

論文の内容の要旨

論文題目 都市ノンポイント汚染源負荷量調査に基づく
地表面特性を考慮した堆積負荷流出モデル解析

氏名 肱岡 靖明

都市化の進行に伴う不浸透域の増加により、雨天時に下水道へ流入する雨水量が急激に増加している。また、都市における様々な社会活動及び日常生活から発生する汚濁物質がノンポイント汚染源負荷として地表面に堆積し、雨天時に下水道を経由して公共用水域へ流入している。雨天時に下水道へ流入する雨水量の増大とともに汚濁負荷量の量及び質も増加している。

都市域における主なノンポイント汚染源負荷の発生源として、自動車排ガスを含む道路粉塵、工場やゴミ焼却場からの煤煙等が挙げられる。これら排ガス及び煤煙には、発ガン性物質である多環芳香族炭化水素等の微量有害有機物質や重金属等が含まれており、これら微量有害物質の雨天時流出に伴う公共用水域の水環境や水域生態系への影響が懸念されている。

公共用水域の水環境を保全するためには、ノンポイント汚染源負荷の挙動を正確に把握し、効果的な対策を実施する必要がある。しかしながら、ノンポイント汚染源負荷は面的に分布するため、発生源や発生量の特定が非常に難しく、雨天時の流出は降雨や地表面の形状によりその挙動が大きく異なるため定量化が非常に困難

である。

下水道システムにおける雨水流出及び汚濁負荷の堆積、流出機構を解析するために、近年、欧米にて数種の分布型モデルが開発されてきており、日本の下水道への適用も推進されている。分布型モデルは地理情報システムと組み合わせることにより、より精度の高い定量的な解析を行うことが可能となっている。一方、商用の分布型モデルに組み込まれている各プロセスのモデルには経験モデルも多く含まれている。特に、地表面堆積負荷流出モデルに関しては、その重要性から既存の研究においていくつかのモデルが提案されているが、いずれも観測データから導かれた経験モデルであり、他流域へ適用する際には、対象流域特性やそこで観測されたデータに基づいて、モデルの適用方法及びモデルに必要なパラメータ設定について検討する必要がある。

既存のノンポイント汚染源に関する調査では、各地の分流式下水道排水区を対象とした雨天時流出量調査、路面堆積負荷量調査、路面堆積負荷流出量調査があるが、必ずしも分布型モデルを前提にした検討はなされていない。また、下水道排水区を対象とした調査や路面堆積負荷流出量調査では単独降雨を対象としたものが多く、路面堆積負荷量調査においては、堆積量の経時変化が長期にわたり調査されているものの、雨天時における負荷流出量の経時変化を同時に捉えられてはいない。雨天時におけるノンポイント汚染源負荷流出量調査には多大な労力と費用が必要とされ、自然現象により調査計画を合わせざるを得ず観測データの蓄積が非常に難しい。

そこで本研究では、都市域の分流式下水道排水区において連続降雨を対象としたノンポイント汚染源負荷の雨天時流出量調査を行った。さらに観測データをもとに、分布型モデルの中でも、汚濁負荷解析において重要なプロセスである地表面堆積負荷流出に関して詳細なモデル検討を行った。

ノンポイント汚染源負荷の雨天時流出量を測定するために、自動採水・連続測定装置を住宅市街地に設置し連続降雨を対象とした採水を行った。対象汚濁物質はSSを測定した。既存の研究より有害化学物質は粒子径の小さなSS分に付着して雨天時に流出することが報告されていることから、サンプルを2分画（微粒子： $1.2\ \mu\text{m}$ ~ $45\ \mu\text{m}$ 、粗粒子： $45\ \mu\text{m}$ ~ 2mm ）して測定した。測定結果より、降雨強度が 10mm/hr 程度以下の場合、微粒子と粗粒子の流出の挙動に大きな違いがあることが示された。降雨強度によらず降雨全般において流出が見られる微粒子と比べ、粗粒子はある一定の降雨強度が観測された場合に明らかな流出が見られた。

調査結果を用いてノンポイント汚染源負荷の流出解析を行うにあたり、まず工種別の雨水流出特性を考慮して分布型モデルを用いた雨水流出解析を行った。解析結果より、都市域を対象とした雨水流出解析を行う場合、その代表不浸透面である屋根と道路を表面特性に基づいて区別し、異なる流出特性を考慮する必要性を示した。

解析では、屋根は道路と比べ凹凸の少ない滑らかな表面を持ち勾配が急であることから不浸透面直接流出域とし、道路はその表面の凹凸が大きく勾配が緩やかであることから不浸透面凹地貯留域と定めた。このとき、道路の初期損失は 0.5mm 程度となった。さらに、地表面流出モデルにおける貯留係数の設定では、屋根のほうが道路より雨水の流出が早いと仮定することにより再現性が飛躍的に向上した。次に、浸透域を高浸透能域と低浸透能域の 2 つに区分し、低浸透能域の有効降雨モデル及び地表面流出モデルに関するパラメータについて考察した。このように、有効降雨モデル及び地表面流出モデルのパラメータに工種別の異なる値を設定することによって雨水流出解析の精度が向上することが示された。そこで、対象排水区における工種情報を既存の土地利用情報を用いて推定するために、細密数値情報に含まれる土地利用毎の屋根、道路、低浸透能域、高浸透能域の割合を提案した。統一された規格を持つ土地利用情報を解析に利用することにより、任意の排水区において同等の解析を行い、解析結果を相互に比較検討することが可能となる。

以上の雨水流出解析の結果より、地表面における適切な雨水流出量を推定することが可能となった。次に、汚濁負荷解析において重要なプロセスである地表面堆積負荷流出に関して SS を対象とした詳細なモデル検討を行った。地表面堆積負荷流出モデルとして Sartor and Boyd モデルを適用して、初期堆積量と負荷流出係数のパラメータ値を降雨毎に検討した。しかしながら、屋根と道路を一括して不浸透域と捉えた汚濁負荷解析では、回帰して得られたモデルパラメータ値を用いても、ファーストフラッシュや SS 負荷流出の時間的な変化を表すことができなかった。そこで、道路からの堆積負荷流出を発生させる限界の掃流量という概念を導入することにより、ファーストフラッシュを含む SS 負荷流出の時間変化を再現することが可能となった。この結果より、雨水流出解析と連帯して、ノンポイント汚染源負荷が堆積する場として不浸透域を屋根・道路と区別しそれぞれの負荷流出特性を考慮した汚濁負荷解析の有効性が示された。さらに、汚濁負荷解析前後の物質収支より、道路の負荷堆積量を見積もる際には先行降雨終了時の残存堆積負荷量を考慮することが重要であることが示唆された。

SS を対象としたノンポイント汚染源負荷の流出解析結果をもとに、ノンポイント汚染源負荷流出調査で得られた微粒子負荷流出量データを用いて、屋根・道路の負荷流出特性に着目した分布型モデルにおける地表面堆積負荷流出モデルの詳細な検討を行った。解析結果より、微粒子は屋根・道路ともに堆積しており、その負荷流出は表面の凹凸、勾配等を考慮し、屋根のほうが道路より早く流出するという現象を考慮した負荷流出係数の値を与えることにより微粒子負荷流出の時間変化を適切に捉えることができることを示した。さらに、表面に凹凸が存在する屋根・道路に対して限界掃流量の概念を適用することはデータ数の増加によりデータ決

定の煩雑性が増すものの汚濁負荷流出解析に非常に効果的であることが示された。結果、屋根の限界掃流量は 0.5mm/hr と非常に小さく、道路の限界掃流量はその 2 倍の 1.0mm/hr となった。雨水流出速度が道路に比べて早いと推定される屋根においては、限界掃流量による影響が小さいと推測されるが、降雨流出初期時の負荷流出を表すには非常に効果的であることが示された。また、道路の限界掃流量は SS を対象とした解析結果 1.5mm/hr より小さな値となったが、これは粒径による負荷流出の違いを表していると考えられた。次に、各降雨を対象として推定された初期堆積量の値を用いて晴天時負荷堆積特性を検討した。屋根は道路に比べ負荷堆積速度が小さく減衰係数が大きいと推定された。また、道路の初期堆積量を推定する場合、先行降雨終了時の残存負荷堆積量の把握が非常に重要であることが示された。

SS 及び微粒子を対象とした汚濁負荷解析の結果に加え、粗粒子を対象とした負荷流出解析を行い、その流出特性について検討した。結果、粗粒子において決定された屋根及び道路の負荷流出係数及び限界掃流量は、微粒子と比べ負荷流出が小さく限界掃流量が大きな値と推定された。これは、粒子径別の観測負荷流出特性に裏付けられた結果である。雨天時汚濁負荷流出解析より、降雨によっては粒子径別にその残存量も大きく異なることが示され、降雨開始時の初期堆積量を推定する場合に先行降雨終了時の残存負荷量を定量的に把握する必要性が示された。さらに、微粒子、粗粒子において決定された屋根及び道路の負荷流出係数及び限界掃流量を用いて SS を対象とした汚濁負荷解析を行い、SS 負荷流出における屋根・道路からの微粒子、粗粒子の寄与分を検討した。結果、SS を対象とした汚濁負荷流出解析において推定された負荷流出係数及び限界掃流量は微粒子と粗粒子の流出を包括した値であることが示され、今後、粒子径別に付着する有害化学物質の特性を検討するためには、粒子径別にその流出パターンを考慮する必要があることが示唆された。

以上のように、本研究では、都市ノンポイント汚染源負荷の雨天時流出に重要なプロセスである地表面堆積負荷流出について詳細な検討を行い、屋根・道路別に異なる雨水流出特性及び負荷流出特性を考慮することにより再現性が飛躍的上昇することを明らかにした。この結果、平面的に非一様に分布していると推測されるノンポイント汚染源負荷の雨天時流出を、工学的手法において再現する場合の考え方を示すことができた。さらに、粒子径別にその負荷流出の挙動を解析することにより、今後重点的に対策が行われると予想される微量有害化学物質を対象とした雨天時流出解析の基礎を提案できたと考えられる。