



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	寒冷少雪地帯の十勝地域における農地保全に関する研究
Author(s)	辻, 修
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第4864号
Issue Date	1995-12-25
DOI	https://doi.org/10.11501/3108218
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51295
Type	doctoral thesis
File Information	000000292958.pdf



寒冷少雪地帯の十勝地域における
農地保全に関する研究

辻 修

寒冷少雪地帯の十勝地域における

農地保全に関する研究

目 次

第 1 章 緒言	1
第 1 節 十勝農業の歴史と自然	3
1 - 1 十勝農業のおいたち	3
1 - 2 十勝の位置	4
1 - 3 十勝の気象	4
1 - 4 十勝の土壌	7
第 2 節 水食の概要	1 2
2 - 1 水食に影響する因子	1 2
2 - 2 水食の種類	1 4
2 - 3 水食研究の流れ	1 6
第 3 節 侵食予測 (U S L E)	2 2
3 - 1 降雨係数 R	2 2
3 - 2 土壌係数 K	2 4
3 - 3 傾斜斜面長係数 L S	2 5
3 - 4 作物係数 C	2 5
3 - 5 保全係数 P	2 6
第 4 節 土壌侵食と農地保全システム	2 7
4 - 1 土壌侵食防止農法	2 7
4 - 2 土壌侵食防止工法	2 8
第 5 節 研究目的	3 0
第 2 章 造成農地の土壌侵食	3 2
第 1 節 造成農地の圃場面での侵食	3 4

第 2 節	造成農地法面の土壌侵食と崩壊	4 5
2 - 1	法面土壌侵食調査方法	4 5
2 - 2	法面の侵食・崩壊実態	5 2
2 - 3	法面の土壌凍結が侵食に与える影響	5 6
2 - 3 - 1	法面における土壌凍結	5 6
2 - 3 - 2	法面における土壌凍結経歴が 法面侵食に与える影響	6 0
2 - 3 - 3	法面方向が土壌侵食に与える影響	6 5
2 - 4	法面降雨と計画排水量	6 7
第 3 章	造成草地の土壌侵食	7 1
第 1 節	調査方法	7 2
第 2 節	山間地域における降雨の特徴	7 4
第 3 節	造成年度別の土壌侵食被害	8 1
第 4 節	造成草地における水食	8 4
4 - 1	草地造成における造成勾配と土壌侵食	8 4
4 - 2	草地造成における地形と土壌侵食	8 8
第 5 節	蹄侵食	9 4
第 4 章	土壌凍結と侵食に関する実験	9 9
第 1 節	表層凍結斜面の侵食	1 0 0
1 - 1	人工降雨装置と実験方法	1 0 0
1 - 2	表層凍結斜面の侵食実験結果	1 0 5
1 - 2 - 1	表層凍結斜面の流出特徴	1 0 5
1 - 2 - 2	表層凍結斜面の流出開始時間	1 0 8

1 - 2 - 3	表層凍結斜面の流亡土量	-----	1 0 9
1 - 2 - 4	表層凍結斜面侵食の経時変化	-----	1 1 1
1 - 3	表層凍結斜面侵食の特徴	-----	1 1 3
第 2 節	表層融解斜面の侵食	-----	1 1 7
2 - 1	実験方法	-----	1 1 7
2 - 2	表層融解斜面の侵食実験結果	-----	1 1 8
2 - 2 - 1	表層融解斜面の流出特性	-----	1 1 8
2 - 2 - 2	表層融解斜面の流亡土量	-----	1 2 2
2 - 3	表層融解斜面侵食の特徴	-----	1 2 6
第 3 節	凍結融解繰り返し斜面の侵食	-----	1 2 7
3 - 1	実験方法	-----	1 2 7
3 - 2	凍結融解繰り返し斜面の侵食実験結果	----	1 2 9
3 - 2 - 1	凍結融解繰り返し斜面の流出特性	--	1 2 9
3 - 2 - 2	凍結融解繰り返し斜面の流亡土量	--	1 3 4
3 - 3	凍結融解繰り返し斜面侵食の特徴	-----	1 3 6
第 5 章	北海道・十勝地域における土壌侵食の予測	----	1 3 9
第 1 節	寒冷多雪地域における土壌侵食	-----	1 4 0
1 - 1	北雨地区における実験方法	-----	1 4 0
1 - 2	試験期間における降雨状況	-----	1 4 0
1 - 3	降雨係数	-----	1 4 6
1 - 4	傾斜係数	-----	1 4 6
1 - 5	土壌係数	-----	1 4 9
1 - 6	保全係数	-----	1 5 2
1 - 7	降雪期間における降雨係数	-----	1 5 4

第2節 寒冷少雪地域における土壌侵食の予測	----- 1 6 0
2-1 実験方法	----- 1 6 0
2-2 実験期間の気象概況	----- 1 6 4
2-3 降雨係数	----- 1 7 0
2-4 融雪期における流出状況と降雨係数	----- 1 7 8
2-4-1 融雪期の表面流出状況	----- 1 7 8
2-4-2 降雪期間における降雨係数の推定	--- 1 8 0
第6章 総括	----- 1 8 3
謝辞	----- 1 8 8
引用文献	----- 1 8 9

第1章 緒言

日本農業は従来、水田を中心におこなわれ、農地といえば水田という図式が弥生時代以来延々と続いてきた。水田は土壌侵食を防止する形状であるため、水食の恐れは少なく、わが国における水食防止は山間部の急傾斜地やシラス等の特殊土壌地帯の水田開発困難地に限定され、土壌侵食防止対策はあまり問題視されていなかった。明治維新以降入植の行われた北海道でも道南から石狩、上川地域においては、開拓当初は畑作であったが、稲作技術が向上し畑作から稲作への転換が図られ、ここでも土壌侵食はあまり問題視されなかった。

しかし、ここ十勝地域では火山灰という土地条件から入植当初の畑作が基幹産業となり現在へと継続されている。このような条件下における十勝地域では土壌侵食問題は避けては通れない重要な問題であった。それに加え昨今の農業経営の大規模化、大型機械導入により、造成農地も小面積から大面積へ、平坦地から山間部の傾斜地へと進んでいった。

このような農地開発の推移により、ここ十勝地域はもとより全道いたるところで、戦後の農地拡大政策とともに農地における土壌侵食が大きな問題のひとつとなってきた。

本研究は、北海道のなかでも特に寒冷、少雪である十勝地域を対象として、土壌侵食について農地造成地・草地造成地の現地調査を行うとともにその問題点の究明のため室内実験、傾斜枠試験などを行った。そしてこの結果を基として、寒冷地域の特徴である土壌凍結、融雪も含めた農地の侵食・破壊機構を把握すると同時に、侵食

量の推定を検討し、十勝地域における農地保全対策の確立を目指した。

十勝農業の歴史と現状

十勝農業の歴史は、戦前戦中戦後の三つの時代に分けられる。戦前は、農業は地域の主要産業であり、農家は自給自足の生活を営んでいた。戦中は、戦時体制の下で、農業は食糧増産のために重要な役割を果たした。戦後は、戦時体制が崩壊し、農業は再び自給自足の生活に戻った。戦後は、農業は地域の主要産業であり、農家は自給自足の生活を営んでいた。戦中は、戦時体制の下で、農業は食糧増産のために重要な役割を果たした。戦後は、戦時体制が崩壊し、農業は再び自給自足の生活に戻った。

戦後は、農業は地域の主要産業であり、農家は自給自足の生活を営んでいた。戦中は、戦時体制の下で、農業は食糧増産のために重要な役割を果たした。戦後は、戦時体制が崩壊し、農業は再び自給自足の生活に戻った。戦後は、農業は地域の主要産業であり、農家は自給自足の生活を営んでいた。戦中は、戦時体制の下で、農業は食糧増産のために重要な役割を果たした。戦後は、戦時体制が崩壊し、農業は再び自給自足の生活に戻った。

1991年、農業基本法が改正され、農地の保全と農家の所得向上が目的とされた。また、農地の保全と農家の所得向上が目的とされた。また、農地の保全と農家の所得向上が目的とされた。

第1節 十勝農業の歴史と自然

1-1 十勝農業のおいたち

十勝開発の最初は慶長年間に松前藩が「ビロ一場所」を設け、十勝アイヌと交易を始めたのが和人による十勝開発の始まりである。

¹⁾そして十勝農業が組織的な生産活動を始めたのは1883年に、静岡県加茂郡の依田勉三の率いる「晩成社」が開拓団を組織して帯広に入植したのが最初である。²⁾その後、1886年北海道庁が置かれ、開拓を促進するための開拓地調査が始まり、1891年帯広を起点とする第1次植民地の区画割りが行われ、300間ごとの区画を6つに分け100間に150間を小区画として、一区画5町歩を1戸分の貸付地としたところから本格的な十勝農業が始まる。しかし、道の開拓方針が道央の入植に重点を置いたため、土地貸与が本格的に始まる1896年以降に多くの入植者が団体を組織し、来勝し、開墾が広がっていった。³⁾

開拓当初は、大豆を中心とする豆作りが増えていったが日露戦争による景気の変動や冷害凶作によって農家の貧窮が続いた。その後、第1次世界対戦が勃発すると豆価格が暴騰し、豆成金もでる好景気が到来するが、戦争の終了とともに価格は暴落し、昭和初期の不景気につながっていった。そして、そのなか不在地主などを主とする大規模農牧場が出現し、小作農を募集して開墾するようになっていった。そして、1945年の農地解放時には、小作、自小作合わせて55.1%におよんでいた。⁴⁾

1961年、農業基本法が制定されると農業の近代化と米作依存型農業からの脱却が図られ、盛んに中山間部における農地開発が行われ

るようになってきた。

そして現在、十勝の農業は広大な耕地と自然条件に恵まれ、豆作を中心としたかつての農業形態から脱却し、わが国の代表的な畑作・酪農地帯として大きく発達し、わが国の食料基地の重要な一端を担うまでにいたっている。

1-2 十勝の位置

北海道における十勝地域の位置を図-1-1に示す。十勝地域は、北海道の東部に位置し、北は大雪山系、西は日高山脈、東は阿寒山地・白糠丘陵、南は太平洋に囲まれた東西110km、南北163kmの封鎖的地形をなしている。その面積は10,831km²で全道面積83,519km²の13.8%を占める。道内14支庁のうちで最大で岐阜県の面積10,492km²に相当する。

また緯度経度でその位置を表すならば、北緯42°09'～43°38'、東経142°40'～144°02'の範囲であり、ヨーロッパではイタリアのローマ、北米ではアメリカ合衆国のシカゴ、ボストン、極東ではロシアのウラジオストクに匹敵する。

そして人口は、356,095(1990)人で北海道の6%を占める。⁵⁾

1-3 十勝の気象

十勝地域は亜寒帯に属する北海道にあって大陸性気候であることが大きな特徴である。その月別気象経過を札幌と比較して図-1-2に示す。⁶⁾



図-1-1 十勝地域の位置

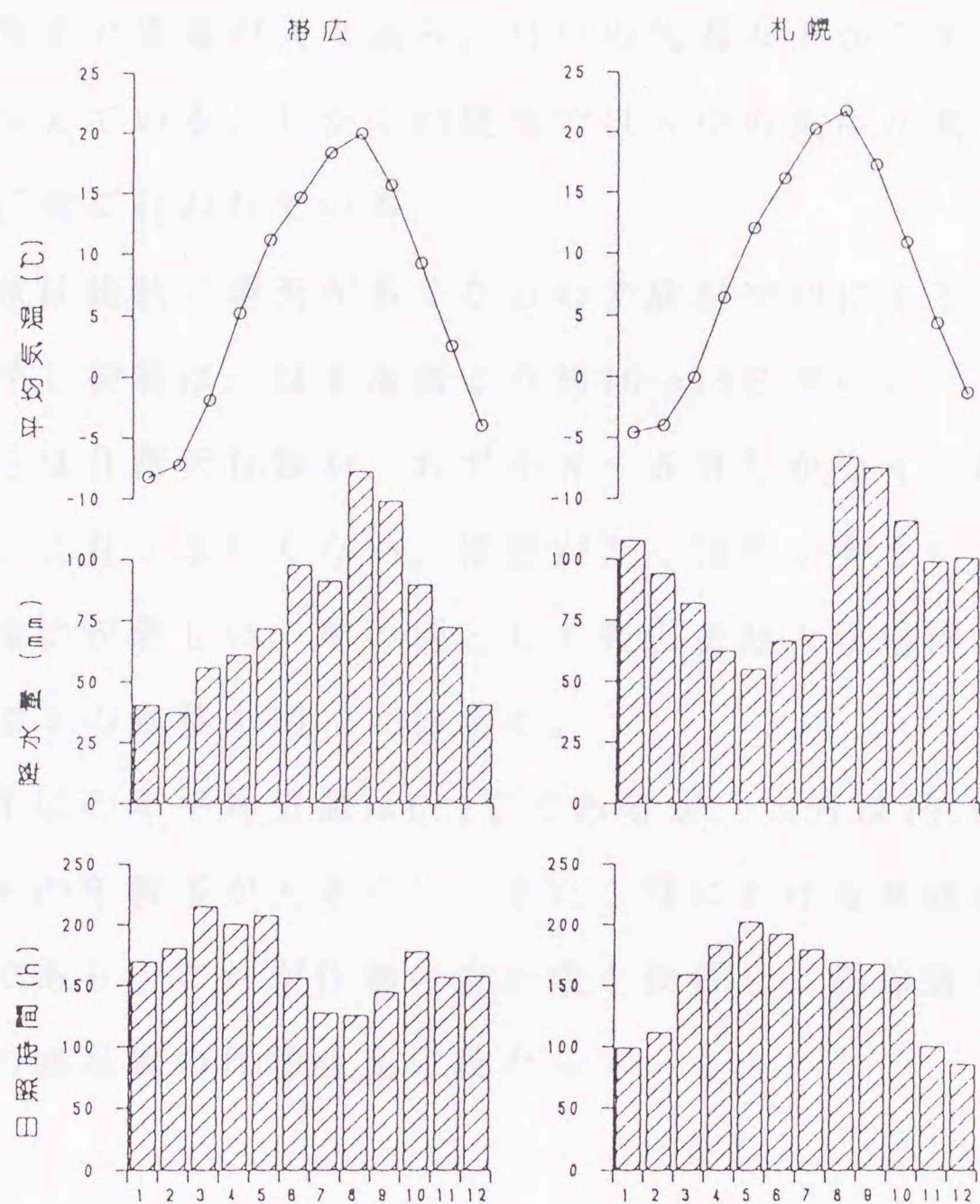


図-1-2 帯広と札幌の平年値の気象経過(1961～1990)

十勝の春は北西季節風が日高山脈でフェーン現象を起こし、乾燥した「馬糞風」が風食を起こす。

夏は海岸地方で海霧が長期に渡って発生し、南寄りの風によって内陸まで海霧が入り込み、日中の気温も上がらず農業に大きな制約を与えている。しかし内陸部では日中の気温が高くなるため、畑作が活発に行われている。

秋は晩秋に晴天が多くなるので放射冷却による初霜が早く訪れる。しかし初雪は、日本海側より約10～15日遅い。

冬は月曇天日数が、わずか5～6日しかなく、降雪も少なく雪のない正月も珍しくない。根雪が遅く積雪が少ないため寒さによる土壌凍結が著しい。その例として帯広畜産大学構内で測定した土壌凍結深さの推移を図-1-3に示す。

帯広の年平均気温は6.1℃であるが、8月は19.6℃、1月は-8.5℃とその年較差が大きく⁷⁾、また1日における寒暖差が大きいのが特徴であり、これが作物の光合成を助長し、馬鈴薯やスイートコーン等の高品質の作物生産に役だっている。

1-4 十勝の土壌

十勝地域の農牧地および農牧適地の土壌は、火山性土、褐色森林土、疑似グライ土、低地土、泥炭土の5種類に大きく分類される。その分類と面積比を表-1-1に示す。そして分布を図-1-4に示す。

火山性土は、十勝の土壌の約5割を占め十勝の主要な農耕土壌である。そして火山性土は乾性と湿性に分類でき、乾性火山灰土は腐植含量は少ないが適潤性の土壌であり農耕に適している。しかし湿

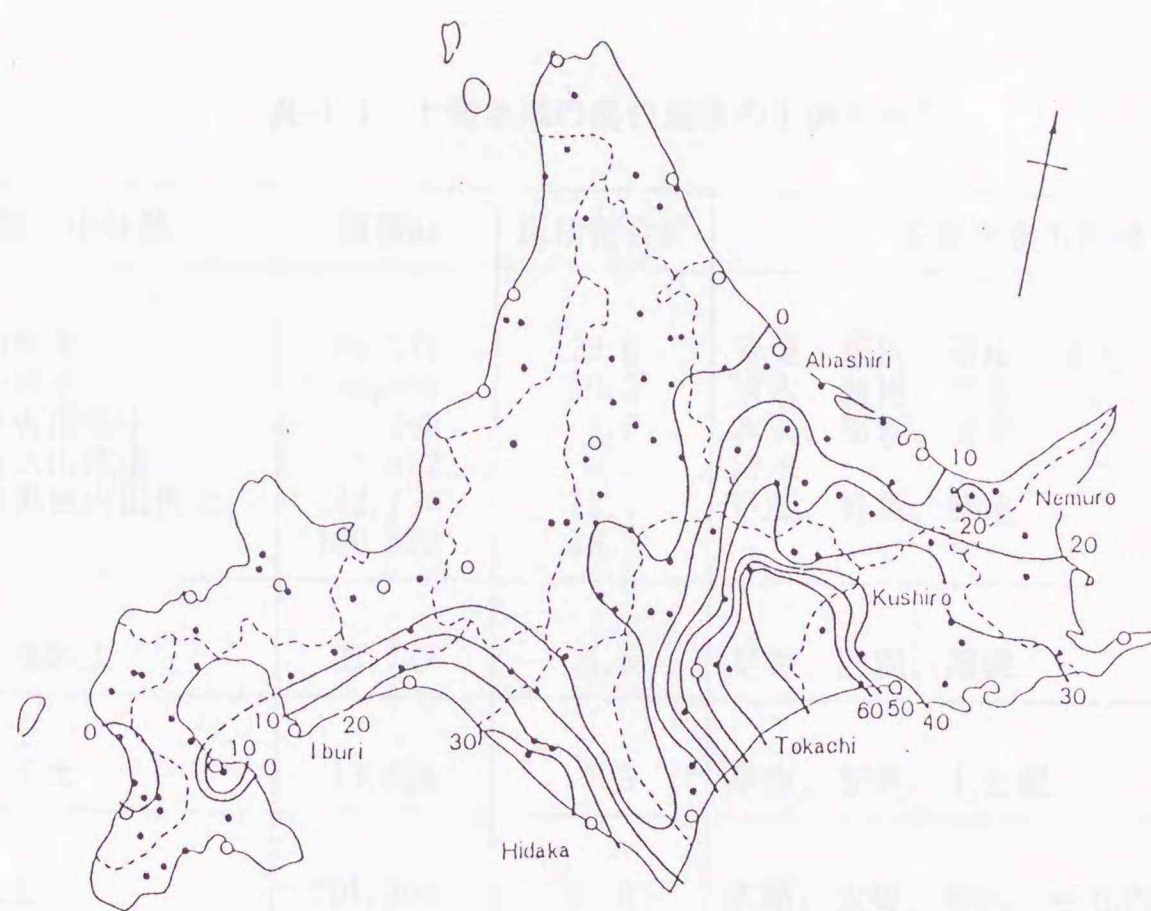


図-1-3 最深土壌凍結深の分布⁸⁾ (cm)

表-1-1 十勝地域の農牧適地の土壌分類⁹⁾

大分類・中分類	面積ha	面積割合%	主要分布市町村
火山性土			
褐色火山性土	84,571	22.6	音更、幕別、帯広、芽室、鹿追
黒色火山性土	38,198	10.2	清水、新得、芽室
湿性黒色火山性土	13,368	3.6	本別、更別、音更
厚層黒色火山性土	1,672	0.4	清水
湿性厚層黒色火山性土	42,726	11.4	帯広、音更、芽室
小計	180,535	48.1	
褐色森林土			
酸性褐色森林土	21,727	5.8	足寄、陸別、浦幌
疑似グライ土			
疑似グライ土	13,026	3.5	足寄、音更、上士幌
低地土			
褐色低地土	101,294	27.0	広尾、大樹、帯広、中札内、幕別
灰色低地土	40,151	10.7	音更、浦幌、士幌
グライ低地土	5,565	1.5	池田、豊頃
小計	147,010	39.2	
泥炭土			
低位泥炭土	12,663	3.4	豊頃、浦幌、幕別
計	374,961	100.0	

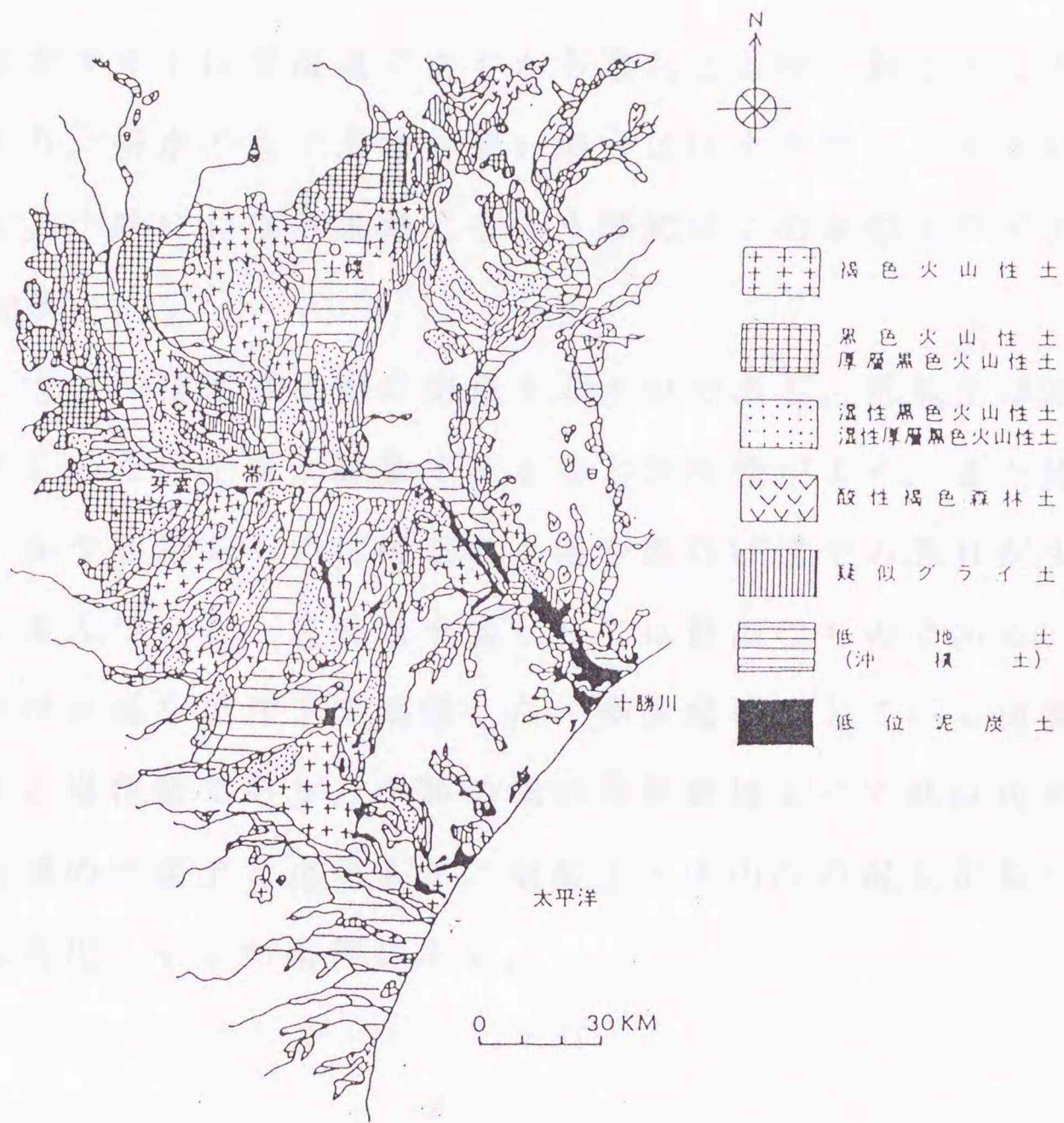


図-1-4 十勝地域の農牧適地の土壌分布図¹⁰⁾

性火山灰土は、腐植含量は多いが排水は不良である。

十勝地域の褐色森林土は、すべて塩基飽和度の低い酸性褐色森林土でありその大半が台地の土壌である。そのため傾斜地が多く表土の流亡に注意する必要がある。また、作土は改良されていても心土は強酸性であるので矯正が必要である。

疑似グライ土は北海道で古くから重粘土と呼ばれてきた土壌の一種であり、排水不良で湿性が強い場合は作土直下から明るい灰色を呈する。十勝における重粘土という呼称はこの疑似グライ土を示す場合が多い。

低地土は沖積世堆積物に由来する土壌である。低地土は堆積の時期が新しいため土層が膨軟であるなど物理性がよく、また地下水位が低くかつ砂質あるいは礫質の土壌を除けば過干の恐れが少なく、養分に富んでいる。農耕地土壌としては最高のものである。

泥炭は多湿な条件下で集積した、多少腐植化している植物遺体を主とする堆積物であり、十勝地域の泥炭地はすべて低位泥炭であり、他の地域の泥炭土と比べると、氾濫土・火山灰の混入が多く農地としては利用しやすい条件にある。

第2節 水食の概要

2-1 水食に影響する因子

土壌侵食に関する諸因子は一般に次のような式で表わされる。¹¹⁾

$$E = f(C, T, V, S, H)$$

ここに E : 侵食量

C : 気候因子 (主として降水の量と強度)

T : 地形因子 (特に勾配と集水面積等)

V : 植生因子 (生育する植物の種類、生育量、特性)

S : 土壌因子 (特に物理的性質)

H : 人類の活動因子 (特に農業活動)

これら水食に影響する諸因子のうち、気象と地形は、人為的に変化させることは困難であり、恒常的因子といわれ、植生や土壌の性質は、比較的容易に人為的に改良しうるもので、可変的因子といわれ土壌侵食の防止に当っては、これら可変的因子に人工を加えることによって、侵食の発現を抑制することが重点となってくる。ただ最近では農地造成時に恒常的因子とされている地形についても、人為的に改良を加える場合が多くなってきている。そこで、水食を防止する対策を考慮する観点から土壌、地形、土地利用と水食の関係について示す。

水食に影響を与える土壌の性質としては、雨水が土壌中に浸透する速度と流去水的作用に対する抵抗性の大小の2点が考えられる。

土壌の間隙はその大きさにより毛管間隙と非毛管間隙に大別され、

透水性の良否はおもに後者によって決められる。すなわち、水の移動は土壌構造や生物が作った穴によりできている非毛管間隙の量とその形状によって左右される。また浸透速度は透水性のもっとも低い層によって決められるもので、ち密で不透水性の土層を有する傾斜地では、激しい侵食を受けやすい。

地表が裸出した所では雨滴の打撃作用により土壌は分散し、これが土壌間隙をふさぐために透水性がきわめて不良となる。これに反し、被覆が行われ膨軟になっている表土では浸透量が多く、したがって流去水量は小さくなり、侵食を受けにくいことになる。このように一般の畑地では、作物や有機質による被覆の有無、耕起のような土壌管理の程度など人為的な要因が、表土の透水性に大きな変化を与えるという点に注意する必要がある。

土壌の抵抗性の面からみると、土壌の流亡は雨によりまず飽和されたのち、粒子が分散され、懸濁状態を経て流去水による移動がはじまる。したがって、土壌の分散の難易が流亡に対する大きな因子で、これは腐植の質および含量などにより影響されるといわれている。

侵食作用と関係が深いとされている土壌の理化学的な性質としての指標として、1. 土壌分散性に関して分散率、2. 透水性に関して透水率、3. 粒径に関して粘土率、4. 化学性に関するもの、などが代表的である。

次に、水食に関係する地形的因子としては傾斜と斜面長が問題となる。傾斜の角度と長さの大小は、流去水の速度、土壌の流亡程度などを支配し、直接水食に大きく関係するばかりでなく、農業経営上にもきわめて密接な関係をもってくる。

一般に傾斜が急になれば流去水の速度が大きくなり、大きな粒子をも流し去るので、土壌の流亡量がいちじるしく増大する。また一般に斜面が長くなるほど水食による土壌流亡量は大きくなるといわれているが、透水性の大きい土壌では影響が小さく、透水性が不良になるほど影響が強く現われるようになる。いずれにしろ、降雨、土壌、植生など各種の条件に左右され、一概に規定することは困難である。

しかしながら、土木的手法により、侵食要因を減少させるための、最も重要な手段であり、農地保全対策の面からの改良山成畑の傾斜や区画形状を決定する大きな要因である。

水食を土地利用の面からみると、植生的因子があげられる。植物は流去水を調節し、土壌の流亡を抑制する効果をもっている。この原因は地上部の植物被覆によって土壌表面を保護し流去水を調節するという直接的な作用と、地下部の発達によって土壌構造に変化を与えるという間接的な作用である。

植物被覆による降雨の遮断は落下雨滴の土壌面を打撃する力を弱め、分散した土の粒子によってできる不透水性の土膜の形成を抑えて、侵食量を軽減するのに役立っている。また、植物の根が、土壌構造の発達と透水性の改良にはたしてどのような機構で影響しているかについては、まだ明らかでないが、現象的にはこれらの土壌要因が根の作用によって質的に変化し侵食抑制に大きな効果があることが確認されている。

2-2 水食の種類

水食の形態は、面状侵食、細流侵食、ガリ侵食の3種類に大別す

ることができる。¹²⁾

面状侵食(sheet erosion)は、表面流出水が斜面をほぼ均一な厚さで流下し、傾斜地全域にわたり土壌が薄層をなして流亡する現象である。この場合原土が組成分のままで流去することではなく、養分、有機物、粘土が著しく流亡するために肥沃な圃場もやせてしまうことになる。しかし、その被害の程度が顕著でないので放任されがちになり、長期にわたると危険性が増す。また近年、Hudsonはこの面状侵食について“表層侵食という、薄層の水の流れによって地表面全体の土粒子が一様に取り除かれるという状態を心に描くが、この分類は水食現象を理解するには適切ではなく、水食の過程の最初でしかも最も重要な雨滴の飛散や雨滴衝撃の影響を忘れており、これはどう見ても間違っている。表面水流はめったに滑らかな層流状態としては起こらないし、水が層流状態で流れる時には、耕地で通常起こる流速よりもはるかに大きい速度でしか洗掘しない。そして、雨滴による土粒子の飛散とその剥離された土粒子が薄い表面流によって輸送される段階にはインターリル侵食(interrill erosion)なる名称の方がより適切で、この時の表面薄層流は雨滴衝撃による攪乱によってその侵食能力が増加する”¹³⁾と述べている。

細流侵食(rill erosion)は、表面流出水が斜面を平らに流下せず、細かく分かれた水ミチを主として流れ、地表に細かく浅い溝をつくる現象である。特に、道内の場合春先の融雪水による被害がこの細流侵食として現れてくる。

ガリ侵食(gully erosion)は、細流侵食が拡大して次第に深い溝をつくったり、畑の畦間、踏跡、斜面のタルミなどに流出水が集まって深い排水路のような溝をつくる現象であり、その水みちが農作業

機械の運行に支障を生ずるほどに発達した状態を指す。しかし細流侵食との間には厳密な区別の基準はない。

十勝管内の被害の例を写真－１－１と写真－１－２に示す。写真－１－１は、草地造成後１～２カ月の降雨による侵食で、程度としてはリル侵食である。写真－１－２は、畑面の春先の融雪水による侵食で程度としてはガリ侵食である。

2－3 水食研究の流れ

土壌流失は自然現象で、地球の誕生以来続いてきた。上流地帯の侵食があるからこそ、平野部に土が供給され、肥沃な河口のデルタが形成される。土壌や気候条件によって異なるが、土壌侵食量が許容基準内であれば自然現象の枠内であり、土壌侵食を防止する必要はない。だが、流失量が自然現象の枠をはみ出したところから深刻な問題となってきた。

土壌侵食研究の先駆的立場にある米国でも、北米大陸中央部の大平原地帯で、開墾が本格的に始まってまもなくの1880年代、ついで1920年代にも大量の表土が、風でまいあげられ雨で流れ出した。最大の危機は、30年代に大恐慌とあい前後して起こった大干ばつとともにやってきた。中部から西部一帯にかけて大砂塵が覆った。オクラホマ、テキサスなど中、南部5州は畑の表土が失われて凶作となり、農民が次々に別の土地を求めて流民となった。この有様を描き出したのが、スタインバックの名作「怒りの葡萄」である。¹⁴⁾

このような犠牲を払ってはじめて土壌侵食の研究が真剣味を帯びてきた。すなわち、1935年農務省内に土壌保全局を設置し、全米に

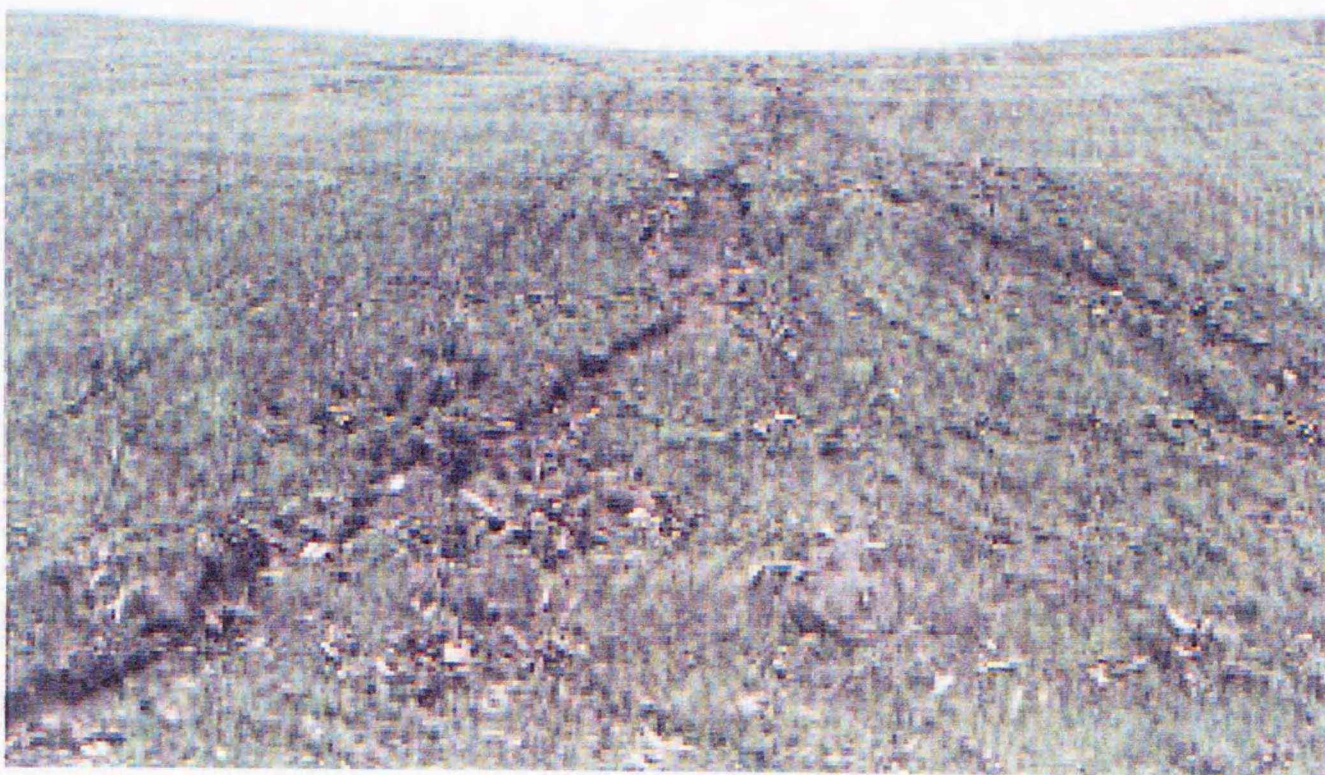


写真-1-1 草地のリル侵食 (1985,7)



写真-1-2 農地のガリ侵食 (1985,4)

渡って、土壌侵食の防止に取り組み、土壌保全の意義と重要性を認識させるための啓蒙を行ってきた。

その本格的な土壌流亡予測式の開発は、合衆国コーンベルト地帯においてZinggによる土壌流亡と地表勾配、傾斜長に関する研究¹⁵⁾で始まった。その翌年、Smithは、この式に作物因子と作物管理因子を付加するとともに許容土壌侵食量の概念を提示した。¹⁶⁾そして1946年、オハイオ州においてこのコーンベルト地帯における土壌流亡予測式を他の栽培作物のある地域に当てはめるべく国内会議が催された。そしてこの会議によってコーンベルト地帯における侵食要因の再考を行い、これに降雨係数をつけ加えた。ここで得られた式は一般にMusgrave式としてよく知られている。この式は、流域の洪水による土壌流亡土量の軽減計画に広く使用された。¹⁷⁾

翌年Browingは、アイオワ州における実験を基に土壌係数と作物管理係数の簡単な表を使用する土壌流亡予測式を発表した。¹⁸⁾

その後の1952年、Lloydはモノグラフによる予測式を発表し、合衆国北西州においても使用されるようになった。¹⁹⁾

その後、1954年合衆国科学教育局とパデュー大学との協力において設立された土壌侵食研究所において現在、もっとも世界中に普及しているUSLE (Universal Soil Loss Equation) と呼ばれる土壌流亡予測式²⁰⁾が作成された。このUSLEは49の調査地点における10,000件以上の流出と流亡土量のデータをもとに土壌侵食研究所において統計的解析が行われ、作成されたものである。その後、MeyerとMcCuneはインディアナ、ジョージア、ミネソタ、ネバラスカにおいて行った降雨再現装置による流出試験をもとに、USLEのデータ収集を行っていない州の各係数の算出のため16の州において

野外実験を行った。^{2.1)}このように開発当初は限られた地域のための土壌侵食予測式であったU S L Eは、このような補足実験等を積み重ねることによって1978年、現在使用されているハンドブックとなった。

しかしこの式も合衆国の降雨特徴を根拠とした統計を手法に用いた経験式の一つであるため、この式を他の国に適応させていく実験（例えばWilsonのカナダ、シムコーチング湖付近の農地における土壌侵食の研究^{2.2)}、LaneによるオーストラリアにおけるU S L Eの適応^{2.3)}等）が数多くなされる一方で、U S L Eの不足部分の改善を求めようとする研究（例えばMcCoolによるU S L Eにおける傾斜係数の見直し^{2.4)}、WilliamsによるEI値の計算に雨量の測定方法が与える影響^{2.5)}等）、他方現在のコンピュータの発達により、Finknerの数理式を用いた雨水の掃流力から流亡土量を予測する研究^{2.6)}などが発表され現在にいたっている。

一方、日本における水食の研究は、戦後の食糧増産計画とともに水田から畑作への展開が計られていく中で発展して行った。そして、この分野の研究は1950年、種田による一連続降雨における土壌流亡量と降雨強度に関する研究^{2.7)}から始まる。翌年、三原が強雨、中雨、弱雨の3つの型に対する雨滴粒径のパターンを究明し^{2.8)}、その後、種田の帯状作付けが土壌侵食に与える影響に関する研究^{2.9)}、前川の各地における傾斜杵を使用した土壌侵食の研究^{3.0)}、金子の統計的手法を用いた土壌侵食に関する研究^{3.1)}、種田の地表面の薄層流による土壌侵食の研究^{3.2)}など多数の研究成果が発表された。

1970年代になると研究はよりミクロへと移行し、河野による水滴の運動エネルギーと飛散量に関する研究^{3.3)}や、松田による降雨径の

測定法に関する研究³⁴⁾が発表された。そして侵食量の予測においては、種田が降雨エネルギーと土壤侵食の関係について侵食に対する有効降雨強度の解明³⁵⁾を行った。

1975年以降1979年には、農業土木学会に農地保全研究部会が発足し、U S L Eの日本への適応を含めた農地保全の研究が進んでいった。

まず、1975年には、種田がこれまでの土壤侵食の研究成果をまとめ、わが国における農地の降雨侵食の予測³⁶⁾を発表し、翌年わが国主要都市の降雨係数と限界侵食期を明らかにした。³⁷⁾

その後、福桜等はレインガンを用い、野外傾斜畑における土壤流亡量を測定し、³⁸⁾高木はガリの発達が生じた土量に影響することを明らかにした。³⁹⁾また松本は、侵食は降雨強度4mm/10min以上の雨に支配されること⁴⁰⁾や、福桜が畝立てによる土壤流亡量の違い等を明らかにした。⁴¹⁾その後ガリ侵食に関しては、松本の開畑に伴うガリ侵食に関する研究⁴²⁾や高木によるガリ縦横断形特徴とその発達に関する研究⁴³⁾を行った。運動方程式からの土壤侵食の解明は、日下により雨水流による土壤の侵食特性に関する研究⁴⁴⁾、また飛散侵食の指標としての粘土比の一連の研究が藤川⁴⁵⁾、⁴⁶⁾、⁴⁷⁾により行われた。

これ以降、土壤侵食に関する研究が活発に行われるようになり、大別すると雨水の掃流力による流亡土量の予測に関する研究⁴⁸⁾、ガリ網の発達シュミレーションに関する研究⁴⁹⁾、重回帰による流亡土量の予測に関する研究⁵⁰⁾、雨滴のエネルギーと飛散侵食に関する研究⁵¹⁾、U S L Eの各係数に関する研究⁵²⁾等数々の研究が前述した農地保全研究部会のメンバーによって発表されていった。

北海道においても、寒冷地という観点に立った研究として、佐藤

の土壌の凍結融解と侵食に関する研究⁵³⁾、長沢等の土壌の凍結融解が土の耐食性に与える影響に関する研究⁵⁴⁾、同じく長沢等の草地開発地域における土壌侵食に関する研究⁵⁵⁾、沢田等の侵食防止としての心土破碎に関する研究⁵⁶⁾、長沢の積雪寒冷地域における農地保全に関する研究⁵⁷⁾、北海道におけるU S L Eの適応に関する研究⁵⁸⁾等が行われてきた。

本研究も寒冷である北海道の中でも特に寒冷少雪である十勝地域の土壌侵食に視点を置き研究を行ったものである。

第3節 侵食予測 (USLE)

USLE (Universal Soil Loss Equation) は米国において Wischmeier らによって開発された土壌流亡予測式で、年間の平均土壌侵食量を6つの因子の積で表す方法であり、米国各地の長年にわたる降雨～侵食量データを統計的に分析して実用化された経験式である。USLE式、各係数の説明を以下に示す。⁵⁷⁾

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{----- (1-1)}$$

ここに

A : 単位面積当たりの流亡土量 (t/ha)

R : 降雨係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{hr})$)

K : 土壌係数 ($\text{hr} \cdot \text{t} / (\text{tf} \cdot \text{m}^2)$)

L : 斜面長係数

S : 傾斜係数

(LとSで傾斜斜面長係数LSとすることが多い)

C : 作物係数

P : 保全係数

3-1 降雨係数 R

降雨係数は、降雨侵食指数を数値化したものである。侵食性降雨ごとの降雨エネルギーEとその降雨のピーク降雨強度Iとの積EIの年間合計値と定義されている。侵食性降雨とは総降雨量12.7mm以

上で、それ以前の無降雨時間が6時間以上のものであり、また15分間で6.4mmを越える場合も侵食性降雨とみなされる。E I 値は単に降雨の侵食エネルギーを表すものではなく、雨滴による土粒子の剥離、運搬など、降雨の侵食性を総合的に評価する指数である。

USLEにおける降雨係数の算出法について説明する。

$$E_k = 210 + 89 \times \text{Log}_{10} I \quad (\text{m} \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{cm})) \quad \text{--- (1-2)}$$

E_k : 一連続降雨中の各10分間降雨エネルギー

I : 降雨強度 (cm/hr)

$$E = E_k \times r \times 1/100 \quad \text{--- (1-3)}$$

E : 一連続降雨における降雨エネルギー

r : 一連続降雨中の各時間降雨量 (cm)

$$EI = \sum E \times I_{30} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{hr})) \quad \text{--- (1-4)}$$

I_{30} : 一連続降雨中の30分間ピーク降雨強度 (cm/hr)

ここで I , I_{30} は次のようにして求められる

$$I = 10 \text{分間雨量 (mm)} \times 0.1 \times 60/10 \quad \text{--- (1-5)}$$

$$I_{30} = \text{最大30分間雨量 (mm)} \times 0.1 \times 60/30 \quad \text{--- (1-6)}$$

ゆえに降雨係数 R は一年間の合計値であるから

$$R = \sum EI \quad (\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{hr})) \quad \text{--- (1-7)}$$

なお積雪寒冷地域においては融雪期の凍結土壌上での融雪水や降雨による土壌侵食を考慮し、12月～3月の総降水量を1.0倍することにより融雪水係数 R_s を算出し、これを降雨係数 R に加算し使用している。

3-2 土壌係数 K

土壌係数は、その地域の土壌の受食性を示す指標である。この値は他の因子とは異なり、観測によって実験的に決定されるものである。もし裸地で、上下耕を施している圃場の場合の土壌係数を算出するには、基本式を変形して求めることができる。

$$K = A / (R \cdot L S) \quad (\text{hr} \cdot \text{t} / (\text{tf} \cdot \text{m}^2)) \quad \text{--- (1-8)}$$

A : 単位面積当りの流亡土量 ($\text{t} / (\text{ha} \cdot \text{yr})$)

R : 降雨係数 ($\text{m}^2 \cdot \text{tf} / (\text{ha} \cdot \text{hr})$)

$L S$: 傾斜斜面長係数

また、USLEでは土壌の粒度組成、有機分含有量、土壌構造、透水性から土壌係数を求める推定式も示されている。

$$K_u = 0.01 \{ 2.1 M^{1.14} (10^{-4}) \cdot (12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3) \} \quad \text{--- (1-9)}$$

ここで、 M : 粒形パラメータ = シルト% $\times$ (100-粘土%)

a : 有機物含有量 (%)

b: 土壌構造コード

c: 土層透水性級位

3-3 傾斜斜面長係数 LS

斜面長係数 L と傾斜係数 S は、畑面の斜面長と勾配の土壌侵食に関わる度合を示す地形要素の侵食性指数である。多くの場合、USLE ではこの二つの係数を組み合わせて LS として用いる。以下に式を示す。

$$LS = (L/22.1)^m \cdot (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065) \quad \text{--- (1-10)}$$

L : 斜面長 (m)

θ : 傾斜角 (度)

m : 傾斜が5%以上のとき 0.5

傾斜が3.5~4.5%のとき 0.4

傾斜が1~3%のとき 0.3

傾斜が1%未満のとき 0.2

3-4 作物係数 C

作物係数は、作物の種別とその生育状態で定まる係数である。ある状況下の耕作地からの流亡土量と、清耕状態の裸地からの流亡土量との比として定義される。この係数は地域性の違いにより、同一作物、輪作体系であっても同じ値になるとは限らないため、作物係数を得るには地域の降雨特性や作物管理状況などの正確な情報が必

要となる。

3-5 保全係数 P 係数 P は、ある保全方法を取り入れた場合、その効果を示す係数である。ある保全対策がなされている場合の流亡土量と、清耕裸地斜面の流亡土量との比で示され、作物係数のような営農上の侵食抑制対策は含まない。

保全係数は、農地の保全方法を取り入れた場合、その効果を示す係数である。ある保全対策がなされている場合の流亡土量と、清耕裸地斜面の流亡土量との比で示され、作物係数のような営農上の侵食抑制対策は含まない。

4-1 土壌侵食防止対策

土壌侵食防止対策とは、農地作物、植生、農業方法等の面から土壌侵食を抑制する方法で、農地改良の重要な要素である。しかし、近年、急傾斜地の崩壊、土石流等の災害が増加している。その対策として、土壌侵食防止対策が求められている。

(1) 等高線法

等高線法とは、農地の等高線を基に、農地改良の方法を決定する方法である。等高線法は、農地の等高線を基に、農地改良の方法を決定する方法である。

(2) 山頂法

山頂法とは、農地の山頂を基に、農地改良の方法を決定する方法である。山頂法は、農地の山頂を基に、農地改良の方法を決定する方法である。

第4節 土壌侵食と農地保全システム

土壌侵食は、人類がこの地球上においての農業を含むすべての営みによって発生しているといっても過言ではない。これを防止するには、人類が破壊した自然をすべてもとに戻す必要がある。しかし、これは文明の否定であり不可能なことである。

そこで、農地の開拓において当然起こる土壌侵食を必要最小限に防止するのが、農業土木技術者に課せられた課題でもある。これを防止する方法としては、耕種方法によって土壌侵食を抑制する土壌侵食防止農法と工学的的方法によって土壌侵食を抑制する土壌侵食防止工法がある。

4-1 土壌侵食防止農法

土壌侵食防止農法とは、栽培作物、地表植生、営農方法等の面から土壌侵食を抑制する方法で設備投資の少ないもっとも安価な侵食防止策である。⁶⁰⁾しかし反面、労働の過大につながり、知名度の割に普及効率の悪い防止策でもある。その方法を以下に述べる。

(1) 等高線栽培

横畝栽培であって、傾斜畑の耕運播種、ならびに収穫が斜面上水平に行われるものを言う。この等高線と平行な畝は、小さなテラスとなり降雨による流出水を貯留し、地中に浸透させ土壌侵食を防止する方法である。

(2) 心土破碎工

降雨の吸収をよくするために堅い不透水性の下層土を破壊する方

法である。これによって表面流出水量を軽減させ、土壌侵食防止を行うものである。

(3) マルチング

この方法は、作物の茎葉、刈り草またはその他の有機物を地上に散布して土壌中への雨水の侵入を増大させることと、地表面での雨滴の衝突エネルギーをマルチング物質に吸収させ地表からの土壌の剝離作用を軽減させることによって土壌侵食防止を行うものである。

(4) 草生法

この方法は、果樹園等において、地表面を植物によって被覆する方法である。わが国では清耕法が一般的であるためなかなか普及しなかったが、最近ではこの研究が進み草生法が普及している。

4-2 土壌侵食防止工法

土壌侵食防止工法とは、土木工学技術を用い地表面流出水の運搬作用による土壌侵食を軽減させる方法である。⁶¹⁾ このためある程度の設備投資を必要とし、直接的な作物の生産性向上には結びつかないが労働面から見れば侵食防止農法と比較して、この点に関して容易であるといえる。その方法を以下に述べる。

(1) テラス工法

本来のテラス工法とは急傾斜を耕作しやすいようにするために作られた段畑であるが、現在では、地表面流出水の流れを調節する目的で作られた山腹の小水路または畝を意味する。このテラスは、畝型テラス、溝型テラス、段畑の3種類に分類される。畝型テラスと溝型テラスは、緩傾斜地において等高線と平行に幅広な畝を作る工

法であり、いずれも上方からの流出水をテラスで補水するが前者はその水を吸水し地下に浸透させるのに対し、後者は水路の役をなし、テラスに付けられた適当な勾配によってテラス排水路によって地区外に排水させる工法である。段畑とは、瀬戸内沿岸の急傾斜地に見られるように法を人工的に造成し、狭い面積ではあるが傾斜の少ない圃場を造成する工法である。

(2) 改良山成畑工

最近、広く日本に普及している農地造成方式であって、現況の複雑な地形の傾斜地を切盛土によって整形し、全体として傾斜の緩い農地を造成するものである。これは大型農業機械の稼働を可能にし、生産性を高めることを目的としているが、それにともない圃場勾配が緩やかになるため、水食防止の点からも効果が認められる。ただし、大面積の造成を行う場合は高盛、大切の土工がともなうため法面での土壌侵食に注意を払う必要がある。なお一般に、改良山成畑工というと農地造成の一方式として認知されているが、北海道では複雑な地形の既耕地を同じ目的で整形するものに、層厚調整工と呼ばれているものもある。

(3) 排水路システム

排水路システムとは、上記工法において地下浸透しない地表面流出水を土壌侵食の危険性を最低限に抑制し、地区外に速やかに排水するシステムのことである。これには、地区外から圃場への流入水および、圃場からの地表面流出水を捕捉する承水路、承水路らの流出水を下流に流下させる集水路、これらの水路で収集された水を速やかに地区外に排水する排水路等が含まれる。またその途中にあって流亡土を捕捉する土砂溜・沈砂池等の保全施設も含まれる。

第5節 研究目的

近年、北海道では傾斜地を含め大規模な改良山成畑工による農地造成や山成工による草地造成が盛んに行われている。改良山成畑工は造成後ある期間を過ぎて、圃場が安定すればよいが、造成直後においては土工による切土・盛土の量が多いため圃場が安定せず、降雨による肥沃な耕土の流亡などが起こりやすく、圃場や周辺環境に大きな影響を与える。また草地造成においてはその施工時期の裸地期間や牛の放牧による裸地化による土壌侵食が発生している。

特に十勝地域では、寒冷・少雪の気象条件により融雪期において、凍結した土壌が完全に融解するまでの期間、凍結層が土中に残存し不透水層となり、融雪水や降雨によって土壌侵食の発生が多く、問題となっている。

現在の科学技術を用いれば、農地からの土壌流亡を許容量までに押さえることは容易であろうと考えられるが、それには相当の経費が必要であろう。

しかし畑作・酪農を主とした十勝農業においては、栽培作物の反収単価が低く、このような農地開発において保全工に膨大な経費を費やすことはできない。そこで、安価でかつ有益な農地保全対策が望まれている。

そこでこの問題を解決するため、まず第一に十勝地域における農地造成地、草地造成地においてどの時期に、どの場所で、どのような形態の土壌侵食が発生しているかの現地調査を行う。

そして、十勝地域の特徴である融雪期の土壌侵食のメカニズムの解明をするため、十勝地域の代表土壌である火山灰土を対象として、

人工降雨装置を用い土壌凍結が侵食に与える影響の室内実験を行う。

この室内実験と同時に寒冷少雪地帯である十勝地方と、北海道のもう一方の冬期の特徴である寒冷多雪地帯の雨竜郡北竜町において U S L E に準拠した試験枠を設け、流出水量と流亡土量を測定することによってまず両地域の土壌係数と降雨係数そして融雪補正係数の算出を行う。そして、融雪期の土壌侵食の特徴を示している降雨係数の融雪補正係数の比較を行う。

この室内実験と同時に実験圃場内に U S L E に準拠した試験枠を設け、流出水量と流亡土量を測定することによって十勝地域における土壌係数と降雨係数そして融雪補正係数の算出を行う。

このような現地調査、室内実験、数値解析の結果と現状における十勝地域の農地保全対策をふまえ、寒冷・少雪地域における適切な農地保全対策の手法を見い出すことを目的とする。

第2章 造成農地の土壌侵食

十勝地域における農地開発は、開拓当初の平坦部から現在では山間部へと移行している。当然その工法も、大面積経営の十勝農業の特色を反映し、大型作業機械の作業効率の高い緩傾斜で大面積圃場の施工が可能である改良山成畑工が中心となっている。この改良山成畑は「人工畑」とでも称する⁶²⁾ものであるから、他の造成工畑と比較して、現地形を大きく改変しているため、地形的にも水文的にも原地形との整合性を欠きやすく、また大きく切盛するため切土・盛土部のそれぞれが広範大規模となり、両者間の異質性がきわだち易いなどの短所を反映させた災害が発生しやすい。特に地表面が裸地状態となると盛土部では土壌の不安定さのため水食に対する抵抗力が低下する。このため降雨や融雪などにより流去水があると土壌侵食が著しく多くなる。これは圃場のみならず切盛土の法面、さらには取付道路、排水路にも影響を及ぼす。

このような土壌侵食の危険から造成圃場を保護するため土木的農地保全工法はこれまでも数多くの研究(例えば堤等の土砂流亡防止を考慮した採草地の設計に関する研究⁶³⁾、佐藤等の排水路・防災施設工等の施工に関する研究⁶⁴⁾、嶋等の畝・承水路の農地保全的研究⁶⁵⁾、秀島等の北海道における改良山成畑工の防災に関する研究⁶⁶⁾等)がなされコスト面さえ考慮しなければ造成圃場の土壌侵食を防ぐことはたやすいことである。しかし、都市土木のような公共事業とは異なり、受益者負担がともなう農地造成工事においては、安全性を高めるため造成コストをむやみに高めることは出来ない。

そこでこの章では、実際農地造成の行われている南後志地区と稲

穂地区の農地造成地を対象とした土壌侵食調査を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

十勝地方の農地造成地を対象とした土壌侵食調査を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

そこで、昭和のはじめに造成された農地を対象として、1985年6月の農地調査の結果を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

まず、十勝地方の農地造成地を対象とした土壌侵食調査の結果を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

次に、十勝地方の農地造成地を対象とした土壌侵食調査の結果を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

次に、十勝地方の農地造成地を対象とした土壌侵食調査の結果を基に、十勝地方における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

第1節 造成農地の圃場面での侵食

北海道のような寒冷な地域の土壌侵食を考える場合、夏期の作物生育期の降雨による土壌侵食と春先における融雪水による土壌侵食があげられる。⁶⁷⁾

そこで、夏期の降雨による農地造成地圃場面の土壌侵食の実態として、1985年9月の異常降雨のため圃場面および法面において土壌侵食被害を被った、国営南後志地区農地造成地の圃場面の土壌侵食を例として取り上げる。

まず、この地区の土壌侵食被害を被った圃場図を図-2-1に示す。

3面からなる造成圃場は、どの圃場も一様にリル侵食が見られるが、その規模については多少異なっている。そこで圃場別に侵食の原因を考えていくことにする。

まず①圃場は他の圃場の上部に位置する圃場であるが、上部道路側溝からの越流水によるリル侵食の著しい場所が見られた。しかし全般的には他の圃場のリル侵食と比較して、その間隔も広くかつ侵食深も浅く、3圃場の中では最も土壌侵食被害の少なかった圃場であった。

次に②圃場は①圃場の下部に位置し、その傾斜上端に①圃場からの流出水を集める承水路および耕作道路が設置されている。このため写真-2-1に見られるように耕作道路からの流出水が道路側溝に流入せず道路面をガリ侵食し②圃場に直接流出し大きな侵食痕を残している。また写真-2-2に見られるように上部圃場からのシュート工による流出水が、②圃場の雨水枒および承水路の設計容量を超えたため、②圃場面への流出を引き起こし3圃場の中で最も密なリル侵

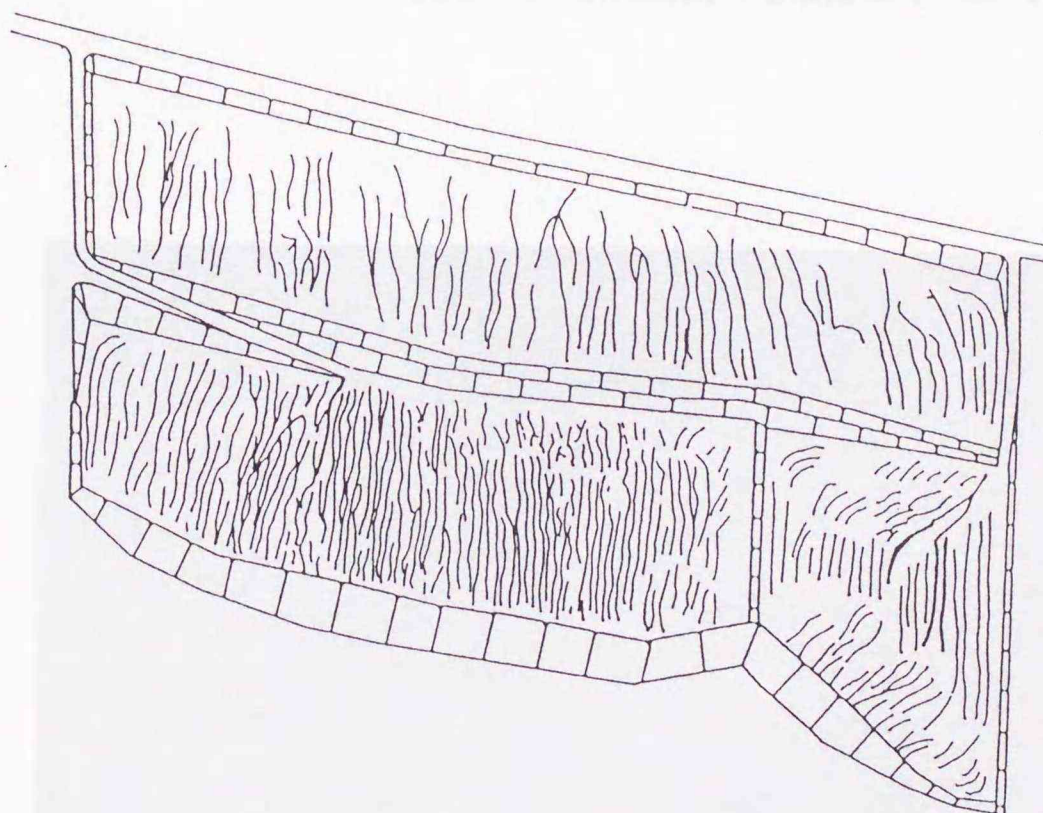
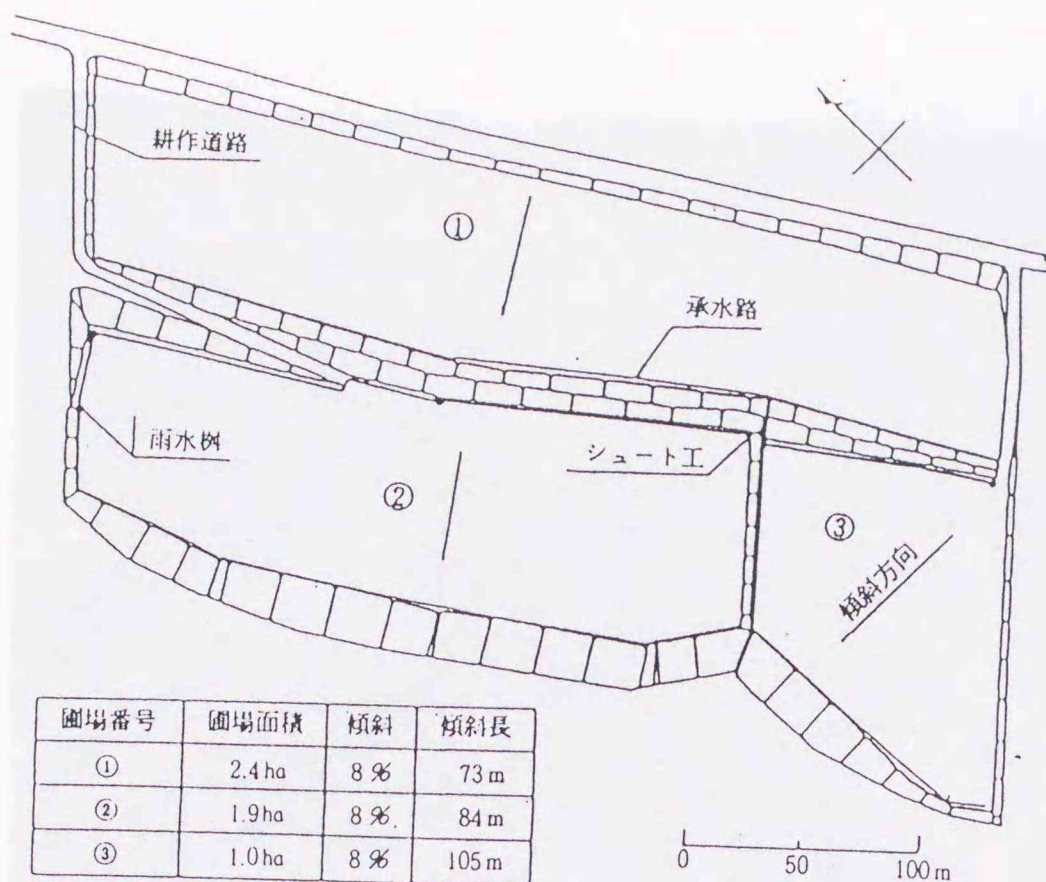


図-2-1 圃場平面および土壌侵食被害状況



写真-2-1 耕作道路の土壌侵食 (1985.11)



写真-2-2 ②圃場の土壌侵食 (1985.11)

食痕を見せている。

しかしこの圃場の北西に位置する部分においては、その上端を耕作道路法面によって仕切られているため傾斜上端からの流出水が少なく②圃場の他の部分とは異なり①圃場と同程度のリル侵食となっている。またこの部分の侵食の特徴としては、写真-2-3に見られるように牧草種子播種時におけるトラクター走行痕にリル侵食痕がみられる。

③圃場は、3圃場の中で最も小さい圃場であるが、その侵食被害は②圃場の次に大きくかつ特徴的であった。この圃場の傾斜方向は東から西に向かっており、リル侵食痕はスケッチ図に見られるように傾斜上下部において傾斜方向に発達しているが、その中間部においては牧草播種方向と一致し、ガリ侵食にはいたっていないが、深いリル侵食痕となっていた。また写真-2-4に見られるように耕作道路からの流出水がこの圃場に流入し②圃場と同様に、これが原因と考えられるリル侵食が見られた。

以上のような夏季期間の異常降雨による造成圃場面における土壌侵食の防止のためには、各圃場における承水路や耕作道路側溝の断面、機能、配置そして牧草播種機械および播種方向等を慎重に検討する必要があるものと考えられる。

この土壌侵食被害を被った圃場に道々をはさんで隣接する同地区造成圃場があるが、ここでは同じ豪雨を受けたのにもかかわらずあまり土壌侵食を被らなかった。その圃場を写真-2-5に示す。この圃場は工事の工程が前述の圃場より遅れていたため豪雨被災時においては、裸地状態であったが写真中央に示される圃場内簡易承水路の設置によりその侵食被害は非常に少なかった。このように施工過程に



写真-2-3 車輪踏圧による土壌侵食 (1985.11)



写真-2-4 ③圃場の土壌侵食 (1985.11)



写真-2-5 圃場内簡易承水路 (1985.11)



写真-2-6 1984年度造成圃場春先の雨水樹 (1987.5)

おける細やかな土壌保全対策を講じることによって圃場面の土壌侵食が最小限に食い止められている圃場もあった。

次に春先の融雪水による農地造成地の圃場面の土壌侵食状況の例として、同地区1987年5月の圃場面における融雪状況を写真-2-6～写真-2-10に示す。

写真-2-6は、1984年度造成地区圃場の残雪状況を示している。この写真より下部圃場の表面に大きな侵食は見られないが、残雪が承水路の上部を覆い隠し、地区外遮水目的の承水路の役目を阻害している状況がみうけられる。

写真-2-7と写真-2-8は、1985年度造成地区圃場の残雪状況を示している。写真-2-7の圃場は、圃場表面が牧草で被覆され、また上部法面も残雪が少なく、圃場面の侵食はみうけられなかった。一方、写真-2-8圃場は、圃場表面が裸地であり、また上部法面の残雪からの融雪水により圃場末端部に若干の侵食痕がみうけられた。

写真-2-9と写真-2-10は、1986年度造成地区圃場の残雪状況を示している。写真-2-9は、承水路断面がすべて積雪で埋められ上部法面で侵食流出した土が積雪上部を伝わり下部圃場面に運ばれている状況を示している。写真-2-10は、圃場面上部にある耕作道路、排水溝が積雪で覆われ、上部からの流亡土砂が雪面上を伝わり下部圃場に流れ込む状況がみうけられる。

この圃場面状態を年度別に比較して見ると、造成年次が古くなるにしたがい土壌状態が安定し侵食に対して抵抗力が大きくなって行くように感じられた。また、同じ造成年であっても写真-2-7と写真-2-8のように表面状態が異なると土壌侵食状況に差があらわれることがわかり、造成後、受益者への引き渡しまでの期間、牧草等の永



写真-2-7 1985年度造成圃場春先の法面 (1987.5)



写真-2-8 1985年度造成圃場春先の圃場面 (1987.5)



写真-2-9 1986年度造成圃場春先の承水路 (1987.5)



写真-2-10 1986年度造成圃場春先の耕作道路・排水路 (1987.5)

年作物で圃場面を被覆することが土壌侵食防止ばかりでなく造成農地作土層の肥沃度維持にも役立つものと考えられる。

次に積雪が圃場面の侵食にどのような影響を与えているかということに視点を置くと、どの写真にも見られるように、降雨による土壌侵食対策として取り入られている承水路、シュート工などが積雪によりその機能が阻害され融雪期における融雪水排水機能が低下する結果となっている。この圃場面に関しては、融雪による土壌侵食被害はあまり見られなかったが、侵食を引き起こす状況は数多く見られ今後の圃場面の侵食防止に圃場内承水路、圃場内沈砂地等の侵食防止工法^{6,8)}を取り入れる必要があるものと考えられる。

特に、土壌凍結の深い十勝地域においては、凍土の融解が完了しないこの時期、最もこれが問題となる。そこで十勝地域における融雪状況を写真-2-11と写真-2-12に示す。写真-2-11は凍土が残存する緩傾斜畑における融雪状況である。不透水層の凍土が地中に残存するため融雪水の地下浸透が阻害され畑低部に融雪水が滞留し、写真左下に見える道路側溝に越流しはじめている。これが長期間になれば越流口からの侵食が発達し大きな土壌侵食被害を発生させることになる。写真-2-12も写真-2-11と同様に緩傾斜畑における融雪状況であるが圃場内に起伏があるためその低部が水みちとなり土壌侵食を引き起こしている状況である。このように十勝地域のような土壌凍結地域においては、前述した侵食防止対策を設計する時点において土壌凍結を考慮した、より高度な侵食対策を講じる必要があると考える。



写真-2-11 十勝地域春先の融雪水の滞水状況 (1986.4)



写真-2-12 十勝地域春先の融雪水の流下状況 (1986.4)

第2節 造成農地法面の土壌侵食と崩壊

2-1 法面土壌侵食調査方法

国営農地開発事業による改良山成畑工が行われている稲穂地区は、十勝地域西部の浦幌町に位置する。調査はそこから、1988年度に造成された圃場（以後1988圃場）と1989年度に造成された圃場（以後1989圃場）を対象に行った。その圃場平面図と侵食状況を図-2-2に示す。なお図中に示す番号は便宜上付けたものである。

調査は春先の融雪水による法面の土壌侵食全体状況を把握するため1989年4月に1988年圃場を対象としてビデオカメラを使用し、各圃場法面の被害状況を撮影した。その後、ビデオデッキで再生し、法面侵食発生箇所を縮尺1/1000の図面に示した。これをもとに侵食の規模、侵食形態の侵食被害図を作成した。

次に、土壌凍結と法面侵食に関する調査は、圃場における土壌凍結状況を知るため1988圃場の圃場面と帯広畜産大学実験圃場（以後畜大圃場）の圃場面、南向き、北向き法面で土壌凍結の観測を行った。1988圃場の土壌凍結深さの測定は、1988年12月5日～1989年4月10日まで1週間ごとに行い、畜大圃場の土壌凍結深さの測定は、1988年11月21日～1989年4月22日まで毎日行った。それぞれメチレンブルー凍結深度計^{6,9)}を使用し、目視により土壌凍結深さを記録した。

また、土壌凍結が法面地盤強度に与える影響を知るため、1989年4月に土壌凍結を経験した1988圃場法面と1989年10月に土壌凍結を経験していない1989圃場の盛土北向きおよび南向き法面において簡

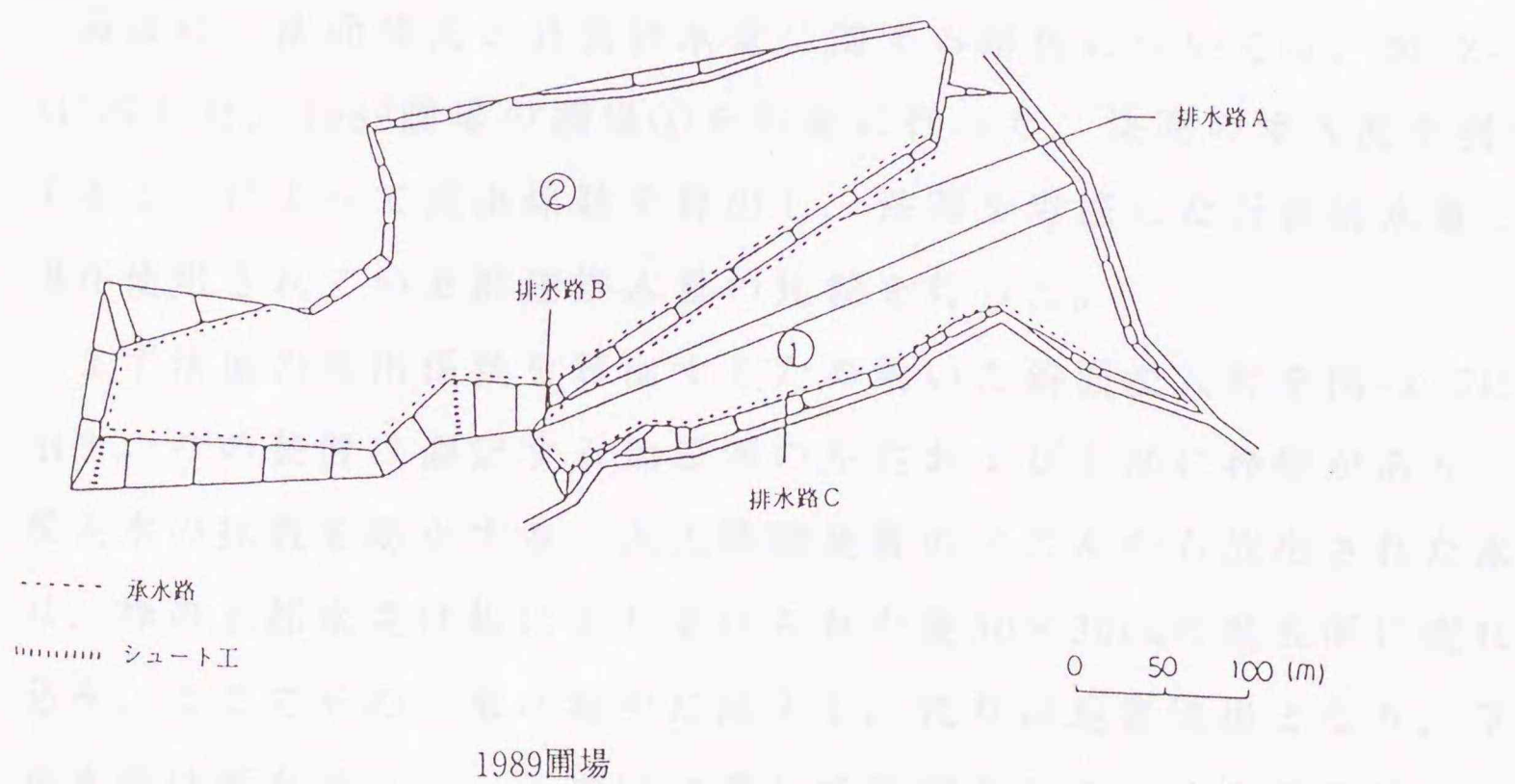
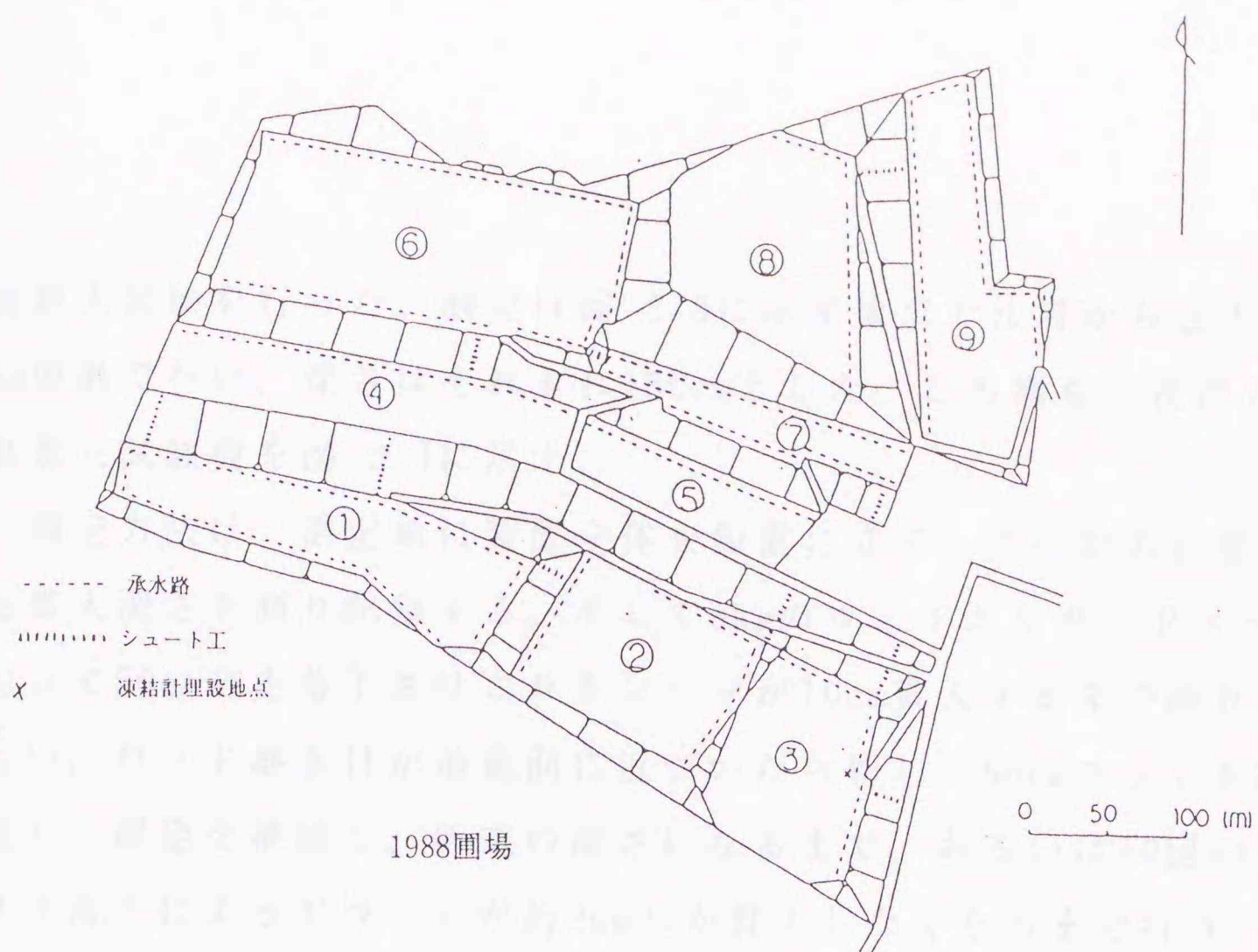


図-2-2 圃場平面図

易貫入試験を行った。測定は図-2-3に示す地点で法肩から法先まで4m間隔で行い、深さはそれぞれ150cmとした。この調査で使用した簡易貫入試験機を図-2-4に示す。

測定方法は、測定地に装置全体を鉛直に立て、この時の自重による貫入深さを測り記録する。そして5kgのウェイトをガイドロッドに沿って50cm自由落下させこれをコーンが10cm貫入するまで繰り返し行い、ロッド継ぎ目が地表面に近づいたら新しく50cmロッドを継ぎ足し、測定を継続し、所定の深さになるまで、あるいは10回のウェイト落下によってコーンが約2cmしか貫入しなくなるまで行う。貫入値はそれぞれの単位貫入量を求め、10cm貫入当りの打撃回数で表し、これをNc値とする。なお、ここで使われているNc値とは、標準貫入試験のN値に相当する。

最後に、法面降雨と計画排水量に関する解析については、図-2-2に示した、1989圃場の圃場①を対象に行った。法面の浸入度を測定することによって流出係数を算出し、法面を考慮した計画排水量と現在使用されている計画排水量の比較を行った。

まず法面の流出係数を算出するため用いた斜面浸入計を図-2-5に示す。この装置は測定する地表面の左右および上部に枠壁があり、浸入水の拡散を防止する。人工降雨装置のノズルから放出された水は、枠の上部水受け板により受けられた後30×30cmの地表面に流れ込み、ここでその一部は地中に浸入し、残りは地表流出となり、下部水受け板を通して、下端口に達して計測される。給水装置はマリ奥特管を使用し、人工降雨装置のノズルにおける圧力水頭は変化せず、一定の降雨強度を保つようになっている。そして、実験時の降雨強度の設定は、基本的に50, 100, 150, 200mm/hrとしたが、正確な

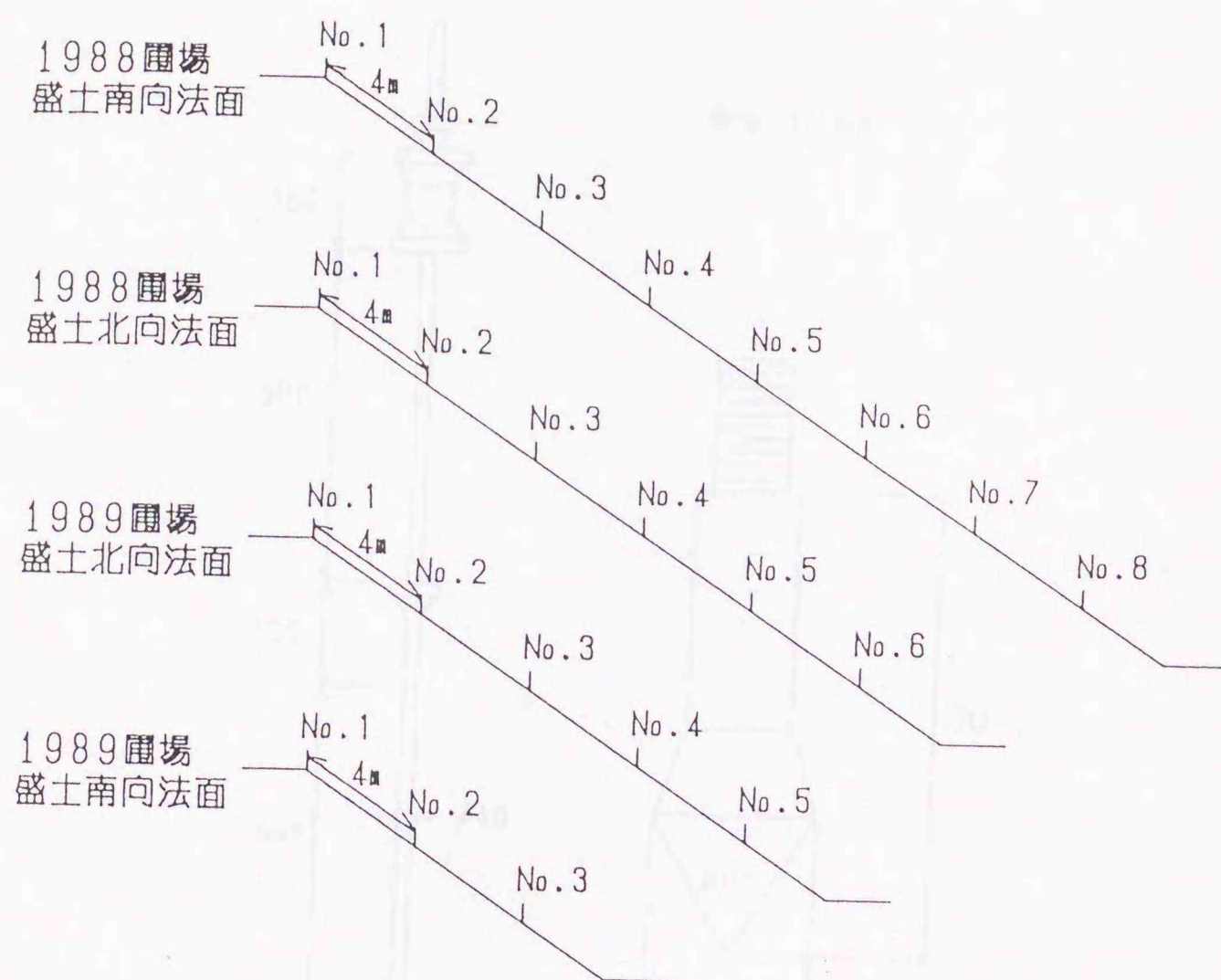


図-2-3 簡易貫入試験実施地点

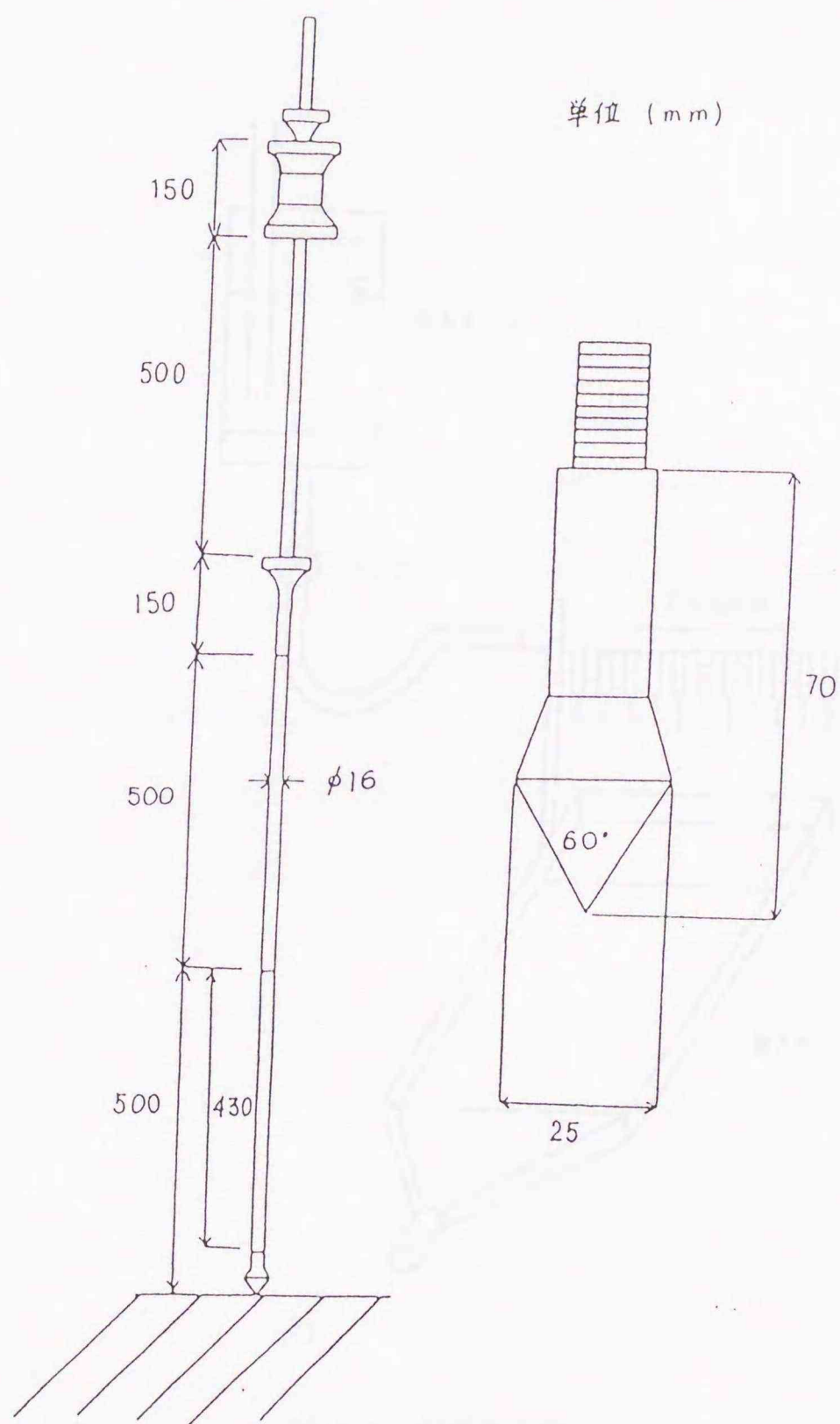


図-2-4 簡易貫入試験器

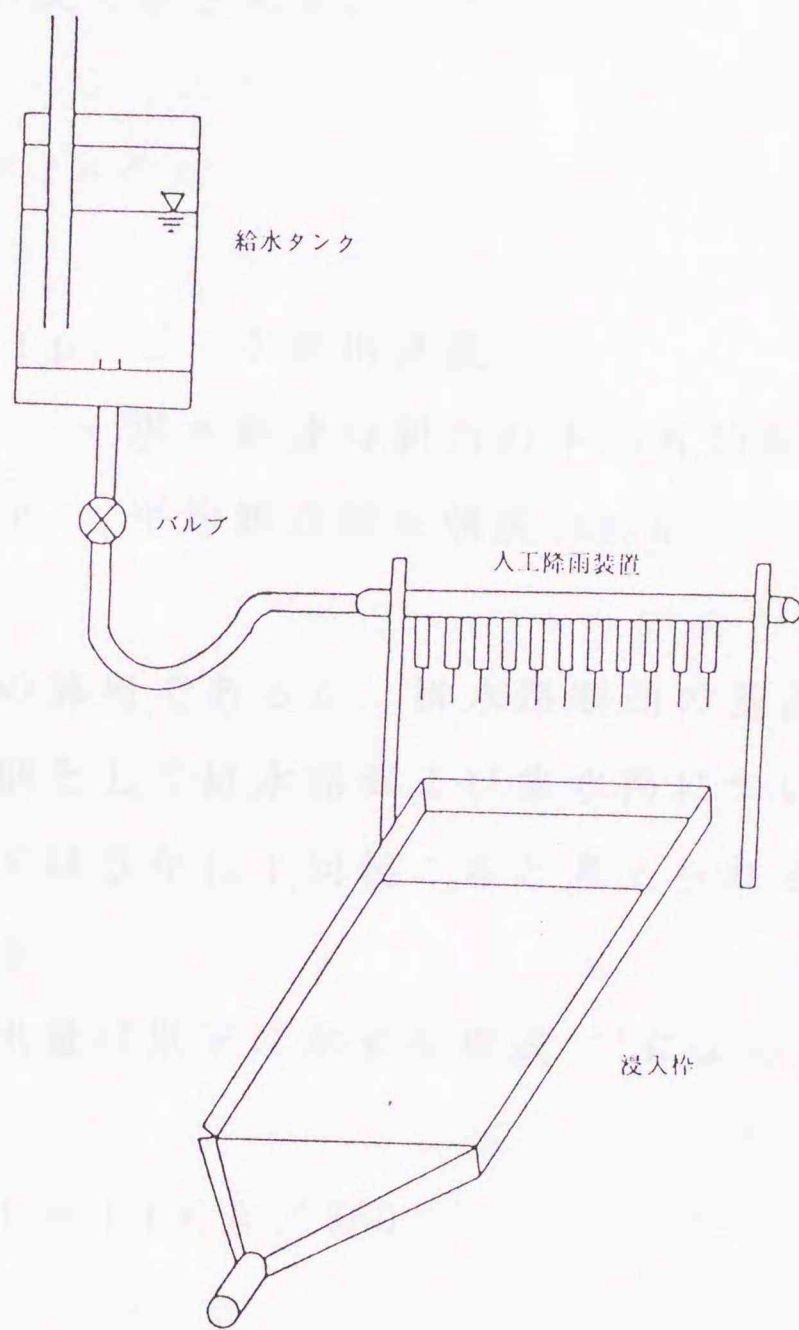


図-2-5 斜面浸入計

降雨強度は実験終了後のマリOTTタンク内の水の消費量より逆算した。なお北向斜面については50, 150mm/hr時の実験時降雨強度がうまく再現されなかったため、300, 400, 500mm/hrの降雨強度を追加し、実験を行った。

この装置を用い法面のピーク流出係数を算出した。なおピーク流出係数⁷⁰⁾は以下の式で示される。

$$f_p = r_e / r \quad \text{-----} \quad (2-1)$$

f_p : ピーク流出係数

r_e : 洪水到達時間内の平均有効降雨強度 (mm/hr)

r : 平均観測降雨強度 (mm/hr)

次に計画排水量の算出であるが、排水路断面の基礎となる計画排水量の規模は、原則として排水路および集水路については10年に1回、承水路については5年に1回起こると考えられるピーク時の流出水量を基準とする。

そしてピーク流出量は以下に示す合理式⁷¹⁾によって算出する。

$$Q = f \times r_t \times A / 360 \quad \text{-----} \quad (2-2)$$

Q : ピーク流出量 (m^3/S)

f : 流出係数

r_t : 洪水到達時間内の降雨強度 (mm/hr)

A : 排水路の集水面積 (hr)

現在の土地改良設計基準の計画排水量の算出には、法面積には言及されておらず法面積をこの集水面積に含むか省かは現場の判断にまかされている。これは全国的に見た場合、造成面積が小さく通常では法面積を考慮する必要がないためと考えられる。しかし十勝地域の造成農地の場合、その一区画が非常に大きくそのためそれに付随する法面積も大きなものとなっている。⁷²⁾

そこで集水面積に法面積を考慮した場合と考慮しない場合の計画排水量を算出し現在の排水路断面の許容排水量との比較を行った。

2-2 法面の侵食・崩壊実態

調査圃場法面を盛土・切土別に分けたものと調査圃場法面の土壌侵食被害状況を図-2-6に示す。

圃場①の土壌侵食は、圃場の北側に位置する盛土法面と東側に位置する切土法面で発生していた。圃場の北側に位置する盛土法面の土壌侵食は、法面の上部の承水路に積雪が残存し、融雪水が承水路を越流して法面へ流出したために発生したと考えられる。また、シュート工の破壊も発生していた。これは圃場で浸透した水が法面の軟弱な地盤箇所から吐出したために発生したと考えられる。東側に位置する切土法面は、多少傾斜している①圃場の低位部につながっており、盛土法面と同様に圃場の融雪水が承水路を越流し法面に流出したためと考えられる。

一方、圃場南側に位置する法面では侵食が発生していなかった。これはこの切土法面上部が農地造成前の林であるため、上部の融雪

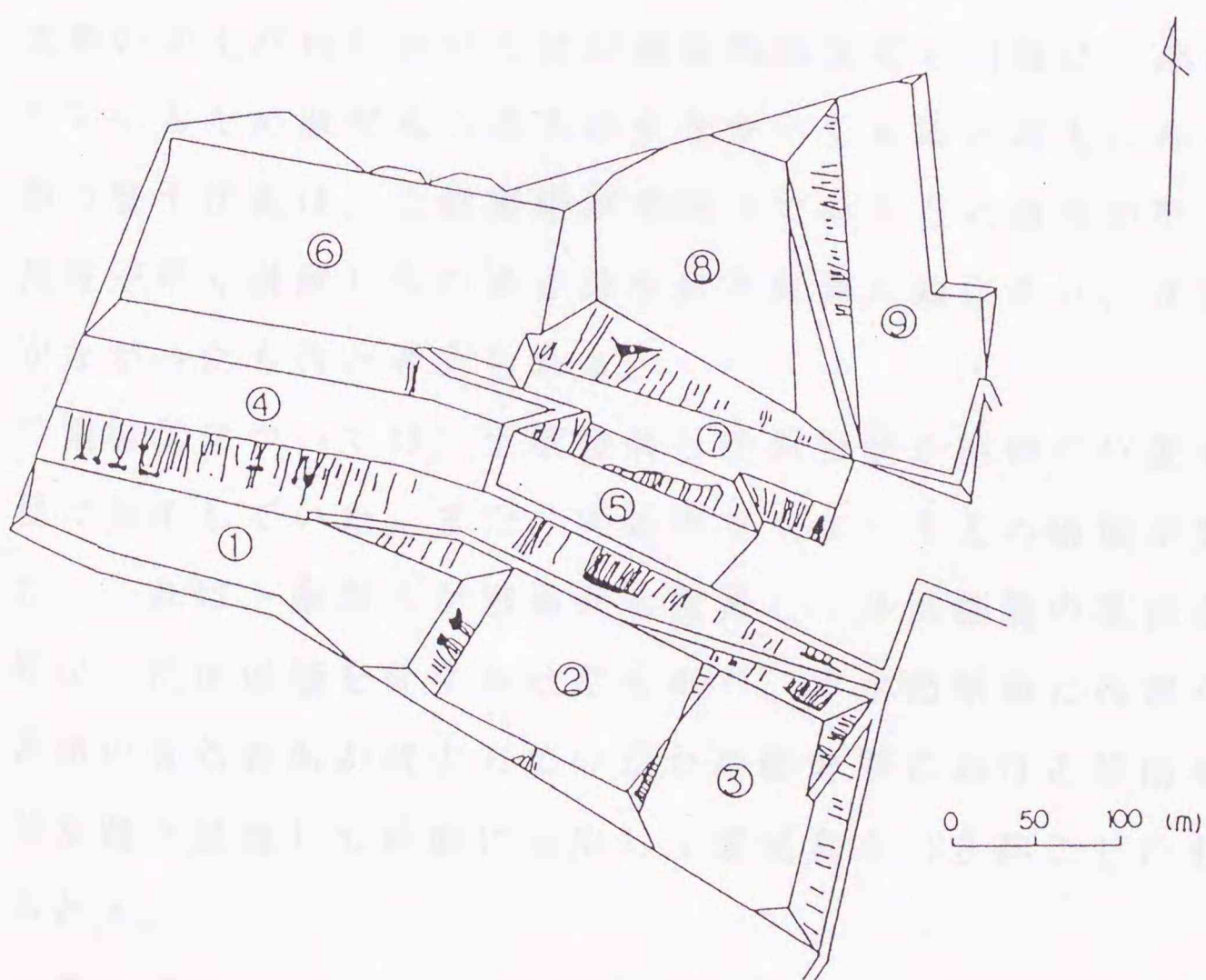
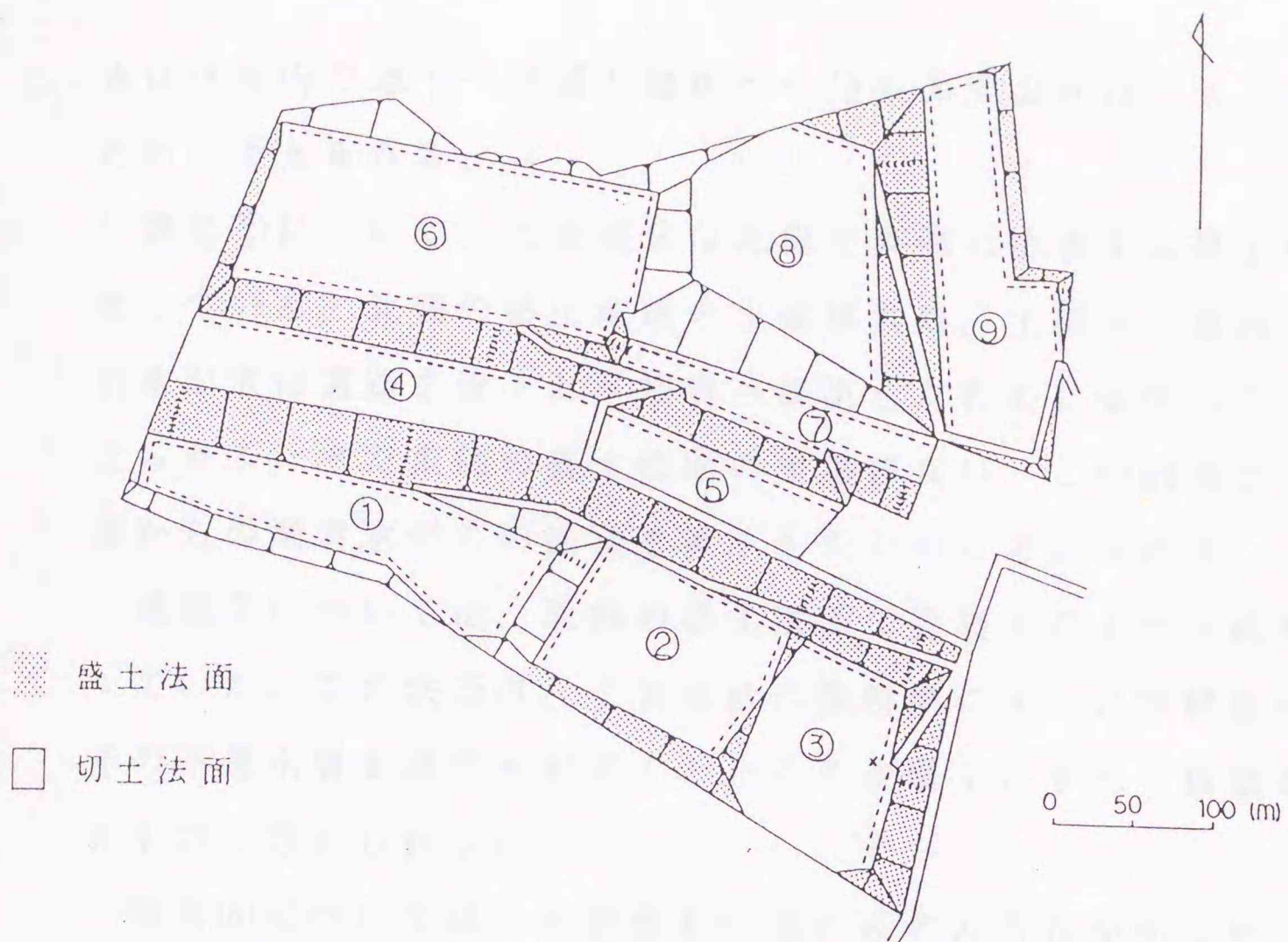


図-2-6 盛土・切土法面の配置と法面の土壌侵食状況

水は林地内で地下へ浸透し法面への地表面流出がほとんどなかったためと考えられる。

圃場②については、土壌侵食は北側と東側に位置する盛土法面で発生していた。北側の盛土法面の土壌侵食は、上部から流れてきた融雪水が取付道路を流下し、法肩へ流出したために発生したものと考えられる。また東側の盛土法面の土壌侵食は、この圃場と上部の圃場からの融雪水がこの法面を流下したためと考えられる。

圃場③については、北側の盛土法面で表層土のすべり破壊が発生していた。この法面は、土壌凍結の融解期に土中に凍結層が残存し、その不透水層を融雪水が流下したため表層土にすべり破壊が発生したものと考えられる。

圃場⑥については、土壌侵食がほとんどみられなかった。これは北側の切土法面においては①圃場南側法面と同様に上部が林地に接しているため融雪水の流入が少なかったものと考えられる。また南側の盛土法面は、上部圃場が南向きであるため融雪が早く承水路の残雪が早く融解したため十分な排水断面が確保され、法面への流出がなかったものと考えられる。

圃場⑦については、土壌侵食と法面崩壊が南側に位置する盛土法面で発生していた。また、大規模なシュート工の破壊が発生していた。これは、融雪水が圃場から浸透し、法面地盤の軟弱な部分から吐出し法面崩壊を発生させたものや、承水路断面に残雪が残存し承水路の有効断面が減少していたため融雪期における降雨や融雪水が承水路を越流して法面に流出し土壌侵食を引き起こしたものと考えられる。

圃場⑧については、土壌侵食が東側の盛土法面と南側の切土法面

で発生していた。東側の盛土法面は、取付道路があり、その下部で発生していたことから、道路表面を融雪水が流下したものと考えられる。また、南側の切土法面では、圃場の法肩に承水路がなく、そのため圃場からの融雪水が直接法面に流出したためと考えられる。

以上の結果より、造成農地法面の融雪期間における土壌侵食形態は次の3形態に分けられる。

1. 冬期間の積雪が承水路断面を覆うことにより融雪期の排水を十分に流下させる断面確保ができず、承水路を越流した排水が法面にリル侵食を発生させている。これは特に北向き斜面の融雪の遅い区域に多くみられる。

2. 法面土壌が冬期間凍結し、これが融凍期になると土壌凍結層が法面中に残存する期間、浸透水がこの凍結土層を疑似河床として流下するため、表層すべり破壊や法面中腹において浸透破壊を発生させている。これは特に承水路がシュート工等の排水路へ連結する排水の集中する部位に多くみられる。

3. 造成農地地区内の取付道路の排水処理工、承水路の不足など土壌侵食防止工法の不備によって、本来は排水路系を通り地区外に排出される表面流出水が法面に流出することによってリル侵食を発生させている。これは残雪が堰となって夏期間とは異なる圃場排水形態を示す例もあり、これは日陰になる北向き圃場の下部法面や長い取付道路の下部法面にみられる。

2-3 法面の土壌凍結が侵食に与える影響

2-3-1 法面における土壌凍結

酷寒小雪地域である十勝地域において、冬期間の気象特徴である土壌凍結は土壌侵食にも大きな影響を与えるため、侵食被害を被っている造成農地法面での土壌凍結観測を行うことは融雪期の土壌侵食発生メカニズムを解明する上で非常に重要な調査のひとつであるといえる。しかし、十勝地域の傾斜地における造成農地は圃場面積が大きいとそれ付随する法面も長大となり、冬期間は積雪のためその地点における土壌凍結の観測を行うには困難と危険をともなう。そこで現地においては、観測が困難ではあるが安全である造成農地の圃場面の土壌凍結を測定し、大学実験圃場に設けた法面を使用し現地法面の土壌凍結推移の推定をおこなった。

稲穂圃場と畜大圃場における土壌凍結推移の結果を図-2-7に示す。

稲穂圃場面の土壌凍結推移は、12月上旬に凍結が始まり、2月下旬から3月上旬にかけて最大凍結深さを記録し、その深さは57.6cmであった。そして、2月下旬に融解が始まり、4月上旬で土壌凍結は消失した。

また、畜大圃場の土壌凍結推移は圃場面、北向き法面で11月下旬に凍結が始まり、最大凍結深さは3月上旬に圃場面で53.5cm、北向き法面で69.2cmを記録した。それに対して、南向き法面の土壌凍結推移は、1月上旬と約1ヶ月遅れて凍結が始まり、最大凍結深さは、約1/3の26.7cmであった。融解に関しては、逆に南向き法面が約1ヶ月早い3月上旬で土壌凍結は消失し、他方圃場面、北向き法面で4月中旬以降に土壌凍結は消失した。

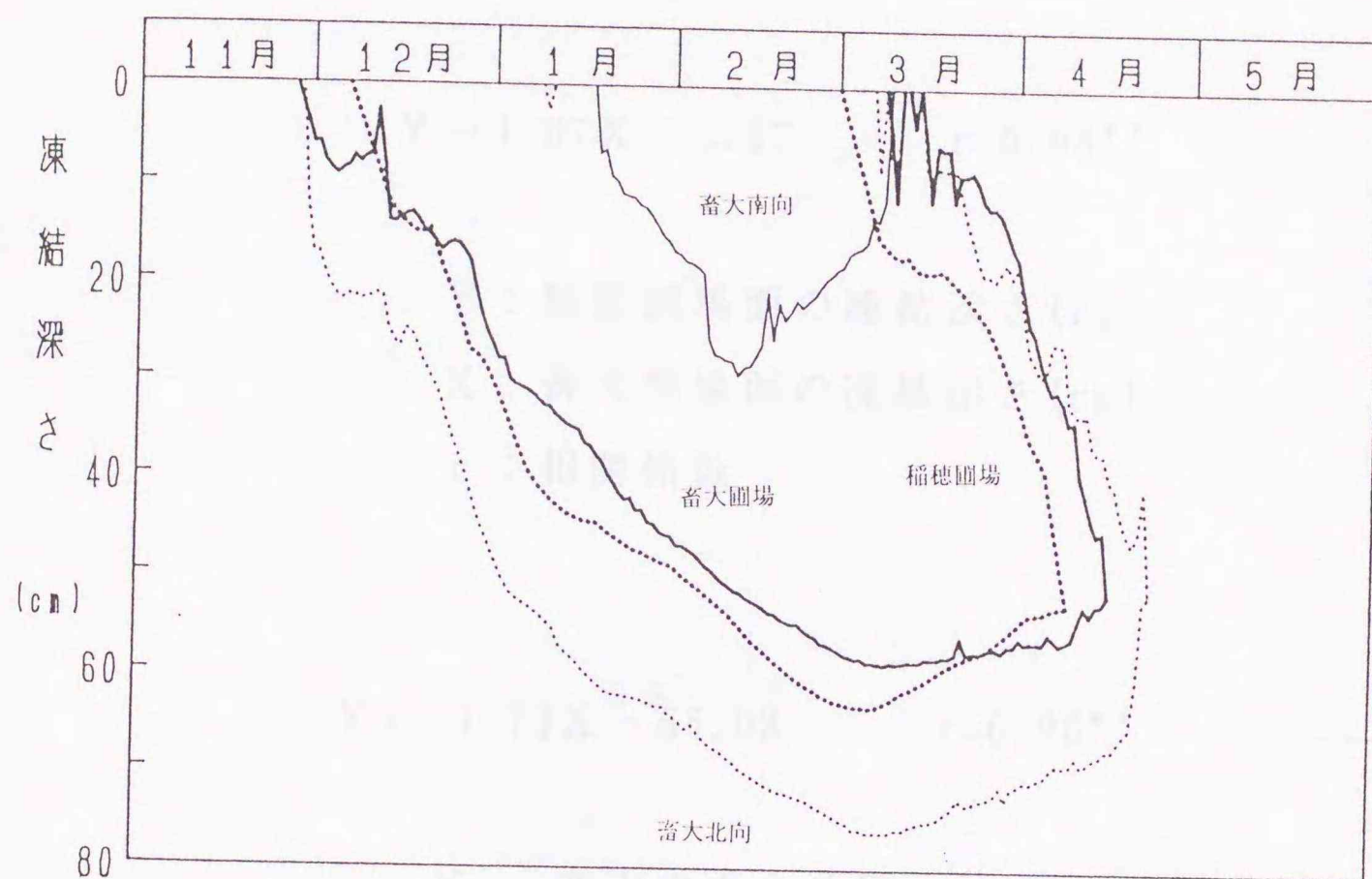


図-2-7 稲穂圃場と畜大圃場の土壌凍結深推移(1988.11~1989.5)

これより、土壌凍結深さは北向き法面、圃場面、南向き法面の順に深く、法面の向きにより土壌凍結深さが変わることがわかった。

これらの結果を基として、稲穂圃場の法面の土壌凍結深さを推定した。稲穂圃場面と畜大圃場面、畜大南向き法面と畜大圃場面、畜大北向き法面と畜大圃場面の相関関係を図-2-8に示し、得られた式を下記に示す。

$$Y = 1.07X + 1.57 \quad r=0.98^{**} \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

Y : 稲穂圃場面の凍結深さ (cm)

X : 畜大圃場面の凍結深さ (cm)

r : 相関係数

$$Y_s = 1.73X - 56.08 \quad r=0.96^{**} \quad \text{-----} \quad (2-4)$$

Y_s : 畜大南向き法面の凍結深さ (cm)

$$Y_N = 1.02X - 16.68 \quad r=0.97^{**} \quad \text{-----} \quad (2-5)$$

Y_N : 畜大北向き法面の凍結深さ (cm)

これらの結果より、稲穂圃場面と畜大圃場面の土壌凍結深さは相関が高く、かつ畜大における法面別土壌凍結の相関も高いことより、

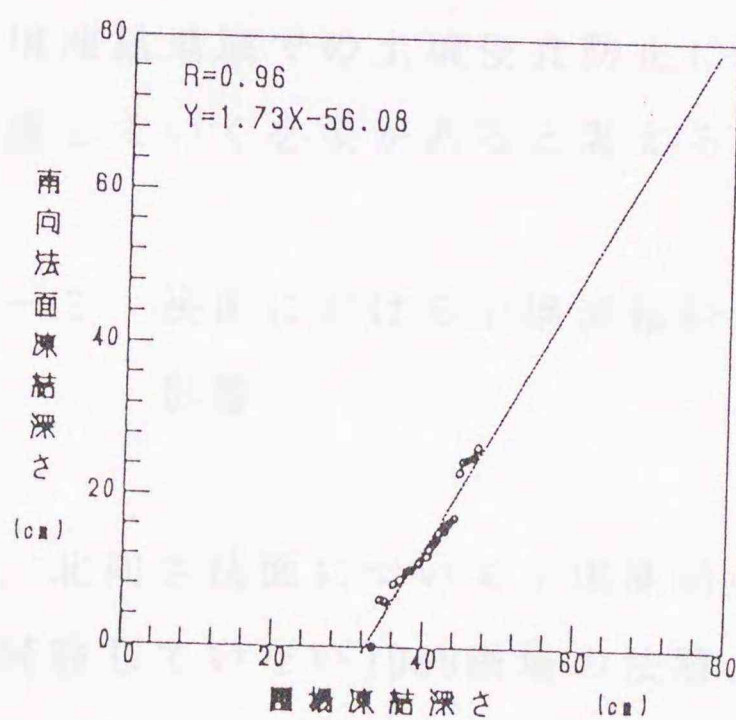
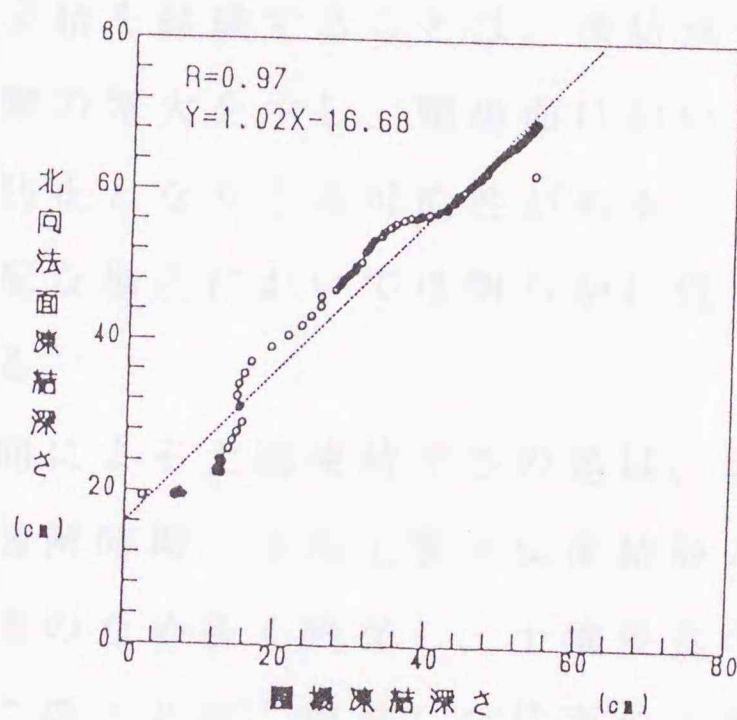
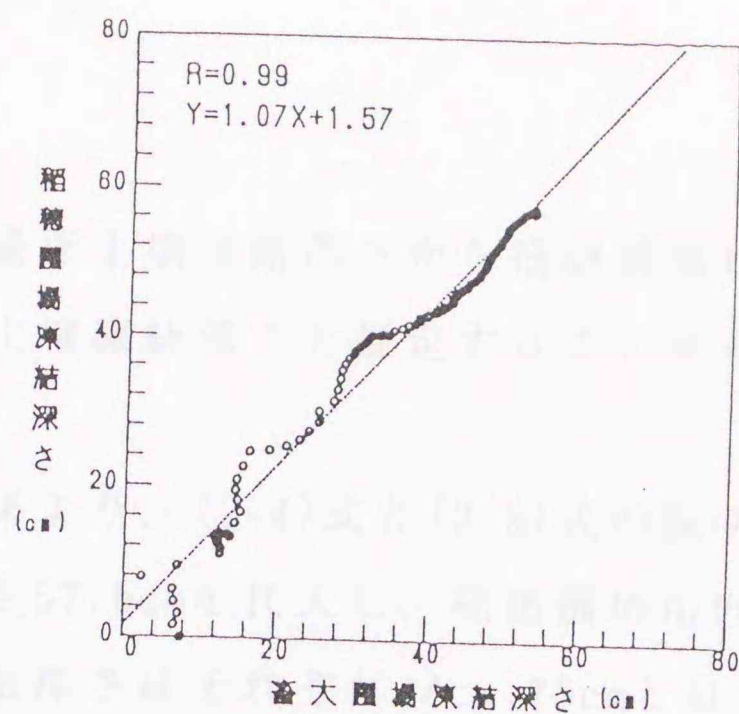


図-2-8 稲穂圃場・畜大南向法面および北向法面と畜大圃場の土壌凍結深の関係

稲穂圃場の圃場面土壌凍結深さから稲穂圃場における南向き法面、北向き法面の土壌凍結深さを推定することが可能であると考えられる。

これらの関係より、(2-4)式と(2-5)式の説明変数 X に稲穂圃場面の最大凍結深さ57.6cmを代入し、稲穂圃場南向き法面および北向き法面の最大凍結深さはそれぞれ44cm、75cmと推定した。

法面土壌が凍結を経験することは、凍結部分の表層土層の地盤強度の低下と間隙の増大を示し、圃場面においては浸透能力の向上につながり侵食防止となりうる可能性があるとしても、農地造成法面のような急勾配な場所においては明らかに侵食・崩壊の危険性を高める要因となる。

また法面方向による土壌凍結深さの差は、北向き法面が南向き法面と比較して融解時期、法面土層中に凍結層の残存する期間が長くかつ積雪も日陰のため多く残存し、土壌侵食の危険性が高いことを示している。このことは、前述した法面の土壌侵食実態調査結果とも一致し、土壌凍結地域での土壌侵食防止には、法面の方向も保全工の設計に考慮していく必要があると考える。

2-3-2 法面における土壌凍結経歴が法面侵食に与える影響

南向き法面、北向き法面について土壌凍結の経歴を持つ1988圃場と土壌凍結を経験していない1989圃場の法肩、法中央、法先における貫入抵抗値を比較した結果を南向き法面は図-2-9に北向き法面は図-2-10に示す。

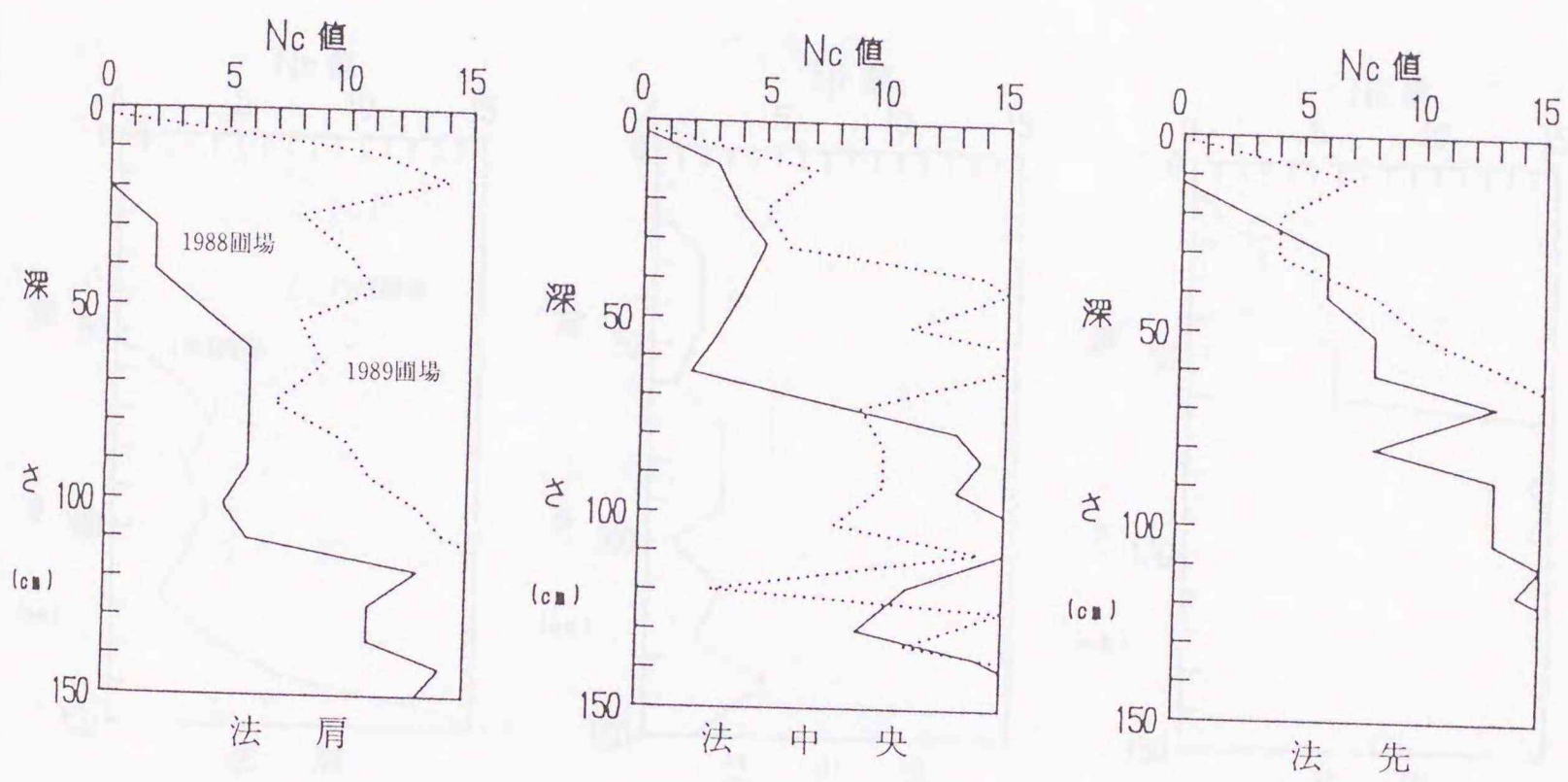


図-2-9 南向法面における地盤強度の垂直分布

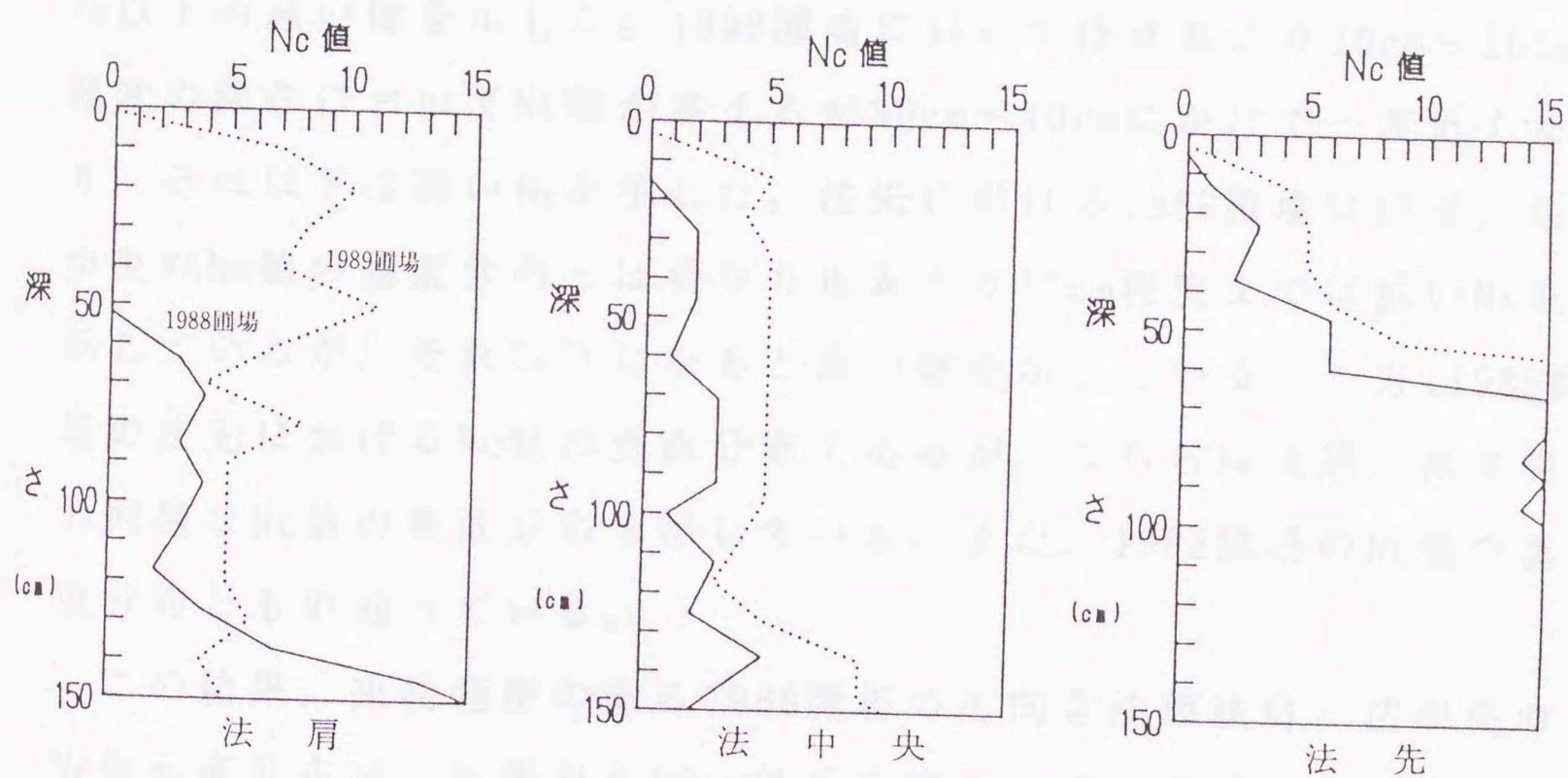


図-2-10 北向法面における地盤強度の垂直分布

南向き法面における貫入抵抗値の垂直分布は、凍結経歴のない1989圃場の法肩で約10cm以下の深さになるとNc値が10を示し、それ以下の深さでも同様な値を示しているのに対して、凍結経歴のある1988圃場は約40cmまではNc値が2と非常に小さな値を示し、それ以下の土層になると6以上の値を示している。法中央では、1988圃場が地表から約70cmまでのNc値が5以下の値を示し、それ以下になると10以上の高い値を示した。1989圃場においては地表より10cm～20cm程度の深さにおいてNc値が高まるが30cm～40cmにかけて一度低くなり、それ以下は高い値を示した。法先における1988圃場は法肩、法中央のNc値の垂直分布とは異なり地表より10cm程度までは低いNcを示しているが、それ以下になると高い値を示している。一方、1989圃場の法先におけるNc値の垂直分布であるが、こちらは法肩、法中央と同様なNc値の垂直分布を示している。また、1988圃場のNc値の垂直分布とも似通っている。

この結果、凍結経歴のある1988圃場の南向き法面法肩、法中央のNc値垂直分布は、地表から50cm付近を境として上部は地盤強度が弱く下部は地盤強度が強いことを示している。また、凍結経験のある1988圃場の法先と凍結経歴のない1989圃場の法肩、法中央、法先においては地表から10cm程度は地盤強度が弱く、それ以下は地盤強度が強いことを示している。そして1988圃場の法肩、法中央のNc値の垂直分の変移点は、前段で推定した南向き法面の最大凍結深さとはほぼ一致することがわかった。これは法面土壌が冬期間、凍結を経験することにより法面地盤下部から給水され凍結した土中水が凍結膨張し土層中の間隙を拡張することにより融解後、凍結土層部分の地盤強度の低下を招いたものと考えられる。

また、1988圃場の法先におけるNc値垂直分布については、法肩、法中央同様に冬期間を経験したにも関わらず、凍結を経験しない1989圃場のNc値垂直分布と同様な傾向を示した。これは積雪地域の特徴である雪の吹き溜まり現象に起因するものと考えられる。つまり、勾配のある法面において一様に降った雪は、風、日照、法勾配などの影響を受け日陰で風の影響の少ない部分に集積する傾向にある。法先は冬期間この条件に適合する場所であり積雪が保温材となりこの部位の土壌凍結を抑制したものと考えられる。

次に北向き法面のNc値垂直分布については、法肩で1989圃場は10～60cmでNc値が6～10を示すのに対して、1988圃場は0～4を示している。それ以下は両者とも、それほど変わらない値を示している。しかし、法中央では、10～80cmまで1989圃場より1988圃場が低くNc値の差が2と若干の違いしかみられなかった。さらに法先では、両者にほとんど違いがみられなかった。

この結果は、法中央のNc値垂直分布においてその傾向が若干異なるが、法肩、法先については、地盤強度の変移点が異なるものの南向き法面と同様な傾向を示していることがわかった。またその変移点についても、前段で推定した北向き法面の最大凍結深度とほぼ一致し、ここでも土壌凍結が法面土壌の地盤強度に強い影響を与えることがわかった。

このように土壌凍結を経験した法面は、土壌凍結を経験していない法面と比較すると、表層付近でNc値がかなり低下し、これが、浸透破壊や法面崩壊の誘引となったり、これに加え法面土壌に凍結土層が残存する期間さらに土壌侵食の危険性が高まり、土壌凍結地域の法面の設計にはこの問題も考慮する必要があると考えられる。

2-3-3 法面方向が土壌侵食に与える影響

土壌凍結を経験した1988圃場において、南向き法面と北向き法面の法肩、法中央、法先の比較した結果を図-2-11に示す。

法肩で南向き法面は、地表から約20cmまでNc値が0を示していて、それより深くなると徐々に大きくなり約120cmでNc値が10以上を示している。それに対して、北向き法面は、地表から約50cmまでNc値が0を示していて、それより深くなると南向き法面同様徐々に大きくなっている。

また法中央で南向き法面は地表から約60cmまでNc値が0～5の間にあり、それより深くなるとNc値が10以上を示している。それに対して、北向き法面は地表から約150cmまでNc値が0～4を示している。

法先で南向き法面、北向き法面は同じ様な値を示し、両者にほとんど差がなかった。地表から約30cmのところでNc値が6を示し、約60cmのところでNc値が10以上を示している。

これより法肩については南向き法面で約40cm、北向き法面で約70cmとそれぞれの土壌凍結深さと考えられるところまでのNc値が非常に低くなっている。これは日射量や風などが法面の向きによって異なるため、土壌凍結深さが異なりこれがその法面の地盤強度低下の違いをもたらすものと考えられる。そしてこのことが、融雪期の表流水や浸透水による土壌侵食や崩壊を助長させる一因と考えられる。

一方、法中央、法先についてはその量に差はあるものの南向き法面・北向き法面ともに冬期間積雪に覆われ土壌凍結に顕著な差が発生せずNc値にも差が現れなかったものと考えられる。

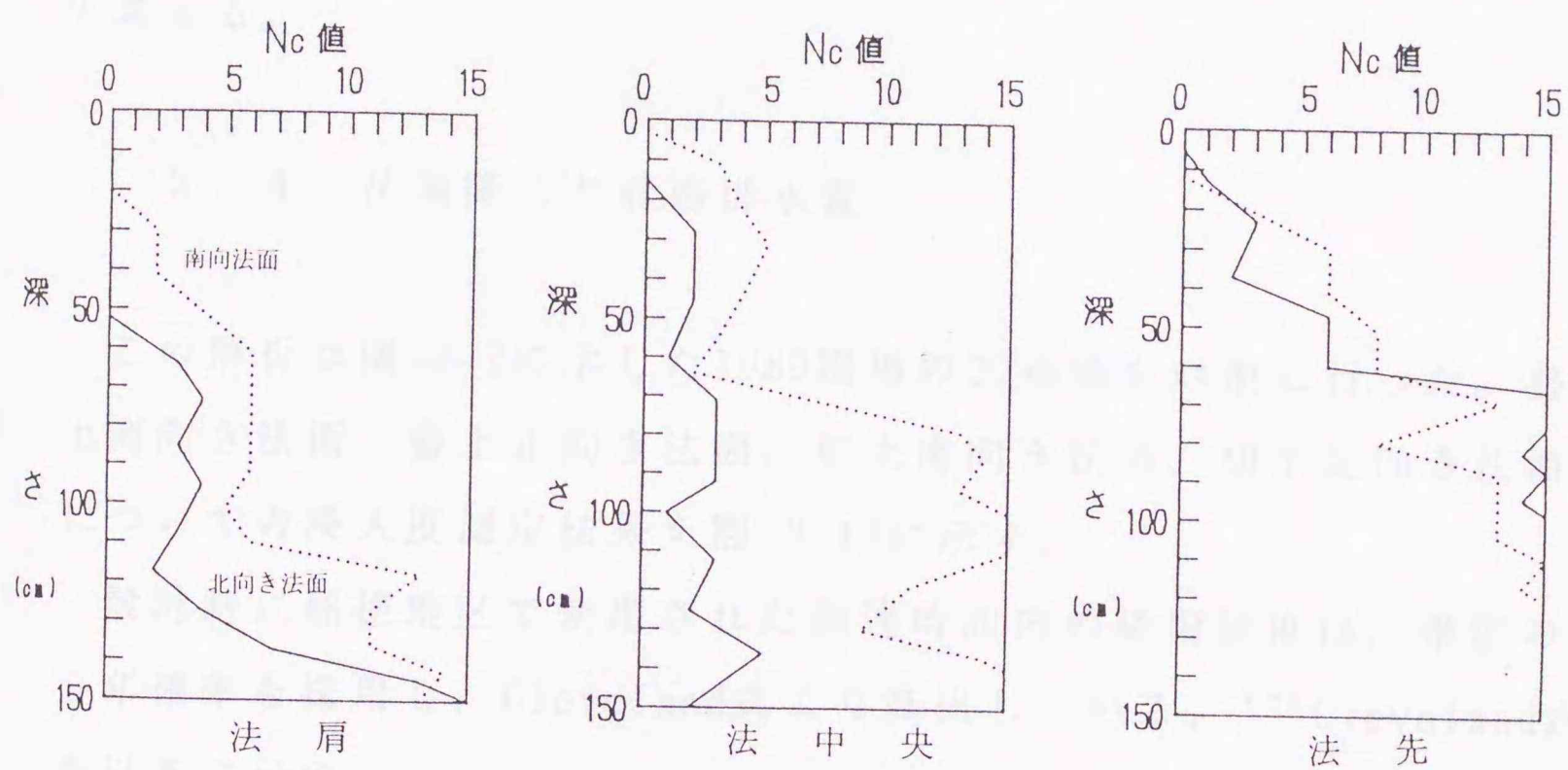


図-2-11 南向・北向法面における地盤強度の垂直分布

この結果より、土壌凍結が発生するような寒冷な地域においては、法面の土壌凍結に起因する土壌侵食対策を講じる必要がある。特に法肩部位においては法面方向を考慮した対策を講じなければ、その部位の土壌凍結により発生する土壌の易侵食性が助長され法肩に多く配置される承水路、排水路等の崩壊、法肩の浸透破壊等の誘因となり、その設計に当たってはこの点についても考慮する必要があると考える。

2-4 法面降雨と計画排水量

この解析は図-2-2に示した1989圃場の①圃場を対象に行った。盛土南向き法面、盛土北向き法面、切土南向き法面、切土北向き法面についての浸入度測定結果を図-2-12に示す。

設計時に稲穂地区で使用された到達時間内の降雨強度は、帯広の5年確率を採用し、Cleveland式より算出している。⁷³⁾ Cleveland式を以下に示す。

$$r = a / (t^n + b) \quad \text{----- (2-6)}$$

r : 到達時間内の降雨強度 (mm/hr)

t : 到達時間 (hr)

a, b, n : 定数

なお、式中の定数の帯広での値は、 $a=28.72, b=0.17, n=0.67$, また到達時間は橋梁実施要領より集水面積が 2.0km^2 未満の場合は 0.3hr と

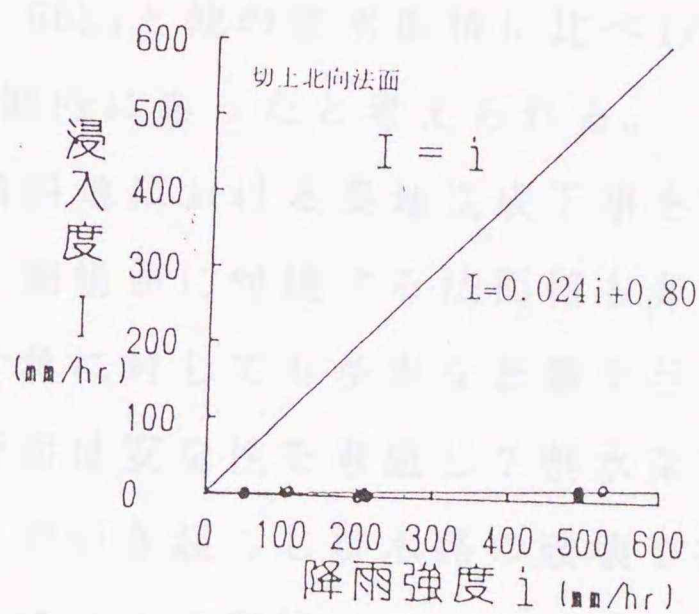
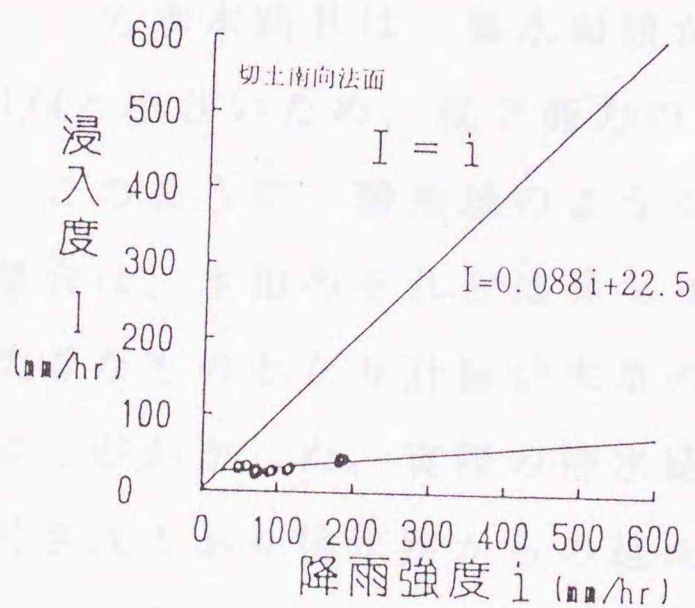
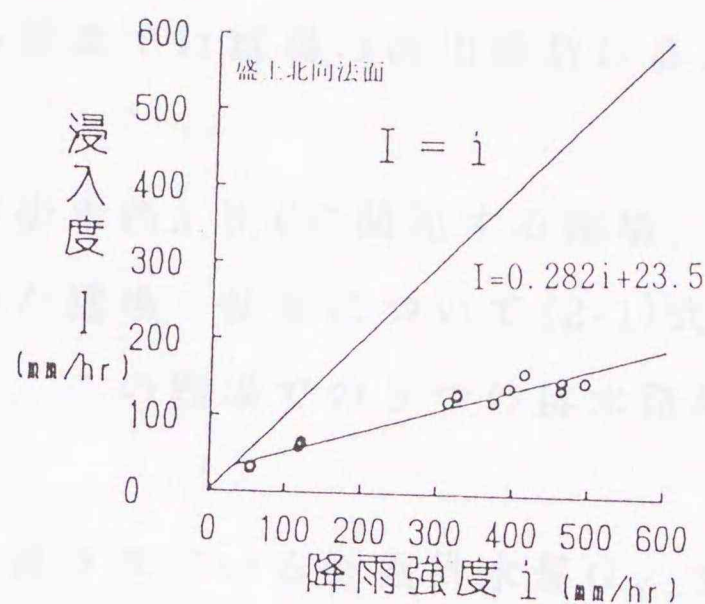
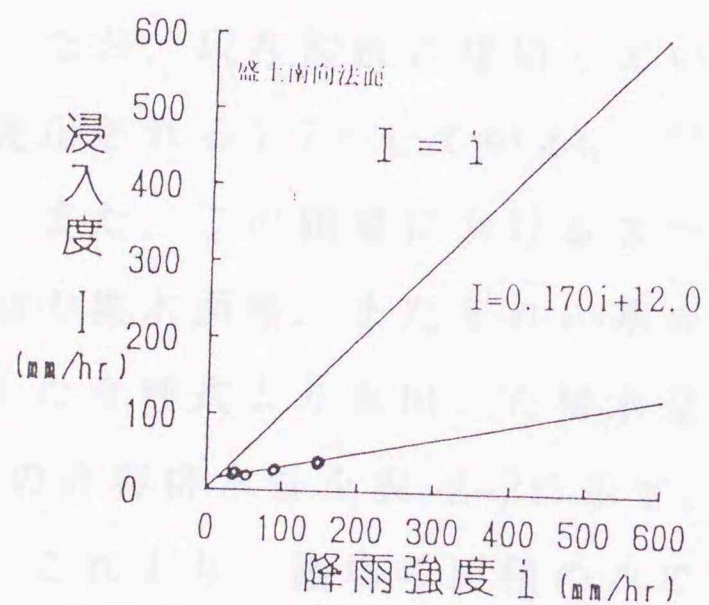


図-2-12 法面における降雨の浸入度

しており、到達時間内の降雨強度は46.6mm/hrと算出されている。⁷⁴⁾

よって到達時間内の降雨強度を、稲穂地区で使用されている46.6mm/hrとして、実測した浸入度から算出された各法面の流出係数を表-2-1に示す。

なお、現在設計に採用している計算では圃場の流出係数は農地に使用される0.7としている。⁷⁵⁾

また、この圃場における3つの排水路A, B, Cに関連する圃場、法面別の集水面積、またそれに基づいた圃場・法面について(2-1)式に示した合理式より算出した排水量と、この圃場での3つの排水路A, B, Cの許容排水量を表-2-2に示す。

これより、圃場の面積のみで計算されている計画排水量は、すべての承水路の許容排水量の範囲内にあるが、法面を集水面積に加えて計算すると承水路A、Cで許容排水量の範囲を越えた。

一方承水路Bは、集水面積が0.60haと他の集水面積に比べ1/3～1/4と小さいため、流下能力の範囲内にあったと考えられる。

このように十勝地域のような傾斜地における農地造成工事を行う場合は、水田のそれとは異なり、圃場面に付随する法面積も非常に大きなものとなり計画排水量の計算に対しても多大な影響を与えることがわかった。実際の排水路断面は安全性を考慮し7割水深で設計されており排水路からの越流まで引き起こし排水路の破壊を招くことはないが、流量・流速の増大による洗掘等、これを放置しておくと土壌侵食を引き起こす危険性が非常に高くなる現象が発生しており、今後の計画排水量の決定にあたっては法面積を集水面積に加えることが必要であると考えられる。

表-2-1 各法面の流出係数

法面種類	流出係数
盛土南向き	0.57
盛土北向き	0.21
切土南向き	0.43
切土北向き	0.96

表-2-2 各排水路の集水面積、排水量および許容排水量

水路種類	集水面積 (ha)			排水量 (m ³ /s)			許容排水量 (m ³ /s)
	圃場	法面	合計	圃場	法面	合計	
排水路 A	1.93	0.29	2.31	0.18	0.03	0.21	0.20
排水路 B	0.54	0.06	0.60	0.05	0.00	0.05	0.19
排水路 C	1.81	0.03	1.99	0.16	0.02	0.19	0.18

第3章 造成草地の土壌侵食

十勝地域の農業は畑作と酪農を中心として発達してきた。畑作は主に十勝地域中央部の平坦地から発達し、酪農は周辺部の山間部や海岸丘陵地帯の気候条件の悪い地域において発達してきた。このため前節で述べた農地造成より古くから十勝地域の山間・海岸丘陵地帯においては草地造成事業が盛んに行われてきた。草地造成は山成畑工が主工法であるため、農地造成に比べ造成工事による移動土砂量も少なく、また造成後は地表面が牧草で被覆されるため土壌侵食問題は主に草地造成施工中および施工完了後、牧草が生育するまでと考えられてきたが、草地造成後の草地においても、放牧された牛に繰返して踏まれ発生する「うしみち」⁷⁶⁾と呼ばれる牛蹄による裸地化が土壌侵食へと発展していく状況や草地造成工事を行うことによって発生した人為的な表流水集中化による土壌侵食などがしばしば見られる。

このような草地造成の土壌侵食に関しては、長沢ら⁷⁷⁾が草地造成過程での土壌侵食状況を報告したものや石田ら⁷⁸⁾が傾斜草地における土壌侵食を報告したものもあるがその数は非常に少ない。

そこでこの章では、実際に草地造成の行われた新得町新内地区の造成直後から造成後2年を経た草地を対象としての、水食被害（水食と呼ぶ）および牛蹄による草地の裸地化が初因となる土壌掘削被害⁷⁹⁾（蹄侵食と呼ぶ）調査を基に、十勝地域における造成草地における土壌侵食特性を論述し、その保全対策の検討を行う。

第1節 調査方法

調査は、図-3-1に示す、北海道新得町新内地区の造成草地を対象として造成年度別、造成区画別に土壌侵食状況の調査を行った。

調査は、新内地区の造成草地を造成年度別に1982年度造成地区3区画、1983年度造成地区3区画、1984年度造成地区2区画の計8区画に分け、それぞれの区画別に1985年夏期に調査を行った。調査内容は、調査区画内の土壌侵食発生地点の位置と勾配、その侵食状況を調査した。

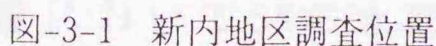
また深刻な土壌侵食被害ではなかったが、1982年度造成草地の区画1において播種直後の降雨のため面状侵食が発生した地点の勾配と裸地率の関係については1982年夏期に調査を行った。

また草地造成過程および放牧期間の降水量と土壌侵食の関係を知らためこの草地造成地区に隣接する佐幌ダムの雨量データ^{8.0)}を使用した。



図 3-1 新内地区造成草地位置図

図-3-1 新内地区調査位置



第2節 山間地域における降雨の特徴

十勝地域で草地造成の行われる現場は、山間地域の未開発な傾斜地に広範に広がっている。この調査対象地である新内地区も山間地域に位置するため、土壌侵食の要因である降雨については一般に平野部と比較すると多いと考えられる。^{8.1)}そこで最近10年間の新内地区の降水量データと平野部であり新内地区の近くに位置する新得市街のアメダス降水量データ^{8.2)}とを比較することにより新内地区の降雨の特徴を解析した。

新内地区と新得市街の作物生育期における1976年から1985年までの月別降水量を表-3-1に示す。これより作物生育期平均降水量は、新内地区で770mm、新得市街で685mmであり新内地区の方が多く、各年の作物生育期降水量についても新内地区が新得市街を下回ることがない。また月別平均降水量については、10月を除いては新内地区が新得市街を上回り、各月降水量についても新得市街が新内地区を上回るのは、58月中16月のみであった。

一方、各月における降雨の特徴は新内地区、新得市街共に、5月が80mmと64mmで最も少なく、8月が196mmと189mmで最も多かった。他の月は6,7月が100mm前後であり9,10月が120mm前後であった。

この降水量の比較を行うため月別降水量・作物生育期降水量の新内地区と新得市街の平均値の差の検定を行い、その結果を表-3-2に示す。この結果、新内地区と新得市街の降水量は5月、6月、9月と作物生育期間降水量において5%の水準で有意差のあることがわかった。また7月、8月についてもそのt値が高くここでも新内地区と新得市街との降水量には差がある傾向があり、降水量データによ

表-3-1 山間部と平野部の作物生育期月別降水量

平 野 部 (新得町市街)							
年次	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
1976	50	111	8	109	157	196	631
1977	53	25	160	185	81	22	526
1978	143	136	87	163	96	124	749
1979	26	100	67	86	121	224	624
1980	41	131	53	262	87	139	713
1981	74	93	151	462	120	105	1005
1982	79	90	113	226	76	111	695
1983	73	134	71	257	130	67	732
1984	70	58	155	50	92	95	520
1985	32	41	144	88	170	176	651
平均	64	92	101	189	113	126	685
山 間 部 (新内地区)							
年次	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
1976	68	113	17	106	150	209	663
1977	73	39	152	214	108	23	609
1978	172	116	122	173	107	114	804
1979	36	109	80	78	161	163	627
1980	58	133	57	251	85	122	730
1981	103	107	152	523	135	141	1161
1982	95	116	169	202	80	68	706
1983	85	151	86	275	163	97	857
1984	—	67	126	32	84	94	—
1985	33	55	128	104	177	—	—
平均	80	101	109	196	125	115	770

(単位: mm)

表-3-2 山間部と平野部の降水量の差の検定

月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	作物生育期
標準偏差	1.728	1.777	2.624	1.562	2.720	2.454	4.301
標準誤差	0.576	0.562	0.830	0.493	0.860	0.818	1.520
自由度	9	10	10	10	10	9	8
t 値	1.93**	2.134*	3.493	3.239	1.162*	1.765	7.891*

**有意水準1%
*有意水準5%

って山間部と平野部の降水量を比較すると山間部で降水量の多いことがわかった。

次に草地造成工事に重要な降雨日数について表-3-3に示す。これより作物生育期平均降雨日数は、新内地区で77.6日、新得市街で65.0日、各年の作物生育期降雨日数も新内地区が新得市街を上回っており、また月別平均降雨日数については、全月新内地区が新得市街を上回り、各月降雨日数で新得市街が新内地区を上回るのは、58月中10月のみであった。

そこで降雨日数に関しても月別降雨日数・作物生育期降雨日数の新内地区と新得市街の平均値の差の検定を行い、その結果を表-3-4に示す。この結果、新内地区と新得市街の降雨日数は7月、8月と作物生育期間降水量において5%の水準で有意差のあることがわかった。降水量ほどではないが新内地区と新得市街との降雨日数には差があることがわかり、降雨日数データによっても山間部が平野部と比較して降雨日数の多いことがわかった。

以上の結果により、山間部に位置する新内地区は、平野部の新得市街に比べ降水量・降雨日数共に多いことがわかり、このような山間地域は、平野部以上に草地造成過程における雨水による土壌侵食の危険が大きいことがわかった。

特に、有意差検定で示された5月、6月の山間部での降水量の多さは草地造成直後の裸地期間とも競合し、土壌侵食の危険性を高めるものであり草地造成の計画を立てる上で施工時期の山間部における降雨特徴を把握する十分な調査が必要なものと考えられる。

また造成後の草地においても降雨日数が多いことより地表面が湿潤状態であることが多く、放牧牛の行動や採草機械類の走行による

表-3-3 山間部と平野部の作物生育期月別降雨日数

平 野 部 (新得町市街)							
年次	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
1976	8	15	2	9	10	11	55
1977	9	6	13	12	12	7	59
1978	13	10	5	12	8	15	63
1979	8	9	10	8	14	13	62
1980	14	9	11	16	9	11	70
1981	14	14	12	13	9	11	73
1982	13	7	12	12	9	8	91
1983	9	21	15	11	11	15	82
1984	7	8	14	4	15	14	62
1985	12	9	11	10	8	13	63
平均	10.7	10.8	10.5	10.7	10.5	11.8	65.0
山 間 部 (新内地区)							
年次	5月	6月	7月	8月	9月	10月	合計
1976	10	16	8	12	11	15	72
1977	11	8	14	13	13	6	65
1978	13	10	12	15	9	14	73
1979	13	10	12	7	14	15	71
1980	14	14	15	16	14	11	84
1981	14	16	18	17	10	16	91
1982	13	10	15	14	8	8	68
1983	11	20	16	14	16	20	97
1984	—	7	14	4	10	13	—
1985	11	9	10	11	10	—	—
平均	12.2	12.0	13.4	12.3	11.5	13.1	77.6

(単位：日数)

表-3-4 山間部と平野部の降雨日数の差の検定

月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	作物生育期
標準偏差	8.359	11.68	23.18	24.17	15.83	29.86	53.78
標準誤差	2.786	3.696	7.330	7.645	5.005	9.953	19.01
自由度	9	10	10	10	10	9	8
t 値	6.061	2.353	1.091*	0.915*	2.397	-0.58	3.168**

**有意水準1%
*有意水準5%

牧草の剥離の危険も大きいとみられ、施工後の牧草管理にも充分注意する必要があるものと考えられる。

第3節 造成年度別の土壌侵食被害

造成草地は、造成過程での降雨、放牧の回数等により土壌侵食状態が非常に異なっている。そこで造成草地を造成年次別、造成区画別に土壌侵食被害調査を行った。

調査は、新内地区の1982年度造成地区3区画、1983年度造成地区3区画、1984年度造成地区2区画の計8区画について行い、その結果を表-3-5に示す。

1982年度造成地区は、3区画からなり、最も水食、蹄侵食被害の多い地区であった。その内の区画1は、1981年8月初旬の集中豪雨により発芽直後の造成草地で大規模な水食被害が発生したために再度、1982年に牧草の播種を行った区画である。ここでは前年度の被害と同様に水食が発生している。これはこの年の草地造成地区に谷地形があったり排根線が集水を起こしやすい配置となっていることや造成年度別の放牧地使用計画が立てられていたため、牧草がしっかり繁茂する前に牛群の放牧が行われ、前年の被害痕跡での牛の歩行が牧草の剥離を起こした上に、この年の7、8月の多雨が作用し、牛の蹄による牧草の剥離を初因とする水食が発生したものとする。また他の2区画で発生した水食についても、発生箇所付近には牛の蹄による牧草の剥離部分が多く見られ、被害程度は区画1より軽いものの同様な原因による水食であるものと思われる。蹄侵食についても1982年度造成地区は、他年度の草地造成地区より多く発生している。これは、造成年次が最も古く、放牧回数が他年次造成地区より多いことや区画1と同様に牧草の不十分な生育下での放牧等が行われたことなどが理由として考えられる。

表-3-5 造成年別土壤侵食被害状況

造成区画番号		水食	蹄侵食	計
1982年度	1	3	4	7
	2	1	3	4
造成地区	3	1	2	3
1983年度	4	0	1	1
	5	0	0	0
造成地区	6	0	0	0
1984年度	7	0	0	0
	8	0	3	3
合 計		5	13	18

(単位：件数)

次に1983年度造成地区も、3区画からなり造成年度別では最も土壌侵食被害が少ない造成地区であった。この造成地区の土壌侵食被害が発生した区画は区画4のみであり、またその土壌侵食被害状況も小範囲における軽度な蹄侵食であり非常に安定している造成草地であることが言える。これは、この年度の草地造成地が他の年度の草地造成地より急傾斜の地域が少ないことと、この年の降雨が牧草の播種時期の6月に牧草発芽に十分な水分を与え、またその後の7月には晴天が多く牧草の生育には理想的な天候であったため8月の多雨期までに牧草が十分に生育し、水食や蹄侵食があまり発生しなかったものと考えられる。

最後に、1984年度造成地区は、最も新しい造成草地である。この年は作物生育期を通して降水量が少なくかんばつぎみの気候であり牧草の生育も不十分ではあったが降水量が少ないため水食は見られなかった。しかし、区画8に見られるように、生育の不十分な牧草地への放牧が行われた結果急斜面において放牧牛がスリップを起こしたことによって発生している蹄侵食が3箇所も見られた。

以上の結果により水食を考える上では勿論、蹄侵食を考える上でも造成過程における降雨の季節的特徴は、造成後の草地の土壌侵食に非常に大きな影響を与えていることがわかった。このように造成年度における牧草の成育状況は造成草地将来にわたって影響するものであるから草地造成施工前に今以上の造成過程時における降雨の特徴の把握が望まれる。

第4節 造成草地における水食

4-1 草地造成における造成勾配と土壌侵食

これまでの多くの研究において傾斜角度が大きくなると土壌侵食量もそれに伴い多くなることがわかっている。⁸³⁾ また最近、草地造成に関してもこの関係が報告されている。⁸⁴⁾ そこで新内地区における造成草地の傾斜角度と水食の関係を考えるために造成草地の勾配別造成面積と勾配別土壌侵食被害発生件数の関係を表-3-6に示す。なおこの勾配の分級は草地開発設計基準の草地分級の傾斜角度を参照とした。⁸⁵⁾

これより新内地区における水食は、緩傾斜角度8～15度において3件発生し急傾斜角度20～25度で1件、それ以上でも1件発生している。これは先に示した傾斜角度と土壌侵食の関係に相反するようであるが、造成面積当たりの発生件数でとらえると逆に勾配の急な斜面に土壌侵食の発生頻度が高くなる結果となり、草地造成においても傾斜角度が大きくなることにより土壌侵食の危険性が高まることがわかった。

次にこの関係をより詳細につかむため1982年度区画1において行った造成勾配と土壌侵食の関係について調査圃場の侵食状況を図-3-2に、調査圃場の各区画の勾配と裸地率を図-3-3に示す。

この調査箇所は、1981年度夏季の豪雨により、この造成区画全体が激しい土壌侵食被害を被り、1982年度春期に再播種を行ったが肥沃な表土が流出したために播種直後の降雨によって、面状侵食が発生した地点である。このため図-3-2に示されるように傾斜方向の右上

表-3-6 勾配別水食発生状況

傾斜角度	造成面積(km ²)	水食発生件数	発生件数当造成面積(km ²)
8°以下	674,250	0	-----
8°-15°	762,000	3	254,000
15°-25°	513,750	1	513,750
25°以上	9,750	1	9,750



图-3-2 面状侵蚀状况

$\frac{13^{\circ} 53'}{8 \%}$	$\frac{14^{\circ} 4'}{16 \%}$	$\frac{14^{\circ} 29'}{27 \%}$	$\frac{14^{\circ} 18'}{21 \%}$	$\frac{13^{\circ} 21'}{13 \%}$
$\frac{18^{\circ} 47'}{21 \%}$	$\frac{18^{\circ} 51'}{25 \%}$	$\frac{19^{\circ} 31'}{51 \%}$	$\frac{19^{\circ} 42'}{83 \%}$	$\frac{18^{\circ} 33'}{22 \%}$
$\frac{22^{\circ} 34'}{67 \%}$	$\frac{22^{\circ} 24'}{44 \%}$	$\frac{22^{\circ} 13'}{57 \%}$	$\frac{21^{\circ} 58'}{40 \%}$	$\frac{18^{\circ} 33'}{8 \%}$
$\frac{23^{\circ} 57'}{70 \%}$	$\frac{22^{\circ} 50'}{35 \%}$	$\frac{21^{\circ} 6'}{30 \%}$	$\frac{21^{\circ} 17'}{34 \%}$	$\frac{20^{\circ} 29'}{24 \%}$
$\frac{22^{\circ} 35'}{49 \%}$	$\frac{22^{\circ} 16'}{76 \%}$	$\frac{20^{\circ} 51'}{80 \%}$	$\frac{15^{\circ} 36'}{26 \%}$	
$\frac{21^{\circ} 28'}{26 \%}$	$\frac{24^{\circ} 20'}{84 \%}$	$\frac{\text{上部}}{\text{下部}} = \frac{\text{傾斜角度} (^{\circ} ')}{\text{裸地率} (\%)}$		

図-3-3 各区画の傾斜角度と裸地率

から左下に向かって大きな侵食が発生している。またこの侵食の発生している斜面の勾配は、図-3-3に示した通り、この地点において勾配の急な部分であることがわかる。そこで、この調査箇所における各区画における勾配と裸地率の関係を知るため、両者の関係を図-3-4に示した。

この図より、勾配と裸地率は相関係数 $r=0.67$ と正の相関関係にあることがわかり、この結果、前述した草地造成地全域調査と同様、この調査においても勾配が大きくなるとそれに伴い土壌侵食の危険性が増すことがわかった。

以上の結果により、草地造成地といえども、特に急傾斜地においては、造成方法、造成時期、播種時期さらには、牧草の生えそろうない造成直後等に対して、細かな対応をする必要があると考える。

4-2 草地造成における地形と土壌侵食

新内地区の草地造成方法は山成り工であるため造成後の地形は施工前の形状を残し、その上に草地造成の特徴である排根線が放牧・採草の作業効率の低下を招かないように配置されている。

遠景には、写真-3-1のように曲線と牧草の緑、そして幾何学的な排根線のアレンジが美しい調和を保っているようにも感じられるが、実際にはこの地形や排根線の配列によって土壌侵食を助長している箇所も見受けられる。そこで、新内地区の造成草地における地形が水食に与える影響を考えるために、水食の多く発生している1982年度造成地区画1の被害発生付近の地形詳細図を図-3-5に示す。

被害地点①は谷地形となっており上部からの表流水の集中が水食

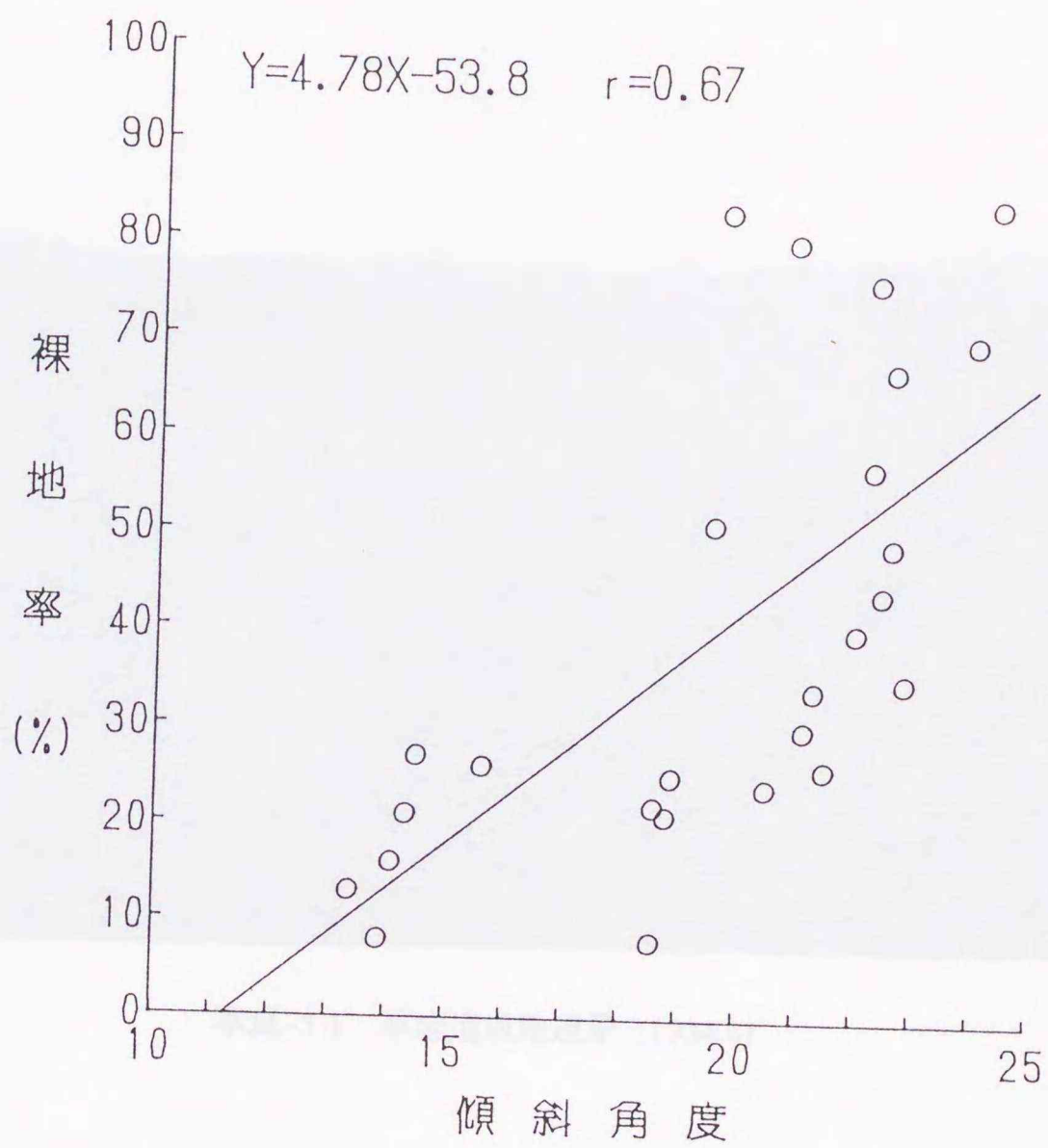


図-3-4 傾斜角度と裸地率の関係



写真-3-1 草地造成地遠景 (1984.8)

を起こしたものと考えられる。またこの部分には牛の蹄によるスリップ痕も数多く見られこれも水食発生を助長したものと思われる。

被害地点②は急傾斜ではあるが集水能力のある谷地形ではない、しかし図に示されるように被害地上部に位置する排根線が止水壁となりこれによって集水された表流水が排根線下端から流出し、この部分に水食を発生させたものと考えられる。

被害地点③も被害地点②と同様急傾斜ではあるが谷地形ではない、そして排根線は等高線に対して平行に配置され土壌侵食防止の観点からは理想的な配列をとってはいるが、排根線が一体構造をとらず3個の部分から成り立つため、排根線で一時停止させた上部からの表流水が、排根線の間から流出したことにより、水食を発生させたものと考えられる。この排線根の配置は、上部の山頂に放牧牛の給水施設があるため牛道として間隔をとっているのだが、牛の歩行もこの排根線によって制限されるため、逆に土壌侵食を大きくする結果となったと考えられる。

このように造成草地の排根線の配置による水食の発生は現況地形や草地造成後の各施設配置、牧柵の設置場所等の条件を熟慮して行えばこの種の被害の軽減に連なると考えられる。また谷地形における水食被害も谷中央部付近にダム状に排根線を配置することなどにより、短時間における表面流出を防ぐばかりでなく流出水の地下浸透を促し、一層の土壌侵食防止対策になるものとする。

以上の結果は、新内地区の一部地区の調査結果ではあるが、造成地全体における排根線の配置方法は、その作業の容易性から等高線に対して直角に配置されている場合がほとんどであり、十勝地域の他の草地造成地区においても、この配置が多くみられる。そして

排根線の配置が水食を助長させている一因となっている場所が多く見受けられる。

このような状況を踏まえ、作業難度は高くなるものの配列の仕様によって土壌侵食防止効果のある排根線の配置を、草地造成の施工計画に取り込むべきであると考えます。

第5節 蹄侵食

草地造成工事終了後、共用開始になった牧草地は地表面が牧草で被覆されるため水食の危険性は非常に少なくなるが、こんどは放牧牛群の踏圧によって牧草が剥離される蹄侵食が発生しやすくなる。

そこで蹄侵食のメカニズムを解明するため、造成草地の傾斜角度別における蹄侵食被害件数と造成面積を表-3-7に示す。

これより蹄侵食は、傾斜角度15～25度の斜面において著しく発生していることがわかった。これは傾斜角度25度が牛群にとって傾斜方向に対する歩行が困難となる歩行限界角度であることから、この限界角付近の傾斜地において牛群がスリップを数多く発生させたためと考えられる。また山間地は、前述したように降雨日数も多く、地表付近の土壌が湿潤状態であることが多く、これも蹄侵食を助長する一因となっているものと考えられる。

傾斜角度が15以下の緩傾斜地では、蹄侵食がほとんど見られない。これは緩傾斜地においては、牛群の歩行中にスリップを引き起こす危険性が非常に少ないためと考えられる。

逆に傾斜角度25度以上の急傾斜地は、牛の歩行限界⁸⁶⁾をこえ、牛群の歩行は傾斜方向の歩行形態から、写真-3-2に示される平行牛道と呼ばれる水平方向への歩行形態⁸⁷⁾となり、歩行痕跡は残存するものの水平方向であるために、広範囲の土壌侵食には発展しない形態に変化するものと考えられる。

次に新内地区では、写真-3-3に示されるように放牧区域を区画する牧柵沿に牛群の通り道ができそこが裸地状態となる現象が見られる。また牛群の給餌施設および給水施設付近においても同様に牛群

表-3-7 勾配別蹄侵食発生状況

傾斜角度	造成面積 (km ²)	蹄侵食発生件数	発生件数当造成面積 (km ²)
8° 以下	674,250	0	-----
8° -15°	762,000	1	762,000
15° -25°	513,750	9	57,083
25° 以上	9,750	3	3,250



写真-3-2 平行牛道 (1984.8)



写真-3-3 木柵沿いの牛道 (1984.8)

の踏圧による裸地状態となっている。どちらも牛群の頻繁な歩行によるものと考えられるが、それによって踏み固められた裸地地表面は、現在のところ土壌の流亡は発生していない。しかし、裸地状態の地表面では水食の危険性が非常に高く、早急な牧草の修復が望まれる。

最後に、新内団地における蹄侵食発生斜面の形状を調査した結果、被害発生箇所は緩傾斜と急傾斜の変移点で多く発生することがわかった。これは牛群が行動目的地へ最短コースを歩行しようとするため、傾斜の変化する地点において牛群の脚による土壌表面への偏加重が加わり、写真-3-4に見られるような牛群のスリップ痕が数多く見られるものと考えられる。

このように蹄侵食と造成草地の傾斜角度には、非常に密接な関係があることがわかった。また草地造成を行う過程において、設置された牧棚や作工物によって牛群の行動が人為的に制限され、これが蹄侵食の主原因になっていることもわかった。

以上の結果を踏まえ、この蹄侵食を軽減させて行くためには、牛群の行動特徴を把握した牧棚の設置、給餌施設等の位置、排根線の配置など草地造成の設計段階で蹄侵食防止対策も考慮していく必要があるものと考えられる。



写真-3-4 牛脚による地表面剥離 (1984.8)

第4章 土壌凍結と侵食に関する実験

一般に傾斜農地の土壌侵食は、降雨に際しての土壌流亡を示唆する。しかし、十勝地域のような寒冷少雪地域においては、冬期間の積雪と土壌凍結にも留意しなければ、融雪期において著しい土壌侵食が発生することを第2章において述べてきた。

この融雪、融凍期における土壌侵食に関する室内実験は、松田らの凍結土壌の侵食に関する研究⁸⁸⁾や今野の傾斜畑地における土壌侵食に関する研究⁸⁹⁾等があるがその件数は非常に少ない。そこで、融雪期の土壌侵食問題が深刻である十勝地方の火山灰土壌を対象として、実験室において凍結土壌を対象とした土壌侵食実験を行った。

侵食実験は人工降雨装置を使用し、傾斜農地の表面が凍結している場合、融凍の過程として傾斜農地の表面が融解しその下部に凍結層が残存する場合、また融雪期の気温特徴である昼夜におけるプラス気温とマイナス気温の繰り返しにより傾斜農地の表面土壌の凍結融解を繰り返している場合を想定し勾配、降雨強度、初期含水比等、土壌侵食に影響を与える条件を整え、流出水量、流亡土量、流出開始時間等、土壌侵食の問題点となる項目について比較検討を行い、酷寒少雪地域における融雪期の土壌侵食のメカニズムを解明することを目的とした。

第1節 表層凍結斜面の侵食

傾斜農地において地表面に凍結層が存在する場合と存在しない場合を傾斜、地表面水分などを変化させ、それが流出水量、流亡土量にどう影響するかを比較、検討した。

1-1 人工降雨装置と実験方法

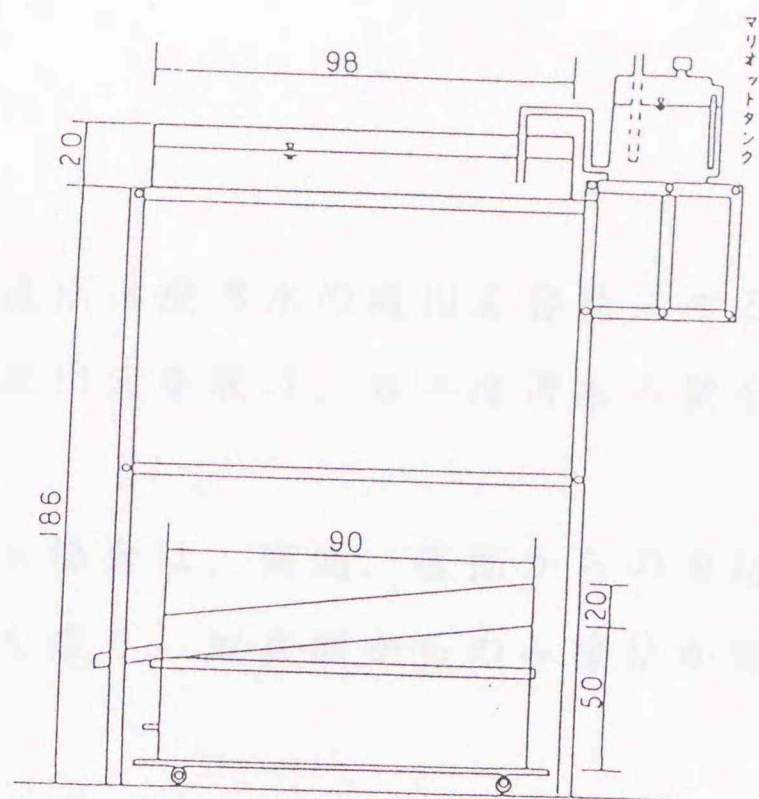
人工降雨装置を図-4-1に示す。

降雨装置は、厚さ1cmの透明アクリル板を使用して、図-4-1中段に示す縦98cm、横35cm、深さ20cmの水槽を作製した。底面には内径0.3mmのステンレス製のパイプを4cm²に一本の割合で配列した。また、このパイプの先に水滴がスムーズに落下するように、テフロン製のパイプを付けた。

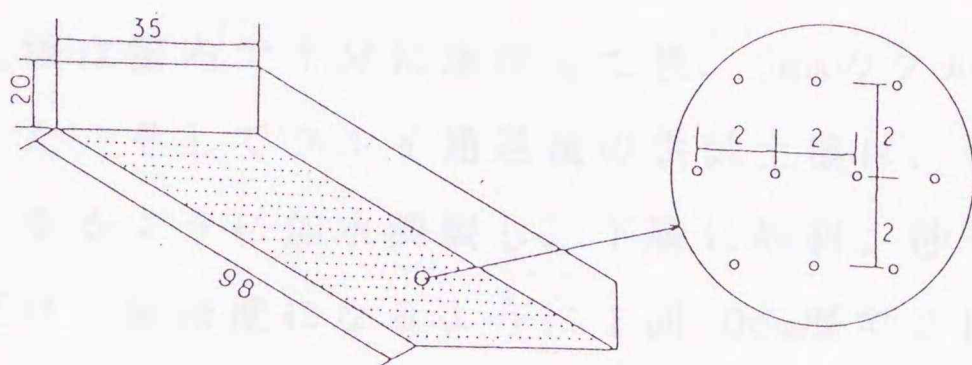
この水槽を高さ186cmの鉄製のアンクルで組み立てた台に載せた。

マリOTTタンクは、水槽内の水位を一定に保つ装置で、水位の調節とともに水の供給を行った。この実験で使用したタンクは50cm³容積のもので、これを2個連結して使用した。

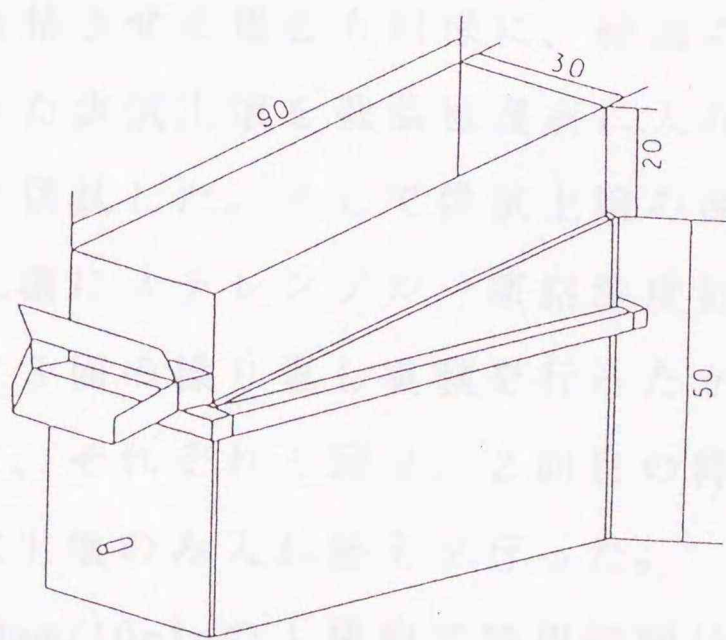
実験に供した土壌槽として、耐水性ベニヤ板を使用し、図-4-1下段に示す、縦90cm、横30cm、深さ30cmの供試容器を作製した。土壌槽の地表面傾斜は4.5%、9.0%、13.5%の3種類とし、それぞれの土壌槽を作成した。そして上部には雨滴の跳ね上がりによる外部からの水の浸入、内部からの水および土粒子の損失を防ぐため、土壌面から20cmの高さまで、土壌面の周囲をカバーで囲った。下流側には流下水受水溝を設け、地表の流下水および流亡土を補足できる構



(a) 全体図



(b) 降雨装置



(c) 土壌槽

図-4-1 人工降雨装置

造とした。また底面は浸透水の流出を容易にするため傾斜床とし、下流端に浸透水流出穴を設け、地中浸透水の量を測定できるようにした。

試料を凍結する場合は、側面、底面からの凍結を防ぐため、土壌槽外面に断熱材を張り、地表面からのみ凍結が進行するよう配慮した。

実験に供した土壌は、帯広畜産大学実験圃場の下層から採取した火山灰土であり、その諸性質を表-4-1に示し、その粒径加積曲線を図-4-2に示す。

この供試土壌は室内で十分に風乾した後、5mmのフルイを通過したものを使用した。そしてフルイ通過後の供試土壌は、含水比が30%または40%となるように加水調製し、下層に砂利、砂を詰めた土壌槽にできるだけ一定密度になるように1回10cm厚で2回に分けて締固め、土壌厚が20cmとなるよう調節した。

締固めた後、表面に水が浮きでるまで十分に散水した後、約24時間、表面から蒸発がない状態で重力水排除を行ったものを供試した。

供試土壌を凍結させる場合も同様に、締固め散水し、約24時間重力水排除を行った供試土壌を低温恒湿室に入れ、約-20℃で24時間凍結させたものを供試した。そして供試土壌の凍結深さを知るため、未凍結の供試土壌にメチレンブルー凍結深度計を埋設した。

なお同条件で3回の繰り返し実験を行ったが、2回目、3回目の実験においては、それぞれ1回目、2回目の降雨実験後の試料の上層10cm厚の供試土壌のみ入れ替えを行った。

降雨強度は10mm/10minの1種類で降雨時間は40分間とした。降雨開始後、10分間隔で流出水量を測定し、流亡土量は炉乾燥した後秤

表-4-1 供試土壤の物理的性質

液性限界	61.1%
最大乾燥密度	0.912g/cm ³
最適含水比	53.6%
粒度組成	粘土 : シルト : 砂 12% : 45% : 43%
強熱減量	7.2%
土粒子密度	2.633g/cm ³

なる間、土壌中の水分を測定し、その変化を記録する。このとき、土壌中の水分は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。

2. 土壌中の水分の測定方法

この方法は、土壌中の水分の測定に用いられる。土壌中の水分の測定は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。

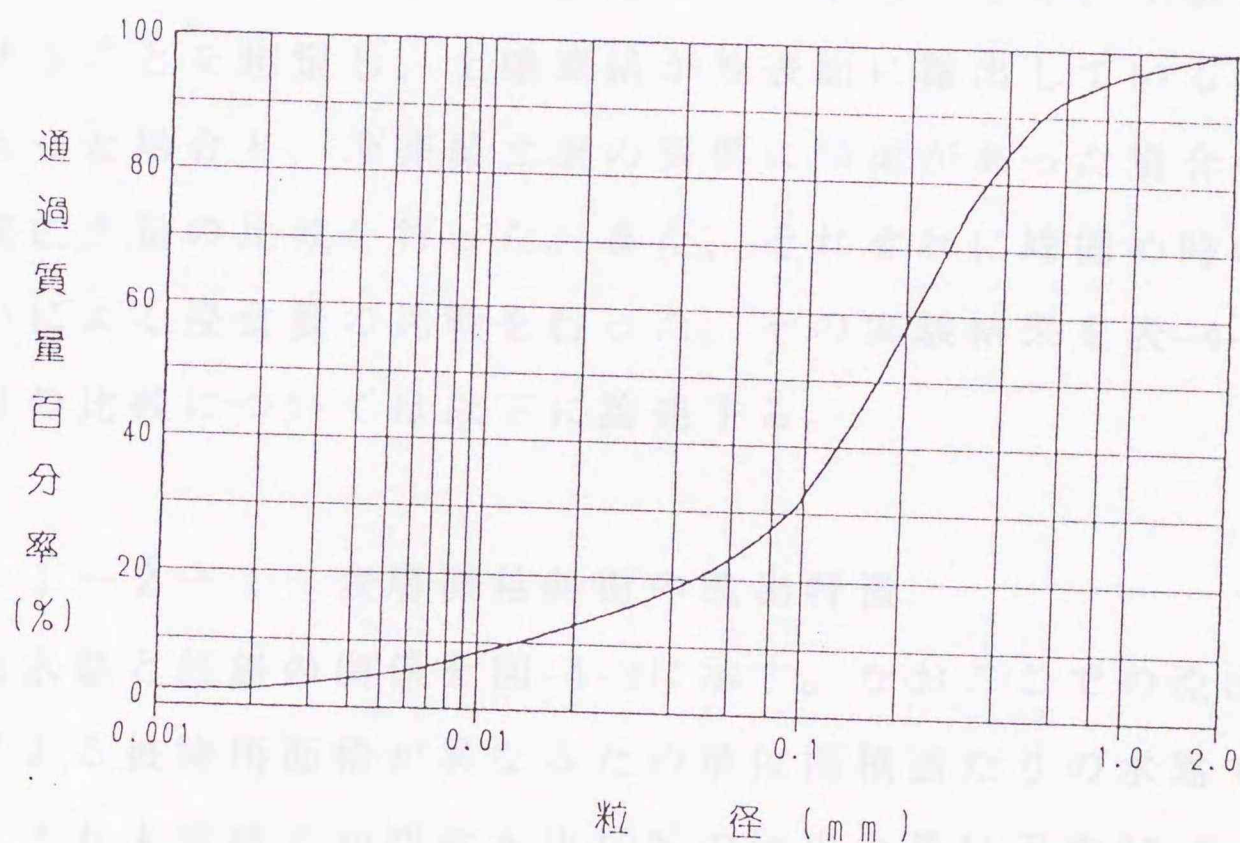


図-4-2 供試土の粒径加積曲線

このように土壌中に水分が減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。土壌中の水分の減少は、土壌中の水分の減少に伴って減少する。

量した。

なお降雨強度は、水位や水温によって変化するので、各実験ごとに、実験開始前に所定の強度になるように水位を調節し、降雨量の算定には、実験前後各5分間の降雨強度を平均したものに時間を乗じて求めた。

1-2 表層凍結斜面の侵食実験結果

この実験は、傾斜農地の表面土壌が凍結し、融雪期においてその土壌凍結が残存する場合、凍結層が不透水層となり、土壌侵食を増大させることを想定し、土壌凍結が地表面に露出している斜面に降雨があった場合と、未凍結土壌の斜面に降雨があった場合の流出水量、流亡土量の比較を行った。また、それぞれに締固め時の含水比の違いによる侵食量の比較を行った。その実験結果を表-4-2に示し、各項目の比較については以下に論述する。

1-2-1 表層凍結斜面の流出特徴

流出水量と傾斜の関係を図-4-3に示す。なおここでの流出水量は傾斜による被降雨面積が異なるため単位面積当たりの水嵩で示した。

これより未凍結で初期含水比40%の流出水量は平均23.8mm、含水比30%では平均16.7mmであり、初期含水比の違いによる流出水量の差が大きいことがわかった。また傾斜の違いによる流出水量の差は認められなかった。

このような結果になったのは、実験に使用した試料の最適含水比が50%前後であり、含水比40%は含水比30%に比べより締固まり、地中浸入量が少なく、表面流出量が多くなったものと考えられ

表-4-2 未凍結・凍結斜面における土壌侵食実験結果

	含水比 (%)	傾斜 (%)	降雨強度 (mm/10min)	降雨量 (mm)	流出水量 (mm)	流亡土量 (g)	流出開始時間 (分：秒)
未 凍 結	40	4.5	10.3	41.2	23.1	26.98	2:40
		9.0	10.3	41.2	25.6	50.01	1:03
		13.5	10.3	41.2	22.8	30.73	2:10
	30	4.5	10.1	40.4	17.8	38.73	9:07
		9.0	10.1	40.4	15.4	36.11	10:32
		13.5	10.2	40.8	16.8	55.37	11:00
凍 結	40	4.5	10.1	40.4	38.6	112.63	1:34
		9.0	10.1	40.4	40.9	215.15	1:21
		13.5	10.1	40.0	37.3	294.29	1:21
	30	4.5	10.1	40.4	38.4	104.03	2:00
		9.0	10.1	40.4	38.8	235.46	1:32
		13.5	10.1	40.4	39.1	285.56	1:16

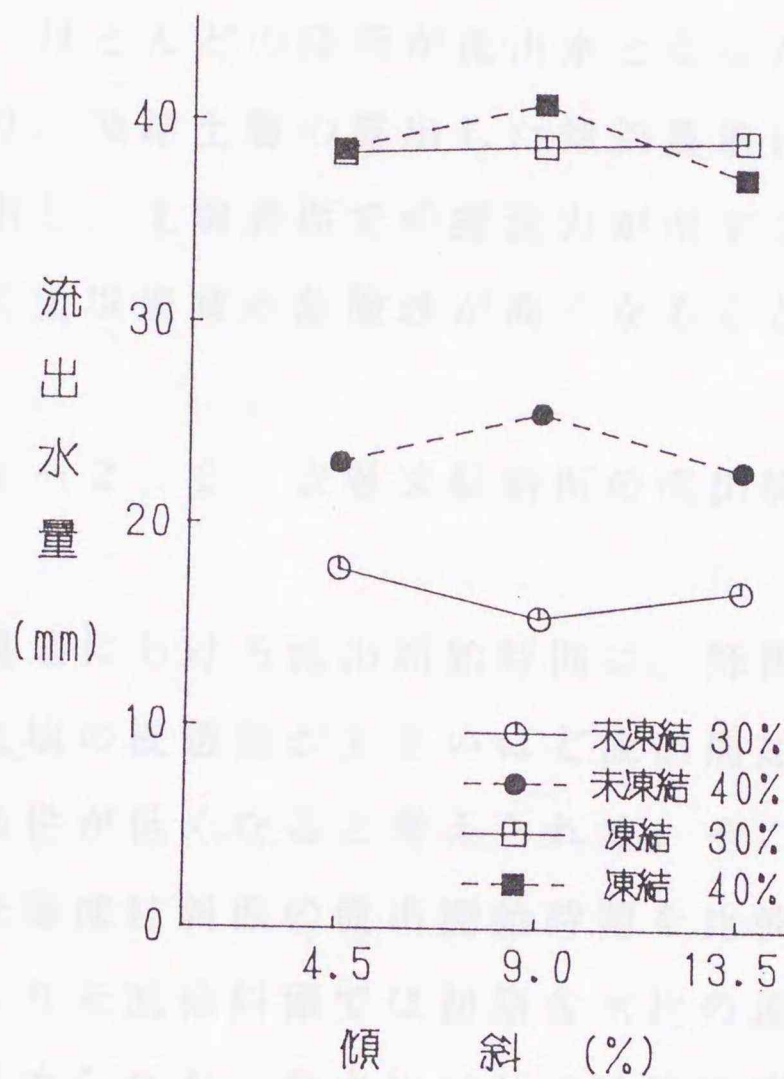


図-4-3 流出水量と傾斜の関係

る。

一方、表層凍結斜面の場合は、未凍結斜面と比較して初期含水比、傾斜の違いによる流出水量の差は認められなかった。また総降雨量に対する流出水量は、すべての試料で90%以上あった。

これは、表層凍結斜面は表層の凍結層が難透水層となり、浸入が遮られ、ほとんどの降雨が流出水となったものと考えられる。このことより、凍結土層の露出した傾斜農地においては、降雨のほとんどが流出し、土壌表面での掃流力が増すこととなり、未凍結土壌と比較して土壌侵食の危険性が高くなることがわかった。

1-2-2 表層凍結斜面の流出開始時間

傾斜農地における流出開始時間は、降雨強度と降雨の持続性に関連し、土壌の浸透能が大きいほど流出開始時間は長くなり、土壌侵食の危険性が低くなると考えられる。そこで表-4-2に示した未凍結斜面と表層凍結斜面の流出開始時間を比較した。

これより未凍結斜面では初期含水比の違いで流出開始時間に大きな差が認められた。含水比40%では降雨開始後1～3分の間にほとんどの試料で流出が開始したが、含水比30%では流出開始まで5～13分必要とした。しかし、傾斜の違いによる流出開始時間の差は認められなかった。

この初期含水比の違いによる流出開始時間の差は、流出と同様に締固まり程度の違いによって雨水の浸入能に差があったものと考えられる。

一方、表層凍結斜面の場合であるが初期含水比、傾斜による流出

開始時間の差はなく、ほとんど降雨開始後1～2分の間に流出が開始した。

試料を凍結した場合、降雨開始時は当然、供試土壌が凍結しており、これが難透水層となり、土中への雨水の浸入がなく、すみやかに流出が開始され含水比による開始時間の差が出なかったと考えられる。

1-2-3 表層凍結斜面の流亡土量

表層凍結・未凍結斜面の流亡土量と傾斜の関係を図-4-4に示す。

これより未凍結斜面においては初期含水比の違いによる流亡土量の差は認められなかった。傾斜の違いによる流亡土量の差は含水比40%では認められず、30%では僅かに傾斜が急になるほど、流亡土量が増加することが認められた。

未凍結斜面の流出水量については含水比40%の試料が30%の試料と比較して約1.4倍であったのに対し、流亡土量において差が出なかったのは、締固まり程度の違いと考えられる。つまり、含水比30%試料は40%に比べ、締固まり程度が緩い状態であり、雨滴の衝撃による土粒子の空中への飛散、水中への浮遊が多くなり、流出水量は少なくとも、結果的には同程度の流亡量があったと考えられる。

次に凍結斜面の流亡土量であるが凍結斜面と同様、初期含水比の違いによる流亡土量の差は認められなかった。しかし、傾斜が急になるとともに流亡土量は大きく増加した。

これは試料を低温恒温室内で凍結した際、かなりの霜柱が発生し相当量の土粒子が霜柱上部に持ち上げられるのが認められた。また、侵食実験は霜柱がおおむね融解してから行ったが、その時点におい

また、この実験の結果から、凍結した土壌の透水性が凍結していない土壌に比べて、著しく低下していることが認められた。つまり、凍結によって土壌中の空隙が凍結によって閉鎖され、透水性が低下していることが明らかになった。

また、凍結した土壌の透水性が凍結していない土壌に比べて、著しく低下していることが認められた。つまり、凍結によって土壌中の空隙が凍結によって閉鎖され、透水性が低下していることが明らかになった。

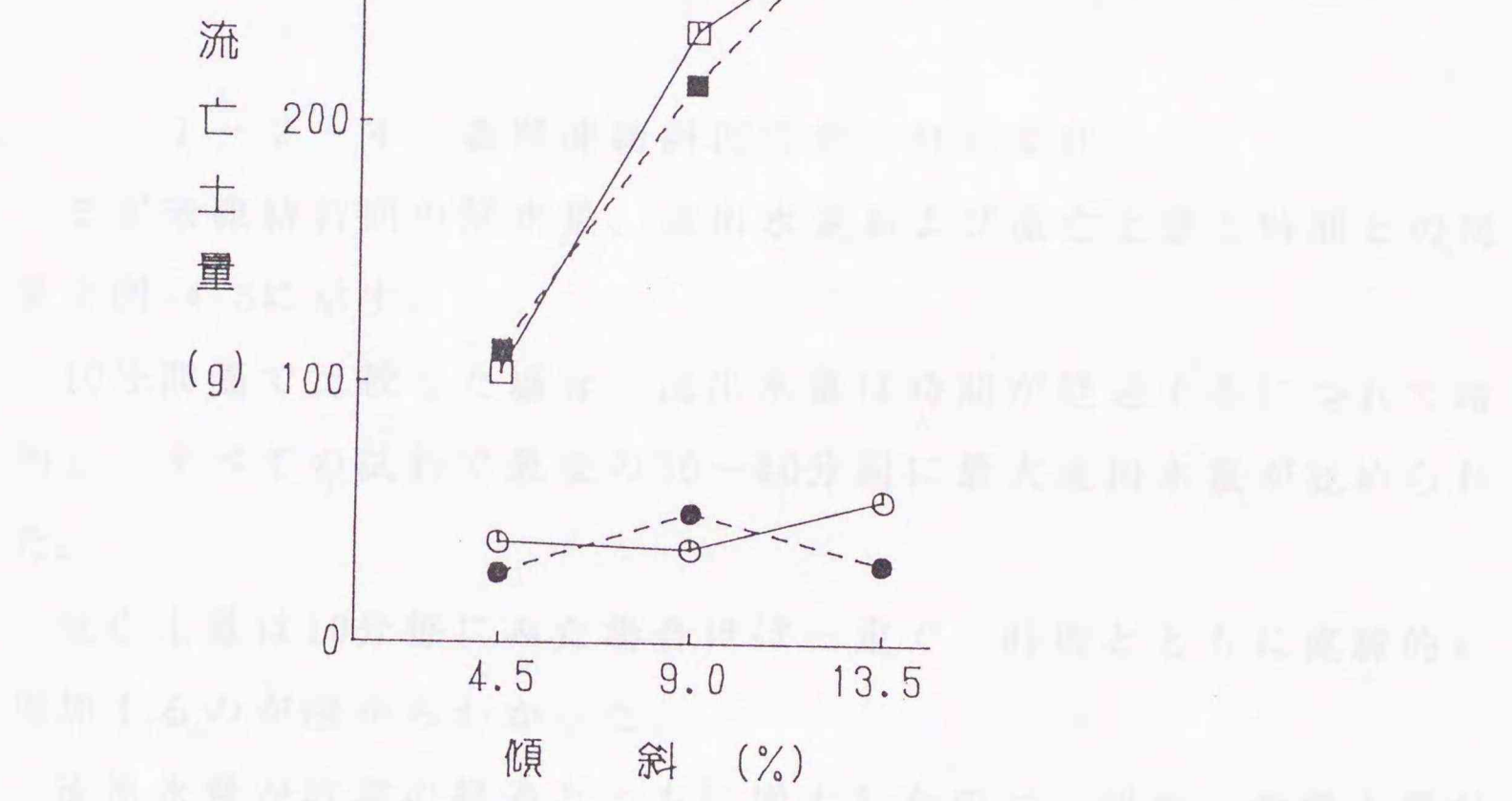


図-4-4 流亡土量と傾斜の関係

凍結した土壌の透水性が凍結していない土壌に比べて、著しく低下していることが認められた。つまり、凍結によって土壌中の空隙が凍結によって閉鎖され、透水性が低下していることが明らかになった。

ても、土壌凍結によって凍上した試料表面土が融解した後も完全に沈下せず、若干の隆起を残存させているのが認められた。つまり、霜柱、凍上によって土粒子の間隙が拡大されたため、含水比の違いによる締固まり程度の差が表れなかったものと考えられる。

また表層凍結斜面では、流出水量は総降雨量の90%以上に達し、降雨の大部分が流出したことが認められた。このような多量の流出水の影響により、傾斜が急勾配になるほど流出水の流速が速くなり、このため掃流力も増大し、流亡土量が増加したと考えられる。

1 - 2 - 4 表層凍結斜面侵食の経時変化

まず未凍結斜面の降水量、流出水量および流亡土量と時間との関係を図-4-5に示す。

10分間隔で比較した場合、流出水量は時間が経過するにつれて増加し、すべての試料で最後の30~40分間に最大流出水量が認められた。

流亡土量は10分毎にみた場合ほぼ一定で、時間とともに直線的に増加するのが図からわかった。

流出水量が時間の経過とともに増大したのは、斜面への浸入量が減少していったことを示している。つまり、雨滴が地表面に落下し打撃を与えると、土壌がかくはんされ泥水となる。そして、泥水中の浮遊粒子が土壌の間隔をみたすクラストを形成し雨水の浸入能を低下させ、流出水量が増加したと考えられる。流亡土量に関しては、時間とともに流出水量が増大したことにより、掃流力が増加し、その結果として流亡土量も時間とともに直線的に増加したと考えられる。

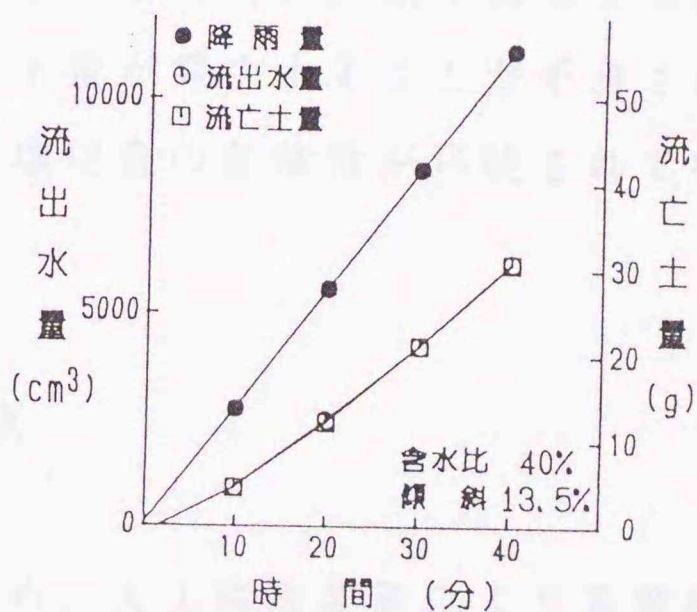
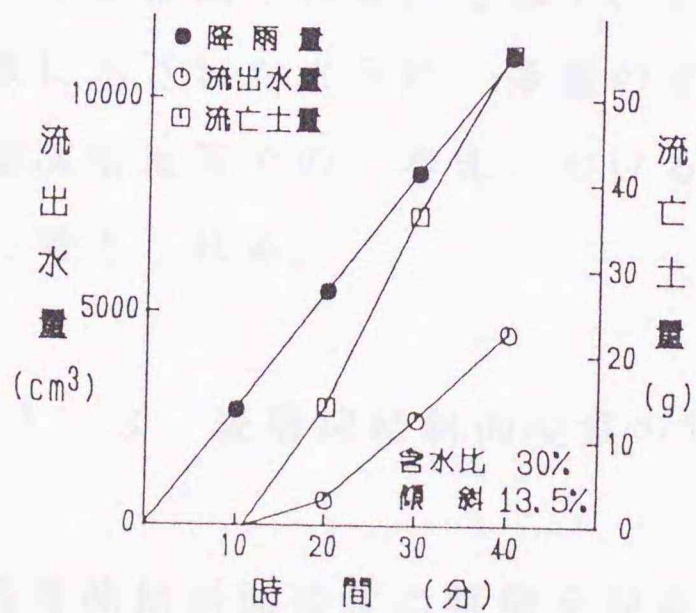
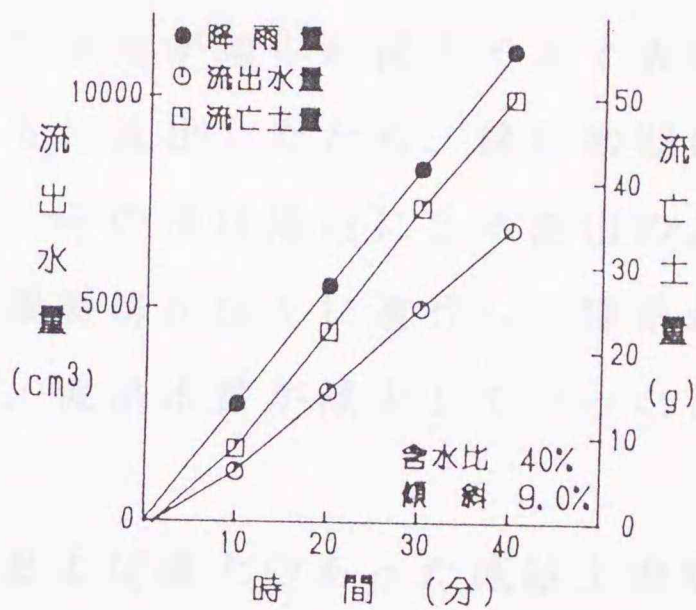
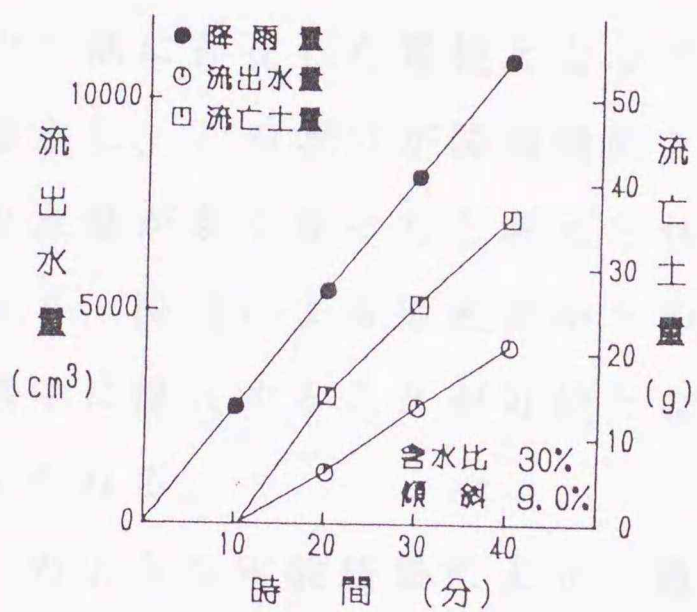
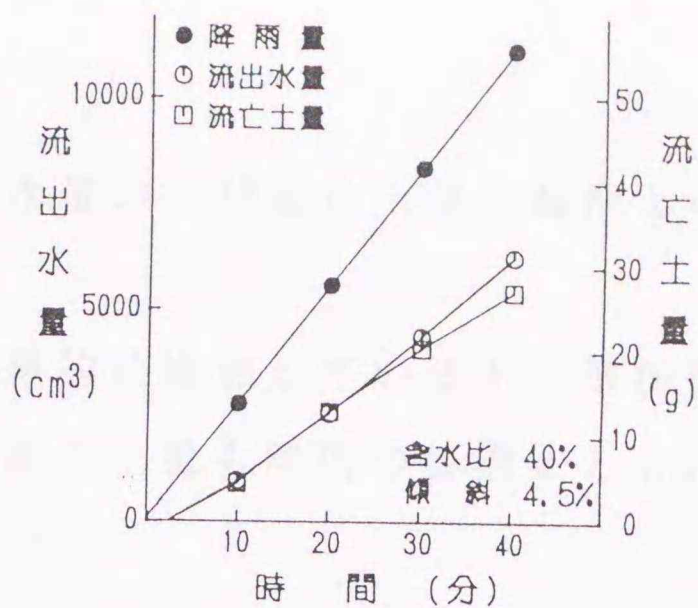
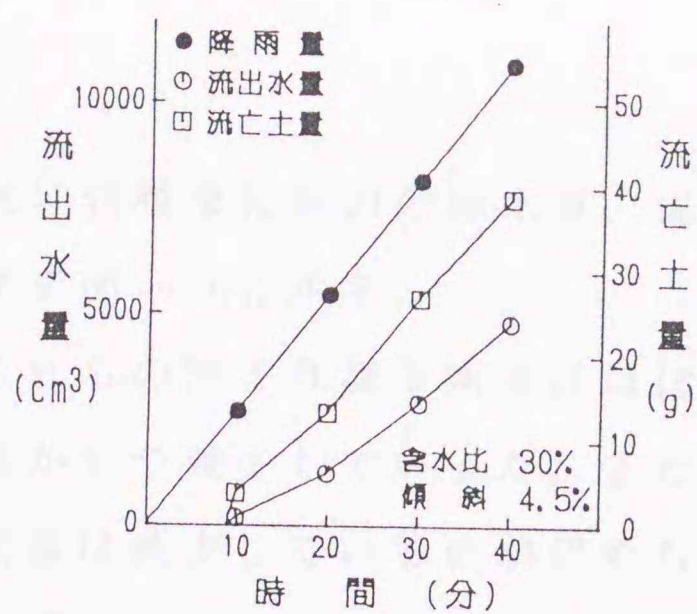


図-4-5 未凍結斜面の流出水量と流亡土量の時間的变化

次に表層凍結斜面の降水量、流出水量および流亡土量と時間との関係を図-4-6に示す。

これらの図より流下水量はほぼ直線的に増加しているが、増加量は僅かずつ減少していった。また、流亡土量も時間の経過とともに増加量は減少しているのが認められた。

表層凍結試料で実験を行う場合は、霜柱がほぼ融解してから降雨を開始したが、試料土自体は凍結状態で不透水性を示しているため、その上部に存在した霜柱となっていた水分が地中に浸入できず表面に滞水し、この水分が降雨開始とともに流出したため、降雨初期は流出水量が多くなったと考えられる。その後は降雨による流出のみとなり、降雨による地表面からの土壌融解が徐々に進行し、降雨が土壌中に浸入することが可能となり、流出水量が減少していったと考えられる。

このような実験結果により、霜柱および凍上のあった凍結土壌が融解した直後は、地表面の土粒子は非常に流亡しやすい状態になっていると推測される。そして、このような時期に降雨があると実験結果に示されたように、多量の流亡土量が発生することが予測され、土壌凍結地帯での、春先における土壌侵食の危険性が示唆されていると考えられる。

1-3 表層凍結斜面侵食の特徴

表層凍結斜面侵食の特徴を知るため、人工降雨装置により表層凍結斜面と未凍結斜面の侵食実験を行った結果、以下の見知を見いだせた。

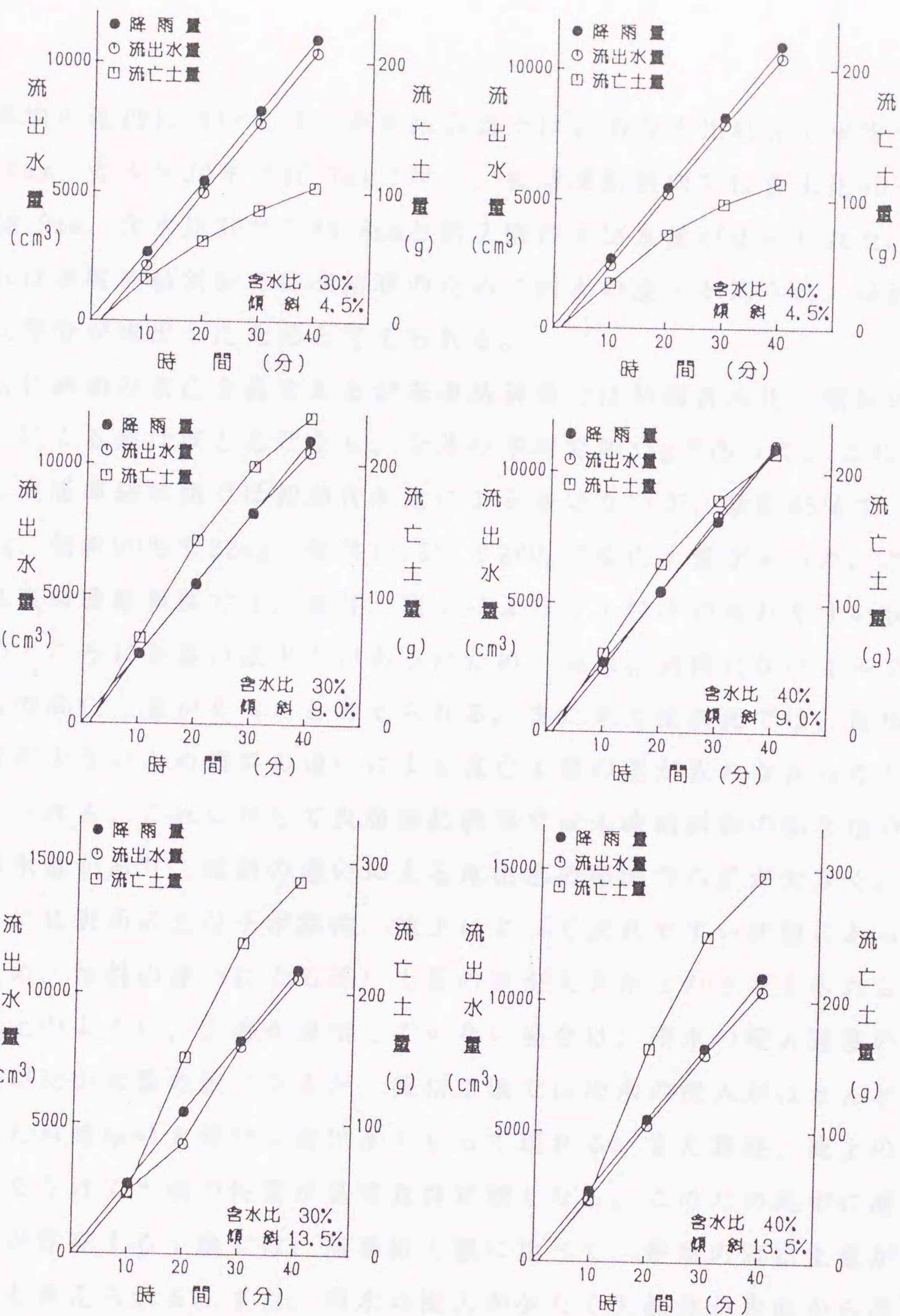


図-4-6 凍結斜面の流出水量と流亡土量の時間的变化

斜面の流出については、未凍結斜面では初期含水比40%で平均23.8mm、含水比30%で16.7mmに対し、表層凍結斜面では含水比40%で38.9mm、含水比30%で38.8mmと約2倍の流出水量が認められた。これは表層凍結斜面では凍結層のために雨水の浸入が遮られ、降雨の大部分が流出したためと考えられる。

次に斜面の流亡土量であるが未凍結斜面では初期含水比、傾斜の違いによる差はほとんどなく、全体の平均で約38gであった。これに対し表層凍結斜面では初期含水比による差はないが、傾斜45%で108g、傾斜90%で225g、傾斜13.5%で290gの流亡土量があった。これは表層凍結斜面では、霜柱、凍上によって土粒子が流れやすい状態のところに多量の流出水があったため、未凍結斜面に比べ4～7倍もの流亡土量があったと考えられる。また未凍結斜面では、流出水量が少ないため傾斜の違いによる流亡土量の差が表れなかったと考えられる。これに対して表層凍結斜面では未凍結斜面の約2倍の流出水量があり、傾斜の違いによる流出水の掃流力の差が大きく、さらに地表面の土粒子が霜柱、凍上によって流れやすい状態にあったため、傾斜の違いによる流亡土量の差が大きかったと考えられる。

以上のように、土壌が凍結していない場合は、雨水の浸入速度の違いが流出水量の差になるが、凍結土壌では雨水の浸入がほとんどないため降雨の大部分が流出水となって現れる。また霜柱、凍上の影響をうけて土壌の性質が易侵食性状態となる。このため地中に凍結層が存在する土壌では、無凍結土壌に比べて、多量の流亡土量があると考えられる。また、雨水の浸入が少なく大部分が表面から流出するため、傾斜の違いによる速度の差が大きく掃流力を変化させる。このためわずかに傾斜が急になっても流亡土量は大きく増加す

という結論を得た。

第2節 表層融解斜面の侵食

この実験は酷寒少雪地域の融解期における融凍過程の一時期として表面土層は融解しているものの、その下部土層は凍結している場合を想定している。そこで、斜面土壌表面から5cm程度の土層が融解し、その下部に凍結土層が残存する状態と作物生育期の凍結層が存在しない土壌の侵食形態を比較すること、また、初期含水比の違いによる侵食形態の比較を行った。

2-1 実験方法

この実験も図-4-1に示す人工降雨装置を使用して行った。

供試土壌も表層凍結斜面の侵食実験と同じ十勝の火山性土壌である。未凍結斜面土壌は風乾した後、含水比が40%または、55%になるように加水調製した。これを表層凍結斜面侵食実験の試料調整と同様に締固め、散水し約24時間放置しそれを供試した。表層融解斜面試料の調整は風乾した供試土壌を含水比50%になるように加水調節した。これを表層凍結斜面侵食実験の凍結試料を作製するのと同様のプロセスを経て凍結させた。この場合の土壌層の厚さを15cmとし、その凍結した試料上部に厚さ5cmの未凍結試料を積載し全層厚20cmとした。未凍結試料は、凍結土層を作製した時と同様の含水比50%状態と、散水飽和後約24時間放置した状態の2種類の含水比状態の土壌である。つまり前者は、凍結層と同様の含水比土壌であり、後者は春先の融凍水が排水されない地表面状態に近似させた土壌状態を現している。これは十勝地方における実測結果64%~73%の含

水比^{8.9)}と同様であった。

降雨強度は5mm/10min、10mm/10min、15mm/10minの3種類で降雨時間は60分以上である。降雨開始後、流出開始時間、1000cc流出ごとの時間を読み取り、流亡土量は表層凍結斜面侵食実験と同様に炉乾燥した後秤量した。

2-2 表層融解斜面の侵食実験結果

凍結土層の上部に融解土を積載した試料を表層融解斜面と想定し、人工降雨装置によって降雨強度、勾配の条件を変化させ、表層融解斜面の侵食の特徴を明らかにした。その実験結果を表-4-3に示し、各項目の比較については以下に論述する。

2-2-1 表層融解斜面の流出特性

降雨強度による比較も行うために、降雨量に対する流出水量の比を取り、これを流出割合とした。そして流出割合と傾斜、降雨強度の関係を図-4-7に示す。

これらの図より、未凍結斜面では初期含水比による流出割合は含水比40%の試料が含水比55%の試料よりわずかに大きい、ほとんど同じ傾向を示している。

なお、含水比40%、傾斜9.0%、降雨強度10.0mm/10minの流出水量及び流亡土量は他と極端に異なる値を示している。これは、この条件で使用した土壌が実験初期に使用した土壌であるため、その後の実験に使用した適度に練り返した土壌の物理性、特に透水性の違いによるものである。よって考察の対象とはしなかった。

表-4-3 表層融解斜面の侵食実験結果

試料の状態	降雨強度 (mm/10min)	含水比 (%)	傾斜 (%)	降雨量 (mm)	流出量 (mm)	流土量 (g)	流出割合 (%)	流出開始 (分:秒)	実験前 含水比(%)	乾燥密度 (g/cm ³)
未凍結	5	40	4.5	30.7	21.5	45.1	69.9	10.52	81.2	0.68
			9.0	29.6	19.7	80.3	66.4	10.47	76.7	0.73
			13.5	30.4	19.8	132.1	65.0	11.11	73.4	0.77
		55	4.5	29.6	20.6	50.5	69.5	9.00	62.6	0.85
			9.0	29.9	15.0	33.2	49.5	16.04	63.3	0.79
			13.5	30.7	11.2	25.2	39.3	10.21	62.6	0.81
	10	40	4.5	59.8	53.4	237.5	89.3	3.01	80.6	0.72
			9.0	60.2	33.4	153.2	55.6	10.59	75.9	0.68
			13.5	59.8	49.5	573.0	82.8	4.42	75.0	0.74
		55	4.5	60.5	52.0	150.9	86.0	3.23	71.9	0.78
			9.0	59.4	52.8	334.4	88.9	3.35	71.8	0.78
			13.5	60.7	44.8	388.1	73.8	2.28	64.4	0.78
	15	40	4.5	89.6	76.3	358.2	85.2	5.32	71.7	0.69
			9.0	90.2	72.0	691.8	79.8	7.33	67.1	0.72
			13.5	89.6	63.7	1017.7	71.1	10.54	63.0	0.69
		55	4.5	90.0	72.1	135.8	80.1	1.26	60.5	0.78
			9.0	89.5	67.1	329.2	75.0	1.30	59.4	0.80
			13.5	89.8	68.1	251.9	75.8	1.35	65.4	0.84
表層融解	5	50	4.5	30.3	18.8	49.7	62.0	13.54	50.0	0.78
			9.0	30.4	17.4	71.9	57.3	13.04	50.2	0.84
			13.5	30.1	17.5	94.0	58.3	16.06	49.3	0.74
		飽和	4.5	30.0	29.3	78.4	97.8	1.21	70.0	0.86
			9.0	30.2	28.6	113.1	94.9	1.01	73.1	0.84
			13.5	29.7	27.9	127.4	93.1	0.51	66.4	0.89
	10	50	4.5	59.7	39.7	89.3	66.4	9.15	51.1	0.80
			9.0	60.0	44.1	173.7	73.6	6.11	50.1	0.81
			13.5	59.9	45.0	208.1	75.1	9.10	50.7	0.84
		飽和	4.5	60.2	57.9	156.1	96.3	1.09	64.2	0.85
			9.0	60.0	57.5	222.4	95.9	0.33	68.8	0.86
			13.5	60.8	60.2	309.7	99.0	0.35	70.2	0.83
	15	50	4.5	89.6	75.7	325.6	84.3	3.32	50.6	0.79
			9.0	90.0	71.7	421.2	79.7	4.31	48.9	0.82
			13.5	90.2	66.0	589.4	73.2	8.32	49.4	0.70
		飽和	4.5	90.3	88.3	238.9	97.8	0.32	68.7	0.85
			9.0	89.8	88.4	359.1	96.2	0.28	70.2	0.85
			13.5	90.4	87.8	385.7	97.2	0.28	69.5	0.84

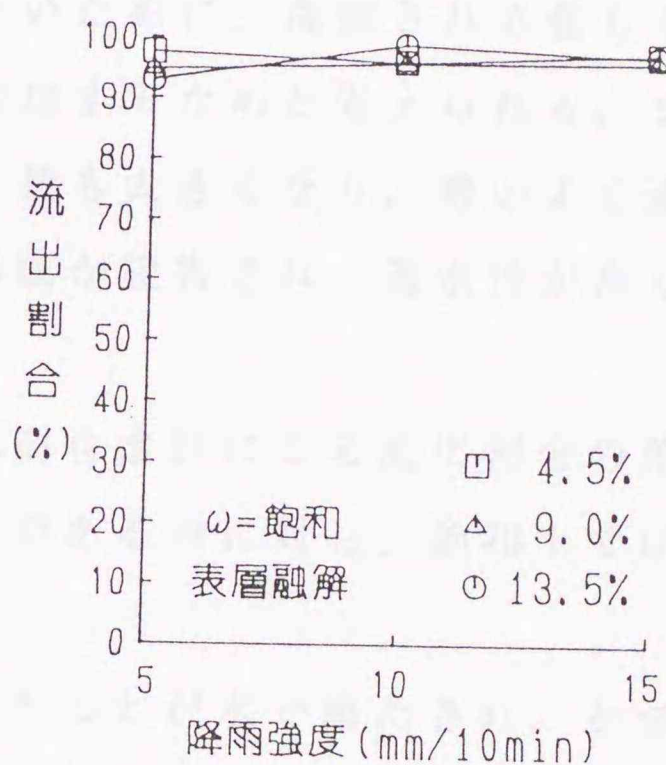
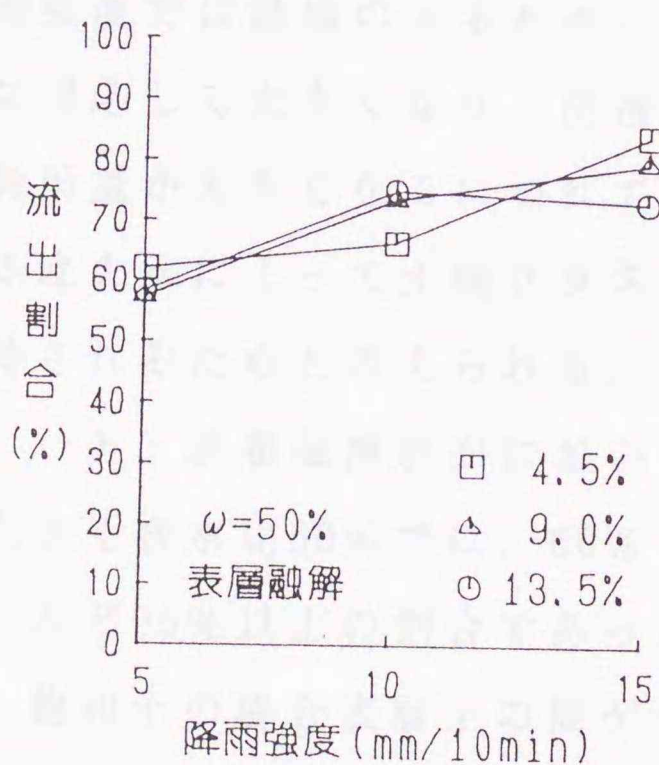
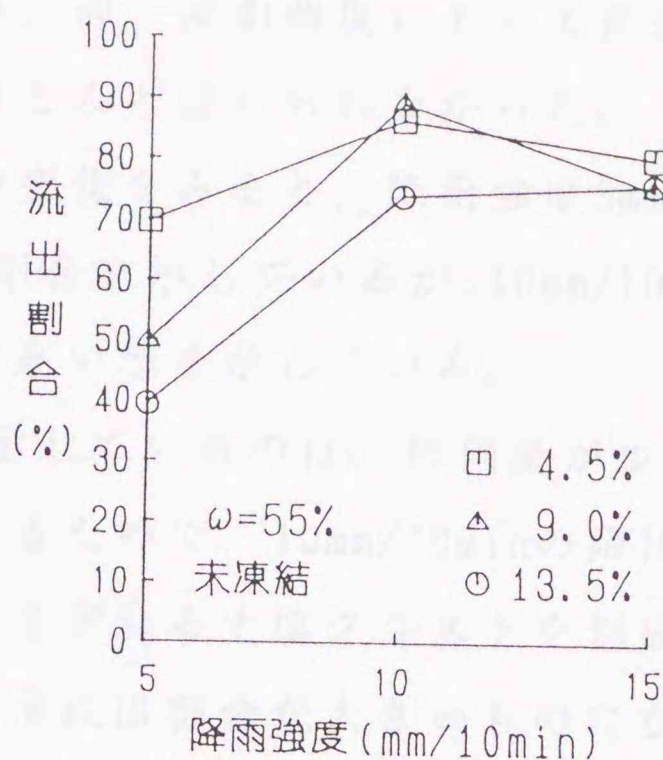
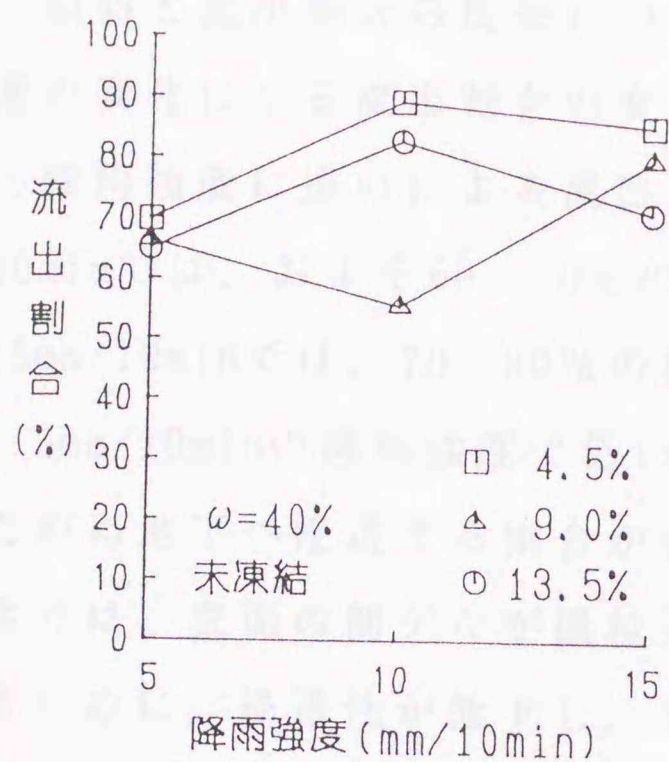


図-4-7 各傾斜における流出割合と降雨強度の関係

傾斜と流出割合の関係については、同一降雨強度において傾斜角度の変化による流出割合の変化はほとんど認められなかった。

降雨強度に違いによる流出割合の変化をみると、降雨強度5mm/10minでは、およそ60～70%の流出割合を示しているが、10mm/10min、15mm/10minでは、70～80%の割合で高い値を示している。

5mm/10minの降雨強度で低い値を示しているのは、降雨量が少ないために地下へ浸透する割合が多くなるためで、10mm/10minの降雨強度では、表面の間ゲキが微粒子でふさがれる土壌クラストを形成するために、浸透性が低下し、その結果流出割合が大きいものになったと考えられる。また、15mm/10minの降雨強度では、10mm/10minの降雨強度よりそれぞれ小さい値を示しているのは、15mm/10minの降雨強度では降雨のエネルギーが大きいために、洗掘される量もそれに呼応して大きくなり、浸透性が増加するためと考えられる。また、降雨量が大きくなるにつれて流下水量も大きくなり、勢いよく流れる流去水によって土壌クラストの形成が阻害され、透水性が高く維持されるためと考えられる。

一方、表層融解斜面においては初期含水比による流出割合の差は大きく含水比50%では、60%～80%であるのに対し、飽和土ではほとんど95%以上の割合であった。

飽和土の場合表層土の間ゲキのほとんどが水で満たされ、かつ、中間部に凍結層が存在するため、浸透性がなく降雨量のほとんどが流出してしまう。これに対して含水比50%の試料では、中間部に凍結層が存在するものの表層土の間ゲキが降雨によって満たされるまでに、ある程度の時間が必要であり、飽和土よりも低い値を示したと考えられる。

傾斜の違いによる流出割合を比較すると、どの勾配においても同様に大きな流出割合を示している。これは地中に凍結層が残存する融解期においては、勾配が小さくとも流出割合が非常に高くなることを示唆している。つまり融雪期の流出割合は畑圃場の勾配よりも地中に残存する凍結層がより強い影響を与えていることを示しており、融雪期における土壌凍結地帯の土壌侵食被害の一因を示すものと推測する。

降雨強度の違いによる流出割合の変化をみると、飽和土ではほとんど変化がないが含水比50%の試料では、降雨強度が増加するにつれて流出割合も増加している。

つまり表層土の容積は一定であるので、含水比、乾燥密度が一定であれば、雨水の浸入できる間ゲキも一定である。よって供給される雨量が増加すれば、浸入できる容積が一定であるので流出量も増大することになる。よって結果的に流出割合も大きくなると推察できる。

2-2-2 表層融解斜面の流亡土量

表層融解斜面の流亡土量と傾斜、降雨強度の関係を図-4-8に示す。

初期含水比の違いによる未凍結斜面の流亡土量を比較すると、含水比40%試料が含水比55%試料より大きいことがわかる。これは40%の試料は55%の試料に比べて締め固まりの度合いが緩いため、雨滴によって洗掘、飛散する量が大きいと推測する。

傾斜の違いによる流亡土量の変化をみると明確な傾向は見られなかった。これは、前節の表層凍結斜面の実験結果にも示されたように、傾斜角度が上昇することにより流出水量が逆に低下し、それが

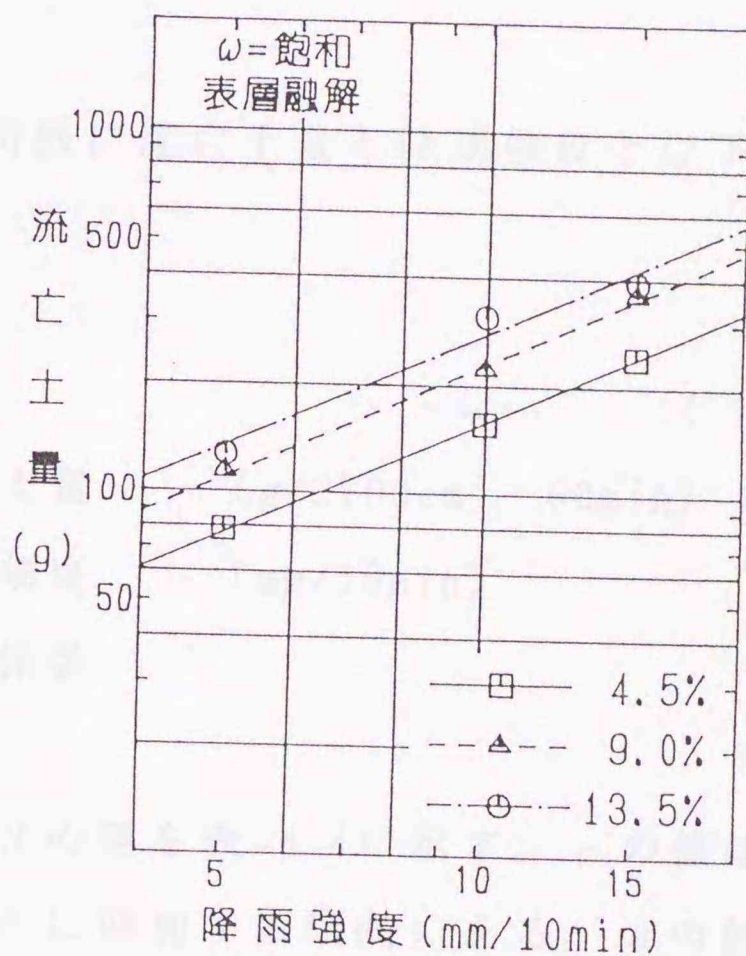
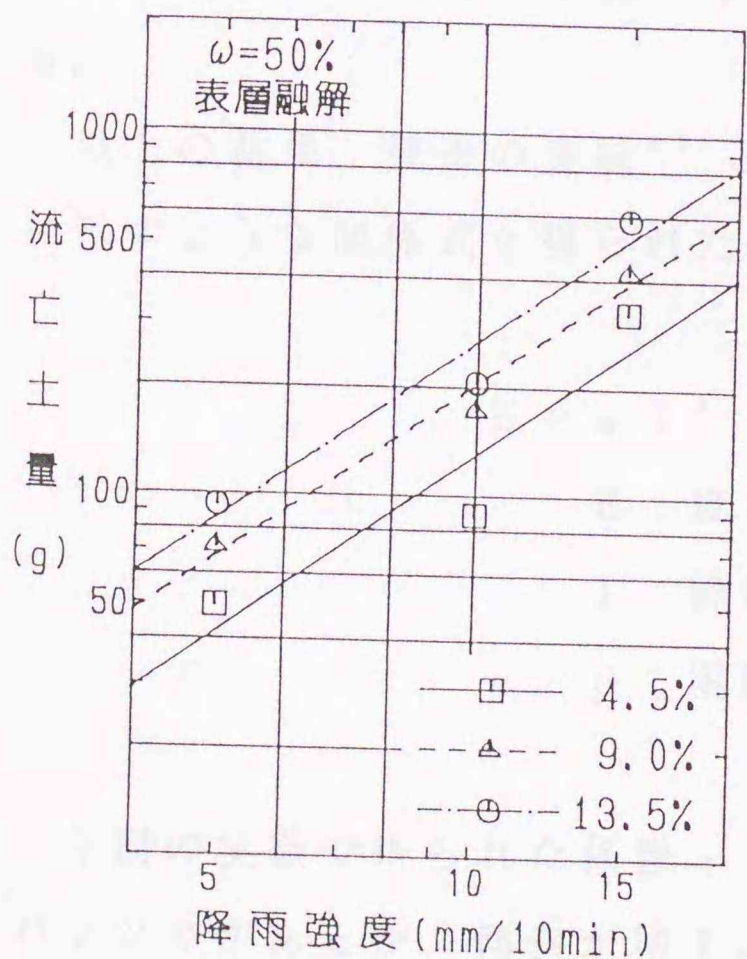
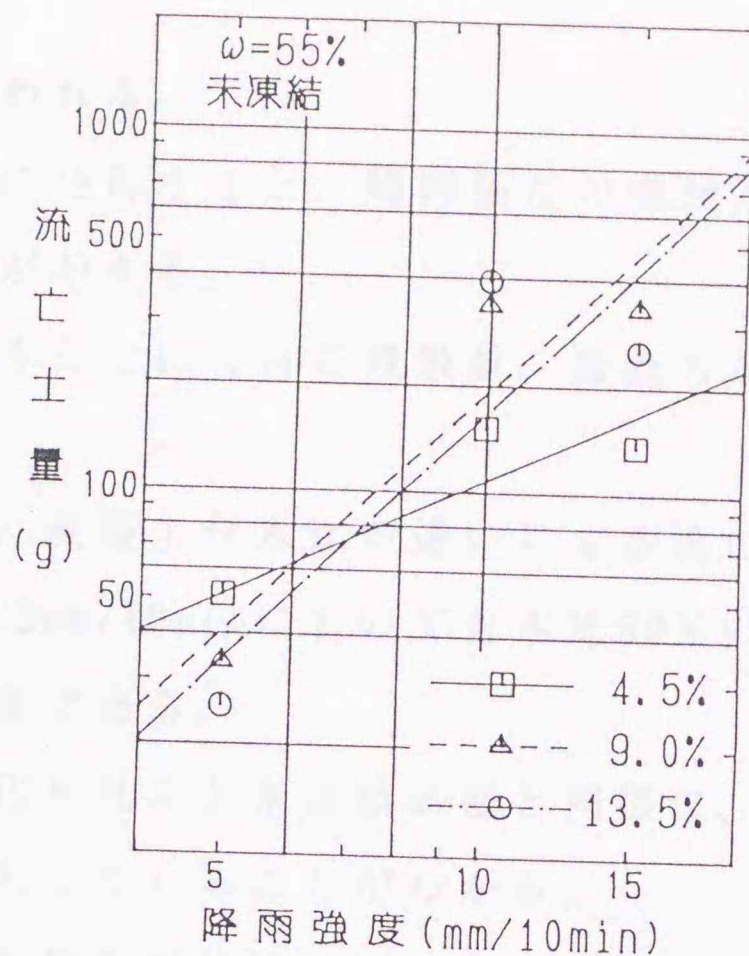
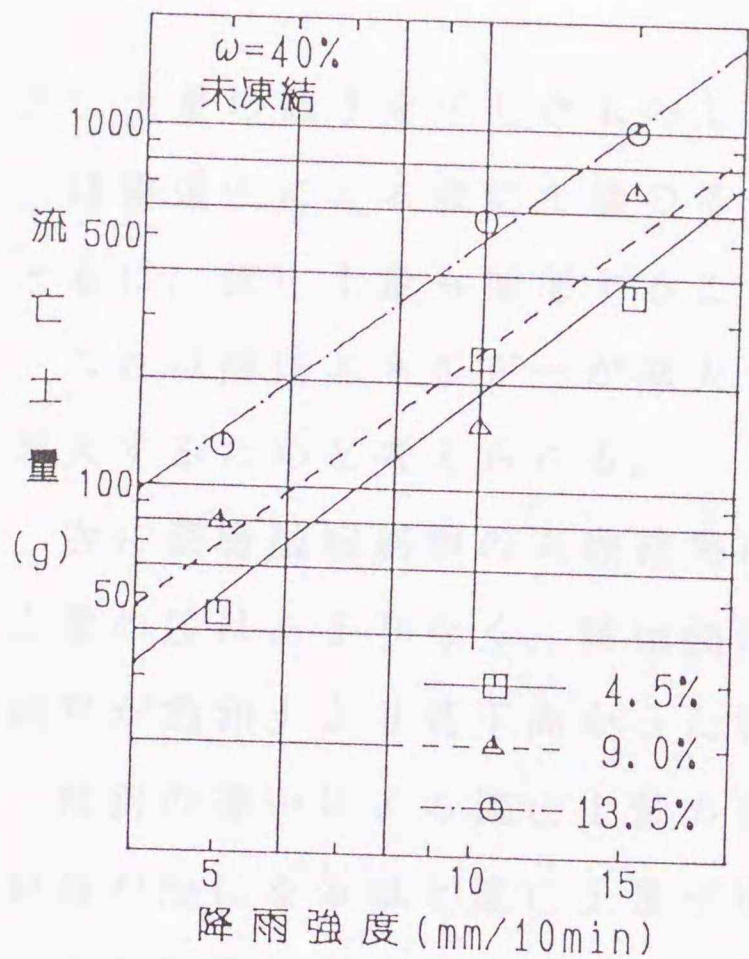


図-4-8 各傾斜における流亡土量と降雨強度の関係

流亡土量の低下を示したものである。

降雨強度による流亡土量の変化に注目すると、降雨強度の増加とともに、流亡土量も増加することがわかる。

これは降雨エネルギーが増大することによって飛散量、掃流力が増大するためと考えられる。

次に表層融解斜面の実験結果は、表層土含水比の違いによる流亡土量の差はあまりなく、降雨強度15mm/10minにおいて含水比50%の試料が飽和土より若干高かった程度である。

傾斜の違いによる流亡土量の変化を見ると未凍結斜面と同様に、傾斜が急になるほど流亡土量が増大してくることがわかる。

また降雨強度の違いによる流亡土量の変化についても未凍結斜面と同様に、降雨強度の増加に伴って流亡土量も増加することがわかる。

以上の結果、種田の実験⁸³⁾と同様に流亡土量と降雨強度とは下記に示すような関係式が得られた。

$$E = \alpha I^\beta \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

E : 流亡土量 (g/2700cm²・60min)

I : 降雨強度 (mm/10min)

$\alpha \cdot \beta$: 実験係数

今回の実験で得られた係数 $\alpha \cdot \beta$ の値を表-4-4に示す。 α の値はバラツキがあるが、傾斜が増すごとに増加する傾向にある。 β の値は初期含水比ごとにほぼ一定の値を示している。このことから、無凍結の土壌では流亡土量は、降雨強度のおよそ2乗に比例して増加

表-4-4 実験係数

	含水比(%)	傾斜(%)	α	β
未凍結	40	4.5	2.2	1.94
		9.0	—	—
		13.5	6.6	1.89
表面融解	50	4.5	11.8	0.97
		9.0	1.1	2.22
		13.5	0.9	2.29
飽和	飽和	4.5	3.2	1.62
		9.0	5.4	1.57
		13.5	6.4	1.61
	飽和	4.5	15.3	1.01
		9.0	20.8	1.04
		13.5	25.1	1.04

していき、また、凍結層のある土壌においては、50%含水比では、降雨強度の1.6乗に比例し、上層土が飽和している場合では、降雨強度そのものの値に比例して増加していくことがうかがえる。

2-3 表層融解斜面侵食の特徴

流出割合に関しては、未凍結斜面で含水比40%と55%ではほとんど差はなく、50%~90%の値を示した。また、この割合は表層融解斜面含水比50%の割合とほぼ同じ値を示している。これに対して、表層融解斜面飽和土では95%以上の値を示している。このように下部に凍結層がある場合は、上層土の水分状態に左右されるので、表層凍結斜面侵食実験のように凍結層に直接雨を降らせる場合と異なり複雑である。

また流亡土量に関しては、未凍結斜面で含水比の違いによる侵食量の差は大きい、表層融解斜面では含水比による差はあまりない。又凍結層の有無による差は大きくなく、かえって未凍結斜面、含水比40%の方が大きく、実験前の予想と異なった。

これは、表面水による打撃エネルギーの減少などが考えられる。その結果、飛散量が減少するためと思われるが、その他、土壌の水分状態、流下水の掃流力など複雑に作用するため、明確な根拠は見いだせなかった。

第3節 凍結融解繰り返し斜面の侵食

第1節、第2節では、凍結斜面の土壌侵食について述べてきたが、春先の凍結融解期における土壌凍結状態は昼夜の温度条件により一般的に斜面表層土壌が日中には融解し、夜間には再び凍結するといった繰り返しを続けながら融解してゆく。このような凍結融解の繰り返しは土壌の物理性にも多大な影響を与え⁹⁰⁾、ひいては斜面の侵食性にも多大な影響を与えるものと考えられる。

この実験はこうした融雪期における傾斜畑地の受食性を解明する基礎として、未凍結土壌に凍結融解を人工的に経験させ、その繰り返し数が土壌侵食にどのように影響するのか、比較検討することを目的に行った。

3-1 実験方法

この実験においても、図-4-1に示した人工降雨装置を使用した。ただし、試料箱に関しては、図-4-1の土壌槽上部に、縦横45cm×30cm、深さ5cm、内容積675cm³の木製で、底面に直径2cmの水抜き穴を設けたものを使用した。なお水抜き穴は、散水の際に過剰な重力水が排水されるようにしたもので、実験中はゴム栓によって水漏れ防止を行った。

供試土壌は、表層凍結斜面、表層融解斜面の侵食実験で使用したのと同じ十勝火山灰土である。

この供試土を十分に風乾した後5mmのフルイを通過させ、含水比などが変化しないよう土壌保管ケースに収め、確認のためにそれぞれ

のケースの含水比を測定し供試した。

この供試土を含水比約40%となるよう加水し、土壌水分を均等にするため5mmフルイを通過させた。この含水比は、降雨による湿潤や乾燥などの影響を受ける前の乱されない土壌を類似したものである。その試料を深さ5cmの試料箱にできるだけ一定密度となるよう、2層に分けて締め固めた。

その後水平面に静置し表面に水が浮きでるまでの十分な散水を行い、一定傾斜面に移動させ、表面からの蒸発を防ぐためにビニールで覆い、24時間水抜き穴より重力排水させた。

散水後24時間の試料は、含水比72.0%、乾燥密度 0.73g/cm^3 であった。このようにして調整した試料のうち、そのまま実験に供した試料を未凍結土壌とし、 -25°C で凍結させ $+25^{\circ}\text{C}$ で融解させた試料を凍結融解の試料とした。また凍結・融解のサイクル数は、帯広における積雪、気温の平年値⁹⁾¹⁾より積雪20cm以下における日最低気温がマイナスかつ日最高気温がプラスである日数32日を考慮し0, 10, 20, 30サイクルの4段階を設定した。

凍結融解の試料は、低温恒温室(-25°C)、常温恒室庫($+25^{\circ}\text{C}$)にそれぞれ3時間ずつ入れたものを1サイクルとし、0サイクルすなわち未凍結のものと、10サイクル、20サイクルおよび30サイクルの凍結融解を繰り返した試料を供試した。

なお、凍結および融解処理の3時間は試料中央にメチレンブルー小型凍結計を埋設して行った予備実験の結果、3時間あれば凍結融解が行えることを確認したものである。

実験時の降雨強度は、降雨が畑地に影響を及ぼすとみられる $10\text{mm}/10\text{min}$ に設定した。実験1回あたりの降雨時間は30分とし、この前

後の降雨強度から平均降雨強度を算出した。

そして実験では、サイクル0、10、20、30の4種類の試料に対し、前2種の実験と同じように地表面傾斜を4.5%、9.0%、13.5%の3種類とし、同じ条件のもとに3回ずつ実験を行った。

3-2 凍結融解繰り返し斜面の侵食実験結果

この実験は、融雪期の特徴である昼夜の気温変動が傾斜農地の表層土壌の凍結融解を繰り返させていることを実験室において再現し、この供試土壌を用い人工降雨装置によって土壌侵食実験を行い、凍結融解の繰り返し回数、地表面傾斜のちがいによる流出水量、流亡土量の比較を行った。その実験結果を表-4-5に示し、各項目の比較については下記に論述する。

3-2-1 凍結融解繰り返し斜面の流出特性

サイクル数・傾斜角度と流出の関係を図-4-9に示す。なお流出水量は時間当たりの水嵩で示す。

これより凍結融解を繰り返した土壌が未凍結土壌に比べて流出量が多いことがわかった。この原因としては凍結融解によって土壌の団粒構造が破壊され土壌表面の風化が進行するため懸濁液を生じやすく、引き続く降雨によって侵入がさまたげられやすくなったために流出量が増大したものとみられる。

斜面勾配で流出を比較すると、凍結融解繰り返し土壌では傾斜9.0%が大きく13.5%ではむしろ流出量の減少傾向がみられる。これは、傾斜9.0%あたりまでは雨滴の打撃によって地表面に土壌クラストが

表-4-5 凍結融解繰返斜面の土壌侵食実験結果

凍結融解 回数	傾斜 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	降雨強度 (mm/10min)	降雨量 (mm/hr)	流出量 (mm/hr)	流出率 (%)	流亡土量 (g)	流土率 (%)	流出開始 (分:秒)
0	4.5	0.73	72.0	10.0	60.0	42.2	70.3	37.14	0.72	3:13
	9.0	0.73	72.0	10.1	60.6	43.4	71.6	56.52	1.44	2:11
	13.5	0.73	72.0	9.9	59.4	43.6	73.4	180.24	4.33	4:11
10	4.5	0.71	67.3	9.9	59.4	41.1	69.2	68.70	1.85	8:29
	9.0	0.71	67.3	10.1	60.6	48.1	79.4	194.64	4.08	8:10
	13.5	0.71	67.3	9.9	59.4	49.1	82.4	335.58	7.05	7:54
20	4.5	0.69	64.7	9.8	58.8	47.5	80.8	89.88	1.91	11:30
	9.0	0.69	64.7	10.0	60.0	56.9	94.8	268.02	4.96	10:57
	13.5	0.69	64.7	10.1	60.6	50.2	82.8	413.04	8.78	11:03
30	4.5	0.67	55.5	10.0	60.0	46.3	77.2	82.02	1.97	12:14
	9.0	0.67	55.5	10.2	61.2	52.8	86.3	265.68	5.50	12:46
	13.5	0.67	55.5	10.0	60.0	49.6	82.7	396.48	8.65	12:47

注) 含水比・乾燥密度・含水比は凍結融解後の値である。

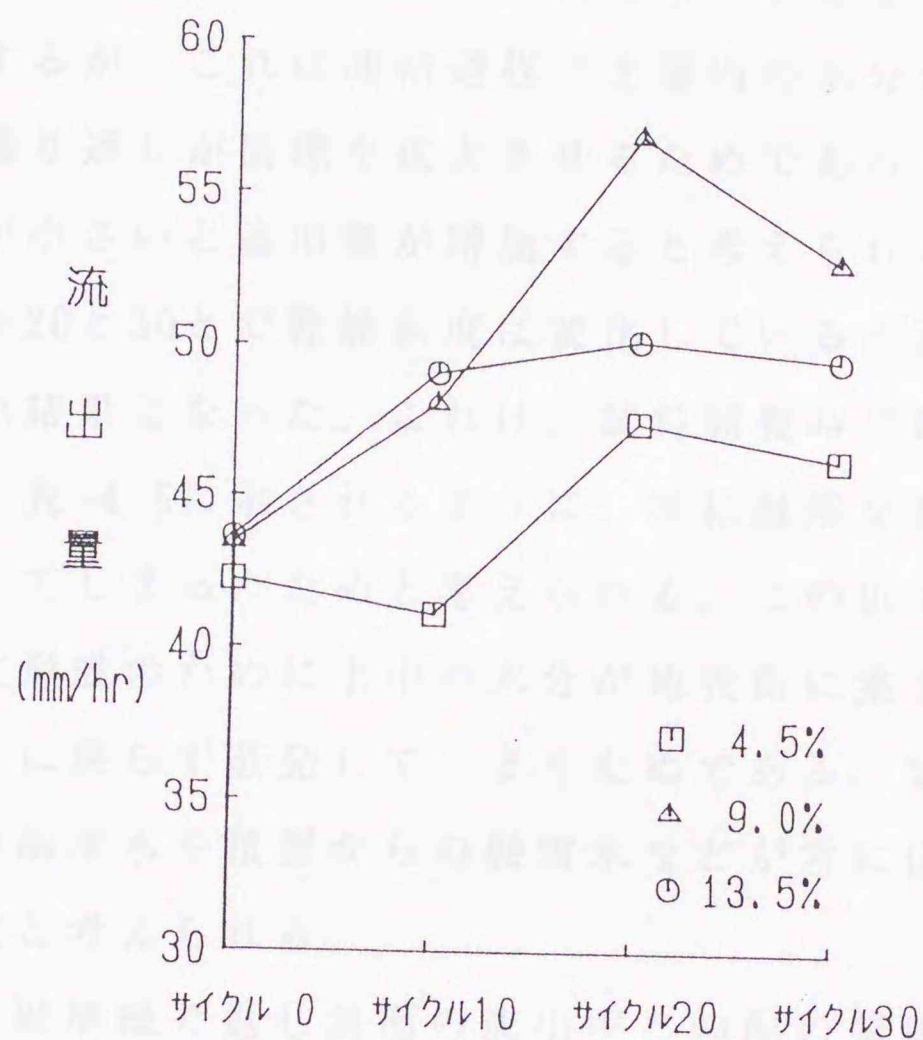


図-4-9 各傾斜における流出量と凍結融解繰返しサイクル数の関係

形成されるために侵入能が低下し流出しやすくなり、それ以上傾斜が大きくなると、雨水の土粒子に対する掃流力が増すために土壌クラストが維持されにくくなって侵入量が増加し、流出量が減少するものと考えられる。

表-4-5に示したように、凍結融解にともなって土壌の乾燥密度が低下するが、これは凍結過程で土層内の水分が膨張し、土塊を壊し、その繰り返しが間隙を拡大させるためであろう。一般的には、乾燥密度が小さいと流出量が増加すると考えられるが、本実験では、サイクル20と30とで乾燥密度は変化しているが流出量ではあまり変化がない結果となった。これは、試料調整時には、含水比を一定にしたが、表-4-5に示されるように、凍結融解を繰り返す過程で著しく低下してしまったためと考えられる。この低下の原因は、凍結過程で霜柱形成のために土中の水分が地表面に集まるが、融解時にこれが下方に戻らず蒸発してしまうためである。実際の現場では凍結層からの融凍水や積雪からの融雪水などが常に供給されるので含水比は一定と考えられる。

凍結融解繰り返し斜面の流出率と勾配の関係を図-4-10に示す。これより、凍結融解を繰り返した土壌において、流出率に斜面勾配が与える影響も流出量と同様9.0%あたりで変位点を生じた。これは前述した降雨の侵入能が起因するものと推測される。

また、流出率でも凍結融解を繰り返したもののほど高い数値を示している。例えば傾斜9.0%で見ると、サイクル0が71.8%であるのに対し、サイクル20では94.8%と、20%以上のひらきがある。つまりサイクル20は降雨のほとんどが流出し、侵入量があまりない事になる。この原因は土壌構造の変化にあると思われる。凍結融解の繰り返し

が土を分散させる事は流出量のところで述べたが、それによって降雨の侵入をさまたげ、わずかな表土のみで湛水した状態となり、引き続き降雨によって流下するものと考えられる。

さらにサイクル20の方がサイクル30より高い流出率を示しているが、これは表-4-5に示したように後者が実験直前含水比55.5%と、前者の64.4%より低いため飽和するのに時間を要したものと推測する。この実験では、凍結融解の繰り返しにおいて低温恒温室を使用したためその過程において供試土壌が凍結乾燥を受けこのような結果になったものと考えられ、流出量同様、実際の現場では常に周辺からの水分の供給がありこのような結果にはならないと推測する。

3-2-2 凍結融解繰り返し斜面の流亡土量

凍結融解繰り返し斜面の流亡土量流亡土量と凍結融解のサイクル数・斜面勾配の関係を図-4-11に示す。

流出量との違いは、凍結融解を繰り返した土壌において傾斜に対する土量の変位点がない事である。これは雨滴の飛散エネルギーと傾斜によって増加した掃流力、凍結融解によって分散した土壌を流下させるためであろう。

また凍結融解を受けた土壌は、凍結時の氷晶分離作用によって土粒子間に相体変位が生じてその間隔が広げられ、土壌内部に微少なクラックが発生しやすい。このために土粒子間の結合力は弱められ、分散するものと思われる。そして土塊が小さくなれば、小さな掃流力に対しても流亡しやすくなるため、図のようなサイクル数増加にともなう流亡土量の増加になったものと思われる。しかしながら、サイクル20と30とではさほど変化がなかった。このことから、サイ

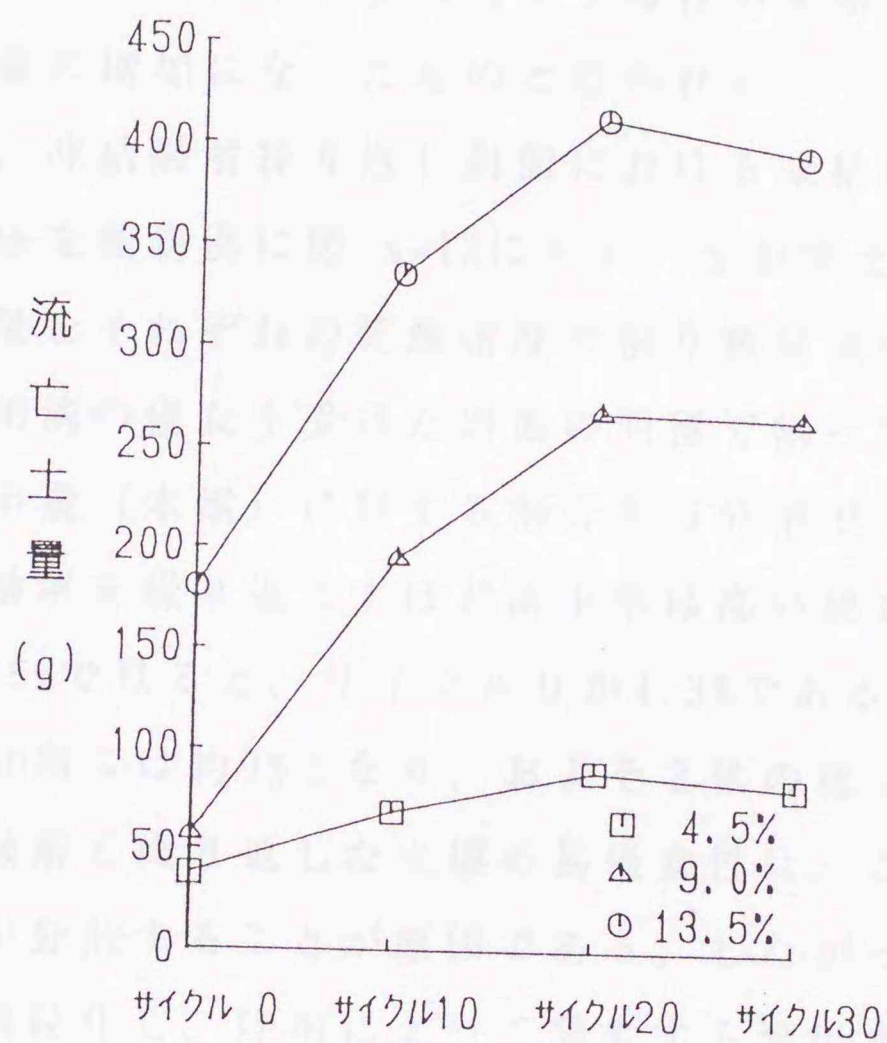


図-4-11 各傾斜における流亡土量と凍結融解繰返しサイクル数の関係

4-3 凍結融解繰返しによる土質変化の過程

凍結融解繰返しによる土質変化の過程を知るため人工凍融試験機による試験を行った結果、以下の結果を見いだせた。

クル20あたりで土の分散活動は落ちつくものと思われる。

また、流出量とは逆に未凍結土壌において流亡土量に傾斜9.0%で変位点が生じたが、これは未凍結土層が土塊の大きな団粒構造をしており、傾斜の緩いうちは浸透力なども働いて流土しにくく、傾斜が急になるにしたがい土に対する掃粒力が増すため、指数関数的な流亡土量の増加になったものと思われる。

次に、凍結融解繰り返し斜面における凍結融解サイクル数と流土率の関係を傾斜別に図-4-12に示す。なお流土率とは各実験における流亡土量をそれぞれの乾燥密度で割り被侵食体積を算出し、それをさらに雨滴の侵食を受けた斜面の面積で割って土の深さに換算し、その流出量（水嵩）に対する割合を百分率で示したものである。

凍結融解を繰り返えすほど流土率は高い値を示している。例えば傾斜13.5%で見ると、サイクル0が4.3%であるのに対し、サイクル20回、30回では約9%となり、およそ2倍の流土率を示している。

凍結融解を繰り返した土壌の易侵食性は、これまで述べてきたとおり土が分散することが原因である。したがって流土率増加の原因は土が細粒化し、降雨によって発生する流出水の掃流力が土に対して大きく働くためである。

また凍結融解の繰り返しの影響としては、サイクル20程度が限界とみられる。

3-3 凍結融解繰り返し斜面侵食の特徴

凍結融解繰り返し斜面侵食の特徴を知るため人工降雨装置により実験を行った結果、以下の知見を見いだせた。

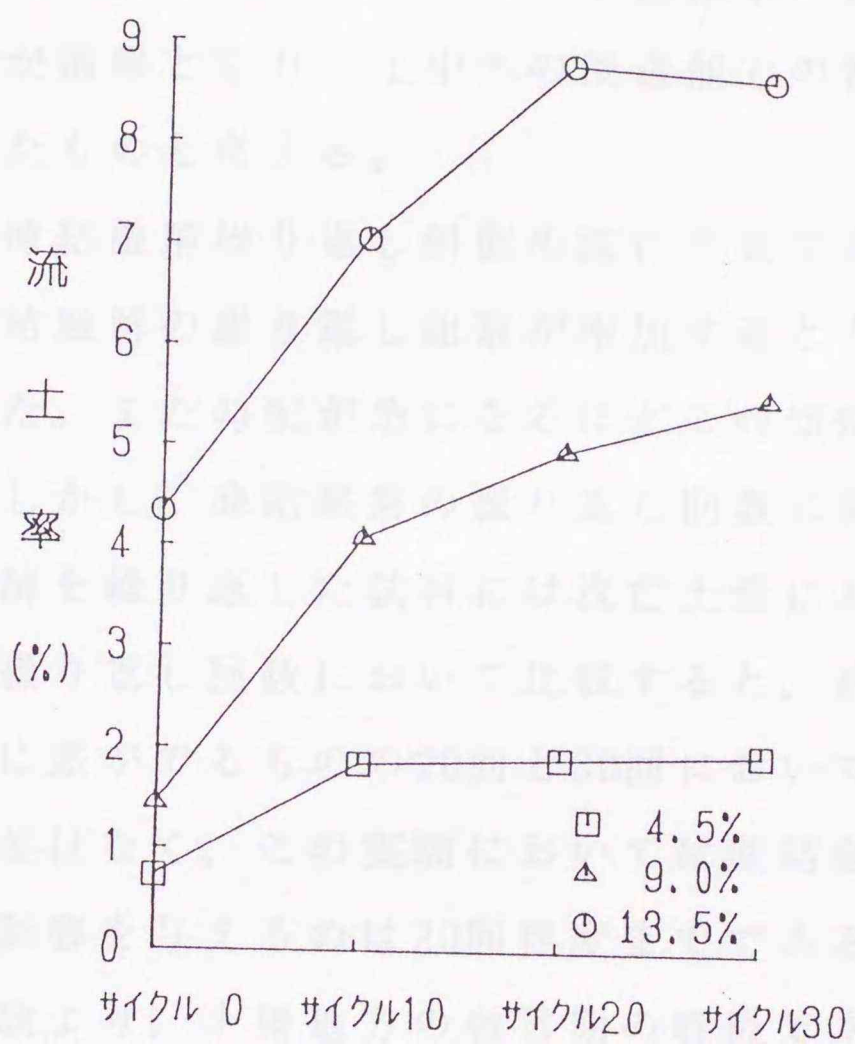


図-4-12 各傾斜における流土率と凍結融解繰返しサイクル数の関係

凍結融解繰り返し斜面の流出量においては凍結融解の繰り返し回数にかかわらず傾斜9.0%までは増加したが、傾斜13.5%では流出水量の低下が見られた。これはある勾配までは斜面表面に雨滴の打撃による土壌クラストが形成され土中への侵入が阻害される^{9,2)}が、それ以上の勾配になるとこのクラストも流去水の掃流力の増大によって形成維持が困難となり、土中への浸透能力の回復のため、流出水量が低下したものと考えられる。

次に、凍結融解繰り返し斜面の流亡土量であるが、どの勾配においても凍結融解の繰り返し回数が増加するとともに流亡土量の増加が見られた。また勾配が急になるほどこの傾向が強くなることがわかった。しかし、凍結融解の繰り返し回数に関しては、未凍結試料と凍結融解を繰り返した試料には流亡土量において顕著な差があるものの、繰り返し回数において比較すると、繰り返し数20回までは流亡土量に差がでるものの20回と30回においてはどの勾配においても顕著な差はなく、この実験においては凍結融解の繰り返し数が流亡土量に影響を与えるのは20回程度までであることがわかった。

この実験より、十勝地方の融雪期の特徴である土壌の凍結融解の繰り返しは、土壌の構造を易侵食性の構造とし、加えて融雪水による余剰水の流出が重なれば、降雨は少ないものの夏期以上の侵食の危険性にさらされていることが検証された。

第5章 北海道・十勝地域における土壌侵食の予測

北海道は、わが国の中でも大規模な他作地帯として発展してきており、その施設や圃場は大規模なものとなってきた。それとともに、農用地造成地区も平坦地から傾斜地への移行が進んでいる。これら造成事業の拡大による圃場面や法面の侵食、さらには周辺環境への土砂流亡被害が大きな社会問題となっているが、その防止策としての排水路、沈砂池、土砂溜等の規模や構造を計画する上で基本となる流亡土量の適切な推定方法が望まれている。

この章では現在、米国において標準的な土壌流亡予測式として定着しているUSLEを北海道、特に寒冷少雪である十勝地方に適用させるため、北海道の冬期の気象特性である多雪地帯（雨竜郡北竜町）と少雪地帯（帯広畜産大学）においてUSLEに準拠した、土壌侵食枠試験を行い、各地域におけるUSLEの係数を求めることにより、上記の流亡土量の適切な推測を試みた。また、USLE中の降雨係数取扱いの一つの特徴である積雪の融雪補正係数に着目し、土壌凍結の深い十勝地方での融雪期の侵食特性を明らかにすることを目的とした。

第1節 寒冷多雪地域における土壌侵食

1-1 北雨地区における実験方法

この試験は北海道雨竜郡北竜町と雨竜町にまたがる国営農地開発事業北雨地区の一圃場内において行った。

試験圃場は、図-5-1に示す標準試験区と図-5-2に示す圃場斜面侵食調査区からなる。標準試験区は、圃場勾配が3度、7度、10度の3種類からなり、それぞれ3連で合計9ヵ所の試験圃場である。この試験区では斜面勾配による流亡土量観測を行った。圃場斜面侵食調査区では、流亡土量抑制の保全施設としての承水路の規模や構造を計画・設計するための承水路の相違による流亡土量観測を行った。調査区ごとの特徴を表-5-1に示す。

試験圃場の土性は、日本農学会法では植壤土、国際土壌学会法では軽埴土(LiC)に分類され、砂が全体の半分、シルトあるいは粘土が残りを占めた。また、工学的分類基準である日本統一土質分類法によると0.42mm以下の細粒分が多いことから粘質土(CL)に分類される。

土壌の耐水食性の指標である分散率および侵食率は両方ともほぼ30%～50%の範囲内にあり、侵食を受け易い受食性土壌である。有機物含有量は1%程度であった。

1-2 試験期間における降雨状況

調査期間であった1986年～1990年までの5年間の北雨地区におけ

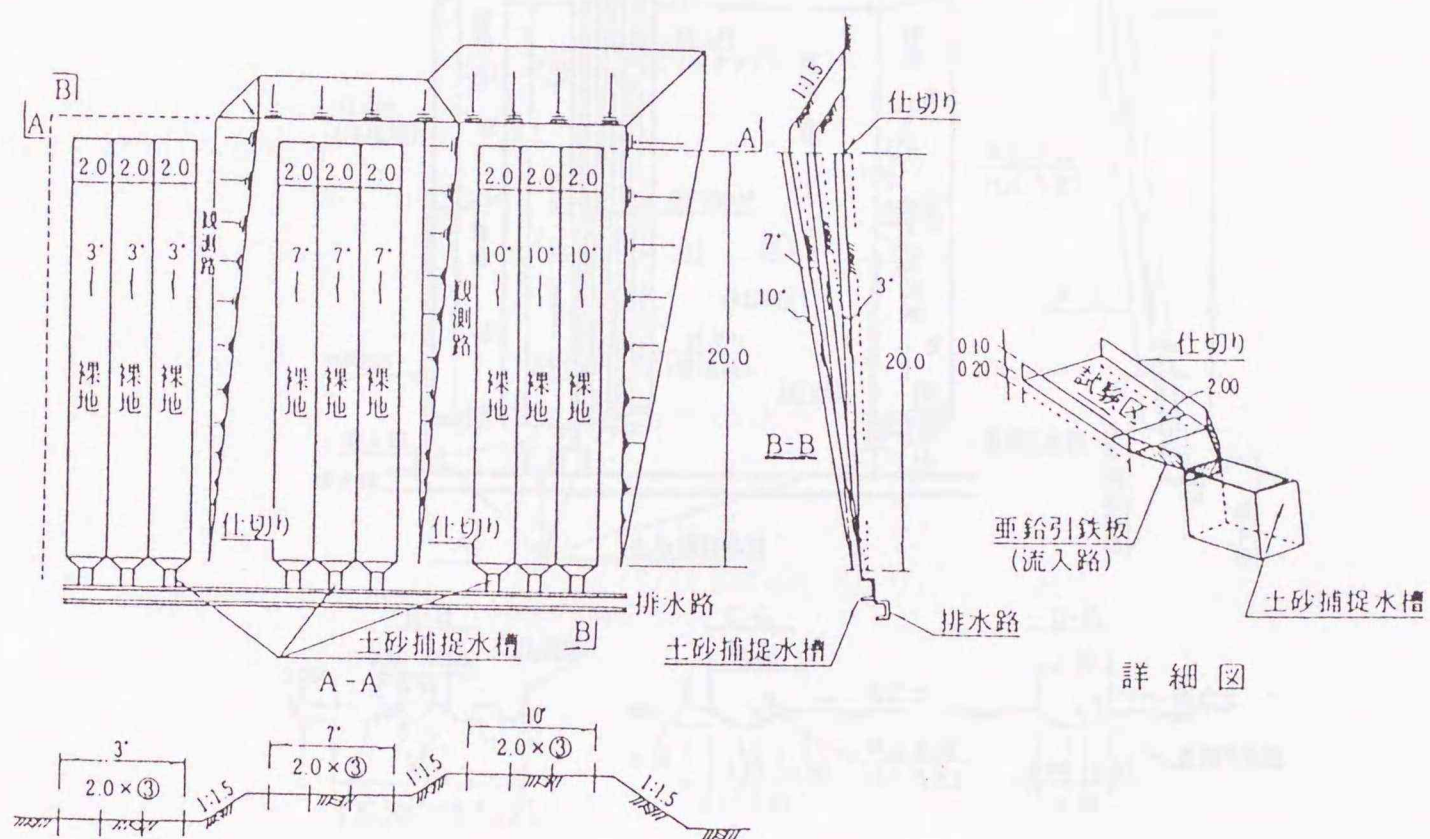


図-5-1 試験圃場(標準試験区)

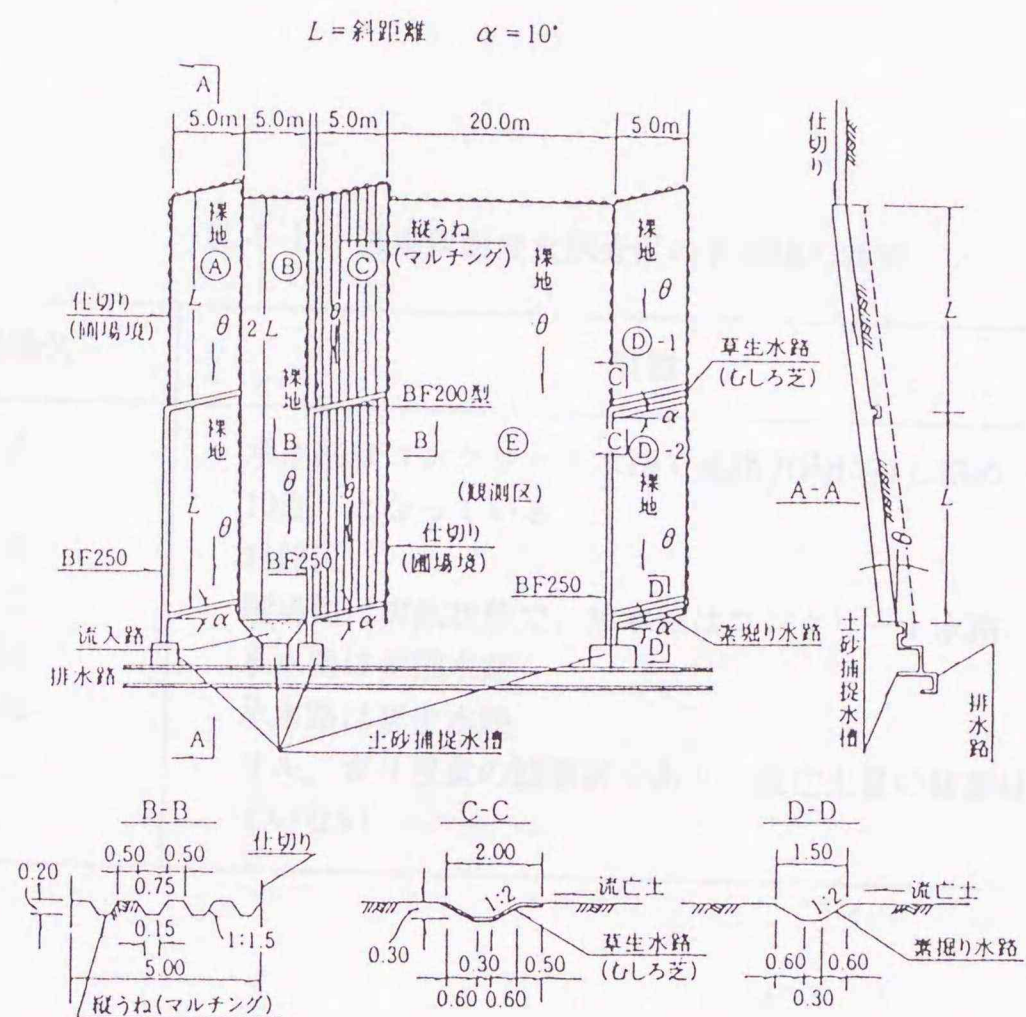


表-5-1 圃場斜面侵食調査区の各圃場の特徴

圃場名	特徴
A	承水路はコンクリート水路で流路方向に対し斜め ($\alpha = 10$ 度) となっている
B	対照区
C	圃場面は縦畝状態で、承水路はコンクリート水路
D1	承水路は素掘水路
D2	承水路は草生水路
E	リル、ガリ侵食の観測区であり、流亡土量の観測は行っていない

る月降水量を表-5-2に示す。

1986年における最も月降水量の多い月は9月の150.5mmで、最も少ない月は6月の9.5mmであった。年降水量は観測期間で最も少ない979.5mmであった。

1987年においては最も月降水量の多い月は7月の153.5mmで、最も少ない月は6月の31.0mmであった。また年降水量は1986年と同程度の985mmであった。

1988年においては1月から7月までは月降水量が100mmに達した月はなかったが、8月の月降水量が484.0mmと突出している。これは8月25日から26日にかけての415mmの大雨によるものである。この月だけで年降水量の1/3の雨が降った。また観測期間において最も降水量が多い月になった。最も月降水量が少ない月は3月の30.5mmであった。年降水量は観測期間で最も多い1397mmであった。

1989年においては1月から7月に降水量が少なく、8月から12月は降水量が多かった。最も月降水量が多い月は8月の224mmで、最も少ない月は2月の29mmであった。年降水量は1158mmであった。

1990年においては9月の月降水量が他の月に比べて257mmと突出して多かった。そして最も少ない月は3月の29mmであった。年降水量は1216mmであった。

流亡土量観測期間の降水量を総括すると調査期間5年間の年平均降水量は1147.2mmであった。そして年降水量の多い順は1988年、1990年、1989年、1987年、1986年であった。またこの地域は春から初夏にかけては降水量は少なく8月から冬にかけて降水量が多かった。特に、8月下旬から9月上旬にかけて集中した雨が多く見られた。また冬は北雨地区が日本海側に位置するため降雪による降水量が多

表-5-2 観測期間の月降水量

(単位:mm)

	1986年	1987年	1988年	1989年	1990年	平均
1月	121.0	108.0	88.5	38.0	108.0	92.7
2月	100.0	49.5	99.0	29.0	60.0	67.5
3月	52.0	61.5	30.5	37.0	29.0	42.0
4月	105.0	66.5	63.5	58.0	81.0	74.8
5月	65.0	53.5	51.0	54.0	59.0	56.5
6月	9.5	31.0	69.0	54.5	67.0	46.2
7月	68.0	153.5	33.5	36.5	66.0	71.5
8月	71.0	105.5	484.0	224.0	120.0	200.9
9月	150.5	70.0	53.0	202.0	257.0	146.5
10月	99.5	99.0	150.0	156.0	99.0	120.7
11月	72.5	115.0	106.5	150.0	137.0	116.2
12月	65.5	72.0	169.0	119.0	133.0	111.7
合計	979.5	985.0	1397.5	1158.0	1216.0	1147.2

かった。

1 - 3 降雨係数

流亡土量と降雨係数との関係を各試験圃場別に図-5-3示す。ただし、標準試験区の流亡土量は3試験圃場の平均値である。

降雨係数と流亡土量の関係は、全ての圃場において直線的関係にあり、その相関係数も $r=0.901\sim0.999$ と非常に高い相関を示し、降雨係数による流亡土量の推定は可能であると思われる。

しかし、観測年は5年と非常に短く1988年の値を除くと相関係数が低くなる。また流亡土量が発生しない年があったり、降雨係数が比較的高いにもかかわらず流亡土量が少ない場合やこれに対し、降雨係数が低い割に流亡土量が多い場合があるため今後の長期にわたる資料の蓄積が必要であると考えられる。

1 - 4 傾斜係数

標準試験区の年次別の流亡土量の観測結果を図-5-4に示す。

これより最も流亡土量が多く発生した試験区は、1986・1989年は10度試験区であるが、1987・1988・1990年は7度試験区であった。USLEの傾斜係数を適応すると傾斜角度が大きくなると流亡土量が増加するが、この調査では5年間のうち3年において7度試験区の流亡土量が多くなった。

そこで、各試験区の傾斜角度と流亡土量の間関係を見るため各傾斜圃場の流亡土量を基準としてUSLEの地形係数を使用し、他の傾

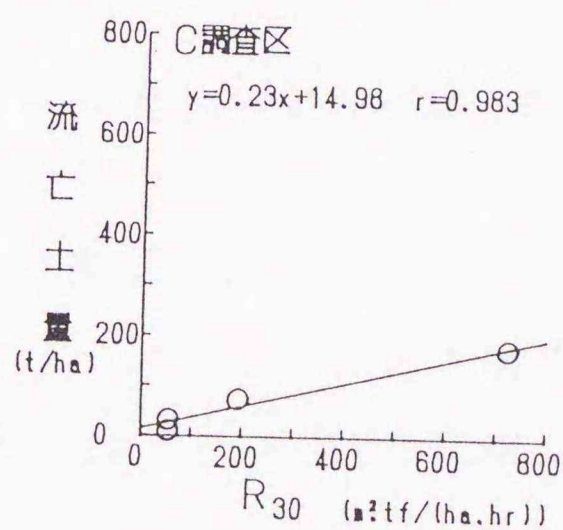
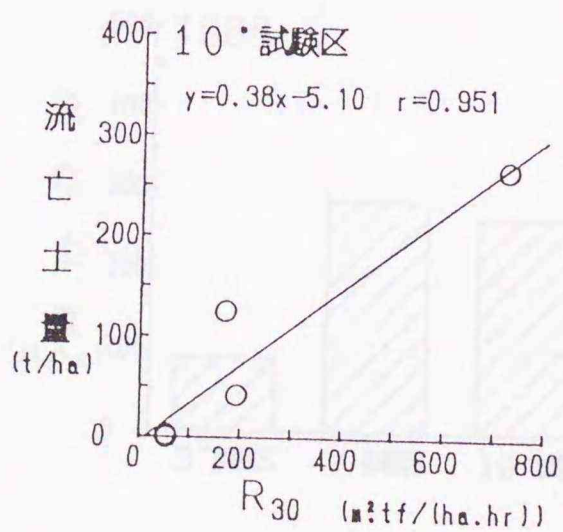
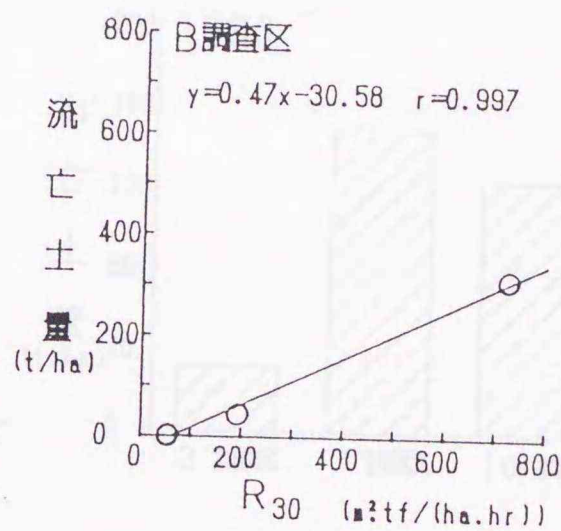
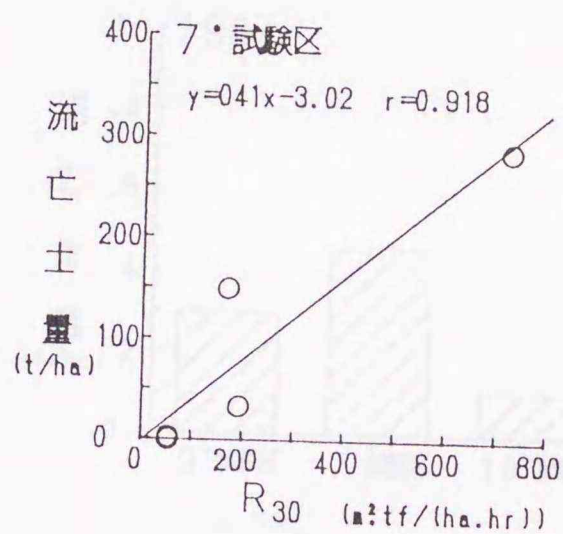
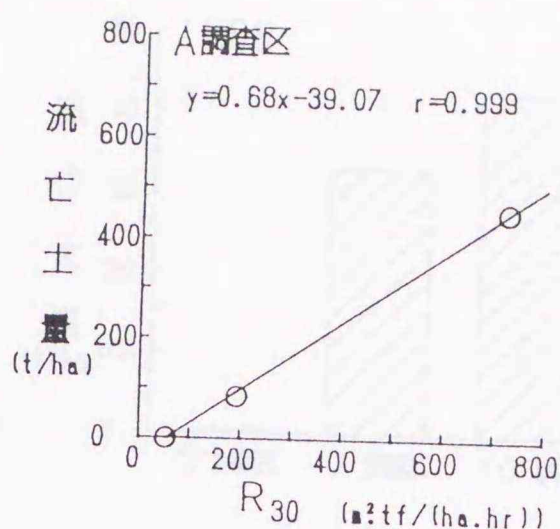
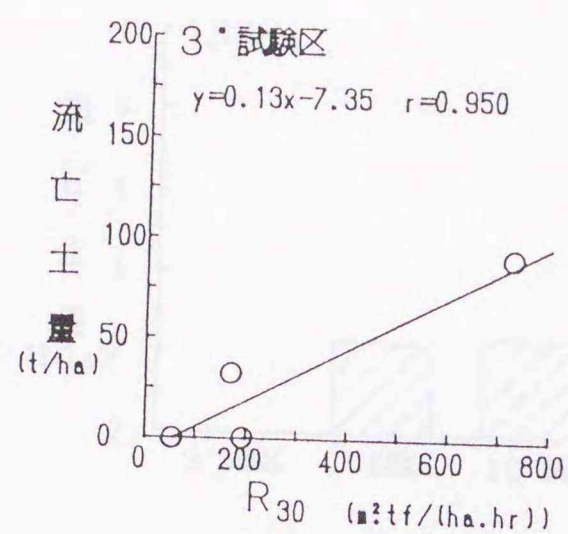


図-5-3 流亡土量と降雨係数の関係

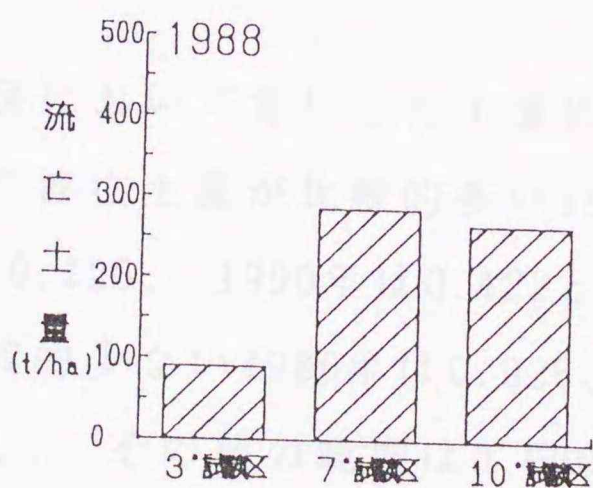
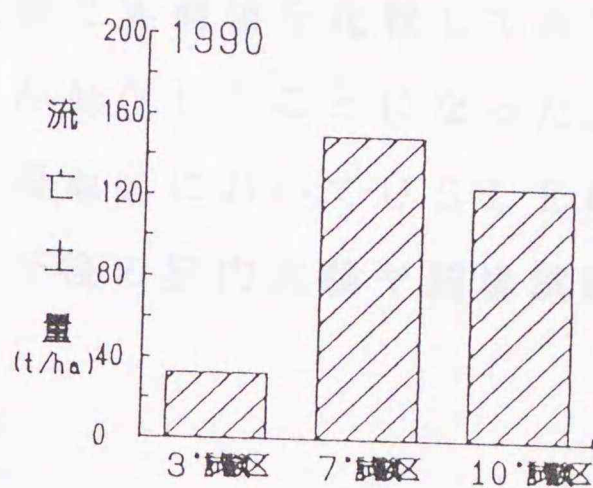
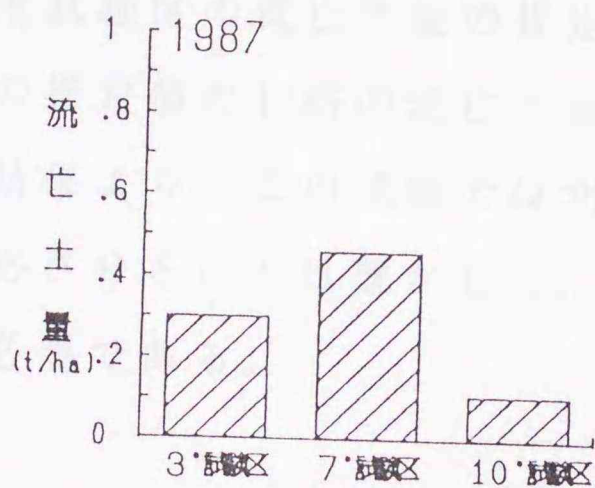
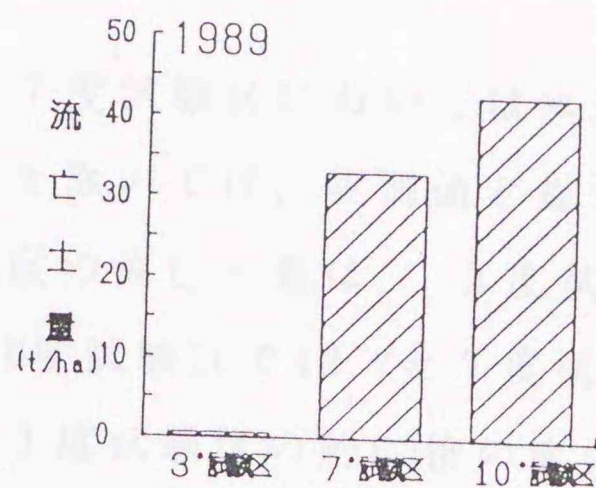
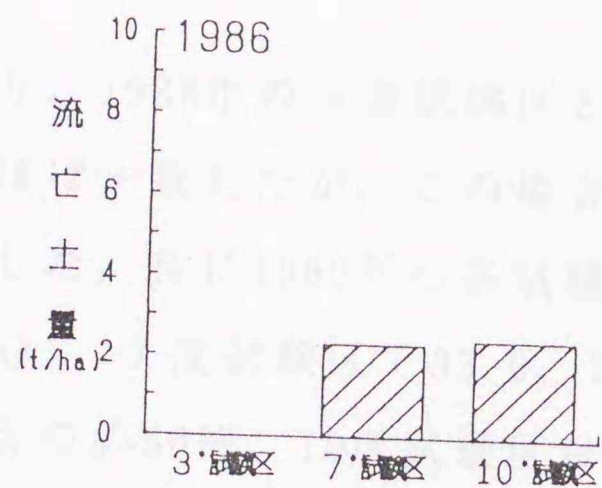


図-5-4 傾斜別の流亡土量

斜圃場の流亡土量を推定し、その比較を行った結果例を図-5-5に示す。

これより、1988年の3度試験区と7度試験区においては実測値と推定値がほぼ一致したが、この場合を除いては、実測値と推定値では差が生じた。特に1989年の各試験区の流亡土量は、3度試験区で0.7(t/ha)、7度試験区で33.0、10度試験区で42.7と7度試験区は3度試験区の約50倍、10度試験区は3度試験区の約60倍の流亡土量が発生したことになる。3度試験区の実測値の流亡土量から7度試験区と10度試験区の流亡土量の推定値と実測値を比較してみても7度試験区の推定値の15倍の流亡土量が発生したことになった。

以上の結果より、この試験では北雨地区においてUSLEの傾斜係数を適応させることは難かしく、今後の室内実験や圃場試験の追跡調査が必要である。

1-5 土壌係数

各試験区において算出した土壌係数を表-5-3に示す。

これより流亡土量が比較的多い1988年は0.280(hr·t/(tf·m²))、1989年は0.125、1990年は0.422と土壌係数は高い値を示し、流亡土量が比較的小さい1986年は0.025、1987年は0.058と土壌係数は低い値を示し、その値の範囲は0.000~0.585と各年・各試験区ごとに様々な値を示した。

しかし、USLEの土壌係数は同一地域・同一土壌においては不変であると定義されるので、その平均値の推定をおこなった。

これより、土壌係数の算術平均は0.148で、その信頼区間90%は0.

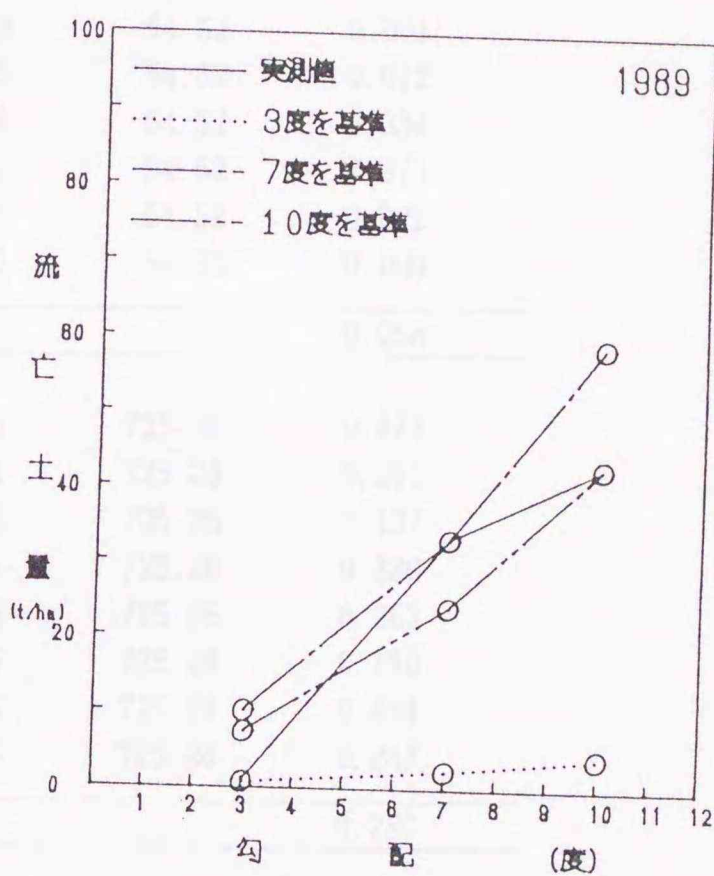
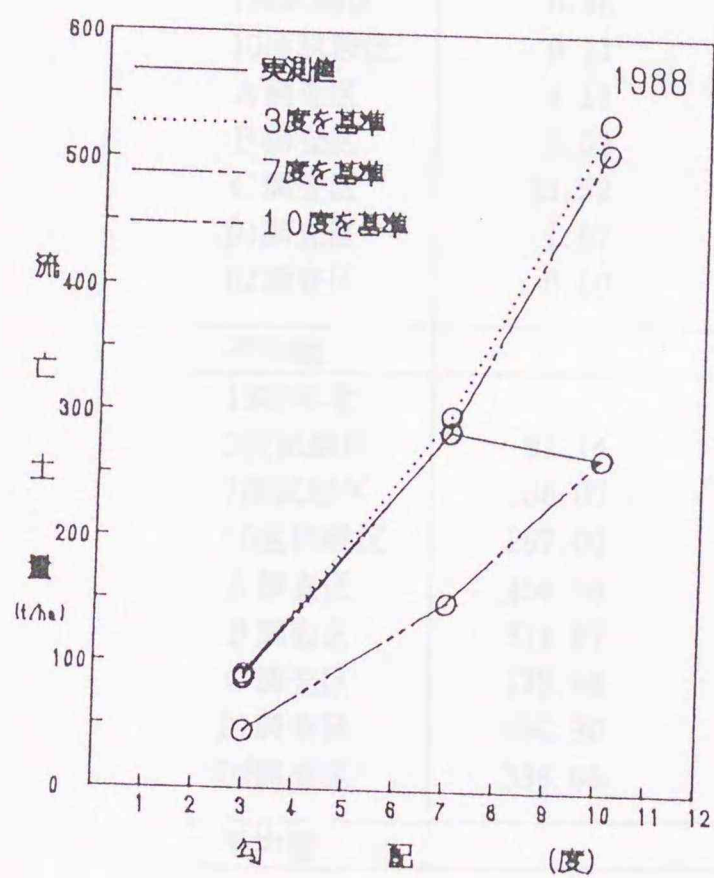


図-5-5 流亡土量の実測値と計算値の比較

表-5-3 各試験区の土壌係数一覧

試験区名	流亡土量 (t/ha)	LS係数	降雨係数 R_{30} ($m^2 \cdot tf / (ha \cdot hr)$)	土壌係数 ($hr \cdot t / (tf \cdot m^2)$)
1986年度				
3度試験区	0.00	0.46	55.50	0.000
7度試験区	2.30	1.51	55.50	0.027
10度試験区	2.44	2.69	55.50	0.016
A調査区	0.90	1.65	55.50	0.010
B調査区	0.60	1.65	55.50	0.007
C調査区	10.16	1.65	55.50	0.111
D1調査区	1.54	1.65	55.50	0.017
D2調査区	0.78	1.65	55.50	0.009
平均値				0.025
1987年度				
3度試験区	0.30	0.46	54.52	0.012
7度試験区	0.46	1.51	54.52	0.006
10度試験区	0.11	2.69	54.52	0.001
A調査区	1.11	1.65	54.52	0.012
B調査区	3.02	1.65	54.52	0.034
C調査区	33.52	1.65	54.52	0.373
D1調査区	1.97	1.65	54.52	0.022
D2調査区	0.00	1.65	54.52	0.000
平均値				0.058
1988年度				
3度試験区	91.14	0.46	725.26	0.273
7度試験区	286.00	1.51	725.26	0.261
10度試験区	267.00	2.69	725.26	0.137
A調査区	454.96	1.65	725.26	0.380
B調査区	314.87	1.65	725.26	0.263
C調査区	179.44	1.65	725.26	0.150
D1調査区	590.90	1.65	725.26	0.494
D2調査区	338.66	1.65	725.26	0.283
平均値				0.280
1989年度				
3度試験区	0.70	0.46	193.63	0.008
7度試験区	33.00	1.51	193.63	0.113
10度試験区	42.70	2.69	193.63	0.082
A調査区	85.60	1.65	193.63	0.268
B調査区	44.50	1.65	193.63	0.139
C調査区	74.40	1.65	193.63	0.233
D1調査区	49.30	1.65	193.63	0.154
D2調査区	1.80	1.65	193.63	0.006
平均値				0.125
1990年度				
3度試験区	32.50	0.46	169.55	0.417
7度試験区	149.90	1.51	169.55	0.585
10度試験区	125.00	2.69	169.55	0.263
平均値				0.422
5年平均				0.148

103～0.193であった。

次にこの値と比較するため土質による土壌係数換算式⁹³⁾を用い、土壌の粒度分布より推算値土壌係数を計算した。供試土壌は、砂34%、シルト44%、粘土22%、有機物含有量1.2%で、土壌構造より土壌コードを推測し計算を行った結果推算値土壌係数は、0.286の値を得た。

仮に実測値からの土壌係数を算術平均値の0.148と考えると、その値は2倍弱の値となり表-5-3の土壌係数の値と比較しても、そのちらばりの中に含まれ農地保全上安全側を考えると、推定値の0.286の値を土壌係数と考える方が適切であると思われる。

1-6 保全係数

圃場斜面調査区における流亡土量の結果を表-5-4に示す。

これより各圃場の4年分の流亡土量の比較すると多い順にC圃場150.63(t/ha)、A圃場97.72、D1圃場64.41、B圃場61.06、D2圃場5.02であった。C圃場の圃場面は縦畝であるために圃場面での浸透が少なく、畝間において、水みちが発生して水みちの拡大がおり、リル・ガリが発達して大きな侵食をもたらしたと思われる。これに対し最も流亡土量が少なかったD2圃場は、承水路が草生水路なので承水路の部分に土砂が捕捉され圃場全体として流亡土量は少なくなったものと考えられる。このことは、圃場面の条件は同一で、承水路断面も同じであるが素掘水路であるD2圃場の流亡土量と比べ

表-5-4 圃場斜面侵食調査区における流亡土量の比較

(単位;t/ha)

年	A圃場	B圃場	C圃場	D1圃場	D2圃場
1986	0.90	0.60	10.16	1.54	0.78
1987	1.11	3.02	33.52	1.97	0.00
1988 *	10.11	12.94	32.55	11.60	2.44
1989	85.60	44.50	74.40	49.30	1.80
合計	97.72	61.06	150.63	64.41	5.02

*1988年の大雨による流亡土量は推定値のため除く

の草生化が、圃場全体としての土壌侵食防止効果すなわち、流亡土量の地区外への流出を抑制する効果があると言える。

次にそれぞれの圃場の保全係数の数値化を行った。B圃場が対照区であるから、B圃場の流亡土量を基準に他の圃場の流亡土量を比にしたものを表-5-5に示す。

これよりA圃場は0.40～1.90、C圃場は1.70～16.90、D1圃場は0.90～2.60、D2圃場は0.00～1.30と各年において様々な値を得た。保全施設の効果は、B圃場の流亡土量よりも少ない場合に効果が示されたと考えられるが、A圃場、D1圃場、D2圃場においては年によって対照区であるB圃場よりも流亡土量が多くなった。

このことを考えると今回の試験で設置した保全工は、草生水路に保全効果がみられたが他の圃場の保全効果はこの観測期間の結果のみでは断定できず、この保全工に対する保全係数を決定することはできなかった。

1-7 降雪期間における降雨係数

北海道のような積雪寒冷地では、融雪期に多量の流亡土量が発生する。これは凍結土壌の融解に起因する表面土壌構造の破壊による耐食性の低下にあわせて融雪や降雨による侵食が加わるためである。USLEによると降雪期間の降雨係数の換算方法は、降雪期間の降水量(cm)を1.0倍し求めている。⁹⁴⁾

しかし、北海道においては長沢らが降雪期間の降水量の0.13～0.17倍を示している。⁹⁵⁾そこで北雨地区においても融雪期による土壌侵食が発生した1990年の春先の融雪水による流亡土量を測定しこの

表-5-5 B圃場を基準にしたときの流亡土量の比較

年	A 圃場	B 圃場	C 圃場	D1 圃場	D2 圃場
1986	1.50	1.00	16.90	2.60	1.30
1987	0.40	1.00	11.10	0.70	0.00
1988 *	0.80	1.00	2.50	0.90	0.07
1989	1.90	1.00	1.70	1.10	0.04

*1988年の大雨による流亡土量は推定値のため除く

侵食が発生した1990年の春先の融雪水による流亡土量を測定しこの検討を行った。

1990年の標準試験区における降雪期間と降雨期間の流亡土量と降雨係数 R_{30} および土壌係数を表-5-6に示す。なお、降雨期間とは調査地域において降水量の形態が雨であった期間である。

降雪期間降水量は32.3cmで、降雪期間の降雨係数はU S L Eの換算方法から32.3となる。この値から降雪期間の土壌係数を求めると3度試験区で0.087、7度試験区で0.043、10度試験区で0.026となった。

一方、降雨期間の降雨係数から降雨期間の土壌係数を求めると、3度試験区で0.417、7度試験区で0.582、10度試験区で0.274となった。降雨期間の土壌係数と降雪期間の土壌係数は約5～15倍とかなりの差があった。

そこでU S L Eの考え方にしたがって、土壌係数は地域では一定であるとし、降雨係数を逆算する。すなわち、春先の流亡土量をL S係数と土壌係数（降雨期間の値）で除し6.78となる。したがって冬期間の降水量が32.3cmなので降雪期間の降雨係数の換算係数は $6.78/32.3=0.21$ 倍となる。同方法で計算した各試験区における換算係数を表-5-7に示す。その結果、換算係数は7度試験区で0.34、10度試験区で0.37となり、各試験区の換算係数の平均値は0.31を得た。

さらに、長沢らの解析⁹⁵⁾と同様に R_{60} を用いると、換算係数は0.07～0.21、平均値0.13という結果となり、長沢らが札幌において観測、算出した換算係数と同様な値を示した。

以上の結果、降雪期間における降雨係数 R_{30} の換算係数は0.31、降雨係数 R_{60} の換算係数は0.13になる。これは米国の換算係数に比べる

表-5-6 降雨期間の土壌係数と降雪期間の土壌係数の比較

試験区名	流亡土量 (t/ha)	LS係数	R_{30} ($m^2 \cdot tf / (ha \cdot hr)$)	土壌係数 ($hr \cdot t / (tf \cdot m^2)$)
(降雨期間)				
3度試験区	32.50	0.46	169.55	0.417
7度試験区	149.90	1.51	169.55	0.582
10度試験区	125.00	2.69	169.55	0.274
(降雪期間)				
3度試験区	1.30	0.46	32.30	0.087
7度試験区	2.10	1.51	32.30	0.043
10度試験区	2.30	2.69	32.30	0.026

* 降雪期間の R_{30} の値は積雪期間の降水量に1.0倍したものである

この値は、融雪水による流亡土量に、降雪期間の降雨係数を乗じた値である。この値は、融雪水による流亡土量に、降雪期間の降雨係数を乗じた値である。

表-5-7 降雪期間の降雨係数の換算係数について

	3度試験区	7度試験区	10度試験区
降雨期間の流亡土量(t/ha)	32.50	149.90	125.00
融雪水による流亡土量(t/ha)	1.30	2.10	2.30
降雨期間の降雨係数($m^2 \cdot tf / (ha \cdot hr)$)	169.55	169.55	169.55
降雪期間の降雨係数($m^2 \cdot tf / (ha \cdot hr)$)	6.78	10.96	12.00
冬期間の降水量(mm)	32.30	32.30	32.30
換算係数	0.21	0.34	0.37

と小さな値となるが、これは米国との気象条件等が異なるためであり、ここに示す換算係数は多雪寒冷である北海道西部で使用できると考えられる。

しかし、十勝地方のような雪で少雪な地域のデータは用いられないのが現状である。また、降雪・融雪時に生じるひたひたの雪崩について J. Goolley 氏による東部地における降雪量の調査に賛同し、研究¹¹⁾や Deidun 氏によるカナダ西部州における降雪¹²⁾。も降雪量の調査に関する研究¹³⁾等がみられる。これらの研究はひたひたの雪崩にのみあつた降雪量の降雪量の調査結果を報告している。これを基礎として取り、この調査に基き多くの知見が得られる。

そこで、この研究では降雪試験槽による一年間の水・土壌の動態を監視する。これにより、今後雪十勝地方、一ノ井谷地域への対応の基盤について必要なデータを得ることを目的とした。

2-1 実験方法

帯広畜産大学実験農場内に降雪試験槽を設けた。その形状を概しに示す。この試験槽は幅1.0m、長さ5.0mとし、斜面の方向による降雪時の土壌侵食の調査を比較するため、北向きと南向きにそれぞれ設置した。試験槽はすべて傾斜とし、勾配は約10%に設定したが、北向きが11.7%、南向きが9.9%となった。斜面の覆材には厚さ30cmの成型強化ゼニを敷き、中に10cmほど埋入し、他の層からの出入を防止した。試験槽の下には排水パイプを敷き、排水の排水装置を設置し、排水を流すための水は排水パイプの下に集め

第2節 寒冷少雪地域における土壌侵食の予測

第1節では北海道西部に位置する空知地方の北雨地区のデータを示したが、十勝地方のような寒冷で少雪な地域のデータは示されていないのが現況である。また、降雪・融雪期におけるU S L Eの適応についてはCooleyらによる寒冷地における降雨係数の算出に関する研究⁹⁶⁾やGordonらによるカナダ沿海州における融雪による降雨係数の適応に関する研究⁹⁷⁾等がみうけられるが、これらの研究はU S L Eハンドブックに示された融雪期の降雨係数の換算法を当てはめることを主眼としており、この適応にはまだ多くの検討が必要である。

そこで、この研究では傾斜試験枠による一年間の水・土流出形態を観測することにより、今後の十勝地方、および道東地域へのU S L Eの適応についての基礎資料を得ることを目的とした。

2-1 実験方法

帯広畜産大学実験圃場内に傾斜試験枠を設置した。その形状を図-5-6に示す。この試験枠は幅1.0m、長さ5.0mとし、斜面の方向による融雪時の土壌侵食の違いを比較するため、北向きと南向きにそれぞれ3面ずつ設置した。試験枠はすべて裸地とし、勾配は約10%に設定したが、北向きが11.9%、南向きが9.9%となった。枠の境界材には高さ30cmの波型塩化ビニル板を使用し、地中に10cmほど挿入し、他の枠からの流入を防止した。試験枠の下流端にはステンレス製の集水装置を設置し、斜面を流下した水は集水用バケツに集め、

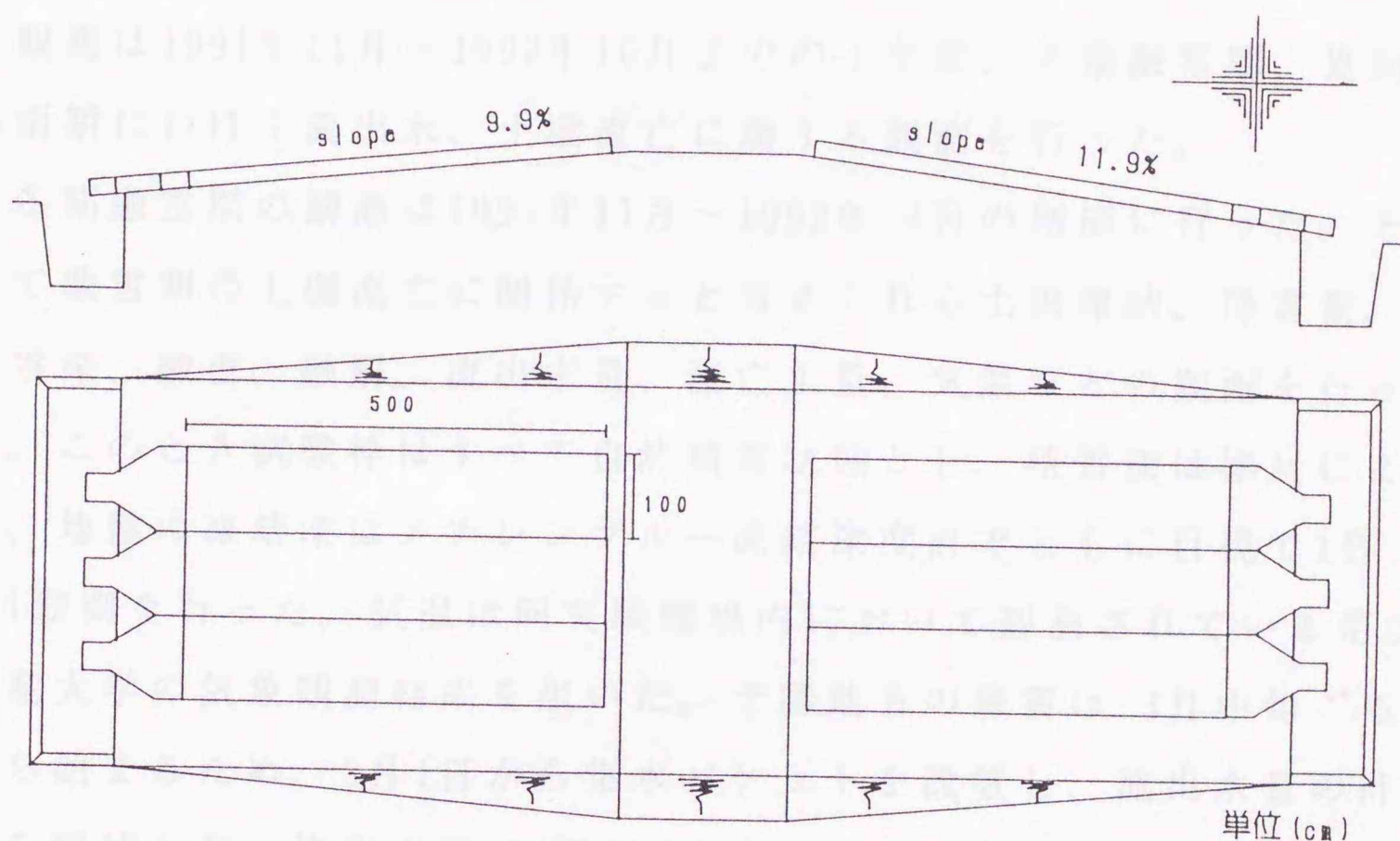


図-5-6 傾斜試験枠の形状

流出土も同時に収集した。

試験枠の供試土壌の物理性を表-5-8に示す。これより供試土壌は、砂が全体の84.3%を占めており、国際土壌学会法による分類ではLS（壤質砂土）、工学的分類である日本統一土質分類法ではSF（砂質土）に分類される。

観測は1991年11月～1992年10月までの1年間、冬期融雪期、夏期降雨期にわけて流出水、土壌流亡に関する観測を行った。

冬期融雪期の観測は1991年11月～1992年4月の期間に行った。そして融雪期の土壌流亡に関係すると考えられる土壌凍結、降雪量、積雪深、融雪、融解、流出水量、流亡土量、気温などの観測を行った。このとき試験枠はすべて自然積雪状態とし、積雪深は標尺により、地盤の凍結深はメチレンブルー凍結深度計とともに目視で1日1回観測を行った。気温は同実験圃場内において観測されている帯広畜産大学の気象観測結果を用いた。十勝地方の融雪は3月中旬ごろから始まるため、3月1日から集水バケットを設置し、流出水量の計測を開始した。流出水量は1日1回集水バケット内の水量を計測することによって求めた。冬期から融雪期にかけて試験枠の地表を攪拌せずに流出・流亡の挙動を観測した。

降雨期の観測は、融雪期から引き続き1992年5月～10月の期間に行った。降雨期は流出水量、流亡土量、降雨量などの観測を行った。降雨によって斜面を流下した水は集水バケットに集められるため、降雨のあった際は降雨終了後、もしくは翌日にバケット内の水量を計測し、流出土は集水バケット内と集水装置上に残るため、これらを集収し、炉乾燥して乾土重量を計測した。夏期降雨期の試験枠の地表は毎月1回、耕うん機により耕起し、清耕して観測を行った。

表-5-8 傾斜試験枠の供試土壌の物理性

土質 砂土	比 重	2.75
	レ キ (%)	0.0
	粗 砂 (%)	18.1
	細 砂 (%)	66.2
	シルト (%)	5.7
	粘 土 (%)	10.0
液 性 限 界 (%)		NP
塑 性 限 界 (%)		NP

また1992年6月12日～10月1日までは、北斜面の集水バケット内に図-5-7に示す水位測定装置を3面それぞれに設置し、10分間毎の流出水量を計測した。水位測定装置は、内径10.5cm、高さ60.0cmの塩化ビニル管の一方にアクリル板を接着、止水し、装置の上部に幅約1.0mm、長さ10.0cmのスリット堰を設け、この堰の越流高さを小型水圧センサーによって10分間毎にKADEC-US（全天候型計測データ記録装置）に記録した。

観測期間中の降雨については、水理学実験室の屋上に精度0.5mmの転倒杓式雨量計を設置して10分間毎の雨量をKADEC-UP（全天候型計測データ記録装置）に記録した。

KADEC-US、KADEC-UPはともに内蔵タイマーをあわせて同時刻の雨量と水位を記録した。記録したデータはKADEC用データ回収器で毎月一回、回収した。回収したデータはコンピューターに転送した。このとき、KADEC-USの水圧を水深に変換し、その後、この水深を10分間流量に換算してフロッピーディスクに保存した。

また、夏期の流出水量算定について、傾斜試験枠の集水装置、及び集水バケットには覆いをしていないため、実際の流出水量を求めるためにこの集水部の流出率を100%として補正値を計算し、観測した水量からこの値を引いたものを実測流出水量とした。

2-2 実験期間の気象概況

観測期間における1991年11月から1992年10月までの帯広畜産大学の降雨日数と月別降水量と帯広の平年値との比較を表-5-9に示す。これより、観測期間の総降水量は778.5mmで、帯広の年平均降水量の

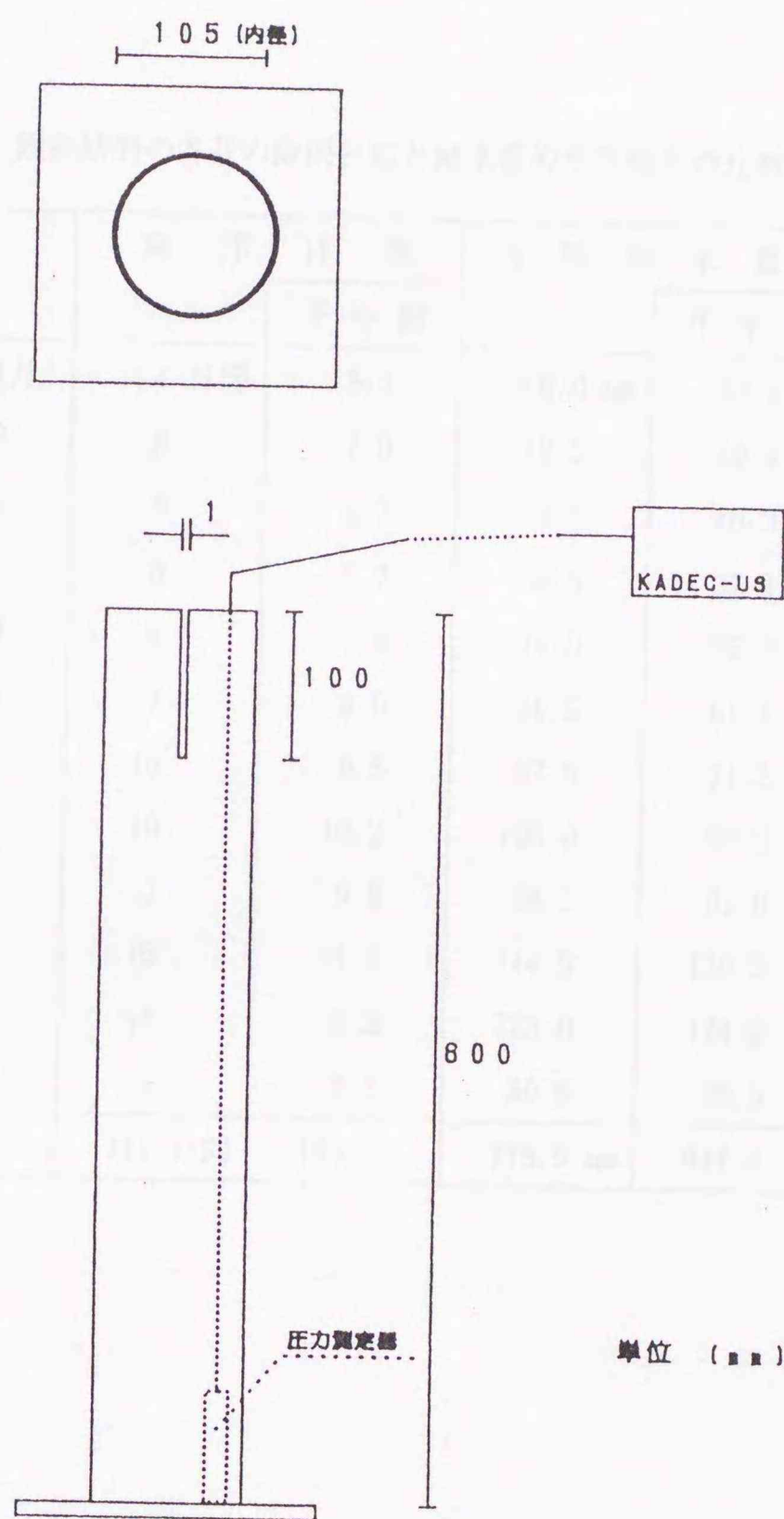


図-5-7 水位測定装置の形状

表-5-9 観測期間の各月の降雨日数と降水量の平年値との比較

		降 雨 日 数		月 別 降 水 量	
			平 年 値		平 年 値
1991年	11月	4 日間	8.4	6.0 mm	72.1
	12	8	7.0	12.5	40.4
1992	1	9	6.7	8.5	40.3
	2	8	5.7	8.5	37.4
	3	4	7.8	14.0	55.9
	4	7	8.0	26.5	61.1
	5	10	9.5	82.5	71.5
	6	10	10.2	105.0	97.5
	7	13	9.9	58.5	91.0
	8	15	11.6	144.5	136.3
	9	18	10.3	223.0	124.0
	10	5	8.7	89.0	89.5
合 計		111 日間	103.7	778.5 mm	917.4

平年値 917.4mmに比べると100mm以上少なかった。しかし、降雨日数は平年値に比べて7日間ほど多かった。最も月降水量が多かったのは9月の223.0mm、最も少なかったのは11月の6.0mmであった。降水量が平年値に比べてやや少ない、もしくはかなり少なかった月は冬期間の11月～4月にかけてであった。この期間の降水量は降雪によるものであるため、観測期間の降雪が平年より少なかったものと考えられる。5月から10月の降水量は、ほぼ平年並みであった。その中では、9月の降水量はやや多く、降雨日数も多かった。これは、9月に北海道を通過した台風17号による多雨のためであった。⁹⁸⁾

観測期間における冬期融雪期の土壌凍結状態を把握するため、1991年11月～1992年4月の気温変化を図-5-8に、また傾斜試験枠の積雪、凍結・融解深さの変化を図-5-9に示す。

これより、日最低気温は12月1日からマイナスとなり、また日平均気温は12月6日からマイナスとなった。それによって、土壌凍結は北斜面で12月3日から、南斜面では12月8日から継続的に始まった。その後、凍結は徐々に深くなり、傾斜試験枠が積雪で覆われるようになった12月28日から凍結の進行が鈍くなり、ゆるやかに推移した。最大凍結深は北斜面では2月27日に28.7cm、南斜面では2月26日に27.8cmを記録した。下部からの融解は北斜面で3月3日から、南斜面で3月1日から始まり、ゆっくりと融解し、地表面からの融解は北斜面では3月24日、南斜面では3月15日から継続的に始まった。北斜面と南斜面の地表面からの融解はともに、日平均気温が0℃以上になった3月26日から急速に進行し、南斜面は3月31日、北斜面では4月6日に終了した。

最大積雪深は両斜面ともに2月1日に記録され、北斜面は37cm、南

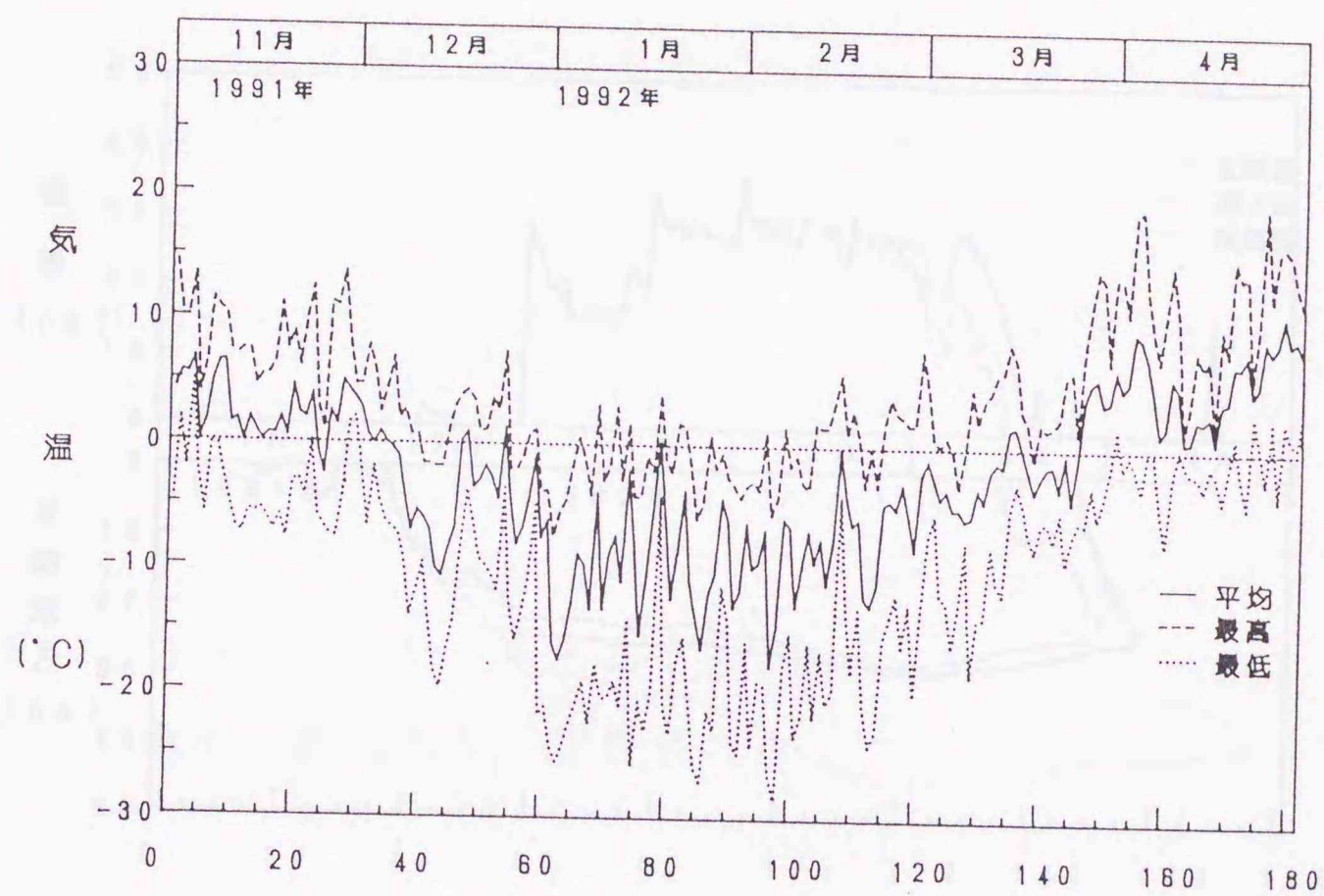


図-5-8 観測期間における気温の経時変化

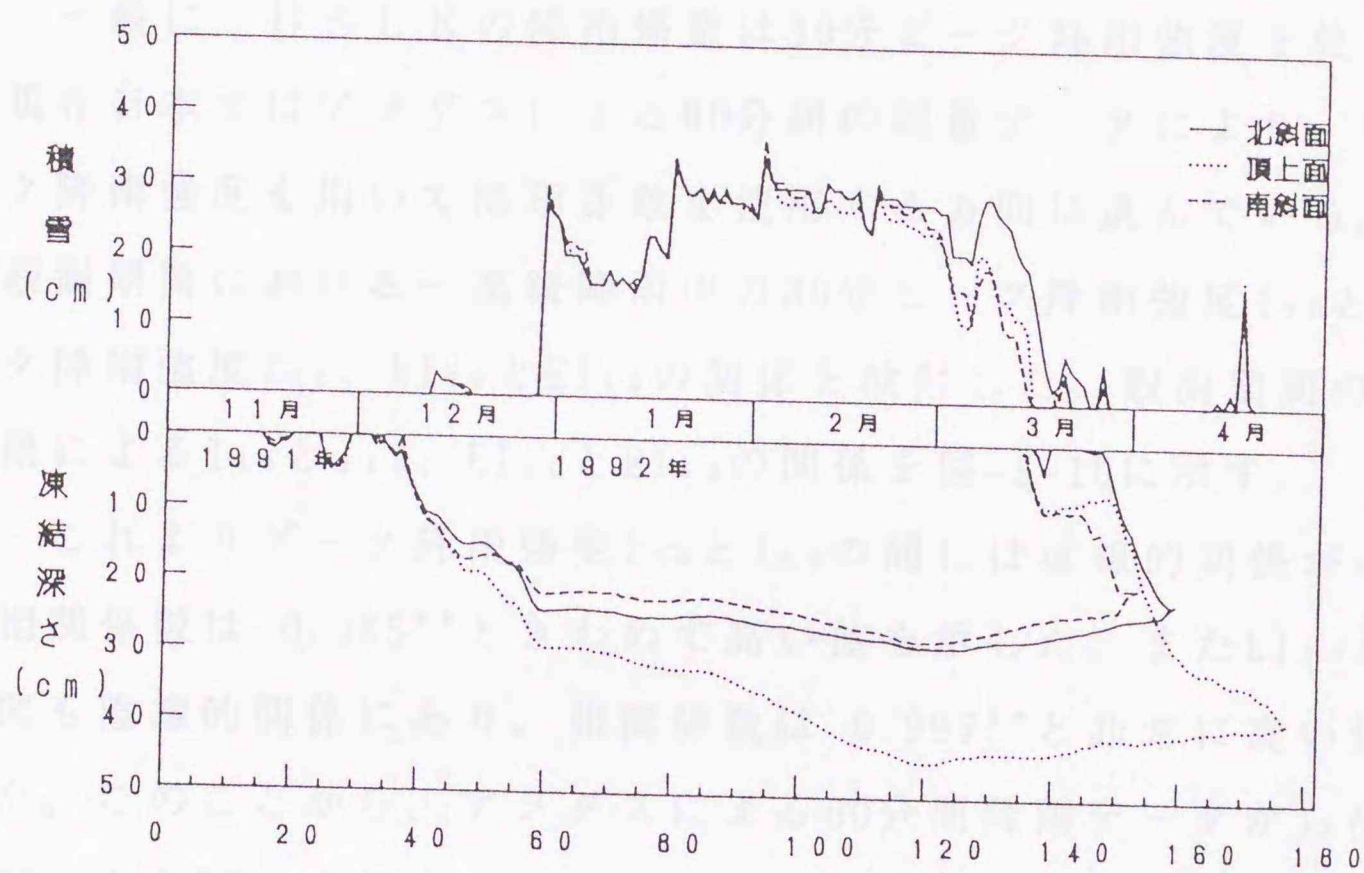


図-5-9 傾斜試験枠における積雪・凍結深の経時変化

斜面では34cmであった。また、4月には季節外れの17cmの降雪があった。

2-3 降雨係数

観測期間の一連続降雨別の観測結果を表-5-10と表-5-11に示す。

一般に、U S L E の降雨係数は30分ピーク降雨強度を使用するが、現在日本ではアメダスによる60分間の雨量データにより、60分ピーク降雨強度を用いて降雨係数を使用する方向に進んでいる。そこで、観測期間における一連続降雨中の30分ピーク降雨強度 I_{30} と60分ピーク降雨強度 I_{60} 、 EI_{30} と EI_{60} の関係を検討した。観測期間の一連続降雨による I_{30} と I_{60} 、 EI_{30} と EI_{60} の関係を図-5-10に示す。

これよりピーク降雨強度 I_{30} と I_{60} の間には直線的関係が得られ、相関係数は0.985**ときわめて高い値を示した。また EI_{30} と EI_{60} の間も直線的関係にあり、相関係数は0.997**と非常に高い値を示した。このことから、アメダスによる60分間降雨データから得られた EI_{60} から EI_{30} を推定することは可能であると考えられる。

降雨強度とEI値は降雨の侵食性を表す重要な指標の一つと考えられる。また種田は、より短時間の降雨強度とその降雨強度を使用したEI値ほど流亡土量との相関性が高いことを確かめた。そこで、流亡土量を観測した降雨について10分、30分、60分ピーク降雨強度 I_{10} 、 I_{30} 、 I_{60} 、この値を使用したEI値と流亡土量の相関性を解析し、その関係を図-5-11と図-5-12に示す。

これよりピーク降雨強度と流亡土量の関係はどのピーク降雨強度においてもピーク降雨強度が大きくなると流亡土量も増加する傾向

表-5-10 一連続降雨における観測結果 (1)

降雨番号 No.	開始時刻		終了時刻		降雨量 (mm)	30分ピーク 雨量(mm)	降雨継続 時間(hr)
1	5/ 8	4:50		6:30	1.5	1.0	100
2	5/14	5:40		16:50	20.5	2.0	670
3	5/19	2:30		2:50	1.0	1.0	20
4	5/21	12:40		13:30	1.0	0.5	50
5	5/22	9:30		22:50	8.0	2.0	800
6	5/23	8:40		9:50	4.5	2.5	70
7	5/23	23:30	5/24	8:10	19.5	3.0	520
8	5/24	18:50	5/25	2:00	9.5	3.0	430
9	5/25	9:30	5/26	6:40	20.5	3.0	1260
10	5/27	10:20	5/27	16:00	1.0	0.5	340
11	6/ 5	5:40		14:00	4.0	1.0	500
12	6/ 7	1:00		1:40	1.5	1.0	40
13	6/ 8	12:00	6/ 9	8:40	39.0	3.5	1240
14	6/ 9	17:20		23:30	1.5	0.5	130
15	6/10	20:40	6/12	3:50	18.0	3.5	430
16	6/12	18:00		19:10	31.0	18.5	70
17	6/14	13:50	6/15	4:00	8.5	2.0	850
18	6/16	14:40		15:10	1.0	1.0	30
19	7/ 5	17:10		18:20	12.0	7.5	70
20	7/ 9	3:40		4:50	7.0	4.0	70
21	7/ 9	16:00		16:50	1.0	0.5	50
22	7/10	2:50		3:30	2.0	1.5	40
23	7/10	11:30		11:50	1.0	1.0	20
24	7/18	22:10	7/19	14:00	16.0	2.0	950
25	7/21	20:10	7/22	2:10	5.0	1.0	420
26	7/22	21:50	7/23	4:10	2.0	1.0	380
27	7/25	13:00	7/26	1:10	6.0	3.0	730
28	7/27	5:10		9:50	2.5	1.0	280
29	7/31	5:40		6:50	1.5	1.0	70
30	8/ 2	13:10	8/ 3	5:20	4.5	2.0	970
31	8/ 7	7:10		8:10	2.0	1.5	60
32	8/ 8	5:00		15:40	4.0	1.0	640
33	8/ 9	9:30		20:10	39.0	5.5	640
34	8/12	23:50		17:10	26.5	3.0	1040
35	8/14	22:40	8/15	10:40	26.5	4.0	720
36	8/16	9:30		16:30	2.0	0.5	420
37	8/20	5:10		9:00	8.0	2.5	230
38	8/20	23:00	8/21	0:50	2.0	1.5	110
39	8/25	16:40	8/26	4:00	22.5	4.5	680
40	8/28	6:30		10:00	5.5	1.5	210
41	9/ 1	1:50		9:30	8.0	2.5	480
42	9/ 2	16:20		23:00	2.5	0.5	400
43	9/ 4	16:50		20:30	2.0	1.0	220
44	9/ 5	10:40		14:40	3.0	1.0	240
45	9/ 9	4:40	9/12	6:10	138.0	5.0	4410
46	9/16	22:00	9/17	7:20	2.5	0.5	560
47	9/24	23:30	9/26	1:10	41.5	4.0	1540
48	9/26	16:20	9/27	0:40	12.0	4.0	500
49	9/27	14:50		22:00	5.5	4.5	430
50	9/28	5:00		5:30	1.0	1.0	30
51	9/29	23:10	9/30	14:00	6.5	1.0	890

表-5-11 一連続降雨における観測結果 (2)

降雨番号 No.	流出水量 (cm ³)		流出係数		ピーク 流出水量	流亡土量 (g/m ²)	
	北斜面	南斜面	北斜面	南斜面		北斜面	南斜面
1	1321.4	1154.7	0.176	0.154	-	-	-
2	22270.1	22336.7	0.217	0.218	-	-	-
3	1458.7	1492.0	0.292	0.298	-	-	-
4	1258.7	925.4	0.252	0.185	-	-	-
5	9795.0	9669.6	0.245	0.242	-	-	-
6	3897.5	3964.2	0.173	0.176	-	-	-
7	25044.7	24911.4	0.257	0.256	-	-	-
8	10957.7	10924.3	0.231	0.230	-	-	-
9	22503.4	22536.7	0.220	0.220	-	-	-
10	1025.4	1025.4	0.205	0.205	-	-	-
11	5134.8	5498.5	0.257	0.275	-	-	-
12	2021.4	2154.7	0.270	0.287	-	-	-
13	42589.4	42356.1	0.218	0.217	-	3.514	1.734
14	2154.7	2121.4	0.287	0.283	-	-	-
15	18190.0	17490.0	0.202	0.194	-	-	-
16	27219.8	28086.4	0.176	0.181	4851.0	24.594	15.246
17	9199.0	8832.3	0.216	0.208	684.8	-	-
18	1392.0	1258.7	0.278	0.252	793.8	-	-
19	12367.1	11867.1	0.198	0.190	1901.9	8.000	5.966
20	6510.9	6344.3	0.186	0.181	840.1	-	-
21	892.0	1436.5	0.178	0.287	325.5	-	-
22	1984.1	2873.0	0.198	0.287	583.7	-	-
23	892.0	1058.7	0.178	0.212	648.7	-	-
24	16022.6	15672.6	0.200	0.196	546.6	-	-
25	5660.2	5660.2	0.226	0.226	1330.2	-	-
26	1684.1	1984.1	0.168	0.198	430.9	-	-
27	6685.5	6402.2	0.223	0.213	1726.1	-	-
28	2480.1	2746.8	0.198	0.220	480.3	-	-
29	1688.1	1754.7	0.225	0.234	430.9	-	-
30	2197.5	2497.5	0.098	0.111	354.6	-	-
31	1984.1	2217.4	0.198	0.222	558.8	-	-
32	3368.1	3395.1	0.168	0.170	479.3	-	-
33	52756.1	50289.4	0.271	0.258	5293.0	3.426	2.826
34	26622.3	25588.9	0.201	0.193	1715.4	-	-
35	25755.6	24355.6	0.194	0.184	2047.6	-	-
36	1684.1	1884.1	0.168	0.188	131.0	-	-
37	7636.3	7136.3	0.191	0.178	782.3	1.514	1.020
38	1984.1	1884.1	0.198	0.188	502.9	-	-
39	22354.1	20920.8	0.199	0.186	1527.5	7.226	12.694
40	5422.9	5122.9	0.197	0.186	561.5	-	-
41	8769.6	9269.6	0.219	0.207	738.3	2.560	0.900
42	2880.1	2913.4	0.230	0.233	305.5	-	-
43	2017.4	2317.4	0.202	0.232	547.3	-	-
44	2509.4	2842.8	0.167	0.190	278.2	-	-
45	128734.3	127134.3	0.187	0.184	1027.7	9.180	10.374
46	2280.1	2513.4	0.182	0.201	179.5	-	-
47	36369.5	36236.2	0.175	0.175	733.3	5.320	3.294
48	11771.1	11271.1	0.196	0.188	1486.0	-	-
49	5222.9	4989.5	0.190	0.181	2761.2	-	-
50	992.0	992.0	0.198	0.198	593.6	-	-
51	8148.2	7181.6	0.251	0.221	457.7	11.006	3.254

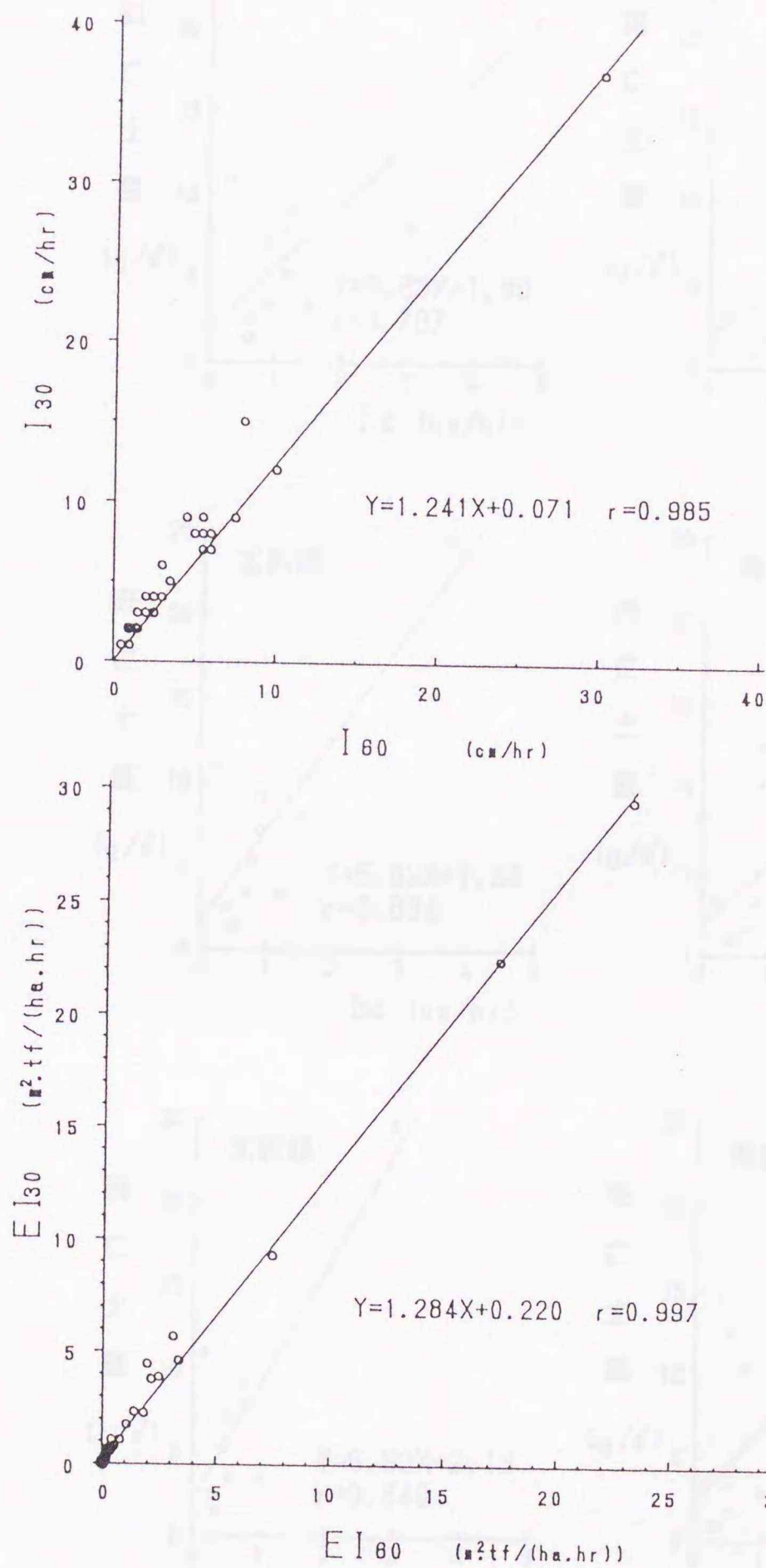


図-5-10 30分ピーク降雨強度と60分ピーク降雨強度および EI_{30} と EI_{60} の関係

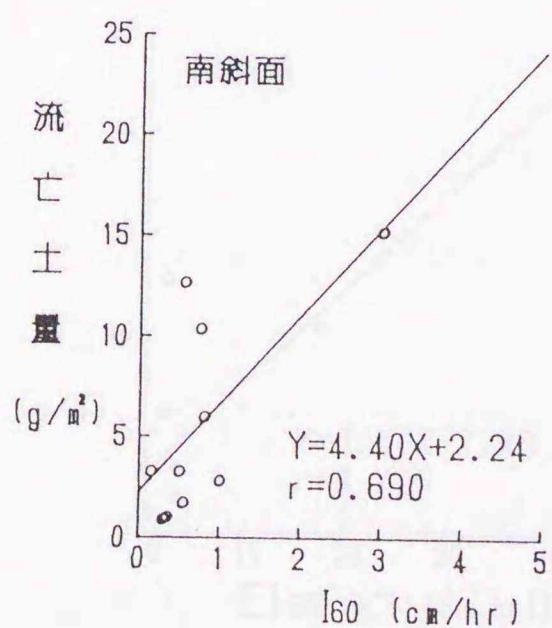
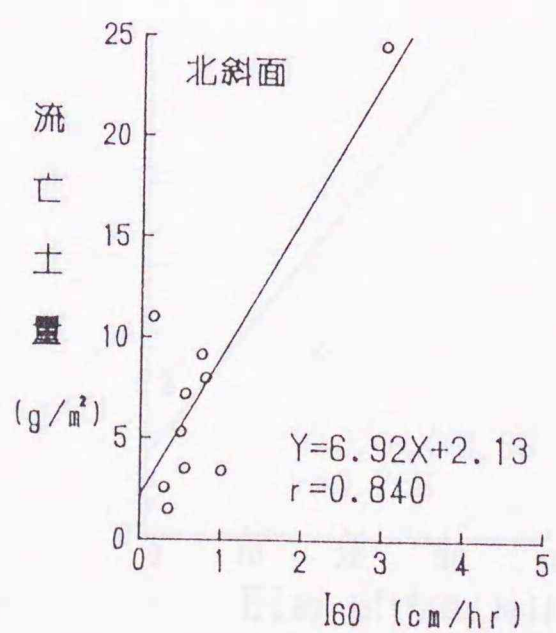
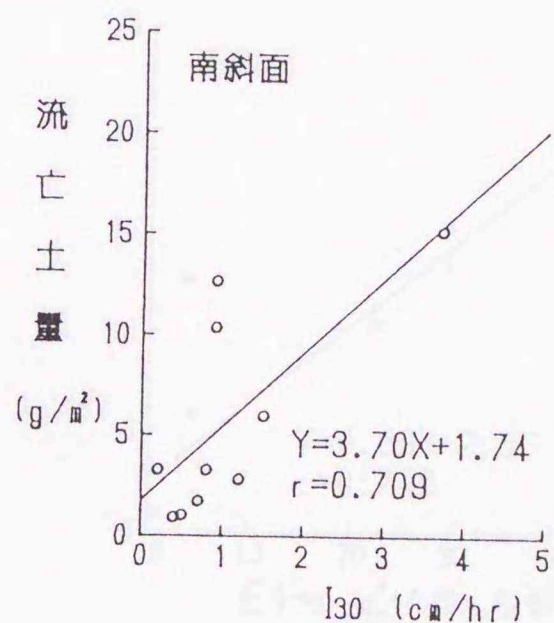
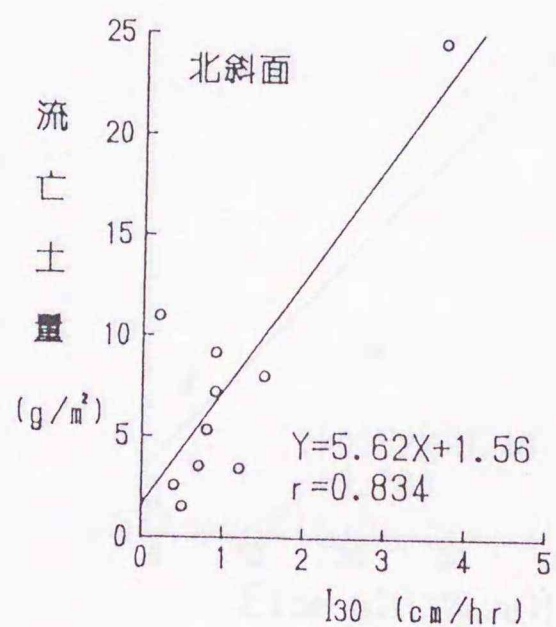
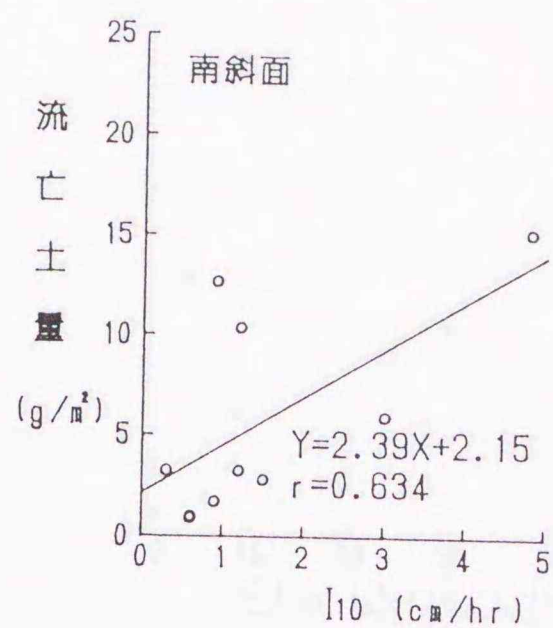
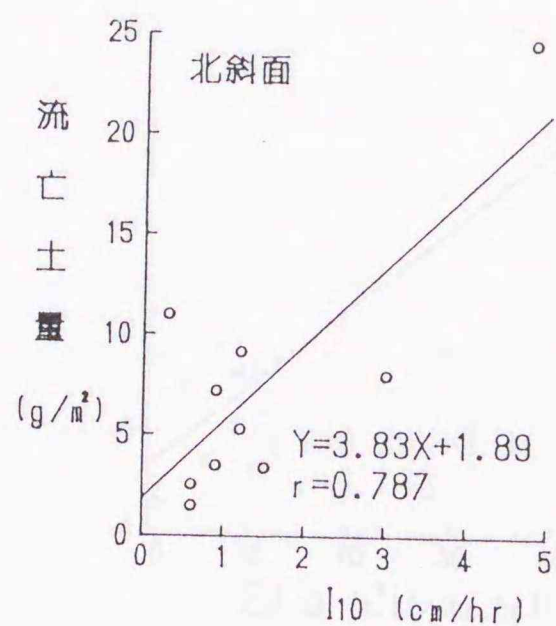


図-5-11 流亡土量とピーク降雨強度との関係

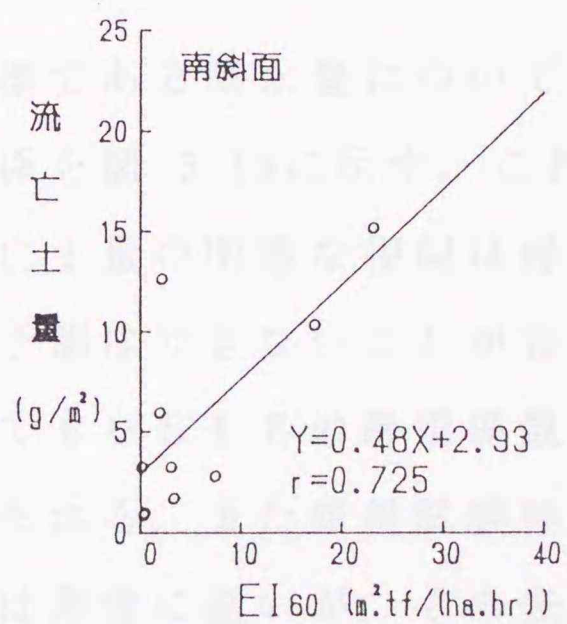
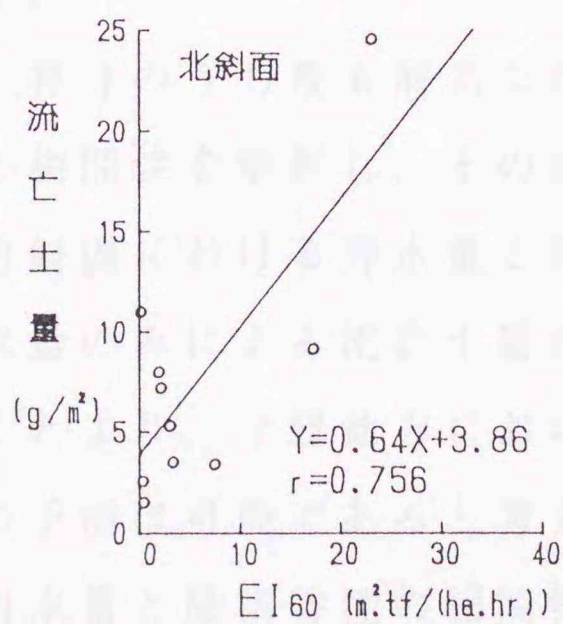
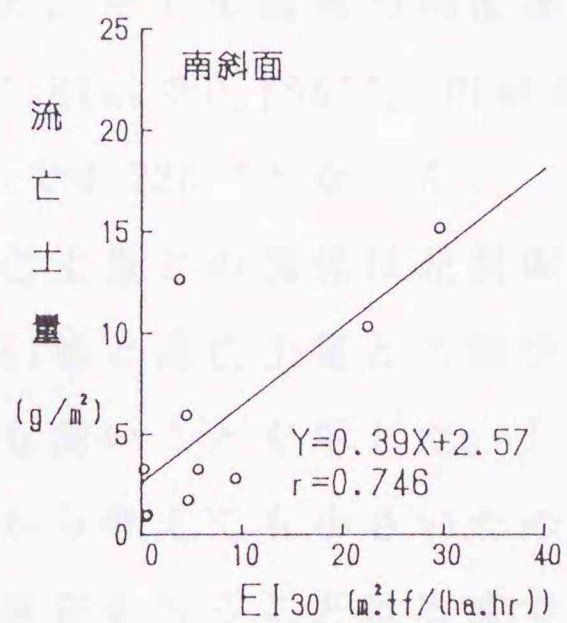
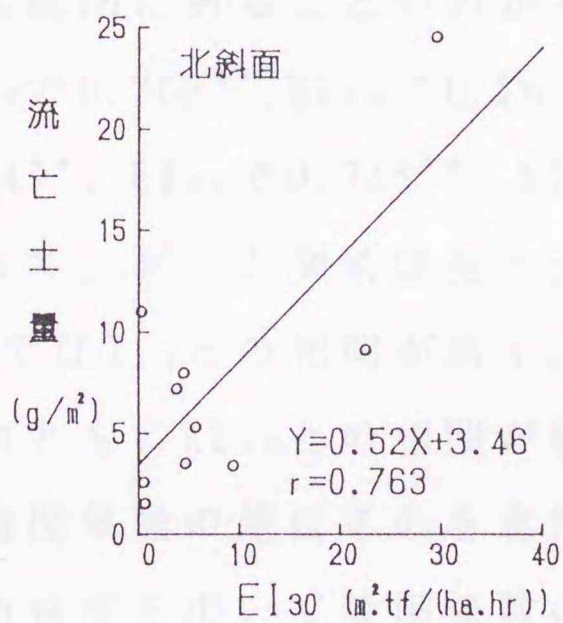
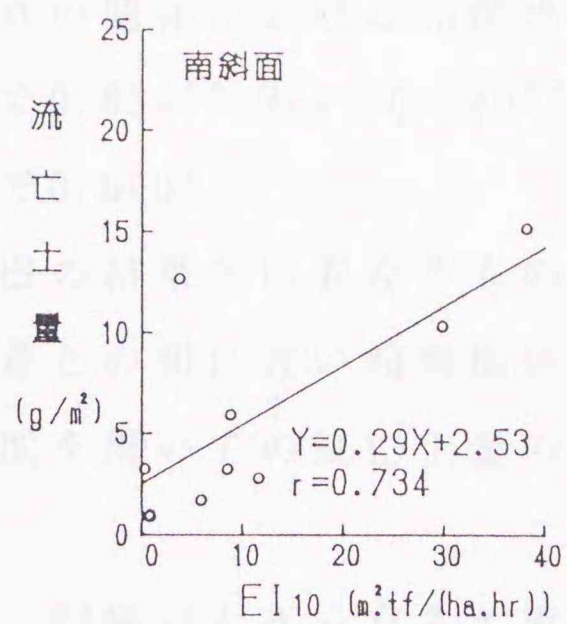
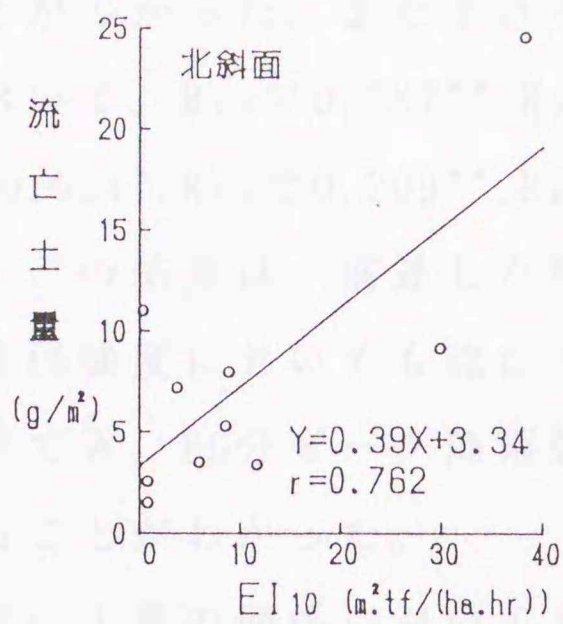


図-5-12 流亡土量とEI値との関係

にあることがわかった。またそれぞれの関係における相関係数は、北斜面において、 R_{10} で0.787^{**}、 R_{30} で0.834^{**}、 R_{60} で0.840^{**}、南斜面で R_{10} で0.634^{*}、 R_{30} で0.709^{**}、 R_{60} で0.690^{*}であった。この結果は、前述した種田の結果とは異なるものの、どのピーク降雨強度においても流亡土量との間に強い相関関係のあることが確認でき、60分ピーク降雨強度を用いての流亡土量の推定は可能であることがわかった。

EI値と流亡土量の関係においても、EI値が大きくなると流亡土量も増加する傾向にあることがわかった。そして両者の相関係数は北斜面の EI_{10} で0.762^{**}、 EI_{30} で0.763^{**}、 EI_{60} で0.756^{**}、南斜面では EI_{10} で0.734^{**}、 EI_{30} で0.746^{**}、 EI_{60} で0.725^{**}となった。

したがって、ピーク降雨強度と流亡土量との関係は北斜面では I_{60} 、南斜面では I_{30} との相関が高く、EI値と流亡土量との関係は北斜面、南斜面ともに EI_{30} との相関が最も高いことを示した。しかし、これらの相関係数の差はその有意性から考えても小さいため、60分ピーク降雨強度を用いて降雨係数の推定を行うことは有意であると考えられる。

次に降雨特性のうち最も簡易な指標である降水量についても、流亡土量との相関性を解析し、その関係を図-5-13に示す。これより、北斜面と南斜面における降水量と流亡土量の明確な相関は得られず、やはり降水量のみによる流亡土量の予測はできないことがわかった。

以上のことより、十勝地方においてもUSLEの降雨係数による流亡土量の予測は可能であると考えられる。また傾斜試験枠における表面流出水量と降雨特性の相関性は非常に高いが、その表面流出水量と流亡土量との関係は明確ではなく、流亡土量はピーク降雨強

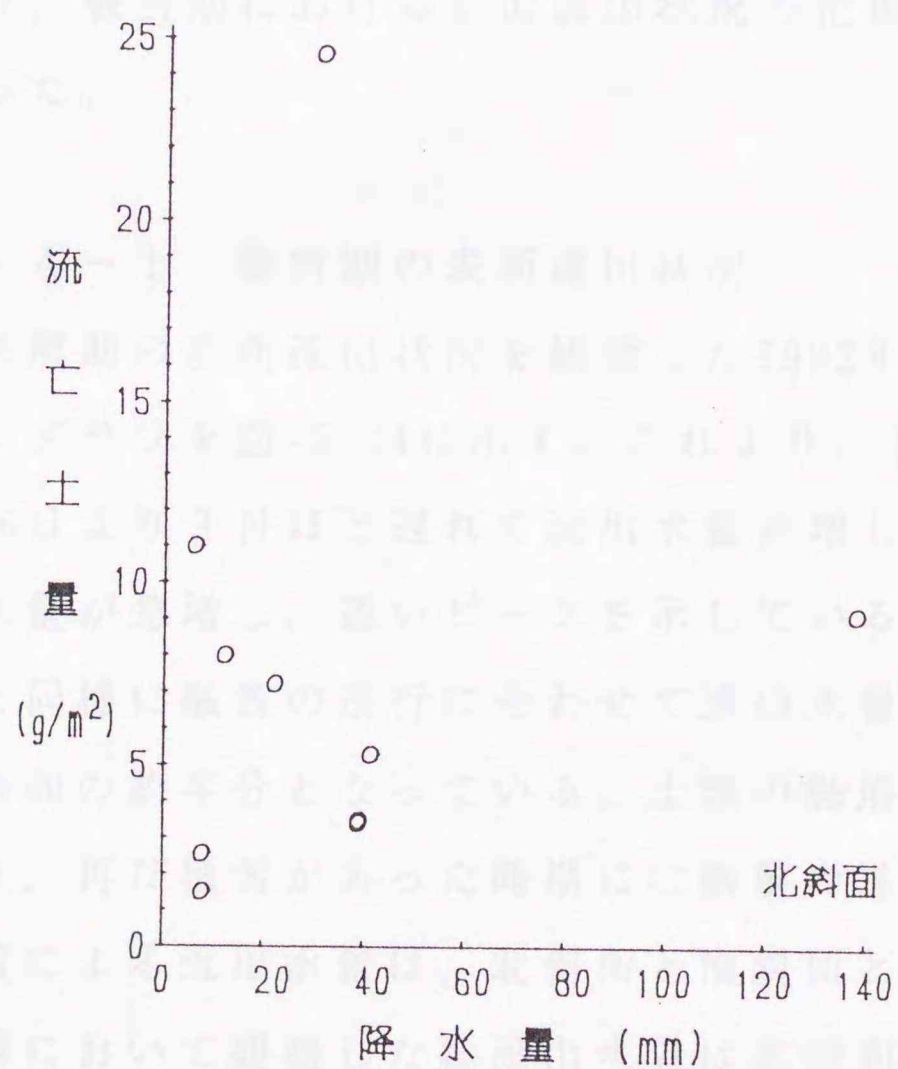
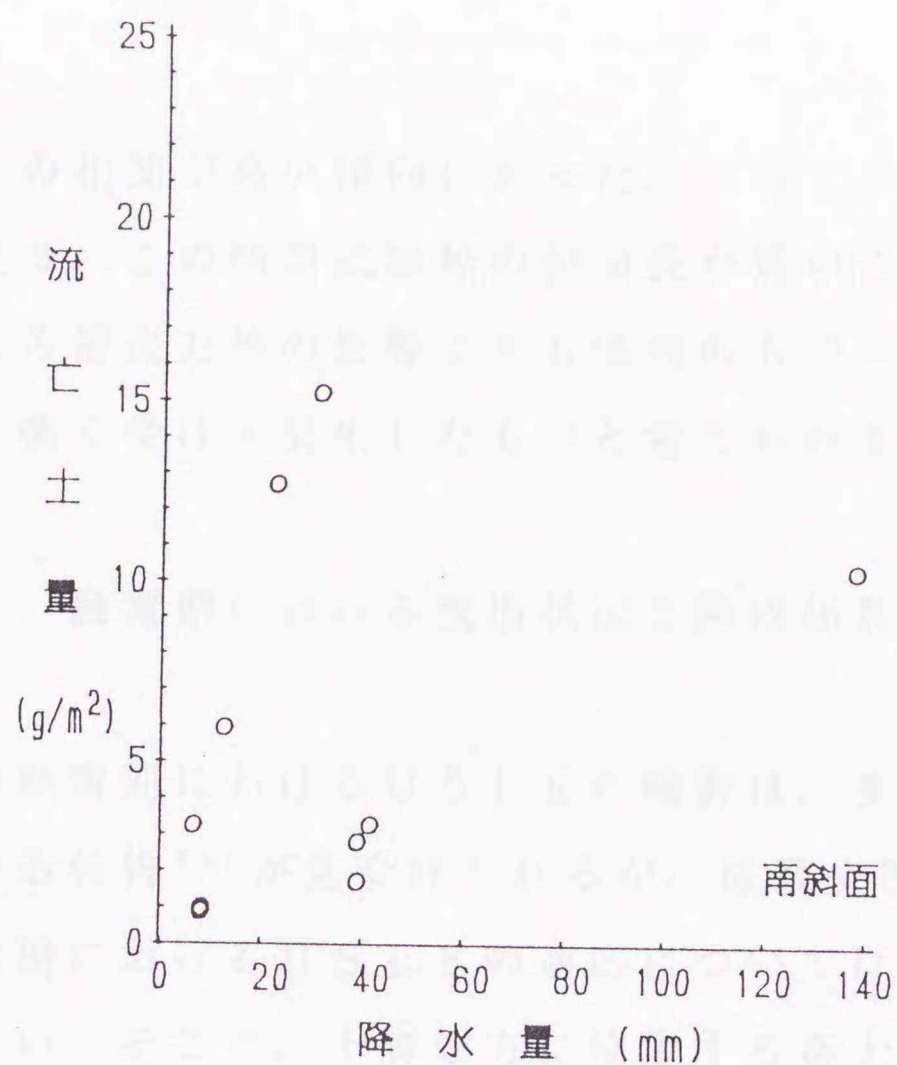


図-5-13 流亡土量と降水量との関係

度、EI値との相関が高い傾向にあった。よって、この試験枠における土壌流亡は、この傾斜試験枠の斜面長が短いことと重なり、表面流出水による掃流力等の影響よりも降雨のもつエネルギー等による影響をより強く受けて発生したものと考えられる。

2-4 融雪期における流出状況と降雨係数

北海道の融雪期におけるUSLEの検討は、多雪地帯である道央地域における報告⁹⁵⁾が見受けられるが、厳寒少雪である十勝地方における融雪期におけるUSLEの適応については、まだその研究が進んでいない。そこで、十勝地方に位置する畜大圃場の傾斜試験枠の実験より、融雪期における表面流出状況の把握と冬期降雨係数の推定を行った。

2-4-1 融雪期の表面流出状況

融雪・融解期の表面流出状況を観測した1992年3月～4月までの流出ハイドログラフを図-5-14に示す。これより、北斜面では融雪が始まった3月6日より3日ほど遅れて流出水量が増し、融雪の進行とともに流出水量が急増し、鋭いピークを示している。一方、南斜面では北斜面と同様に融雪の進行に合わせて流出水量が増加するが、量的には北斜面の約半分となっている。土壌の融解は積雪の終了とともに始まり、再び積雪があった時期には融解の進行は止まっている。

4月の降雪による流出水量は、北斜面と南斜面とも同様な値を示した。融雪期において観測した総流出水量は北斜面では $83,500\text{cm}^3$ 、南斜面では $65,500\text{cm}^3$ であり、その差は $18,000\text{cm}^3$ であった。この差

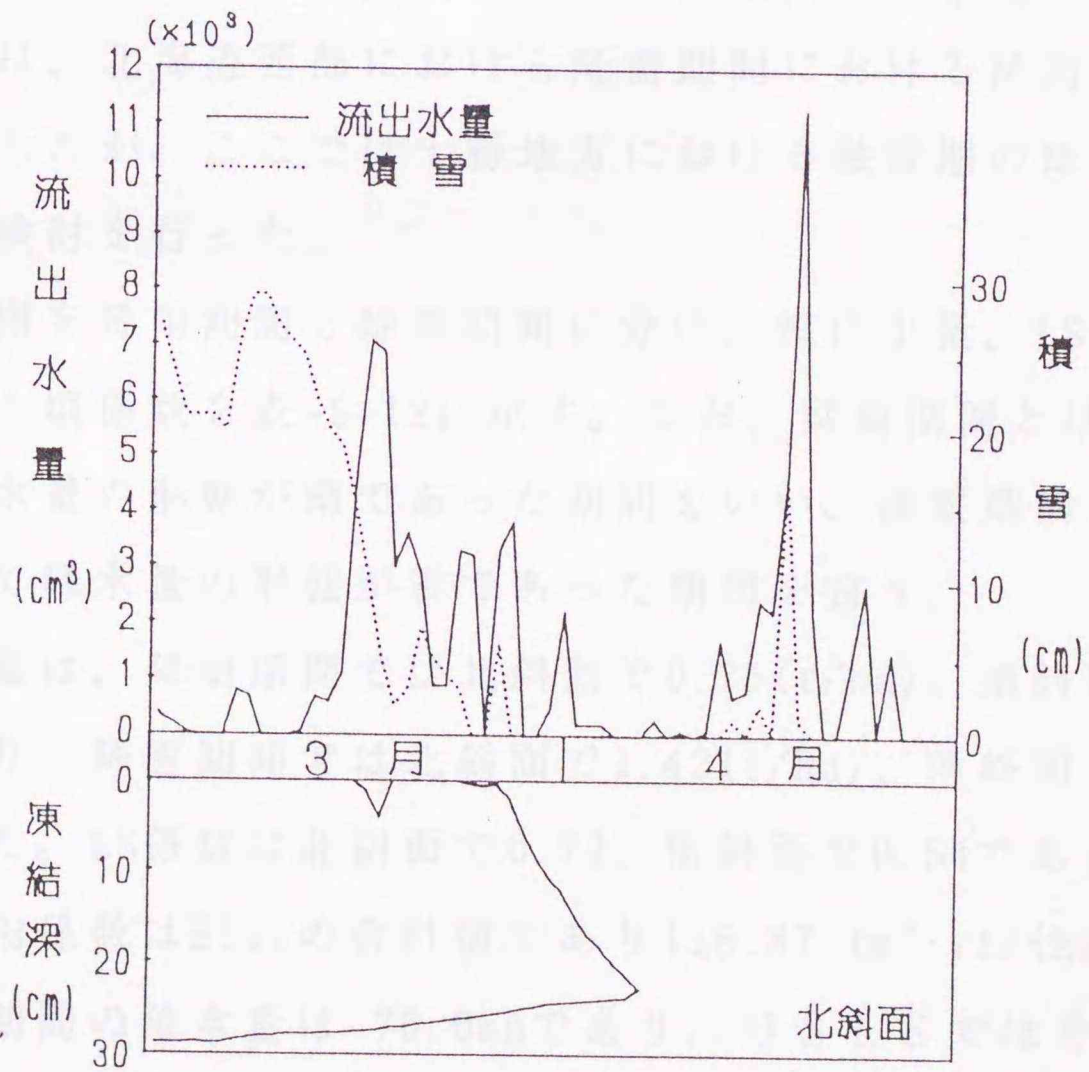
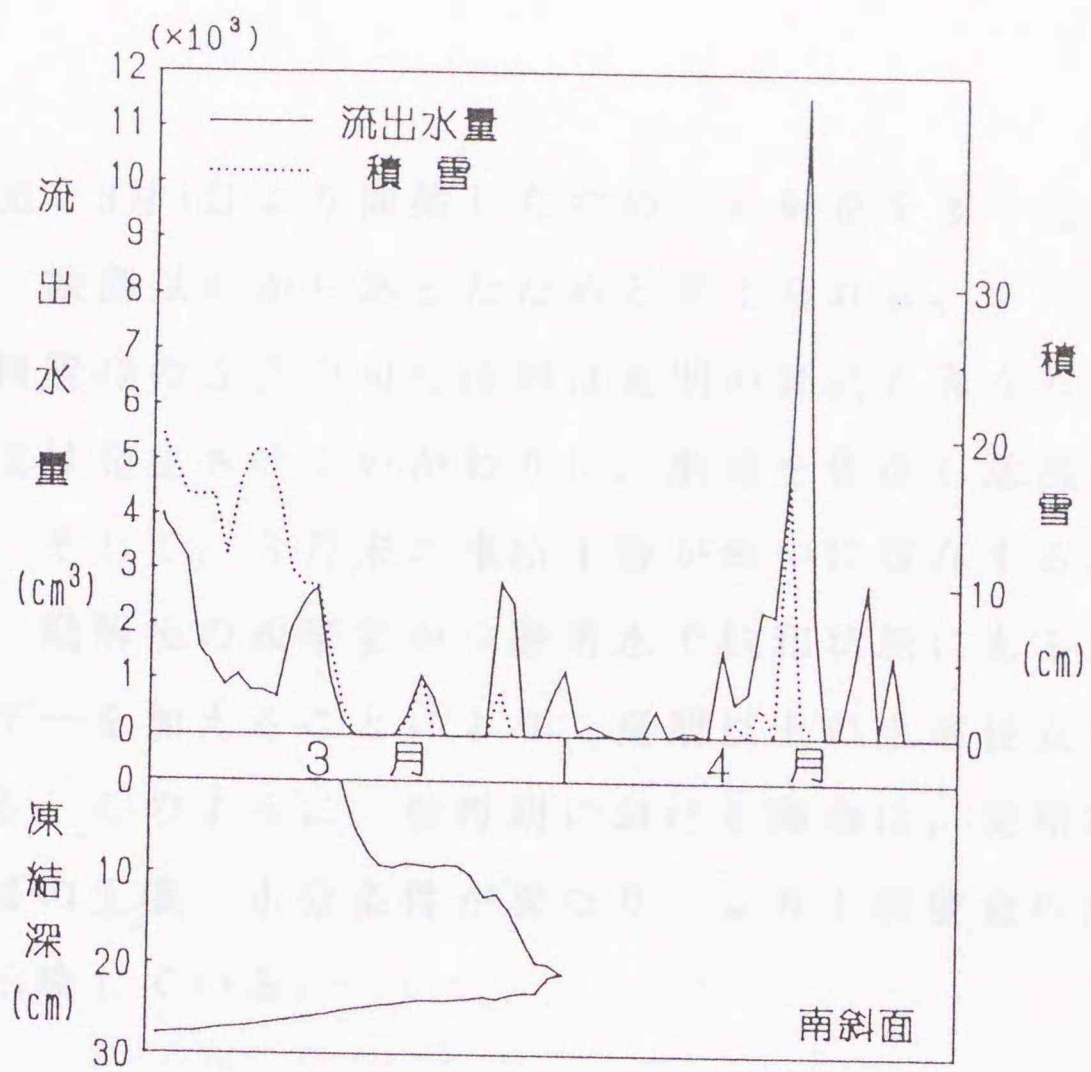


図-5-14 融雪期における土壌融解、消雪および流出の関係

はこの観測を3月1日より開始したため、日射量を多く受ける南斜面の流出が、観測以前からあったためと考えられる。

また、積雪時の3月中旬の降雨は夏期の降雨と異なり、土壌表面の飛散侵食は発生させないかわりに、融雪を促進し急激な流出を発生させた。そして、3月末の凍結土層が地中に残存する期間における降雨は、融解後の緩密度かつ融雪水で飽和状態にある表土層に降雨エネルギーを加えることにより、夏期以上の土壌侵食の危険性を与えている。このように、融雪期における降雨は、夏期期間の降雨とは地表層の土壌・水分条件が異なり、より土壌侵食の危険性が高いことを示唆している。

2-4-2 降雪期間における降雨係数の推定

前節では、北海道西部における降雪期間における降雨係数の換算係数を示したが、ここでは十勝地方における融雪期の降雨係数についてこの検討を行った。

観測期間を降雨期間と降雪期間に分け、流亡土量、LS係数、降雨係数及び土壌係数を表-5-12に示す。なお、降雨期間とは観測期間において降水量の形態が雨であった期間をいい、降雪期間とは観測期間において降水量の形態が雪であった期間を言う。

流亡土量は、降雨期間では北斜面で $0.75(t/ha)$ 、南斜面で $0.57(t/ha)$ であり、降雪期間では北斜面で $1.42(t/ha)$ 、南斜面で $4.42(t/ha)$ であった。LS係数は北斜面で0.72、南斜面で0.54であった。降雨期間の降雨係数は EI_{30} の合計値であり $116.87(m^2 \cdot tf/(ha \cdot hr))$ である。降雪期間の降水量は $76.0mm$ であり、USLEではその降雨量(cm単位)を1.0倍することによって流出係数としているため $7.6(m^2 \cdot$

1/1(1/100))となる。これをLS係数として計算すると、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。これは、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。

降雨期間と降雪期間のLS係数の比較は、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。これは、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。

表-5-12 降雨期間の土壌係数と降雪期間の土壌係数との比較

斜面区分	流出土量 (t/ha)	LS係数 ($m^2 \cdot tf / (ha \cdot hr)$)	降雨係数 ($hr \cdot t / (tf \cdot m^2)$)	土壌係数
(降雨期間)				
北斜面	0.75	0.72	116.87	0.009
南斜面	0.57	0.54	116.87	0.009
(降雪期間)				
北斜面	1.42	0.72	7.60	0.260
南斜面	4.42	0.54	7.60	1.077

以上の結果から、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。これは、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。

以上の結果から、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。これは、降雨期間のLS係数は0.72、降雪期間のLS係数は0.54となる。

tf/(ha·hr))となる。これらの値から土壌係数を求めると降雨期間では北斜面、南斜面ともに0.009となり、降雪期間では北斜面で0.260、南斜面で1.077となった。

降雨期間の土壌係数と降雪期間の土壌係数の比は北斜面で約28倍、南斜面では約120倍とかなりの差があった。そこで、U S L Eに従い土壌係数は一定であると考え、降雨期間の土壌係数から降雪期間の降雨係数を逆算すると、北斜面では $219.14(m^2 \cdot tf/(ha \cdot hr))$ 、南斜面では $909.47(m^2 \cdot tf/(ha \cdot hr))$ となった。また降雪期間における降雨係数の換算係数を求めると北斜面で28.83、南斜面で119.67となった。

本実験で得られた冬期間の降雨係数の換算係数は、長沢⁹⁹⁾や北雨の換算係数と比較して非常に大きな値となった。これは前段でも述べたように長沢、北雨の実験圃場は道央地域に位置し、冬期間の気候特徴としては、多雪地帯であり土壌凍結があまり進行しない地域である。一方、道東地域に位置する十勝地方は厳寒少雪地帯であり、土壌凍結が深く進行する。そのため春先に上部から土壌の融解が始まると、土中に凍結層が残りこの部分が不透水層となり融雪水がこの凍結層の上面の土を飽和させ、土の移動が起こりやすくなり、これが進行すると土壌流亡が発生する。このことから、実験で得られた大きな換算係数は、降水量が同じであっても、土壌凍結が深く進行する地域では土壌凍結の浅い地域よりも融雪期における土壌侵食が大きいことを示している。

以上のように、降雪期間の降雨係数はU S L Eで定義される値よりも大きい値となり、十勝地方のような少雪で寒冷的な地域では融雪期における流亡土量の割合が高くなり、また北斜面よりむしろ南斜面による土壌侵食の発生の可能性が高いと考えられる。

第6章 総括

北海道における農用地造成は傾斜地を含め大規模な改良山成畑工による農地造成や山成工による草地造成である。特に北海道における改良山成畑工は一圃場面積が大きく、土工による切土・盛土の量が多いため圃場が安定せず、降雨による肥沃な耕土の流亡などが起こりやすく、圃場や周辺環境に大きな影響を与える。また草地造成においてはその施工時期の裸地期間や牛の放牧による裸地化による土壌侵食が発生している。また寒冷・少雪の気象条件にある十勝地域では融雪期において、凍結した土壌が完全に融解するまでの期間、凍結層が土中に残存し不透水層となり、融雪水や降雨によって土壌侵食の発生が多く、問題となっている。

これらの農地保全的問題を解決するためには、その原因となる地域の気象、土壌、地形、営農形態等を把握し、この地域に即した農地保全対策の確立が望まれる。本研究では、寒冷、少雪である十勝地域における農地造成地、草地造成地を主な対象として現地調査、人工降雨装置による土壌侵食実験、傾斜枠試験、降雨係数の算出解析等を通して、農用地造成圃場における侵食実態、凍結土壌の侵食メカニズム、侵食予測等について検討したものである。本研究で得られた主な知見をまとめると以下のようになる。

1) 南後志地区における農地造成地の土壌侵食調査結果より、夏季期間の異常降雨による造成圃場面における土壌侵食では、造成圃場に付帯する排水設備にその被害が集中しており、承水路や耕作道路側溝の断面、機能、配置そして圃場面の保全工として播種されて

いる牧草の、播種機械および播種方向等を慎重に検討する必要があることがわかった。

2) 南後志地区、稲穂地区両地区の融雪期における土壌侵食調査結果より、融雪期間における土壌侵食は、造成農地の圃場面よりもそれに付帯する法面において侵食被害が多く発生していることが明らかとなった。

この特徴としては、(1)冬期間の積雪が承水路断面を覆うことにより融雪期の排水を十分に流下させる断面確保ができず、承水路を越流した排水が法面にリル侵食を発生させている。(2)法面土壌が冬期間凍結し、これが融凍期になると土壌凍結層が法面中に残存する期間、浸透水がこの凍結土層を疑似河床として流下するため、表層すべり破壊や法面中腹において浸透破壊を発生させている。(3)造成農地地区内の取付道路の排水処理工、承水路の不足など土壌侵食防止工法の不備によって、本来は排水路系を通り地区外に排出される表面流出水が法面に流出することによってリル侵食を発生させている等である。

また法面方向による土壌侵食の危険性は、北向き法面が南向き法面と比較して融解時期、法面土層中に凍結層の残存する期間が長く、かつ積雪も日陰のため多く残存し、その危険性の高いことが明らかとなった。

3) 新内地区における造成草地の土壌侵食調査結果により、草地造成が行われる地域は、山間部に位置することが多く、平野部と比較して降水量・降雨日数共に多いことがわかり、草地造成過程におけ

る雨水による土壌侵食の危険性が高いことが明らかとなった。造成工事の行われた年の降雨が造成後の土壌侵食にも非常に大きな影響を与えていることもわかった。そして、造成草地の土壌侵食は谷地形や不適切な廃根線の配置による雨水の集中する場所で発生することが明らかとなった。また、牛群の歩行によって草地表面が剝離され土壌侵食を起こす形態を蹄侵食と定義したが、この侵食は牛群の行動形態より、傾斜角度15～25度の斜面において著しく発生していることがわかった。

4) 人工降雨装置を使用した表層凍結斜面、表層融解斜面の土壌侵食実験結果より、傾斜農地における表層の土壌凍結層は難透水層となり、雨水の浸入が遮られ、土壌表面での掃流力が増すこととなり、未凍結斜面と比較して土壌侵食の危険性が高くなることが明らかとなった。また、表層融解斜面の流亡土量に関しては、未凍結斜面の流亡土量と比較してあまり差はなく、実験前の予想と異なった。これは、凍結融解を経験した試料土表面が不均一となり、散水による打撃エネルギーが拡散されるためと考えられる。その結果、飛散量が減少すると思われるが、その他、土壌の水分状態、流下水の掃流力など複雑に作用するため、明確な根拠は見いだせなかった。

5) 人工降雨装置を使用した凍結融解繰り返し斜面の土壌侵食実験の結果より、凍結融解繰り返し斜面では、どの勾配においても凍結融解の繰り返し回数が増加するとともに流亡土量の増加が見られた。また勾配が急になるほどこの傾向が強くなることが明らかとなった。また、凍結融解の繰り返し回数が土壌侵食に与える影響とし

ては、未凍結試料と比較して凍結融解を繰り返した斜面の流亡土量が増加することが明らかとなった。凍結融解の繰り返し回数において比較すると、繰り返し数20回までは流亡土量に差がでるものの20回と30回においてはどの勾配においても顕著な差はなく、この実験においては凍結融解の繰り返し数が流亡土量に影響を与えるのは20回程度までであることがわかった。

この結果は、十勝地方の融雪期の特徴である土壌の凍結融解の繰り返しが、土壌の構造を易侵食性の構造とすることを示唆しており、加えて融雪水による余剰水の流出が重なれば、春期は降雨量が少ないものの夏期以上の侵食の危険性にさらされていることが検証された。

6) 寒冷多雪地帯である雨竜町の農地造成圃場に傾斜侵食観測枠を設置し土壌侵食実験を行った結果、U S L Eの傾斜係数についてはU S L E本来の傾斜係数と一致する試験区もあったが違いを見せた試験区が多く、今後の圃場試験の追跡が必要であろう。土壌係数については $0.148\text{hr}\cdot\text{t}/(\text{tf}\cdot\text{m}^2)$ の値を得た。この値は、土質による土壌係数換算式から推測した土壌係数 $0.286\text{hr}\cdot\text{t}/(\text{tf}\cdot\text{m}^2)$ とも近似しておりこの係数を使用できるものと考ええる。しかし、実際の使用に当たっては農地保全上安全側を考え推定値の値 $0.286\text{hr}\cdot\text{t}/(\text{tf}\cdot\text{m}^2)$ を使用すべきであろう。次に降雨係数であるが降雪の影響を考え、降雨期間と降雪期間に分け算出した。その結果、降雨期間の降雨係数は $170\text{m}^2\cdot\text{tf}/(\text{ha}\cdot\text{hr})$ 、降雪期間の降雨係数は $10\text{m}^2\cdot\text{tf}/(\text{ha}\cdot\text{hr})$ となり、年間降雨係数は $180\text{m}^2\cdot\text{tf}/(\text{ha}\cdot\text{hr})$ となった。また降雪期間の降雨換算係数は0.13となった。

7) 帯広畜産大学内実験圃場に南向き・北向き傾斜侵食観測枠を設置し土壌侵食実験を行った結果、試験枠における流亡土量とピーク降雨強度の間には北斜面の相関係数 $r=0.787^{**} \sim 0.840^{**}$ 、南斜面の相関係数 $r=0.634^{*} \sim 0.709^{*}$ と高い相関を示した。また、流亡土量とEI値の間にも北斜面の相関係数 $r=0.762^{**} \sim 0.763^{**}$ 、南斜面の相関係数 $r=0.725^{*} \sim 0.746^{**}$ と高い相関を示した。これより、十勝地域においてUSLEの降雨係数によって土壌流亡を予測することは可能であると思われる。また積雪期間における降雨係数の換算係数を求めると、北斜面で28.83、南斜面で119.67となり、北海道西部の積雪寒冷地域の降雨係数の換算係数0.13~0.17、0.21~0.37と比べて大きいものとなった。これより十勝勝地域のような寒冷少雪であり、土壌凍結の深い地域の融雪期における土壌侵食の危険性が非常に高いことが明らかとなった。

これらは寒冷少雪地帯である十勝地域の農地保全に関する基礎的な研究であり、さらには、本研究で得られた結果を用いて現地での観測結果との比較検討が必要となろう。

このような過程を通して、農地からの土壌侵食量の予測がより精度の高いものとなり、農地保全対策としての農業構造物の設計・施工、維持管理等に資するものと考ええる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、帯広畜産大学在職中から現在まで御指導、御校閲を賜りました北海道大学教授 松田 豊博士に深く感謝いたします。また、本論文審査に当たり、懇切な御指導と御助言を賜りました北海道大学教授 梅田 安治博士、北海道大学教授 堀口 郁夫博士、北海道大学教授 新谷 融博士に謝意を表します。そして帯広畜産大学教授 土谷 富士夫博士には常に御教示、御助言を賜りましたことに謝意を表します。

また、調査、実験に当たりご協力いただきました帯広畜産大学畜産環境科学科土地資源利用学講座の多数の学生諸君と前教室事務員 太田 啓子嬢に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 帯広市史編纂委員会: 帯広市史, 帯広市役所, p. 32 (1960)
- 2) 同上 1), p. 769
- 3) 十勝郷土研究会: 新十勝史, 十勝毎日新聞社, p. 149 (1992)
- 4) 十勝大百科事典刊行会編: 十勝大百科事典, 北海道新聞社, p. 371 (1993)
- 5) 北海道十勝支庁振興課: とかちの統計 (平成 2 年度国勢調査の結果), 北海道十勝支庁, p. 3 (1992)
- 6) 気象庁編: 日本気候表 (その 1), 日本気象協会, p. 17, p. 21 (1991)
- 7) 前出 4), p. 3
- 8) 石川政幸・鈴木孝雄: 林業試験場北海道年報, pp. 238-241 (1964)
- 9) 北海道開発局農業水産部農業計画課: 帯広地域の土壌 (農牧地および農牧適地), 北海道開発局, p. 17 (1988)
- 10) 前出 4), p. 235
- 11) L. D. Baver, SOIL PHYSICS (Modern Asia Edition), JOHN WILEY & SONS, INC. pp. 429-431 (1960)
- 12) H. H. Bennett: Soil Conservation, MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc., pp. 95-116 (1939)
- 13) Hudson, N.: Soil conservation, Batsford Academic and Educational Ltd., pp. 38-39 (1981)
- 14) 藤原輝男: 農地の保全と防災 (その 2) - 水食 -, 農業土木学会誌 53 (7), pp. 617-622 (1985)
- 15) Zimmg, A. W.: Degree and Length of Land Slope as it Affects Soil Loss in Runoff, Agricultural engineering 21, pp. 59-64 (1

940)

- 16) Smith, D. D. : Interpretation of Soil Conservation Data for Field Use, Agricultural Engineering 22, pp. 173-175 (1941)
- 17) Masgrave, G. W. : The Quantitative Evaluation of Factor in Water Erosion, a First Approximation., Journal of soil and water conservation 2(3), pp. 133-138 (1947)
- 18) Browning, G. M., Parish, C. L. and Glass, J. A. : A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa, Soil Science Society of America Proceedings 23, pp. 246-249 (1947)
- 19) Lloyd, C. H. and Eley, G. W. : Graphical solution of probable soil loss formula for Northeastern Region, Journal of Soil and Water Conservation 7, pp. 189-191 (1952)
- 20) USDA: Predicting Rainfall Erosion Losses (A Guide to Conservation Planning), Science and Education Administration, p. 2 (1978)
- 21) Meyer, L. D. and McCune, D. L. : Rainfall simulator for runoff plots, Agricultural Engineering 39, pp. 644-648 (1958)
- 22) J. P. Wilson: Soil Erosion from Agricultural Land in The Lake Simcoe-Couchiching Basin, 1800-1981, Canadian Journal of Soil Science 69, pp. 137-151 (1989)
- 23) L. J. Lane, K. G. Renard, G. R. Foster and J. M. Laflen: Development and Application of Modern Soil Erosion Prediction Technology, Australian Journal Soil Research 30, pp. 893-912 (1992)

- 24) D.K. McCool, G.R. Foster, C.K. Mutchler and L.D. Meyer: Revised Slope length Factor for the Universal Soil Loss Equation, Transactions of the ASAE 32(5), 1571-1576 (1989)
- 25) R.G. Williams and J.M. Sheridan: Effect of Rainfall Measurement Time and Depth Resolution on EI Calculation, Transactions of the ASAE 34(2), 402-406 (1991)
- 26) S.C. Finkner, M.A. Nearing, G.R. Foster and J.E. Gilley: A Simplified Equation for Modeling Sediment Transport Capacity, Transactions of the ASAE 32(5), 1545-1550 (1989)
- 27) 種田行男: 降雨の性質と土壌侵食との関係について, 農業土木研究 18(2), pp. 1-6 (1950)
- 28) 三原義秋: 雨滴と土壌侵食, 農業技術研究所報告 A1 (1951)
- 29) 種田行男: 帯状作付の土壌侵食に及ぼす影響について, 農業土木研究 19(2), pp. 113-118 (1951)
- 30) 前川忠夫・瀬川晃三: 傾斜耕地の土壌保全に関する2, 3の試験, 農業土木研究 21(1), pp. 37-45 (1953)
- 31) 金子良: 土壌侵食の統計的考察, 農業土木研究 26(2), pp. 57-63 (1958)
- 32) 種田行男: 土壌侵食の機構に関する研究(I), 農業土木研究別冊 5, pp. 24-30 (1963)
- 33) 河野洋・小谷佳人・内田勝利・中本崇: 水滴による土壌面破壊に関する一実験, 農業土木学会誌 39(4), pp. 250-251 (1971)
- 34) 松田松二・中井逸文・秋永俊明: 雨滴径の測定装置とその検定 - 斜面保護に関する研究(I) -, 農業土木学会論文集 39, pp. 8-13 (1972)

- 35) 種田行男・富田正彦:雨滴のエネルギーからみた土壌侵食と降雨強度の関係－土壌侵食の機構に関する研究(II)－, 農業土木学会論文集 40, pp. 23-26 (1972)
- 36) 種田行男:農地の土壌侵食量の予測, 農業土木学会論文集 56, pp. 8-12 (1975)
- 37) 種田行男:降雨侵食の可能性を示す降雨係数の算定, 農業土木学会論文集 65, pp. 15-20 (1976)
- 38) 福桜盛一・今尾昭夫・長堀金造・高橋強:侵食機構解明のための人工降雨の基礎的試験－傾斜地における開発農地の侵食機構と保全に関する実証的研究(I)－, 農業土木学会論文集 76, pp. 38-44 (1978)
- 39) 高木東・矢橋晨吾・中野政詩:ガリ網の規則性と発達－斜面の侵食に関する研究(II)－, 農業土木学会論文集 77, pp. 47-52 (1978)
- 40) 松本康夫・丸山利輔・長堀金造・高橋強・今尾昭夫・福桜盛一:ガリ発達の過程と流亡土砂量－傾斜地における開発農地の侵食機構と保全に関する実証的研究(II)－, 農業土木学会論文集 77, pp. 53-60 (1978)
- 41) 福桜盛一・今尾昭夫・長堀金造・高橋強・松本康夫:ウネ立てによる侵食現象の差異－傾斜地における開発農地の侵食機構と保全に関する実証的研究(III)－, 農業土木学会論文集 85, pp. 11-18 (1980)
- 42) 松本康夫・五十嵐恒:開畑に伴うガリ侵食の発生形態について, 農業土木学会論文集 85, pp. 19-27 (1980)
- 43) 高木東・矢橋晨吾・中野政詩:ガリ縦横断形特性とガリ網の発達－斜面の侵食に関する研究(III)－, 農業土木学会論文集 90, pp.

17-25(1980)

- 44) 日下達朗・田中宏平・藤田則之・四ヶ所四男美:粘着性のある土壌の剥離・移動限界について—雨水流による土壌の侵食特性(I)—, 農業土木学会論文集 90, pp.9-16(1980)
- 45) 藤川武信・内田勝利:土性と飛散侵食について—土の初期水食に関する土質理工学的研究(I)—, 農業土木学会論文集 90, pp.1-8(1980)
- 46) 藤川武信・内田勝利:乱した土の初期水食の判定要因—土の初期水食に関する土質理工学的研究(II)—, 農業土木学会論文集 91, pp.1-7(1981)
- 47) 藤川武信・内田勝利:乱した土の初期水食の判定要因—土の初期水食に関する土質理工学的研究(II)—, 農業土木学会論文集 92, pp.1-7(1981)
- 48) 日下達朗・田中宏平・四ヶ所四男美:表面流亡量の推算について—雨水流による土壌の侵食特性(III)—, 農業土木学会論文集 94, pp.1-6(1981)
- 49) 高木東・中野政詩:農地斜面のガリ網の形成・発達に関する確率的シミュレーション, 農業土木学会論文集 98, pp.22-30(1982)
- 50) 南信弘・小椋正澄・今尾昭夫:裸地斜面畑土壌流亡量の層別重回帰分析, 農業土木学会論文集 99, pp.1-7(1982)
- 51) 福桜盛一, 水滴の衝撃に対する硬さの影響について—水滴の衝撃と土壌飛散に関する基礎的研究(II)—, 農業土木学会論文集 102, pp.7-14(1982)
- 52) Kenzo Hosoyamada: On Soil Erosion by Rainfall at Bare Sloping Field Composed of Kuroboku Soil—Studies on the

- estimation of erosive soil loss(I)－, 農業土木学会論文集
91, pp. 8-14 (1981)
- 53) 佐藤裕一: 土壌の凍結融解と侵食について, 農業土木学会論文集
44, pp. 28-33 (1973)
- 54) 長沢徹明・梅田安治: 土の耐水食性に及ぼす凍結融解作用の影響
－凍結・融解土の特性に関する研究(V)－, 農業土木学会論文集
94, pp. 48-54 (1981)
- 55) 長沢徹明・梅田安治: 山林傾斜地における草地造成と保全－傾斜
草地に関する農業土木的研究(Ⅱ)－北海道大学農学部邦文紀要
15(2), pp. 159-168 (1987)
- 56) 沢田則彦・小野寺康浩・廣田達雄: 改良山成り畑における融雪と
心土破碎の排水効果, 農業土木学会大会講演要旨集, pp. 374-375
(1988)
- 57) 長沢徹明: 積雪寒冷地域の農地保全, 農地保全の研究 11, pp. 33-5
1 (1990)
- 58) 辻修: 北海道における U S L E の適応について, 農地保全の研究
12, pp. 78-96
- 59) 前出 19), p. 4
- 60) 種田行男: 農地保全工学, 農業技術出版社, pp. 90-96 (1971)
- 61) 同上 58), pp. 96-98
- 62) 松田豊: 改良山成工における農地保全問題, 農地開発増刊号北海道
土木工業新聞社, PP. 100-103 (1984)
- 63) 堤聡・小林裕志・鈴木創三・杉浦俊弘・高木東・佐藤幸一・江崎
要: 土砂流亡防止を考慮した採草地の設計施工例－改良山成畑工
に関する研究(Ⅲ)－, 農業土木学会大会講演会講演要旨集, PP. 33

- 2-333(1984)
- 64) 佐藤芳久・和高喜一・穴沢健夫・持館孝悦・坂下幸男:排水路、
防災施設工、法面保護工等の施工と問題点－福島県三春南部地区
の農地開発事業(Ⅲ)－,農業土木学会誌 54(5),PP.407-412(1986)
- 65) 嶋栄吉・山路永司・小出進:農地保全から見た畝・承水路の配置
農業土木学会大会講演会講演要旨集,PP.498-499(1986)
- 66) 秀島好昭・沢田則彦・小野寺康浩:北海道における改良山成畑工
の防災に関する研究,農業土木学会大会講演会講演要旨集,PP.45
0-451(1987)
- 67) 長沢徹明・梅田安治・水谷環:積雪寒冷地域の傾斜農地における
融凍期の侵食問題,北海道大学農学部邦文紀要 15(3),pp.282-29
2(1987)
- 68) 北海道土地改良設計技術協会編:北海道における農地造成と保全,
北海道土地改良設計技術協会,PP.84-86(1986)
- 69) 土谷富士夫:十勝地方における火山灰土壌の凍結、凍上が農地に
及ぼす影響に関する研究,須田製版,PP.100-102(1986)
- 70) 農林水産省構造改善局:土地改良事業計画設計基準(計画・農地保
全),農業土木学会,P.13(1979)
- 71) 同上70),P.12
- 72) 辻修・松田豊・土谷富士夫:農地造成における土壌侵食に関する
研究(Ⅰ)－造成圃場法面が流出水量に与える影響－農業土木学会,
北海道支部講演要旨集,PP.76-77(1991)
- 73) 北海道土木部河川課監修:北海道の大雨資料第7編Ⅱ(確立雨量
編),北海道土木協会,pp.5-8(1986)
- 74) 前出73),P.160

- 75) 前出 70), P. 14
- 76) Arold, G.W. and Dudzinsky, M.L.: Ethology of free-ranging domestic animals, *Developments in Animal and Veterinary Sciences*. 2., Elsevier Sci. Pub. Com., 68-84 (1978)
- 77) 長沢徹明・片岡隆四・梅田安治・桜田純司: 草地開発による土壌侵食の実験的調査, 農業土木学会北海道支部講演要旨集, PP. 13-16 (1977)
- 78) 石田良作・西村格・須山哲夫: 草地の造成と開発計画に関する研究 (V. 傾斜草地における土壌侵食の 2・3 の問題点), 草地試験場研究報告 17, pp. 1-10 (1980)
- 79) Bates, G.H.: The Vegetation of Footpaths, Sidewalks, Cart-tracks and Gateways, *Jou. Ecol.* 23, pp. 469-487 (1935)
- 80) 北海道土木部河川課監修: 雨量・水位・流量年表, 北海道土木協会, (1976-1985)
- 81) 石橋豊・内藤利貞・田邊邦美・林広宣: 農業水文, コロナ社, pp. 35-36 (1967)
- 82) 札幌管区気象台編 北海道の気象第 20 巻～第 29 巻, 日本気象協会北海道本部, (1976-1985)
- 83) 前出 20), pp. 44-48
- 84) 辻修・松田豊・土谷富士夫: 造成草地の土壌侵食, 帯広畜産大学学術研究報告 15(2), pp. 137-143 (1987)
- 85) 農林水産省畜産局: 草地開発事業計画設計基準, 日本草地協会, p. 34 (1988)
- 86) 花田吉朗: 鳴尾放牧地に於ける放馬の移動習性に関する調査, 農林省山林尾施業参考資料 5, pp. 83-107 (1942)

- 87) 及川棟雄・嶋村国俊・牛山正昭・福山正隆, 傾斜地における家畜行動と草地管理 (I. 牛道の区分と特性), 草地試験場研究報告 18, pp. 105-126 (1981)
- 88) 松田豊・今野繁: 凍結土壌の侵食に与える影響, 農業土木学会北海道支部講演要旨集, PP. 19-20 (1982)
- 89) 今野繁: 傾斜畑地の土壌侵食について, 帯広畜産大学修士論文, p. 34 (1983)
- 90) 長沢徹明・梅田安治: 凍結融解条件による土の構造変化への影響 - 凍結・融解土の特性に関する研究 (VII) -, 農業土木学会論文集 123, pp. 49-55 (1986)
- 91) 日本気象協会北海道本部編: 北海道の気候, pp. 186-187 (1991)
- 92) 西村拓・中野政詩・宮崎毅: 室内人工降雨装置による土壌クラストの形成との関連性, 農業土木学会論文集 146, pp. 101-107 (1990)
- 93) 前出 20), pp. 10-11
- 94) 前出 20), pp. 7-8
- 95) 長沢徹明・梅田安治・大西峰隆: 降雨係数の推定に関する雨水と融雪水の影響 - 北海道における土壌侵食抑制に関する研究 (Ⅲ) -, 農業土木学会論文集 167, pp. 97-102 (1993)
- 96) K.R. Cooley, C.L. Hanson and C.W. Johnson: Precipitation Erosivity Index Estimates in Cold Climates, Transactions of the ASAE 31(5), pp. 1445-1450 (1988)
- 97) R. Gordon and C.A. Madramootoo: Snowmelt Adjusted USLE Erosivity Estimates for The Maritime Provinces of Canada, Canadian Agricultural Engineering 31(2), pp. 95-99 (1989)
- 98) 札幌管区気象台監修: 北海道の気象第37巻特別号, 日本気象協会北

海道本部, p. 4 (1993)

