

都市化地域における土地利用と河川水質の関係 — 下総台地の坂川流域における事例 —

RELATIONSHIP BETWEEN LAND USE AND RIVER WATER QUALITY IN THE
URBANIZING AREA OF THE SAKA RIVER,
WESTERN PART OF THE SHIMOUSA UPLAND

田林雄¹ 山室真澄²

Yu TABAYASHI and Masumi YAMAMAURO

¹ 非会員 環修 東京大学大学院院生 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

² 正会員 理博 東京大学大学院院教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

Subsequent realization of the significance of diffuse sources necessitated the need for assessing the impact of land use characteristics on river water composition with alternative methodological approach. This study collected water samples from Saka River basin and the concentration of major ions were analyzed. Proportion of land uses of the respective drainage basins were calculated from GIS data. The results were analyzed with the objective to find out the relationship between land use characteristics and water chemistry. Forest dominated sub-watersheds showed lowest ion concentrations. As the urbanization progressed, sub-watershed became to contain more ions. Urbanization induced positive significant relationships with Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , TMI (Total Major Ions), while farmland with K^+ , SO_4^{2-} , TMI, and Industrialization with Na^+ , K^+ , Cl^- , TMI. These trends are distinguished more clearly using hexadiagram of the ion concentration and PCA scores for the sub-watersheds.

Key words: urbanization, land use, river water quality, sub-watershed

1. はじめに

人間が河川水質に与える影響については、その重要性が認識されているものの、富栄養化以外の水質項目については体系的な研究が遅れている。特に主要無機イオンについては、かつては「水質」として重要な項目であったが、富栄養化と直接結びつかない要素であったために、土地利用との関係などが体系的に研究されることが少なかった。

河川水質の負荷形態は、点源負荷と面源負荷に大別される。負荷量の評価において、点源負荷に比べて面源負荷は、定量的な評価がより困難であるとさ

れている。しかしながら、この面源負荷が湖沼を含む河川水質に与える影響が非常に大きいことが、今日認識されている。このように定量的評価が難しい面源負荷に対して、データが地図・数値データ (GIS: Geographical Information System) として存在する土地利用との関係を検討することは、人間活動による面源負荷の定量評価の一手段となり得ると期待される。

このような観点からの水質研究として、GIS を用いて土地利用の水質への影響を評価したものは、特に農地の影響を議論する研究は多く^{1), 2)}、河川水質に強く影響するとしたものがある一方で³⁾、農地より都市 (宅地を含む) の影響が大きいとする報告も

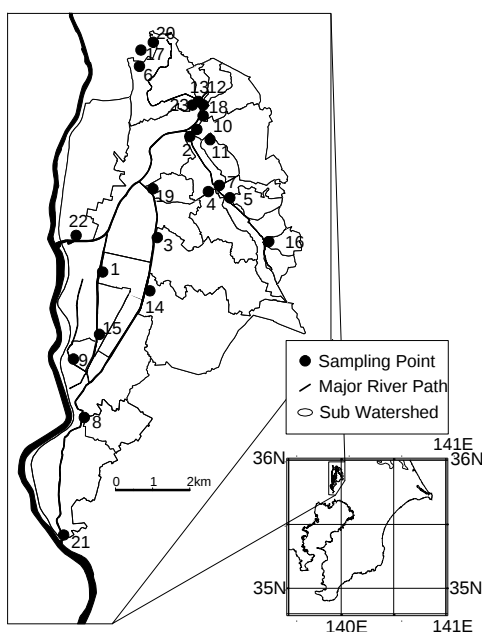


Fig. 1 Site map of the study area.

ある⁴⁾。このように、現状では個別の事例が報告されている段階で、一般的な傾向を見いだすには、より多くの条件における知見の蓄積と、それらを総合的に統括する視点が求められる。

土地利用との関係の議論においても、水質項目としては栄養塩²⁾や特定の汚染物質を扱ったもの⁶⁾⁷⁾が多く、一般河川の溶存物質で9割以上を占める主要無機イオンを対象とした研究は少ない。代表的な水質指標として電気伝導度 (EC: Electric Conductivity) があるが、一般に、汚染の進んだ河川においてはその値が高く、無機イオンの当量濃度の総和との相関が高い。河川水質としてECだけでなく、個々の主要無機イオンと土地利用との関係を精緻に把握することで、特定の元素だけでは分からない挙動が組み合わせとして把握されたり、またそのようにして整理された構造的な環境との関係性から、未知の有害物質の流出に備えたり、流域の開発計画等に有用な示唆を得る、あるいは悪化した水環境の改善に役立つことが大いに期待できる。

本研究ではこのような観点から坂川流域における河川水中無機イオン濃度の変化を分析し、その結果を流域の土地利用の変化の応答として、整理を試みた。

2. 調査対象地域

調査対象地域は下総台地北西部に位置する坂川流域である (Fig. 1)。流域内には常磐線が通り、柏・松戸・流山などの都市域を含む。東京への通勤客が多く居住し、ベッドタウンとしての性格が強い。

流域においては1960年代から大規模な宅地開発、工業団地開発が始まった。現在は、人口の伸び率が鈍化しているものの、流域の北部に位置するつくばエクスプレス沿線の宅地・商業地開発が盛んで、都市化は継続している。

流域内の地形的な差異は小さく、台地と台地を樹枝状に下刻する谷とから構成される。河川は台地上から始まり、樹枝状の谷を下り、江戸川に流入する。地質層序は下位から、上岩橋層・木下層・常総粘土層・武蔵野ローム・立川ロームとなる^{8), 9), 10)}。主に第四紀に地形が形成された地域であり、下総台地全域にわたって海水準変動による海成層と陸成層の互相が形成された。地質条件も地形条件同様にほぼ均質であるため、地形・地質条件の差異が流域水質の差異に与える影響は少ないと考えられる。このことから、自然条件ではなく、人為的な影響による水質形成機構を検討するのに適した場所といえる。

3. 研究方法

坂川流域をさらに支流域に分割し、それぞれの支流域における土地利用の差異と水質との関係を検討することで、都市化が水質にどのような影響を与えるのかを検証した。

(1) 水質調査・分析

各支流域の最下流部を測定地点とし (Fig. 1)、現地で水温、EC、pHを東亜 DKK 製 EC/pH 計を用いて測定した。また、HACH 社製デジタルタイトレータを用いて pH4.8 アルカリ度を測定し、重炭酸濃度に換算した。各測定地点において、100mL ポリエチレン瓶に採水し、分析に用いた。分析まではサンプルを冷暗所に保存した。水質分析項目は主要無機イオン (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) で、20 μm のメンブレンフィルターで濾過した後、島津製作所製高速液体イオンクロマトグラフ LC-VP シリーズを用いて定量分析を行った。採水は2004年の6月、10月、12月、2005年の3月に行い、いずれも降雨の影響がないように、降雨後少なくとも24時間以上は無降雨であった期間を選定した。また、分析結果の統計処理の結果、季節の差による有意差は認められなかったため、上記4期の平均水質を解析に用いた。なお、今回分析したイオン種全ての総量を TMI (Total Major Ions) と表現し当量濃度で表した。

(2) 土地利用解析

水質を調査した支流域ごとに、土地利用割合を算出した。対象地域の流域界は、おおむね地形的流域

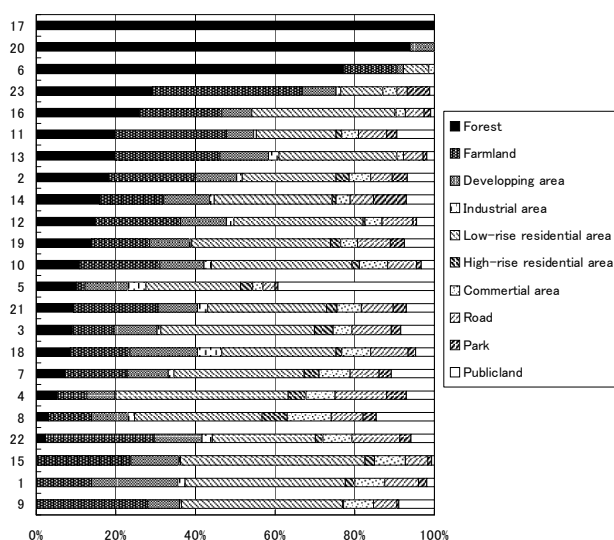


Fig. 2 Land use of the sub-watershed. Number of the left row is the sub-watershed number corresponds with the Fig. 1 and Table 1.

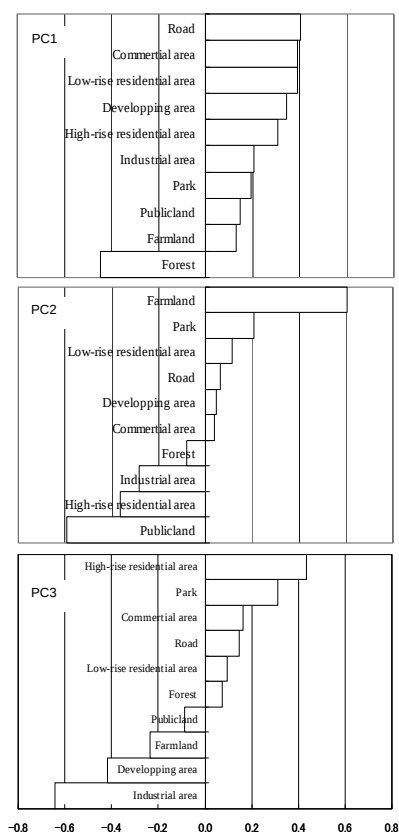


Fig. 3 Eigenvectors of the PCA

界に従うが、都市域において若干流域の形が変更されているので、森林の卓越する3流域を除き、流域の流域界は自治体で作成している雨水幹線図によった。土地利用割合はGISソフトのMicroimages社製TNTmips(ver.6.8)を使用し、流域ごとに土地利用を求めた。土地利用データとしては国土地理院発行の1994年版10mメッシュ細密数値情報を利用

した。細密数値情報は土地利用を16項目に分類しているが、今回の解析では以下のように10項目に再分類した。

まず、本流域に含まれない「その他(防衛施設等)」「海」と、「河川・湖沼等」は解析から除外した。また、「田」「畑・その他の農地」は「農地」に、「造成中地」「空地」は「造成地」に、「一般低層住宅地」「密集低層住宅地」は「住宅地」にそれぞれ統合した。その他の項目はもとのデータのままで一部名称を変更して使用した。その結果、本研究での土地利用項目は以下となった。すなわち「森林(元のデータでは森林・荒れ地)」、「工業用地」、「中高層住宅地」、「商業・業務用地」、「道路用地」、「公園・緑地」、「公共用地(元のデータでは「その他の公共施設用地」)」、「農地」、「造成地」、「住宅地」である。

土地利用と水質との関係性の検討では、クラスター分析、主成分分析(PCA)および直線回帰式を用いた。

4. 結果・考察

(1) 流域の土地利用特性

1994年の各支流域における土地利用構成を森林割合の多い順に並べた結果(Fig. 2), 坂川の支流域は森林が卓越する流域(3 支流) から、森林が流域内に存在しない流域(3 支流) まで、森林割合については幅広い土地利用形態を有することが分かった。また、全域が森林で占められている支流1を除いて、支流域全体がひとつの土地利用項目で占められている支流はなく、水質との関係を検討する上では、前述のように土地利用に関する類型化(主成分分析) が有効であると考えられた。

支流域の土地利用割合(Fig. 2) を変数にして、相関行列を用いて主成分分析を行った。分析の結果得られた3主成分の固有ベクトルによれば(Fig. 3), 第1主成分の変数全体に対する寄与率は46.5%, 第2主成分は16.7%, 第3主成分は12.9%で、3主成分までを合わせた累積寄与率は76.1%であった。

これらのうち、第1主成分(PC1)は道路、商業・業務用地、住宅地、造成地、中高層住宅地、工業用地、公園、農地が正の値を示し、森林は負の値を示した。正の値を示した土地利用項目は都市を特徴づける土地利用であることから、第1主成分は都市化度を表すと考えられた。第2主成分(PC2)は農地が大きな正の値を示し、反対に公共用地は負の大きな値を示した。また、調査地域において農地は減少する傾向にあるため、第2主成分は農地残存度を示すと解釈した。第3主成分(PC3)は工業用地と造成中地が負の大きなベクトルを示したことから、第

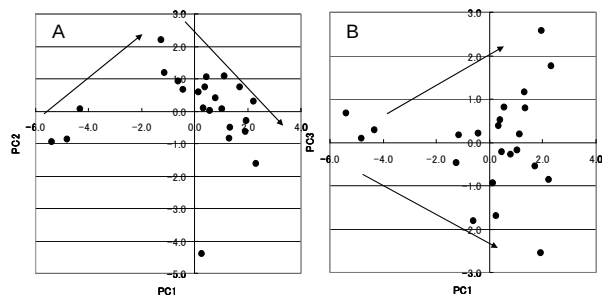


Fig. 4 PCA scores of the sub-watersheds.

Table 1 Water quality of the subwatersheds.

No.	Sub Watershed	T [°C]	pH	EC [μS/cm]	TMI [mg·l ⁻¹]	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
1	Asahi-s	17.2	8.1	497.5	10.62	1.54	0.17	1.10	2.60	1.29	0.09	0.58	3.25
2	Fuji	16.7	7.6	421.8	8.55	1.00	0.13	0.85	2.32	0.71	0.39	0.72	2.43
3	Futatsuki	18.2	7.7	470.5	9.06	1.55	0.19	0.76	1.96	1.11	0.52	0.64	2.34
4	Hiraga	18.3	7.5	388.5	7.64	1.05	0.12	0.76	1.91	0.64	0.35	0.54	2.27
5	Hiroike	16.5	7.4	379.0	7.36	0.92	0.13	0.75	1.82	0.70	0.36	0.54	2.14
6	Ichijun-u	14.1	6.3	166.4	2.91	0.44	0.01	0.54	0.48	0.48	0.58	0.13	0.25
7	Kamifuji	16.7	7.6	442.5	8.89	1.05	0.14	0.89	2.41	0.78	0.44	0.70	2.47
8	Kanda	14.7	7.7	390.8	7.82	1.08	0.12	0.93	1.87	0.86	0.31	0.59	2.06
9	Misaki	15.6	7.3	402.0	7.97	1.08	0.14	0.79	2.02	0.76	0.29	0.79	2.10
10	Nadukari	18.1	7.4	418.5	7.91	1.39	0.22	0.66	1.60	0.85	0.41	0.54	2.26
11	Nadukari-t	18.1	7.4	413.8	8.14	1.09	0.16	0.75	1.98	0.82	0.43	0.55	2.35
12	Nagasaki-1	16.9	7.2	435.3	8.12	1.32	0.16	0.82	1.69	0.94	0.39	0.64	2.17
13	Nagasaki-2	16.9	7.1	446.0	8.57	1.37	0.18	0.75	1.78	1.03	0.64	0.68	2.12
14	Nagatsu	16.3	7.5	437.3	8.55	1.16	0.14	0.94	1.84	0.87	0.53	0.62	2.44
15	Nakabori	16.5	7.6	477.3	10.19	1.22	0.19	1.16	2.58	0.78	0.12	0.86	3.28
16	Nishiyama	16.3	7.5	386.8	7.18	1.09	0.14	0.85	1.32	0.79	0.57	0.47	1.96
17	N-katsutsu	16.6	6.8	131.5	2.66	0.37	0.02	0.44	0.50	0.39	0.12	0.09	0.73
18	Nonoshita-2	17.3	7.3	516.3	10.88	1.87	0.21	1.02	2.71	1.34	0.35	0.84	2.55
19	Ooyaguchi	16.9	7.6	420.0	8.30	1.24	0.15	0.78	2.04	0.76	0.46	0.58	2.29
20	Preon	14.9	6.6	145.2	2.30	0.27	0.01	0.34	0.55	0.29	0.09	0.16	0.60
21	Saka	15.8	7.3	404.8	7.81	1.07	0.14	0.76	1.98	0.80	0.36	0.83	1.88
22	Shimmyobori	16.7	7.1	414.0	8.37	1.32	0.18	0.77	1.96	0.80	0.14	0.70	2.50
23	Yagi	18.4	7.7	426.8	8.53	0.92	0.13	0.87	2.38	0.67	0.40	1.05	2.11

Unit of the each ion is meq·l⁻¹

Table 2 Partial correlation coefficients between PCA score of the land use and ion concentration.

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TMI
PC1	0.89	0.90	0.80	0.88	0.80	0.02	0.79	0.89	0.94
PC2	0.39	0.52	0.38	0.36	0.20	0.14	0.55	0.41	0.58
PC3	-0.63	-0.63	-0.25	-0.40	-0.60	0.01	-0.44	-0.30	-0.61

*Bold values are significant at 5% level by t-test

3 主成分は非工業地化度を示すとした。

これら 3 主成分から各支流の主成分得点を求め、坂川流域における支流間の土地利用による関係を整理した (Fig. 4)。Fig. 4(A) においては、もともと森林が卓越していた支流が、都市化度 (PC1) が高まるとともに、農地残存度 (PC2) も高まるという開発段階をたどったことが推察された。さらに、ここでは、都市化度がさらに継続する中で農地残存度は減少に転じていた。一方で、流域 5 (PC1=0.26, PC2=-4.41) のように、流域に学校等の施設 (公共施設) ができると、ここに示した支流の変化の流れから離れてプロットされていた。Fig. 4 (B) に都市化度 (PC1) と非工業地化度 (PC3) との関係を示す。もともと森林が卓越していた支流の

都市化度が高まる際に、非工業地化度は、一定の変化傾向は示さず、大きく散らばっていた。これは、大都市近郊域の都市化が進むにつれて、道路や商業・業務用地、住宅地等が増えるという共通した「都市化度」の増大と同時に、あわせて工業用地が広がるタイプの都市化 (非工業地化度小) と、中高層住宅地が増加するタイプの都市化 (非工業地化度大) に二極化する傾向を示していると解釈される。

(2) 流域の土地利用と水質

各支流の水質分析結果 (Table 1) のうち、EC は流域 6・17・20 で値が低かった。これらの流域は森林割合が高いことから (Fig. 2), 森林の存在と低い EC との関係が推察できる。実際、流域 1・15・18 は EC 値が他の流域に比べて高く、かつ、これらの流域には森林がほとんど存在しない (Fig. 2)。

Table 2 は各支流の主成分得点と各イオン種との偏相関をとって、その偏相関係数を示したものである。都市化度は NO₃⁻を除く全てのイオンと正の相関を示した。すなわち Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, TMI と相関があった。個々の土地利用と水質の単相関において、森林は特徴的に多くのイオンと高い負の相関を示した (Table 3)。支流内の森林割合が高いと他の土地利用からの物質負荷が少なく、結果として森林割合が高くなるとイオン濃度が小さくなるものと考えられる。

都市化度は道路、商業・業務用地、住宅地、造成地、中高層住宅地、工業用地、公園・緑地と相関を示すが、公園と中高層住宅を除いた土地利用は都市化度と同様に多くのイオンと正の相関を示した (Table 3)。丁ほか¹¹⁾は、本研究と同じ下総台地で、土地利用が河川水質に与える影響を検討し、特徴的な土地利用として緑地・宅地・工業用地の影響を議論している。特に宅地の影響に関しては、宅地化度 (PCA による) と水質との関係を導き出し、原因として低層住宅地からの生活雑排水中由来の K⁺, SO₄²⁻の流出を指摘している。また同じ下総台地近郊の、台地の湧水の研究においても、下水道未整備の住宅地で SO₄²⁻が高いことが報告されている¹²⁾。低層住宅地と K⁺, SO₄²⁻の相関は本研究においても高く (Table 3), 現地において多数の地点で排水の流入を確認しており、低層住宅地からの生活雑排水は本調

Table 3 Simple correlation coefficients between land use and ion concentration.

	TMI	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	PC1	PC2	PC3
Forest	-0.91	-0.81	-0.86	-0.79	-0.85	-0.70	-0.13	-0.78	-0.88	-0.96	-0.10	0.08
Farmland	0.50	0.37	0.52	0.42	0.48	0.28	0.24	0.71	0.42	0.29	0.78	-0.27
Developing area	0.83	0.83	0.76	0.73	0.76	0.85	-0.13	0.58	0.80	0.74	0.06	-0.47
Industrial area	0.48	0.57	0.50	0.34	0.46	0.59	0.00	0.42	0.35	0.45	-0.36	-0.73
Low-rise residential area	0.77	0.74	0.76	0.71	0.66	0.62	0.11	0.53	0.79	0.84	0.15	0.11
High-rise residential area	0.38	0.30	0.28	0.34	0.41	0.25	-0.04	0.20	0.40	0.66	-0.47	0.49
Commercial area	0.66	0.57	0.58	0.67	0.69	0.48	-0.24	0.56	0.66	0.84	0.05	0.19
Road	0.70	0.76	0.70	0.51	0.63	0.61	0.00	0.49	0.69	0.87	0.08	0.17
Park	0.40	0.22	0.22	0.39	0.43	0.16	0.25	0.44	0.38	0.42	0.27	0.35
Public land	0.15	0.05	0.10	0.08	0.19	0.04	0.07	0.11	0.17	0.32	-0.77	-0.10

*Bold values are significant at 5% level by t-test

Table 4 Water quality of the 6 clustered sub-watershed.

No.	T[°C]	pH	EC[μS/cm]	TMI[meq·l ⁻¹]	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
CL1	17	7.4	405.6	8.00	1.11	0.14	0.80	1.94	0.78	0.36	0.64	2.22
CL2	17	7.4	431.4	8.17	1.34	0.18	0.77	1.67	0.94	0.50	0.59	2.17
CL3	17	7.6	430.3	8.66	0.99	0.13	0.87	2.37	0.72	0.41	0.82	2.34
CL4	15	6.5	147.7	2.63	0.36	0.01	0.44	0.51	0.39	0.27	0.12	0.53
CL5	17	7.9	487.4	10.40	1.38	0.18	1.13	2.59	1.03	0.11	0.72	3.26
CL6	17	7.3	516.3	10.88	1.87	0.21	1.02	2.71	1.34	0.35	0.84	2.55
mean	17	7.4	392.7	7.75	1.11	0.14	0.80	1.84	0.80	0.36	0.60	2.11

*Unit of value for the ion species is meq·l⁻¹.

For each ion, top 3 of concentration values are highlighted with bold.

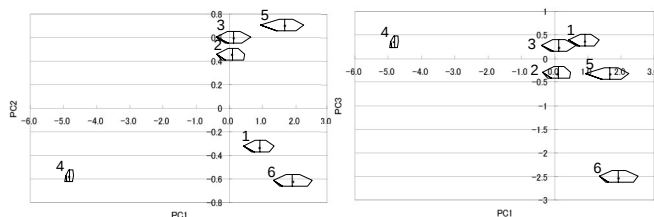


Fig. 5 Relationship between hexadiagram(water quality) and the PCA score of sub-watersheds. Number of the each diagram represents the CL number and the concentration of ion species corresponds with the data on the **Table 4**. Right side of the diagram represents cation (Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺+K⁺ from the upper row) and left side represents anion (SO₄²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻+NO₃⁻ from the upper row).

査地においても水質形成要因の一因であるといえる。

Hirose and Kuramoto¹³⁾は、本研究とは異なる地質構造を含む筑波山麓において、52の支流の土地利用を農地割合と宅地割合、流域面積によって評価し、これらの土地利用の河川水質への影響を分析している。この宅地割合と河川水質の偏相関分析（流域面積、農地割合の影響を排除）において10種のイオンを測定し、9種のイオンが正の相関を示していた。本研究で都市化度と正の相関を示したイオンと同様な傾向を示したイオンはNa⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻であった。Hirose and Kuramoto¹³⁾は、これらのイオンが宅地割合と関係があった要因として、河川への下水の流入を指摘している。本研究においても雑排水として河川に流入しているイオンは多いと考えられる。

海外の例として、イギリス東部のHumber川流域における60支流の土地利用割合と水質の単相関を検討した報告¹³⁾では、分析した16種の水質項目のうち11種が都市との正の相関を示していた。さらに、本研究と分析項目の共通する4イオン（Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻）のうちMg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻がいずれも都市化が進むことでイオン濃度が増加していた。

以上から、森林が卓越する支流から都市化が進んだ支流まで、支流間の土地利用の違いが明確にある流域を対象に水質と土地利用の関係をみた際に、地質構造に関わりなく、都市化の影響は一部のイオンだけでなく多くのイオンに現れる^{13),14)}ことが推察される。

農地残存度はK⁺, SO₄²⁻, TMIと正の相関を示した（**Table 2**）。土地利用と水質の相関をみた場合に農地残存度は農地と高い相関を示し、農地における水質との単相関では、K⁺, SO₄²⁻, TMIと正の相関を示した（**Table 3**）。農地からのSO₄²⁻の流出に関しては肥料や土壌改良材流出が原因であるとする報告が複数あり^{15), 16)}、また、K⁺も肥料に含まれる物質で、肥料流出に由来すると考えられる。

非工業地化度はNa⁺, K⁺, Cl⁻, TMIと負の相関を示し（**Table 2**）、工業化が進むとNa⁺, K⁺, Cl⁻が増えることが分かった。同様の傾向が工業用地、商業・業務地とイオン種との単相関でも示された（**Table 2**）。これまでも工業用地がNa⁺, Cl⁻でと正の相関をもつという報告がある¹¹⁾。事業所からの排水の規制は水質汚濁防止法によって規定されているが、対象となる物質は毒物と富栄養化原因物質である窒素とリンである。工業用地では多くの化学物質を使用し、特にNa⁺, Cl⁻はその用途が広く、多く使われている実態が、土地利用と水質との関係に反映していると言える。

(3) 水質のクラスター分析と土地利用との関係

今回分析した全8イオン種の濃度を変数にクラスター分析を行なった結果、支流は6クラスターに分類され（**Table 4**）、各クラスター(CL)はイオン濃度の多寡によって分類された（なお**Table 4**では各イオン種で上位3位までを太字で示した）。各クラスターの特徴を見ると、CL4, CL1, CL2はTMIが低かった。CL4は特にTMI値が2.63meq·l⁻¹と低く、全てのイオン種の濃度が低かった。CL1はイオン種に関して、SO₄²⁻, NO₃⁻のみ値が高く、CL2はNa⁺, K⁺, Cl⁻, NO₃⁻の4種で値が高かった。

一方でCL3, CL5, CL6はTMIが高かった。CL3ではNa⁺, K⁺, Cl⁻を除く5イオン種の値が高く、CL4はSO₄²⁻, NO₃⁻を除く6イオン種の値が高く、CL5はNO₃⁻を除く7イオン種の値が高いという結果になった。これらの6クラスターについて、4(2)で求めた各支流の主成分得点を分類し平均値を求めた。**Fig. 5**はこれら6クラスターのPCA得点と、ヘキサダイアグラムによって表した水質を同時に表記したものである。

都市化度(PC1)と農地残存度(PC2)との関係においては、都市化度の増大はTMIの増大と関係していた。一方で農地残存度はその絶対値の増加によってTMIが高まっていた。これは、農地残存度が固有ベクトルにおいて、負に高い値として公共用地や工業用地を持つことが原因であると考えられる（**Fig. 3**）。

都市化度(PC1)と非工業地化度(PC3)との関係をみると、都市化度の増大と並んで非工業地化度の減少（工業化の増大）もイオンの増大に寄与していると言える。

5. まとめ

下総台地西縁部の坂川流域で、人為的な面源負荷の特徴を明らかにするという観点から、河川水質を土地利用の関係から考察した。その結果、森林からの河川水はイオン濃度が小さいのに比べ、都市に移行するに従い、河川水はより多くのイオンを含むようになることが分かった。

人為的影響が水質に与える影響の違いとして、都市化度は Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、TMI と正の相関を示した。農地残存度は K^+ 、 SO_4^{2-} 、TMI と正の相関を示した。また、非工業地化度は Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、TMI と負の相関を示した。

水質型と土地利用の関係をヘキサダイアグラムと主成分得点を比べることにより、水質に与える影響の低い森林域から都市化度・農地残存度・工業化度（非工業地度の逆）など、それぞれの面的人為負荷が流域の開発段階に応じて増加することにより、イオン濃度が特徴的に増加する様子をより明確に示すことができた。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、新領域創成科学研究科自然環境学専攻の大森博雄先生には研究を進めるにあたり格別のご指導を賜った。また、同じく自然環境学専攻の学生、理学部地理学教室の学部生(当時)にはフィールド調査を協力していただいた。法政大学の小寺浩二先生や立正大学の鈴木裕一先生には学会や機会があるたびに研究の内容についてアドバイスを受けた。松戸市、流山市、柏市の河川環境課、河川課の方々にはデータを収集するにあたり格別の配慮をしていただいた。これらの方々 に記して感謝の意を示したい。

参考文献

- 1) Gburek, W. J. and Folmar, G. J.: Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: a base flow survey, *J. Hydrology*, Vol.217, pp.1-18, 1999.
- 2) Collins, R. and Jenkins, A.: The impact of agricultural land use on stream chemistry in the Middle Hills of the Himalayas, Nepal, *J. Hydrology*, Vol.185, pp.71-86, 1996.
- 3) Johnson, L. B, Richards, C, Host, G. and Arthur J. W.: Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems. *Freshwater Biology*, Vol27, pp.193-208, 1997.

- 4) Osborne, L.L. and Wiley, M.J.: Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed. *J. Environ. Management*, Vol. 26, pp.9-27, 1988.
- 5) Poor, C. J. and McDonnell J. J.: The effects of land use on stream nitrate dynamics, *J. Hydrology*, Vol.332, pp.54-68, 2007.
- 6) 小川祐美, 田瀬則雄, 檜山哲哉, 嶋田 純: 埼玉県金子台地付近における不圧地下水の硝酸性窒素の起源に関する一考察, 日本水文科学会誌, 28(4), pp.125-134, 1998.
- 7) 黒田清一郎, 田淵俊雄: 湧水中の硝酸態窒素濃度と負荷量の変動—野菜畑地からの硝酸態窒素流出特性に関する研究 (I)—, 農業土木学会論文集, 64 (1), pp.31-38, 1996.
- 8) 杉原重夫: 下総台地西部における地形の発達. 地理学評論 43,703-718. 1970.
- 9) 下総台地研究グループ: 千葉県手賀沼北岸地域に分布する木下層基底の埋積谷の形成過程, 下総台地の地質と古環境. 地団研専報, 45, pp.68-80, 1996.
- 10) 三谷豊, 下総台地研究グループ: 下総台地北西部における後期更新世の地殻変動地団研専報, 45, pp.95-114, 1996.
- 11) 丁 長梅, 大森博雄, 高村弘毅: 首都圏・真間川の水質と流域の土地利用との関係, 日本水文科学会誌, 36(4), pp219-233, 2006.
- 12) 篠村義徳: 下総台地における GIS を用いた土地利用データと湧水水質との関係について, 環境情報科学論文集
- 13) Jarvie H. P, Oguchi, T. and Neal C.: Exploring the linkages between river water chemistry and watershed characteristics using GIS-based catchment and locality analysis. *Regional Environmental Changes*, Vol.3, pp.36-50, 2002.
- 14) Hirose, T. and Kuramoto, N.: Stream water quality as influenced by land use patterns in the Kakioka basin, Japan, *J. Environmental Quality*, Vol.10, pp.185-188, 1981.
- 15) 井上千晶, 小倉紀雄: 大規模農業地域における土地利用と地下水の関係—長野県野辺山原を研究地域として, —日本水文科学会誌 30(4), pp.143-154, 2000.
- 16) 永井茂: 地下水汚染の水文化学的アプローチ -無機汚染の実態と問題点-, 地下水学会, 33(3), pp.145-154, 1991.

(2007. 9. 30受付)