面源負荷としての土壌の富栄養化ポテンシャルに関する研究

史 秀華* 浮田正夫** 樋口隆哉**
今井 剛** 関根雅彦**

Evaluation of Eutrophication Potentials of Soils Representing Nonpoint Sources

Xiuhua SHI*, Masao UKITA**, Takaya HIGUCHI**,
Tsuyoshi IMAI** and Masahiko SEKINE**

* Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

** Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan

Abstract

In order to grasp the eutrophication potential of nonpoint sources, we performed a detailed investigation on the soils of paddy field, dry field and forest in the Koto basin of Yamaguchi Prefecture. It was found that the vertical distributions of TN, TP and IL in the soils decreased exponentially with increasing the depth of the soils. The amount of accumulated N and P in the layer from 0 to 50cm was calculated. The accumulated N was 72 times of the used N-fertilizer per year in the paddy field and 51 times in the dry field. The accumulated P was 56 times of the used P-fertilizer per year in both paddy field and dry field. The percentages of soluble N in the surface soils were 2.5% for dry field and 0.1% for paddy field and forest. The percentages of soluble P were 0.8% for paddy field and dry field, and close to zero for the forest. The fraction of soluble N increased with increasing depth of the soil, whereas soluble P was mainly remarkable in the surface soil. The present investigation gives insight to the actual situation of the eutrophication potentials of nonpoint sources in agricultural land.

Key words: eutrophication, nonpoint source, soil, elution

1. はじめに

近年、土壌汚染に由来する地下水の汚染や閉鎖性水域の富栄養化などが問題になっている。その主要な原因は農業排水を中心とした面源負荷であると考えられている。琵琶湖への COD、窒素 (N) およびリン (P) の流出負荷源のうち、面源負荷によるものはそれぞれ全体の 58, 45 および 44% とされている¹⁾。また、米国では面源負荷による汚染が全体の 2/3 を占め、その中で農業によるものは約 75% である²⁾といわれている。しかし、農地からの栄養塩の流出はすでに定常状態になっているのか、また降雨時に流出する土壌に懸濁態として含まれる栄養塩は閉鎖性水域の富栄養化にどのような影響を与えているのかなどといった問題に対して、なお十分な知見が得られているとはいえない。

従来の面源負荷に関する調査研究は、主に流出水の水質や流達過程などに関するものが多く、土壌の栄養塩ポテンシャルの評価を試みたものは少ない。そこで本研究では、面的負荷源として山口県厚東川流域を主な対象とし、水田、畑地、山林の土壌調査を行った。そして、富栄養化に係わる N, P の土壌中の鉛直分布、溶出特性な

どについて体系的な調査と分析を行い、調査データの定量評価と解析に基づいて各種土壌中の栄養塩の蓄積量を計算した。またその蓄積量のうち、どの程度が溶出しやすい部分なのかを把握し、農地土壌中の N, P の潜在的汚濁源としての位置づけについて考察した。

Fig. 1 Schematic map of investigated basin. The points represent the locations of the sampling sites.

* 山口大学大学院理工学研究科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

** 山口大学工学部社会建設工学科 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1

Table 1 Type and number of investigated sites

Type	Grass and fallen leaves location×point	Surface soil location×point	Vertical soil cross section
Paddy field	Reductive	1×3	1
	Oxidative	1×3	1
	Unconsolidated paddy field	1×3	1
	Consolidated paddy field	1×3	1
	Organic farming	—	2
	With secondary crop	1×3	1
	Test field	—	2 ⁺ +4
Dry field	Vegetable	—	2
	Orchard	3×3	5
	Pasture	3×3	3
Tea garden	—	3×3	2
Forest	Fallen broadleaf	2×3	1
	Evergreen broadleaf	6×3	1
	Conifer	3×3	3
Total	21×3	38×3	30
Date	Apr. 8, 2000	Apr. 8, 2000	* Sept. 10, 1999 Apr. 28-29, 2000

2. 研究方法

2.1 調査地点の概要

調査対象としたのは山口県秋芳町、美東町、宇部市を含む厚東川流域と山口市、阿東町である。厚東川は、流路長 59.9km、流域面積 406km²の二級河川である。当流域は、その 71.0%が山林、10.6%が水田、2.3%が畑であり、秋芳町を中心に秋吉台、岩永台のカルスト台地が広がっている。調査地点の分布図を Fig. 1 に概略的に示す。各種土壌の調査地点は普遍性の損なわれないように留意し、Table 1 に示したように、水田については還元的湿田、酸化的乾田、圃場整備前水田、圃場整備後水田、有機農業水田、二毛作水田および大学農場水田を選定した。畑地については、代表的な野菜畑、果樹園、牧草地を選定した。茶園は独特な腐植土であるため、畑地とは区別している。山林については、落葉広葉樹林、常緑広葉樹林および針葉樹林（スギ人工林およびヒノキ人工林）を調査対象とした。流域以外では、山口市の山口大学試験農場の水田、阿東町のリング園、宇部市のミカン園等を対象とした。

2.2 調査方法

1999 年 9 月に大学農場水田 2 ケ所で鉛直分布調査用の土壌（以下、鉛直土とする）を採取し、2000 年 4 月に Table 1 に示すように、落葉雑草を 21 ケ所、表層土を 38 ケ所、鉛直土を 28 ケ所で採取した。4 月は雑草も少なく、水田は作付け前で、比較的地表植生の影響が小さい時期であった。また、茶園を除いて施肥の短期的な影響が少ない時期であった。なお、鉛直土を採取した 30 ケ所はすべて表層土を採取した 38 ケ所に含まれている。

表層土については、高さ 5cm の採土器（コア容積 100ml）で 1 ケ所につき 3 点から土を採取し、それらを混合することによって、その場所を代表する試料を得た。また、土壌有機物の潜在的な蓄積量と分布状況を把握するため、1 ケ所につき 3 点で 30×30cm の枠を置き、その範囲内にある落葉雑草をポリ袋に採取した。鉛直土については、可能な

ところでは径約 8cm、長さ約 50cm の半開閉式のパイプを打ち込み、引き抜いて採取した。この場合は各場所でそれぞれの土壌断面外観から層位を分けて土壌を採取した。これが困難な場所では、長さ約 120cm のスクリュードリル式の採土器を回転しながら押し込み、スクリュー溝に入った土を順次採取した。これらの試料は水分を逃がさないようにアルミ箔で包んだ後、ポリ袋に入れて持ち帰った。

2.3 分析方法

採取した土壌および落葉雑草サンプルは 108℃で 24 時間乾燥させ、乾燥重量を求めた。次に乾燥したサンプルを粉碎し、均一に混合した。その後、全窒素（TN）はケルダール法、全リン（TP）はケルダール分解モリブデン青法により測定した。有機物については、風乾土を用いて 600℃、2 時間の強熱減量法³⁾により強熱減量（IL）を測定し、その指標とした。可溶性（soluble）、可給態（acid soluble）および易分解性（readily degradable）の N、P の測定は以下の方法で行った⁴⁻⁷⁾。可溶性 N（NH₄-N+NO_{2,3}-N）、P（PO₄-P）については、湿土壌約 4g を予め風袋重量を量った 100ml 広口共栓ビンにとり、純水約 100ml を加えて満杯とし、密栓して重量を測定した後、30 分間よく振り混ぜ、GA100（孔径 1μm）でろ過し、ろ液中の濃度として測定した。可給態 N（NH₄-N+NO_{2,3}-N）、P（PO₄-P）については、湿土壌約 2g を 200ml 三角フラスコにとり、100ml の 0.001N 硫酸（pH=3）を加え、30 分間振り混ぜた後、GA100 でろ過し、ろ液中の濃度として測定した。易分解性 N および P については、湿土壌約 4g を 100ml 広口共栓ビンにとり、純水約 100ml を加えて満杯とし、密栓して 35℃で 1 ヶ月間放置した。その後、GA100 でろ過し、ろ液中の可溶性 N（NH₄-N+NO_{2,3}-N）、P（PO₄-P）として測定した。NH₄-N はインドフェノール青法、NO_{2,3}-N および PO₄-P はそれぞれ硫酸ヒドラジン還元法とモリブデン青法で測定した。なお、土壌中の N、P の各態濃度は、全て乾重当たりの濃度として表現した。

3. 結果および考察

Table 2 Concentration ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and Content ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) of TN and TP in grass, fallen leaves and surface soil

Type	—		Grass and fallen leaves		Surface soil	
			TN	TP	TN	TP
Paddy field	Mean value (range)	Conc.	8.14 (4.51~12.7)	3.38 (1.51~5.37)	1.97 (1.20~2.71)	1.21 (0.15~1.72)
		Content	41 (20.9~61.0)	18.8 (7.0~29.8)	812 (722~1240)	339 (137~454)
Dry field	Mean value (range)	Conc.	20.4 (9.61~35.1)	13 (1.18~26.8)	3.92 (2.1~8.12)	1.63 (0.77~4.31)
		Content	70.9 (32.8~110)	47.6 (3.3~84.8)	1570 (748~1630)	1020 (335~1090)
Forest	Mean value (range)	Conc.	9.29 (1.39~12.3)	3.19 (1.38~5.20)	3.05 (2.01~4.40)	0.36 (0.26~0.72)
		Content	84 (14.6~186)	31.6 (7.5~69.7)	959 (865~1300)	126 (66.7~160)

3.1 土地類型別の N, P 現存量

3.1.1 落葉雑草の N, P 濃度および現存量

水田、畑地および山林地面の落葉雑草を採取して TN, TP 濃度および現存量を求めた結果を Table 2 に示す。比較のために表層土中 (0~5cm 層) の TN, TP 濃度および現存量も示す。落葉雑草の現存量は、山林の TN と畑地の TP が比較的高くなっている。また、水田や畑地と比べると山林の表層土の TP 現存量がかなり小さい。落葉雑草の TN 現存量を表層土と比較すると、水田および畑地で 5%, 山林で 9% 程度であり、落葉雑草の TP を表層土と比較すると、水田で 6%, 畑地で 5%, 山林で 25% 程度となっている。このように、山林では表層土中の TP 現存量が小さいことを反映して、落葉雑草の TP の割合が高くなっている。

3.1.2 各種表層土の N, P, IL 濃度

各種表層土中の TN, TP および IL の分析結果を立地類型別に示したものが Fig. 2 である。Fig. 2-a) は各種水田の結果を示している。TN についてみると、還元湿田、圃場整備後水田、有機農業水田で $2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ を超えて高い値となっている。TP については、麦の裏作を行っている二毛作水田で $1.6\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ と最も高く、有機農業水田が $1.0\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ で続いている。有機農業水田で TN, TP が比較的高いのは、土作りのために現物 1000kg 当たり 5kg 以上の窒素やリン酸、カリ

を含む⁸⁾有機肥料が施されているためであると考えられる。また、二毛作水田では裏作時に多量の化学肥料が施用されているために TP が高くなっていると考えられる。

Fig. 2-b), c) は各種畑地土壌の結果を示しているが、TN についてみると、茶園で $16\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ を超えて非常に高い値となっている。TP についてみると、茶園が最も高く、果樹園、牧草地、野菜畑の順で高い濃度を示している。このように、茶園は TN, TP ともに特に高くなっている。

Fig. 2-d) では各種山林土壌の結果を示している。腐葉土の層を含むためか、TN がすべて $2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ を超えて高くっており、常緑広葉樹林が最も高く、針葉樹林、落葉広葉樹林が続いている。TP についてみると、水田および畑地と比較して低く、概ね $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下のバックグラウンド的なレベルになっている。

Fig. 2 には立地類型別の平均値もまとめている。これによると、TN については畑地が最も高く、山林、水田が続いている。TP についても畑地が最も高く、水田、山林の順で高い値を示している。IL については山林が最も高く、畑地、水田の順になっている。全般的に、水田の TN は低濃度であり、山林の TP は TN と対照的に特に低い値を示している。また、茶園はすべての項目で非常に高い値を示している。

Fig. 2 Concentration of TN, TP and IL in different surface soils of a) paddy field, b) dry field, c) tea garden and d) forest

Fig. 3 Vertical distributions of the TN concentration in a) paddy field, b) dry field, c) tea garden, and d) forest soil. Points represent the values obtained in the measurements. The solid lines are best-fitting lines of exponential function.

3.1.3 各種土壌の N, P, IL の鉛直分布

Fig. 3, 4, 5 に水田, 畑地, 茶園, 山林土壌の TN, TP, IL 含有量の鉛直分布調査結果を示す。概ね深さ 5cm までを表層, 5~30cm を中層, 30cm 以深を下層とすると, どの土壌も当然ながら表層が高く, 下方へ行くほど低く, 概ね指数関数的に減少する傾向が認められる。したがって, 含有量は次式で近似的に表すことができる。

$$C = C_0 e^{-kx} \quad (1)$$

ここで, C : N, P, IL の含有量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_0 : 表層土の N, P, IL 含有量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), k : 減衰係数 (cm^{-1}), x : 鉛直深度 (cm) である。

Fig. 3 は各種鉛直土壌の TN データをプロットした結果である。水田, 畑地および山林における表層の濃度はそれぞれ 1.6, 3.5, $3.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 程度であるが, 下層 (40cm) と比較してみると, 水田で 2.5 倍程度, 畑地で 5 倍程度, 山林

Fig. 4 Vertical distributions of the TP concentration in a) paddy field, b) dry field, c) tea garden, and d) forest soil. Points represent the values obtained in the measurements. The solid lines are best-fitting lines of exponential function.

は 4 倍強となっている。茶園については有機肥料の施用が多い表層の TN が非常に高くなっている。また, 深さ方向に指数関数的に減少する傾向が他と比較して大きく, 表層の TN は下層に対して 10 倍程度高い値となっている。

Fig. 4 には水田, 畑地, 茶園, 山林土壌の TP の測定結果を示す。水田は深さ 40cm 程度で一定レベルに漸近しているようにも見えるが, データのばらつきも大きい。これは有機農業水田と二毛作水田で表層土の TP が高かったためである。畑地では水田より全般にやや高めであり, 深さ方向の減衰は顕著である。Fig. 4-b) の中で数値の高いポイントは果樹園と野菜畑のデータである。茶園については有機・無機肥料の施用が多く, TP は全般的に高い。また, Fig. 4-d) によると, 山林の TP のレベルは全体的に低い。

Fig. 5 には水田, 畑地, 茶園, 山林土壌の IL の調査結果をまとめている。水田ではその他の土壌と比べて全般的にやや低めであり, 深さ方向に緩やかに変化している。畑地では表層から中層までに草根があるので, IL の値が高い。茶園については表層から深さ 20cm 辺りまでは落葉の未分解の枝葉を含む腐植土で, 全般的に高い値となっており, 表層と下層の IL には顕著な差が認められた。Fig. 5-d) の山林における表層の 2 つの高いデータは落葉広葉樹林であり, 落葉の腐植土のために高い測定値となっている。

Fig. 5 Vertical distributions of the IL values in a) paddy field, b) dry field, c) tea garden, and d) forest soil. Points represent the values obtained in the measurements. The solid lines are best-fitting lines of exponential function.

3.2 土地類型別の N, P, IL の蓄積量算定と評価

3.2.1 土壌の容積重

各種土壌の単位面積当たりの N, P, IL の蓄積量を計算するために, まず容積重 (単位体積重量) の鉛直分布調査を行った。その結果を Fig. 6 に示す。容積重は土壌の物理的な状態を最もよく反映した性質であり, 植物の根の発達あるいは水の供給などの良否にも関係する指標である。土壌の容積重は鉛直変化より自然規律を考えると, 次式で表すのが实际的であると考えられる。

$$\frac{d\rho}{dx} = a(\rho_m - \rho) \quad (2)$$

ここで、 ρ : 土壌の容積重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), ρ_m : 基底土壌の容積重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), a : 減衰係数 (cm^{-1}), x : 鉛直深度 (cm) である。式(2)を積分すると、次式が得られる。

$$\rho = \rho_m - \Delta\rho e^{-ax} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\rho$ は積分定数であるが、容積重の変化幅 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)を表している。式(3)を用いて、Fig. 6 に示した調査データを最小二乗法で回帰分析し、各種土壌容積重の係数を算定した。回帰分析の結果を Table 3 に示す。算出した係数と式(3)を用いて、表層の容積重 (ρ_0) を求めたところ、水田、畑地、茶園および山林で、それぞれ 1.0, 0.9, 0.2 および $0.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ となった。土壌の容積重と有機物の含有量はほぼ反比例の関係にあるので、以上の結果は Fig. 5 に示した状態とほぼ一致することが明らかになった。ここで、茶園の ρ_0 が特に小さく、 ρ_m と $\Delta\rho$ が大きいのは、現場の表層土に膨軟な落葉の腐植土があり、容積重が深さ方向に急激に変化することを反映していると考えられる。

Fig. 6 Soil densities of a) paddy field, b) dry field, c) tea garden, and d) forest as a function of depth. The points represent the measured values. The solid lines are best-fitting lines.

3.2.2 土壌中の N, P, IL の蓄積量

水田、畑地、茶園および山林土壌における N, P, IL の蓄積量は、土壌の TN, TP, IL 含有量と土壌の容積重を用いて求められる。すなわち、式(1)と式(3)を用いると次式が得られる。

$$S = \int_0^{x_s} C(x) \cdot \rho(x) \cdot dx \quad (4)$$

ここで、 S : TN, TP, IL の蓄積量 (ただし単位は $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ とする), x_s : 計算深度 (cm) である。 x_s は土壌の採取深度の 50cm とする。この深度は作土層と微生物が豊富な土層を含んでいる。式(4)から N, P, IL の蓄積量を求めた結果を Table 4 に示す。比較のために、表層土 (0~5cm) 中の蓄積量も計算し、算定結果を Table 4 に示している。表層土と鉛直土 (0~50cm) における TN, TP, IL の存在割合を算出した結果、各種土壌の鉛直土に対する表層土中の蓄積量の割合は、TN で 13~17%, TP で 6~23% であり、TP では

Table 3 Constants of the best-fitting density functions for different soils

Type	ρ_0 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	ρ_m ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$\Delta\rho$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	a (cm^{-1})	R^2
Paddy field	1.00	1.51	0.51	0.0369	0.71
Dry field	0.90	1.44	0.54	0.0781	0.61
Tea garden	0.21	1.96	1.75	0.0141	0.88
Forest	0.51	1.25	0.74	0.1230	0.87

ρ_0 : density of the surface soils R : correlation coefficient

特に畑地が高い値を示した。茶園では表層土の TP が高いにもかかわらず、表層土における TP 蓄積量の割合は 6% しかない。これは、茶園では腐植土が多く、土壌の容積重が小さいためであると考えられる。

肥料年鑑^{9,10)}に基づいて、水田および畑地における施肥量を実績より N についてそれぞれ $85\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$, $175\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ とすると、地表面から 50cm までの鉛直土中の N の蓄積量は水田で 72 年分、畑地で 51 年分に相当する。P について、施肥をそれぞれ $44\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$, $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$ とすると、地表面から 50cm までの鉛直土中の P の蓄積量は水田、畑地ともに 56 年分に相当する。また、肥料由来ではない元々の土壌に含有されていた TN, TP の量を考慮して、仮に山林土壌の値をバックグラウンドとして差し引いた場合は、N の蓄積量は水田ではなく、畑地で 11 年分に相当し、P については水田で 27 年分、畑地で 41 年分に相当する。

3.3 土壌栄養塩類の溶出特性

3.3.1 表層土の N, P 溶出量

38ヶ所の表層土を用いて、可溶性および可給態 N, P を測定し、単位面積あたりの溶出量を求めた。各種水田、畑地および山林の溶出量の平均値をまとめて Table 5 に示す。可溶性の pH は 5.2~6.5 で、やや酸性条件であった。可給態は pH=3 を想定したが、3.1~4.6 とやや高めの条件になった。 $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_{2,3}\text{-N}$ を合計した N と P ($\text{PO}_4\text{-P}$) については、可溶性に比較して可給態の方が大きく、pH の低下による溶出の促進が認められた。すなわち、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は粘土または土壌有機物に吸着されているが、酸性条件ではイオン交換により溶出しやすく、また粘土に吸着しているリンも酸性条件で溶出しやすいと考えられる。このことから、多肥や酸性雨によって土壌の酸性化が進行した場合の危険性が示唆された。N について、畑地の蓄積量は水田の蓄積量の 2 倍に足りないが、可溶性 N の割合は水田の 25 倍となっている。水田および山林の蓄積量および可溶性 N の割合はほぼ同様の値となっているが、集水域に占める山林面積の割合は概して大きいので、山林地域からの N の溶出量が下流域の水質に与える影響も無視できないと考えられる。P について、畑地の蓄積量は水田の蓄積量の 3 倍以上あるが、畑地の可

Table 4 Accumulated N, P and IL in different soils ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Type	TN			TP			IL		
	a	b	%	a	b	%	a	b	%
Paddy field	0.8	6.1	13	0.3	2.4	14	33	304	11
Dry field	1.6	9.0	17	1.0	4.5	23	49	429	11
Tea garden	2.3	13.5	17	0.7	11.7	6	45	471	9
Forest	1.0	7.1	14	0.1	1.2	11	43	365	12

a: 0~5cm b: 0~50cm, %: a/b×100

Table 5 Analytical results of the surface soils (0~5cm)

(kg·ha⁻¹)

Type	Accumulated TN a	N(NH ₄ -N+NO _{2,3} -N)				Accumulated TP d	P(PO ₄ -P)			
		Soluble	%	Acid soluble	%		Soluble	%	Acid soluble	%
		b	b/a	c	c/a		e	e/d	f	f/d
Paddy field	812	0.7	0.1	2.4	0.3	339	2.8	0.8	11.4	3.4
Dry field	1570	38.7	2.5	55.5	3.5	1020	8.1	0.8	33.1	3.2
Tea garden	2270	115	5.1	127	5.6	663	79.9	12	86.3	13.0
Forest	959	1.1	0.1	5.1	0.5	125	0.0	0.0	1.1	0.9

溶性Pの割合は水田と同じである。茶園では可溶性、可給態ともにNとPの溶出が際だって多くなっており、NおよびPの可溶性割合もそれぞれ5%および12%と高い。これと対照的に、山林の可溶性Pは0 kg·ha⁻¹であり、可給態Pも1.1 kg·ha⁻¹と低い。このように、山林の溶出性が非常に小さいという事実が明らかになった。

3.3.2 鉛直土のN、P溶出量

1999年9月に採取した山口大学試験農場の水田土壌を深さ0~10cm、10~20cm、20~30cmおよび30~50cmの4層に分け、含水率、IL、pH、TNおよびTPを測定した結果をTable 6に示す。含水率とILは地表面から50cmまで徐々に減少し、pHは5.9から6.8に変化している。TNおよびTPについては表層から下層に向けて低下しており、表層のTNは下層(30~50cm)の約3倍、表層のTPは下層の約5倍となっている。

Fig. 7は層別のNおよびPの溶出試験(易分解性、可溶性、可給態)結果を示したものである。ただし、NO_{2,3}-Nに関しては分析時の発色妨害によって可給態が過小に測定される状況が認められたため、可溶性を可給態とみなしている。可溶性および可給態Nの結果をみると、ともに下層になるほど値が大きくなっていることがわかる。また、易分解性Pと可給態Pの溶出量は、表層で下層(30~50cm)の10倍以上となっており、可溶性Pは表層から下層になるに

つれて徐々に濃度が低下している。易分解性Nは有機性Nのうち容易に分解されて無機化する部分であり、易分解性Pは同じく無機化しやすい部分と嫌気性条件の進行とともに可溶化する部分に相当するが、これらの成分もNとPでは分布に明確な違いが認められる。すなわち、全般的にNと比較してPの場合、溶出しやすい成分は表層に近いほど多くなっていることがわかる。なお、これらの傾向が季節を通して一般的なものであるかどうかについては、さらに検討が必要である。

Table 6 Characters of the paddy field soil

Depth (cm)	Moisture (%)	IL (%)	pH	TN (mg·kg ⁻¹)	TP (mg·kg ⁻¹)	Density (g·cm ⁻³)
0-10	27.8	5.4	5.9	1460	1050	1.12
10-20	24.1	5.0	6.2	1280	733	1.20
20-30	20.1	4.4	6.6	857	458	1.35
30-50	18.5	4.0	6.8	539	191	1.37

4. 土壌の富栄養化ポテンシャルについて

土壌のTN、TPは富栄養化ポテンシャルの評価項目としては過大評価になるが、肥料・土壌・作物の間の物質循環をチェックする上で必要な項目である。本論では、可溶性および可給態として、より現実的な富栄養化ポテンシャルを表現しようとしたが、可溶性分はTNに対して、水田で0.1%、畑地で2.5%、TPに対しては、水田、畑地とも0.8%であり、過小評価のように感じられた。

実際、Sharpleyら¹¹⁾はNaOH溶液による抽出法などを用いて畑土壌のTPのおよそ数十%が作物に利用可能な画分であることを報告している。また土壌肥料学の分野では、アスコルビン酸で土壌を還元抽出し、可給態リンを評価する考え方もある¹²⁾。本論では、前章において、一部の水田土壌について、生物分解可能なN、Pの測定を行い、TN、TPのそれぞれ1.1%、7.4%程度の値を得ている。

しかし一方、年間の流出負荷量と存在量の比較をすると、以下ようになる。すなわち、年間の水田への施肥量をNで85 kg·ha⁻¹、Pで44 kg·ha⁻¹、流出率をNで20%、Pで3%¹³⁾とすると、流出負荷量はNで17 kg·ha⁻¹·y⁻¹、Pで1.5 kg·ha⁻¹·y⁻¹程度である。同様に畑地の場合、施肥量をNで175 kg·ha⁻¹、Pで80 kg·ha⁻¹、流出率をNで30%、Pで2%¹³⁾とすると、流出負荷量はNで50 kg·ha⁻¹·y⁻¹、Pで1.5 kg·ha⁻¹·y⁻¹前後であると考えられる。Table 4の50cmまでの蓄積量とTable 5の可溶性分の割合から、可溶性Nの存在量は水田の場合で6 kg·ha⁻¹、畑地の場合で225 kg·

Fig. 7 Elution properties of N and P in different soil layers of a paddy field.

ha^{-1} , 可溶性 P の存在量は, 水田の場合で $19 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, 畑地の場合で $36 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ であり, 水田の可溶性 N を除いて, 年間の流出量を十分まかなえる量であることがわかる。土壌サンプルの採取が 4 月であったことも, 水田土壌で可溶性 N の割合が小さかった原因の一つであると考えられる。水田の場合は施肥後の田面水の溢流による直接流出もある。耕作は年々繰り返されるので, 可溶性分の更新もなされるであろう。このように考えれば, 可溶性 N や可溶性 P の TN, TP に占める割合は小さくても, 富栄養化ポテンシャルとして必ずしも過小評価とはいえない。

もちろん, 溶解性成分の流出のほか, 土壌微粒子の流出に伴う肥料成分の流出も, とくに P については重要な割合を占めると考えられるので, これについては別途検討が必要であると考えられる。

5. 結論

面的負荷源としての土壌の富栄養化ポテンシャルを定量的に評価するために調査を行った結果, 以下のことが明らかになった。

1) 富栄養化に係わる N, P について, 水田, 畑地および山林で, 地面の落葉と雑草, 表層土および鉛直土における現存量を把握した。その結果, 地面の落葉と雑草の TN および TP を表層土と比較すると, 水田と畑地ではそれぞれ 5% 程度で, 山林では 9% および 25% 程度となった。また, 表層土中の TN, TP は畑地が最も高く, 特に茶園は非常に高い値を示した。一方, 各種土地類型別の表層土の容積重を求めたところ, 水田で $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 畑地で $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 山林で $0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ となった。

2) TN, TP および IL の鉛直分布を概ね指数関数で表現することができた。これらの表層 0~50cm における蓄積量を施肥量から計算したところ, N については水田で 72 年分, 畑地で 51 年分に相当し, P については水田, 畑地ともに 56 年分に相当した。また, バックグラウンド濃度を考慮した場合は, N は水田で蓄積なし, 畑地で 11 年分, P は水田で 27 年分, 畑地で 41 年分に相当し, TP の蓄積が TN に比較して大きかった。

3) 表層土の N について, 畑地の可溶性 N の割合は 2.5%, 水田および山林は 0.1% であった。P について, 畑地および水田の可溶性 P の割合は 0.8% で, 山林は 0% であった。表層土の N における可給態 N の割合は, 水田, 畑地および山林でそれぞれ 0.3, 3.5, 0.5% であった。同じく P における可給態 P の割合は, それぞれ 3.4, 3.2, 0.9% であった。

4) 可溶性および可給態 N の濃度は下層にいくほど増加の傾向を示し, 逆に P については溶出しやすい成分は表層に近いほど多くなる傾向を示した。

農林水産省¹⁴⁾は, 農地土壌に存在する肥料成分の平均濃度の推移を報告している。これによると窒素濃度の増加は見られないが, 有効態リンの濃度は継続的に増加の傾向を示している。本研究でも P の農地土壌への蓄積が顕著であるという結果が得られたが, 降雨時における土壌微粒子の

流出に伴うリンの負荷が年々増加していく可能性がある。このことが閉鎖性水域の富栄養化にどのような影響を及ぼしているのか, 今後注意を払う必要があると考えられる。

謝 辞

本研究は河川整備基金助成事業によって行われた。また, 研究の遂行にあたって, 平成 12 年度山口大学卒業生の磯部美鈴氏には現地調査および分析において多大なる協力をいただいた。ここに記して謝意を表する。

(原稿受付 2001 年 4 月 2 日)

(原稿受理 2001 年 11 月 30 日)

参 考 文 献

- 1) 財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構 (1999) 琵琶湖・淀川水環境改善対策総合調査一面源負荷削減対策調査—第 4 回委員会資料, p. 219, 財団法人琵琶湖・淀川水質保全機構, 大阪。
- 2) Dosi, C. and Tomasi, T. (1994) Nonpoint Source Pollution Regulation: Issues and Analysis, pp.ix-xvii, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- 3) 建設省都市局下水道部, 厚生省生活衛生局水道環境部 (1997) 下水試験法上巻—1997 年版—, pp. 115-116, 社団法人日本下水道協会, 東京。
- 4) 加藤哲郎 (1996) 第 2 章 3. 土壌の化学性の診断方法と基準, 「土壌診断の方法と活用」(藤原俊六郎, 安西徹郎, 加藤哲郎著), pp. 87-112, 社団法人農山漁村文化協会, 東京。
- 5) 小川吉雄 (1997) 第 V 章 10. 可給態窒素, 「土壌環境分析法」(日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法編集委員会編), pp. 255-262, 博友社, 東京。
- 6) 南條正巳 (1997) 第 V 章 12. 可給態リン酸, 「土壌環境分析法」(日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法編集委員会編), pp. 267-273, 博友社, 東京。
- 7) 住田弘一 (1997) 第 V 章 13. 可給態ケイ酸, 「土壌環境分析法」(日本土壌肥料学会監修, 土壌環境分析法編集委員会編), pp. 273-278, 博友社, 東京。
- 8) 藤原俊六郎 (1996) 第 3 章 4. 施設栽培土壌, 「土壌診断の方法と活用」(藤原俊六郎, 安西徹郎, 加藤哲郎著), pp. 218-228, 社団法人農山漁村文化協会, 東京。
- 9) 肥料協会新聞部 (1994) 肥料年鑑, p. 193, 肥料協会新聞部, 東京。
- 10) 小西千賀, 高橋治助 (1971) 土壌肥料講座, pp. 32, 朝倉鋆造, 東京。
- 11) Sharpley, A.N., T. Daniel, T. Sims, J. Lemunyon, R. Stevens, and R. Perry (1999) Agricultural phosphorus and eutrophication. Agricultural Research Service. 149:1-36.
- 12) 武久邦彦, 長谷川清善, 上沢正志 (1997) アスコルビン酸還元水田土壌のトルオーグリン酸含量, 土壌肥料学会関西支部講演会講演要旨集。
- 13) 浮田正夫 (1998) 沿岸海域への物質負荷の定量的把握—②原単位計算—, 「沿岸の環境圏」(平野敏行監修), pp. 291-295, フジテックノシステム, 東京。
- 14) 農林水産省農蚕園芸局農産課, 日本土壌肥料学会監修, 土壌保全調査事業全国協議会編 (1991) 日本の耕地土壌の実態と対策, 295pp, 博友社, 東京。