



Title	苫小牧における凍上観測（昭和51年～52年冬期）：初期地下水位の影響
Author(s)	木下, 誠一; 鈴木, 義男; 堀口, 薫; 福田, 正己; 井上, 正則; 武田, 一夫
Citation	低温科学. 物理篇, 35, 307-319
Issue Date	1978-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/18347
Type	bulletin (article)
File Information	35_p307-319.pdf



[Instructions for use](#)

苫小牧における凍上観測 (昭和51~52年冬期)*

— 初期地下水位の影響 —

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・武田 一夫

(北海道大学大学院 理学研究科)

(昭和52年10月受理)

I. 緒 言

苫小牧北大演習林内において、ここ数年来毎冬凍上観測を行なってきた^{1)~6)}。昭和47年12月には、観測室(81 m²)が建てられ、以来自記観測や種々の土質試験も現場で行なえるようになった。現場には、内面が防水のプールが4ヶあり、その中に試験土が詰められている。凍上に際しての土中水分の移動が、プールの内部だけで独立に起り、プールの外とは関係のないようになっている。

土の凍結に際して起る凍上は、未凍土側から凍結線へ土中の水分が移動し、そこで氷として析出することによるものである。従って、地下水位が浅ければ、その移動水分も多くなり、当然大きな凍上が期待される。そこで、同じシルト質土を埋めてある3ヶのプールについて、

第1表 苫小牧凍上観測現場におけるプール状況

プール名	旧名称	広 さ (m)	凍結前の試験土の深さ (m)	初期地下水位 (cm)	土 質
I	D	5×5	2.30	0	シルト質土*
II	A	3×3	1.90	40	〃
III	C	5×5	2.00	200	〃
IV	B	3×3	1.60	30	小石**(0~10 cm) 小石**とシルト質土*の混合(10~20 cm) シルト質土*(20~60 cm) 砂*** (60~160 cm)

* シルト質土—砂分55%, シルト分24%, 粘土分21%, 砂質粘土ローム, 60% 粒径0.08 mm, 比表面積54 m²/g

** 小 石—径1~10 cm

*** 砂—砂分100%, 60% 粒径0.4 mm, 比表面積1 m²/g

凍結直前の水位を、ちょうど地面、地下 40 cm、プールの底（自由地下水がない状態）という 3 つの違う状態に設定して、初期地下水位と凍上との関係を調べた。又、もう一つのプールには、同じシルト質土をはさんで、上に小石、下に砂という不連続層状態を作り、初期地下水位を地下 30 cm に設定して、凍上の様子を調べた。

4 つのプールの状況を第 1 表に示す。

II. 測定方法

1. 通常観測項目

(1) 気温及び次の各点の地温：地下 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 cm（凍上した地面からの距離、温度計をはめこんだビニール管が地面と一緒に凍上する¹⁾）、120, 150 cm（凍結前の地面からの距離¹⁾）及びプールの底

(2) メチレンブルー溶液を用いた凍結深度計⁷⁾及び矢作式凍結深度計⁸⁾による凍結深の測定

(3) 地面凍上量

(4) プール内の地下水位

(5) 地面に直径 13 cm の円板をおき、この部分を固定したときに現われる凍上力⁹⁾

(6) 表層部に生ずる水平土圧⁵⁾ 地面に垂直に土圧計（直径 3 cm、厚さ 0.67 cm、共和電業製 BE-2 KC）を中心が地下 10 cm になるようにうめ、地温変化に基く凍土内熱応力を測定した。

2. 断面観測

凍結直前の 11 月 25 日、凍結時の 1 月 7 日と 3 月 8 日、融解時の 5 月 10 日に、地面から下 1 m ほどにわたって、凍土及び未凍土を採取した。凍土の採取には、ダイヤモンド刃のついた高速回転のコ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、単位体積重量、重量含水比、土粒比重を測定した。

III. 測定結果

1. 気温・積算寒度

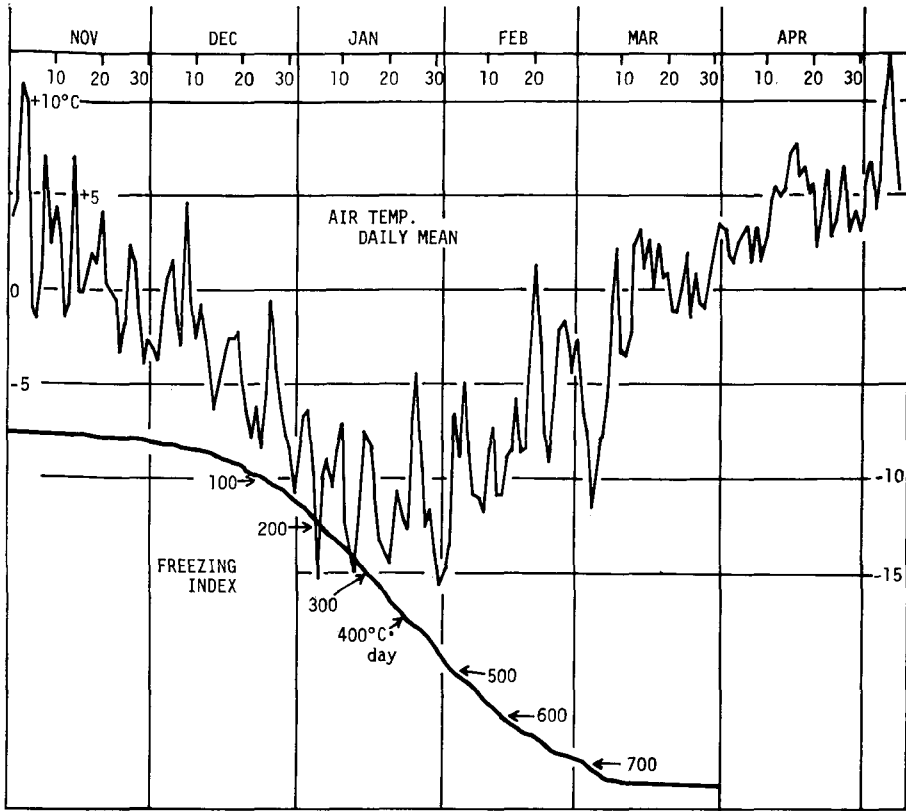
この冬の日平均気温と積算寒度の推移を第 1 図に示す。この冬の特徴は、気温が一日中 0°C より高くない、いわゆる真冬日が長く続いたことである。12 月 27 日から 1 月 14 日までの 19 日間と、1 月 17 日から 2 月 17 日までの 32 日間とである。最低気温として 2 月 2 日 7 時 40 分に -30.4°C が記録された。全体の積算寒度は 750°C・day に達し、近年にない寒さであった。

各月ごとの状況を第 2 表に示す。

2. 凍上状況及び断面観測結果

各プールの凍上状況を、第 2, 3, 4, 5 図と第 3 表に示す。

同じシルト質土が埋められているプール I, II, III については、初期地下水位が高いほど、凍上量は大きい。凍上率は初期地下水位が地面にあったプール I では、118% と非常に大きな



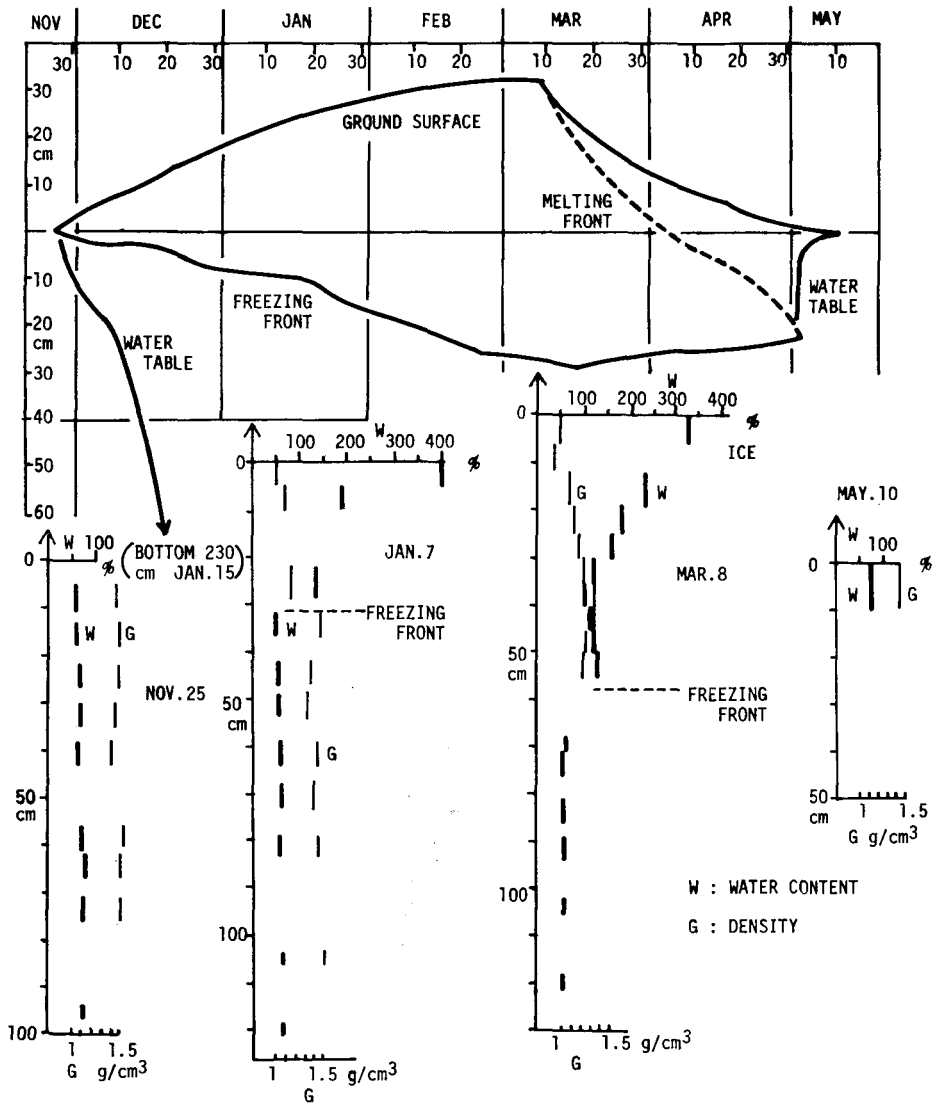
第1図 日平均気温と積算寒度，昭和51～52年冬期，苫小牧凍上観測現場

第2表 昭和51～52年冬期の気温と積算寒度（苫小牧凍上観測現場）

	11月	12月	1月	2月	3月	4月	合計
月積算寒度 (°C·day)	18.8	122.3	333.4	209.7	65.9	0	750.1
日平均気温が 0°C 以下の日 数	13	28	31	27	17	0	
月平均気温 (°C)	1.6	-3.7	-10.8	-7.4	-1.3	4.1	
最低気温 (°C)	-10.2	-19.0	-26.0	-30.4	-19.9	-7.1	
出現時刻	7:30, 29日	7:10, 30日	7:20, 13日	7:10, 2日	4:50, 5日	5:15, 22日	
最高気温 (°C)	17.0	6.8	1.2	4.9	9.0	14.3	
出現時刻	11:30, 3日	14:30, 3日	12:40, 15日	11:20, 27日	14:05, 30日	12:35, 13日	

値であった。地下 40 cm にあったプール II では 55 cm, 自由地下水なしのプール III では, 36% にすぎなかった。又, プール IV の混合層では 24% であった。凍結の進行とともに, 地下水位は下降し, 1 月にはどのプールも地下水位が底になってしまった。その後の凍上は, プール II の方がプール I よりも大きかった。

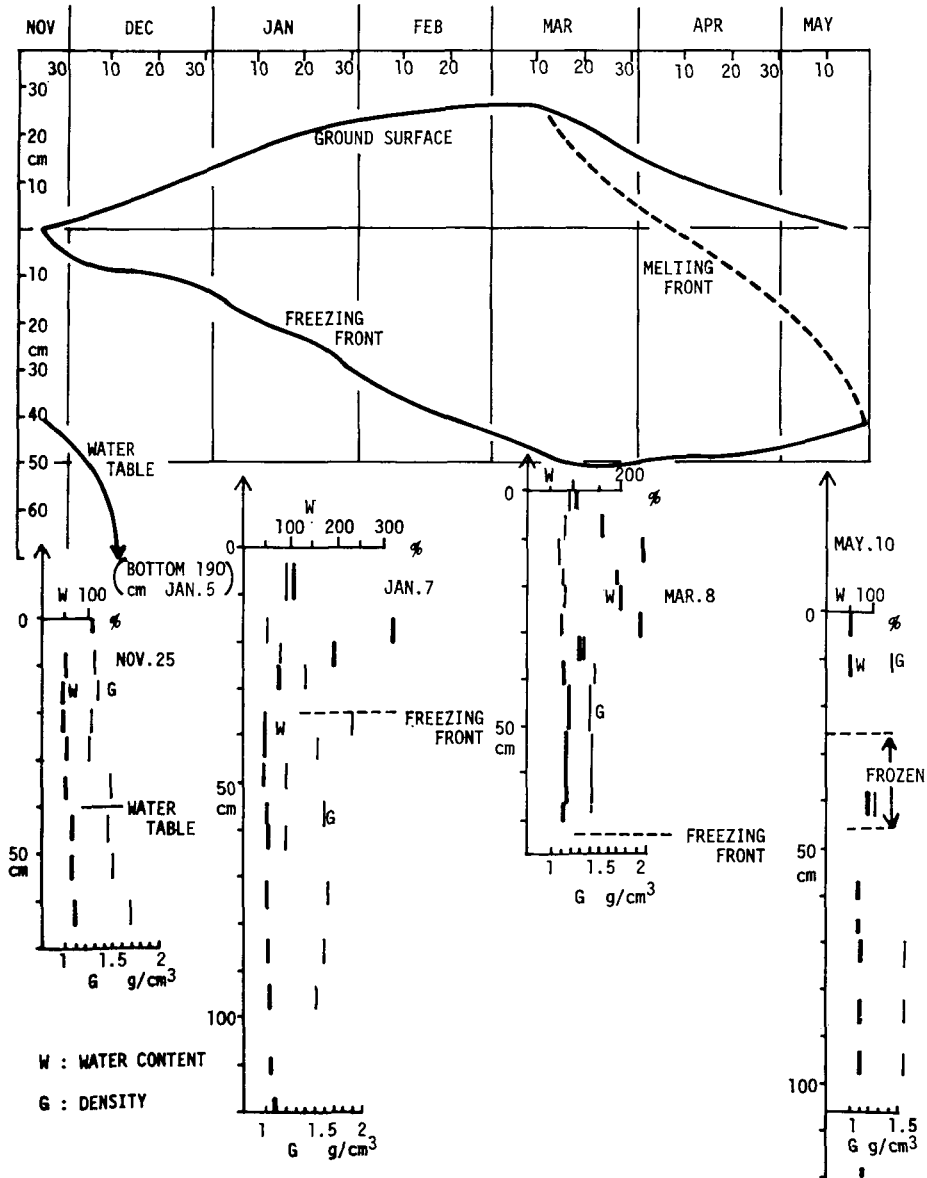
第 2 図は, プール I の凍上状況である。11 月 27 日に凍結が始まり, 3 月 9 日頃から地面の融解が始まった。5 月 2 日頃には凍土層が完全に融解した。そして, 地下水位は凍結前と同じ, 地面にもどった。地下水位は 1 月 15 日に底に達したのであるが, 自由地下水が凍結線へ補給されている間は, 凍上速度は平均 5 mm/day であった。1 月 15 日以後の自由地下水の補



第 2 図 プール I の凍上状況及び断面観測時の重量含水比 W と単位体積重量 G , 昭和 51~52 年冬期, 苫小牧凍上観測現場

給がないときには、凍上速度は0~2.5 mm/dayとおそくなった。

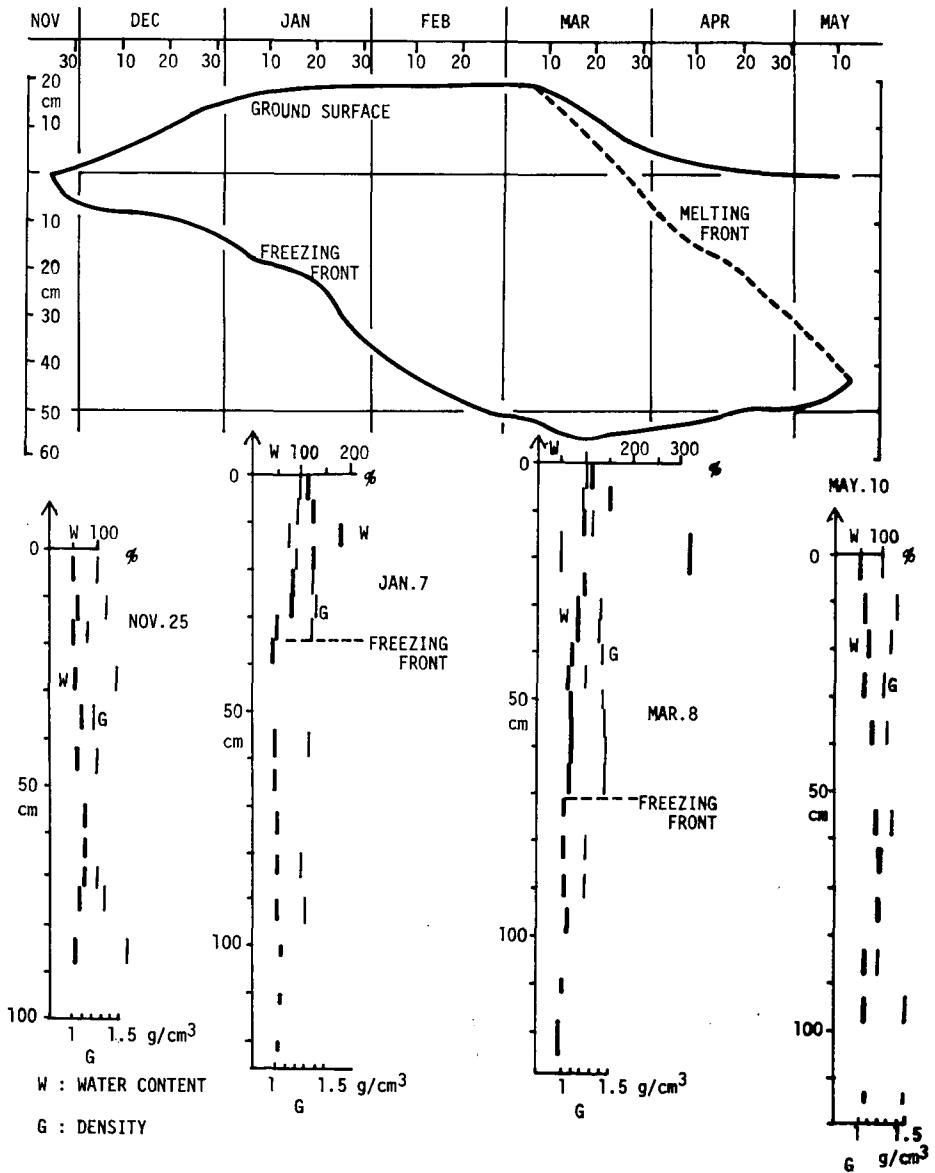
11月25日の断面観測において、重量含水比 W は60~70%、単位体積重量 G は1.42~1.55 g/cm³、又粒比重 G_s は2.48~2.54であった。これらの値から土の単位体積内に含まれる水分の割合 V_w と土粒分の割合 V_s を、次の式で求めることが出来る。即ち、 $V_w = \frac{WG}{1+W}$ 、 $V_s = \frac{G}{G_s(1+W)}$ 。残りの空気分 V_A は $1 - V_w - V_s$ である。11月25日には、 V_w が60~65%、 V_s が35~40%、 V_A が0であった。地下水位が地面なので、土は全部水飽和の状態にあって、



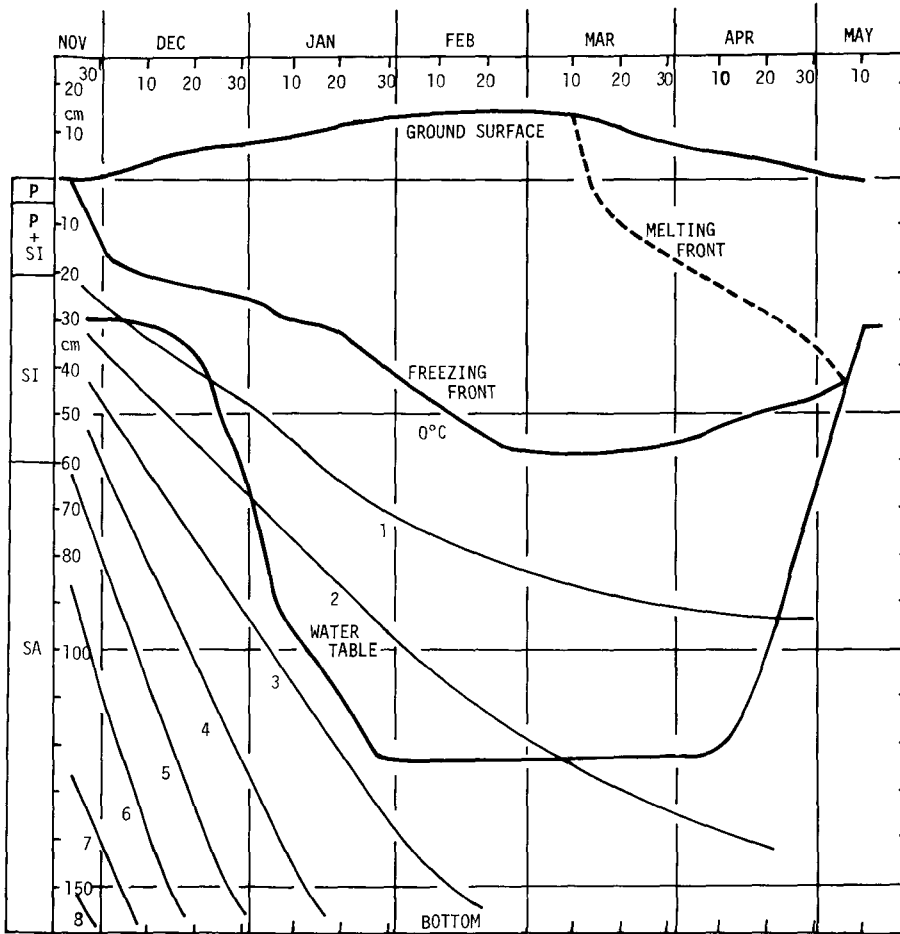
第3図 プールIIの凍上状況及び断面観測時の重量含水比 W と単位体積重量 G ，昭和51~52年冬期，苫小牧凍上観測現場

空気分はない。

冬のはじめの方が凍上速度がはやい。従って、凍土の上層部の方に氷層が多い。第6図 a, b に氷層部の写真を示す。a はプール I の地下 22~29 cm の部分で、b は同じくプール I の地下 20 cm 付近の拡大写真である。写真から解るように、同じ深さの水平面にそって、氷層が一様に入っているわけではない。従って、ある深さの層の凍土試料について、重量含水比や単位体積重量を測るにしても、その層を代表する部分を選ぶことは一般には難しい。ここでは出来るだけその層の平均になるような所を選ぶよう心掛けた。



第4図 プール III の凍上状況及び断面観測時の重量含水比 W と単位体積重量 G ，昭和 51~52 年冬期，苫小牧凍上観測現場



P : PEBBLES, SI : SILT, SA : SAND

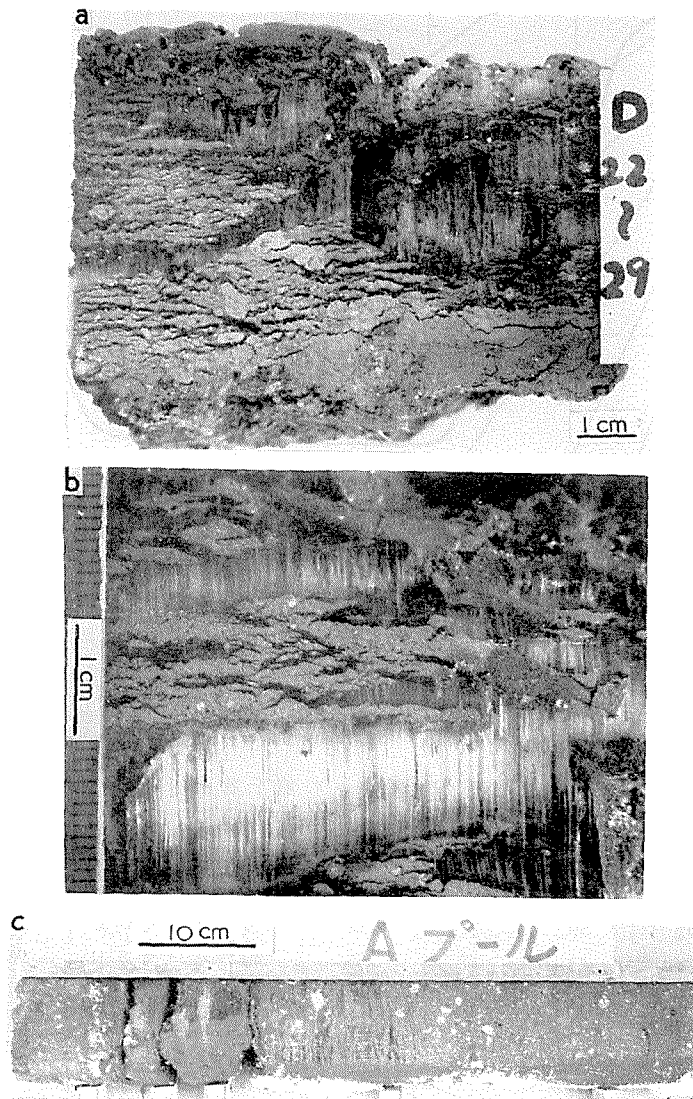
第5図 プール IV の凍上状況と未凍土内の地温分布, 昭和51~52年冬期, 苫小牧凍上観測現場

第3表 各プールの凍上状況

	最凍上量 (cm)	最大凍結層の厚さ (cm)	冬の始めの地面からの凍結深 (cm)	凍上率 (%)	初期地下水位 (cm)	地下水位がプール底に達した日	そのときの凍上量 (cm)	その後の凍上量
I	32	59	27	118	0	1月15日	24	8
II	26	73	47	55	40	1月5日	15	11
III	19	72	53	36	底			
IV	14	73	59	24	30	地下123cmでとまる 1月29日	13	1

1月7日、3月8日の断面観測のときの、重量含水比 W と単位体積重量 G を第2図のグラフの下段に示してある。凍土層の上部では W は100%を大きく越す値を示した。凍土層の下部で100%に近い値である。一方、未凍土層では、50~70%で、特に凍結線のすぐ下が W が最も小さい。

凍土の単位体積内に含まれる氷分を V_i とすると、 $V_i = \frac{1.1WG}{1+W}$ で与えられる。この関係から求められた凍土内の V_i , V_s , V_A 及び未凍土内の V_w , V_s , V_A の値を第4表にまとめて示す。凍土上層部では V_i が80%以上、凍土下層部では V_i が75%前後である。一方凍結線の



第6図 凍土層内の氷層の状況

- a: プール I (旧 D プール⁶⁾) の地下 22~29 cm
- b: プール I の 20 cm 付近
- c: プール III (旧 A プール⁶⁾) の凍土コア、左端が地表面

第4表 土に含まれる水 (V_w) 又は氷 (V_i), 土粒 (V_s), 空気 (V_A) の体積割合 (%)

プ ー ル	凍 結 前 (11月25日)			凍 結 時 (1月7日, 3月8日)			融 解 後 (5月10日)								
	深 さ (cm)	V_w	V_s	V_A	深 さ (cm)	V_i	V_s	V_A	深 さ (cm)	V_w	V_s	V_A			
I	全 層	60~65	35~40	0	0~10	80~89	8~10	2~10	全 層	60	40	0			
		地下水位以下飽和状態			10~30	80	20	0					地下水位以下飽和状態		
					30~	75	25	0							
					以上凍土	V_w									
II	7~12 40~ 0~3 cm に霜柱が出来ていた	43	36	21	0~20	70~80	12~20	3~9	(5月10日には内部に20cm) ほど凍土が残っていた						
		深くなる程増大する			20~50	70	30	0							
					以上凍土	V_w									
		地下水位以下飽和状態			凍結線直下	46	36~39	15~17							
III	表 層 100	41	34	25	0~20	70~80	20~25	5	上 層 100	42~50	32~35	15~24			
		深くなる程増大する			30~	60~65	30	5					(場所により一部) 凍土が残る		
					以上凍土	V_w									
					凍結線直下	43	35	22							
地下水位以下飽和状態			はなれた所	57	40	5									
			はなれた所	50	33	17									
			はなれた所	50	33	17									

すぐ下では、水分が49%にすぎず、又空気分も13~17%と多い。以下深くなるにつけ、水分は増し、55~60%に達する。

融解後は、地下水位はもとの地面にもどって、全層が水飽和の状態になった。水分60%、土粒分40%、空気分は0%である。

第4表には、プールIIとIIIについても、未凍土内の水分、土粒分、空気分及び凍土内の水分、土粒分、空気分の体積割合を示す。はじめの地下水位が地面にないため、未凍土状態でかなりの空気分をもつ。凍土層の上部で水分が多く、下部で少いこと(第6図cのプールIIの凍土コアから上部ほど氷の多いのが解る)、又凍結線直下では水分が46%、43%と少く、それより深くなるにつれ、水分が増して57%、50%になるということは、傾向的にプールIの状況と変りない。

完全融解は、プールIIで5月18日頃、プールIIIで5月12日頃である。プールIに比べてかなり遅れている。凍土層が厚く出来たための当然の結果で、状況を第3図と第4図に示してある。

プールIVは、最上層に小石、その下小石とシルト質土の混合、その下シルト質土、その下砂という4層からなっている。第5図にその凍上の状況を示すように、小石を含む層は熱伝導がよいため、凍結が始まると、僅か数日でその層の下面まで凍ってしまう。凍結がシルト層に達すると、凍上が起るため、凍結の進行がおそくなり、又地下水位もさがり始める。1月29日に凍結前の地面から123cmの時まで地下水位がさがった。その後は、この地下水位はほぼ一定の位置を保った。これは砂層を通して、63cm以上水が上昇しないことを表す。凍結線への水の移動がとまったわけで、従って、それ以後は地面の凍上も殆ど起らなかった。3月9日頃から地面の融解が始まったが、上層の小石を含む層が熱伝導がよいため、はじめのうち融解の進行が非常に速い。3月下旬からは融解の進行もおそくなり、5月6日頃に凍土層は完全になくなった。地下水位も凍結前の地下30cmの位置にもどった。

IV. 凍結面への水分移動について

凍結線が dD だけ進行する間に、 dh だけ凍上が起ったとすると、厚さ dD の層が $dD+dh$ に膨脹したことになる。凍結前の dD の層における体積含水率を V_w 、凍結後の $dD+dh$ の層における体積含水率を V_i とすると、この層に含まれる凍結前の水分量 M_1 、凍結後の水分量 M_2 は、それぞれ、 $M_1 = V_w dD$ 、 $M_2 = V_i \frac{1}{\rho_i} (dD+dh)$ で与えられる、 ρ_i は氷の密度である。従って、凍結によって $M_2 - M_1$ だけの水分増があったことになる。この水分は当然未凍結側から補給されたものに他ならない。第5表に、凍土層を5つに別けて、各層における水分移動量を示す。凍結前の V_w としては、凍結線のすぐ下の未凍土の値(第4表参照)を採用した。

各プールとも冬のはじめの方が水分移動速度は大きく、以後次第に小さくなって行く。又同じ時期については、初期地下水位が高いほど、水分移動速度は大きい。地下水位がプールの底に達した場合でも、第4表に示すように、未凍土側では凍結線より離れるに従い、水分が増す傾向が見られた。従って水分勾配がある。

凍結線のすぐ下では脱水が起り、その結果生ずる水分勾配で下方から水分が拡散移動をし

第5表 凍結による水分移動量

プール	層	日数	凍結後		凍結前		凍上量 dh (cm)	凍上率 dh/dD (%)	水分移動量 $M_2 - M_1$ (g/cm ²)	水分移動速度 v (g/cm ² ·dry)	地下水位降下 $L_2 \rightarrow L_1$ (cm)
			厚さ dD+dh (cm)	水分 M_2 (g/cm ²)	厚さ dD (cm)	水分 M_1 (g/cm ²)					
I	地面から 12月10日凍結線まで	13	10	7.9	3	1.9	7	230	6.0	0.46	0→24
	12月10日凍結線から 12月25日凍結線まで	15	12	9.2	3.5	1.7	8.5	41	7.5	0.50	24→83
	12月25日凍結線から 1月7日凍結線まで	13	9	6.8	2.5	1.2	6.5	38	5.7	0.44	83→145
	1月7日凍結線から 2月1日凍結線まで	25	15	10.4	8	3.9	7	87	6.5	0.26	145→230(底)
	2月1日凍結線から 3月8日凍結線まで	35	13	9.2	10	4.9	3	30	4.3	0.12	
II	地面から 12月10日凍結線まで	15	13	8.4	8	3.4	5	63	5.0	0.33	40→62
	12月10日凍結線から 12月25日凍結線まで	15	9	6.9	3	1.4	6	200	5.5	0.37	62→120
	12月25日凍結線から 1月7日凍結線まで	13	12	8.8	7	3.2	5	71	5.3	0.41	120→200(底)
	1月7日凍結線から 2月1日凍結線まで	25	20	12.9	13	6.0	7	54	6.9	0.28	
	2月1日凍結線から 3月8日凍結線まで	35	19	11.2	16	7.4	3	19	3.8	0.11	
III	地面から 12月10日凍結線まで	15	14	9.0	8	3.4	6	75	5.6	0.37	
	12月10日凍結線から 12月25日凍結線まで	15	9	6.0	3.5	1.5	5.5	157	4.5	0.30	
	12月25日凍結線から 1月7日凍結線まで	13	12	7.5	7	3.0	5	71	4.5	0.34	
	1月7日凍結線から 2月1日凍結線まで	25	19.5	11.6	17.5	7.5	2	11	4.1	0.16	
	2月1日凍結線から 3月8日凍結線まで	35	17.5	10.3	17	7.3	0.5	3	3.0	0.086	

苫小牧における凍上観測

て来るといわけである。

V. 凍上力・土圧について

プール III に凍上力の測定装置を 12 月 13 日に設置した。1 月 1 日から 27 日にわたって、2700 から 5300 kg にわたる力が観測された。このときの円板のまわりの地面の凍上速度は、1~2 mm/day であった。その後、凍上速度が減少し、ほぼ一定の凍上量を保つ状態が続いたが、凍上力の方も 0~1000 kg の小さい値であった。

同じくプール III に土圧計を、中心が地下 10 cm になるように鉛直に 12 月はじめに埋めた。凍上力が大きく現われた期間には、350~600 g/cm² の圧力が、それ以外では 0~300 g/cm² の圧力が観測された。凍土層のうちの表面近くで、温度の日変化のために、熱応力が生ずるが、それに対応する圧力変化⁵⁾として 100~200 g/cm² が観測された。土圧については更に今後の観測のつき重ねを待って検討を加えたい。

現場の観測にあたって北大苫小牧演習林の職員一同に協力を得た。厚く感謝の意を表する次第である。又、本研究に要した費用の一部は特定研究費「土地の凍結融解過程の研究」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**, 367-377.
- 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・田沼邦雄 1971 凍上と地下水位との関係 III. 低温科学, 物理篇, **29**, 245-256.
- 4) 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.
- 5) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・福田正己・井上正則 1974 苫小牧における凍上観測 (昭和 48~49 年冬期). 低温科学, 物理篇, **32**, 251-260.
- 6) 木下誠一・鈴木義男・堀口 薫・福田正己・井上正則・武田一夫 1975 苫小牧における凍上観測 (昭和 49~50 年冬期). 低温科学, 物理篇, 資料集, **33**, 77-83.
- 7) 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.
- 8) 矢作 裕 1976 苫小牧における土壌凍結進行速度の観測結果について. 昭和 51 年度日本雪氷学会講演予稿集, 235.
- 9) 木下誠一 1972 凍上力実験. 低温科学, 物理篇, **30**, 191-201.
- 10) Kinoshita, S. 1975 Soil-water movement and heat flux in freezing ground. Proc. Conf. Soil-Water Problems in Cold Regions, Calgary, Canada, 33-41.

Summary

Frost heavings have been observed on the soils in the water-proof basins at the Tomakomai field site, Hokkaido.

Basin I : 5×5 m wide, 2.30 m deep, filled with silty soil.

Basin II : 3×3 m wide, 1.90 m deep, filled with silty soil.

Basin III : 5×5 m wide, 2.00 m deep, filled with silty soil.

Basin IV : 3×3 m wide, 1.60 m deep, filled with pebbles at the depths of 0-5 cm, mixture of pebbles and silty soil at the depths of 5-20 cm, silty soil at the depths of 20-60 cm and sand at the depths of 60-160 cm.

The total freezing index of the winter of 1976-1977 amounted to 750°C·day (Fig. 1). The monthly mean air temperature was +1.6°C in November, -3.7°C in December, -10.8°C in January, -7.4°C in February, -1.3°C in March and +4.1°C in April. The minimum air temperature -30.4°C was recorded at 0710, Feb. 2.

Before the beginning of ground freezing water levels in the basins were set at the levels of the ground surface in I, 40 cm below the ground surface in II, the bottom in III and 30 cm below the ground surface in IV. Basin III had no free ground water. In I, II and IV water levels went down with the progress of freezing fronts and the rising of ground surfaces. In I and II water levels reached the bottoms on Jan. 15 and Jan. 5 respectively. After then they had no free ground water. In IV the water level reached the depth of 125 cm below the initial ground surface on Jan. 29. and then kept the level till melting began.

Ground freezing began on 25-27 November, and reached the deepest level in mid-March. The heave amount of the ground surface reached the highest level around March 10. Melting also began around March 10 and ended on 2-19 of May. The following table shows the frost conditions of the four basins :

Basin	Max. Heave Amount	Max. Thickness of Frozen Layer	Max. Frost Penetration	Initial Water Level	End of Complete Melting
I	32 cm	59 cm	27 cm	0 cm	May 2 Fig. 2.
			From the initial surface		
II	26	73	47	40	May 19 Fig. 3.
III	19	72	53	Bottom	May 13 Fig. 4.
IV	14	73	59	30	May 6 Fig. 5.

In case of I, II and III which were filled with the same silty soil, the heave amount decreases with lowering of the initial water levels. The frost heaving takes place while free soil water is supplied from the unfrozen part towards the freezing front. In I the height of the supply extends over 2 m through the silty soil. On the other hand, in IV the height is limited to 63 cm through the sand. It depends on the height of capillary rise of water through the soil. The larger is the size of pore in the soil, the lower is the height. In I, II and III soil samples were taken on Nov. 25, Jan. 7, March 7 and May 10 by the use of a core boring machine. Measurements were done for their water contents and densities. From these results the migration speeds of the water which had been supplied from the unfrozen part towards the freezing front were calculated as follows:

Freezing Period	Basin		
	I	II	III
Nov. 27-Dec. 10	0.46	0.34	0.37 g/cm ² ·day
Dec. 10-Dec. 25	0.50	0.37	0.30
Dec. 25-Jan. 7	0.44	0.41	0.34
Jan. 7-Feb. 1	0.26	0.28	0.16
Feb. 1-March 8	0.12	0.11	0.09