HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 凍上の機構について : Ⅳ. 第四年度現場調査 |
| Author(s) | 中谷, 宇吉郎; 菅谷, 重二 |
| Citation | 低温科學, 2, 47-63 |
| Issue Date | 1949-10-20 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/17398 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 2_p47-63.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

# 凍上の機構について
## IV. 第四年度現場調査*

中谷宇吉郎, 菅谷重二**

### § 1. 緒　　言

本報告は札幌鐵道局凍上對策委員會の第4年度現場調査に參加して行つた調査の報告であつて，第1年度[(1)]，第2年度[(2)]，第3年度[(3)]の調査を補足するものである．

本年度調査に於ては，特に凍結前及び融解終了期の調査をも行つた．調査場所及び調査者は第1表に示す如くである．

第　1　表

| | 調査場所 | 時期 | 調査月日 | 調査者 | 摘要 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 石北線，北見 | 凍結直前 | 17年11月16日 | 中谷，菅谷 | 凍結前含水量分布及び凍上率豫備調査 |
| 2 | 根室本線，豐頃 | 凍結直前 | 〃　〃　17日 | 中谷，菅谷 | 〃　〃 |
| 3 | 函館本線，旭川 | 盛期 | 18年2月28日 | 菅谷 | 地中溫度測定，壕調査 |
| 4 | 石北線，北見 | 〃 | 〃　3月1日 | 中谷，菅谷 | 凍上率調査 |
| 5 | 根室本線，豐頃 | 〃 | 〃　3月2日 | 〃　〃 | 〃 |
| 6 | 根室本線，札內 | 〃 | 〃　〃　〃 | 〃　〃 | 〃 |
| 7 | 石北線，北見 | 融解完了期 | 〃　5月2日 | 〃　〃 | 融解期の含水比調査 |
| 8 | 根室本線，札內 | 〃 | 〃　5月3日 | 菅谷 | 〃　及び融下率調査 |

### § 2. 調 査 方 針

前年迄の3箇年に亙る現場調査により，凍上の成因及び凍上量と凍土の含水量との關係を略ゝ明かにすることが出來た．

本年度に於ては，凍結融解によつて路盤內の水分が如何に移動するかを調査し，同時にこの水分移動によつて生じた凍上量の深度別の分布を詳しく測定することを試みた．

そのために同一線路地點を凍結前，凍結最盛期及び融解終了期の3回に亙つて，切斷調査を繰返した．先ず凍結直前に路盤の縱斷面を作り，土層中の深度別含水比分布を測定した．ついで路

---

* 北海道大學低溫科學研究所業績　第24號．

** 低溫科學研究所．

(1) 氣象集誌，第2輯，第18卷（昭和15年），313頁．低溫科學，第1輯，1頁．

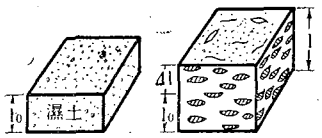
(2) 氣象集誌，第2輯，第19卷（昭和16年），125頁．低溫科學，第1輯，27頁．

(3) 氣象集誌，第2輯，第22卷（昭和19年），21頁．低溫科學，第2輯，7頁．

盤内の單位厚さの土層の凍上率を測定するために，路盤内に水平に五寸釘を打込んで埋戻し，そのまま自然の狀態で凍上させた．

凍上最盛期に再び發掘を行い，含水比の移動狀態及び各釘間間隔の變化を測り，凍上率分布を測定した．次で同じ凍結路盤中の別の斷面に又一定の間隔で釘を打込み，再び埋戻しを行う．以上の狀態で放置し，融解の完了したと思はれる頃三度發掘して，釘間隔より融解沈下の量を測定し，この測定値及び地表面よりの沈下量の測定値より，その凍土の凍上率を算出する事にした．

此の場合の凍上比及び凍上率は村尾氏の例に倣い[1]，即ち第1圖に示す如く，單位高さ $l_0$ の濕土層が，凍結に際して下方から水を吸上げて氷層分離を生じ，$\Delta l$ だけ凍上し $l$ の高さになつた場合，$l_0$ の濕土の凍上比 $f$ は



第　1　圖

$$f=\frac{\Delta l}{l_0} \qquad (1)$$

で表わされる．次に凍上率 $F$ は%で示し

$$F=\frac{\Delta l}{l}\times 100 \qquad (2)$$

である．凍結に際し上方に水が吸上げられた爲，その部分が乾燥收縮したまま凍結する場合，即ち凍縮する場合もあるので，その場合には $f$ 及び $F$ は負の記號を附して表わす事にした．從來の測定量に二三追加して以下

$l_0$＝原濕土の高さ　　$m_a$＝乾土重量（100°C 恆量乾燥）

$\Delta l$＝凍上量　　$w=m-m_a$ 濕土含水量

$l$＝凍土の高さ　　$w+\Delta w=M-m_a$ 凍土含水量

$f=\frac{\Delta l}{l_0}$ 凍上比　　$R'=\frac{w+\Delta w}{M}\times 100$ 凍土含水率

$F=\frac{\Delta l}{l}\times 100$ 凍上率　　$r'=\frac{w}{m}\times 100$ 濕土含水率

$\rho$＝見掛比重（凍土及び濕土の）　　$R=\frac{w+\Delta w}{m_a}$ 凍土含水比

$M$＝凍土重量

$m$＝濕土重量（天然採取土）　　$r=\frac{w}{m_a}$ 濕土含水比

として記述する．猶含水比資料の採取は，新しく考案製作した土壤採取器を用いて，特に天然土の緊密度のまゝ一定容積量を採取し，測定に際して正確を期した．緊密度，含水比，路盤の濕潤度等の關係を調べる際，その緊密度が重要な意義をもつものであるが，從來その點には餘り重き

（1）　滿鐵業務の友，65 號，217 頁に於て村尾氏はこの方法について詳しく述べられている．

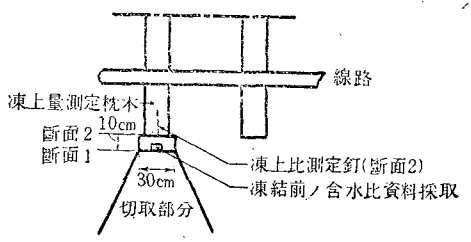
を置かれていなかつたので，特に注意する事にした．採取器及びその使用結果については別の報告で述べる．

## § 3. 調 査 結 果

### I. 北見に於ける調査

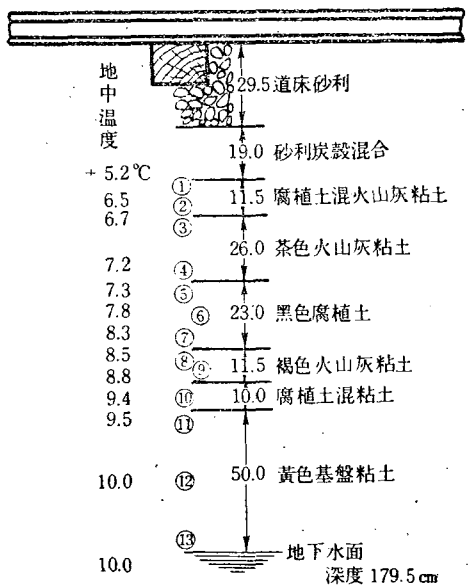
#### a) 凍結前の豫備調査

凍結期直前の 11 月 16 日北見驛より約 2.5 km 地點の築堤箇所で，昨年度凍上量最大の枕木について第2圖に示す如く，枕木の小口下を地下水位迄掘鑿し，含水量測定用資料の採取及び凍上比測定用釘の打込みを行つた．此の枕木より 17 挺はなれた凍上量最小の枕木についても發掘調査を行つた．調査時の氣温は，11 時 20 分で +0.6°C であつた．



第　2　圖

最初枕木端より 10cm 離れて作つた斷面1について，第3圖に示す如き位置より，含水比資料を採取した．採取資料の大きさは，直徑 57.5 mm，長さ 67.0 mm の圓柱で，これを斷面に直角に採取器を差込んで採取した．又此の跡に直ちに寒暖計を深さ 30 cm 迄差込んで地中温度を測定した．地中温度の値は第 3 圖に書き込んである通りで，又その分布狀態を第 16 圖 (a)に示す．即ち路盤内の温度傾斜は 1 m につき約 4°C である．斷面1の見掛土質，資料採取位置及び地中温度は第3圖に示す如くである．採取した資料についての含水比，見掛比重の測定結果を第2表に示す．



第　3　圖

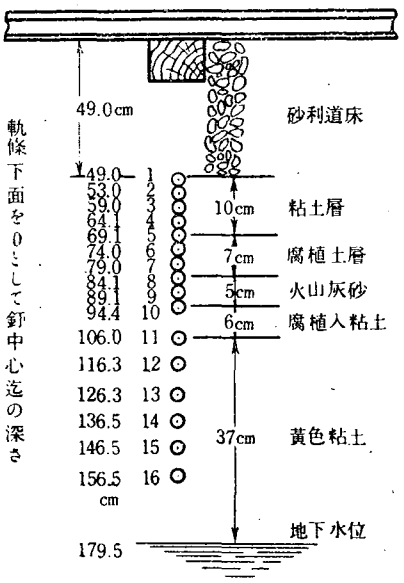
第2表及び第3圖よりわかる如く，此の路盤は火山灰質ローム の盛土地盤であつて，各層は種々多様の土質より構成されている．從つて第2表よりは路盤の含水量の分布狀態を推定する事は困難である．土壌の濕潤度を用うれば，このような場合の含水量の分布狀態を推定することが出來るが，その詳細は後報 “自然地盤に於ける土の緊密度及び含水量の分布狀態について” に於て述べる．含水比資料を採取後土を枕木小口迄削り取り，第2圖に示した斷面2を作り，此の面に直角に，即

第 2 表　北見，凍結前

| 資料番號 | 含水比 | 見掛比重 |
|---|---|---|
| 1 | 0.34 | 1.74 |
| 2 | 0.35 | 1.64 |
| 3 | 0.37 | 1.60 |
| 4 | 0.31 | 1.64 |
| 5 | 0.63 | 1.28 |
| 6 | 0.73 | 1.20 |
| 7 | 0.72 | 1.26 |
| 8 | 0.35 | 1.26 |
| 9 | 0.49 | 1.25 |
| 10 | 0.37 | 1.62 |
| 11 | 0.35 | 1.72 |
| 12 | 0.41 | 1.71 |
| 13 | 0.58 | 1.65 |

ち土層内に水平に凍上比測定用の五寸釘を打込んだ．釘の打込深度及びこの斷面2に於ける土層分布狀態を第4圖に示す．

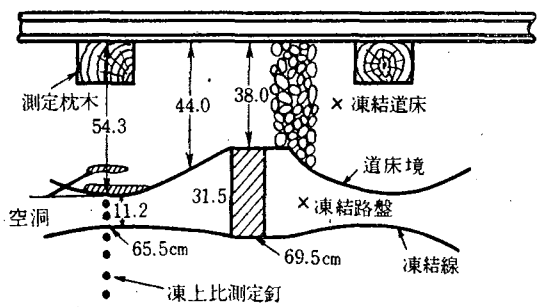
第 4 圖の土層分布は第 3 圖とは多少異つている．此のように土層分布は局部的なものであつて，線路全體が一樣ではないが，大體黃色粘土基盤上に腐植土，火山灰，砂土等の混合した盛土層があるものと見て差支えない．釘打込後此の面に對して，幅 25 cm, 長さ 80cm, 厚さ 5 mm の板の兩面にグリースを充分塗つたものを押し當てて，掘上げた土を從前通りの層位に蹈み固めながら穴の埋戻しを行つた．地表面部分は特に叩きならし，雨水等の過度に浸透するのを防いだ．以上の如くして放置し，天然の狀態で凍結させた．此のようにして各釘間の距離の變化を測定して，凍上收縮の量を深度別に於て測定する事にした．測定枕木，及び附近の枕木についての絕對凍上量は，保線區の協力により殆ど全期を通じて10日目毎に測定した．




第　4　圖

b)　凍上最盛期調査

凍上量が最高に達したと思はれた3月1日に上記の凍上比測定施設個所の發掘を行つた．前回同樣斷面の手前を掘上げ，保護用に當ててあつた板を取除いて測定斷面を露出させ，測定を行つた．その時の凍結狀態を第5圖に示す．圖に見られる如く，測定枕木下の道床は著しく喰込を生じていることを知つた．枕木間の路盤は多量の氷層分離を生じていて，著しく凍上していた．その爲に枕木が吊り上げられ，測定枕木下の道床と路盤との境界には，空洞を生じていた．




第　5　圖

凍結深度は枕木間の 69.5 cm に對して枕木下においては，65.5 cm である．凍結路盤の厚さは枕木間では 31.5 cm あるのに對して，枕木下では 11.2 cm しかなかつた．これは枕木及び空洞の保溫作用の極めて顯著であることを示している．

次に凍上比測定釘の動きを凍結前のそれと比較し，これより凍上量及び凍上比を算出した結果を第3表に示す．即ち凍上量は道床内で53 mm，路盤内で 37 mm，合計 90 mm である．特に釘間 4～5，9～10 に於ては 1 mm づつの收縮が現われている事に注意すべきである．釘間距離の測定にはキャリパーを用いて 0.1 mm 迄測定した．測定枕木について，ベンチマークを基準として測定した絶對凍上量は第4表に示す如く，測定前日 23 日において 87 mm である．凍上進行狀態から見て更に1乃至2 mm の凍上があつたとすると，兩者の差は約 1～3 mm 程度に過

**第 3 表**　北見，凍結盛期

| 釘　間 | 凍結前の釘深度 (cm) | 凍結前の釘間隔 $l_0$ (cm) | 凍結後の釘間隔 $l_0+\Delta l$ (cm) | 凍上量又は收縮量 $\Delta l$ (cm) | 凍上比 $\Delta l/l_0$ | 土層狀況 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 軌條下～釘 1 | 49.0 | 49.0 | 54.3 | 5.3 | 0.11 | 凍結道床 |
| 釘1～2 | 53.8 | 4.8 | 8.3 | 3.5 | 0.73 | |
| 2～3上 | — | 2.6 | 2.9 | 0.3 | 0.12 | 凍結路盤凍結線 65.5 cm |
| 2～3下 | 59.0 | 2.6 | 2.6 | 0.0 | 0.0 | 未凍結 |
| 3～4 | 64.1 | 5.1 | 5.1 | 0.0 | 0.0 | |
| 4～5 | 69.1 | 5.0 | 4.9 | −0.1 | −0.02 | 收縮 |
| 5～6 | 74.0 | 4.9 | 4.9 | 0.0 | 0.0 | |
| 6～7 | 79.0 | 5.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 7～8 | 84.1 | 5.1 | 5.1 | 0.0 | 0.0 | |
| 8～9 | 89.1 | 5.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 9～10 | 94.4 | 5.3 | 5.2 | −0.1 | −0.02 | 收縮 |
| 10～11 | 106.0 | 11.6 | 11.7 | +0.1 | +0.02 | |
| 11～12 | 116.3 | 10.3 | 10.3 | 0.0 | 0.0 | |
| 12～13 | 126.5 | 10.2 | 10.2 | 0.0 | 0.0 | |
| 13～14 | 136.5 | 10.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 14～15 | 146.5 | 10.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 15～16 | 156.5 | 10.0 | 10.0 | 0.0 | 0.0 | |

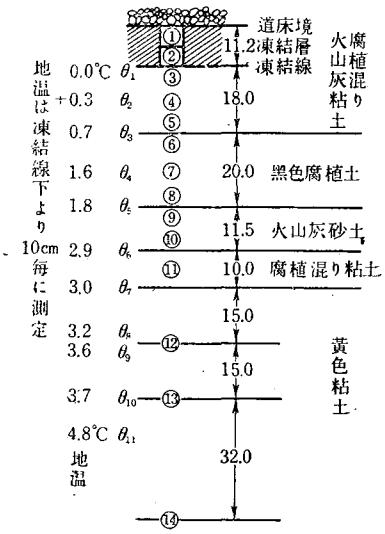
〔註〕 たまたま釘 2～3 の間に凍結線が止つていたため此の間を上下の2部に分け下部の未凍結部分は收縮しないものと假定して此の部分の厚さを引いた殘りを凍結部分の原濕土の厚さとして計算した．

ぎない．この兩者はよく一致しているというべきである．第3表に見られる道床内に於ける 53 mm の凍上量は，凍結道床の含水量を測定した結果，道床部分の凍上によつて生じたものではないと判定された．從つて第5圖に見られるような空洞の存在することより，枕木間の凍上によつて吊り上げられた結果であると推定した．以上の結果より，凍上比測定釘は枕木下に打込むより枕木間に打込み，その左右枕木の絶對凍上量の平均をもつてその位置の凍上量として測定を行えば，より正確な値が得られることがわかつた．それで第5圖に示す枕木間の斜線を施した部分の凍土を切出してその含水比分布を測り，又凍土採取後その面に釘を打込んで融解させ，兩者より前記の凍上量 90 mm を算出しようと試みたが，融解完了期に於ける發掘調査が早過ぎ，凍結部分が殘つてゐた爲，十分な結果が得られなかつた．しかしこの方法については，之と同樣の方法に依つて成功した例，卽ち札内に於ける調査の結果において詳報する．

**第4表**　北見，凍上進行狀態

| 測定月日 | 凍上量 mm | |
|---|---|---|
| | 左（斷面上） | 右 |
| 12 月 5 日 | 0 | 0 |
| 〃 15 日 | 3.0 | 9.0 |
| 〃 25 日 | 7.0 | 11.0 |
| 1 月 5 日 | 16.0 | 18.0 |
| 〃 15 日 | 39.0 | 40.0 |
| 〃 25 日 | 55.0 | 55.0 |
| 2 月 5 日 | 63.0 | 62.0 |
| 〃 15 日 | 73.0 | 70.0 |
| 〃 25 日 | 81.0 | 77.0 |
| 〃 28 日 | 87.0 | — |

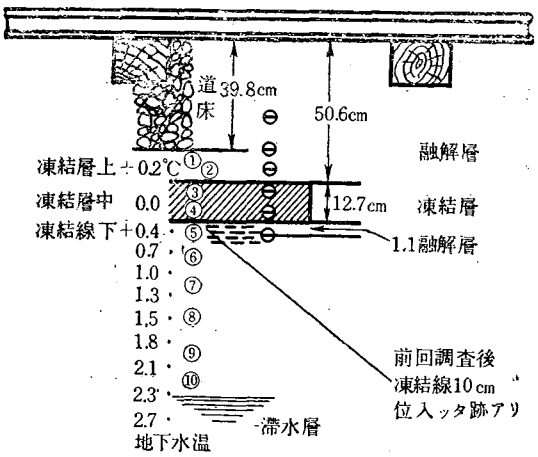
凍上比の測定後，その斷面につき第6圖の①より⑬に示す位置に於て含水比資料の採取をなし，$\theta_1$ より $\theta_{11}$ の點につき地中溫度の測定を行つた．そのうち含水比及び比重を第5表に示し，地中溫度分布狀態を第 16 圖 (b) に示す．溫度傾斜は約 5°C/m で第 2 報の結果と大體一致し，傾斜の大きい場合に相當する．



第　6　圖

c)　融凍終了期調査

5 月 2 日三度前回箇所を發掘した．凍上は最盛期の調査後 7mm 增し，3 月 25 日に於ては，全凍上量は 94 mm となつた．其の後氣溫の上昇と共に，融解が始まり，5 月 2 日現在に於ては絶對凍上量は 52 mm となり 42 mm の融下を生じていた．發掘調査の結果，第 7 圖に示す如く軌條下深度 50.6 cm 迄の道床及び路盤は融解し，その下に 12.7 cm の凍土層が殘存していた．凍土層下端は第 2 回調査の時凍結層の最下端に打込んだ釘より 1.1 cm しか上昇していなかつた．從つて凍結路盤の融解は大體上部からのみ行われると云う前報告の結論は此の場合にも立證された．第 7 圖に示した深度別に採取した含水比資料についての測定結果を第6表に示す．本表に見られる如く本斷面




第　7　圖

第 5 表　北見，凍結盛期

| 資料番號 | 含水比 | 見掛比重 |
|---|---|---|
| 凍結層 1 | 1.11 | — |
| 〃 2 | 0.76 | — |
| 未凍結層 3 | 0.29 | 1.54 |
| 〃 4 | 0.26 | 1.47 |
| 〃 5 | 0.31 | 1.50 |
| 〃 6 | 0.48 | 1.21 |
| 〃 7 | 0.55 | 1.14 |
| 〃 8 | 0.50 | 1.13 |
| 〃 9 | 0.18 | 1.15 |
| 〃 10 | 0.15 | 1.13 |
| 〃 11 | 0.33 | 1.55 |
| 〃 12 | 0.32 | 1.70 |
| 〃 13 | 0.39 | 1.64 |
| 〃 14 | 0.57 | 1.58 |

の土層の構成狀態は前の枕木下の斷面の土層と殆ど一致していた．

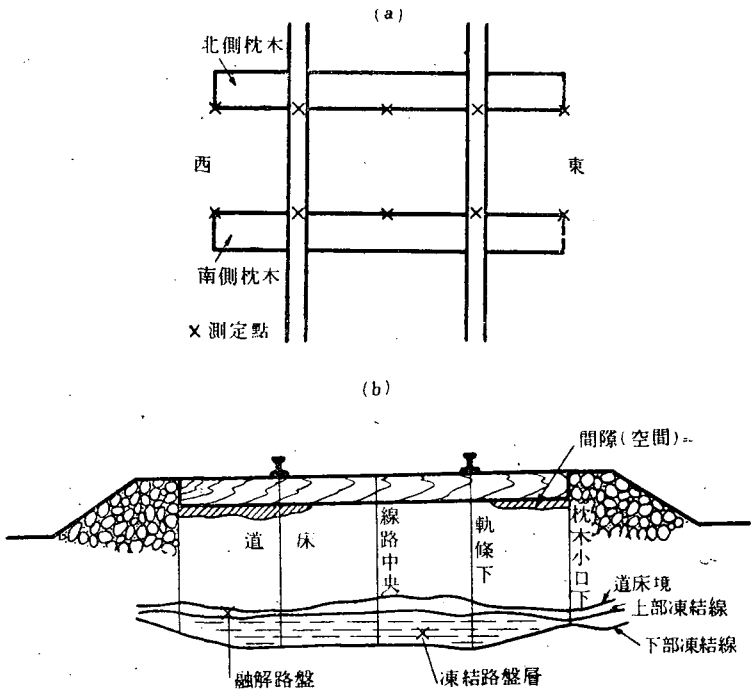
d)　融解期に於ける補足的觀察資料

融解期に於ける調査に於て，測定枕木並びに附近一帶の枕木は線路中央だけ道床に密着していたが兩端は殆ど全部浮いて居た．その原因を確める爲調査枕木より 8 挺離れた枕木と次の枕木とについ

第　6　表

| 資料番號 | 含水比 | 見掛比重 | 資料採取位置 | 見掛土質，備考 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.35 | 1.68 | 凍結層直上，上 | 腐植入火山灰粘土，飽水狀態 |
| 2 | 0.35 | 1.47 | 〃　，下 | 〃 |
| 3 | 0.93 | 1.21 | 凍結層內，上 | 黑色腐植土，多量の上澄水出る |
| 4 | 0.69 | 1.35 | 〃　，下 | 〃　，少量の上澄水出る |
| 5 | 0.72 | 1.28 | 凍結線直下， | 腐植土 |
| 6 | 0.79 | 1.29 | 凍結線下 27 cm | 〃 |
| 7 | 0.74 | 1.28 | 37.5 cm | 火山灰砂 |
| 8 | 0.40 | 1.55 | 48.0 cm | 腐植入粘土 |
| 9 | 0.50 | 1.54 | 60.0 cm | 黃色粘土 |
| 10 | 0.50 | 1.64 | 滯水層直上 | 〃 |

て，切斷調査を行つた．第 8 圖 (a)に示す如き各測定點について，枕木道床間の間隙，凍結深度，凍結層の厚さ等を測定した結果を第 7 表及び第 8 表に示す．以上の測定結果より線路中央は枕木




第 8 圖

兩端に比較して，上部凍結線深度は 2 乃至 6 cm 淺く，又凍結層の厚さは枕木兩端部に對して，夫々 2 倍及び 6 倍位あり，中央部の融解が遲れる事を示している．卽ち第 8 圖(b)に見られる如く，線路內の凍結層はレンズ狀に殘り，中央が中高となる．その爲に道床は特にゆるみ，枕木との間に間隙を生ずる．此の狀態は凍結層が完全に消滅する迄續くもの

第 7 表 (北側枕木下)

| 測定位置 / 厚さ又は深度 | 西側枕木小口下 | 軌條下 | 線路中央 | 軌條下 | 東側枕木小口下 | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 道床厚 | 52.0cm | 53.8 | 51.0 | 55.0 | 57.4 | 挾木量 東側 7 mm 西側 5 mm |
| 上部凍結線深度 | 56.0 | 56.9 | 54.4 | 57.5 | 58.5 | |
| 下部凍結線深度 | 62.2 | 66.0 | 67.1 | 64.4 | 61.8 | |
| 凍結層厚 | 6.2 | 9.1 | 12.7 | 6.9 | 3.3 | |
| 枕木道床間間隙 | 1.0 | 1.0 | ナシ | ナシ | 0.4 | |

第 8 表 (南側枕木下)

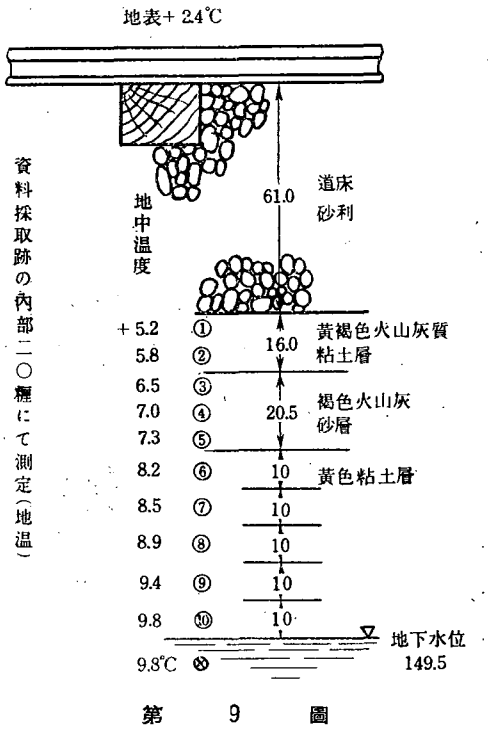
| 測定位置 / 厚さ又は深度 | 西側枕木小口下 | 軌條下 | 線路中央 | 軌條下 | 東側枕木小口下 |
|---|---|---|---|---|---|
| 道床厚 | 52.0 | 52.3 | 50.8 | 56.8 | 52.9 |
| 上部凍結線深度 | 52.0 | 52.3 | 50.8 | 56.8 | 56.5 |
| 下部凍結線深度 | 57.4 | 63.1 | 65.6 | 60.9 | 58.0 |
| 凍結層厚 | 7.4 | 10.8 | 14.8 | 4.1 | 1.5 |
| 枕木道床間間隙 | 5.0 | ナシ | ナシ | 7.0 | 10.0 |

と推察される．又西側に比して，東側の凍結層が薄いのは日射の影響である．冬期午前の日射量が午後に比して強力なる事は北海道に於て一般に見られる現象である．

## II. 豊頃に於ける調査

根室本線の豊頃に於て 11 月 17 日，北見に於けると全く同様の方法で凍結前の豫備調査を行つた．附近線路は極めて凍上量の大なる箇所であつて，過去に路盤入替を行つた形跡があり，路盤中に割石等が見出された．

前述と同様に切斷面を作り，含水比資料の採取を行つた．含水比資料の採取位置及び路盤内の土層分布狀態を第 9 圖に示す．採取した資料の測定結果を第 9 表に示す．資料採取後第 9 圖の面を削り取つた結果は，道床厚が 65.5 cm に深まつたのみで，路盤土層位の變化は見られなかつた．此の斷面に測定釘を打込んで前と同樣に埋戻した．




第　9　圖

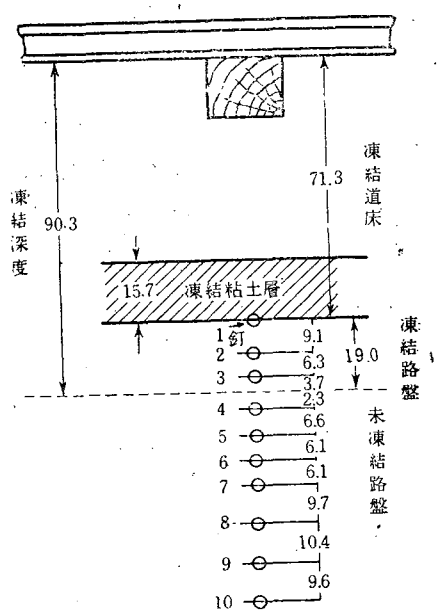
第 9 表　豊頃，凍結前

| 資料番號 | 含水比 | 見掛比重 |
|---|---|---|
| 1 | 0.92 | 1.36 |
| 2 | 0.82 | 1.27 |
| 3 | 0.58 | 1.17 |
| 4 | 0.47 | 1.19 |
| 5 | 0.52 | 1.14 |
| 6 | 0.54 | 1.52 |
| 7 | 0.42 | 1.67 |
| 8 | 0.44 | 1.89 |
| 9 | 0.46 | 1.84 |
| 10 | 0.50 | 1.68 |

3 月 2 日再び發掘調査を行つた．前回の測定枕木について 12 月 14 日より絶對凍上量の測定を行つていた．その結果を第 10 表に示す．第 10 表によれば，測定當日迄に約 116 mm 以上の凍上量があつた事がわかる．次に凍上比測定釘の發掘調査の結果を第 10 圖に示す．凍結深度は 90.3 cm であつて，凍結路盤厚さは 19.0 cm である．第 10 圖の釘の動きより凍上量及び凍上比等を算出した結果を第 11 表に示す．即ちその釘間の測定による凍上量は合計 110 mm であり，第 10 表の凍上量と大體一致した値を示している．此の切斷面に於ける道床の厚さは 71.3 cm であるが，斷面を更に削り取つて見た結果，約 5 cm 奥の枕木下一帶に，15.7 cm の厚さの凍結

**第 10 表**　豐頃，凍上進行狀態

| 測定月日 | 凍上量 mm 左 | 右（斷面上） |
|---|---|---|
| 12 月 14 日 | 0 | 0 |
| 19 日 | 11 | 9 |
| 25 日 | 26 | 26 |
| 1 月 5 日 | 66 | 56 |
| 15 日 | 91 | 88 |
| 25 日 | 111 | 96 |
| 2 月 5 日 | 114 | 111 |
| 15 日 | 117 | 114 |
| 25 日 | 118 | 116 |




第　10　圖

粘土層が存在している事が判明した．此の層は多量に氷層を含んでいて，凍上量の大なる事が觀察された．從つて第 11 表に示す道床部分の 5.8 cm の凍上量は此の粘土層によつて生じたものであることが推察される．以上の如き觀察より，鐵道線路の如き複雜なる地盤構造を有する場合の

**第 11 表**　豐頃，凍結盛期

| 釘間 | 凍結前の釘深度 (cm) | 凍結前の釘間隔 $l_0$(cm) | 凍結後の釘間隔 $l$ (cm) | 凍上量又は收縮量 $\Delta l$(cm) | 凍上比 $\Delta l/l_0$ | 土層狀況 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 軌條下～釘 1 | 65.5 | 65.5 | 71.3 | + 5.8 | 0.09 | 凍結道床凍上 |
| 釘 1～2 | 70.9 | 5.4 | 9.1 | + 3.7 | 0.69 | 凍結路盤凍上 |
| 2～3 | 76.2 | 5.3 | 6.8 | + 1.5 | 0.28 | 〃 |
| 3～4上 | 79.2 | 3.0 | 3.2 | + 0.2 | 0.07 | 〃 |
| 3～4下 | 81.5 | 2.3 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 未凍結路盤 |
| 4～5 | 88.1 | 6.6 | 6.6 | 0.0 | 0.0 | 〃 |
| 5～6 | 94.2 | 6.1 | 6.1 | 0.0 | 0.0 | 〃 |
| 6～7 | 100.3 | 6.1 | 6.0 | −1.0 | − 0.02 | 〃 收縮 |
| 7～8 | 110.0 | 9.7 | 9.7 | 0.0 | 0.0 | 〃 |
| 8～9 | 120.4 | 10.4 | 10.4 | 0.0 | 0.0 | 〃 |
| 9～10 | 130.0 | 9.6 | 9.5 | − 1.0 | −0.07 | 〃 收縮 |

〔註〕釘 3～4 の凍結部分の原濕土の厚さは第 3 表と同樣にして計算した．$\Sigma \Delta L = 11.0$ cm

凍上に於ては，一部分の斷面調査の結果をもつて線路全體の凍上現象を説明する事は，極めて困難であると云う事が分つた．次に凍結層及び未凍結部分の含水比分布を測定した結果を第 12 表に示す．資料の採取位置は，凍結前，卽ち第 9 圖及び第 9 表と全く同樣である．地下水位は不明であるが，深度 1.5 m 附近の土は殆んど飽水狀態を示していた．含水比資料採取後更に線路中

第 12 表　豐頃，凍結盛期

| 資料番號 | 含水比 | 見掛比重 | 備考 |
|---|---|---|---|
| 1 | 1.20 | 1.25 | 釘 1～2 間の凍土 |
| 2 | 1.06 | 1.29 | 釘 2～3 間の凍土 |
| 3上 | 0.87 | 1.32 | 釘 3～4 間の凍土 |
| 3下 | 0.29 | 1.00 | 釘 3～4 間の未凍結部 |
| 4 | 0.29 | 1.00 | 未凍結土 |
| 5 | 0.33 | 1.14 | 〃 |
| 6 | 0·58 | 1.46 | 〃 |
| 7 | 0.44 | 1.56 | 〃 |
| 8 | 0.45 | 1.66 | 〃 |
| 9 | 0.43 | 1.73 | 〃 |
| 10 | 0.46 | 1.70 | 〃 |

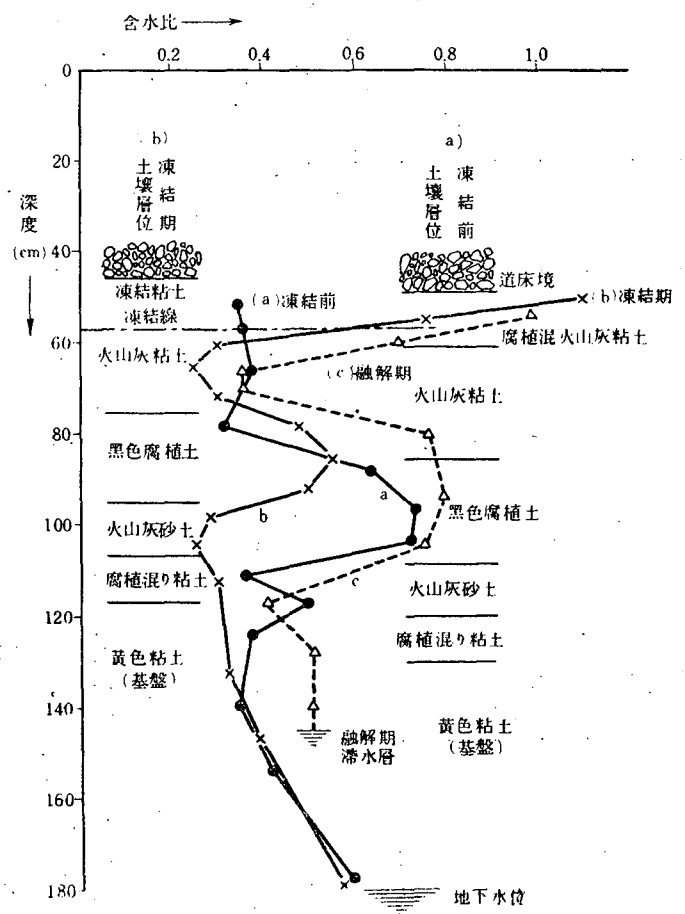
第 13 表　豐頃，凍結盛期

| 測定深度 | 地中溫度 |
|---|---|
| 軌條下77.0 cm（凍結線直下） | 0.0°C |
| 〃 87.0 cm | + 0.8 |
| 〃 97.0 | + 1.0 |
| 〃 107.0 | + 1.6 |
| 〃 117.0 | + 1.8 |
| 〃 127.0 | + 2.0 |
| 〃 137.0 | + 2.2 |
| 〃 147.0 | + 2.8 |

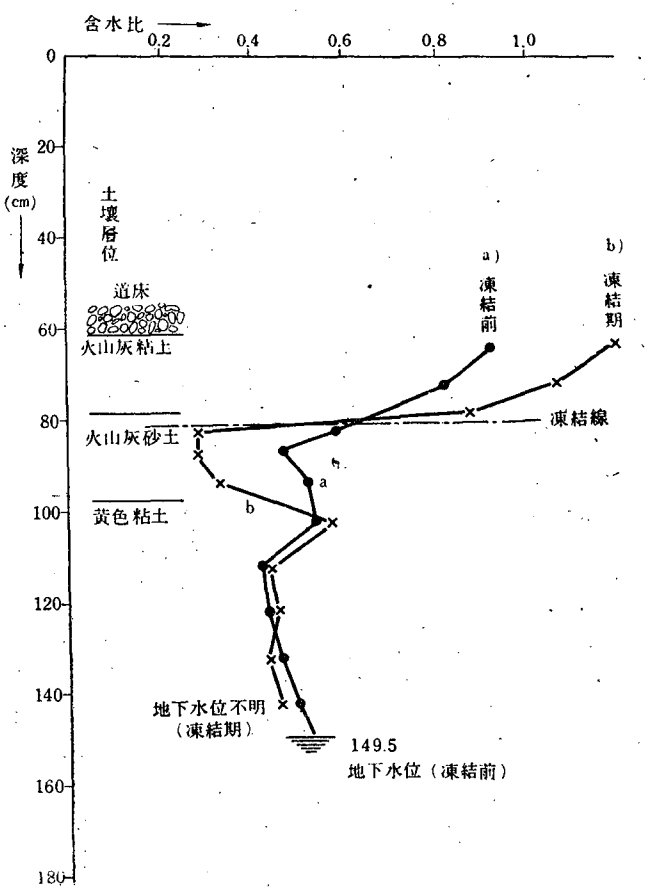
央部に近く作つた面について測定した地中溫度分布を第13表に示す．此の位置に於ける凍結深度は，約77cm であつた．表中最下端の溫度は飽水土中のもので殆んど地下水溫と見る事が出來る．

## § 4. 凍結融解による含水比分布の變化

以上の測定値，卽ち第 2, 5, 6 表より北見現場に於ける地中水分の移動狀況，同じく第 9 表，第 12 表より豐頃に於ける狀況を圖示すると，夫々第 11 圖及び第 12 圖の如くなる．第 11 圖北見の例では凍結前及び凍結後の土壤層位が異つている爲，深度を基準として畫いた分布圖では，細い點は判然しないが，凍結の進行にともない，比較的透水性の良い下方土層中の水は，可成り多量に凍結部に移動している事が分る．凍結期の未凍土の含水比を $r_2$，同じ層の凍結前の含水比を $r_1$ とすると，$r_1-r_2$ は水の減少量を示す．この減少しただけ水は他の層へ移動しているので，これを移動量とも云える．北見の例では全層の平均移動量は最初の含水比 $r_1$ の 23%に達している．卽ち平均移動率は 23%である．第 11 圖及び第 12 圖より，深度が大體同じ深さにある同一土質につき各土層別に移動率を算出して見ると，第 14 表の如くなる．卽ち各層の見掛土質より判定するに，層位の深淺にかゝわらず，透水性の良い土質程多量の保有水を上部の凍結層に供給している事が分る．各層別の土の粒度分析結果は，第 14 表右方に示してあるが，粘土分の含有




第 11 圖　北見，含水比分布

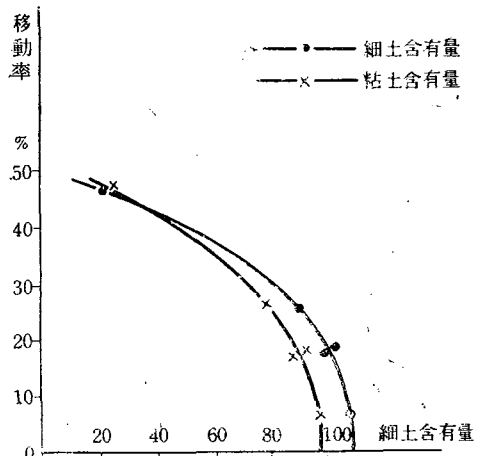



第 12 圖　豐頃，含水比分布

第　14　表

| 圖番號 | | 見掛土質 | 凍結前含水比平均 $r_1$ | 凍結期含水比平均 $r_2$ | 移動率 $\left(\frac{r_1-r_2}{r_1}\times 100\right)$ | 細土 100分中(2 mm 以下) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 2.0～0.25 mm | 0.25～0.05 | 0.05～0.01 (微砂) | 0.01以下 (粘土分) |
| 第11圖 | 上部↓下部 | 火山灰粘土 | 0.34 | 0.23 | 18% | 7.2% | 3.9% | 38.5% | 50.4% |
| | | 黒色腐植土 | 0.69 | 0.51 | 26 | 14.1 | 6.3 | 35.4 | 44.2 |
| | | 火山灰砂土 | 0.49 | 0.26 | 47 | 54.7 | 11.6 | 23.6 | 10.2 |
| | | 腐植混り粘土 | 0.37 | 0.30 | 19 | 4.6 | 1.6 | 42.6 | 51.2 |
| | | 黄色基盤粘土 | 0.45 | 0.42 | 6.7 | 2.0 | 1.1 | 43.3 | 53.6 |
| 第12圖 | 上部 | 火山灰砂土 | 0.52 | 0.30 | 42 | | | | |

量と保有水の減少率との間には明らかな關係がある．それを圖示して見ると第 13 圖の如くなる．即ち粘土分の含有量が 60% 近くになると，含有水の移動は殆ど無くなることを示している．北見の例では基盤粘土層下部に地下水があつたので，それよりの補給が少量存在し，特にこの場合の減少率を小さく示していることも考えられる．しかしその量は少く，本質的にこの結果をかえる程ではない．微砂と粘土との合計即ち細土の含有量と移動率との間にも同様な關係があり，第 13 圖に×印で示してある如くである．以上の結果より凍結層下部に透水性の良い土層が厚く存在する時は，地下水位の深い場合でも，その保有水が凍上の爲の給水源として可成り有力であるという事がわかる．元來地下水と地中保有水とは單に量の差にすぎなくて，本質的の區別はつけられないのであるから，この結果は寧ろ當然のこととも云える．



第　13　圖

凍結線下に乾燥層があり，その下方に含水比の餘り顯著でないが或る極大がある事は前報告[1]で述べた．本回の調査に於ては，更に著しい含水比分布の極大が北見でも豐頃でも見られた．しかし凍結期の含水比分布では凍結期以前より乾燥したか否かは分らないので，移動率の大小が乾燥狀況を示すものである．凍結線直下の移動率を見るに，北見に於ては，第 14 表に見られる如く

(1)　氣象集誌，第2輯，第 19 卷(昭和16年)，125頁．

18%であり，此の値は他の下部の土層の移動率に較べて特に少く，凍結によつて特に乾燥してはいないことを示している．含水比分布が極大の形を示している様に見られるのは，土壌の最大容水量の差に基く含水量の相違によるものと考えられる．この場合，各土層別の最大容水量の値は第15表に示した如くである．第14表中の火山灰砂土が，その粘土分の含有量の少ないにも拘らず含水量が比較的多いのは，此等の粒子が極めて多孔質の輕石状粒子であるためである．

融解期の水分の動きは，凍土の融解が完了していなかつた爲と，資料採取斷面が異つたために層位の厚さが一致しない事に依つて判然とした結果は得られなかつた．調査の際に凍結層上部の融解によつて生じた餘剰水が凍土を浸透して，その下部の土層を飽水状態にしていた事が觀察された．含水比分布の測定結果は第11圖中點線で示す如くであり，第15表の最大容水量と比較して見る時は，全く飽水状態にある事が分る．

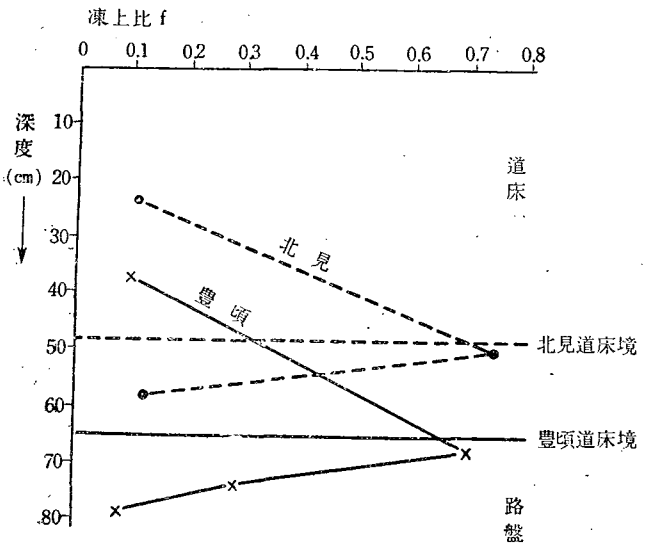
第　15　表

| 土壌層位見掛土質 | 凍結前含水比 | 最大容水量 | |
|---|---|---|---|
| | | 粗の場合 | 密の場合 |
| 火山灰粘土 | 0.34 | 0.46 | 0.40 |
| 黒色腐植土 | 0.69 | 0.85 | 0.71 |
| 火山灰砂土 | 0.49 | 0.47 | 0.39 |
| 腐植混り粘土 | 0.37 | 0.49 | 0.35 |
| 黄色粘土 | 0.45 | 0.48 | 0.41 |

## §5. 補足的資料

### I. 深度別凍上比分布

豐頃に於ける調査の結果，第11表について見るに，路盤内の凍上は路盤上層部程，凍上比は大で，下部に進むに從つて小さいという結果を得た．此の結果を圖示すると第14圖に實線で示した如くなり，後述の札内に於ける調査の結果と一致する．北見の調査の結果も同様であつて第14圖に點線で示す如くである．これから凍上量の大部分は道床直下の路盤部分に於て現われるという結論を得た．この結果は別に新しいことではなく，凍上關係者には常識的に考えられていたことであるが，今回の測定結果はそれを量的に確めたことになる．

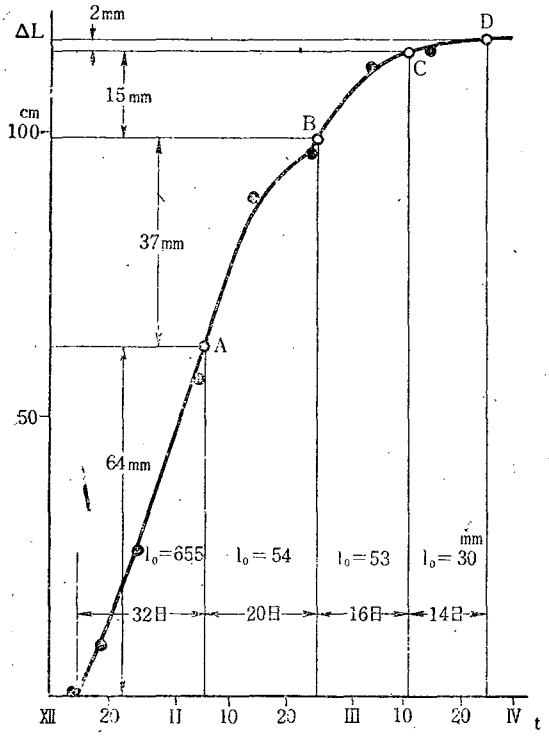



第　14　圖

### II. 凍結進行速度

線路内に凍結が進行して行く速度についての精しい測定値は

今迄餘りなかつた．本回の測定に於ては，凍上比測定用釘の間隔の變化より各深度での凍上量が測定され，又地表面に於て或る期間毎に絶對凍上量を測定してあつたので，その兩者より凍結線が路盤内に侵入して行く速度を概算する事が出來た．豐頃現場について示すと，第 15 圖の如き結果を得る．即ち第 10 表右の凍上量を用いて凍上曲線を畫き，此の曲線上に第11表に示した凍上比測定釘間の凍上量 $\Delta l$ を置いて見ると，第 15 圖 A,B, C, D の各點を得る．此の場合前述の如くベンチマークから測つた凍上量は，2 月 25 日調査當日 116 mm を示し，$\Sigma\Delta L$ は +112−2= 110 mm であつた．その差は測定の誤差，主として軌道と釘 1 間の測定誤差と考えられるので，先ず切斷調査日の D 點を押へ，それより第 11 表の $\Delta l$ を下向きにとつて C, B, A 點の順に決めた．




第　15　圖

第 11 表と第 15 圖とより凍結線が地表より侵入して各深度に於て凍結前の濕土の單位厚さを通過するに要する時間が分る．即ち凍結進行速度を深度別に知ることが出來る．例えば AB 間について見るに，凍結前に 54 mm の厚さであつた土が凍結して 37 mm だけ膨脹したのであるが，その凍結に 20 日を要したことが分る．即ち原濕土について凍結進行速度は 2.7 mm/day である．各深さについて計算した結果は第 16 表に示す如くである．

表より明かな如く道床は凍結速度大きく，路盤の 10 倍程度速く凍る．凍結線が路盤内に入つ

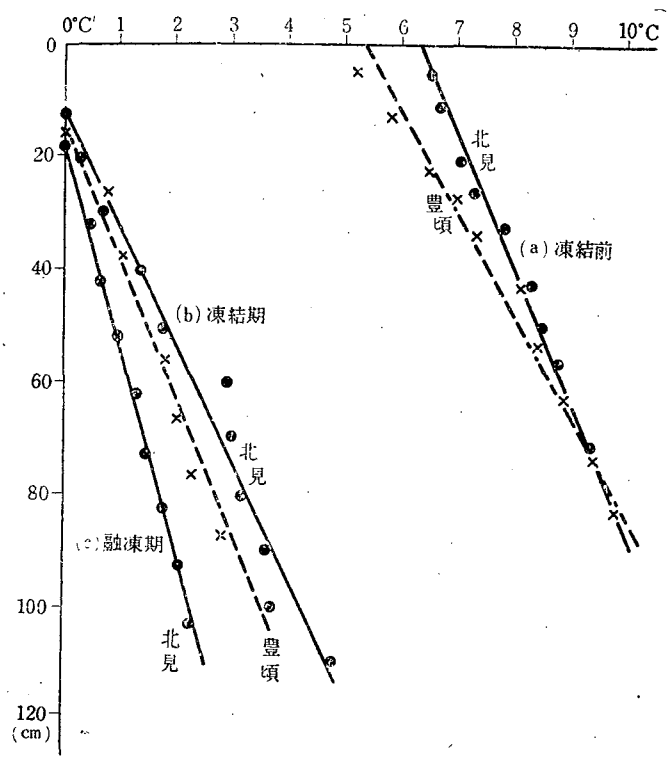
第　16　表

| 釘　　間 | 地表よりの深度（凍結前） | 凍　上　比 $\Delta l/l_0$ | 凍結線沈下速度 mm/day | 備　　考 |
|---|---|---|---|---|
| 軌道～釘1 | 65.5 cm 迄 | 0.09 | 29.8 | 道床部分粘土層混入 |
| 釘1～2 | 70.9 〃 | 0.69 | 2.17 | 路　盤　内 |
| 2～3 | 76.2 〃 | 0.28 | 3.03 | 〃 |
| 3～凍結線 | 79.2 〃 | 0.07 | 2.02 | 凍結部のみ |

てからは，初めは速度大で深くに行くに從い小さくなるのは當然である．路盤上層卽ち釘1～2間の速度が次の層より速度が小さい．これは含水量が多い爲に氷を作る潛熱が澤山出る爲である．その點は凍上比を比較してみれば了解される．

III．地中溫度分布及びその變化

凍結前及び凍結後の路盤內地中溫度分布を測定した結果は，各項の圖中に示す通りである．今この結果と道床境を起點として各深度別に圖示して見ると，第 16 圖の如くなる，卽ち北見及び豐頃に於ける測定の結果は，地中の溫度傾斜は，地下水位の深淺に殆ど關係なく，大體1mにつき 4～5°C である．此の溫度傾斜は凍上盛期に於てもその未凍結路盤についてみれば，凍結前と大體同じ値を示している．融凍期になると上方からとけた零度の水が浸透してくるので，地溫は全體としても下り又溫度傾斜も大體凍結前の半分くらいになる．精密な測定は北見の1例だけしか得られなかつたが，その點は全般的に當嵌まるものと考えて差支えなかろう．




第 16 圖　路盤內溫度傾斜

## § 6. 總　　括

本年度調査に於ては，土壤の深度別に凍上比，含水量等を調べ，地下各層に於ける凍上狀態を知ることに努めた．凍結直前に路盤を掘り，五寸釘を一定間隔に埋めて埋め戻し，凍結盛期にそれを堀つて，間隔の變化から各深度に於ける凍上比分布を調べた．本調査で判明したことは次の如くである．

i) 凍上比分布から出した總凍上量はベンチマークから出した値と誤差の範圍內で一致した．卽ち本方法で深度別凍上比分布が正しく測定される．

ii) 凍結に際し下層の未凍結土壤の保有水が凍結層へ動き，それが凍結層の凍上に貢獻する．從つて未凍結部分の水分の移動を調べることが大切である．

iii) 凍上曲線と凍上比分布とから，凍結線沈下速度即ち凍結速度を出すことが出來た．そして道床と路盤との差，路盤内での凍上比と凍結速度との關係を天然の凍上について調べた．

iv) 地中溫度分布を精しく調べ，凍結前 4～5°C/m 程度で凍結を始め，凍上盛期でもその値は餘り變化しないことを知つた．融凍期ではその傾斜は約半分に減る．

本研究は札幌鐵道局凍上對策委員會の仕事の一部であつて，本調査に多大の協力を惜しまれなかつた札鐵當局各位の御好意に感謝の意を表する．

# 低溫科學第二輯（第一刷）正誤表

| (頁) | (行) | (誤) | (正) |
|---|---|---|---|
| 目次 | 20 | 福島 | 福富 |
| 3 | 12 | $\alpha$ | $\alpha d$ |
| 6 | 第6圖 | 5 cm | 0.5 cm |
| 〃 | 20 | $kg/cm^{\frac{3}{}}$ | $kg/cm^{\frac{3}{2}}$ |
| 24 | 22 | 相對溫度 | 相對濕度 |
| 26 | 第1表の5 | <105 | >105 |
| 27 | 4 | 寫眞 2 | 寫眞No.2 |
| 〃 | 10 | 〃 1 | 〃 No.1 |
| 〃 | 14 | 〃 3 | 〃 No.3 |
| 〃 | 19 | F | 下 |
| 〃 | 30 | 寫眞 4,5 | 寫眞No.4,5 |
| 28 | 4 | $Tc$ | $Ta$ |
| 〃 | 5 | $Tc$ | $Ta$ |
| 〃 | 23 | 寫眞 6,7,8 | 寫眞No.6,7,8 |
| 〃 | 29 | 〃 8 | 〃 No.8 |
| 29 | 2 | 〃 9,10,11 | 〃 No.9,10,11 |
| 34 | 10 | 鐵線があるが | 鐵線であるが |
| 59 | 第13圖 | −•−細土含有量 | −•−粘土含有量 |
| 〃 | 〃 | −×−粘土含有量 | −×−細土含有量 |
| 70 | 24 | b c | b : c |
| 71 | 3 | 寫眞No.1 | 寫眞No.12 |
| 〃 | 3 | 〃 No.2 | 〃 No.22,13 |
| 〃 | 16 | 〃 No.1 | 〃 No.21,12 |
| 74 | 6 | 第2圖(A) | 〃 No.14 |
| 〃 | 〃 | 〃 (B) | 〃 No.15 |
| 〃 | 〃 | 〃 (C) | 〃 No.16 |
| 〃 | 8 | 寫眞 (A) | 〃 No.14 |
| 〃 | 10 | 寫眞 (B) | 〃 No.15 |
| 〃 | 18 | 〃 (C) | 〃 No.16 |
| 〃 | 20 | 〃 (A) | 〃 No 14 |
| 75 | 9 | 第4圖(D)及(E) | 〃 No.17,No.18 |
| 〃 | 11 | 寫眞 (D) | 〃 No.17 |
| 〃 | 12 | 〃 (E) | 〃 No.18 |
| 77 | 脚註3 | Seron | Screen |
| 80 | 11 | $\int_0^\infty \varphi(r)d^2(r)p\tau$ | $\int_0^\infty \varphi(r)p^2(r)d\tau$ |
| 88 | 10 | 寫眞 1 | 寫眞No.19 |
| 〃 | 20 | 〃 2 | 〃 No.20 |
| 89 | 1 | 〃 3 | 〃 No.21 |
| 〃 | 3 | 〃 4 | 〃 No.22 |
| 〃 | 12 | 〃 5 | 〃 No.23 |
| 〃 | 〃 | 〃 6 | 〃 No.24 |
| 〃 | 14 | 〃 4 | 〃 No 22 |
| 〃 | 22 | 〃 7 | 〃 No.25 |
| 〃 | 27 | 〃 8 | 〃 No.26 |
| 〃 | 28 | 〃 9 | 〃 No.27 |
| 90 | 3 | 〃 12 | 〃 No.30 |
| 〃 | 10 | 〃 8 | 〃 No.26 |
| 〃 | 11 | 〃 11 | 〃 No.29 |
| 〃 | 12 | 〃 9 | 〃 No.27 |

| (頁) | (行) | (誤) | (正) |
|---|---|---|---|
| 90 | 13 | 寫眞 12 | 寫眞No.30 |
| 94 | 28 | 〃 7 | 〃 No.25 |
| 99 | 16 | 示すと | みると |
| 〃 | 〃 | 寫眞No.1の如く | トル |
| 〃 | 22,23 | 寫眞1に見られる | トル |
| 100 | 2 | 寫眞と同樣に | トル |
| 101 | 27,28 | 寫眞No.2に示す樣に | トル |
| 101,102 | 30,1 | 寫眞に示す如く | トル |
| 102 | 13 | 第1表及び寫眞No.2を | 第1表を |
| 108 | 26 | 寫眞 1 | 寫眞No.31 |
| 〃 | 29 | 〃 4 | 〃 No.34 |
| 109 | 3 | 〃 4 | 〃 No.34 |
| 〃 | 〃 | 〃 5 | 〃 No.35 |
| 〃 | 20 | 〃 2 | 〃 No.32 |
| 112 | 3 | 〃 3 | 〃 No.33 |
| 113 | 17 | 〃 6 | 〃 No.36 |
| 〃 | 18 | 〃 7 | 〃 No.37 |
| 〃 | 29 | 〃 8 | 〃 No.38 |
| 115 | 27 | 〃 9 | 〃 No.39 |
| 116 | 4 | 〃 9 | 〃 No.39 |
| 120 | 13 | $1.0\times10^{-7}V$ | $1.0\times10^{-2}V$ |
| 121 | 7 | 30cm | 130cm |
| 128 | 14 | 3m | 4.8m |
| 136 | 第1表の1 | 左右對線 | 左右對稱 |
| 142 | 1 | 打點式によつて | 自記的に |
| 159 | 6 | Ag | Aq |
| 164 | 25 | $\Delta lg > tw$ | $\Delta' g > \Delta tw$ |
| 166 | 27 | 0.001N | 0.001/N |
| 171 | 3 | 9術 | 6年 |
| 〃 | 16 | $\frac{Tt}{Ta}Vt$ | $\frac{Ta}{Tt}Vt$ |
| 172 | 2 | $R\text{-}I=\frac{e}{e_{sat}}100$ | $RH=\frac{e}{esat}100$ |
| 〃 | 22 | a), b) | 寫眞No.40, No.41 |
| 174 | 第3表 | 相對溫度 | 相對濕度 |
| 180 | 6 | *B.nap s* | *B.napus* |
| 181 | 2 | *Faphanobras-sica* | *Raphanobras-sica* |
| 182 | 4 | *Horde m* | *Hordeum* |
| 183 | 13 | *nap s* | *napus* |
| 244 | 19 | 單位生殖 | 單爲生殖 |
| 248 | 15,16 | 溫度氏はでも | 溫度でも |
| 〃 | 16 | 伺松島 | 伺松島氏は |
| 252 | 13 | Sthwarkinowa | Schkwarnikow |
| 257 | 6 | 寫眞1—5 | 寫眞No.56の1—5 |
| 259 | 8 | 寫眞4—5 | 寫眞No.56の4—5 |
| 260 | 6 | 〃 6 | 〃 No.56の6 |