

タイ熱帯季節林土壌の粒径別元素分析

酒井正治¹、世良耕一郎²、後藤祥子³

¹森林総合研究所立地環境研究領域

305-8687 茨城県つくば市松の里1

²岩手医科大学サイクロトロンセンター

020-0603 岩手県滝沢市留が森348-58

³日本アイソトープ協会滝沢研究所

020-0603 岩手県滝沢市留が森348-1

1 はじめに

森林生態系の炭素現存量の約半分を占める土壌炭素の分解速度、土壌腐植の起源およびそれらに影響する要因について理解することは、地球レベルでの大気炭素収支を予測する上で不可欠である。そこで、土壌有機物の分解過程や土壌有機物の長期貯蔵メカニズムの解明のため、炭素同位体比および微量元素の分析を行ってきた。前報¹⁾では、タイ国東北部の熱帯季節林下に存在する風化の進んだ土壌について、土壌中での元素の挙動について報告した。今報告では、土性（土壌の粒径組成によって示される土壌の性質）による元素の挙動の違いを調べるため、湿性物理分画法により3つの粒径区分（粗砂、細砂、シルト+粘土）に分画した土壌サンプルをPIXE分析したので報告する。

2 方法

2.1 試験地

土壌サンプルを採取した試験地はタイ国東北部ナコンラチャシマ県サケラート試験地を研究サイトとした（図-1）。試験地の詳細は前報¹⁾で記したが、概略は以下の通りである。試験地入り口にある事務所の位置は北緯14°28'06.1"、東経101°54'15.0"、標高420 mである。事務所の気象観測によれば、年平均気温および年降水量はそれぞれ23.9℃ 1100 mmで、4月～11月は雨季、12月～翌年3月まで乾季を持つ。本来の植生は*Hopea ferrea*が優占するDEF（乾燥常緑林）、*Shorea*属が優占するDDF（乾燥フタバガキ林）の2種類の森林植生から成立している。ここでは、天然林（乾燥常緑林、主要樹種、*Hopea ferrea*、*Shorea henryana*、*Dipterocarpus tubercuaotus*）および隣接する草地（*Saccharum spontaneum*）を試験地とした。この地域に分布する土壌は、Orthic Acrisols²⁾である。なお、US土壌分類では、Ultisols、古くは、Red-yellow podzolic soilsに相当する³⁾。この土壌は、強度の風化と洗脱が特徴で、養分含有量も少なく、養分保持力も少ない。基岩は中生代に属する砂岩が主である。

2.2 土壌採取方法

1 m深さの土壌断面調査を行った後、深さ60 cmまでの8層位(0-5、5-10、10-15、15-20、20-30、30-40、40-50、50-60 cm) から土壌を採取した。それらの土壌を風乾後、2 mmの円孔ふるいを使って風乾細土に調整した。風乾細土の一部はメノー製自動乳鉢を使って微粉末に粉碎し、バルクサンプルとした。なお、残りの風乾細土は、下記湿式物理分画法で3粒径サイズに分画した。なお、土壌採取断面数は、天然林は2土壌断面、草地は1土壌断面である。

2.3 土壌分析方法

2.3.1 湿式物理分画法

風乾細土は、Aoyamaら⁴⁾の方法を参考に、国際法による粒径区分(表-1)に準拠した粒径サイズで分画した。なお、篩い分けには、メッシュサイズが20 μmと212 μmのナイロン製篩を使用したため、粒径区分は表-2の通りである。図-2に、湿式物理分画法の操作概略を示した。つまり、100 ml容のガラスビーカー(ホウケイ酸ガラス、パイレックス)に15~35 gの風乾細土を秤量採取し、超純水100 mlを加えた。それを超音波洗浄器(5分間、2回)にかき、土壌粒子を分散させた。その後、懸濁液を212 μmのメッシュ篩に通し、篩上の土壌粒子をナイロン製目詰まり除去ブラシで丁寧に透明な洗浄液が得られるまで超純水で洗浄した。次に212 μmのメッシュ篩を通過した懸濁液 I を20 μmのメッシュ篩に通し、同様な操作を行った。212 μmのメッシュ篩上の土壌粒子(粗砂)、20 μmのメッシュ篩上の土壌粒子(細砂)およびのメッシュ篩を通過した懸濁液をホットプレート上で乾燥し、メノー製乳鉢を使って微粉末に粉碎し、各粒径区分の分析サンプルとした。



図-1 試験地の位置図

表-1 国際法による粒径区分

粒径区分	粒径サイズ
礫	> 2mm (= 2000 μm)
粗砂	0.2~2.0 mm(=200~2000 μm)
細砂	0.02~0.2 mm(=20~200 μm)
シルト	0.002~0.02 mm(=2~20 μm)
粘土	<0.002 mm (= 2 μm)

表-2 使用メッシュ篩による粒径区分

粒径区分	粒径サイズ
粗砂	0.212~2.0 mm(=212~2000 μm)
細砂	0.020~0.221 mm(=20~212 μm)
シルト・粘土	<0.020 mm(=20 μm)

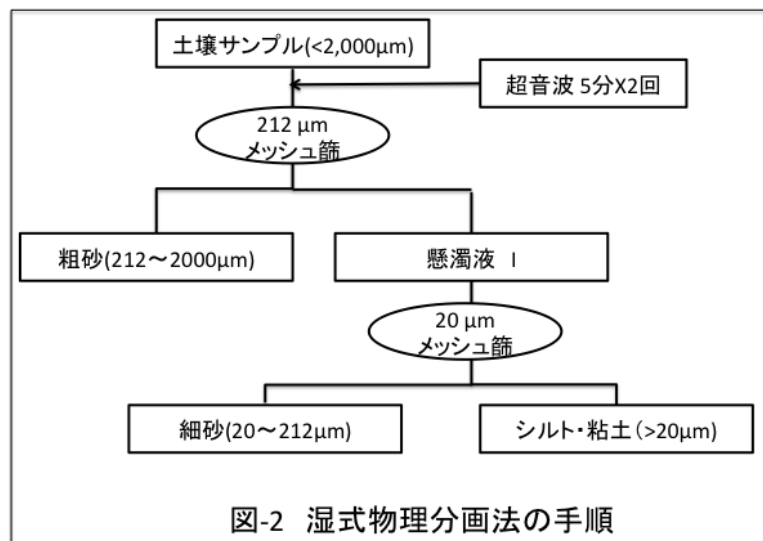


図-2 湿式物理分画法の手順

2.3.2 炭素およびPIXE分析

バルク、粗砂、細砂、およびシルト・粘土サンプルについて、炭素およびPIXE分析を行った。炭素濃度は乾式燃焼法計(NC-Analyzer, NC-22F)で分析した。また、PIXE分析は、前報¹⁾の通り、パラジウムカーボンを用いた粉末内部標準試法で元素濃度を定量した。

なお、得られた元素濃度データはJMP(ver.10)で統計解析および図化を行った。

3 結果と考察

3.1 検出元素

図-3に、全土壌サンプル(72個)の各元素の検出頻度(=検出数/72)を高い順に示した。なお、検出頻度が10%以下の低い元素(Hg、Sb、Se、P、Sn、Te)を除外し25元素について解析した。90%以上の高頻度で検出された元素はAl、Cl、Si、Fe、Ti、Zn、Na、Zrの8元素、80%台はCa、Crの2元素、70%台はBr、60%台はSr、Ni、Mn、Yの4元素、50%台はGa、Rb、S3元素であった。各元素の検出頻度について、前報りのバルク土壌の分析結果とほぼ同じ傾向を示したが、前報りの元素検出頻度が60%台であったP元素の検出頻度が今回、3%と低くなったこと、および前報りで10%~20%台と低い検出頻度を示すMo、Ba元素が今回検出されなかった理由については不明である。

今度は、粒径サイズ別に検出頻度をみてる(図-4)。最も小さな粒径サイズ(シルト・粘土)画分の検出頻度はすべての元素で50%以上を示し、粗砂、細砂の画分に比べ、すべての元素で検出頻度は同等か、高い値を示した。なお、粗砂と細砂の画分の元素検出頻度は同じ傾向を示した。

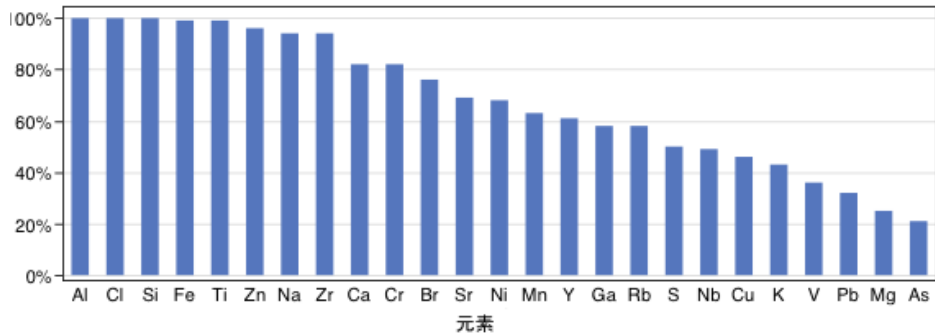


図-3 元素の検出頻度(全土壌サンプル)

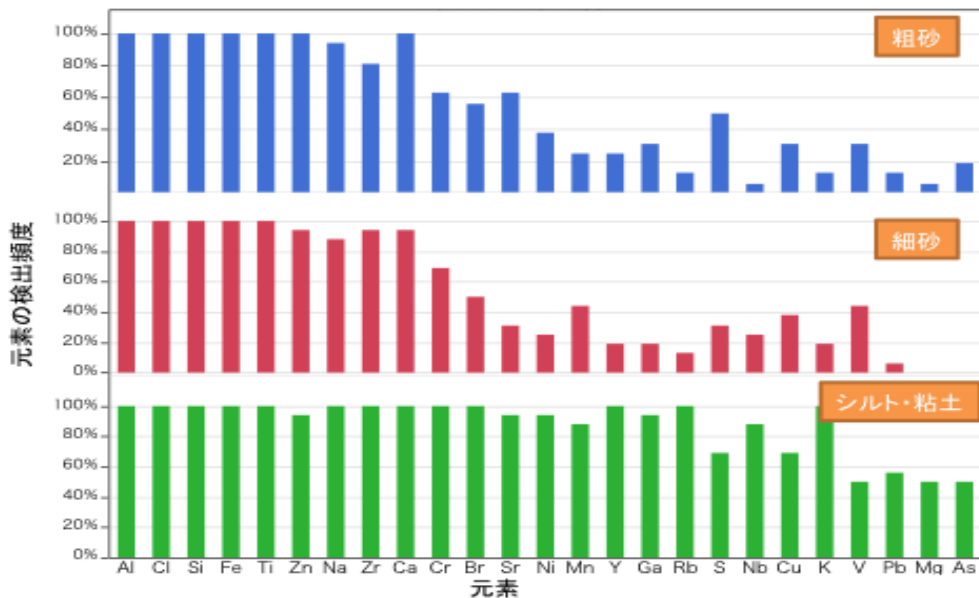


図-4 元素の検出頻度(粒径サイズ別)

3.2 元素濃度

図-5に、粒径サイズ別に各元素の濃度を箱ひげ図で示した。ばらつきのあるデータをわかりやすく表現するための統計学的グラフである箱ひげ図は、下端から上端までの順に、最小値、第1四分位点、中央値、第3四分位点、最大値を、丸点は外れ値を示している。各元素の濃度（中央値）を降順に記述すると以下の通りである。100,000 ppm (10%) 以上 : Si, 10,000~100,000 ppm (1~10%) : Al, 1,000~100,000 ppm (0.1~10%) : Fe, 1,000~10,000 ppm (0.1~1%) : Mg, Na, 100~10,000 ppm (0.01~1%) : K, Ti, 100~1,000 ppm : Ca, Cl, S, 10~1,000 ppm : Cr, Mn, N, V, 10~100 ppm : Cu, Nb, Pb, Rb, Zn, 1~1000 ppm : Zr, 1~100 ppm : As, Br, Ga, Sr, Y。

一般に、岩石の全組成の99.4%前後を占める主要な10構成元素⁵⁾、O、Si、Al、Fe、C、Ca、Na、Mg、KおよびTiのうち、PIXE分析では検出できないOとCを除く、8元素濃度は前報¹⁾とほぼ同じ濃度範囲を示した。ただし、多くの元素で粒径サイズ毎の濃度差が認められた。

今回は粒径サイズ毎の各元素濃度の違いを比較してみる。シルト・粘土画分を基準に、粗砂および細砂画分との比較で以下の3グループに分けることができた。

グループ1（シルト・粘土画分で高い元素） : Al, As, Br, Cr, Fe, Ga, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Y, Zn, Cu

グループ2（シルト・粘土画分で低い元素） : Si

グループ3（シルト・粘土画分と差がない画分を含む元素） : Ca, Cl, K, Na, Nb, Rb, S, Zr

シルト・粘土画分で高濃度を示すグループ1にはもっとも多い16元素が含まれていた。土壌は、岩石の風化過程および生物作用による土壌化過程を通して、腐植や粘土などの二次鉱物が生成される。一般に細かい粒子表面は負に帯電しており、微細で比表面積が大きいいため、極めて反応性が高く、各種元素を吸着している。従って、グループ1は、粘土などの二次鉱物や腐植中に取り込みやすい元素と考えられた。グループ2は、Si元素のみがシルト・粘土画分で低濃度であった。このことは、Siは一次鉱物が細粒化する風化過程をとり比較的大きな粒子が残ることを示唆していた。また、TiやZn

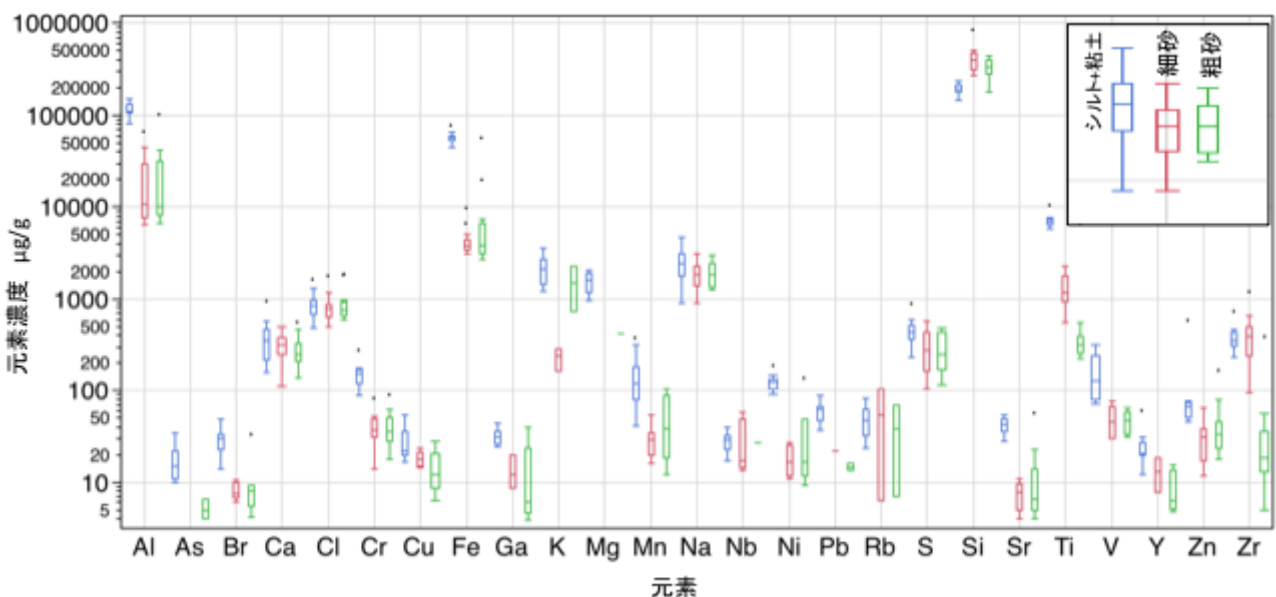


図-5 元素濃度(粒径サイズ別)

元素の特徴として、粗砂画分の濃度が細砂画分のそれより低濃度であった。これらのことは、若槻ら⁶⁾が沖積および洪積土壌で、「Si、Zn元素は比較的粗いサイズ、Ti、Cr元素は粘土サイズで残りやすい」と報告した事例と一致していた。

3.3 炭素濃度との関係

岩石の風化による元素の土壌への供給同様、有機物（落葉落枝、細根）も土壌へ大きな元素供給源である。図-6に示す通り、土壌炭素濃度と土壌深さとの間に密接な関係が認められる。つまり、土壌有機物の分解に伴いCO₂が大气へと放出される結果、深くなるにつれ土壌炭素濃度は減少する。なお、土壌炭素濃度は、より小さい粒子（シルト・粘土画分）で高い値を示し、明確な減少傾向を示した。この有機物分解過程において、元素の放

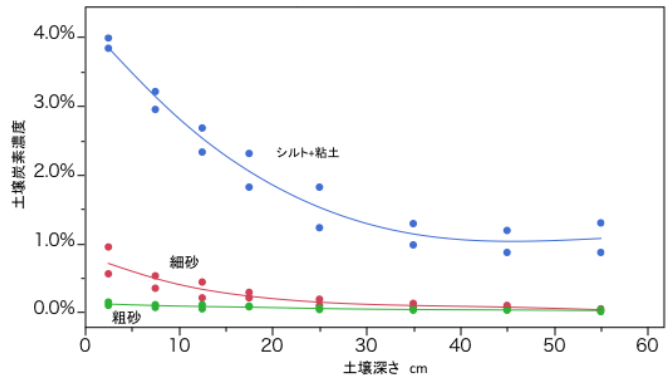


図-6 土壌炭素濃度(粒径サイズ別)

出および腐植物質や粘土鉱物への吸着が土壌中で起こっている。そこで、土壌炭素濃度と元素濃度との関係から、土壌有機物分解過程における土壌中での元素の挙動をみてみる。

図-7に、粒径サイズ別に土壌炭素濃度と各元素濃度との相関関係を示した。なお、図中の直線は回帰直線、幅は信頼区間を示す。粗砂と細砂画分の場合、土壌炭素濃度の変化域が小さいため、全ての元素において土壌炭素濃度と各元素濃度との関係は明確ではなかった。一方、シルト・粘土画分では、土壌炭素濃度の増加に伴い、元素濃度が増加あるいは減少する元素が認められた。明確な増加傾向のある元素は、Ca、Mn、若干増加傾向の元素はBr、Sである。一方、減少傾向は、As、Cr、Fe、Ni、V、Zr、Pb元素で認められたが、いずれも、MnやCaほど明確な関係ではなかった。

寺島ら⁷⁾は、関東平野南部の黒ボク土と褐色森林土およびそこに生育する植物の微量元素の濃度比を解析し、生物濃縮の影響の大きい土壌元素、例えば、濃縮効果が特に大きい元素はP、Sb、Zn、Cd、Pb、Cu、Ca、濃縮効果が認められる元素はMn、Pb、Bi、Sr、Mo、K、As、Sn、濃縮効果がある元素はMg、Ba、Rbで、それらの大部分の元素は最表層部で高濃度を示す傾向にあると報告している。寺島らは最表層部で高濃度を示す傾向がある多くの元素を示したが、今回は、4元素のみが認められる結果となった。これらシルト・粘土画分の4元素（Ca、Mn、Br、S元素）の濃度は、土壌炭素濃度と正の相関があることから、土壌炭素とほぼ同じ挙動をすることが示唆された。従って、これら元素が土壌有機物分解の指標となり得ること、また、有機物分解に密に関与している可能性が示唆された。

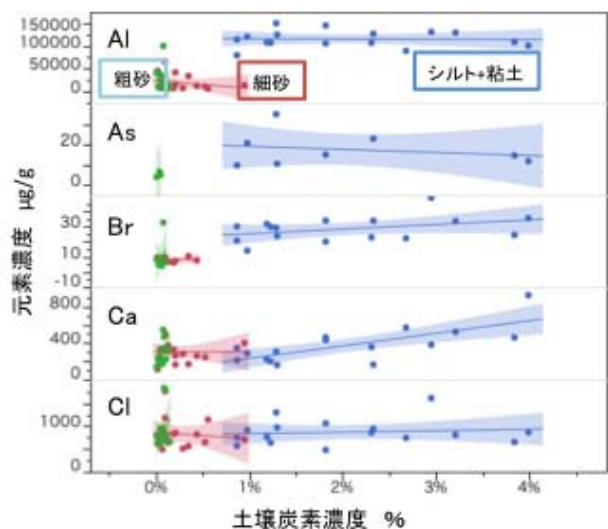


図-7(1) 土壌炭素濃度と元素濃度との関係

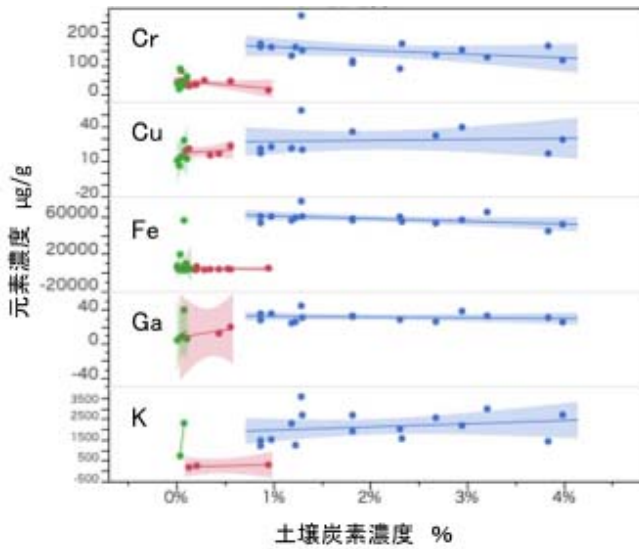


図-7(2) 土壤炭素濃度と元素濃度との関係

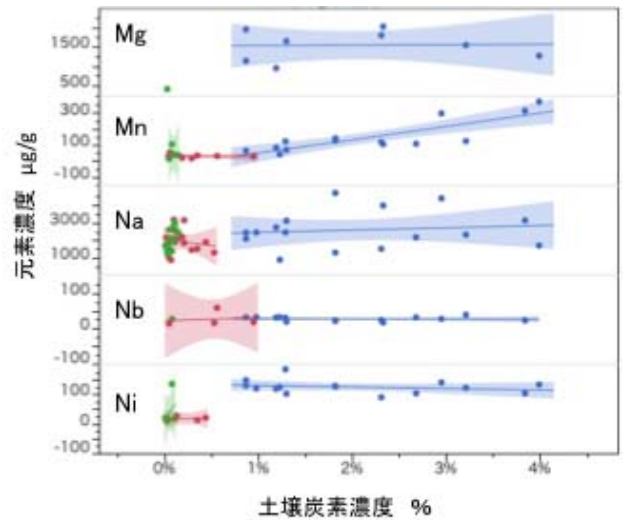


図-7(3) 土壤炭素濃度と元素濃度との関係

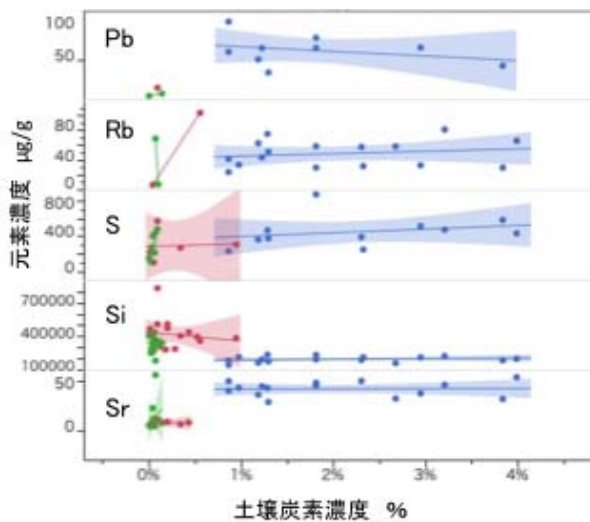


図-7(4) 土壤炭素濃度と元素濃度との関係

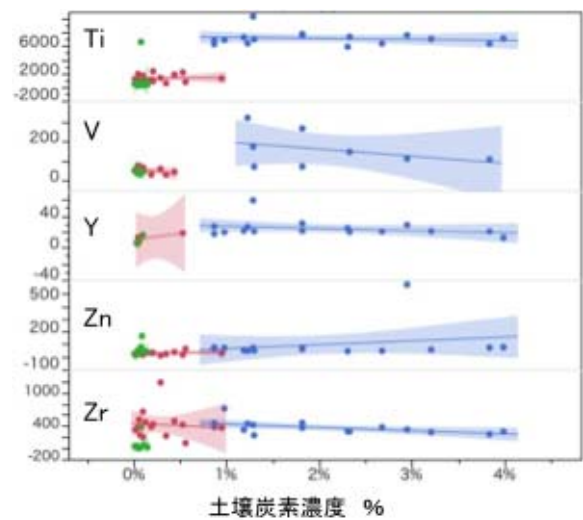


図-7(5) 土壤炭素濃度と元素濃度との関係

4 まとめ

土壤有機物の分解過程を微量元素の挙動から解明することを目的に、熱帯季節林帯における天然林および草地土壤を対象に、PIXE分析法により元素分析を行った。今回は、土性（土壤の粒径組成によって示される土壤の性質）による元素の挙動の違いを調べるため、湿性分画法により3つの粒径区分（粗砂、細砂、シルト+粘土）に分画した土壤サンプルを使用した。また、土壤中の有機物分解に伴う土壤元素の挙動を、土壤炭素濃度との関係から解析を試みた。

1. 25元素が検出され、シルト・粘土画分で元素の検出頻度が高かった。
2. 16元素がシルト・粘土画分で高濃度を示す一方、Si元素はシルト・粘土画分で低濃度であった。
3. 土壤炭素濃度は、シルト+粘土画分で高い値を示した。

4. 炭素濃度との関係解析では、炭素濃度範囲が広いシルト・粘土画分の分析結果の利用が適切であった。
5. シルト・粘土画分の4元素 (Ca、Mn、Br、S元素) の濃度は、土壤炭素濃度と正の相関があることから、土壤炭素とほぼ同じ挙動をすることが示唆された。
6. さらに、これら4元素が土壤有機物分解の指標となり得ること、また、有機物分解に密に関与している可能性が示唆された。

今回は、湿式物理分画法を使ったが、粒径サイズ画分の容脱・洗脱の影響を少なくするため、今後、乾性物理分画法の検討が必要と考えられる。

参考文献

1. 酒井正治・世良耕一郎・後藤祥子：タイ国乾燥常緑林土壤の元素分析、NMCC共同利用研究成果報文集19、45-59、2013
2. FAO : World Reference Base for soil resources 2006
3. 久馬一剛：熱帯の森林と土壤、熱帯林業、No.2,p11-18,1985
4. Aoyama, M., Angers, D.A. and N'Dayegamiye, A.:Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. Can. J. Soil Sci., 79, 295-302.1999
5. H.J.M. Bowen, Environmental Chemistry of the Elements, Academic Press, London (1979). p.333、(和訳、環境無機化学、浅見輝男訳、1983)
6. 若月利之、松尾嘉朗、片山幸士、石田紀郎：沖積および洪積土壤の風化過程における諸元素の挙動(第3報) 元素の土壤地球化学的分類、日本土壤肥料科学雑誌、49(2)、100-106、1978
7. 寺島 滋、今井 登、太田充恒、岡井貴司、御子柴真澄：関東平野南部における土壤の地球化学的研究— 土壤地球化学図の基礎研究(第5報)総括 一、地質調査研究報告 第55 巻 第1/2号、p1-18、2004

謝辞

この研究は、科研費(課題番号: 22405026、24658144)の補助のもと行った。また、土壤採取に際し、タイ王室森林局の職員に感謝します。

Elements of physically fractionated soils in a tropical seasonal forest in northeast Thailand

M.Sakai¹, K.Sera² and S.Goto³

¹Forestry and Forest Products Research Institute
1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan

²Cyclotron Research Center, Iwate Medical University,
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

³Takizawa Laboratory, Japan Radioisotope Association,
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

Abstract

The climate change is emerging as perhaps the greatest environmental topic of the twenty-first century. Forests in tropics have very important roles in climate change. A half of global C is stored in soils. Soil organic matter is recognized as an important factor in C-driven climate change. In order to evaluate the relationship between the stabilization of soil organic matter and the behavior of elements in soil, we studied the elements of size-fractionated soils.

The study site was located at Sakaerat Silvicultural Research station (14°28'06.1"N, 101°54'15.0"E; alt., 420 m), Nakhon Rachasima Province, Northeast Thailand. Meteorological conditions were 26°C, annual mean air temperature and 1,100 mm, annual precipitation with the dry (November–April) and wet (May–October) seasons. The soil type is Orthic Acrisols (FAO/UNESCO).

A total of 3 profiles including two natural forests and one grassland, were sampled at 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm and 50-60 cm depth intervals. Visible plant residues and roots were removed, and soil was air-dried and sieved (<2 mm).

The size fractionation procedure for fine soil (<2 mm) was essentially that of Aoyama *et al.* (1999), modified to separate fine soil into coarse sand (2000-212 μm), fine sand (212-20 μm), and silt-clay (<20 μm) fractions by wet-sieving. Each fractionated soil was ground into powder using an agate mortar and pestle for carbon and elements analysis. The element concentrations were determined by the proton-induced X-ray emission (PIXE) method at NMCC (Nishina Memorial Cyclotron Center). Soil samples were adjusted by the internal reference method.

We detected 25 elements, Al, Cl, Si, Fe, Ti, Zn, Na, Zr, Ca, Cr, Br, Sr, Ni, Mn, Y, Ga, Rb, S, Nb, Cu, K, V, Pb, Mg, and As. The 16 elements, Al, As, Br, Cr, Fe, Ga, Mg, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Y, Zn, and Cu in the silt-clay (<20 μm) fraction show the higher contents than that in other fractions. Si element showed the lower content of the silt-clay (<20 μm) fraction than that of other fractions. That indicated that Si physically breaks into finer particles during weathering. We did not find any correlation between soil carbon contents and element contents in the sand-sized fraction, while there are relationship between soil carbon contents and the contents of 4 elements, Ca, Mn, Br, and S in the silt-clay (<20 μm) fraction. The behaviors of these elements in the soil performed same as soil carbon. These 4 elements show the good index of decomposition of soil organic carbon.