

土の侵食性と物理的性質

内 田 勝 利*

Relation of Soil Physical Properties to its Erodibility

Katsutoshi UCHIDA

Faculty of Agriculture, Tottori University

Abstract Multiple regression analyses were fitted to those soil physical parameters found to be most useful in predicting soil erodibility to particle detachment and transport by rainfall and runoff. The soil erodibility was made clear by introducing the new term of "clay ratio" and "increment of soil loss".

The results obtained are as follows :

1. The prediction equations in soil loss developed from the regression of data are :

$$e_{DV} = 5.147 + 16.695X_1 - 0.017X_{12} - 1.312X_{16}$$

or

$$e_{DV} = \frac{1}{X_{22}} (0.833 + 17.091X_1 + 0.113X_6 - 0.025X_{12} - 4.558X_{16})$$

in which e_{DV} is soil loss (mm^3/cc), X_1 is "clay ratio", X_{12} is coefficient of aggregation, X_{16} is infiltration ratio, X_{22} is bulk density (g/cc), and X_6 is silt plus fine sand (%).

2. It was found that "clay ratio" was the most important parameter to be used in soil loss by rainfall and runoff. "Clay ratio" alone explained 84 percent of the variation in soil loss.
3. Erodibility of soils can be evaluated from "clay ratio" and "increment of soil loss".

1. ま え が き

水による土壌侵食には、第1段階として雨滴による分離、飛散、輸送の侵食過程がある。次に、層状あるいはリル流による侵食が水食過程の第2段階である。雨滴の衝撃、飛散過程は高分離力をもつが低輸送力である。一方、層状とリル流は低分離力と高輸送力をもっている。いずれもが裸土と一緒に作用する時、侵食は重大な問題を生じる。それ故に、降雨と流出による土粒子の分離と輸送に抵抗する土の性質、すなわち土固有の侵食性は侵食予測あるいは土地利用計画等において重要な因子である。また土自身の侵食性ととも土の浸入能と透水性が土の侵食性に影響する。この土の侵食性について室内において簡単な方法により提示することは、土の侵食災害を予測するためにも重要である。従来、土の侵食性はMiddletonの分散率、侵食率によって検討されているが、火山灰土に対しては往々にして合致しない場合が多い。それ故に、火山灰土を含む土全体に対して土の侵食

性を判定するための規準となる侵食予測因子を明確にすることが切望される。

本論文は土の侵食性と物理的性質について重回帰分析を用いて解析を行い検討し、そして土の侵食性の判定規準となる一試案を提示している。

2. 土の侵食性に関連する研究について

水による土の侵食性に影響する土の性質は、(1)浸透速度と透水性に影響する土の性質、(2)降雨と流出による分離、飛散、摩擦、輸送する力に抵抗する土の性質の2型に分けられる¹⁾。

Middletonは土の物理的性質に基づく土の侵食性の指数の提出を試みた最初の一人である。彼は分散率を考え、そして土の侵食性に影響する土の性質に最も関係深いものを侵食率と称した²⁾。

O'neal³⁾はホ場にて土の透水性を評価するための手懸を展開した。この手順における最初の段階は構造の型を決定することであった。それから土の透水性の分類は4

*鳥取大学農学部

つの主因子と8つの第2因子から見積られた。

Adamsら⁴⁾は土の侵食性に影響する多くの重要な土の理工学的性質を述べるため、彼らは流出、浸透、洗掘侵食、飛散侵食、0.10mm以下の耐水性団粒、分散率、シルトと粘土、単位体積重量、60cm water tensionによって排水された間ゲキ、ホ場用水量での空気の透過性の現場、室内測定を行った。

川村ら⁵⁾は鈹質土壌の侵食性を気象条件と直接関連づけ、土の含水状態の違いにおける流亡土と土の耐水性集合体と密接な関係があることを明らかにした。また彼らは土の侵食性の判定指標として風乾率を提案している。

Epstein⁶⁾は土の侵食性へ影響をもつ降雨衝撃によって影響される土の表面状態の変化について検討している。また Bruce-okineら⁷⁾は団粒径、初期土水分、雨滴の温度の因子を取り上げ、土の構造安定への影響について実験を行っている。

土の理工学的性質は土の侵食性に影響し、影響する因子は互いに関係があると考えられる。それら因子のいくらかは過去の乾燥履歴、侵食、管理状況に影響される。土による影響のみを分離するための手段として Wischmeierら⁸⁾は、異なる降雨性質にて測定した流出土を調整するため降雨・侵食指数の使用と、異なる地形の調整のために勾配因子の使用を提出した。また Wischmeier⁹⁾は流出土予測のため、指定された勾配と斜面長でのホ場から測定された単位降雨・侵食指数あたりの流出土として土の侵食性因子(K)を定義している。K値の定量化には、Olsonら^{10),11)}、Barnettら¹²⁾、Mcgregorら¹³⁾の研究があり、1970年代になると、Wischmeierら¹⁴⁾はシルト+微細砂、砂分、有機物含有量、土の構造、透水性の5因子を用いてK値を求めるのに簡単なノモグラフを提出している。Youngら¹⁵⁾は土の侵食性を5変数、すなわち土の団粒指数、分散率、密度、シルト+微細砂、モンモリロナイト量からK値を計算し比較検討を行っている。

本研究は火山灰土を含む19試料土を用いて、人工降雨と越流水を一定にして土の物理的性質の侵食性に対する効果を把握するため実験した。なお、土の侵食性関係は重回帰分析法の展開にて示唆した。

3. 実験方法

実験は人工降雨と土槽上流端越流水による土の侵食について行った。人工降雨は降雨発生部、定水位給水槽、流量制御器から構成される人工降雨発生装置を用いて作成された。なお、tubing-tipを用いた降雨発生部は266個/m²の雨滴形成部から成り、これに振動を与えることによって雨滴を形成させる。雨滴の落下高さは平均6.95

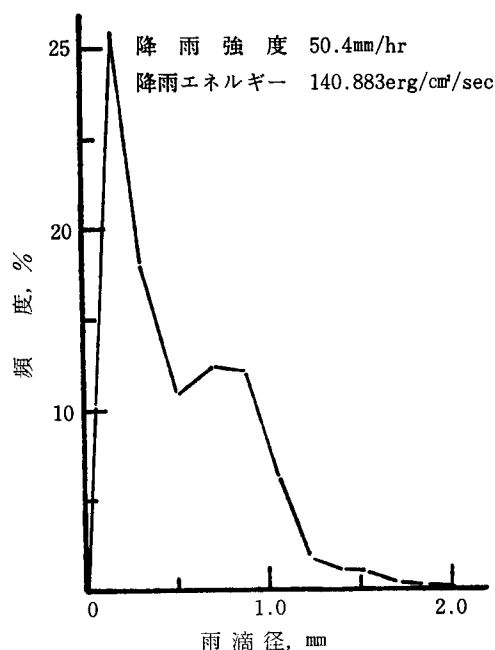


図-1 雨滴の頻度分布

mである。雨滴はウォーターブルー紙にて採取し、その紙上の雨滴痕をもとに今井ら¹⁶⁾の実験式から雨滴径を求めた。代表的な雨滴分布を図-1に示す。図-1より、実験に用いられた人工降雨の雨滴径は2mm以下であり、Laws¹⁷⁾の実験結果より、すべての雨滴はほとんど終速度に達していると考えられる。地表流は定水頭補助水槽から導びかれた水を上流端に供給することにより流された。

実験土槽は斜面長30cm、幅10cm、深さ3cmであり、下流端に排水孔を有し、その孔の開閉にて排水条件を規制した。なお、供試土は2mm目フルイ通過の風乾土を用い土槽上部2cm深に供試土を、下部1cm深に砂を均一に充填した後、下流端の排水孔より給水し、飽和させ、その後排水させて24時間後に実験を行った。

実験方法は供試土に降雨強度(降雨量)が約50mm/hr地表流量が降雨量の約2倍である水量を与え、下流端にて30分間流出土水量を採取した。なお、斜面勾配は8°であった。

供試土はシラスを除いて、いずれも鳥取県内の未耕地から採土した。関金クロボクは鳥取県東伯郡関金町から採取した大山クロボクであり、大山クロボクの平均的な性質を示している¹⁸⁾。その他に火山灰土として鏡成、鳥大クロボク、赤碕土を取り上げた。またシラスは鹿児島県大口市にて採土したものである。19供試土の物理試験結果を表-1に示す。

表-1 試料土の物理性

試料	粒度組成			土の分類名	比重	コンシステンシー			有機物 含量
	砂	シルト	粘土			液性 限界	塑性 限界	塑性 指数	
	%	%	%			%	%	%	
津ノ井	18.5	38.5	43.0	粘土	2.722	51.8	25.1	26.7	0.3
大栄B	30.5	39.3	30.2	粘土	2.699	53.1	42.5	10.6	0.2
高住	5.8	55.9	38.3	シルト質粘土	2.781	74.2	46.2	28.0	—
山湯山B	35.0	37.0	28.0	粘土質ローム	2.684	46.2	33.6	12.6	0.7
山湯山A	43.0	34.5	22.5	粘土質ローム	2.686	42.3	30.9	11.4	0.7
郡家C	46.0	26.5	27.5	粘土質ローム	2.643	38.9	31.0	7.9	0.3
大栄A	58.0	21.0	21.0	砂質粘土ローム	2.659	45.6	38.2	7.4	0.3
郡家D	38.0	33.5	28.5	粘土質ローム	2.696	68.2	31.0	37.2	0.7
赤崎	77.0	15.0	8.0	砂質ローム	2.674	77.6	50.5	27.1	2.1
関金クロボク	52.7	30.8	16.5	砂質ローム	2.319	91.7	75.8	15.9	25.4
牛ノ戸	35.0	43.5	21.5	粘土質ローム	2.699	34.7	21.9	12.8	0.5
鏡成クロボク	65.5	27.0	7.5	砂質ローム	2.229	124.0	100.2	23.8	45.0
シラス	65.2	24.0	10.8	砂質ローム	2.471		N.P.		0.0
郡家B	33.0	49.0	18.0	ローム	2.746	58.0	42.0	16.0	1.7
横枕	82.0	12.5	5.5	砂	2.640		N.P.		1.2
布勢	73.0	20.5	6.5	砂質ローム	2.666		N.P.		0.0
鳥大クロボク	50.0	33.0	17.0	砂質ローム	2.510	54.9	41.3	13.6	26.8
砂丘砂	98.0	2.0	0.0	砂	2.687		N.P.		0.8
郡家A	36.0	51.0	13.0	シルト質ローム	2.691	38.1	26.0	12.1	1.2

表-2 重回帰分析に用いられた説明変数

説明変数 X	
X ₁	粘土比
X ₂	粘土分, (%)
X ₃	粘土+シルト
X ₄	シルト+ (砂+粘土)
X ₅	砂÷ (シルト+粘土)
X ₆	シルト+細砂, %
X ₇	シルト, %
X ₈	loge シルト
X ₉	loge 細砂
X ₁₀	loge 粗砂
X ₁₁	風乾率
X ₁₂	団粒係数
X ₁₃	50μ分散率
X ₁₄	20μ分散率
X ₁₅	侵食率
X ₁₆	浸入率
X ₁₇	pF1.5, %
X ₁₈	pF3.0, %
X ₁₉	pF4.2, %
X ₂₀	コロイド+水分当量
X ₂₁	有機物含量, %
X ₂₂	乾燥密度, g/cc
X ₂₃	液性限界, %
X ₂₄	塑性指数, %
X ₂₅	比重
X ₂₆	loge 液性限界

4. 実験結果と考察

土の侵食性に関する研究は前述のように多くの研究があり、数々の土の侵食性に対する判定指標が提案されている。本論文では、幾つかの土壌因子を考え、降雨と流出による分離と輸送へ関連づけるため色々な組合せにて検討した。また研究目的は有機質火山灰土を含む土全体に対する土の侵食性の判定指標となる侵食因子を示唆することにある。

1) 土の侵食量について

土の侵食性に影響する土の性質は2つの主要な因子に分けられる。ここでは、降雨と流出による分離、輸送力に抵抗する土の性質を3型に分け、以下のように土の侵食性に影響する26侵食因子を4グループに分別した。

- 土の粒径分の組合せ
- 土壌構造の分離度合
- 降雨と流出の影響下での浸入能
- (a) 因子以外の土の物理的性質

表-2に侵食因子として取り上げた26変数を示す。表におけるこれら説明変数(x)と土の侵食量を目的変数(y)として重回帰分析にて解析を行う。(a) 因子としては、粘土分がほとんど零である砂質系の土を考慮して分母に粘土分があるのは省略し、X₁~X₁₀の10変数を選択した。(b) 因子としては、風乾率¹⁰⁾、団粒係数、Middletonの分散率、侵食率がある。有機質火山灰土を

考慮すると分散率，侵食率は土を完全分散させるうえで問題が残る。変数としては $X_{11} \sim X_{15}$ の5変数である。

(c) 因子としては，浸入率（排水量を供給水量で割った値， X_{16} ）を用いた。(d) 因子としては，土の物理的性質である $X_{17} \sim X_{28}$ の10変数を選択した。

すべてのデータを用いて4グループに分別した26変数の最良の組合わせが重回帰分析を用いて解析された。重回帰式は各グループ内で最も有意な1変数を選択し，それらの組合わせから求めた。重回帰分析は有意水準1%にて検定を行い，重回帰式の標準誤差が最小となる組合わせを選んだ。選択した変数の組合わせを表-3に示す。土の侵食量予測式は次式のように仮定した。

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \dots (1)$$

ところで， Y は侵食量(mg/ccあるいは mm^3/cc)である。 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ は重回帰分析によって決定した係数である。 x_1, x_2, \dots, x_n は表-2に示す変数である。

表-3 目的変数に関して選択された予測因子

目的変数 Y	説明変数 X^*	標準誤差	重相関係数	F**
e_D	$X_1, X_{12}, X_{16}, X_{25}$	1.442	0.966	48.115***
e_D	X_1, X_6, X_{12}, X_{16}	1.096	0.980	85.967***
e_{DV}	X_1, X_{12}, X_{16}	1.391	0.957	54.476***
e_{DV}	$X_1, X_{10}, X_{12}, X_{16}$	1.109	0.973	66.752***

*変数の番号については表-2 参照

** F分布検定の値

***有意水準 1.0%で有意

各グループ内の説明変数使用による侵食量予測式としては表-3の選択された予測侵食因子を用いて次式を提出する。

$$e_D = 1.420 + 17.537 X_1 - 0.019 X_{12} - 1.876 X_{16} + 1.653 X_{25} \dots (2)$$

$$e_{DV} = 5.147 + 16.695 X_1 - 0.017 X_{12} - 1.312 X_{16} \dots (3)$$

ここに， e_D は排水状態における水の単位体積あたりの流出土(mg/cc)である。 e_{DV} は e_D を土の乾燥密度で割った値であり，水の単位体積あたりの流出土容積(mm^3/cc)である。なお，非排水状態での選択された変数が表-3に載せてないのは，有意水準1%にて有意な選択された変数の組合わせがなかったからである。(2)，

(3)式において重相関係数はそれぞれ0.966, 0.957であり，これらの式は土の侵食量を予測するためには十分使用できると考える。またこれら両式において，土の侵食性の大小を予測するのに最も簡単な予測因子は粘土比

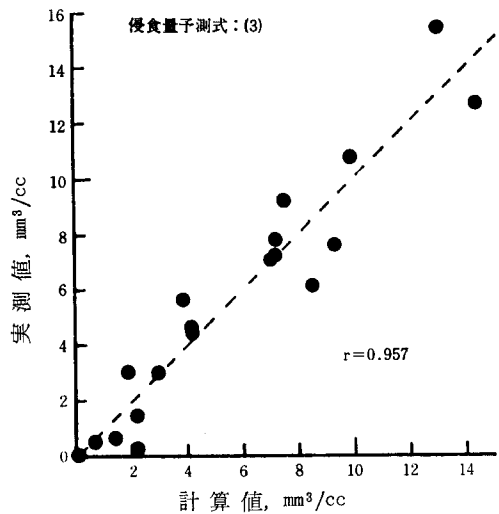


図-2 土の侵食量の計算値と実測値

(粘土/ (シルト+砂) と定義される) であり，侵食量変動のそれぞれ83, 84%を占めている。(2)，(3)式を用いて計算した e_D, e_{DV} 値と実測値との相関係数の比較から e_D の実測値と予測値の方がより有意であるがF値と有機質火山灰土の特性を考慮すると e_{DV} の方にて土相互の侵食性の比較をすることが望ましいと考える。 e_{DV} の実測値と計算値を図-2に示す。また(3)式に選択された侵食因子と e_{DV} との関係を図-3に示す。粘土比，浸入率は e_{DV} と有意水準0.1%で有意であり，団粒係数は有意水準5%で有意である。団粒係数があまり有意でないのは，実験に供した時の土相互の風乾処理の程度等によるものと思われる。 e_{DV} と粘土比(Cr)との関係における回帰式は

$$e_{DV} = 0.319 + 20.318 Cr \dots (4)$$

とあらわされる。この式の相関係数は0.916である。そして粘土比はJIS規定の粒度分析に従って求めた粒度分布からの値であり，有機質火山灰土における分散剤など考慮する必要がないという利点もある。粘土比は土の侵食性の判定指標の侵食予測因子として土全体に対して大いに使用できると考える。

今，26侵食因子から，有意水準1%，標準誤差が最小となる最良の組合わせによる e_D, e_{DV} における重回帰式は，表-3の選択された予測侵食因子を用いて次式を提出する。

$$e_D = 0.833 + 17.091 X_1 + 0.113 X_6 - 0.025 X_{12} - 4.558 X_{16} \dots (5)$$

$$e_{DV} = 10.550 + 11.086 X_1 - 0.984 X_{10} - 0.018 X_{12} - 3.164 X_{16} \dots (6)$$

これら両式はそれぞれ(2)，(3)式よりかなり有意であり，(5)，(6)式による予測値はそれぞれ侵食

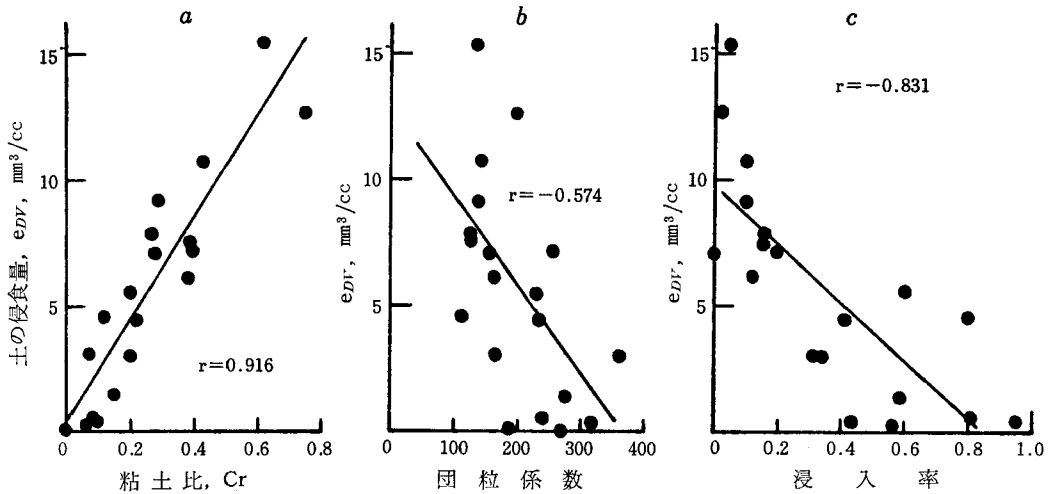


図-3 土の侵食量と土壌因子との関係

量変動の96, 95%を説明している。両式の重相関係数はそれぞれ0.980, 0.973であり, F値, 標準誤差と考え合わせると(5)式が最良の重回帰式と推測する。しかしながら, 有機質火山灰土は団粒構造が発達して, 間ゲキ比が大きく, 比重も小さい故に, 土の重量による(5)式からの侵食量予測値は有機質火山灰土を十分に説明していないと考える。そこで, 土の容積による侵食量予測値として, (5)式に土の乾燥密度(X_{22})を導入することにより(5)式を修正し次式を提出する。

$$\frac{e_D}{X_{22}} = e_{DV} = \frac{1}{X_{22}} (0.833 + 17.091X_{11} + 0.113X_6 - 0.025X_{12} - 4.558X_{16}) \dots (7)$$

(6), (7)式を用いて計算した侵食量予測値 e_{DV} と実測値とを比較すると, それぞれ相関係数は0.973と0.974

であり, (7)式の方が少し良い結果を得た。 e_{DV} の実測値と(7)式を用いて計算した予測値との関係を図-4に示す。(7)式において選択された4変数は粘土比, シルト+細砂, 団粒係数, 浸入率であり, (3)式よりシルト+細砂が追加されている。この侵食因子については, Wischmeier²⁰⁾, Youngら²¹⁾も取り上げており, 土の侵食性に対しては重要な因子の1つであると考えられる。Mazurak²²⁾, Farmer²³⁾, 内田ら²⁴⁾は飛散侵食の粒径fractionにおける実験から一番飛散し易い粒径分に関して興味ある結果を示している。

土の侵食性の判定指標として, 粘土比が最も重要な侵食因子であると結論づけられる。そして外的な要因, すなわち下層土の透水性などを考慮しないその土固有の侵食性を評価する場合には粘土比の大小によって土の侵食性は判定できる。今, 試料土の粒径分布における粘土分の3段階, すなわち粘土分30%以上, 30~20%, 20%以下と土の侵食性判定における安全性を考慮して, 表-4のような土固有の侵食性の判定規準が求められる。

表-4 土固有の侵食性と粘土比

土の侵食性	粘土比
大	0.4<
中	0.4 ~ 0.2
小	0.2>

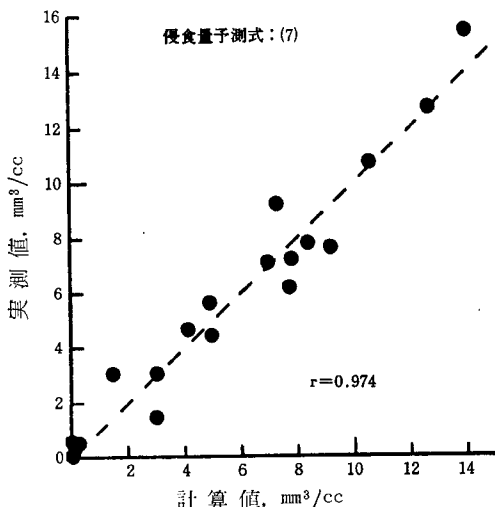


図-4 土の侵食量の計算値と実測値

2) 土の侵食量増加率について

次に, 内的要因である土固有の侵食性だけではなく, 外的要因である浸透速度と透水性に影響する土の性質を考慮した場合の土の侵食性について考える。排水, 非排

水状態の実験結果からの侵食量を基にして、土の侵食量増加率(e_r)を求める。土の侵食量増加率は、 $e_r = (e_{DV} - e_{DV'}) / e_{DV}$ と定義した。ここに、 e_{DV} は下層土の影響を受ける状態での水の単位体積あたりの流出土容積 (mm^3/cc) である。 e_{DV} は供試土の下層土の影響、すなわち下層土が不透水性である場合最大の侵食量の増加を示す。 e_r が大きいほどその土固有の侵食性だけではなく、下層土の透水性に大きく土の侵食性が影響されることを示している。

土の総合的な侵食性を判断する場合には、前述の内的要因による e_{DV} と外的要因による e_r とから土の侵食性を判定する必要がある。今、土の侵食性 (e_r) を $e_r = e'_{DV} \times e_r + e'_{DV}$ と定義する。ここに、 e'_{DV} は供試土の e_{DV} を、(4) 式に $C_r = 1.0$ (粘土分を50%と仮定した) を代入した時の e_{DV} で割った値である。 e'_{DV} は土自身の性質による値であるから、その土については一定である。そして、 e_r は下層土の透水性の違いによって変化する。従って、 e_r は e_r の増減とともに増減する。図-5 は下層土が不透水性の場合の各供試土の e_r と e_r との関係を示している。図-5 より火山灰土について侵食性を判定すると、鳥大クロボク、シラスは侵食性大であり、関金、鏡成クロボク、赤碓土は侵食性小となる。シラスは一般的にクロボクに比較して非常に侵食性は大きく、下層土の透水性にも左右され、侵食災害を受けやすい土である。またクロボクにおいて、関金、鏡成クロボクと鳥大クロボクとはその侵食量に大きな差がみられた。これはそれらの地域的な違いあるいは乾燥履歴が大きな要因をなしていると考えられる。また両者は物理的性質において大きな違いがみられる (表-1)。以上両クロボクの比較より

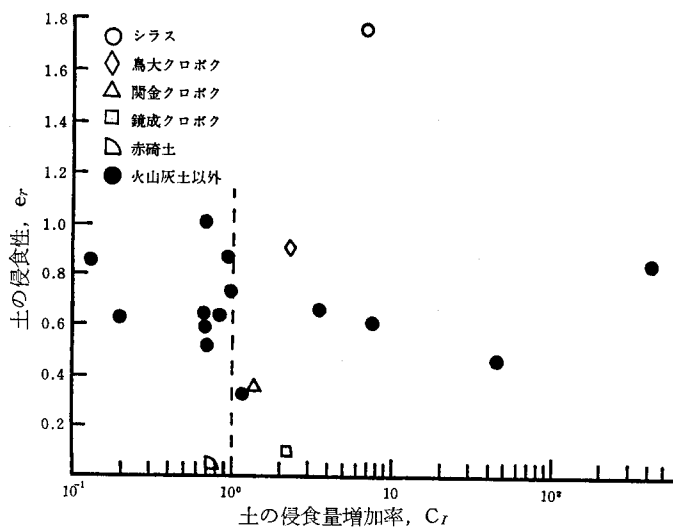


図-5 C_r と e_r との関係

有機質火山灰土は気候的な影響あるいは耕作等によりその理工学的性質の変化を伴い、その侵食性は増大する。また有機質火山灰土は下層土の透水性にも左右され、その侵食災害は乾燥・湿潤の繰返し、あるいは人為的な攪乱等により増加する。

土固有の性質による侵食性の判定指標の侵食予測因子である粘土比と侵食量増加率とを使用して表-5に土の侵食性の判定規準を提示する。なお、侵食量増加率の危険度の境として e_{DV} を $e_{DV'}$ の2倍と仮定して、 e_r 値は1.0

表-5 土の粘土比と侵食量増加率

粘土比	土の侵食量増加率	
	$1.0 >$	$1.0 \leq$
$0.4 <$	土固有の性質に左右され、常に多量の土が侵食されるが、急激な侵食量の増加は起らない	侵食量大で非常に危険な土
$0.4 \sim 0.2$	土固有の性質に左右され、侵食量は中程度である	下層土の透水性に左右され、やや危険な土
$0.2 >$	侵食量小で安全な土	下層土の透水性に左右され、侵食量は増加傾向を示す

表-6 土の侵食性の判定規準

土の侵食性	e_r
大	$0.8 <$
中	$0.8 \sim 0.4$
小	$0.4 >$

を用いた。また、表-4の粘土比、(4) 式とここでは仮に $e_r = 1.0$ を用いて、土の侵食性 e_r を数値化したものを表-6に示す。各試料土において下層土の透水性の違いにより e_r は変化する。その変化の範囲は試料土における e'_{DV} の値から、下層土が不透水性の場合の最大侵食量増加率 e_r 値を用いて求めた e_r 値までである。

5. あとがき

降雨と流出による土の侵食性を評価するうえで判定指標となる侵食予測因子について、重回帰分析を用いて解析した。特に火山灰土を含む土一般に対して、土の粘土比、侵食量増加率という語を導入して土の侵食性に検討を加

えた。そして次のような結論を得た。

(1) 重回帰分析による土の侵食量予測式は、

$$e_{DVR} = 5.147 + 16.695X_1 - 0.017X_{12} - 1.312X_{16}$$

あるいは

$$e_{DVR} = \frac{1}{X_{22}} (0.833 + 17.091X_1 + 0.113X_6 \\ - 0.025X_{12} - 4.558X_{16})$$

とあらわされる。

(2) 粘土比(粘土/(シルト+砂))は降雨と流出による土の侵食において用いられる最も重要な因子である。そして粘土比は土の侵食量変動の84%に寄与していた。

(3) 土の侵食性は粘土比と侵食量増加率でもって評価できる。

最後に、本研究をまとめるに当り、懇切なるご指導とご教示いただいた九州大学藤川武信教授に心からの謝意を表します。

引用文献

- 1) Smith, D.D. and Wischmeier, W.H. : Rainfall erosion, *Advances in Agronomy* 14, pp.109~148 (1962)
- 2) 土質工学会編 : 土質工学ハンドブック, 技報堂, p.316 (1965)
- 3) O'Neal, A.M. : A key for evaluating soil permeability by means of certain field clues. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 16, pp.312~315 (1952)
- 4) Adams, J.E., Kirkham, D. and Scholtes, W.H. : Soil erodibility and other physical properties of some Iowa soils. *Iowa State Coll. J. Sci.* 32, pp.485~540 (1958)
- 5) 川村秋男・山崎清功・氏家勉 : 寡雨条件における侵蝕機作に関する研究, *四国農試報告*, 8, pp.171~184 (1963)
- 6) Epstein, E. and Grant, W.J. : Soil erodibility as affected by soil surface properties, *Trans. ASAE* 14(4), pp.647 648, 655 (1971)
- 7) Bruce-okine, E. and Lal, R. : Soil erodibility as determined by raindrop technique, *Soil Science* 119(2), pp.149~157 (1975)
- 8) Wischmeier, W.H., Smith, D.D. and Uhland, R.E. : Evaluation of factors in the soil-loss equation, *Agr. Eng.* 39 (8), pp.458~462, 474 (1958)
- 9) Wischmeier, W.H. : Cropping-management factor evaluation for a universal soil-loss equation, *Soil Sci. Soc. Proc.* 24(4), pp.322~326 (1960)
- 10) Olson, T.C., Mannerling, J.V. and Johnson, C.B. : The erodibility of some Indiana soils, *Ind. Acad. Sci. Proc.* 72, pp.319~324 (1962)
- 11) Olson, T.C. and Wischmeier, W.H. : Soil-erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations, *Soil Sci. Soc. Proc.* 27(5), pp.590~592 (1963)
- 12) Barnett, A.P., Rogers, J.S., Holladay, J.H. and Dooley, A.E. : Soil erodibility factors for selected soils in Georgia and South Carolina, *Trans. ASAE* 8(3), pp.393~395 (1965)
- 13) Mcgregor, K.C., Greer, J.D., Gurley, G.E. and Bolton, G.C. : Erodibility factors for Loring and Lexington soils, *Jour. Soil Water Conserv.* 24(6), pp.231~232 (1969)
- 14) Wischmeier, W.H., Johnson, C.B. and Cross, B.V. : A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites, *Jour. Soil Water Conserv.* 26(5), pp.189~193 (1971)
- 15) Young, R.A. and Mutchler, C.K. : Erodibility of some Minnesota soils, *Jour. Soil Water Conserv.* 32(4), pp.180~182 (1977)
- 16) 今井一郎・藤原美幸・市村市太郎・吉原善次 : 雨のレーダー反射因子と粒径分布について, *研究時報*, 7(7), pp.36~47 (1955)
- 17) Laws, J.O. : Measurements of the fall-velocity of water-drops and rain-drops, *Trans. Amer. Geophys. Union.* 22, pp.709~721 (1941)
- 18) 小谷佳人・河野洋・内田勝利 : 大山, 三瓶山系有機質火山灰土の理工学性に関する研究(I), *農土論集*, 60, pp.7~13 (1975)
- 19) 前掲5)
- 20) 前掲14)
- 21) 前掲15)
- 22) Mazurak, A.P. and Mosher, P.N. : Detachment of soil particles in simulated rainfall, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32(5), pp.716~719 (1968)
- 23) Farmer, E.E. : Relative detachability of soil particles by simulated rainfall, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37(4), pp.629~633 (1973)
- 24) 内田勝利・河野洋・小谷佳人 : 水滴による土粒子の飛散について, *鳥大農研報*, 30, pp.188~193 (1978)