

⑩ 流域スケールで見た物質の動態把握と水質管理技術

研究期間：平成 23 年度～27 年度

プロジェクトリーダー：水環境研究グループ長 池田茂

研究担当グループ：水災害研究グループ、水環境研究グループ（水質チーム）、材料資源研究グループ

1. 研究の必要性

公共用水域の水質は、「水質汚濁に係る環境基準」における、「人の健康の保護」に係る項目は達成率が次第に高まっているが、有機汚濁等の「生活環境の保全」に係る項目については、特に閉鎖性水域において改善が十分に進んでいない。

安全・安心への関心の高まりの中で、科学技術に関する基本政策について（答申原案）（総合科学技術会議、22 年 11 月 17 日）では、社会インフラのグリーン化や、人の健康保護や生態系の保全に向けて、大気、水、土壌における環境汚染物質の有害性やリスクの評価、その管理及び対策に関する研究を推進することが位置づけられている。

これらの解決にあたっては、栄養塩類をはじめとする汚濁物質による水質障害への対応、病原微生物等によりもたらされる水質リスクへの対応を、流域スケールの視点での物質動態を踏まえ、河川管理者や下水道管理者がその役割の下ですすめていく必要がある。

2. 研究の範囲と達成目標

本プロジェクト研究では、流域スケールでの統合的な水質管理技術の確立を見据え、有機物や栄養塩類を対象とした負荷原単位把握、汚濁現象の解明・モデル化、病原微生物等を対象とした調査方法開発、実態・挙動の解明、対策手法の提案を、雨天時汚濁負荷、微量金属動態等の、従来十分に考慮してこなかった因子も加えてすすめることとし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 各土地利用における物質動態を統合した流域スケールでの水・物質循環モデルの構築
- (2) 流域からの汚濁負荷が閉鎖性水域の水質におよぼす影響の解明と対策手法の提案
- (3) 流域スケールで見た水質リスクの把握と対策技術の提案

3. 個別課題の構成

本プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 流域スケールで見た物質動態特性の把握に関する研究（平成 23～27 年度）
- (2) 土地利用や環境の変化が閉鎖性水域の水質・底質におよぼす影響に関する研究（平成 23～27 年度）
- (3) 水環境中における病原微生物の対策技術の構築に関する研究（平成 23～27 年度）

4. 研究の成果

本プロジェクト研究では、上記の 3 個別課題の検討と並行して、総括課題として、流域における雨天時の物質動態についても課題横断的な検討を行った。以下に、平成 23 年度から 27 年度にかけて実施してきた研究の総括課題および個別課題の成果概要を示す。

4.1 流域における雨天時の物質動態に関する研究

降雨が河川等の水域に流出するまでの道のりは、種々の過程から成っている。森林地であれば、樹木の枝葉などによる遮断と蒸散、森林地表面からの蒸発の現象があり、これらにより土壌面に到達する降水量は減少する。土壌面に到達した降雨の多くは地中に浸透するが、土層に飽和部分が生じると斜面側方への流出（中間流）が起り、流出量が増加する¹⁾。降雨強度が浸透能を越えると、表面流が発生するが、植被された土壌の浸透能は高

く、通常の降雨では裸地以外で地表流はほとんど見られないとされている²⁾。これらの降雨流出は、その滞留時間で区別して扱われることが一般的である。すなわち降雨流出成分のうち、表面流出と中間流出のうちの早い中間流出は直接流出（降雨時流出）として、また遅い中間流出と浸透水のうちの地下水流出は間接流出（晴天時流出）として分類される³⁾。流出水の水質は、この流出経路とそこでの滞留時間、あるいは浸透速度により水質変化が左右されることになる⁴⁾。

一方、市街地における降雨時の流出形態は、森林地とは大きく異なる。市街地では、地表面が建物や道路などの不浸透性の構築物で覆われ、降水の表面流出が卓越する流出形態となる⁵⁾。また市街地流出の場合、大気中の浮遊物質、煤塵・粉塵、各種の塵などだけでなく、道路側溝、雨水ます、都市下水道、分流式下水道雨水管渠などの堆積物の流出（堆積汚濁源）⁶⁾や、合流式下水道の雨天時越流水などの汚濁流出がみられる。さらに、田園地では、施肥や土壌改良材等の投入による汚濁負荷の流出や、農薬の流出などが特徴となる⁷⁾。

降雨時流出における各種の物質動態は、調査自体の困難さなどから挙動の把握が難しいと言われてきた。本章では、過去5年間の研究結果の中から、雨天時の物質動態として、1) 栄養塩類、微量金属等の流出特製の把握、2) 雨天時を含む主として栄養塩類の流出予測モデルの構築、さらに 3) 雨天時の流出負荷が閉鎖性水域に流入した際の湖内水質への影響に関する調査研究の概要を示す。さらに 4) 市街地における雨天時特有の汚濁負荷源である合流式下水道の雨天時越流水における人由来のウイルス等の流出実態に関する研究の概要を示し、これらの結果から、雨天時の流出負荷が水域に与える影響を考察するとともに、雨天時の物質動態に関して、今後検討の必要性が高い課題について記述する。

4.1.1 雨天時における流域からの栄養塩等の流出特性

4.1.1.1 雨天時の栄養塩、微量物質の流出特性

4.1 で述べたように、異なる土地利用では、雨天時の流出形態は大きく異なっており、この流出形態の相違は、流出水の水質や流出負荷量に影響を及ぼす。本研究では、こうした雨天時のさまざまな物質の流出特性を把握するため、印旛沼流域高崎川およびその支川における雨天時流出負荷量調査をもとに、窒素、リン、SS、DOC および各種金属類の流出挙動を調査した。

その結果、各物質の L-Q 式、1 降雨あたりの平均濃度 (Event Mean Concentration: EMC) に関する知見

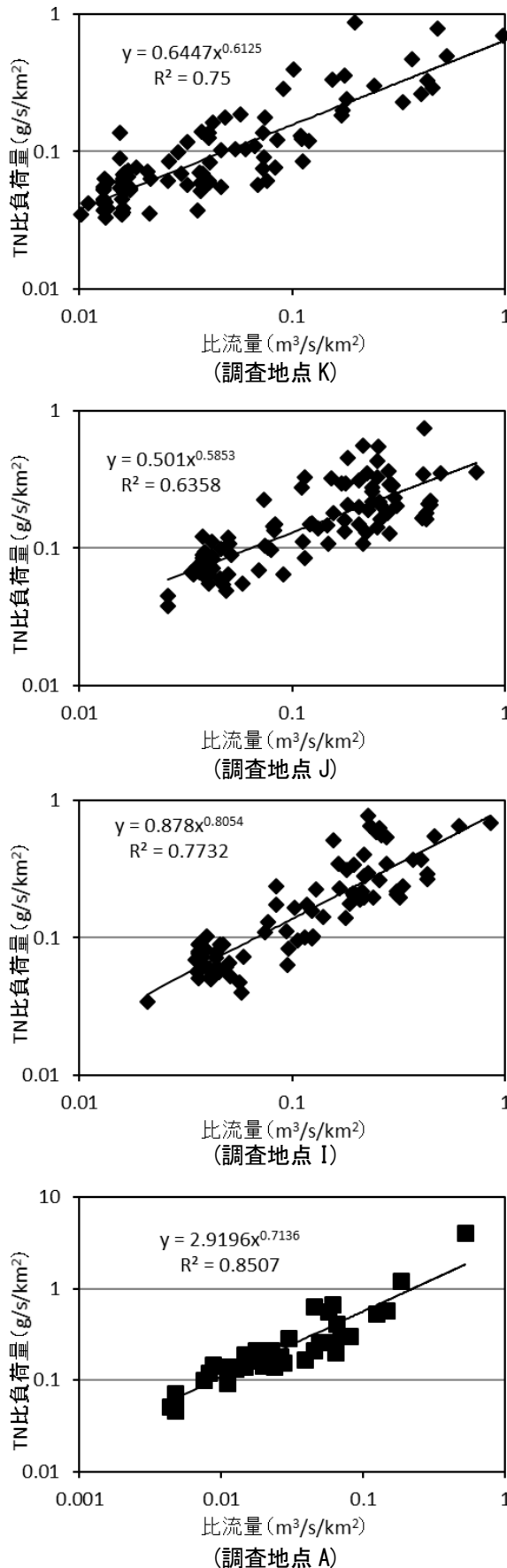


図1 全窒素(T-N)の比負荷量と比流量の関係

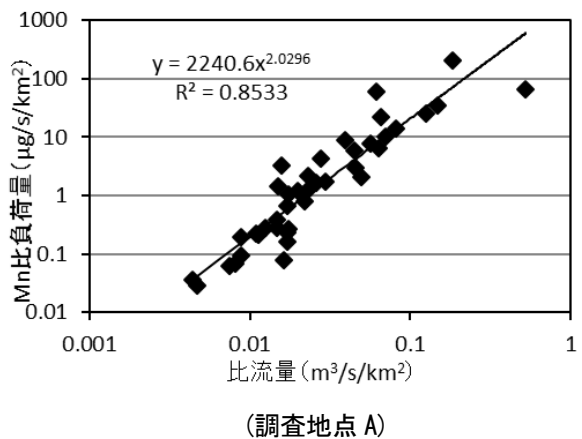
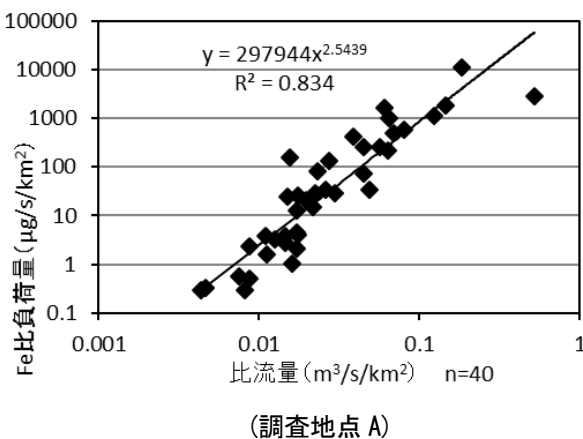
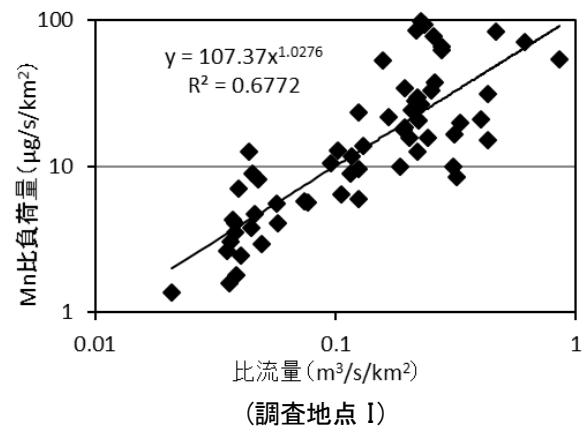
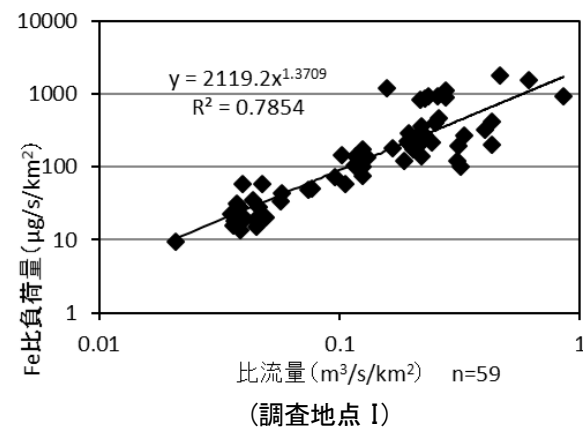
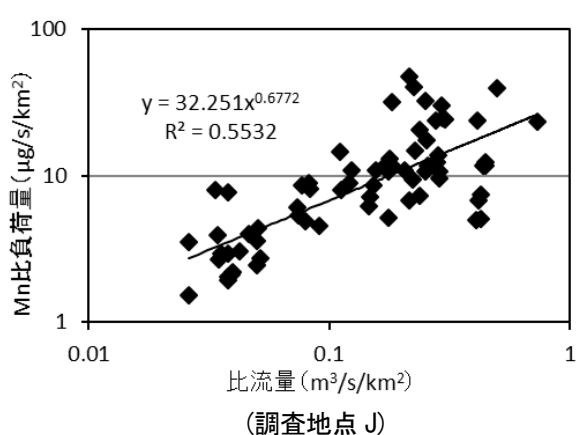
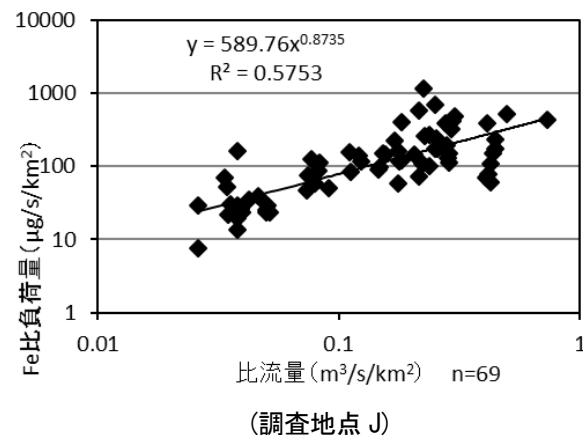
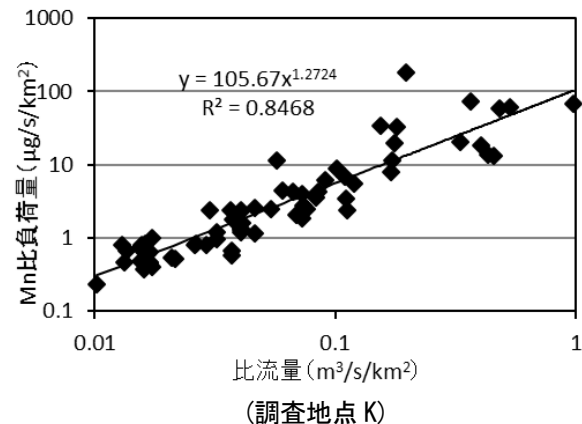
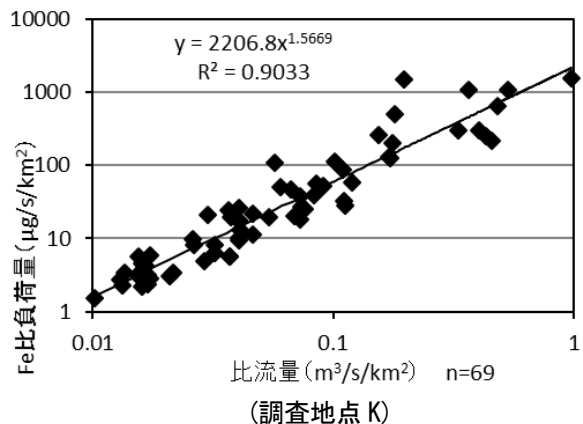


図2 Feの比負荷量と比流量の関係

図3 Mnの比負荷量と比流量の関係

を得るとともに、概ねの土地利用別の特性を把握した。また、流域からの非点源負荷の算定手法の検討を行った。

流域の土地利用の70%以上が市街地である調査地点K、60%以上が市街地である調査地点J、約30%が森林で約50%が市街地である調査地点I、80%以上が畑地である調査地点Aについて、調査結果の一例として、全窒素(TN)、T-Fe、T-Mnの比負荷量と比流量の関係を図1~3に示す。なお、地点Iは、地点Jの下流に位置している。また、Fe、Mnは、4.3.3や個別課題報告にも示すとおり、湖沼等において藻類の増殖に影響を及ぼす可能性が指摘されている微量金属であり、本調査地点のような湖沼流域では、その物質動態の把握は重要である。

TNについては、地点K、Jと地点Aの比較より、市街地より畑地からの流出が大きい結果となっており、既往の知見と同様の傾向であった。降雨の影響の無い基底流量と考えられる状況でも、畑地の多い地点AではTNの比負荷量が市街地の多い地点K、Jよりも高い傾向が見られ、さらに降雨量が多く比流量が高い状況では地点K、Jの数倍の比負荷量の流出が観測されている。一方、地点Iと地点J、Kの比較より、市街地と森林では、流出負荷量に大きな差は見られないと考えられた。

Fe、Mnなどの微量金属については、雨天時の流出挙動に関する既往の知見は限られているが、今回の調査結果で雨天時の流出特性に関する知見を得ることができた。地点K、Jと地点Aとの比較より、T-Fe及びT-Mnについても市街地よりも畑地が大きな供給源となっていることがうかがえる。また地点Jと地点Iの比較より、森林も市街地よりも多くのFe、Mnを供給していることが推測された。

降水の流出先河川や、閉鎖性水域の水質予測等の際に、流域からの雨天時を含む総流出負荷量を的確に把握することが重要である。林地や田畑、市街地等からの非点源汚濁負荷の予測手法として、従来から用いられている原単位法では、原単位算定の際の降雨時調査をどの程度行うかが精度に大きく影響するとされ、降雨時調査が不十分であれば負荷量算定は過小評価になることが知られている⁸⁾。そこで本研究では、晴天時、雨天時調査により得られた栄養塩のEMC(Event Meaning Concentration)により、雨天時の流出負荷を含む年間総流出負荷量の算定を試みた。

EMCとは、一降雨イベントにおける総流出負荷量を総流出水量で除した平均濃度であり、実態の流出現象を把握しやすいとの知見がある⁹⁾。流域の土地利用の70%以上が市街地である調査地点Kにおける窒素・りん等のEMCと、総雨量・時間最大雨量との間には一定の相関が認められた。また、同じ地点Kにおける総雨量と総流出水量との間にも一定の相関が認められた。それらの近似式を用いて、総雨量からEMCと総流出水量を求め、これらを乗じて1降雨での流出負荷量が求められる。これを1年分(平成23~27年の五か年の雨量データを用い、平均)積算し、雨天時の年間総負荷量とし、降雨の影響のない時間帯の調査結果をもとに、晴天時の年間流出負荷量を求めた。これらの結果のうち、窒素に関して図4に示す。なお、雨天時に含まれない時間の割合、すなわち、晴天時の時間の割合は88%であった。併記している原単位法では、湖沼水質保全計画印旛沼第6期の原単位等を用い算出した。

原単位法に比べ、EMC等による推定値が大きくなった。原単位法では、市街地からの面源汚濁負荷が8割を占めており、市街地の原単位は、総雨量17mm以下、なおかつ、最大時間雨量4mm/hr以下の3降雨7地点の現地調査によっている。EMC等による推定値には、総雨量150mm以上、なおかつ、最大時間雨量20mm/hr程度の雨天時調査結果も反映されている。調査時の最大時間雨量または平均降雨強度が大きいほど、実測調査から求めた原単位の値が大きくなるとの知見もあることから、この原単位法では雨天時負荷が十分に算定されず、非点源汚濁負荷が低く見積もられている可能性が考えられた。

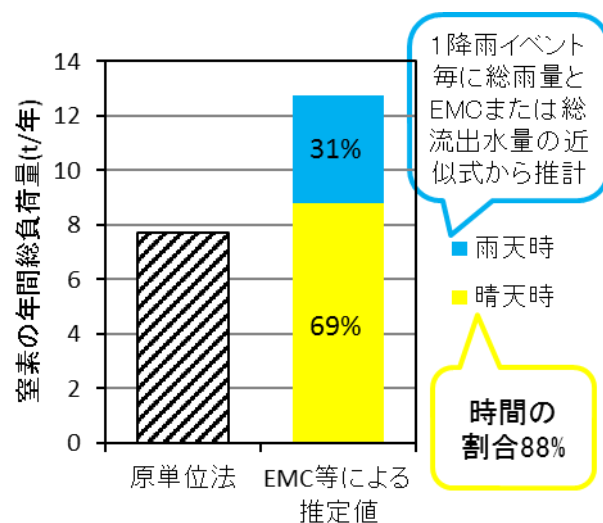


図4 窒素の年間総負荷量
(印旛沼高崎川流域・市街地の例)

4.1.1.2 雨天時を含む流出予測モデルの構築

印旛沼高崎川流域を対象に、畜産由来、都市由来、森林由来の汚染負荷流出サブモデルを検討し、WEP (Water and Energy Process) モデルに実装した。当該小流域で観測した雨量データを使ってサブモデルの適用性を検証した。その結果、計算値は、観測値に比べて大きめに算出される傾向がみられたが、比較的よい相関関係が得られた (図 5)。次に、畑地の 80%が市街地・宅地あるいは山林に土地利用変化をしたと仮定し、土地利用変化による影響評価への適用可能性を検討した。その結果、都市化が進むと、年間 TN 流出負荷量の増加傾向がみられた (図 6)。しかしながら、原単位や観測結果から考察すると年間 TN 負荷量の減少が推測された。この点については、引き続き検証を行うことにより、流量と TN 流出負荷量との関係をより明確にし、それを踏まえてパラメータの調整等を行う必要がある。

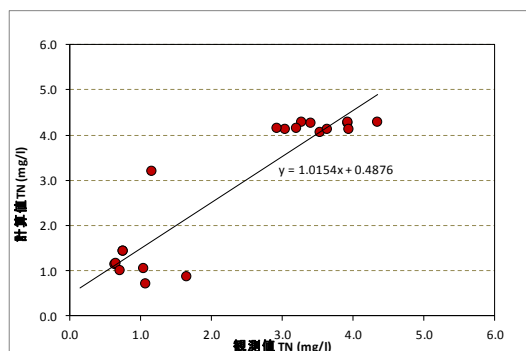


図 5 小流域における TN の観測値と計算値との関係

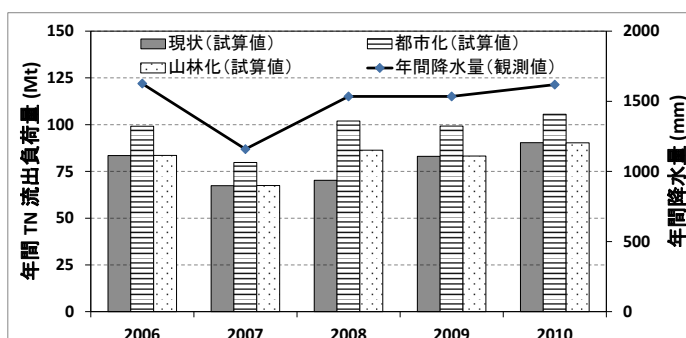


図 6 年間 TN 流出負荷量の変化 (試算)

4.1.2 雨天時の気象・水象・流入負荷による湖内挙動

霞ヶ浦を対象に、雨天時の流域からの負荷が湖内の水質に与える影響を把握するため、台風による出水前後の底質を用いた溶出試験および微生物群集解析を実施した。本実験に供した底質は霞ヶ浦西浦湖心(St.1)、掛馬沖(St.2)、土浦港沖約 1km 地点(St.3)にて採取した。採取は平成 26 年 9 月 (台風通過前)と 10 月 (通過後)の計 2 回行った。採取後の試料は、嫌気条件 (DO: 1.0 mg/L 以下) および好気条件 (DO: 8.0 mg/L 程度) で、20 日間 30°C 暗所で溶出試験を行った。微生物群集解析は、溶出試験後の底質表層 (0-5 cm) および底質底層 (20-25 cm) から、DNA を抽出し、16S rRNA 遺伝子の V3-V4 領域を対象にシーケンス解析を行った。図 7 に溶出試験時の NH_4^+ および NO_3^- の溶出速度を示す。台風通過後の底質を用い、嫌気条件下で試験した場合、それぞれの地点で NH_4^+ の溶出速度が増加しており、流入河川である桜川河口に最も近い St.3 で最大であった。また、台風通過後の St.3 では、一般的には好気条件下でほとんど溶出しない NH_4^+ が溶出し、溶出してはくはずの NO_3^- が溶出されなかった。これは、台風による出水や底質の巻き上げがアンモニア酸化細菌 (AOB) や亜硝酸酸化細菌 (NOB) の活性に影響を与えた可能性が考えられる。一方、シーケンス解析でそれぞれの試料から得られた菌叢構造を基に、サンプル間の類似度を算出し、2 次元プロットした結果、霞ヶ浦の底質中に存在する菌叢は、St.3 では、他の地点と大きく傾向が異なっていた。(図 8)。St.3 では、底質表層と底質底層で菌叢構造に顕著な違いはなく、むしろ、台風通過前後で異なる傾向があった。さらに、AOB に注目すると、St.2 では、底質表層では *Nitrosococcus* sp. が、底質底層では *Nitrosovibrio* sp. が優占しており、深さ方向で住み分けが確認されたのに対し、St.3 では、そのようなことは確認されず、底質の攪乱があったことを裏付ける結果となった。また、NOB が属する *Nitrospira* sp. の底質表層での検出割合に着目すると、St.3 では 0.9% と St.1 (2.4%) や St.2 (2.6%) と比べ、低かった。これらのことから、St.3 における硝化ポテンシャルは、他の地点よりも低かった可能性が考えられる。通常の降雨では底層環境に影響は与えないと考えられるが、大型の台風のような一度に大量の河川水が流入する場合、流入河川水に含まれる濁質成分が底質を攪乱させ、硝化ポテンシャルを低下させる可能性が考えられる。今後、直接浄化施設等を活用した湖沼への濁質負荷低減対策を検討する必要がある。

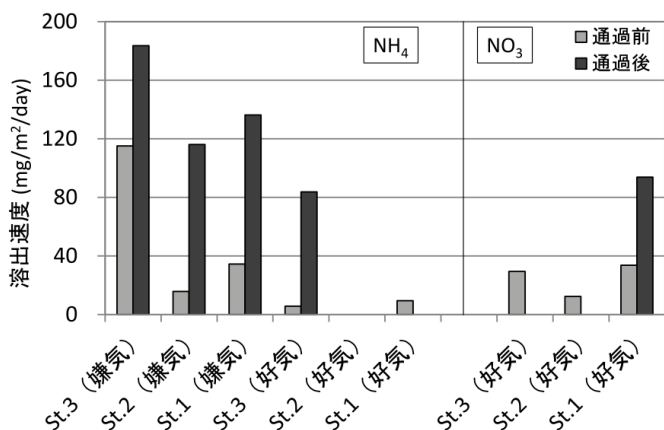


図7 霞ヶ浦におけるNH₄⁺およびNO₃⁻溶出速度

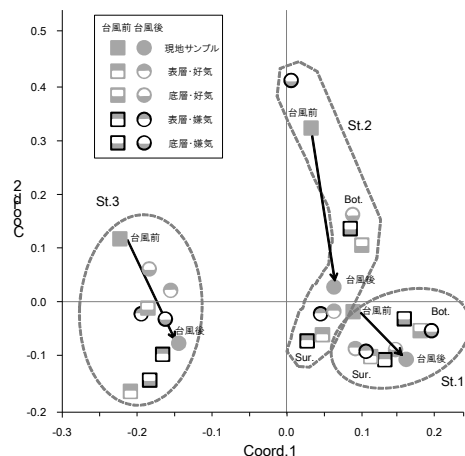


図8 菌叢構造のサンプル間比較

4.1.3 ヒト由来ウイルス、栄養塩の河川における雨天時の挙動

ノロウイルス (NV) を指標として、雨天時の遮集倍率向上にともなう合流式下水道の雨天時越流水 (CSO) の有無が放流先へ及ぼす影響を明らかにした。調査対象とした A 市では、合流式下水道区域にあるポンプ場施設に滞水池を設置している。降雨時における流入下水の増加により下水処理場にて受け入れが困難となる状況が想定される場合に滞水池で一時貯留を行うが、滞水池が満水に至ることで CSO として B 河川へ放流される。近年では下水処理場の施設拡張にともない処理能力が増強され、雨天時の遮集倍率を向上させたことで、CSO の影響が改善されている。時間最大降雨量は約 11mm、累積雨量が 32mm における調査結果を図 9 に示す。比較対象として晴天時 (1、2 月) の B 河川水の値を示す。降雨直前の流入下水の NV 濃度は 10⁹copies/L のオーダーであり、冬季の感染性胃腸炎の流行状況を反映したものと考えられた。越流後は、時間経過にともない、雨水による希釈によって流入下水、越流水ともに NV 濃度の低下傾向が見られた。一方、B 河川水 (越流水放流口から約 400m 下流) の NV 濃度は、晴天時試料を含め、越流開始前には 10⁵~10⁶copies/L 程度で推移していたが、越流後は一時的に最大検出濃度で 10⁷copies/L オーダーに上昇しており、CSO は公共用水域に対する NV 汚濁負荷源として考慮する必要があると考えられた。次いで、下水処理場の施設拡張によって処理能力が増強されたことで、雨天時の遮集倍率向上にともなう越流水の影響が無い状況における調査結果を図 10 に示す。時間最大降雨量は 5.0mm、累積雨量が 22.5mm における降雨当初の流入下水の NV 濃度は 10⁸copies/L 程度であったが、時間の経過とともに雨水による希釈により濃度低下が見られた。CSO の影響が無い B 河川水の NV 濃度は降雨初期において 10⁴copies/L のオーダーであったが、その後多くの試料が検出限界値以下で推移しており、処理能力を増強し、越流状況を改善することにより放流先河川への影響が小さくなることが明らかとなった。今後の課題として、放流先の下流域を含めた流域全体での消長評価が必要である。

一方で、CSO が流入する C 河川のポンプ場上流 700 m 地点 (St.1) およびポンプ場下流 100 m 地点 (St.2) の河川水について、栄養塩負荷の比較を行った結果を図 11 に示す。なお、C 河川の流量に対する越流水の寄与率 (越流期間中の最大値) は、調査日①では 12.7%、調査日②では 1.2%と推測された。雨天時の St.1 の栄養塩負荷と、CSO による栄養塩負荷の追加が考えられる St.2 についての負荷量を比較したところ、調査日①では越流期間中に St.1 より St.2 の負荷量が上回った。一方で、調査②では越流期間中に St.1 より St.2 の負荷量が上回る結果となった。越流水の寄与率は調査日①より調査日②の方が低いにもかかわらず、調査日②では St.1 から St.2 にかけて栄養塩負荷が大きくなっているため、調査日②では一定の CSO による影響が考えられた。

雨天時の流入下水、越流水、河川水から得られた NV 濃度と SS の関係をまとめると、相関関係が見られた (図 12)。同様に、C 河川の St.1、St.2 における河川水について、TN、TP 濃度と SS の間には相関関係が見られた (図 13)。なお、濁度と SS には一般的に相関があり、現地測定が可能な濁度も指標とし得ると推定される。栄養塩やヒト由来ウイルス等の河川における雨天時の挙動を把握する上で、流量、SS (濁度) を指標とすることで負荷量の実態把握が簡易に行える可能性があるものと考えられた。

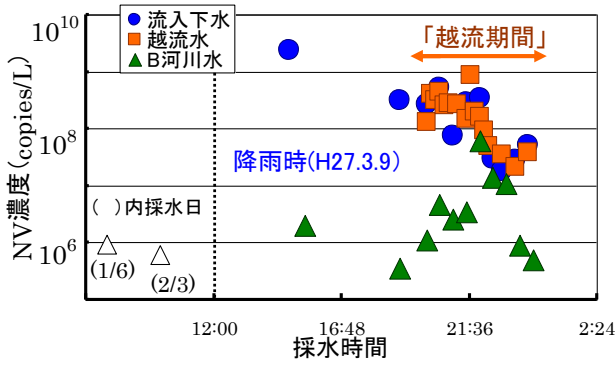


図9 越流水の放流先への影響評価

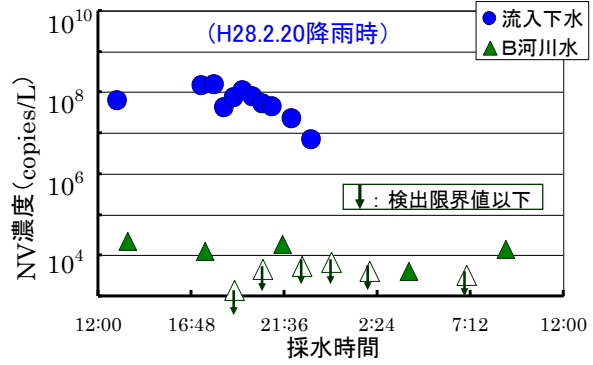


図10 越流水の放流先への影響評価
(遮集倍率向上)

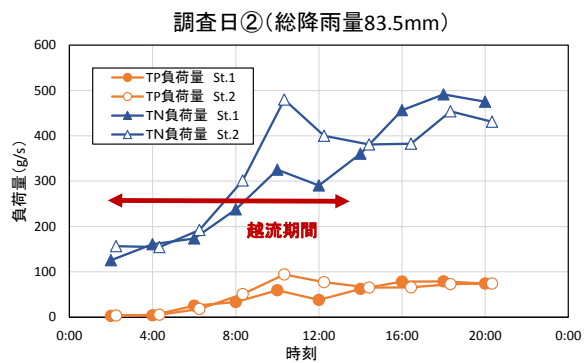
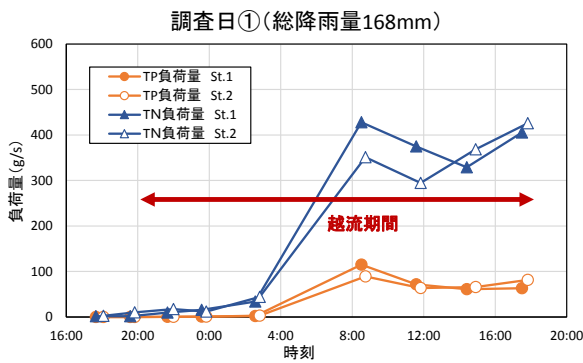


図11 越流水の放流前後の栄養塩負荷量

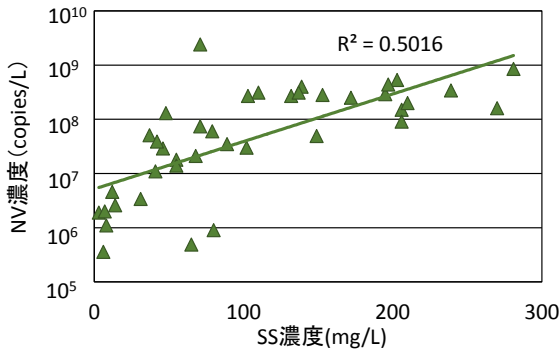


図12 SSとNV濃度の関係
(流入下水、越流水、河川水について)

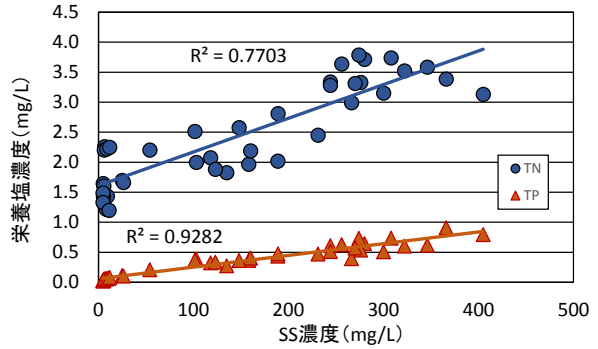


図13 SSと栄養塩濃度の関係
(河川水について)

4.1.4 まとめ (全体)

本プロジェクト研究の3つの個別課題と並行して、総括課題として、流域における雨天時の物質動態に関して課題横断的な検討を行った。まず、雨天時の物質動態把握の基礎となる継続的な調査を、印旛沼流域高崎川を中心に行った。調査結果より、雨天時の濁質、栄養塩類、微量金属類の流出特性を把握し、土地利用との関係についても分析、考察した。この中で、降雨時のEMC(Event Meaning Concentration)データと、降水量-流量の関係に基づく年間流出負荷量の算定を試み、原単位法の算定負荷量との比較検証を行った。今後、土地利用(市街地、森林等)別のEMC情報を集積していけば、比較的簡易に雨天時流出も含めて、年間総流出負荷量を一定の精度で算定できる可能性がある。

ここで得た雨天時調査データを基に、土木研究所で開発してきた流域水・物質循環モデルである WEP (Water and Energy Process) モデルにおいて、土砂動態(SS)モデルを導入したサブモデル構築し、懸濁物質の影響も考慮しつつ窒素、リンの雨天時流出予測への適用を試みた。引き続き精度向上のための検証が課題ではあるが、雨天時を含む流出負荷量予測に有用なツールとして、モデルの機能向上を図ることが出来た。

雨天時の流出物質が水域に流入した場合の影響については調査そのものが困難であり、既往研究も少ない。本研究では、特に栄養塩類の閉鎖性水域への流入後の挙動に着目し、特に沈降、堆積した底質への影響、挙動に関する実態把握を試みた。微生物群集解析(シーケンス解析)の手法も活用しながら、底質の微生物の役割も含めた底質の挙動解明に向けた調査を行っており、今後、こうした手法の現場への適用も図っていききたい。

雨天時には、晴天時には見られない汚濁負荷源が発生することがあるが、その代表例として合流式下水道の雨天時越流水(Combined Sewer Overflows; CSOs)がある。こうした影響が顕著な水域では、人のし尿等由来の病原微生物の流出が晴天時に比べて顕著に増加することがある。本研究ではノロウイルスを対象に雨天時の水域への流出実態を把握するとともに、その改善対策(現行では、有機物の汚濁負荷軽減を対象に設計・施工されている)のウイルスに対する効果等についても調査した。

雨天時のサンプリング調査は、実施のタイミングも難しく、豪雨時などは危険も伴う。連続的な現地計測が可能な水質項目から、本研究で着目した水質項目の濃度や負荷量が推計可能であれば、調査の省力化にもつながり実務上の効果は大きい。本研究では、雨天時の濁度と栄養塩類、ウイルス等などの関係にも着目して、雨天時負荷量把握の省力化についても検討をしている。

総括課題の研究で得られた成果のポイントを以下に示す。

- 雨天時における流出負荷量調査により、全窒素は市街地より畑地からの流出が大きく、Fe 及び Mn も市街地よりも畑地が大きな供給源となっていることなどの概ねの土地利用別の特性を把握するとともに、雨天時の流出挙動に関する既往の知見が限られている Fe、Mn などの微量金属の流出特性に関する知見を得た。
- EMC(Event Meaning Concentration)降雨データによる雨天時の年間流出負荷量の算定法を構築し、原単位法による負荷量推定との比較を行った結果、原単位法では雨天時負荷が十分に算定されず、非点源汚濁負荷が低く見積もられる可能性が見いだされた。
- 畜産由来、都市由来、森林由来の汚染負荷流出サブモデルを検討し、WEP (Water and Energy Process) モデルに実装した。今後の課題として、さらなるモデルの精度向上、SS モデルの改良、BOD や TOC の有機汚濁モデルの構築(機能拡張)、地質や地形条件の異なる他流域への適用検証(一般化の検討)を進めていく必要がある。
- 雨天時における河川流量の増加に伴い、閉鎖性水域に流入する濁質などの浮遊成分、窒素やリンなど栄養塩類が増加する。特に、河口付近では、雨天後、底泥からのリンの溶出が増大する現象が観察された。窒素については、増加するものの、雨天時の流入水の増加以外に、強風による底泥の巻き上げによる影響が大きいことが、微生物菌叢解析の結果からも推定された。今後は、底質表面における境界環境の変化(DO、ORP、NO₃-N)が底質からの栄養塩溶出に与える影響を検討し、湖沼水質を制御することで、底質からの溶出を抑制するような管理方法を提案していく。
- 越流水対策として下水処理場において雨天時流入下水の受け入れ量を増加させ、越流状況を改善することで、放流先河川へのノロウイルスの影響が小さくなることが明らかとなった。今後の課題として、放流先の下流域を含めた流域全体での消長評価が必要である。
- 栄養塩やヒト由来ウイルスの河川における汚濁負荷を把握する上で、流量、SS(濁度)を指標とすることで負荷量の実態把握が簡易に行える可能性があるものと考えられた。

4.2 個別研究の概要

4.2.1 流域スケールで見た物質動態特性の把握に関する研究 ①

印旛沼高崎川流域を対象に、家畜排せつ物法の適用前後での流域の家畜の状況を調査し、畜産由来の汚濁負荷 (N, P)、都市由来、森林由来の汚染負荷 (N, P, SS) の流出サブモデルを検討し、WEP (Water and Energy Process) モデルに実装した。そして、雨天時に、当流域の都市化が進んだ小流域や森林が比較的多い小流域 (農地以外の面積が卓越する流域) で得られた観測データを使って WEP サブモデル (N,P,SS) の適用性を検証した。その結果、計算値が観測値より大きくなる傾向がみられたが、SS を除き、ある程度再現性のあることが確認された。さらに、2006 年から 2010 年の 5 年間の降雨、流量データを使い、現在、高崎川流域面積の 33.4% を占める畑の 80% を市街地・宅地あるいは山林に変化させた場合の、年間の流量や TN 流出負荷量を試算した。その結果、畑を市街地・宅地に変化させると、年間の流量や NT 流出負荷量が増加する傾向がみられた。しかしながら、当該小流域の観測結果から、市街化・宅地の占める割合が比較的多い小流域は、畑の占める割合が比較的多い小流域に比べて TN 比負荷量(g/s/km²)が少ないといった知見が得られている。このことから、さらなる検証が必要である。

4.2.2 流域スケールで見た物質動態特性の把握に関する研究 ②

霞ヶ浦と印旛沼流域での流入河川の窒素、リン、微量金属濃度と土地利用の関係を検討するとともに、窒素・酸素安定同位体比により栄養塩類の流出機構を調査し、雨天時の窒素負荷源の寄与率を推定した。また、長期にわたる雨天時調査を継続し、栄養塩等の流出負荷量 (L-Q 式) のデータを収集するとともに、市街地を中心に雨天時の平均流出濃度 (EMC) の傾向について検討した。

その結果、霞ヶ浦と印旛沼流域での栄養塩類と土地利用の関係の検討では、晴天時及び雨天時の溶存態・粒子態の金属の流出特性を把握した。窒素・酸素安定同位体比解析により栄養塩類の流出機構を調査し、高崎川 (印旛沼流域) における雨天時の窒素負荷源の寄与率を推定した結果、高崎川上流部および市街地では、晴天時は畑地由来の窒素負荷が高く、降雨時は水田や森林由来の窒素負荷が増加すること等明らかにすることができた。雨天時の平均流出濃度 (EMC) を用い、雨天時の市街地からの栄養塩の年間流出負荷量の推計手法を提案するとともに、晴天時/雨天時それぞれの栄養塩の流出負荷の寄与率を解明した。

4.2.3 土地利用や環境の変化が閉鎖性水域の水質・底質におよぼす影響に関する研究

栄養塩類濃度の変化が底泥からの溶出に与える影響、環境の変化が水質・底質におよぼす影響、閉鎖性水域の水質変化予測手法、水質汚濁対策手法の水質改善に対する寄与について検討を行い以下の結果を得た。

- ・霞ヶ浦において浚渫実施区域と未実施区域についての底泥の溶出試験を行い、浚渫実施区域の底質を用いた溶出試験では、他の区域と比べ、栄養塩溶出速度が小さいことを確認した。
- ・近年のアオコ発生前後の気象・水象データから藻類増殖要因を検討して藻類増殖を助長しうる要因を抽出し、さらに自動観測所データをもとにアオコ発生期の簡易予測手法を提示した。
- ・台風による出水前後の底質の溶出試験より、NH₄-N 溶出速度は台風通過後に大幅に上昇し、PO₄-P 溶出速度は減少した。また、底泥の地点別、深度別の細菌群集が栄養塩類の溶出に与える影響を把握した。
- ・霞ヶ浦の自動観測所データより、大雨時・強風時の水質の応答特性を分析し、沿岸部を除けば大雨による流入よりも強風による巻き上がりの水質影響が卓越することを明らかにした。
- ・湖沼等の藻類増殖と栄養塩・微量金属との関連性について、藻類生長試験により評価した。
- ・藻類の増殖速度への微量金属(Fe, Mn)の役割と実際の湖沼やダム貯水池等での挙動を解明した。
- ・底質からの栄養塩溶出に寄与する要因を整理し、閉鎖性水域の水質変化予測手法を提案した。

4.2.4 水環境中における病原微生物の対策技術の構築に関する研究

下水や環境水における新興・再興感染症としての病原微生物である原虫類、ウイルス、薬剤耐性菌の実態解明では、公共用水域に対するノロウイルス (NV)、原虫類の負荷源の 1 つとして、浄化槽排水の存在を明らかにした。下水、河川水、下水道へ排出される病院排水での抗生物質耐性大腸菌に関しては、カルバペネム系のイミペネム

に耐性を示した大腸菌は、現在のところ不検出であることを明らかにした。

リアルタイム RT-PCR 法による NV の定量にあたり、試料中の阻害物質や試薬反応量の影響を明らかにした。それらの影響回避として、抽出 RNA の逆転写工程および PCR 反応容量に対する供試水量をコントロールする手法の改良により、NV 検出濃度の向上方策を提案した。

生物学的高度処理法による除去率向上要因の解明では、活性汚泥生物相などと NV 除去率の関係を把握し、被災下水処理場の復旧において、活性汚泥処理の初期水質管理の重要性を提案した。また、被災下水処理場の段階的な対策技術の導入にあたり、放流水の病原微生物の実態調査から適切な水質管理手法を示せた。

適正な流域管理のための非点源負荷と対策技術の構築では、合流式下水道の雨天時越流水対策技術として、遮集倍率向上による放流先河川への NV 負荷の低減効果や、雨天時活性汚泥処理による NV 負荷の削減効果を評価し、効果的な負荷削減方策を提案した。

水環境保全システムとしての適切な対策技術の構築として、抗生物質耐性大腸菌を用いて塩素、紫外線による不活化特性を解明した。塩素消毒では Ct 値（添加塩素量）を高めることで、抗生物質耐性大腸菌の割合が上昇し、耐性を有さない菌の割合は減少した。紫外線消毒においては抗生物質耐性大腸菌の不活化のための適切な消毒条件を提案した。抗生物質耐性大腸菌の耐性遺伝子は垂直伝播していると考えられたことから、下水処理場などにおいて適切な消毒管理の必要性を明らかにした。

参考文献

- 1) 丹保憲仁、丸山俊朗：水文大循環と地域水代謝、pp. 51-53、技報堂出版、2003
- 2) 日野幹雄、長谷川正彦：水文流出解析-FORTRAN と BASIC による、p.20、森北出版、1985
- 3) 日本水質汚濁研究協会編：湖沼環境調査指針、pp. 58-59、1982
- 4) 海老瀬潜一：水質流出解析、p.3、技報堂出版、2014
- 5) 同上、p35
- 6) 和田安彦：ノンポイント負荷の制御～都市の雨水流出と負荷制御法～、pp.19-20、技報堂出版、1994
- 7) 海老瀬潜一：水質流出解析、p25、技報堂出版、2014
- 8) (社)日本水環境学会：非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究、p158、平成 23 年度環境省環境研究総合推進費成果報告書(RFb-11T1)、2012
- 9) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部：流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説、pp.74-76、2015

RUNOFF-MECHANISMS OF MATERIAL AND MANAGEMENT METHOD FOR WATER QUALITY ON BASIN SCALE

Research Period : FY2011-2015

Project Leader : Director of Water Environment Research Group
SHIGERU Ikeda

Research Group : Water-related Hazard Research Group
Water Environment Research Group (Water Quality)
Material and Resources Research Group

Abstract : The water quality improvement of closed water body is not advanced enough. In order to prevent outbreaks of infectious diseases caused by microbes contained in water bodies, it is necessary to ensure that the natural water is safe with respect to microbes. This project carries out the elucidation of runoff characteristics of nutrient in terms of rainfall-runoff and land use, development of watershed runoff model, development of measurement methods and countermeasures for microbes, and the elucidation of occurrence and behavior of them.

Key words : nutrient dynamics, watershed model, closed water body, land use, microbes