HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍結による土壌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

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

凍結による土壌の體積變化について

中谷宇吉郎，荒川　淳

§1. 緒　言

土壌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，その詳しい研究は未だ殆ど無いやうである．第一に土壌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)土中に氷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% はこの分離した氷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，土中の空氣を眞空裝置によつて抜き，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，温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（backling）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

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

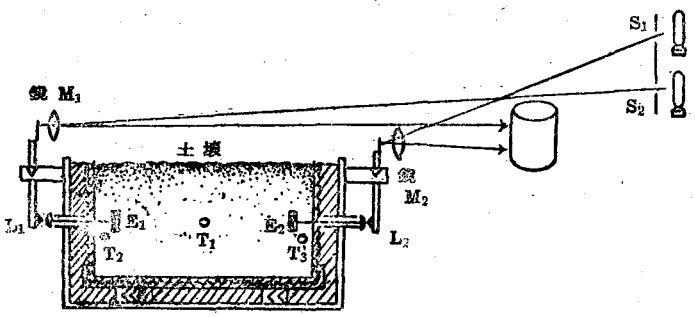
(1) 中谷宇吉郎，孫野長治：氣象集誌 18 (昭. 15), 313.
中谷宇吉郎：氣象集誌 20 (昭. 17), No. 4.
中谷宇吉郎，孫野長治：氣象集誌 20 (昭. 17), No. 5.
中谷宇吉郎，菅谷重二：應用物理 11 (昭. 17), 160.

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

(3) T. F. Buehrer and M. S. Rosenblum: J. Phys. Chemistry, 43 (1639), 941.

だものと說明出來るので，その說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) 測定裝置　裝置は第 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，その兩側に直徑 3 cm の小型試驗板 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

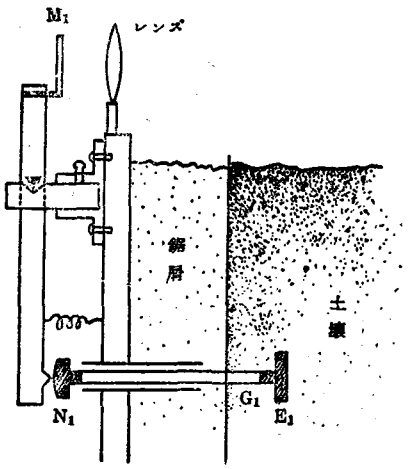


第　1　圖

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，ブ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圍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 が常に大體同じ溫度を示しながら下降するやうに，卽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．裝置全體は −30°C の低溫內に作つた水暗室の中に設置した．

試驗板の可變裝置は第 2 圖に示す如くである．E_1 はエボナイト製，G_1 は硝子管，N_1 はエボナイト製である．供試土壤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樣に作つた．



第　2　圖

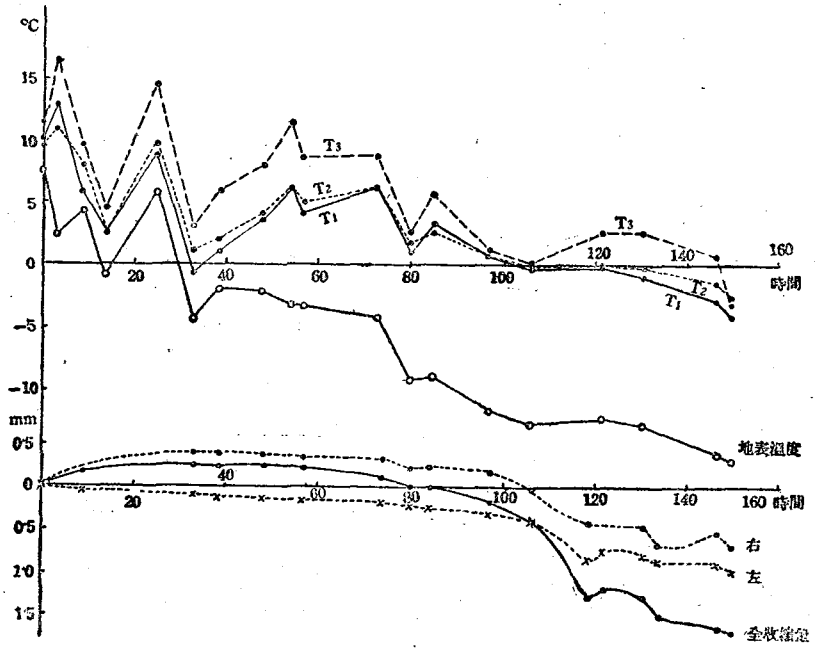
ii) 測定方法　實驗は，常溫に於て濕土を詰め，試驗板其の他を設置し，低溫室內に入れてすぐ光學裝置を調節し，その後放置して上方からのみ冷却させる．$\overline{E_1N_1}$, $\overline{E_2N_2}$ が初めに常溫にあつたので，その冷却に上る收縮を補正する必要がある．硝子の熱膨脹係數が小さいので，その補正値は，0.05 乃至 0.07 mm，最大 0.08 mm に過ぎなかつた．以下の圖ではこの値を補正した曲線があげられてゐる．

試驗土壌は赤土，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，試驗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定せず，流出限界より水の少い程度で實驗した．

此の裝置を −25°C 乃至 −30°C の低溫室內に放置して，上方からのみ凍らせた．凍結線が試驗板の所まで下降するには，土により 20 乃至 40 時間かかつた．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．

此の裝置では，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出なかつた．それで倍率は實驗的に測定し，左の試驗板が 34.1 倍，右が 33.1 倍といふ値を得た．

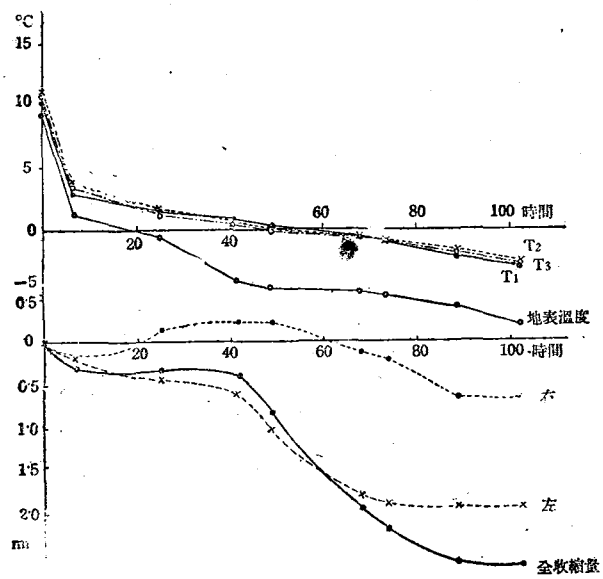
iii）測定結果　測定は各種の土について澤山行つたが，そのうち完全に記錄のとれたのは7例であつた．初めのうちは地溫を一樣に，卽ち等溫面を略水平に保ちながら下げることが困難であつたが，後には外函內の加熱補助電流の調整に馴れて，地中の等溫面を略水平に保ちながら冷やすことが出來るやうになつた．



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．土中の同一水平面內にある寒暖計 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

右の試驗板の動きが異るので，その各を點線で示し，その和，卽ち土の全收縮量を實線で描いた．この圖によると，土の溫度の降下に伴ひ，初めは膨脹し，凍結面が試驗板の面に近づいた頃から收縮が起ることが分る．この膨脹は後章で述べるやうに，上部の凍土が下方の未凍土に壓力を及ぼす爲である．その量は收縮量から見ると小さく，又この膨脹が全然起きず，初めから收縮する場合も多い．



第　4　圖

初めから收縮のみが起る場合で，凍結面が大體水平を保ちながら下降した例，卽ち T_1, T_2, T_3 が殆ど一致した例を第4圖に示す．この例では，凍結面が下降して來た場合に，その直下で横向きの收縮が生じ始め，凍結進行中，卽ち土の溫度が −1°C 位になるまでの間に，著しい收縮が起きることがよく分る．

7 例の結果を第 1 表に示す．

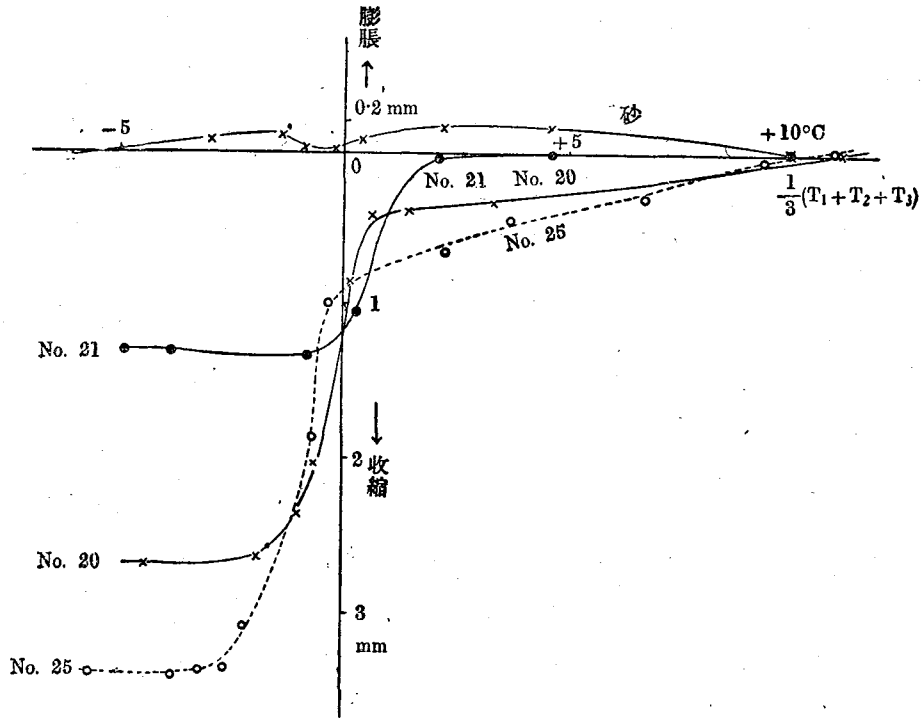
第　1　表

實驗番號	土名	試驗極間距離	全收縮量
19	札幌現場 No. 2	16 cm	0.19 cm
20	北大構內赤土	16	0.26
21	〃	16	0.12
23	札幌現場 No. 3	17	0.14
24	北大構內粘土	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內である．

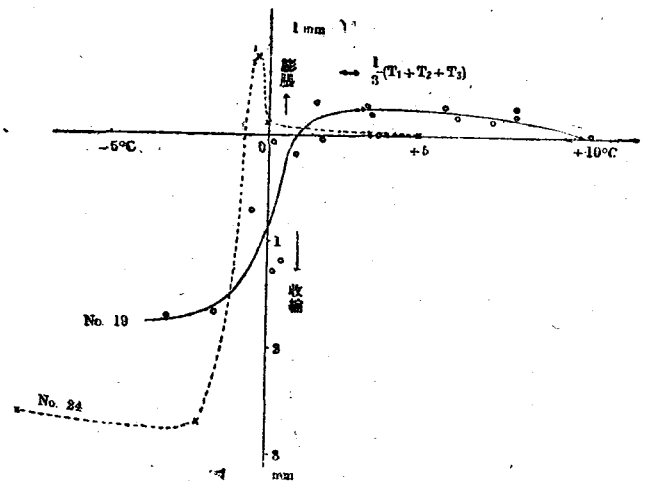
次に第 3 圖，第 4 圖及び同種の他の圖から，T_1, T_2, T_3 の平均と收縮との間の關係を出し，圖示した．その結果を第 5 圖及び第 6 圖に示す．第 5 圖は初めから收縮の起つた 3 例と砂の場合とである．砂は初めに少し膨脹するが，これも後述の加壓の爲で，收縮は 0°C 附近で少量起きるが，その量は極めて小さい．他の 3 例では，土が 0°C 乃至 +2°C 位まで冷えると急激

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 は試驗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．



第 6 圖

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，その氷板の出來る位置を決定するものは，凍結直前に土壤內に出來る割れ目であることを述べた．凍結線が或る深さに達し

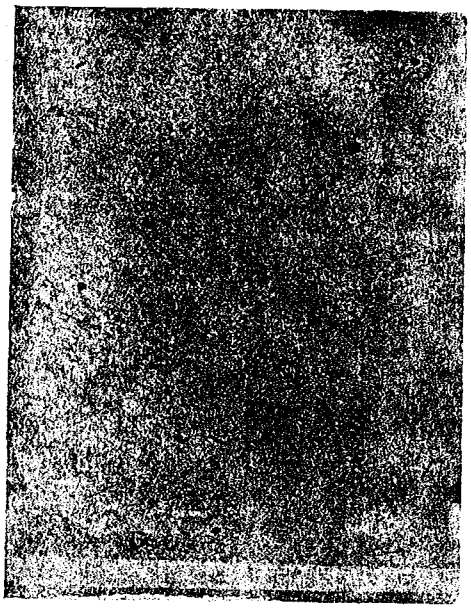
(1) 中谷，孫野，氣象集誌 20 (昭. 17), No. 5.

た場合，その直下の土が乾燥し(1)且つ溫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來，その割目中に氷が析出して割目をひろげ，氷板となる．その氷板が出來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狀に入るのである．

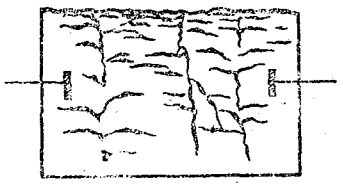
此の實驗に於て，凍結線直下で橫向きの收縮が起きることが判明したので，以上の考察が裏書されたことになつた．普通は凍結線が水平である爲，その直下の土の水平な層が收縮して，略水平の割目を生ずる．天然の場合にも霜降狀の氷板は大抵水平に出來てゐる．ところが此の場合或る深さまで土が一樣に收縮して，塊狀に割れ，その爲縱の割目が同時に出來，その中に氷が析出することもある筈である．

滿洲の凍上現場切斷調査の結果，縱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，縱，橫に無數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縱の割目を生じてゐることを知つた．その狀態を第 8 圖に模型的に示す．かういふ縱の割れ目が生ずると，今迄測つた收縮量は，兩試驗板間の土の收縮量



第 7 圖



第 8 圖

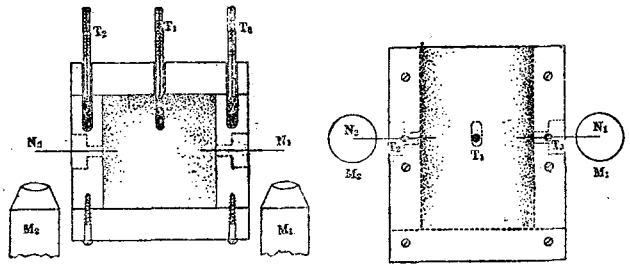
とは言へなくなる．例へば第 1 表の No. 21 の實驗では 0.12 cm の收縮がある．しかし兩試驗板間の 16 cm の土がこれだけ縮んだのではなく，實際は縱の割れ目の幅だけこれよりも多く收縮してゐるのである．No. 20 と No. 21 とを比較して，同じ土について著しい收縮量の異る理由もこれで說明される．

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，次の小型裝置で實驗をすることにした．

§3. 改良裝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裝置は第 9 圖に示す通りである．この裝置の內容は，5cm 角で深さ 8cm 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．容器の內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

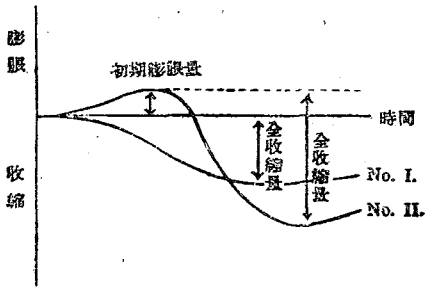
擦を少くした．この容器を低溫室內で適當な保溫用外箱に入れ，その外箱內の溫度分布を調節することによつて，凍結面が略水平を保ちながら下降するやうにした．その全體を恒溫箱中に入れて實驗した．T_1, T_2, T_3 は直徑約 3mm の特製細酒精寒暖計で，三者の溫度がいつも大體等しい値を示しながら下るやうに調節した．M_1, M_2 の倍率は共に 7.6 倍にして使用した．

i) 測定方法　實驗は主として一旦乾した土を水でねり，約一晝夜放置したものを使つた．その外に天然の濕土をその儘 5cm 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溫室中の恒溫箱內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 5mm 乃至 8mm 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．



第　10　圖

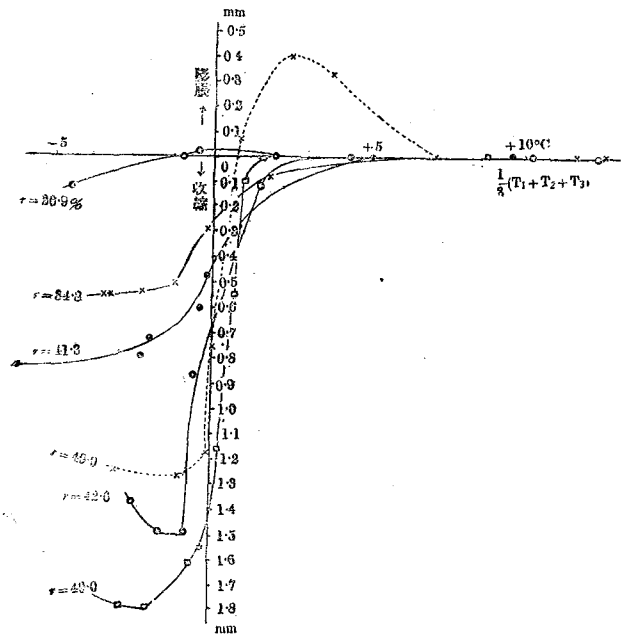
實驗終る後，凍土を切つて，內部を檢したところ，これ位の小さい土塊でも，時には內部に縱の割目の發生してゐたこともあり，此の實驗での全收縮量は最小値を示すものであることが知られた．

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

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．

大學構內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．それが含水率の增加と共に增して行つて，$r=49.0\%$ 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．



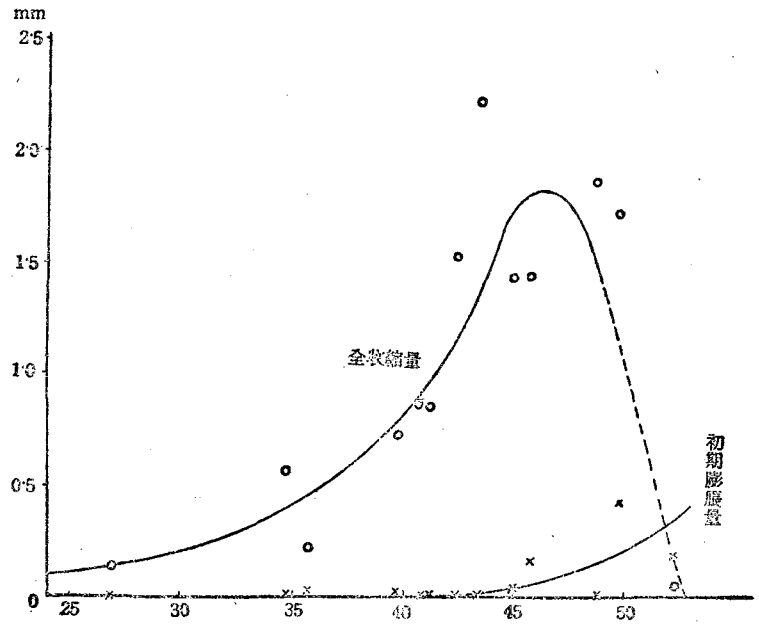
第　11　圖

その狀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增すに從て增して行くが，約 46% の含水率の附近で極大に達し，それ以上水分が增すと減少の傾向にある．飽水狀態に近い $r=52.6\%$ 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 1.72 に亙つて變化してゐた．第 12 圖の曲線は，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．

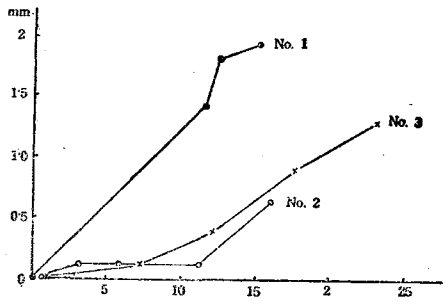
iii) 初期膨脹の現象　第 11 圖に於て點線で示した例のやうに，凍結による水平收縮の起きる前に，少しく膨脹することが屢々ある．この膨脹は前裝置の實驗でも時々見られたのであるが，その理由は分らなかつた．今回の含水率との關係で，第 12 圖に見られるやうに，初期膨脹は含水率が大體以上の濕つた土で現はれ，含水率の增加と共に增す傾向のあることが知られた．含水率が增すと，土が軟くなるので，上方よりの加壓によつて，軟土が橫に押し出されるために，見掛け上の水平膨脹が生ずるものと思はれる．既凍結部分が上方にせり出す場合に，周壁との摩擦によつて下方の未凍結部分に壓を加へることは充分有り得る．

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，それを裝置に詰め，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

壓を增すに從ひ，第 13 圖 No. 1 曲線の如く膨脹量が增した．一旦 15 g/cm² 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にした．



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

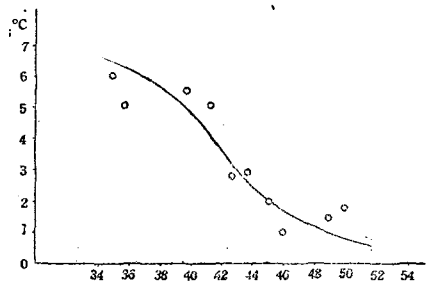
傾向は說明される.

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來ない．しかし土壤の熱傳導測定結果の 1 例では飽水狀態の時に 0.0021 であつたものが，乾燥狀態ではその約 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 $\Delta x=$ にも比例する．卽ち

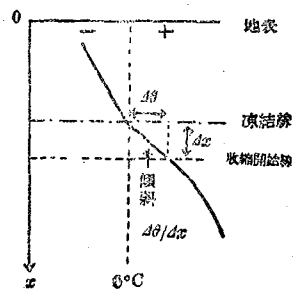
$$\Delta\theta=\frac{\Delta\theta}{\Delta x}\Delta x$$

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，或る粘土質土壤の 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．卽ち Δx が大きいと推定される.

天然の凍土地層を切斷調査し，凍土層及び凍結線下の地溫と含水比とを測定した結果は旣に報告した.[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，その下方では增してゐた.



第　14　圖



第　15　圖

卽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．その外に常溫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罅が出來，その中に氷が分離析出するのが，凍上現象の第一步である.

§4. 各種土壤に就ての實驗　以上の實驗は主として凍上を起すに適した大學構內の粘土について行つたのであるが，同樣の實驗を他の土についても行つた.

i) 黑土　大學構內の黑土について，天然に緊迫された儘の狀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. いづれも收縮又は膨脹量は 0.01 mm 程度で, 實驗の誤差の範圍内であつた. 故に砂は收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	收縮量
No. 1	1.56	49%	0.6 mm
No. 2	1.59	62〃	13.6 〃

iv) 滿洲奉山線某地の土　吾々の實驗に使用した範圍内では, 滿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收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狀に入らず, 從て凍上の際の氷層も, 北海道の粘土に見られるやうな霜降狀にはならず, 綿綿狀になることも說明される.

§5. 總　括

凍上の起きるやうな土壌凍結の場合, 卽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收縮する. この收縮は土の含水率により異り, 又土質によつても異る. 砂の如き凍上を起さぬものでは, この收縮は起きない.

此の收縮は凍結面直下の土が水の移動によつて乾燥し, 且つ溫度が低下する爲による. この收縮による歪みによつて凍結直前の土中に毛細割目が出來, 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) 卽ち凍上が起きるものと考へられる.