HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍上と地下水位との関係　II
Author(s)	木下, 誠一; 鈴木, 義男; 堀口, 薫 他
Citation	低温科學. 物理篇, 28, 325-336
Issue Date	1971-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18162
Type	departmental bulletin paper
File Information	28_p325-336.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Seiiti KINOSITA, Yosio SUZUKI, Kaoru HORIGUCHI, and Kunio TANUMA 1970 Change of Water Level During Frost Heaving II. *Low Temperature Science, Ser. A, 28.* (With English Summay p. 336)

凍上と地下水位との関係 II*

木下誠一・鈴木義男
堀口　薫・田沼邦雄
(低温科学研究所)

(昭和45年8月受理)

I. 緒　　言

凍上は，土中の水分が未凍土内を通って凍結線までひきよせられ，そこで氷として析出するために起る現象である。地下水位が浅ければ，この水分の補給が豊富で，凍上が大きく起る。地下水位は凍上現象に強く影響する。筆者等は，さきに[1]，地下水位と凍上との関係を調べるため，地下水位が他の原因で変化することのないように，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させた。試験は苫小牧の北大演習林内で行なわれた。昭和43～44年冬期における測定の結果，土の凍結が始まると，地面の凍上とともに，地下水位が下降し，地下水位と凍結線との距離は，1月末頃までは次第に大きくなって行くが，以後融解期まで，ほぼ一定の値(約1m)を保つことが解った。又，断面観測や，地下水位の下降から，凍結線における水分の移動速度を求めたところ，冬のはじめのうちは，0.25～0.31 g/cm²·day であったのが，次第に小さくなり，その後は0.18 g/cm²·day 位になった。

この冬(昭和44～45年冬期)は，測定を継続する一方，もう一つ新しいプールを作り，違う土質についても，測定をおこなった。昨年と同じく，地面の凍上量，地下水位，土中の温度分布などを冬期間継続して測定した。又，12月4日，1月19日，2月23日には，断面を作って重量含水比，密度の鉛直分布を求めた。これらの値から，未凍土内から凍結線への水の移動を求めた。又，この水分の移動速度が，未凍土内の水分分布の凍結線における勾配に依存すると考え，両者の関係に検討を加えた。

II. 測 定 方 法

さきに，苫小牧の北大演習林内に，凍上と地下水位との関係をみるための，野外実験用のプール(内面の広さ3m×3m，深さ1m 63cm)を作った。そこに，凍上性の土を埋めこんで測定をおこなったわけであるが，今回，その近くに，もう一つ新しいプールを作って，違う土質の土を埋めた。プールの寸法は，内面の広さが3m×3m，深さ1m 80cmで，厚さ10cmのコンクリートで出来ている。側面のコンクリート壁の上に，更に高さ15cmの木の板がある。コンクリートに直接日が当ってあたたまるのを防ぐため，板を立てたのである。このプールの中

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1082号

に実験用の土をつめた。従って，プール底面から地面までは，195 cm である。プール内の水位は，プール側面の底から取りつけられたビニール管（直径 20 cm）内の水位から求められた。装置の詳細は，昨年作られたものと同じであるので，文献 1) の第 1 図を参照されたい。便宜のため，新しいプールをプール A，古いプールをプール B と，今後呼ぶことにする。

両プールに埋められた土の土質試験の結果を次の第 1 表に示す。

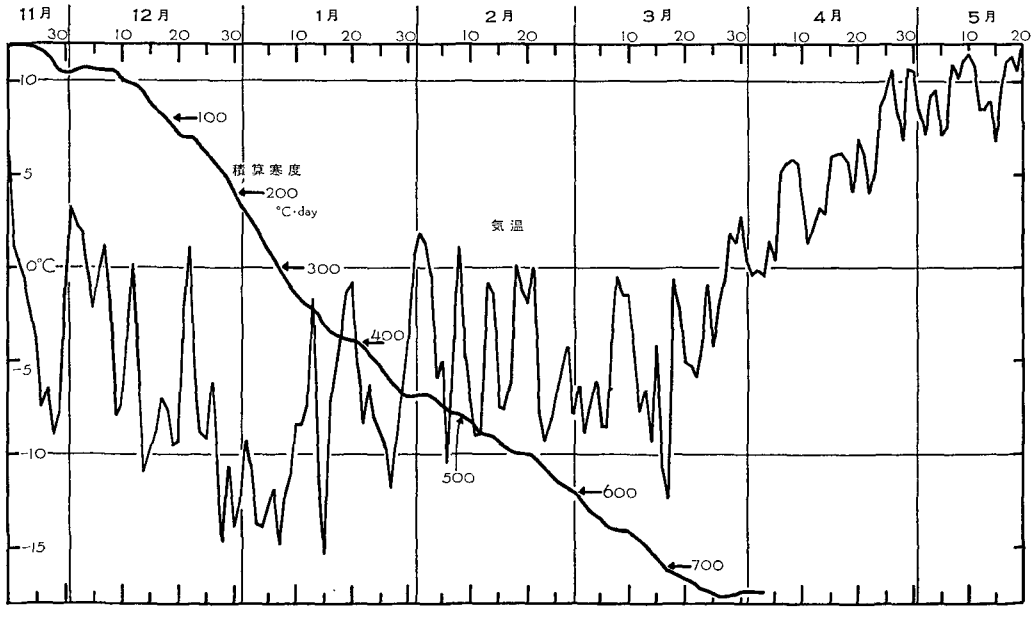
第 1 表

	土質名	粒度分布 (%) 砂分 (2～0.05 mm)	シルト分 (0.05～0.005 mm)	粘土分 (0.005 mm 以下)	土粒の比重	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数	透水係数 (cm/sec)	土粒の比表面積 (m^2/g)
プール A (新)	砂質粘土ローム	60	19	21	2.54	46.1	38.1	8.0	2.87×10^{-4}	57
プール B (旧)	粘土	28	31	41	2.55	30.6	26.4	4.2	1.90×10^{-4}	18

プール A の新しい土は，粒径の大きい砂分を割合多く含むが，比表面積が非常に大きい。霜柱がよく出る土で，凍上性も強い。

プール B では，昨年うめた粘土が圧密され，地面が 3 cm 沈下した。今回，その上に 15 cm だけ新しい土を埋めたした。従って，プール底面から凍結前の地面までの距離は，175 cm である。

凍結深度計[2]，凍着凍上量測定用の鉄管，ビニール管（外径 7.6 cm，うめこみ深さ 95 cm），地面凍上量測定用板，カールソン温度計を，昨年と同じく設けた。ただ，温度計は，プール A は，地面から 10, 20, 40, 60, 80, 100, 145, 195 cm に，又，プール B では，地面から 10, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 175 cm にすえられた。このうち，プール A では，10 cm から 100 cm までの



第 1 図　日平均気温と積算寒度，昭和 44～45 年冬期苫小牧演習林内

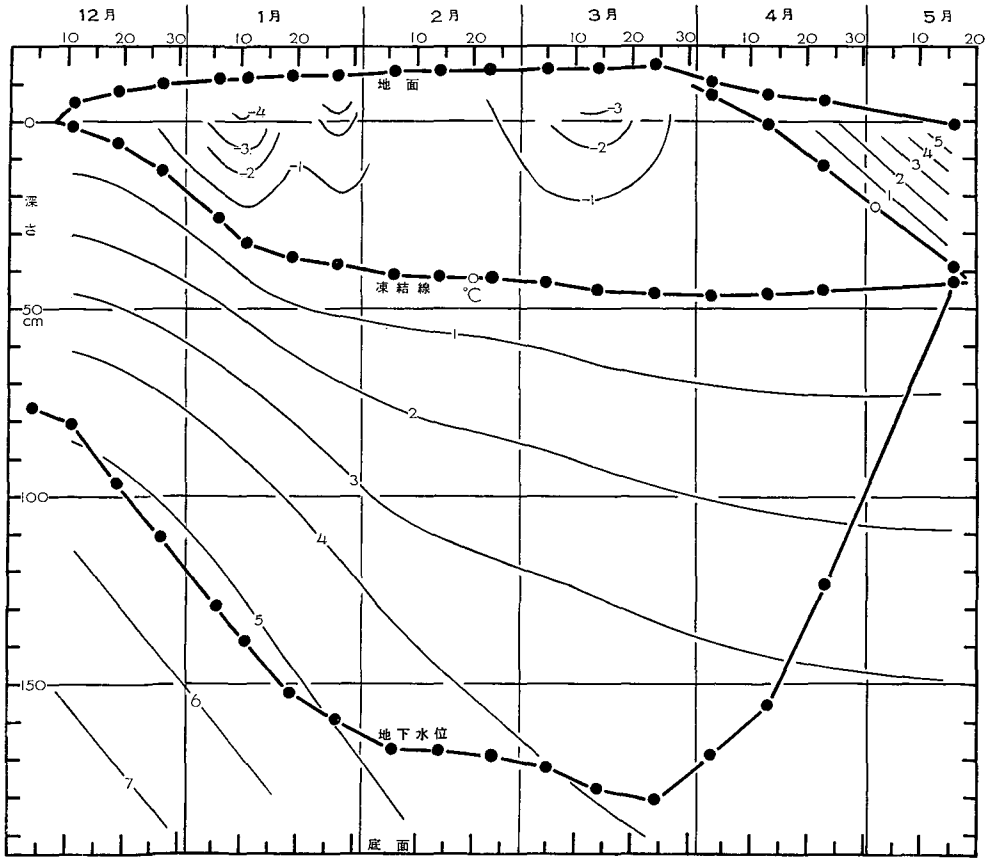
6本，又，プールBでは，10 cmから120 cmまでの7本は，それぞれ先端部を外径7.6 cmのビニール管の所定の穴にはめこんで埋められた。従って，地面の凍上とともに，このビニール管も多少浮上する。地面からの深さをその分だけ補正して，地温の分布を求めた。

12月4日以来，ほぼ10日おきに現地に赴き，凍上量，温度分布，凍結深度，地下水位等の測定をおこなった。試験場所の上に積雪がある場合には，これを完全に除いて，出来るだけ寒気が直接地面に触れるようにした。プールBには，自記水位計をとりつけ，地下水位の自記記録をおこなった。

凍結前の12月4日に断面を掘って重量含水比の分布を測定した。又，1月19日と2月23日には，凍った土を掘り起し，断面を作って，重量含水比，現場密度[3]，土粒の比重を測定した。

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−24.6℃で，1月4日，5日，15日に現われた。1月末から2月はじめにかけての暖気が特に目立つ。2月1日には，最高気温が+4.2℃にもなった。積算寒度は，3月27日に最大の



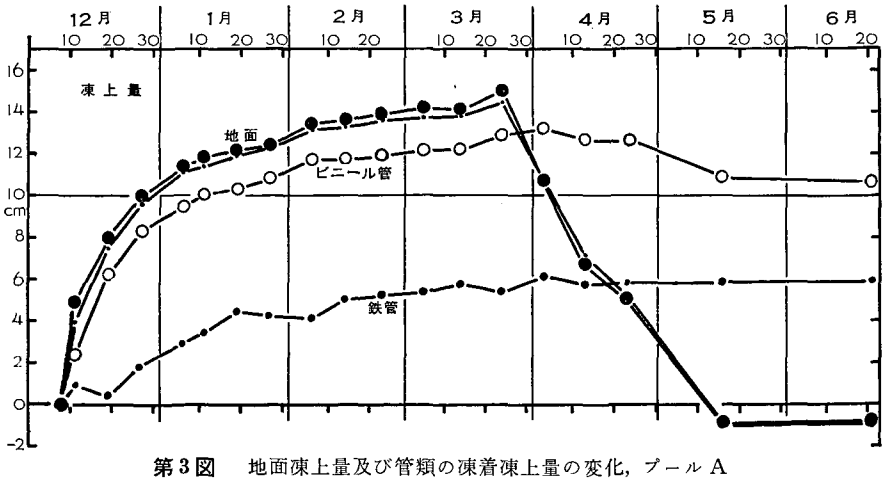
第2図 地面，凍結線，地下水位及び地温の冬期間の変化，プールA，
地温は地面近くを省略

740°C·day に達した。昨年の最大 711°C·day (3 月 19 日) に比べると，いくらか寒いと云える。

第 2 図に，プール A における地面凍上量，凍結深，地下水位，地温分布の推移を示す。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 12 月 8 日と推定した。このときの地下水位は地面下 79 cm である。凍上，凍結が進むにつれ，地下水位もさがって行く。凍結線と地下水位との距離は，次第に大きくなって行くが，1 月下旬に 125 cm ほどになってからは，以後ほぼその値を保つ。3 月 24 日には，最も深い 181 cm (凍結前の地面からの距離) に達した。以後融解期に入ってからは急上昇した。凍結線は 4 月 3 日に，最も深い 47 cm に達した。又，凍上量は 3 月 24 日に最大の 15 cm になり，以後融解とともに地面は沈下した。地面から凍結線までの間の距離，つまり凍結深の最大は，3 月 24 日の 61 cm である。地面からの融解による凍結線の下降速度は 0.8～1.2 cm/day，又，凍結層下面からの融解による凍結線の上昇速度は，ほぼ 0.1 cm/day であった。5 月 20 日には凍結層は完全に融解したようである。凍土内の地温の等温線の変化から，1 月 10 日ごろ，1 月下旬，3 月上旬から中旬にかけて，寒気があったことが解るが，事実第 1 図の気温の曲線からもうかがえる。

一般に，積算寒度 F°C·day と凍結深 D cm との関係は，$D=\alpha\sqrt{F}$ の型で整理される。この係数 α は，土質，凍上の度合等の条件で異なるが，このプール A の場合，α の値はほぼ 2.3 である。

第 3 図に，プール A で測定された地面の凍上量と，地中に鉛直にうめられたビニール管と鉄管の凍着凍上量のグラフを示す。地面の凍上量は，2 点で測定されたが，両者の測定値はほぼ同じであった。冬のはじめ，12 月中旬までの凍上速度は極めて大きい。これは，この土が非常に霜柱を発生し易い土であるためで，事実表層近くには，2～5 cm の霜柱が各所にみられた。管はビニール管の方が鉄管より凍上した。北見における観測によると[3]，管の重量が小さいうちは，ビニール管の方が鉄管よりよく凍上する。又，管の重量が小さいほどよく凍上する。この試験では，ビニール管が 1.1 kg，鉄管が 5.6 kg なので，管の種類の差の他に，重量の差も加わって，凍上量に大きな差が現われたわけである。融解期に入ると，地面は沈下を始めるが，管類はほとんど沈下せず，結局浮き上った形になってしまう。

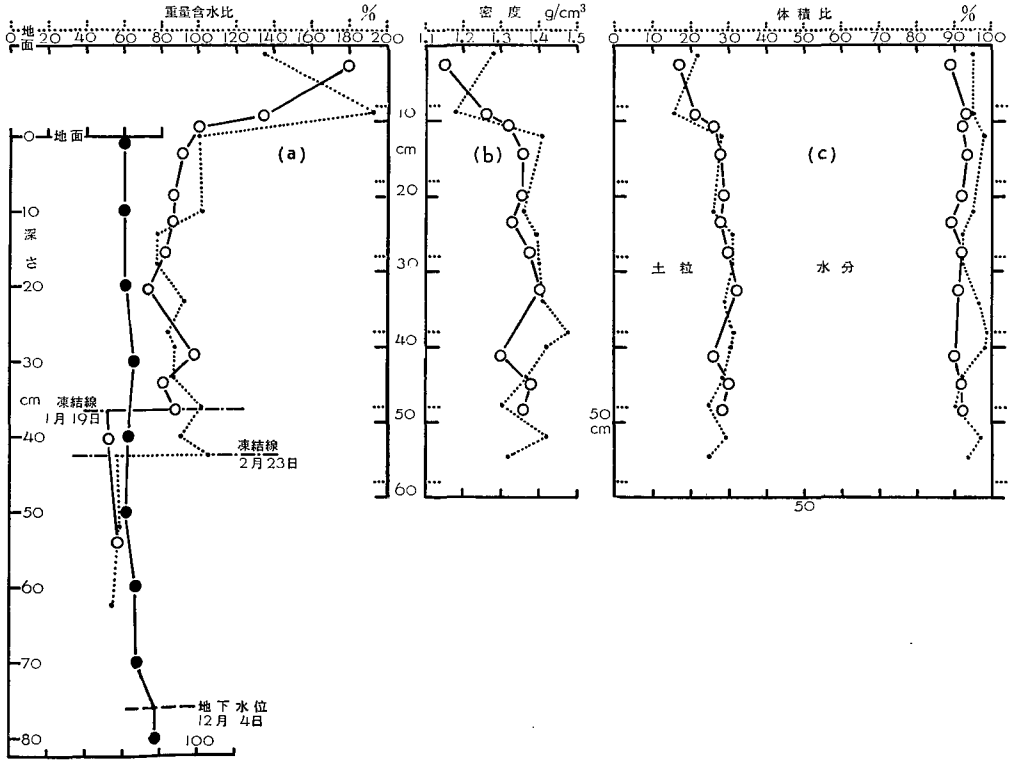


第 3 図 地面凍上量及び管類の凍着凍上量の変化，プール A

第4図に断面観測の結果を示す。(a) は重量含水比で，12月4日（黒丸），1月19日（白丸），2月23日（点）における測定値を示す。12月4日には地下水位が地面下77 cmで，地下水中では，含水比は78%であった。1月19日，2月23日には，地面が凍結前の12月4日に比べて，それぞれ12 cmと14 cm凍上しているので，深さの基準の線をそれぞれそれだけ上げてグラフに示した。凍結深は1月19日が49 cm，2月23日が56 cmであった。凍結前の含水比が60%前後であるのに，凍結後はほとんどが80%以上である。特に，霜柱を含む表層近くでは130～195%にも達する。又，凍結線直下では，逆に凍結前よりも乾燥し，1月19日の断面で52%，2月23日の断面で55%であった。

第4図 (b) は，1月19日と2月23日の現場密度で，含水比の大きい表層近くを除くと，1.25～1.4 g/cm^{3}である。現場密度の測定には，試料をケロシンに浸して秤量する浮力法を用いた[3]。

第4図 (c) は，重量含水比，現場密度，土粒の比重の値から計算された凍土内の土粒分と水分の体積含有比を示す。凍土内には，土粒，不凍水，氷，空気が含まれるが，不凍水と氷の分との割合を決めることが出来ないので，ここでは，氷の分も水に換算して，水分の総計で表し



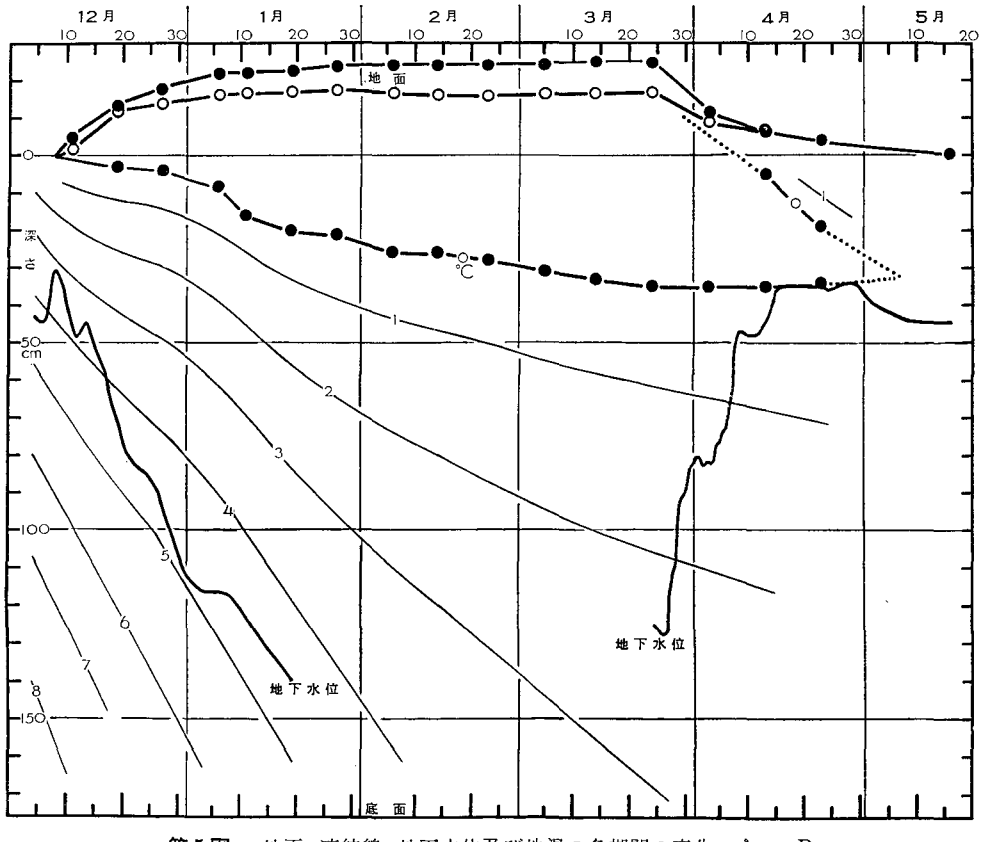
第4図　断面観測の結果，プールA

(a) 重量含水比，昭和44年12月4日と昭和45年1月19日，2月23日，地面は1月19日には12 cm，2月23日には14 cm凍上
(b) 現場密度
(c) 凍土内の土粒と水分の体積比

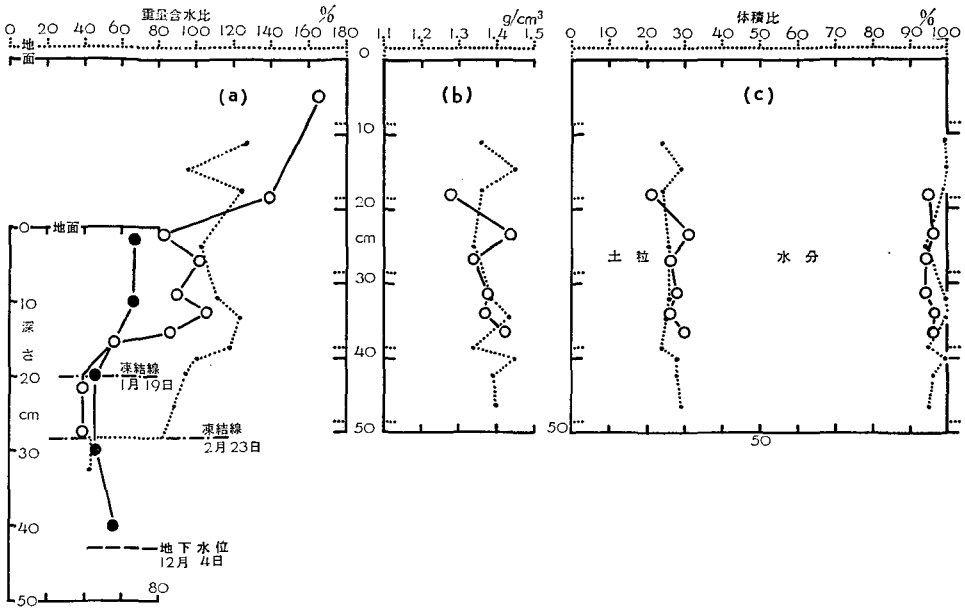
た。求め方は文献3)による。1月19日，2月23日とも，土粒分は，表層近くが15～20%，他は25～30%，又水分は全層とも60～70%である。

第5図にプールBの地面，凍結線，地下水位及び地温分布の変化状況を示す。地下水位については，1月下旬から3月下旬までの記録に失敗した。凍結開始の12月8日には，地下水位は地面下31 cmであった。以後，地下水位はさがり，凍結線との距離も次第にはなれて行く。1月下旬では130 cmになった。これは昨年の最大100 cmよりも大きい。土がそれだけ圧密されてより深い所から水分が上昇するのであろう。地面の凍上量は2点で測られた。冬の始めにいっぺんに10 cm以上も地面が上ったが，これは，表層に新しく盛った土のなかに出来た霜柱によるものである。新しい土の底15 cmまで凍結線が達したのが1月10日すぎで，その頃すでに地面は，16 cm, 22 cmと凍上していた。地面凍上量の2点の値に大きな差があるのは，場所によっての霜柱の出来方の違いにもとずく。一般に土質の違いがあると，その境界に氷の析出が顕著に起るようである。

凍結線は3月24日に最深の35 cmに達した。又凍上量は3月24日に25 cm，17 cmと最大に達した。又凍結深の最大は3月24日の60 cm，52 cmである。凍結層のうち表層近くのかなりの部分が霜柱であるため，積算寒度と凍結深との一般関係をあてはめるのは適当でない。



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
地温は凍土内省略



第6図 断面観測の結果，プールB

(a) 重量含水比，昭和44年12月4日と昭和45年1月19日，2月23日，地面は1月19日に22.5 cm，2月23日に23.9 cm凍上
(b) 現場密度
(c) 凍土内の土粒と水分の体積比

3月24日以後は融解が始まり，結局5月7日頃に凍結層は完全に融解したようである。これはプールAに比べて約2週間も速い。凍結層の表層近くが，空気を多く含み，実質が氷だけの霜柱であったため，凍結の進行を抑制し，凍結深を減らす一方，融解も速いことにもとずく。地面からの融解による凍結線の下降の速度は1.0～1.3 cm/dayで，プールAよりも速い。又凍結層下面からの融解による凍結線の上昇速度は0.02～0.2 cm/dayであった。

第6図にプールBにおける断面観測の結果を示す。記号は第4図と同じである。地面は1月19日，2月23日にそれぞれ22.5 cm, 23.9 cm凍上している（断面観測の地点に近い地面凍上量をとった）ので，それだけ深さの基準をあげた。凍結前の含水比が45～68%であるのに，凍結後はほとんど80%以上である。しかし，凍結線直下では，逆に減少する。1月19日の断面で40%，2月23日の断面で43%である。現場密度は1.28～1.45 g/cm³，又土粒分の体積含有比は22～31%，水分の体積含有比は65～70%である。

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，凍結線へひきよせられ，そこで氷として析出するために起る。この凍結線への水分の移動速度 v (g/cm²·day) は，未凍土内の水分分布の勾配 $\frac{\partial w}{\partial z}$ (g/cm⁴) の凍結線直下における値 $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ に比例すると考えられている[4]。すなわち

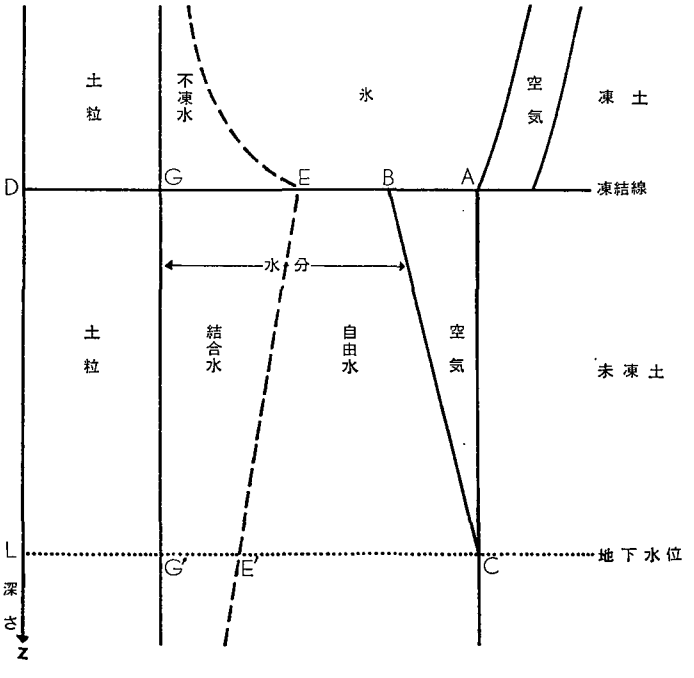
$$v = k\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D} \qquad (1)$$

k は水分移動係数 (cm²/sec) とも云われる常数で土質に依存する。又，w は未凍土 1 cm³ 中の水分量 (g/cm³)，z は凍結前の地面から鉛直下方にとられ (cm)，D は凍結前の地面から凍結線までの距離 (cm) を表わす。

筆者等の野外実験においてこの関係がみたされるかどうか検討してみよう。凍上している土の断面でどのような水分分布をしているかを，模式的に図で表現したのが第 7 図である。上層の凍土は，土粒，不凍水，氷，空気からなり，又下層の未凍土は，土粒，水 (結合水と自由水)，空気からなる。それぞれが占める体積割合の鉛直分布を模式的に曲線で示している。土のしまり方が一様ならば，凍土，未凍土とも土粒分は同じである。凍土内の不凍水は凍結線で 20～30% を占めるが，上方になって 0°C より低い温度になるにつれ，急に減少する[5]。氷の部分は体積増大つまり凍上に直接関係する部分である。一般に上層ほど多い。空気の分については，はっきりした傾向は解っていない。

未凍土内では，水分は凍結線直下で，凍結線直上の (水＋氷) 分の $\overline{GA}$ よりかなり少ない $\overline{GB}$ である。凍結線直下の未凍土の含水比が小さいことは多くの実験例で確かめられている。凍結線より深くなるにつれ，水分量はふえて地下水位 $z=L$ のところで飽和の値 $\overline{G'C}$ になる。未凍土内の水分には，土粒に結合されている部分と自由水の部分とがある。結合水は温度が高いほど少ないから，その分布状況は，模式的に EE′ の線で表されるであろう。空気の分は，凍結線直下の $\overline{AB}$ から次第に減って地下水位で 0 になる。昨年の観測によると[1]，この減り方は直線的とみなしてよい。

凍結線を境にしての水分量の差 $\overline{AB}$ だけが，下方の未凍土から凍結線へ移動した水分であ



第 7 図　凍上している土のなかの水分分布の模式図

第 2 表

層		凍結前の厚さ dD (cm)	凍上量 dh (cm)	凍上率 $\frac{dh}{dD}$	凍結後 土粒部分 V_s (cm)	凍結後 土粒部分 M_s (g/cm²)	凍結後 水分 M_2 (g/cm²)	凍結前 含水比 W_1 (%)	凍結前 水分 M_1 (g/cm²)	水分移動量 M_2-M_1 (g/cm²)	水分移動速度 v (g/cm²·day)	凍上速度 (cm/day)	r (g/cm³)	凍結線から地下水位までの距離 $L-D$ (cm)	$\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ (g/cm⁴)
プ　ー　ル　A															
表面から 12月24日凍結線まで	I	10	9	0.9	3.8	9.6	13.6	40	3.8	9.8	0.61	0.56	0.24	87	0.0028
12月24日凍結線から 1月1日凍結線まで	II	10	1.5	0.15	3.3	8.4	7.1	50	4.2	2.9	0.36	0.19	0.24	98	0.0025
1月1日凍結線から 1月9日凍結線まで	III	10	0.9	0.09	3.3	8.3	6.6	52	4.3	2.3	0.29	0.11	0.24	103	0.0023
1月9日凍結線から 1月19日凍結線まで	IV	6	0.6	0.10	1.9	4.8	4.1	52	2.5	1.6	0.16	0.06	0.26	111	0.0023
1月19日凍結線から 2月23日凍結線まで	V	6	1.9	0.32	2.0	5.0	5.4	54	2.7	2.7	0.077	0.054	0.22	123	0.0018
プ　ー　ル　B															
12月29日凍結線から 1月7日凍結線まで	I′	5	2.5	0.5	1.8	4.6	5.3	37	1.7	3.6	0.36	0.25	0.31	99	0.0031
1月7日凍結線から 1月11日凍結線まで	II′	5	0.5	0.1	1.6	4.0	3.6	46	1.8	1.8	0.45	0.13	0.31	108	0.0029
1月11日凍結線から 1月19日凍結線まで	III′	5	0.8	0.16	1.6	4.1	3.9	40	1.7	2.2	0.24	0.09	0.34	114	0.0030
1月19日凍結線から 2月23日凍結線まで	IV′	8	1.3	0.16	2.7	6.9	6.1	43	3.0	3.1	0.089	0.037	0.29	126	0.0023

る。この水分は一般には未凍土内を自由水の形で移動して来るものと思われる。しかし，最近の堀口の実験例では[6]，結合水でも移動可能の部分がかなりあることが推定されている。

移動した水分量は次のようにして求められる。今厚さ dD の層（そのうち土粒分 V_s，水分 V_w，空気分 V_a）が凍って $dD+dh$（dh は凍上量）の厚さの層（そのうち土粒分 V_s，水分 V_w'）になったとする。凍結後の水分量 M_2 は，$M_2=V_w'\rho_w$（ρ_w は水の密度），又，土粒分の質量 M_s は，$M_s=V_s\rho_s$（ρ_s は土粒の密度），又，凍結前の水分量 M_1 は，$M_1=M_sW_1$（W_1 は重量含水比）で与えられる。$\frac{V_s}{dD+dh}$（$=p$ とする）と $\frac{V_w'}{dD+dh}$（$=q$ とする）は，それぞれ第4図(c)，第6図(b)で求められている。又，W_1 については，プールAで1月19日が52%，2月23日が54%，又プールBで1月19日が40%，2月23日が43% と求められているので，M_2, M_1 を計算することが出来る。

今，プールAとプールBについて，次の第2表に示されるように断面をそれぞれ，5層と4層に分けてみよう，プールBの最上層は，霜柱を多く含むので，一応考察から外した。IV, V, III′, IV′ 層については，そのすぐ下の未凍土の重量含水比が上述のように測定されているので，これを凍結前の重量含水比 W_1 とみなして，M_2, M_1 及び水分移動量 M_2-M_1，又水分移動速度 v を求めた。

未凍土内の水分勾配の凍結線直下における値 $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ は，第7図で $\frac{\overline{AB}}{\overline{AC}}$ 表される。$\overline{AB}$ に相当する水分量を r(g/cm³) とすると，r は $\frac{V_a}{dD}\rho_w$ で与えられる。一方，$\frac{V_a}{dD}$ は次のようにして求められる。

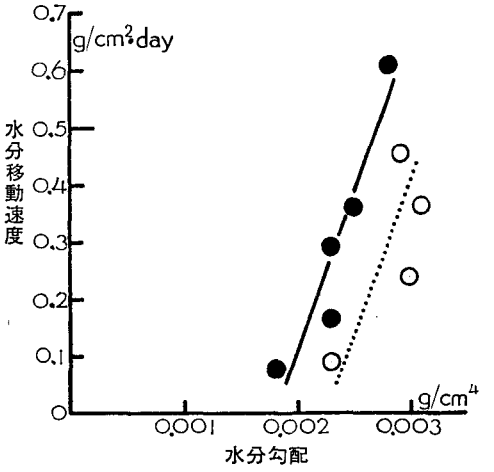
$$\frac{V_a}{dD}=1-\frac{1}{dD}(V_s+V_w)=1-\left(1+\frac{dh}{dD}\right)p\left(1+\frac{\rho_s}{\rho_w}W_1\right)$$

又，$\overline{AC}$ は $L-D$ に等しい。

IV, V, III′, IV′ 層について r の値を求めたところ，それぞれ 0.26, 0.22, 0.34, 0.29 であった。他の層については，W_1 を求めてないので，r を計算することは出来ない。ここで，凍結線直下の r がいつでもほぼ一定と仮定する。プールAについて 0.26 と 0.22 の平均 0.24 を採用し，プールBについて 0.34 と 0.29 の平均 0.31 を採用した。そしてこの r 値から W_1 を求め，更に，M_2, M_1, v 等を計算して第2表に示した。

各層について，凍結線を通って移動する水分の速度 v(g/cm²·day) と，凍結線直下における水分勾配 $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}=\frac{L-D}{r}$(g/cm⁴) とを取出して，次の第8図のグラフに示した。

v と $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ とは，先に述べた(1)式のような比例関係ではなく，次の式でまとめられ



第8図　水分移動速度と凍結線直下での水分勾配との関係，黒丸印：プールA，白丸印：プールB

る。プールAについて

$$v = 560\left\{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D} - 0.0018\right\} \qquad (2)$$

プールBについて

$$v = 560\left\{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D} - 0.0023\right\} \qquad (3)$$

上の関係は，水分勾配がある値以下では凍結線への水分移動がないことを意味する。この値とは，凍結ということに関係なく，たとえば毛管上昇で出来る水分勾配を示すものと思われる。その値は新プール(A)で0.0018 g/cm^4，又旧プール(B)で0.0023 g/cm^{4}である。この分を引いた残り((2), (3)式の{ }のなか)が有効水分勾配といえる。従って，同じ水分勾配なら，プールAの方が有効水分勾配が大きい。従って，水分移動も大きくなり，より凍上性ということになる。プールAの土の方が比表面積が大きいが，これは，比表面積の大きい土ほど土粒子の表面を動く水が多く，従って凍上性であるという考えと一致する[5]。

(2), (3)式の係数560 cm^2/dayが水分移動係数である。C.G.S単位では，6.5×1.0^{-3} cm^2/secになる。Жесткова の実験[7]では，$3\times10^{-5}\sim10^{-3}$ cm^2/secで，筆者等の値に比べると小さい。

第2表に示されるように，水分移動速度は，冬のはじめは大きいが，次第に小さくなって行く。このことは凍上速度についても云えることである。しかし，凍結線へ移動した水分だけ凍上が起っているのではなく，実際の凍上速度は，水分移動速度の25～90%である。田沼の実験[8]によると，未飽和土の場合，凍結線へ移動した水分が凍ること，及び土が元来もっていた水分が凍ること，これらによる体積膨脹に比べて，実際の凍上はその30～60%にすぎない。

V. むすび

凍上と地下水位との関係を，今回は，土質の違う2種類について調べた。特に，凍結線への水分移動速度と，凍結線直下における水分勾配との関係に検討を加えた。そして，水分移動を支配する有効水分勾配があることをみつけた。又，移動係数として6.5×10^{-3} cm^2/secが求められた。凍結線へ水分をひきよせる原動力については，依然として不明な点が多いが，移動の機構そのものについては，かなり明らかになったと云えよう。

装置の設定や現場の観測に際し，北大苫小牧演習林の皆様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**, 367-378.

2) 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.

3) 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.

4) Достовалов, Б. Н. и Кудрявцев, В. А. 1967 Общее мерзлотоведение. Издательство Московского Университета, Москва, 404 pp.
5) Ананян, А. А. 1966 Оценка толщины слоев незамерзшей воды в мерзлых горных породах. Мерзлотные Исследования, вып. VI, Издательство Московского Университета, Москва, 221-228.
6) 堀口 薫 1970 粉体の結晶構造と氷晶分離能. 低温科学, 物理篇, **28**, 345-358.
7) Жесткова, Т. Н. 1966 Криогенные текстуры и льдообразование в рыхлых отложениях. Издательство ≪НАУКА≫, Москва, 108 pp.
8) 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

Frost susceptible clay of 18 m^2/g of a specific surface area was laid out in a water resistant basin (B) in 1968, at Tomakomai, Hokkaido. In 1969 one more basin (A) was constructed nearby and filled with another frost susceptible sandy clayish loam of 58 m^2/g of a specific surface area. In the winter of 1969–1970, field observations of frost heaving of the soils were carried out 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 depths, the water levels and the ground temperatures at several depths were measured on every tenth day from Dec. 4 to May 16. The results are shown in Figs. 2 and 5.

On Jan. 19 and Feb. 23 pits were dug in the ground and samples were taken from several layers. The moisture content and the density, and the density of the soil particles were measured (Figs. 4 and 6). Based on these data amount of moisture transfer through a freezing front from below were calculated and given in Table 2 (M_2-M_1).

It has been considered that the rate of moisture transfer through a freezing front v is proportional to the moisture gradient immediately below the freezing front $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$; that is, $v=k\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ However, according to our observations the relation between v g/cm²·day and $\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}$ g/cm⁴ is expressed by the following equation; $v=k\left\{\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)_{z=D}-a\right\}$, where k is independent of the type of soil ($k=560$ cm²/day), while a seems to decrease with the increase in the specific surface area of the soil ($a=0.0018$ g/cm⁴ for A and $a=0.0023$ g/cm⁴ for B).