農地主体の小流域に対応した侵食・土砂 流出モデルの構築

CONSTRUCTION OF EROSION AND SEDIMENT RUNOFF MODEL FOR SMALL AGRICULTURAL WATERSHED

大澤和敏¹・池田駿介²・高椋恵³・酒井一人⁴ Kazutoshi OSAWA, Syunsuke IKEDA, Kei TAKAMUKU and Kazuhito SAKAI

1正会員 農博 東京工業大学助手 大学院理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-1)
 2フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科 (同上)
 3学生会員 東京工業大学大学院理工学研究科 (同上)
 4農博 琉球大学助教授 農学部 (〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町千原1)

In these years, red-soil erosion and runoff have led to agricultural and environmental problems in Okinawa, and models predicting sediment runoff rate are required for the purpose of assessment on land development projects and sustainable management of farmlands. The authors constructed a soil erosion and sediment runoff model for small agricultural watershed. The model is a process-based model which predicts erosion rate from overland flow on hillslopes, sediment runoff from concentrated flow in channels, and sediment deposition in settling basins. It represents temporal variation of sediment runoff and discharged sediment particle size. Some processes and parameters of the WEPP model, such as plant, soil, management, etc., were partially employed. In case of the field scale application, the results have revealed that the model is effective to estimate the erosion rate at farmlands affected by various agricultural management conditions. These models were expanded to the watershed scale; the calculated suspended sediment movements were reasonable compared with observed ones.

Key Words : red-soil runoff, erosion and sediment runoff model, WEPP model, agricultural watershed, Okinawa

1. 序論

面源における土砂生産が顕著である沖縄では、これを 赤土流出と称して、サンゴをはじめとする沖縄地方独自 の自然形態を破壊する要因として問題視している.経常 的な土砂流出発生源である農地は、現状の侵食量および 各種営農的対策の効果が定量的に把握されていないため に条例規制の対象外となっているが、沖縄県としては、 近い将来規制対象にする方針である. その際, 様々な営 農方法に対する侵食量を予測可能なモデルが必要である. 筆者ら^{1), 2)}は既往の侵食モデルであるUSLEやWEPPの検 証を行い,WEPPは精度,適用性ともに優れていると評 価した.しかしながら、WEPPの土砂流出量の時間解像 度が一雨単位であることが、精度を低下させる一因とな るとともに沿岸域までを扱う赤土流出の時系列解析を行 う上で問題であると指摘している.また、南ら³⁾によっ て新たなモデルが構築されているが、多様な営農条件を 反映できるモデルには至っていない.

そこで、本研究では新たなモデルとして農業流域対応 型侵食モデルを提案することを目的とした. モデルは流 域スケールで評価可能とするために、 圃場、 水路、 そし て沈砂池の3つの機構から構成される、圃場における土 壌侵食過程として,作物および土壌の変動,耕起などの 圃場管理作業を表現し、インターリル侵食(畝斜面部に おける侵食)およびリル侵食(畝間部における侵食)を表現 する. 土壌侵食に関わる機構は、可能な限り現象に即し た形でモデル化を行う. その際, 作物, 土壌, 管理作 業などに関する機構およびパラメータはWEPPのそれ らを一部援用する. 土砂生産および土砂運搬過程にお いて,流出土砂の粒度組成を考慮する.なお,土砂流出 の時系列まで表現するために、土砂の運搬過程を効率良 く計算可能な方法を用いる.構築したモデルを沖縄県に おける農地および農地主体の小流域に適用し、精度およ び適用性について考察する. このようなモデルを構築す ることによって、営農活動に伴い変化する流域土砂動態 をその時系列まで含めて評価することが可能となる.

2. 圃場における土壌侵食過程

本研究で提案するモデルの圃場スケールにおける土壌 侵食過程の概要を図-1に示す.土壌侵食に直接的に関与 する要素として,降雨および降雨に伴う表面流があり, 間接的な要素として,作物,土壌,管理作業,そして気 候がある.土砂生産機構はインターリル侵食およびリル 侵食を考慮し,生産された土砂は圃場末端の水路まで堆 砂を伴いながら運搬される.

(1) 作物および残渣

作物は播種または苗の植え付け後から生長を開始する. バイオマス量はBeerの法則⁴⁾やMontieth⁵⁾によって提案さ れたバイオマスの可能増加量によって算出される.バイ オマス量から、樹高、植生の被覆率、根重、そしてLAI がそれぞれ日単位で算定される.それらの算定式は USDA-ARS⁶に詳述されている.

残渣は地表面残渣と地中残渣に分類され,作物の収穫, 耕起,分解によって増減する.地表面残渣量はGregory⁷⁾ の式によって地表面における被覆率に換算される.また, 残渣の分解はRESMANモデル⁰を用いる.残渣に関する 項目は日単位で算定される.これらの植生や残渣に関す る変数は後述の侵食係数などの算定に用いられる.

(2) 土壌

土壌に関する変数として、ランダムラフネス(地表面 の微小な凹凸)、乾燥密度、有効透水係数などがある. それらは日単位で変化し、WEPPの機構を一部改良して 算定する.ランダムラフネスは耕起直後に任意の初期値 となる.その後、徐々に減少する.乾燥密度は耕起に よって減少し、耕起後の降雨や経過日数によって一定値 まで圧密として増加する.有効透水係数の算定のための 飽和透水係数はCampbell[®]が提案した実験式を用いた. さらにクラスト、耕起、そして作物の影響を考慮した有 効透水係数はWEPPにおける実験式を用いた.

(3) 管理作業

管理作業として,播種(植え付け),収穫,耕起の3つ の作業をそれらの作業日とともに表現する.播種によっ て作物の生育が開始する.収穫によって地上部のバイオ マス量の一部が残渣として地表面に残り,根は地中にお ける残渣として加えられる.耕起によって任意の畝高さ, 乾燥密度,そしてランダムラフネスになり,攪乱される 地表面の残渣は地中に移動する.

(4) 水収支

降雨-流出以外の水の移動は水収支として日単位で把 握する.水収支の内訳は蒸発散および地中下方への浸透 である.蒸発散位はペンマン式を用い、土壌水分の蒸発



図-1 圃場スケールでの土壌侵食過程の概要

および蒸散量はRitchie⁹の方法を用いて算定する.地中 下方への浸透は現段階では考慮していない.それは,一 般的な沖縄県の農地では深さ40cm程度に硬盤があり, 透水量が無視できる程度であると考えたからである.

(5) 降雨-流出過程

降雨-流出過程では、有効降雨の算定に次式を用いる.
$$R_{a} = R - I - F$$
 (1)

ここで、 R_e :有効降水量(m·s⁻¹), R:降水量(m·s⁻¹), I:植生 による遮断量(m·s⁻¹), F:浸入量(m·s⁻¹).植生による遮断 量はSavabi·Stotto¹⁰の実験式を用いる.浸入量はGreen-Amptモデルを用いて算定する.インターリルの流出量 (リルの流入量)は流下距離(畝斜面長)が0.5~1m程度なの で有効降水量 R_e とした.リルにおける水の流れは、畝間 の流れを想定した三角形断面の流れとして、次式で示さ れるKinematic wave法によって逐次計算される.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = bR_e \tag{2}$$

$$Q_s = C I^{1/2} A^{3/2} \tag{3}$$

ここで、A:流水断面積(m²)、 Q_s :流量(m³·s⁻¹)、b:畝間隔 (m)、C: Chezy係数(m⁰⁵·s⁻¹)、I:流下方向の勾配(m·m⁻¹). これらの式の特性曲線を4次精度のRunge-kutta法で陽的 に解く. なお、Chezy係数はDarcy-Weisbachの摩擦抵抗 係数から算定される. また、地中側方流はDarcy則を運 動方程式として用いる.

(6) インターリル侵食

インターリル侵食はWEPPの過程を援用し、雨滴侵食 とインターリルにおける流水による土粒子の剥離による ものと考え次式のように表す.

$$Di = K_i R_e \sigma_{ir} (1 - A_r) \tag{4}$$

ここで、 $Di: インターリル侵食量(kg s⁻¹·m²), K_i: イン$ $ターリル侵食係数(kg s·m⁴), <math>\sigma_{ir}: インターリル流量(=R_e, m s⁻¹), A_r: 圃場におけるリル面積率. インターリル侵食$ 係数は次式で表される.

$$K_i = K_{ib} C K_{ican} C K_{igc} C K_{idr} C K_{ilr} C K_{isc} C K_{isl}$$
(5)

ここで, K_{ib} : 定数(kg·sm⁴), CK_{ican} : K_i に関する作物被覆 の補正係数(以下無次元), CK_{igc} : K_i に関する地表面被覆の 補正係数, CK_{idr} : K_i に関する地中死根の補正係数, CK_{ilr} : K_i に関する作物の生根の補正係数, CK_{isc} : K_i に関するク ラストの補正係数, CK_{id} : K_i に関する勾配の補正係数. なお, K_{ib} および各係数はUSDA-ARS⁶においてWEPPの 実験式として定められている. K_{ib} は0.5×10⁶~12×10⁶の範 囲で算定され, 土壌の粒径区分, 有機物含有率によって 異なる. その他の補正係数は作物, 残渣, 地形などに関 する変数を用いて算定され, それぞれ0~1の範囲で日変 動する. これらの係数および後述のリル侵食に関する係 数は, 米国における試験結果を検証データとした実験式 として定められたものであり, 沖縄地方等の他の地域で の有効性は確認されていない.

本研究では侵食された土粒子をFosterら¹¹⁾の方法を用 いて5つの粒径区分に分けた.区分と代表粒径は粘土 (0.002mm),シルト(0.01mm),砂(0.2mm),フロック小 (0.03~0.1mm,粘土とシルトで構成),フロック大 (0.3~2mm,粘土,シルト,砂で構成)である.各粒径区 分におけるインターリル侵食量を次式で表す.

$$Di_i = Di F_i SDR_i \tag{6}$$

ここで、 Di_i : 粒径iクラスのインターリル侵食量(kg·s⁻¹·m⁻²), F_i : 粒径iクラスの割合, SDR_i : 粒径iクラスの土砂運 搬率. 粒径iクラスの割合 F_i の算定方法および粒径iクラ スの土砂運搬率 SDR_i はFoster¹²⁾の値を用いた.なお, SDR_i はランダムラフネスによって異なる.

(7) リル侵食

リルにおける流水による土粒子の剥離を次式で表す.

$$\tau_f \ge \tau_{ci} \qquad Dr_i = K_r (\tau_f - \tau_{ci}) A_r \qquad (7-1)$$

$$\tau_f < \tau_{ci} \qquad Dr_i = 0 \tag{7-2}$$

ここで、 $Dr_i: 粒径iクラスのリル侵食量(kg·s⁻¹·m²), K_r:$ リル侵食係数(s·m⁻¹), $\tau_f: 掃流力(Pa), \tau_{ci}: 粒径iクラスの限$ 界掃流力(Pa). 掃流力はリル流れの過程で算出される径深を用いて次式で表す.

$$\tau_f = \rho_w g R I \tag{8}$$

ここで、 ρ_w : 水の密度(kg·m⁻³)、R: 径深(m)、I: 流下方向 の斜面勾配(m·m⁻¹). 限界掃流力はWEPPで用いられてい る限界掃流力補正係数を用いて次式のように表す.

$$\tau_{c\,i} = 0.04(\rho_{s\,i} - \rho_w)gd_i\tau_{cadj} \tag{9}$$

ここで、 ρ_{si} : 粒径iクラスの土粒子の密度(kg·m⁻³)、 d_i : 粒径iクラスの土粒子の代表粒径(m)、 τ_{cadj} : 限界掃流力補正係数(Pa). 限界掃流力補正係数は次式で表す.

$$\tau_{cadj} = \tau_{cb} \ C \tau_{rr} \ C \tau_{sc} \tag{10}$$

ここで、 τ_{cb} :定数(Pa)、 $C\tau_{rr}$: τ_{cadj} に関するランダムラフネ スの補正係数(無次元)、 $C\tau_{sc}$: τ_{cadj} に関するクラストの補正 係数(無次元). また、リル侵食係数はWEPPで規定され た補正係数を用いて次式のように表す.

$$K_r = K_{rb} \ CK_{rbr} \ CK_{rdr} \ CK_{rlr} \ CK_{rsc} \tag{11}$$

ここで, K_{tb} : 定数(sm⁻¹), CK_{tbr} : K_r に関する地中残渣の 補正係数(以下無次元), CK_{rdr} : K_r に関する死根の補正係 数, CK_{rbr} : K_r に関する生根の補正係数, CK_{rsc} : K_r に関する クラストの補正係数. なお, 各定数および各係数は USDA-ARS⁶⁰においてWEPPの実験式として定められて いる. τ_{cb} は0.3~7, K_{cb} は0~0.05の範囲で算定され, 粒径 区分, 有機物含有率などによって異なる. その他の補正 係数は作物, 残渣, 地形などに関する変数を用いて算定 され, それぞれ0~1の範囲で日変動する.

(8) 土砂の運搬

本研究では、インターリル侵食およびリル侵食によっ て生産された土砂の運搬や土砂の沈降および再懸濁を仮 想粒子を生成し追跡する方法によって表現する.各計算 時間ステップにおいて生産された土砂は粒径クラス毎の 粒子として生成され、その粒子は場所、質量、代表粒径 の情報を有する.インターリルにおいて生産された土砂 はリルに流入し、その粒子とリル内で生成された粒子の 運搬は次式のように表現される.

$$\tau_f \ge \tau_{ci} \quad dx = U_s \, dt \tag{12-1}$$

$$\tau_f < \tau_{ci} \qquad dx = 0 \tag{12-2}$$

ここで、dx: 土砂移動距離(m)、 U_s : リルにおける流速 (=Qs/A, m·s⁻¹). なお、土砂の運搬は移流のみによるもの とし、拡散は考慮しない. 仮想粒子を生成し追跡する方 法の利点として、①計算における数値拡散が無い、②圃 場、水路、沈砂池の境界での土砂の移動を明確に表現可 能、③土砂の堆積、再懸濁の表現が簡便、が挙げられる.

WEPPは一雨の総降水量や降雨継続時間などの降雨イベントにおける代表値を用いて、一雨における土砂流出量の総和が出力されることに対して、本モデルではその時系列まで表現することが可能となる.さらに運搬される土砂の粒径情報も表現することが可能である.これらの特徴がWEPPと本モデルで大きく異なる点である.

3. 水路および沈砂池における土砂流出過程

(1) 水路における土砂流出過程

水路における土砂流出過程は,前章で示した圃場にお けるリル侵食および運搬過程と同様に行う.本研究で対 象としている水路は,U字溝などの幅の比較的狭い流路 なので一次元解析とする.水の流れは連続式とManning 公式を用いて逐次計算される.圃場や上流水路から流入 した土砂の運搬は,式(8)で表される掃流力と式(9)で表 される限界掃流力の大小関係を用いて,式(12)で表され る仮想粒子を生成し追跡する方法によって表現される.

(2) 沈砂池における土砂流出過程

沈砂池は既往の研究¹³⁾で示されているように構造的特 徴(規模,流出入箇所の配置,そして植生などによる抵



抗など)によって、土砂動態が著しく異なる.しかしな がら、それらの機能を体系的に表現するためには、観測 や実験がさらに必要となる.よって本研究では、沈砂池 の機構は単純にモデル化するのみに留める.

沈砂池における水の流れとして,沈砂池水面は水平を 保ったまま昇降すると仮定した一般的な洪水調節池計算 の連続式を用いる.流水による土砂の運搬は前述の仮想 粒子を生成し追跡する方法を用い,土粒子の沈降はス トークスの法則を用いて次式によって算出する.

$$dz = -\frac{g(\rho_{si} - \rho_w)d_i^2}{18\mu\rho_w}dt$$
(13)

ここで、dz: 土粒子の沈降距離(m), d_i : 粒径iクラスの土 粒子の代表粒径(m), μ : 粘性係数($m^2 \cdot s^{-1}$). また,現段階 では,沈砂池における植生などの抵抗は考慮しない.

4. モデルの検証

(1) 対象流域

対象流域は沖縄県本島恩納村の安幸地土地改良区を含 む小流域である. 図-2に概要を示す. 流域面積は約 0.12km²であり、流域内には大小51筆の農地、それに付 随したコンクリート製の排水路(幅:0.3~1.3m),大小9基 の沈砂池,そして下流の湿地を有する.2002年6月26日 の土地利用を図-3に示す. 流域内においてサトウキビが 最も多く栽培され、流域面積の37%を占める. 図-2にお けるSt-1~St-7の7地点で流量と土砂流出量の連続計測を 行った.雨量計は図中のR-1に設置した.St-3上流にお けるサトウキビ畑S-1を農地における侵食量観測地点と し、約1年間、流量と土砂流出量の連続観測を行った. 畑は畝が水路に垂直方向に施されており、侵食された土 砂は畝間から水路に流出する. 畝方向の平均勾配は約 3%である. 土壌は一般に国頭マージと呼ばれる赤土で あり、表層土の粒度組成は粘土9%、シルト29%、細砂 および粗砂34%、礫28%であった、現地観測に関しては 大澤ら^{1),13)}で詳述している.

本モデルの入力データは降雨の時系列データ以外,



図-4 圃場における土壌侵食過程の計算結果(時系列)

WEPPとほぼ同様であり、既往の研究^{1),2)}で述べられている.また、作物や耕起などに関する各種パラメータはWEPPで定められている値を用い、パラメータの同定は行っていない.流域の要素分割をする上で、斜面は面積および斜面長を真値とする長方形、水路は矩形断面、沈砂池は直方体、として扱った.

(2) 圃場における計算結果

S-1における2002年6月8日の降雨イベントでの土砂流 出過程の計算結果を図-4上に示す.ピーク部分を若干過 小評価しているが,WEPPでは表現不可能な土砂流出量 の経時変化を概ね良好に表現できている.計算過程にお いて算出された流出土砂の粒度組成を図-4下に示す.大 部分が粘土,シルト,そしてフロック小(代表粒径: 0.03mm)で構成されていた.砂およびフロック大(代表粒 径:0.3mm)はわずかに存在する程度であった.算出さ れた粒度分布は観測された変動領域(0.0005~0.1mm)の中 にあり,妥当な結果であったと評価できる.

ここで、観測期間全体(2002年5月~2003年4月)におけ る降雨イベント毎の土砂流出量の総和を図-5に示す.本 モデルの結果は誤差が大きい降雨イベントもあるが、全 体的な侵食量の増減を捉えることができている.特に、



図-5 圃場における土壌侵食過程の計算結果 (S-1における降雨イベント毎の総和)

作物の生長(5/11~1/27),耕起の影響(4/11以降)を明確に反映することができている。例えば、同程度の降水条件であった6/8と12/20の土砂流出量を比較すると、栽培初期の6/8の方が栽培終期の12/20より土砂流出量が大きいことを本モデルでも表現できている。また、畑の全面耕起および苗の植え付けが行われた直後の降雨イベント4/11~4/14では、土砂流出量が他のイベントより著しく大きいことを本モデルでも誤差はあるが表現できている。

図-5に併記したWEPPによる計算結果¹⁾と比較すると、 7/14では誤差が減少する結果となった.一方,4/11およ び4/12における誤差が増大する結果となった.本モデル におけるリルおよびインターリルでの侵食係数は、 WEPPと同様であることを考えると、これらの結果の差 は、WEPPのように一雨毎の代表的パラメータを利用し て一雨毎の土砂量を算定するのではなく, 時系列で表現 したために生じた特徴と考えられる. WEPPは計算を行 う1回の降雨イベントにおいて、観測された降水量の時 系列を直接用いず,総降水量,イベント継続時間,ピー ク降雨強度、ピーク降雨強度の発生時刻を用いて擬似的 な降水量の時系列を再現する. その結果, 再現される降 水量および流量の時系列はただ1つのピークを有する形 となる. さらに,WEPPは降雨-流出過程で算定された ピーク流量、流出継続時間、有効降雨強度、有効降雨継 続時間の4つ変数を用いて降雨イベント毎の総土砂流出 量を算出する. そのため、複数の降水量のピークを有す る4/12や比較的大きな降雨強度が長時間継続する7/14で は、降水量や流量の時系列が正確に表現できず、土砂流 出量にもそれらの結果が影響している可能性が高い¹⁾. 以上のことから、4/12や4/11におけるWEPPの計算値の 高い適合性は、降雨-流出過程の誤差と侵食過程の誤差 で相殺されたことによると予想される.一方、本モデル では降雨-流出過程および土砂流出過程を時系列で表現 しているため、7/14ではWEPPより精度が高くなり、 4/11, 4/12では流量時系列の誤差や侵食係数による誤差 のため精度が低下したと考えられる.このことから、本 モデルにおける誤差の大きい部分については、沖縄の土 壌や作物に適したパラメータの再考が必要である.

(3) 流域における計算結果

多点同時観測を行った2002年6/15における流域内のSt-1~St-7での土砂流出量の観測値および計算値を図-6に示 す.また、各地点の図の右側に総流出土砂量をWEPPに よる計算値²⁾とともに示す.本モデルにおける全ての計 算結果は土砂流出量の時系列を的確に表現できているこ とがわかる.特に、営農作業や作物の生育によって異な る土地利用状況や沈砂池の有無などの集水域特性を明確 に反映している.土地利用に着目すると、1年生のサト ウキビ(生育初期のため被覆率が低い)や裸地などの受食 性の高い土地利用面積もしくはその割合が比較的大きい 集水域を有するSt-1やSt-3では、土砂流出量が大きい傾 向にあることを本モデルでも誤差はあるが明確に表現で きている.一方,受食性の高い土地利用面積もしくはそ の割合が比較的小さい集水域を有するSt-5では土砂流出 量が小さい傾向も表現できている. WEPPによる計算値 とともに総流出土砂量を比較すると、全ての地点におい てWEPPの方が本モデルより精度が高い. これらの精度 の差も、前節の考察のように土砂流出を時系列で表現し たためと考えられる.

沈砂池SB-4の流出入箇所であるSt-1(流入地点)とSt-2 (流出地点)を比較すると,沈砂池を通過することによっ てピーク値の減少およびピーク部分の時間的遅れが計算 結果においても明確に表現できている.同様に沈砂池 SB-7の流出入箇所であるSt-3~5(流入地点)およびSt-6(流 出地点)においても同様の傾向が表現されている.また, ここでは示していないが,沈砂池の通過に伴う移動土粒 子の細粒化も確認できた.WEPPの計算値とともに比較 すると,沈砂池SB-4における堆砂量(St-1からSt-2の土砂 量を減じた値)の精度は本モデルの方が高い.一方,沈 砂池SB-7における堆砂量(St-3~5の和からSt-6を減じた値) の精度はWEPPの方が高い.本モデルの堆砂量が観測値 より過小評価であった要因として,SB-7における植生の 影響が本モデルでは考慮されていないことが挙げられる.

5. 結論

面源からの微細土砂の流出が社会的問題となっている 沖縄において,既往の代表的な土壌侵食モデルである WEPPの機構を一部援用することによって,農業流域対 応型侵食モデルの構築を行った.特徴的な機構として, 圃場において生産される土砂の粒度組成を考慮すること によって,微細粒子まで含めた土砂流出を表現した.ま た,生産された土砂の運搬過程の計算方法に仮想粒子を 生成し追跡する方法を用いて,土砂流出量の経時変化を 効率良く表現した.また,水路および沈砂池における土 砂流出過程を表現し,流域スケールまで拡張可能なモデ ルとした.その結果,以下に示す知見が得られた.

(1) 圃場における侵食過程では、侵食量の時系列および粒度組成を明確に表現するとともに、作物の生長



図-6 流域におけるモデルの適用結果(左上:降水量,それ以外:土砂流出量)

および耕起に伴う侵食量の変化を明確に表現するこ とができた.

(2) 圃場,水路,そして沈砂池を組み合わせることに よって表現した流域スケールにおける土砂流出過程 では,流域内の土地利用や沈砂池の特徴を明確に反 映した形で土砂動態を再現することができた.

以上から、本研究で新たに提案したモデルは、沖縄地 方における赤土流出解析のための有力な予測手法の基本 型として確立できたと評価することができる.

謝辞:この研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S)(課題番号:17106006,研究代表者:池田駿介)および沖縄建 設弘済会技術開発支援事業(研究代表者:酒井一人)の支援に よって行われた.

参考文献

- 大澤 和敏, 酒井 一人, 田中 忠次, 吉永 案俊: 降雨毎の侵食 予測におけるUSLEおよびWEPPの検証, 農業土木学会論文 集, 255, 43-50, 2004.
- 大澤和敏,池田駿介,酒井一人,島田正志: 農業流域における 土砂動態の現地観測およびUSLE・WEPPによる評価,河川 技術論文集,10,179-184,2004.
- 3)南 哲行,桜井 亘,山田 孝,菊池 英明,武藤 由育:沖縄地 方で発生する赤土砂の流出モデルの開発とシミュレーション,砂防学会誌,56(3),22-30,2003.

- Monsi, M. and T. Saeki: Uber den Lictfaktor in den Pflanzengesell schaften und sein Bedeutung für die Stoffproduktion, *Japan J. Bot.*, 14, 22-52, 1953.
- 5) Montieth, J.L.: Climate and the efficiency of crop production in Britain, *Phil. Trans. Res. Soc.* London B, 281, 277-329, 1977.
- 6) USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory: USDA-Water Erosion Prediction Project hillslope profile and watershed model documentation, *NSERL Report No. 10*, 1995.
- Gregory, J.M.: Soil cover prediction with various amounts and types of crop residue, *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1333-1337, 1982.
- 8) Campbell, G.S.: パソコンで学ぶ 土の物理学(中野 政詩, 東山 勇 監訳), 鹿島出版会, p.48, 1987.
- Ritchie, J.T.: A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover, *Water Resources research*, 8(5), 1204-1213, 1972.
- Savabi, M.R. and D.E. Stott. (1994): Plant residue impact on rainfall interception, *Transactions of the ASAE*, 37, 1093-1098.
- 11) Foster, G.R., R.A. Young and W.H. Neibling: Sediment composition for nonpoint source pollution analyses, *Transactions of the ASAE*, 28, 133-139, 1985.
- 12) Foster, G.R. Modeling the erosion process, Chapter 8 in: C.T. Haan (ed.), *Hydrologic Modeling of Small Watersheds, ASAE Monograph No.5*, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI., p297-360, 1982.
- 13) 大澤和敏, 酒井一人, 吉永安俊, 田中忠次, 島田正志: 農業 流域での多点同時観測による浮遊土砂動態の検討, 農業土 木学会論文集, 229, 101-108, 2004.

(2005.9.30受付)