

土の凍結膨張現象

—凍上現象研究の歴史および現状について—

赤川 敏

§ 1. はじめに

土の間引き水が凍るとき興味深い挙動をすることがある。身近には霜柱がそれで、この霜柱状のものが土中に成長することを一般に「土の凍結膨張現象」（以後単に「凍上現象」という）と呼んでいる。この凍上現象を完全に解明する理論は、未だにないといっても過言ではない。しかし、われわれの生活の中で人工的にこのような現象が起こり易い条件を土中に作る場合がある。たとえば、地盤凍結工法であり、また低温の液体を地下に貯蔵する場合などである。このような働きかけを人が起こす以上、われわれはその結果を可能な限り正確に予知する必要がある。このような認識から、筆者等は液化天然ガスの地下貯槽の設計のために必要とされる土の凍上性（率）を個々の土質につき、室内実験により求めている。

本報告では、この凍上現象に関する研究の歴史を最初に、次にこの現象に対して考え得る代表的な機構を示し、最後に実際に実験室内で「土の凍結膨張率」（以後「凍上率」という）を測定した結果を報告することにする。

§ 2. 凍土研究の歴史

寒冷地における土壌の凍結による膨張、および融解による沈下について、17世紀末から北ヨーロッパにおいては、記録が残っている。18世紀の中頃になって、ルネベルグ (E.O. Runeberg, 1765年) によって凍上現象に関する全般にわたる解説が行なわれ、一般に凍上現象が理解されるようになった。この時代は地形学、地質学といった分野、および道路の施工に携わる人々により、その研究は進められていたが、この凍上現象の全容は把握されてはいなかった。

20世紀の初め頃、北欧でも道路による物資輸送が盛んになり、冬および春の道路保全が経済的にも問題となり

始めた。スウェーデンでは1925年秋、スウェーデン道路研究所 (Swedish Institute of Roads) の主催する凍上現象に関する会議が道路、鉄道、その他の技術者の参加の下に開催された。そして、その2年後には地質調査所 (Geological Survey) を含め、理論、応用両面からの研究が始められた。この頃のスウェーデンを代表する研究者はベスコウ (G. Beskow) であり、現在もなおこの分野の研究者に影響を与えている。

一方、アメリカ、ソビエトなどでも、凍上現象は道路、鉄道、建築と関連した問題として研究され始めていた。アメリカでは、1925年、1926年にテーパー (S.M. Taber) とキャサグランデ (A. Casegrande) により、この分野の研究が開始された。また、ソビエトでは1937年にチトビッチ (N.A. Tsytoich) による最初の凍土の力学特性に関する論文が発表されている。さらに数年遅れて、ノルウェー、フィンランドでも開始され、フィンランドでは地質学、あるいは農学的見地より研究されていた。

ところで、凍上とは土中の水が氷に相変化することにより体積膨張するために起こる、ということをも提唱したのはルネベルグ (1765年) である。しかし、凍上は土中の既存の水分が氷になるだけではなく、間引き水を遠くから凍結面へ引き寄せて氷になるために多大な体積膨張をするのだ、という現在われわれの持つ概念は、ヨハンセン (S. Johansson, 1914年) により解説されている。この中でヨハンセンは、この水分の移動が土粒子間の間引き水が示す毛管現象によるものであると述べている。そして1935年当時ベスコウもこの考え方に同意している。

日本においてもこの頃、北海道大学低温科学研究所の中谷宇吉郎、稲垣己丙のような気象、農業、地質などの分野の研究者、および満鉄の酷寒対策委員会の渡辺貫、黒田正夫、札幌凍上対策研究委員会などの現場報告などが見られる。このうち多くのものは現場調査の報告であったが、中には稲垣乙丙 (1899年) による霜柱の研究や、気象、農学分野の研究者による実験的研究も行われていた。さらに、いわゆる霜柱の研究より始まった凍上機構

の研究は、中谷(1944年)の頃には、ある程度凍土の成長をコントロールした状態での室内実験にまで発展していた。

1950年頃より、この分野でも研究が盛んとなり、また研究項目も細分化されてきた。この頃から現在までの動向をまとめた出版物として、たとえばジェスベルガー(H. L. Jessberger, 1970年)、アンダーソン(D.M. Anderson 1973年)などがある。これらによると、凍上現象は土中の水、氷の相平衡、熱収支、界面科学的な視点より研究されていることがわかる。そして、これらの研究は主に凍上現象に関係する諸現象の因果関係をモデル化して解明しようとしたものであったために、実際的な問題に直接適用できるものは少ない。とはいえ、これらの業績が応用分野に有益でないわけではない。

§ 3. 既に発表されている凍上機構

ここに紹介する土の凍上機構は、カナダ NRC (National Research Council) のエトワード・ペナー(Edward Penner)により1969年に発表された論文で、その内容は既に他の研究者により発表された考えを、より理想化した室内実験で検証したものである。

3.1 理論

氷が土粒子間げき内で成長してゆく温度(結氷点温度)は、図-1のような土粒子モデルを考えると式(1)のように表わせる(Sill and Skapski, 1956年)。

$$T - T_m = \Delta T = - \frac{2T_m \cdot \sigma_{iw}}{Q_f \cdot \rho_i \cdot r_i} \quad \dots\dots(1)$$

T : 水と半径 r の界面で接し、凍結が起こっているところの温度

T_m : 標準圧力において、平面で接する固-液相界面の融解温度

σ_{iw} : 氷-水の界面エネルギーに関する項

Q_f : 氷の融解潜熱

ρ_i : 氷の密度

r_i : 氷-水の界面における曲率半径、あるいは空げきの半径

また、エベレットとハイネス(Everett and Haynes, 1965年)によれば、ペナー(1957年, 1958年, 1963年)がいつているように、凍上圧力は土粒子の空げきの大きさに依っていると解説されているが、古くはベスコウ、キャサグランデの時代よりこの概念は存在していた。とにかくエベレット、ハイネス(1965年)によれば、図-

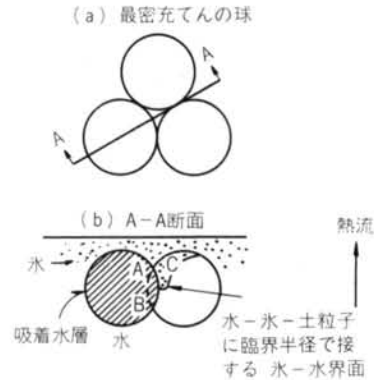


図-1 最密充てんの球の間げきを通してしようとする氷-水界面の模式図

1(a), (b)に示すような均一粒径の土のモデルを考えた場合、次の式が成立するとされている。

氷-水の相間では、

$$p^i - p^w = \frac{2\sigma_{iw}}{r_i} \quad \dots\dots(2)$$

p^i : 氷の表面の圧力

p^w : 水の圧力

σ_{iw} : 氷-水の界面エネルギーに関する項

r_i : 氷-水の界面での曲率半径

同様に、氷-土粒子の相間では、

$$p^i - p^s = \frac{-2\sigma_{is}}{r} \quad \dots\dots(3)$$

p^s : 土粒子表面の圧力

σ_{is} : 氷-土粒子の界面エネルギーに関する項

r : 土粒子の曲率半径

ここで(2)-(3)とすることにより、図-1(b)のA点での圧力が求まる。

$$p_{A^s} = p^w + \frac{2\sigma_{iw}}{r_i} + \frac{2\sigma_{is}}{r} \quad \dots\dots(4)$$

p_{A^s} : 土粒子表面上A点の圧力

また、同図B点での圧力は、土粒子と水との接面であるから、次式のように表わせる。

$$p_{B^s} = p^w + \frac{2\sigma_{ws}}{r} \quad \dots\dots(5)$$

p_{B^s} : 土粒子表面上B点の圧力

ここで、A点とB点がC点に近付くと、このC点では、

$$\Delta p = p_{A^s} - p_{B^s} = \frac{2\sigma_{iw}}{r_i} + \frac{2}{r}(\sigma_{is} - \sigma_{ws}) \quad \dots\dots(6)$$

σ_{ws} : 氷-土粒子の界面エネルギーに関する項

という圧力差が生じていることになる。ペナーは、この Δp が凍上力と関連するものと考えている。

ここで、ヤング、デュプレ(Young, Dupre)の式を導入すると、

$$\sigma_{is} - \sigma_{we} = \sigma_{iw} \cos \theta \quad \dots\dots(7)$$

さらに、

$$B' = \frac{r}{r_i} \times \frac{1}{\cos \theta}$$

とおくと式(6)は、

$$\Delta p = \frac{2\sigma_{iw}(1+B')\cos \theta}{r} \quad \dots\dots(8)$$

となる。そして、1~30ミクロンの範囲で粒径のそろったガラスビーズを、土試料のかわりに用いて凍上させた結果、 r/r_i の値として5~7程度を得ている。また、 σ_{iw} の値としては、30~35 kg·cm⁻¹程度が妥当な値であると提唱している。

以上が、ペナーがまとめた土の凍上機構である。実際の土における適用を目的としていないため、工学的応用には問題がある。

§ 4. 土の凍上率予知法

4.1 土の凍上率整理法 (記載法)

土の凍上現象は、その結果であるアイスレンズの分布状態からもわかるように、アイスレンズが形成されている段階と、単に凍結前線が土中を通過している段階の2段階が繰り返されているものと考えられる。そこでアイスレンズの厚さより十分厚い土試料を実際に凍結させ、直接その凍上性を検討することは特に工学的に意味がある。

1970年代、高志勤は土の凍上率が同一の土質では、その拘束圧の逆数に比例して増大することを、多くの実験を通して定式化した。

すなわち、

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \quad \dots\dots(9)$$

ξ : 凍上率 (凍上量/初期供試体長さ)

ξ_0 : 試験定数

σ_0 : 試験定数

σ : 拘束応力 (後に有効応力)

続いて1974年、同氏は凍上率がおおむね凍結速度の平方根に比例して低くなることを定式化した。

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(\sqrt{\frac{U_0}{U}} + 1 \right) \quad \dots\dots(10)$$

U_0 : 試験定数

U : 凍結速度 (初期供試体長/凍結所要時間)

さらに1976年、同氏は凍上に伴う間げき水の移動によって生ずる未凍土の脱水圧密をも考慮し得る式を定式化し

た。

$$\xi = (1+\Gamma)\xi_w + \xi_0 + n\Gamma \quad \dots\dots(11)$$

$$\begin{aligned} \xi_w = \frac{1}{2U\Gamma} & \left[\sqrt{(C\sigma_1 - Bl)^2 + 4ACl} - C\sigma_1 - Bl \right. \\ & + \frac{C(2A - B\sigma_1)}{B} \\ & \times \log B \sqrt{\frac{(C\sigma_1 - Bl)^2 + 4ACl + B^2l + C(2A - B\sigma_1)}{2AC}} \\ & - C\sigma_1 \\ & \left. \times \log \frac{\sqrt{(C\sigma_1 - Bl)^2 + 4Al} + \frac{2A - B\sigma_1}{\sigma_1} \times l + C\sigma_1}{2C\sigma_1} \right] \end{aligned} \quad \dots\dots(12)$$

ここに、

$$A = \frac{U}{1+\Gamma} \times \sigma_0 \times \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right)$$

$$B = n\Gamma \frac{\Gamma}{1+\Gamma} U$$

$$C = \frac{k}{\gamma_w}$$

ξ_w : 吸排水率

U : 凍結速度

l : 供試体長さ

σ_1 : 供試体軸方向の有効応力

Γ : 水-氷の相変化に伴う体積膨張率

$\sigma_0, U_0, n\Gamma, \xi_0$: 土の固有定数 (試験定数)

γ_w : 間げき水の単位体積重量

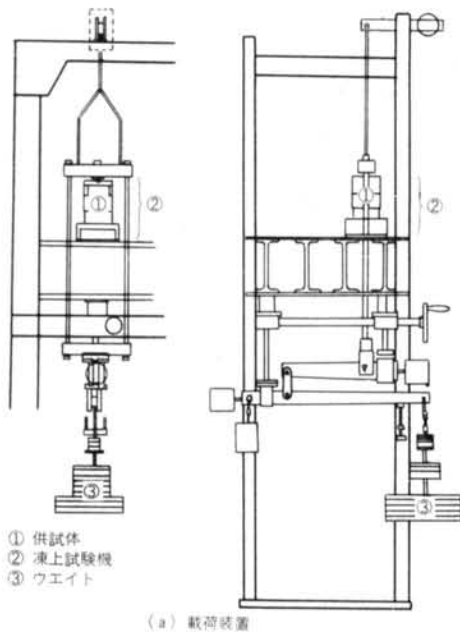
k : 土の透水係数

このような高志による一連の研究は、凍上現象という不連続現象を、その積分形態で捕えてはいるものの、その適用範囲を認識して用いれば、非常に有力な凍上量予測法となり得、後に続く者にとって重要な道しるべとなっている。

4.2 凍上試験

前節で紹介した高志による土の凍上率の記載法を適用するために、載荷装置と凍上試験機 (図-2) を用いて試験は行なわれる。この載荷装置は、軸荷重 2 ton までの載荷が可能であり、凍上試験機は、土の凍結が開始される側の冷却板がプログラムコントローラにより任意の温度変化が設定できるようになっており、吸排水側の冷却板は任意の温度が設定できるようになっている。間げき水系は図-3に示すとおりで、開、閉両試験が可能である。

試験は、初期に設定された軸荷重、間げき水圧および冷却速度のもとで、間げき水の出入が自由に行なえる状

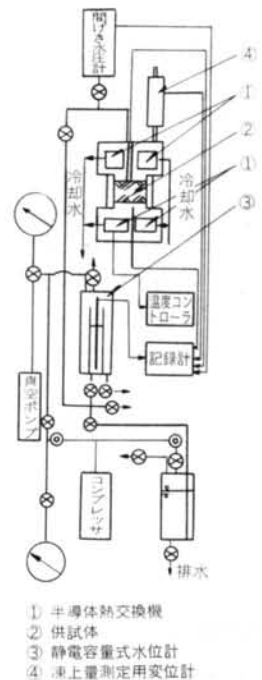


図一2 載荷装置と凍上試験機

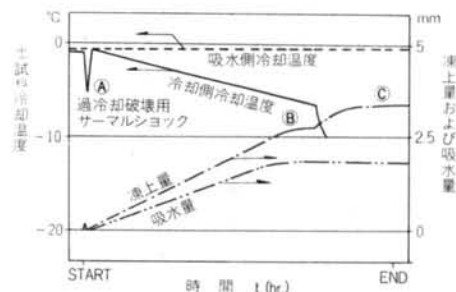
態(いわゆる開式試験法)で供試体の一端より土の凍結が開始される。この結果、土は図一4に示すような温度変化を受け、それに伴う凍上現象を示す。同図中A点は一般にサーマルショックといわれるもので、試験初期に供試体端部の開けき水の過冷却を破り、氷の種付けをするための作業である。土粒子の吸着水に起因する2次凍上量を規定する意味で、B点通過後の供試体を -10°C になるまでさらに急冷し、その時点(C点)の凍上量を用いて凍上率を計算している。

4.3 凍上試験例

われわれが行なった洪積粘土の凍上試験結果を紹介す



図一3 開けき水制御系



図一4 凍上試験の設定温度および凍上量、吸水量の時間変北(例)

ることとする。表一1にこの土質の諸定数を示す。この節で使用した土はAであり、次節ではA、B両土質を使用している。

図一5は、この試験を通して得られた凍上量と吸水量である。ここで、同一の凍結速度のもとで、数種類の拘束応力について行なった凍上試験の結果を、図一6のように凍上率と拘束応力の逆数について整理すると、両者の関係がよくわかる。すなわち、同一凍結速度のもとでは式(9)が示すように、凍上率は拘束応力の逆数に比例するという関係が成り立つ。次に $(\xi - \xi_0) \times \sigma$ と $1/\sqrt{U}$ について整理すると、図一7のようになる。この図は縦軸の切片が式(10)の σ_0 を示し、また傾きが $\sigma_0 \times \sqrt{U_0}$ で

試料番号		試料A	試料B
深さ		m	—
粒度特性	れき分 (2000 μ 以上)	%	0
	砂分 (74~2000 μ)	%	22.4
	シルト分 (5~74 μ)	%	61.4
	粘土分 (5 μ 以下)	%	16.2
	最大粒径	mm	0.84
	均等係数 U_c		43
	曲率係数 U_c'		6
コンシシステンス特性	液性限界 w_L	%	41.1
	塑性限界 w_p	%	23.3
	塑性指数 I_p		17.8
分類	統一分類	CL	—
	三角座標	F	F
土粒子の比重 G_s			2.626
比表面積 S		m ² /g	40
自然状態	含水比 w	%	37.6
	湿潤単位体積重量 γ_t	g/cm ³	1.74
	間げき比 e		—
	飽和度 S_r	%	—
一試軸圧縮験	一軸圧縮強さ q_u	kg/cm ²	—
	変形係数 E_{50}	kg/cm ²	—
	鋭敏比 S_t		—

表一 土質諸定数

あるため U_0 もこの図より決定することができる。

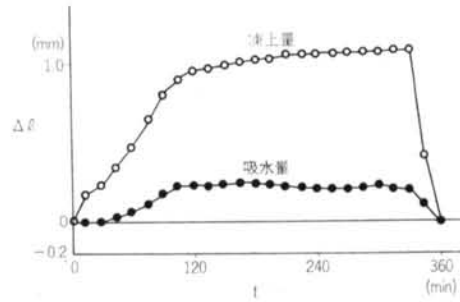
凍上に伴う間げき水の凍結前線への流入量の割合は、吸排水率 (ξ_w) と呼ばれ、高志 (1974年) によれば、

$$\xi = (1 + I') \cdot \xi_w + n_f \cdot I' + \xi_0 \quad \dots\dots(13)$$

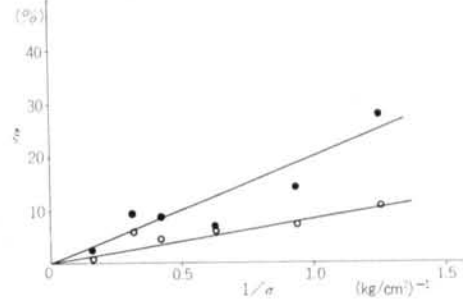
と表わせる。そこで、図一8に示すように凍上率と吸排水率で整理すると、縦軸の切片は $n_f \cdot I' + \xi_0$ を示し、 n_f を求めることができる。以上の作業により、特定の土の凍上性を記載することができる。

4.4 大型の凍上試験

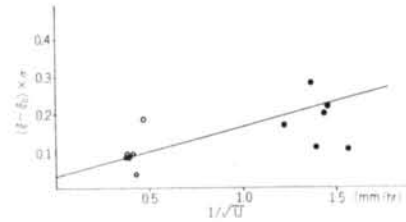
前節で紹介した凍上試験の供試体は直径60mm、厚さ15~20mmの薄い円柱状であるため、スケール効果に関する疑問が生じる。また、凍上率と吸水距離 (凍結前線から透水層までの距離) の関係、および凍上による凍結前線近傍での間げき水圧低下に起因する未凍土の脱水圧密現象の傾向を調べるため、より大きな供試体を用いた凍



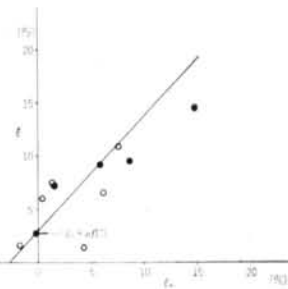
図一5 凍上量、吸水量の時間変化



図一6 凍上率 (ξ) と拘束応力の逆数 ($1/\sigma$) の関係

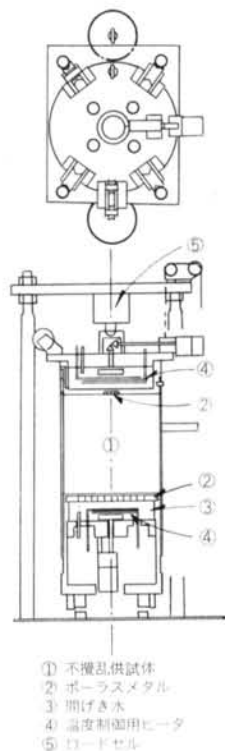


図一7 $(\xi - \xi_0) \times \alpha$ と $1/\sqrt{U}$ の関係

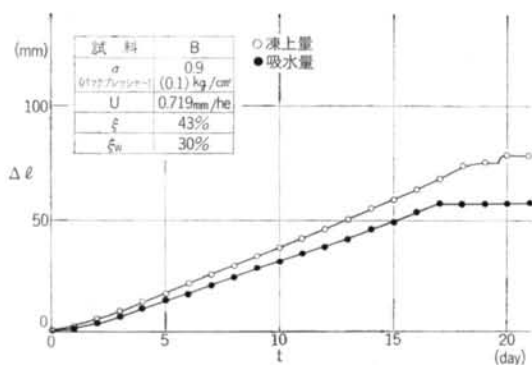


図一8 ξ と ξ_w の関係

上試験を行った。この供試体の寸法は直径300mm、長さ約250mmの不攪乱試料であり、1回の凍上試験は約0.5 mm/hrの凍結進行速度で行なったため、試験終了までにほぼ1カ月間の日数を要した。試験は図一9に示す上下の温度コントロール板を、前述の凍上試験機のコントローラを用いて温度を制御し、凍結進行速度が一定になっていることを供試体内部に設置した熱電対により監視し



図一 9 大型凍上試験機



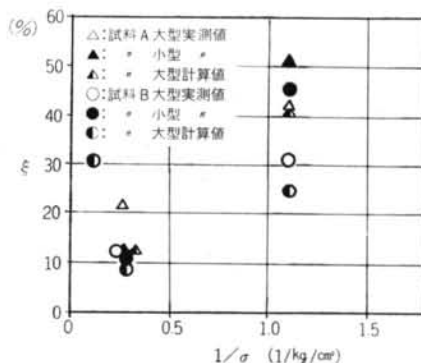
図一 10 凍上量、吸水量の時間変化

ながら行った。この結果、写真一 1 に示すような熱流に直交する厚さ数ミリメートルのアイスレンズを数多く持った凍土を作ることができたため、本試験は側方からの熱の影響をほとんど受けずに遂行されたことがわかる。

図一 11 に前述の小型、大型両凍上試験の凍上率と小型凍上試験の結果より供試体の大きさの違いを考慮して求めた(式(1), (2)を用いた)大型の供試体による凍上率の計算値を示してある。この結果、同一条件下では供試体が薄いほど大きな凍上率を示すことがわかり、またこの原因を吸水距離の違いによるものとした高志の式(式(1),



写真一 1 凍上後の固結シルトの断面
(黒い筋がアイスレンズ)



図一 11 2 種類の土質による大型、小型両凍上試験結果および小型凍上試験結果より算出した大型凍上試験の凍上率(2)を用い、小型凍上試験の結果より算出された大型供試体の凍上率は実測値と比較的良好に合致していることがわかる。すなわち、このスケール効果の補正法は実用上適当なものと判断され、1 試験 1 カ月という大型供試体を用いた大型凍上試験を行わず、より簡便な小型凍上試験を行ない、その結果をスケール効果の補正をしながら使用することにした。

§ 5. おわりに

§ 2. で紹介したように、凍上現象に関する研究はかなり長い歴史を持っている。そして、各種の土に関してその凍上率が実測、記載されているが、現在でも凍上試験を行っていない土質に対して、既在のデータを用いた凍上率予知法は確立されていない。これは、凍上率とい

うものが、土の持つさまざまな性質に左右され、その総合的な評価ができないためである。そこで、§4. で述べたように、実際に土を一定条件のもとで凍らせ、その凍上率を把握している。この手段の意味するところは、凍上機構が厳密にはわからなくとも、この現象の挙動を把握することができれば、工学的に問題は生じないものとの考え方であるが、いずれは凍上機構に根ざした凍上率予知法がより重要視されると思われる。そのためにも、凍上試験を数多く行ない、その特性を試験を通してより把握し、凍上現象を支配する土の諸性質を総合的に研究することにより、さらに正確な凍上率予知法の確率を目指している。

謝 辞

本報告の主な部分は筆者が北海道大学低温科学研究所へ留学中にまとめたもので、凍土の研究において有意義なアドバイスをいただいた木下誠一教授、鈴木義男助教授、福田正己助手、および特に凍上機構に関してお教え下さった堀口薫助手にお礼を申し上げる次第であります。

さらに、凍上試験の実施、運用に御協力いただいた東京瓦斯㈱に謝意を表明するものであります。また、小型凍上試験の資料を提供して下さいた当社研究所土質研究部後藤茂氏に感謝いたします。

＜参考文献＞

- 1) G.Beskow: "Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Rail Roads.(translated by N. Western, 1947)" Sver. Geol. Unders., Ser. C, Vol. 375 (1935)
- 2) N. A. Tsytovich & M. I. Sumgin: "Fundamentals of the Mechanics of Frozen Ground" USSR Academy of Sciences Press (1937)
- 3) S. Taber: "Frost Heaving" J. of Geology, Vol. 37, 428
- 4) 稲垣乙丙: "農業気象学 (第15版)" (明治32年) p. 255
- 5) 中谷宇吉郎, 小藤英登: "粉鉄鉱の凍結に関する研究 (凍上の機構について・IV)" 北海道大学低温科学研究所業績第23号
- 6) H. L. Jessberger: "Ground Frost: A Listing and Evaluation of More Recent Literature Dealing with the Effect of Frost on the Soil" AD-865128 (1970)
- 7) D. M. Anderson & N. R. Morgenstern: "Physics, Chemistry and Mechanics of Frozen Ground" 2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk, USSR (1973)
- 8) E. Penner: "Pressures Developed During the Unidirectional Freezing of Water-Saturated Porous Materials" Proc. of Int. Conf. on Low Temp. Science (1966)
- 9) 高志勤, 益田稔: "拘束圧下における凍上量と間ゲキ水移動について," 雪氷 Vol. 33, No. 3 (1971) pp. 1~11
- 10) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: "土の凍結膨張率に及ぼす凍結速度, 有効応力の影響に関する研究" 雪氷 Vol. 36, No. 2(1974) pp. 1~20
- 11) 高志勤, 生頼孝博, 山本英夫: "一次元凍結における凍結面前方の間ゲキ水圧の経時変化" 日本雪氷学会秋季大会予稿集 (1976) p. 235
- 12) 高志勤, 益田稔, 山本英夫: "凍上に及ぼす未凍結土内の動水抵抗の影響" 雪氷 Vol. 38, No. 1 (1976) pp. 1~9
- 13) 高志勤, 生頼孝博, 山本英夫: "一次元定速度凍結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密" 雪氷 Vol. 39, No. 2 (1977) pp. 1~12

