



Title	凍上の實驗的研究
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 孫野, 長治
Citation	低温科學, 1, 37-51
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/17382">http://hdl.handle.net/2115/17382</a>
Type	bulletin (article)
File Information	1_p37-51.pdf



[Instructions for use](#)

# 凍上の實驗的研究

中谷宇吉郎, 孫野長治

## 緒言

昭和 15 年 2 月より 3 月にかけて、北海道各地の凍上現場を發掘し、土壤凍結の状態を調査分類した結果は、前報告<sup>(1)</sup>に述べた。

その際、凍上の起きる原因としては、地下に發生する霜柱が主な役割をするものと推定した。此處で霜柱と稱するのは、關東平野などの地表で普通に觀測される霜柱ばかりを指すのではなく、凍結によつて濕土から氷が分離析出する現象を廣い意味で霜柱と稱した。凍結による氷の分離析出現象が地下一定の深さの所で定常的に繼續すれば、分離された氷は厚い層となり、普通の地表の霜柱と同じ内部構造を示す。それを前回の報告の分類では、「霜柱狀氷層」と名付けた。

しかし寒氣の土中への侵入が急速であると、薄い氷層が無數に入つて、凍土と氷層とが、「霜降狀凍結」又は「縮緬狀凍結」になる、それ等を包含して地下の霜柱と稱するのである。

凍上は地下で水が氷層となつて分離析出する爲に起る現象であるといふ研究は、諸外國特にアメリカの土木工學者間で相當詳く爲されてゐる<sup>(2)</sup>。それ等の研究は多岐に亘つてゐるが、濕土から氷が分離析出する現象 (segregation) が凍上の原因であること、又その際に生ずる上積壓力は著しい量に達し、建造物や線路路盤などを持ち上げるに十分であるといふ點では、大體皆一致した見解に達してゐる。

此の氷の分離析出現象について最も詳しく研究したのは Stephen Taber<sup>(3)</sup>である。彼は冷蔵庫内で、各種の土を色々な條件の下で凍らせて、その際土中に分離析出する氷層の厚さと數と、凍

北海道帝大低溫科學研究所報告第 5 號, 氣象集誌, 第 2 輯, 第 5 號, 146 頁。

- (1) 氣象集誌, 第 2 輯, 第 18 卷, 313 頁。
- (2) A. C. Rose: Present status of subgrade studies. *Public Roads*, 6 (1925), No. 7, p. 137.  
A. M. Wintermyer: Percentage of water freezable in soils. *Public Roads*, 5 (1925), No. 12, p. 5.  
Stephen Taber: Freezing and thawing of soils as factors in the destruction of road pavements. *Public Roads*, 11 (1930), No. 6, p. 113.  
J. A. Sourwine: A method of analysis of data on frost occurrence for url in high way desing. *Public Roads*, 11 (1930), No. 3, p. 51.  
Ira B. Mullis: Illustrations of frost and ice phenomena. *Public Roads*, 11 (1930), No. 4, p. 61.  
Henry Aaron: Frost heave in highways and its prevention. *Public Roads*, 15 (1934), No. 1, p. 10.  
Burton and Bankelman: Frost in road subgrades. *Eng. News-Record*, 106 (1931), 266.  
C. L. Moth: Curing Minnesota frost boil; by drains. *Eng. New-Record*, 106 (1931), 270.  
Remedy of frost heaves on highways. *Eng. News-Record*, 112 (1934), 509.
- (3) Stephen Taber: Frost heaving. *J. of Geology*, 37 (1929), 428.  
Stephen Taber: The mechanics of frost heaving. *J. of Geology*, 38 (1930), 303.

上量との關係を調べた。濕土の下面を水槽に連結した場合、即ち開式 (open system) と、遮斷した場合、即ち閉式 (closed system) とについて、

- 1) 土中の空隙量との關係
- 2) 土粒子の大きさの問題
- 3) 土の含水量の影響
- 4) 冷却速度の問題
- 5) 凍結深度
- 6) 冷却方向に膨脹すること
- 7) 外から壓力を加へた場合
- 8) 不整凍上
- 9) 凍結と融解との交互作用の影響
- 10) 氷の分離による土の收縮

などの諸項目について研究してゐる。そして氷の分離析出現象の機構を説明してゐる。その機構の説明の當否は別として、凍上に關係した重要な項目は、一應殆んど全部に亙つて調べてある。しかしその研究は氷層としては霜柱狀氷層を主として問題にしてゐるので、其の他の凍結様式についての研究が少く、又實驗物理的研究として見る時は、不十分な點もあるので、一部の重複をいはず、當低温實驗室内でも同様な實驗から手をつけることにした。

我國に於ける凍上の研究は、滿鐵の酷寒對策委員會<sup>(1)</sup>、渡邊貫博士<sup>(2)</sup>、黒田正夫博士<sup>(3)</sup>、札幌凍上對策研究委員會<sup>(4)</sup>などの報告があるが、現在のところでは現場調査の報告が主であつて、實驗的研究は少い。

筆者等は前報告に述べたやうに、北海道各地に於ける凍上現場の發掘調査の結果からも、その原因が地下の霜柱の現象に起因することを認めためて、北大附屬常時低温實驗室に於て、各地發掘現場の土を用ひて、人工的に凍上を起さしめて、凍上現象の機構を實驗的に調べて見た。

本報告に於ては、總括的な實驗の結果を報告し、そのうち凍上を支配する各要素についての詳しい研究は改めて報告することにする。

### § 1. 霜柱に關する實驗

霜柱に關する研究は、斷片的な報告が 1870 年頃から 1890 年頃にかけて、Nature 誌の寄書欄を賑はしたことがある<sup>(5)</sup>。その時代に既に、霜柱は土中の水が浸み出しながら凍つて、氷の結

(1) 宮川 勇：路盤の凍上機構に就て。滿鐵酷寒對策委員會，第 1 分科會報告。

”：路盤の凍上。雪氷，第 3 卷 (昭和 16 年)，216 頁。

(2) 渡邊 貫：地盤の凍上。雪氷，第 3 卷 (昭和 16 年)，159 頁。

(3) 黒田正夫，木村幸一郎：土壤凍上の研究。理研彙報 16 (昭和 15 年)，424 頁。

(4) 報告第 1 回，昭和 15 年 12 月。

(5) W. J. McMegee: Nature, 31 (1885), 480 にそれ迄の Nature に出た霜柱の報告の名が列擧されてゐる。

晶になつて伸び出したものであることが知られてゐた。しかし霜柱は英國の土質及び氣候では、日本の如く一般的のものではなく、比較的珍稀現象として報告されたに止り、その後の詳しい研究はされてゐない。

我國に於ける霜柱の研究は、舊く明治 32 年に稻垣、後藤兩氏の廣範な研究<sup>(1)</sup>があつて、霜柱中にある小氣泡が霜柱發生の原因であると結論されてゐる。此の結論には異論が多いが、霜柱の物性の詳細な研究は甚だ有益である。其の後藤原博士<sup>(2)</sup>の物理學的考察、川野氏<sup>(3)</sup>の成長速度の測定が發表され、其後福田氏<sup>(4)</sup>の更に詳細な研究が出て、霜柱成長の熱學的考察もされてゐる。又自由學園自然科學グループ<sup>(5)</sup>の研究では、霜柱を人工的に立たせて、土壤粒子の問題を確り、又土壤以外のゲル等に霜柱を立たせる實驗もされてゐる。

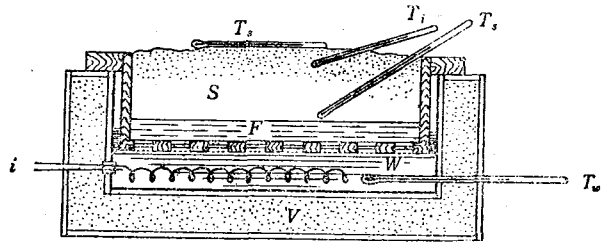
以上の研究で、霜柱の性質及び發生條件も大分判つて來たが、霜柱が空中に伸び出て來る時の機構には不明な點が多い。本研究では、その機構は後廻しとして、凍上と直接關係ある諸點について、以上の研究の補足的實驗をなした。

装置は第 1 圖に示すやうなもので、 $V$  なる木製容器の二重壁内に鋸屑(後には土)をつめて斷熱壁とし、中の水は電熱で任意の溫度に保てるやうにした。この水が實驗用の土壤中に浸み上つて、土の表面から霜柱として伸び上る。装置全體は低温室内或はその中に設置した恒温箱中に放置する。溫度は水温  $T_w$ 、土表面から 3 cm の高さの氣温  $T_a$ 、土の表面溫度  $T_s$ 、表面から  $n$  cm 地下の溫度  $T_n$  を、特に作った細い酒精寒暖計で測つた。又少量の土壤を用ひる時は、自由學園の研究に倣つて、下の土を單に給水體として使つて、表面に吸取紙をのせ、その上に目的とする土を撒いて、それからの霜柱の發生を調べた。各種の土壤について、 $T_w$ 、 $T_s$ 、 $T_a$  等を色々かへ、又その變化即ち冷却速度をかへて、霜柱の出來方を見た。

土は、粘土の多い土(廣尾線)及び赤土などの霜柱の立ち易い土を主として用ひた。土が一定でも、氣温、水温等の熱的條件が異ると、霜柱の形、外觀はまちまちで、生長速度も廣い範圍で變化した。その中で凍上と直接關係あるのは、霜柱中に土の混入する問題である。

或る時は透明な綺麗な霜柱が立つが、他の時には、氷は殆んど見え、土の凍つた柱が地表面

第 1 圖



- (1) 稻垣乙丙：農業氣象學，第 15 版，第 255 頁。
- (2) 藤原咲平：氣象集誌 II，2 (1924)，55。
- (3) 川野昌美：氣象集誌 II，10 (1932)，221。
- (4) 福田仁志：東大農學部紀要，13 (1936)，453。
- (5) 自由學園自然科學グループ，霜柱の研究，第 1 (1937)，第 2 (1940)。









上に隆起して來ることがある。又その中間の状態として、霜柱中に土の薄層が混入したり、又はその量が多くなつて土氷柱と稱すべき外觀を呈することがある。これ等の土混入の問題は、前から知られてゐたことで、福田氏は數層の土層がはひつてゐた天然の霜柱について、その時の氣溫自記記録と對照して、急激な氣溫低下がある毎に土の層が一つ宛混入することを報告してゐる。

要するに、霜柱が成長することは、地表面に零度の層があつて、水が下から水として供給され、この薄い水の膜から氷として外へ晶出するのである。

この状態が長くつづけば、綺麗な霜柱が長く伸び出る。その間に氣溫の低下があると、凍結線は地中へ進行し、少し地中へはひつた所で霜柱が生長し始めるので土の層が混入するのである。それで冷却速度が大きいと、凍結線がどんどん降下するので、霜柱中に土の混入することが多くなり、土氷柱、更に土柱となる。

又霜柱はばらばらに立つこともあり、連続した氷層となつて隆起する場合もあるが、それは最初の霜柱が立ち始める時の地表の條件で大體きまる。地表に小凸凹があつて、比較的乾いてゐる場合には、ばらばらに立ち、地表面が平らで、特に水で濡れてゐる場合には、連続した氷層になる。

第 2 圖

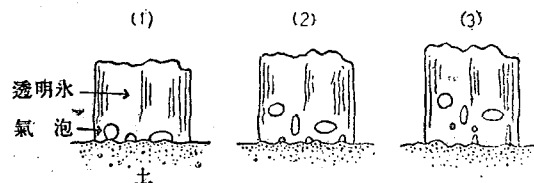
	地表に凹凸あり 比較的乾いてゐる時	地表面が平らで 濡れてゐる時	
(透明)霜柱	1 	5 	冷却速度 ↓ 大
土入霜柱	2 	6 	
土氷柱	3 	7 	
土柱	4 	8 	

以上の結果を分類して圖示したものが第 2 圖である。この圖の各個にそれぞれ相應した凍結様式が、凍土の内部の凍結様式にも見られる。第 2 圖中の土氷柱の一例を寫眞 No. 24 に示す。

次に凍上の場合の地下の霜柱氷層と、地表の霜柱とが、同じものであるといふことを最も明瞭に示すものは、兩者に共通な縦の細い垂直な縞である。この縞は、氷の結晶内に直径 0.06 mm 程度の氣柱又は同じ程度の小氣泡が垂直に並んでゐるのである。稻垣博士等は、この小氣泡が凍結線上の薄い水膜中にあつて、霜柱を支へてゐるから、霜柱が上へのび出ると説明されてゐるが、その論據は確かではない。

霜柱發生途中の状態、特にその根本の土に接した部分を水平顯微鏡で連続的に觀測すると、色々興味ある現象が見られる。氣泡又は氣柱の發生状態を見ると第 3 圖に示すやうな経過をとる。土中に收藏された空氣、及び水に溶解してゐた空氣が、凍結に

第 3 圖



際して分離し、一ヶ所から連続的に出れば氣柱となり、次々に切れて出れば、氣泡となつて、霜柱の中にとり入れられるのである。氣泡の状態を示す寫眞の一例を寫眞 No. 25 に示す。

## § 2. 凍結に伴ふ粘土の割目

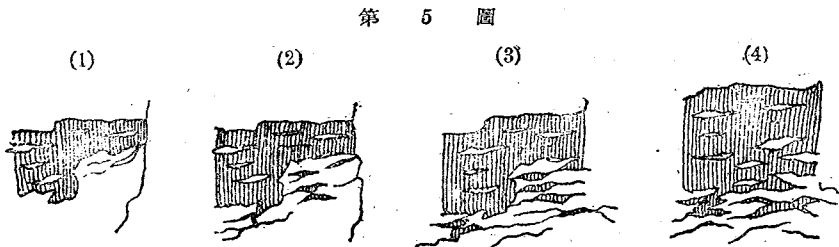
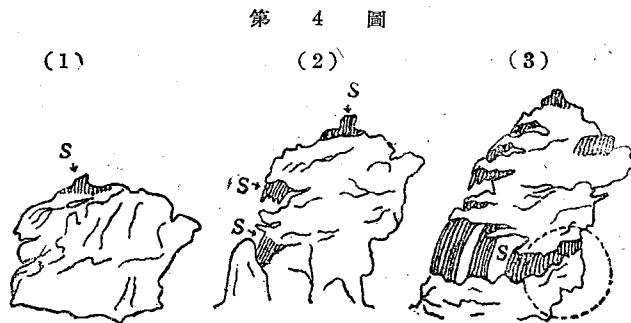
凍土内の水層分布の形が、土に歪みを與へた時の割れ目に非常によく似てゐることは、前報告に述べた。そこで実際に凍結線の直下、未凍結土壌中に毛細割目が出来てゐることも、現場調査の際に數回観測した。それで、土に凍結直前割目が入り、その中に氷が析出して霜降状凍結になるのではないかと推測し、それを確める実験を行つた。

乾燥した粘土塊に水を吸はせると、割目を生じ、時には原形を止めぬ位に顯著な變形をすることはよく知られてゐる。それで先づ粘土塊について、凍結による割目の發生を調べて見た。

第 1 圖の装置を用ひ、赤土を給水體として、その上に粘土塊を置いて冷却させた。すると、冷却の進行と共に割目が入り、その中に氷が析出して来る状態をよく觀察することが出来た。その中の或る場合には、即ち冷却が早く進行する時には、割目の中に出来た氷層は薄い儘で止り、所謂霜降状となつた。又凍結線が暫く止つてゐると、割目に霜柱がどんどん伸びて、土の薄層を霜柱の中にとり入れて、土入り霜柱氷層となつた。かういふ風に、凍土の氷の分離析出様式の各種のものの發達状態がよく見られた。

その中の一例を第 4 圖及び第 5 圖に示す。粘土塊を低温室内の第 1 圖に示す装置上に乗せて、約 1 時間位すると、 $T_a = -8^\circ\text{C}$  で第 4 圖 (1) の状態になる。即ち所々に割目が入り、上端部には霜柱 (S で示す) が立つ。(1) より 2.5 時間後、 $T_a = -15^\circ\text{C}$  では、割目が口をあけてその中に霜柱が立ち、全體として凍上を起して背が高くなつてゐる。此の隆起は其の後も續いて、更に 1 時間後には (3) の状態になる。

第 4 圖 (3) 中、點線で示した圓の内部を擴大して、其の後の凍上進行状態を第 5 圖 (1)-(4) に示す。(1) の粘土中の割目の中に既に霜柱が發達して、20 分後には (2) の如く擴がる。更に 10 分後には、割目中の霜柱が一層發達して、土が層状をなして霜柱氷層中にとり入れられたやうな形になる。そして更に下方に新しい割



目が出来て、凍結が下方へ移つて行く。(4) は (3) の後更に 15 分を経た時の状態で、このや

うになれば、土は完全に霜柱氷層の中にとり入れられる。寫眞 No. 26 中に見られるやうな、土層入り霜柱氷層は、このやうな経路を経て出来るものである。

以上のやうな觀察を各種の土について色々やつて見た結果、凍上に於ける氷の分離析出は、凍結直前に土に割目が入ることが、氷層の出来る位置を決定するものであることが推定された。此の割目の出来る原因は、凍結直前に土が横に收縮する爲に歪みが出ることに依るものである。此の凍結直前の横の收縮を測定した實驗は、別報に詳しく述べる。

### § 3. 土壤凍結の進行状態

上述の觀測で、粘土が凍結直前に割目を生ずることが分つたので、凍上の起る場合、即ち上方からのみ冷却されて、凍結線が略水平になつて下降して行く場合について、果して同様な現象が見られるか否かを調べた。

それは硝子の二重筒を用ひて、下から温い水を供給し、周圍は斷熱して上方からのみ冷すことにした。硝子筒は内側のものの内徑 6.5 cm の筒を用ひ、下からの給水は第 1 圖の裝置を使つた。周圍の斷熱には、鋸屑又はフェルトを用ひたが、いつれの場合も、觀測の時だけ、斷熱層を一寸とりのけて内部を見た。

土壤は次章第 1 表にその成分を示すやうに、粘土及び細砂の多い廣尾線 No. 3 及び赤土を主として用ひた。これ等の土は凍上し易く、又氷層の分離析出も明瞭なものであるが、その土では、凍結線直下の毛細割目も判然と見られた。そして普通の條件では凍上を起さない土、例へば砂土では、このやうな割目は出来なかつた。

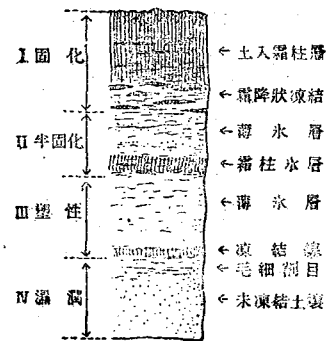
第 6 圖は赤土を用ひ、室温  $-20^{\circ}\text{C}$  附近、地表温度  $-5^{\circ}\text{C}$  位の状態で約 2 日間かゝつて凍らせた時の凍結様式を示す。霜柱氷層、霜降状凍結などの部分があつて、凍結線は約 3/4 位の深さの所まで達してゐる。もつともこの種の粘土分の多い土では、判然とした凍結線はない、凍結は塑性状態から順次湿润状態に移り變つてゐる。

第 6 圖に於て、上部 I 固化の部分は完全に混凝土程度に固つてゐるが、II 半固化の部分は針の先では孔があく程度、III 塑性の所は鉛筆の先を差し込める程度の固さである。凍結線直上では、薄い氷層は存在しながら、氷層と水層との間の土は湿润状態にあつた。この部分では、水は  $0.5^{\circ}\text{C}$  乃至  $1^{\circ}\text{C}$  の水點降下をしてゐることが、別の實驗で測定された。かういふ土では、それで凍結線の定義を、氷層の介在がなくなる所とした方がよい。以下さういふ風に凍結線を決めた。

この凍結線の直下には、第 6 圖に示したやうに、毛細割目がはつきり觀測された。

第 6 圖と同じ條件で作つた、廣尾線 No. 3 の土の凍結様式を寫眞 No. 26 に示す。この土は

第 6 圖



霜柱氷層を作り易いので、寫真に見られるやうな美事な氷層が出来てゐる。凍結線直上にも綺麗な霜柱氷層が発達してゐて、その直下に毛細割目が出来てゐるのが見られる。

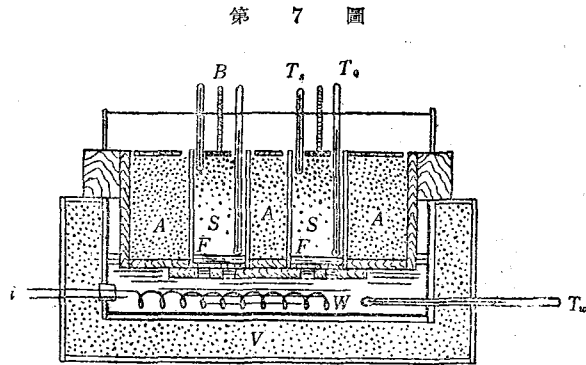
以上の観測によつて、凍結線直下では土の収縮によつて割目が出来、そこへ下から吸ひ上げられた水が氷として析出して、氷層が出来ることが分つた。この考へではこの氷層がその後発達して厚い霜柱層となるか、或はその儘凍結線が下降して薄い氷層で止り、さういふ氷層が澤山出来て霜降状凍結になるかは、割目の所で温度零度の線が永く停止するか否かできまるわけである。それならば気温又は水温を適當に調節することによつて、土中任意の深さの所で、霜柱氷層だの霜降状凍結だのを、勝手に作ることが出来る筈である。以下その実験の結果を述べる。

#### § 4. 人工凍上実験装置と土壤凍結様式

人工凍上の実験は、飽水土或は濕土を、上方からのみ冷して凍結せしめ、その凍上量を測ると共に、凍結完了後その氷層分離状態を調べるといふ方針を採つた。

標本土壤を入れる器は各種の型のものを試みた末、木製にて内法 6 種角、高さ 12 寸の筒を作り、その底に金網を張つたものを主として採用した。木には防水剤を塗り、内面にワセリンを塗布して、その中に濕土を入れた。ワセリンは凍土がのび上る際に壁との間に摩擦或は凍結を生ずるのを防ぐ爲である。

この容器を普通四本同時に使ひ、夫々異なる土を入れて比較実験をした。之等の容器を第 1 圖の装置の V の中に入れて、第 7 圖に示すやうにして実験した。後半の実験では、標本土壤の上に薄く砂をのせ、その上に銅板を置き、その銅板に凍土量測定用の支柱をとりつけた。砂をのせたのは、表面で霜柱の立つのを防ぐためであつて、霜柱が立つと凍上量の測定が曖昧になるからである。又後の実験では、廻轉ドラム上に凍上量を自記させた。此の報告の実験では、土の底が常に地下水に連絡してゐる場合、即ち開式 (open system) の場合だけについて調べた。









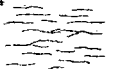
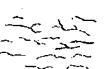
凍結完了後、氷の分離析出状態を見ると、土により、又水温気温の變化によつて、様々な分離状態が見られた。前報告即ち現場調査第 1 號の報告では、霜柱氷層と霜降状凍結とに大體分類したが、其の後の実験によつて、凍結に際して土に入る割目が氷の分離析出の形をきめる主要素であることが分つたので、その立場から、前の分類を少し補正した。

即ち、凍結進行速度が遅い時は霜柱氷層になり、段々速くなるにつれて、土入霜柱層、霜降状凍結となり、更に速くなると、薄い氷層が粗らに入るやうになる。この分類は第 8 圖左側に示



第 8 圖

す通りであつて、霜柱に土が混入して來る状態（第 2 圖）と並行の関係にあるので、簡単に了解出来る。しかしこのやうな凍結様式の順序を採るのは、粘土のやうに明瞭な割目の出来る土に限るのであつて、赤土などの場合には、第 8 圖右側の列のやうな形になる。即ちこの場合は割目がはつきりしないので、土入霜柱層でも、霜降状凍結でも、氷と土とが入り雜つて、縮緬状に凍るのである。この傾向は滿洲の土では特によく見られる。縮緬状に凍る場合でも、第 8 圖 (6) は實は霜柱の中に土が混入してゐると言つた方が良いので、氷と土との比が 3 乃至 4 になつてゐることが多く、(7) の場合はその比は 1 乃至 2 程度である。凍結様式と含水比との関係は、後に改めて報告する。

	割目明瞭(粘土) 水平割目多し	割目不明瞭(赤土) 縮緬状に凍結す	凍結進行速度 ↓ 大
霜柱水層	1 	5 	
土入霜柱層	2 	6 	
霜降状凍結	3 	7 	
薄水層	4 	8 	

凍結進行中、(6) のやうな土入霜柱層が出来る條件になつてゐた時に、氣温が一寸下るとそれ以下は (7) の凍結様式になる。寫眞 No. 30 で、霜柱水層以外の凍土中にも水平な縞が見えるのは、このやうな境である。その部分を擴大して、寫眞 No. 27 に示す。分離析出する氷が段々多くなつて來た所で、氣温が下ると、土の方が多量の凍結様式になる様子が、この寫眞でよく見られる。

§ 5. 凍上實驗の資料及び方法

以上の考へからすれば、氣温と水温とが一定ならば、全土層は一樣の凍結様式で凍結する筈である。それで以下第 7 圖の装置を、低温室内に更に空氣恒温箱を作つて、その中に入れて實驗することにした。空氣恒温箱内では扇風器がゆるく廻つてゐるので、その風の影響もあるのであるが、その詳細は次報で述べる。表面から外氣へ熱が逃げる量、従つて此の場合の重要因子であるところの冷却速度は、風によつて著しく左右されるので、扇風器の影響は無視出来ないのである。此の實驗では大體風の條件を一定にして、その點には觸れないこととした。

用ひた土壤は各種あつて、その機械分析の結果は、第 1 表に示す通りである。

又此の系の實驗で測定した量は、第 2 表に示す如くである。この中で第 3 列の量が主として必要な量である。含水比は風乾土に對する比を採り、此處で風乾土とは、湯煎によつて一定重量に達した時を指す。第 3 列中  $r$  は飽水状に於ける土の含水量を示し、 $(R-r)$  は凍上の原因たる過剩吸上水量を示す目安となるものである。 $\Delta L$  は勿論第一に必要な量であり、 $\rho$  は土の初めの緊密度を示すもので、これも凍上と関係が深い量である。土を詰めるには、よく水でこねて器に詰め、更に下から水を吸ひ上げ得る状態に保ちながら 1 晝夜放置しておいて、低温室内の装置へ設置した。初めのうちは、濕土をつめてすぐ實驗にとりかかつたが、その場合は、凍結が始

第 1 表

名 稱	土 性 名	粗 砂	細 砂	微 砂	粘 土
士 幌 No. 1	砂 壤 土	45.00%	31.25	4.50	19.25
" No. 2	砂 壤 土	51.25	30.00	4.25	14.50
" No. 3	砂 壤 土	52.50	27.50	5.00	15.00
廣 尾 No. 1+2	埴 壤 土	27.50	25.00	10.00	37.50
" No. 3	埴 壤 土	24.00	20.50	32.50	33.00
" No. 4	壤 土	30.00	18.25	18.75	33.00
深 理 學 部 赤 土	砂 壤 土	47.00	23.50	11.00	18.50
	細 砂 壤 土	3.75	20.00	52.50	23.75
安 奉 線 A	砂 壤 土	53.20	12.50	16.75	17.50
" B	砂 壤 土	51.00	16.75	15.25	17.00
奉 山 線 A	礫 壤 土	39.50	13.50	16.50	30.50
" B	細 壤 土	2.50	24.50	40.00	33.00
新 京 A (底土)	細 砂 壤 土	3.75	28.50	44.00	23.75
" B (赤土)	細 壤 土	13.00	17.50	33.75	35.75

粗砂 2-0.25 mm      微砂 0.05-0.01 mm      (菅谷重二君分析)  
 細砂 0.25-0.05 mm      粘土 0.01 以下

第 2 表

$M$ = 凍土重量	$W = M - m_a$ = 全含水量	$\Delta L$ = 凍上量
$m$ = 飽水土重量	$w = m - m_a$ = 飽水量	$R = W/m_a$ = 凍土含水比
$m_a$ = 風乾土重量	$w_0 = M - m$ = 上澄量	$r = w/m_a$ = 飽水土含水比
$L$ = 濕土の高さ	$V$ = 濕土體積	$P$ = 濕土見掛比重

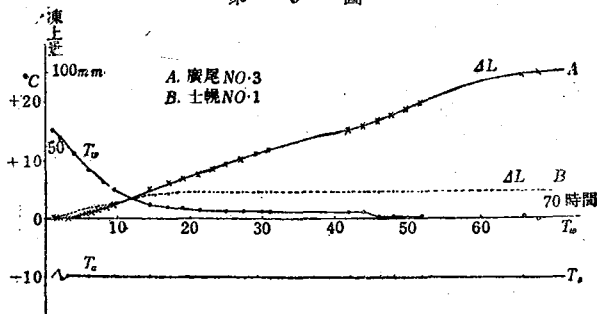
まつてから初めのうち暫くは、土が収縮して、凍下のやうな現象が見えた。これは土が落付く時の収縮であつて、豫め室温で 1 晝夜放置して十分落付かせてから凍結を始めさせると、此の外観上の凍下現象は起らない。

§ 6. 外界条件一定の場合の凍上

最初に  $T_a$ ,  $T_w$  を一定にした時の凍上の模様を調べた。 $T_w$  は初め室温近くであつたものが、約 15 時間で  $1^\circ\text{C}$  近くに下り、大體その温度で保つやうに電流を加減したが、途中から  $0^\circ\text{C}$  になつた。この状態では 70 時間で凍結線が大體底まで達した。その経過は第 9 圖に示す如くである。

土は廣尾 No. 3, 士幌 No. 1, 理學部赤土を用ひ、外に砂を標準用として試験した。砂は凍上しなかつたが、赤土も此の場合は殆んど凍上しなかつた。この赤土は凍上することもあるが、詰め方、冷却速度などによつて水の分離析出を生ぜず、従つて凍上しないこともある。

第 9 圖



一番よく凍上したのは、粘土の多い廣尾の土であつて、第 9 圖の  $\Delta L$  曲線で示すやうに大體

一樣にずつと凍上した。もつとも後半の方が凍上速度が少し小さく、氷の分離析出状態と一致した経過を示した。土幌 No. 1 が初めだけ凍上してすぐ止つてしまつたのは、容器内でこねてゐる間に、粘土分が表面近くに集つたので、表面近くだけで氷の分離即ち霜降状凍結を生じ、中央部以下は混凝土状に凍つた爲である。凍結完了後表面と底部との土を別々に分析して見た結果、粘土分が移動したことが分つた。

廣尾 No. 3 の凍結様式を、寫眞 No. 28 に示す。これで分るやうに、外界の條件が一定ならば、全體に一樣な凍結様式、此の場合は霜降状凍結になる。霜降状凍結で、氷と土とが薄い層になつて重り合ふのは、氣温などの「偏異」によるやうにも一寸考へられるが、さうではなく、條件を一定にして置いて、土質、冷却速度などによつて決まる細い割目が凍結線直下に出來、その中に氷が析出する爲に起る現象であることがこれで分つた。

寫眞 No. 28 の標本で、下部に行くに従ひ、氷が多くなつて、土入霜柱層の性質を帯びて來てゐるのは、 $T_w$ 、 $T_w$  一定では凍結線が下ると、凍結進行速度がおそくなる爲である。この點は前述の第 9 圖に於ける  $\Delta L$  曲線の傾斜が、後になると緩くなることと一致する。凍上曲線の傾斜のことは、§ 8 で更に詳しく説明する。

この實驗で測定した各量の値を、第 3 表に示す。赤土と砂とは殆んど凍上しなかつたので、略する。風乾土を更に焼いて吸着水も測つたが、その値は廣尾 No. 3 で 75 g、土幌 No. 1 で 60 g であつた。

第 3 表

廣尾 No. 3	$M=1062$ g $m=700$ g $m_a=397$ g $L=106$ mm	$W=665$ g $w=303$ g $w_0=362$ g $P=1.57$	$R=1.67$ $r=0.76$ $R-r=0.91$ $\Delta L=98$ mm
土幌 No. 1	$M=791$ g $m=726$ g $m_a=418$ g $L=111$ mm	$W=373$ g $w=308$ g $w_0=65$ g $P=1.55$	$R=0.89$ $r=0.74$ $R-r=0.15$ $\Delta L=17$ mm

### § 7. 氣温一定で水温を變へた實驗

氣温及び水温が一定ならば、一樣に全凍土が霜降状に凍結することが分つた。この場合或る深さまで凍結線が下つた時に、氣温か水温かを一寸上げてやると、凍結線はその位置で暫く止る筈である。さうすると、今の考へによれば、其處で霜柱水層が出来る筈である。その點を確める爲に、途中で水温だけを少し高めて見る實驗をした。

實驗は No. 2 から No. 5 まで 4 回繰り返した。氣温は全部に亙つて、 $-10^{\circ}\text{C}$  に保つたが、此の氣温は少し高すぎたことが後に分つたが、低温室の都合で變更出來なかつた。全實驗に亙つて、完全な氷層を作ることは出來なかつたが、水温を高めたところで、土入霜柱層になつた。それ以上水温を高めると氷層が昇華して空洞になつたが、それは氣温が十分低くなかつた爲と思は

れた。更に低温でこの實驗をくり返した結果は、次報で報告する。

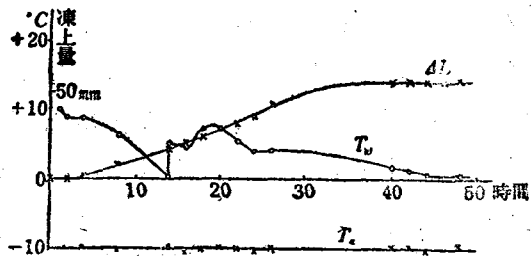
土は、廣尾 No. 3, 土幌 No. 1, 赤土, 砂の外に新しく廣尾 No. 1 と No. 2 の混合及び土幌 No. 2 を試験した。このうち、赤土は數回使用したもので、後の分析によつて粘土分がその間に逃げたことが知られたが、凍上量も少く、霜柱氷層も出来なかつた。砂は勿論此の場合も全部混凝土状に凍り、凍上は殆んどしなかつた。

廣尾線の土は粘土が多く、凍上もし易く、又水温を高めた所で、土入霜柱層が出来易かつた。實驗経過を示す一例を第 10 圖に示す。廣尾 No. 3 の土では、途中で水温を高めた所で土入霜柱層が出来てゐることは、圖に示す通りである。但しこの時は霜柱層の發達が十分でなく、霜降の氷部分が多くなつた程度である。

この系の實驗で、凍上量、含水比などを測つた結果を、第 4 表に示す。この結果で面白いのは、凍上量  $\Delta L$  と、凍結に際

して餘分に下から吸ひ上げた水の量 ( $R-r$ ) との間の關係である。即ち  $\Delta L$  と ( $R-r$ ) とは略直線的に増加してゐるので、その關係を圖示すれば、第 11 圖のやうになる。かういふ關係が成立するといふことは、凍上現象が、土が下から水を吸ひ上げて、それを氷として分離析出する爲

第 10 圖



第 4 表

土	實驗番號	M(g)	m(g)	$m_a$ (g)	W(g)	w(g)	$w_0$ (g)	R	r	L (mm)	P	R-r	$\Delta L$ (mm)
廣尾 No. 3	2	1000	785	445	555	340	215	1.24	0.76	107	1.70	0.48	41
	3	890	712	446	444	266	178	1.00	0.60	112	1.52	0.40	55
	4	1106	748	(450)	—	—	358	—	—	110	1.61	(0.72)	84
土幌 No. 1	2	795	766	441	354	325	29	0.81	0.74	115	1.55	0.07	-15
	3	687	676	444	243	232	11	0.55	0.52	112	1.42	0.03	4
	4	865	738	(450)	—	—	127	—	—	115	1.52	(0.28)	36
赤土	3	731	706	518	213	188	25	0.41	0.36	103	1.48	0.05	7
砂	2	972	935	645	327	290	37	0.50	0.45	113	1.73	0.05	-1
	3	820	835	640	180	195	-15	0.28	0.30	108	1.83	—	2
廣尾 No. 1+2	4	1278	675	421	857	254	603	2.03	0.60	110	1.46	1.43	145
土幌 No. 2	4	844	795	584	260	211	49	0.45	0.36	114	1.65	0.09	21

$\Delta L$  に負の値が出たのは、凍上少く土の落付きの影響が勝つた爲であり、又砂で  $w_0$  に負の値が出たのは、初めに水が多すぎた爲と思はれる。

に起る現象であるといふ考へを確めたことになる。

第 11 圖で○印は、前節第 3 表の結果、即ち気温水温一定で一様に凍らせた場合の値である。それも同じ曲線の上になる。第 11 圖の結果は、“異なる条件下で勝手に凍上させた場合でも、

いつでも凍上量は凍結に際して吸ひ上げた水の量に略比例する”といふ重要な結論を示唆してゐる。この點は更に廣い範圍に互つて確める必要がある。

§ 8. 氣溫の變化が凍結様式に及ぼす影響

外界の條件をかへて、土の凍結様式を支配するには、水溫を變へるよりも、氣溫を變へる方がやり易いことが分つた。

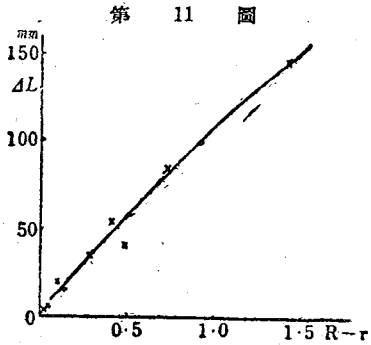
初めは低温室内の氣溫變化を自記させて、その溫度變化と凍結様式との關係を調べてみた。その結果、極めて明瞭な關係があることが分つた。霜柱の場合に、よく土の層が數層重つて、水平にはひつてゐることがある。あの現象について福田氏は自記溫度計の記録との對比によつて、土の層がはひるのは、氣溫の急低下によるので、兩者はよく照應してゐることを報告してゐる<sup>(1)</sup>。凍上についても全く同様なことが觀測されるのである。

第 12 圖及び寫眞 No. 29 及び 30 は、氷層と氣溫變化との關係を示す最も良い例である。この例では土は、廣尾 No. 3 と理學部赤土とを用ひ、兩者を同じやうな條件で詰めて、同時に凍結させた。廣尾 No. 3 の方は著しく凍上して、舊の高さの 2 倍以上になり、赤土の方でも 50% 近く隆起した。廣尾 No. 3 の凍

結様式を、寫眞 No. 29、赤土の方を寫眞 No. 30 に示す。この兩者は同じ  $T_a$  の變化を受けてゐるので、氷層の出來方も全く相似であり、寫眞中 A, B, C, D, ……で印した各層が、兩者それぞれ對應してゐる。

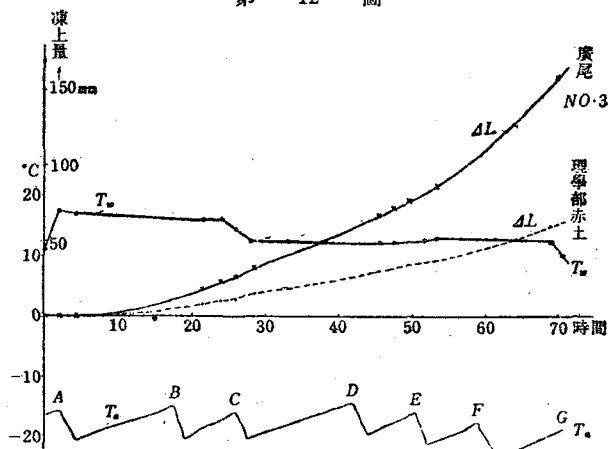
これ等の氷層は、又それぞれ第 12 圖の  $T_a$  曲線の A, B, C, D, ……と對應してゐるのである。此の

$T_a$  曲線は、自記溫度記録をうつしたものである。寫眞 6b について説明すると、例へば實驗開始後 30 時間から 40 時間にかけて、氣溫が徐々に上昇してゐる。この間に寫眞中の厚い霜柱氷層 D が出來たのであつて、 $T_a$  曲線の D 點で急に氣溫が下つた時に、霜柱氷層の底に停滯してゐた凍結線が急に下降して、下の土を凍らせ、下からの水の供給を斷つたので、氷層はそこで



第 11 圖

第 12 圖



(1) 前田.

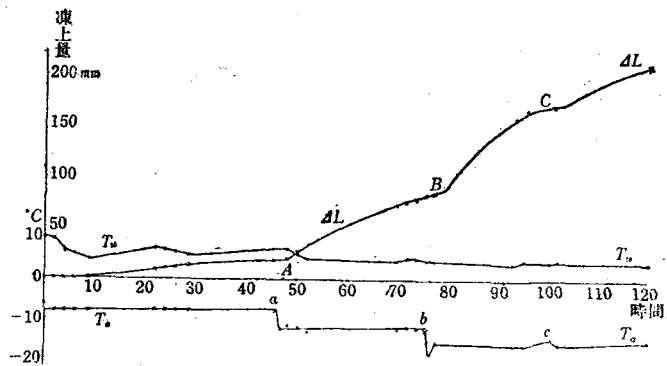
切れたのである。次に又氣温が暫く上つて薄い氷層  $E$  が出來、次に  $F$  に移つて行く。寫眞で  $E$  から  $F$  に近づくとつれて、霜降狀の氷の部分が多くなり、土入霜柱層に近い状態になる。その時  $T_a$  曲線の  $F$  點で示すやうな氣温の急降下によつて、再びもとの霜降狀凍結に戻つてゐる。この境の線が寫眞 6b に  $F$  で印してある。この場合は、前に寫眞 No. 4 で説明した状態に當るのである。即ち氣温の上昇と急低下とは、霜柱氷層に對應する場合もあるし、又霜降狀凍結の模様は縞になる場合もある。それ等をきめる條件は案外細微なところにあるのであつて、更に詳しい實驗を後に述べる。

寫眞 No. 29 の方は、30 程明瞭には出てゐないが、よく見ると、全く同じ凍結様式を示してゐることが分る。

以上の實驗によつて、氣温の變化の方が凍結様式に及ぼす影響が明瞭に出ることが分つたので、恒溫箱内で氣温をかへて見た。條件を簡單にするために、氣温を一定に保ちながら數段に下げることを試みた。

實驗経過のうち廣尾 No. 3 の土についての結果は第 13 圖に示す如くである。この場合は初め  $-8^{\circ}\text{C}$  といふ比較的温い温度に保つた爲に、長時間を要した。凍結状態は寫眞 No. 31 に示す如くで、第 13 圖と對照すれば、凍結進行状態がよく分る。

第 13 圖



即ち初め氣温を  $-8^{\circ}\text{C}$  に保つた間は、表面に霜柱が立つだけで、凍結線は地中へ進行して行かなかつた。その時  $T_a$  曲線の  $a$  點で、氣温を  $-12^{\circ}\text{C}$  附近に下げると、一寸時間の遅れがあつて、 $\Delta L$  曲線の  $A$  で示すやうに、急に凍上を始めた。その速度が段々ゆるくなつた頃は、寫眞で見ると、霜降狀凍結の氷の部分が多くなつてゐる。そこで又氣温を  $-16^{\circ}\text{C}$  附近に下げると、霜降狀凍結に戻つて(寫眞  $B$  點)、凍上曲線は  $BC$  で示すやうに急に速くなる。途中氣温が  $T_a$  曲線の  $C$  點で示すやうに、 $2^{\circ}\text{C}$  ばかり高くなると、凍上の速度が急におそくなり、寫眞の  $C$  で示すやうに、氷の部分が多くなる。氣温をもとに戻すと又凍上は速くなる。

以上の結果を綜合すると、新しく凍結様式と凍上速度との間にも判然とした關係があることが分るのである。即ち氷層が出来る時には、從來の常識から考へると、凍上速度が大きいやうに思はれるが、實際は反對であつて、霜降狀凍結の方が速度が大きいのである。霜柱氷層や土入霜柱層が出来る時は、凍結線の下降が一時停滯するのであつて、凍上速度が小さいのは、よく考へて

見れば當然なのである。この凍上速度の量的な測定は、次報で詳しく述べる。

### § 9. 霜柱氷層の生成條件、豫報

以上の實驗によつて、霜柱氷層の出来る條件は、地中一定個所に凍結線が止つて、其處で霜柱が生長を續けるやうな條件であることは確められたが、それを支配する氣温と水温との組合せ及びその範圍を決定することは、可成り困難であつた。氣温と水温との組合せ以外に、土の種類及びその詰め方にもより、又單に凍結線が或る面で停滯するといふ以外に、その面を通して一定量の熱が流れることも必要であるらしいが、此の實驗では、其處までは進まなかつた。土の詰め方は著しく効き、見掛比重の小さい方が、霜柱氷層が出来易かつた。詰め方即ち緊密度の影響は、別の報告で述べる。

霜柱氷層の生成條件をきめる實驗の一例を第 14 圖に示す。即ち水温を一定に保つ装置はせず、大體一定にする程度に止め、氣温を矩形波型にかへることを試みた。この場合も、土は一番凍上し易い粘土の多い廣尾 No. 3 である。此の實驗では凍上状態も廻轉ドラム上に自記させた。第 14 圖の  $\Delta L$  曲線は、その自記記録の寫しである。凍結様式は、寫眞 No. 32 に示す。

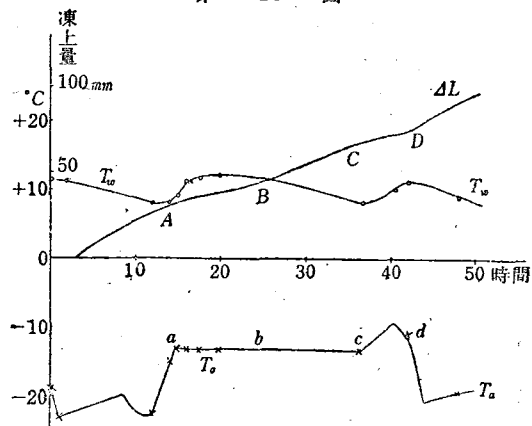
第 14 圖と寫眞 No. 32 とを對照して見るに、氣温が  $-20^{\circ}\text{C}$  附近の時は、霜降狀凍結をなし、その凍上速度は大きい。氣温を  $a$  點で  $-13^{\circ}\text{C}$  に上げると、寫眞  $AB$  の霜柱氷層が出来、その時の凍上速度は  $\Delta L$  曲線の  $AB$  で示すやうに小さい。氣

温を下げないのに、以下霜降狀になつてゐるのは、水温が下つたからであらう。次に第二の霜柱氷層  $CD$  が、氣温が  $cd$  に上つた時に出来て、その凍上速度が又おそくなつてゐる。このやうに霜柱氷層の出来る條件はかなり細微な差によるのである。

寫眞 No. 8 で、霜柱氷層の一部が蒸發した形になつてゐるのは、温度が上りすぎた爲に昇華が起きたものと思はれる。他の實驗で、氣温を數度上げすぎた爲に、全氷層が昇華してしまつて、空洞になつた場合があつた。又温度が少し低いと土入霜柱層になる。その間の様子を例示すると、第 5 表に示す如くである。

霜柱氷層の出来る時の凍上速度、即ち地下で霜柱の伸びる速度も、此の種の實驗から測定出来る筈である。その速度は土によつて少し異なるのであつて、廣尾 No. 3 では、約 1 耗/時であつたが、この場合は少し土入霜柱層になつてゐたので、純粹な霜柱氷層ではもつと小さい。氷層の出来る温度限界、その生長速度などの定量的な測定結果は、實驗の精度を増し、次報で詳しく報

第 14 圖



第 5 表

実験番号	$T_w$	$T_a$	凍 結	摘 要
No. 9	+12~14°C	-16°C	土 入 霜 柱	$T_a$ や や 低 し
No. 10	+14°C	-12.4°C	空 洞	$T_a$ 高 す ぎ
N. 12	+13°C	-15.5°C	土 入 霜 柱	$T_a$ 低 す ぎ

告する。

### § 10. 總 括

本研究は、凍上現象が地下に出来る霜柱及びそれに類似の現象に起因することを確める爲に行つたもので、各種の土を低温実験室内で凍らせ、人工凍上を起させて、その機構を調べた。

先づ霜柱の人工製作から始め、霜柱に土の混入する度が、冷却速度によることを知り、同様な現象が凍上の場合にもあることを確めた。次に凍結に際して土に割目の入る現象を調べ、凍結による氷の分離析出現象がこの割目によつてその位置がきまることを推論した。

凍上量と凍結に際して下から餘分に吸ひ上げる水の量との間に、簡単な関係のあることを知つた。

各種の凍結様式、即ち霜降状凍結、霜柱氷層などを人工的に作り、その生成條件が氣温と水温とで決まることを實驗し、従つて、各種の凍結様式が自由に得られるやうになつた。

以上で凍上の原因及びその機構は、定性的には殆んど明かにされた。

本研究は、札幌鐵道局に設置された凍上委員會の研究の一部として爲されたもので、本報告の發表を認容された委員會の厚意に感謝の意を表す。又實驗の後半に助力された菅谷重二君に感謝す。