

Quantifying Sediment Production in Steepland Environments

(急傾斜山地における土砂生産プロセスの解明)

学位論文内容の要旨

ニュージーランドは環太平洋地域の他の国々と同様に、山地の浸食現象への対策が国土管理において重要な意義を持っている。環太平洋諸国は、太平洋プレートの縁辺部にあたるため、急速な隆起を伴う造山運動と多量の降雨のもとで風化速度が著しく早く、地すべり、地すべり性崩壊、ガリー浸食などの削剥作用が卓越し、流域スケールでの多量の土砂流出がもたらされている。これに加えて、20世紀以降の気候変動が集中豪雨やサイクロンを高頻度でもたらし、人口増加に伴う木材需要が大規模な森林伐採を引き起し、これらに伴う山地の浸食現象の激化は一層深刻な問題となってきた。

本研究では、異なるタイプの浸食現象が卓越するニュージーランドの2つの地域において、浸食崩壊量の定量化手法を確立し、これを用いて流域スケールでの長期間の浸食量予測を行うことを目的としている。山地の浸食崩壊プロセスのうち、地すべり性崩壊については Taranaki 山地において、ガリー浸食については東海岸 Raukumara 山地において調査解析した。Taranaki 山地では、地すべり性崩壊の測定に新しい方法を適用し、土壌厚と斜面傾斜角の関係解析に基づいて、地すべり性崩壊による長期間の浸食速度推定手法を開発した。浸食崩壊の発生密度に関しては、これまでは平衡状態を仮定した多変量統計モデルや斜面安定解析に基づく物理モデルが提案されているが、斜面スケールでの土壌安定性と水文特性を考慮すると、これらのモデルはいずれも利用限界がある。そこで、現在最も有効といわれる地すべり応答性モデル (landslide susceptibility model) を用いて DEM(Digital Elevation Model)解析を行い、広い範囲の landslide susceptibility のマッピングを行った。

Taranaki 山地では、地すべり性崩壊は斜面傾斜の増加に伴って増加し、その浸食速度は 28° 以上では $2.4 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$ 、 32° 以上では $2.7 \pm 0.8 \text{ mm/yr}$ であった。1990年のサイクロンヒルダに伴う豪雨では浸食量が 0.041 mm となり、1回の豪雨が斜面浸食に大きな影響を及ぼすことが示された。一方、長期間の浸食現象は土壌生成速度に比例することより、発生時期の異なる地すべり地を比較して土壌生成速度と土壌厚の変化との関係を対数関数で示した。土壌生成速度は、地すべり発生後40年間は 3.5 mm/yr 、その後の50年間は 1.2 mm/yr に減少した。さらに、安定斜面では平均 0.57 mm/yr とかなり遅く、時間とともに減少するものと推測された。また、森林に被覆された期間が長いほど地すべり性崩壊が少なく、豪雨に対する浸食量も少ないことが示さ

れた。なお、過去 85 年間森林で覆われた斜面の浸食量は 0.15m、年平均浸食速度は $1.8 \pm 0.5 \text{ mm/yr}$ であった。自然林が生育する場合、斜面安息角に近い 31° で浸食速度が劇的に増加する。 31° より緩斜面では、洪積世に堆積が進行したため、長期の平均浸食速度は 0.1 mm/yr となった。これに対して 31° 以上の急斜面では、過去の地すべりが斑紋状の堆積物を残しており、平均浸食速度は 1 mm/yr となった。森林消滅後の浸食速度は相対的に大きくなるが、この場合も地形に依存している。

北島東海岸の Raukumara 山地では、大規模なガリー型崩壊 (mass movement gully complex) によって多量の土砂がワイパオア川本流に供給されている。ここでは、過去の空中写真と GPS 測量の解析結果から、ガリー型崩壊の DEM を生成し標高補正を行って、地表微地形や浸食量の変化を再現した。その結果、1939 年～1992 年の間は、ガリー型崩壊による土砂生産量がワイパオア川流域での全土砂生産量 $6800 \text{ t/km}^2/\text{yr}$ の 2% 以下で、ガリー型崩壊はワイパオア川流域における土砂収支にとって支配的な要因ではないことが示唆された。最も重要な知見として、ガリー浸食による地表下刻速度がその面積に比例することが解明された。扇形のガリー型崩壊のうち、数 ha の小規模ガリーでは 0.2 m/yr 、20–30ha の大規模ガリーでは 0.8 ha/yr の割合で面積が増加していた。下刻速度とガリー面積との関係からパワー関数を導き、流域からの総土砂生産量を求めた。これを、 29 km^2 の Te Werarua 流域に適用したところ、1950 年～1988 年に 28.7 Mton の土砂を生産し、Waipaoa 川の平均土砂流出土砂量の 5% に当たることが明らかになった。同様に、 140 km^2 以上ある Mangatu 森林流域では 3.2 Mton/yr で、Waipaoa 川の 1960 年～1970 年の最大土砂流出時の流出量の 19% にあたるということがわかった。ガリー浸食による斜面下刻速度には、その形状もまた影響している。Haunui Forest の小さく細長いガリーの下刻速度が Tarndale や Mangatu の扇形ガリーに比べてより小さいことから、ガリー浸食の形状が下刻速度に重要な役割を果たすことを示唆しており、ガリー形状の差異を考慮すれば、流域スケールでの推定土砂生産量の誤差修正ができること示している。

ガリー浸食の修復については、数 ha 以下のサイズの小規模ガリー浸食では緑化用樹種による再植林が効果的であることが示された。Mangatu 森林流域の 9 つの小規模ガリー浸食からの総生産土砂量は、1960 年代初頭に再植林されたことによって、1992 年には 1/5 に減少したことがわかった。一方、大規模ガリー浸食では、多量の土砂生産により、流域スケールでの再植林を効果的に反映できない。その上、支流に土砂が滞留することにより、土砂生産源から流域出口までの土砂流出の応答はかなりの時間遅れを生じる。1960 年代の最もガリー浸食が活発な時期には、ガリー浸食から生産された約 60% の土砂は、支流流路の河床と流域出口の扇状地を上昇させた。しかし、現在では再植林によりガリー浸食は安定し、わずかな土砂が滞留するだけである。再植林による効果が約 40 年を必要としたことになる。ガリー浸食からの土砂生産が減少すれば、支流の滞留土砂も減少し、本流への流出土砂も減少する。このような流域管理は長期計画によるものであり、再植林によるガリー浸食の減少には数十年の時間が必要となる。

本研究では、森林の伐採と再植林の繰り返しが斜面地形に応じて浸食速度を制御し、流域スケールでの土砂収支に最も重要な役割を果たすことが定量的に解明された。また、新たな解析方法は土地利用マッピング技術や浸食の活発な地域における地表モニタリング技術にも大きな貢献をなし、浸食速度予測モデルによりを流域スケールでの土砂収支が可能となり、水質や流域環境を改良するための様々な土地利用戦略を立てる際にも、人間活動に起因する地表浸食に影響する地域環境のサステナブルな管理にも重要な知見を提供した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 丸 谷 知 己

副 査 教 授 中 村 太 士

副 査 教 授 柳 井 清 治

学 位 論 文 題 名

Quantifying Sediment Production in Steepland Environments

(急傾斜山地における土砂生産プロセスの解明)

本論文は7章からなり、図21、表2を含む総頁数81の英文論文である。他に参考文献8編が添えられている。

日本、東アジア、ニュージーランドなど、太平洋プレートの縁辺部に位置する環太平洋諸国では、急速な造山運動と多量の降雨のために、地すべり、ガリーなどの浸食作用による激しい土砂流出が進行している。特に、急傾斜地における森林伐採は浸食作用を加速する大きな要因である。本研究では、ニュージーランド北島において地すべり型崩壊とガリー型崩壊という2つの異なる浸食作用に着目して、土砂生産プロセスを定量的に解明し、そのモデルを用いて流域スケールでの土砂生産量の長期予測を行うことを目的としている。急傾斜山地の浸食作用のうち、地すべり型崩壊は北島中央の Taranaki 山地において、ガリー型崩壊は東海岸の Raukumara 山地において調査解析した。

Taranaki 山地では、風化土壌厚に着目して地すべり型崩壊を測定し、土壌厚と斜面傾斜角の関係より地すべり型崩壊の長期浸食速度推定手法を開発した。崩壊発生密度に関しては、地すべり応答モデル(landslide susceptibility model)を用いて、DEM 解析によって広範囲の地すべり潜在斜面をマッピングした。

その結果、地すべり型崩壊は斜面傾斜の増加に伴って増加し、その浸食速度は 28° 以上で $2.4 \pm 0.6 \text{ mm/yr}$ 、 32° 以上で $2.7 \pm 0.8 \text{ mm/yr}$ となった。1990 年サイクロンヒルダに伴う浸食量は 0.041 mm で、とくに豪雨が斜面浸食速度に大きな影響を及ぼすことが示された。一方、土壌生成速度は地すべり型崩壊の発生後 40 年間で 3.5 mm/yr であり、その後の 50 年間で 1.2 mm/yr に減少した。さらに、安定斜面では平均 0.57 mm/yr とかなり小さく、土壌生成速度が時間とともに減少することが明らかになった。また、森林の影響に関して、過去 85 年間森林に覆われた斜面の年平均浸食速度が $1.8 \pm 0.5 \text{ mm/yr}$ であることがわかった。さらに、自然林が生育する斜面では、傾斜により年平均浸食速度が劇的に変化し、洪積世堆積物からなる 31° 以下の緩斜面では 0.1 mm/yr

であるのに対して、地すべり堆積物からなる 31° 以上の急斜面では 1mm/yr であった。森林伐採後の浸食速度はそれ以前に比べ相対的に大きくなるが、これも斜面傾斜に依存することがわかった。

北島東海岸の Raukumara 山地では、大規模なガリー型崩壊から多量の土砂が本流の Waipaoa 川に供給されている。ここでは、空中写真と GPS 測量からガリー型崩壊地の DEM を生成し、浸食量変化を求めた。その際、ガリー型崩壊の下刻速度がその拡大速度に比例することを見だし、両者の関係からパワー関数を導き、流域ごとに積算して総土砂生産量を求めた。Waipaoa 川の 2 つの流域で土砂生産量を比較すると、1950 年～1988 年(38 年間)に天然林の Te Weraroa 流域(29km^2)では 0.75Mton/yr 、人工林の Mangatu 流域($>140\text{km}^2$)では 3.2Mton/yr であった。さらに、ガリー型崩壊の下刻速度は、小さく細長いガリー(Haunui Forest 流域)の方が扇形ガリー(Tarndale・Mangatu 流域)に比べてより小さいことから、ガリー形状を考慮すれば流域スケールでの推定土砂生産量がさらに精査されることがわかった。

ガリー型崩壊は、地すべり型崩壊の様に自然に修復することは稀で、緑化用樹種の再植林が必要である。Mangatu 流域の 9 つの小規模ガリーでは、1960 年代初頭の植林によって、1992 年には総生産土砂量が $1/5$ に減少した。しかし、大規模ガリーでは、土砂生産が過剰なため植林の効果が反映しないうえ、支流に滞留した土砂が流域出口に達するまでに時間遅れを生じる。そのため、1960 年代のガリー型崩壊による生産土砂が、2000 年頃まで支流流路の河床と流域出口の扇状地を上昇させた。現在は植林によってガリーは安定したが、再植林の効果が土砂生産の抑制に効果を示すまで約 40 年以上かかることになる。

本研究では、森林伐採と再植林の繰り返しが斜面地形に応じて浸食速度を制御し、流域スケールでの土砂生産に重要な役割を果たすことを定量的に示した。また、地すべり応答モデルやガリー型崩壊の下刻速度－面積拡大速度モデルなどの新たな解析手法により、流域スケールでの土砂生産量の長期予測を可能とした。これは、流域スケールでの土砂動態の把握や水質・流域環境モニタリングに重要な知見を提供するものである。

これら一連の成果は 8 編の論文として国際学会誌に発表され、いずれも高い評価を受けている。よって、審査員一同は Ronald C. DeRose 氏が博士(農学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。