

凍上害に対する鉄道および道路対策技術の展開

History of Frost Heave Prevention of Roads and Railway in Hokkaido

原口 征人

by HARAGUCHI Masato

abstract : The engineers of Hokkaido had the problem for the long time. Because there was the "Frost Heaving" that is a disaster only in the cold regions. The theory of frost heaving appearance isn't clear as yet, but in the engineering section (railway, road, etc.), it's prevention has been settled. In the case of railway, it's study was started before the World War 2 and many style of prevention was designed. Another case of road, the prevention was investigated after World War 2. In this study, the vicissitude of it's prevention was cleared, so it is the history of development of original technology against disaster cause from meteorological phenomena.

1. はじめに

凍上害に対する研究は昭和初期に鉄道において始められた。今日の凍上対策工はこの時期の検討委員会のうち、札幌鉄道管理局に設置された「凍上対策研究委員会」の成果を発展させ鉄道・道路に適応させていったといえる。

そこで本研究では、筆者の既存研究^{※1}からこの委員会の資料をより詳細に検証し、委員会内の研究から対策工が導き出された経緯をまとめ、その前後の対策工の変遷をまとめる。またのちに道路における対策工に及ぼした影響について考察する。

2. 凍上害の概要

(1) 土の凍上現象

気温が零下となる寒冷地では、地盤の熱が奪われ土中に零度線が深く進行する。この零度線付近では土中の水分を吸い上げ、厚い氷の層が成長していき土木構造物に被害を及ぼす。これを凍上害といい、北海道と東北の一部の地域で発生する^{※2}。

(2) 凍上による実際の被害

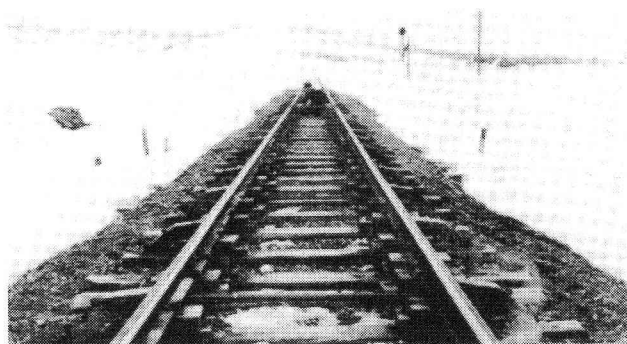


図1 挟み木挿入後の軌道^{※3}

鉄道においては軌道が土構造物であり、バラスト層の下部にある路盤は、水分が供給される状態であれば凍上を起こす。線路全体が一様に上がれば列車の運行上なんら問題は生じないが、ほとんどは前後左右がばらばらに持ち上がる不斉凍上となる。このため凍上が起きてしまった線路では、列車の安全な運行のために枕木と線路の間に「挟み木」をかませ、低い部分をかさ上げして軌道面を確保する(図1参照)。

道路の凍上害は舗装道路が普及しだしてから認識されるようになった。戦後に舗装道路が検討され始めると凍上力による舗装の破壊、舗装下部の春期泥濘化の問題が現れる。春期に破壊された道路を補修しても、また次冬の凍上によって破壊されるという状態であった。

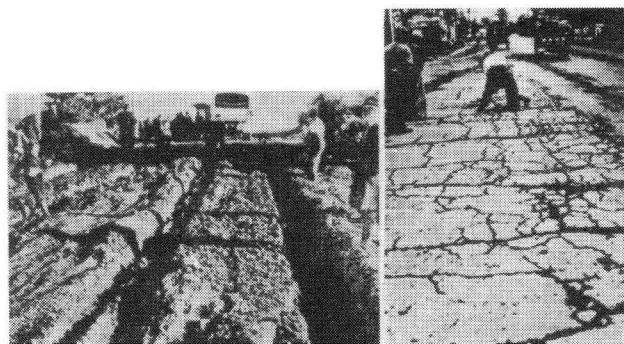


図2 破壊された砂利道(左)と舗装道路(右)^{※4}

3. 凍上対策研究委員会での検討

(1) 札幌鉄道管理局凍上対策委員会の設立

昭和初期までの凍上対策については前記論文において詳述した。保線作業に多くの労力を費やしていたこの凍上害に対し札幌鉄道管理局では、1937年(昭和12)8月、稲積豊二氏の発案により、工務部と保線課の職員からなる「凍上線路研究委員会」を発足させ、3カ年の計画で調査を開始した^{※5}。

*keyword : 凍上害、昭和期

**正会員 博(工)(社)北海道開発技術センター 道路情報館
(〒061-2273 札幌市南区豊滝424-1)

1937年冬期 予備調査（凍上の形態、来年度からの調査箇所選定）

1938年 5月 第2回打ち合わせ

1938年冬期 本格的調査

しかし、凍上の発生原因がつかめねば的確な対策を見出せないことが判り、職員のみで検討するにはあまりにも問題が複雑で、委員の一人（本間氏）は日本雪氷協会の座談会^{注5}で協力要請をしている。

この座談会が契機となったのか、千秋邦夫保線課長の指示によりこの凍上の問題を大学研究者とともに研究することにした。座談会出席者、鉄道技術研究所の渡邊貫技師から北大理学部教授中谷宇吉郎に協力依頼がなされた。同じ時期（1939年夏頃）には中谷の高校時代の友人である、満鉄保線課長高野与作も満鉄の凍上研究に対して助言を求めている^{注6}。それまで中谷は雪の研究者として活躍していたが、これらの依頼を受け凍上の研究に関わることになる。

工学部への依頼はどのような経緯であったか定かではないが、土木工学科教授小野諒兄が鉄道の権威者であったため、この人選は順当である。

こうして1939年(昭14)11月「凍上対策研究委員会」が設置される（図3に写真を示す）。

委員長	工務部長	小出こう次郎氏
副委員長	保線課長	千秋邦夫氏
囑託委員	北大工学部	小野諒兄教授
同	同	真井耕象助教授
同	北大理学部	中谷宇吉郎教授
同	本省工務局保線課	堀越一三技師
同	大臣官房研究所	渡邊 貫技師

局内委員としては工務部各課長ならびに技師ほか数名の技手が加わり、幹事は宮沢技師、国沢技手、のちに小川技手が担当した。

このように委員会は、鉄道省工務局、大臣官房研究所（のちに鉄道技術研究所）、北海道帝国大学理学部および工学部、のそれぞれの専門家が加わり構成された。北大理学部には理論調査、工学部には対策調査、鉄道省本



図3 初期の委員会メンバー^{注7}
（前列右から2人目が中谷、次が小野、一人おいて真井）

省関係には軌道関係と土質の専門的な調査、と分担された^{注7}。

（2）現場の調査^{注8}

委員会の研究活動は、まず現場調査から始められた。職員によって既に行われていた現場計測は引き続き毎年の冬期間（11月から3月）続けられ、1939年度は道内63箇所において調査された。目的は、まず現場計測の大量調査から気温と凍上の関係を求めようとするものであった。計測項目は「毎日の最低、最高気温」「10日毎の枕木上端の絶対凍上量」である。

次に凍上の顕著な箇所は、枕木間合いをあらかじめ掘削しておき、調査日に到着した大学の研究者により観察、調査された（図4および図5）。写真の撮影も同時に行い、採取された試料が大学に持ち帰られた。

（3）凍上の観察

研究者の観察によって見出された見解は的確なものであった。特に中谷は雪の研究において雪結晶を観察し分類したときと同じように、凍上した土をよく観察し、氷の入り具合から4つの状態に分類した。曰く「霜柱状凍結」「霜降り状凍結」「氷粒状凍結」「コンクリート状凍結」である。図6は、開削によって観察される特定箇所



図4 調査中の中谷宇吉郎^{注7}



図5 掘削され露出した路盤^{注3}

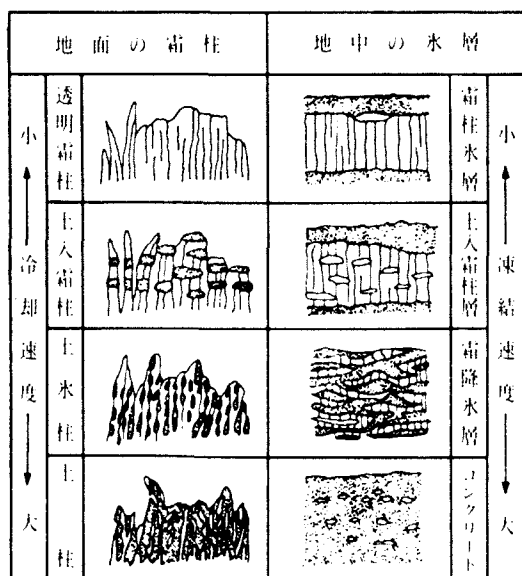


図7 霜柱と凍上の類似^{注6}

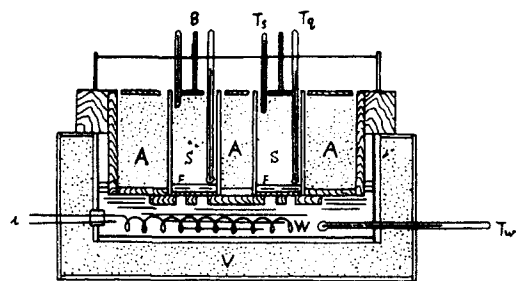


図8 凍上試験機^{注9}

所の状況データを総合して、軌道内部でこういった様相を呈しているのかを想像した模式図である。また水の間に土を挟み込んで結晶化していることに注目し、偏光顕微鏡で水を見ると縦に結晶がそろっていることから、霜柱と同じ現象が凍上の成因である、と推論した。

工学部の2名は当時の対策工を施した路線を調査したことから、対策を施しても全てが押さえられておらず、排水工だけでは効果が上がっていないため、土質自体の粒度とくに微粒子（細粒分）を研究する必要を感じとった。また工学部の研究者らしく、費用の少ない対策工を考案するよう腐心している。

(4) 大学での実験

工学部では土の物性に着目したことから、現場試料を砂以下の粒度において粒度分布を分析し、同じ土を用いた凍上試験結果とあわせて考察した。土の吸水性が大きく影響していることから、吸水試験・透水試験も実施している。結果は、吸水度と凍上性がよく近似したため、排水を重要としている。

さらに同じ細粒度でも凍上しない石炭殻について、アルカリ性質の面から凍上抑止効果を吟味した。凍上性の粘土に塩化マグネシウム・塩化カルシウム等を添加し、凍上性を減じることを確認している。

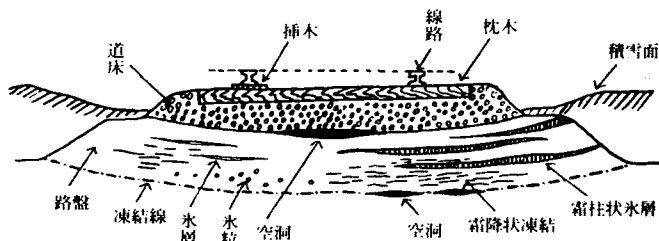


図6 中谷宇吉郎が観察した線路凍上の被害状況^{注6}

一方、現場調査で凍上と霜柱の類似を認めた中谷は、低温実験室で冷却速度を変えた実験を行い、霜柱も凍上も土の混入が凍結速度に依存してくることを確認した。図7は霜柱と凍上を、水中への土の混入度合いと凍結速度の観点からまとめたものであり、図8は理学部で利用された凍上試験機で、国内初の試験機である。

また中谷は凍上現象について、土中で水が成長するために水が吸い上げられ、凍結面直下の土が収縮して割れ目を発生させ、この割れ目に氷が析出してきて割れ目を押し広げ成長してゆく、との凍上発生メカニズムを仮説として導いた。この理論を確認するため、凍上するときの土の収縮（縦方向と横方向）、凍結面の上下の含水比分布、を凍上試験で調べた。同じことを再度、現場調査でも行い実験室と同じ仮説を裏付けする結果をえた。

(5) 対策工の変遷^{注10}

図9に研究委員会の論文に対して、委員会以前の対策工と以降の対策工を関連させた相関図を示す。上から下に図を見通すと判るように、以前の対策工を研究で解明された事項により選別し、新しい対策工を導き出している。以下ではこの間に対策工としてa)退けられたもの、b)検討が深められたもの、c)新規に検討されたもの、に分け詳しく説明を加える。

a) 退けられたもの

・路盤の保温

泥炭による保温は良質の泥炭が無いことや劣化してしまうこと、寒気が厳しければ役に立たなくなること等により、却下された。

・特殊工法

特殊道床は玉石に細粒分が入って役に立たなくなると。支壁工法はコンクリート量が多く施工単価が高価すぎて、広範な凍上対策には不向きであることで却下。

・道床の対策

道床部で凍上することは確かだが、路盤の凍上量と比較して相対的に影響が少ないので、道床への対策のみで対処することはできない。

b) 検討が深められたもの

・路盤入れ替え

対策としては一番良い。入れ換え材料としては玉

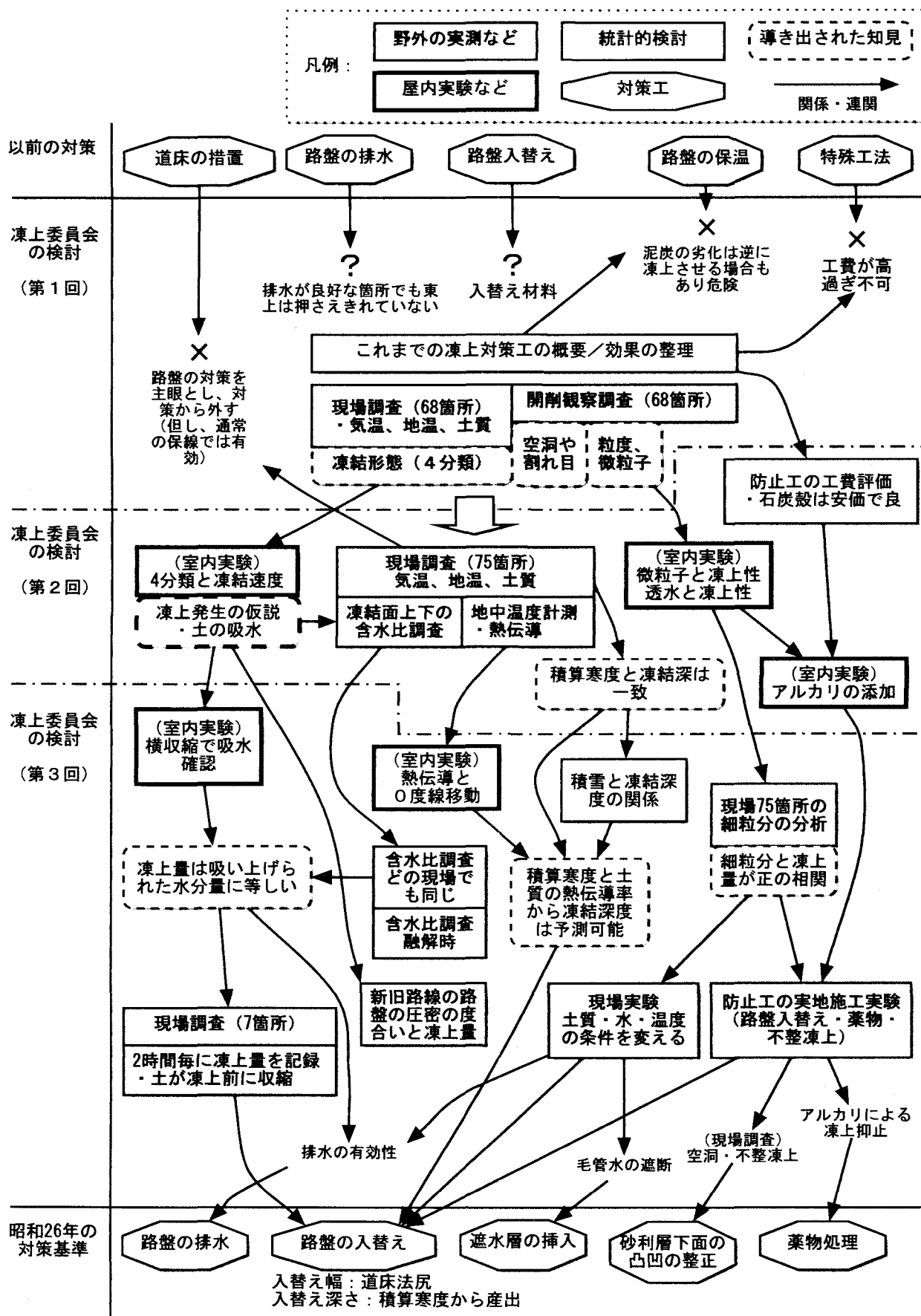


図9 凍上防止対策工の変遷と凍上対策委員会の検討 (原口作成)

表1 北海道における凍上対策の変遷

		凍上対策の変遷 (鉄道：通常、道路：太字)	備考
1927	昭和2	鉄道省で第1回保線講習会開催され、線路凍上防止について議論される	
1928	昭和3	第4回保線講習会開催	
～	～	この頃、第13回保線講習会で線路凍上防止について議論される	
1937	昭和12	満州鉄道総局内に設置された耐寒対策委員会で鉄道線路の凍上防止に関する調査研究が行われる	凍上対策検討始まる
		札幌市内に凍上線路研究委員会が設置され、3カ年の研究を行う(国鉄の職員のみ)	
1938	昭和13	高田金十郎「寒地鉄道線路の特異性と保守」鉄道保線研究会より発行	
1939	昭和14	旧日本国有鉄道札幌鉄道局に凍上対策研究委員会が発足。北大の中谷吉郎や真井耕象教授に研究を嘱託。	官学連携で理論からの研究
		保線講習会の内容が本として出版される(仙台保線事務所：大友勇)	
1940	昭和15	凍上対策委員会で2月下旬3月上旬に発掘調査。札幌凍上対策委員会第1回報告書。	
1941	昭和16	札幌鉄道局凍上対策委員会の第2年度現場調査が行われる	
1942	昭和17	札幌凍上対策委員会第2回報告書	
1943	昭和18	札幌凍上対策委員会第3回報告書	
1944	昭和19		
1945	昭和20	旭川鉄道管理局で調査坑による各種置換材地温の測定開始。	戦争による成果の散逸
1946	昭和21		
1947	昭和22	真井教授による凍上機構講演(日本学術振興会)。	
～	～	＜この間、鉄道で各管理局ごとの対策＞ ＜道路では舗装の凍上害が顕在化＞	
1951	昭和26	旭川鉄道管理局業務資料「凍上」発行(小川清氏の功績)。東北線の複線工事に北海道の路盤入替工が採用される	土木試験所による観測の開始
		札幌・帯広・釧路・室蘭・函館開港の国道(砂利道)で調査開始	
1952	昭和27	旭川・留萌・稚内を加えさらに調査。5号線に凍上防止対策調査試験工事。月寒でコンクリート舗装への影響調査	
1953	昭和28	第1期3カ年調査終了(砂利道実験調査)	
1954	昭和29	凍結調査1年目	
1955	昭和30	凍結調査2年目。美瑛地区凍上調査を4カ年で始める	
～	～		
1959	昭和34	36号線美々試験道路が着工(24ブロックの凍上抑制層)。土木試験所に低温実験室着工。	大規模な実験試験道路の施工
1960	昭和35	「路盤入替第1次計画」によって北海道の工事が強力に進められる。	
1961	昭和36	伊藤部所長による集大成の研究報告。薬劑処理による凍上対策、断熱工法による凍上対策に着手。	

石、碎石など間隙の大きいものは不可。石炭殻が廃物利用も兼ね廉価であるため最良である。砂も良好である(火山灰も同じく)。入れ換え幅は道床法尻までとする(道床凍固したときに宙づりで中が空洞になるのを防ぐ)。入れ換え深さはその場所の積算寒度より算出した深さまで(以前はどの場所でも画一の深さ)

・排水工

路盤入れ替えとあわせると効果が高く推奨する。

c) 新規に検討された工法

・薬物処理

塩化マグネシウム、塩化カルシウム、海水などを散布することで凍結温度を低下させ、粘土を固化するため凍上を抑止する。粘土粒子にこれらイオンは吸着するので持続性も期待できる。

・砂利層下面の凸凹の整正

枕木下のバラストは路盤に食い込むため、補充により枕木下のバラスト厚は増し、枕木間合いの部分は路盤粘土が上がる、というサイクルを繰り返し古い線路では道床と路盤の境界面が凸凹になっている。この凸凹があると枕木間合いの部分が早く凍上し枕木部分の道床ごと持ち上げたに空洞を作る。これが凍上を促進、融解時の沈下を甚だしくしているので、この凸凹を平らに整正する。

・遮水層の挿入

毛管水の遮断

4. 鉄道凍上対策への研究の応用

凍上対策委員会の成果は計3回の研究報告があったが、2次大戦の戦況悪化のため最終報告が出ていなかった。さらに、戦後の資料の焼却で研究成果は散逸してしまう。これをまとめたのが旭川鉄道管理局である。

中心となったのは凍上対策委員会で委員であった、小川清氏である。小川氏は散逸した資料を集めて復刻し、終戦後になされた調査研究もあわせて「業務資料 凍上」²¹⁰を発行した(1951年(昭和26)3月)。

戦後調査された事項に凍結深度の計測があげられる。中谷教授の指導により旭川と北見において、旭川鉄道管理局により「防空壕式土中温度計測」が実施された。駅構内に地下壕を掘り、入れ換え材料ごとに凍結深を計測するもので、このデータを使い経済的な置き換え深さが提言された。また、挟み木作業と路盤入れ替えの費用対効果の算出も行い、凍上量20mm以上の箇所には路盤入れ替えを行うのが経済的であるとされた。

こうして1951年(昭和26)7月「凍上防止工法標準」「路盤入替作業標準」が制定され、以降路盤入れ替え工が強力に推進された。

5. 道路での対応

(1) 北海道開発局土木研究所での凍上調査の開始

戦後、道路除雪の普及に伴い冬期交通が円滑化された反面、路面が直接寒気にさらされるため、道路の凍上と融解による被害が増大し、その対策が技術上の課題として早急に対応が迫られてきた。舗装施工をしても凍上害で破壊される事例が発生し、これから舗装道路を延長していくにあたり最大の障害となっていた。

1951年(昭和26)以降、北海道土木技術会に道路凍上防止対策研究委員会が設けられ、北海道開発局、北海道大学、北海道、札幌市の協力のもと組織的な調査研究が始められる。委員長は真井教授であり、鉄道での成果を元に効率的に事業が推進されていく。

1951年(昭和26)北海道開発局の設置に伴って付属機関となった土木試験所は、11月から、札幌・帯広・釧路・

室蘭・函館の各開発建設部管内の国道のうち、冬期間除雪する路線で凍上調査を開始した。翌年には旭川・留萌・稚内の開発建設部も加わった。調査は気象観測にはじまり、観測坑（ピット）を掘り、凍上量・地温・土質・凍結深度などの凍上観測がされた。

観測と同時に試験工事もすぐ行い、国道5号線の手稲に「凍害防止対策試験工事」を施工した。アスファルト舗装の下路盤を20,40,60,80cmの砂層とした置換工法と、エラストイトを用いた遮水工法の両者を施工し比較検討に用いる。

これらの結果から、凍上対策工法としては置換工法を基本とすることに決定し、検討事項をその材料の許容限界と置換厚さに絞りきった。この点は、鉄道で長期間にわたって現象の理解に固執し、工法も様々に検討していったのと比較して、その決定の早さが目立つ。先行事例があったからこそできた技といえる。

観測方法も鉄道の応用を順次改良して行っていく。地温計測は熱伝対を用いた自動計測に、凍上量は凍上板を地中に埋め込み深度ごとの凍上量を観測できるように工夫された。

（2）国道36号札幌千歳間における対策工

凍上調査の結論がまだ提出されない1952年(昭和27)9月、のちに弾丸道路と呼ばれる国道36号札幌千歳間の改良舗装工事が始まった。この改良工事にあたり直接の指揮者で、道路凍上防止対策研究委員会のメンバーでもあった高橋敏五郎（当時は北海道開発局札幌開発建設部長）は、研究会の試案を実行に移した。

方法は、凍結深度の80%までを凍上の可能性がある深さとし、舗装や基層、碎石路盤の厚さを差し引いた下層の範囲を、周辺でとれる良質の粗粒火山灰で置き換えるものであった。この路線の区間は約100cmが凍結深度であるため、80cmまでを凍上しない材料で構築することとなった。

1953年(昭和28)11月の工事完成ののち一冬を経過した状態において、当初の設計通りに施工された区間には全て凍上被害が発生していなかった。

（3）観測の拡大と大規模な試験道路の施工

一方、委員会の凍上現場調査は1953年(昭和28)に3カ年の調査を終え、最終的に計測箇所は58箇所にとどんだ。これは砂利道の調査であった。続いて1954年(昭和29)からの2カ年で、舗装計画路線においてあらかじめ凍結最盛期における凍結深度・凍結状態・路床土質の調査（85箇所）を行っている。これらの観測データは継続して集められていき、膨大な統計資料となっていく。

調査データを用いた研究によって、置き換え深さや置換材料に一定の基準を得て、最終的な仕上げに大規模な試験道路を施工しその効果を確かめることとなった。この試験道路は国道36号線美々地区に1959年(昭和34)着工、翌年完成した（図10）。延長1250m、幅員7.5mの副道は凍上抑制層の種類と施工の厚さを変えた24ブロック480mの凍上試験区間を持ち、他に凍害対策用アスファル

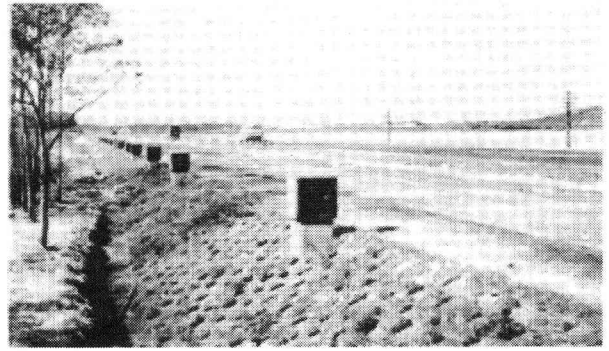


図10 美々試験道路^{※11}

トの区間も併せ持っていた。

（4）置き換え深さの算定

北海道開発局土木試験所の継続的観測により、道内各地の最大凍結深度が計測された。これを用いて、最適な置き換え厚さを導出する算出式が統計的に求められ、「凍結深さの80%の深さまでを置換する」との経験的基準に、理論上の妥当性が加えられた。最終的な研究は1962年(昭和37)に伊福部氏により提出されている^{※4}。

北海道の舗装道路は凍上対策工のために他地域よりも工費が高く、このために舗装延長が留められていた。舗装延長を延ばすためにも、最も経済的つまり置き換え厚さを可能な限り浅くする必要があったのである。

また適当な置換材料（砂、切り込み砂利）も入手し難くなってきたため、道内に大量に存在する火山灰を置換材料として使用できないかを吟味するために、室内凍上試験を始める。この凍上試験法は海外の文献^{※12}を参考にしてはじめられ、以降道路路体材料の凍上試験に適用されていく。

6. 鉄道・道路の凍上対策史の比較による成果

以上、両者の比較から判断される歴史的事項として以下の点を上げる。

- ・凍上対策は鉄道の対策が進み、それを道路の対策が追うことになった。両者には、研究者を介した技術の継承が見いだせる。
- ・鉄道の対策試行時期が長かったのに対して、道路の対応は短く完了し、これらは技術的蓄積の反映といえる。
- ・鉄道で終戦時に戦前の成果をまとめ、実施に持っていった人物がいた。
- ・鉄道と道路の人脈的つながりは北海道大学工学部の研究室であると推察される。
- ・現在、道路で出された基準を鉄道に準用している^{※13}。
- ・凍上学の研究支援は「鉄道」「電柱」「LNG地下タンク」など、集中的に解決の投資を受けたときに学問的進展もはかられた。
- ・道路の実施調査は、置き換え厚に問題点を絞り、効率的な調査を行った。
- ・道路の研究は置換材料の研究（各種土質の凍上性の実施研究）へ移行（適当な置換材料の不足）する。

(参考文献)

- 1) 原口征人：鉄道技術における列車凍上害への対策の変遷,土木史研究,pp.197～200,2002
- 2) 「凍上」については、土の凍結改訂編集委員会編：『土の凍結－その理論と実際－』土質基礎工学ライブラリー23,土質工学会,1994、に詳しい
- 3) 北海道総局施設部保線課編：『北海道保線資料編』,1974
- 4) 伊福部宗夫：北海道における道路の凍上・凍結深さおよび置換率に関する研究, 土木試験所報告・第26号, 1962.3
- 5) 「鉄道と雪害・凍害に関する座談会」,日本雪氷協会月報,第1巻3号,pp.59～71,1939.7
- 6) 東晃：『雪と氷の科学者・中谷宇吉郎』,北海道大学図書刊行会,p122,1997
- 7) 小川清：『線路のおもり』,旭川鉄道管理局保線業務研究会,1956
- 8) 札幌鉄道局：『凍上対策研究委員会報告 第2回』,1942.3
- 9) 北海道帝国大学低温科学研究所編：「低温科学」,第1巻,1946
- 10) 旭川鉄道管理局：『業務資料 凍上』1951.3
- 11) 北海道開発局：『北海道開発局十五年小史』, 1966
- 12) 例えば、Stephen Taber; Freezing and Thawing of Soils as Factors in the Destruction of Road Pavements, Public Roads Vol.11, No.6
- 13) 鉄道総合技術研究所「鉄道構造物等設計基準・同解説 省力化軌道用土構造物」1999 (p66)、における難凍上性材料の基準は、(社)日本道路協会編「道路土工－排水工指針」1987、より準用されている