

# 山地流域における吸着プールを考慮した塩基流出過程の解明

成岡 朋弘

広島大学大学院生物圏科学研究科

## Base cation discharge process in mountainous catchments, considering the adsorption pool in soil

Tomohiro NARUOKA

*Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University,  
Higashi-Hiroshima 739-8521, Japan*

### 概要

#### 1. 序論

近年、酸性雨や地球温暖化といった地球環境変化の陸水への影響が懸念されるようになり、山地流域における水素イオンや主要塩基の動態の解明が進んだ。その結果、化学的風化により土壌・岩石の成分である主要塩基が溶出し、このプロセスが流域の酸緩衝作用として大きく寄与していることが明らかになってきた。しかし、過去の研究では、物質収支によって化学風化速度や塩基流出を定量化することが多く、流域から流出する主要塩基の起源については明確にされていない。実際の一次鉱物の化学的風化過程では、二次鉱物（粘土鉱物）に変質する際、解離した一部の陽イオンは二次鉱物に吸着され、さらに、その一部はその後水素イオン等とのイオン交換によって解離してゆく。このため、短期的に正確に塩基収支を見積もるには、直接的な化学風化による塩基流出と塩基プール中に吸着された塩基との交換による塩基流出とを分離してとらえる必要がある。また、酸性雨による短期的な土壌や流域生態系への影響を明らかにするためには、土壌中における陽イオン交換反応を明らかにするだけでなく、溶液のpHや温度にともなうイオンの選択的溶脱、降雨時の非定常な地中水流動なども明らかにすることが必要である。以上の点については、対象とするスケールによって異なってくる。山地スケールでの研究では、流出経路の長短による塩基流出過程の変化に焦点が置かれる傾向が強く、標高による気温の変化やpHの変化にともなう塩基流出機構の変化は明らかではない。また、流域スケールでは、降雨流出機構の解明のために降雨流出のトレーサーとして塩基成分が利用されてきたが、降雨時の流出経路の変化にともなう塩基流出機構の変化については詳細な研究がみられない。斜面スケールでは、前述した短期的な塩基プール中の交換性塩基の変動現象が明らかにされていない。

そこで本研究では、山地流域において、多様なスケールで主要塩基の流出過程を明らかにすること

を目的とする。特に、(1)山地スケールでは、標高にともなう温度条件の違いや地下水流動のスケールにともなうpHの違いによって引き起こされる塩基流出過程の変化を明らかにし、(2)小流域スケールでは、流出経路の違いによる塩基流出の変動を確認し、(3)斜面スケールでは、土壌塩基プールの変動と塩基流出速度を明らかにしていく。

## 2. 研究方法

### 2.1. 試験地

奥多摩試験地：山梨県塩山市北部の関東山地において標高が700 m、1200 m、1500 m、1900 m前後にある2 ha程度の4つの小流域を試験流域とした。なお、それぞれの試験流域をG7、G12、G15、G19とした。流域の尾根から湧水点までの比高は40～100 m程度で、斜面傾斜は40～50°であり、斜面は基盤岩を母材とする比較的厚く明瞭な層位の分化がみられる土壌層によって覆われている。土壌層厚は1～2m程度である。植生はG7がスギ、ヒノキ、G12およびG15がヒノキ、カラマツ、G19がツガ、ウラジロモミを中心とした針葉樹であり、下草としてチシマザサが繁茂している。地質は花崗閃緑岩である。

竹原試験地：広島県竹原市に位置し、一帯は過去からの森林伐採、山火事により土壌荒廃した地域であり、貧栄養の受触土が分布する。試験流域であるTY流域は23年前に山火事があった地域に位置し、標高は30～130mである。流域は北に面し、流域面積は1.55haである。土壌は酸性化しており、層厚は斜面下部で1～2m程度、それ以外の地点では50cm以下で極めて薄い。A<sub>0</sub>層の発達が悪くほとんどみられない。A層の層厚は2～3cm程度で、以下BC層およびC層となる。植生は広葉樹、マツを中心とする2次林であり、下草としてシダ類がみられる。地質は花崗岩である。

### 2.2. 研究方法

1)山地スケールで、温度およびpHによる塩基の流出プロセスの違いを明らかにするため、関東山地の試験流域において詳細に土壌および水試料を採取し、吸着成分、塩基組成を計測した。調査は、1997年から2001年まで、2ヶ月に1度程度行なった。

2)小流域スケールで、降雨流出過程と短期的な塩基流出を明らかにするため、竹原試験流域において河川および試験斜面で流出量および土壌水分張力を測定し、同時に河川水および土壌水を採水し、塩基組成を計測した。調査は2000年6月から2002年3月まで1ヶ月に1度程度行ない、降雨時には集中観測を行なった。

3)斜面スケールで、酸性土壌における吸着プールでの塩基の変動と塩基溶出速度を明らかにするために、竹原試験流域において土壌試料を採取し、その吸着成分、水溶成分および含水率、密度等を測定した。調査は2000年6月から2002年3月まで1ヶ月に1度程度行なった。また、塩基プールを考慮した場合としない場合で塩基収支計算を行ない溶出速度を見積もり、誤差について考察した。

## 3. 山地スケールでの塩基流出機構

### 3.1. 標高による塩基流出過程の変化

奥多摩試験流域において林内雨、土壌水および湧水を採取し、マサと基盤岩石試料の溶出実験も比較のため行なった。溶出量としては、標高の低下にともない上昇した。特にG7(標高700m)では林内雨、土壌水、湧水への濃度上昇が明瞭であったのに対し、標高の上昇に伴って、土壌水および湧

水の水質が林内雨の水質に近くなった。これは、土壤中における溶出速度が標高によって変化した結果であると考えられる<sup>1)</sup>。土壤中のCO<sub>2</sub>濃度は標高によって変化がみられなかったことから、温度が流域における溶出速度を直接制御していたと考えられる<sup>2)</sup>。さらに、G7では林内雨から土壤水、土壤水から湧水への移動にともない溶出が活発に起きていたが、標高の上昇に伴って、溶出の場は土壤の表層に限られる傾向がみられた。それぞれの流域の規模や土壤構造はほぼ同じ傾向にあることから、標高の変化は流域における溶出の場にも変化を及ぼしていることが明らかになった。

### 3.2. 塩基組成の変動 流動経路の吸着成分とpHの効果

林内雨が土壤水に移動する過程でCa<sup>2+</sup>濃度が著しく上昇し、同時にSiO<sub>2</sub>濃度も上昇した。一方、Na<sup>+</sup>濃度はわずかにしか変化しなかった。さらに湧水へと移動する過程においてはNa<sup>+</sup>濃度、SiO<sub>2</sub>濃度の変化に対してCa<sup>2+</sup>濃度が著しく上昇した。ここで、従来の地球化学過程を考慮した多くの研究によれば、土壤中において溶出する溶存成分はマサや基盤岩を構成する鉱物の化学風化過程に依存すると仮定している。しかし、実際の土壤水の化学組成は溶出実験の傾向よりもCa<sup>2+</sup>がNa<sup>+</sup>と比較して著しく溶出している傾向にあり、鉱物の直接的な化学風化過程では説明できない。本地域の風化土層中には、わずかながらもCECが存在し、その中の交換性塩基としてはCa<sup>2+</sup>が主成分であった。すなわち、ここでは粘土鉱物等に吸着されているCa<sup>2+</sup>がイオン交換反応により溶出しているということが推定できる。

また、A層からC層までの土壤水および湧水のCa<sup>2+</sup>とNa<sup>+</sup>およびCa<sup>2+</sup>とSiO<sub>2</sub>の比の関係をみると、それぞれの溶出比は土壤水と比較して湧水でCa<sup>2+</sup>の割合が高くなる傾向がみられた。さらに、山地の浅層地下水と深層地下水を比較すると、浅層地下水でCa<sup>2+</sup>の割合が高かった。従来の花崗閃緑岩の溶出実験からCO<sub>2</sub>濃度の増加にともなうCa<sup>2+</sup>の選択的な溶出が示されている。実際の流域の溶存CO<sub>2</sub>濃度は土壤層より浅層地下水中で最も高く平均で3000ppmに達する。深層地下水中では逆に溶存CO<sub>2</sub>濃度は供給がなくなるため低下し、pHは浅層地下水と比べて上昇する。結果として山地において浅い地下水流動で流出する小流域の湧水はCa<sup>2+</sup>が多く<sup>3)</sup>、深い地下水流動の結果形成される温泉水はNa<sup>+</sup>が多くなった。

以上より、山地流域規模では、森林生態系内で生産されたCO<sub>2</sub>にともない選択的な塩基流出、すなわち、風化土層中の吸着成分がイオン交換反応によって溶出することが示された。結果的には、Ca<sup>2+</sup>がNa<sup>+</sup>に比べて生成された。

## 4. 小流域スケールでの塩基流出機構

竹原試験流域において、水文観測とともに渓流水、土壤の採取を行った。斜面の土壤水の水質は、流域斜面の下部と中・上部で大きく異なる傾向がみられた。すなわち、斜面中・上部においては、Na<sup>+</sup>は土壤層の表層で濃度が低く、深度とともに上昇し、一方、Ca<sup>2+</sup>は表層で高く深層で低くなる傾向がみられた。斜面下部においては、Na<sup>+</sup>はCa<sup>2+</sup>よりもはるかに濃度が高い傾向がみられ、深度による塩基の濃度変化はみられなかった。このように、斜面では水溶性のNa<sup>+</sup>とCa<sup>2+</sup>の濃度分布が顕著に異なった。基底流出時および洪水流出時における河川水のCa<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>とpHの関係をみると、基底流出時と洪水流出時で河川水のpHには変化はみられなかったが、洪水流出時のCa<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup>が基底流出時よりも高くなる傾向がみられた<sup>4)</sup>。この結果は洪水流出時には流出するCa<sup>2+</sup>の割合がNa<sup>+</sup>に対して高くなることを示す。水文観測結果によれば、洪水流出時における斜面の流出経路は土壤表層であり、斜面中部から上部表層付近に顕著に存在しているCa<sup>2+</sup>を流出させ、その結果、河川水中のCa<sup>2+</sup>

の割合が上昇したものと推測される。一方、基底流出時には、流出経路は土壤層の深部にあり、その結果、深層に高濃度で存在する  $\text{Na}^+$  が河川水の水質に寄与しているものと考えられる。

## 5. 斜面スケールでの塩基流出機構

竹原試験斜面において表層から深度50cmまで10cmおきに土壤を採取し、土壤中の交換性塩基の変動および水溶性成分の変動をとらえた。土壤試料の交換性塩基（吸着成分）の変動は、 $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  で顕著にみられ表層ほど変化が大きかった。 $\text{Ca}^{2+}$  で吸着量は0.3 ~ 1.5meq/100gと最大で5倍以上の変動がみられた。 $\text{K}^+$  は変動が小さく、 $\text{Na}^+$  についてはほとんど変動がみられなかった。これは  $\text{Ca}^{2+}$  が容易に吸着・解離する結果であると考えられる<sup>5)</sup>。斜面表層の吸着性  $\text{Ca}^{2+}$  は洪水流出時に表層を通る地下水によって溶脱され湧水まで流出し、洪水時における河川水の  $\text{Ca}^{2+}$  比の増加に寄与していると考えられる。特に、土壤中の吸着量の変動には季節性がみられ、夏季に最も吸着量が低下し秋季に回復する傾向を示した。吸着性塩基の生成量（風化・分解）は夏季から秋季に多く、消費量（酸緩衝・流出）は梅雨季から夏季に多くなり、これらのバランスと吸着量の変動に調和的であった<sup>6)</sup>。

また、土壤中の塩基プールの存在が塩基流出の定量化において重要であることを検証するために、水溶性成分と塩基プールの変動を考慮した場合と水溶性成分の変動のみから見積もった場合とで、塩基収支を行った。その結果、考慮しない場合で年間の総溶出量が実際の10分の1程度に見積もられた。値は変動が大きい時期ほど塩基収支の誤差が大きく、変動の小さい時期やまた変動の小さい  $\text{Na}^+$  や  $\text{K}^+$  では誤差が小さく見積もられた。極めて酸性化している流域においては、塩基の吸着プールの変動を考慮することにより土壌からの塩基流出を1オーダー以上高い精度で見積もることができるようになった。

## 6. 総合考察

山地渓流水中における  $\text{Ca}^{2+}$  の起源はA層やB層で代表される表層土壤層中ばかりではなく、標高の低下に従ってマサで構成される深層風化土層中においても塩基プールからの解離により生じていることが示された。また、森林流域で生産される大気より高い土壌  $\text{CO}_2$  濃度は、 $\text{Ca}^{2+}$  の選択的な溶出を生じ、結果として、岩石化学組成より  $\text{Ca}^{2+}$  の割合が高くなった。また、イオン交換や化学的風化作用は標高の低下にしたがってその速度が速くなる傾向、すなわち温度依存の傾向が確認できた。また、地球化学反応が作用する深度についても標高の低下にともなって、より深層におよぶ傾向がみられ、標高の変化は溶出の場にも変化を及ぼしていることが明らかになった。以上の結果から、山地スケールでの塩基流出において、土壌塩基プールでのイオン交換反応や、pH変化にともなう  $\text{Ca}^{2+}$  の選択的溶出過程が重要なプロセスであることが示された。

小流域スケールでは酸性化した貧栄養土壌が分布する小流域において流出経路の違いが湧水の溶存塩基の成分比に変化を及ぼすことが示された。すなわち、表層土壤層に卓越する水溶性および交換性の  $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  が降雨イベント時に斜面表層を通る流出経路によって流出し、湧水の  $\text{Ca}^{2+}$  および  $\text{Mg}^{2+}$  の比が高くなった。一方、基底流出時には流出経路が深層にあり、深層において卓越する  $\text{Na}^+$  が流出し、湧水の  $\text{Na}^+$  比が高くなった。また、斜面スケールでは塩基プール中の交換性塩基は常に変動している点が明らかになり、土壌塩基プール中の交換性塩基として  $\text{Ca}^{2+}$  が卓越していること、特に表層での変動が大きいことから、酸性化した土壌が分布する流域では、塩基、特に  $\text{Ca}^{2+}$  の流出起

源としての塩基プールの重要性が示唆された。また、土壌中での塩基収支を見積もる際、塩基プール中の交換性塩基が変動している場合にはその変動分を考慮する必要性が示唆された。

本研究の結果は、山地流域において塩基流出を扱う場合、対象とするスケールの違いによって考慮すべき点が異なることを示し、対象スケールにあった問題設定が必要であることが示された。

## 7. 結 論

本研究により以下のことが明らかとなった。

- 1) 山地スケールでは、溶存CO<sub>2</sub>濃度によって制御されるpHの変化にともなう変化、温度の変化にともなう変化が重要なプロセスであった。
- 2) 小流域スケールでは、降雨イベント時と無降雨時での地中水の流出経路の変化が湧水に流出する塩基に重要な影響を与えていた。その起源としては、表層でCa<sup>2+</sup>およびMg<sup>2+</sup>が塩基プールからの溶出であり、深層で風化起源のNa<sup>+</sup>が卓越した。
- 3) 斜面スケールでは塩基プールからのCa<sup>2+</sup>の流出が重要なプロセスであり、交換性塩基は常に変動し平衡状態にはなかった。また、塩基流出をモデル計算によって求める場合、塩基プールの変動を考慮する必要性が示唆された。
- 4) 山地流域における塩基流出を扱う場合には対象とするスケールによって考慮すべき点が異なるので注意が必要である。