

凍上量と温度分布・吸水量との関係について

福尾義昭・北岡豪一・有賀祥夫

FROST HEAVING AND ITS DEPENDENCE ON HEAT FLUX THROUGH FREEZING FRONT

By Yoshiaki FUKUO, Koichi KITAOKA and Yoshio ARIGA

Synopsis

It has been pointed out that the essential part of frost heaving is laid on the mechanism of moisture flow to freezing front of soil. However, the moisture flow depends on various controlling factors such as particle size, suction force, temperature gradient and surcharge. So, systematic experimental research would be required to make clear the relation of these factors to heaving. We had constructed newly the instrument and obtained the successful operation. From the results of experiment, it was found that the moisture flow had optimum heat flux although its value was varied by cooling rate.

ま え が き

ソヴィエト・カナダ・アメリカ北部及び北欧の国々など、いわゆる寒冷地域に必ずつきまとう自然現象であり、しかも我々がこの環境で生活するために克服しなければならない重要な現象として“Frost Action”(凍結作用)がある。普通この現象は見かけ上相反する二つの作用に分けて考えられる。一つは Frost Heaving (凍上現象)であり、一つは Thawing (解凍現象)である。前者は土壌の凍結にともなう地表面が不均等に隆起する現象であり、後者はこの隆起した地面が春先の温暖な時期に氷の部分が融解しその結果多量の水分を含んだ軟弱な地盤になる現象である。これらはいずれも建築物・道路等の変形や破損をひきおこす。温暖地域でも高地では冬期に霜蝕型浸食として岩石風化に大きな役割を演じている。最近は高速道路の高地縦断も多くなり、この問題は単に極寒冷地だけでなく世界各地で注目されるようになった。この報告は上記2つの現象のうち特に凍上現象に注目しておこなった実験の結果を述べるものである。

凍上現象を解明する研究は前述のように寒冷地における生活や開発の現実的要求ばかりでなく、現象そのものが物理的に興味ある問題を数多く含んでいるために現在多くの人々によって研究されている。系統的な研究がなされるようになってからまだ日が浅く、S. TABER(1929)¹⁾, G. BESKOW (1935)²⁾の研究に始まり、その後現在にいたるまで NATIONAL RESEARCH COUNCIL (OTTAWA, CANADA), HARVARD UNIV. (CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS), 我が国では北海道大学低温研究所³⁾等で精力的に研究がおこなわれている。

凍上現象は単にその土壌中に含まれている水分の凍結膨脹(約10%増)にともなう地表面の盛り上りのことではない。S. TABER, G. BESKOW 等の室内実験の結果によると適当な条件のもとでは凍結深度の3倍にも達する盛り上がりが観測されている。さらに、よく凍上を起した土壌の断面をみると **Photo. 1** のように heat flux (熱流束)の方向とほぼ直角方向にレンズ状でしかも土粒子を含まない純氷の層が数多くできていたのが必ず見られ、このレンズ氷の厚みの合計が凍上量になっていることは数多くの実測例が示してい

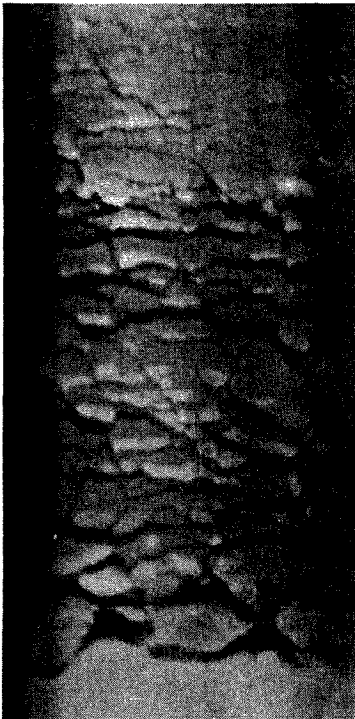


Photo. 1 Frozen soil, showing excessive segregation of ice.

る。これらは明らかに未凍結部分から凍結面へ水分の移動が起っていることを物語るものであり、この水分移動のメカニズムこそが凍上をひきおこす本質である。

土壌水分は外力（重力）だけではなく数々の内力（吸着力、毛管力、浸透圧等）の影響を受けている。自然界では重力場が一定でも、降水の浸透・地面からの蒸発・植物の根による吸収・温度勾配の変化・土粒子塩分の溶解等によって内力の場はたえず変動し、これらの合成作用によって土壌水分が複雑に動いている。これら土壌水に作用している複雑な合力を量的に自由エネルギーで表現できれば統一的に土壌水分移動のメカニズムを解明するのに非常に有効な手がかりになる。このように凍上現象の研究はそのものばかりからさらに広く土壌物理学の進展にも役立つであろう。

1. 実験試料

本実験に用いた試料は、大阪市内の城東運河わきに作られた地下鉄工事用堅坑の側面（地表面下約 6 m の深さ）から採取された沖積層土塊である。この試料の粒度別重量加積曲積は Fig. 1 に示すように粒径 5μ 以下の粘土が約45%， 5μ から 50μ までのシルトが約45%，残りの10%が 50μ から 100μ の細砂になっている。含水比は 79.4%，湿潤密度は 1.65，乾燥密度は 0.92 であり，飽和度は 100%であった。

この土塊を不攪乱状態のままで、内径 10 cm，肉厚 17 mm，高さ 26 cm のアクリル製シリンダーに充填するために、このシリンダーの下に刃先をはめ、油圧式ジャッキを使って刃先から徐々に採取した角状土塊に圧入した。試料土塊がシリンダーの上端まで詰めこまれると、注意深く刃先をシリンダーから取りはずし、ストレッチナイフを用いてシリンダーの上、下面をそれぞれ厚さが 15 mm，45 mm まで取り除いて、平面状に仕上げる。こうしてシリンダーの内部に直径 10 cm，高さ 20 cm の不攪乱土塊試料が挿入される。

る。これらは明らかに未凍結部分から凍結面へ水分の移動が起っていることを物語るものであり、この水分移動のメカニズムこそが凍上をひきおこす本質である。

K. A. JACKSON, D. R. UHLMAN, B. CHALMERS⁴⁾ 等はこのレンズ氷の形成を支配する要素として次の3つを指摘している。それは地表面から熱を奪う速度、即ち冷却速度、凍結面への水の輸送、それにレンズ氷が成長するときに持ち上げねばならない荷重の量である。凍結過程に水分移動をおこさせる原因に関して JACKSON & CHALMERS⁵⁾ と PENNER は土壌水の過冷却現象に注目している。つまり土粒子間隙に存在する過冷却水が徐々に相変化をおこして放出するエネルギーが水分を移動させる力と荷重を持ち上げる力に配分される。このメカニズムはまだ充分に解明されておらず今後に残された興味ある問題である。E. PENNER⁶⁾ は凍上現象全般にわたって本質的でありかつ最も見つけにくい要素間の相関関係は熱流束と水分流束との関係であることを指摘している。これはもちろん熱力学的な要素の複雑さによるものであるが各要素（heave rate, heat flow, moisture flow, temperature gradient, moisture tension）の実測値の不足にも起因していることはたしかである。この観点から各要素が測定できる適当な凍上装置の製作が必要になる。我々はその試作した装置とそれから得た実験結果を紹介する。

凍上現象でみられるような相変化をともなった水分移動現象を熱力学的立場から土壌水分の自由エネルギーで表現して考察する方法は現象を定量化するのに便利である⁷⁾。土粒子間隙に存在す

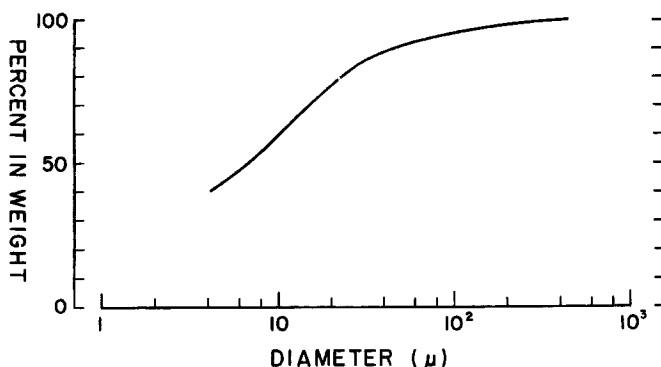


Fig. 1 Accumulation curve of particle size distribution. Diameters were determined by sieving mesh for diameter larger than 62μ and by settling velocity for diameter smaller than 62μ .

2. 実験装置及び方法

凍上実験装置の概要は Fig. 2 に示す。Sample ⑬の詰まった Plastic cylinder ⑪の下部を Cylinder adapter ⑭の溝にはめこみ、上側には Piston ⑧を挿入する。Cylinder adapter には予め Porous plate ⑮がおさまられている。Plastic cylinder 内面と、Cylinder adapter 及び Piston との滑動部には、それぞれ O-ring を2段ずつはめこみ、試料中の水分が逃げないようにした。試料を静置するとき、Porous plate と試料下面との間に残った空気は Thermister holder ⑬挿入用の穴から逃げるようになっている。Piston と試料上面との間に閉じこめられた空気も Plastic cylinder に施こした空気抜きを通して除くことができる。

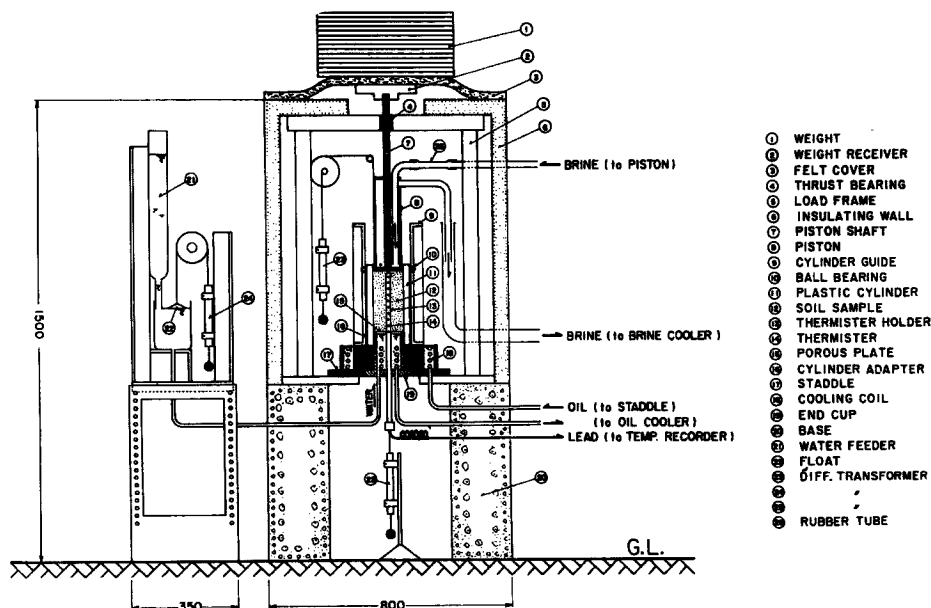


Fig. 2 Diagrammatic schetch of frost heaving apparatus.

一定温度に保たれた冷却槽中でブラインを冷却する。このブラインは Piston の中を通して循環する。したがって Piston 下面が一定温度の冷却面となって土壌試料は上面から冷却される。冷却による試料の温度分布の変化、及び Piston 中のブライン温度は Thermister 温度計で測定される。Thermister holder ⑬は外径 16 mm のアクリルパイプ壁に 2 cm おきに設けた 10 個の小孔に土と接するように Thermister ⑭を固定したものである。試料の中心軸に外径 15 mm 程度のホールオーガーで穴を開け、この穴に Thermister holder を所定の位置まで静かに挿入する。Thermister holder は凍上時に試料との凍着のために上に引張られても移動できるように、しかも試料の水分が逃げないように O-ring をはめた袋ナットで、End cup ⑨に半固定されている。この際の Thermister holder の変位量は差動変圧器 ⑮によって自己記録されるので、Thermister 素子の位置は正確にわかる。合計 11ヶ所の温度は 20 分週期のモーターに連結したロータリースイッチで自動切換して記録される。その温度測定精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ である。

試料の凍上量、あるいは圧密量は Piston の変位量となって現われる。荷重 ①は Piston の中心軸 ⑦を通して試料にかかるが、土壌試料の冷却前の初期圧密においては、Piston は Plastic cylinder を摺動しながら沈下する。しかし凍上時には、土の凍結部分と Plastic cylinder との凍着のため、荷重が大きいときには、凍上に伴う体積膨張量の一部は土の未凍結部分を圧密する結果となり、Piston の上昇量は正確に凍上量ではない。したがって試料がこの凍上力に相当する圧力以上に圧密されたとき、はじめて Piston の上昇量が凍上量に等しくなり、このときには土の未凍結部分と Plastic cylinder との間に摺動がおり、Plastic cylinder が Piston と共に凍上量だけ持ち上ることになる。凍上力の不均一、あるいは荷重重心の中心軸 ⑦からのずれは、Plastic cylinder を傾ける恐れがあり、その場合には、滑動部の抵抗も増大し、また所定の荷重も試料に加わらないことになる。これを防ぐため、Staddle ⑰にしっかりと固定された Cylinder guide ⑧に、3 個の Ball bearing ⑩を取り付け、Plastic cylinder が鉛直に支持されながら動くようにしてある。凍上量は、図にあるように滑車を通じて差動変圧器 ⑮へ伝えられ、直流電圧に変換されて打点式記録計に 90 秒毎に記録される。その記録精度は $\pm 0.1 \text{ mm}$ である。

未凍結部分の水分移動が凍上現象において重要な因子であることはまえがきでも述べた。Thermister 素子と同じように、試料中の各点で土の含水比の時間的変化が測定出来るような素子があれば、それを使うのが一番いいのであるが飽和に近い含水比を測るのに適した素子はまだない。そこでこの実験装置では、どれだけの水分が試料の下面から吸収されたかという測定方法を取らざるを得なかった。Fig. 2 の左の部分がその給水装置である。すなわち、ガラス製ビーカー (断面積 113 cm^2) 中の水はビニールパイプ (内径 18 mm) を通じて、End cup ⑨と Cylinder adapter ⑪によって形成される水溜につらなり、Porous plate ⑫を介して試料の下端に通じている。Porous plate は直径 2 mm の細穴が 4 mm ピッチで縦横一面にあげられた厚さ 10 mm の真鍮板である。これと試料の間にはガラスウールが敷かれており、土粒子の通り抜けを防ぐフィルターの役目をしている。したがって試料の給排水は、そのままビーカーの水面の上下動として現われる。この水面には蒸発を防ぐため、油を浮かせてある。水面の上下変動は Float ⑭で敏感に感じ取られる。Float と差動変圧器 ⑮のピースコーを径 0.1 mm の細銅線で結び、鋭敏な滑車で予めバランスさせておく。Float の上下動はそのまま差動変圧器によって電圧変動に変えられ、打点式記録計に、凍上量、Thermister holder 移動量と同時に自己記録される。ビーカーの水面は、Water feeder ⑯によって、1.5 mm の範囲で一定に保たれ、また、給水装置全体の位置を上下させることによって、試料に対する水位の相対的位置が調整できる。気温の変化による水位の変動は予め補正してあり、気圧による影響は無視できる。

試料は肉厚 17 mm の Plastic cylinder ⑪によって半径方向にはほとんど断熱されているので、試料の上下両端の温度をそれぞれ変えることによって、試料の温度勾配を設定することができる。試料の上面の温度はブライン冷却槽を循環するブラインの温度を制御することによって、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度で 0°C から -20°C まで調整できる。他方、試料の下面も、水銀ローリーを使って一定温度に保たれたブラインを試料の下の水溜および Staddle ⑰中の蛇管内を循環させることによって、指定した温度に保つことができる。その

精度は実測の結果 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ で、氷点まで下げることができる。

凍上装置本体は断熱兼防湿壁③、⑥によって外界とはほとんど遮断されている。実験進行中、凍上がどのように成長してゆくかを観察し、写真撮影ができるように、試料の入っている Plastic cylinder は透明なアクリル製にしてあり、断熱壁には二重ガラス窓が取り付けられている。また、内部には照明ランプ、乾燥剤も入れる。

3. 実験結果の整理と考察

このたびの実験では給水ビーカーの水面を土壌試料の上端面にあわせただけで試料は完全に水で飽和されていると考えてよい。そして試料下端面の温度は約 200 時間にわたる実験中常に $12 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ にして、上端面の温度は試料内の温度分布、凍上量、吸水量等の記録を考慮しながら -10°C 、 -15°C 、 -20°C 、 -5°C に変化させた。実験の整理結果は Fig. 3 に示すとおりである。試料内各部分での温度変化の一例として上端面から 8 cm、6 cm 下の点での模様を Fig. 3 上段に示した。まず凍上量 (Frost heaving) と吸水量 (Moisture flow) との時間的変化を調べよう。まえがきにも述べたように吸収された水が全て凍結して約 10% の体積膨

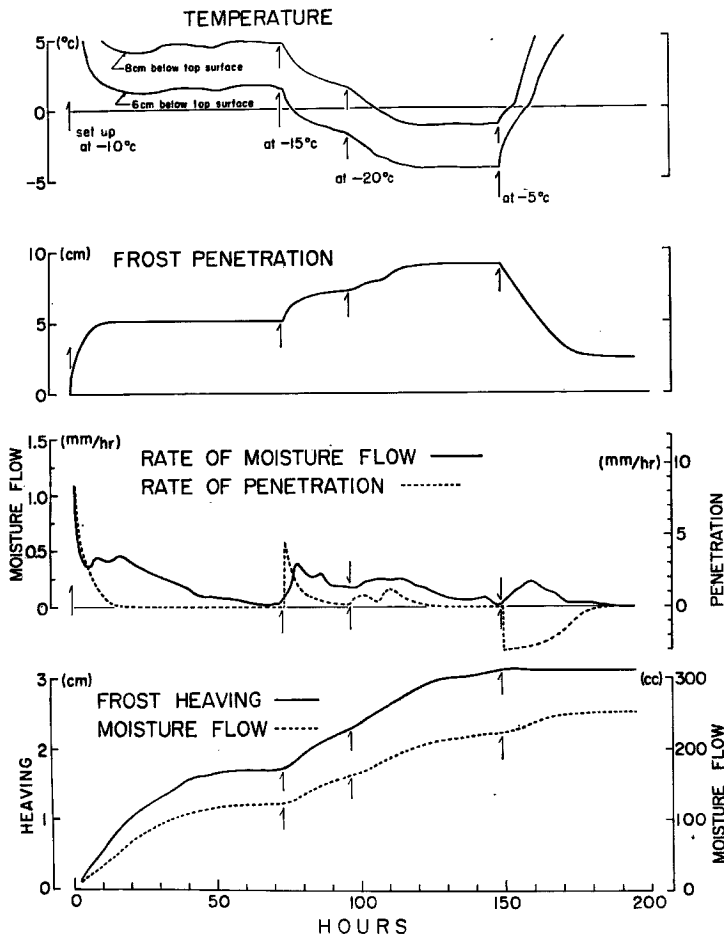


Fig. 3 Variation of frost heaving, moisture flow, frost penetration and typical temperature during freezing of soil.

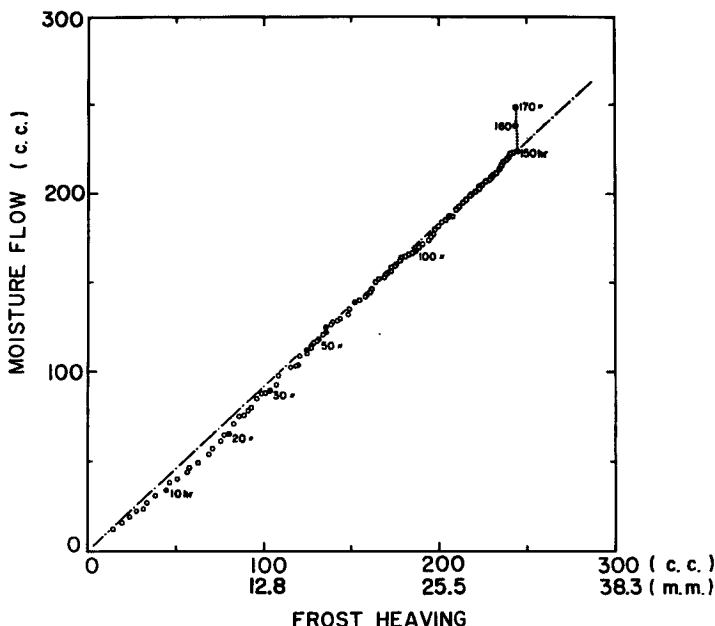


Fig. 4 Relationships between moisture flow and frost heaving. Figures written beside circles represent time in hours after freezing.

脹をすると考えて計算した体積増加量が凍上量になるはずであり、したがって観測した積算吸水量と積算凍上量との相関図を画けば原点を通る直線になるはずである。たしかに Fig. 4 にみられるように観測値は計算値（一点鎖線）とほとんど一致している。150時間から170時間の立ち上り部分は上端の冷却温度を -20°C から -5°C に上げたためにおこった融解現象である。

Frost penetration は試料の凍結厚みで示される。水分凍結温度を近似的に 0°C と考え試料上端面から 0°C 面までの厚さを試料内各点での温度記録から測定して求めた結果が Fig. 3 中の Penetration である。Frost penetration の時間微分が Penetration rate である。Penetration rate に関して次のような RUCKLI の方程式⁹⁾ である。

$$\frac{dX}{dt} = \left(A \cdot \frac{1}{X} \right) - (B \cdot v) - \left(C \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

第一項は凍結部分の温度勾配に起因する。

第二項は凍結面への水分移動に起因する。

第三項は未凍結部分からの熱流に起因する。

ここで、 X は凍結厚であり係数 A, B, C は土個有の性質及び冷却条件によって決まる定数である。いま冷却を始めてから試料内の温度分布がほぼ一定に落つくまでの過渡領域を考えると第一項に比べて第二、第三項による影響は小さいので無視すると (1) 式から

$$X = \sqrt{2At} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり NEUMANN の方程式と同じ型になる。定数 A は具体的要素で表わされ (2) 式は次のように書ける。

$$X = \sqrt{\frac{2K_1(T_f - T_s)t}{\rho_w n Q_L + \frac{1}{2} C_i (T_f - T_s)}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで T_f : 凍結温度 T_s : 冷却表面温度 K_1 : 凍結部分の熱伝導率 C_1 : 凍結部分の比熱 ρ_w : 水の密度 n : 空隙率 Q_L : 融解潜熱である。

E. PENNER⁹⁾, A. HIGASHI¹⁰⁾, K. ARAKAWA¹¹⁾ 等は凍結土壌中のレンズ氷の成長過程すなわち凍上過程は土の中を通る熱流に密接に関係していることを指摘している。この熱流は土個有の性質及び冷却条件により変化するが凍上量と熱流との対応をみるのには凍結面での熱収支を考えるのが好都合である。凍結面での熱収支の式は

$$K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \rho_w L_w v + \rho_s L_s \frac{dX}{dt} \approx \rho_w L_w \left(v + n \frac{dX}{dt} \right) \dots\dots\dots (4)$$

K_1, K_2 : 凍結・未凍結部分の熱伝導率

T_1, T_2 : 凍結・未凍結部分の温度

ρ_w : 氷の密度 ρ_s : 土の密度

L_w : 水の凍結潜熱 L_s : 土の凍結潜熱

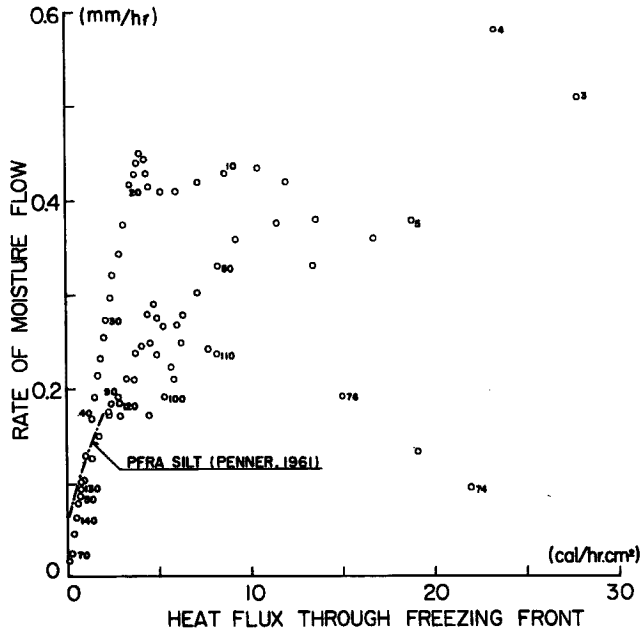
v : 凍結面へ引かれる水の水の速度

$\frac{dX}{dt}$: Penetration rate

n : 空隙率

温度勾配は凍結面のごく近くで計算され、又 v は凍上速度に相当する。

K. A. JACKSON etc.⁴⁾ は土壌試料が与えられるとそれが凍上する最高の速度 v_m があるという興味ある考えを述べている。即ち $\left(K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)$ が $\rho_w v_m L$ より大きいときには勿論凍結面は土の中を進むが、凍上速度は熱条件とは無関係に v_m であり、凍結面の進む速さが (4) 式の熱流に依存する。逆に $\left(K_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - K_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)$ が $\rho_w v_m L$ より小さいときには凍結面は土の中を進むことができず静止したままであり、その



ときの凍上速度すなわち v が熱流に依存すると述べている。我々は Fig. 3 の結果をもとに (4) 式の右辺を計算して凍結面を通る熱流を求め凍上速度、即ち吸水速度 (Rate of moisture flow) との関係を Fig. 5 に示した。

図中の点のわきに示された数字は実験開始からの冷却継続時間である。JACKSON らの考えにしたがえば Heat flux が約 10 cal/hr. cm^2 より大きい場合には Maximum moisture flow が約 0.4 mm/hr に定まらねばならないが、グラフでは Heat flux が 10 cal/hr. cm^2 以上で Moisture flow が減少している (例えば 74~78 時間)。これは試料表面温度を下げた直後には Penetration rate が大きいいため凍結膨脹作用は未凍結部分の一部を圧密し土粒子間隙に満たされている水分を追い出そうとする結果吸水量が減少したのかも知れない。

Fig. 5 に示されるような関係は土によってそれぞれかわると思われるが、吸水速度が最大になるような Heat flux が存在することは興味深い。それぞれの土についてこの関係がとも角求まれば、Moisture flow が存在する場合の熱伝導微分方程式、たとえば (1) 式を準静的に解くことにより凍上量を計算することができるので実際の凍上防止対策に役立つであろう。

謝 辞

この研究に際し、終始御教示をたまわった当研究所奥田節夫教授に厚くお礼申し上げる。また凍上装置の考察に当って有益な助言を下された精研冷機株式会社高志勤常務、当研究所奥西一夫助手に心から感謝します。

参 考 文 献

- 1) S. Taber: Frost Heaving, Journal of Geology, vol. 37, No. 1, 1929, pp. 428—461.
- 2) G. Beskow: Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, 1935, translated by J. O. Osterberg, Technological Institute, Northwestern University, 1947.
- 3) S. Kinoshita: Heaving Force of Frozen Soils, Physics of Snow and Ice, Inter. Conf. on Low Temp. Science, Sapporo, Japan, vol. 1, part 2, 1967, pp. 1345—1360.
- 4) K. A. Jackson D. R. Uhlmann, B. Chalmers: Frost Heave in Soils, Journal of Applied Physics, vol. 37 No. 2, 1965, pp. 848—852.
- 5) K. A. Jackson, B. Chalmers: Freezing of Liquids in Porous Media with Special Reference to Frost Heave in Soils, Journal of Applied Physics, vol. 29, No. 8, 1958, pp. 1178—1181.
- 6) E. Penner: The Mechanism of Frost Heaving in Soils, Bulletin, No. 225, Highway Research Board, 1959, pp. 1—22.
- 7) P. F. Low, J. M. Deming: Movement and Equilibrium of Water in Heterogeneous Systems with Special Reference to Soils, Soil Science, vol. 75, 1952, pp. 187—202.
- 8) A. R. Jumikis: The Frost Penetration Problem in Highway Engineering, Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey, 1955.
- 9) E. Penner: The Importance of Freezing Rate in Frost Action in Soils, Res. Paper No. 126, Nat. Res. Council, Ottawa, Canada, Jul. 1961.
- 10) A. Higashi: Experimental Study of Frost Heaving, U. S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, Wilmette, Illinois, Res. Report. 45, Aug. 1958. pp. 1—20.
- 11) K. Arakawa: Theoretical Studies of Ice Segregation in Soil, Jour. Glaciology, Vol. 6, No. 44, 1966, pp. 255—260.