

隆起をともなう微小侵食地形の形態変化

研究代表者 研究員 大内俊二（理工学部地学教室）

共同研究者 研究員 松下 貢（理工学部物理学科）

1 はじめに

山地地形に代表される侵食地形については、証拠となる物質が持ち去られているためにその発達過程を知る手がかりが乏しく、地形の重要な部分をしめる割には理解が進んでいるとは言いがたい。筆者らは、侵食地形の形態的特徴をフラクタル幾何を応用したパラメーターで表すことによって、侵食地形の形態そのものを形成過程を知るために残された最大の手がかりにできると考えてきた。これまでに、ランダム数を用いて作成した偽地形や地形図から読み取った格子点の高度分布の解析から、非整数ブラウン運動のスケールパラメーターと同等のパラメーター、 H' によってフラクタル幾何からみた侵食地形の形態的特徴が表現できることを指摘した [1][2]。さらに、人工降雨によって形成される微小侵食地形の発達過程を観察・計測して、微小ながら実際の侵食地形発達と H' などの変化との関連を探ってきた [3][4][5]。前回はさらに隆起を加えた実験を行い、山地地形形成の重要な要素である地殻変動と侵食地形形成の関連を考察した [6]。今回の実験も隆起を加えた実験であるが、十分侵食が進んで準平原状の形態が形成された後に隆起を開始するという、現実の地形発達により近い条件で行われた。

2 実験設定

地下に埋設した隆起装置の上に上面が $90 \times 90\text{cm}$ ほど（測定範囲は $76 \times 76\text{cm}$ ）で地上に高さ約 15cm 出るように（地下に約 20cm ）細砂とカオリナイトの混合物で四角い砂山を形成し、この砂山に農業用の灌水チューブから細かい人工雨を降らせて微小な侵食地形を作り出した。十分侵食が進み準平原状の形態が発達した 255 時間後（ここまでは Run9 とし、以降を Run10 とする）、隆起装置によって砂山全体を隆起させ、隆起をともなう微小侵食地形の発達過程を観測・計測した。隆起は、471 時間まで降雨時間 1 時間おきに約 0.5mm ずつ間欠的に起こした。全体の隆起量は約 112mm であった。その後 791 時間まで降雨を続けた。計測は、適宜降雨を止め、 1cm 刻みの 77 本の測線についてポイントゲージを用いて行った。可能な限りすべての変曲点を計測し、解析のために $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のグリッドデータに変換した。侵食による砂山の形態変化の概略は図

1 および図 2 に示した。実験条件は次のとおりである。

Run9

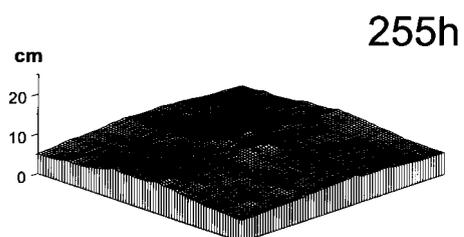
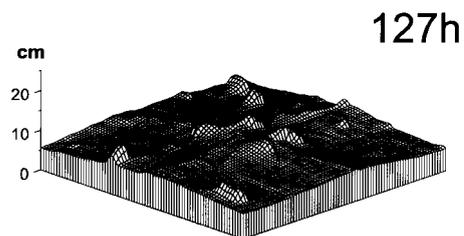
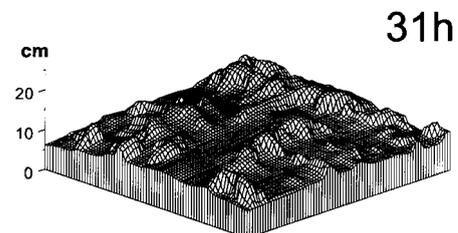
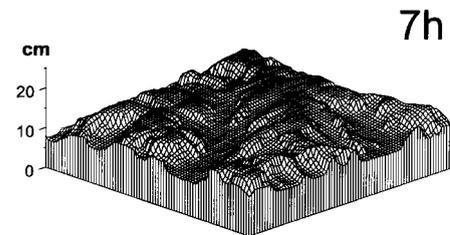
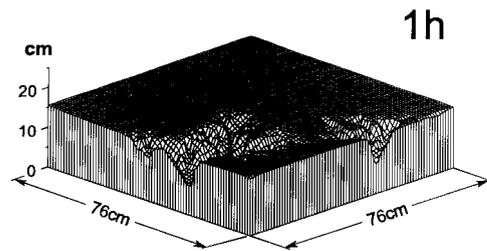


図 1 隆起開始（255h）以前、Run9 における微小侵食地形の変化を示すブロックダイアグラム。

砂：粘土 30：3
 透水係数 約 3.1×10^{-4} cm/s
 平均降雨 約 38mm/h
 降雨時間 Run9：255h，Run10：536h，total:791h
 隆起速度 約 0.5mm/h

3 実験経過

隆起を起こす前 (Run9, 255 時間まで) の侵食の様子はこれまでの隆起のない侵食実験と同様であった。降雨とともに谷系が発達し、主要谷は急速に下刻するが、最低点高度 (z_{min}) の変化を見る限り、約 15 時間後砂山を取り巻く扇状地が発達するところにはこの下刻はほぼ終息した (図 3)。

Run10

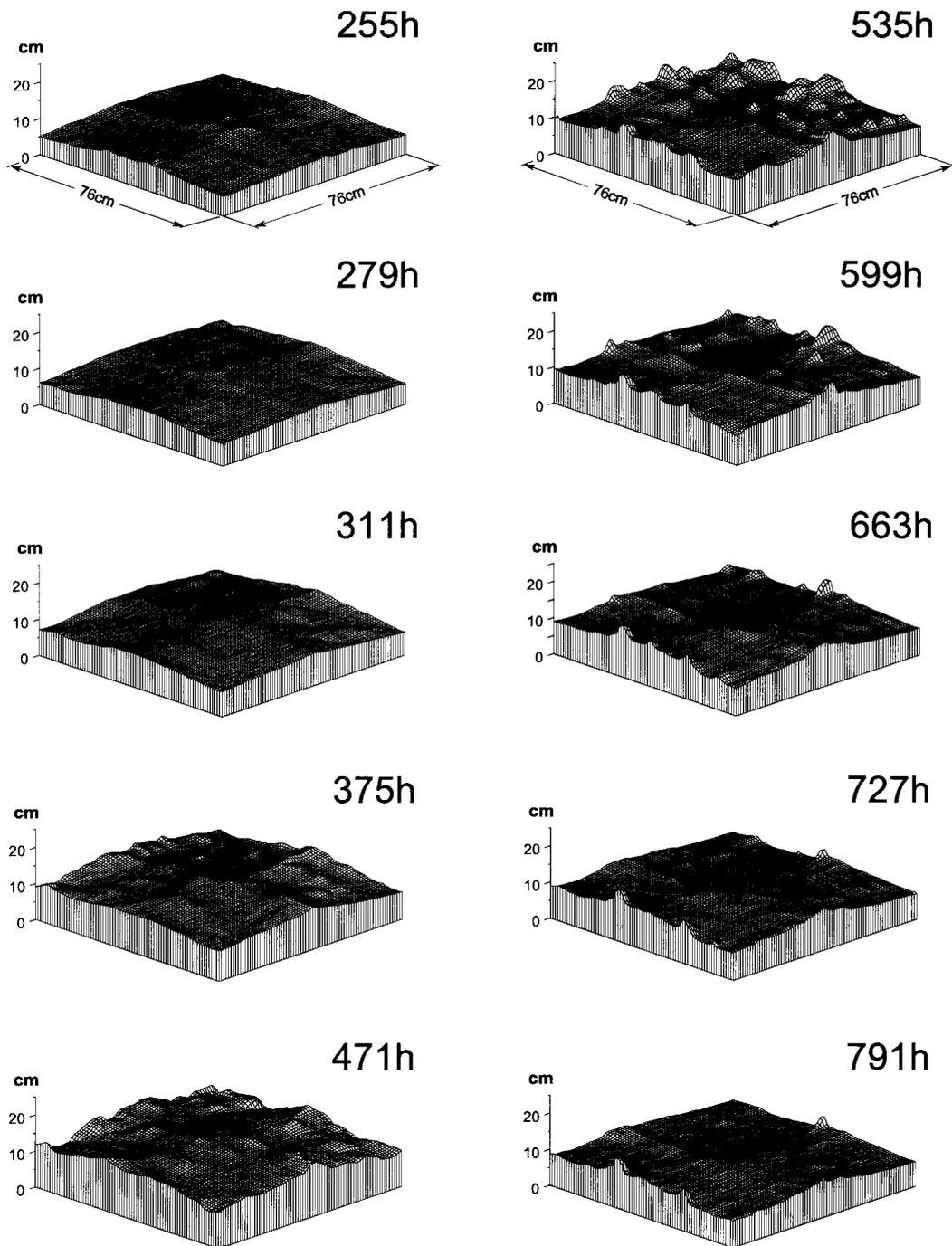


図 2 隆起開始 (255h) 以降, Run10 における微小侵食地形の変化を示すブロックダイアグラム。

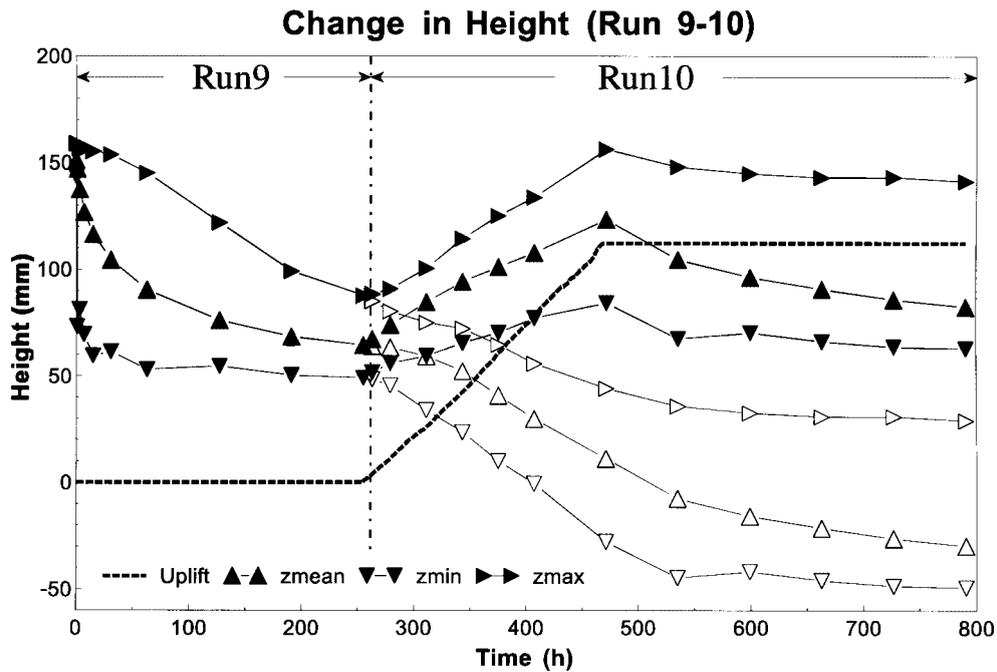


図3 平均高度 (z_{mean}), 最高点高度 (z_{max}), 最低点高度 (z_{min}) の Run9, Run10 における時間的变化。中抜きのマークはそれぞれの値から隆起量を除いた値を示している。

平均高度 (z_{mean}) は少し遅れて指数関数的な低下を示し、さらに遅れて最高点高度 (z_{max}) の低下が続く、隆起が始まるまではそのまま低下を続けた。最大起伏は急速に増加して最大値をとった後に、最高点高度の低下とともに減少したことになる。隆起が始まると、最高点高度、平均高度、最低点高度どれもが隆起とともに上昇に転じたが、その速度は隆起を下回っていた。上昇速度はこの順序で大き

く、結果として全体としての起伏が少し増大した。隆起終了後は、最高点高度と最低点高度が非常にゆっくりとした低下しか見せないのに対して、平均高度は明瞭な低下を示している。これは残丘状の地形を残して全体的な平坦化が進んだことを意味している。10×10cm の範囲内における高度の標準偏差 (Z_i) は、31h ころに最大の状態に達した後減少に転じ、隆起が始まると、隆起とともに増加を見せ

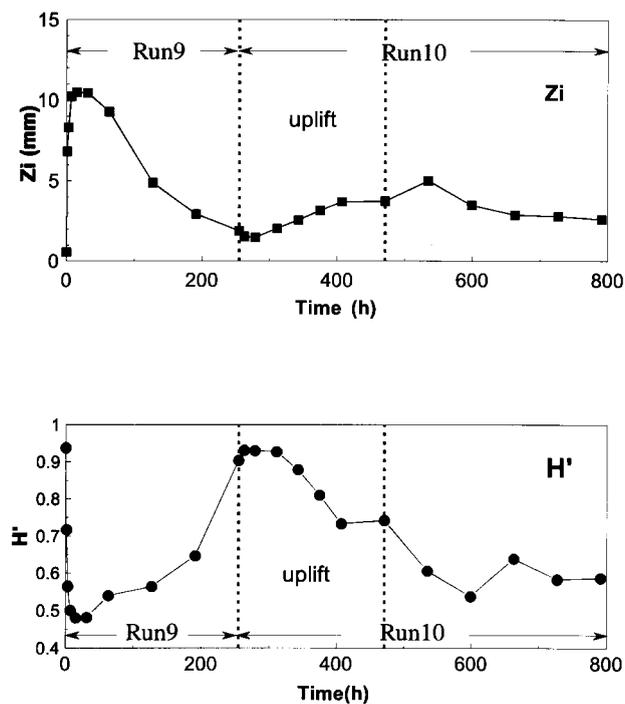


図4 10×10cm の範囲内における高度の標準偏差 (Z_i) および H' の時間的变化。

た(図4)。隆起終了後当初はいったん少し増加したが、その後かすかな減少に転じた。

H' の算出にはこれまでと同様 area scaling method[2]を用いた。 H' は、始原面の1に近い値(0.94)から7hにはランダム表面を表す0.5となり、少し低下した後31h以降は増加に転じた(図4)。隆起開始直前の225hには0.9まで増加し、隆起開始直後の263h、279hには0.93に達した。311h以降は減少に転じ、隆起終了後の599hにはランダム表面の値に近い0.54まで減少した。しかし、隆起終了後は0.6前後の値で推移し、明確な変化傾向は見られない。

4 考察

Run9は高さ15cm程度の平坦で四角い砂山から出発しており、これは平坦地が瞬間的にこの高さまで隆起した場合と同等と考えられる。また、255h以降に始まった隆起(Run10)では、降雨侵食による低下がありながら最高点は実験開始時と同等の高さまで回復した。したがって、隆起開始以前(Run9)とRun10の隆起終了以降の変化を、隆起速度の異なる場合の隆起終息後の侵食による変化として比較することが可能である。隆起以前のRun9における侵食は平坦な高原状の地形を急速に下刻する谷系の発達が始まっており、降雨開始直後の最低点高度低下が著しい。これに対してRun10の隆起終了後は、急速な谷の下刻も新しい谷系の発達もなく、最高点高度、最低点高度がゆっくりと低下するとともに中間的な斜面の平坦化が進んだ。隆起開始時にはすでに十分発達していた扇状地が、隆起中も隆起に追いつくように発達したことによって下刻が制限されたと考えられる。隆起終了後も、ゆっくりとした平坦化によって供給される砂でこの扇状地がほぼ維持された。残丘状の地形が目立ち、急速に下刻が進んだRun9の場合と比べて最高点高度の低下が少なかった。始原面が残っている間に急速な下刻が進んだRun9では、このような面の上に発生する水流による谷系の発達とともに侵食が進んだのに対して、Run10の隆起終了後はすでに高い地点は残丘状の地形となっており、水流による侵食が進まなかったであろう。Run10では、平坦化による平均高度の低下とともに、数は減少するものの残丘状の地形が目立つようになった。 Z_i は、Run10の隆起終了後はわずかな減少傾向しか見せず、 H' も0.6程度の値で推移した。これはRun9で H' がすぐに0.5に近い値まで減少した後、増加したことと大きく異なっている。Run9では Z_i も急激な下刻とともに急速に増大し、その後指数関数的な減少を見せている。ここにも、瞬間的な隆起で急崖に囲まれた平坦な高原

状の地形が出現した場合と、侵食によって形成された比較的平坦な地形がゆっくりと隆起した場合の侵食過程の違いが表れている。Run10で隆起終了後に H' が明らかな変化傾向を示さないことは、後者の場合、侵食によって平坦化が進んでも基本的な凹凸の様子が変わらなかったことを意味している。 H' は大小の起伏のバランスによって決まる値で、起伏の大きさには左右されないことから考えると、いったんできあがった地形の平面的配置を保ったまま少しずつ平坦化が進んだことになる。

Run10の隆起中の地形変化は、前回の実験(Run8)と隆起始原面の形態が異なる場合として比較することもできる。急崖に囲まれた高原状の平坦面が急速に侵食されていくと同時にゆっくりとした隆起が起こったRun8の場合、最低点高度と平均高度は侵食開始後早い段階で最小となりその後大きな変化を見せなかった。しかし、最高点高度は隆起とほとんど同じだけ上昇した。急速な下刻と谷系の発達が発達と同時に起こったため、最低点高度と平均高度については隆起量が相殺されたのであろう。最高点高度が隆起とともに上昇したのは、隆起によって谷の下刻が長引くことになり、側方への平坦化と始原面の消失が遅れたためではないだろうか。これに対してRun10では、最高点高度、平均高度、最低点高度どれもが隆起とともに上昇しており、どの地点においても侵食が隆起を上回らなかったことを示している。ただし、最高点高度の場合でもその上昇は隆起量よりも小さく、全体的に侵食が起こっていたことも明らかである。隆起量を差し引くと、最高点高度は隆起以前から連続的な低下を見せているが、最低点高度と平均高度の低下は隆起によって加速されたことが明らかである(図3)。隆起の影響は尾根部より谷筋の下刻と中間的な斜面の平坦化に表れるようである。Run8とRun9を比較すると、 H' の変化に隆起の影響がほとんど現れておらず、隆起は起伏の大きさと侵食量には影響を与えないが、凹凸の性格にはあまり影響しないことが読み取れる[6]。Run10の隆起継続中における H' の減少も Z_i の増加にともなって起こっており、この点ではRun8と変わりはない。結局のところ、Run8とRun10の違いは、急速な下刻が起きる時期に隆起を受けたか、起伏が小さくなってゆっくりとした平坦化が進む時期に隆起を受けたかの違いである。下刻が急速に起こったRun8でも、全体の平坦化のなかで隆起とともに徐々に起伏が増したRun10でも、 H' の変化は Z_i の大きさではなく変化傾向と概ね対応しており(Z_i が増加すると H' が減少する)、この実験条件においては大きな単位での凹凸の様子が変わらず、 Z_i で表現されるような比較的小さな単位の起伏変化が主であったことを

示唆している。隆起が水平な隆起であり、曲隆のように大きな単位の起伏増大をもたらすものではなかったことも大きく影響していると考えられる。

5 おわりに

侵食が進んで起伏の小さな侵食地形が発達したところにゆっくりした水平隆起が起こった場合、隆起に合わせて谷の侵食が加速されるが、尾根部山頂部は大きな影響を受けないようであった。谷の侵食の加速も、砂山を取り巻く扇状地の成長によって下刻が制限され、隆起を相殺するまでにはならなかった。隆起が終わると、中間的斜面の平坦化によると思われる平均高度の低下がゆっくりと進むようになった。 H' の値は隆起に反応した局地的起伏 (Z_i) の増大に伴って減少したが、隆起が終わると傾向的な変化は見られなくなった。瞬間的な隆起で急崖に囲まれた平坦な高原状の地形が出現した場合と比べると、急速な谷の下刻と新しい谷系の発達がないために隆起にともなう起伏の増大が小さく、隆起が終わった後の侵食も残丘を残した平坦化の進行という形をとった。実際の地形の場合も継続的な隆起の方が一般的と考えられるが、隆起速度より侵食過程のどの段階で隆起が起こったかの方が地形発達に対する影響は大きい可能性がある。今後さらに隆起速度を変えて実験を行い、隆起・侵食と地形発達の関係について考えていく必要がある。

参 考 文 献

- [1] Matsushita, M., and Ouchi, S.: *On the self-affinity of various curves*. Journal of the Physical. Society of Japan, 58, 1489–1492, 1989.
- [2] Ouchi, S., and Matsushita, M.: *Measurement of self-affinity on surfaces as a trial application of fractal geometry to landform analysis*. Geomorphology, 5, 115–130, 1992.
- [3] Ouchi, S.: *Fractal analysis on the miniature erosion landform generated by artificial rainfall*. Geographical. Report of Tokyo Metropolitan University, 31, 97–103, 1996.
- [4] Ouchi, S., and Matsushita, M.: *Morphological characteristics and evolution of miniature erosional landforms generated by artificial rainfall*. Jour. Inst. Science. and Engineering, Chuo University, 3, 67–80, 1997.
- [5] 大内俊二, 松下 貢: 人工降雨による微小侵食地形の形態変化。中央大学理工学研究所年報, 6, 52–55, 1999.
- [6] 大内俊二, 松下 貢: 隆起をともなう微小侵食地形の形態変化。中央大学理工学研究所年報, 8, 28–31, 2001.