日本各地のテフラの風化変質に影響する 諸因子について

岡田 清*・小坂丈予**・松井久仁雄***・鈴木正紀****

On the Factors Influencing the Weathering of Tephra
in Various Parts of Japan

Kiyoshi OKADA*, Joyo OSSAKA**, Kunio MATSUI***
and Masanori SUZUKI****

Abstract

The relations between the factors influencing the weathering of tephra and evolved clay minerals were studied for specimens of pumices and scoriae in various parts of Japan. The factors of weather like rainfall, temperature and humidity largely influenced the species of clay minerals formed by weathering. The correlation that the formation of halloysite became easier with increasing amount of water supplied for that system was recognized. The concentration of SiO_2 in the interstitial water of tephra changed to higher as their burial depth became deeper and this relation was considered to contribute strongly to the formation of halloysite. The change of chemical compositions of tephra by weathering always showed the leaching of SiO_2 and relative condensation of Al_2O_3 compared with those of the host rocks independent of the chemical compositions of the host rocks. In pumices and scoriae allophane and/or imogolite were transformed into halloysite with the long lapse of time and this time was considered to be largely influenced by the factor of weather. The following clay mineral change was found as the burial depth of tephra became large: (volcanic glass)→(allophane, imogolite)→(halloysite)→(kaolinite)→(smectite).

1. ま え が き

日本は世界でも有数の火山国であり、国土面積の半分以上はそれらの火山より放出されたテフラ(火山砕屑物)により被われている。これら日本各地に堆積するテフラの風化変質により生成する粘土鉱物に関しては既に多くの報告^{3,6,7,18,19)}があり、それらの結果から風化による鉱物相変化に対するいくつかの系列^{8,23)}が報告されている。一方、筆者らもいままでに北海道の道央部²¹⁾、東北の北上²¹⁾、北関東一帯¹²⁾、南関東一帯¹³⁾、中部の伊那¹⁰⁾及び大町²⁷⁾、南九州の都城²¹⁾等日本各地 (Fig. 1) でのテフラの風化変質の状況を、主に鉱物学的、化学成分的变化の観点から検討を行って来た。そこで今回は、これらの研究結果を総合し、気候、地形、母岩、堆積年数などテフラの風化に関係する諸因子と生成粘土鉱物

1985年10月16日受理

* 東京工業大学工学部無機材料工学科

Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology. O-okayama, Meguro-ku, Tokyo.

** 現在の所属は岡山大学理学部

*** 現在の所属は新日本化学工業(株)

**** 現在の所属は通産省特許庁

種、化学成分変化との関係について考察した。なお、テフラのうちで軽石やスコリア層の試料についてはその試料中への外来物質の混入が比較的少ないと考えられること、それらの噴出年代や給源がある程度明らかにされていることなどを考え、ここでは軽石、スコリア層の試料のみに主眼を置いて考察することにした。

2. 気候に関係する要因

風化作用に関係する気候的因子としては降水量、気温、湿度などが挙げられる。Parfitt ら¹⁵⁾はニュージーランドの火山灰土壌の風化により生成する粘土鉱物種と年降水量およびそれらの堆積年数との関係について検討し、Fig. 2 (a) に示す結果を報告した。この図の関係から、彼らは例え同一給源の土壌でも多雨地域では SiO_2 が溶脱するためにイモゴライトやケイバン比 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) が 1 に近いタイプのアロフェンが生成しやすく、一方少雨地域ではケイバン比の 2 に近いアロフェンやハロイサイトが生成しやすい傾向があることを指摘している。そこで、著者らの取り扱った日本の軽石、スコリア層の試料についても同様のプロットをし、Fig. 2 (b) に示した。その結果、この場合には堆積年数の古い試料の方がハロイサイト化しているという一般的な傾向は読みとれるが、年降水量と生成粘土鉱物種との関係ははっきりしないことがわかった。これは著者らの取り扱った試料では気候因子として年降水量だけをパラメータとしたのでは不十分であることを意味している。そこで、年降水量の他に気温や湿度等の因子をも考慮してみた。ここでは供給水量としての年降水量に蒸発水量を補った指数であるマイヤー指数とラング指数¹⁾を用いて検討してみた。両指数は次式で表わされる。

$$\text{マイヤー指数} = R/S$$

$$S = V(100 - H)/100$$

$$\text{ラング指数} = R/T$$

ここで R は年降水量 (mm), S は飽差, H は年平均相対湿度 (%), T は年平均気温 ($^{\circ}\text{C}$), V は年平均気温に対応する飽和水蒸気圧 (mmHg) である。Fig. 3 にこれらの結果を示したが、各試料に対する気象データは理科年表²²⁾より求めた。いずれの図においてもそれぞれの指数値が大きくなるほどハロイサイトを生成しやすい関係にあることがわかる。これは土の中への供給水量が多いほどハロイサイトが生成しやすいことを意味しており、Parfitt ら¹⁵⁾の報告とはまったく逆の傾向を示す。これは以下のように解釈することができる。つまり、Fig. 2 (b) と Fig. 3 に示した日本各地の軽石、スコリア層の試料ではある程度以上埋没深さが深く、風化殻の集積帯的な要素を持つ位置にあたっている。このため表層からの供給水量が多くなると、土層からの SiO_2 の供給が増加することになりハロイサイトが生成しやすくなる。一方、Fig. 2 (a) に示した Parfitt ら¹⁵⁾の試料は地表に極く近いところのものであるため、風化殻の溶脱帯に対応し降水量の増加が溶脱の進行を促進するため、 SiO_2 は脱けて Al_2O_3 が残りケイバン比の 1 に近いアロフェンやイモゴライトが生成しやすい傾向を示したものとする。また Fig. 2 に示した降水量だけのデータに対して、年平均気温を考慮したラングの指数を用いただけで粘土鉱物種と堆積年数との間には Fig. 3 (b) に示すような明確な相関が認められるようになったということから、気温の因子が生成粘土鉱物種に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

3. 地形に関する要因

種々の地形的要因が風化変質に大きな影響を及ぼしていることはもちろんのことであり、とくに埋没深さ、地下水位、地形、地層など多くの因子が挙げられる。

これらの各因子のうち、埋没深さと生成粘土鉱物との関係については北関東地方のテフラ¹²⁾、南関東地方一帯に広く分布する東京軽石層¹¹⁾及び東北地方の十和田テフラ中の軽石層¹⁸⁾に対して検討した例がある。それによると、これらの軽石層中の生成粘土鉱物種はその上に堆積するテフラ層の層厚が厚

Fig. 1 Locations of sampling points. Numbers in the parentheses are number of sampling points at each locality.

Fig. 2 The relation among the rainfalls, sedimentary ages and the species of dominant clay minerals. (a) : soils in New Zealand, (b) : pumices and scorias in Japan.

Fig. 3 The relations among the indices of R/S (a) or R/T (b), the sedimentary ages, and the species of dominant clay minerals in the pumices and scorias in various parts of Japan.

Fig. 4 The relation between the concentrations of SiO_2 in the interstitial water of the specimens and their burial depths. Filled and open symbols represent allophane and/or imogolite, and halloysite as the dominant clay minerals in the specimens, respectively. Error bars in the data of Shinohara represent the variation range of the data observed among the different sampling days.

いところではハロイサイトが生成しているのに対し、それが薄いところではアロフェンやイモゴライトが生成するといった関係が報告されている。この理由としては、上層の堆積が厚いほど SiO_2 の供給が多いためであろうと推察されている。そこで、実際にこれら試料中に含まれている間隙水中の SiO_2 濃度について検討してみた。試料の採取地点は神奈川県横浜市港北区の篠原町、鴨居町および長野県伊那市若宮の3ヶ所であり、そのうち横浜市の2地点のデータについては既に報告¹³⁾したものである。埋没深さと間隙水中の SiO_2 濃度の関係を Fig. 4 に示した。いずれの地点のデータも埋没深さが深くなるに従って SiO_2 濃度が高くなる傾向を示していることがわかる。篠原町のデータが他の2地点のそれらより濃度が高いのは、この地点の下部には透水性の悪い海成粘土層が存在することが関係していると考えられ、間隙水が高い SiO_2 濃度を示す試料中には Fe_2O_3 を多量に含み層間水が非常に不安定なハロイサイト型鉱物が含まれていることについては既に報告した^{13,14)}。この粘土鉱物¹⁴⁾は最近 Quantin ら¹⁶⁾によって報告されたハロイサイト-ヒシゲライト系の混合層鉱物とよく似たものと考えられるが、この点については更に詳しく検討する必要がある。その他の2地点のデータについてみると、約4~5mより深い埋没深さになると SiO_2 濃度はほぼ一定となることがわかる。このときの SiO_2 濃度は図中に示したように、Rimstidt と Barnes¹⁷⁾の報告より求めたこの両地点付近の年平均気温におけるクリストバライトの飽和溶解度とほぼ一致する。これはテフラ風化物の $2\mu\text{m}$ 以下の粘土区分中にしばしば自生と思われるクリストバライトが観察されることと調和的である。このように間隙水中の SiO_2 濃度が4~5mの深さまで増加するという傾向は、その上部堆積層が7~8mより薄いところではアロフェン、イモゴライトが生成しており、それより厚いところではハロイサイトが生成するという傾向が観察された東京軽石層中の生成粘土鉱物種分布¹¹⁾と定性的にはあるがよく一致する。

4. 母岩に関係する要因

母岩に関連した因子としては化学組成、構成鉱物、粒度、発泡度および固結度などについて考慮する必要があるが、ここでは主に化学組成と粒度について検討する。Fig. 5 には伊那¹⁰⁾と日本各地の軽石、スコリア層の試料^{10,11,12,13,21)}についてまとめた $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 三成分の風化による成分変化の様子を示した。図中には各試料の母岩と仮定した各給源火山の溶岩の分析値^{5,20)}も示した。風化したテフラ試料ではいずれも SiO_2 の溶解と Al_2O_3 の相対濃縮の傾向を示し、中性条件下での一般的な成分変化²⁶⁾とよく一致することがわかった。Fig. 5 (b) より明らかなように、風化テフラ試料の成分変化経路は母岩中の酸化鉄の多寡と関係し、流紋岩質、安山岩質、玄武岩質の3経路に分かれるように分布している。この観点に立てば、伊那ロームについて著者らがかつて報告した Fig. 5 (a) の実線で示した変化経路はむしろ図中の点線で示した変化経路のように考えたほうがよいように思われる。ここで扱っている試料の噴出年代は約10万~3万年前に相当し、この間、御岳火山について報告されている活動史⁴⁾によれば、これらの時期には流紋岩質から安山岩質への岩質の変化が考えられている。この傾向は上述の考えをテフクロノロジーの面から支持していると言える。

つぎに、 $2\mu\text{m}$ 以下の粘土区分の化学成分を $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 三成分図にプロットし、Fig. 6 に示した。主要な生成粘土鉱物がハロイサイト、アロフェン、イモゴライトであることを反映し、ほとんどのデータは図中の AC と BE で囲まれる範囲内に分布している。試料中のハロイサイト含量が増えるに従ってデータは A 点に漸近するはずであるが、試料中には3価の鉄が共存するためデータは線分 AC 上に沿って分布していることがわかる。もし3価の鉄が単に水酸化鉄の状態で共存しているならば、データは線分 AD に沿って分布するはずである。これに対して、実際のデータが線分 AC に沿って分布していることから Fe_2O_3 成分はハロイサイト中に固溶しているかヒシゲライト様鉱物として存在している可能性があることを示唆している。なお、一部試料¹⁴⁾については分析電子顕微鏡を用いて検討し、ハロイサイト中への Fe_2O_3 の固溶の可能性を報告している。

Fig. 5 Alteration diagrams of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ components in the specimens. (a): Ina Loam, (b): various parts of Japan. Filled and open symbols represent allophane and halloysite as the dominant clay minerals in the specimens. Compositions of kaolin and imogolite are represented by 2S1A and 1S1A, respectively.

Fig. 6 Alteration diagram of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ components in the specimens under $2\ \mu\text{m}$. Filled and open symbols represent allophane and halloysite as the dominant clay minerals in the specimens. Points of A and B correspond to the compositions of kaolin and imogolite. AC and AD are the lines connecting between $2\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and $2\text{SiO}_2\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, and $2\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and Fe_2O_3 . BE and BF are those between $\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{SiO}_2\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, and $\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and Fe_2O_3 .

粒度、発泡性や固結度などの因子は主に風化変質反応の進行速度に影響を及ぼす。一般にはローム層に比べ粒度の大きな軽石やスコリア層の試料は当然風化変質による化学成分変化や、生成粘土鉱物種に時間的な遅れがみられる。こういった現象は北関東¹²⁾や伊那^{10,25)}で報告されており、その生成粘土鉱物は、軽石層ではアロフェンおよびイモゴライト、ローム層ではハロイサイトといった対応関係を示す。この結果は軽石層では透水性がよいため水の移動が速くイモゴライトやアロフェンが生成しやすく、一方それより透水性が悪いローム層では水の移動が遅いため、ハロイサイトが生成しやすいといったことも理由になっているかも知れない。伊那市周辺では Pm-I 軽石層はハロイサイト化しているが、同一層内の所々にハロイサイト化していない部分が存在することが報告²⁵⁾されている。これはこの軽石層の形成時にもたらされた大きな軽石塊の風化物と考えられ、囲りの軽石粒と比べ粗粒で変質しにくいいため、ハロイサイト化しなかったものと解釈できる。

5. 堆 積 年 数

テフラ層の風化変質に対するそれらの堆積年数の及ぼす影響は 2～4 の項で示した気候、地形、母岩等の各因子の複合した結果としてしかとらえられないため大変複雑である。しかし、それらの結果の反映となる生成粘土鉱物種をいくつかの軽石、スコリア層について調べた結果を Fig. 7 に示した日

Fig. 7 Dominant clay minerals in the pumices and/or scorias in the various parts of Japan. Allo : allophane and imogolite, Ht/A : allophane, imogolite and halloysite, Ht : halloysite, 14Å : 14Å-mineral.

Fig. 8 Schematic representation of the relation of minerals in the weathering.

本各地の示標テフラ編年図²⁾上にまとめた。少なくとも軽石、スコリア層の試料ではいわゆる 14 Å 鉱物^{9,24)}の出現頻度は少なく、ほとんどの試料ではアロフェン、イモゴライトまたはハロイサイトが粘土鉱物種として卓越している。この図から、堆積年数の経過とともに卓越粘土鉱物種が明らかにアロフェン、イモゴライトからハロイサイトへと移り変わることがわかる。しかし、その変化の起こる堆積年数は各地域ごとにかかなり大きく相違しており、北海道や九州ではその変化が比較的早く起こるのに対して中部地方の大町ロームでは非常に遅い。この違いは 2～4 の項に示した各因子とか、今回はふれていないが生物学的因子等が関与していると考えられる。Fig. 3 に示したように年降水量、年平均気温および相対湿度等の気候的因子と堆積年数が生成粘土鉱物種との間にかかなりはっきりとした相関を示したことを考慮すると、中でも気候的因子の影響が大きいと考えられる。

6. ま と め

テフラの風化変質には気候、地形、母岩、堆積年数や生物因子等が大きな影響を及ぼしており、また一般的にはこれらの諸因子が複合的に影響を及ぼしあっているだけでなく、様々な外来物質の混入による影響も無視できないことが多い。その結果、種々多様な粘土鉱物組み合わせが出現することが多い。そこでここでは外来物質の混入の可能性が少ない軽石、スコリア層の試料に主眼をおいて風化変質に関連する諸因子と生成粘土鉱物種との関係について考察した。その結果、気候因子は生成粘土鉱物種に大きく影響し、系への水分供給量が多くなるほどハロイサイトが生成しやすい相関が認められた。テフラ中に存在する間隙水中の SiO_2 濃度はその埋没深さが深くなるに従って高くなり、これはハロイサイトの生成と深くかかわっていると考えられた。風化による化学成分変化は母岩の化学組成に関係なく、いずれも SiO_2 の溶脱と Al_2O_3 の相対濃縮の傾向を示した。生成粘土鉱物種は堆積年数の経過とともにアロフェン、イモゴライトからハロイサイトへと移行するが、この変化には気候因子の影響が大きいと考えられた。また、これらの結果より得られる各粘土鉱物種と風化殻との概念図をFig. 8に示した。このような環境条件では埋没深さが深くなるにつれて一般的な鉱物変化系列として、(火山ガラス)→(アロフェン、イモゴライト)→(ハロイサイト)→(カオリナイト)→(ス멕タイト)という系列が考えられ、溶脱帯から集積帯的性格を帯びるような変化をしていくことがわかった。

文 献

- 1) 地団研：地形と土壌，104，東海大学出版 (1982).
- 2) 第四紀学会：日本の第四紀研究，372，東大出版 (1978).
- 3) 井上克弘・吉田 稔：岩手大農学部報告 **13**, 19 (1976).
- 4) Kobayashi, T.: J. Lib. Arts Toyama Univ. **7**, 71 (1974).
- 5) 小林武彦・大森江い・大森貞子：地調月報 **26**, 7 (1975).
- 6) 近堂祐弘：北海道の第四紀火山砕屑物および土壌の粘土鉱物組成，14，北海道開発局 (1967).
- 7) 倉林三郎・土屋竜雄：地質雑 **65**, 545 (1959).
- 8) 倉林三郎・土屋竜雄：地質雑 **66**, 586 (1960).
- 9) 増井淳一・庄子貞雄：須藤俊男教授退官記念論文集，192 (1975).
- 10) 小坂丈予・平林順一・岡田 清・二木昌次：粘土科学 **23**, 17 (1983).
- 11) 小坂丈予・平林順一・岡田 清・二木昌次：粘土科学 **23**, 106 (1983).
- 12) 小坂丈予・岩井津一：自然災害資料解析 **1**, 91 (1974).
- 13) 小坂丈予・大津賀望・平林順一・岡田 清・松井久仁雄：粘土科学 **24**, 116 (1984).
- 14) 小坂丈予・大津賀望・平林順一・岡田 清・松井久仁雄・林 滋生・神山宣彦：第 28 回粘土科学討論会要旨集，74 (1984).
- 15) Parfitt, R. L., Russel, M. and Orbell, G. E.: Geoderma **29**, 41 (1983).
- 16) Quantin, P., Herbillon, A. J., Janot, C. and Siefferman, G.: Clay Miner. **19**, 629 (1984).
- 17) Rimstidt, J. D. and Barnes, H. L.: Geochim. Cosmochim. Acta **44**, 1683 (1980).
- 18) Saigusa, M., Shoji, S. and Kato, T.: Geoderma **20**, 115 (1978).
- 19) 佐治孝次・田崎和江・赤木三郎・麻田 齊：地球科学 **29**, 199 (1975).
- 20) 柴田秀賢：日本岩石誌III, 255, 朝倉書店 (1968).
- 21) 鈴木正紀：東京工業大学修士論文 (1985).
- 22) 東京天文台：理科年表，気 8，丸善 (1980).
- 23) Uchiyama, N., Masui, J. and Shoji, S.: Soil Sci. Plant Nutr. **14**, 133 (1968).
- 24) Wada, K. and Kakuto, Y.: Clays Clay Miner. **31**, 183 (1983).
- 25) 渡辺晃二：第四紀 **11**, 296 (1972).
- 26) Yamada, H., Iwai, S. and Ossaka, J.: Proc. Intern. Clay Conf. **1**, 359 (1969).
- 27) 山田玲一：東京工業大学卒業論文 (1984).