

模擬降雨流出水採取法 (MOS 法) に基づく 路面上のノンポイント汚染源調査

FIELD MEASUREMENTS OF NON-POINT SOURCES ON ROAD SURFACE
USING A MODELED STORM-WATER SAMPLING (MOS) TECHNIQUE

砂田岳彦¹・二瓶泰雄²・坂井文子³・吉田拓司³

Takahiko SUNADA, Yasuo NIHEI, Ayako SAKAI and Takushi YOSHIDA

¹ 学生員 学 (工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

² 正会員 博 (工) 東京理科大学助教授 理工学部土木工学科 (同上)

³ 非会員 東京理科大学 理工学部土木工学科 (同上)

To clarify environments of road deposits, one of main non-point sources in urban area, we have already presented a new technique, named as a modeled storm-water sampling (MOS) technique, in which one can easily obtain road deposits under simulated rainy conditions. By using the MOS technique, we performed the field measurements for road-deposit environments in the watershed of the Oohori River which inflows into Lake Teganuma. In addition, we used a direct sampling (DS) technique with a brush to compare the observed results obtained with the MOS technique. The observed results indicate that the SS and water quality measured with the DS technique are much larger than those with the MOS technique. This result corresponds to the experimental data conducted by the authors. The differences of the road-deposit environments between the residential and industrial area are also discussed.

Key Words: non-point source, road deposit, pollutant load, MOS technique, urban area

1. はじめに

近年の公共用水域では、水質環境が横ばいか悪化傾向にある水域が多く、その一因として、都市化に伴う面源負荷 (ノンポイント汚染源) の増加が挙げられる^{1), 2)}。ノンポイント汚染源の中でも、路面上の堆積負荷は量的にも屋根面など他の面源負荷よりも大きく³⁾、また、最近では、路面堆積塵埃に微量有害物質が含まれていることが指摘されている^{4), 5)}。このようなことから、路面堆積負荷特性を把握するために、これまでに多くの調査研究が行われている。そこでは、路面堆積塵埃を採取する際には、作業が簡便なため、ブラシや掃除機を用いて直接堆積物を採取する方法 (堆積物採集法) がよく用いられる¹⁾。しかしながら、この方法では、実際に降雨時に流出する成分よりも多くの堆積物を採取している可能性が高く、得られたサンプルの代表性に問題がある。さらに、このような方法に基づいて得られた路面堆積負荷に関する知見¹⁾がどこまで有効であるかは疑問である。

それに対して、著者らは、簡易的に降雨流出状況を再現しつつ、路面堆積塵埃を採取することが容易である、模擬降雨流出水採取法 (MOdeled Storm-water sampling technique, 以下、模擬降雨法 (MOS 法) と呼ぶ) を提案している^{6), 7)}。そこでは、室内実験を通して、模擬降雨

法が降雨流出過程を概ね模擬した形で路面塵埃を採取できることが検証されている⁷⁾。また、この模擬降雨法を用いて多時点・多地点調査を行い、路面上の定点における路面堆積塵埃の時間変動特性と気象条件 (降雨量) との関連性を検討するとともに、道路上の堆積塵埃量の平面マップを作成した^{6), 7)}。このように、多時点・多地点調査を簡便かつ精度良く行うことが可能な模擬降雨法を用いて、今後、路面堆積負荷に関する既存の知見の見直しや流域全体にわたる広域調査を行うことは有用である。

このような研究背景に基づいて、本論文では、模擬降雨法に基づいて、都市河川の流域全体にわたる路面上のノンポイント汚染源調査を実施することを試みる。ここでの調査対象は、富栄養化が著しい千葉県手賀沼への主要流入河川である大堀川流域全体とし、用途地域毎の堆積負荷に着目して、住居系地域と工業系地域にそれぞれ観測地点を設けている。ここで得られた調査結果に基づいて、まず、1) 模擬降雨法及び既存の堆積物採集法により得られた堆積塵埃環境を比較・検討する。また、その結果に基づいて、2) 工業系地域の堆積負荷量が他の地域 (住居系地域等) よりも非常に大きい、という既存の知見¹⁾の適用性について検討する。

2. 模擬降雨法の概要

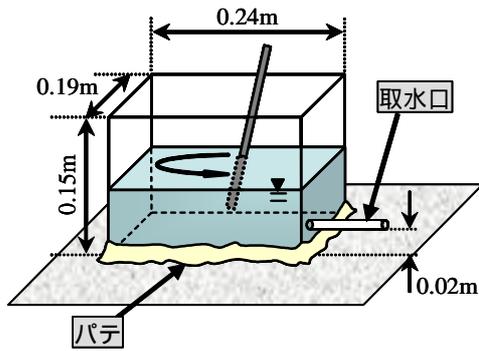


図 - 1 模擬降雨法で用いる装置の概要

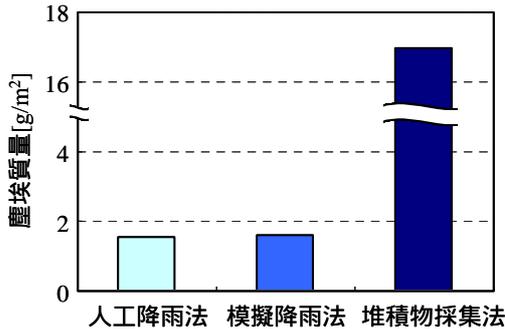


図 - 2 人工降雨法と模擬降雨法 堆積物採集法により得られた塵埃質量 (散布量 21.2g/m²の場合)⁷⁾

模擬降雨法では簡便に降雨流出状況を模擬するために、図 - 1 に示すプラスチック製容器を路面上に突き立てて、その容器内に注入された水を攪拌棒により 1 秒間に 2 往復程度の速さで攪拌し、水中を浮遊する路面塵埃を採取している。これまで用いていた容器の形状は円筒であるが⁶⁾、縁石により角となることが多い路肩部での堆積物採取を行い易くするために容器形状を長方形としている。この容器を用いた作業手順としては、

パテによりプラスチック製容器を路面に接着する。
容器内に蒸留水 2L を注入する。

容器内の水を攪拌しながら取水口より採水する。

なお、この一連の作業を行うのに、5 分程度かかる。

模擬降雨法が降雨流出過程をどの程度模擬できているかを調べるために、著者ら⁷⁾は、アスファルト製プレート上に塵埃を散布し、模擬降雨法と堆積物採集法により路面塵埃を採取する、という室内実験を行った。ここでは、降雨状況を再現している人工降雨法も比較のために適用した。各手法により得られた単位面積当たりの塵埃質量を比べたところ(図 - 2)、模擬降雨法の結果は人工降雨法と同程度となるのに対して、堆積物採集法の結果は他の 2 つの結果よりも 1 オーダー大きくなっている。これより、堆積物採集法は降雨時に流出してくる成分よりも非常に大きな塵埃量を取得しているのに対して、模擬降雨法は概ね降雨流出条件を模擬した形で路面塵埃を採取し得る手法であることが分かる。

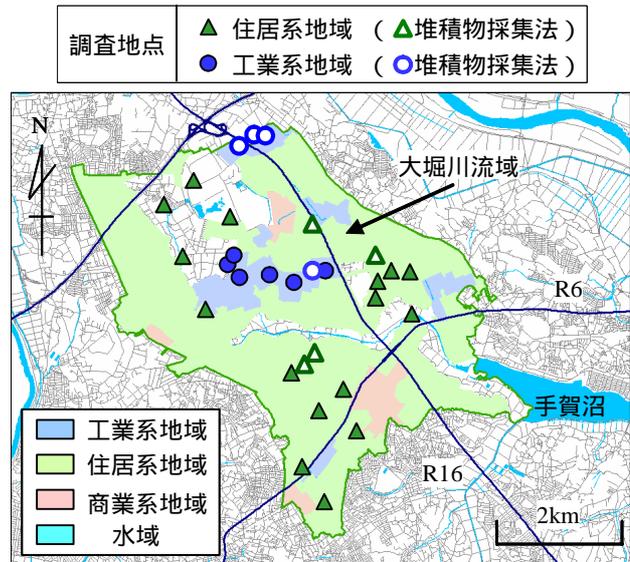


図 - 3 大堀川流域と調査地点

3. 現地調査の概要

(1) 大堀川流域について

模擬降雨法を用いた路面上のノンポイント汚染源調査は、千葉県流山市、柏市を流下し手賀沼西部に注ぎ込む大堀川の流域において行われた。この大堀川流域は、図 - 3 に示すように、面積 31.2km² であり、土地利用特性としては約 80% が市街地となっている。図中には、用途地域別に住居系地域 (第 1 種住居専用地域, 第 2 種住居専用地域, 住居地域, 準住居地域) と工業系地域 (準工業地域, 工業地域, 工業専用地域), 商業系地域 (商業地域, 近隣商業地域) に色分けされて表示している。色が表示されていない部分は、市街化調整区域である。これより、住居系地域が大部分を占めており (68%), また、工業系地域 (10%) もいくつか点在している。

(2) 調査内容

和田¹⁾は用途地域別に路面堆積負荷を検討し、工業系地域の負荷量が他の地域よりも大きいことを指摘している。そこで、模擬降雨法を用いて用途地域毎の路面堆積負荷特性を明らかにするために、観測地点は、図 - 3 に示すように、住居系地域 20 点 (図中, 印), 工業系地域 10 点 (図中, 印), という 30 地点とする。各観測地点では、路肩部の 2 箇所と路肩から 1.0m 離れた中央部の 1 箇所において路面堆積塵埃を採取している。この際、路肩部における測定箇所としては、目視により、周辺の中で最も堆積量の大きい場所が選定されている。このような現地観測を 2005/6/30 ~ 7/1, 7/21, 7/29, 8/29 の計 4 回行っている。本論文では、紙面の都合上、7/21 に行われた路肩部における結果のみを記述する。

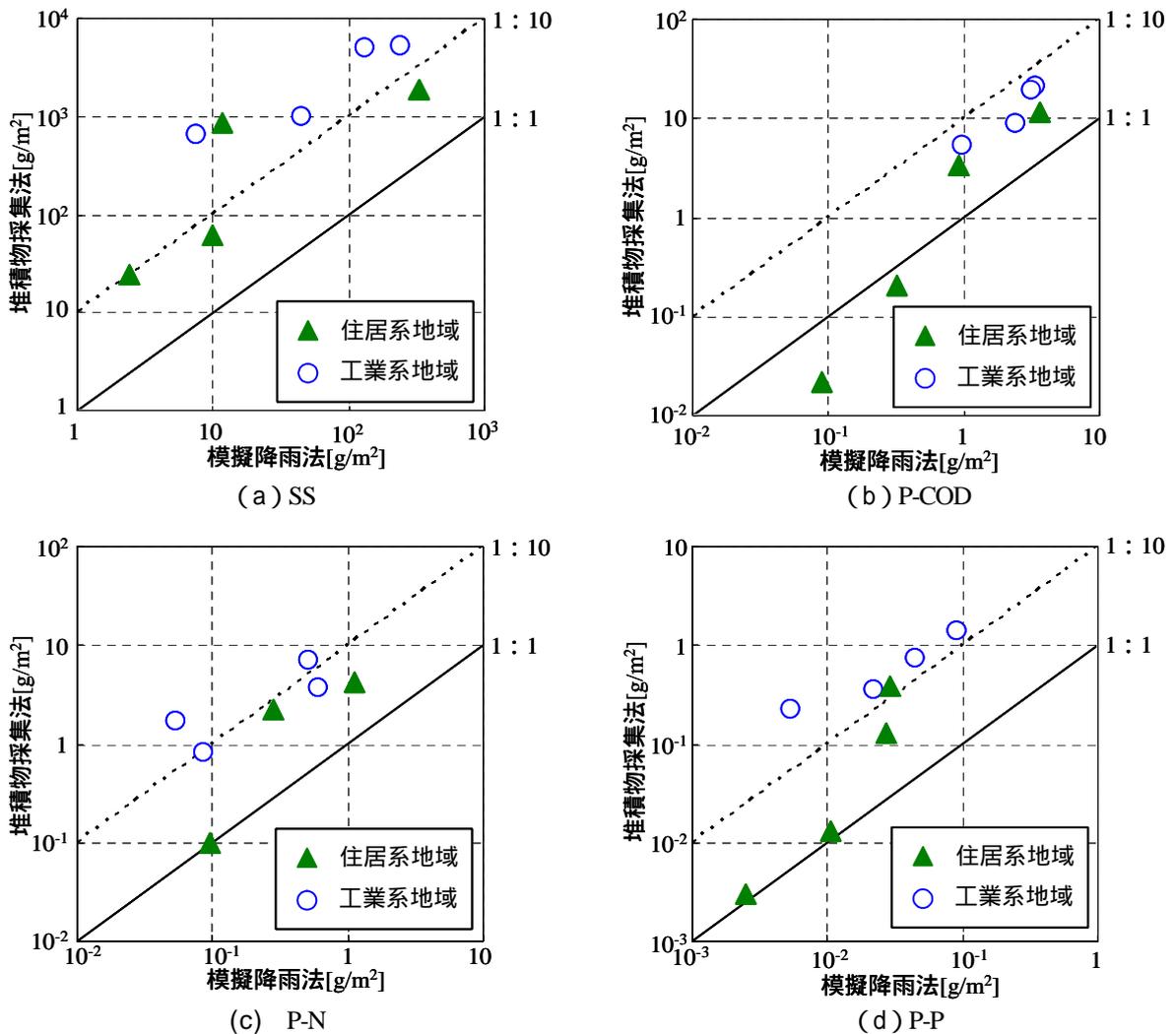


図 - 4 模擬降雨法と堆積物採集法による SS や水質濃度の相関図 (単位面積当りに換算して表示)

採取されたサンプル水の分析項目としては、全てのサンプルに対しては濁度とし、一部については SS、COD、窒素、リンとする。濁度の計測には、多項目水質計 (WQC-24, 東亜ディーケーケー(株製)) を用いる。その他の水質項目に関しては、下水試験方法⁸⁾に基づいて分析する。また濁度と SS の関係から、検定曲線を求めて、全サンプル水に対して得られた濁度値を SS に変換している。なお、COD と窒素、リンに関しては、全成分 (T-COD, T-N, T-P) と溶存態成分 (D-COD, D-N, D-P) を分析し、両者の差として懸濁態成分 (P-COD, P-N, P-P) を算出している。

さらに、模擬降雨法と堆積物採集法により得られる路面塵埃環境を比較するために、前述した模擬降雨法による調査と同期する形でブラシを用いた堆積物採集法による調査を実施した。調査日は、模擬降雨法の第二回目 (7/21) であり、調査地点は、図 - 3 に示すように、住居系、工業系地域ともに 4 地点 (図中、印) とする。ブラシにより路面塵埃を採取する面積は、模擬降雨法と

同じ面積 (0.045m²) としている。採取された路面塵埃の分析項目は、模擬降雨法の場合と同一である。

4 模擬降雨法と堆積物採集法による路面塵埃採取状況の比較

(1) 生データの比較

模擬降雨法と堆積物採集法により、同一地点・同時に採取された路面堆積塵埃環境を比べるために、住居系地域 4 地点と工業系地域 4 地点における両手法の計測結果の生データを図 - 4 に示す。ここでは、SS と水質項目の懸濁態濃度 (P-COD, P-N, P-P) に関する結果を、単位面積当たりの質量に換算して図示している。図中の横軸は模擬降雨法による計測値、縦軸は堆積物採集法による計測値を表しており、また、住居系地域 (印) と工業系地域 (印) を分けて表示している。これを見ると、大局的には、堆積物採集法により採取された SS や水質項目の懸濁態濃度は、模擬降雨法の計測値よりも大きく、

表 - 1 模擬降雨法と堆積物採集法による計測結果の平均値
(単位: g/m²)

		①	②	②/①
		模擬降雨法	堆積物採集法	
SS	工業系	106.1	2946.3	27.8
	住居系	87.39	705.4	8.1
	平均	96.76	1825.9	18.9
P-COD	工業系	2.509	13.44	5.4
	住居系	1.257	3.841	3.1
	平均	1.883	8.640	4.6
P-N	工業系	0.315	3.326	10.6
	住居系	0.374	1.646	4.4
	平均	0.345	2.486	7.2
P-P	工業系	0.0410	0.6751	16.4
	住居系	0.0172	0.1325	7.7
	平均	0.0291	0.4038	13.9

その傾向は工業系地域の方が顕著である。具体的には、SS については、全地点において、堆積物採集法による計測値の方が模擬降雨法の結果よりも1~2オーダー程度大きくなっている。また、P-N や P-P に関しては、堆積物採集法の方が1オーダー程度模擬降雨法よりも大きいですが、両者の結果が同程度となるサンプルも住居系地域において1,2箇所存在する。さらに P-COD についても、他の項目と同様に、堆積物採集法の計測結果の方が相対的に模擬降雨法よりも大きいものの、その逆の結果となる測定点も2地点存在し、これらはいずれも住居系地域である。

このように、住居系地域の何点かでは、両手法による結果は大差なかったものの、残りの住居系地域や全ての工業系地域の調査点では、堆積物採集法の計測値の方が明らかに模擬降雨法の結果よりも大きいことが分かる。図-2に示しているように、著者らが行った室内実験により、堆積物採集法による路面塵埃の採取量は、同一条件における模擬降雨法よりも1オーダー程度大きいという結果は得られており、本調査により、実験結果と類似した傾向が様々な地点において行われた現地調査結果においても確認された。

(2) 平均値の比較

二つの採取法に基づいて得られた結果をより定量的に比較するために、SS や水質濃度に関する平均値をまとめた結果を表-1に示す。ここでは、住居系地域の地点と工業系地域の地点、全地点について、それぞれ平均値が表示されている。これを見ると、まず、ブラシを用いた堆積物採集法に関しては、工業系地域の方が全般的に住居系地域よりも大きい。両者の比率(=工業系地域の計測値/住居系地域の計測値)は2.0~5.1となっている。

表 - 2 SS 中の COD, 窒素, リン含有量 (単位: g/kg)

		模擬降雨法	堆積物採集法
		P-COD/SS	工業系
	住居系	39.854	3.601
	平均	68.347	5.101
P-N/SS	工業系	3.878	1.389
	住居系	12.434	1.675
	平均	8.156	1.532
P-P/SS	工業系	0.524	0.281
	住居系	1.165	0.212
	平均	0.844	0.246

和田¹⁾は工業系地域における SS や水質濃度は1オーダー程度住居系地域よりも大きいとしている。本論文での結果は、和田¹⁾が指摘するほどの両地域間の差は見られないが、定性的な傾向は一致している。一方、模擬降雨法により得られた、住居系地域と工業系地域における塵埃環境を比較すると、工業系地域の方が住居系地域を上回ることが多いものの、その比率は0.8~2.4と堆積物採集法の場合と比べて小さい。

また、この表を用いて、図-4と同様に、模擬降雨法と堆積物採集法における計測値を比較する。堆積物採集法の計測値を模擬降雨法の結果で基準化すると、この割合は、工業系地域では5.4~27.8、住居系地域では、3.1~8.1となっており、前述したように、堆積物採集法の方が模擬降雨法よりも多くの路面堆積物を採取しており、その傾向は、工業系地域において顕著となっていることが分かる。水質項目別に見ると、両手法の違いはSSが最も大きいことが分かる。

このように堆積物採集法では、ブラシなどを用いて、調査対象領域の全ての路面塵埃を採取してしまうが、その中には、降雨時においても流出せずに路面上に堆積し続ける塵埃も多く含まれている。特に、今回の路肩部のように多量の塵埃が堆積している場所では、道路表面が一部隠れるほどの塵埃がある程度の厚さをもって堆積している。そのような場合には、実際には、塵埃の堆積層の表面部分しか降雨時に流出しないにも関わらず、堆積物採集法では全て路面堆積塵埃を採取していることとなる。一方、模擬降雨法では、降雨時流出状況を模擬的に再現して、塵埃の堆積層表面の部分から離脱した塵埃のみを採取している。そのため、両手法により採取されたSS や水質項目の懸濁態濃度は大きく異なったものと考えられる。

また、表-2は、SS 中の COD, 窒素, リン含有量について、模擬降雨法と堆積物採集法により得られた結果の平均値を示している。ここでも住居系地域と工業系地

表 - 3 大堀川流域における路面堆積負荷特性

(a) COD

	T-COD [g/m ²]		D-COD [g/m ²]		P-COD [g/m ²]	
	レンジ	平均	レンジ	平均	レンジ	平均
工業系地域	0.140~3.839	1.218	0.064~0.435	0.155	0.040~3.403	1.063
住居系地域	0.173~3.910	0.964	0.058~0.380	0.144	0.067~3.717	0.820

(b) 窒素

	T-N [g/m ²]		D-N [g/m ²]		P-N [g/m ²]	
	レンジ	平均	レンジ	平均	レンジ	平均
工業系地域	0.015~0.675	0.185	0.015~0.098	0.035	0.008~0.607	0.166
住居系地域	0.021~1.195	0.219	0.011~0.075	0.030	0.009~1.121	0.199

(c) リン

	T-P [g/m ²]		D-P [g/m ²]		P-P [g/m ²]	
	レンジ	平均	レンジ	平均	レンジ	平均
工業系地域	0.0012~0.0984	0.0272	0.0007~0.0076	0.0027	0.0006~0.0921	0.0245
住居系地域	0.0025~0.0814	0.0247	0.0011~0.0058	0.0022	0.0011~0.0789	0.0225

域及びその平均に分けて表示している。これを見ると、全ての水質項目、地域において、堆積物採集法による結果が模擬降雨法よりも小さいことが分かる。このような調査結果より、両手法による採取物は、SS等の量そのものが異なるのみならず、採取物の質も大きく変化していることが分かる。

5. 大堀川流域における路面堆積負荷特性

(1) 住居系地域と工業系地域の比較

大堀川流域の住居系地域と工業系地域における路面堆積負荷特性を比較するために、模擬降雨法により得られたCODと窒素、リンに関する平均値及びそのレンジ(最小値から最大値)をまとめたものを表-3に示す。ここでは、3つの水質項目ともに、全成分、溶存態成分、懸濁態成分について記述している。この表から、9つの水質濃度の平均値を住居系地域と工業系地域で比べると、一部のデータを除けば、大部分は工業系地域における濃度値が相対的に大きくなっている。しかしながら、そのような違いは、和田¹⁾が指摘しているようなオーダーが異なるほどではなく、両者の結果はほぼ同程度と見なしでよい。このように、降雨流出状況を再現している模擬降雨法を用いることにより、路面堆積負荷に関する既存の知見と大きく異なる結果が得られている。なお、この表における懸濁態濃度の結果と、表-1の濃度値は同一となっていない。これは、表-1ではブラシを用いて路面塵埃を採取した地点(図-3中の住居系・工業系各々4地点)のみの結果から算出したのに対して、表-3では全観測点(合計30地点)の結果から算出したためである。

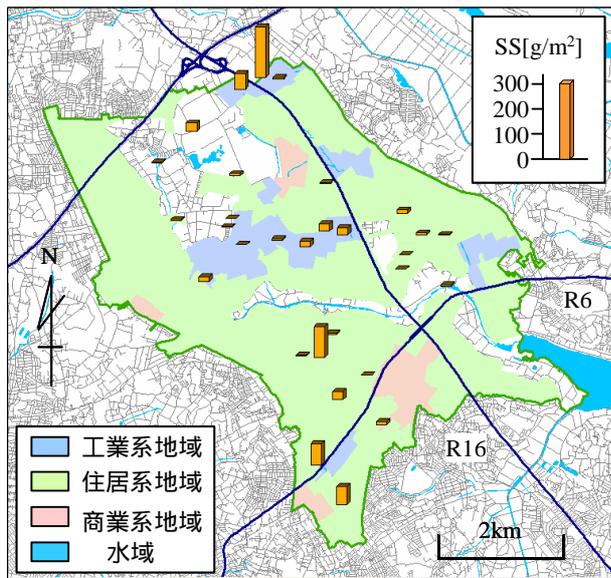
また、全成分に対する溶存態成分と懸濁態成分の寄与を見ると、COD、T-N、T-Pともに、懸濁態成分が大部分を占めているものの、その割合はリンが最も高く、窒素が最も低いことが分かる。さらに、各水質項目について平均値とレンジを比べると、平均値に比べてレンジの幅が広く、特に最大値が平均値よりも極めて大きくなっている部分も存在する。

(2) 路面堆積負荷の平面マップ

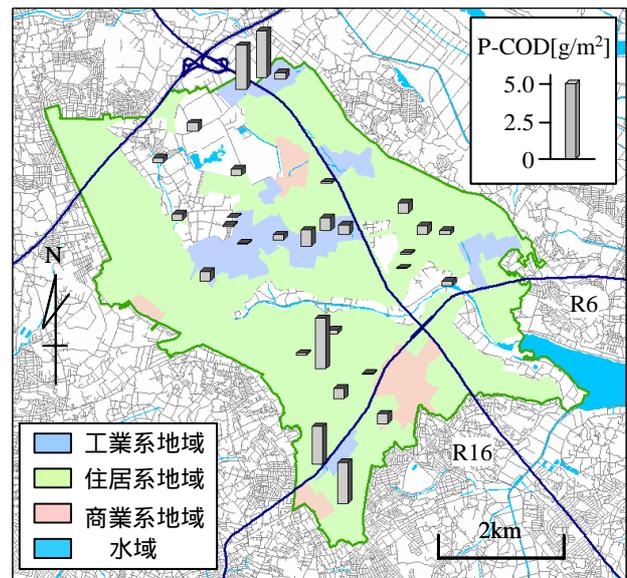
次に路面堆積負荷の空間分布特性を調べるために、大堀川流域全体におけるSSとP-CODの空間マップを図-5に示す。これによると、流域の南部と北部の数箇所において、非常に大きな濃度値がSSやP-CODで見られている。しかしながら、それらの地点はスポット的に散在している。なお、流域全体における路面上のノンポイント汚染源モニタリングを行うには、今回の30点のみで十分かどうか議論の余地があり、今後、さらに多地点における調査を継続して行う必要がある。そのためには、簡便に多地点調査を行うことが容易な模擬降雨法は有力な観測ツールとなり得るものと考えられる。

6. まとめ

降雨流出過程を簡便に模擬しつつ、多地点・多時点調査が容易な模擬降雨法を用いて、富栄養化が著しい手賀沼に流入する大堀川流域全体にわたる路面上のノンポイント汚染源調査を実施した。また、既存のモニタリング手法であるブラシを用いた堆積物採集法も適用して、二つの手法により計測された路面堆積負荷量を比較・検討した。その結果、ブラシを用いた堆積物採集法による採取量は、模擬



(a) SS



(b) P-COD

図 - 5 大堀川流域における SS と P-COD の空間分布

降雨法よりも1オーダー程度大きいことが示された。このような傾向は、著者らが行った室内実験と類似しており、現地調査においても模擬降雨法の有用性が確認された。

また、工業系地域と住居系地域における路面堆積負荷環境を比べたところ、堆積物採集法による結果では、工業系地域における路面堆積負荷が住居系地域よりも非常に大きい、という既存の知見¹⁾と類似する結果が得られた。それに対して、模擬降雨法を用いた場合には、両地域における負荷特性の違いはほとんど見られなかった。この結果より、堆積物採集法は、降雨時に流出する成分よりも過剰に路面塵埃を採取したため、工業系地域における路面堆積負荷量を過大に評価したものと考えられる。

今後、模擬降雨法を用いて調査地点・地域をさらに拡大し、路面上のノンポイント汚染源の実態を明らかにしていく予定である。

謝辞：本調査を行う際には、東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室学生諸氏には多大なる御助力を頂いた。また、水質分析の際に、同学科出口浩教授に様々な便宜を図って頂いた。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)(2)(研究代表者：二瓶泰雄)、下水道振興基金研究助成金(研究代表者：二瓶泰雄)、文部科学省・私学学術フロンティア(2005)によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 和田安彦：ノンポイント汚染源のモデル解析，技報堂出版，pp.1-214，1990。
- 2) 古米弘明：都市域の雨天時汚濁負荷流出解析の現状と課題，水環境学会誌，Vol.25，No.9，pp.524-528，2002。

- 3) 武田育郎：水と水質環境の基礎知識，オーム社，pp.1-198，2001。
- 4) 小野芳朗，貫上佳則，小田美光，宗宮功：道路路面排水中の多環芳香族化合物ニトロ誘電体由来の遺伝毒性評価，水環境学会誌，Vol.20，No.11，pp.738-745，1997。
- 5) 村上道夫，中島典之，古米弘明：多環芳香族炭化水素類(PAHs)含有率とそのプロファイルに基づく粒径画分ごとの道路・屋根堆積塵埃の識別，水環境学会誌，Vol.26，No.12，pp.837-842，2003。
- 6) 砂田岳彦，二瓶泰雄，水野智之，今野篤：路面堆積物の簡易モニタリング手法の提案，水工学論文集，Vol.49，pp.1573-1578，2005。
- 7) 二瓶泰雄，砂田岳彦，水野智之：模擬降雨流出水採取法に基づく路面塵埃環境の時間的・空間的変動特性の把握，水環境学会誌，2005(投稿中)。
- 8) (社)日本下水道協会：下水試験方法上巻 - 1997年版 - ，pp.116-201，1997。

(2005.9.30 受付)