

陸域環境負荷評価の課題*

Issue on Evaluation of Environmental Impact from Inland

二 瓶 泰 雄**

NIHEI Yasuo

Abstract Water pollution in lakes and inner bays has been mainly caused by larger environmental impact from inland. It is therefore necessary to accurately evaluate the pollutant loads which are composed of point and non-point sources. In the present paper, the outline and current issue on the evaluation of point and non-point sources are introduced. Note that previous approaches may not evaluate accurately non-point sources. For more advanced evaluation for pollutant loads, it is indispensable to collect field data for non-point sources, and hence one attempts to conduct field measurements for the non-point sources in urban area. The observed results for environments of road and roof deposits, one of main non-point sources in urban district, are shown.

Keywords: Environmental impact from inland, Pollutant load, Non-point source, Road deposit, Roof deposit

1. はじめに

湖沼や内湾等の公共用水域における水質環境は、近年、概ね横ばい傾向となっており、琵琶湖等のように若干悪化している水域も報告されている[1]。このような水域環境問題は、様々な人為的活動に起因して、陸域で生成された栄養塩類などの富栄養化原因物質が大量に水域へ流入したために引き起こされており、水質環境改善のためには陸域から水域へ流入する汚濁負荷を削減することは必要不可欠である。

この陸域起源の汚濁負荷(以下、陸域環境負荷と呼ぶ)は、流域から河川や地下を通過して湖沼や内湾等の受水域に流入する汚濁物質フラックスである。これは、発生源の特徴により、Fig.1に示すように、点源負荷(特定汚染源、ポイントソース)と面源負荷(非特定汚染源、ノンポイントソース)に分類される[2-4]。点源負荷は、家庭や工場、畜産場等のように、「点」として認識できる場所からの排水の負荷である。最近では、事業場の排水規制や下水道整備率の向上、下水処理

の高度化により、点源負荷は大幅に削減されつつある。一方、面源負荷は、山林や農地、市街地等に「面」的に広がって堆積している固体状の汚濁物質に主として由来しており、降雨時にはこれらの堆積物が流送されて受水域に流入する。このような面源負荷は広い範囲に分布するため、点源負荷と異なって汚濁水を集めて処理・制御することは困難であり、有効な浄化・処理対策は存在しない。また、近年の都市化の進行と相まって、陸域環境負荷に占める面源負荷の割合は増加しつつある[5, 6]。そのため、公共用水域の水質環境が十分に改善されない主な要因の一つとして、実態解明が進まず削減対策が不十分な面源負荷に関心が集まっている[1]。最近の水環境研究分野の専門誌にも、面源負荷(ノンポイント汚染源)に関する特集記事が組まれていることから、その注目の高さが分かる[7]。

本稿では、湖沼や内湾における水域環境問題を取り扱う上で不可欠な陸域環境負荷について、特に面源負荷に着目して、一般的な評価法の概略や

* 2006.##.## 受付

** 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
TEL: (04)7124-1501 FAX: (04)7123-9766 E-mail: nihei@rs.noda.tus.ac.jp

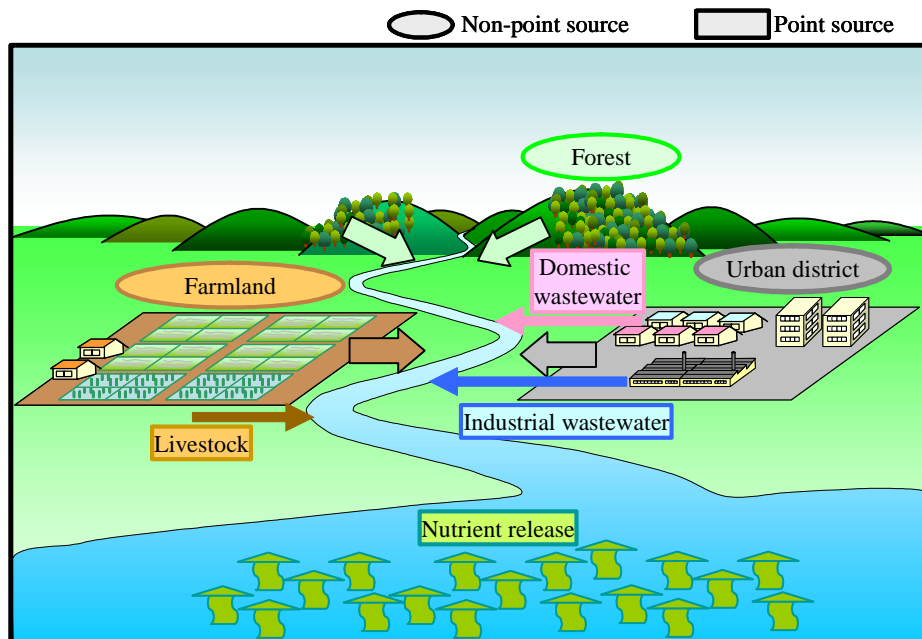


Fig.1 Schematic diagram for water pollution.

課題を列挙する。次に、これまで不明な点が多い面源負荷の実態を把握するために、ブラックボックスとなっている都市域の面源負荷の発生・排出過程に関する現地モニタリングを行った結果の一端を紹介する。

2. 陸域環境負荷評価法の現状と課題

代表的な陸域環境負荷評価法としては、従来から用いられている原単位法[2]や統計回帰モデル[4]に加えて、最近の計算技法の進展により適用されつつある統合型流域水・物質循環モデル[8]、という3つの方法が挙げられる。それらについて、以下に記述する。

2.1 原単位法

原単位法では、単位時間あたりに発生（または排出）する汚濁負荷量を「原単位」として表し、その原単位に人口や面積などを掛けて汚濁負荷量を求める。例えば、点源負荷の一つである家庭からの排水（生活系負荷）では、排水処理形態別人口（流域下水道、合併浄化槽、単独浄化槽）にそれぞれの排出負荷原単位（単位：g/人/日）を乗じて、生活系負荷を算出する。また、面源負荷に関しては、土地利用形態を市街地や畑、水田、森林等に分類し、それぞれの面積と原単位（単位：

kg/km²/日）を掛けたものの総和を求めている。この手法は、人口等の統計データを反映した形で簡単に汚濁負荷量を求めることが可能である。そのため、原単位法による陸域環境負荷の推定結果は、湖沼や内湾における水質保全策の立案や水質総量規制等において、広く用いられている[9]。

このような原単位法は、当然のことながら、原単位の設定により解析結果が大きく依存する。原単位のチューニングにより、点源負荷に関しては原単位法の再現精度は概ね良好であるが、面源負荷に関しては、原単位自体が大きくばらつくことにより、原単位法の解析精度は総じて高いとは言えない[10, 11]。また、原単位法では、長い時間スケール（少なくとも数年以上）にわたる平均的な汚濁負荷量を算出しているため、月、季節、年等の様々な時間スケールの変化を記述することは難しい。さらに、原単位の与えられている水質項目は、全リンや全窒素、COD（化学的酸素要求量）等に限定されており、湖沼・内湾管理に必要となる水質項目の無機態・有機態濃度、懸濁態・溶存態濃度に関する原単位はこれまでのところ存在しない。これらのことより、原単位法を用いて、陸域環境負荷、特に面源負荷の現況再現や将来予測を行うのには自ずと限界がある。

2.2 統計回帰モデル

河川や下水管を通過する陸域環境負荷量をモニタリングするには、流量と水質濃度（窒素、リン、COD等）が必要となるが、現状では水質濃度を長期間連続的に計測する手法は確立されていない。そのため、流量 Q と陸域負荷量 L の関係式（ L - Q 式）を求め、時々刻々得られる流量データから負荷量 L を算出する、という統計回帰モデルが陸域環境負荷評価に多く用いられている[12]。Fig.2は、著者らが、富栄養化の著しい千葉県手賀沼に流入する主要河川の一つである大堀川において計測した流量 Q と水質負荷量 L の相関図である。ここでは、CODを例として、合計8つの降雨イベント時の結果が表示されている。このように、流量と水質負荷量は概ね高い相関性があり、 L - Q 式としては一般に次式が与えられる。

$$L = aQ^b \quad (1)$$

ここで、 a 、 b は係数である。なお、統計回帰モデルでは、流量のみならず、河川流域の雨量を用いる場合もある[4]。

このような統計回帰モデルは、原単位法と異なり、時々刻々の陸域環境負荷量を得られるという利点を有しており、陸域環境負荷の現況評価に適している。しかしながら、式(1)中の係数 a 、 b は対象河川毎に大きく変化し、人口や土地利用等の流域環境情報と係数 a 、 b との定量的な関係は不明である。したがって、係数 a 、 b の設定上の問題に起因して、統計回帰モデルを陸域環境負荷の将来予測に適用するには大きな問題がある。また、陸域環境負荷 L は流量 Q のみならず降雨の履歴状況などにも依存するため、同一の流量条件下において必ずしも L が同じになるとは限らない。そのため、一つの降雨イベント中に L と Q はヒステリシスの関係となることが指摘されており、その傾向は懸濁物質において顕著である[13]。このように統計回帰モデルを陸域環境負荷評価に適用するには限界があり、特に、面源負荷が顕著となる降雨時の評価に大きな制約がある。

2.3 統合型流域水・物質循環モデル

統合型流域水・物質循環モデルとは、湖沼（もしくは内湾）の流域全体における水・物質（栄養塩等）輸送過程を追跡し得る数値モデルである。特に、流域内における水量・水質の空間分布特性

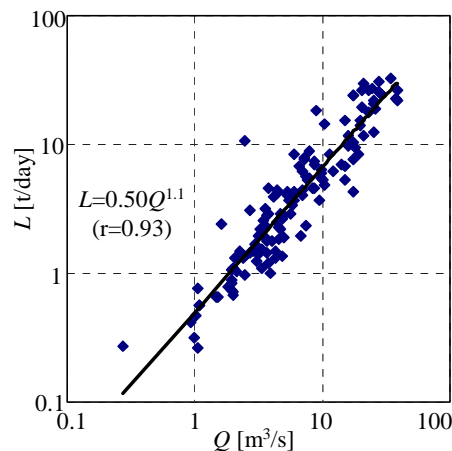


Fig.2 An example of relation between Q and L where means COD flux in the figure.

を把握可能な分布型モデルは、任意地点の流量や陸域負荷量を推定でき、かつ、それらのプロセスに流域内の人間活動や自然条件の空間分布を反映させることが可能である[8]。また、GISの進展により、広範囲の流域環境情報を統合的に整理することは容易であり、統合型流域モデルによる陸域環境負荷の現況評価や将来予測が望ましいと考えられる。現在、研究レベルにおいて様々な流域に統合型モデルが適用されつつあり（例えば、東京湾流域に対する安間らの研究[14]）今後、政策決定への応用が模索されている。

しかしながら、これらの統合型流域モデルは、様々な水・物質輸送過程を含んでいるため、モデル構造は複雑であり、原単位法のような簡便さはない。また、実測値が不足している面源負荷においては、複雑な汚濁物質の発生・排出・流下過程について極めて簡便な取り扱いしかなされておらず、統合型流域モデルの高度化には、面源負荷モデルの精度向上が大きなキーとなる。

2.4 まとめ

これら3つの方法には、上述したように一長一短はあるが、より高度な流域環境管理を指向する上では、統合型流域モデルを用いて陸域環境負荷評価や将来予測を行うことが望まれる。そのためには、モデリング技術や計算技法の高度化を図ることと並行して、現地モニタリングを実施し陸域環境負荷の実態を把握するとともに、数値モデルの検証用及び同化用データを取得することが必要となる。陸域環境負荷のうち面源負荷に関して

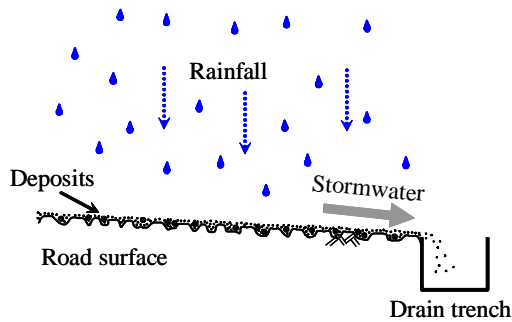


Fig.3 Schematic illustration of storm water flowing with deposits on road surface.

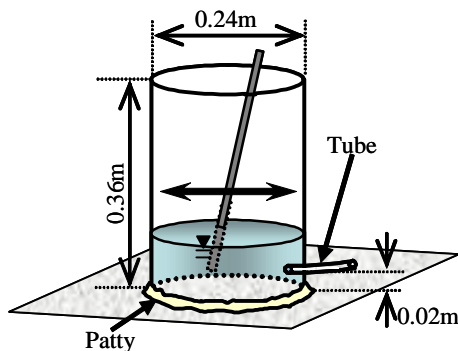


Fig.4 Schematic view of a device used in the modeled-stormwater sampling (MOS) technique [15].

は、現地調査データが著しく不足している。それは、面源負荷では、汚濁物質が広く面的に分布し、かつ、その時間的・空間的变化が大きいいため、調査自体が非常に多くの労力を必要とするためである。それに加えて、面源負荷の調査法自体が十分確立されていないものもあり、特に、汚濁物質の発生・排出・流下過程のモニタリングについては検討すべき項目が多い。

このような現状を鑑みて、著者らは、面源負荷の発生（排出）過程や流下過程（堆積、再懸濁を含む）という素過程について、都市域を中心に現地モニタリングをここ数年間実施している[15, 17]。次章以降では、特に実態が不明である発生（排出）過程として、市街地負荷の大部分を占める路面及び屋根面の堆積負荷の実態の一部を記述する。

3. 路面堆積負荷[15]

3.1 概要

都市域における面源負荷の発生源としては、路

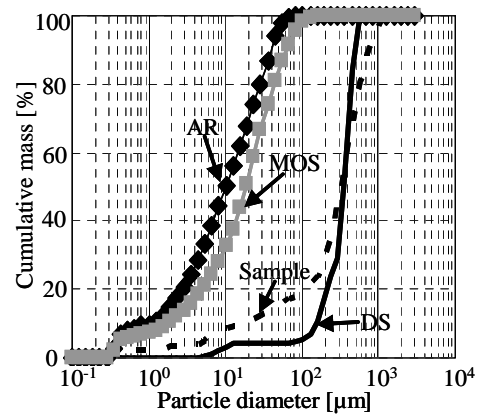


Fig.5 Grain-size distribution of road deposits collected in the experiment [15].

面や屋根面という不浸透面上の堆積物が挙げられる。一例として、降雨条件下における路面堆積物の流出挙動に関する模式図を Fig.3 に示す。雨滴による衝突や降雨流出水からの底面せん断力により、凹凸が大きい路面上に存在する固体状の堆積物の一部が選択的にピックアップされ、路面排水とともに隣接する水路まで輸送される。

一般的な路面堆積負荷調査では、ほうきやブラシ等により路面堆積物を根こそぎ収集する方法（堆積物採集法）が用いられるが、この方法では降雨時に流出する成分よりも過剰に堆積物が採取されてしまう可能性があり、採取された路面堆積物の代表性に疑問が生じる。そこで、模擬的に降雨状況下を簡便に再現した形で路面堆積物を採取する、という模擬降雨法（MOS 法）が提案されている[15]。模擬降雨法とは、Fig.4 に示す円筒容器を用いて、路面を水で浸し、攪拌された水中を浮遊する路面堆積物を採取しており、簡単に作られた降雨流出条件下において路面堆積物のみを採取している。

3.2 路面堆積物の流出特性に関する室内実験

降雨時における路面堆積物の基本的な流出特性を調べるために、シンプルな室内実験を行う。ここでは、アスファルト製プレート(0.33m 四方)を用い、それに実際の路面より採取された塵埃を散布する。そのプレート上に人工的に雨を降らし、その流出水を採用する方法（人工降雨法、AR）により、流出する路面堆積物を採取する。この人工降雨法と合わせて、模擬降雨法（MOS）や堆積物採取法（DS）により、プレート上から路面堆

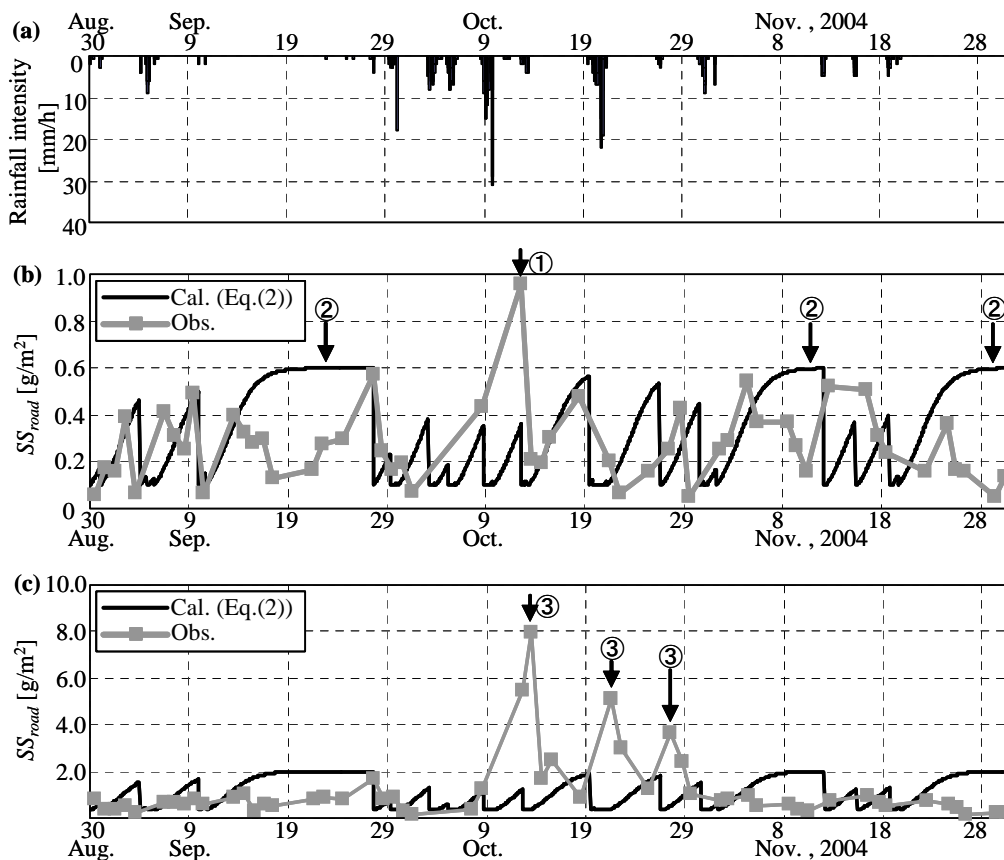


Fig. 6 Temporal variations of rainfall intensity (a) and SS_{road} on the center (b) and edge (c) of the road [15].

積物を採取し、得られた結果を相互に比較する。各手法により採取された路面堆積物の粒径加積曲線を Fig.5 に示す。ここでは、3つの手法により得られた堆積物及び散布試料(図中点線)に関する結果が表示されている。まず、散布試料に関しては、 $100[\mu m]$ 以上の粗粒子が主として存在し、中央粒径 D_{50} は約 $300[\mu m]$ である。それに対して、人工降雨法では、微細粒子が大部分を占めており、中央粒径 D_{50} は約 $10[\mu m]$ と散布試料の $1/30$ となっている。堆積物を根こそぎ取得する堆積物採取法では散布試料と類似した結果が見られるのに対して、模擬降雨法では人工降雨法と同様な結果となっている。また、各手法により採取された路面堆積物の回収率 (=回収された堆積物の質量を実験開始前に散布した堆積物の質量で無次元化したもの)を比べたところ、人工降雨法では $5\sim 8\%$ 、模擬降雨法では $7\sim 10\%$ 、堆積物採

取法では $83\sim 86\%$ となっている。

これらの結果より、路面上の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やす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ことが示された。さらに、模擬降雨法の結果は人工降雨法の結果と概ね一致しており、模擬降雨法は降雨流出過程を十分模擬した形で路面堆積物を採取していることが検証された。

3.3 路面堆積負荷の時間変化に関する現地調査

路面堆積負荷の時間変動特性の実態を把握するために、模擬降雨法に基づいて実路面における現地観測を長期間実施した。観測サイトは、本学野田校舎南側道路(幅員 $4.8[m]$)であり、2004年8月30日から11月30日までの約3ヶ月間にわたりほぼ毎日調査が実施された。路面内では、中央部と路肩部において調査地点が設定されて

いる。その結果の一例として、路面の中央部と路肩部における単位面積当たりの堆積物質量(以下、路面 SS (SS_{road}) と呼ぶ)の経日変化を Fig.6 に示す。これより、路肩部における路面 SS 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。また、路面 SS は中央部、路肩部ともに時間的に一定とはならず大きく変動している。

一般に、路面 SS の時間変化は、次式に示すロジスティック曲線でモデル化される[16]。

$$SS_{road} = \frac{\alpha}{1 + \beta \exp(-\gamma T)} \quad (2)$$

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、 α 、 β 、 γ は路面堆積荷に関わる係数である。観測値を参考に中央部では $\alpha = 0.60 \text{g/m}^2$ 、 $\beta = 5.0$ 、 $\gamma = 0.03 \text{h}^{-1}$ 、路肩部では $\alpha = 2.0 \text{g/m}^2$ 、 $\beta = 5.0$ 、 $\gamma = 0.03 \text{h}^{-1}$ とした時の式(2)の結果を Fig.6 に示す。ロジスティック曲線による路面堆積荷の計算値は、降雨時に大幅に減少し、その後先行晴天時間とともに増加し極大値に漸近する。この計算値と実測値を比べると良好に一致しているとは言えず、そのずれは路肩部の方が大きい。実測値では、降雨時に必ずしも路面 SS が減少せず(図中矢印)、また、先行晴天時間が十分長くても路面 SS は一定値に近づかず大きく変化している(図中矢印)。

降雨時や非降雨時における路面 SS の時間変動特性は、路面内における堆積物の浮遊・移動(移流・拡散)・堆積過程に起因している。これらの過程は式(2)のような単純なモデル化では表現することは困難であり、本調査により、その一端が示された。路面上における固体状物質の挙動を解明する上では、混相流としての取り扱いが不可欠である。ここで扱う現象の特徴としては、路面の凹凸が大きい、路面排水の水深は極めて浅い、降雨流出水の一部は蒸発したり地下に浸透する、様々な粒径の固体粒子が堆積する、雨滴の衝突により固体粒子の一部が移動する、などが挙げられ、混相流としても極めてチャレンジングな研究テーマであり、今後の展開が期待される。

4. 屋根面堆積荷[17]

4.1 概要

屋根面堆積荷は、一般に路面堆積荷よりも

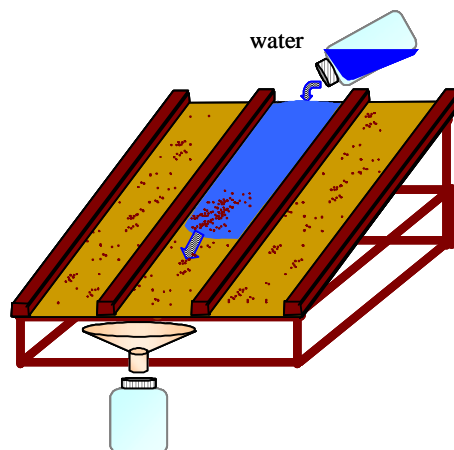


Fig.7 Schematic view of the present sampling technique for roof deposits [17].

小さいものの[15]、屋根面積が相対的に大きいことを考慮すると、屋根面堆積荷を調べる意義は高い。この屋根面堆積荷の調査方法としては、路面と同様に、堆積物採取法では採取されたサンプルの代表性に問題がある。そこで著者らは、計測精度と安全性・簡便性を考えて、Fig.7 に示すような模型屋根を用いて、模擬的に再現された降雨状況下において屋根面堆積物を採取する手法を提案している[17]。これも一種の模擬降雨法と見なせる。

4.2 現地調査の概要と結果

上記の調査法に基づいて、屋根面堆積荷の時間変動特性に関する長期調査を実施した。ここでは、本学野田校舎の建物屋上に模型屋根 6 基を設置し、2005 年 9 月 15 日から 2006 年 3 月 31 日までほぼ毎日調査を行った。観測結果の一例として、全観測期間における日雨量 R と屋根面 SS の時系列変化を Fig.8(a)、(b)に示す。ここで、屋根面 SS (SS_{roof}) とは、単位面積当たりの屋根面上の堆積物質量である。なお、2005 年 12 月 19 日から 2006 年 1 月 14 日においては、模型屋根の破損等により屋根面 SS は欠測している。これらの図を見ると、屋根面 SS は一定とはならず、0.0 ~ 0.25 g/m^2 の範囲で時間的に変化している。このときの屋根面 SS の大きさは、前章で記述した一般道路での路面 SS よりも全般的に小さい。また、屋根面 SS の変化は降雨量に対応しており、降雨直後に屋根面 SS は減少し、その後、次の降雨時まで屋根面 SS は増加する。また、無降雨期間が

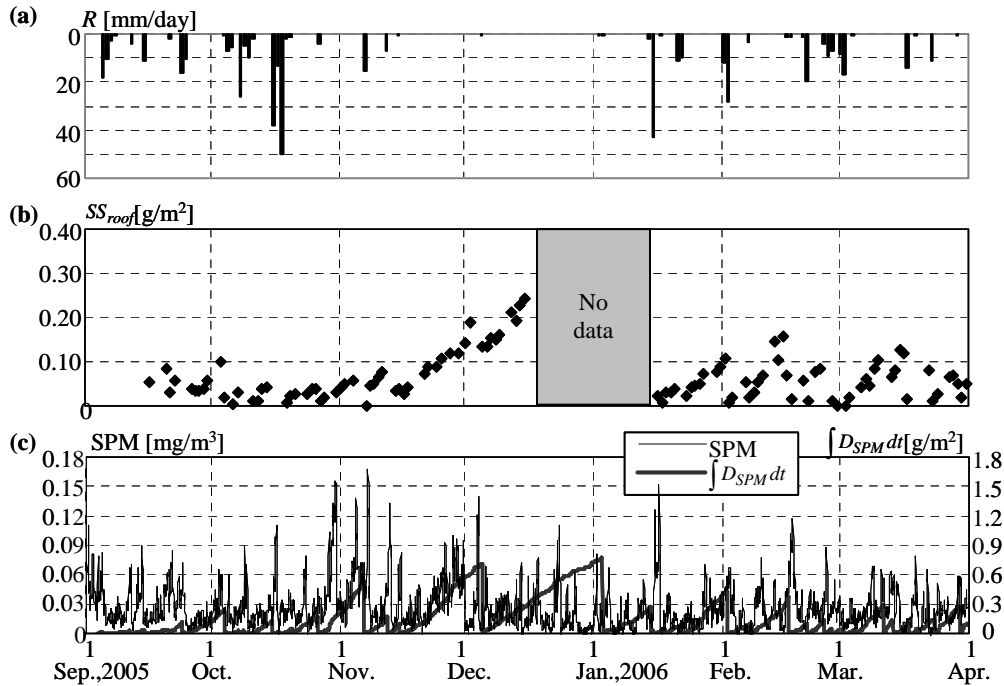


Fig.8 Temporal variations of daily precipitation R (a), SS_{roof} (b) and SPM (c) [17].

続いて、屋根面 SS は一定値に近づかず増加傾向を保っている。このことは、屋根面堆積負荷にも使用されているロジスティック曲線(式(2))の適用が難しいことを示唆している。

次に、屋根面 SS と発生源である大気中の浮遊物質濃度との関係性を調べるために、SPM (Suspended Particulate Matter) の時系列データを Fig.8(c)の細線で示す。SPM データは屋根面 SS 観測点の周囲 7 地点の計測結果[18]を平均した値である。これより、屋根面 SS と同様に、SPM も時間的に大きく増減しているが、このままでは屋根面 SS との相関性は見られない。そこで SPM と屋根面 SS を直接的に比較するために、屋根面への SPM 沈着量を算出する。SPM 沈着フラックス D_{SPM} は、SPM と沈着速度 $W_d (= W_0 + 0.006u$ 、 W_0 : 静止空気中の沈降速度、 u : 風速)の積となる[19]。このようにして得られた SPM 沈着フラックスの累積値 $\int D_{SPM} dt$ を Fig.8(c)中に太線で示す。ここでは、降雨が観測された直後に累積値 $\int D_{SPM} dt$ を便宜的に 0 とし、累積値 $\int D_{SPM} dt$ を計算している。これを見ると、屋根面 SS と SPM 沈着フラックスの累積値の時間変化は類似しており、両者の間には何らかの相関性があることがう

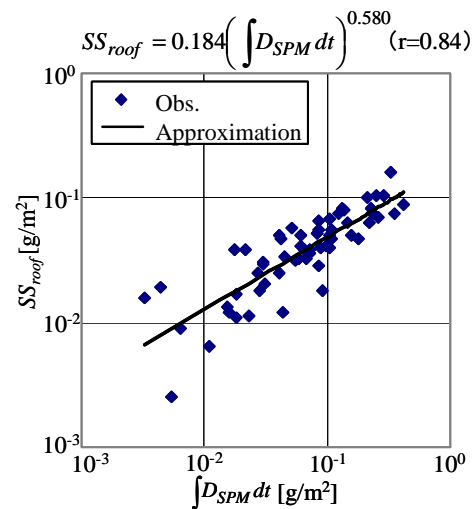


Fig.9 Relationship between SS_{roof} and $\int D_{SPM} dt$ [17].

かがえる。そこで、両者の相関図を Fig.9 に示す。この図を見ると、全体的には、SPM 沈着フラックスの累積値 $\int D_{SPM} dt$ とともに屋根面 SS は増加しており、図中のような相関式が得られた。この時の相関係数は 0.84 であり、 SS_{roof} と $\int D_{SPM} dt$ は概

ね良好な相関性を有している。これより、大気環境データである SPM 沈着フラックスを用いることにより、屋根面 SS を精度良く推定することが可能となる。

このように、大気環境データを用いて屋根面 SS のモデル化への道筋が示されたが、これらの素過程を精緻にモデリングする上では、混相流の知見を導入することは不可避である。すなわち、大気中から屋根面への浮遊粒子の沈着過程、屋根面における固体粒子の移流・拡散過程、固体粒子の移動限界に及ぼす雨滴衝突の影響など、多様な混相流現象が屋根面堆積負荷には含有されている。以上より、路面堆積負荷と同様に、屋根面堆積負荷に対しても混相流研究の導入・応用が今後期待される。

5. おわりに

本稿では、水域環境問題を取り扱う上で必要となる陸域環境負荷の評価法の現状と課題について列挙した。また、その中で、面源負荷の発生過程に関する著者らの取り組みを紹介した。それらを通して、混相流研究の応用・展開が、面源負荷モデルの向上に大きく寄与することを指摘した。しかしながら、現段階では、面源負荷を含む陸域環境負荷評価モデルに対して、本格的な混相流研究の導入例はないことから、今後の展開が期待される。

謝 辞

東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室 学生諸氏、特に砂田岳彦君(現セリオ国際特許事務所)と水野智之君(現株銭高組)、吉田拓司君、坂井文子さんには、長期間にわたる現地調査やデータ整理の大部分を実施して頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 山田淳, 面源負荷 その現状と課題, 環境技術, 29(7), 496-501 (2000).
- [2] 国松孝男, 村岡浩爾, 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, 1-267 (1989).
- [3] 和田安彦, ノンポイント汚染源のモデル解析, 技報堂出版, 1-214 (1990).

- [4] 武田育郎, 水と水質環境の基礎知識, オーム社, 75-166 (2001).
- [5] 和田安彦, 非特定汚染源負荷の流出量とその特性, 環境技術, 14(1), 97-101 (1985).
- [6] 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, 25(9), 524-528 (2002).
- [7] 山田淳, ノンポイント汚染 - 科学から政策へ -, 水環境学会誌, 29(11), 665 (2006).
- [8] 朴珍赫, 小尻利治, 友杉邦雄, 流域循環評価のための GIS ベース分布型流出モデルの展開, 水文・水資源学会, 16(5), 541-555 (2003).
- [9] 小林節子, 平間幸雄, 湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法, 水環境学会誌, 19(2), 121-131 (1996).
- [10] 二瓶泰雄, 服部祐司, 小久保武, 大竹野歩, GIS を用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析, 水工学論文集, 48, 1459-1464 (2004).
- [11] 坂井文子, 二瓶泰雄, 砂田岳彦, 原単位法による面源負荷評価に関する基礎的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, 61, 515-516 (2006).
- [12] 高橋順二, 長谷部均, 白谷栄作, 吉永育生, 河川流域における降雨時流出負荷量の算定に及ぼす影響要因, 水文・水資源学会誌, 13(3), 216-226 (2000).
- [13] Williams, G. P., Sediment Concentration Versus Water Discharge During Single Hydrologic Events in Rivers, *J. of Hydrology*, 111, 89-106 (1989).
- [14] 安間智之, 小路剛志, 伊藤弘之, 藤田光一, 流域水物質循環モデルを用いた東京湾と流入河川における水質変遷再現について, 水工学論文集, 50, 1381-1386 (2006).
- [15] 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, 29(5), 261-268 (2006).
- [16] 和田安彦, 三浦浩之, 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), 朝倉書店, 164-168 (1997).
- [17] 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, 29(11), 755-760 (2006).
- [18] <http://w-soramame.nies.go.jp/>.
- [19] 浮遊粒子状物質対策検討会, 浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル, 東洋館出版社, 1-398 (1997).