



|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 凍上と地下水位との関係 III   |
| Author(s)        | 木下, 誠一; KINOSITA, Seiti; 鈴木, 義男 他   |
| Citation         | 低温科学. 物理篇, 29, 245-256  |
| Issue Date       | 1972-03-30  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/18188">https://hdl.handle.net/2115/18188</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 29_p245-256.pdf   |



## 凍上と地下水位との関係 III\*

木下 誠一・鈴木 義男

堀口 薫・田沼 邦雄

(低温科学研究所)

(昭和46年9月受理)

### I. 緒 言

土が凍るとき、土中の水分が未凍土を通して凍結線に移動し、そこで氷として析出するのが凍上現象である。地下水位が浅ければ、この水分補給が豊富で大きな凍上が起こる。この関係を調べるため、内面が完全防水のプールを作り、その中に土をつめて凍上を起こさせた。土中水の移動がプール内に限られるようにして、精度のよい測定を行なうわけである。

このようなプールを2個(Aは広さ3m×3m、深さ1m93cm; Bは広さ3m×3m、深さ1m76cm)苫小牧北大演習林内に作り、それぞれ異なる土をつめた。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%, 土粒の比表面積57m<sup>2</sup>/g)を、又プールBには、粘土(砂分28%, シルト分31%, 粘土分41%, 土粒の比表面積18m<sup>2</sup>/g)をつめた<sup>1),2)</sup>。

昭和45~46年の冬は、凍結開始が11月下旬、完全融解が5月上旬で、最大積算寒度598°C·day、又最低気温は1月27日の-21.5°Cであった。プールAでは凍結初期に地面から霜柱が多く出たので、これをふみつけて平らにし、12月17日からの測定データについて解析を行なった。そのときの地下水位は地下25cm(昨年は79cm)であった。又、プールBでは、側面から出ているU字管に穴をあけ、水位が145cm(昨年、一昨年とも凍結開始時に31cmで、以後凍結が進むとともに下降した)以上にならないように設定した。その結果、凍結開始から1月6日までと、2月8日から3月21日までの2期間において、地下水からの水分の補給のない凍上がみられた。これらの結果を昨年や一昨年の結果と対比してみた。

11月30日、1月6日、2月27日、5月19日には、断面を作って、重量含水比や密度等の鉛直分布を求めた。これらの値と地下水位の変動から、未凍土内を通して凍結線へ移動する水分と、未凍土内の水分勾配を求め、両者の関係について検討を加えた。又、凍結線における熱平衡式について考察し、凍結時に凍らないで残る不凍水分量について推定をしてみた。

この冬は、細い電線(長さ20cm)を9本並べて、深さ10cmごとに地表面から80cmの深さまで埋めこみ、各電線間の電気抵抗を測定した。抵抗値は、土中の含水比の変化や、凍結の状況によって大きく変わることをみつけた。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第1143号

## II. 測定方法

昨年、一昨年と同じく、地面凍上量、地温分布、凍結深度、鉛直に地中に埋めた管の凍着凍上、地下水位等を冬期間継続してほぼ10日毎に測定を行なった。地下水位の測定にはプールAで自記記録を行なった。

地下水位は、プールAについては、凍結開始後は人為的な変更を加えなかった。プールBについては、下側端からプール外に取りつけられているU字ビニール管の下部に穴をあけ、プール内の地下水位が凍結前の地面から145 cmの位置より浅くならないように設定した。

又、プールAには、凍結前に、長さ20 cmの細い電線を9本、10 cm間隔に平行に並べて長方形(20 cm×20 cm)の枠に組みこんだものを、鉛直に埋めた。そして、一番上の電線がちょうど地面になるようにした。各電線端子に上から順に1から9までの番号をつけ(第4図参照)、それぞれにビニール被覆電線をつけて地上に取出した。1と2, 2と3, 3と4, 4と5, 5と6, 6と7, 7と8, 8と9の端子をそれぞれ直流電流を用いた電気抵抗計(タケダ理研 TR-6334)の、マイナスとプラスの端子に接続し(18 k $\Omega$ の測定抵抗範囲に指定)、1分を経たときの値をよみとった。水を含む土は誘電体なので、直流抵抗値は時間的に変化する。それで、相対的な値をとり出して抵抗値の冬期間の変化だけを見るという意味で、1分値をとるわけである。抵抗値は、土の含水量が少ないとふえ、又土中水が凍ってもふえる。従って、冬期間を通じての土中水の変化と凍結の状況を知ることが出来る。

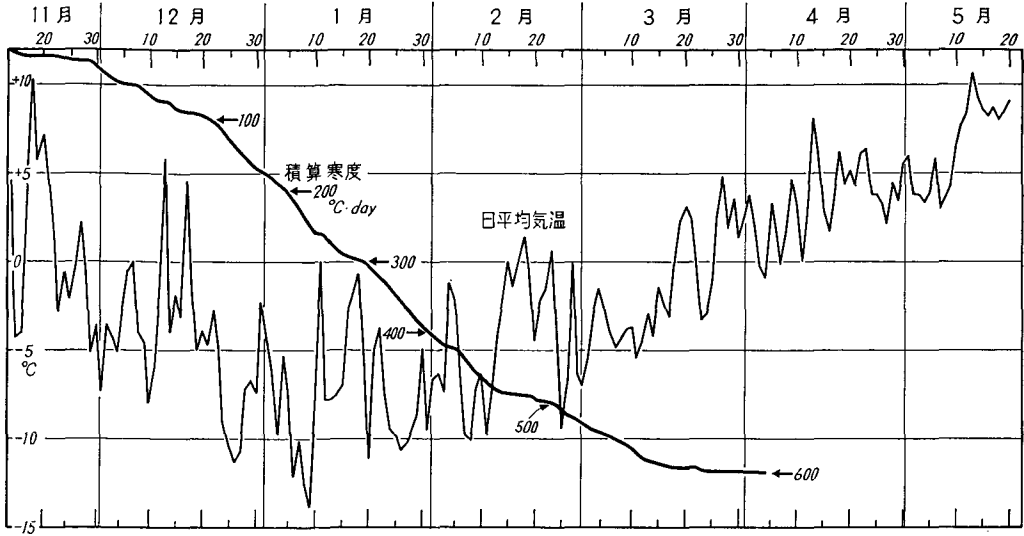
凍結前の11月30日、凍結後の1月6日、2月27日、融解後の5月19日に断面観測を行ない、試料を採取して、重量含水比、密度、土粒の比重等を測定した。これらの値から、土の中に含まれる土粒分と水分の体積割合を求めた

## III. 測定結果

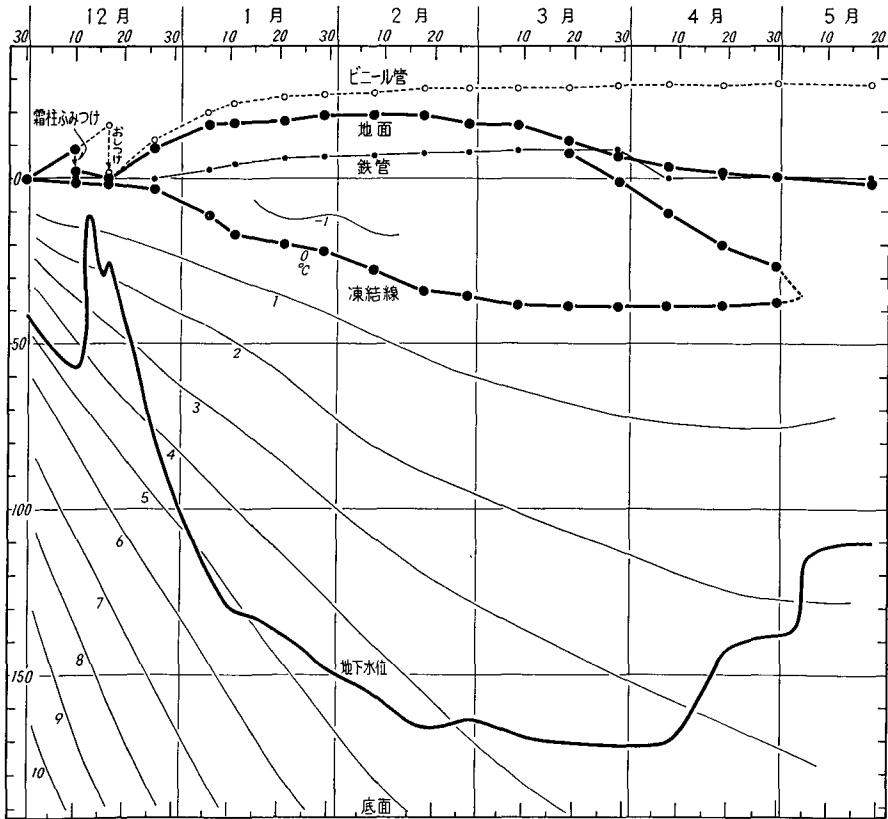
苫小牧演習林内で測られたこの冬の日平均気温と積算寒度の推移を第1図に示す。最低気温は-21.5°Cで、1月27日に現われた。積算寒度の最大は598°C·dayで、一昨年の711°C·day及び昨年の741°C·dayに比べてかなり少ない。暖かい冬であったといえる。

第2図にプールAにおける地面の凍上量、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を示す。図中の丸印は観測日に得られた値である。凍結開始は、気温のデータから11月下旬と推定される。11月30日の地下水位は41 cmであった。12月10日には、地面から霜柱が10 cm近くも伸び出ていた。以後の測定に不便なので、これをふみつけて平らにした。地面は11月30日よりも3 cmほど上がった位置になった。その後暖気があって地面がとけ、12月17日には、地面は再び元の位置になった。このときの地下水位は地下25 cmで、土の凍結は地下2 cmに達していた。又、すでに16 cmも凍上していたビニール管(外径7.6 cm、長さ1 m)を元の位置まで押しこめた。そして、12月17日以後を対象にして測定結果の解析を行なうことにした。

凍結、凍上が進むにつれ、地下水位も下がって行く。凍結線と地下水位とは、次第に離れて行くが、相互の距離は2月上旬に125 cmほどになってからは、以後ほぼその値を保つ。地



第1図 日平均気温と積算寒度，昭和45～46年冬期，苫小牧演習林内



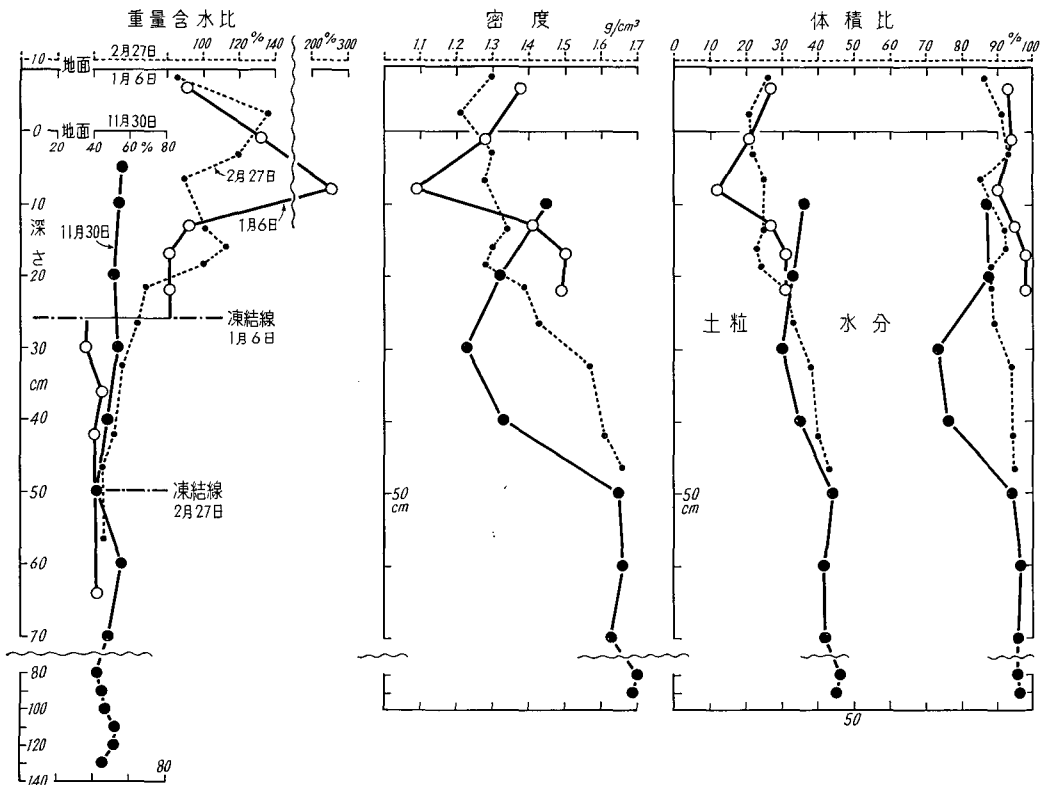
第2図 地面、ビニール管と鉄管の凍着凍上量，凍結線，地下水位及び地温の冬期間の変化，プールA，昭和45～46年冬期，苫小牧演習林内

下水位は3月下旬には最も深い172 cm (凍結前の地面からの深さ)に達した。凍結線は、3月末に最も深い39 cmに達したが、凍結層の厚さの方は、3月9日が最大の54 cmであった。地面凍上量は2月18日に最大の19 cmになり、以後沈下を続けた。2月下旬以後になると、日平均気温が0°C以下で凍結が進むにも拘らず、日中気温が0°C以上になることが多いので、地面が融解し沈下することもある。凍土に凍着しながら上昇するビニール管や鉄管では、融解による地面の沈下には関係せず、地面が隆起するときだけ、一緒にもち上がる。ビニール管の凍着凍上は4月中旬に最大の28.6 cmに達し、以後凍土の完全融解の時期までその値を保つ。又、鉄管は3月29日に、最大の8.8 cmに達し、その後は下降した。鉄管の凍上量の方が少なく、又下降も速いのは、重量の違いにもとづく<sup>3)</sup>。ビニール管の重量は1.1 kg、鉄管の重量は5.6 kgである。軽いビニール管では、土の凍上にほとんど遅れずに、凍上が起こる。

地面の融解は3月中旬から始まった。4月中旬から始まった凍結層下面での融解と相待ち、5月5日には完全融解したものと思われる。このことは5月5日に地下水位が急上昇したことから推定される。

プールAについて、積算寒度  $F^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$  と凍結層の厚さ  $D$  cm との関係を見ると、 $F=2.4\sqrt{D}$  で整理される。

第3図に断面観測の結果を示す。11月30日には地下水位が地面下40 cmで、地下水位より下では、重量含水比は86%であった。1月6日と2月27日には、11月30日に比べて、地面



第3図 断面観測の結果，プールA，昭和45～46年冬期，苫小牧演習林内

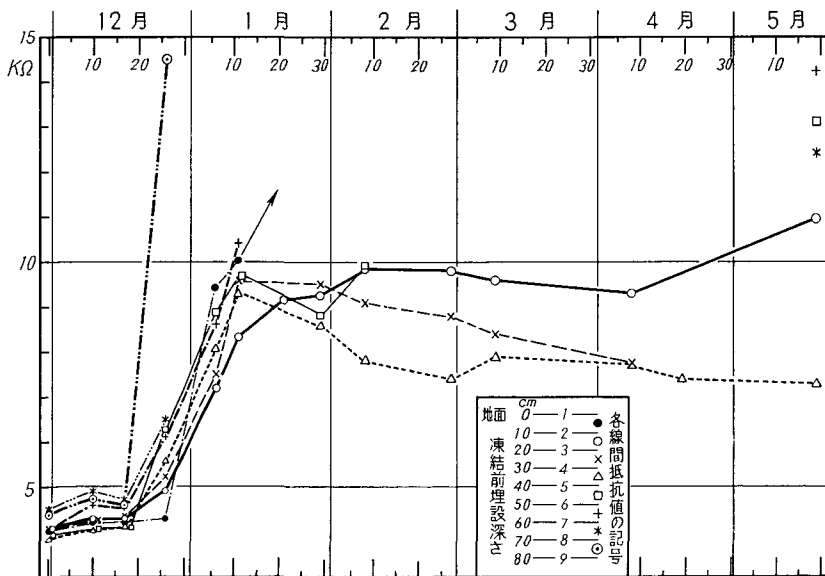
がそれぞれ 16 cm と 18 cm 凍上している。凍結線は 1 月 6 日が 11.5 cm, 2 月 27 日が 35 cm で、凍結層の厚さは、それぞれ 37.5 cm, 53 cm である。凍結後の重量含水比は地面付近では特に大きく 200% から 500% 近くにまで達した。これは凍結初期に霜柱が多く発生したためである。凍結線のすぐ下では、逆に凍結前よりも乾燥し、1 月 6 日の断面で 54%, 2 月 27 日の断面で 58% であった。

凍結前の土のなかに含まれる土粒分は、26~30%, 水分は 53~63%, 残りの空気分は 7~18% である。凍結後には、土粒分 7~24%, 水分 66~87% (凍土内に含まれる氷と不凍水とを合計して水分に換算した値) になる。残りの空気分は、凍土内に含まれる氷と不凍水との割合に関係するので、一義的にきめられないが、ほぼ数% である。又、土粒の比重は、2.54~2.65 であった。

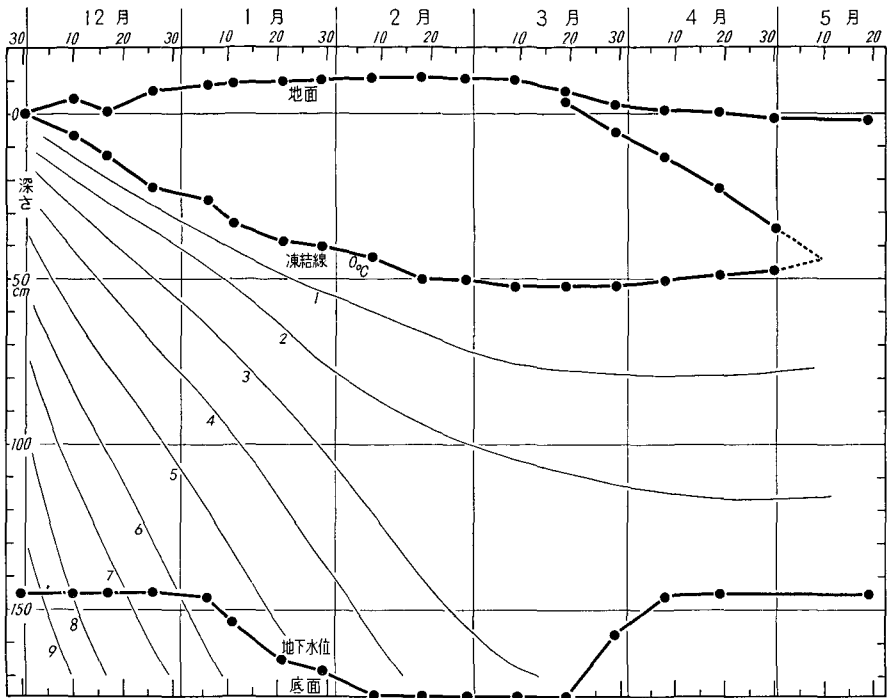
融解後 5 月 19 日の断面観測では、土がかなり乾燥はしていたが、地下 70 cm までの間で、重量含水比 52~58%, 密度 1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup>, 単位体積内に含まれる土粒分 34~40%, 水分 43~54%, 空気分 10~25% であった。

第 4 図に、地中に埋めた電線間の電気抵抗の 1 分値の変化を示す。各線間の土が凍らない間は、4~5 k $\Omega$ , 凍ってしまうと 10 k $\Omega$  前後になる。又、凍らないで水分が減少するときには、両者の中間の値をとる。現場の大きな凍上のため、電線を固定した棒がゆがんだり、又一番上の電線が 1 月中旬以降地上に露出するようなことがあって、不満足なデータになった。しかし、一応の傾向は掴めたと思う。来冬には、電源として交流を用い、抵抗値の絶対測定を行ないたい。

第 5 図にプール B の地面、凍結線、地下水位及び地温の変化状況を示す。地下水位が 145 cm より上らないようにしたため、はじめのうちは、地下水からの補給なしで凍上が起こる。



第 4 図 電線間の抵抗値の冬期間の変化。プール A, 昭和 45~46 年冬期, 苫小牧演習林内



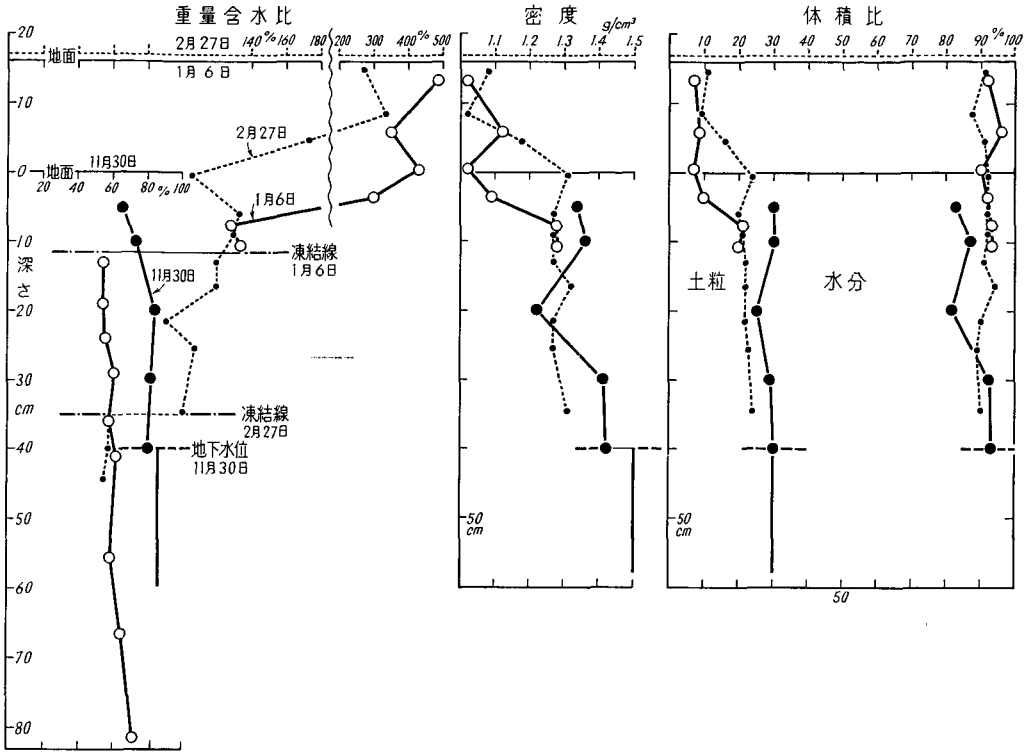
第5図 地面、凍結線、地下水位及び地温の冬期間の変化、プールB、昭和45~46年冬期、苫小牧演習林内

12月始めに地面に現われた霜柱は、地下水位の低いこともあって、4~5 cm にすぎなかった。12月中旬の日中の暖気で地面が融解し、12月17日の観測日にはもとの位置に戻っていた。しかし、凍結の方は13 cm にまで達していた。その後、凍上・凍結ともに進み、1月6日以後は145 cm の地下水位が下降を始めた。このときの凍結線と地下水位との距離は120 cm であるから、プールBの土の凍上では120 cm 離れた所から水を補給し得るということを示すわけである。1月6日からは、地下水から補給のある凍上になったが、2月8日には地下水位がプール底面に達し、地下水はなくなった。このときの凍結線と地下水位との距離は132 cm であるから、同じく132 cm 離れた所から水を補給し得たと言える。前の120 cm からこの132 cm までの値は、この土質の毛管上昇高にはほぼ等しい。<sup>4)</sup>

凍上量の最大は2月8日の11 cm、凍結が最も進んだのは3月上旬の52 cm である。又、凍結層の最も厚いのは、同じ3月上旬の62 cm である。積算寒度が昨年より小さいのに、厚く凍ったことは、凍上量の小さいこと(昨年は16 cm~22 cm に達した)に帰因する。凍上が大きいと、凍結線での潜熱発生が大きくなり、従って凍結の進行が遅くなる。3月中旬から地面の融解が始まり、地下水位も上昇を始めた。又、3月末からは凍結線でも下方からの地熱流で融解が始まり、5月10日頃には凍結層は完全に融解したと思われる。

積算寒度  $F^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$  と凍結層の厚さ  $D$  cm との間に、 $D=2.8\sqrt{F}$  の関係が得られた。

第6図に断面観測の結果を示す。1月6日と2月27日には、11月30日に比べて、地面は8.5 cm と10 cm 凍上している。凍結線は1月6日が26 cm、2月27日が50 cm で、凍結層の厚



第6図 断面観測の結果，プールB，昭和45～46年冬期，苫小牧演習林内

さは、それぞれ 34.5 cm と 60 cm である。凍結後の重量含水比は、地面近くでは特に大きいですが、プール A に比べるとかなり小さい。地下水からの補給なしの凍上であるためである。凍結線のすぐ下の未凍土の重量含水比は、1月6日が 37% で、上の凍土よりも、又凍結前よりもかなり小さい。しかし、2月27日には、56% で、上の凍土が凍結前と余り変わらない。

凍結前の土のなかに含まれる土粒分は 30～44%、水分は 41～58%、残りの空気分は数% である。凍結後には、土粒分 12～43%、水分（氷＋不凍水を水分として）52～78%、残りの空気分 数% である。又、土粒の比重は、2.55～2.67 であった。

融解後 5月19日の断面観測では、土がかなり乾燥していたが、地面から 80 cm までの間で、重量含水比 41～47%、密度 1.4～1.5 g/cm<sup>3</sup>、単位体積内に含まれる土粒分は 37～43%、水分は 44～47%、空気分は 11～20% であった。

#### IV. 凍結線への水分移動について

凍上現象は、土中の水分が下方の未凍土内を伝わって凍結線へ引きよせられ、そこで氷として析出するために起こる。この凍結線への水分の移動速度  $v$  (g/cm<sup>2</sup>-day) は、未凍土内の水分勾配  $\frac{\partial w}{\partial z}$  (g/cm<sup>4</sup>) の凍結線直下における値  $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$  と次の形で関係することが、昨年の観測でみつけられた。

$$v = k \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=D} - a \right\} \tag{1}$$

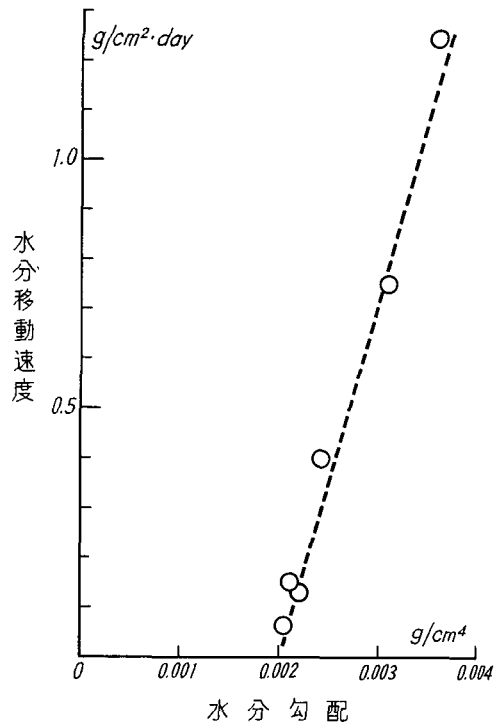
|       | 層                          | 凍 結 後              |                               |  | 凍 結 前           |                        |                        |  |     |
|-------|----------------------------|--------------------|-------------------------------|--|-----------------|------------------------|------------------------|--|-----|
|       |                            | 厚 さ<br>dD+dh<br>cm | 土 粒 分<br>V <sub>s</sub><br>cm | 水 分<br>M <sub>2</sub><br>g/cm <sup>2</sup> | 厚 さ<br>dD<br>cm | 体 積 比<br>含水比<br>w<br>% | 空 気 分<br>含有率<br>γ<br>% | 水 分<br>M <sub>1</sub><br>g/cm <sup>2</sup> |     |
| プール A | 12月17日凍結線から<br>12月26日凍結線まで | I                  | 14.7                          | 1.3  | 12.8            | 3.0                    | 53                     | 17   | 1.6 |
|       | 12月26日凍結線から<br>1月6日凍結線まで   | II                 | 13.6                          | 2.0  | 10.5            | 5.1                    | 43                     | 27   | 2.2 |
|       | 1月6日凍結線から<br>1月21日凍結線まで    | III                | 15                            | 3.3  | 10.5            | 10.5                   | 43                     | 27   | 4.5 |
|       | 1月21日凍結線から<br>2月8日凍結線まで    | IV                 | 7.7                           | 1.8  | 5.1             | 6.3                    | 43                     | 27   | 2.7 |
|       | 2月8日凍結線から<br>2月27日凍結線まで    | V                  | 8.3                           | 2.0  | 5.5             | 7.4                    | 44                     | 27   | 3.3 |
| プール B | 12月17日凍結線から<br>12月26日凍結線まで | I'                 | 16.5                          | 3.7  | 11.5            | 10.4                   | 34                     | 31   | 3.5 |
|       | 12月26日凍結線から<br>1月6日凍結線まで   | II'                | 4.7                           | 1.4  | 3.1             | 3.2                    | 33                     | 34   | 1.1 |
|       | 1月6日凍結線から<br>1月21日凍結線まで    | III'               | 13.8                          | 4.8  | 7.7             | 12.4                   | 41                     | 26   | 5.1 |
|       | 1月21日凍結線から<br>2月8日凍結線まで    | IV'                | 5.4                           | 2.1  | 3.0             | 4.8                    | 44                     | 21   | 2.1 |
|       | 2月8日凍結線から<br>2月18日凍結線まで    | V'                 | 7.1                           | 3.0  | 3.7             | 6.7                    | 50                     | 10   | 3.3 |

プール A の土では、 $k$  の値が  $560 \text{ cm}^2/\text{day}$ 、 $a$  の値が  $0.0018 \text{ g/cm}^4$ 、又プール B の土では、 $k$  の値が同じく  $560 \text{ cm}^2/\text{day}$ 、 $a$  の値が  $0.0023 \text{ g/cm}^4$  として求められた。

この冬の観測結果から、層をいくつかに分けて、凍結前後の水分状況、凍上量及び凍結線への水分移動速度  $v$  や、未凍土内の水分勾配の凍結線直下における値  $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$  を求めて第 1 表に示す。求め方は昨年の通りである。この冬は、プール A については、凍上量として、ビニール管の凍着凍上量をとった。前述のように、地面は冬の最中といえども、日中の暖気で多少融解し沈下することがあるので、凍上量としては、凍着凍上のビニール管の値をとるのが望ましいと言える。第 1 表のプール A の凍上量としては、ビニール管の凍着凍上量をとった。

$v$  と  $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$  の関係を、プール A について第 7 図に示す。その結果は、ほぼ次の式でまとめられる。

$$v = 700 \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=D} - 0.002 \right\} \quad (2)$$



第 7 図 水分移動速度と凍結線直下での水分勾配との関係

表

| 凍上量<br>$dh$<br>cm | 水分移動量<br>$M_2 - M_1$<br>g/cm <sup>2</sup> | 水分移動速度<br>$v$<br>g/cm <sup>2</sup> ·day | 凍結線から<br>地下水位ま<br>での距離<br>$L - D$<br>cm | 平均水分勾配<br>$\left(\frac{\partial w}{\partial Z}\right)_{z=D}$<br>$= \frac{\bar{v}}{L - D}$<br>g/cm <sup>4</sup> | 凍上率<br>$\xi \left( = \frac{dh}{dD} \right)$<br>% | 理想凍上率<br>$\xi' \left( = \frac{dh_1}{dD} \right)$<br>% | 空気分の増減<br>に伴う補正項<br>$\beta \left( = \frac{dh_2}{dD} \right)$<br>% |
|-------------------|---|---|---|--|--|---|---|
| 11.7              | 11.2                                      | 1.24                                    | 25~70                                   | 0.0036   | 390  | 409   | +7  |
| 8.5               | 8.3                                       | 0.75                                    | 70~105                                  | 0.0031   | 167  | 180   | -14   |
| 4.5               | 6.0                                       | 0.40                                    | 105~115                                 | 0.0024   | 43   | 64  | -20   |
| 1.4               | 2.4                                       | 0.13                                    | 115~128                                 | 0.0022   | 22   | 43  | -21   |
| 0.9               | 2.2                                       | 0.12                                    | 128                                     | 0.0021   | 12   | 34  | -20   |
| 6.1               | 8.0                                       | 0.89                                    | —                                       | (0.0035)   | 59   | 85  | -20   |
| 1.5               | 2.0                                       | 0.18                                    | —                                       | (0.0021)   | 47   | 69  | -25   |
| 1.4               | 2.6                                       | 0.17                                    | 120~126                                 | 0.0021   | 11.3   | 25  | -16   |
| 0.6               | 0.9                                       | 0.05                                    | 126~132                                 | 0.0016   | 12.5   | 22  | -15   |
| 0.4               | 0.4                                       | 0.04                                    | —                                       | (0.0019)   | 6  | 9   | -4  |

即ち、 $k$ として700 cm<sup>2</sup>/day、 $a$ として0.002 g/cm<sup>4</sup>の値をとる。この冬は、凍上量としてより正確なビニール管の凍着凍上量をとったこと、又凍結初期の地下水位が高かったため、水分移動 $v$ の値として大きな値が経験されたこと（今年 $v$ の凍結初期の値は1.24 g/cm<sup>2</sup>·dayであるのに、昨年の同時期では、0.61 g/cm<sup>2</sup>·dayにすぎなかった）が、(2)式をより妥当な式として評価を許すものである。

プールBについては、昨年と同じく凍上量の値として地面の値をそのまま採用した。第1表I', II', V'の層の凍上の場合には、地下水からの補給がないので、地下水位の変化から $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ を求めることは出来ない。しかし、III', IV'層については、 $v$ と $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ との関係はほぼ昨年<sup>2)</sup>の式<sup>2)</sup>をみます。 $v$ を引き起こす原因が $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ である<sup>5)</sup>という意味で、I', II', V'層についても昨年の式を適用し、その値を第1表に括弧をつけて示した。凍結初期は地下水からの補給のない凍上であるため、凍上量、凍結線への水分移動とも、昨年の場合の地下水位の高いときより、値が小さい。たとえば、II'層の $v$ は0.18 g/cm<sup>2</sup>·dayであるが、昨年同時期には0.45 g/cm<sup>2</sup>·dayであった。

## V. 凍結面における熱収支

一般に土が凍るとき、凍結面では次の熱平衡が考えられる。

$$k_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial z} \right)_{z=D} - k_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial z} \right)_{z=D} = Lv + L \frac{d(w - \alpha) D}{dt} \quad (3)$$

ここで、 $k_1$ と $k_2$ は、それぞれ凍土・未凍土の熱伝導率、 $T_1$ と $T_2$ は、それぞれ凍土・未凍土の温度、 $L$ は単位体積の水についての融解潜熱、 $v$ は凍結線へ移動して来る水分の流入速度、 $w$ は凍結直前に土中にある水分の体積含有比、 $D$ は凍結線の深さ、 $\frac{dD}{dt}$ は凍結線の進行速度であ

る。 $\alpha$ は、土粒子に吸着されている水分で、 $0^{\circ}\text{C}$ で自由水が凍っても、この水分は凍らない。従ってマイナスの符号がつく。 $\alpha$ の値は、凍上性の土で、土粒子の凍結前の単位体積当たり10~30%と言われている。

(3)式の左辺の凍土内及び未凍土内の熱流の凍結線における差が流入水の氷化の際の潜熱発生( $Lv$ )だけでまかなわれるときには、 $\frac{dD}{dt}=0$ となり、凍結線が停止し、レンズ氷(地表では霜柱)が発生する<sup>5)</sup>。

水分移動速度 $v$ は、凍結線直下の水分勾配 $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ と(1)式の関式で結びつく。しかし、飽和土の場合には、水分勾配がないので、 $v$ は0の筈であるが、実験によると、 $v$ がマイナス、即ち逆に水が排水されるとか<sup>6)</sup>、或は又、水頭差による水圧が凍結線に加わる場合には、 $v$ は未飽和土と同じくプラスになる<sup>7)</sup>ことが観測されている。

(3)の関係をこの冬の観測結果に適用してみよう。プールAの2月8日頃をみると、 $\left(\frac{\partial T_1}{\partial z}\right)_{z=p}=0.1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、 $\left(\frac{\partial T_2}{\partial z}\right)_{z=D}=0.043^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、 $v=0.13\text{ g}/\text{cm}^2\cdot\text{day}$ 、 $\frac{dD}{dt}=0.6\text{ cm}/\text{day}$ 、 $w=0.43$ である。土質・含水比の関係から<sup>8)</sup>、凍土の熱伝導率 $k_1=0.003\text{ cal}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$ 、未凍土の熱伝導率 $k_2=0.001\text{ cal}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$ 、又 $L=80\text{ cal}/\text{cm}^3$ を代入して、数値的に当たってみると、 $\alpha$ の値としてほぼ0.2が得られる。

凍上は、凍結面へ未凍土から水分が移動して来ることによることは間違いないが、凍上と水分移動との関係について検討してみよう。凍結線が1 cm進む間に起こる凍上量 $\xi\text{ cm}$ 、つまり凍上率 $\xi=\frac{dh}{dD}$ は、その間に移動して来る水分量 $\frac{M_2-M_1}{dD}$ 、凍結前にもっていた水分量 $w$ 、凍結時に不凍水として残る量 $\alpha$ との間に次の関係がある。

$$\xi = 1.09 \frac{M_2 - M_1}{dD} + 0.09(w - \alpha) + \beta \quad (4)$$

第1項+第2項は、いわば理想凍上量( $\xi'$ )とも言えるもので、第3項の $\beta$ は補正項である。これは空隙をうめたり、新しく作り出したりするために起こる。地面に出る霜柱の場合には、 $\beta$ はプラス、地中に出るレンズ氷の場合には、 $\beta$ はマイナスである<sup>9)</sup>。

$\beta$ の値は次のように求められる。凍結前の厚さ $dD$ の層内の空気分を $\gamma dD$ 、凍結後の厚さ $dD+dh$ の層内の空気分を $\delta(dD+dh)$ とすると、凍結による空気分の増減 $\delta(dD+dh)-\gamma dD$ が、凍結による土の膨脹に加わらねばならない。従って

$$\beta = \delta - \gamma + \delta \frac{dh}{dD} \quad (5)$$

不凍水量として先に得られた $\alpha$ の値0.2を用いて計算した理想凍上率 $\xi' = \frac{M_2 - M_1}{dD} + 0.09(w - \alpha)$ の値と、 $\gamma$ 及び $\delta$ の値から求めた補正項 $\beta$ の値を第1表の最右欄に示す。 $\xi = \xi' + \beta$ の関係はほぼみたされていると言えよう。

## VI. む す び

昨年や一昨年と異なる地下水状態について観測を行ない、凍上現象の基本原則である未凍土内の水分勾配にもとづく凍結線への水分移動をより広汎に適用出来る形で表現することが

出来た。又、この冬は、凍結線における熱平衡について考察を加え、凍結時に不凍水分として残る量を推定した。又、実際の凍上量と理想凍上量（元来ある水分と流入して来た水分から不凍水の分を差引いたものの凍結による膨脹）との違いが、土中の空気分の増減にもとづくことを数量的に確かめた。

現場の観測には、北大苫小牧演習林の皆様は大変お世話になった。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補助金によってまかなわれた。

### 文 献

- 1) 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**, 367-368.
- 2) 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.
- 3) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・田沼邦男・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.
- 4) ローヂェ 1963 土壌と水 (山崎不二男・長田昇・田淵俊雄訳). 東京大学出版会, 138 pp.
- 5) Arakawa, K. 1966 Theoretical studies of ice segregation in soil. *J. Glaciol.* **6**, 255-260.
- 6) 高志 勤・益田 稔 1971 上載荷重による凍上量の増減と土粒子間隙水収支について. 雪氷, **33**, 印刷中.
- 7) 木下誠一 未発表.
- 8) Иванов, Н. С. 1969 Тепло-и массоперенос в мерзлых горных породах. Академия Наук СССР, Сибирское Отделение, Институт Мерзлотоведения, Издательство НАУКА, Москва, 240 pp.
- 9) 田沼邦雄 1969 凍上の際の土中水分移動と間隙率との関係. 低温科学, 物理篇, **27**, 359-366.

### Summary

Observations of frost heaving in the two water-resistant basins, one constructed in 1968 and the other in 1969, were carried out in the winter of 1970~1971, too. In the winter, Basin A was filled by sandy clayish loam (consisting of 60% sand, 31% silt and 21% clay, and their average specific surface being 57 m<sup>2</sup>/g) and Basin B by clay (consisting of 28% sand, 31% silt and 41% clay, and their average specific surface being 18 m<sup>2</sup>/g). Heave amounts, soil temperatures at several depths, freezing depths, and water levels were measured on nearly every tenth day (Fig. 2 for A and Fig. 5 for B). Since the intensive growth of ice needles in the beginning of freezing made heave measurements difficult, the surfaces were tamped down to the original levels on Dec. 17. As seen from the figures, soil began to freeze around Nov. 30 and completely melted in early May. The freezing index calculated from daily mean air temperatures at a nearby meteorological station amounted to 600°C-day (Fig. 1). Pits were dug and samples of soil were taken at various depths on Nov. 30, Jan. 6 and Feb. 27 for the determination of vertical distributions of water contents (Fig. 3 for A and Fig. 6 for B). The period between Dec. 17 and Feb. 27 was divided into five intervals and the change of water content ( $M_2 - M_1$ ) in each layer where freezing took place in each interval was computed

with the aid of relations  $M_1 = dD \cdot w_1$  and  $M_2 = (dD + dh) w_2$ . In the relations,  $dD$  is the thickness of the layer before freezing,  $dh$  is an increase in the thickness during freezing, and  $w_1$  and  $w_2$  are volumetric water contents of the layer before and after freezing, which were computed from the data on the nearest available days. The changes and the same divided by the length of the interval, or the water migration rates  $v$ , were shown in Table 1, where for Basin B, as was in the previous paper (Kinosita *et al.* 1970),  $dh$  was taken equal to the surface heave amount during the interval. But the soil surface may melt and sink in the daytime so as to make the heave amount less than  $dh$ . In Basin A,  $dh$  was measured by the heave of a light plastic pipe which had been inserted deep into the soil. Hence, the computed values of water migration rate for A were considered more precise than those for B or in the previous paper. The migration rates in Basin A were expressed well by the previously suggested equation:

$$v = k \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=D} - 0.002 \right\}$$

with  $k$  equal to 700 (Fig. 7), which might be considered a more precise value than the previously given value 560.

As seen from Fig. 5, the water level in Basin B remained at a constant level (145 cm) until Jan. 6, when it began to sink and reached the bottom of the basin (176 cm) on Feb. 8.

It is well known that there remains some unfrozen water in frozen soil. If it is assumed that  $\alpha\%$  of original water remains unfrozen, following relations hold:

$$\begin{aligned} dh &= dh_1 + dh_2 \\ dh_1 &= \left\{ 1.09(M_2 - M_1) + 0.09M_1(1 - \alpha) \right\} \end{aligned}$$

and

$$dh_2 = \delta(dD + dh) - \gamma dD,$$

where  $dh$ ,  $dD$ ,  $M_1$  and  $M_2$  are those defined earlier, while  $\gamma$  and  $\delta$  are volumetric air contents before and after freezing. The best fit value of  $\sigma$  was searched for and found to be equal to 20. The comparison of the last three columns of Table 1, where the values of  $dh_1$  and  $dh_2$  were computed from the last two relations with  $\alpha=20$ , showed that the first relation was satisfied fairly well.