



Title	苫小牧における凍上観測（昭和48年～49年冬期）
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiti; 鈴木, 義男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 32, 251-260
Issue Date	1974-03-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18263">https://hdl.handle.net/2115/18263</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	32_p251-260.pdf



## 苫小牧における凍上観測 (昭和 48~49 年冬期)\*

木下 誠一・鈴木 義男  
堀口 薫・福田 正己  
(低温科学研究所)

井上 正則  
(北海道大学大学院 理学研究科)  
(昭和 49 年 10 月受理)

### I. 緒 言

北見・紋別・苫小牧において従来から土の凍結に伴う凍上の現場観測を行なって来た<sup>1-11)</sup>。特に苫小牧(北大演習林内)においては地下水位が凍上に及ぼす影響に着目し、地下水位が凍上以外の原因で変化することのないように、内面が防水になっているプールを作り、その中に土をつめて凍上を起こさせている<sup>6,8,10,11)</sup>。プールは 3 個あり、広さ 3×3 m、深さ 1.89 m のプール A には、砂質粘土ローム(砂分 60%, シルト分 19%, 粘土分 21%)をつめ、広さ 3×3 m、深さ 1.55 m のプール B には粘土(砂分 28%, シルト分 31%, 粘土分 41%)をつめ、又広さ 5×5 m、深さ 1.99 m のプール C には、A と同じ砂質粘土ロームをつめた。これらプール内の地下水位は適宜調節できるようになっている<sup>1)</sup>。昭和 47 年 12 月には、この現場に観測室(建坪 81 m<sup>2</sup>)が建てられた。自記記録室、土質実験室、低温室等を備えているので、現場における観測が非常に容易になった。

ここでは、昭和 48~49 年冬期に苫小牧において行なわれた凍上の現場観測について報告する。

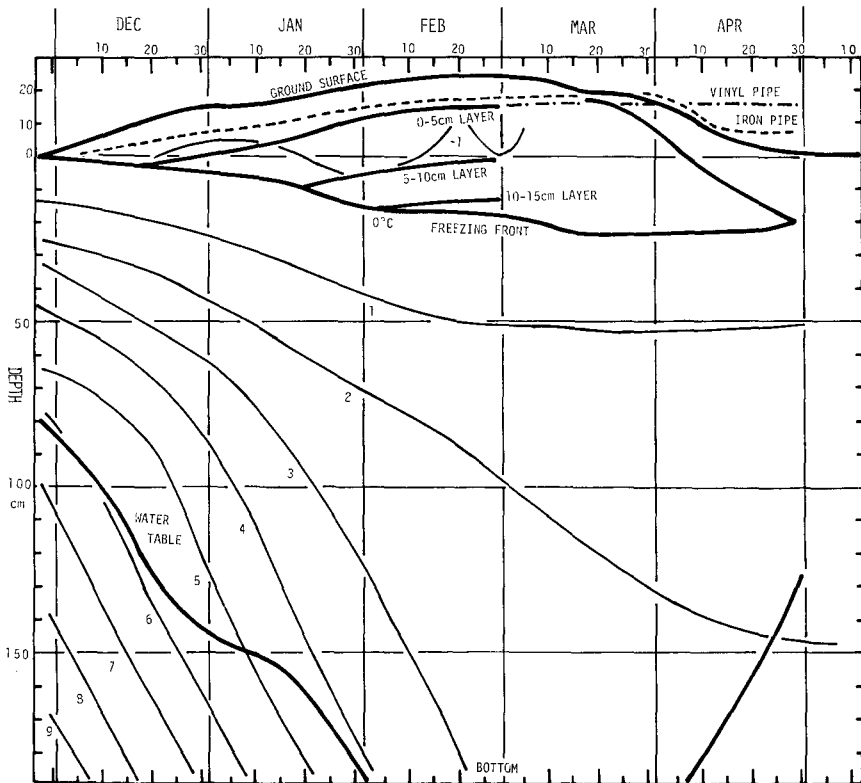
### II. 測定方法

#### 1. 通常観測項目

- (1) 気温及び地下 1, 5, 10 cm の地温を自記する一方、地下 10, 20, 40, 60, 80, 100 (凍上した地面からの距離), 120, 150 (凍結前の地面からの距離) 及びプール底部の地温をほぼ 10 日おきに測定した。
- (2) 青色のメチレンブルー水溶液が凍結する際に、無色の氷が析出することを利用して凍結線の位置を判定する凍結深度計<sup>4)</sup>を埋設し、ほぼ 10 日おきに凍結深を測定した。
- (3) 下端をプール底部に埋めこんだ鉄棒の上端を基準点として、地面凍上量を自記測定した。
- (4) 地下水位を自記した。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 1324 号

- (5) 鉄管とビニール管(長さ1 m, 直径7.6 cm)を鉛直に上部だけ5 cm 地上に出るように埋設し, 凍土との凍着による管のせり上りを測定した。
- (6) 高さ5 cm, 直径4 cmの真鍮の円管(下底部側方に幅1 cmの横出しつばつき)を10個つみ重ねて, 地面から地下50 cmにわたって埋めた。各管の内面からは上方に指示棒がとりつけてあり, 地上に出たそれぞれの先端部のレベルを測定することにより, 地面から5 cmごとの各層の凍上量を測定した。
- (7) 地面に直径12 cmの円板をおき, その上に力計をのせ, 更に長さ80 cmのチャンネルをのせた(力計上端を中心に)。チャンネルの両端部はプール底部から地面にのび出した直径4 cmの鉄棒2本にはめられて固定された(2本の鉄棒の間隔は60 cm)。従って, 円板の部分は固定のままであるが, 周囲の地面が凍上するため, 円板に応力が集中する<sup>1)</sup>。この力(凍上力)を測定した。
- (8) 土圧計(共和電業製 BE-2KA, 直径10 cm, 厚さ2 cm)を地面に垂直に, 上端がちょうど地面になるように埋めた。1個を凍上力測定部の円板中心から30 cmの所に埋め, 凍上力の変化に伴う土圧の変化を測定した。又, 他の1個を凍上力装置の影響を受けないよう1 m 50 cm離れた所に埋めて, 地面近くの温度勾配の変化にもとづく熱応力を測定した。



第1図 地面凍上量, 地下0~5 cm層, 5~10 cm層, 10~15 cm層の凍上状況, ビニール管と鉄管の凍着凍上量, 凍結線, 地下水位及び地温の冬期間の変化, プールA(砂質粘土ローム), 昭和48~49年冬期, 苫小牧演習林内

2. 断面観測

凍結前の11月28日、凍結時の1月9日と3月8日、融解後の5月13日に、地面から下方1mにわたって土の試料を採取した。凍土の採取には、ダイヤモンド刃のついた高速回転のユアサンプラーを用いた。採取した試料について、層構造を観察し、現場密度<sup>5)</sup>、重量含水比、土粒比重を測定した。これらの値から土の中に含まれる土粒分と水分の体積割合を求めた。

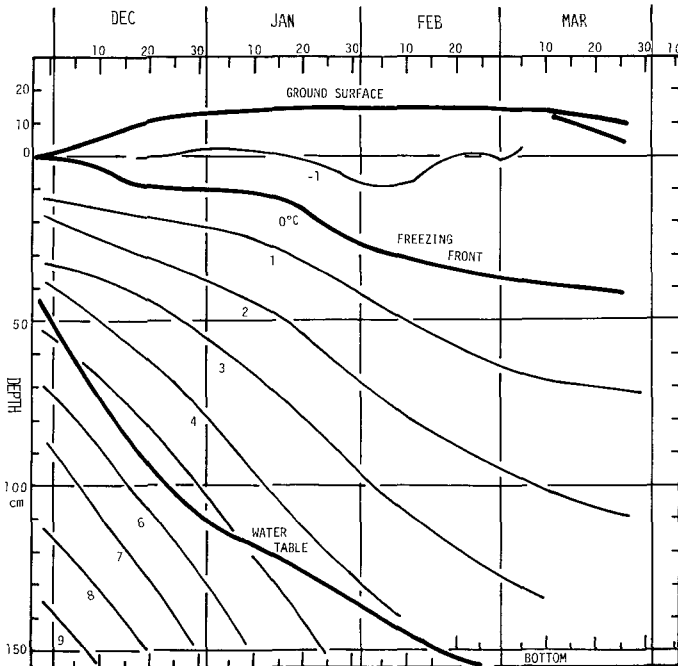
III. 測定結果

1. 気温・積算寒度

日平均気温は11月20日に始めて0°C以下になり、4月には0°C以上になった。月平均気温は11月が+3.5°C、12月が-4.6°C、1月が-5.9°C、2月が-5.1°C、3月が-2.0°C、4月が+3.2°Cであった。又、最低気温は1月31日の-21.8°Cであった。日平均気温の0°C以下の値を集計したのを積算寒度というが、この冬の総計は561.9°C・dayであった。その内訳は11月が15.8°C・day(日平均気温が0°C以下の日数が9日間)、12月が146°C・day(28日間)、1月が183°C・day(31日間)、2月が142°C・day(27日間)、3月が71.9°C・day(25日間)、4月が3.2°C・day(1日間)である。

2. 凍上状況

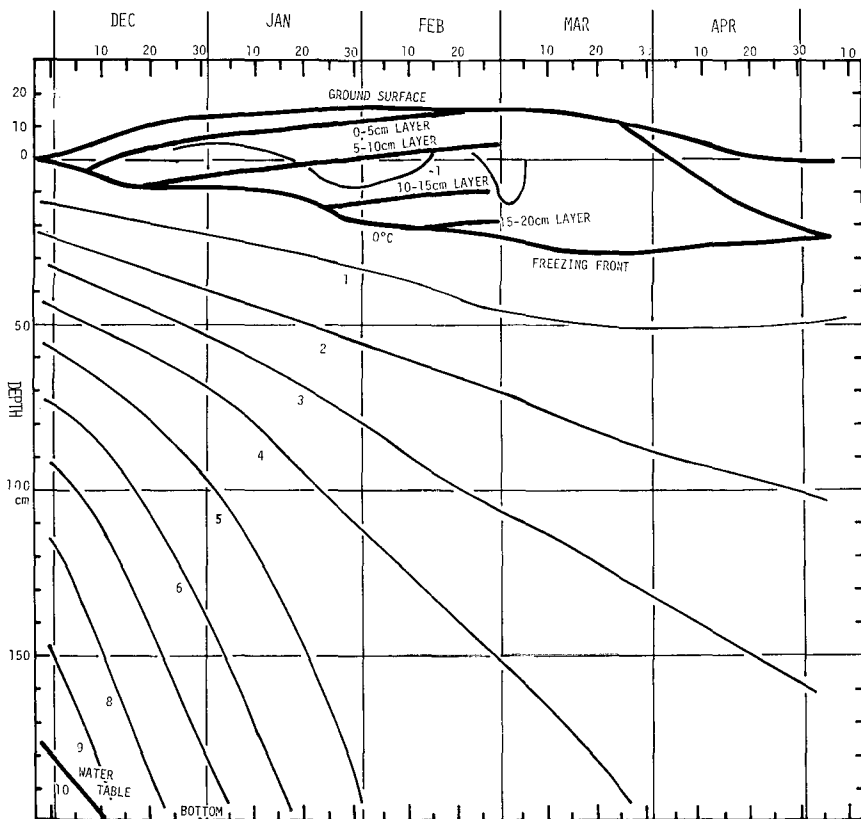
地面の凍結は11月28日に始まり、3月中旬には最深凍結に達した。3月上旬からは地面から融解が始まり、4月末には完全に融解した。凍結期間中の凍結深、凍上量、地下水位及び地温分布をA, B, Cの3プールについて、それぞれ第1, 2, 3図に示す。



第2図 地面凍上量、凍結線、地下水位及び地温の冬期間の変化、プールB(粘土)、昭和48~49年冬期、苫小牧演習林内

A プールと C プールは同じ土質であるが、初めの地下水位が違う (A プールでは地下 80 cm, C プールでは地下 175 cm)。凍結が進むにつれ、地下水位は下り、地面は凍上する。すでに前報<sup>6,8,10)</sup>で報告したように、地下水から水分が上方に補給されて、凍結線で氷として析出し、凍上が進行するわけである。この冬の場合、A プールでは 2 月 2 日から、B プールでは 2 月 28 日から、又 C プールでは 12 月 11 日から水位はプールの底に達し、地下水がない状態になった。従って以後は凍結線への地下水からの補給のない閉式凍上の状態になった。従って、同じ土質でも A プールの方が、C プールよりも凍上が大きい。A プールの最大凍上量は 23.8 cm で、C プールの最大凍上量は 16.4 cm である。又地下水からの補給があるときの凍上速度は、A プールで 2.4~4.8 mm/day, C プールで 5.3 mm/day である。又地下水からの補給がないときの凍上速度は、A プールで 0~1.8 mm/day, C プールで 0~2.9 mm/day である。

B プールの粘土は一般に A, C プールの砂質粘土ロームよりも凍上が小さい<sup>12)</sup>のであるが、初め地下水位を A, C プールよりも浅くしたため、C プールに相当する凍上が現われた。最大凍上量は 15.0 cm である。B プールの土を 4 月始めに砂質土に入れかえたため、観測は 3 月末で打切った。

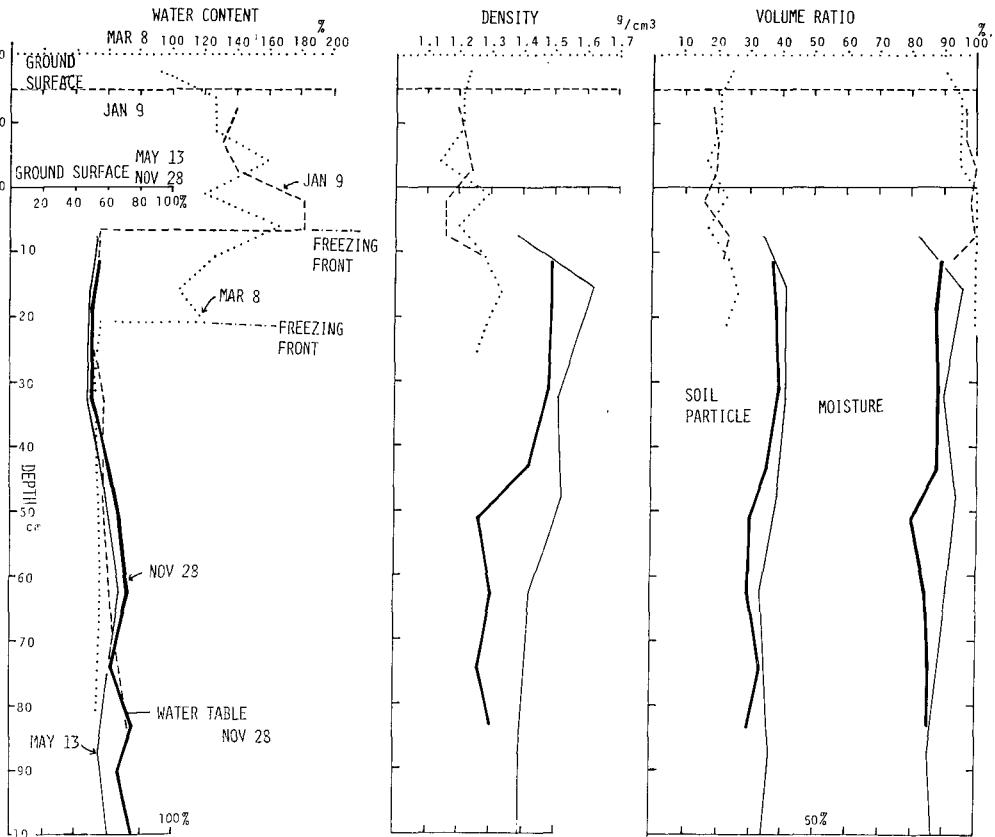


第3図 地面凍上量、地下0~5 cm層、5~10 cm層、10~15 cm層、15~20 cm層の凍上状況、凍結線、地下水位及び地温の冬期間の変化、プールC (砂質粘土ローム)、昭和48~49年冬期、苫小牧演習林内

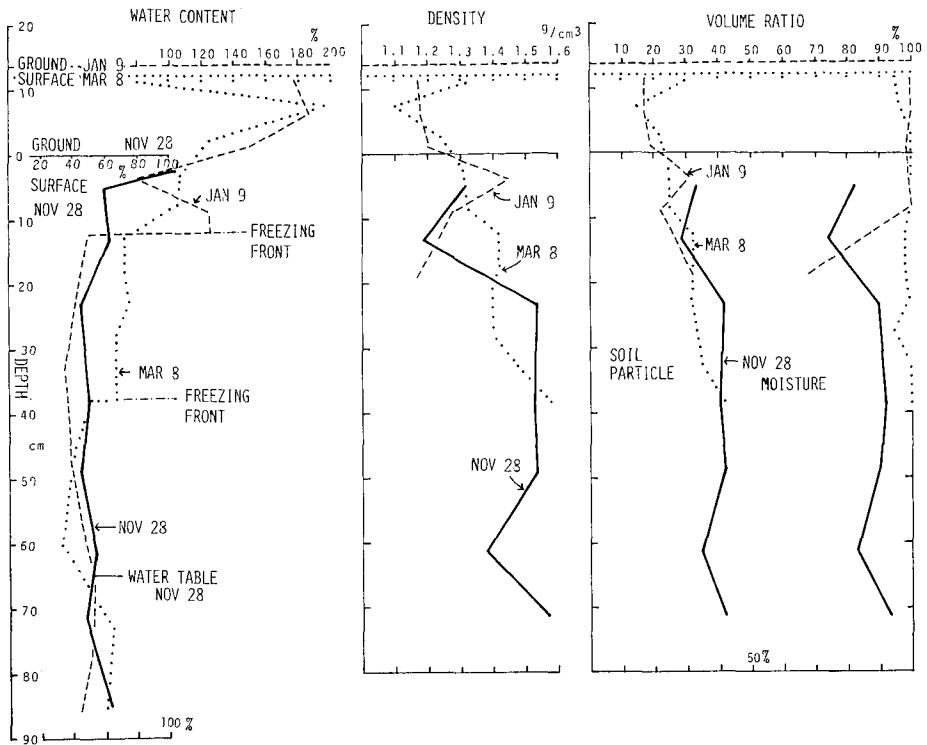
A, C プールで地面から地下 5 cm ごとの各層の凍上量を測定した。凍結前の地面から測った最深凍結線は、A プールで 23 cm, C プールで 27 cm であった。そのうち凍上を示したのは、A プールで 15 cm の層まで、C プールで 20 cm の層までであった。その凍上状況を第 1 図と第 3 図に書きこんであるが、深い層ほど凍上が少ないことが解る。すなわち、地面凍上の殆どは、上部の層でまかなわれる。ただ、地面よりも地下 0~5 cm の層の凍上の方が大きく現われる。これは、地面は冬のさい中といえども、日中の暖気などで融解し 1 cm ほど沈下することがあるからである。

3. 断面観測結果

A, B, C 各プールについて、凍結線の 11 月 28 日、凍結時の 1 月 9 日と 3 月 8 日、融解後の 5 月 13 日 (B プールは 3 月末で観測中止) に行なった断面観測の結果を、それぞれ第 4, 5, 6 図に示す。凍結前の地面を基準に図を示してある。これまでの観測と同じく、凍結線の下では凍結前よりも含水比が減少するのが目立つ。又、このときに採取した凍土試料について、福田・井上<sup>13)</sup> は超音波パルス法を用いて弾性波伝播速度を測った。



第 4 図 断面観測の結果、プール A (砂質粘土ローム)、昭和 48~49 年冬期、苫小牧演習林内



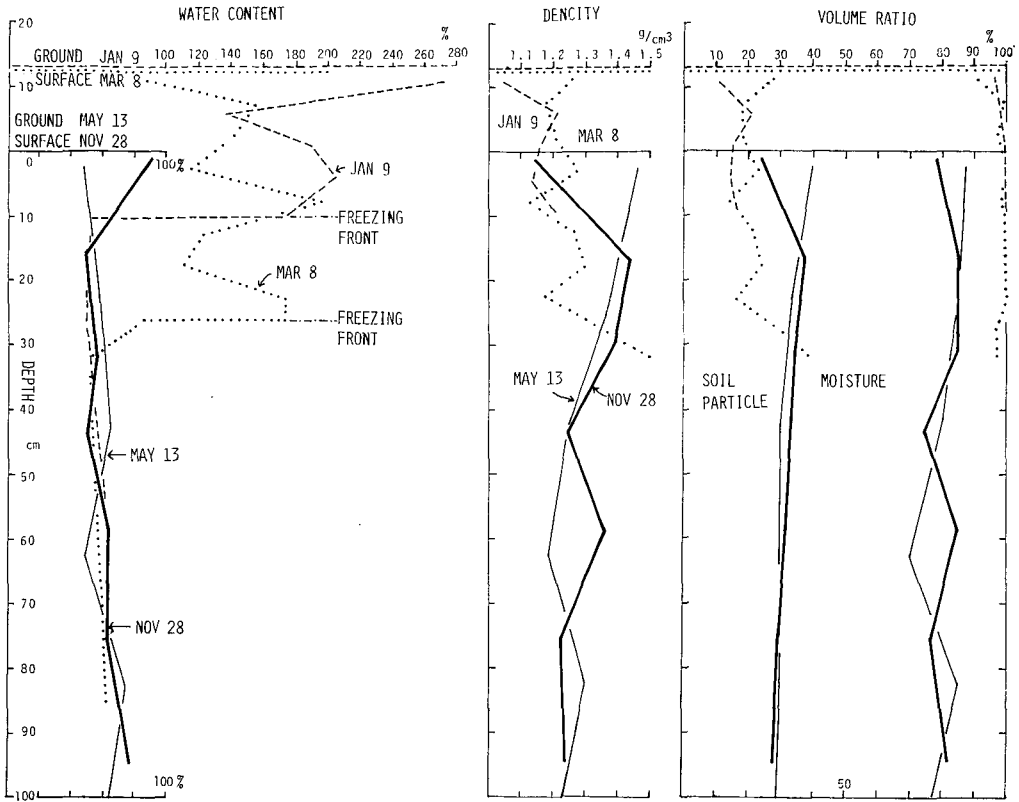
第5図 断面観測の結果，プールB（粘土），昭和48～49年冬期，苫小牧演習林内

4. 凍上力・土圧の日変化

拘束個所に作用する凍上力は，この冬2月13日に最大の3750 kgを記録した。凍上力は一様な増加を示すものでなく，増加減少の波を繰り返す。凍上の粘弾性特性にもとづくものであることを既に指摘した<sup>1,2,12,14</sup>。ここでは，更に細かく一日のうちでどの程度変化するものかを調べてみた。又凍土表面近くにおける地面に垂直な面に作用する土圧についても，変化の様子を調べてみた。凍上のふえ方が急速な1月18～21日と，ゆるやかな2月26日～3月1日の場合について，得られた結果をそれぞれ第7，8図に示す。

いずれの場合も，気温の変化に比べて地温の変化は，地下5 cmでは振幅が約40%に減少し，位相が約1時間遅れている。又地下10 cmでは振幅が約20%に減少し，位相が約4時間遅れている。気温，地温の日変動に応じて，凍上量，凍上力，土圧も日変動を示しているが，それらの特徴的なものをまとめると次のようになる。

- (1) 凍上量は7時から12時にかけて増大し，その他の時間では殆ど変化しない。
- (2) 凍上力は，凍上量の増大のはげしい1月（第7図）では，増加減少を繰り返すが，凍上量の増大が全体として小さい2月末（第8図）では，凍上量の増大する時間に凍上力も増大するが，その他ではほぼ同じ値をとり，階段的な変化を示す。
- (3) 破線の土圧（凍上力装置から十分離れている所）は，地下10 cmの地温とほぼ同じ位相で変化している。



第6図 断面観測の結果，ブールC（砂質粘土ローム），昭和48～49年冬期，苫小牧演習林内

(4) 点線の土圧（凍上力装置のそばにある）は，一日週期的変動を示してはいるが，その傾向は他と顕著なつながりは特にないようである。

#### IV. 凍上力及び土圧の日変化に対する考察

凍上力装置と土圧計の配置略図を第9図に示す。凍上力  $F$  の増加分  $dF$  と凍上量  $w$  の増加分  $dw$  との関係は，弾性論を適用すると，

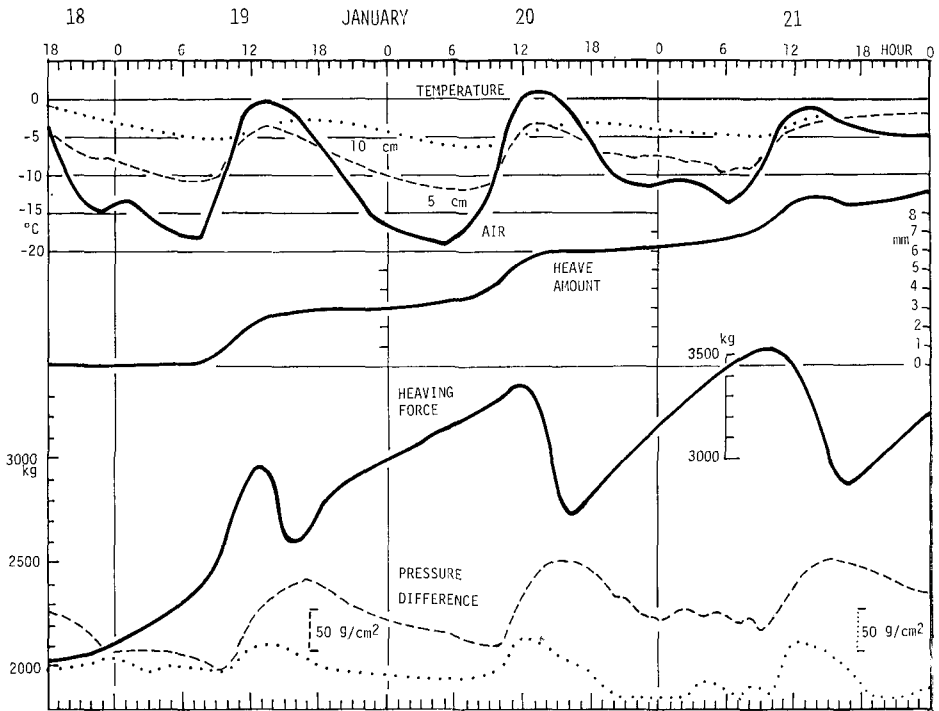
$$dF = \frac{E}{1-\nu^2} R dw \quad (1)$$

になる。ここで， $E$  は弾性率， $\nu$  はポアソン比， $R$  は円板の半径である。又応力をうけもつ凍土が粘弾性体であることを考慮すると，

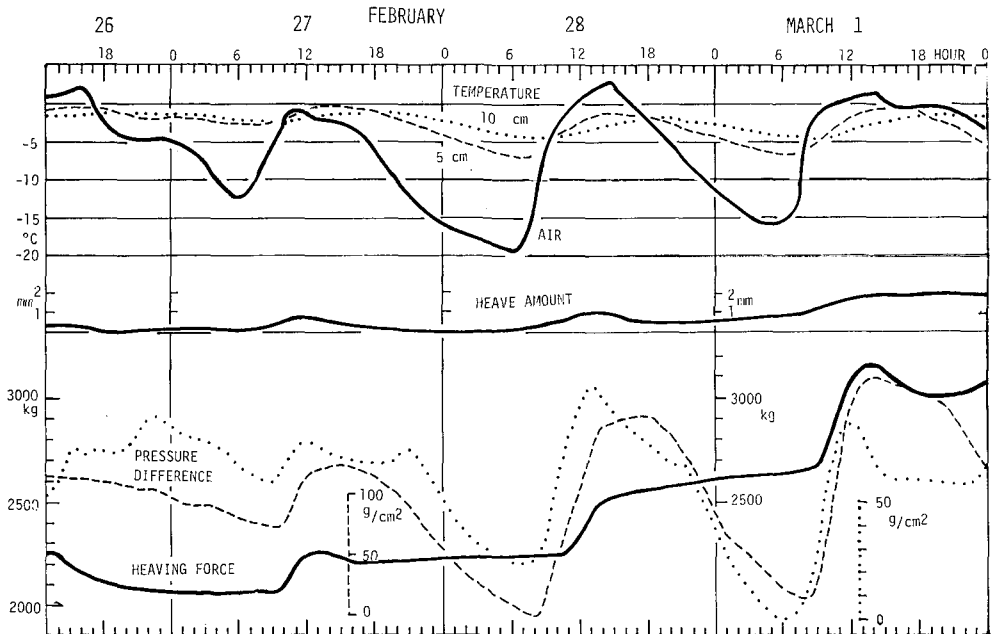
$$\frac{dF}{dt} + \frac{F}{\tau} = E \frac{dw}{dt} \quad (2)$$

になる。ここで， $\tau$  は応力緩和時間である。一方地面の凍上量  $dw$  は，凍結線での氷の析出にもとづく  $dh$  と，凍土内の温度変化にもとづく熱膨脹  $dI$  との和と考えられる。すなわち

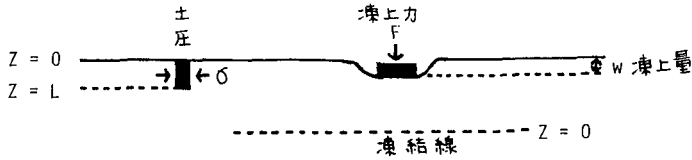
$$dw = dh + dI \quad (3)$$



第7図 気温、地下5及び10 cmの地温、地面凍上量、凍上力、地面に垂直な面に作用する凍土内土圧（破線は凍上力装置から十分離れた所、点線は凍上力装置から30 cm離れた所）の変化、昭和49年1月18～21日、この時期の地面凍上量15 cm、凍結層の厚さ27 cm、Cプール（砂質粘土ローム）、苫小牧演習林内



第8図 気温、地下5及び10 cmの地温、地面凍上量、凍上力、地面に垂直な面に作用する凍土内土圧（破線は凍上力装置から十分離れた所、点線は凍上力装置から30 cm離れた所）の変化、昭和49年2月26日～3月1日、この時期の地面凍上量16.4 cm、凍結層の厚さ39.4 cm、Cプール（砂質粘土ローム）、苫小牧演習林内



第9図 凍上力装置及び土圧計配置の略図

気温の日変化分  $\Delta T$  を  $A \sin at$  とすると、深さ  $z$  における地温の日変化分  $\Delta T(z)$  は、

$$\Delta T(z) = Ae^{-\frac{z}{\kappa} \sqrt{\frac{a}{2}}} \sin \left( at - \frac{z}{\kappa} \sqrt{\frac{a}{2}} \right) \quad (4)$$

である。ここに  $\kappa$  は温度拡散率である。従ってこれにもとづく熱膨脹  $dl$  は、

$$dl = \int_0^D \alpha \cdot \Delta T(z) dz \quad (5)$$

である。ここに  $\alpha$  は膨脹係数、 $D$  は凍結深である。 $\alpha$  は温度に依存する<sup>15)</sup> ので、(5) 式は簡単には導かれないが、 $\alpha$  を一定のものと考え、 $dl$  は、気温や地温の日変化と同じ週期の日変化を示す。

一方、土圧  $\sigma$  の方も熱応力によるものと考え、その変化分  $d\sigma$  は

$$d\sigma = \frac{2}{\nu} E \int_0^L \alpha \Delta T(z) dz \quad (6)$$

となり、 $dl$  と同じ週期変動をもつ。

凍上力や土圧の日変動が凍土の熱膨脹にもとづく熱応力によると考えたわけであるが、その数値的な検討については、単純な条件の下での実験室の結果を今後参照にして行きたい。

現場の観測にあたって北大苫小牧演習林の皆様大変お世話になった。厚く感謝の意を表す次第である。また本研究は文部省の凍上研究に対する臨時事業費及び日本学術振興会日米科学協力計画「土の凍結融解に伴う水分の移動」(4R020) によって行なわれた。

### 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**, 285-298.
- 3) 木下誠一・大野武敏 1967 北見における凍上観測結果. 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. 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) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄 1969 凍上と地下位との関係 I. 低温科学, 物理篇, **27**, 367-377.
- 7) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄・青田昌秋・大野武敏 1969 北見・紋別における凍上観測 (昭和 43~44 年冬期). 低温科学, 物理篇, **27**, 379-393.
- 8) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄 1970 凍上と地下水位との関係 II. 低温科学, 物理篇, **28**, 325-336.

- 9) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄・大野武敏 1970 北見における凍上観測 (昭和 44~45 年冬期), 低温科学, 物理篇, **28**, 資料集, 81-84.
- 10) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄 1971 凍上と地下水位との関係 III. 低温科学, 物理篇, **29**, 245-256.
- 11) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦雄 1972 苫小牧における凍上観測 (昭和 46~47 年冬期), 低温科学, 物理篇, **30**, 203-210.
- 12) 木下誠一 1972 凍上力実験. 低温科学, 物理篇, **30**, 191-201.
- 13) 福田正己・井上正則 1974 凍上した土の構造と弾性波速度. 低温科学, 物理篇, **32**, 283-286.
- 14) 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.
- 15) 堀口 薫 1973 凍土の熱膨脹について. 低温科学, 物理篇, **31**, 295-298.

### Summary

Frost heavings have been observed on the soils in the water-proof basins A, B and C at Tomakomai, Hokkaido.

Basin A : 3×3 m wide, 1.89 m deep, filled with silty clay.

Basin B : 3×3 m wide, 1.55 m deep, filled with clay.

Basin C : 5×5 m wide, 1.99 m deep, filled with silty clay.

Items measured throughout the winter of 1973-1974 of the three basins are: (1) temperature, (2) frost penetration, (3) heave amount of the ground surface, (4) level of water table, (5) adfreeze heave amount of a pipe buried vertically in the ground, (6) heave amount of each 5 cm-thick layer below the ground surface, (7) frost heaving force which the ground exerts when its heave is suppressed completely, and (8) soil pressure which acts on the vertical plane just below the ground surface. The results are graphed in Figs. 1, 2 and 3. The total freezing index of the winter amounted to 591.6°C·day. The minimum air temperature -21.8°C was recorded on Jan. 31. The maximum heave amounts of Basins A and B which were filled with the same type of soil were respectively 23.8 and 16.4 cm. The difference is due to the difference of the initial levels of the water tables: 80 cm at Basin A and 175 cm at Basin C. It is because the frost heave, that is, the expansion of freezing soil depends mainly on a supply of water from below for its freezing mechanism.

Using core sampling machines we took soil samples at various depths on Nov. 28 (before freezing), Jan. 9 and March 8 (during freezing) and May 13 (after melting) and measured their water contents and densities (Figs. 4, 5 and 6).

The frost heaving force and the soil pressure showed remarkable daily changes. They are graphed with the air temperature, the ground temperatures at 5 cm, 10 cm below the ground surface, the heave amount of the ground surface in Fig. 7 (from Jan. 18 to 21, the period of rapid heaving) and Fig. 8 (from Feb. 26 to March 1, the period of slow heaving). It is suggested from the figures that the one part of the frost heaving force and the soil pressure is composed of the thermal stress caused by the temperature change of the frozen ground.