

宮島の土壌化学特性と物質循環

－周辺の土壌劣化流域との比較－

小野寺真一*、M.D. Birmano**
成岡 朋弘**、藤崎知恵子**

1. はじめに

富栄養化は瀬戸内海を含む閉鎖海域や湖沼では重要な環境問題の一つである。富栄養化物質は流入河川を通して閉鎖海域に供給されることから、流入河川での負荷量が調査されてきた(海老瀬、1985; 宗宮、1993)。ただし、地球温暖化や酸性雨といった環境変化にもなって流出負荷量に変化し、また植生、土壌、地質によってその影響は異なる(小野寺、2000)ため、様々な植生及び土壌からなる流域で源流域における土壌中の物質循環を明らかにすることが必要である。特に、瀬戸内海沿岸は、栄養分の少ない受蝕土(「日本の森林土壌」編集委員会、1983)が広く分布し、国有林が少ないためいわゆるスギやヒノキなどの人工針葉樹林は少なく、古くから森林が過剰に利用されてきた歴史があり一時はげ山化し、その後2次林となっている。一方で、宮島は歴史的に森林が管理され原始林として天然林も残っている。そのため、土壌も栄養分に富むと考えられる。以上のように、土壌が劣化した流域と保護されてきた流域では現在の土壌中の物質循環も異なるものと予想される。しかし、これまで十分な調査は行われていない。

また、水源流域において水質形成過程を明らかにすることは、水源水質の持続的利用とそのため
の保全にとって必要不可欠である。特に、流域へのインプットである降水中で酸性物質(Likens et al., 1967; Cogbill and Likens, 1974; Driscoll et al., 1989; 堀田他、1990)や重金属成分(Church et

al., 1984; Jichells et al., 1984; Lindberg and Thurner, 1988)が確認され始めて以来、その水源水質への影響が危惧され、降水から土壌水、河川水への水質変化が議論されるようになってきた(平田・村岡、1988; Likens and Bormann, 1995; 加藤他、1995)。欧米では、1970年代に降水中の酸性物質や重金属の濃度がピークに達しその後低下傾向を示したが、土壌中及び溪流水中の濃度の変化はそれほど大きくなかったことが確認されている(Driscoll et al., 1988; Driscoll et al., 1994)。これは、土壌の緩衝作用という浄化機能(van Breemen et al., 1983; 堤、1987; 佐藤・大岸、1990; 岩坪、1990)としてとらえることもできる。しかし、実際には、土粒子への吸着(Tiller, 1989; McDaniel and Buol, 1991; Teutsch et al., 1999)とそれにとまなう主要塩基の流亡(Christophersen et al., 1990)という土壌の汚染物質の蓄積という見かけの浄化作用や、土壌中における降水の降下浸透にとまなう遅延効果(Webb and Walling, 1985; Jardine et al., 1990)などの影響も考慮する必要がある。以上のように、水源水質管理のためには、土壌中の詳細な物質循環プロセスの追跡が必要である。これまで、窒素(大類他、1995; 加藤他、1995; Likens and Bormann, 1995)及び炭素(岩坪、1996; Ohte et al., 1995; 佐竹、1999)といった生態系における主要な成分については十分な調査が行われてきた。しかし、酸性降下物の中和や重金属の降下という視点からすると陽イオンの変化が重要であるが、Moldan and Cerny (1994)、

* 広島大学・総合科学部自然環境科学講座 e-mail; sonodera@hiroshima-u.ac.jp

** 広島大学・大学院生物圏科学研究科

Likens and Bormann (1995)、岩坪(1996)や佐竹(1999)にれば、降水から湧水に至る過程での酸性物質や重金属とその他の陽イオンとの反応を考慮した研究は十分ではない。特に、瀬戸内流域は酸性雨に対する緩衝能も低い(佐藤・藤田、1994)だけでなく、山火事にともなう流域からの塩基の流出量が増大することが報告されており(Nakane et al., 1983)、森林流域と山火事等による土壌劣化流域における塩基流出の変化についての詳細な議論が必要である。しかしながら、流出負荷という視点から、瀬戸内地域の山地源流域で調査が行われた例はほとんど無い。以上のように、瀬戸内海への負荷量の評価という意味からも、山地流域における物質循環の特徴を明らかにし、今後の変化を予測していくことは重要である。

本研究では、森林に覆われた宮島と瀬戸内地域に広く分布する受蝕土壌からなる流域において、降水から湧水に至る過程での水質変化、すなわち土壌中での物質循環を明らかにすることを目的とする。特に、本論では酸性化に注目し、流域内におけるpHの変化とそれにとまなう金属イオンの変化を中心に議論した。

II. 試験流域および研究方法

1. 研究地域

研究地域は、広島県西部の宮島町と海を隔てて隣接する大野町及び広島県東部の竹原市の山地流域である(図1)。地形的には、瀬戸内海沿岸に位置するが、中国地方の脊梁山地である標高1000m

から1500mの中国山地と連続した山地をなす。海岸付近の山地における最高標高は500mから800m程度である。また、北東-南西方向の多数の線状構造がみられる。瀬戸内海沿岸地域には広く花崗岩が分布する。研究対象地域は全て花崗岩からなる山地である。気候的には西部が年降水量1500mm、東部が1000mm程度と異なるが、気温は年平均が15℃程度と東西での変化はほとんどない。

また、古くから森林が過剰に利用されれば山化した経緯から、土壌が内陸部に比べ侵食を受け有機分に富むA層及び漸移層であるB層が薄く、栄養分に乏しい受蝕土が広く分布すると考えられる(「日本の森林土壌」編集委員会、1983)。また、広島県は昭和40年代の統計でも昨年度の統計でも山火事発生件数は、日本で最も多くその焼失面積も大きい。広島県西部の大野町では平成11年5月に約100haが焼失し、東部の竹原市では平成6年3月に約350haが焼失し、宮島でも10年以上前に西部が焼失している。竹原市ではその1年後、肥料及び種子の空中散布が行われたが、植生の回復は思わしくなかった。さらに、平成10年末には木本類(アカマツ、クヌギ、ヤマザクラ)の植栽及び根元への肥料の散布が行われた。現在は、植栽木が樹高1m前後になり、その他にシダやワラビ等の草本類が50cm~80cm程度被覆している。植被率が現在でも50%を下回るような地表面の露出したエリアがパッチ状にみられる。

2. 研究方法

流域へのインプットとして、広島県西部の宮島

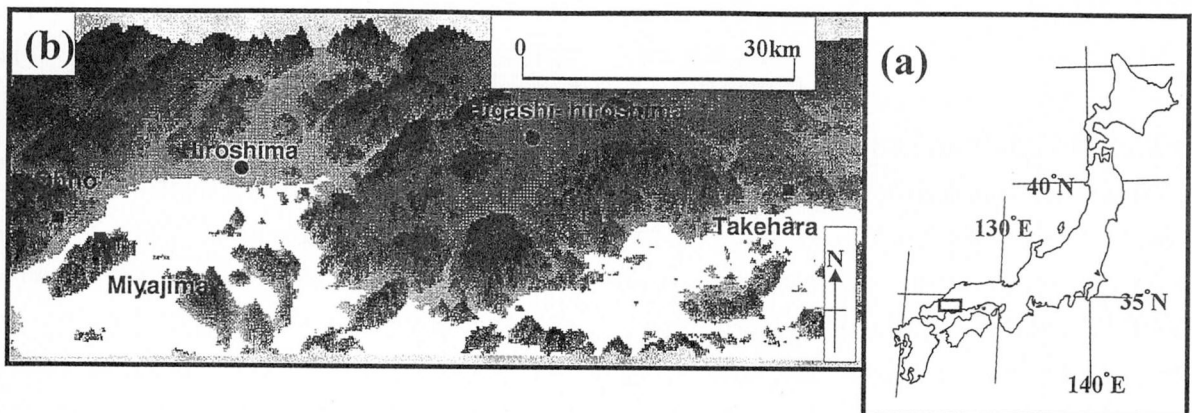


図1 研究地域

町役場、広島市内の広島大学東千田キャンパスの校舎屋上、東広島市内の広島大学総合科学部校舎屋上、広島県東部の竹原試験地で、降水の採水を行った。また、宮島町及び竹原市には水文試験流域を建設した。宮島試験流域(MM)は島のピークをなす標高530mの弥山から宮島原始林が分布する斜面を北流する紅葉谷の1源流をなし、尾根付近が標高約200m程度である。試験流域は、降雨を採水した町役場から500m程度のところに位置する。試験流域にはパーシャルフリューム堰を設置し、水位、水温及び電気伝導度を自記記録した。竹原試験流域は竹原市街地から東へ2kmの付近にある内浜川の1源流をなす2流域である。一つは、山火事から6年経過した植生があまり回復していない1次谷流域(TB)で、尾根付近の標高が180mである。もう一方は、山火事から20年以上経過した2次林の流域(TY)である。それぞれには三角堰を設置し、水温及び水位を自記記録した。なお、TBでは電気伝導度も自記記録した。また、土壌水及び地下水を吸引方式で採水した(Onodera and Kobayashi, 1995)。竹原試験地の渓流水に関しては、降雨時に集中的なサンプリングを行った。本論では、1999年6月24日から6月30日にかけての期間に行った集中観測の結果を示す。

また、大野町で山火事直後には径10cm、深度5cm、10cm、20cmの不攪乱土壌カラムを採取し、竹原試験地に設置し、下端からの流出水を採水した。本論では、これをマイクロライシメーターと呼ぶ。比較のため、山火事から6年経過した土壌と20年経過した土壌も同様に採取し、試験地に設置した。さらに、土壌の化学特性を明らかにするため各流域及びその周辺では土壌を採取した。安定した森林に覆われた宮島と山火事や侵食による攪乱を多く受けてきた大野町の山火事試験地では、詳細な土壌調査を行った。宮島では1999年9月に計13地点で、大野町では3地点で山火事直後(1999年5月)から2000年11月まで計5回土壌調査を行った。

持ち帰った土壌試料は、実験室で化学実験に供した。水抽出、1N塩化カリウム溶液抽出、1N酢酸アンモニウム溶液抽出実験を行い、それぞれ

土壌pH、吸着性 NH_4^+ 、交換性陽イオンの測定に使用した(安道他、2000)。降水、土壌水、渓流水サンプルは持ち帰った後、土壌抽出液とともに実験室で無機化学分析に供した。それぞれ、 HCO_3^- はpH4.8までの H_2SO_4 滴定により、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} はイオンクロマトグラフィにより、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、Al、Mn、Zn、 SiO_2 についてはICP発光分析装置により、 NH_4^+ は分光光度計により定量した。

III. 結果と考察

1. 降水から土壌への物質移動

1.1 降水の化学特性

竹原試験地及び東広島試験地における降水のpHと重金属イオンのうちZnとMnの積算供給量を図2に示す。各地の降水のpHは平均で4.8程度と大きな差は無かったものの、金属イオンの積算供給量には大きな差が認められた。竹原では、Mnで東広島の5倍程度、Znで10倍程度に達した。各試験地における重金属の供給量は、東広島がもっとも小さく、竹原、広島、宮島の順となった。海岸地域は工業活動が盛んであることから、それらの影響を大きく反映した結果になっているものと考えられる。また、表1に宮島、広島、東広島、竹原の4地点における1999年7月から6ヶ月間の積算量を示す。降水量の影響もあるが、明らかに

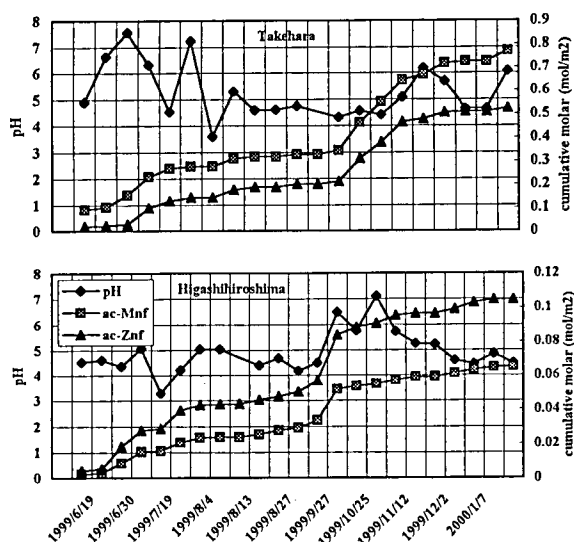


図2 降水のpH及びMn及びZnの供給量

表1 降水中の金属イオン量
(1999年7月～2000年1月)

	Mn (meq)	Zn (meq)
Miyajima	0.215	0.848
Hiroshima	0.140	1.199
Higashi-Hiroshima	0.049	0.077
Takehara	0.690	0.349

西部で多い傾向をもつ。

竹原及び東広島試験地における林外雨及び林内雨のMn濃度を図3に、Na濃度を図4に示す。各流域ともに林内雨のMn濃度が林外雨の濃度より高く、その近似直線の傾きはそれぞれ竹原試験地で3.77、東広島試験地で4.87であった。従来の研究(佐竹、1999など)のように、湿性降水物を降水による供給量、林内雨と林外雨の供給量の差を

乾性降水物とすると、この結果は、明らかに竹原より東広島の方が乾性降水物によるMnの供給の割合が大きいことを示す。これは、竹原試験地の樹種が広葉樹であるのに対し、東広島試験地が針葉樹であったことが影響しているものと考えられる。また、Na濃度については、近似直線の傾きが竹原で13.7、東広島で0.99である。すなわち、従来の多くの研究で指摘されているように、海岸地域における塩類の乾性降水物が多いこととともに、内陸地域において乾性降水物がほとんど無いことが示されている。以上のことを総合すると、内陸部(東広島)におけるMnの乾性降水物は海岸付近すなわち広島市などから遠路輸送されてきたものではなく、東広島においてその起源があることが推定される。また、東広島と竹原試験地それ

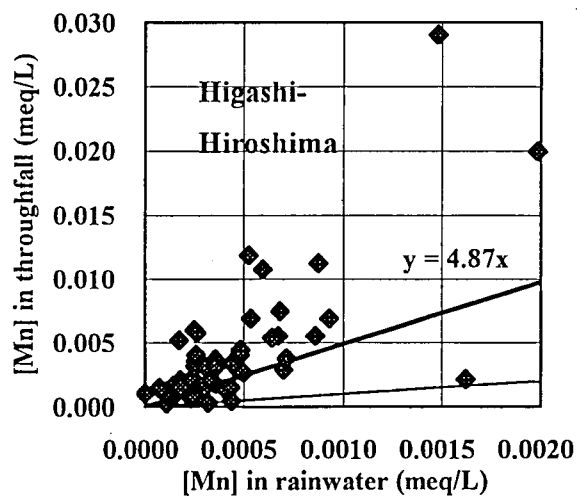
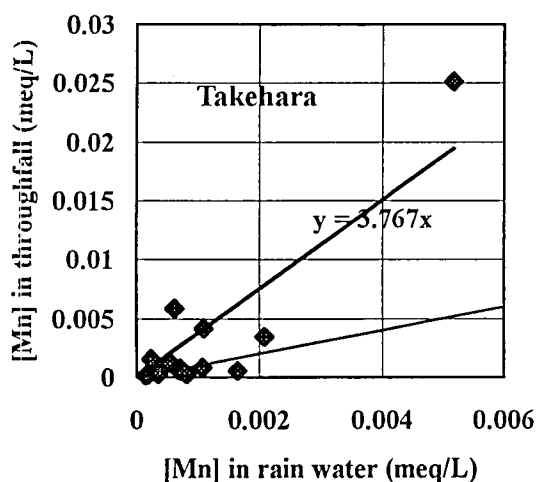


図3 竹原及び東広島試験地における林外雨及び林内雨のMn濃度

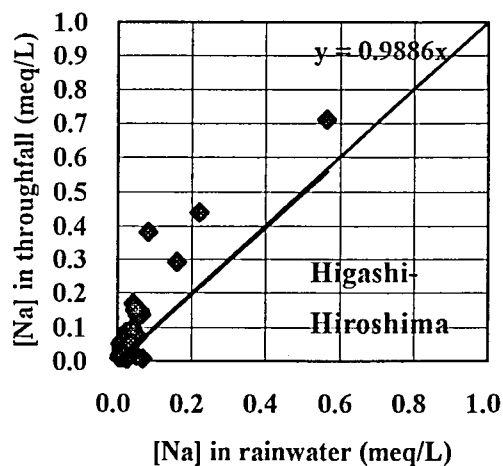
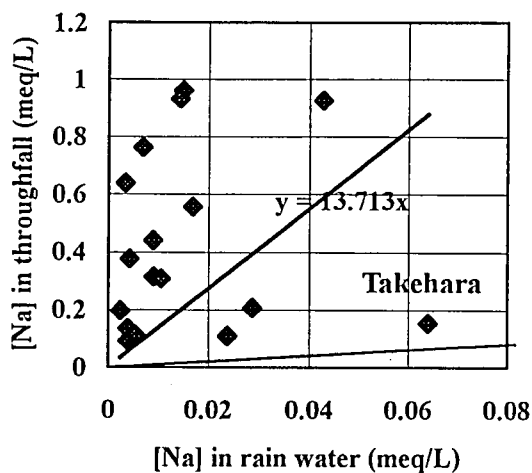


図4 竹原及び東広島試験地における林外雨及び林内雨のNa濃度

表2 竹原試験地の土壌化学特性

Horizon	Depth	pH	Exchangeable base Cation (meq/100g)	CEC (meq/100g)	Base saturation (%)
A	~1.5cm	5.06	0.14	10.35	1.4
B	1.5~15cm	4.87	0.038	6.36	0.6
C	15cm~	4.62	0.028	4.51	0.6

Horizon	Depth	pH	Adsorbed Mn (meq/100g)	Adsorbed Zn (meq/100g)
A	~1.5cm	5.06	0.14	0.00
B	1.5~15cm	4.87	0.05	0.00
C	15cm~	4.62	0.05	0.00

ぞれの湿性降下物に比べ乾性降下物の差が小さい点は、降水の初期に重金属が降下する傾向をもつことと針葉樹の樹皮からの溶出などの可能性が上げられ、今後の検討が必要である。

1.2 土壌の化学特性

表2に竹原試験地における土壌の化学性を示す。土壌pHは5.0以下であり、本試験地土壌は酸性土壌である。また、交換性主要塩基量(吸着態Na, K, Mg, Ca)は、いずれも褐色森林土壌(10meq/100g程度)に比べ低い値である。結果として塩基飽和度も極めて小さい。一方で、吸着態重金属イオンは、Mnで0.14meq/100gと交換性塩基量とはほぼ同量存在した。すなわち、大気降下性重金属は、表層土壌に吸着されていることが示された。また、その吸着量としてA層のみとした場合、比重が2とすると42meq/m²と見積られる。降水による供給量が1999年の4.1meq/m²/yで、一旦吸着された後溶脱されていないとすれば、約10年分の重金属が吸着されていることになる。ただし、竹原試験地は酸性土壌でMnの流出が確認されている(Birmano et al., 2000)ことから、現在の重金属の供給レベルで10年以上継続していることが推測される。

図5に、山火事流域での土壌pHのプロファイル変化を示す。山火事後2週間で採取した土壌は、表層で7以上の高い値を示す。2ヶ月後の7月には、pHは表層で5.3程度まで低下しているが、深度10cmでは逆に5月より上昇している。さらに、1年後、1年半後と、プロファイル全体に低下す

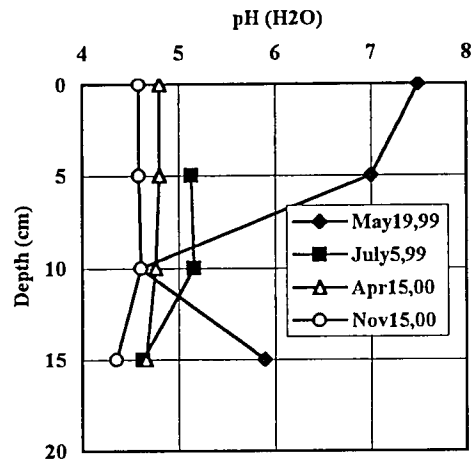


図5 大野町流域での山火事後の土壌pHの変化

る傾向がみられる。なお、吸着態の塩基濃度はpHの傾向と同様の傾向を示した。以上の結果から、表層土壌では山火事直後にミネラルの急激な無機化が生じ、塩基が急増しpHが上昇したものと考えられる。しかし、その後、酸性雨の供給にともない塩基の流亡が進み、約1年後には酸性化したものと考えられる。ただし、流域土壌の酸性化には、酸性雨による効果だけではなく、土壌侵食による影響も大きいことが観察から確認されている。

さらに、図6に不攪乱土壌(マイクロライシメーター)下端からの流出水の流量及びpHを示す。これは、大野町での山火事直後に採取した深度10cm、及び20cmの土壌である。流量は、設置から1ヶ月後の1999年の梅雨に最も上昇した。流出水のpHは、梅雨直前の時期に7以上まで上昇した。その後、速やかに6程度まで低下し、その後1年3ヶ月は安定している。しかし、その後は、

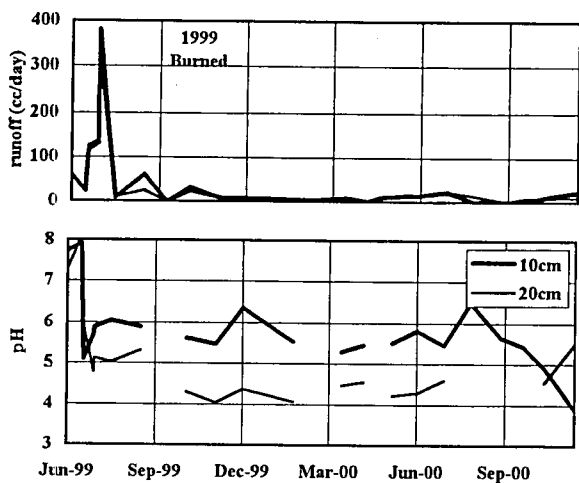


図6 マイクロライシメーター(山火事直後に採取した深度10cm、20cmの土壌カラム)の下端からの流出量と溶液pHの変化

急激に低下し、pHは4程度まで低下した。この時期、流出水中ではAl濃度が上昇しており、酸性化の傾向を示す。一方、深度20cmでは、初期のころからpHが低い傾向を示している。これは、風化層自体が酸性化した花崗岩からなる影響もあると考えられる。以上のように、広島県の山地流域では山火事にともない急激な酸性化過程が確認できた。

一方、宮島における土壌の化学性を表3に示す。竹原試験地とは対照的に、交換性主要塩基量(BC)が多くなっている。ただし、pHは低く、酸性化している傾向を示す。また、吸着性の重金属量は、竹原に比べて1オーダー低い傾向を示す。

2. 河川からの化学成分の流出過程

2.1 定常的な流出

図7に竹原及び宮島試験地で観測された河川流量を示す。期間は2000年9月から11月までを示し、流量の単位は単位面積あたりの流出高で示してある。また、電気伝導度も示す。欠測期間はあるが、

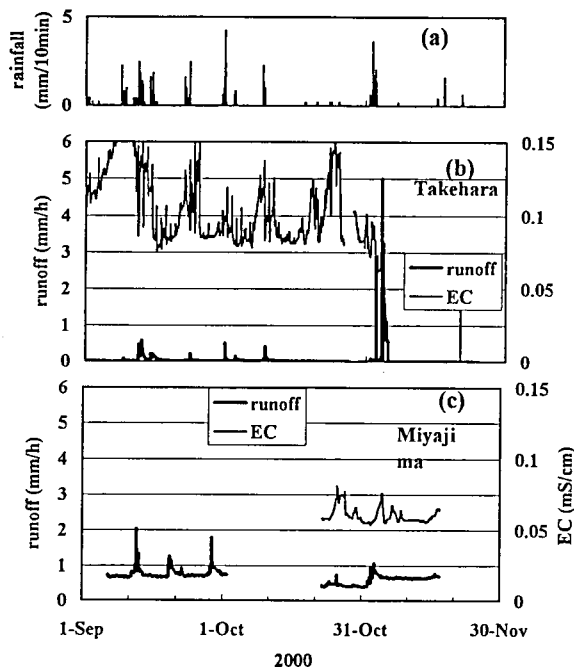


図7 竹原及び宮島試験地における河川流出量及び電気伝導度変化

降雨の無いときの流量(低水時)は明らかに宮島流域で高い。また、11月2日の洪水流出は竹原試験地のほうが大きな変化を示している。すなわち、土壌劣化の著しい竹原試験地では降雨の貯留容量が小さく、洪水時には直接流出として大量に排水し、無降雨時には流量が著しく低下する特性を有する。一方、宮島流域は貯留容量が大きく洪水を緩和し、その分無降雨時に分配する特性を有している。

図8に2流域における1年間のpHおよび珪酸濃度の変化を示す。宮島流域はpHがほぼ7前後で安定しているのに対し、竹原流域ではpHが6前後と低く、夏季に5.5、冬季に6.5と季節的に変動している。各流域にもたらされる降雨のpHは4.8程度と同じであるが、宮島流域でより酸が緩衝されている。また、特に竹原流域では夏季に低下しているが、流域の水貯留容量が小さい上に夏

表3 宮島土壌の化学特性

rneq/100g	pH(H ₂ O)	Na	Mg	K	Ca	BC	Al	Mn	Zn	Cu	Pb
Mt.Misen	4.46	0.0157	0.1053	0.0985	0.7930	1.0125	0.0458	0.0040	0.0014	0.0003	0.0004
Mt.Komagabayashi	4.47	0.0112	0.1239	0.1107	0.3666	0.6124	0.0306	0.0062	0.0011	0.0003	0.0005
Mt.Iwafune	4.18	0.0446	0.4075	0.1266	2.2149	2.7937	0.0066	0.0260	0.0024	0.0004	0.0005
Exp.Cat.	4.8	0.0201	0.0336	0.0677	0.0580	0.1794	0.0115	0.0024	0.0005	0.0002	0.0002
Yamashiroura	4.67	0.0491	0.0798	0.0586	0.1168	0.3043	0.0022	0.0017	0.0005	0.0002	0.0001
Tsutsumigaura	4.53	0.0403	0.0294	0.0588	0.0884	0.2169	0.0828	0.0027	0.0006	0.0002	0.0001

*BC; 交換性主要塩基量(Na, K, Ca, Mg)

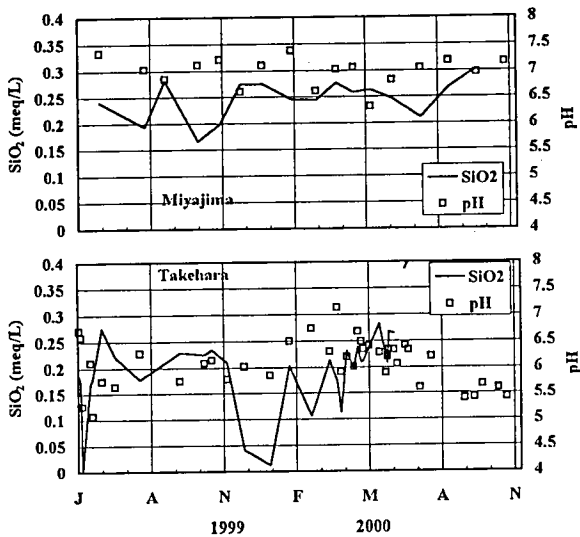


図8 竹原及び宮島試験地における河川水のpH及び珪酸濃度の変化

季に降雨による酸の供給が多いため、酸性物質が緩衝されずに速やかに流出しているものと考えられる。一方、珪酸濃度は両流域とも0.3meq/L以下であるが、竹原流域で変動が大きい。珪酸濃度と流量の積である負荷量(フラックス)は花崗岩流域では風化量を意味する。流量は宮島流域で大きいことから、宮島流域で風化速度が大きいといえる。以上より、古くから森林が保持されてきた宮島流域では、降雨がゆっくりと浸透流出するため、風化速度も大きく流域への塩基供給量も大きく、土壤養分も豊富で酸性物質も緩衝されているといえる。

2.2 降雨流出過程

観測期間中の1次谷流域(B1)でのハイドログラフと主要塩基濃度及び Al^{3+} 濃度の変化を図9に示す。期間中の降水量は286mmで、流出量は3回の降雨イベント(P1、P2、P3)ごとにそれぞれ降雨とともに増加し、直接流出率は1回目のイベントから3回目にかけて40%から70%程度まで増加した。降雨期間中は十分に湿潤であったため、Bsp流域とB1流域とで流出率には差がなかった。主要塩基濃度は、降雨にともなう流出ピーク時に低下する傾向を示し、流出量の低減時期に濃度が回復し、やや降雨前より濃度が上昇している。また、この傾向は、1回目のイベントでは顕著ではないが、2回目、3回目では顕著にみら

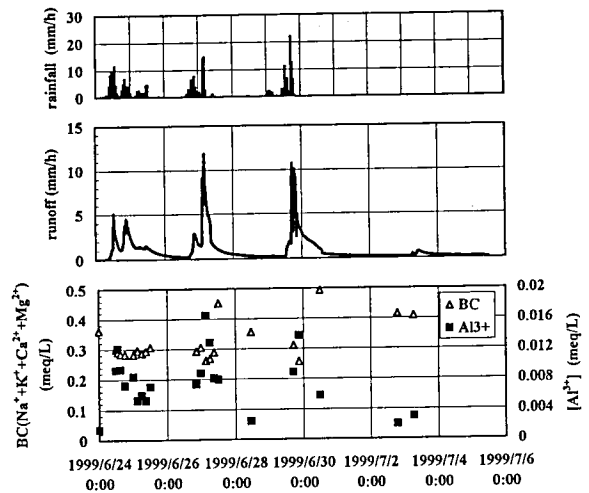


図9 竹原試験地の洪水流出時における主要塩基濃度及びアルミニウム濃度の変化(1999年6月24日~7月6日)

れる。一方、 Al^{3+} 濃度は逆の傾向を示す。流出量のピーク時に濃度が上昇し、流量の低減にもなって濃度が低下している。そして、この傾向は1回目よりも2回目、3回目と顕著になっている。従来から、 Al^{3+} は酸性化にともなって流出することが報告されていることから、酸性化の指標としてとらえられている。すなわち、本結果は、流出ピーク時に最も酸性化していることを示すものである。

竹原試験地の降水、土壌水、地下水、河川水の主要塩基濃度と Al^{3+} 濃度の関係を図10に示す。各点は1年間のデータの算術平均値である。なお、

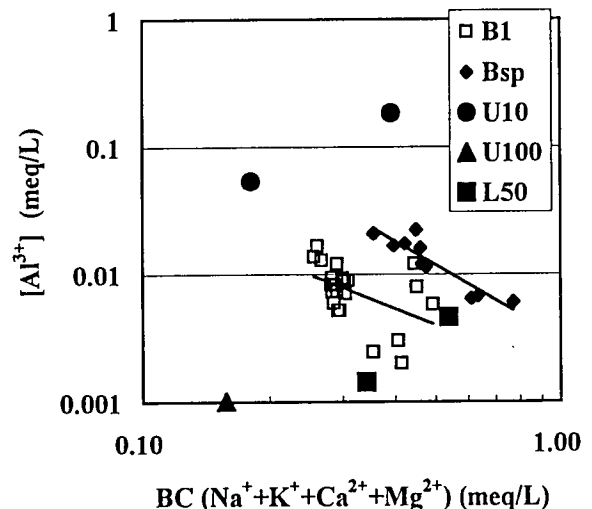


図10 洪水流出時の河川水(B1;下流、Bsp;湧水)、及び降雨前の斜面表層(深度10cm)土壌水、斜面深度100cmの土壌水、地下水の主要塩基とアルミニウム濃度の関係

1次谷河川及び湧水の結果を分けて示す。降水は両濃度ともに低いが、表層土壌ではそれぞれ高濃度である。これは、降水に含まれる H^+ が土壌中でイオン交換反応を起こし陽イオンと交換しているためである。ただし、土壌中の交換性主要陽イオン量は多くないため、 Al^{3+} 濃度も上昇していると考えられる。すなわち、土壌の酸性化が示唆される。一方で、斜面の風化土層中においては Al^{3+} 濃度はほとんど検出されない。これは、風化土層中へ強酸性物質があまり達していないことを意味する。また、谷底地下水では Al^{3+} 濃度がやや上昇し、河川水では地下水より高い濃度が検出されている。すなわち、河川水は、基本的には谷底地下水に近い傾向を示すが、 Al^{3+} 濃度がより高いことを考慮すれば、斜面の表層土壌の影響を受けていることが示唆される。

続いて、渓流水の主要塩基濃度と Al^{3+} 濃度の関係に、イベント直前の土壌水及び地下水の組成をプロットした。この結果をもとに、土壌水や地下水をエンドメンバーとした寄与域の推定を行う。まず、Bspに関しては、関係式上を直線的に変化することから、この2成分で見た場合には、谷底地下水と表層土壌水の2成分混合といえる。流出量の多い時期は Al^{3+} 濃度が高くより表層土壌水に近づくことから、より表層を経由した酸性の地中水の寄与が示される。一方で、B1については、必ずしも直線関係ではないことから、地下水と表層土壌水という考えではなく、そこに斜面風化土層中の水やBspからの河川水なども起源として考えなければならない。流量が多い時期は Al^{3+} 濃度が高くなっているが、この起源として、上流のBspからの寄与と斜面風化土層中の地中水の混合、または、Bsp同様に谷底地下水と表層土壌水の混合という考え方が出来る。また、減水期においては、 Al^{3+} 濃度が低下し主要塩基濃度が上昇することから、谷底地下水によって寄与されているといえる。

IV. ま と め

本研究は、広島県の瀬戸内海沿岸地域で森林が

過剰な頻度で利用されてきた地域に分布する受蝕土壌に覆われた流域と健全な天然林に長い間覆われていた宮島の紅葉谷流域において、物質循環を比較した。その結果以下のようなことが明らかになった。

- 1) 降水は宮島でも広島でも竹原でもpHには大きな差は無かった。ただし、重金属に注目すると地域差が見られ、より西部で高い傾向を示した。
 - 2) 宮島とそれ以外の地域の土壌を比較すると、どの地域も土壌pHは低く酸性土壌の特性を示したが、明らかに宮島では吸着態の主要塩基量が多く、竹原では貧栄養状態であった。一方、重金属はより竹原で保持されていて、その量は10年分の降雨のインプットに匹敵した。
 - 3) 山火事にともなって、その直後土壌では無機化が生じ塩類が急激に上昇した。その後速やかに塩基類は洗脱され流亡した。その結果、山火事流域では著しく酸性化した。
 - 4) 山火事流域では侵食等により水貯流量が低下し、洪水流出は激しくなり、一方で低水時には極端に水位が減水した。また、河川水中のpHも特に雨季に低く、酸緩衝能が低下した。一方、珪酸濃度も低く化学風化速度も小さいことが示唆された。
 - 5) 洪水流出時のエンドメンバー法による流出寄与成分の推定の結果、表層土壌を経由する成分が増大していることが明らかになった。
- 今後は、宮島流域での1年間の物質収支をもとに金属イオンの負荷量や風化速度の違いを明確にしていく必要がある。

謝 辞

本研究は、広島大学総合科学部研究プロジェクト助成金、文部省科学研究費補助金(奨励A;課題番号12780069)、アサヒビール学術振興財団、河川環境管理財団、及び中国電力技術研究財団により助成を受けて行ったものである。研究計画の際に広島大学総合科学部開発一郎教授には御助言頂き、また、化学分析に際しては広島大学生物圏

科学研究科竹田一彦博士にご指導頂いた。さらに、現地調査に際して広島県農林事務所の職員の方々には多くの便宜をはかっていただいた。広島大学大学院生物圏科学研究科環境地形学研究室の大学院生安道幸仁、村井知里、長濱則夫君には協力を頂いた。以上記して感謝の意を表します。

文 献

- 安道幸仁・小野寺真一・成岡朋弘・松本栄次 (2000)：亜高山帯山地流域における表層土壌の酸緩衝能－斜面スケール及び山地スケールでの変動。日本林学会誌，82：227-233。
- Birmano, M.D.・小野寺真一・藤崎知恵子・長濱則夫・竹田一彦 (2001)：山火事流域における重金属イオンの流出過程について。地下水学会誌(投稿中)
- Christophersen, N., Robson, A., Neal, C., Whitehead, P.G., Virgerust, B. and Henriksen, A.(1990): Evidence for a long-term deterioration of streamwater chemistry and soil acidification at the Birkenes catchment, southern Norway. *Jour. Hydrol.*, 116: 307-320.
- Church, T.M., Tramontano, J.M., Scudlark, J.R., Jickells, T.D., Tokos, J.J.Jr., Knap, A.H. and Galloway, J.N.(1984): The wet deposition of trace metals to the western Atlantic Ocean at the mid-Altantic coast and on Bamuda. *Atmospheric Environment*, 17: 1779-1786.
- Cogbill, C.V. and Likens, G.E.(1974): Acid precipitation in the northeastern United States, *Water Resour. Res.*, 10: 1133-1137.
- Driscoll, C.T., Fuller, R.D. and Simone, D.M. (1988): Longitudinal variations in trace metal concentrations in a northern forested ecosystem. *Jour. Environ. Qual.*, 17 : 101-107.
- Driscoll C.T., Likens, G.E., Hedin, J.S. Eaton, J.S. and Bormann, F.H.(1989): Changes in the chemistry of surface waters: 25-year results at the Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Environ. Sci. Technol.*, 23: 137-143.
- Driscoll, C.T., Otton, J.K. and Iverfeldt, A. (1994): Trace metals speciation and cycling. In *Biogeochemistry of Small Catchments*, Moldan, B. and Cerny, J.(eds.): 299-322. John Wiley & Sons, Chichester.
- 海老瀬潜一(1985)：汚濁物質の降雨時流出特性と流出負荷量。水質汚濁研究，8：499-504。
- 平田健正・村岡浩爾(1988)：森林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響。土木学会論文集，399：131～140。
- 岩坪五郎(1996)：森林生態学。文永堂出版，東京。
- Jardine, R.M., Wilson, G.V. and Luxmoore, R.J. (1990): Unsaturated solute transport through a forest soil during rain storm events. *Geoderma*, 46: 103-118.
- Jichells, T.D., Knap, A.H. and Church, T.M. (1984): Trace metals in Bermuda rainwater. *Jour. Geophys. Res.*, D89: 1423-1428.
- 加藤正樹・小野寺真一・小林政広(1995)：源頭部森林小流域における土壌溶液と湧水の硝酸態窒素の動態。日本林学会誌，77：516-526。
- Likens, G.E., Bormann, F.H., Johnson, N.M. and Pierce, R.S.(1967): The calcium, magnesium, potassium and sodium budgets for a small forested ecosystem. *Ecology*, 48 : 772-785.
- Likens, G. E. and Bormann, F. H.(1995): Pattern and process in a forest ecosystem. Springer-Verlag, New York.
- Lindberg, S.E. and Thurner, R.R.(1988): Factors influencing atmospheric deposition, stream export, and landscape accumulation of trace elements in four forested watersheds. *Water, Air, and Soil Pollution*, 39: 123-156.
- McDaniel, P.A. and Buol, S.W.(1991): Manganese Distributions in Acid soils of Carolina Piedmont. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 152-158.
- Moldan, B. and Cerny, J.(1994): *Biogeochemistry in small catchments*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Nakane, K., Kusaka, S., Mitsudera, M. and

- Tsubota, H. (1983): Effect of fire on water and major nutrient budgets in forest ecosystems II. Nutrient balances, input (precipitation) and output (discharge). *Jap. J. Ecol.*, 33: 333-345.
- 「日本の森林土壌」編集委員会 (1983) : 第15章 中国地方の森林土壌. 日本の森林土壌, 「日本の森林土壌」編集委員会 (編) : 365-382. 日本林業技術協会, 東京.
- 大類清和・生原喜久雄・相場芳憲 (1995) : 森林小集水域での水質変化の過程. *水文・水資源学会誌*, 8 : 367-381.
- Ohte, N., Tokuchi, N. and Suzuki, M. (1995): Biogeochemical influences on the determination of water chemistry in a temperate forest basin : Factors determining the pH value. *Water Resour. Res.*, 31 : 2823-2834.
- 小野寺真一 (2000) : 多摩川最上流域における水質形成に及ぼす立地環境の影響の解明. *とうきゅう環境浄化財団研究助成*, 204, 136p.
- Onodera, S. and Kobayashi, M. (1995): Evaluation of seasonal variation in bypass flow and matrix flow in a forest soil layer using Br^- . *IAHS Publication*, 229 : 99-107.
- 佐竹研一 (1999) : 酸性環境の生態学. 愛智出版, 東京.
- 佐藤一男・大岸 弘 (1990) : 酸性降下物に対する土壌中和能の簡易測定法. *環境科学会誌*, 3 : 37-48.
- 佐藤一男・藤田慎一 (1994) : わが国の酸性雨の実態と地下土壌への影響. *地熱エネルギー*, 19 : 126-131.
- 宗宮 功 (1993) : 自然の浄化機構. 技報堂出版, 東京.
- Teutsch, N., Erel, Y., Halicz, L. and Chadwick O.A. (1999): The influence of rainfall on metal concentration and behavior in the soil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 3499-3511.
- Tiller, K.G. (1989): Heavy metals in soils and their environmental significance. *Advanced in Soil Science*, 9: 113-142.
- 堤 利夫 (1987) : 森林の物質循環. 東京大学出版会, 東京.
- van Breemen, N., Mulder, J., and Driscoll, T. (1983): Acidification and alkalization of soils. *Plant and Soil*, 75: 283-308.
- Webb, B.W. and Walling, D.E. (1985): Nitrate behavior in stream flow a grassland catchment in Devon, UK. *Water Res.*, 19: 1005-1016.