HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 凍上の際の土中水分移動と間隙率との関係 |
| Author(s) | 田沼, 邦雄 |
| Citation | 低温科學. 物理篇, 27, 359-366 |
| Issue Date | 1970-03-31 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/18124 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 27_p359-366.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Kunio TANUMA 1969 The Relation Between the Soil Moisture Transfer and Porosity During Frost Heaving. *Low Temperature Science, Ser., A, 27.* (With English Summary p. 365)

# 凍上の際の土中水分移動と間隙率との関係*

田 沼 邦 雄
(低温科学研究所)

(昭和44年7月受理)

## I. まえがき

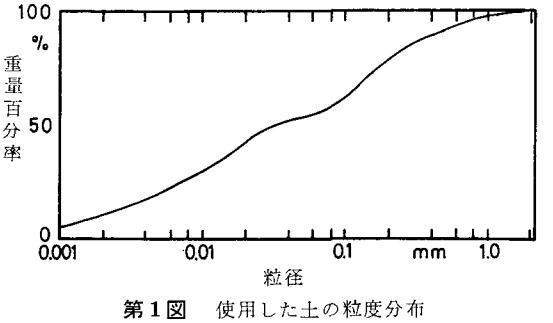
水を含んだ土が一方向から凍結するときに，地面が隆起する現象が凍上である。これは凍結線より下の未凍結土から凍結線に水が移動して氷として析出するためであることは，既に中谷，孫野[1]によって実証されている。

筆者は，前の論文で土の含水比が凍上に大きく影響することを述べた[2]。そして凍上に最適な含水比があることを見つけた。その含水比は，使用した土の突き固めのときの最適含水比でもある。

水が未凍結土中を凍結線へ向って移動するのは，当然土中の間隙を通して行なわれる。それで，筆者は，凍上の際の土中水分移動について調べるために，同じ土質の土について含水比が同じで間隙率の異なる試料を作り，凍上を起させた。そしてそのときの凍上量，水分移動量，凍結線進行速度等の間の関係を調べた。

## II. 試料と実験装置

実験に使用した土は，粒径0.005 mm以下の粘土分（コロイド分を含めて）が23%，粒径0.005～0.05 mmのシルト分が29%，粒径0.05～2 mmの砂分が48%で，この土は土質学会規格による粘土質ロームである。その粒度分布を第1図に示す。

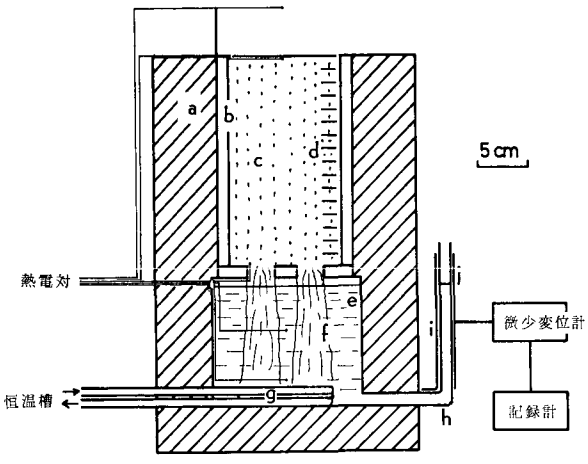



**第1図** 使用した土の粒度分布

含水比が一定で，間隙率の異なる試料は次のようにして作った。まず，炉乾燥した土に蒸留水を加え，凍上に対してほぼ最適である含水比26%[2]の試料を作った。そして，供試体用の容器に詰めるときに，突き固めを適度に変えることによって，間隙率の異なる試料が得られるようにした。この容器は断面が8×8 cmの正方形の箱で，高さが16 cmである。これは透明なアクリル樹脂を用いて作ったものである。側面の一つには，上面から底まで1 cm間隔に直径0.1 cmの穴をあ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第985号

けてある。土を容器に詰めた後，この穴から直径 0.07 cm，長さ 2.5 cm の針を土の中へ挿入した。この針は凍結線進行速度とこの間層が凍結するのに要した時間を求めるために使われる。

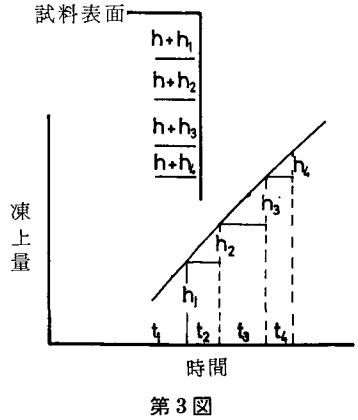


第2図 実 験 装 置

このように準備された試料は，気温 +5°C の箱に約 4 時間入れられた。その後凍上実験用の装置に入れる。実験装置の概略を第 2 図に示す。予め容器の下から吊しておいたガーゼが，容器の下方の水槽に浸される。従って，試料内への水の移動はこのガーゼを通して行なわれる。その移動量は，実験装置の外に出ている水槽に通じた細いガラス管 ($h$) 内の水位の変化で測定される。水位の変化は，ガラス管の外側面に貼られたアルミ箔の極板と水の間の静電容量の変化で測定される。その測定には微少変位計（岩崎通信機製）と記録計を用いた。

表面の凍上量は，槓杆拡大装置[2]で廻転ドラムに自記させた。温度は，試料の表面から 5 cm 上の空気と，試料の表面，試料の底面及び試料の底面から 4 cm，7 cm 下の水槽内部の水の 5 点について，熱電対（銅—コンスタンタン）を用いて測定された。水温の調節には，実験装置の外にある恒温槽から，水槽内の下端に取り付けた管 (g) を通して，メタノールを循環させて +5°C に保った。

試料上面を除いて，装置全体は厚い断熱材で覆われる。装置全体は自動制御低温室に入っており，実験開始と共に，−10°C の空気が循環する。即ち，試料上面のみが −10°C の空気にさらされ，以後凍結は，試料の上面から下に向って進行する。約 50 時間 −10°C の空気にさらして実験を止め，容器を取り出す。実験開始前に試料内部に挿入しておいた針の間隔を実測することにより，それぞれの間隔の凍上量を知ることが出来る。そして，それぞれの間隔の凍上量の和が試料上面の凍上量となり，廻転ドラムに自記された凍上量と時間曲線により，それぞれの間隔が凍結するのに要した時間が求められる。第 3 図にこのことを示す。図中の $h$ は実験開始前の間隔（1 cm）である。$h_1$, $h_2$, $h_3$, … は実験終了後実測した各間隔の凍上量である。$t_1$, $t_2$, $t_3$, … は各間隔が凍結するのに要した時間である。そして，この時間 $t_1$, $t_2$, $t_3$, … で凍結前の間隔 1 cm を割った値をそれぞれの間隔における凍結線進行速度とした。

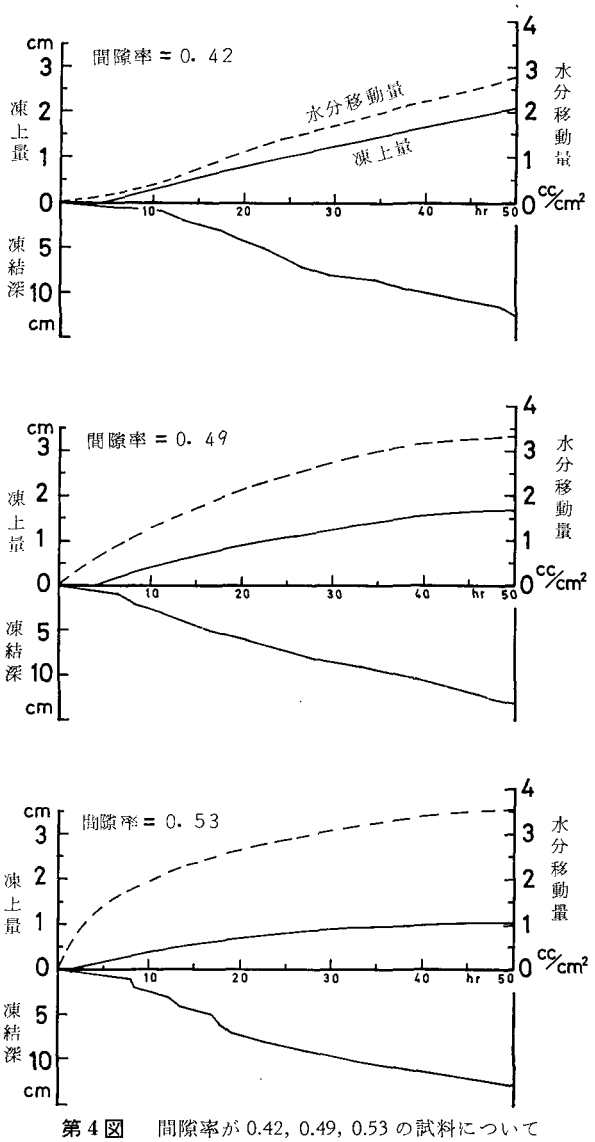


第3図

従って，凍結線進行速度というのは凍結前の厚さが1 cm の層を，凍結線が通過するときの平均速度である。

## III. 実験結果と考察

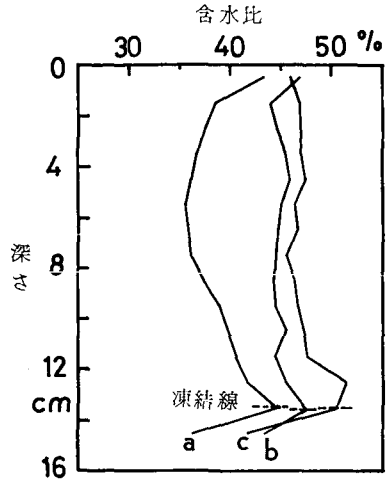
含水比がいずれも26% で，間隙率が0.41 から0.57 までの範囲にわたる土について，同じ温度条件，即ち，試料上面にふれる空気の温度 −10°C，下部水槽の水温 +5°C で数多くの実験を行なった。その内，間隙率が0.42，0.49，0.53 の試料について，上面の凍上量，水槽から土の中へ移動した水の量 (試料の土の1 $cm^2$ 当りについての値)，凍結深の時間変化を第4図に示す。実験はいずれも，50時間で打ち切られたが凍結線の進行はほぼ同じで，最後にはそれぞれ12.8 cm，13.0 cm，13.0 cm に達した。一方，凍上量は間隙率の大きい試料程小さくなる傾向を示した。又，水分移動量は間隙率の大きい試料程大きくなる傾向を示した。



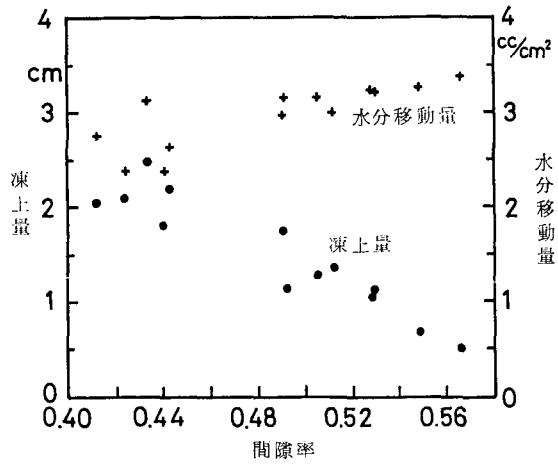

第4図　間隙率が 0.42, 0.49, 0.53 の試料についての水分移動量，凍上量，凍結深の時間変化

実験終了後のこれらの試料の含水比分布を第5図に示す。いずれも凍結線の直ぐ下で含水比が減少しているが，全体として初期含水比26% よりは大幅に増加している。そして間隙率の大きい試料程含水比が大きい。このことは第4図の間隙率の大きい程，水分移動量が大きかったことと一致する。

筆者の行なった実験の全てについて，試料の間隙率と，凍上量，水分移動量との関係をまとめて第6図に示す。ところで福尾[3]は，飽和土について筆者と同じ形式の凍上実験を行なった。そして下部水槽から吸上げられて土の中へ移動した水が全部凍って，その約1割体積膨脹した分が凍上量になることを確かめた。筆者の実験について，水分移動量と凍上量との関係を第7図に示す。図中の実線は福尾の場合の飽和土についての関係を示す。筆者の場合の未飽和土では，飽和土と比べると，同




**第5図** 実験終了後の試料の含水比分布 aは間隙率が0.42, bは間隙率が0.49, cは間隙率が0.53の試料

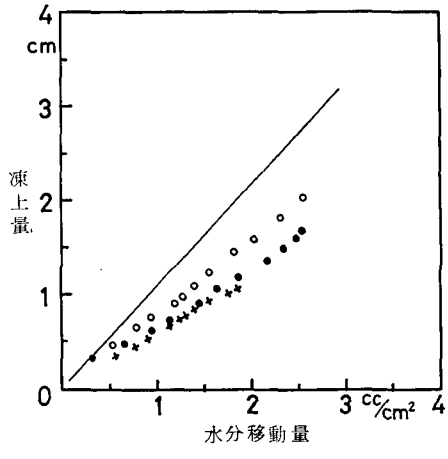



**第6図** 実験開始から50時間後の試料の間隙率に対する凍上量，水分移動量の関係

じ凍上量に対して水分移動が大きい。つまり空隙を満たすのに水分が使われるので，この傾向は間隙率が大きい試料程大きい。

そこで，この凍上量と水分移動量との関係が，試料の不飽和の度合でどのように変わるかを検討してみる。第7図から筆者の実験では凍上量 $h$ cm と水分移動量 $q$ cc/cm² との間に次の関係が見られる。$n$ は間隙率，$S$ は飽和度である。

| | | |
|---|---|---|
| $n=0.42$ | $S=91.4\%$ | $h\approx 0.77\,q$ |
| $n=0.49$ | $S=67.7\%$ | $h\approx 0.64\,q$ |
| $n=0.53$ | $S=60.9\%$ | $h\approx 0.57\,q$ |




**第7図** 水分移動量と凍上量の関係 実線は福尾[3]の実験による飽和土の場合，○印は間隙率が0.42，●印は間隙率が0.49，×印は間隙率が0.53の試料

この関係を飽和度 $S$ についてまとめると，ほぼ次の関係で表わされる。

$$h\approx(0.25+0.57\,S)\,q$$

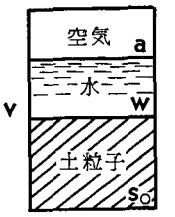
$S=1$ の飽和土については $h\approx 0.82\,q$ となり，福尾の得た $h=1.09\,q$ とは一致しない。

一般に，土（体積 $V$）は，第8図に示されるように，土粒子（$S_0$），水（$W$），空気（$a$）で構成される[4]。そのとき，間隙率 $n$ は $\dfrac{a+W}{V}$，飽和度 $S$ は $\dfrac{W}{a+W}$ で表わされる。そこで，水分が凍上にどれだけ寄与したかを検討してみよう。凍結前に土中に存在する水分 $W$ cc/cm²（土の単位面積当りの体積，即ち，1 cm² 面積の柱を考える）と，凍結の際に吸上げられた水分 $q$ cc/cm² が全部氷に変わり，又その際，空気の部分に変化がないとすると，凍上量 $h$ cm は，これらの水分が氷に変わるときの体積増加，つまり $h=1.09\,q+0.09\,W$ で与えられる。この関係

で $W$ を間隙率 $n$，飽和度 $S$ で表わすと

$$h = 1.09\,q + 0.09\,nVS \qquad (1)$$

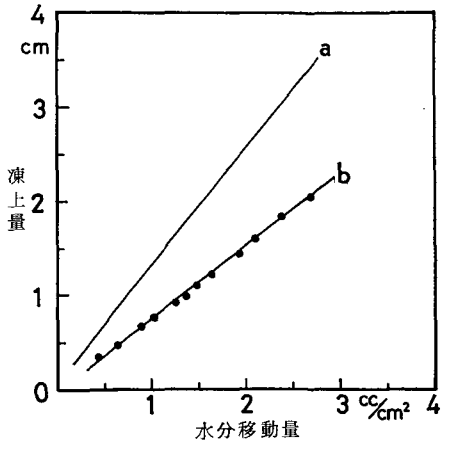
となる。しかし，これらの氷の一部は当然空隙を埋めると考えられる。又，霜柱現象に見られるように，新たに空隙をつくることもある[5]。更に，土が凍結するときには，土粒子に吸着する水分が相当量不凍水になることが知られている[6]。従って，(1) 式の理想値からは，かなりずれることが予想される。そこで，そのための補正係数 $\beta$ を考慮して次の関係を考える。




**第8図**　土の構成
$V$ は全体積，$a$ は空隙の体積，$W$ は水の体積，$S_0$ は土粒子の体積

$$h = \beta\,(1.09\,q + 0.09\,nVS) \qquad (2)$$

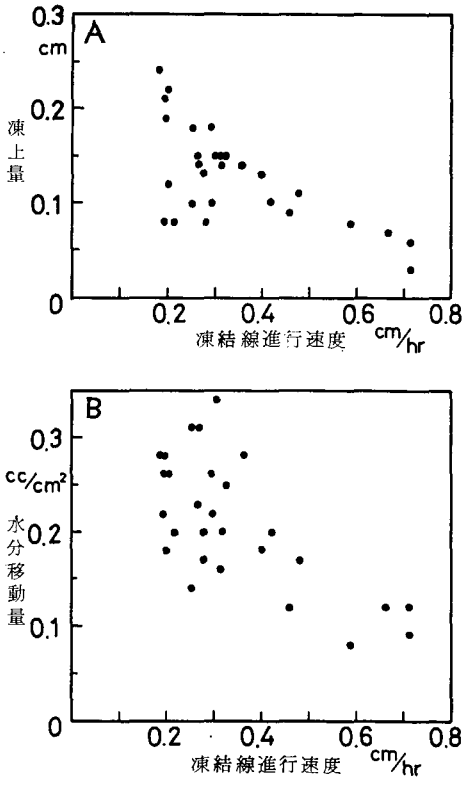
筆者の実験について，この補正係数 $\beta$ が間隙率 $n$，飽和度 $S$ とどのような関係にあるかを調べた。間隙率が 0.42～0.55 で $\beta$ は 0.61～0.32 の値を取る。この内，第 9 図に間隙率が 0.42 の試料について，(1) 式と (2) 式の関係を示す。この試料は $\beta=0.61$ である。他の試料について，間隙率 $n$，飽和度 $S$，補正係数 $\beta$ の値を第 1 表に示す。




**第9図**　(1) 式と (2) 式による水分移動量と凍上量の関係
試料は $n=0.42$，$S=91.4\%$，実線 a は (1) 式による値，実線 b は $\beta=0.61$ の値で ● 印が実測値

**第1表**　間隙率と飽和度に対する補正係数 $\beta$ の値

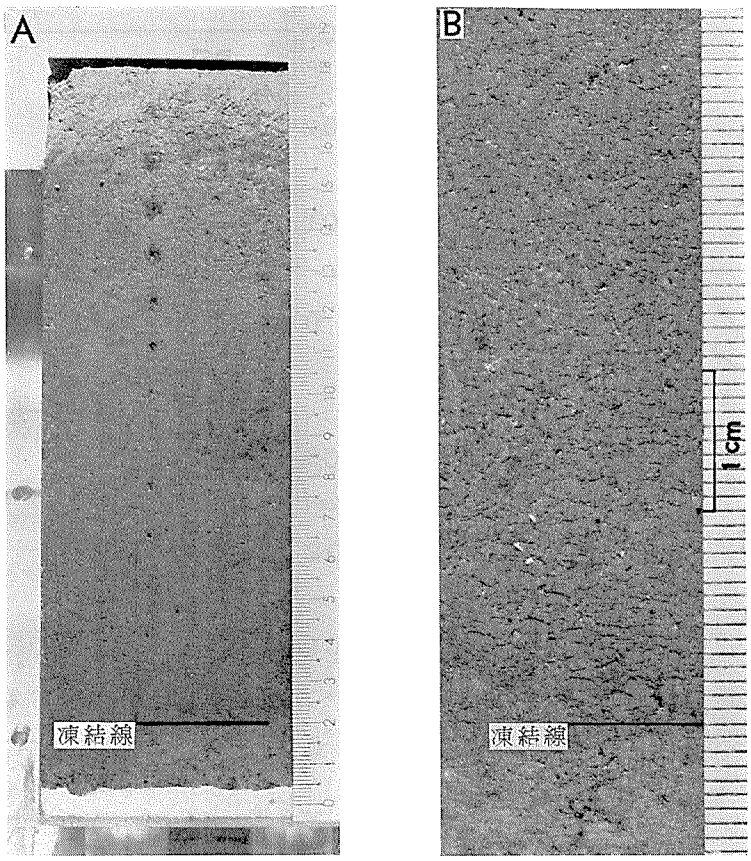
| 間隙率 ($n$) | 飽和度 (%) ($s$) | 補正係数 ($\beta$) |
|---|---|---|
| 0.42 | 91.4 | 0.61 |
| 0.49 | 67.7 | 0.46 |
| $0.50_5$ | 66.2 | 0.44 |
| $0.51_1$ | 66.8 | 0.41 |
| $0.52_8$ | 61.9 | 0.36 |
| $0.52_9$ | 60.9 | 0.36 |
| $0.54_8$ | 55.4 | 0.32 |




**第10図**　凍結線進行速度と凍上量，水分移動量の関係
図中の点は $n=0.42$，0.49，0.53 の試料についてのそれぞれの間隔 (凍結前 1 cm) に対する値

$\beta$は，凍結前の土の状態及び外的な実験条件に関係する量である。この場合には，間隙率の増加と共に減少の傾向を示した。この$\beta$の値の範囲をきめるには更に多くの，異なる状態の土について実験を行なわなければならない。

次に，凍結線進行速度と凍上量，水分移動量の関係を第10図A，Bに示す。図中の点は$n=0.42$，0.49，0.53の試料に挿入された針と針との間隔（凍結前1 cm）について得られた値を示す。これらの関係を見ると，凍上量，水分移動量とも，凍結進行速度の減少と共に増加する傾向が見られる。一般に，一つの試料については，凍結線の進行は上部で速く，深さが増すにつれて遅くなる。そして凍結線での氷の析出量は，深くなるにつれて凍結線より上の凍土を持ち上げるために費やされる仕事量が多くなるので減少する。従って，凍上量，水分移動量とも深さの増加，つまり凍結線進行速度の減少と共に減少する。第10図A，Bではこの関係が逆になっている。これは，筆者の実験において，深さが増すにつれて凍結線が水槽内の水位に近づくため，土中の熱力学的条件が幸いして氷の析出が多くなったためと考えられる。実際，凍結後の凍土の断面を見ると深さの増加と共にレンズ氷が多くなるのが認められる。第11図に実




**第11図** 凍土の断面写真
試料は$n=0.42$，$S=91.4\%$，$h=2.1$ cm，写真Bは写真Aの凍結線から上5 cmまでの拡大

験終了後の凍土の断面写真を示す。写真Aで縦に穴があるのは凍結前に1 cmの間隔で挿入された針の穴である。写真Bで凍結線にほぼ平行に割れ目のように見えるのがレンズ氷である。

## IV. むすび

同じ含水比で間隙率が違う試料について，気温 −10°C，水温 +5°C の一定な外部温度条件で，凍上の実験を行なった。その結果，凍上量は間隙率の増加と共に減少する傾向を示した。又，凍上量 $h$ cm と水分移動量 $q$ cc/cm$^2$，間隙率 $n$，飽和度 $S$，断面 1 cm$^2$ 当りの土の体積 $V$ の間に $h=\beta\,(1.09\,q+0.09\,nVS)$ の関係を考えた。この $\beta$ は，凍上量の理想値（土中水分が全部氷に変わり，しかも空気分に変化がないとする）からのずれを表わす係数である。今回の実験では，間隙率が 0.42～0.55 で $\beta$ は 0.61～0.32 であった。この補正係数 $\beta$ は凍結前の土の状態及び外的な実験条件できまる量で，間隙率の増加と共に減少する傾向を示した。この係数 $\beta$ については更に多くの，異なる土について調べる考えである。

終りに，この研究を御指導下された木下誠一教授，鈴木義男助教授に厚く感謝の意を表わします。

### 文　献

1) 中谷宇吉郎・孫野長治 1944 凍上の機構について I. 低温科学，**1**，1–10.
2) 田沼邦雄 1967 凍上量と含水比の関係 I. 低温科学，物理篇，**25**，179–184.
3) 福尾義昭・北岡豪一・有賀祥夫 1969 凍上量と温度分布・吸水量との関係について. 京都大学防災研究所年報第 **12** 号 **B**，169–176.
4) 木下誠一・堀口 薫・田沼邦雄・大野武敏 1968 北見における凍上観測. 低温科学，物理篇，**26**，363–381.
5) 前野紀一 1966 水氷界面における気泡の発生と捕捉. 低温科学，物理篇，**24**，91–109.
6) 堀口 薫 1969 モンモリロナイトの水分吸着. 低温科学，物理篇，**27**，415–418.

### Summary

Frost heaving was investigated using samples of the same soil (clayey loam) with the same mass ratio of water to soil particles (26%) but which had various porosities. The samples were prepared by packing a mixture of the soil particles with 26 wt-% of water in a $8\times8\times16$ cm$^3$ plastic box. The loosest packing was made to have a porosity of one minus the volume ratio of the soil particles to the sample, namely, 0.41, while the densest had a porosity value of 0.57.

A schematic diagram of the experimental apparatus is show in Fig. 2. The box (b) with the prepared sample (c) was placed in an insulated container (a) and cooled from the surface with the temperature maintained at −10°C. The water was supplied through strips of gauze (f) from a water basin (e), and the temperature was maintained at +5°C. Before placing the box in the container, pins (d) were inserted into the sample at intervals of 1 cm as markers through holes in the box. The water level in a tube (h) connected to the basin and the amount of surface heave were continuously recorded.

At the end of the experiment, the frozen sample was bodily removed and the inter-

vals between the pins were measured to determine the heave of each layer. By comparing the values thus obtained with the record of total heave, the time when the frost line passed the position of each pin can be computed.

In an ideal case, where there is no unfrozen water in a layer and where the air volume in the layer showed no change during freezing, the heave amount of the layer $h$ is given by

$$h = (1.09\,q + 0.09\,nVS)$$

where $q$ is the amount of water transfered to a unit colum of the layer, $n$ is the porosity of the layer, $V$ is the volume of the colum, and $S$ is the volume ratio of water to air plus water in the layer before freezing.

Because the water distribution in layers below the frozen layer may change during freezing, the water transfer to the layer $q$ may not be equal to the water transfer in the whole sample $q^*$ which was actually measured. Moreover, the two assumptions for the ideal case may not hold in the experiment. Therefore, a correction factor $\beta$ was determined to satisfy the following equations:

$$h = \beta\ (1.09\,q^* + 0.09\,nVS)$$

The correction factor $\beta$ decreased from 0.61 to 0.32 with the increase in the porosity from 0.42 to 0.55 (Table 1).