

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—

齋藤 光代*・小野寺 真一*・竹井 務*・西宗 直之**

* 広島大学総合科学部

** 広島大学大学院生物圏科学研究科

NO₃⁻-N Flux of Streams in the Setouchi Region: Effects of Fruit-Farmland Area, Water Reservoir, and Alluvial Fan

Mitsuyo SAITO*, Shin-ichi ONODERA*, Tsutomu TAKEI* and Naoyuki NISHIMUNE**

* Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

** Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University

Abstract : To confirm the effects of fruit-farmland area, water reservoir, and alluvial fan on nitrate load in short streams, we measured runoff and collected water samples at five or eight sites in each of four streams, Seto Inland Sea catchment. Nitrate load of the streams increased with increasing ratio of fruit-farmland area. At a downstream site of water reservoir, nitrate concentration showed a slight decrease. On the area widely dominated by alluvial fan, it assumed that groundwater pollution by nitrate-nitrogen is accelerated with groundwater recharge of stream water. It is necessary for conservation of water resources to consider function of these effects as well as river-groundwater mixing.

Keywords : Setouchi region, NO₃⁻-N flux, Fruit-farmland area, Reservoir, Alluvial fan

I. はじめに

瀬戸内海沿岸地域では、山地斜面とそれに連続する扇状地地形が広く見られ、水はけのよい扇状地斜面を中心に果樹園が分布する。近年では果樹園で大量に散布される窒素肥料が原因で、硝酸性窒素による河川水や地下水の汚染が進行している(熊沢, 1994)。これは、瀬戸内海における富栄養化の原因の一つとして大きな問題となっている。これまで、農業地域における窒素負荷量の見積もりに関する研究(海老瀬, 1985; 田淵・黒田, 1991; 竹内, 1995)は多く存在するが、瀬戸内海沿岸の果樹園分布流域における窒素負荷量の分布は、十分に明らかにされてきたとはいえない。

一方で、瀬戸内海沿岸地域には溜池が広く分布しており、硝酸性窒素の輸送過程において植物や微生物による養分吸収や脱窒・硝化などの作用が活発に生じるため、水質浄化において重要な働きをすると指摘されている(Burt et al., 1993; 戸田ら, 1993; 内田ら, 2001)。また、河川水が河岸や河床

に侵入し地下水と混合した後に再度河川に流出するという現象（ハイポレーイク流）にともない、河川水中の硝酸性窒素濃度が低下するという事例が報告されている（Harvey and Bencala, 1993, 1996）。この現象は、河床勾配の緩い北米での研究例に限り確認されており、日本の河川においては検討されていない。しかし、河川水と地下水との交流という点に限れば、日本においても、緩勾配な河川と同様に急勾配な扇状地を流れる河川に関連した多くの報告例があり（山本, 1983；原田, 2001；山田, 2001）、ハイポレーイク流が生じている可能性がある。従って、扇状地の占める割合の大きい小規模の山地河川が多く分布する瀬戸内海沿岸地域においても、その流域の窒素負荷量を見積もるためにはハイポレーイク効果を考慮する必要がある。また、瀬戸内海沿岸地域では前述したように海洋への窒素負荷量に対して注意を払う必要があり、果樹園の持続的利用と河川流域－海洋環境の保全という2つの命題を両立していくためには、自然浄化機能の定量的な評価は重要な課題といえる。しかし、以上のことを考慮した研究は十分に行われていない。

本研究では、瀬戸内海沿岸の山地小河川において果樹園面積、溜池の有無、および扇状地の形態の違いによる硝酸性窒素負荷量の比較を行い、それらの要素が河川水中の硝酸性窒素負荷量に及ぼす影響を評価することを目的とした。

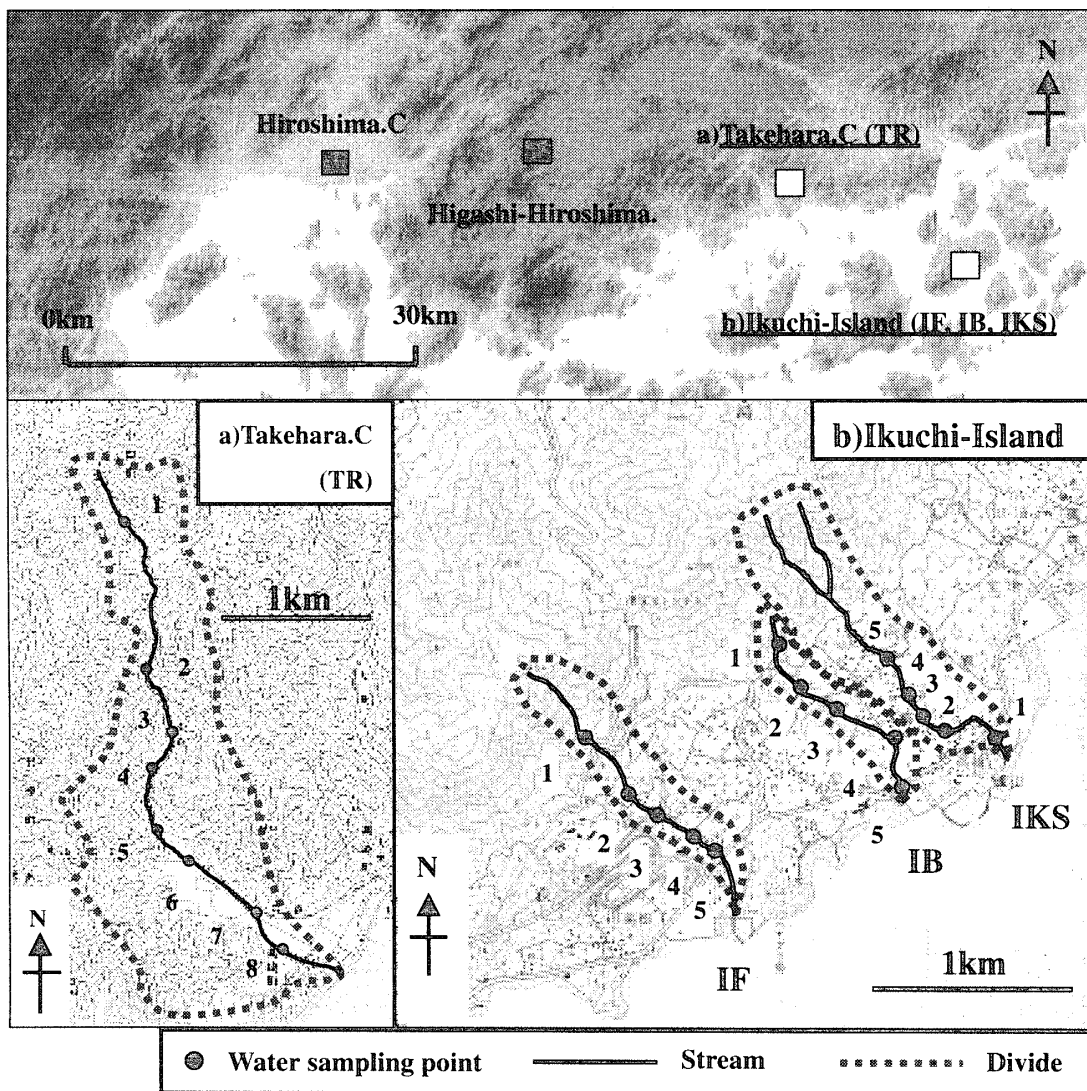


図1 試験流域概要

II. 試験流域及び調査方法

試験流域は、広島県豊田郡瀬戸田町（生口島）の果樹園の分布するIF、IB、IKSの3流域と広島県竹原市のTR流域（図1）の計4流域とした。いずれの流域も基盤岩は花崗岩から成る。図2に各流域の河床縦断面図を示す。この図から分かるように、生口島のIF、IB、IKS流域は竹原のTR流域と比較して明らかに河床勾配が大きく、かなりの急勾配である。一方、河口付近で標高10m以下の勾配の小さい区間はTR流域で最も長い。この区間は、地下水面と地表面とがほぼ一致しているため地下水が河川へ流出するいわゆる地下水流出域になっており、水田の分布によって特徴づけられている。また、急勾配な生口島の流域では、中流域から扇状地地形が形成されている。なかでもIKS流域においては、他の流域と比較して明瞭な扇状地地形が最も広い範囲で見られる。各流域の流域面積、果樹園面積、果樹園面積率、河床勾配は表1のとおりである。果樹園面積率は、果樹園面積と流域面積から流域内において果樹園が占める割合として見積もった。生口島は、果樹園の面積が全体の39.8%と広く分布する（池上・中越, 1995）、典型的な瀬戸内海の島嶼である。これら3流域の中流から下流に分布する扇状地では、流域の大部分が果樹園として利用されており、流域内に占める果樹園面積の割合は非常に高くなっている（表1）。生口島IB流域内には溜池が存在している（IB-3）。竹原のTR流域は流域面積が約273.7haであり、生口島試験流域の約6倍～13倍の大きさである。河床勾配は比較的緩やかであり、流域の大部分を山地・森林が占め、果樹園面積は流域のわずか約8.4%となっている（表1）。

それぞれの試験流域において、2002年5月の平水時に調査を行った。調査方法としては、各流域において上流から下流にかけて100m～300mおきに地点を定め、それらの地点において採水及び流量の測定を行った。各流域における調査地点は、上流から下流にかけてIF流域で5地点（IF-1～IF-5）、IB流域で5地点（IB-1～IB-5、うちIB-3は溜池）、IKS流域で5地点（IKS-5～IKS-1）、TR流域で8地点（TR-1～TR-8）である（表1）。また、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により硝酸性窒素の定量を行った。

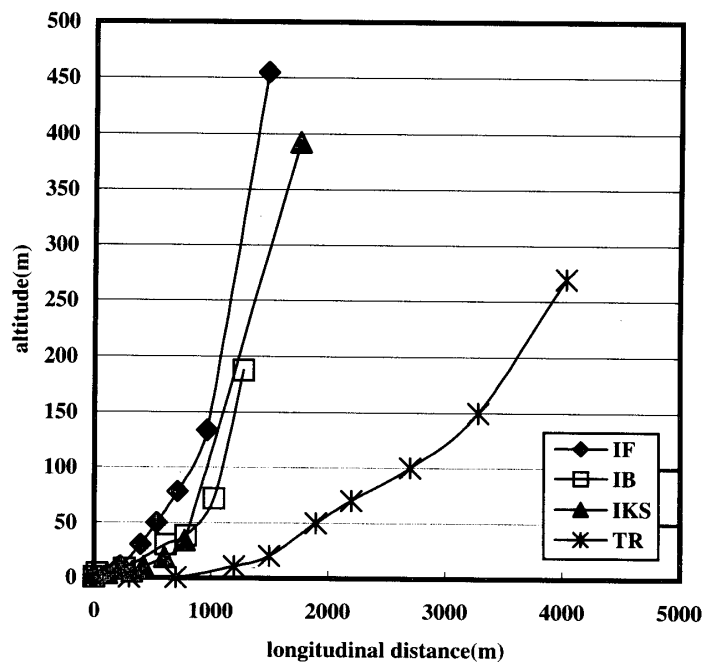


図2 各流域の河床縦断面図（河口を0とする）

表1 各流域別の流域面積と果樹園面積及び河床勾配

生口島	流域面積(ha)	果樹園面積(ha)	果樹園面積率(%)	河床勾配
IF-1	7.92	0.00	0.00	0.63
IF-2	11.42	1.30	11.43	0.22
IF-3	24.90	5.33	21.38	0.16
IF-4	27.02	7.40	27.38	0.15
IF-5	30.44	9.09	29.87	0.11
IB-1	1.50	0.00	0.00	0.46
IB-2	7.14	1.95	27.36	0.14
IB-3	10.76	4.21	39.16	0.05
IB-4	17.89	8.93	49.92	0.06
IB-5	20.30	10.97	54.03	0.02
IKS-5	29.34	10.20	34.77	0.37
IKS-4	36.58	15.12	41.32	0.09
IKS-3	40.02	16.72	41.78	0.05
IKS-2	41.97	17.46	41.60	0.05
IKS-1	44.26	19.46	43.97	0.01
竹原				
TR-1	25.00	0.00	0.00	0.16
TR-2	59.44	1.20	2.02	0.09
TR-3	92.30	1.74	1.88	0.06
TR-4	106.71	2.76	2.59	0.07
TR-5	147.76	6.75	4.57	0.08
TR-6	200.09	14.95	7.47	0.03
TR-7	248.38	22.01	8.86	0.02
TR-8	273.68	23.04	8.42	0.00

III. 結 果

図3の(a)~(d)には、4流域それぞれの上流から下流にかけての単位面積あたりの流量と硝酸性窒素濃度の変化を示す。単位面積あたりの流量は、流域面積が最大のTR流域で最も多く、これに対し、全体的に流域面積の小さな生口島の3流域で比較的少ない。特に、IKS流域における流量が最も小さく、TR流域との差は1オーダー以上にも及ぶ。また、IF流域においては、上流から下流にかけて流量は一貫して増加傾向を示し、硝酸性窒素濃度はIF-2からIF-3にかけて一旦減少するが、全体的に見ると下流に向かって上昇している(図3-(a))。IB流域においては、IB-3の溜池と最下流部で流量が減少し、硝酸性窒素濃度はIB-3の溜池においてわずかに低下するものの、下流に行くに従って上昇する傾向を示す(図3-(b))。IKS流域では、源流部からIKS-3にかけて流量が増加した後に下流にかけて減少するのに対し、硝酸性窒素濃度は一貫して上昇している(図3-(c))。TR流域では、流量がTR-3からTR-6の間と最下流部のTR-8で増加するが、全体的には下流に行くに従って減少傾向を示すのに対し、硝酸性窒素濃度は全体を通してあまり変動を示さない(図3-(d))。

図5には、横軸に単位面積あたりの流量、縦軸に単位面積あたりの硝酸性窒素負荷量を取り、各流域における流量と硝酸性窒素負荷量との関係を示す。この図から全ての流域においてほぼ正の相関が見られ、流量が増加するとそれにともない硝酸性窒素負荷量も大きくなることから、TR流域以外の流域のデータについてはTR流域の相関直線よりも上にプロットされていることから、これらの流域ではTR流域よりも硝酸性窒素濃度が高くなっていることを示している。

IV. 考 察

IV-1 果樹園面積が異なる流域間における硝酸性窒素負荷量の比較

試験流域のうち生口島のIF、IB、IKS流域では流域内において果樹園面積率がかなり高い割合を占めているのに対し、竹原のTR流域では果樹園はほとんど分布していない(表1)。図4に各流域における果樹園面積率と単位面積あたりの硝酸性窒素負荷量との関係を示す。IF流域及びIB流域では果樹園面積率と硝酸性窒素負荷量との間に明らかな正の相関が見られ、果樹園面積率が高くなるほど硝酸性窒素負荷量は大きくなる傾向を示す。以上から、IF、IB流域は果樹園を起源とする高い窒素負荷の影響を強く受けており、果樹園が少ないTR流域に比べて硝酸性窒素による河川水の汚染がより進んでいると言える。しかし、IKS流域については果樹園面積率が高いにも関わらずTR流域よりも硝酸性窒素負荷量が小さく、両者の間に相関は見られない。これは、IKS流域では単位面積あたりの流量が他の流域よりも極端に小さいため(図3)であると考えられる。IKS流域における流量が極端に小さい原因としては、IKS流域は他の流域に比べ扇状地面積が大きく中・下流域における河川水の地下水涵養量が他の流域よりも大きいということが考えられる。以上の結果から、生口島の試験流域では河川水の汚染源として果樹園から出る窒素負荷が大きな要因となっていることが分かる。

IV-2 溜池の有無が河川水中の硝酸性窒素濃度に及ぼす影響

今回調査を行った4つの試験流域のうち唯一IB流域のみに溜池(IB-3)が存在している。IB流域と果樹園面積率及び河床勾配がほぼ近い値を示すIKS流域とで硝酸性窒素濃度を比較すると、図3-(b)よりIB流域ではIB-3の溜池において流量の減少にともない硝酸性窒素濃度がわずかに低下する傾向を示している。

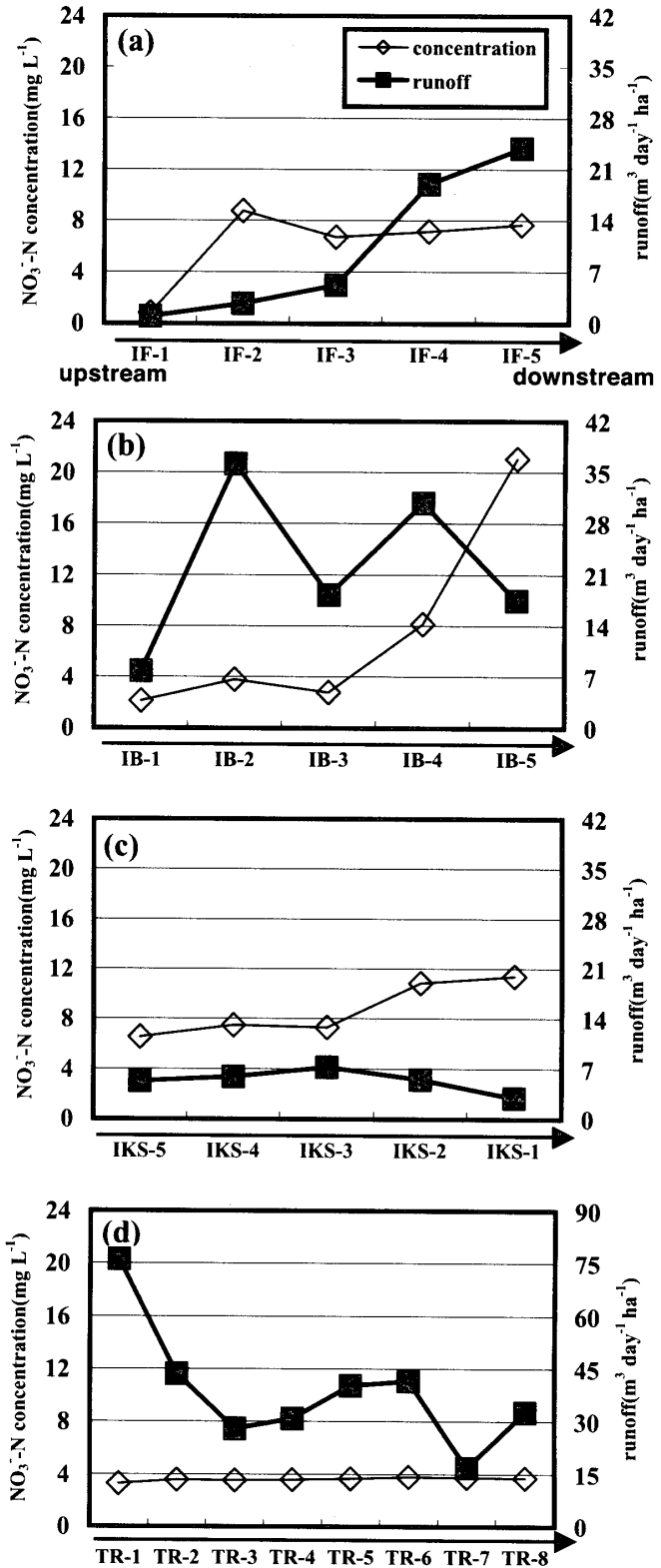


図3 各流域における上流から下流にかけての単位面積あたりの流量と河川水中の硝酸性窒素濃度の変化 (a: IF流域、b: IB流域、c: IKS流域、d: TR流域)

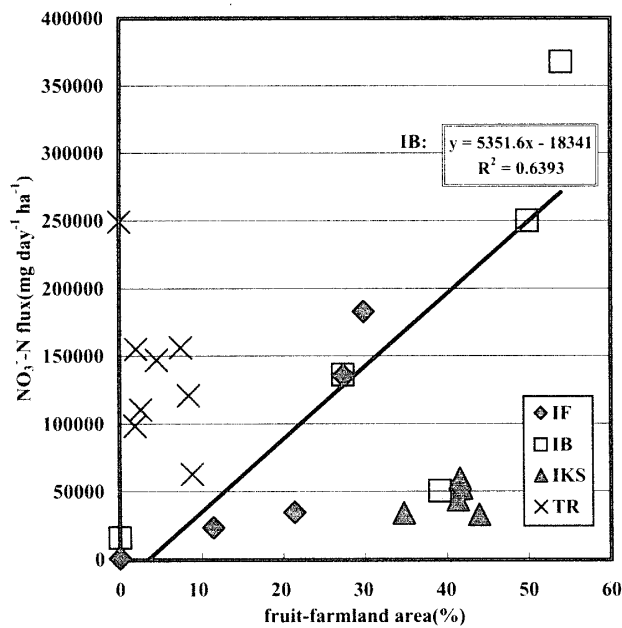


図4 各流域における果樹園面積率と単位面積あたりの硝酸性窒素負荷量との関係

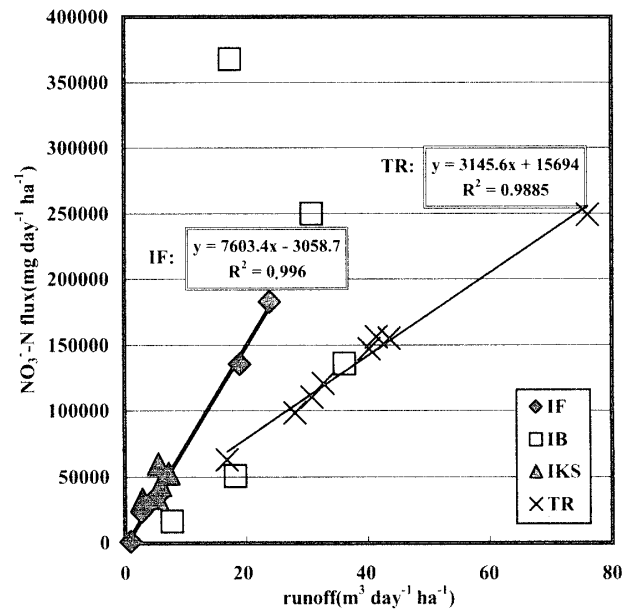


図5 各流域における単位面積あたりの流量と硝酸性窒素負荷量との関係

しかし、下流のIB-5では再び流量が減少しているのに反して濃度は上昇している。一方、図3-(c)よりIKS流域では上流部で流量と濃度がともに増加した後、扇状地のほぼ扇頂部にあたるIKS-3より下流にかけて河川水の地下水涵養にともない流量は減少するが、濃度は変わらず上昇傾向を示し、流域全体を通して硝酸性窒素濃度の減少は見られない。これらの結果から、IB流域においては河川水がIB-3の溜池を通過することでわずかではあるが硝酸性窒素濃度が低下し、河川水の浄化が起きているという可能性が考えられる。この原因としては、溜池内の植物及び微生物による硝化・脱窒などの生物活動が考えられる。また、IB-3で急激に流量が減少していることからIB流域ではIB-3の溜池が地下水涵養域になっていると考えられる。今後、溜池における水質浄化機構を解明していくには溜池及びその上流・下流における水質の季節変化をモニタリングすること、流量変化から溜池における地下水涵養量を算出することが必要である。

IV-3 扇状地面積の違いによる硝酸性窒素負荷量の変化

生口島のIF、IB、IKS流域は竹原のTR流域と比較して河床勾配が大きく(図2)、中流域以下は扇状地地形になっている。表1より、河床勾配はIF、IB流域で最も大きく、TR流域で最も小さく、IKS流域ではその中間になっている。生口島の試験流域における扇状地の大部分は果樹園として土地利用されているため、硝酸性窒素による地下水の汚染はかなり進行していると想定できる。一般的に、IF、IB流域のように非常に急勾配で扇状地面積が小さい河川や、TR流域のように緩勾配で下流における地下水流出域が大きいような河川では、山地河川から海への硝酸性窒素の主な流出経路は河川である。しかし、扇状地においては河川水の地下水涵養量が大きいため、扇状地の多い瀬戸内海沿岸地域では、地下水へ涵養した河川水が地下水の形態のまま海に流出する割合も多いと考えられ、それにともない地下水中に含まれる硝酸性窒素が海へ流出する量も無視できない値になると考えられる。特に、図3-(c)より、IKS流域においてはIKS-3地点から下流にかけて河川流量が減少していることから、IKS-3が扇状地のほぼ扇頂部となりそこから河川水が地下水へ涵養していると考えられる。表1から分かるように生口島のIKS流域は果樹園として利用されている扇状地面積が最も大きいに

もかわらず、河川水中の硝酸性窒素負荷量が低いことから、硝酸性窒素を多量に含んだ河川水が一旦地下水へ涵養し、地下水の形態のまま海へ流出している可能性がある。瀬戸内海の富栄養化問題を考えるにあたって、今後は下流側で潮位変動の影響がない地点に流量観測点を設けるなどして河川水としての海への流出量及び地下水としての流出量をそれぞれ算出し、瀬戸内海における河川水を通じた汚染と地下水を通じた汚染の割合を正確に把握する必要がある。

V. まとめ

本研究では、瀬戸内海沿岸地域の山地小河川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分析を行い、以下のことが確認された。

- 1) 果樹園面積が大きな流域ほど、硝酸性窒素による河川水の汚染は進行している。
- 2) 果樹園流域内に存在する溜池においては、河川水中の硝酸性窒素濃度がわずかに減少する傾向を示す。
- 3) 生口島 IKS-3 流域においては、中・下流域の扇状地で河川流量が減少していることから河川水が地下水へ涵養しており、果樹園起源の硝酸性窒素による地下水汚染が進行していると想定できる。瀬戸内海の富栄養化問題にとっては、河川から海への硝酸性窒素の流出経路を明らかにし、河川水による汚染と地下水による汚染がどのような割合で起こっているかを把握することが重要である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、対象とした試験流域に関する土地利用情報をご教示いただいた広島大学総合科学部中越信和教授に深く感謝いたします。

引用文献

- 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.
- 原田守博 (2001) 河川からの地下水涵養, 日本地下水学会編「雨水浸透・地下水涵養」, 理工図書東京, 122-127.
- Harvey, J.W. and Bencala, K.E. 1993 The effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments, *WaterResour. Res.*, 29, 89-98.
- Harvey, J.W., Wagner, B.J. and Bencala, K.E. 1996 Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-subsurface water exchange, *WaterResour. Res.*, 32, 2441-2451.
- 池上佳志・中越信和 (1995) 広島県瀬戸田地区の景観構造, 広島大学総合科学部紀要IV理系編 第21巻, 131-144.
- 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「暖地農業における養分循環の問題点と技術的展望」, 第12回土・水研究会, 九州農業試験場農業環境技術研究所, 1-16.
- 田淵俊雄・黒田久雄 (1991) 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造—面源主体の農業集水域か

- らの流出負荷に関する研究（Ⅲ），農業土木学会論文集，154, 65-72.
- 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.
- 戸田任重・松本英一・宮崎龍雄・芝野和夫・川島博之（1993）灌漑用溜池における硝酸態窒素の消失，土壤肥料学会誌，65, 266-273.
- 内田晴夫・井上久義・細川雅敏（2001）土器川沿岸地区のため池・農業用水路における水質，四国農業試験場報告，66.
- 山田啓一（2001）多摩川における伏流機構と水質浄化機能評価に関する研究，財団法人とうきゅう環境浄化財団年報，46-57.
- 山本莊毅（1983）「地下水調査法」，古今書院，東京，490pp.