

凍上氷生成過程

準會員 小 川 新 市 *

要 旨 土壤凍結に伴つて起る凍上の原因となる凍結土壤中に分離析出されたる氷層を此處では凍上氷と略稱し、主として粘土質の如き細粒土壤に於ける其の生成過程の現場観測に就き述べたもので、凍上氷は凍結線直下の土壤中に生じたる微小亀裂内に於て、下方より上昇したる毛管水が氷壁に達すると共に霧柱層となり或は尙之れが多少變化して霜降状氷層を形成せるものである。これを現地の現象に就き説明せん。

目 次

- | | |
|------------|-------------|
| 1. 序 | 5. 凍結前の現象 |
| 2. 凍上被害の色々 | 6. 凍上氷の變移過程 |
| 3. 凍上概論 | 7. 結 言 |
| 4. 滿洲の氣象概観 | |

1. 序

凍上に関しては北海道帝國大學教授中谷宇吉郎博士の御研究があるので敢て筆者如き筋違ひの若輩が本問題を云々する必要はないが、ここに筆者が同博士御指導の下に滿鐵に於ける鐵道線路盤の凍上現象を現場観測せる結果から、滿洲の凍上實狀に就き又特に其の内の凍上氷生成過程の事實に就き述べ、凍上理論確立の爲の一踏石ともなればと卑見を記す次第である。そして之れに依り北海道の凍上も滿洲のものも原則的には同一であり、且つ凍上とは如何なる現象であるかに就いて幾分でも理解を促進し、日常見過して來た家の入口等の身近にある凍上に興味を持ち1日も早く此の問題を解決し、嚴寒地に於ける諸問題を科學的に解明する一步ともなれば望外の喜びである。尙これに土木學會誌27-3に掲載せるものの續きの如きものにして、今回は同僚猪狩、宮崎兩氏と共同観測せるものを筆者が取纏めたものであつて、詳細は「樂善の友」或は滿鐵線路凍害研究會報告を参照されたい。

2. 凍上被害の色々

鐵道に於ける被害は線路そのものが耗單位を争うものであるから僅か數耗と云はれる凍上量の差も實に大きい影響を持ち、金額から見ても現在滿鐵に於ける之れが直接費だけで數百萬圓に達し間接費（否恢復費とも考へら

れ當然一般概念からすれば直接費に算入すべきものもあらう、が今は整理の都合上從來の分類を臨時に使ふが) 入れれば其の數倍になるであらう。これが随きもせず毎年繰返へされてゐるのである。これには嚴寒の中を拱木と云ふものを軌條の下に入れて晝夜を分たず走る列車のすべてを完全に走らせる爲數萬の人が毎日働いてゐる。

極く身近な凍上を考へて見やう、多になつて街の歩道を歩いてゐると所々道を横断して急に高くなつてゐる所がある。これは大體水道管の漏水に依る凍上である。又家庭では屋外の薪炭倉庫の取出口の扉が多になるとだんだん開き難くなつて家の人がいつも困つてゐる。これは新しい家の扉に龜裂が入つてゐると同様に大きな凍上量を示すものである。住宅街の暖房管の通つてゐる所は冬或は春先によく特に凹んで夜歩きに危ない。春の雪崩の頃奉天ではバスが道路の真中で立往生してゐるのをよく見受ける。これは凍上に起因する融下による被害である。北滿の建物が多に墮れた等は特に著しい例である。其他土木構築物は多少の差はあるが滿洲では此の凍上を充分考慮しな取れかつた爲に色々の變形を生じ困つてゐる例が多い。

構築物、道路等土木建築に關する凍上に依る被害は實に大きい。されば之れを如何に防止すべきか、實に大問

通り霜柱水層を生じ難く、爲に急激なる凍上及融下がない。そして之に依り凍道も比較的安全な道である。但し道路は舗装等の爲舗装自體である程度の荷重に耐え、融下に依る其の直下の空洞は其の荷重が限界を越えた時始めて路面の破壊に依り認められる事が多い。

滿洲の地表面は之れを被覆すべき草木なく表面が露出してゐるし又雪が少ないから、寒氣は地中に透過し易い。即ち地下凍結深度は大にして絶対凍上量も大きくなる筈である。

此の他凍道も多く割合に凍上に弱しては條件が揃つてゐる。特に凍結深度の大なる事は凍害対策に最大の難條件となるであらう。

5. 凍結前の現象

凍上氷生成前即ち凍結線直下に起る現象として (1) 土粒子の小團粒生成に依る網状微小龜裂或は (2) 直接に縮縮状微小龜裂の生ずる事を認め、之れが凍上機構中重要な過程なる事を觀察した。

抑々凍上氷生成過程に於て粘土質の如き緊密なる土壌中の水分が如何なる過程を通過して水として分離析出するかについては從來の諸説に明かでなかつた。之れに疑問を懐いて昨多現場觀測の時特に注意した所が、凍結直前に土壌中に氷れ目が出る事を発見した。そして又これが Terzaghi 氏の粘土質土壌の實驗に於ける龜甲型多角形構造の龜裂と同様のものである事に気がついた。尙且つ今日では北大中谷博士に依つても発見され實驗的に證明せられ、此の現象が確認されてゐる。今冬期之れを尙少し詳しく現場觀測した結果は次の通りである。

凍結線(硬さに依る、以下同じ)下5-1cm附近に實験-3に見る様な徑1-3mm程度の粘土の團粒を認める。此の團粒は稍横に長い球形で、其の表面はコロイドの如き極微小粒子の薄膜を以て蔽はれ(此の膜は水分を多量に含む事もあれば又寒外乾燥してゐる事もある)内部は表面に比し少し乾燥してゐる。此の團粒は上部の凍上氷生成の爲に急遽に水分を奪はれた爲の乾燥等に依り生ずるものと思はれる。而して之れは粘土の如き微小粒子の

土壌にのみ認められる。尙この團粒表面のコロイド膜は其れが濕潤なると乾燥せるとある事より考へて、嘗て毛管水の一定通路となり其れが運搬沈澱したものと推測せられる。而して各團粒間はコロイド膜の所から剝離し易く又既にそれが網状微小龜裂を形成せるものも認められた。この内に氷があれば網状の縮縮状水となる。Terzaghi 氏の謂ふ龜甲形龜裂は昨多滿鐵鐵道技術研究所の宮川氏に依り訥河附近の兩壟時に注目されたが、今多筆者の北安にて獲たるは實験-4の通りのものであつて、之れは團粒の1種として凍上量の少ない粘土質土壌に稀に見るものであつた。

凍結線下5cm附近、換言すれば凍結帯(特に凍結線に幅を持たせて考へたもの)の下境邊りに寒氣透過面に平行に縮縮状微小龜裂を見る。これは中谷博士の實驗に表はれたのと同様のものである。而して此の微小龜裂の分布位置は相當特徴を持つもので分布範圍は僅かであつて凍結帯中央部以上には認められない。尙凍結帯と最下部水層との間には何等特徴のない一見平滑な土層がある。この中間層は間隙水に充たされ且つ上部の承層生長の爲加壓され一應微小龜裂は密着した爲目撃出来ないのではなからうかと考へられる。此の縮縮状微小龜裂は粘土より極く少し粗粒の土壌に見られ易く、時には團粒を破壊して出來てゐるものもある。之れと同様に微粒凍結土も寒さに依り其の表面に同一形状の微小龜裂を生ずるが、之等より此の微小龜裂は上部凍上氷生成の爲に間隙水の1時的積量を生じ其の乾燥に依る土壌の收縮に加へて、寒氣(過冷却の影響も考慮すべきと思ふ)の作用に依る收縮もあつて多少擴大し水層の母體となるものと考へられる。尙此の割目の内面は平滑にして團粒表面と同様コロイド膜があるやうに見えるのは毛管水の充満せし事を示すものである。而して此のコロイドが霜柱を生長せしめる役をなすものであらう。粘土を多く含む土が乾燥により團粒を形成するは濕土の乾燥によく見る現象であるから、此の團粒生成の性質を有する事は明かである。

以上を要約すれば凍結線直下に於て土壌が粘土質なる

時は先づ團粒を生ずるか或は直接微小龜裂を生じ、此の内に毛管水が上部の水層生成に費消されたる補給として供給され、それが氷堅に達したる時刻目内面のコロイドに依り次に述べるが如き霜柱を形成す。若し砂土質土壤なる時は土壤粒子間に間隙多き爲に割目を要せずして温度水分及土粒子の好條件なる位置に霜柱を生ず。而して之れが層をなすは等温線に依るものにして特に厚い層は温度の1時的停滯(氣温の停滯即ちる3寒4温の如きもの或は毛管水の温度に依る調和助長の爲の停滯等)に起因するものである事は明かである。

尙此等の微小龜裂が土堅を受けた土壤中に生成する爲には土壤の收縮の問題がある。これは實験-5に依り明かであるが、詳細は中谷博士の報告を参照されたい。

6. 凍上氷の變移過程

約言すれば中谷博士の御説の通り凍上氷はすべて地中の霜柱或は其れが多少變形したものである。即ち先づ土中に霜柱を生じ次に周囲の條件に依り霜降狀水の如き形となるものである。以下此の生成と其の變移過程を現場の實況に就き翻釋せるものと、蠶土堅の代りに手に依り之れを壓縮して次ぎ次に擣たる變移過程を擧げる。

凍上氷は前述の如く外觀上から霜柱水層と霜降狀水層(縮縮狀水を含む)とに分ち得る(中谷博士の分類に依る)而して凍結土の蠶盤側面を見るに霜柱水層とは實験-6の如く明かに霜柱の並列層にして、霜降狀水層とは中谷博士の仰せの通り神戸の霜降牛肉に似た外觀を持ち其の油部が氷で肉が土となつた様なものである。此の水は氣泡柱(或は氣泡連鎖をも)を有するか或は縦の割目を持つ特徴とす。縮縮狀水は凍結土壤中に縮縮狀に分布したる微りなる氷層にして、多くは透明であるが氣泡連鎖を有する事もある。

之等が同じく霜柱であると云ふ事は氣泡柱が霜柱の特質である事より了解出来るが又現場にて事實之等が順次連鎖して生ぜるを見れば容易に首肯し得るし、尙且つ霜柱を壓して順次霜降狀水及縮縮狀水を得る事に依り明瞭となる。即ち次に例證しやう。

安東附近にて觀測したる結果を第1に就き見るに此等各々に共通性を看取出来る、即ち大體相似形を有し唯内

部の氣泡の形及其の數或は有無に差を見るのみである。

尙此處では蠶盤中凍結線下の蠶盤土壁面に小さい霜柱が澤山生えて来るのを發見した。之れを注意して見てみると、上壁面に急にきらきら白く光るものが出来る。これは小なりとも既に完全な霜柱である。そして直ぐ0.5m位に生長する。實験-7は此の1束の霜柱である。之れが多少預間をもつて並んだものが圖-1のaである。之れより氣泡柱の數を少なくしたものがbの霜降狀水層であり、氣泡柱をなくし又多少變曲したものがcの縮縮狀水である。尙此の縮縮狀水にも實験-8の如き氣泡連鎖あるものもあり、此の氣泡連鎖は氣泡柱が切れ切れになつたものに過ぎない事は實験-7を見れば直ちに了解出来る。即ち以上が凍上の變移過程である。

奉天附近にて觀察せしは圖2に示す通りにして、之れは凍結線下の蠶盤土壁の少し凍結したものを取り出すと瓦狀に取れるが、之れを壁面に垂直に切つた圖である。之れに依り明かなる如く表面の上方の抵抗なき即ち壓力小なる所では霜柱が其の體残り、下方に行くに従ひ氣泡柱及氣泡連鎖ある霜降狀水層より連鎖氣泡のみ或は透明なる縮縮狀水となる。

圖3は氷層多き蠶盤凍土塊が日光により表面融解し其處に生じたる1種の霜柱であるが、上に近き部分は氣泡柱があり其の上は密なる氣泡連鎖となり、それが粗となり遂には透明となる。此の1つの氷片のみにては氣泡の變化過程は諒承出来る。

尙以上を實驗的に作り得れば此の推論は確證されるわけであるこれは實験-9の新生霜柱群を上方より壓縮して實験-10の様な僅かの氣泡柱を有する霜降狀水を、尙強く壓して、實験-11の様な透明な縮縮狀水を得られたる事實に依り明らかとなる。

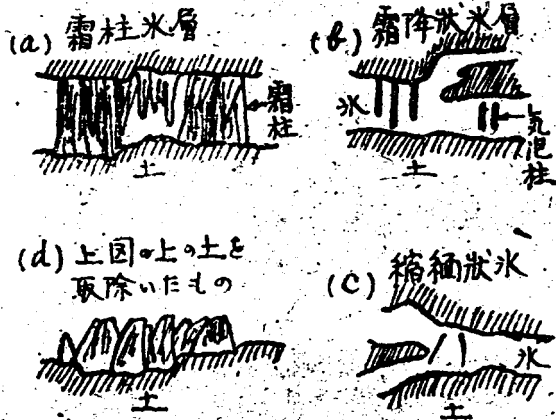
即ち粘土質土壤の凍結線下の割目内に生じたる霜柱は其の内面のコロイドの爲に隣接相互に密着群生して伸びんとする爲、其の生長及周圍の凍上に依り壓縮されて相方に融合され氣泡柱は其の壓力に依り粗となり、尙壓縮されて氣泡連鎖となり遂にはそれすら消えて透明水となる而して特に白氷となるは各霜柱束の間が外部からの壓力に依り割目を生じ其の面の反射の爲に白氷と見えるもの

で、之れは此の水の上面をエツテングすれば龜甲型の模様を見る事に依り明かである。尙又寒氣きびしい時出来る霜柱は腕を伏せた様な束となり群生す、之れが相互融合した時其の融合面は比較的弱く、爲に霜降状水層を其水面に沿つて凍土を剥離する時見る圖-4の如き龜裂となる事も明かである。即ち此の面に依り白氷と見えるのである。

7. 結 言

寒さが土中に入つて行くと土中の水分は凍結を始めるすると附近の水は此の水の初期結晶に集まり氷が生成すると云ふ性質がある。其處に平衡が破れ下方の間隙水は

圖-22



上方に移動す。その移動した時に1時的に極く乾燥した状態が起る事がある。尙この間に寒さが傳はり土層は収縮し、若し粘土質の如き微粒子なる時は其れが團粒状となり其の團粒間は網状微小龜裂の母體となる。粘土質よ

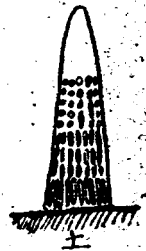
圖-23



り多少粗なる粒子の土壤に於ては(粘土質土壤をも含めて)乾燥、寒冷に依り収縮し縮縮状龜裂を生ず。此處に尙下方から毛管水の補給が有り、然かも凍結時に達すれ

ば其等龜裂内部に毛管水に依り運搬沈澱されたるコロイドある爲之れが苗床の役目をなし霜柱を發生す。此處に發生した霜柱は生長して上方に伸び龜裂内を埋め尙生長せんとして壓縮された貌となる此の壓力は土質に依つて異なり、砂土質の如く砂粒子間に間隙が多く可塑性に當むものでは此の砂粒子を壓して比較的自由に霜柱が其の原形を保つて生長し得るが、その反力大なる粘土に於ては霜柱は壓縮せられたと同様の力を受け隣接相互に融合し少しの氣泡柱を残し、氣泡連鎖となり、遂には透明水ともなる。即ち霜柱氷層は霜降状水層となり或は縮縮状氷ともなる。

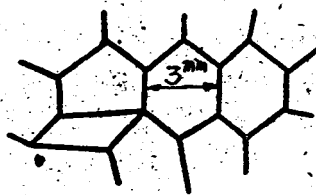
圖-23



而して温度と毛管水が適當ならば此の水層は漸次厚くなる。氣温の變化と氷層の變化は滿洲に於ては幸ひに寒4温ありて氷層も粗密の模様を生じ之等が可塑性を簡單に認め得られる。

尙此等氷層は(特に霜柱氷層に顯著であるが)昇華蒸

圖-24



發に依り漸次浸透して來て、時に空隙を有するものとなる事もある。此の昇華蒸發は如何なる深度、如何なる

温度にても起るもので唯温度差を要するのみであることは上記霜柱氷層の空隙上面の霜及砂利層中の石の下面に附着した霜氷-12の如き霜に依り明かである。

此の外空同性凍上模式は局部的不齊凍上に依る凍上の肉離れに起因するものである事は一見して明かである。滿洲の空同は殆ど此の式に屬し北海道に見られる昇華蒸發に依る大なる空隙は氣温の關係からか見當らない。

以上に依り凍上氷及其の變移並に其れの生成機構の一端を明か究明し得たのであるが尙今後に残された問題の方が多く、之等は現在研究旅行中なれば何れ次の機會に發表させて戴き諸先輩の御指導を仰ぎたい。



写真-1 凍結線下温度測定状況 (五股野)



写真-2 凍上氷層の融融状況 (北安子)



写真-3 凍結線下の粘土の粒径 (北安子) ×25

写真-4 上から見た凍結線下の龜甲型龜裂(北安)

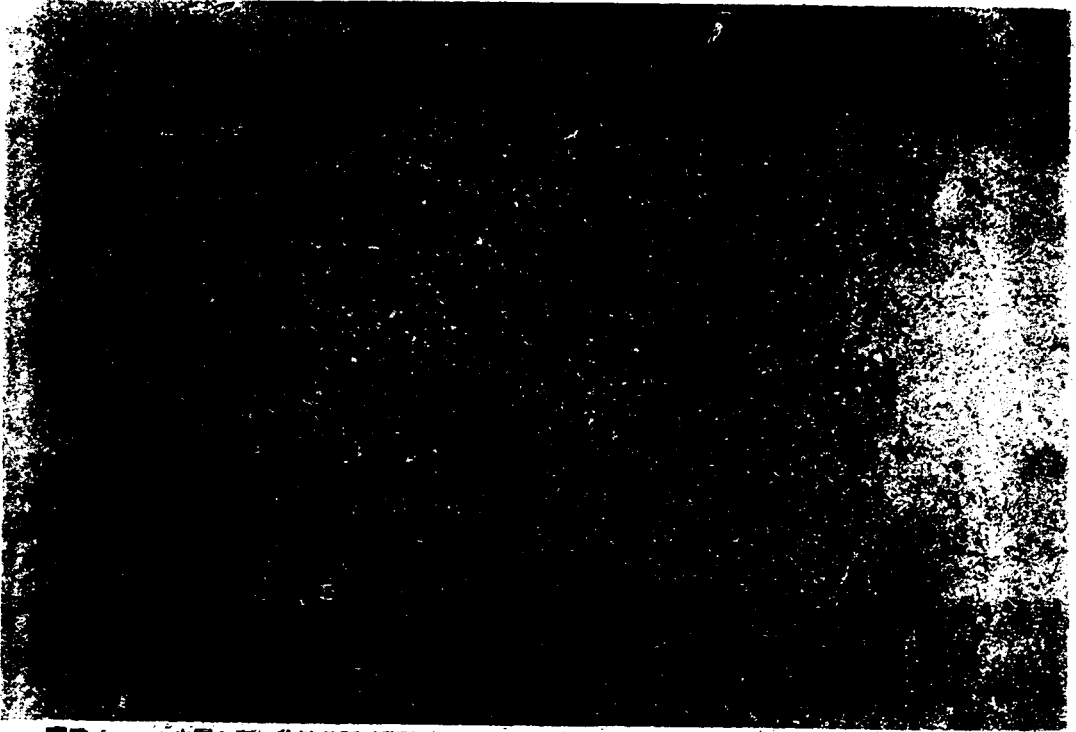


写真-5 凍上水層と豎の收縮龜裂(綏陵)

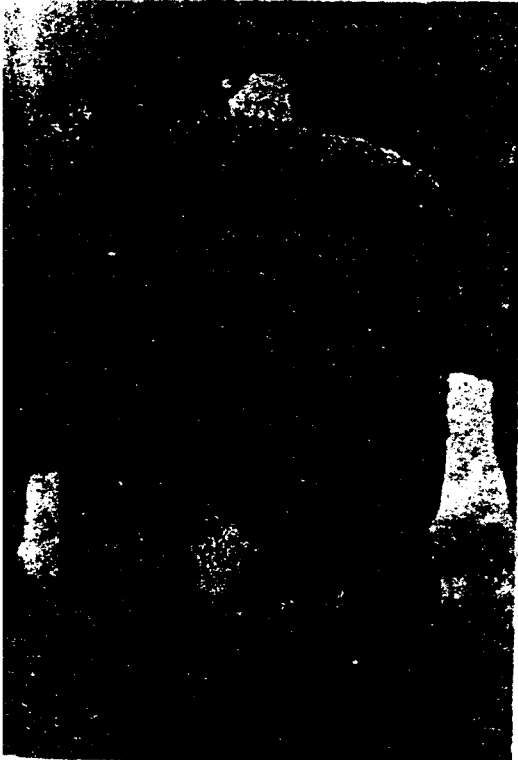


写真-6 凍上水層の色々(北安)

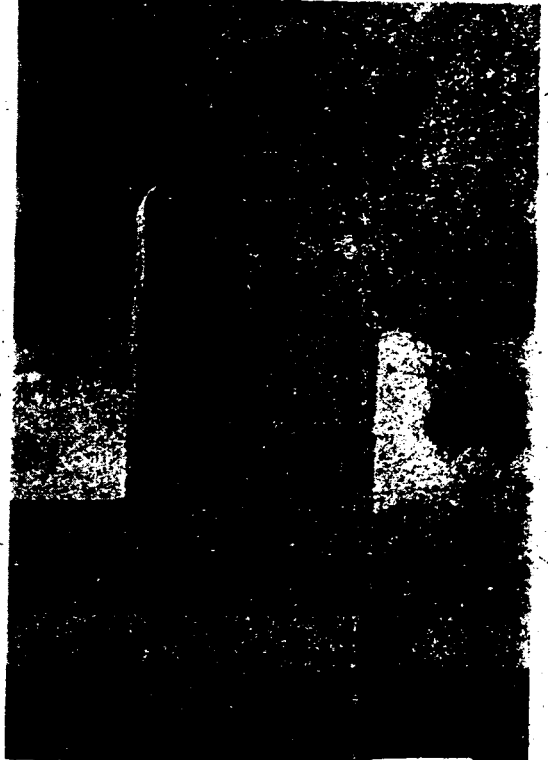


写真-7 新生霜柱束(得勝合) ×50



写真 8 縮縮状水中の気泡油膜(吉林) ×1



写真-9 新霜柱群(五龍背) ×25

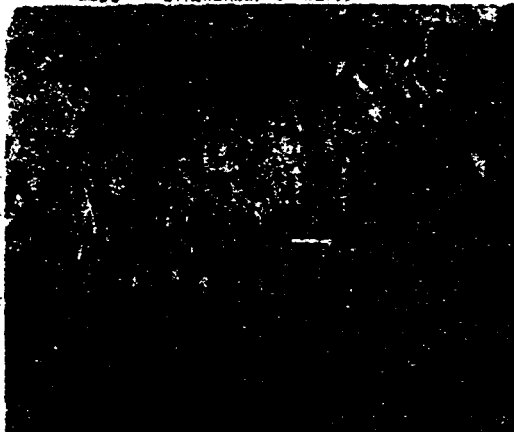


写真 10 前寫眞の霜柱群を少し壓縮したもの(縮縮状水層に同じ)



写真-11 前寫眞のものを稍強く壓縮したもの(縮縮状水と同じ)

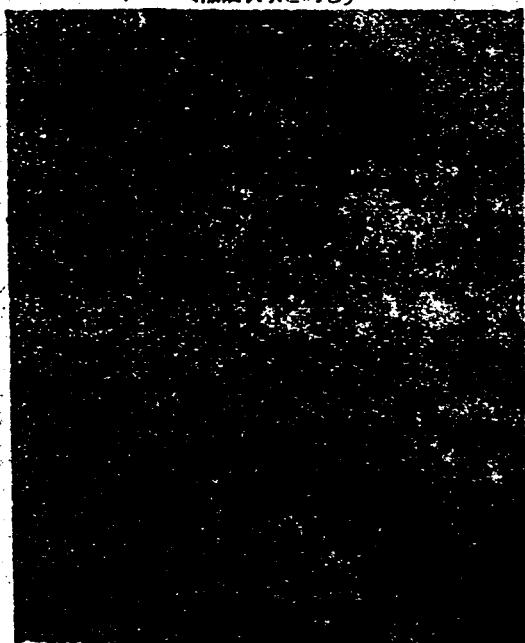


写真-12 コツブ型霜(北安) 25x

