



Title	馬鈴薯塊莖の凍結曲線
Author(s)	青木, 廉
Citation	低温科學, 2, 185-193
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17415
Type	departmental bulletin paper
File Information	2_p185-193.pdf



馬鈴薯塊莖の凍結曲線* **

青 木 廉***

I

新鮮な馬鈴薯塊莖の小片を冷却しつゝ時間的に其の温度の低下を記録して行くと凍結曲線が得られる。凍結現象の研究には此の凍結曲線の分析が重要なものである事は論を俟たない。多くの場合馬鈴薯の凍結曲線には二つの氷點が現はれて来る。第一氷點は大體 -1°C 内外の處で明瞭な過冷却が起つた後の山か又は急激な折曲り點として識別出来る。然し第一氷點の持續時間は短かく直ちに温度は再び降下し始めるが -2°C 近くになると温度の降下は緩徐となり比較的長い時間温度は變らなくなる。曲線は略横軸に平行した水平線となる。此が第二氷點である。斯様に新鮮な馬鈴薯の凍結曲線には二つの氷點の存する事及び此等の氷點を左右する條件等に就いては既に或程度 Maximow (1914), Walter & Weismann (1935) 及び Luyet & Gehenio (1937) 等により報告されてゐる。Maximow 等は第一氷點は溫度計 (熱電對を使用) を挿入した際、組織より滲出した液の凍結點であり、第二氷點は組織自身の凍結點であると説明してゐるし、又 Luyet によれば第一氷點は細胞間隙中の溶媒水の凍結であり第二氷點は細胞内の水の凍結—それは滲透で細胞から奪はれて細胞外で凍結するか或は細胞内で直接凍結する—の現はれてゐるといふ。然し斯様に斷定を下すには現在未解決の問題が尙多く残されてゐる。

一旦凍結し融解したものを再び凍結せしめた場合の凍結曲線 (以後便宜上再凍結曲線と呼ぶ) は未凍結組織の凍結曲線 (再凍結曲線に對して初凍結曲線と呼ぶ) とはかなり趣を異にして、氷點は通常一つしか現はれて來ない事は既に觀察されてゐるが初凍結の程度と再凍結曲線との關係に就いては殆ど注意が拂はれてゐない様である。此の點に關して行つた簡単な豫備的實驗の結果を報告したい。

II

材料は農林省島松馬鈴薯試験地で收穫された馬鈴薯 (品種名石狩白丸) である。實驗の大部分は昭和 18 年 11 月より昭和 19 年 2 月に互つて行はれたものであるが特殊のものは 3 月より 4 月にかけて實驗した。實驗の方法は大體 Walter & Weismann 等のものと同様で Beckmann

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第 20 號。

** 此の研究は文部省緊急科學研究費による研究の一部である。

*** 低溫科學研究所。

の水銀温度計を用いた。先ブロルク栓抜きで直径約 19 mm、長さ約 37 mm の圓棒を作り其の中を Beckmann 温度計の水銀球に合ふ様に削り抜き、中に温度計を差込む。其の孔の下端の部分には抜いた薯の棒を差込んで塞ぐ。これを直径約 15 mm、長さ 150 mm のガラス製保護試験管に挿入し、全體を寒剤中に浸し 15 秒置きに温度を記録した。寒剤は鹽と細粉状の氷又は雪を混合したもので Dewar 瓶に入れる。寒剤の温度は約 -20°C である。此の温度は實驗には少々低過ぎるのであるが、何時も同じ温度が簡単に得られ且割合に長時間同一温度を保つ事が出来るので便宜上選んだままである。冷却温度が異なる即ち冷却速度が異なると氷點が變つて來るのでそれを避ける爲である。此の水銀温度計を用ふる方法には組織と水銀球の接着部等にかかりの缺點はあるが用方が簡便であるのと、同一温度計を用ふる限り相對的比較が可能なので此の方法を用いたのである。

凍つた組織を急激に融解する場合は保護試験管を附けたまま 50°C の恆温水槽に入れ Beckmann の讀みが $+0.4^{\circ}\text{C}$ 位になつた時に取出す。約 3~4 分位かゝる。取出した後も餘熱で温度は幾分更に上昇する。比較的緩徐の融解は同様に室溫 (約 $+15^{\circ}\sim+16^{\circ}\text{C}$) の水中で行ひ、極めて緩徐に融かす場合は $+6^{\circ}\sim+1^{\circ}\text{C}$ の水を用ふ。後の場合には $+0.4^{\circ}\text{C}$ になる迄には約 40~130 分を要する。斯く全組織が融解した後は、又保護試験管共に寒剤中に入れ前同様温度の低下を記録する。

III

初凍結曲線の典型的のものは圖 1 に示してある。圖 1 の場合は 0.2 度位の過冷却の後第一氷點が現はれる。然し直ちに温度は降下し始め、やがて暫らくの間温度は略恆常となる。此が第二氷點

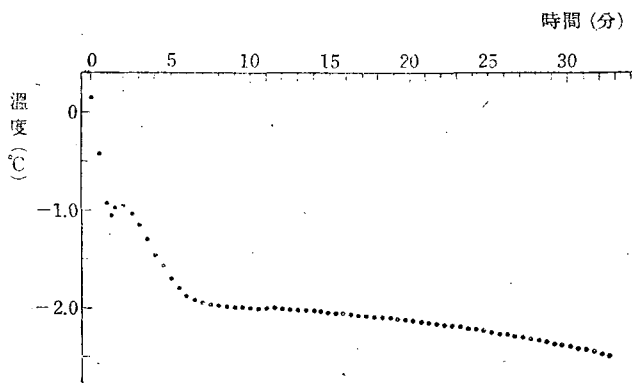


圖 1 初凍結曲線。第一氷點に過冷却の先行する例
寒剤温度 -19.4°C

である。其の後は極めて徐々に温度は低下するが或時間経つと其の降下はやゝ急激となつて遂に寒剤の温度迄下る。第二氷點の水平部の持續期間は極めて短時間で後は緩かな傾斜を有する直線になる場合が割合に多い。然し氷點は常に此の様な型をとつて現はれるとは限らない。例へば圖 2 の如く第一氷點は過冷却が全く現はれず極めて短かい水平部として現はれたり(イ)、又は單なる折曲り點として識別し

却が全く現はれず極めて短かい水平部として現はれたり(イ)、又は單なる折曲り點として識別し

得るに過ぎない場合 (□) もある。又時には全く現れて来ない例も二例だけあつた。第二氷點も

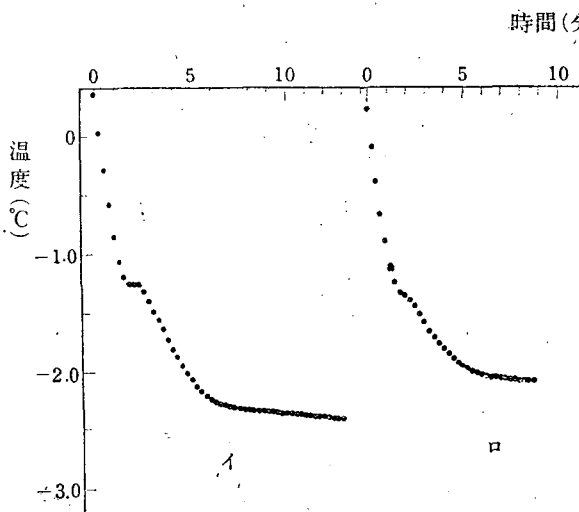


圖 2 初凍結曲線、寒劑溫度 (イ) -21.0°C , (ロ) -20.0°C
 (イ) 第一氷點が水平部として現はれる場合
 (ロ) 第一氷點が單なる折曲り點として現はれる場合

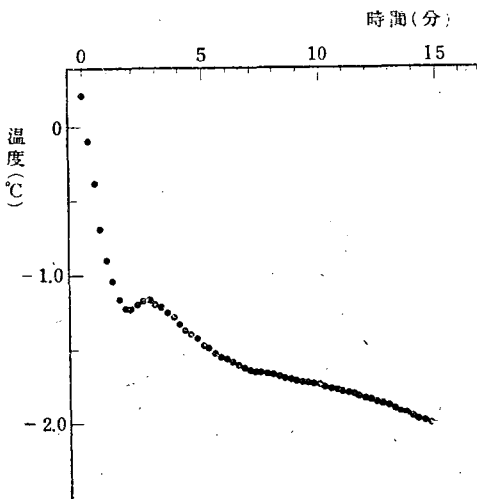


圖 3 初凍結曲線、第二氷點不明瞭の例
 寒劑溫度 -20.8°C

時間(分) 明瞭に識別し得ない場合、即ち水平部若しくは折曲り點が判然としないで徐々に低下して行く例が一つだけあつた(圖 3)。

17 例について氷點の現はれ方をまとめて見ると表 1 の様になる。一見して判る様に大部分のものに於いては凍結曲線に二つの氷點が存在する。第一氷點の“略識別出来るが過冷却の先行しないもの”の多い事及び第二氷點が“完全な水平部として現はれないもの”の多い事は、一つには寒劑の溫度が氷點に對して低過ぎる事即ち氷析出に依る發熱量に對して外部寒劑に奪はれる熱量が比較的多い事に起因してゐるものであらう。

第一氷點は過冷却又は水平部の現はれる場合は明らかに識別出来るが單なる折曲りの場合は時により不明瞭となる。大體 -0.8°C から -1.4°C 位の間である。第二氷點に就いても同様に水平部の現はれない例では明瞭に氷點を決定するのは困難である。その様な場合には屈曲部を境として其前後の直線部を延長し其の交點より求めた。氷點は全部 -1.7°C から -2.4°C の間に入る。大部分の場合第一氷點は第二氷點よ

りである。第一氷點は過冷却又は水平部の現はれる場合は明らかに識別出来るが單なる折曲りの場合は時により不明瞭となる。大體 -0.8°C から -1.4°C 位の間である。第二氷點に就いても同様に水平部の現はれない例では明瞭に氷點を決定するのは困難である。その様な場合には屈曲部を境として其前後の直線部を延長し其の交點より求めた。氷點は全部 -1.7°C から -2.4°C の間に入る。大部分の場合第一氷點は第二氷點よ

表 1

實驗數	第一氷點				第二氷點		
	過冷却不明瞭のもの	水平部のみのもの	單なる折曲りのもの	現はれざるもの	水平部明瞭のもの	水平部はないが折曲り明瞭のもの	不明のもの
17	5	5	6	1	9	7	1

り約 1°C 高い。

此の第一氷點は Maximow (1914), Luyet & Gehenio (1937) 等の指摘してゐる様に薯の含水量により非常に影響を受ける結果、凍結曲線の型は組織の脱水、吸水といふ事に支配される(圖4及び5)。圖4は薯の圓筒狀小片を蒸溜水(pHの補正を行はず)中に3時間浸漬した後得られた凍結曲線で、イ、ロ共に同一薯より採つた小片に就いて行はれたものである。イの方は蒸溜水より取出したまゝで表面に附いてゐる水分を拭はずそのまま温度計を挿入した場合で、第一氷點に先行する過冷却の度はロに比べて著しく大きく 1.7 度位になつてゐる。第二氷點は不明瞭である。ロは表面に附着してゐる水分を出来るだけ濾紙で吸取つた薯の小片に就いて得られた凍結曲線であり、第一氷點の前に 1°C 近く過冷されてゐる。第一氷點はイ、ロ共に大體等しく約

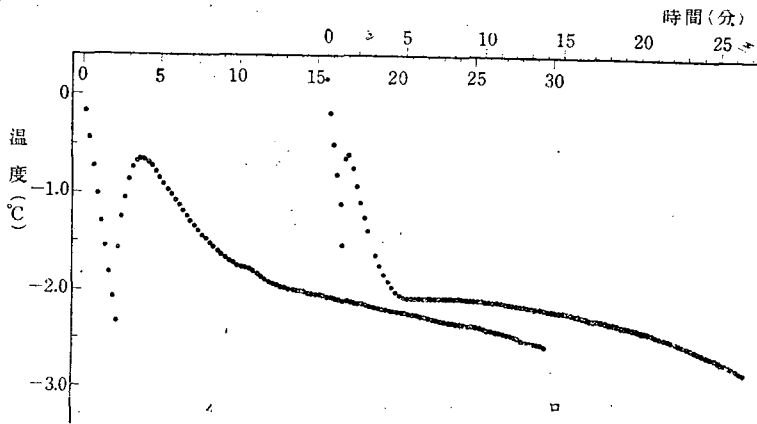


圖4 蒸溜水中に豫め3時間浸漬した小片の初凍結曲線。寒劑温度 -20.0°C

- (イ) 表面に附着してゐる水を拭はない場合
- (ロ) 表面の水を濾紙で充分拭ひ去つた場合

-0.6°C であるが第二氷點はイの -1.9°C に對してロでは -2.1°C となつてゐる。又新鮮な圓筒切片を蒸溜水で軽く洗ひそのまま冷却した場合は程度は低いが略イと同じ型の凍結曲線が得られるが新しい圓筒切片の表面に滲出した液を充分拭つてから冷却すると一般に第一氷點は不明瞭になる傾向が強く、時によつては殆ど認められぬ事もある。

次に同一薯より採つた二つの圓筒切片を室温($17\sim 19^{\circ}\text{C}$)で18時間乾燥した後、冷却した處圖5の様な結果になつた。イは乾燥のまま冷却したものでロは一旦水道水中に5分間浸した後濡れたまま冷却した場合である。兩者を比較するとイでは第一氷點は完全に認められず約 2.8 度の過冷却の後急に第二氷點が現はれて來るのに對し、ロでは折曲り點として明らかに第一氷點が認められそれに續いて明らかな水平部を持つた第二氷點が來る。第二氷點は前者では -1.8°C 、後者では -1.7°C となつて居り、前者のやゝ低いのは大なる過冷却の爲めであらう。

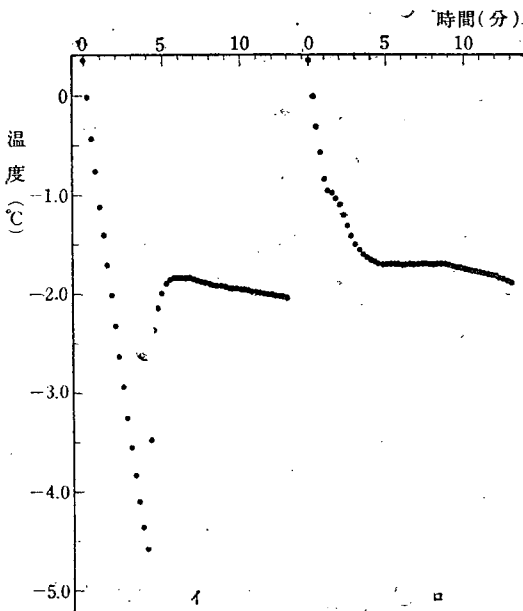


圖5 室温で13時間乾燥した小片の初凍結曲線。寒剤温度 -21.0°C
 (イ) 乾燥のまま凍結させた場合
 (ロ) 凍結せしめる前に水道水中で5分間処理し拭ぬ場合

以上の結果から明らかな様に第一氷点及びそれに先行する過冷却の度は非常に不安定なものであり、此を支配するものは一つには組織の含水量である。此の他組織表面と水銀球の間に存する水分がかなり大きな影響を及ぼすものである事は圖5及び6のイロを比較すれば明瞭である。水銀球表面に水分が多量に接してゐる程第一氷点は明瞭となり過冷却の度も著しくなる。

IV

一度凍結した後融解した馬鈴薯を再び凍結せしめる時得られる凍結曲線の様子は初凍結のものとは著しく趣を異にする。例へば初凍結を完全に行つた場合即ち第二氷点の水平部が終り再び温度が降下する迄凍結させたものを室温で融解し(約15分を要

した) そのまゝ再び凍結せしめた例(圖6ロ)では氷点の一つであり然も水平部は割合に長い。尙氷点が現はれて後の温度の降下は初凍結の時よりも急激な爲めに兩凍結曲線は交叉する。その

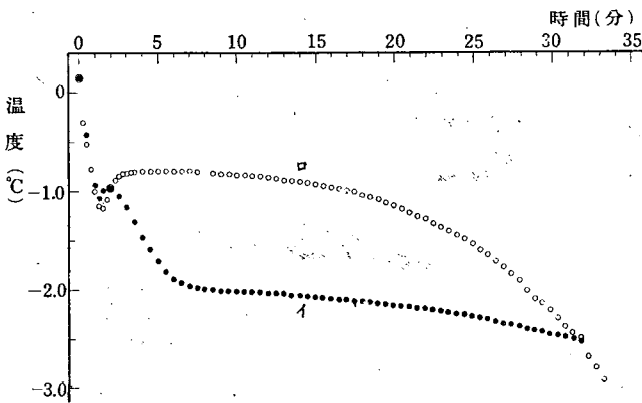


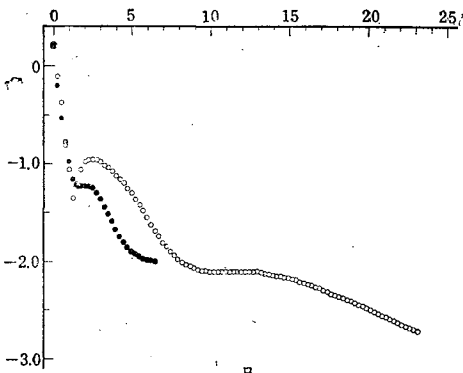
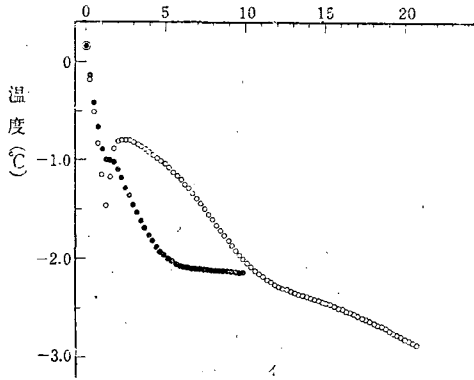
圖6 完全凍結後の再凍結曲線
 寒剤温度(イ) -19.4°C 、(ロ) -20.0°C
 ●●● 初凍結曲線 ○○○ 再凍結曲線

氷点は初凍結の第一氷点より約 0.1°C 高く過冷却の度合も著しい。融解を 50°C の温水中(空氣外套を附けたまゝ)で急激に行つても再凍結曲線の型は同じである。此の様な型の再凍結曲線は此の實驗条件下では約13~15分以上初凍結を持続させた場合には例外なく得られる。再凍結に於ける氷点はいつも初凍結の第一氷点より $0.1\sim 0.2$ 度位

高く、それに先行する過冷却は一般に著しく、初凍結で全く認められないものでも再凍結の時に

は明らかに現はれる様になる。

處が初凍結に於て第二氷點が現はれ温度が降下し始める前に凍結を中止して一此の實驗条件下では約9分以内である一融解した後の再凍結曲線の型は圖6のイとロの中間型を呈する。其の著



しい差は氷點が二つ識別出来る様になる事である(圖7参照)。圖7の例で初凍結時間の一番長いイでは第二氷點は最も不明瞭であるが、それより初凍結時間の短かいロに於ては第二氷點は明瞭になり且其の位置も初凍結曲線の方に接近してゐる。ハは第二氷點に未だ到らぬ前に初凍結を中斷した場合であるが曲線の型は初凍結

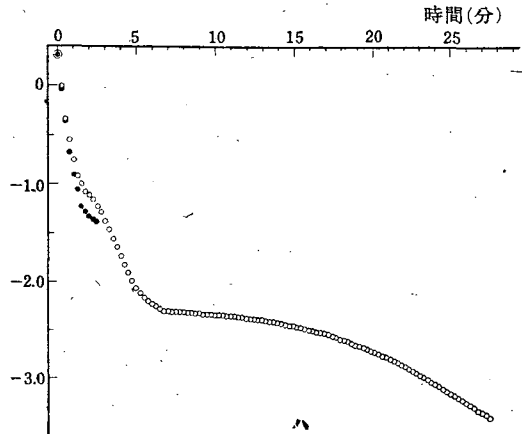


圖7 不完全凍結後の再凍結曲線。寒剤温度(イ) -20.8°C (ロ)(ハ) -20.0°C
 (イ) 初凍結 8分45秒 第二凍結が完了する前に凍結を中止した場合
 (ロ) 初凍結 5分15秒 第二凍結が始まつた處で凍結を中止した場合
 (ハ) 初凍結 1分15秒 第一凍結で凍結を中止した場合
 ... 初凍結曲線 ooo 再凍結曲線

曲線と殆ど變らない。第一氷點は勿論高いが、初凍結曲線よりの位置のずれも第一氷點の出現の位置から推測して非常に少ないものらしい。此等の結果から見ると初凍結時間が短かい程即ち初凍結が不完全な場合程、再凍結曲線の型及び位置は初凍結曲線に近づいてくる。

又初凍結が大體充分であつても融解を極めて徐やかに行ふと再凍結曲線に不完全乍ら第二氷點に相當すると思はれる屈曲部が見られる。圖8に示す一例はそれで初凍結時間は約14分で急激に融解すれば再凍結曲線は當然圖6のイの様な型を呈する筈であるが融解を 1.8°C で110分もかゝり徐々に行つたため不明瞭乍ら第二氷點らしい屈曲部が認められる。斯様に再凍結曲線の型

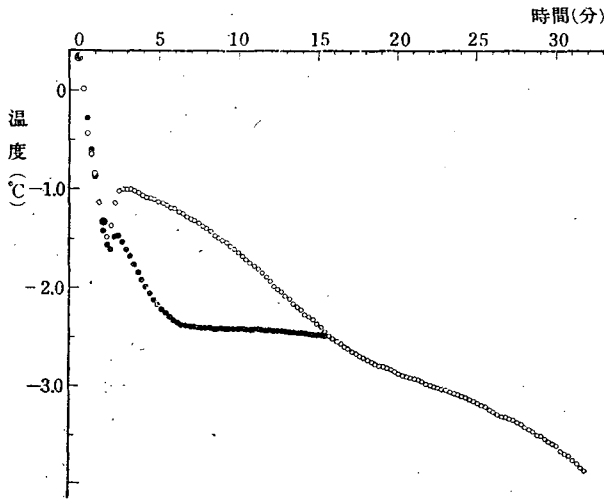


圖 8 初凍結の融解を極めて徐々に行つた場合の再凍結曲線. 寒剤温度 -20.0°C . 初凍結時間約 14 分. 融解 18.8°C に於いて約 110 分間.

●●● 初凍結曲線 ○○○ 再凍結曲線

は融解速度により或程度左右される可能性は充分あるので、再凍結曲線を比較して論ずる場合には初凍結の融解速度を一定にしなければならぬ。

V

初凍結で明瞭に氷點が二つ現れるのは前述の様に新鮮なもの若しくは障害を與へる様な處理を受けないものに就いてである。此の場合第一氷點はいつも一過的に現はれるのに反して第二氷點は遂に長時間持續するといふ事は第一凍結では極めて一部の水が凍結する

に過ぎず第二の凍結で始めて組織全體に涉つて凍結が起る事を示すに他ならない。初凍結に於いて第二氷點の現はれる以前に又は第二氷點の現はれ始めて凍結を中止した場合には、再凍結曲線に比較して著しい變化は見られないが、第二氷點が現はれてからは初凍結の影響が次第に現はれ始め第二凍結が更に進行するにつれて再凍結曲線の變型は甚しくなる。此の事實からみて第一番目の凍結は組織には直接の害作用を及ぼさぬか又例へ與へたとしてもそれは極めて軽度のものであり且可逆的である事は疑の餘地はない。第一氷點が決して安定なものではなく容易に現はれたり現はれなかつたりする事實は此の事を裏書きしてゐる。これに反し第二凍結は必ず現はれ、或程度細胞に非可逆的の變化を與へるものと思はれる。細胞自身が完全に凍結してしまふと融解後殆ど大部分の細胞は死ぬものである。再凍結曲線の初凍結曲線よりの變型の度は初凍結に於いて死んでしまつた細胞の數に比例する。即ち死んだ細胞の數が多くなるにつれて再凍結曲線の第二氷點は次第に不明瞭となり、組織全體が完全に凍結してしまふと遂に第二氷點が現はれなくなるのではあるまいか？ すると凍結曲線に於ける第二氷點の現はれ方は或程度馬鈴薯の凍結による障害の程度を示す尺度となり得よう。Maximow (1914) は馬鈴薯で第二凍結が完了し再び温度が低下し始めた時、凍結を中止、融解後原形質分離を起させた處、細胞は全部生きてゐたと報告してゐる。實驗條件がかなり異なるので直接の比較は出來ないが著者の得た實驗例では此の程度に初凍結せしめた場合は殆ど例外なく圖 6 に近い再凍結曲線が得られる。即ち初凍結の場合とま

るで異なつた凍結経過をとる。従つて大部分の細胞に非可逆的の變化が起つたとしか考へられない。

凍結曲線の冷却曲線よりのズレは凍結による潛熱の放出によるものであるから兩曲線により圍まれた面積は生じた氷の相對的値を現はす。圖6と7を比較してみると初凍結の程度が高い程、再凍結に際して其の初期に多量の水が一時に氷として析出し、初凍結が不完全な程再凍結に於いては凍結が徐々に進行するものであると云へる。此の事は圖6及び7について初凍結曲線と再凍結曲線により圍まれてゐる面積を比較しても容易に判る事である。兎に角一度凍結した組織内に於いては水は非常に凍り易い状態になつてゐる。細胞が死ぬと其の表層部の半透過性が失はれるので組織の内部での水の移動は容易になる事は明らかである。此の他植物組織が凍結する時、先づ水分が細胞より奪はれて細胞間隙で凍る事が多くの人々によつて報告されてゐる。従つて例へ融解後尙細胞が死なないとしても細胞外で凍結した水分が再び細胞に吸収される以前に再凍結を行つた場合には脱水と云ふ過程が省かれる事になるので凍結は早く起り得る。此の可能性は馬鈴薯に於いても圖8に示した例の様に初凍結の融解速度によつて再凍結曲線の型が左右される事から考へても充分にある。恐らく此等の原因が複雑に關與してゐるものであらう。いずれにせよ一度凍結し融解された組織内に於ける水の凍り易い状態が具體的に如何なるものであるかに對する充分な説明は馬鈴薯の薯の細胞の生理状態が明らかになり、又凍結以外の方法で殺した組織の凍結曲線及び初凍結の融解速度の再凍結に及ぼす影響等の分析がより精細に行はれる迄は與へられない。

實驗材料の馬鈴薯を快よく分與下さつた農林省島松馬鈴薯試驗地の田口啓作技師の御好意に深謝する。

摘 要

新鮮なる馬鈴薯の薯の凍結曲線には二つの氷點が認められる。第一の氷點は一過性で且つ非常に不安定のものであり、此に反し第二氷點は持續的で安定である。

再凍結曲線は此の初凍結曲線とは趣を異にし、其の型は主として初凍結の程度によつて決定される。初凍結で完全に凍結した場合には氷點は唯一つであり然もそれは長く持續する。初凍結の程度が不完全になるにつれて再凍結曲線にも次第に氷點が二つ認められる様になり、初凍結で第一氷點が現はれて直ぐに凍結を中止した場合は初凍結曲線と殆ど區別がつかない程である。此の再凍結曲線の型は又初凍結の融解速度にも支配される。再凍結の氷點は例外なく初凍結のそれよりも高い。

一度凍結し融解した組織内に於いては水は非常に凍結し易い状態になつてゐる。其の具體的状

態については現在未だ解釋を與へる迄にはなつてゐない。

文 獻

- Luyet, J.B. and P.M. Gehenio 1937. *Biodynamica*, No. 30, p. 1-23.
Maximow, N. A. 1914. *Jahrb. f. wiss. Bot.*, Bd. 53, S. 327-420.
Walter, H. und O. Weismann 1935. *Jahrb. f. wiss. Bot.*, Bd. 82, S. 273-310.
-