



Title	凍上の機構について : II (第二年度現場調査)
Author(s)	中谷, 宇吉郎
Citation	低温科学, 1, 27-36
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17381">https://hdl.handle.net/2115/17381</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p27-36.pdf



# 凍上の機構について

## II 第二年度現場調査

中谷 宇吉郎

### §1. 緒言

本文は札幌鐵道局凍上対策委員會の第2年度現場調査に参加し、前年度調査の結果<sup>(1)</sup>を補足した報告である。

第2年度調査は、11回行ひ、そのうち、重要な個所については、凍上初期、盛期、後期に互つて調査した。

調査場所、調査者などは、第1表に示す如くである。

第 1 表

調 査 個 所	時 期	調 査 月 日	調 査 者
1. 土幌線 蘇平	初 期	16年 1月 19日	中谷, 吉田, 菅谷, 加賀美
2. " " "	盛 期	2 " 23 "	中谷, 花島, 荒川, 石菅 田
3. " " "	終 期	3 " 16 "	吉田, 井上, 荒川, 菅 谷
4. 土幌線 幌加	盛 期	2 " 23 "	中谷, 花島, 荒川, 石菅 田
5. " " "	終 期	3 " 16 "	吉田, 井上, 荒川, 菅 大
6. 幌加内線 深川	初 期	1 " 26 "	中谷, 花島, 菅谷, 小口, 大 瀧
7. " " "	盛 期	2 " 23 "	中谷, 菅谷, 菅谷, 小口, 大 瀧
8. 札沼線 月形	初 期	1 " 27 "	中谷, 花島, 菅谷, 小口, 大 瀧
9. " " "	終 盛 期	3 " 1 "	吉田, 菅谷, 菅谷, 小口, 大 瀧
10. 廣尾線 更別	盛 期	2 " 24 "	花島, 荒川, 荒川, 石田
11. 帯廣驛 試験土	盛 期	2 " 24 "	花島, 荒川, 荒川, 石田

### §2. 調査方針

前年度の調査及び其の後の實驗的研究によつて、凍土の原因が凍結による氷の分離析出現象 (segregation) に起因することが確認され、又凍土の各種の凍結様式も略前年度の調査によつて知られた。

今回の調査に於ては、前年度未着手であつた凍結パラス層、及び凍結路盤の含水比を測定し、且つ凍結線下の路盤中の含水比分布を詳しく測定することにした。又凍結線下の地中温度分布も同時に測定した。

北海道帝國大學低溫科學研究所報告第4號。氣象集誌，第2輯，第19卷，125頁。

(1) 氣象集誌，第2輯，第18卷，313頁。

含水比測定には、第 2 表に示した各量を測定し、更にその標本の寫眞を撮り、凍結様式と含水比との関係をも求めた。

第 2 表

$M$ = 總重量 $m$ = 飽水土重量 $m_a$ = 風乾土重量 $V$ = 凍土又は濕土體積	$W = M - m_a$ = 全含水量 $w = m - m_a$ = 飽水土含水量 $w_0 = M - m$ = 上澄量 $\rho$ = 見掛比重	$R = W/m_a$ = 全含水比 $r = w/m_a$ = 飽水土含水比 $r'$ = 融解凍土の含水比 $R - r$ = 凍上目安
---	--	---

これ等の量の中、問題になるのは飽水土重量  $m$  であつて、これには 2 通りの測定法がある。凍土を融かすと、上澄水が出て来るので、それを棄てた残りを飽水土とするのが一法であるが、上澄水だけを完全に取り去ることが實驗的にやや面倒であつた爲に、風乾土に十分吸水させたものを飽水土重量とした。従つてその含水比  $r$  は  $w/m_a$  である。

$r$  に対して、融解凍土から上澄水を取り去つた濕土の含水比を  $r'$  としたが、 $r'$  は上澄水の除去によつて少し異つた。凍土の形を崩さないで、融解に伴つて流れ出る水を取り去つても、融解土を崩すと又水が出て来るし、初めから掻き廻して了ふと、微粒子や膠狀質部分が沈澱せず、上澄水の部分を判然と知りにくい場合が屢々あつた。それで、多くの場合、 $r'$  よりも  $r$  をその土の容水量として採用した。

$r$  の方が  $r'$  よりも常に大であつた。更別の土について測つた結果を例として挙げる。此の場合  $r'$  の測定には、凍土を細い金網で包み、蓋付廣口罎中に懸垂して放置し、上澄水を滴下させた。同じ土について半風乾状態から吸水させて  $r$  を測つた結果は、第 3 表に示す如く、吸水法による値が常に大であつた。

第 3 表

	粘土+赤土	赤土	腐蝕土	黑色腐蝕土
$r$	1.00	1.25	1.20	1.10
$r'$	0.82	0.83	0.64	0.86

今  $r$  を採用するとして、 $R - r$  を算出して見れば、これが凍結によつて最大容水量よりも更に餘分に吸ひ上げた水の量を示す。それで、その水が分離析出した爲に凍上が起つたと考へると、 $R - r$  が凍上量と密接な關係があることになる<sup>(1)</sup>。

霜降状凍結の場合について考へて見るに、分離析出した氷層は氷であるから問題はないが、氷層間の混凝土状に凍つた部分が、融解した場合の飽水状態と同じ含水量であるか否かが問題である。凍上量  $\Delta L$  が分離析出した氷層の厚さの和と略等しいこと、少くも 10% の誤差の範圍内では等しいことが實驗的に分つてゐるので<sup>(2)</sup>、

(1) 凍上の研究第 3 報に於て、實驗的にこの點を確めた。

(2) その結果も後報で述べる。



へ行くに従つて次第に硬くなり、凍結線が判然としてゐなかつた。さういふ所では全凍結路盤の含水比を測らずに、各深さの層に於て小さい標本を採つて測定した。又此の種の粘土の多い土では、凍土をとかしても上澄水は出て來ないので、 $r$ の方が $R$ より大、即ち $R-r$ が負のことが多かつた。粘土では透水性が少いために、下よりの水の補給が十分に出來ず、 $R-r$ が負になるのは當然である。此の際でも凍土中に當り氷層が分離析出してゐるので、混凝土状に凍つてゐる部分は、飽水状態よりも遙かに乾いた状態で凍つてゐるのである。築堤個所でも同様な現象が見られた。

全測定地點に於ける測定結果を綜合して、第4表に示す。

以上測定結果から二、三の結論を述べれば

第 4 表

	摘 要	$R$	$r$	$R-r$
糠 平 初 期	左線路下, 全凍結路盤, 厚さ=25 cm, 凍上量=89 mm	1.36	0.96	0.40
	右線路下, 全凍結路盤, 厚さ=23 cm, 凍上量=77 mm	1.21	1.00	0.21
	右線路下, 全凍結路盤, 厚さ=24 cm, 凍上量=77 mm	1.11	0.86	0.25
	左路盤層, 凍結線直上部分, 形不明	1.11	0.82	0.29
糠 平 盛 期	凍結路盤を3分し, その上部, 霜降状凍結	1.18	1.02	0.16
	" " , その下部, "	0.80	0.67	0.13
深 川 初 期	凍結道床, 土砂混入少し	0.05	—	—
	全凍結路盤, 厚さ=6 cm, 霜柱氷層2層あり	1.13	0.57	0.56
深 川 盛 期	凍結路盤上部, 霜降状凍結	0.51	0.40	0.11
	" 下部, "	0.60	0.40	0.20
月 形 初 期	凍結道床, 土砂混入す	0.09	—	—
	全凍結路盤, 厚さ=3.4 cm	0.32	>0.32	(-)
月 形 終 盛 期	凍結路盤, 道床直下, 厚さ=2 cm	0.45	—	—
	" , 道床より5 cm 下, 厚さ=2 cm	0.38	>0.38	(-)
	" , 道床より10 cm 下, 厚さ=2 cm	0.35	>0.35	(-)
更 別 No. 9 盛 期	全凍結路盤 (青白色粘土, 下は赤土)	1.18	1.00	0.18
	空洞下霜降状凍結の赤土	1.87	1.25	0.62
	氷層の見えない凍結腐蝕土 (赤土の下)	1.32	1.20	0.12
	空洞底部黑色腐蝕土の凍つたもの	1.41	1.10	0.31
更 別 築 堤	凍結道床, 土砂混入多し	0.11	—	—
	凍結路盤, 赤土	0.49	1.25	-0.76

a) 片上りの場合は、凍上量の多い方が全凍結路盤の含水比 $R$ も大きく、又 $R-r$ も大きい。

b) 道床の全含水比 $R$ は著しく小さいが、土砂の混入と共に大きくなる。故に道床だけが凍つた場合でも、土砂の混入が多くなれば凍上するおそれが十分ある。

c) 同一個所の測定で、 $R$ が著しく異なる場合でも、 $R-r$ は凍結様式が一定ならば、大體一定の値に出る。糠平盛期の資料がその良い例である。故に $R-r$ を凍上の目安として採用した方が順當である。

d) 霜降状凍結の場合は、 $R-r$ は0.1から0.3位の範囲である。霜柱氷層が入つたり、又

は土入霜柱層になると、 $R-r$  は 1 以上の大きい値になる。

e) 不整凍上の爲に空洞を生ずるやうな所では、 $R-r$  の著しく異なる凍土が混在してゐることが多い。

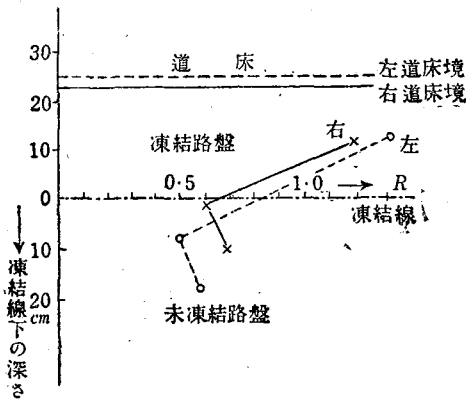
f) 築堤の如く水はけの良い場所では、 $R-r$  が負になる。

g) 粘土の場所でも、 $R-r$  が負になることが多い。

ii) 凍結線下の土の含水比の測定法 凍上現象の進行に伴つて、下層から水を吸ひ上げて、氷として分離析出するために、凍結層は過剰の水を含み、その下方の未凍結土壌は幾分乾いてゐるであらうといふことは、誰でも想像することである。その様子は、凍土及び未凍土の含水比の垂直分布を測つて見れば分る筈であるが、詳しい實測は餘りされてゐないやうである。例へば Osterberg<sup>(1)</sup> の報告に、含水比の垂直分布と、凍結様式との関係を圖示したものがあつたが、實測の結果ではなく、想像の説明圖である。又我國の凍上文獻にも餘り見當らなくて、滿洲の調査で小川氏の報告<sup>(2)</sup> がある位に過ぎない。

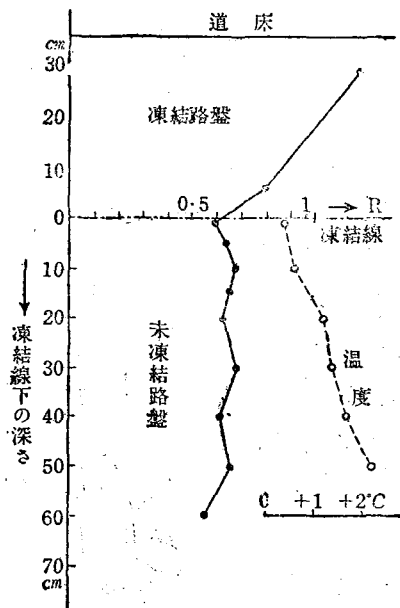
今回の調査でした未凍土の含水比測定は、5 cm×4 cm で厚さ 2 cm の土標本を打抜器やうの器具で採集し、湯煎によつて  $m_a$  を求めて計算した。凍結線下を特に注意して採集し、以下 5cm 乃至 10cm おきに土を採つた。

第 2 圖



iii) 凍土及び凍結線下土壌の含水比分布 凍結線下土壌の含水比は上述の如くにして測定し、凍土の方法は第 1 表に示した値を採用した。それで凍土の含水比は、全凍結路盤の平均又は凍結層 1/3 の平均である。道床の價は全道床の平均である。

第 3 圖



(1) J. O. Osterberg: Civil Engineering, 10 (1940) 100.

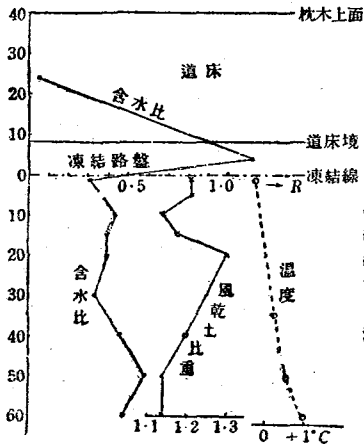
(2) 小川新市, 「雪氷」3 (昭 16) 385.

第 2 圖及び第 3 圖は、糠平の初期及び盛期に於ける測定結果である。これ等の例で第一に注目すべきことは、凍結線直下に乾燥した層があることで、その層以下は少し湿つてゐるが、第 3 圖の例では、その下方が又少し乾いてゐる。さういふ傾向は今回の測定では、第 4, 5, 6 圖に示す如く、常に見られるのであつて、物理的意味のある現象と思はれる。

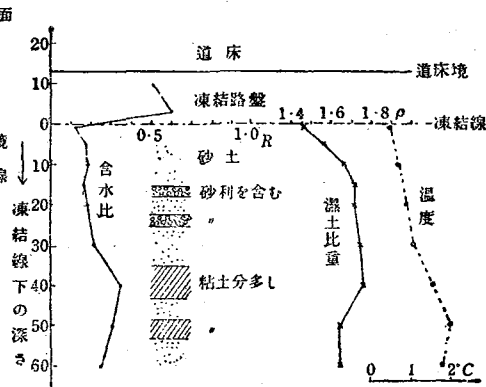
凍結線直下に乾燥した層のあることは、従来言はれてゐるやうに、“凍結層への水が吸引される” ためである。但し吸引の原因及び機構はまだ不明である。その下方に又含水比の極大があることの説明は、“温度傾斜による水の移動” に起因するものと考へられる。この温度傾斜による土中の水の移動は、當教室で實驗的に知られた現象であつて、續報で報告する。

第 4 及び 5 圖は、深川の測定結果であつて、この場合は、土の見掛比重も同時に測つた。天

第 4 圖



第 5 圖

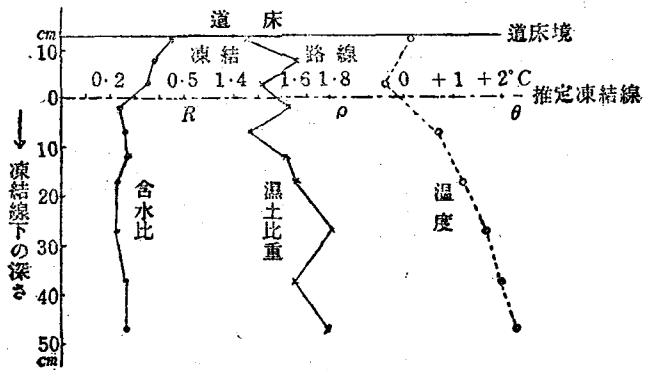


然土は層位構造になつてゐるので、この比重の外に、最大含水量や、透水性なども同時に測らねば、詳しい説明は出来ない。しかし本年度の観測では其の點までには及ばなかつた。

第 6 圖は月形の例であつて、この土質は微砂及び粘土が多く、透水性が著しく小さいので、含水比分布も變化が少なかつた。

しかし傾向は今迄の説明と全く同様であつた。この例で推定凍結線とあるのは、判然とした凍結線が分らなかつたからである。粘土質の爲に、硬い凍土から連続的に半硬状態を経て軟土に移つてゐたので、割目に氷が見える範圍を凍結路盤としたのであ

第 6 圖



る。

凍結線下の温度分布も同時に測定した。その結果は、圖中に點線で示した如くであつて、深さによる温度上昇率は、0.05 乃至 0.025°C/cm の範囲内で、略一定であつた。

§ 4. 空洞及び空隙

凍土中に空洞の出来る原因については、前報告<sup>(1)</sup>に於ても簡単に説明したが、今回の調査でその代表的な例を觀測することが出来たので、その結果について述べる。

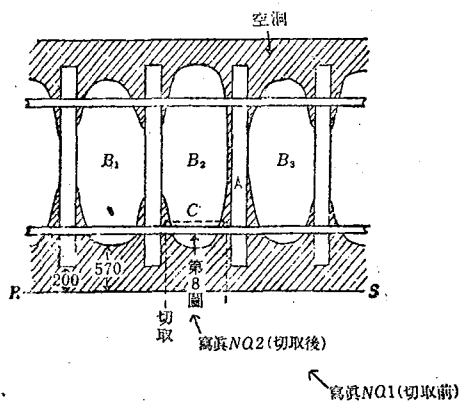
i) 幌加に於ける代表的な空洞 士幌線幌加(釧路 70 k 100 m~125 m)に昨年の調査で見られなかつた著しい空洞があつた。この地點の調査は、16年2月23日最盛期に第1回の實測を行つた。

道床は切込みより成り、それが一枚板に凍り、下の路盤の不整凍上によつて上へ持ちあげられた形となつてゐた。そして凍結道床の下に大空洞が出来てゐた。

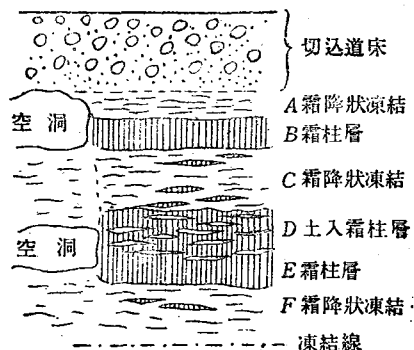
此の空洞は、第7圖に示すやうに、道床の兩側及び枕木下に發達してゐた。即ち第7圖に於て斜線で示した部分は空洞になつてゐて、枕木は殆んど宙に浮いてゐるやうな場合もあつた。例へばA枕木下は、ずつと空洞が線路の向ふ側まで續いてゐた。此の場合線路、枕木、凍結道床は一體となつて凍りつき、その全體が、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>などの部分で支へられてゐる形であつた。寫眞 No. 12 は凍結道床の縁に沿つて除雪し、空洞の口即ち第7圖のRS線を示したものである。この空洞の奥行は、枕木間では淺く、枕木下では深い。時には上述のやうに向ふ側まで通つてゐる所もあつた。

枕木間を第7圖に點線で示したやうに切取つて見た様子は、寫眞 No. 13 に示す如くである。即ち路盤には霜柱水層と、土入霜柱層と、霜降狀水層とが澤山はひつてゐて、著しい凍上をしてゐることを示してゐる。寫眞の左側に枕木下の空洞が見えてゐるが、その空洞は2段に出来て

第 7 圖



第 8 圖



(1) 前出。凍上の研究，第1報。

ゐる。

路盤内の霜柱層，土入霜柱層などを，モデル的に描いたものを第 8 圖に示す。この圖の中の A, B, C, ……などの部分は，それぞれ寫眞 No. 13 のそれ等の文字が示した部分に當つてゐるのである。換言すれば，第 8 圖は第 7 圖中の C 断面のスケッチである。

此の中での土入霜柱層の一部は，寫眞 No. 20 に改めて出してあるが， $R-r=0.86$  に達し，凍結に際して澤山の水を吸ひ上げてゐること，従つて凍上量も著しかつたことが分る。

此のやうな場合の空洞の出來方は，次のやうに説明される。此の路盤の土は，寫眞に見る如く，霜柱氷層，土入霜柱層などを作り易く，凍上量も大きい。枕木間中央部分，即ち第 7 圖の  $B_1, B_2, B_3$  などの部分は，除雪の影響もあつて一番先きに冷える。それでその部分が初めに多く凍上し，凍結道床を持ち上げて，路盤から離し，縁及び枕木下に空隙を作る。枕木下に空隙の出來る原因は，枕木の保温作用の影響と考へられる。

一旦空隙が出來ると，空氣層の斷熱作用が，この傾向を助長する方向に働き， $B_1, B_2, B_3, \dots$  ……などの部分が益々多く凍上して，空隙が空洞に生長する。即ち此の場合， $B_1, B_2, B_3$  などの凍結路盤部分は，支柱の役目をなしてゐるのである。

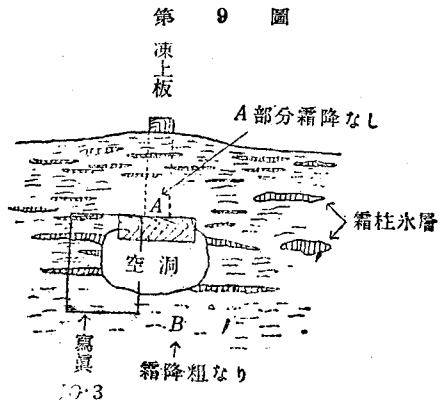
この地點を，凍上後期 3 月 16 日に再び調べて見た。空洞は益々發達して，その中に昇華した霜柱層の存在してゐるものもあつた。支柱になる凍結路盤中の霜柱層の氷層は透明な氷になつてゐる場合が多かつた。これは氷河の場合のやうに氷結晶の融合無定形化によるものであらう。

要するに此の種の空洞の原因は，不整凍上によるものであるといふ前に提出した考へは，間違つてゐないと思はれる。幌加の此の例はその良い標本である。

ii) 試験土に生じた空洞 帯廣驛構内に札幌鐵道局にて， $180\text{ cm} \times 160\text{ cm}$ ，深さ  $150\text{ cm}$  の穴を掘り，その中に所定の土を入れ，その試験土の凍上を研究した。その凍上を測る爲に， $16\text{ cm}$  角厚さ  $5\text{ cm}$  の木製凍上板を埋めて置いたところ，その板の下に深さ  $10\text{ cm}$  位の空洞が出來た。

その模様は第 9 圖に示す如くであつて，圖中の四角の線で示した部分の寫眞が，寫眞 No. 14 である。この空洞の出來方も不整凍上の好例である。

第 9 圖に於ける A 部分，即ち凍上板の上に當る土は混凝土狀に凍り，氷層も雜つてゐない。その上方，地表に近い所には氷層が判然とあるが，この氷は A 部分から水を吸ひ上げて分離析出したものである。A 部分は下の凍上板の爲に給水が遮られて，氷層が出來なかつたのである。凍上板直上以外の部分には，各深さ一様に氷層が出來てゐることから，この點は明かである。空洞の出來る機構は次のやうに説明される。凍結線が凍上板下面に達した頃，凍上板の保温作用の爲に，凍



結線は上向きに少し凸状になり、板の左右が多く凍上する。その爲に既凍結土壌が持ち上げられるとすると、凍上板の下面は土から離れて、其處に空隙が出来る。空隙が出来ると益々熱傳導が悪くなるので、凍上は左右に多く發達して、板の下には空洞が出来るのである。第 9 圖の水層分布がよくその點を説明してゐる。空洞の底の下方、即ち、B 部分は粗な霜降狀凍結になつてゐたが、此の邊まで凍結線が下つてから以後は、水の供給も少く、全部一様に凍つたのである。

此の保温材料の挿入によつて、その下に空洞の出来た例は外にもあつた。糠平第 1 回調査に於て、道床下に白樺の皮が埋れてゐたことがあつたが、その時にもその皮の下に厚さ約 2 cm の空洞が出来てゐた。

### § 5. 補足的觀察資料

凍上の研究第 1 報及び今回上述の報告によつて、天然の凍上に伴ふ現象は一應調査したが、外に斷片的な觀察資料があり、それ等も今後更に詳しく研究が進む時には、資料となり得るものであるから、以下列記する。

i) 氷層中の氷の結晶 霜柱氷層の水が、地表に見られる霜柱と殆んど同じ構造をしてゐることは、第 1 報に於て詳述した通りである。又霜降狀凍結中の薄い氷層は、透明な氷よりなり、その結晶構造は、外觀上は不明である。

ところが滿洲などでは、氷角柱が竝んだやうな構造の水層も屢々見られる。それと同じものは、北海道でも可成り屢々觀察されるので、その一例を擧げる。深川第 1 回調査に於いて、道床直下の路盤内に粗な構造の水層があり、その氷は氷角柱に容易に分離出来た。その顯微鏡寫眞を、寫眞 No. 15 に示す。この氷が單結晶になつてゐることは、寫眞でも明かであり、氣柱の存在も前回の報告の通りである。唯特徴はその角柱の側面が水晶の結晶の如く、極めて滑かで稜線が非常にはつきりしてゐることである。

同様な結晶は、月形の粘土中の氷層でも見られたので、水蒸氣の流通のために昇華蒸發及び凝縮をした結果とは考へにくい。

又幌加第 1 回調査に於て、厚い氷層で、小氷塊の集合より成つてゐるやうな構造のものも見られた。その時は、氷の表面に多結晶金屬表面を蝕化した時のやうな結晶の境界が見られた。此の種の氷は微結晶集合よりなつてゐる。

ii) 霜降狀氷層の水 霜降狀凍土中にある薄い氷層の水がどういふ構造をしてゐるかは今まで分らなかつた。前報告でもそれが貝殻狀劈開を示すことが多い點だけを述べておいた。ところが今回月形第 2 回の調査に於て、この種の氷板をとり出して調べることが出来た。

氣温が高かつたので、凍結粘土がゆるみ、氷板を簡単に土から分離することが出来た。その表面を顯微鏡で見ると、寫眞 No. 16 に示すやうに、六角形の結晶境界がよく見えた。此の場合の氷板即ち薄氷層の厚さは大體 1 mm 位で、その中に小氣泡が澤山あつた。寫眞で黒く見えるのはその氣泡である。これによつて霜降狀凍土中の薄い氷層も、霜柱氷層と本質的には同じ構造を

してゐる場合もあることが分つた。

### § 6. 凍結様式と含水比との關係

第 3 節にて詳述した如く、凍土の含水比が凍土と密接な關係があるので、天然の各種の凍結型式とその含水比との關係を調べて見た。凍結型式を示すために、豫め標本の寫眞を撮り、その標本をとかして、全含水比を測定した。それから同じ土を飽水状態にして、その最大容水量に當る  $r$  を測定した。

凍結状態と  $R-r$  との關係は、寫眞 No. 17~21 に示す通りである。そのうち No. 6~10 は霜柱氷層の生じ易い赤土又は粘土入赤土などである。この種の土については、混凝土状凍結の場合  $R-r$  は負、即ち凍土は飽水状態よりも少い水しか含んでゐないが、霜降状、土入霜柱状と進むに従つて、 $R-r$  が大きくなり、多量の過剰水分を吸ひ上げてゐることが分る。その結果を第 5 表にまとめて示す。

第 5 表

	寫 眞	$R$	$r$	$R-r$
混 凝 土 状 凍 結	No. 6	0.93	1.21	-0.28
細 い 霜 降 凍 結	No. 7	0.88	0.55	0.33
粗 い 霜 降 凍 結	No. 8	1.23	0.52	0.76
土 入 霜 柱 層	No. 9	1.59	0.73	0.86
霜柱層及び土入霜柱層	No. 10	1.61	0.39	1.22

以上の數値は北海道の天然の凍上現象については大體代表的なものと考えられる。しかしこの値は所によつては著しく異なるのであつて、滿洲の凍土について小川氏の測定した結果ではずつと小さい値が出てゐる。要するに凍結開始直前頃の土中の水分の量によつて左右されるのであつて、滿洲のやうに土が乾燥してゐるところでは小さいのは當然である。

實驗的に十分水を吸はせた土で凍上を起さすと、霜降状凍結でも  $R-r$  が 2 位にもなることがある。人工凍上の場合の凍結型式と含水比との關係は後報で述べる。

寫眞 No. 22' 及び 23 は粘土の場合であつて、粘土では月形の例でも幌加の例でも、氷層がはつきり存在してゐても融かした時に上澄水は出て來ない。即ち  $R-r$  は常に負であつて此の場合、氷層間の混凝土状に凍つてゐる部分が可成り乾いてゐるのである。

本研究は、札幌鐵道局凍上委員會の研究の一部で、局保線課竝に現場の方々の發掘調査の報告に屬するものである。本報告の發表を認容された凍上委員會の厚意を謝し、又本調査に協力された北大物理教授室の吉田順五、井上直一、花島政人、荒川・淳、菅谷重二、加賀美幾三諸君の甚大なる助力に感謝する次第である。