



Title	上載荷重条件における凍上について
Author(s)	石崎, 武志; 木下, 誠一
Citation	低温科学. 物理篇, 38, 169-178
Issue Date	1980-03-10
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18402
Type	bulletin (article)
File Information	38_p169-178.pdf



[Instructions for use](#)

上載荷重条件における凍上について*

石 崎 武 志

(北海道大学大学院 理学研究科)

木 下 誠 一

(低温科学研究所)

(昭和54年10月受理)

I. 緒 言

凍上性の強い土を一方向から凍らす場合、上載荷重が大きくなると、その凍上速度は減少する。このような載荷条件下での凍上実験は、古くは Taber の論文¹⁾に見られる。最近、高志等²⁾は、上載荷重と凍上率の間に実験式を導き出し、この実験式が色々な土について、適当であることを確かめた。

凍上は凍結面へ未凍土中の水分が吸い寄せられることで起こるのであるが、その吸水力に及ぼす荷重の影響を考える上で、次の2つの立場がある。

一つは、凍結面での吸水力は、毛管吸水力と同様に、土粒子間の氷と水の間に生ずる界面力によるとする立場である。この場合、凍結面での間隙水圧の落ち込み ΔP_w は、以下の式で示される。

$$\Delta P_w = \frac{2\sigma_{iw}}{r} \quad (1)$$

σ_{iw} は、氷、水間の表面張力、 r は有効空隙半径である (Penner³⁾, Everett と Hayness⁴⁾)。そこで、土粒子中の氷、水界面が作り出す界面力以上の荷重を加えると、凍結面では吸水することができなくなる。この荷重を 'Shut off pressure' と呼んでいる。D. Hill と N. R. Morgenstern⁵⁾ は、実験結果から、シルト質土に於て、この圧力が温度条件によらずに、3~5 kg/cm² であることを提案した。

もう一つは、吸水力は、凍土内の不凍水が自由水より低い間隙水圧を持つために生ずるとする立場である (P. J. Williams⁶⁾)。この場合には、不凍水の間隙水圧が温度の関数でもあることから土固有の値としての 'Shut off pressure' は存在しない。

Radd と Oertle⁷⁾ は、180 kg/cm² 程度の荷重をかけても温度条件によっては、凍土がおこることを観測した。また Hoekstra⁸⁾, 高志⁹⁾ も同様の結果を得た。

高志¹⁰⁾, Luthin と Taylor¹¹⁾ が提案した凍上機構のモデルでは、凍結面での吸水力は、凍土内の不凍水が自由水より低い間隙水圧を持つために生ずるという立場を採用している。

ここでは、凍上性の強い苫小牧シルト質土を上載荷重下で一方向から凍結させた場合、温

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2173号

度条件で、どの様なふるまいをするかを調べ、吸水力と上載荷重との関係に考察を加えてみた。

その結果から、全く凍上しない場合の上載荷重の値は、温度条件によることがわかった。これは、凍結面での吸水が、土固有の値ではなく、凍土側の温度に依存するという第2の立場を支持している。

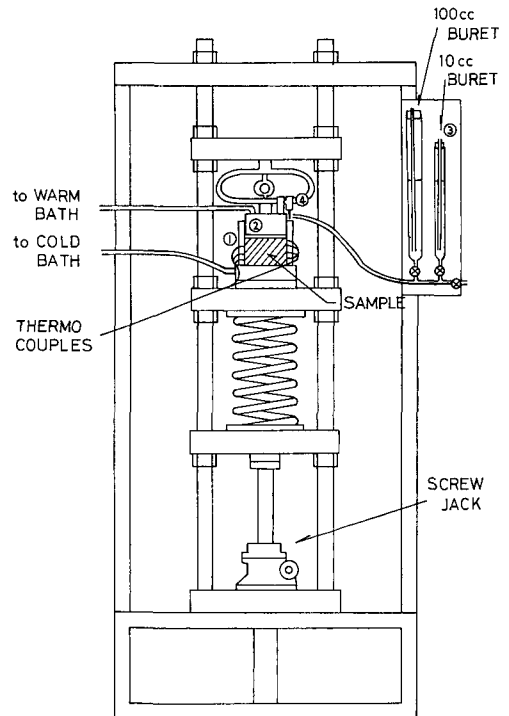
この場合の凍結面の温度と上載荷重の関係は、氷だけに圧力がかかり、水にかからない場合の水-氷系の氷点降下であることがわかった。

水に余計な圧がかからずに、水に負圧がかかった場合にも、同じ様に氷点降下をするはずである。水-氷系で、このことを実現するのは不可能なので、水が負圧になっている不飽和の土について上載荷重なしで氷点降下量を測ってみた。この場合は、氷と土の実質部分には圧がかからず、逆に水に負圧がかかる。実験結果によると、圧力と氷点降下量の関係は、理論と若干異なる結果が得られた。

II. 载荷条件における凍上実験

1. 実験装置

実験装置の模式図を第1図に示す。装置の大きさは、全体で高さ190 cm、幅85 cm、奥行き50 cmである。上部に透明のアクリル円筒（内径10 cm、肉厚1 cm、高さ10 cm）がおかれ、その中に土の試料が詰めこまれる。円筒の下面には冷却板がおかれる。試料は、下から上に向かって凍結して行く。冷却板には、冷凍機で冷却した不凍液を循環させ、常温と -30°C の間の任意の一定温度に保つことができる。試料の上面には、ポーラスプレート（真鍮性）を置き、これを通して試料内に自由に水が出入りできる。円筒上面のピストンの内部にも、一定温度の不凍液を循環させ、温度が一定になる様にした。試料に加える圧力は、下部のスプリングを縮めることで発生させ、その値をプルービングリングで読み取る。実験中、凍上のため試料の高さが変化するため、試料に接するスプリングも縮み、圧力は若干変化する。その都度、スプリングの下にあるスクリージャッキを回すことで、圧力を一定に保つことができる。土試料の凍上量は、ピストンに取り付けたダイヤルゲージ（0.01 mm目盛、測定範囲2 cm）により測定される。土試料の吸排水量は、ビュレット（100 cc、10 cc容量）で測定される。土試料内の温度分布は、アクリル円筒の側面に上から下へ5 mm ごと



第1図 凍上実験装置模式図

- | | |
|----------|-----------|
| ① アクリル円筒 | ② ピストン |
| ③ ビュレット | ④ ダイヤルゲージ |

に取り付けられた、7個の熱電対により測定される。

2. 実験方法

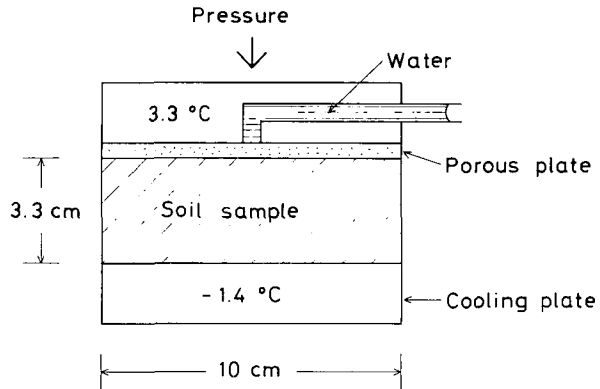
実験に用いた試料は、凍上性の強い砂質粘土ロームで、砂(粒径2~0.05 mm)60%、シルト(0.05~0.005 mm)19%、粘土(0.005 mm以下)21%、比重2.54、比表面積57 m²/gである。水に浸した試料を煮沸処理して完全飽和になるようにした。これを、アクリル製の試料円筒に入れるのであるが、その前に、円筒内壁には、凍着防止と摩擦緩和のためワセリンを塗っておく。試料の入った円筒を装置にすえてから、試料を20 kg/cm²の荷重で24時間圧密した。これは、20 kg/cm²以下の実験荷重では、土の実質の骨格が変わらない様にするためである。次に、所定の圧力まで減圧し、変位が一定になるまで、約半日放置した。熱電対による温度測定により、試料内が一様な温度分布(3°C)になるのを確認した後、試料下面の温度を0°C以下にし、冷却を開始した。始め-10°Cに冷却面の温度を下げ、土試料の過冷却が、10分ほどで破れるのを確認した後、所定の冷却温度にした。凍上量、吸水量を、15分おきに測定し、試料温度を打点記録計により自動記録した。

3. 実験結果

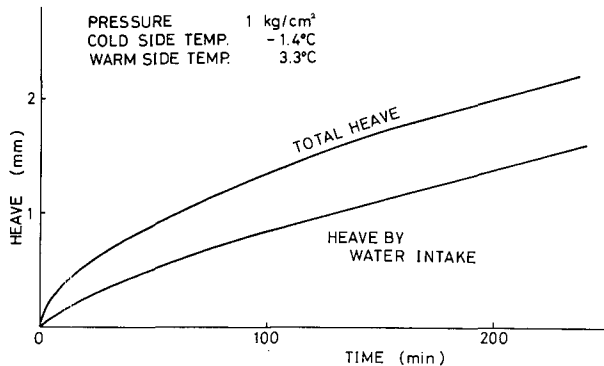
実験は、第2図の様に、試料上面の温度が、3.3°C、下面温度が-1.4°Cの条件では、上載荷重1, 5, 10, 20 kg/cm²の実験を行ない、上載荷重が20 kg/cm²の下では、冷却面温度-1.4, -4.5, -8.6, -13.8°Cの条件で実験を行なった。

第3図は、荷重1 kg/cm²の下での実験結果である。ここで、全凍上はダイヤルゲージから読み取られたものである。吸水による凍上は、装置横のビュレットから読みとられた吸水量から計算した凍上部分を示す。両者の差は、土試料内にあらかじめ含まれていた水が氷に変わることによる体積膨張部分である。この載荷条件に於ては、常に吸水しながら凍上した。

第4図には、荷重5 kg/cm²の下での結果を示す。この条件では、1時間30分程度まで、排水しながら凍上し、その後は、吸水しながら凍上した。また、温度記録によると、冷却開始後5~6時間で、0°C等温線が止まったため、それ以後の凍上は、吸水だけに寄るものである。このことは、全



第2図 試料付近の模式図



第3図 荷重1 kg/cm²のときの全凍上 (total heave) と吸水による凍上 (heave by water intake) の時間経過

凍上は、吸水だけに寄るものである。このことは、全

凍上量と吸水による凍上量のグラフが平行であることから明らかである。実験開始後10時間以後は、ほぼ直線的に凍上しており、この傾きから、 13.3×10^{-3} mm/hの凍上速度を得た。

第5図は、荷重 10 kg/cm^2 、 20 kg/cm^2 の時の結果である。荷重 10 kg/cm^2 の場合、実験開始直後から、ほぼ直線的に凍上し、その凍上速度は、 3.2×10^{-3} mm/hであった。吸水水様式は、 5 kg/cm^2 の時と同じだが、吸水速度が小さくなっている。荷重 20 kg/cm^2 では、凍結開始時に、グラフに示した様に2.4 ccほど排水したので、水の凍結は確認されたが、凍上は観測されなかった。

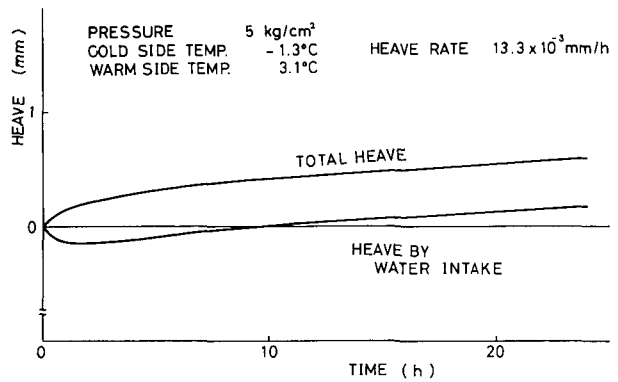
以上の結果を基に、冷却面温度 $-1.3^\circ\text{C} \sim -1.4^\circ\text{C}$ 、試料上面温度 $2.9 \sim 3.5^\circ\text{C}$ の下での上載荷重と凍上速度の関係を、第6図に示す。上載荷重が増すと、凍上速度が減少し、 20 kg/cm^2 の下では、凍上速度が0になった。

次に、荷重 20 kg/cm^2 で、冷却面の温度を下げて、 -4.5°C にした所、第7図に示すように、 1.1×10^{-3} mm/hの一定速度で凍上が起った。

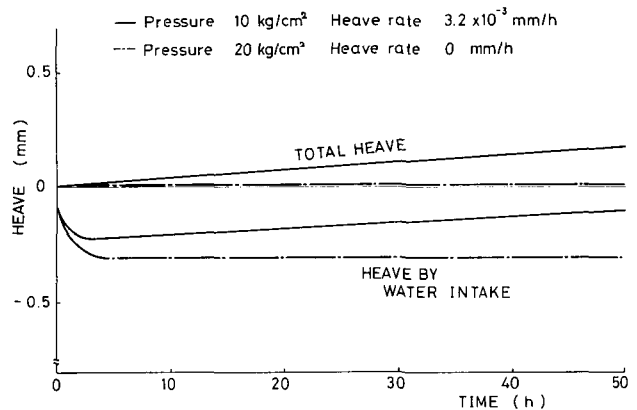
20 kg/cm^2 の下で、試料の冷却面側の温度を色々変えた所、冷却面の温度が下がるにつれて、凍上速度が直線的に増大するのが見られる。第8図にその関係を示す。

4. 考 察

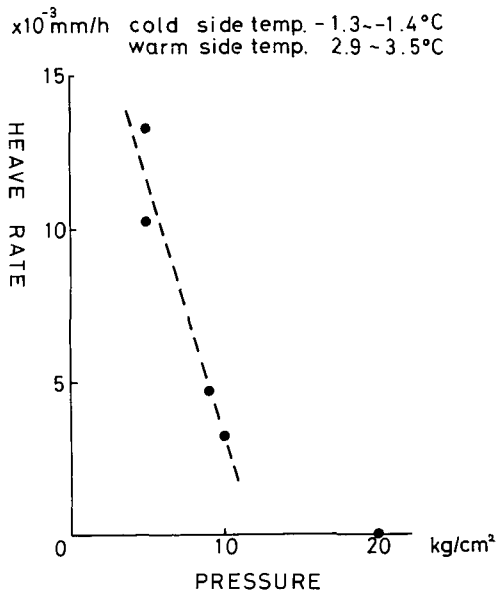
先に述べた様に、凍結面での



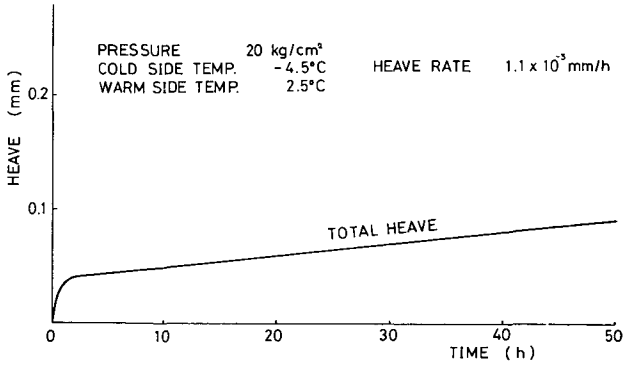
第4図 荷重 5 kg/cm^2 の下での凍上



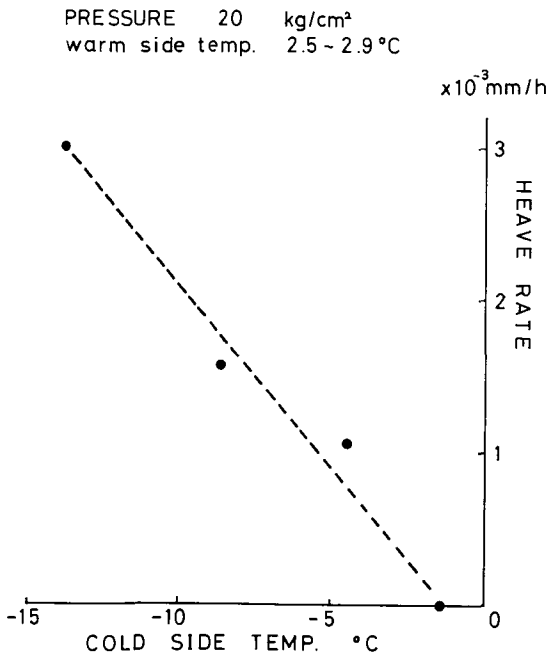
第5図 荷重 10 kg/cm^2 、 20 kg/cm^2 の下での凍上



第6図 荷重と凍上速度の関係



第7図 荷重 20 kg/cm² の下での凍上
(冷却面温度 -4.5°C)



第8図 冷却面温度と凍上速度の関係

吸水力が、土粒子の間の氷と水の間に起こる界面力であるという立場から、‘Shut off pressure’ という考えが出て来た。‘Shut off pressure’ は、凍結面での吸排水がなくなる荷重を意味する。この実験に於ては、第4図、第5図に見られる様に、凍結開始後数時間後に、凍上量と吸水量の曲線が平行になった。そこで、この‘Shut off pressure’ を凍上速度の値から判断した。この見方から、第5図を見ると、この‘Shut off pressure’ は、波線を外挿すると、12kg/cm²程度になる。ところが、第7図に見られる様に、冷却面の温度を下げた場合、20 kg/cm² の荷重の下でも、凍上した。そのため、この‘Shut off pressure’ は冷却面の温度に依存し、土固有の値ではないことがわかった。

冷却面の温度が-1.4°Cの時、荷重 20 kg/cm² の下で凍上が起こらなかったのは、圧力による氷点降下のため、凍上を起こす様な凍結が起こらなかったことが、次の理論から導かれる。

一般に、水に圧力 dP_w 、氷に

圧力 dP_i だけ大気圧より過剰に圧力が加わった状態で、水と氷が共存している場合、この水の氷点降下量は、次式で示される値になる。Edlfsen-Anderson によると、

$$dT = \frac{T}{H} (V_w dP_w - V_i dP_i) \quad (2)$$

ここで、 H は 1 g 当りの氷の融解熱 (79.8 cal/g), V_w, V_i はそれぞれ水、氷の比容 (1.00 cm³/g, 1.09 cm³/g), T は温度 (°K), dT は氷点降下量である。

この実験で上載荷重の下で土試料中の氷と水のそれぞれの圧力状態を考えてみる。凍上が起こるには、上載荷重を押し上げて氷が成長しなければならない。従って、氷には上載荷重 ($dP_i > 0$) がかかると考えられる。一方、水の方は、上面の未凍結部に接するポーラスプレート

を通じて、外部の水に通じているため、水の圧力は、大気圧である。

すなわち $dP_i = P$ (P は上載荷重), $dP_w = 0$ である。これを(2)式に代入すると、(3)式が得られる。

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = -0.09P(\text{kg}/\text{cm}^2) \quad (3)$$

この式を用い、上載荷重が $20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の下での、氷点降下温度を計算すると、 -1.8°C となる。従って、冷却面の温度が -1.4°C の時凍上しなかったのは、上載荷重による氷点降下のためである。また、冷却面の温度が -4.5°C の時、凍上したのは、この温度は氷点降下温度 -1.8°C よりも低く、上載荷重を押し上げて氷が成長し得るためである。

III. 不飽和土に於ける氷点降下量の測定

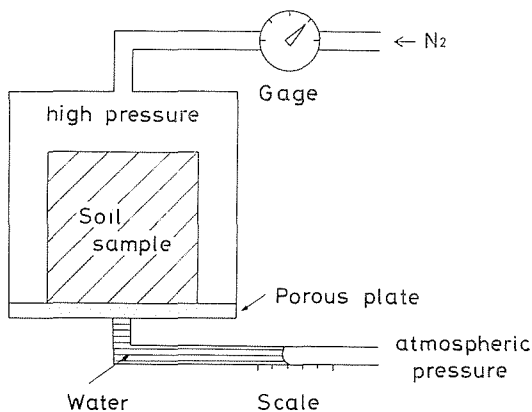
1. 実験装置

加圧板装置の模式図を、第9図に示す。この装置は、一定の水分ポテンシャル(負の間隙水圧、張力状態)を持つ土試料を作成する装置である。圧力容器の下部に、ポーラスプレートがあって、試料中の水が自由に、容器外部に出ることができる。圧力は窒素ポンプを用いて加え、 $10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ までの任意の値に設定できる。実験装置の写真を第10図に示す。

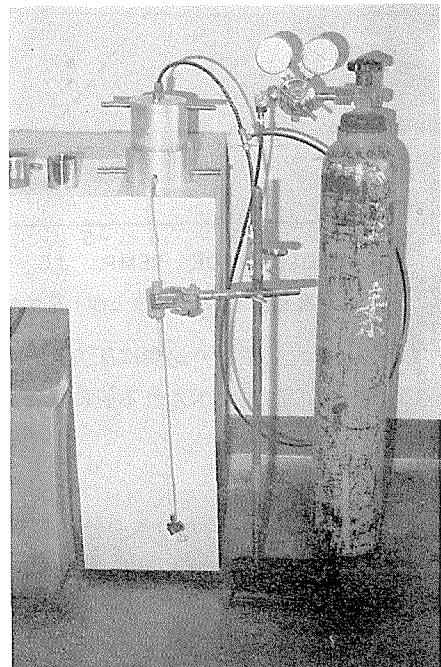
試料の作成原理を簡単に述べる。例えば、 $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の窒素圧で、試料中の水を追い出すとき、平衡状態では、試料周囲の窒素圧は $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で試料中の水の間隙水圧は大気圧になる。そのため、間隙水は、周囲の圧力より $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ だけ低い状態でつり合う。次に試料を取り出して、大気圧中に置くと、間隙水圧は、この差分だけ落ち込んで $-5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ になるという原理である。このような不飽和の土が凍る場合には、上載荷重がなければ、 $dP_w < 0$, $dP_i = 0$ の状態になる。このときの水が凍結する温度を測定した。

2. 実験方法

試料作成方法は、まず、重量含水比30%の苦小牧シルト質土を、100 ccの円筒容器に、乾燥密



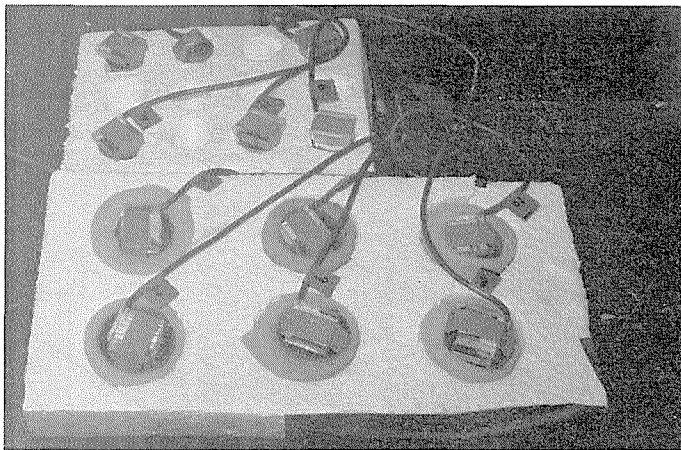
第9図 加圧板装置模式図



第10図 加圧板装置写真

度が 1.0 g/cm^3 になる様均質につめる。次に、この試料に水飽和（体積含水率約 62%）になるまで水を加える。その状態で加圧板装置に入れ、所定の間隙水圧を持つ試料にする。

この様にして作成した試料の氷点降下量を測定する方法を以下に示す。試料の中心部に、熱電対温度センサーを埋め込む。その上から乾燥しない様ビニールテープでシールして、第 11 図に示す様に、スタイロフォーム断熱材で覆う。それを -6°C に保った冷却箱の中に入れる。断熱材で試料を覆うのは、試料中の温度勾配が小さくなる様、徐々に冷却するためである。試料の温度変化は、12 打点の記録計で記録した。実験中、基準温度 (0°C) が常に安定に得られる様にするため、基準温度箱を更にほぼ 0°C の恒温箱に入れた。また、低い温度で過冷却が破れると、大きな潜熱が発生し、試料内の温度状態を乱すので、試料温度が -1°C 程度まで下がった時、液体窒素で種付けし、凍結させた。

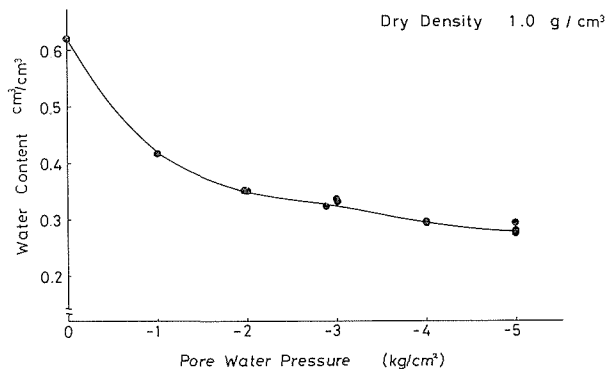


第 11 図 氷点降下測定実験写真

3. 実験結果

加圧板装置で作成した試料の体積含水率と、間隙水圧の関係（水分特性曲線）を第 12 図に示す。横軸のマイナスを取ると加えた窒素圧になるので、このグラフから、窒素圧を大きくすると、含水比が小さく乾燥した試料が得られることがわかる。さらに、この曲線は、含水率の小さい試料は、低い間隙水圧を持つことを示している。圧力 0 の点は、苫小牧シルト質土が完全に水飽和になる含水率を計算して求めた。

次に間隙水圧が、 -2 kg/cm^2 の土試料を冷却した際の温度変化を第 13 図に示す。 0°C 付近の冷却速度は、 0.92°C/h であった。試料温度が -0.67°C まで下がった時に、液体窒素に浸した針金を土試料に付け、種



第 12 図 体積含水率と間隙水圧の関係

付けを行なった所 -0.15°C で温度が安定した。図に見られる様一時間ほど一定温度を示したので、平衡温度と見なし、 -0.15°C をこの試料の氷点降下量と考えた。但し、より乾燥した試料の場合、温度が一定である期間が短くなるので、実際に平衡温度であるか確かめるために、色々な温度で、過冷却を破って、その再現性を確かめた。

この様な方法で求めた氷点降下量と、土試料の間隙水圧の関係を第14図に示す。黒丸は、それぞれの間隙水圧での氷点降下量の平均値を示し、縦棒は、実験データのすべてが納まる範囲を示している。氷点降下量は、土試料の間隙水圧の低下とともに、直線的に増大する。最小二乗法によって得られた式を次に示す。

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 0.0614P_w$$

$$(\text{kg}/\text{cm}^2) - 0.012 \quad (4)$$

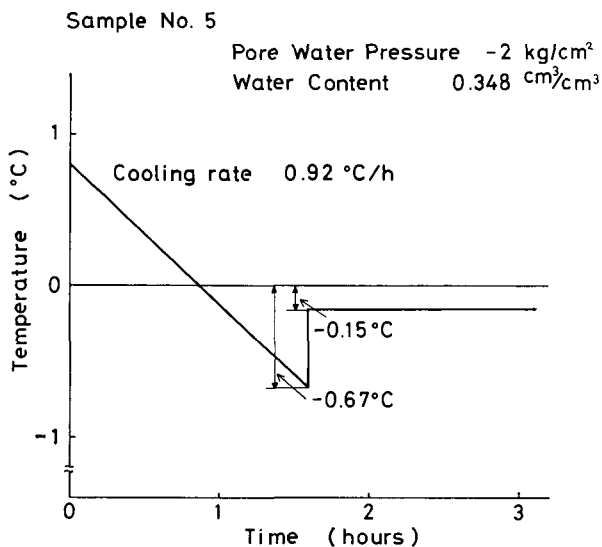
ΔT は氷点降下量、 ΔP_w は間隙水圧である。

第15図に、体積含水率と氷点降下量を示す。含水率が大きくなるにつれて、氷点降下量は急に小さくなる。この曲線を $\Delta T = A\theta^B$ の型で表わすと以下の様になる。

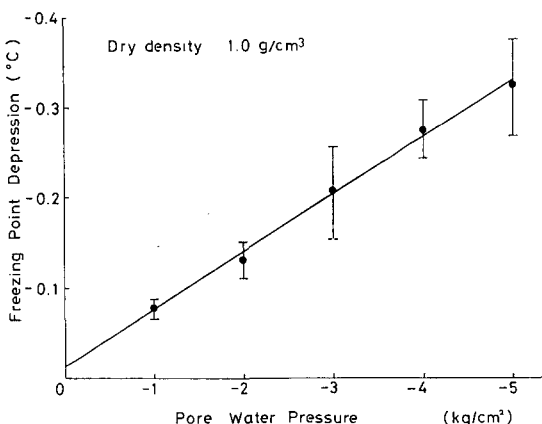
$$\Delta T = 1.12 \times 10^4 \theta^{-3.14}$$

θ は体積含水率(%)である。

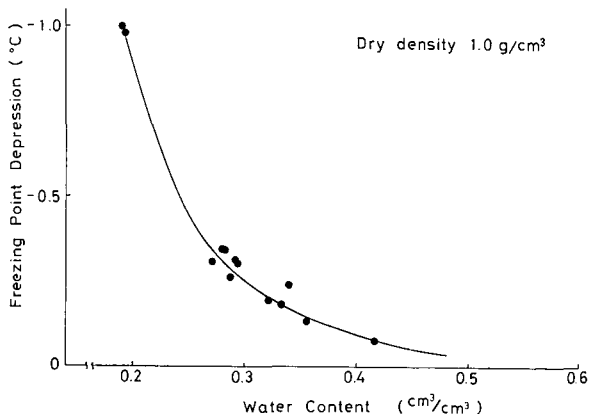
次に、不飽和土の氷点降下量のうち、土中水に溶存している物質による氷点降下量を見積もる実験を行なった。まず、土中水を 20, 40, 70 cmHg の負圧で引き採取した。この土中水の氷点降下量を測定した所



第13図 試料の温度変化測定例



第14図 間隙水圧と氷点降下量の関係



第15図 体積含水率と氷点降下量の関係

実験誤差の範囲内で 0°C であった。次に、溶存物質のモル濃度から氷点降下量を推測した。その値は、 $5 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ 程度であり、非常に小さいことがわかった。

4. 考 察

不飽和土が無拘束の条件で凍結した時の氷の圧力は、Yih-Jame と D. I. Norum¹³⁾ の論文に述べられている様に、大気圧であると仮定する。 $dP_1=0$ (2)式により、氷点降下量は(5)式で表わされる。

$$\Delta T = 0.08 \Delta P_w \quad (5)$$

ΔT は氷点降下量 ($^{\circ}\text{C}$)、 ΔP_w は間隙水圧 (kg/cm^2) で負の値である。

苫小牧シルト質土の場合、係数が、0.06 と若干小さくなっているが、これは、土粒子の吸着力等の影響により、氷側にも多少圧力が加わっているためと思われる。

また、R. D. Miller ら¹⁴⁾ は、実験方法は異なるが、同様の目的で氷点降下量を求めている。彼の実験結果によると、SS soil (土粒子間の接触が固体-固体である土) では、この係数は 0.04 になる。また、SLS soil (土粒子間には常に液体が存在している土) では、0.09 である。今回の実験で得た傾き、0.06 は、彼が得た値のほぼ中間の値を示している。これは、苫小牧シルト質土が、彼の言う SS soil と SLS soil の両方の性質を持った、言わば、SSLS soil と呼ばれる土であるためと推測される。

Yih-Jame と D. I. Norum¹³⁾ の論文に述べられている様に、第 13 図に示した、体積含水比と氷点降下量の関係は、不凍水分量と温度の関係に、ほぼ一致すると考えられる。この不凍水分量と温度の関係は、G. S. Taylor と J. N. huthin¹¹⁾ のモデルに於ては、水流と熱流の微分方程式を結びつける重要な関係である。また、これは凍上の基本的機構を考える上でも重要な関係であるので、氷点降下等の実験により、この関係を求めておくことは、重要なことであると考えられる。

IV. ま と め

凍上性の強い苫小牧シルト質土を用い、凍上実験を行ない、凍上速度に対する上載荷重、温度条件の影響を調べた。実験結果により以下のことがわかった。

- ① 荷重が大きくなると、凍上速度は急激に減る。
- ② 荷重条件、温度条件によっては、全く凍上しない場合がある。この条件は、氷に荷重がかかっている、水には荷重がかかっていない場合の氷点降下によって説明された。
- ③ 不飽和土の凍結に於ても、不飽和土中の水が負の間隙水圧を持つため氷点降下する。この間隙水圧と凍結温度の関係も、氷と水の圧力状態を用いて同様に考察できた。

この研究を行なうにあたり、低温科学研究所凍上部門の鈴木義男助教授、堀口薫、福田正己の両助手から有益な助言を得た。ここに感謝の意を表する次第である。

文 献

- 1) Taber, S. 1929 Forest heaving. *J. Geol.* **37**, 428-461.
- 2) 高志 勤・益田 稔・山本英夫 1974 土の凍結膨脹に及ぼす凍結速度・有効応力の影響に関する研究.

- 雪氷, **36**, 2, 1-20.
- 3) Penner, E. 1959 The mechanism of frost heaving in soils. *Bull.* **255**, Highway Res. Board, 1-13.
 - 4) Everett, D. H. and Haynes, J. M. 1965 Capillary properties of some model pore systems with special reference to frost damage. *Bull., New Series*, **27**, 31-38.
 - 5) Hill, D. and Morgenstern, N. R. 1977 Influence of load and heat extraction on moisture transfer in freezing soils. Internat. Symp. Frost Action in soils. Univ. Luleå, Sweden, 76-91.
 - 6) Williams, P. J. 1964 Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction. *Geotech.* **14**, 231-246.
 - 7) Radd, F. J. and Oertle, D. H. 1973 Experimental pressure studies of frost heave mechanisms and the growth-fusion behavior of ice. Proc., 2nd. Internat. Conf. Permafrost, 377-384.
 - 8) Hoekstra, P. 1969 Water movement and freezing pressures. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 512-518.
 - 9) 高志 勤・生頼孝博・山本英夫 1978 日本雪氷学会秋季大会講演予稿集. p. 83.
 - 10) 高志 勤 1979 凍上機構の数理解析. 66 pp. 第2回凍上シンポジウム (北大低温研).
 - 11) Taylor, G. S. and Luthin, J. N. 1978 A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canad. Geotech., J.*, **15**, 548-555.
 - 12) Edlefsen and Anderson 1943 Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, **15**, 2, 31-398.
 - 13) Jame, Y. W. and Norum, D. I. 1972 Phase composition of a partially frozen soil. Division of Hydrology, College of Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Research Paper, **11**, 17 pp.
 - 14) Koopmans, R. W. R. and Miller, R. D. 1966 Soil freezing and soil water characteristic curves. *Soil Sci. Soc. Amer., Proc.*, **30**, 680-685.

Summary

Frost heaving was measured for unidirectionally freezing soils under various overburden pressures using an apparatus shown in Fig. 1. Named Tomakomai silt, the soil sample was sandy clay loam, whose particle compositions are sand (60%), silt (19%) and clay (21%). It was frozen from below, having the upper unfrozen part always saturated with free water and the top and the bottom kept at $+3.3^{\circ}\text{C}$ and -1.4°C respectively. It was found that the heave rate decreased with increasing overburden pressure, as shown in Fig. 6. No heave was observed when the overburden pressure was 20 kg/cm^2 . It is explained by the freezing point depression of a water-saturated soil in which pressure acts only on a soil-ice matrix and not on water, the freezing temperature being -1.8°C under this overburden pressure. Therefore, in the experiment in which the cold side temperature was -1.4°C , the whole soil sample was never frozen except the free water. However, if the cold side temperature was lowered below -1.8°C , the soil sample began to freeze and heaving appeared again. The relation between the heave rate and the temperature of the cold side is shown in Fig. 8.

In an unsaturated soil the pore water pressure was negative. In this case the freezing point depression was also observed even in the absence of overburden pressure. If the pressure P_w acts only on the water (negative) and not on the soil-ice matrix, the freezing point depression ΔT is derived theoretically as $0.08^{\circ}\text{C } P_w$. In Tomakomai silt, however, ΔT was confirmed to be $0.06^{\circ}\text{C } P_w$ as shown in Fig. 14. This suggests that part of the pressure acts also on the soil-ice matrix.