



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北見における凍上観測（昭和42～43年冬期） 付 土中水移動の機構及び凍着凍上の低温室実験
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiti; 堀口, 薫 他
Citation	低温科学. 物理篇, 26, 363-381
Issue Date	1969-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18096
Type	departmental bulletin paper
File Information	26_p363-381.pdf



北見における凍上観測 (昭和 42~43 年冬期)*

付 土中水移動の機構及び凍着凍上の低温室実験

木下 誠一・堀口 薫・田沼 邦雄

(低温科学研究所 凍上学部門)

大野 武敏

(北見工業大学)

(昭和 43 年 9 月受理)

I. 緒 言

冬に地面が凍ってもち上る現象が凍上である。凍上のために、地上の施設物、たとえば、道路、鉄道、建築などが、大きな被害を受ける。この凍上現象を基礎的に解明するため、木下・大野は、昭和 36~37 年冬期以来、北見工業大学構内において毎冬継続して、凍上観測をおこなってきた。北見地方は、冬期寒さがきびしく、又、雪が少ないので北海道でも最も凍上のひどい所である。これまでに得られた結果は、すでに報告されている^{1),2),3)}。ここでは、昭和 42~43 年冬期に得られた観測結果をとりまとめて報告する。

この冬は事情により、観測現場を同じ北見工業大学構内ではあるが、従来の観測現場から 200 m ほど離れた所に、新たに設定した。設定の方法は、従来と変りない¹⁾。そして昨年³⁾と同じく、地面の凍上量、地温分布、凍結深度、凍上力、種々の管類の凍着凍上量、凍着凍上力などの測定を、冬期間継続しておこなった。又、2 月 10~12 日には、現場の凍った土を掘り起し、鉛直断面を作って、構造の観察と重量含水比や密度の測定をおこなった。重量含水比と密度及び現場の土質の真比重の値から、体積含水比を求めることができる。この体積含水比の鉛直分布と他の測定諸量との関連を検討して、凍上現象の基本となる土中水分の移動の機構について、一つの考察を加えた。

又、これまで数年間にわたって得られた観測結果にもとづいて、平均気温、積算寒度、凍結深度、凍上量の冬期間の推移を簡単な図式で表現することを試みた。

一方、低温実験室においては、凍着凍上の模型実験をおこない、現場の結果と比較検討した。又、凍着の強度の測定も併せておこなった。

以下、これらについて述べる。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 929 号

II. 観測現場における測定方法

30 m×30 m ほどの新たな現場を設置した。この部分は、降雪ごとに必ず除雪され、いつでも寒気が直接地面にふれるようにした。

1. 凍上力

直径 12 cm、厚さ 2 cm の鉄の円板を地面におき、これを頑丈な枠（基底部が地下 2 m のコンクリート塊のなかにアンカーされる）でおさえて、冬じゆう動くことのないようにした。地面が凍上しても、円板の部分だけは固定されているので、ちようどスリ鉢の底のようになる。この円板には強い力が働くが、その力を測定するため、円板と枠との間に 5 トンまで測定可能のロードセルをはさんだ。装置の詳細は、「凍上力 I」¹⁾ の報告に述べられている。

従来までは、力の値を静的歪計で毎日読みとっていたのであるが、この冬は、自記記録計ラストラックをも併用して、精度のよい測定をおこなった。

2. 地 温

カールソン型温度計を、地表、地下 5, 10, 20, 40, 70, 100 cm の深さにうめ、指定の指示器で、それぞれの温度の値を毎日 1 回読みとった。測定地点の深さが、地面の凍上によっても変わることのないように、予め硬質のビニール管に温度計をはめて、それを、土中にうめた。このビニール管は長さ 1 m、外径 7.6 cm で所定の位置に穴を貫通し、それぞれ温度計をはめこむようにした。更に、凍上による管のうき上りや、電線の切れを防ぐため、管の周囲の土を砂におきかえた。

又、凍結深度を直ちに読めるようにメチレン青水溶液による凍結深度計⁴⁾をうめた。これは昨年紋別において用いたのと同じである。

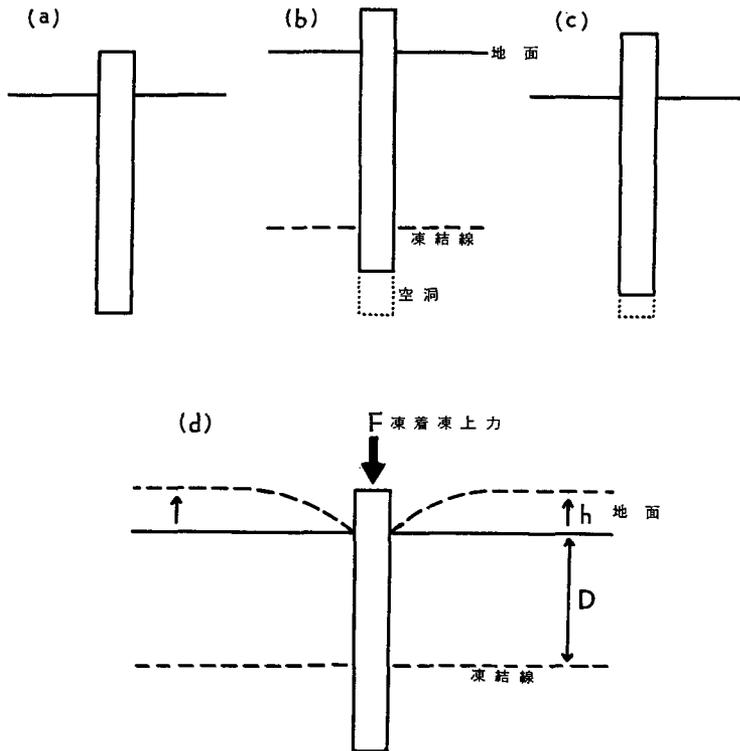
3. 地面凍上量

凍上力測定用の枠として使われている太い鉄棒（地下 2 m の深さでコンクリート塊のなかにアンカーされる）の先端を基準点として、自由地面の凍上量を、Y レベルを用いて測定した。

4. 凍着凍上力

凍着凍上というのは、たとえば電柱などのように、地中に鉛直に埋められた物体が、凍った土にくっついて、地面の凍上とともに、うき上る現象である。第 1 図にその模式図を示す。(a) のように地中に鉛直にうめられた棒や管が、(b) のように、地面の凍上とともにうき上る。そして、下端部には空洞ができる。春の融解期になると、(c) のように、地面は元の位置まで沈下するが、棒の方は沈下がおくれて、なお、下端に空洞を残す。これは、融解で地面は沈下するけれども、内部に依然として残る凍土と棒の側面との凍着のために、棒の沈下がおくれるからである。このため、地上に高くつき出た棒などが安定を失って倒れることがある。

このような凍着凍上で、どれほどの力が現われうるかを調べるため、凍着凍上力の測定をおこなった。すなわち、地中深くアンカーされて、冬じゆう動くことのない鉄棒に管を通し、この管と鉄棒とを、引張り計を通して結ぶ方法を用いた。測定方法の詳細は、「凍上力 I」の報告¹⁾に述べられている。



第1図 凍着凍上の模式図

(a) 冬のはじめ, (b) 凍上最盛期, (c) 融解後
(d) 凍着凍上力の出現

第1図(d)のように、管は動かずにまわりの地面が凍上する。このとき、管にかかる力 F が凍着凍上力である。

この装置のうち地上に露出した部分の写真を第2図のcに示す。まわりの地面がもり上って、装置の部分が凹んでいる。

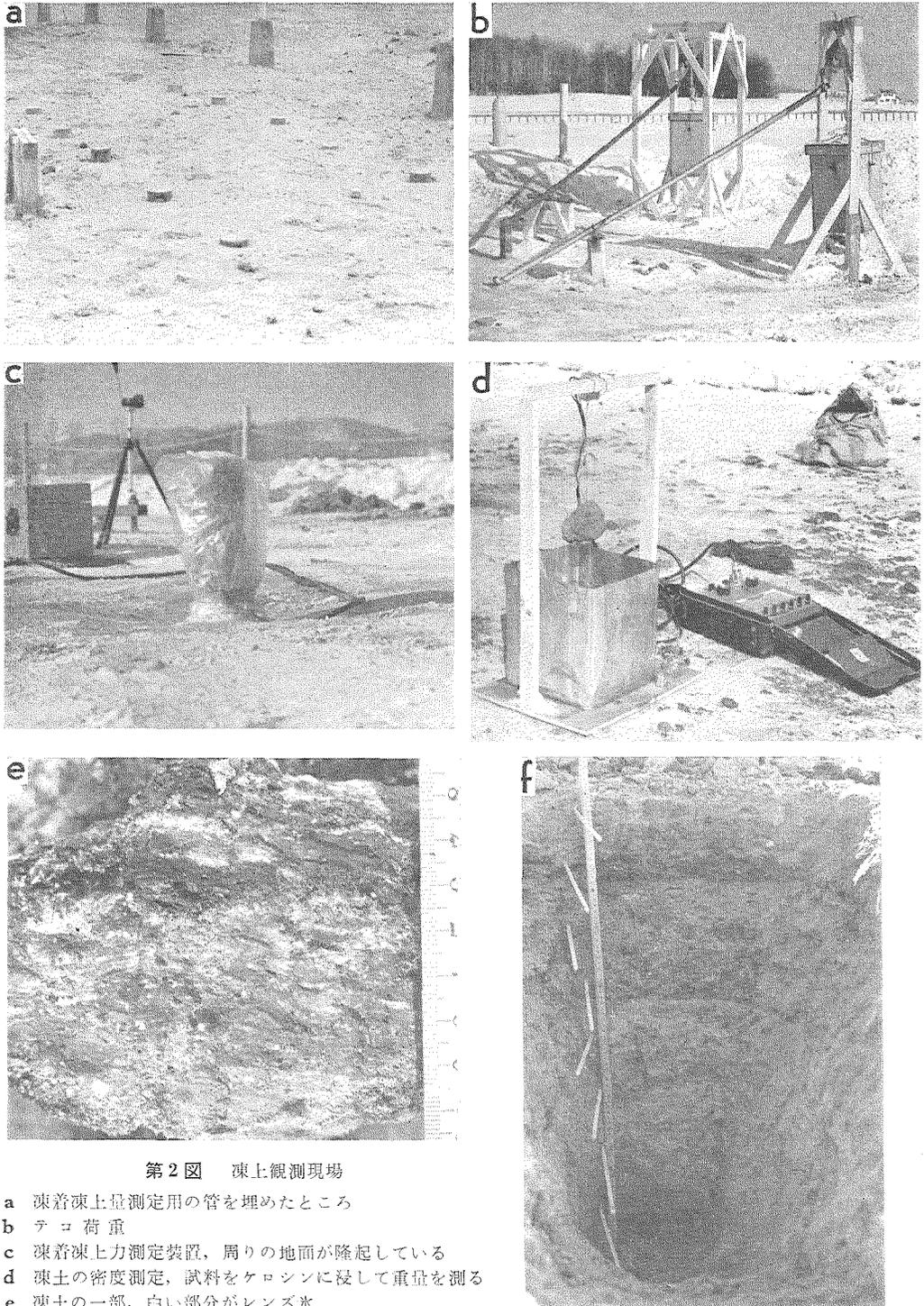
測定に用いた管は、外径7.6cm、長さ1m 地中埋設部分95cmの鉄管(5.5kg)とコンクリート管(9.4kg)の2本である。

5. 凍着凍上量

凍着凍上力の測定に用いたのと同じ形状、寸法の管(鉄、ビニール、コンクリート、各数本)を地中に鉛直に95cmだけうめた。すべての管について、土との接触面積を同じにして、まず材質による違いを調べた。又、一方、管の中に砂とか鉄屑などのつめものをしたり、更にテコで大きな荷重をかけたりして、管の重量が凍上に及ぼす影響を調べた。用いた管の重量を次の第1表に用す。

第2図aに管をうめた現場を、又、bにテコ荷重の状況を示す。

前述の凍着凍上力というのは、第1図(a)にあるように、力 F で管をおさえて、管の凍上を完全にとめるということである。すなわち、管に F に相当する重量があれば、凍上しない



第2図 凍上観測現場

- a 凍着凍上量測定用の管を埋めたところ
- b テコ荷重
- c 凍着凍上力測定装置, 周りの地面が隆起している
- d 凍土の密度測定, 試料をケロシンに浸して重量を測る
- e 凍土の一部, 白い部分がレンズ氷
- f 凍土の鉛直断面 (2月11日)

第1表 凍着凍上量の測定に用いた管

材 質	重 量	備 考
鉄	5.5 kg	自 重
	58	12月始めにテコ荷重, 3月9日に荷重外す
	86	1月11日にテコ荷重, 3月9日に荷重外す
ビニール (硬 質)	1.4	自 重
	8	砂をつめる
	10.4	鉄屑をつめる
コンクリート	9	自 重

ことになる。第1表にかかげた凍着凍上量測定の場合の管の重量は、凍上に対し、抵抗の役をする。管の重量が違えば、凍上のしかたも違うことが当然予想される。

凍着凍上量の測定には、地面凍上量の測定と同じく、Y レベルを用いた。

6. 現場の土質

現場の土を持帰り、粒度分析をおこなった。上部 20 cm ほどが、粘土分 28%、シルト分 26%、砂分 46%、真比重 2.5 の粘土質ローム、又、その下が粘土分 43%、シルト分 35%、砂分 22%、真比重 2.62 の粘土質である。いずれも凍上性の強い土質である。又、これまでの現場と同じく、地下 140 cm より深いところは、砂地である。従って粘土層に含まれる水分の移動だけで凍上が起る。

III. 低温実験室における実験方法

1. 凍着凍上

直径 10 cm、深さ 10 cm の円筒形のプラスチック容器 2 ケに、現場の粘土をつめ、その中央に直径 1 cm、長さ 10 cm の細長い鉄の丸棒をたてる。棒は深さ 9 cm だけ埋まる。容器の底の直径 2 cm の穴からガーゼが吊される。この容器を、凍上試験装置にすえる。ガーゼは、プラスの温度に設定された水槽の中に浸される。容器の測面は、断熱材でおおわれ、上面だけがマイナスの温度の空気にさらされる。容器のなかの土は、上面から凍って行き、凍上現象が起る。容器の内側には、凍土との摩擦が非常に少ないテフロンテープをあらかじめまきつけておき、凍土がよくすべるように注意した。

二つの容器のうち、一方のなかの鉄棒は自由に凍上するようにして、その凍上量をダイヤルゲージで測定した(第 10 図の (a))。もう一方のなかの鉄棒は、凍上しないように頑丈な枠でおさえて、そのとき棒にかかる力をロードセルで測定した(第 10 図の (b))

2. 凍着強度

大浦がおこなったのと同じ方法⁵⁾で、凍着の強度を測定し、現場において経験された凍着凍上力と比較した。たて 10 cm、よこ 10 cm、深さ 5 cm の箱に湿った土をつめ、その中央に丸棒を鉛直にうめこむ。これを低温実験室内にもちこんで凍らし、10 トン万能試験機にかけて

中央のうめこみ丸棒を凍土のなかからひきぬく。このときの抵抗力を測定した。用いた丸棒は鉄、ビニール、木で、その直径はそれぞれ 2.5 cm, 2.2 cm, 2.7 cm であった。

IV. 現場における測定結果の総合

第 3 図上段に、平均気温と地下 10, 20, 40, 70, 100 cm の地温の冬期間の変化状況を示す。なお、この冬の最低気温は、2 月 16 日の -26.2°C であった。又、下段には土の等温線図を示す。これは、上段の図に示される地温の測定値及び凍結深度計の読み、途中の断面観測のときに測られた温度分布の測定値などを総合して、作られたものである。太い実線が凍結線を表す。観測開始の 12 月はじめには、すでに 20 cm 近く凍っていた。3 月中旬には最大凍結深の 79 cm に達し、そして、3 月下旬には、地表面からの融解が始った。その速度は $1\sim 1.5\text{ cm/day}$ であった。又、同時に凍土の下部でも、未凍土からの熱で融解が始った。この方は速度がおそく、 $3\sim 5\text{ mm/day}$ であった。5 月 10 日頃には、完全に凍土がなくなった。5 月 14 日の断面観測のときには、凍った土は全く見られなかった。

第 2 表

年	最大凍結深 cm	最大凍上量 cm	最大積算寒度 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$
昭和 37	57		800
38	65	7.0	820
39	70	10.8	840
40	65	7.5	800
41	83	7.3	770
42	85	12.8	900
43	79	5.2	847

第 2 表に、これまでに北見で得られた観測結果のうち、最大凍結深、最大凍上量、最大積算寒度の値を示す。今冬の 79 cm の最大凍結深はほぼ平年並といえる。

第 4 図 (a) に、積算寒度の推移を示す。12 月上旬、20 日頃、1 月中旬、22 日頃、2 月上旬に、暖気が目立つ。3 月中旬には、最大値の $847^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ に達した。この値も、ほぼ平年並である。

第 4 図の (b) と (c) には、凍上力の推移を示す。(b) の実線は、地面においた直径 12 cm 円板を固定したときにかかる凍上力である。最大値 2700 kg (1 月 31 日, 24 kg/cm^2) は、これまでに得られた値のうちで、最小に近い。第 3 表に観測開始以来各冬に得られた凍上力の最大値と、そのときの地面凍上量、凍結深、積算寒度を示す。

第 3 表 凍上力の最大値

年月日	力 kg	圧力 kg/cm^2	凍上量 cm	凍結深 cm	積算寒度 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$
昭和 37.3. 1	5150*	29		54	660
38.1.22	2600	23	6.0	52	380
39.2.27	5300	47	10.6	68	750
40.1. 8	3600	32	4.1	42	250
41.1.24	4900	43	5.7	62	410
42.2.15	6200	55	10.7	80	750
43.1.31	2700	24	4.0	64	470

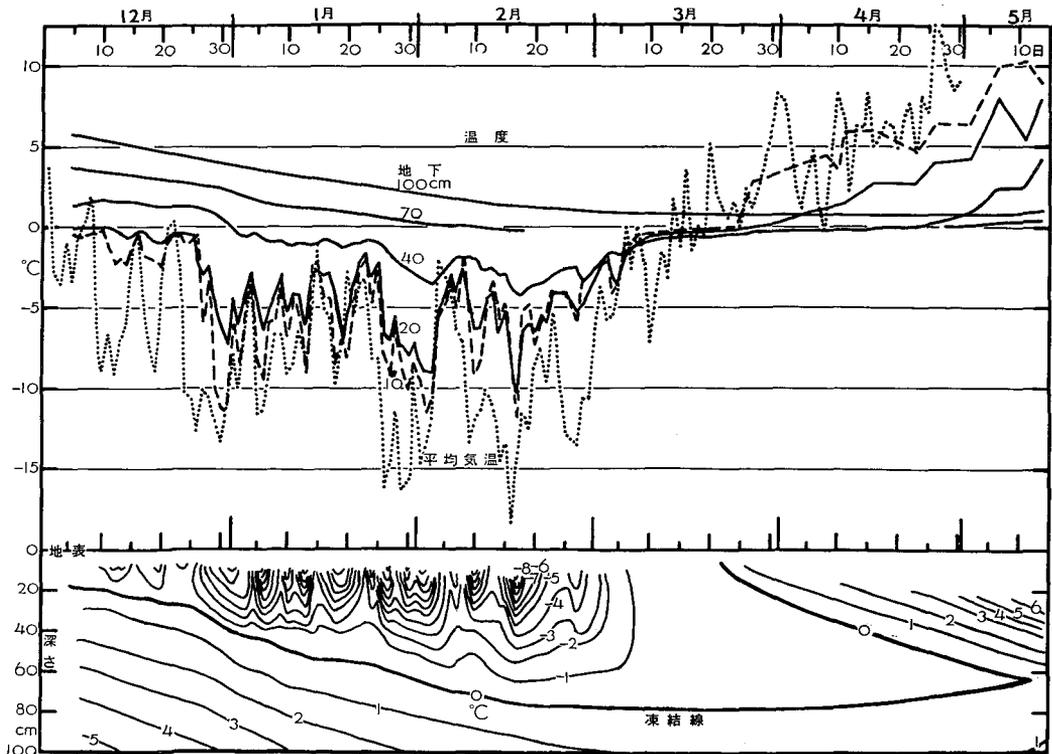
* この年だけ円板の直径 15 cm, 他は 12 cm

第4図(b)と(c)の破線は、鉄管にかかる凍着凍上力、又、点線は、コンクリート管にかかる凍着凍上力の推移を示す。(c)は、そのときの凍結深度から、凍着の単位面積当たりについて計算し直した値を示す。それぞれの最大値は鉄管が4050 kg(3月1日)、 2.9 kg/cm^2 (1月8日)、コンクリート管が2250 kg(1月8日)、 2 kg/cm^2 (1月8日)である。

地面の凍上力、管の凍着凍上力とも、増大減少の波が目立つ。暖気のあとには、減少がみられる。このような力の減少は、凍土の粘弾性特性による応力緩和にもとづくものであるが、このことについては、これまでの報告^{1),2),6)}で述べた通りである。従って、凍上力の最大は、凍上量や凍結深が最大になる3月上旬、いわゆる凍上の最盛期には現われない。このことが凍上力の大きな特徴である。一般に強い寒気襲来の一日か二日後の凍上速度が大きいときに現われる。

第5図には、凍上量の推移を示す。(a)は鉄管、(b)はビニール管、(c)はコンクリート管と地面のグラフである。いずれも12月9日の測定値を基準として凍上量を測っている。

鉄管では、58 kg重量のものだけが、他の2つに比べて凍上速度が小さい。86 kg重量と5.5 kg重量とがほとんど同じ凍上のしかたであるが、この86 kg重量は、はじめ、5.5 kg重量の自重だけであったものに、1月10日にテコ荷重をして86 kgにしたものである。従って、冬のはじめに、重量を増しておけば、その効果はあるが、すでに50 cmも凍結の進んだ1月10



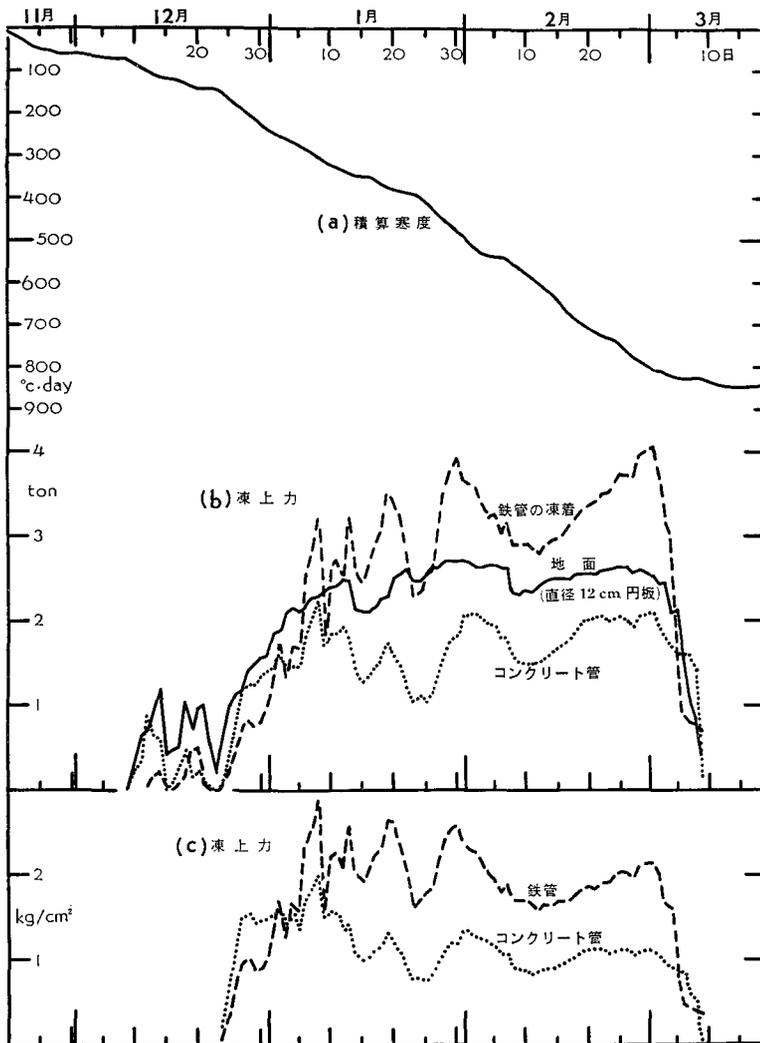
第3図 北見観測現場における温度状況(昭和42~43年冬期)

日では、この程度の重量の加算は効果がないことになる。事実、鉄管の凍着凍上力は、このときにはすでに2トンという大きな値にまでなっていた。3月6日にテコを外したので、3つの管とも自重の5.5 kg になったのであるが、86 kg 重量であったものだけが速く沈下した。

ビニール管では、3つともほぼ同じ凍上を示した。この程度の重量の違いは影響がない。しかし、融解期の沈下の方は、重量の大きいものほど沈下が速い。

コンクリート管では、2つとも同じ重量ではあるが、凍上、沈下とも若干の差がみられる。

管類の凍上量はいずれも3月6日の測定値が最大であるが、地面の方は2月22日に最大値を示し、以後は沈下を始めた。2月下旬にはすでに日中の日射が強く、そのため地面の融解が起るので、沈下が始まる。3月6日まで、7 mm 沈下した。しかし、管類の方は地下の凍



第4図 北見観測現場における測定結果 (昭和42~43年冬期)

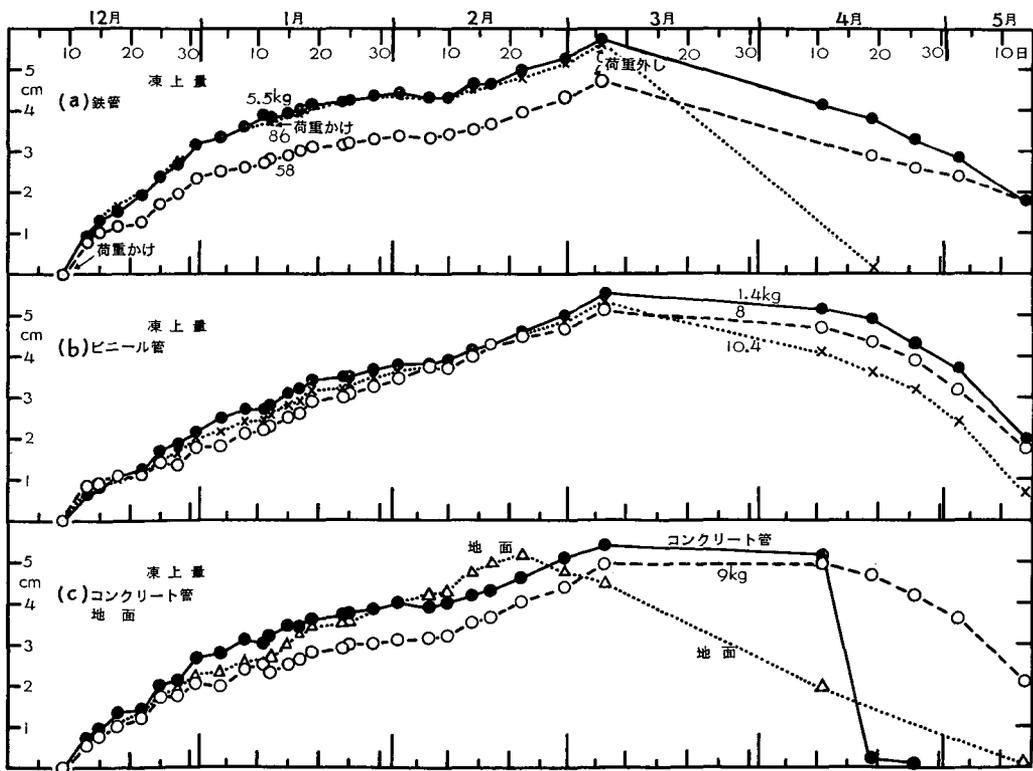
(a) 積算寒度 (b) 凍上力 (c) 凍着の単位面積当りの凍着凍上力

結深 79 cm にまでわたって、凍土と凍着しているので、地面の 7 mm 沈下の影響はない。逆にこの期間に 1 cm 近くも凍上した。

この冬の地面凍上量の最大値 5.2 cm は、第 2 表に示すように、これまでの最小である。5 月 14 日の融解土の含水比が 36% で、昨年⁷⁾の 43%、昭和 40 年の 38% に比べて少ない。この値はほぼ初期含水比に近いわけであるが、田沼⁷⁾の実験によると、凍上量は初期含水比に強く影響される。この冬の凍上量が少ないのも、このためであろう。又、先きのべたように、凍上力の方も小さな値であった。

地面は、5 月 14 日測定のとときには、12 月 9 日測定開始のとときの位置にまで沈下していた。従って、管の下端にはこのときなお、0.6~2 cm の空洞を残していたわけである。

3 種類の材質、鉄、ビニール、コンクリートの間には、特に大きな凍上量の違いがなかった。又、地面凍上量と同じく、いずれも最大値が 6 cm にもみならず、従来の観測値に比べると少なかった。



第 5 図 北見観測現場における凍上量 (昭和 42~43 年冬期)

V. 断面観測

2 月 10 日に、現場の一部を掘り起し、凍土の鉛直断面を作った。その断面の写真^fを第 2 図 f に示す。上部にはレンズ氷を多く含む層がみられる。その一部を取り出して接写した。

それを第2図 e に示す。

10日, 11日, 12日にわたって, 重量含水比と密度の鉛直分布を測定した。その測定結果を第6図の (a) と (b) に示す。

重量含水比 w は, 試料を 110°C で 24 時間炉乾燥して求められる。すなわち, 採取した凍土の試料の重量を $w_1\text{g}$, 乾燥後の重量を $w_2\text{g}$ とすると, 水分は $(w_1-w_2)\text{g}$ で, 含水比 w は $w = \frac{w_1-w_2}{w_2}$ で与えられる。

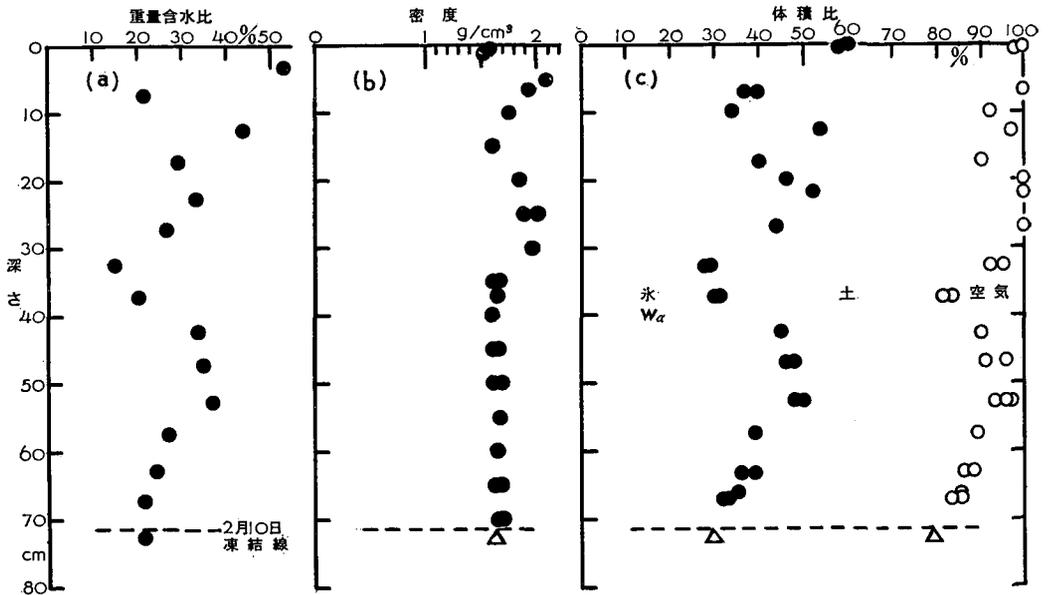
又, 密度 ρ は, 試料の空気中の重量 $m\text{g}$ とケロシンのなかに浸したときの重量 $m'\text{g}$ とを測定して得られる。すなわち, ケロシンの密度を ρ' とすると, ρ は $\rho = \frac{m\rho'}{m-m'}$ で与えられる。ケロシンの密度は, 50cc のピクノメーターにケロシンを満たしたときの重量から求められる。使用したケロシンの密度は 0.81g/cm^3 であった。この凍土の密度測定装置の写真は第2図の d に示す。重量の測定には, ストレンメーターによる方法を用いた。

地表近くは非常に含水比が多いが, これは多少現場に残った積雪が日中の日射で融解して, そのとけ水が凍土内にしみこんだためである。

つぎに, 重量含水比 w , 密度 ρ , 真比重, つまり実質の密度 ρ_0 の値から, 凍土内の氷の部分 ($\alpha\%$), 実質の部分 ($\beta\%$), 空気の部分 ($\gamma\%$) の体積比を求めることができる。すなわち

$$\alpha = \frac{1.1\rho w}{1+w}, \quad \beta = \frac{1}{1+w} \times \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \gamma = 1-\alpha-\beta$$

で与えられる。これらの値を第6図 (c) に示す。



第6図 昭和42年2月10~12日の断面観測の結果

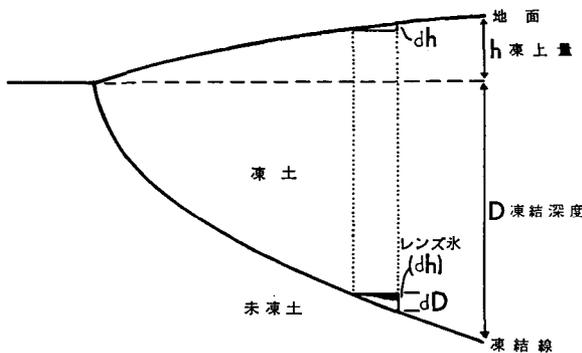
(a) 重量含水比 (b) 現場密度 (c) 重量含水比, 現場密度及び現場の土質の真比重から計算した凍土内の氷, 土, 空気の体積比

体積含氷比 α として 28~60% の値が得られたが、重量含水比 w の値よりもかなり大きい。実質の部分 β は 40~60% であるが、この実質というのは、110°C で 24 時間炉乾燥して残った部分である。空気の部分 γ は 0~19% である。

なお、凍結線のすぐ下の凍っていない土の重量含水比は 22% であった。凍っていないため、塊として採取出来ず、密度は測れなかったが、凍結線のすぐ上と同じ密度 1.61 g/cm³ と仮定すると体積含氷比 α が 29%、実質の部分 β が 50%、空気の部分 γ が 21% である。それを第 6 図 (b) と (c) に三角印で示す。

VI. 凍上の際の土中水分移動についての考察

凍上現象は、凍結線より下の未凍土内の水分が、凍結線まで吸い上げられて、そこで氷として析出するために起ると考えられている。そして、析出した氷は、一般に、厚さ 1~10 mm、



第 7 図

水平長さ 1~10 cm のレンズ状である。これをレンズ氷 (ice lens) とよぶが、この凍土内に無数に現われたレンズ氷の厚さを鉛直線に沿って総計したものが、そのときの地面の凍上量に等しい。

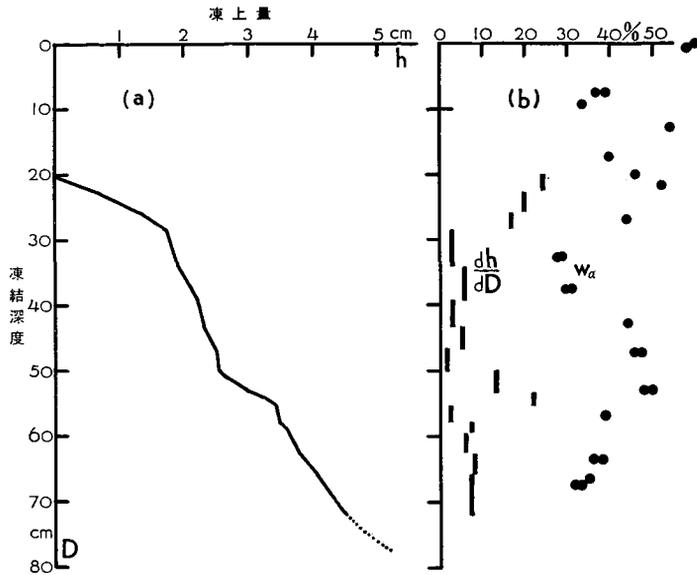
今、地面の凍上量を h 、そのときの凍結深を D として、凍結深が dD だけ進んだときに、凍上量が dh だけ増したとすると、その比 $\frac{dh}{dD}$

が、第 7 図に示されるように、深さ D と $D+dD$ の間におけるレンズ氷の含有比である。これを w_e で表す。すなわち、 $w_e = \frac{dh}{dD}$

そこで、今冬の観測結果から、地面凍上量 h -凍結深 D のグラフを書いてみた。それが第 8 図の (a) である。凍上量測定開始の 12 月 9 日には、すでに 20 cm 凍っていたので、曲線は $D=20$ cm から始まる。断面観測時の 2 月 10 日までを実線で、以後を点線で示した。この曲線から $\frac{dh}{dD}$ を計算して、第 8 図 (b) の太く短い縦の線群で表した。これがレンズ氷の含有比 w_e である。最大 25%、最小 2% である。2 月 10 日の断面観測のときまでを考えると、凍結深 D が 20 cm から 27 cm まで増加したのに対し、凍上量 h はその間に 4.5 cm に達した。従って、その間の w_e の平均は $\frac{4.5}{52} = 8.7\%$ である。

先に得られた体積含氷比 α (以後 w_a で表す) を、第 8 図 (b) に黒丸印で示した。この値はレンズ氷の含有量 w_e に比べてかなり大きい。凍結深が 20 cm から 72 cm までの間の平均は、ほぼ 40% である。しかし両者の分布の傾向はほぼ平行して、その差は約 30% である。

w_e はレンズ氷として析出して、凍上に参画した分であるから、体積含氷比 w_a との差の約 30% は、凍結線において水から氷への変態があったときに、体積増加に参加せずに (空隙



第8図 (a) 2月10日までを実線で表す
 (b) $\frac{dh}{dD}$ はレンズ氷の含有比は, w_v 体積含水比を示す

をうめて) 氷になった分と, 不凍水としてそのまま残った分とに分けられる。

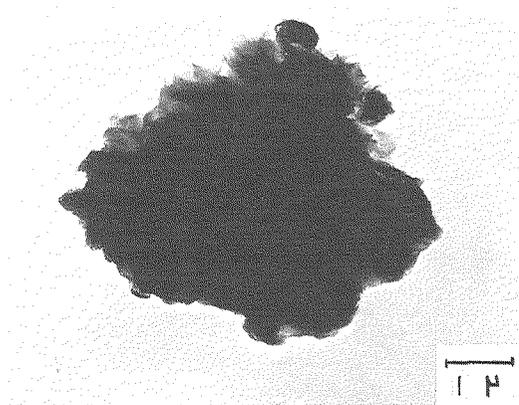
凍結線のすぐ下の未凍土の中の空気の方は 21% である。一方, 凍結線のすぐ上の凍土の中の空気の方は 14~17% で, それよりも数%少ない。従って, この差の数%の方は, 水で埋められる空隙の方と考えてよいであろう。それで, さきの 30% からこの数%をひいた残りの 25% ほどが不凍水として凍土のなかにくりこまれることになる。

その後更に温度がさがると, この不凍水は逐次氷になって行く。この場合の体積増加は, 凍土内にまだかなり残る空隙を埋めるにとどまって, 凍上には影響しない。この凍土内の不凍水分量については, すでに若干の研究者によって測定がおこなわれている^{8),9),10)}。粘土では, 重量含水比で 15~25% というかなり大きな値であることも確認されている。我々の場合も重量含水比に直すと, 18% ほどになるが, 妥当な値と云うことが出来よう。

レンズ氷の含有比 w_e と体積含水比 w_v との差がいつでもほぼ一定していることから, 凍上の際の土中水分の移動について, 次のような機構を考えた。すなわち, 凍結線では, 水分は土粒子をあるきまった厚さ (d_0 とする) の膜の形でとりまいている。そして, その下の未凍土内で, 土粒子をとりまく水分は, この厚さ d_0 よりも厚い (d とする)。この厚さの差の分 $d-d_0$ の水分が, 凍結線に向って上昇する。その様子を第9図の模式図に示す。凍結線では, 膜の厚さは d_0 と一定である。従って, 下から上昇して来る水分は, この膜を通して動き, 氷となって析出する。析出した氷はレンズ氷の形をなし, その厚さの分だけ地面が凍上する。 d_0 の厚さを保った水の膜は, 寒気で凍結線が進行すると, そのまま凍らずに凍土内にくりこまれる。凍土は, このような不凍水でとり囲まれる土粒子とレンズ氷のまざり合ったものである。凍結

線のすぐ下で最も水分が少ないが、事実、多くの観測結果がこのことを証明している^{11),12),13)}。

現場の土質は粘土質であるが、最も凍上性が強いのは、そのなかで粒径数ミクロンの土粒である。土粒子を球として、25% ほどの水がこれを一様の厚さで取巻くと考えると、その厚さは、粒径の $\frac{1}{24}$ ほど、つまり 0.1~0.2ミクロンである。これは、水分子が1000 個近くもつみ重なる厚さである。従ってこの水の殆んどは土粒子との結合力が弱い。不凍水のままで全部が凍土内にくりこまれるとは考えられない。ところが、最近のアナニヤンの研究¹⁰⁾によると、土粒子の表面は非常に凹凸がひどく、表面積はなめらかな球と仮定した場合の数十倍にも達することが報告されている。アナニヤンは、窒素ガス吸着の方法 (BET) で粘土質の表面積を求めたのであるが、一方、熱量計を用いて、測定された不凍水分量の値から、土粒子を取り巻く不凍水分の厚さを、 -0.2°C で $30\sim 40 \text{ \AA}$ と計算している。これは、水分子が高々十数個つみ重なる程度で、土粒子との結合力が



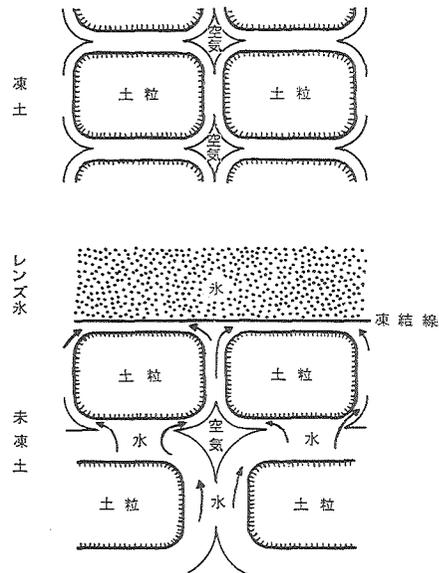
第10図 粘土鉱物モンモリロナイトの粉の電子顕微鏡写真

強いために、不凍水となることが十分考えられる。

一方、Uhlmann¹⁴⁾の理論では、この凍結線で平衡を保つ水の厚さを 10 \AA と仮定している。

現場の土質ではないが、粘土鉱物モンモリロナイトの粉を、電子顕微鏡でみた写真を第10図に示す。表面はなめらかではなく、かなりの凹凸があることが解る。

現場の土の一つの試料についてだけ BET 法で、表面積を測定したところ、 $10.1 \text{ m}^2/\text{g}$ という値を得た。先に述べたように、北見の観測では凍結線においてきまった厚さで土粒子をとりまく水の膜は重量含水比にして 18% ほどであるから、それから計算すると、その厚さは 180 \AA ほどになる。アナニヤンが得た値よりはかなり大きい。



第9図 凍上の際の土中水分移動機構の模式図

VII. 凍上現象の模式表現

これまでに得られた観測結果を総合して、第1近似的表現として、次のような模式化を考えた。

まず、平均気温 T は、冬期間第 11 図 (a) のように正弦的に変化する。

$$T = T_m \sin \frac{\pi}{A} t \tag{1}$$

ここで、 T_m は平均気温の最低で、 A は冬期全期間、 t は時間を表す。

積算寒度 I は第 11 図 (b) のように変化する。

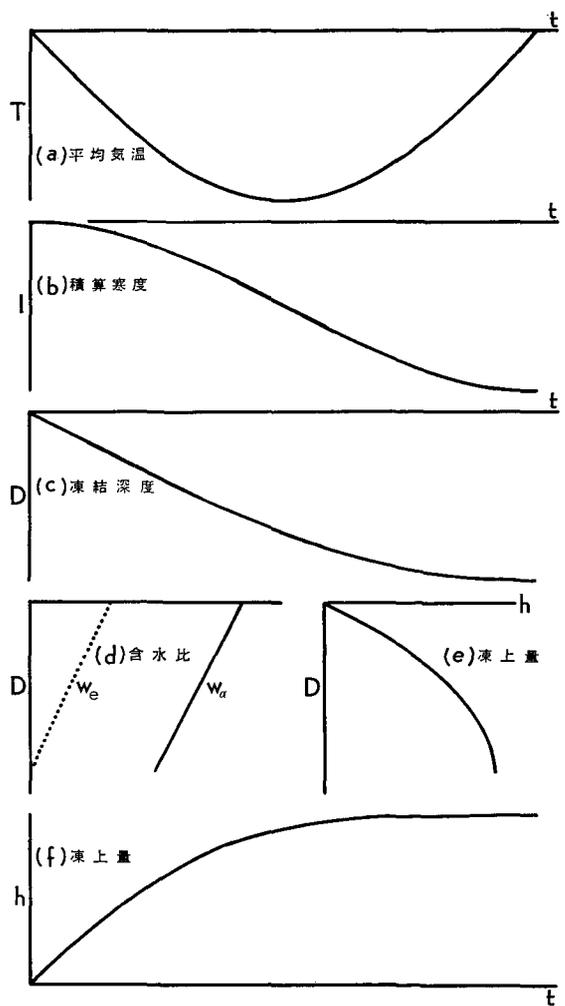
$$I = \int_0^t T dt = 2T_m \frac{A}{\pi} \sin^2 \frac{\pi}{2A} t \tag{2}$$

つぎに、凍結深度 D は、土中水分の凍結による潜熱放出を含む場合、これを正確に解くことは極めて難しい。しかし、Ruckli¹⁵⁾、Jumikis¹⁷⁾、Sanger¹⁷⁾等の計算にあるように、 $D \propto \sqrt{I}$ の型であることに変わりない。そして、比例常数が土質や土中水分、析出水の多少などの、そのときの条件に支配されるだけである。又、実用面においても、 $D \propto \sqrt{I}$ が採用され、比例常数としては、4~6 が得られている。従って、条件によってそれほど大きな違いはない。ここでも、 $D \propto \sqrt{I}$ を採用して、最大凍結深を D_m とすると

$$D = D_m \sin \frac{\pi}{2A} t \tag{3}$$

第 11 図 (c) のような変化をする。

前節でレンズ氷の含有量 w_e について述べたが、一般にレンズ氷として析出するエネルギー源は、凍結に際しての土と水との界面のエネルギーの変化と考えられている¹⁴⁾。地下深くなると、レンズ氷の析出のためにその上部の凍土をもち上げなければならない仕事の量がふえる。従って、その分だけ



第 11 図 凍上現象の模式表現

析出するレンズ氷が少なくなる。事実、凍上した土の断面を掘ってみると、下層ほどレンズ氷が薄く且つまばらになっている。それで、 w_e については第 11 図 (d) の点線のように、深さとともに直線的に減少すると考えた。又、最大凍結深 D_m で、レンズ氷析出が 0 になるとして

$$w_e = \frac{w_{e0}}{D_m} (D_m - D) \quad (4)$$

凍結線のすぐ下で、土粒子を一定の厚さの水がとりまき、それがそのまま不凍水となって凍土内にくりこまれ、その後の寒気で凍ると考えたが、その量を w_0 とすると、体積含水比 w_a は

$$w_a = w_e + w_0 \quad (5)$$

で与えられる。 w_a を第 11 図 (d) の実線で示した。

凍上量 h と凍結深 D との関係は $\frac{dh}{dD} = w_e$ であるから

$$h = \frac{w_{e0}}{D_m} \left(D_m D - \frac{1}{2} D^2 \right) \quad (6)$$

で与えられる。第 11 図 (e) のように、二次曲線で示される。

(3) (6) 式から、凍上量-時間の関係として

$$h = w_{e0} D_m \left(\sin \frac{\pi}{2A} t - \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{2A} t \right) \quad (7)$$

が得られ、これをグラフに書いたのが第 11 図 (f) である。

以上の表現は、勿論第 1 近似的なものであるが、凍上現象を平均的に表現するものと云えよう。しかし、凍上力については、すでにこれまでの研究で得られたように、平均的な傾向ではなく、寒気暖気の変化速度に強く影響されるので、今ここの議論のような平均的な表現は出来ない。これは凍土が粘弾性体であるためであるが、一方、このように平均値で表現できないのが、凍上力の特徴とも云える。

VIII. 低温実験室における実験結果

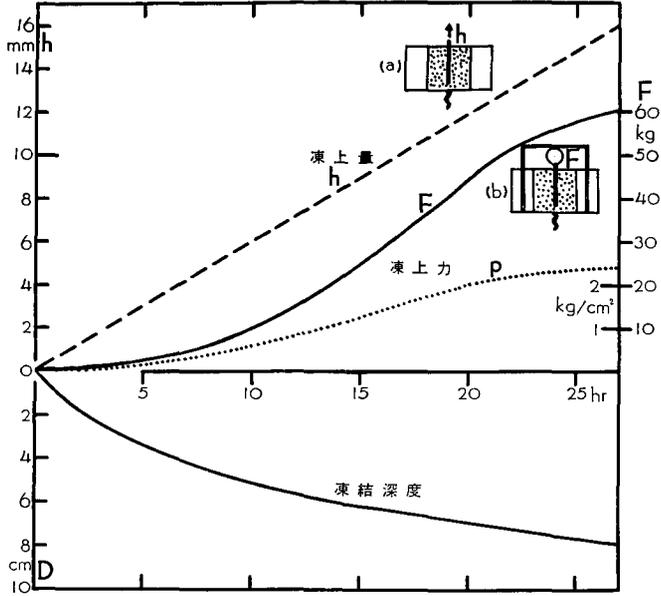
凍着凍上量、凍着凍上力及び凍着強度に関する実験を、低温実験室においておこなった。

1. 凍着凍上

先に第 III 節で述べたように、自由に凍上する場合の鉄の丸棒の凍上量 h と、凍上を完全におさえた場合に、鉄の丸棒にかかる力 F とを凍上実験装置のなかで測定した。第 12 図にその結果の一例を示す。この場合は、土の表面を -6°C の空気にさらし、又、底からさがるガーゼを $+5^\circ\text{C}$ の水槽につけた。表面の凍結が始ってから 27 時間で深さ 8 cm まで凍った。そのときの凍上量が 16 mm、凍上力は 60 kg であった。第 12 図の上段に凍上量を破線で、凍上力を実線で示した。又、点線は、凍着の単位面積当りの凍上力で、最大 2.4 kg/cm^2 に達した。下段は凍結深の進行経過を示す。

他にもおこなわれた実験と併せて、結果をまとめて次の第 4 表に示す。

実験 1 と 2 及び 2 と 3 を比べてみると、凍上速度が速いほど力が大きい。又、同じ凍上



第 12 図 凍着凍上の低温室実験

h 自由に凍上させた鉄棒の凍上量
 F, p 鉄棒の凍上を完全におさえたときに現われる凍上力

第 4 表

番号	室温 °C	水温 °C	凍上速度 mm/hr	凍結深 8 cm の ときの凍上力 kg	そのときの凍 着単位面積当 りの力 kg/cm ²
1	- 6	+ 5	5.8	60	2.4
2	- 7	+10	3	40	1.6
3	-10	+10	5.5	100	4.0

速度の 1 と 3 を比べてみると、3 の方が力が大きい。室温、水温の比較から 3 の方が土のなかの温度勾配が大きい。

現場の観測結果は、色々の条件に支配されて現われるものではあるが、上記実験室の結果と同じ傾向がみられる。すなわち、第 5 図 (a) の鉄管の凍上量で、12 月はじめから 1 月はじめまでと 2 月下旬から 3 月上旬までの間で凍上速度が速いが、第 4 図の (b) と (c) をみると、その期間で大きな凍上力が現われている。一方、第 5 図 (a) で、1 月下旬、2 月中旬で凍上速度が小さいが、第 4 図の (b) と (c) をみると、その期間で凍上力の減少がみられる。現場の凍上速度は速いと云っても高々 1 mm/day で、実験室の場合に比べると非常に小さいが、凍上速度が速いほど凍上力が大きい傾向には変りない。凍上速度が凍上力に対し、このような関係にあることは、既に述べたように、凍土が粘弾性体であることに起因する。

つぎに、土のなかの温度勾配が大きいほど凍上力が大きいことについては、「凍上力 I」¹⁾ の報告において、現場の観測結果について検討を加えたことと一致している。

2. 凍着強度

第 III 節で述べた方法で、凍着した棒の引抜き試験をおこなった。実験結果をとりまとめて次の第 5 表に示す。

同じ温度、同じ引抜き速度では、力は鉄、木、ビニールの順である。又、同じ物質では、引抜き速度の速い方が、又、温度の低い方が力が大きい。この傾向は、凍土が粘弾性体であることを顕著に示すものである。

凍着凍上力として、現場及び実験室で経験される値に比べると、この引抜き強度はほぼ数倍の大きさである。又、現場及び実験室とも、ここの引抜き速度に相当する凍上速度は極めて小さい。従って、凍着を破壊するに要する力は、もっと大きい筈である。凍着凍上力としては条件さえととのえば、もっと大きな力が出現し得ると推定される。現場の観測で、管類の凍上量と地面の凍上量とにほとんど差がなかったが、このことは、凍土と管との凍着面でほとんどすべりがなかったことを示す。

第 5 表

物 質	土の含水比 %	温 度 °C	引抜き速度 mm/min	最 大 力
鉄	50	-8	0.5	800 kg, 20 kg/cm ²
	63	-8	1.4	1000 , 25
	63	-8	10	970 , 24
	50	-2.5	1.3	370 , 9
ビ ニ ー ル	50	-8	0.5	100 , 3
	63	-8	2.5	115 , 3.3
木	50	-8	0.5	615 , 14
	63	-8	3	680 , 16
	63	-8	10	914 , 21
	50	-2	1.6	380 , 9

IX. 結 語

現場で得られた観測結果を検討して、凍上の際の土中水分移動の機構について考察を加えた。そして、凍結線では体積含水比にして 25% ほどの水分が土粒子をとりまき、凍結線の進入とともにそのまま不凍水分として、凍土内にくりこまれることをみつけた。この水分が、土粒子表面にどのような形で存在するのか、今後は土粒子の表面状態と関係づけて研究を進めたい。

又、凍着凍上について、凍着凍上量、凍着凍上力という外面に現われる量についてだけ検討を加えた。今後は、氷と異物質の凍着の微機構をも含めて研究を進めたい。

現場観測に際し、北見工業大学中村秀臣氏には、色々と御協力を得た。又、粘土鉱物粉末

の電子顕微鏡写真は、低温科学研究所松坂理夫助手に撮ってもらった。又、現場の土の表面積の BET 法による測定は、柴田理化学器械株式会社をお願いした。ここに厚く感謝の意を表する次第である。又、この研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費によってまかなわれた。

文 献

- 1) 木下誠一・大野武敏 1963 凍上力 I. 主に現場調査について. 低温科学, 物理篇, **21**, 117-139.
- 2) 木下誠一・大野武敏・小黒 貢 1966 凍上力 II. 現場の測定結果について. 低温科学, 物理篇, **24**, 285-297.
- 3) 木下誠一・大野武敏 1967 北見における凍上観測結果 (昭和 41~42 年冬期). 低温科学, 物理篇, **25**, 225-228.
- 4) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄・青田昌秋 1967 紋別における凍上観測結果 (昭和 41~42 年冬期). 低温科学, 物理篇, **25**, 229-232.
- 5) 大浦浩文・薄治之・高木雄二 1960 土の凍着力について. 低温科学, 物理篇, **19**, 215-224.
- 6) Kinoshita, S. 1967 Heaving force of frozen soils. In *Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 1345-1360.
- 7) 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.
- 8) Williams, P. J. 1963 Specific heats and unfrozen water content of frozen soils. In *Proceedings of the First Canadian Conference on Permafrost. Nat. Res. Council Canada, Tech. Memorandum No. 76*, 109-126.
- 9) Nersesova, Z. A. and Tsytoich, N. A. 1963 Unfrozen water in frozen soils. *Proceedings of the Permafrost, International Conference, Nat. Acad. Sci.-Nat. Res. Council, Publ. 1287*, 230-234.
- 10) Ананян, А. А. 1966 Оценка толщины слоев незамерзшей воды в мерзлых горных породах. Мерзлотные Исследования VI, Издательство Московского Университета, 221-228.
- 11) 伊福部宗夫 1962 北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究. 北海道開発局土木試験所報告, 第 **26** 号, 1-105.
- 12) Тютюнов, И. А. и Нерсесова, З. А. 1963 Природа миграции воды в грунтах при промерзании и основы физико-химических приемов борьбы с пучением. Издательство Академии НАУК СССР, 1-158.
- 13) Ананян, А. А. и Москвина, Е. В. 1966 О миграции влаги в замерзающих тонкодисперсных горных породах в условиях закрытой системы. Мерзлотные Исследования VI, Издательство Московского Университета, 215-220.
- 14) Uhlmann, D. R. and Jackson, K. 1967 Frost heave in soils: The influence of particles on solidification. In *Physics of Snow and Ice, Part 2* (H. Ôura, ed.), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo, 1361-1873.
- 15) Ruckli, R. 1950 Theorie des Gefrierens des Erdbodens. In *Der Frost im Baugrund. Wien, Springer-Verlag*, 143-161.
- 16) Jumikis, A. R. 1966 Frost penetration depth in soil. In *Thermal Soil Mechanics. (Rutgers University Press, New Brunswick, New Jersey)*, 101-105.
- 17) Sanger, F. J. 1963 Degree-days and heat conduction in soils. *Proceedings of the Permafrost, International Conference, Nat. Acad. Sci.-Nat. Res. Council, Publ. 1287*, 253-262.

Summary

The heave amount of the surface of frozen ground, the temperature profile in the soil, frost penetration, and the heaving force, namely, the force which the ground exerts when its heave is suppressed completely, have been measured continuously at Kitami, Hokkaido, throughout each winter since the winter of 1961–1962. For this winter (1967–1968) maximum values of 5.2 cm of the heave amount, 79 cm of frost penetration, and 2700 kg (24 kg/cm²) of the heaving force were recorded.

Several pipes (iron, vinyl, concrete; 100 cm in length, 7.6 cm in diameter) were previously buried vertically in the ground before winter (Fig. 2 a). Because the soil freezes to the pipes, a tendency to rise together with the ground as it heaves is seen. The rise depends on the pipe weight. An iron pipe weighted to 58 kg from the beginning of the winter (the weight of pipe 5.5 kg and the additional load 52.5 kg which was weighted by means of a lever device (Fig. 2 b)) rose more slowly than a 5.5 kg pipe (Fig. 5 (a)). However, an iron pipe weighted to 86 kg (the additional load 80.5 kg was weighted by means of a lever device after January 11) rose in the same way as the pipe weighing 5.5 kg.

Measurements were made on the aggelative heaving force of iron pipe, namely, the force which the pipe exerts when its rise is suppressed completely. The force reached about 3 tons at 11 th of January (Fig. 4 (b)). Therefore, it may be said that the additional load of 80.5 kg at the time had no effect on the rise. The maximum value of the aggelative heaving force reached 4 tons at the beginning of March (Fig. 4 (b)).

At 10th of February a pit was dug in the frozen ground as shown in Fig. 2 f. From the measurements of water content and density of frozen soil samples taken from the pit (Fig. 6 (a) (b)) the volume ratio between ice, soil and air composing the frozen soil was calculated (Fig. 6 (c)).

The total thickness of all ice lenses appearing in the frozen soil was found to correspond very closely to the heave amount of the ground surface. Therefore, the ratio dh/dD (where h is the heave amount and D is the frost penetration) is equal to the volume content of ice lenses (w_e) within the soil layer between D and $D+dD$. The average of w_e was 9%, while the average of the volume content of ice, w_a , was 40%. The difference between w_e and w_a , namely, 31%, made no contribution to the heave amount or the volume change of soil at freezing.

Since the air content just above the freezing front was smaller at 5~7% than that just below it (Fig. 6 (c)), 5~7% of the ice content gave the reduction of air content within the soil at freezing. Therefore, it is suggested that the remainder, about 25%, was left unfrozen at freezing, covering the soil particles (180 Å in thickness), and that the soil moisture migrating upwards from below passed through the liquid layer covering the soil particles, resulting in a segregation into ice lenses (Fig. 8).