文 論

ガラス多孔質体中のアイスレンズの観察

――アイスレンズの成長と含水比について――

武藤由子¹⁾,渡辺晋生²⁾,石崎武志³⁾,溝口 勝⁴⁾

要 旨

アイスレンズの成長面付近の水分状態とアイスレンズの厚みの関係を調べるために,水で飽和した ガラス多孔質体中に析出するアイスレンズを観察する実験を行った.ガラス多孔質体の凍結速度と温 度勾配は,一方向凍結装置を用いて一定に制御した.まず,初期含水比が異なるガラス多孔質体中に 析出したアイスレンズの厚みを比較した.その結果,初期含水比が高いほどアイスレンズが厚く成長 することがわかった.次に,凍結過程のガラス多孔質体の未凍結領域において,含水比分布を数 mm 間隔で測定した.その結果,アイスレンズの成長面から高温側には,異なる2種の含水比領域が生じ ることがわかった.アイスレンズの成長によらず,成長面より約20 mm 以遠の含水比は初期含水比 を維持した.成長面近傍から約20 mm の領域の含水比は初期含水比より低く,またアイスレンズが 厚く成長した場合ほど低かった.この結果は,アイスレンズが発生してから成長を終えるまでの,成 長面付近の含水比の変化を示していると考えられる.

キーワード:凍上, アイスレンズ, ガラス粉粒体, 多孔質体, 含水比 Key words: frost heave, ice lens, glass powder, porous medium, water content

1. はじめに

土が凍上すると、一般に凍土中にアイスレンズ が見られる.アイスレンズの析出は、土中水が 0°C以下に冷やされた結果生じる、熱と水の移動 現象によるものと考えられるが、土粒子の形状や 電荷、土壌水に含まれる溶質にも影響される複雑 な現象である.そのため、凍上に関する多くのモ デルや理論が提唱されているものの(Miller, 1978; Gillpin, 1980; Konrad and Duquennoi, 1993)、アイスレンズの析出のメカニズムの全て は明らかとなっていない.

一方, アイスレンズの析出は, 土以外でも多孔

		•• ••
1)	三重大学大学院生物資源学研究科	
	〒514-8507 三重県津市上浜町1515	
2)	三重大学生物資源学部	
	〒514-8507 三重県津市上浜町1515	
3)	東京国立文化財研究所	
	〒110-8713 東京都台東区上野公園 13-	43
4)	東京大学大学院農学生命科学研究科	

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

質膜上(Ozawa and Kinosita, 1989)やガラスビ ーズとヘリウムからなる系(広井・水崎, 1991) で生じることが知られている。粒子や間隙の形状 の不均一性や,溶質の影響を受けない試料は,ア イスレンズの形成機構における熱と水の効果を詳 細に調べるのに適している。武藤ら(1998)は, 脱気した蒸留水とガラス粉粒体を混合し,一方向 凍結装置で凍らせてアイスレンズを析出させた. 観察されたアイスレンズは成長面が滑らかで,そ の位置を明確に特定することができた.このガラ ス多孔質体を用いることで,アイスレンズの成長 量を微細に測定することが可能であった.実験の 結果,凍結速度や温度勾配とアイスレンズの厚み の関係が明らかになった.

そこで今回は、ガラス多孔質体の水分状態とア イスレンズの厚みの関係を調べることを目的とし た.本研究では、武藤ら(1998)と同様の試料と 装置を用いて、次の2つの実験を行った.まず、 初期含水比の異なるガラス多孔質体中に、凍結速

度と温度勾配が等しい条件で析出したアイスレン ズの厚みを測定して比較した、次に、成長量の異 なる3つのアイスレンズについて、成長面から高 温側へ向けての含水比分布を測定した. 試料に土 を用いて凍結面付近の含水比分布を測定した研究 は、これまでにも報告されている。例えば Fukuda et al. (1980) は, 2線源ガンマー線水分 計を用いた実験で、不飽和状態の苫小牧シルトの 凍結過程において凍結面付近の含水比分布の変化 を測定した、その結果、未凍結部分の含水比は凍 結面付近で低下していた. また Konrad et al. (1990) は、Devon シルトを凍結させ、アイスレ ンズの位置と凍結面付近の含水比分布を測定し た. 高志ら(1977)も、飽和シルト質粘土がアイ スレンズの析出を伴って凍結するとき. 凍結面か ら 200 cm の未凍結領域では脱水圧密が生じて含 水比が低下していることを確認した、本研究では、 ガラス多孔質体中に析出させたアイスレンズの成 長面の位置を顕微鏡を用いて正確に特定し、その 成長面から40mm前方までの含水比分布を数 mm間隔で測定する実験を行った。また、この含

水比分布がアイスレンズの成長量が異なることで どのように変化するのかを調べた.

2. 実験装置と方法

2.1 試料

本研究では, 粒径が2.2 µm, 比表面積が 128.6 m²/g, 密度が2.12×10⁶g/m³のシリカを主 成分とする単分散性のガラス粉粒体を用いた.こ れに脱気した蒸留水を加えて飽和試料とした.こ のガラス多孔質体は, 微粒子と水のみからなる骨 格構造を持たない単純な多孔質体である. 複雑な 形状をした土を用いるよりも,初期含水比の違い がアイスレンズの厚みに対して純粋に反映される と考えられる.

2.2 装置

一方向凍結装置を使って試料を凍結させた(図 1).この装置を用いることで,試料に任意の温度 勾配を与えることと,試料内の等温線を一方向へ 一定速度で移動させることができる(Nagashima and Furukawa, 1997).

本実験で用いた試料セルは二枚の光学ガラス



図1 ---方向凍結装置と試料セル. T_H(°C):高温側恒温ブロックの温度,T_L(°C):低温側恒温ブロックの温度,G(°C/mm):温度勾配(G = (T_H − T_L)/L₀),L₀(mm):温度勾配Gが有効な範囲,v₁(µm/s):試料セルの移動速度.

 $(26 \times 1 \times 76 \text{ mm}^3)$ と 3 mm 厚のアクリルスペー サーからなる (容積: 20×3×70 mm³). 試料 セルの高温側には $2 \times 3 \text{ mm}^2$ の隙間を設け開放 系とした. 試料の融点 T_Mより高温と低温の二つ の恒温ブロックで、試料を詰めたセルの両端の温 度をT_HとT_Iに制御すると、二つの恒温ブロック の間の試料には一定の温度勾配が与えられる.こ の温度勾配をG(°C/mm) = $(T_H - T_I)/L_L$ と する.本実験では、Gが有効な領域はL,= 36 mmである. 試料セル中に生じる温度分布が 一定に保たれた後, 試料セルを一定速度v.(試料 セルの移動速度) で低温側へ移動させると, 試料 内の等温線はvと等しい速度で逆方向へ移動す る.この等温線の移動速度をv(v = -v)とす る.このとき、仮に試料が一定の温度 T_uで凍結 を続けると、凍結面の見かけの位置は移動しない. よって、図1のように一方向凍結装置と顕微鏡を 組み合わせることで,凍結面近傍を連続的に観察 することが可能である. 顕微鏡画像を CCD カメ ラとビデオレコーダーで録画し、コンピュータに 取り込んで解析した(武藤ら, 1998).

2.3 温度分布

試料セルが移動している間の試料内の温度分布 を,熱電対の入ったキャリブレーションセルを用 いて測定した.キャリブレーションセルは、二枚 の光学ガラス(26×1×76mm³)と銅板からな る $(26 \times 3 \times 76 \text{ mm}^3)$ (図 1). まず, キャリブ レーションセルを装置にセットし、セルの両端の 温度を $T_{\mu} = 6^{\circ}C, T_{\mu} = -3^{\circ}C$ に制御した(G= 0.25°C/mm). このまま 30 分間放置して温度場を 定常状態にした後、セルを v_e = 1.0 µm/s で低温 側へ移動させ、温度を1分間隔で記録した.この 測定した温度を用いて, キャリブレーションセル が移動している間の、銅板の温度分布を求めた (図2). 図2のz'(mm)は0°Cの位置からの距 離を示す.その結果、試料セル内の温度分布は線 形で、セルを移動している間にも一定に保たれて いた. 温度勾配は G_{ex} = 0.19°C/mm で, 設定温 度 T_H, T₁ から求めた G = 0.25°C/mm よりも小 さい値を示した.このことから、試料セル中の実 際の温度勾配は、各実験で設定したGよりも小 さいと考えられる.また、図1のz軸に対して直 行方向の試料セル中の温度は、これまでの実験で



図2 キャリブレーションセル内の温度分布. $z'(mm):0^{\circ}Cの位置からの距離, T_{H}(^{\circ}C):高$ $温側恒温ブロックの温度, T_{L}(^{\circ}C):低温側恒温$ $ブロックの温度, G(^{\circ}C/mm):温度勾配(G = (T_{H}-T_{L})/L_{,}), v_{,}(\mu m/s):試料セルの移動速度, G_{cx}(^{\circ}C/mm):測定した温度分布から求めたキ$ ャリブレーションセル内の温度勾配.

表1 実験条件1.

G (°C/mm):温度勾配 (G = $(T_{II}-T_{I})/L_{i}$), v (μ m/s):等温線が試料セル内を移動する速度 (v = $-v_{i}$), t (min.):試料にvを与えた時間, w_i (%):初期含水比.

G (°C/mm)	v (µm/s)	t (min)	w _i (%)		
	0.2	500	80 109 150		
0.27	0.4	250	78 110 130 160 210		
	0.8	125	78 100 139 153 206 228		

観察された試料の凍結面の形状から一定であると 考えられる(武藤ら, 1998).

2.4 方法

2.4.1 初期含水比が異なる試料中に析出したアイ スレンズの観察

初期含水比が w_i のガラス多孔質体を満たした 試料セルの両端の温度を $T_H = 2^{\circ}C$, $T_L = -8^{\circ}C$ に制御し,1時間放置した($G = 0.27^{\circ}C/mm$). その後,試料セルを低温側 $\sim v_s \mu m/s$ でt分間移 動させた.試料セルの移動距離は各試料とも 6 mmである.こうすることで,試料セル内の等 温線は,試料セルの移動方向とは逆方向に $v \mu m/s$ でt分間移動する.ガラス多孔質体の初期 含水比 w_i ,等温線の移動速度v, vを与えた時間 t を表1に示す.vを与えた間,ガラス多孔質体の 凍結面付近を観察し録画した. 2.4.2 アイスレンズ成長面付近の含水比分布の測定 初期含水比 w_i のガラス多孔質体を満たした試 料セルの両端の温度を $T_H = 2^{\circ}$ C, $T_L = -8^{\circ}$ Cに 制御し,1時間放置した(G = 0.27^{\circ}C/mm). そ の後,試料セルを $v_s = 0.4 \mu$ m/sでt分間移動させ た.ガラス多孔質体の初期含水比 w_i と等温線の 移動速度v,vを与えた時間tを表2に示す.t分 後,ガラス多孔質体を装置から取り出し,凍結面 から高温側へ向かって2~5 mm間隔で切り出し て含水比を測定した.この測定は,凍結面から高 温側へ40 mmの範囲について行った.

3. 結果と考察

初期含水比が異なる試料中に析出したアイ スレンズの観察

図3に、初期含水比w_iが78,110,160%,等 温線の移動速度vが0.4 μ m/sの場合の実験終了 時(t = 250)のガラス多孔質体の様子を示す. 図の左が低温側、右が高温側である.試料セルの 両端にT_H = 2°C,T_L = -8°Cを与えると、試料 は低温側から高温側へ向かって凍結した.1時間 後の凍結面の位置は、図中の破線の位置であった. この後、温度勾配G = 0.27°C/mmを一定に保ち つつ、試料セルをv_s = 0.4 μ m/sで低温側にt = 250分間移動させた.この時、試料内の等温線は v = 0.4 μ m/sでv_sと逆方向に移動している.250 分の間に凍結した部分は、図の破線と点線の間で ある.

実験中,観察領域に気泡および気泡の発生は確認されなかった.空気を含んだ水が本実験で設定した等温線の移動速度 $v = 0.2 \sim 0.8 \, \mu m/s$ で凍結すると,氷の成長面に気泡が発生する(前野,

表2 実験条件2.

G (°C/mm):温度勾配 (G = (T_{it} - T_{i}) /L_i), v (μ m/s):等温線が試料セル内を移動する速度 ($v = -v_s$), t (min.): v を与えた時間, w_i (%):初期含水比.

G (℃/mm)	v (µm/s)	t (min)	w _i (%)
	0.4	45	110
0.27		90	104
		180	105

1966). このことから,ガラス多孔質体は実験中 も飽和状態を保っていたと考えられる.

初期含水比 $w_i = 78\%$ のガラス多孔質体が破線 から点線まで凍結する間,凍結領域には5つのア イスレンズ ($IL_1 ~ II_5$)が発生した(図3の(a)). これらは, $IL_1 ~ IL_5$ の順に発生し,図3の時点 (t = 250)で $IL_1 ~ IL_4$ はすでに成長が停止してい た.最後に発生した IL_5 は成長の途中であった. また,初期含水比 $w_i = 110\%$ のガラス多孔質体 には,2つのアイスレンズ(IL_6 , IL_7)が発生し た(図3の(b)).一方,初期含水比 $w_i = 160\%$ のガラス多孔質体が破線から点線まで凍結する間 に観察されたアイスレンズは1つだけで(IL_8), 図3の時点でも成長を続けていた(図3の(c)).

これらのアイスレンズのうち, $IL_1 ~ IL_4$ の厚 みの平均値, IL_6 , IL_8 の厚み T_a を測定して初期 含水比 w_i との関係を調べた(図4). アイスレン ズの厚み T_a は初期含水比 w_i が大きい場合ほど厚 かった. このことから, ガラス多孔質体の初期含 水比がアイスレンズの厚みを決める要因となると 考えられる. ただし, $v = 0.2 \mu m/s$ では $w_i =$ 109%, $v = 0.4 \mu m/s$ では $w_i = 160$ %, v =0.8 $\mu m/s$ では $w_i = 206$ %以上のとき, 図3の(c) と同様に1つのアイスレンズが成長する様子が観



図3 初期含水比の異なる試料中に析出したアイスレ ンズ. (a) w_i = 78%, (b) w_i = 110%, (c) w_i = 160%.

 $v = 0.4 \ \mu m/s$, $T_{\rm H} = 2^{\circ}C$, $T_{\rm L} = -8^{\circ}C$, $G = 0.27^{\circ}C/mm$, $\phi = 2.2 \ \mu m$.

v (μ m/s):等温線の移動速度, G (°C/mm):温 度勾配 (G=(T_{II}-T_L) /L₂), $\phi(\mu$ m):ガラス粉 粒体の径.

試料は, 試料セルを移動させた間に破線から点 線まで凍結した.



図4 初期含水比とアイスレンズの厚さの関係.
w_i(%):初期含水比, T_a(mm):アイスレンズの厚み, v(μm/s):等温線の移動速度.

察された.これは、アイスレンズの成長が可能で ある厚みが、試料セルを移動させた距離(6 mm) よりも大きいことを示している.各等温線の移動 速度vに対して初期含水比w_iが上記の条件よりも 大きい場合には、試料セルを6 mm以上移動させ れば、6 mmよりも厚いアイスレンズが成長する と考えられる.また、初期含水比w_iが等しい場 合、アイスレンズの厚さT_{ii}は等温線の移動速度v が遅いほど大きくなった.この傾向は、武藤ら (1998)の報告と一致する.以上の実験の結果、 析出したアイスレンズの厚さは、試料の等温線の 移動速度と初期含水比に依存した.よって、アイ スレンズの厚みは、等温線の移動速度と水分条件 の相互の効果に影響されるものと思われる.

3.2 アイスレンズ成長面付近の含水比分布の測定

図5は試料セルを移動させてからt = 45,90, 180分後の試料の様子であり,含水比の測定を行 う直前である.各ガラス多孔質体の初期含水比w_i はほぼ等しい.図の左が低温側,右が高温側であ る.各試料セルの両端にT_H = 2°C,T_L = -8°C を与えると,ガラス多孔質体は低温側から高温側 へ向かって凍結した.1時間後の凍結面の位置は, 図中の破線の位置であった.その後,試料(d) については45分間,試料(e)については90分 間,試料(f)については180分間,試料セルを $v_s = 0.4 \,\mu m/s$ で低温側に移動させた.この間,試 料(d)には IL₉が,試料(e)には IL₁₀が発生し た.試料(f)には IL₁₁が発生して成長が停止し た後,IL₁₂が発生した.IL₉,IL₁₀,IL₁₁の厚さは, 1.1,2.2,2.9 mm だった.IL₁₁と IL₁₂の間隔は



5 含水比の測定に用いた凍結試料. (d) t = 45 min. ($w_i = 110 \%$), (e) t = 90 min. ($w_i = 104 \%$), (f) t = 180 min. ($w_i = 105 \%$). v = 0.4 μ m/s, T_{II} = 2°C, T_L = -8°C, G = 0.27°C/mm. t (min.) : vを与えた時間, v (μ m/s) :等温線の 移動速度, G (°C/mm) : 温度勾配 (G = (T_H-T_L) /L_i), ϕ (μ m) : ガラス粉粒体の径. 試料は, 試料セルを移動させた間に破線から IL₉, IL₁₀, IL₁₂の成長面まで凍結した. 点線より高温 側について含水比を測定した.



 図6 含水比分布.
D_i (mm):図5の点線から高温側方向への距離, w(%):含水比,t (min.):vを与えた時間.

0.9 mm であった.

図6は図5のIL₉, IL₁₀, IL₁₁の成長面から高温 側へ40mmまでの含水比分布である.IL₁₂は含 水比を測定する際に取り除いた.図6の横軸 $D_z = 0$ は図5の点線で示したIL₉, IL₁₀, IL₁₁の成 長面の位置と対応している.

図6中の実線(d)は、 $D_z = 0 \sim 19 \text{ mm}$ の含水 比は初期含水比 $w_i = 110\%$ よりも低下している こと、それよりも高温部分の $D_z = 19 \sim 40 \text{ mm}$ の含水比は初期含水比 $w_i = 110\%$ をおよそ保っ ていることを示している.また、図6中の点線 (e) と破線(f) についても、アイスレンズの成 長面から高温側へおよそ20mmまでの部分と、 さらに高温側の部分で点線(d)と同様の傾向が 見られた.このことから、今回与えた凍結条件下 の試料では、アイスレンズの成長面から高温側へ およそ20mmまでの部分の含水比は、初期含水 比w_iよりも低下していることがわかった.

水とガラス粉粒体からなる骨格構造を持たない ガラス多孔質体においては、含水比の低下は、単 位体積あたりの水分量が減少することとガラス粉 粒体の量が増加することによって起こる. アイス レンズの成長面近傍では、アイスレンズが成長す る際にガラス粉粒体が未凍結部分に残されるた め、単位体積あたりの水分量の減少とガラス粉粒 体の量の増加が同時に生じていると考えられる. また、含水比の低い領域は図6中の(d)では $D_z = 0 \sim 19 \text{ mm}$, (e) $\text{C} \text{it } D_z = 3 \sim 22 \text{ mm}$, (f) では D₂ = 1 ~ 25 mm で,アイスレンズが厚く成 長している場合ほど広かった. さらに、この領域 の含水比は (d), (e), (f) の順で低下した. こ のことは、(d)、(e)、(f)の異なるガラス多孔質 体を用いた実験の結果ではあるが、これらの初期 含水比wiがほぼ等しいので、以上の結果はアイ スレンズが発生してから成長を終えるまでの、成 長面付近の含水比の変化を示していると考えられ る. ここで用いたガラス多孔質体については、ア イスレンズの成長過程において、その成長面から 高温側へおよそ20mmまでの領域の水が使われ たことがわかる.

図6の(e)の $D_z = 0 \sim 3 \text{ mm } k$ (f)の $D_z = 0$ ~1mmの含水比は、周囲の含水比よりも高い値 を示した.このアイスレンズの成長面と接した部 分は、アイスレンズの成長過程と深く関わる重要 な部分であると思われる.しかし、本実験の結果 は、測定の際にアイスレンズが融けたことによる 可能性が高い.今後、このアイスレンズの成長面 に接した部分の含水比を正確に測定することで、 アイスレンズの形成機構の解明に貢献できると思 われる.

4. おわりに

異なる含水比で飽和した骨格構造を持たないガ ラス多孔質体を凍結し,アイスレンズが成長する 様子を観察した. その結果, ガラス多孔質体の初 期含水比が高いほど,また等温線の移動速度が遅 いほど、アイスレンズは厚く成長した、次に、初 期含水比のほぼ等しい試料を用いて,成長面付近 の未凍結部分の含水比分布を、異なる実験時間に おいて調べた.その結果、アイスレンズの成長面 付近の未凍結領域には、含水比の異なる2つの領 域が現れた.今回の実験条件の範囲では、アイス レンズ成長面近くの約20mmの領域の含水比は 初期含水比よりも低く、アイスレンズが厚い場合 ほど低くなることがわかった. それよりも高温側 の領域では、初期含水比を維持していた、これら は異なるガラス多孔質体を用いた結果ではある が、各ガラス多孔質体の初期含水比がほぼ等しい ことから、この2つの領域の各含水比の変化と、 2つの領域が占める割合の変化は、アイスレンズ が成長することによって起こる成長面付近の含水 比の変化を示していると考えられる.

以上の結果から,ガラス多孔質体中にアイスレ ンズが析出する際にも,土中にアイスレンズが析 出するときと同様,等温線の移動速度と水分条件 が関係していることがわかった.今後も,ガラス 粉粒体を水で飽和した単純なガラス多孔質体を用 いて実験を行い,等温線の移動速度と水分条件の 相互の関わりがアイスレンズの形成の過程にどの ように影響するのかを調べることで,土中でのア イスレンズの形成機構を解明することに貢献でき ると思われる.

謝 辞

本研究を進めるにあたり,三重大学生物資源学 部の清澤秀樹助教授に貴重な御助言を頂きまし た.また,比表面積は東京ガスの宮田嘉明氏,見 波裕氏に測定して頂きました.ここに記して謝意 を表します.

文 献

- Fukuda, M., Orhun, A. and Luthin, J. N., 1980: Experimental studies of coupled Heat and moisture Transfer in soils during freezing. Cold Regions Science and Technology, 3, 223-232.
- Gillpin, R. R., 1980: Model for prediction of ice lensing and frost heave in soil. Water Resources Research, 16, 918-930.
- 広井政彦·水崎隆雄, 1991: He(4)の凍上現象. 結

晶成長学会誌, 18, 217-222.

- Konrad, J. -M. and McCammom, A. W., 1990: Solute partitioning in freezing soils. Canadian Geotechnical Journal, 67, 726-736.
- Konrad, J. M. and Duquennoi, C., 1993: A model for water Transport and ice Lensing in freezing soils. Water Resources Research, 29, 3109-3124.

前野紀一, 1966:氷の中の気泡.雪氷, 28, 8-12.

Miller, R. D., 1978: Frost Heaving in Non-colloidal soils. Proceedings 3rd International Conference on Permafrost, 707-713.

武藤由子・渡辺晋生・石崎武志・溝口 勝, 1998:ガ

ラスビーズ中におけるアイスレンズ形成過程の顕微 鏡観察.農業土木学会論文集,**66**, 293-299.

- Nagashima, K. and Furukawa, Y., 1997: Nonequilibrium effect of anisortropic interface kinetics on the directional growth of ice crystals. Journal of Crystal growth, 171, 577-585.
- Ozawa, H. and Kinosita, S., 1989: Segregated ice growth on a microporous filter. J. Colloid and Interface Science, **132**, 113-124.
- 高志 勤・生頼考博・山本英夫,1977:一次元定速凍 結における凍結面前方の間隙水圧と脱水圧密.雪氷, 39,53-64.

Observation of ice lensing in glass-powder medium — The relationship between ice lens Growth and water content —

Yoshiko MUTO¹⁾, Kunio WATANABE²⁾, Takeshi Ishizaki³⁾ and Masaru Mizoguchi⁴⁾

1) Department of Bioresources, Mie University, 1515 Kamihama Tsu Mie 514-8507

2) Faculty of Bioresources, Mie University, 1515 Kamihama Tsu Mie 514-8507

3) Tokyo National Research Institute of Cultural Properties, 13-43 Ueno Park Taito-ku Tokyo 110-8713

4) Department of Biological and Environmental Engineering, The University of Tokyo,

1-1-1 Yayoi Bunkyo-ku Tokyo 113-8657

Abstract: Unidirectional freezing experiments were carried out using a water-saturated porous medium made from micro-glass particles, in order to obtain the relationship between water content and formation of ice lenses. In the first experiment, we compared the thicknesses of ice lenses in the porous media with different initial water content and freezing rate. When the initial water content was high, thicker ice lenses formed. The thickness decreased with increasing freezing rate. In the second experiment, we measured the profile of water content in unfrozen areas. The unfrozen areas were divided into two regions, which have different type of water content. In the region apart from the growing ice lens farther than 20 mm, initial water content was maintained regardless of the ice lens growth. In the region extending from the vicinity of growing ice lens approximately 20 mm into the unfrozen areas, the water content became lower than initial water content. The water content decreased as the ice lens growth surface due to the growing affect the ice lensing mechanism itself.

(1999年12月29日受付, 2000年9月2日改稿受付, 2000年11月30日受理, 討論期限2001年7月15日)