

屋根面堆積負荷に関する非定常原単位モデルの提案

AN UNSTEADY UNIT LOAD OF ROOF DEPOSIT

吉田拓司¹・二瓶泰雄²

Takushi YOSHIDA and Yasuo NIHEI

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) 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (同上)

A unit effluent load has been widely used for evaluation of pollutant loads flowing into eutrophic lakes and inner bays, although the applicability of the unit effluent load for non-point sources has been severely limited. This study presents newly an unsteady unit effluent load for roof-deposit load, one of non-point sources in urban area, using its association with dry fallout. For this purpose, we have conducted a long-term, continuous monitoring of the amount of sediments and nutrients on the roof (SS_{roof} , TN_{roof} and TP_{roof}) during two years. The measured results indicate the good correlations not only between SS_{roof} and dry fallout, but also between SS_{roof} and TN_{roof} (TP_{roof}). The unsteady effluent load is described with these relations and measured SPM. This method was applied to evaluate the temporal variations of roof-deposit loads, showing the fundamental validity of the present method.

Key Words: unsteady unit load, roof deposit, non-point source, dry fallout, atmospheric environment

1. はじめに

内湾の水質汚濁問題が長年解消されない要因の一つとして、流域からの面源負荷が注目されている¹⁾。面源負荷の実態を評価する際には、単位面積・単位時間当たりの汚濁負荷発生(排出)量である「原単位」が用いられることが多い^{2), 3)}。原単位は市街地や山林等という土地利用特性に合わせて算出されるため、原単位法により流域状況を反映した形で面源負荷を簡便に評価することが可能となる。これより、原単位法は東京湾等の富栄養化水域における水質総量規制等に活用されている⁴⁾。

しかしながら、面源負荷の原単位は地域毎に大きく異なり、最大で2, 3 オーダーもばらついている⁵⁾。この要因としては、調査法やその計測精度が調査対象ごとに統一されていないことに加えて、面源負荷の発生源や降雨状況により面源負荷自体が時間的に大きく変化するためである³⁾。このようなことから、面源負荷評価には年平均降水量に対する一定値の汚濁負荷量を表す“定常”原単位を用いるのではなく、降雨状況や発生源の影響を考慮した形で時間変動特性を表現可能な“非定常”原単位モデルの構築が不可欠である。既存の研究としては、ロジスティック曲線等による面源負荷の時間変化を表す簡易モデルが提案されている程度であり⁶⁾、面源負荷の発生源状況まで考慮した非定常モデルは皆無である。

これを背景としては、著者らは、都市域の面源負荷の一要素である屋根面に着目し、図-1 に示す模型屋根を用いた模擬降雨法による屋根面堆積負荷調査を実施した

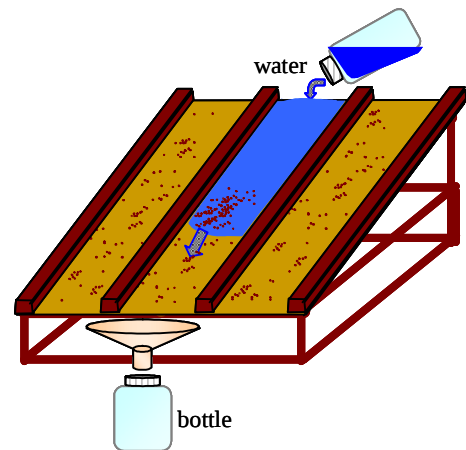


図-1 模型屋根を用いた屋根面堆積負荷調査法⁷⁾

(二瓶ら⁷⁾, 以下前報と呼ぶ)。その結果、無降雨時を含む屋根面堆積負荷の時間変動特性を把握し、屋根面堆積負荷と発生源(大気降下物)の関係を示した。しかしながら、そこでは観測期間や地点、屋根種類等に制約が多く、これらの観測・解析結果には一般性が乏しかった。

その後、同一模型屋根における調査を計2年間継続するとともに、いくつかの形状・勾配・地点の屋根面堆積負荷調査や大気環境調査も同時に実施している。本研究では、これらの観測結果に基づいて、屋根面堆積負荷を対象として、発生源である大気環境を考慮した非定常原単位モデルを提案する。ここでは、まず、長期間及び様々な条件下での屋根面堆積負荷調査結果に基づいて、堆積塵埃(SS)と窒素、リンに関する屋根面堆積負荷の特徴

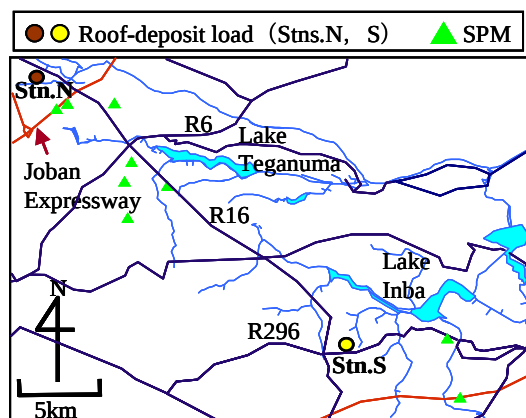


図-2 屋根面堆積負荷と大気環境（SPM）の測定地点

を明らかにする。次に、発生源である大気環境データとして SPM（Suspended Particulate Matter）等の浮遊粒子状物質濃度データを収集・計測し、大気から屋根面への沈降フラックスと屋根面堆積負荷の関係性を定量化する。その結果に基づいて、屋根面堆積負荷の非定常原単位モデルを構築し、その有用性を検証する。

2. 屋根面堆積負荷調査の概要

（1）模擬降雨法について

一般的な屋根面堆積負荷調査では、実際の降雨時における採水調査やブラシ等により堆積物を採取する方法が行われる⁸⁾。しかしながら、前者では無降雨時を含む屋根面堆積負荷データを取得できず、また後者では、降雨時に流出する成分よりも多くのサンプルを採取する可能性が高い⁷⁾。そこで、著者らは、模型屋根を用いて、模擬的な降雨流出条件下における屋根面上の堆積物を採取する、という一種の模擬降雨法⁹⁾による調査を行う。このような調査をほぼ毎日行い、安全でかつ簡便に日々の屋根面堆積負荷データを取得することが可能となる。

具体的には、模型屋根の上端から水道水を流して下端において流出水を採取する、という作業を、屋根面上のいくつかの凹部に繰り返し行う（図-1）。その後、得ら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。詳細な観測法については、前報を参照されたい。

（2）観測内容

この模擬降雨法に基づいて屋根面堆積負荷調査を行う。観測地点は、図-2 に示すように、前報と同じ東京理科大学校舎屋上（千葉県野田市，Stn. N）に加えて、印旛沼流域内の市街地（千葉県佐倉市，Stn. S）¹⁰⁾、という計2地点とする。設置屋根の種類としては、表-1 に示すように、印旛沼流域（Stn.S）では、前報と同じ亜鉛メッキ銅版製の屋根（4寸勾配）のみである。なお、4寸勾配とは、傾き 4/10 を意味する。また、本学校舎（Stn.N）では、

表-1 観測条件

名称	地点	期間	屋根材質	勾配
Z4	本学校舎 (Stn.N)	2005/9/15～現在	亜鉛メッキ 銅版製	4寸
Z2		2007/7/24～現在		2寸
Z7			7寸	
T4			S形瓦製	4寸
Z4	印旛沼流域 (Stn.S)	2006/9/1/～ 2007/1/25	亜鉛メッキ 銅版製	4寸

いくつかの形状や勾配における屋根面の堆積負荷を比べるために、勾配としては亜鉛メッキ銅版製屋根の 2・4・7 寸勾配と、形状として S 形瓦製屋根（4 寸勾配）、という計 4 種類の屋根を設置している。以下では、亜鉛メッキ銅版製の 2・4・7 寸勾配屋根をそれぞれ Z2, Z4, Z7、また 4 寸勾配の S 形瓦屋根を T4 と呼ぶ。これらの地点、屋根を対象として、表-1 に示す期間において週 3 ～ 5 回調査を行っている。なお、前報では Stn.N における Z4 の屋根のみ観測を行っており、この種類の屋根のみ約 2 年間にわたる調査を実現している。

上記のサンプル水に対して、全地点・屋根にて多項目水質計（WQC-24，東亜ディーケーケー（株）製）により濁度を計測し、別途得られた濁度と SS の相関式より SS を求める。また、2 地点に設置している Z4 の屋根に関してのみ、窒素 T-N，リン T-P，SS，粒径分布についても分析する。分析方法として、窒素・リンにはオートアナライザー（swAAt，BLTEC（株）製），SS にはガラス繊維ろ紙法，粒径分布にはレーザー回折式粒径分布測定装置（SALD-3100，（株）島津製作所製）を各々用いる。なお，Stn.N に関しては、表-1 と異なり、2006 年 5 月 10 日以降におけるサンプルのみの水質分析を実施している。計測された SS，T-N，T-P を計測対象面積で除して、単位面積当たりの堆積塵埃，窒素，リンを算出する。以下では、これらを屋根面 SS (SS_{roof})，屋根面窒素 (TN_{roof})，屋根面リン (TP_{roof}) と称する。

屋根面堆積負荷の発生源と考えられる大気環境データを収集するため、環境省大気汚染物質広域監視システム¹¹⁾に公開されている SPM を取得する。地点としては、図-2 に示す柏市 7 地点と佐倉市 2 地点とし、前者は Stn.N，後者は Stn.S に対応させるための SPM として用いる。また、大気降下物としては、直径 $10\mu\text{m}$ 以下の SPM のみならず、直径 $10\mu\text{m}$ 以上の PM（Particulate Matter）の寄与も有意であると考えられるが、PM については一般に計測されていない。そこで粒径別パーティクルカウンター（MODEL-350S，（株）大和製作所製）を用い大気中の粒径別粒子数密度を計測する。この機器を Stn.N の模型屋根近傍に設置し 2007 年 8 月 1 日から計測する。また、前報と同じく気象項目（雨量等）も Stn.N 近傍で計測する。

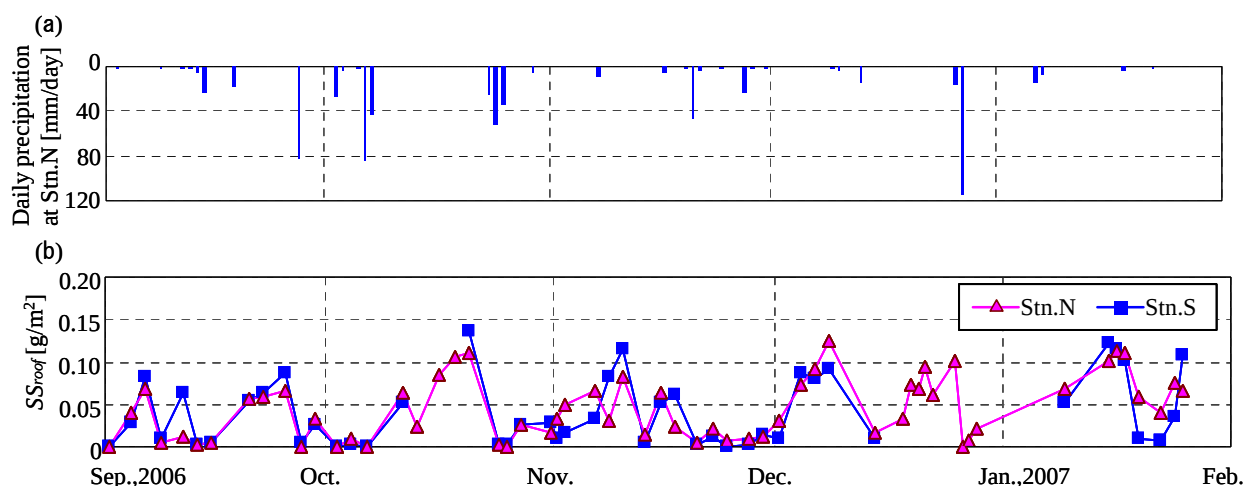


図-3 日雨量 (a) 及び屋根面 SS (b) の時間変化 (日雨量 : Stn.N, 屋根面 SS : Stns.N&S, Z4 を使用)

3. 結果と考察

(1) 様々な地点・形状・勾配の屋根面 SS の比較

異なる場所における屋根面堆積負荷を比較するために、本学校舎屋上 (Stn.N) と印旛沼流域市街地 (Stn.S) における屋根面 SS の時間変化を図-3 に示す。ここでは、同時観測が行われた 2006 年 9 月から 2007 年 1 月までの結果が図示されている。また、比較のため、Stn.N における日雨量も表示されている。なお、2006 年 12 月 16 日から 2007 年 1 月 8 日までは、Stn.S では調査は行われていない。これを見ると、屋根面 SS は降雨に伴って急激に減少し、その後の無降雨期間において緩やかに増加する、という前報と同じ変動パターンが、両地点において生じている。屋根面 SS の大小関係に関しては、本学校舎 (Stn.N) の屋根面 SS は、約 30km 離れた印旛沼流域 (Stn.S) とほぼ同程度であり、この期間中の屋根面 SS の平均値は、Stn.N では 0.044g/m^2 、Stn.S では 0.042g/m^2 と概ね一致している。また、屋根面 SS の粒径分布も両地点において一致することが確認された。一方、柏市と佐倉市における SPM に着目すると、上記期間の両者の経時変化は類似して、また平均値は柏市、佐倉市共に 0.032mg/m^3 となる。以上より、同レベルの SPM 環境の場合には、大気降下物量に大きな差は生じないため、屋根面 SS の質と量が同程度になることが示された。

次に、様々な種類の屋根面における堆積負荷特性を調べるために、Stn.N における亜鉛メッキ銅板製の 2, 4, 7 寸勾配 (Z2, Z4, Z7) 及び 4 寸勾配の S 形瓦屋根 (S4) における屋根面 SS の結果を図-4 に示す。ここでは、同時観測が行われた中で無降雨期間が継続した 2007 年 8 月 6 日から 17 日における屋根面 SS の平均値が表示されている。まず、同じ 4 寸勾配で異なる形状である亜鉛メッキ銅板製 (Z4) と S 形瓦製 (T4) を比べると、それぞれ 0.102g/m^2 、 0.099g/m^2 となり、両者はほぼ一致してい

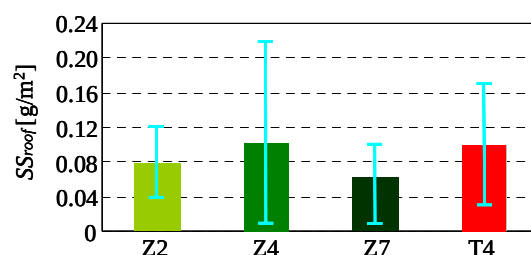


図-4 様々な形状・勾配を持つ屋根面 SS の比較 (2007/8/6～17 の平均値±標準偏差, Stn.N)

る。一方、同一形状で異なる勾配の屋根 (Z2, Z4, Z7) に関しては、4 寸勾配 (Z4) の屋根面 SS が最も大きい。大気中の浮遊粒子状物質は、水平方向に移流されつつ、鉛直方向に沈降・乱流拡散する形で、屋根面に沈着するものと考えられる。そのため、屋根の勾配が小さい場合には、水平移流成分が相対的に小さくなるため、屋根面への沈着量も少なくなる。一方、屋根の勾配が大きいと、浮遊粒子が屋根面に到達してもそのまま屋根面に沈着できず、屋根面に沿って下方へ移動してしまうものと考えられる。このようなことから、屋根面堆積負荷が最も大きくなる適度な勾配が存在しており、本研究の範囲では 4 寸勾配がそれに相当していると考えられる。

以上の結果をまとめると、SPM 等の大気環境条件が類似していれば、異なる場所でも屋根面 SS は同一となる。また、屋根面 SS は屋根の種類には関係なく、その勾配により規定される。一般的な屋根の形状や勾配としては、瓦屋根で、4～5 寸勾配が多いことが知られている¹²⁾。このことより、Stn.N における 4 寸勾配の亜鉛メッキ銅板製屋根 (Z4) における堆積負荷特性は、一般性、代表性を有するものと考えられる。以下では、屋根面堆積負荷に関しては、Stn.N の Z4 で得られた結果のみを示す。

(2) 屋根面窒素・リンと屋根面 SS の関連性

屋根面窒素・リンの特徴を抽出するために、日雨量と

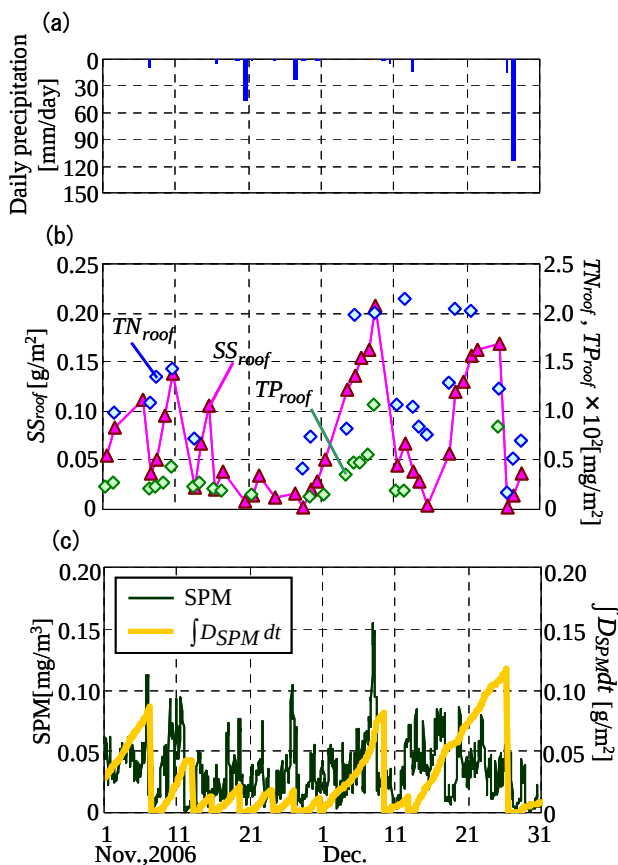


図-5 日雨量 (a) と屋根面 SS・窒素・リン (b), SPM・累積 SPM 沈降フラックス (c) の時間変化 (Z4, Sn.N)

屋根面 SS・窒素・リンの時間変化を図-5 に示す。図中の屋根面窒素・リンは、分析された窒素・リン濃度から観測時に使用した水道水の濃度値を差し引いた形で算出している。また、図中には大気環境データとして、SPM 及び SPM 沈降フラックス D_{SPM} の累積値 $\int D_{SPM} dt$ が表示されている。この D_{SPM} は、次のように与えられる。

$$D_{SPM} = w_0 * SPM \quad (1)$$

ここで、 w_0 は静止空気中における浮遊粒子の沈降速度であり、前報と同様に与える。この図を見ると、前述したように、降雨時に急激に減少し、無降雨時に緩やかに増加する、という屋根面 SS の特徴が、屋根面窒素やリンにおいても見られ、大局的にはこれら 3 者の変動パターンは類似している。また、累積 SPM 沈降フラックスの時間変化は、屋根面 SS のみならず、窒素やリンにおいても概ね似ている。なお、屋根面リンは屋根面窒素と比べて 2 オーダーも小さいことに注意されたい。

このような屋根面 SS と窒素・リンの相関関係を調べた結果を図-6 に示す。ここでは、観測で得られた全サンプルを 2006 年と 2007 年に分けて表示している。屋根面窒素に着目すると、多少のばらつきはあるものの、屋根面 SS と窒素は正の相関関係が見られる。また、2006 年と 2007 年の結果には大きな違いが見られず、全データに

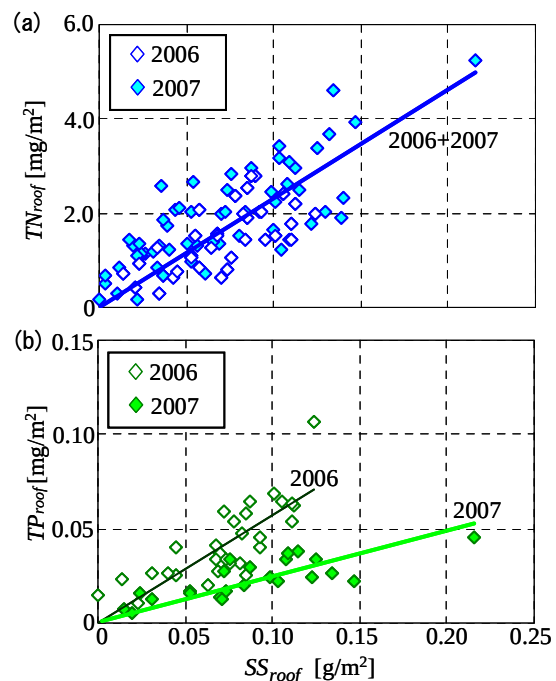


図-6 屋根面 SS と屋根面窒素 (a)・リン (b) の相関関係 (図中の実線は、各データに対する近似式を示す)

対する屋根面 SS と窒素には、次の相関式が得られた。

$$TN_{roof} = 0.0232 \times SS_{roof} \quad (2)$$

ここで両者の単位は共に g/m^2 である。上式の相関係数 r は 0.71 となり、屋根面 SS と窒素には概ね良好な相関性が存在する。一方、屋根面リンに関しては、2006 年と 2007 年の結果を分けて見ると、屋根面 SS とリンの間には各々有意な相関が存在し、次に示す相関式が得られた。

$$TP_{roof} = 0.000573 \times SS_{roof} \quad (3a)$$

$$TP_{roof} = 0.000247 \times SS_{roof} \quad (3b)$$

ここで、式 (3a)、(3b) はそれぞれ 2006 年と 2007 年の結果に対する相関式であり、それぞれ相関係数が 0.78、0.70 と概ね高い結果である。ただし、屋根面窒素と異なり、年により屋根面 SS とリンの相関関係は変化している。2006 年と 2007 年では屋根面 SS の中央粒径が $25.2 \mu m$ 、 $20.8 \mu m$ と屋根面堆積物の質が変化したため、屋根面 SS とリンの相関関係が年により異なったものと推察される。

(3) 屋根面堆積負荷と SPM の関係及びそれに基づく非定常原単位モデルの提案

屋根面堆積負荷を発生源である大気環境データを用いてモデル化する。屋根面 SS は大気降下物の総和と見なせるため、SPM 沈降フラックスの累積値と屋根面 SS の相関図を図-7 に示す。ここでは全データを対象とし、目安として $SS_{roof} = \int D_{SPM} dt + SS_0$ となる点線も表示している。ここで、 $\int D_{SPM} dt$ を算出する時の初期値 (SS_0) とし

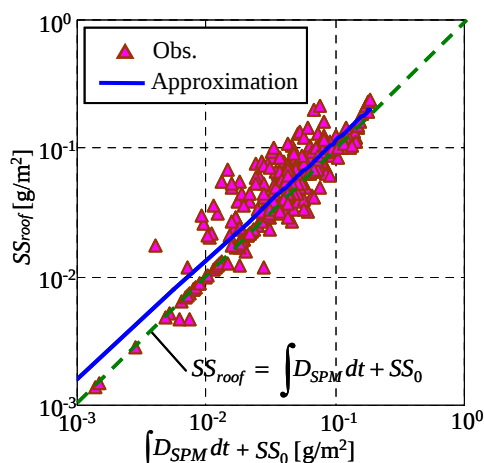


図-7 累積SPM沈降フラックス $\int D_{SPM} dt$ と屋根面SSの相関図

ては、前報と異なり、降雨イベント直後の屋根面SSの実測値を与えており、ここでは降雨直後から増加する屋根面SSと累積SPM沈降フラックスの関係を見ることとなる。両者の間には正の相関があり、次の相関式が得られた。

$$SS_{roof} = 0.9563 \left(\int D_{SPM} dt \right)^{0.9263} \quad (4)$$

上式の相関係数は0.90であり、屋根面SSとSPM沈降フラックスの累積値は良好な相関関係を有している。なお、上式において線形関係ではなく、べき関数を用いるのは $\int D_{SPM} dt$ の大きさにより $\int D_{SPM} dt$ と SS_{roof} の増加量の関係が異なると考えられるためである。

これらに基づいて、発生源である大気環境を考慮した形で屋根面堆積負荷の時間変動特性を表記可能な非定常原単位モデルを構築する。具体的には、次の内容とする。

- ①SPM観測値より、SPM沈降フラックスを評価する。
- ②式(4)及び①の結果より、屋根面SSを算出する。
- ③式(2)と式(3a)（もしくは式(3b)）を用いて、②で得られた屋根面SSから屋根面窒素・リンを求める。

なお、屋根面SSから屋根面窒素・リンを推定するのは、リン・窒素に対応する大気データが限られるためである。

このような非定常原単位モデルに基づいて推定された屋根面SS・窒素・リンを観測値と比べた結果の一例を図-8に示す。ここでは、2006年9月から2007年1月までの結果が表示されている。なお、屋根面リンの推定に用いる屋根面SSとリンの相関式としては、2006年では式(3a)、2007年では式(3b)としている。この図より、非定常原単位モデルによる推定値は概ね観測値と良好に一致している様子が、屋根面SS・窒素・リンにおいて見られる。このように、本研究で提案された非定常原単位モデルは、大きく時間変動する屋根面堆積負荷の非定常挙動を良好に表現できており、本モデルの有効性が検証された。

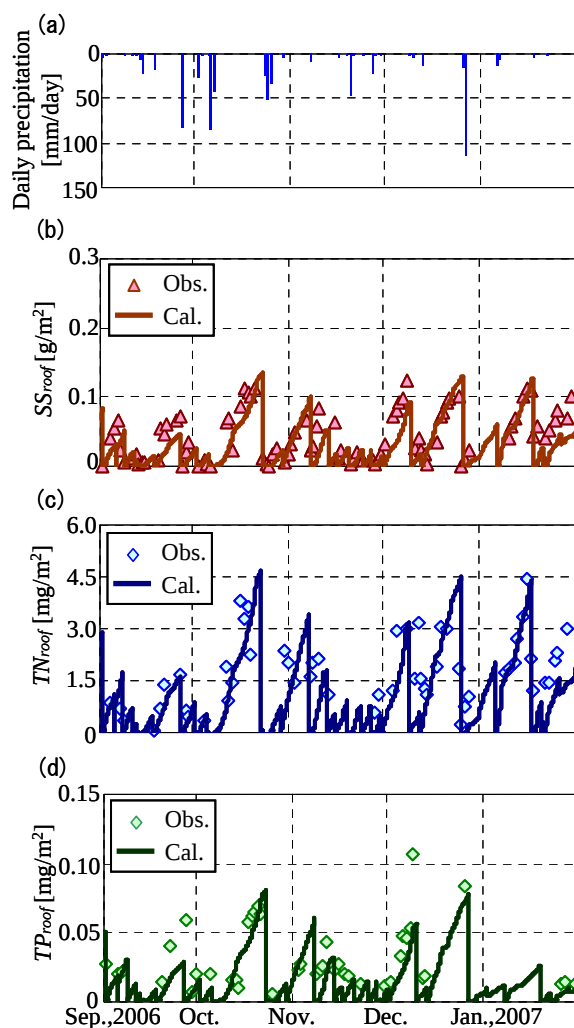


図-8 日雨量(a)と屋根面SS(b)、屋根面窒素(c)、屋根面リン(d)の観測値と推定値の時間変化

なお、図-7に示しているように、屋根面SSに関する実測値は全般的に $SS_{roof} = \int D_{SPM} dt + SS_0$ の点線よりも上側にプロットされている。これは、SPM沈降フラックスのみでは屋根面SSを過小に評価することを示唆している。この要因を検討するために、全サンプルに対する屋根面SSの粒径分布を調べた結果、屋根面上にはSPMに相当する $10 \mu m$ 以下の成分は30%程度であり、残りはPM成分である。また、粒径別パーティクルカウンターによる実測値では、SPMとPMの割合は平均すると各々85、15%となっている。これより、屋根面SSを実現現象に基づいてモデル化するには、SPM沈降フラックスとともに、PMの沈降フラックスを考慮する必要がある、そのためには現在計測例が少ないPMの連続モニタリングを実施することが重要である。なお、図-7中の点線よりも下側にプロットされる結果も少なからず存在する。これは、屋根上の大気降下物がそのまま屋根面にとどまらず、再浮上するためである。

(4) 非定常原単位と定常原単位の比較

非定常原単位モデルによる屋根面堆積負荷の評価結果

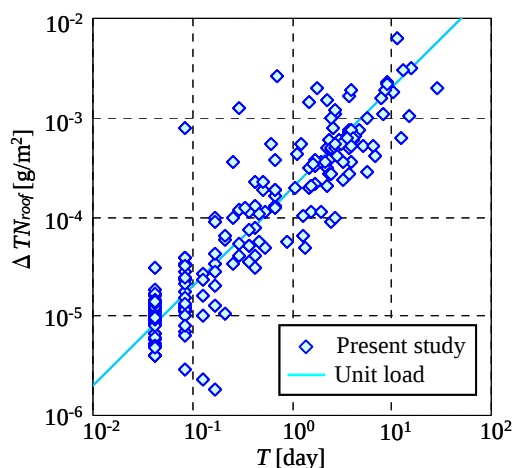


図-9 一降雨イベントに流出する屋根面窒素 ΔTN_{roof} に関する非定常原単位モデルと定常原単位の比較 (T: 先行無降雨時間)

とこれまで用いられている“定常”原単位の結果を比較する。ここでは、屋根面窒素を例として、一降雨イベントに流出する屋根面堆積負荷量（降雨前後の負荷量差） ΔTN_{roof} に関する結果を図-9に示す。図の横軸は降雨終了直後からの時間 T （先行無降雨時間）である。また、定常原単位としては、本モデルにより得られる屋根面堆積負荷の年間合計値を原単位（ $=0.0728\text{g/m}^2/\text{year}$ ）として与える。その原単位に先行無降雨時間をかけたものを図中に示しており、一定値である原単位は時間 T と共に比例する。これより、非定常原単位モデルによる結果は、大局的には先行無降雨時間 T と共に増加傾向にあるものの、そのばらつきは極めて大きく、最大2オーダーも異なる。これより、屋根面堆積負荷量が先行無降雨時間に加えて、発生源である大気環境（SPM）の影響を強く受けることが示唆された。当然、このような非定常性の強い屋根面堆積負荷の挙動を定常原単位では再現できず、本研究で提案する非定常原単位モデルの有用性の一端が実証的に示された。

4. まとめ

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 異なる地点における屋根面堆積負荷を比較した結果、同レベルの SPM 環境の場合には、大気降下物量に大きな差が生じないため、屋根面 SS の質と量は同程度になる。また、亜鉛メッキ銅版製と瓦製の屋根面堆積負荷を比較したところ、同じ勾配の時には両者は概ね一致した。
- 屋根面窒素・リンの時間変動パターンは、屋根面 SS と同様に、降雨時に急激に減少し、無降雨時に緩やかに増加する、という傾向が見られた。また、屋根面 SS と窒素・リンの相関関係を2006年と2007年に分けて検討した結果、屋根面 SS と窒素は両年とも差がなく概ね良

好な相関関係が得られた ($r=0.71$)。一方、屋根面 SS とリンに関しては、2006年と2007年の間には差が生じたものの、各年においては $r=0.78$ (2006年), 0.70 (2007年) と概ね高い相関関係が得られた。

3) 屋根面 SS と累積 SPM 沈降フラックスの間には良好な相関関係が見られ ($r=0.90$)、大気環境データより屋根面 SS が良好に推定できることが示された。

4) これらの結果に基づいて、時々刻々の SPM データから屋根面 SS を評価し (式 (4))、その結果と屋根面 SS と窒素、リン間の相関式 (式 (2), (3)) から屋根面窒素・リンを推定する、という非定常原単位モデルを提案した。また、屋根面 SS と窒素、リンに関する非定常原単位モデルの推定値と観測値は良好に一致し、本モデルの有効性が示された。

5) 本モデルにより求められた降雨毎に流出する屋根面堆積負荷は同一の先行無降雨時間でも2オーダーもばらついており、大気環境の影響が極めて強いこと、このような屋根面堆積負荷の非定常挙動をこれまで用いられている“定常”原単位では表記できないことが示された。

謝 辞

現地観測には、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。本研究の一部は、下水道振興基金研究助成金（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。

参考文献

- 山田淳：面源負荷—その現状と課題—，環境技術，Vol.29, No.7, pp.496-501, 2000.
- 国松孝男，村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析，技報堂出版，pp.1-266, 1989.
- 環境庁水質保全局水質管理課：非特定汚染源負荷調査マニュアル，pp.23-106, 1990.
- 中央環境審議会：第6次水質総量規制の在り方について（答申），21p, 2005.
- 国土環境庁：非特定汚染源対策計画検討調査，2004.
- 水文・水資源学会編：水文・水資源ハンドブック，朝倉書店，pp.164-168, 1997.
- 二瓶泰雄，吉田拓司，砂田岳彦：屋根面堆積負荷の非定常挙動に関する連続観測，水環境学会誌，Vol.29, No.11, pp.755-760, 2006.
- 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.
- 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，Vol.29, No.5, pp.261-268, 2006.
- 吉田拓司，二瓶泰雄，柴田秀爾，上原浩：印旛沼流域における市街地面源負荷の排出・流下調査，土木学会年次学術講演会講演要旨集，Vol.62, pp.293-294, 2007.
- <http://soramame.taiki.go.jp/>.
- http://www.jhf.go.jp/research/pdf/shuyoudata_h14-5.pdf

(2007. 9. 30 受付)