



Title	凍上の過程と之を支配する二、三の要素について
Author(s)	眞井, 耕象; Manai, Kōzō
Citation	北海道大學工學部彙報, 6, 54-67
Issue Date	1952-09-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40499
Type	departmental bulletin paper
File Information	6_54-67.pdf



凍上の過程と之を支配する二、三の要素について

眞井 耕 象

(昭和 27 年 2 月 18 日受理)

On the Process of Frost-Heaving of Soil and its some Effecting Factors

KŌZŌ MANAI

Synopsis: In the first part of this paper a progressive process of frost-heaving of soil is considered analytically on the elements of a) heaving rate $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)$, b) heaving velocity $\left(\frac{\Delta l}{t}\right)$, c) freezing velocity $\left(\frac{\Delta l + l}{t}\right)$, d) moving velocity of a freezing line $\left(\frac{l}{t}\right)$ and their relationship. Next, from the results of experiment, the author discusses the effects on it due to (1) temperature and its gradient, (2) degree of water-supply through soil and (3) initial moisture content of soil, as the fundamental factors. He believes this paper will present some suggestible data to explain the mechanism of this phenomena.

目 次

§ 1. 序 説	54
§ 2. 凍上過程の解析	56
§ 3. 温度の影響	59
§ 4. 補水性の影響	60
§ 5. 初期含水量と凍上性	65
§ 6. 結 語	67

§ 1. 序 説

(A)

土壤の凍上作用に對する考慮は既に古くから拂われている。基礎を安定にする爲には之を凍結線以下に築設しなければならぬことは、遠くローマ時代から一般に知られている。そして凍結線以上の部分を凍上性の無い適當な材料で置換へようとする方法は、一つの有力な對策法として今日も尙續けられている。然し凍上の原理を究明して之に應じた科學的な對策法が講ぜられる様になつたのは比較的近年の事である。

凍上による被害が輕視出來ないことは從來判つていた筈であるが、凍上現象の本質が漸次闡明されて來るに従つて、凍上被害が意外の處にまで及び、農林業方面にも少なからぬ影響を與へていることも明らかになつて來た。特に融解時には全面的に地盤が弛んで不安定になるから、凍上の際

よりは却つて廣範圍に大きな被害を與へて、實際問題として極めて重視すべき結果を招來する。

最近社會經濟の發展、文化の進歩と共に交通機關の速度及び重量昂上、除雪の普及に伴つて寒地の道路・鐵道・滑走路等の建設・維持に益々重要な意義を有つことになり、新たに大きな關心が持たれる様になつて來た。

かくして此の種の問題に直面している國では、強力な研究機關を設けて活潑な研究が展開されている。然し土が吾々に最も卑近なものであるに拘らず、土性的に色々複雑した厄介な問題があつて、その研究が意外に立遅れとなつている様に、凍上作用の問題も突込んで見ると案外に判つていない事が多く、今後開拓すべき分野も廣い。

本邦でも國土の半近くは凍上作用の活動圏内にあり、而かも其の作用は諸外國におけるものに比し、むしろより活動的で、殊に北海道では極めて凍上被害を受け易い條件にあるようである。

(B)

凍上作用は土質によつて著しく不同があり、又同一土質でも條件によつて凍上性も變つて來る。例えば微細砂は普通條件では一般には凍上しないが、冷却速度を比較的緩かにすると徐々に凍上して來る。然し土質の中には凍上に必要な諸要件を具有しているに拘らず凍上し難いものもある。北海道に廣く分布する火山灰質土の中には、適度の微粒子に富み吸水性も極めて大であるのに殆んど凍上しないもの(例：美幌及び小清水火山灰土)がある。風化性の火山灰質土は却つて高度の凍上性を有つている。石炭殻粉末共他の灰類も火山灰質土と略類似の微粒組織であるに拘らず、非凍上性であるため、置換材料として利用されているが、此の場合の主なる凍上阻止作用は構成粒子の物理性でなくむしろ含有成分の化學作用に歸着する。凍上阻止効力の大きい化學成分は $MgCl_2$ 、 $CaCl_2$ 等であらう。之等の藥液を以て土を處理するときは、その凍結溫度の降下と補水性の減退とが主因となつて凍上性が阻止されるようである。

凍上作用はひとり土壤のみならず岩石にも甚しい被害を與える。例えば頁岩の地山に設けられた隧道(例：若松隧道)が、丈夫なコンクリート覆工を有するに拘らず、岩盤の凍上に起因してその側壁は横壓のため甚しく張出し、縦横に龜裂・喰違ひを生じ、兩口の坑門は全く崩落しているものがある。この隧道では取付けの切取斜面も同じ岩盤より成り、ひどく崩壞して毎年入口を埋められ通行を危険ならしめている。

泥炭土や安定處理土も凍上性を免れない。

かように凍上作用は土質と環境條件に支配されて色々な變化するから、吾々は凍上現象の原理と之を支配する諸要素の影響をよく認識して、初めて適切有効な對策法が講ぜられるであらう。

(C)

凍上作用の機構を一言に要約すれば、主として土壤水の分離晶出作用であつて、土壤水の單なる凍結氷化ではない。之を今少し詳しく言えば、過冷却状態にある土粒子面の吸着水分子が、氷の結晶として壓力を排除して冷却面に向つて析出する。之と同時に吸着水は元の水膜厚を維持するために下方から水分子を吸引して、更に分離を続けると説明されている。之は地上の霜柱の生成理論

と略同じである。従つて換言すれば、地中に霜柱が発生して成長して行くことであるとも言えるのである。然しそこには尙多くの不明の基本的な問題があつて、究極の處、分子問題にまで進んだデリケートなもので、物理化學上からも頗る難解とされ、種々の假定により一應は色々に解説されているが、未だ定論なく實はよくは判つていないようである。

筆者は茲に凍上作用の特性を究明する目的で、凍上の進行に伴いその過程を追及して凍上率・凍上速度・凍結速度或は凍結移動速度等の諸要素に解析し、夫等の變化する状態を吟味し、相互の關連性を明かにすることにした。之は又凍上機構を探ぐる一つの鍵となるであろう。

凍上作用を支配する要素は多々ある。就中環境條件として冷却速度又は溫度勾配と補水性の2要素は、凍上作用を決定すべき重要なものの一つであろう。茲には之等2要素が凍上性に及ぼす影響を検討した。

土壤の初期含水量の多少——或いは別な見方からすれば、土の經歷も亦凍上性を支配する有力な要素であることがわかり、同時に之も亦凍上機構を窺知する一つの示唆を與えるものとして取扱つた。

以下は叙上の諸問題に關する實驗結果の報告である。それは問題の解決を示すと云うより、むしろ新たな課題を提示するものと云えよう。

§ 2. 凍上過程の解析

地表面が冷却されて漸次凍結して行く場合を考える。此の場合外氣の冷却速度は常に一定に保たれている。そして土質も均質で、地下水源からも一樣に補水されるものとする。かような場合における凍上作用の過程を實驗的に觀察する。勿論實驗装置は閉式である。先ず凍上曲線を自記せしめると極めて平滑な略、直線として表わされる。凍上曲線は時間凍上量曲線でその傾斜は凍上速度を示す。即ち略、一樣な速度で凍上することがわかる。之は當然豫想されるところである。尤も凍結線が或程度下降するに従つて地中水の補給が容易なため、後で述べる様に凍上は促進されて曲線は上向きに上昇し、更に凍結線が下降すれば冷却速度が鈍るため、凍上は減退して曲線は逆に下向きに低下する傾向がある。夫でも曲線は常にスムーズである。

然るに凍土を取出してみると、凍結形態は一樣單純でなく、分離析出したレンズ状の氷板がよく發達して密集している部分と、そうでない部分とが何段にも互層をなしていることが多い。分離氷層が多い所ほど凍上量が多いことは勿論である。之は供試体の土柱には豫め5 mmの間隔に正しく蟲ピンを挿入してあるので、凍結後各區分の伸縮量から直接測定出来るようになってゐる。

扱、かような實驗における凍上過程を次の諸要素に分析して検討しよう。

- | | |
|-------------|--------------------|
| (1) 凍上率 | $\Delta l/l$ |
| (2) 凍上速度 | $\Delta l/t$ |
| (3) 凍結線移動速度 | l/t |
| (4) 凍結速度 | $(l + \Delta l)/t$ |

凍上率は供試体各区分の元の長さ l に對する凍上量 dl との比 dl/l の値である。 dl の値は凍結した供試体を實測して直接求められる。尤も嚴密に言えば dl の値は實際は凍上量と凍縮量との差として表わされる。凍縮とは土が凍結する直前に含有する水を吸取られて收縮したまま凍結することを謂う。圖-1 は横軸に時間 t を、縦軸に凍上量 dl を表わした凍上曲線を示す。之は又前述の廻轉ドラムに原寸で自記せしめた凍上曲線に相當する。 dl 軸のプラスは凍上量、マイナスは凍縮量を表わす。土が表面から冷却されると間もなく僅かではあるが凍縮し初める。之は土質により、又條件によつても違ふ。そして少し後れて凍上が始まる。凍上性の土ほど凍縮量も大であるが凍上量は著しく大であるから、兩者を比較すれば閉式における凍縮量は常に無視し得る程小さい。従つて供試体の各区分における見掛上の凍上量は圖に示す如く次式から求められる。

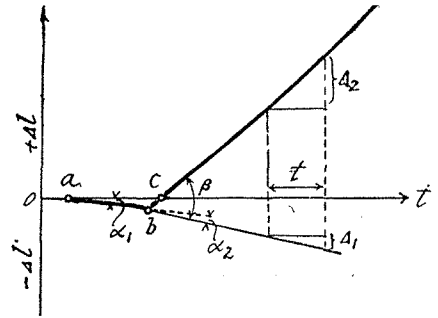


圖-1 凍上曲線

$$\text{見掛上の凍上量 } dl = \text{絶対凍上量 } (d_1 + d_2) - \text{凍縮量 } d_1 = d_2$$

自記した dl の値は供試体で實測した dl の値と大体一致する。

凍上速度は單位時間に對する凍上量の割合である。供試体の各区分に於ける凍上量 dl を成長させるに要した時間を t とすれば dl/t で表わされる。 t の値は圖-1 に示す如く自記凍上曲線から dl に相當する t の値として容易に求められる。

凍結線移動速度は凍結線が供試体の各区分 l だけを下降移動する速さで l/t で表わされる。 t は凍上速度において求めたものと同一のものである。即ち茲では土から氷結晶を析出しつつある處を凍結線と見做したのである。此處の溫度は 0°C 又は夫より僅かに低下した値で、略、零度線を凍結線と見做している。尤も土は土質や含水量によつて異なるが 0°C では完全には凍らない、幾分氷點降下をする。重粘土性ほど降下は大である。従つて凍結しかかつた所から固く凍結した所までの間には半凍結状態の部分がある。即ち土の凍結線は線でなくある幅を持つてゐるものである。凍結線の幅の問題については興味ある實驗があるがここには割愛しよう。

凍結速度は凍結深度を地表面から凍結線までの深さと考える時 $(l + dl)/t$ として表わされることになる。

凍上曲線及び凍結曲線は、積算した凍上及び凍結深度が時間と共に變化する状態を示す曲線である。

そこで土が凍結するに従つて以上の各要素が、如何様に變化しながら進んで行くかを解析的に曲線で現わすと共に、相互の關係を明瞭に意義づけようとするものである。

圖-2 は外氣温を -20°C とし、地下水温を夫々 $+2$, $+5$, $+8$, $+11^\circ\text{C}$ とする 4 箇の供試体の實驗例である。之等は他の條件を同一にするため同じ装置内で同時に實驗された。供試体に使用した土は更別ローム質で極めて凍上し易い土質である。實驗操作中外氣温及び地下水温は一定である。

従つて自記凍上曲線は極めてスムーズな直線に近いものである。 $\frac{1}{100}$ mm ダイヤルゲージで細かく観測しても平滑に進行していることがわかる。

然るに凍結した供試体の方を調べると、5 mm 間隔の各区分の凍上量又は凍上率は一樣でないのみならず甚しい不同がある。之を曲線で示すと圖の如く波状に變化している。凍上の凍結形態も之に相當して五層を呈している。即ち外界の條件は常に一樣に進行しているに拘らず、土の内部は複雑な周期的變化を生ずることが看取される。之は一見奇異の感を抱かしめるが、よく考察すると次のように一應説明がつく。

一般に土が凍結する際、氷晶を分離しつつある所は前にも述べたように略 0°C の線で、晶出に伴う潜熱と下の方から補給される地中水の保有熱とが、丁度上面からの冷却作用と熱的に平衡している。そして地中水の補給を受けながら氷晶を析出している間は、零度線の進行は殆んど停止の状態にある。しかも此の分離晶出作用に伴う水分子の吸引力は後に述べる如く、土の毛管作用よりも著しく大であると考えられているから零度線附近の未凍結部分から活潑に水分を吸引する。その結果凍結線直下は下の方からの毛管作用による水の補給が間に合わないため、漸次含水量を減じて収縮龜裂する傾向となる。従つて今までの凍結線では水の補給が減退する爲、熱的平衡が破れて遂に凍結線は下降する。然るにここでは土の含水量が既に低下しているため凍結し易い。換言すれば零度線の移動は早く、それだけ凍上量も少ないわけである。そこで更に零度線が下降すると、漸次土の含水量も多くなり下からの水の補給も容易なため再び熱的平衡を得て活潑に氷晶を分離し初めて凍上することになる。

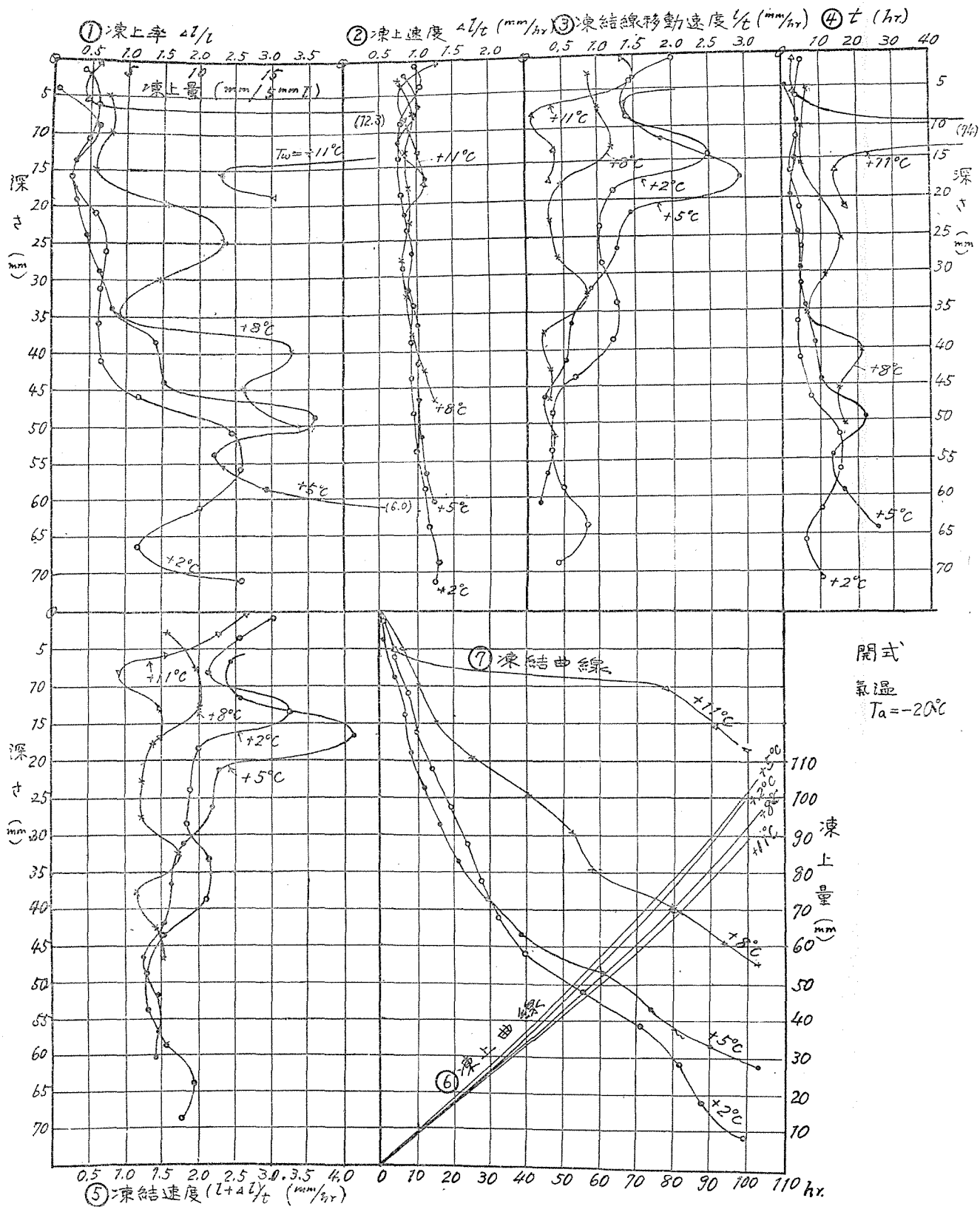
かようにして外気温は常に一樣な温度を持続しているのに對し、土の内部では氷晶分離して凍上旺盛な時は凍結速度は緩慢となり、反對に凍結速度大なる所は氷晶分離は衰へて凍上量も少ない。而して之等は交互に波動的に進む。従つて其の結果として外部に現われた凍上曲線は極めてスムーズな直線に近い曲線を描くことになり、凍上速度曲線も變化が少ないわけである。

以上の考察によつて凍上率曲線の波動的變化が理解されよう。凍結線移動速度曲線乃至は凍結速度曲線の波動性も同様に容易に理解される所である。そして之等の曲線の谷の所は凍上率曲線の山に、山の所は谷に對應する位置に表われることは次の關係からも明かである。

$$\frac{\Delta l}{l} \times \frac{l}{t} = \frac{\Delta l}{t};$$

即ち 凍上率 \times 凍結線移動速度 = 凍上速度 となる。

圖-2 で地下水温を $+2^{\circ}\text{C}$ ~ $+11^{\circ}\text{C}$ と變化せしめても、凍上曲線は何れも略、近似して大なる差異は認められない。従つて凍上速度曲線も大体近似している。然るに凍結曲線を比較すれば全く相違して、水温が低いほど凍結速度或は凍結深度は著しく大となつている。 $+11^{\circ}\text{C}$ の場合を見ると、凍結線 (0°C 線) は殆んど停滯して厚い氷層を分離發達せしめ、凍上率曲線も之に應じて他の場合とは甚しく違つたものであることがわかるであらう。



圖—2 凍上過程を示す諸曲線

§3. 温度の影響

凍上作用を支配する要素として温度の影響を考察する。試料は何れも高度の凍上性を有する前掲の更別ローム質、供試体の高さは 15 cm、装置は開式である。

気温 T_a 及び地下水温 T_w の値を色々に変えて見る。先ず $T_a = -20^\circ\text{C}$ に於て地下水温 T_w を +2, +5, +8, +11 $^\circ\text{C}$ に變へた場合の諸曲線は前記の圖-2 に示した。自記凍上曲線だけについて見れば餘り差異がない。但し凍結曲線其他は全然違つていることは既に述べた。次に気温 T_w を

-15 $^\circ\text{C}$ 及び -10 $^\circ\text{C}$ に變へて、夫々前と同様の地下水温に對して凍上實驗を行う。今度の場合には、地下水温の違いによつて凍上曲線も亦相當違つて来る。之等の凍上曲線から気温 T_a と地下水温 T_w に對する温度勾配 $(T_w - T_a)/d$ (d は供試体の高さ) と凍上速度の値を求めると表-1 となる。圖-3 は温度勾配を横軸に、凍上速度 (dI/t) を縦軸に取つて表-1 の値をグラフに描いたものである。地下水温が +11 $^\circ\text{C}$ のような比較的高い温度の時は気温が -10 $^\circ\text{C}$ の程度では殆んど凍上せず、水温が勝過ぎて気温との熱的平衡の機会が少なく、たとへ氷晶を分離しても恐らく間もなく融解されるだろう。-15 $^\circ\text{C}$ 更に -20 $^\circ\text{C}$ と気温が降下するに従つて漸く両者は熱的平衡を得て盛に凍上

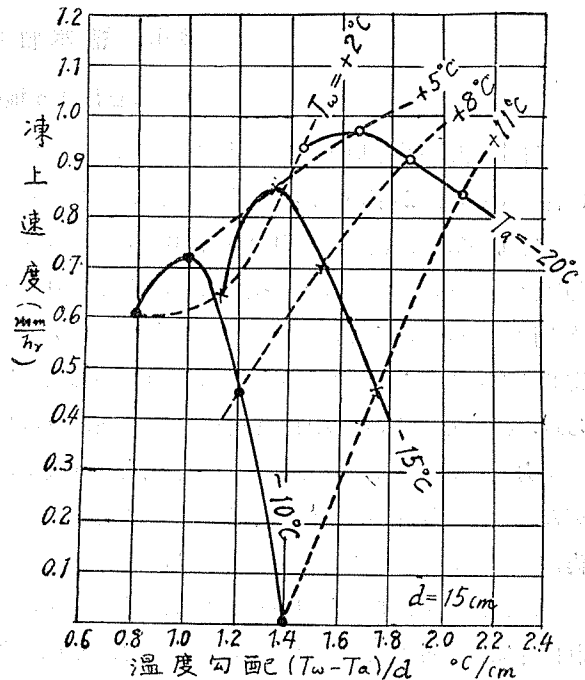


圖-3 温度勾配と凍上速度との關係

表-1 温度勾配と凍上速度

気温 T_a °C	地下水温 T_w °C	温度勾配 ($T_w - T_a$)/ d °C/cm	凍上速度 (mm/hr)		
			$t_1 = 0 \sim 40$ hr	$t_2 = 40 \sim 80$ hr	平均
-10	+ 2	0.8	0.61	0.59	0.60
	+ 5	1.0	0.73	0.71	0.72
	+ 8	1.2	0.51	0.38	0.45
	+11	1.4	0.0	0.0	0.0
-15	+ 2	1.14	0.68	0.59	0.64
	+ 5	1.33	0.82	0.89	0.86
	+ 8	1.54	0.68	0.74	0.71
	+11	1.73	0.58	0.30	0.44
-20	+ 2	1.46	0.87	1.01	0.94
	+ 5	1.67	0.93	1.01	0.77
	+ 8	1.86	0.89	0.93	0.91
	+11	2.07	0.84	0.85	0.85

するに至る。即ち気温が充分低下すれば地下水温が高いほど後で述べるように水の移動も旺盛となるから凍上も活潑となる。之に反して地下水温が $+2^{\circ}\text{C}$ のような比較的低い温度では気温が -10°C でもむしろ冷却速度が強過ぎて、水温 $+5^{\circ}\text{C}$ の時よりも凍上作用は少し低下する。実験範囲の条件では何れの場合も水温 $+5^{\circ}\text{C}$ が最も凍上し易いことを示している。

以上の結果から明かな如く、凍上作用は温度勾配だけでは決定されない。気温及び気温と水温との相対値が影響することが認められる。但し以上の結論は地下水源からの水の補給が十分な場合である。

§4. 補水性の影響

(A) 凍結に伴う地中水の移動

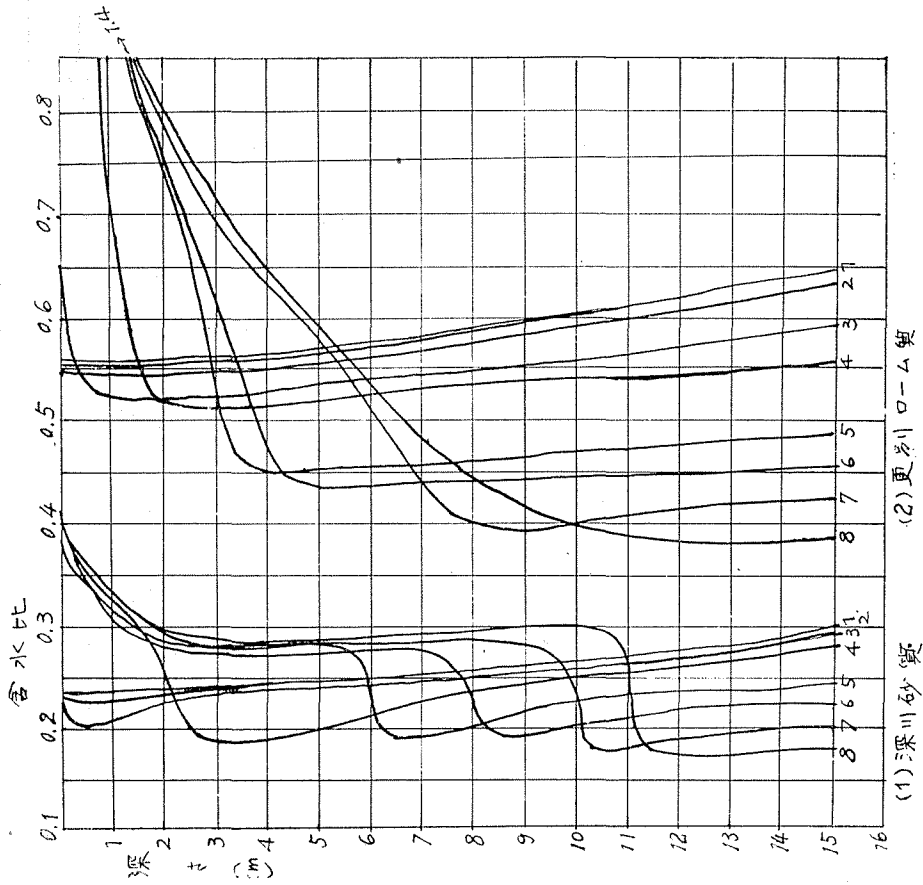
凍上現象の基本原理は既に述べたように、土壤が凍結する際氷晶が土壤水から分離析出し、之に伴つて地中水が下の方から吸寄せられて更に分離を續けて行くことに歸着する。

凍上の機構に就いては Taber や Beskow 等の所説を綜合すれば、微細土粒子面の吸着水が過冷却状態から氷の結晶を分離析出する時、大なる力(1)が壓力(2)に抗して冷却方向に向つて押上げ、之と同時に吸着水は元の水膜の厚さに復歸しようとして大きな吸引力(3)で地中水を反対側から吸寄せるのであると要約されよう。茲に(1)の力は水分子が吸着水膜から分離して氷の分子に變化する時の結晶力、(2)の壓力は土粒子とその表面に吸着している水分子との分子引力及び上部からの荷重壓力、(3)の吸引力は吸着水膜の分子引力に基因する復元力であると解釋される。勿論此の外に重要な熱の平衡條件が這入つて來るが、之に就いては前項で述べた所である。之等の理論については尙種々の疑義や異論の存する所であり、今後の研究に俟たなければならない。

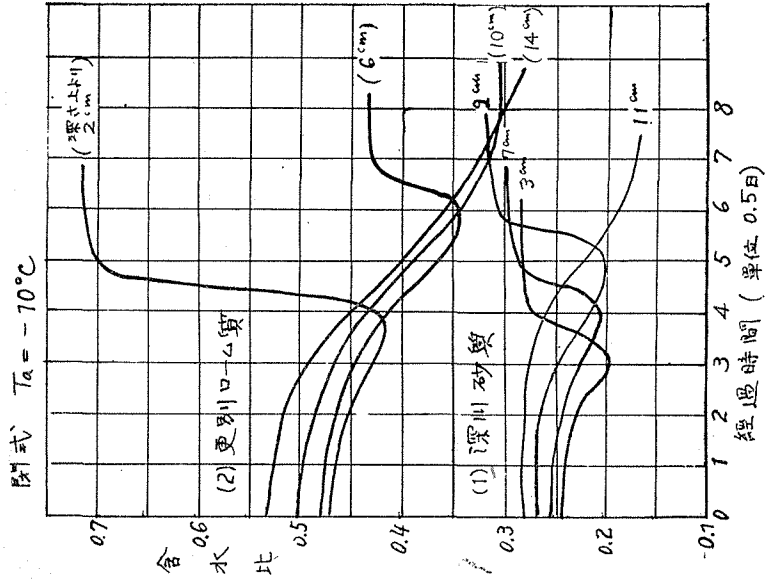
茲には凍上に必要な地中水の補給作用に就いて考える。此の補給作用は上記の論旨より推理すれば凍結線附近では氷晶分離に伴う吸引力により、之より離れた所では土の毛管作用によつて地下水源から吸上げられることになる。そして之等の吸引作用は同じ分子引力に基くものであるが、氷晶分離に伴うものは毛管作用によるものよりは遙かに大であると云う。之に關しては多くの現地の調査や実験の結果を觀察する時、凍結線附近の未凍結土は多くの場合含水量が減退し、ひどくなると收縮龜裂の傾向を生ずる。特に凍結線直下はその傾向が大であることが判る。又地下水位が深くて寒氣が嚴しい所では、土質によつては凍上よりも凍縮で惱まされている所がある。滿洲地方にその例が少なくない。之等は明かに凍結線附近の地中水が氷晶分離作用に伴う大きな吸引力で吸寄せられ、しかも土の毛管作用による水の補充が之に伴わないことを示している。

尤も氷晶分離に伴う水分子吸引力が、どの程度に遠くまで作用するかは明かでない。此の力は高さ150mの水柱を吸上げ得るものだと Taber は云つている。又地中水の補給源は地下水位の水とは限らない。土の保水力が大で飽和状態に近い多量の水を含有する場合や、中間の不透水層に遮斷されて停滯する溜り水も勿論有害凍上を起さしむるに足る補給水源となるのである。

次に土壤の凍結に伴う地中水の移動作用に就いて二、三の実験例を挙げよう。圖-4、圖-5は深



圖一四 閉式試験に於ける垂直分布曲線の時間的變位



圖一五 同一深さにおける含水量の時間的變位 (圖一四より)

川の砂質土及び更別のローム質土を試料として、充分水を吸収せしめた後閉式装置により実験したもの。気温は -10°C 、供試体の高さは16cmである。8箇の供試体を同一條件で同時に表面から凍結せしめ、一定時間(半日)経過毎に取出して深さ別に含水量を測定した。圖-4は含水量の垂直分布曲線が時間の経過と共に變移する状態を示し、圖-5は之を引き直して一定の深さにおける土の含水量の時間的變化を示したものである。之等から明かな如く、下層土の地中水は上層土の凍結によつて上昇移動し、殊に凍結線上においては氷層分離と共に、異常の水分が吸收集積せらるることが認められる。

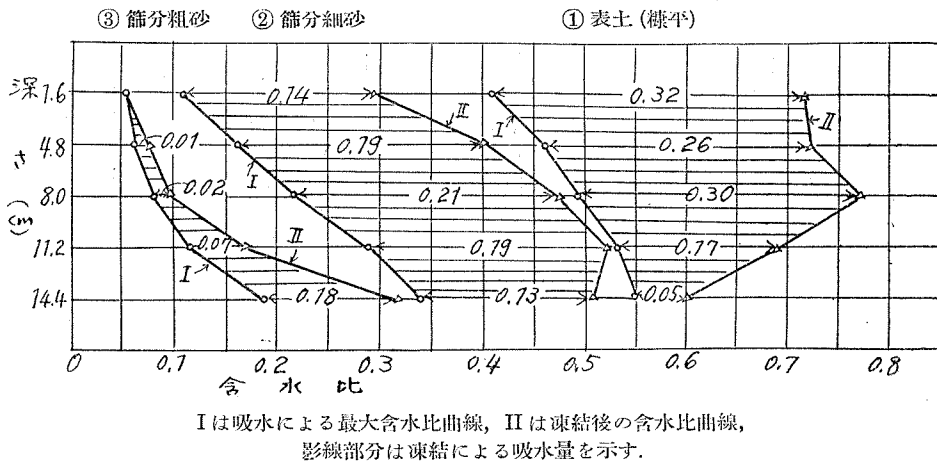


圖-6 3種の土の凍結による地中水の上昇(開式)

圖-6は粘土分を含む一般の表土(糠平)及び篩分した細粒砂と粗粒砂の3種の試料を用い、供試体の下面から毛管作用で吸上げ得るだけ吸水せしめた後、開式として表面より凍結せしめた場合である。圖は凍結前後の含水量の垂直分布の變化を示し、凍結による地中水の移動量を示す。そして土の構成粒子が小さいほど移動性が活潑であることが認められる。但し此の場合何れも凍上を伴っていないことに注意を要する。即ち凍結による地中水の移動性は必ずしも氷晶分離作用を要しない。單なる凍結だけでも盛に移動する。尤もかかる場合の地中水の上昇は土壤間隙を飽和するに到れば停止するが、凍上作用を伴う時は全く無制限に移動し得るわけである。

一般に土壤水は相隔たる2點間の温度差によつて、高い温度側から低い温度側に移動する性質がある。そして温度勾配が急なほど活潑となり、特に低温側が 0°C 以下で凍結を伴う時は著しく促進される。之に就いて Sumgin は水蒸気による移動説を提唱している。即ち土壤気隙は常に水蒸気で飽和され、高温側では氣壓高く、低温側は低く、従つて氣壓差によつて水蒸気は盛に移動する。そして低温側の凍結線にふれて凝縮氷化すると云うのである。

かように土壤の凍結に伴う土壤水の凍結移動は、凍上に伴うと否とに拘らず上層部に多量の地中水を集積せしめる結果、之が一旦融解期に到れば上層の地盤は著しく軟化される。若し此の際凍上を伴う場合は凍上による直接の被害の外に、融解期には融解水を氾濫せしめて凍上最盛期に劣ら

ぬ惨害を遅しうすることになる。之は又重大なる問題である。

兎に角以上の実験例より見て、凍結に伴う地中水の移動は單なる毛管作用のみでないことは明かである。

既に述べた如く、凍上に必要な地中水の補給は凍結線附近では氷晶分離に伴う吸引力により、それより遠い所では土の毛管作用によつて地下水源から補充されるとすれば、假令兩者の吸引力に差異があつても地下深い所の水源から補給される場合は、結局は土の毛管作用に制約されることになる。而かも此の場合決定的な要素となるものは、毛管作用による上昇高或は上昇割合でなく、上昇し得る水量である。而して毛管作用による補給水量は又毛管壓力と移動水に對する摩擦抵抗により左右される。毛管壓力は土壤間隙の徑に逆比例し、摩擦抵抗は土粒子の表面積の函數で表わせることは一般に認容されている所である。氷晶分離に伴う吸引力も恐らく之と同じ法則に律せられるものと考えられる。若し同じ土質で他の條件が同じならば、水源からの補給路の距離は補水性の難易を示し、凍上作用に直接影響することになるであろう。尤も凍結線からの距離が短い時の補水作用は、主として凍結線における氷晶分離に伴う吸引力に支配されるものと見るべきであろう。

何れにしても補給路の長さは補水性の難易を定める一つの尺度となる。次にかような條件は凍上作用に如何ように影響するかを實驗的に検討しよう。

(B) 補水性の影響

試料は前と同じく更別のローム質である。供試体は8箇で、凍結中、下方の地下水源からの補給性を色々に變へて見る。他の條件は成可く同一にするため8箇の供試体は同一装置内で同時に實驗される。勿論閉式である。氣温 -15°C 、水温 $+2^{\circ}\text{C}$ 、同一温度勾配にするため供試体の高さも次の要領で凡て18cmである。即ち供試体は圖-7に示す如くA, B 2種

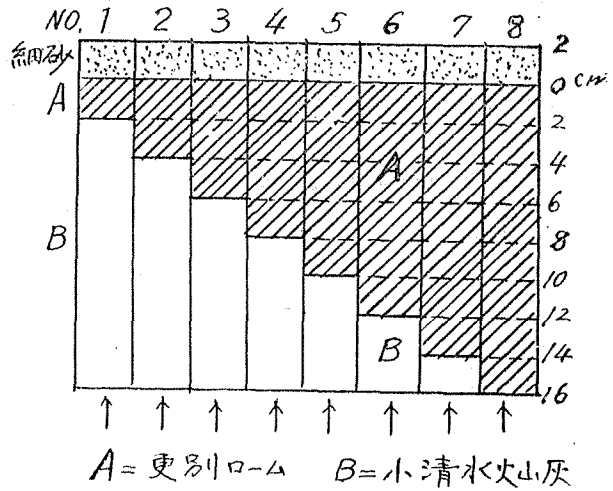


圖-7 供試体

表-2 補水性と凍上速度

No.	A cm	B cm	A+B cm	凍上開始 迄の時間 hr	凍上速度 (mm/hr)		
					$t_0=0\sim10$	$t_2=20\sim30$	$t_3=60\sim70$
1	2	14	16	8.2	1.5	2.2	—
2	4	12	〃	〃	1.5	2.2	—
3	6	10	〃	〃	1.1	1.5	—
4	8	8	〃	9.0	1.0	1.2	1.7
5	10	6	〃	12.8	0.8	0.8	1.3
6	12	4	〃	〃	0.7	0.8	1.0
7	14	2	〃	〃	0.5	0.7	0.8
8	16	0	〃	14.0	0.5	0.6	0.7

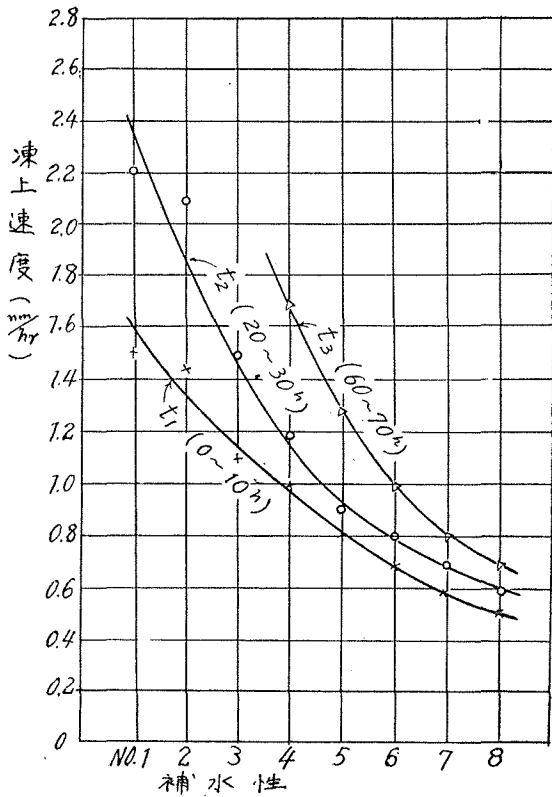


圖-9 土の補水性と凍上速度との関係

の土より構成されていて、その内Aは凍上性の高い更別ローム質、その補水性はBに比すれば著しく劣っている。Bは小清水火山灰質土、細粒組織で吸水性も極めて大であるが、全然凍上性がない問題の土である。夫々の厚さは表-2の如くなつて居り、A+Bは何れも16cmであるが、各供試体の上面には2cmの微細砂を被覆して高さ18cmとする。砂の被覆は表面に霜柱の発生するのを防ぐためである。

斯くして凍上試験の結果、各供試体の凍上曲線は圖-8で示される。これから凍上速度を求めると表-2となる。補水性と凍上速度との関係は表-2から圖-9で表わされる。之等の圖表によつて明かな如く、補水性は凍上速度に著しい影響があることがわかる。水の補給がよくなれば凍上性を増すことは當然のことであるが、その影響は前項の温度の影響に比すれば極めて大きい。

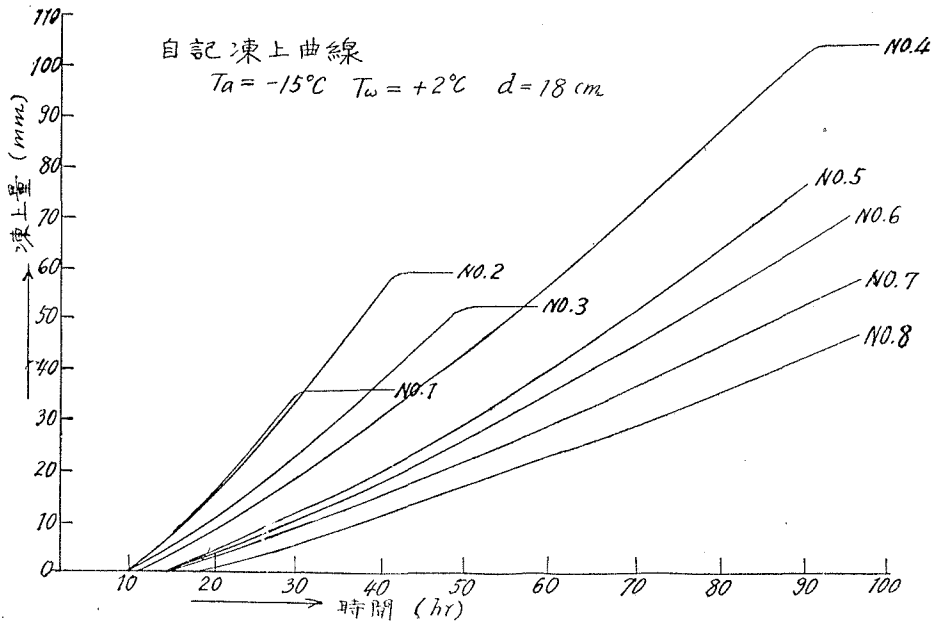


圖-8 自記せる凍上曲線圖

例えば表-1で気温を -10°C より -20°C (水温は $+2^{\circ}\text{C}$ の場合)とすれば、凍上速度は0.6より1.0 mm/hrとなる。之に対して補水性を変えると0.6より2.2 mm/hrまで充進させることが出来る。

尙表-2において同一供試体でも t_1 より t_2 , t_3 と進むに従つて凍結線が下降し、凍結線への水の補給が容易になるから凍上速度は増大している。かように水の補水性は凍上作用を支配する重要な要素であることが認められる。

§5. 初期含水量と凍上量

同一土質でも条件によつてその凍上性も變つて来る。前掲の更別赤褐色ロームを風乾土として乾濕を繰返して使用していると漸次凍上性を低下して来る。之は土の組成が攪亂されて原土とは違つたものとなつて来るからであろう。其の際流出限界値も明かに變つて来ることがわかる。

茲に興味ある現象は、更別ロームの風乾土に色々の割合に水を混和したものを試料として凍上試験をする。即ち初期含水量 ρ_0 を風乾状態から飽和状態に至るまで8つの段階に變えたものを夫々適度の密度に容器に詰める。之を常温で底面から毛管作用で充分に水を吸収させて何れも一旦飽和状態に達せしめる。然る後に低温恒温室に入れ、全く同一条件において同時に開式により凍上試験をする。

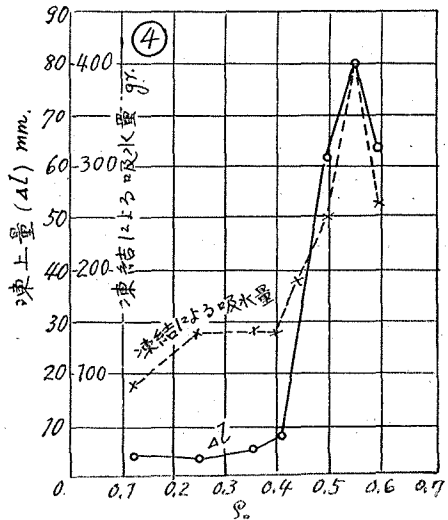
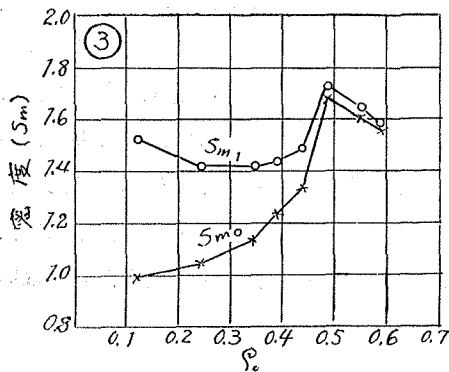
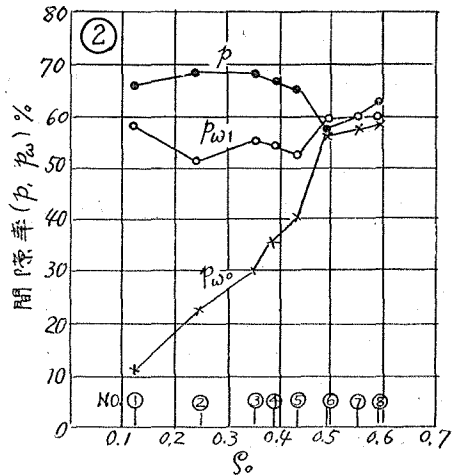
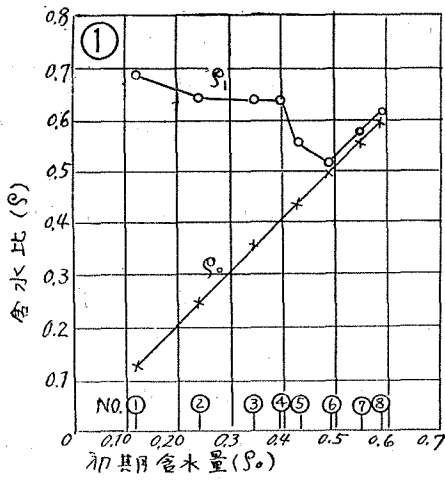
然るときはその結果として、初期含水量 ρ_0 が少ないものは飽和状態に水を吸収していてもその凍上量は極めて少ない。之に反して初めに充分の水を混和した初期含水量の多いものは原土と略々同様によく凍上する。幾回か実験を行つたが同じような結果が得られる。圖-10及び表-3は実験の1例を示す。圖-10は豫備吸水試験前後における各供試体の含水比(ρ)、間隙率(p)、水際率(p_w)及び密度(S_m)の變化を表わし、又凍上試験における凍上量(d)及び吸水量を表わす。此の時の気温は -10°C である。即ち同じ土が同じ飽和状態にあつても、一つは吸収した水が主体をなし、他は注加混合した水が主要部分をなす。之等の間に密度の差異も比較的輕少である。(尤も或程度密度を高めるに従つて凍上性を増して来る傾向はある。)又土粒子の配列機構か或は間隙水の性状に變異を生じたためか、何かそこに凍上性を左右する要素が介在する事が窺われる。前項で記述したような補水性の差異に基因するのではないかの懸念から之に關しての檢證実験を行つた。即ち8箇の供試体は下半分には初期含水量 ρ_0 を色々に變へたものを補水層として詰め、上半分には凡て同じ状態の更別ロームを凍上し易い状態に載せ、之を開式により凍上実験をした。然るにその結果は各供試体の凍上量には餘り不同がなく、初期含水量の差異によつては補水性に何等影響をもたらしなことがわかつた。

茲にも凍上機構の謎を解く鍵が秘められているように思惟される。

表—3

No.	吸水前				吸水後			凍結後	
	ρ_0	$p_{w_0}(\%)$	$p(\%)$	S_{m_0}	ρ_1	p_{w_1}	$S_{m_1}(\%)$	$\Delta l(\text{mm})$	吸水量(g)
1	0.12	11	66	0.99	0.69	58	1.51	4	90
2	0.24	22	68	1.04	0.64	50	1.41	3	136
3	0.34	29	68	1.12	0.64	55	1.41	5	140
4	0.39	35	66	1.22	0.64	54	1.42	7	135
5	0.43	40	65	1.32	0.56	52	1.47	21	189
6	0.49	56	57	1.68	0.51	59	1.72	61	248
7	0.55	57	60	1.60	0.59	59	1.64	80	401
8	0.59	58	63	1.55	0.61	59	1.58	64	267

ρ 含水比, p_w 水隙率(%), p 間隙率(%), S_m 密度(見掛比重), Δl 凍上量(mm)



ρ_1 吸水後の含水比, p_{w_1} 吸水後の水隙率(%), S_{m_1} 吸水後の密度(見掛の比重)

圖—10 吸水前後に於ける含水比・水隙率・密度及び凍上試験に於ける凍上量及び吸水量

§ 6. 結 語

以上記述した所を要約すると次の如くなる。

1. 凍上の過程を凍上率・凍上速度・凍結速度等の諸要素に解析して、凍上作用の一つの特性を明かにした。
即ち一様な冷却作用に對して、凍上速度曲線は略々一様であるが、内部の凍上率曲線や凍結速度曲線等は複雑な波動的變化を呈する。
2. 氣温と地下水温との相關性が凍上に及ぼす影響を檢討した。
3. 凍結による地中水の上昇移動作用を明かにすると共に、補水性の難易が凍上に及ぼす影響は極めて大きいことを實證した。
4. 初期含水量も凍上を支配する一要素であることを指摘し、風乾土又は之に近いものを吸水飽和せしめたものは凍上性極めて低く、同じ風乾土に加水混和すれば凍上性を著しく亢進せしめることを示した。

之等は其の理論において尙檢討の餘地があるが、深遠な凍上機構の基本原理の解決に一步でも前進せしむべき素地を造ることになれば幸である。(なお以上の實驗は主として昭和 17~18 年においてなされたものであり、昭和 22 年 10 月 3 日 日本學術振興會土質工學第 104 小委員會において講演したものであることを附記する。)