

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

DEVELOPMENT OF ESTIMATION METHOD FOR IMPACT ENERGY OF RAINDROP
CONSIDERING RAINDROP SIZE DISTRIBUTION AND THE RELATIONSHIP
BETWEEN THE IMPACT ENERGY AND LOCAL SEDIMENT YIELD

大石 哲¹・佐山 敬洋²・中川 一³・里深 好文⁴・武藤 裕則⁵
・ Dian Sisinggih⁶・砂田 憲吾⁷

OISHI Satoru, SAYAMA Takahiro, NAKAGAWA Hajime, SATOFUKA Yoshifumi,
MUTO Yasunori, Dian Sisinggih and SUNADA Kengo

¹正会員 博(工) 山梨大学助教授 大学院医学工学総合研究部(〒 400-8511 甲府市武田)

²学生員 工修 京都大学大学院工学研究科(〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所(〒 612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴正会員 博(工) 京都大学助教授 大学院農学研究科(〒 606-8502 京都市左京区北白川追分町)

⁵正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所(〒 612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁶学生員 M.E. 山梨大学大学院医学工学総合教育部(〒 400-8511 甲府市武田)

⁷フェロー 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部(〒 400-8511 甲府市武田)

In order to build a connection between former study of fine sediment yield and former study of rainfall system, the observation of raindrop size distribution and sediment yield has been made in the Lesti river basin that is a tributary of the Brantas river in Indonesia.

The following results were obtained. Rainfall energy work which are calculated by size distribution obtained by MRR has good relationship with rainfall amount obtained by a raingage. The energy which is used for calculating sediment yield is proven to be treated as linear to rainfall amount. On the other hand, the spatially non-uniform rainfall is shown in the Lesti river basin. The methods for treating the limited rainfall data is proposed in this study. Finally, the accumulation and erosion of sediment is observed in three points in the Lesti river basin. Moreover, main items which are important to estimate the sediment yield is picked up by the observation.

Key Words : *fine sediment, rain drop, size distribution, observation, Brantas river*

1. はじめに

日本、フィリピン共和国、インドネシア共和国は島国であること火山活動が活発であることなどの共通点を持っているが、水管理の問題に目を向けると土砂生産量が極めて多く、流域総合土砂管理が大きな共通課題となっている。2004年の夏季には日本では豪雨を原因とする洪水災害が頻発したが、内水氾濫などの水だけの災害の被害と比較して、土石流や泥流による災害は被害も格段に大きくなることが強く認識される結果となった。一方、破堤時などに代表される破壊的な土砂災害以外にも、土砂の蓄積による河床上昇、貯水池

の機能低下、清流環境の悪化などの継続的な土砂災害も無視することができない課題であり、極めて多くの公共財を日々損失させている。後者の日常的な土砂災害は、前者の突発的な土砂災害と比較すると定常的であると考えられるが、広域で長期間の資料が要求され、複雑な土地被覆や人間活動が影響しているために十分な解析が行われていない。

本研究で対象にするインドネシア共和国ジャワ島東部を流れるブランタス(Brantas)川は、日本の国際援助も含む多数の河川事業が行われてきた。しかし、流域内に活火山があること、人口増加に伴って農地を拡

大する必要性から大規模な森林伐採が行われてきたこと等の影響によって、ウォッシュロードなどの細粒土砂の生産が極めて活発であり、その結果、継続的な土砂災害の問題が極めて深刻になっている。

そのような背景から、本研究ではブランタス川の支川レスティ (Lesti) 川において、細粒土砂生産量把握を目的とした雨滴粒径、降雨強度および土砂生産量の観測を行った。

雨滴粒径を考慮に入れて土砂生産量の研究を行ったものには、深田らの一連の研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾や村上ら⁵⁾の研究などがある。また、水工学の分野で雨滴粒径分布そのものを扱った研究としては中川ら⁶⁾⁷⁾、芝ら⁸⁾、大石ら⁹⁾などがある。さらに、降雨を考慮して土砂生産量を把握する手法としてUSLE法¹⁰⁾などがある。本研究では、これらの土砂生産量の研究と降水システムの研究をつなぐ研究として以下のことを行った。まず実際の降雨で観測された雨滴粒径分布を用いて雨滴が地面に与える衝突エネルギーによる仕事 (以下、雨滴衝突仕事) を算出する。次に一般的には雨滴粒径分布の観測および雨滴衝突仕事の算定は困難であることから、転倒マス式雨量計によって測定される降雨量を用いて雨滴衝突仕事を算定する方法を提案する。最後に局所的な土砂の堆積・浸食を土地被覆毎に観測した結果を用いて降雨と土砂の浸食・堆積の関係を求めるとともに、降雨以外の土砂浸食要因の影響について言及する。

2. 観測の概要

本研究では、インドネシア共和国マラン (Malang) 市およびその周辺のレスティ川流域 (流域面積 625km²) において、マイクロレインレーダー (以下、MRR) 1 台、転倒マス式雨量計 4 台、斜面土砂変動測定杭 3 カ所の観測結果を用いる。解析に用いた観測期間は MRR が 2003 年 12 月 22 日～2004 年 3 月 23 日、転倒マス式雨量計が 2003 年 10 月 12 日～2004 年 3 月 23 日、斜面土砂変動測定杭が 2003 年 10 月 12 日～2003 年 12 月 20 日である。

ブランタス川はインドネシア共和国ジャワ島東部に位置する流域面積 11,800km² の河川である。レスティ川はブランタス川上流に位置し Sengguruh ダムに左岸よりそそぐ支川である。レスティ川上流には活火山の Semeru 山 (3676m) があること、レスティ川流域では林地が違法に農地に転用され森林伐採がさかに行われていること等の理由で土砂生産は多い。そのため、ブランタス川本川の Sutami ダムの貯水容量確保すなわち貯砂と、落差を利用した発電を目的とする Sengguruh ダムが Sutami ダム直上流に建設された。Sengguruh ダムでは総容量 21.5 × 10⁶m³ に対し有効貯水量が 2.5 × 10⁶m³

であり、それも後 3 年程度で満砂になると予測されている。

レスティ川流域での活発な土砂生産活動に対しては、斜面域からの細粒土砂生産プロセスについて考察し、生産土砂量を推定することで対策を立てる必要がある。さらに、斜面域からの細粒土砂生産は雨滴の衝突が影響していると考えられること、土砂生産量を算出するために従来から用いられている USLE 法¹⁰⁾でも、雨量から雨滴衝突エネルギーを考慮していることから、まずは MRR で観測された詳細な雨滴粒径分布を考慮した雨滴衝突仕事の算出方法を検討した。

MRR¹¹⁾は 24GHz の波長をもつ鉛直一次元ドップラーレーダーであり、マラン市の Jasa Tirta 1 公共事業社屋上に設置した。MRR は鉛直一次元ドップラーレーダーであるので、レーダーエコーによる降雨強度の鉛直プロファイルとともに、雨滴粒子の落下速度のドップラースペクトルを測定することができる。それによって 0.21mm～4.08mm までの雨滴の大きさの分布すなわち雨滴粒径分布を測定することができる。本研究では鉛直プロファイルは使わずに地上から高度 200m までの観測結果のみを用いた。雨滴粒径分布を用いると降雨強度は

$$RR = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D) D^3 v(D) dD \quad (1)$$

と算出される。ここで RR : 降雨強度 [mm/hr], D : 雨滴径 [mm], $N(D)$: 雨滴粒径分布 [$1/\text{m}^3/\text{mm}$], $v(D)$: 終端落下速度に MRR で測定された下降風速を加えた落下速度 [m/s] である。さらに雨滴粒径分布を用いれば雨滴が地面に衝突する際に与えるエネルギー (以下、雨滴エネルギーと称する) を算出することができる。1 個の雨滴の雨滴エネルギー [w] は

$$E_0 = \rho_w \frac{\pi}{6} D^3 \frac{v^2(D)}{2} \quad (2)$$

と与えられるので、雨滴粒径分布を考慮すれば単位時間単位面積あたりの雨滴エネルギー [w/m²] は

$$E = \int_0^{\infty} N(D) E_0 v(D) dD \quad (3)$$

と算出される。

次に雨滴粒径分布の測定は、一般的に広く用いられることは困難であるので、転倒マス式雨量計データと雨滴衝突仕事との関係を求めた。転倒マス式雨量計は MRR と同じ Jasa Tirta 1 公共事業社に 1 台設置したほか、レスティ川流域内に図-1 のように下流から Tawangrejeni 地点、Gedogwetan 地点、Poncokusumo 地点の 3 台設置した。ただし、Jasa Tirta 1 公共事業社は図-1 の Poncokusumo 地点北西約 19km にあり、図-1 には載せていない。

最後に局所的な土砂移動量を測定し、雨滴衝突仕事で土砂生産量にあたえている効果を調査するために斜

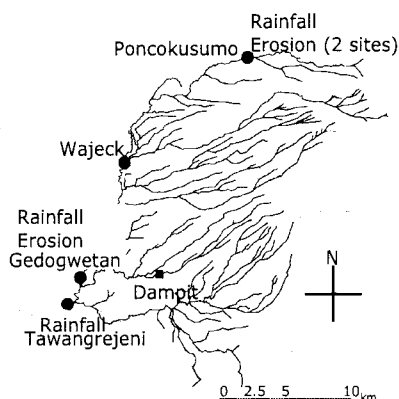


図-1 レスティ川流域の観測状況

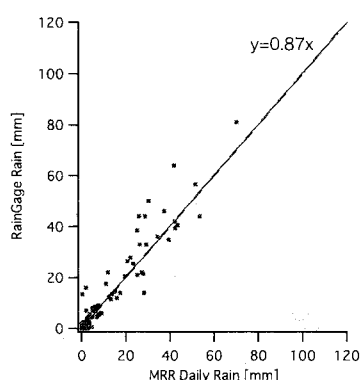


図-2 MRRと転倒マス式雨量計の日雨量の比較

面土砂変動測定杭による観測も行った。斜面土砂変動測定杭とは、長さ30cmの木製杭の側面にスチール製のメジャーを張り付けたものである。これを地面に打ち込み、地面と杭の交面の測定を毎日行うことによって、地面に土砂が堆積し交面が上昇したり、逆に土砂浸食により交面が下降したりする様子を観察する。測定は現地の農家の方に依頼し、測定精度を高めるためにデジタルカメラによって測定面を毎日撮影してもらった。斜面土砂変動測定杭は土地利用がバナナやキャッサバなどの耕作地（現地の土地被覆図によると Cultivated Area に相当）である Gedogwetani 地点に1式（4本）、土地利用がリング栽培（現地の土地被覆図によると Tree Crops に相当）である Poncokusumo 地点に1式、土地利用が森林である Poncokusumo 地点上流に1式を設置した。

3. 結果と考察

まず、MRRを用いた雨滴粒径分布を考慮した雨量と同地点の転倒マス式雨量計で測定した雨量とを比較すると、日雨量の比較では図-2のようになる。このとき、

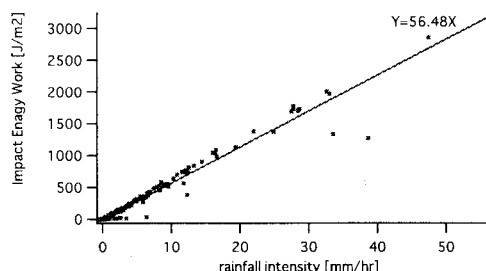


図-3 1時間雨滴衝突仕事とMRRの雨滴粒径分布を用いた1時間雨量の関係

相関係数は0.86となった。ただし、日雨量40mm以上では回帰線よりも上のプロットが多く、必ずしも雨滴粒径分布を考慮した雨量が過小評価ではないことがわかる。また、 $y = x$ よりも上のプロットもいくつかあり、その多くは縦軸の40mmよりも上にある。これはMRRが24GHzという短い波長帯を使っていることと、この地域では短時間に極めて強い降雨が生起することが原因で電波減衰が起こっていることが原因であると考えられる。さらに、時間雨量での比較はもう少しばらつきが目立つ結果となったが、その理由はMRRと転倒マス式雨量計の時計が完全に同期がとれていなかったことにある。ブラタス川流域では雨期の夕方から深夜にかけてスコール型の雨が降るので、10分程度の時計の狂いは時間雨量には影響を与えるが、日雨量には影響を与えない。

次に単位時間単位面積あたりの雨滴エネルギー（式(3)）を1時間で時間積分した1時間雨滴衝突仕事と、MRRの雨滴粒径分布を用いた降雨強度（式(1)）を1時間で時間積分した1時間雨量の関係を調査する。まず、式を見ると1時間雨滴衝突仕事は1時間雨量の落下速度の2次モーメントになる。雨滴の終端落下速度はGunn and Kinzer¹²⁾によると、

$$v(D)[\text{m/s}] = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D[\text{mm}]) \quad (4)$$

である。すなわち1mmの雨滴の終端落下速度（4.0m/s）と4mmの雨滴の終端落下速度（8.7m/s）では約2倍強みの差がある。雨滴の落下速度は終端落下速度と下降風速の和となるが、強い雨が生起した2003年12月29日15時～16時の下降風速は6.0～8.7m/sの間で変動していた。従来の研究ではこの雨滴粒径分布にガンマ関数などをフィッティングさせるという手法を取ってきたが、本研究では雨期を通した多数の観測データを用いて実証的に1時間雨滴衝突仕事と1時間雨量の間の関係を見る。それを図-3に示す。図-3よりわかるように1時間雨滴衝突仕事と、MRRの雨滴粒径分布を用いた1時間雨量には相関係数が0.983の極めて強い相関関係がある。

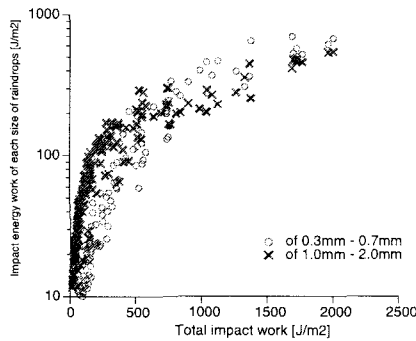


図-4 雨滴径の毎の1時間雨滴衝突仕事の変化

式(3)に示すように雨滴衝撃仕事は落下速度の3乗の式となっており、式(4)に示すように雨滴径が大きいほど落下速度は大きくなる。したがって、上述したように1時間雨滴衝突仕事と1時間雨量の間に線形関係がなりたつには、1時間雨滴衝突仕事あるいは1時間雨量の大きさによって雨滴径の大きさが変化しなくてはならない。図-4は、横軸に全雨滴粒径を用いて計算した1時間雨滴衝突仕事を、縦軸に雨滴粒径が0.3～0.7mmの雨滴および1.0～2.0mmの雨滴だけで計算した1時間雨滴衝突仕事を表している。図-4は点の種類がわかりやすいように縦軸を対数表示している。図-4からは、横軸の1時間雨滴衝突仕事小さい時、すなわち1時間雨量が小さい時には、1.0～2.0mmの雨滴による雨滴衝突仕事の割合が大きい、横軸の1時間雨滴衝突仕事大きい時、すなわち1時間雨量が大きい時には0.3～0.7mmの雨滴による雨滴衝突仕事の割合が大きくなっていることがわかる。すなわち、1時間雨量が小さい時には大きな雨滴で効率よく雨滴衝突仕事を与え、1時間雨量が大きくなると雨滴の粒径が小さいものが増加する。その結果、落下速度の3乗の効果が相殺されて、1時間雨滴衝突仕事と1時間雨量の間に線形関係がなりたっている。この現象は、1時間雨量が大きくなると雨滴が分裂する割合が大きくなり、小さい雨滴が多数発生することが原因であると考えられる。

上述したようにマイクロレインレーダーの雨滴粒径分布を用いた1時間雨量と転倒マス式雨量計で測定した1時間雨量の間には線形関係がみられるので、図-5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なりたっている。1時間雨量が大きくて線形関係からはずれている2例について検証したところ、1例は上述したように、MRRと転倒マス式雨量計の時計が完全に同期がとれていなかったことが原因であり、その値を補正すると回帰線に近づいた。別の例は転倒マス式雨量計では44mm/hrを観測していたが、MRRでは28mm/hrしか

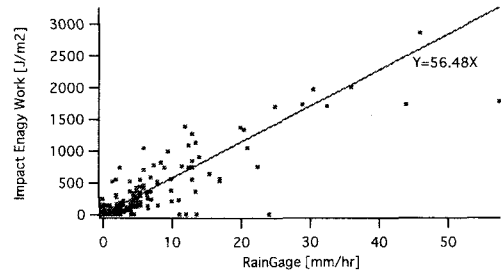


図-5 1時間雨滴衝突仕事と転倒マス式雨量計で測定した1時間雨量の関係

観測されておらず、図-2で説明したのと同様にMRRの電波減衰が原因であると考えられる。

さらに上述したように日雨量ではマイクロレインレーダーの雨滴粒径分布を用いた日雨量と転倒マス式雨量計の日雨量の間にはよい線形関係が成り立っていたことからわかるように、転倒マス式雨量計の日雨量と1日雨滴衝突仕事の間には相関係数0.95の線形関係がなりたっていた。式にすると $E_d = a \times R_d$ であった。ただし、 E_d : 1日雨滴衝突仕事[J/m²/day], R_d : 日雨量[mm/day], a :次元を持った係数=49.5J/m²/mmである。

以上より、マラン市においては、転倒マス式雨量計の時間雨量あるいは日雨量から線形的に1時間あるいは1日の雨滴衝突仕事を算出することが可能であることを示した。この結果は気象学的には「ブラントス川流域では」と言い換えてもよいと考えられる。

次に雨滴衝突仕事を用いた土砂生産量の算出を考える。深田ら³⁾は、1個の雨滴による土砂剥離量は水深が浅い場合には

$$V_{s+}(\sigma - \rho)g = 2K_+ \left[0.572 \times \rho g^{1/2} \left(\frac{2E_0}{\rho g \pi} \right)^{7/8} \right] \quad (5)$$

となり、剥離量は雨滴のエネルギーのみに依存することを示した。ここで、 V_{s+} : 1個の水滴による土砂剥離量(体積)、 σ : 土砂の密度、 K_+ : 無次元定数、 E_0 : 1個の雨滴の雨滴エネルギーである。この式を用いて t 時間単位面積あたりの土砂剥離量を算出するためには

$$E_{7/8} = \int_0^t \int_0^\infty N(D) \left(\frac{E_0}{\rho} \right)^{7/8} v(D) dD dt \quad (6)$$

を計算する必要がある。しかし、マラン市で観測された雨滴粒径分布を用いれば

$$E_1 = \int_0^t \int_0^\infty N(D) \left(\frac{E_0}{\rho} \right) v(D) dD dt \quad (7)$$

で計算される E_1 と $E_{7/8}$ は相関係数0.996で $E_{7/8} = 1.04 \times E_1$ の関係が得られることが、図-6に示される。ここで t は1時間である。ここまでの検討から土砂剥離量は雨量と線形関係にある。すなわち、1日の土砂剥離量は1時間の土砂剥離量の和であり、それは1時間

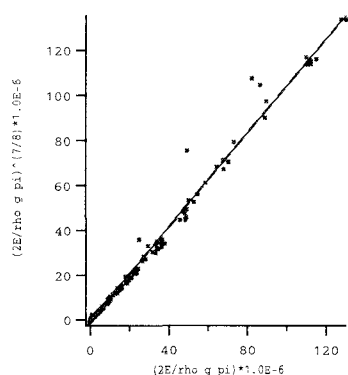


図-6 2004年1月1日～3月23日までの $E_{7/8}$ (縦軸) と E_1 (横軸) との関係

雨量の和としての1日雨量で考えてよい。インドネシア共和国の統計的な雨量情報の整備状況から考えると1日雨量を用いた1日の土砂剥離量を求めていくのが妥当であると考えられる。

一方、雨量の空間分布についてはよく知られているように極めて変動が大きい。ここで要求されている空間分布と比較すると、既存の降雨量データなどは決して多くはないが、上述したように土砂剥離量は雨量と線形関係にあるので、年間あるいは数年間の土砂生産量を算出する際には降雨生起日と生起場所が一致したデータが必要ではなく、確率的な相互相関関係を求めることができればよい。人工衛星データや数値気象モデルの結果から空間的な確率モデルを作成し、降雨量測定地点における実測データを使って年間あるいは数年間の降雨量を算出すればよいと考えられる。

ここまででブランタス川流域の1日雨滴衝突仕事を転倒マス式雨量計の1日雨量から算出する方法を提案した。また、その結果を用いれば1日土砂剥離量と1日雨量の間には線形関係がなりたっていることを示した。これらは地面の傾斜や土地被覆の変化などの要素を無視して上空が開けたような場所での理想的な土砂生産量についての理論である。しかし、実際には土砂生産には様々な要素が考えられる。USLE法¹⁰⁾では雨滴衝撃仕事に相当するものの他に、地面の傾斜、斜面長、土壌タイプ、土地被覆、土砂流出防止工について考慮されている。そこで本研究では地面の傾斜と土地被覆が局所的な土砂移動現象に与えている影響について調査し、土砂生産に支配的な要素を考察する。

斜面土砂変動測定杭による、Poncokusumo 地点上流の森林、Poncokusumo 地点の Tree Crops 栽培地および Cultivated Area である Gedogwetan 地点の土砂の堆積・浸食量と日雨量の関係を図-7に示す。この図では、縦軸に杭と地面の交面高さの日変動量を地点毎に4本の

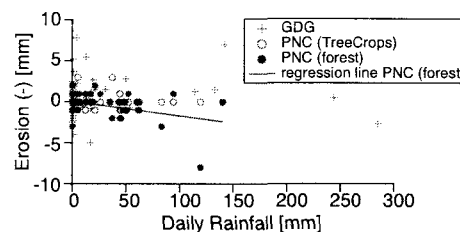


図-7 3地点の堆積・浸食量と日雨量の時系列

杭で平均した値を土砂の堆積(+)・浸食(-)量として表し、横軸に転倒マス式雨量計で観測されたその地点の日雨量を示している。直線はPoncokusumo 地点上流の森林のデータ(図-7中の黒点)の回帰線である。図に示すように全体的に土砂の堆積・浸食と日雨量の相関関係は高くなかった。最も相関係数の絶対値が高かったPoncokusumo 地点上流の森林で相関係数が-0.41であり、その他の2点では相関係数の絶対値が0.1に満たなかった。すなわち、傾斜の大きな森林域では雨滴衝撃仕事は土砂移動に与える影響を考慮する必要があるが、傾斜の小さな場所ではそれ以外の要因の方が支配的であるといえる。

そこでさらに解析すると、本研究の結果からも、江頭¹³⁾にあるように傾斜が10～4度の斜面(本研究では正確に測量していないがPoncokusumo 地点上流の森林が相当する)がウォッシュロードの生産源(浸食傾向)であり、傾斜が4度以下(本研究では同様にPoncokusumo 地点とGedogwetan 地点が相当する)では水成作用を強く受けて掃流砂や浮遊砂によって輸送された土砂が堆積する傾向であるという傾向が見られた。定量的には森林での浸食量は2ヶ月で1cm程度、Tree Crops栽培地での堆積量は2ヶ月で1cm程度、Cultivated Areaでの堆積量は2ヶ月で1cm～3cm程度であることがわかった。また、Poncokusumo 地点上流の森林の堆積・浸食の日変化を見ると数mm程度の浸食と安定の繰り返しであり、小規模の崩壊が断続的に発生していることがわかった。

次にPoncokusumo 地点の Tree Crops 栽培地の堆積・浸食を図-8に示す。図-8の縦軸は、杭と地面の交面高さの日変動量の平均値を累加した値、すなわち観測開始からの堆積(+)・浸食(-)量の平均値に相当するものを表している。図-8より、Tree Crops栽培地では10月後半から11月前半は堆積傾向にあり、11月後半から11月末までは浸食傾向に、その後は細かい周期で変動しながらも安定している様子が見られる。この時の斜面土砂変動測定杭周辺のデジタルカメラ映像を見ると10月前半から耕した裸地に雑草が生え始め、11月末になるとほぼびっしりと雑草で覆われている

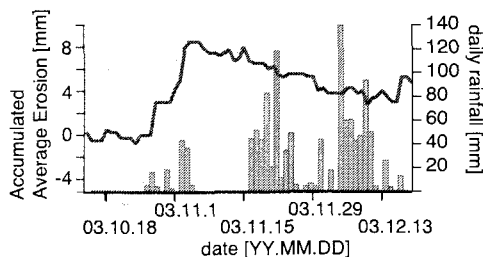


図-8 Poncokusumo 地点の Tree Crops 栽培地の堆積・浸食量と日雨量の時系列

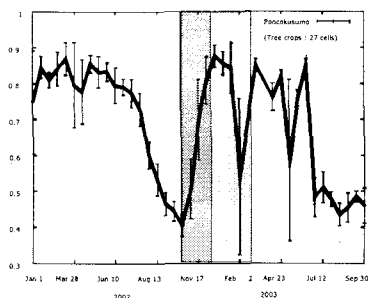


図-9 CPoncokusumo 地点の Tree Crops 栽培地における NDVI の季節変動

様子がわかった。その結果 11 月 16 日から 25 日には雑草が生えそろうていないところに強い雨が生じたために浸食傾向にあり、12 月 4 日からは雑草が生えそろうているために強い雨にもかかわらず浸食が抑制されたと考えられる。この雑草の影響を流域全体でとらえるためには人工衛星などが効果的であると考えた。そこで、本研究での観測期間の 1 年前の人工衛星 MODIS のデータを用いて算出した Poncokusumo 地点の NDVI を図-9 に示す。この図では雑草が生える時期に NDVI が急激に上昇している様子がとらえられている。すなわち、Tree Crops 栽培地のように裸地面が多い土地被覆状態における地表面浸食には雑草の生育が重要な要素でそれは NDVI によって知ることができることが示唆される。

4. おわりに

本研究ではインドネシア共和国ブランタス川の支川 レスティ川において、細粒土砂生産量把握を目的とした雨滴粒径、降雨強度および土砂生産量の観測を行った。その結果、以下のような結果を得た。

マラン市に設置したマイクロレインレーダーの雨滴粒径分布より、降雨量、雨滴エネルギー、雨滴衝突仕事を算出し、それらと転倒マス式雨量計データとを比較

して、雨滴衝突仕事を転倒マス式雨量計データから算出する方法を提案した。また、雨滴衝突仕事を用いる土砂剥離量を転倒マス式雨量計データから線形的に計算できることを示した。一方でレスティ川流域の降雨の空間的な非一様性について示し、限られた雨量データから土砂生産量を把握するための方法論を提案した。

また、レスティ川流域の主要な土地被覆状態である森林、Tree Crops 栽培地、Cultivated Area での土砂の堆積・浸食量を観測し、その量を測定するとともに、堆積・浸食過程に影響を及ぼしている事項を抽出した。

謝辞： 本研究は、(独) 科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・水の循環系モデリングと利用システム研究領域「社会変動と水循環の相互作用評価モデルの構築」(代表者：寶 馨・京都大学防災研究所教授) の補助を受けた。また、データの取得にあたっては Jasa Tirta 1 公共事業社 (インドネシア共和国マラン市) にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 深田三夫・藤原輝男：湛水士壤面における雨滴作用の写真解析 - 雨滴浸食の基礎的研究 (I) -, 農業土木学会論文集, 第 143 号, pp.21-29, 1989.
- 2) 深田三夫・藤原輝男：湛水面への水滴落下衝突による水中ドームの挙動と水圧変動特性 - 雨滴浸食の基礎的研究 (II) -, 農業土木学会論文集, 第 146 号, pp.43-56, 1990.
- 3) 深田三夫・藤原輝男：水圧力積の考え方による湛水士壤面での土粒子剥離のモデル化 - 雨滴浸食の基礎的研究 (III) -, 農業土木学会論文集, 第 158 号, pp.17-28, 1992.
- 4) 深田三夫・藤原輝男：水滴衝突による正圧力積で剥離された土粒子量の測定 - 雨滴浸食の基礎的研究 (IV) -, 農業土木学会論文集, 第 159 号, pp.37-43, 1992.
- 5) 村上正吾・辻本哲郎・中川博次・S.Makhanu：降雨による裸地斜面の土壌浸食に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 40 巻, pp.855-862, 1996.
- 6) 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一：降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直分布, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.141-146, 1997.
- 7) 中川勝広・中北英一・佐藤亨・池淵周一：雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダー雨量推定手法の構築, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.7-12, 1998.
- 8) 芝定孝・平田雄志・八木俊策：大気汚染粒子への水蒸気凝結による雲粒の成長, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.245-250, 1999.
- 9) 大石哲・木谷有吾・中北英一・池淵周一：詳細な雲物理過程を考慮した豪雨に及ぼす地形の影響に関する数値実験的研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.117-122, 1997.
- 10) Varshney, R.S : Engineering Hydrology, 1979.
- 11) METEK: MRR Physical Basis, ver.1.3, pp.1-22, 2001.
- 12) Gunn, R and G.Kinzer : The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, 6, pp.243-248, 1949.
- 13) 江頭進治編：河道堆積物の生成機構を考慮した土砂流出予測法に関する研究, 平成 13 年度～平成 15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)(2)) 研究成果報告書, pp.1-14, 2004.

(2004. 9. 30 受付)