

黒瀬川流域における窒素流出の空間分布特性と それに及ぼす地形の影響

峯 孝樹*・小野寺 真一*・齋藤 光代**・吉田 浩二**・重枝 豊実*・
竹井 務**

*広島大学総合科学部

**広島大学大学院生物圏科学研究科

Spatial variation in nitrogen export from various catchments and topographic effects on it in Kurose River Catchment

Takaki MINE, Shin-ichi ONODERA, Mitsuyo SAITO, Koji YOSHIDA, Toyomitsu SHIGE-EDA
and Tsutomu TAKEI

* Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

** Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University

Abstract : To evaluate the spatial variation of nitrogen flux in urban-suburban catchments, topographic influences on nitrate concentration, flux and runoff were examined at nineteen small catchments. The results indicated no correlations between topographic parameters on one hand and NO_3^- -N concentration, flux, and runoff, respectively. These results suggest that both of runoff and NO_3^- -N concentration is controlled by factors such as land use and artificial factor. On the other hand, the fluctuation of NO_3^- -N concentration decreases with increase in the catchment area. This means that we can estimate the common values of them in such catchment size.

Keyword : nitrate-nitrogen flux, water pollution, geographical features

はじめに

近年、各地で河川の水質汚染問題が深刻化している。将来にわたって持続的に水資源を利用していくためには、水質汚染の変動を予測していくことが重要であり、特に広域に評価していくためには空間的変動特性を明確にしていく必要がある。例えば、竹井ら(2002)は、広島県西条盆地において広瀬ら(2000)や小野寺・広瀬(2002)にならい250mメッシュでの水質とグリッドの地形情報との関係を検証し、水質と標高および土地利用との相関を確認した。また、本地域は、最近25年間で地下水の水質悪化が確認されており(開発,2001)、将来にわたる保全が必要である。従来から、特に農地と都市域が混在する地域において、硝酸性窒素による水質汚染は明らかにされてきている(Burt et al., 1993)が、窒素フラックスの空間的変動と地形パラメーターとの関係については十分に議論されていない。

流域の窒素フラックスは、河川水中の窒素濃度と河川流量の積によって見積られる。一般に、窒

素濃度は、都市部では生活廃水の流入によって、農地では水田に大量に投入された肥料成分の溶脱によって上昇する（海老瀬,1985；Burt et al., 1993；竹内,1995）。一方、流域の水流出は、地質や地形によって異なり、そこでの降水の排水特性が密接にかかわる（恩田ら,1996）。すなわち、窒素流出の支配要因として、その流域の地形は無視できない（Freeze and Cherry, 1979；齋藤ら, 2002；小野寺ら, 2003 など）。そのため、流域からの物質移動にともなう水質汚染を考える際、その流域の土地利用とともに地形も考慮する必要がある。しかし、地形と物質移動の関係はこれまであまり議論されていないため、多様な地形の存在する広域での窒素流出の予測には至っていない。広域の水質予測を行っていくためには、簡便に収集可能なデータ、すなわち流域の地理情報（地形、地質、気象、土地利用、人為活動）のみによって予測を行っていくことが将来的には必要である。数 ha 程度の小流域においては、地形情報と水質情報または地下水流出および平時の河川流量との関係が、内部の水文生物地球化学過程を考慮してある程度議論されてきている（Moldan and Cerny, 1994；White, 1995；恩田ら, 1996；小野寺・辻村, 2001 など）。しかし、やや大きな流域サイズになった場合には、様々な他の過程（深層地下水流動や地下水 河川混合過程にともなう生物地球化学過程など）を包含する（Burt et al., 1993；Moldan and Cerny, 1994 など）ため、十分な解析が行われていないのが現状である（小野寺・辻村, 2001）。すなわち、これまで余り議論されていないやや大きなスケールの流域（数十～百 ha）において、流域内のプロセスを考慮に入れて地形情報と水質情報との関係を明確にしていくことは、今後のために必要である。また、今後、流域の窒素フラックスの代表値を決定していくためには、多様な流域サイズにおけるそのばらつきと収束性についても明確にすることが必要となってくる。

そこで本論では、気候や地質が比較的一様で、多様な地形からなる流域において、硝酸性窒素流出の空間的変動特性を明らかにすることを目的とする。特に、地図から得られる地形情報をもとに、地形がどの程度硝酸性窒素流出の空間変動に影響をおよぼしているか、また、ばらつきが収束する、すなわち代表性のある値を得るための流域サイズはどの程度なのかを検証していく。

・試験流域及び調査方法

調査地域は、広島県東部西条盆地（広島県東広島市）に位置する。本地域は、周辺の山地を源流とし、呉市まで流下する黒瀬川の流域である。本河川は、流路長が 50.6km、流域面積が 238.8km² の二級河川である。本地域の地質は主に広島花崗岩類、高田流紋岩類からなる。西条盆地における年平均降水量は約 1500mm、年平均気温 13.2 である。試験流域として、西条盆地における黒瀬川の支流の中から 20 流域（図 1）を選定した。しかし、流域 10 に関しては、4 月における流量が測定できなかったため除外した。各流域面積は 35.9ha～276ha である。また、地形パラメーターとして流域ごとの流域面積、平地の割合、地下水涵養域（山地、傾斜地）の割合、各流域の平均勾配、平地勾配、地下水涵養域勾配を 25000 分の 1 の数値地形図を用いて抽出した（表 1）。ここで、平地とは勾配が 1/100 以下の地域を指す。また、平地以外の地域を地下水涵養域とした。各流域の平均勾配は、流域内の最低標高とその地点から最も離れた地点の標高の差を、その 2 点間の直線距離で除して求めた値である。また、平地勾配と地下水涵養域勾配はそれぞれの地域内の最高標高と最低標高の差をその 2 点の直線距離で除して求めた値である。

本研究では流域からの物質移動を定量的にとらえるために、河川水中の物質濃度と流量の積から求められる、物質のフラックスを指標に用いた。フラックスは、物質が単位時間あたりに採水地点を通る総量であり、その流域全体から河川によって流出している物質の総量を示す。各試験流域で

は、最下流の地点において、2003年4月11日と2003年7月29日の2回河川水を採水した。採水時にはpH、電気伝導度を測定し、同時に流量を測定した。流量は浮き子法によって行った。なお、各調査時期は、降雨が数日間程度ないときであり、河川水は、上流域に貯留されている地下水が流出してきたものであると考えられる (Freeze and Cherry, 1979)。すなわち、採水日における各地点の時間変化は小さく、空間的な変動を比較することが可能である (Moldan and Cerny, 1994)。また、異なる2つの時期は、それぞれ降雨の少ない時期と梅雨期にあたり、地下水面の低い時期と高い時期にあたる。

採水した水試料は実験室に持ち帰り、イオンクロマトグラフィー (島津製作所) をもちいて、硝酸性窒素濃度を定量した。

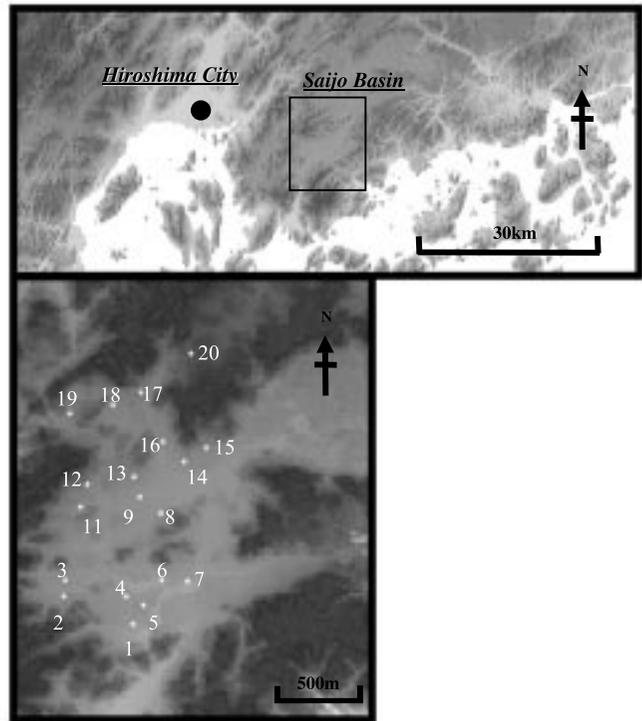


図1 研究地域概要および採水地点

・ 結果と考察

1 河川流量の空間変動特性

前述したように、平水時における河川水は、一般に地下水流出によって成り立っていると考えられる (Freeze and Cherry, 1979)。ここで地下水流出量は、ダルシー則 (Freeze and Cherry, 1979) に基づけば、地下水の供給源となる地下水涵養域の割合やその地形勾配にともなって増大すると考えられる。また、地下水流出域となる河川及び平地の面積やその地形勾配も地下水流出量、すなわち河川流量に影響を与える。各パラメーターと単位面積あたりの河川流量との相関関係は全くみられなかったのでここでは示さない。そこで、図2に地下水涵養域の割合とその地形勾配の積と単位流域面積

表1 各流域における各地形パラメーター

流域番号	流域面積 (ha)	平地面積率	地下水涵養域面積率	平均勾配	平地勾配	地下水涵養域勾配
1	61	1.000	0.000	0.013	0.028	0.000
2	183	0.150	0.850	0.216	0.057	0.196
3	184	0.395	0.605	0.139	0.037	0.257
4	183	0.690	0.310	0.086	0.030	0.102
5	47	1.000	0.000	0.034	0.020	0.000
6	164	0.776	0.224	0.078	0.025	0.192
7	73	0.736	0.264	0.108	0.041	0.232
8	225	0.925	0.075	0.108	0.016	0.267
9	67	1.000	0.000	0.004	0.004	0.000
11	98	0.569	0.431	0.293	0.043	0.309
12	138	0.240	0.760	0.250	0.075	0.249
13	134	0.951	0.049	0.100	0.037	0.103
14	56	0.727	0.273	0.121	0.017	0.188
15	137.5	0.119	0.881	0.276	0.053	0.203
16	35.9	0.486	0.514	0.197	0.035	0.225
17	178	0.130	0.870	0.213	0.040	0.231
18	236	0.414	0.586	0.239	0.040	0.273
19	276	0.153	0.847	0.190	0.008	0.378
20	134.3	0.083	0.917	0.113	0.040	0.119

各面積率は流域面積に占める各面積の割合を示す

平均勾配は各流域の最低標高とその地点から最も遠い地点の標高の差を2地点の直線距離で除した値である

平地勾配および地下水涵養域勾配は各域内の最高標高と最低標高の差をその2点の直線距離で除した値である

ここでは平地を傾斜1/100以下である地域を指し、それ以外の地域を地下水涵養域とした

あたりの河川流量との関係を示す。しかし、これについても相関がみられなかった。このことは、重枝ら(2003)による傾向とは異なり、河川水の大半が地下水流出成分によって占められていないことを示唆する。そのため、地形要因よりも別な影響を受けていると考えることができる。この別な要因としては、溜池や生活排水などの人為的要因が考えられる。溜池は降雨を貯留する場であり、河川流量に大きな影響を与える土地利用と考えられる。西条盆地の土地利用の特徴として、溜池が多く分布していることが挙げられることから、西条盆地において平水時の河川流量を議論する際、地下水だけではなく溜池による影響なども考慮する必要がある。

2 硝酸性窒素濃度、窒素フラックスの空間変動特性

平地は地下水が停滞する場であり、脱窒反応による硝酸性窒素濃度の低下、すなわち浄化の場となっている場合が多く確認されている(Howard, 1985 ; Burt et al., 1993; Bohlke and Denver, 1995 ; 小野寺ら, 1996; 小野寺ら, 2003など)。流域面積が小さい場合(数ha)には、涵養域の土地利用にともなう窒素負荷量の違いの影響を強く受けると考えられる。しかし、ある程度広い流域(数十ha以上)になると、流域内の窒素浄化機能(脱窒反応や植物による養分吸収)の影響を強く受けて、窒素濃度は徐々に低下し平準化されることが推定される。その場合には、流域の勾配や平地の流域に占める割合が、河川における硝酸性窒素濃度に対して大きな影響を与えられ。平均勾配が大きい場合には、地下水流動速度が大きくなり脱窒反応は十分に生じない可能性がある。また、平地の割合が大きい場合には、脱窒反応域が広がると考えられ、十分に浄化作用を受けると考えられる。そこで、図3に各流域の平均勾配及び平地の全流域に占める割合と硝酸性窒素濃度の関係を示す。しかし、この2つの指標と濃度の間には明瞭な相関はみられない。しかも、平均勾配が大きくなるほど濃度が低下し、平地の面積率が小さくなるほど濃度が低下するという、想定し

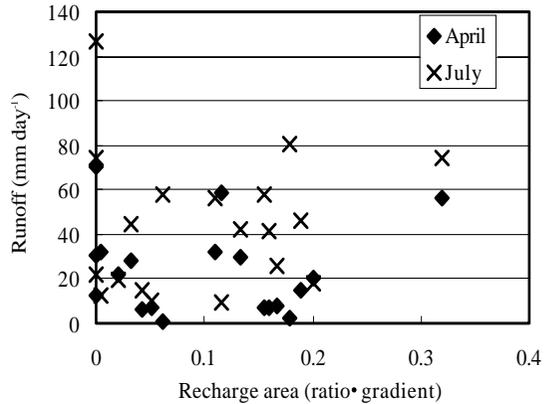


図2 地下水涵養域の割合と勾配の積と単位流域面積あたりの流量の関係

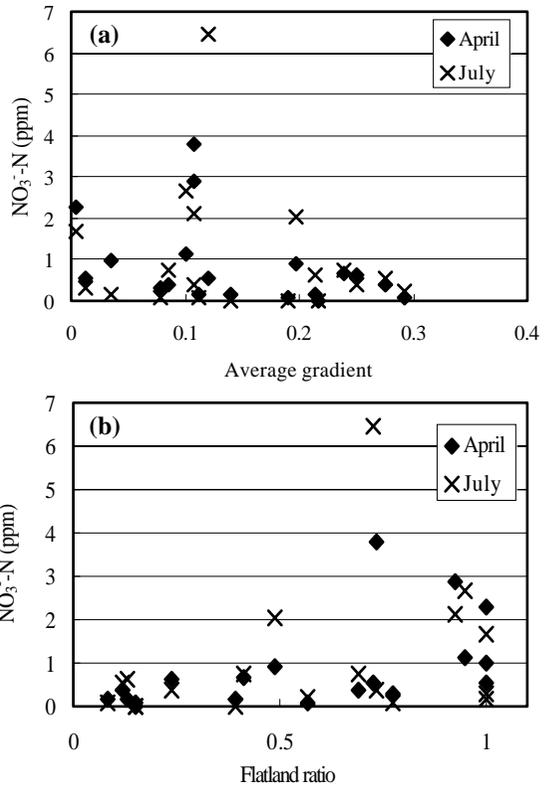


図3 (a)平均勾配及び (b) 平地の割合と硝酸性窒素濃度の関係

た傾向とは逆の傾向を示した。ここで、想定した傾向が得られなかった要因として、土地利用の影響が大きかったためであることが示唆される。すなわち、勾配が急になるほど、また平地が減少するほど、主たる土地利用は森林となり、勾配が緩やかになり平地が増えれば、水田や住宅地が多く分布するようになるためであると考えられる。また、平地部の割合が増えることによってばらつきが大きくなる点は、前節でも触れたように、地下水による流出成分だけでなく、溜池や家庭排水からの流出成分の寄与の影響が異なるためではないかと考えられる。

図4に平均勾配と硝酸性窒素フラックスの関係を示す。この図からも2つの間には相関をみることはできないが、硝酸性窒素濃度との関係と同様に、勾配が急になるにつれてフラックスの変動幅は小さくなっているとみることができる。一般に、多様な流域での窒素フラックスは、流量の変化幅に対して濃度の変化幅が小さいため、流量に依存して決まる(Burt et al., 1993; Moldan and Cerny, 1994; 齋藤ら, 2002; 小野寺ら, 2003など)。しかし、本地域では、図3、図4からみられるように、濃度と窒素フラックスがほぼ同様の变化を示しており、流量より濃度の変化幅が大きいことが示唆される。すなわち、この結果は、本研究の対象流域サイズにおいても、土地利用の違いによる窒素負荷量の違いの影響が、窒素消失過程(浄化過程)の影響より大きいことを示すものである。

3 空間変動の収束性及び代表的流域面積

前節までの議論によれば、本研究において対象とした数十～百haという流域サイズにおいて、流量は地表の貯水池などの人為的水循環の影響で、窒素濃度及び窒素フラックスは土地利用による異なった人為的窒素負荷量の違いによる影響で、それぞれ地形パラメーターとの相関が確認できなかった。そこで、ここでは、どの程度の流域面積で平準化して各値のばらつきが収束するのを確認する。すなわち、代表的な流域サイズの定

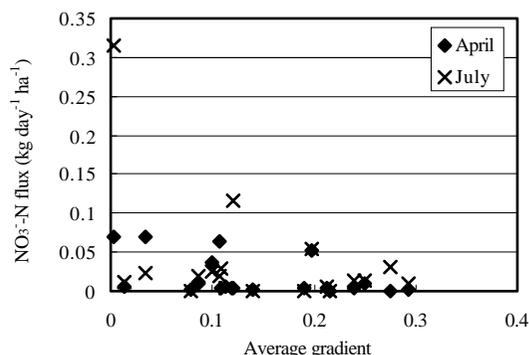


図4 平均勾配と硝酸性窒素フラックスの関係

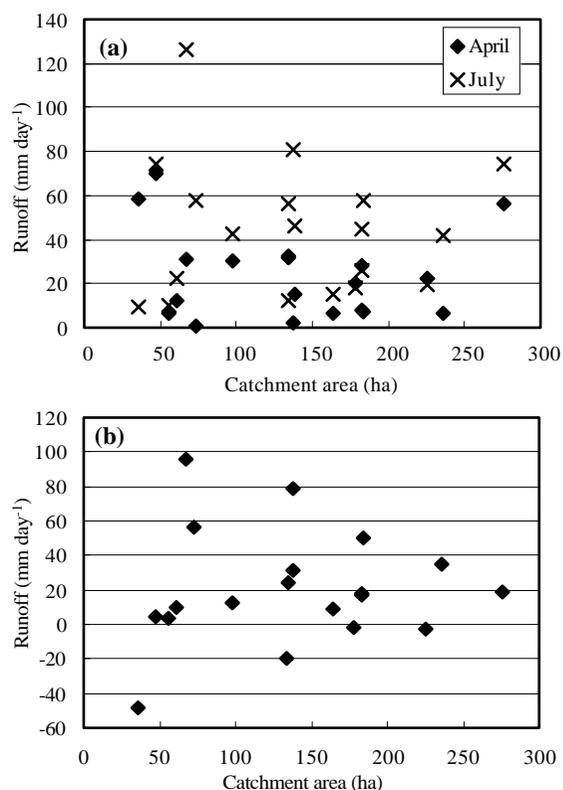


図5 流域面積と(a)単位流域面積あたりの流量及び(b)単位流域面積あたりの流量の季節変化

季節変化については7月29日に測定した単位流域面積あたりの流量と4月11日に測定した単位流域面積あたりの流量の差をとった値を示した

義が可能かどうかを確認する。まず、河川流量との関係を議論する。図5に流域面積と単位流域面積あたりの流量及び単位流域面積あたりの流量の季節変化を示す。流量は流域面積が大きくなっても収束する傾向を示さない。しかも、そのばらつきの幅は面積が大きくなっても一定の傾向を示す。これは、-1で議論したように、地下水だけでなく地表の貯水池などの人為的影響を受けているため、本研究で対象とした流域面積の範囲では、値が収束しなかったものと考えられる。しかし、これ以上大きなスケールになった場合は、気候などの違いが顕在化し、値がばらつく可能性がある。一方、流量の季節変化については、面積が大きくなるにしたがって収束する傾向を示す。今回採水した2回の時期は、4月が水田に水を張る前で乾燥した時期であるのに対して、7月が梅雨期で水田にも水が張られている時期と、想定される地下水も地表水もともに貯留量が年間で最も差のある時期と考えられる。すなわち、この結果、250ha以上の流域では季節変化の差はみられないことが示唆された。これは、今回対象とした最大の流域面積の流域における経時変化については、代表値を得ることができることを意味する。

次に、濃度について議論する。図6に、流域面積と硝酸性窒素濃度及び硝酸性窒素濃度の季節変化の関係を示す。硝酸性窒素濃度は、流域面積が大きくなるに従い低減しながら収束する傾向を示す。これは、流域面積の増大とともに、脱窒反応を起こす河床や河岸の地下水河川水混合域などが拡大し、相対的に人為的な窒素負荷の影響を上回るため、窒素濃度は平準化されていくことが示唆される。ここで、前節で議論した流域の平均勾配や平地面積率などに比べて、流域面積で以上の傾向が示されたのは、流域面積が浄化過程の影響の大きさを決定する指標であることを意味するものと考えられる。今後、この点についてもより詳細な検証が必要である。ただし、1流域だけ大きくはずれぬものがみられるが、その理由についてはこの流域を詳細に調べる必要があるが、生活廃水の混入など特異な現象が生じていたことが推定される。一方、硝酸性窒素濃度の季節変動は、流

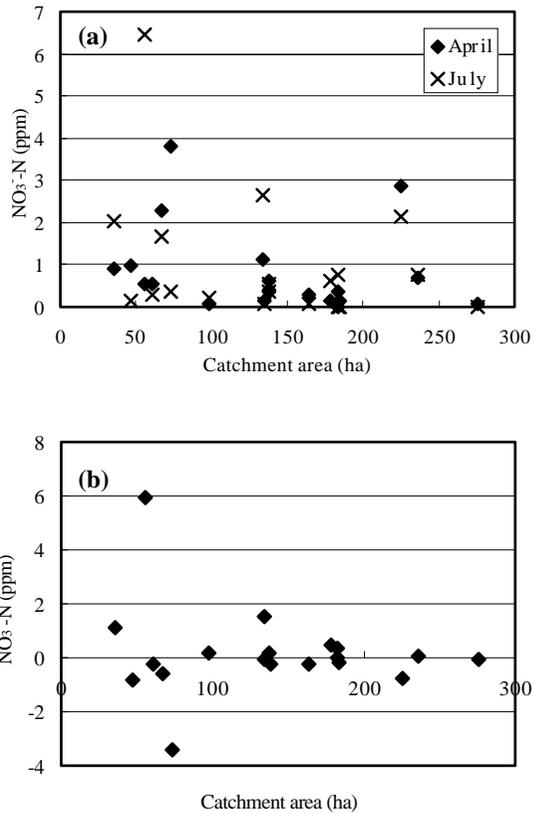


図6 流域面積と(a)硝酸性窒素濃度及び(b)硝酸性窒素濃度の季節変化の関係

季節変化については7月29日に測定した硝酸性窒素濃度の値から4月11日に測定した硝酸性濃度の差をとった値を示した

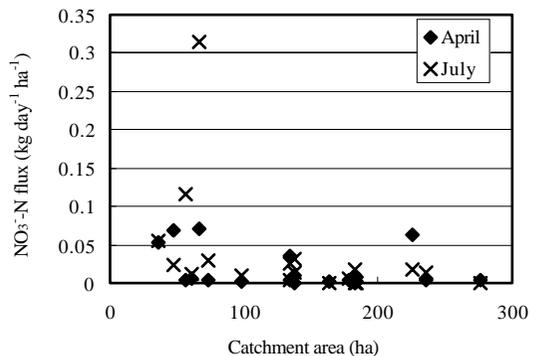


図7 流域面積と硝酸性窒素フラックスの関係

量の季節変動と同様に、流域面積が広くなるに従いその変動幅は小さくなる傾向を示す。これは、流域面積の増大にともない、脱窒反応を起こす地下水流出域や、河床、河岸など、いわゆる脱窒域も増加するため、浄化機能も向上し、季節の変化にともなう硝酸性窒素濃度の増加があったとしても、浄化作用でその増加分を消してしまうため季節変動量は収束していくと考えられる。

最後に、フラックスに関して、図7に流域面積と硝酸性窒素フラックスの関係を示す。前述したように流量ではみられなかったにもかかわらず、ここでは、流域面積の増大にともなって変動幅が小さくなることが確認できた。以上から、流域面積が増大すると、その流域独特の土地利用などが流域全体の硝酸性窒素フラックスにあたる影響は少なくなることが確認できた。すなわち、集水域面積が250ha以上になると、代表的な値を得ることができることが明らかになった。

まとめ

本論では、気候や地質が比較的一様で、多様な地形からなる流域において、採水及び流量観測、採取した試料の硝酸性窒素の定量を行ない、地図から得られる地形情報との関係から以下のことが確認された。

- 1) 調査流域における河川流量は地形要因よりも別の影響を強く受けていた。
- 2) 本研究の対象流域サイズ(35.9ha ~ 276ha)においては河川への窒素流出に対して地形による窒素消失過程の影響よりも、土地利用の影響を強く受けていた。
- 3) 集水域面積が250ha以上になると、流量の季節変化は収束し、単位流域面積あたりの硝酸性窒素フラックスは収束、減少した。すなわち、このサイズの流域で代表的な値を得ることが可能となった。
- 4) 集水域が増大することで、河川への硝酸性窒素負荷量に対する土地利用などの影響は小さくなり、逆に地形による窒素消失過程の影響が顕在化することが示唆された。

今後、より正確に広域の水質予測を行なっていくためには、代表的な値を得ることが可能になった流域サイズでの詳細なプロセス研究とともに、人為的な要因の評価も加えた地理情報との関係性も含めて議論していくことが必要である。

謝辞

本研究は文部省科学研究費基盤A(代表:福岡正人)および広島大学学内プロジェクト助成金をうけておこなったものである。

引用文献

- Bohlke, J.K. and Denver J.M (1995) Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland, WATER RESOURCES RESEARCH, 31, 2319-2339.
- Burt, T.P., Heathwaite, A.L. and Trudgill, S.T. (1993) Nitrate; Processes, Patterns and Management, John Wiley & Sons, Chichester, 444pp.
- 海老瀬潜一(1985)降雨による土壌層から河川への NO_3^- の排出, 衛生工学研究論文集, 21, 48-59.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater, John Wiley & Sons, Chichester, 604pp.

- 広瀬 孝・小野寺真一・松本栄次 (2001) 関東山地における小流域の酸性化に関する研究 - 250m メッシュスケールを用いた空間変化と予測 -, 琉球大学法文学部人間科学科紀要, 8, 193-204.
- Howard, K.W.F. (1985) Denitrification in a major limestone aquifer, *Journal of Hydrology*, 76, 265-280.
- 開発一郎 (2001) 西条盆地の地下水動態の四半世紀変化, 地下水学会秋季公演要旨集, 56-57.
- 熊沢喜久雄 (1994) 環境保全型農業における土壌肥料研究の展望, 環境保全型農業シンポジウム
- Moldan, B. and Cerny, J. (1994) *Biogeochemistry in Small Catchments*, John Wiley & Sons, Chichester, 419pp.
- 小野寺真一・加藤正樹・篠宮佳樹・小林政広・田中優子 (1996) 1992年から1995年までの土壌中の硝酸性窒素濃度の変動 - つくば市近郊の稲敷台地の畑地に隣接する平地林の例 -, 筑波大学水理実験センター報告, 21, 11-18.
- 小野寺真一, 辻村真貴 (2001) 山地の地下水涵養, 「雨水浸透・地下水涵養」日本地下水学会編, 理工図書, 128-134.
- 小野寺真一・広瀬 孝 (2002) 地理情報を用いた山地流域の酸緩衝能の予測, 福武財団研究助成報告書
- 小野寺真一・齋藤光代・加藤成子 (2003) 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 -, 「日本研究」特集号2 (瀬戸内の地域資源), 29-36, 日本研究研究会
- 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
- 齋藤光代・小野寺真一・竹井 務・西宗直之 (2002) 瀬戸内海沿岸小河川における硝酸性窒素負荷量 - 果樹園面積・溜池・扇状地の効果 -, 広島大学総合科学部紀要, 28, 77-84.
- 重枝豊実・小野寺真一・齋藤光代・吉田浩二・竹井 務・峯 孝樹 (2003) 広島県生口島における SiO₂ フラックスの空間分布特性, 広島大学総合科学部紀要
- 竹井 務・小野寺真一・成岡朋弘・西宗直之・齋藤光代 (2002) 表流水の水質の空間分布特性とその評価に関する研究 - 西条盆地の250 mメッシュの地理情報による評価 -, 広島大学総合科学部紀要, 28, 69-75.
- 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, *Reviews in Mineralogy*, 31, 407-461.