HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	冷蔵庫の凍上害
Author(s)	木下, 誠一; 鈴木, 義男; 堀口, 薫 他
Citation	低温科學. 物理篇, 29, 257-266
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18189
Type	departmental bulletin paper
File Information	29_p257-266.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Seiiti KINOSITA, Yosio SUZUKI, Kaoru HORIGCHI and Kunio TANUMA 1971 Damages of a Cold Storage due to Frost Heaving. *Low Temperature Science Ser. A, 29.* (With English Summary p. 265)

冷　蔵　庫　の　凍　上　害*

木下誠一・鈴木義男
堀口　薫・田沼邦雄
(低温科学研究所)

(昭和46年8月受理)

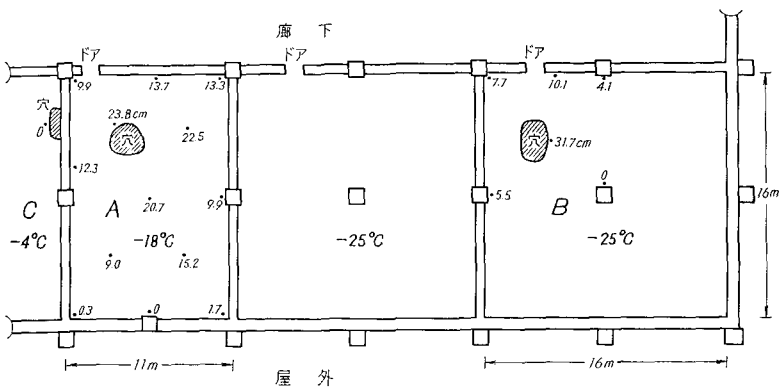
I. 緒　　言

近来，冷凍技術や食品冷蔵の進歩とともに，各地に冷蔵庫が建てられつつある。冷蔵室の四周は厚く断熱材で蔽われる。しかし，その厚さは，冷凍の熱効率という面からだけ定められているにすぎない。従って，断熱材下面に土があれば，その土が凍る機会も多い。当然凍上も考えられる。

筆者等は，たまたま，凍上のために非常に大きな被害をうけた冷蔵庫の凍土断面を調査する機会を得た。被害をうけた冷蔵室の凍上量は 24 cm, 32 cm という大きなもので，凍土の厚さはそれぞれ 141 cm と 135 cm であった。土層の一部に凍上性の強い土質があったことと，地下水位が高かったことが原因であることが解った。以下にその調査について報告する。

II. 調査した冷蔵室の構造

調査した冷蔵庫は数個の冷蔵室からなるが，そのうちの3室について凍土を掘削し断面を作って調査を行なった。それらをかりに A·B·C 室と名付けることにする。各室の位置関係は第1図の通りである。各室とも床面から下はコンクリート，炭化コルク，コンクリート，栗石，土の順になっている。各室の特徴を第1表に示す。



第1図　調査した A·B·C 室の配置と各室内の凍上量分布

* 北海道大学低温科学研究所業績　第1132号

栗石の下の土は，冷蔵庫建設前の在来の土で，土の上面はかっての地表である。最上層の5 cmほどには，草の根が入っている。又，比較対照の意味で屋外でも穴を掘って断面を調査した。

第 1 表

		A 室	B 室	C 室
常時使用温度 (℃)		−18	−25	−4
床面下の構造 (cm)	コンクリート	10	10	10
	炭化コルク	10	25	10
	コンクリート	15	15	15
	栗石	10	10	10
	以下土			
広さ (m)		11×16	16×16	11×16

III. 調査方法

A·B·C 3室で掘った穴の位置は，第1図の斜線を引いた場所である。A·B室では，最も凍上の大きい所である。凍結層より下30 cmほどまで掘って鉛直断面を作った。C室では，隣りのA室に接した壁ぎわに穴を掘った。調査した項目は，凍上量，層構造，密度，重量含水比，粒度分布，土粒の比重である。各項目について調査方法をのべる。

(1) **凍上量 h**　土の凍結が始まる以前の基準の床面が解らなかったので，各室にある柱に接した床面のうちで，一番低いものを基準とした。

(2) **層構造**　目視観察と写真によった。

(3) **密度 ρ**　断面のほぼ10 cmごとに，約100 gの塊を採取し，その重量 w_1 をまず測定する。つぎに，その塊をケロシン (密度 ρ') に浸して重量 w_2 を測定する。ケロシンからうける浮力だけ軽くなる。試料の密度 ρ は次の式で求められる。

$$\rho = \frac{w_1 \rho'}{w_1 - w_2} \tag{1}$$

(4) **重量含水比 W**　採取した塊を実験室に持ち帰り，110℃で炉乾燥した後の重量 w_3 を測定する。重量含水比 W は，乾燥重量を基準にした値で，$W = \frac{w_1 - w_3}{w_3}$ で与えられる。

(5) **粒度分布**　土質工学会規格にもとづいて測定を行なった。

(6) **土粒の比重 ρ_0**　同じく土質工学会規格にもとづいて測定を行なった。

(7) **体積含水比 β**　凍土内に含まれる土粒と水分の体積割合をそれぞれ α と β で表わすと，

$$\alpha = \frac{1}{1+W}\frac{\rho}{\rho_0} \tag{2}$$

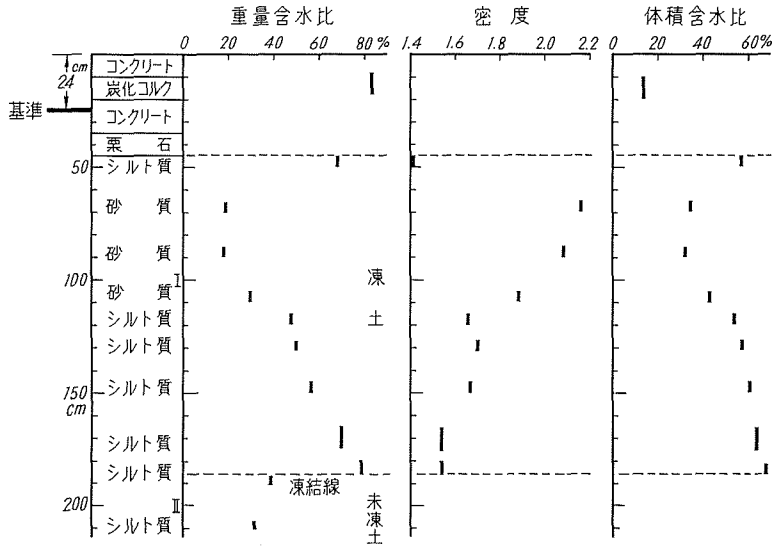
$$\beta = \frac{W}{1+W}\rho \tag{3}$$

で与えられる。凍った土のなかには，水分として氷の他に不凍水も考えられる。この不凍水の量は，凍上性の土では，0℃で20～30% (重量含水比)，−5℃で5% 前後，−10℃で2～3%である[1]。全部融解して水分量として求めたものが β の値である。β の値を体積含水比と呼ぶが，これは重量含水比と違って試料の全体積を基準にしたものである。

IV. 調査結果

1. A室

室内の凍上量分布を第1図に，断面観測の結果を第2図に，断面の写真を第3図と第4図

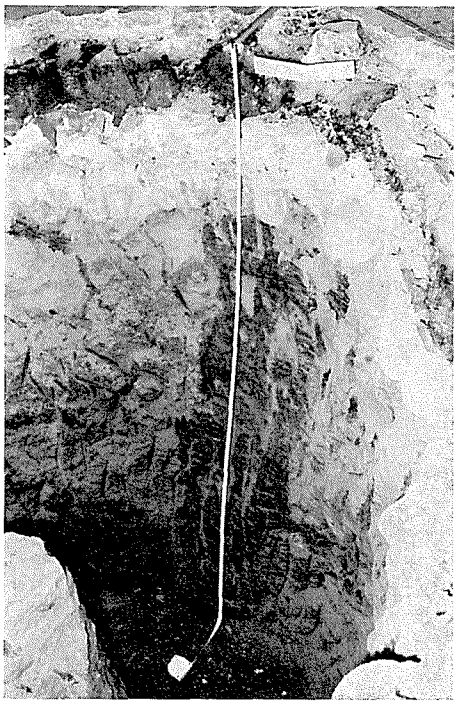


第2図　A室における断面観測結果

に示す。又，断面のうちI及びIIと印した層の土粒分布測定の結果を第2表のI及びIIの欄に示す。

(1) **凍上量**（第1図）　第1図のA室内の各所に点と数値で示したのが，測定点の位置と凍上量の値である。屋外側の柱の3本のうち中間の柱のそばの床面を基準にした値である。内側の壁ぎわでは，柱の所でも13 cm以上も隆起している。このため梁が上がり，天井に亀裂が入る結果になった。断面観測をした穴のところで23.8 cmの凍上である。

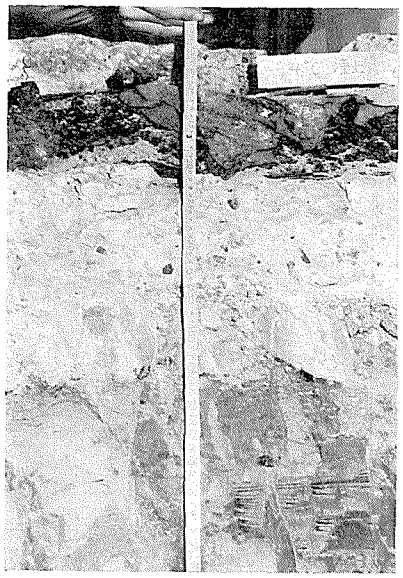
(2) **層構造**　第4図の写真にみられるように，床面から114～120 cmに顕著な氷層がある。第2図の左欄に目視観察による土質状況を示してあるが，上からシルト質の表土（第1層）5 cm，砂質土（第2層）60 cm，以下シルト質（第3層）というように，顕著な層構造がみられる。凍結深は床面から186 cm，そのうち凍土の厚さは141 cmである。氷層の多くは第3層のシルト質のなかにある。



第3図　A室の凍上断面

(3) **断面観測の結果**（第2図）　第2層の砂質土は含水が少ない。第1層と第3層のシルト質は含水が多く，凍上のひどさを思わせる。しかし，第1層は薄いので，これの受けもつ凍上は極めて僅かである。第2図右端に体積含水比の分布を示すが，第1層は，体積含水比57%

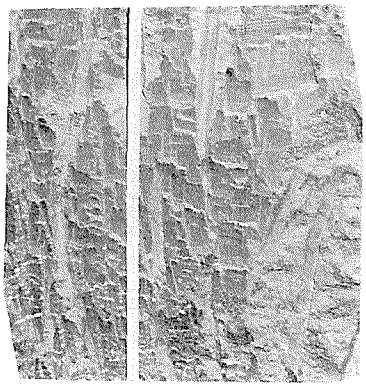
(a)



(b)

(c)

(d)



第4図 A室の凍土断面
(a) 床面から 66 cm まで
(b) 44 cm から 99 cm まで
(c) 90 cm から 137 cm まで
(d) 124 cm から 165 cm まで

で，土粒分の含有比は31% である。残りの空気分は7% である（含まれる水分の殆んどが氷と考えてよい）。第1層以外の凍結層は，殆んど空気分を含まない。未凍結層は，凍結層よりも含水が少ない。凍上が起こる場合には，未凍土から凍結線へ水が吸いよせられるので，凍結線近くの未凍土は含水が少ない状態になっている[2]。

(4) **粒度分布**（第2表）　床面から下100 cm 付近の砂質土（I の層）と，200 cm 付近のシルト質（II の層，未凍結層）について，粒度分布を第2表の I と II の欄に示す。土質工学会規格によると，I は砂質ローム，II は粘土に分類される。

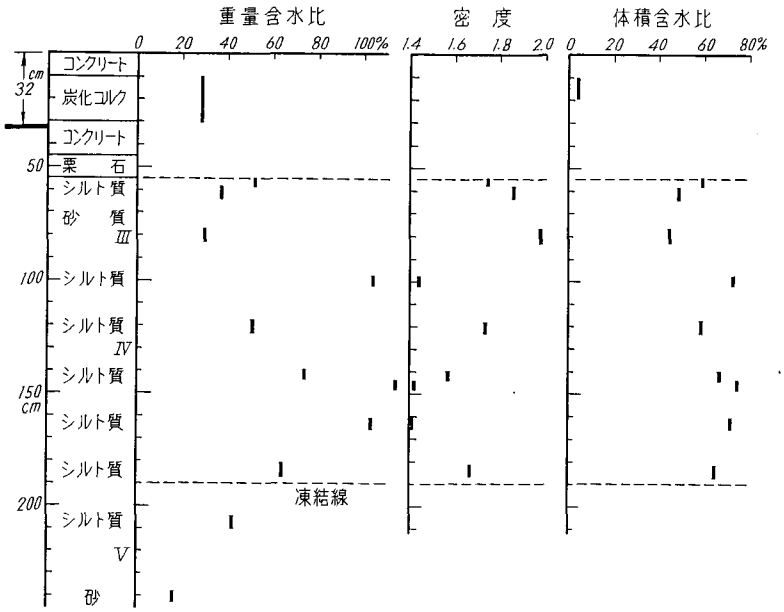
2. B 室

室内の凍上量分布を第1図に，断面観測の結果を第5図に，断面の写真を第6図に，又，粒度分析の結果を第2表の III, IV, V の欄に示す。

第2表　粒度分析の結果

	採取層			土質分類名	粒度分布 (%)			土粒の比重
	室名	床面からの深さ (cm)	観察による層状況		砂分 (2～0.05 mm)	シルト分 (0.05～0.005 mm)	粘土分 (0.005 mm 以下)	
I	A	100	砂質	砂質ローム	64	20	16	2.67
II	A	200	シルト質	粘土	38	24	38	2.67
III	B	80	砂質	砂	97	3	0	2.74
IV	B	130	シルト質	砂質粘土ローム	52	20	28	2.65
V	B	220	砂質	砂	100	0	0	2.72
VI	C	100	砂質	砂	100	0	0	2.75
VII	屋外	30*	砂質	砂質ローム	78	9	13	2.72

*　地面からの深さ



第5図　B 室における断面観測結果

(1) 凍上量（第1図） 室内中央にある柱のそばの床面を基準にした。この部屋の奥の方には荷物が積み重ねられていたので，室の $\frac{1}{4}$ ほどしか測量出来なかった。従って，穴の所の実際の凍上量は，得られた値 31.7 cm より大きい可能性が強い。

(2) 層構造 第6図の写真にみられるように，A室よりも氷層が目立つ。特に床面から 100～106 cm と 130～180 cm の所には，厚い氷層がある。目視観察による土質状況は，シルト質表土（第1層）5 cm，砂質土（第2層）35 cm，その下のシルト質（第3層）は 95 cm が凍結し，cm が未凍結，その下に再び砂質（第4層）というように顕著な層状構造である。A室では第4層の砂質土までは，掘ってみなかったが，第1, 2, 3層については，A・B室ともほぼ同じ層状態である。凍結深は床面から 190 cm で，凍上の厚さは 135 cm である。第3層のシルト質にだけ氷層が多くみとめられ，第1層，第2層には顕著な氷層がない。

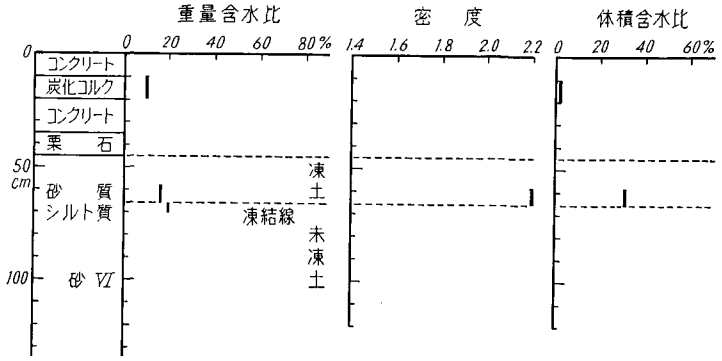
(3) 断面観測の結果（第5図） 第2層の砂質土は含水が少なく，第1層と第3層のシルト質は含水が多い。これはA室と同じ状況である。B室では，凍結層内に含まれる水分が殆んど水と考えると，空気分は殆んど0である。A室と同じく凍結線の下の未凍結のシルト質は含水が少なく，又，その下の砂は更に含水が少ない。

(4) 粒度分布（第2表） 床面の下 80 cm 付近の砂質（III の層），130 cm 付近のシルト質（IV の層），220 cm 付近の砂質（V の層，未凍結）についての結果を第2表の III, IV, V の欄に示す。土質工学会規格によると，III と V は砂で，IV は砂質粘土ロームである。この砂質粘土ロームが凍上の最も強い層[3]，つまり氷層を数多く含む層である。III の砂はシルト分を3% 含み，多少の凍上は予想される。氷層は目立たないが，含水比を比べると，同じ砂でもシルト分のない V の砂の 16.2% よりも大きい 29.6% である。

3. C室

隣りのA室に接した壁ぎわに穴を掘った。鉛直断面は壁から 70 cm 離れた所に作られた。凍結深は床面か

第6図 B室の凍土断面



第7図　C室における断面観測結果

ら66 cmであった。壁の所では100 cmであった。壁に近いほど凍結が厚いのは，A室からの冷却によるものである。従って，壁から離れるに従い凍結層は薄くなり，恐らく室の中央部には凍結層はないものと思われる。壁から70 cm離れた鉛直断面の観測結果を第7図に示す。

(1) **凍上量**　床面は水平で高低がない。凍上はないものとみてよいであろう。

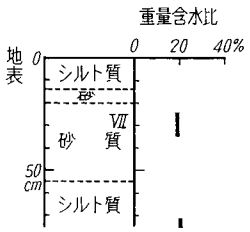
(2) **層構造**　表土のシルト質（第1層），その下に砂質（第2層），シルト質（第3層），再び砂質（第4層）というように，A·B室と層状構造の順序は変わらない。しかし各層とも非常に薄い。凍結は第2層の砂質のなかでとまっている。砂質は凍上性が非常に弱いので，まず凍上はないと考えてよい。

(3) **断面観測の結果**（第7図）　凍結している第2層の含水比は16%で，非常に小さい値である。凍結線の下にある凍っていないシルト質の含水比も僅かに20%にすぎない。

(4) **粒度分布**（第2表）　床面から下の100 cm付近（VIの層）についての結果を第2表のVIの欄に示す。土質工学会規格では砂の分類に入る。

4. **屋　　外**

屋外に掘った穴の断面観測の結果を第8図に示す。表土のシルト質（第1層）は厚さが15 cm，その下の砂質（第2層）厚さ40 cm，その下がシルト質（第3層）というように，層構造の順序は屋内のA·B·C室と変わりない。含水比は各層とも20%前後で，A·B·C室においても凍結前は恐らくこの値と同じであったろうと想像される。第2層の砂質については，屋外もA·B·C室も含水比の値は余り変わりがない。凍結しても含水状態が変わらないということは凍上が少なかったということである。一方，第3層のシルト質については，屋外に比べて，凍上の大きいA·B室では，含水比が非常に大きい。屋外の砂質（VIIの層）を粒度分析したところ砂質ローム（第2表のVIIの欄）で，A室のI層と同じであった。



第8図　屋外の断面

V. 考　　察

1. A·B室の凍上の主因となった土層は，第3層のシルト質である。重量含水比は50%以上114%にまでわたっている。一方，屋外の相当する土層の重量含水比は僅か20%にすぎない。

これは恐らく凍結前の含水比に相当するものであるから，それだけ水分が増加したわけである。この水分増を数量的に詳しく検討してみよう。

凍結前の1 cmの厚さの土に，土粒分 a，水分 b，空気分 c が含まれていたとする。この土が凍結後，凍上が起こって $1+h$ cmの厚さになったとする。そのうち土粒分は，凍結前と変わらずに a，水分は $b+p$（p は凍結のときに，未凍土側から流入した水分）にふえ，そのうち k の部分が氷，$1-k$ の部分が不凍水とする。残りの空気分を c' とすると，

$$a+b+c=1 \tag{4}$$

$$a+(b+p)(1.09-0.09k)+c'=1+h \tag{5}$$

この調査で測定されたのは，凍結前の重量含水比 w_i，凍結後の土の単位体積に含まれる土粒分 α と水分 β（氷＋不凍水として水分に換算），又土粒の比重 ρ である。

$$w_i=\frac{b}{a\rho} \tag{6}$$

$$\alpha=\frac{a}{1+h} \tag{7}$$

$$\beta=\frac{b+p}{1+h} \tag{8}$$

以上の関係から，凍結のときに未凍土側から流入して来た水分量 p は次で与えられる。

$$p=(1+h)(\beta-\alpha\rho w_i) \tag{9}$$

(1) A室の場合　氷層が多くみられる第3層だけで凍上がまかなわれたとすると，凍上率 h は $\frac{24}{76-24}=0.46$ である。又，凍結土のなかの体積含水比 β として平均値0.60，土粒分の含有比 α の平均値として0.35，又，不凍水分の割合として $k=0.1$ を採用すると，空気分 c' は0である。$w_i=0.2$, $\rho=2.65$ を入れると，$p=0.6$ になる。つまり，1 cmの厚さの土に，6 mmの水が流入したことになる。

(2) B室の場合　A室と同じように考え，$h=\frac{32}{92-32}=0.5$, $\bar{\alpha}=0.26$, $\beta=0.69$, $k=0.1$, $c'=0$ とすると，$p=0.85$ になる。つまり1 cmの厚さの土に8.5 mmもの水が流入したことになる。

2. 凍上が主に起こっている第3層のシルト質の凍結前の厚さは高々1 mで，その下には砂質がある。砂質を通しての水分の移動範囲は，余分の水圧がかからなければ，その毛管上昇高（10～20 cm）に限られる[4]。もし，シルト質の中だけの水分移動による凍上とすれば（閉式），恐らく10 cm程度にもならないであろう[5]。前述のように，40%以上も凍上が起こり，1 cmの土について6 mmや8.5 mmもの水分流入があったということは，豊富な水の補給が外界からなされねばならない[6]。つまり，地下水位がかなり高く，第4層の砂層でも，上部の第3層に近いところ，或は第3層のシルト層のかなり高いところにまで達したに違いない。調査時点では，230 cm掘っても地下水位には達しなかったが，地下水位は季節によって変動が大きいのが通常であるので，上の推論は間違いないであろう。現場の凍上は建設後1～2年の間に起きたものであるので，地下水位の高い時期は，1年のうちのかなりの部分にわたっていたと思われる。

3. 断熱層として用いられていた炭化コルクは，第3, 5図の写真にみられるように，氷を多く

含んでいた。乾燥させて，その重量含水比を測ったところ，A室83%，B室28%，C室10%であった。C室を除き，断熱効果は薄れている。A·B室で想像以上に厚く土が凍っていたのは，このためであろう。従って，大きな凍上の現われた原因の一つとも考えられる。

終りに，この調査の機会を与えて下さった三菱電機株式会社田中剛氏に感謝の意を表する次第である。

文　献

1) Ананян, А. А. 1966 Оценка Толщины слоев незамерзшей воды в мерзлых горных породах. Мерзлотные Исследования, вып. VI, Издательство Московского Университета, Москва, 221–228.
2) 木下誠一・鈴木義男・堀口　薫・田沼邦雄 1970 凍上と地下水位との関係 II. 低温科学，物理篇，**28**, 325–336.
3) Beskow, F. D. G. 1935 Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroad. *Swed. Geol. Soc. Ser. C*, **375**, **26**th *Year Book* No. 3; (*Translated* by J. O. Osterberg 1947 Tech. Inst. Northwestern Univ., Evanston, III. 145 pp).
4) ロージェ 1963 土壌と水 (山崎不二夫・長田昇・田淵俊雄訳). 東京大学出版会，138 pp.
5) Kinosita, S. 1966 Heaving force of frozen soils. *In* Physics of Snow and Ice, Part 2 (H. Ôura *ed.*), Inst. Low Temp. Sci., Sapporo. 1345–1360.
6) 木下誠一・鈴木義男・堀口　薫・田沼邦雄 1971 凍上と地下水位との関係 III. 低温科学，物理篇，**29**, 245–256.

Summary

With the progress of food freezing techniques, more and more cold storages have been constructed recently. Though the necessary thicknesses of thermal insulators for a cold room to work at a given thermal efficiency are easily calculated and have long been standardized, the protective means against damage due to frost heaving are difficult to be standardized because of various complex factors causing the latter. An inadequate choice of the means often leads to severe damage. Examples of such damage observed recently by the authors are reported here. The observed cold stroage consisted of several rooms which had been used at various constant temperatures ranging from −4°C to −25°C for about two years. The damage of two typical rooms, Room A (11 m×16 m, used at −18°C) and Room B (16 m×16 m, used st −25°C), was as follows: In both rooms, the floor heaved irregularly along the wall. In general, heaving was small along the wall facing to the open air. The difference between the maximum and minimum heaves along the wall amounted to 10 cm or more. These irregular heaves caused cracks not only on walls and pillars but on beams and ceillings so that in some places even leaks on the roof were noticed. In Room A with no center pillar, the floor heaved most severely in the central part, the largest heave having amounted to 24 cm (referred to the lowest heave in the room), while, in Room B with a center pillar, there were four points of maximum heaves, each being located near the center of each quarter, the two points near the aisle having heaved more than the two others near the open air did. The largest heave amounted to 32 cm. For the observation of the frozen state of

the understructure, two pits were dug at the maximum heave points of each room, and, for comparison, the third pit was dug in non-damaged Room C (used at −4°C) adjacent to Room A at a point 70 cm apart from the wall facing to Room A. The floor and the understructure consisted of, from upper downward, a 10 cm concrete floor, a 10 cm (A and C) or 20 cm (B) carbonized colk layer with water-proof treatment on both surfaces, a 15 cm concrete base, a 10 cm pebble layer, and soil. The soil itself had a layered structure consisting of a 5 cm surface soil layer, a sand layer, a layer of sandy-clay-loam, and another sand layers. The thicknesses of the latter three varied from room to room (See Table 1). Thick ice lenses (several to 20 mm thick, 5 to 20 cm long) were observed only in the third (sandy-clay-loam) layer, the composition of which was 52% of sand, 20% of silt, and 28% of clay. If the observed heave is assumed to be caused only in this layer, the heaving rate amounts to 24/(76−24)=46% in Room A or to 32/(92−32)=54% in Room B, too large values to be accounted for by the original water content in this layer. Hence, the supply of water from beneath must have occurred. Since the suction capability of the underlying sand was estimated 10 to 20 cm, the underground water level must have been in this range from the lower surface of the third layer for a considerably long period of time, despite the fact that the water level was very low when observed. The freezing depths under the three rooms were large to an extraordinary degree due to the inferior quality of the carbonized colk. The water contents in weight of the colk were 83%, 28%, and 10% for Rooms A, B, C, respectively.

Table 1. Thicknesses and Water Contents of Each Soil Layer

Room	Heave Amount (cm)	Thickness (cm) [Water Content (%)]				
		Surface Soil	Sand	Sandy-Clay-Loam		Sand
A	24	5[68]	60[18～30]	76[48～ 79]	[32～39]	
B	32	5[51]	38[30～36]	92[51～114]	30[42]	[16]
C	0		16[16]		30[20]	
		Frozen			Unfrozen	