

1. はじめに

2015 年に採択された持続可能な開発目標 (SDGs) や、2018 年に発表された EU プラスチック戦略をはじめとして、世界的に海洋汚染の防止とプラスチック使用量の削減に関する対策が進められている。この対策の効果が表れれば、現存するプラスチック廃棄物の回収が必要かもしれないものの、長期的には環境中のマイクロプラスチック (MPs) 存在量が減少していくのだろう。これを確認するために、我々は、MPs 存在量の動向を監視しなければならない。

筆者は、MPs の調査結果の表現方法に疑問を感じている。まず、我々の目前に存在する MPs は MPs 環境汚染の本質ではない。MPs による環境汚染は、ある空間に MPs が大量に存在することによって引き起こされる。これは MPs 存在量によって報告される。しかしながら、MPs 存在量は二次的な現象である。ある空間に MPs が存在するのは、発生源から MPs がやってきたからである。すなわち、MPs の流入・蓄積の方が一次的な現象であり、MPs 環境汚染の本質である。したがって、本研究では、MPs の蓄積速度を測定する。

次に、ある砂浜における定点やホットスポットの MPs 含有量は、その砂浜全体の MPs 存在量を表現していない。すなわち、その報告された値によって、複数の砂浜間の MPs 存在量の比較をしたり、MPs の経時変化を評価したりできない。まず、定点がたまたまホットスポットだったり、非ホットスポットだったりするので、観測値は代表値を表さない。これを防止するためには標本数を増やせばよいが、労力が増えるので現実的ではない。次に、ある砂浜のホットスポットの報告値は、偏って存在する MPs から特に濃度の高い部分を対象にした測定値である。私たちは砂浜同士の MPs 存在量を比較したいのに、えりすぐった MPs の最高値同士を比較している。

本研究では、砂浜を対象として、砂に含まれる MPs の調査結果の表現方法の提案を行う。以下に、解明すべき疑問を示す。

- ・ 調査対象地への MPs 蓄積速度に、信頼できる代表値や明確な傾向が見られるだろうか。
- ・ 調査対象地全体における MPs 存在量を「平均値および誤差 (mg-MPs/m²-砂)」という代表値とばらつきで示すことができるだろうか。

2. 試料と実験方法

2.1. 全体行程

MPs の含有量調査を行う位置の名称を定義する。調査対象とするある程度広い区域を調査対象地と呼ぶ。調査対象地において、砂を採取する 1 単位区画を試料採取面と呼ぶ。

調査対象地を決定する。本研究では、日本の西に位置する九州にある長崎県内で調査を行った。県内に存在する砂浜の海水浴場 A, B, C, D を調査対象地とした。定点調査は海水浴場 A に置いて行い、ホットスポット調査は海水浴場 B, C, D で行った。本研究では実際の調査対象地間の MPs 存在量の比較をすることを目的としていないので、位置を説明しない。調査時期は、海水浴場 A:2021/7~2022/12 (6 回)、海水浴場 B:2022/9、海水浴場 C:2022/10、海水浴場 D:2022/12 である。

まず試料採取面を決定する。定点調査であれば測量して試料採取面を決定する。ホットスポット調査であれば、試料採取面を決定してからその位置を測量によって求める。Asakura (2023)に示す方法で試料採取面の砂を採取し、海水を用いて浮上選別した。実験室に持ち帰った浮上物には、MPs 以外のものが含まれており、また、汚れている。Asakura (2023)に示す方法で浮上物からMPsを選別し、水道水で洗浄し、乾燥して重量を測定した。本研究におけるMPs分析の定量下限値は、13 mg-MPs/m²-砂である(Asakura (2023))。

2.2. 定点調査による蓄積速度の計算

本研究の調査では、初めて($i = 1$)訪れた調査対象地の試料採取面のMPsを採取して持ち帰って測定する(C_{i-1})。すなわち、試料採取面のMPsを消滅させる。一定期間(t_i)をあけて同じ試料採取面(定点)でMPsを採取して持ち帰って測定したとする(C_i)。この時、蓄積速度 r_{acci} (mg-MPs/m²-砂・d)は、

$$r_{acci} = C_i / t_i \quad \text{式(1)}$$

となる。初回の測定値である C_{i-1} は捨てることになる。本研究では、A 海水浴場において、複数の定点を設置し、一定期間を開けて繰り返しMPsを測定することによってMPs蓄積速度を算出した。蓄積速度データは一つでは信頼できない。複数のMPs蓄積速度を得ることによって、平均値やレンジなどの代表値とばらつきが得られるだろう。コンクリート製の道路から海に向かって4, 8, 12, 16, 20, 40 mの距離においてMPsを採取・測定した。

2.3. ホットスポット調査による調査対象地全体のマイクロプラスチック存在量の表現

ある砂浜において、MPsが多く存在、また見当たらないことが目視で確認できる箇所をホットスポット(HS)および非ホットスポット(nHS)として、それぞれの区画のMPs含有量を複数箇所($i = 1, 2, \dots, n$)測定して平均値を得た。またそれぞれの区画の面積を測定し、面積比でMPs含有量を重みづけすることによって、その砂浜全体におけるMPs存在量の代表値とばらつきを表現する方法を考えた。

添え字 H および n は、HS および nHS を表す。ある砂浜におけるHS面積 A_H (m²-砂)、nHS面積 A_n (m²-砂)とする。このとき、それぞれの区画の面積比 r は、

$$r_H = A_H / (A_H + A_n) \quad \text{式(2)}$$

$$r_n = A_n / (A_H + A_n) \quad \text{式(3)}$$

となる。また、サンプルサイズ n 、個々のMPs含有量を C_i (mg-MPs/m²-砂)とすると、MPs平均含有量 C_{ave} (mg-MPs/m²-砂)は、

$$C_{H_ave} = 1/n_H \sum C_{Hi} \quad \text{式(4)}$$

$$C_{n_ave} = 1/n_n \sum C_{ni} \quad \text{式(5)}$$

となる。

砂浜全体のMPs含有量(mg-MPs/m²-砂)を、平均と誤差を用いて表現したい。HSおよびnHSを、そのMPs含有量と面積比を保ちながら合計面積1 m²に集約(総合)することを考える。平均と誤差をそれぞれ総合する。

砂浜全体の平均含有量 C_{all_ave} (mg-MPs/m²-砂)は、それぞれの区画の平均含有量を面積比で重みづけして、

$$C_{all_ave} = r_H C_{H_ave} + r_n C_{n_ave} \quad \text{式(6)}$$

となる。

次に、総合した誤差 δC_{all_ave} (mg-MPs/m²-砂)を考える。式(6)を見ると、測定値(平均値)を面積比で定数倍し、またそれら測定値同士の和を求めている。すなわち、測定値(平均値)に付随する誤差の伝播を考えると、

$$\delta C_{all_ave} = \sqrt{\{(\partial C_{all_ave} / \partial C_{H_ave})^2 (\delta C_{H_ave})^2 + (\partial C_{all_ave} / \partial C_{n_ave})^2 (\delta C_{n_ave})^2\}}$$

$$= \sqrt{\{r_H^2 (\delta C_{H_ave})^2 + r_n^2 (\delta C_{n_ave})^2\}} \quad \text{式(7)}$$

となる。以上から、砂浜全体の MPs 含有量(mg-MPs/m²-砂)を平均と誤差を用いて表現すると、以下の通りとなる。

$$C_{all_ave} \pm \delta C_{all_ave} \quad \text{式(8)}$$

B, C, D 海水浴場においてホットスポット調査を行った。満潮線から陸側の人工物(道路, 階段, 堤防)までを砂浜とみなした。満潮線にはごみが打ち上げられているので、目視で明確に判定できた。人工物から満潮線までの距離をレーザー距離計もしくは巻き尺で測定した。目視で HS を判定し、また、面積と位置を記録した。HS および nHS は比較的容易に判別できる。一つの砂浜につき、HS および nHS の試料採取面を 12 個ずつ抽出して決定した。試料採取面は、調査対象地全体に分布させた。試料採取面の位置は、Asakura (2023)に示す方法で測量した。試料採取面の MPs を採取して実験室に持ち帰った。

3. 結果と考察

3.1. マイクロプラスチック蓄積速度

A 海水浴場での定点調査における MPs 蓄積速度を、図 1 に示す。平均は、1.7 mg-MPs/(m²-sand-d)であった。蓄積速度を表す縦軸は、対数軸であるにもかかわらず上下に大きな幅があり、信頼できる代表値や明確な傾向は得られなかった。道路から 12 m の位置での蓄積速度は比較的安定している。ただし、この位置が当該調査対象地を代表しているわけではない。蓄積速度の特性を把握するためには、継続的な調査を行う必要がある。

砂浜における MPs 蓄積速度の報告例は少ない。アメリカのジョージア州の湿地と浜辺では、0.18 から 1.61 kg/30 日-8000 m²(0.75 から 6.7 mg/m²-d)の蓄積速度が得られた(Lee and Sanders, 2015)。これは、本研究の蓄積速度と同様の値である。また、Eriksson et al. (2013)は、海岸 1 km に 1 日当たりに漂着するプラスチック片を調査した。本研究結果と比較可能な MPs 蓄積速度の測定結果が望まれる。

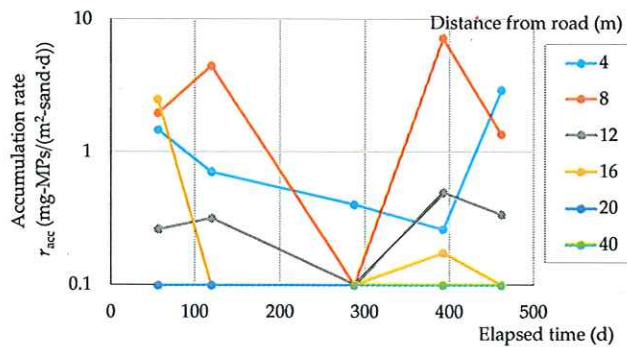


図 1. A 海水浴場での定点調査における MPs 蓄積速度

3.2. 調査対象地全体のマイクロプラスチック存在量の表現

表 1 に B, C, D 海水浴場の面積当たりの MPs 含有量を示す。平均値±誤差の形式で示すと、298 ± 144 mg-MPs/m²-砂、1115 ± 518 mg-MPs/m²-砂および 4084 ± 2243 mg-MPs/m²-砂であった。本研究では、調査対象地間の比較を目的としていないため、地域間の数値の大小に意味づけを行わない。HS の面積は、全面積の 11 から 33%であった。

砂浜における MPs の測定値を、面積あたりの重さ(例えば mg/m²)で報告している例は少ない。インドでは高

所満潮線で約 300 から 1500 mg/m²(Jayasiri et al., 2013), または, 高所満潮線で 1323 ± 1228 mg/m², 低所満潮線で 178 ± 261mg/m²(Karthik et al., 2018), 香港では高所満潮線で 5600 mg/m²(Fok and Cheung, 2015) の MPs が見つかった。これらの調査は, MPs が多く存在するであろう高所満潮線を対象としているため, 測定値は調査対象地全体の平均値より高いであろう。本研究の MPs 測定値は, 調査対象地全体の平均値であるにもかかわらず, 既往の研究の報告値に匹敵している。すなわち, 本研究の調査対象地全体の MPs 存在量は高い。

表 1. B, C, D 海水浴場の面積当たりの MPs 含有量

	Average	Error
	C _{all_ave}	δC _{all_ave}
B	298	144
C	1115	518
D	4084	2243

mg-MPs/m²-sand

4. 結論

現場調査結果の表現方法の提案について, 以下のように説明できる。

- ・ 定点で定期的に MPs を採取測定することによって調査対象地への MPs 蓄積速度を測定したところ, 平均は 1.7mg-MPs/(m²-sand·d)であった。蓄積速度を表す縦軸は, 対数軸であるにもかかわらず上下に大きな幅があった。
- ・ ホットスポットおよび非ホットスポットにおける MPs 含有量を, それぞれの面積で重み付けすることによって, 調査対象地全体における MPs 存在量を「平均値および誤差(mg-MPs/m²-砂)」という代表値とばらつきで示すことができた。

引用文献

- Asakura, H., 2023. Accuracy of a simple microplastics investigation method on sandy beaches. *Microplastics*. 2 (3), 304–321.
- Eriksson, C., Burton, H., Fitch, S., Schulz, M., Hoff, J., 2013. Daily accumulation rates of marine debris on sub-Antarctic island beaches. *Mar. Pollut. Bull.* 66, 199–208.
- Fok, L., Cheung, P.K., 2015. Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution. *Mar. Pollut. Bull.* 99, 112–118.
- Jayasiri, H.B., Purushothaman, C.S., Vennila, A., 2013. Quantitative analysis of plastic debris on recreational beaches in Mumbai, India. *Mar. Pollut. Bull.* 77, 107–112.
- Karthik, R., Robin, R.S., Purvaja, R., Ganguly, D., Anandavelu, I., Raghuraman, R., Hariharan, G., Ramakrishna, A., Ramesh, R., 2018. Microplastics along the beaches of southeast coast of India. *Sci. Total Environ.* 645, 1388–1399.
- Lee, R.F., Sanders, D.P., 2015. The amount and accumulation rate of plastic debris on marshes and beaches on the Georgia coast. *Mar. Pollut. Bull.* 91, 113–119.