

## ブランタス川の支川レスティ川流域における 降雨・土砂流出に関する研究

中川 一・里深好文\*・大石 哲\*\*・武藤裕則  
佐山敬洋・寶 馨・シャルマ ラジハリ\*\*\*

\* 京都大学大学院農学研究科

\*\* 山梨大学大学院医学工学総合研究部

\*\*\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

本研究では、インドネシア国第 2 の河川であるブランタス川の支川レスティ川流域における土砂流出特性を明らかにするために、雨量観測、土壌侵食の観測、河川における濁度や流量等の水理量の観測を実施するとともに、衛星データを用いた植生指数の分析を行っている。さらに、植生指数と降雨に伴う土壌侵食との関係から土砂流出のモデル化を行い、観測データとの比較検討によりモデルの妥当性を検証した。その結果、本モデルにより降雨・土砂流出特性がある程度再現できることが確認された。そして、植生指数によって耕地の攪乱等の人的行為を把握し、これを降雨による土壌侵食量の評価に応用することで土砂流出に与える人為的インパクトを定量的に把握することが可能であると推察された。

**キーワード：**降雨流出，土砂流出，植生指数，ブランタス川，観測，モデル化

### 1. はじめに

本研究は、戦略的創造研究推進事業(CREST)の補助を受けて、平成13年度より始まった「社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築」(代表:京都大学防災研究所 寶 馨教授)の中のサブテーマである「アジアモンスーン地域を対象とした水循環モデルの構築」に関する研究の一環として、インドネシア国のブランタス川の支川であるレスティ川を対象として降雨・土砂流出に与える人為的なインパクトの影響評価を明らかにすることを目的として実施したものである。本研究が平成18年度をもって所定の研究期間を終えたこともあり、この間に得た研究成果を取りまとめて報告することにする。

本研究では、ブランタス川支川のレスティ川流域を対象に、豪雨の雨滴径、雨量、河川流量、濁度などの計測・観測を通して、降雨・土砂流出の特徴を明らかにするとともに、植生指数と斜面の粗度係数とを関連付けた抵抗則や植生指数と斜面の侵食特性とを関連付けた侵食モデルを用いた分布型豪雨・洪水・土砂流出モデルを対象流域に適用し、観測値によってモデルの妥当性

を検証する。なお、本研究の一部は学会(大石ら, 2005)や国際会議(Nakagawa, et al., 2005)で既に報じていることを断っておく。

### 2. 流域の概要と観測点

レスティ川(Lesti River)はスメル火山(Semeru Volcano)の南西斜面に源を持つ多数の二次支川からなるブランタス川(Brantas River)の右支川である。Fig. 1 にブランタス川上流域およびレスティ川流域を示す。ブランタス川の流域面積は約 11,800km<sup>2</sup>、流路延長は約 320km であり、インドネシア国内でソロ川につぐ大きな河川である。レスティ川の流域面積は約 625km<sup>2</sup>であり、ブランタス川との合流点に発電と利水を目的としたセングルーダム(Sengguruh dam)(1988 年完成、総貯水容量 21.5 百万 m<sup>3</sup>、有効貯水容量 2.5 百万 m<sup>3</sup>)がある。さらに、その直下流には治水、発電、利水(農水・上水)のための多目的ダムであるスタミダム(Sutami dam)(1972 年完成、総貯水容量 343.0 百万 m<sup>3</sup>、有効貯水容量 253.0

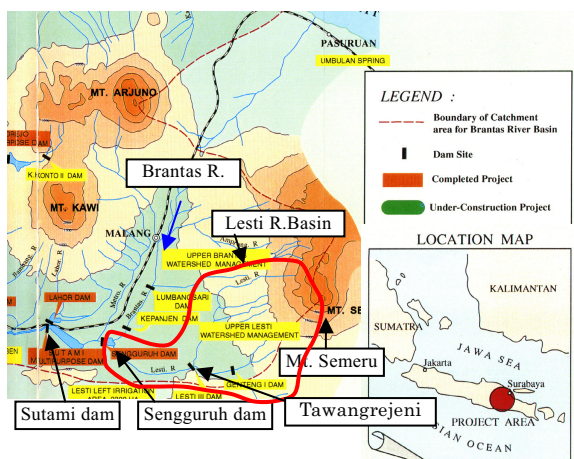


Fig. 1 Lesti River basin

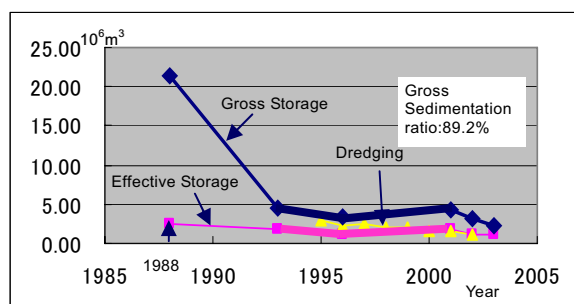


Fig. 2(a) Reservoir sedimentation of Sengguruh dam

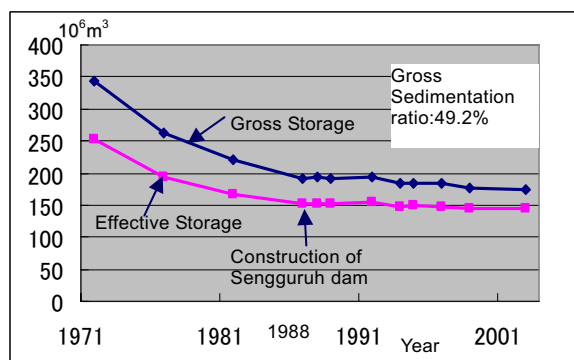


Fig. 2(b) Reservoir sedimentation of Sutami dam

百万  $m^3$ ) がある。

セングルーダムは、10年に1回は噴火するといわれている土砂生産が活発なスメル火山に源をもつレスティ川と、森林伐採により農地の拡大が年々進行しているブランタス川本川の両方の流域から出てくる土砂を受けるために急激な貯水池堆砂が進行し、極めて深刻な問題となっている。とくに、スタミダムの堆砂を軽減することが目的の一つとなって建設されたため、Fig. 2(a)に示すようにグロスの堆砂率(堆砂量/総貯水容量)は、ダム建設後5年で約80%, 15年で89%以上となっており、利水上、由々しき状況となっている。スタミダムでもFig. 2(b)に示すように、グロスの堆砂率は50%近くになっており、両貯水池では浚渫による貯水容量の回復を図っているが、高価

な対策費用を強いられざるを得ない状況となっている。このような流域において土砂流出を軽減するための砂防や降雨・土砂流出量の予測に基づいた土砂管理が早急に進められる必要がある。

堆積土砂の大部分は粒径が  $20 \sim 30 \mu$  以下のウォッシュロードであり、火山灰からなる山腹斜面からの侵食土砂の流出によるものと考えられる。したがって、降雨による斜面での侵食特性をきちんと評価し、それが河道内に流出した後の河道内濁度観測と流量観測は、流域の洪水・土砂管理を実施するうえで極めて重要であり、観測データに基づいた降雨・土砂流出特性の把握とその予測モデルの構築が本研究の主たる目的である。その際、降雨・土砂流出に与える人為的インパクトを考慮することが求められている。

Fig.3 に示すようにレスティ川流域のダンピット(Dampit)にはもともと雨量観測点があり、また、タワングレジェニ(Tawangrejeni)には流量および濁度観測点があったが、新たにデータロガー付雨量計(転倒マス式)をレスティ川上流のリングヤキャッサバの栽培地帯であるポンチョクスモ(Poncokusumo)とアルジョサリ(Argosari)に各1台設置し、下流の耕作地帯にあるゲドゲダン(Gedog Wetan)とタワングレジェニにも各1台設置するとともに、レスティ川の支川で、タワングレジェニ近傍でレスティ川に流入するゲンテン川(Genteng River)の中流域に位置するスリムリョ(Srimuryo)にも1台設置した。このように新たに合計5台の雨量計を設置することで、熱帯地方特有の局地的短時間豪雨域を観測できるようにした。なお、機器設置、現地観測、データ回収等の実施状況をTable 1に示す。

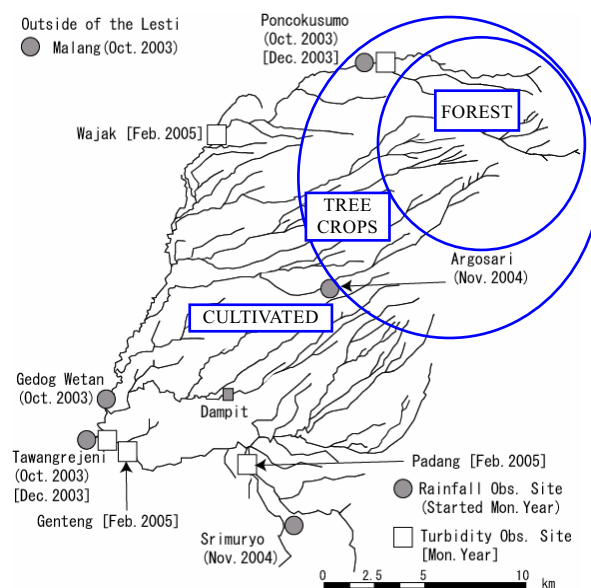


Fig. 3 Observation sites in the Lesti River basin

Table 1 Outline of the observations

| Date       | Article                                                                              | Location                                                                          |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 2002, Oct. | Setting up of micro rain radar                                                       | Malang (JASA TIRTA I)                                                             |
| 2003, Feb. | Measurement of water discharge and turbidity by using ADCP, turbidity meter and etc. | Tawangrejeni                                                                      |
| 2003, Oct. | Setting up the rain gauges and erosion depth measurement poles                       | Tawangrejeni, Poncokusumo, Gedog Wetan                                            |
| 2003, Dec. | Turbidity measurement                                                                | Wajak, Poncokusumo, Tawangrejeni                                                  |
| 2004, Mar. | Data collection of rainfall and erosion                                              | Poncokusumo, Gedog Wetan, Tawangrejeni                                            |
| 2004, Nov. | Setting up the more rain gauges and erosion depth measurement poles                  | Argosari, Srimuryo                                                                |
| 2005, Mar. | Measurement of water discharge and turbidity, data collection                        | Genteng, Tawangrejeni, Wajak                                                      |
| 2005, Jul. | Brantas River Workshop at Batu city                                                  | Batu                                                                              |
| 2005, Nov. | Data collection                                                                      | Poncokusumo, Gedog Wetan, Tawangrejeni, Argosari, Srimuryo                        |
| 2006, Mar. | Measurement of water discharge and turbidity, data collection                        | Genteng, Tawangrejeni, Wajak                                                      |
| 2006, Sep. | Workshop of the research at JASA TIRTA I Corporation and data collection             | Malang (JASA TIRTA I), Poncokusumo, Gedog Wetan, Tawangrejeni, Argosari, Srimuryo |

### 3. 観測とその結果

本章では、レスティ川流域での土地利用変化および植生の活性度の季節変化を衛星データを用いて分析するとともに、降雨による土壌侵食観測および流量・濁度観測結果について述べる。

#### 3.1 土地利用変化と植生活性度の季節変化

森林の伐採による耕地の拡大などの土地の改変は降雨・土砂流出特性に大きなインパクトを与える。ところが、改変の規模や土地利用の変化を把握するには現地観測だけでは大変な労力が必要である。衛星データがこの問題を解決するには大変有用である。

Fig. 4はレスティ川流域における土地の開発状況を把握するために衛星データを用いて土地の被覆分類を行ったものである。上の図が1997年6月にADEOSに登載の光学センサAVNIR（高性能可視近赤外放射計のことで、地表面から反射される可視域3バンド、及び近赤外域1バンドの太陽光を観測する光学センサ）で撮影された画像をもとに土地利用分類したものである。

下の図は2002年5月にLANDSAT7に登載されたセンサETM+（エンハンスド・セマティック・マップパー・プラス：改良型主題図化センサ）で撮影された画像をもとに土地利用分類したものである。なお、Table 2に衛星と登載センサの特徴等をまとめておく。両者のセンサで解像度に違いがあるが、土地の被覆状態

を比較するには十分な精度であると考えられる。

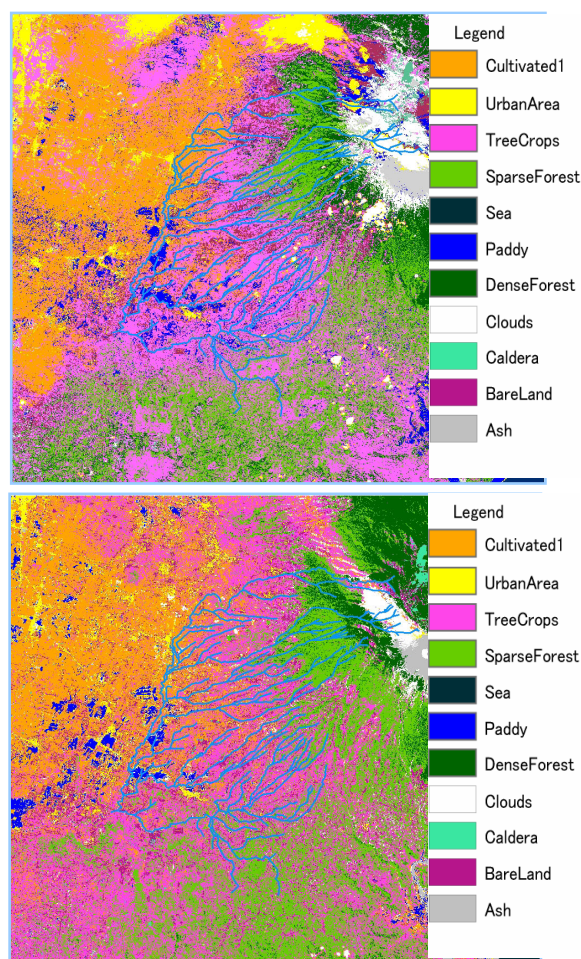


Fig. 4 Land cover classification in the Lesti River basin

両者の比較より、この5年間で広域的な森林の伐採による土地被覆状態の変化（土地利用の変化）は確認できない。また、森林以外の場所でも有意な土地利用の変化は認められない。したがって、この流域においては土地利用の改変という人為的なインパクトが降雨・土砂流出に与える影響を見ることができない。しかし、同一の土地利用形態であっても、耕作などによる土地被覆状態の擾乱が降雨・土砂流出に影響するかどうか条件を絞って検討することが可能となる。

Table 2 Inter-comparison of the sensors

|               | ETM+                        | AVNIR        | MODIS          |
|---------------|-----------------------------|--------------|----------------|
| Platform      | LANDSAT7                    | ADEOS        | TERRA/AQUA     |
| Launch        | 1999                        | 1996         | 1999/2002      |
| Orbit         | Near polar, sun synchronous |              |                |
| Altitude(km)  | 705                         | 797          | 705            |
| Swath(km)     | 186                         | 80           | 2300           |
| Resolution(m) | 30 (15)                     | 16           | 250 (500,1000) |
| Band          | 7                           | 4            | 36             |
| Red band(mm)  | 0.63-0.69                   | 0.61-0.69    | 0.62-0.67      |
| NIR (mm)      | 0.76-0.90                   | 0.76-0.89    | 0.84-0.88      |
| Used scene    | May 22, 2002                | June 4, 1997 | 36 (Jan.2002-) |



Fig. 5 Seasonal change of the condition of the farmland cover

Fig. 5は同一地点における土地被覆状態の季節変化を見たものである。左の図は2003年10月に撮影した山腹斜面の状況である。雨季が始まる直前では植生の活性度は低く、また、次の作付けに備えて表土をかき乱すため、土地の表面は広範囲に亘って土が露出している。一方、右の図は乾季の最中である7月に撮影されたものである。乾季の最中であっても乾季の終わり頃に比べてみるとまだ植生の活性度は高そうに見える。この地帯は雨季と乾季が明確に区分でき、同図にあるような降雨パターンを繰り返している。

Fig. 6は2002年から2005年まで、ほぼ同一地点の農地における土地被覆状態の季節変化を示したものである。前出のFig. 5と同様なことが見て取れるが、雨季に入ってすぐに植生が回復していることも見て取れる。また、3月には場所によっては裸地となっている農地も見られる。これは、キャッサバやとうもろこし等の穀物が、雨季末期頃に収穫を迎え、収穫の後、次の作物の作付けのために耕作されるからである。このことが、雨季末期の豪雨と裸地の存在により土砂流出量の増大を引き起こしていると考えられる。

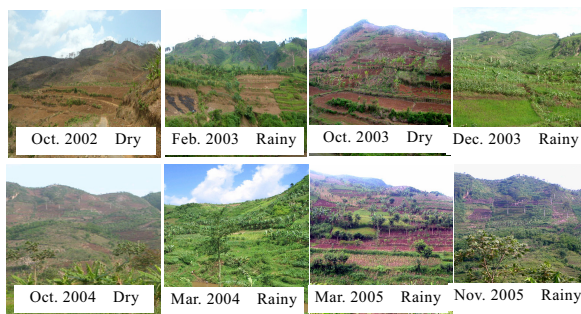


Fig. 6 Seasonal change of the condition of the farmland cover from 2002 to 2005

レスティ川流域全体の土地被覆状況の季節的な変化をみるために、衛星TERRAに搭載のセンサMODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)はNASAの地球観測衛星Terra及びAqua衛星に搭載されたセンサ)のデータを用いて植生指数 (NDVI : Normalized

Difference Vegetation Index, 正規化植生指標)の季節変化を表したものがFig. 7である。同図より、10月の雨季直前には植生指数が低い、すなわち植生の活性度が低いところが最も広範囲に分布していることが分かる。そして、雨季直後の12月には植生指数が高いところが極めて広く分布し、驚くべきスピードで植生が回復していることがわかる。

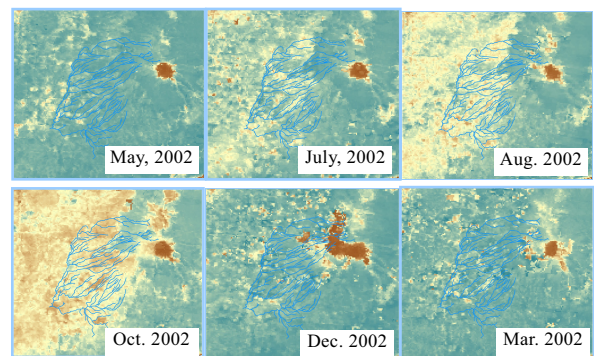


Fig. 7 Seasonal Variability of NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (TERRA/MODIS, 250m resolution)

Fig. 8は森林、果樹園、耕作地（畑地）、市街地の4通りの土地利用毎に植生指数の季節変化を見たものである。これより、雨季前には植生指数は最小値をとるが、雨季が始まると急激に増加することがわかる。また、森林地帯での植生指数の季節的变化は最も穏やかであり、一方、耕作地での変化が最も激しいことが分かる。これより、季節変化や耕作等による土地の擾乱が植生指数の変化と関連付けられ、これが土砂流出特性に大きな影響を及ぼすと考えれば、これらの関係をモデル化することで降雨・土砂流出に与える人的インパクトが定量的に把握できるのではないかと推察される。

### 3.2 土壌浸食の観測

降雨による斜面侵食量を把握するために、森林、果樹園、耕作地の3種類の土地利用地域において、複数地点に標尺を設置するとともに、降雨イベントがあった直後に標尺の写真撮影と目視による侵食量の観測を行った。なお、写真撮影および目視による

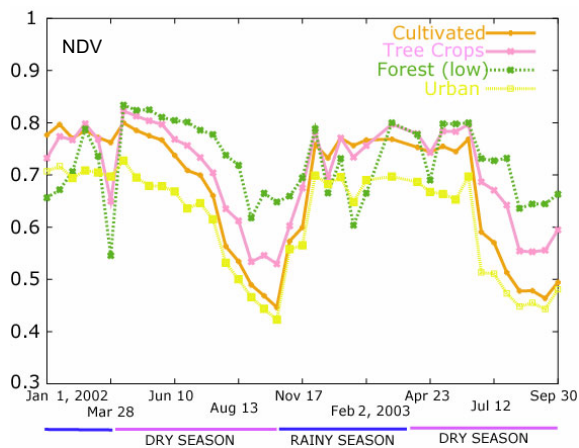


Fig. 8 Seasonal Variability of NDVI

標尺の読みと記帳は地元の農家の人などに依頼し、定期的に写真と目視データを記帳したノートを回収し、分析を行った。

Fig. 9は土壌侵食・堆積量の観測結果を取りまとめたものである。同図より、雨季の後半になるにつれて（侵食深+堆積深）／日雨量の値が小さくなるが、一方、植生指数は大きくなっていくことが顕著に現われている。また、土壌侵食・堆積深については、耕作地（畑）の方が森林や果樹園に比べて3倍程度大きいことが分かる。更に、土壌侵食・堆積量はNDVIと負の相関傾向が認められる。

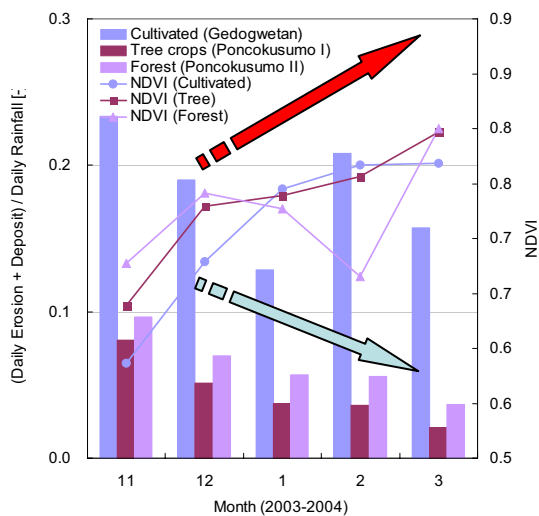


Fig. 9 Outline of the observed results concerning to the soil erosion

### 3.3 流量・濁度観測

流量および濁度の定点観測がタワングレジェニで従来からカウンターパートのJASA TIRTA IIにより実施されている。ここでは、防災研究所とJASA TIRTA Iとの間で締結した協定書に則り、このデータの提供を受けることとなったが、データの精度については

十分な吟味が必要であった。

そこで、観測流量（水位－流量曲線により算定している）については流量観測地点でADCPによる流速測定値等から求めた流量との照査を行った。その結果、両者はほぼ同様の結果となり、研究期間中の観測流量についてはモデルの検証として十分利用可能であることが分かった。

一方、観測濁度データは5分ごとの採水による自動分析であったが、濁度計による濁度の鉛直分布計測結果との照査を行ったところ、両者の値はほぼ一致したため、この採水式の濁度分析データをモデルの検証データとして利用することとした。

Fig. 10はタワングレジェニ観測点における2003年の1年間の流量と濁度を示したものである。同図より、雨季の始まりと終わり頃に高濁度を記録していることがわかるが、それらが大きな流量イベントと必ずしも一致していないことが分かる。この理由は定かではないが、人為的な要素、たとえば、収穫や植え付けのための耕作が適度な降雨量があるときに広範囲になされた場合などが考えられる。

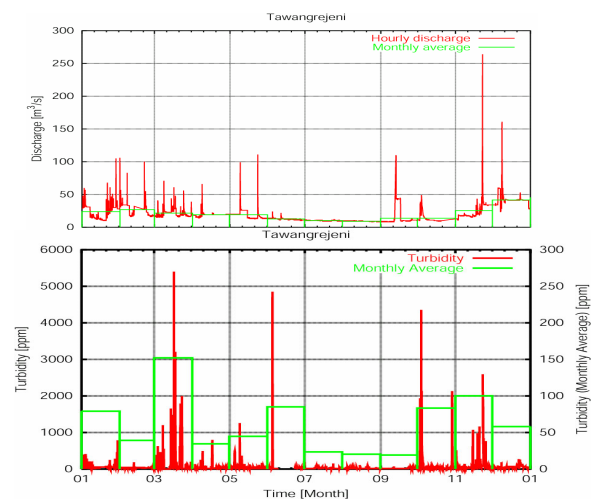


Fig. 10 Observed water discharge and turbidity at Tawangrejeni in 2003

どの次期に土砂流出量が多いのかを知るには流量濁度を別々に見るのではなく、流砂量に直してみれば理解しやすい。Fig. 11はタワングレジェニ地点で観測された流量と濁度から求めた流砂量である。同図より、雨季直後および雨季末期に流砂量が多いことが分かる。また、2005年3月の現地観測で偶々洪水に遭遇し、此处から約14km上流のワジャック (Wajak) (Fig. 3参照) で流量の計測と濁水の採取を実施した。その結果、流量は6.5 m³/s、濁度は室内での分析により強熱減量で12,600 mg/literであり、流砂量に換算すると295 ton/hとなり、自動採水による濁度から求め

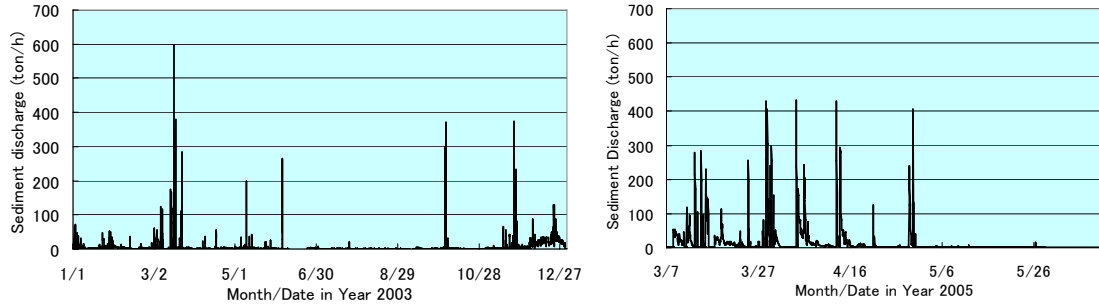


Fig. 11 Sediment transport rate evaluated by the observed water discharge and turbidity at Tawangrejeni

た流砂量と同様のオーダーとなっていることが分かる。

#### 4. 分布型降雨土砂流出モデル

本章では、新たに提案する2種類の分布型降雨・土砂流出モデルについて示す。1つは、土砂流出モデルにおいて表層土の受食性の季節変化に関するパラメータを、観測から得られた結果に基づいて導入したもので、ここではSTモデルと呼ぶことにする。他の一つは、植生指数と斜面の粗度係数とを関連付けた抵抗則を用いたモデルであり、ここではこれをRHモデルと呼ぶことにする。

##### 4.1 STモデル

###### (1) モデルの概要

降雨流出モデルとしては、マトリックス部を流れる不飽和流、大空隙部を流れる飽和中間流、地表部を流れる表面流の3種類の流れを考慮した立川らによって開発されたモデル(2004)を援用する。Fig. 12は各グリッドセルに適用した降雨流出モデルの概念図である。流れの連続式および運動方程式はそれぞれ以下のようなものである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) = f \cdot R(t) \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} v_c d_c (h/d_c)^\beta & , \quad (0 \leq h \leq d_c) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) & , \quad (d_c < h \leq d_s) \\ v_c d_c + v_a (h - d_c) + \alpha (h - d_s)^m & , \quad (d_s < h) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $h$ :水深、 $q$ :単位幅流量、 $r(t)$ :有効降雨強度、 $f$ :蒸発散や樹幹遮断等による欠損を考慮するた

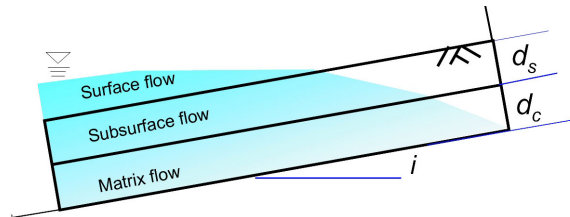


Fig. 12 Schematic view of surface and subsurface flow

めに導入した流出係数、 $R(t)$ :観測雨量、 $v_c, v_a$ :それぞれマトリックス部を流れる不飽和流の平均流速および大空隙部での飽和流の平均流速であり、それぞれ以下のように表せる。

$$v_c = k_c i, \quad v_a = k_a i \quad (3)$$

ここに、 $k_c, k_a$ :それぞれマトリックス部の飽和透水係数および大空隙部の飽和透水係数、 $i$ :斜面勾配である。さらに、(2)式において、 $d_c, d_s$ :それぞれマトリックス部の層厚および大空隙に相当する層厚、 $\alpha = \sqrt{i}/n$ 、 $n$ :粗度係数、 $\beta = k_a/k_c$ 、 $m$ :定数、 $t$ :時間、 $x$ :距離である。

降雨・土砂流出モデルについては、土砂の連続式において雨滴の衝撃力による表層土の侵食と表面流の底面せん断力による侵食を考慮することにする。

すなわち、

$$\frac{\partial(h_s c)}{\partial t} + \frac{\partial(q_s c)}{\partial x} = e(x, t) = D_r + D_f \quad (4)$$

$$D_r = K \cdot K_e, \quad D_f = \delta(c_t - c)h_s \quad (5)$$

ここに、 $h_s$ :表面流の水深、 $c$ :土砂濃度、 $q_s$ :表面流の単位幅流量、 $D_r$ :雨滴の衝撃力による表層土の侵食速度、 $D_f$ :表面流の底面せん断力による侵食速度(Govers and Rauws, 1986)、 $K$ :表土の侵食特性を表わす係数(=0.002kg/J)、 $K_e$ :雨滴衝突仕事、 $\delta$ :流砂量に関する係数、 $c_t$ :最大土砂輸送能力である。

###### (2) 適用結果

Fig. 13はMRR(マイクロ レイン レーダ)で観測された地上雨量の時間降雨強度と雨滴衝突仕事との関係を見たものである。同図に示されるように1時間雨滴衝突仕事は転倒マス式雨量計で測定された1時間雨量とよい線形関係が成立することがわかる。この線形関係は以下のように表せる。

$$K_e = 56.48r \quad (\text{Unit: J/m}^2) \quad (6)$$

なお、土砂濃度の単位として重量濃度(ppm)を用いるために、各項を単位付で再掲すると以下のようである。

$$e(x, t) = (D_r + D_f)/3600 \quad (\text{Unit: kg/h/m}^2) \quad (7)$$

$$D_f = \delta(x_t/1000 - c)h_s \quad (\text{Unit: kg/h/m}^2) \quad (8)$$

$$c_t = 187.4v_s i - 125.4 \quad (\text{Unit: ppm}) \quad (9)$$

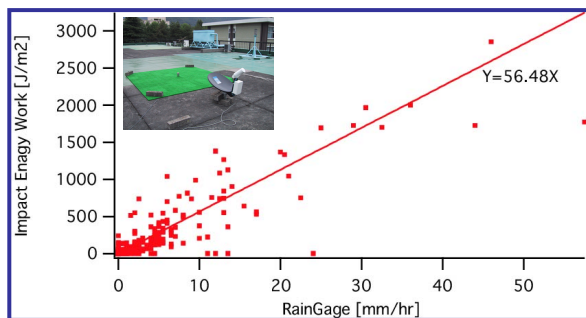


Fig. 13 Relationship between rainfall intensity measured by rain gauge and impact energy work of rain drop per 1mm amount of rainfall

ここに、 $v_s$ : 表面流の平均流速、 $\delta, \varepsilon$ : それぞれ係数で、0.9および0.2とする。

Fig. 14(a)は、2003年10月3日から10月7日におけるタワングレジュニ地点での流量および濁度の計算結果と観測結果を比較したものである。(b)は2005年9月19日から9月20日の観測値と計算値とを比較したものである。流量と濁度とも比較的良く観測値と計算値は一致しているといえる。

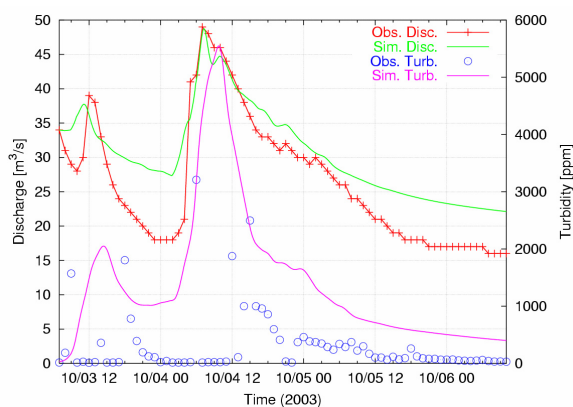


Fig. 14(a) Comparisons between calculated and observed water discharge and turbidity in 2003 flood ( $\delta = 0.9$ ,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $K = 0.2 \times 0.002$ )

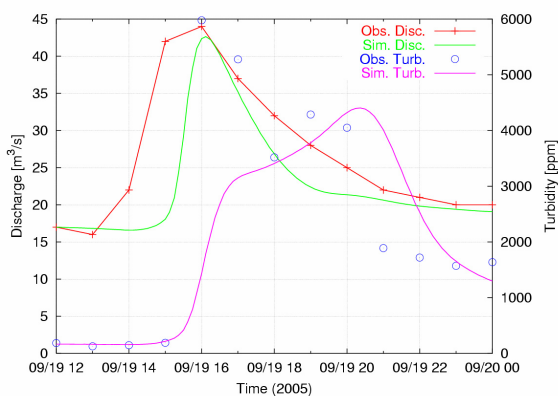


Fig. 14(b) Comparisons between calculated and observed water discharge and turbidity in 2005 flood ( $\delta = 0.9$ ,  $\varepsilon = 0.2$ ,  $K = 0.2 \times 0.002$ )

表層土壌の受食性の季節的な違い、土地利用の違いをモデル化することを試みた。Fig. 15は季節変化に伴う植生指数 (NDVI) の変化と、土壌侵食量の変化 (観測データより) を見たものである。耕作地の方が、果樹園や森林よりも土砂の移動量が多いことや、NDVIの増加とともに土砂の移動量が小さくなっていることもわかる。

こうした傾向を土砂流出モデルに反映するために、 $D_r$ の項にこの値を $\mu$ として導入し、 $D_r = \mu \cdot K_1 K_e$ として $K_1$ をチューニングパラメタとするモデルに改良した。

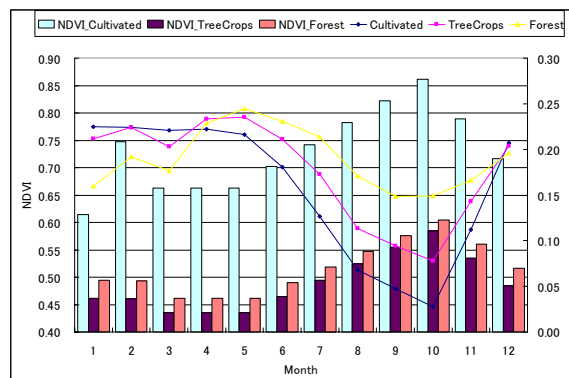


Fig. 15 Seasonal change of the erodibility of the top soil (right) and NDVI (left)

Fig. 16(a)および(b)はこのようにして求めた流量および濁度の長期の流出計算結果である。降雨流出については計算結果のほうが過小であるが、濁度の長期計算結果と観測値とは比較的良好に一致している。

Fig. 17は2005年3月から11月の間の積算土砂量の計算結果と観測結果とを比較したものである。計算結果のほうが観測値よりやや上回っていることから、計算流量は過小であったもののFig. 16(b)の流砂量の計算結果がやや過大であった可能性もある。

## 4.2 RHモデル

### (1) モデルの概要

降雨流出モデルとしては、表面流は流域を斜面と河道に分けたDEMに基づくKinematic wave modelであり、Richardsの式により降雨の土層内への浸透など、土層内の流れおよび土層内から河道への横流入も考慮している (Sharma, 2006)。

土砂流出モデルにおいては、斜面では雨滴及び表面流による侵食を考慮した土砂の連続式、Manning式および水の連続式である。雨滴の衝撃による侵食速度 $e_s$ は、雨滴径と表面流の水深との関係を考慮したパラメータが導入されたモデル (Meyer and Wischmeier, 1969) を用いる。すなわち、

$$e_s = c_f F_w r^2 \quad (10)$$

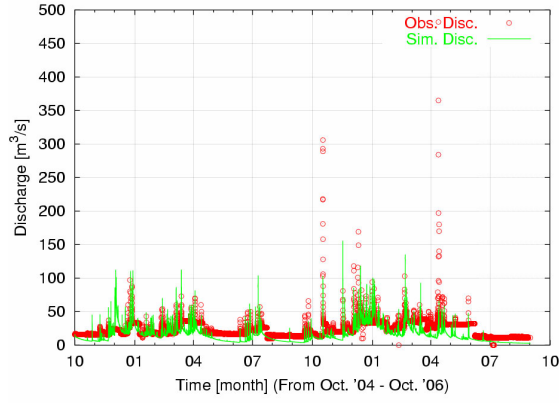


Fig. 16(a) Comparison between calculated and observed long term water discharges at Tawangrejeni from October 2004 to October 2006

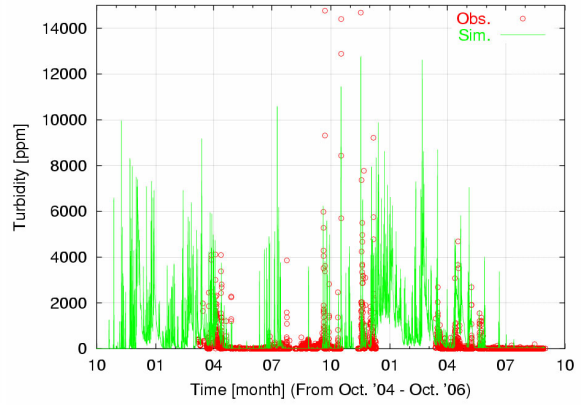


Fig. 16(b) Comparison between calculated and observed long term turbidity at Tawangrejeni from October 2004 to October 2006

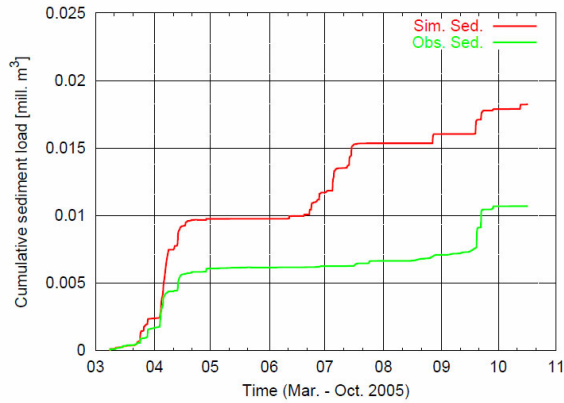


Fig. 17 Comparison between calculated and observed accumulated sediment volume in the period from March 2005 to October 2005

$$F_w = \begin{cases} \exp(1 - h/d_m) & h > d_m \\ 1 & h \leq d_m \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 $r$ :降雨強度、 $h$ :斜面での表面流の水深、 $c_f$ :土壌や表土の特性に関係したパラメータ、 $d_m$ :雨滴の直径であり、次式で表せるものとする。

$$d_m = 0.001242r^{0.182} \quad (12)$$

なお、雨滴径においてはMRRによる観測で同定した値を使用すべきであるが、これについては今後の課題としたい。

一方、斜面での表面流による土壌侵食速度 $e_h$  ( $e_h < 0$ :堆積、 $e_h \geq 0$ :侵食)については、STモデルと同様の考え方にに基づき、以下のように表す。

$$e_h = c_g(C_t - C_s)A \quad (13)$$

ここに、 $c_g$ :係数、 $C_s$ :土砂濃度、 $A$ :流積、 $C_t$ :平衡土砂濃度であり、次式で表される。

$$C_t = \frac{1}{2} \frac{u_*^3}{gdh(\gamma_s - 1)^2}, \quad u_* = \sqrt{ghi} \quad (14)$$

ここに、 $u$ :表面流の流速、 $u_*$ :摩擦速度、 $g$ :重力加速度、 $\gamma_s$ :土粒子の水中比重、 $d$ :土粒子径、 $i$ :斜面勾配である。流量を $Q$ とすると土砂の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} = e_s + e_h \quad (15)$$

ここでは、植生による土地の被覆状況の違いが流れの抵抗すなわち粗度係数に反映され则认为、植生指数と関連付けたManningの粗度係数を定義し、表面流による侵食の難易をモデル化している(Sharma, 2006)。Fig. 18は植生指数(12月のNDVI)とManningの粗度係数との関係を示したものである。図中の曲線は最小二乗法により以下のような関係である。

$$n = 0.0713 \exp(2.8p) \quad (16)$$

ここに、 $n$ :Manningの粗度係数、 $p$ :NDVIである。

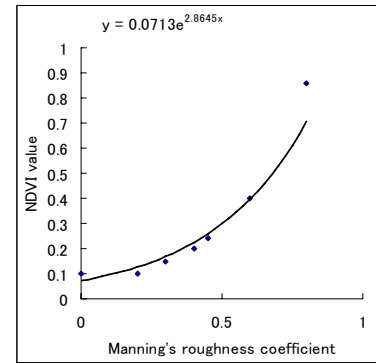


Fig. 18 Relationship between Manning's roughness coefficient and NDVI (NDVI value is obtained from the satellite data taken in December 2002).

Fig.19は(16)式を用いてレスティ川流域におけるNDVIの分布をManningの粗度係数の分布に変換したものである。この関係式を用いるにあたっては、季節ごとのNDVIの値とManning式との相関式を用いる必要があることは論を待たない。

河道においてはバルクの連続式、粒径ごとの土砂の連続式、土石流、層流状集合流動、乱流といった流れの形態ごとの抵抗則、河床位式等を用いている(Takahashi, et. al., 2001)。なお、対象とする土砂の粒径は小さく、ウォッシュロードに分類されることから、土砂の連続式において微細砂(流体として流

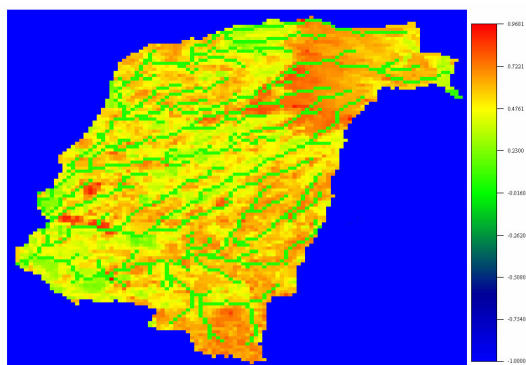


Fig. 19 Distribution of roughness coefficient evaluated by using eq.(16) in the Lesti River basin (NDVI value is obtained from the satellite data taken in December 2002).

動する)として取り扱った。

## (2) 適用結果

Fig. 20(a), (b)はタワングレジェニ地点での流量と濁度の計算値と観測値とを比較したものである。傾向はある程度再現できているが、不一致も認められるのでモデルの更なる改良が必要である。

NDVIと関連付けたManningの粗度係数を用いて流量と濁度を計算した場合と、Manningの粗度係数を一律  $n = 0.1$ 、あるいは  $n = 0.5$ 、あるいは  $n = 0.8$ とした場合に、観測値と計算値の2乗平均平方根誤差を求めたものがTable 3である。これより、流量および濁度ともNDVIと関連付けたManningの粗度係数を用いた場合が最も観測値に近い値となることがわかる。

## 5. おわりに

ブランタス川の支川レスティ川流域を対象としてこれまで実施してきた降雨・土砂流出の観測と予測

Table 3 Root Mean Square Error (RMSE) for different roughness coefficient

|           | NDVI · $n$ | $n = 0.1$ | $n = 0.5$ | $n = 0.8$ |
|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Discharge | 11.9       | 35.9      | 20.1      | 47.5      |
| Turbidity | 550.1      | 1860      | 1458.3    | 1315.4    |

について報告した。観測データの有効利用やモデルの改良など、まだまだ不十分であるが、降雨・土砂流出予測精度の向上のため、今後更に研究を進展させていきたいと考えている。

得られた成果の中で、土砂流出が人為行為と関係すると思われる事項を中心にまとめると、以下のようである。

- (1) インドネシアのような火山活動が活発な流域においては、雨季の短時間ではあるが降雨強度が大きい豪雨によって土砂流出が極めて活発となる。
- (2) 10月の雨季が始まる直前では、耕作地は極端に乾燥し、植生指数は極めて低い。
- (3) 雨季が始まった直後の最初の豪雨時には、耕作地の表面は植生が弱く、雨滴侵食によって容易に土砂流亡する状態となる。また、斜面上の表面流によっても容易に侵食される状態となる。
- (4) また、耕作地のみならず道路や側溝にも多量の微細土砂が乾季の間に堆積しており、雨季の初期にはこれらの微細土砂が耕作地の土砂とともに流出するために、高い濁度が観測された。
- (5) 雨季は3月～4月まで継続するが、雨季末期を除き、雨季前期と同様の降雨があっても高濁度な土砂流出はあまり発生しない。これは、雨季前期に道路や側溝にたまった土砂が出尽くすことと、耕作地において急激に植生が回復し、

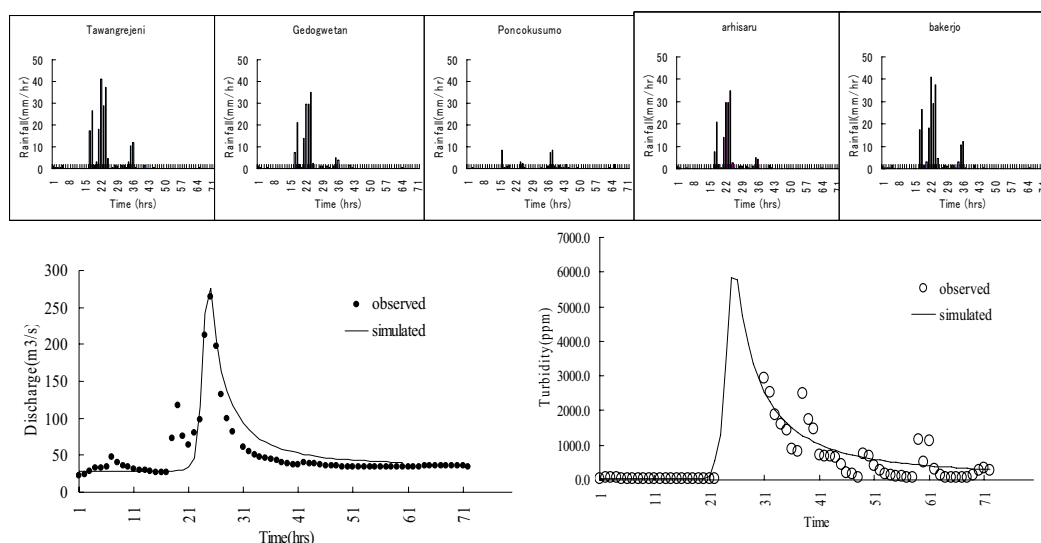


Fig. 20 (a) Comparisons between calculated and observed water discharge and turbidity at Tawangrejeni in the period from 0:00, Nov. 21, 2003 to 0:00, Nov. 24, 2003

地表面を覆いつくすために、土砂流出が抑制されることによると考えられる。

- (6) 土砂流出抑制の原因として、裸地斜面でのアーミングも考えられるが、斜面の土砂の粒度分析から土粒子そのものの粒度は極めて均一で細かく、アーミングを起こすような粗粒径土砂は殆ど見当たらないことがわかった。ただし、まだ十分は検討していないが、表面侵食や雨滴侵食を受けた斜面では微細土砂の団粒化が進行し、これが粗粒径の役割を果たすために見かけ上、アーミングが生じている可能性がある。これを破壊するような豪雨が発生すると、その下層の土砂は容易に流出するものと考えられる。これについては今後の検討が必要である。
- (7) インドネシアの東ジャワでは年2回、農作物の収穫が通常見込まれる。山地部の斜面ではキャッサバやとうもろこしの栽培が活発である。なお、ブランタス川本川上流では高原野菜としてキャベツの栽培が極めて活発に行われている。雨季末期の3月頃は第1回目の農作物の収穫時期であり、畑が収穫や次の植え付けのために攪乱されるとともに、田圃は代かきで攪乱され、降雨によって多量の土砂流出が観測された。
- (8) 標高が高い所ではりんご等の果樹園が増えてきている。熱帯でのりんごの栽培は珍しく、大変良い現金収入のもととなっている。そのため、農家は熱心に果樹園の管理をし、雨季には下草が繁茂するため、せっせと下草刈りに精を出す。これによって表土が露出し、雨季の豪雨で土砂

が流出して高濁度な水が畑から河川に流入する。

- (9) キャベツ畑では確認できていないが同様の行為がなされているものと推測され、高付加価値のある農産物の無秩序な栽培が土砂生産・流出を助長しているものと考えられ、適切な農業指導が喫緊の問題であろう。
- (10) 植生指数を考慮した2つの降雨・土砂流出モデルを開発し、これをレスティ川流域に適用した。計算結果とタワングレジェニでの観測結果とを比較してモデルの妥当性を検討したところ、ある程度本モデルで再現できることが分かった。ただし、人為行為、とくに代かきや野菜の作付けのための攪乱が土砂流出に及ぼす影響を詳細に考慮できるモデルではないため、モデルの改良が必要である。すなわち、計算での格子サイズは植生指数を評価するピクセルの衛星画像の解像度に依存しており、攪乱が生じている耕地のサイズを何らかの方法で求め、それを計算格子サイズに反映する必要がある。さらに、STモデルでは植生指数に応じた雨滴侵食速度のさらなる改良が必要である。RHモデルでは植生指数に応じた雨滴侵食速度の導入が必要である。
- (11) 非洪水時には砂利採取がレスティ川流域のいたるところで行われており、土砂生産、土砂流出に多大な影響を与えているものと推察されるが、その実態が殆ど把握されていないため、本研究では考慮していない。今後、砂利採取による河床の攪乱が微細土砂の生産・流出に与え

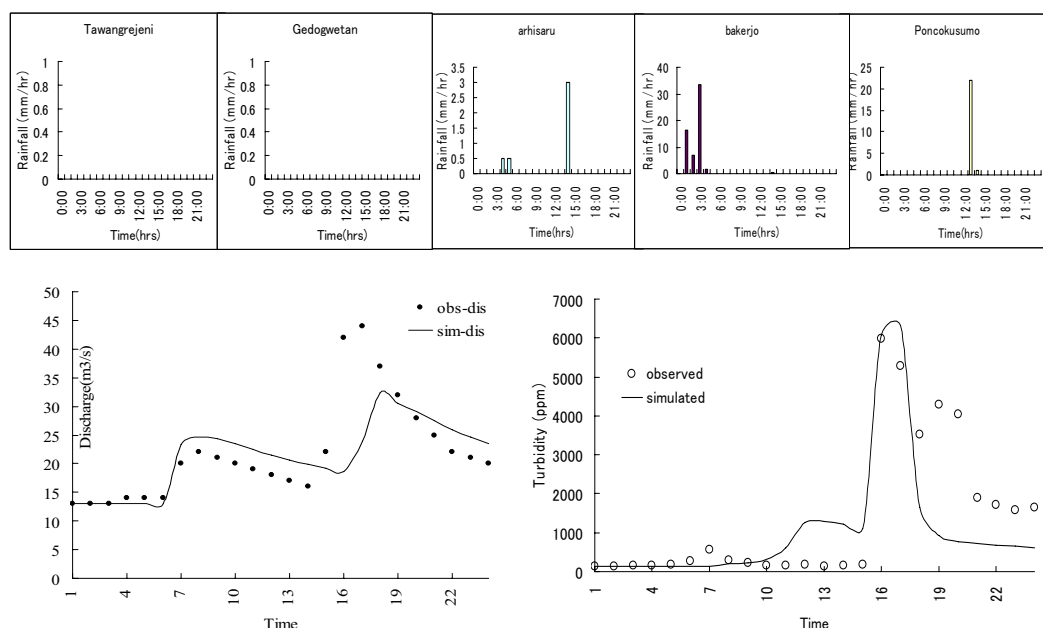


Fig. 20 (b) Comparisons between calculated and observed water discharge and turbidity at Tawangrejeni in the period from 0:00, Sep. 19, 2005 to 0:00, Sep. 20, 2005

る影響（マイナス面）、および採取された粒径成分の土砂が下流に到達しなかったことによる河床低下（マイナス面）、河床上昇の防止（プラス面）、貯水池堆砂の軽減（プラス面）など、砂利採取の影響を多面的に検討する必要がある。

- (12) レスティ川流域は古くから農耕が活発で、ある意味では成熟した農耕がなされている。すなわち、肥沃な表土層の流亡を防ぐために等高線に沿った階段状の耕作地が発達している。最近開発が活発なブランタス川本川上流域ではそのような耕作がなされていないために耕作のたびごとに斜面から表土が流亡している。このようなところで耕作する農民に対して適切な耕作方法を指導することが、過剰な土砂流出を軽減する有効な対策の一つであると考えられる。
- (13) 研究成果の今後期待される効果としては以下のようなことが考えられる。すなわち、近年、わが国を含む東南アジア諸国でダム堆砂が極めて深刻な問題になっている。これを解決するために色々な対策が考えられているが、環境への負荷が少なくなるべく安価で効果的な排砂方法が望ましい。現在、既設のダムでは浚渫による排砂がもっとも良く利用されているが、インドネシアのように年間の堆砂量が多いダムでは毎年高額なお金が必要となる。既設のダムであれ新規であれ、流入する土砂をダムから排出するためにはどのような規模のどのような施設が必要となるかを検討する上で、流入土砂量を正確に予測すること、連続的、継続的な流量および流砂量観測を実施すること等が極めて重要である。わが国で適用可能な予測モデルを、わが国とは異なった自然的・社会的条件をもつ国に、直接的には利用できないし、利用してはいけない。

本研究で行ったように、植生指数によって耕地の攪乱等の人的行為を把握し、これを降雨による土壌侵食（雨滴侵食と表面流による侵食）量の評価に応用するというアイデアはかなり普遍性があると考えられ、各国、各地域の特性に即したモデルへと改良すれば、大変有用な土砂流出予測が行えるものと推察できる。ひいてはダム堆砂対策のための施設設計にも有用な情報を与えることが出来ると思われる。

## 謝 辞

本研究は、6年の長きにわたり（独）科学技術振興機構からの研究費の補助（戦略的創造研究推進事業、研究課題：社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築（代表：京都大学防災研究所 寶 馨教授））を受けて実施してきたものであり、関係各位に記して深謝する。

## 参考文献

- 大石 哲・佐山敬洋・中川 一・里深好文・武藤裕則・Dian Sisinggih・砂田憲吾(2005)：雨滴粒径分布を考慮した雨滴衝撃エネルギー算出方法の開発と局所的土砂生産量との関係に関する研究，土木学会水工学論文集，第49巻，pp.1087-1092.
- 立川康人・永谷 言・寶 馨(2004)：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，土木学会水工学論文集，第48巻，pp.7-12.
- Govers, G. and Rauws, G. (1986): Transporting Capacity of Overland Flow on Plane and on Irregular Beds, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 11, pp. 515-524.
- Meyer, L.D. and Wischmeier, W. H. (1969): Mathematical simulation of the process of soil erosion by water, *Transaction of ASAE*, pp.754-759.
- Nakagawa, H., Satofuka, Y., Muto, Y., Ohishi, S., Sayama, T. and Takara, K. (2005): On sediment yield and transport in the Lesti River basin, a tributary of the Brantas River, Indonesia, -Experiences from field observations and remotely sensed data-, *Proc. of the International Symposium on Fluvial and Coastal Disasters*, CD-ROM.
- Sharma, R. H. (2006): Study on Integrated modeling of rainfall induced sediment hazards, *Doctoral Thesis of Kyoto University*, pp.71-96.
- Takahashi, T., Nakagawa, H. and Satofuka, Y. (2001): Estimation of debris-flow hydrographs in the Camuri Grande River basin, *Research report on natural disasters*, pp.41-50.

## **Rainfall and Sediment runoff in the Lesti River Bain, Tributary of the Brantas River**

Hajime NAKAGAWA, Yoshifumi SATOFUKA\*, Satoru OISHI\*\*, Yasunori MUTO,  
Takahiro SAYAMA, Kaoru TAKARA and Raj Hari SHARMA\*\*\*

\* Graduate School of Agriculture, Kyoto University

\*\* Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi

\*\*\* Graduate School of Engineering, Kyoto University

### **Synopsis**

Intensive and continuous observations on sediment yield and transport are conducted in the Lesti River Basin, a tributary of the Brantas River, Indonesia. This report presents the observation results of raindrop characteristics investigated with Micro Rain Radar (MRR), seasonal and inter-annual land cover change detected by remotely sensing, soil erosion measurements with staves installed at different land covers, river discharge and velocity measurements with Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), and sediment turbidity measurements at the outlet of the Lesti River. Our motivation of these integrated observations is to understand all the processes from sediment yield to transport with the consideration of human impact such as cultivation, deforestation, and sand mining.

**Keywords:** rainfall runoff, sediment runoff, vegetation index, Brantas River, observation, modeling