

降雨による農地斜面からの 土壌流出モデルに関する基礎的検討

FUNDAMENTAL STUDY ON MODELLING OF SEDIMENT TRANSPORT FROM AGRICULTURAL LAND DUE TO RAINFALL RUNOFF

村上正吾¹・林誠二²・渡辺正孝³

Shogo MURAKAMI, Seiji HAYASHI, Masataka WATANABE

¹正会員 工博 国立環境研究所室長 水土壤圏環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 国立環境研究所研究員 水土壤圏環境部 (同上)

³正会員 Ph. D 国立環境研究所部長 水土壤圏環境部 (同上)

The sediment transport from steep agricultural land through the watershed causes not only the deformation of river morphology but also the change of terrestrial and aquatic ecosystems. Hence, the sediment discharge equation due to rainfall runoff should be established so as to predict and to prevent the outflow of agricultural soils to the watershed. In this study the sediment discharge equation applied to the bare land was proposed based upon the experiments with the rainfall simulator and the previously-obtained data. The sediment discharge equation inclusive of the protection effect of vegetation cover which was examined theoretically was applied to the actual field, and explained the order of sediment outflow from agricultural land by using the runoff process model simultaneously.

Key Words : rainfall runoff, Stanford Watershed Model, erosion in agricultural land, stream power of surface flow, protection effect by vegetation cover

1. まえがき

従来、治水・利水の面から水系内の土砂輸送の『量』的な動態把握の検討が行われてきた。流域の水環境管理、特に生息空間、生態系の保全の観点からすると、『量』的な検討に加え、栄養塩が吸着した土壌といった意味での『質』の面も考えた土壌侵食量の評価が必要とされる。

例えば、釧路湿原に流入する久著呂川では1960年代後半から70年代前半にかけ、周辺の農業開発の必要性から河道改修、農業排水路等の水系網の整備が進められた。一方、農地拡大と森林域の減少とが相俟って増大した流出土砂は疎通能力の向上した河川を通じて湿原内に流入し氾濫堆積した。流出土壌に含まれる栄養塩は氾濫域での植生の成長を促進、これがさらに土砂堆積を促進し、植生域が拡大するという相互作用系を形成することで湿

原の陸地化が進み、湿原生態系の変化に繋がる問題となっている¹⁾。このように流域の中山間地では農業開発が進行し、森林のみの土地利用から農業と宅地等の混在利用に変化、富栄養化成分を含む土壌の流出が増大する傾向にあり、降雨時の侵食土壌を含む表面流から高濃度の全窒素、アンモニア態窒素、全リンが検出されている²⁾。すなわち、懸濁態の富栄養化成分の定量的把握あるいは懸濁態成分の流出抑止策の評価さらに河川地形への影響といった観点から、降雨による流域からの流出土壌の流域内動態のモデル化が必要とされている。土壌の流出現象は輸送外力となる降雨流の水文過程が土壌表層構造に規定されるため、物理水文過程と土砂輸送機構の連立的理解が不可欠である。本研究では流域内での土壌流出の動態モデルの基本構成を示し、その構成要素の内、降雨流出モデルと土壌流出モデルについての検討結果を示す。

2. 流域内での土壌流出モデルの構成

著者らは、水による物質輸送の概念に忠実であること、地形特性、土壌特性、土地利用状況といった流出過程に及ぼす様々な要因の空間分布の取り込み易さの観点から、河川水系網において合流・分流を端点とする河道区間への集水域を単位流域としてモデル化し、これらを多数接続させることで流域全体を表現するベクター型のモデルを用いている。この時、対象流域の環境情報のデータベースを前提として、流出土壌の動態モデルは、流域面での (i) 降雨流出モデル、(ii) 土砂生産場から河道への土砂輸送モデル、(iii) 河川流モデル、(iv) 河道での流砂モデルの4つのサブモデルより構成されることになる。

流域斜面での降雨流出モデルとしては、土地利用あるいは土壌等で条件が付けられたタンクが流域面に多数配置された分布型モデルが長・短期流出双方への適用性を有するとの観点から、Crawford & Linselyが開発したStanford Watershed Model Ver.IV^{3,4)}が適当であると、著者らは判断している。著者らはすでに同モデルと河川流の貯留方程式に基づく洪水追跡により降雨流出の再現計算を行っている^{5,6)}。しかしながら、土砂、懸濁態栄養塩等の物質の輸送の予測精度の向上のためには、(i)河道区間内での流れが必要な精度に応じて正確に計算されること、(ii)河道網系としてのシステムの取り扱いが容易であること、の条件を満たす次式で表される非定常流の拡散波近似モデルの流出モデルへの組み込みが必要である。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + w \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q_0 \right) = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$w = \partial Q / \partial A \quad (2a)$$

$$\mu = Q / (2Bi_b) \quad (2b)$$

ここで、 w ：洪水流の伝播速度、 μ ：拡散項の係数、 t ：時間、 Q ：流量、 x ：流下距離、 q_0 ：河道の単位長さ当りの横流入流量、 A ：流水断面積、 B ：川幅、 $i_b (= \sin \theta)$ ：河床勾配 (θ ：路床傾斜角度)である。井上⁷⁾は拡散項を含む上式は広範囲の強度の洪水流に対して良好な適用性を有することを示している。

各河川区間に対応する単位流域面でStanford Watershed Modelに基づいて計算される降雨流出の各成分を河川への横流入として扱うことで、単位流域面での水文過程と河川流とのネットワーク構造の形成が可能となる。

降雨流出モデルに比べて、降雨による農地からの土壌流出量については一般化されたモデルがないため、本研究で検討を行い、河道での輸送については流出土砂量評価法が確立した後の検討課題とした。

3. 斜面耕地からの土壌流出モデル

(1) 耕地からの流出土砂強度の表示について

農耕地からの土壌侵食流亡量の代表的な予測式であるWischmeier & Smith⁸⁾のUSLE(Universal Soil Loss Equation)では、降雨による農耕地からの土壌流亡量 A (単位面積当りの年間土壌侵食量)は、 R ：降雨強度、 K ：土壌の物理化学的性質、 L ：斜面長、 S ：傾斜角度、 C ：作物の種類、 P ：侵食に対する保全対策の積として、

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3)$$

と表示される。USLEはあくまでも年平均土壌流亡式であり、集中豪雨、断続的な長雨等の非定常性が強い降雨の場合への適用は限界があることが指摘されており、我が国では一降雨による農地からの土壌流出量の評価の観点から、流出土砂強度 q_B (単位時間・単位幅当たりの体積表示土壌流出量)と前述した要因との関係についての検討が行われている^{9,10)}。これらの検討結果によると、営農状態での流出土砂強度は、降雨・地形条件という外力(R, L, S)と土壌の性質に関わる侵食抵抗性(K)のみにより規定される裸地での流出土砂強度 q_{B0} 、侵食抵抗要因としての作物の種類、耕作法、保全対策の積として、

$$q_B = \Xi \cdot \Pi \cdot \Gamma \cdot q_{B0} \quad (4)$$

と表示され、各項の合理的評価が求められている。ここで、 Ξ ：作物による被覆効果、 Π ：耕作形態に関わる要因、 Γ ：保全対策要因、 q_{B0} ：裸地状態での土壌流出強度である。本研究では特別な保全対策が採られず、畝が作られていない営農状況を、耕地からの土壌流出の基準と考え、 Ξ および q_{B0} の表示について実験的な検討を行う。

(2) 裸地斜面からの土壌流出に関する実験

q_{B0} の検討のための土壌流出実験は長さ3m、幅2.5mの領域に散水可能な人工降雨装置¹¹⁾の下に、長さ $L=2.7$ m、幅 $W=1.5$ mの可変勾配移動床水路を設置して行った。一様砂の実験の場合には粒径 $d=0.088$ cmのほぼ均一砂を用い、混合砂の場合には中央粒径 $d_{50}=0.088$ cmで幾何標準偏差 $\sigma_g=1.5$ 、4.0の対数正規型粒度分布に従う混合砂を用いた。実験条件を表-1に示す。降雨装置の高さの制限により、実験の降雨強度 $r=70, 255, 390$ (mm/hr)は見かけ上大きく設定したが、実際には単位時間当たりに単位面積の砂面に落下する自然降雨の運動エネルギーに換算すると、それぞれ25, 100, 150(mm/hr)に相当する降雨強度である。表-1に実験結果を、図-1に無次元土壌流出強度 q_B と無次元侵食外力 $q \cdot I$ の関係を示した。ここで、 $q_B = q_B / \{(\sigma/\rho-1)gd^3\}^{0.5}$ 、 $q \cdot I = q / \{(\sigma/\rho-1)gd^3\}^{0.5} \cdot I / (\sigma/\rho-1)$ であり、 q ：斜面下端での表面流の単位幅流量、 g ：重力加速度、 σ ：土の密度、 ρ ：水の密度、 I ：斜面勾配である。

表-1 実験条件と結果

Run No.	σ_g	θ (°)	r (mm/hr)	$q \cdot l$	q_B
1	1.01	0.57	70	0.0088	0.0009
2			255	0.0142	0.0002
3			390	0.0440	0.0112
4		1.00	255	0.0130	0.0084
5			390	0.0186	0.0143
6		2.90	255	0.0140	0.0009
7			390	0.0489	0.0221
8		5.00	255	0.0588	0.0558
9			390	0.0915	0.1860
10		10.00	255	0.1190	0.2030
11			390	0.1860	0.2890
12	1.5	0.57	70	0.0100	0.0002
13			255	0.0110	0.0012
14			390	0.0158	0.0013
15		2.90	255	0.0048	0.0162
16			390	0.0785	0.0336
17	4	0.57	70	0.0100	0.0062
18			255	0.0120	0.0040
19			390	0.0160	0.0140
20		2.90	255	0.0480	0.0220
21			390	0.0785	0.0380

表-2 斜面侵食に関する従来の実験概要

Author		Rain	L(m)	W(m)	θ (°)	Soil	σ_g	d_m (cm)
Holly	○	Natural	19.8	6	24.0	Natural	-	0.010
Sawai	□	Simulated	7.0	7.0	9, 12.4	Sandy	2.76	0.088
Sakanishi	▽	Simulated	10.0	2.5	2.5~10	Kuroboku	4.4	0.036
& Hayase	▲	Natural	10.0	2.5	2.5~10	Kuroboku	4.4	0.036
	△					Sandy	4.3	0.019
Murakami	●	Simulated	2.7	1.5	0.5~10	Sandy	1.0	0.088
	⊖						1.5, 4	0.088

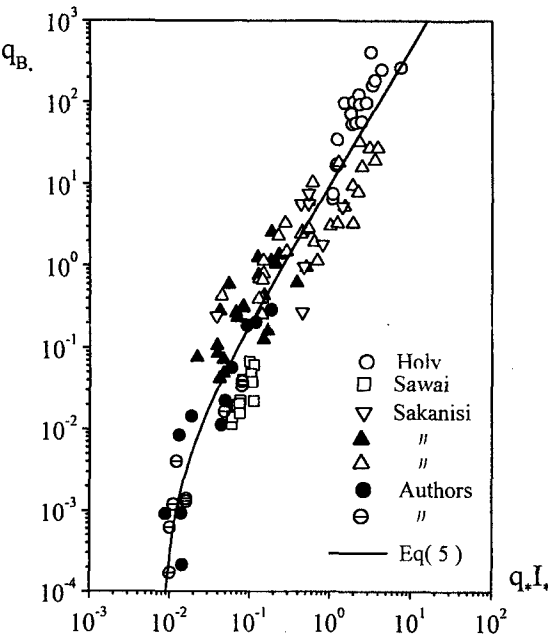


図-1 流出土砂強度と stream power の関係

ql は水流の底面せん断応力と平均流速との積で表される stream power で、芦田・奥村¹²⁾は豪雨時の山腹斜面からの流出土砂量が stream power に規定されることを見い

だしていること、河川流による流砂量を stream power で表示すると抵抗則（路床形態）に無関係にほぼ 1 対 1 の関係が認められること等¹³⁾、マクロ的に土壌侵食に関わる仕事を十分に表現していることを勘案し、侵食外力を斜面表面流の stream power ql で代表させた。一定時間内の一定の降雨強度 r_0 に対して平衡状態に至った表面流を仮定すると斜面下端での流量は $q=r_0L$ (L : 斜面長) で与えられるので、 ql は降雨強度、斜面長、斜面勾配の3つの効果を含む外力指標であることがわかる。Stanford Modelでは単位時間当たりの表面流を一定降雨に対する kinematic wave modelの解を用いて表現しており、水文モデルとの齟齬もない。図中には従来のデータ^{9,14,15)}が併示しており、各実験の概要を表-2に示す。なお、混合砂の場合、無次元化の代表粒径として砂質土には平均粒径を用いた。黒ボク土については平均団粒サイズを用いると Kalinske型の掃流砂式で侵食量が良好に表示されることから平均団粒サイズを用いた⁹⁾。今回、整理した黒ボク土、砂質土の混合砂・一様砂については、ほぼ 1 対 1 の関係で、まとまりが認められたことより図-1中の実線(式(5))で $q_B \sim q \cdot l$ 関係の平均的な挙動を表現した。

$$q_B = A_0 \{ q \cdot l - (q \cdot l)_c \}^m \tag{5}$$

ここで、 $A_0=10$, $m=5/3$, $(q \cdot l)_c=0.008$ とした。これまでの多くの実験結果は q_B が l の(1.5~2)乗に比例することを示しており、 $m=5/3$ は妥当な値と考えられる。

A_0 , $(q \cdot l)_c$ が土壌の物理化学的性質に依る抵抗特性を表すものと考えられ、今後のデータの蓄積と解析により、一般的な傾向を見いだす必要があると考える。

(3) 植生の侵食抑制効果のモデル化

式(5)が式(4)の q_{B0} に相当するものであり、本節では式(4)中の営農作物の存在による侵食抑制効果 Ξ についての検討を行う。植生の侵食抑制の代表的効果は樹冠遮断・枝葉遮断・腐敗表層形成に代表される被覆効果、幹・茎の存在に伴う流水抵抗の増加効果、根の成長に伴う表層構造変化に伴う表面流量変化の大別される。本節では、これらのうち、被覆による雨滴の土表面への到達個数の減少と流水抵抗増加による底面せん断応力の減少の2つの効果についてのモデル化を行う。

裸地斜面上の降雨による土壌流出機構は、雨滴の衝撃による土壌粒子の剥離作用、表面流による剥離及び流送作用の2つの機構に大別される。一旦移動を開始した土壌粒子は、剥離形式とは無関係に、その移動は駆動力である水流と路床面静止土壌粒子との接触により規定されると考えられ、従って、両者のstep length（確率変数）は同一の確率密度関数に従うものと考えられる。この時、平衡状態での流出土砂強度は次のように書ける¹¹⁾。

$$q_B = (A_3 \Lambda d / A_2) (p_{sf} + p_{sr}) \quad (6)$$

ここで、 A_2 、 A_3 : 2, 3次元の形状係数, Λ : 平均step length, p_{sf} : 水流による単位時間当たりの平均離脱率, p_{sr} : 雨滴衝撃による単位時間当たりの平均離脱率である。

遮断された雨滴は再落下せず樹幹・茎に沿って土表面に至る状況を想定する。この時の被覆率（樹冠、葉の地表投影面積比率）を ε とすると、雨滴衝撃による砂粒の離脱率の変化は、

$$p_{sr} = (1 - \varepsilon) p_{sr0} \quad (7)$$

で与えられ、以下、裸地斜面での値は下付添え字0は付けて示す。植物の茎を直径 D_v の円柱と見なし、正方形格子状に間隔 s で植付けられているものと仮定、さらに、雨水流を2次元疑似等流とみなすと次式が成立する。

$$ghl = \frac{f}{8} U^2 + \frac{1}{2} C_D \frac{D_v h}{s^2} U^2 \quad (8)$$

ここで、 h : 表面流水深, f : 流れの摩擦損失係数, U : 断面平均流速, C_D : 円柱の抗力係数である。裸地状態での流れの抵抗則 $gh_0 l = (f_0/8) U_0^2$ との比をとると、底面せん断応力 τ_b の変化率 r_τ に関する次式が得られる。

$$\sqrt{\frac{f_0}{f}} r_\tau^{\frac{3}{2}} + \frac{8\gamma_0}{f_0} \frac{f_0}{f} r_\tau = 1 \quad (9)$$

ここで、 $r_\tau = \tau_b / \tau_{b0}$, $\gamma_0 = C_D D_v h_0 / (2 s^2)$ である。

底面せん断応力の変化率 r_τ が評価されると、植生抵抗の存在に伴う離脱率の変化は容易に計算され、その変化率 α を次のように定義する。

$$\alpha = p_{sf} / p_{sf0} \quad (10)$$

裸地斜面と植生が存在する斜面での水流による土壌の平均移動距離が同一と仮定すると流出土砂強度の変化は、裸地斜面の場合の $q_{B0} = (A_3 \Lambda d / A_2) (p_{sf0} + p_{sr0})$ と、ある場合の $q_B = (A_3 \Lambda d / A_2) (p_{sf} + p_{sr})$ の比として、

$$\Xi(\alpha, \beta, \varepsilon) = \frac{q_B}{q_{B0}} = \frac{\alpha + (1 - \varepsilon) \beta}{1 + \beta} \quad (11)$$

と書ける。ここで、 $\beta = p_{sr0} / p_{sf0}$ である。式(11)が式(4)中の植生の侵食抑制効果 Ξ の機構を表し、裸地状態での雨滴衝撃と流れの比、および底面せん断応力の減少に伴う流れの離脱率変化がパラメータであることを示している。

(4) 植生の被覆効果に関する実験

植物の侵食抑制効果が被覆効果と流水抵抗より成るとの考え方の検証のために、簡単な実験を行った。両者を分離するため樹冠・葉に相当する部分で集められた降雨の全量が土層に達するように製作された図-2に示す様な植物モデルを、所定の被覆率になるように均等に設置した移動床部（粒径 $d=0.088\text{cm}$ の一樣砂）を持つ可変勾

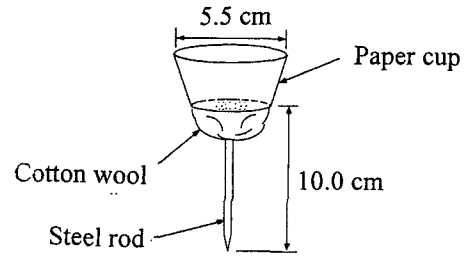


図-2 植生モデルの概要

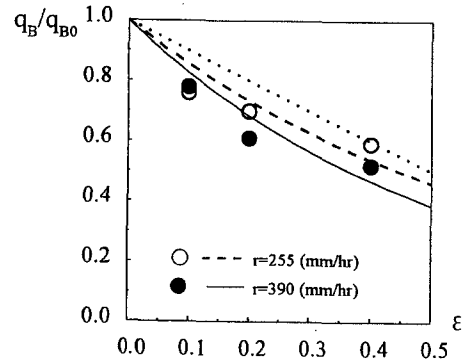


図-3 植生被覆による流出土砂強度の通減

配水路を人工降雨装置の下に置き、水路勾配は10度、降雨強度は $r=255, 390(\text{mm/hr})$ とした流出実験を行った。

図-3に被覆率の変化による流出土砂強度の通減の実験結果を示した。図中、点線は植生抵抗を考慮せず被覆率のみを考慮した場合、破線は $r=255(\text{mm/hr})$ で $\beta=1.19$ 、実線は $r=390(\text{mm/hr})$ で $\beta=1.28$ の場合の計算曲線である。

α および β の評価に当たって、雨滴衝撃および流れによる離脱率評価には次式を適用した¹¹⁾。

$$p_{sr*} = r / \{7200 \sqrt{(\sigma/\rho - 1)gd}\} \cdot (1 - 0.08h/D_r)^4 \quad (12)$$

$$p_{sf*} = 0.03/\Psi(\theta) \cdot \tau_* \{1 - 0.035\Psi(\theta)/\tau_*\}^3 \quad (13)$$

ここで、 D_r : 雨滴の平均径, $\tau_* (= \tau_b / \{\rho(\sigma/\rho - 1)gd\})$: 無次元底面せん断応力, $\Psi(\theta) = 10^{1.72 \tan \theta}$ である。計算に当たって、 $C_D=1.0$, $D_v=0.5(\text{cm})$, $f=f_0=0.08$ 一定とした。

今尾¹⁶⁾は屋外枠試験圃場（長さ9.7m, 幅0.94m, 深さ0.60m, 勾配10度）に種々の作物を植え付け、成長に伴う被覆率の増加と自然降雨による流出土砂強度変化についての観測を行った。図-4に流出土砂強度の通減率と被覆率との関係に整理した結果を示す。図より明らかなように、トウモロコシと大豆については、単純な被覆効果では説明し得ず、被覆率の効果との差が耕作形態要因と考えられる。これについては侵食抑制要因を分離した上で、耕作形態、リルの形成と流量集中についての関係を水理学的に検討する必要があると考えられる。

牧草の場合の侵食抑制効果の評価に本モデルを適用した結果と観測結果を比較した図-5は、散播栽培で草本系作物にはモデルが有効であることを示している。計算に当たって、 $\beta=1.0$, $\{2gs^2/(C_D D_v)\}^{0.5} = 0.5(\text{cm/sec})$ とした。

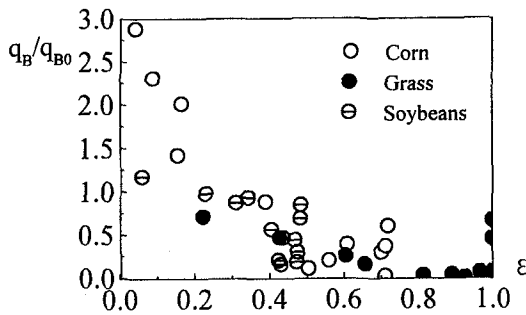


図-4 農作物による被覆効果の違い

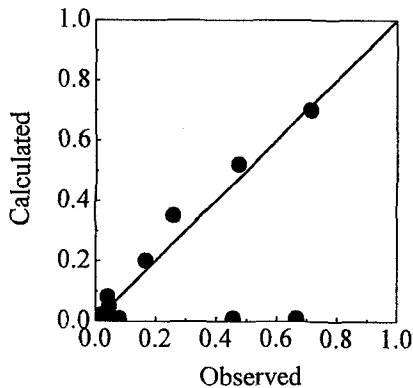


図-5 モデルと実験値の比較 (牧草)

4. 土壌流出モデルの現地への適用

(1) 降雨流出モデルの適用

本節では降雨流出モデルと土壌流出モデルを用いて、1. で述べた釧路湿原に流入する久著呂川の上・中流域の農地開発地域での微細土砂の生産量の推定を試みる。

降雨流出モデルの適用に当たっては国土地理院発行の250mメッシュ数値標高データと河川水系網データをもとに河川区間に対応する単位流域を決定、さらに国土地理院発行の土地利用データで条件付き（農地、森林、草地、水域、都市の6範疇）の副単位流域の勾配や面積をGISソフト（ARC/INFO）を用いて算定した。モデルへの入力条件である気象データは気象庁のAMeDAS、地上気象観測原簿データおよび北海道開発局釧路開発建設部から提供された降水量データであり、同建設部が測定した10地点での1990～93年の4年間の河川流量データでモデル定数の同定計算を行った。計算を年間を通じて複数年連続して行うため積雪・融雪モデルをStanford Watershed Modelへ組み込んでいる⁹⁾。流域面水文モデルとしてのStanford Modelと河道網モデルとしての拡散波モデルとの結合モデルの妥当性を、下久著呂流量観測点での河川流量に関する再現計算結果として図-6に示した。

(2) 土壌流出量モデルの適用

斉田・中村¹⁷⁾は、1995年9月27日～10月1日の降雨時に、久著呂川上流から下流の4点で浮遊砂・wash loadの観測を行い、同期間の上・中流域の2点に流入するwash load

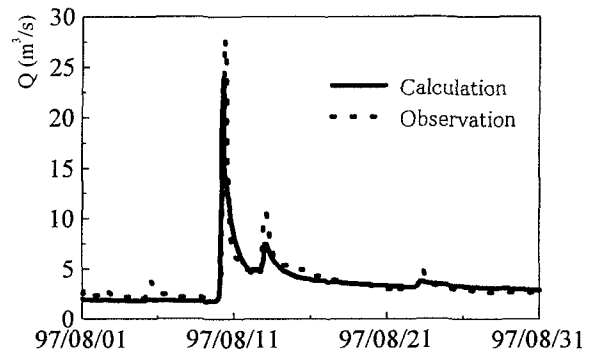


図-6 降雨流出モデルの検証 (下久著呂地点：流量)

の350(ton)、430(ton)のうち、溪岸崩壊地以外の生産量を182(ton)、360(ton)と推定し、農業排水路堆積物との関連から、この微細土砂の生産場が農地である可能性を示唆している。本節では、95年9月降雨に強度・継続時間が類似している97年8月9～13日降雨に対して、農耕地の耕作状況が9月末の耕作状況であると仮定した場合の同地域からの土壌侵食量を推定し、オーダー的な意味で、土壌流出モデルの検証を行うこととした。

上流域(28.96km²)、中流域(28.91km²)の土地利用割合は、森林86.5%、荒地12.5%、畑1%および森林82.5%、荒地6.5%、畑11%である。各斜面の勾配、斜面長および土壌の性質はデータベース化されており⁹⁾、裸地状態での降雨による流出土砂強度 q_{B0} は計算可能である。被覆効果の評価に重要であるこの地域の主要作付け作物は、牧草と飼料用トウモロコシで、その面積は前者が98%、2%の比率である¹⁸⁾。本節で想定している9月末の作付け状況は、トウモロコシ畑は刈り取り後で、裸地に近い状況($\epsilon=1.0$)である。一方、牧草は秋期栽培で9月初旬の播種後、約30日経過した状況である。植物の被覆率は成長とともに変化するので、作物別に平均的な被覆率増加曲線を知っておく必要がある。図-7は牧草についてのKingushukら¹⁹⁾、今尾¹⁹⁾の観測結果を示したもので、図中の実線、点線は、

$$\epsilon = \epsilon_0 / \{1 + \exp(5.0 - E_0 t)\} \quad (14)$$

で表される個体群の成長曲線の近似式として利用されるlogistic曲線である。ここで、 ϵ_0 ：最終被覆率、 E_0 ：成長時間に関わる定数 ($7/E_0$ ： $\epsilon=0.99\epsilon_0$ に要する時間)、 t ：経過日数で、牧草に対しては $\epsilon_0=1.0$ 、 $E_0=0.20\sim0.32$ 程度である。

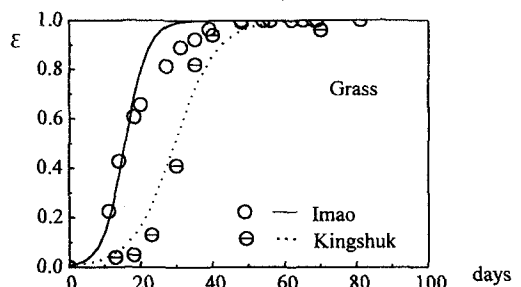


図-7 作物成長に伴う被覆率の時間変化

なお、トウモロコシ、大豆、人参、大根等もlogistic曲線に従うことは確認している。植生の被覆効果評価の上で作物毎の ε_0 、 E_0 と、今回は一定値と見なした茎径の成長率のデータ収集が今後必要であると考えられる。

Stanford Watershed Modelに基づくこの期間における上流域農地からの表面流、中間流、地下水流の各流出高は31.4, 39.5, 6.6(mm)で、下流域農地の場合は28.5, 42.0, 6.7(mm)である。なお、著者らは分離された成分の計算値についての検討を行い、観測値との良好な対応関係にあることを確認している¹⁹⁾。

対象領域が黒ボク土地域であることより、式(5)で裸地状態での土壌輸送量を算定した。計算に当たって、農業排水路堆積物の粒度分布より流出土壌の平均粒径を $d_m=0.012(\text{cm})$ とした。播種後30日の牧草の被覆率は式(14)で評価する。次に、 $\beta=1.0$ 、 $\{2gs^2/(C_D D_m)\}^{0.5}=0.1(\text{cm/sec})$ 、 $f=f_0$ を仮定し、牧草による土壌の流出量の逓減率を式(9)～(11)で評価、これと裸地状態での流出土砂強度、耕地幅の積として上流域、下流域の土壌流出量を計算した。結果は、上・下流域でそれぞれ378(ton)、951(ton)と推定され、斉田・中村¹⁷⁾の推定値の2倍、2.6倍の値となり、オーダー的には一致した。この差は、裸地状態での流出土砂強度の評価の精度、刈り取り後のトウモロコシ畑を裸地と見なしたことに起因するものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、室内実験と従来の実験資料の解析にもとづいて、降雨による裸地斜面からの流出土砂強度の簡便な式を提案し、これに植生の被覆効果と流水抵抗効果を付加することで、背丈の低い草本性植生の場合の流出量逓減の予測式を提案した。この土壌流出モデルに水文モデルを組み合わせ、久著呂川流域の農地からの流出土壌量を推定した結果は、オーダー的には観測値と一致した。今後は、作付け農作物の耕作形態・保全対策効果を考慮するとともに、農地以外の土地からの土壌流出の力学モデルの検討を進め、河道流モデルと組み合わせることで、流域内の土壌動態モデルの確立を図る予定である。

謝辞：なお、本研究の実験にあたり、奥田晃久君（当時京都大学大学院生、現建設省）、新橋秀樹君（当時京都大学大学院生、現JR東日本）の熱心な協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境庁自然保護局：湿原生態系保全のためのモニタリング手法の確立に関する研究、1993。
- 2) 三原真人・坂本充：多肥集約畑地の土壌侵食に伴う富栄養化成分の流出、農業土木学会論文集、第186号、pp.127-134、1996。
- 3) Crowder, W.H. and Linseley, R.K. : Digital simulation in

hydrology: Stanford Watershed Model IV, Tech. Rep. 39, Dept. Civil Engrg., Stanford Univ., 1966.

- 4) Environmental Protection Agency : Hydrological simulation program: FORTRAN, Users manual for Release 10,1993.
- 5) 村上正吾・渡辺正孝・天野邦彦・林誠二・井上隆信：河川環境整備のための流域水環境システムモデルの応用、第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集、pp.135-140、1997。
- 6) 渡辺正孝・村上正吾・天野邦彦・林誠二：流域環境管理に関する国際共同研究、平成9年度国立環境研究所年報、pp.132-134、1998。
- 7) 井上和也：開水路非定常流の数値計算法とその水工学への応用に関する研究、京都大学学位論文、1986。
- 8) Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. : Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky mountains, USDA, Agriculture Handbook, No.282,1965.
- 9) 坂西研二・早瀬吉雄：ライシメータ裸地斜面を用いた降雨流出と侵食に関する研究―掃流砂式を応用した流出土砂量の解析―、農業土木学会論文集、第173号、pp.11-20、1994。
- 10) Kingshuk, R.・日下達朗・深田三夫：作物の成長に伴う被覆係数および畝状係数の定数化について―土壌流亡量推算式の適用性に関する研究(I)―、農業土木学会論文集、第180号、pp.721-729、1995。
- 11) 村上正吾・辻本哲郎・中川博次・Makhanu, S. : 降雨による裸地斜面の土壌侵食に関する基礎的研究、水工学論文集第40巻、pp.855-862、1996。
- 12) 芦田和男・奥村武信：豪雨時の流出土砂量に関する資料解析、自然災害資料解析、4、pp.85-91、1977。
- 13) 中川博次・辻本哲郎：新体系土工学23、移動床流れの水理、技報堂出版、1986。
- 14) Holy, M. and Vaska, J. : Relation between surface runoff and soil-loss caused by water erosion, Proc. of International Water Erosion Symposium, Vol. 1, pp.229-246, Praha, 1970.
- 15) 澤井健二：粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究、京都大学学位論文、1977。
- 16) 今尾昭夫：傾斜農林地の開発に伴う自然災害の防止に関する研究、文部省科学研究費 自然災害特別研究成果報告書（代表：河村三郎）、pp.63-69、1980。
- 17) 斉田綾・中村太士：釧路湿原周辺の土地利用変化に伴う土砂流入と湿原植生の変化、文部省科学研究費 基盤研究(B)研究成果報告書（代表：中村太士）、pp.119-130、1998。
- 18) 標茶町町勢要覧 資料編、1998。
- 19) 林誠二・村上正吾・渡辺正孝：Stanford Watershed Modelの流出特性に関する検討、水工学論文集第44巻（印刷中）。

(1999. 9. 30受付)