

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04937

研究課題名(和文) 河川流況・流域情報を考慮したマイクロプラスチック輸送量モデルの開発

研究課題名(英文) Modeling of microplastics fluxes using river flow and basin data

研究代表者

片岡 智哉 (Kataoka, Tomoya)

東京理科大学・理工学部土木工学科・助教

研究者番号：70553767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は国内河川から海洋へどれくらいのマイクロプラスチック(MicP)が流出しているのかという学術的な問いを解決するため、3つの現地調査(全国河川でのMicP採集調査、平水時・出水時のMicP採集調査、河川横断面におけるMicP採取調査)を実施して、人口密度と市街地率に基づくMicP濃度の線形回帰式を構築し、国内からのプラスチック流出量を推計した。その結果、年間210tから4776tのプラスチックが流出していることが推計され、人口が集中する三大都市圏からのプラスチック流出量が高いことが明らかとなった。今後、MicP濃度の出水による短期変化や河川横断面分布を考慮したプラスチック流出量を推計する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、国内河川におけるマイクロプラスチック(MicP)調査の先駆けであった。また、全国河川を対象にした研究例は世界的にも類を見ない研究成果であり、結果として人為的影響の大きい汚濁河川でMicP濃度が高いという重要な学術的知見が得られた。本研究成果は、沿岸地域だけでなく、内陸域でも河川を介して海洋へMicPを流出させていることを示しており、社会的にもインパクトのある研究成果が得られた。また、現地調査に基づいてMicP濃度の出水時における短期変化や河川横断面分布を明らかにしており、河川におけるMicPの流体力学的な挙動を明らかにするための学術的に重要なデータが得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to answer the academic question for global plastic pollution: how much microplastics is released from Japanese rivers to the oceans, three types of in-situ surveys (sampling in multiple Japanese rivers, sampling during the floods and sampling in river cross section) had been conducted in the research period. High-resolution map of microplastic emission was generated using the linear relationship between microplastic concentration and basin characteristics (population density and urban ratio) established from sampling in the 70 rivers. Based on the map, annual plastic emission from Japan was estimated, which was 210 to 4776 ton. Expectedly, the plastic emission from the three major metropolitan areas was predominant over other areas. To more accurately estimate the plastic emission, we will consider the temporal variability of microplastic concentration during floods and the spatial distribution of microplastic concentration in river cross section in near future.

研究分野：水工学

キーワード：河川マイクロプラスチック 輸送量 鉛直分布 横断分布 マクロプラスチック 画像解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

海洋中に存在する大きさ 5 mm 以下のプラスチック微細片 (MicP) は、有害な化学物質の輸送媒体として認識され、いまや海洋生態系への脅威として世界的にその懸念が広がっている。河川は陸域から海洋へ MicP の主要な流出経路であり、内陸部で発生した MicP を効率的に海洋へ輸送する。そのため、MicP 流出抑制対策を講じる上で、河川での MicP 輸送実態を把握することは必要不可欠であるが、現時点で水表面における単発的な MicP 浮遊量の把握に留まっており、河道断面全体での MicP 輸送量評価に至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、世界の海洋環境中に拡散し、生態系への脅威として認識されつつある MicP の“流出抑制対策”の一環として、海洋への主要な MicP 流出源である河川からの MicP 輸送量モデルを開発する。ここでは、実河川での MicP 採取に基づき、MicP 輸送量の横断・鉛直分布を明らかにし、同時計測された流速分布と関連づけることで河道断面内の MicP 空間分布モデルを構築する。加えて、降雨時における複数河川での MicP 採取に基づき、MicP 輸送量の非定常性や流域情報を考慮した時間変動モデルを構築する。これらを組み合わせることで、他の河川にも適用可能でかつ簡便に MicP 輸送量を推定できるモデルとし、国内から海洋への MicP 流出量推計を最終目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、MicP 輸送量モデルを構築するため、3つの現地調査（全国河川での MicP 採取調査、平水時・出水時の MicP 採取調査、河川横断面における MicP 採取調査）を実施して河川における MicP 濃度（河川水 1m³ 当たりの MicP 個数や質量）を実計測した。ここでは、全ての現地調査で共通する MicP 濃度計測方法について説明し、その後、各々の現地調査に関する研究方法を説明する。

(1) MicP 濃度計測方法

本研究では、橋梁からプランクトンネット（口径 30 cm、目合 0.35 mm、ネット長 0.75 m; No. 5512-C、離合社）をロープで降ろして一定時間静置後に引き上げ、MicP を採取した。ここでプランクトンネットの開口部には、ネット内を通過した河川水量を計測するため、濾水計（No. 5571-A、離合社）を取り付けた。静置時間は 5 分を基準として河川の流速に応じて 3 分～10 分とした。所定の静置時間経過後、ネットを引き上げ、研究室に持ち帰った。現地観測では引き上げたネットの開口部を布で覆い、研究室に持ち帰り、①前処理、②MicP 候補物質の抽出、③粒子の質量・サイズ測定及び材質同定の 3 ステップでネットに捕捉された粒子の分析を行い、MicP 濃度を算出した。最終的に、各観測点における MicP の個数と質量を集計して、ネット開口部に取り付けた濾水計で計測されたろ水量で除すことで、河川水 1m³ 当たりの MicP 個数と MicP 質量を算出し、MicP 濃度を評価した。なお、以後、個数ベースの MicP 濃度を MicP 数密度、質量ベースの MicP 濃度を MicP 質量濃度と呼称する。

(2) 全国河川での MicP 採取調査方法

本調査は日本全国 70 河川 90 地点で MicP 採取調査を 2015 年 8 月～2019 年 5 月にかけて実施した。調査河川は、流域特性（土地利用形態や人口密度など）による MicP 濃度の違いを考察するため、様々な流域特性をもつ河川を対象に選定した。また、調査地点は、上流から輸送される MicP を対象にするため、潮汐により海水が遡上する感潮域を除いた。

(3) 平水時・出水時の MicP 採取調査方法

本調査は、利根川の分派河川である江戸川の野田橋（河口から 39km 上流地点）で実施した。平水時の調査期間は 2016 年 9 月から 2017 年 9 月までの 1 年間であり、1 ヶ月 1 回実施した。また、出水時の調査期間は、2017 年台風 18 号が襲来した 2017 年 9 月 18 日～19 日と台風 21 号が襲来した 2017 年 10 月 23 日～25 日である。台風 21 号は関東地方に上陸したため、台風 18 号と比較して江戸川で大規模に増水した。

(4) 河川横断面における MicP 採取調査

本調査は、江戸川の野田橋で 2 回（2018 年 10 月 30 日と同年 11 月 29 日）と鶴見川の新横浜大橋で 2 回（2019 年 9 月 17 日と同年 11 月 28 日）の計 4 回実施した。いずれの調査でも水表面から鉛直方向にネットを配置して、江戸川では 8 層、鶴見川では 4 層の MicP 濃度を計測した。鶴見川では、同日同地点において河川横断方向 4 点において水表面における MicP 濃度を計測した。

4. 研究成果

(1) 全国河川での MicP 採取結果

全国河川における MicP 数密度の計測結果を図 1 に示す。図 1 の背後は市町村毎の人口密度を意味する。この図から人口密度が高い地域ほど、MicP 数密度が高いことが見てとれる。全国 70 河川の MicP 濃度の平均値及び標準偏差は、 4.3 ± 8.0 個/m³（数密度）、 0.79 ± 1.9 mg/m³（質量濃度）であり、平均として河川水 1 m³ 当たりに 4 個の MicP が含まれていることがわかった。標準偏差が示すように、MicP 濃度の地点間のばらつきが非常に大きく、MicP 濃度のオーダーは 10⁻²～10² の範囲であった。このような地点間のばらつきを考察するため、調査地点上流域における市街地面積の割合（市街地率）と人口密度と比較したところ、MicP 濃度は、市街地率及び人口密

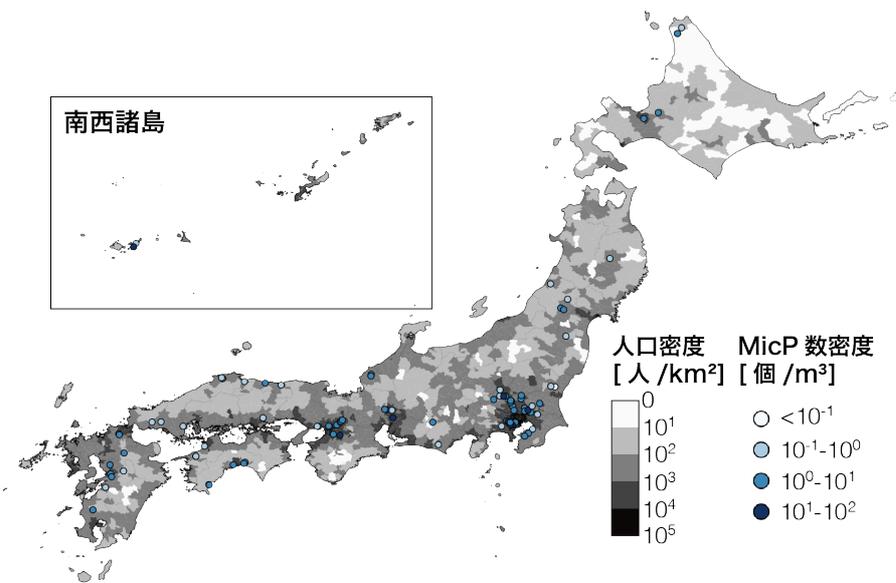


図1 全国70河川90地点で計測したMicP濃度と市町村別人口密度の比較

度と統計的に有意な相関関係 ($p < 0.01$) があり、人口が集中する市街地を流域に含む河川で MicP 濃度が高いことが明らかとなった。これはチェサピーク湾に流入する4河川で調査した既往の研究成果と一致し、より多くの河川でも普遍的な結果であることが世界で初めて示された。さらに、全調査地点の内、29河川36調査地点を選定して近傍で計測された水質データと MicP 濃度を比較したところ、河川水質の代表指標である生物化学的酸素要求量 (Biochemical oxygen demand; BOD) と統計的に有意な関係 ($p < 0.05$) があることがわかった。また、近傍水質観測所の水質階級 (AA, A, B, C, D, E の6階級があり、AAが清涼、Eが汚濁河川を意味する) 別に MicP 濃度の平均化したところ、汚濁河川ほど MicP 濃度が高いことがわかった。本研究成果の一部は、国際学術雑誌 *Environmental Pollution* (IF: 5.714) に掲載され (Kataoka *et al.*, 2019), Web of Science の Highly Cited Paper に選出された。

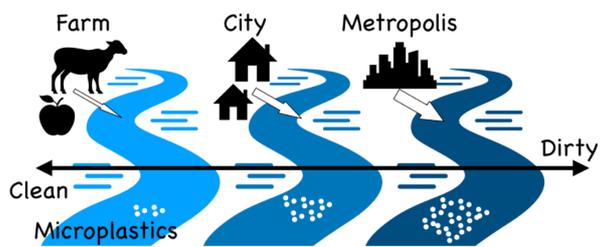


図2 MicP濃度と流域特性や水質との関係

(2) 平水時・出水時の MicP 採取結果

2016年9月から2017年9月において江戸川野田橋で MicP 濃度を計測したところ、冬季(12月-3月)に比べて夏季(6月-9月)の方が河川水中の MicP 濃度が高いという季節変動があることがわかった。これは江戸川野田橋における冬季よりも夏季の方が高く、降雨量の増大に伴って MicP 濃度が高くなる可能性を示唆する。平水時の MicP 濃度と比較するため、2017年台風21号による増水イベント時の MicP 濃度の時系列変化を図3に示す。MicP 濃度は、河川流量の増大期に急激に上昇し、河川流量のピークの少し前で MicP 濃度はピークとなり、その後、急激に MicP 濃度が減少していた。ここでは、例としてより大規模な増水イベントであった台風21号の結果を示したが、同様の結果が2017年台風18号による増水イベントでも得られた。平水時における MicP 濃度の平均値 (3.4 個/m³, 0.60mg/m³) と比較すると、増水期のピークは1桁から2桁大きく、出水時に多量の MicP が河川を流下していることがわかり、既往の汚濁物質の輸送特性と類似していることがわかった。

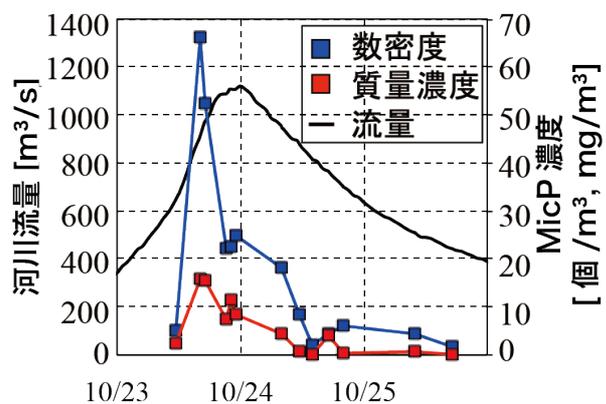


図3 台風21号による出水時の MicP 濃度の時系列変化

一般的に、汚濁物質の輸送量は河川流量と関係づけられる。そこで、MicP 濃度に河川流量を乗じることで MicP 輸送量を評価し、MicP 輸送量 (数密度と質量濃度に基づく MicP 輸送量をそれぞれ L_n 及び L_m と称す)、と河川流量 Q の関係式、すなわち、 $L-Q$ 式を構築した。

$$L_n = 0.097Q^{1.76} (R^2 = 0.83, P < 0.05) \quad (1)$$

$$L_m = 0.0095Q^{1.84} (R^2 = 0.83, P < 0.05) \quad (2)$$

式(1)及び式(2)により江戸川における MicP 輸送量が河川流量から見積もることが可能となった。

(3) 河川横断面における MicP 採取調査

江戸川野田橋と鶴見川新横浜大橋で計測された MicP 濃度の鉛直分布を図 4 に示す。まず江戸川野田橋では、10 月 30 日には水表面付近と底面付近で濃度が大きくなっているのに対し、11 月 29 日には水表面よりも底面付近で高い MP 濃度が観測された。これは、多くの MicP が河床に沈降していることを示しており、河川のような乱れの大きい場であっても多くの MicP が沈降して堆積していることが示唆された。また、11 月 29 日の鉛直平均流速は 10 月 30 日に比べて小さかったことから、河川横断面の乱れが小さく、沈降しやすい環境下であったと推察される。一方、9 月 17 日の鶴見川での観測では、水表面と底面で MicP 濃度が高く、中層で低いという鉛直分布が確認されたが、11 月 28 日では、鉛直方向に一様な分布であった。このような MicP 濃度の鉛

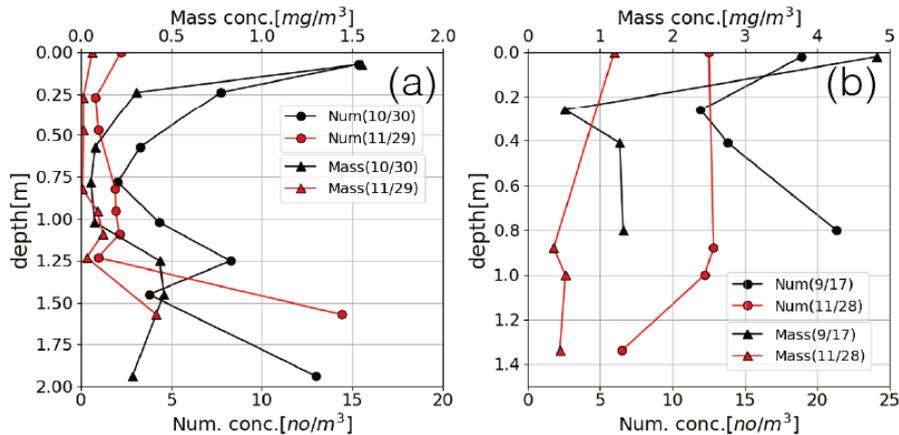


図 4 江戸川野田橋(a)及び鶴見川新横浜大橋(b)における MicP 濃度の鉛直分布

直分布の決定要因を今後詳細に研究するため、引き続き研究を推進していく。

さらに、横断方向と鉛直方向の MicP 濃度分布が MicP 輸送量推計への影響を考察するため、鶴見川新横浜大橋では MicP 濃度の横断分布も計測した。左岸側に比べて右岸側の MicP 濃度の方が高いという大まかな傾向は見てとれるが、鉛直分布と比較すると、特徴的な分布形状は確認されなかった。ここでは 9 月 17 日における MicP 濃度の横断分布と鉛直分布を考慮して MP 輸送量の推計を試みた。観測日に ADCP で計測した流速と MicP 濃度の積を横断方向と鉛直方向に関して積分することで MicP 輸送量を計算し、これを真値とした。水表面 1 点の MicP 濃度 (Case1)、鉛直 4 点観測の MicP 濃度の平均値 (Case2)、横断 4 点観測の MicP 濃度の平均値 (Case3) に流量を乗じて計算した 3 つのケースの MicP 輸送量と真値を比較することで、MicP 濃度の横断面分布の影響を考察した。数密度に関しては、横断変化も小さいので、いずれのケースでも 11-35% の誤差に留まっている。一方、質量濃度に関しては、Case1 では大きく過大評価しているが、Case2、3 では約 100% の誤差となった。これは、MicP 1 個当たりの質量のばらつきが影響したためと考えられる。また、Case 間で比較すると、数密度と質量濃度で共通して Case3 で最も MP 輸送量の推計誤差が小さいことがわかる。このことから、横断分布よりも鉛直分布が重要であることが示唆された。

(4) 全国におけるプラスチック流出量の

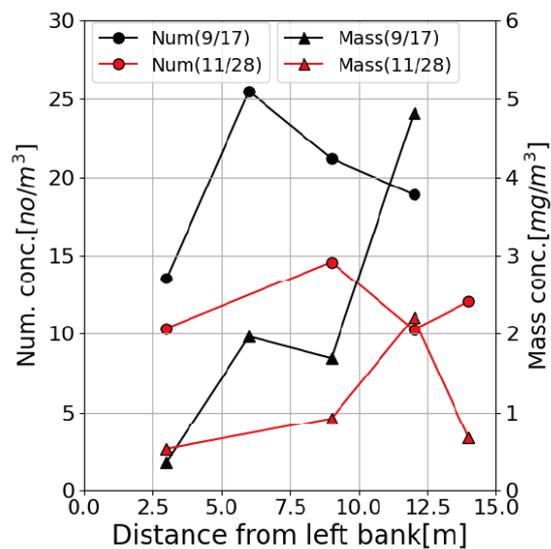


図 5 鶴見川新横浜大橋における MicP 濃度横断分布

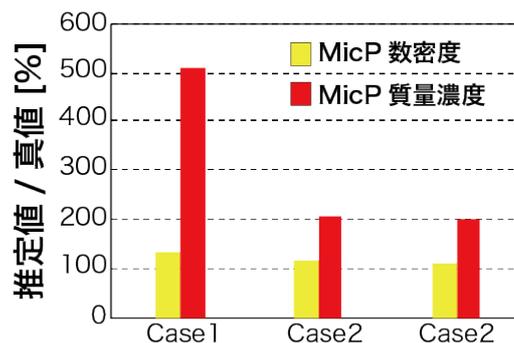


図 6 MicP 輸送量推計への横断面分布の影響

推計

全国河川での MicP 採取調査の結果 (4(1)), MicP 濃度を目的変数, 流域特性 (市街地率及び人口密度) を説明変数とする線形回帰式が得られた. そこで, 全国を対象に 1km² メッシュで市街地率及び人口密度を整理して, MicP 濃度と流域特性の回帰式に代入することで, 1km² メッシュから排出される MicP 濃度の全国マップを作成した. さらに, 既往研究の MicP とそれよりも大きなマクロプラスチック (MacP) の比率を用いることで MacP 濃度も計算した. 全国の降雨量の観測値から水収支解析に基づき, 1km² メッシュの表面流出量を計算し, 前述の MicP と MacP の濃度に乗じることで, 高解像度なプラスチック流出量マップを作成した. 全国におけるプラスチック流出量を推計したところ, 日本の陸域から海洋に流出するプラスチックの総量は年間 210 から 4776 トンと推定され, 東京や大阪, 名古屋など人口の多い都市部でのプラスチック流出量が高いことが明らかになった. 本研究成果は, 国際学術雑誌 *Water* (IF: 2.524) に掲載された (Nihei *et al.*, 2020).

(5) 河川におけるマクロプラスチック輸送量の計測に向けた画像解析手法の開発

本研究により全国河川の MicP 濃度は明らかになったが, MicP のソースである MacP は未だ計測手法が確立されておらず, 海洋への流出量が未知である. Nihei *et al.* (2020) では, 既往研究の MicP と MacP の比率から我が国の MacP の流出量を推計したが, 国・地域によって異なると考えられ, こうした推計値を検証する上でも MacP の河川での計測手法の確立は緊迫の課題である. そこで, 本研究を MacP 輸送量の把握にも展開するため, 河川浮遊ごみ (自然系と人工系ごみ) の画像解析手法の開発を行った. 本画像解析手法は, 橋梁から鉛直下向きに撮影された動画から色情報に基づき水表面を流下するごみを検出してテンプレートマッチングからその面積フラックスを計測するものである. 図 8 は本手法を適用して実験水路を流下するペットボトルを検出した結果である. 図 8(b) では, 値が大きい画素程, 周囲に比べて知覚的な色差が大きいことを示している. この色差にある閾値を設定することで, 図 8(c) のようにペットボトルのみを検出できる. この検出画像に基づき, テンプレートマッチングにより, 1 フレーム間の移動距離を明らかにすることで面積フラックスを計測することができる. 本研究成果は, 国際学術雑誌 *Scientific Reports* (IF: 4.525) に掲載された (Kataoka and Nihei, 2020).

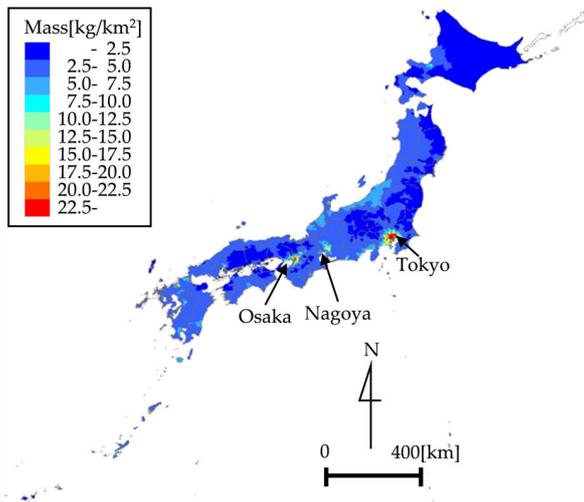


図 7 日本全国におけるプラスチックごみ流出量マップ

と推定され, 東京や大阪, 名古屋など人口の多い都市部でのプラスチック流出量が高いことが明らかになった. 本研究成果は, 国際学術雑誌 *Water* (IF: 2.524) に掲載された (Nihei *et al.*, 2020).

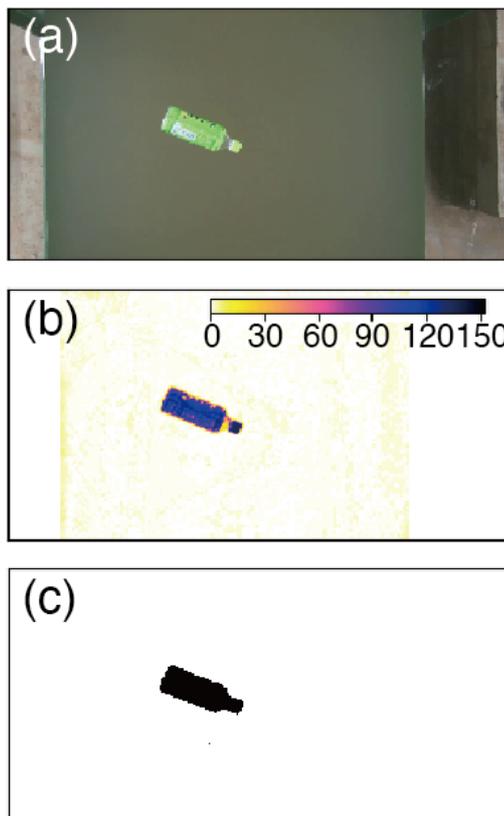


図 8 画像解析に基づく MacP の検出結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Kataoka Tomoya, Nihei Yasuo, Kudou Kouki, Hinata Hirofumi	4. 巻 244
2. 論文標題 Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Pollution	6. 最初と最後の頁 958 ~ 965
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kataoka Tomoya, Murray Cathryn Clarke, Isobe Atsuhiko	4. 巻 132
2. 論文標題 Quantification of marine macro-debris abundance around Vancouver Island, Canada, based on archived aerial photographs processed by projective transformation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Marine Pollution Bulletin	6. 最初と最後の頁 44-51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.08.060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kataoka Tomoya, Nihei Yasuo	4. 巻 10
2. 論文標題 Quantification of floating riverine macro-debris transport using an image processing approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 2198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41598-020-59201-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nihei Yasuo, Yoshida Takushi, Kataoka Tomoya, Ogata Riku	4. 巻 12
2. 論文標題 High-Resolution Mapping of Japanese Microplastic and Macroplastic Emissions from the Land into the Sea	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Water	6. 最初と最後の頁 951 ~ 951
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3390/w12040951	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Tomoya Kataoka, Fumiya Kitaura, Yasuo Nihei
2. 発表標題 Spatial distribution of microplastic concentrations in a cross-section of the Edo River
3. 学会等名 ECSA57 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡智哉, 二瓶泰雄, 工藤功貴, 日向博文
2. 発表標題 日本国内河川におけるマイクロプラスチック汚染の実態
3. 学会等名 日本環境化学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡智哉, 北浦郁弥, 二瓶泰雄, 工藤功貴
2. 発表標題 江戸川におけるマイクロプラスチック濃度の横断・鉛直分布特性とMP輸送量評価
3. 学会等名 第73回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kataoka, T., T. Fujiyama, and Y. Nihei
2. 発表標題 Continuous monitoring for floating-debris flux in rivers with image-analysis technique
3. 学会等名 38th IAHR World Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kataoka, T. and Y. Nihei
2. 発表標題 Microplastic contamination of the surface waters of Japanese rivers
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	二瓶 泰雄 (Nihei Yasuo) (60262268)	東京理科大学・理工学部土木工学科・教授 (32660)	