



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍上の機構について : I (現場調査)
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 孫野, 長治
Citation	低温科学, 1, 1-9
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17378
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p1-9.pdf



凍上の機構について

1. 現場調査

中谷 宇吉郎, 孫野 長治

緒言

寒地に於て土壤が凍結して隆起する現象、即ち凍上の現象は、其の土地の土質並に氣候に關係するので、寒國の鐵道、建築、土木等廣い範圍に亘つて、その影響するところが大きい。特に鐵道では除雪によつて地表面を冷却させる機會が多いので、冬期の保線上凍上は非常に重大な問題となつてゐる。

筆者等は、此の冬から札幌鐵道局、鐵道大臣官房研究所との連絡の下に凍上の研究に着手し、主としてその物理的方面を擔當することになつた。凍上の物理的研究としては、先づ凍上現場の發掘をなし、地下に於て土壤が如何なる形態をなして凍結してゐるかを調べた。そして各種類の凍結をなす土壤を低温室内に運び、種々の條件の下にてこれを凍結せしめて、天然の凍結の場合と類似の現象を再現してその成因を調べることにした。本報告はその第一報であつて、凍上の現場調査の結果を概報する。

§ 1. 凍上現場の發掘調査

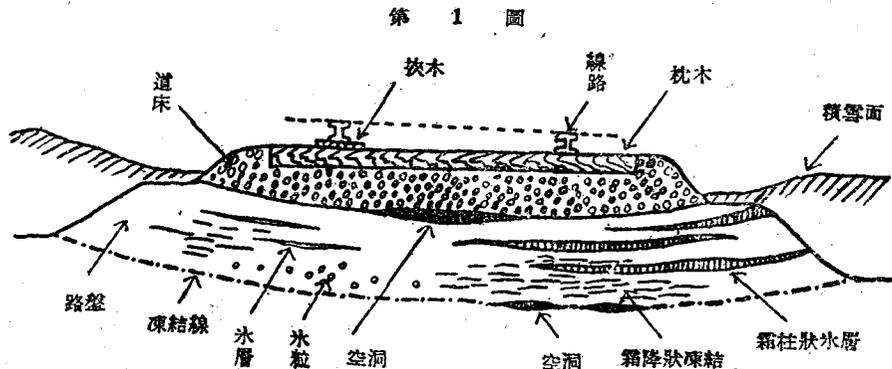
現場の發掘は、凍上量の最大期即ち 2 月下旬より 3 月上旬に亘つて行ひ、實際の鐵道線路について、枕木 2 本乃至 3 本の範圍を凍結線まで掘つて調べた。發掘は札幌鐵道局現場各員の手によつて行はれた。發掘箇所は第 1 表に示す如くである。

土壤内部の凍結状態は勿論土質によつて著しく異り、その凍結状況と線路の凍上量との間には定性的の關係を確認することが出来た。線路は第 1 圖に示す如く、土壤の路盤の上に砂利層の

第 1 表

	發掘箇所	時 日	調 査 者
1	石北線、東相の内	2 月 19 日 午前	中谷、花島、孫野
2	網走本線、上常呂	2 " 19 " 午後	中谷、花島、孫野
3	廣尾線、更別	2 " 26 " "	中谷、孫野、孫野
4	幌加内線、深川	2 " 29 " "	中谷、孫野、孫野
5	宗谷本線、深名	3 " 1 " "	中谷、孫野、孫野
6	夕張沼線、追分	3 " 2 " "	中谷、孫野、孫野
7	札内線、月形	3 " 8 " "	中谷、孫野、孫野
8	江差線、古内	3 " 11 " "	中谷、孫野、孫野、加賀美

道床があり、その上に敷設してある。冬期凍上によつて、例へば第 1 圖に示す如く、右側の線



路が持ち上げられると、左側の線路下に^{ハサミ}挟木を挿入して補正するやうにしてゐる。凍上量と普通に稱する量は、此の挟木の厚さであつて、即ち不整凍上量の差の意味である。かういふ意味での凍上量でも 30 乃至 40 cm に達することがある。

砂利層は水はけ良き爲、霜の結晶が所々に見られる程度であつて凍結の堅さから言つても、凍上量から言つても、大したことはない。ところが路盤の凍結には色々複雑な現象が見られ、霜柱状水層、單なる水層、霜降状凍結、氷粒、混泥土状凍結、空洞など、その凍結状態は甚しく複雑である。以下各項について説明をする

§ 2. 砂利層の凍結

i) 概況 砂利層は一般に排水良き爲、特に初冬凍結開始直前に大雨なき限り、堅固な凍結をすることはない。一般には砂利と砂との間に空隙が出来、その空隙が霜の結晶で凍りついてゐることが多い。即ちつるはしを要せず金属棒にて突きこはし得る程度である。

砂利を取り出して見ると、殆んど例外なく、その底面に白い霜の結晶が一面に發生してゐる。稀に砂利の上面に霜の發生を見たといふ報告もあるが、例外的なことである。

ii) 砂利に發生する霜の結晶 この霜の結晶は水蒸氣が冷却せる砂利面に昇華によつて凝縮したもので、全部結晶質である。稀に結晶形不分明のものもあるが、それは結晶生成後水蒸氣の供給が減少した爲に昇華蒸發をしたものである。

岩石の熱傳導度は 3 乃至 6×10^{-3} ($\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1}$) degree^{-1} で、乾燥した土及び砂の 0.2 乃至 0.8×10^{-3} に比し著しく大きい。故に砂利面は早く冷え、其處へ水蒸氣が空隙を通つて供給せられる際に、霜の結晶として凝縮する。水蒸氣の供給は下方の温き層から爲されるので、石の下面に凝結するのである。

霜の結晶の形は出来る時の氣候的條件及び土質などによつて種々變化し、霜柱状、コップ型、^{スケルトン}骸晶、角板状、角柱状など色々ある。コップ型や骸晶は水蒸氣の供給度大なる時に發達し、角板

や角柱は小なる時に出来ることは實驗的に分つてゐるが、現場に於て見られる結晶の形とその土地排水竝に給水情況とは定性的にはよく一致してゐた。

コップ型、骸晶、角板、角柱の夫々代表的なものの顯微鏡寫眞を寫眞 No. 1~No. 4 に示す、寫眞 No. 1 はコップ型を上から見たもので、六角の一頂點が螺旋形に捲き込んでゐるのも此の種の結晶の特徴を示してゐる。この結晶は Wegener が Greenland の氷河の裂罅のなかで發見した霜の結晶の寫眞と全く一致してゐる。此の種の結晶は水蒸氣の供給が充分多い時に出来るので、従つてかゝる結晶が存在してゐることは、凍結砂利層を通じて水蒸氣の流通が可成り自由であることを示してゐる。寫眞 No. 2 は骸晶の例で、六角柱を側面から見たところである。この骸晶も水蒸氣の供給が可成り良いことをしめしてゐる。それよりも過飽和の度が小さくなると、結晶は No. 3 に示すやうな角板になるが、この内部の模様も幾分骸晶的發達をした爲に出来たのである。過飽和の度がずつと小さくなり、結晶が極めて徐々に成長すると、No. 4 に示したやうな無垢の六角柱（或は厚い六角板）になる。No. 4 に於て左圖は上から、右圖は同じ結晶を側面から見た形を示す。此の種の霜の結晶がある場合には、水蒸氣の供給が少く土地が乾いてゐたことが推測される。

實際の現場について、砂利層内の霜を廣く調べて見ると、以上のやうな完全な結晶ばかりでなく、形が崩れてしまつたものも可成り多い。この種のもは輪廓の不明な霜で一見無定形のやうに見えるが、大抵は舊の結晶の形が判斷されることが多い。これは結晶の表面勢力の爲に昇華によつて形が崩れたもので、結晶生成後水蒸氣の供給が少くなり、過飽和の度が減つたことを示してゐる。

iii) 砂利層の熱傳導 前述の如く砂利の熱傳導は土に比し 10 倍近くも大きい爲、砂利層は外氣溫の低下と共に速かに冷却する。この冷却はしかし單に石の熱傳導度が大きい爲許りでなく、即ち傳導によるのみでなく、對流も著しく働くのである。

砂利層には凍結と共に空隙が著しく増し、その空隙を通つて水蒸氣が盛に流通することは、上述の霜の結晶形から判斷される通りである。即ち水は下層に於て 600 cal (水の蒸發の場合) 又は 680 cal (氷の蒸發の場合) の潜熱を奪つて水蒸氣となり、それが空隙を通つて上昇して、上層の寒冷却に於てそれだけの潜熱を出して昇華凝縮する。この水蒸氣の移動によつて熱の移動が大量に行はれるので、巨視的に見ると砂利層の熱傳導は著しく大きいものとなる。この現象は氣象學の方面での渦動傳導と似てゐるが、それと較べて潜熱の受授が大きい役目をしてゐる點が一寸變つてゐる。砂利層は以上述べた如く巨視的に見て熱傳導度が著しく大きい爲に、下層迄速に冷却する。それで凍上防止の爲に砂利を澤山入れても、それだけ凍結線が下ることを知つておく必要がある。

§ 3. 土壤の凍結

凍上は殆んど路盤の土壤の凍結によつて惹起されるので、現在の問題については、土壤の凍結

を詳しく調べることが重要である。その特徴は氷層を伴ふことであつて、その氷層は原則として土を混ぜず、即ち濕土より凍結によつて氷が分離したものである。

氷層の特性には色々種類があつて、土質及び温度變化との間に密接な關係がある。氷層以外の部分は土は大體一樣に固くなり、所謂混凝土狀に凍る。これ等の現象は非常に複雑であるが、要するに霜柱生成の機構と本質的には同じものと現在のところ考へられる。

i) 霜柱狀氷層（霜柱層）

a) 概観 霜柱狀氷層は厚さ數 cm の厚い氷層で、縦に細い線條が無數に入つたやうな概観を呈してゐる。丁度霜柱が密生したやうに見えるが、實際にそれは地下に發生する霜柱と思はれる。それで略して霜柱層とも稱することにする。

此の種の氷層の出来る土質は霜柱のよく出来る土質と一致してゐる。そして水の供給が盛に爲されることが厚い霜柱狀氷層の生成條件の一つである。例へば深川に於てその良い例が見られたが、右側が山手で水の供給が多い場合に、右側の線路が餘計に凍上して、左側に 18 mm の挟木が入つてゐた。しかも掘つて見た所が、右側の下層に霜柱成長に適した火山灰入り粘土の層があり、その中に霜柱狀氷層が數層發達してゐた。左側の下は砂質火山灰で厚い霜柱狀氷層は 1 層もなかつた。即ち此の場合の凍上不整は霜柱狀氷層によることが分つた。同様の例は他に 2 ケ所許り見られた。

b) 氷層の氷の構造 その代表的な例を寫眞 No. 5 に示す。此の場合氷層は 2 段に入つてゐて、その氷層はほとんど完全に氷ばかりからなつてゐる。かかる氷層が夏期存在するはずなく、氷が凍結によつて下から吸ひ上げられて氷となつて析出したものである。もし最適條件が長くつづけば氷層はいくらでも厚くなり、したがつて凍上は著しく増すはずであるが、一般には寒氣の持續と共に凍結線が下るので、下方よりの水の供給が絶たれて氷層の成長は或る程度で止む。

この氷層の一部を顯微鏡下で檢すると、寫眞 No. 6 に示すやうな構造になつてゐる。即ち縦の條痕は空氣性であり、他に氣泡が垂直に分布してゐる。空氣柱や氣泡は稻垣博士⁽¹⁾の研究時代より分つてゐるやうに霜柱の特性である。

c) 霜柱と推定される理由 地上の霜柱の成長には、全土塊がその發達に適した土質である必要はなく、表面の土質だけが問題になる。即ち自由學園自然科學グループの研究⁽²⁾によれば、コップに水を満たした上に吸取紙を載せておいて、その上に赤土を撒いたものからも霜柱を立たすことが出来る。

同様の現象は霜柱狀氷層の場合にも見られた。木古内の例では、砂利層下に黑色腐蝕土があり、その中では霜降狀凍結はあつたが、霜柱狀氷層は無かつた。ところが一部に黃綠色の薄い粘土層

(1) 稻垣乙丙；農業氣象學。第十五版、255 頁。此の研究は明治 32 年に後藤氏と共に爲されたものである。

(2) 自由學園學術叢書。第一。霜柱の研究。33 頁。

があつて、その直上のみ立派な霜柱状氷層が発達してゐた。

次に普通の霜柱ではよく土の薄層が水平になつて水中に挟まれてゐることがある。同様の現象は凍上の氷層の場合にもあり、第2圖のやうな構造の氷層も屢々観測された。

又霜柱層を融解直前の頃掘り出すと、土と氷層とが容易に分離する。この時土に接してゐた面を見ると、龜甲狀の模様が出来てゐることが多い。此の模様は霜柱の横断面を少しとかした時に出来る模様と全く同じものである。

以上の諸點から見ても、此の霜柱状氷層が地下に出来る霜柱であることには殆んど疑ふ餘地がないと思はれる。

以上の霜柱状氷層を生ずる土では、これを掘り起して、零下數度の大氣に露出放置すると、霜柱が急激に立つて来る。大抵の場合には、10~20分間に5~6mm'位伸び出る。その形は彎曲してゐることが多い。

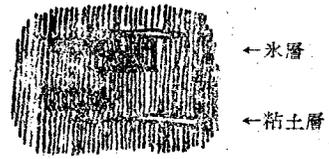
d) 霜柱状氷層の退化 霜柱状氷層には充填してゐる氷が粗な構造のものもある。土質によつて異り、粗なる火山灰質土中に出来たものに多い。この氷層は容易に角柱單位に分離出来る。その一つを顯微鏡下で調べて見ると、空氣柱及び氣泡の配列などは霜柱と全く同様である。

追分で此の種の氷層の各段階の状態がよく分る場合が見られた。土質は火山灰で間知石の割栗入り、土中を通つて水蒸氣の移動は極めて容易と思はれるものであつた。此の中に數層の氷層があつたが、上方の層は空洞となり天井に霜の結晶が附着してゐた。中間のものは粗なる霜柱層、その下に普通の霜柱状氷層が存在してゐた。その分布の状態は第3圖に示す如くであつて、このやうな現象は、他の數ヶ所での觀測結果から綜合して見るに、霜柱状氷層の昇華蒸發による退化と考へられる。即ち霜柱状氷層も、生成後長時間を經過し、且つ水蒸氣の移動が容易な場合には昇華によつて退化し、遂に空隙又は空洞になることがあると考ふべきである。

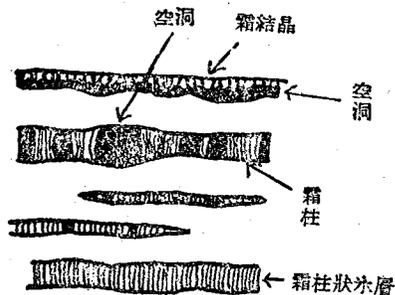
e) 豫備的綜括 以上により凍上に重大な影響を與へる霜柱状氷層は、地下の霜柱であるといふ結論に、現在のところでは達した。その生成條件としては従つて、霜柱の生成に適した土質なること、水の供給が豊富なことなどが擧げられる。もつとも氣溫の低下率も效くのであつて、凍結線が急激に降下する場合は、下方よりの水の供給が切れる爲に厚い霜柱状氷層にはならない。

水の供給が豊富で霜柱が地下でどんどん成長する場合には、水溫による熱の供給と凍結により發生する潜熱との爲に、凍結線は殆んど下降せず氷層の發達を促す。そして著しい氣溫の低下

第2圖



第3圖



などによつて初めてその成長が止り、其の後は土質が粗な場合には時日と共に昇華蒸発をして空隙が出来る場合もある。

ii) 霜降状凍結

a) 概観 粘土が凍結する場合には、その大部分は例外なく霜降状凍結をする。即ち粘土が凝土状凍結をなし、その中に薄い氷層が 1 乃至 2 mm 程度の厚さで、大體水平に無数に入つてゐるのである。その外観は寫眞 No. 7 に示す如くであつて、この寫眞で白い部分が凝土状凍結の粘土で、黒い部分が氷層である。

此の氷層は多くは透明な氷から成り、それをこはすと、貝殻状劈開を示す。この劈開の形から判断すると、この氷は無定形のもののやうに思はれるが、霜降の中の或るものは單なる霜柱氷層の薄いものと考へられる場合もある。

霜降状凍結が最もよく見られるのは純粹な粘土(更別)である。もつとも黒色腐蝕土(木古内)や火山灰砂質(深川)赤土状粘土(月形)などにも幾分霜降状凍結が見られる。

赤土状粘土(月形)中の霜降層を調べた時凍結線の直上に於て、薄い氷層は存在しながら、その中間の土は十分固化せず、金屬棒を容易に突き挿せる程度であることを知つた。この時の軟い粘土中に寒暖計を挿入せしに -1°C を示せり。この氷點降下の現象は實驗室内にて更に調べたが、その報告は II に譲る。

b) 霜降状凍結の成因の推定 此の成因については二様に考へられる。一つは霜柱氷層の薄い層と見られるもので、他は凍結に際して土壤が收縮する爲に出来る割れ目に氷がまつたものと考へられる。

前者が存在することは確定的であつて、第 2 圖に於て厚い霜柱氷層中に土の薄い層が介在することより割れ目で無いことは明かである。ところが同じ土にて隣接せる部分には霜降状凍結があり、厚い霜柱層と霜降状凍結とは連続的に變化してゐるのを認めた。故に霜降氷層の或るものは薄い霜柱層と見做して差支へない。霜柱の成長には水の補給が充分なることが必要である。ところが霜降状凍結の起り易いのは粘土であつて、これは水の流通悪く、霜柱が充分成長せぬ中に凍結線が降下すると考へれば説明出来る。結晶性の霜柱の集合が壓力によつて固體の流れ(flow)を生じ、その爲融合して無定形となることは氷河の場合にもよく知られてゐる⁽¹⁾。

一方霜降状凍結に於ける氷層の分布を見ると、その模様が粘土に歪みを與へた時に出来る割れ目に非常によく似てゐることに注意すべきである。又更別の觀測では、代表的霜降凍結をなせる粘土層の直下、凍結線との境に實際に割れ目による空隙層が見られた。これより考へて霜柱状氷層の薄いものといふ即ち前者の霜降凍結も、水分の逸脱によつて粘土が收縮し、その爲割れ目が出来て、その割れ目に霜柱が成長し始めるものとすれば、全部の特性が巧く説明出来る。この現

(1) M. F. Perutz: Proc. Phys. Soc. London, 52 (1940) 132.

象は低温室内で人工的に霜降状凍結を生ぜしめて調べれば分る筈で、目下進行中である。

霜柱状氷層、空洞、霜降状凍結などを、凍結による土壤の膨脹の爲に生ずる挫屈 (buckling) に起因するといふ説¹⁾もあるが、挫屈の起きるやうな場合はむしろ稀であらうと思はれる。

iii) 氷粒状凍結 凍結の際、氷が粒状をなして分離析出してゐる場合が時々あり、これを氷粒状凍結と稱する。北海道では深川でその例が見られ、火山灰砂質で地下水の供給の少い場所に薄い不分明な氷層と共存してゐた。

満洲の凍上の場合には、この氷粒状凍結が屢、且つ大規模に見られる由であるが、今年の観測では、此の現象は北海道では、餘り重要な要素とは思はれなかつた。

iv) 凝滯土状凍結 肉眼で容易に見える氷層以外の土の部分凝滯土状に凍結してゐる。即ち土と水とが一樣に雜つて固化してゐるやうに見える。しかしその部分を顕微鏡で調べると、寫眞 No. 8 に示すやうに、矢張り細い氷層が土から分離して凍つてゐる。寫眞の中で、黒い筋に見える層が氷層なのである。此の種の凝滯土状凍結は、それで微細霜降凍結である。この種の凍結の生ずるのは粘土であつて、普通の霜降状凍結がよく發達する粘土では、その凝滯土状凍結部分も微細霜降構造をしてゐる。

ところが火山灰砂質土壤では霜柱状氷層は厚く成長するが、霜降状凍結は顯著に現はれない。この場合凝滯土状に凍つた部分を顕微鏡で見ると、寫眞 No. 9 に示すやうに、土と水とが一樣にまじつて固化してゐて、前のやうな微細霜降構造にはなつてゐない。即ち凝滯土状凍結には 2 種あつて、土質によつてことなる凍り方をする。もつともその中間の各段階に相當する凍り方もある。

§ 4. 空洞及び空隙

凍上現場を掘つて見ると、よく地下に空洞又は空隙層が見られる。その生成場所は、異土質の層の境及び凍結線直上のことが多い。空洞の出來方には種々ある。

i) 道床と路盤との境に出來る空洞、道床は多く砂利層で路盤は粘土、火山灰、砂などいろいろあるが、特に粘土の時に空洞が生じ易い。その代表的な例を寫眞 No. 10 に示す。これは砂利層なる道床と、粘土の路盤との境に出來た空洞の一例で、ほとんど例外なく何時でもこれ等の空洞の天井には霜の結晶が發達してゐる。その結晶形には前述のやうな各種の型のものがみなある。

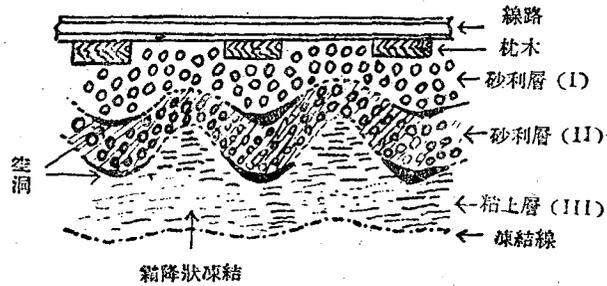
此の種の空洞の成因として、挫屈 (buckling) 説があるが、筆者はもし挫屈による場合があつても、それはむしろ比較的稀な場合であると考へる。それよりも不整冷却によつて、所により凍上量が異なる爲に、或る層が持ち上げられて空洞を生ずる方が多いと思はれる。

その良い例が更別で見られた。土質は黄色純粘土に近いもので、其處へ砂利を盛に入れ枕木の

(1) 黒田正藏、木村幸一郎：理研彙報. 19 (昭和 15) 424.

下に打ち込んだ爲に、列車の重量による加圧も手傳ひ、砂利が枕木下だけ深く粘土層中に喰ひ入り、枕木間では逆に粘土が押し上げられてゐた。その場所を、一方の線路直下で、線路の方向に切つた断面を作つて見たところ、第4圖に模型的に示すやうな構造になつて

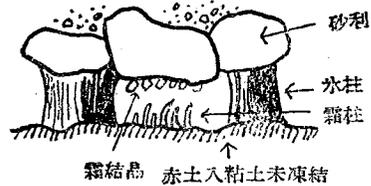
第 4 圖



ゐた。そして第一層と第二層、茲に第二層と第三層間の、枕木の下に當る部分に空洞が存在してゐた。これは第三層の霜降状凍結による凍上量が、枕木間で大なりし爲に上部の層が持ち上げられて出来た空洞として説明される。

ii) 凍結線附近の空洞 凍結線直上に空洞の出来てゐた例は澤山あつた。その中名寄の例では、砂利層と切込み層とが凍結し、その下の赤土入粘土層は未凍結で濕潤の状態にあつた。その時の空洞は第5圖に示すやうに、氷柱で持ち上げられた爲に出来たやうな觀を呈してゐた。この氷柱を點検するに、矢張り縦に細い條痕あり、霜柱から成つてゐるものと見られる。事實空洞内で下の未凍結粘土から、普通の霜柱が発生してゐた。又空洞の天井を爲してゐる砂利の裏には霜の結晶が生じてゐた。現場の寫眞は、No. 11 に示す如くである。此の種の空洞は木古内にも適例あり、空洞を支へてゐる氷柱は常に大形の砂利を持ち上げてゐた。

第 5 圖



以上の例より見て、此の凍結線直上に出来る空洞は霜柱によるものと推定される。霜柱の強度は稻垣博士の測定によると、厚さ 77 厘の花崗岩を支へることが出来る程度に充分強いものであつて、強度には問題は無い。但し此の場合は下が未凍結粘土なる爲、凍結層の全重量は主として空洞を有せざる部分にてアーチ型に支持されるものであらう。

iii) 凍土中の空隙層 凍土中にも不規則なる形の空隙層が存在することが屢々ある。その多くは不整凍上によつて生じたものとして説明される。即ち凍結線直上に出来た霜柱による空洞が、其の後凍結線の降下によつて、凍土中に残存したものと見られることが多い。此の種の空隙はそれで砂利が混入してゐる場合に限る筈で、實際にもその通りである。

その外に霜柱層の昇華蒸發によつて空隙の出来ることもあり、第3圖で説明した通りである。

以上の如く凍上の現象は甚だ複雑であるが、その中實際問題として凍上量に著しく働くのは、霜柱状氷層と霜降状凍結とである。それ等の成因、生成機構については、只今低温室内で人工凍上を生ぜしめて研究中であるから、その結果は第2報で報告する。

本調査に當つて、現場の發掘は札幌鐵道局の保線課の方々の絶大なる努力によつて爲されたものであることを附記し、本報告の發表を認容された凍上委員會の厚意に感謝の意を表記する次第である。又本調査に協力された北大物理教室、吉田順五、花島政人、加賀美幾三の諸君に感謝する。