

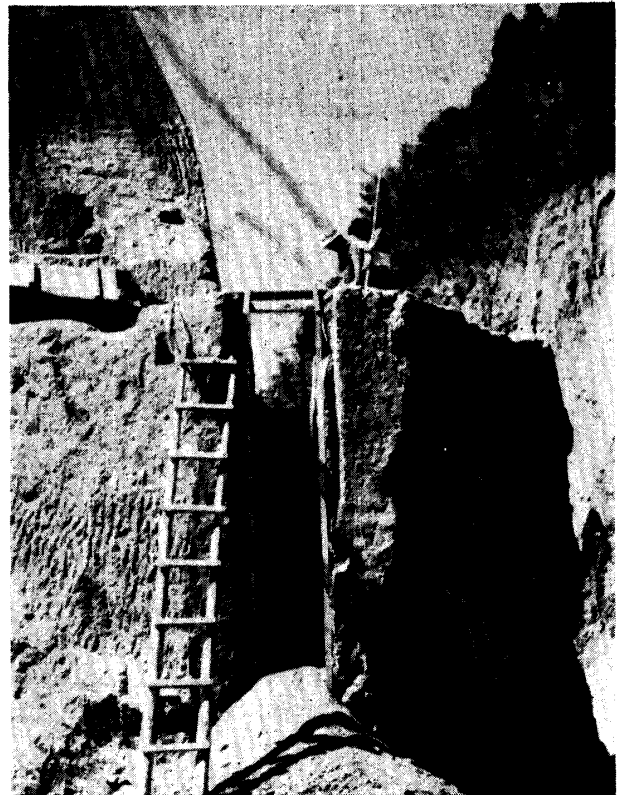
シラス地帯研究（第3報） 地面の傾斜と侵蝕の関係

西 力 造 ・ 木 村 大 造

南九州地方における特殊土壌の災害の主因が、この方面一帯に亘るシラス層の存在に基くことは何人も異論のない所であるが、同時にこのシラス層が案外に堅固で、殆ど垂直に切取つたままよく安定を保つことも亦一般に認めらるる所として、既に本研究第1報^(註1)に述べた通りである。然らばこの直角又はこれに類する急傾斜が安定で、土の休止角又はこれに類する緩傾斜が却て不安定であるという従来他種の土について認められた原則とは全く反対な基準によつてシラスに関する工法を取扱つてよいかという、今日まで未だ実験的に証明せられたものもなければ、理論的に検討せられたことも聞かない。よつて著者等はこれ等について次の如き実験を試みた。岩川における実験については同事業所主任平島直材氏の好意ある協力に負う所大であつた。ここに厚く感謝の意を表する。

I. 侵蝕と傾斜の関係についての実験

昭和 26 年 2 月鹿児島県肝属郡牛根村嶽野鹿児島大学 農学部 附属演習林において、又同年 10 月 同県 嶺南郡 岩川町 笠木原馬渡迫、熊本営林局国営砂防工事施行地において、シラス層の自然状態のままの所に写真の如き幅 50 cm 長さ 4~5 m の素堀の人工水路を設け（写真参照）、ここに前者にては流量 $Q=0.015 \text{ m}^3/\text{sec}$. 後者にては $Q=0.007 \text{ m}^3/\text{sec}$. を上流より木製の樋によつて導来して、このシラス水路に注入する。この場合その水路底面の勾配（シラス地盤面の水平線となす角 $=\theta$ ）を $3^\circ, 6^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ の 9 種類に順次つくり替えて一定時間内にその表層が水によつて侵蝕せらるる容積を測定した、その結果を示すと次の如くである。



侵 蝕 試 験 水 路
(岩川町馬渡谷)

註 1. 鹿児島大学農学部学術報告 No. 1 (1952)

第1表 (A) 肝属郡牛根村演習林内
(赤シラス層)

勾 配	侵 蝕 土 積 (m ³)		
	20 分後	40 分後	60 分後
3°	0.058	0.126	0.144
6°	0.150	0.216	0.246
10°	0.201	0.262	0.329
20°	0.226	0.270	0.348
30°	0.253	*0.374	0.392
45°	*0.258	0.342	*0.440
60°	0.072	0.130	0.212
80°	0.016	0.038	0.058
90°	0.006	0.029	0.044

第2表 (B) 岩川町国営砂防
施工地 (白シラス層)

勾 配	十分後の侵蝕土積 (m ³)
3°	0.158
6°	0.160
10°	0.234
20°	0.366
30°	0.397
45°	*0.472
60°	0.376
80°	0.148
90°	0.151

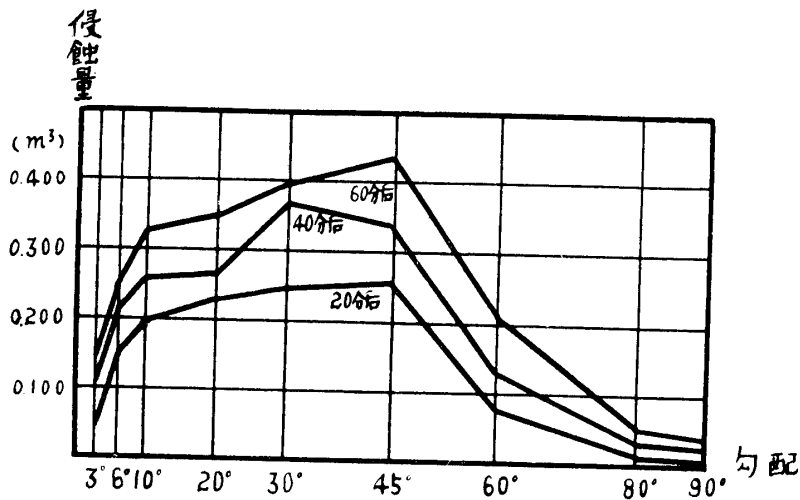


Fig. 1

牛根村岳野鹿兒島大学演習林

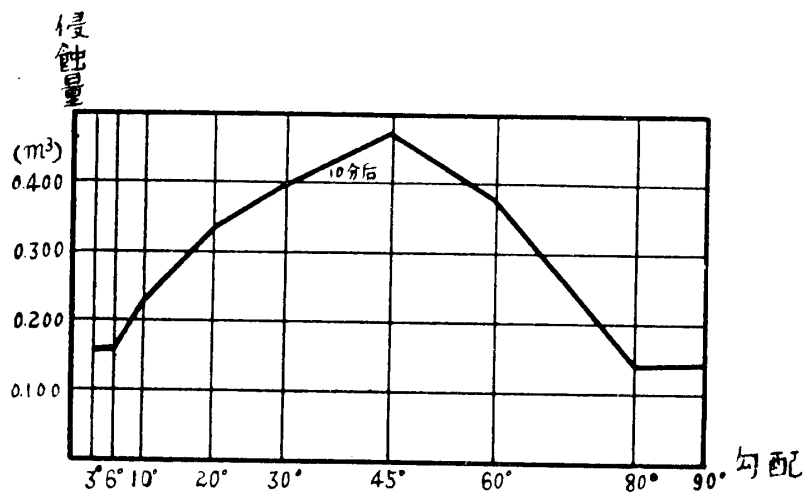


Fig. 2

岩川町笠木原国営砂防地

時間的経過においては最初の 10~20 分間が最も侵蝕甚しく、次ぎの 20 分、第3の 20 分は多少差異はあるが略同し程度に進行した。

地面勾配と侵蝕の関係は、第1図に示せる如く 3°~10°までは傾斜の急となるに伴つて、侵蝕も急激に増大し、更に急となるに従つて一定時間当り侵蝕量も増大し 45°に至りて最大となり、これより更に急となれば却て急に侵蝕量は減少し 80°~90°において最小となる。

II. 供試シラスの理学的性質及び粒度

実験施行箇所のシラスの施工前と施工後における理学的性質並に粒度分析を行つた結果を示すと次表の如くである。

第3表 実験前後におけるシラスの理学的性質

実 験 箇 所	土 質	試験の 前後別	含水比 %	見かけ 比 重	真比重	間隙比	飽和度 %
A	鹿大附属演習林	赤シラス {	前	27.8	1.34	2.51	50.1
			後	43.2	1.46	2.51	61.3
B	岩川町国営砂防地	白シラス {	前	26.4	1.31	2.38	48.3
			後	34.2	1.45	2.38	67.7

第4表 粒 度 分 析 表

	土 質	試験の 前後	コロイド <0.001 mm	粘 土 0.001~ 0.01 mm	微 砂 0.01~ 0.05 mm	細 砂 0.05~ 0.25 mm	粗 砂 0.25~ 2.00 mm	礫 2.00< mm
A	演 習 林	赤シラス {	前	2.96	6.69	14.45	41.61	22.57
			後	1.66	6.45	13.47	33.83	19.87
B	国営砂防地	白シラス {	前	1.89	12.20	12.90	36.07	28.72
			後	1.02	8.47	12.57	26.20	26.67

前掲諸表を見ると

1. 流水実験後において含水量を増加することは云うをまたない。
2. 従て単位容積当り重量（見かけ比重）が増加する。
3. 粒度の微細なる粘土コロイド等を喪失しその割合を減ずる。
4. その反対に礫又は粗砂以上の粗大なる粒子の割合が増加する。
5. それらの結果から間隙率が減少する。

更に注目すべきことは (A) 肝属郡牛根村演習林のシラスと、(B) 岩川町国営砂防地のシラスとを比較する時に、侵蝕の速度が土によつて著しく相違することである。即ち (B) は (A) に比し流量は約 $\frac{1}{2}$ なるに拘らず $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$ の時間ではほぼ同一量の侵蝕をうくることである。実験誤差の影響ありととしても、あまりに大なる差であり、シラスの個別差によりて侵蝕せらるる難易に甚しき差異あるは否むことはできない。而してかかる差異がシラスの構造の差か組織の差によるか、或は更に他に何らかの原因あるか、容易に判定し難い。本実験の場合にては、その物理的性質においても又組織においても甚しく差異ないものの如く、唯粒度においてコロイド量がやや目立つた差異ある如くあるけれど、この僅少の実験例からして直に判断するは早計たるを免れない。しかし等しくシラスというてもその組織的構造的に相当大幅な個別差があることは注目すべきことである。

III. 侵 蝕 現 象 の 理 論

前に述べし如く実験の結果は、シラス表面の傾斜が水平から初まつて漸次急となるに伴い侵蝕も漸増し 45° 前後にて最大となり、これより更に急となると侵蝕は漸減して 80°~90° において

最小となる。かかる結果は果して理論的にも是認すべき根拠があるか。この土の現象は種々複雑なる関係があるから簡単に解説するは困難ではあるが以下少しくこれを検討して見よう。侵蝕の問題は結局「水対土」の関係に外ならぬ。水の土に及ぼす関係は2に分けられる。

- (1) 水が直接土を衝撃する外力としての作用即力学的関係。
- (2) 水が土の性質に影響し即ち土の理学的性質を変化せしめ、これにより土の強度又は硬度を弱くし侵蝕を促進する間接的作用の2である。

A. 直接土を動かす力学的関係

この作用は更に3に分けられる。

i) 水の衝撃力 土の表面が全く平滑で凹凸なく、又水流はこの表面と平行に流下するものとすれば、地表面に働く分力もなく、作用は全く起らない筈であるけれど、実際のシラス表面は粒子の大小凹凸があり、又一旦侵蝕が初まつた後は、表面は愈々起伏不同甚しく、流水の方向に垂直なる面=A に対し v なる速力の水の掃流力 (Schleptkraft) = P 及び固体の水中における重量 = W の流れの方向の分力が働く。即ち押流せんとする力は

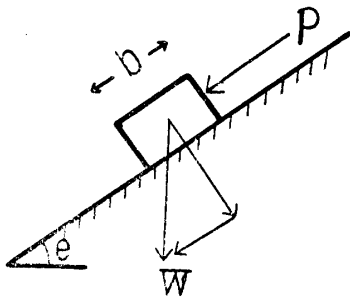


Fig. 3

$$P + W \sin \theta = \zeta A \gamma_0 \frac{v^2}{2g} + W \sin \theta$$

ζ = 固体の形状による係数

$$W = A \cdot b \cdot (\gamma - \gamma_0)$$

γ = 固体の単位容積の重量

γ_0 = 水の " "

b = 固体の流れの方向の長さ

かかる押流せんとする力をうくる時、この外力がこの固体の抵抗力より大ならば、その形状大小により (1) slip (方形又は扁平なるとき) (2) rolling (球状又は円筒状なるとき) 及び (3) 浮游する。slip する場合の抵抗は接触する面の摩擦力 $F = \mu \cdot W$, μ は摩擦係数。rolling する場合は支点 A を基点として $P \cdot r \sin \theta$ なる moment に対し抵抗は、 $W \cdot r \cos \theta$, r = 固体(球)の半径。又固体が極めて微小なる時は、その比重は水より遙に大であつても浮游流送せられる。この場合浮揚力は渦流による上向圧力で $\zeta \gamma_0 \pi r^2 \frac{v^2}{2g}$, r は浮游する球体の半径で式は前述の衝撃力と同形のものであり、これに対する抵抗は固体の降下力即ち重量である。以上何れの場合でも水の力の大きさは水速 v に因り、それが固体の抵抗に勝つときは洗堀 (Kolkung) が起る。一旦洗堀が起るときはこゝに水流の集注が生じ益々侵蝕を大ならしむる。

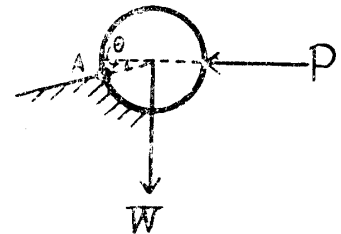


Fig. 4

ii) 水の粘性による作用 水は普通その粘性を無視して取扱われるけれど、相当大なる流速を以て動くときは固体に接触する部分では速度 $v=0$, それよりある僅かな範囲内ではこれに引つられて速度が減少する。その一定範囲 (δ) 所謂境界層 (Grenzschicht) 内では頗る大なる速度

勾配で層の境界外の元来の速度 V に復する。この間の運動量の損失は上層と下層の間の相対速度による摩擦抵抗に打勝つ為に用いられるもので、流体の粘性は大でなくても、この摩擦応力はある大きさを有し地表面を引き流さんとするものである。層に沿うて x 軸をとり、これに直角に y 軸をとれば単位面積当り摩擦応力 $=\tau$ は

$$\tau = \rho \frac{d}{dx} \int_0^{\delta} v(V-v) dy$$

を以て示される。従つてこの作用も亦速度の大なるほど大であると見るべきものである。

iii) 水の削磨作用 (Abrasion) 土の表層がその上を流る水によりて磨せられ、又はその上を転動する固体によりて削磨せられる。この場合の抵抗は強度の関係でなく硬度の問題と見るべきであろう。

以上水が外力として土に働くいろいろの場合を考えて見たが、何れも主となるものは水速であり、その v は勾配が大となればなるほど大となる。又水の自重 W の流水の方向に働く分力 $W \sin \theta$ も θ が大となる程大となる。これに反しこの外力に抵抗する力は主として摩擦力 $F = \mu N$; $N = (W$ の面に直角なる分力 $= W \cos \theta$, θ が大となるほど却つて小となる)。然らば即ちこれら力の関する限りにおいては傾斜の大となるに従つて侵蝕力は大きくなり抵抗力は小となる。従つて傾斜の 0 から 45° と漸次侵蝕され易く不安定となることはいふをまたないが、 45° 以上更に急傾斜となるときは侵蝕が小となり安定となるとの説明には何ら寄与する所がない。唯 (iii) の水の削磨作用がこれに抵抗するは硬度であるとすれば、シラスの硬度ということについて別に少しく検討するを要する。

抑々硬度 (Hardness) なる性質は簡単明瞭なる如くで実はあまり明かでないではなからうか。普通硬度はある一定の測定の方法がまず規定されて、その測定の結果を硬度として表示せられ、溯つて硬度そのものの本来あるべき性格が何を意味するかは判然としておらぬではないかと思われる。ここではこの問題に立入つて論議する余裕を持たぬが、著者らがシラスの硬度を測定したのは山中氏の土壤硬度計を用い、地層に対し垂直及び水平の両方向の硬度を測定した。その実験の結果は次表の如くである。

第5表 鹿児島市郡元町唐湊シラス硬度

箇 所	土 質	測定方向	測定個所数	硬度範囲 kg/cm^3	平均硬度 kg/cm^3
吉 田	白シラス	垂 直	17	1.37~ 21.08	6.54
		水 平	14	26.60~ 79.80	39.90
久 米	"	垂 直	34	7.29~ 33.41	14.60
		水 平	23	6.08~110.10	19.90
"	赤シラス	垂 直	19	3.42~ 26.60	9.87
		水 平	23	6.08~ 79.80	19.51
長 谷	白シラス	垂 直	16	10.10~ 23.40	17.10
		水 平	15	10.90~ 79.80	39.50

即ち水平の方向は垂直の方向より硬度が大である。従つて縦の方向から削磨され易く横の方向からは削磨され難い、水平の面が不安定で垂直の面が安定であるということとはできないだろうか。前にも述べし如く硬度の性質についても判然たらざる所もあり、又この実験例も不充分であるから軽々と断定し難く今後尙広く実験し試験器も異つたものによりて実行したいと考えて居る。

更になお一つ極めて素朴的な解釈であるが実際には最も主たる理由ではないかと考えらるるこ

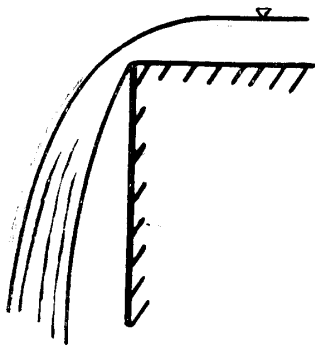


Fig. 5

とは、勾配が急となり直角に近くなるに従い、図に示す如く水
の方向と土表面の方向が平行に近ずき、流水の作用が土層面に触れ
ないようになるということである。加之水流が急となるに従
つて常流から射流 (Jet flow) となる、勿論 $30\sim 40^\circ$ 以下でも既
に射流となるが、これが更に急斜となるに従つて水流の表面のみ
でなく水流の殆ど全体が飛沫となつて落下 断面積が非常に拡散せ
られる為め、速度 v の増大により総体の力 P は大となつても単
位面積当りの強度は却つて減少するのではないか。この点実験的

に数的に確むるに至らなかつたけれど観察上最も有力なる原因でないかと思考するものである。

B. 土の理学的性質に及ぼす水的作用

- i) シラスは相当大的な凝集力を有しておる、寧ろ一つの岩石としてある程度の硬度を有する。

$$S = \mu \cdot N + C$$

C 即ち Kohäsion は主として所謂見かけの凝集力 (Scheinbare Kohäsion) であるが、これを水
中に入ると忽ち失われて 0 となる。真の凝集力 (echte Kohäsion) と見かけの Kohäsion
との割合如何は判然せぬけれど、採掘に非常に困難なシラスもこれを水桶の中に入れると直にと
け崩れるによりても知ることができる。従つて間隙が地下水に飽和さるる状態にまでなるように
多量の水が滲透する時は、その強度は著しく減退することは推知するに難くない。

ii) Kolloid 量の減少 前述の如くシラスが相当大なる C の値を有するは恰もコンクリート
における如く大小種々なる粒子の結合からなり殊に粘土及びコロイド分によりて結合せられおる
によるものと考えられる。然るにこれに水が作用するときは、粘土分以下の微粒の割合が減する
ことは前掲第 4 表に示す如くである。

然るにシラス内の含水量は必ずしも急に飽和状態となるものでないことは前第 3 表実験後の
含水量を見ても分る。殊にこの含水量は地面の勾配の緩急によつて大差あることは本研究第 2
報(註 2)に述べた通りで 70° 以上の急斜地は大雨後においても含水量に甚しき変化なく 60° 以下
緩斜となるに従つて滲入量を増加しそれにより土の理学的性質を変化し間接にその抵抗力を減却
する結果を来すものと考えられる。

要 約

以上説明した如くシラスに加わる水的作用は外力として平坦より傾斜増すに従つて侵蝕する力

を増大し、これに抵抗する力を減小する。然るにあまりに急勾配となる時は層面に衝撃する力が集注せず単位面積当りの強さを減じ且急傾斜のシラス層は水の滲透する量割合少く間接に土の抵抗性を弱くすることが少い。この平坦から急斜に向うに従つて外力の作用が大となる傾向と、急斜となる程外力が集注せず、又抵抗力の減却も少いという相反せる二作用の合成結果が第1図に示す如く 45° 内外に侵蝕の最大が生じ、90° 附近に最小が生ずるのではないか、この理論的解説はなお決定的に断ずることは困難で、更に他日の研究を期したい。(昭和 28 年 8 月 25 日)

RÉSUMÉ

Studies on the “Shirasu” District (III) The Relation between the Slope of the Ground Surface and Erosion.

Rikizo NISHI and Daizo KIMURA

1. In the south Kyushu district, it is believed that the slope of “Shirasu” layer is stable in 90° or near to 90°, and is rather unstable in the angle of repose or near to it contrary to the common belief that the latter is stable. But it has not been theoretically verified, experimentally as well.
2. Therefore the writers made an experiment at two places out in the fields (the University Forest and Iwagawa-cho, Kagoshimaken). As its results the erosion by water showed maximum with an incline of about 45°, and minimum with 80°—90° as was denoted before in Figs. 1 and 2.
3. On the one hand the steeper a slope is, the power of water increases the more, and the resistance to it decreases. But on the other when its steepness is too much, external forces do not concentrate on the ground and intensity of force rather decreases. And the steeper a slope becomes, the more permeability of water decreases and the proportion to change physical properties of soil decreases, too. So we judge the reason to be the resultant of these two actions contrary with each other. But we expect in future the more exact theoretical verification.