

解 説

雨で蘇る乾燥昆虫の謎

— ガラス化したトレハロースが水代替作用 —

古木隆生, 奥田 隆, 黄川田隆洋, 櫻井 実

(受取日: 2008年11月14日, 受理日: 2008年12月25日)

An Insect Life during Dry Season

— Glassy Trehalose Acts as Water Replacement —

Takao Furuki, Takashi Okuda, Takahiro Kikawada, and Minoru Sakurai

(Received November 14, 2008; Accepted December 25, 2008)

Anhydrobiosis is an extremely dehydrated state in which organisms show no detectable metabolism with the ability to revive upon immersion into water. Larvae of an African chironomid, *Polypedilum vanderplanki*, are the largest multicellular animal capable of anhydrobiosis. Recently we have successfully clarified the physicochemical mechanism of their anhydrobiosis. When larvae of *P. vanderplanki* fell into an anhydrobiotic state, they accumulated endogenously non-reducing disaccharide, α, α -trehalose, as high as 25 % of their dry body mass, which was found to be uniformly distributed throughout the dehydrated body by Fourier transform infrared (FT-IR) microscopic mapping image. Differential scanning calorimetry measurements indicated that the anhydrobiotic larvae were in a glassy state up to ca. 65 °C. Changing from the glassy to rubbery state by either heating or allowing slight moisture uptake led to their very poor survival ability. FT-IR spectra showed that the cellular membrane of the anhydrobiotic larvae remained in the liquid-crystalline state throughout formation of hydrogen bonds between its phospholipids and the endogenous trehalose. Taken these findings together we concluded that trehalose plays important roles in biological glass formation as the water replacement, although other compounds would be also involved in these phenomena.

Keywords: anhydrobiosis; *Polypedilum vanderplanki*; trehalose; glass transition; water replacement

1. はじめに

生物の体の60~70%を占める水は、生命の営みにとって必須のタンパク質、核酸、及び細胞膜の構造と機能を維持する役割を担っている。この為、生物が極度の脱水状態に陥ると多くの場合は死に至る。しかし、ある種の生物達は、水が欠乏し干からびても、蘇生可能な状態のまま代謝

活動を完全に停止し、再び水に巡り合うまでの逆境を生き抜くことができる。この現象は英語ではanhydrobiosis（無水生命）と呼ばれるが、日本語では「乾眠」と訳されることが多い。乾眠は、クマムシ（緩歩動物）及びワムシ（輪形動物）のような微小動物（体長数百 μm ）を中心に見られることが、18世紀初頭から知られている。しかし、個体サイズの微小さ及び飼育の難しさが壁となり、これらの乾眠

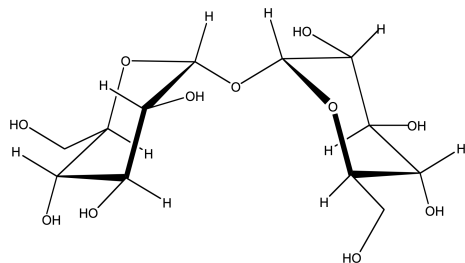


Fig.1 Schematic representation of α,α -trehalose molecular structure. Two glucose molecules are linked by α,α -1,1-glycosidic bond.

分子機構に迫る生体直接の科学的知見は殆ど無い。現在までのところ、乾眠現象を示す最も大型且つ高等な動物は、ネムリユスリカ（節足動物）の幼虫（体長3～5 mm程度）である。これは、アフリカ中西部半乾燥地帯の岩盤表面の窪みにできた水溜り等に生息する。乾季には岩盤表面と共に幼虫も干上がってしまうが、次の雨季に水が張ると幼虫は吸水して生命活動を復活する。この現象はHinton¹⁾によって報告されたが、その後詳しく解明されることは無かった。しかし、近年になって、ネムリユスリカの幼虫をある条件で乾燥させると、体内にトレハロースと言う二糖類（Fig.1）が大量に合成・蓄積されることが農業生物資源研究所の奥田隆らのグループによって明らかにされた。^{2,4)}

トレハロースは、今日、食品や化粧品分野で鮮度保持剤・保湿剤等として広く利用されているほか、医療では臓器保存液に不可欠な構成成分として注目されている。⁵⁾ トレハロースは生物の細胞や蛋白質を乾燥から効果的に保護する糖として、過去数十年に渡り学術見地からも多くの研究が報告されてきた。これらの主としてモデル系を用いた研究から、乾燥時にはトレハロースが水に代わって細胞膜や蛋白質等の生体物質に結合し（水置換仮説）、同時にこの糖がガラス状に固化してこれら生体物質を包み込み（ガラス状態仮説）保護すると考えられてきた。⁶⁾ しかし、生きたままの動物を用いてこれらの仮説を実証した報告はなかった。最近、筆者らは、乾燥したネムリユスリカ幼虫のどこにトレハロースが蓄積され、またそれが物理的にどのような状態になっているのかを物質科学の手法を用いて調べることにより、同幼虫が示す乾眠現象に秘められた物理化学的なメカニズムを解明することに成功した。⁷⁾ 本稿では、その概要を紹介する。尚、トレハロース単体の基礎的な熱物性及び相転移に関する情報は、例えば文献8～11を御覧頂きたい。

2. トレハロースの蓄積と分布

研究では、トレハロース含有量が異なる2種の乾燥幼虫を調製し両者の特性を比較した。

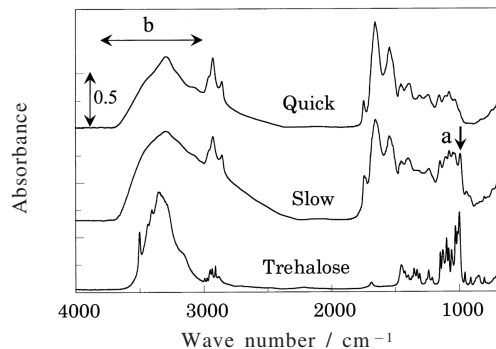


Fig.2 FT-IR spectra of anhydrous glassy trehalose (bottom), a slowly dehydrated larva (middle), and a quickly dehydrated larva (top), respectively. The arrow denoted by a in the middle spectrum indicates the peak at 992 cm^{-1} characteristic of α,α -trehalose. The arrow with denotation of b indicates the spectral region, $3800\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, of O-H and N-H stretching vibration bands.

Slow サンプル：常温で1日毎に相対湿度を段階的に下げ（100% → 76% → 5%）、その結果、体内に乾燥体重の約4分の1に及ぶトレハロースを蓄積した乾燥幼虫。これは、常温乾燥保存しておけば水に戻したときの蘇生率は90%に達する。

Quick サンプル：常温にて半日程度で急速に乾燥させた幼虫。体内にトレハロースは蓄積されず、蘇生不可。

尚、これら両サンプルの含水率は3%で、タンパク質及び脂質の含有量に差はない。また、糖の定量は高速液体クロマトグラフィー（HPLC）によるが、Slow サンプルからトレハロース以外の糖類は検出されていない。

Fig.1に示すように、トレハロースは α,α -1,1-グリコシド結合という他の糖及び生体分子には無い特異的な結合をもつため、振動分光学的にも特徴的な吸収スペクトルを示す。¹²⁾ 故に、生体から直接にトレハロースを選択的に観測することが原則的に可能である。Slow及びQuickサンプルのフーリエ変換赤外吸収（FT-IR）スペクトルをFig.2に示す。Slowサンプルではトレハロースに特有の 992 cm^{-1} のピークが明瞭に現れたが、Quickサンプルでは該当する吸収は見られなかった。これは、HPLCによるトレハロース含有量の測定結果と矛盾しない。

筆者らは 992 cm^{-1} のピークをトレハロースのプロープとして使い、フーリエ変換顕微赤外吸収分光法によってSlowサンプルのトレハロース分布を調べた。その結果、この糖は乾燥幼虫の体内全域に渡ってほぼ均一に分布することが分かった（Fig.3(b)）。ネムリユスリカの体内でトレハロースの合成が行われるのは脂肪体というヒトの肝臓に相当す

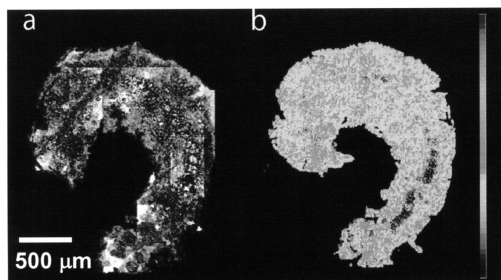


Fig.3 (a) Optical, and (b) FT-IR imaging data for a slow sample.

る組織のみである。¹³⁾ 脂肪体はこの昆虫の特定部位に偏在するわけではなく、しかもネムリユスリカはトレハロースを特異的に細胞の内外に輸送するために必要な膜貫通型トランスポーターを備えている。¹⁴⁾

3. 幼虫個体のガラス化と蘇生

乾燥したネムリユスリカ幼虫は、一見単なる固形状の物質である。筆者らは、この物体が物理的にどのような状態であるのかを調べるため、示差走査熱量 (DSC) 測定を行った。その結果、Slow サンプルは約65 °Cまで物理的に安定なガラス状態であることが分かった (Fig.4)。おそらくSlow サンプルの場合、体内全体に分布するトレハロースがガラス状のカプセルを形成することによって、細胞膜、タンパク質及び核など生体組織を構成する各成分の分子構造及びそれらの集合体としての秩序が維持されたまま代謝活動が停止した状態であると考えられる。尚、ネムリユスリカ幼虫個体のガラス化に寄与する化学成分の議論は次の節であらためて述べる。

一般に、ガラス状態の物質が流動性の高いラバー状態へと相転移する条件として、周囲の温度が物質のガラス転移温度 T_g よりも高い場合、或いは、物質自身の吸湿に伴い T_g が周囲の温度よりも低くなる場合 (水による可塑効果) がある。これらのことを念頭に筆者らは、乾燥幼虫のガラス化と蘇生の関係を調べるため、Slow サンプルの耐熱及び吸湿試験を行った。耐熱試験では、乾燥幼虫を一定時間オープンで所定の温度に曝露した後、常温まで冷ましてから水に戻して蘇生率を調べた。Fig.5に、その蘇生率の熱処理温度依存性を、Slow サンプルのDSCサーモグラム (Fig4と同一) と対比して示す。明らかに、熱処理温度がSlow サンプルのガラス転移終点 (= 71 °C) を越えると蘇生率は急激に低下した。しかし、注意深く見るとガラス転移に対して、蘇生率曲線はやや温度ラグがあるとの見方もできる。このような結果は、次のように解釈できる。ガラス転移温度より高い温度では、ラバーと呼ばれる流動的な状態にな

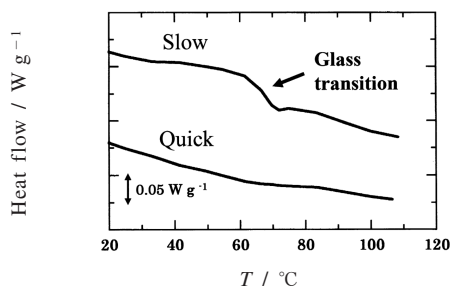


Fig.4 DSC thermograms of slow and quick samples, respectively, measured at a heating rate of 5 °C min⁻¹.

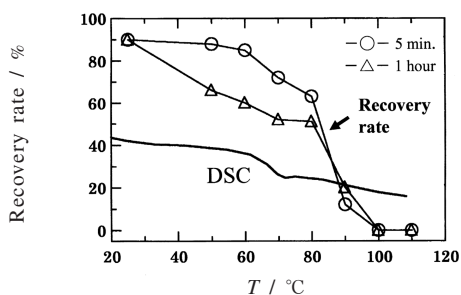


Fig.5 Dependence of the recovery rates upon rehydration after exposure to high temperatures for the slow and quick samples, respectively. Open circles and triangles show recovery data of samples subjected to the heat treatments for 5 min. and 1 hour, respectively.

るものの粘度は高いため、5分或いは1時間程度の熱処理時間では、幼虫体内の組織が致命的な程度までには崩壊しなかったであろう。

一方、吸湿試験では、乾燥幼虫を所定の相対湿度環境に常温で5日間又は15日間静置した後、これらのトレハロース含有量、蘇生率、ガラス転移等を調査した。結果をTable 1に示す。Slow サンプルの含水率が10 %程度迄であれば、水による可塑効果によってガラス転移温度が約30 °C (中点) まで下がるものの、蘇生率に対する影響は殆ど見られなかった。しかし、Slow サンプルの含水率が30 %近くに増加するとガラス状態は失われ、蘇生もしなくなることが分かった。一方、トレハロース含有量に大きな違いは見られず、吸湿後も幼虫には乾燥体重4分の1に相当するトレハロースが含まれていた。このことは、幼虫が体内にトレハロースを単に蓄えているだけでは、幼虫の乾燥耐性に結びつかないことを示している。

以上の結果から、ネムリユスリカ幼虫の乾眠発現には、

Table 1 Effects of humidity on the water and trehalose contents, recovery rate, and physicochemical properties of slowly dehydrated larvae.

Condition	Water % by mass	Trehalose % per larval dry weight	Recovery rate %	T_g (onset) ℃	T_g (mid point) ℃	T_g (end) ℃
Control (RH 5 %) ^{a)}	3	27	91	62	65	71
5 days treatment						
RH 38 %	7	24	90	24	35	45
RH 60 %	10	24	93	19	32	43
RH 93 %	31	24	50	nd ^{c)}	nd	nd
RH 98 %	36	28	0	nd	nd	nd
15 days treatment ^{b)}						
RH 38 %	7	24	90	23	31	42
RH 60 %	11	28	78	14	28	43

a) Slowly dehydrated larvae, referred to as the slow sample in the text, were kept in dry states as such.

b) When slowly dehydrated larvae were incubated for 15 days at RH 93 % or RH 98 %, they were spoiled.

c) Not detected.

幼虫個体のガラス化が必須であることが明らかとなった。⁷⁾ 同幼虫が生息するアフリカ半乾燥地帯岩盤の表面温度は、乾季に60℃に達することがある。実際には、乾燥幼虫は岩盤窪みの土の中にもぐっているケースが殆どなので、彼ら自身の温度は岩盤表面温度よりは低いかも知れない。しかし、いずれにせよ、Slowサンプルのガラス転移温度が65℃であることから、日々炎天下に曝される過酷な自然環境でもネムリユスリカ幼虫は蘇生に不可欠なガラス状態を維持することが可能と思われる。

ここで、乾燥幼虫を水に戻すことと吸湿との区別を捕捉説明しておく。水に戻した場合には、体内に速やかに水が行きわたり30分から1時間程度で幼虫は動き出す。物理的に言えば、細胞の溶質がガラス状態から、ラバー状態を殆ど経験せず水溶液へと変化したことになる。また、体内に蓄積されたトレハロースは再水和後、16時間程度ではほぼ分解される。¹⁵⁾ 一方、吸湿の場合には、水による可塑効果によってガラス転移温度が周囲の温度よりも低下すると幼虫はラバー状態へと転移する。ラバー状態は直ちに生体組織の崩壊を意味するわけではないが、数日間そのような不安定な状態に置かれることによって、体内組織の秩序が回復不可能なまでに失われたものと考えられる。

4. 幼虫個体のガラス化と体内成分

SlowサンプルとQuickサンプルの化学組成の大きな違いは、乾燥体重の約4分の1に及ぶトレハロースの有無である。また、トレハロースはこれ自身の特質として、他の糖類と同様、乾燥するとガラスを形成する傾向がある。^{6,16,17)} それ故に、Slowサンプルで観測されたガラス転移には、体内に蓄積されたトレハロースによる寄与が含まれると考えてよ

いであろう。この推察は、次のように分光学的にも支持を得ることができる。一般に糖分子が数多く有するOH基の伸縮振動に由来する赤外吸収は、高波数領域 (Fig.2の矢印b) に現れる。Slow及びQuickサンプルについて、この波数領域に観測された赤外吸収のピーク波数を温度に対してプロットすると (Fig.6)、前者はDSCで観測されたガラス転移温度近傍に屈曲点を生じるが、後者では屈曲点は見られない。このSlowサンプルと同様の結果は、非生体系でガラス化した糖について報告されている。¹⁷⁾ しかし、幼虫のような生体を直接測定した場合、赤外吸収の結果の解釈には注意を要する。と言うのは、タンパク質などに含まれるNH基の伸縮振動による赤外吸収の波数領域が、OH基のそれと重なるからである。

果たして、幼虫体内でガラス化した成分が排他的にトレハロースであるか否かを判断するためには、Slowサンプルのガラス転移温度の含水率依存性を、トレハロースと水の2成分系を仮定したガラス転移温度の計算値と比較すればよい。トレハロースを含め、糖と水の2成分系のガラス転移はよく研究されていて、そのガラス転移温度はGordon-Taylorの式に従う。¹⁸⁾

$$T_g = (w_1 T_{g1} + k w_2 T_{g2}) / (w_1 + k w_2) \quad (1)$$

ここで、 w_1 , w_2 は、それぞれ糖、水の重量分率、 T_{g1} , T_{g2} は、それぞれ糖、水のガラス転移温度 (-135℃),¹⁹⁾ そして、 k は実験的に決められるパラメータである。トレハロースの場合、 $T_{g1} = 113.9$ ℃, $k = 7.5$ である。¹⁶⁾ これらの数値はそれぞれ、ガラス転移の始点の温度、及びその含水率依存性から求められた経験的パラメータである。Slowサンプルの場合、例えば含水率が3%から11%に増加すると、

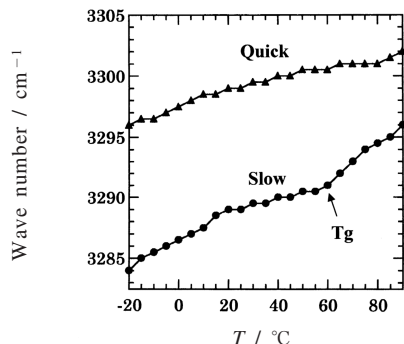


Fig.6 Temperature dependence of the maximal peak position between 3800 and 3000 cm^{-1} for slow and quick samples, respectively.

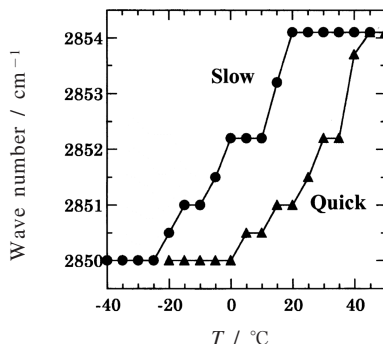


Fig.7 Temperature dependence of ν [CH_2] for slow and quick samples, respectively.

ガラス転移の始点は62℃から14℃へと低下した (Table 1)。一方、これらの含水率に該当する上記2成分系のガラス転移温度を計算すると、それぞれ、67℃、-6℃である。即ち、吸湿によるSlow サンプルのガラス転移の低下は、単純なトレハロース-水2成分系に比べて緩やかである。従って、ネムリユスリカ幼虫のガラス化には、吸湿によるガラス転移温度の低下を抑制する働きをするトレハロース以外の成分 (便宜上、第三成分と呼ぶ) が寄与していると考えざるを得ない。

植物の乾燥耐性機構の場合には、乾燥時に特異的に発現することで有名な所謂 LEA (Late embryogenesis abundant) タンパク質が、スクロース (蔗糖) のような糖と共にガラス化し、且つ糖が形成するガラスを強固なものにする可能性が報告されている。²⁰⁾ 興味深いことに、ネムリユスリカ幼虫でもこの種のタンパク質が発現することが分かっている。²¹⁾ 現在までのところ、乾燥ネムリユスリカ幼虫でガラス化したタンパク質の存在を示す証拠は得られていない。しかし、上の段落で述べた第三成分の1つが LEA タンパク質であることは十分に考えられる。

5. 水代替物質としてのトレハロース

トレハロースがどのように細胞膜を保護しているのかを調べるため、Slow 及びQuick サンプルの赤外吸収スペクトルを詳細に解析した。例えば、波数1200~1280 cm^{-1} の領域に現れる吸収は、細胞膜の極性ヘッドグループなどに含まれるリン酸基のO=P-O-非対称伸縮振動に由来するが、Slow サンプルの該当する吸収バンドのピーク位置はQuick サンプルに比べて4 cm^{-1} ほど低波数側であった。これは、前者では、トレハロースがリン酸基に水素結合してその伸縮振動が抑制されたことを示唆している。但し、生体内にはリン酸基を含む重要な分子としてDNA等も存在することに注意せねばならない。筆者らが非生体系で行った実験に

よると、トレハロースは乾燥DNAに対しても水代替物質として保護作用をする²²⁾ことから、上記の結果が細胞膜の極性ヘッドグループの状態を直接反映したものであるか否か判断できない。そこで、我々は、脂肪鎖の主要な赤外吸収である CH_2 対称伸縮バンドのピーク位置 ν [CH_2] の温度依存性に注目した。これは、トレハロースなどの糖が人工リン脂質二重膜 (リボソーム) のゲル-液晶相転移温度 T_m に与える影響を評価する際に採用されてきた調査項目であり、(a) 昇温に伴う相転移によって ν [CH_2] は3~4 cm^{-1} 高波数シフトし、また、(b) トレハロースが極性ヘッドグループに水素結合していると T_m は低下する (水置換仮説の根拠) ことがよく知られている。²³⁾ Fig.7 に示すように、Slow サンプルの ν [CH_2] の温度シフトは全体としてQuick サンプルのそれよりも低温領域で起こり、前者の T_m は後者のそれよりも低いことがはっきりと分かる。この結果と、上で述べたリン酸基の吸収バンドの結果を組み合わせると、「Slow サンプルの体内に満遍なく分布したトレハロースが、乾燥によって失われた水和水の代わりに細胞膜と水素結合することによって、細胞膜は常温で液晶状態を保持している。」と考えるのが合理的である。

さて、Fig.7 から、Slow サンプルの場合、温度が下がっても15℃付近迄であれば細胞膜は液晶状態であることが分かるが、本段落では、乾燥した膜の物理的状態と再水和時の出来事の関係について述べる。乾燥してゲル状態の膜について注意すべき点は、再水和したときにゲル-液晶相転移が起こり得ることである。例えば、水という媒質が無い状態での、昇温による膜の相転移であれば、リン脂質の相分離による細胞膜の非可逆的な構造劣化やこれに付随する細胞内部からの溶質の漏れが生じる可能性はほとんど無い。しかし、再水和によって細胞膜の T_m が水温よりも低くなり、水が豊富な状態で膜のゲル-液晶相転移が起こると、これらの問題が発生する恐れがある。生体にとって、このよう

な出来事自体が直ちに死を意味するとは限らないが、少なくとも好ましいことでは無い。そして、見方を換えれば、乾燥して蘇生可能な状態の生体であっても、再水和する際の温度は重要な因子である。この具体例としてよく知られているのは乾燥酵母（トレハロース含量8.6 wt%）で、この T_m は約40℃である故、酵母の細胞膜を液晶状態に保ちつつ水に戻して高い蘇生率を得るには温水を用いる必要がある。²⁴⁾ これに対しSlow サンプルの場合、再水和の温度が15℃を下回ると生存率は急激に低下することが分かっている（未公表データ）。一方、Quick サンプルの場合、細胞膜が液晶状態となるような温水に浸しても全く蘇生しないので、この幼虫はそもそも乾燥時点で死んでいることが分かる。

6. おわりに

以上、現時点で明らかになっているネムリユスリカ幼虫による乾眠現象の主要な物理化学的背景をまとめると、「トレハロースが体内に満遍なく分布し、且つ同糖がガラス状に固まって細胞膜等を包埋し保護している」という Fig.8 のような描像に達する。

乾眠現象を示す他の動物種としては、線虫 (*A. avenae*)²⁵⁾ や甲殻類アルテミア (*A. franciscana*) の卵²⁶⁾ など、乾燥時に体内に比較的多量（乾重量10数%）のトレハロースを蓄積するものが見受けられる一方で、クマムシ (*A. coronifer*) の場合にはトレハロースの蓄積量は2.3%に過ぎない。²⁷⁾ また、ある種のワムシ (*P. roseola*, *A. vaga*) に至っては、トレハロースの蓄積無しに乾眠現象を示すことが報告されている。²⁸⁾ 更に、ここ数年の間に、クマムシを除く上記いずれの動物種にも、ネムリユスリカと同様、LEAタンパク質が発現していることが相次いで発見されている。²⁹⁾ これらネムリユスリカ以外の動物種の乾眠分子機構はいずれも未解明であるが、体長数100 μm 程度の微小動物では乾燥保護剤としてトレハロースの必要性は薄く、肉眼で見える大きさの動物種では多量のトレハロースを必要とする傾向が見てとれる。このことは、トレハロースとLEAタンパク質の細胞内における作用機序仮説「LEAタンパク質は言わば鉄筋として細胞の機械的強度を維持し、ガラス化したトレハロースはコンクリートとして鉄筋間の空隙を埋めると共に、細胞膜や他のタンパク質を保護する。（細胞骨格説）³⁰⁾」の検証へ向けて極めて示唆に富んでいる。動物種が示す乾眠分子機構の解明はまだ第一歩を踏み出した段階である。今後、この分野が発展していくためには、より一層高感度且つ高精度の熱測定による助けが必要と思われる。「必要は発明の母」のことわざの如く、本稿で紹介したネムリユスリカの物理化学的な研究を契機として無水生命科学への関心が高まると共に、熱測定とこの分野がお互いに協調しつつ飛躍していくことに期待を寄せたい。

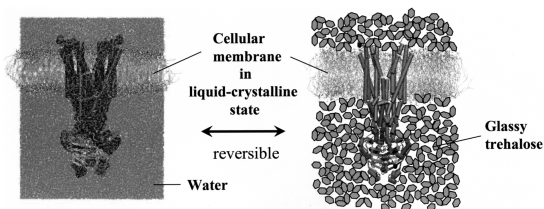


Fig.8 Schematic representation of biological cellular membrane and protein embedded in there. The left hand represents the ordinary state of metabolic working, whereas the right hand does the desiccated state with no metabolic activity, where the membrane and protein are protected by encapsulation with glassy trehalose as the water replacement.

謝 辞

本研究は、生研センター基礎研究推進事業試験研究費 (PROBRAIN) によって実施されたものである。

文 献

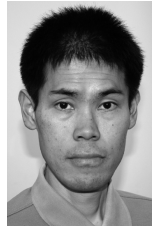
- 1) H. E. Hinton, *Proc. Zool. Soc. Lond.* **121**, 371 (1951).
- 2) M. Watanabe, T. Kikawada, N. Minagawa, F. Yukuhiro, and T. Okuda, *J. Exp. Biol.* **205**, 2799 (2002).
- 3) M. Watanabe, T. Kikawada, and T. Okuda, *J. Exp. Biol.* **206**, 2281 (2003).
- 4) 奥田 隆, *Netsu Sokutei* **33**, 20 (2006).
- 5) C. W. Zhan, Y. Suzuki, A. K. Kitahara, H. Wada, and Y. Nishimura, *Annals of Plastic Surgery* **37**, 538 (1996).
- 6) J. S. Clegg, *Comp. Biochem. Physiol. B* **128**, 613 (2001).
- 7) M. Sakurai, T. Furuki, K. Akao, D. Tanaka, Y. Nakahara, T. Kikawada, M. Watanabe, and T. Okuda, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105**, 5093 (2008).
- 8) T. Furuki, *Carbohydr. Res.* **337**, 441 (2002).
- 9) T. Furuki, A. Kishi, and M. Sakurai, *Carbohydr. Res.* **340**, 429 (2005).
- 10) T. Furuki, R. Abe, H. Kawaji, T. Atake, and M. Sakurai, *J. Chem. Thermody.* **38**, 1612 (2006).
- 11) T. Furuki, R. Abe, H. Kawaji, T. Atake, and M. Sakurai, *J. Therm. Anal. Cal.* **93**, 561 (2008).
- 12) K. Akao, Y. Okubo, N. Asakawa, Y. Inoue, and M. Sakurai, *Carbohydr. Res.* **334**, 233 (2001).
- 13) M. Watanabe, T. Kikawada, A. Fujita, and T. Okuda, *J. Insect Physiol.* **51**, 727 (2005).
- 14) T. Kikawada, A. Saito, Y. Kanamori, Y. Nakahara, K. Iwata, D. Tanaka, M. Watanabe, and T. Okuda,

- Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 11585 (2007).
- 15) M. Watanabe, Y. Nakahara, T. Sakashita, T. Kikawada, A. Fujita, N. Hamada, D. Horikawa, S. Wada, Y. Kobayashi, and T. Okuda, *J. Insect Physiol.* **53**, 573 (2007).
 - 16) L. M. Crowe, D. S. Reid, and J. H. Crowe, *Biophys. J.* **71**, 2087 (1996).
 - 17) W. F. Walkers, A. E. Oliver, F. Tablin, and J. H. Crowe, *Carbohydr. Res.* **339**, 1077 (2004).
 - 18) Y. Roos, *Carbohydr. Res.* **238**, 39 (1993).
 - 19) G. P. Johari, A. Hallbrucker, and E. Mayer, *Nature* **330**, 552 (1987).
 - 20) J. Buitink and O. Leprince, *Cryobiology* **48**, 215 (2004).
 - 21) T. Kikawada, Y. Nakahara, Y. Kanamori, K. Iwata, M. Watanabe, B. McGee, A. Tunnacliffe, and T. Okuda, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **348**, 56 (2006).
 - 22) B. Zhu, T. Furuki, T. Okuda, and M. Sakurai, *J. Phys. Chem. B.* **111**, 5542 (2007).
 - 23) D. K. Hincha and M. Hageman, *Biochem. J.* **383**, 277 (2004).
 - 24) J. M. Aguilera and M. Karel, *Crit. Rev. Food Sci. Nutri.* **37**, 287 (1997).
 - 25) K. A. C. Madin and J. H. Crowe, *J. Exp. Zool.* **193**, 335 (1975).
 - 26) J. S. Clegg, *J. Exp. Zool.* **200**, 467 (1997).
 - 27) P. Westh and H. Ramlov, *J. Exp. Zool.* **258**, 303 (1991).
 - 28) A. Tunnacliffe, J. Lapinski, and B. McGee, *Hydrobiologia* **546**, 315 (2005).
 - 29) A. Tunnacliffe and M. J. Wise, *Naturwissenschaften* **94**, 791 (2007).
 - 30) M. J. Wise and A. Tunnacliffe, *Trends in Plant Sci.* **9**, 13 (2004).

要 旨

ある種の生物は極度の乾燥状態に陥っても、再び水に浸ると生命活動を回復する。これは、英語でanhydrobiosis(無水生命)と呼ばれる。最近、筆者らは、この現象を示す最も大型かつ高等の動物であるネムリユスリカの幼虫を用いて、その物理化学的なメカニズムを明らかにした。蘇生可能な乾燥幼虫には、乾燥体重の約4分の1に達する量の α,α -トレハロースと言う非還元性二糖類が体内に万遍なく分布していた。また、そのような乾燥幼虫は約65℃までガラス状態にあることが分かった。更に、トレハロースは細胞膜に水素結合し、これによって細胞膜は通常の代謝活動時のように、常温で液晶状態を維持していた。以上、一連

の結果と、乾燥幼虫の蘇生率に関する耐熱及び吸湿試験の結果を総合し、筆者らは、体内全体に広がり且つガラス化したトレハロースがいわばカプセルを形成し、水代替物質として乾燥幼虫の生体を保護していると結論づけた。



古木隆生 Takao Furuki
東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センター, Center for Biological Resources and Informatics, Tokyo Institute of Technology, TEL.&FAX 045-924-5795, e-mail: furuki@cherry.bio.titech.ac.jp
研究テーマ: 極限環境耐性生物と生体物質(糖類・タンパク質)の物理化学的研究
趣味: 鉄道, 旅行



奥田 隆 Takashi Okuda
農業生物資源研究所乾燥耐性研究ユニット, Anhydrobiosis Research Unit, National Institute of Agrobiological Sciences, TEL. 029-838-6157, FAX 029-838-6110, e-mail: oku@affrc.go.jp
研究テーマ: 昆虫の高温下での休眠(熱帯休眠, 夏休眠)の生物学的研究
趣味: 多趣味。筆頭はガラクタ収集



黄川田隆洋 Takahiro Kikawada
農業生物資源研究所乾燥耐性研究ユニット, Anhydrobiosis Research Unit, National Institute of Agrobiological Sciences, TEL. 029-838-6157, FAX 029-838-6110, e-mail: kikawada@affrc.go.jp
研究テーマ: クリプトビオシスの分子的背景の解明
趣味: スポーツ観戦。特にサッカーとモータースポーツ



櫻井 実 Minoru Sakurai
東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センター, Center for Biological Resources and Informatics, Tokyo Institute of Technology, TEL.&FAX 045-924-5795, e-mail: msakurai@bio.titech.ac.jp
研究テーマ: 生物の乾燥耐性の物理化学的研究, タンパク質の構造と機能の計算化学的研究
趣味: お散歩デジカメ, クラシック音楽鑑賞