



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北見・紋別における凍上観測（昭和43～44年冬期）
Author(s)	木下，誠一；鈴木，義男；堀口，薫 他
Citation	低温科学．物理篇，27，379-393
Issue Date	1970-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18126
Type	departmental bulletin paper
File Information	27_p379-393.pdf



北見・紋別における凍上観測 (昭和 43~44 年冬期)*,**

—— 凍着凍上, 土中水の移動 ——

木下 誠一・鈴木 義男・堀 口 薫
田 沼 邦 雄・青 田 昌 秋
(低 温 学 科 研 究 所)

大 野 武 敏
(北 見 工 業 大 学)
(昭和 44 年 7 月受理)

I. 緒 言

北見 (北見工業大学構内) 及び紋別 (流氷研究施設敷地内) において, 従来と同じく凍上観測をおこなった¹⁻⁵⁾。地面凍上量, 地温分布, 凍結深度, 凍上力, 種々の管類の凍着凍上量, 凍着凍上力などが, 従来と同じ方法で, 冬期間継続して測定された。特に, この冬は, これまで最大で 86 kg であった管の重量を 536 kg まで大きくし, 重量が凍着凍上に及ぼす影響を調べた。

1 月上旬と 2 月中旬に, 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, 含水比, 密度, 真比重の測定を行なった。これらの結果から, 凍上の際に起る土中水分の移動について検討を加えた。

この冬の特徴として, 凍結開始が例年より 10 日以上もおくれる一方, 3 月前半に寒気があったため, 融解も 20 日近くおくれた。又, 2 月中旬に, 気温がプラス数度の暖気があった。

II. 測 定 方 法

北見・紋別両現場とも, 降雪ごとに除雪され, つねに寒気が直接地面にふれるようにした。

1. 凍上力, 地温, 凍結深度, 地面凍上量

これらの測定は, 従来と全く同じ方法でおこなわれた。

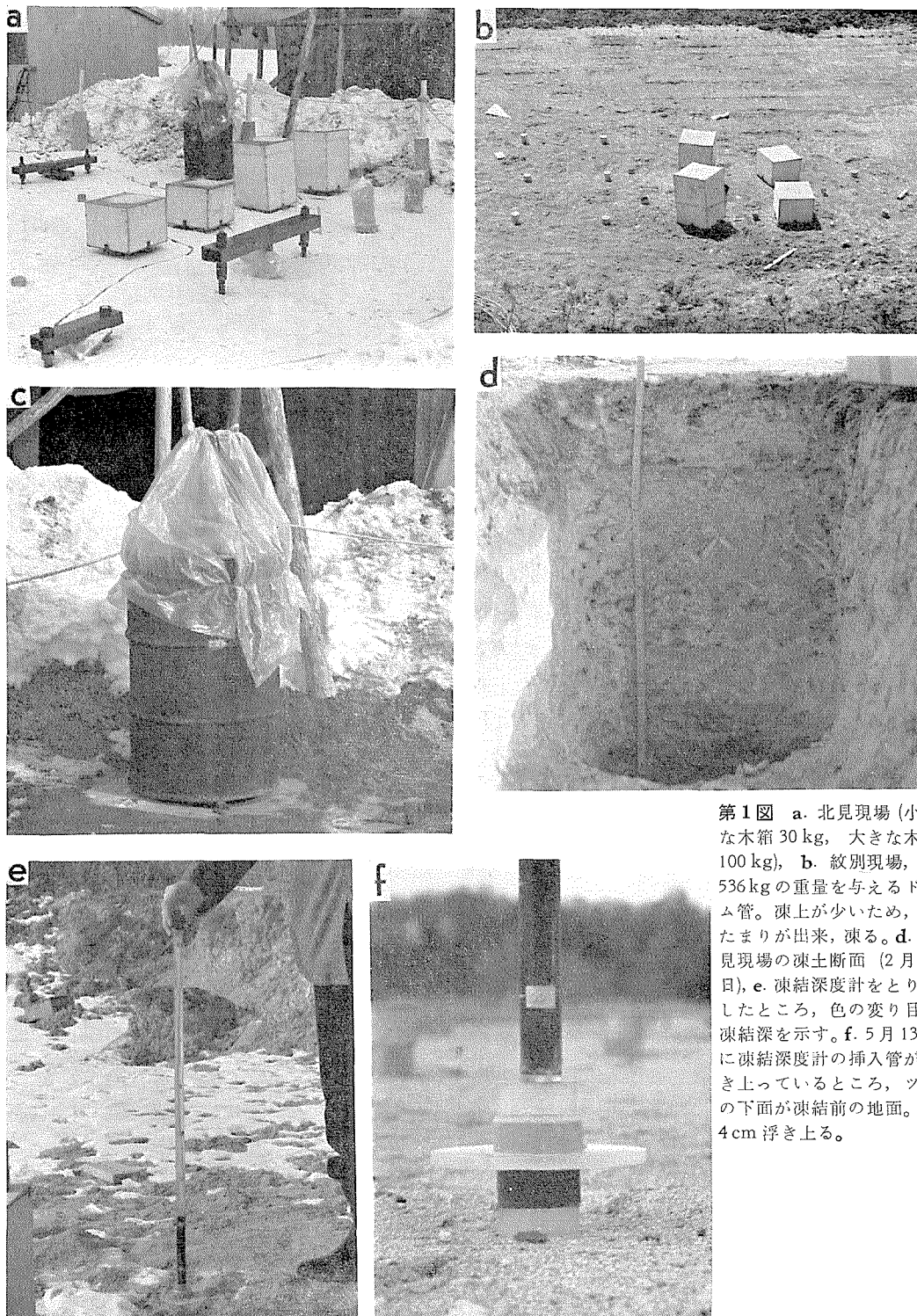
2. 凍着凍上力

測定方法は従来と変わらないが, 北見では鉄管 (直径 7.6 cm, 地中埋めこみ深さ 95 cm) とビニール管 (直径 9.8 cm, 地中埋めこみ深さ 95 cm),

第 1 表

場 所	材 質	重 量 (kg)
北 見	鉄	5.2, 5.4, 5.6, 37, 107, 536
	ビ ニ ー ル	8.4, 10.2, 32, 102
	コンクリート	9.3, 9.3
紋 別	鉄	6.6, 6.7, 6.8, 37, 118
	ビ ニ ー ル	1.0, 1.0, 1.5, 37, 114
	コンクリート	9.0, 9.0

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 962 号
**



第1図 a. 北見現場 (小さな木箱 30 kg, 大きな木箱 100 kg), b. 紋別現場, c. 536 kg の重量を与えるドラム管。凍上が少いため, 水たまりが出来, 凍る。d. 北見現場の凍土断面 (2月12日), e. 凍結深度計をとり出したところ, 色の変り目が凍結深を示す。f. 5月13日に凍結深度計の挿入管が浮き上がっているところ, ツバの下面が凍結前の地面。約 4 cm 浮き上る。

紋別では鉄管（直径 7.6 cm，地中埋めこみ深さ 95 cm）を用いた。

3. 凍着凍上量

同じ形状・寸法の管（直径 7.6 cm）を地中に鉛直に 95 cm 埋めた。使用した管の種類及び重量を第 1 表に示す。

重量が 10 kg 以下のものは，管そのままか，又は管の中に砂などをつめたものである。30 kg から 118 kg までのものは，T 字型の鉄の杵の鉛直部分を管の中にはめ，上に出た水平部分の杵の上に，土をつめた木の箱のをせたものである。又，536 kg のものは，その杵の上にドラム管のをせ，その中に鉄屑を入れたものである。その状況を第 1 図の写真 a, b, c に示す。

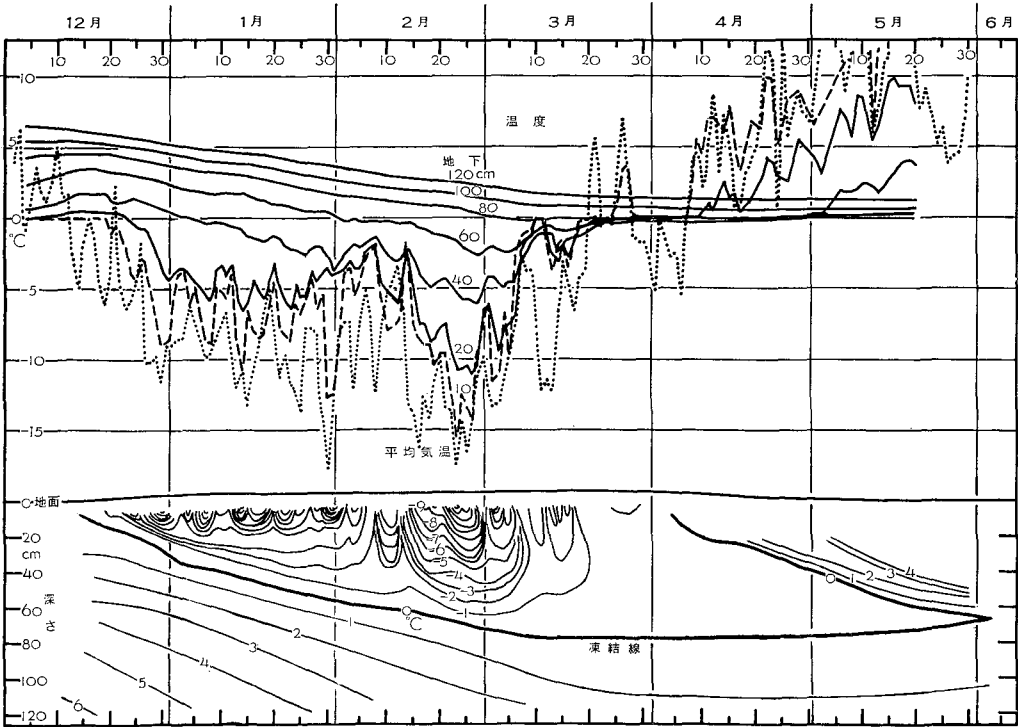
4. 現場の土質

北見・紋別の現場の土質を次の第 2 表に示す。

第 2 表

場 所	粒 度 分 布			土質分類名	土粒の比重	比 表 面 積 (m^2/g)
	砂 2~0.05 mm (%)	シルト 0.05~0.005 mm (%)	粘土 0.005 mm 以下 (%)			
北 見	33	26	41	粘 土	2.41~2.47	1.2
紋 別	16	31	53	粘 土	2.61~2.68	3.09, 39.6

北見については，昨年と現場の位置が変わったので，土質が多少違っている。



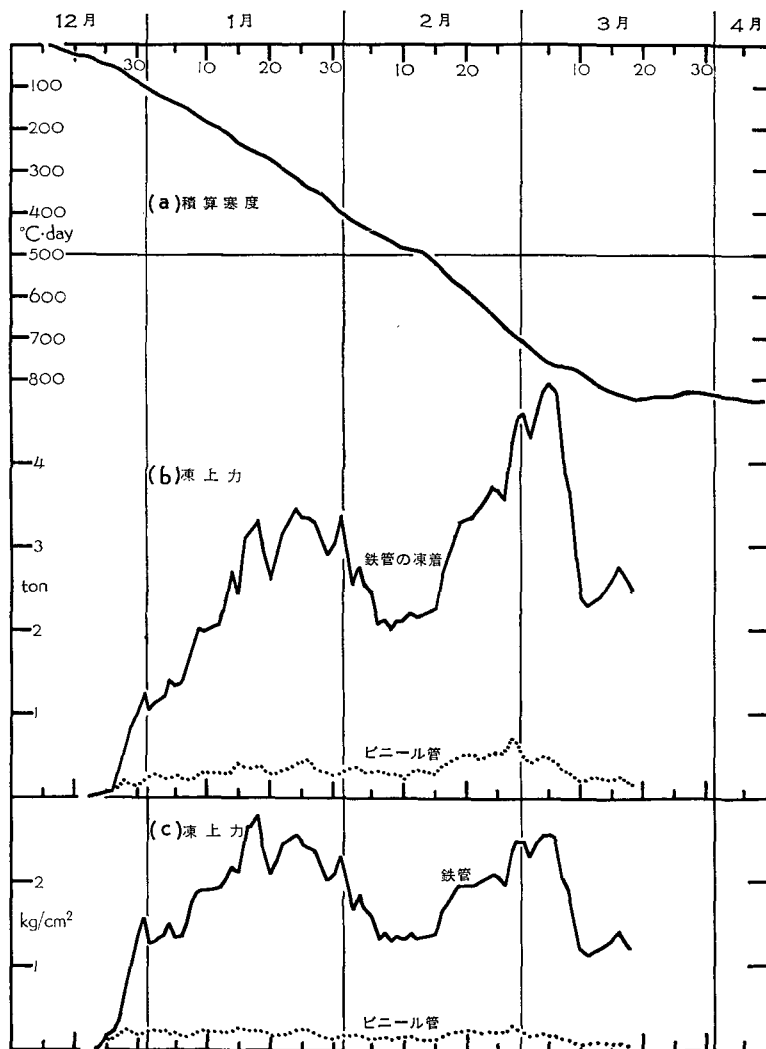
第 2 図 北見観測現場における温度状況 (昭和 43~44 年冬期)

III. 測定結果

1. 北 見

測定結果をまとめて、第2, 3, 4, 5図に示す。

第2図上段に、平均気温と地下10, 20, 40, 60, 80, 100, 120 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1月30日の -26.5°C であった。又、下段には、土の等温線を示す。これは、上段の図の地温と凍結深度計の読み、途中の断面観測のときの温度分布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示す。凍結開始は、例年11月下旬であるが、この冬は、凍結開始がおくれ、12月中旬になった。2月9~12日にかけて、異常な暖気があり、12日には日中最高気温が $+6.1^{\circ}\text{C}$ にも達した。しかし、3月前半に寒気があった



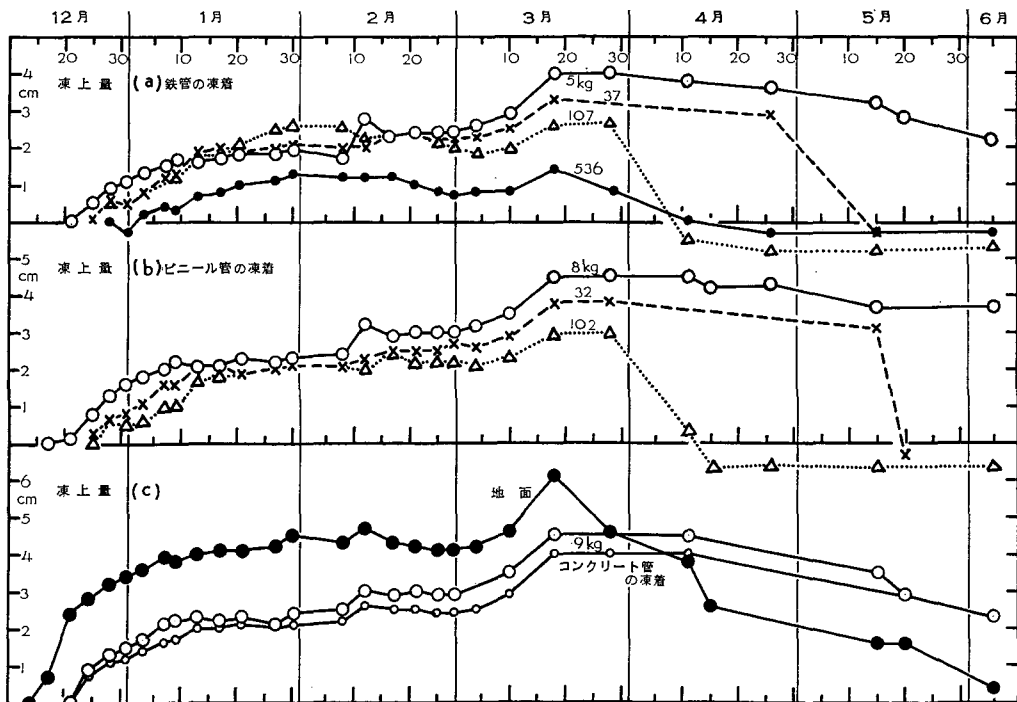
第3図 北見観測現場における測定結果(昭和43~44年冬期)
(a) 積算寒度 (b) 凍着凍上力 (c) 単位凍着面積当りの凍着凍上力

ため、最大凍結深は3月中旬で、85 cm になり、ほぼ例年と変わらない。3月下旬から、地表及び凍結層下部から融解が始まり、6月5日には凍土が完全になくなった。完全融解は、例年5月中旬であるから、この冬は諸状況が全体として約20日間ずれたことになる。地表からの融解速度は、0.4~1.2 cm/day、又凍結層下部からの融解速度は、0.2~0.6 cm/day であった。

第3図(a)に積算寒度の推移を示す。4月7日に最大値 $852^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ に達した。

第3図(b)と(c)には、凍着凍上力の推移を示す。実線と点線は、それぞれ鉄管とビニール管にかかる凍着凍上力である。管がこの力に等しい重量であれば、管は凍上しない⁵⁾。(c)は、そのときの凍結深度から、凍着の単位面積当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4,950 kg (3月5日)、2.8 kg/cm² (1月18日)、ビニール管が700 kg (2月27日)、0.29 kg/cm² (2月27日)である。力の曲線で2月中旬に深い谷があるのは、この時期の暖気のためである^{1-2), 6)}。

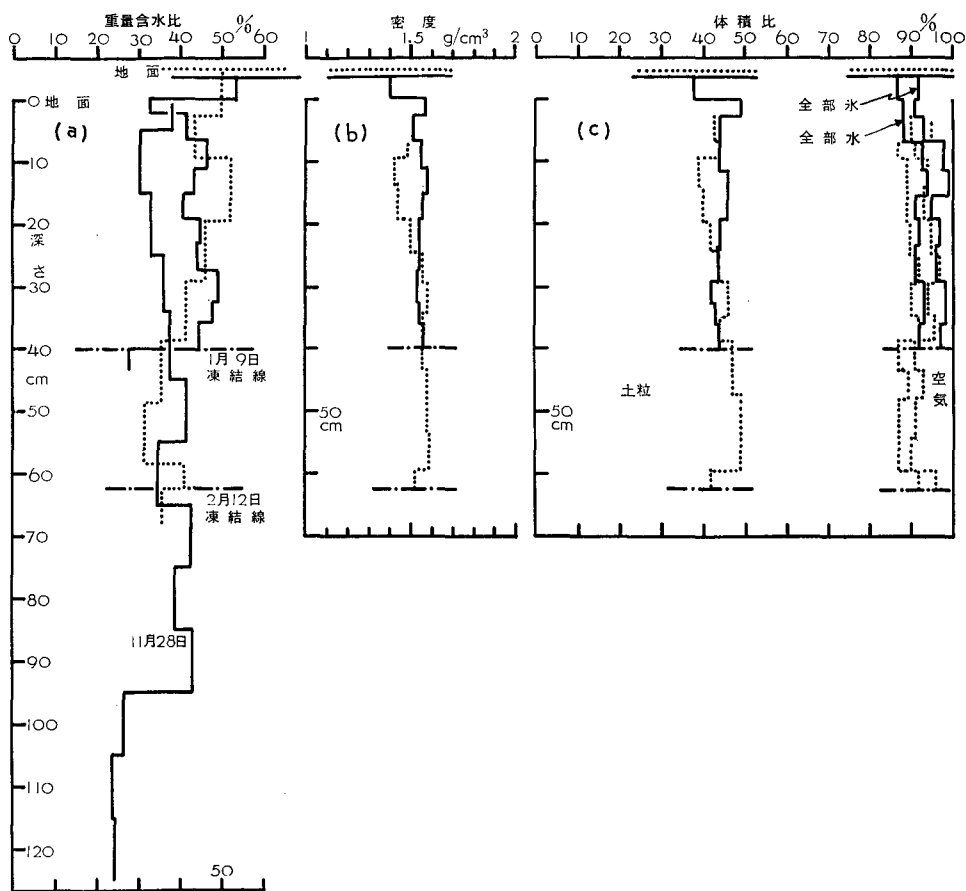
第4図に、凍上量の推移を示す。(a)は鉄管、(b)ビニール管、(c)はコンクリート管と地面のグラフである。鉄管・ビニール管とも重量を大幅に変えたので、重量による凍上のしかたの違いを明確にすることができた。この重量との関係については、次節で考察を加える。いずれの曲線も2月に中だるみがあるが、これは2月中旬の暖気によるものである。鉄管の536 kg 重量のものは、この時期には、少し沈下している。3月前半の寒気で、いずれも再び凍上を始め、3月18日の測定日に、最大値が得られた。地面の最大凍上量は6.1 cm であった。融解時の沈下については、重量の大きいものほど速い。100 kg、500 kg のものは、いち早く4月10日、



第4図 北見観測現場における凍上量 (昭和43~44年冬期)

まだ地面下 24 cm から 82 cm までは凍っているのに、凍着面がすべって沈下し、ほぼ冬のはじめのときの位置になった。一方、30 kg 以下のものは、5 月までほとんど沈下しない。10 kg 以下のものは、凍土が全部とけた 6 月 5 日でも、なお 2~3 cm 浮き上ったままであった。

第 5 図には、断面観測で測定された重量含水比を (a) に、現場密度を (b) に、これらと土の真比重の値とから計算された土粒、水又は氷、空気の体積比を (c) に示す。重量含水比は、冬のはじめ凍結前の 11 月 28 日に測定されたもの、及び 1 月 9 日と 2 月 12 日に測定されたものを示す。深さは 11 月 28 日の地面を基準にとってある。1 月 9 日と 2 月 12 日には、それぞれ地面が 3.8 cm と 4.7 cm 凍上したので、そのときの地面からグラフを書いた。又、凍結深はそれぞれ、44 cm、67 cm であった。1 月 9 日と 2 月 12 日には、凍った土の現場密度を測った。その方法は、試料 100 g ほどを採取して、まず空気中で秤量し (M_{ag})、つぎにケロシン中に浸



第 5 図 北見における断面観測の結果 (昭和 43 年 11 月 28 日, 昭和 44 年 1 月 9 日, 2 月 12 日)。深さのスケールは凍結前の 11 月 28 日を基準にする。1 月 9 日, 2 月 12 日の地面を, それぞれ, 上部の水平な実線 (3.8 cm 凍上) と点線 (4.7 cm 凍上) で表わす。

(a) 重量含水比, (b) 現場密度, (c) 凍土内の土粒, 水又は氷, 空気の体積比。右側に 2 本平行に並ぶ線のうち, 全部水だけとした場合が左側, 全部氷だけとした場合が右側の線である。実線は 1 月 9 日, 点線は 2 月 12 日の測定値。

して秤量する (M_k g)。ケロシンの密度 (ρ_k g/cm³) を測定すると、凍土の密度 (ρ g/cm³) は、 $\rho = \rho_k M_a / (M_a - M_k)$ で与えられる。この密度測定を試料をそのまま炉乾燥させて秤量し (M_d g)、重量含水比 $W\%$ を測定した ($W = 100(M_a - M_d)/M_d$)。したがって、密度、重量含水比とも同一の試料についての値である。

凍土を構成するものは、土の実質部分すなわち土粒と、不凍水、氷、空気である。凍土 1 cm³ 中に含まれるこれらの質量を求めると、上記測定試料の体積 v cm³ は $v = (M_a - M_k)/\rho_k$ で与えられるから、土粒の質量 m_s g と、不凍水と氷を含めた水分量 m_m g は次式で与えられる。

$$m_s = \frac{\rho_k M_d}{M_d - M_k} \quad (1)$$

$$m_m = \frac{\rho_k (M_a - M_d)}{M_a - M_k} \quad (2)$$

一方、凍土 1 cm³ 中に含まれるこれらの体積は、土粒部分を v_s cm³、水分を v_m cm³、空気分を v_a cm³ とすると、

$$v_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (3)$$

$$v_m = \left(\frac{k}{\rho_w} + \frac{1-k}{\rho_i} \right) m_m \quad (4)$$

$$v_a = 1 - v_s - v_m \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 ρ_s 、 ρ_w 、 ρ_i はそれぞれ、土粒、水、氷の密度 (g/cm³) を表わす。又、 k は全水分中の不凍水の割合である。この k の値を一義的にきめることは出来ない。 k が 1 なら、全部水で、 k が 0 なら、全部氷である。 v_m の値は、全部氷とした方が、全部水とした方の 1 割増しである。そして、残りが空気の部分である。第 5 図 (c) に、この方法で計算された値を示す。土粒部分は 40~50%、全部水とすると、水の部分は 38~51%、空気が 7~13% である。又、全部氷とすると、氷の部分は 41~56%、空気が 1~10% である。

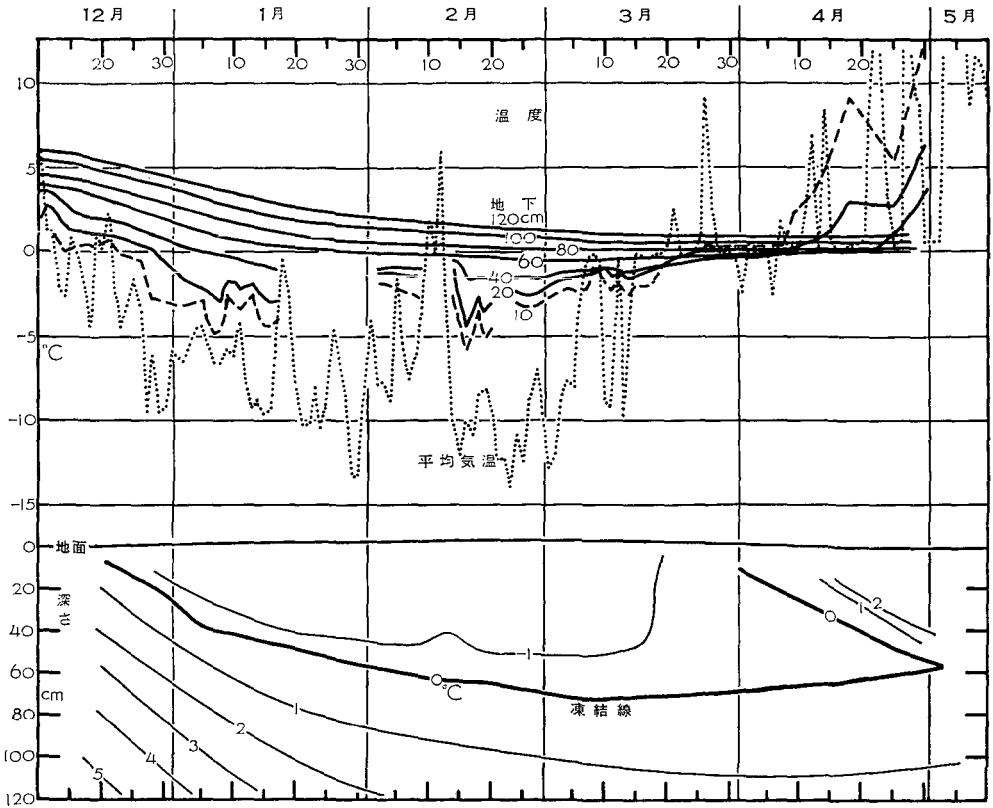
2. 紋 別

測定結果を第 6, 7, 8, 9 図に示す。

第 6 図は、上段に平均気温と地下 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120 cm の地温、下段に土の等温線図を示す。北見とほぼ同じ推移を示す。2 月中旬の異常暖気がやはり目立つ。2 月 12 日には最高気温が +9.9°C にもなった。この冬の最低気温は 1 月 30 日の -19.5°C で、北見に比べると、寒さはかなり弱い。凍結深の最大は 3 月中旬の 75 cm で、5 月はじめには、完全に凍土がなくなった。3 月下旬から始まった地面からの融解速度は 1.0~1.7 cm/day、又凍結層の下面からの融解速度は、0.3~0.5 cm/day であった。

第 7 図 (a) は積算寒度で、3 月 24 日に最大値 584°C·day に達した。北見の最大値 852°C·day よりはかなり小さい。紋別は海に面しているので、北見ほど寒さがきびしくない。

第 7 図 (b) と (c) には、それぞれ、鉄管の凍着凍上力と、凍着の単位面積当りの力に換算した値とを示す。それぞれの最大値は、595 kg (3 月 5 日)、0.47 kg/cm² (1 月 18 日) である。これらは、北見に比べると、非常に小さい。力の曲線に 2 月中旬の谷が目立つが、これは、この時



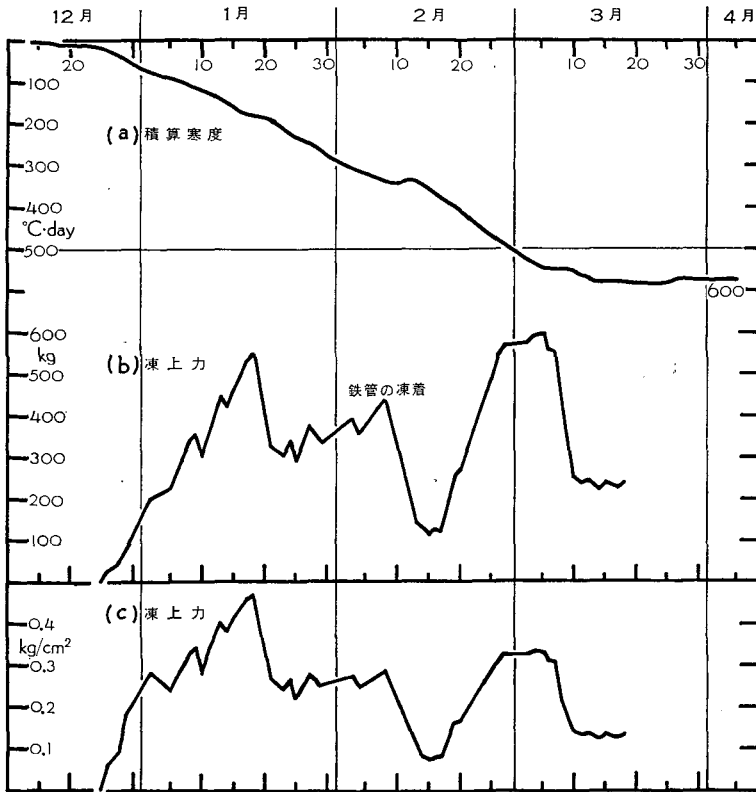
第6図 紋別観測現場における温度状況 (昭和43~44年冬期)

期の暖気による凍上停滞にもとづくものである^{1-2),6)}。

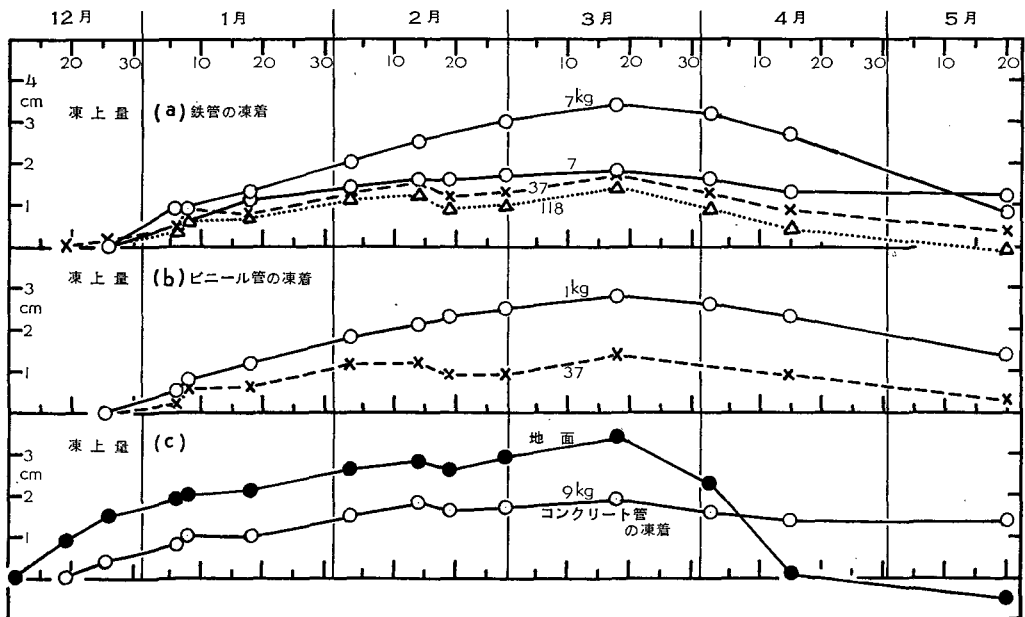
第8図は、凍上量の曲線である。(a)は鉄管、(b)はビニール管、(c)はコンクリート管と地面である。北見と同じく、重量による違いが顕著にみとめられる。2月中旬の暖気では、重量の大きいものほど、大きく沈下した。又、地面の沈下は、日中の融解によるものである。3月前半の寒気で、再び凍上し、3月18日に最大値3.4 cmが測定された。

総体的に、紋別の方が凍上の度合は、北见到比べてかなり弱い。寒さがきびしくない点もあるが、さきに第2表に示したように、粒子がこまかく、比表面積が大きい。一般に、粒子が余りこまかいと、水分移動のときの抵抗が強く、凍上が弱いことが知られているが⁷⁾、紋別もこの例の一つであろう。

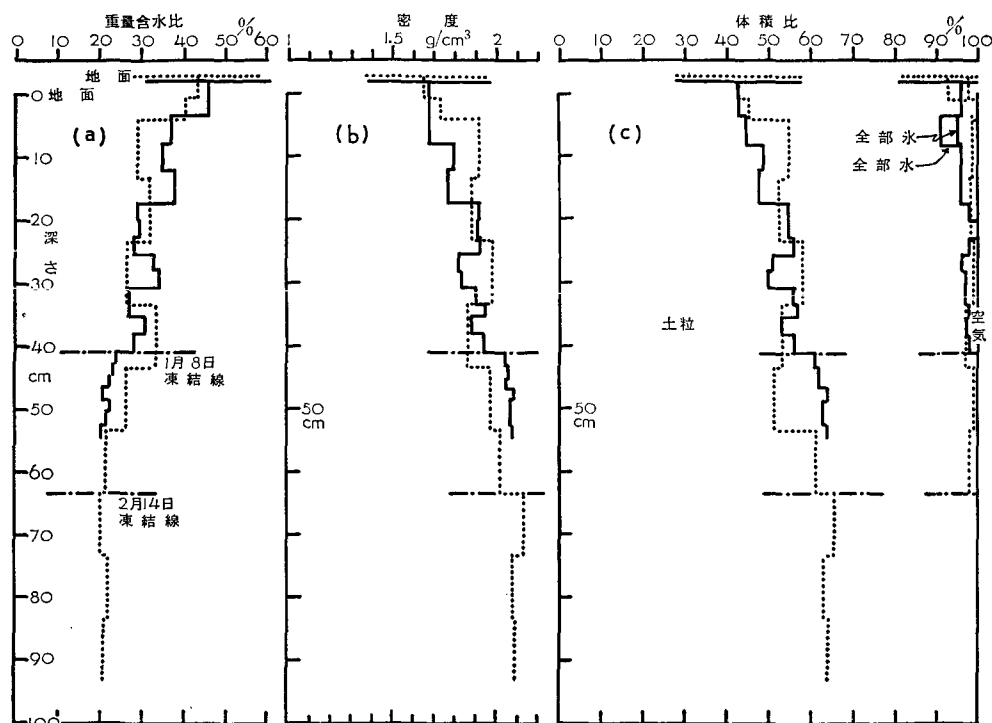
第9図に、断面観測の際の測定結果を示す。(a)は重量含水比、(b)は現場密度、(c)は凍土の諸構成要素の体積比を表す。いずれも、実線は1月8日、点線は2月14日の測定値を示す。地面は、1月8日に2 cm、2月14日に2.8 cm凍上していた。凍土の構成要素としての土粒の部分は43~65%、全部水とすると、水の部分は35~53%、空気の部分が、0~9%である。又、全部水とすると、氷の部分は39~58%、空気の部分が-4~+5%である。従って、全部が氷であることはなくて、かなりの部分が不凍水として残っていることが想像される。



第7図 紋別観測現場における測定結果 (昭和43~44年冬期)
(a) 積算寒度, (b) 凍着凍上力, (c) 単位凍着面積当りの凍着凍上力



第8図 紋別観測現場における凍上量 (昭和43~44年冬期)



第9図 紋別における断面観測の結果(昭和44年1月8日, 2月14日)。深さのスケールは凍結前を基準にする。1月8日, 2月14日の地面を, それぞれ, 上部の水平の実線(2 cm 凍上), 点線(2.8 cm 凍上)で表わす。

(a) 重量含水比, (b) 現場密度, (c) 凍土内の土粒, 水又は氷, 空気の体積比。右側に2本平行に並ぶ線がある場合は, 全部氷としたのが左側, 全部水としたのが右側である。

IV. 管の重量が凍着凍上に及ぼす影響について

大浦等⁸⁾は, 凍った土と他の物質との凍着を, その接触面にそっての剪断力で破壊させる実験をおこなったが, 破壊を起す前に, 凍着面が少しずつずべることをみつけた。筆者等の野外実験においても, 管の重量が大きい場合には, 凍着による凍上に反抗して, 凍着面に微少なすべりが生ずると考えられる。その結果, 重量が大きいものほど, 凍上しにくくなる。又, もう一つの理由として, 管と凍土との間に完全にすべりが無い場合でも, 管の周りの凍土内における管の重量にもとづく応力状態のため, 管と凍着する地面が自由地面よりも少なく凍上することが考えられる。

ここでは, 管の凍上に対して, 管自身の重量が抵抗となるため, 自由地面の凍上よりも少なくなるという現象面だけをとりあげて, これら諸量の間の関係を見ることにする。これまでの経験から, 凍上を少し減らすのにも, 非常に大きな重量が必要であることが解った³⁾ので, 次の仮定をした。すなわち, 自由地面の凍上量を h , 管の凍上量を ξ , 重量を M として, それらの間に

$$h - \xi \propto M^n \quad (5)$$

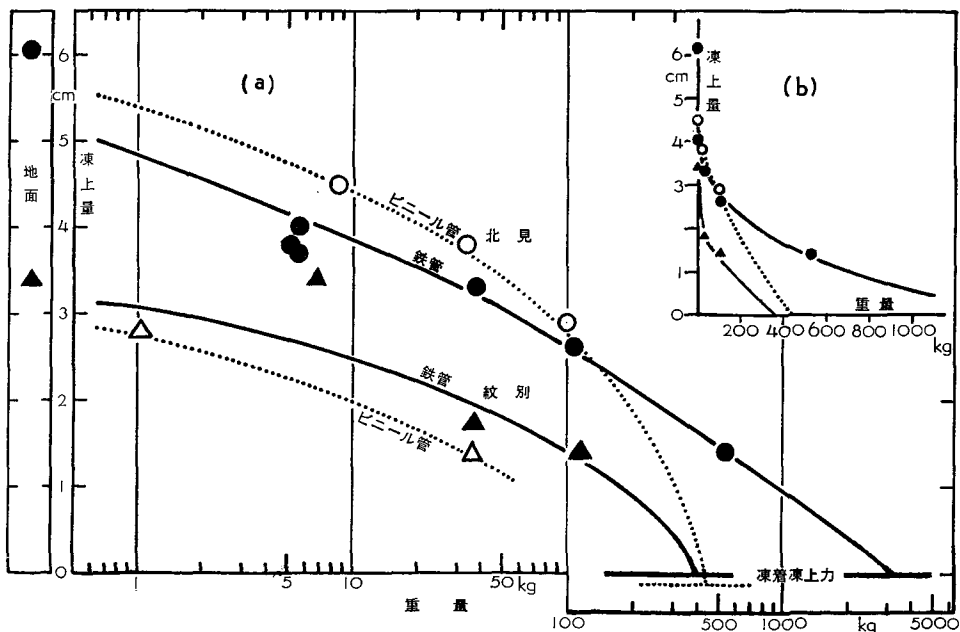
の関係を考える。

一方、管の凍上を、冬のはじめから0のままにしておくときの、重量に相当する力 F が、凍着凍上力である。したがって、(6)式は次のように書き直される。

$$\xi = h \left\{ 1 - \left(\frac{M}{F} \right)^n \right\} \quad (7)$$

今回の北見・紋別の観測において得られた凍上量の値のうち、最大値だけを取り出して、第10図に示した。(a)は重量を対数スケールで表わしたもの、又(b)は重量をそのままのスケールで表わしたものである。凍着凍上力 F の方は、凍土の粘弾性に起因する変動をくり返す^{1-2),6)}が、ここでは、凍上最盛期の2月から3月にかけて現われた力の範囲を、凍上量が0の線に書いた。点線の北見のビニール管については、凍着凍上力測定のもは、他のすべてと違い、これだけが直径9.8 cmであったので、測定値を他の管と同じ直径7.6 cmに換算して150~550 kgの範囲に書いた。黒丸、白丸がそれぞれ北見の鉄管、ビニール管である。又、左の枠の中の黒丸は、北見の自由地面凍上量の最大値6.1 cmを示す。黒三角、白三角は、それぞれ、紋別の鉄管、ビニール管で、左枠内の三角は地面最大凍上量である。いずれも、凍上量を減らすには、重量を急激に増加しなければならないことが解る。(6)式の n の値として、鉄管で5~6、ビニール管でほぼ3である。

ビニール管は、重量が小さいうちは、鉄管よりも凍上するが、凍着凍上力は、鉄管よりもはるかに小さい。数百 kg のところで、ビニール管の凍着面がすべりよくなるためであろう。凍着強度の点で、ビニール管は鉄管よりもかなり小さい⁵⁾。ビニール管は凍着し易い一方、すべり易い傾向があることになる。



第10図 管の重量と凍着凍上量との関係

V. 土中水分移動

凍上が起るとき、下層からの水分の吸上げがどれ位であったか、断面観測の測定値から計算しよう。

さきにのべたように、凍結後の土 1 cm^3 中の土粒部分 $m_s\text{ g}$, $v_s\text{ cm}^3$ と水分 $m_m\text{ g}$, $v_m\text{ cm}^3$ を求めた。今、体積 $V\text{ cm}^3$ の凍土層を考え、その中に含まれる土粒部分を $M_s\text{ g}$, $V_s\text{ cm}^3$, 又、水分を $M_2\text{ g}$, $V_2\text{ cm}^3$ とすると、

$$M_s = m_s V = v_s \rho_s V \tag{8}$$

$$V_s = v_s V \tag{9}$$

$$M_2 = \frac{W_2}{100} M_s \text{ (} W_2 \text{ は重量含水比 \%)} \tag{10}$$

$$V_2 = v_m V \tag{11}$$

で与えられる。この層が凍結前にもっていた水分量 $M_1\text{ g}$ と $M_2\text{ g}$ との差が、凍上の際の水分移動量である。 M_1 は次のように求められる。凍結前と後とで、この層に含まれる土粒部分 M_s に変わりはない。凍結前については、重量含水比 $W_1\%$ が測定されているので、

$$M_1 = \frac{W_1}{100} M_s \tag{12}$$

から、 M_1 が求められる。

北見の測定値第5図について、凍結前の11月28日と、44 cm 凍結した1月9日とを比較する。44 cm のうち、3.8 cm が凍上量である。今、 1 cm^2 の断面について、その間の層の平均を考えると、 $\bar{W}_1=34\%$, $\bar{W}_2=45\%$, $\bar{v}_s=0.44\text{ cm}^3$, $\rho_s=2.44\text{ g/cm}^3$ であるから、 V_s , M_s , M_2 , M_1 などは第3表のように求められる。

つぎに、1月9日から2月12日までの間に、凍結深が44 cm から67 cm にふえ、凍上量は3.8 cm から4.7 cm になった。すなわち、23 cm が凍結して、そのうち0.9 cm が凍上量である。同じように、 1 cm^2 の断面について、その間の層の平均を考える。ただ、ここで、凍結前の重量含水比 $\bar{W}_1\%$ としては、1月9日の断面観測で、凍結線のすぐ下の未凍土で得た28%という小さな値をとる。すぐ上の凍結層では44%という大きな値である。このことは、凍結線で水分が吸上げられるという考え方の妥当性を裏付けるものである。したがって、 $\bar{W}_1=28\%$, 又、 $\bar{W}_2=35\%$, $\bar{v}_s=0.48\text{ cm}^3$, $\rho_s=2.46\text{ g/cm}^3$ であるから、同じく V_s , M_s , M_2 , M_1 などは第3表のようになる。

第 3 表

層	凍結層の厚さ (cm)	凍上量 (cm)	凍 結 後		凍 結 前		水 分 移動量 M_2-M_1 (g/cm ²)	水 分 移動速度 (g/cm ² ·day)	
			土 粒 部 分	水 分	平均重量	水 分			
			V_s (cm ³ /cm ²)	M_s (g/cm ²)	M_2 (g/cm ²)	含水比 $\bar{W}_1$ (%)			M_1 (g/cm ²)
表面から 1月9日凍結線まで	44	3.8	19	47	21	34	16	5	0.19
1月9日凍結線から 2月12日凍結線まで	23	0.9	11	27	9.5	28	7.5	2	0.06

凍上量が大きいと、水分移動量や水分移動速度が大きいのは当然であるが、凍上量の 3.8 cm, 0.9 cm に対し、水分移動量は 1 cm^2 についての高さに換算して 5 cm, 2 cm と、値がかなり大きい。これは、吸上げられた水の半分近くも空隙をうめるのに使われることを意味する。筆者等の一人、田沼は、実験室において、間隙率を色々に変えた土について凍上実験を行ない、吸上げ量と凍上量の関係を詳細に調べた。又、筆者等のうち、木下、鈴木、堀口、田沼が、苫小牧において、地下水位と凍上の関係を調べたが、水分移動速度として、ここで得られた第 3 表の値よりはかなり大きな値が得られた。すなわち、ほぼ対応する深さの層で、北見の $0.19 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$ に対し、 $0.35 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$ 、又、 $0.06 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$ に対し、 $0.13 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{day}$ であった。これは、苫小牧では地下水位が浅いのに対し、北見では、地下 150 cm の粘土層の下が砂で、地下水位は更にその下になり、したがって、粘土層に保持される水分でだけ、吸上げが起るからである。

不凍水、氷の割合を一義的にきめることは出来ないが、実測によると¹¹⁾、重量含水比にして 20~30% とされている。この場合でも、恐らくその値に近いのであろう。

VI. 結 び

この冬は、凍着凍上測定用の管に 536 kg もの重量を与えて、管の重量が凍着凍上に及ぼす影響を、かなり精度よく測定することが出来た。その結果、凍上を少しだけ減らそうとしても、相当大きな重量を与えねばならないことが解った。又、断面観測の結果から、凍上に際しての土中水分の移動量を計算し、それが凍上に寄与する割合と、土中の空気分を減らす割合とを知ることが出来た。凍上現象の基本機構は、この吸い上げが何の原因で起るかということ、凍結線での氷析出と関連があることは云うまでもないが、今後この方面からも検討を加えたい。

北見の現場観測については、北見工業大学中村秀臣氏に色々とお力を得た。又、紋別の現場観測については、流水研究施設長田畑忠司教授はじめ施設の職員の皆様に、色々とお力を得た。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. 低温科学, 物理篇, **21**, 117-139.
- 2) 木下誠一・大野武敏・小黑 貢 1966 凍上力 II. 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) 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 (昭和 42~43 年冬期). 低温科学, 物理篇, **26**, 363-381.
- 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) Jackson, K. A. and Chalmers, B. 1957 Study of ice formation in soils. Arctic Construction and Frost Effects Laboratory, Corps of Engineers, U. S. Army, Tech. Rept., **65**, 19 pp.

- 8) 大浦浩文・薄木浩之・高田雄二 1960 土の凍着力について. 低温科学, 物理篇, **19**, 215-224.
- 9) 田沼邦雄 1969 凍上の際の水分移動と間隙比との関係. 低温科学, 物理篇, **27**, 359-366.
- 10) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄 1969 凍上と地下水位との関係 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 367-378.
- 11) 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.

Summary

1. General observations. Heave amounts of the ground surface, ground temperature profiles, and air temperatures were measured throughout the winter at appropriate intervals both in Kitami and Mombetsu, Hokkaido. The results are shown in Fig. 2 (Kitami) and Fig. 6 (Mombetsu). For easy reading and for comparison with the rises of loaded pipes, the heave amounts are also shown in (c) of Fig. 4 (Kitami) and Fig. 8 (Mombetsu) by black dots. The maximum values of frost penetration and freezing index amounted to 85 cm and 852°C·day in Kitami, and 75 cm and 584°C·day in Mombetsu (See (a) of Fig. 3 (Kitami) and Fig. 7 (Mombetsu) for the freezing indices).

2. Aggelative heaving forces of a pipe. A pipe buried in ground rises with the frost heaving of the ground because of its adhesion to the frozen ground. A force which the pipe exerts on the ground when the rise of the pipe has been completely suppressed is called the aggelative force of the pipe. Iron pipes, each 7.6 cm in diameter, and a vinyl pipe, 9.8 cm in diameter, were buried vertically to a 95 cm depth in the ground and their aggelative heaving forces were continuously recorded (for details of the method, see Literature⁶⁾). The recorded total forces are shown in (b) and the forces per unit area of the contacting surface of the pipe with the frozen ground are shown in (c) of Fig. 3 (Kitami) and Fig. 7 (Mombetsu), where the solid lines are for the iron pipes and the dotted lines for the vinyl pipes.

3. Rise of pipes of various weights buried in the ground. In contrast to the measurements described in the previous section, rises of a pipe pressed down by a constant force were measured for iron, vinyl and concrete pipes, each 7.6 cm in diameter and buried vertically to a 95 cm depth in the ground; the constant forces were up to 536 kg-wt (Figs. 1 a, b and c). The weight of the pipe and a load on it were used as the force. The results are shown in Fig. 4 (Kitami) and Fig. 8 (Mombetsu), where (a) is for the iron, (b) for the vinyl, and (c) for the concrete pipes. The maximum rises in the winter are plotted against the weights in Fig. 10, where the circles are for Kitami, the triangles for Mombetsu, the solid ones for the iron, and the open ones for the vinyl pipes. The end points of the curves in the figure, in which the solid ones are for the iron and the dotted for the vinyl pipes, were determined on the basis of the date of the maximum aggelative forces in the corresponding cases. It may be seen from the figure that the force necessary to reduce the rise increases very rapidly with the increase in the amount of the reduction.

4. Composition of the frozen ground. Pits were dug in Kitami on Nov. 28, Jan. 9 and Feb. 12 (Fig. 1d) and in Mombetsu on Jan. 8 and Feb. 14, and soil samples were taken from the walls at intervals of several centimeters. For the frozen sample, its

mass in air (M_a) and that in kerosene (M_k) of known density (ρ_k) were measured immediately after sampling, while its dried mass (M_d) was measured later in a laboratory. The following quantities were obtained:

Weight percentage of moisture to soil particles in the sample: $W=100(M_a-M_d)/M_d$.

Density of the sample: $\rho=\rho_k M_a/(M_a-M_k)$.

Mass of soil particles in a unit volume of the sample: $m_s=\rho_k M_d/(M_a-M_k)$.

Mass of moisture in a unit volume of the sample: $m_m=\rho_k(M_a-M_d)/(M_a-M_k)$.

Volumes of soil particles (v_s), moisture (v_m) and air (v_a) in a unit volume of the sample are given by $v_s=m_s/\rho_s$, $v_m=(k/\rho_w+(1-k)/\rho_i) m_m$ and $v_a=1-v_s-v_m$, where ρ_s is the density of the soil particles, ρ_w that of water, ρ_i that of ice and k the ratio of unfrozen water to total moisture. Values of ρ_s were determined as 2.43 for Kitami and as 2.64 for Mombetsu. For $k=0$, almost all values of v_a in Mombetsu were negative. This means that a certain amount of unfrozen water remained in the frozen ground.

5. Increase of moisture content in a layer during freezing. For the unfrozen samples taken from the pits, M_k was not measured and only W was calculated. However, because the total amount of soil particles in a layer does not change during freezing, the total mass of moisture in the layer before freezing (M_1) can be estimated by use of the values of W before freezing and those of m_s after freezing. The comparisons of M_1 with the total mass of moisture in the layer after freezing (M_2) were made for two layers in Kitami, as shown in the following table:

Freezing period of layer	Heave amount (cm)	After freezing				Before freezing		Moisture transfer	
		Thick-ness (cm)	Soil particles in a unit column		Mass of moisture in a unit column (M_2) (g/cm ²)	Mean value of W ($\bar{W}_1$)	Mass of moisture in a unit column ($M_1=M_s \times \bar{W}$) (g/cm ²)		
			Volume (V_s) (cm ³ /cm ²)	Mass (M_s) (g/cm ²)				Mass (M_2-M_1) (g/cm ²)	Rate (g/cm ² ·day)
Dec. 14 to Jan. 9	3.8	44	19	47	21	0.34	16	5	0.19
Jan. 9 to Feb. 12	0.9	23	23	11	9.5	0.28	7.5	2	0.06

The rate of moisture transfer through a unit area of the lower frozen surface on Feb. 12 for a period from Jan. 9 to Feb. 12 was a mere 0.06 g/cm²·day. In the experiment in Tomakomai, increases of moisture content of a layer were computed by another method¹⁰⁾. The rate of moisture transfer through a unit area of the lower frozen surface on Feb. 25 was 0.18 g/cm²·day for a period from Jan. 11 to Feb. 25. The large difference is probably due to the fact that the water level is much deeper in Kitami than in Tomakomai.