

沖積錐の斜面傾斜とプロセスに関する地形実験

A Geomorphic Experimental Study on the Slope Inclination and Processes on Alluvial Cones

山本憲志郎*
Kenshiro YAMAMOTO*

キーワード：沖積錐、斜面傾斜、プロセス、地形実験

Key words : alluvial cone, slope inclination, processes, geomorphic experiment

Abstract

A geomorphic experiment was carried out in order to discuss the relationships between slope inclination and geomorphic processes on alluvial cones. An experimental slope (5 m in length, 1.8 m in width and 1.8 m in height) was modeled after alluvial cone with gravels and sand, and water was supplied from the top of the slope. The inclination of experimental slope shows between 20.0 degrees and 24.9 degrees on the parts having a tendency with sedimentation. The slopes with inclination ranging from 19.9 degrees to 15.0 degrees were constructed under a tendency of erosion. The materials on the former slopes were transported by some processes related to water level, such as unsaturated, saturated, and supersaturated debris flows. These differences were probably caused by the changes in degree of debris supply through the experiment.

I. はじめに

沖積錐は「扇状地のうち扇状地面の傾斜が大なるもの」と定義される場合が多い。たとえば斎藤(1988)は沖積錐は規模、勾配などが扇状地と崖錐との中間的な地形としてとらえている。こうした中でBull(1977)は勾配20°以上の扇状地を沖積錐と呼ぶことを提唱しているが、その根拠はかなりしも明確ではない。これは今まで、沖積錐斜面の傾斜と発生するプロセスに関する関係がじゅうぶんに検討されてこなかったためと思われる。そこで沖積錐斜面において、1)侵食傾向あるいは堆積傾向にある部分の斜面の傾斜値、およびそれぞれの傾向下において発生するプロセスの種類について検討する、2)供給される岩屑が少ないと次第に流路が埋積されなくなり、結果的に流路

が固定されるかどうか検討する、ことを目的に簡単な地形実験を試みた。

II. 実験の概要

筑波大学陸域環境研究センターの敷地内に設けたローム質土の盛土を深さ約1.8m、幅約1.8m、奥行き約4m、ショベルカーによって掘削した。この掘削断面に2.5mm~5mm礫(重量85%)と中~細砂(重量15%)を混合した砂礫(携帯型ベンセン断試験機によって計測された内部摩擦角は35.0°)を均一になるように投入し、斜面長約5m、幅約1.8m、高さ約1.8mの実験斜面を造り、水道水を斜面最上部に埋設したゴムホースから供給(毎秒0.6l)し、約2時間経過した斜面を造った。この斜面を実験計測の基準となる初期斜面(origi-

*中央学院大学商学部

*The Faculty of Commerce, Chuo-Gakuin University

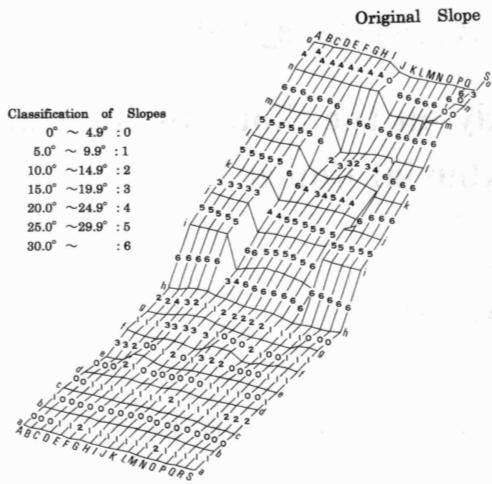


図1 初期斜面 (original slope) の計測結果

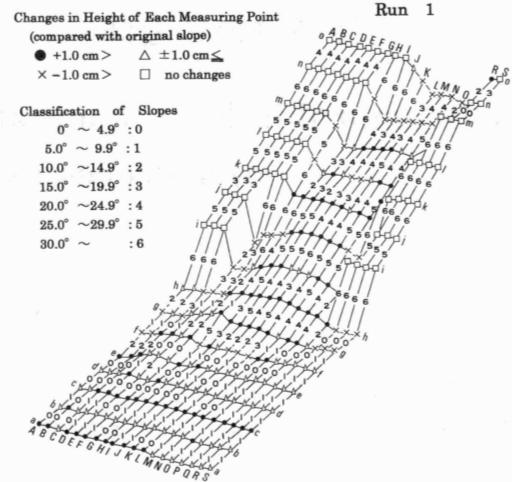


図2 Run 1 で形成された斜面の計測結果



写真1 原斜面の様子



写真2 Run 1 で形成された斜面の様子

nal slope) とした (図1, 写真1)。実験1 (Run 1) は斜面最上部に埋設したゴムホースから初期斜面に水道水(毎秒0.6 l)を約2時間供給した(図2, 写真2)。実験2 (Run 2) は同様にさらに水道水を2時間供給した (図3, 写真3)。

計測は実験斜面の両側に基準点を設けて行われた。基準点は2枚の木製の板を①傾きが 20° で、②互いに平になるようにトランシットを用いて設置された。実際の計測はこの板の斜面長40 cm 間隔

ごと(平面投影長は37.6 cm 間隔ごと)に標尺を渡し、横方向に10 cm 間隔ごとに折り尺をおろして地表面までの長さを計測した。すなわち初期斜面およびRun 1, 2 で形成された斜面について、横方向に10 cm 間隔で縦側線A~Sを、縦方向に37.6 cm 間隔ごとに横側線a~oを設け、各測線の交点 (=格子点; 縦側線記号と横測線記号の順で表記する) の高さを計測した。この計測値に基づいて、各斜面における各格子点を縦方向に結んだ測

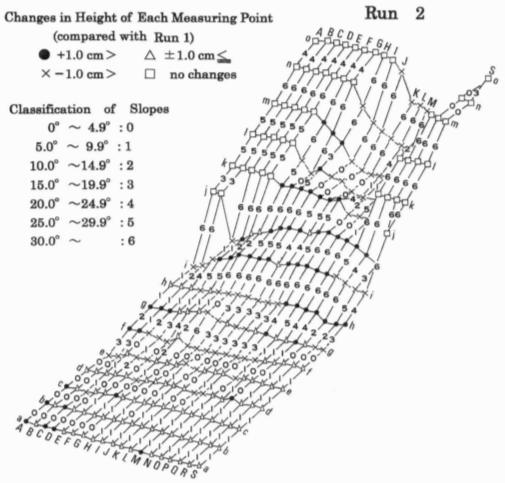


図3 Run 2で形成された斜面の計測結果



写真3 Run 2で形成された斜面の様子

線の傾斜を算出した。傾斜は5°間隔で階級分けし、小さい方から順に0~6に分類した。さらにRun 1, 2で形成された斜面について各格子点の高さの変化から、それぞれの点が侵食あるいは堆積傾向にあるのか判断した。なお、格子点の高さを読み取る時の誤差は最大で1cmあると仮定して、高さの変化が1cm以内の格子点については侵食あるいは堆積傾向にあるかどうかの判断を行っていない。また、実験中に発生した砂礫の流

動様式を観察した。

III. 実験の結果

初期斜面の斜面上部の両側は基盤岩に見立てたローム質土によって構成されている（横側線i~o, 縦測線A~FおよびP~Sの区画）。斜面上部の中央部付近（縦測線G~O）から下方は砂礫によって構成されている。格子点No付近に埋設されたゴムホースからの水の供給によって砂礫が移動したため、砂礫を投入した際にできた表面の微小な凹凸が少なくなっている。

砂礫分布域の上部には傾斜30°以上の区画が広がっている（横測線m~o, 縦測線K~Qの区画）。この傾斜は実験材料の砂礫の内部摩擦角に相当すると判断されることから、この区画は一種の崖錐斜面であるといえる。その斜面下方には傾斜15.0°~24.9°の斜面が広がっている（横測線k~m）。この傾斜は沖積錐斜面にしばしば認められる傾斜である。さらにこの下方には傾斜25.0°~29.9°の斜面が広がり（横測線i~k），上方から移動してきた砂礫が堆積したことを示している。さらにこの下方には再び30.0°以上の斜面が分布し（横測線h~i），10.0°~14.9°の斜面（横測線g~h）と非連続的につながっている。このように初期斜面は最上部に砂礫の供給源である崖錐斜面を、中部から下方に沖積錐に相当する斜面（砂礫の堆積によって増傾斜した部分を含む）をもっているといえる。

初期斜面との比較から、Run 1によって造られた斜面には斜面上部での侵食と斜面中部～下部にかけての堆積が認められる。斜面上部（横測線n, o付近）にある格子点はいずれもその高さを低下させており、この区画の砂礫がマスムーブメントによって運び去られたことを示している。横測線g~m上の格子点の多くが堆積傾向にあることから、斜面上部で侵食された砂礫はこの区画周辺に堆積したと考えられる。

横測線1~o上の格子点の高さの低下は、Run 2によって造られた斜面上部で広く侵食が進行したことを示している。侵食された砂礫の一部は斜面中部（横測線i~j）上の格子点付近に堆積したと考えられる。横測線f, g上でも広く侵食が生じている。また横測線k~mと縦測線H~Kに

よって囲まれた区画に傾斜4.9°以下の極めて平坦な面が形成されている。これはRun 2中、地表面を流れる水流が縦測線M, N, O付近に集中し、下刻したために形成された段丘状の地形である。

なお、図1、図2においてローム質土の部分にある格子点は高さが変化していないところが多いが、水流によって侵食された地点も存在する。

IV. 考 察

1. 約20°を境界値とした沖積錐の成長と開析

本実験では斜面傾斜約20°を境界値として、その斜面の性質が堆積あるいは侵食傾向下のどちらかに分かれる現象が観察された。斜面横断方向に同じ階級が出現した事例は同じ傾斜をもつ面が形成されたと判断した場合、Run 1において造られた階級4あるいは5の傾斜をもつ面は計11個認められる。この各面の周囲および内部の格子点数は合計45個であり、そのうち30個が堆積傾向を示し、侵食傾向を示すのは7個にすぎない。同様に階級3の面を構成する格子点は全部で12個である。そのうち堆積傾向を示すのが3個（このうち2個は階級4の面の格子点と重複している）、侵食傾向が7個となっている。

同様の認定方法によってRun 2によって造られた斜面における階級4あるいは5の面についてみると、Run 1において形成されたそれに比較して少なくなっている。Run 1の場合と同様に計測すると、階級4あるいは5の面の全格子点数は22個である。その中で堆積傾向を示すのは17個であるのに対し、侵食傾向を示すのは1個にすぎない。また階級3の面を構成する格子点は20個である。その中で堆積傾向を示すのは2個であるのに対し、侵食傾向を示すのは14個と多くなっている。これらのことから、階級4あるいは5の面を構成する格子点は堆積傾向下にある場合が多く、逆に階級3の面を構成する格子点はほとんどが侵食傾向下にあるといえよう。

このことは沖積錐斜面が成長（堆積傾向）あるいは開析（侵食傾向）のどちらの状況下におかれているかは、斜面傾斜約20°を境界値として判断されることを示している。おそらく岩屑が十分に供給されて成長している沖積錐は20°以上の斜面傾斜となり、逆に岩屑の供給が少なくて開析が進行

している沖積錐は20°以下の斜面傾斜になりやすいと考えられる。

なお本研究で使用した砂礫の内部摩擦角（=35°）と実際の沖積錐を構成する砂礫の内部摩擦角との差異に対応して、本実験で得られた約20°の境界値は実際の沖積錐では若干変化する可能性があると考えられる。

今まで、岩屑供給の増減と掃流状あるいは土石流状の各種の岩屑流の発生を関連させて検討した沖積錐の形成に関する研究は少ない。その中で、柳井・新村（1990）は斜面傾斜約10°の土石流扇状地堆積物に挟在するテフラから推定される土石流の発生時期と、背後の山地斜面におけるテフラの残存状態から推定される山地斜面の崩壊時期がよく対応していると報告している。また、磯ほか（1980）は離水年代が判明している河成段丘上の沖積錐の体積と流域面積の関係などから、土石流の発生頻度と沖積錐の成長速度を検討している。しかし、これらの研究は土石流の発生によって沖積錐堆積物あるいは土石流扇状地堆積物が堆積する場合を想定しており、侵食される場合を考慮していない。また磯部（1990）は筑波山周辺の緩斜面の形成が、主に土石流の側刻によることを明らかにしているが、岩屑供給量の変化との関係については明らかにしていない。今後、沖積錐は岩屑供給量の変化に対応して斜面傾斜を変化させるという視点からも、沖積錐の研究がなされねばならないと思われる。

2. 沖積錐斜面上の地形プロセス

一般に凝集性の低い砂礫からなる斜面物質が降雨などによってその間隙が水で充填された際に、せん断を伴った集合流動が発生することが理論および実験によって検証されている。

例えば土石流の流動機構を検討した江頭（1988）や、実験水路を用いて流動勾配と砂礫と水の混合比を検討した渡部（1994）によれば、集合流動様式がおよそ斜面傾斜に対応して1) 不飽和岩屑流（浸透流が岩屑表層にまで達しない侵食傾向のゆっくりとした流動）、2) 飽和岩屑流（浸透流がちょうど岩屑表層に達した堆積傾向のゆっくりとした流動）、3) 過飽和岩屑流（水流が岩屑表層の上を流れる堆積傾向の流動）の3つに決定される。

なお伊勢屋ほか（1995）は水路実験により、過飽和岩屑流は表面水流のある掃流状集合流動あるいは掃流による物質移動であると述べていることから、3)の流動様式は土石流と同じであると考えられる。両者の提案した公式は2)および3)に関しては同じである。ただし不飽和岩屑流に関しては、流動層全体の浸水率よりPlug層（移動時に垂直方向の速度勾配を持たない表層部の砂礫層）の浸水率によって、不飽和岩屑流の発生可能な限界傾斜角が決定されることが渡部（1994）によつて示されている。

ここで江頭（1988）の公式によれば、内部摩擦角が 35° の砂礫の場合、不飽和岩屑流は斜面傾斜 18.9° 以上で発生し、飽和岩屑流は 18.9° で発生し、過飽和岩屑流（=土石流）は 18.9° 以下で発生する（ただし、堆積物の体積濃度：0.6、水の密度：1.0、粒子の実質密度：2.6として計算）。これらの斜面傾斜と集合流動様式の関係は、定常条件下では物質の内部摩擦角によってほぼ決定され、浸透流の流量などによって変化しない。

ところで渡部（1994）は過飽和岩屑流（=土石流）が斜面傾斜にかかわらず、浸透流量に対して相対的に岩屑量が減少すると突発的に発生することを報告している。この報告は斜面上あるいは流路内の岩屑量が浸透流量に対して相対的に十分にある場合は、理論的に決定される斜面傾斜値に対応した各種の集合流動が発生するが、岩屑量が相対的に少ない場合は（すなわち表面流が発生する条件下では）、斜面傾斜に関係なく過飽和岩屑流（=土石流）が発生することを示唆していると考えられる。

先述したように実験材料の砂礫の内部摩擦角がおおよそ 35° であることから、Run 1, 2 によって造られた斜面の傾斜の中で階級4： $20.0^{\circ} \sim 24.9^{\circ}$ および階級5： $25.0^{\circ} \sim 29.9^{\circ}$ はおおよそ不飽和岩屑流の流動勾配に相当しているといえる。また階級3： $15.0^{\circ} \sim 19.9^{\circ}$ はおおよそ過飽和岩屑流（=土石流）の流動勾配に相当している。したがって、Run 1, 2 に

よつて造られた斜面の中で少なくとも $15.0^{\circ} \sim 29.9^{\circ}$ の斜面（階級3, 4, 5）は砂礫による種々の集合流動によって造られた可能性が高いといえよう。

本実験でもRun 1中に斜面傾斜約 20° において飽和岩屑流が観察され（写真4）、岩屑がじゅうぶんにある場合は斜面傾斜によって集合流動様式が決定されることが確認できた。また、本実験では斜面傾斜にかかわらず（斜面傾斜 20° 以上でも）、過飽和岩屑流（=土石流）が頻発した。例えばRun 2中において土石流に典型的な“首振り”現象が観察された（写真5）。こうした過飽和岩屑流（=土石流）は初期斜面～Run 1～Run 2と時間が経過する中で、新たな岩屑を斜面上部から供給しな



写真4 Run 1に観察された実験斜面中央部における飽和岩屑流



写真5 Run 2中に観察された実験斜面上部における土石流の“首振り”現象

かったため、実験斜面の岩屑量が水量に對して不足したために生じたと考えられる。

Run 2において造られた斜面には階級0の面が出現する。すなわちIm-Km-Kk-Ik(格子点数は6)である。この面は傾斜4.9°以下と極めて緩傾斜であることから段丘地形といえる(写真6)。この面の上方を囲う格子点(Im, Jm, Km)はいずれも侵食傾向下にあるのに対し、下方を囲う格子点(Ik, J, Kk)はいずれも堆積傾向下にあることから、この面は表面流による砂礫の移動によって平滑化されたと考えられる。また、この面は側方向に隣接する格子点(Lm, Mm, Mk, Nk)より高度が高くなっている。このことから表面流は面Im-Km-Kk-Ikを造った後、流路を側方向に移動して下刻したと考えられる。Lm, Mm, Mk, Nkなどの側方向にある格子点がいずれも侵食傾向下にあることもこの考えを支持する。ところで斜面上部に位置するほど、より早く砂礫の供給が少なくなったと考えられる。この面を含む斜面上部はRun 1～Run 2と経過する中で、常時侵食傾向(砂礫の供給不足)にあったと考えられる。水山(1988)が指摘するように土石流が発生する流路において砂礫の供給が不十分になったため、流路の下刻が生じ、結果的に段丘地形を形成したと考えられる。

V. まとめ

実験の結果、以下の知見を得た。
①20.0°～24.9°の斜面および25.0°～29.9°の斜面は、その上方および下方の格子点が堆積傾向にある場合が多い。この傾斜をもつ斜面では飽和・不飽和岩屑流やいわゆる土石流などのプロセスが卓越した。また、15.0°～19.9°の斜面はその上方および下方の格子点が侵食傾向にある場合が多い。この傾斜をもつ斜面ではいわゆる土石流や掃流などのプロセスが卓越した。この結果は沖積錐斜面にじゅうぶんな岩屑が供給されている時は20°以上の傾斜になりやすく、逆に供給される岩屑が少ないと20°以下の傾斜になりやすいこと、また斜面傾斜および斜面上の岩屑量によって卓越するプロセスが異なる可



写真6 Run 2中に形成された段丘地形

能性を示唆している。②初期斜面(original slope)～Run 1～Run 2と経過する中で、特に計測斜面上部において流路の固定と下刻、それに伴う段丘状地形の形成が観察された。計測斜面上部はいち早く砂礫が斜面下方に移動し、上方からの砂礫の供給が無いため、実験中は常時侵食傾向(砂礫の供給不足)にあったと考えられる。このことから沖積錐斜面に認められる深く下刻した流路は、供給岩屑の減少が原因となって形成される可能性が指摘される。

本稿を作成するにあたり、筑波大学陸域環境研究センターの池田 宏先生と飯島英夫氏には実験に関する多くの御助言と御協力を賜りました。この拙論を常日頃から励ましを賜っている立正大学の門村 浩先生の定年退官に献じさせていただきます。なお、本論の骨子は2000年度秋季東北地理学会および2001年度秋季日本地理学会で発表した。

参考文献

- 池田 宏・伊勢屋ふじ子・小玉芳敬(1993)：大井川上流の沖積錐における岩屑の移動・堆積、筑波大学農林技術センター演習林報告、9, 149～173.
伊勢屋ふじ子・小玉芳敬・池田 宏(1995)：岩屑の移動様式の急変にともなう沖積錐の成長と開析、地形(1995年春季研究発表会講演要旨), 16, 310.
磯 望・山川克己・半澤 宏・松原敏子(1980)：岐阜県高原川流域における土石流による岩屑供給と沖積錐の成長

- 速度。地理学評論, **53**, 699~720.
- 磯部一洋 (1990) : 茨城県筑波山・加波山周辺の緩斜面堆積物の形成について。地質調査所月報, **41**, 357~371.
- 江頭進治 (1988) : 土石流の流動機構。「災害地形最前線」, 63~82, 奥田節夫教授退官記念事業会。
- 斎藤享治 (1988) : 「日本の扇状地」。古今書院, 280p.
- 水山高久 (1988) : 土石流に関する実験的研究。地形, **9**, 269~278.
- 柳井清治・新村義昭 (1990) : 大規模崩壊地における土石流扇状地の発達過程。地形, **11**, 349~362.
- 渡部 真(1994) : 岩屑の流動勾配に及ぼす砂礫と水の混合比の影響に関する実験的研究。地形, **15**, 349~369.
- Bull, W.B. (1977) : The alluvial fan environment. *Progress in Physical Geography*, **1**. 227~270.