

# 土壌表層浸食と全流出土砂量の観測

芝野 博文

しばの ひろふみ

東京大学大学院

農学生命科学研究科 准教授

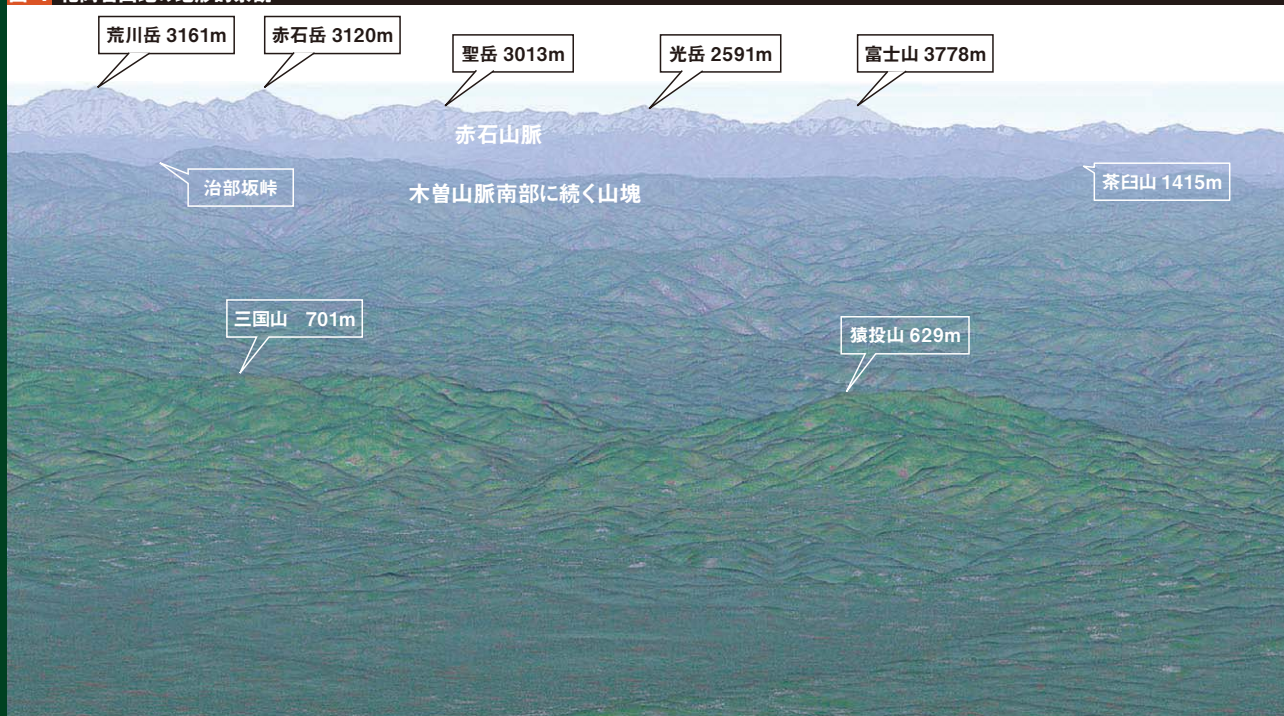


## 1 | はじめに

花崗岩地質は我が国においても広大な面積を占めており、降雨量も多く開発の進んでいた西南日本内帯を中心に土砂災害を引き起こしてきた。とりわけ植生で地表を被覆していない花崗岩の山地流域の場合は、砂状に風化した細粒成分を毎年大量に供給し、山地に接する農地や都市域を流れる河川の管理を難しくしてきた。一方、山腹工事をとおして山地流域が緑化され溪流に土砂流出をコントロールする構造物が施工された現在では災害が軽減された感がある。

東京大学愛知演習林では、長年にわたる水文研究の基礎資料として雨量・流量のデータが蓄積されており、筆者の16年間にわたる職務のなかでこの観測業務をとおして花崗岩の山地からの土砂の流出を見る機会に恵まれた。これは、水位観測精度維持のために、量水堰後背部の貯水池で土砂排出作業を体験したことによるものである。そのなかでも、1999年6月30日の豪雨で愛知演習林のヒノキ壮齢林において山腹崩壊とそれに続く土石流が発生したこと、2000年9月の東海豪雨による

図-1 花崗岩山地の地形的景観



猿投山・三国山から木曾山脈南部さらに赤石山脈に続く広大な山塊は基岩が花崗岩となっている。JR名古屋駅上空2000mから東方を望む(KASHMIR3D Ver8.82 by T. SUGIMOTO)三国山から猿投山にかけて東京大学 愛知演習林が広がっている

量水堰を満砂させる土砂流出を目の当たりにしたことが印象的であった。なぜならば、筆者は、緑化や溪流区間の砂防構造物の存在がそのような大量の土砂の流出を許さないだろうとの砂防研究者としてはのんびりとした予断をもっていたためである。

白坂量水堰堤では長期にわたってこの土砂排出作業にともなってその堆砂量を記録してきている。愛知演習林の1990年までの長期の流量データとBrown式を用いて予測した全流出土砂量に対する全流出土砂量観測値との比率の減少傾向から、それが緑化と砂防構造物の配置によって経年的に減少しているという主張(矢部, 2003)に対して、上述の1999年・2000年と連続して発生した大量の土砂の流出を目の当たりにした経験から次のような疑問に直面せざるを得なかった。

- 1) 全流出土砂量に占める土壤表層浸食起源の土砂の比率はどれほどか
- 2) 全流出土砂量は土砂水理学的要因によって推定される土砂流送のポテンシャルと比較してどの程度の比率を示しているのか

上記の1)に関する課題は、緑化によって抑え込まれた土壤表層浸食量は十分に小さいといえるのだろうかとの疑問から発しており、2)に関する課題は、給砂量の問題が本質にあるのではないかという疑問から発したものである。1)で意味する比率が小さく、2)で意味する土砂水理学的要因が経年的に変化していないとすると、源流域で大きな土砂供給源が出現した場合に今後も大規模な土砂流出の可能性は払拭されないからである。

以上のような検証のためには、土壤表層浸食量については観測データとそれを流域全体に拡張するロジックが、全流出土砂量については、少なくとも月単位での正確な観測データと全流出土砂量を算出できる正確な流量のデータが必要である。フィールドの条件は整っていた。マンパワーについては、ネパールからの留学生 K.B. Karki氏(現 WWF Nepal)により土壤表層浸食の観測が北谷・南谷の小流域上流部で始まり、東京農業大学矢部和弘氏と同治山緑化工学研究室の学生諸君および愛知演習林職員の協力を得て2002年から4年間の全流出土砂量観測が可能となった。以下に観測の手法やそれを取り扱うロジック、観測結果についての筆者の考えを紹介してみたい。

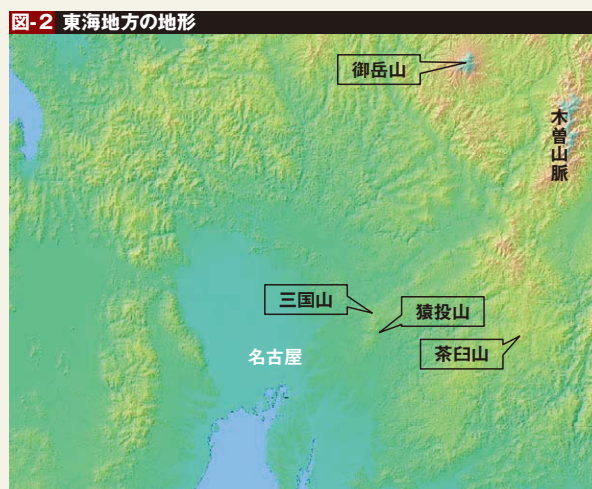


図-2 東海地方の地形  
 東京大学愛知演習林赤津研究林は、三国山から猿投山に広がり中部山岳地帯南西端が濃尾平野に面して張り出した部分である

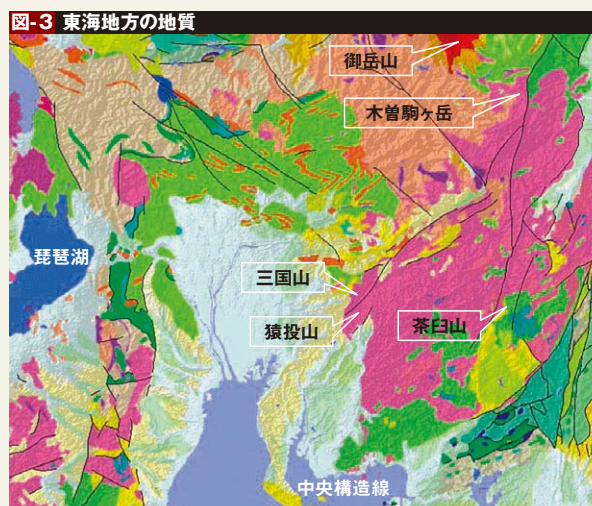


図-3 東海地方の地質  
 中央構造線の北側、西南日本内帯に花崗岩が広く分布する。図の桃色に塗られた部分が花崗岩の地質を示す。愛知演習林赤津研究林はこの広大な花崗岩地帯の西端に位置し、猿投北活断層が北東から南西へ走っている

## 2 | 風化花崗岩の地質で構成された流域

観測の行われた流域の立地について紹介したい。東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林愛知演習林の赤津研究林は赤石山脈から西に続く広大な花崗岩分布域の西端を占め、濃尾平野を取り囲むグリーンベルトの東端に位置する。図-1にその地形的な景観を見ることができる。図-2に地形図、図-3に地質図((独)産業技術総合研究所, 2010)を示した(図中で桃色表示された領域は、原典では白亜紀古第三紀にかけての「珪長質深成岩」とあるが、「花崗岩」として筆者が表記した)。



**写真-1** 水位信号変換器・安定器・記録計 (水晶式水位計) 5分間隔で水圧を水晶の振動数に変換



**写真-2** ロール紙とペンによる水位記録装置 (バックアップ用)



**写真-3** ポイントゲージ すべての記録のベースとなる。週に一度の手観測の記録



**写真-4** 北谷下端測水所

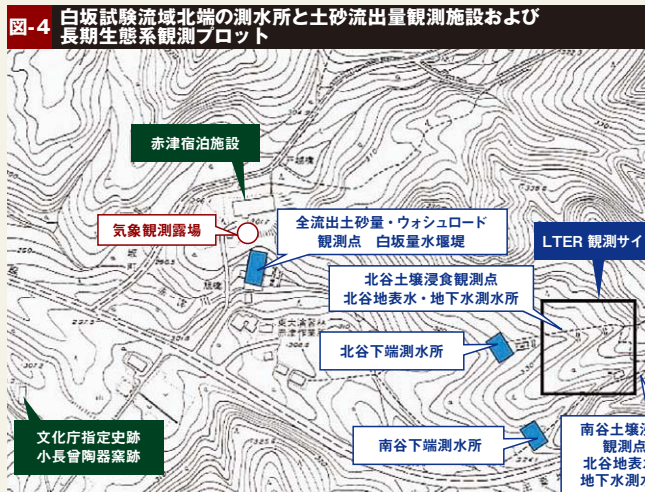


**写真-5** 北谷上流 地表水・地下水測水所



**写真-6** 南谷上流 地表水・地下水測水所

地表水は矢印の方向に導かれる。  
土壌表層浸食量観測地点



### 3 | 測水所の配置と流出する土砂の観測

三国山と猿投山の間に庄内川支流の赤津川があり、猿投山から北流する流域88.6haが白坂量水堰の流域となっている。白坂量水堰堤は、1929年から流量・雨量の日観測値を公表しており、その観測精度は森林の回

復にもなって変化してきた水収支を検証できるほどのレベルである。**写真-1**・**写真-2**・**写真-3**にその水位観測の機器を示した。測水所は、多少の土砂の流出があっても水位観測を高精度で維持できるように越流部の後背部に貯水池をもち、そこに堆積した土砂は全流出土砂量(ここでは掃流砂量と浮遊砂量の合計値を意味し、ウォッシュロードを含まない)として定期観測を行った。

**図-4**に量水堰の周辺の関連する観測施設の位置関係を示した。流域内部には、二つの小流域が学生宿舍近くに設けられており、それぞれ北谷(1.2ha)南谷(1.4ha)の測水所をもつ。北谷下端の測水所を**写真-4**で見ることができる。それぞれの測水所の上流には、地表水・地下水を分離して観測する測水所があり、北谷上流の地表水・地下水測水所(0.4ha)の下流から見た様子は**写真-5**により、南谷上流の地表水・地下水測水所(0.4ha)の上流から見た様子は**写真-6**で知ることができる。**写真-6**で示すように、地表水をコンクリート張りのテラスで誘導して、観測小屋の床下に設えられた地下水貯留のためのプールとは分離したプールに導かれるように



写真-7 地表水・地下水測水所ノッチ形状

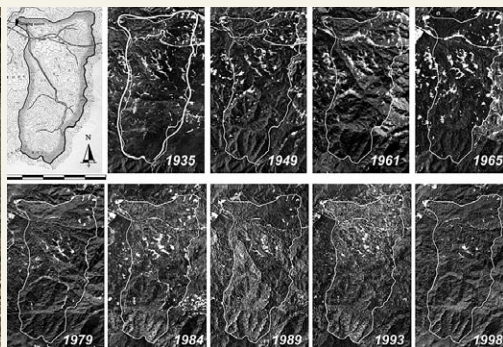


写真-8 白坂流域の裸出地の縮小経過  
Naiyanan: 2000



写真-9 白坂量水堰の貯水池における堆砂 2004台風1/4が土壤表層浸食由来の土砂で構成されていると推定された。内部の小流域(0.4ha)で観測される土壤表層浸食量はUSLEを用いてよく再現され、流域全体(88.6ha)へ空間的に拡張を可能にした



写真-10 堆積した土砂の排出作業 粒径の細かい砂で占められるため流水を利用して人力で容易に排出ができる。この作業の前後で水準測量により土砂の堆積量を測定している。全流出土砂量として記録される



写真-11 ウォッシュロードのサンプリング 流量と濃度の校正曲線を作成し、年間の流量からウォッシュロードを算出する

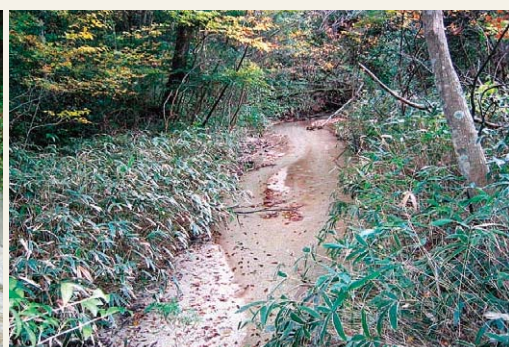
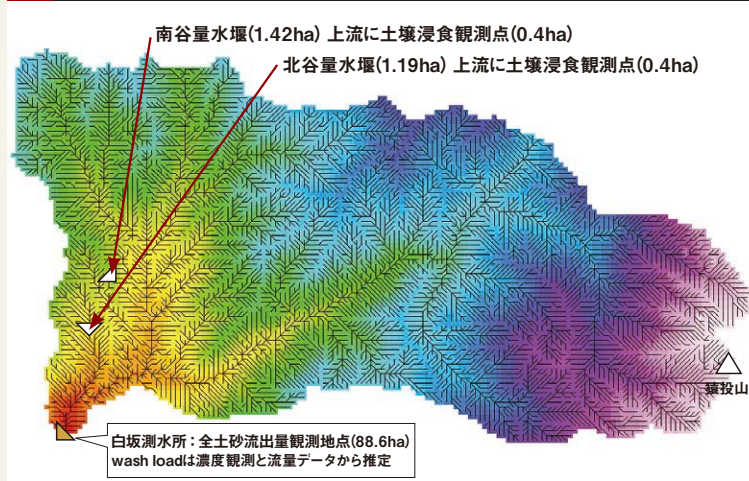


写真-12 土砂流送容量計算河道区間

なっている(写真-7参照:流出孔を下流側から見た様子)。このテラスでは、流出してきた土砂を観測している。後述するように、この土砂量はすべて土壤表層浸食起源の土砂であると見なせる。図-5には、白坂測水所に対応する流域の形状とその内部にある北谷・南谷小流域の位置関係を流路網のなかで示した。土壤表層浸食量は0.4haの流域面積まで絞らなければ観測値に河道浸食のバイアスが含まれる。白坂測水所での土砂量の観測値に土壤表層起源の土砂がどのような割合で含まれるかはこの河道網の全域に拡張するロジックとしてUSLEを用いた。

写真-8は、植生の回復とともに経年的に裸出地が縮小していく様子を白坂測水所の流域で示したものである(Naiyanan, 2000)。写真-9には、2004年10月の台風により押し出した土砂が白坂測水所に堆積しつつある様子を示している。写真-10には、流量観測精度を維持するための土砂の排出作業の様子を示している。この作業の前後で排出土砂量の体積を水準測量により観測している。この測量作業に加えて、月に一度の間隔でボー

図-5 白坂試験流域の水系網と北谷・南谷小流域の配置



10m×10m DEMによる流路網:北谷・南谷土壌浸食実測値から全流域土壌浸食量への推定に使用

トを貯水池に浮かべて同様の水準測量を実施して、全流出土砂量の観測を行っている。濁りは、ウォッシュロードとして、堆積せず越流部から水とともに流去するのでその濃度を測定し写真-11、ハイドログラフから4年間の総量を推定している。



**写真-13**  
風化花崗岩(マサ)の堆積状況  
均質な粒径(平均粒径: 2.2mm)をもち、礫をほとんど見ない。粒径の大きな礫・岩塊は上流の渓流に堆積しており東海豪雨においても岩塊が流出することはなく、礫の流出も少量であった

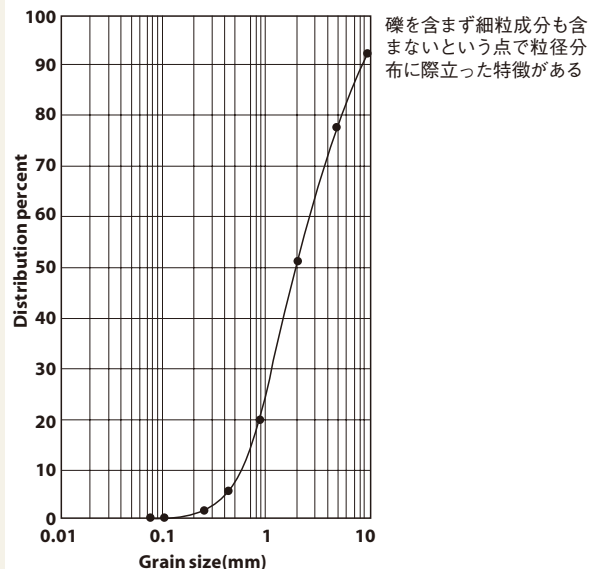
#### 4 | マサ土の粒径分布の特性

測水所に堆積した土砂は花崗岩が風化した細粒成分(いわゆるマサ)と若干の有機物である。**写真-13**にその様子を示した。粒径加積曲線は**図-6**に示したとおりであり、0.1mmから数cmのサイズで全体が構成され大部分がmm単位の粒径をもつ。粒径分布は極めて均質である。この測水所に出現する堆積の特徴は、次の2点にまとめられる。

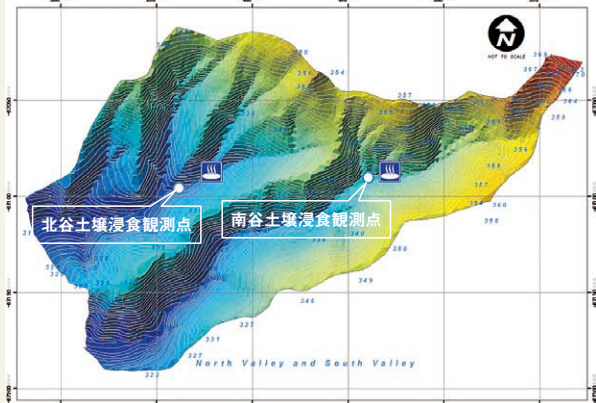
- 1) 巨礫が到達しない
- 2) 微細な粒径( $d < 0.1\text{mm}$ )がきわめて少ない

この特性について、1)から全流出土砂量は巨礫の間隙や上部をあるいは流域内の砂防構造物を乗り越えながら「砂」の形で各個運搬により流出してきたとみることができ、2)から源流部では未熟土とされる状況で粒子間の粘着力がなく植生を失うと容易に土壤表層浸食のプロセスにより流出する成分であろうと推測できる。後述するように、微細な粒径の土砂はウォッシュロードとしてかなりの比率を占めるが、貯水池にはごく一部しか残らない。

**図-6** 貯水池堆積土砂の粒径加積曲線



**図-7** 北谷・南谷小流域の地形と土壤浸食量観測地点

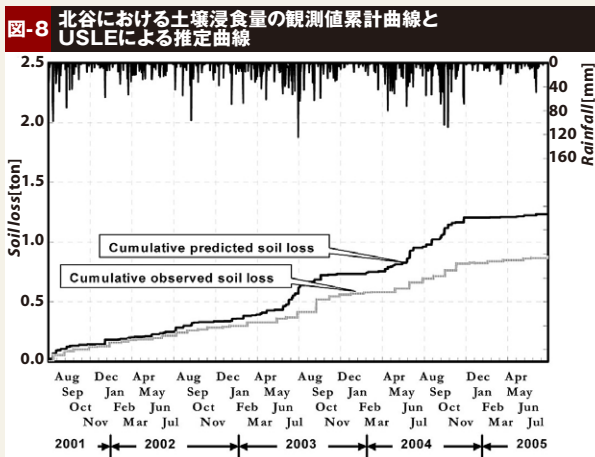


(1m×1m DEMからGISを用いて描画、USLEの適用では10m×10mのDEMを使用している)  
土壤表層浸食観測地点の上流5m以内に湧水点(■で表示)があり河道区間はわずかなので、堆積した土砂はほとんどが土壤表層浸食によるものと推定できる

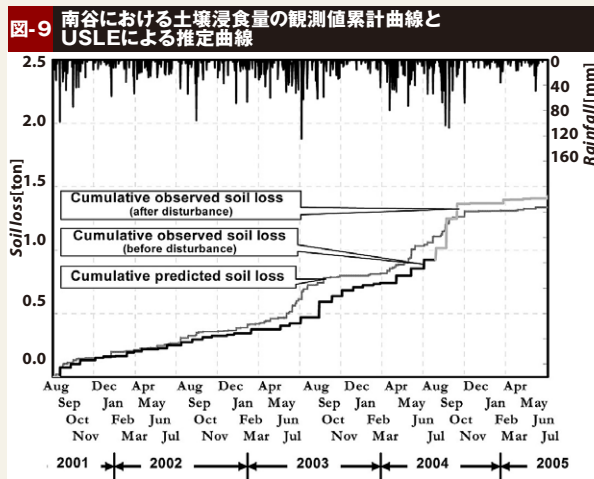
#### 5 | 土壤表層浸食量の観測結果と流域全体での推定

**図-7**に北谷・南谷の地形を示した。湧水点がそれぞれにあってその数m下流に地下水・地表水測水所が位置している。この測水所の地表水が流下する部分がテラスとなっているので、ここに恒常的に土砂が堆積してくる。これを土壤表層浸食量とみなすことができる。とりわけ森林流域の場合、斜面単位で観測すると土砂が微量しか観測できない場合が多く、一方で大きな流域面積で土砂量を観測すると溪流の掃流力により土壤表層浸食とは認められない大規模なマスウェイディングで発生した土砂を観測値として取り込んでしまいかねない。

土壤表層浸食を明確に定義してロジックを組上げた手法としてUSLEとそれに続くRUSLEの理論体系がある。アメリカの農地を対象にして発展したこのロジックを日本の森林流域に当てはめる際にはやはり自らの



K.B.Karki/H.Shibano 2006より



Parameterの最適化を行っていない

註:

- 2004年9月10日に流域の歩道整備を行い、若干の攪乱から土砂流出が増大
- 攪乱以降をグレイのラインで示した

K.B.Karki/H.Shibano 2006より

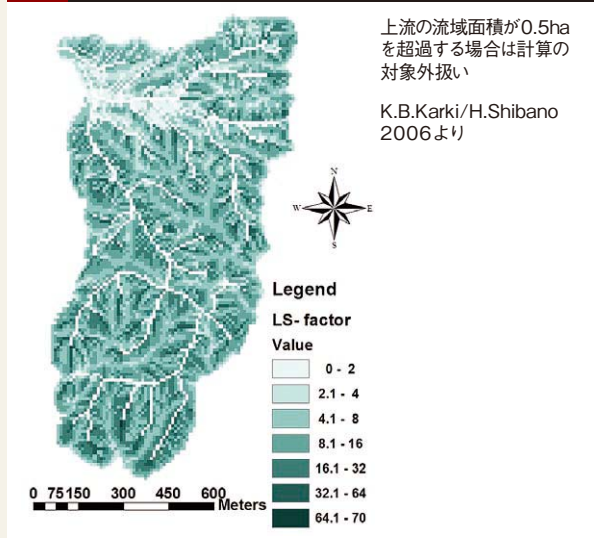
定義を行う必要があった。とくに0.5ha以下の流域面積の流域をのみ対象として土壌表層浸食量を計算し、それ以上の流域面積をもつ河道部分は計算から除外している。

北谷と南谷の土壌表層浸食量観測値とUSLEによる推定値を比較した様子をそれぞれ図-8、図-9に示した。パラメータは、RUSLEで定義されたものを採用している。この適合度は満足のいくものであったため、流域全体に拡張している。その際、北谷・南谷で使用したパラメータと唯一異なるものが斜面長要素と傾斜要素である。それを積の形で表現したものが図-10であり、その結果推定された土壌浸食量の空間分布が図-11である。

## 6 全流出土砂量の観測結果と平衡河床理論による推定値

全流出土砂量は、白坂測水所の後背部に位置する貯水池写真-12に堆積した土砂の体積を定期的に測定することで得られた。この土砂流出を決定づけている河道区間として、貯水池上流50mに位置する河道区間を選定し、土砂水理学上のパラメータを求めた。その位置関係を平面図上に示したものが図-12である。全流出土砂量観測値(3.67ton/ha/year)と、いくつかの平衡河床理論のなかでそれに対して結果的に最もよく適合したEinstein式による土砂流送容量(transportation capacity)の推定値とを比較して表示したものが図-13である。

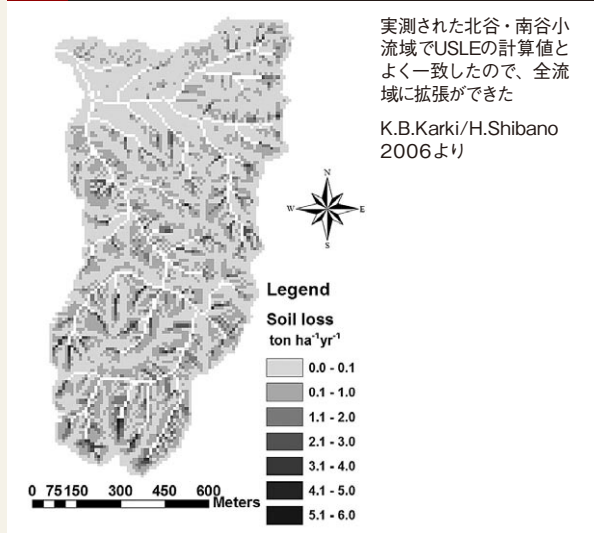
図-10 斜面長要素×傾斜要素



上流の流域面積が0.5haを超過する場合は計算の対象外扱い

K.B.Karki/H.Shibano 2006より

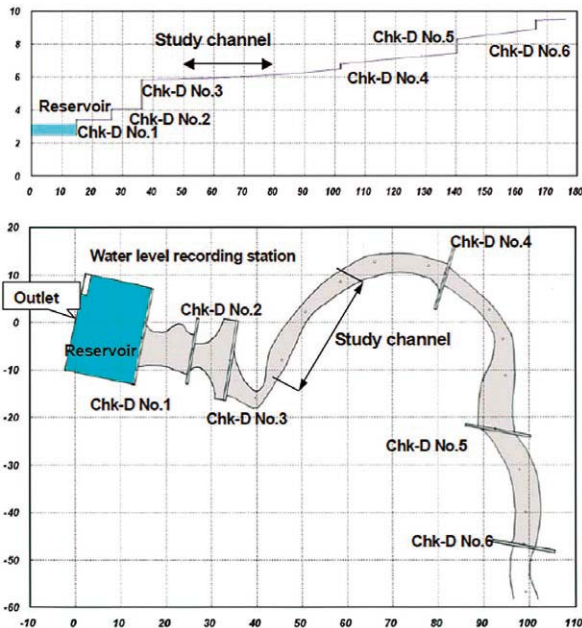
図-11 推定された土壌浸食量の空間分布



実測された北谷・南谷小流域でUSLEの計算値とよく一致したので、全流域に拡張ができた

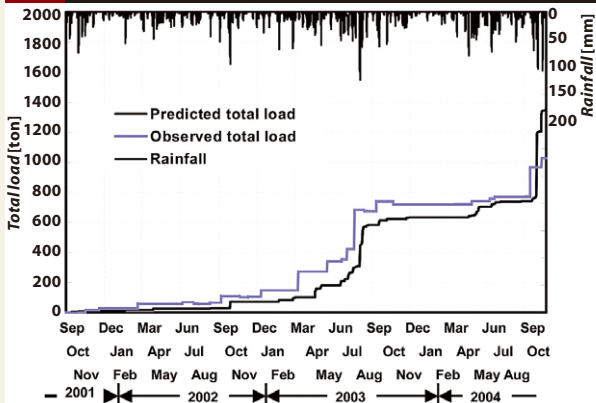
K.B.Karki/H.Shibano 2006より

図-12 全流出土砂量観測地点と土砂流送計算を行った河道区間



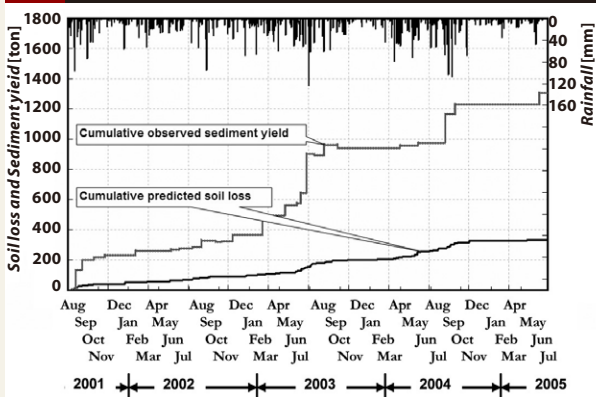
掃流砂・浮遊砂がこの貯水池で観測されるが、ウォッシュロードは除外されるので貯水池の出口で濃度を観測した K.B.Karki/H.Shibano 2007より

図-13 Einstein式で予測したtransportation capacityと全流出土砂量の推移



中小の出水では平衡河床理論で予測されるポテンシャルは、全土砂流出量をよく再現しているが、大きな出水ではそれほど出てこない。給砂条件が満たされないためと解釈される K.B.Karki/H.Shibano 2007より

図-14 土壌浸食量(流域全体での外挿後の推定値)と流出土砂量累積曲線



土壌浸食量は全流出土砂量(観測値)の1/4程度と推定される。 K.B.Karki/H.Shibano 2006より

中小の出水では観測値は土砂流送容量でほぼ再現されるものの、大きな出水では観測値は土砂流送容量よりも小さな値となった。このことは、上流で斜面崩壊などが発生するなどの給砂条件が不足するためと推測される。

## 7 | 全流出土砂量に対して土壌表層浸食起源の土砂の占める割合

図-14に全流出土砂量の観測値と全流域(88.6ha)に対して観測値から拡張して推定した土壌表層浸食起源の土砂量とを比較して表示した。この図からその比率が20~25%程度を占めることが明らかにされた。残りの75~80%は、土壌表層浸食以外のマスウェイディングによりもたらされると考えられる。それは、ガリー浸食・溪岸浸食・斜面崩壊などで構成されUSLEで取り扱える範囲外の現象に起源をもつ土砂である。

この図には示されていないウォッシュロードは、全流出土砂量に含まれていないが、観測値は0.4ton/ha/yearとなり、全流出土砂量の1割程度の大きさをもつことが明らかにされた。このウォッシュロードも微細な粒径から土壌表層浸食起源の土砂が相応に含まれているということが出来る。

## 8 | マサ土の流出の観測結果が示唆するもの

愛知演習林にわずかに残された裸出地斜面(0.03ha)で、最近2年ほど東京農業大学学生諸君の卒業論文のための土砂流出観測をお手伝いしている。おそらく数十年裸出地のままの斜面であるが、毎年の土砂流出量は、30ton/ha/yearほどにもなると推定されている(未発表)。

また、裸出斜面で過去に観測された報告でも23.8ton/ha/year(愛知県, 1959)の事例がある。愛知県瀬戸付近の風化花崗岩の山腹斜面は、森林で被覆されていない状態では恒常的に大量の土砂を供給する可能性をもつことはあきらかである。この数値が土壌表層浸食のプロセスによってもたらされたものであることは、注目に値する。

これに対して、ほとんど裸出地をもたず、針広混交林の(森林被覆は胸高断面積合計が35m<sup>2</sup>/haに達するほどの状態にまで回復した)白坂試験流域(88.6ha)からの全流出土砂量は4ton/ha/yearにも満たない程度であり、しかもそのなかで土壌表層浸食起源の土砂はその20~25%程度である。森林被覆の効果がマサ土流出抑制にいかにか効果的であるかを示す数値である。

さて、冒頭に示した課題1)の結果として、土壌表層浸食起源の土砂量は全流出土砂量の最大25%程度であることが判明した。残りの75%は、それ以外のマスマスウェイティングで発生しており、これ以上抑制することは森林の効果としては期待の度合いも低いはずである。治山ダムが流域内に多数配置されているが、これも東海豪雨で満砂状態となりここで報告したような全流出土砂量に匹敵する土砂の流出は今後も恒常的に継続すると推測される。

課題2)の結果として、土砂流送容量として定義される平衡河床理論が教える十分な給砂条件のもとでの全流出土砂量について次のことが予想されよう。流域の土砂発生源からの十分な土砂の供給がないかぎり、①河床の堆積から供給される土砂で平衡河床が維持される中小の出水では、全流出土砂量は土砂流送容量によって説明される。②大きな出水では土砂流送容量によって推定される土砂量ほどには全流出土砂量は達しない。

最後に少しばかり飛躍した議論を展開してみたい。土石流のような集合運搬の抑制の議論ではなく、細粒成分であるマサの流出が砂防構造物によってどのように抑制されるかという議論である。砂防構造物の配置によって土石流発生の危険性が効果的に緩和されることはいままでもないが、白坂試験流域のように風化花崗岩の地質の流域で砂防構造物が配置されて、しかも東海豪雨によって満砂状態の治山ダムがほとんどを占めるような場合に、砂防構造物の効果がマサのような細粒成分の各個運搬に対してどれほど有効であろうかという疑問を筆者は抱いている。

堆積物がマサで構成されるような河床は、河床勾配が砂防構造物によってほとんど水平に近い縦断勾配をもつ(白坂の場合0.014)。これは、粒径が均質で平均粒

径がmm単位のマサの際立った特徴である。構造物がない場合でも、上流部でみられるステップ・プールの河道構造では、マサがこのような緩勾配で堆積している様子を確認することができる。第6節で紹介した平衡河床理論を適用し土砂水理学的なパラメータを特定した河道区間は、筆者の長期にわたる観察からだが、ほとんどその河床の形を変えていない。東海豪雨の前後でも渓床縦断勾配や横断形状は変化せず、移動する土砂の粒子はマサで粒径分布も同一である。だとしたら、平衡河床理論が教える土砂流送容量は掃流力を起こす流量によってのみ規定されるだけである。平衡河床理論には給砂条件は盛り込まれていないので、給砂条件が変われば平衡河床理論からの全流出土砂量の推定値である土砂流送容量は実際に観測される土砂量を再現できない。

風化花崗岩地質の流域の場合に限って、恒常的に流出する土砂は、森林の被覆によって土壌表層浸食が抑制されるという観点から効果的にコントロールされてきた。ただし、通常の土石流や崩壊など豪雨によって発生するマスマーブメントに対しては、砂防構造物によるコントロールや警戒避難など注意が必要であるという平凡な表現で結びとしたい。

#### ★参考文献

- 愛知県：治山事業調査報告書(第一集)．昭和26年度～32年度治山事業調査 I. 土砂流出量調査報告書, 1959
- 芦田和男・高橋 保・道上正規：河川の土砂災害と対策-流砂・土石流・ダム堆砂・河床変動-. 1983 森北出版
- 独立行政法人産業技術総合研究所：日本地質図データベース(豊橋(5237)). 2010
- Einstein, Hans Albert: The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Soil conservation service, United States, Department of Agriculture, Soil conservation service, Technical bulletin no 1026, September 1950
- Krishna Bahadur Karki and Hirofumi Shibano: Soil loss in a forested watershed underlain by deeply weathered granite: comparison of observation to predictions of a GIS-based USLE. Bulletin of the Tokyo University Forests, 115: 1-36, 2006
- Krishna Bahadur Karki and Hirofumi Shibano: Sediment yield and transportation capacity in a forested watershed underlain by weathered granite. Journal of Japan Society of Erosion Control Engineering, 59(5): 35-42, 2007
- Naiyanan ARIYAKANON, Shinya NUMAMOTO and Masakazu SUZUKI: Sixty-year Decreasing Trend of Bare Land in Shirasaka Watershed, University Forest in Aichi, Revealed by Aerial Photography, Bulletin of the Tokyo University Forests, 103, 339-348(2000)
- 矢部和弘：花崗岩山地における流出土砂量と森林被覆との関係. 砂防学会誌, 56(4), 4-11, 2003