

鉄道技術における列車凍上害への対策の変遷*

*The countermeasure to the frost heave damage in the railway technology**

原口征人**

By Masato HARAGUCHI**

要旨：鉄道線路の凍上害は北海道や東北など寒冷地の鉄道に特有であり、土の凍上現象が科学的に解明されていないこともあって根本的な解決手段が今だ無い。しかし実務経験上ではさまざまな工法や保線技術での対処が模索されてきた。1937年(昭12)には札幌鉄道管理局が北海道帝国大学の中谷宇吉郎教授などに凍上機構の科学的解明をめざし、研究の依頼をしている。

本研究では、地域特有の気象害に対する技術解決の1つの事例として、列車凍上害への対処の変遷を追ひ、科学的な検討と実務への応用について考察する。

1. はじめに

線路凍上は寒冷地の保線に関わるものとして起こってきた。北海道では建設直後からの問題であったと思われるが、輸送量が少なかった時代には冬期・春期の期間に線路保守を遂行すればよいとの認識であったと推測される。しかし、満州事変によって南満州鉄道株式会社の経営が北方まで伸び、その線路保守が必要になり、また時局の推移からの防衛的観点から特に列車の高速化、物資の確実な輸送が求められる。このため、寒冷地列車運行の根本的課題とされていた線路の凍上防止について、各局部で大規模な研究活動が開始されることとなる。

2. 鉄道における凍上問題

(1) 土の凍上現象

気温が零下になる寒冷地では、地盤の温度も零度以下になる。当たり前のことであるが北海道、東北以外の地に住む人にはなかなか想像しがたいことである。地盤が零下になれば当然土中の水分は凍りつく。この時に土中では複雑な物理化学現象が起こり、土質によって様々な形態で、氷が成長したり、またはその場で凍ったりする。日本中で多く観察されるものとしては霜柱がこの現象に近い。霜柱は気温が零下になり、零度線が地表面にとどまった状態のとき、氷が土壌から析出して成長する現象である。この氷の析出が土中で起きると想像すれば現実の凍上現象に近い姿を描ける。

(2) 凍上の工学的問題（特に線路保守について）

さて、地盤が凍ると砂質土など粒径が大きな土ではその場で水が凍り、コンクリートのように固くなるだけであるが、粘性土やある種のシルトの場合には、零度線が到達したあたりで氷の層が、まわり（主に下方）の土壌から水分を吸引して発達していく。この氷層の成長は条件さえ整えば留まることを知らず、いつまでも地盤を上方に押し上げていく。寒冷地で粘性土の地盤上に構

築された構造物は、一様にこの凍上力の作用により被害を受ける。

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げ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（図1）。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はさみ木をかませ、低い部分をかさ上げして軌道面を確保する。これをはさみ木作業（図2）と称し、現在も寒冷地の保線作業として行われている。



図1 凍上により波うった軌道¹⁾

第百十一圖 枕木挿入状態

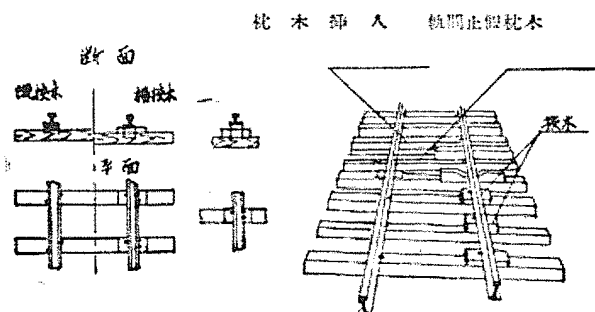
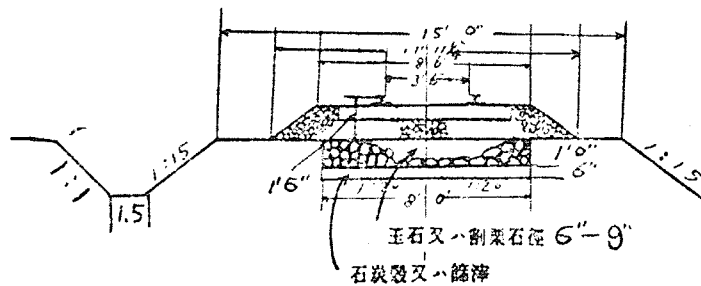


図2 凍上対策一はさみ木¹⁾

*キーワード：鉄道工学，凍上，昭和期

**正会員 博(工) 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

第百二圖 道床断面圖 A-A (其ノ一)



第百二圖 道床断面圖 B-B (其ノ二)

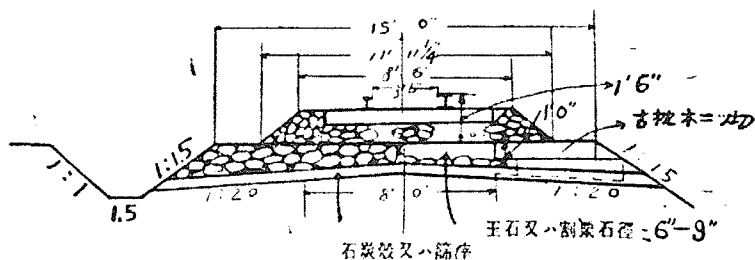


図3 昭和初期に考案された路盤改良¹⁾

3. 昭和初期の線路凍上対策

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¹⁾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かにかかわり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います。(括弧内はその工法の目的：筆者記す)

1. 側溝拡大 (排水)
2. 砂利のふり直し (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材料として多用された。前文にあるようにこれらの対策工は、土がなぜ凍上するか未だよく分からない時期に、現場保線員の経験と努力から生み出されたものである。現在でも通用する対策も多く含まれている。

4. 凍上研究の勃興

(1) 札幌鉄道管理局凍上対策委員会

凍上の現象が解明されていなかったため、凍上防止方法も適切なものがなかったが、1939年(昭14)11月に札幌鉄道管理局に「凍上対策委員会」が設置され、凍上の研究が始められる。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。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。特にこの委員会には、今日、雪の研究者として知られる中谷吉郎教授が参画しており、凍上機構の理論的解明に力が注がれた。工学部土木工学科からは眞井耕造助教授が入り、各種実験を行っている。

(2) 満鉄による凍上研究

満鉄では満州事変を契機として、その経営が北満に及びそれまで少なかった凍上被害に対する対応が求められるようになる。のみならず満州の極寒に起因する鉄道運営上の一般技術的対策を根本的かつ組織的に研究する必

第 1 圖

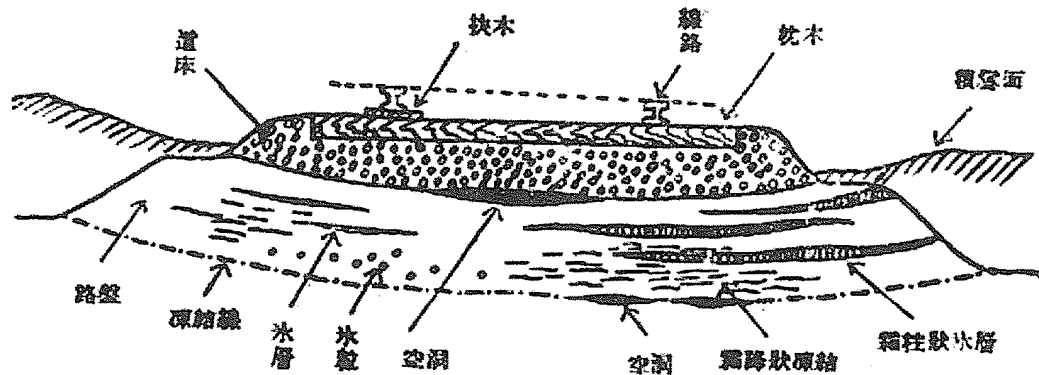


図4 中谷宇吉郎が観察した線路凍上の被害状況³⁾

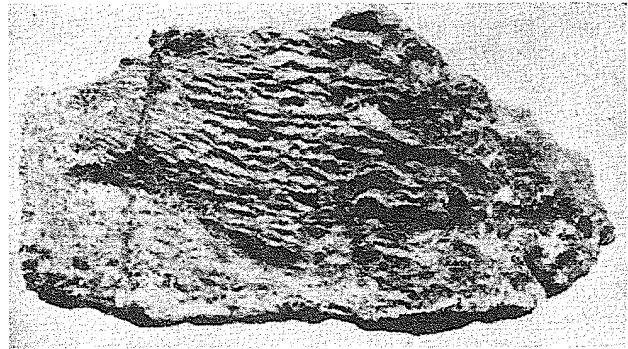
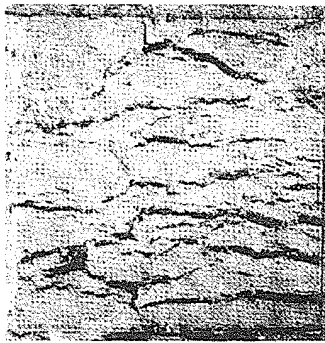


図5 凍結・凍上した土試料³⁾

要性を生じ、1937年(昭12)鉄道総局内に「酷寒対策委員会」が設立された。その線路関係部門のなかには線路凍上防止に関する項目がかかげられ、鉄道技術研究所、工務局保線課、地方鉄道局が参画した。奉吉線および京函線に試験区を設けて、1937年(昭12)11月～1939年(昭14)5月の間、気温、深度別地温、深度別凍上量、路盤土質などについて測定、試験をなすと共に、路盤開さくによる凍結様式の観察、全満州における主要凍害箇所土質調査をした。鉄道技術研究所内では、内外の研究によって既往の研究過程を知ると共に、1938年(昭13)からは低温実験室内で実験を開始し、凍上に関する土質の諸性質を調べている。

5. 凍上研究の成果

(1) 中谷宇吉郎の研究成果³⁾

中谷教授は北海道内の凍上発生箇所の視察を行い、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4)。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、体系だてたものとして面白い。

(2) 満鉄の研究成果²⁾

現地の観測結果から、凍上が凍土内の氷レンズの形成で生じ、その主要因は土の粒度と保水性であるとしている。氷レンズを形成しやすい粘土を粗粒土に置き換えるのが最良であるとしている。また、旧ソ連の凍上研究を訳出している。凍結深度の算定について詳述し、今日用いられる積算寒度のはじまりはここからが起こりと思われる。

(3) 鉄道方面への研究

理化学研究所黒田正夫による「不斉凍上対策の研究」²⁾では、絶対凍上を押さえ込むことはあきらめ、線路が一様な凍上になるように局部的に大きな凍上箇所への対策を提言している。

土質変化の緩和

湧き水の処理

特殊構造物の処理

6. 鉄道凍上対策への研究の応用

ここでは札幌鉄道管理局の研究およびそれを踏まえた提言を見る⁴⁾。凍上委員会の系統だった研究では、凍上防止の対策として次のようなことが研究された。

- ・地下水位を下げ、路盤排水をはかる
- ・路盤の噴泥を防止する
- ・凍上路盤を非凍上性の材料と置換える
- ・路盤土壌を化学的薬物処理により、非凍上性とする
- ・路盤中に遮水層を設け、下方からの水の補給を断つ

- ・熱伝導の低い材料、または保温材を用いて凍結線を浅くする

以上の研究により、凍上防止に効果のあるものとして、次のような工法があげられた。（下線は3章で対策に上がっていなかったもの）

道床

道床厚の増加、道床更換、道床ふるい分け等を行う

路盤排水

- ・側溝の掘下げ、整備等により、路盤の排水を良くする
- ・めくらこうを設け、路盤の排水を排除する
- ・地下埋設こうを設け地下水位を低下させる

路盤の保温

- ・路盤のかさ置きにより路盤を覆って寒気の侵入を防ぐ
- ・道床をむしろ等で覆って寒気の侵入を防ぐ

路盤の噴泥防止

- ・噴泥を除去する

化学薬品での処理方法 ・薬品の路盤注入、または散布して凍上性を非凍上性に変えたり、路盤内に断熱層や、遮水層を造る。

路盤入替工法 ・凍上路盤を非凍上性の材料（石炭がら、砂、砂利等）に置き換える

断熱板敷設工法 ・断熱材を移動の下に敷設して、上部からの寒気を遮断する

ここで「路盤の噴泥防止」についての対策があがっているが、これは凍上の原因が土質の細粒分によって起こることが研究によって確かめられたことによるといえる。また「断熱板敷設」は長く適当な材料が無く行うことができなかったが、戦後、1958年(昭33)から研究され実用化された。断熱材には、スタイルフォーム（厚さ25ミリから30ミリ）が主に用いられ今日に至っている。

7. おわりに

本研究では、地方特有の土木技術上の課題に対して、集中的に理論的問題解決の動きがあった結果、理論の深化とその技術的な応用がはかられていく経過を追ってきた。列車凍上害の解決から始まった土の凍上の研究は、戦後は道路の凍上防止工について、北海道開発局や道路公団によってなされていく。また凍上機構の理論的研究は、LNG地下タンク周囲の凍上防止や地盤の凍結工法などに応用される。

《参考文献》

- 1) 大友勇：『保線作業規準並解説』,1929.4.25
- 2) 日本雪氷協会：「雪氷」第1～3, 6～10, 43～44巻,1929～1941,1944～1947,1981～1982
- 3) 北海道帝国大学低温科学研究所編：「低温科学」,第1巻,1946
- 4) 北海道保線史研究委員会：『北海道保線のあゆみ』,19729