

山地土壤侵蝕の研究（第2報）

土 壤 の 受 蝕 性 指 標

難 波 宣 士⁽¹⁾

菫 沢 俊 子⁽²⁾

I 緒 言

第1報¹⁾において山地土壤侵蝕全般の研究が行われたが、ここではその中の“土壤侵蝕に関連する因子”の一つである土壌をとりあげ、土壌性質と侵蝕作用の関係について一応の結論を得たので第2報として報告する。この種の研究はアメリカ、ソ連邦では相当以前から行われ、土壌のいかなる性質が侵蝕ともつとも密接に関係するか、換言すれば、いかなる性質を有する土壌がもつとも侵蝕されやすいかが侵蝕防止の基礎的問題の一つとして提起され、ここに気象、地形、地被などは考えずに、土壌の水侵蝕に対する本質的安定性の大小を数量的に示す受蝕性の指標が用い込まれた。しかしながら、わが国の土壌についてのこれら資料がきわめて乏しく、また多少とも地被物の影響を反映する指標が望まれている現状を考えると、新しい指標を提案し、これと従来のおもな指標とを数箇所の土壌について測定し、その結果について考察してみた。しかし、この指標はきわめて不均質な、しかも、自然状態下の土壌の侵蝕に対する抵抗力の大小を簡単な数字の大小で表現しようとしているため、まだこの指標と侵蝕土量を直結させるにはほど遠いが、山崩跡地などの受蝕度判定や森林の侵蝕防止機能解明の一助にもなれると思う次第である。

稿を起すにあたり終始指導を賜わった萩原防災部長、川口治山科長はじめ、実験遂行に多大の援助をうけた好摩分場、高島分場の両防災研究室員一同ならびに東京大学愛知演習林長中島教官に厚く感謝の意を表するものである。

なお、本報告の一部はすでに日本林学会誌²⁾に報告したものと同一であることを附記する。

II 受 蝕 性 の 指 標

侵蝕作用と土壌性質との関係についてはきわめて多数の研究がなされているが、両者の関係を系統的に究明したのは1930年のMiddletonの報告³⁾⁴⁾⁵⁾にはじまる。彼は数年にわたってアメリカ各地の侵蝕試験場の土壌につき侵蝕に影響する因子を求めるために、機械的組成・水分当量・液性限界・比重・間隙量・分散率・化学的組成などを測定して、土壌の受蝕性

(1)(2) 防災部治山科砂防第一研究室

にもつとも関係深いものは分散率・コロイド含量/水分当量であるとし、この両者を一つにまとめて侵蝕率なる指標を発表した。ここに受蝕性の程度を一つの数字で示す試み、すなわち、受蝕性指標に関する研究に先鞭がつけられるにいたつた。

その後多くの研究者によつてこの種の研究がうけつがれ、種々の土壌性質を使つて決定された指標が発表されているが、そのうちの代表的のものについて、それぞれの指標の意義を考察することとする。

(1) 従来の指標

i) 分散性・吸水性に関する指標

$$a) \text{ 侵蝕率 erosion ratio}^{3)} = \frac{\text{dispersion ratio}}{\frac{\text{colloid percent}}{\text{moisture equivalent}}}$$

b) 被流亡示度⁶⁾

c) 侵蝕係数 erosion coefficient⁷⁾

これらの指標は全く同じ思想によるものであり、多くの人々に検討され、なお批判の余地もあるが、受蝕性の指標としては代表的なものといえよう。この中の分散率 dispersion ratio は多量の水の中で土壌の細粒の部分がどの程度安定であるかを量的に示すものであり、容易に懸濁する細粒の割合が大きい土壌は流去水によつて流亡を受けやすいため、他の条件が同一ならばこの分散率の大小がそのまま受蝕性の大小と比例的な関係を示すというものである。また、コロイド含量/水分当量 $\frac{\text{colloid percent}}{\text{moisture equivalent}}$ はコロイドの含有量と、重力の 1000 倍の遠心力を作用させた時に保持している水分量をおのの百分率であらわして除したもので、コロイドの水蒸気を吸着する性質と、水分当量が大きくなれば水の透過が悪くなることに着目し、水の吸収性および透水性との関係からこの比の大小が受蝕性に反比例するとしたものである。

これら 3 指標は、分散率を測定する時の細粒の限界径や水分当量の測定方法が多少異なるために最後の値がやや違つてくるだけで、いずれも指標の値の大きなものの方が侵蝕されやすいことを示すのは変りがない。

ii) 滲透性に関する指標

$$a) \text{ 滲透率 percolation ratio}^{3)} = \frac{\text{suspension percent}}{\frac{\text{colloid percent}}{\text{moisture equivalent}}}$$

Slater と Byers は野外における滲透状況を考究した結果、室内実験によつて土壌の滲透性と受蝕性の大小との関係をみいだそうとしてこの指標の使用を提唱した。この滲透率は

Middleton の侵蝕率のなかの分散率 $= \frac{100 \times \text{懸濁率 suspension percent}}{\text{全 (沈泥+粘土) のパーセント}}$ のかわりに分子の一部である懸濁率を用いた点が違うだけで、これは分散し懸濁した粒子そのものが自然の通水路をふさいで滲透を低下させるため流去水量が増加するとの考えにもとづいている。この滲透

率は表土にのみ適用可能で、かつ質的にすぎるとの非難が多く、考え方はよいとしても、この表現方法では結果的に i) の指標と大差ないといえよう。

b) 滲透能 infiltration capacity⁹⁾

この滲透能とはある条件下の土が雨水を吸収する最大の割合で、一般に降雨時における時間の函数である。このように滲透能は動的性質をもち、その大小は当然流去水量を左右することになるから、重要な一つの物理性質で、間接的に受蝕性に影響するとしているが、まだこの思想を具体的に表現するにはいたっていない。しかし、採取土壌でなく、自然状態下の現地土壌を直接対象としている点に特徴があり、既述の指標と趣を全く異にしていることに意味があろう。

iii) 粒径に関係する指標

a) 粘土/沈泥比 clay/silt¹⁰⁾

$$b) \text{粘土比 clay ratio}^{10)} = \frac{(\text{sand} + \text{silt}) \text{ percent}}{\text{clay percent}}$$

ただし, sand: 2.0~0.05 mm, silt: 0.05~0.005 mm, clay: 0.005 mm 以下

いずれも土壌の粒径組成についての指標で、砂や沈泥が粘土に比して多い場合には、耐水性集合体の形成されることが少ないので、侵蝕をうけやすいということが基礎となつている。このうち、a) は粘土と沈泥の含量の和が全量の半分またはそれ以上の割合を示す土壌についてはある程度の意味があつても、砂質土壌などで粘土と沈泥の含量の和が僅かなものでは侵蝕作用と結びつけ難い点を発表者自身も認めている。b) は Bouyoucos が Middleton の報告の data について計算した結果、この比の値も侵蝕率と同じく受蝕性と関係深いので一つの指標として用いられるといい、また粘土比も侵蝕率もともに侵蝕度に関係するならば、この粘土比の方が測定簡易の点ですぐれているともいつている。しかしながら、単に機械組成の比のみでは受蝕性の差異は明確に説明しえないであろう。

iv) 化学性に関係する指標

$$a) \text{硅酸/三二酸化物 silica-sesquioxide ratio}^{11)} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{R}_2\text{O}_3}$$

Bennett が土壌コロイドの化学性を検討の結果、この比が小さくなるほどコロイドの荷電は低下し、コロイドの懸濁液は次第に不安定となつて沈澱しやすくなることを指摘した。耐蝕性土壌の $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ は <2, 受蝕性土壌では >2 と発表したが、その後の研究により、この比の値が水分当量、膨潤度などに影響することは明らかであるとしても、コロイドの性質のみでは間接的指標と思われるようになっていく。

v) その他の指標

a) $D/A \cdot P \cdot p$

(D は分散性, A は吸水性, P は透水性, p は粒子の大きさ)

Baver¹²⁾ は侵蝕作用 E を $E = K \frac{D}{A \cdot P \cdot p}$ で表現し、K は常数としているところか

ら、この $D/A \cdot P \cdot p$ も一つの受蝕性の指標と考えられる。しかし、 $D \cdot A \cdot P \cdot p$ についての具体的表示法が不明なので、ここでは一つの常数によつて土壤の侵蝕度をあらわしうると考えた点を記するにとどめておく。

$$b) \quad E_l^{(13)} = \frac{E \cdot r}{a}$$

(E は侵蝕率, r は $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$, a は団粒指数)

Voznesensky が発表した指標である。個々の性質の意義はすでに 他氏の 報告に述べられているものであり、 r および a は E の中の一性質にある程度関連しているため、実用的にみてこの指標の価値は乏しいと考える。

以上現在までの主要な指標全般についていえることは、ほとんどのものが自然状態と全く異なる条件のもとで測定した土壤の物理性を基礎にしている点で、最近この種の研究に土壤構造からの掘り下げがなされだした現況からすると、さらに別の見地から検討が加えられねばならないであろう。

(2) 新しい指標

i) 新指標の意義

従来の指標の大部分は採取土壤について実験室内で test した値を用いているが、この値が自然状態の現地土壤に行われる侵蝕作用とどの程度関連するかはかなり疑問である。そこで土壤構造の破壊をなるべく少なくした現地土壤そのままでの測定を 第一の条件とし、これに Horton の時間概念を入れた滲透能の考え方⁹⁾ と Tsyplenkin の土壤構造の安定指数¹⁴⁾ の意味を加味して、Musgrave が時間と滲透量の関係を表現した式¹⁵⁾

$$I = bt^a \quad (I \text{ は積算滲透量, } t \text{ は時間, } a \cdot b \text{ は常数})$$

の指数 a に着目し、これが一つの指標たりうるのではないかと考えた。すなわち、Horton は降雨時間 t の時の滲透能 f を

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

(f_c は一定値の最少滲透能, f_0 は $t=0$ の滲透能, k は常数)

という一般式で示したが、この f_0 , f_c を判定することの困難性と、この式を積分した滲透全量を示す式がきわめて複雑な形となることはそれ以後の取扱いを面倒にし、Musgrave も最初の報告ではこの式を用いたが、後年の報告で $I = bt^a$ の式に変えたのをみても、この式の不便さがうかがわれる。しかし、動的な現地での滲透現象に一つの常数を導入した点は大いに意義があり、筆者らもこの点を取りいれたわけである。

また、Tsyplenkin は滲透度 k_t と時間 t の関係を次式¹⁴⁾ で示し、

$$\log k_t = \log k_0 - a \log t$$

この常数 a が土壤の structural stability の良い指標であるといっている。この式を変形

して積分すれば、積算の滲透量 I は

$$I = \frac{k_{t_0}}{1-a} t^{1-a}$$

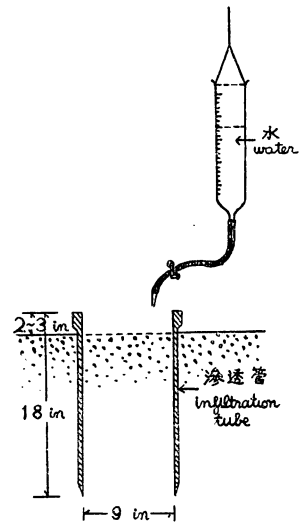
となり、前記 $I=bt^a$ と同型となることからすれば、 $I=bt^a$ の a も土壌構造に関係深い数であると想像され、しかもこの a は滲透速度 $\frac{dI}{dt}$ が滲透量 I に比例し、時間 t に反比例するとした場合の比例常数である点を考えると、この a は土壌の一般性質を総括的に反映しているものと思われる。この値が大きいということ、換言すれば時間とともに滲透量が減少してゆく時の減じ方が小さく、また、雨水の吸水に対しても安定であることの一証と左と考えて、 a の大小は受蝕性の大小に反比例するとしたのがこの指標を用いる前提的な思想であり、この a を安定指標 *stability index* と名づけることとする。

ii) 測定法

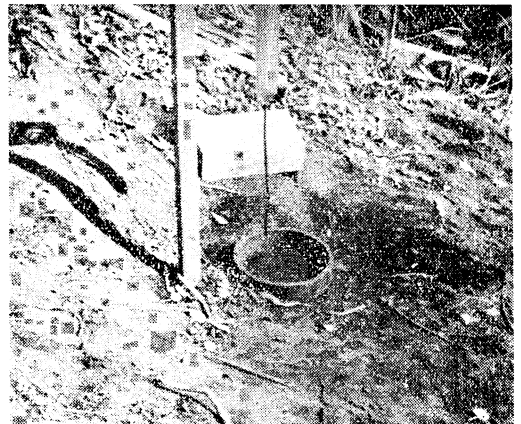
Musgrave の滲透式 $I=bt^a$ の a を決定するため、現在現地土壌滲透速度測定に最も便といわれる円筒による方法(第1図)にしたがつて、種々の土地状態の箇処に滲透管を埋込み(写真)、絶えず管内の地表面に一定の厚さの水の薄い膜が保たれるように注水し、時間 t と注水量すなわち滲透量 I の測定を行つた。滲透管埋込みの際、その埋込みによって土壌構造をなるべく変化させぬようくに注意し、さらに埋込んでから測定まで相当の期間放置した。測定開始時は任意であるが、数回の3時間にわたる予備実験で、測定時間の短いときの値と長い時の値とはやや傾向が違ふが、5分以上の値については $\log I$ と $\log t$ の直線関係を確かめえたので、測定時間はすべて30分間に統一した。なお、この円筒の大きさは、これだけの直径と長さがあれば、管壁ならびに滲透した水の側方への移動の影響は無視でき、自然状態における滲透現象を良く示すことを明らかにした Lewis の実験結果¹⁶⁾ によつて決定したものである。

III 測定結果とその考察

既述の指標のうち分散率 (D.R.), コロイド/水分当量 (C./M.E.), 侵蝕率 (E. R.), 滲透率 (P. R.), 粘土比 (C. R.), 粘土/沈



第1図 測定方法略図
Measuring equipment of new index.



測定地の一例 A plot under experiment.

泥 (C./S.) および安定指標 (a) の値が種々の土壌についていかなる値となるかを測定した。測定箇所は現在受蝕度を量的に比較しうる地区がほとんどないので、常識的に受蝕度を異にする地区、すなわち耐蝕性の古生層 (高島分場内)、関東ローム (本場内); 中間的な東北火山灰 (好摩分場内)、三紀層 A (東大愛知演習林内); 受蝕性の三紀層 B, 花崗岩 A および B (いずれも東大愛知演習林内) のおのおのについて、林地および裸地 (いわゆる裸地程度の意で、それが無い箇所では人為的に裸地状とした) を組合わせて測定を行つた。従来の指標についての値は第1表のごとくであり、新しい指標に関するものが第2表である。

なお、コロイドの測定は水蒸気吸着法によるのを本則とするが、Middleton の測定結果³⁾⁴⁾⁵⁾ から、水蒸気吸着法によるコロイド含量と、0.002 mm 以下をコロイド含量としたものとの間にはほとんど差がないことを確かめたので、沈澱法による 0.002 mm 以下を便宜的にコロイド含量とした。

第 1 表 各地の受蝕性指標

地区別	指標の種類	D. R.	C./M.E.	E. R.	P. R.	C. R.	C/S
東北火山灰	林地	34.1	0.23	150.2	25.6	15.67	0.55
	裸地	20.0	0.26	77.5	23.3	10.01	0.43
関東ローム	林地	10.3	0.73	14.1	8.2	2.33	1.07
	裸地	9.2	0.76	12.1	5.8	2.41	1.53
三紀層 A	林地	9.7	1.37	7.1	2.7	2.07	2.80
	裸地	12.4	1.64	7.5	2.9	2.18	2.80
三紀層 B	林地	19.2	1.40	13.7	5.4	2.69	2.00
	裸地	28.2	1.35	20.9	7.9	2.76	1.92
花崗岩 A	林地	35.6	0.54	66.4	11.9	11.29	0.64
	裸地	51.5	0.44	117.0	23.4	10.05	0.67
花崗岩 B	林地	27.7	1.07	25.9	7.7	3.94	1.50
	裸地	19.1	0.80	23.8	5.2	6.83	1.20
古 生 層	林地	10.0	0.99	10.1	5.8	2.96	0.76
	裸地	24.9	0.83	29.9	16.4	4.21	0.53

受蝕度	種 類	記 号
小	古 生 層 { 林地 裸地	A ₁ A ₂
	関東ローム { 林地 裸地	B ₁ B ₂
中	火 山 灰 { 林地 裸地	C ₁ C ₂
	三紀層 A { 林地 裸地	D ₁ D ₂
大	三紀層 B { 林地 裸地	E ₁ E ₂
	花崗岩 A { 林地 裸地	F ₁ F ₂
	花崗岩 B { 林地 裸地	G ₁ G ₂

(1) 各種土壌の受蝕性指標

林地、裸地は単に受蝕度を異にする別種の土壌と考え、7箇所の地区から 14 種の資料を取り上げたものとして、各々の土壌を常識的な判断と個々の観察から一応左表のように分類した。

左表の順序と受蝕性指標の値を対比させたのが第3表で、これを基として各指標の価値を考察してみる。

ここで、まず感ぜられることは、受蝕度大

第 2 表 各地の時間 (分) —— 滲透量 (耗) と a

場所・回数	時間	5	10	15	20	25	30	a	a の平均
東北 火山灰	林地	1	16.1	30.6	40.4	50.9	60.7	70.6	0.75
		2	13.7	21.3	28.1	35.2	41.9	49.0	0.71
		3	17.8	26.5	34.9	42.3	49.8	57.1	0.65
		4	15.9	25.2	33.7	40.9	48.4	55.6	0.70
		5	15.0	22.1	29.3	36.5	43.4	50.2	0.68
		6	13.2	21.9	30.3	38.6	46.3	53.8	0.79
		7	14.2	22.9	31.1	38.4	47.3	55.5	0.72
		8	13.5	21.8	29.7	37.3	44.6	52.1	0.75
		9	14.5	22.3	29.4	36.8	43.9	50.9	0.70
	裸地	1	14.7	23.3	30.6	37.7	44.9	51.5	0.70
		2	9.8	15.7	20.6	25.4	30.1	34.9	0.70
		3	11.3	16.9	22.1	27.0	32.0	37.1	0.66
		4	9.3	13.5	17.5	21.4	25.2	28.9	0.63
		5	9.2	14.1	18.4	22.8	27.0	30.9	0.68
		6	8.7	12.3	15.7	19.1	22.5	25.9	0.61
		7	8.9	13.5	17.5	21.6	25.5	29.3	0.66
		8	9.1	13.1	17.0	20.8	24.6	28.3	0.64
		9	9.6	13.2	16.9	20.6	24.3	27.8	0.60
関東 ローム	林地	1	9.7	15.1	19.6		32.3	0.67	0.68
		2	10.2	14.7	20.2		34.0	0.68	
		3	7.6	11.9	14.7		24.2	0.64	
		4	8.3	12.2	16.0		29.6	0.71	
		5	6.6	10.2	14.7		22.9	0.70	
		6	11.3	17.1	22.3		36.7	0.66	
	裸地	1	1.1	1.6	1.9		2.7	0.50	0.55
		2	2.0	2.9	3.8		6.1	0.61	
		3	1.4	2.0	2.5		3.9	0.58	
		4	1.3	2.0	2.4		3.8	0.58	
		5	1.2	1.7	2.0		2.9	0.51	
		6	1.6	2.4	2.9		4.2	0.51	
	林地	1	20.5	38.4	54.5	68.3	81.4	93.4	0.76
		2	30.6	55.0	74.8	98.0	122.2	142.2	0.78
		3	37.0	70.8	108.1	126.8	145.7	164.5	0.75
		4	39.2	68.6	91.8	109.8	131.1	149.5	0.74
		5	36.8	64.5	80.9	102.9	121.3	139.7	0.74
三紀層A	裸地	1	5.6	7.4	9.6	11.0	12.3	13.2	0.49
		2	2.5	3.2	4.0	4.8	5.3	5.9	0.50
		3	1.7	2.2	2.7	3.1	3.6	3.9	0.50
		4	1.3	1.6	1.8	2.2	2.6	2.8	0.45
		5	0.6	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	0.51
	林地	1	77.5	98.8	121.2	141.7	161.9	183.2	0.48
		2	55.4	69.0	84.8	98.0	111.8	126.6	0.46
		3	54.8	69.2	84.6	98.9	113.0	128.6	0.47
		4	50.1	63.5	77.0	90.4	102.9	116.4	0.47
		5	61.5	75.7	88.1	102.9	112.9	122.5	0.43
三紀層B	裸地	1	1.1	1.3	1.6	1.7	1.8	2.0	0.32
		2	0.9	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	0.34
		3	0.9	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5	0.32
		4	0.9	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	0.36
		5	1.6	2.0	2.3	2.6	2.8	2.9	0.35
	林地	1	26.7	34.1	37.6	39.8	41.1	42.9	0.22
		2	11.2	13.2	14.8	15.6	16.5	17.4	0.24
		3	23.3	28.3	31.0	33.3	34.7	36.0	0.24
		4	20.1	25.9	28.8	30.9	32.2	34.1	0.29
		5	15.0	15.0	16.2	17.3	18.4	19.2	0.22
花崗岩A	裸地	1	11.8	15.9	18.4	21.6	23.8	25.6	0.44
		2	9.1	11.3	12.9	14.0	15.3	16.4	0.33
		3	15.2	18.1	21.6	24.0	25.7	27.2	0.34
		4	9.2	12.9	15.2	17.0	18.4	19.6	0.42
		5	10.3	14.0	15.7	17.0	19.4	20.8	0.38
	林地	1	26.7	34.1	37.6	39.8	41.1	42.9	0.22
		2	11.2	13.2	14.8	15.6	16.5	17.4	0.24
		3	23.3	28.3	31.0	33.3	34.7	36.0	0.24
		4	20.1	25.9	28.8	30.9	32.2	34.1	0.29
		5	15.0	15.0	16.2	17.3	18.4	19.2	0.22

第 2 表 つづき

場所・回数		時間	5	10	15	20	25	30	a	aの平均
花崗岩B	林地	1	52.7	66.2	75.5	82.7	90.8	98.5	0.34	0.38
		2	58.2	75.4	84.1	93.1	101.0	110.3	0.35	
		3	14.6	19.0	21.9	25.7	28.9	31.4	0.43	
		4	14.3	19.0	22.3	26.5	29.4	31.7	0.45	
		5	53.9	68.4	76.5	84.6	92.2	99.0	0.33	
	裸地	1	1.4	1.8	2.1	2.3	2.6	2.8	0.38	0.40
		2	1.2	1.6	1.8	2.1	2.3	2.5	0.40	
		3	1.3	1.8	2.1	2.3	2.6	2.8	0.40	
		4	0.9	1.2	1.4	1.6	1.8	1.9	0.39	
		5	1.3	1.7	2.0	2.3	2.6	2.8	0.42	
古 生 層	林地	1	7.4	12.3	16.8	21.1	25.0	28.9	0.77	0.84
		2	2.2	4.2	5.6	7.1	8.6	10.0	0.84	
		3	2.5	4.2	6.1	8.1	10.0	11.8	0.89	
		4	2.9	5.6	8.1	10.8	12.5	14.2	0.89	
		5	3.9	7.8	10.5	13.0	15.2	16.4	0.80	
	裸地	1	20.8	31.9	44.1	52.7	65.4	78.4	0.73	0.79
		2	16.7	31.1	45.6	58.1	70.1	82.1	0.89	
		3	17.2	26.2	32.4	40.9	49.0	64.7	0.70	
		4	8.6	14.0	18.0	23.5	28.8	33.5	0.75	
		5	4.8	8.9	12.5	16.7	20.3	23.8	0.90	

第 3 表

指標	D.R		C./M.E.		E.R.		P.R.		C.R.		C/S		a	
	変域	平均	変域	平均	変域	平均	変域	平均	変域	平均	変域	平均	変域	平均
地区														
A ₁	9.2		0.99		10.1		5.8		2.33		1.53		0.84	
A ₂		13.6		0.83		16.6		9.0		2.98		0.98		0.72
B ₁														
B ₂	24.9		0.73		29.9		16.4		4.21		0.53		0.55	
C ₁	9.7		1.64		7.1		2.7		2.07		2.80		0.75	
C ₂		19.0		0.88		60.6		13.6		7.48		1.64		0.65
D ₁														
D ₂	34.1		0.23		150.2		25.6		15.67		0.43		0.49	
E ₁	19.1		1.40		13.7		5.2		2.69		2.00		0.46	
E ₂														
F ₁		30.2		0.95		44.6		10.2		6.26		1.32		0.37
F ₂														
G ₁	51.5		0.44		117.0		23.4		11.29		0.64		0.24	
G ₂														

中小の group ごとに各指標の値の変域が別々になつていればいるほど精度が高い指標ということになるが、いずれの変域も相当重なり合つてゐることである。このことはもちろん group 分けの不正確にも起因するが、それよりもただ一つの指標で、ある土壌の受蝕度を明確に判定することの困難性を示していると考えるのが妥当であり、土壌の受蝕性は単にその分散性あるいは粒径組成などだけではその一部が説明されるにすぎないのであろう。しかしながら、このような段階では、従来の指標のなかの分散率および新しい安定指標による順位が相対的にもつともよく常識と合致し、これが a を新指標として提唱する一つの大きな根拠である。

ここでさらに考えられることは、全く別の立場からできた侵蝕率と粘土比の類似性である。

第1表中の侵蝕率と粘土比の値の相関係数を求めると、 $\rho=0.94$ (自由度 12, 危険率 0.1% の有意水準 0.78) であることからしても充分両者の類似性は認められる。大体この侵蝕率は、分散率と C./M.E. のおのおのが侵蝕度に関連あるところから、単に一方を他方で除して表現したものであるため、その表現方法自体にもある程度問題が残る、C./M.E. の精度をもあわせ考えた場合には、Bouyoucos が侵蝕率も粘土比もともに侵蝕度に関係するならば、測定簡易の点で粘土比の方がまさつていと結論したのも妥当であろう。

第3表の7種の指標のうち、透透率および粘土/沈泥については発表者やその後の検討者によつてもその欠点が指摘されており、ここでも特徴ある指標といい難いため除外し、受蝕性の指標を侵蝕率関係のものと粘土比および新しい安定指標に限つて論議を進めてみる。これら指標によつて土壌の受蝕；非受蝕を判定する場合の限界値については、二、三の研究者によつても区々であり、Middleton によれば分散率 15, C./M.E. 1.5, 侵蝕率 10 といわれ、Rost と Rowles¹⁷⁾ によれば分散率 19, C./M.E. 1.0, 侵蝕率 19 などといわれ、さらに米田氏の紹介¹⁸⁾ がある。これらを参考にして各指標の限界値を試案的に定めたものが第4表で、第4表の値によつて測定した各種土壌に受蝕度を附したものが第5表である。第5表をみると、C./M.E. によつては受蝕度の差を明瞭に区別できないのは、第3表からも察せられるところであるが、

各種土壌の測定結果をみても、水分当量が大きくなると透透が悪くなつて地表流量の増加をきたし流亡をうけやすくなると考えることは疑問であり、Musgrave も透透量と水分当量について測定した結果¹⁴⁾、表層土では両者の間には有意な相関関係がないことを指摘している。したがつて、C./M.E. の大小が土壌の透水性に反比例し、地表流下量に関係があるとするにはまだ幾多の疑問があり、少なくともこの C./M.E. だけを単独に取り上げることは、指標としての価値が少ないと思われ、このことはそのまま侵蝕率の欠点ともなるであろう。

以上の考察から結論すると、受蝕性の指標として役立つものは分散率、粘土比、侵蝕率および安定指標である。このうち自然状態の現地土壌で測定しうる安定指標が相対的にもつとも実地的であり、測定容易な分散率、粘

第4表 各指標の限界値

受蝕度 指標	1	2	3
D. R.	15以下	15~30	30以上
C./M. E.	1.0以上	1.0~0.5	0.5以下
E. R.	15以下	15~60	60以上
C. R.	2.5以下	2.5~5.0	5.0以上
a	0.60以上	0.60~0.40	0.40以下

ただし、受蝕度 1<2<3

第5表

	D.R. による 順位	C./M.E. による 順位	E.R. による 順位	C.R. による 順位	a による 順位
A ₁	1	2	1	2	1
A ₂	2	2	2	2	1
B ₁	1	2	1	1	1
B ₂	1	2	1	1	2
C ₁	3	3	3	3	1
C ₂	2	3	3	3	1
D ₁	1	1	1	1	1
D ₂	1	1	1	1	2
E ₁	2	1	1	2	2
E ₂	2	1	2	2	3
F ₁	3	2	3	3	3
F ₂	3	3	3	3	3
G ₁	2	1	2	2	3
G ₂	2	2	2	3	3

土比もかなり良い指標であることが認められる。これら指標の代表的な侵蝕率は、一つの指標には違いないが、侵蝕度の尺度とするよりもむしろ多くの指標の母体としての価値の方が大きいであろう。これらの特質を考慮すると、一つだけの指標で土壌の受蝕性を速断せずに、二、三の指標を組合わせて用いれば受蝕度判定は一応可能であると信ずる。

附帯的にみいだされたことは、同じ三紀層あるいは花崗岩の地区でも、場所により明らかに受蝕度を異にする地区があることで、測定した三紀層Aの地区は、数年前まで肥料別生長試験が行われていた地域の中でも、もつとも土壌の深い落葉や腐植に富む地区であつたため、いずれの指標から判断しても耐蝕性と思われるが、同じ三紀層でもBの地区は、表土浅く樹冠粗で地表面が裸出している箇所も多いため、指標の値も明らかに侵蝕を受けやすいことを示している。この点は質的には以前から説明されていることであるが、これらの指標によつても確認され、単に地質だけで受蝕度を判定できない実状は大いに考慮すべきことであろう。

(2) 地被状態と新しい指標

(i) 林地・裸地の差

第6表 分散分析表

要 因	平方和	自由度	不偏分散	F	F _{0.05}
東北火山灰					
全分散	426.5	17			
地被別	160.5	1	160.5	9.76	>5.32
実験時別	98.0	8	12.2	0.66	<3.44
誤差	146.0	8	18.5		
三紀層 A					
全分散	1775.6	9			
地被別	1742.4	1	1742.4	600.83	>7.71
実験時別	21.6	4	5.4	1.86	<6.39
誤差	11.6	4	2.9		
三紀層 B					
全分散	412.0	9			
地被別	384.4	1	384.4	74.64	>7.71
実験時別	7.0	4	1.8	0.34	<6.39
誤差	20.6	4	5.2		
花崗岩 A					
全分散	615.6	9			
地被別	490.0	1	490.0	35.64	>7.71
実験時別	70.6	4	17.6	1.28	<6.39
誤差	55.0	4	13.6		
花崗岩 B					
全分散	140.9	9			
地被別	8.1	1	8.1	0.43	<7.71
実験時別	57.4	4	14.4	0.76	<6.39
誤差	75.4	4	18.5		

従来の指標は地被状態を対象外においているため、それらによつて林地、裸地の受蝕度の差を判定した資料はないが、一般常識からいつても林地土壌がより耐蝕性なことは決定的である。この関係は第1表あるいは第5表を調べれば多少は認められるが、従来の指標の値の中には粒径についての値が直接とりいれられている部分が多いため、それらによつて判別するのはあまり適当といい難く、このような差の検討は土壌構造にも関係した新指標によるのが妥当と思われる。そこで第2表の data のうち林地、裸地の両者が対応している a の値について分散分析法により統計的に検討してみたのが第6表である。この結果によれば、いずれの地区においても実験時別の値には有意の差がなく、かつ東北火山灰と三紀層AおよびBの三地区では林地、裸地の差が有意である。すなわち、測定したその時その時の a の値の多少の変化は意味がなく、それらの差よりも林地と裸地の差の方が意味が

あることになり、aの恒数性が裏書きされると同時に林地、裸地の差を明らかにしうるもので、この点は地被による差が明確にでない従来の指標に比しきわめてすぐれた特長である。なお、花崗岩の地区について、Aにおいては林地の方が裸地よりも受蝕性、またBでは両者に有意の差がないとなつた結果について考えると、Aの林地は数年前砂防工事を行つたばかりで階段工のあとが歴然と残つている区域の山頂附近であり、Bの林地も典型的な痩悪林地でネズミサシ、ササなどが散生しているだけで、まだ林地としての特徴を備えていないのが原因と思われ、いずれも林地、裸地として比較するのが適當でないところからすれば、この結果は必ずしも不合理とは思へぬが、これら土壌がいずれも浅い風化土層であつた点を考慮すると、一応特殊な地区の問題としてなお研究の余地があり、また時間の経過にともなうaの変化状況にも着目すべきであろう。

(ii) 落葉有無の差

最近森林の侵蝕防止機能のなかで落葉の作用を無視しえないことが立証¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾されはじめているため、関東ロームの地区では林地の中に二箇処の地点をとり、一箇処は落葉をそのまま存置し、一箇処は落葉を除いて、この両者を裸地と対応させて測定した結果が第7表で、このa

の値について分散分析をしたのが第8表である。ここでも前述したように林地と裸地の差は検出しえたが、実験時別の差と林地内の二箇処の差は認められぬこととなつた。そこで落葉が流去水中の土砂を濾過する性質を考え、引續いて林地内の二箇処に対して濁水(1 lの清水中に粘土分を 15 g 混入)による測定を行つて a' (濁水を用いた際の a を a' とする)を算出した(第9表)。第9表の a' の値を再び分散分析(第10表)すると、ここでも実験時による差は認められないが、落葉の有無による差は有意となり、清水では区別しえなかつた落葉有無による差でも濁水を用いると検出しうることになつた。し

第 7 表 時間 (分) — 滲透量 (耗) と a

地被・回数	時間	時間				a	aの平均
		5	10	15	30		
裸地	1	1.1	1.6	1.9	2.7	0.50	0.55
	2	2.0	2.9	3.8	6.1	0.61	
	3	1.4	2.0	2.5	3.9	0.53	
	4	1.3	2.0	2.4	3.3	0.53	
	5	1.2	1.7	2.0	2.9	0.51	
	6	1.6	2.4	2.9	4.2	0.51	
林地 (落葉なし)	1	4.0	6.1	8.0	14.0	0.69	0.66
	2	3.2	4.9	6.2	9.9	0.63	
	3	2.3	3.7	4.7	7.3	0.64	
	4	2.2	3.3	4.3	6.9	0.63	
	5	1.8	2.9	3.9	6.4	0.70	
	6	2.0	3.1	4.3	6.9	0.71	
林地 (落葉あり)	1	9.7	15.1	19.6	32.3	0.67	0.68
	2	10.2	14.7	20.2	34.0	0.68	
	3	7.6	11.9	14.7	24.2	0.64	
	4	8.3	12.2	16.0	29.6	0.71	
	5	6.6	10.2	14.7	22.9	0.70	
	6	11.3	17.1	22.3	36.7	0.66	

第 8 表 分散分析表

要因	平方和	自由度	不偏分散	F	F _{0.05}
全分散	824.95	17			
地被別	611.45	2	305.73	15.29	>4.10
実験時別	13.61	5	2.72	0.14	<3.33
製 差	199.89	10	19.99		

第 9 表 濁水による時間 (分) —— 滲透量 (耗) と a'

時間		5	10	15	30	a'	a' の平均
地 被 ・ 回 数	1	2.0	2.8	3.4	5.1	0.54	0.57
	2	2.9	4.4	5.8	8.8	0.62	
	3	3.4	5.0	6.4	9.6	0.57	
	4	4.2	6.1	7.7	11.9	0.58	
	5	2.4	3.3	3.8	6.5	0.53	
落 葉 あ り	1	11.5	18.6	25.6	39.4	0.69	0.68
	2	13.7	21.1	28.7	45.9	0.68	
	3	11.6	17.9	23.5	39.2	0.68	
	4	29.1	44.1	61.2	99.9	0.69	
	5	12.2	18.8	25.1	39.4	0.66	

第 10 表 分 散 分 析 表

要 因	平方和	自由度	不偏分散	F	$F_{0.05}$
全 分 散	370.4	9			
落葉有無	313.6	1	313.6	56.00	>7.71
実験特別	34.4	4	8.6	1.54	<6.39
誤 差	22.4	4	5.6		

第 11 表 濁水による時間 (分) —— 滲透量 (耗) と a'

時間		5	10	15	20	25	30	a'
地 区	林地	40.9	63.7	80.8	106.6	124.5	137.1	0.69
	裸地	1.2	1.5	1.7	2.0	2.2	2.4	0.38
三紀層 B	林地	47.3	61.5	74.3	84.9	96.3	107.6	0.46
	裸地	1.5	1.6	1.8	2.0	2.1	2.2	0.23
花崗岩 A	林地	24.0	29.6	31.8	33.6	34.9	36.1	0.22
	裸地	14.7	17.8	20.8	22.8	24.3	25.7	0.32
花崗岩 B	林地	30.5	37.3	40.4	44.1	46.9	49.8	0.27
	裸地	1.7	2.1	2.5	2.7	2.9	3.1	0.33

第 12 表

地 区	棄却限界域	a'
三紀層 A	林地	0.79~0.69
	裸地	0.55~0.39
三紀層 B	林地	0.49~0.43
	裸地	0.40~0.24
花崗岩 A	林地	0.28~0.19
	裸地	0.45~0.29
花崗岩 B	林地	0.47~0.25
	裸地	0.44~0.34

かも落葉のある箇処では、 a' の値が清水によつてえた a の値とほとんど変らないにもかかわらず、落葉がないと濁水による a' が a に比し小さくなることは、やはり落葉が土壌の非毛細管間隙を閉塞する微細粒物を濾過して、土壌の安定度を維持する作用を行っている証拠であろう。濁水を用いる測定は、一度注水するとその地点で再び測定を繰り返すことができないため、附近の条件が同一とみられる地点で測定せねばならぬので、関東ロームにおける同様の test は他の地区について行いえないかつたが、三紀層および花崗岩の地区で、一連の清水を用いた測定の最後に 1 回だけ濁水を注水したもの (第 11 表) について a' を求め、清

水の場合にえた a の値と合わせて Thompson の棄却検定を行うと、第 12 表のごとく、林地ではすべての a' が棄却限界域内にはいつて棄却できないのに反し、裸地では三紀層 A・B および花崗岩 B の地区が a' の値を棄却しうることとなる。これは上記 3 地区では清水による a と濁水による a' とは

別個のものであることを示し、 $a > a'$ と判断して差支えないであろう。ここにも花崗岩 A 区の特異性が出てきてはいるが、これらの結果と関東ローム区についてえられた結果とを合わせ考えると、落葉の作用が説明しうることとなる。

以上の考察からすれば、新しい安定指標は林地、裸地の差のごとく地被物の相違による受

蝕度の差を検出しようとするとともに、ひいては落葉の侵蝕防止効果の一端をも表現しうるものである。この点は従来の指標に比して新指標のもつとも特長とするところで、森林の侵蝕防止機能を解明するには、ぜひとも地被物の影響を考慮に入れた指標が要求されていることを思えば、現状では林地土壌云々の問題を取り扱うにはきわめて重要な指標であると考えられる。しかし、土壌層が極端に不連続であつたり浅かつたりする場合にのみ、まだ検討の余地が残されているものである。

Ⅳ 要 約

従来の受蝕性指標は、採取土壌の室内測定による土壌の物理性を基礎としたものが多い点を考慮し、土壌構造の破壊をなるべく少なくした自然状態下の現地土壌について測定しうる指標を考究した結果、Musgrave の時間——滲透量の関係式 $I=bt^a$ の a を新しい受蝕性指標として提唱し、これを安定指標 stability index と名づけた。各地土壌について従来の指標の中の主要なもの和新指標とを測定し、それらの値から各指標の価値を考察すると、つぎのように要約される。

(1) 一つだけの指標によつて土壌の受蝕を完全に判定しうるような精度の高い指標は現在ないが、従来の指標の中では分散率、粘土比が実用性大で、侵蝕率これにつぎ、新しい安定指標は決してそれらに劣らぬ価値をもつ指標である。

(2) 前記の指標によつて耐蝕、非耐蝕を判定する場合の限界値は、おおむね安定指標 0.6、分散率 15、粘土比 2.5、侵蝕率 15 と推定される。

(3) 従来の指標が土性を主としたものであるのに反し、新指標が構造を主とした総合性質を示すものであるため、林地、裸地の差のような地被物の相違による受蝕度の差を検出するのに便であり、落葉などの地被物はそのままにして測定しうる特長がある。

(4) 安定指標を測定する場合に、地被物があれば清水・濁水のいずれを用いてもその値に差が認められないに反し、地表面が露出していれば清水を用いて求めた値より濁水を用いて求めた値の方が小さくなり、地被物が濁水中の微細粒子を濾過する作用が証明され、Lowdermilk や Kraebel の説を裏書きしうる。

(5) 従来の指標もすべて侵蝕に関連する諸因子のうちの一つの土壌性質を取り上げたのみで、流出土砂量と直結しうるものでないと同様に、新指標も土壌の受蝕度の大小を質的に区別するもので、量的に関連づけるにはなお今後現地の数多くの data をまたねばならないのもちろんであり、またある地域の侵蝕土量の予想は、新指標と地形・降雨その他の要素との関連をも検討し、これら侵蝕に関連する要素を総合的に考慮してはじめて可能となるものである。

参 考 文 献

- 1) 川口武雄：山地土壌侵蝕の研究 (第1報) 従来の資料による統計的研究，林業試験集報 61 号，(1951)。
- 2) 難波宣士：受蝕性指標に関する実験，日本林学会誌，34，4 p 113，(1952)。

- 3) Middleton, H. E.: Properties of soils which influence soil erosion, U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 178, (1930).
- 4) Middleton, H. E. • Slater, C. S. • Byers, H. G.: Physical and chemical characteristics of the soils from the Erosion Experiment Station, U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 316, (1932).
- 5) ————: The physical and chemical characteristics of the soils from the Erosion Experiment Station—Second Report, U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 430, (1934).
- 6) 満鉄調査局訳: 土壤侵蝕防止の研究 p. 223, (1943).
- 7) 菅野一郎: 土壤の侵蝕率について, 資源調査会土地部会資料, 90, (1950).
- 8) Slater, C. S. • Byers, H. G.: A laboratory study of the field percolation rates of soils, U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 371, (1937).
- 9) Horton, R. E.: The role of infiltration in the hydrologic cycle, Trans. Amer. Geophys. Union, p. 446, (1933).
- 10) Bouyoucos, G. J.: The clay ratio as a criterion of susceptibility of soil to erosion, Jour. Amer. Soc. Agron. 27 p. 738, (1935).
- 11) Bennett, H. H.: Some comparisons of the properties of humid tropical and temperate American soils, Soil Science 21 p. 349, (1926).
- 12) Baver, L. D.: Some soil factors affecting erosion, Agr. Eng. (1933).
- 13) Herbage Publication Series: Erosion and soil conservation, Bull. 25 p. 25, (1938).
- 14) Russell, E.W.: Soil structure, Imperial Bureau of Soil Science, Tech. Communication 37 p. 4, (1938).
- 15) Free, G. R. • Browning, G. M. • Musgrave, G. W.: Relative infiltration and related physical characteristics of certain soils, U. S. Dept. Agr. Tech. Bull. 729, (1940).
- 16) Lewis, M. R.: The rate of infiltration of water in irrigation-practice, Trans. Amer. Geophys. Union, p. 361, (1937).
- 17) Rost, C. O. • Rowles, C. A.: A study of factors affecting the stability of aggregates, Proc. Soil Sci. Soc. of Amer. 5 p. 421, (1940).
- 18) 米田茂男: 地力と土壤侵蝕 (II) 農学 1 10 p. 28, (1947).
- 19) Lowdermilk, W. C.: Influence of forest litter on run-off, percolation and erosion, Jour. Forestry, 28 p. 474, (1930).
- 20) Kraebel, C. J.: 日本の林業と治水勧告, 治山事業参考資料 5, (1951).
- 21) 川口武雄・滝口喜代志: 地被物の侵蝕防止機能に関する実験 (予報), 日本林学会誌, 35, 3 p. 73, (1953).

Senshi NAMBA and Shizuko NITASAWA : Studies of Soil Erosion on
Mountain Area—Second Report Erodibility Index of Soil.

Résumé

There are many indexes on erodibility of soil. But most of them are obtained by measuring the physical characters about soils in the laboratory. So they are in little relation with soil structures. Considering this, we offered a new erodibility index named stability index that is exponent "a" in the infiltration-time equation $I=bt^a$, derived by Musgrave. After measuring the soil properties having the greatest influence on soil erosion by old and new indexes, we discussed the value of indexes. Results gained are summarized as follows:

(1) There is no index to judge the degree of erodibility perfectly. Although dispersion ratio and clay ratio have the highest applicational value and next comes erosion ratio, a new index also has a value similar to the first two ones.

(2) Tentatively we present the following limiting values for distinguishing erosive from nonerosive soils such as 0.6 in stability index, 15 in dispersion ratio, 2.5 in clay ratio and 15 in erosion ratio.

(3) While old indexes are based on soil textures, new one is something to relate with soil structure. This also facilitates to distinguish between erodibilities of bare and forest lands.

(4) The procedure to decide the value of new index can be carried out even on sites with forest litter. Comparing two kinds of "a", exponent of $I=bt^a$,—one decided by pure water and the other by muddy water—, we can find out the filtration function by forest litter.

(5) Both new and old indexes can only distinguish erosive from nonerosive soils qualitatively, so these data must be combined with field data of rainfall, erosion, topographic factors, etc. for estimating soil loss from a given area.