

## 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

二瓶 泰雄\* 砂田 岳彦\*\* 水野 智之\*\*\*

### Study of Temporal and Spatial Variations of Road-Deposit Environments with Modeled-Stormwater Sampling Technique

Yasuo NIHEI\*, Takahiko SUNADA\*\* and Tomoyuki MIZUNO\*\*\*

\* Dept. of Civil Eng., Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda 278-8510, Japan

\*\* Dept. of Civil Eng., Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda 278-8510, Japan

\*\*\* Zenitaka Corporation, 2-2-11 Nishihonmachi, Nishi-ku, Osaka 550-0005, Japan

#### Abstract

As a new monitoring technique for road-deposit environments, one of main nonpoint sources in urban areas, we present a modeled-stormwater sampling (MOS) technique in which one can easily obtain road deposits under modeled rainy conditions. To simulate a rainy condition using the MOS technique, we first stir water placed on a road surface and collect the water with suspended matter detached from the road surface. We then analyze the quality of the water samples obtained. To confirm the validity of the MOS technique, we conduct a laboratory experiment for the comparison of road-deposit environments measured with the MOS and those measured using other monitoring techniques. The experimental results indicate that the road-deposit environments measured using the MOS technique show the same results as those measured using an artificial rainfall technique, indicating the fundamental high performance of the MOS technique. Using the MOS technique, we perform field measurements of the temporal and spatial variations of road-deposit environments in urban areas. The observed results indicate that rainfall and traffic may cause appreciable variations of road-deposit environments in time and space.

**Key words:** road deposit, nonpoint source, MOS technique, pollutant load

#### 1. はじめに

湖沼や内湾における水質環境に関しては、下水道整備の促進や事業場の排水規制等の点源負荷除去対策が実施されているにも関わらず、顕著な改善傾向は見られない<sup>1)</sup>。この原因の一つとしては、都市化の進行に伴い増加傾向にある面源負荷（ノンポイント汚染源）の存在が挙げられる<sup>2), 3)</sup>。都市域における面源負荷は、主として、地表面（道路・屋根等）上の堆積物や水路（河川・下水管・雨水排水路等）内における堆積汚泥、降水からの負荷から構成されている。これらの発生源は自動車の排気ガスや車体由来、工場煤煙などである<sup>1), 2)</sup>。このような面源負荷の中で道路上の堆積負荷は、一般に屋根面上の負荷よりも大きい<sup>1)</sup>。また、道路上の塵埃には、発がん性物質である多環芳香族炭化水素（PAHs）などの微量有害物質や重金属が含まれている<sup>4~7)</sup>。このことより、道路上における塵埃の堆積量や降雨時における路面堆積塵埃の流出挙動をモニタリングすることは極めて重要である。

このような路面堆積塵埃に関する環境調査では、①晴天時に人工的に路面に散水して流出水を採水する方式（人工降雨法）、②雨天時に路面からの流出水を集水する方式（実降雨法）、③直接堆積物を採取する方式（堆積物採集法）、という3つの方法が主として用いられる（Fig. 1）<sup>2)</sup>。まず、①の方法では、あらかじめ定められた面積に散水装置を用いて降雨を散水し、雨水枡などで流出水を集水する。②は実際の降雨時に流出する路面堆積物を排水ピット等にて採水する方法であり、高速道路などのように独立した排水管が存在するところでは有用である<sup>8)</sup>。これら①と②の方法では、一降雨イベント、調査対象領域における路面堆積負荷の平均値を取得することは可能である。しかしながら、路面堆積負荷は晴天時に大きく変化し、また、路面上にて空間的に一様に分布しないため<sup>2), 9)</sup>、それらの実態を把握するには①と②の方法では限界がある。一方、③の方法では、ブラシや掃除機などにより路面上に堆積する固形物を直接採取しており、路面堆積塵埃環境の時間変化や空間分布を把握し得る。しかしながら、この方法では、実際の

\* 東京理科大学理工学部土木工学科 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

\*\* 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 〒278-8510 千葉県野田市山崎2641

\*\*\* 榊高組 〒550-0005 大阪市西区西本町2-2-11

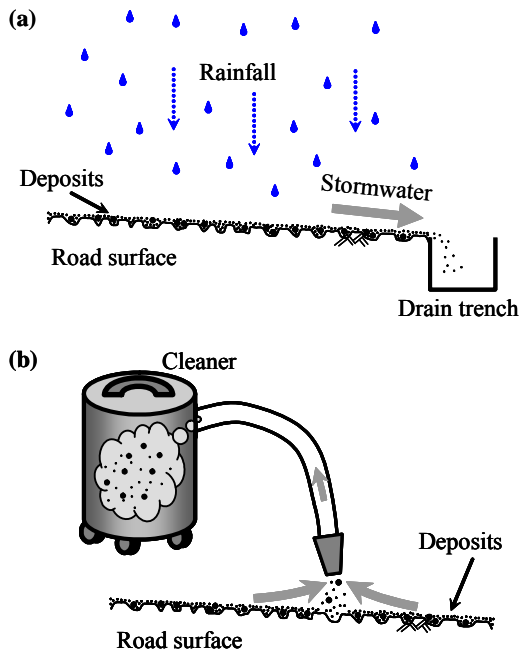


Fig. 1 Previous sampling techniques for (a) storm water under artificial or natural rainfall conditions and (b) road deposits by a cleaner or brush.

降雨時に流出する成分よりも多くの路面堆積物が採取されることに留意する必要がある<sup>2)</sup>、採取された堆積物の代表性には大きな疑問が生じ、分画して採取物の細粒分のみを化学分析試料とする事例もある<sup>7)</sup>。

以上のような路面堆積塵埃に関する既存調査法の問題を回避するには、降雨流出条件を簡便に模擬した形でその流出水を多時点・多地点で採取可能なモニタリング手法が必要となる。そこで本研究では、新しいモニタリング手法として、降雨流出条件を模擬するために路面を水で浸し、攪拌された水中を浮遊している路面塵埃を採取する、という模擬降雨流出水採取法 (MOdeled-Stormwater sampling technique, 以下、模擬降雨法 (MOS法) と呼ぶ) を提案する。この模擬降雨法により得られたサンプル水に対して水質分析を行い、路面堆積塵埃の環境モニタリングを実施する。以下では、まず、模擬降雨法による路面堆積塵埃採取方法の妥当性を検証するために、シンプルな室内実験を行い、模擬降雨法と既存の手法により採取された路面塵埃の堆積量や粒径分布を比較する。次に、模擬降雨法を用いて都市域における路面堆積負荷モニタリングを行い、これまでの調査例が皆無に等しい、長期間にわたる多時点調査による路面塵埃量の時間変化や路面上における塵埃環境の平面分布特性に関して検討を行う。

## 2. 模擬降雨法に基づく路面堆積負荷調査方法

### 2.1 模擬降雨法の概要

前述したように、路面堆積負荷に関する既存の調査法には、道路塵埃の採取方法に大きな問題が含まれていた。これらの問題を解決するために、本研究では、降雨流出状況を模擬的に再現しつつ、多時点・多地点における路面堆積物を収集することが容易である模擬降雨法を提案する。この模擬降雨法では、路面塵埃を採取する際に、掃除機やブラシ等を用いずに、Fig. 2に示される採取装置を導入する。

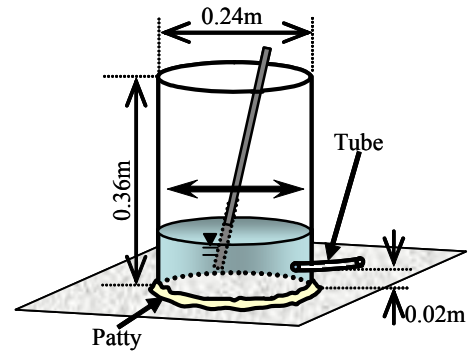


Fig. 2 Schematic view of a device used in the modeled-stormwater sampling (MOS) technique.



Fig. 3 Photograph for the measurement of road-deposit environments with the MOS technique.

この装置は、図示されているように、路面上に設置されるプラスチック製円筒容器と、その容器と路面を密着させるためのパテから構成されている。この装置を用いて路面堆積物を採取する様子をFig. 3に示す。ここでは、まず、路面上に円筒容器を設置し、容器内に所定量の水を注水して容器内の水を攪拌し、模擬的な降雨時における流出状況を簡易的に再現する。攪拌されている水を容器下部の取水口から採水し水中を浮遊する路面塵埃を採取する。得られたサンプル水について水質分析を行い、路面塵埃環境を把握する。なお、ここで用いられている円筒容器の寸法は、直径0.24m、高さ0.36mであり、底面より0.02mの高さに取水口 (ビニールホース、内径0.01m) を取り付けられている。また、凸凹のある路面と円筒容器の隙間から水漏れが起らないようにするために、エアコン配管用に使われているパテ(材質: ポリブテン樹脂, 因幡電機産業(株)製)を円筒容器底部に接着している。

このような採取装置を採用する模擬降雨法の特徴をまとめると、次の4つが挙げられる。

- ①簡易的に降雨流出状況を模擬している。
- ②路面塵埃の採取方法が簡便で、短時間で採取作業を完了できる。
- ③同一地点における多時点調査が可能であり、路面堆積負荷の時間変化を捉えられる。
- ④多地点での調査を行うことが容易であり、路面堆積塵埃の空間分布調査が可能である。

上記のうち、①は人工降雨法、②は堆積物採取法の利点であることから、模擬降雨法は、人工降雨法や堆積物採取法の両者の長所を合理的に取り込んだ手法であるといえる。また、模擬降雨法により、路面堆積負荷の時間的・空間的

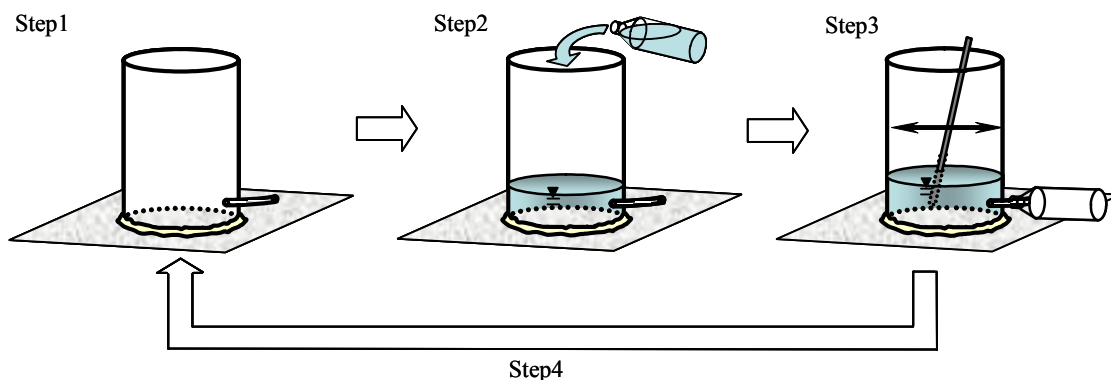


Fig. 4 Procedure for collecting samples of road deposits.

変化を簡便に計測することが可能となるので、これらのモニタリング結果を蓄積していくことにより、路面堆積負荷モデル<sup>2), 10)</sup>の精緻化が進展するものと期待される。

### 2.2 路面塵埃の採取手順

Fig. 4は、模擬降雨法に基づく路面塵埃の採取手順を時系列的に示している。この手順は、以下の4つのステップから構成されている。

Step1: 粘着力が十分なパテを円筒容器底部に付け、その容器を路面上の所定の場所に設置する。

Step2: 円筒容器の上部から蒸留水2lを容器内に注入する。

Step3: 攪拌棒を用いて容器内の水を攪拌して、路面上に堆積している塵埃を浮遊させる。その後、十分攪拌した状態で取水口から約0.5 l 採水する。

Step4: 路面より円筒容器を撤去し、容器内の水を適宜排水する。また、円筒容器からパテを取り外し、パテを拭いて汚れと水分を取り除き、粘着力が戻るまでパテを練り直す。

なお、使用しているパテは水に濡れると粘着力が落ちるが、タオル等で水分を拭取った後、繰り返し練ることでパテの粘着力はある程度回復し、約200回の調査に同一のパテを使用できることが確認された。また、ここでの攪拌状況としては、容器内の水を1秒間に2往復程度の速さで攪拌し、それを30秒程度継続している。

上述した模擬降雨法における作業時間は、円筒容器を路面に設置してから採水を終了する (Step1~Step3) までで約2分30秒、残りのステップも考慮すると全部で約5分かかる。堆積物採取法により多地点調査を実施する場合、一つのブラシもしくは掃除機で行うと、各地点の作業終了後にブラシや掃除機を洗浄する必要がある。その作業を考慮すると、模擬降雨法の作業時間は堆積物採取法の場合と比べて同程度か場合によっては短くなると考えられる。

### 2.3 水質分析方法

円筒容器より採取されたサンプル水を実験室に持ち帰り水質分析を実施する。分析項目は、全サンプルに対しては濁度とし、一部のサンプルについてのみSSと粒径分布とする。このうち濁度に関しては、十分に攪拌された採水サンプルをメスシリンダーに注ぎ、その中に多項目水質計 (WQC-24, 東亜ディーケーケー(株)製)を挿入して計測する。SSに関しては、ガラス繊維ろ紙法<sup>11)</sup>により計測する。粒径分布の計測には、レーザ回折式粒径分布測定装置 (SALD-3000S, 株式会社島津製作所製)を用いる。

濁度の計測値から路面上に堆積している単位面積当た

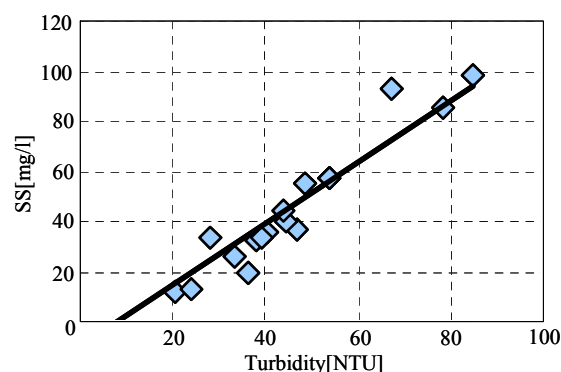


Fig. 5 Correlation between SS and turbidity for sampled road deposits.

りの塵埃質量を求めるためには、まず濁度とSSの相関関係を把握して、濁度からSSに換算する必要がある。そこで、3.及び4.で対象とする道路塵埃 (東京理科大学野田校舎南側道路より採取) に対して得られたSSと濁度Turbの相関図をFig. 5に示す。この図より、以下の関係式が得られた。

$$SS = 1.23 \text{ Turb} - 10.0 \quad (1)$$

ここで、上式の相関係数は0.95 (サンプル数17) であり、両者は概ね良好な相関関係を有している。なお、式(1)で切片が0とならないのは濁度計測に際してサンプル水を十分に攪拌するためであり、この方法では蒸留水の濁度も6~8NTUとなる。このように得られるSSを本装置の設置面積 (0.045m<sup>2</sup>) で除し単位面積当たりの塵埃質量M<sub>1</sub>を算出する。

## 3. 模擬降雨法と既存手法に基づく路面塵埃採取状況の比較実験

### 3.1 実験概要

本論文で提案している模擬降雨法では、降雨流出状況を簡易的に再現した形で路面堆積塵埃を採取するために、上述したように、路面上に立てられた円筒容器内に流し込まれた水を攪拌し、水中を浮遊している塵埃を採取している。この手順はあくまでも簡易的な方法であるので、模擬降雨法において降雨流出過程をどの程度模擬できているかを検討する必要がある。そこで、模擬降雨法や既存の手法に基づいて、小さなアスファルト製プレートに散布された路面塵埃を採取し、得られた塵埃環境 (質量や粒径分布) を比較する、という室内実験を実施する。ここでは、路面用

の常温補修材（DRミックス，前田道路機製）を用いてプレートを作成する。このプレートの平面形状は0.33m四方の正方形であり，その厚さは約0.01mである。実験ではアスファルト製プレートを傾けて設置するが，4.で述べる現地観測サイト（東京理科大学野田校舎の南側道路）を参考にして，プレートの勾配を1/42とする。また散布された塵埃は，同サイトからホウキにより採取したものである。この塵埃サンプルに対して特別にふるい分けを実施していないが，2mm以上の粗粒子は含まれていないことを確認している。この塵埃をスプーンに載せ，スプーンから塵埃を少量ずつプレート上に落下させ，塵埃がプレート上に概ね均一となるように散布する。このときの単位面積当たりの塵埃散布量 $M_0$ は14.2，21.2，28.4g/m<sup>2</sup>の三種類とする。

このように散布された塵埃を採取する方法としては，模擬降雨法と，既存の手法である人工降雨法及び掃除機を用いる堆積物採取法を選定し，各方法で採取される路面塵埃の質量と粒径分布を比較する。この実験における各手法の概略を説明する。まず，模擬降雨法に関しては，2.2で記述している作業を一通り実施するだけでは，流出すべき塵埃を十分に採取できない可能性があるため，得られる塵埃の質量がほぼ一定となるまで，2.2の手順を繰り返し実施する。ここでは，同一作業を6，7回行っている。また，円筒容器から排水（2.2のStep4）を行うと，塵埃も一緒に流されるので，ここでは排水作業を実施しない。そのため，この実験に限り採水量と注水量を変更しており，毎回の採水量を1l，注水量としては1回目のみ2l，それ以降1lとする。次に人工降雨法では，プレート直上にビニールホースを固定し，満水状態のビニールホースの小孔から降雨を発生させ，プレートからの流出水を採取する。このとき降雨強度は12mm/hとなるように調整されている。人工降雨法においても，模擬降雨法と同様に，流出する塵埃の質量がほぼ一定となるまで実験を継続する。堆積物採取法では，市販の乾式サイクロン掃除機（柵日立製作所製，吸引仕事率：530W）を用いて，目視により塵埃の存在を確認できなくなるまでプレート上の塵埃を採取する。

### 3.2 実験結果

各手法において回収された塵埃の質量を比較するために，塵埃質量の回収率（=回収された塵埃質量 $M_1$ /散布質量 $M_0$ ）の結果をFig. 6に示す。ここでは，3つの散布質量 $M_0$ を対象として，模擬降雨法（MOS）と人工降雨法（AR），堆積物採取法（DS）による結果を表示している。図中横軸の累積注水量とは，模擬降雨法や人工降雨法における注水量（降雨量）の累積値である。なお，堆積物採取法では，水を用いずに実験を行っているため，ここでは便宜的に回収率を一定値として実線で示す。これらを見ると，模擬降雨法や人工降雨法における回収率 $M_1/M_0$ は累積注水量とともに増加し概ね一定値に近づいていることが分かる。最終的な回収率としては，模擬降雨法では7~10%，人工降雨法では5~8%となっており，模擬降雨法の回収率が人工降雨法よりも若干高い値となっている。一方，乾式掃除機を用いている堆積物採取法における回収率は83~86%となっており，模擬降雨法や人工降雨法よりも1オーダーも大きな値となっている。

次に，路面塵埃の粒径分布を比較するために，3つの方法により採取された塵埃の粒径加積曲線をFig. 7に示す。

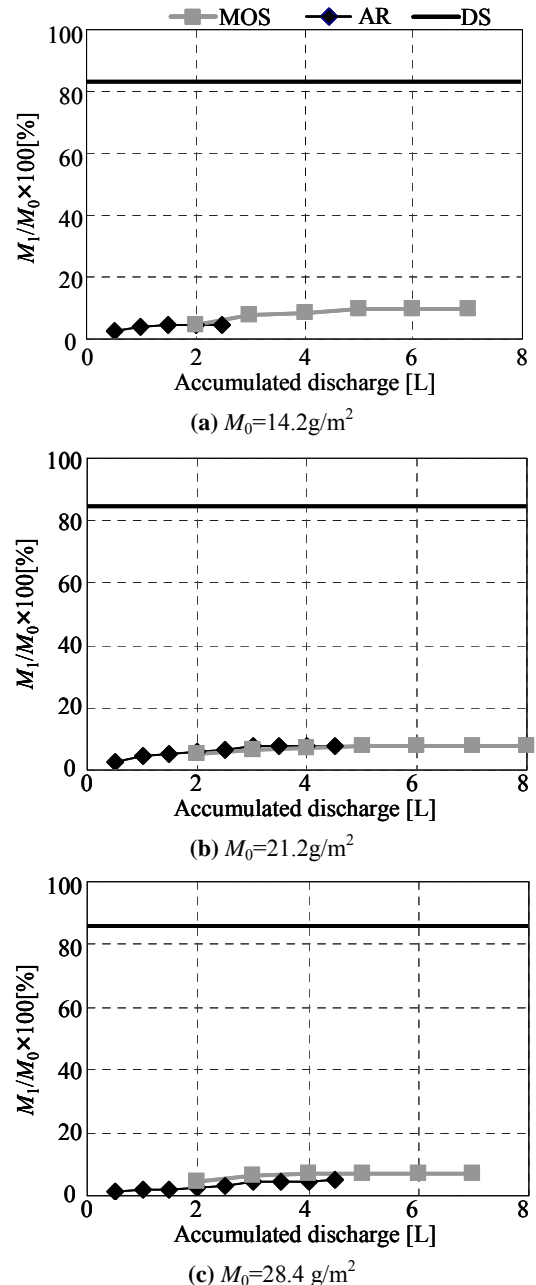


Fig. 6 Experimental results for  $M_1/M_0$  in the MOS, Artificial-Rainfall (AR) and Deposit-Sampling (DS) techniques.

図中には，散布されたサンプル試料に関する粒径加積曲線も点線により表示されている。ここでは，一例として，単位面積当たりの散布質量 $M_0 = 28.4 \text{ g/m}^2$ の結果を図示している。まず，散布試料に関しては，100  $\mu\text{m}$ 以下の微細粒子は20%程度しか占めておらず，100  $\mu\text{m}$ 以上の粗粒子が主として存在しており，ここでの中央粒径 $D_{50}$ は約300  $\mu\text{m}$ である。人工降雨法における粒径分布としては，散布試料と比べて大きく変化し，粗粒子がほとんど存在せず微細粒子が大部分を占めており，中央粒径 $D_{50}$ は約10  $\mu\text{m}$ となっていることが分かる。これは，降雨流出過程において，相対的に沈降速度が小さく浮遊し易い微細粒子のみが雨水とともに流出するのに対して，沈降速度が大きい粗粒子は浮遊せずに路面にそのまま留まるためである。次に，模擬降雨法と堆



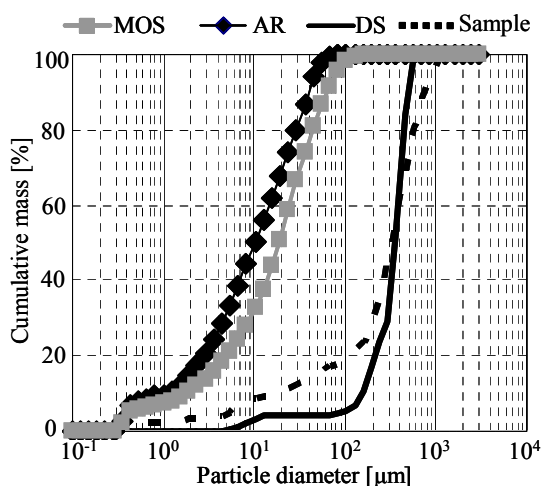


Fig. 7 Grain-size distribution of road deposits collected in the experiment.

積物採取法における粒径分布に着目すると、模擬降雨法では微細粒子が大部分を占めておりその中央粒径 $D_{50}$ は約 $18 \mu\text{m}$ となっており、一方、堆積物採取法では主に粗粒子から構成され、そこでの中央粒径 $D_{50}$ は約 $350 \mu\text{m}$ となっている。これより、堆積物採取法の粒径分布は散布試料と類似しているのに対して、模擬降雨法の場合は人工降雨法の結果と概ね一致していることが分かる。各手法における採取物の粒径分布に関する上記の傾向は、残りの二つの散布量条件においても確認されている。このように、模擬降雨法では、採取されている塵埃の粒径分布に関しても、人工降雨法による結果と概ね類似していることが示された。

このように、堆積物採取法では実際に流出する成分よりも非常に多くの塵埃が採取されている。それに対して、模擬降雨法により採取される路面塵埃の質量や粒径分布は人工降雨法の場合と概ね一致している。これより、模擬降雨法は降雨流出過程を十分模擬した形で塵埃を採取していることが検証された。

#### 4. 模擬降雨法による路面堆積塵埃環境の現地調査

##### 4.1 調査概要

3. で有用性が検証された模擬降雨法に基づいて、実際の都市域における路面塵埃環境調査を行うことを試みる。ここでは、Fig. 8に示している東京理科大学野田校舎南側の道路（北緯 $35^{\circ}55'29''$ ，東経 $139^{\circ}54'37''$ ）を対象として、①同一地点において約3ヶ月間にわたる多時点連続調査、②90地点という多地点における平面調査、という2種類の現地調査を実施している。これらの調査は模擬降雨法が有する特徴を生かして実現されるものであり、これらの結果より得られている路面堆積負荷の時間的・空間的変動構造は、これまで調査例が見当たらない事例である。なお、3. で示した室内実験では塵埃採取の作業を複数回実施したが、1回だけの作業でも塵埃量の50~70%程度を採取できることや多時点・多地点調査における作業効率性を考慮して、現地調査では採取作業を1回のみ行うこととする。

まず、①の多時点連続調査の概要を述べる。調査期間は、2004年8月30日から11月30日までの三ヶ月間とし、週末や休日を除いてほぼ毎日観測を行った。なお、降雨中もしくは降雨後において路面が濡れていて、パテの粘着力が発揮

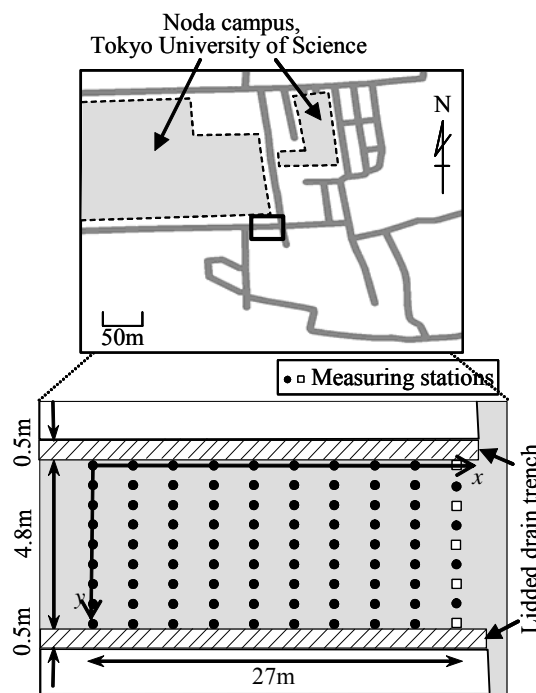


Fig. 8 Location of the measuring stations in the field observations.

されないような状況においても、現地調査を行っていない。調査地点は、Fig. 8に示されているように、一つの横断面内における5地点（同図中口印）とし、調査地点間の横断方向距離は $1.2\text{m}$ である。この横断面は、後述する多地点平面調査における対象領域の東端の断面に相当している。これら5地点のうち、路肩部分に位置するのは2地点、それ以外の部分（中央）に位置するのは3地点である。

次に、②の多地点平面調査に関しては、Fig. 8に示す縦断方向 $27\text{m}$ ，横断方向 $4.8\text{m}$ の矩形領域を調査対象とし、合計90地点（縦断方向10断面，横断方向9地点）という多地点における路面堆積塵埃の平面調査を行う。調査地点の間隔は、縦断方向 $3.0\text{m}$ ，横断方向 $0.6\text{m}$ である。この領域内において合計8回の調査を実施しているが、ここでは2回分（調査日：2004年11月2，5日）の結果を示す。

なお、調査対象となる道路は、第一種中高層住居専用地域に位置し、アスファルト舗装の非透水性道路である。Fig. 8に示すように、道路の北側と南側に蓋付きの排水溝（幅 $0.5\text{m}$ ，孔の間隔： $0.5\text{m}$ ）がある。排水溝は北側では直立したコンクリート塀、南側では傾斜した草地と隣接している。最も路肩に近い測定点は排水溝と接しており、この点において道路と排水溝の接合点付近に多量に蓄積している塵埃量を計測している。また対象道路の交通状況を調べるために、2004年11月25日に交通量調査を実施したところ、約1300台/日の自動車交通量であることが確認された。

##### 4.2 路面塵埃環境の時間変動特性

路面塵埃環境の時間変動特性を調べるために、①の多時点調査結果から得られた路面中央部及び路肩部における単位面積当たりの塵埃質量 $M_1$ の経日変化をFig. 9に示す。ここで、中央部と路肩部の結果として、それぞれ中央3点、路肩2点における測定値を平均した結果を図示している。また、路面堆積塵埃と密接に関連している要素の一つである時間雨量（気象庁アメダスデータ，千葉県我孫子市）も

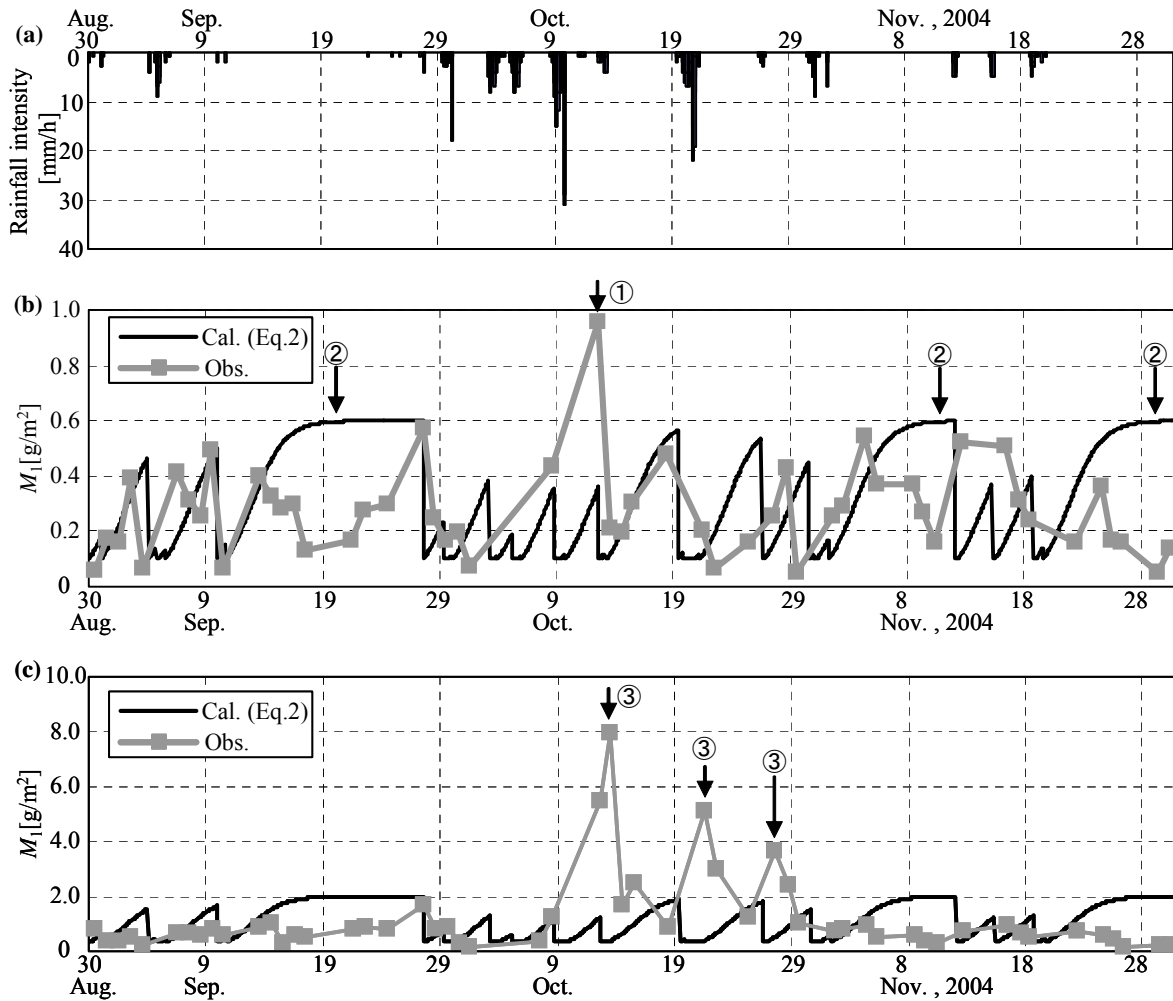


Fig. 9 Temporal variations of rainfall intensity (a) and the deposit mass per unit area  $M_1$  on the center (b) and edge (c) of the road.

合わせて表示している。これらを見比べると、まず、路肩部における塵埃質量は全体的に中央部の値よりも大きく、特に、10月には両者の差が顕著となっている。全期間にわたる単位面積当たりの塵埃質量の平均値は、中央部と路肩部では各々 $0.28\text{g/m}^2$ 、 $1.18\text{g/m}^2$ となり、路肩部での塵埃量は中央部の値の約4倍となっている。また、塵埃質量は、中央部、路肩部ともに時間的に一定とはなっておらず、中央部では $0.07\sim 0.95\text{g/m}^2$ 、路肩部では $0.12\sim 7.93\text{g/m}^2$ となり、時間的に非常に大きく変動している。特に、大きな降雨イベントが複数回生じた10月には、塵埃質量の時間変動幅が大きく、全観測期間における塵埃質量の最大値は、これらの降雨イベント前後に出現している。さらに中央部では、降雨後に塵埃質量が極小値となることが多く、この極小値は、全期間を通して、 $0.07\sim 0.17\text{g/m}^2$ と概ね一定である。

このように塵埃質量と雨量には何らかの関連性があることがうかがえる。雨量と路面堆積負荷（路面上に堆積する単位面積当たりの塵埃質量） $M_{cal}$ の関係を記述する簡易モデルとして、 $M_{cal}$ をロジスティック曲線で表すモデルが挙げられる<sup>10)</sup>

$$M_{cal} = \frac{a}{1 + b \exp(-cT)} \quad (2)$$

ここで、 $T$ は直前の降雨からの経過時間（先行晴天時間）を示しており、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ は路面堆積負荷に関わる係数である。時間雨量より算出される路面塵埃質量の計算値 $M_{cal}$ の時系列変化をFig. 9に合わせて図示する。ここで式(2)中の係数に関しては、観測値を参考にして、中央部については $a=0.60\text{g/m}^2$ 、 $b=5.0$ 、 $c=0.03\text{h}^{-1}$ 、路肩部では $a=2.0\text{g/m}^2$ 、 $b=5.0$ 、 $c=0.03\text{h}^{-1}$ とする。路面塵埃質量の計算値の時間変化を見ると、降雨時には先行晴天時間 $T$ が0となるため $M_{cal}$ は極小値となり、その後、先行晴天時間とともに $M_{cal}$ は増加し極大値に漸近する。このような計算値と模擬降雨法により得られた観測値を比べると、まず中央部に関しては、降雨直後に路面塵埃質量が減少し、その後急上昇するという様子が観測値でもいくつか見られ、そのときには観測値と計算値の時間変動パターンは類似している。このように両者の間にはある程度の共通点が見られるものの、相違点もいくつか存在する。例えば、降雨イベント時に必ずしも路面塵埃質量が減少しているわけではなく、逆に増加しているケースも見られる。また、降雨イベント間の極大値は概ね $0.50\sim 0.60\text{g/m}^2$ となっているが、それらを大幅に上回る最大値（ $0.95\text{g/m}^2$ 、同図中矢印①）が記録されている。さらに、無降雨期間が長くなると路面塵埃質量の計算値 $M_{cal}$ はほぼ一定となるが、観測値では一定とならず有意

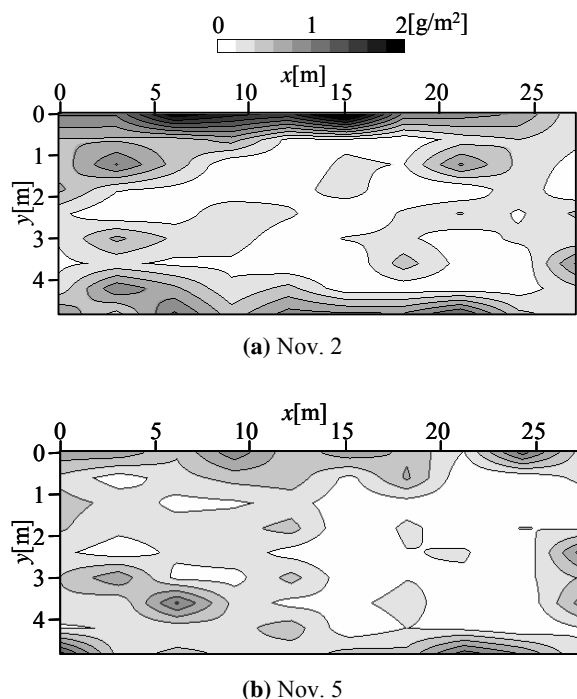


Fig. 10 Horizontal pattern of  $M_1$  on Nov. 2 and 5, 2004.

な時間変化をしていることが分かる（同図中矢印②）。一方、路肩部に関しては、中央部以上に、路面塵埃質量に関する観測値と計算値の違いが顕著になっている。特に、降雨イベント直後に路面塵埃質量が著しく増加し（同図中矢印③）、その後の晴天時に塵埃質量は減少している。

降雨イベント後に中央部や路肩部での塵埃質量が増加する要因としては、路面塵埃の流出量よりも集積量の方が大きいためである。調査対象としている横断面の路面高さは、周囲道路と比べて相対的に低く、この場所では、降雨後には路面堆積物が集積していることが確認されている。特に、中央部よりも低い路肩部では、降雨後における塵埃量の増加がより顕著になる。また、無降雨期間において塵埃質量が時間的に大きく増加・減少する理由としては、大気からの粉塵降下や車体由来の塵埃の堆積等が考えられるが、その際には塵埃量の変化は増加のみとなる。他のメカニズムとしては、路面上を吹く風により塵埃が路面から浮遊し、拡散することが挙げられる。対象道路は建物に囲まれたキャンピー層内にあるため、自然の風は概ね1m/s以下と非常に弱い。一方、路面上を車両が通行する場合には移動車両に引きずられて局所的に強い風が吹き、車両の移動速度を例えば時速20kmとしても車両周辺の路上では単純には5m/s強の風が吹くこととなる。これより、弱い自然風よりも移動車両が引き起こす人工的な風が局所的に卓越し、その効果により路肩等に堆積している多量の塵埃は中央部へ拡散するため、降雨直後に大幅に増加した路肩部の塵埃量はその後の晴天時に減少するものと推察される。以上の結果から、塵埃は、降雨や車両移動に伴う風応力により、路面上において浮遊・移動・堆積を繰り返し、それらが塵埃環境の時間変化に大きな影響を及ぼしているものと思われる。さらに、塵埃環境の時間変動特性を理解する上では、路面塵埃質量の平面分布特性を把握することは不可欠であり、これに関しては、次節にて検討する。

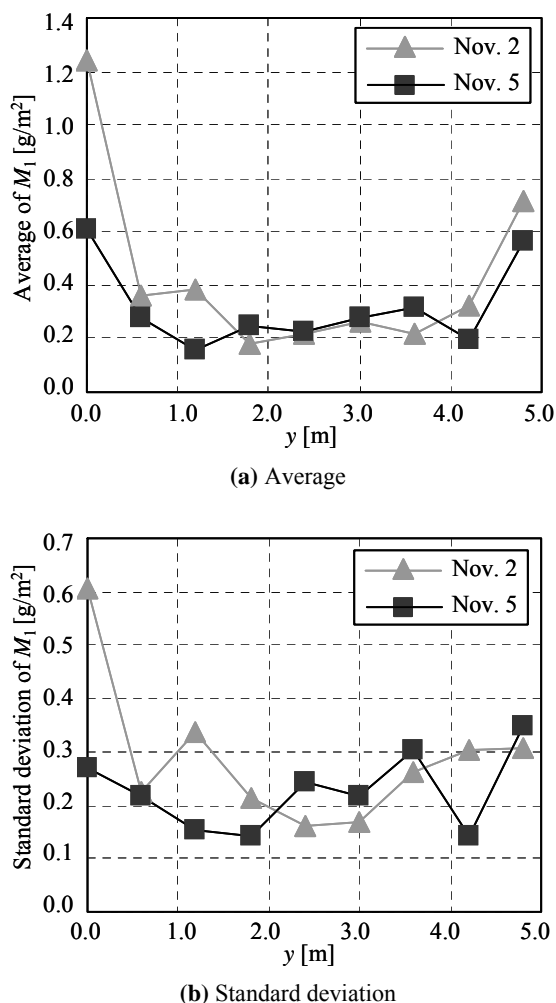


Fig. 11 Lateral distributions of the average and standard deviation of  $M_1$ .

### 4.3 路面上における塵埃質量の平面分布

路面上における塵埃量の平面分布を把握するために、多地点平面調査により得られた単位面積当たりの塵埃質量  $M_1$  の平面コンター（11月2日、5日）をFig. 10に示す。図中の  $x$ ,  $y$  軸は、Fig. 8に示しているように、道路の縦断方向、横断方向を各々示している。両日の先行晴天時間は、11月2日においては27時間、11月5日においては98時間となり、前者は降雨直後に相当しており、前者と後者の間は無降雨期間となっている。これを見ると、降雨イベント直後である11月2日の結果に関しては、路肩部分における塵埃質量の方が中央部よりも大きい、という傾向が見られ、既存の研究<sup>2)</sup>やFig. 9の結果と定性的に一致している。しかしながら、全ての横断面において、上記の傾向が見られるわけではなく、中央部における塵埃量のほうが路肩部と同程度かやや大きくなる横断面も存在する。このように、路面塵埃環境は、縦断方向に一様になっていないことが分かる。次に、相対的に先行晴天時間が長い11月5日の結果に着目すると、11月2日の結果と同様に、全体的には路肩部分における塵埃質量の方が中央部よりも大きい。しかしながら、11月5日での路肩部と中央部の塵埃量の違いは、11月2日の結果よりも不明瞭であり、11月5日における塵埃分布は全体的に一様化している。

このような路面塵埃環境の平面分布特性を定量的に論

じるために、各横断位置において、縦断方向における10個の塵埃質量データに対して平均値と標準偏差を求め、それらに関する横断分布をFig. 11に示す。塵埃質量の平均値としては、まず11月2日においては、路肩部では $0.71 \sim 1.24 \text{g/m}^2$ 、中央部では $0.18 \sim 0.39 \text{g/m}^2$ となっている。それに対して11月5日においては、路肩部では $0.56 \sim 0.61 \text{g/m}^2$ 、中央部では $0.16 \sim 0.32 \text{g/m}^2$ となっている。このように、降雨直後の11月2日には、路肩部に塵埃が集中しているのに対して、その後の晴天時の11月5日では路肩部と中央部の塵埃質量の差が小さくなっている。次に、塵埃質量の標準偏差に関しては、11月2日では $0.16 \sim 0.61 \text{g/m}^2$ 、11月5日では $0.16 \sim 0.35 \text{g/m}^2$ となっており、単位面積当たりの塵埃質量に関する平均値と標準偏差が同程度になっている地点が存在する。このことより、単位面積当たりの塵埃質量は横断方向のみならず縦断方向にも有意に変化しており、路面塵埃環境を正確に把握する上では塵埃環境の平面分布特性を考慮することの重要性が示された。

以上の結果をまとめると、降雨イベント時には、降雨流出水にトラップされた路面塵埃は移流・拡散されるものの、その一部は水溜りが形成され易い路肩部分などの低地に堆積する。その結果、降雨直後では塵埃は中央部よりも路肩部に集積する。その後の晴天時には、自動車などの車両が移動することにより路面近傍に局所的に強い風が吹き、それに伴い塵埃が路面上を拡散する。このような移動車両の効果により、路肩部と中央部における塵埃量の差は縮まり、塵埃が路面全体に様に分布するものと考えられる。

## 5. まとめ

1) 既存の調査方法の問題点を回避し得る新しい路面堆積塵埃環境調査方法として、簡易的に降雨流出条件を模擬しつつ、多時点・多地点における路面堆積物を採取することが容易な模擬降雨法 (MOS法) を考案した。この模擬降雨法では、降雨流出条件を簡易的に再現するために、路面上に浸された水を攪拌し、その水中を浮遊している塵埃を採取しており、得られたサンプル水を水質分析して塵埃環境を計測する。

2) 模擬降雨法における路面堆積塵埃の採取状況を既存の手法 (人工降雨法、堆積物採取法) と比較するために、小さなアスファルト製プレートに散布された塵埃を採取し、塵埃の質量や粒径分布を比較する、という室内実験を実施した。その結果、堆積物採取法により採取された塵埃の単位面積当たりの質量や中央粒径は、人工降雨法の結果と1オーダーも異なるのに対して、模擬降雨法により得られた塵埃質量やその粒径分布は、人工降雨法の場合と概ね一致する。これより、模擬降雨法では降雨流出過程を十分模擬した形で塵埃を採取していることが検証された。

3) 模擬降雨法に基づいて、約3ヶ月間にわたる多時点連続調査を都市道路にて実施したところ、降雨イベントにより単位面積あたりの塵埃質量は大きく変化するものの、その様子は路肩部と中央部とは大きく異なることが示された。また、この塵埃質量の時間変化は、先行晴天時間の関数となる既存の路面堆積負荷モデル (式 (2)) で全て表現するには限界があることを実証的に示した。

4) 路面塵埃環境に関する多地点平面調査を行い、単位面積あたりの塵埃質量の平面分布特性を検討した結果、降

雨イベント直後には、路肩部における塵埃量の方が中央部よりも顕著に大きいものの、その後無降雨期間が続くと路肩部と中央部における塵埃量の差は減少し、塵埃量分布は横断方向に一様化する。また塵埃環境は、横断方向のみならず縦断方向にも有意に変化することが明らかとなった。

5) これらの結果に基づいて路面上における塵埃の動態をまとめると、降雨時には降雨流出水により塵埃は移流・拡散されるものの、その一部は路肩部等の低地に集積する。その後の無降雨期間が継続すると、移動車両が引き起こす局所的な人工風に伴い塵埃が路面上を浮遊・拡散する。このように、路面堆積塵埃は、降雨や人工的な風により、路面上にて浮遊・移動・堆積を繰り返し、それらが塵埃環境の時間・空間変動特性の一因となっていることが示された。

## 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。粒径分析を行う際には、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻鯉淵幸生講師に御協力して頂いた。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) によるものである。ここに記して謝意を表する。

(原稿受付 2005年9月1日)

(原稿受理 2006年3月13日)

## 参考文献

- 1) 武田育郎 (2001) 水と水質環境の基礎知識, 198pp., オーム社, 東京.
- 2) 和田安彦 (1990) ノンポイント汚染源のモデル解析, 214pp., 技報堂出版, 東京.
- 3) 古米弘明 (2002) 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, **25**(9), 524-528.
- 4) 小野芳朗, 貫上佳則, 小田美光, 宗宮功 (1997) 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, **20**(11), 738-745.
- 5) 浦瀬太郎, 灘岡和夫, 日下部治, フェルナンド・シリガン, 宮下健一朗, 鈴木洋介 (2002) 廃棄物処理場浸出水および道路脇粉塵に含まれる重金属の日本とフィリピンでの状況の比較, 水環境学会誌, **25**(11), 657-660.
- 6) 村上道夫, 中島典之, 古米弘明 (2003) 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, **26**(12), 837-842.
- 7) 杉谷健一郎, 野村晶子, 南雅代, 加藤博和 (2004) 都市公共用水域に対するノンポイント汚染源としての道路脇粉塵 ( $<63 \mu\text{m}$  画分) の化学的特徴一名古屋市の事例一, 水環境学会誌, **27**(8), 547-552.
- 8) Kayhanian, M. K., Singh, A., Suverkropp, C. and Borroum, S. (2003) Impact of annual average daily traffic on highway runoff pollutant concentrations, *J. of Environ. Eng.*, **129**(11), 975-990.
- 9) Sartor, J. D., Boyd, G. B. and Agardy, F. J. (1974) Water pollution aspects of street surface contaminants, *J. of WPCF*, **46**(3), 458-467.
- 10) 和田安彦, 三浦浩之 (1997) 都市河川の水質とモデリング, 「水文・水資源ハンドブック」 (水文水資源学会編), pp.164-168, 朝倉書店, 東京.
- 11) (社)日本下水道協会 (1997) 下水試験方法上巻—1997年度版—, pp.116-118, 東京.