

磐梯山の崖錐斜面に分布する礫のファブリック

Fabric of Gravel on Talus Slope in Mt. Bandai

小花和宏之*・有賀雄高**・山本憲志郎***・松倉公憲****

Hiroyuki OBANAWA, Yutaka ARIGA, Kenshiro YAMAMOTO, and
Yukinori MATSUKURA

I はじめに

崖錐斜面は一般に乾燥地域に形成されるため、湿润地域である日本においてはあまり多く見られない地形である。しかし崖錐斜面は他の斜面に比べて斜面物質の供給、堆積、浸食速度が速く、斜面上の諸問題を考える上で適した地形である。崖錐斜面上の斜面移動プロセスとして、転・落石、乾燥岩屑流、土石流の3つが挙げられる(町田ほか, 1975)。その中でも特に転・落石と土石流は社会的に大きな被害をもたらすものであり、防災上でも重要なテーマである。そこで本稿では、磐梯山火口壁崖錐において、転・落石と土石流によって堆積したと思われる斜面を調査対象として、表層礫のファブリックについて計測した結果を報告する。

II 調査地

1) 磐梯山火口壁崖錐

磐梯山は福島県会津盆地東部、猪苗代湖の北約5 kmに位置する成層火山で、1888年に大規模な水

蒸気爆発が起こり、山体北側が巨大な崩壊を起こした。そのときに小磐梯山の山頂部が失われて北に開いた馬蹄形の爆裂火口(カルデラ)が形成された。その形状は東西の幅が約2.0 km、南北の幅は約2.5 kmである。火口壁の急崖は現在でも岩石がむき出しになっており、活発な岩屑生産が行われている。急崖基部には崖錐斜面が広く形成され、特に東側斜面によく発達している。その東側斜面の崖錐(以下、東側崖錐と呼ぶ)は北から南に向かって徐々に大きくなる形で連続しており、斜面長は10~300 m、比高は5~150 mという規模である。崖錐頂部ではシルトサイズの細粒物が見られ、基部では粒径が3 m近い巨礫も見られるが、崖錐表面は礫が卓越しており、起伏もあまりなく比較的滑らかに連続している。

2) 調査崖錐

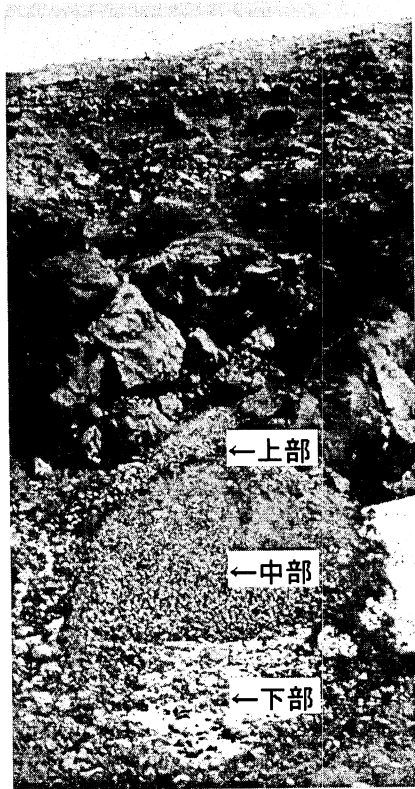
町田ほか(1975)によると、崖錐表面の物質移動・堆積プロセスとして、転・落石、乾燥岩屑流、土石流の3つが挙げられ、それぞれのプロセスによる堆積後の表層状態は異なるとされている。一般に、転・落石によって堆積した斜面においては斜面上部から下部に向かって粒径が増大していくgradingが見られる。ま

*筑波大学大学院地球科学研究科

**筑波大学第一学群自然学類(現在, 青年海外協力隊)

***筑波大学陸域環境研究センター

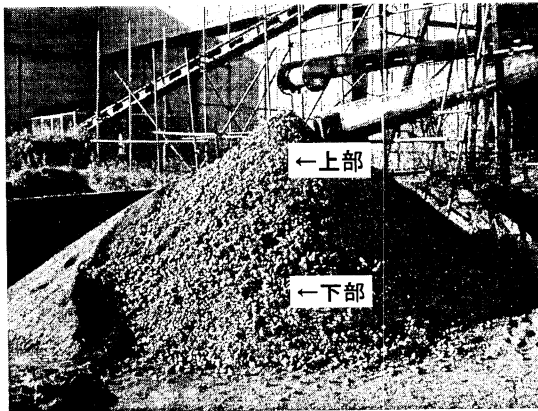
****筑波大学地球科学系



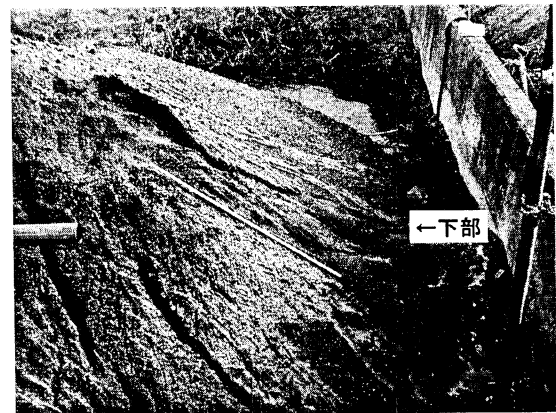
第1図 転・落石崖錐斜面



第2図 土石流崖錐斜面



第3図 転・落石実験斜面



第4図 土石流実験斜面

た、乾燥岩屑流による斜面は、相対的に粒径の小さい物質が斜面下部まで連続して縦の帯状に分布していることが特徴である。一方、土石流による斜面は、斜面上部においては両側に小規模な堤防上の起伏

を伴う、中心が凹型に削られた形状を持ち、斜面下部に向かって徐々に凹みが浅くなり、下部においては凸型のロウブ状の堆積部を形成する。その構成粒子は相対的に細粒である。

東側崖錐の表層においてもそれら3種の表層形態が認められた。堆積プロセスの判別が難しい崖錐もあるが、その中でも上記の堆積特徴により明らかに転・落石によって堆積したと思われる斜面(第1図, 崖錐斜面の斜面長は約70 m, 勾配は約32°)と, 土石流によって堆積したと思われる斜面(第2図, 斜面長は約120 m, 勾配は約32°)の2つの崖錐を調査崖錐とした。

3) 実験斜面

東側崖錐と比較するために, 小規模な模型斜面に転・落石による斜面と土石流による斜面を, 人工的に実験により製作した。転・落石による斜面を作る際には, 粒径の異なる3種の礫を用いた。それぞれの平均粒径は20 mm(以下, 大礫と呼ぶ), 12 mm(以下, 中礫), 9 mm(以下, 小礫)である。勾配が約33°の円錐状の砂山上に中礫を敷き詰め, その上部より上記3粒径の礫を重量比で1:1:1に混合したものを落下させ, 堆積させたものを転・落石実験斜面(第3図, 斜面長は約3.5 m)とした。土石流による斜面を作る際には, 小礫と岩粉(平均粒径, 0.65 mm)を用いた。先の砂山上に小礫と岩粉を混合したものを敷き詰め, 散水することで土石流を発生させ, その堆積したものを土石流実験斜面(第4図, 斜面長は約2 m)とした。

III 調査方法

1) ファブリックの測定

礫のファブリックとは, 礫が空間的にどのように存在, 配列しているのかを表すものであり, 具体的には長軸の走向, 傾斜の分布状態を表すものである。実際の測定手順としては, まず測定斜面上に礫径に応じて1×1 m~2×2 mの枠を置き, 斜面全体の走向, 傾斜を測定する。次に枠内の表層礫にスプレーラッカーで着色し(これは, 表層1層分の礫を測定するため), 枠内から大きい礫を60個選び, それぞれの長軸の走向, 傾斜および長軸, 中軸, 短軸径を測定するものである。

以上のような測定を, 東側崖錐の転・落石斜面と土石流斜面でそれぞれ斜面上部, 中部, 下部の計6地点と, 転・落石実験斜面の斜面上部と下部の2地点, 土石流実験斜面の1地点, 合計9地点で行った。それ

ぞれの計測地点は図に示してある。

2) ファブリック解析

ファブリック解析は固有値ベクトル解析法(Scheidegger, 1965; Mark, 1974)を用いて行った。この方法によって $S1, S2, S3, C, K$ などを算出した。ここで $S1, C$ は個々の礫の長軸方向がどの程度集中しているのかを示す指標である。

固有値ベクトル解析法は, 個々の礫の長軸方位と傾斜を計測し, 各々を単位ベクトル(x_i, y_i, z_i)で表し(ただし $x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = 1$), 行列 A

$$A = \begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix}$$

の固有値を $\lambda 1 \geq \lambda 2 \geq \lambda 3$, これに対応する固有ベクトルを $V1, V2, V3$ とした時,

$$S1 = \lambda 1/N, S2 = \lambda 2/N, S3 = \lambda 3/N$$

(ただし N は計測数)で与えられる。ここで $V1$ は計測された礫の長軸方向の平均方向を示す。 C, K は

$$C = \ln(S1/S3), K = \ln(S1/S2)/\ln(S2/S3)$$

で与えられる。また, 平均方向と斜面の流向との方位の偏差を $\Delta \theta H$ (時計回りに+, 反時計回りに-), 平均傾斜と斜面の傾斜との偏差を $\Delta \theta P$ (斜面下方へのインプリケーションを+, 斜面上方へのインプリケーションを-)として算出した。

IV 測定結果

礫径の測定結果を第1表に示す。先に述べた9地点における礫について, それぞれの長軸, 中軸, 短軸径, 及び短軸/中軸, 中軸/長軸の値の平均値を求めた。崖錐斜面の転・落石斜面上部における長軸の値は98 mm, 斜面中部で131 mm, 下部で203 mmであり, 土石流斜面上部における長軸の値は89 mm, 中部で111 mm, 下部で120 mmである。実験斜面の転・落石斜面上部における長軸の値は54 mm, 斜面下部で56 mmであり, 土石流斜面における長軸の値

第1表 礫の粒径, ファブリックパラメーター, 形状

		計測地点								
		崖錐斜面					実験斜面			
		転・落石斜面			土石流斜面		転・落石斜面		土石流斜面	
		斜面上部	中部	下部	斜面上部	中部	下部	斜面上部	下部	斜面下部
粒径	長軸(mm)	98	131	203	89	111	120	54	56	27
	中軸(mm)	70	94	156	64	84	94	36	39	18
	短軸(mm)	50	72	113	44	59	64	22	28	13
	短軸/中軸	0.72	0.76	0.74	0.69	0.70	0.69	0.62	0.72	0.76
	中軸/長軸	0.73	0.73	0.77	0.73	0.74	0.77	0.69	0.70	0.65
ファブリック パラメーター	S1	0.47	0.51	0.39	0.40	0.58	0.55	0.55	0.49	0.55
	S2	0.43	0.41	0.36	0.38	0.32	0.35	0.32	0.34	0.33
	S3	0.11	0.09	0.25	0.22	0.11	0.11	0.14	0.17	0.13
	C	1.47	1.78	0.46	0.61	1.69	1.63	1.40	1.05	1.47
	K	0.06	0.14	0.24	0.13	0.56	0.40	0.69	0.51	0.53
	$\Delta \theta H(\text{deg.})$	40.5	4.1	-51.4	-44.4	-0.7	-14.9	-52.2	-41.2	-33.8
$\Delta \theta P(\text{deg.})$	-14.1	-8.9	-9.3	-26.7	-8.5	-4.7	-21.7	-19.4	-13.1	
形状	SPHERE(%)	43	57	55	33	47	50	20	33	18
	ROD(%)	25	20	15	25	13	12	22	32	27
	DISC(%)	25	15	27	38	33	33	35	33	23
	BLADE(%)	7	8	3	3	7	5	23	2	32

は27 mmである。実験斜面で測定した長軸値は、実験材料の平均粒径(大礫20 mm, 小礫9 mm)よりもかなり大きい値をとっているが、それは実験材料の平均粒径は篩を用いて求めたものであり、礫の中軸径の平均値を示しているためである。

ファブリック解析の結果を第1表に示す。計測地点ごとにS1, S2, S3, C, K, $\Delta \theta H$, $\Delta \theta P$ を求めた。個々の礫の長軸方向がどの程度集中しているのかを示す指標であるS1, Cを見ると、崖錐斜面の転・落石斜面上部におけるS1, Cはそれぞれ0.47, 1.47, 斜面中部で0.51, 1.78, 下部で0.39, 0.46であり、土石流斜面上部においては0.40, 0.61, 中部で0.58, 1.69, 下部で0.55, 1.63である。実験斜面の転・落石斜面上部においては0.55, 1.40, 斜面下部で0.49, 1.05, であり、土石流斜面においては0.55, 1.47である。また、長軸の平均方位と斜面の流向の偏差である $\Delta \theta H$ と、平均傾斜と斜面の傾斜との偏差である $\Delta \theta P$ を見ると、崖錐斜面の転・落石斜面上部における $\Delta \theta H$, $\Delta \theta P$

はそれぞれ40.5, -14.1, 斜面中部で4.1, -8.9, 下部で-51.4, -9.3であり、土石流斜面上部においては-44.4, -26.7, 中部で-0.7, -8.5, 下部で-14.9, -4.7である。実験斜面の転・落石斜面上部においては-52.2, -21.7, 斜面下部で-41.2, -19.4, であり、土石流斜面においては-33.8, -13.1である。

V 考察

第1表に示したように、崖錐斜面においては、転・落石斜面, 土石流斜面ともに斜面上部から斜面下部に向かって粒径が大きくなっている。その傾向は長軸, 中軸, 短軸全てで見られる。しかし、転・落石斜面の方が土石流斜面よりも礫径の増加率が大きい。つまり、転・落石斜面の方が土石流斜面よりも分級が発達している。この理由は以下のように考えられる。転・落石運動では粒子の重量が大きい(すなわち粒径が大きい)方が運動エネルギーが大きく、斜面下部まで転が

りやすく、分級されてgradingが発達する。さらに、崖錐上部に相対的に細粒物が、崖錐下部に粗粒物が堆積すると、礫と礫の間のすき間(間隙)も崖錐上部が小さく、崖錐下部が大きくなる。すると、小さい礫は崖錐上部の小さな間隙に捕らえられて停止するのに対し、大きな礫は小さな間隙では捕らえられず、大きな間隙がある崖錐下部まで転がっていく。そのような作用によって分級がさらに発達する。それに対し、土石流運動では斜面上部に堆積していた粒径の小さい礫が、水や細粒物質とともに斜面下方まで運搬されて分級を悪くする。以上のような転・落石運動と土石流運動の特徴の差が、転・落石斜面の方が土石流斜面よりも礫径の増加率が大きくなる理由と考えられる。一方、転・落石実験斜面においては斜面上部と下部に明確な粒径の増大が認められないが、これは斜面長が短いため礫が十分に転がらず、分級がよく発達しなかったためと考えられる。

次に、計測した礫の形態をZingg(1935)による分類にしたがってSPHERE, ROD, DISC, BLADEの4種類に区分した(第1表)。転・落石崖錐斜面、土石流崖錐斜面ともに見られる傾向として、斜面上部から下部に向かってSPHERE礫は増加し、ROD礫は減少する、ということが挙げられる。これは、球形の礫は転がる時も土石流で運ばれる時も抵抗が少ないため、斜面下方まで移動する確率が高く、逆に、棒状の礫は引っかかりやすいため斜面上部で停止する可能性が高いためだと考えられる。しかし、転・落石実験斜面を見ると、SPHERE礫とROD礫はともに斜面下方に向かって増加している。ROD礫が増加しているのは、斜面長が短くて分級が不十分であったためだと考えられる。

次に、第1表に示したファブリックデータを検討する。個々の礫の長軸方向がどの程度集中しているのかを示す指標であるSI, Cに注目すると、崖錐斜面の転・落石、土石流両斜面のどちらも、斜面上部から下部にかけて明確な傾向は示していない。転・落石崖錐斜面では、SI, Cともに上部から中部にかけてわずかに増加し、中部から下部にかけて大きく減少しているのに対し、土石流崖錐斜面では、上部から中部にかけて大きく増加し、中部から下部にかけてわずかに減少している。このようにファブリックに明確な傾向が見

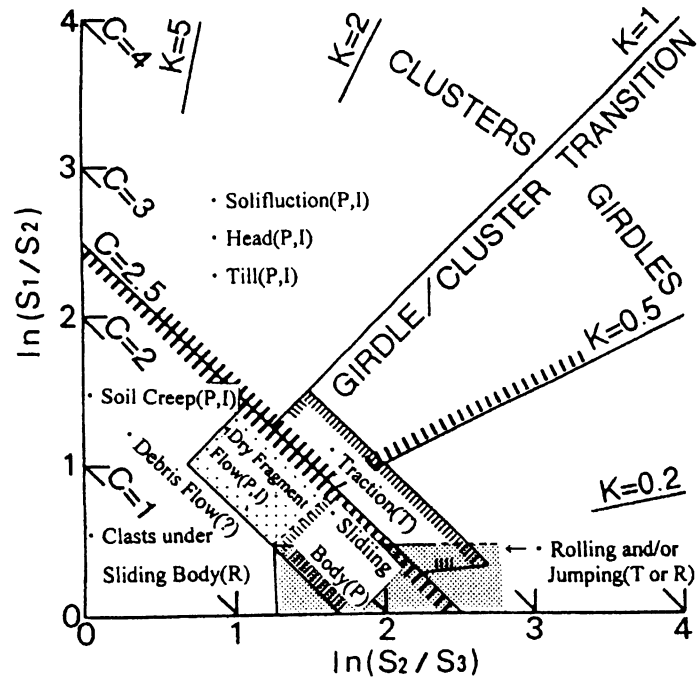
られないのは、第1表に示したように、計測礫のうち約70~80%の形状がSPHERE, DISCという、長軸と中軸の値が近い、すなわち長軸の方向性が曖昧になりやすい形状であり、ファブリックにも強い傾向が現れなかったためと思われる。

長軸の平均方位と斜面の流向の偏差である $\Delta\theta H$ を見ると、これも転・落石、土石流崖錐斜面ともにばらばらの値を示しており、明瞭な傾向は見られない。その原因は、上述のように長軸の方向性が弱いためと思われる。平均傾斜と斜面の傾斜との偏差である $\Delta\theta P$ をみると、全ての計測場所においてマイナスの値を示している。 $\Delta\theta P$ がマイナスということは、礫が斜面上方へのインプリケーションを示しているということである。これは、転・落石による移動、土石流による運搬のどちらにおいても、礫の停止時に斜面下方部の礫先端が何かに引っかかり、つんのめる形で斜面上方の部分が浮き上がる様子を想像させる。また $\Delta\theta P$ の値の絶対値は、 20° 以下という比較的小さいものが多い。この値が小さいということは、礫の長軸方向の傾斜が斜面傾斜に近いことを示すが、これはやはり、礫が停止するときは重力に対して最も安定な状態、すなわち長軸と地面が平行な状態になるためであろう。

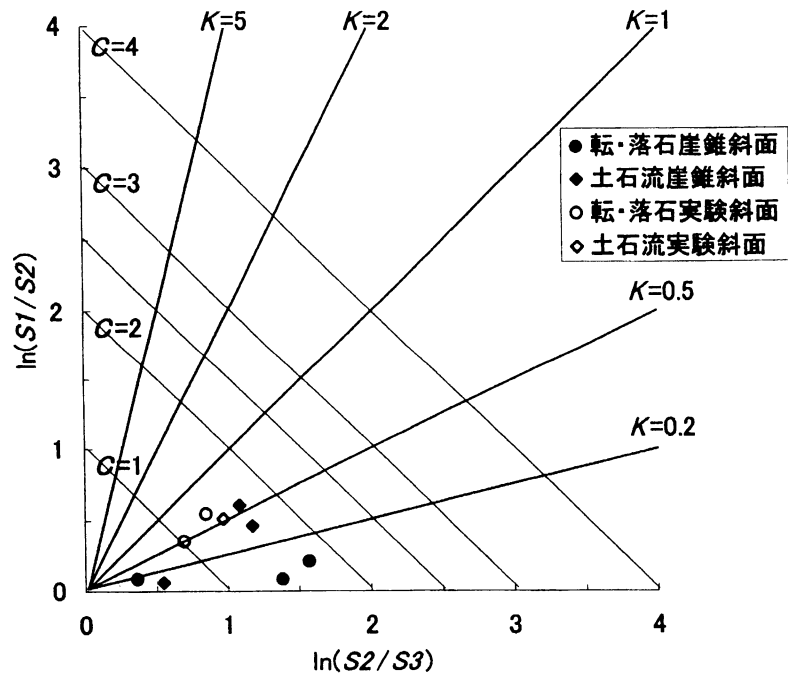
算出されたSI, S2, S3, C, KをLogarithmic Ratio Plot(Woodcock, 1977)上にプロットすることで、堆積プロセスを推定することができる(第5図, 山本, 1998)。今回の測定結果の分布を第6図に示した。これを第5図と比較してみると、転・落石崖錐斜面下部および転・落石実験斜面のデータは、第5図の分布と比較して大きく外れているが、その他のデータはほぼ同様な分布をしている。転・落石実験斜面に関しては、やはり斜面長の長さにより分級が不十分で、ファブリックも十分に発達しなかったであろう。

VI まとめ

転・落石崖錐斜面、土石流崖錐斜面ともに、斜面上部から下部に向けて粒径が増加するが、その増加割合は転・落石斜面の方が大きい。その原因は、転・落石運動と土石流運動の形式の違いによるものであると考えられる。



第5図 様々な斜面プロセスによって移動した礫の, Logarithmic Ratio Plot上での分布 (山本, 1998)
 (かっこ内の文字は配列タイプを示す; P: Parallel, R: Random, T: Transverse, I: Upslope imbrication)



第6図 Logarithmic Ratio Plot上における計測礫の分布

礫の形態に着目すると、斜面上部から下部に向かってSPHERE礫は増加し、ROD礫は減少する、という傾向が見られる。これは礫形態の違いによる斜面上での運ばれやすさの違いを反映していると考えられる。

ファブリックデータに関しては、転・落石崖錐斜面、土石流崖錐斜面ともに、明確な傾向は見られない。これは、計測礫形態の大部分がSPHERE、DISCという、長軸と中軸の値が近い、すなわち長軸の方向性が曖昧になりやすい形状であり、ファブリックにも強い傾向が現れなかったためだと思われる。

*S1, S2, S3, C, K*のLogarithmic Ratio Plot上における分布を見ると、山本(1998)による様々な斜面プロセスによって移動した礫のLogarithmic Ratio Plot上での分布に調和的である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、筑波大学自然科学類4年の柴山卓史氏、赤崎久美子氏には現地調査、斜面実験において協力して頂きました。また、地形学専攻の皆様にも大変お世話になりました。これらの方々に、深く感謝致します。

文献

- 町田 貞・松本栄次・石井孝行 (1975) : 足尾荒廃地における崖錐の形成プロセス. 地理学評論, 48, 768~783.
- 山本憲志郎 (1998) : 斜面傾斜および礫のファブリックと斜面プロセスの関係. 地形, 19-4, 243-259.
- Mark, D.H. (1974) : On the interpretation of till fabrics. *Geology*, 2, 101-104.
- Scheidegger, A. E. (1965) : On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 525-C, 164-167.
- Woodcock, N. H. (1977) : Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Bulletin of the Geological Society of America*, 88, 1231-1236.
- Zingg, Th. (1935) : Beitrag zur Schotteranalyse. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 15, 39-140.