

凍上量と温度分布・吸水量との関係について (第2報)

福 尾 義 昭 ・ 北 岡 豪 一

FROST HEAVING AND ITS DEPENDENCE ON HEAT FLUX THROUGH FREEZING FRONT (2)

By Yoshiaki FUKUO and Koichi KITAOKA

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. 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. It was reported that we found the existence of the optimum heat flux to the rate of moisture flow from the results of experiments with the newly constructed instrument. In this paper we discuss the dependences of unfrozen water content and heat flux to the rate of moisture flow.

1. 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。前者は土壤の凍結にともなって地表面が不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。これらはいづれも建築物、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つて研究されている。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科学研究所等³⁾⁴⁾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壤中に含まれている水分の凍結膨張(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りが観測されている。さらによく凍上を起した土壤の断面をみると **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水の層が数多くできてゐるのが必ず見られ、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つてゐ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。

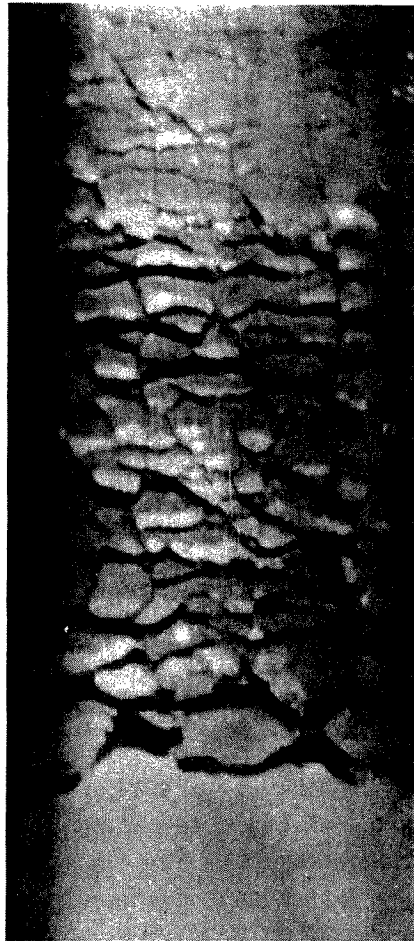


Photo. 1 Frozen soil, showing excessive segregation of ice .

K.A. Jackson, D.R. Uhlman, B. Chalmers³⁾ 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 & Chalmers⁶⁾ 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凍結して氷になる時に放出する free energy が水分を移動させ荷重を持ち上げる energy に配分される。しかしこの配分された energy がどのような mechanism で仕事をしていくのかはまだ充分解明されていない。E. Penner⁷⁾ は凍上現象全般にわたって本質的であるが最も見出し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。土の複雑な構造とも考え合わせると、これらの要素が測定できる凍上実験装置を製作し当分実験的研究を進める必要があるだらう。我々はこの観点から水分移動を測定できる装置を試作しこれを使つておこなった実験結果の一部を昨年度第一報として報告した⁸⁾。今もその実験を続けているがその後の実験の結果をここに報告したい。

2. 実験試料

本実験に用いた試料は、国鉄大阪駅近くの工事現場で地表面下約 5 m の深さから採取された沖積層土塊である。この試料の粘度別重量加積曲線は Fig. 1 に示すように粒径 5μ 以下の粘土が約 5%， 5μ から 50μ までのシルトが約 85%，残りの 10% が 50μ から 300μ までの細砂になっている。含水比は 38.1%，空隙率は 50.7% 乾燥密度は 1.26 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つ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両面をそれぞれ厚さ 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。

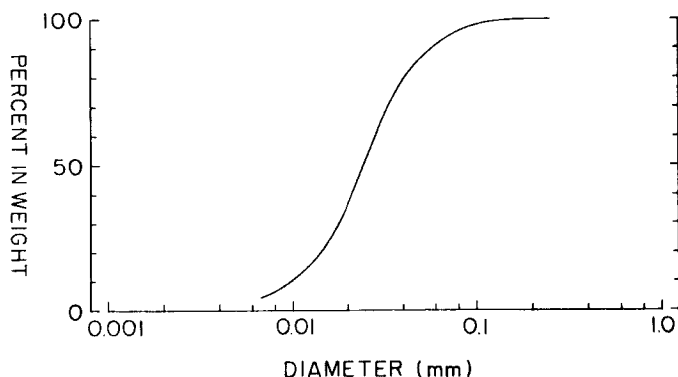


Fig. 1 Accumulation curve of particle size distribution. Diameters were determined by sieving mesh for diameter larger than 62μ and by settling velocity for diameter smaller than 62μ .

3. 実験装置及び方法

凍上実験装置の概要は Fig. 2 に示す。土塊試料⑫の詰め付た Plastic cylinder⑪の下部を Cylinder adapter ⑩の溝にはめこみ、上側には Piston ⑨を挿入する。Cylinder adapter には予め Porous plate ⑮がおさめられている。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。試料をセットするとき、Porous plate と試料下面との間に残った空気は Thermistor 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 に施した空気抜きを通して除くことができる。

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 の中を通つて循環する。したがって Piston 下面が一定温度の冷却面となって土塊試料は下面から冷却される。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 Thermistor 温度計で測定される。Thermistor holder ⑬は外径 16 mm 肉厚 5 mm のアクリル製のパイプ壁に 2 cm おきに直径 3 mm の小穴を 10 ヶ所あけ、この小穴にできるだけ Thermistor 素子⑭が土に接するようにそしてアクリルパイプ表面は滑らかになるように接着剤で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 Thermistor holder を所定の位置まで静かに挿入する。Thermistor holder は凍上時に試料との凍着のため

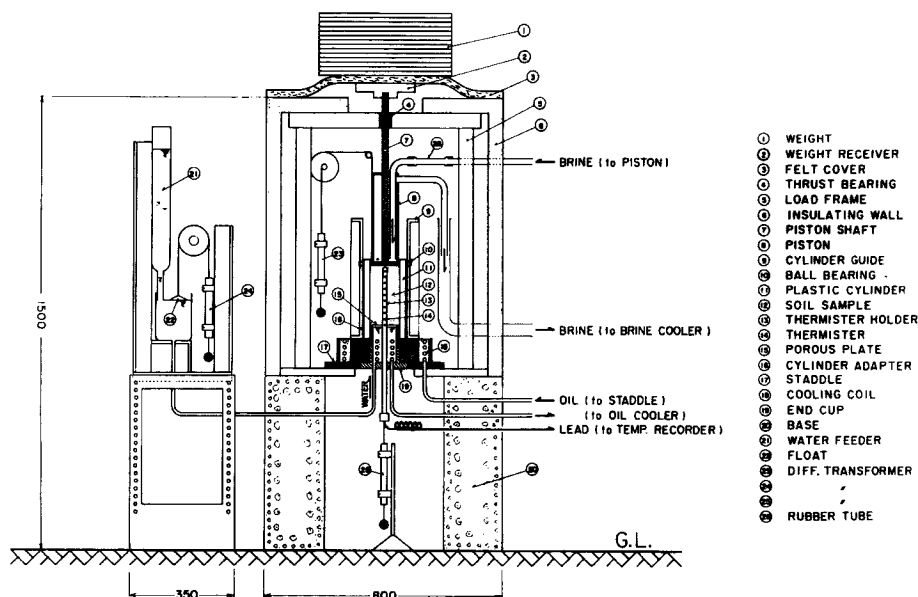


Fig. 2 Diagrammatic sketch of frost heaving apparatus.

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 ⑲ に半固定されている。この際の Thermistor holder の変位量は差動変圧器②⑤によって自記記録されるので、Thermistor 素子の位置は正確にわかる。合計11ヶ所の温度は20分週期のモーターと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 の変位量となつて現われる。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 を撓動しながら沈下する。しかし凍上時においては、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、凍上に伴う体積膨脹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。したがつ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 との間に撓動がおり、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 ⑨ 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②⑤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。その計録精度は $\pm 0.1\text{ mm}$ である。

凍結面へ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。Thermistor 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、それを使うのがもつとも適切であるが、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 ⑲ と Cylinder adapter ⑯ によって形成される水溜につらなり、Porous plate ⑮ 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けられた厚さ 10 mm の真鍮板である。これと試料と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、そのままピ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 ㉔で敏感に感じ取られる。Float と差動変圧器㉔のピスコアーを 0.1 mm の銅線で連結して、鋭敏な滑車で予めバナンスさせておく。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、Thermistor holder 移動量と同時に自動記録される。ピーカーの水面は Water feeder ㉔によつて、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つて、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 ㉔によつ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つて、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つて、 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 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、水銀ローリーを使つ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 ㉔中の蛇管内を循環させることによつてきめられ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によつ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。

4. 実験結果とその考察

まえがきにも述べたように、凍上時の水分移動を中心に考察してみよう。Fig. 3 に水分移動量 moisture flow と凍結厚 frost penetration 凍上量 frost heaving との関係を示した。各曲線に付した 10, 20, 40…等の数字は土試料を冷却し始めた時からの経過時間である。縦軸の moisture flow はその時までに水分移動量測定用ピーカー (Fig. 2 ㉔) に生じた水の体積の変化量を土試料断面積 $= \frac{\pi}{4} \times 10.4^2 = 84.95 \text{ cm}^2$ でわつた高さで示したものであり、減少のときすなわち土試料に水が吸収されているときを正、増加すなわち水が排出されたときは負にとつてある。横軸の penetration はサーミスター温度計で測定した土試料中の温度分布から 0°C 面を求めこれを凍結面 freezing front と見做し、試料上面よりこの freezing front までの厚さを示したものであり、もう一つの横軸はその時のピストン上昇量を示したものである。たとへば曲線㉔について述べれば、冷却後35時間までに水分 1.45 mm が排出されそのときのピストン上昇量は 0.73 mm でその後に水分の吸い上げが始まっている。この土試料からの水分の排出は penetration が進み土が凍結されるにつれて下の未凍結土が圧密されその結果間隙中を充たしていた間隙水の一部が排出されて生じたものと考えられる。この penetration は55時間頃までに 9.81 mm となり、そこで freezing front は停滞し土試料中の温度分布が定常状態になったことがわかる。Penetration の変化は土試料の冷却速度を与えるものであり Fig. 3 から曲線 ㉔ ㉕ ㉖ ㉗ の順にその強さは弱くなつていけると言える。冷却の強さが大きい程凍結厚 penetration は大きくなるから水分の排出時間が長くまた排水量も大きくなるのは当然であるが、凍結厚当りの水分排出量が冷却強さの大きい程大きくなつていのは興味のあることである。この傾向と並行して、ピストン上昇量についても単位上昇量当りの水分排出量がその順に大きくなつていように見える。これは冷却の強さによつて凍結面での不凍水の量がことなることを示しているものと思われる。このことは後程またふれるであらう。

Fig. 4 には凍結面における熱流量 heat flux が水分吸収率とどのように関係しているかを示したものである。この図の縦軸の値が0になる時刻は Fig. 3 中で moisture flow が減少から増加に向う時刻であり、曲線㉔では冷却後35時間、㉕では10時間、㉖では13時間、㉗では3.8時間となっている。この時刻以後は各曲線とも水分は吸収状態に移りまもなく penetration は止まり freezing front も停滞し、吸収した水分量によつてピストンが上昇するといういわゆる凍上現象にはいる。曲線 ㉖ ㉗ については、Fig. 3 右の曲線の傾

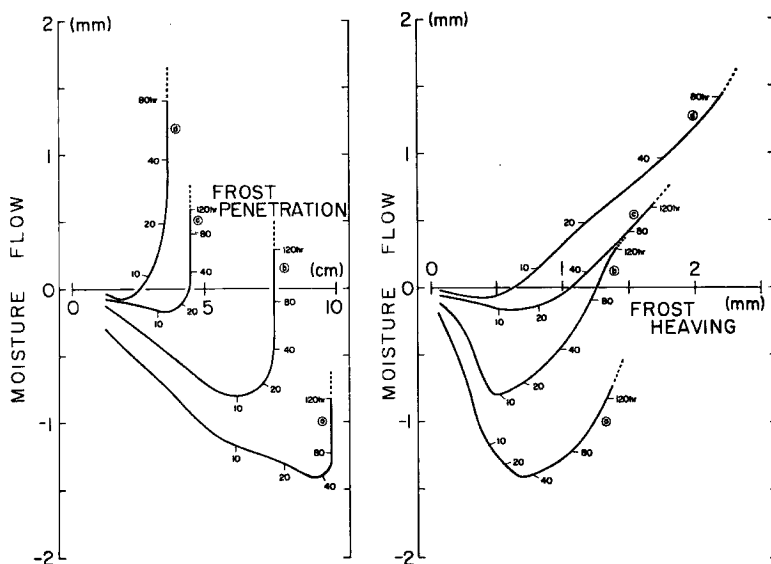


Fig. 3 Variation of moisture flow, frost penetration and frost heaving during freezing of soil.

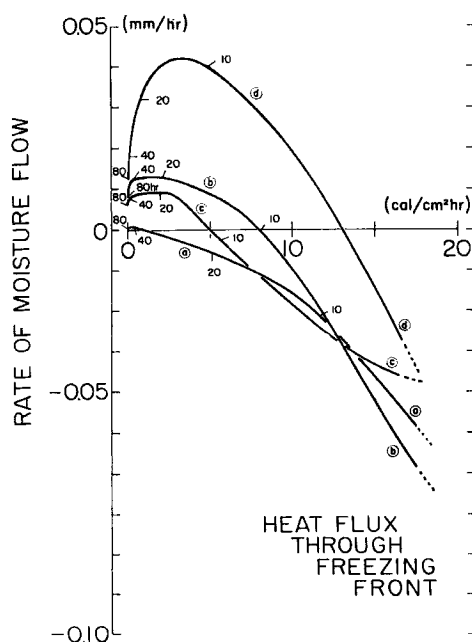


Fig. 4 Correlations between the rate of moisture flow and heat flux through the freezing front. Abscissa gives heat flux difference between frozen part and unfrozen part just above and just below the freezing front. Figures beside curves represent the time in hours after freezing.

きから吸収した水分の凍結膨脹だけ凍上するというよく知られた事実と一致する結果が得られるが、曲線④⑤については、120時頃までは凍上量から予想される以上の水分吸収が起っているように見える。昨年度の報告⁸⁾で水分吸収率が最大になる熱流量が存在することを述べたが、Fig. 4の結果から今回のシルト質が約90%を占める土についても同様のことがみられ、④⑤⑥⑦の順にその optimum heat flux が大きくなっているようである。

凍上時に凍結面へ吸収されていく水分の通路は土粒子表面に吸着されている吸着水の薄膜であることは現在多くの研究者にみとめられていることである。この吸着層中の水は -78°C でも凍らないという報告⁹⁾もある。ところで、この水分を freezing front に向かわせる力は Jackson, Uhlmann and Chalmers の理論⁵⁾によれば surface free energy すなわちこの吸着不凍水層が土粒子および間隙水と接触する両界面に起因する chemical potential の界面に沿った方向の勾配であり、彼等はこの勾配は吸着層の厚みいかにえれば土粒子表面と間隙水表面との間隔 separation の界面に沿った勾配に帰している。したがって、吸着層中を移動する水分の輸送量は通路断面すなわち separation そのものの大きさと流動方向に向つての separation gradient との積に比例することとなる。separation は不凍水層の厚さであるから同じ土試料であれば平均して不凍水量が多い程 separation は大きいと考えられるであらう。我々は Fig. 3 で水分排出時に冷却強さが強い程間隙水がよく凍っていることを見た。それゆえ penetration がとまり凍結面で水分の吸収が始まったとき separation は曲線④⑤⑥⑦の順に平均して小さくなっていると考えられる。このことから水分の吸収は④⑥⑤⑦の順に大きくなり得る条件にあるだらう。一方、separation gradient は間隙水中で生長していく間隙水が土粒子表面にむかつて生長していく速さや過程に大きく依存するものと思われる。我々は毛細管中では表面張力のため氷点の降下が起ることを知っている。したがって、土粒子が構成する間隙が非常に小さいものであれば freezing front は通過しにくくなり separation gradient が生じやすくなる傾向があるだらう。比較的大きい土粒子からなる砂質土で frost heaving がおこりにくいのは、逆に freezing front が土粒子表面に向つて一様に進み separation gradient が生じにくいためであらう。P. Hoekstra¹⁰⁾は Fairbanks silt を用いておこなった実験から unfrozen film 中の水分移動量（単位温度勾配・単位断面積・単位時間当たり）と温度との関係を求めている。この結果によれば温度が低い程大きく、上昇とともに急激に減少していることがわかる。Fig. 4 に示した凍結面における熱流量はそこにおける温度勾配の大小を示している量でもある。我々はサーミスター温度計の記録から 0°C 面を凍結面と仮定して熱流量を計算したが、真実の凍結面は冷却の強さが大きい程その温度や勾配が大きいのかもしれない。そうだとすればこの点からでは曲線④の方が⑦よりも水分吸収率は大きくなり得るはずであるが separation との積のために実際には小さくなったのかも知れない。今後この点に注目しながら凍上時の moisture flow の実態を究明していきたい。

謝 辞

この研究に際して多くの励しをいただいた当研究所奥田節夫教授に深くお礼申し上げる。また有益な議論をいただいた精研冷機株式会社常務取締役高志勤部長に心から感謝します。

参 考 文 献

- 1) Taber, S.: Frost Heaving, Journal of Geology, Vol. 37, No. 1, 1929, pp. 428~461.
- 2) Beskow, G.: Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, 1935, translated by J.O. Osterberg, Technological Institute, Northwestern University, 1947.
- 3) Kinoshita, S.: 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) 木下誠一・堀口 薫・田沼邦雄・大野武敏：北見における凍上観測（昭和42~43年冬期），低温科学，物理篇第26輯，北大低温研，昭和43年，pp. 363~81.

- 5) Jackson, K.A., D.R. Uhlmann and B. Chalmers: Frost Heave in Soils, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 2, 1965, pp. 848~852.
- 6) Jackson, K.A. and 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.
- 7) Penner, E.: The Mechanism of Frost Heaving in Soils, *Bulletin*, No. 225, Highway Research Board, 1959, pp. 1~22.
- 8) 福尾義昭, 北岡豪一, 有賀祥夫; 凍上量と温度分布・吸水量との関係について, 京大防災研究所年報第12号B, 昭和44年3月, pp. 169~176.
- 9) Jumikis, A.R.: *Thermal Soil Mechanics*, Rutgers Univ. Press, New Jersey, 1966, p. 93.
- 10) Hoekstra, P.: Moisture Movement in Soils under Temperature Gradients with the Cold-Side Temperature below Freezing, *Water Resources Res.*, Vol. 2, No. 2, 1966, pp. 241~250.