



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	イラガ前蛹の過冷却に及ぼす冷却速度の影響
Author(s)	青木, 廉; 篠崎, 壽太郎
Citation	低温科学, 10, 109-116
Issue Date	1953-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17548
Type	departmental bulletin paper
File Information	10_p109-116.pdf



イラガ前蛹の過冷却に及ぼす冷却速度の影響*

青 木 廉・篠崎 壽太郎

(低温科学研究所 生物學部門)

(昭和 27 年 9 月 受理)

I

一般に耐寒性の昆虫は越冬中 -20°C あるいはそれよりもつと低い温度まで過冷却状態を保ち得るものであること、いかえれば相当低い温度まで凍らないでいられるものであることは既に多くの研究者によつて報告されている (Payne, 1926, 1927, 1928⁷⁻⁹); Salt, 1936¹⁰; Ditman, Vogt & Smith, 1942⁶); Siegler, 1946¹²)。札幌附近のイラガの前蛹も越冬中は -20°C 位まで過冷却され得るものである。³⁾ たしかに過冷却状態を保ち得る能力が大きいことは直接寒さにさらされながら厳寒時を越すムシにとつては非常に大きな意味を有するものではあるが、それに安定性がなければ過冷却の能力は實際寒さに耐えることに對して左程重要なものではなくなつてくる。元來過冷却現象は不安定であつて、特に水では** 僅かの變動などによつてさえも破れてしまふ、すなわち凍結が始まるばあいが多い。ただ我々はどういう條件のときによく過冷却するかということについては經驗的にいくつかの要因を知っているにすぎない。それらの要因の一つに冷却速度がある。いつばんに冷却速度が小さいほど低い温度まで過冷却されるといわれている。Bachmetjew (1900)⁵⁾ は數種類の昆虫について調べた結果、過冷却點は冷却速度によつて左右されると報告しているが、實驗例が非常に少なく、冷却速度の範圍も狭い。過冷却の破れる温度とそのときの冷却速度との關係が明らかにならなければ過冷却の限界温度 (過冷却點) の比較も意味がなくなるし、また過冷却の生態的意義もはつきりしなくなる。そこで越冬中のイラガの前蛹について冷却速度と過冷却の關係を調べてみた。

II

材料はイラガ (*Cnidocampa flavescens*) の前蛹で越冬末期 (3~4 月) のものである。温度の測定は主にマユから取出された裸の前蛹の口部陥入部に熱電對を挿入して行つたが、その他体表の一部に接觸させて測つたばあいもある。使用した熱電對及び温度の測定法は前報³⁾ と同様である。

* 北海道大學低温科学研究所業績 第 164 號

この研究の費用の一部は文部省科学研究費による。

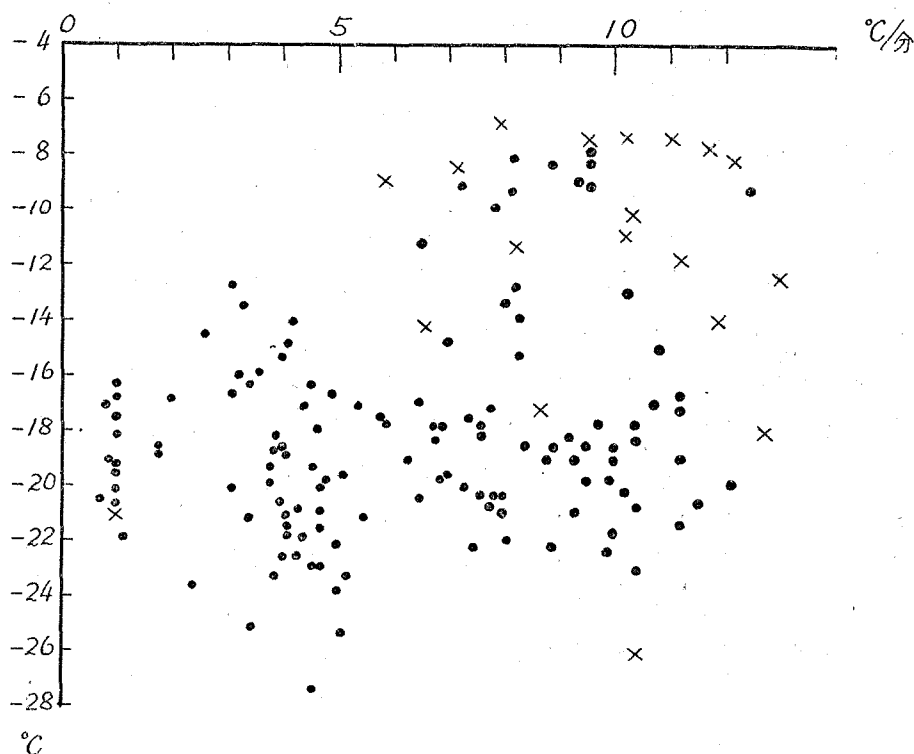
** 毛細管などに入っているばあいは破れにくいことがある。

過冷却点としては個体ごとにとつた凍結曲線上で温度の急に上昇する点をとつた。

冷却は固型炭酸で -50°C 以下に冷したエチルアルコールの槽の中に銅製の圓筒を入れる。この圓筒にはヒーター、温度調節器、攪拌器が備えてあり、やはりアルコール約20 Lを入れ、温度をだいたい $-40^{\circ}\sim -50^{\circ}\text{C}$ に保つた。この中にミシの入つている硝子製の保護管を浸すのであるが、保護管を透明な Dewar 管に入れたり、また幾重にも重ねたより太い硝子管中に挿入し、ばあいによつてはその間に乾いた綿をはさみ断熱の程度を變えて冷却速度を調節した。ミシを直接入れた保護管の内径は約17 mm と 28 mm の2種類である。

III

實驗した冷却速度は 0°C を中心として測つた値で $0.7^{\circ}\text{C}/\text{分}$ から $13.0^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の間である。結果は第1圖にまとめてあるとおり、冷却速度と過冷却点との間には簡単な關係は認められないが、



第1圖 冷却速度と過冷却点

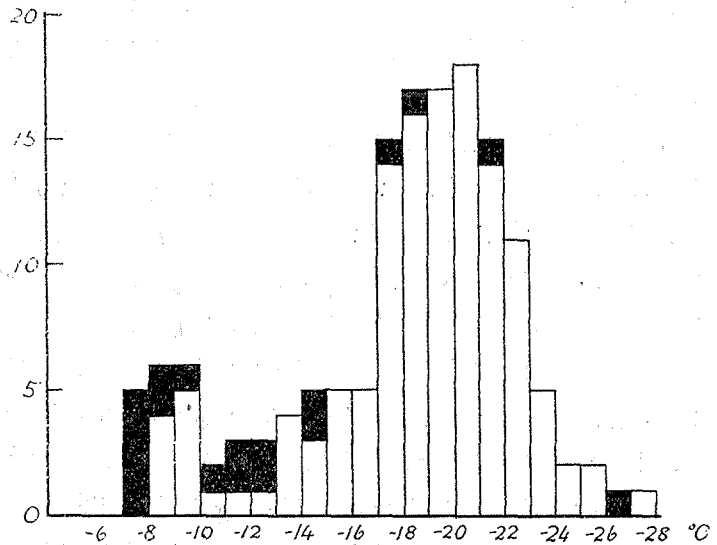
縦軸…過冷却点；横軸…冷却速度 (0°C における)

第1圖をみただけでも次のような傾向のあることだけは明らかである。同じ冷却速度においても過冷却点はかなり振れを示しているけれども、その振れの範囲は冷却速度の大きいばあい著しい。この事實は冷却速度が大きいときには過冷却状態はより不安定である。すなわち凍

結の始まるチャンスが増大することを示しているものである。これに對し冷却速度の小さいときには割合せまい範囲に過冷却點が集まっている。全体としてみると各冷却速度における振れの最高點は冷却速度が大きくなるにつれて高くなっているのに反し、最低點の方にはこのような傾向は認められない。また過冷却點の頻度を調べてみると(第2圖) -18°C から -21°C にかけて山が現われている。第

2圖と第1圖を併せ考えると越冬中の前蛹の過冷却點には漠然とはしているが、ある限界があつて、それ以下の溫度まで過冷却されることは困難なように思われる。冷却速度の小さいばあいの過冷却點はみな頻度圖の山のあたりに落ちている。いかえれば徐々に冷されるばあいにはこの溫度あたりまでは凍結に對してかなり安定である、あるいは例外なく抵抗できるものといえよう。自然界における冷却速度はこの實驗の最小冷却速度 $0.7^{\circ}\text{C}/\text{分}$ よりは遙かに小さいものであるから、冷却速度が小さいときには過冷却狀態が安定であるということは生態的にみて重要な意味がある。

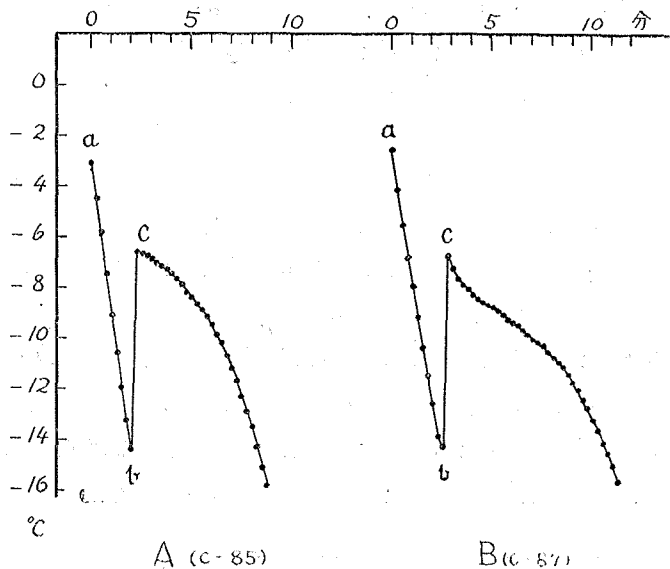
Bachmetjew (1900)⁵⁾ は14種類あまりの昆蟲について冷却速度と過冷却點との關係を調べた。昆蟲体内の液分の過冷却點は冷却速度に支配されるもので、*Saturina spini*, *Deilephila galii*,



第2圖 過冷却點の分布圖

縦軸…個体数；横軸…過冷却點

黒色部は氷點分離の傾向のある個体(第3圖B)を示す。



A (c-85)

B (c-87)

第3圖 凍結曲線

縦軸…溫度；横軸…時間

Vanessa io, *V. polychloros*, *V. atalanta*, *V. levana* の蛹では冷却速度* が $1.2^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 位のときに一番過冷却されるという結果を得ている。しかし彼の實驗した冷却速度の範圍は約 $0.2\sim 3.0^{\circ}\text{C}/\text{分}$ というせまいもので、かつ實驗は夏の時期(すなわち耐凍性でない時期)に行われているので、イラムシの結果と直接比較することはできないが、冷却速度によつて過冷却點に最高點、あるいは最低點があるということは各種類についての實驗例が非常に少ないために偶然に現われたものと思われる。少なくとも越冬中のイラムシ前蛹においては過冷却點が最低になるような冷却速度というものは認められない。

イラムシの凍結曲線はだいたい單一の水點** を有するもので(第3圖A)、植物の組織片におけるように水點の二重性²⁾¹³⁾ がみられないのが普通であるが、時々水點が分離しかけたような曲線(第3圖B)が得られることがある。このような凍結曲線を示す個体はだいたい冷却速度が大きく、かつ高い温度で過冷却の破れたものに多い。これらの個体を第1圖では×印、第2圖では黒く塗つて區別しておいた。凍結曲線上で水點が現われた後の温度の下り方に遅速のあることは氷の生成速度に遅速のあることを示すものである。第3圖のbのところでは過冷却が破れた後、体内で急激に凍結がすすみ多量の氷が生ずるのでそれに伴つて温度は急にcまで上昇する。圖のAのbあるいはc以後氷の生成速度は連續的に低下しているため滑かな曲線となつて下つていくが、同圖Bではcのすぐ後で温度の下り方は一時急となり、曲線の冷却部(ab間)とやや平行的になつていくことからみてその間では氷の生成速度は一時非常に低下する、つまり凍結はほとんど起つていないと考えられる。その後再び凍結が始まるので曲線の傾斜は再びゆるやかになる。すなわちBのbあるいはcには凍り方がAとちがつている。この原因はムシ自体の中にあるのか、あるいは測定側にあるのか現在のところ明らかではないが、ここにムシの凍結過程を解く一つの手がかりがありそうである。

IV

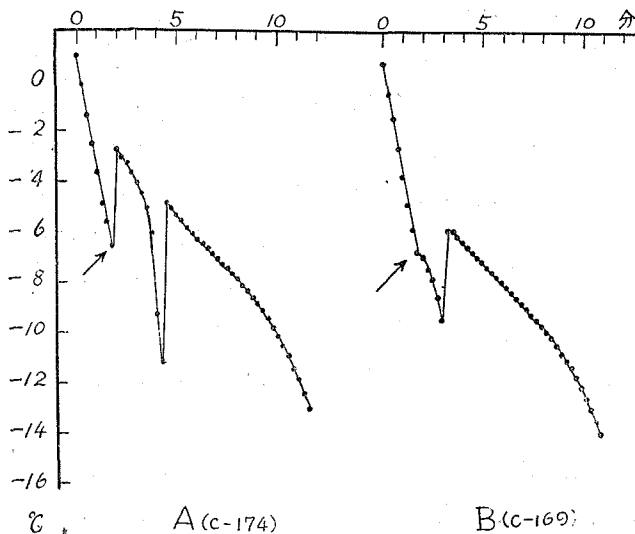
また過冷却する一つの條件として表面が乾燥していることが、いろいろの植物についてかなり前から知られていた。昆蟲についても体表が水で濡れていると、過冷却が早く破れることはSalt (1936)¹⁰⁾ が實驗的に示している。*Plodia interpunctella* の幼蟲の過冷却點はふつう -15°C 以下であるが、濡つた濾紙上においたところ25匹中24匹は -4°C で凍つてしまつたという結果を得ている。また *Lucilia sericata* の幼蟲を繰返し凍結融解すると、そのたびに過冷却點は次第に高くなつていくが、この原因は体表面に凝縮した水滴の凍結によるものであると述べている。このように体の表面に水がついていれば、それは當然ムシより高い温度で凍るためにムシは直

* 冷却速度は -4°C より1分間に下る温度の値である。

** この水點はよく rebound point と呼ばれているもので、みかけの水點にすぎない。みかけの水點は過冷却の破れる温度、及びそのときの冷却速度によつて著しく左右される(青木¹⁾(1950)、照本³⁾(1951))したがつて條件によつては眞の水點と非常に差があるのは當然である。

接氷に接することになり、ひいてはその氷によつてムシの過冷却状態が破れるチャンスが増大する可能性も考えられる。つまり体表を通しての植氷という問題に関連してくるので、この點を確かめるため簡単な實驗をしてみた。

試験管の底に裸の前蛹を入れ、その表面に熱電對を強く接觸させたまま冷し、凍結曲線をとる。冷却速度は $4^{\circ}\text{C}/\text{分} \sim 6.9^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であつた。乾いている試験管にムシのみを入れたばあいの過冷却點は -18°C であつたが、試験管の底に少量の水を一緒に入れたとき(蟲の下面が水に蔽われる程度)は -5.9°C と過冷却點は著しく高くなる。ムシを氷の上にのせて冷したばあいは氷の状態、すなわち氷の表面が融けているときと、氷の温度が低く表面が乾いているときとでは過冷却點は非常にちがってくる。前者ではムシの体表は直接 0°C の水に接していることになり、過冷却點も -7.2°C で水と共に冷したときの値とあまり變らないが、後者では過冷却點は -17.5°C で、体表が乾いているときの値とほぼ等しい。すなわちムシの過冷却は單に氷に接すれば破れるというものではなく、体表面と氷との密着の程度が問題になることがわかる。この関係をもう少し量的に明らかにするために次のような實驗を行つた。裸の前蛹をセルロイドの細片で作つた小さな籠に入れ、熱電對の先端部を口部陷入部に挿入し凍結曲線ととり、それをコントロールとする。^{*} 次いでムシを融かし、体表面が充分乾いて体温が室温まで上昇してから、体表面に小水滴をつけるか、あるいは水で濡らした 4mm^2 の濾紙を貼りつけて再び凍結曲線をとる。冷却速度は平均 $4.6^{\circ}\text{C}/\text{分}$ であつた。結果はコントロールの過冷却點 $-22.6^{\circ}\text{C} \pm 2.7^{\circ}\text{C}$ に對し



第4圖 凍結曲線

A…体表面に水滴をつけた場合、B…体表面に水で濡した濾紙を貼つた場合、矢印は体表面につけられた水の凍結の始まつた點

て体表に水をつけたばあいは $-11.2 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ と明らかに高くなつている。このように体表についている水が凍結するとムシの過冷却は破れ易くなる。

体表に水滴をつけたばあいは、先ず水滴が凍結した後ある程度さらに温度が下つてから始めて蟲体の凍結が始まる(第4圖A)。水で濡らした濾紙片を貼つたものでは水の量が少ないため、その凍結は單なる折曲り點として現われるに過ぎず(第4圖B)、なかに

^{*} 過冷却點は二度目の凍結においても融解乾燥が充分であればほとんど變らない。差があつてもせいぜい 1°C 位である。この事實も過冷却にはだいたい定まつた限界點のあることを示すものであらう。このような蟲は融解後完全に生きていた⁴⁾。

はほとんど判別のつかない例もあつた。いずれにしても体表面についている水の過冷却の破れる温度にはかなりの振れはあるが、平均約 -6.9°C 位であつた。体温は口部陷入部で測定しているため、濾紙片は口部附近につけたのではあるが、氷が生じた直後濾紙片のつけられている部分の体温は -6.9°C よりは高い筈である。しかし濾紙片についている水の量と温度の下り方からみて、その温度もすぐに下り始めていると考えられる。したがつて濾紙片に生じた氷に接している蟲体の部分も確かに過冷却状態になつているのであるから、もし体壁上層部が表面上の氷からの植氷を阻止しなければ、体表面に接している水が凍ると間もなく引續いて体内が凍り始める筈である。しかし事實は体表面についている水が凍つても体はすぐに凍結を始めないでさらに過冷却されていくが、やはり体表面が氷に接していないときに比べればかなり高い温度で過冷却は破れている。このことからみると体壁にはある程度氷の侵入を阻止する能力があるにちがいない。とにかく体表面に氷が密着していると過冷却は破れ易くなることは事實である。一方前蛹の体表面につけられた水滴の接觸角は大きく、体表面には水をよくはじく性質がある。これは表面の epicuticle の性質によるものであろうが、この epicuticle の性質も複雑であり、さらにその下層の exocuticle, endocuticle, 表皮細胞層, basement membrane 等を通して如何に植氷されるのかは残された問題である。しかし現在のところ体表面と氷との接觸の粗密や氷との接觸面積が一つの条件となつていられるらしいことから、体表面どこでも一様に植氷されるものではなく、植氷され得る點が体表面に散在していると考えた方がよさそうである。

一方凍結曲線をみると過冷却が破れてから短時間内(15秒前後)に温度は急上昇し最高點に達している。この事實はどこかで過冷却が破れると、それに引續き短時間内に相當量の氷が生じたことを示すもので、それはおそらく血液の凍結によるものと思われる。³⁾しかし体壁を通して植氷され、いきなり血液が凍り始めるとは簡單には斷言できない。というのは体壁のみを分離し、表面を乾燥させてから熱電對に捲きつけて冷していくと(冷却速度 $6^{\circ}\text{C}/\text{分}$) $-10^{\circ}\sim-12^{\circ}\text{C}$ あたりで凍結が始まる。油滴を含む体壁の外層部だけを剝して測つてみても、やはり -10°C 附近で過冷却は破れてしまう。これらのばあい表面は乾いているとはいえ、多くの傷口があるため過冷却は破れ易い状態になつているので、實際の過冷却點はこの値より低いにちがいない。しかし特に体壁が血液より低い温度まで過冷却されるという證據もないので、まず体壁が凍りついで血液の凍る可能性もあるわけである。

熱電對の一極を口部陷入部に、他極を体表面のいろいろな部分に、あるいは兩極をそれぞれ体表面の離れたところに接觸させて過冷却の破れ方をみると、その結果はまちまちで、ある場所から凍結がいつも始まるというような傾向すら見られなかつた。

いずれにしても体の表面についている水が凍ると、蟲体の過冷却の破れるチャンスが増してくることは確かである。したがつて前蛹が水分を非常に通しにくいマユ¹⁾の中に入っていることは過冷却状態を保持するのにたいへん都合のよい条件といえよう。

摘 要

越冬中のイラガの前蛹について冷却速度と過冷却との関係を調べた。冷却速度 $0.7^{\circ}\text{C}/\text{分}$ から $13.0^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の間では、冷却速度の大きいときにはミシの過冷却状態はより不安定で、高い温度で破れる個体が現われてくる。これに反し冷却速度の小さいとき、 $1^{\circ}\text{C}/\text{分}$ 位のばあいには過冷却の破れる温度はだいたい -20°C 前後の割合せまい範囲に限られている。

越冬中の前蛹には過冷却状態を保ち得る限界の温度域があるらしく、この実験条件の下ではだいたい $-22^{\circ}\sim -24^{\circ}\text{C}$ あたりにあたる。

前蛹の体壁にはある程度氷の侵入を阻止する作用があるが、氷が密に接触しているばあいには過冷却は破れ易くなる。したがって体表が乾いていることは過冷却状態を保つうえに有利な条件である。

文 献

- 1) 青木 廉 1950 馬鈴薯塊茎の再凍結曲線の型について. 低温科学, 3, 207.
- 2) ——— 1948 生物の凍結過程の分析 III. 植物組織の凍結曲線上の二つの氷点. 低温科学, 4, 65.
- 3) 青木 廉・篠崎壽太郎 1953 イラガ前蛹の過冷却について. 低温科学, 10, 103.
- 4) 朝比奈英三・青木 廉 1951 耐凍性昆虫の凍り方. 昆虫, 19, 13.
- 5) Bachmetjew, P. 1900 Die Abhängigkeit des kritischen Punktes bei Insekten von deren Abkühlungsgeschwindigkeit. Ztsch. wiss. Zool., 67, 529.
- 6) Ditman, L. P., G. B. Vogt & D. R. Smith 1942 The relation of unfreezable water to cold-hardiness of insects. J. Econ. Entomol., 35, 265.
- 7) Payne, N. M. 1926 The effect of environmental temperatures upon insect freezing points. Ecol., 7, 99.
- 8) ———. 1927 Freezing and survival of insects at low temperature. J. Morph., 43, 521.
- 9) ———. 1928 Cold hardiness in Japanese beetle, *Popillia japonica*. Biol. Bull., 55, 163.
- 10) Salt, R. W. 1936 Studies on the freezing process in insects. Univ. Minnesota Agr. Exp. Stat. Tech. Bull. No. 116.
- 11) 篠崎壽太郎 1953 イラガのマユについて. 低温科学, 10, 127.
- 12) Siegler, E. H. 1946 Susceptibility of hibernating codling moth larvae to low temperatures, and the bound water content. J. Agr. Res., 72, 329.
- 13) 照本 勳 1951 植物組織の第1氷点と過冷却. 科学, 21, 596.

Résumé

The effect of the rate of cooling, ranging from 0.7°C to 13°C per minute, on the undercooling points of the prepupa of slug moth, *Cnidocampa flavescentis*, was experimentally studied.

It was found that no definite relation exists between the cooling rate and the undercooling points of the prepupa. In general, however, the undercooled state of a prepupa becomes unstable with increasing cooling rate, and freezing occurs frequently at higher undercooling temperatures. At a slow cooling rate, i. e. 1°C per minute, the undercooling points are scattered only in relatively narrow limits around -20°C . But in the whole range of the cooling rate examined, ca.

63% of the undercooling points lie between -17°C and -23°C , below which only a few individuals can keep the undercooled state. From this fact it is suggested that there exists a critical temperature zone and at the temperatures below this zone the prepupa can not withstand freezing.

To some extent, the integument of the prepupa serves to prevent the transmission of freezing from without, but intimate contact of the integument surface with ice apparently raises the undercooling points.
