

砂質土石流堆積物の粒度特性

— 京都大学理学部構内の弥生時代の砂層（黄色砂） —

増田富士雄* 田村 亨** 富井 眞

1 はじめに

京都市左京区の北白川追分町遺跡に位置する、京都大学理学部6号館建設予定地の発掘調査で（図139）、弥生時代の「砂質土石流堆積物」の断面を2000年10月に観察した。そして、その断面における粒度組成変化を解析した結果、この堆積物が異なる種類の流れから堆積したと考えられる三層構造をもつことと、そのうちの二層については陸上土石流堆積物では初めての報告となる「多重逆級化構造」をもつことがわかった。

本文は第2節を富井が、その他を増田・田村が執筆し、編集は富井が担当した。

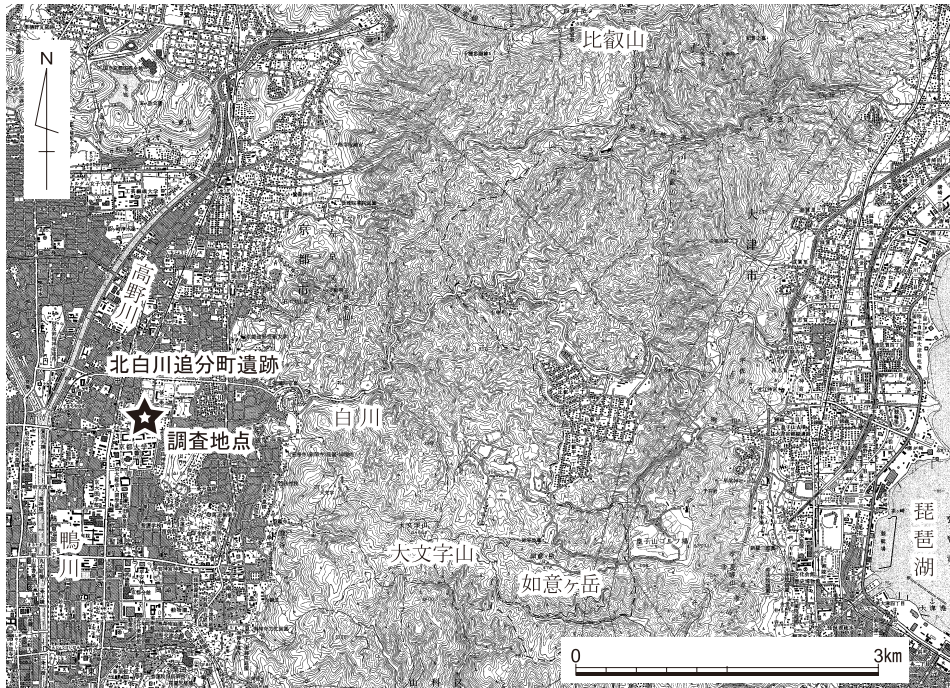


図139 調査地点の位置 縮尺1/7万5千

*京都大学大学院理学研究科 **産業技術総合研究所

2 既往調査の概略

京都東山の比叡山と如意ヶ岳の間の西麓に広がる白川扇状地の扇端に位置する、北白川追分町遺跡を含めた京都大学構内遺跡には、主に黄褐色を呈する砂層が広く分布することが知られている(清水1985, 富井2003)。残存する層厚が2 mを超える地点もあるこの砂層は、下位に弥生時代前期までの遺物を包含する地層が確認されることから、構内遺跡の発掘調査においてはいわゆる鍵層とみなされ(泉1978)、「黄砂」ないし「黄色砂」と呼ばれている。今回の発掘調査でも、水稻耕作の開始期である弥生時代前期末葉の水田を覆って、層厚2 mに近い黄色砂が堆積しているのが確認されている⁽¹⁾。黄色砂の堆積年代は、黄色砂の上に弥生中期前葉の墓が認められる地点があるので(岡田・吉野1979)、弥生時代前期末～中期初頭(約2500年前)に限定できる。

黄色砂は、各地点でまったく同様の堆積相を呈するというわけではない。最下部の粘土ないしシルトから上方にむかって粗粒化していく地点や(泉1978; 伊藤1995)、あるいは上方で細粒化している地点(浜崎1983)もある。また、構内遺跡の北半では、下部に主に花崗岩の垂円礫からなる巨礫が散見できる⁽²⁾。浜崎(1983)は、理学部6号館の北東に隣接する地点の調査で、こうした巨礫を黄色砂の下部に確認した⁽³⁾。そして、その調査地点の北半に巨礫の分布が限られることから、そこが西へ流れた土石流の南端であろう、と推定している。以来、黄色砂は、土石流に後続した洪水性の堆積物とみなされたり(例えば清水・古賀1997)、「土石流堆積物」(例えば浜崎ほか1995)とみなされたりしている。しかし、巨礫と黄色砂を分離して考えるにしても、両者の間には、人間の活動の痕跡は無論、地表面が安定していた痕跡も見出すことはできない(清水1985)。

3 砂質土石流堆積物

今回の調査地点で観察できた「土石流堆積物」(図140)は、花崗岩が風化して「まさ」化したものが再移動して堆積したと考えられる粗砂から中砂を主体とし、まれに直径1 m程までの花崗岩垂円礫を含む。そのうちで精査した部分は厚さ75~90cmで、上部は人工的に攪乱され欠けている。野外での色調と粒度の観察から、この砂層は細~中粒で灰白色の下部ユニット(厚さ25~30cm)と、中~粗粒で黄褐色の上部ユニット(厚さ50~60cm)に区分できる。砂層は塊状で、明瞭な堆積構造はみられないが、粒度や構成物質の違いに由来すると思われるほぼ水平の境界によって、層状構造が不明瞭ながら認められる。こうし

砂質土石流堆積物

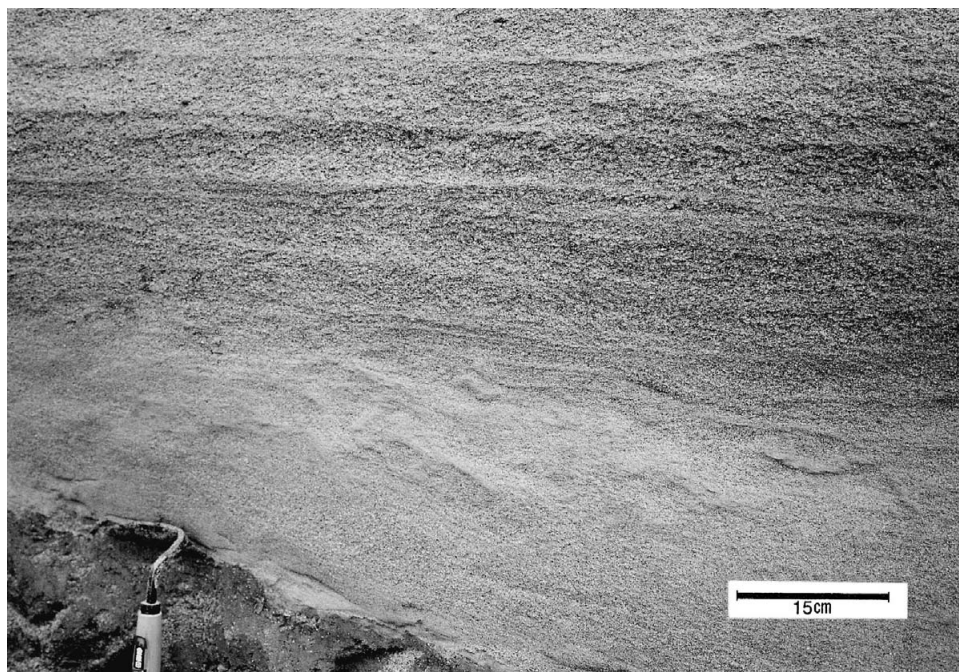


図140 調査地点東壁面の「黄色砂」

た境界で、下部ユニットは4帯に、上部ユニットは7～8帯に、区分できる。ここでは、この層状構造をなす層をバンドとよんでおく。下部ユニットと上部ユニットの境界は漸移する。基底は原地形の小さな凹凸を埋積しており、最下部のバンドは下位の白肌色の粘土層（厚さ1～4 cm）から逆級化して連続的に移化する。したがって、この基底の粘土から砂へ逆級化する泥層部分から下部ユニットさらに上部ユニットは一連の過程で堆積したものであり、層内に「長い時間間隙」を示すと考えられるような境界面は認められない。

「黄色砂」については、これまで地質学的な分析はほとんどなく、竹村ほか（1985）が、理学部構内の黄色砂の粒度組成を1例報告しているのみで、その後も粒度分析は試みられていない。そこで今回は、黄色砂から多数の試料を採取して（図141）、詳細な粒度分析をおこなった。我が国で見られる土石流堆積物は、さまざまな大きさの礫が泥質の基質に混在するのが普通である（増田1999）が、ここで報告するものは、花崗岩地域を発生域とした土石流であり、砂を主体とする、いわゆる「砂質土石流堆積物」であることが特徴である。こうした砂質土石流の粒度特性が詳しく調べられた例はこれまでにないといつてよい。

砂質土石流堆積物の粒度特性

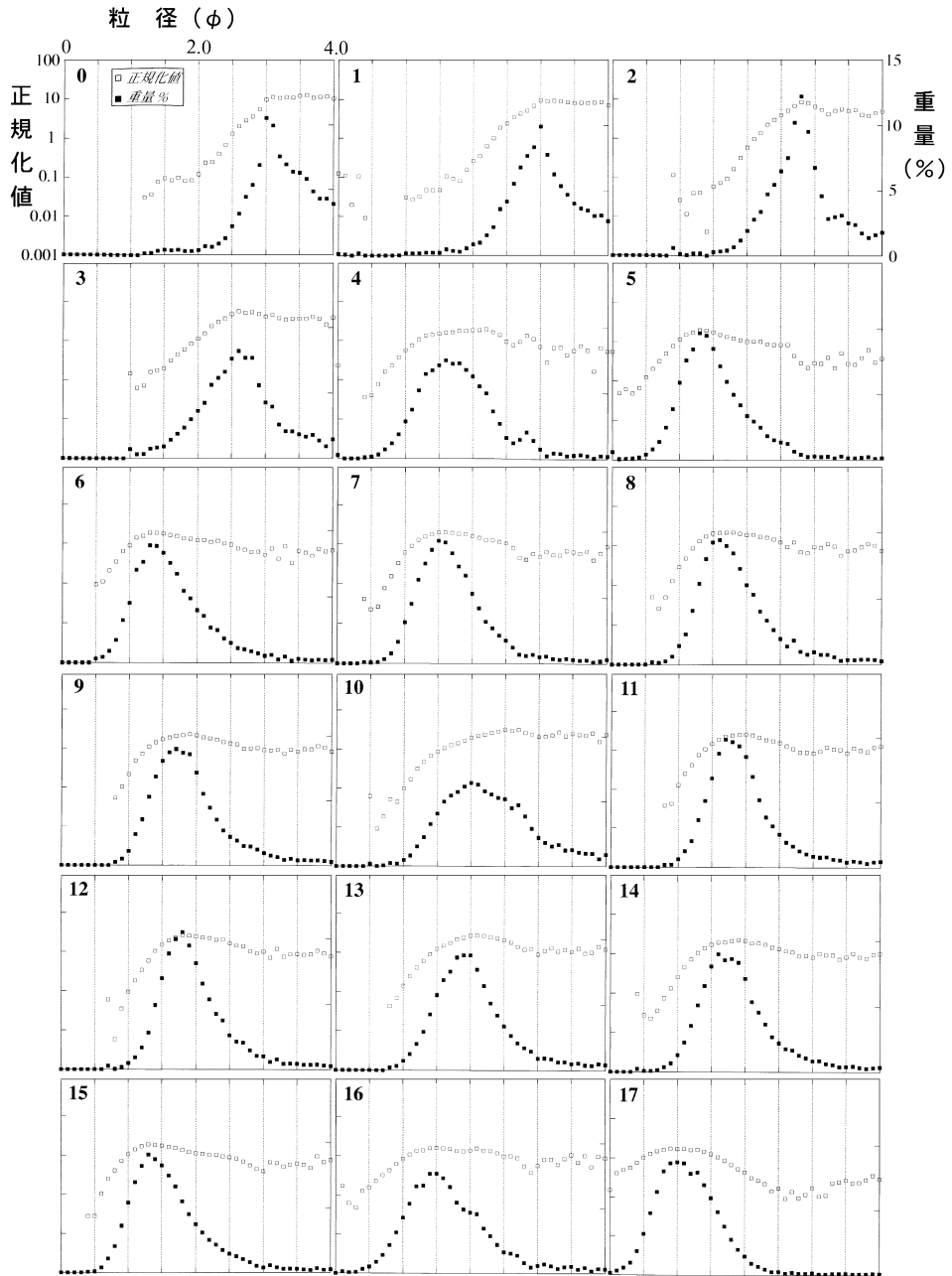


図141 各試料の粒度分布曲線（黒四角）と正規化曲線（白ぬき四角）

砂質土石流堆積物

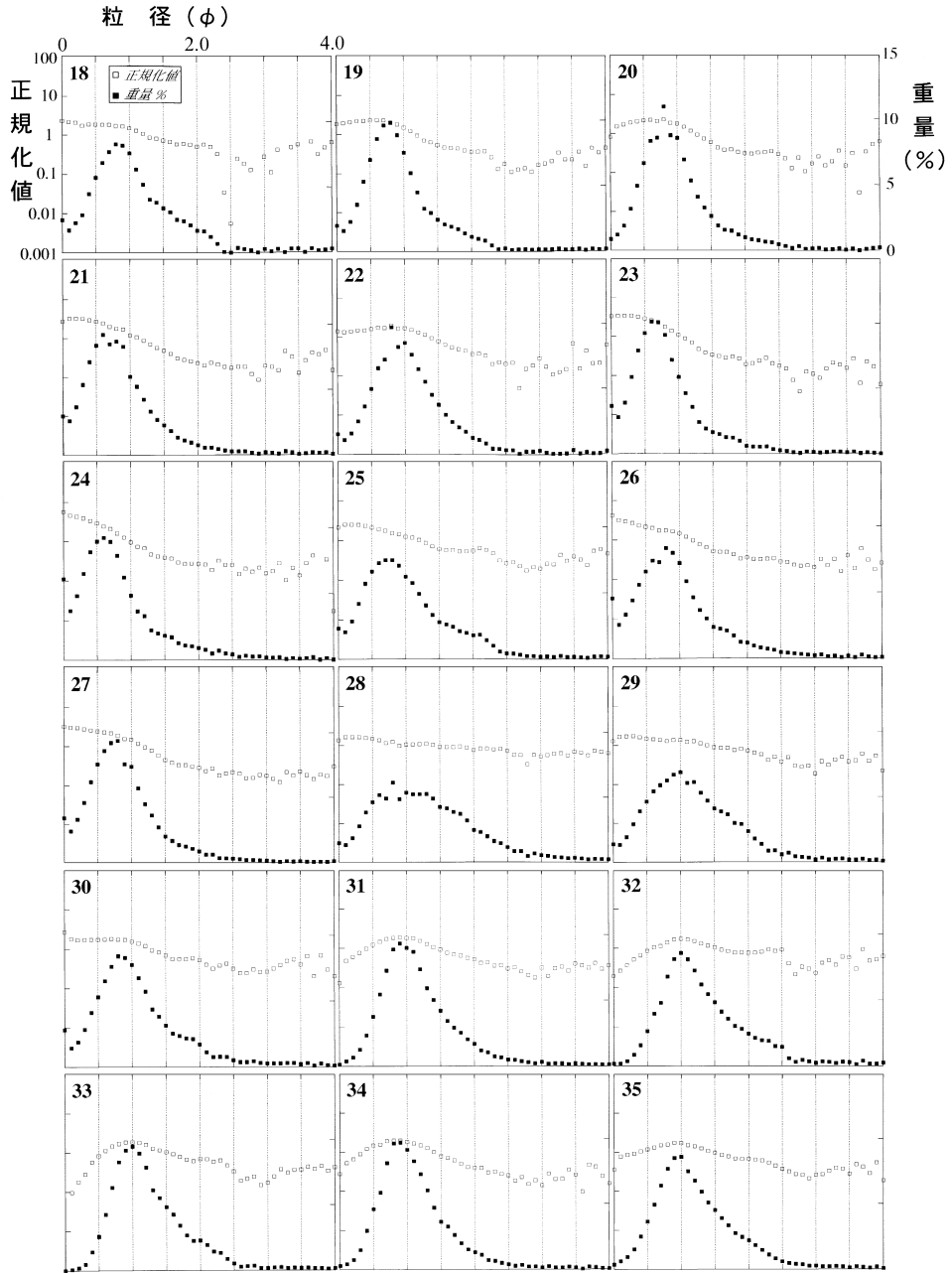


図141 つづき

4 試料採取と粒度解析法

粒度分析の試料は、発掘調査区の東壁に露出した黄色砂の厚さ約60cmの部分から、堆積構造と対応させながら、36個採取した(図141・142)。試料の粒度分布は自動沈降粒度分析器で求めた。

各試料の粒度特性は、通常おこなわれる古典的な方法(Folk and Ward 1957)と、新しい方法(正規化法:Endo and Masuda 1996;Endo et al. 1996;増田1997)をもちいて解析した。

Folk and Ward(1957)の方法は、求めた粒度分布形から、分布の5, 16, 25, 50, 75, 84, 95パーセントの粒径値を用いて分布形を表現する方法である。これに対し、新しい正規化法は、採取した垂直断面全体に対する各部分の粒度分布の割合を求める方法で、そのパターンで粒度分布の特性を識別する方法である。すなわち、採取した36個の分析結果を基にしてすべての粒径において重量の総和を求め、それを全体で100%になるようにしたものが、「全体の粒度分布」となる。この「全体の粒度分布」で、各試料の粒度分布を割った値(正規化値)をプロットしたものが、正規化した曲線となる。「全体の粒度分布」と比べて、各試料のどの粒径が濃集しているか、欠如しているか、あるいは同じ組成か、などを知ることができ、その特徴から試料を分類することもできる。また、「全体の粒度分布」を構成する複数の正規分布集団を、井口(1975)の方法で分離した。つまり、今回の場合で言えば、「黄色砂」として一括りにされてきた堆積物に対して、約60cmの層厚の下部から順次36点の試料を採取することによって、堆積物のミクロな構造を観察し、その堆積の成因を詳細に推理することが可能になるのである。例えば、洪水と土石流の堆積物が分離できるのか、洪水ならばその水流はどのように変化したのか、土石流ならばその粘性は変化していないのか、といったことを解明するためには有効な解析方法と期待される。

5 粒度解析の結果と解釈

分析で求めた結果は、粒度分布図に示した(図141)。粒度分布からFolk and Ward(1957)の方法によって、中央粒径、分級度(淘汰度)、歪度を計算した。その結果を黄色砂の垂直変動として示した(図142)。なお、粒径はファイ(ϕ)スケールで表示するので、値が大きくなるほど粒径が小さくなる⁽⁴⁾。

これらによると、中央粒径は土石流堆積物の最下部(約50cm)で最も小さく(3.2 ϕ)、そこから逆級化して下部ユニットでは1.4~2.1 ϕ 、上部ユニットでは0.6~1.1 ϕ で、わず

粒度解析の結果と解釈

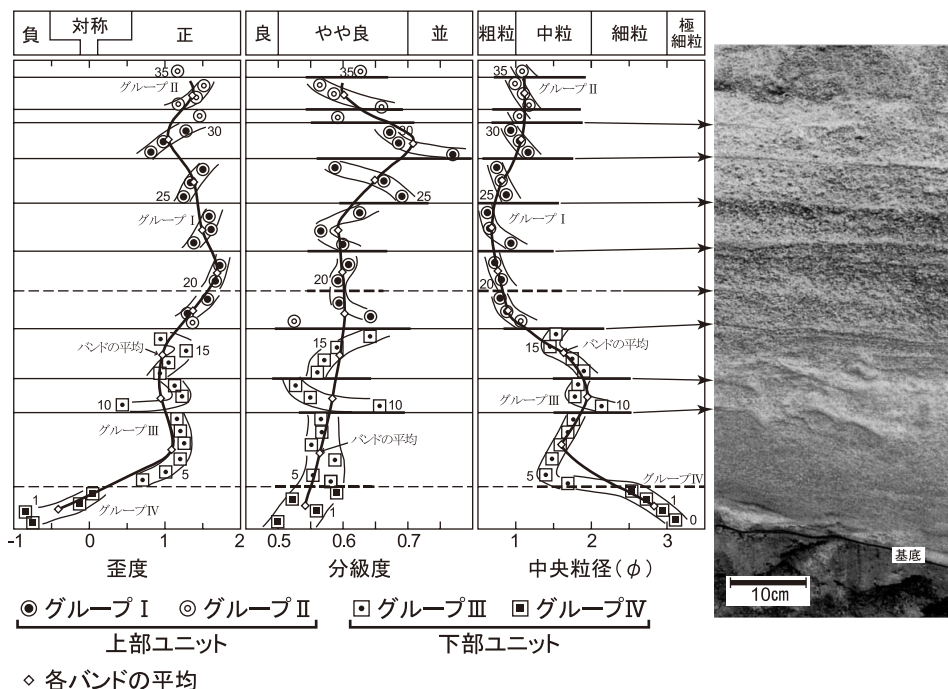


図142 「黄色砂」の粒度特性の垂直変動 (図中の数字は試料番号)

かながら正級化する。淘汰は下部ほどよい。歪度は、最下部では最頻粒径が平均粒径と同じか小さい対称～負の歪みで、それ以外の部分では最頻値が平均値を上回る正の歪みの分布を示す。

36個の各試料の粒度分布を基に全試料の総和として作成した「全体の粒度分布」は、中央粒径が 1.4ϕ となる(図143の曲線A)。この粒度分布は、2つの変曲点(p1, p2)をもつので、粒径に応じて3つの正規分布をする集団(正規分布集団)に分離できる。その3つの集団とは、全体の35%を占める粗粒な正規分布集団(同図の直線B)、全体の50%を占める中粒な正規分布集団(同図の直線C)、15%の細粒な正規分布集団(同図の直線D)である⁽⁵⁾。言い換えると、「全体の粒度分布」は、35%の粗粒集団と50%の中粒集団と15%の細粒集団から構成される。

「全体の粒度分布」で各試料の粒度分布を正規化した曲線(図141の□)は、粒径の正規化値が1より大きい値の時にはその粒径が全体のそれに対してより取り込まれ易く、1より小さいときにはその粒径がより欠乏していることを示している。その正規化した曲線

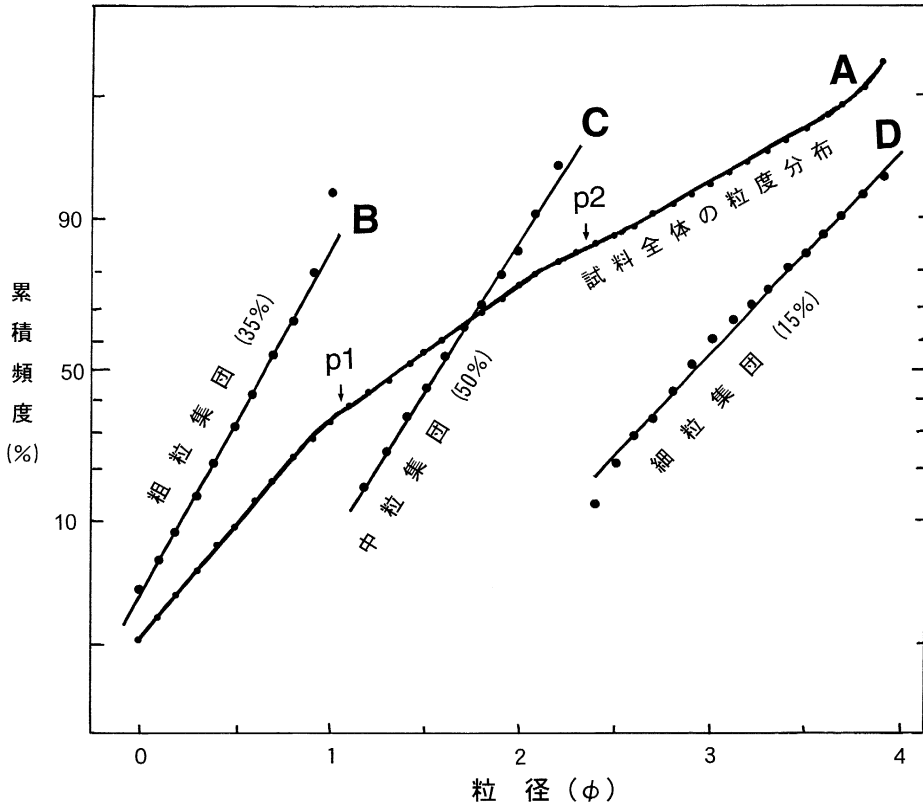


図143 正規確率紙上に表した粒度分布

の形状から4グループに分類できる(図144)。グループI(試料番号18~30)は、1.5 ϕ より粗粒になるに連れて正規化値が左上がりになり、1.5 ϕ より細粒な部分は1より小さな値でほぼ水平のパターンをとる。これは、グループIの堆積時には、1.1 ϕ より大きな粒子ほど大きい割合で取り込まれ(正規化値が粒径の大きいものほど大きい)、1.5 ϕ より小さな粒子は全体の組成と同じ割合で欠如していることを示す。グループII(試料番号17, 31~36)は、1.0 ϕ 付近にピークをもつ上に凸の曲線で、2 ϕ 以下はほぼ水平のパターンを示す。これはグループIIの堆積時に、1 ϕ 付近(0.5~1.5 ϕ)のやや大きな粒子が濃集し、それ以外の粒径の粒子は欠乏していることを意味する。グループIII(試料番号4~16)は、1.0~1.5 ϕ より粗粒な部分は左下がりで、2.5 ϕ より細粒な部分は1の値でほぼ水平のパターンをとる。これは、1.0~1.5 ϕ の粒子がわずかに濃集し、それより大きな粒

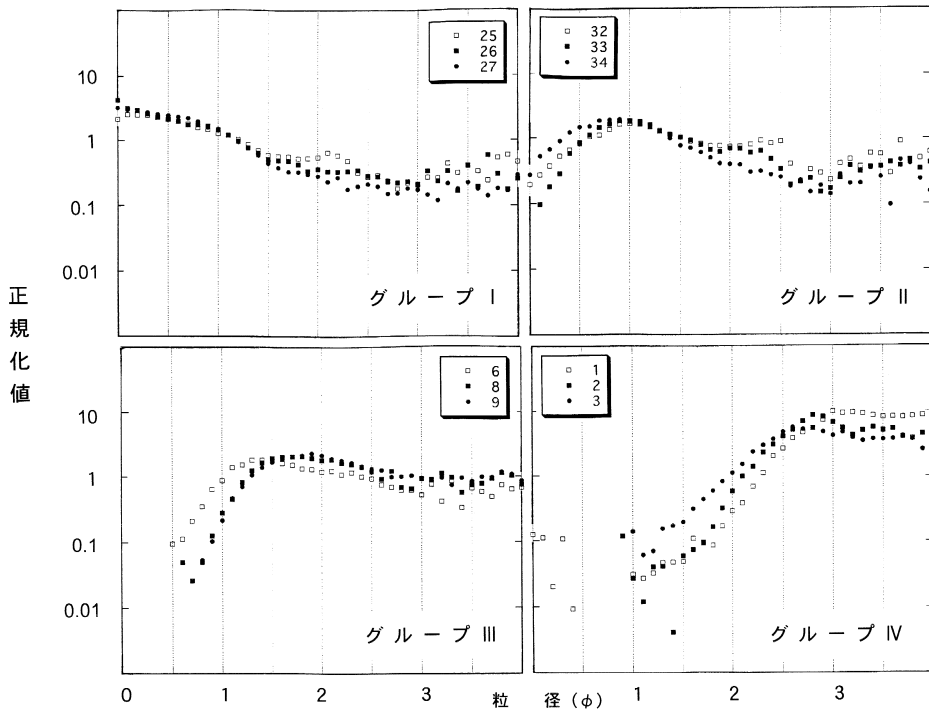


図144 正規化法によって分類した4グループの主な試料の曲線パターン（凡例は試料番号）

子ほど取り込まれにくく、 2.5ϕ 以下の小さな粒子は全体の粒度組成と同じ割合で含まれている（正規化値が1）ことを示す。グループIV（試料番号0～4）は、 2.75ϕ より細粒な部分は左下がり、それ以上はほぼ水平なパターンをとる。これは、 2.75ϕ よりも小さな粒子が一定の割合で、しかも全体の組成より多く取り込まれ、それ以上の大きな粒子は大きいものほど取り込まれにくいことを示す。

上下のユニットとこれらのグループとの関係をもてみると（図142）、上部ユニットはグループIとグループIIのパターンを、下部ユニットはグループIIIとグループIVのパターンを、それぞれ示す粒子群からなる。グループIとグループIIでは、グループIの方がグループIIよりもより大きな粒子を多く取り込むと考えると、両者は連続したグループと考えることができる。一方、グループIIIとグループIVでは、ある粒径よりも大きな粒子が選択的に排除され、それより小さい粒子はほぼ一定の割合で含まれるという共通の変化パターンを示す。これは「流れの中で浮遊する粒子が、流れの強さに応じて、流れで支持で

きなくなったより大きい粒子から順に選択的に除かれるときのパターン」(Endo and Masuda 1996; Endo et al. 1996) で説明できる。つまり、流れが比較的弱い状態で堆積したことを示している。しかし、グループⅣはグループⅢよりもはるかに細粒物質を多く含み、中央粒径なども違い、2つのグループ間にはギャップがある。

「全体の粒度分布」を構成する3つの正規分布集団を全体の粒度組成で正規化すると、粗粒集団は 1.1ϕ よりも大きい粒子がより多く取り込まれているグループⅠに、中粒集団は $1.0\sim 2.5\phi$ の粒子が取り込まれやすいグループⅢに、細粒集団は 2.75ϕ よりも小さい粒子がより多く取り込まれているグループⅣに、それぞれ一致する。このことは、黄色砂は、粒度特性からすると、上部ユニットのグループⅠと下部ユニットのグループⅢに大きく2分され、グループⅡはグループⅠに共通していてグループⅠとグループⅢの中間に位置づけられる一方で、グループⅣのパターンはグループⅢに近いが、先に述べたように、両者間にギャップがある、ということを示している。

6 級化構造と堆積過程

粒度特性の垂直変動(図142)を細かくみると、まず、グループⅢ・Ⅳからなる下部ユニットは、それぞれが逆級化から正級化を示す3つのバンドで構成されている。また、グループⅠ・Ⅱからなる上部ユニットは、少なくとも8つの逆級化したバンドから構成されている。すなわち、どちらも「多重逆級化層」で構成されていることがわかる。

黄色砂の最下部(図145)、つまり粘土層とグループⅣからなる部分は、河川の洪水氾濫堆積物で観察される粘土から砂への逆級化構造(増田・伊勢屋1985; 鈴木2000)に似る。この構造は、氾濫初期に洪水流に多量に含まれる風化物質の粘土がまず堆積し、その後、流速の増加にともなって浮遊物質の粒径が大きくなり、それが堆積してできる。一方で、土石流堆積物の基底部にも逆級化構造が認められることは知られている(Nielsen 1982; 増田2004)。この両者を区別する基準は確立していないが、氾濫堆積物の基底は純粋な粘土層で、土石流の基底のものは砂質泥層であることが多いように思える。従って現状では、黄色砂の最下部(図145)は、河川の洪水氾濫堆積物であろうと考えている。これは、すでに述べたグループⅣの粒度分布を正規化したパターンが、他のグループと区別されることから支持される。

上部ユニットにみられる多重逆級化層はトラクションカーペット(traction carpet)と呼ばれ、多量の粒子を含んだ高濃度の流れから堆積した水中高密度混濁流堆積物(高密度

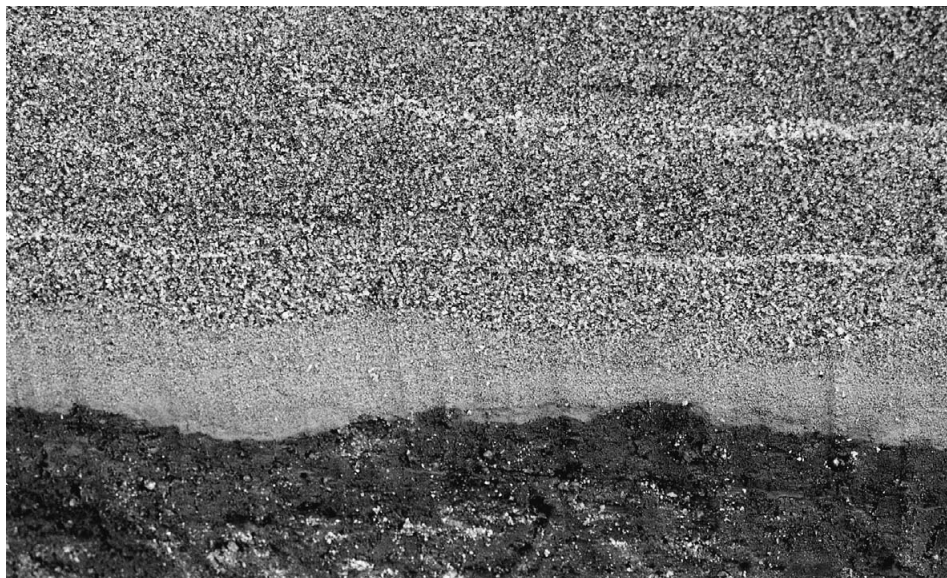


図145 「黄色砂」の下部ユニットの逆級化構造（写真の高さが約15cm）

タービダイト）や水中土石流堆積物に特徴的な堆積構造とされた（Lowe 1982；Hiscott 1994；Sohn 1997）。その成因については、高密度の流れの中で、小さな粒子が大きい粒子のすき間に落ち込んだ（Middleton 1970）、細粒なものが選択的にかつ連続的に堆積した（Sohn 1997）、などの考えがある（成瀬ほか2001；成瀬2004）。こうした過程では、粒度組成と流れの中を通過する粒子の量とともに、粒子のつくりだす連鎖構造が重要な役割を果たしているという指摘（高川2004；高川・増田2004）もある。また、速い流れの中で形成される高領域のベッドフォームであるアンティデューン（反砂堆）が多重級化構造をつくりだすことも知られている（宮田・田中2004）。

これまで水中で形成された高密度の重力流堆積物から報告されてきた多重逆級化層が、今回の例のように陸上での堆積物、とくに風化花崗岩起源の砂質土石流堆積物から見いだされたことは、成因を考える上でひとつの参考となろう。陸上の堆積物ではこれまで、火山砕屑物にこの種の逆級化層や級化層が見いだされ、それを堆積した流れは、土石流と河川流の中間的な濃度の流れ、つまり砂粒含有率の比較的高い流れである「ハイパーコンセントレイティッド流」と名づけられている（Smith and Lowe 1991；片岡2004）。ハイパーコンセントレイティッド流堆積物についてもその詳細な垂直粒度変動が解析されていない

ので、これ以上は言及できないが、今回の黄色砂全体をみてみると、粒径の小さい下部ユニットのうちでも最下部を除いた部分は、ハイパーコンセントレイティッド流堆積物ではないかと考えている。そして、本当の意味での砂質土石流堆積物は、上部ユニットだといえよう。

以上を総合すると、黄色砂は、基底部が洪水氾濫堆積物、下部ユニットの残りがハイパーコンセントレイティッド流堆積物、上部ユニットが砂質土石流堆積物、の3種の層から構成されており、つまり堆積させた流れの変化に対応した三層構造をしている。大雨による洪水の氾濫で最下部が堆積し、その後、上中流域の多くの地点で土砂崩れが発生して、それが集まって大規模な「土石流」となって、白川扇状地を流れ、調査地点でその一部が堆積したと思われる。「土石流」の性質は流下方向やその側方で多様に变化する。この黄色砂の場合、連続した下部ユニットと上部ユニットの累積は次のような流れから形成されたと考えられる。それは、①流れの前方がハイパーコンセントレイティッド流で、そのあとが土石流本体として流れたか、②土石流からハイパーコンセントレイティッド流が分化した (Sohn 2000) ものであるかである。しかし、陸上であることを考えると、②である可能性は少ない。したがって、ハイパーコンセントレイティッド流から下部ユニットが、続く土石流本体の堆積時に明瞭な多重逆級化層をもった上部ユニットが、それぞれ堆積したと考える。

7 おわりに

ここでは、「砂質土石流堆積物」の粒度分布の垂直変化を明らかにした初めての事例を提示し、さらにそこに多重逆級化構造を発見した。通常おこなわれる古典的な方法と新しい方法（正規化法）とを用いて粒度分布を解析し、さらに粒度特性の垂直変動を解析することで、堆積させた流れの情報を得ることをめざした。この研究方法では、さまざまな地域や堆積物における数多くの事例研究を比較・検討して体系化することが必要である。ここで示した研究例は、そのような体系化への第一歩である。中でも正規化法は、砂層の「部分」の粒度分布について、砂層の「全体」の粒度分布を考慮に入れて評価するという、自然の堆積物の粒度解析法としては、まったく新しい考えによるもので、今後、事例研究が広がることを期待している。

〔注〕

- (1) 伊藤淳史・富井 眞・外山秀一・上中央子 2005年 「京都大学北部構内B C 28区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 2000年度』, pp.133-208. (本年報第3章)
- (2) 富井 眞 2005年 「京都白川の弥生時代前期末の土石流」『京都大学構内遺跡調査研究年報 2000年度』, pp.225-262. (本年報紀要XVI)
- (3) 京都大学構内遺跡の東北部分にあたる北白川追分町遺跡に巨礫が存在することは、体系的な発掘調査がはじまるころから指摘されていたが、当初は歴史時代の土石流とも考えられていた(池田・石田1973)。
- (4) ファイ(ϕ)スケールは、地質学で用いられる粒径を表示する単位で、2mmを基準として負の指数関数(次式)で示したものである。 $\phi = -\log_2(d/d_0)$, $d_0 = 1\text{mm}$.
- (5) 例えば、図5の直線Cは、累積頻度では50%分を占めているp 1からp 2までの間を一つのまとまりとみなし、それを100%として再び分布をみてみたものである。

〔参考文献〕

- 浜崎一志・千葉 豊・伊藤淳史・鎮西清高・伊東隆夫 1995年 「京都大学北部構内B A 28区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 1992年度』, pp.65-125.
- 浜崎一志 1983年 「京都大学北部構内B D 30区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 昭和56年度』, pp.25-30.
- 井口正男 1975年 『漂砂と流砂の水理学』古今書院, 290 p.
- 池田 碩・石田志朗 1973年 「比叡平小起伏面2地点の黒土の年代 -日本の第四紀層の14C年(85)-」『地球科学』27巻4号, pp.150-151.
- 伊藤淳史 1995年 「京都大学構内遺跡における弥生前期水田の調査」『京都府埋蔵文化財情報』第58号, pp.1-8.
- 泉 拓良 1978年 「京都大学北部構内の地形復原 -縄文時代から弥生時代-」『京都大学構内遺跡調査研究年報 昭和52年度』, pp.43-48.
- 片岡香子 2004年 「ハイパーコンセントレイティッド流と堆積物」『堆積システムと堆積物』日本堆積学会, pp.457-477.
- 増田富士雄 1997年 「地層の粒度組成から水理条件を推定するための実験的研究」『平成7・8年度科学研究費補助金(基盤研究B)研究成果報告書』98 p.
- 増田富士雄 1999年 「透水層・滲水層のトレース:ダイナミック地層学からのアプローチ」『地下水技術』41巻10号, pp.1-15.
- 増田富士雄編 2004年 『堆積システムと堆積物』日本堆積学会, 512 p.
- 増田富士雄・伊勢屋ふじこ 1999年 「“逆グレーディング構造”:自然堤防帯における氾濫原洪水堆積物の示相堆積構造」『堆積学研究会報』22/23号, pp.108-116.
- 宮田雄一郎・田中凡子 2004年 「水路実験から見たアンチデューンの安定性と多重逆級化層の形成」『日本地質学会第111回学術大会講演要旨』O-112, pp.86.
- 成瀬 元 2004年 「重力流堆積物の堆積構造」『堆積システムと堆積物』日本堆積学会, pp.421-456.
- 成瀬 元・田村 亨・久保雄介・増田富士雄 2001年 「重力流堆積物とその構造」『堆積構造入門シリーズ』2号, 堆積学研究会, 147 p.
- 岡田保良・吉野治雄 1979年 「京大理学部遺跡B E 29区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 昭和53年度』, pp.17-38.
- 清水芳裕 1985年 「自然地形の変化と遺跡の形成過程」『第四紀研究』24巻3号, pp.183-188.
- 清水芳裕・古賀秀策 1997年 「京都大学北部構内B B 28区の発掘調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 1993年度』, pp.41-52.

砂質土石流堆積物の粒度特性

- 鈴木一久 2000年 「洪水氾濫の堆積学」『地団研専報』48号, 69 p.
- 竹村恵二・飯田義正・石田志朗 1985年 「北白川追分町遺跡の堆積物」『京都大学埋蔵文化財調査報告 -北白川追分町縄文遺跡の調査-』京都大学埋蔵文化財研究センター, pp.79-93.
- 高川智博 2004年 「逆級化のメカニズム」『堆積システムと堆積物』日本堆積学会, pp.496-512.
- 高川智博・増田富士雄 2004年 「“Filtering mechanism” による逆級化～無級化層の堆積」『日本地質学会第111回学術大会講演要旨』O-123, pp.87.
- 富井 眞 2003年 「京都大学本部構内A X22区の立合調査」『京都大学構内遺跡調査研究年報 1999年度』, pp.113-122.
- Endo, N. and Masuda, F., 1996: Grain size distributions of single transport: microdelta experiment and the diffusion model. *Jour. Geological Society Japan*, 102 (2), pp.105-115.
- Endo, N., Masuda, F. and Yokokawa, M., 1996: Grain size distribution of sediment carried by single transportation modes in an experimental microdelta system. *Sedimentary Geology*, 102(3/4), pp.297-304.
- Folk, R. L. and Ward, W. C., 1957: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Jour. Sedimentary Petrology*, 27, pp. 3-26.
- Hiscott, R. N., 1994: Traction-carpet stratification in turbidites - fact or fiction? *Jour. Sedimentary Research*, A64, pp.204-208.
- Lowe, D. R., 1982: Sedimentary gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Jour. Sedimentary Petrology*, 5, pp.279-297.
- Middleton, G. V., 1970: Experimental studies related to the problems of flysch sedimentation. Special Paper, *Geological Association Canada*, 7, pp.253-272.
- Nielsen, 1982: Alluvial fan deposits. In; Scholle, A. and Spearing, D. (eds.): *Sandstone Depositional Environments*. Memoir of AAPG (American Association of Petroleum Geologists), 31, pp.49-86.
- Smith, G. A. and Lowe, D. R., 1991: Lahars: volcano-hydrologic events and seposition in the debris flow-hyperconcentrated flow continuum. In; Fisher, R. V. and Smith, G. A. (eds.): *Sedimentation in Volcanic Settings*. Special publication of SEPM (Soc. Econ. Paleontol. Miner.; Society for Sedimentary Geology), 45, pp.59-70.
- Sohn, Y. K., 1997: On traction-carpet sedimentation. *Jour. Sedimentary Research*, 67, pp.502-509.
- Sohn, Y. K., 2000: Depositional processes of submarine debris flow in the miocene fan deltas, Pohang Basin, SE Korea with special reference to flow transformation. *Jour. Sedimentary Research*, 70, pp.491-503.