

一般研究課題 農業地域からのノンポイント汚濁負荷の評価と  
削減対策に関する研究  
助成研究者 豊橋技術科学大学 山田 俊郎



## 農業地域からのノンポイント汚濁負荷の評価と 削減対策に関する研究

山田 俊郎  
(豊橋技術科学大学)

### 1. はじめに

我が国における湖沼・港湾など閉鎖性水域における水質の改善対策として、これまで下水道等の整備や事業排水に対する規制を行ってきたが、依然としてこれら閉鎖性水域の環境基準達成率は低い。例えば伊勢・三河湾における環境基準達成率は、年度によるばらつきはあるもののCODで5～6割程度と大きな変化はなく横ばい状態にある<sup>1)</sup>。このように閉鎖性水域における水質の改善が見られない原因として、流域全体に面的に分布する汚濁発生源からの負荷、すなわちノンポイント汚濁負荷(特に窒素・リン等)の寄与が大きいことが指摘されている<sup>2)</sup>。農地はそのノンポイント汚濁発生源の一つであり、地下浸透あるいは降雨時表面流出等によって農地から汚濁物質が河川や湖沼に流出しそれらの水質に対して大きな影響を与えている。日本において農地面積は国土面積のおよそ13%程度であるが、単位面積あたりの汚濁発生量は他のノンポイント汚濁源と比べて大きく<sup>3)</sup>、原単位等を用いた試算では農耕地に入った窒素・リンの7割が河川へ流出するとの報告<sup>4)</sup>もあり、農地からの下流への負荷流出の現状を把握しその影響を明らかにすることは下流受水域の水環境保全上必要不可欠といえる。これまで農耕地における物質循環に関する研究は盛んに行われてきたが、農耕地を負荷発生源としてその汚濁負荷の実態を把握する研究は多くなく、特に畑地からの負荷流出に関して降雨時を含めた調査研究例は少ない。そこで本研究では畑地中心の小流域を対象としたフィールド観測を基に、農地から流出する窒素・リンを中心とした水質成分の負荷流出の実態を明らかにし、そこから下流水環境保全に有効な方策を検討することを目的とした。

### 2. 研究方法

本研究の調査対象地域は、愛知県豊橋市内を流れる梅田川(二級河川)およびその支流である浜田川流域である。図1に調査流域の地図を示す。豊橋市周辺は国内でも有数の農業地域である。梅

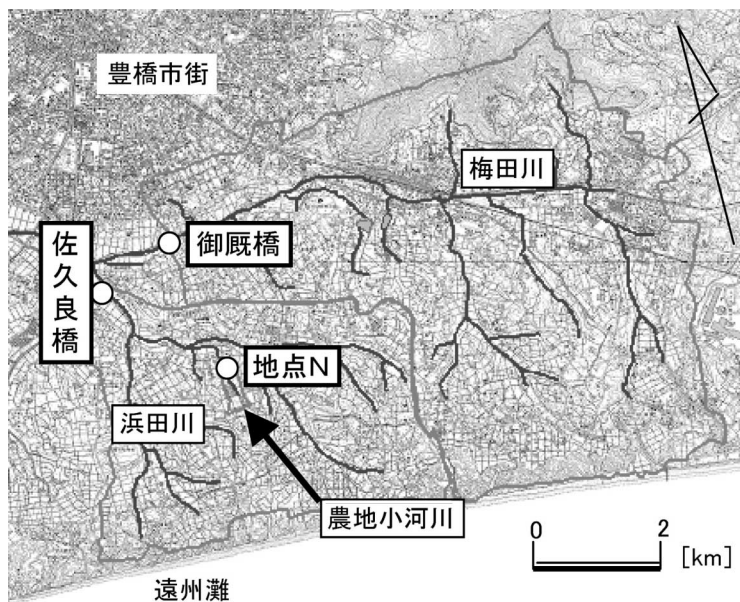


図1 調査対象流域

表1 調査対象流域の概要

		農地小河川	梅田川	浜田川
流域面積	km <sup>2</sup>	0.39	56.2	20.4
晴天時流量	m <sup>3</sup> /s	0.05	2.20	1.00
晴天時比流量	m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup>	0.13	0.04	0.05
土地利用	農地	%	98	62
	山林	%	0	12
	市街地	%	2	26

の概要と流域の土地利用について示した。土地利用形態において、農地、森林以外の土地利用（都市、道路など）を市街地とした。

調査は2002年7月9日から10月22日まで週1回程度の間隔で晴天時に実施した。また降雨時の調査を9月11～12日および9月17～18日の2回の降雨に対して行った。調査時、水温、pH、電気伝導度等は水質チェッカーを用いて現場で測定し、分析用試料として直接河川からバケツで採水を行った。同時に水位および流量観測を行った。採取した試料は0.45 μmのメンブランフィルターにより濾過し、SS、栄養塩（窒素・リン）成分、一般無機イオン等について分析を行った。降雨時、降雨量は調査流域内で直接測定し、地点Nの流量は観測水位より求めた。

田川および浜田川の流域では都市域を含み、人間活動による影響が河川水質に反映されると考えられたため、浜田川流域内のある小河川を農業地域の代表として調査対象に選んだ。この河川の流域内では野菜、花卉等を栽培する畑地として主に利用されている。流域内には畜産は含まれていないが、豚畜産農家1軒および牛畜産農家1軒が流域に隣接している。この流域を流れる小河川（以後農地小河川とする）を対象に調査を行った。調査地点は図1の地点Nである。比較のため、梅田川（調査地点は御厩橋）と浜田川（調査地点は佐久良橋）においてもほぼ同時刻で調査を行った。表1に調査河川

### 3. 結果と考察

#### 3.1 農地河川水質

調査対象河川における晴天時の水質を表2に示す。2002年7月から10月まで週1回行った定期的な調査結果から平均を求めたものである。参考のために豊川中流（江島橋）の水質データの一部（平成12年7月12日および同年9月20日の平均値）と自然流域のみの北海道の森林河川水質データ<sup>5)</sup>も示した。

調査河川の電気伝導度は30mS/mと、10mS/m以下の豊川中流や森林河川に比べて3倍以上高く、多くの溶存物質を含んでいると考えられる。塩化物イオン濃度は梅田川、浜田川、農地小河川の順に高い。一般に塩化物イオン濃度は人間活動の影響が大きくなると濃度が高くなる<sup>6)</sup>とされ、晴天時の各河川の塩化物イオン濃度はそれぞれの流域における土地利用が反映されているといえる。

調査河川の栄養塩濃度は全窒素で10mg/l以上、全リンで0.5mg/l程度であり、これらの河川の受水域である三河湾の環境基準値（類型3：全窒素0.6mg/l以下、全リン0.05mg/l以下）と比べても10倍以上高い。森林河川の栄養塩濃度と比較すると成分によっては100倍程度高い場合もあり、農地の下流域に与える影響は非常に大きい。調査河川の受水域である三河湾の水環境保全のためには、まずこれらの濃度を低下させる必要がある。晴天時の調査河川水中の窒素とリンは主に溶存態として存在し、その主要な部分はそれぞれ硝酸態とリン酸態である。農地小河川の窒素濃度は、特に硝酸態窒素濃度が10mg/lと他の河川よりも高く、農地（畑地）の水環境に与え

表2 調査地点等の水質の平均値（2002年7月～10月）

		農地小河川	梅田川	浜田川	豊川中流*	森林河川**
DO	mg/l	8.5	9.1	8.8	9.1	9.6
pH		8.2	7.9	7.3	7.6	7.1
E. C.	mS/m	38.8	34.1	31.2	8.5	9.3
Cl <sup>-</sup>	mg/l	24.6	38.3	28.7	4.0	4.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	39.5	29.6	25.3		15.6
Alk.	meq/l	1.2	1.0	1.0		0.4
SS	mg/l	7.0	7.4	7.5		2.8
TN	mg/l	16.69	9.56	10.30	1.00	0.130
PN	mg/l	1.24	2.76	2.89		0.010
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	0.08	0.31	0.36	0.01	0.001
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	mg/l	10.46	5.35	6.37	0.87	0.080
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	mg/l	0.08	0.44	0.56	0.02	0.004
TP	mg/l	0.48	0.51	0.60	0.20	0.007
PP	mg/l	0.23	0.07	0.07		0.005
DP	mg/l	0.25	0.43	0.54		0.003
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	mg/l	0.21	0.42	0.56		0.005
サンプル数		15	15	15	2	8

(\*平成12年度公共用水域等水質調査結果（愛知県）江島橋地点の結果より算出)

(\*\*文献5)

る影響が非常に大きいといえる。窒素の大半は硝酸態であり、これは畑地に投入された肥料成分が河川水を形成する地下水に入ったことによる<sup>7)</sup>ものと考えられる。梅田川、浜田川では一般河川では濃度の低いアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素濃度がそれぞれ0.5mg/l、0.3mg/l程度と高い。これは、これらの流域での下水や畜産等の事業排水による影響と思われる。このことは梅田川、浜田川においてリン成分のなかで主要な溶存態リン（主にリン酸態リン）の濃度が高いことから推測される。この高い栄養塩濃度は下流受水域への影響だけでなく、河川自体の環境に対しても影響し、特に水温の上昇した夏期に藻類の増殖が調査河川においてしばしば見られる。これは河川水中の豊富な栄養塩を利用して、流れの弱い場所などで藻類が増殖し、その後死滅、沈殿、腐敗するといった閉鎖性水域の富栄養化と同様の現象が生じており、その結果河川の生態系を貧困なものにしていると考えられる。

### 3.2 降雨時の農地河川水質変化

2002年9月16～17日の農地小河川の流量と降雨量を図2に示す。また農地小河川の水質成分濃度変化を図3-1から図3-5に示す。この降雨の2日前に合計19mmの先行降雨があるが、流量や水

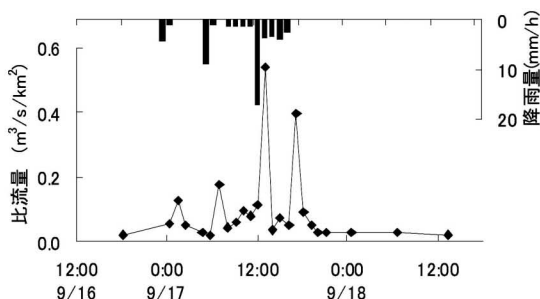


図2 農地小河川比流量と降雨量(9月16～18日)

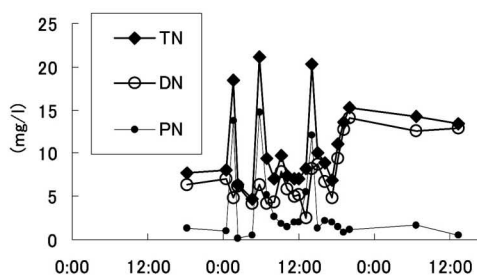


図3-3 農地小河川の降雨時水質(TN・DN・PN)

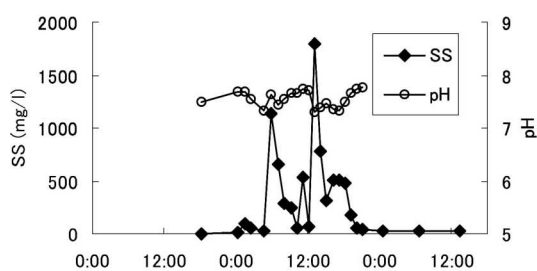


図3-1 農地小河川の降雨時水質(SS・pH)

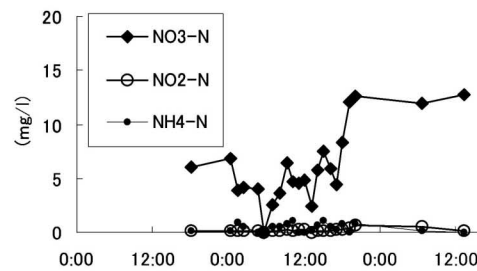


図3-4 農地小河川の降雨時水質(窒素成分)

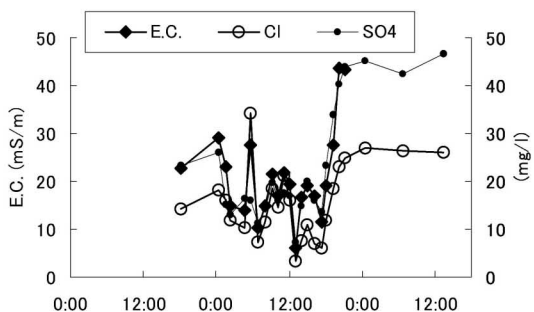


図3-2 農地小河川の降雨時水質(E.C.・Cl⁻・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

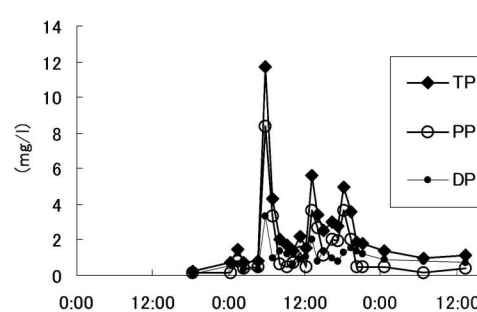


図3-5 農地小河川の降雨時水質(窒素成分)

質は晴天時のレベルにあり、水質に対する影響は少ないと考えられる。この降雨は3回の降雨ピークをもつ総降雨量52.3mmであった。農地小河川の流域面積が小さいため流量変動は大きい。降雨強度に対応した流出が見られる。流量増加に伴い、SS濃度はピーク時には平水時の100倍程度まで増加した。はじめの降雨ピークに比べて、その後の降雨ピークによるSS濃度の増加への影響は非常に大きく、これは流域からの表面流出によるものと考えられる。一方溶存イオン量の指標である電気伝導度は晴天時の4分の1以上低下した。降水中のイオン濃度は塩化物イオン、硫酸イオンはそれぞれ0.9mg/l/1.9mg/lと河川中濃度の10分の1以下であり、これらの成分については降雨によって希釈されたといえる。

栄養塩成分の窒素とリンでは降雨期間中の濃度変化に異なる傾向が見られる。全窒素濃度の降雨時変化は2段階に特徴づけることが出来る。すなわち、降雨開始から降雨初期の段階と降雨後期から終了後の段階である。前者において、全窒素濃度は晴天時に比べ低下するが降雨ピーク時に濃度の急激な増加が見られた。これは河川水中の窒素濃度の主要な成分が懸濁態窒素と硝酸態窒素であるため、降雨開始からしばらくの間は、硝酸態窒素は降雨によって希釈（降雨中硝酸態窒素濃度は0.28mg/l）されて濃度が減少する一方、懸濁物質の流出に伴う懸濁態窒素濃度の増加によって全窒素濃度が変動したと考えられる。そして後者の段階では降雨前以上の窒素濃度レベルに達した。これは、降雨終了によって懸濁態窒素濃度が減少するが、硝酸態窒素濃度を豊富に含む地下水が時間遅れで河川へ流出するため全体として窒素濃度が増加したと考えられる。農地において流域から河川への水の出方によって降雨時の窒素濃度およびその構成は大きく変化し、このことは農地からの窒素流出を評価する時、全窒素だけでなく主要な成分である懸濁態、硝酸態を把握することが重要であるといえる。

全リンはSSと同様の傾向を示し、降雨時の全リン濃度は晴天時と比べ非常に高く、最大で12mg/lと晴天時平均濃度の60倍以上となる場合があった。この高いリン濃度はほぼ懸濁態による。降雨時の流量増加により懸濁態リンの降雨時負荷は非常に大きいと考えられる。溶存態リン濃度は懸濁態と比べて小さく、そのほとんどがリン酸態リンであった。溶存態リン濃度は硝酸態窒素と同様、降雨直前よりも降雨終了時期のほうが高いが、降雨期間は希釈されず、いくつかの濃度のピークをもつ。降水中にはリンはほとんど含まれず（降雨中溶存態リン濃度は0.008mg/l）、またSS濃度の変化と同様の傾向が見られる（相関係数0.69）ため、溶存態リンは硝酸態窒素が多く含まれる流出の遅い地下水ではなく降雨に反応する早い流出成分、例えば土壌の浅い部分や河道に存在していると考えられる。

降雨時に農地から流出するリンの大半は懸濁態であり、その濃度の変化が全リン濃度を左右しているといえる。懸濁態リン濃度のピークの出現タイミングはSS濃度のもとのほぼ一致するが、ピーク強度は異なる。そこで降雨開始直後からの懸濁態リンとSSの比の時系列変化を図4に示す。参考のため懸濁態窒素とSSの比も示した。これは懸濁物中のリンおよび窒素の含有量の目安といえる。懸濁物中の窒素の割合は、降雨開始後数時間は10%程度と高い値を示すが、すぐに2%程度まで低下してその後は大きな変化は見られない。河道等に堆積したのと考えられる。一方、懸濁物中のリンの割合は降雨直後の1%程度から0.2~0.3%へ徐々に低下する傾向が見られた。すなわち降雨初期にリンを多く含んだ懸濁物が流出し、降雨が進行するに従いリン含量の少ない懸濁物が流出している。流域からリンを含む懸濁物が容易に洗い流されていると思われる。また

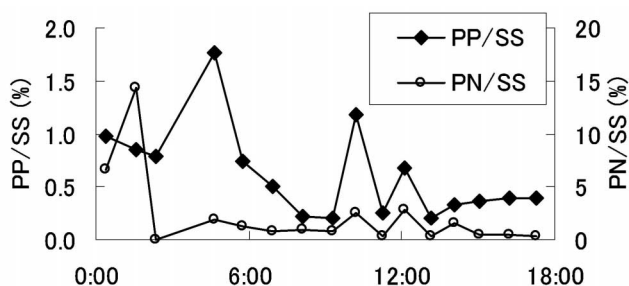


図4 SS中の懸濁態リンおよび懸濁態窒素 (9/17)

降雨中に懸濁態リンの割合が急激に高くなるピーク値が見られる。このピークが出現するのは懸濁物質 (SS や PP) の濃度がピークとなる一つ前の時間であり、多量の懸濁物流出に先立ってリンを豊富に含んだ懸濁物が流出していることが分かった。容易に輸送される粒径の細かい懸濁物質にリンが多量に含まれていると考えられ、この成分の制御が農地からのリン流出制御

に重要である。この成分は、降雨開始後に懸濁態リンとSSの比のピークが見られないことや降雨強度が最大の時にその比が最も高いこと、さらにピークの強度は降雨に従って減少していくことから、河道堆積物の洗い出しよりも流域の農地土壌からの表面流出によるものと思われる。降雨時のリン流出の中心となる懸濁態リンの由来や構成については今後さらに研究を進め検討する必要がある。

### 3.2 農地からの水質成分負荷流出特性

晴天時の調査と降雨時の調査の結果を基に農地小河川の負荷量を算出し、各水質成分負荷の流出特性を比流量と比流出負荷量の関係から検討した。水質成分負荷の流出は流量の変化に対応しており、比流量と比流出負荷量の関係は次式で表される。

$$L = c \times Q^n \quad \dots (1)$$

ここで、Lは比流出負荷量(g/s/km<sup>2</sup>)、Qは比流量(m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>)、nとcは係数である。各水質成分について係数n、CおよびlogQとlogLの相関係数Rを求め、表3に示す。n値は水質成分発生負荷量の流量との対応を示し、流出の特性を示すパラメーターである。nが1以上の時洗い出し型、nが1前後の時濃度一定型、nが1以下の時希釈型など分類される<sup>5)</sup>。表3の水質成分はアンモニア態窒素 (R=0.63) や懸濁態窒素 (R=0.70) 以外は相関係数が0.8以上と負荷量の流量との対応がよい。塩化物イオン、硫酸イオン、硝酸イオンのn値は0.6程度と希釈型であった。これは、これらの成分について農地からの負荷発生量に限界があるといえるが、

表3 農地小河川の水質成分負荷流出特性

(L=cQ<sup>n</sup>、c、n:定数 R:相関係数)

	n	c	R
SS	2.5	6359	0.85
Cl <sup>-</sup>	0.6	4.3	0.83
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.6	7.2	0.85
TN	0.8	6.3	0.89
PN	1.3	4.3	0.70
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	1.3	0.4	0.81
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.6	2.2	0.83
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	1.6	0.6	0.63
TP	1.6	8.2	0.92
PP	2.0	8.9	0.86
DP	1.4	2.4	0.89

試料数：38

晴天時河川水を涵養する流域の地下水中の濃度が高く、降雨時に雨水がこれらの成分濃度の低い経路を通じて多く河川に流れ出るためとも考えられる。農地小河川における一日あたりの硝酸態窒素比負荷量を試算すると $17\text{kg}/\text{km}^2$ で、例えば自然森林河川( $0.3\text{kg}/\text{km}^2$ )の50倍以上の負荷を流出している。農地小河川の懸濁態窒素の $n$ 値は1.3と洗い出し傾向だが、溶存態窒素の主成分である硝酸態窒素については強い希釈型であるため、全窒素の流出特性は希釈型である。下流水環境保全のためには、地下水中の硝酸態窒素濃度の削減がまず重要であるが、大規模土地整備工事等による雨水の流出経路の変更で河川へ流出する地下水流出成分を増大させないようにする等の対策も考えられる。農地からのリン負荷は、懸濁態、溶存態ともに $n$ 値が1以上の洗い出し型、すなわちノンポイント型の流出特性があり、特に懸濁態リンは $n$ 値が2.0と強度の洗い出し型を示し、降雨流出時に多量の負荷が発生する。すなわち、窒素と異なり多くのリン成分は流域土壌の表層の部分に存在し、降雨表面流出とともにリンが河川へ流れ出る。リン負荷削減のためには、農地土壌流出を抑制することが重要であるといえよう。

#### 4. 結論

本研究は、農業地域からの栄養塩成分を中心とした水質成分負荷流出を明らかにし、そこから下流水環境保全対策を検討することを目的として、畑地中心の小流域を対象として降雨時を含めた調査を行い、以下の結果を得た。

- 1) 調査対象とした農地小河川は自然河川(森林河川)に比べて溶存物質が多く、晴天時栄養塩成分は主に溶存態として下流受水域の環境基準値を遙かに超える濃度で存在し、下流の河川や閉鎖性水域に対する影響は大きい。
- 2) 降雨時に農地から流出する窒素の濃度およびその組成は、その流域内から河川への流出経路によって大きく変化し、降雨中は懸濁態、降雨後は硝酸態がそれぞれ窒素負荷の中心となる。そのため農地からの窒素流出の評価には全窒素のみでなく成分毎に把握する必要がある。
- 3) 降雨時農地から流出するリンの大半は懸濁態リンであり、懸濁態リン濃度の変化が全リン濃度を左右する。また降雨増水の早い段階で流出する懸濁物はリンを多く含み、この成分の制御が農地からのリン流出制御に重要である。
- 4) 農地小河川からの水質成分負荷の流出特性を比流量と比流出負荷量の関係から検討した結果、主要な溶存態イオンは強い希釈型であり、懸濁態成分はすべて洗い出し型であった。また懸濁態リンの流出特性は洗い出し型が強く、農地から降雨時、容易に多量のリン負荷が発生する。

今回、降雨時を中心に農地からの負荷流出について検討したが、農地からの負荷流出は農作業による影響も大きい。そのため農作業時期毎の降雨時流出の影響を考慮した調査研究が農地負荷流出を正確に把握するために必要である。

農地からの流出はこれまで主に肥料などの地下水への浸透・流出による河川への栄養塩負荷流出の影響の大きさが指摘され、本研究でも窒素負荷に関して同様の結果が得られた。この負荷の削減には施肥や水利用の管理を適切に行うといった、長期的かつ広域的な取り組みを必要とする。本研究ではさらに、降雨時に農地から表面流出によるリン負荷が多量に発生していることを示した。農地からの土壌流出の抑制する農地管理や農地表面流出水の簡易処理が対策として考えられる。今後、

懸濁態リンの内容（構成）の解明によってこの懸濁物質の由来を特定することができれば、より有効な負荷抑制対策につながると思われる。

#### 参考文献

- 1) 愛知県(2001)：平成12年度公共用水域及び地下水の水質調査結果
- 2) 武田郁郎(2001)：水と水環境の基礎知識、オーム社、p119
- 3) 井上隆信(2003)：非特定汚染源の原単位の現状と課題、水環境学会誌、26(3)、131-134
- 4) 水谷潤太郎(1997)：総窒素・総リンの物質循環図、土木学会論文集、566(7-3)、103-108
- 5) 山田俊郎、大江史恵、清水達雄、橘治国(1998)：森林集水域からの栄養塩負荷流出とその特性に関する比較研究、土木学会環境工学研究論文集、35、85-93
- 6) 半谷高久、小倉紀雄(1995)：第3版水質調査法、丸善、230-232
- 7) 田淵俊雄、高村義親(1985)：集水域からの窒素・リンの流出、東京大学出版会、p48-63