

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：21501005

研究課題名（和文） 隆起と侵食による地形発達の実験的研究

研究課題名（英文） Experimental study on the development of landform by rainfall erosion and uplift

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

研究成果の概要（和文）：細砂とカオリナイトからなる砂山に異なる速度の隆起と降雨侵食を与える実験から、実験侵食地形の発達を隆起速度の閾値によって、流水侵食で砂山構成物質の性質を反映した起伏が形成されて安定する特徴的起伏段階、流水侵食だけでなく斜面が成長して崩壊することが繰り返される平衡状態段階、隆起が侵食を圧倒して山地が発達する山地成長段階の三段階に分けることができた。現実の山地地形の発達・変化にもこのような隆起速度の影響を考える必要がある。

研究成果の概要（英文）：The development of experimental landform with rainfall-erosion and uplift of various rates on a mound of a mixture of fine sand and kaolinite revealed the existence of two threshold uplift rates, across which the experimental landform shows significantly different aspects of development. Below the lower threshold, the erosion becomes exclusively fluvial and a stable characteristic landform reflecting the erodibility of the mound and the rainfall intensity develops (Characteristic relief phase). When the uplift rate becomes higher than the lower threshold, slopes develop and slope processes become significant. Slopes grow with the uplift, and slope failures occur after the height and gradient of slopes become higher than certain critical values. Sediments produced by slope failures are carried out by fluvial processes and the combination of periodical slope failures and continuous fluvial erosion work to keep the surface height around a certain height dependent on the uplift rate (Steady state phase). When the rate of uplift is above the upper threshold, the uplift overwhelms the erosion, and the mountain landform grows until it reaches the limit determined by the experimental setting (Mountain building phase). The effect of uplift rate seems important even for the development of real mountain topography.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	100,000	30,000	130,000
2011年度	200,000	60,000	260,000
2012年度	300,000	90,000	390,000
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：地形実験、降雨侵食、隆起、隆起速度の閾値、平衡状態

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 実験地形そのものを千差万別である実際の地形と同格のプロトタイプと捉えれば、小さくとも地球上に働く物理法則の支配下にある変化を観測・計測することで、隆起と侵食による地形変化についての貴重な知見が得られると考え、簡単な装置を用いて降雨侵食実験を行ってきた。その結果として、使用する材料、降雨量、実験装置、計測装置など、適切な実験条件についてほぼ見当がつく段階まで来ていた。今回科学研究費補助金を得ることで、計画していた実験の一部が実現することになり、大きな一歩を踏み出すことができた。

## 2. 研究の目的

(1) 現在見られる様々な地形が長い時間をかけてどのようにしてできたのか、そしてこれからどのような変化をして行くのかといった疑問は、かつては地形学の中心テーマであった。しかし、長大な時間を想定する地形進化は実証的な科学研究の対象とはなりにくく、演繹的・抽象的な説明が批判された後は忘れ去られてしまった感がある。最近になって、時間的空間的制限から自由な数学モデルやコンピューターシミュレーションモデルを使って地形進化を研究する流れが出てきたが、実証手段を欠くという致命的な問題点が払拭されたわけではない。降雨装置を用いた実験でもこの問題点が解消されるわけではないが、時系列的な変化を実際に観察することができ、他の方法では得難い知見が得られる可能性がある。多大な労力が要求される実験ではあるが、この意味で有効な研究手段の一つとなり得る。地形に関する実験としては、スケールモデルを考えることが一般的である。しかし、長大な時間を想定する地形進化を工学的な要請に基づいて考案されたスケールモデルで再現することは不可能で、地形進化に関しては、厳密な相似性を要求しないアナログモデル (analogue model) 実験のほうが実用的である。アナログモデル実験は、小さいながら地球上で現実に関与する作用による変化を示すものであり、地形進化の全体像を浮かび上がらせる手掛かりを得るための数少ない手段の一つである。

(2) ここで行われる地形発達実験は、実際の具体的な地形プロセスを再現するものではないが、隆起と侵食の関係のように各種プ

ロセスの相互関係に関しては実際の地形とも関連させて考えることができるはずである。侵食と隆起の間に“平衡状態”が成り立ちうるかといった大きな問題から斜面プロセスと流水プロセスの関係というような話まで、具体的なプロセスそのものではなく関係性を検討することで、実際の地形発達の解釈に何らかの手がかりとなるものを提供することができると思える。

## 3. 研究の方法

(1) 新たに製作した実験装置

(図1)を用いて、平均降雨量を約50mm/h、隆起速度を約5mm/h、

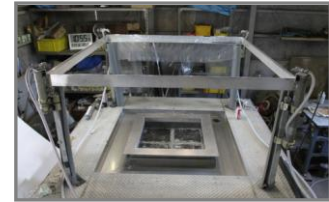
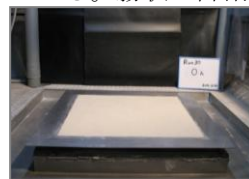


図1

0.4mm/hとした実験 (runs25, 26) を行い、さらに降雨量を約90mm/hに増やし、隆起速度を約0.4, 2.0, 5.0, 0.1mm/h (runs27, 28, 29, 30)とした実験を行った。

(2) 隆起装置の間口60x60cm、深さ約38cmのコンテナ部に細砂とカオリナイトの混合物を詰め(図2)、透水係数が $3 \times 10^{-4}$ cm/s程度になるように締め固める。このコンテナの底板がその下に設置されたステッピングモーターとギアによって少しずつ上昇するようになっており、四角い砂山を上へ押し出して隆起を起こす。コンテナ上端周囲に設置した堆積域の幅は10cmである。降雨は、上部に設置した噴水ノズル(2ないしは4個)からポンプを用いて霧状の水を噴出させることによる。霧状の降雨であり、雨滴の衝撃は見られない。



(3) 砂山の表面形態を、適宜(主に8~40時間の間隔)レーザーセンサを用いた計測器で、1cm間隔の測線について計測する(その間、降雨・隆起は停止)。計測結果は1cmの格子データに変換し、平均高度、起伏、平均傾斜などの値を計算し解析する。画像による記録も重要で、3~5分に一枚の画像を撮影する装置を工夫し、後に動画に変換した。ただし、長時間の撮影には困難・事故がつきもので、失敗も多かった。

#### 4. 研究成果

##### (1) 隆起速度の閾値

同じ降雨強度（約 90mm/h）で隆起速度を変えて行った実験では、隆起速度 5.0mm/h の場合 (run29) 以外は、平均高度も最高点高度も隆起速度に応じたある高さ以上にはならず、平衡状態段階にあると推定できた。隆起速度 0.1mm/h の場合 (run30) は、流水による侵食がゆっくり進行し、下方閾値より下の特徴的起伏段階で落ち着くかと思われたが、四辺から成長した流域がほぼ砂山全面に発達した 900h ころから分水界の部分が尾根状に成長し、斜面崩壊を起こすようになった。隆起速度の下方閾値はこの実験条件では 0.1mm/h より小さいことは明らかである。Run29 (5.0mm/h) では、隆起装置の限界に達した 72h まで上昇が続き、隆起速度が上方閾値より大きかったことを示した。したがって、この実験条件における隆起速度の上方閾値は 5.0mm/h と 2.0mm/h の間、下方閾値は 0.1mm/h 以下と推定することができる。Run25 (5.2mm/h) でも run29 と同様の変化が見られ、このくらいの隆起速度は、降雨量の少ない場合も、山脈発達段階にあると考えることができる。Run26 は run27 と比べて降雨量が約 1/2 であるが隆起速度が同じ (0.4mm/h) で、その実験地形の発達には明らかに平衡状態段階にある。実験結果から推定された隆起速度の閾値と地形発達様式の区分は、以下の図 3 のように表わすことができる。

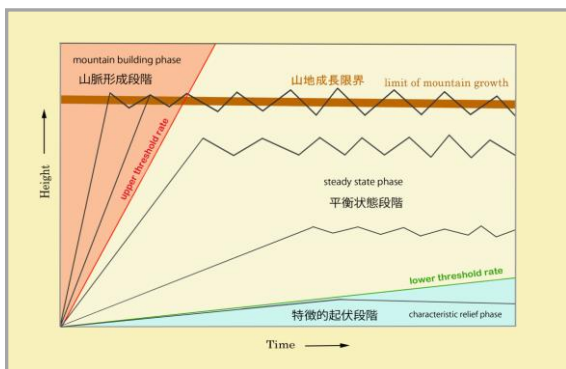


図 3

##### (2) 斜面の成長と崩壊

①隆起速度が平衡状態段階にある場合は、斜面の成長に伴う斜面プロセスと斜面から供給される物質の流水による運搬・排出が侵食低下の主因となる。隆起と流水侵食の進行とともに斜面が成長するが、斜面がある程度の高さと勾配を持つようになると崩壊が起こるようになる。当然、隆起速度が大きいほ

ど崩壊頻度も高くなる。斜面崩壊によって生産された物質は流水によって運搬され、隆起に伴う斜面の成長を助ける。水路の勾配は雨量と運搬する物質質量によって決まり、隆起速度が大きいほど急になる。つまり、隆起速度が大きいほど計測範囲の最低点高度が高くなり、起伏を変えずに最高点高度も平均高度も大きくなることできる。ただし、今回の実験では、堆積域の幅が 10cm と狭いために、この効果は限定的であり、起伏も隆起速度が大きい場合に大きくなる傾向を見せた。

②斜面崩壊には 2 種類あることが観察された。一つは斜面の高さにあまり関係なく、限界を越えて急勾配となった斜面の一部が崩落するもの、もう一つは高さを増した斜面が大規模に崩れ落ちるものである。前者は隆起と流水侵食によって急斜面ができるとあちこちで個別に起こるのに対して、後者は隆起速度に応じた周期で集中的に起こるようであった。どちらも降雨を止めて計測を行った後降雨を再開した時に起こることが多く、降雨の中断と再開が引き金となったと考えられる。斜面がある限界を越えても、このような引き金現象がない限り、砂山構成物質が保持できる限界までさらに成長を続けるのであろう。1cm 格子内の最大傾斜を求めると、どの実験においても 80° くらいが上限であり、今回の実験材料と降雨の条件で保持できる最大限界勾配は約 80° と考えられる。当然、1cm 格子より大きな範囲を想定すればこれより小さくなる。実際にどのくらいの高さ・勾配の斜面が、どのような引き金現象があった場合に崩壊を起こすのかについては、今後計測方法を工夫して検討する必要がある。今のところ、1cm 格子内の最大傾斜の頻度分布から見て、今回使用した砂の乾燥安息角約 34° 以上であれば引き金現象によって斜面崩壊が起こり得るのではないかと考えている。この角度と堆積域を含めた底面面積から、乾燥砂で山を作った場合の最大高度は 270mm と算定できる。山脈形成段階にあるとした Runs25, 29 の最大最高点高度 (242mm, 278mm) はこの値に近く、勾配 34° 以上の斜面で崩壊が起こるといふ推定もそれほど的外れとは言えない。

③大規模な斜面崩壊は、急斜面のあちこちで個別に起きる崩落状の小規模崩壊とは違って、ある時集中的に起こる傾向が強い。高度・勾配が十分に大きくなっている斜面が、

引き金現象によって崩壊するわけであるが、この状態に達するまでの時間が隆起速度によって異なるため、隆起速度が大きければ大規模崩壊集中発生頻度も大きく、小さければ小さくなる。また、発生頻度だけでなく、崩壊が起こる斜面の高度、勾配も隆起速度と関連している。大規模崩壊が起こりうるまで斜面が成長するための時間が隆起速度に反比例して長くなるだけでなく、隆起速度が大きければ、崩壊が起こりうる状態になっても次の引き金現象が起こるまでの時間内に斜面はより高く急になることができ、大規模崩壊の起こる斜面の規模も大きくなるはずである。

### (3) 降雨量の影響

Run26 と run27 では、隆起量は同じであるが、降雨量が2倍ほど異なる。降雨量が少ない場合 (run26)、流水による侵食によって流域が発達するより、隆起とともに始原平面が上昇することが先行する。高低差がある程度できると、流水の侵食がいくつかの水路に集中するようになり、峡谷状の谷が四辺から中心部に向かって成長する (図4)。



図4 Run26 120h

(図4)。降雨量が約2倍になると、流水の侵食によって4辺から流域の発達が進み、比較的早い段階から始原平面が見られなくなる (図5)。峡谷の発達はない。120時間



図5 Run27 120h

間の時点で、地形発達の状態が異なることは明らかである。隆起が継続されたまま実験が終了した1000時間の時点では、run26 で比較的大きな山塊状の地形が残ったのに対して、run27 では低い丘陵状の形態が残っただけであった。どちらの場合も平衡状態段階にあって平均高度の上昇は頭うちになったが、その高度は run26 の方が40mmほど高かった。降雨量が少なくて侵食が遅くなると、その分隆起が卓越するようになるのは当然であろう。降雨量と隆起速度の関係のみを考えると、run27 と同じ降雨量でも隆起速度が大きければ run26 と同様な結果になると予想すること

もできる。しかし、run28 は同じ降雨量で隆起速度が2.0mm/hと約5倍の条件であったが、峡谷の発達ほとんどなく、隆起速度が大きいだけに短い間隔で斜面崩壊が起こった。隆起が停止した176hにおいても、一つの大きな山塊状の地形ではなく、いくつかの尾根に分かれ頂が切り立った山脈状の地形となった。侵食の形態そのものは、降雨量に支配されるようである。

### (4) 実際の地形発達への適用

ここで行われたアナログモデル実験は、実際の地形変化を再現しようとするスケールモデルではない。したがって、ここで得られた知見を実際の地形変化の解釈に安易に適用すべきではない。しかしながら、前述したように、実験で見られたプロセスの相互関係については、実際の地形発達を理解するために役立つ点があるように思う。まず、隆起速度が一定である範囲にあれば、流水の侵食と斜面崩壊のコンビネーションによる低下と隆起による上昇が平衡状態的な状況となり、高度がある幅を持って安定するようになることは、実際の山地地形でも考えることではないだろうか。また、大規模崩壊がある間隔で集中的に起こることは、隆起が一定の速度で続いていても山地からの土砂生産が間欠的に起こることを意味しており、実際の山地においても、10万年オーダーの時間を考えれば、大きな気候変化や特別な地殻変動がなくても、砂礫の生産が集中的に起こる時期があることを想定できそうである。さらに、グランドキャニオンのような峡谷の発達について、隆起速度ではなく降雨量を重要な要素として考える必要性も実験結果が示唆している。

### 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2件)

- ① 大内俊二, 降雨侵食と隆起による実験地形の発達. 地質学雑誌 117, 2011, 163-171.
- ② Ouchi, S., Effects of uplift on the development of experimental erosion landform generated by artificial rainfall. Geomorphology 127, 2011, 88-98.

〔学会発表〕（計 9 件）

- ① 大内俊二，隆起と降雨侵食による地形発達実験に見られる隆起速度の閾値について．日本地球惑星科学連合会 2013 年大会，2013 年 5 月 21 日，幕張メッセ国際会議場
- ② 大内俊二，地形実験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会 2012 年大会，2012 年 5 月 22 日，幕張メッセ国際会議場
- ③ 大内俊二，地形進化に関するアナログモデル実験．日本堆積学会 2011 年長崎大会，2011 年 12 月 23 日，長崎大学
- ④ Ouchi, S., Evolution of experimental landform with rainfall erosion and uplift. Geological Society of America 2011 annual meeting, 10/11/2011, Minneapolis Convention Center, Minneapolis, Minnesota, USA
- ⑤ Ouchi, S., Development of experimental landform and the effect of uplift rate. T Symposium “Dynamic topography,” 9/1/2011, The Geological Society, London, UK
- ⑥ 大内俊二，実験侵食地形の発達における隆起速度の影響．日本地球惑星科学連合会 2011 年大会，2011 年 5 月 25 日，幕張メッセ国際会議場
- ⑦ 大内俊二，隆起と降雨侵食による実験侵食地形の発達－隆起速度が変化する場合－．日本地球惑星科学連合会 2010 年大会，2010 年 5 月 25 日，幕張メッセ国際会議場
- ⑧ Ouchi, S., Effects of uplift rate and its change on the development of experimental erosion landforms rising from a flat surface. Geological Society of America 2009 annual meeting, 10/19/2009, Oregon Convention Center, Portland, Oregon USA
- ⑨ 大内俊二「降雨侵食と隆起による実験地形の発達に現れる隆起速度の影響」日本地球惑星科学連合会 2009 年大会，2009 年 5 月 19 日，幕張メッセ国際会議場

## 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