



Title	凍結による土壤の體積變化について
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 荒川, 淳
Citation	低温科學, 1, 67-77
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17384
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p67-77.pdf



凍結による土壤の體積變化について

中谷 宇吉郎, 荒川 淳

§1. 緒 言

土壤が凍結によつて體積を變化することは當然考へられるが、その詳しく研究は未だ殆ど無いやうである。第一に土壤が凍結によつて膨脹するか、收縮するかさへも方向によつては分つて居ないのである。凍上の現象がある以上、土は凍結した場合膨脹すると考へるのが當然であるが、凍上の現象は吾々の研究によれば、⁽¹⁾土中に水層が分離析出する爲に起るもので、凍上量即ち上方への膨脹量の大部分少くも 90% はこの分離した水層の厚さの和を示すものである。それで土自身は凍結によつて膨脹したか收縮したかは分らない。

この方面では黒田、木村兩氏の説⁽²⁾があつて濕土が凍結によつて膨脹すると假定すると凍上に伴ふ色々な現象がよく説明されるといふのである。しかしその假定の實驗的研究は其の後否定に傾いてゐる由であり、又吾々の實驗でも、濕土は冷却方向には外觀上膨脹するが、それと直角な方向には收縮するといふ結果になり、簡單には言へないことが分つた。

濕土の凍結による體積變化の研究には、別の一聯の研究が外國特に米國⁽³⁾にある。それは膨脹計の中に濕土を入れ、水に溶けない有機不凍液を加へ、土中の空氣を眞空装置によつて抜き、全體を零下數度に冷して、その體積膨脹から凍つた水の量を測る研究である。この場合は土中の空氣を抜いてあるので、勿論體積は水の凍結により膨脹分だけ大きくなる。しかしこれは普通の意味での濕土の凍結による體積變化ではない。

凍上に於て問題になるのは、普通の意味での濕土の凍結による體積變化である。その變化は土の質とその含水量とによつて變るばかりでなく、冷却方法によつても變化するので、各種の條件でそれ等の測量をした結果を此の報告で述べる。

§2. 凍上が起きる場合の土の横の伸縮

凍上の現象、即ち凍土が上方に隆起する現象は、溫度傾斜の方向即ち上方へ向つて地中で霜柱が伸びる爲に起る。この際それと直角の方向即ち水平方向に土が膨脹すれば、挫屈 (buckling) が起き、それで凍上が説明される。もしさうならば地中の霜柱は挫屈で出來た割目を氷でふさい

北海道帝國大學低溫科學研究所報告 第 7 號。理化學研究所彙報, 第 22 輯, 第 4 號, 1 頁。

(1) 中谷宇吉郎, 孫野長治: 氣象集誌 18 (昭. 15), 313.

中谷宇吉郎: 氣象集誌 20 (昭. 17), No. 4.

中谷宇吉郎, 孫野長治: 氣象集誌 20 (昭. 17), No. 5.

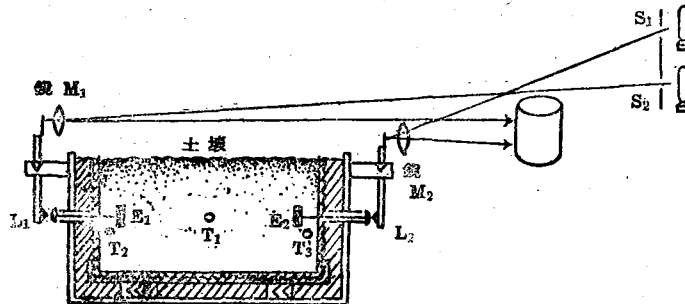
中谷宇吉郎, 菅谷重二: 應用物理 11 (昭. 17), 160.

(2) G. J. Boryoucos: Soil Science, 42 (1936), 217.

(3) T. F. Bahrer and M. S. Rosenblum: J. Phys. Chemistry, 43 (1939), 941.

だものと説明出来るので、その説では霜柱は凍上の原因ではない結果になる。その點を確める爲に、凍結の際の水平方向の伸縮を實驗的に調べた。

i) 測定装置 装置は第 1 圖に示す如くである。防水したケント紙で作つた函 A (29 cm × 13.5 cm, 深さ 15 cm) の中に供試濕土を入れ、その兩側に直径 3 cm の小型試験板 E_1, E_2 を挿入した E_1, E_2 の線まで凍結線が下降して來た時に、水平方向に土が伸縮すれば、 E_1, E_2 が

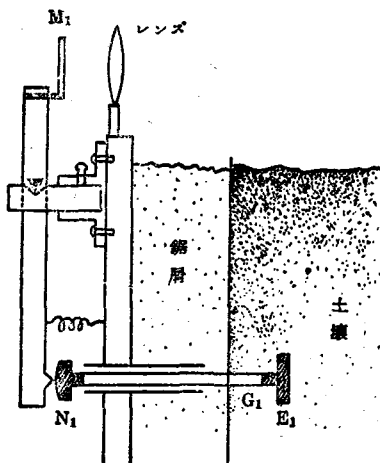


第 1 圖

動く。それをレバー L_1, L_2 で擴大し、鏡 M_1, M_2 の動きに直し、プロマイドの廻轉ドラム上に描かせた。 T_1, T_2, T_3 は酒精寒暖計で、壁の前面から水平に入れてある。

A 函を更に大きい外函に入れ、その間に鋸屑を入れて周囲からの冷却を防いだが、それでは不充分だつたので、更にその中にニクロム線を配置し、弱い電流を通して、 T_1, T_2, T_3 が常に大體同じ温度を示しながら下降するやうに、即ち凍結面が略水平を保ちながら沈下するやうに電流を調節した。装置全體は -30°C の低温内に作つた水暗室の中に設置した。

試験板の可變装置は第 2 圖に示す如くである。 E_1 はエポナイト製、 G_1 は硝子管、 N_1 はエポナイト製である。供試土壌が冷却の進行に伴ひ、垂直方向にも伸縮するので、 G_1 が少し傾くのは



第 2 圖

止むを得ない。それから來る誤差を少くする爲に N_1 の面を球面狀に削つて置いた。レバー L_1 は眞鍮製である。他の側も全くこれと同様に作つた。

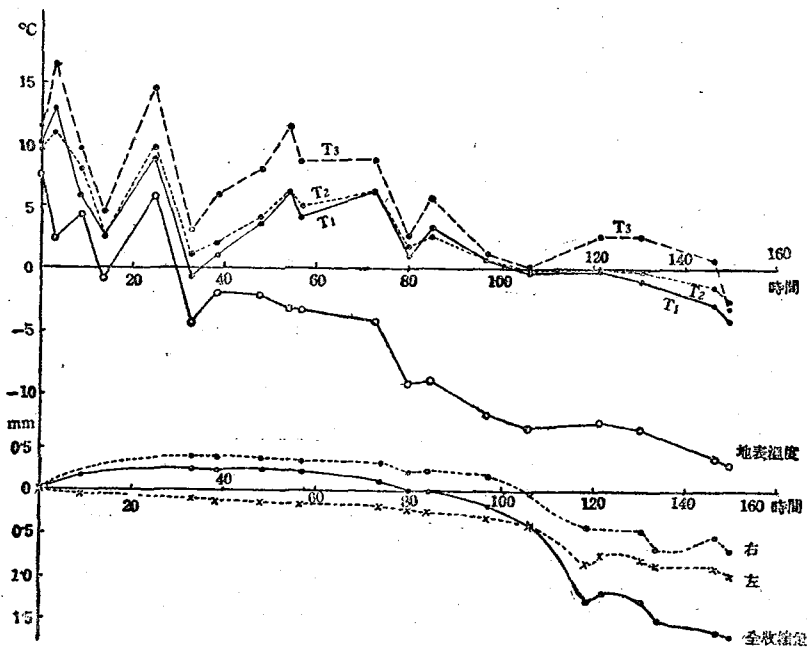
ii) 測定方法 實驗は、常溫に於て濕土を詰め、試験板其の他を設置し、低温室内に入れてすぐ光學装置を調節し、その後放置して上方からのみ冷却させる。 $\overline{E_1 N_1}, \overline{E_2 N_2}$ が初めに常溫にあつたので、その冷却に上る收縮を補正する必要がある。硝子の熱膨脹係數が小さいので、その補正值は、0.05 乃至 0.07 mm, 最大 0.08 mm に過ぎなかつた。以下の圖ではこの値を補正した曲線があげられてゐる。

試験土壌は赤土、粘土、砂、北海道の鐵道現場の土二種、滿洲奉山線の土一種を用ひた。いづれの場合も風乾土に水を加へてこね、それをパラフィンで防水したケント紙の函に、試験板寒暖計などを適當に埋めながら詰めた。この豫備的實驗では土の含水率は正定せず、流出限界より水の少い程度で實驗した。

此の装置を -25°C 乃至 -30°C の低温室内に放置して、上方からのみ凍らせた。凍結線が試験板の所まで下降するには、土により 20 乃至 40 時間かかった。測定は全土壌の凍るまで、長い時には 100 乃至 120 時間つづけた。

此の装置では、凍上によつて土が著しく隆起すると測定が困難になるので、下方から餘分の水の補給はせず、所謂閉式 (closed system) で實驗した。それでも少量の凍上はするので、光學レバーの倍率が計算通りにならなかつた。それで倍率は實驗的に測定し、左の試験板が 34.1 倍、右が 33.1 倍といふ値を得た。

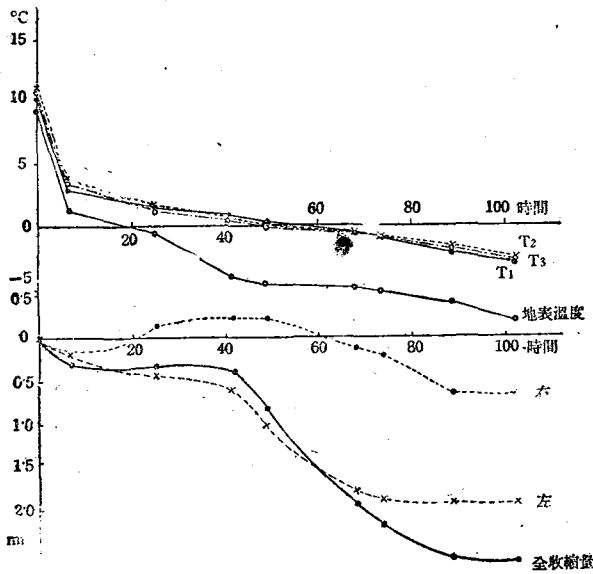
iii) 測定結果 測定は各種の土について澤山行つたが、そのうち完全に記録のとれたのは 7 例であつた。初めのうちは地温を一様に、即ち等温面を略水平に保ちながら下げることが困難であつたが、後には外函内の加熱補助電流の調整に馴れて、地中の等温面を略水平に保ちながら冷やすことが出来るやうになつた。



第 3 圖

初期の溫度調節の巧く行かなかつた頃の例は第 3 圖に示す如くである。土中の同一水平面内にある寒暖計 T_1 , T_2 , T_3 は圖の如き偏差を示してゐるが、その平均が大體 0°C に近づいた時から、土は急に收縮を示すのである。土の膨脹收縮は同圖の下方に描いた曲線で示してあるが、左

右の試験板の動きが異なるので、その各を點線で示し、その和、即ち土の全收縮量を實線で描いた。この圖によると、土の温度の降下に伴ひ、初めは膨脹し、凍結面が試験板の面に近づいた頃から



第 4 圖

起きることがよく分る。

7 例の結果を第 1 表に示す。

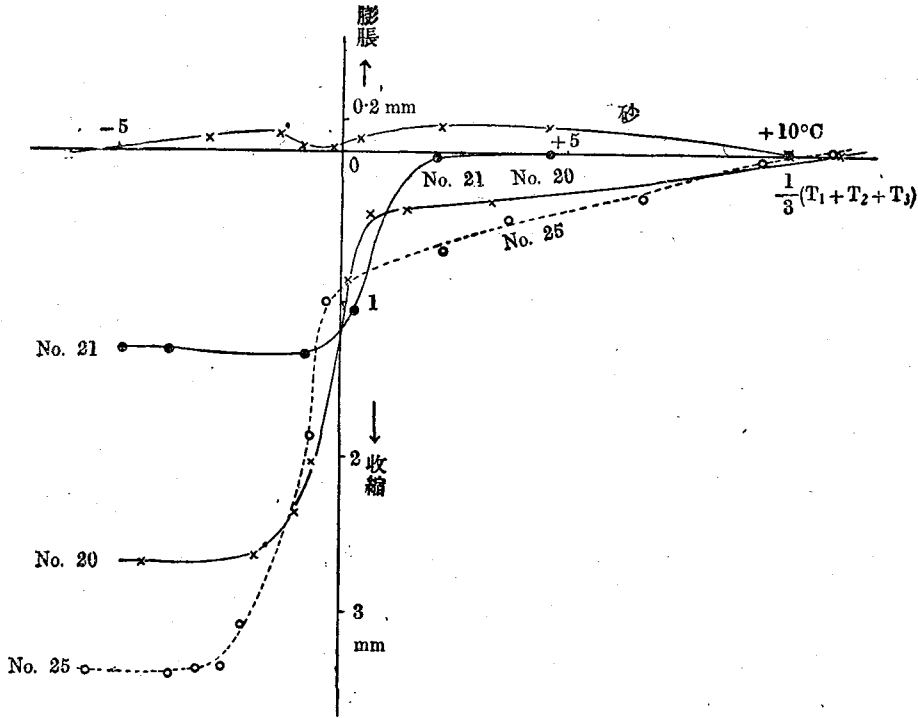
第 1 表

實驗番號	土名	試験極間距離	全收縮量
19	札幌現場 No. 2	16 cm	0.19 cm
20	北大構内赤土	16	0.26
21	"	16	0.12
23	札幌現場 No. 3	17	0.14
24	北大構内粘土	17	0.32
25	滿洲奉山線 No. 2	17	0.30
26	砂	18	0.01

この表で分るやうに、凍結によつて土は例外なく横向きには收縮するが、砂は殆ど收縮しない。表中の 0.01 cm の收縮は殆ど誤差の範圍内である。

次に第 3 圖、第 4 圖及び同種の他の圖から、 T_1 、 T_2 、 T_3 の平均と收縮との間の關係を出し、圖示した。その結果を第 5 圖及び第 6 圖に示す。第 5 圖は初めから收縮の起つた 3 例と砂の場合とである。砂は初めに少し膨脹するが、これも後述の加壓の爲で、收縮は 0°C 附近で少量起きるが、その量は極めて小さい。他の 3 例では、土が 0°C 乃至 $+2^{\circ}\text{C}$ 位まで冷えると急激

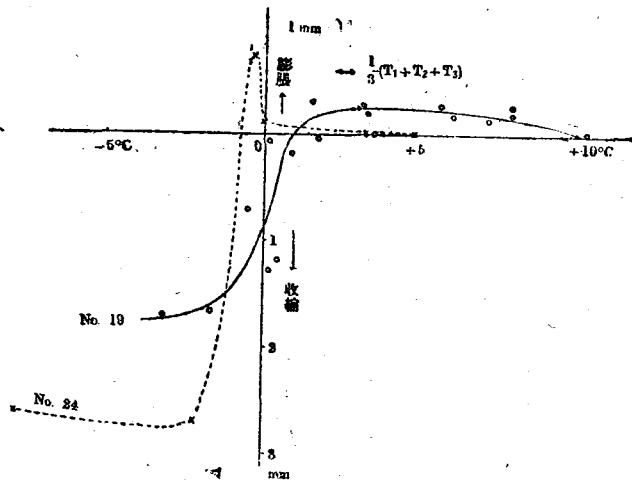
に收縮し始め、 -1°C 乃至 -2°C 位までの間に收縮が完了する。それ以下は凍結してしまふので勿論變化しない。第 6 圖は初めに少し膨脹して、 0°C 附近から急激に收縮する 2 例を示す。



第 5 圖

この場合も 0°C 乃至 -2°C 間で收縮が完了する。No. 24 は試験板直上の土中にパラフィン紙を挿入した場合である。この時は一寸著しい膨脹の起きるのは壓力の爲で、その點については次章で述べる。

iv) 豫備的考察 前に行つた凍上の實驗的研究⁽¹⁾に於て、凍土中に氷が層となつて分離析出する場合、その氷板の出来る位置を決



第 6 圖

定するものは、凍結直前に土壌内に出来る割れ目であることを述べた。凍結線が或る深さに達し

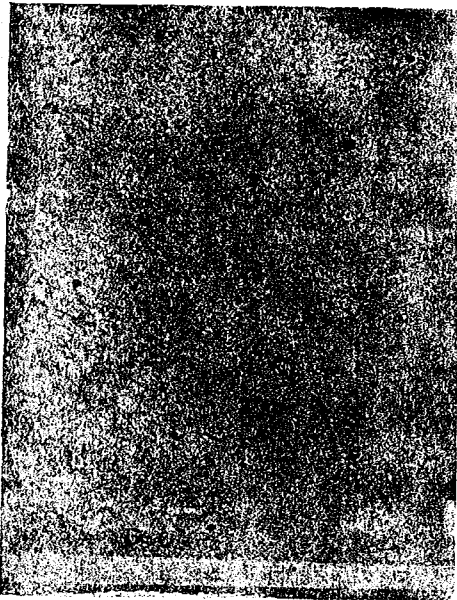
(1) 中谷, 孫野, 氣象集誌 20 (昭. 17), No. 5.

た場合、その直下の土が乾燥し⁽¹⁾且つ温度が低下するために、收縮する。その際土中に毛細割目が出来、その割目中に氷が析出して割目をひろげ、氷板となる。その氷板が出来た頃は凍結線がそこまで降つてゐるので、その直下に又割目を生じ、その中に又氷板が發達するといふ風にして、氷板或は氷層が霜降状に入るのである。

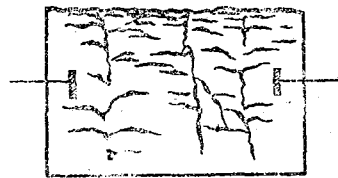
此の實驗に於て、凍結線直下で横向きの收縮が起きることが判明したので、以上の考察が裏書されたことになつた。普通は凍結線が水平である爲、その直下の土の水平な層が收縮して、略水平の割目を生ずる。天然の場合にも霜降状の氷板は大抵水平に出来てゐる。ところが此の場合或る深さまで土が一樣に收縮して、塊状に割れ、その爲縦の割目が同時に出来、その中に氷が析出することもある筈である。

滿洲の凍上現場切斷調査の結果、縦の割目が大抵の場合存在することを知つた。又數種の滿洲の土について實驗的に調べた結果、滿洲の土は一般に收縮が著しく、縦、横に無数の割目が入ることを認めた。その 1 例を第 7 圖の寫眞に示す。

それで以上の實驗で作つた凍土を切斷觀測して見た。すると北海道の土についても少數ながら縦の割目を生じてゐることを知つた。その状態を第 8 圖に模型的に示す。かういふ縦の割れ目が生ずると、今迄測つた收縮量は、兩試験板間の土の收縮量



第 7 圖



第 8 圖

とは言へなくなる。例へば第 1 表の No. 21 の實驗では 0.12 cm の收縮がある。しかし兩試験板間の 16 cm の土がこれだけ縮んだのではなく、實際は縦の割れ目の幅だけこれよりも多く收縮してゐるのである。No. 20 と No. 21 とを比較して、同じ土について著しい收縮量の異なる理由もこれで説明さ

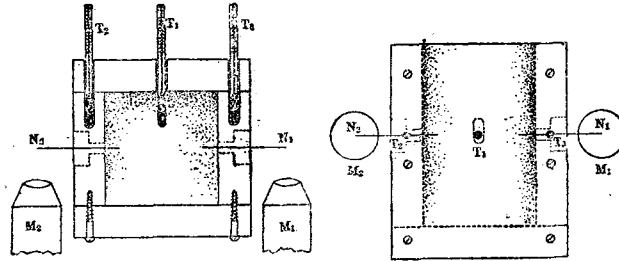
れる。

それで收縮量の測定には、もつと小さい標本について實驗する方が却つて精密な値を得ることを知り、次の小型装置で實驗をすることにした。

§3. 改良装置による水平收縮の測定

(1) 中谷, 氣象集誌 20 (昭. 17), 4.

前章に述べた實驗結果にかんがみて作つた改良小型装置は第 9 圖に示す通りである。この装置の内容は、5 cm 角で深さ 8 cm とし、周壁は堅木で作つた。測定方法を極めて簡明にするため、兩側面から埋めこんだ細い硝子針 N_1 、 N_2 の動きを、目盛顯微鏡 M_1 、 M_2 で讀むことにした。容器の内面にはアスファルト及び不凍ワゼリンを塗つて、土が凍上によつて隆起する際の摩



第 9 圖

擦を少くした。この容器を低温室内で適當な保温用外箱に入れ、その外箱内の温度分布を調節することによつて、凍結面が略水平を保ちながら下降するやうにした。その全體を恒温箱中に入れて實驗した。 T_1 、 T_2 、 T_3 は直徑約 3 mm の特製細酒精寒暖計で、三者の温度がいつも大體等しい値を示しながら下るやうに調節した。 M_1 、 M_2 の倍率は共に 7.6 倍にして使用した。

i) 測定方法 實驗は主として一旦乾した土を水でぬり、約一晝夜放置したものを使った。その外に天然の濕土をその儘 5 cm 角に切り出したものについても測定した。

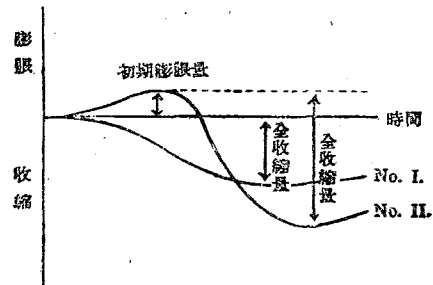
測定方法は、土を容器に入れ、1 時間位放置した後低温室中の恒温箱内にて上面より冷却させた。針 N_1 、 N_2 の水平方向の動きは約 1 時間毎に目盛顯微鏡で讀んだ。 N_1 、 N_2 は 5 mm 乃至 8 mm 程度土中にさしこんである。

各資料毎に初めの含水率 r と見掛比重 ρ_1 、凍結後の比重 ρ_2 を測定した。針 N_1 、 N_2 の動きは個々の實驗では左右不對稱のこともあつたが、全部の結果を圖示してみると對稱の形になつたので、その和を全收縮量とした。

水平收縮量は第 10 圖に示すやうに、No. I 型、即ち初めから收縮する場合と、No. II 型即ち初め膨脹して、凍結少し前から收縮を初める場合とがあつた。後の場合、初期膨脹量は見掛上のものであることが分つたので、全收縮量としては、第 10 圖に示すやうに極大極小の差を用ひた。

實驗終る後、凍土を切つて、内部を検したところ、これ位の小さい土塊でも、時には内部に縦の割目の發生してゐたこともあり、此の實驗での全收縮量は最小値を示すものであることが知られた。

ii) 含水率と收縮量との關係 凍結による水平收縮が最初の含水量によつて著しく影響され

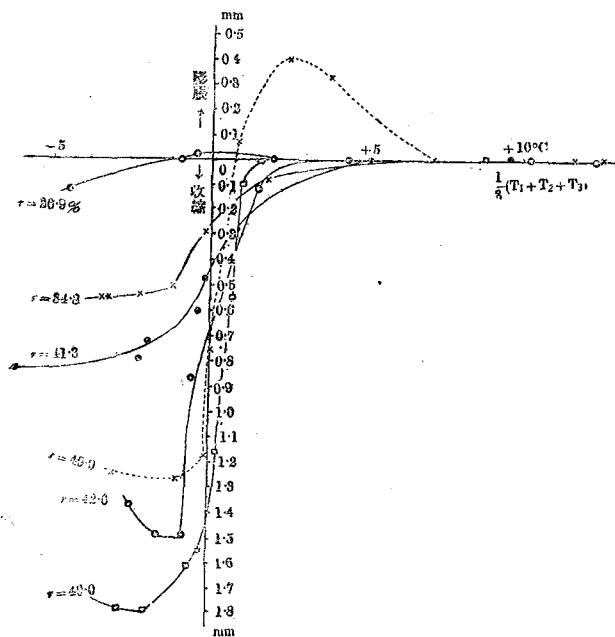


第 10 圖

ることは充分豫期し得る。それで初めの含水率 r を色々加へて實驗して見た。

大學構内理學部前から採集した粘土について、この點を調べる實驗を多數行つたがその結果の數例を第 11 圖に示す。この圖は前出の第 5 圖及び第 6 圖と同じ性質の圖である。初めの含水率が小さい程水平收縮は少く、例へば $r=26.9\%$ の時は 0.1 mm くらゐしか收縮しない。それが含水率の増加と共に増して行つて、 $r=49.0\%$ の場合には 1.8 mm も收縮してゐる。

充分に飽水した場合には此の收縮は起らず、反對に水の凍結による膨脹がきいて來る筈である。それで極大の水平收縮を與へる含水率があつて、それ以上になると收縮量が減ると豫想される。實驗の結果もその通りであつて、 $r=49.9\%$ になると、第 11 圖に點線で示したやうに少し收縮量が減少してゐる。



第 11 圖

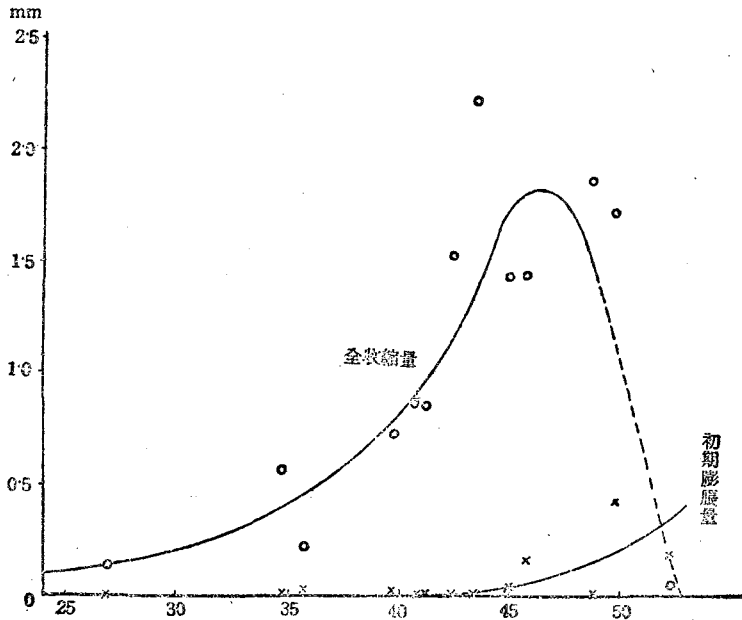
この曲線は、この緊密度の影響も幾分はいつてゐる筈であるが、含水率の影響は大體の傾向としては、同圖に示した如くであると見做して差支へない。

iii) 初期膨脹の現象 第 11 圖に於て點線で示した例のやうに、凍結による水平收縮の起きる前に、少しく膨脹することが屢々ある。この膨脹は前装置の實驗でも時々見られたのであるが、その理由は分らなかつた。今回の含水率との関係で、第 12 圖に見られるやうに、初期膨脹は含水率が大體以上の濕つた土で現はれ、含水率の増加と共に増す傾向のあることが知られた。含水率が増すと、土が軟くなるので、上方よりの加壓によつて、軟土が横に押し出されるために、見掛け上の水平膨脹が生ずるものと思はれる。既凍結部分が上方にせり出す場合に、周壁との摩擦によつて下方の未凍結部分に壓を加へることは充分有り得る。

その状態を更に詳しく見るために、初めの含水率と全收縮量との關係を調べてみた。その結果は第 12 圖に示した如くである。即ち全收縮量は含水率の増すに従つて増して行くが、約 46% の含水率の附近で極大に達し、それ以上水分が増すと減少の傾向にある。飽水状態に近い $r=52.6\%$ % についても 1 回測定したが、その時は第 11 圖に見られるやうに、殆ど收縮は起きなかつた。

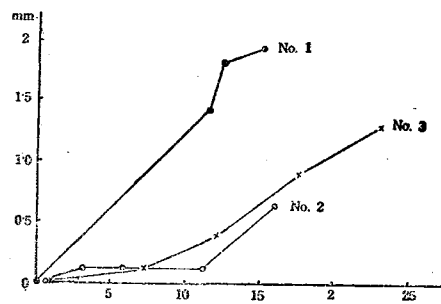
以上の實驗は、土の緊密度 (packing) を一定にしては行はなかつたので、初めの見掛け比重は 1.60 から互つて變化してゐた。第 12 圖の

その點を確めるために、同じ粘土について含水率 51.6% の軟土を作り、それを装置に詰め、常溫に於て上から壓を加へて見た。すると豫期通り水平方向の膨脹が生じた。第 1 圖の加壓では



第 12 圖

壓を増すに従ひ、第 13 圖 No. 1 曲線の如く膨脹量が増した。一旦 15 g/cm^2 近くに加壓して、壓を去り、引きつづいて第 2 回目の加壓を行ふと、No. 2 の如く減少し、第 3 回目も No. 3 に示した如く、大體同じ傾向になつた。以上の實驗で、初期膨脹は上方からの加壓に基くものであることが推定されたので、第 10 圖に示した如く、此の種の場合の全收縮量は、初期膨脹量最大の線から測ることとした。



第 13 圖

iv) 收縮の始まる溫度 收縮は第 11 圖等に見られる如く、土の溫度がプラス數度程度まで冷却した時から起り始める。即ち凍結線が下降して來る時、その下方で收縮が始まる。其の後凍結線が丁度觀測線に達する直前に主な收縮が生じ、 -1°C 即ち凍結が完了したと思はれる時に、收縮も完了する。

この收縮の始まる時の土の溫度は、含水率によつて異なるのであつて、大體に於いて乾いた土ほど高溫に於て收縮が始まる傾向にある。その横線は第 14 圖に示した如くである。凍結線下の土、即ち、 0°C 以上の土では、含水率が小さい程熱傳導率は小さい。それで溫度傾斜が大きくなる。今凍結線下一定の深さのところでは水平收縮が始まるとすると、質的にはそれだけでも第 14 圖の

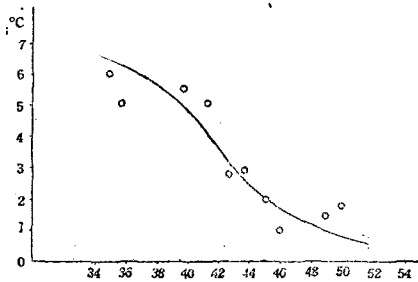
傾向は説明される。

各種の土について色々な含水率緊密度での熱傳導度の測定がないので、此の場合量的の計算は出来ない。しかし土壌の熱傳導測定結果の1例では飽水状態の時に0.0021であつたものが、乾燥状態ではその約1/6の0.00033になつた。その外に第15圖に示したやうに、 $\Delta\theta$ は熱傳導率によつてきまる。溫度傾斜 $\frac{\Delta\theta}{\Delta x}$ の外に Δx にも比例する。即ち

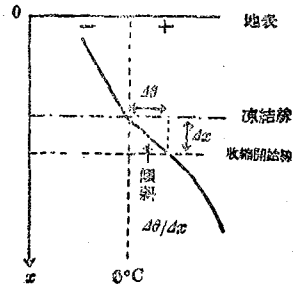
$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \Delta x$$

それで乾いた土では幾分凍結線下深いところで收縮が始まるのであらう。乾燥收縮量と含水率との關係も測定例は少いので、此の場合すぐ量的には言へないが、或る粘土質土壌の1例で含水率が或る限界例へば10%附近になると、急に收縮量が大きくなることが知られてゐる。此の傾向は一般に適用し得るので、今の場合でも、初めの含水率の小さい土が早く收縮を開始する。即ち Δx が大きいと推定される。

天然の凍上地層を切斷調査し、凍土層及び凍結線下の地温と含水比とを測定した結果は既に報告した。(1) そのうち含水比は常に凍結線直下に於て特に小さくなり、その下方では増してゐた。



第 14 圖



第 15 圖

即ち凍結に際し水分が凍結層に移り、凍結線直下の層は著しく乾燥してゐることが分つた。丁度その層で本實驗の水平收縮が起つてゐるので、此の收縮の原因が一部は土の乾燥によることが推定される。その外に常温から零度近くまで冷却される爲の單なる冷却收縮も勿論ある。いづれにしても此の收縮によつて、凍結直前の粘土質の土に毛細裂隙が出来、その中に氷が分離析出するのが、凍上現象の第一歩である。

§4. 各種土壌に就ての實驗 以上の實驗は主として凍上を起すに適した大學構内の粘土について行つたのであるが、同様の實驗を他の土についても行つた。

i) 黒土 大學構内の黒土について、天然に緊迫された儘の状態のものを四角に切り出したものと、一度乾燥して水を加へてねつたものとを比較した。いづれの場合も、收縮は少く、0.2 乃

(1) 中谷, 氣象集誌, 第 2 輯 18, 313.

至 0.3 mm 程度であつた。

ii) 砂 砂は見掛比重及び含水率を 1.54, 10.0% にしたものと、1.73, 40% にしたものとに就て精密な測定をした。いづれも収縮又は膨脹量は 0.01 mm 程度で、實驗の誤差の範囲内であつた。故に砂は収縮しないと見て差支へないことが確められた。

iii) 更別赤粘土 實驗結果は質的には前節で述べた大學構内の粘土と全く一致してゐた。此の土も凍上のよく起きる土である。この土についての 2 例を第 2 表に示す。

第 2 表

	初めの比重	含水率	収縮量
No. 1	1.56	49%	0.6 mm
No. 2	1.59	62%	13.6 "

iv) 満洲奉天線某地の土 吾々の實驗に使用した範囲内では、満洲の土は一般に膠狀質に富み、適水度小さく、凍結によつて縦の割れ目を生じ易かつた。それで此の方法では水平収縮を測定することが困難であつた。此の種の土では凍結線下に水平に近い割れ目が層状に入らず、従て凍上の際の水層も、北海道の粘土に見られるやうな霜降状にはならず、縮緬状になることも説明される。

§5. 總括

凍上の起きるやうな土壌凍結の場合、即ち上方から冷却される場合には、凍結面直下の土は水平方向に収縮する。この収縮は土の含水率により異り、又土質によつても異なる。砂の如き凍上を起さぬものでは、この収縮は起きない。

此の収縮は凍結面直下の土が水の移動によつて乾燥し、且つ温度が低下する爲による。この収縮による歪みによつて凍結直前の土中に毛細割目が出来、その中に氷が析出して割目を擴げる爲に氷の分離析出 (segregation) 即ち凍上が起きるものと考へられる。