

生 命 の 凍 結

朝 比 奈 英 三*



われわれ人間は感情的に寒さに対する恐怖心があるため、他の生きものもひどい低温にさらされて体内まで固く凍ってしまえば、ほとんど助からないように思いがちである。しかし、生物の中には相当な低温で凍らせても生きていられるものが決して稀ではない。

寒い地方に生えている植物や、動物でも海岸の岩に付着している貝やイソギンチャク、樹の枝に付いている昆虫の幼虫や蛹などは、ほとんど移動することができないので、体温がその場の温度まで下がっても、これに耐えられることが生存のための必要条件である。この意味で水中にすむ生物は空中に露出しているものよりも有利であり、そのすみかが完全に水底まで凍ってしまわない限り、 0°C 以下には絶対に冷えない風呂に入っているようなものである。また、大地は水中に勝る温かいすみかであり、比熱が大きいばかりでなく熱の伝導も悪いので、ごく表面を除けば真冬の外気に近い温度まで冷されることはない。もし、この上に雪が積れば、わが国の気象条件では、浅い地中でも 0°C より数度も冷えることは少なく、積雪はその下にすむ生物にとって最上の防寒具とさえいえることができる。

以下、このような低い温度のところ棲める生物について話を進めるが、これは主として植物や比較的下等な動物の問題であって、後から述べるように、人間を含む高等動物はその体の一部の組織が強くとも、一個体まるごとでは全く凍結に耐えない。

生物が低温に耐える様式

一般に、生物がその体液の氷点以下に冷却された場合

にとりうる物理的状态として、凍結と過冷却の二つが考えられる。多くの生物は、冬になってもその体重の 50～60% 以上に及ぶ水分を含んでいる。したがって、その体液の氷点以下の温度では生物体は凍り易いようにみえる。しかし、生物体内の水は、とくに越冬期の小動物の場合には、むしろ非常に凍りにくいといえよう。元来、水はかなり凍りにくいもので、小滴として冷却された場合は、純水であれば -40°C 付近で初めて凍る。水道の水のように、かなり不純物を含んでいても、 -10°C 以下に過冷却させることは容易である。例えば、越冬昆虫などを冷却すると、その体液の氷点が -2°C くらいの場合に -20°C くらいまで過冷却することができ、 -15°C 付近では、この虫を振動させたりしても、とても凍りださないほど、その過冷却状態が安定している。それどころか、種類によっては過冷却状態のまま活発に雪の上をはい回っているものさえある。

生物が野外で氷点下の寒さにさらされているときにはすでにその周囲に霜や雪のような氷晶が存在している場合が多いので、それらにふれるために、その氷晶の生長として生物体の凍結がはじまることが多い。このような凍結の開始を植氷とよぶ。植物や、動物でも海岸の岩についた表面がぬれている貝類などは、そのほとんどが植氷によって凍りはじめるものと思われる。

一方、クモや昆虫のような小型の動物では、過冷却しやすいので、酷寒地以外では凍ることなく越冬できるものが珍しくない。しかし、気温が -20°C 以下に下がる地域では、また酷寒地でなくともその生物が植氷されやすい条件にある場合は、その体内の凍結がおこり易い。一般に体内の凍結は、その生物にとって過冷却状態よりもはるかに有害となる場合が多い。しかし、多くの植物と少なからぬ種類の動物は、とくに越冬期にはその体内の凍結に耐えることができ、温めて融解させると正常な生活に戻る。このように、生物がその体の凍結に耐える性質を耐凍性とよぶ。

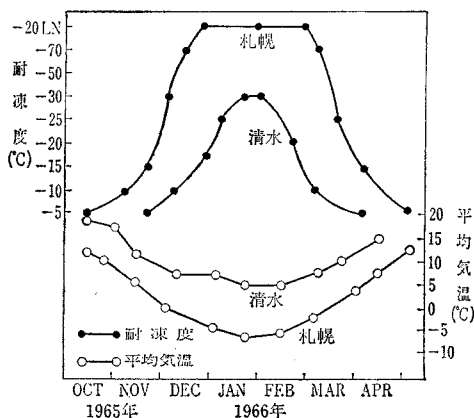
* 理博 北海道大学教授 低温科学研究所長
東京都出身。大正3年11月16日生。北大理学部動物学科卒。昭和44年4月以来現職。現住所・〒064/札幌市中央区南5条西24丁目。

耐凍性の程度

すでに述べたように、植物は植水され易い。また、実験室内で表面の乾いた植物体を冷した場合でも、まわりに氷晶がないのに比較的高い温度で自然に凍りだすことが多い。例えば、切り取った野菜の葉の場合に、 -5°C 以下に過冷却させるのはかなり難しい。これは、植物組織のある部分が、構造的に氷の核としての作用をもっているのではないと思われる。

昔から、植物の耐凍性は季節により大きな違いのあることが知られている。ヤナギを例にとると、札幌では10月中旬に -5°C ぐらいの凍結にしか耐えられなかったものが、11月下旬には -15°C 、12月に入ると急に強くなって -70°C 、あるいは方法によっては、さらに低い温度にも耐えられるようになる。春になるとこの逆の現象がおこり、2月末ごろから弱くなりはじめ、3月中には -15°C くらい、5月には -5°C くらいの凍結に耐えるのがやっとならぬ。ところが、同じヤナギでも静岡県の清水市のような暖地に生えているものは、耐凍性が同程度に高まる時期が1か月以上も遅れ、また、春には1か月以上早く耐凍性が低下してくる(図一)。

このような事実から、生物の耐凍性の変動には環境温度に支配される要素の多いことがわかる。一般に同一種の植物では、秋早く生長を停止する品種ほど冬の耐凍性が高まる傾向がある。植物の耐凍性を最高に発揮させるためには、植物が生長期を終わって休止期に入ってから寒さに十分な時間さらされることが必要である。しかしやたらに低い温度にあてることが有効のではなく、一応連続的な軽度の凍結に耐えられる植物では、 $-3\sim-5^{\circ}\text{C}$ の温度で凍結状態におくと一番効果がある。 -15°C 以下の温度では、このような効果はほとんどない。



(縦軸上の -20LN は -20°C で予備凍結後液体窒素中での凍結に耐えられることを示す(Sakai, 1970).)

図一 ヤナギの耐凍度と環境温度との関係

一方、植物でも種類がかわると、真冬の材料でも耐凍性の限度は、ヤナギほどには強くないものが多い。例えば、マカンバは -25°C 、トドマツは -40°C 、ドイツトウヒは -45°C くらいが限度である。これらの樹木は、このような低温限界以下に冷却されると、例えば芽は正常であっても芽の基部と材部が凍害を受け、1本の木としては正常態に回復できなくなる。草は一般に樹木よりはるかに弱く、畑で越冬しているネギやキャベツやカブなどは、せいぜい -10°C くらいまでの凍結にしか耐えられない。

動物の耐凍性の程度は植物の場合よりさらに変化が多い。下等なものほど寒さに強いように思われやすいが、活動期のものは原生動物でもはなはだ弱く、 0°C くらいに冷されただけで、もはや回復できないものが多い。一方、卵細胞が受精してこれから分裂発生するという、はなはだ活発な生長期にあるものでも、かなり低い温度での凍結に耐えるものもある。無脊椎動物としては最も高等な昆虫類には耐凍性の高いものも多く、 -200°C に近い超低温に耐えられるものもしばしばある。これらの動物のいくつかの例を表一に示す。

この表で耐凍型としたのは、その体内が凍っても生きていられる動物であり、非耐凍型とあるのはその体内が凍れば致命的であるものを示している。したがって、非耐凍型の動物は、過冷却状態でいる限り氷点下の温度に耐えることができる。このような非耐凍型動物の過冷却能力の限度は、多くの場合、短時間ならば -25°C 内外、長時間ならば -20°C またはこれより高温となる。耐凍型の動物も高い過冷却能力をもつ場合がしばしばあり -20°C 以下に冷されると初めて体内が凍り、これより低温では、凍結状態で寒さに耐えるという例は珍しくな

表一 日本産無脊椎動物の耐寒性

名 称	耐寒様式	耐寒限度*
線虫類	多くは耐凍型	$0^{\circ}\sim-196^{\circ}\text{C}$
環形動物	多くは耐凍型	$-10^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$
ゴカイ	ほとんど非耐凍型	-2°C
ミミズ		
軟体動物		
タマキビ	耐凍型	-20°C
タニシ	非耐凍型**	-1°C
イガイ	耐凍型	-10°C
棘皮動物		
ウニ成体	非耐凍型	-2°C
ウニ幼生	耐凍型	-10°C 以下
節足動物		
クモ	非耐凍型**	$-15^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$
チョウ・ガ越冬成虫	非耐凍型**	$-10^{\circ}\sim-20^{\circ}\text{C}$
チョウ・ガ越冬幼虫	耐凍型多し	$-5^{\circ}\sim-196^{\circ}\text{C}$
甲虫類越冬成虫	一部は耐凍型	$-10^{\circ}\sim-15^{\circ}\text{C}$
甲虫類越冬幼虫	非耐凍型多し**	$0^{\circ}\sim-25^{\circ}\text{C}$
ハチ越冬成虫	一部は耐凍型	$0^{\circ}\sim-10^{\circ}\text{C}$
ハチ越冬幼虫	一部は耐凍型	$0^{\circ}\sim-196^{\circ}\text{C}$

注：* 実験的にたしかめられた最低耐寒温度。

** 過冷却状態なら生存できるが、凍結すれば致命的となる。

い。

耐凍性と防御物質

これまで述べたように、生物には種類により凍結に耐えるものと耐えないものがあり、また、耐凍性のあるものでも、その耐えられる温度限界はいろいろである。このことから、何か凍害を防ぐのに有効な物質が生物の体内に含まれていて、その物質の量の多少により耐凍性の程度、つまり耐凍度が決まるのであろうという予想があった。果たせるかな 1956 年ころに越冬する前の時期の昆虫にグリセリンが含まれていることが日本(茅野)とアメリカ合衆国(Wyatt)の学者により、それぞれ蚕の卵、ヤマムコの蛹を使って発見された。もともと、人の血液の凍結保存を行う場合にグリセリンを加えると卓効のあることが 1950 年ころからわかっていたので、昆虫の耐凍性のメカニズムは、この体内におけるグリセリンの存在で説明されたように思った学者も少なくなかった。

実際に、耐凍性の高い昆虫には、グリセリンかまたはこれに代わる他の炭水化物(例えば糖類)が発見される場合が多いが、その逆は必ずしも真ではない。また、昆虫の耐凍度とそのグリセリン含量との間には、種類が変わると、ほとんど平行的な関係がない。

いま、耐凍性昆虫のなかで最もよく調べられているわが国のイラムシについてグリセリンと耐凍性の関係を説明してみよう。イラムシというのは小さい黄色の蛾(イラガ)の幼虫で、本州ではカキやナシの、北海道ではカエデやクワミの葉の上によくみつける。短いがさされると非常に痛い刺をもった、ずんぐりした 2 cm くらいの長さの緑色の毛虫である。この毛虫は、北海道では 9 月初めごろまでに十分生長してスズメの卵によく似たマユを樹上につくり、その中に入ると間もなく刺がなくなり、柔らかい前蛹という姿にかわる。この時期に達すると、いままで脱皮を重ねて生長をつづけていたイラムシの発生変態がとまり、いくら温かい条件にしてやっても一年間ぐらいい眠ったままで過してしまう。このように温めても発生生長の進行しない生物の状態を休眠という。

自然の季候のもとでは、秋涼しくなるにつれイラムシの体内に蓄積されていたグリコーゲンがグリセリンに変わってゆき、11 月中旬ごろにはグリコーゲンはほとんどなくなりグリセリンは最高値に達する(図-2)。イラムシの休眠は真冬になるとほとんどさめてしまうので、それから温めれば変態して蛹になるが、自然の冬の寒さのなかではグリセリンをもったまま眠っていて、4、5 月ごろ暖かくなるにつれてグリセリンが、またグリコーゲン

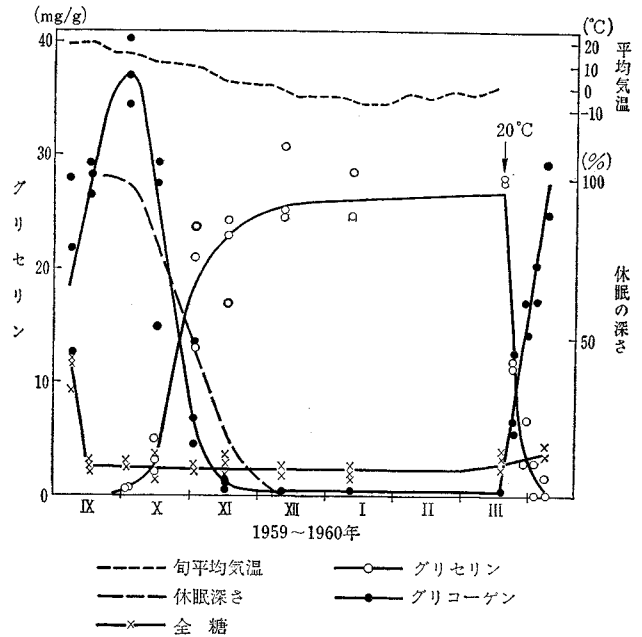
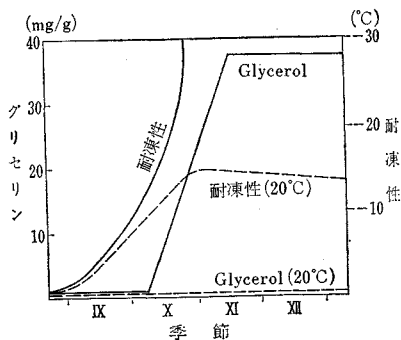


図-2 イラムシの越冬期におけるグリセリン⇄グリコーゲン変化

に変わりイラムシは蛹に変態する。もし、越冬中のイラムシをまだ寒いうちでも 20°C くらいの暖かいところに移すと、前蛹の体内にあるグリセリンのほとんど全部が急速にグリコーゲンに再合成される(図-2、1960 年 3 月の矢印)。

さて、越冬期のイラムシの体内でこのようなグリセリンの増減が行われる間、この虫の耐凍性はどのように変化するのでしょうか。まだ、カキの葉をたべている活動期のイラムシを冷却すると、ほとんど凍りさえすれば死んでしまう。イラムシがマユに入り前蛹になると間もなく軽度の凍結に耐えられるようになり、その体内にごくわずかのグリセリンが認められる 10 月のはじめには、すでに -10°C 以下の温度で凍らせても凍死しない。グリセリンが体内で急増する 10 月中旬ごろにイラムシの耐凍度は急に高まり、グリセリン含量が生体重の 20% 以上に達すると、もはや自然状態での最低気温(-30°C 以下)での凍結に十分耐えられる。このようなイラムシの高い耐凍度は翌年の春まで続くが、温くなり体内のグリセリンが減るとともに、また耐凍度も下がり始める。これをみた限りでは、イラムシの耐凍性の発現はその体内におけるグリセリン蓄積の結果であるようにみえる。

ところが先に述べたように、イラムシを秋のはじめから寒さにあてずに温い室に保存すると、長期間休眠させたまましておくことができる。このとき室温を 20°C 以上にしておくと、虫体内には全くグリセリンが蓄積されない。しかし、耐凍度の方は、自然状態におかれたもの比べると、やや遅いがやはり向上してゆき、2 か月くら



(実線は自然気温、破線は 20°C 室温においた場合)

図-3 秋から冬にかけてのイラムシの耐凍性とグリセリン含量との関係

いのうちに -15°C くらいの温度での凍結に耐えられるようになる (図-3)。

また、春に体内のグリセリンがグリコーゲンに変わってゆくとき、虫を 10°C の温度に保っておくと、グリセリンが全く消失した後も、前蛹から蛹への変態がなかなか進まず、その耐凍性もまた失われず、 -10°C 程度での凍結に耐えることができる。また、これらの全期間を通じて、虫体内の全糖量はきわめて微量で、しかもいつも一定であるので、これが上述のような耐凍度の変化に効いているとは思われない。

以上のような事実からみて、イラムシのような越冬期の生物が耐凍性を現わすためには、グリセリンのような物質の存在が必須なのではなく、このようないわゆる防御物質の蓄積以前に、なんらかの変化がイラムシの体をつくっている細胞におこるものと思われる。このような変化がおこった後は、グリセリンや糖類のような高濃度になっても生物に害の少ない小分子物質が相当量存在すれば、その溶液の束一的性質に従って、与えられた凍結温度において体内にできる氷の量を減らすから、当然凍害を軽減することができる。実際に夏の活動期のイラムシにグリセリンを注射しても耐凍性を現わさないが、 20°C

で休眠中のグリセリンをもたぬイラムシにグリセリンを注射してやると、自然状態で越冬中のイラムシと同程度に耐凍性を高めることができた。

生物細胞の凍りかた

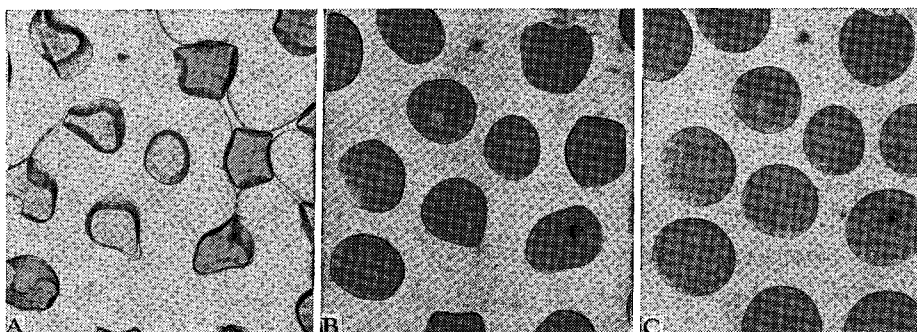
よく知られているように、動植物の体は細胞と呼ばれる小さい袋状のものが集まってできている。したがって生物体の凍結を語る前に、まずひとつひとつの細胞の凍りかたを説明しよう。

生物細胞を顕微鏡で観察しながらゆっくり冷してゆくと、まず細胞のまわりにある液が凍り、できた氷は次第に細胞をとりまく。このままゆっくり冷却を続けると、次のような理由で細胞は氷によって脱水され、しなびてゆく (写真-1)。

細胞の表面を覆っている原形質の膜は水はとおすが氷はとおしにくい。このため、冷却が進めば細胞内の水溶液は過冷却状態となる。ところが、過冷却水の化学ポテンシャルは同じ温度における氷の表面の水分子のそれよりも高い (これは 図-4 に示した氷と過冷却水との間の蒸気圧の差によっても示される)。したがって、細胞の内部の水は表面の膜をとって氷の表面に達しここで凍る。このような細胞の凍りかたを細胞外凍結という。こうして、細胞外凍結のまま冷却を続けると、細胞内部の脱水濃縮も進み、遂には細胞の中には凍りうる水がほとんどなくなるほど乾いてしまう。

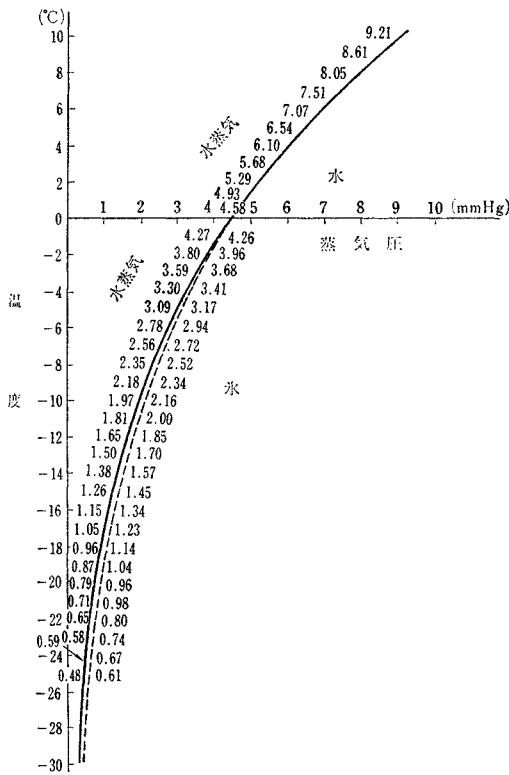
野外にある植物や無脊椎動物の細胞は、夏にはほとんどみな凍結に耐えないが、冬には耐凍性をもつものが少なくない。その場合の細胞の凍りかたはすべて細胞外凍結であって、それぞれの細胞の性質に応じて、いろいろな程度の凍結と脱水に耐えることができる。

一方、細胞が急に冷された場合、例えば 1 分間に $10\sim 100^{\circ}\text{C}$ くらいの早さで冷されると細胞内凍結がおこり易い。細胞は氷に覆われた直後に暗化し、しかも全く収縮



A. 媒液 (海水) の凍結後 1 時間、 -8°C
 B. 同上融解直後
 C. 同上 5 分後 0°C 。どの細胞も生きていて発生できる

写真-1 ウニ卵細胞の細胞外凍結 ($\times 75$)



(Shumskii, 1964)

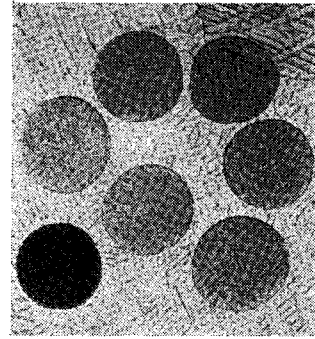
図-4 水および氷（実線）と過冷却水（破線）との飽和蒸気圧

しない。これは、急に冷却されたため、外側の氷による細胞からの脱水が進まぬうちに細胞自身の過冷却が進み、このため当初は凍結の進行を防いでいた細胞表面にあるゲル状の層が、氷によって植氷されやすくなったからだと考えられる。

十分な過冷却状態で細胞内凍結がおこると、細胞の内部には無数の微小な氷晶が瞬間的に充満し光の透過を防いでしまうので全く暗黒にみえる。このような様式の細胞内凍結をフラッシングと呼び、その外観から先に述べた細胞外凍結とは、はっきり区別できる（写真-2）。

細胞内凍結をおこした細胞は、よほど低い温度に保たぬ限り凍ったままでおいても、その中の氷晶が互いに融合しあい大形に生長してゆくので次第に内部が明るくなっていく（写真-3）。こうしてついには比較的少数の球形に近い大型の氷粒が細胞内にあらわれ、その結果として細胞の内容物はスポンジ状となる（写真-4）。細胞内凍結は、次に述べるような特別な場合を除いて、すべての生物細胞に致命的である。

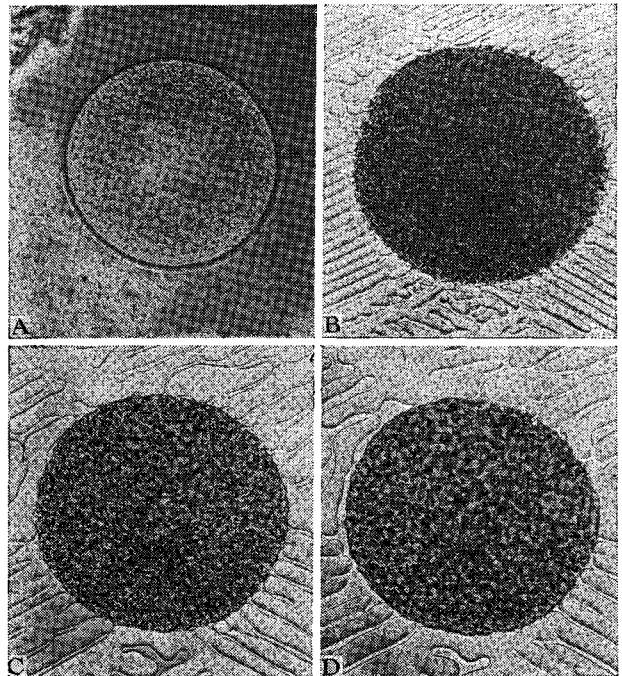
昔から、ごく小さい生物を極度に急速に冷却凍結した後、これをまた非常に急速に融解させると



（暗色の1卵は細胞内凍結、半透明の6卵はやや扁平になって細胞外凍結をしている。-5.4°C(×73)）

写真-2 ウニ卵細胞の凍結

生きてあるものがあることが知られていた。このように超急速凍結させた生物細胞を、凍結食刻法、凍結置換法などを利用して観察すると、電子顕微鏡レベルでも正常の細胞とほとんど変わらないことがわかっている。これらの事実を説明するために、超急速冷却された細胞ではその中に含まれている水がガラス化（Vitrify）されているであろうという仮説が提出されていた。しかし、最近の研究によれば超急速凍結された細胞の中にも実際に氷晶ができるが、その氷晶は光学顕微鏡では観察されぬほど微小であることがわかった。以下、このような超急速凍結の一例として、われわれが行ったネズミの腹水がん細胞を材料とした実験について述べよう。

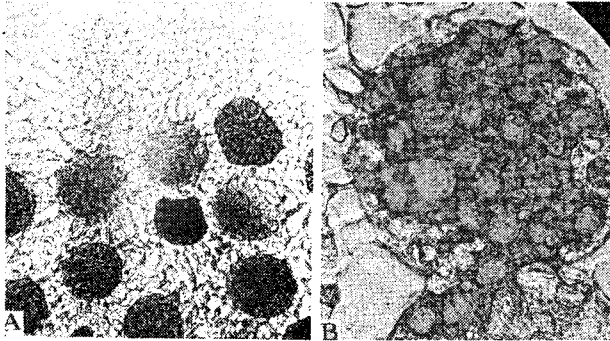


A. 凍結前(×250) B. 凍結直後 -10°C(×270) C. 凍結1分後 -10°C(×270) D. 凍結2分後 -10°C(×270)

写真-3 ウニ卵細胞の細胞内凍結

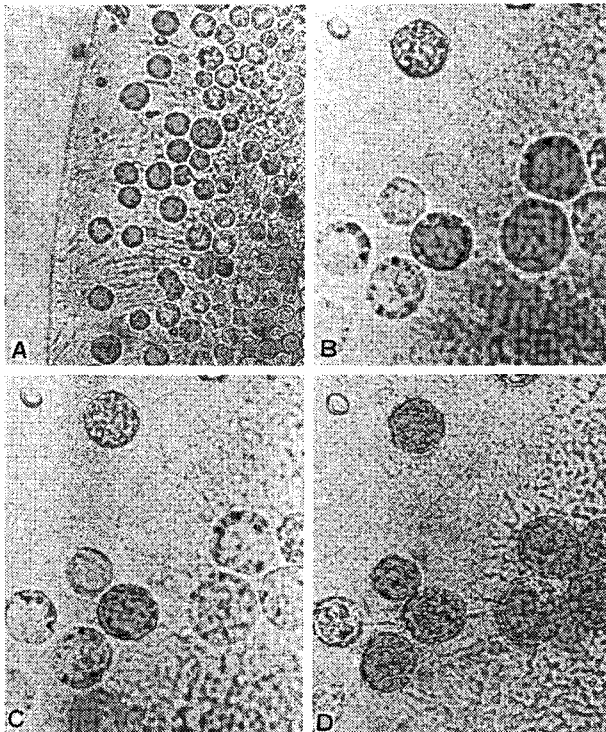
ネズミの腹水に浮遊しているがん細胞（直径 10μ くらい）をカバーガラスの上にごく少量とって厚さ 10μ 以下の薄層とし、1分間 1000°C 以上の冷却速度で凍らせる。このように急速冷却された細胞を光学顕微鏡で見ると、細胞のまわりの液は凍って見えるが、その中にある細胞のほとんどは、凍る前と同じように半透明に見える（写真—5）。このとき、細胞内が過冷却状態でない、つまり細胞外凍結でないことは、細胞が脱水収縮を全くお

こさないことからわかる。このように凍った細胞は、 -30°C 付近の温度ではかなり安定していて、1時間以上たっても外観が変わらない。凍結細胞の温度をゆっくり上げていくと、細胞のなかで暗化するものが、ひとつひとつできてくる。これは非常に多数の微氷晶が細胞内にあらわれたことを示している。 -20°C 以上に温めると、二、三分のうちに、はっきりした氷の粒がすべての凍結細胞の内部にあらわれてくる（写真—5）。こうな



A. -14°C で凍結した細胞を同じ温度で 10 分間おいたもの ($\times 60$)
 B. 同上の一部拡大 ($\times 300$)
 A. 氷粒の大型化に伴い細胞質はこわされてアメモ状に凝固する

写真—4 ウニ卵細胞の細胞内凍結中の変化



A. 液体窒素中で超急速凍結し -30°C に移したところ ($\times 360$)
 B. 同じ試料をゆっくり温め 24 分後 -25.5°C ($\times 680$)
 C. 同上 28 分後 -24.5°C ($\times 680$)
 D. 同上 40 分後 -20°C ($\times 680$)
 すべての凍結細胞内に氷粒があらわれている

写真—5 ネズミがん細胞の超急速凍結

た細胞をさらに温めると、細胞内の氷晶の融合が進み、先に述べた細胞内凍結の融解の場合と全く同様な過程をへて細胞は例外なく崩壊する。

超急速凍結した細胞がまだ半透明なままで少しも変化の認められないうちに、ごく急速に（例えば、約 40°C に温めた生理的食塩水に凍結した少量の細胞を投入すると、 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ くらいの早さで加温できる）融かすと細胞は生きていてネズミの体内にもどすと、がん細胞として増殖できる。

上記の事実は次のように説明できる。超急速凍結によって細胞内には非常に微小な多数の氷晶ができる。しかし、この氷晶の大きさは可視光線の波長（約 $4000\sim 7000\text{Å}$ ）に比べるとはるかに小さいため、透過光線を散乱させないので、細胞は凍結以前と同様に半透明に見える。このような凍結細胞を温めれば、温度の上がるにつれて微氷晶は互いに融合して大型に生長するので可視光線の透過をさまざまに妨げ、したがって、細胞は暗くなって見え、さらに氷粒が大型になると氷粒の形として顕微鏡下に認められるようになる。

生物体の耐凍性

一個体としての動植物をまるごと凍らせる場合は、大きな含水量をもった生物体が凍結するとき放出する潜熱のために、冷却速度を十分大きくすることはほとんど不可能に近いので、全体としてゆっくり冷えるために、その体をつくっている細胞のほとんどすべてが細胞外凍結をおこす。野外で越冬している生物は、植物はもちろん動物でも無脊椎動物で耐凍性のあるものは、そのほとんどがこの状態で、つまり体の組織のすき間に氷ができ、体の細胞は脱水されて、しなびたまま相当の低温に耐えているのである。

高等温血動物の体をつくっている細胞は、本来適度の体温でのみ機能するようにできているものが多いので、耐凍性が無いか、または、あってもごく低いものが少なくない。しかも一個体の動物

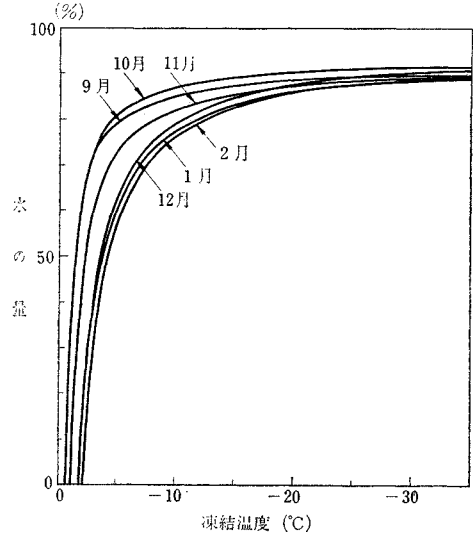
では、一部の細胞や組織が凍死してもその機能を十分に代用するものがないため、ある器官が全体として能力を失い、その結果としてその動物全体の死をもたらし場合がきわめて多い。このような理由で、人間を含む高等な脊椎動物では、その体の一部の細胞は耐凍性があっても全体としては凍結に耐えない。

ネズミ類を使った実験報告によれば、動物体の水分の30~40%が凍ったとき、特別な方法で急速に融かすと生存するものがあるが、50%以上の水分が氷に変わった後では、直腸温度は -5°C 程度であっても、わずか1時間以内に実験動物はすべて凍死した。もちろん、高等動物でも、その細胞や組織の中には耐凍性の高いものがあり、血球や皮膚などはグリセリンやDMSOなどの防御物質を利用して凍結保存され実用に供されている。また、胎児ほどに発育したものは現在のところ無理だが、ネズミの卵細胞が分裂を繰り返して生長しつつある時期には、これを凍結生存させることが最近可能となった。

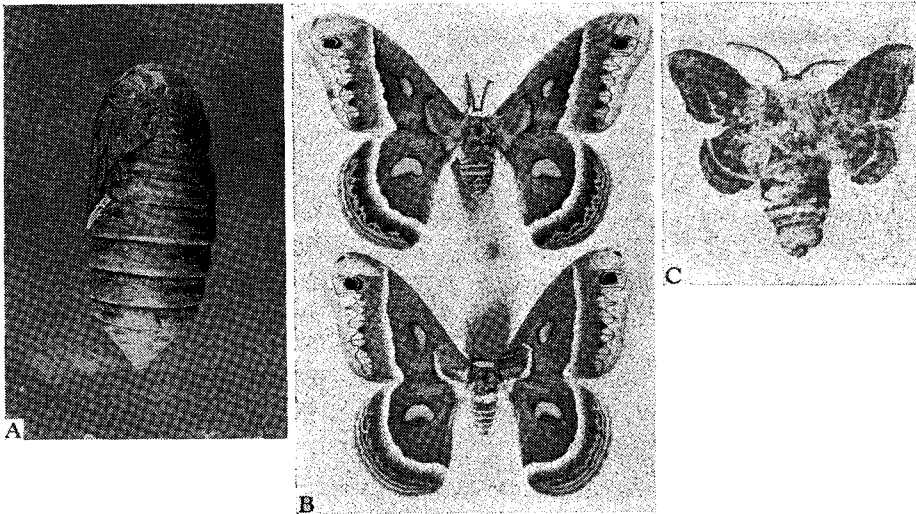
一方、植物となると、その体をつくっている組織の違いにより程度の差があるとはいえ、そのうちの一番弱い組織でも越冬期には相当の低温に耐えられるので、動物に比べると凍結生存できる種類がきわめて多い。

動植物を問わず、 -30°C 付近の温度で1日程度の凍結に耐えられる生物では、人工的な超低温、例えば液体窒素温度(約 -196°C)まで冷却しても凍死しないものが多い。これには、まずその生物を -30°C (生物によってはこれよりやや高い温度でもよい)でしばらく凍らせて、十分細胞外凍結による脱水が進行した状態にさせてから、液体窒素中に移すのである。図-5に示すよう

に、例えば前述のイラムシを凍らせると、その体内の氷の量は温度が下がるにつれて増加するが -20°C くらいまでに凍るべき水はほとんど氷にかわり、 -30°C より低温では、氷はほとんど増えなくなる。したがって、超低温まで冷却しても、イラムシにとって新しい害の要素は、ほとんど増加しないと考えられる。このような方法(予備凍結法)を利用して、多くの動植物を超低温で凍結生存させることが可能であり、ヤナギの枝では液体ヘリウム中(-272°C)で冷却した場合でも、温めてから正常に生育できた。動物でもイラムシをはじめ数多くの昆



(秋から冬にかけての材料別の資料)
 図-5 凍結したイラムシ体内における氷の量と温度との関係



A. 蛹、休眠中に体内にグリセリンを多量に蓄積し、非常に耐凍性が高まる
 B. 凍結融解させた蛹から生れた正常な蚕蛾。(上： -70°C 凍結，下： -30°C 凍結)
 C. $-30^{\circ}\text{C} \rightarrow -70^{\circ}\text{C} \rightarrow$ 液体窒素(-196°C)の三段冷却を行った凍結蛹から生れた蚕蛾。脱皮できなかったので翅のびていない

写真-6 セクロピア蚕

虫でこの方法が成功しているが、いままで超低温生存が実証された最大の動物は、体重7gに及ぶ米国産ヤマモユのセクロピア蚕の越冬蛹である(写真-6)。

最後に蛇足ながら、生命の凍結の好例と称してしばしば見せられる実験について一言しておきたい。金魚やドジョウを液体空気などの中に投入して、真白に凍結したところで再び水中に戻すと生きかえって泳ぎだす。これを説明して、通常の低温なら金魚は凍死するが、超低温で凍らせれば生命は保たれるというのである。これは全く観客の目をごまかす手品である。すなわち、金魚の表面は多量の水を含む粘膜で覆われており、いかに急に冷却されても、この水が凍るときに莫大な量の潜熱がでる

ので、金魚の体温は水の氷点である0°Cにしばらく保たれる。一方、液体空気がいままで室温に温められていた魚体に接するとはげしく沸騰し、魚体はこの空気の泡で覆われ、超低温の液体空気と金魚との間には非常に効果のある断熱層ができたことになる。したがって、魚体の冷える速さは非常に小さくなり、その表面は固い氷に覆われても体内への凍結は、しばらくの間進行しない。この期間に金魚を室温の水中に戻せば、魚体を包んでいた氷のテンブラの皮は解け、金魚は泳ぎ出すのである。いま、もし液体空気中から金魚を取り出す時間をさらに10秒ものばせば、凍結は体の組織内まで進行し、金魚は必ず致命的な凍害を受けてしまう。

(昭和48年10月1日、札幌市・自治会館において講演)

土木計画学研究委員会編・第6回土木計画学講習会テキスト ●1700円 会員特価1500円(〒140)

施工の計画・管理に対する科学的接近 B5・170 上製

●施工の計画・管理における情報処理の問題/情報工学、情報処理機器、情報処理用語、情報処理方法(東洋大学 中村慶一) ●施工の計画・管理における品質の問題/品質管理とは、品質の測定値、管理手法、管理の補助手段、品質管理の実態、検査(建設省 成田久夫) ●施工の計画・管理における安全の問題/労働災害防止の基本的事項、計画における安全の問題、管理における安全の問題、安全管理の総合的な実施(労働省 加来利一) ●施工の計画・管理における工程の問題/工程管理のあり方、工程管理のシステムの問題、手法、問題の整理(東海大学 宮内敬保・首都公団 宇津橋昭八郎) ●施工の計画・管理における原価の問題/土木工事のシステムと工事費、計画的工事費の計算、土木工事における施工計画と積算、土木工事の積算と施工計画例(建設省 本山蒔) ●施工の計画・管理における積算・見積りの問題/予定価格の性格、積算における施工計画の特色、施工計画立案に必要な調査、施工計画、工事発注と施工計画(国鉄 岡田宏・末平治)

土木雑誌 施工技術

1月号 12月20日発売 定価360円(〒40円)

特別構成 これからの 土木技術と私

●新春対談 建設業界の問題点を探る

建設機械化研究所 三谷 健 建設省北陸地方建設局長 増岡康治

●特別記事

メキシコ地震より学ぶ…防災都市計画研究所 村上 處直

□主要記事□

ネガティブフリクション……………清水建設 井上嘉信
軟弱地盤における土留壁の設計・施工……………東京都交通局 三好 勉夫
シミュレーションによる地下水の動きと解析……………鎌田 裂
泥水壁圧気工法による施工例……………帝都高速度交通営団 守屋 一光

システム工学講座⑩

都市社会 システム

東京工業大学 石原舜介編 2500円
都市がかかえる構造的欠陥を明らかにし、それを除去是正していくためにはどうすればよいかを都市自治体の経営という立場から考察し、今後の都市発展を探るための方向づけをしたもの

施工管理技術の 基礎知識

吉野技術士事務所 吉野次郎著 1200円
建設工事の第一線で管理監督に当る技術者を対象に、施工管理技術の基本を解説し、あわせて土木施工管理技術検定試験の出題を含めた演習問題を付して理解を助けている。

日刊工業新聞社出版局 東京都千代田区九段北1-8-10 ☎03(263)2311