

テフラの差別風化とハロイサイト高含有層の形成に関する水文化学的研究 Hydrogeochemical study on the differential weathering of tephra and the formation of halloysite-rich layer

○福井宏和・松四雄騎・渡邊哲弘

○Hirokazu FUKUI, Yuki MATSUSHI, Tetsuhiro WATANABE

Tephra-mantled landscape is subjected to catastrophic landslides, even in gentle slopes ($<20^\circ$). Many researchers recently attribute it to the occurrence of a secondary mineral, halloysite, in the sliding surface, that is formed by the weathering of tephra. The aim of study is to examine the distribution of halloysite in the weathering profile of tephra and to clarify the formation mechanism of halloysite-rich layer.

Vertical distribution of halloysite are clearly different between white weathered pumice (WWP) and reddish pumice (RP) in the layer of pumiceous Ta-d2 unlike the layer of En-a included loam in which the halloysite distribution showed similar trend between vertical lines. Although soil water chemistry indicated almost no difference in the concentration of Si and Al and pH between WWP and RP, larger amount of free iron oxide, Fe(d), was detected from solid samples in the domain of RP than that of WWP. Simulation of subsurface water movement using the parameters obtained from soil core samples indicated that subsurface water behavior does strongly affect the distribution of halloysite-rich layer.

1. はじめに

近年、地震による斜面崩壊の発生に関して、地中のハロイサイトが地盤強度の低下を引き起こす素因になるとして、地盤工学の分野においても重要視されるようになってきている (e. g. Moon, 2016, Churchman et al., 2016)。特に火砕堆積物に覆われる斜面において、地震が誘因となり崩壊する事例が多発しており、人命やインフラの損害は後を絶たない。崩壊ポテンシャルの高い場所を推定し、斜面災害を軽減するには、ハロイサイトがどこに、どれだけあるか、その地中分布と形成メカニズムの解明が喫緊の課題である。

2. 研究方法

2-1. 研究対象地

本研究の対象地とした北海道勇払郡厚真町は、2018年の胆振東部地震によって6000以上の斜面崩壊が発生した (Kasai and Yamada, 2019)。Chigira et al. (2019)は多くの崩壊地で、すべり面に、ハロイサイトの存在を確認している。さらに特筆すべき点として、そのすべり面の上下には、テフラの風化によるハロイサイト高含有層が多数残存しているうえ、火砕物、主に軽石、がハロイサイト化した強風化部と、鉄酸化物が沈着した赤

褐色部、及び軽石が新鮮な状態で残っている未風化部のコントラストが明瞭であり、風化の局所的進行や、鉄が関与するハロイサイト結晶形成の律速要因を研究するうえで、最適な場所と考えた。

2-2. 分析方法

地震によって崩壊した斜面の側方崖に観察断面を設置した。地表からの深さ3m、斜面方向の長さ2.5mの断面において、風化が進んだ強風化部 (WWP: White weathered pumice)、酸化が進んだ赤褐色部 (RP: Reddish pumice)、そして、ほとんど風化を受けていない新鮮な軽石が残っている未風化部 (FP: Fresh pumice)のスケッチを行い、鉛直方向に5つの側線を設け、5~10cm毎に攪乱、不攪乱土壌のサンプリングを行った。

試料を乾燥させないように実験室に持ち帰り、X線回折分析を行った、水和ハロイサイトの回折ピーク10Åを基準に同定を行い、その回折強度からバックグランドの値を差し引くことにより、準定量的にハロイサイトの含有量を求めた。また、風化による母材からの元素溶脱量、及び二次鉱物の化学組成を調べるため、蛍光X線分析によって、ハロイサイトの生成に関わるSi、Al、Feの重量%濃度を測定した。また、土壌水の化学組成を調べるために、100ccコアサンプルを、10000rpm

(pF=4.3)で遠心分離し、採取した土壤水について ICP-AES で、Si、Al、Fe の濃度を測定した。

鉄の酸化還元状態を調べるため、ジチオナイト抽出による遊離鉄酸化物 Fe(d)の定量を行い、鉄の二価、三価成分の割合をメスバウアー分光分析によって決定した。

3. 結果と考察

ハロイサイトの含有量を準定量的に測定した結果から、RP では、ハロイサイトが全く見つからず、WWP で多く見つかった。また、Ta-d 層位の下位に当たる En-a を含むローム(En-a loam)層位内では、全深度で見つかり、その量は増減を示し、En-a 軽石が高密度で残留しているところで、最もハロイサイトの含有量が多かった。

化学組成を調べた結果、Al と Fe は、どの側線においても、元素の増減はほとんど認められなかった。一方で、Si は、未風化の軽石と比べて、明らかに減少している傾向があり、風化によって溶脱したと考えられる。RP では、地表に近いほど、Si の溶脱の程度が大きく、これは浅層部で溶脱した Si が土壤水に溶け込み、Si 濃度の高い水が深層部に流れ下ったためと考えられる。また、同じ RP でも、側線 S3、S4、S5 の間で比較したとき、異なる Si の溶脱の傾向を示している。これは、土壤浸透水が不均一性に流れていたため、水-岩石反応にも側線間で違いが生じたものと考えられる。一方、WWP では、興味深いことに、基準面からの深度 55~85cm まで、Si がほぼ同じ値 22.5wt%の値を示した。これは、後述する WWP における自己組織的風化(Self-organized weathering)が関係していると考えられる。

Fe(d)について、WWP 優勢の側線 S1、RP 優勢の側線 S3 で求めた結果、RP で明らかに Fe(d)、すなわち、三価の鉄を主体とする鉄酸化物が多く、深度が浅いほど、Fe(d)の値が大きくなることがわかった。一方 WWP では、Fe(d)は RP の 1/3~1/2 の値を示し、上述した Si 含有量と同様、深度 55~85cm までほとんど同じ値 1.5g/kg を示すことが分かった。

水理特性と風化状態の関係を考察するために、飽和透水試験と pF 試験を行った結果、RP における K_{sat} は、WWP のそれより、 10^3 オーダー程度大きく、透水性が全く異なること、水分特性曲線からも、RP より WWP の方が、はるかに保水性が高いことがわかった。

もともと同一 Ta-d2 層位内にあった母材が、RP と WWP という全く異なる風化状態を示したその理由を明らかにするため、それぞれの部位で採取した土壤水中の元素濃度と pH から、Visual MINTEQ 3.0 software (KTH)を用いて、ケイ酸イオン H_4SiO_4 とアルミニウムイオン Al^{3+} の活動度を計算し、Si-Al 成分系において、各土壤水の値をプロットした。その結果、WWP、RP どちらにおいても、ハロイサイトが生成するのに十分な条件であることがわかった。WWP では、ハロイサイトが見つかったにもかかわらず、RP では見つかっていない。これは、ハロイサイトを生成する要因が、これ以外にあることを示唆している。

そこで、メスバウアー分光分析の結果から、鉄イオン種の割合とハロイサイト生成の関する考察を行った。その結果、FP には、55%以上の二価成分が含まれていることがわかった。さらに、RP (22%)の方が WWP (13%)よりも二価鉄の割合が多いこともわかった。このことから、二価鉄の量だけでは、RP と WWP の違いを説明することはできない。また、1つの軽石が風化してハロイサイト化する過程を調べるために、RP-WWP の境界にある風化途中の軽石の断面を観察し、 0.5Φ のピンホールを用いて、鉄イオン種の定量を原位置で行った。その結果、軽石中心部は、FP 粉末試料と同様、およそ 55%以上、赤褐色バンドには、およそ 36%の二価成分が含まれることがわかった。また最も外側の白色部には二価鉄が全く含まれなかった。

これらの結果から、軽石が水-岩石反応によって、RP のように鉄酸化物を多く含む風化様式と、WWP のように、ハロイサイト化する風化について、次のように結論づけられた。軽石は二価鉄を含むため、 $Fe^{2+} + 3H_2O = Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^-$ にしたがって、表面に鉄酸化物、水酸化物の被膜を生成する。ここで土壤水が空間的に不均一に流れると、部分的に軽石の表面で水が滞留し、還元状態になることがあり、これによって鉄酸化物が溶解して、二価鉄が遊離し、ハロサイトの結晶核生成に関与すると考えられる。そして、いったん、粘土ができると、水が滞留しやすくなり、さらに粘土化が進むという positive feedback が起こる。このようにして、鉄に富む軽石の Self-organized weathering (自己組織的風化)による、ハロイサイト凝集層が形成されたと考えられる。