

## 審査の結果の要旨

氏名 アリアル ルパク クマール

本論文は、都市ノンポイント汚染現象のうち、高速道路における活発な交通活動に伴って排出される重金属、多環芳香族炭化水素類（PAHs）などの有害な微量汚染物質が雨天時に水環境中に流出する動的な過程を研究した成果を報告している。特に、初期雨水流出に関する現場調査結果をもとに、流出水中の懸濁物の粒径サイズに着目して、45 $\mu\text{m}$  を境に細粒分と粗粒分に分画して両者の流出挙動の違いを検討している点、懸濁粒子に付着している重金属と多環芳香族炭化水素類の両者の挙動特性について考察を行っている点に新規性がある。また、道路塵埃および流出水懸濁試料の粒径分布、重金属やPAHsの成分組成の類似性を議論することから道路塵埃の雨天時流出特性を評価するとともに、汚濁流出負荷量を推定するために Sartor and Boyd モデル式が適用可能かどうかについても考察を行った研究論文である。論文は、9章より構成されている。

第1章では、研究の背景と目的、および論文構成を述べている。

第2章では、既存知見として、高速道路雨天時流出水中で取り扱うべき汚染物質の特性とその発生源、既存の道路堆積塵埃や雨天時汚濁負荷流出調査に関する研究成果などを取りまとめている。そして、汚濁負荷流出過程を定量化するためのモデルに関して整理を行っている。

第3章では、本研究の調査対象である高速道路の雨水排水システム（排水面積 8.4ha）について概要を説明し、調査期間中の降雨特性、道路塵埃や流出水の採取方法、試料の前処理方法、粒径分布測定、懸濁態微量汚染物質の分析方法などを説明している。

第4章では、1ヶ月以上にわたる連続モニタリング結果に基づき、初期雨水流出水の採取を実施した9降雨に関して、SSと微量汚染物質の動的な流出挙動を降雨特性と関連づけて考察している。その結果、懸濁態重金属及び懸濁態PAHs濃度はSS濃度に概ね連動して変化すること、重金属の濃度レベルは、Cr:4~36、Zn:94~512、Cu:7~79、Pb:5~50 $\mu\text{g}/\text{l}$ の範囲であり、PAHs濃度は1~16 $\mu\text{g}/\text{l}$ の範囲であることを報告している。これらの濃度範囲は、過去に報告されている高速道路や市街地幹線道路の観測値と同程度であり、当該高速道路においても微量汚染物質の雨天時流出に伴う汚染が深刻であることを確認している。また、懸濁物中PAHs含有量は重金属のそれと比較して変動性が低いこと、またPAHs含有量は3~107 $\mu\text{g}/\text{g}$ の範囲であり、初期雨水中に高PAHs含有率の懸濁物が存在していることを明らかにしている。

第5章では、4降雨の流出水試料に関して、懸濁成分を45 $\mu\text{m}$ メッシュで細粒分と粗粒分に分画して、画分ごとの流出挙動の違いを検討している。そして、細粒分と粗粒分では流出挙動が異なり、全SS濃度及び流速の変化とともに各画分SS濃度がある特徴を有して変動することを明らかにしている。具体的には、全SS濃度として100 $\text{mg}/\text{l}$ 程度を超えると、細粒画分濃度に飽和傾向がある

一方で、その濃度以上では粗粒画分が急激に増加することを示している。このような細粒画分と粗粒画分の流出挙動の違いにより、雨天時汚濁現象が複雑となる可能性を示唆している。

第6章では、2つの道路塵埃および流出試料に関して、重金属とPAHsの成分組成のパターン（以下プロファイルという）を調べている。流出水懸濁試料の重金属プロファイルは堆積塵埃の細粒分のそれと類似していた。道路塵埃3画分（ $<50$ 、 $50-125$ 、and  $125-250\mu\text{m}$ ）のPAHsプロファイルについては、 $<50\mu\text{m}$ 画分において流出懸濁試料よりもB(a)Anが高い含有率であったことを除けば、ほぼ類似していた。それに対して、 $250\sim 400\mu\text{m}$ の比較的粗粒な画分は、流出試料よりもIpyとB(ghi)Peが高含有率であるという異なる特徴を有していた。

同一の降雨期間中では、試料の採取時間の違いやその細粒や粗粒の違いにかかわらず、PAHsプロファイルは類似している一方で、異なる降雨ではプロファイルに相違が見られた。これは、塵埃堆積期間中の気温や湿度といった気象条件によってPAH成分ごとの蓄積傾向が変化する可能性があること、そしてそれに連動して流出水の毒性も変化することを示唆している。また、一降雨平均の流出水試料PAHs含有量は、道路塵埃とともに $10\sim 50\mu\text{g/g}$ 程度の範囲にあった。

第7章では、代表的な堆積負荷流出モデルであるSartor and Boydモデルを用いて、全SSおよび分画されたSSの負荷挙動の定量評価への適用可能性を検討している。その結果、負荷量推定に重要となる負荷流出係数を粗粒画分については算定できるものの、細粒画分については降雨ごとに大きく変化することが明らかとなった。つまり、全SSおよび粗粒画分のSS流出負荷量は本モデルで説明することが可能である一方で、細粒画分では、累積雨水流出量に対して線形的に増加する傾向が見られ、累積雨水量が $3\text{mm}$ を超えて適用すると流出負荷量を過大評価する可能性が示唆された。

第8章では、雨水流出解析用の分布型モデルソフトウェア（InfoWorks）を活用して、対象排水区内の管路ネットワーク情報を考慮した雨水流出解析を行っている。その結果、降雨強度の高い降雨を除き、再現性の高いハイドログラフを得ることに成功している。そして、その水理計算結果のもとで堆積負荷流出モデルを組み込みSS負荷流出についてモデル解析した結果、初期雨水における流量変化に伴う汚濁負荷流出量のダイナミックな変化を再現可能であることを確認している。

第9章では、各章で述べた本研究の成果の取りまとめと今後の課題や展望を整理している。

以上の成果は、微量汚染物質の発生源となりうる高速道路からの初期雨水流出現象に関して、懸濁粒子サイズ別に汚染物質濃度や負荷量が数倍の範囲で変動するという貴重な環境モニタリングデータを提供しているだけでなく、その汚濁負荷量の観測や予測、汚染物質管理の観点からは、非定常な流出挙動を理解することが必要不可欠であることを示すものである。これらの知見は、都市ノンポイント汚染現象の解明やその対策を検討する上で非常に有用な知見を提供しており、都市環境工学の学術の進展に大きく寄与するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。