

柑橘類果樹園地からの栄養塩・元素類の流出特性 と影響因子に関する調査研究

RUNOFF CHARACTERISTICS OF NUTRIENTS AND ELEMENTS FROM CITRUS FRUIT GROVE AND EFFECTS ON THE BEHAVIOR

西村文武¹・増田理子²・渡邊政広³・津野洋⁴

Fumitake NISHIMURA¹, Michiko MASUDA²,
Masahiro WATANABE³ and Hiroshi TSUNO⁴

¹正会員 博士(工) 京都大学准教授 大学院都市環境工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

²正会員 博士(理) 名古屋工業大学准教授 大学院社会工学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工博 愛媛大学教授 大学院生産環境工学専攻(〒790-8577 松山市文京町3番)

⁴フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院都市環境工学専攻(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1)

In this study, observations in the test fields and laboratory scale experiments are executed in order to make clear the run-off characteristics of pollutants from citrus fruits grove, especially nutrients such as nitrogen, phosphorus and other inorganic materials are mainly considered. In the observations at test fields, long-term observation is continued more than 7 months and detailed observations during the one rainfall are also executed. In laboratory scale experiments, the relationship between chemical characteristics of the soils and run off characteristics of pollutants, and the effects on algal growth potentials by AGP tests are investigated. From these observations and experiments, it is concluded that the run off characteristics is affected by the pH and rate of rainfall and the ways to affect run off characteristics are different in each pollutants. It is also suggested that detailed investigations are required to estimate the effect of pollutant run off because the run off characteristics are widely changed by the rainfall characteristics.

Key Words : Run-off; nutrients; nitrogen, phosphorus, citrus fruits grove, grove soil

1. はじめに

下水道の普及と処理技術の向上,ならびに排水基準の規制強化が進み,流域における点汚染源(ポイントソース)からの汚濁負荷は減少傾向にある.一方で,面汚染源(ノンポイントソース)からの水域環境中への汚濁負荷は,排出源が面的に広がっているため,制御しにくく,その対策もポイントソースの場合と比較して,十分になされているとは言い難い.とりわけ農地では,作物生産量の増大を図るために意図的に化学肥料の投入や栽培過程での農薬の投与が継続的に行われるために,主要なノンポイントソースとなっている.近年は,環境保全型農業^{1,2)}の実施が図られるなど,汚濁負荷削減への取り組みが全国的になされるようになって来つつあるものの,関心を持たれる化学物質としては肥料や農薬が主であり,作物の生産性を低下させることなくそれらの使用量を削減する方法が検討されるなど,必然的に作物生産に関連する事項が中心になり,必ずしも

種々の物質の排出源としての農地という視点ではない.一方で,肥料や農薬の投与の結果として,農地からこれらの物質が流出すること以外に,作物の継続的な栽培と施肥により,土壌質が変化し,その影響により元素流出特性が変化する可能性も考えられる.さらに降雨強度が強いときには濁質の流出があるなど,降雨の強弱によっても農地からの物質流出特性は変化する.しかしながら,農地は作物毎に施肥等の土地管理状況が異なることから,ノンポイントソースとしての農地の特性や,汚濁物質排出の定量的な把握は,農地種毎に行う必要がある.これまでに,茶園^{3,4)},牧草地⁵⁾,果樹園地(ミカン・キウイフルーツ)⁶⁾についての原単位が調査されてきた.しかしながらCOD, TN, TPに関する調査報告がほとんどであり,多種多様な元素を対象としたものではなく,一降雨の大小による流出特性までを調査したものではない.また,農耕地からのノンポイントソースは,作物種や農地管理方法等人為的要素による影響に加え,降雨特性等をはじめとする気象条件

にも影響されることから、地域単位での調査も汚濁物質の詳細な把握には必要となってくる。

流域内での水質汚濁原因物質の正確な挙動把握は、流域における水環境問題等を考える上で必要不可欠な事項である。近年は、地理情報システム(GIS)の性能向上により、流域における環境管理に関しても、詳細で多様大量の情報を一元的に管理が可能になるなど、その可能性はますます広がりを見せつつあるが^{7),8)}、一方で基礎となるのは汚濁発生原単位などの調査研究であり、双方の進展が流域内環境管理には求められている。

そこで、本研究では、農耕地の例として愛媛県松山市内の柑橘類果樹園地を対象としてそこからの汚濁物流出特性の把握を目的とした。愛媛県はわが国における柑橘類の出荷量の最も多い地域のひとつであり、県中央に位置する松山地域においても伊予柑をはじめとする柑橘類が地域の主要農作物のひとつであり、流域の14.2%が果樹園地となっている。松山地域は人口約50万人を要する中核市であり、市内を流れる一級河川重信川の流域では、中心部に都市域が存在し、その周囲の郊外には水田が広がり、さらにそのまわりの山地・丘陵地においては、柑橘類果樹園地が広がる構造となっている。また年平均降水量が約1200mm程度であり、6月に降水量が多く12月に少ない夏雨型であり、水資源量が必ずしも豊富な地域ではなく、さらに流達水域が瀬戸内海であることから、水環境に与える柑橘類果樹園地からの物質流出の影響を把握することは、地域の水域環境保全策を講じる上でも重要となる。ここでは、約半年にわたる継続観測と、一降雨による土壌溶出水(流出水)の水質特性を調査し、汚濁発生特性を検討した。

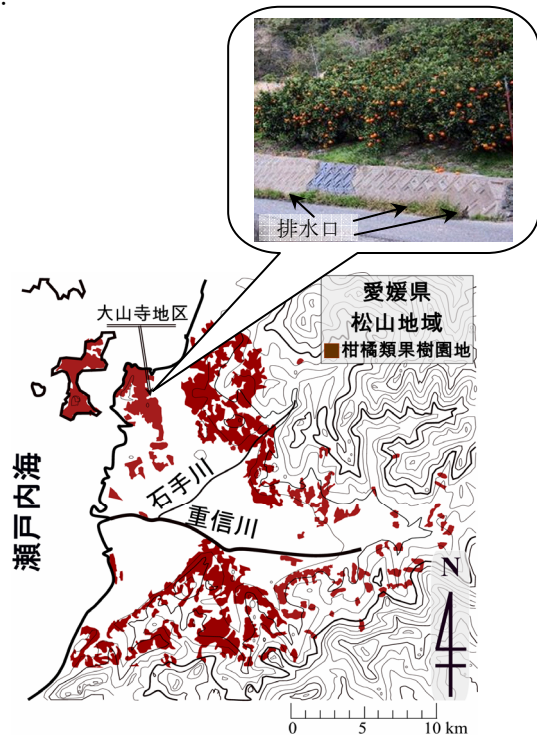


図-1 松山地域における柑橘類果樹園地の分布と調査地点(排水口)

2. 調査方法

(1) 調査地点

調査は松山市北西部の太山寺町に位置する標高104mの山の東側斜面(北緯33°53'20", 東経132°43'01")を対象として行った。松山地域における柑橘類果樹園地の分布と調査地点を図-1に示す。本対象地は主として伊予柑を栽培しており集水域約940m²の面積を有する。窒素・リン酸・カリウムを主とする有機無機の混合肥料を用いて年4回、3, 6, 9, 11月に計1.65kg/m²(34g-N/m², 27g-P₂O₅/m², 18g-K₂O/m²)の施肥が農協の栽培指針に基づいて行われている。またこの地域には石灰散布が年間で0.2kg/m²程度行われているものの、この果樹園地土壌は強酸性となっている。果樹園地土壌の化学的特性を表-1に示す⁹⁾。採水は、果樹園地下部にある通路に面した擁壁に敷設している3ヶ所の排水口より行った。採水地点としての排水口は北側からNo.1、

表-1 柑橘類果樹園地土壌の化学特性

土壌pH*		交換性陽イオン (水溶性陽イオン) [meq/100g soil]				
(H ₂ O)	(KCl)	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Al ³⁺
4.25	3.68	2.08 (0.66)	3.25 (0.81)	1.24 (0.60)	6.19 (1.24)	0.61 (0.32)
CEC** [meq/100g]		塩基飽和度*** [-]		TP [mgP/100g]	水溶性P [mgP/100g]	
9.05		1.41		228	4.28	

* 測定時溶媒: H₂OまたはKCl

** CEC: 陽イオン交換容量

*** 塩基飽和度: [交換性陽イオン計]/[CEC]

表-2 調査項目及び調査方法

調査項目	調査方法	
流量	メスシリンダー＋ストップウォッチ	
水温	赤液棒状温度計	
pH	ガラス電極法(セントラル科学 UC-23 DIGITAL pH METER)	
SS	ガラス繊維ろ紙法	
TOC	燃焼酸化-赤外線式TOC自動計測法 (島津製作所 TOC-5000A)	
全窒素濃度	紫外線吸光光度法	
NH ₄ -N濃度	インドフェノール青吸光光度法	
全リン濃度	酸化分解後モリブデン青吸光光度法	
PO ₄ ³⁻ -P濃度	モリブデン青吸光光度法	
イオン濃度 陰イオン (Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻) 陽イオン (Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺)	イオンクロマトグラフィー (島津製作所 LC-10A) 検出器 CDD-6A	
	分離 カラム	陰イオン: Shim-pack IC-A3 陽イオン: Shim-pack IC-C3
	移動相	陰イオン: 8.0mM p-ヒドロキシ 安息香酸, 3.2mM Bis-Tris混合液 陽イオン: 3.0mM しゅう酸水 溶液
Al, Si, Ba, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, V, Zn	ICP発光分光分析装置 (PERLIN ELMER Optoma3000)	

No.2, No.3とした。排水口からは天候にかかわらず常時排水がなされており、それらを土壤溶出水として水質分析に供した。

(2) 観測

観測は数ヶ月にわたる継続観測と一降雨における観測の双方を行った。継続観測は平成11年7月27日より開始し平成12年1月16日までの期間に行った。一降雨観測は平成11年10月26日～10月27日(降雨A)と平成11年10月31日～11月1日(降雨B)にかけての2回行った。継続観測においては、約週1度の頻度で調査を行った。調査地点にて各採水地点での土壤溶出水の流量、pH、水温を測定するとともに、500mLのプラスチック製サンプル瓶に採取し、保冷しつつ大学研究室に持ち帰った。その後直ちに孔径1μmのガラス繊維ろ紙(Whatman GF/B)を用いてサンプルの一部をろ過し、溶解性サンプルとして用いた。調査項目及び測定方法を表-2にまとめて示す。基本的にはStandard Methods¹⁰⁾や下水試験方法¹¹⁾に記載の水質分析方法に準拠して行った。水質項目としては、栄養塩類(NH₄-N, NO_x-N, DN, PO₄-P, DP), 有機物(DOC), 陽イオン(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), 陰イオン(Cl⁻, SO₄²⁻), 金属類他(V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Cd, Pb, Ba, Al, Si, Sr)とSSを測定した。イオン類はイオンクロマトグラフィー、金属類等の元素類はICP-AESを用いて測定した。

3. 結果及び考察

(1) 継続観測結果

図-2に継続観測における窒素並びにリンの流出特性を示す。全窒素濃度は観測期間中、25-45mgN/Lの範囲で推移しており、周囲の水環境中の濃度に比べて10倍以上高い濃度で流出していた。また成分のほとんどは硝酸性窒素であった。リン濃度も同様に0.1-0.8mgP/Lの範囲で周囲の水中濃度よりも高い濃度で流出していた。成分のほとんどはリン酸態リンであり、窒素成分と同様無機酸化態の成分であった。柑橘類果樹園は栄養塩のノンポイントソースとなりうることを示されている。濃度の変化傾向としては窒素成分が流出流量と負の相関関係がみられるのに対して、リン成分は流量が増加するにつれて濃度も増加する傾向がみられた。流出流量と流出濃度の関

係では物質により挙動が異なることが示されている。

継続観測時での土壤溶出水の水質結果を表-3にまとめて示す。今回の観測ではPb, Seについて、人の健康の保護に関する環境基準や要監視項目および指針値としての排出基準値を超過する時があった。

(2) 一降雨観測結果

図-3に一降雨観測時での雨水ならびに土壤溶出水の水質経時変化を示す。図の左側は降雨Aの結果であり、図の右側は降雨Bの結果である。降雨Aは、降雨強度が小さく、降雨継続時間が長いのに対し、降雨Bは、降雨強度が大きく、降雨継続時間は短いものである。一降雨期間での全降水量は、降雨Aと降雨Bでほとんど差がないものの、土壤溶出水流量は異なり、降雨強度の強い降雨Bの方が、降雨Aに比べて3倍程度の流出量であった。両降雨とも、降雨に対する溶出水流出の応答は、早かった。これは、観測域での流域面積が小さいことに加え、比較的表層での流出を観察していたためであると考えられる。パターンの異なる両降雨での物質流出の相違を比較すると、溶出水流量に対する物質濃度の挙動は物質ごとに異なることが理解される。例えば、継続観測時でも見られたが、流量が大きくなるにつれてNO_x-N濃度は低くなるが、逆にPO₄-P濃度は高くなる。図-4の上段に例として、一降雨時の流量とリン並びに窒素濃度の関係を示す。流量の増大と共にリ

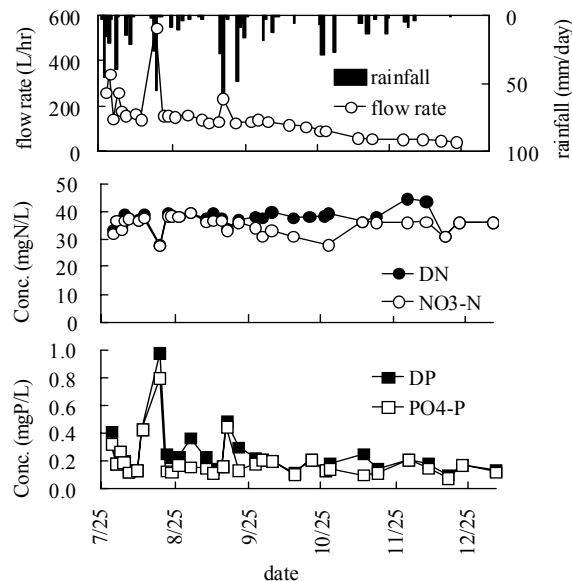


図-2 継続観測結果(流量ならびに栄養塩)

表-3 継続観測時での土壤溶出水の水質結果 [mg/L]

	pH	DOC	DN	NO ₃ -N	NH ₄ -N	PO ₄ -P	DP	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Si
平均値	7.10	3.40	37.5	35.1	0.11	0.20	0.25	21.4	1.48	47.9	47.2	20.2	148	24.3
最大値	7.64	5.48	44.6	39.7	0.23	0.80	0.98	35.9	2.42	58.0	51.6	36.7	790	39.5
最小値	5.79	2.45	27.9	27.8	0.08	0.08	0.10	15.1	1.06	38.2	31.5	11.2	62	4.4
標準偏差	0.46	0.76	3.2	3.1	0.03	0.14	0.17	4.1	0.30	6.9	4.2	4.7	216	13.7
	Sr	Fe	Cr	Pb	Ba	Al	Zn	V	Se	Mn	Co	Cd	Cu	Ni
平均値	0.19	0.163	0.066	0.029	0.023	0.014	0.013	0.014	0.008	0.001	0.001	ND*	ND*	ND*
最大値	0.21	0.428	0.188	0.131	0.037	0.190	0.051	0.026	0.071	0.027	0.005	ND*	ND*	ND*
最小値	0.15	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	ND*	ND*	ND*
標準偏差	0.01	0.174	0.071	0.038	0.007	0.038	0.015	0.006	0.017	0.005	0.001	ND*	ND*	ND*

*ND: 検出限界以下 (サンプル数n=31)

ン濃度も高くなっていることが明示されている。NO_x-Nと同様な挙動をするものとしてはMg²⁺, Si, Ca²⁺, Sr, Na⁺, Cl⁻があり、流量とは負の相関関係にある。一方で、PO₄-Pと同様な挙動をするものとしてはNH₄-N, Cu, DOC, Al, SS, K, Mnがあり、流量とは正の相関関係にある。負の相関関係になる原因として土壌との接触時間の減少と希釈が考えられた。一方正の相関関係を示す原因としては流量増大による攪拌混合等の物理的な溶出促進現象やpHの低下が考えられた。図-4の下段左に流量と流出水pHの関係を示す。流量が大きくなるにつれpHが低下していることがわかる。果樹園地土壌は強酸性であり降水も酸性化していることから、流量増大により土壌との接触時間が減少し、緩衝が十分に作用せずpHが低下したことが考えられ、低pHがリン等の溶出促進に関与したものと推察された。汚濁物質負荷は、流量と濃度の積で算出されることから、土壌溶出水の流量と濃度の関係は、流量と汚濁物質負荷の関係にも関連する。汚濁物質負荷と流量の関係は、経験的にこれまで以下のようなべき関数として表されてきている^{12),13)}。

$$L_x = a_x P_x (Q/A)^{b_x} A \quad (1)$$

ここで、 L_x : 物質 x の流出負荷 [mg/hr]
 P_x : 物質 x の流域での残存濃度 [mg/m²]
 Q : 土壌溶出水の流量 [L/hr]
 A : 流域面積 [m²]
 a_x, b_x : 物質 x の流出に関する係数
 [(L/m²)^{-b_x}/hr^{-b_x+1}], [-]

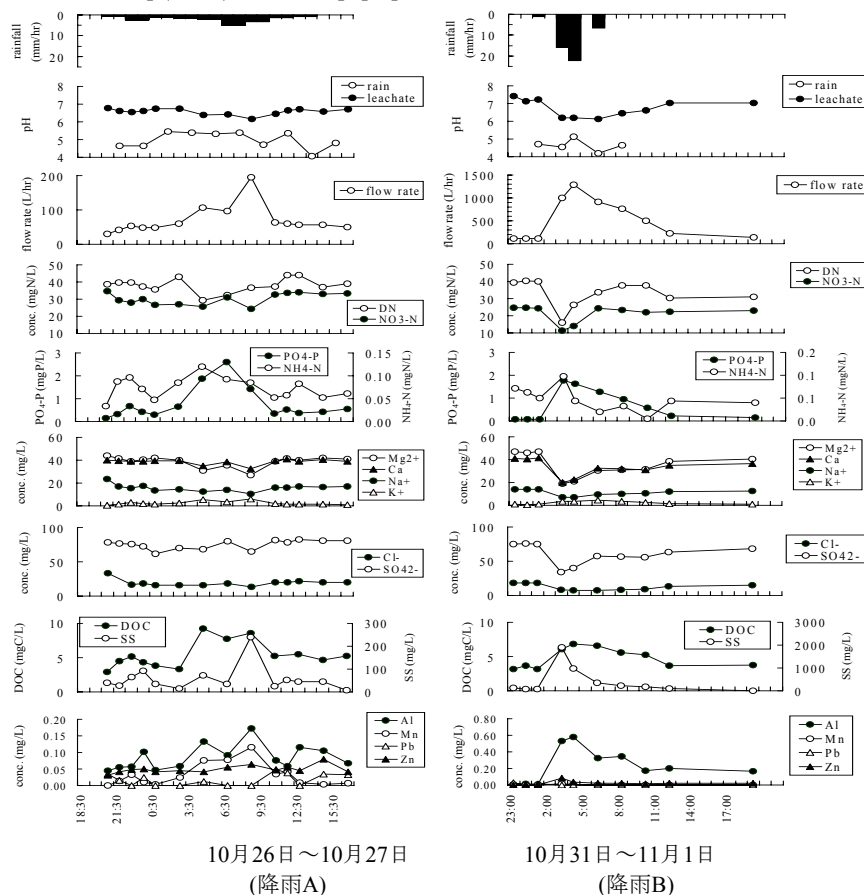


図-3 一降雨時での雨水ならびに土壌溶出水水質特性観測結果(流量ならびに栄養塩)

もしも流域面積が広大な場合や、地下水系が複雑であれば、土壌溶出水の最大流量を示す時刻は、通常最大濃度を示す時刻と異なってくる。しかし本研究で実施した調査においては、降雨強度は表面流を生じさせるほど強いものではなく、また降雨から土壌溶出水の流出までに大きなタイムラグが生じるほど、流域や雨水の浸透層が広くて大きなものではないこと、加えて土壌中に残存する物質が十分な量存在すれば、一降雨の短い期間中に残存量の著しい減少が生じないと仮定して差し支えないと考えられる。本調査研究での一降雨観測の条件においては、 P_x と A は一定であると見なせることから、式(1)は、以下のように変形することが出来る。

$$L_x/A = a_x' (Q/A)^{b_x} \quad (a_x' = a_x P_x) \quad (2)$$

$$C_x = a_x' P_x (Q/A)^{b_x-1} \quad (L_x = C_x Q) \quad (3)$$

ここで、 C_x : 土壌溶出水中の物質 x 濃度 [mg/L]

一方、図-4の調査結果よりpHは流量 Q の関数であり、またリン酸などの物質濃度はpHの関数となることが示されている(図-4の下段)。各々べき乗型の関数として近似するとき最も相関係数が高くなる結果となり、以下の近似式(調査結果による関係式)が成立する結果となった。

$$\text{pH} = f_1(Q) = M_1(Q)^{N_1} \quad (4)$$

$$C_x = f_2(\text{pH}) = M_2(\text{pH})^{N_2} \quad (5)$$

ここで、 M_1, M_2, N_1, N_2 : 関係式上の定数

(4), (5)式より

$$C_x = M_1 M_2 (Q)^{N_1 N_2} \quad (6)$$

が、導出され、 C_x と Q には(3)式と類似した関係があることが示されている。

式(2)は、比流量-比負荷量関係式(L'-Q'式)として、流量と汚濁負荷の関係を表す経験式として広く用いられてきている¹⁴⁾。 a_x は流域面積や地下水系の構造に関連する係数であり、 b_x は土壌溶出水中の物質 x 濃度におよぼす流量やその変化速度の影響に関連する係数である。また b_x は、土壌の物理学的、化学的特性に関わるものである。とりわけ果樹園地での物質流出はpHの影響があると考えられ、 b_x がpHにより影響を受けていると考えられる。また、式(4)～(6)より、pHの影響を表しているのは、べき乗部分でもあり、 b_x の値を用いて、各物質の流出特性を考察し特徴付けることを試みた。 $0 < b_x < 1$ のときは、流量増加に伴い、土壌溶出水中の物質濃度が低下し、 $b_x=1$ のケースでは流量にかかわらず物質濃度の変化はないことになる。また、 $b_x > 1$ の場合は、流量増加に伴い物質濃度も上昇し、流量増加に伴い汚濁負荷が急激に増大することになる。

図-5に窒素化合物とリン酸についての比流量-比

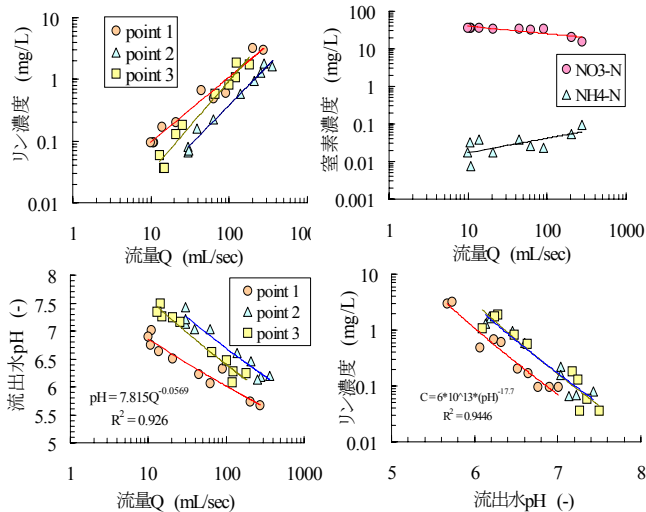


図-4 流量と流出水水質の関係(上段, 下段左) および流出水pHとリンの関係

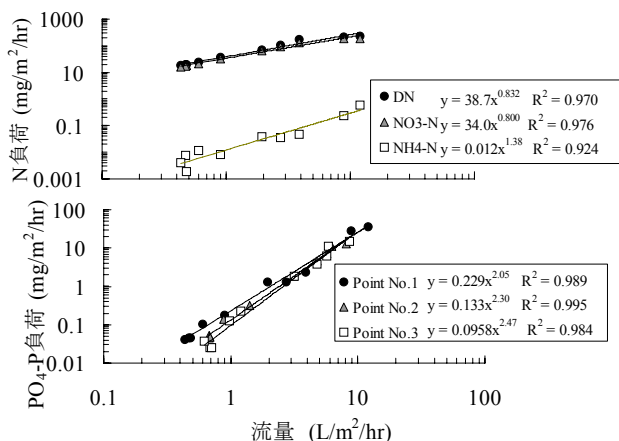


図-5 窒素化合物とリン酸の比流量-比負荷量の関係

負荷量関係式を示す。比負荷量は比流量のべき関数として表現しうることが示されている。また、物質により b_x の値が異なり、各物質の流出特性を示していることもわかる。その他の物質における比流量-比負荷量関係式での b_x 値について図-6にまとめて示す。山地河川では雨天時においては b_x 値は1付近の値を示すとの従来からの報告があるものの¹⁴⁾、本研究での調査結果からは、物質により b_x 値が大きく異なることがわかる。また、SS等の懸濁性の物質では b_x は2付近の値を取ることも報告されている¹⁵⁾。これは流量増加に伴いより強力な水理学的作用を受けるためであると考えられている。本研究においてもSSの b_x 値(b_{SS} 値)は平均で1.3程度であり、流量増加に伴う物理的な作用がSS濃度上昇の要因のひとつとなったものと考えられる。SSのケースより b_x 値が大きくなった物質には、Fe, Pb, Mn, リン酸, Cu, Al, K^+ , Znがある。山林部や都市域を含む中小流域による詳細な調査においても、 b_x 値が1.3より大きな値をとることはなく¹⁶⁾、また、これらは溶解性物質であり、SSのケースのように流量増加に伴う物理的な要因とは別の濃度上昇機構があるものと考えられる。図-4に示しているとおり、流量増加に伴いpHの低下が観察され、またpHの低下はリン酸の濃度上昇を誘発していることがわかる。Fe, Pb, Mn, Cu, Al, Znも同様の現象が観察されている。金属類はpHが高い場合には水に難溶性の水酸化物を形成し、pHが低い環境下では、溶解度が上昇する。Fe(OH)₃, Al(OH)₃のpKa(酸解離定数)は、各々2.2および5.5であり、pHが酸性域になると溶解度が増加することや、リン酸もヒドロキシアパタイトやその他の塩類形成においても、pH低下に伴い溶解度が増大することが示されている¹⁷⁾。これらの b_x 値が1より大きな値となったのは、pH低下に伴い化学的な作用により濃度上昇が生じたものと考えられた。柑橘類果樹園地における物質流出にはpH低下の影響が推察されたが、これは酸性雨と緩衝作用がほとんどない柑橘類果樹園地特有の強酸性土壌によるものであると考えられる。一般的に農耕地における土壌の酸性化の要因のひとつには過剰施肥が挙げられ、柑橘類果樹園地の場合も、適切な施肥量により、土壌の酸性化を防ぐと共に、物質流出、とり

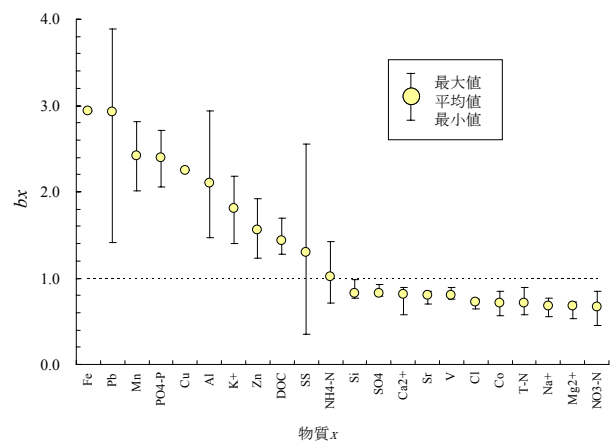


図-6 各物質の流出に関する係数 b_x 値

わけ栄養塩類や金属類の流出を制御出来る可能性がある。

4. まとめ

本研究では、愛媛県松山地域における柑橘類果樹園地からの栄養塩ならびに元素流出特性を調査するとともにそれに影響を与える因子、周辺水環境への影響について考察した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- 1) 柑橘類果樹園地土壌溶出水の窒素濃度は、25～45 mgN/Lの範囲であり、主たる形態は硝酸性窒素であった。またリン濃度は、0.1～0.8mgP/Lの範囲であり、主たる形態はリン酸態リンであった。栄養塩類は周辺環境からの溶出水中濃度よりも有意に高い濃度であった。
- 2) 柑橘類果樹園地からの流出特性は、各物質毎に異なる。また、柑橘類果樹園地からの物質の比負荷量は比流量のべき関数となることが一降雨観測の結果から明らかになった。またこれにより物質流出特性を、比流量-比負荷量関係式におけるべき指数(b_x)を用いて明らかにした。
- 3) b_x の値はNOx-N, Mg^{2+} , Si, Ca^{2+} , Sr, Na^+ , Cl⁻では1より小さい値を取ることがわかり、流量増加に伴い土壌溶出水中の濃度は低下することがわかった。一方で、 $PO_4\text{-P}$, $NH_4\text{-N}$, Cu, DOC, Al, SS, K, Mnは1より大きい値を取ることがわかり、流量増加に伴い土壌溶出水中の濃度は上昇することがわかった。SSについては、物理的な作用により流量増加に伴い土壌溶出水中の濃度が上昇するものと考えられた。また $PO_4\text{-P}$, Fe, Pb, Mn, Cu, Al, Znについては流量増大に伴うpH低下が要因であると考えられた。

柑橘類果樹園地からの物質流出は、概略的には比流量-比負荷量関係式($L^a\text{-}Q^b$ 式)で表現できるが、土壌の低pHが起因と考えられる流出水中の低下に影響を受けることが明らかとなった。とりわけ周辺水域の富栄養化の原因となるリンがpHの影響を大きく受ける可能性があることから、流域管理面においても柑橘類果樹園地における施肥や土壌管理の重要性が示された。

謝辞：本研究の一部は平成10,12年度公益信託下水道振興基金の助成を受けました。また、愛媛大学工学部環境建設工学科卒業生の高橋竜士氏(現(株)熊谷組)、愛媛大学大学院理工学研究科修了生の赤瀬孝也氏(現(株)修成建設コンサルタント)には、調査実施に際し多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1)堀内孝次, 根本圭介: 持続可能な社会の実現に向けた

- 環境保全型農業の構築, 日本作物学会紀事, Vol. 77, No.2, pp.213-220, 2008.
- 2) 菅原秋日人: 農業分野における面原対策の推進について, 水環境学会誌, Vol. 30, No.4, pp.169-171, 2008.
 - 3) 山本富久, 中曾根英雄, 松沢康宏, 黒田久雄, 加藤亮: 集団茶園地帯における地下水水質と窒素・リン流出負荷量の推定, 水環境学会誌, Vol. 28, No.6, pp.399-404, 2005.
 - 4) 井伊博行, 平田健正, 田中豊和, 西川雅高, 中島二夫, 梅原鎬一: 静岡県中部地域での茶畑由来の湧水・池水・河川水の水質について, 水工学論文集, Vol. 44, pp.1155-1160, 2000.
 - 5) 國松孝男, 駒井幸雄: 農林地ノンポイント汚染の実測と原単位-牧草地を例にして, 水環境学会誌, Vol. 30, No.4, pp.176-180, 2008.
 - 6) 福島忠雄, 河村宣親: 急傾斜樹園における栄養塩類の流出特性に関する調査研究, 農業土木学会論文集, Vol. 142, pp.75-82, 1989.
 - 7) 増田貴則: 流域水環境管理におけるGIS利用の現状と展望, 水環境学会誌, Vol. 26, No.3, pp.140-145, 2003.
 - 8) 青田容明, 熊谷道夫: 河川等における多点自動環境監視システムに適用可能な通信ネットワークの最適化-遺伝的アルゴリズムの適用-, 水文・水資源学会誌, Vol. 17, No.6, pp.618-624, 2004.
 - 9) 農林水産技術会議事務局監修・土壌養分測定法委員会編: 肥沃度測定のための土壌養分分析法, 養賢堂, 1970.
 - 10) APHA, AWWA, WEF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition, Washington D. C.: American public health association, ISBN 0-87553-235-7, 1998.
 - 11) 日本下水道協会: 下水試験方法 -1997年版-, 1997.
 - 12) Huber WC. and Dickinson R. E.: Storm Water management model, Ver.4-Part A; User's Manual, U. S. EPA/600/3-88/001a, 1988.
 - 13) Watanabe M., Kobayashi Y., Fujisawa T. and Hokazono R.: A practical runoff model of water quality and storm water with flow regulations in combined sewer pipe system, *Proceedings of the Eighth international conference on Urban storm drainage*, pp.1583-1588, 1999.
 - 14) Hirata T. and Muraoka K. Seasonal change of streamwater chemistry in Tsukuba experimental forested basin, *Jpn. J. Limnology*, Vol. 49, No.1, pp.1-9, 1988.
 - 15) 渡邊政広, 西村文武, 重田尚秀, 小林康司: 都市流域の不浸透流出面(屋根面, 道路面)における雨水・汚濁負荷流出特性, 水工学論文集, Vol. 45, pp.55-60, 2000.
 - 16) S. Fujii, M. Moriya, P. Songprasert and H. Ihara: Estimation of annual pollutant loadings in two small catchments and examination of their differences caused by regional properties, *Water Science & Technology*, Vol. 53, No. 2, pp.33-44, 2006.
 - 17) 田中俊博, 島村和彰: リン回収工程を有する下・廃水処理技術, 環境バイオテクノロジー学会誌, Vol. 4, No. 2, pp.101-108, 2005.

(2009. 9. 30受付)