



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍上現象のメカニズムに関する実験研究
Author(s)	石崎, 武志; Ishizaki, Takeshi
Citation	低温科学, 84, 39-56
Issue Date	2026-03-10
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.84.39
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99016
Type	departmental bulletin paper
File Information	05_p039-056_LT84.pdf



凍上現象のメカニズムに関する実験研究

石崎 武志¹⁾

2025 年 8 月 25 日受付, 2025 年 10 月 2 日受理

凍上現象とは地盤が凍結する際に、凍結面近傍でアイスレンズが成長し地盤が膨張する現象である。地盤凍結工法やLNG地下タンク周辺地盤の凍結など工学分野では重要な問題である。本研究は、この現象のメカニズムを明らかにするために、様々な温度勾配と凍結速度条件下で系統的な凍上実験を行い、凍結面への吸水速度と凍土中の温度勾配、凍結速度の間の関係を求めた。また、実験からアイスレンズ成長面温度を求め、凍結面への吸水速度とアイスレンズ成長面温度との関係を求めた。これらの実験結果をもとに、既往の凍上モデルの妥当性の評価を行ったところ、アイスレンズへの吸水速度をフローゼンフリンジやアイスレンズ近傍の水膜の透水係数の低下が律速しているという凍上モデルは、実験結果に合わないことが分かった。一方、アイスレンズへの吸水速度がアイスレンズと近傍の水膜の化学ポテンシャル差により律速されているという凍上モデルが実験結果に対応することが分かった。

Experimental study on the mechanism of frost heave phenomenon

Takeshi Ishizaki¹

Frost heave is a phenomenon in which ice lenses grow near the frozen surface during freezing, causing the soil to expand. This phenomenon is an important issue in engineering fields such as ground freezing methods and the freezing of ground around underground LNG tanks. To clarify the mechanism of this phenomenon, we conducted systematic frost heave experiments under various temperature gradient and freezing rate conditions and investigated the relationship between the water intake rate at the frozen surface, the temperature gradient in the frozen soil, and the freezing rate. We also calculated the ice lens growth surface temperature from the experiments and the relationship between the water intake rate at the frozen surface and the ice lens growth surface temperature. Based on these experimental results, we evaluated the validity of previous frost heave models. We found that the frost heave model, which assumes that the water intake rate into the ice lens is limited by the decrease in the hydraulic conductivity of the frozen fringe or the water film near the ice lens, does not fit the experimental results. On the other hand, we found that the frost heave model, which assumes that the water intake rate into the ice lens is limited by the chemical potential difference between the ice lens and the nearby water film, is consistent with the experimental results.

キーワード：凍上現象, アイスレンズ, 氷晶析出温度, 部分凍結領域, 化学ポテンシャル

Frost heave phenomenon, Ice lens, Ice segregation temperature, Frozen fringe, Chemical potential

1. はじめに

土の凍上現象とは、地盤が凍結することにより、地盤内に氷の層が析出し地盤が膨張する現象をいう。地盤が凍結する際に、その場の水が凍結することによる体積膨張だけではなく、水が凍結面に吸い寄せられ氷として析出することにより膨張する現象である。北海道大学の低温科学研究所では、以前に、苫小牧演習林の中に凍上観測施設を持っていた。そこでの冬季の観測で、凍結した地盤のボーリングコアを採取した。この断面を図1に示す。この地盤中に析出した氷の層は、アイスレンズと呼ばれる。これは、多孔質体中のベンゼンの凝固の際 (Taber, 1930) や液体ヘリウムの凝固の際 (Hiroi et al., 1989) でも見られ、多孔質体内の液体の凝固の際に見られる物理現象である。

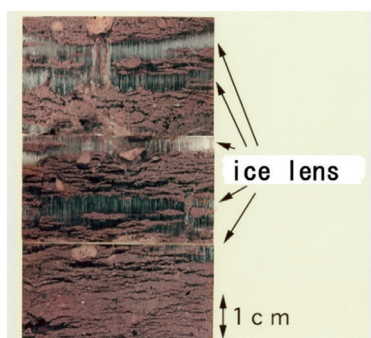


図1：地盤中の氷晶析出の様子

Figure 1: Ice lens segregation in soil during ground freezing

著者は、凍結速度、凍土中の温度勾配を独立に設定できる凍上実験を行い、凍上速度と凍結速度、凍土中の温度勾配の間に線形な関係があることを明らかにし、新たな凍上速度予測式を提案した (Ishizaki, 2023)。ここで凍上速度とは、土が凍結するときに単位時間当たりの膨張量のことである。また、本実験では、凍結面への吸水速度およびアイスレンズの成長面温度も凍結速度、凍土中の温度勾配と線形関係があることが分かった。さらに、アイスレンズの成長速度が、アイスレンズの成長面の温度と線形な関係にあることも示された。これらの実験結果は、凍上現象における、試料中の温度場や水の流れに関してより詳細な情報を提供している。

現在までに凍上現象を説明する凍上理論、凍上モデルは多くの研究者により提案されている。しかし、これらの凍上理論、凍上モデルの妥当性を評価する実験データは少なく、どの凍上モデルが正しいのかまだ研究者の間で、統一的な理解はないのが現状である。Ishizaki (2023) の論文で示した凍上実験のデータを、さらに詳細に検討し、提案さ

れている凍上モデルの予測結果と比較することにより凍上モデルの妥当性を評価した (Ishizaki, 2025)。ここでは、これらの論文をもとに、凍上現象のメカニズムに関して検討を行ったので、以下に報告する。

2. 既往の凍上モデル

軟弱地盤中にトンネルを掘削する際に行われる地盤凍結工法や東京湾沿岸に建設されている液化天然ガス (LNG) 貯蔵タンク周辺地盤の凍結では、地盤は水で飽和状態にあると考えられるので、ここでは飽和条件にある土の凍上モデルについて検討する。土の凍結過程では、アイスレンズが0℃面より温度の低い部分で成長することが知られている。このアイスレンズの成長面と0℃面の間は、フローゼンフリンジ (部分凍結領域) と呼ばれ、この領域中に間隙水が存在し、不凍水量は温度の低下と共に少なくなり、透水係数は小さくなる。O'Neillら (1985) の凍上モデルでは、フローゼンフリンジ中の透水係数の低下とともにアイスレンズの成長速度も低下する。一方、Styleらにより提案された凍上モデルでは、アイスレンズ近傍の水膜の厚さは、温度の低下と共に非常に小さくなり、水膜内の動水抵抗がアイスレンズの成長速度を律速しているとしている (Style et al., 2012)。ここでStyleらは、フローゼンフリンジ中には間隙水が存在しないという仮定をしている。Kuroda (1985) により提案されたモデルでは、低温下でのアイスレンズと近傍の水膜の化学ポテンシャル差が、結晶成長の駆動力としている。以下に、それぞれの凍上モデルを詳細に説明する。

ここでは、地盤工学で対象としている地盤凍結工法の現場と液化天然ガス貯蔵タンク建設現場の不攪乱の土試料を用いた凍上実験結果と凍上モデルの比較を行い、この様な対象の地盤凍結で、どの凍上モデルが妥当であるか検討を行った。

2.1 凍結面への吸水速度が部分凍結領域の温度勾配、凍結速度により律速される凍上モデル

図2に部分凍結領域 (フローゼンフリンジ) の構造を模式的に示す。凍結フリンジとは、0℃の表面とアイスレンズの成長面との間に空隙水が存在する領域である。Konrad (1989) は、アイスレンズの成長面への水分の吸収速度が凍結フリンジ内の温度勾配 (G_f) に比例することを表す式 (1) を提案した。

$$V = SP_0 \exp(-aP_0) G_f, \quad (1)$$

ここで、 V は凍結面への吸水速度、 SP_0 はセグリティシヨ

ナルポテンシャルと呼ばれる試料固有の定数, は上載荷重による圧力, a は試料固有の定数である.

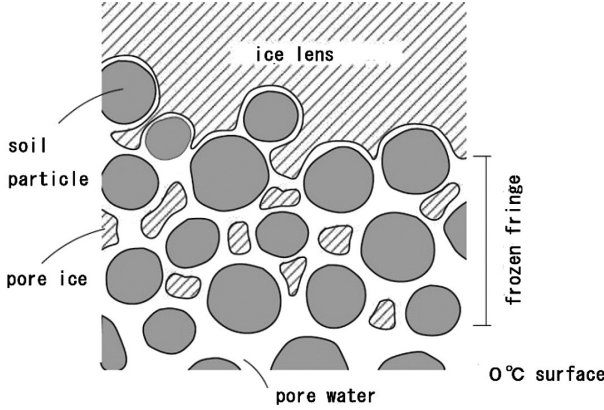


図2：フローゼンフリンジの構造の模式図

Figure 2: Schematic diagram of the structure in the frozen fringe zone

日本では, 地盤凍結法の先駆者であるTakashiら (1974) が, 数多くの凍上実験を行い, 凍結膨張率 (ξ) を凍結速度 (U) と有効応力 (σ) の関数として表す経験式を開発した. 凍結膨張率は単位体積あたりの膨張量であり, この値は, 凍結速度の関数となっている. この式は式 (2) で示される. これは, 土質凍上試験法 (Japanese Geotechnical Society, 2020) で, 凍上量を予測するために用いられている.

$$\xi = \xi_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma} \left(1 + \sqrt{\frac{U_0}{U}} \right), \quad (2)$$

ここで, ξ_0 , σ_0 , U_0 は試料固有の定数である.

日本では地盤凍結工法の設計には式(2)が用いられるが, 海外では式(1)が用いられている.

Ishizaki (2023) は, 凍土中の温度勾配と凍結速度を独立に設定できる実験を行い, 凍結面への吸水速度を式 (1) に示すように部分凍結領域の温度勾配のみで表すことも, 式 (2) に示すように凍結速度のみで表すことも困難であることを示し, 吸水速度を式 (3) に示すように凍土中の温度勾配と凍結速度の関数として表すことで, 正確な予測が可能であることを示した.

$$V = aU + bG_f + c, \quad (3)$$

ここで, a , b , c は凍上実験から得られた定数である.

式 (3) は, 凍結速度 (U) が $0.30 \sim 7.61 \text{ mm/h}$, 凍結帯温度勾配 (G_f) が $0.15 \sim 2.37^\circ\text{C/cm}$ の実験から得られたものである. また, U と G_f がゼロであれば, V もゼロとなるはずである. 重回帰分析によって得られた式 (3) の c の値は小さく, ゼロに設定してもよいが, 著者らは $c=0$ として式を修正するには更なる実験のおよび理論的研究が必要であると考へ, 実験データから直接得られた経験式 (3) の関係を用いた.

2.2 フローゼンフリンジ中の動水抵抗が律速している凍上モデル

この凍上モデルで土が上部から凍結する際の, 地盤中の温度分布, 間隙水圧分布, 透水係数の値の変化などを, 地盤の状態と共に, 図3に示す.

アイスレンズ成長面と 0°C 面との間に間隙水が存在し, 間隙水と土粒子の間に不凍水が存在し, 不凍水がアイスレンズへ向かって吸い寄せられ, 氷晶として析出する. 間隙氷は, 土粒子が作る毛管構造の表面力の影響を受けて, 0°C より低い温度で生ずる. この温度を T_p とすると, 毛管の平均の間隙半径を r_p とすると, T_p は, 式 (4) で表される (Hillel, 1980).

$$T_p = T_m \left(1 - \frac{2\gamma_{iw}}{\rho_w L r_p} \right) \quad (4)$$

ここで, T_m は, 大気圧下での氷の融点, γ_{iw} は, 水と氷の間の表面張力, L は水の凍結潜熱である. 間隙の半径が小さくなると, T_p の値も小さくなる. 間隙径が $1\mu\text{m}$ の場合 γ_{iw} の値として 0.029 J/m^2 を用いると, T_p の値は -0.05°C となる (Hardy, 1977).

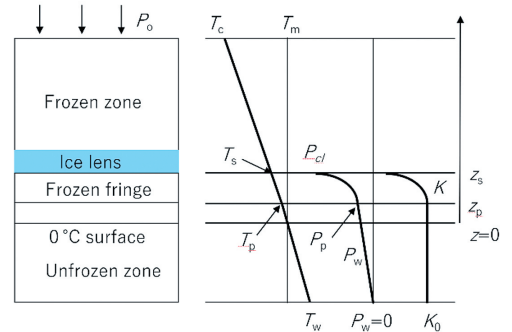


図3：地盤が凍結時の地盤中の温度分布, 間隙水圧分布, 透水係数分布の模式図

Figure 3: Schematic profile of the temperature, pore water pressure, hydraulic conductivity in the freezing soil

アイスレンズの成長面の温度を T_s とし, アイスレンズの圧力を P_i , アイスレンズ近傍の間隙水圧を P_w とすると, 下記のClapeyron式が成り立つと仮定している.

$$v_i P_i - v_w P_w = L \frac{T_m - T_s}{T_m} \quad (5)$$

ここで, v_i , v_w は, 氷と水の比容, P_i , P_w は, 氷と水の圧力である. 式 (5) を変形して, 間隙水圧 P_w を求めると, 式 (6) となる.

$$P_w = \frac{\rho_w}{\rho_i} P_i - \rho_w L \frac{T_m - T_s}{T_m} \quad (6)$$

ここで, ρ_i , ρ_w は, 氷と水の密度である. 氷に荷重がかかっていない条件 ($P_i = 0$) で, 氷晶析出面の温度を -1°C とする

と、アイスレンズ近傍の間隙水圧は-1.2 MPaの負圧になる。この負圧が、間隙水をアイスレンズ成長面に引き込む駆動力になっていると考えている。

フローゼンフリンジ中の透水係数を $K(z)$ 、間隙水圧を $p(z)$ とし、 z 座標は、図3に示したように、 0°C 面を0とし、低温側(図では上方)を正の方向とする。フローゼンフリンジ中の流速(V)は、ダルシー側により、式(7)で表すことができる。

$$V = -K(z) \frac{dp(z)}{dz} \quad (7)$$

O'Neillら(1985)により提案された凍上モデルでは、この透水係数が式(8)で示す不凍水分量(θ_u)の関数として表されている。

$$K(\theta_u) = K_0 \left(\frac{\theta_u}{\theta_0} \right)^7 \quad (8)$$

ここで、 K_0 は、未凍土の飽和透水係数、 θ_0 は、未凍土の飽和含水率である。不凍水量は、温度の低下と共に低下する。

NMRによる測定から、不凍水量の温度変化は、式(9)で表されている。

$$\theta_u = a(T_m - T)^b \quad (9)$$

ここで、 a は、 -1°C での不凍水量、 b は、土による物性値である。藤ノ森粘土の測定値では、 b の値は、-0.5程度であった(Ishizaki, 1994)。

式(8)と式(9)から、フローゼンフリンジ中の透水係数は、温度の低下と共に、急激に低下し、これがアイスレンズの成長速度を律速していることになる。図4に透水係数の測定結果を示す(Burt and Williams, 1974, Horiguchi and Miller, 1980, Takashi et al., 1983, Ishizaki et al., 1985)。図から、凍土中の透水係数が温度の低下と共に、大きく減少するのが分かる。

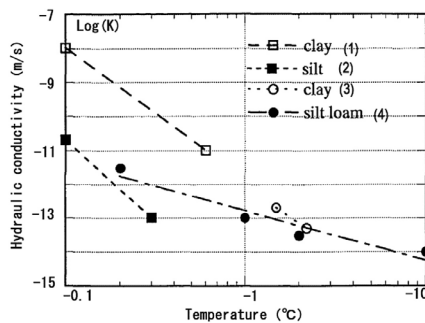


図4：凍土中の透水係数と温度の関係

Figure 4: Relationship between hydraulic conductivity and temperature in the frozen zone

(1) Burt and Williams, (1974), (2) Horiguchi and Miller (1980), (3) Takashi et al. (1983) (4) Ishizaki (1985)

2.3 アイスレンズ近傍の水膜の動水抵抗が律速している凍上モデル

Styleら(2012)は、フローゼンフリンジ中に間隙水は無く、アイスレンズと土粒子との間の非常に狭い水膜部分での、水分移動がアイスレンズの成長速度を律速しているという凍上モデルを提案している。アイスレンズ、粘土粒子、水膜の関係の模式図を図5に示す。

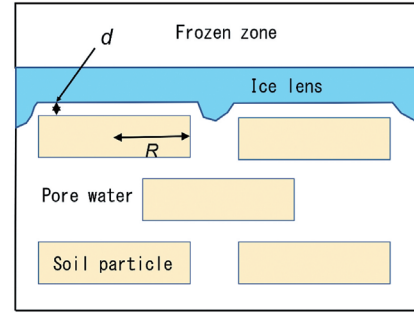


図5：アイスレンズ近傍の土粒子と水膜の模式図

Figure 5: Schematic diagram of the relationship between ice lenses, clay particles, and water films

土粒子は、平板円盤状の粒子とし、水膜の厚さを d 、土粒子の半径を R として、この水膜中の水の流れを計算している。水膜の厚さの温度変化は、測定結果から、式(10)で表している。

$$d = a_0 \ln \left(\frac{17}{T_m - T} \right) \quad (10)$$

ここで、 a_0 は、 0.84nm である。例えば -1°C の水膜の厚さは、 2.4nm と薄くなり、この部分の動水抵抗が大きくなることを示している。また、この凍上モデルでは、アイスレンズ成長面と接する水膜の間隙水圧(P_{cl})は、式(11)で示されている。

$$P_{cl} = P_o - \rho_w L \frac{T_m - T_s}{T_m} \quad (11)$$

ここでクラペイロン式中の水および氷の密度は、同じ値として式(6)より簡略化された式を用いている。また、氷の圧力は、上載荷重による圧力(P_o)に等しいとしている。

このモデルで、アイスレンズへ吸引される水の流速(V)は、式(12)で示されている。

$$V = \frac{p_h - P_o + \rho_w L \frac{T_m - T_s}{T_m}}{\frac{\mu h}{K_0} + \frac{3\phi\mu_p R^2}{2d^3}} \quad (12)$$

ここで、 p_h は、未凍土端面の間隙水圧、 μ は、未凍土の水の粘性係数、 h は、未凍土端面からアイスレンズ成長面までの距離、 ϕ は空隙率、 μ_p は、図3の土粒子と氷の水膜の粘性係数、 d は水膜の厚さである。分母の第1項目は未

凍土部分の動水抵抗, 第2項目は, 土粒子と氷の間の水膜の動水抵抗を表し, 計算結果によると, 第2項目が大きく, アイスレンズへ吸引される水の流速は, アイスレンズ近傍の水膜の動水抵抗が律速していると考えている.

2.4 アイスレンズ近傍のカイナティック過程が律速している凍上モデル

Kuroda (1985) は, 凍上現象には以下の3過程が関連していると述べている. 1) アイスレンズと土粒子の間の水膜近傍でのカイナティック過程, すなわち水膜による間隙水の吸引と水膜の凍結過程, 2) 地下水位から水膜に向かう巨視的な水輸送過程, 3) 水膜の凍結の潜熱と未凍土側から凍結面へ流れ込む熱を凍土側へ逃がす熱輸送過程. ここで, 1) のカイナティック過程とは, 結晶成長の駆動力が, アイスレンズと近傍の水膜の化学ポテンシャル差であり, この差がアイスレンズの成長速度を律速していると考えている.

水の化学ポテンシャル μ_w は, 0°C , 大気圧下の環境を基準とすると, 0°C 近傍では, 温度 T , 圧力 P_w の条件では, 式(13)で示すことができる.

$$\mu_w = v_w P_w - S_w(T - T_m) \quad (13)$$

氷の化学ポテンシャル μ_i は, 温度 T , 圧力 P_i の条件では, 式(14)で示すことができる.

$$\mu_i = v_i P_i - S_i(T - T_m) \quad (14)$$

ここで, S_w , S_i は, それぞれ水と氷のエントロピーである. 式(13)と式(14)から, 温度 T での, 水と氷の化学ポテンシャル差($\Delta\mu_{wi}$)は, 式(15)で表すことができる.

$$\Delta\mu_{wi} = v_w P_w - v_i P_i + L \frac{T - T_m}{T_m} \quad (15)$$

このモデルでは, 凍上速度(R_h)が以下の式(16)で表されている (Kuroda, 1985).

$$R_h = \frac{L \frac{T_m - T_s}{T_m} - P_o v_i}{\frac{akT}{D} + \frac{R}{K_f}} \quad (16)$$

ここで, D は水膜の中の水分子の拡散係数, a は分子間隔, k はボルツマン定数である. R は土粒子の半径, K_f は, アイスレンズ近くの透水係数である. Δv は, 氷と水の一分子当たりの体積差である. 式(16)の分子の第二項は, 水と氷の化学ポテンシャル差に対する圧力の効果を示したものである. 式(15)と比較すると, 圧力の効果が, 水と氷に同じ P_o の荷重がかかっている状態を示している. しかし, 実際は荷重の効果は氷に加わるが, 間隙水にはかからないことが知られているので (Takashi et al., 1979), ここでは, Ozawa の論文で使われているより一般的な関係式を用い (Ozawa, 1989), 氷のみに荷重の影響がある形に変更し, 実験結果

と比較した. また, この凍上速度(R_h)は, アイスレンズ成長面への吸水速度と等しいと簡略化されているので, ここでは, 他の凍上モデルと同様に, 吸水速度(V)とした. これを式(17)に示す.

$$V = \frac{L \frac{T_m - T_s}{T_m} - P_o v_i}{\frac{akT}{D} + \frac{R}{K_f}} \quad (17)$$

3. 凍上実験

3.1 凍上実験装置

凍上実験装置を図6に, 模式図を図7に示す. 試料は, 直径6cm, 高さ5cmの円柱状試料である. 試料容器は, アクリル製で, 厚さ2cmである. 試料容器には, 1cmごとに, サーミスタ温度センサーを取り付け, 実験中, 試料中の温度分布を測定した. 温度測定には, テクノセブン社製, サーミスタ高精度温度計 (D642, 精度 $\pm 0.02^\circ\text{C}$, 分解能 0.01°C , 外径1mm) を用いた. それらは, 水の三重点で校正を行い, 精度の良い温度測定が出来る様にした.

試料上下面は, サーモモジュールで温度制御を行った. 温度制御は, 比例制御および積分制御を用いて, 試料上面, 下面の温度を測定し, 設定値に合うようにプログラム制御を行った. 温度環境が安定していたので, 0.01°C の精度で制御を行うことができた. 試料の凍上量は, 変位計 (小野測器社製) で 0.01mm の精度で測定した. また, 吸水量は, 差圧計 (バリダイン社製) で測定した. 試料容器部分には, 厚さ3cmのウレタンフォームを巻き断熱した. また, 試料中への熱の移動が少なくなるように, 実験装置全体を 0.5°C に保った低温室に入れた. また, この装置において試料への水の供給は, 試料上部から行い, 間隙水圧を加えられる様になっている. また, 上載荷重はベロウフラムシリンダーで加えられる様になっている. 本実験では, 上載荷重によ

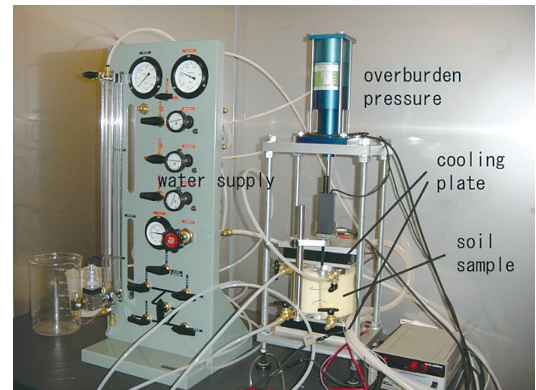


図6：凍上実験装置

Figure 6: Frost heave experimental apparatus

る試料上面に加わる垂直応力を0.12 MPaと0.24 MPaに設定して実験を行った。

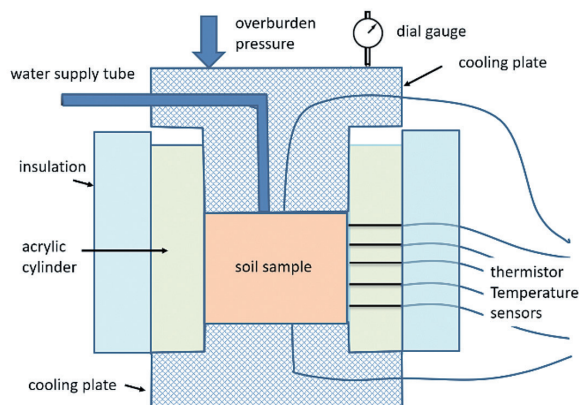


図7：実験装置の模式図

Figure 7: Schematic diagram of frost heave experimental apparatus

3.2 実験試料

試験には、2種類の土試料を用いた。試料1は、東京都千代田区の地盤凍結工法の現場である地下13mの所から採取された不攪乱試料である。また、試料2は、神奈川県根岸の地下タンクヤードから採取された不攪乱試料である。試料の諸定数を表1に示す。

表1：試料の諸定数

Table 1: Physical properties of the soil sample

		unit	Sample1	Sample2
particle size characteristics	sand	%	2.0	23.3
	silt	%	34.5	56.7
	clay	%	63.5	20.0
classification			clay	silt loam
consistency properties	W_L	%	84.8	41.0
	W_p	%	43.7	23.7
	I_p	%	41.1	17.3
soil particle specific gravity	G_s		2.64	2.65
natural moisture content	w	%	92.9	29.7
wet density	γ_t	g/cm ³	1.50	1.85
degree of saturation	S_r	%	98.5	92.1
specific surface area	S	m ² /g	136.2	15.6
volmetric water content	θ	%	70.7	55.0
hydraulic conductivity	K_0	m/s	1×10^{-9}	5×10^{-10}

3.3 試料の凍結方法

試料の凍結方法としては、上端面温度を0℃に一定にし、下端温度を一定速度で下げ、凍結速度を一定にする方法と試料の上端面、下端面の温度を同時に変化させる方法の2種類の方法で実験を行った。前者の方法は、地盤工学会、凍上量予測のための土の凍上試験方法に準拠したものである。ここで、凍上量とは、地盤が凍結した場合に、地表面

が上方向に持ち上がる高さのことである。この条件では、凍結速度と凍土中の温度勾配が比例関係になり、独立なパラメータとして設定できない。後者の方法では、凍結速度と温度勾配を独立なパラメータとして設定できる様に、試料の上端面温度と下端面温度の間に、一定の温度差を設定し、両方の温度を一定速度で低下させ、試料の凍結速度および温度勾配を独立に設定した状態で実験を行った。この方法で、様々な凍結速度、温度勾配を設定し、これらの値と凍上速度の間の関係について調べた。実験では、まず下部冷却板温度を急速に低下させ、サーマルショックという試料下部の水の過冷却を破る作業を行う。下部冷却面の温度が上昇した時に、凍結潜熱が発生し、間隙水の過冷却が破れたことを確認できるので、その時点を実験の開始時とした。

実験は、Case A, Case B, Case Cの3ケースで行った。Case Aでは、試料1を用い、上載荷重0.12MPaで実験を行った。Case Bは、試料2を用い、上載荷重0.12MPaで、Case Cは試料2を用い、上載荷重0.24MPaで実験を行った。それぞれのケースで上端面温度を0℃にし、下端面の温度を一定速度で低下させる実験および上端面、下端面の温度を一定速度で低下させる実験の両方を行った。Case Aの凍結条件および見かけの温度勾配、見かけの凍結速度を表2に、Case B, Case Cの凍結条件および見かけの温度勾配、見かけの凍結速度を表3に示す。

Case Aのa22では、実験開始時に上端面温度を5℃、下端面温度を0℃にし、両端面温度を1時間あたり0.2℃の速度で低下させた。この実験での試料中の温度変化を図8に示す。実験初期では、サーマルショックの影響で、各温度測定値が、設定値より低くなっているが、実験開始後1時間程度経過した後では、温度が設定値に近づき、直線的な温度分布になっているのが分かる。

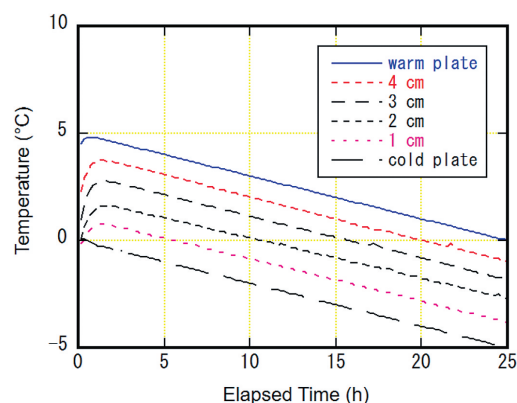


図8：試料中の温度変化(実験a22)

Figure 8: Temperature change with time (a22)

表2：Case A の凍結条件および見かけの温度勾配，見かけの凍結速度

Table 2: Freezing conditions, set temperature gradients, and set freezing rates for Case A

Experiment name	a01	a02	a03	a04	a05	a06	a07	a11	a12	a13	a14	a21	a22	a23	a24	a31	a32	a33	a34
name shown in the graph	a0							a1				a2				a3			
initial upper side T_w (°C)	0	0	0	0	0	0	0	2.5	2.5	2.5	2.5	5	5	5	5	10	10	10	10
cooling rate of T_w (°C/h)	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	1.6
initial lower side T_c (°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
cooling rate of T_c (°C/h)	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	0.05	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8	1.6
temperature grad. (°C/cm)	—	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	2	2	2	2
set freezing rate (mm/h)	—	—	—	—	—	—	—	1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8

表3：Case B, Case C の凍結条件および見かけの温度勾配，見かけの凍結速度

Table 3: Freezing conditions, set temperature gradients, and set freezing rates for Cases B and C

Experiment name	b01	b02	b03	b04	b05	b06	b07	b08	b11	b12	b13	b14	b21	b22	b23	b24	b31	b32	b33	b34	b41	b42	b43
name shown in the graph	b0								b1				b2				b3				b4		
Experiment name	c01	c02	c03	c04	c05	c06	c07	c08	c11	c12	c13	c14	c21	c22	c23	c24	c31	c32	c33	c34	c41	c42	c43
name shown in the graph	c0								c1				c2				c3				c4		
initial upper side T_w (°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	1.25	1.25	1.25	1.25	2.5	2.5	2.5	2.5	5	5	5	5	10	10	10
cooling rate of T_w (°C/h)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8
initial lower side T_c (°C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
cooling rate of T_c (°C/h)	0.01	0.03	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	0.03	0.05	0.1	0.2	0.05	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2	0.4	0.8	0.2	0.4	0.8
temperature grad. (°C/cm)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	2	2	2
set freezing rate (mm/h)	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4

4. 凍上実験結果

図9に，凍上量と吸水による凍上量の測定例(a22)を示す．ここで，凍上量は，ダイヤルゲージにより測定した土試料の膨張量であり，吸水による凍上量は，吸水量を試料の断面積で割り，水から氷への相変化時の体積膨張係数を乗じた値である．凍上量と吸水による凍上量は，時間とともにほぼ直線的に増加していることがわかる．これらの増加率の違いは，試料中に元々存在していた間隙水の凍結による膨張の寄与によるものである．

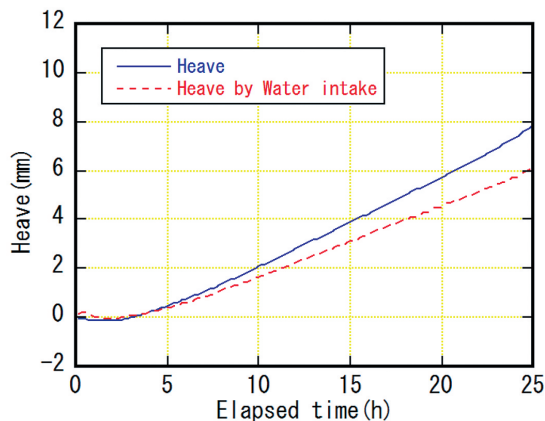


図9：凍上量および吸水による凍上量の時間変化（実験a22）

Figure 9: Heave amount and heave by water intake change with time (a22)

実験は，様々な凍結速度と温度勾配で実施した．図10は，表2に示したCase Aの条件で得られた，吸水速度と凍土中

の温度勾配 (G_f) の関係を示す．温度勾配 (G_f) は，凍土中の温度データを用いて算出した．

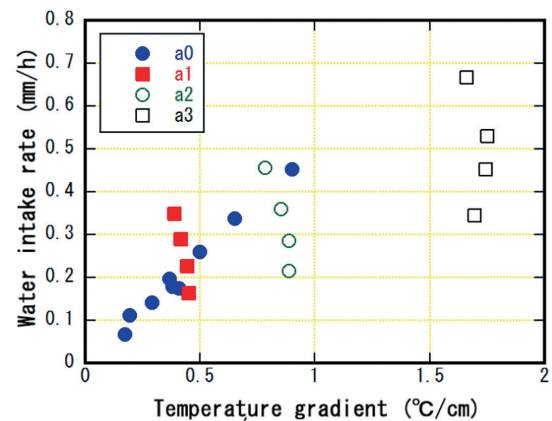


図10：Case Aの吸水速度と凍土中の温度勾配の関係

Figure 10: Relationship between water intake rate and temperature gradient in Case A

図10において，点a0は，サンプル上部の温度を0°C一定に保ったまま，下部の温度を0°Cから表2に示す速度で低下させた実験結果を示している．

図10のすべてのデータを用いて，吸水速度 (V mm/h) と凍土中の温度勾配 (G_f °C/cm) の関係を示す回帰式は以下のよう算出される．

$$V = 0.211 G_f + 0.115 . \quad (18)$$

この回帰式の相関係数は0.80である．温度勾配が大きくなるにつれて吸水速度は増加するが，相関は高くない．

図11は，Case Aにおける吸水速度と凍結速度の関係を示している．

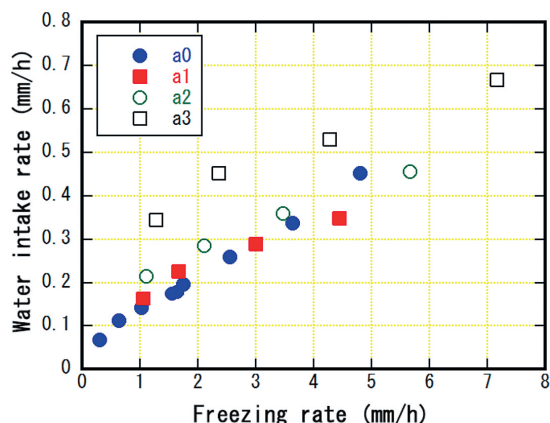


図11：Case Aの吸水速度と凍結速度の関係

Figure 11: Relationship between water intake rate and freezing rate in Case A

図11のすべてのデータを用いて、吸水速度(V)と凍結速度(U mm/h)の関係を示す回帰式は以下のように算出される。

$$V = 0.068 U + 0.093 . \quad (19)$$

この回帰式の相関係数は0.89であり、凍結速度が増加すると吸水速度も増加することがわかるが、a3のデータは系統的にずれている。

次に、凍結速度と温度勾配を独立変数として、吸水速度を3次元的に示す。図12は、両端板の温度を一定速度で低下させた試験結果(a1, a2, a3)を赤丸で、a0の結果(青丸)を示している。

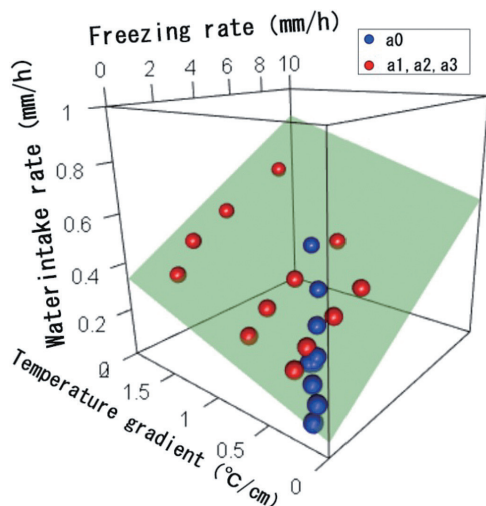


図12：Case Aの吸水速度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 12: Relationship between water intake rate, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case A

これらのデータを用いて、吸水速度(V)、凍結速度(U)、および凍土中の温度勾配(G_f)の関係に関する重回帰式を以下のように示す。

$$V = 0.049 U + 0.127 G_f + 0.050 . \quad (20)$$

この回帰式の相関係数は0.99であり、吸水速度は凍結速度と凍土中の温度勾配を独立変数とする直線方程式で表せることがわかった。図には、重回帰分析によって得られた重回帰平面を緑色で示している。

図13は、Case Aにおける吸水速度、凍結速度、凍土中の温度勾配の関係を重回帰面側から見たものである。この視点から見ると、重回帰面からのデータの乖離が小さいことがより明確にわかる。

実験a1, a2, a3と実験a0では、上面温度条件が異なるため、未凍結部分の温度勾配が大きく異なっている。この結果から、凍土中の温度勾配と凍結速度が同じ場合、凍結面への吸水速度はほぼ同じであることがわかった。

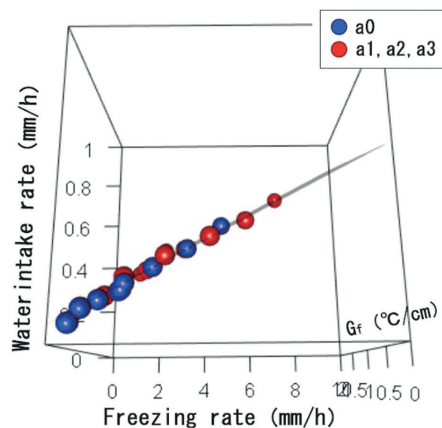


図13：Case Aの重回帰面から見た凍結面への吸水速度と凍土中の温度勾配、凍結速度の関係

Figure 13: Relationship between water intake rate, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case A seen from the side of multiple regression surface

図14は、実験開始時における凍上量と吸水による凍上量を示している。実験初期に水が排出され、ある点(点A)から吸水が開始された。

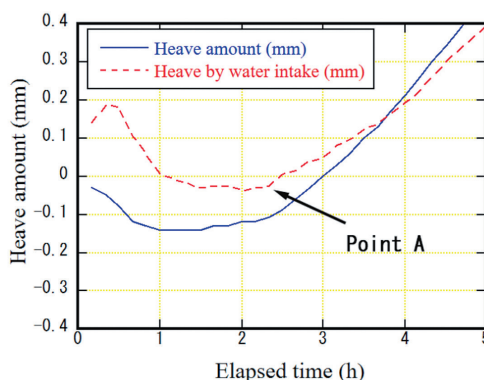


図14：実験a22の実験初期の吸水による凍上量の変化、吸水開始(点A)

Figure 14: Changes in the amount of frost heave due to water intake in the early stages of experiment, start of water intake (Point A)

吸水が開始する点Aは、冷却面に最も近い試料底面から吸水が開始されたことを示しており、この冷却面の温度はアイスレンズ成長面の温度 (T_s) とほぼ等しくなる。これを考慮し、実験結果はこれを氷晶析出面温度として解釈した。吸水時に冷却板付近で土壌が隆起し、アイスレンズが析出するという事実は、断熱材を外した状態でアイスレンズの析出過程をビデオ撮影した実験によって確認した。実験中、凍結速度 (U) と凍土中の温度勾配 (G_f) は一定に保たれ、凍上速度もそれに応じて一定であったため、凍上過程は定常状態で進行すると考えられる。そのため、各温度境界条件において、実験中に凍結面が移動したとしても、氷晶析出面温度 (T_s) は同じであると想定することができる。図15は実験初期段階の温度変化を示す。実験開始前に下板温度を急激に下げて氷核を生成させ、潜熱放出による下端温度上昇で氷核生成を確認した。この時点を実験開始とした。この操作により、実験開始から1時間半までは各箇所の温度は設定値よりも低い状態が続いたが、約1時間半後には直線的に設定値に近づいていった。

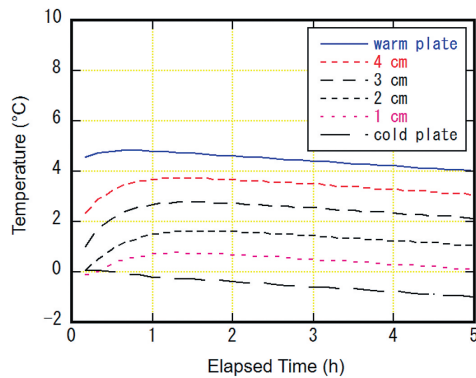


図15：実験の初期段階での試料の温度変化

Figure 15: Temperature change of the sample in the early stages of experiment.

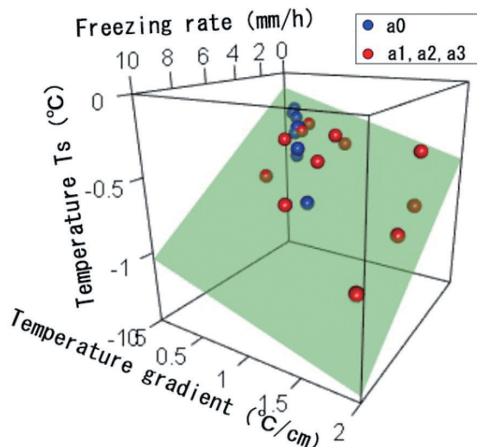


図16：Case Aの氷晶析出面温度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 16: Relationship between ice segregation temperature T_s , freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case A

図16は、凍結速度と温度勾配を独立変数として、氷晶析出面温度 (T_s) を3次的に表現したものである

この図において、赤丸は実験結果 (a1, a2, a3), 青丸は (a0) を表している。また、図には重回帰分析によって得られた近似平面も示されている。図16の全データを用いて、氷晶析出面温度 (T_s (°C)), 凍結速度 (U), および凍土中の温度勾配 (G_f) の関係に関する重回帰式を以下のように算出した。

$$T_s = -0.093 U - 0.207 G_f - 0.115 \quad (21)$$

この回帰式の相関係数は0.91であり、有意な相関が認められた。

図17は、Case Aにおける氷晶析出面温度、凍結速度、および凍土中の温度勾配の関係を重回帰平面側から見た図である。このグラフは、重回帰平面からのデータの乖離が小さいことを示している。

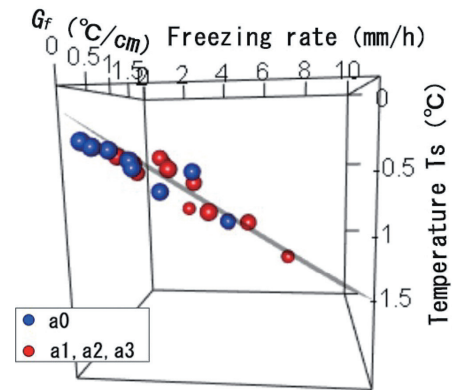


図17：Case Aの重回帰平面から見た氷晶析出面温度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 17: Relationship between ice segregation temperature, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case A seen from the side of multiple regression surface

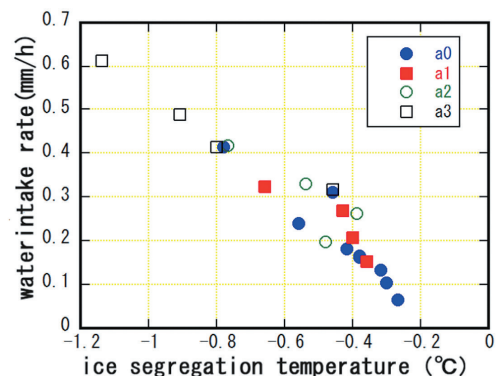


図18：Case Aの氷晶析出面温度と吸水速度の関係

Figure 18: Relationship between water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case A

図18は、Case Aにおける凍結面への吸水速度と氷晶析出面温度の関係を示している。氷晶析出面温度が低下すると、吸水速度が増加することがわかる。図18の全データを用い

て、凍結前線への吸水速度 (V) と氷晶析出面温度 (T_s °C) の関係を示す回帰式を以下のように算出した.

$$V = -0.578T_s - 0.050. \quad (22)$$

この回帰式の相関係数は0.95であり、吸水速度は氷晶析出面温度の低下に伴って直線的に増加することを示す. V と T_s のこの直線関係は、Ishizakiら(1985)の実験結果とよく一致した.

図19は、Case Bにおける吸水速度、凍結速度、および温度勾配の3次元表示である. 図20は、ケースBにおける吸水速度、凍結速度、および凍結域温度勾配の関係を重回帰平面側から見た図である. このグラフからも、重回帰平面からのデータの乖離が小さいことがわかる.

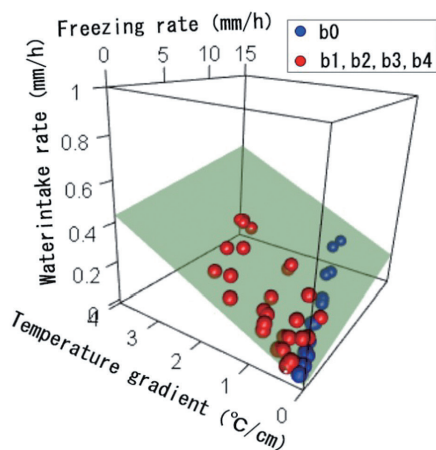


図19: Case Bの吸水速度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係、緑色平面は重回帰平面

Figure 19: Relationship between water intake rate, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case B

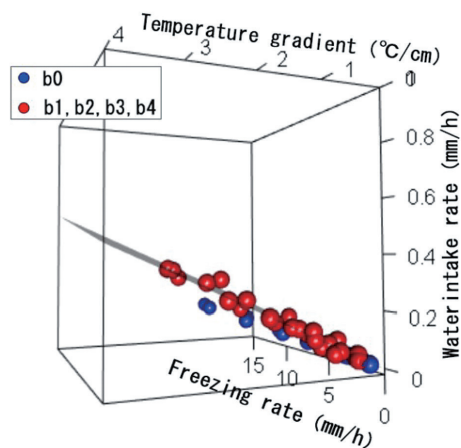


図20: Case Bの重回帰平面から見た吸水速度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 20: Relationship between water intake rate, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case B seen from the side of multiple regression surface

図21は、Case Bにおける氷晶析出面温度、凍結速度、および温度勾配の3次元表示である. Case Aと同様に、これらの値には直線関係が認められた. 図22は、Case Aにおける氷晶析出面温度、凍結速度、および凍土中の温度勾配の関係を重回帰平面側から見た図である. このグラフからも、重回帰平面からのデータの乖離が小さいことがわかる.

図23は、Case Bにおける凍結面への吸水速度と氷晶析出面温度の関係を示している. ここでも、氷晶析出面温度が低下すると、吸水速度も増加する. 図22の全データを用いた回帰式は、以下の式で表される.

$$V = -0.422 T_s - 0.030. \quad (23)$$

この回帰式の相関係数は0.93であり、有意な相関を示している.

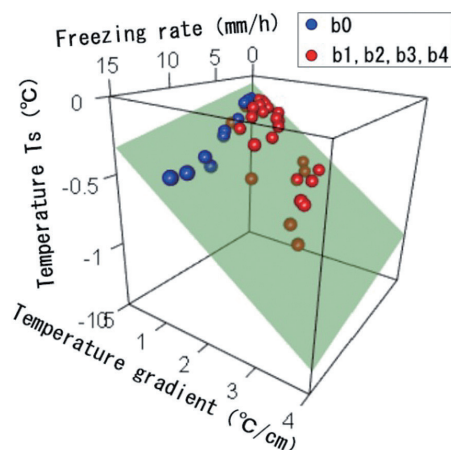


図21: Case Bの氷晶析出面温度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 21: Relationship between ice segregation temperature T_s , freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case B

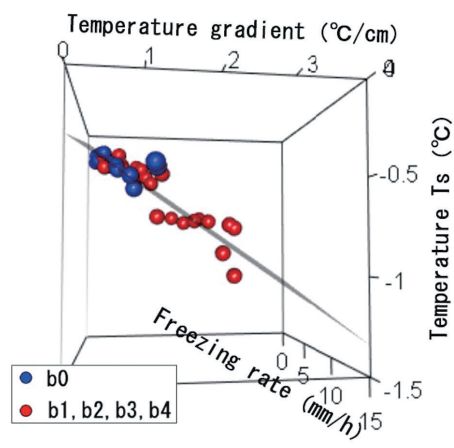


図22: Case Bの重回帰平面から見た氷晶析出面温度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係

Figure 22: Relationship between ice segregation temperature, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case B seen from the side of multiple regression surface

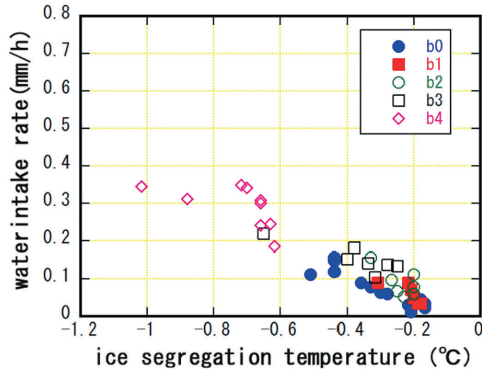


図23：Case Bの氷晶析出面温度と吸水速度の関係
Figure 23: Relationship between water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case B

図24は、吸水速度、凍結速度、および温度勾配の3次元表示であり、図25は、Case Cにおける氷晶析出面温度の同様のプロットである。これらの値には、Case AおよびBと同様に直線関係が認められた。

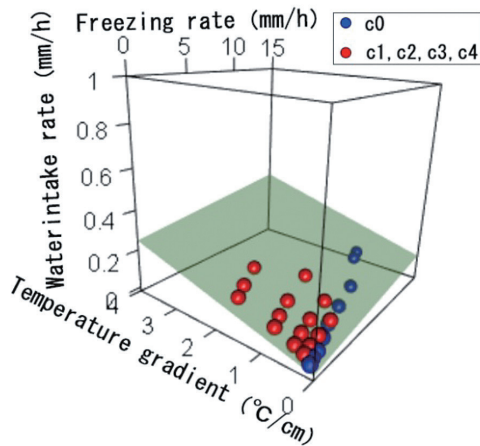


図24：Case Cの吸水速度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係、緑色平面は重回帰平面
Figure 24: Relationship between water intake rate, freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case C

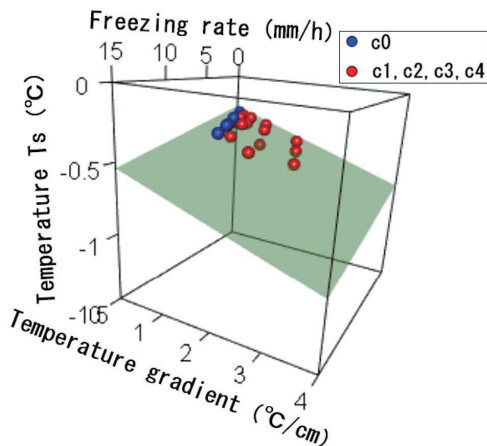


図25：Case Cの氷晶析出面温度と凍結速度、凍土中の温度勾配の関係
Figure 25: Relationship between ice segregation temperature T_s , freezing rate and temperature gradient in frozen zone in Case C

図26は、Case Cにおける凍結面への吸水速度と氷晶析出面温度の関係を示しており、やはり直線傾向を示している。図26の全データを用いて、凍結面への吸水速度 (V) と氷晶析出面温度 (T_s) の関係を示す回帰式を以下のように算出した。

$$V = -0.514 T_s - 0.141 \quad (24)$$

この回帰式の相関係数は0.93と有意であった。

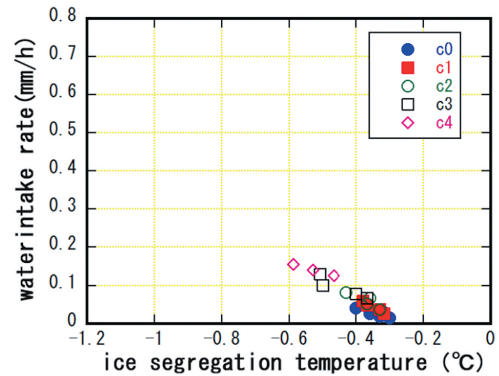


図26：Case Cの氷晶析出面温度と吸水速度の関係
Figure 26: Relationship between water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case C

5. 凍上実験結果による既往の凍上モデルの評価

CaseA, CaseB, CaseCのすべての実験結果から、アイスレンズへの吸水速度が、アイスレンズ析出面の温度の低下と共に、線形に増加することが分かった。次に、現在までに提案されている凍上モデルを用いて、アイスレンズへの吸水速度とアイスレンズ析出面の温度を計算し、実験結果と比較を行い、既往の凍上モデルの妥当性の評価を行う。

これらの凍上モデルで使われている凍土中の透水係数や、フローゼンフリンジ中の間隙水が発生する温度等は、精度良く測定するのは困難であるが、現在までに得られている測定値から推定したものをを用いた。

5.1 凍結面への吸水速度をフローゼンフリンジ中の温度勾配、凍結速度が律速している凍上モデル

ここでは、式(1)と式(3)を用いて算出した吸水速度を比較する。式(1)は上載荷重の影響を考慮しているが、上載荷重を系統的に変化させた実験は行っていないため、温度勾配と凍結速度のみに着目したデータを比較する。

CaseAで得られた吸水速度と凍結部の温度勾配の関係を式(18)に示す。図27に、式(1)を用いた吸水速度の計算値(青平面)と式(3)による吸水速度の計算値(緑平面)を示す。青丸はa0の測定値、赤丸はa1, a2, a3の測定値である。図28は、式(1)で算出した面側から見たケースAのデータを

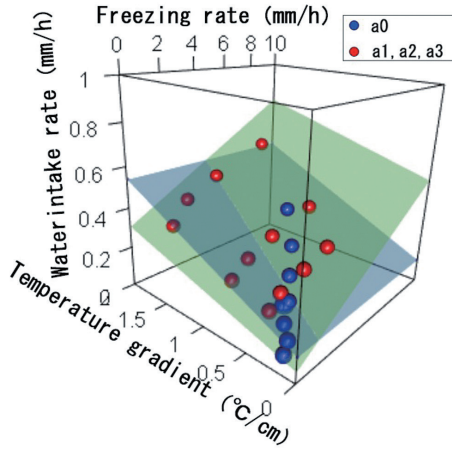


図27：式 (1)、式 (3) から計算した結果とCase Aの実験結果との比較

Figure 27: Comparison of the calculated values by equation (1) and by equation (3) with data of Case A

示す。この図では、式 (1) で算出した吸水速度が測定値から全体的に乖離していることが確認できる。これは、式 (1) では、吸水速度が凍結部の温度勾配のみの関数となっているためである。これらの結果から、凍結速度または温度勾配のみを考慮した経験式を用いて凍上量を予測するよりも、吸水速度が凍結速度と凍土中の温度勾配の関数となる経験式 (3) を用いる方がより正確であることがわかった。

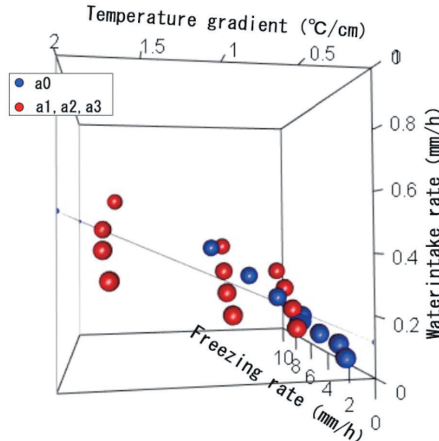


図28：式 (1) から計算した平面から見た、計算結果とCase Aの実験結果との比較

Figure 28: Comparison of the calculated values by equation (1) with data of Case A seen from the side of the surface calculated by equation (1)

5.2 フローズンフリッジ中の動水抵抗が律速している

凍上モデル

この凍上モデルと本実験結果との比較において、フローズンフリッジ中の温度分布は、図8に示した測定値により直線で近似した。図9に示したように、実験中、凍結の初期段階を除いて、凍上速度、吸水速度がほぼ一定であるこ

とから、フローズンフリッジ中の水の流れは、定常的であると考えられる。また、吸水速度は、凍結が進んで、未凍土部分の長さが変化しても、ほぼ一定であることから未凍土部分の動水抵抗は小さく、図3に示す、 P_p の値は、大気圧に近いと考えられる。また、式 (4) で規定される間隙水が生ずる温度は、間隙径の平均を $1\mu\text{m}$ とし、 T_p の値は、 -0.05°C と仮定した。

式 (9) で示される、不凍水の温度変化に関して、Case Aの試料1に関しては、藤ノ森粘土の測定結果をもとに、 b の値を、 -0.5 とし、図3の z_p の間隙水が生ずる温度で、飽和体積含水率に等しいと仮定した。この仮定をもとに、以下の計算で、フローズンフリッジ中の不凍水量は、下記の式 (25) を用いた。

$$\theta_u = 17.3(T_m - T)^{-0.5} \quad (25)$$

O'Neillらにより提案された凍上モデルでは、この透水係数が式 (8) で示す不凍水分量 (θ_u) の関数として表されている。式 (8) および式 (25) を用いて計算したCase Aの試料1の凍土中の透水係数を式 (26) に示す。

$$K(T) = 5 \times 10^{-14} (T_m - T)^{-3.5} \quad (26)$$

この式において、 -1°C の透水係数は、 $5 \times 10^{-14} \text{m/s}$ であり、 -0.1°C の透水係数は、 $1.6 \times 10^{-10} \text{m/s}$ であり、図4の測定値に対応した関係式になっていると考えられる。

次に、以上の仮定をもとに、フローズンフリッジ中の間隙水圧分布を求める。式 (26) の -1°C の透水係数を K_1 、温度の指数を $-\alpha$ とし、式 (27) の形で表す。

$$K(T) = K_1 (T_m - T)^{-\alpha} \quad (27)$$

図3に示したように、 0°C 面を $z=0$ 、間隙水の発生位置を z_p 、アイスレンズの発生位置を z_s とする。また、 0°C 面を T_m 、間隙水の発生位置の温度を T_p 、アイスレンズ析出面の温度を T_s とする。アイスレンズの析出面の間隙水圧は、式 (6) を用い、また間隙水の発生位置の間隙水圧を p_p とする。

フローズンフリッジ中の温度勾配を G_f とすれば、温度と座標 z の間には、以下の関係がある。

$$T_m - T = G_f z \quad (28)$$

式 (27) と式 (28) から次式が得られる。

$$K(T) = K_1 (G_f z)^{-\alpha} \quad (29)$$

フローズンフリッジ中の水の流れは、式 (30) のダルシー則に従うとする。

$$V = -K(T) \frac{dp}{dz} \quad (30)$$

式 (30) に、式 (29) 式に代入して z_p から z_s の間で積分を行うことにより、フローズンフリッジ中の流速を、アイスレンズの析出面温度 (T_s) と、アイスレンズ近傍の間隙水圧

(P_a), 間隙水の発生位置の間隙水圧(P_p)を用いて, 以下の式(31)で表すことができる.

$$V = (\alpha + 1)G_f K_1 (T_p - T_s)^{-(\alpha+1)} (P_p - P_{cl}) \quad (31)$$

式(29)の透水係数の条件を用い, 様々な, 凍結速度および温度勾配の条件で, 式(31)によりフローゼンフリンジ中の流速の計算を行い, 実測結果と比較したものを図29に示す.

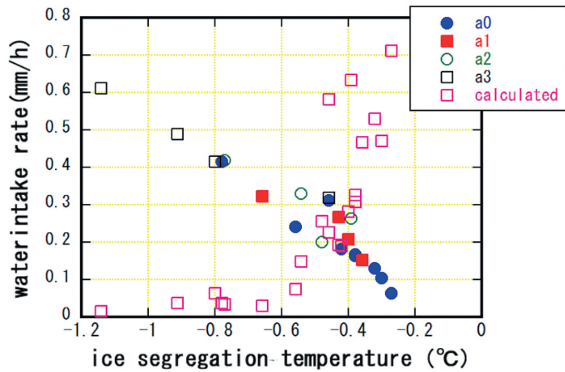


図29: Case Aの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値と式(30)の計算結果

Figure 29: Comparison between the calculated results by equation (28) and the measured water intake rate of Case A

図において, フローゼンフリンジ中の流速は, 氷晶析出面温度の低下と共に減少する結果となっている. これは, 式(6)に示されているように, 間隙水の吸引の駆動力となっているアイスレンズ近傍の間隙水圧が, 温度の低下と共に, 1次の関数で増加するのに対し, 式(29)で示す透水係数の項が, より高次の関数となっており早く低下するためと考えられる. 式(29)の関数において, α の値がより小さい値になったとしても, 同様の結果が得られると考えられる. また, CaseB, CaseCにおける計算でも同様の結果が得られ, 本凍上モデルでは, 実験結果を説明できないことが分かった.

5.3 アイスレンズ近傍の水膜の動水抵抗が律速している凍上モデル

Styleら(2012)は, フローゼンフリンジ中に間隙水は無く, アイスレンズと土粒子との間の非常に狭い水膜部分での, 水分移動がアイスレンズの成長速度を律速しているという凍上モデルを提案している. 式(12)において, 分母の第1項は, 未凍結部分の動水抵抗の影響である. この部分は, 図9に見られるように, 未凍土中の長さが, 変化しても実験初期を除いて, 吸水速度がほぼ一定になることから, この部分の項は, 第2項に比べ小さいと考えられるが, ここでは, 未凍土端面からアイスレンズ成長面までの距離 h は,

未凍土部分の長さが, 試料長の長さの半分の2.5cmとして計算を行った. また飽和透水係数 K_0 は, 表1の値を用いた. 水の粘性係数 μ は, Styleらの論文で使われている $1.7 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$ の値を用いた. p_h は, 未凍土端面の間隙水圧で, ここでは大気圧に等しいとする. ϕ の空隙率は, 表1から0.7とする. 平板土粒子の半径 R は, $1 \mu\text{m}$ とした. d は式(10)の関数で求めた. 図5の土粒子と水の水膜の粘性係数 μ_p は, Styleらの論文で使用されている値を用いた.

式(12)を用いて, アイスレンズへの流速の計算を行い, 実測結果と比較したものを図30に示す.

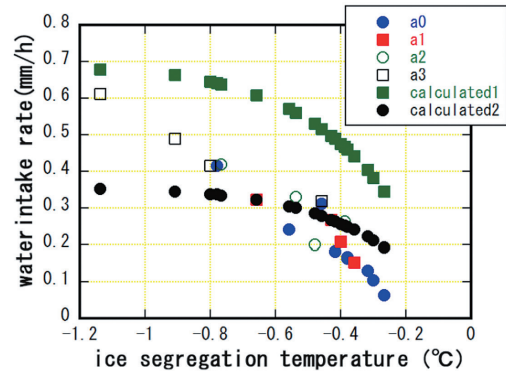


図30: Case Aの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値と式(12)の計算結果

Figure 30: Comparison between the calculated results by equation (12) and the measured water intake rate of Case A

図において計算結果1は, 水膜の粘性係数を, Styleらの論文で使われているように, 水の粘性係数の41倍として計算したものである. 計算結果2は, 水膜の粘性係数をさらに2倍にした計算結果である. この計算結果から, 吸水速度は, 水膜の粘性係数により大きく変化することが分かる. 氷晶析出面の温度の低下と共に, 吸水速度が増加する傾向は, 実験結果と合っているが, 温度の高い部分では, 実験結果と大きく異なること, また, 温度の低下による吸水速度の変化が, 実験結果と異なるなど, この凍上モデルでも, 本実験結果を説明できないことが分かった.

5.4 アイスレンズ近傍のカイナティック過程が律速している凍上モデル

Kuroda(1985)は, 結晶成長の駆動力が, アイスレンズと近傍の水膜の化学ポテンシャル差であり, この差が, アイスレンズの成長速度を律速していると考えている. ここでは, 式(17)を用いて, アイスレンズへの吸水速度を計算し, 実測結果と比較を行った. 式(17)において, 次の数値を用いた. $L/T_m = 3.7 \times 10^{-16} \text{ J/K}$, 氷1分子当たりの容積 $v_l = 3.26 \times 10^{-29} \text{ m}^3$, 原子間距離 $a = 3 \times 10^{-10} \text{ m}$, ボルツマン定数

$k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$. アイスレンズ近くの透水係数は, Kuroda (1985) の論文で使われているHoriguchiらの測定値を用いた $K_f=1 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{Js}$. 土粒子の半径 R は $1 \mu\text{m}$, また, 上載荷重 P_0 は, Case A, Case Bでは, 0.12 MPa , Case Cでは, 0.24 MPa とした. アイスレンズ近傍の水膜の自己拡散係数に関しては, Case Aの実験a11の吸水速度が, この凍上モデルの計算値に一致する形で求めたものを使った ($D=5 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$). この値は, 自由水の値 ($2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) (Gillen, 1972) より6オーダー小さく, Mizunoら (1986) のNMRによる -1.5°C の疑似液体膜の測定結果 ($3.1 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$) より2オーダー小さくなっている.

式(17)を用いて, 様々な, 凍結速度および温度勾配の条件で, アイスレンズへの流速の計算を行い, Case Aの実測結果と比較したものを図31に示す.

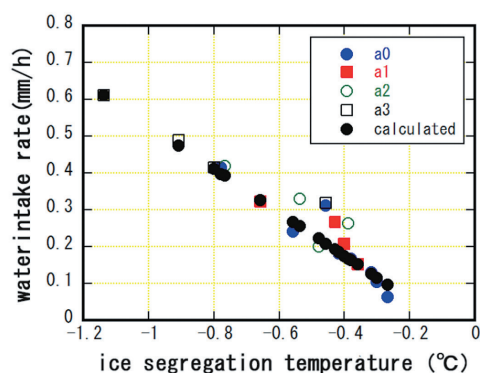


図31: Case Aの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値と計算結果

Figure 31: Comparison between the calculated results by equation (17) and the measured water intake rate of Case A

図において, 計算結果は氷晶析出温度が, 低下するにつれて, ほぼ直線的に増加していき, 実験結果と良く対応しているのが分かる. また, 式 (17) において, 分母の第2項の未凍土部分の動水抵抗の影響は, 第1項の水膜の凍結過程の寄与より2オーダーほど小さいことが分かった.

式(17)を用いて, 様々な凍結速度および温度勾配の条件で, アイスレンズへの流速の計算を行い, Case Bの実測結果と比較したものを図32に示す.

図において, 計算結果は氷晶析出温度が, 低下するにつれて, ほぼ線形に増加しているのが分かる. 氷晶析出温度が低い部分では, 吸水速度の実測値が小さくなっているが, 変化傾向は, 実験結果と良く対応しているのが分かる.

式(17)を用いて, 様々な凍結速度および温度勾配の条件で, アイスレンズへの流速の計算を行いCase Cの実測結果と比較したものを図33に示す.

図において, 計算結果は氷晶析出温度が, 低下するにつ

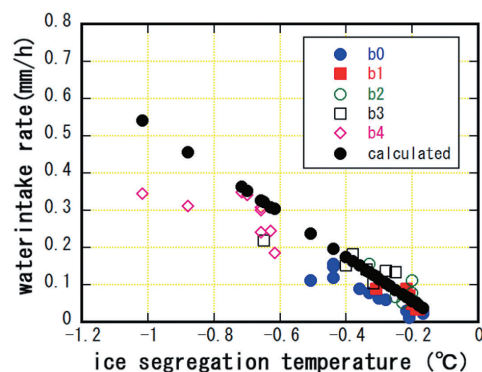


図32 Case Bの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値と計算結果

Figure 32 Comparison between the calculated results by equation (17) and the measured water intake rate of Case B

れて, ほぼ線形に増加しているのが分かる. 測定値全体で吸水速度の実測値が小さくなっているが, 変化傾向は, 実験結果と良く対応しているのが分かる.

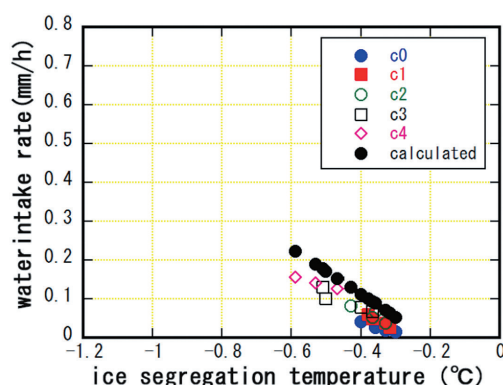


図33 Case Cの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値と計算結果

Figure 33 Comparison between the calculated results by equation (17) and the measured water intake rate of Case C

6. 考察

6.1 フローズンフリッジ中の間隙水の存在

フローズンフリッジ中の間隙水が存在に関しては, Watanabeら (2000) は, ガラスビーズ試料を用いた凍上実験を行い, ラマン分光装置を用いてアイスレンズ近傍の状況を調べた結果, フローズンフリッジと呼ばれる領域に間隙水は存在していないとした. 一方, Andersonら (2012) は, 酸化アルミナの粉末試料を用いた凍上実験を行い, フローズンフリッジ中の状態変化から, この領域に間隙水は存在していると結論づけている. Peppinら (2013) は, これまでの実験結果からは, フローズンフリッジ中の間隙水の存在の有無は結論付けることができず, 試料の種類, 凍結速度などの条件により, フローズンフリッジ中の状況が変わる

のではないかとしている。

本実験では、サーマルショックにより、下面の温度を下げ、凍結潜熱を確認した後実験を開始している。図14の実験初期の凍上量、吸水による凍上量を見ると、実験開始後2時間が経過するまで、試料からの排水が確認されている。他の実験でも同様な排水が確認されることから、本実験では、フローゼンフリンジ中に間隙水が存在すると考えられる。また、図9から、凍上量から計算した、アイスレンズへ流れる水分量 (W_1)、試料へ吸水される水分量 (W_2) を計算することができる。ここで、凍上が、アイスレンズの成長によるものであり、フローゼンフリンジ中の間隙水の凍結が凍上に寄与していないと仮定すると、 W_1 と W_2 の差が、試料全体が凍結する際のフローゼンフリンジ中の間隙水の生成による体積膨張のための排水量と考えることができる。そこで、単位長さ凍結面が進行した時のフローゼンフリンジからの排水量の平均値 (W_{out}) を、図9の、凍結面が試料上面に到達した時の W_1 、 W_2 (それぞれの単位はmm) を、試料長 (L , mm) で割ることにより式(32)で求めた。

$$W_{out} = (W_1 - W_2) / L \quad (32)$$

また単位体積の水が凍結した際の、体積膨張により元の体積より増加する体積割合を考慮し、フローゼンフリンジの平均の含水率 (ϕ_{ice}) は、水の密度を ρ_w 、氷の密度を ρ_i とすると、式(33)で求めることができる。

$$\phi_{ice} = W_{out} \times \rho_w / (\rho_w - \rho_i) \times 100 \quad (33)$$

以上の方法で、Case A, B, Cの実験結果をもとに求めたフローゼンフリンジ中の平均の体積含水率とフローゼンフリンジの平均温度との関係を図34に示す。

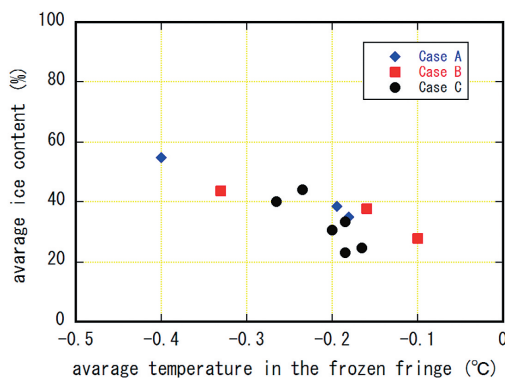


図34 フローゼンフリンジ中の平均含水率とフローゼンフリンジの平均温度の関係
Figure 34 Relationship between average ice content and average temperature in the frozen fringe zone

図から、フローゼンフリンジ中の平均の体積含水率は、温度の低下と共に、徐々に増加しているのが分かる。ここで、Case Aは、粘土試料、Case B, Case Cは、シルトローム

試料であり、土質が異なっているが、含水率に大きな違いは見られなかった。

また、Case A試料の、飽和体積含水率は、70.7%であり、Case B, Case Cの飽和体積含水率は、55.0%であるので、フローゼンフリンジ中の平均の不凍水量を、飽和体積含水率からフローゼンフリンジ中の平均含水率を差し引き求めたものを図35に示す。不凍水量は、フローゼンフリンジ平均温度の低下と共に、徐々に低下していくが、温度の低下と共に、急激に低下する形にはなっていないことが分かる。

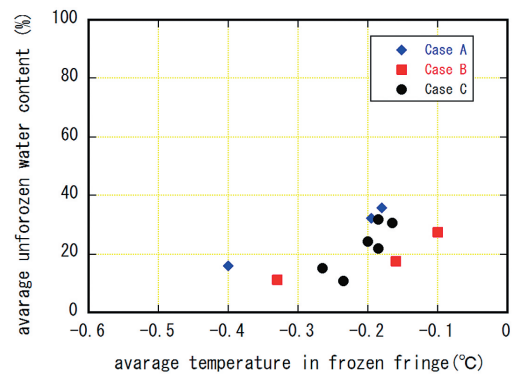


図35 フローゼンフリンジ中の平均不凍水含水率とフローゼンフリンジの平均温度の関係

Figure 35 Relationship between average unfrozen water content and average temperature in the frozen fringe zone

Watanabeらの実験では、フローゼンフリンジ中に間隙水がないことを確認しているが、アイスレンズ成長面への吸水速度と氷晶析出面温度との間には、本論文の実験結果と同様に、線形な関係が得られている。

以上の結果をもとに、フローゼンフリンジ中に間隙水がある場合でも、無い場合でも、アイスレンズの成長速度は、アイスレンズと土粒子間の氷膜近傍でのカイナティック過程、すなわち氷膜による間隙水の吸引と氷膜の凍結過程により律速されていると考えるのが妥当であると結論付けることができる。本実験では、フローゼンフリンジ中の間隙水の存在のための透水係数の低下による動水抵抗の影響が小さく、アイスレンズ成長速度の律速過程とはなっていないと考えられる。

表1に示したようにCase Aの試料1は、細粒度で粘土成分が多く、比表面積も $136.2\text{m}^2/\text{g}$ と大きく、一方Case B, Case Cの試料2は、砂質土でシルト分が多く、比表面積も $15.6\text{m}^2/\text{g}$ と、試料1ほど大きくはない。しかし、図18、図23、図26に見られるように、アイスレンズの成長面での氷晶析出面温度と吸水速度の関係は、大きくは異なっていない。この結果も、複雑な土の物性値が入らない、式(17)により、アイスレンズ成長面での吸水速度が求まるとい

うシンプルな凍上モデルの妥当性を示唆するものと考えられる。

6.2 吸水速度の荷重による影響

Ishizakiら(1985)は、X線を用いた凍上実験を行い、試料のX線写真から、土の凍結中に発生するアイスレンズ成長面の位置を求め、氷晶析出面温度と吸水速度の関係を求めた。

実験試料は、試料2を攪乱状態で準備し、先行圧密荷重3MPaで圧密し、実験荷重は0.5MPaとした。試料直径は120mm、高さは97mmの円柱試料である。実験Case D (d1)は、まず、試料上面温度を4℃、試料下面温度を-5℃に設定し、試料中央部にアイスレンズを成長させ、その後、試料上面温度を、2℃～7℃の範囲で変化させ、氷晶析出面温度を変化させ氷晶析出面温度とアイスレンズ成長面への吸水速度との関係をもとめた。

実験Case E (e1)は、試料上面温度を10℃、試料下面温度を-10℃に設定し、試料中央部にアイスレンズを成長させ、アイスレンズ成長面の温度と吸水速度の関係を求めた。実験結果を図36に示す。

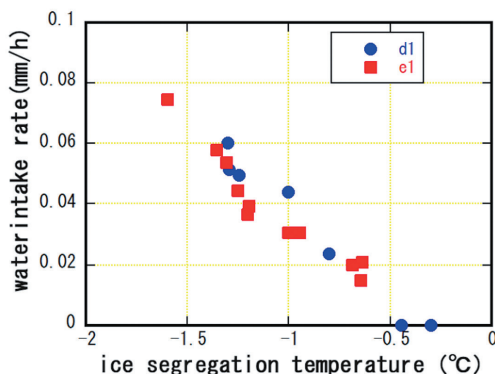


図36 実験Case D、実験Case Eの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値

Figure 36 Relationship between water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case D, E

図から土試料の凍結に関する温度環境の変化は実験Case Dと実験Case Eでは異なるが、実験結果が良く対応しているのが分かる。

また、5.4で使用した物性値を用い、式(17)により求めた吸水速度と氷晶析出面温度の計算値と比較したものを、図37に示す。

図から、式(17)により計算した吸水速度がゼロになる氷晶析出面温度は、-0.44℃になるが、これは実験結果に対応している。一方、式(17)により求めた吸水速度の計算結果は測定値の8倍程度になっているのが分かる。

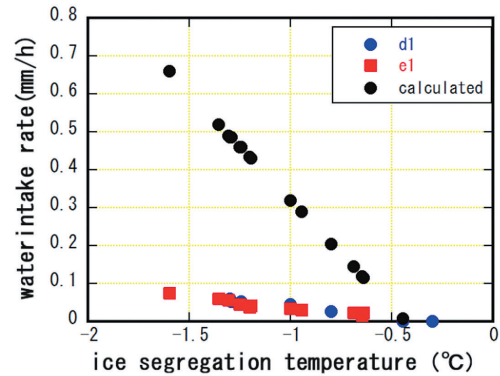


図37 実験Case D、実験Case Eの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値

Figure 37 Measured and calculated water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case D, E

Takashiら(1974)は、凍上速度が荷重の値に反比例して小さくなる経験式を示している。また、Konradら(1989)は荷重の指数関数として減少する経験式を示している。式(17)は、この荷重増加による吸水速度の減少の効果を取り込んでいないと考えられる。ここでは、高志らの経験式に基づきCase Aとの荷重の比(0.5MPa/0.12MPa)の逆数を計算結果にかけたものを計算結果補正1とし、荷重の比の2倍の値の逆数を計算結果にかけたものを計算結果補正2として計算した結果を図38に示す。

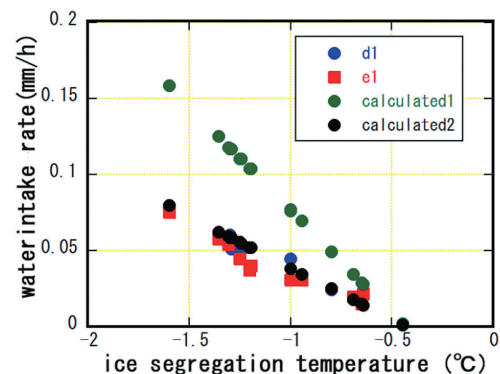


図38 実験Case D、実験Case Eの氷晶析出面温度と吸水速度の関係の測定値

Figure 38 Measured and modified calculated water intake rate to the ice lens and ice segregation temperature in Case D, E

図から、荷重 P_0 の2倍の値の逆数を計算結果にかけた計算結果補正2と実験結果が対応することが分かった。

Case B、Case Cの土試料と、Case D、Case Eの土試料は同じ種類のものであるが、前者が不攪乱土、後者が攪乱土であり土の構造も違うので、吸水速度には、他の要素が影響している可能性がある。今後、同じ構造の土試料を用いて、吸水速度に対する荷重の影響は詳細に検討する必要がある。

あると考えられる。また、式 (17) によるKuroda (1985) の凍上モデルでは、荷重の影響に関するメカニズムの取り込みが不十分であると考えられる。

7. まとめ

現在までに凍上現象を説明する凍上理論、凍上モデルは多くの研究者により提案されている。しかし、これらの凍上理論、凍上モデルの妥当性を評価する実験データは少なく、どの凍上モデルが正しいのかまだ研究者の間で、統一的な理解はないのが現状である。ここでは、地盤工学で対象としている地盤凍結工法の現場と液化天然ガス貯蔵タンク建設現場の不攪乱の土試料を用いた凍上実験結果と凍上モデルの比較を行い、この様な対象の地盤凍結で、どの凍上モデルが妥当であるか検討を行った。

凍結速度、凍土中の温度勾配を独立に設定できる凍上実験のデータを、さらに詳細に検討し、提案されている凍上モデルの予測結果と比較することにより凍上モデルの妥当性を評価した。検討結果から、アイスレンズの成長速度の律速が、フローズンフリッジ中や、アイスレンズ近傍の水膜の動水抵抗によるとするモデルでは、実験結果をうまく説明できず、アイスレンズと近傍の水の化学ポテンシャル差により律速されているという凍上モデルでは、計算結果と実測結果が良く対応することが分かった。ただ、この凍上モデルは、吸水速度に対する上載荷重の影響を十分に説明できてはいない。また、氷晶析出面温度と凍結速度、温度勾配の関係に関しても十分な理論付けができていない状況である。凍上現象のメカニズムを明らかにするには、これらの点の研究が必要と考える。今後の結晶成長に関する新たな実験、理論に関する研究の進展を期待したい。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費 (22H00742) により支弁された。ここに感謝の意を表します。

参考文献

Anderson, A. M., Worster, M. G.: Periodic ice banding in freezing colloidal dispersions. *Langmuir* 28 (48), pp. 16512–16523. 2012.

Burt, T.P., Williams, P. J. 1974. Measurement of hydraulic conductivity of frozen soils, *Can. Geotech. Journal*, vol. 11, pp. 647-650.

Gillen, K. T., 1972. *J. Chem. Phys.* Vol. 57, 5117p.

Hillel D., 1980. *Applications of Soil Physics*, Academic Press, 270p.

Hardy S. C., 1977, A grain boundary groove measurement of the surface tension between ice and water, *Philosophical Magazine* 35(2), pp. 471-484.

Hiroi, M., T. Mizusaki, T. Tsuneto, A. Hirai, K. Eguchi, 1989. Frost heave phenomena of 4He on porous glasses, *Phys. Rev. B* 40, 6581.

Horiguchi, K., Miller, R. D., 1980. Hydraulic conductivity function of frozen materials, *Proc. 4th Int. Conf. on Permafrost, Alaska*, pp. 504-508.

Ishizaki, T., Yoneyama, K., Nishio, N 1985. X-ray technique for observation of ice lens growth in partially frozen saturated soil, *Cold Regions Science and Technology*, 11, pp. 213-222.

Ishizaki, T. and Nishio, N., 1985. Experimental Study of final ice lens growth in partially frozen saturated soil, *Proc. of Fourth International Symposium on Ground Freezing, Sapporo*, pp. 71-78.

Ishizaki, T., 1994. Temperature dependence of unfrozen water film thickness in frozen soils, *Seppyo*, vol.56-1, pp. 3-9.

Ishizaki, T., 2023. Proposal of frost heave rate prediction formula using freezing rate and temperature gradient in ground freezing, *Japanese Geotechnical Journal*, vol.18, No.2 pp.139-150.

Ishizaki, T and Nishimura, S., 2025. Evaluation of frost heave model using measured values of temperature and water intake rate near the freezing front, *Soils and Foundations* 65, 101570.

Japanese Geotechnical Society, 2020. Frost heave test method of soil for prediction of frost heave, JGS0171-2020.

Konrad, J. M., 1989. Influence of overconsolidation on the freezing characteristics of a clayey silt, Vol. 26, pp. 9-21.

Kuroda, T., 1985. Theoretical study of frost heave – Kinetic process at a water layer between ice lens and soil particles-, *Low Temperature Science, Ser. A*, 44, pp. 183-189.

Mizuno, Y., Hanafusa, N., 1986. Dynamical properties of ice surfaces studied by Nuclear Magnetic Resonance, *Low Temperature Science, Ser. A*, vol. 45, pp. 1-10.

O'Neill, K., Miller, R. D., 1985. Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resour. Res.* 21 (3), pp. 281–296.

Ozawa, H., Kinoshita, S., 1989. Segregated ice growth on a microporous filter, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 132, no. 1, pp. 113-124.

Peppin, S. L., Style, W. R., 2013. The physics of frost heave and

- ice-lens growth, Vadose Zone Journal, pp.1-12.
- Style W. R., Peppin S. L. Stephen; The kinetics of ice-lens growth in porous media, J. Fluid Mech. Vol. 692, pp. 482-498, 2012.
- Taber S., 1930. The mechanics of frost heaving, Journal of Geology, Vol. 38, No. 4, pp. 303-317.
- Takashi, T., Masuda, M. and Yamamoto, H., 1974. Experimental study on the influence of freezing rate upon frost heave ratio of soil under constant effective stress. Seppyo, vol. 36-2, pp. 49-68.
- Takashi, T., Ohrai, T., Yamamoto, H., Okamoto, J., 1979. Upper limit of heaving pressure obtained by observing pore water pressure under partially freezing, vol. 41-4, pp. 228-238.
- Takashi, T., Ohrai, T., Yamamoto, H. and Okamoto, J., 1983. An experiment on growth-fusion and migration of ice lenses in partially frozen soil, Seppyo, vol. 45-4, pp. 189-196.
- Watanabe, K., Mizoguchi, M.: Ice configuration near a growing ice lens in a freezing porous medium consisting of micro glass particles, Journal of Crystal Growth, vo. 213, pp. 135-140, 2000.