

北海道における鉄道と道路の凍上対策史

History of Frost Heave Prevention of Roads and Railway in Hokkaido

北海道大学大学院工学研究科 ○正員 原口征人 (Haraguchi Masato)

1. はじめに

「凍上」という寒冷地特有の現象は、長く北海道の土木技術者にとって問題であった。その根本的な発生理論はいまだ明らかにされていないが、技術的な対処方法は様々に考案されてきた。これらの対策の歴史は、寒地土木技術にとって誇るべき成果であり、ひとつの技術発達史として考察に値する。また、凍上害は完全に克服されていないことから、過去の構造物への対処方法を検討し、今後の対策の方向性を導き出すことも重要である。

今日的には北海道新幹線に凍上害が発生するかどうかを検討課題としてあげられ、現在、実際の凍上試験などで検討を進めている。これらハード面の対応に加え、本研究では凍上対策史のなかから参考とすべき事項を導き出すことを目的とする。

2. 凍上害の概要

2.1 土の凍上現象とその工学的問題

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の間隙水や吸着水が氷の結晶として析出し、厚い氷の層を成長させる。この氷は冬期間徐々に成長するのだが、その圧力は非常に強く、地表または地中に構築された土木構造物を破壊する。

また、凍上現象はマクロ的には土中水の移動であり、土構造物の水分を地表面近くに氷として集める作用を果たす。このため春期には氷が溶け、排水されない余剰間隙水として土構造物表層を泥濘化させる。

2.2 線路の凍上害

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)。

図1 挟み木挿入後の軌道(札幌線)¹⁾

2.3 道路の凍上害

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。砂利道の時代には春期の道路の泥濘化は、凍上によるものも顕著であったが、雪解け水の排水の問題が大きかった。冬期は逆に道路が凍土となり固結して使いやすくなった。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使用できるようにしてから、また凍上によって破壊されるという状態であった。

図2 凍上によって破壊された砂利道(右)と舗装道路(左)²⁾

3. 鉄道における対応

3.1 明治から昭和初期までの凍上害への対応

昭和初期の鉄道保線状況については、1925年(大14)から1941年(昭16)までに計31回が開催された「保線講話会」の記録³⁾にその実状がうかがえる。鉄道省主催で開催されたこの会では、保線員の技術向上、情報共有や研究研鑽を目的として、各鉄道局から選抜された研究発表があり、討議がなされた。凍上対策については第1回と第13回に発表がなされ、その内容を以下に記す。

「線路凍上防止

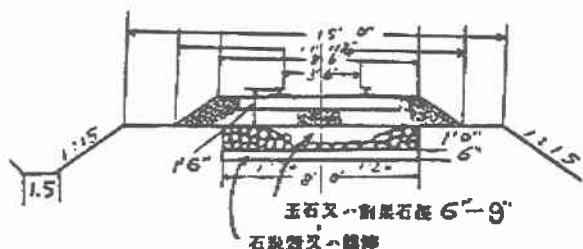
凍上の防備策は……凍上の理論が明瞭にならないと果たして容易に防備しうるものか、またある程度までは相当の経費を投ぜねば効果のないものにわかに判断しがたいのでありますがいまだ悲しいかな、凍上の物理性が充分研究されておりませんし、一方経費の点から申して投すべき防備費の利率が普通のはさみ木作業の保守費以上であるような莫大なる施設は面白くないのでありますし、かたがた別に妙案もないのであります。ただ、従来行ったものを申し上げて参考に供したいと思ひます。

(括弧内はその工法の目的：筆者記す)

1. 側溝拡大(排水)
2. 砂利のふるい直し(細粒分除去)
3. かさ置き(寒気の遮断)
4. 路盤改良(細粒分除去)
5. 地下配水管(排水)
6. 線路陶管箇所の閉塞(寒気の遮断)
7. 雪にて線路を覆うこと(寒気の遮断)
8. 凝固点低下する化合物の散布(凝固点効果)

このなかで一番効果のあるのは「4. 路盤改良」とし、図3のように排水のよくない路盤土を砂または石炭がらに置き換える工法として紹介している。石炭がらは蒸気機関車が動力だった時代に、容易に入手できる非凍上性

しかしこれらの対策は一長一短があり、他の本⁴⁾では玉砂利を使った路盤置き換えは細粒分の混入によって、徐々に効果をなくす、といている。この時期問題とされたのは挟み木作業による枕木の消耗であった。犬釘を何度も打ち直すことにより通常の半分の寿命しかもたないため、高価なクレオソート注入枕木は使わないようにとされている。また、挟み木作業は冬期間の保線作業のうち45%を占めていた。



3.2 札幌鉄道管理局と満鉄の対応

札幌鉄道管理局では 1937 年(昭和 12)8 月、工務部と保線課の職員により部内だけの「凍上線路研究委員会」を発足させ、3 力年の調査を行った。しかし問題の複雑さに研究を完成するまでには至らず、1939 年(昭 14)11 月「凍上対策委員会」が設置される。この委員会は、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によって構成された。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。その成果は 1943 年(昭 18)12 月までに、3 回にわたり委員会の報告書として発表されている。この委員会には今日、雪の研究者として知られる中谷宇吉郎教授が参画しており、凍上機構の理論研究の担当となった。工学部土木工学科からは小野諒兄教授、眞井耕造助教授が入り、各種実験を行っている。

この委員会が日本における凍上研究の開始といつてよい。これ以前に満鉄において研究調査が始められていたが、その指導に当たったのも中谷であり、札幌鉄道管理局でその経験を生かしたといえる。

まず始めに凍上発生箇所現場調査が行われた。現場を開さくし観察することから研究をはじめている。そして凍結形態を適格な表現で名称を付けている(図5)。また氷の層以外にも空洞が多く見られることに注目している。次にそれまで行われることの少なかった注)実験室内での凍上実験に着手する。そして氷層直下の土が脱水収縮を起こして割れ目をつくることを見出し、毛管現象の理論から氷の成長を導きだしている。現在の研究蓄積からは多少誤っていると思われる箇所もあるが、その当時の凍上の形態を忠実に観察し、体系だてたものにな

工学部嘱託の研究では、真井助教授が中心となり調査研究が進められた。凍結深度の算出の研究、化学物質の混入による氷点降下の対策など、実際の対策案を導出することに焦点を絞り研究が展開していった。



図4 掘削された路盤

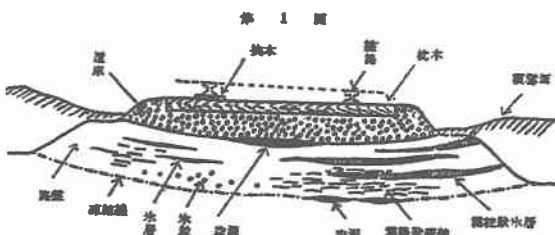


図5 中谷教授の凍上した軌道の観察⁵⁾

この研究委員会の成果は第3回の報告に採択された事項より以下である。

(1) 凍上の原因

凍上は主として土壌の凍結に依り地中水の分離晶
出せるに起因す。

- 1) 気温
- 2) 土壤の熱伝導度
- 3) 土壤の組成および緊密（締固め注）状態
- 4) 温度降下ならびに乾燥による土壤の収縮性
- 5) 土壤凍結による含有水の分離晶出性
- 6) 地中水の量
- 7) 毛細管現象による水の移動性
- 8) 温度傾斜による水の移動性

(3) 凍上線路の防止工法として有効なもの

- 1) 路盤入れ換え
入れ換え材料 石炭殻、海砂、川砂（細砂）
- 2) 薬物処理
薬物 苦汁、塩化カルシウム
- 3) 路盤の排水
- 4) 砂利層下面凹凸の整正

凍上対策委員会の成果は計3回の研究報告があつたが、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、戦後の資料消却などにより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」を発行した（1951年(昭和26)3月）。

表1 北海道における凍上対策の変遷（鉄道および道路）

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回保線講話会開催され、線路凍上防止について議論される	凍上対策検討始まる
1928	昭和3	第4回保線講話会開催	
～	～	この頃、第13回保線講話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	
1938	昭和13	札鉄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）	
1939	昭和14	高田金十郎「寒地鉄道線路の特性と保守」鉄道保線研究会より発行	
1940	昭和15	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。北大の中谷宇吉郎や真井耕象教授に研究を囑託。	
1941	昭和16	保線講話会の内容が本として出版される（仙台保線事務所：大友真）	
1942	昭和17	凍上対策委員会で2月下旬3月上旬に発掘調査。札鉄凍上対策委員会第1回報告書。	
1943	昭和18	札鉄凍上対策委員会第2回報告書	
1944	昭和19	札鉄凍上対策委員会第3回報告書	官学連携で理論からの研究
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。	
1946	昭和21	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。	
1947	昭和22	第1期3カ年調査終了（砂利道実験調査）	
～	～	凍結調査1年目	
1951	昭和26	凍結調査2年目。美瑛地区凍上調査を4カ年で始める	
1952	昭和27	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。	
1953	昭和28	「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。	
1954	昭和29	伊福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。	
1955	昭和30	～	大規模な実施試験道路の施工
1959	昭和34	～	
1960	昭和35	～	
1961	昭和36	～	
～	～	～	
～	～	～	
～	～	～	
～	～	～	
～	～	～	
～	～	～	

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。駅構内につくられた防空壕で冬期間、地中温度を計測するもので、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した。

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。

4. 道路での対応

4.1 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の路盤を 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、問題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。

4.2 観測の拡大と大規模な試験道路の施工

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 箇所に及んだ。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



図6 美々試験道路

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5)。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トの区間も併せ持っていた。

4.3 置き替え深さの算定

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。

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を参考にしはじめられ、以降道路路体材料の凍上試験に適用されていく。

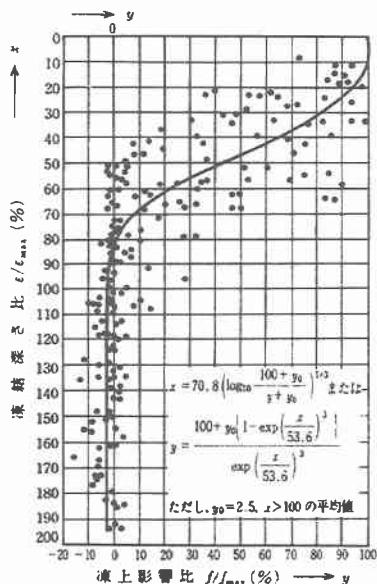


図7 凍結深度の観測データを利用した置換深さの算定

5. 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、道路の順に進み両者に直接的つながりは見いだせない
- ・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。（指針が出るまで鉄道20年道路10年）
- ・鉄道で終戦時に戦前の成果をまとめ、実施に持っていた人物がいた
- ・鉄道と道路の人脈的つながりは真井教授がキーパーソンといえる。今後、どのような指導をしたのかを検討。
- ・道路で出された基準を鉄道に適用している
- ・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れたため、効率的の調査が行われた。
- ・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）へ以降（適当な置換材料の不足）

6. おわりに

鉄道での長い期間の検討から道路での置き換え深さに焦点を絞った集中的な検討へ、技術的成果が活用されていることが見出された。その後、新規鉄道軌道の施工基準には、道路での研究成果が応用されている。

今後は、これらの対策方策の連関を加味して考察し、新しい鉄道の凍上対策基準の一助とする予定である。

参考文献

- 1) 北海道総局施設部保線課編：「北海道保線資料編」, 1974
- 2) 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
- 3) 大友勇：『保線作業規準並解説』, 1929.4.25
- 4) 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, 1938
- 5) 北海道開発局：北海道開発局十五年小史, 1966
- 6) 北海道保線史研究委員会：『北海道保線のあゆみ』, 1972
- 7) 北海道帝国大学低温科学研究所編：「低温科学」, 第1巻, 1946