

瀬戸内流域における水資源の質的再評価

—将来の利用のための指標として—

小野寺真一*・齊藤光代**・加藤成子***

はじめに

流域における自然資源としては、水、土壌、森林などがある。ここで、水が再生可能な循環性資源であるのに対し、他者は再生に比較的時間を要する資源といえる。しかし、降水量の少ない乾燥地域では降水量のほとんどが蒸発散により大気へ戻るため、利用可能な水資源は量的に乏しい(榎根, 1989)。すなわち、循環性の資源といえども、陸域において液体として滞留することがなければ利用することができない。そのため、従来から、乾燥地域における地下水涵養量や地下水貯留量が評価されてきた(Sharma, 1989; 小野寺ら, 1996; 小野寺, 1996など)。半乾燥地域における地下水貯留量にとっては、蒸発散量が多いということだけでなく、半乾燥であるがゆえに植被率が低下することにもない地表流の発生量が多い(小野寺ら, 1996)こともマイナスの大きな要因といえる。この点では、瀬戸内地域も雨季と乾季とのコントラストが強く、半乾燥気候と類似した傾向を示す(小野寺・成岡, 2002)。そのため、日本の他地域に比べて瀬戸内地域の基底流量は少なく、水資源は乏しい傾向である。結果として、渇水年が2.5年に1度程度の頻度で発生する。

一方、先進国においては、水質汚染の進行にともなって、水資源の質的低下が進み、利用可能な水資源の保持が困難になってきている(Burt et al., 1993)。特に、水質汚染では、農業系肥料の大量散布にともなう窒素汚染(Burt et al., 1993)と酸性雨にともなう酸性化及び重金属の流入(Moldan and Cerny, 1994)などが問題となってい

る。広島県や岡山県では、沿岸部には果樹園が広く分布し、窒素肥料が大量に散布されているだけでなく、近年、pHが4.6から4.8の雨が降っており、大気に関しても二酸化窒素や浮遊粒子状物質(SPM)の濃度が、国の環境基準を上回る汚染状況である(環境省, 2001)。そのため、今後水資源の評価を行う際には、量的な評価にとどまらず、質的な評価も必要となる。しかし、量的な評価については従来から多くの研究があるが、質的な評価については水質形成過程の複雑さ(小野寺, 1999)とともに人為的影響の多様性(小野寺ら, 2002)のために、十分に検討されてきたとはいえない。例えば、地質の違いは地下の透水ゾーンの透水性やその深度を大きく変化させ(恩田ら, 1996)、結果として水質形成過程は異なるものと推定される。また、White(1995)はモデルによる風化速度(水質形成)の推定を行い、その結果、降水量の増加にともなって風化速度(溶出量)が増大することを報告している。しかし、実際には極端に降水量が多いと、地表流や地下水流出などの水文過程が変化して、侵食過程が活発に起こり土壌が薄くなり、土壌-水の接触時間は小さくなる。また、地下を通過する水の量自体も、降水量の増加にともなって地表流が増大するため、降水量に比べると増加の割合は大きくないものと予想される。そのため、実際の源流域における物質流出量が、White(1995)の予測どおりになることは容易に想像できない。さらに、人為的影響についても、農業流域における物質負荷量を土地利用毎に異なる負荷量を設定し、流域の下流に向けて積分する分布型モデルを用いて推定することが試み

*広島大学総合科学部

**広島大学大学院生物圏科学研究科

***日本IBM中国ソリューション株式会社

られてきた(竹内, 1995)が、流域の浄化機能などの評価が不十分であった。すなわち、将来にわたり水資源を持続的に利用していくためには、各立地環境で異なる水質形成機構を明らかにした上で、現状及び将来の水資源の質的な再評価を行うことが必要であり、また評価法そのものを検討し環境変化にともなう水質の悪化を予測していくことも必要である。

本論では、多様な立地環境から成り、かつ多様な人為的インパクトを受けてきた瀬戸内流域において水資源の再評価を行うために、流域の水質形成機構を明らかにすることを目的とした。特に、源流域における水質形成に及ぼす降水量、地質の影響について確認し、また、陸域から海洋への物質負荷(流出)に及ぼす地形の影響について検討した。

研究方法

本研究では、多様な立地環境における水質形成を明らかにするために、特に、源流域での水質形成過程と源流域から下流域にかけての自然浄化過程をそれぞれ分離して確認していくこととし、それぞれ以下の地域を対象とした(図1)。

源流域における水質形成過程の検討のために、岡山県山陽町周辺山地流域、及び広島県吉和村山地流域において調査を行った。それぞれの地域の年平均降水量は、岡山県山陽町で1000mm、広島県吉和村で2000mmである。各山地流域には、中生代以前の堆積岩類、花崗岩類、斑レイ岩類が分

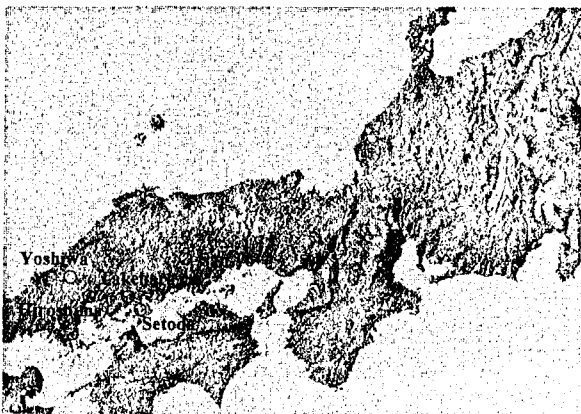


図1 研究地域概要

布しているため、各山地流域で地質毎に3~5地点、計15地点程度抽出し採水を行った。なお、採水地点の集水面積はほぼ2ha程度の源流域である。採水時には、流量の測定のほかに、電気伝導度、水温、pHを測定した。採水は、雨季(2001年6月下旬)及び乾季(2001年8月下旬)にそれぞれ1度ずつ行った。

また、山地源流域から下流への自然浄化機能を明らかにするため、広島県竹原市(TR河川)、及び生口島瀬戸田町(3河川)の河川流域において、河川水の採水を行った。竹原市及び瀬戸田町の流域はそれぞれ南斜面であり、最高標高が300m~400m程度である。竹原市の流域で河床勾配がもっとも小さく、下流域で0.02~ほぼ0の範囲である。これに対して瀬戸田町の流域は、下流域の河床勾配が0.1~0.04程度と急勾配である。流域面積は、竹原市のTR流域が2.5km²である。瀬戸田町の流域は、IF、IB、IKSでそれぞれ流域面積が0.3km²、0.2km²、0.4km²である。流下距離には大きな差がないため、それぞれ流域面積に比例して流域の幅が異なることを意味する。各流域とも源流域は森林に被覆されているが、中流部からはいずれも果樹園が広く分布している。果樹園面積率は、竹原市で平均8%、瀬戸田町のIF、IB、IKSでそれぞれ、30%、54%、44%である。なお、TR及びIB流域は、それぞれ中流部及び源流部に山火事跡地が分布する。採水地点は、上流域から下流域にかけて数地点である。採水時には、流量の測定とともに、電気伝導度、水温、pHの測定を行った。採水時期は2002年5月中旬で、比較的降雨の少ない時期であった。

採取した水試料は実験室に持ち帰り、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻濃度をイオンクロマトグラフィーで、Na⁺、Mg²⁺、K⁺、Ca²⁺、Fe、Al、Sr²⁺、SiO₂、Mn、Zn、Cu、Pb濃度をICP発光分析装置で分析した。また、HCO₃⁻濃度については、5mmolL⁻¹硫酸を用いてpH4.8滴定により定量した。

源流域における水質形成過程 —降水量及び地質の影響—

渓流水のpH及び電気伝導度

図2に吉和流域と岡山流域における渓流水のpHと電気伝導度との関係を示す。吉和流域の電気伝導度は、斑レイ岩の湿潤期で20~56 μ S/cm、乾燥期で34~74 μ S/cm、花崗岩の湿潤期で21~24 μ S/cm、乾燥期で23~57 μ S/cm、堆積岩の湿潤期で26~43 μ S/cm、乾燥期で35~58 μ S/cmである。岡山流域の電気伝導度は、斑レイ岩の湿潤期で60~100 μ S/cm、乾燥期で80~122 μ S/cm、花崗岩の湿潤期で42~81 μ S/cm、乾燥期で82~132 μ S/cm、堆積岩の湿潤期で128~192 μ S/cm、乾燥期で193~194 μ S/cmである。降水量の少ない岡山流域では吉和流域よりも電気伝導度が高く、季節による違いや地質による違いが明瞭である。一方、降水量が多い吉和流域では、季節による違いや地質による違いが見られない。降水量の多い地域では降水量の少ない地域よりも渓流水の溶存物質濃度(電気伝導度)が低かった。これは、

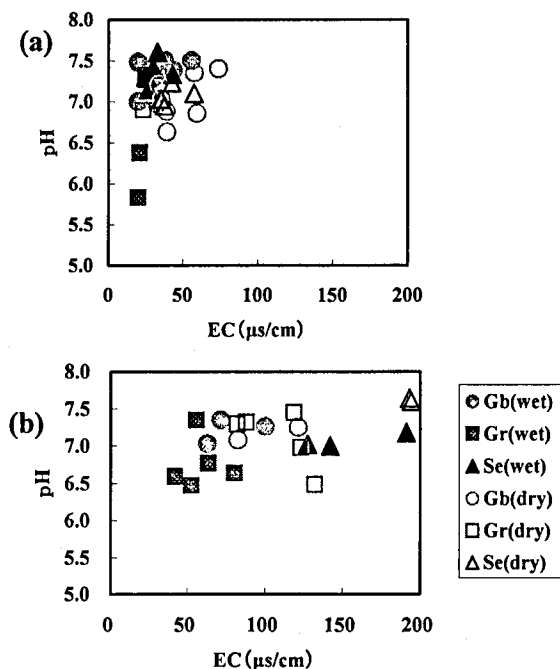


図2 広島県吉和流域(年降水量2000mm)と岡山県山陽町流域(年降水量1000mm)の源流域渓流水の電気伝導度(EC)とpHとの関係。

Gb; 斑レイ岩類地域、Gr; 花崗岩類地域、Se; 堆積岩類地域、wet; 2001年6月下旬、dry; 2001年8月下旬

次のように降雨流出過程の違いによるものであると考えられる。降水量が少ない地域では地下水面が低く、湧水点に達するまでに時間がかかり、その間にゆっくりと流域の内部で化学風化が起こり溶存物質濃度は高くなる。一方、降水量の多い地域は、地下水面が高く湧水点が高い位置にある。そのため、滞留時間が短くなり、溶存物質濃度は低くなる。

次に、同じ流域の中で、降水量が多い時期と少ない時期の違いについて比較する。降水量が多い時期には降水量が少ない時期に比べて渓流水の溶存物質濃度が低い。しかし、吉和流域の降水量が少ない時期と岡山流域の降水量が多い時期とを比較しても、明らかに岡山流域の溶存物質濃度が高い。これは、吉和流域と岡山流域とで年降水量に約1000mmも差があり、年間を通して地下水の滞留時間に歴然とした差があるためであると考えられる。

一方、pHの平均値は、吉和流域で7.04、岡山流域で7.09と、岡山流域で若干高いものの、どちらの流域においても平均的には酸は十分に緩衝されているといえる。すなわち、本流域の渓流水におけるpHの形成は、森林流域で一般に認められる(Ohte et al., 1995)ような土壤中での供給されたCO₂の水への溶解と、その水と岩石との反応(化学風化)とで説明される。ただし、岡山流域では6.5~7.5の範囲であったのに対して、吉和流域では、5.8~7.5とその変化幅はやや大きい。特に、花崗岩類の流域で変動が大きい。一般に森林流域の土壤中のCO₂濃度は森林の樹齢や土壌の厚さに応じて変化するといわれている(Jury et al., 1991; 浜田ら, 1996)。日本のような環境下では、溶存CO₂濃度(pCO₂)は10^{-2.0}~10^{-2.5}atm.程度となる。本溪流において、溶存CO₂濃度をHCO₃⁻濃度及びpHから算出(小野寺, 1999)すると、岡山流域ではpCO₂は10^{-2.40}~10^{-2.66}atm.であり、一方、吉和流域ではpCO₂は10^{-2.58}~10^{-3.19}atm.となった。明らかに吉和流域で幅がある。すなわち、吉和流域でpHに差があったのはこのためであると考えられる。

一般に、大気の濃度レベルで平衡になった場合、pCO₂は約10^{-3.4}atm.である。すなわち、地下水が

地下から地表へ湧出した後、溪流を流下する過程で徐々にCO₂は脱気していくため、大気濃度レベルへ溶存濃度は低下していく。したがって、採水地点がかなり湧水に近いと、pCO₂は高い値を示し、湧水からの流下距離が長ければ、より大気濃度レベルへ近づくことになる。本結果をもとに整理すれば、降水量の多い吉和流域では、2 haという集水域を持つ溪流での採水地点は、湧水点からかなり流下した地点となっていることが推察される。特に、花崗岩類の流域では雨季に顕著に湧水点が高くなるということが明らかになった。

降水量、地質の水質形成過程への影響

降水量の少ない岡山流域では、溶存物質濃度は堆積岩で最も高く、花崗岩、斑レイ岩の順となった。また、溪流水のpHは堆積岩で高く、斑レイ岩、花崗岩の順となった。岡山流域では、どの地質の溪流水もpCO₂が一定なので、地質による溪流水のpHの違いは、岩石の風化速度、または流域の滞留時間の違いによって生じるHCO₃⁻濃度の違いによるものと考えられる。しかし、高屋ら(1996)の実験によれば、岩石の溶出速度は斑レイ岩、堆積岩(泥岩)、花崗岩の順に低下することから、ここでは、流域の滞留時間の違いによる影響が大きいものと考えられる。

一方、降水量の多い吉和流域では、溪流水の溶存物質濃度の差はわずかで、斑レイ岩、堆積岩、花崗岩の順となった。また、地質によるpHの違いは顕著ではなかったが、花崗岩類では他に比べて雨季に低下した。これは、前述したように、雨季に湧水点の高度が上昇するためであると考えられる。吉和流域では、降水量が多いため地下水の滞留時間が短く、化学風化によって岩石を溶出する前に溪流水として流下するため、溶存成分濃度も差がなく、pHにも差がみられなかったものと考えられる。

以上のことを整理すると、図3のような山地流域における斜面と地下水面の関係が推定できる。ここで、各地質における岩盤や土壌層の分布については従来の研究(恩田ら, 1996; 小野寺ら, 1998)を踏まえた上での模式図である。降水量が

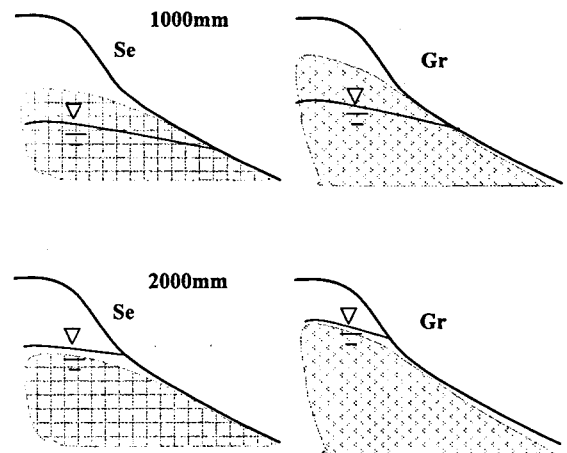


図3 異なる地質と降水量の源流域縦断面図における地下構造と地下水面の概念図。

各ハッチは水文学的基盤(割れ目等を経由する地下水)、白抜きは土層。1000mm、2000mmは年降水量。Se; 堆積岩類流域、Gr; 花崗岩類流域

多い年や年降水量の多い地域には大規模な降水量のイベントがみられる(小野寺・成岡, 2003)ことから、降水量の多い地域では地下水の流出経路がより浅く、滞留時間も短いといえる。そして、降水量の多い地域では結果的に土壌表層の化学過程(生物化学過程)の影響を受け、降水量の少ない地域では深層岩盤の化学過程(地球化学過程)の影響を受ける。結果的には前者はより酸性で、Ca/Naも大きく(Naruoka et al., 2002)、溶存濃度も低くなる。ただし、吉和流域では、酸性雨が確認されなかったことから、酸性化の傾向はみられなかった。一方、降水量の少ない後者のタイプの流域では、逆の特性を示すものと思われる。特に、深層の影響をより受けた結果、地質による溶存成分濃度の違いは明瞭に現れた。以上の結果は、源流域の水質形成において、降水が基盤内の割れ目を経由するのか土層中を経由して流出するのか、という水の流出経路が最も重要であることを意味する。年間の水質形成を評価していく上では、地質や降水量という立地条件は本質的ではなく、今後、降水量と流出経路の関係をより明確にすることによって質的な評価を確立していくことができるものと考えられる。

さらに、以上の結果と従来の研究を踏まえて現状の水資源を再評価すると以下ようになる。す

なわち、従来、降水量の多い地域ほど風化速度が大きく、結果的には酸緩衝能も大きいと考えられていた。しかし、降水量の増加は、流出経路を酸緩衝能の低い表層へとシフトさせ、結果として酸性化しやすくなると考えられる。また、酸緩衝能の大きい斑レイ岩のような塩基性岩の流域においても降水量の増加は酸性化を引き起こしやすいと考えられる。一方、降水量の少ない流域では、相対的に酸性化は起きにくいと考えられるが、地質が酸性岩である花崗岩類では酸性化の可能性があるだろう。

下流域での自然浄化機能

窒素インプット量と窒素流出量との関係

流域における自然浄化機能の違いを評価するためには、流域における窒素インプット量を見積もり、それに対してどの程度窒素が浄化されているかを評価することが必要である。ここでは、流域にもたらされた降水が海洋へ流出する過程で、地形によって地下水流出と河川流出の割合が異なることに注目し、その浄化機能に及ぼす影響を検討する。また、定量的に評価する前の段階として、地形の異なる流域で比較することにより浄化機能の違いを検討することにした。従来の研究によれば、河川における微生物活動や藻類の活動により窒素の浄化が進むことが報告されている。また、地下水の流動にともない NO_3^- -Nが浄化されることがいくつかの流域で報告されている(Howard, 1985; Onodera et al., 1999)。特に、瀬戸内海沿岸流域において報告されている例(Onodera et al., 2003; Saito et al., 2003)では、下流域では地下水中の NO_3^- -N濃度がほとんど検出されない程度まで浄化され、その量は河川のそれに比べるとはるかに大きい結果となっている。そこで、流域における窒素浄化過程としては、海洋への地下水流出成分は全て浄化されるものとして評価することにした。

流域における窒素インプット量は年4回施肥を行う果樹園で明らかに大きい。そこで、流域の果樹園面積率を施肥窒素指標と置き換えて議論を行

う。すなわち、果樹園面積率が高ければ窒素インプット量も多いと考える。また、河川としての窒素流出量は、採水時期の濃度と流量との積によって算出した。図4に各流域における施肥窒素指標と窒素流出量の関係を示す。窒素流出量は一般に河川流量に比例して増加する。ただし、竹原のTR流域で果樹園面積率が5~8%、生口島のIF流域で10~30%、IB流域で27~54%、IKS流域で35~44%と、窒素インプット量には大きな差があることから、基本的には窒素インプット量の違いが窒素流出量の違いに結びつくことが予想される。しかし、結果は予想とは異なっている。IB流域とIF流域では、窒素インプット量と窒素流出量の関係が平均的な傾向を示している。一方、IKS流域は、IB流域と同程度の窒素インプット量(果樹園面積率)にもかかわらず、窒素流出量は小さい。反対に、竹原のTR流域では、窒素インプット量は小さいにもかかわらず、窒素流出量は大きい。この結果は、流域の浄化機能を反映したものであると考えることが出来る。

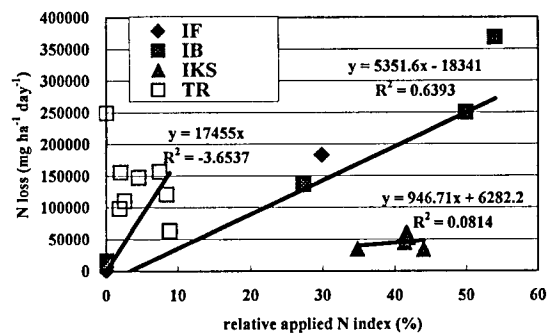


図4 各流域における施肥窒素指標と窒素流出量

流域地形特性と窒素流出・浄化特性

図5に、流域の地形特性と河川流量及び窒素流出量との関係を示す。流域の特性としては、竹原(TR)が河床勾配が小さく、ほぼ流域幅が広く、低地状の特性を呈している。一方、生口島のIB、IF流域は河床勾配が大きく、流域幅が狭い、急勾配河川の特性を示す。これに対して、IKS流域は河床勾配は中間的で流域幅が広い、扇状地地形の特性を呈する。全体の傾向としては、下流域の河床勾配が最も小さいTR流域で単位面積あた

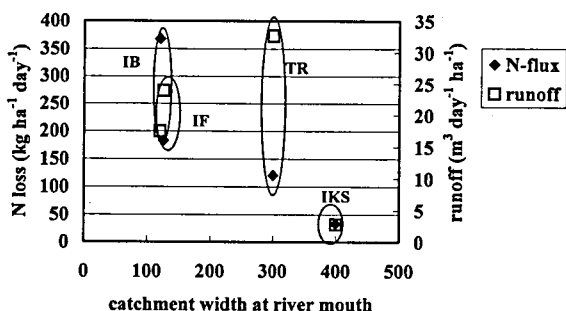
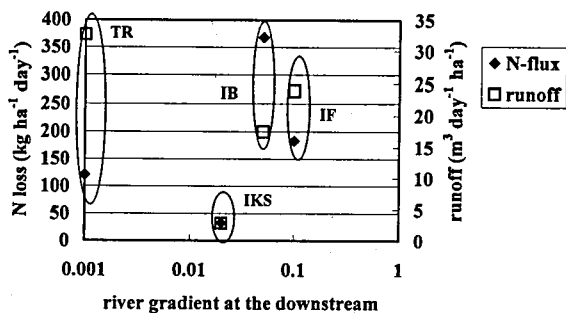


図5 下流域の河床勾配及び流域幅と窒素流出量及び河川流量との関係

りの河川流量が最も多く、次いで河床勾配の最も大きいIF、IB流域で多い。この地域の降水量がほぼ同じであることを考慮すれば、河川流量が多いということは、地下水としての窒素流出が少ないことを意味する。低地地形の竹原では、窒素インプット量は少なかったにもかかわらず、河川流量が多かったため河川としての窒素流出量が多くなったものと考えられる。一方、中間的な河床勾配のIKS流域では、最も河川流量は少ない。これは、ここが扇状地地形であるため、河川水が失水傾向を示すためである。その結果、地下水として流出する割合が最も多くなり、より効率的に窒素浄化が行われていたことが明らかになった。これに対して、より河床勾配が大きく急勾配なIB、IF流域では地下水貯水量の大きい扇状地は存在せず、地下水としての流出成分はさほど多くなく、IKS流域より5倍以上多い河川流量になった。そのため河川からの窒素流出もIKS流域に比べると多くなった。

以上のことをまとめると以下ようになる(図6)。排水形態として地下水流出が主となる扇状地河川では浄化機能は高いことになる。Saito et al. (2003)によれば、IKS流域周辺の地下水では流域に散布された窒素肥料の約3割に及ぶ浄化が行わ

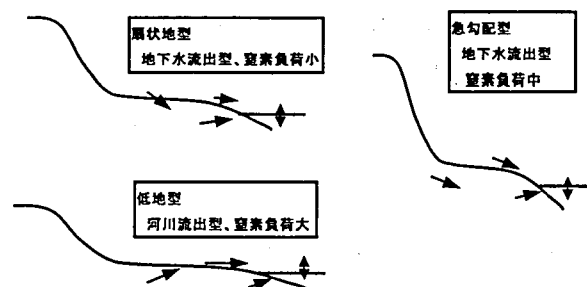


図6 河川地形と窒素流出傾向

れていると見積もられた。一方、流出域が低地型の河川では、河川としての流出が主となるため、地下水としての窒素浄化はそれほど多くないものと考えられる。以上のことから、水資源を供給する流域の機能の再評価という点で、地下水の浄化機能に注目して評価すれば、扇状地型の流域においてその機能が最も高いことが明らかになった。ただし、沿岸域における地下水中の浄化についてはほぼ普遍的であるといえそうだが、内陸の地下水についての浄化機能についてもより明確にしていくことが必要である。

まとめ

本研究では、水資源の質的な再評価を行うために多様な立地環境からなる流域における水質形成機構を明らかにすることを目的とし、特に、水質形成に及ぼす降水量及び地質の影響を明らかにし、また下流域の浄化機能に及ぼす地形の影響を確認した。その概要は以下のとおりである。

- 1) 降水量の多い地域では、流出経路がより浅く滞留時間も短くなるため、土壌表層の生物化学過程の影響を受け、降水量の少ない地域では深層岩盤の地球化学過程の影響を受けることが明らかになった。そのため、前者では流域の地質によって溶存物質濃度の差はなく、また全体に濃度自体も低く、より酸性で、塩基性岩の流域でも酸性化しやすい傾向を示すと考えられた。一方、降水量の少ない地域では、濃度自体が高く地質による濃度の差も大きく、相対的に酸性化は起きにくいものの、酸性岩では酸性化の可能性が示唆された。

2) 下流域の地形によって窒素浄化機能に差があることが明らかになった。扇状地型の流域では、浄化機能を有する地下水の流動量が相対的に多いため、河川としての窒素流出量は少なかった。一方、低地型の流域では河川流量が多いため、窒素流出量も多かった。

今後は、以上の明らかになった水質形成過程を組み合わせて流域の水資源を評価していくことが必要である。

謝 辞

本研究は、広島大学文理ジョイント研究プロジェクト助成金、文部省科学研究費(基盤A、代表;福岡正人)を使用して行われたものである。研究の遂行にあたり、研究室の学生である成岡朋弘君、西宗直之君、竹井 務君にはご協力いただいた。また、広島大学風化研究会の福岡正人教授をはじめとするメンバーには御議論いただいた。上記して感謝の意を表します。

参考文献

- Burt, T.P., Heathwaite, A.L. and Trudgill, S.T. (1993) *Nitrate; Processes, Patterns and Management*, John Wiley & Sons, Chichester, 444pp.
- 浜田美鈴・大手信人・小橋澄治(1996) 森林流域における土壌CO₂ガス濃度の鉛直分布、日本林学会誌, 78, 376-383.
- Howard, K.W.F. (1985) Denitrification in a major limestone aquifer, *Journal of Hydrology*, 76, 265-280.
- 榎根 勇(1989) 「水と気象」, 朝倉書店, 180p.
- 環境省(2001) 「平成13年度版環境白書」, 財務省印刷局
- Jury, W.A., Gardner, W.R. and Gardner, W.H. (1991) *Soil Physics* (Fifth Edition), John Wiley & Sons, Inc., 208-210.
- Moldan, B. and Cerny, J. (1994): *Biogeochemistry in Small Catchments*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Naruoka, T., Onodera, S., Fujisaki, C., Birmano, M.D., Takeda, K. and Kaihotsu, I. (2002) Evaluation of cation exchange processes in acid soil slope for solute transport modeling in unsaturated zone, *Acta Univ. Carolinae, Geologica*, 46, 439-441.
- 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(1996) 熱帯半乾燥地域における集中的地下水涵養機構, 日本水文科学会誌, 26, 87-98.
- 小野寺真一(1999) 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報告書, 204, 136p.
- 小野寺真一・成岡朋弘(2002) 広島県瀬戸内海沿岸域の降雨特性—降雨時間帯, 季節性, 降雨強度—, 広島大学総合科学部紀要IV, 28, 61-68.
- 小野寺真一・藤崎知恵子・成岡朋弘・M. D. Birmano(2002) 瀬戸内土壌劣化流域における降水から湧水への金属成分の変化. *陸水学雑誌*, 63, 21-30.
- Onodera, S., Shinomiya, Y. and Ishizuka, S. (1999) Nitrate and sulfate transports in the shallow groundwater on Tsukuba upland area, *Proc., Int., Symp., Groundwater in Environmental Problems*, 79-84.
- Onodera, S., Saito, M., Takei, T. and Naruoka, T. (2003) Nitrate load of coastal shallow groundwater at some urban and rural areas on the northwestern side of Seto inland Sea, Japan, *Proc. of ICGGE*, (in press).
- 小野寺真一・近藤昭彦・佐藤芳徳・林 正貴・新藤静夫・松本栄次・池田 宏(1996) 東アフリカタンザニアの半乾燥地域における地中水循環, *水文科学会誌*, 26, 75-86.
- 小野寺真一・宮岡邦任・廣瀬 孝・野田岳史・成

- 岡朋弘・井岡聖一郎・小野孝也(1998) 関東山地小流域の地下構造と水理特性の推定, 筑波大学水理実験センター報告, 23, 11-16.
- 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴(1996) 「水文地形学」, 古今書院, 267p.
- Saito, M., Onodera, S. and Takei, T. (2003) Nitrate flux in a steep coastal small catchment covered by orange plantations in Seto Inland Sea of Japan, Abstracts of IAHS Workshop JSH03, (in press).
- Sharma, M.L. (1989) *Groundwater Recharge*. BALKEMA, Rotterdam, Netherlands, 323p.
- 高屋康彦・八田珠郎・松倉公憲(1996) 堆積岩類および火成岩類の溶解特性に及ぼす岩石物性の影響, 地形, 17, 193-202.
- 竹内 誠(1995) 流域における水質保全機能の評価, 農林交流センターシンポジウム「農耕地における浅層地下水等の汚染状況と今後の対策」, 87-114.
- White, A.F. (1995) Chemical weathering rates of silicate minerals in soils, In White, A.F. and Brantley, S.L. (eds) *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals*, Reviews in Mineralogy Vol.31, Mineralogical Society of America, Washington D.C., 407-461.