

霜柱による侵食の防止に関する実験的研究

辰 野 良 秋

EXPERIMENTAL RESEARCHES ON THE EROSION CONTROL CAUSED BY FROST HEAVING

By Yoshiaki TATSUNO

目 次

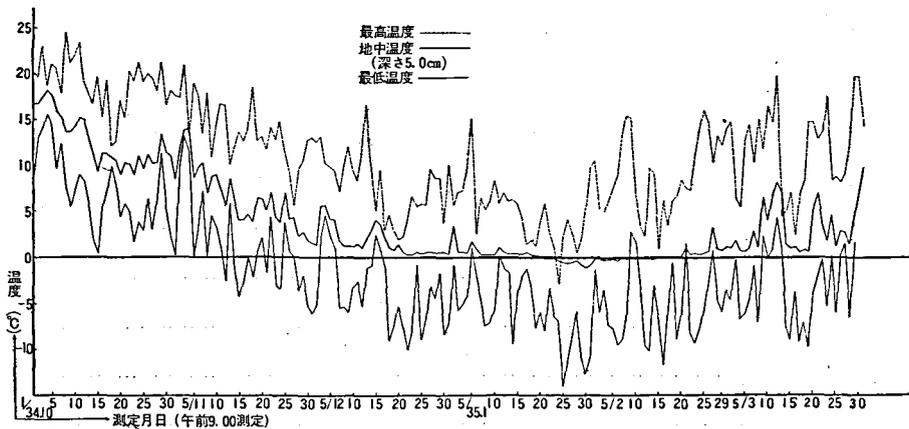
I 緒 言.....	2
II 実験方法.....	6
III 実験結果とその考察.....	11
1 土壌水分と霜柱の発生量.....	11
2 冷却温度と霜柱の発生量.....	28
3 土質と霜柱の発生量.....	37
4 斜面の部位と霜柱の発生量.....	49
5 斜面の霜柱侵食の2,3の防止法.....	60
IV 要 約.....	74
V 結 言.....	75
参考文献.....	76
Summary	79

I 緒 言

冬期、積雪が少なく寒気のきびしい地方にあつては、霜柱、凍上によつて押し上げられることによつて、山腹の砂防工作物が破壊されたり、凍結、融解のくりかえしにより浮土砂を生産して崩壊、侵食をおこしやすく、また荒廃地が新生拡大するなど裸地斜面における侵食は甚大である。また植生の根が切断されたりして、復旧工事の不成功の原因をなすことが多い^{1)~4)}。

当地方(長野県伊那市周辺)においても、その被害は非常に大きい。信州大学農学部(北緯 $35^{\circ}51'43''$ 、東経 $137^{\circ}56'19''$ 、標高 772.69m)における気温および地温を示すと図I-1)のとおりであり霜柱の発生、土壤凍結の期間は11月上旬から4月上旬までの長い期間である。霜柱の発生状況を示すと写真I-1), (2)である。本実験中に観察された一発生期の霜柱の最大量は、長さ 12.0cm にして生体量は 7.04kg/m^2 (純水 6.45kg/m^2)であり、降水量に換算すると 6.5mm であつた。(昭和34年12月22日、最低気温 -12.5° 、積算温度 129.2)。普通の場合にはこの $1/2\sim 1/3$ 程度である。

図I-1)



気温および地中温度の日変化(34.10.1~35.3.31)

凍上、土壤凍結および霜柱については、従来数多くの研究がなされている。

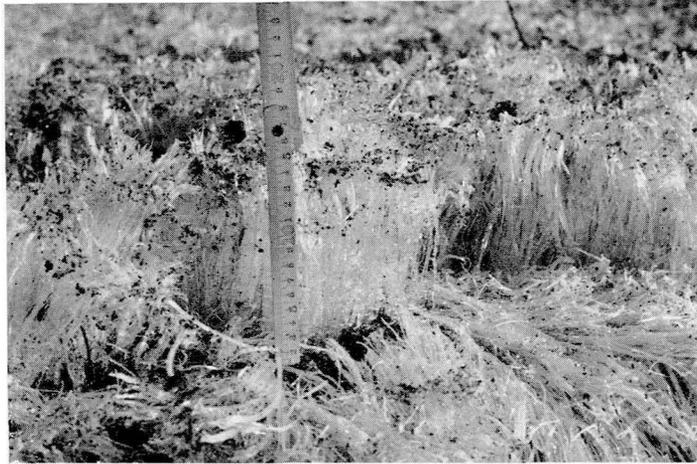
凍上については鉄道、道路の面から満州、北海道において研究されており、その機構、防止法について解明されている。発生は地下における柱状凍結、アイスレンズが原因とされており、また防止法としては地盤の置換工法が行なわれている^{5)~30)}。

土壤凍結については強度、その他の性質について研究されており^{31)~41)}、またその融解侵食についてなされた研究がある^{42)~48)}。

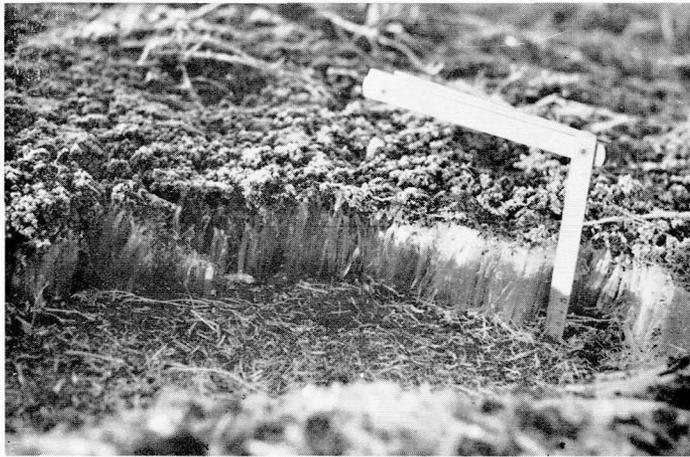
積雪および植生の被覆の影響については多くの研究があり、いずれもその断熱的効果を認めている^{49)~61)}。また被覆のない場合とその土壤凍結の状況を異にしている。

山地の霜柱、凍上による荒廃、侵食および防止についての研究は比較的少ないが、近時次第に進んでいる^{62)~71)}。

写真 I—(1) 信州ホーム層の霜柱，凍上



土を含まない霜柱



土を持ち上げた霜柱

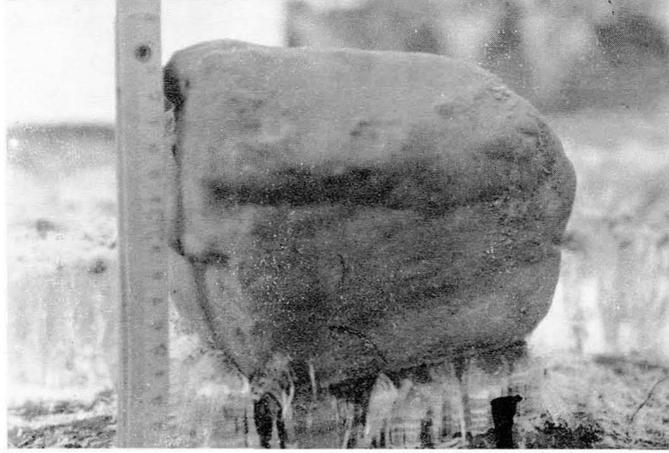


積雪下の霜柱

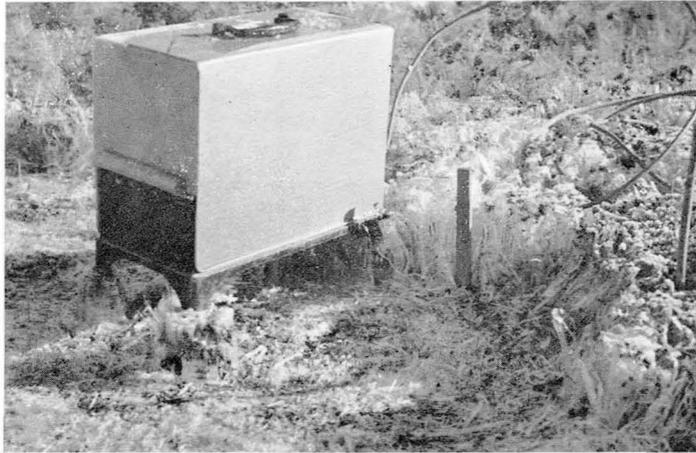


凍上

写真 I-(2) 霜柱の押し上げる力



石（重量 6.5kg 底面積 130cm²）を持ち上げた霜柱



地中温度計を持ち上げた霜柱

霜柱については、古くは稲垣、後藤両氏による発生について広範な研究がある⁷²⁾。その後、藤原氏の物理的考察⁷³⁾、川野氏の生長速度の測定があり⁷⁴⁾、その後、福田氏の詳細な研究が出て熱学的考察がなされている⁷⁵⁾。また自由学園自然科学グループの研究では霜柱を人工的に立たせて土壌粒子の問題を確かめている⁶⁷⁾⁷⁷⁾。このような研究で霜柱の性質および発生の条件も大分明らかになっているが⁷⁸⁾⁷⁹⁾、これを量的に測定して、侵食およびその防止について研究されているものは少なく、解明の余地が多く残っている。

土壌の凍結については種々分類されているが¹⁸⁾⁶³⁾、要するに土壌中の水分が地表に析出して凍結する現象が霜柱であり、地中で凍結して体積が増加することによつて、その上の土層や工作物等を押上げる現象が凍上である。

本研究は、霜柱、凍上による侵食のうち、とくに霜柱について、その発生条件として最も関係のある土壌水分、冷却温度、土質および斜面の部位等の因子について基礎的資料をはあくして、侵食防止の合理的な方法を得ることを目的として実施したものである。

本研究を行なうにあつては、終始京都大学教授遠藤隆一氏の懇切なる御指導をうけ、また本学教官堀内照夫氏からは大きな協力をうけたので、ここに心からの謝意を申しのべる。

II 実験方法

霜柱の発生に関係する諸因子と、霜柱による侵食の防止の方法について、自然条件下において、またあるものは低温室内において、さらにあるものは両者において実験した。

1 土壌水分と霜柱の発生量の実験

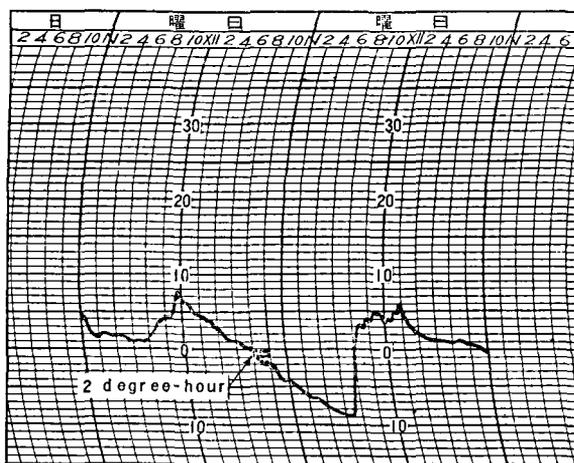
温度を同じ条件にし土質を一定にして、水分を変化させて実験した。供試土壌の作成は、長さ26cm、巾26cm、深さ10cmの試料木箱の形状に合わせて自然状態の土を掘り下げ、それをそのままくずさないように箱につめて、表面をけずり切土（自然状態）の試料とした。盛土の試料は自然状態をくずして、5mm目のふるいでふるつたものを、3層に分けて箱に入れ、箱を高さ20cmより10回落下させて沈圧させ表面をけずつた。アトランダムにとられた盛土の試料の容積重、含水量はつぎのとおりであり、試料が一樣に作成されたことを示している。

試料番号	No. 3	No. 7	No. 9
容積重	1.403	1.435	1.405
含水量	64.2	62.0	63.4

供試体の作成は、以後の実験もこれと同様にした。このようにして作成した土質の一樣な試料に対して、上方より散水し、あるいは下方から吸水させ、また一度吸水させたものを、そのまま放置して水分状態を変えた後、約20gの土壌をとつてその時の含水量（乾燥土量に対する水分量を百分率で表わす）を決定し、自然状態および低温室内にお

いて霜柱を発生させた。低温室内に静置した時間は、自然状態における一発生期が8～16時間が多いので16時間とした。冷却温度（地表上10cmの温度）は自記温度計に記録された温度曲線と、0°C線にかこまれた面積を degree-hour で表わして積算温度とした。（1ます目は2 degree-hour である）図II-(1)。霜柱、凍結の発生は側面から冷却されて不規則な霜柱や、凍結がおこるので、その影響を除くため、外縁から5cmをさけて中央16×16cm² 当りの量を測定し、純水と土量に分離した。霜柱の発生量は霜柱量と持ち上げ土量（乾土）をそれぞれ kg/m² に換算して示した。霜柱発生に伴う土壌水分の変化は自然状態においては、発生前後の深度別の水分を測定し、低温室内においては長さ60cm、巾48cm、深さ30cmの木箱を用いて長さ25cm、巾2cm、深さ3cmの金網のかごを別につくり、一様に土壤をつめて3層に重ねて、土壌水の移動が円滑に出来るようにして所要深度の水分を測定した。pF 値の測定は吸引法と遠心沈殿器による方法を併用した。

図 II-(1)



積算温度曲線図

2 冷却温度と霜柱の発生量の実験

土壌水分、土質の条件を一定にして、低温室内において冷却温度を変えて霜柱の発生量を定量した。冷却温度は積算温度 (degree-hour) で示した。

3 土質と霜柱の発生量の実験

信州ローム（赤土）を下層土として、一様な試料をつくり、信州ローム赤土、信州ローム黒土、花崗岩風化土表層、花崗岩風化土下層、緑泥片岩風化土、頁岩風化土の細土（10メッシュ）にて、それぞれ0.5cmの厚さに地表面をつくり、また信州ローム（赤土）の10、20、200メッシュのふるい通過分の土粒子でそれぞれ地表面を0.5cmの厚さにつくり、最大容水量の状態にして低温室内に静置して発生量を比較した。また傾斜角 20° 斜面長 210cm の北面の斜面において展圧区と対照区とをつくり 30×30cm² 内の霜柱発

生量を測定した。

4 斜面の部位と霜柱の発生量の実験

斜面の方位別の発生量は、信州ローム(赤土)の傾斜角 30° 、斜面長100cm、斜面巾500cmの斜面において、また斜面の上部、中部、下部別の発生量は傾斜角 20° 、斜面長210cmの斜面において、霜柱の発生が休止した時に $30 \times 30 \text{cm}^2$ 内の霜柱を定量した。斜面の方位別の侵食量の測定は、既設の斜面を使用し、測定部位の土質は信州ローム(赤土)を5mm目のふるいでふるつた通過分の土粒子を深さ10cmまで客土して、同一条件で展圧し様な斜面をつくり、のりじりに設置された土砂受け箱への崩落量を1~2日毎に定量し、乾土量で示した。斜面は傾斜角 30° 、斜面長100cm、斜面巾46cmであり、のりじりは移動を防ぐために長さ100cm、巾60cm、厚さ2cmのコンクリート板を埋めた。また斜面の霜柱消失時刻は、この斜面積内の全部が消失した時刻で示した。

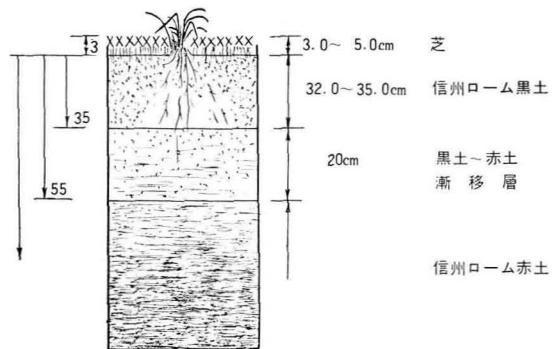
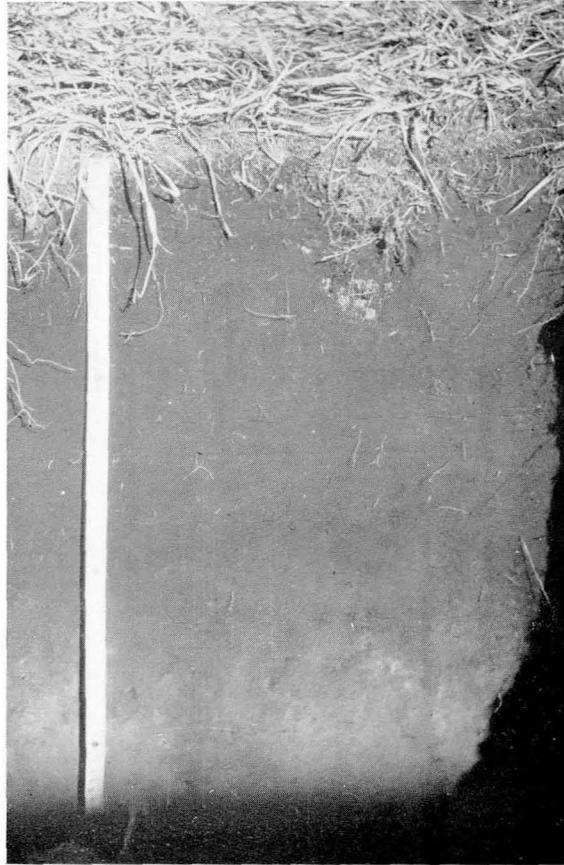
5 斜面の霜柱侵食の防止法の実験

傾斜角 20° 、斜面長210cmの信州ローム(赤土)の斜面に巾60cm毎に斜面混播区、筋芝区、わら伏区、土壌改良剤施用区を設置し、のりじりに土砂受け箱を埋めて、台風期における降雨による侵食量を測定し、ひきつづき霜柱発生期間中の侵食量を測定した。斜

表 II-(1) 供試土壌の性質

土 質	信州ローム(赤土) (黒色森林土 B層)					信州ローム(黒土) (黒色森林土 A層)				
	粗砂	細砂	微砂	粘土	腐植	粗砂	細砂	微砂	粘土	腐植
粒 径 組 成 %	8.5	22.3	42.8	26.3	0.1	5.6	17.0	32.8	29.0	15.6
比 重	2.88					2.31				
仮 比 重	1.72					1.45				
孔 隙 量	66.9					73.8				
最大容水量 (pF:0) %	74.6					113.0				
圃場容水量(pF:2.0)%	51.1					93.2				
水分当量(pF:3.0)%	41.2					71.7				
毛管上昇度 cm/10h	43.0					35.8				
透 水 係 数	7.7×10^{-5}					3.8×10^{-4}				
最 適 含 水 量 %	41.1					82.0				
流 出 限 界 %	56.5					76.0				
塑 性 限 界 %	44.1					55.9				
塑 性 指 数	12.4					20.1				
収 縮 限 界	42.8					59.3				
収 縮 比	1.29					0.97				
団 粒 係 数	45.64					21.84				

写真II-(1) 供試土壌の断面



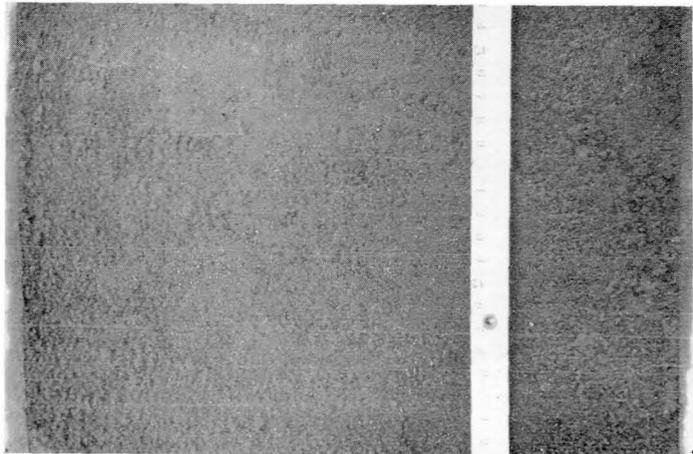
信州ローム層とその断面図



信州ローム A 層 (黒土)



信州ローム B 層 (赤土)



供試体の表面

面混播区はケンタッキー 31F, ヤハズソウ, ベント・グラスを重量比で 2:2:1 に混合して 1m² 当り 7g の割合で播種した。筋芝区は 60×20cm の芝を 50cm の間隔に設置した。わら伏区はわらの代りに荷作り用のこもを伏せた。土壤改良剤施用区はアロン A-20P, アロン A-40 を乾土重量の 0.6% (18g/m²) の薬剤を水溶液にして施用した。工種 1 通りの斜面を 1 群として, 3 群の斜面を設定して侵食土砂量を測定し, 乾土量で示した。

食塩, 肥料の施用は, 信州ローム (赤土) の表面に食塩, 窒素 (硫酸アンモニア), 燐酸 (過燐酸石灰), 加里 (塩化加里), 消石灰をそれぞれ粉末にして 100cm² 当り 1g 散布して散水した。低温室内においては 2 昼夜放置したものを静置した。

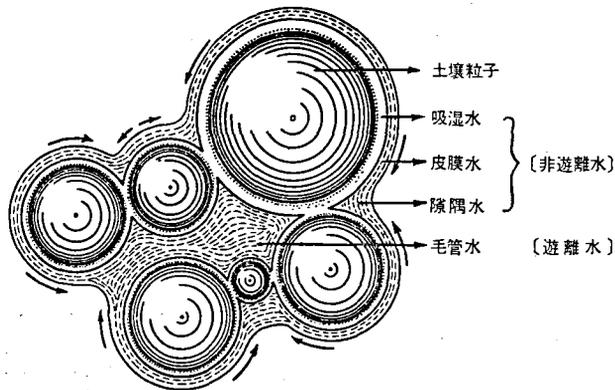
実験に使用した信州ローム, すなわち黒色森林土壌 A 層 (黒土) および B 層 (赤土) の土質条件は表 II-1 のとおりである。土層の状態は写真 II-1 に示される。

III 実験結果とその考察

1 土壤水分と霜柱の発生量

土壤水の分類は, 植物学, 土質力学あるいは土壤物理学等の立場から幾通りにもなされているが, そのうちでも大きく分けて, 結合水, 吸湿水, 毛管水, 重力水とすることには一致している図 III-1-1, 写真 III-1-1。

図 III-1-1



土粒子と土壤水

Bouyoucos は土壤粒子に強く結合されている水ほど結氷し難く, 氷点が低くなることに着目して, 氷点の相違によつてつぎのように分類している^{80)~82)}。

- 1) 非遊離水, 溶媒として作用しない, すなわち物を溶かす作用のないもの。
 - (1) 結合水, -78°C でも結氷せず, 植物に利用されない。
 - (2) 毛管水, -4°C で結氷し, 土粒子に非常に強く吸着されていて, 植物に僅かに利

用されるにすぎない。

- 2) 遊離水, -1.5°C で結氷し, 植物に吸収利用されるもの。
- 3) 重力水, 重力によつて移動する水で, 植物が利用する以上に存在するもの。

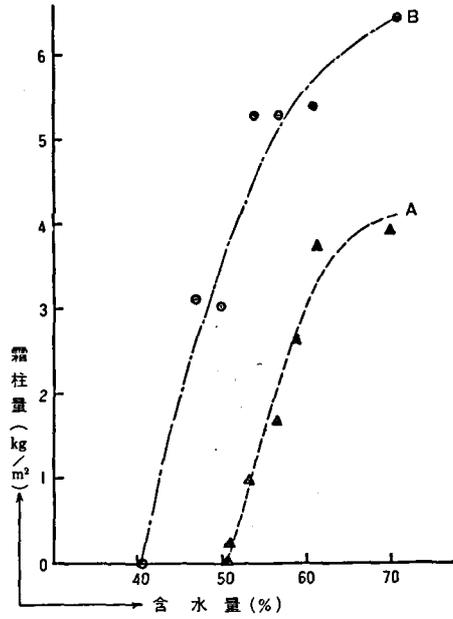
本研究における土壤水の名称はこれに従うことにした。

自然状態において, 土壤が含有しうる水分量は, 最大容水量の時に最も多く重力水をはじめすべての水を含有している状態であり, 土壤の性質, とくに粒径組成, 孔隙量, 吸湿性, こう質物含有量に関係し, 圧結度が一樣な場合には土壤の種類によつて一定しており $pF0$ で示される。降雨直後またはかん水された場合にこの状態になる。余分の水は重力水として土壤中を浸透し, その後は含水勾配にしたがつて浸透するか, 地表面から蒸発して漸次水分量を減じて, 2~3日経過すると水分移動の非常に緩慢な状態になる。寒冷期でも3~5日を経過するとこの状態に達する。この状態では遊離水はほとんどなくなり, 毛管水, 結合水が存在する。この状態を圃場容水量と称し, やはり土壤により一定しており $pF2.0$ で示される。この状態では土壤粒子の小間隙には, 多少の遊離水は残留する。さらに土壤中の水分が減少すると, もはや液体の状態では移動しえない限界に達する。この状態を水分当量と称し, この場合の土壤粒子の吸引力は1気圧に相当し, $pF3.0$ で示される。

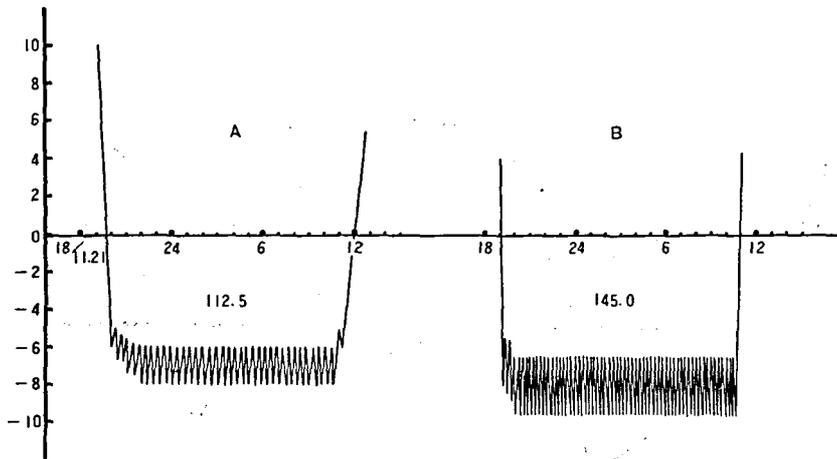
霜柱の発生はこの水分状態と密接な関係がある⁶⁹⁾⁷⁶⁾。自然状態における実験の結果から明らかにされ, さらに低温室における実験結果からも確認することが出来た。すなわち, 表Ⅲ-1-1(1)によれば圃場容水量以上の含水量を示す状態においては, 純粋の霜柱を発生し, それ以下になると, その発生量は急速に減少し, 水分当量以下の状態では絶対に霜柱は発生しない。この場合には土壤凍結をおこしている。写真Ⅲ-1-2)は各種の含水量において霜柱を発生させた状態を示すものである。自然状態における実験の結果から, 人為的に所定の含水量の試料を作成して, 低温室内において実験した結果も全く自然状態における現象と一致し, 霜柱の発生限界を土壤水分の面から究明することが出来た。低温室内において発生させた状態は写真Ⅲ-1-3), (4)で示される。さらに霜柱の発生量は水分当量から最大容水量の間にあつては, 冷却される条件が一定であれば, ほぼ含有水分に比例することが表Ⅲ-1-1(1), (2)の結果から明らかである。地下水位が高く所定の最大容水量以上に水分が存在する場合には, 最大容水量までは地表面に氷層をつくり, その下に霜柱を発生することが通例で, 霜柱によつて地上に析出される量は最も多いことになる。

前述のように霜柱の発生量は遊離水の多いほど多く, $pF0$ の時に最大で, $pF3.0$ の時に最小で, それ以下では土壤凍結をおこす。 $pF0$ ~ 3.0 の間における両者の関係については, 実験の回数が少なく決定的な結果は得られないが, つぎのように考察される。図Ⅲ-1-2)に示されるように, $pF3.0$ の時は霜柱になりうべき水分が存在しないため, 霜柱は発生しないが, 水分が増加すると発生量は多くなり, $pF2.0$ までは急激に増加する。土壤水分がさらに増加して $pF0$ に至るまでの発生量の増加の割合はあまり急激ではない。これは $pF2.0$ 以上の水分状態では霜柱になりうる遊離水が十分存在するので, 冷却条件が一樣であれば, 水分の差はそれほど発生量に影響しないものと考えられる。

図 III-1-(2)

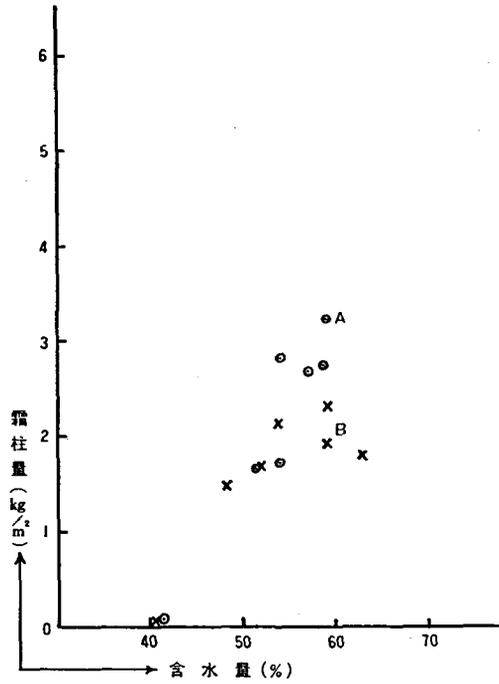


含水量と霜柱発生量の関係 (低温室内)

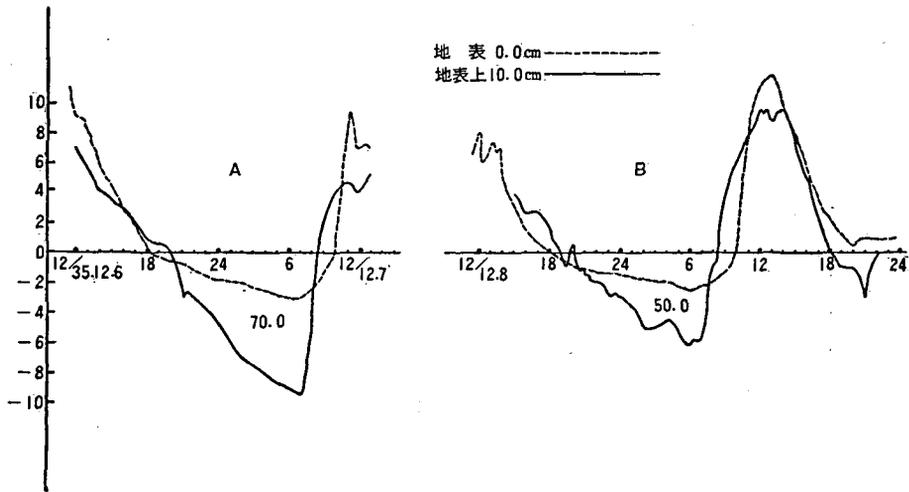


積算温度曲線図

図 III-1-(3)

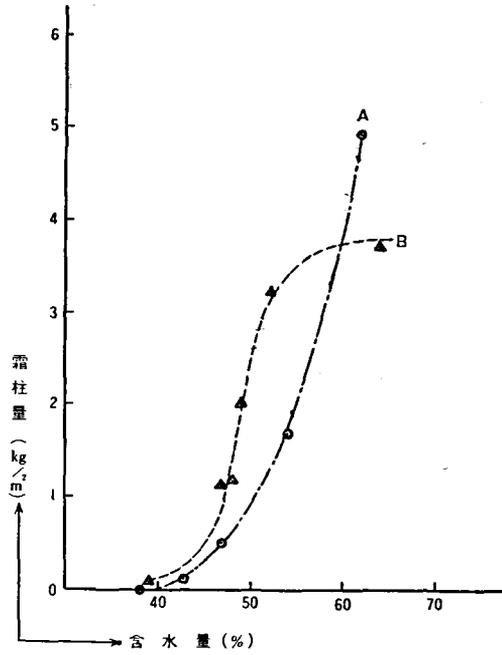


含水量と霜柱発生量の関係 (自然条件 12月初旬)

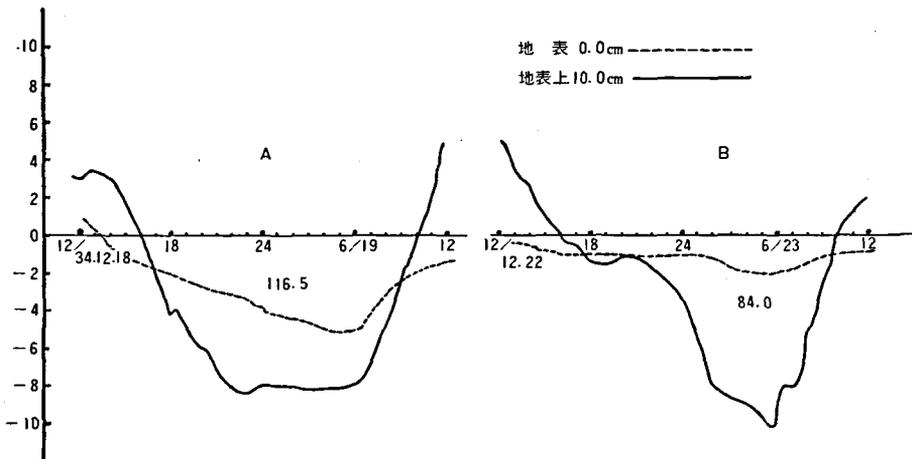


積算温度曲線図

図 III-1-(4)



含水量と霜柱発生量の関係 (自然条件 12月下旬)



積算温度曲線図

表 III-1-(1) 土壤水分の差異による霜柱の発生量(自然条件)

測定日	最低 気温	冷却 時間	積算 温度	信州ローム赤土(盛土)					信州ローム赤土(切土…下層土)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
34 12.24	-1.5	10	12.0	62.5 1.17 (0.20)	59.1 1.18 (0.22)	52.6 1.16 (0.34)	50.0 1.11 (0.40)	45.0 0.15 (0.46)	102.8 2.01 (0.20)	105.5 1.49 (0.60)	92.5 1.71 (0.91)	86.1 0.66 (0.94)	84.0 0.82 (0.57)
12.27	-3.2	11	25.0	63.3 2.13 (0.53)	59.6 1.77 (0.90)	57.9 1.21 (1.00)	54.0 0.09 (0.38)	50.4 凍結 —	97.6 1.68 (1.35)	87.2 0.58 (1.40)	81.1 0.40 (0.97)	— 凍結 —	77.0 凍結 —
12.28	-6.8	14	65.0	54.5 1.98 (0.37)	50.0 0.53 (1.14)	48.4 凍結 —	48.2 凍結 —	42.1 凍結 —	92.4 0.54 (0.76)	84.7 凍結 —	75.3 凍結 —	73.9 凍結 —	67.3 凍結 —
12.23	-10.2	18	84.0	64.3 3.71 (0.27)	52.7 3.12 (0.54)	49.0 2.00 (0.60)	47.6 1.11 (0.55)	48.9 0.12 (0.40)	105.3 3.94 (0.72)	89.9 3.04 (1.35)	83.3 1.57 (0.74)	— 1.12 (1.49)	— 0.50 (1.06)
12.19	-8.3	18	116.5	61.9 4.93 (0.30)	54.3 1.63 (0.92)	46.6 0.46 (1.44)	42.5 0.16 (0.84)	38.4 凍結 —	104.0 2.38 (0.97)	98.4 1.28 (1.17)	83.3 0.70 (1.22)	73.9 0.24 (0.52)	73.5 凍結 —
pF		0 2.0 3.0				65 50 38					100 88 40		

(注) 第1行: 設置時の土壤の含水量, 第2行: 霜柱量, 第3行: 持ち上げ土量

表 III-1-(2) 土壤水分の差異による霜柱の発生量 (低温室内)

冷却温度	積算温度	土壤水分	信州ローム赤土(盛土)					土壤水分	信州ローム赤土(表土)				
			1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
-3.0 ~ -5.0	47.5	63.4	0.70 (0.10)	0.77 (0.10)	0.79 (0.10)	0.92 (0.08)	0.80 (0.04)	65.3	0	0	0	0	0
	46.3	45.3	0.30 (0.29)	0.48 (0.29)	0.51 (0.31)	0.60 (0.25)	0.68 (0.25)	45.9	0	0	0	0	0
	46.5	39.4	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —	43.2	0	0	0	0	0
-5.0 ~ -8.0	97.5	57.4	3.48 (0.39)	4.26 (0.39)	4.08 (0.41)	4.72 (0.65)	4.25 (0.45)	55.4	2.83 (0.27)	2.89 (0.39)	3.51 (0.49)	3.65 (0.45)	3.53 (0.41)
	98.8	54.4	2.94 (0.33)	3.85 (0.51)	3.87 (0.35)	— (0.49)	3.37 (0.37)	50.3	2.49 (0.20)	— (0.16)	2.49 (0.41)	2.85 (0.47)	2.55 (0.37)
	102.0	48.0	1.71 (0.25)	1.50 (0.25)	1.54 (0.23)	0.21 (0.22)	1.90 (0.23)	46.0	1.33 (0.16)	0.13 (0.18)	0.25 (0.22)	0.29 (0.25)	0.89 (0.29)
	102.0	39.4	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —	43.2	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —	凍結 —
pF	0		60.0~65.0						55.0~60.0				
	2.0		46.7~47.6						49.2~50.2				
	3.0		39.4						43.2				

- (注) 1. 括弧内は持ち上げ土量
 2. 冷却時間 16時間
 3. 冷凍機始動時の地温6.0~7.0°C, 2.0~4.0°C

とくに自然条件下において観測したものによれば、霜柱発生初期(11月中旬~12月上旬)においては地温が高く、気温の降下も最低気温ほどに激しくなく、積算温度が小さいのでこの傾向が著しく、かえつて pF2.0 以上の場合、水分の多いほど発生量が少なくなっている表Ⅲ-1-(3)。これは土壌水分の多いほど比熱、熱容量が大きく冷却速度がおくれることによるものと考えられる表Ⅲ-1-(4)。しかしながら12月下旬以降においては、低温室内における結果と同様に水分量の差は図Ⅲ-1-(4)に示すとおり大きく影響している。

表 Ⅲ-1-(3) 土壌水分の差異による霜柱の発生量

測定日	冷却温度	冷却時間	積算温度	信州ローム赤土						備考
				1	2	3	4	5	6	
35 11.14	-6.5	16	145.0	70.8	60.8	56.9	54.0	50.0	46.8	低温室内 (pF 3 : 50)
	-9.5			6.40 (1.51)	5.38 (1.21)	5.24 (1.21)	5.24 (1.02)	2.97 (1.02)	3.06 (0.84)	
35 11.28	-6.0	16	112.5	69.9	61.6	59.0	56.5	53.5	50.7	" (pF 3 : 40)
	-8.0			3.95 (0.55)	3.73 (0.66)	2.60 (0.35)	1.64 (0.47)	0.96 (0.45)	0.20 (0.39)	
35 12. 7	-10.1	—	70.0	59.0 3.21 (0.08)	58.9 2.74 (0.16)	57.5 2.66 (0.16)	54.2 2.83 (0.12)	53.9 1.76 (0.16)	51.6 1.64 (0.12)	自然条件 (pF 3 : 40)
35 12. 9	-6.6	—	50.0	62.7 1.80 (0.23)	58.5 1.92 (0.16)	58.4 2.33 (0.29)	54.4 2.05 (0.35)	50.6 1.64 (0.55)	48.6 1.45 (0.55)	" (pF 3 : 40)

(注) 第1行: 土壌水分, 第2行: 霜柱量, 第3行: 持ち上げ土量

表 Ⅲ-1-(4) 土壌の含水量と比熱 C (cal. g⁻¹°C) (C × 10)

土壌の種類	含水量 (%)							
	0	10	20	30	40	50	100	
砂	3.02	3.44	3.85	4.27	4.68	5.10	7.17	
腐植	1.48	2.33	3.00	3.74	4.49	5.25	9.02	
粘土	2.40	2.98	3.57	4.15	4.73	5.32	8.23	

つぎに霜柱が発生するさいに土壌水分が地表に析出される結果, どのように変化するかを実験した。その結果は表Ⅲ-1-(5)~(9), 図Ⅲ-1-(5), (6)に示すとおりである。冷却される温度とその持続される時間によつて変化する。表Ⅲ-1-(8)によれば, 土壌中の水分は気温が降下して, 地表面が長時間冷却されても, 霜柱が発生するか, 土壌凍結をおこすかしなければ移動しないことを示している。しかも霜柱の発生, 土壌の凍結の結

表 III-1-(5) 霜柱の発生に伴う土壌水分の変化 (自然条件)

測定時	土壌断面 (cm)													
	0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5
霜柱発生前 35.12.6. 17.00	54.4	53.9	53.8	53.7	53.5	53.7	53.7	55.1	55.8	56.3	56.7	57.2	58.3	58.4
霜柱発生後 35.12.7 7.00	51.3	51.7	51.7	51.9	53.1	53.9	53.0	55.0	55.6	56.9	57.7	57.6	58.4	58.8
霜柱消失後 35.12.7 11.30	54.5		54.5											
備考	霜柱発生後の土壌水分は 6.0cm の深さまで圃場容水量に減少している。また霜柱消失後では発生前の水分状態にもどっている。													

- (注) 1 信州ローム赤土, 土壌深25.0cm
 2 霜柱発生量 2.56kg/m²
 3 最低気温-9.5°C, 最低地温-3.0°C
 4 積算温度 70.0

表 III-1-(6) 霜柱および土壌凍結の生成に伴う土壌水分の変化

測定時	土壌断面 (cm)																
	地表面	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
霜柱発生前 35.10.28 10.00	56.8		58.3		59.4		63.6		71.3		72.2		65.3		67.3		
霜柱発生後 35.10.29 10.00	52.3	52.3	52.4	52.6	52.2	53.5	54.6	54.3	56.4	56.4	57.6	未測定					
土壌凍結後 35.10.30 10.00	120.2	81.5	74.1	59.8	41.3	45.2	44.1	44.9	45.2	45.2	45.9	45.9	46.1	45.9	45.6	47.4	47.5
備考	板状凍結でめアイルスレ	板状凍結でめアイルスレ	板状凍結で下方に	塊状凍結でブロック化	塊状凍結で	凍結は水分直下当量を示す	1 未測定部分の土壌水分は漸増程度と推定される。 2 霜柱発生中の土壌水分は pF2.0 (圃場容水量) で保持される。 3 土壌凍結進行中の土壌水分は pF3.0 (水分当量) で保持される。										

- (注) 1 霜柱発生に伴う土壌水分の吸引力は 0.1 気圧に相当し土壌凍結に伴う土壌水分の吸引力は 1 気圧に相当する
 2 信州ローム (赤土)
 3 霜柱発生量 5.24kg/m²
 4 冷却温度 -4.0~-6.0°C, 積算温度 112.5 (霜柱発生), 125.0 (土壌凍結)

表 III-1-(7) 霜柱の発生に伴う土壌水分の変化

試料箱	No. 10				No. 7				No. 3				No. 9			
設置時の含水量	68.7				61.1				55.0				35.2			
土壌断面 (cm)	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8
各断面の含水量	57.2	60.0	61.6	60.7	47.6	50.4	50.7	57.0	52.1	54.4	54.8	55.7	35.6	34.3	34.5	35.2
霜柱および土壌凍結の状態	0.5cm の霜柱が貝柱状に密生土壌凍結なし。				0.5~1.0cm の綿糸状の霜柱がやや粗に発生土壌凍結なし。				0.5cm の貝柱状の霜柱がやや密に発生土壌凍結なし。				霜柱は全然発生しない0.5cm の深さにわたって板状凍結			

- (注) 1 冷却時間 18時間
2 冷却温度 -2.0~-5.0°C

表 III-1-(8) 冷却と霜柱、凍結層の生成に伴う土壌水分の変化

試料箱	No. 1				No. 2				No. 8				No. 6			
設置時の含水量	59.3				56.6				55.8				39.4			
土壌断面 (cm)	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8	0 } 2	2 } 4	4 } 6	6 } 8
冷却し霜柱発生直前	59.4	61.2	61.3	61.6	54.7	56.7	56.7	56.7	54.4	56.5	56.5	56.5	39.9	40.2	39.7	40.6
凍結後の各断面の含水量	77.6	42.3	42.5	42.6	64.2	41.3	41.5	42.7	61.7	38.9	38.2	39.2	46.1	41.7	35.6	35.0
霜柱、土壌凍結の状態	凍結土壌	凍直結線下			凍結土壌	凍直結線下			凍結土壌	凍直結線下			1.0cm凍結土壌	凍直結線下		

- (注) 1 冷却時間 18時間 (2.0~-1.0°C), 22時間 (-7.0~-9.0°C)
2 冷却温度 2.0~-1.0°C, -7.0~-9.0°C

果非常に多量の水分が析出され、あるいは凍結層となつて消費される経過が明らかになつた。従来は地下4~7cmまでの地中水分が霜柱の発生にあずかるといわれているが⁷⁶⁾、8~10cmの部分の水分にも変化が認められる。一様に測定されたことは、地表の直下部はとくに乾燥していることと、その下方は僅かにそれより含水量が多くなり、霜柱の発生に余分の水を析出している点である。さらにそれ以下の部分はほとんど一般的な状態で下方から水分の補給をうけていることが推察される。つまり、この場合、霜柱の発生に要する水分量と、下方から補給される水分量の移動が最も円滑に行なわれる状態で霜柱が発生していると考えてさしつかえない。さらに地表の土壌水分が、水分当量に達すると、もはや霜柱の発生は止み、さらに冷却されると土壌凍結をおこすことになる。水分当量以下の水分をもつ土壌では、板状凍結、粒状凍結をおこすことになる。この場合の水分の移動は土壌断面における温度差と関係があり、寒冷期においては、表層より深層における温度が高いため、下層より上層へ向つて蒸発が行なわれる。土壌凍結をおこした場合の含水量の分布は凍結層が多く、その直下部がとくに少なくなつている。

表 III-1-(9) 霜柱および土壤凍結の生成に伴う土壤水分の変化

測定時	0 1.0	1.0 2.5	2.5 4.0	4.0 5.5	5.5 7.0	7.0 8.5	8.5 10.0	備考
霜柱発生前 (地表温度が0°Cになったとき) 0.00	67.9	103.5	104.0	103.0	106.0	108.2	110.7	最大容水量の状態
霜柱発生後 (土壤凍結の直前) 9.00	58.7	93.4	93.8	96.7	98.2	102.0	100.9	霜柱3~4cm発生
土壤凍結後 (土壤凍結は進行中) 25.00	116.0	104.5	105.3	67.6	73.0	69.8	70.5	4.0cmまで土壤凍結
土壤凍結をおこした後の土壤断面の状態	板状に凍結し凍結土の土壤水分は最大容水量以上に増加している。			霜柱の発生後の土壤水分は圃場容水量を示し、凍結線直下では水分当量を示している。				

- (注) 1 冷却温度は-7.0~-8.0°C
 2 供試土壤は信州ローム黒土(地表のみ赤土)
 3 黒土の水分限界は

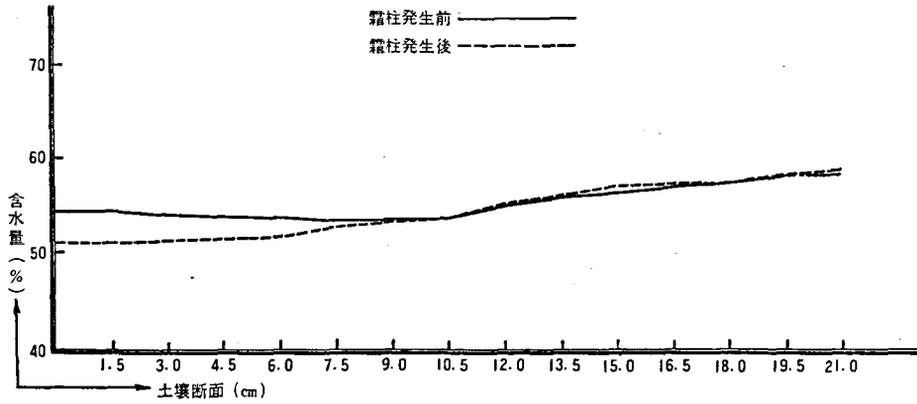
	0	105~110
pF	2.0	93.2
	3.0	71.7

これは霜柱発生の場合と同様である。凍結層と未凍結層の水分分布は、その境目において逆転し下層が少なくなっている³²⁾。霜柱、凍結をおこさない場合の土壤水分の分布状態は表III-1-(10)に示すとおり、地下30cm位までは漸増している。寒冷初期から中期においては、霜柱の発生、融解によつて地下10cm前後における表層土の土壤水分が変化することは前述のとおりであるが、寒冷終期においては、裸地では、地下25~30cm、芝生地、わら伏地のような被覆地では、10~15cmまで土壤凍結をおこし、凍結層は著しく過飽和の水分状態を示しているが、凍結線下の土壤水分は、その直下部を除いて下方からの水分上昇によつて最大容水量を保持している。

霜柱の発生が、理想的な状態で行なわれれば、下層土からの水分の補給がつづく限り、霜柱は限りなく上長するはずであるが、気温が急激に降下して霜柱の発生速度と補給との均衡がくずれれる場合、すなわち地温が-4°C以下になる場合、あるいは熱伝導度が土壤より大きく比熱の小さい石礫の混入が原因して、毛管水まで凍結して水分の上昇が休止すると、霜柱は地表を凍結してしまうことになる。この氷結層は霜柱発生時におけるより非常に多量の土壤水を吸収し、凍結線直下部の土壤水分が水分当量になるまでこの状態を持続する。したがつてこのような場合には、凍結土壤層の間に中間層として純粋な水層の単一結晶を構成し、あるいは不斉凍上によつて空洞を生じ、空洞の中に地表面におけると同様の霜柱氷層を析出する。そのため、この部分の凍結土壤は最大容水量をはるかに越えた水分状態を示し、凍上の原因をなしている。また、寒冷終期において霜柱の発生がほとんどないのは、降雨の少ないことと、下部の凍結層のために土壤水が上昇出来ないため地表面が乾燥する結果である。

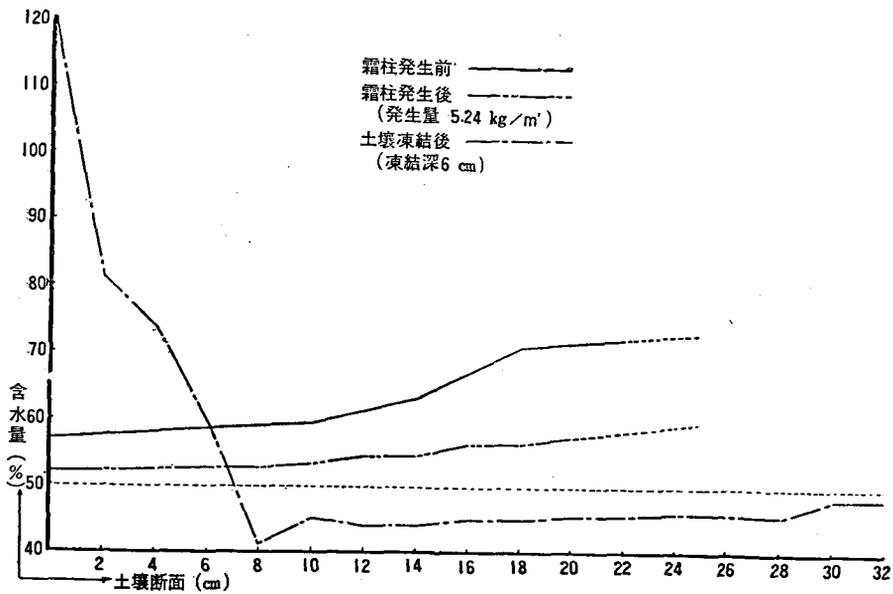
土壤水分の状態と霜柱、土壤凍結の限界を表示すれば表III-1-(11)のとおりである。

図 III-1-(5)



霜柱の発生に伴う土壌水分の変化 (自然条件)

図 III-1-(6)



霜柱および土壌凍結の生成に伴う土壌水分の変化 (低温室内)

写真 III-1-(1) 土粒子と土壤水



× 20

写真 III-1-(2)

土壤水分の差異による発生状況（自然条件）



含水量

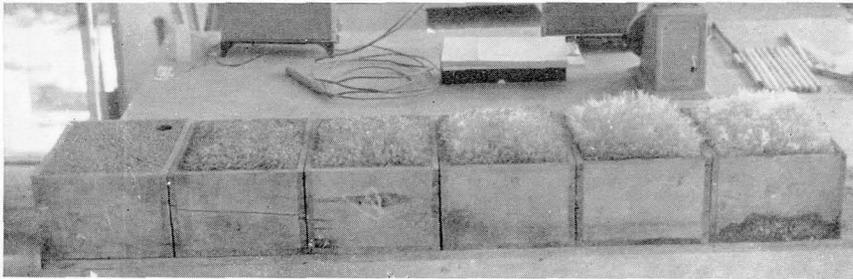
盛土	40%	50	55	60	65
切土	70	75	90	85	105

参考

含水量	盛土	切土
pF		
0	65	105
2.0	50	80
3.0	40	70

写真 III-1-(3)

土壤水分の差異による発生状況（低温室内）



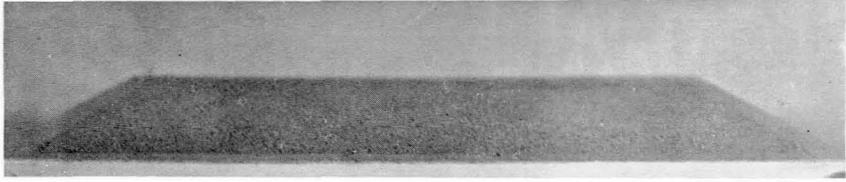
含水量

45%	50	55	60	65	70
-----	----	----	----	----	----

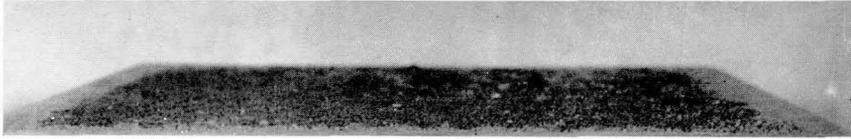
参考

pF	含水量
0	70
2.0	55
3.0	45

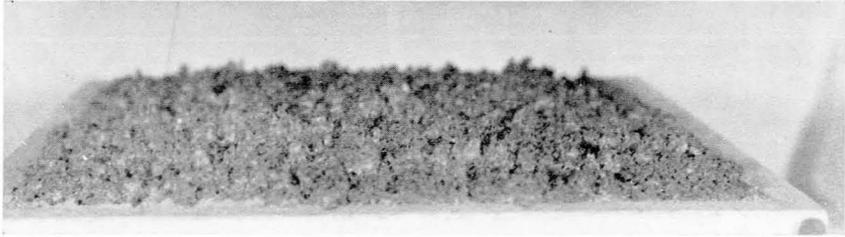
写真 III—1—(4) 霜柱の発生限界



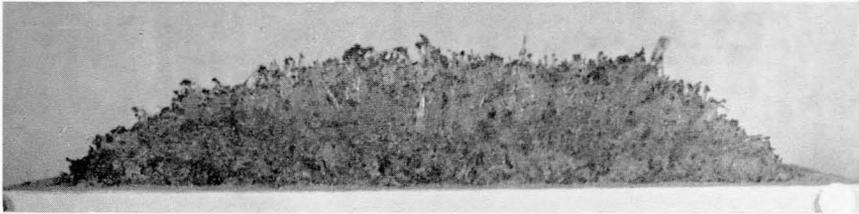
含水量 40%



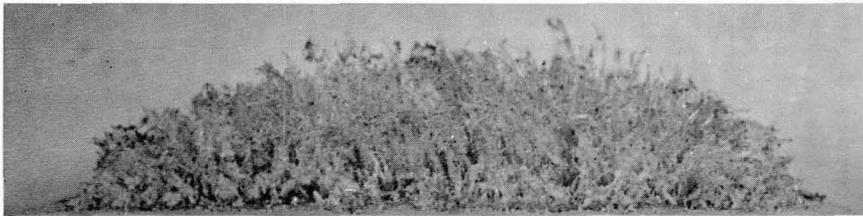
45%



55%



60%

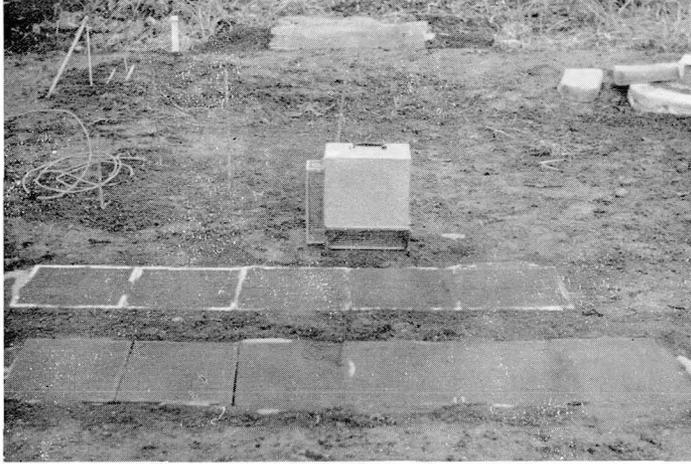


65%

参考

pF	含水量
0	65
2.0	50
3.0	40

写真 III-1-(5) 霜柱の発生状況



設置時の状況 (35・12・6 17時)



霜柱発生開始後2時間 (35・12・6 20時)



霜柱発生終止時の状況(35・12・7 7時)日の出6時50分 現地照射7時15分

含水量	60%	60	60	60	60	
		50	50	55	55	60

表 III-1-(10) 土 壤 水 分 の 日 変 化

裸 地																
土壌深	0 cm	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
測定日																
35																
10. 31	102.5	109.6	110.2	110.2	112.0	112.5	113.4	105.0	95.1	92.6	81.7	60.3	58.7	60.5	60.6	63.9
11. 2	96.3	103.7	102.4	100.5	105.8	106.8	107.6	100.9	87.8	95.0	78.4	59.0	55.7	55.2	59.0	60.4
11. 4	98.0	102.3	99.8	105.9	106.7	104.0	104.5	93.9	88.2	89.9	64.3	55.3	54.9	58.5	59.9	61.7
11. 7	86.0	101.6	98.7	101.8	104.3	101.0	103.0	100.2	90.8	83.2	65.5	57.2	55.8	55.6	58.0	60.9
備考	151.8	184.2	173.9	162.0	156.4	105.3	104.9	104.3	95.0	92.8	81.8	59.3	58.8	60.8	60.0	66.2
土壌層	信州ローム黒土								黒←→赤			信州ローム赤土				

芝 生 地																
土壌深	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
測定日																
35																
10. 31	92.6	100.7	102.4	106.4	105.6	109.2	106.5	108.1	102.2	92.9	78.4	60.1	55.4	56.2	52.5	59.5
11. 2	100.8	99.8	101.4	106.9	107.9	108.7	105.0	101.4	99.8	88.5	71.5	59.8	56.2	58.2	56.6	59.0
11. 4	98.1	101.2	101.2	104.8	106.7	102.6	97.4	99.8	90.8	88.3	79.5	56.7	58.6	61.8	60.1	62.6
11. 7	98.7	98.9	98.7	101.7	104.1	98.4	97.0	102.2	98.8	87.4	79.1	54.2	59.3	57.1	58.1	59.8
備考	170.7	96.3														
土壌層	信州ローム黒土								黒←→赤			信州ローム赤土				

土 壤 水 分	pF		
	0	2.0	3.0
信州ローム(黒土)	113.0	93.2	71.7
〃 (赤土)	74.6	51.1	41.2

- (注) 1 測定は各日とも13.00~14.00時
 2 備考は寒冷終期における凍結土壌とその下の土壌水分を示す(36. 2. 23)

表 III-1-(II) 信州ローム赤土における土壤水分と霜柱発生の関係

土 壤 水 分 (含 水 量)	pF	霜 柱 の 場 合	土 壤 凍 結 の 場 合
最 大 容 水 量 (74.6)	0 ↑ ↓	土壌を含まない霜柱が 発生し発生量は土壤水 分が減少するにしたが つて漸減する。	板状(コンクリート状)に凍結し粒 径組成が不齊で大小に偏在すれば大 間隙を中心にしてアイスレンズが生 成され、石礫の混入、異質土壌との 成層によつて、不齊凍上をおこし、 空洞を生じて、ともに凍上の原因と なる。
圃 場 容 水 量 (51.5)	2.0 ↑ ↓	非常に小さい土粒子間 にはなお少量の遊離水 を残しているため土壌 を混入した霜柱が発生 する。	板状凍結をおこすが凍上現象は少な い。
水 分 当 量 (41.2) (30.0)	3.0 ↑ ↓	もはや霜柱は発生せず 直ちに土壤凍結をおこ す。	板状凍結をおこすが凍上現象はほと んどおこさない。
萎 凋 係 数 (20.0)	4.2 ↑ ↓	粒状またはブロック状 に凍結する。	粒状またはブロック状に凍結する。
風 乾 土 (5.0)	↑ ↓	土壤凍結はほとんどお こさない。	土壤凍結はほとんどおこさない。

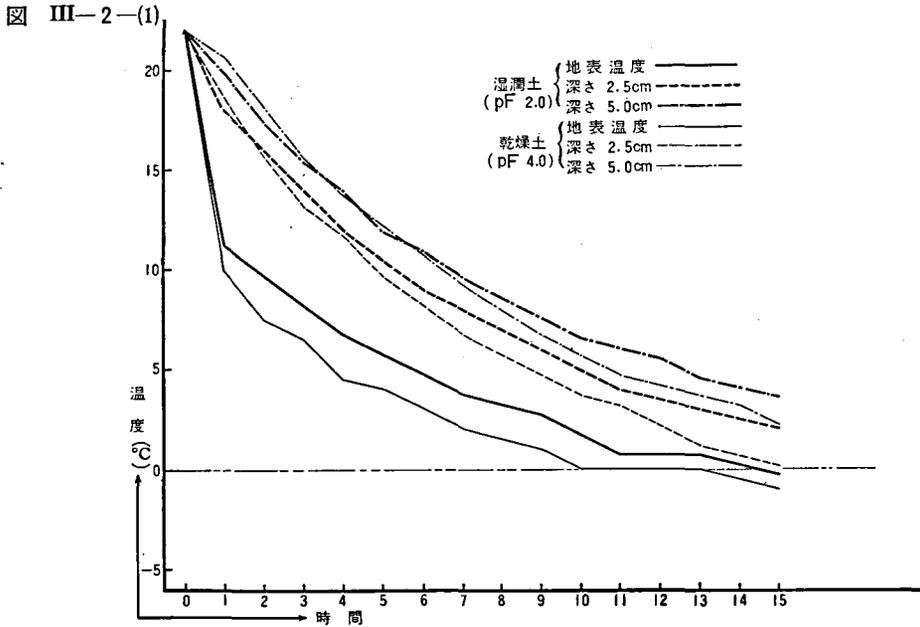
(注) 1 地温が -4°C 以下になると、霜柱は発生せずに土壤凍結をおこす

2 萎凋係数は近似値

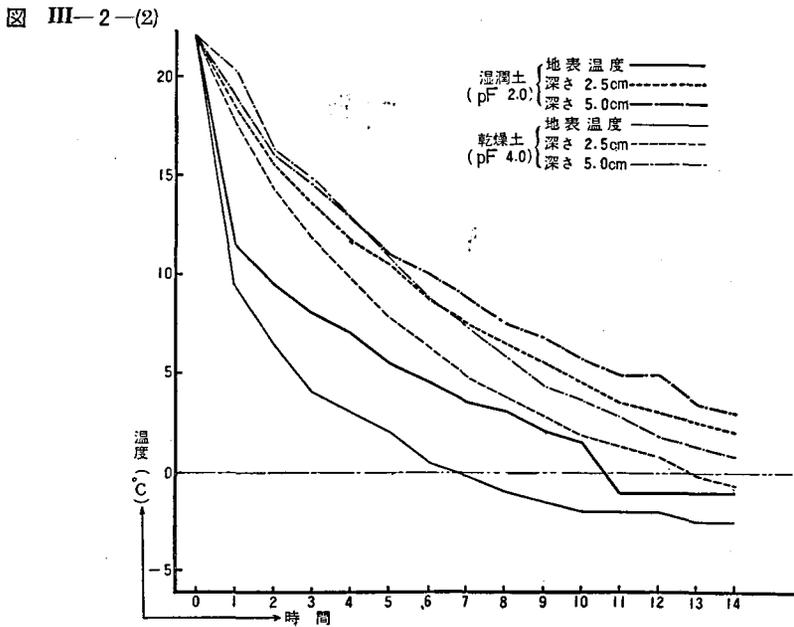
2 冷却温度と霜柱の発生量

温度、土質の条件が一樣であれば、霜柱の発生量は最大容水量の時に最も多く、水分当量の時に最も少ない。水分、土質の条件が一樣であれば、温度の低いほど霜柱の発生量は多く、土壤水分が十分あれば急激に温度が降下して $-15\sim-17^{\circ}\text{C}$ の低温下においても、土壤面を氷結することなく純粋な霜柱のみ発生させることが出来た。この場合低温室へ設置する前の土壤温度は 10°C 前後で、霜柱の発生期間中地表層の温度は冷却初期においては、土壤のもつ熱エネルギーによつて、また冷却の継続中は発生した霜柱層が保温帯となつて、 -4°C で氷結するといわれる毛管水の凍結温度以下にはならなかつたことが観測された。したがつて土壤のもつ熱エネルギーが大きければ急激な温度低下にさいしても土壤凍結をおこすことなく、霜柱だけを発生して土壤面を保護する役割を果たすことが出来る。しかしながら自然条件下においては、地温は気温の低下に比例して降下し、寒冷最盛期においては 0°C を昇降するようになり、気温が 0°C 以下になると同時に霜柱を発生し、土壤水分が水分当量以上であつても霜柱の発生を休止して、土壤凍結をおこし、やがて凍上現象に移行する。寒冷初期の11月中旬から12月上旬までは、霜柱の発生、融解、発生のかくりかえしが行なわれ、それ以降においては土壤凍結、凍上期に入るのは前項における土壤水分による霜柱の発生限界と同様、気温の降下に対する地温、すなわち大地の熱エネルギーとの関係がそれを支配している。熱伝導度が大きく、熱容

量の小さい砂層、砂礫混じり土壌が寒冷初期において、すでに凍結現象をおこすのはこの関係によるものである表Ⅲ-2-(1)。冷却したさいの地温の低下は図Ⅲ-2-(1)、(2)に示すとおりである。



低温下における地温分布の時間変化 (冷却温度 $-3.0\sim-6.0^{\circ}\text{C}$)



低温下における地温分布の時間変化 (冷却温度 $-4.0\sim-7.0^{\circ}\text{C}$)

表 III-2-(1) 土壤の熱伝導率 K ($\text{cal. cm}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$)
($K \times 10^3$)

土 壤 の 種 類	乾 燥 状 態	湿 潤 状 態
細 砂	4.6	3.9
砂	4.7	4.1
壤 土	3.3	2.1
砂 壤 土	4.5	3.2
粘 土	2.7	1.1
硅 藻 土	0.13	
花 崗 岩	8.00	
水	1.32	
空 気	0.057	
木 材	0.1	

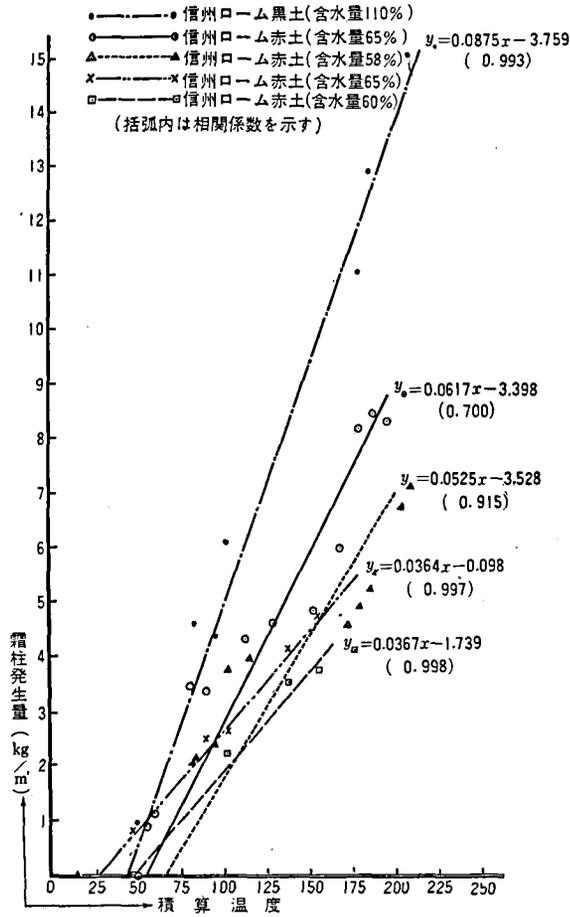
この場合気温に相当する低温室内の温度は、ある範囲内で終始するが、地表面、地中温度の変化は、冷却温度、土壤水分の状態によつて変化する。すなわち冷却温度が一定であれば、地表では乾燥しているほど降下は著しく、水分を多量に含んでいるほど緩慢である。この両者の差は地下深部におよぶにしたがつて巾がせまくなる。また冷却温度が異なる場合には、含水量が多いと地表温度の降下する割合は、温度差に対してそれほど鋭敏ではないが、乾燥している場合は敏感である。これは地中温度の変化についても同じ傾向である。

冷却温度を積算温度で表わし、霜柱の発生量を単位面積当りの重量で示した結果は、表III-2-(2)~(5)のとおりである。両者の関係をグラフに描くと図III-2-(3)のようになり、相関関係の大きい直線関係が得られ、最小自乗法により直線式を求めた。

信州ローム（赤土）の自然土（切土）と盛土についての結果は、実験値のちらばりも非常に少なく相関係数 0.99 を示している。この種の実験では供試体を一様に作成することに難点があり、とくに地表面の状態、土壤水分、設置時における地温を一様にするのが重要である。霜柱発生の限界温度は、盛土の場合は -1.5°C であり、自然土の場合は -2.4°C であつて、自然条件下で観測された結果ともよく一致している。盛土の場合と自然土の場合の相違については、自然土の場合は組織が緊密であるため、孔隙量が少なく容積重が大であつて保持する熱量が大きく、また熱の消失が少ないため地表温度の降下が少なく、霜柱の発生がそれだけおくれ、盛土の場合は土壤含水量が大きいばかりでなく、霜柱となりうる遊離水が多いことに原因していると考えられる。

また供試土壤に信州ローム（赤土）の盛土を使用して、土壤水分を変えて霜柱の発生量を定量したものは、設置時における地温を一様に規正することが出来ないで、ちらば

図 III-2-(3)



冷却温度と霜柱発生量の関係

表 III-2-(2) 冷却温度の差異による霜柱の発生量
(土壌水分65%)

冷却 温度	冷却 時間	積算 温度	地温	信州ローム赤土(盛土)					信州ローム赤土(切土…表層土)				
				1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
-3.0 ~ -5.0	16	47.5	7.0	0.70	0.77	0.79	0.92	0.80	0	0	0	0	0
				(1.00)	(1.00)	(1.00)	(0.08)	(0.04)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
-5.0 ~ -8.0	16	89.5	7.0	2.65	2.48	2.06	2.52	2.46	1.34	1.32	1.47	1.58	1.97
				(0.18)	(0.18)	(0.22)	(0.12)	(0.22)	(0.06)	(0.10)	(0.12)	(0.16)	(0.29)
"	16	102.0	9.0	2.50	2.70	2.49	2.68	2.57	1.99	2.09	2.13	2.21	2.49
				(0.47)	(0.39)	(0.41)	(0.43)	(0.49)	(0.16)	(0.33)	(0.31)	(0.27)	(0.35)
-8.0 ~ -10.0	16	137.5	9.0	3.66	3.77	3.69	4.79	4.31	2.91	3.16	3.48	3.64	4.16
				(0.35)	(0.37)	(0.45)	(0.47)	(0.43)	(0.22)	(0.29)	(0.35)	(0.29)	(0.53)
"	16	155.0	7.0	4.44	4.41	5.11	4.67	4.48	3.67	3.45	3.73	3.47	4.23
				(0.23)	(0.16)	(0.16)	(0.16)	(0.16)	(0.16)	(0.14)	(0.33)	(0.22)	(0.23)
pF	0			60.0~65.0					55.0~60.0				
	2.0			46.7~47.6					49.2~50.2				
	3.0			39.4					43.2				

(注) 括弧内は持ち上げ土量

りの大きい結果となり、相関係数0.70を示した。土壌水分の相違による直線の性質は、さきの実験と一致している。この直線と、信州ローム(黒土)を供試土壌とした場合の直線式は、勾配が急になっているが、これは地中温度、および土質とくに粒径組成に関係するものと推察される。地中温度が高いと遊離水の移動が円滑に行なわれるので勾配は急になり、地中温度が低いと遊離水は粘性を増して移動が緩慢になるので勾配は緩になる。また黒土の場合は赤土に比較して、粒径組成が一樣で毛管上昇性がよいので、霜柱の発生量が多いことに原因している。さらに低温室内の冷却温度を非常に低い温度(-12~-17°C)にして実験したため純粹の霜柱だけでなく、一部凍結層が混入したためのものと考えられる。

この結果から、霜柱だけでなく土壌凍結をも含めて、気温の低下によつて土壌中から析出される水分は、このような関係が成立するものと考えられる。

つぎに冷却温度の変化と霜柱の発生状況について実験した。霜柱は地表面の温度が0°C以下に低下すると、遊離水が凍結して、その体積膨脹によつて上長し、冷却温度と

表 III-2-(3) 冷却温度の差異による霜柱の発生量
(土壌水分58%)

測定日	冷却温度	冷却時間	積算温度	地温	霜柱長	信州ローム赤土(盛土)				
						1	2	3	4	平均
35 5.9	-0.5~ -2.5	16	15.0	9.5	0	0	0	0	0	0
4.21	-4.0~ -7.0	16	82.5	7.5	3.8	1.84 (0.35)	2.35 (0.45)	1.64 (0.39)	2.31 (0.39)	2.03 (0.40)
6.9	-4.0~ -6.0	16	83.8	16.0	4.0	2.12 (0.65)	2.48 (0.43)	1.61 (0.41)		2.07 (0.50)
5.1	-4.0~ -8.0	16	95.0	11.3	3.5	2.22 (0.49)	2.11 (0.51)	2.27 (0.47)	2.74 (0.70)	2.35 (0.54)
5.24	-5.0~ -7.5	16	102.5	13.5	4.0	3.66 (0.94)	4.15 (0.80)	3.21 (0.82)		3.68 (0.85)
4.20	-5.5~ -9.0	16	115.0	7.3	5.0	3.94 (0.49)	3.50 (0.51)	4.19 (0.61)		3.87 (0.54)
6.12	-9.0~ -11.0	16	172.5	14.5	4.7	4.91 (0.80)	4.11 (0.70)	4.37 (0.92)		4.47 (0.81)
4.29	-8.5~ -12.0	16	178.3	12.8	5.5	4.66 (1.15)	5.05 (1.62)	4.73 (1.49)		4.81 (1.42)
4.28	-8.0~ -12.5	16	185.0	13.3	6.0	5.36 (1.37)	4.36 (0.86)	6.05 (1.51)		5.12 (1.25)
5.6	-10.0~ -15.0	16	203.3	14.8	6.3	6.24 (1.06)	7.05 (1.19)	6.49 (1.25)		6.57 (1.17)

- (注) 1 括弧内は持ち上げ土量
2 水分限界は表III-2-(2)に同じ

遊離水の補給のつづく限り伸びるが、地表面の温度が -4°C 以下になると非遊離水が凍結するので、霜柱の発生は休止して、土壤凍結をおこす。写真III-2-(1)に示す霜柱は、信州ローム(黒土)に発生したもので、この状態を示している。低温室内の温度変化は -6.0°C ~ -9.5°C の範囲で変化しており、 -6.0°C の付近では土粒子を含まない霜柱が発生し、 -9.5°C の付近では土粒子を混じて、しま状の霜柱を発生している⁷⁵⁾。この場合発生中期の部分は、発生初期および終期の部分に比較して、土粒子の混入が少ないのは、霜柱の発生面がすでに発生している霜柱層のために保温され、冷却の程度および速度がおくれているためであり、また終期には土壌水分の不足と、地表面がついに -4°C 以下に低下したために、土壤凍結をおこす状態になつたものと考えられる。低温室内の温度が -6.0°C ~ -9.5°C の状態にあつて、このような霜柱が発生するのは地熱のため霜柱の発生面である地表面温度は -4°C の付近を上下していたものと推察される。

表 III-2-(4) 冷却温度の差異による霜柱の発生量
(土壤水分65%)

測定日	冷却温度	冷却時間	積算温度	地温	霜柱長	信州ローム赤土(盛土)					
						1	2	3	4	5	平均
35 4.15	-1.0~ -4.0	16	50.0	14.0	0	0	0	0	0	0	0
4.16	"	16	54.5	0	2.0	0.68 (0.18)	0.87 (0.22)	1.00 (0.27)	1.01 (0.14)	0.76 (0.20)	0.86 (0.20)
3.30	-3.0~ -6.0	16	59.3	11.0	3.0	1.03 (0.14)	1.08 (0.12)	1.01 (0.14)	1.09 (0.08)	1.27 (0.14)	1.10 (0.12)
4.11	-4.0~ -6.0	16	80.0	8.5	1.5	3.23 (0.45)	3.80 (0.61)	3.60 (0.63)	3.14 (0.41)	3.09 (0.39)	3.37 (0.50)
3.31	-5.5~ -7.5	16	88.8	11.0	4.0	3.03 (0.27)	3.54 (0.43)	3.57 (0.41)	3.22 (0.25)	3.20 (0.29)	3.31 (0.33)
4. 8	-6.0~ -8.5	16	112.0	10.5	4.0	3.50 (0.35)	4.67 (0.51)	4.67 (0.74)	4.30 (0.39)	3.78 (0.37)	4.19 (0.47)
4.18	-6.5~ -9.5	16	127.5	9.5	4.5	4.67 (0.55)	4.99 (0.57)	4.84 (0.57)	4.21 (0.41)	3.80 (0.41)	4.50 (0.50)
4. 1	-9.0~ -11.5	16	150.1	11.5	7.0	4.94 (0.53)	4.78 (0.49)	4.61 (0.47)	4.75 (0.43)	4.56 (0.39)	4.73 (0.46)
4.17	-9.0~ -12.0	16	167.5	12.0	6.5	5.39 (0.53)	5.51 (0.94)	6.33 (0.61)	6.37 (0.90)	5.56 (0.76)	5.83 (0.75)
4. 7	-11.0~ -13.0	16	178.3	10.5	7.5	7.21 (0.78)	8.18 (0.92)	8.35 (1.06)	7.80 (0.98)	8.32 (1.00)	7.97 (0.95)
4. 2	-11.0~ -13.0	16	187.0	8.5	7.5	7.71 (0.82)	9.30 (1.31)	8.18 (1.11)	8.38 (1.11)	7.84 (1.21)	8.28 (1.11)
4.10	-12.0~ -14.0	16	195.5	12.5	7.0	7.96 (0.70)	8.61 (0.76)	8.13 (0.70)	8.20 (0.68)	7.63 (0.80)	8.11 (0.73)

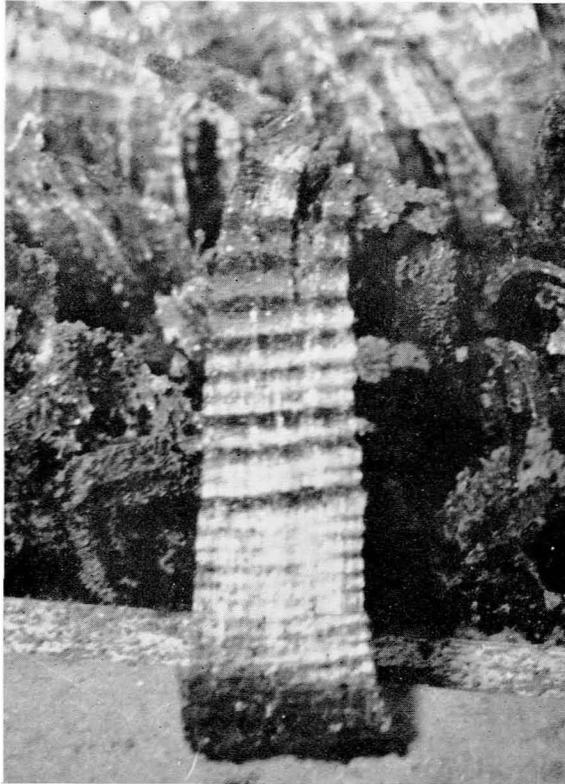
- (注) 1 括弧内は持ち上げ土量
2 水分限界は表III-2-(2)に同じ

表 III-2-(5) 冷却温度の差異による霜柱の発生量
(土壌水分110%)

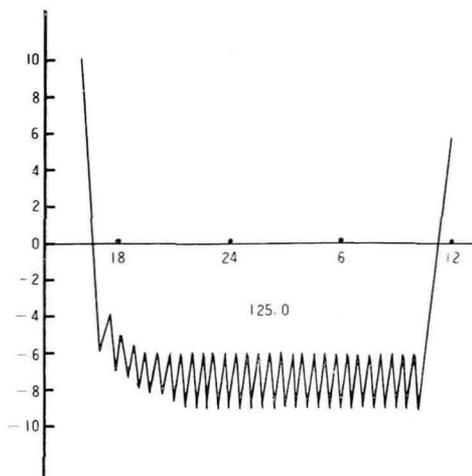
測定日	冷却温度	冷却時間	積算温度	地温	霜柱長	信州ローム黒土(盛土)					
						1	2	3	4	5	平均
35 4.30	-1.5~ -4.0	16	45.8	12.5	0	0	0	0	0	0	0
5.3	-1.5~ -5.0	16	49.0	13.0	0.5	1.02 (0.25)	0.87 (0.22)	—	—	—	0.97 (0.24)
4.21	-4.5~ -7.0	16	82.5	8.0	0.8	4.41 (0.65)	4.39 (0.57)	4.20 (0.63)	4.40 (0.59)	5.22 (0.70)	4.52 (0.63)
5.1	-4.0~ -8.0	16	95.0	8.0	0.8	4.03 (0.74)	4.33 (0.92)	4.21 (0.80)	4.63 (0.68)	—	4.30 (0.79)
4.24	-5.0~ -7.5	16	100.8	9.5	1.0	5.81 (0.90)	6.13 (0.92)	6.02 (0.98)	6.08 (0.63)	5.81 (0.70)	5.96 (0.83)
4.29	-8.5~ -12.0	16	178.3	13.0	2.0	10.95 (1.29)	10.62 (1.76)	10.37 (1.23)	12.52 (1.58)	9.61 (1.43)	10.81 (1.46)
4.28	-8.0~ -12.0	16	185.0	13.0	2.0	12.89 (2.48)	12.79 (2.17)	11.72 (2.99)	13.18 (2.56)	12.52 (2.91)	12.62 (2.62)
4.26	-11.0~ -14.0	16	192.5	10.0	2.0	12.77 (1.70)	12.36 (1.52)	13.18 (2.03)	13.16 (2.01)	12.16 (1.52)	12.73 (1.76)
4.27	-12.0~ -15.0	16	207.5	12.0	2.3	15.68 (1.96)	14.37 (1.56)	14.58 (2.62)	13.20 (3.47)	15.66 (3.75)	14.70 (2.67)
					0	113.0					
pF					2.0	93.2					
					3.0	71.7					

(注) 括弧内は持ち上げ土量

写真 III-2-1(1) 温度変化と霜柱の発生状況



信州ローム(黒土)に発生した土粒子混じり霜柱 ×1.5



低温室内の温度時間変化

3 土質と霜柱の発生量

霜柱が発生するか、しないかは極く地表面の状態できまる⁷⁶⁾。さらに地表面の状態は土粒子の組成および材質に由来する遊離水の純度、保水性、毛管上昇性、熱伝導度等に影響される。土粒子の大きさについては、いかなる微粒子からも霜柱は発生することが認められ⁷⁶⁾、微粒子の存在は絶対的なものではあるが、これに対してさらにその粒子の水に対する特殊な性質、すなわち pF 0 ~ 2.0, pF 0 ~ 3.0 の間に保持される土壤水の質と量とその保水性、および土壤水の下方から表面へ上昇する毛管性の大小がとくに関係し、また材質の熱伝導度が影響する。

材質の異なる4種類の土壤(信州ローム、花崗岩風化土、緑泥片岩風化土、頁岩風化土)について、最も霜柱の発生しやすい状態で実験を行なつた。なお4種類6通りの試料は、試料箱の表面に厚さ 0.5cm をつめたものである。試料箱の下層土は信州ローム(赤土)であり、十分吸水させた後、低温室に設置した。各土壤の性質は表Ⅲ-3-1(1)、(2)、図Ⅲ-3-1(1)~(3)に示される。霜柱発生量は表Ⅲ-3-1(3)に示すとおりであり、発生状況は写真Ⅲ-3-1(2)~(4)に示される。

表 Ⅲ-3-1(1) 供試土壤の性質

土 質	信州ローム		洪積花崗岩風化土層		破碎帯	第三紀層	
	赤 土	黒 土	表 土	下層土	緑泥片岩風化土	頁 岩風化土	
毛細管上昇速度	43.0	35.8	39.0	35.0	8.5	21.0	
pF 値	0	74.6	113.0	52.6	20.5	22.2	39.8
	2.0	51.1	93.2	31.7	11.0	14.0	30.2
	3.0	41.2	71.7	27.7	6.5	10.6	25.3
pF (0~3.0) の差	33.4	41.3	24.9	14.0	11.6	14.5	

(注) 毛細管上昇速度はガラス管(1.0cm)中の風乾細土(10メッシュ)を上昇し10時間後に到達する高さを cm にて示す

表 Ⅲ-3-1(2) 供試土壤の粒径組成(国際法)

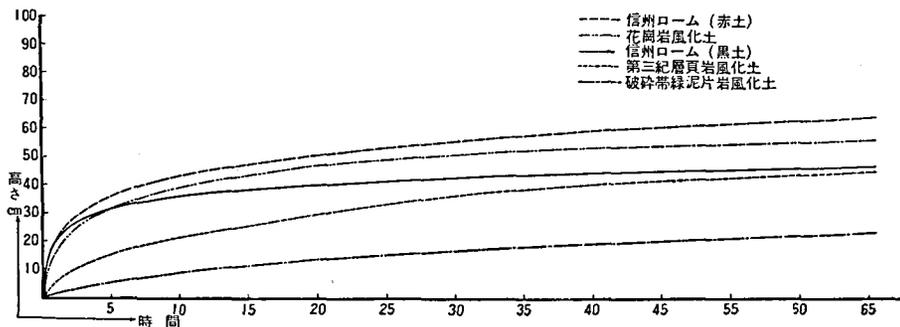
土 壤	粒 径				腐 植	土 性
	粗 砂 2.00~0.20	細 砂 0.20~0.02	微 砂 0.02~0.002	粘 土 0.002以下		
信州ローム赤土	8.55	22.3	42.8	26.3	0.1	軽 植 土
信州ローム黒土	5.6	16.9	32.8	29.0	15.7	〃
花崗岩風化土 (表土)	25.1	16.7	17.7	37.6	2.9	〃
花崗岩風化土 (下層土)	65.7	27.3	5.5	2.7	0	壤質砂土
緑泥片岩風化土 (破碎帯)	56.3	21.2	11.0	11.4	0.1	砂質壤土
頁岩風化土 (第三紀層)	5.1	34.0	30.6	28.1	2.2	軽 植 土

表 III-3-(3) 土質条件による霜柱の発生量

種別	試料 信州ローム土 赤	信州ローム土 黒	花崗岩風化土 (表土)	花崗岩風化土 (下層土)	緑泥片岩風化土 (破砕帯)	頁岩風化土 (第三紀層)	
霜柱量	6.373	5.474	4.574	凍結	凍結	5.767	
持ち上げ土量	2.033	1.525	1.486	凍上	凍上	3.324	
霜柱長 cm	3.0	1.5	2.0	発生しない	発生しない	1.5	
凍上量 cm	0	0.4	0.6	1.7	2.6	1.2	
霜柱、凍上の形態	霜柱で土壌面は凍結しない	霜柱に土砂を混入	霜柱に土砂を混入	板状に凍結し、アイスレンズの生成は認められない	板状に凍結し、不斉凍上の空洞を生じ霜柱氷層を生成	氷層	
最大含水量%	62.2	68.6	52.5	31.5	26.0	45.0	
孔隙量%	66.9	73.8	59.6	37.6	37.1	50.2	
容気量	-4.7	-5.2	7.1	6.1	11.1	5.2	
pF	0	74.6	113.0	52.6	20.5	39.8	
	2.0	51.1	93.2	31.7	11.0	30.2	
	3.0	41.2	71.7	27.7	6.5	25.3	
pF差 (0~3.0)	33.4	41.3	24.9	14.0	11.6	14.5	
比熱	乾	0.315	0.265	0.176	0.140	0.238	0.197
	湿	0.847	1.152	0.810	0.352	0.466	0.548

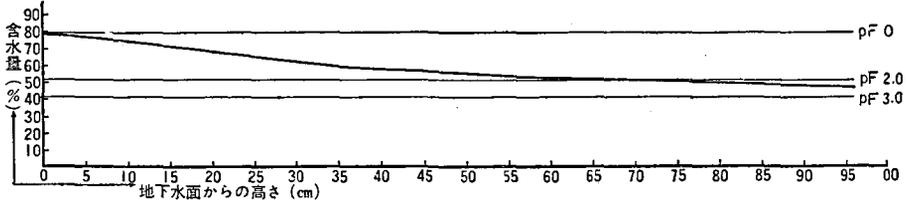
- (注) 1 最大含水量は容積含水量, 孔隙量は最大孔隙量を示す
 2 冷却温度は $-4.5\sim-7.0^{\circ}\text{C}$, 16時間, 積算温度は 100
 3 各試料とも下層土は信州ローム(赤土)で, 各種土壌は, それぞれ 0.5cm の表層土とする

図 III-3-(1)



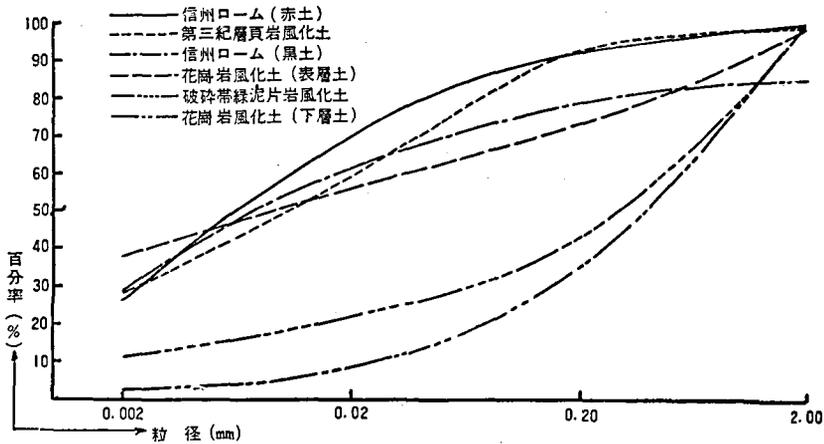
毛細管上昇速度曲線
 10メッシュ(2mm目ふるい)通過分の風乾細土

図 III-3-(2)



地下水面からの各断面における土壌水分 信州ローム (赤土)

図 III-3-(3)



粒径加積曲線 (細土)

信州ローム赤土および黒土に最もよく発生している。これは pF 0~3.0 の差が最も大きく、土壌水が毛細管間隙を通して非常に円滑、急速に上昇する特性が重大な役割を果しているものと推察される。また粒径加積曲線を見ても霜柱の発生するものと、しないものとの差が判然としている。この信州ロームと類似の土質を示す花崗岩風化土 (表層) および第三紀層の粘土では霜柱が発生し、寒冷初期においては、土壌凍結をおこすことなく、したがって凍上量も少ない。また緑泥片岩風化土では、とくに土壌中に含まれる水分が少ないこと、毛管上昇性が不良であること、さらには粒子が非常に細かく、土粒子間隙中の土壌水が不純化していると考えられる破砕帯粘土の存在等のために、霜柱は発生しないで、冷却されると直ちに土壌凍結をおこす。また緑泥片岩および花崗岩風化土の土壌化が進んでいないものについて見られるように、石質の小粒子を多量に含有している土壌では、土壌水の不足することのほかに、熱伝導度が大きく、比熱が小さいために、霜柱が発生することなく、土壌凍結をおこしている写真 III-3-(4)。これは熱伝導度がとくに小さい珪藻土からは、その粒子組成が非常に微細 (300 メッシュ) で一様になつている不利な条件にもかかわらず、よく霜柱が発生しているのと好対称をな

している。霜柱は粒径組成上の土性区分からは、国際土壌学会法による軽埴土⁸²⁾によく発生するということが出来る。

つぎに霜柱が最も発生しやすい信州ローム(赤土)の粒径を変えて、その発生量を定量した結果は表Ⅲ-3-4(4)に示すとおりである。粒径の細かいほどすなわち微粒子であるほど、短い細い霜柱が層をなして密生し、発生量が多い。粒径が大きくなるにしたがつて、長い細い霜柱が群をなして疎生し発生量は少なくなっている。また、ふるい分ける前のもの(全土)をそのまま地表を構成する場合は形態、量ともに、粒径の最も細かいものの状態に近い。この場合は微粒子が密に一樣に配列されているために、土壌水の存在と毛管性による上昇が一樣に行なわれるため、短かく細い霜柱が層をなして密生する。粒子が大きくなると、粒子間隙はあらく、不均一に配列されているために、粒子間隙は大小区々となり、土壌水の存在も、また毛管上昇性も一樣性を欠くために、最も発生しやすい部分に集中して発生するので、細い長い霜柱が群をなしている。そのために太い長い霜柱が疎に発生しているように見える。また連続的な粒径組成の地表面は粗粒子の間を微粒子が適当にみたしているために、微粒子だけの地表面から発生するものに近く、一樣な霜柱が発生している。この点から霜柱は地表およびその付近における土粒子間隙の軌跡であるように推察される写真Ⅲ-3-4(5)。

表 Ⅲ-3-4) 土質条件による霜柱の発生量
(信州ローム赤土)

冷却 温度	積算 温度	地温	地表面の処理区分					備 考
			200	20	10	全	切土	
-5.0~ -7.5	93.8	8.0	5.0 3.75 (0.31)	4.5 0.87 (0.33)	7.0 2.19 (0.90)	7.0 1.83 (0.37)	8.0 1.27 (0.82)	最大容水量
-5.0~ -7.5	96.3	3.0	3.5 4.00 (0.33)	4.0 1.94 (0.51)	5.0 1.86 (0.70)	4.0 2.87 (0.43)	4.0 3.37 (0.53)	〃
-5.0~ -7.5	96.8	8.0	6.0 4.31 (0.29)	5.5 1.97 (0.27)	7.0 1.80 (0.47)	7.0 2.74 (0.23)	4.0 4.03 (0.70)	〃
-5.0~ -9.0	100.0	5.0	1.5 4.20 (0.43)	4.5 2.22 (0.37)	5.5 2.31 (0.59)			〃
-5.0~ -7.5	100.0	6.0	4.0 4.95 (0.31)	4.0 2.66 (0.51)	6.5 1.69 (0.76)	4.5 3.05 (0.27)	4.0 3.52 (0.39)	〃

(注) 1 200:200メッシュ(0.075mm)通過粒子

20:20〃(0.85)〃

10:10〃(2.00)〃

全:10~200〃

切土:自然土

2 第1行:霜柱の長さcm, 第2行:霜柱量, 第3行:持ち上げ土量

表 III-3-(5) 土質条件による霜柱の発生量

測定日		33.11-29~30			
処 理	区 分	霜 柱 量	持ち上げ 土 量	霜 柱 量	持ち上げ 土 量
	斜 面				
対 照 区	上	0.89	1.33	1.72	2.39
	中	1.61	1.06	1.39	2.00
	下	1.11	1.33	1.83	2.61
展 圧 区	上	1.56	0.44	2.17	0.83
	中	2.33	0.67	2.22	0.78
	下	2.11	1.00	—	1.50

(注) 傾斜角20°, 斜面長210cm

表 III-3-(6) 土質条件と霜柱, 凍上の関係

発生状態		霜	柱	凍	上
土質因子	微 粒 子均一	遊離水が均一に分布し、毛管上昇は一樣に行なわれるが速度は遅いので細い短い霜柱が揃って密生する。		板状(コンクリート状)に凍結しアイスレンズを生じやすいので凍上量は多い。	
	ローム	粗粒子に基因する霜柱が先ず発生し引き続き微粒子による霜柱が発生するので種々な霜柱が全面に発生する。		板状に凍結する。場合によつてはアイスレンズ, 空洞を生じ霜柱氷層を生ずるので凍上量は多い。	
	細粗粒 子均一	粒子間隙の大きい部分に存在する遊離水がまず結氷し, 周りの水分を集めて霜柱となるので太い長い霜柱が群状に発生。		板状ないしは粒状凍結をおこし, とくに空洞を生じやすい。空隙が多いので凍上量は少ない。	
遊離水量	多	霜柱を多く発生する。		アイスレンズの生成が進むので凍上量は非常に多い。	
	少	霜柱の発生後遊離水が不足するので土壤凍結をおこす。		凍上量は少なくなる。	
遊離水質	純	氷点が0°Cに近いほど霜柱の発生に適している。		地表部分に不純物が存在すると霜柱を発生することなく直ちに土壤凍結をおこすが下層土がこの不純物を含まぬ場合は凍結土層の下に霜柱氷層を発生するので凍上量は多い。	
	不 純	不純物が溶解していると氷点が降下し, 遊離水と非遊離水の分離が出来なく凍結する。			
毛 管 上 昇 性	良 好	霜柱の発生に伴つて土壤水分が消費されるので補給のつづく限り霜柱は発生する。		下方からの補給が十分であるため凍上量は多い。	
	不 良	下方からの水分補給が遅れると霜柱の発生は休止して土壤凍結をおこす。		凍上量は少ない。	
土 性	埴質土	熱伝導, 水分関係が良好で霜柱は良く発生する。		孔隙量が少ないので凍上量は多い。	
	砂質土	熱伝導度が大きく水分関係が不良で霜柱は発生せず土壤凍結をおこす。		孔隙量が大きいので凍上量は少ない。	
粒 子 構 造	単 粒 構 造	短い霜柱が密生する。		板状に凍結する。土壤水が十分ある場合は, 粒子間隙が小さく, 一樣であるため水平アイスレンズが発達し, 凍上量は多い。	
	団 粒 構 造	長い霜柱がまばらに発生する。		粒状に凍結する。土壤水が十分ある場合は塊状に凍結する。粒子間隙が大きいので部分的なアイスレンズ, 霜柱氷層が発達する。	
圧 結 度 (孔隙量)	密	粒子間隙が一樣になるので遊離水の分布も均一になる。短い霜柱が密生する。		孔隙量が小さくなるので凍上量は多い。この場合持ち上げる力は大きい。	
	疎	粒子間隙はまばらに存在し霜柱の発生に遅速を生じ, 不連続的な霜柱が出来る。		孔隙量が大きいので凍上現象は少なくまた持ち上げる力も弱い。	
新 鮮 度	新	霜柱の発生を妨げるものがないので純粋なきれいな霜柱を発生するが段々に浮土砂をのせる様になる。			
	古	浮土砂を頭にのせて発生する。			
熱 伝 導 度	大	霜柱を発生することなく土壤凍結をおこす。		最も早く凍結するので凍上量は多い。	
	小	霜柱を多く発生する。		凍上量ははるかに少ない。	

また土壌は同一の条件で展圧される場合、その密度は含水量の増加につれて増大し、最適含水量で最大値を示し、その後は水分の増加につれて減少するものである。また同一の含水量の場合、展圧のために加える力が大きければ大きいほど、その密度は大きくなる。霜柱の発生は、この土壌の展圧される程度によつて、発生状態および発生量を異にする。展圧されたところからは細い短い霜柱が密生し、その発生量が多いが、よくしまつていないところからは、太い長い霜柱がまばらに発生し、その量は少ない。表Ⅲ—3—(5)に示す⁷⁰⁾。地表面の凹凸も影響する。

地表面の土質の微妙な差が霜柱の発生に非常に大きな関係をもつものである。とくに熱的關係が大きいものと推察される。これ等の関係をまとめると表Ⅲ—3—(6)のようになる。

写真 Ⅲ—3—(1) 毛管上昇速度の測定装置

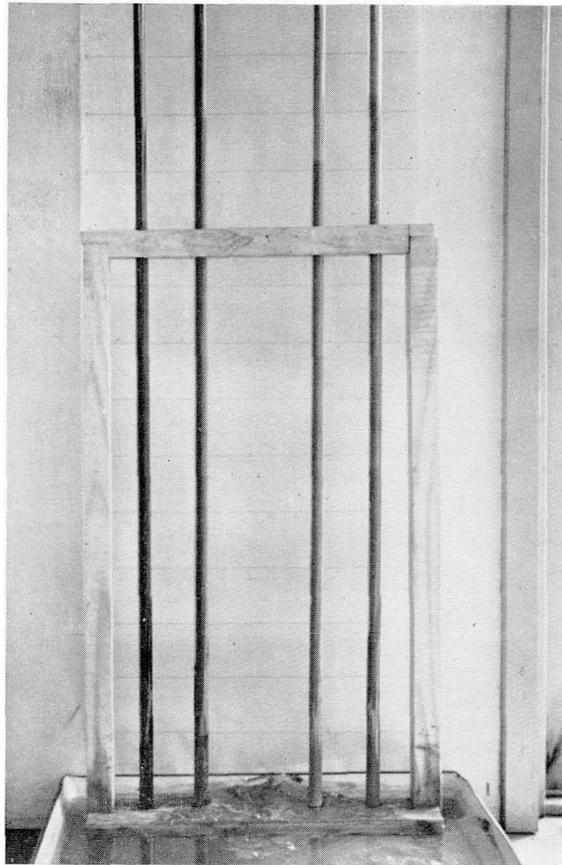
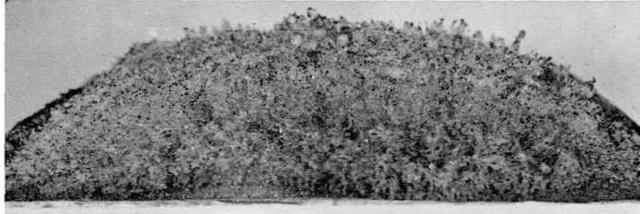
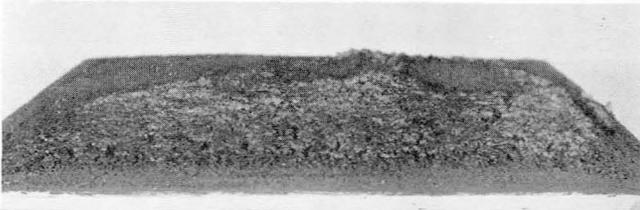


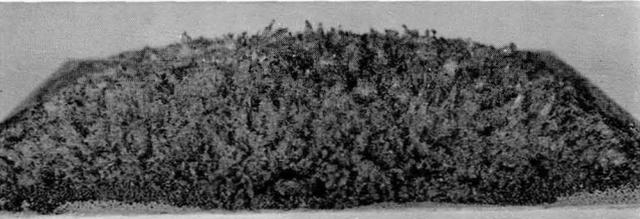
写真 III-3-(2) 各種土壤の霜柱発生状況



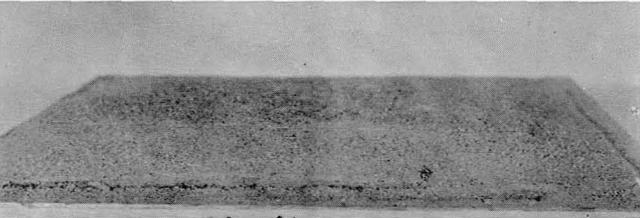
信州ローム
(赤土)



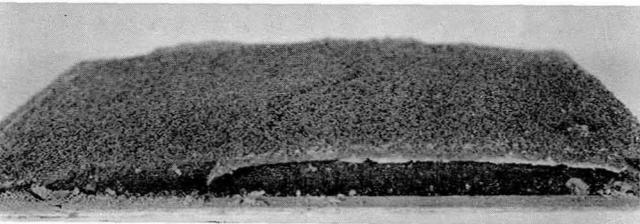
信州ローム
(黒土)



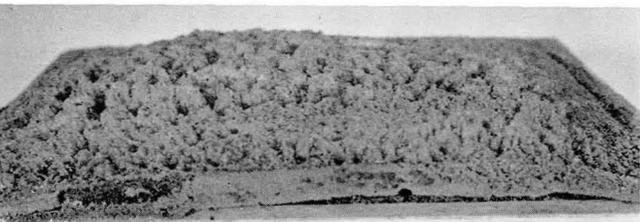
花崗岩風化土
(洪積層表土)



花崗岩風化土
(洪積層下層土)



緑泥片岩風化土

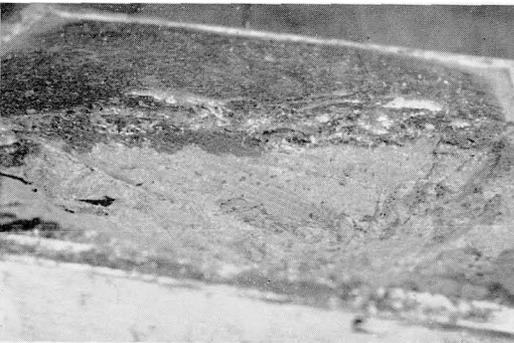


頁岩風化土

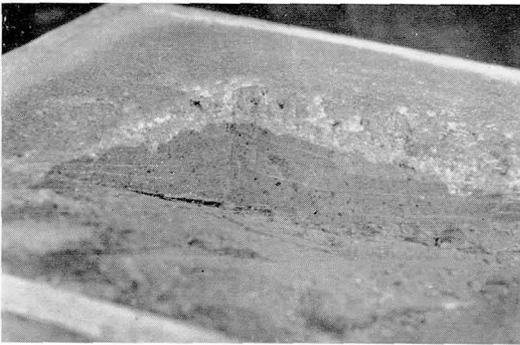
写真 III-3-(3) 各種土壤の霜柱，凍結の断面 表土(0.5cm)は200メッシュの微細土



信州ローム(赤土)



信州ローム(黒土)



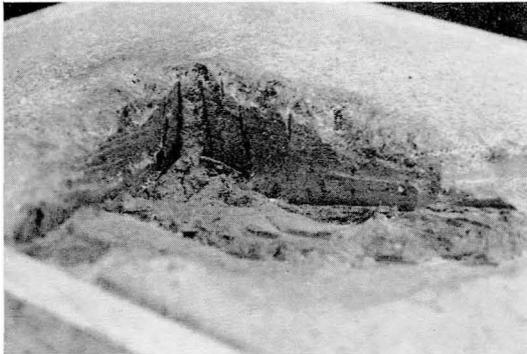
花崗岩風化土(表土)



花崗岩風化土(下層土)



緑泥片岩風化土



頁岩風化土



珪藻土

写真 III-3-(4) 凍結の断面

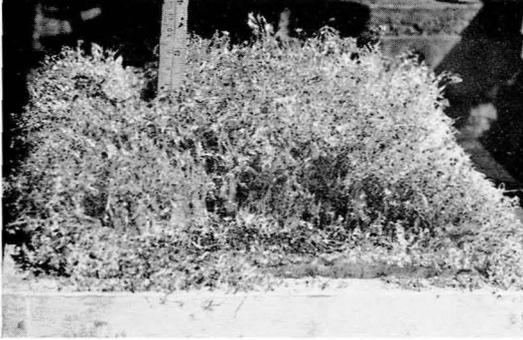


表層（緑泥片岩）と下層（信州ローム赤土）の間に
出来た空洞とその空洞に発生した霜柱氷層

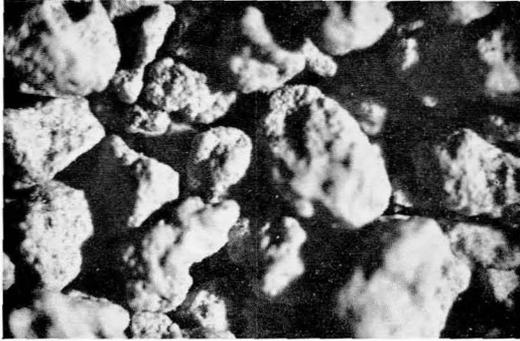


表層（花崗岩風化土）と下層（信州ローム赤土）
の凍結層

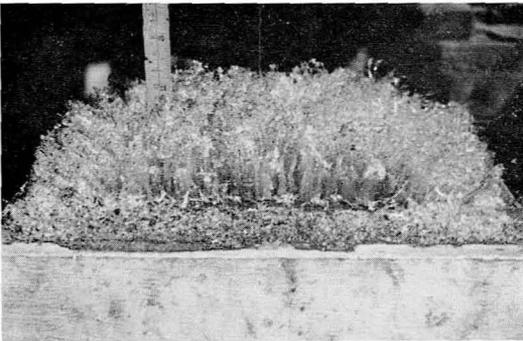
写真 III-3-(5) 粒径の差異による霜柱の発生状況



霜柱の太さ
2.0~0.4mm



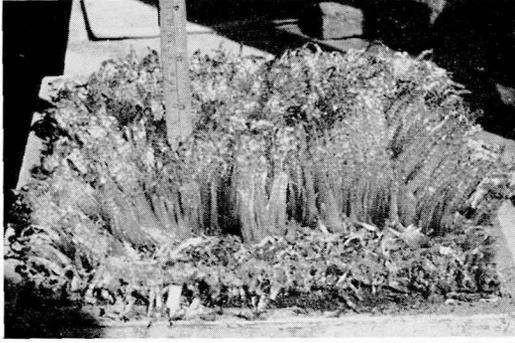
土粒子の大きさ
10メッシュ (2.0~0.85mm)



霜柱の太さ
1.5~0.2mm



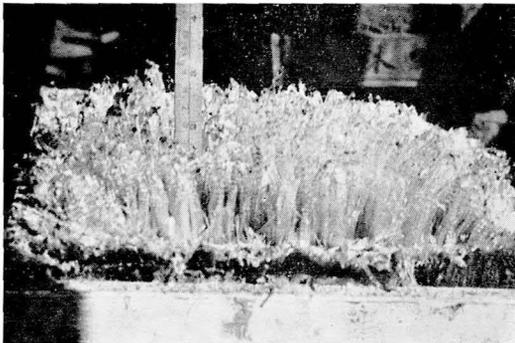
土粒子の大きさ
20メッシュ (0.85~0.4mm)



霜柱の太さ
0.15~0.03mm



土粒子の大きさ
200メッシュ (0.075mm以下)



霜柱の太さ
1.5~0.15mmで0.4~0.3mm
のものがもつとも多い。



土粒子の大きさ
全土 (2.0mm以下)

4 斜面の部位と霜柱の発生量

霜柱および凍上による斜面の侵食量は、北斜面が最も少なく、東、西、南面には差が認められないとされている⁽⁶³⁾⁷⁰⁾。これは観測期間が12月から2月までの途中の経過であり、しかも斜面が凍結する場合、北面が最も早いので、途中の経過では侵食量が少なくなっていることと、季節風の卓越する関係から北斜面が雪の吹きだまりとなり、凍上が保護されることのためであろうと考えられる。

本実験はまず霜柱が発生し、融解し、また発生する寒冷初期の期間中において、一発生期毎の発生量および持ち上げた土量を定量した。その結果は、表Ⅲ-4-(1)のとおりである。これによると北面が最も多く、一様性の検定においてその差は非常に有意であった。他の面についても東、西、南面の順に少なくなっている。この原因は明らかに土壌中の水分量の多少と、非常に局所的な気温低下の差によるものと考えられる。表Ⅲ-4-(2)、(4)、図Ⅲ-4-(1)は、霜柱発生直前における方位別の土壌含水量の測定結果であるが、北斜面の土壌水分は常に最も多く、南斜面は最も少ない。東、西両面については明確な差異は認められないが、東面にやや多い。とくに降雨後の土壌水分は東面が西面に比して多いことが認められる。

表 Ⅲ-4-(1) 斜面の方位別霜柱の発生量

測定日	最低気温	東	西	南	北
34 11.28	-3.8	1.97 (0.97) 1.44	1.44 (1.15) 1.73	1.09 (2.11) 3.17	1.71 (2.40) 3.60
30	-5.3	1.32 (2.46) 3.69	1.82 (3.12) 4.68	1.33 (1.78) 2.67	1.48 (3.35) 5.03
12. 1	-6.2	1.82 (1.64) 2.48	2.00 (9.14) 2.10	1.47 (1.18) 1.77	2.43 (2.69) 4.04
2	-5.2	2.02 (1.44) 2.16	1.53 (1.15) 1.72	1.42 (0.93) 1.40	2.80 (0.99) 1.49
6	-5.0	2.89 (1.20) 1.80	3.21 (0.60) 0.90	3.54 (0.89) 1.34	3.95 (0.92) 1.38
11	-4.0	0.80 (2.90) 4.35	0.76 (2.48) 3.72	0.13 (3.01) 4.55	1.41 (3.94) 5.91
12	-7.0	2.43 (1.10) 1.65	1.91 (0.46) 0.69	1.70 (1.02) 1.53	2.58 (1.69) 2.54
18	-11.0	2.20 (1.68) 2.52	1.66 (2.46) 3.69	1.55 (1.46) 2.19	2.16 (4.90) 7.35
19	-8.5	2.45 (2.13) 3.20	2.30 (2.40) 3.60	2.63 (1.95) 2.93	4.48 (5.27) 7.90

(注) 1 第1行：霜柱量，第2行：持ち上げ土量，第3行：生体土量
2 傾斜角 30°，斜面長 100cm，斜面巾 500cm

表 III-4-(2) 斜面の土壤水分

斜面 測定日	東	西	南	北
34 11.29	60.5	46.4	54.8	53.9
30	53.1	55.1	54.2	54.6
1	51.6	—	51.8	52.8
2	54.4	46.7	48.2	58.2
3	66.0	60.5	62.8	68.5
5	62.8	61.5	66.7	68.1
6	60.8	51.6	62.8	65.4
9	51.5	59.8	56.4	68.1
10	54.6	50.0	53.2	58.3
11	51.4	48.2	51.8	57.7
12	53.7	49.4	55.0	60.9

(注) 1 土壤水分は 16.00 時測定
2 傾斜角 30°, 斜面長 100cm, 斜面巾 500cm

表 III-4-(3) 斜面の方位別霜柱の消失時刻

測定日	東	西	南	北	備考
35.12.2	10.00	11.00	9.40	16.00	東面に障害物存在
12.3	9.40~10.00	10.40	10.00	消失しきらないものがわずかに残存	快晴
12.7	9.40~9.50	11.30	9.50~10.00	5%残存	“(平坦地 11.30)”
12.8	9.30	10.40	9.30	10%残存	“
12.9	9.40	10.50	9.40	16.00	“
12.20	10.00	12.30	9.40	80%残存	“(平坦地 12.00)”

北面においては前日発生した霜柱の融解が他の斜面に比較して、はるかにおそく、南面は日の出と共に融解ははじめ、晴天の場合には午前 9 時頃には融解を完了する。東面がひきつづき解け、西面の融解はさらにおくれる。北面では日光の直射を全くうけないので、気温の上昇によつて融解するだけで、日没直前までに融解しきるか、あるいは僅

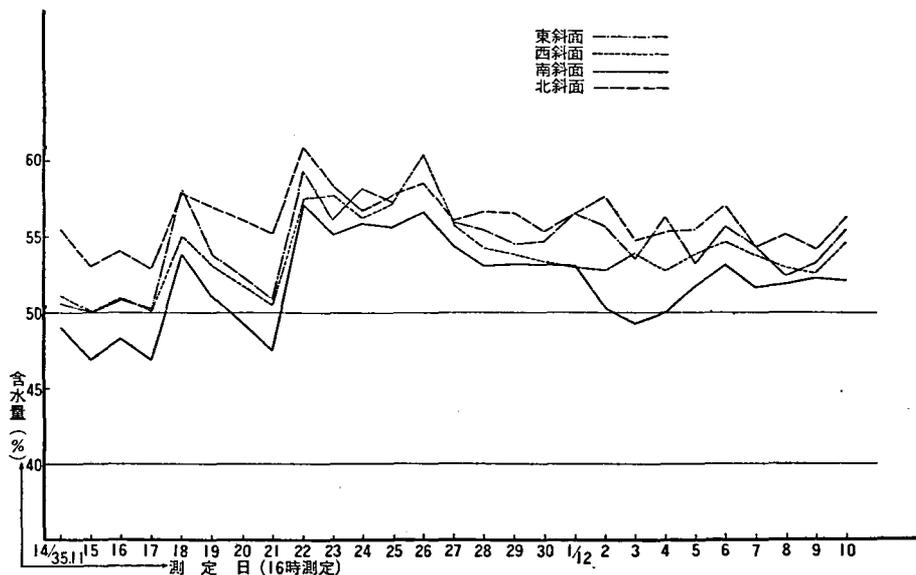
かでも霜柱を残すのが、霜柱発生期間中の通例である。当日の気象状況および前日発生した霜柱の量によつて、その融解時刻は変動するが、方位別の消失時刻は表Ⅲ—4—(3)に示すとおりである。

表 Ⅲ—4—(4) 斜面の方位別霜柱の侵食量

測定日	最高気温	最低気温	降水量	土 壤 水 分				霜 柱 侵 食 量				備 考		
				東	西	南	北	東	西	南	北			
35.														
11. 14	13.8	3.8		50.6	51.1	49.0	55.5							
15	13.8	-3.8		50.0	50.0	46.8	53.0							
16	13.8	-3.7		50.8	50.9	48.2	54.0	0.217	0.413	0.761	0.315		11/7, 15, 16の合量	
17	11.9	-1.8	11.1	50.3	50.0	46.8	52.8	0.185	0.206	0.196	0.217		(降雨による侵食)	
18	15.3	4.7	0.5	58.1	55.0	53.8	57.8							
19	14.3	3.5		54.8	53.0	51.0	56.9							
20	12.9	-1.4		—	—	—	—	0.348	0.424	0.674	0.283			
21	16.0	-2.0		50.7	50.4	47.4	55.2							
22	12.6	-2.0	31.2	59.3	57.5	57.0	60.9	1.196	1.304	1.011	1.293		21, 22の合量	
23	18.5	4.0	4.5	56.1	57.7	55.1	58.3							
24	16.8	9.6	1.8	58.1	56.3	55.8	56.6							
25	16.0	7.0	7.7	57.2	57.2	55.6	57.7							
26	12.4	7.6	1.8	60.1	60.4	56.6	58.5							
27	7.2	-5.4		55.9	55.7	54.3	56.0							
28	6.7	-8.8		55.4	54.2	53.0	56.6	0.478	0.750	0.989	0.250		27, 28の合量	
29	9.2	-4.0		54.5	53.8	53.1	56.5	0.206	0.359	0.413	0.076			
30	7.6	-6.2	4.7	54.7	53.3	53.1	55.3	(1.020)	(0.600)	(0.500)	(1.585)		霜柱発生量(kg/m ²)	
12.1	9.7	-0.6		56.5	52.9	53.0	56.4							
2	10.6	-7.7		55.6	52.7	50.2	57.6							
3	10.4	-7.8		53.5	53.8	49.2	54.7							
4	4.8	-5.0	0.8	56.3	52.7	49.9	55.3	1.174	0.869	3.522	2.272		2, 3, 4の合量	
5	11.2	0.3	3.6	53.2	53.0	51.7	55.4							
6	6.2	0.1	0.7	55.6	54.6	53.1	57.0							
7	4.9	-10.1		54.3	53.7	51.6	54.2	2.380	2.478	0.750	1.826			
8	7.2	-5.5		52.3	52.9	51.8	55.1	1.228	1.674	0.717	0.522			
9	9.2	-6.6	0.6	53.2	52.5	52.0	54.1	5.130	5.674	3.630	0.869			
10	11.1	-0.6		55.4	54.6	52.1	56.3							
								12.543	14.152	12.663	7.924		小計	

- (注) 1 土壌水分は 16.00 時測定
 2 霜柱侵食量は斜面積 46cm² 当りを ton/ha に換算したもの(乾土量)
 3 斜面の傾斜角30°, 斜面長100cm, 斜面巾46cm
 4 小計は北斜面の霜柱が融解されずに残るようになった時までのもの

図 III-4-(1)



斜面における方位別土壌水分の日変化

北面ではこのために、水分の蒸発量が少なく、土壌水分量が多くなっている。さらに北面は気温の降下に伴う地表、地中温度の低下はともに他の斜面より早くなっている図 III-4-(2)~(5)。このため霜柱の発生が早く、量も多くなっている。東、西面における場合は、霜柱が早く融解するので土壌水分が少なく、地温が高いために霜柱の発生がややおくれ、量が少なくなっている。また南面がとくに少ないのは、一日中直射日光をうけるので、水分の蒸発が最も盛んで、土壌水分が減少しており、地温が高いので霜柱の発生が最もおくれるためであると考えられる。

つぎに斜面より崩落した土量を測定したものは異つた結果を示している。表 III-4-(4)に示すように、霜柱による侵食量は南面が最も多い。霜柱および持ち上げられた土量は南面は最も少ないが、融解時に急激に倒伏すること、浮土が非常に乾燥するので倒伏した霜柱の上をすべり落ちること、あるいは乾燥した浮土が崩れ落ちること等のために侵食量が多くなっている。表中、南斜面に持ち上げ土量の多い現象が見られるのは、前日が晴天で終日日照がある場合には地表がとくに乾燥するためである。斜面の霜柱の状況を写真 III-4-(1), (2)に示す。斜面の霜柱によつて持ち上げられた土量の霜柱倒伏による移動は、霜柱の長さを h cm, 斜面の傾斜角を θ° とすれば $h \cdot \tan \theta$ cm だけ一発生期において下方へ動くはずである。北斜面では発生する霜柱と、持ち上げられた土量とは他の斜面に比して最も多いが、融解が非常に徐々でありほとんど消失しきらないことと、浮土がしめつていて崩落がほとんど認められないので、倒伏した移動だけによる侵食量である。また試験斜面ののりじりをコンクリート板で固定したため、その部分は

図 III-4-(2)

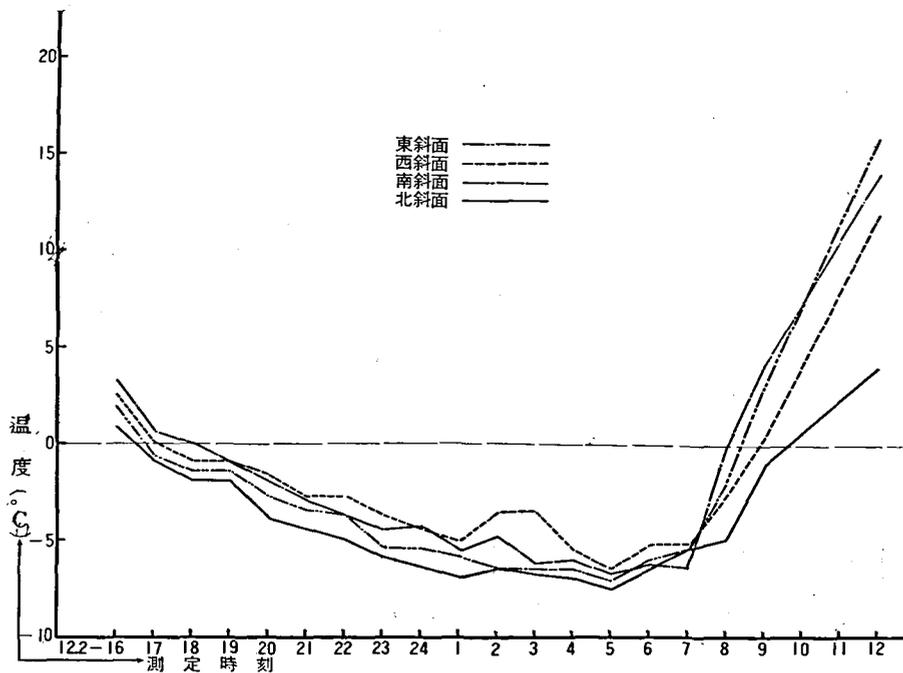
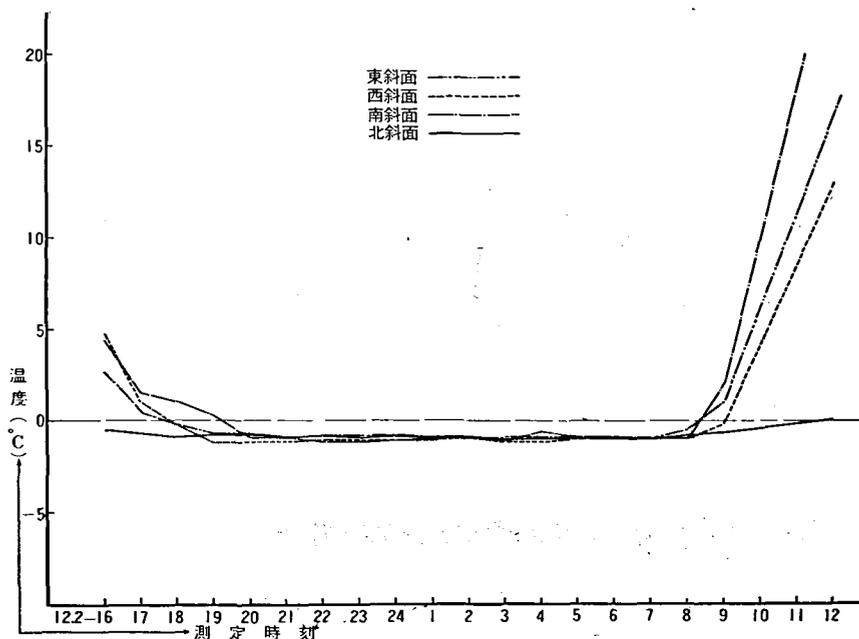
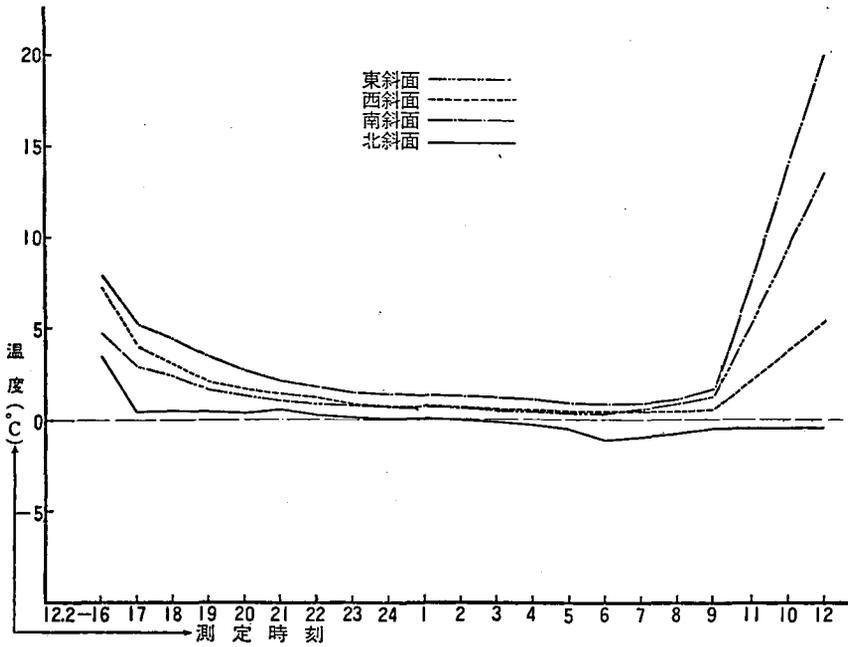


図 III-4-(3) 地表温度の時間変化 (地表上2.0cm)



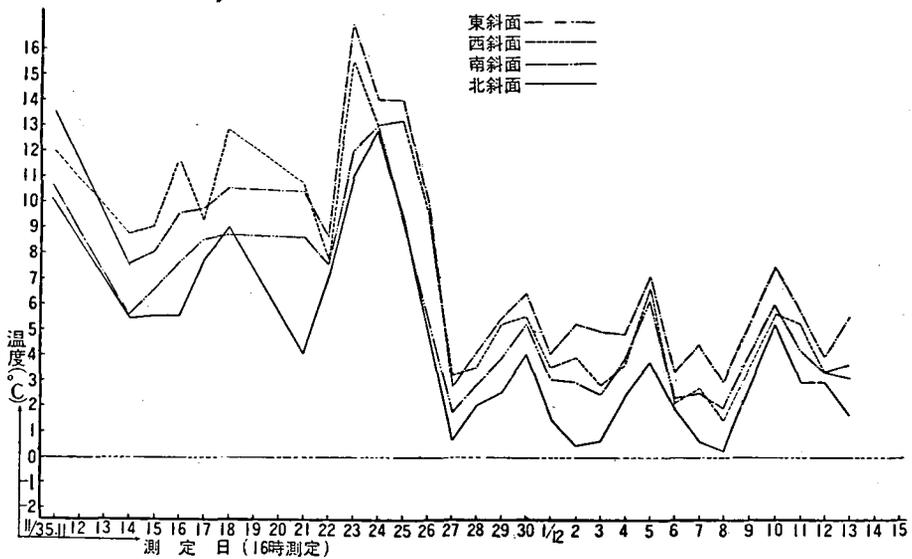
接地温度の時間変化 (地表0.0cm)

図 III-4-(4)



地中温度の時間変化 (地表下2.0cm)

図 III-4-(5)



斜面における方位別地温の日変化 (地表下2.0cm)

霜柱は発生せずに凍結してしまうため、浮土の移動が少なくなつた。東、西両面については、明確な差は認められない。

寒冷初期における霜柱の発生は、自然条件下においては積算温度が小さいので、土壤水分が pF2.0 以上ならば水分の差は発生量には、ほとんど影響していないものと推察される。したがつて斜面における霜柱の発生量の相違は、気温の差によるものと考えられる。しかしながら気温の条件がほとんど同一と考えられる斜面において、位置による霜柱の発生量の相違は、土壤水分の多いと考えられる下部に最も多く測定された⁷⁰⁾表 III-4-(5)。

表 III-4-(5) 斜面の部位における霜柱の発生量

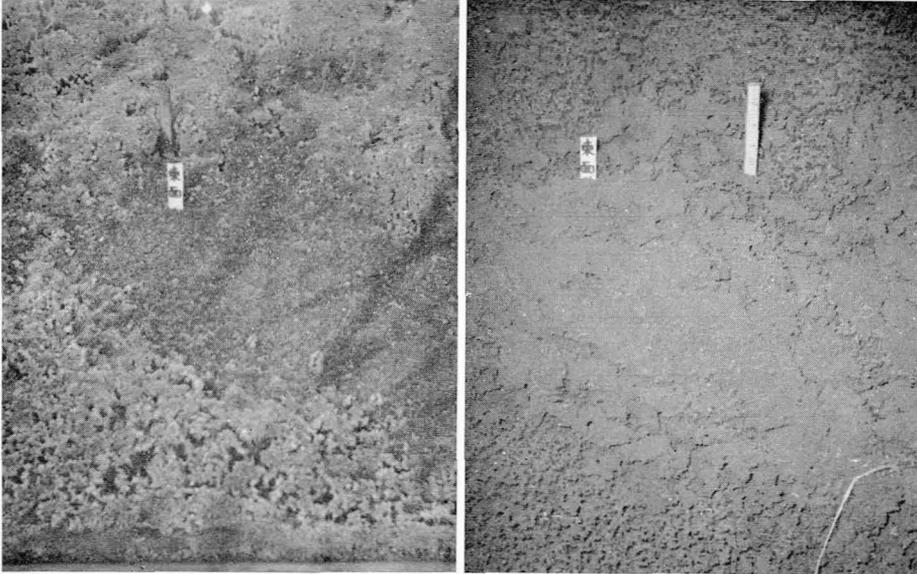
区分	部位	測定日						
		33 11-29	30	12-3	4	7	10	11
霜柱量	上	0.89	1.72	2.44	3.89	3.56	3.44	4.56
	中	1.61	1.39	1.89	5.06	2.89	3.67	6.00
	下	1.11	1.83	2.78	3.39	2.56	3.78	5.00
持ち上げ土量	上	1.33	2.39	1.89	2.00	1.67	1.22	1.78
	中	1.06	2.00	1.78	2.11	2.11	1.11	2.89
	下	1.33	2.61	2.45	3.22	3.22	2.89	4.00
霜柱長	上	3	2	4.5	5~6	5~6	5~6	4~5
	中	4	2	5	6~7	6~7	6~7	5~6
	下	4	2.5	5	7~8	7~8	7~8	6~7

(注) 1 傾斜角 20°, 斜面長 210cm

2 霜柱量, 持ち上げ土量は g/30×30cm² を kg/m² に換算

寒冷最盛期に入ると霜柱の発生は休止して、土壤凍結、凍上をおこす。融解期における侵食土量は異つた結果があらわれるものと推察されるので測定を継続している。

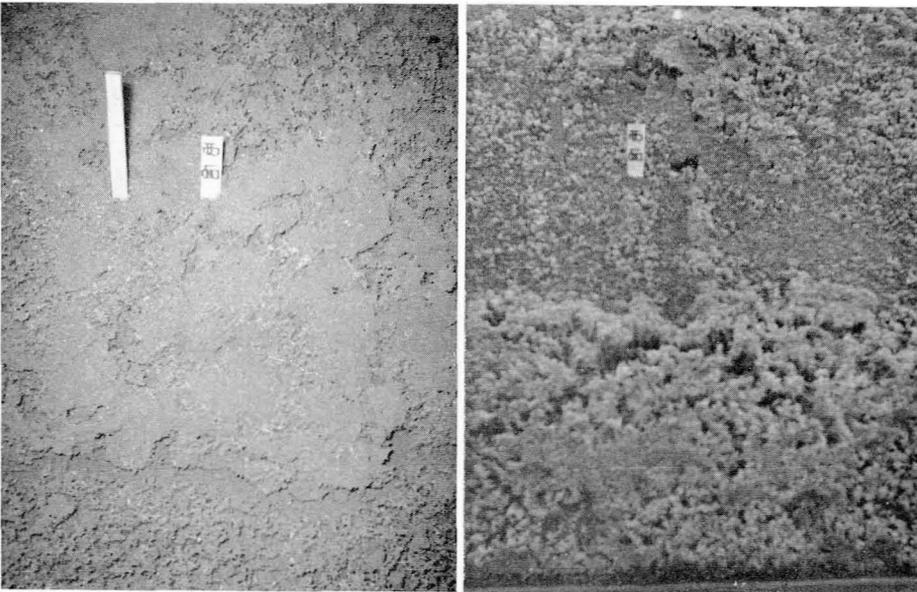
写真 III-4-(1) 斜面の霜柱の発生状況（昭和35年12月2～3日）



発生初期 20時

東 面

発生終期 8時



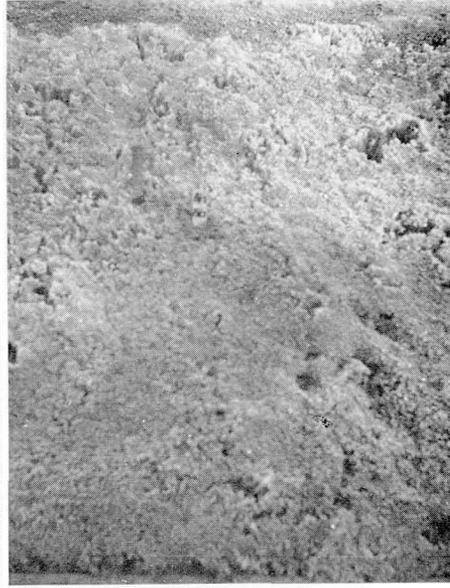
発生初期 20時

西 面

発生終期 8時



発生初期 20時



南 面

発生終期 8時



発生初期 20時



北 面

発生終期 8時

写真 III-4-(2) 斜面の霜柱の消失状況 (昭和35年12月2日10時)



東 面



西 面



南 面



北 面

写真 III-4-1(3) 侵食量の測定試験地



5 斜面の霜柱侵食の2, 3の防止法

霜柱は理想的な条件で発生する場合には、水分だけを析出して土砂を持ち上げないので、融解しても浮土砂をつくらず、かえつて土壌面を保護するものである。しかしながら自然条件下においては、このような状態のものはまれである。したがって霜柱の発生およびこれにつづいておこる凍上現象による侵食を防止することが必要である。

裸地斜面においては霜柱の発生、融解、発生の過程をくりかえすことによつて侵食をうける。霜柱は土粒子を持ち上げ、あるいは含んで発生し、その持ち上げ土量はくりかえしの多くなるほど、また気温の低下の急激なほど、多くなるものである。さらに持ち上げられた土砂は浮土砂となり、降雨によつて侵食され、乾燥しやすいために風食をうけることになり、侵食量は増加する。

本研究によつて得られた資料によれば、霜柱による侵食を防止するには、つぎのような方法が考えられる。

土壌水分については、排水によつて霜柱、凍上を避け粒状あるいは板状凍結に移行させて、侵食を少なくすることである⁶³⁾⁶⁸⁾。等高線溝法⁶³⁾を実施して溝の深さを凍結線、毛管上昇性等について考慮すれば効果があると考えられる。

温度の関係については、斜面を被覆するいわゆる断熱的な工法を実施すれば効果が大きい。

土質改良については、道路、鉄道方面にては地盤の入れかえによつて防止しているが、山腹斜面に利用することは困難である。土壌改良剤の散布⁶³⁾⁶⁴⁾、ペントナイト⁶⁵⁾、食塩、肥料⁶⁶⁾等の施用によつて、地表面を処理する方法が考えられ、また植栽木については植穴に堆肥、わらを入れて⁶⁷⁾毛管上昇を妨げて損傷を防ぐ方法が考えられる。

2, 3の工法について実験を行つた。

表Ⅲ-5-1(1)は霜柱の発生初期の11月中旬より土壌凍結前の12月中旬までの約1か月間にわたつて、霜柱によつて侵食された土砂量を、斜面に施工された工法別に定量したものである。写真Ⅲ-5-1(1)はその状況を示す。

この場合、標準区(裸地)では伊勢湾台風(昭和34年9月25~26日、降雨量119.9mm)によつて侵食をうけた量の2倍以上の侵食量を記録している。これは霜柱による斜面の侵食土砂量がいかに多大なものであるかを示すものである。極言すれば霜柱、凍上の発生する地方の斜面侵食は、すべて寒冷期間中における霜柱、凍上によつて直接、間接になされるものであるとさえいえる。

1) 斜面混播等による植生被覆

完全な全面被覆は出来なかつたが、侵食量はほとんどなく、非常に効果的であつた。霜柱はほとんど発生しないで、わずかに雑草の生えない部分から発生する。それも周囲の雑草が保温効果を発揮するため発生日数も少ない。したがつて、本法は霜柱侵食のみならず、降雨による侵食に対しても適切なものである。斜面混播法以外にも張芝、植生盤による方法も有効であると考えられる。

本法では、裸地が雑草、芝草で被覆されるだけでよいのではなく、根系によつて下層土を固定させる必要がある。しかしながら本法においても、凍上期には全面的に持ち上

表 III-5-(1) 霜柱による斜面の侵食量(霜崩れ)

区 分	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
A 群	0.365	0.349	5.770	4.095	4.389	0.603
B 群	0.619	0.786	9.111	5.032	4.794	0.341

降雨による斜面の侵食量(流出土砂)

観 測 日	台風	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	備 考
34. 9.25~26	15号	0.212	0.254	2.148	1.761	0.940	2.228	降雨量 119.9mm
34.10.6~7	16	0.189	0.161	0.757	0.537	0.583	0.581	// 80.9
34.10.8	18	0.101	0.163	0.217	0.178	0.214	0.173	// 50.4

- (注) 1 34.5施工 No. 1 斜面混播区 No. 4 標準区(裸地)
 No. 2 筋芝区 No. 5 アロンA-40施用区
 No. 3 アロンA-20P施用区 No. 6 わら伏区
 (流出土砂量測定の際は No. 4 と同様標準区)
- 2 斜面は北面, 傾斜角20°
 斜面長 210cm, 斜面巾 60cm (斜面積 126cm²)
- 3 土砂量は乾土量で示し, ton/ha に換算

げられ, 斜面ののりじりが固定されていない場合には, 融解期には全体が崩落するのが通例で, 施工地の失敗はのりじり固定の不備が原因している場合が多い。のりじりが固定されていれば, 一度持ち上げられても, 翌春表土層が沈下することによつて安定し植生が完成される。

2) 筋芝

筋芝と筋芝の間からは, 標準区よりかえつて多量の霜柱が発生した。これは芝によつて保水力を増進しているからである。しかしながら筋芝によつて侵食土砂を止めているのでその量は非常に少なく, 斜面混播法と同等の効果が期待出来る。しかし凍上においては, 筋芝の部分と裸地の部分とが, 量的にも時期的にも異なる。すなわち筋芝の部分が, 下層土のもつ多量の水分のために凍上して遊離し, 融解期には芝がすべり落ちて著しく破壊される危険がある写真III-5-(2)。のりじりの固定は勿論, 筋芝の固定を考えなければならない

3) わら伏

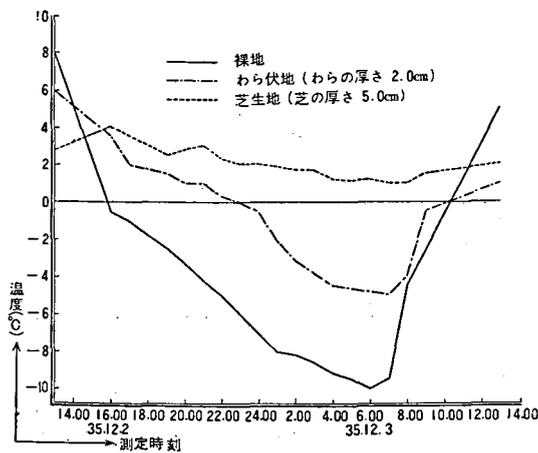
裸地をいねわら, 芝で被覆すれば, 保温の効果が非常に大きい表III-5-(2), (3), 図III-5-(1), 写真III-5-(3)。わら伏は霜柱の発生防止に顕著な効果をあげている⁶⁶⁾⁵⁷⁾⁷⁰⁾。また霜柱による侵食防止の面においても前述の2方法と同等の効果をあげている。しかしながら被覆したわらはおさえが完全でないと飛散することがある。また凍上期に入ると, 凍上量を抑制するほどの保温効果は期待されない。斜面混播法と併用して植生進入を保護する面において施用価値が認められる。

表 III-5-(2) 断熱被覆による地温分布の日変化

測定日		11-21	23	25	27	28	29	30	12-1	3	5	7	8	11	13	20	
裸地	cm																
	0.0	5.5	14.0	13.0	-1.0	1.5	-0.2	3.3	-0.5	-4.0	-1.3	-1.8	-2.1				
	5.0	8.0	13.0	12.7	5.0	3.5	4.0	4.6	5.0	1.7	4.9	0.9	0.7				
	10.0	6.5	10.0	11.2	6.4	3.8	4.5	4.0	5.0	2.2	4.2	1.8	1.2				
	15.0	6.0	8.5	10.5	7.0	4.8	5.0	4.2	5.0	2.8	3.6	2.4	2.0				
地	20.0	6.5	8.0	10.0	8.0	6.0	5.5	5.0	5.5	3.8	3.8	3.4	2.9				
	30.0	8.0	8.0	9.7	9.4	8.0	7.0	6.5	6.5	5.2	4.5	4.7	4.2				
	わら伏地	0.0	8.5	12.0	12.3	3.2	3.0	2.2	4.2	2.7	0.7	3.7	0.3	0.7	4.2	3.0	1.0
		5.0	9.0	11.0	12.0	5.5	4.0	4.8	4.0	5.0	2.0	4.5	1.2	1.8	4.4	3.2	1.2
		10.0	8.5	10.5	11.7	7.0	5.0	5.0	4.7	5.6	3.0	4.8	2.3	2.6	4.2	3.6	1.4
15.0		8.0	9.5	11.0	7.7	6.0	5.6	5.3	5.8	3.7	4.7	3.5	3.3	4.0	3.8	2.2	
20.0		8.0	9.0	10.4	8.2	6.7	5.8	5.7	5.8	4.2	4.5	4.0	3.6	3.8	3.8	2.5	
30.0	9.0	9.0	10.4	9.2	8.3	7.2	6.9	6.8	5.6	4.4	5.2	4.8	4.7	4.5	3.8		
芝生地	(0.0)	4.0	14.5	14.0	-3.0	2.6	-2.0	4.5	-0.5	-3.4	0.7	0.1	-0.2	0.1	2.4	-4.0	
	0.0	8.5	13.0	12.0	7.4	5.6	5.5	5.5	6.0	3.0	5.1	2.9	2.2	3.8	3.1	1.0	
	5.0	7.5	10.0	11.0	8.0	5.7	6.0	5.1	6.0	3.2	4.5	2.4	2.3	3.2	2.8	1.0	
	10.0	7.5	8.5	10.5	8.5	6.3	6.5	5.4	6.2	4.0	4.4	3.2	3.0	3.3	3.1	2.0	
	15.0	8.5	8.0	10.5	9.5	8.0	7.3	5.7	7.0	5.3	5.1	3.8	3.3	4.2	3.8	3.0	
20.0	8.5	8.0	9.5	9.4	8.5	7.5	7.1	7.0	5.8	5.1	5.1	4.6	4.3	4.0	3.5		

- (注) 1 測定日は35.11.21~12.20, 16.00時測定
 2 0.0は接地温度, (0.0)は芝の表面温度
 3 裸地における12.11以降は地中温度計の折損が著しいので中止

図 III-5-(1)



断熱被覆による地温の時間変化 (地表 0.0cm)

表 III-5-(3) 断熱被覆による地温分布の時間変化

測定時	13.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	13.00	
裸地	0.0	8.0	-0.5	-1.0	-1.8	-2.5	-3.3	-4.2	-5.0	-6.0	-7.0	-8.0	-8.2	-8.6	-9.2	-9.5	-10.0	-9.5	-4.5	—	5.0
	5.0	1.5	3.2	2.5	2.4	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2
	10.0	2.5	2.8	3.0	3.0	2.9	2.8	2.8	2.8	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3	2.2	2.1	2.2	2.2
	15.0	4.6	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.4	3.5	3.4	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	30.0	4.7	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.7	4.3	4.3	4.3	4.2	4.1	4.1	3.8	4.0	4.0	4.2
わら伏地	0.0	6.0	3.5	2.0	1.7	1.5	1.0	1.0	0.3	0.0	-0.5	-2.1	-3.2	-3.8	-4.5	-4.6	-4.8	-5.0	-4.0	-0.5	1.0
	5.0	2.8	4.0	3.5	3.0	2.5	2.8	3.0	2.3	2.0	2.0	1.9	1.7	1.7	1.2	1.1	1.2	1.0	1.0	1.5	2.0
	10.0	3.6	3.3	4.2	4.0	3.9	3.7	3.5	3.4	3.2	2.9	2.8	2.7	2.5	2.4	2.2	2.2	1.9	2.1	2.7	3.2
	15.0	4.8	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.2	4.2	4.1	3.9	3.8	3.8	3.7	3.5	3.5	3.4	3.5	4.0	4.8
	30.0	5.6	5.0	4.8	4.7	4.7	4.7	4.6	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.2	4.0	4.2	4.8	5.5
芝生地	(0.0)	12.0	0.1	-2.4	-2.8	-3.0	-3.5	-4.0	-4.3	-4.7	-5.5	-6.1	-6.2	-6.0	-7.0	-7.6	-7.5	-6.0	-4.5	4.2	11.8
	0.0	2.6	3.8	3.7	3.6	3.5	3.4	3.1	3.2	2.9	2.8	2.7	2.6	2.3	2.4	2.2	2.1	2.0	1.9	2.0	2.0
	5.0	3.5	4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.5	3.4	3.1	3.1	3.0	3.0	2.8	3.0	3.0
	10.0	4.5	4.6	4.7	4.7	4.7	4.6	4.6	4.6	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.3	4.2	4.2	4.0	3.0	4.0	4.0
	20.0	6.3	6.1	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.9	5.9	5.8	5.8	5.8	5.7	5.7	5.6	5.5	5.5
20.0	6.8	6.5	6.4	6.4	6.3	6.3	6.3	6.4	6.2	6.2	6.2	6.3	6.2	6.1	6.2	6.1	6.2	6.0	6.2	6.2	

- (注) 1 測定日は35.12.2~3
 2 0.0 は接地温度, (0.0)は芝の表面温度
 3 裸地は芝(5.0cm)をはぎ取り, わら伏地は裸地へわらを2.0cm程度被覆した

4) 土壤改良剤施用

土壤改良剤を散布して、土質改良の効果と霜柱発生におよぼす効果について観測した⁷⁰⁾。表Ⅲ—5—(4)は土壤改良剤を施用した土壤について施用後の土質を示したものである写真Ⅲ—5—(4)。これによると、アロン A—20P(ポリアクリル酸ソーダ)の施用区は、現場の含水量が非常に少なく、また団粒係数が施用前 8.6 が施用後 40.2 に改良されている。霜柱の発生はアロン A—20P ではほとんどなかつた。これは改良剤の施用によって土壤の構造が単粒構造から団粒構造に変化したため、水分保持力が減少して、水分が減じた結果である⁸⁹⁾と考えられる。しかしながらそのために、表土が乾燥して粘着力を失い、ぼろぼろした状態になつて受食性が増して、侵食量を増大し標準区の 1.5 倍の侵食量を示した。

またアロン A—40 (アクリル酸カルシウム) は裸地とほとんど変わらなかつた。

表 Ⅲ—5—(4) 土壤改良剤の施用による土質変化

改良剤 土質	対 照 区 (無 処 理)	アロン A—40 (アクリル酸 カルシウム)	アロン A—20P (ポリアクリル 酸ソーダ)	ゴ—セニール (酢酸ビニール 系乳化剤)	ゴ—セラン (ビニール系)
含 水 量 (圃 場 容 水 量)	48.3	51.7	45.5	48.2	49.8
団 粒 係 数	8.6	12.9	40.2	12.5	11.3

- (注) 1 乾土重量の 0.6% の薬剤を水溶液とし施用
2 10月施用し翌年 4 月採土し測定

5) 食塩、肥料施用

遊離水の純度が霜柱の発生に関係すると考えられる。表Ⅲ—5—(5)は食塩、各種肥料を散布して低温室内および自然状態において霜柱の発生を観測したものである写真Ⅲ—5—(5)~(7)。いずれも霜柱は発生していない。

この結果によると、明らかに遊離水中に各種の塩が混じて、そのために氷点降下をおこして、霜柱の発生条件を破つているためであろうと推察される。(溶液の氷点降下は溶媒である水分子の容積に対する溶質分子の占める容積が、非常に小さい稀薄溶液の場合、溶質の種類によることなく、その容積割合の大なるほど大きいといわれる。)

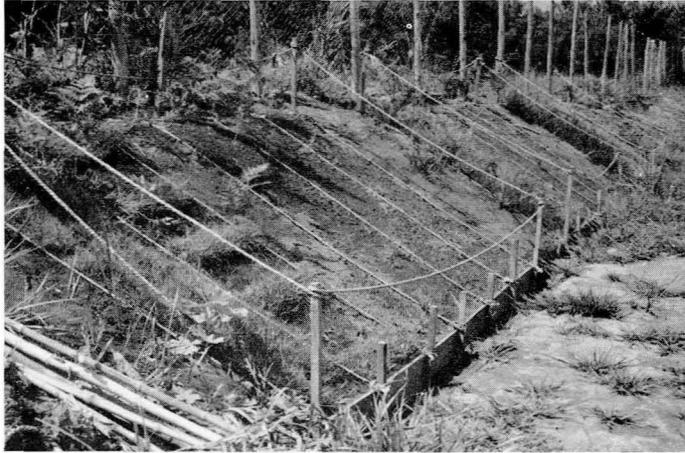
食塩、肥料を施用すれば霜柱の発生を休止させることは出来るが、凍上期になると板状あるいは凹凸不規則に持ち上げられるので、その施用量および有効期間について考慮しなければならない。

表 III-5-1(5) 食塩、肥料施用による霜柱および土壤凍結

肥料名	霜柱および凍上	氷点	溶解度 (5.0°C)	吸収率 (%)	溶液の凍結状況	
					低温室	自然条件
食塩	霜柱は全く発生せず地表面の温度が-5.0°Cに低下すれば土壤凍結をおこす。連続的に冷却されると霜柱表層を生成。	-4.8	30.12	—	凍結20	凍結 0
窒素	霜柱は全く発生せず地表面が-2.5°C以下に低下すれば土壤凍結をおこす。霜柱氷層は塩化加里、食塩区よりも先に生成される。	-2.2	47.03	40~60	〃 80	〃 30
磷酸	霜柱は発生せず直ちに土壤凍結をおこし霜柱氷層の発達が著しい。	-0.4	2.80	10~20	〃 95	〃 95
加里	霜柱は全く発生せず前区同様に-4.0°C以下になれば土壤凍結をおこす。	-3.5	26.61	40~60	〃 20	〃 0
消石灰	石灰を頭にのせあるいは混じて霜柱が発生する。対照区よりも浮土砂量は多い。	0.0	0.12	—	〃 100	〃 100
対照区	霜柱を発生し土表面は凍結しない。土壤凍結は土壤水分がpF3.0以下になるかあるいは地温が-4.0°C以下になった時に始まる。	0.0	—	—	〃 100	〃 100

- (注) 1 信州ローム(赤土)の表面に肥料各100cm² 当り1gを散布し散水して2昼夜放置し、低温室および自然に冷却した
- 2 低温室-3.3~-6.3°C, 自然条件における最低温度-6.2°C
- 3 溶解度は飽和溶液 100g 中の溶質量(g)
- 4 溶質 10g を含む溶液 150cc の氷点

写真 III-5-(1) 斜面侵食防止工法



施工直後

左側より

斜面混播区

筋芝区

アロンA-20P区

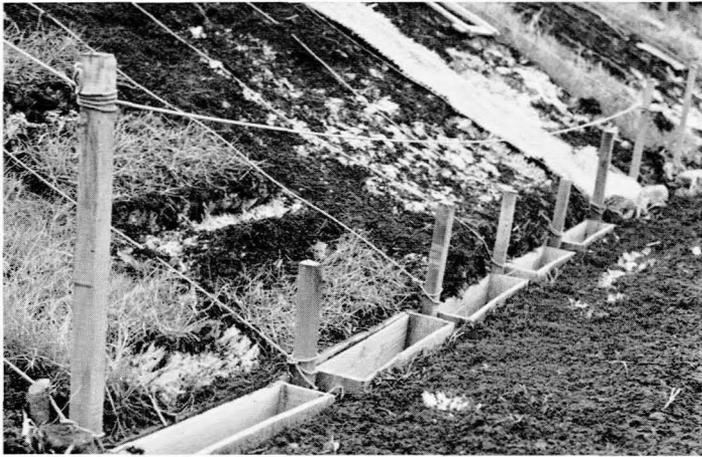
標準区

アロンA-40区

わら伏区



霜柱発生時

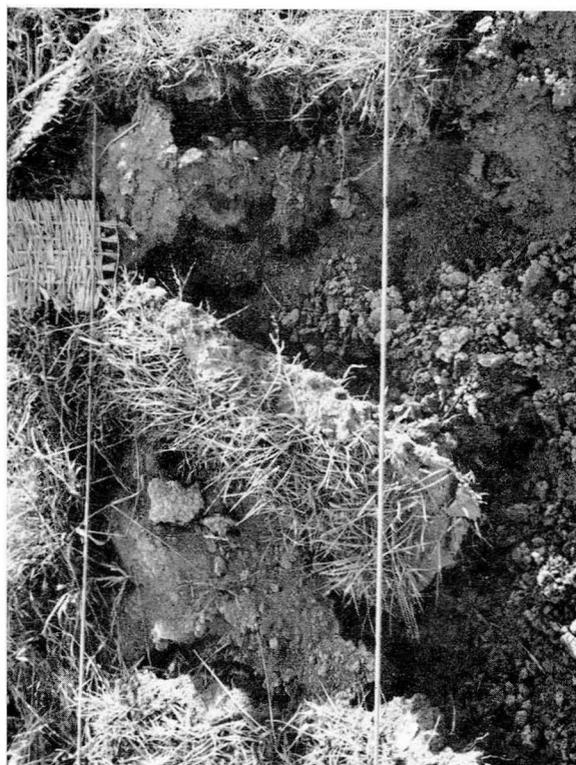


霜柱消失時

写真 III-5-(2) 凍上侵食



不齊凍上による侵食



不齊凍上によつて破壊された筋芝工

写真 III-5-(3) 地温測定試験地

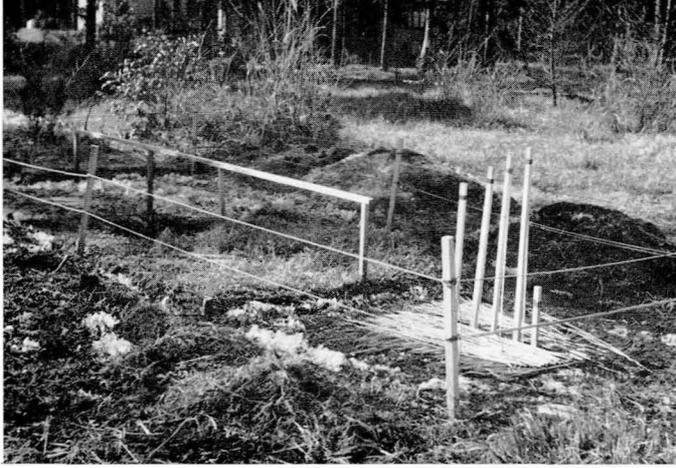
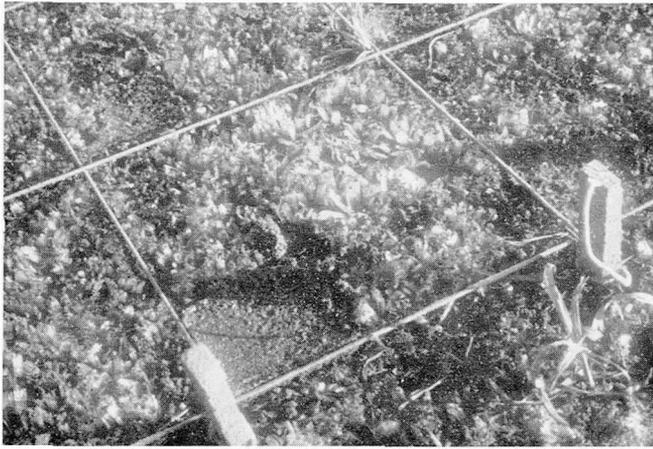


写真 III—5—(4) 土壤改良剤施用効果



アロソ A-20P

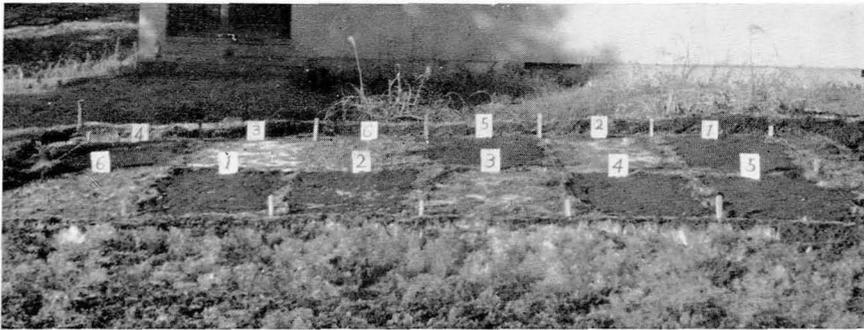


アロソ A-40

写真 III—5—(5) 食塩、肥料の施用効果（自然状態）

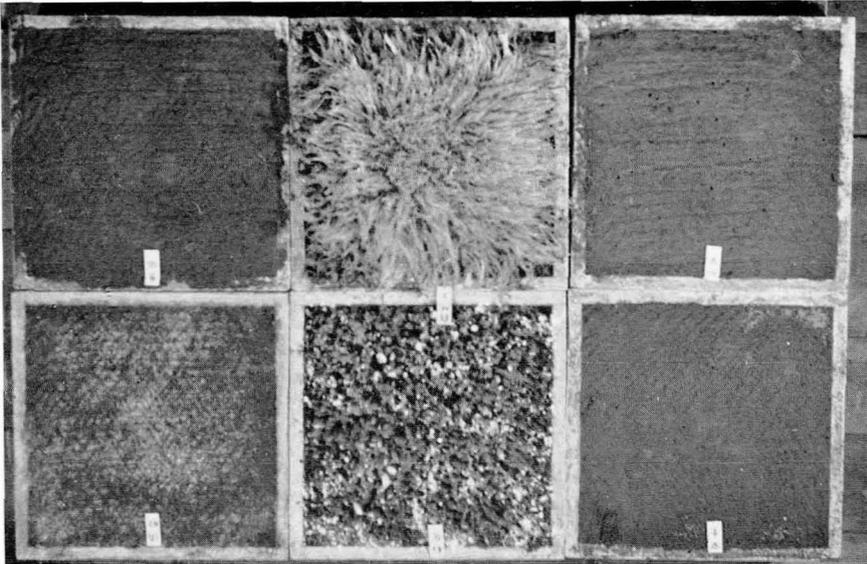
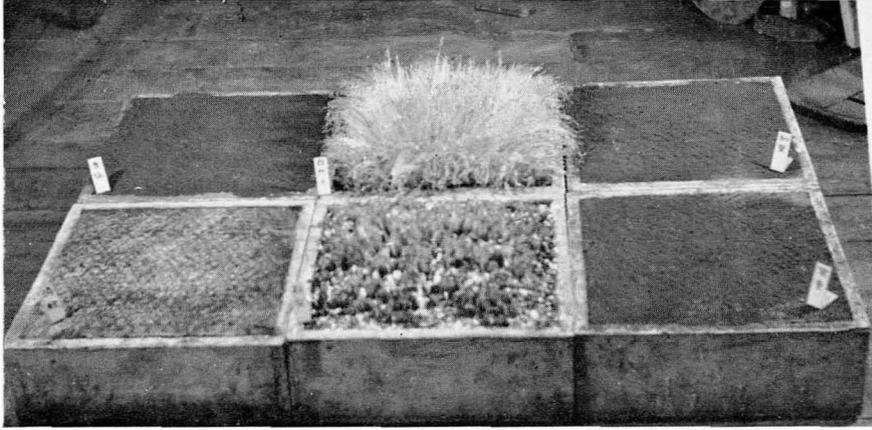


窒 素	磷 酸	対 照 区	食 塩	加 里	消 石 灰
--------	--------	-------------	--------	--------	-------------



- | | | |
|-------|-------|---------|
| 1 食 塩 | 2 磷 酸 | 3 消 石 灰 |
| 4 加 里 | 5 窒 素 | 6 対 照 区 |

写真 III—5—(6) 食塩、肥料の施用効果（低温室内）



食 塩	対照区	加 里
磷 酸	消石灰	窒 素

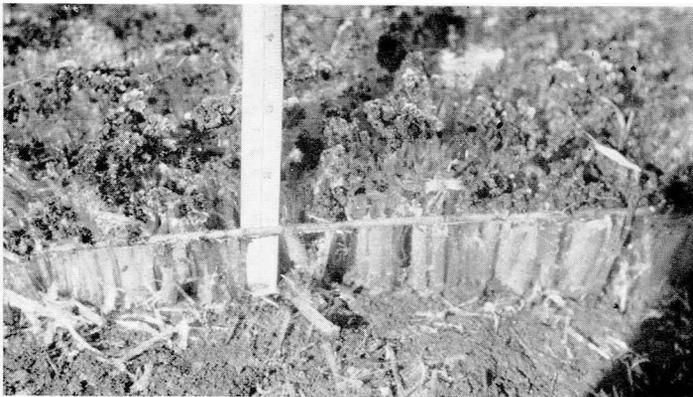
写真 III-5-(7) 凍結の断面



窒素



加里



対照区

IV 要 約

寒冷初期において、霜柱は土砂を持ち上げて発生し、融解する時にその土砂を地表面に残して浮土砂を形成する。その後は漸次持ち上げ土量を増して、多量の浮土砂を生産して土壤凍結期に移行する。この霜柱の反復現象によつて侵食される土砂量は、霜柱が最もよく発生する信州ローム層（関東ローム層も同様と考えられる）の地域においては、非常に大きな台風の来襲に伴う豪雨による侵食土砂量に相当し、あるいはそれ以上であり、さらに斜面に残る浮土砂量および凍上による侵食を考えると、寒冷初期における土壤侵食は、受食面積からも、また侵食土砂量そのものにおいても、土壤保全の面から非常に重大な問題である。

本研究はそのうち、霜柱による侵食について、その防止工法に関する基礎的な実験を通じて、霜柱の発生機構と土壤水分、冷却温度、土質条件および斜面の部位等の関係を明らかにし、2, 3の工法についてその適性を検討した。

1) 土壤水を pF で示すと、霜柱の発生限界は $pF3.0$ である。 $pF0 \sim 2.0$ の間では純粋の霜柱が発生し、土壤水分的には土壤凍結に移行しないが、 $pF2.0 \sim 3.0$ の間では土砂混じりの霜柱が発生し、 $pF3.0$ で直ちに土壤凍結に移行する。この場合凍上現象は見られない。

2) 土壤水が $pF0 \sim 3.0$ の間では積算温度が小さい寒冷初期のうち、霜柱の発生量は、 $pF2.0$ の付近が最も多く、 $pF0$ に向つても発生量には差がほとんど認められない。しかし $pF3.0$ に近づくにつれて明らかに減少している。積算温度の大きい寒冷中期の場合は $pF0$ の時最大で $pF2.0$ に向つて徐々に減少し $pF3.0$ に向つては急激に減少し、 $pF3.0$ の時は霜柱の発生量は零で、土壤凍結をおこす。

3) 霜柱発生に伴つて土壤水分は析出して、下部からの補給をうけている。霜柱の直下の水分はとくに少なく余分に消費されている。土壤凍結の場合は、凍結線直下の水分が少なく土壤水分分布が凍結線直下から地表面までは逆転している。

4) 地表部分の地温は気温の変動に伴つて影響をうけ、気温の降下に伴つて地温が漸次低下する。寒冷初期においては霜柱層が保温帯となつて地表温度を $0^{\circ}C$ に保持するが、やがては $0^{\circ}C$ 以下になる。この場合地温が、 $-4^{\circ}C$ になるまでは霜柱は発生するが $-4^{\circ}C$ 以下に低下すると土粒子そのものを結晶体の中に閉じ込んで土壤凍結をおこす。この場合凍上量は激しい。

5) 冷却温度を積算温度で表わし、霜柱の発生量を単位面積当りの重量で示すと、両者の間にはきわめて有意な相関関係が認められ、土質が一定であれば直線式が適用される。この場合、地温、遊離水の量、毛管上昇性は直線の勾配を支配し、横軸からその時の霜柱発生に対する温度限界が推定される。

6) 霜柱が発生するかしないかは、極く地表面の土壤の状態によつてきまるが、これは全く土質的特性によるもので、土性的には軽埴土に限定され、遊離水の量、質およびその保水力、毛管上昇性、物理的には土壤の対熱関係（比熱、熱伝導度、熱容量）および

氷点降下の度合に支配される。

7) 霜柱は地表面付近における土粒子間隙の軌跡であると考えられ、粒径組成、圧結度によつて霜柱の発生量および形態を異にする。

8) 斜面の部分によつて霜柱の発生量を異にする。方位については北面が最も多く、東、西、南面の順に発生量は減少しているが、これは土壤水分量および気温の差によるものである。また位置の関係は斜面の下部が最も多い。

9) 霜柱侵食による崩落土砂量は、寒冷初期には南面が多く、西、東、北面に順次減少しているが、寒冷中期には南、西、東面の差はほとんどなくなる。さらに寒冷終期における凍上侵食量は北面が最も多くなると推定される。

10) 霜柱侵食の防止工法は、斜面混播等による被覆工が最も効果的であるが、凍上期にはのりじりの固定が絶対に必要である。筋芝工は霜柱侵食については効果はあるが、凍上期には破壊される。したがつて早期芝付工事を終了し、肥培管理によつて芝の定着を促進し繁殖させなければならない。わら伏工は寒冷初期には非常に効果的であるが、一時的であるため斜面混播との併用によつて、発芽促進と植生の保護面に価値が認められる。

11) 表面処理による工法としての土壤改良剤のアロン A-20P (ポリアクリル酸ソーダ)、アロン A-40 (アクリル酸カルシウム) の施用は霜柱の発生は防止出来るが、侵食防止の効果は認められない。アロン A-20P の斜面地への施用はかえつて受食性を著しく増大させた。

12) 食塩および肥料を施用すると、氷点降下をおこして、霜柱の発生を休止させる効果は期待出来るが、その施用量および有効期間については残された問題である。

V 結 言

本研究の目的は霜柱による侵食に対する合理的な防止工法を確立することにある。霜柱の発生に対しては、その限界を土壤水分の面から、また積算温度、地表面の土質、斜面の部位等の面から考察して上述の結果を得た。霜柱は信州ローム、関東ロームを主体にした埴土に発生するもので、他の砂質壤土については、全く発生し得ない現象であることが明らかになった。しかしながら現実には霜柱を発生し得ない土壤が、種類が多く広範囲に分布すること、また気象条件は土粒子も吸湿水と同時に氷結してしまうほど気温が低下する場合が多い。そのために土壤凍結についてそのすべてを解決しないかぎり、霜柱、凍上侵食、さらには霜柱、凍上による破壊作用は防止することは出来ない。今後は本研究で得られた資料を基礎にして、さらに合理的な霜柱による斜面侵食の防止に対する工法を得るとともに、熱的關係を重点にして土壤の凍結、凍上による侵食防止について研究を進めたい。

参考文献

- 1) 川口武雄 (1956) : 森林気象 PP.95~96
- 2) 伏谷伊一 (1957) : 砂防工学新論 PP.153~154
- 3) 飯塚 肇 (1958) : 森林防災工学 PP.160~164
- 4) 林野庁編 (1959) : 治山計画と実行 PP.217~223 PP.509~514
- 5) 稲積豊二 (1939) : 線路の凍上, 雪氷1-5, PP.89~90
- 6) 黒田正夫・木村幸一郎 (1940) : 土壌凍上の研究(1), 雪氷2-4, PP.53~57
- 7) 宮川 勇 (1941) : 路盤の凍上(1), 雪氷3-1, PP.3~15
- 8) 渡辺 貫 (1941) : 地盤の凍上, 雪氷3-4, PP.159~172
- 9) 宮川 勇 (1941) : 路盤の凍上(2), 雪氷3-5, PP.216~224
- 10) 渡辺 貫 (1941) : 地盤の凍上(続), 雪氷3-8, PP.350~355
- 11) 渡辺 貫 (1943) : 土の科学 PP.83~97
- 12) 黒田正夫 (1944) : 不斉凍上対策の研究 (第1報) 1, 雪氷6-4, PP.79~84
- 13) 黒田正夫 (1944) : 不斉凍上対策の研究 2, 雪氷6-5, PP.106~110
- 14) 黒田正夫 (1944) : 不斉凍上対策の研究 3, 雪氷6-6, PP.137~144
- 15) 村木満寿雄訳 (1944) : 凍土及び凍上 1, 雪氷6-6, PP.161~168
- 16) 村木満寿雄訳 (1944) : 凍土及び凍上 2, 雪氷6-9, PP.226~236
- 17) 村木満寿雄訳 (1944) : 凍土及び凍上 3, 雪氷6-10, PP.261~271
- 18) 中谷宇吉郎・孫野長治 (1944) : 凍上の機構についてI, 低温科学第一輯, PP.1~10
- 19) 中谷宇吉郎・孫野長治 (1944) : 凍上の機構についてII, 低温科学第一輯, PP.27~36
- 20) 中谷宇吉郎・孫野長治 (1944) : 凍上の実験的研究, 低温科学第一輯, PP.37~52
- 21) 中谷宇吉郎 (1945) : 霜柱と凍上, 生活社
- 22) 黒田正夫 (1945) : 不斉凍上対策の研究 (第2報), 雪氷7-1, PP.4~10
- 23) 真井耕象 (1946) : 凍上の話, 雪氷8-1, PP.12~15
- 24) 黒田正夫 (1946) : 不斉凍上対策の研究 (第3報), 雪氷8-2, PP.29~35
- 25) 谷藤正三・小川哲夫 (1949) : 凍上現象に対する工学的的方法に関する研究, 雪氷12-1, PP.17~28
- 26) TERZAGHI K. and PECK R.B. (1948) : Soil Mechanics in Engineering Practice, PP.131~133
- 27) 黒田正夫 (1949) : 土壌の凍結及び凍上, 雪氷10年, PP.22~24
- 28) RUCKLI R. (1950) : Der Frost im Baugrund
- 29) 谷藤正三 (1951) : 道路工学特論, PP.172~291
- 30) 小野薫・外3氏訳 (1955) : 土質力学, PP.114~116
- 31) 岡野竜信 (1940) : 土壌凍結について, 雪氷2-9, PP.143~146
- 32) 小川新市 (1941) : 満州における凍土含水比の鉛直分布, 雪氷3-10, PP.385~393
- 33) 原田干三 (1943) : 雪, 氷, 凍土, PP.173~260
- 34) 宇都宮寿夫訳 (1943) : 土の工学的性質, PP.79~99
- 35) 中谷宇吉郎・荒川淳 (1944) : 凍結による土壌の体積変化について, 低温科学第一輯, PP.67~78

- 36) 中谷宇吉郎・菅谷重二 (1944) : ツンドラ地帯の凍結, 低温科学第一輯, PP. 89~94
- 37) 八鍬利助・斉藤正則 (1944) : 北海道における土壌の凍結, 雪氷6-2, PP. 27~33
- 38) 寺田一彦 (1948) : 土地の凍結の深さを推定する一方法について, 雪氷9-6, PP. 92~93
- 39) STOECKELER J.H. and THAMES J.L. (1958) : The Lake States Penetrometer for Measurement Depth of Soil Freezing, Soil Sci. 85-1, PP. 47~50
- 40) STOECKELER J.H. and WEITZMAN S. (1960) : Infiltration Rates in Frozen Soils in Northern Minnesota, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24-2, PP. 137~139
- 41) 東 晃 (1960) : 凍土, 最近の雪氷に関する研究展望, PP. 15~16
- 42) TIEGERMAN M.H. and ROSA J.M. (1949) : Erosion from Melting Snow on Frozen Ground, Jour. For. 47-10, PP. 807~809
- 43) 八鍬利助 (1951) : 融解水及び凍土の融解水による土壌侵食並に凍土の地温, 農業及園芸26-2, PP. 267~268
- 44) 八鍬利助 (1953) : 融解水及び凍土の融解水による土壌侵食に関する研究, 土壌侵食に関する研究集録II, PP. 20~22
- 45) 山田 忍 (1953) : 土壌の凍結と侵食について, 土壌侵食に関する研究集録II, PP. 23~24
- 46) 八鍬利助 (1955) : 凍土の融解促進について, 農業気象11~2, PP. 81~83
- 47) 八鍬利助・藤井重人 (1955) : 凍土の融解促進について, 北大農学部紀要2-3, PP. 1~6
- 48) 八鍬利助・石井衛・工藤勇夫 (1957) : 雪及び凍土の融解水による土壌侵食, 農業気象12-3, PP. 111~112
- 49) KIENHOLZ R. (1940) : Frost Depth in Forest and Open in Connecticut, Jour. For. 38-4, PP. 346~350
- 50) 満鉄調査局編 (1943) : 土壌侵蝕防止の研究
- 51) ANDERSON H.W. (1947) : Soil Freezing and Thawing as Related to Some Vegetation, Climate, and Soil Variables, Jour. For. 45-2, PP. 94~101
- 52) KITTREDGE J. (1948) : Forest Influence, PP. 161~163
- 53) LINSLEY R.K. and others. (1949) : Applied Hydrology, PP. 151~153
- 54) COLMAN E.A. (1953) : Vegetation and Watershed Management, PP. 86~88
PP. 201~205
- 55) 村井延雄 (1955) : 斜面の侵食と積雪・凍土について, 北大演習林報告17-2, PP. 769~792
- 56) 藤原彰夫外4氏訳 (1956) : 植物生育と土壌, PP. 398~401
- 57) 青木茂一 (1956) : 土壌と植生, PP. 111~125
- 58) SARTZ R.S. (1957) : Influence of Land Use on Time of Soil Freezing and Thawing in Northeast, Jour. For. 55-10, PP. 769~792
- 59) 村井延雄 (1958) : 北海道の水源流域における斜面侵食に関する基礎的研究, 北大演習林報告19-3, PP. 1~98
- 60) STRIFFLER W.D. (1960) : Effects of Forest Cover on Soil Freezing in Northern Lower Michigan, For. Abst. 21-2, PP. 182
- 61) BAY R.R. (1960) : Soil Freezing Observations after Changes in Forest Cover, For. Abst. 21-3, P. 355
- 62) 八代雄蔵 (1943) : 箱根附近の霜崩れについて, 森林治水試験彙報19

- 63) 四手井綱英 (1953) : 赤城の凍土を見て (第1報), 前橋営林局
- 64) 四手井綱英・渡辺隆司 (1954) : 赤城の治山 (第2報), 前橋営林局
- 65) 四手井綱英 (1954) : 森林の雪害と凍害による崩壊について, 信州治山輯録9, PP.6~12
- 66) 渡辺隆司・丸山修三 (1955) : 赤城の治山 (第3報), 前橋営林局
- 67) 倉田益二郎 (1957) : 霜柱による土砂崩落防止の研究, 第67回日林講演集, PP.280~282
- 68) 日本治山治水協会編 (1957) : 関東地方荒廃山地の霜柱凍結防止工に関する研究
- 69) 井上正男 (1957) : 凍上霜柱による土壤侵食状況調査について, 治山1-12, PP.171~175
- 70) 辰野良秋・堀内照夫 (1959) : 霜柱凍上対策について, 新砂防32, PP.21~26
- 71) 遠藤治郎・末勝海 (1959) : 阿蘇山での凍上侵食に関する研究, 山形農林学会報14, PP.32~36
- 72) 稲垣乙丙 (1921) : 農業気象学, PP.255~296
- 73) 藤原咲平 (1924) : 霜柱について, 気象集誌2-2, PP.55~58
- 74) 川野昌美 (1932) : 霜柱の生長速度について, 気象集誌10-4, PP.221~225
- 75) 福田仁志 (1937) : 霜柱について, 東大農学部紀要13, PP.336~360
- 76) 藤田ミチ外 (1937) : 霜柱の研究 I, 自由学園学術叢書
- 77) 藤田ミチ外 (1940) : 霜柱の研究 II, 自由学園学術叢書
- 78) 清野 要 (1940) : 霜柱の発生機構並に文献の紹介, 雪氷2-11, PP.163~168
- 79) 田島節夫・山田直勝 (1942) : 霜柱の発生について, 雪氷4-3, PP.81~84
- 80) BAYER L.D. (1948) : Soil Physics, PP.198~262
- 81) 野口弥吉・福田仁志訳 (1955) : 土壤物理学, PP.205~207
- 82) 芝本武夫 (1955) : 森林土壌, P80, PP.107~108
- 83) 遠藤隆一 (1958) : 砂防工学, PP.224~228
- 84) 門田正也 (1956) : 荒地地造林をめぐる土壌の問題, 林業解説シリーズ, PP.20~26
- 85) 小林 登 (1960) : ベントナイト及び砂による霜柱の防止について, 第70回日林講演集, PP.176~179
- 86) 大後美保 (1952) : 農業気象通論, PP.99~101
- 87) 氏原光二・西尾敏男 (1952) : 耕土の凍上に関する研究 (第1報), 愛知農試彙報6, PP.29~48

Summary

This paper is the observation on the factors which exert an influence on forming of frost heaving. These factors are soil moisture, temperature of refrigeration and soil condition. And then, the object of this investigation is to find the rational method of the control of frost erosion.

The results are summarized as follows:

1) Soil moisture Ice filament was formed on the presence of water in the soil within pF 3.0, it was made from pure water at the moisture content of pF 0~2.0, but on the presence of water of pF 2.0~3.0 soil particles took part in it, the volume of ice filament was approximately in proportion to the volume of water in the soil.

2) Temperature of refrigeration The volume of ice filament increased with the effective accumulative temperature, and the curve of this relation was fitted a straight line.

3) Nature of soil It is recognized that the form of ice filament was alike to the locus of the pore space in the surface soil, and that the volume and the form of ice filament depended on the soil conditions.

4) Direction of slope Frost heaving was most repeatedly found out on the north slope, and its frequencies decreased in order of the east, the west and the south slope.

5) Method of control The most effective method was to cover the ground surface with the object of intercepting the thermic conduction.