世界の幸せをカタチにする。
Creating Peace & Happiness for the World
Musashino University
武蔵野大学 学術機関リポジトリ
Musashino University Academic Institutional Repository

Review of Microplastics behavior in the Groundwater

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2023-04-20
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 八十歩, 奈央子, 真名垣, 聡
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://mu.repo.nii.ac.jp/records/2097

地下水環境におけるマイクロプラスチックの輸送動態

Review of Microplastics behavior in the Groundwater

八十歩　奈央子 *
YASOBU Naoko

真名垣　聡 †
MANAGAKI Satoshi

1. はじめに

人類は様々な発明を繰り返し、よりよい暮らしや持続可能な発展のために貢献してきた。

その中でも、化学物質における化学農薬や化学肥料は、飛躍的な食糧生産システムに焦点を当てたとき、この構築に貢献している。この恩恵を受けた人類は、2022 年現在の世界の人口は 80 億人に到達しようとしている。このような地球の繁栄を支える化学物質の中で、依然大きな生産量をほこる「プラスチック」は、人類の暮らしに貢献している物質の一つである。「プラスチック」は、様々な使用用途があり、衣食住のみならず、様々な環境や製品等における様々な使われ方をしている。

一方、地球環境における廃プラスチックの破片である「マイクロプラスチック」のごみ問題は、近年世界的な環境問題のひとつに上げられてもいる。この問題は、地上で使用された製品から「マイクロプラスチック」化した破片が、風などで飛ばされる、または雨水などにより土壌中へ輸送され、側溝などから河川へ流れ出たのち、最終的に海までたどりつき、現在では世界中の海で検出が確認できる「海洋プラスチックごみ問題」となっている。近年この問題は世界的な環境問題のひとつであり、喫緊の課題として議論されている。

現在、海洋、河川などの水環境や大気環境からマイクロプラスチックの分布について様々な報告がある。一方、比較して地下水環境についてはまだ多くの報告がなく、起源や輸送動態についてさらなる報告が望まれている。地下水環境は淡水の供給源として 2 億人以上をまかなっており、また農業や工業にも多く使用されている。

本稿では、新しい環境化学物質のひとつである「プラスチック」について、特に地下水環境における 5mm 以下の破片化された「マイクロプラスチック」の輸送動態について解説する。

* 環境学研究科 博士後期課程 , 環境研究所 客員研究員
† 環境学研究科 准教授 , 環境研究所 研究員

受理日：（2022 年 11 月 3 日）
発行日：（2023 年 3 月 1 日）

2. プラスチック

2.1 プラスチックの用途

プラスチックとは、主に石油由来の合成樹脂であり、商業や工業、農業など様々な用途に利用されている。衣食住を例にあげると、日常生活に欠かせないものとして、衣類に使われている「化学繊維」、テイクアウトの食事の購入時に包まれている「プラスチックパッケージとビニール袋」、住環境における計量カップやプラスチック製のコップなどの小物にまで使われている。プラスチック由来の原料が使われている製品は、長く使用できるという観点からでは「持続可能性」が高いという側面も否定はできない。実際に化学繊維の衣類は、綿素材の衣類より劣化するのが遅く、長く着ることができる。自然素材の衣類は、劣化してしまったり、虫にくわれたりすることもある。また、テイクアウトの食事を購入したときに包まれている「プラスチックパッケージとビニール袋」なども忙しい現代人には欠かせない梱包製品となっている。住環境における計量カップやプラスチック製のコップも、自然素材のガラス製のコップより、長く使用できるという観点からは持続可能性が高い。ガラス製のコップは落としただけで割れてしまうが、プラスチック製のカップやコップは、割れてしまうという確率は低い。

このように、プラスチック製品には耐久性や使用可能時間の観点からの「持続可能性」が高い一方、廃プラスチックになり焼却による処理が施されない場合は、自然界における光分解や熱酸化による分解のため、数百年から数千年の時間が必要になり、廃プラスチックという（環境におけるマイクロプラスチックの排出源）化学物質としての自然界での存在で見る「持続可能性」も併せて高い。

2.2 マイクロプラスチック

5mm 以下の破片化された「マイクロプラスチック」には、さまざまな種類や形状が存在する。ここに種類別マイクロプラスチックの例をあげる。

2.2.1　形状（Shape）

形状には、Fragment や Fiber、Film、Foam、Pellet、Sphere、Line、Bead、Flake、Sheet、Granule、Paint、Foil、Nurdle などがある[1)]。

表 1.　マイクロプラスチックの形状（Shape）

1.	Fragment	破片	8.	Bead	玉、ビーズ
2.	Fiber	繊維	9.	Flake	断片、フレーク
3.	Film	フィルム	10.	Sheet	シート
4.	Foam	発泡させているもの	11.	Granule	顆粒
5.	Pellet	小粒	12.	Paint	塗料
6.	Sphere	球体	13.	Foil	ホイル
7.	Line	ライン	14.	Nurdle	レジンペレット

（Koelmans 等、 2019）より筆者作成

2.2.2　ポリマータイプ（合成樹脂種類）

合成樹脂には、PE、PP、PS、PVC、PET、Acrylic、PEST、PUR、Nylon、Polyester、Cellulose、Cellophane、SAN、PC、PDMS、PLA、PTFE、SBR、Silicone、Epoxy-resin などがある[1)]。

表 2. ポリマータイプ（合成樹脂の種類）

1.	PE	ポリエチレン	11.	Polyester	ポリエステル
2.	PP	ポリプロピレン	12.	Cellulose	セルロース
3.	PS	ポリスチレン	13.	Cellophane	セロファン
4.	PVC	ポリ塩化ビニール	14.	SAN	AS 樹脂
5.	PET	ポリエチレンテレフタレート	15.	PC	ポリカーボネート
6.	PA	ポリアミド	16.	PDMS	ポリジメチルシロキサン
7.	Acrylic	アクリル	17.	PLA	ポリ乳酸
8.	PMMA	ポリメタクリル酸メチル（メタクリル樹脂）	18.	SBR	スチレン-ブタジエンゴム
9.	PUR	ポリウレタン	19.	Silicone	シリコーン樹脂
10.	Nylon	ナイロン	20.	Epoxy-resin	エポキシ樹脂

（Koelmans 等、2019）より筆者作成

3. 地下水環境におけるマイクロプラスチックの報告

環境中に放出されたマイクロプラスチックの分布や輸送動態に関しては、オランダや米国、オーストラリアなどを中心に国内外において様々な報告がある。特に、河川や湖沼、海洋への輸送動態に関しての研究報告が主であるが、一方、地下水にフォーカスした研究は世界的に見ても報告例が少ないのが現状である。Huang 等[2] は地下水や農地の土壌等に焦点をあて、世界の様々な地域で検出されるマイクロプラスチックの濃度分布及びその排出源や環境動態（図1）についてまとめている。

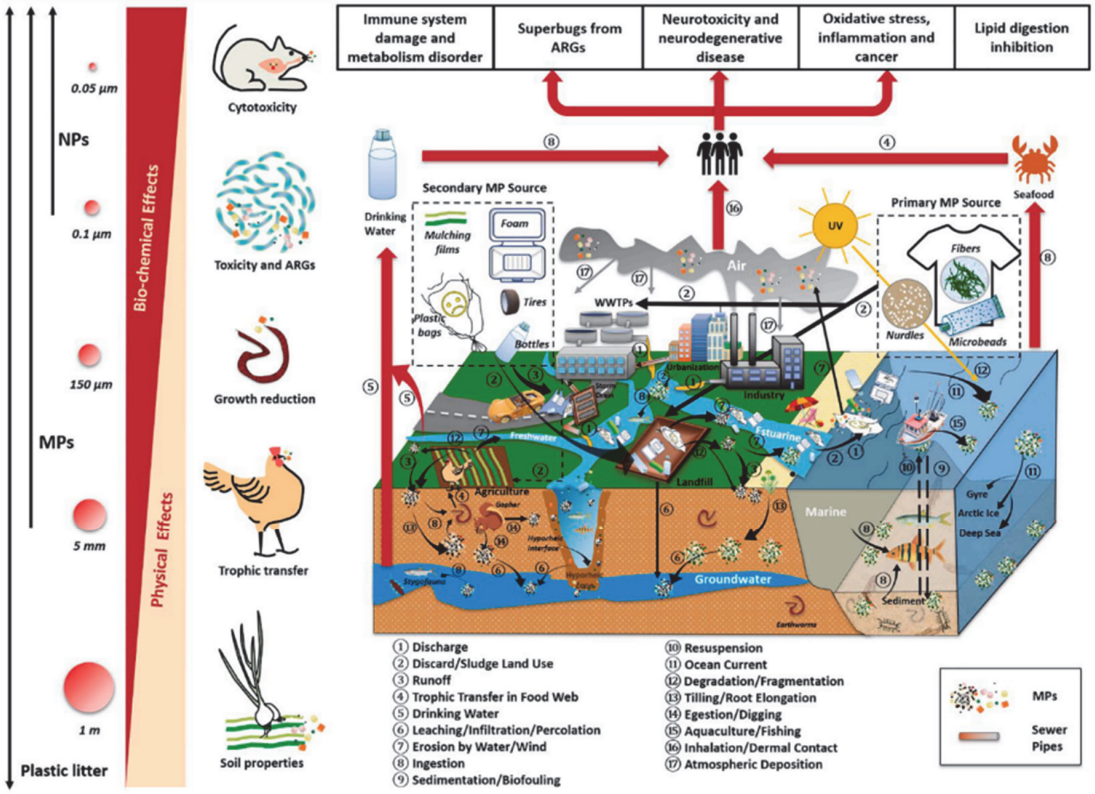

図 1. 環境におけるマイクロプラスチックの発生源、経路　（Huang 等、2021）

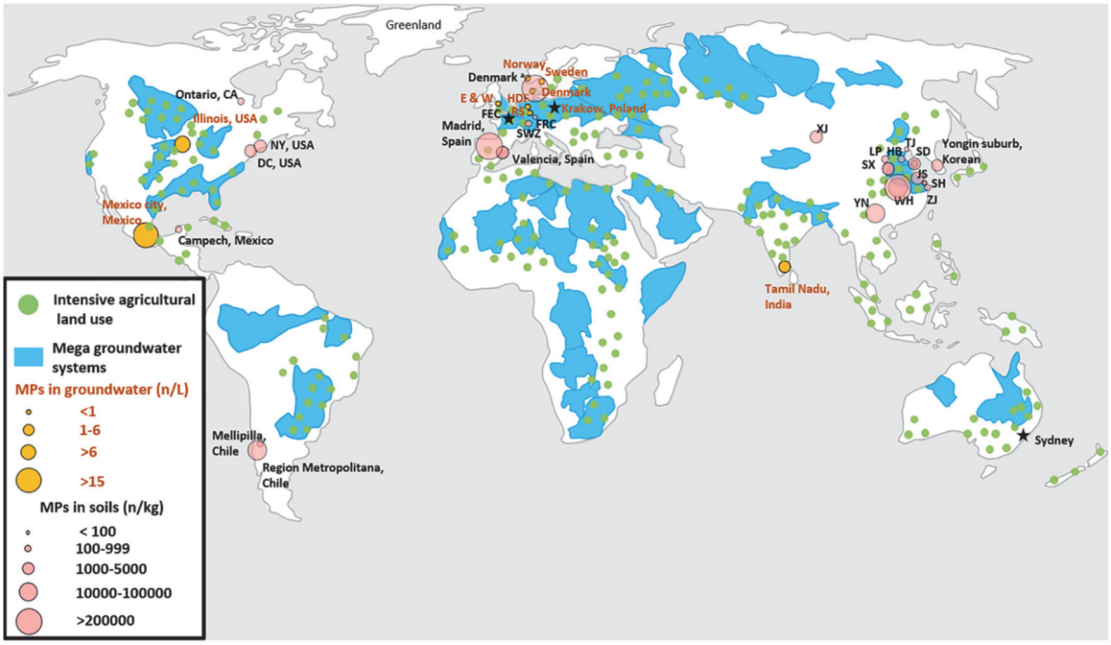

図 2. 土壌および地下水中のマイクロプラスチック存在量 （Huang 等、2021）

オレンジ；地下水中のマイクロプラスチック濃度（個 /L）、ピンク；土壌中のマイクロプラスチック濃度（個 /kg）

表 3. 地下水中におけるマイクロプラスチック濃度

	場所	地下水タイプ	濃度(n/L)	サイズ	形状 (Shape)	構成 ポリマータイプ
1.	メキシコ メキシコシティ	公共の飲用水	18±7n/L	0.5-5mm	Fibers 繊維 Fragments 破片	PTT ポリトリメチレンテレフタレート エポキシ樹脂
2.	米国 イリノイ州	井戸と泉 カルストシステム 深さ 65m	6.4n-15.2n/L	1.5mm	Fibers (100%)	PE ポリエチレン

3.	スウェーデン スコーネ	蛇口　飲用水	0.174n/L	0.15㎜ (32%)	Fibers 繊維(19%) Fragments 破片(81%) Fragments & Fibers	主なもの PA ポリアミド PET ポリエチレンテレフタレート & Acrylates アクリル酸 PP ポリプロピレン PS ポリスチレン & PE ポリエチレン
4.	ドイツ ホルドルフ	井戸	0.0007n/L	0.05- 0.15㎜	Fragments 破片	PE ポリエチレン

（Huang 等、2021）より筆者作成

3.1 土壌および地下水中のマイクロプラスチック存在量

図 2、及び表 3 に各国における土壌および地下水中のマイクロプラスチック存在量を示す。地下水中の報告例は多くないものの、メキシコのメキシコシティや米国のイリノイ州、インドのタミル・ナードゥ州で高いとの報告がなされている。一方土壌中の存在量は、中国や欧州などで比較的高い数値が報告されている。青色の地域は巨大な地下水システムを有す地域であり、緑色の丸い点が存在する地域は、集中的に農業が行なわれている地域をあらわしている。地下水 1L あたりのマイクロプラスチック粒子の濃度が最も高い地域は、1. メキシコのメキシコシティ、ついで 2. 米国のイリノイ州であった[2)]。Panno（2019）ら[4)] の研究では、カルスト地形の地下水帯水層に焦点をあて研究している。この研究では、地下水中からマイクロプラスチックが検出されており、それらは人間活動による人為的なごみ、および個人の浄化システムからの排水であるという結論があげられていた。この研究では、マイクロプラスチックの Fiber 繊維が全ての地域で発見されている。すべてのごみは人為的なごみである、自動車、建築、家庭や農業関係のごみであり、ポリマータイプは、ポリエチレン、ポリプロピレン、およびポリスチレンであった。他にも Samandra（2022）ら[5)] の地下水中のマイクロプラスチックの研究は、農業由来のマイクロプラスチックに焦点もあてた研究も報告されている。いずれにしろこれら

の結果はマイクロプラスチックが帯水層内を長距離移動できることを示唆している。

3.2 地下水環境におけるマイクロプラスチックの排出源

地下水環境に存在するマイクロプラスチックの汚染源（マイクロプラスチックの負荷）については地域ごとの地質や涵養量にも依存するため、様々な議論がなされている。例えば、Viarolii 等[3] は汚染源として、大気経由、表層水経由、浸透システム、都市や農業地域からの寄与を想定して議論をおこなっている。一般的に雨水などの大気環境からの水の寄与は帯水層への主要な涵養となるが、沈着物としてのマイクロプラスチックの負荷は必ずしも十分に検討されているわけではない。雨水中のマイクロプラスチックに関しては Liu 等（2019）[6] や Klein と Fischer（2019）[7] が都市域で最大 250 個 /m^2/ 日で検出されたと報告し、また郊外地域での報告（Allen 等、2019[8]）もあり最大で 365 ± 69 個 /m^2・日（主成分：ポリプロピレンやポリスチレン）と報告している。この報告では、付近に大規模な農業活動や工業活動がなくまた推定される汚染源からは 100km 離れており、マイクロプラスチックの長距離輸送について示唆している。また、マイクロプラスチック濃度と風向・風速、雨量・風速の間に正の相関があることが報告されている。

表層水経由としては廃棄物投棄や処理場が排出源となりうる。また河床間隙水域（hyporheic zone）は、土壌の細孔に似た大きさの粒子がより多く存在するマイクロプラスチックの重要な集積ゾーンであり、帯水層にマイクロプラスチックを導入する可能性があることを指摘している。揚水によって地下水位が低下している場合は、も MPs が発生する。特に、河床が編組された一時的な河川の場合は、洪水時に大量の汚染物質が帯水層に移動する可能性がある。

地下水の浸透システムにおいては、枯渇した帯水層の回復という効果がある一方で、帯水層に直接、汚染物質を持ち込む可能性がありこれまで様々な生活排水に由来する化学物質が検出されている。これらのシステムは、帯水層内に直接導入する可能性があるため、マイクロプラスチックの排出源としての今後の詳細な研究の必要性が指摘されている。

農業用土壌は、下水汚泥の肥料としての利用や、プラスチック製肥料（被覆肥料）や梱包材を使用することでマイクロプラスチックの供給源となる可能性がある。環境中では、紫外線照射や風化作用をうけてより小さな粒子に分解して土壌に浸透すると、さらに土壌生物によるかく乱（bioturbation）によりさらに地中へと浸透し、最終的に帯水層まで移動することも報告されている。

3.3 今後の課題

一方、地下水に関する報告例がまだ多くない点として統一的な分析方法が存在しないことで、存在量の結果の比較が難しくなっているとする報告もある[3]。地下水における代表的な試料を採取することは他の表層水（河川水）と比べて難しく、結果として試料採取方法が統一されていない。特に採取において使用されるネットやフィルターのメッシュサイズが異なるため実際に分析されるマイクロプラスチック断片が異なるのが大きな問題点でもある。同時にその分析方法についても研究機関に応じていくつかの方法が適用されている。代表的な方法である光顕微鏡法では比較的形状の大きな断片を明らかにできる一方、ポリマーの種類に関して情報が難

しい。フーリエ変換赤外分光法（FT-IR）では一般的には数十μm以上のプラスチック断片を対象としており、種類分別に適しているが、多くの個数をこなすには時間を要する。熱分解ガスクロマトグラフ質量分析計は600-700℃で試料を気化させ、質量分析する手法である。課題としては、数、形状、大きさを事前に解析する必要がある。蛍光法は疎水性粒子を親油性蛍光色素で処理し、顕微鏡で観察する。測定は自動化することができるため、さらなる発展が期待されている。

4. まとめ

本稿では、「プラスチック」について、5mm以下の破片化された「マイクロプラスチック」の輸送動態に焦点をあて、既存論文のレビューをおこなった。

欧州や米国、豪州の研究では、地下水の地形と帯水層が、マイクロプラスチックを地下水流系への輸送を可能にしていることを示していた。

近年では水道水や井戸、飲料水や地下水などさまざまな水源からマイクロプラスチックが検出されており、さまざまな起源や侵入ルートからの調査研究の必要がある。

日本におけるマイクロプラスチックの輸送動態の研究は、海洋や地表水である河川や湖沼における報告はあるが、地中水である地下水における日本での既存論文の研究報告はない。

日本でも地下水におけるマイクロプラスチックの輸送動態について、あらたな知見が必要とされる。

参考文献

1）Albert A. Koelmans., Nur Hazimah Mohamed Nor., Enya Hermsen., Merel Kooi., 2019. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. Water Research 155, 410-422.

2）Jinsheng Huang., Hao Chen., Yulin Zheng., Yicheng Yang., Yue Zhang., Bin Gao., 2021. Microplastic pollution in soils and groundwater: Characteristics, analytical methods and impacts. Chemical Engineering Journal 425, 131870.

3）Stefano Viaroli, Michele Lancia, Viviana Re., 2022. Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. Science of total environment. 824, 1-7.

4）Samuel V. Panno., Walton R. Kelly., John Scott., Wei Zheng., Rachael E. McNeish., Nancy Holm., Timothy J. Hoellein., Elizabeth L. Baransk. 2019.
Microplastic Contamination in Karst Groundwater Systems. Groundwater 57(2), 189-196.

5）Subharthe Samandra., Julia M. Johnston., Julia E. Jaeger., Bob Symons., Shay Xie., Matthew Currell., Amanda V. Ellis., Bradley O. Clarke. 2022.
Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. Science of the Total Environment 802, 149727.

6）Lu, Q., He, Z.L., Stoffella, P.J., 2012. Land application of biosolids in the USA: a review. Appl. Environ. Soil Sci., 201462
7）Klein, M., Fischer, E.K., 2019. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the metropolitan area of Hamburg, Germany. Sci. Total Environ. 685, 96–103.
8）Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Duranteza, P., Simonneau, A., Stéphane, B., Galop, D., 2019. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. Nat. Geosci. 12, 339–344.