



Title	原位置凍上試験法について
Author(s)	福田, 正己; Fukuda, Masami; 木下, 誠一 他
Citation	低温科学. 物理篇, 45, 99-107
Issue Date	1987-03-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18540
Type	departmental bulletin paper
File Information	45_p99-107.pdf



原位置凍上試験法について*

福田正己・木下誠一

(低温科学研究所)

了戒公利・赤川敏

(清水建設技術研究所)

(昭和61年11月受理)

I. はじめに

土の凍上性を判定するためには、一定の条件下での凍上試験をおこなう。多くの場合は、対象となる土試料を現地から採取し、これを実験室で凍結させて凍上量・凍上力などを測定する。試料の大きさは円筒型として直径5~15 cm, 高さ10~20 cm の場合が多い。さらに試料へ水分の供給を行う開式と行わない閉式との2つの方法がある。初期の水分条件では、飽和させておくケースと不飽和状態で実験を開始するケースがある。

さらに、上載荷重下での凍結と無荷重の場合があるが、こうしたさまざまな条件の組合せで、実際に野外で発生する凍上過程に相当するものを実験室において再現し、土の凍上性判定実験を行っている。この場合、試料の大きさによる制限が必ず存在するので、その結果を直接野外での予測に適用することには難しい点がある。

一方、こうした実験室の場合におけるような試料の大きさの制限を受けない凍上性判定が、野外観測における実験とでなされる。しかし、このような実験のためには規模の大きい実験施設が必要とされ、また観測期間も長いので実験効率が悪い。さらに、自然の寒さの条件下の凍結実験のため、気象条件に左右されやすい。

そこで、野外実験規模でありながら、実験室での実験と同じく、温度の制御や凍上量、温度分布などの細かい計測が可能となる実験法が、Nixon ら (1982)¹⁾ によって試みられた。さらにこの新しい実験法は、Konrad ら (1980)²⁾, (1981)³⁾, (1982)⁴⁾, Gilpin (1982)⁵⁾ によって、提案された凍上判定基準を検証するのにも適した方法である。そこで本研究報告では、この凍上判定基準の提案のもとになる凍上機構論 (Segregation Potential Concept) を紹介し、この凍上性判定基準検証のための実験結果を報告する。

II. 氷レンズ形成時の凍上の条件式

野外での凍上量を予測する方法として、福田ら (1986)⁶⁾ は凍上過程での熱と水の結合した流れモデルによる数値解析法を開発した。しかし、この解析を適用するには、対象とする土の物理的性質や理的性質、さらに不凍結水の存在量などの物理化学的性質が既知でなければな

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2905号

らない。地表面での冷却温度を決定するために、さまざまな気象要素も必要とされ、これを応用するのは容易ではない。

Konrad らは、多くの実験から簡潔な形として次のように凍上量を予測式を導き出した。

$$V_0 = SP_0 \cdot \text{grad } T \quad (1)$$

ここで V_0 は氷の析出している凍結面への水分フラックス (g/sec) であり、 $\text{grad } T$ はフロズンフリンジ (Frozen fringe) として定義される未凍土層と氷レンズ形成層の間にある凍土層内の温度勾配 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) である。 SP_0 は現象上の比例係数で Konrad はこれを工学係数と呼んでいる。凍上に関わるものの、物理的に明確に規定しえない土の性質を、実験から得た係数に置き換えることを意味する。さらに Konrad らは (1) の成立条件として凍結面が停滞せず、未凍土内の温度条件が定常状態にならない場合に限られるとした。

(1) 式の物理的解釈はつぎのようになる。フロズンフリンジでは、間隙水はすでに凍結しているが、土粒子表面の吸着場にある水は凍結せず、不凍水となっている。つまり 0°C 以下でも凍結していないことは、その化学ポテンシャルがバルク状態よりも低くなっていることを意味する。温度のより低い場所ほど、化学ポテンシャルは低くなるので、フロズンフリンジ層範囲に温度勾配があれば、それに沿った化学ポテンシャル勾配も形成されている。つまり $\text{grad } T$ で誘導されるポテンシャル勾配があり、これを動水勾配と見なすと (1) 式は水分拡散式になる。

しかし拡散係数にあたる SP_0 は複雑な性質をもち、凍結の際の外的条件に依存している。Konrad らは実験結果から SP_0 は、① 上載荷重、② フロズンフリンジと未凍結面との境界での水の水分ポテンシャル (水分張力)、③ フロズンフリンジの温度低下速度に依存するとした。

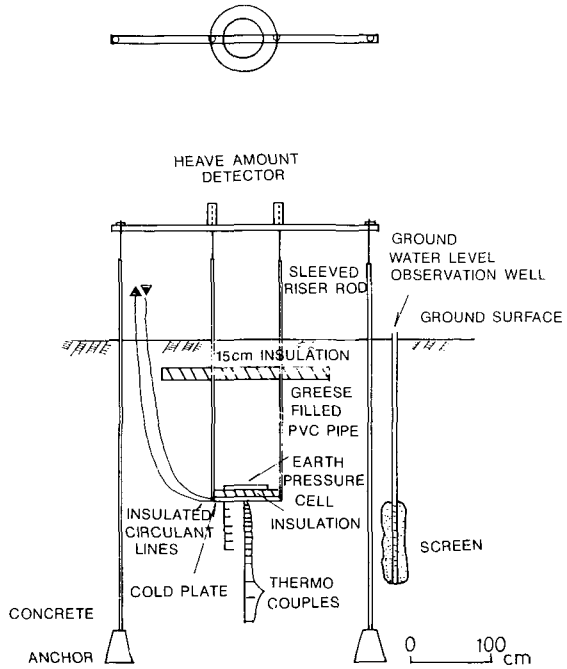
これらは、物理的にはフリンジでの透水係数 (あるいは凍土の透水係数) と、形成されつつある氷レンズの析出温度にかかわっている。しかし、これらを物理現象から定量的に決めることが困難なため、実験的に決めやすい SP_0 で表現している。

そこで、Konrad らの提案する凍上の条件式 (1) が成り立つ実験を行ない、 SP_0 の値を得ることで、野外での凍上予測が可能となる。こうした実験のためには、 $\text{grad } T$ を精度よく測定しなければならない。しかし、試料長さが数 10 cm の室内実験では両端の温度差を大きくしなにかぎり測定は難しい。ところが、両端温度差を大きく設定しても試料内での温度分布は、数時間で定常状態に達するので、成立条件が満たされない。凍結する試料の長さの制約がない野外の凍上実験であれば、このような条件式の成り立つ測定が可能となる。

Fukuda ら (1985)⁷⁾ は苫小牧での野外凍上観測の結果を用いて成立する期間が限られるものの、(1) 式の成り立つことを示した。Nixon (1982)⁸⁾ はさらに巧妙な大規模野外実験を行って、 SP_0 の値を得た。つまり、地盤中に冷却板を埋設し、地層を乱さず自然の状態での上載荷重下での凍上実験を実施した。今回の著者らの実験もこれに類似したものである。

III. 実験装置と方法

野外実験は低温科学研究所の構内にて行われた。そこで実験に用いた装置の概略図を第1図に示す。実験対象地に3×3m、深さ2mの掘込みを作り、その底面を平坦にする。この上に直径80cm、厚さ10cmの鋼鉄製のディスク型冷却板を設置する。このディスクの内部には内径4mmの銅パイプがスパイラル状に組み込まれている。外部の冷凍機から供給される冷却したブラインを、ディスク内に循環させることで、ディスクより下の土の凍結を生じさせる。冷却板の両端には、地中での凍上変位を地上に伝える鉄製ロッドが固定され、地中部は塩化ビニール製パイプでケーシングされている。このロッドの上端には変位計が取り付けられており、凍上変位量を自動計測することが出来る。地下2m以深の土層内には、一定深さごとに温度センサー（銅コンスタンタン熱電対）が埋設してある。埋設位置は冷却板中心部と縁辺部の2カ所である。



第1図 原位凍上実験装置の概要

冷却板の直上に厚さ10cm、直径85cmの断熱材をおき、冷却板の上側を覆う土層が凍結しないようになっている。また、その上には低温用土圧計を設置する。以上の準備ののち、再び土を埋め戻すが、地表から50cm深さに厚さ15cm、広さ2×2mの断熱材を埋設する。これは、実験中に地表の温度変動が地中に侵入するのを、防止するためである。実験中の地下水位を観測するために、観測用孔が隣接して掘ってある。

埋設ののち1カ月以上放置し、熱的な平衡が再び成り立ったのを確認して冷却を開始した。試験地に隣接して置かれた2.4kW冷凍機から、冷却用ブラインを供給循環させた。

なお、試験地の地盤構成土層の物理的性質を第1表に示す。

第1表 実験地の土の性質

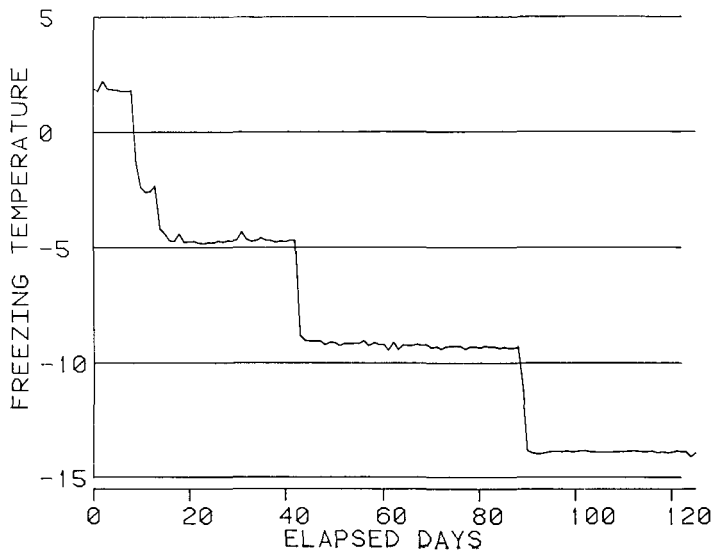
粒 度 分 布	砂 分 (%)	7.0	液 塑 性	液性限界 (%)	146.6
	シルト分	40.7		塑性限界 (%)	62.7
	粘土分	52.3		塑性指数	83.9
	最大粒径 (mm)	0.105		含水比 (%)	131.2

実験中は以下の項目と内容を自動計測した。

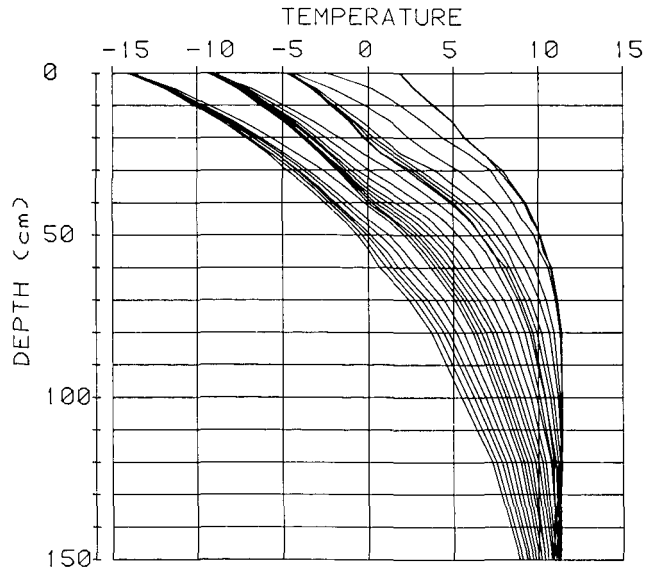
- 地中温度分布 (27点3時間毎)
- 凍上変位量 (3点3時間毎)
- 土 庄 (3点3時間毎)
- 地下水水位 (1点7日毎)

冷却は先に述べたように、凍結面の移動が一定の値以上になり、非定常的な凍結となるよう、以下のように段階的に温度低下させた。

実験開始前 +2°C、開始時 -5°C、28日経過後 -10°C、49日経過後 -15°C。このときのブライン温度の経時変化を第2図に示す。



第2図 冷却温度の経時変化

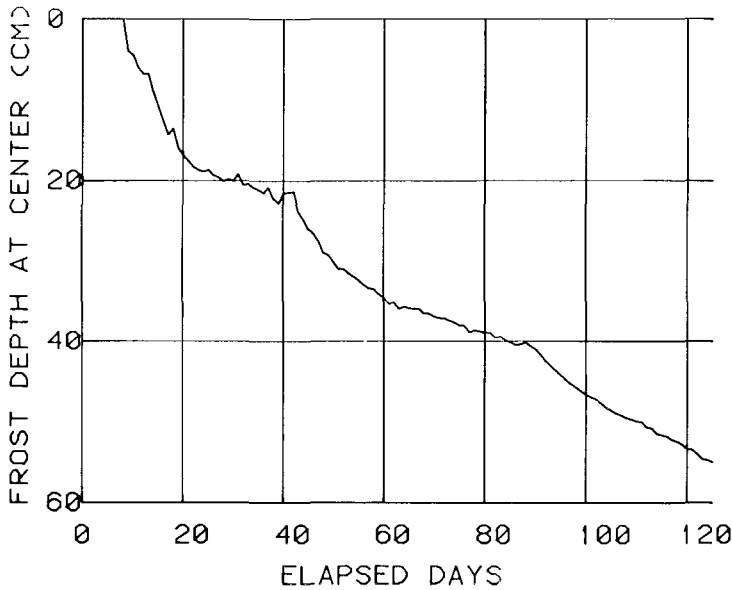


第3図 実験中の地中温度分布の変化 (5日毎の分布を示す)

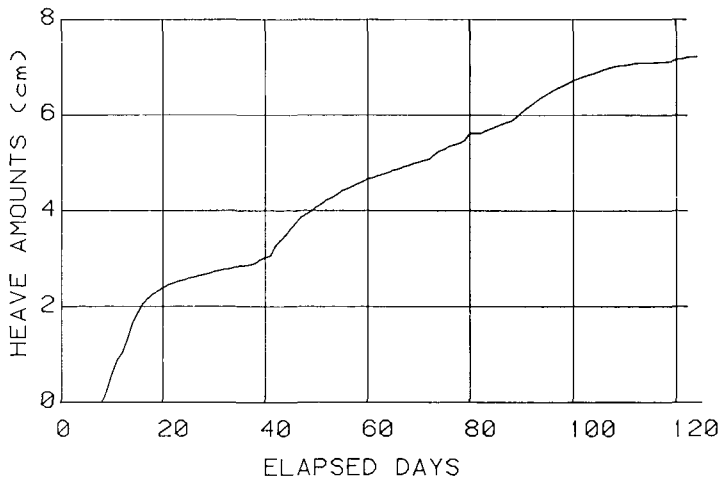
IV. 実験結果

実験中の地中温度分布の変化を第3図に示す。3時間毎の記録から日平均を算出し、5日毎の温度分布として表してある。第2図のように表面温度を低下させると、深さ20cmまででは2日間で温度変化が殆どなくなる。

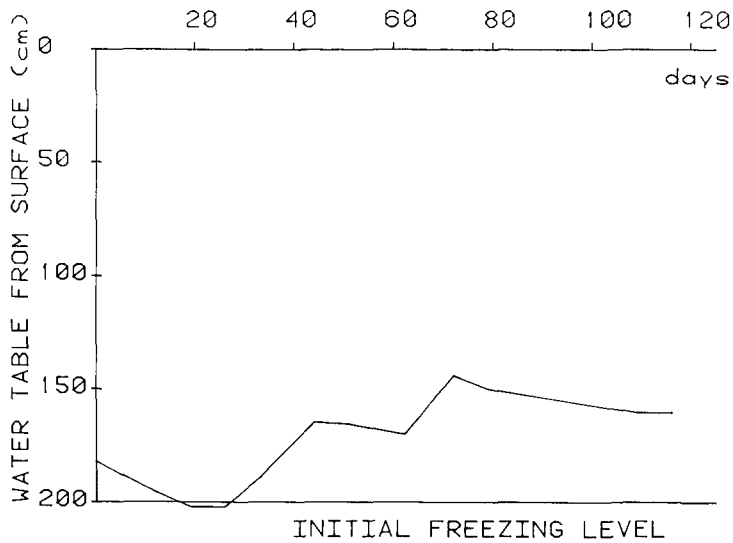
この温度分布から0°Cの位置を推定し、その経時変化を第4図に示す。一時的に凍結面が上がっているように見えるが、これは表面温度を変化させた直後の過渡現象であり、融解によるのではない。次に第5図に凍上変位置の経時変化を示す。冷却開始後9日から凍上が記録された。一旦冷却温度を設定すると、20日後頃に凍上速度が小さくなってくる。再び温度を下げると凍上速度が大きくなる。こうした凍上速度の変化が冷却の条件に应答していることが読み取れる。



第4図 冷却板中心直下での0°C凍結面位置の移動



第5図 凍上変位置の経時変化



第6図 周辺地盤の地下水位の経時変化

実験期間中の地下水位の変動を第6図に示すが、地表面から2m深よりもほぼ上にあつた。すなわち、実験期間中凍結土層は水分飽和であつたことになる。また、土圧変化を見ると初期は2mの土の厚みによる荷重分の土圧を示していた。凍結開始後土圧は増加したが、38日のちから減少しもとのレベル(約400 gf/cm²)に戻つた。この値は土の密度を2 g/cm³とした場合に適合している。

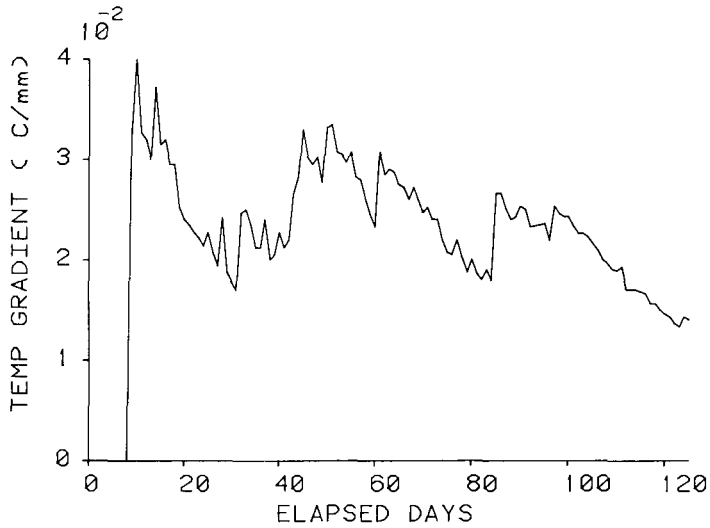
以上の結果から、地中での冷却による凍上試験では、地表面での温度変動の影響も受けず、また地下水条件も一定で、冷却温度を段階的に低下させた場合の温度分布と凍上速度との関係を得ることが出来た。

V. 解析と考察

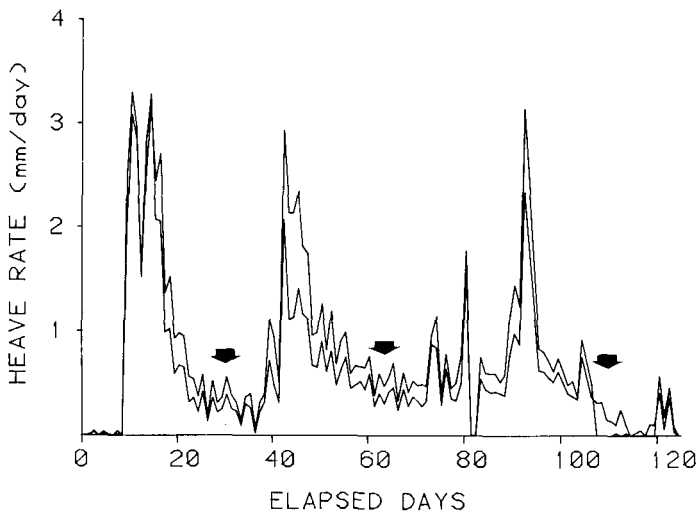
第4図から0°Cの位置が決定されているので、これを挟む2点間の温度勾配を第3図の各経過時間毎の温度分布から算出する。これをフロンズフリッジ近くの温度勾配(grad T)とする。その結果得られた、各時間毎の温度勾配を第7図に示す。段階的に表面冷却温度を下げた後には、地中温度分布が急激に変化し、こうした過渡期を過ぎると温度分布が定常状態に近づく。

第5図の凍上量の変化からこれを時間微分して、凍上速度を算出した(第8図)。表面温度を急激に低下させた直後は、凍上速度も急増している。およそ8~12時間後には凍上速度が低下しはじめる。冷却温度の低下から約20日後には、凍上速度は0.1 mm/day以下となって測定精度の範囲外となる。

Konradらの定義によれば、凍結面がほぼ停滞する条件では(1)式は成立しない。この状態では凍上速度も0.1 mm/day程度になっている。第8図で矢印で示した時期を、(1)式の不成立期間とする。この期間を除く各時間毎の凍上速度と温度勾配の関係をとり、それらの代表的な



第7図 フロズンフリンジでの温度勾配の経時変化



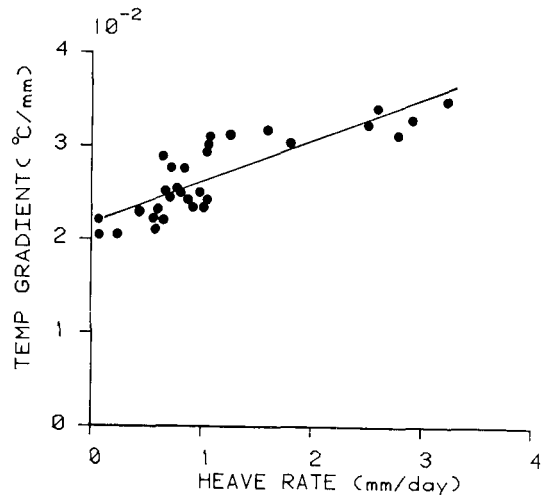
第8図 凍上速度の経時変化

組合せをプロットしたのが第9図である。多少バラ付きはあるものの、一次直線回帰式が成り立っている。これは(1)が成立していることを示している。つまり SP_0 の値がこの実験範囲では一定であり、上載荷重と未凍結層の最上部での水分ポテンシャルが変動しなかったことを意味している。このことは冷却板の上の土圧計の読み取り値があまり変化しなかったこと、そして地下水位が変動しなかったことから裏づけられる。

凍結面が停滞し温度分布が定常状態に近ずいて、凍上速度がほぼ0となっても、温度勾配は0とならない。つまり図中の一次関係を示す直線は原点を通らない。これは、与えられた上載荷重と水分ポテンシャル条件で規定される氷レンズの析出する温度 (Konrad の定義では T_{0i}) よりも、その温度が高いためである。この時の温度を Konrad らの事例にならって -0.1°C

とすると、温度勾配の値 ($2 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{mm}$) からこの時のフローズンフリッジの厚さは 5 mm と推定される。

直線回帰式から SP_0 を算出すると、 $2.5 \times 10^{-3} (\text{mm}^2/\text{sec} \cdot ^\circ\text{C})$ が得られた。この値は Konrad らの結果では 40 KPa 荷重下の Devon シルトに等しい。また、Fukuda らが苫小牧ではほぼ無荷重の条件で得た苫小牧シルトの SP_0 の 1/3 であった。Nixon が Calgary シルトを用いた実験では SP_0 は、 0.9×10^{-3} と小さい値であったが、これは上載荷重が本研究の場合よりも約 2 倍であったためであろう。



第8図 凍上速度と温度勾配の関係
(凍結面進行速度 $\geq 0.1 \text{ mm/day}$)

VI. 結 語

土の凍上性を判定する新しい実験をおこなった。不攪乱状態での野外凍上実験から、凍上速度が氷レンズの形成位置 (freezing front) と凍結面 (0°C 温度面 frost front) に挟まれた領域 (frozen fringe) での温度勾配に比例することが示された。これは Konrad らの提案した凍上の条件式と一致する。また、この条件式の成立条件は、凍結面が一カ所に停滞して温度分布が定常状態にならない場合である。こうして得られた凍上性に関連するパラメーター (SP_0) の値は、Konrad ら、あるいは Nixon による結果と類似した。

従来、物理的にその機構の正しさが裏づけられた数値解析モデルであっても、実験対象とする土のさまざまな性質が既知でないと実際に凍上予測には適用出来なかった。本報告で紹介した凍上の条件式は、実験の条件を巧妙に設定すれば、単純な経験式として得ることができる。今後この条件式の物理的な解釈が可能となるように、実験方法の改善が行われるであろう。

おわりに本研究の実施にあたっては、低温科学研究所の工作部と低温機関室の方々の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。本研究実施の経費の一部は昭和 59 年度文部省科学研究費課題番号 59850084 によった。共著者 (了戒, 赤川) はこの研究課題での研究分担者である。

文 献

- 1) Nixon, J. F., Ellwood, J. R. and Slusarchuk, W. A. 1982 In situ frost heave testing using cold plate. Proc. 4th Canadian Permafrost Conference, 466-474.
- 2) Konrad, J. M. and Morgenstern, N. 1980 A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **17**, 473-486.
- 3) Konrad, J. M. and Morgenstern, N. 1981 The segregation potential of a freezing soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **18**, 482-491.

- 4) Konrad, J. M. and Morgenstern, N. 1982 Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing. *Canadian Geotechnical Journal*, **19**, 250-259.
- 5) Gilpin, R. R. 1982 A frost heave interface condition for use in numerical modelling. Proc. 4th Canadian Permafrost Conference, 459-465.
- 6) 福田正己・木下誠一・中川 茂 1986 熱と水の結合した流れモデルによる野外凍上量の予測. 低温科学, 物理篇, **45**, 83-97.
- 7) Fukuda, M. and Kinoshita, S. 1985 Field frost heave prediction related to ice segregation process during freezing. *Annals of Glaciology*, **6**, 87-91.

Summary

The segregation potential concept of frost heaving proposed by Konrad and Morgenstern is briefly outlined. During a soil freezing, water migrates to the freezing front where ice segregates at depressed temperature below 0°C. Pore-water in soil layers freezes at the 0°C thermo-line named frost front. The soil layer between the freezing front and the frost front is termed frozen fringe where unfrozen water in partially frozen soil exists and migrates to the colder side under temperature gradients.

A simple equation of moisture flux in the frozen fringe is expressed as follows:

$$V_0 = SP_0 \text{ grad } T \quad (1)$$

where V_0 is flux of water to the freezing front and $\text{grad } T$ is the temperature gradient in the frozen fringe. SP_0 is a unique parameter to be applied for the prediction of the frost heave amount.

The authors designed a new in situ frost heave test apparatus and used it for a field experiment. A previously proposed equation (1) is derived from the results of the experiment. The obtained SP_0 value coincided with the value estimated by Konrad and Morgenstern.