

衛星画像解析による植生指標と分布型物理モデルに基づいた 表層土壌流出モデリング

Enrico Paringit*・灘 岡 和 夫**

1. はじめに

沿岸域における生態環境システムの保全に当たって、隣接する陸域からの環境負荷を適切に把握することが不可欠になる。隣接流域における農地造成等の土地利用変化に伴う表層土壌侵食と流出は、陸域からの環境負荷の典型的なものであるが、その定量的評価法となると、これまでのところ、USLE 式に代表されるような、経験的な評価式によるものがほとんどである。しかしそのような方法では、対象流域ごと・時期ごとにパラメータ・チューニングの必要があるうえ、将来の土地利用変化等に対応した表層土壌流出量の予測を合理的に行うことが難しい、という難点がある。さらに、洪水中の土壌流出量の時間的な変化を表現するというのも原理的にできない。そこで本研究では、雨水の土壌浸透・表面流出過程やそれに基づく土壌侵食・輸送過程に関する分布型物理モデルと、地表面過程評価で重要となる植被状態を示すいくつかの植生指標を衛星データから適切に評価する手法を組み合わせた方法を開発することにより、表層土壌流出のモデリングを行い、現地データと比較・検証した。

2. 解析対象流域と現地調査

(1) 対象流域の概要

解析対象流域としては、現在でも表層土壌流出（赤土流出）によるサンゴ礁海域の汚染が問題になっている石垣島の蕪川流域を選定した。同流域は、11.5 km²の流域面積の小さな流域で、図-1 に示すように、上流に数本の支川を持つ蕪川が、流域の東側に位置するサンゴ礁海域にそそぎ込む形で流れている。蕪川流域は、沿岸近くの平坦地形と背後の丘陵地形からなり、標高範囲は 0 m から 149 m である。土地利用形態としては、タバコ、サトウキビ、米、パイナップル等を主要作物とする農地が主体である。

(2) 現地調査の概要

2000 年 6 月上旬から 9 月上旬にかけて、図-1 中に▲で示す河道内の 3 地点に光学式濁時計（ワイパー付き）を設置し、河川水濁度の時間変動記録（サンプリング間隔：30 分）をとった。同時に、■で示す 4 カ所にメモリ自記式雨量計を設置し、雨量強度を連続計測した。また、期間中、上記の典型的な植生被覆状態に対する分光特性計測、植生キャノピー諸元計測、土壌の種類・平均粒径・透水系数・間隙率・含水率の計測を行った。河川流量は、

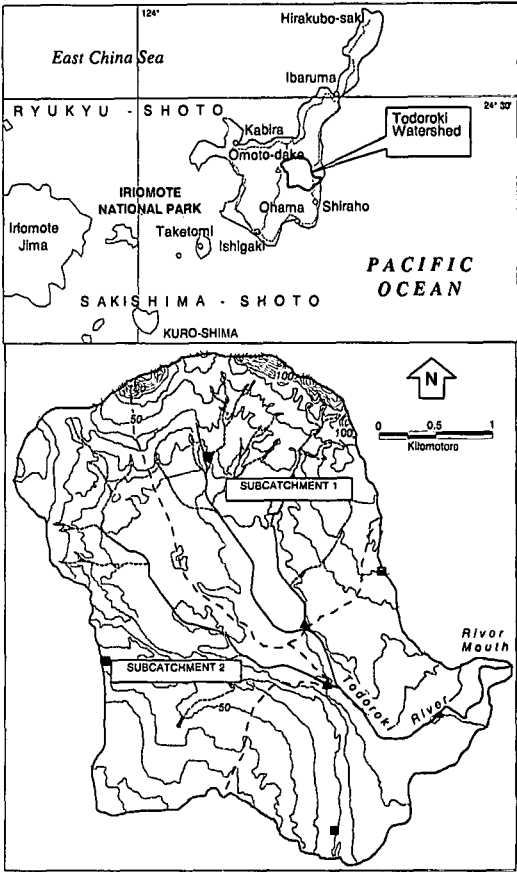


図-1 石垣島と蕪川流域の位置図(上)および蕪川流域の拡大図(下)。
(図中の■印：雨量計, ▲印：濁度計)

* M.Sc. 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程
** フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究科情報環境工学専攻

水位の時間変動記録をとることによって h - Q curve によって求めた (ただし蕪橋地点のみ)。

3. 衛星画像解析による植生指標の評価

地表面過程の評価に必要となる Leaf Area Index (LAI) や Percentage Vegetation Cover (PVC) を、衛星画像や航空写真データから合理的に抽出することを試みた。その際、単位ピクセル内に複数の植生が混在している状況に対処するため、Linear Spectral Mixing 法による Deconvolution 処理アルゴリズムを適用した。具体的には、Gilabert et al. (2000) のモデルをベースとして上記の解析を行った。

4. 分布型物理モデルによる表層土壌流出モデリング

(1) 分布型物理モデルによる表面流と表層土壌流出のモデリング

ここでは、表面流のモデル化を、流域内のデジタル標高データ (DEM) と Wang and Hjelmfelt (1998) の表面流追跡ルーチンをベースとし、Green-Ampt モデルによる土壌内への浸透量の評価を組み込んだ形のモデルを用いている。蕪川流域の計算での空間格子サイズは 10 m, 時間ステップは 10 s である。

土壌流出過程のモデル化は、表層流、土壌離脱・輸送・沈降過程をシミュレートする形の SHESED model (Wicks and Bathurst, 1996) をベースとし、上記の衛星画像を用いた spectral unmixing 手法による植生指標を合理的に組み込む形に modify することによって行った。

(2) 雨水遮蔽効果の評価と植生指標の応用

地表面からの土壌粒子の離脱過程には、雨水の植生による遮蔽効果が大きく影響するものと考えられる。しかし、その効果は時間的に一定ではなく、植生キャノピー内でトラップされる雨水の貯留量が大きくなると、茎を伝わって雨水が流下したり、葉面から雨水が落下し、土壌面を攪乱することになるものと考えられる。そこで、Domingo et al. (1998) のモデルを変形して、植生キャノピー内での雨水の貯留量 S に関する以下の方程式を導いた。

$$\frac{dS}{dt} + aS^b + E_{p,t} \frac{S}{S_r} = rPVC, \quad S_r = \frac{S_{rmax} LAI}{LAI_{max}} \quad (1)$$

ここに、 r : 降雨強度、 $E_{p,t}$: 植生キャノピーからの単位時間あたりの蒸発量、 aS^b : 上述の雨水が茎を伝わったり葉面から落下することによる植生キャノピーからの雨水の流出量で、パラメータ a , b は植生の種類による係数、 S_r : キャノピーによる雨水遮蔽量の容量、 S_{rmax} : 当

該の植生が最も繁茂したときの S_r , LAI_{max} : 対応する最大の LAI である。

(3) 土壌流出過程のモデル化

ある面積要素の平面上をシート上に流下する土壌粒子の輸送フラックスベクトルを q_s と表すと、その時空間変化を記述する式として以下の式が書ける。

$$\frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} + \frac{\partial (|q_s|/|u|)}{\partial t} + (1-\theta) \frac{\partial z}{\partial t} = D_r + D_f + D_s - E_s \quad (2)$$

ここに、 u : 土壌粒子の流下速度ベクトル、 θ : 表層土壌の空隙率、 z : 土壌表面高さ、である。また、右辺の D_r と D_f は、それぞれ雨滴の衝撃、流水による単位時間あたりの土壌粒子の離脱量であり、 E_s と D_s は、沈降フラックスおよび再離脱フラックスである (Hairsine et al., 1999)。このうち D_r は、PVC と PSC を用いて、次式で評価できる (Wicks et al., 1992)。

$$D_r = k_r F_w (1 - PSC) \cdot [(1 - PVC) M_R + M_D] \quad (3)$$

ここに、 k_r は、雨滴の衝突に対して土壌の浸食のされ易さを表す係数、 F_w : water depth correction factor, PSC : Percentage Soil Cover, M_R と M_D : 雨滴及び葉面からの水滴の運動量の二乗値である。このうち、 M_R については $M_R = \alpha r^\beta$ によって評価できる。この経験的パラメータ α と β は、上記の k_r とともに Wicks et al. (1992) によって与えられている。また、 M_D については次式によって見積もることができる。

$$M_D = \frac{(V\rho)^2 \pi D^3}{6} DRIP\% D_L \quad (4)$$

ここに、 V : 葉面からの水滴の落下速度、 D , ρ : 葉面からの水滴の直径および密度、 D_L は先の式 (2) で計算される植生キャノピーからの雨水の流出 aS^b に等しい量、 $DRIP\%$: 葉面からの落下の形で植生キャノピーから流出する雨水の量の割合、である。さらに、土壌表面上の水の層が雨滴の衝突のエネルギーを吸収する効果を表す補正係数 F_w については、以下のようにモデル化できる。

$$F_w = 1 \quad \text{if } h \leq d_m \quad (5a)$$

$$F_w = e^{(1-h/d_m)} \quad \text{if } h > d_m \quad (5b)$$

ここに、 h : 水深、 d_m : 雨滴の中央粒径で、 $d_m = 0.00124 r^{0.182}$ として見積もることができる。式 (2) の右辺の他の変数、 D_f と E_s , D_s は、植生被覆情報を必要としないで、表面流の水理量や土壌表面の特性量により評価できる量である。

5. 計算結果と考察

ここでは、観測期間中の典型的な 4 つの降雨イベントに対して、本モデルによる土壌流出計算を行った。解析に際しては、蕪川の流域内に 2 つの小流域 (SUBCAT-CHMENT 1, 2) を、図-1 に示すようにそれぞれの下端

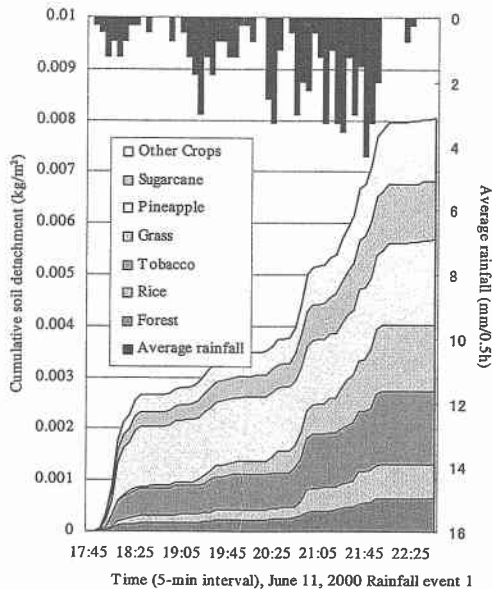


図-2 単位面積あたりの累積土壌離脱量と植生タイプとの関係

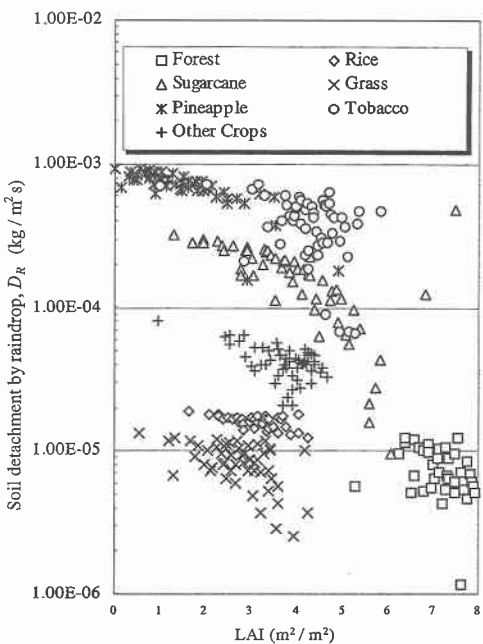


図-3 雨滴衝撃による単位時間当たり土壌離脱量 D_r と LAI との関係

に濁度計の設置地点が位置する形で設定した。

4 回の降雨イベント全てによる総土壌流出量の計算値は、轟橋地点（3つの濁時計設置点のうち下流側の河口に近いポイント）において 24.13 トンとなったが、これは流域内の全離脱土壌量の 47%に相当する量である。このうち、パイナップル畑からの単位面積あたり土壌離脱量が最も大きく $3.30 \text{ kg hr}^{-1}\text{ha}^{-1}$ で、たばこ畑の $2.84 \text{ kg hr}^{-1}\text{ha}^{-1}$ が続く形となった。ただし、パイナップル畑は流域内の面積が少ないため、絶対量としてはあまり大きくない。流域内全離脱土壌量のうちの残りの 53%は流域内に貯留されている計算になるが、14%に当たる量は、植生被覆状態が急変する境界の上流側にトラップされる形となっていることが確認された。

図-2 は、いくつかの種類の植生状態に対する単位面積あたりの累積土壌離脱量を 1つの典型的な降雨イベントに対して示したもので、これからもパイナップル畑やたばこ畑からの離脱量が相対的に大きいことが分かる。ただし、例えばパイナップル畑からの土壌流出量は、パ

イナップルの成長段階によってかなり異なることが知られているので、ここでの結果は、1つの事例計算としてみなければならない。

図-3 は、雨滴衝撃による単位時間あたり土壌離脱量 D_r と LAI との関係を各植生状態について示したものである。これから、 LAI だけでなく、植生の種類や量によっても土壌侵食特性がかなり異なることが分かる。

図-4 は、河川内の観測点での濁度の時間変化に関する実測値を、4つの降雨イベントに対して、本表層土壌流出モデルによる推定値と比較したものである。これから、推定値の方がピーク位相が若干早まる傾向があるけれども、ピーク値そのものの推定値は実測値と良い一致を示していることが分かる。実際、河川のすべての観測点（3地点）での河川水位、河川流量、濁度それぞれのピーク値に関する推定値と実測値の間の回帰係数を算定したところ、各々、0.95、0.62、0.91であった。表-1 は、

表-1 4 回の降雨イベントに対する流量、土壌流出量、水位のピーク値に関する実測値と計算値の比較及びピーク時刻のずれ

Peak water discharge ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)			Peak sediment discharge kg s^{-1}			Peak runoff (mm)		
Observed	Simulated	Delay in time to peak (min)	Observed	Simulated	Delay in time to peak (min)	Observed	Simulated	Delay in time to peak (min)
85.99	65.17	6.33	850.03	528.99	43.83	1005	857	2.83
97.33	87.98	5.33	388.36	537.18	22.33	971	854	9.66
73.98	85.19	12.5	299.87	471.56	32.33	624	741	2.33
161.86	169.89	5.33	380.37	453.35	13.83	1462	1187	1.17

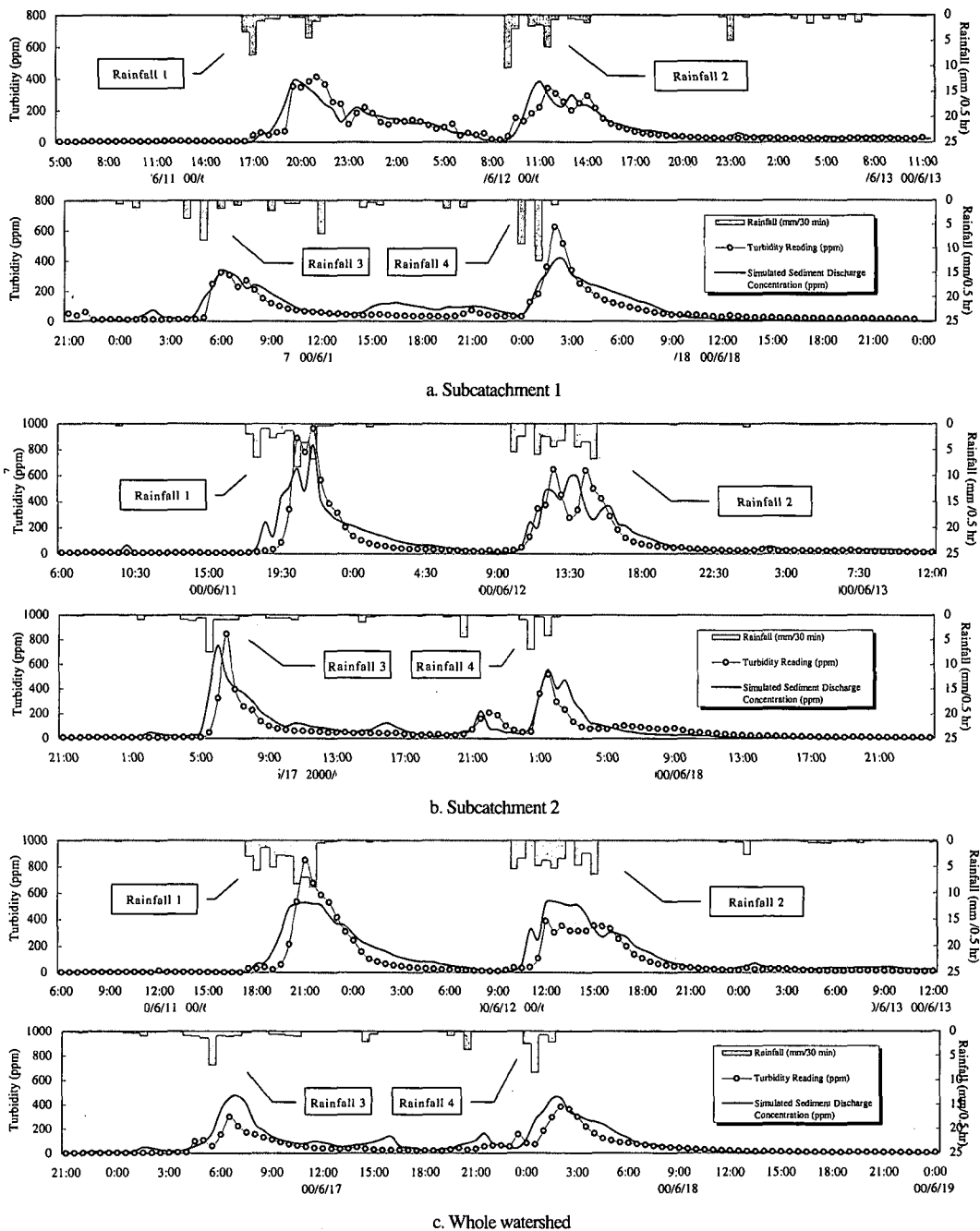


図-4 河川内濁度の時間変化に関する実測と推定値の比較

4回の降雨イベントに対して、轟橋地点での河川流量、土壌流出量、河川水位のそれぞれのピーク値の計算値と実測値、ピーク時刻のずれ（計算値のピーク時刻－実測値のピーク時刻）をまとめて示したものである。これから、河川水濁度だけでなく、これらの諸量のピーク値の一致度も良好であることが分かる。また、ピーク時刻のずれは多くは数分から20分程度の程度であるが、濁度の測

定時間間隔が30分であったことを考えると、この程度のピーク時刻のずれも許容範囲といえる。以上のことから、本研究で開発した表層土壌流出モデルは、良好な性能を有していることが検証された。

6. おわりに

本研究では、USLE式に代表されるような経験的な手

法ではなく、物理過程を反映させやすい分布型モデルに基づいた定式化と、そこで必要となる植生指標をリモートセンシング画像データ解析により合理的に評価する方法を組み合わせた手法を開発し、その基本的な妥当性を、石垣島・轟川流域での現地観測データと比較することにより確認した。ただし、その際の比較対象は、河道内の数地点での測定値と計算値であって、その意味で、現段階では、モデルの妥当性の確認を流域全体あるいはサブ流域全体からの出力という一種の積分量的な変数に対して行っているに過ぎない。したがって、今後は、流域内分布情報を直接得ることによって、集中型モデル (lumped model) ではなく分布型モデル (distributed model) としての本モデルの特徴を直接反映させたモデル性能チェックを行っていく必要がある。また、本文中でも述べたように、植生の発育段階の違いによる植生指標の違いや土壌水分量の時間的変化の影響など、対象とするシステムの非定常性の影響は無視し得ない重要性を持つものと考えられる。本モデルによれば、これらの情報を直接モデルに反映させることができるので、逆にこれらの情報を合理的にかつ簡便に抽出する手法を今後開発していくことにより、本モデルの有用性をより明確にしていけるものと考えている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、東京理科大学工学部土木工学科専任講師の二瓶康雄氏および東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程の若木

研水君に現地調査において大変ご助力いただいた。また、沖縄県衛生環境研究所赤土研究室長の大見謝辰男氏には有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。なお、本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(研究代表者：灘岡，課題番号：12450198)，同 基盤研究(C)(1)(研究代表者：灘岡，課題番号：12895008)，平和中島財団国際学術共同研究助成金(研究代表者：灘岡)を得て行ったものであることを付記する。

参 考 文 献

- Domingo, F., G. Sanchez, M. J. Moro, A. J. Brenner and J. Puigdefabregas (1998): Measurement and modeling of rainfall interception by three semi-arid canopies, *Agri. For. Met.*, Vol. 91, pp. 275-292.
- Gilabert, M. A., F. J. Garcia-Haro and J. Melia (2000): A mixture modeling approach to estimate vegetation parameters in remote sensing, *Rem. Sen. Env.*, Vol. 72, pp. 328-345.
- Hairsine, P. B., G. C. Sander, C. W. Rose, J. Y. Parlange, W. L. Hogarth, I. Lisle and H. Rouhipour (1999): Unsteady soil erosion due to rainfall impact: a model of sediment sorting on a hillslope, *J. Hydro.*, Vol. 220, pp. 115-128.
- Wang, M. and A. Hjelmfelt (1998): DEM-based overland flow routing model, *J. Hydro. Engg.*, Vol. 3, pp.1-11.
- Wicks, J. M. and J. C. Bathurst (1996): SHESED: a physically-based, distributed erosion sediment yield component for the SHE hydrological modeling system, *J. Hydro.*, Vol. 175, pp. 213-238.
- Wicks, J. M., J. C. Bathurst and C. W. Johnson (1992): Calibrating SHE soil erosion model for different land covers, *J. Irrig. Drain. Engg.*, Vol. 118, pp. 708-723.