

多摩川流域における水中微細マイクロプラスチック存在調査と  
シミュレーションモデルを用いた流域内挙動解析

2021年

亀田 豊

## 目次

1. 研究の背景 .....	1
2. 調査概要及び分析方法 .....	3
2.1. 調査概要 .....	3
2.1.1. 晴天時における上流から下流における多摩川 水中マイクロプラスチック調査 .....	3
2.1.2. 晴天時における潮汐による河川水中マイクロプラスチック濃度影響調査 .....	5
2.1.3. 降雨による河川水中マイクロプラスチック濃度変化調査 .....	6
2.2. マイクロプラスチック分析方法 .....	7
2.2.1. 前処理方法 .....	7
2.2.2. 顕微 FTIR による同定及び定量方法 .....	7
2.3. その他の水質分析方法 .....	9
2.4. 検出されたポリマー別マイクロプラスチック濃度データを用いた主成分分析 .....	9
2.5. シミュレーションによる下水処理水由来のマイクロプラスチック濃度推定 .....	9
2.6. 多摩川河川水中マイクロプラスチック情報ウェブページ作成 .....	11
3. 結果及び考察 .....	12
3.1. 晴天時における上流から下流における多摩川水中マイクロプラスチック調査 .....	12
3.2. 晴天時における潮汐による河川水中マイクロプラスチック濃度影響調査 .....	14
3.3. 降雨による河川水中マイクロプラスチック濃度変化調査.....	16
3.4. シミュレーションによる下水処理水由来のマイクロプラスチック濃度推定 .....	23
3.5. 多摩川河川水中マイクロプラスチック情報ウェブページの公開 .....	27
4. まとめと今後の展望（成果発表等含む） .....	29
5. 参考文献 .....	31

## 1. 研究の背景

多摩川は流域に 13 の下水処理場が位置しており、多摩川原橋付近地点においては河川流量の 50%が下水処理水であると見積もられている（国土交通省 HP、東京都の下水道事業の概要）。また、流域面積は 1240km<sup>2</sup>と広く、流域の様子も上流部の秋川溪谷に代表される山岳溪谷地域から、中下流部における都市区域、下流部においては人口超過密地区と感潮域と複雑で多種多様となっている。そのため、多摩川には人為活動由来の汚染物質が下水処理水、生活排水及び工場排水を介して流入するほか、雨天時には流域全体から雨天時越流水を介してさまざまな汚染物質が流入する。近年、海洋で大きな社会問題になっているマイクロプラスチック (MPs) も多摩川に流れ込んでいる可能性があり、多摩川の水生生態系に悪影響を及ぼしていることが懸念されるが、本格的な詳細な調査はされていない。唯一、多摩川を含む全国の主要な一級河川の代表地点について、335  $\mu\text{m}$  以上の MPs を調査した結果がある (Kataoka et al., 2019)。この調査はアメリカ海洋大気庁が推奨している、海洋で行われている標準的な調査手法に基づいて実施された。しかし、この調査により河川における調査は調査時の多大な労力と時間の他、MPs 分析の精度管理の特殊さ、長時間の分析と多大な労力が必要であることが明らかとなった。その結果、国内においては河川における MPs の汚染状況調査や環境中挙動調査はごく限られた研究者のみが行う結果となっており、多摩川における MPs の存在特性は未知のままとなっている。

一方で、世界的には国内で行われている約 300  $\mu\text{m}$  程度以上の MPs よりも小さいサイズ的环境中 MPs の存在や挙動について関心が高まっている。事実、20  $\mu\text{m}$  程度以下の MPs をマウスに経口摂取すると、小腸からそれらが吸収され、消化管のみならず、肝臓をはじめとする複数の器官へ移行する研究が報告されている (Deng et al., 2019)。したがって、水生生物への MPs による生態影響やヒトが食物等を介して摂取する MPs の健康影響を評価する場合には、微細な MPs の調査が必要不可欠と考えられる。また、海洋では、微細な MPs の粒子数濃度は 300  $\mu\text{m}$  程度以上の大きな MPs よりもオーダーが異なるレベルで著しく高い可能性が指摘されているほか、質量濃度で評価しても海洋における微細な MPs が占める全重量は 300  $\mu\text{m}$  程度以上の大きな MPs とほぼ同じレベルであるという推測がされている (Poulain et al., 2019)。MPs の資源循環的観点からの挙動解析においては重量濃度がベースになることが多いため、この点からも微細な MPs の調査は無視できない状況となっている。

したがって、今後の MPs 調査は世界や国内で一般的に行われている 300  $\mu\text{m}$ ~5mm の MPs のみならず、数十  $\mu\text{m}$  あるいは 1  $\mu\text{m}$  程度までの MPs を調査する必要がある。しかし、300  $\mu\text{m}$  程度よりも微細な MPs の測定は未だ主流ではなく、一部の研究者が測定できる状況に過ぎない。その原因として、10  $\mu\text{m}$  以上の MPs の定量分析には顕微フーリエ変換赤外分光高度計 (顕微 FTIR)、1~10  $\mu\text{m}$  の MPs には顕微ラマン分光光度計が必須であるためである。そのため、調査方法や分析方法の統一化、精度管理方法の確立、トレーサビリティ管理は今後の課題となっている。

このような段階において、研究代表者は顕微 FTIR を用いた 20  $\mu\text{m}$ ~5mm までの水中 MPs の調査分析手法を確立した (Kameda et al., under review)。この手法を利用して鶴見川において、上流から下流の 5 地点における河川水中 MPs 濃度を調査するとともに、18 種類のポリマー別の濃度やサイズ分布を明らかにした。さらに、プラスチック素材の引張強度と河川水中に存在する MPs のサイズ分布のメディアン径の間に正の相関

があることを報告し、力学的に強度の弱いプラスチックほど微細化していることが推定されている。しかし、鶴見川以外の国内河川において詳細な MPs 調査はいまだに少ない状況である。

これらの状況を鑑み、本研究では多摩川における  $20\mu\text{m}\sim 5\text{mm}$  までの MPs の存在特性を把握した。さらに、感潮域における海水の遡上による MPs 特性への影響を確認するとともに、同地点において降雨による河川水中 MPs 濃度や組成への影響を調査した。また、研究代表者が調査した下水処理場への MPs 流入量調査結果を基に、下水処理水由来の多摩川河川水中 MPs 濃度をシミュレーションソフト（産総研－水系暴露解析モデル（national institute of Advanced Industrial Science and Technology-Standardized Hydrology-based Assessment tool for chemical Exposure Load: 通称 AIST-SHANEL）（AIST-SHANEL HP）により推定し、多摩川河川水中の MPs の発生源寄与について推定を行った。最後に、MPs の国民の関心を深めるため、これらの調査結果や MPs の基礎的情報を学ぶことのできるウェブページを開設した。

## 2. 概要及び分析方法

### 2.1. 調査概要

#### 2.1.1. 晴天時における上流から下流における多摩川水中マイクロプラスチック調査

2020年1月の晴天時に図2.1に示す5地点において河川水中MPs調査を行った。また、図2.2に調査地点の写真を示す。調査地点まで河川水中MPs調査グッズを運んだ後、ノンプラスチック手漕ぎポンプで400～1000Lの河川水をくみ上げ、現場にて10 $\mu$ mメッシュのプランクトンネットでろ過した。濾過終了後、プランクトンネットを木綿の袋に入れ、研究室に持ち帰って分析に供した。

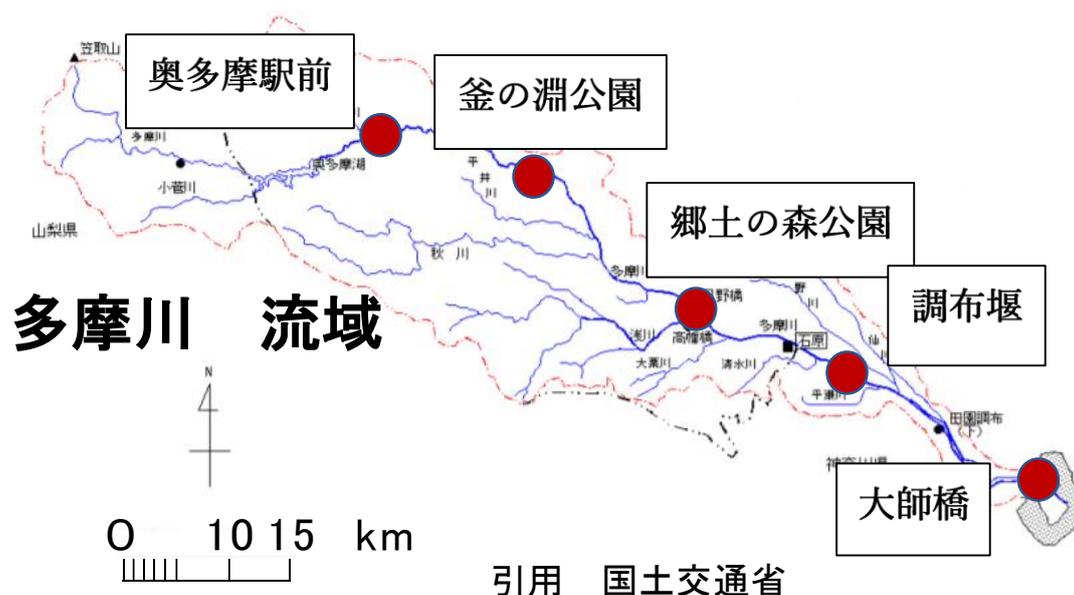


図 2.1 晴天時多摩川調査における調査地点



図 2.2(a) 奥多摩駅前地点の写真と調査器具一式

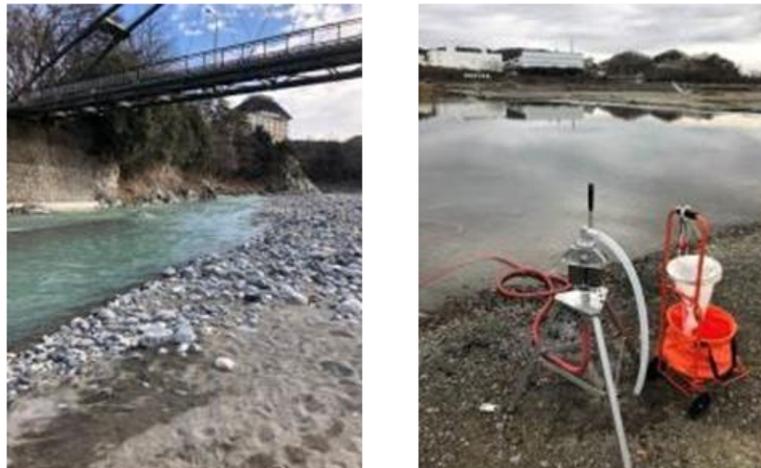


図 2.2(b) 釜の淵公園及び郷土の森公園調査地点（左より）



図 2.2(c) 調布堰及び大師橋調査地点（左より）

## 2.1.2. 晴天時における潮汐による河川水中マイクロプラスチック濃度影響調査

2020年11月21日の晴天時に図2.3に示す丸子橋付近にて河川水中MPs調査を行った。採水は丸子橋下流にて、気象庁の潮位表を基に干潮時二回(3:35及び16:00)、満潮時二回(11:15及び21:00)及び干潮と満潮の間(13:00)に一回MPsを採取した。一方、干潮と満潮の調査は丸子橋の上流でもMPsを採取した。MPs採取は、10Lのローブ付ヤカン二つを用い、水面下5~15cmの表流水を40L採水した。その後、現場にて10 $\mu$ mメッシュのプランクトンネットで表流水をろ過し、ガラス瓶に保存し、研究室へ持ち帰り分析に供した。また、懸濁態濃度(SS)、全有機炭素濃度(TOC)、溶存態有機物濃度(DOC)、全窒素濃度(TN)及び溶存態窒素濃度(DN)測定のため、表流水500mlも採取した。



図 2.3 調布堰における雨天時調査地点

### 2.1.3. 降雨による河川水中マイクロプラスチック濃度変化調査

2020年8月22～23日に多摩川流域で発生した降雨イベントについて、河川水中のMPs濃度や組成の降雨の影響を調査した。調査地点は2.1.2の丸子橋下流地点とした。降雨は8月22日10:00より発生したため、MPs採取は22:32、4:32、7:05、10:09、13:02、16:02、19:10、21:59の計8回行った。MPs採取は、10Lのローブ付ヤカン二つを用い、水面下5～15cmの表流水を11.5L採水した。その後、現場にて10 $\mu$ mメッシュのプランクトンネットで表流水をろ過し、ガラス瓶に保存し、研究室へ持ち帰り分析に供した。また、懸濁態濃度(SS)、全有機炭素濃度(TOC)、溶存態有機物濃度(DOC)、全窒素濃度(TN)及び溶存態窒素濃度(DN)測定のため、表流水500mlも採取した。

## 2.2 マイクロプラスチック分析方法

### 2.2.1 前処理方法

多摩川の調査地点におけるプランクトンネットで回収された懸濁物質は研究室に持ち帰り後、プランクトンネットを水道水で洗いながら懸濁態水溶液として回収した。その後、研究代表者が開発した方法(Kameda et al., under review)により前処理を行った。

研究室にサンプルを持参後、懸濁態水溶液を 5mm のふるいで分画後、さらに 5mm 以下の画分を 5 $\mu$ m メッシュの親水性 PTFE メンブレンでろ過し、懸濁態をメンブレン上に回収した。その後、メンブレンごと 200mL のトールビーカーに移し、30%過酸化水素を 30mL 程度添加し、ガラスの蓋をした状態で 100rpm、70°C で数日間加温攪拌した。過酸化水素による酸化反応がほぼ終了後、100ml に超純水で定容後、100g のヨウ化ナトリウムを静かに加えた。添加後、数分攪拌した後、ガラスの蓋をして 6~9 時間静置した。静置後、専用のスプーンで上澄み液 20mL を回収し、再度 200mL のトールビーカー内の水溶液を攪拌し 6~9 時間静置した。この作業を合計 3 回繰り返す、上澄み液を合計 60ml 回収しプールし、5 $\mu$ m メッシュの親水性 PTFE メンブレンでろ過し、メンブレン上に MPs を回収した。メンブレンは専用の顕微 FTIR 用プレートに張り付けたのち、プレートごとマッフル炉で 50°C で乾燥させた。

### 2.2.2 顕微 FTIR による同定及び定量方法

2.2.1 で処理された顕微 FTIR 用プレート上の MPs は、顕微 FTIR(サーモサイエンティフィック社製、Nicolet iN10 MX)により自動分析された。分析の詳細条件は研究代表者が開発した方法(Kameda et al., under review)に従った。分析条件の概要として、測定は透過法で行い、30 $\mu$ m $\times$ 30 $\mu$ m のアパーチャサイズで 15 $\mu$ m ステップで 5mm $\times$ 5mm の領域の赤外吸収スペクトル(IR スペクトル)を面的に測定した。この測定をメンブレン上の中心部、上端部及び右端部で行うことで、ろ過面積全体の 29.4%の IR スペクトルを測定した。測定後、顕微 FTIR に付属した解析ソフト(OMNIC Software)を使用してメンブレン上の IR スペクトルのコンター図、ケミカルイメージ(図 2.4)を作成した。このケミカルイメージの IR スペクトルデータと表 2.1 に示す 18 種類のプラスチックポリマーのリファレンススペクトルの相関係数によるコンター図を作成することで、18 種類の MPs の抽出を行った。抽出された MPs 粒子や繊維は、OMNICSoftware を用いて検出数、各 MPs の長径短径を測定した。

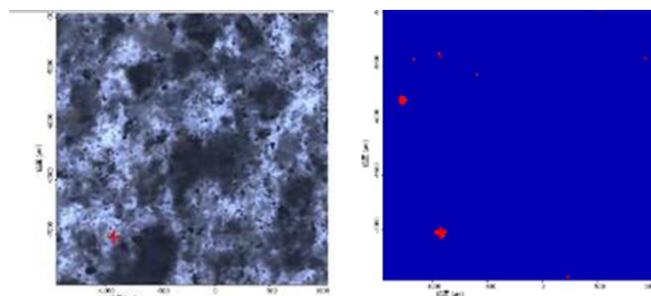


図 2.4 顕微 FTIR によるメンブレン上の MPs の顕微鏡画像(左)とポリエチレンのケミカルイメージ図(右；赤い部分がポリエチレン)

表 2.1 本調査で測定したプラスチック種類(ポリマー)

I. D	ポリマー名	略称
1	アクリロニトリルブタジエンスチレン	ABS
2	アルキド樹脂	Alkyd
3	スチレンアクリロニトリル樹脂	AS
4	エポキシ樹脂	Epoxy
5	ポリアミド(ナイロン)	PA
6	ポリエチレン	PE
7	ポリエチレンテレフタレート (PET)	PET
8	ポリイソプレン	PIP
9	ポリメチルメタクリレート	PMMA
10	ポリプロピレン	PP
11	ポリフェニレンスルフィド	PPS
12	ポリスチレン	PS
13	ポリウレタンフォーム	PU
14	ポリビニルアセテート	PVAc
15	ポリビニルアルコール	PVA1
16	ポリ塩化ビニル	PVC
17	ポリビニルメチルエーテル	PVME
18	スチレンブタジエンゴム	SBR

## 2.3 その他の水質分析方法

2.1.3の雨天時調査における水質分析は以下の通り実施した。SSについては、適量をガラスフィルターでろ過し、ろ過前後の重量差によりSSを計算した。DOC及びDNは試料水をガラスフィルターでろ過後、濾過液を日東精工アナリテック社製TOC-300V及びND-210を用いて分析した。TOC及びTNは採取した河川水を直接前述した分析装置で分析した。

## 2.4 検出されたポリマー別マイクロプラスチック濃度データを用いた主成分分析

2.1.2の感潮域におけるMPs調査及び2.1.3の雨天時調査で得られたMPsのポリマー別濃度を使って、統計解析ソフトJMP15.2による主成分分析を行った。降雨イベント時及び干潮満潮時の河川水中MPsのポリマー別濃度は全体濃度に対する割合に換算後、相関行列を利用して主成分分析を実施した。

## 2.5 シミュレーションによる下水処理水由来のマイクロプラスチック濃度推定

AIST-SHANEL(産総研一水系暴露解析モデル(national institute of Advanced Industrial Science and Technology- Standardized Hydrology-based Assessment tool for chemical Exposure Load))を用いて、下水処理場経由のMPsの多摩川河川水中濃度を推定した。メッシュサイズは250 $\mu$ mメッシュとし、図2.5に示す多摩川流域内の河川を対象として、低水流流量時(年間を通じて275日はこれを下回らない流量)の流量推定値を用いた定常解析条件により、河川水中MPs濃度を推定した。なお、国内における事業所別のMPsの排出量インベントリ情報やノンポイントソースからの排出インベントリに関する信頼性の高い包括的な情報は存在しないため、今回はSHANELにおける下水処理場以外の排出負荷はゼロとした。多摩川流域にある各処理場への年間のMPs流入量データは、関東地方の複数の下水処理場へのMPs流入量調査(亀田ら、2021)の結果を利用した。その結果によると、18種類の合計MPs、アルキド樹脂及びPETの処理場への一日流入量と処理区域人口との間に統計学的に正の相関がありかつ強い直線関係があったことから、これら三種のMPsをシミュレーション推定対象とした。この調査結果である合計MPs下水処理場流入負荷量325000個/人/日、アルキド樹脂流入負荷量52800個/人/日及びPET流入負荷量93600個/人/日を利用して、多摩川水系に存在する各処理場への3種のMPs年間流入量を推定し、SHANELに利用した(表2.2)。一方、下水処理場におけるこれら三種のMPsの除去率は十分詳細に調査されていない。そこで、先の下処理場結果で多摩川流域の一処理場の全MPsの除去率結果99.83%をすべての下水処理場に適用した。また、水圏におけるMPsの分配に大きな影響を与えるパラメータは、表2.3のように設定した。

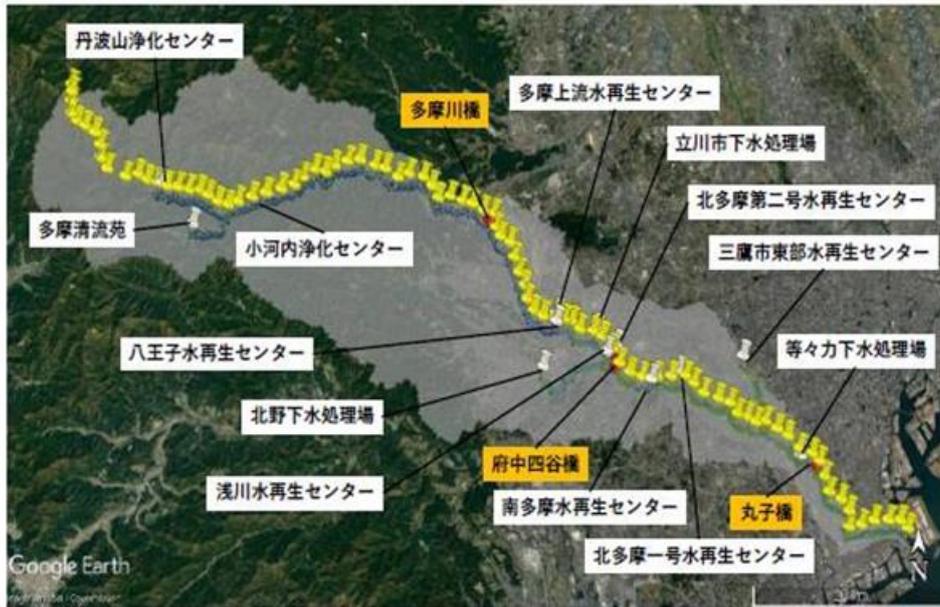


図 2.5 SHANEL で推定した多摩川流域と考慮された下水処理場

表 2.2 SHANEL で使用した各下水処理場の MPs 年間流入量

	年間処理水量(m <sup>3</sup> /年)	処理区域人口(人)	MPs流入量(個/年)		
			TOTAL	Alkyd	PET
等々力水処理センター	183,760	653,712	2.12E+11	6.12E+10	1.26E+13
北多摩一号水再生センター	161,210	509,949	1.66E+11	4.77E+10	9.83E+12
南多摩水再生センター	107,900	375,140	1.22E+11	3.51E+10	7.23E+12
北多摩二号水再生センター	21,720	142,524	4.63E+10	1.33E+10	2.75E+12
立川市錦町下水処理場	43,245	93,396	3.04E+10	8.74E+09	1.80E+12
八王子水再生センター	117,390	398,675	1.30E+11	3.73E+10	7.68E+12
多摩川上流水再生センター	157,270	463,644	1.51E+11	4.34E+10	8.94E+12
小河内浄化センター	139	228	7.41E+07	2.13E+07	4.39E+09
丹波山浄化センター	543	523	1.70E+08	4.90E+07	1.01E+10
多摩清流苑	586	7,440	2.42E+09	6.96E+08	1.43E+11
浅川水再生センター	77,400	255,605	8.31E+10	2.39E+10	4.93E+12
北野下水処理場	40,720	44,058	1.43E+10	4.12E+09	8.49E+11
東部水再生センター	20,516	98,671	3.21E+10	9.24E+09	1.90E+12

表 2.3 SHANEL で使用した MPs の物理化学的特性値

河川底泥孔隙率(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	1.00E+00
蒸気圧(Pa)	1.00E-20
分子量(g/mo.)	1.00E+04
水溶解度(g/m <sup>3</sup> )	1.00E+05
有機炭素水分配係数(m <sup>3</sup> /t)	1.00E-10
有機性炭素含有率(-)	5.00E-01
土壌A層気相半減期(1/h)	0.00E+00
土壌A層液相半減期(1/h)	0.00E+00
土壌A層固相半減期(1/h)	0.00E+00
土壌B層気相半減期(1/h)	0.00E+00
土壌B層液相半減期(1/h)	0.00E+00

## 2.6 多摩川河川水中マイクロプラスチック情報ウェブページ作成

今回の調査結果の公開や多摩川における MPs 情報の広い周知、さらには MPs の基礎的な学習の場の創出のため、<https://www.tamagawa.kamedalab.com/>にウェブページを開設した。ウェブページの基盤は株式会社ピリカに委託した。また、調査結果をわかりやすく表示する地図機能についても株式会社ピリカに委託した。また、小中学生といった環境に関心を持ち始める層へのアピールとして、有名イラストレーター寺田てらさまに依頼し、多摩川の MPs キャラクター、江古田くん(Ecoをもじった)とリサちゃん(Recycleをもじった)を作り、彼らを親しみのあるキャラクターとして登場させた。

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 晴天時における上流から下流における多摩川水中マイクロプラスチック調査

図 3.1 に晴天時における多摩川 5 地点の河川水中 MPs 濃度及びポリマー組成を示す。大師橋 6382 個/m<sup>3</sup>、調布堰 13140 個/m<sup>3</sup>、郷土の森 10683 個/m<sup>3</sup>、釜の淵公園 14130 個/m<sup>3</sup>、奥多摩駅前 6007 個/m<sup>3</sup> という結果となった。この濃度は鶴見川河川水中の濃度調査結果（源流地点で 300 個/m<sup>3</sup>、河口域で 1240 個/m<sup>3</sup>）と比較して 10 倍程度高い。また、代表者の調査結果では下水処理水中の MPs 濃度が約 1000 個/m<sup>3</sup> レベルであることを考慮しても、多摩川河川水中濃度はかなり高いことが明らかとなった。特に、特徴的な結果は奥多摩駅前で高濃度の MPs が検出されたことであった。奥多摩町は人口も 5000 人程度と少なく、緑豊かな山岳地域である。にもかかわらず、高濃度の MPs が検出された理由としては、下水道普及率が約 50% 程度と低いことが一原因と考えられる。しかし、組成面では下水や下水処理水中に多く含まれる衣服由来の PET がほとんど検出されていないことから、必ずしも下水の流入が大きな原因とは考えにくい。そのほかの MPs の由来としては、MPs の主要なポリマーがアルキド樹脂、ポリエチレン及び PMMA であったことから、小さいながらも都市域のノンポイントソースから流入が考えられる。アルキド樹脂は舗装用塗料として使用されている他、ポリエチレンや PMMA も樹脂として塗料等に含まれている。これらのものが風化により降雨イベント等を通じて河川に流入している可能性が考えられる。

流下方向の濃度変化としては下流ほど濃度が増加する傾向が見られ、海水の影響の大きい大師橋付近では海水による希釈と思われる濃度減少が確認された。組成的には、奥多摩駅前及び釜の淵公園付近まではアルキド樹脂、ポリエチレン及び PMMA が全体の MPs の 90% 近くを占めているのに対し、下流域ではポリプロピレンやポリイソプレンさらには AS 樹脂の寄与も大きくなった。ポリイソプレンは合成ゴムであり、特に自動車タイヤに利用されており、海外の河川でも河口域の底質中に検出されている (Leads, et al., 2019)。AS 樹脂に関しては様々な家庭用品に使用されており、逆に海洋や河川下流域で特に利用されているという情報はないので、特徴的な結果ではない可能性がある。

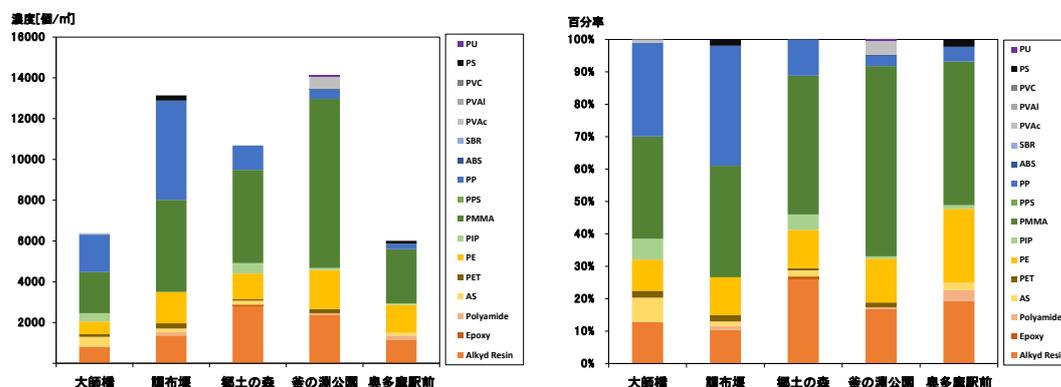


図 3.1 多摩川本川 5 地点における河川水中 MPs 濃度及び組成

また、図 3.2 に多摩川 5 地点における MPs のサイズ分布を示す。いずれの地点においても、メディアン径は約 40  $\mu$ m ととても小さく、通常の河川調査で行われる 330  $\mu$ m

以上の MPs の占める割合は、最も高い釜の淵公園地点でも 2.2%であった。この結果は鶴見川の結果とほぼ同様であった (Kameda et al., under review)。このことから、河川水中の MPs の濃度やその組成を含む環境中挙動の解明や水生生物への生態リスク評価のためには、従来の調査手法よりも微細な MPs も加えて調査する重要性が示唆された。

一方、上流部である奥多摩駅前、釜の淵公園及び郷土の森はいずれもミディアン径が  $38\mu\text{m}$  だったが、奥多摩駅前よりも下流の 2 地点のほうがサイズ分布がより均一に小さい方向にシフトしていることがわかる。さらに、調布堰及び大師橋の下流に地点はこれら上流三地点よりもミディアン径が  $43\mu\text{m}$  と若干大きく、サイズ分布全体も大きめにシフトしていることがわかる。このような下流に向けてミディアン径等、サイズ分布が大きくなる傾向は鶴見川でも観察された (Kameda et al., under review)。一般に MPs は河川の流下に従い、より微小化する可能性は考えられるが、河口域における局所的な凝集を除けば、凝集等を含めたサイズの増加は考えにくい。また、下水や下水処理水中の MPs のサイズ分布は鶴見川の河川水中 MPs のそれよりも小さく、ミディアン径では  $39\sim 42\mu\text{m}$ 、D90 は  $68\sim 72\mu\text{m}$  であった (Kameda et al., under review)。以上のことから、多摩川河川水中の MPs のサイズは下流に向かうにつれ、下水処理水よりも大きいサイズも含まれる MPs が下流の都市域からノンポイント汚染的に排出されている可能性が考えられた。

以上のことから、多摩川河川水中の MPs 濃度は鶴見川や下水処理水と比較して 10 倍程度高いことが明らかとなった。また、組成的には上流ではアルキド樹脂、ポリエチレン及び PMMA 樹脂で 9 割近くを占め、下流域ではそれらの比率が若干下がりその代わりにポリプロピレンやポリイソプレン及び AS 樹脂の寄与が大きくなることが明らかとなった。MPs のサイズではすべての地点においてミディアン径は約  $40\mu\text{m}$  程度であり、通常の調査対象である  $330\mu\text{m}$  以上の MPs よりも著しく小さいことが明らかとなった。また、下流域は上流域よりもサイズ分布が大きい傾向が見られ、その原因として下流の都市域のノンポイントソースからの河川への流入の可能性が示唆された。

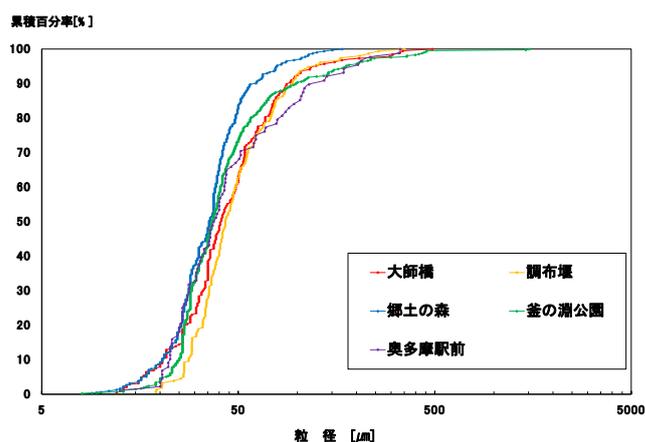


図 3.2 多摩川本川 5 地点における河川水中 MPs のサイズ分布比較

### 3.2 晴天時における潮汐による河川水中マイクロプラスチック濃度影響調査

図 3.3 に晴天時調査時の水位変化と MPs 濃度変化を示す。また、図 3.4 に SS、図 3.5 にその他の水質変化についても示す。今回の調査では潮見表に従い調査を行ったが、調査地点の水位差は 5cm 程度しか観測されなかった。これは当日稀にみる強風日であったため、本来満潮時に遡上する海水が上りにくかったためと考えられた。しかし、MPs 濃度については水位上昇とともに濃度の現象が確認され、海水の遡上による影響があったと考えられた。同様に SS についても MPs 濃度変化と類似の時間変化が観測されたが、TOC や DOC、TN や DN については異なる傾向を示した。

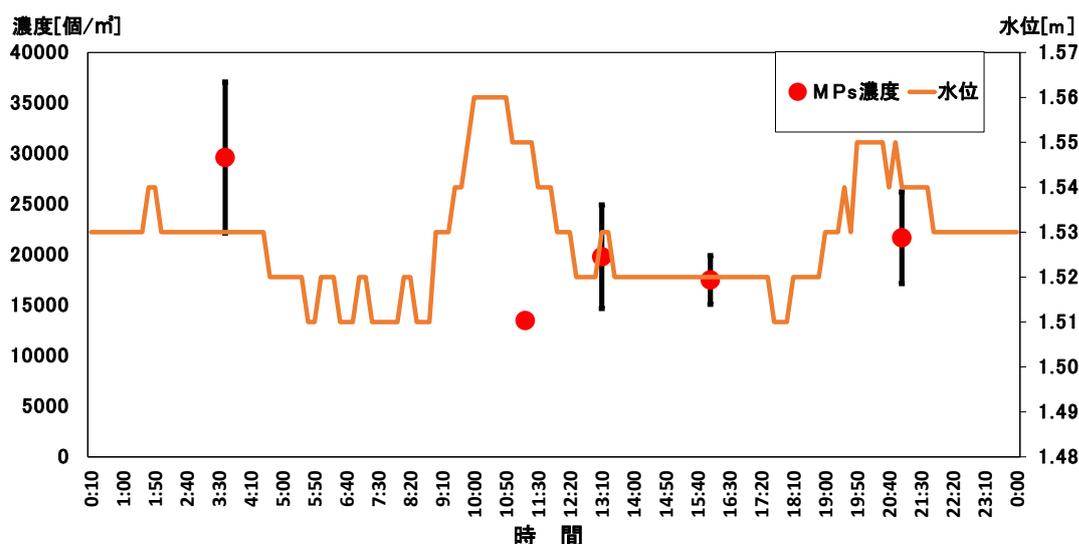


図 3.3 調布堰下流地点における潮汐による水位及び MPs 濃度の時間変化  
(エラーバーは 3 回の分析エリアからの検出濃度の標準偏差)

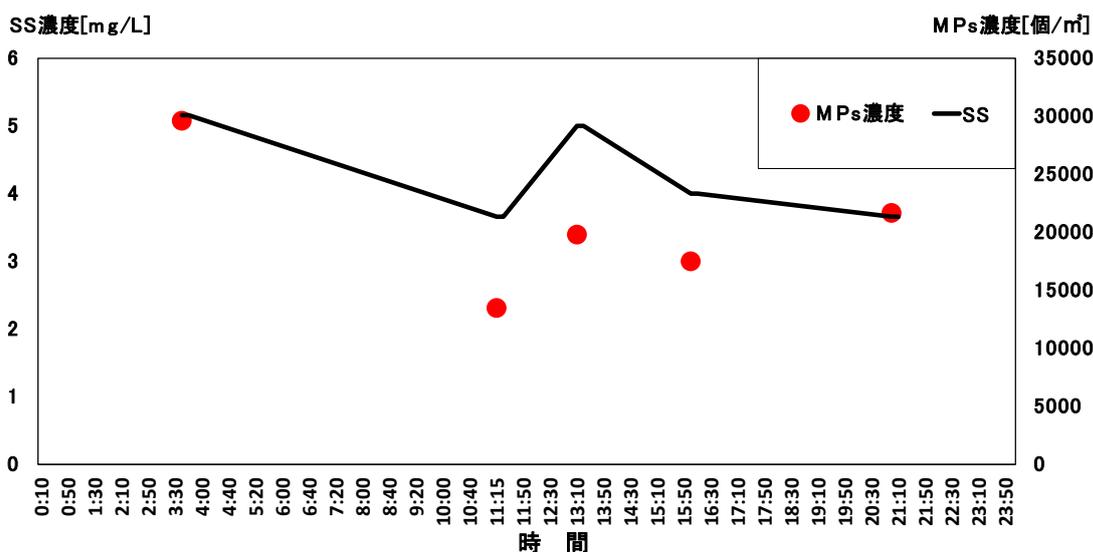


図 3.4 調布堰下流地点における潮汐による水位及び SS 濃度の時間変化

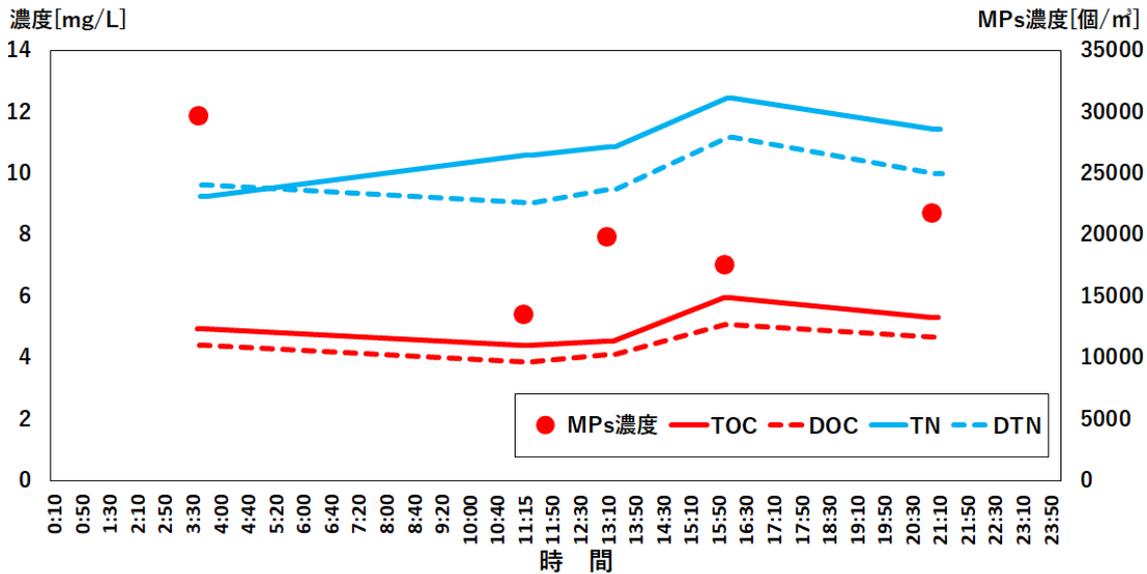


図 3.5 調布堰下流地点における潮汐による水位及び TOC, DOC, TN, DN 濃度の時間変化

図 3.6 に調査時における MPs のポリマー別濃度とその組成を示す。干潮、満潮に関わらず主要なポリマーはアルキド樹脂、ポリエチレン、PET 及び PMMA であり、明らかな海水の遡上の影響は見られなかった。しかし、3.3 章で議論する主成分解析を行うことで海水の影響を見ることができた。具体的には、鶴見川の調査と同様に陸域ではほとんど検出されないが海域で比較的検出されるポリスチレン、ABS 樹脂及びスチレンブタジエンゴム (SBR) が、満潮時には特徴的に検出されていた。

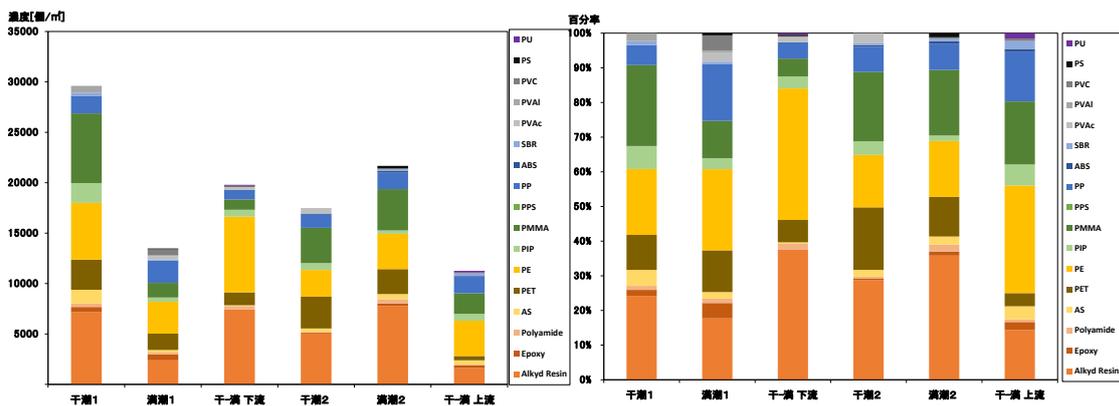


図 3.6 調布堰下流地点における潮汐による MPs 濃度及び組成の変化

一方、図 3.7 に検出された MPs のサイズ分布への干満の影響を示す。二回の干潮時は二回の満潮時に比較して若干小さく、ミディアン径でそれぞれ  $36\mu\text{m}$  及び  $39\mu\text{m}$  であった。しかし、その差は非常に小さいため、MPs のサイズ分布に与える海水の遡上による影響は無視できると考えられた。

以上の結果から、感潮域では海水の遡上とともに MPs も運ばれてくる可能性や海水による濃度希釈効果が示唆された。しかし、今回は海水の遡上が強風により通常よりも小さくなったため、著しい濃度変化やサイズ分布の変化は見られなかった。

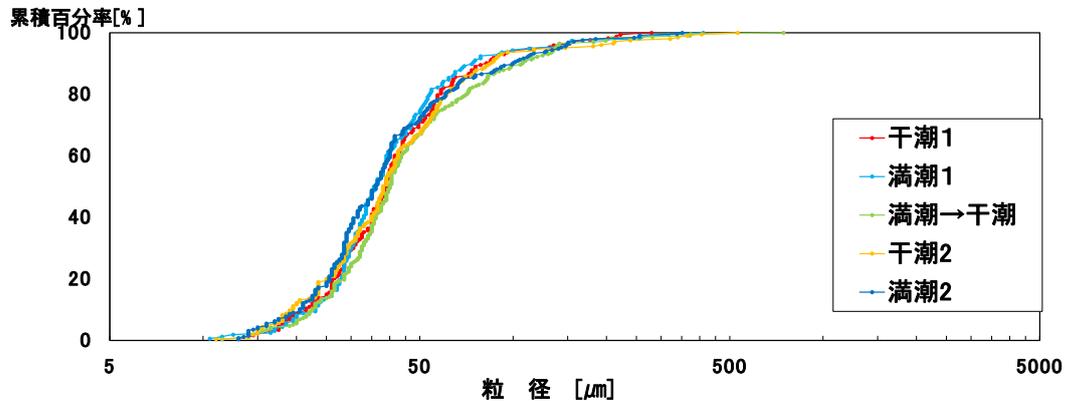


図 3.7 調布堰下流地点における潮汐による MPs のサイズ分布変化

### 3.3 降雨による河川水中マイクロプラスチック濃度変化調査

図 3.8 に田園調布(下)に設置されている国土交通省管轄の雨量計による降雨量の経時変化を示す。また、図 3.9 に降雨時調査時の降雨状況図を示す。図 3.8 から調査地点最寄りの雨量調査地点付近は 22 日 21:00 及び 23 日 10:00 頃、猛烈な降雨が生じている。これを降雨分布と比較すると初期の降雨は調査地点周辺に限られた狭い地域での降雨であることが分かった。一方、降雨分布図では 23 日 7:00 頃から流域全体にわたり数 mm/hr の降雨が継続的に発生していることがわかるが、図 3.8 では降雨量は未検出、水位にも大きな変化は見られなかった。また、23 日 14 時頃～16 時頃も数 mm/hr 程度の降雨が発生しているが、こちらも同様に降雨量は未検出、水位変化も見られなかった。したがって、河川への越流水による影響が大きいと考えられた降雨イベントは、図 3.8 に示す 23 日 21:00 頃の降雨(以後、一回目の降雨と称す。)及び 23 日 10:00 頃の降雨(以後、二回目の降雨と称す。)の二回と考えられた。なお、図 3.8 では 23 日 7 時頃及び 19:00 頃に大きな水位変動が観測されているが、これは潮見表との整合性から潮汐が原因であることが判明した。

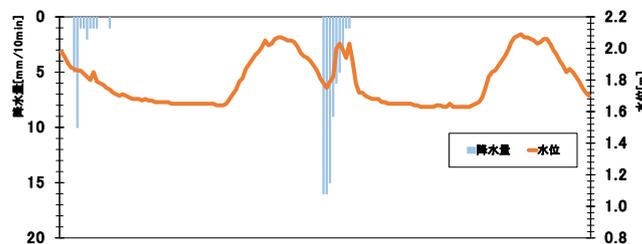


図 3.8 田園調布(下)における雨天時調査期間の降水量及び水位の変化

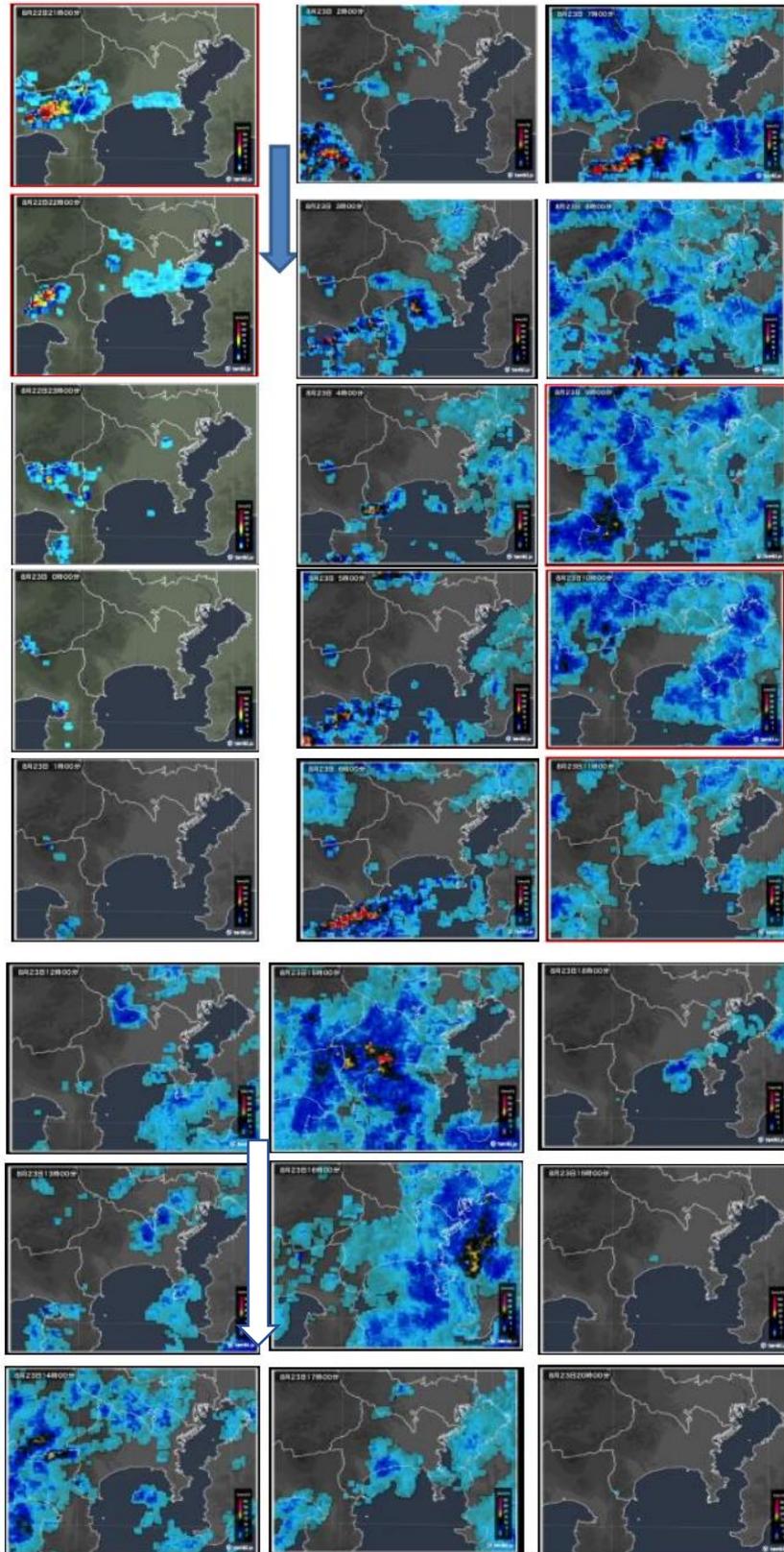


図 3.9 調布堰雨天時調査期間の降水量分布の変化（続き）

次に、これらの降雨による調布堰付近の多摩川河川水中の水質変化を図 3.10 に示す。これらの図から、局所的な一回目の降雨により河川水中 SS 成分が著しく上昇していることが明らかとなった。ただし、SS 濃度は二回目の降雨と比較して約 3 倍近くの濃度まで一回目の降雨で増加しているのに対し、POC は 2 倍も増加していないことから 1 回目の降雨による降雨では、2 回目の降雨よりも粘土や土砂等の無機性 SS 成分が高い寄与を占めていた可能性が示唆された。二回目の降雨でも河川水中の SS はシグナル状に上昇しており、降雨により SS 成分が流域より河川へ流入していることが考えられたが、その後も POC や PN は大きく減少しなかった。つまり、二回目の降雨後、田園調布(下)の降雨計では測定できなかった少量の継続的な降雨により少しずつ河川に懸濁態成分が流入していることが推測された。

以上のことから、従来の降雨イベントにおける汚濁成分の河川への流入現象調査の測定項目である SS や POC, PN の結果から推定すると、第一回目の降雨で調査地点付近の陸域からいわゆるファーストフラッシュ現象が生じており、二回目の降雨では広域の流域からファーストフラッシュ成分で流されなかった懸濁態フラクション(以降、セカンドフラクションと称す。)が流されたと考えられた。

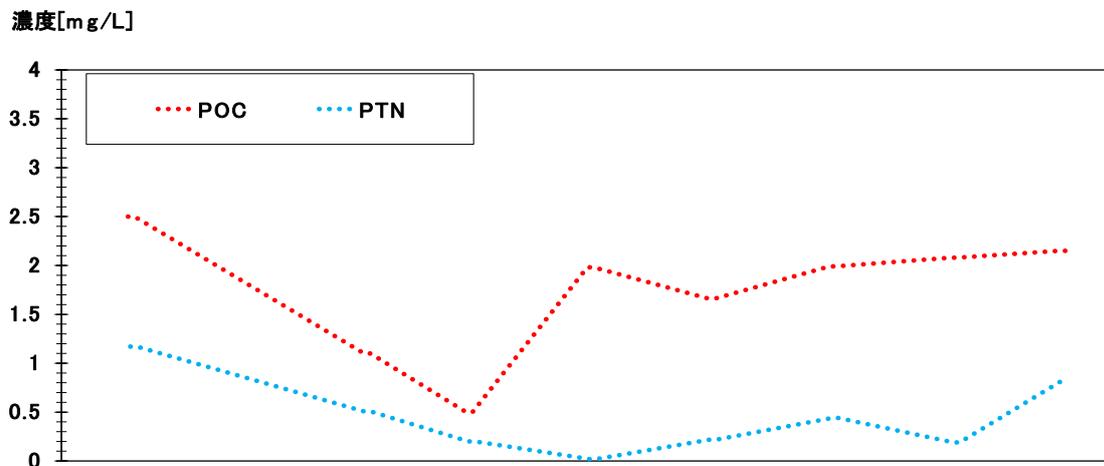
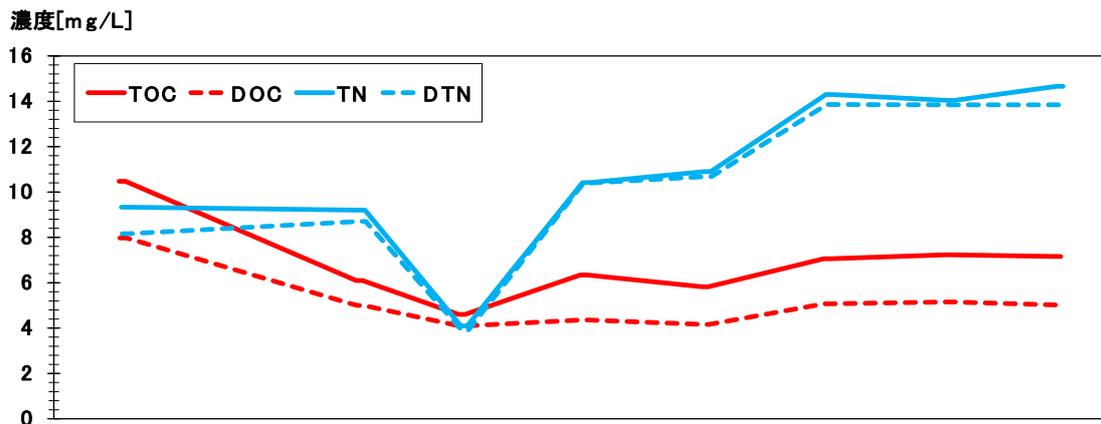
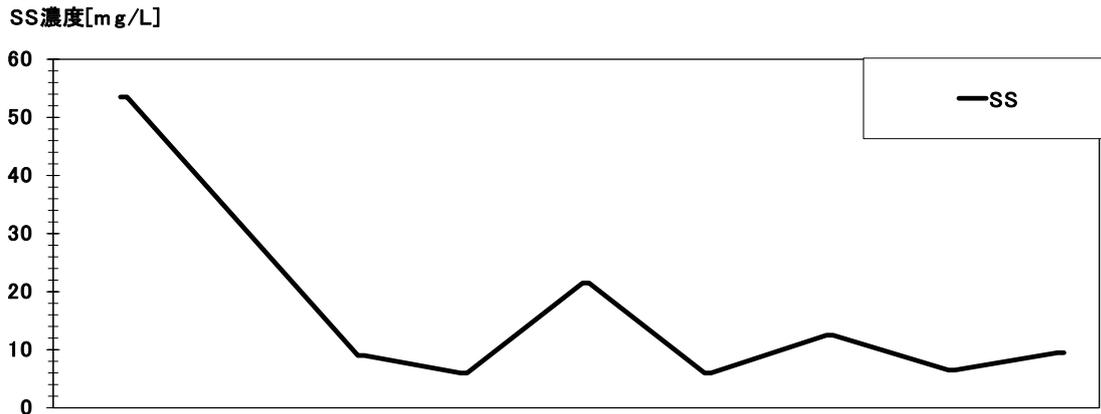
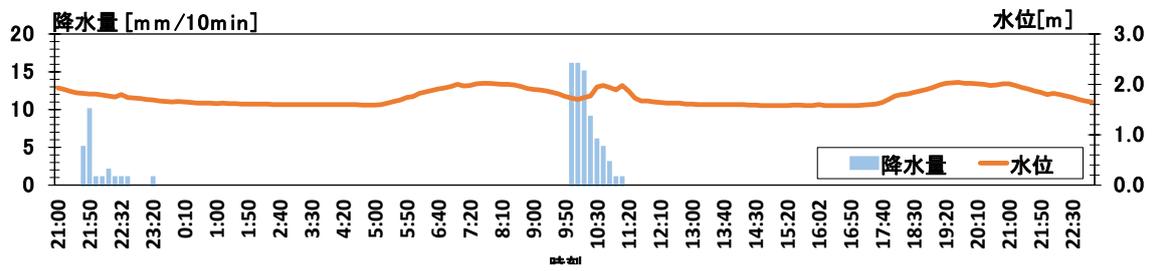


図 3.10 調布堰雨天時調査期間の水質変化

図 3.11 に河川水中の MPs 濃度及び組成の経時変化を示す。晴天時の調布堰下流地点の MPs 濃度は 3.1 の晴天時調査結果から 13100 個/m<sup>3</sup>、3.2 の潮汐調査からは 13500 ~ 29600 個/m<sup>3</sup>であった。これに比較すると、降雨時は第一回目の降雨で 73900 個/m<sup>3</sup>、二回目の降雨直後では 133000 個/m<sup>3</sup>と晴天時の約 10 倍まで MPs 濃度が増加することが明らかとなった。また、一回目の降雨がやんだ約 5 時間後(②)でも濃度は下がらなかった。③で濃度が若干下がった原因は満潮時による希釈効果と考えられる。二回目の降雨では一回目の降雨時よりも MPs 濃度が上昇しており、これは水質の変化から推定した一回目の降雨では無機性の懸濁態が多く、二回目の降雨の時の流出成分が異なる可能性と調和的な結果となった。一方、二回目の降雨では、降雨後、⑥のように濃度が晴天時のレベルまで大きく減少した。この時間帯は、非常に弱い降雨が継続していたことが降雨分布図から明らかになっているが、水位も増加していないことから降雨による希釈効果とは考えにくい。考えられる原因としては④⑤で非常に高濃度の MPs が陸域から流入してきたことで、降雨地域に蓄積していた MPs が少なくなった可能性が考えられるが、明らかな原因は不明である。しかし、その後⑦⑧のように再び濃度が上昇していることから、別の流域の MPs が流入してきたと考えられる。この推定は、河川水中の MPs のポリマー組成でも調和的な結果であった。つまり、降雨直後のポリマー組成は①④⑤すべて共通しており、アルキド樹脂、ポリエチレン、ポリプロピレンが主要であった。⑥⑦⑧ではこれらの成分が少ないものの、⑦⑧になるにつれ、少しずつこれらのポリマーの寄与率が増加してきている。このことから、降雨時にすぐに流出しやすいポリマーはこれら三種であることが明らかとなった。

一方、PMMA は降雨直後よりも数時間以上遅れて河川水中濃度が上昇する傾向を示した。実際、主要なポリマー種別の河川水中濃度の経時変化を図 3.11 に示すが、PET では降雨よりも遅れて増加した。また、ポリイソプレンのように二回目の降雨時の濃度が増加したポリマーも観察された。このようにポリマーに応じて河川への流出パターンが異なった原因は流域によって陸域に蓄積しているポリマーが大きく異なる可能性や陸域に蓄積しているポリマー組成の相違よりも流出過程におけるポリマーの特性が考えられるが、今回の調査では明らかにできなかった。なお、このポリマー別の流出特性の結果は各調査時の MPs 合計濃度に対する各ポリマー濃度の割合を変数とした主成分分析でも明らかとなった。図 3.12 に主成分スコア図及び因子負荷量プロットを示す。主成分スコア図により、各時間の MPs 組成は 47.6%の寄与率で二つの主成分で説明され、4 つのグループに分類された。一つ目のグループは X 軸が正の方向のもので、ポリプロピレン、ポリエチレン、アルキド樹脂の因子負荷量が大きくなっており、降雨直後に流出しやすいポリマーと考えられ、ファーストフラッシュで流出しやすいグループと分類された。つまり、第一主成分の負の方向は降雨よりも遅れて流出するセカンドフラッシュ成分と考えられ、実際負荷量の大きい因子は PMMA や PET であった。第二主成分の正の方向には ABS 樹脂やポリスチレン、スチレンブタジエンゴムが位置しており、これらは内湾で特に検出されやすいポリマーという共通性があった。したがって、第二主成分の正の方向は満潮による海水中 MPs の影響が考えられた。さらに、晴天時調査の結果も加えると、第二主成分の原点もしくはマイナス付近にすべての調査結果が主成分スコア図でプロットされたことから第二主成分は潮の影響度合いと推定された。このような主成分分析による主成分スコア図から、各時間帯の MPs の由来の推定が可能になることが明らかとなった。

以上、今回の雨天時調査結果から降雨特性によって結果は異なる可能性は考えられるものの、雨天時の多摩川河川水中 MPs 濃度は晴天時よりも 10 倍程度高いことが明らかとなった。また、MPs の陸域からの流出特性はポリマーごとに異なることが明らかとなった。さらに、各ポリマーの合計 MPs 濃度に対する割合をデータとすることで、主成分分析により MPs の由来をファーストフラッシュ、セカンドフラッシュ及び潮汐に分類できることが示唆された。

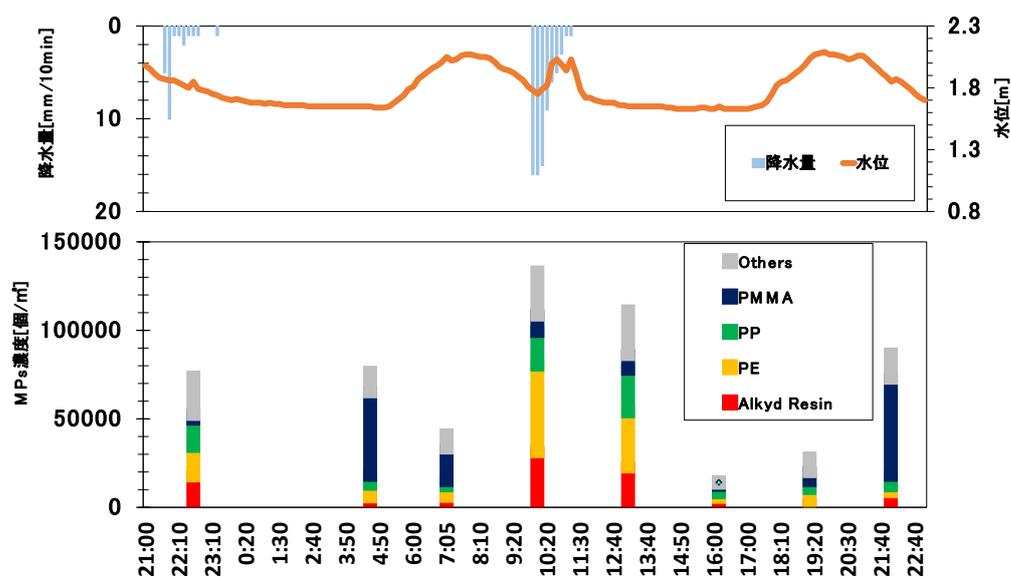


図 3.11 調布堰雨天時調査期間の河川水中 MPs 濃度変化

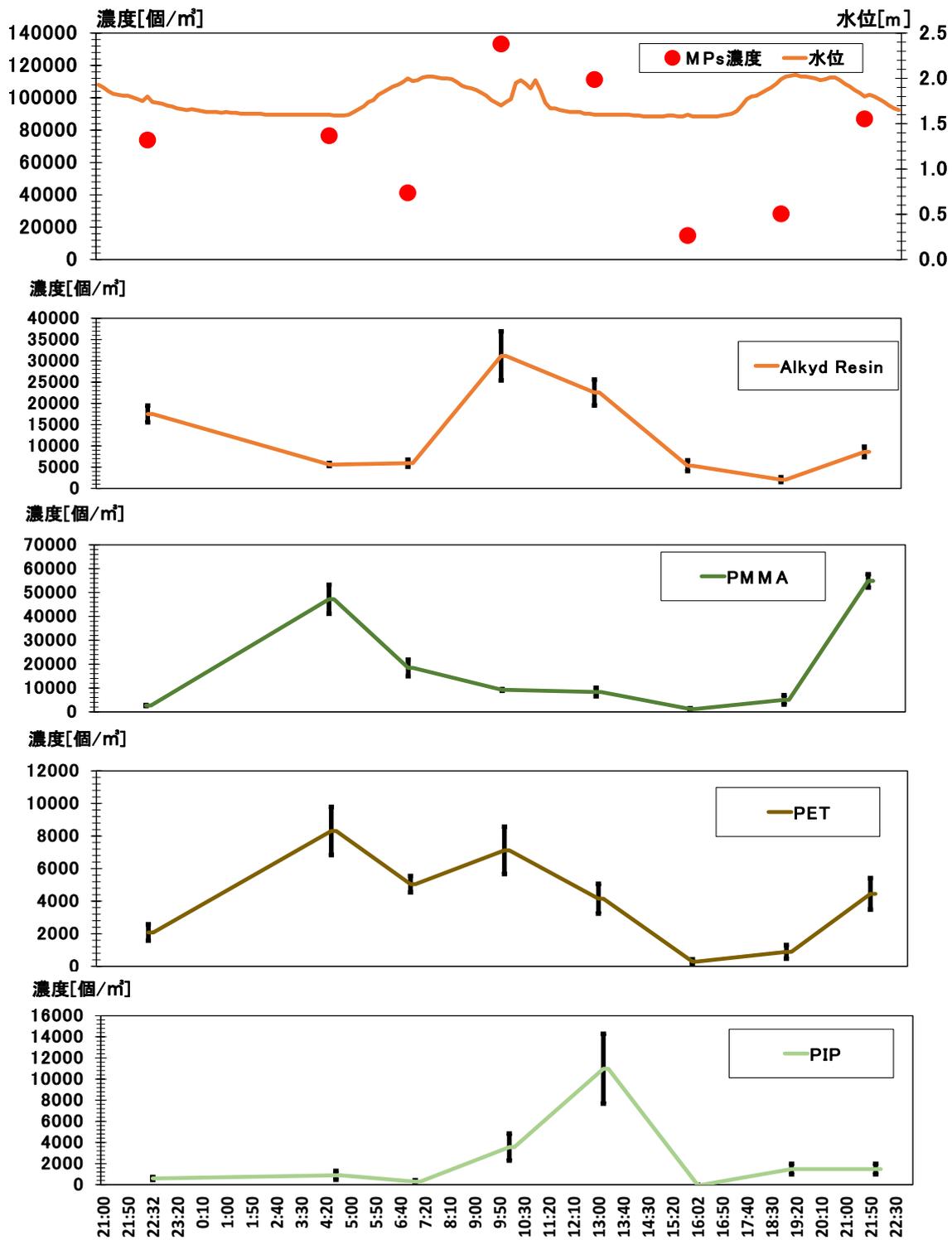


図 3.12 特徴的な流出パターンが観察された河川水中 MPs ポリマー濃度変化

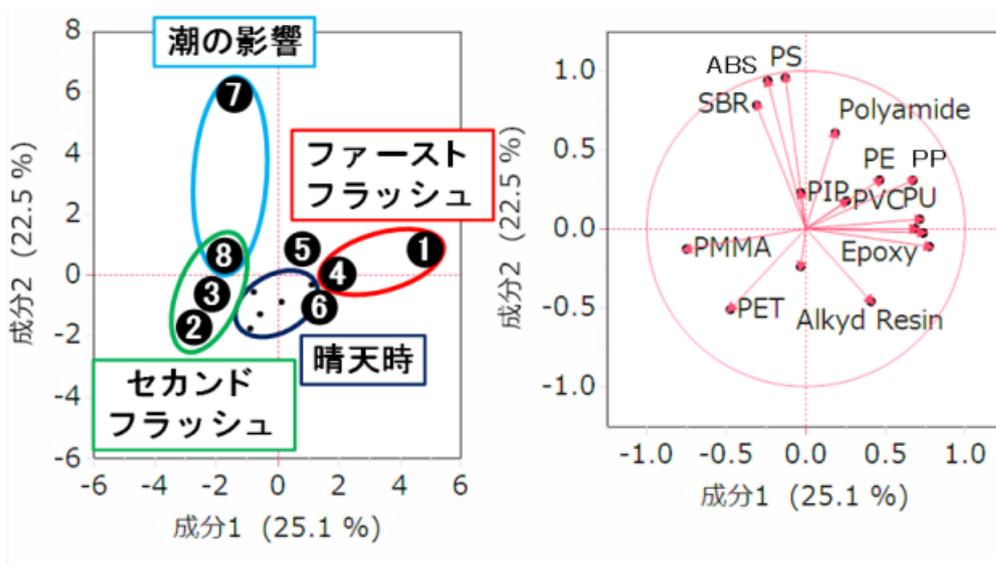


図 3.13 河川水中 MPs のポリマー組成データを用いた主成分解析結果(左：主成分スコア図、右：因子負荷量プロット)

### 3.4 シミュレーションによる下水処理水由来のマイクロプラスチック濃度推定

図 3.14～3.16 までに SHANEL で推測した下水処理場処理水由来の多摩川河川水中の合計 MPs 濃度、アルキド樹脂濃度及び PET 濃度の濃度分布図を示す。また、図 3.17 にこれらの結果の上流から下流までの濃度変化図を示す。今回のシミュレーションでは、下水処理場を経由し処理された下水処理水中の MPs 濃度のみを推定しているため、図に示すように下水処理場の存在しない上流は予測結果がゼロとなっている。晴天時調査の各調査地点での実測値と推定値を比較すると、奥多摩駅前では MPs 合計濃度では、実測値 6007 個/m<sup>3</sup>、推定値 9 個/m<sup>3</sup>、釜の淵公園で実測値 14100 個/m<sup>3</sup>、推定値 6 個/m<sup>3</sup>、郷土の森公園で、実測値 10700 個/m<sup>3</sup>、推定値 353 個/m<sup>3</sup>、調布堰で実測値 13100 個/m<sup>3</sup>、推定値 465 個/m<sup>3</sup>、大師橋で実測値 6380 個/m<sup>3</sup>、推定値 459 個/m<sup>3</sup>であった。このように、実測値は推定値より 13.9 倍～2350 倍と大きく超過した。今回の推定値は、MPs の河川水中における沈降は加味しておらず、すべて溶存態として分散している条件としており、晴天時では巻き上げが小さいと考えられるため、過大評価気味の値となっている。しかし、実測値が大きく調査した原因は、下水処理場を介さない生活排水による影響及び流域からのノンポイントソース、さらには下水処理場以外の事業所排水が考えられる。

図 3.18 には合計 MPs、アルキド樹脂及び PET について、実測値に対する比率を示す。アルキド樹脂は合計 MPs と同様に実測値が推定値を大きく上回ったが、PET では釜の淵公園を除き、すべての地点で 0.7～1.9 となり、シミュレーションとしては十分実測値を再現できるレベルとなっていた。代表者による下水原水中 MPs 調査において、PET の下水処理場への流入量と処理人口が最も正の直線関係が強いことがわかっており、その原因は多くの既往の研究から明らかのように、洗濯時の衣服からの排出と考えられる。一方、アルキド樹脂は概ね処理人口と正の相関はあるものの、特殊な事業所排水系では相関がなく、著しく高濃度で存在していた。これらの点を総合すると、多摩川河川水中

のアルキド樹脂や MPs 合計濃度を SHANEL で下水処理場処理水のみで推定することは、他の事業所排水の影響や流域からのノンポイントソースの影響が大きく困難であることが推定された。

一方、PET については下水処理水由来の PET の排出データを使った SHANEL により、多摩川河川水中実測濃度と同程度の値を推定できたことから、河川水中の PET-MP に対する下水処理水経由の PET-MPs の寄与率は非常に高く、概ね多摩川河川水中の PET-MPs 濃度を推定できることが明らかとなった。ただし、釜の淵公園地点のみ、実測値と推定値に大きな乖離があり、この原因は奥多摩駅地域から釜の淵公園の地域は下水道普及率が若干低い地域があり（青梅市及び奥多摩町）、これらの未処理排水の影響と考えられた。



図 3.14 SHANEL による多摩川河川水中下水処理場由来合計 MPs 濃度分布

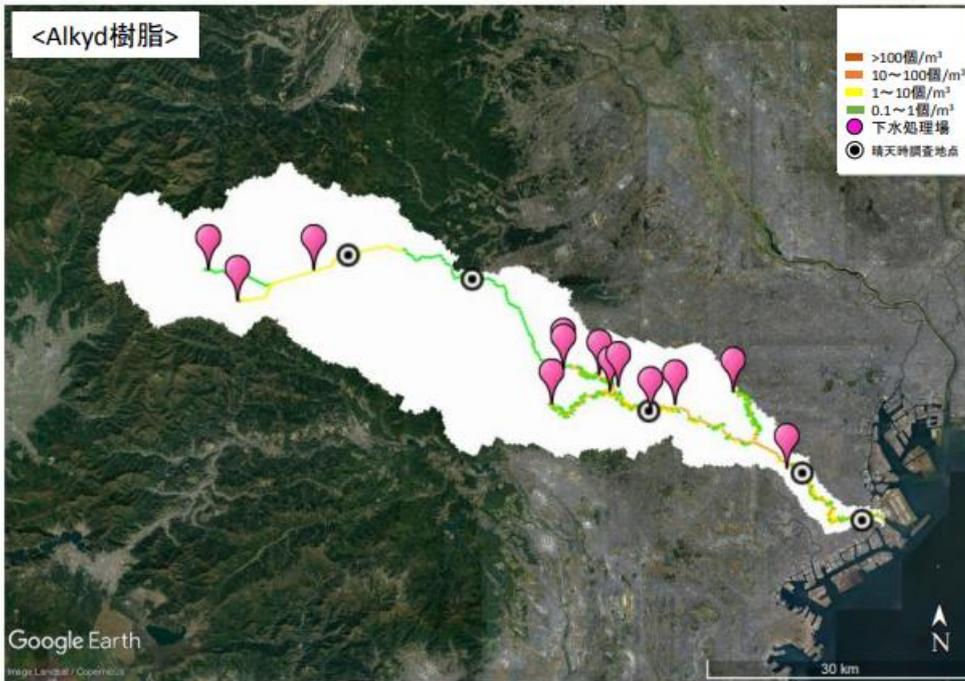


図 3.15 SHANEL による多摩川河川水中下水処理場由来アルキド樹脂濃度分布

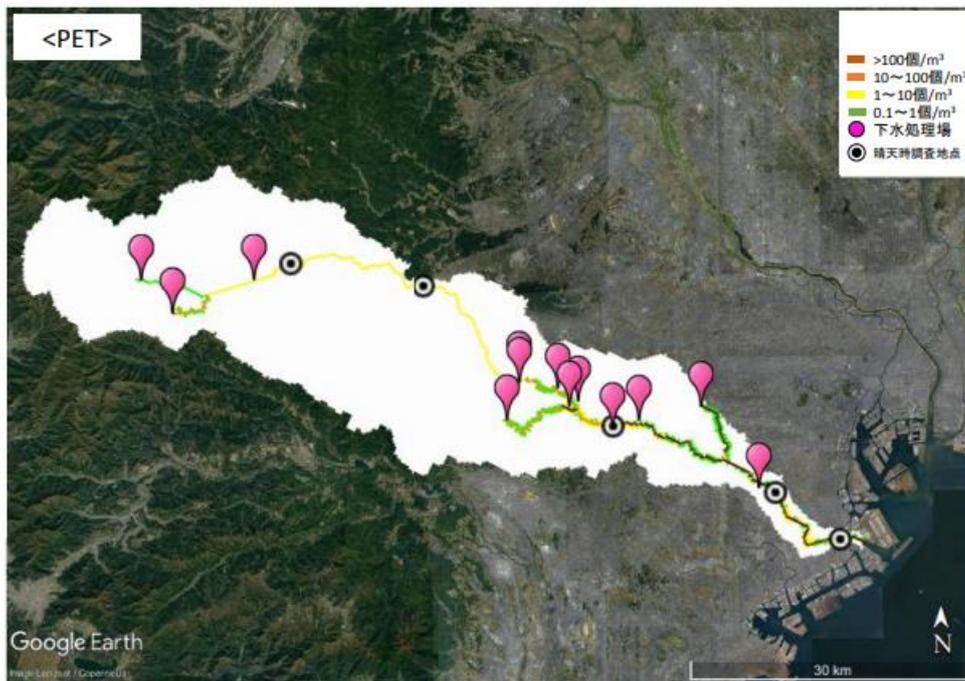


図 3.16 SHANEL による多摩川河川水中下水処理場由来 PET 濃度分布

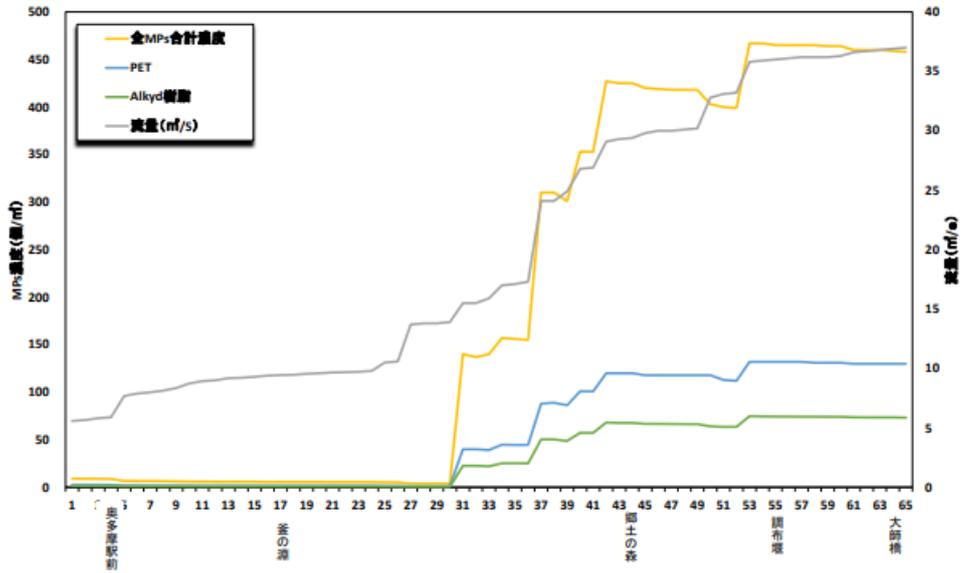


図 3.17 SHANEL による多摩川河川水中下水処理場由来 MPs 濃度の流下方向変化

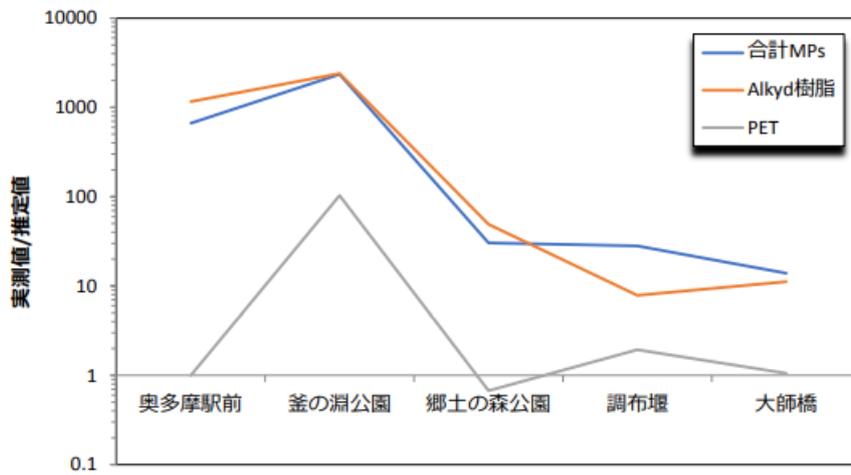


図 3.18 各調査地点における SHANEL による推定値に対する実測値の比率

### 3.5 多摩川河川水中マイクロプラスチック情報ウェブページの公開

MPs 問題はマスコミで頻繁に取り上げられているが、実は一般の人たちの認識度合いは非常に低い。近年はTVよりもYou tubeなどネット等を見ることが主流になったためも考えられる。環境ビジネスはバイデン大統領になってから一段と世界では注目を浴び、さまざまな活動がされている反面、日本自国民は環境の意識が高いという思い込みはあるものの、世界的には明らかに環境への意識や活動が低くなっている。そこで、今回の多摩川の調査結果の公開を含め、MPs を知らない市民でも理解できるようなウェブページ「多摩川流域（+世界の河川）におけるマイクロプラスチック調査ウェブページ」を作成した (<https://www.tamagawa.kamedalab.com/>)。それに先立ち、マスコットキャラクターを図 3.19 のようにイラストレーター寺田てら様と協力のもと作成した。小中高校生に人気のあるイラストレーター作成によるキャラクターは、今後必ず注目を浴びることが期待される。今回の多摩川調査結果については、google map と連動させて地図表示とした(図 3.20)。今後は多摩川の追加調査をはじめ、本研究室で行われる国内 MPs 調査の結果を追加していき、国内の MPs 濃度状況を理解できるものにしていく予定である。また、小学生でも理解できるように、MPs の基礎的な学習情報もマンガを用いて作成した(図 3.21)。今後、小中学校の環境教育や夏休みの自由研究などに、本ページが利用され、多摩川への関心がより深まることを期待したい。



図 3.19 ウェブページに登場するキャラクター

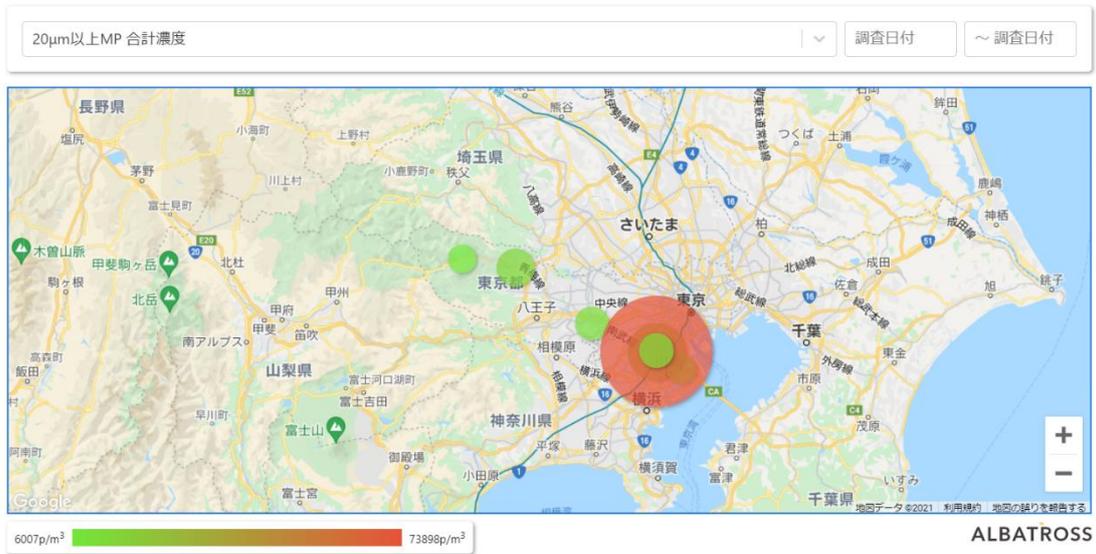


図 3.20 多摩川 MPs 調査結果表示の一例

[ロゴを追加](#)
Sponsored by Tokyu Foundation (東急財団)    Home ...    [亀田研究室HPへ戻る](#)

## 多摩川のマイクロプラスチックあれこれ (調査結果)

[サブキャッチを追加](#)

多摩川水中にはマイクロプラスチックってあるの？  
12月OPEN

多摩川のマイクロプラスチックはどこから来るの？  
12月OPEN

雨が降ると河川水中のマイクロプラスチックはどうなるの？  
(12月OPEN)  
[テキストを追加](#)

シミュレーションで多摩川河川水中のマイクロプラスチックの濃度を推定してみよう。  
(12月OPEN)  
[テキストを追加](#)

?

図 3.21 ウェブページ内の MPs 学習情報コーナー

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、 $20\mu\text{m}$ 以上のMPs自動分析手法を駆使して、多摩川河川水中のMPs調査を晴天時、雨天時に実施するとともに、下水処理場から排出される多摩川河川水中MPs濃度をシミュレーションソフトを利用して推定した。 $20\mu\text{m}$ 以上の微細なMPsの多摩川における存在調査は本調査が最初であり、これからのMPs削減対策において重要な情報となりうると期待できる。具体的には以下の点が明らかとなった。

① 晴天時において、多摩川上流から下流に至る計五地点でMPs濃度を測定した結果、大師橋  $6382\text{個}/\text{m}^3$ 、調布堰  $13140\text{個}/\text{m}^3$ 、郷土の森  $10683\text{個}/\text{m}^3$ 、釜の淵公園  $14130\text{個}/\text{m}^3$ 、奥多摩駅前  $6007\text{個}/\text{m}^3$ という結果となった。この濃度は鶴見川河川水中の濃度調査結果（源流地点で  $300\text{個}/\text{m}^3$ 、河口域で  $1240\text{個}/\text{m}^3$ ）と比較して10倍程度高い。また、代表者の調査結果では下水処理水中のMPs濃度が約  $1000\text{個}/\text{m}^3$  レベルであることを考慮しても、多摩川河川水中濃度はかなり高いことが明らかとなった。さらに、検出されたMPsのミディアン径は約  $40\mu\text{m}$  ととても小さく、通常の河川調査で行われる  $330\mu\text{m}$  以上のMPsの占める割合は、最も高い釜の淵公園地点でも2.2%であった。これらのことから、今後は通常MPsよりも微細なMPsまで調査することが重要であることが明らかとなった。

② 多摩川感潮域におけるMPs濃度に与える海水の遡上の影響を調査した。あいにく調査実施日に記録的な強風が吹いたため、潮位による水位変動はとても小さいものとなった。しかし、MPs濃度については水位上昇とともに濃度の現象が確認され、海水の遡上による影響があったと考えられた。強風の影響のない場合であれば、海水中のMPsが感潮域に流入してくる可能性が示唆された。

③ 雨天時における河川水中MPs濃度の時間変化を調布堰付近で調査した。調査期間中2回の集中的な降雨が生じ、その結果、平常時の10倍程度まで河川水中MPs濃度は増加した。このことから、雨天時には流域の陸域から大量のMPsが多摩川に流入していることが推定された。また、陸域からの流出特性がポリマーにより異なる結果が得られ、アルキド樹脂、ポリエチレンおよびポリプロピレンは降雨直後から河川水中濃度が増加した。一方、アルキド樹脂やPETは降雨より数時間以上遅れて濃度の最大値を示した。今後は、濃度ばかりでなく、流量も考慮した負荷量として評価するとともに、各ポリマーのサイズ分布の時間変動も考慮することで、ポリマー別の流出挙動がより解明されることが期待できる。

④ 下水調査結果をもとにして、多摩川流域に点在する下水処理場から多摩川に排出されるMPs濃度をシミュレーションソフトSHANELを用いて推定した。18種類のポリマーの合計MPs濃度、アルキド樹脂およびPETについて推定したが、MPs合計濃度とアルキド樹脂では、本研究の河川水中MPs実測値と比較して著しく低い濃度が推定された。このことから、多摩川河川水中に存在するこれらMPsの大半は下水処理場以外から排出されているのではなく、そのほかの流出源の影響が大きいと考えられた。考えられる流出源として、下水処理を十分行われていない未処理排水の影響や都市からのノンポイントソース、あるいはごみの不法投棄が考えられる。河川水中のMPsに対するこれらの影響をより調査していく必要がある。一方、PETに関しては実測値の推定値に対する比率は0.9~1.7倍とシミュレーションモデルの推定値としてはとても精度の高い推定結果となった。このことから、多摩川河川水中のPET-MPsは下水処理水由来の寄与率が他のポ

リマーよりも高く、未処理の生活排水の影響が小さい場所ではほぼ 100%が下水処理水由来である可能性が示唆された。

⑤ 多摩川における MPs への関心を深めるためのウェブサイトを立ち上げた。有名イラストレーターの多摩川 MPs 専用キャラクターや漫画による学習教材さらには、今回の調査結果の地図表示機能を加えた。今後もこのウェブサイトにデータを随時追加し、多摩川の水環境を除くことのできるバーチャル多摩川の作成を目指していきたい。

一方で助成開始時には計画していたものの、実施・実現できなかったことは以下があげられる。

①雨天時調査及び晴天時調査については他地点で 2 回程度行う予定であったが、新型コロナウイルスまん延による外出規制や大学の規制により実施できなかった。

②雨天時調査については、自動採水器を用いた連続採水を行う計画であったが、河川管理者に理解していただけず、設置できなかった。多摩川や他県の河川においても一般的に自動採水器による調査は許可されてきたが、今回は理解が得られなかった。そのため、学生が多摩川に張り付いて徹夜で実施することとなった。

本助成による研究結果や活動結果は、未だに本格調査が行われていない国内河川における MPs 調査に先駆けた詳細調査であるため、今後、国や地方自治体が実施する予定の河川水中 MPs 調査の橋頭保として利用されることが期待される。また、今回の調査結果は 2021 年中に論文として投稿予定となっている。さらに、すでに以下の学会にて発表を行い、学生発表賞を受賞している。

①中村至克，藤井 遼，藤村海人，亀田 豊（2021 年 3 月）「多摩川河川水中マイクロプラスチックの降雨時流出特性に関する研究」日本水環境学会、第 55 回日本水環境学会年会（京都大学：オンライン）年会学生ポスター発表賞（ライオン賞）受賞

## 5. 参考文献

1. Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., Ren, H., 2017. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci rep.* 7, 46687.
2. Kameda, Y., Yamafa, F., Fujita, E. Source- and polymer-specific size distributions of fine microplastics in surface water in an urban river. under review.
3. Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., Hinata, H., 2019. Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan. *Environ. Pollut.* 244, 958-965.
4. Leads, R., Weinstein, J. 2019. Occurrence of tire wear particles and other microplastics within the tributaries of the Charleston Harbor Estuary, South Carolina, USA. *Mar. Pollut. Bull.* 145, 569-582
5. Poulain, M., Mercier, M. J. R., Brach, L., Martignac, M., Routaboul, C., Perez, E., Desjean, M. C., Halle, A., 2019. Small microplastics as a main contributor to plastic mass balance in the north Atlantic subtropical gyre. *Environ. Sci. Technol.* 53, 1157-1164.
6. 国土交通省, 東京都の下水道事業の概要 . <https://www.mlit.go.jp/common/000028961.pdf> (2021年4月28日現在)
7. 亀田豊, 藤田恵美子. 2021. 下水処理場流入原水中のマイクロプラスチック濃度とポリマー別流入負荷量特性. 第58回下水道研究発表会.
8. 産業総合研究所, AIST-SHANEL. <https://shanel.aist-riss.jp/> (2021年4月28日現在)

多摩川流域における水中微細マイクロプラスチック存在調査と  
シミュレーションモデルを用いた流域内挙動解析

(研究助成・学術研究 VOL. 50—NO. 354)

著 者 亀田 豊

千葉工業大学創造工学部都市環境工学科・准教授 (採択当時)

発行日 2021年12月

発行者 公益財団法人 東急財団

〒 150-8511

東京都渋谷区南平台町5番6号

TEL (03) 3477-6301

<http://foundation.tokyu.co.jp>