

北国の動物と虫たち：どのようにして冬を越すのだろうか

木村正人

温度適応に関し、動物は恒温動物と変温動物に分けることができます。もともと、恒温動物とされるものに体温を下げ冬眠するものもあり、この「恒温動物」という語は必ずしも正確ではありませんが。さて、本講義ですが、この2群の動物の低温への適応について紹介いたします。

1. 恒温動物

1. 1. 体温を保つ

恒温動物の平常時の体温はほぼ36℃から42℃の範囲に収まります。体温が平常値より低下すると一般に機能が低下し、極端な場合死に至ります。ヒトでは25℃以下になると死ぬようです。では何故死ぬのでしょうか。臓器自体は4℃で保存できますので、25℃という温度が細胞を死に至らしめている訳ではないと言えます。25℃になると心臓、肺の機能が低下し、脳を含む臓器に酸素を供給できなくなることが原因のようです。

恒温動物の低温適応はいかに体温を保つかにあります。体温は産熱と放熱のバランスで決まっています。寒くなると産熱を上げ、放熱を抑えればよい訳です。小型哺乳類やヒトの新生児は褐色脂肪組織を有し、寒くなるとそこでエネルギーを消費し、産熱を上昇させます。それ以外には、肝臓でのエネルギー消費を上昇させる、筋肉の震えにより産熱する、などの方法をとっていますが、その効果はそれほど大きくありません。そこで、放熱を抑えることが寒さへの主な対策になります。その方法には、1) 体型を変える、2) 羽毛を生やす、3) 皮下脂肪層を厚くする、4) 血管の配置を変える、等があります。以下にこれらの対策について説明します。

「**体型を変える**」 放熱は体表の面積が増加すれば増加します。したがって、体表面積を小さくすれば放熱を減らすことができます。寒冷地の個体ほど突出部(たとえば耳)が小さくなるというアレンの法則がありますが、これは放熱を抑える適応の結果と言われています。また、寒冷地の個体ほど体が大きくなるというベルグマンの法則があります。一般に産熱は体重に比例し、体重は体長の3乗に比例します。一方、対表面積は体長の2乗に比例しますので、産熱に対し放熱を小さくするには、体を大きくすればよい訳です。もともと、体の大きさ、突出部の大きさに影響する要因は温度だけではありませんので、この法則が常に成立する訳ではありません。

「**羽毛を生やす**」 羽毛は熱伝導率の低い空気を保持することにより、放熱を抑えています。したがって、寒冷地の動物の毛は、窪みがあったり、中空になっていたりして、空気を多く保持できるようになっています。また、低温にさらされると、毛を逆立てることにより、より多くの空気を保持できるようにします。ヒトの場合、寒さに合うと鳥肌が立ちますが、これは毛を逆立てるための筋肉が収縮したためで、毛があった頃

の名残で、毛を失った現在は意味がないようです。

「**脂肪層を厚くする**」 脂肪も熱伝導率が低く断熱効果があります。海獣類などでは体毛層に空気を大量に保持することが困難なことなどにもより、脂肪層が体温保持に重要な役割を果たしています。また、ブタはヒトと同じく体毛がほとんどないにも関わらず寒さに強いのですが、それは厚い脂肪層によるようです。

「**血管の配置を変える**」 低温下では、体表、特に手足などの突出部の表面近くを流れた血液の温度は低下します。この血液をそのまま心臓に戻しますと心臓の温度も低下します。そこで突出部へ向かう動脈を静脈に添わせ、動脈流の熱を静脈流に移すことにより、心臓に達する静脈の温度を上昇させています。添って走る動脈と静脈の流れの方向が逆になっていることが重要で、これは対向流と呼ばれ、効率よく温度を移すことができます。対向流は酸素など物質の移動にも重要な働きを示し、生物の持つ重要なシステムです。この対向流により、突出部の温度は低くなっていますが、心臓の温度の低下は軽減することができます。

1. 2. 冬眠

哺乳類には冬眠するものがあります。ヒグマが有名ですが、冬眠中でも体温は 30℃ほどにしか下がりません。一方、冬眠中のシマリスの体温は 5℃まで下がりますが、心臓はこの温度でも、心拍数はかなり低下するものの、働くことができます。しかしながら、彼らの心臓が低温下で働くメカニズムについてはまだよく理解されていません。

冬眠する動物では窒素老廃物の処理も問題になります。冬眠中でも代謝はゼロではなく、老廃物が産出されます。平常時、窒素老廃物を尿素に変換され、尿として排出されますが、冬眠中には尿を排出することができません。そこで、冬眠中の動物は、尿素を唾液より分泌します。その尿素は腸内細菌によりアミノ酸に変換され、そのアミノ酸を腸から吸収します。この尿素再利用のシステムはウシなどの草食獣にみられます。草食獣の場合、植物の細胞壁のセルロースは腸内細菌により分解されますが、それを吸収するため、糖分過多になります。つまり相対的にタンパク質不足になります。そこで、アミノ酸の老廃物である尿素を再利用するシステムを進化させたものと思われます。冬眠する動物はこのシステムを借用したと言えます。

2. 変温動物

変温動物の温度適応は陸棲か水棲かで異なるようです。一般に前者は冬を不活動状態(冬眠・休眠)で過ごし、後者は比較的活動的に過ごすようです。変温動物のなかでは、魚類、昆虫について低温適応がよく研究されています。ここでは、まず低温下でも活動的に過ごす魚類の適応を紹介し、次に休眠状態で過ごす昆虫について紹介します。

2. 1. 低温下で活動する

南極では海水温は 0℃以下になりますが、多くの魚が活動しています。この魚たちの

温度適応のメカニズムのうち、1) 細胞膜の機能の維持、2) タンパク質の活性の維持、3) 凍結回避について紹介します。

「細胞膜の機能の維持」 生物の示す機能のほとんどは細胞によって担われています。細胞が機能を果たすには細胞膜を通した物質の移送が必要ですが、そのためには細胞膜は流動性を保ってなくてはなりません。さて細胞膜ですが、主にリン脂質という物質で構成されています。リン脂質は、いわゆる脂肪(トリアシルグリセロール)の三つの脂肪酸のうち、一つが親水性の物質に置き換わったものです(図 1-B,C)。細胞膜では脂肪酸が向き合い、親水基が外側に向く、という構造をしています(図 1-A)。この細胞膜ですが、多くの物質同様、温度が高くなると流動性が増し、低くなると低下します。そこで寒冷下の魚は脂肪酸の種類を変え、流動性の低下を回避しています。

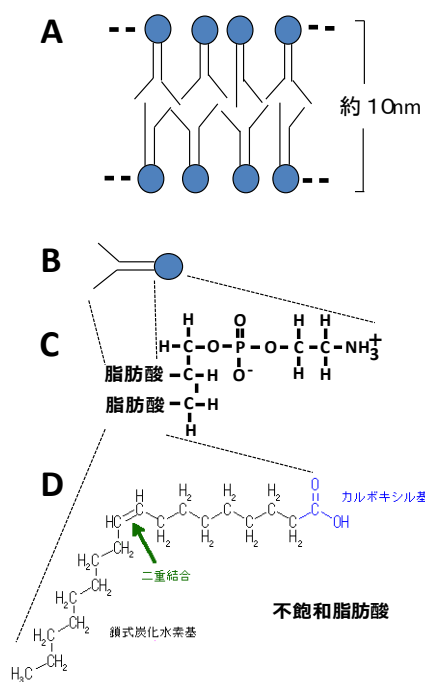


図 1. 細胞膜の構造とリン脂質. A) 細胞膜の構造、B) リン脂質、C) リン脂質 (オスファチジルエタノールアミン)の分子構造、D) 脂肪酸の分子構造

脂肪酸には飽和脂肪酸と不飽和脂肪酸があります。脂肪酸は炭素分子が直鎖状に並んだもので、飽和脂肪酸では炭素鎖がほぼ直線状になるのに対し、不飽和脂肪酸では炭素鎖に2重結合があるため折れ曲がります(図 1-D)。この不飽和脂肪酸が多いほど固まりにくくなります。寒冷下の魚は、細胞膜の脂質の不飽和脂肪酸の割合を増やし、細胞膜の流動性を保っています。

「タンパク質の活性の維持」 タンパク質の重要な機能の一つは触媒作用(酵素反応)です。ここでは南極の海に棲む魚の乳酸脱水素酵素というタンパク質に見られる適応について紹介します。この酵素はピルビン酸・NADH と乳酸・NAD⁺の変換を触媒します。触媒作用は酵素タンパク質の触媒部位で行われます。触媒部位は酵素分子にあるポケットの中にあるのですが、このポケットにはドアがあり、ドアが開くとピルビン酸とNADH が入り込みます。ドアが閉まると反応が起こり、また開くと乳酸とNAD⁺が放出されます(図 2)。この一連の過程にかかる時間は、触媒反応の速度ではなく、主にドアの開閉速度によって決まります。温度が下がるとドアの開閉速度が落ち、生産効率が低下します。従って、寒冷下の魚が生産効率を維持するためには、ドアの開閉速度を上げる必要があります。南極の海に棲む魚はドアの蝶番ともいふべき部分の amino acid

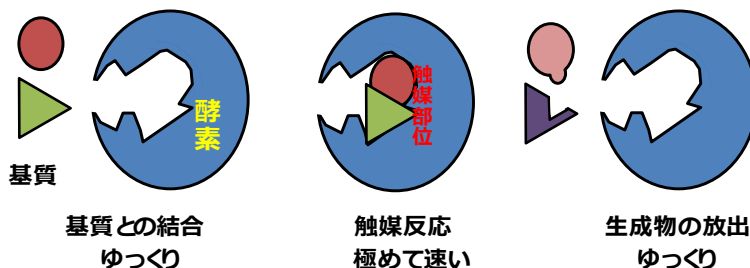


図 2 酵素反応過程

の分子を小さくすることにより、ドアが開閉しやすくし、生産効率を上げています。現在のところ、こうした研究は乳酸脱水素酵素以外では行われておらず、ここで紹介したメカニズムが普遍的であるかどうかは不明です。

「凍結回避」 魚の体液の氷点は海水の氷点より若干高いため、南極などに生息する魚は体液が凍結する恐れがあります。そこで彼らは抗凍結タンパク質を生産することにより凍結を回避しています。氷は、まず核になるものに水分子が結合し、それにさらに水分子が結合することにより成長します。抗凍結タンパク質は氷(規則正しく並んだ水分子)に結合する性質を持っており、氷の成長を阻害します。抗凍結タンパク質は南極の魚で初めて見つかりましたが、現在では寒冷域に生息するさまざまな魚、昆虫でも知られています。現在、このタンパク質を食品の冷温・冷凍保存に用いるべく研究が進められています。

2. 2. 低温期を不活動状態で過ごす(休眠)

陸棲の変温動物の多くは、秋になると代謝を落とし、不活動になります。彼らは主に日長により秋の到来を知ります(正確には夜長です。つまり、彼らは“暗い時間”を計測しています)。彼らがどのようにして夜長を測り、その情報を代謝系に伝え、代謝経路を変更させるかについてはまだよく分かっていません。これまでに明らかになっていることは、彼らの多くはグリセロールやトレハロースなどの糖・糖アルコールを蓄積するということです。これらの糖・糖アルコールは適合溶質と呼ばれ、氷点を降下させる以外に、低温・乾燥下においてタンパク質および細胞膜を保護する機能を有しています。しかし、これらの適合溶質の作用メカニズムの詳細についてもよく分かっていません。また、これら適合溶質を蓄積せず越冬するものも知られており、その役割についても不明な点が多々あります。

次に越冬中のエネルギーについて紹介します。代謝を落としているとはいえ、生きている限りはエネルギーを消費します。昆虫の場合、多くはエネルギー源として脂肪を蓄積します。脂肪につきましては、以前紹介したように、飽和脂肪酸/不飽和脂肪酸の比により凝固温度が異なります。凝固した脂肪に比べ、融けた脂肪は10倍も効率よく分解されます。したがって、寒冷地域の動物・昆虫は凝固点の低い不飽和脂肪酸の多い脂肪を蓄積します。もっとも、冬期のエネルギー問題についてもそれほど多くの動物・昆虫で調べられている訳ではありません。さらなる研究が必要です。

最後に、極限条件にも耐えることができるクマムシとネムリユスリカについて紹介します。クマムシは脱水されることにより、乾眠という状態になり、乾燥下はもとより、150度の高温、ほぼ絶対零度の極低温、高圧7万5千気圧下、高線量の紫外線・エックス線にも耐えることができます。ネムリユスリカも脱水されることにより、同様の極限状態に耐えることができます。しかし、彼らの耐性のメカニズムにつきましても、残念ながらほとんど分かっていません。