

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26350405

研究課題名(和文) 山地の成長限界と限界斜面に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on the development of mountains and critical slopes

研究代表者

大内 俊二 (Ouchi, Shunji)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00185191

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：隆起する平坦な始原面(細砂とカオリナイトの混合物からなる)に降雨を与えると、端から谷の発達が始まる。斜面が成長して斜面崩壊が起こるようになると、崩壊物質が流水により速やかに排出されるため、斜面の拡大とともに地表面の上昇が減速する。そして侵食と隆起が釣り合う平衡状態に達する。降水量が多ければ、流水による侵食力が強く初期の上昇が抑えられて平衡高度が低くなる。しかし、砂山の透水性が大きいと斜面プロセスが強く働き、降水量が少ない方が初期の侵食が速く平衡高度も低くなる。流水侵食、斜面プロセス、斜面崩壊のそれぞれが同じ実験条件の変化に異なる反応をしており、結果としての地形発達を複雑なものにしている。

研究成果の概要(英文)：Applying rainfall on a rising flat surface made of a mixture of fine sand and kaolinite induces valley development from edges. As valleys incise, slopes grow and slope failures start to occur. Material yielded by slope failures is quickly drained out by stream flows, and this reduces the rising rate of average height. Increasing frequency and size of slope failures leads the landform to the stage of steady state, in which erosion balances with uplift to keep average height around a certain level. High rainfall promotes fluvial erosion and restrains the surface rising in earlier stages, resulting in lower steady state height. When the permeability of sand mound is reduced, however, lower rainfall makes the steady state height lower, because high permeability intensifies slope processes. A change in a controlling factor draws different response from each element of erosion, namely, stream flow, slope processes and slope failures, to make the development of landform very complex.

研究分野：地形学

キーワード：地形発達実験 隆起 人工降雨 流水侵食 斜面プロセス 斜面崩壊 平衡高度

## 1. 研究開始当初の背景

アナログモデル実験と呼ばれるような地形発達実験は、相似則の適用が困難であることや実施に膨大な労力と時間が必要なことから地形研究の方法として重要なものとは見做されてこなかった。しかし、近年コンピューターを使った数値シミュレーションが盛んに行われるようになると、時系列変化の観察・計測が可能な地形発達実験がシミュレーション結果の検証手段として有用とされ、実験装置の開発も進んで、実験が盛んに行われるようになってきた(eg., Paola et al., 2009, Graveleau et al., 2012)。地形発達実験はその性質上、得られた結果を直接実際の地形に応用することは不可能であるが、実験地形発達の経過を詳細に観察・計測することができ、実際の地形発達をわずかな証拠から解釈するための重要な知見が得られるはずである。このような考えのもと、人工降雨と隆起による地形発達実験を試行錯誤しながら繰り返してきた。その結果、本研究を開始する時点では、実験装置の整備がかなり進み、実験を連続して行える条件が整いつつあった。また、それまでの実験結果からは、隆起速度がある値より大きいか小さいかで実験侵食地形の発達過程が大きく異なる“閾値(threshold)”が2つあることが予想できていた(Ouchi, 2011)。しかしながら、実験手法が確立しているとは言えないこの種の実験においては、実験条件を少し変更するだけでも試行錯誤を繰り返して計測可能な状態を探る必要があり、実験数が足りないために実験侵食地形発達の全体像が今一つ明確ではなかった。地形発達実験から得られる知見を実際の地形発達を明らかにする一助とするためには、まず少しでも実験例を増やすことで実験地形の発達そのものの合理的説明を可能とすることが求められる。

## 2. 研究の目的

本研究は、研究開始当初の背景を踏まえて新たに実験を重ね、隆起速度の閾値の存在を確認すること、さらに、隆起速度以外の条件が実験地形の発達に与える影響も含めて、侵食の具体的メカニズム、隆起速度の閾値、斜面と山地の発達限界、実験侵食地形の発達段階などについて明らかにすること、を目的とした。降雨侵食と隆起による地形発達実験では、隆起、流水侵食、斜面プロセス、斜面崩壊という実際の地形変化に見られる作用によって現実の地形に極めて類似した形態を発達させることができる。これまでの研究で、隆起速度に応じた周期で斜面崩壊の集中が起こり、実験山地の成長に限界があることが推定された。この隆起に伴う山地の成長限界と斜面崩壊が集中する時期の存在は、実際の山地地形発達にも適用できる考え方であるが、そこへ至る過程を観察・計測し定量的に捉えることは実験においてこそ可能である。本研究では、侵食と隆起による実験地形発達において、主に隆起から山地の成長・崩壊に至る経過を明確にし、隆起とともに周期的に起こる大規模崩壊の発生条件とそのメカニズムを探る。同時に、堆積場や降水量、さらに砂山の性質などの条件が地形発達に与える影響を検討する。ここで得られる知見は、実際の山地地形発達についての限られた証拠を解釈するための重要な手掛かりとなる。

## 3. 研究の方法

これまで使用してきた装置を土台に図1に

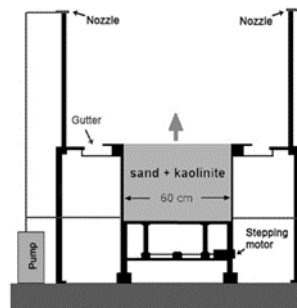


図1 実験装置の概略図

示すような実験装置を製作した。また、図1には描かれていないが、x軸y軸方向にアクチュエ

ーターを組み込んでレーザ測深器を移動させることによって、x軸y軸z軸3方向の計測を同時自動的

に行うことができるようにした。この装置により研究期間中に8回の実験を繰り返すことができた。

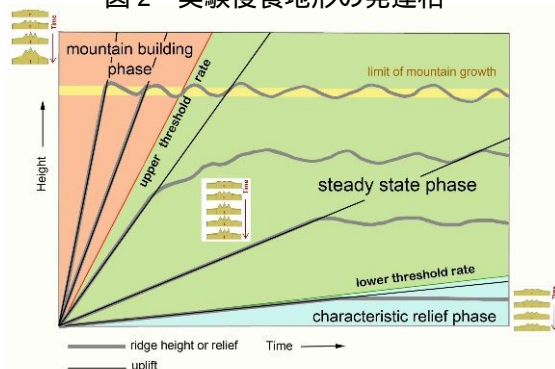
隆起装置の天板を底とするステンレス製のコンテナ(60×60×40 cm)に細砂とカオリナイトの混合物(重量比10:1)を詰め、これをゆっくり隆起させながら人工降雨によって微小侵食地形を作り出す。地表形態の計測は定期的に雨を止めて実行する。実験経過はデジタルカメラでコマドリ撮影を行い、後に動画に変換する。時間をかけて小さくとも谷の発達や斜面崩壊による地形変化が見られるような実験としたため、降雨時間は176~1,540時間、形態の計測は30~84回であった。計測結果は1×1 cmの格子データに変換し、これまでに開発したプログラムや市販のソフトウェアを用いて解析した。ブロックダイアグラムを描き、平均高度、平均傾斜、最高点・最低点高度、1×1 cm格子中の最大傾斜の分布、などを求め、これらの時間的変化から侵食と隆起の経過を明らかにした。今回はこれ以外に、流路の勾配の計測も行った。なお、研究全体の統括も実際の実験遂行も、これまでの実験同様、すべて申請者自身が行ったが、このような実験においてはデータの質が最も重要であり、実験目的や実験過程をよく理解している申請者自身が実行することが最善であると考えたからである。ただし、そのために実験の進行が遅くなってしまったことは否めない。

#### 4. 研究成果

(1) これまでの実験を含めて、各種実験条件を変えて行った実験結果の比較検討から、侵食地形の発達過程が第一義的には、図2に示すように隆起速度の2つの閾値によって分けられる3つのPhaseに分けられることが明らかとなった。平らな面が隆起して行く時、隆起速度が下方閾値(lower threshold rate)より小さな場合(雨量との兼ね合いであるが概ね0.05mm/h以下と考えられる)は、侵食

はほぼ全面的に流水侵食で、地表面の比高が大きくなって流水侵食がほぼ隆起と釣り合う状態になると、それ以上の地表面の上昇はなくなり、ほぼ一定の高度が保たれるようになる。しかし、斜面上の流水侵食により尾根部が少しずつ痩せていくため平均高度はゆっくり低下する傾向を見せる。この状態では砂山を構成する物質の性質を反映する地形が発達するようであった(characteristic relief phase)。隆起速度が上方閾値より大きな場合(6.0mm/h以上程度)隆起が完全に侵食を上回り、地表面はどんどん上昇して高い山が形成されると考えられるが、実験装置の限度を超えてしまうと隆起速度が大きくなっても山はそれ以上成長できなくなるはずである(mountain building phase)。隆起速度が2つの閾値の間にある場合、比高が大きくなるにつれて侵食が加速するために地表面の上昇速度が減少し、やがて一方的な上昇が終わって平均高度が隆起速度や侵食力で決まると考えられるある高度付近で上下を繰り返すようになる(steady state phase)。実験ではこれが一般的な状態であり、本研究においてもこのsteady state phaseにある実験地形の発達が主な対象である。

図2 実験侵食地形の発達相



(2) 平坦な状態から隆起してくる四角い砂山に人工降雨を与えると、隆起域の周辺からまず谷の侵食が始まり、谷系へと発達していく。この時点では侵食はほぼ全面的に谷の下刻を中心とする流水侵食であり、谷筋以外は

隆起による上昇が続く。従って、隆起域の地表面平均高度は隆起をわずかに下回る速度で隆起とともに上昇する。この段階を Stage1 と呼ぶことにする。隆起と谷の侵食が進むと、谷壁や隆起域端斜面が成長し斜面崩壊が起こるようになる。斜面崩壊によって生産された物質は谷中の流水によって速やかに排出され、隆起域の平均高度の上昇速度は徐々に低下してゆく (Stage2)。斜面の成長がさらに続くと、斜面崩壊の頻度も規模も増大し、平均高度の一方的な上昇は終わる。このころになると流路はほぼ安定した縦断形を取るようになり、斜面崩壊で生産された物質が運搬される道筋となる。大規模な斜面崩壊はある周期に集中して起こり、平均高度を一気に低下させるが、次の集中期までは隆起によってじわじわと上昇する。この繰り返しが続き、実験地形はそのおおよその形態を保ったまま上昇と低下を繰り返す平衡状態を示すようになる (Stage 3)。このように、steady state phase にある実験地形は Stage 1、2、3 の段階で発達する。Stage 1、2 は、流水侵食と斜面プロセスが侵食の大きな部分を担い、斜面崩壊が頻度・規模を増すとともに侵食が加速するが、平均高度は上昇して行く段階である。つまり、この段階に働く侵食が弱いほど時間が長いほど Stage 3 における平衡高度が高くなるわけで、この段階で働く流水侵食と斜面プロセスの強度が Stage 3 での

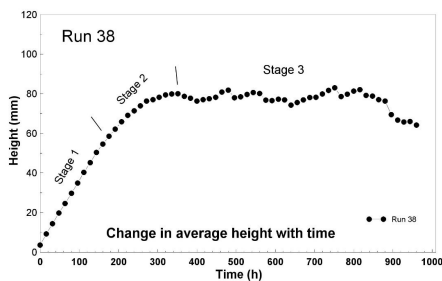


図3 Run 38 (隆起速度 0.36mm/h、降雨強度 80-90mm/h) の平均高度変化と Stage。

高度を決定すると考えられる。また、Stage 3 における地表面は、斜面崩壊集中時の侵食に

よる低下とそれ以外の隆起による上昇を繰り返して平衡高度を保つため、斜面崩壊が平衡高度維持の重要なプロセスであると言える。例として、図3に Run38 における隆起域の平均高度の変化と Stage 1、2、3 との対応関係を示す。

(3) 降水量が小さくなれば、流水による侵食、つまり Stage 1、2 における侵食が弱くなるため、Stage 3 の平衡高度も高くなり massive な山岳が成長する。実際、以前に行った降水量以外の条件を同じにした2回の実験結果は予想どおりであった。しかし、透水性を一桁大きくした ( $10^{-3}$ cm/s オーダー) 実験では、実験地形の発達経過自体は大きな違いはなかったのであるが、予想とは逆に降水量が小さな方が Stage 1、2 における侵食が強く働き、Stage 3 の平衡高度も高く尾根も分散する傾向を見せた。透水性は締固めの程度で変えられているため、透水性を高めると砂山の剪断強度が小さくなる。このことは今回作成した簡易剪断応力計測器を用いた計測によって確認されている。剪断強度が小さくなれば、侵食されやすく崩れやすくなる。透水性が高く強度が小さい場合は、透水性が低く強度が大きい場合と比べて、浸透水によるクリープやサッピングが起こりやすく、表面流の運搬能力が十分あれば侵食が速く進むと考えられる。また逆に、降水量が多ければ表面流による谷の侵食が速く進み、起伏が大きくなると考えられる。これからさらに詳細な検討が必要ではあるが、実験地形の発達には隆起速度や降水量だけでなく、流水侵食の働きを規定する透水性や強度と降水量のバランスが重要であることは明らかである。実際の地形変化においても、降水量が増大することで侵食力が増すと単純に考えるのではなく、降水量以外の条件を慎重に検討する必要があるのではないだろうか。

<引用文献>

Graveleau, F., Malavieille, J., Dominguez, S., 2012, Experimental modelling of orogenic wedges: a review. *Tectonophysics*, **538-540**, 1-66.

Ouchi, S., 2011, Effects of uplift on the development of experimental erosion landform generated by artificial rainfall. *Geomorphology* **127**, 88-98.

Paola, C., Straub, K., Mohrig, D., Reinhardt, L., 2009. The "unreasonable effectiveness" of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews* **97**, 1-43.

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Ouchi, S., Experimental landform development by rainfall erosion with uplift at various rates, *Geomorphology* **238**, 2015, 68-77.

DOI:10/1016/j.geomorph.2015.03.001

[学会発表](計 9 件)

大内俊二

実験地形の発達を規定する要因としての砂山の性質と降水量

日本地球惑星科学連合 2018 年大会

2018 年 5 月 20 日

幕張メッセ

Ouchi, Shunji

Effects of permeability on the combination of fluvial erosion and slope failures as the main process of erosion in the development of experimental landform.

Geological Society of America 2017 annual

meeting

2017 年 10 月 22 日

Washington State Convention Center, Seattle

大内俊二

実験地形の発達における透水性の影響について.

日本地球惑星科学連合 2017 年大会

2017 年 5 月 22 日

幕張メッセ

大内俊二

降雨侵食と隆起による実験地形発達における堆積域幅の効果.

日本堆積学会 2017 年松本大会

2017 年 03 月 29 日

信州大学

Shunji Ouchi

Factors controlling the development of experimental erosion landform.

2016 Annual meeting of Geological Society of America

2016 年 09 月 26 日

Colorado Convention Center, Denver

大内俊二

実験地形発達における堆積域幅の影響.

日本地球惑星科学連合 2016 年大会

2016 年 05 月 23 日

幕張メッセ

大内俊二

降雨侵食と隆起による実験地形発達における降雨強度の影響.

日本地理学会 2016 年春季学術大会

2016 年 03 月 21 日

早稲田大学

Ouchi, Shunji

Processes of erosion and sediment yield during the development of experimental landform with rainfall erosion and uplift at various rates.

XIX INQUA Congress

2015年08月01日

Nagoya Congress Center

大内俊二

実験地形の発達における山地の成長限界について.

日本地球惑星科学連合 2014 年大会

2014年04月30日

パシフィコヨコハマ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大内 俊二 (OUCHI, Shunji)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 00185191