



| | |
|------------------|---|
| Title | 凍上と地下水位との関係 |
| Author(s) | 木下, 誠一; 鈴木, 義男; 堀口, 薫; 田沼, 邦雄 |
| Citation | 低温科学. 物理篇, 27, 367-377 |
| Issue Date | 1970-03-31 |
| Doc URL | http://hdl.handle.net/2115/18125 |
| Type | bulletin (article) |
| File Information | 27_p367-377.pdf |



[Instructions for use](#)

凍上と地下水位との関係 I*

木下 誠一・鈴木 義男

堀口 薫・田沼 邦雄

(低温科学研究所)

(昭和44年7月受理)

I. 緒 言

土が凍って地面が隆起する現象が凍上である。このとき凍結線より下の土中水が凍結線まで移動して氷として析出する。地下水位が浅いと、この土中水の補給が豊富で、大きな凍上が起る。一方、地下水位が深いと、凍上は小さい。又、一方、一般に土が凍結する間は地下水位が次第に下がることが知られている¹⁾。

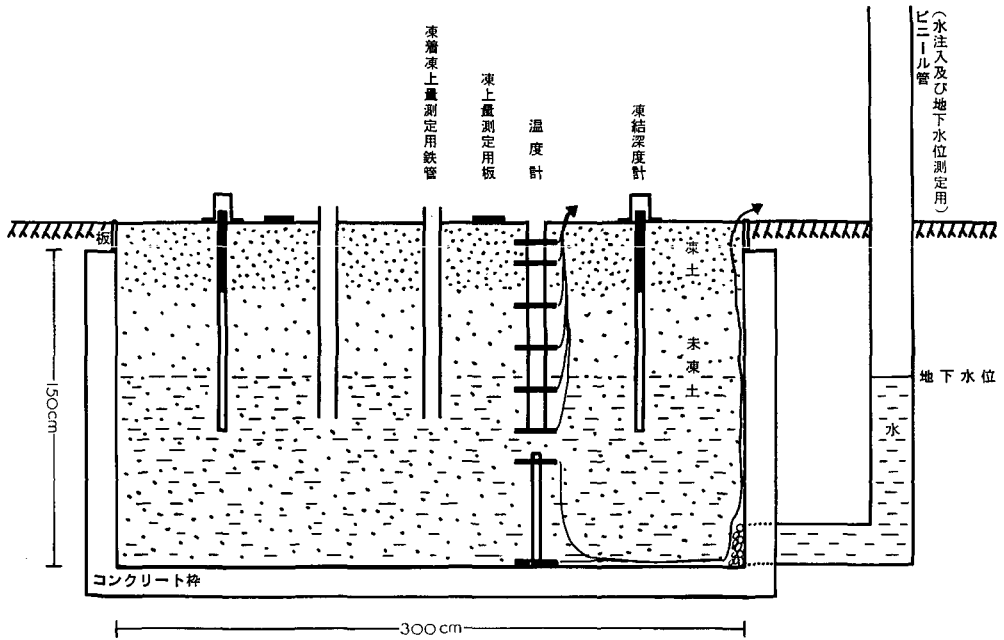
筆者等は、凍上が起る際に、地下水から凍結線まで、どの位の水が吸い上げられるかを測定する実験をおこなった。すなわち、苫小牧演習林内に、内面が完全防水の小さなプール(広さ3×3 m, 深さ1 m 63 cm)を作り、その中に凍上性の土をつめて、この土とプールの下方及び周囲の土との間の水の出入りを遮断するようにした。そして、凍上と地下水位の変化の過程を調べた。まず、この冬は、凍結直前の地下水位を地下30 cmにして、以後外から水を補給しなかった。地下水位は、凍上の進行とともに下がって行き、2月中旬にはほぼプールの底近くまで達した。

又、2月下旬には、凍土を掘り断面を作って、含水比や密度の鉛直分布を測定した。これらの結果を総合して、凍上量と水分吸い上げ量との関係を検討した。

II. 測定方法

苫小牧市高丘にある北大演習林内に実験現場を作った。第1図にその略図を示す。土を1 m 60 cm ほど掘り起し、コンクリートの枠を作った。その寸法は内面が広さ3×3 m, 深さ1 m 50 cm で、鉄筋入りコンクリート壁面の厚さが15 cm である。このプールの側面からその底面と通ずるU字管(直径20 cm のビニール管)がとりつけられた。このビニール管の、プールへの取付け口には、金網をはめ、又、プール側に碎石をおいた。コンクリート枠の上面には、高さ15 cm の板を立て、プールの中には、凍上性の強い土をつめた。第2図 a 及び b の写真がそれである。土の厚さは1 m 63 cm になった。土の上部は板で囲まれコンクリート枠に直接日が当たってあたたまるのを防いだ。U字管用のビニール管は、地上1 m つき出て居り、これを通して水の注入や、地下水位の測定をおこなった。このような土中水分についての野外の凍

* 北海道大学低温科学研究所業績 第968号



第1図 測定装置の略図 周囲の土との間の水の出入りを遮断して、凍土と地下水位との関係を調べる

上実験装置は、既に Haas²⁾ が試みた例がある。

土のなかに、温度測定用のカールソン型温度計を、地下 10, 20, 40, 60, 80, 100, 113, 163 cm の位置に埋めた。地下 100 cm までの 6 ケは、直径 7.6 cm のビニール管にはめ、又、残りの 2 ケはプール下面に板をたてて、それに開けられた穴にはめこんで、それぞれ第 1 図に示される形ですえた。

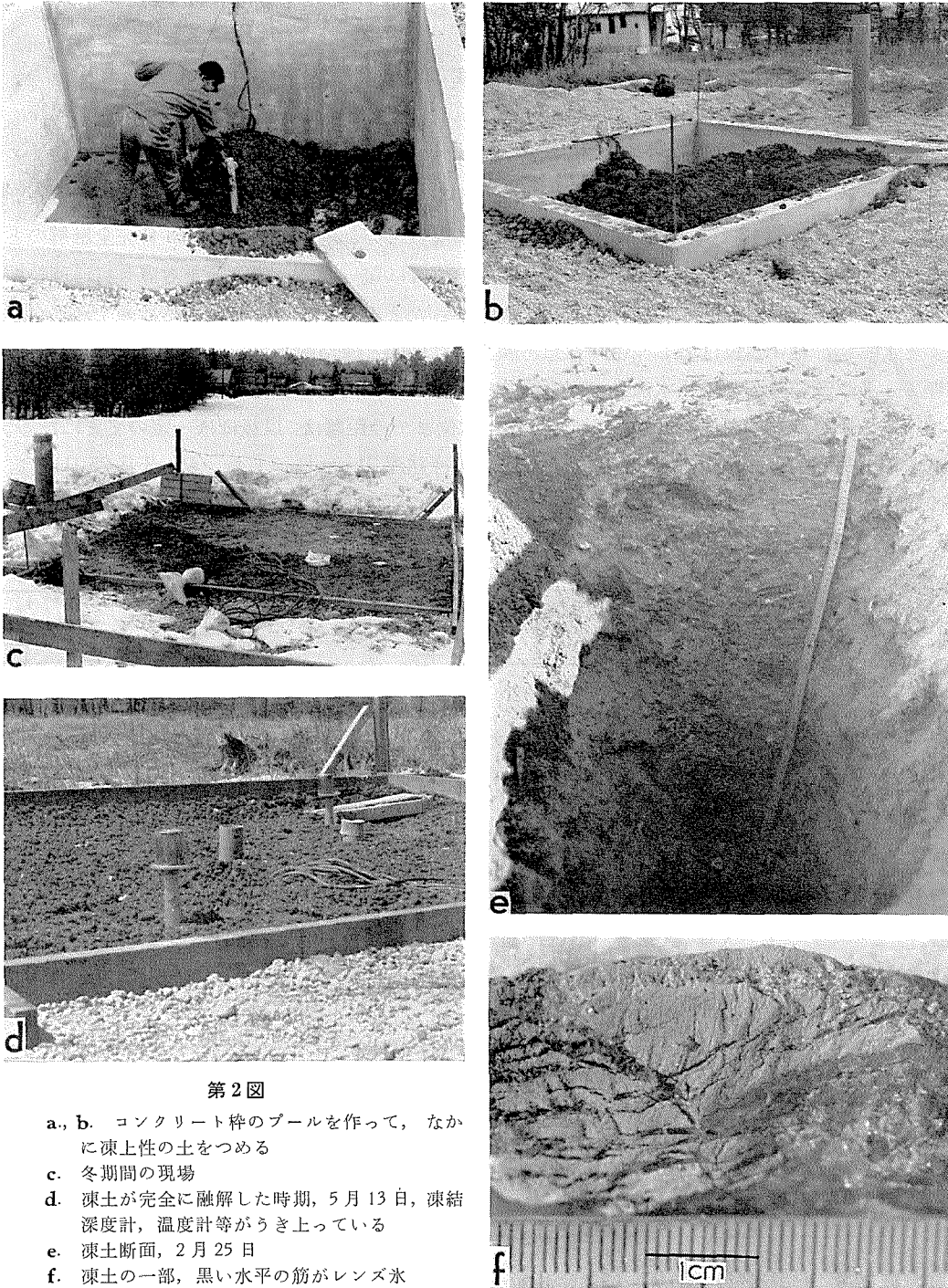
他に凍結深度計 2 本、凍着凍上測定用の鉄管 (直径 7.6 cm, 地中うめこみ 95 cm) 2 本をうめ、又、地面上に凍上量測定用の板 2 本をすえた。それぞれ配置の状況を第 1 図及び第 2 図 c の写真に示す。

12 月 3 日に計器類の設置をし、以後ほぼ 10 日ごとに、5 月 13 日まで凍上量、温度分布、凍結深度、地下水位の測定をおこなった。

うめこんだ土は、低温科学研究所敷地内から運ばれたもので、その特性は次の通りである。粒径 2~0.05 mm の砂分 28%、粒径 0.05~0.005 mm のシルト分 31%、粒径 0.005 mm 以下の粘土分 41% で、土質分類名は粘土である。又、真比重 2.63、比表面積 18 m²/g で、一般的に凍上性の強い土の一種である。

土のうめこみは 9 月におこなわれ、ビニール管を通しての水の注入は、10 月末におこなわれた。12 月 3 日には、地下水位が地下 70 cm であったが、後に述べるように、融解後の地下水位から推定すると、凍結開始時の 12 月 17 日ごろには、地下 30 cm であったと考えられる。以後、水の注入はおこなわれず、地下水位の位置だけを、ビニール管内の水面で測定した。

2 月 25 日に凍土を掘り起し、断面を作って、含水比、密度、真比重を測定したが、その



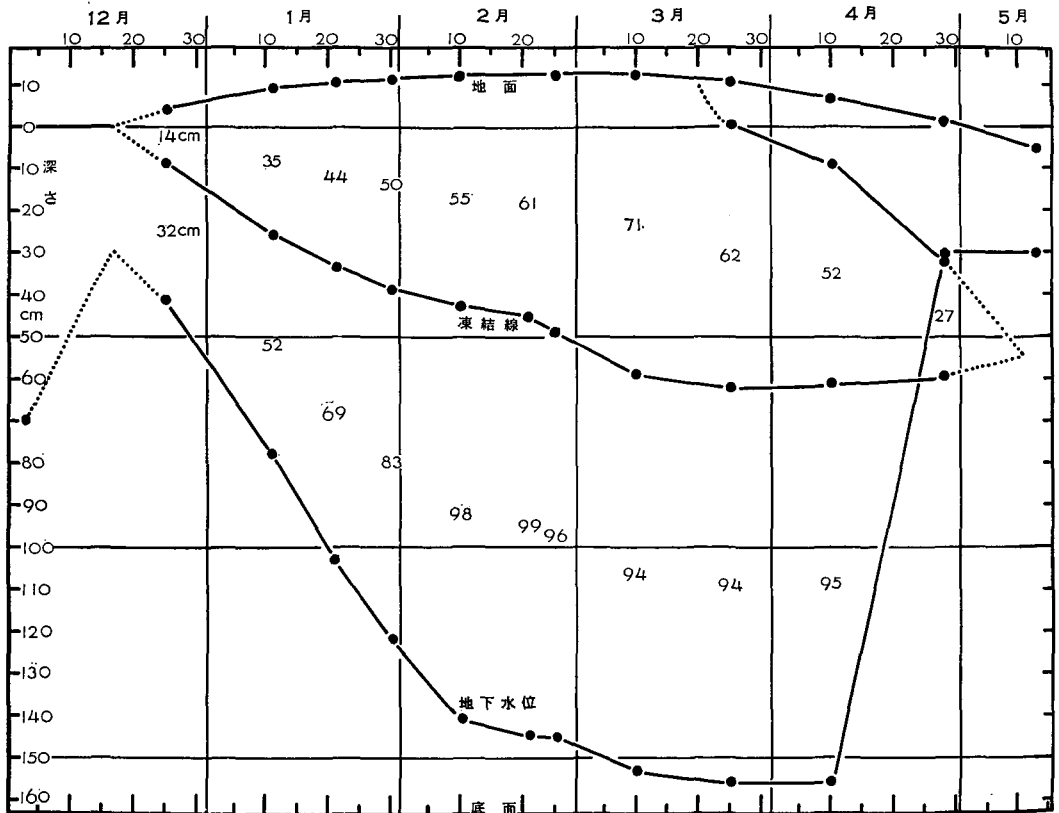
第2図

- a., b. コンクリート枠のプールを作って、なかに凍上性の土をつめる
- c. 冬期間の現場
- d. 凍土が完全に融解した時期、5月13日、凍結深度計、温度計等がうき上っている
- e. 凍土断面、2月25日
- f. 凍土の一部、黒い水平の筋がレンズ氷

方法は筆者等が北見や紋別においておこなっているのと同じである^{3),4)}。

III. 測定結果

第3図に地面凍上量、凍結深度、地下水位の冬期間の推移を示す。地面の凍結開始は、気温のデーターから12月17日と推定した。又、地下水位は12月3日に地下70cmに設定したのであるが、その後の12月11, 12, 15日に、降雨又は降雪があったので、水位は上がった。2回目の観測日の12月25日には、地下41cmになっていた。しかし、5月13日完全融解のときには、地下水位は、凍結前地面より下30cmの位置になった。このことを考慮して、凍結開始の12月17日にも、同じ位置の地下30cmであったと推定した。以後、凍結、凍上が進行するとともに、地下水位は著しく下降した。凍上した地面と凍結線までの距離、つまり凍結層の厚さ、及び凍結線から地下水位までの距離をそれぞれその位置に数値で示した。2月になると地下水位はプールの底に近づき、凍結線と地下水位までの距離は、以後ほぼ一定のままになる。3月10日の観測日に、最大凍上量12.3cm、最大凍結深71cmに達した。又、3月25日には、凍結前の地面を基準にして、最大凍結深62cm、最深地下水位156cmに達した。プールの底



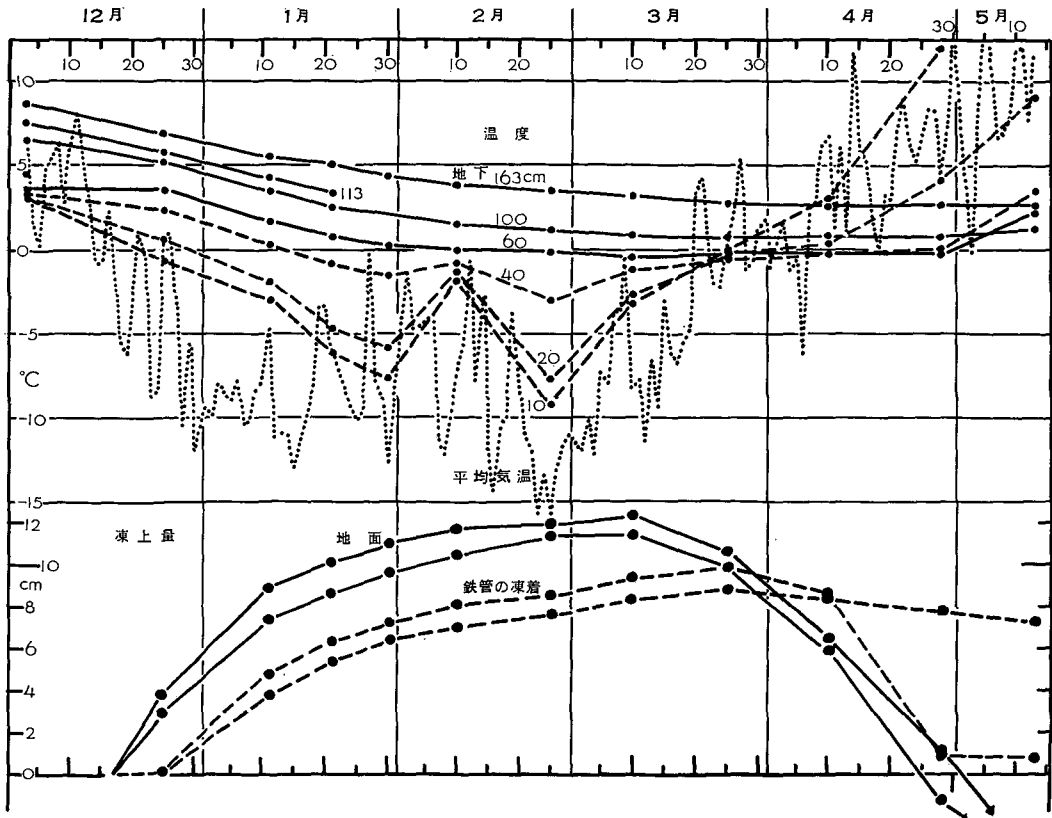
第3図 地面、凍結線、地下水位の冬期間の変化 上段に並ぶ数値は、凍結層の厚さ、下段に並ぶ数値は凍結線から地下水位までの距離を表す。グラフの一番下の線163cmがプールの底。グラフの点線部分は他のデーターから推定した部分

までは僅か7 cm にすぎない。

3月20日ごろから地面および凍結層の下面から融解が始まり、5月13日には完全にとけていた。地面からの融解速度は、0.8~1.4 cm/day、又、凍結層下面からの融解速度は、0.07~0.4 cm/dayであった。地下水位の方は、4月28日まだ内部に27 cmの凍結層が残っているのに急に上昇して、ほぼ凍結層の上面と一致した。

第4図に平均気温、地温、凍上量のグラフを示す。平均気温は、演習林庁舎近くにおいて百葉箱のなかで測定された毎日の最高気温と最低気温の平均をとったものである。この冬の最低気温は、2月25日の -26.5°C であった。又、積算寒度の最大は $711^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ (3月19日)に達した。これは、苫小牧市内にある測候所の測定値 $429^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$ に比べてかなり大きい。演習林は市内から4キロほど内陸であるが、寒さがこのように違う。2月10、11、12日と暖気があり12日には日中の最高気温が $+7.8^{\circ}\text{C}$ にもなった。これが影響して、凍結深が2月中旬に停滞した。このことは、北見、紋別でも同じ傾向を示し⁴⁾、この冬の全道的な特徴である。

第4図下段の凍上量のグラフには、地面の2点と、2本の鉄管の凍着凍上を示す。第3図にはこのうち大きい凍上量を示した地面をとり出して書いた。地面は3月10日に最大凍上量12.3 cmと11.4 cmに達した。一方、鉄管の方は3月25日に最大凍上量9.9 cmと8.8 cmに達

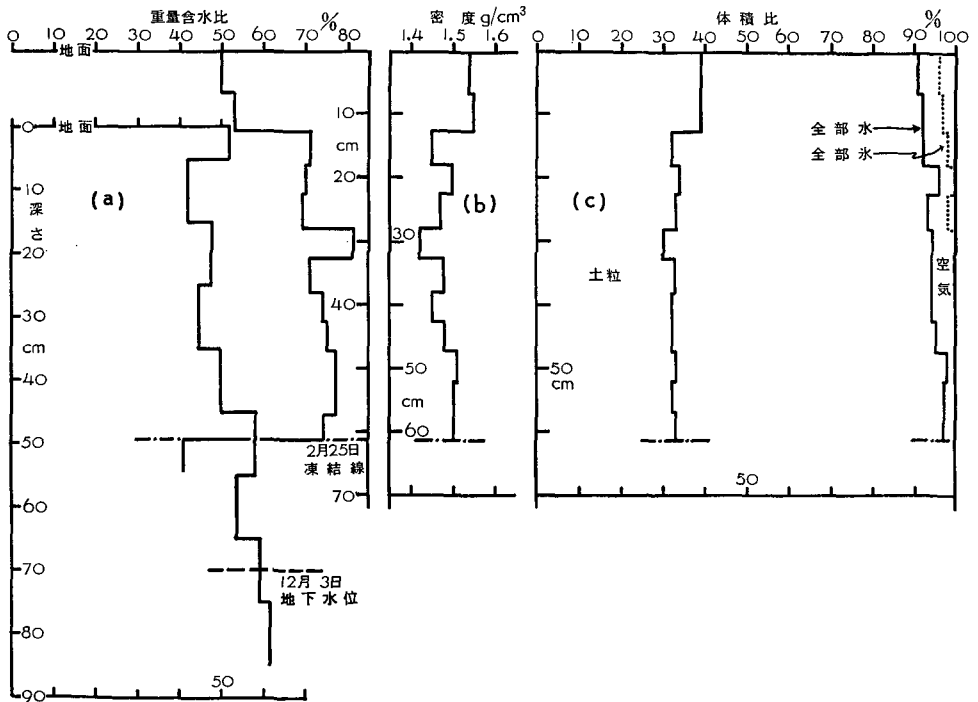


第4図 上段は温度状況、下段は凍上量の変化を示す。5月13日に地面は凍結前よりも5 cm 沈下していた。又、地下10 cm から100 cm までの温度計は、5月13日に、地面から14 cm 浮き上っていた

した。このように、鉄管の凍着凍上が地面の凍上より遅れて最大になるのは、次の理由による。すなわち、3月中旬には日中の気温が 0°C 以上になるため、地面が融解して沈下するのに、一方、鉄管は、内部の凍土との凍着で、沈下しないからである。しかも、夜間の寒気などで、鉄管はまだ凍上を続ける。

完全融解の5月13日には、地面は、凍結前の位置よりも5 cm 沈下した。土を埋めてはじめての凍結であったからである。一方、鉄管の方は、一つはほぼもとの位置に沈下したが、もう一つは依然として7.3 cm うき上ったままである。第2図 d の写真に凍結深度計のうき上りを示す。ツバのところは凍結前の地面の位置である。16 cm もうき上っている。この16 cm は地面の最大凍上量12 cm と完全融解時における地面の沈下5 cm との和に、ほぼ等しい。したがって、凍結深度計は、地面とともに凍上し、地面が沈下をはじめても、内部に残る凍土との凍着のため、結局地面の最大凍上量のとときの位置を保ったままでいたことになる。

第5図に断面観測の結果を示す。(a)は重量含水比で、12月3日と2月25日における測定値である。12月3日には地下水位が地下70 cm で、地下水つまり飽和では、ほぼ60%である。2月25日には、凍結前の12月3日に比べて、地面が12 cm 凍上したので、深さの基準を12 cm あげてグラフに書いた。このときの凍結深は61 cm で、その位置は12月3日凍結前



第5図 断面観測の結果

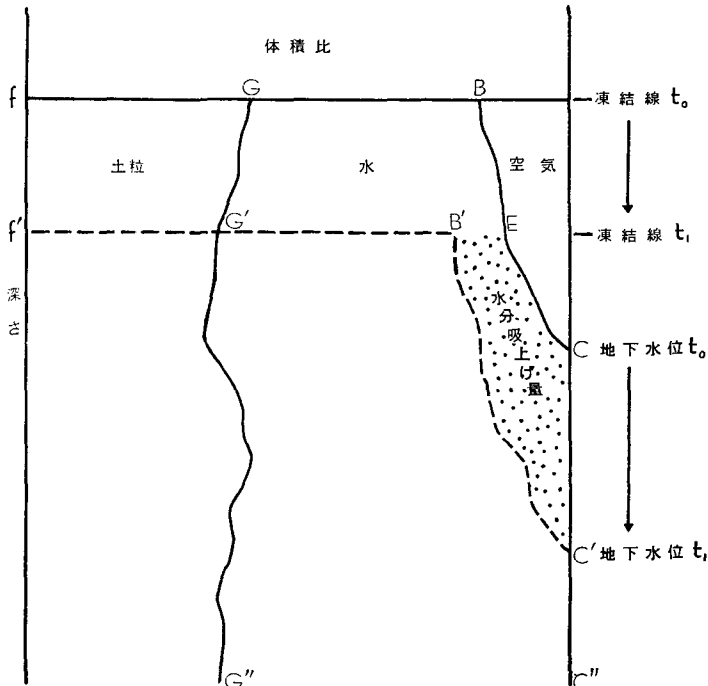
- (a) 重量含水比，昭和43年12月3日と昭和44年2月25日，2月25日には地面が12 cm 凍上
 (b) 現場密度
 (c) 凍土内の土・水又は氷，空気の体積比。右側の実線と点線は、それぞれ全部水とした場合及び全部氷とした場合を表す

の 49 cm の位置である。2 月 25 日に掘った断面の写真を第 2 図 e に示す。レンズ氷が各所にみられる。その一部をとり出して接写したのが第 2 図 f の写真である。厚さ 1~2 mm の黒い水平に細長い筋がレンズ氷である。2 月 25 日の含水比の平均は 72% で、12 月 3 日のそれよりも 20% 以上も大きい。ただし、地面近くが含水比が小さいのは、地面での乾燥にもとづくものである。又、凍結線のすぐ下では、一般的にみられることであるが^{1),3),4)}、含水比は小さく 41% である。

第 5 図 (b) は、現場密度で、1.4 と 1.55 g/cm³ の間の値である。(c) は、重量含水比、現場密度、真比重の値から計算された凍土内の土粒、水又は氷、空気の体積比⁴⁾を示す。右側の線のうち、実線が全部水とした場合、点線が全部氷とした場合の値を示す。点線がない部分は、全部氷とすると、その部分は 52~65%、空気は 2~9% である。又、全部氷とすると、その部分は 57~71%、空気は -4~+4% である。凍土内に残る不凍水と氷との割合を一義的にきめることは出来ないが、全部氷とすると、残りの空気の部分がマイナスになるということは、このうちかなりの量が不凍水であることを想像させる。

IV. 水分移動についての考察

第 2 図 f の写真にみられるように、凍上した土の中には、数多くのレンズ氷がみられる。これは、未凍結層からの水分の移動があったことを想像させる。今、筆者等の実験について、地下水位の下降及び凍土内の、土、水又は氷、空気の体積比の鉛直分布から、土中水分の移動について検討してみよう。

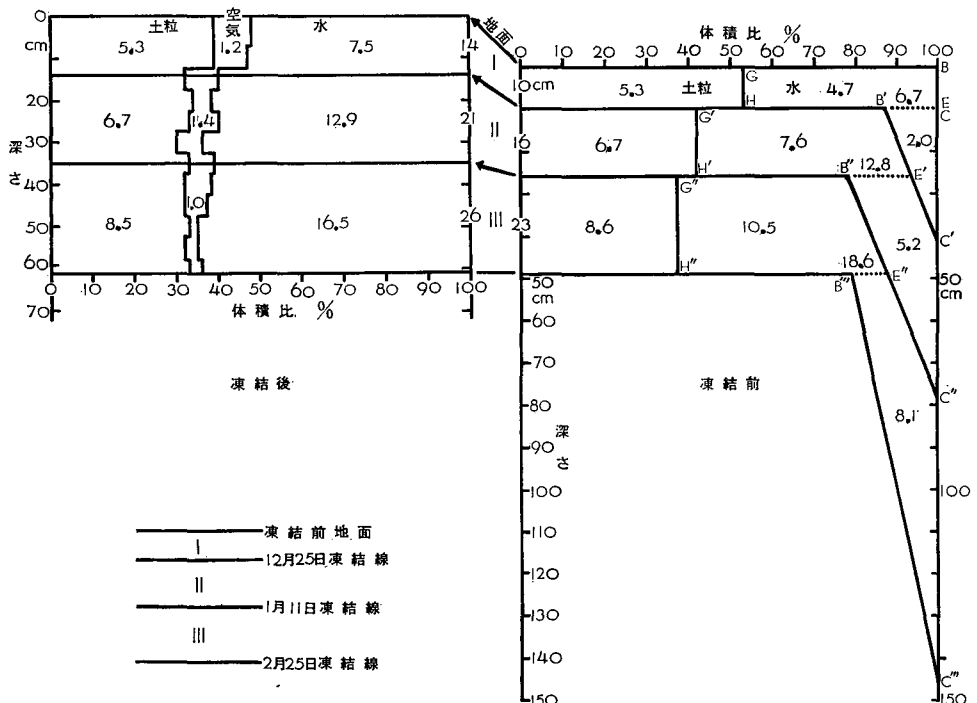


第 6 図 凍結進行にともなう土中水分の変化図

土中の水分変化を模式的に第6図に示す。横軸を、凍結線から下の未凍土内の土の実質部分と水及び空気の体積比にとる。縦軸は深さである。時刻 t_0 における凍結線を f 、地下水位を C とし、そのときの土の実質部分の分布を $GG'G''$ 、又、土の実質部分プラス水、つまり右端を基準とした空気の部分の分布を $BECC'C''$ とする。地下水位より下では、空気の部分がなく飽和である。つぎに、時間がたつて、時刻 t_1 に凍結線が f' に、地下水位が C' に、又空気の部分の分布が、凍結線より下で $B'C'$ になったとする。もちろん、土の実質部分は変化がなく、分布は $G'G''$ のままである。ここで、 B および B' の位置は、前節で述べたように、2月25日の測定で、凍結線のすぐ下で重量含水比が急に減って41%になることから求められる。

面積 $E'CC'B'$ の部分は、時刻 t_0 では水の部分であったのが、時刻 t_1 では空気の部分になったことになる。したがって、その水は、吸上げられたわけで、これが凍上に寄与したわけである。 f と f' にはさまれる層は、凍結前に面積 $GBEB'G'$ に相当する水をもっていたのが、凍結後には面積 $GBECC'B'G'$ に相当する水をもつことになる。この水のお大半が氷に変わり体積をます。その体積増加分から、凍結前後における土中空気量の変化分を引いたものが、地面の凍上量になる。 t_0 に f の位置にあった層は、 t_1 にはその分だけ上昇する。

この関係を実際の観測結果に当ててみる。第7図左に、地表面から12月25日凍結までの第I層(厚さ14 cm, はじめの厚さ10 cmで4 cm凍上)、その下1月11日凍結までの第II層(厚さ21 cm, はじめの厚さ16 cmで5 cm凍上)、その下2月25日凍結までの第III層(厚さ26 cm, はじめの厚さ13 cmで3 cm凍上)にわけて、それぞれの凍土内に占める土粒、空気、水(全部水として書きこむ)の体積比を示す。又、枠内に書きこまれている数値は、その厚さ



第7図 凍結前及び凍結後における土中水分の変化図

の凍土 (断面 1 cm^2) 内に占められるそれぞれ水の体積の値である。

又、右には、凍結前のこれら三層について、同じように、土と水分の体積関係を示す。土の体積については、凍結前後で変りない。第 I 層は、水飽和と仮定すると、凍結前の重量含水比 53% から、その水分量は $4.7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ になる。水飽和、すなわち、空気分がないことから、E と C が一致する。

つぎに、第 I 層が凍結し終ったとき、その下の未凍結層では、重量含水比が 41% であるから、土粒分 O-G' に対し、水分は G'-B' になる。体積比にして 45% である。残りの空気分は B'-E の 13% である。第 II 層の土粒分 O-G'H' (42%) は、凍結後の厚さ 21 cm に含まれる土粒分の体積 $6.7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ が、凍結前の厚さ 16 cm に含まれていたとして、求められた。第 I 層が凍結し終った 12 月 25 日の地下水位は、凍結前地面より 41 cm 下である。この位置 C' は第 III 層に入る。地下水位以下では、土は水飽和であるから、C' は 100% の線上に位置する。B' と C' の間が直線関係になっているとすると (三角形 EC'B' が第 I 層凍結後の第 II 層以下の空気の部分を示す)、第 6 図における考察から、第 I 層が凍る間に三角形 EC'B' の面積に相当する水分が吸い上げられたことになる。その値は $2.0 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ で、凍結前にもっていた $4.7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ と合せて $6.7 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ である。これが凍結後の第 I 層に含まれた水分であるが、第 7 図左の第 I 層内の水分 $7.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ より少し小さい。恐らく B'C' で示される未凍土内の関係が少し凹になるのであろう。

以上の考察を第 II 層、第 III 層についてもおこなう。その結果をまとめて次の第 1 表に示す。

実際の吸い上げ量と、第 7 図の面積計算による吸い上げ量との間に、若干の差があるが、これは、B'C' と B''C'' が少し凹に、又、B'''C''' が少し凸になっているためであろう。又、吸い上げ量がそのまま凍上量にならないのは、土の間隙がいつでも飽和⁵⁾ になっているわけではなく、かなりの空隙を残すためである。このことの実験的考察を田沼がおこなっている⁶⁾。又、

第 1 表

| | | 土 粒 (cm^3/cm^2) | 水 (cm^3/cm^2) | 空 気 (cm^3/cm^2) | 計 (cm^3/cm^2) | 凍上量 (cm^3/cm^2) | 吸い上げ量 (cm^3/cm^2) | 吸い上げ量 (計算) (cm^3/cm^2) | 吸い上げ速度 ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{day}$) |
|---------|-----|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|---|---|
| 第 I 層 | 凍結前 | 5.3 | 4.7 (面積 BEHG) | 0 | 10 | 4 | 2.8 | (面積 EC'B'') 2.0 | 0.25 |
| | 凍結後 | 5.3 | 7.5* | 1.2* | 14 | | | | |
| 第 II 層 | 凍結前 | 6.7 | 7.6 (面積 B'E'H'G') | 1.7 | 16 | 5 | 5.3 | (面積 E'C'/C''B'') 5.2 | 0.31 |
| | 凍結後 | 6.7 | 12.9* | 1.4* | 21 | | | | |
| 第 III 層 | 凍結前 | 8.5 | 10.5 (面積 B''E''H''G'') | 4.0 | 23 | 3 | 6.0 | (面積 E'''C'''C''''B''') 8.1 | 0.18 |
| | 凍結後 | 8.5 | 16.5* | 1.0* | 26 | | | | |

* 凍土内に水を考えず、全部水としたときの値である

筆者等が、北見、紋別の凍上観測現場で得た結果も、ほぼ同じである⁴⁾。ただ、北見に比べてここでは、水分補給源の地下水位が近いため、吸い上げ速度は、同じ深さについて、ほぼ2倍に近い。

V. む す び

地下水位が凍上現象に関係があることは、従来から知られていた。筆者等は、野外の現場において、人工的に地下水位を調節できる装置を作り、凍上が進むにつれ、地下水位がどのように下がって行くかを測定した。そして、水位の下降が非常に速いことと、凍結線から1m以下にある水をも吸い上げて凍上が起ることをみつけた。又、断面観測その他から、吸い上げ量と凍上量との関係を検討した。又、凍結線から下、地下水位までの含水比分布についても、推定することができた。次の冬は、地下水位をたえず一定に保つように、外から水を補給しながら実験をおこないたい。

装置の設置や現場の観測に際し、北大苫小牧演習林の皆様非常に非常にお世話になった。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) 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, **26**, 105 pp.
- 2) Haas, W. M. 1962 Frost action theories compared with field observations. *Highway Research Board, Bulletin* **331**, 81-97.
- 3) 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.
- 4) 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**, 379-394.
- 5) 福尾義昭・北岡豪一・有賀祥夫 1969 凍上量と温度分布・吸水量との関係について. 京都大学防災研究所年報, **12B**, 169-176.
- 6) 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**, 359-365.

Summary

A water resistant basin filled with frost susceptible soil was constructed in 1968 at Tomakomai, Hokkaido, for studies of frost heaving under controlled water conditions. A schematic diagram of its section and photographs of its construction are shown in Fig. 1 and Figs. 2 a, b, c and d, respectively. As understood from Fig. 1, the water level in the basin can be controlled and measured through a pipe laid near by and connected to the basin.

In the winter of 1968-69, a field observation of frost heaving was carried out here in such a way that no water was supplied after the ground began to freeze (a closed system experiment).

The amount of frost heave, the frost line depth and the water level were measured

on every ten days or so from Dec. 3 to May 15, at which time the ground had melted completely. The results are shown in Fig. 3. As seen from the figure, the distance between the frost line and the water level increased almost linearly from 32 cm to 98 cm and became stationary.

The ground temperatures at several depths were also measured. These and daily mean air temperature measured at a near-by station are plotted in the upper part of Fig. 4. The maximum freezing index amounted to 711°C-day.

On Feb. 25, a pit was dug in the ground (Fig. 2 e) and samples were taken from several layers. The volume of soil particles (v_s cm³) and the moisture content (m_w g) in 1 cm³ of each layer were obtained from these samples and are shown in Fig. 5 c, where the ordinate represents the depth from the surface on Feb. 25 and the abscissa one hundred times the value of v_s or m_w and where the left solid line represents the distribution of v_s and the right that of (v_s+m_w) .

The volume of soil particles (v'_s cm³) in 1 cm³ of the layer is given by $v'_s=v_s(D+h)/D$, where D and $D+h$ are the thicknesses of the layer before and after freezing. The value of h for a given layer can be estimated from the curves in Fig. 3, but for a small value of D , the error in the estimation of h may be too large for v'_s to be reliable. Therefore, the frozen ground on Feb. 25 was divided by the frost lines on Dec. 25 and Jan. 11 into three layers for further analysis.

Because no water was supplied during the experiment, the following considerations are applicable for moisture transfer. In fig. 6, let f be the depth of the frost line at a certain moment t_0 , f' that at a later moment t_1 , C the depth of the water line at t_0 , and C' that at t_1 . Let BE'CC'' be a distribution of (v'_s+m_w) at t_0 , B'C'C'' that at t_1 , and GG'G'' a distribution of v'_s at t_0 . Because of moisture conservation, an amount of moisture represented by an area GBE'CC'B'G'G' (M g) should be contained at t_1 in a unit column of a frozen layer, which was found at t_0 between the depth f and f' , and an amount of moisture represented by an area B'E'CC'B' (M' g) should be the amount of moisture transfer through a unit area of the surface at f' during a period from t_0 to t_1 .

No direct observations of the distributions were carried out. But a few measurements of moisture content immediately below the frost line showed that it was always about 41 wt-% of soil, that is, $m_w=0.41 \rho v'_s$, where $\rho=2.63$ g/cm³ is the density of the soil particle. These two relations were used in determining points B's in the sight side of Fig. 7, where the distribution of v'_s , GHG'H'G''H'', was plotted by the previously mentioned method. The distributions of v'_s+m_w were assumed to be straight lines connecting each B to the corresponding C, that is, the air content was assumed to decrease linearly to zero at the water lever. The agreements between the value M observed in a frozen state and that computed on the above assumptions in an unfrozen state were rather good as seen in the following table:

| Layer | Freezing Period | D (cm) | h (cm) | v'_s (cm ³ /cm ³) | M_{obs} (g/cm ²) | M_{com} (g/cm ²) | M'_{com} (g/cm ²) | R (g/cm ² ·day) |
|-------|--------------------|-------------|-------------|---|--|--|---|---------------------------------|
| I | Dec. 17 to Dec. 25 | 10 | 4 | 0.53 | 7.5 | 6.7 | 2.0 | 0.25 |
| II | Dec. 25 to Jan. 11 | 16 | 5 | 0.42 | 12.9 | 12.8 | 5.2 | 0.31 |
| III | Jan. 11 to Feb. 25 | 23 | 3 | 0.38 | 16.5 | 18.6 | 8.1 | 0.18 |
| Total | Dec. 17 to Feb. 25 | 49 | 12 | 0.42 | 36.9 | 38.1 | 15.3 | 0.22 |