\begin{aligned} \text{○体重 1kg あたりの必要カロリー} &= (0.12+0.0012)/0.00006 \\ &= 2,020\text{kcal/kg} \end{aligned}$$

後で説明するように、恐竜を温血動物として体温維持および活動に必要なカロリーおよび食べ物の量を計算しておきましょう。

恐竜は全長 25m、体重 30トンと標準的な大きさのアパトサウルスを想定しましょう。

恐竜の体重は  $30\text{t}/60\text{kg}=30,000/60=500$  より人間の 500 倍です。したがって、恐竜の表面積は人間の  $500^{2/3}=63$  倍 となります。

したがって、

$$\text{体温維持に必要なカロリーは } 1,200 \times 63 = 7.56 \times 10^4\text{kcal}$$

$$\text{活動に必要なカロリーは } 1,200 \times 500 = 6.0 \times 10^5\text{kcal}$$

したがって、

$$\begin{aligned} \text{体重 1kg あたりの必要カロリーは } & (7.56 \times 10^4 + 6.0 \times 10^5) / 3.0 \times 10^4 = \\ & 6.76 \times 10^5 / 3.0 \times 10^4 = 22.5\text{kcal/kg} \end{aligned}$$

食べ物の量では象が 100kg を食べるころから類推します。

体重は象の  $30,000/6,000=5$  倍ですから、表面積は  $5^{2/3}=2.92$  倍になります。

一方、恐竜の体温維持のためのエネルギーと活動のためのエネルギーの比率は人間の 63 倍と 500 倍ですから

$$63:500=1:7.94$$

$$\text{したがって、体温維持に } 100\text{kg} \times 2.92 \times 1/7.94 = 32.8\text{kg}$$

$$\text{活動に } 100\text{kg} \times 5 \times 7.94/8.94 = 444\text{kg}$$

となり、必要とされる食べ物の量は  $32.8+444=477\text{kg}$  となります。

これらを表にまとめておきましょう。

動物	体重 kg	体温維持 kcal	活動 kcal	全体 kcal	必要カロリー kcal/kg	活動/全体	体温/全体
恐竜	30,000	75,600	600,000	675,600	22.5	0.888	0.111
象	6,000	25,800	120,000	145,800	24.3	0.823	0.177
人間	60	1,200	1,200	2,400	40.0	0.500	0.500
シマリス	0.06	12	1.2	13.2	220	0.091	0.909
チビトガリネズミ	0.00153	1.03	0.0305	1.06	693	0.029	0.972
小動物	0.00006	0.12	0.0012	0.121	2020	0.010	0.992

なお表中、体温/全体とあるのは、(体温維持のために必要なカロリー)/(体温維持に必要なカロリー+活動に必要なカロリー)などを表します。

まず、上の表だけでは恐竜を除く5種類の動物達の特徴はよく判りません。そこで、これらを図で表しておきましょう。

図1. は基礎代謝と活動エネルギー比率と体重の関係を示します。X軸の左が小動物、右へ行くほど大型になります。小型の動物の場合はエネルギーの大部分は体温維持のために、また大型の動物の場合はエネルギーの大部分は活動のために使われることが判ります。つまり、「動物は小さくなればなるほど、朝から晩まで食べ続けていても、体温を維持することさえ出来ない危険性がある」ということを示しています。

表よりシマリスは、体重 1kg あたり人間の  $220/40=5.5$  倍も食べる勘定になります。トガリネズミにいたっては人間の  $693/40=17.3$  倍も食べていることになります。

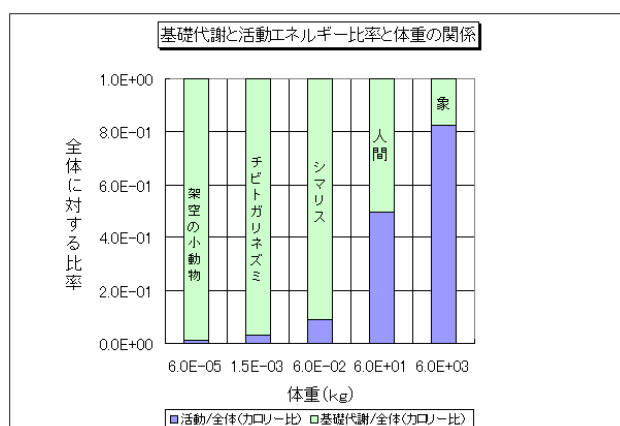


図1. 活動/全体・体温/全体と体重の関係

図2. は単位体重(1kg)あたりの1日に必要なカロリーと体重の関係を示したものです。図には恐竜の値も入れてみました。動物は小型になるほど単位体重あたりの必要カロリーが大きくなり、大型になるほど必要なカロリーは少なくてすむようになります。

つまり、小型の動物の食べ物の量は体の表面積に比例し、大型の動物では曲線がほぼフラットになり体重に比例します。動物は大型化することによって、餌を食べない省エネ型になっているというわけです。

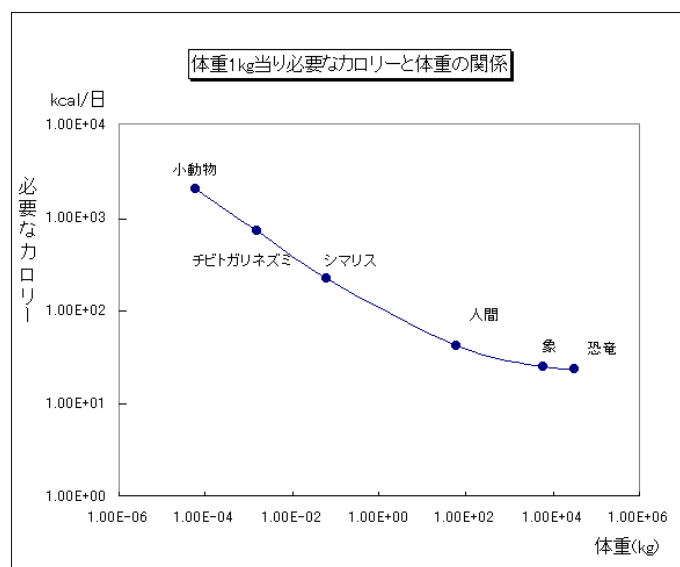


図2. 体重 1kg あたりの必要カロリーと体重の関係

実際、シマリスの近縁のネズミなどは毎日、自分の体重の 1/4 の重さの餌を食べるといわれています。ネズミは、もし必要なだけの食物が得られない場合は、自分の組織を食物代わりに分解してエネルギーを得ますが、そのエネルギー量に比べて体が小さいために、たちまち、自分の体を食い尽くしてしまい、食物がないと 2、3 日で餓死します。体重が半分に減少した時点でほとんどの動物は耐えきれずに死んでしまいます。

もっと小さな小鳥では、餌をやるのを1日忘れてただけで死んでしまったという経験を持っている人は多いはず。この大きさの小鳥になると、常時餌をやっていると、体温維持が出来ないというわけです。

例えば、シジューカラなどは、1年間に捕食する昆虫は 12 万 5 千匹と言われてます。ということは、単純計算で、1日に約 340 匹(125000/365=342)の虫を食べないと生きていけないということになります。

哺乳動物の中で、最も小さいものはトガリネズミの中のチビトガリネズミですが、体

重が 2g(1 円玉 2 枚分) ならずです。このネズミは不思議なことに体が小さくなるほど体重に対する体表面積が大きくなり、熱を多く失ってしまうという不利な環境の北半球の寒い地方にだけ棲息しています。

温血動物である哺乳類は体温が下がると生きていけません。というのは、一定体温以下では、体内の酵素が働かなくなるからです。小さな体で寒冷地で生きていくためには、必死で熱を作り出す必要があります。とにかく食べてエネルギーを作り出さなくてはなりません。

そのため、体重 2g のチビトガリネズミは 1 日に体重の 2 倍の 4g もの餌を食べます。人間が自分の体重の 2 倍の 120kg もの食べ物を食べることを考えれば想像できますね。とにかく、一度食べた栄養はほんの 1~2 時間でなくなってしまうので、彼らは休むことなく食べています。食べ続けなければ生きていけないので、歯が磨耗してしまえば人間のように入れ歯で間に合わすわけにはいきませんから、それっきりということになるわけです。

すなわち、象などは「体が大きい割には小食」で、大型化することによって餌を食べない省エネ形の動物になっており、一方で、ネズミや鳥などは体に似合わず大食いということになります。

表中、人間の 1/100(1.7cm) の小動物がいたとすれば、体重 1kg あたりの必要カロリーはチビトガリネズミの  $2020/693=2.9$  倍にもなります。これでは、チビトガリネズミの食生活をさらに 3 倍近く苦しめたような危険な状況が考えられ、ちょっとでも食糧不足に出会うと即座に命を落とすという綱渡りのような生き方になります。そもそも、カロリーの 99% が体温維持に使われる状況は尋常ではありません。

以上のような理由から、温血動物は昆虫のように小さくなり得ないわけです。もし、この「体温維持のための制限」が取り除かれれば、昆虫の占める生態学的地位は、たちまち知能の高い温血動物に奪われてしまい、現在のような昆虫達の繁栄はなかったのではないかと考えられます。さらに、もし高等な動物に昆虫ほどの力を与えたとしたら、地上は直ぐにも荒廃するに違いありません。



「哺乳類の大小のチャンピオン、ゾウとハツカネズミが断食をしました。どちらが早く死ぬでしょう」と、生物の先生が生徒達に質問しました。さて、あなたならなんと答えますか。

答えは、もう上で述べましたね。参考までに記しておく、温血動物では、小型の動物ほど、単位体重あたりの放散する熱量が大きいから、早いテンポで代謝を進めな

いと体温が維持できません。したがって、小さな動物は断食後に早いテンポで飢え、早く死んでいきます。

100gの高温の鋼球を空気中に置いたときと、これを1gの鋼球100個に分けた場合、同じ重さでも1gの球100個の方が表面積が大きい(21.5倍)わけですから、放熱も早いわけですから、どちらが早くさめるか(どちらが早く死ぬか)は想像すれば分かりますね。

簡単な計算:100gの鋼球の半径を $r$ 、表面積を $S$ 、1gの鋼球の半径を $r'$ 、表面積を $S'$ とし、鋼球の質料密度を $\rho$ とする。

$4/3 \times \pi r^3 \rho = 100$ 、 $4/3 \times \pi r'^3 \rho = 1$ より、 $(r/r')^3 = 100$ 、したがって

$S/S' = (r/r')^2 = 21.5$

---