

凍結による土壌の体積変化について

福尾義昭・加藤哲治・有賀祥夫

ON THE VOLUMETRIC EXPANSION OF SOIL DUE TO FREEZING

By Yoshiaki FUKUO, Tetsuji KATO, and Yoshio ARIGA

Synopsis

In cold regions, the considerable uplift of ground surface is often seen as the soil is freezing. This uplift is called as "Frost heaving". Uneven heave of ground surface brings the heavy damages to the floor of railway, pavement of road and foundation of building. For the prevention of these damages, the behavior of frost heaving must be understood exactly and fully.

On this point of view, the freezing expansion of soil was measured under various compressive loads, using silty sand sampled in alluvial layer in Osaka and from the results of examination, it was found that

- 1) the moisture in soil was supercooled and the greater the cooling rate was, the higher the supercooling temperature was.
- 2) the amount of expansion in the direction parallel to the horizontal plane was different from the amount in the direction perpendicular to horizontal plane.

ま え が き

土壌が凍結するとある適当な条件のもとでは凍上現象がおこる。この現象は凍土中に存在する不凍水の薄膜を通じて、未凍結領域中の土壌水分が凍結領域中に吸いこまれ、そこで結氷膨張して地表面をもち上げる現象である。Beskow¹⁾ Taber²⁾ 等の研究によると、凍結深度の3倍にも達するもち上がりが観測されている。Pingos³⁾ と呼ばれる興味のある地形もこの凍上作用によって提出される現象である。未凍結土壌から凍結土壌への水分の移動現象は土粒子と水分との相互作用の本質にふれる重要な現象であり、近年この方面の研究が進み、次第にその機構が解明されつつあるが⁴⁾、まだ充分な説明はなされていない。

ところで凍上は、盛土や構造物の重力に抗しながら大地をもち上げていくのであるが⁵⁾、そのためにはこのもち上げの仕事をするだけのエネルギーが必要である。このエネルギーの大部分は熱伝導による熱補給や水が氷になる時に放出される潜熱によって供給されるものと考えられるが、この過程を量的に取扱うためには、凍土中の土粒子、氷、不凍水および空気が構成する複雑な界面におこっている熱力学的現象を考察しなければならない。

寒冷地方において冬期、鉄道路床や道路路面が不整凍上のため大きな災害を受けていることは周知の事である。他面、冷凍技術の進歩にともなって大規模な地盤凍結が人為的に可能となりこれによって軟弱地盤を補強し、あるいは地盤中の湧水を防止して、建設工事を進めるいわゆる凍結工法 (Freezing method in engineering construction) が時代の要請に応じて近年発展しつつあるが⁶⁾、この工法は必然的に凍上現象をひ

きおこし、地中の埋設物や基礎構築物の複雑な移動など工法にとって好ましくない事態をもたらしている。

以上のように、凍上現象の機構の解明は、地中水に関する学術的研究発展に貢献するばかりでなく、防災技術の進歩にも重要な手がかりを提供するものと考えられる。

以下に述べる報告は、この凍上機構研究の前段階として、孤立した土壌塊が種々の荷重のもとに凍結によってどのように体積膨脹するかを実測調査したものであり、凍上機構解明の基本資料を提供してくれるであろう。

1. 実験土壌試料

実験に使用した土壌は大阪市南東部の沖積層の2地点AおよびBから採取したもので採取深度は約 5 m である。採取土塊は約 20 cm 立方の角塊でこの角塊の各面はほぼ水平面と鉛直面に一致するよう切り出さ

Table 1 Physical properties of soil samples

Sample number		Sample weight (g)	Brine temp. (° C)	Moist unit weight of soil (g/cm³)	Moisture content (%)	Specific gravity of soil particles	Void ratio (%)	Degree of saturation (%)	Compressive load (kg/cm²)	Amount of expansion (%)
AH	1—1	343	—15.0	1.75	40.56	2.65	1.13	94.7	1	4.96
	1—2	339	"	1.73	45.71		1.23	98.4	5	3.19
	1—3	343	"	1.75	40.93		1.13	95.6	10	2.48
	2—1	338	— 7.5	1.72	48.59		1.29	100.0	0.05	6.96
	2—2	339	"	1.73	41.30		1.16	94.0	10	2.94
	2—3	335	"	1.71	40.90		1.18	91.5	20	2.86
	2—4	343	"	1.75	44.28		1.18	99.2	25	2.32
A V	2—1	333	"	1.70	42.84		1.23	92.7	1	1.63
	2—2	348	"	1.77	34.80		1.02	90.2	1	2.05
	2—3	333	"	1.70	40.04		1.18	89.8	5	1.77
	2—4	346	"	1.76	40.03		1.11	95.5	10	1.20
	2—5	345	"	1.76	42.36		1.14	98.2	15	2.11
BH	1—1	333	—15.0	1.70	50.58	2.65	1.35	99.3	0.05	4.55
	1—2	331	"	1.69	46.74		1.30	95.4	1	3.57
	1—3	331	"	1.69	48.60		1.33	97.0	5	2.35
	1—4	336	"	1.71	49.39		1.32	99.2	20	1.71
	2—1	330	— 7.5	1.68	53.09		1.42	99.3	0.05	5.10
	2—2	328	"	1.67	52.09		1.41	97.9	15	3.62
	2—3	332	"	1.69	52.70		1.40	100.0	30	3.81
	2—4	326	"	1.66	50.57		1.40	95.7	40	3.25
B V	1—1	335	—15.0	1.71	48.69		1.30	99.2	0.05	2.06
	1—2	335	"	1.71	47.43		1.29	97.7	1	3.08
	1—3	323	"	1.65	47.74		1.38	92.0	5	2.91
	1—4	327	"	1.67	50.55		1.39	96.4	10	2.03
	1—5	340	"	1.73	46.42		1.24	99.2	15	1.48
	1—6	341	"	1.74	46.06		1.22	100.0	20	2.65
	1—7	332	"	1.69	51.86		1.38	93.3	25	1.94
	1—8	331	"	1.69	51.93		1.38	100.0	30	2.75

れた。運搬中水分の蒸発や土塊のひび割れがおこらないよう充分注意した。この角状土塊の土質力学的性質は Table 1 の通りであり、また粒度別重量加積分布は Fig. 1 の通りである。図からもわかるように、A、B 両地点の土壌は何れも砂が大部分で残りはシルトである。

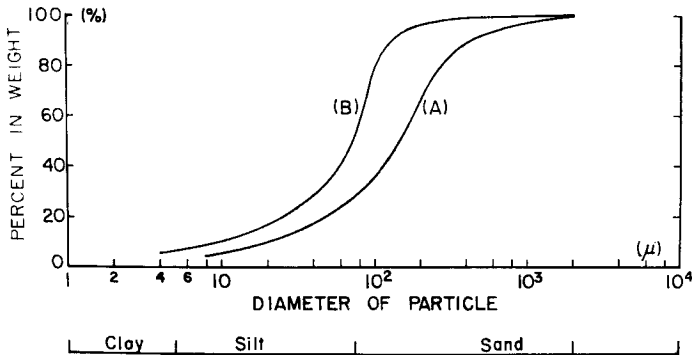


Fig. 1 Grain size accumulation curves of soil sampled at points A and B in Osaka City

研究室に搬入されたこの土塊を内径 5 cm 高さ 10 cm の真鍮製円筒容器に不攪乱状態のまま充填するために、Fig. 2 右に示されるような整形充填器 (Sampler) を製作した。これは土壌を充填する充填器本体 (Container) ②の下に刃先 (Cutter) ⑪と附属円筒 (Attachment) ⑫を取りつけたもので、刃先から徐々に整形充填器を試料土塊に圧入していく。試料土壌が附属円筒⑫の上面まで詰めこまれた後、注意深く刃先⑪および附属円筒⑫を本体②から取りはずし、本体②の上下両端面からはみだしている土をストレートナイフで切り取り平面状に仕上げる。こうして本体②の内部に直径 5 cm 高さ 10 cm の不攪乱土壌試料が充填される。この場合、充填容器の円筒軸は角状土塊の一面にはば垂直に挿入したので、その平面が水平面の場合は、本体②の円筒軸は土塊採取現場の鉛直方向に一致し、またその平面が鉛直面の場合は本体②の円筒軸は現地の水平面に平行な方向となる。土塊試料のつまった本体②は Fig. 2 左にみられるように真鍮製内円筒 (Inner cylinder) ⑦におさめられる。その上からさらに案内円筒 (Piston guide) ⑤を挿入する。各円筒の接触部には O-ring をはめて土壌中の水分が逃げないようにした。案内円筒内には圧縮用ピストン④を入れる。また内円筒⑦の底からは、外径 5 mm 内径 3 mm のサーミスター保護銅管を試料中心部まで試料をできるだけ乱さないよう静かに挿入する。保護銅管は内円筒との熱絶縁をよくするためにテフロンパッキング⑧で周囲をかこみ、その下から真鍮製底蓋 (End cap) ⑨を内円筒⑦にネジ止めして、固定した。組み立てられた内円筒⑦は、さらに鋼鉄製の外円筒 (Outer cylinder) ⑩におさめられる。

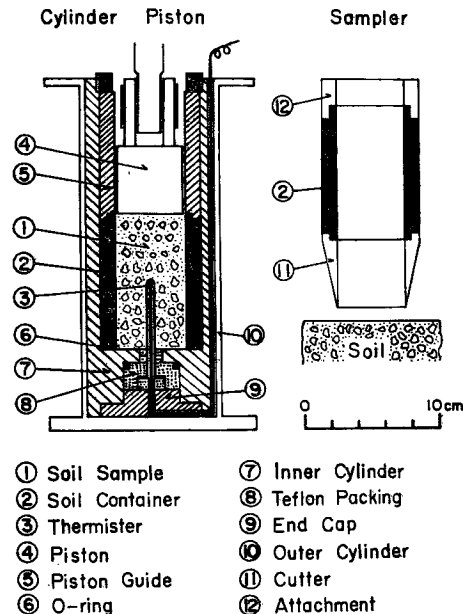


Fig. 2 Cross sections of cylinder, piston and sampler

2. 実験装置とその方法

実験装置の概要は Fig. 3 に示すとおりである。

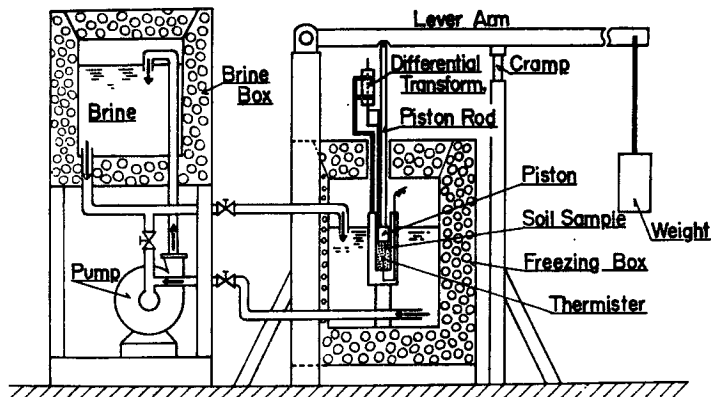


Fig. 3 Schema of instrument

組み立てられた外円筒②を冷却槽 (Freezing box) (内容積 40 cm×40 cm 断面×50 cm 深) の中央におき、ブライン槽 (Brine box) で冷却されたブラインをポンプで循環させながら外円筒の周囲から本体②につめこんだ試料を冷却する。冷却による試料の温度低下はサーミスター温度計で測定される。ピストン④の底面は土壌試料の底面に接している。このピストン (外径 49 mm) には皮製のピストンリングを3段にはめてあり、ピストンガイド (内径 50 mm) との間に設けた 0.5 mm の隙間から土壌中の水分や空気が逃げないように注意した。皮製ピストンリングには東芝シリコンオイル (流動点 -40°C 以下) を充分しみこませ、またピストンガイド内面にもこの油を塗り、ピストンとピストンガイドとの凍着を防いだ。ところで、今回の実験は種々の荷重を受けながら充填土壌がどのように凍結膨脹するかを測定する実験であり、この荷重はテコ、ピストンロッドおよびピストンを通じて充填試料の上面にかけられるわけであるが、ブライン循環開始後しばらくの間は試料は未凍結の状態であり、したがってブライン循環開始と同時にピストンによって試料をおさえこむと、充填土壌中の水分や空気は圧縮のため排除され土壌が攪乱されるおそれがあるので、それを避けるため、ピストンが充填試料の始めの高さ 10 cm 以下には下がらないように、テコの腕を受ける支持台 (Cramp) を設けた。したがって充填土壌が冷却凍結し、膨脹しようとする力がピストンによる圧縮荷重より大きくなったときに始めてピストンは上方に押し上げられることになる。

土壌の体積膨脹は充填円筒(2)のために半径方向には拘束され、もっぱら円筒軸の方向にのみ生ずるが、この軸の方向の膨脹量はピストン上面に当たった差動変圧器のピースコアの上昇量を連続自記記録して測定した。この上昇量の測定精度は $\pm 0.04\text{ mm}$ である。試料土壌の温度低下は挿入されたサーミスターによって測定されることは前に述べたがこの温度測定の精度は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ であり、ピストン上昇量を記録する同じ自記記録計に、上昇量と併行して連続記録した。ブライン槽は冷凍機および温度調節器によって一定温度に保持されているので充填土壌温度は、時間の経過とともに次第にブライン槽中の温度に冷却接近していくが、ブライン循環量や室温変化のために試料の冷却速度は試料毎にことなっていた。今回の実験ではブライン槽の保持温度は -7.5°C および -15°C の2種に指定した。

3. 実験結果とその考察

前にも述べたように、充填容器②中の試料が圧縮荷重に抗しながら凍結膨脹してピストンを上昇させるとき、その過程で、土壌中の水分や空気が O-ring や皮製ピストンリングの隙間から充填容器外に漏失する

ならば、この漏失はピストン上昇に寄与せず結局膨脹量の測定誤差となる。我々が考案したこの装置がどれだけ正確に凍結膨脹量を測定できるかを検討するために、煮沸した蒸留水を充填容器②に充たし、この蒸留水を凍結膨脹させる検定実験をおこなった。この結果の一例は Fig. 4 に示されている。この図は充填容器に注入した 196 gr の蒸留水を 1 kg/cm^2 圧縮荷重（ピストン、ピストロッドおよびテコアームの自重だけで生じる圧縮荷重）のもとに凍結膨脹させたときの結果を示すもので、水から氷になる場合比重が 1.000 から 0.917 に変化すると計算から軸方向の上昇量を求めると、9.04 mm になるが図にみられるように測定上昇量は 9.25 mm となっている。同様な実験を 30 kg/cm^2 までの圧縮荷重についてくり返した結果、この装置は $\pm 0.2 \text{ mm}$ の誤差で軸方向の上昇量を測定できることをたしかめた。

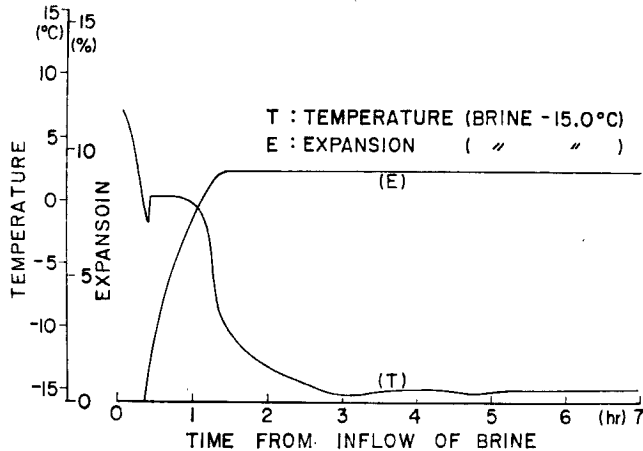


Fig. 4 Variations of temperature and expansion of water due to cooling by the brine

試料の実験結果を考察する際に、まず採取地点AおよびBにおける土壌は Table 1 や Fig. 1 にみられるように土質力学的な特性がことなるので、試料をA群とB群にわけた。さらに試料を充填する際に充填円筒の軸方向が水平面に平行にした場合と鉛直方向にした場合とに区別し、前者をH、後者をVと附号する。その次に数字1あるいは2を附し、数字1はブライン槽の温度を -15°C に保持してブラインを循環させた場合、数字2は -7.5°C に保持した場合を表わすことにした。最後の数字は実験測定順につけた番号である。Table 1 中の試料番号は上述の区別にしたがって記入したものである。

まず -7.5°C ブライン冷却したときの実験の結果を見ると、すべての試料について、温度は -2°C 附近まで下り、そこで急に 0°C 近くに回復昇温していることがわかった。その一例は Fig. 5 にみられるとおりである。たまたまブライン槽冷却用冷凍機の不調のため冷却速度が非常におそくなった例（試料番号A V2-2）では、 -1°C から -2.5°C までの状態が約5時間も続き、その後約2分間で 0°C に回復している。この変化はおそらく土壌水分の過冷却現象によるものであろう。 -15°C ブライン冷却ではこのような記録はあらわれなかった（Fig. 5 点線）。冷却速度が大きいときには氷生成の伝播が早くなり、これが擾乱となって過冷却をさまたげるのかも知れない。冷却速度の目安として、各試料が 6°C から 1°C まで冷却されときの速さを自記記録から求め、それぞれの場合の過冷却温度との対応を調べた結果は Fig. 6 に示されている。冷却速度が大きくなると過冷却温度は上昇し、大まかに 1.0°C/min では過冷却が消失するように見える。我々が測定している温度は試料中心部の温度であり、冷却は外円筒②の周囲からおこなわれているので試料中心部が過冷却を終る頃には充填容器の壁に接する試料部分は過冷却を過ぎ氷になっていると考えられるが、実験結果をみると過冷却消失後に試料の膨脹が始まっている。また過冷却現象の見出されな

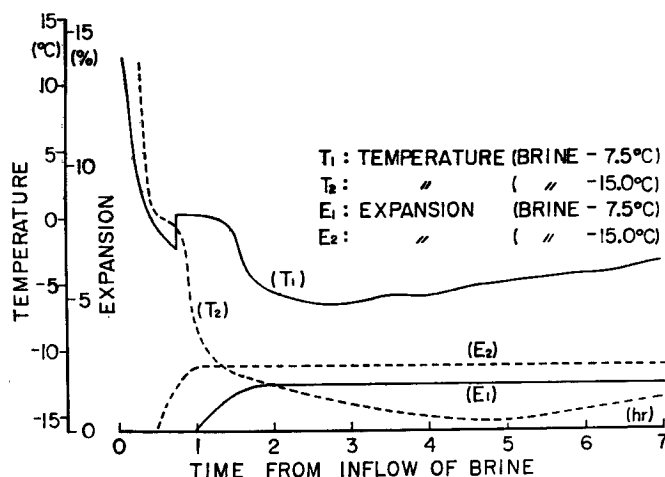


Fig. 5 Variations of temperature and expansion of soil samples due to cooling by the brine

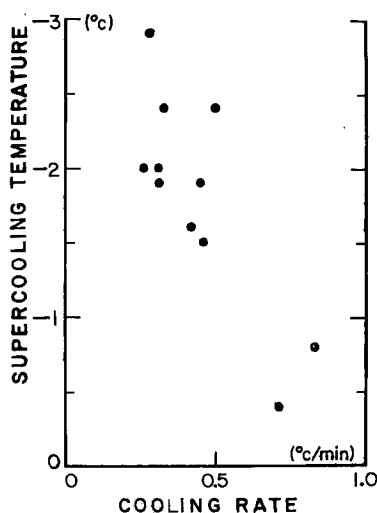


Fig. 6 Relation between cooling rate and supercooling temperature

かった場合では試料中心温度が 0°C になった頃から膨脹が始まっている。これらの現象は将来考察されるべき興味ある問題である。

次に圧縮荷重と凍結膨脹量の関係を調べよう。試料温度は時間とともに低下し、ブライン循環開始後数時間かかってブライン槽保持温度に達しその後はブライン循環を停止するまでその保持温度に保たれるが、試料の膨脹は Fig. 5 にみられるように膨脹開始後約1時間たらずで完了し、その後は試料温度の低下に関係なく一定値に保たれたままである。我々はこの一定値をそのときの圧縮荷重に対する膨脹量として、両者の関係を調べた。結果は Fig. 7 および Fig. 8 に示すとおりである。Fig. 7 は充填試料の軸方向が水平方向になっている場合で、Fig. 8 は鉛直方向になっている場合である。Fig. 7 においては全体の傾向として

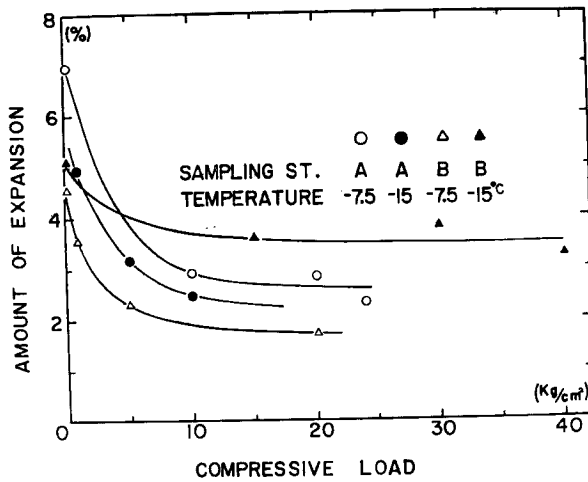


Fig. 7 Expansion of soil samples in direction parallel to the horizontal plane

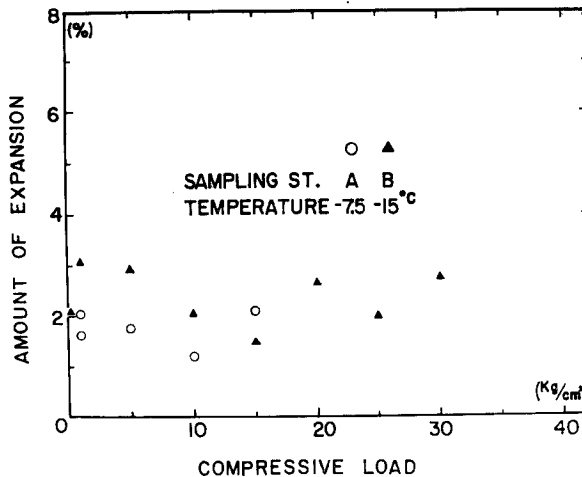


Fig. 8 Expansion of soil samples in direction perpendicular to the horizontal plane

圧縮荷重が0のときに平均約5%膨張し圧縮荷重の増加とともに膨張量は減少し20 kg/cm²位で約2.5%の膨張量となっている。これに反して Fig. 8 においては圧縮荷重の増加にもかかわらず、平均して約2%の一定の膨張量しか示していない。試料の間隙比や飽和度から試料中の土粒子体積や水分、空気の体積を求めると、大まかにいって試料全体積 ($= \frac{\pi}{4} \times 5^2 \times 10 \text{ cm}^3$) の中約90 cm³前後が土粒子体積、105 cm³、5 cm³がそれぞれ水分、空気の体積となる。105 cm³の水が氷になるときの体積膨張が円筒軸方向のみにおこるとしてピストン上昇量になおすと、始めの試料高さ10 cmの約5%となり、5 ccの空気が占める空隙がなくなったとすれば、ピストンは約2.5 mm沈下して、始めの試料高さの約2.5%の収縮となる。したがって Fig. 7 に示されている試料膨張量の変化は、圧縮荷重が0のときは空気の占める空隙はそのまま残

り水分の凍結による膨脹量だけピストンを押し上げ、圧縮荷重が増すにつれて、水分の凍結膨脹量の一部は次第に空気の占める空隙に逃げこみ、それにつれて空気は圧縮あるいは排除されて $20\sim 30 \text{ kg/cm}^2$ の圧縮荷重では、空気間隙がほとんどなくなってしまったと考えれば、きわめて簡単に、膨脹量の変化が説明できる。そうだとすれば鉛直方向に試料を膨脹させたときには、無荷重でも水分膨脹量は空気間隙に逃げこみ、水分の凍結膨脹量によるピストンの押し上げと空気の圧縮排除によるピストンの沈みとの差し引きだけが圧縮荷重の如何にかかわらず試料膨脹量として測定されたということになる。空気が圧縮排除される仕方が水平方向と鉛直方向とで異なるということを支持する証拠は今のところなにもないので、上述の説明が正しいかどうかは疑問であり、今後さらに実験検討すべき問題であるが、実験に使用した土壌は沖積層で採取されたものであり、土壌の堆積過程においては、鉛直方向には重力が作用することや、水平方向には土粒子径の大小によって水平輸送距離がことなることなどを考えれば、沖積層土壌の土粒子や空隙の構造に異方性が存在し得ることは充分考えられることである。

4. 結 論

今回の実験は試料数が少なく、参考資料もないので、さらに数多くの実験をくり返すことが必要であるが、実験を通じて次の結論が導かれた。

- 1) 土壌の冷却に際して、その中の水分は過冷却され、その過冷却温度は冷却速度が大きい程高くなる傾向がある。
- 2) 土壌が圧縮荷重を受けながら凍結膨脹する際に水平方向に膨脹する場合と鉛直方向に膨脹する場合とで異なり、水平方向では圧縮荷重の増加とともに凍結膨脹量は減少したが、鉛直方向では膨脹量は圧縮荷重に無関係のように見える。

謝 辞

この研究に際し、終始御教示を賜った当研究所奥田節夫、村山朔郎両教授に厚くお礼申し上げます。また、実験に当って多くの御援助を頂いた精研冷機株式会社高志勤部長に心から感謝します。

参 考 文 献

- 1) Beskow, G : Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads, 1935 translated by J. O. Osterberg, Technological Institute, Northwestern University, (1947).
- 2) Taber, S : Frost Heaving, Journal of Geol., Vol.37, No.1 pp.428—461, (1929).
- 3) Scheidegger, A.E. : Theoretical Geomorphology, Springer-Verlag, Berlin, pp.281—284, (1961).
- 4) Jackson, K.A., Uhlmann, D.R. and Chalmers, B. : Frost Heave in Soils, J. Appl. Phys., Vol.37, No.2, pp.848—852, (1965).
- 5) 木下誠一, 大野武敏 : 凍上力 I, 低温科学物理篇, 第21輯, 昭和38年, 117—139頁。
- 6) 村山朔郎, 柴田徹, 軽部大蔵 : 地盤凍結工法に関する実験, 京大防災研究所年報, No.5 A, 昭和37年, 94—101頁。
- 7) 高志勤, 松浦一三, 谷口晴美 : 土壌凍結工法 [II], 冷凍, Vol.36, No.410, pp.1082—1101.