講座

テフラ学 (第 3 回) : テフラの再堆積

片岡 香子^{*1, a}・長橋 良隆^{*2}

キーワード: テフラ, 再堆積, 火山砕屑堆積物, ラハール

I. はじめに

火山噴火とその産物を人の一生になぞらえるのは妙かもしれないが、あえて例えるのなら、火山地下に閉じ込められたマグマが地表に顔を出すという噴火とは、人の誕生の瞬間である。プリニー式噴火の場合、数時間から数日で終息する火山噴火とそこから降下・堆積したテフラ層は、ある種、手のかかる時期の子どもといったところだろうか。人ならば、この頃は、周囲に優しく扱われ、もっとも「ちやほや」される良い時間である。この噴火に直接的に関わる現象や噴出物を研究の対象とすることは、周辺の研究者からみるともっとも華やかにみえる。噴火に直接的に関わる初生的作用 (primary process) やその産物である溶岩や火砕堆積物に関する研究は火山学の核である。給源近傍ではなくとも、初生堆積したテフラ層の層序学、それに基づく対比・編年学は、やはりテフラ研究の主流である。このような初生的作用に関する研究については既に多くの論文が存在し、教科書にも詳しく解説されている。

さて、人は成人し、齢を重ね、最期を向かえるまでの道のりはやや長い。その過程で悲喜こもごものさまざまな経験をするようになるが、これは噴火後 (初生堆積後) の現象に例えてもよいだろう。初生的に一旦堆積したテフラ粒子・テフラ層は、噴火後も数年・数十年・数百年・数千年という単位で、降雨や河川作用などによって打ち砕かれ、突発的にも恒常的にも再移動し、時間空間的に元と異なる場所に再堆積する。再堆積性のテフラ層は地層中にもしばしば見かけられ、場合によっては初生堆積したテフラ層よりも分厚く堆積し、何らかの主張

をしている。しかし、これらはなかなか主役に躍り出ることはない。ここでは、多くの研究者が見向きもしない、あるいは取り扱いに困惑するであろう、この「テフラの再堆積」を取り上げよう。再堆積は「二次堆積」・「二次移動」ともいうことができ、英語では rework (ing) や resedimentation, remobilization である (本講座第 1 回「用語法」の図 1: McPhie *et al.*, 1993)。再堆積は噴火や層序に関する初生的情報をかき消すような「悪役」的印象が少なからずある。しかし、実は、再堆積したものを含んだ地層をきちんと読み解くことにより、噴火後の地表環境の変容が復元でき、ついには噴火様式や噴出規模などの給源火山の情報までもが理解できる。なお、以後本論では、「テフラ」はテフラ粒子やテフラ物質を指し、その堆積物についてテフラ層と記載的に呼ぶ (講座第 1 回「用語法」を参照)。また、ここでは主として陸水成・海成の再堆積を扱う。風成・乾陸成環境での再堆積については、第 7 回「肉眼視出来ないテフラ (クリプトテフラ) の認定と評価」で触れる。

II. 再堆積に関する用語

噴火時から噴火後において、テフラや溶岩などの火山噴出物は水流作用により侵食され、再度移動し、初生的作用で定置した地点から離れたところへと再堆積する。このような移動と拡散は、空間的だけでなく時間的にも起こる。

なかでも噴火時・噴火直後に水を媒介として大量の土砂移動をとまなう現象は、1) ラハール (lahar: インドネシア語が語源、低緯度多雨地域)、2) 火山泥流 (volcanic mudflow: 日本ではしばしばこう呼称される、中

2013 年 7 月 22 日受付。2014 年 3 月 22 日受理。

*1 新潟大学災害・復興科学研究所 〒950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050。

*2 福島大学共生システム理工学類 〒960-1296 福島市金谷川 1 番地。

*a Corresponding author: kataoka@gs.niigata-u.ac.jp

緯度地域), 3) ヨークロイプまたはヨークフロイプ (jökulhlaup: アイスランド語, 氷河の発達が顕著, 高緯度地域) など, 地域によってさまざまな名称がある。ラハールという用語は, 火山学的にも堆積学的にもしばしば使われるが, 特定の流れの状態を示す用語ではなく (Smith and Lowe, 1991), 火山性の土石流・泥流・hyperconcentrated flow (土砂流や高密度洪水流, 掃流状集合流動とも呼ばれるが以下本論では粒子濃集流とする)・洪水流を含む総称であり, 噴火時もしくは噴火後に降雨や融雪, 火口湖・カルデラ湖・ダム湖決壊などによる水をとまって発生する火山土砂の流れ現象 (イベント) を言う。また, この流れの状態は上流から下流へ, あるいは同一地点でも時間的に変化することがある。

ラハールや火山泥流という名称は, イベントやその発生原因がある程度分かっているものを指すため, 現行過程や若い時代の地層には使いやすい。一方, 給源火山体や原地形も残さないような, 古い時代の地層には不向きでもある。例えば, 噴火後ラハールイベントが落ち着き, 通常の河川に戻つつある状態でも多くのテフラが再移動・再堆積し, 地層を形成することもある (図 1, 図 2-a)。例えばその場合, それをラハール起源の堆積物とは厳密には呼称できない。つまりイベントとして再堆積し (すなわちラハールにより) 形成されたものはラハール堆積物と呼ぶことができるが, その一方で成因やイベントの種類が不明な場合は, 再堆積性火山碎屑堆積物 (reworked/resedimented volcanoclastic deposits), や二次的火山碎屑堆積物 (secondary volcanoclastic/pyroclastic deposits), 再堆積性テフラ層 (reworked/resedi-

mented tephra bed/layer) などと記載的用語を用いて呼称するのがよいだろう。

III. 再堆積するテフラ

1. 陸上での水流作用による再堆積

フィリピンで 1991 年に起きたピナトゥボ火山の噴火直後には, 雨期の度にラハールが発生した (Newhall and Punongbayan, 1996)。噴火十数年後には, ラハールの発生は落ち着いているものの火砕物供給過多の状況は続いており (田村・山越, 2008; Gran *et al.*, 2011 など), 主として河道周辺においてテフラの再堆積が起きている (図 2-a, b)。ピナトゥボ火山の例からは, 火山周辺地域に一度定置した降下火砕堆積物や火砕流堆積物がラハールや河川作用により再堆積し, 1) ラハールを含めた再堆積が噴火継続時間に比べ長期間続くこと, 2) ラ

図 1 火山噴火時・噴火後における碎屑物供給量の時間的変化とラハール・再堆積作用の時間的定義

図 2 フィリピン共和国ピナトゥボ火山 1991 年噴火後の河川堆積したテフラ層

a: Tabun 川上流 (N15°12'59.5", E120°32'15.9", 2006 年 2 月 28 日撮影)。浅い網状流路で平水時でも火山灰・軽石が運搬・堆積する。b: Sacobia 川 (Bamban 川) のラハール堆積物 (N15°16'39.2", E120°45'34.0", 2006 年 2 月 28 日撮影)。クライミングリップル葉理が顕著に発達し, 洪水時に堆積したことを物語る。

ハール堆積物が降下火砕物や火砕流堆積物の分布域をししばし超えて分布すること, 3) 再堆積したテフラが大量であること, 4) 発生要因や堆積過程が多様であること, が直接的に理解された (Newhall and Punongbayan, 1996). 1) から 3) はラハール堆積物の時間空間的占拠の大きさを示唆し, 再堆積した火山砕屑堆積物が, 地層中から見出される可能性がより高いことを暗示している. 4) は堆積物の層相が多様であることを示唆する.

このようなテフラの再堆積は多くの噴火後, 普遍的に起こり, それは古い時代の地層にも記録されている. 1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて Gary A. Smith が, 通常の砕屑物 (すなわち非火山性堆積物) に用いられた堆積相解析の手法を, 再堆積した火山砕屑堆積物に先駆的にまた系統的に導入した (Smith, 1987, 1988, 1991). アメリカ北西部カスケード地域の中新統 Ellensburg 累層や Deschutes 累層などの火山砕屑堆積物を対象とし, その堆積相解析から, カスケード山脈 (火山群) からの数百万年間にわたる火砕物質の供給とそれによる周辺の河川システムの空間的变化を明らかにし, 火山活動が河川システムに与える負荷を議論した. 日本においては, 鮮新・更新統に含まれる珪長質な広域テフラ層の堆積学的検討が 1990 年代後半頃からなされてきた (Nakayama and Yoshikawa, 1997; 中前・中山, 1998; Kataoka and Nakajo, 2002; Kataoka, 2005). Smith の一連の研究と大きく異なるのは, 遠方テフラ層中の (多くは基底部の) 降下テフラユニットを明確に抽出したことにより, ある 1 回の大規模な噴火に対する (つまり 1 対 1 の) 再堆積作用やそれによる広域的な河川システムの変化を論じたところである.

講座第 2 回「テフラ層の同時堆積性について」でも触れたが, 以下では, 恵比須峠-福田テフラ層 (吉川ほか, 1996; 長橋ほか, 2000) を取り上げ, 具体的な再堆積過程について見てみよう. このテフラ層では, 遠方相の再堆積部の母材となった軽石質火砕流堆積物の上流域 (つまり噴出源近傍) での存在と, 下流域での水流による再堆積作用との関係が層序学的・堆積学的に明瞭に示されている (長橋ほか, 2000; Kataoka and Nakajo, 2002; 講座第 2 回「テフラ層の同時堆積性について」を参照). 遠方テフラ層は大阪層群・古琵琶湖層群・東海層群・魚沼層群において陸水成層中に挟在し, 再堆積部は粒度変化に富み, 塊状無層理のほかトラフ型斜交層理・リップル葉理・平行層理などさまざまな堆積構造を呈し, 複数のユニットから構成される (図 3, 4). これらは, 粘着性土石流堆積相・粒子濃集流堆積相・河道充填堆積相・氾

濫原堆積相・洪水堆積相と解釈できるものである (Kataoka and Nakajo, 2002).

噴出源に比較的近い東海堆積盆では, テフラ層の垂直的变化から, 1) 噴火以前における蛇行河川システムの発達→2) 水蒸気マグマ噴火とプリニー式噴火による火山灰や co-ignimbrite ash の降灰→3) 土石流や粒子濃集流の発生→4) 砕屑物の過剰供給による網状河川システムの発達とそこでのテフラの再堆積→5) 河川系を通じたテフラ供給量の減少にともなう蛇行河川システムへの回帰, という時間的变化が読みとれた. 古琵琶湖・大阪堆積盆は給源火砕流堆積域からより下流域にあったので, そこでは土石流や粒子濃集流による堆積物は認められず, 給源からの距離にしたがい再堆積部の層厚が減じ, 洪水堆積物の挟在が少なくなるという空間的变化が読み取れる. さらに噴出源より西側と東側の堆積盆を比較すると, 東側の魚沼堆積盆は給源火砕流堆積物に最も近くに位置していたにも関わらず, 上流に分布する火砕流堆積物の体積が給源西側よりも小さかったため (長橋ほか, 1996; 長橋, 1998), 堆積盆に供給された再堆積性テフラが少なかったものと考えられる (図 3).

このような鮮新・更新統のテフラ研究に基づき給源火砕流堆積域と遠方沖積域とを結ぶ物質供給ルート (すなわち当時の古地理・古地形) と運搬・堆積過程を議論したものに, 黒川 (1990), Nakayama and Yoshikawa (1997), 長橋ほか (2000), Kataoka and Nakajo (2002), Kataoka *et al.* (2009) などがある. これらの研究によると, 噴出源から 100 km 以上遠方の沖積域に再堆積した厚層のテフラ層の多くは, 堆積盆上流に分布する非溶結の火砕流堆積物に由来する. また大阪層群・古琵琶湖層群・東海層群中のテフラ層の層相記載から, 降下テフラ部 (初生的堆積作用) と再堆積テフラ部の層厚を比較すると, 後者が前者を上回るものが半数以上を占める (図 5). このうち厚層のものは数 m から 10 m ほどの再堆積部をもち, 再堆積部に含まれる中礫サイズの軽石は降下テフラ部には認められない (片岡・長橋, 2012). 片岡・長橋 (2012) は, 大阪層群・古琵琶湖層群・東海層群中の非海成層中に挟まる遠方テフラ層の層相について検討し, 複数の堆積盆にわたる降下テフラ部の有無や, 降下テフラ部と再堆積部の層厚比, 軽石礫の含有, およびそれらの側方的変化から, 給源方向を推定する方法を提唱した.

このように遠方堆積盆にもおよぶテフラの再堆積からは, 1) 噴火に対する堆積環境レスポンス (再堆積作用の時間的变化), 2) 給源からの距離 (再堆積作用の空間的

図3 恵比須峠—福田テフラ層の葛蒲谷・大阪・古琵琶湖・東海・魚沼堆積盆における代表的柱状図
Kataoka et al. (2009) を一部改変.

図 4 東海層群で見られる恵比須峠—福田テフラ層
(嘉例川火山灰層) 中の軽石質堆積物
トラフ型斜交層理が発達する。中条・片岡 (2001) より引用。

変化), 3) 給源火砕物質の特徴 (火砕流噴火の有無, 溶結の有無, 堆積物の分布), 4) 堆積当時の地形・水系, が読み取れる。とくに 3) や 4) などの要因に絡むことであるが, 噴出源「近傍」にある火砕流堆積物の性質・分布が, 噴出源「遠方」の堆積盆での堆積作用や堆積システムを規制することは非常に興味深い。また, 再堆積に要する時間に幅があっても, 再堆積を含めたテフラ層そのものが地質学的に短期間の時間面を提供する。そのため, 再堆積したテフラ層の堆積相解析の最大の利点は, 複数の堆積盆にもまたがる広域な堆積域での堆積作用や堆積環境と地形の変化が復元でき, それぞれが直接的に比較できることにある。とりわけ, 前出の恵比須峠—福田テフラ層や大田テフラ層 (Nakayama and Yoshikawa, 1997), 佐布里テフラ層 (中山ほか, 1996) は, 初生堆積した降下火山灰層や火砕流堆積物とその上位にある再堆積したテフラ層が明瞭に区別でき, 噴火に対する再堆積を含めた陸域堆積環境の変化を検討できた例である。このような再堆積も含めたテフラ層の記載法とそこからどのような再堆積過程や堆積環境が読み取れるのか, という点については, 講座第 6 回「テフラ層の記載法」で具体例を挙げて改めて触れる。

2. バックグラウンド堆積作用におけるテフラの再堆積

陸水成の堆積環境下において, 噴火時と直後にテフラが大量に短期間のうちに流入する時期とは別に, ある程度時間が経過し, 通常の河川環境に戻った時期における堆積作用をバックグラウンド堆積作用 (background sedimentation) と呼ぼう (図 1)。火山から遠方の沖積域でのバックグラウンド堆積作用は, 通常の碎屑性堆積物

図 5 第二瀬戸内累層群 (大阪層群・古琵琶湖層群・東海層群) に挟むテフラ層の降下テフラ部と再堆積部の層厚の分散図

図中の実線は降下テフラ部と再堆積部の層厚が等値であることを示し, これより上の領域にプロットされるものは再堆積部の方が厚い。片岡・長橋 (2012) を一部改変。

(siliclastic sediments: 非火山碎屑性堆積物というべきか) といえ, その堆積物の鉱物組成は後背地の地質を反映するだろう。一方, 流域の上流に活動的な火山がある場合は, バックグラウンド堆積時でも, 常に後背地からの侵食・運搬・堆積作用により, テフラが地層中に混合する。

小野ほか (2012) は, 津軽平野中部の浅層堆積物を検討し, ハンドボーリングや遺跡の地層断面の観察から, 奈良時代から平安時代初頭にかけて堆積した有機質シルト層の上位に十和田火山 915 年噴火 (十和田 a) 後のラハール堆積物を見出した。小野ほか (2012) では, ラハール堆積物だけでなくその下位にある有機質シルト層についても垂直方向に細かく試料を採取し, テフラの分析を丁寧に行った。下位の有機質シルト層は氾濫原や湿地環境を示しているが, その砂粒分に 20% 程度の火山ガラスが含まれる。ここに含まれる火山ガラスはその屈折率が, 十和田 b テフラ, 十和田中振テフラ, 十和田八戸テフラの屈折率のレンジと重なることから, 火山活動が直接的に影響しないバックグラウンド堆積時においても, 周辺山地や丘陵, 火砕流台地からテフラが二次的に運搬・堆積したことを明らかにした。また, ラハール堆積物には十和田 a テフラ由来の低屈折率の火山ガラスの他にも, 本来十和田 a テフラには含まれない角閃石や

図6 只見川流域，片門^{かたかど}でみられる，沼沢湖噴火後のせき止め湖決壊洪水堆積物
露頭では層厚 20 m の含巨礫軽石砂礫層として見られ，矢印は巨礫を示す。Kataoka *et al.* (2008) より引用。

高い屈折率の火山ガラスが含まれることから，十和田 a よりも古い時代のテフラも同時に取り込まれていることが分かる。

3. 浅海で再堆積したテフラが示す偽同時面

先に述べたようなテフラの再堆積は，平野下流域から浅海域でも起きている。福島県只見川中流域に位置する沼沢火山は直径 2 km 程度の小型のカルデラをもち，約 5,350 年前の沼沢湖噴火では，体積約 4 km^3 の軽石質火砕流噴火と後続のプリニー式・水蒸気プリニー式噴火が発生した(山元, 1995)。この火砕流は堆積物の層厚が 100 m 以上もある谷埋め型であり，沼沢火山周辺の火砕流台地の分布から，只見川のせき止めが起きた(Kataoka *et al.*, 2008) ことは容易に想像できる。このせき止め湖の決壊で推定約 1.6 km^3 のダム湖水が流出し， $30,000 \sim 50,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上のピーク流量をもつ洪水が発生した(Kataoka *et al.*, 2008)。その決壊洪水堆積物は，只見川・阿賀野川流域にかけて数 m～数 10 m の厚さで広く分布し(図 6: Kataoka *et al.*, 2008)，150 km 下流の新潟平野の一部をも構成している(Kataoka *et al.*, 2009; ト部ほか, 2011)。

沼沢湖噴火後に決壊洪水や火山性の碎屑物過剰供給の影響を受け，当時の新潟平野のデルタは急速に沖に前進し，沼沢湖噴火起源の軽石や火山ガラスを多く含むデルタ砂層が広域に分布したことが，4 本のボーリングコア解析により明らかとなった(ト部ほか, 2011)。いずれのコアでも標高マイナス 15～20 m 付近の砂粒分中に軽石含有量の濃集が認められ，場合によると含有量の鉛直的变化においてピークをなすものもある。中でもとりわけ SN-1 コアの深度 16.71～16.76 m の層準では，極粗粒砂から細礫サイズの軽石が斜交層理を成す単層として，層厚 5 cm で砂層中に産する(図 7: ト部ほか, 2011)。コア堆積物のように側方への観察が限られる場合，このような産状はあたかも 1 枚の軽石層が挟在すると解釈してしまう。軽石層を挟むこの砂層はデルタフロントで堆積したものである。時間と共にデルタフロント部は沖側へと前進するため，各コアでのデルタフロント相中に挟在する軽石層もしくは軽石の濃集層準はほぼ同じ深度にあっても，堆積年代は等値ではない(図 8)。すなわち，軽石の記載岩石学的特徴(屈折率や化学組成)からそれぞれを物質的に対比できる軽石濃集層準と解釈した

図 7 新潟平野ボーリングコア (SN-1 コア) にみられる極粗粒砂サイズの沼沢湖噴火起源の再堆積軽石層 (ト部ほか (2011) より引用)。

図 8 浅海域におけるテフラ粒子の堆積と時間面の関係
A: 太線は初生的テフラ (層・濃集層) が示す同時面で、この場合、降下テフラは時間 = t_2 に堆積した。B: 再堆積テフラ (層・濃集層) が示す「偽」同時面。テフラは時間 = t_2 から t_4 に堆積し、真の同時面と斜交する。ただし、全ての再堆積が B のようになるわけではない。

場合、これは「偽」同時面を示していることになる。具体的に見ると、もっとも内陸側にあるコア KN-1 地点は、決壊洪水発生により当初の軽石堆積物が新潟平野に運搬された約 5,000 年前に汀線付近に位置していたと考えられる。一方、もっとも沖側に位置する TA-1 コアでは、軽石の濃集が認められるデルタフロント堆積物が、 ^{14}C 年代値に基づく約 1,000 年前に堆積したと考えられ

る (ト部ほか, 2011)。つまり、噴火後 4,000 年もの間、同一噴火起源の軽石は汀線付近の浅海域を再移動・再堆積し続け、場合によってはその一部が明瞭な層となり産する。このことから、テフラの濃集層準の認定だけに注目せずに、堆積過程や堆積環境を考慮し、再堆積したテフラの時間空間的広がりや拡散を理解しておくことが重要である。

IV. おわりに

このように、再堆積したテフラ層の詳細な記載と解釈に基づけば、噴火後の長期的な広域にわたる地表環境への時間空間的インパクトに関するさまざまな情報を引き出すことができる。また、再堆積した火山碎屑堆積物からでも初生的プロセスにつながる情報 (噴火様式や給源火山の位置など) を推定することもできる。さらに、降雨型・火山性湖決壊型ラハールや河川・浅海・深海域での恒常的な再堆積を十分に考慮した堆積学的・水力的見地からのテフラ研究は、テフラが示す同時性・非同時性を議論する上でも重要である。

「再堆積」というと付随的印象をもつが、その堆積物の産出頻度や現象の時間空間的占有の大きさを考えると、噴火の初生的現象に比べてその評価が適切になされているとは言い難い。1 km³ の降下テフラや火砕流堆積物が重宝されているのに対して、さまざまな情報を保持する同量以上のラハール堆積物や再堆積性火山碎屑堆積物がきちんと記載されることなくぞんざいに扱われていたとすれば、何ともしようのないことである。火山噴火による地質学的瞬時の過剰な物質供給は、初生的現象とその後の再堆積を区別することなく連続的に、地表環境に劇的な変化をもたらす。とくに日本のような活動的火山弧において、爆発的火山噴火による大量の火砕物質供給とその堆積作用は、地層・地形・堆積盆形成や発達を規制する重要な要因である。そのため、場合によっては、海水準変動やテクトニクス、気候変動などと同等もしくはそれ以上に考慮されるべき要因である。

引用文献

- Gran, K.B., Montgomery, D.R. and Halbur, J.C. (2011) Long-term post-eruption elevated sediment yields at Mount Pinatubo, Philippines. *Geology*, 39, 367–370.
Kataoka, K. (2005) Distal fluvio-lacustrine volcanoclastic resedimentation in response to an explosive silicic eruption: Pliocene Mushono tephra bed, central Japan. *Geological Society of America Bulletin*, 117,

3-17.

- 片岡香子・長橋良隆 (2012) 鮮新・更新統第二瀬戸内累層群中の遠方テフラ層の層相・層厚変化からみた火山砕屑物供給源と沖積堆積場との関係. 地質学雑誌, 118, 1-18.
- Kataoka, K. and Nakajo, T. (2002) Volcaniclastic resedimentation in distal fluvial basins induced by large-volume explosive volcanism: the Ebisutoge-Fukuda tephra, Plio-Pleistocene boundary, central Japan. *Sedimentology*, 49, 319-334.
- Kataoka, K.S., Urabe, A., Manville, V. and Kajiya, A. (2008) Breakout flood from an ignimbrite-dammed valley after the 5 ka Numazawako eruption, northeast Japan. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1233-1247.
- Kataoka, K.S., Manville, V., Nakajo, T. and Urabe, A. (2009) Impacts of explosive volcanism on distal alluvial sedimentation: examples from the Pliocene-Holocene volcaniclastic successions of Japan. *Sedimentary Geology*, 220, 306-317.
- 黒川勝巳 (1990) 水底に堆積した珪長質テフラの層相モデルとその形成機構—新潟地域の例—. 地球科学, 44, 361-378.
- McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R. (eds.) (1993) *Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic Rocks*. 198 p, University of Tasmania.
- 長橋良隆 (1998) 中部日本, 大峰地域の鮮新世火砕流堆積物—層序・記載岩石学的特徴—. 地質学雑誌, 104, 84-198.
- 長橋良隆・小坂共栄・日比伸子 (1996) 岐阜・長野県に分布する後期鮮新世の大規模火砕流堆積物とその対比—丹生川火砕流堆積物・恵比須峠火砕流堆積物とその相当層の例—. 地球科学, 50, 29-42.
- 長橋良隆・里口保文・吉川周作 (2000) 本州中央部における鮮新—更新世の火砕流堆積物と広域火山灰層との対比および層位噴出年代. 地質学雑誌, 106, 51-69.
- 中条武司・片岡香子 (2001) 水の流れて運ばれてたまった火山灰. *Nature Study*, 47, 1-2.
- 中前秀章・中山勝博 (1998) 鮮新統板東1火山灰層の堆積過程と堆積機構. 地球科学, 52, 301-317.
- Nakayama, K. and Yoshikawa, S. (1997) Depositional processes of primary to reworked volcaniclastics on an alluvial plain; an example from the Lower Pliocene Ohta tephra bed of the Tokai Group, central Japan. *Sedimentary Geology*, 107, 211-229.
- 中山勝博・増本亜紀・細山光也 (1996) 鮮新統佐布里テフラ層の堆積過程. 島根大学地球資源環境学研究報告, 15, 63-73.
- Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S. (eds.) (1996) *Fire and mud—Eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. 1126 p, Philippine Institute of Volcanology and Seismology and the University of Washington Press.
- 小野映介・片岡香子・海津正倫・里口保文 (2012) 十和田火山 AD 915 噴火後のラハールが及ぼした津軽平野中部の堆積環境への影響. 第四紀研究, 51, 317-330.
- Smith, G.A. (1987) The influence of explosive volcanism in fluvial sedimentation: the Deschutes Formation (Neogene) in central Oregon. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57, 613-629.
- Smith, G.A. (1988) Sedimentology of proximal to distal volcaniclastics dispersed across an active foldbelt: Ellensburg Formation (late Miocene), central Washington. *Sedimentology*, 35, 953-977.
- Smith, G.A. (1991) Facies sequences and geometries in continental volcaniclastic sediments. Fisher, R.V. and Smith, G.A. (eds.) *Sedimentation in volcanic settings*, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, no. 45, 109-121.
- Smith, G.A. and Lowe, D.R. (1991) Lahars: volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow—hyperconcentrated flow continuum. Fisher, R.V. and Smith, G.A. (eds.) *Sedimentation in volcanic settings*, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, no. 45, 59-70.
- 田村圭司・山越隆雄 (2008) 大流域に影響を与えた火山噴火事例. 土木技術資料, 50, 40-43.
- ト部厚志・藤本裕介・片岡香子 (2011) 越後平野の沖積層形成における火山性洪水イベントの影響. 地質学雑誌, 117, 483-494.
- 山元孝広 (1995) 沼沢火山における火砕流噴火の多様性: 沼沢湖および水沼火砕流堆積物の層序. 火山, 40, 67-81.
- 吉川周作・里口保文・長橋良隆 (1996) 第三紀・第四紀境界層準の広域火山灰層—福田・辻又川・Kd38 火山灰層—. 地質学雑誌, 102, 258-270.

Tephrology (part 3) : Reworking and resedimentation of tephra

Kyoko S. Kataoka^{*1, a} and Yoshitaka Nagahashi^{*2}

Keywords : tephra, rework, resedimentation, volcanoclastic deposits, lahar

*1 Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University. 8050 Ikarashi 2, Nishi-ku, Niigata, 950-2181, Japan.

*2 Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University. 1 Kanayagawa, Fukushima, 960-1296, Japan.

*a Corresponding author : kataoka@gs.niigata-u.ac.jp