



Title	凍上の機構について： . 第三年度現場調査
Author(s)	中谷, 宇吉郎; 菅谷, 重二
Citation	低温科学, 2, 7-15
Issue Date	1949-10-20
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/17393
Type	bulletin (article)
File Information	2_p7-15.pdf



[Instructions for use](#)

凍上の機構について

III. 第三年度現場調査*

中谷 宇吉郎**, 菅谷 重二**

§ 1. 緒 言

本報告は札幌鐵道局凍上対策委員會の第3年度現場調査に参加して行つた調査の報告であつて
(1) (2)
第1年度及び第2年度の調査結果を補足するものである。

調査場及び調査者などを第1表に示す。

第 1 表

	調査場所	時 期	調査月日	調査者	摘 要
I	石北線, 北見	盛 期	17年2月8日	中谷, 菅谷	含水比と凍上量との關係
II	夕張線, 追分	盛 期	2 // 22 //	中谷, 菅谷	各種人工土壤調査
III	稚名線, 樺 岡	後 期	3 // 21 //	菅 谷	路盤入替調査
IV	稚内線, 鬼志別	後 期	3 // 21 //	菅 谷	泥炭挿入個所調査
V	豊 頃	融 解 期	4 // 12 //	中谷, 菅谷	融解状態調査
VI	豊 頃	融 解 期	4 // 26 //	中谷, 菅谷	融解完了直前状態

§ 2. 含水比と絶対凍上量との關係

北見驛より東方 2 km の地點で切斷調査した結果について主として述べる。最盛期をやゝ過ぎた程度で、標準枕木の絶対凍上量は 76 mm であつた。

凍結深度は左バラス肩下 枕木上面より 782 mm, 路盤面より 500 mm

右バラス肩下 枕木上面より 794 mm

であつた。

含水比測定標本は、左バラス肩下より採つた。凍上は殆んど全部路盤の凍結によつて生ずるので、路盤面より凍結線までの凍土の厚さ 500 mm が 76 mm の凍上を生じたものと考えられる。此の部分を柱狀に切り出し、更にそれを幅 5 cm, 厚さ 3 cm, 高さ 50 cm の柱に削り出した。その柱を更に上下 10 個に切つた。鋸の目減りが約 5 mm あるので、1 個は幅 5 cm, 厚さ 5 mm,

* 北海道大學低溫科學研究所業績 第 16 號. U. Nakaya and S. Sugaya: On the Mechanism of Frost Heaving. III. The Field Survey in the Third Year of the Research.

** 北海道大學理學部物理學教室及び低溫科學研究所。

(1) 氣象集誌, 第 2 輯, 第 18 卷 (昭和 15 年), 313 頁。

(2) 氣象集誌, 第 2 輯, 第 20 卷 (昭和 17 年), 125 頁。

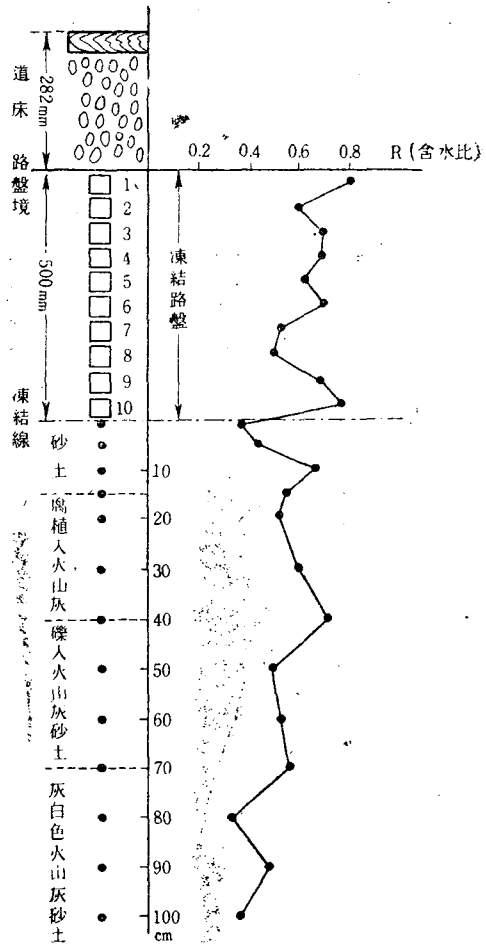
高さ約 4.5 cm となつた。即ち此の大きさの凍土塊を 10 個第 1 圖に示す如く切り出したことになる。

此の 10 個の標本について、重量、含水比などを測定した結果は、第 2 表に示す如くである。

第 2 表に於ける含水比 R の分布が、この場合の凍上量總計 76 mm を生じたものであるという吾々の前論文の考えを此處で天然の場合について吟味する。(1) 前報告では、低温室内の人工凍上の場合についてのみ論じた。その時の考えでは、飽水状態の土の含水比 r_0 よりも餘分に吸い上げた水が氷層となつて分離析出し、この氷層の和が凍上量を示すとした。實驗の結果も大體その考えを支持し、凍上量は $R - r_0$ に略々比例するという結果に達した。

この考えに従えば、霜降状凍結の氷層以外の部分、即ち混凝土状凍結部分は、飽水状態で凍っていることになる。しかし凍結直線下の未凍結部分が常に比較的乾燥している點から考えて、混凝土状凍結部分もその儘とかした時に飽水状態よりも乾いている方が至當である。そう

第 1 圖



第 2 表

No.	全重量 M	乾土重量 m_a	含水量 w	含水比 $R = w/m_a$	乾土比重 ρ_a	$\rho_a \cdot l$ $l = 5 \text{ cm}$	$\rho_a \cdot lR$ $l = 5 \text{ cm}$
1	78.2 g	43.3 g	34.9	0.80	0.64	3.2	2.56
2	78.9	49.4	29.5	0.60	0.73	3.65	2.19
3	78.8	46.6	32.2	0.69	1.69	3.45	2.33
4	127.1	75.4	61.7	0.68	1.11	5.55	3.76
5	117.0	72.7	44.3	0.61	1.07	5.35	3.26
6	102.9	60.9	42.0	0.69	0.90	4.5	3.10
7	102.7	67.7	35.0	0.50	1.00	5.0	3.50
8	103.9	69.4	34.5	0.50	1.02	5.1	2.55
9	101.0	59.9	41.1	0.69	0.89	4.45	3.07
10	87.5	50.0	37.5	0.75	0.74	3.7	2.77
Σ						43.95	28.14

(1) 中谷: 氣象集誌, 第 2 輯, 第 20 卷 (昭和 17 年), 125 頁. 記號は本報文では變更して用いる.

すると凍上量は $R-r_0$ に比例せず、 $R-kr_0$ に比例することになる。此處に k は乾燥の度合を示す係数で、0 と 1 との間にある。

0 の場合は、濕土の全含水量が氷層となつて析出した場合で、1 の時は氷層間の混凝土狀凍結部分が飽水状態になつてゐることになる。

樺太のツンドラ地帯の基盤粘土の含水比を測定した時に、霜降狀凍結の氷層以外の部分の含水比が飽水状態よりも

乾いていることが確かめられた。それで以下混凝土狀凍結部分の含水比を kr_0 として考えることにする。

今第2圖 (a) に示す如き、底面が單位

面積で高さ l の濕土柱を考える。これが凍結に際し下方から Δw の水を吸い上げて、氷層分離を生じ、霜降狀に凍結したとする。その状態を第2圖 (b) に示す。この時氷層は薄い霜柱層で、それ以外の部分は含水率 kr_0 なる混凝土狀凍結となる。凍上量は Δl である。

次に混凝土狀凍結部分は、凍結に際し凍上量僅少なりと假定する。肉眼で混凝土狀に見えても、顯微鏡下で微細霜降狀氷層の見えるものは、その微細氷層を除いた部分を混凝土狀凍結とすると、此の假定は大體に於て正しい。すると氷層部分と混凝土狀部分とを分離して考えると、第2圖 (c) の如くなる。即ち凍上量 Δl は分離析出した氷層の和となる。滿洲の土などには、混凝土狀部分が凍結に際し收縮するものもあるが、それ等は別に考えることとする。以下

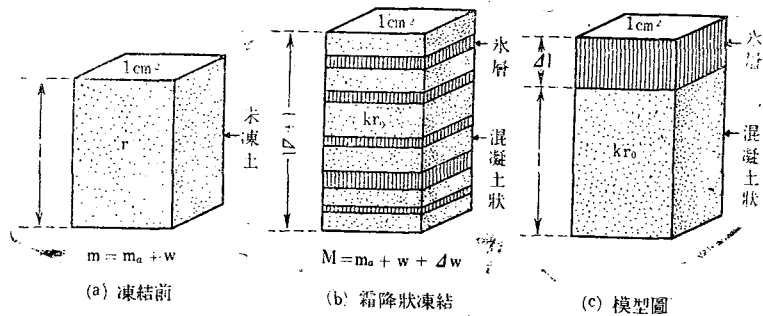
$$\begin{aligned}
 m &= \text{濕土重量}, & m_a &= \text{風乾土重量}, \\
 w &= \text{毛管水}, & \Delta w &= \text{凍結に際し吸い上げた水}, \\
 M &= \text{凍土重量}, & w_0 &= \text{飽和水}, \\
 r &= \frac{w}{m_a} = \text{含水比}, & R &= \frac{w + \Delta w}{m_a} = \text{凍土全含水比}, \\
 r_0 &= \frac{w_0}{m_a} = \text{飽水含水比}, & \rho_c &= \text{風乾土比重}
 \end{aligned}$$

として計算する。

第2圖 (c) から分るように、

(1) 中谷・菅谷: 理化學研究所彙報, 第21輯(昭和17年), 819頁。

第 2 圖



$$kw_0 + \frac{\Delta l}{1.1} = w + w \Delta w$$

$$\Delta l = 1.1(Rm_a - kr_0 m_a)$$

$$m_a = \rho_a l$$

$$\therefore l = 1.1 \rho_a l (R - kr_0)$$

$$\therefore \text{全凍上量} = 1.1 \sum \rho_a l (R - kr_0) \quad (1)$$

第2表の数値を入れると

$$\frac{7.6}{1.1} = 28.1 - \sum \rho_a l k r_0$$

此處で混凝土状部分の平均の含水率を kr_0 とすると、

$$6.9 = 28.1 - 44.0 k r_0$$

$$\therefore k r_0 = 0.48 \quad (2)$$

となる。

同じ場所の凍結線下の含水比を測定した結果は第3表に示す如くで、その値は第1圖にも圖示してある。その含水比の平均は 0.50 であつて、(2) の算出値 0.48 と著しく近似している點が上述の簡単な理論が實際に近いことを示す一つの論據となる。

第 3 表

No.	深 度	含水比 r	摘 要	No.	深 度	含水比 r	摘 要
1	凍結線直下	0.36	地中温度 -0.05°C 黒褐色粘土粗粒火 山灰を含む	8	50	0.49	樺黑色火山灰砂土 を含む
2	5 cm	0.43		9	60	0.52	
3	10	0.66		10	70	0.56	
4	15	0.54					
5	20	0.51	黒色火山灰砂土礫 を含む	11	80	0.32	灰白色火山灰砂土
6	30	0.59		12	90	0.47	
7	40	0.71		13	100	0.36	
				平 均		0.50	

今一つの實驗的論據は、凍土をとかしてその飽水含水比 r_0 を測つてみることから得られる筈である。簡単に考えると r_0 の測定には凍土をとかしてその時出る上澄水を棄て、残りの濕土の含水比を測ればよささうである。第1圖に於ける 50 cm の凍結路盤を 4 層に分け硝子圓筒中でそれをとかして上澄水の高さと洗滌した土の高さとを測つた結果を第4表に示す。これで見ると、上層部から澤山の上澄水が出て、下層部からは殆んど出ないことが分る。此の時上澄水を除去して、洗滌濕土の含水比を測つてみると、最後の行に示す如く、下部の土の r が著しく大きい。これは下部の土の緊密度が小さかつた爲である。

第 4 表

層 位	No.	濕土の高さ h	上 澄 水 h'	h'/h	濕土含水比 r
上 部	1+2+3	50 mm	6 mm	10.7%	0.61
	3+4	45	5	10.0	0.60
中 部	5+6	60	5	8.3	0.62
	6+7+8+9+10	44	0	0	0.71

次に最大容水量測定の方法によつて r_0 を測定してみた。その結果は

密に詰めた場合 $r_0 = 0.54$

粗に詰めた場合 $r_0 = 0.66$

であつた。最大容水量は緊密度によつて此の程度に著しく異なる。天然の今の場合の緊密度と此の實驗とを量的に比較する資料が不足しているが、大體 $r_0 = 0.54$ 程度と思はれる。それで前に得た $kr_0 = 0.48$ から

$$k = 0.9$$

となる。

即ち氷層間の混凝土状凍結部分が飽水状態より 1 割程度乾燥しているとすると、分離析出した氷層の和が實際の凍上量 76 mm に相當することを量的に説明出来ることになる。この 1 割程度の乾燥という數字は大體豫想される値である。

現個所の地中温度は

凍結線直下 -0.05°C , 10 cm 下 $+0.5^{\circ}\text{C}$, 30 cm 下 $+23^{\circ}\text{C}$

であつた。

§ 3. 凍結層の融解

凍結路盤の融解状態を調べるために、豊頃の瞬間融下測定装置を施した地點について、4 月 12 日、4 月 26 日の 2 回切斷調査をした。

4 月 12 日の調査時では、切斷個所の枕木の最大絶対凍上量は 126 mm であつた。調査時までの融下は 45 mm であつて、現在 81 mm の凍上量が残つている。

切斷面は第 3 圖に示す如くで、道床は既に融解し、路盤との境が上の凍結線であつた。下の凍結線直下は緊密度大で且つ乾燥していた。故に融解は未だ下方からは起らず、殆んど上方からのみとけたものである。地温分布は第 3 圖に示す如く、線路中央で

枕木下面 $+2.7^{\circ}\text{C}$, 道床中央 $+0.5^{\circ}\text{C}$, 路盤直下 $+0.1^{\circ}\text{C}$,

凍結路盤中央 0.0°C , 凍結線直下 $+0.3^{\circ}\text{C}$

であつた。この温度分布から見ても融解が上方より起つてゐることが分る。

注意すべきことは、凍結路盤が殆んど全域に亘つて 0.0°C になつてゐることである。此の地點で嚴冬期の測定はないが、大體凍結路盤中央 -2°C には下つてゐたと思はれる。それが融解に際し、一應全層が 0°C になつて、それから一方から融け始めるものであることを確めた。

路盤が殆んどとけていないのに、最盛時より既に 45 mm の融下が生じてゐるのは、道床は凍上に殆んど関係しないという今までの結論と矛盾するようである。しかし此の場所では道床に土砂の混入多く、道床下半部は砂利混りの土と稱すべき程度であつた。そういう場合には勿論道床も凍上する。

同一地點に於て、枕木 3 挺隔てて 4 月 26 日に再び切斷調査をした。前回より 14 日間に 63 mm の融下あり、猶約 18 mm の凍上量が残つてゐた。

切斷調査の結果は第 4 圖に示す如くである。即ち上方からの融解は更に進み。路盤内に 16.5 cm とけ込んでいたが、下方の凍結線は殆んど動いてゐなかつた。そして霜降状凍結層が 18 cm 残つてゐた。この氷層は小氷柱に分離して凍結層が全體として疎になり、0°C の水は通過し得る状態になつてゐた。

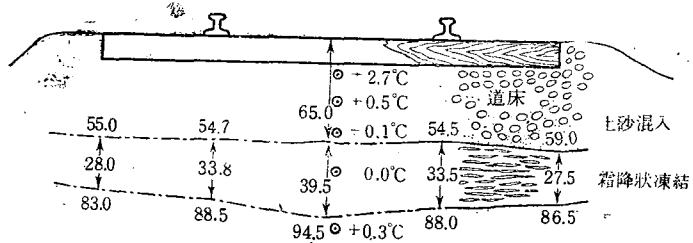
地中温度は

凍結層直下 +0.15°C、凍結層中央 0.0°C、凍結線直下 +0.1°C

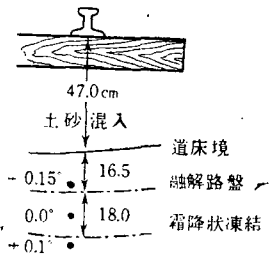
であつた。即ち前回の結果と照合するに、凍結路盤は融解に際し、上方からの融解水が浸み込む爲と傳導とによつて、先ず全層に亘つて 0.0°C となり、此の零度になつた凍結層が上方より融けることが分つた。この時凍結路盤は殆んど例外なく上部即ち道床直下部分に氷層が發達しているために、此の例では凍結層の上半部がとけて 63 mm の融下を生じ、下半部に 18 mm の凍上がある。但し融解直前の凍結層を 0°C の水が通過している形跡が、後述の含水比分布から明らかに認められるので、その爲に凍結層が縮むことは十分あり得る。それで 63 mm の融下は凍結路盤の上半部 16.5 cm 厚さの層の融解のみには歸せられない。此の點は實驗的に人工凍上で調べることにする。

含水比分布は第 5 表に示す如くである。

第 3 圖



第 4 圖



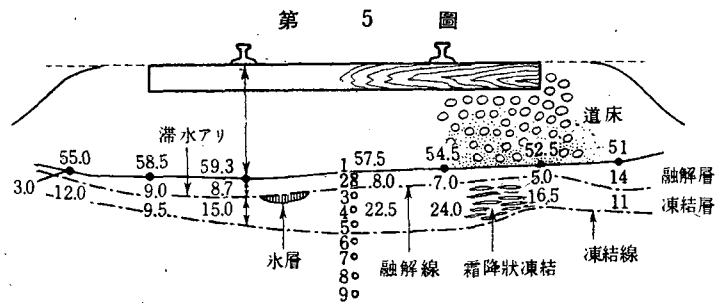
表に見られる如く、凍結線下の土が著しく濡れていて、不透水層たる基盤粘土の上は殆んど飽水状態にあり、特に凍結線直下から 20 cm 下までの間は、緊密状態の最大含水量以上の水を含み、即ち滞水状態にあることが分つた。それで凍結層が上方からとけた場合に、0°C の水が下方

第 5 表

No.	位 置	R(r)	最大含水量 (緊密状態)	摘 要
1	融解層 (16 cm) 上部	0.56	不 均 0.51	砂利混入、飽水状態、所々滞水あり
2	// 中部	0.64		
3	// 下部	0.57		
4	凍結層 (18 cm) 上部	0.86	平 均 0.74	霜降状凍結、土性均一
5	// 中部	0.84		
6	// 下部	0.74		
7	凍結線直下	0.96	平 均 0.81	腐植を含む、凍結層に比し黒色を帯ぶ
8	// 10 cm 下	0.86		
9	// 20 //	0.83		
10	// 30 cm 下	1.03		黒色腐植土、飽水状態 砂入粘土、// 砂土、// 腐植土、// 基盤粘土、//
11	// 40 //	0.55		
12	// 45 //	0.29		
13	// 50 //	1.35		
14	// 60 //	0.98		

の凍結層に浸み込み、それが全域に亘つて 0°C の氷と 0°C の水との混合状態になり、過剰の 0°C の水が凍結層下へ浸み出したものと考えられる。

4 月 26 日に前切斷箇所より枕木 4 挺手前の所を更に切斷調査した。その結果は第 5 圖及び第 6



第 6 表

No.	位 置	R(r)	摘 要
	道床全體	0.073	道床下部土砂混入
1	融解層上部	0.19	切込 87%, 凍土 13%, 凍結線直上滞水、上部の土少し乾く
2	// 下部	0.33	
3	凍結層上部	1.75	粘土、腐植を含む。最大含水量 (緊密状態) = 0.56
4	// 中部	1.40	
5	// 下部	1.29	
6	凍結線直下	0.63	凍結層と同じ土、緊密度小 腐植に富む粘土、やや乾燥 砂土、飽水状態 腐植、飽水状態
7	// 10 cm 下	0.71	
8	// 20 //	0.42	
9	// 30 //	1.29	

表に示す如くである。第5圖に示す如く、此の例でも融解は殆んど上部からのみ生じている。又第6表の含水比分布からも凍結線下に融水が浸透している状態がよく見られる。

§ 4. 補足的資料

i) 試験土壌中の水の移動

追分驛構内に札幌鐵道局の手にて 1 m 立方の穴を掘り、四方の壁を板で在來地盤から隔離して、その中に多種土壌を入れた施設が爲された。發掘調査は 2 月 22 日に行つた。試験土壌 28 種の中、7 種について凍結時の含水比分布を測つた。

1) 海砂、深さ 1 m に入れてある。凍結部を 4 箇所、凍結線直下 1 箇所につき測定。凍結は混凝土狀、霜結晶多し。粒度組成は

4 mm 以上	3.5%	1~0.5 mm	31.5%
4~2 mm	18.3%	0.5~0.25 mm	16.3%
2~1 mm	26.9%	0.25 mm 以下	3.3%

で、極めて粗粒、細土を殆んど含まない。含水量は従つて極めて小さいが、それでも第7表 I に示す如く、凍結層への水の移動が見られた。

次の試験區は以上と同じ海砂を 50 cm だけ入れてあつた。その凍結層の中央部の含水比は 0.12 で、上述の場合と同様であつた。

2) 川砂、深さ 1 m。凍結様式は海砂と同様。粒度組成は

4 mm 以上	29%	1~0.5 mm	51%
4~2 mm	4.3%	0.5~0.25 mm	19.8%
2~1 mm	12.1%	0.25 mm 以下	9.9%

で、細土の含有量が相當ある。従つて含水量も多い。2 mm 以下の粒の 3 分の 1 は多孔質の火山灰砂であつた。含水比分布を第7表 II に示す。凍結層中央に含水比の極大がある。

第 7 表 含 水 比 分 布

位 置	I 海 砂	II 川 砂	III 石 炭 殻	IV 火 山 灰
凍 結 部 1	0.12	0.26	0.78	0.94
" 2	0.12	0.24	0.71	0.95
" 3	0.06	0.39	0.67	0.90
" 4	0.07	0.18	0.50	0.65
凍結線直下 5	0.04	0.13	0.22	0.48

3) 石炭殻、深さ 1 m。凍結部は極めて堅く、未凍結部は乾燥してさらさらしていた。含水比分布は第7表 III に示す如くで、凍結、未凍結各部分の含水量の差の著しいことを示している。

4) 火山灰、深さ 1m. 火山礫と稱すべき大きい粒が多く、最小粒も數 mm あり、土砂分は殆んどない。含水比分布は第 7 表 IV に示す如く、含水量は著しく多い。

ii) 泥炭による路盤入替

稚内附近鬼志別に大正 15 年及び昭和 2 年に泥炭をもつて路盤入替をした場所あり、施工は完全に出ていて、排水施設もしてある。泥炭層の厚さは現在は施工當時の約半分に壓縮されていた。泥炭入替 5 箇所、炭殻入替 1 箇所につき切斷調査の結果は第 8 表に示す如くである。

第 8 表

	砂 利 層	泥 炭 層	泥炭下面深	凍 結 深 度
泥炭入替 1	540 mm	70 mm	610 mm	660 mm
// 2	460	130	590	780
// 3	420	90	510	930
// 4	450	90	540	860
// 5	555	45	600	800
炭殻入替	—	—	—	680

表に見られる如く、凍結線は泥炭層を通り抜けてその下まではいつている。厚さ 100 mm 程度の壓縮された泥炭層では斷熱材としては殆んど効力が無いことが分る。特に炭殻よりも凍結線が深いのは含水量の多寡によるものと思はれる。即ち泥炭區は排水施設良好のため乾燥状態にあつたので、凍結線は深くまで入つた。地下水は低い所であるが、炭殻區は上方からの雨による水の保有量多く、それを凍らすために凍結線の沈降が遅かつたのである。

路盤入替材料としての泥炭の性質の資料として、比重、含水率などを測定した。その結果を第 9 表に示す。施工後 15 年以上経過した材料についての測定はかなり珍しいものである。

第 9 表

施 工		比重 = $\frac{M}{V}$	含水率 = $\frac{w}{M}$	摘 要
大正 15 年	泥炭 1 上部	1.03	81%	よし泥炭, 分解不良
	// 1 下部	0.95	79%	// //
	// 2	1.05	80%	// 分解稍良
	// 3	1.02	82%	// 分解不良
昭和 2 年	// 4	0.98	79%	よし, すげ, 分解稍良
	// 5	1.15	75%	// // 分解良, 土を含む

以上の調査は札幌鐵道局保修課並に現場の方々の絶大なる助力によつて出来たものであつて、筆者等は深甚なる感謝の意を表するものである。