

令和 7 年 3 月 28 日

令和 6 年度 ばく露等評価の検討結果に関する報告

1.	ばく露等に関する検討結果	2
1.1.	背景・目的	2
1.2.	個数濃度の推計式の更新・追加.....	3
1.2.1.	はじめに.....	3
1.2.2.	推計方法の検討.....	7
1.2.3.	結果.....	10
1.3.	個数濃度から重量濃度への換算.....	13
1.3.1.	はじめに.....	13
1.3.2.	換算方法の検討.....	14
1.3.3.	結果.....	16
1.4.	ばく露評価におけるまとめと現状理解.....	19
1.5.	現状の課題点と今後の検討の方向性(案)	22
1.6.	別添	23
1.6.1.	ヒアリングの開催概要.....	23
1.6.2.	ヒアリングでの主なご意見.....	23

1. ばく露等に関する検討結果

1.1. 背景・目的

個数濃度の推計式の更新・追加(1.2 節)

有害性評価ではマイクロサイズ（粒径 1 μm 以上）の微細な MicP を対象としているが、ばく露評価では 1 μm 付近の微細な MicP の海洋表層濃度に関するデータは限定的であり、実測のほとんどが粒径 330 μm 以上を対象としている状況にある。そのため、両者を比較するためには、微細 MicP の個数濃度の推計を行う必要がある。

令和 5 年度は、MicP の海洋表層中の濃度を推計する手法として、①べき乗則（Cozar モデル）と②Kaandorp モデルを用いた。今年度は、新たに③青木モデル、④Sugar Lump モデルの 2 つのモデルを追加して検討を行った。

また、環境省の粒径 330 μm 以上の MicP の実測データを、Tokai et al. (2021)¹の補正式を用いてネットから漏れた MicP を補正（150 μm 程度まで）した後、推計に用いた。

環境中の実測データに基づく関係式を用いた重量濃度への換算(1.3 節)

MicP の実測データはそのほとんどが個数濃度（個/ m^3 ）で報告されているが、有害性試験は主に重量濃度（ $\mu\text{g/L}$ ）で報告されている。両者を比較する際は、実環境中の個数濃度を重量濃度に換算、あるいは有害性試験の重量濃度を個数濃度に換算する必要がある。

令和 5 年度は既往研究を参考に、形状・密度を仮定して重量濃度への換算を行ったが、今年度は環境中の実測データに基づく関係式を用いて重量濃度への換算を行った。具体的には、MicP の長径と投影面積の関係式、及び投影面積と重量の関係式を用いて重量濃度への換算を行った。

今年度は、ばく露等評価分科会は開催せず、有識者へのヒアリング及び文献調査にて推計結果をとりまとめたうえで、拡大分科会にて上記検討を行った。

¹ T. Tokai, K. Uchida, M. Kuroda, A. Isobe, Mesh selectivity of neuston nets for microplastics, Mar. Pollut. Bull., 165 (2021), Article 112111

1.2. 個数濃度の推計式の更新・追加

1.2.1. はじめに

令和 5 年度に推計を行った、①べき乗則 (Cozar モデル)、②Kaandorp モデルに加えて、今年度は新たに、③青木モデル、④Sugar Lump モデルの 2 つのモデルを追加して検討を行った。4 報の文献の概要を以下に示す。

また、環境省の粒径 330 μm 以上の MicP の実測データを、Tokai et al. (2021)の補正式を用いてネットから漏れた MicP を補正 (150 μm 程度まで) した後、推計に用いた。

- ① Plastic debris in the open ocean (Cozar A et al. (2014)) ²
- ② Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation (Kaandorp MLA et al. (2021)) ³
- ③ A model for the size distribution of marine microplastics: A statistical mechanics approach (Aoki K et al. (2021)) ⁴
- ④ A threshold model of plastic waste fragmentation: New insights into the distribution of microplastics in the ocean and its evolution over time (George M et al. (2024)) ⁵

² C zar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Irigoien, X.,  beda, B., Hernández-León, S., Palma,  .T., Navarro, S., García-de-Lomas, J., Ruiz, A., Fernández-de-Puelles, M.L., Duarte, C.M., 2014. Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, 10239–10244.

³ Kaandorp, M.L.A., Dijkstra, H.A., Seville, E. van, 2021. Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation. *Environ. Res. Lett.* 16, 054075.

⁴ Aoki, K., Furue, R., 2021, A model for the size distribution of marine microplastics: A statistical mechanics approach, *PloS one*, Vol.16 (11), e0259781-e0259781.

⁵ George, M., Nallet, F., Fabre, P., 2024, A threshold model of plastic waste fragmentation: New insights into the distribution of microplastics in the ocean and its evolution over time, *Marine Pollution Bulletin*, Vol.199, 116012.

①べき乗則 (Cozar モデル)

べき乗則 (Cozar モデル) を図表 1-1 に示す。Cozar モデルは、系外からの MicP の流入 (河川や大気からの流入等) と系外への MicP の流出 (底質や大気への移行) が平衡状態にあるという仮定のもと、体積保存を満たすように粒子が微細化するというモデルである。体積保存のため、粒径が小さくなるにつれて、個数濃度は単調に増加する。海洋表層で完結した閉鎖系 (破碎された MicP が海洋中の表層にとどまる) を想定しているため、推計された個数濃度は上限値に近い値であり、過大評価となっている可能性がある。

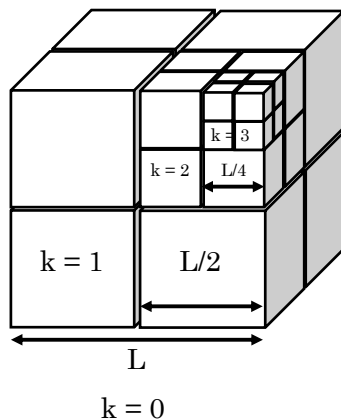
$$A_i^f = \frac{A_{ref} \cdot \alpha \cdot l_{ref}^3}{\alpha \cdot l_i^3} = \frac{A_{ref} \cdot l_{ref}^3}{l_i^3} \quad A(l) = \frac{c}{l^3}$$

A: 存在量、 α : 形状因子、 l : 粒子のサイズ、 c : 定数

図表 1-1 べき乗則 (Cozar モデル)

②Kaandorp モデル

Kaandorp モデルを図表 1-2 に示す。Kaandorp モデルは、MicP の破碎過程はフラクタル構造に従い、粒子の形状に寄らず破碎される確率は一定であるというモデルである。固体地球分野の土壌や岩盤破壊で使われるモデルを適用している。一定の割合で粒子が破碎されるプロセスは無限に繰り返されることを想定しており、粒子が際限なく微細化され続けるという前提が置かれている。 D_N は粒子の形状に依存しており、 $D_N=1$ は繊維状粒子、 $D_N=2$ は平面上 (シート状) 粒子、 $D_N=3$ は破片状粒子の破碎過程を表している。粒子の素材は破碎される確率 p と連続フラグメンテーションインデックス f に影響する (PP では $p=0.45$ 、PE では $p=0.39$)。



$$m(k, f, p) = \frac{\Gamma(k + f)}{\Gamma(k + 1)\Gamma(f)} p^k (1 - p)^f$$

$$n(k, f, p) = 2^{D_N k} m(k, f, p)$$

m : MPs粒子の重量の確率密度分布

k : サイズクラス

f : 連続フラグメンテーションインデックス

p : 破碎される確率

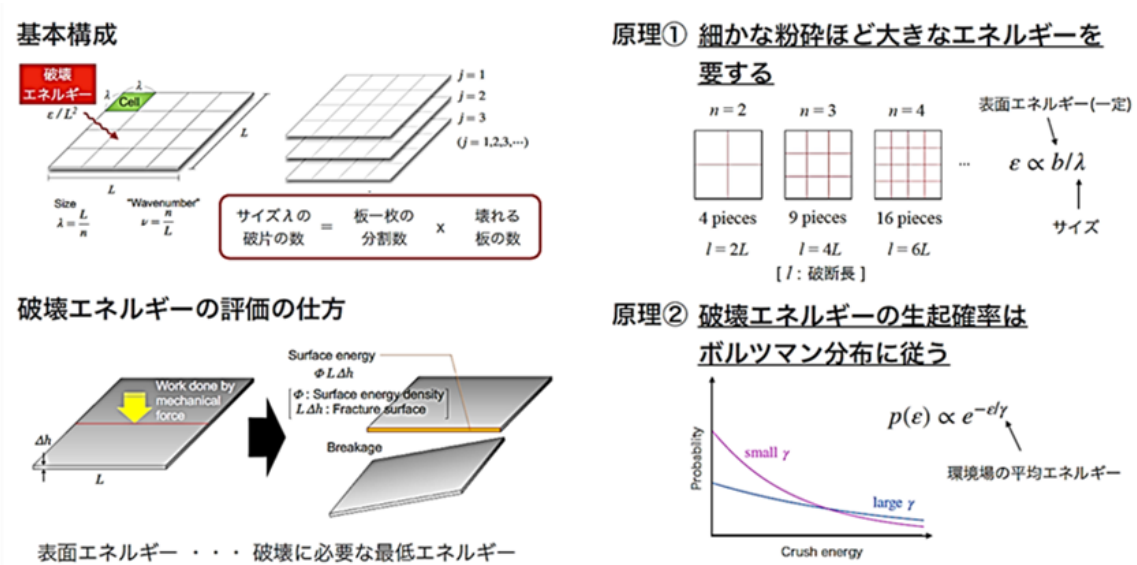
Γ : ガンマ関数

n : 存在量

図表 1-2 Kaandorp モデル

③青木モデル

青木モデルを図表 1-3 に示す。平面破碎を想定しており、粒径 λ が小さくなると、破碎に必要なエネルギーが大きくなり、破碎しにくくなることと、破壊エネルギーの発生確率に統計力学（ボルツマン分布）を適用していることが特徴である。粒径が大きい領域では個数濃度は粒径の 2 乗で変化し、2 次元の Cozar モデルと同様の挙動を示すが、粒径がある程度まで小さくなると、それより小さな粒径では個数濃度は急激に減少する。



個数線密度

$$S(\lambda) = \frac{A}{\lambda^4} \frac{1}{e^{1/\gamma^* \lambda} - 1}$$

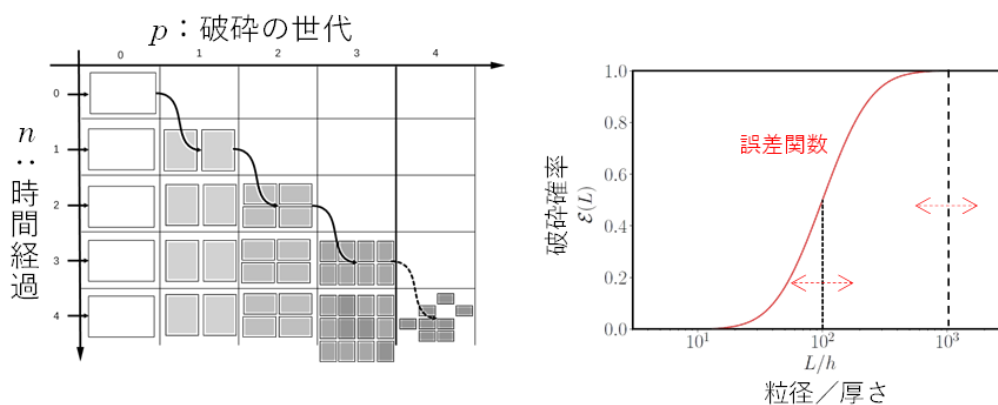
$$\gamma^* = \gamma/b$$

A: 任意の正の定数、破壊MicPの総質量で調整
 λ : 粒径
 γ : e-フォールディング スケール
b: 表面エネルギー

図表 1-3 青木モデル

④Sugar Lump モデル

Sugar Lump モデルを図表 1-4 に示す。時間経過 n と破碎の世代（破碎回数） p に基づいて MicP の個数 $C(n, p)$ を計算する。平面破碎を想定しており、破碎する場合は半分に破碎して、MicP の個数が 2 倍になる。初期投入量 a_0 と年率 τ を設定して、海洋への MicP 投入量が年々増加することも考慮できる。粒径が小さくなると破碎しにくくなることを想定したモデルであり、粒径に閾値を設定し、誤差関数を用いて閾値の前後で破碎確率変動するように調整する。



モデル式

$$C(n, 0) = a_0 (1 + \tau)^n \quad (p = 0)$$

$$C(n, p) = \varepsilon \times 2C(n-1, p-1) + (1 - \varepsilon) \times C(n-1, p) \quad (p \geq 1)$$

a_0 : 系への投入量

τ : 系へのMicP投入量の増加率 (/年)

$C(n, p)$: 時間 n 、破碎回数 p のMicPの個数

ε : 破碎確率

図表 1-4 Sugar Lump モデル

1.2.2. 推計方法の検討

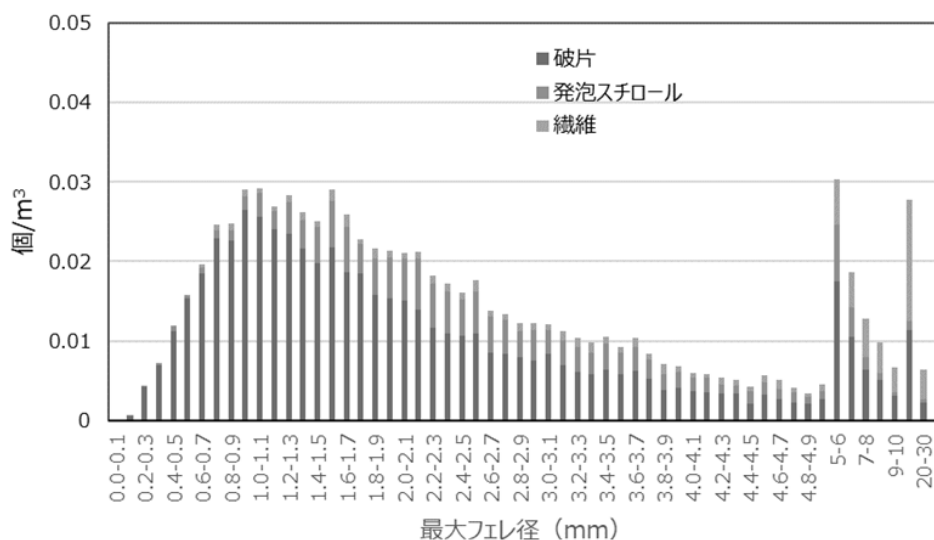
(1) 環境省実測データの使用

微細 MicP の個数濃度の推計を行うにあたり、環境省の「令和 3 年度 沖合海域における漂流・海底ごみの分布調査検討業務」における海洋表層の実測データ（目合 330 μm のネット使用）を用いた。

環境省実測データは、2021 年から 2022 年にかけて日本近海 89 地点で採取され、「漂流マイクロプラスチックのモニタリング手法調和ガイドライン」に従って分析されたものである。個数濃度は、基本的に粒径 100 μm ごとの分布として整理されており、形状は破片、発泡スチロール、繊維に区別されている（図表 1-5）。本推計には、海洋表層から最も多く検出されており、毒性試験においても使用率の高い破片のデータを用いた。

環境省実測データは日本近海 89 地点分存在し、地点によって個数濃度が異なる。そのため、推計に利用するデータの選定方法として、全地点における各粒径区分の最大値を利用する方法、中央値を利用する方法、平均値を利用する方法等が考えられる。本検討では、異常値を抜いた上限側の値として環境省実測データの 95%ile 値、下限側の値として 5%ile を利用することとした。

また、令和 5 年度の検証結果より、日本近海において個数濃度の推計を行う場合は、海域区分ごとに推計を行う必要はなく、日本近海全体を 1 つの海域として推計を行っても問題がないことが示唆されたため、日本近海全体を 1 つの海域として推計を行った。

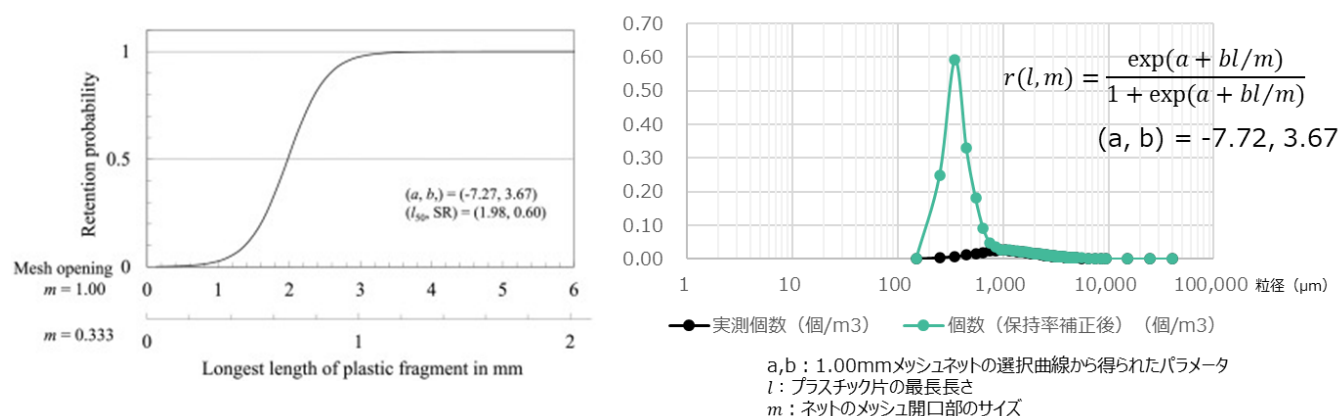


図表 1-5 環境省実測データの粒径別個数濃度分布（全地点平均）

(2) 環境省実測データの補正

環境省実測データは、目合 330 μm のネットを使用しており、粒径 1 mm を下回るあたりで個数濃度は下降に転じる傾向にある。これは、採取時に 1 mm 以下の MicP が網目からのすり抜けてしまうことや、FTIR 分析時に損失してしまうことなどが原因と考えられる。

令和 5 年度の推計では、確実に採取・分析ができていると考えられる粒径 1 mm 以上の粒子の実測データを使用した。今年度は Tokai et al. (2021)⁶の補正式を用いることにより、ネットから漏れた MicP を補正 (150 μm 程度まで) し、推計に用いた。選択曲線と環境省実測データの補正結果を図表 1-6 に示す。



図表 1-6 選択曲線と環境省実測データの補正結果

(補足) Mesh selectivity of neuston nets for microplastics (Tokai et al. (2021)) の概要

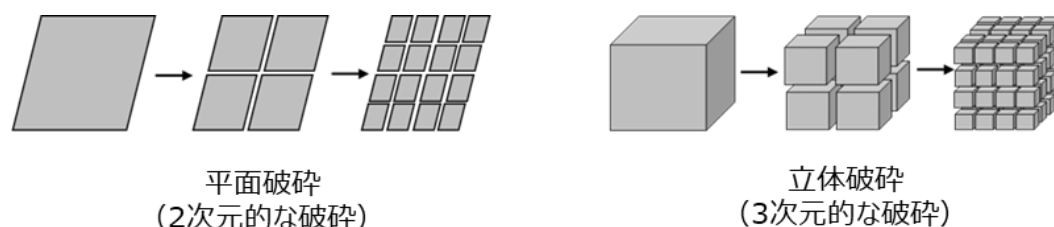
2種類のニューストンネット(メッシュサイズ 1.00mm および 0.333mm)を並行して曳航し、各ネットが収集する MicP の粒径の選択性を比較した。選択曲線は、2つのネットから収集された MicP のサイズ分布を比較することによって推定。0.333mm のネットでは、最長長さが 0.4 ~1.0mm の MicP の約 60%がメッシュを通過し、未収集であった。また、最長長さが 0.4mm 以下の MicP を最大でも 1.5%しか保持せず、0.3mm 以下の粒子はほとんど保持しない結果となった。0.333mm ネットにおけるメッシュ選択性は、1.00mm メッシュネットの選択性に基づいて、幾何学的類似性(プラスチック片の長さでメッシュ開口部のサイズの関係)を仮定した推計式で表された。この推計式を用いることで、0.333mm メッシュネットで収集される MicP のサイズ分布を補正。その結果、0.333mm ネットでの収集結果が過小評価されていることが明らかとなり、実際にネットに入っていたはずの微小プラスチックの数を推定。

⁶ T. Tokai, K. Uchida, M. Kuroda, A. Isobe, Mesh selectivity of neuston nets for microplastics, Mar. Pollut. Bull., 165 (2021), Article 112111

(3) 破碎形態の検討

MicP が環境中で微細化していく過程で想定される破碎形態は、シート状の粒子が 2 次元的に破碎する平面破碎とブロック状の粒子が 3 次元的に破碎する立体破碎が想定される。破碎イメージを図表 1-7 に示す。

今年度のヒアリングより、破碎形態に関して、海洋の MicP はフレーク状やシート状のものが多く、薄い板が割れていくようなプロセス（2 次元的な破碎）が中心であり、アスペクト比が 1 に近づくと 3 次元的な破碎が進むと想定される。2 次元的な破碎から 3 次元的な破碎に遷移する境界の粒径に関しては現在研究段階にあるが、今年度の分科会での専門家判断により、本検討では粒径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上に関しては 2 次元的な破碎が主であり、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下で 3 次元的な破碎に遷移していくと想定した。



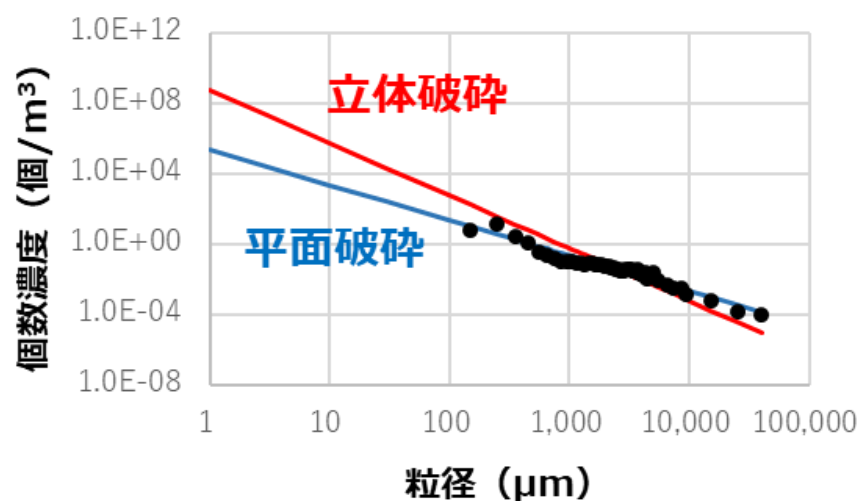
図表 1-7 平面破碎と立体破碎

1.2.3. 結果

個数濃度の推計を行うにあたり、①べき乗則(Cozar モデル)と②Kaandorp モデルそれぞれについて、立体破碎と平面破碎を想定し、補正を行った R3 環境省実測データに最小二乗法でカーブフィッティングを行った。③青木モデル、④Sugar Lump モデルも同様の手法で推計を行ったが、③青木モデル、④Sugar Lump モデルの論文内では平面破碎のみを想定しているため、当該モデルは平面破碎のみを示した。以降、それぞれのモデルの推計結果を示す（環境省実測データは 95%ile 値を使用）。

①べき乗則(Cozar モデル)

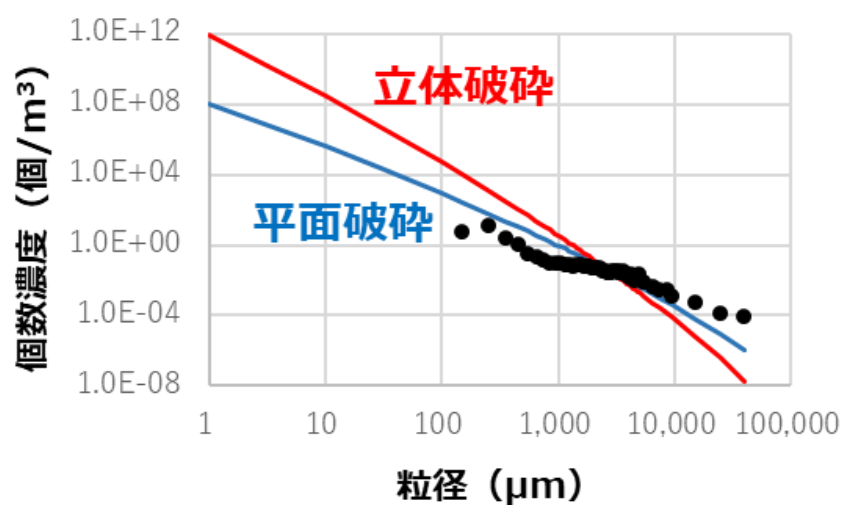
海洋表面で MicP が平衡状態という仮定のもと、個数濃度は、粒径のべき乗で変化するモデルであり、粒径が小さくなるにつれて個数濃度は単調増加する。粒径が変わっても、その粒径の全ての質量を足し合わせた値は一定と仮定（質量保存）している。



図表 1-8 べき乗則(Cozar モデル)の推計結果

②Kaandorp モデル

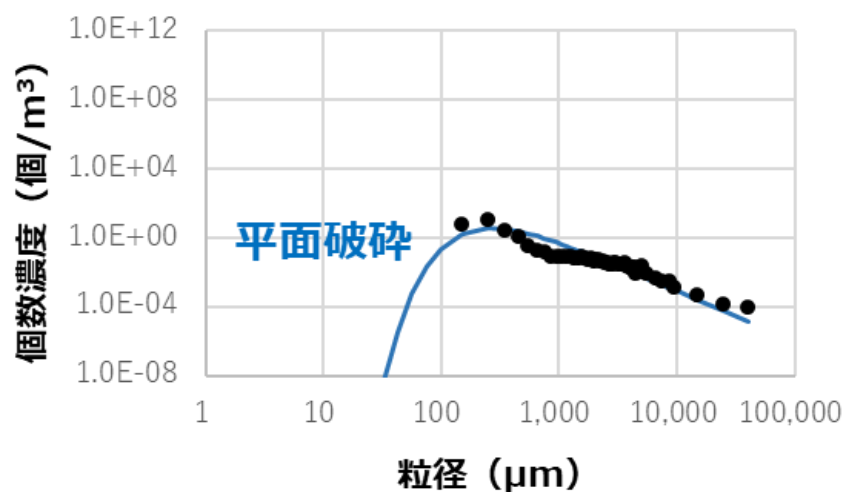
衝撃を受けると、粒子がフラクタル的（相似的）に破碎するモデルであり、粒径が小さくなるにつれて個数濃度は単調増加する。衝撃を受けた際の破碎確率は、材質のみに依存する（破碎確率は粒径に依存しない）。系内での質量保存を仮定。



図表 1-9 Kaandorp モデルの推計結果

③青木モデル

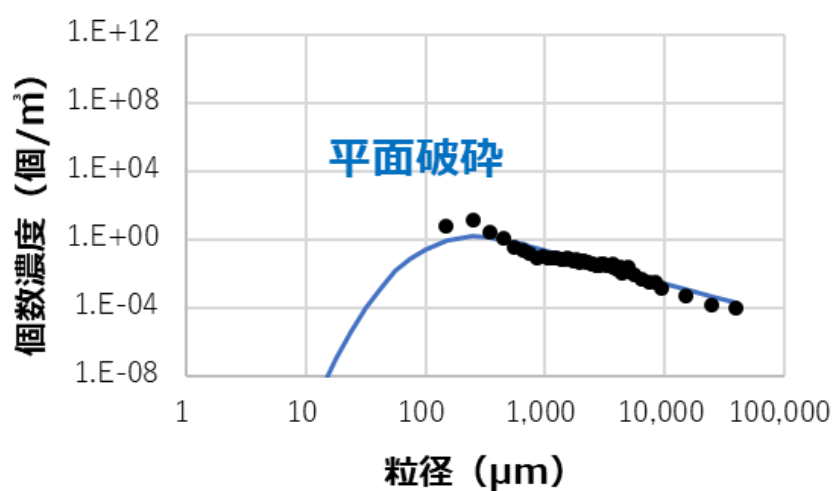
破壊エネルギーの発生確率に統計力学を適用したモデル。小さいサイズの破片形成ほど、大きな破壊エネルギーを要する(=破砕確率は粒径に依存する)。そのため、ある粒径でピークを持ち、それより微小部分では濃度が下がる。論文内では平面破砕のみを想定。



図表 1-10 青木モデルの推計結果

④Sugar Lump モデル

粒径に閾値を設定し、閾値の前後で破砕確率が変動するモデル(=破砕確率は粒径に依存する)。そのため、ある粒径でピークを持ち、それより微小部分では濃度が下がる。破砕の閾値となる粒径を自由に設定できるため、粒径のピークが明瞭でないと、フィッティング困難。



図表 1-11 Sugar Lump モデルの推計結果

1.3. 個数濃度から重量濃度への換算

1.3.1. はじめに

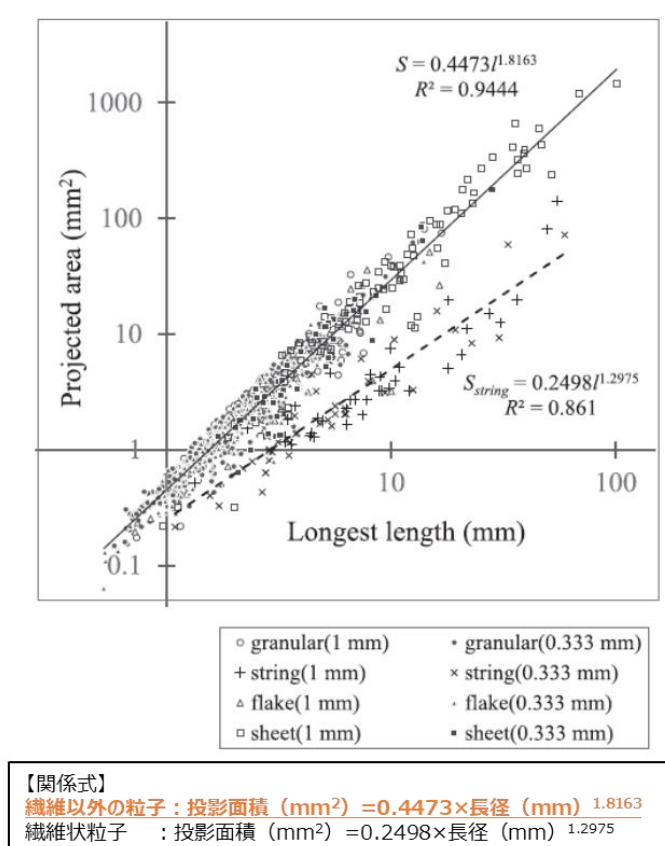
環境中の MicP の実測データはそのほとんどが個数濃度(個/m³)で報告されている一方、有害性試験は主に重量濃度(μg/L)で報告されている。ばく露と有害性を比較する際は、実環境中の個数濃度を重量濃度に換算する、あるいは有害性試験の重量濃度を個数濃度に換算する必要がある。令和 5 年度は、既存文献を参考に、形状と密度を仮定し、個数濃度からの重量濃度への換算を試みた。

今年度は、実環境中の MicP の長径と投影面積の関係式を用いて、長径から投影面積へ換算を行った後、MicP の投影面積と重量の関係式を用いて、投影面積から重量へ換算を行った。更に、環境省の実測データと上記の関係式を用いた換算値の比較を行った。

1.3.2. 換算方法の検討

(1) 長径から投影面積への換算

長径から投影面積への換算は、Tokai et al. (2021⁷)の関係式を使用した（図表 1-12）。Tokai et al. (2021)は、2016 年 10 月に東京湾でニューストーンネット（メッシュサイズ 333 μm 及び 1 mm）を用いて採取した粒子（333 μm メッシュ：354 個、1 mm メッシュ：188 個）の長径と投影面積より、関係式を算出している。関係式は、「繊維以外の粒子」と「繊維」に区別して算出。本検討では、繊維は推計の対象外としているため、「繊維以外の粒子」の関係式を用いた。



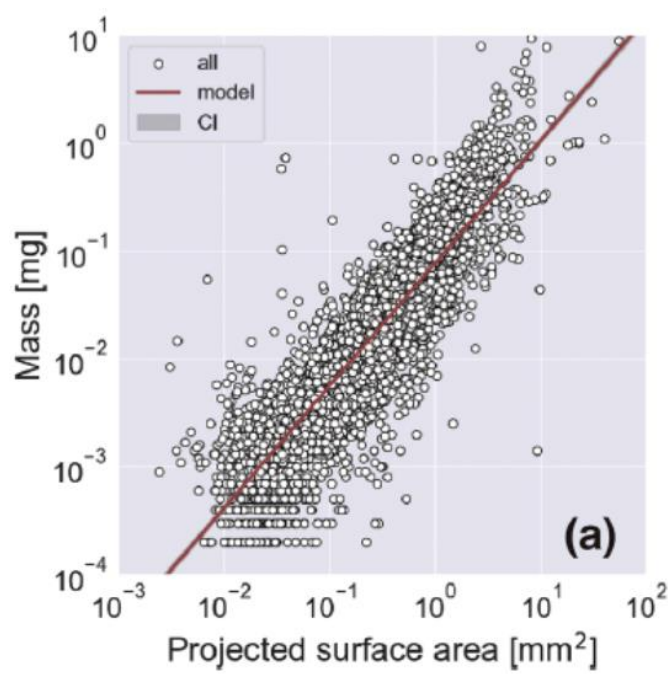
図表 1-12 長径と投影面積の関係式

⁷ Tokai, T., Uchida, K., Kuroda, M., & Isobe, A. (2021). Mesh selectivity of neuston nets for microplastics. Marine Pollution Bulletin, 165, 112111.

(2) 投影面積から重量への換算

投影面積から重量への換算は、Kataoka et al. (2024)⁸の関係式を使用した(図表 1-13)。Kataoka et al. (2024)は、2019 年 5 月～2022 年 10 月に日本国内の 17 の河川でプランクトンネット(メッシュサイズ 335 μm)を用いて採取した粒子(4390 個)の投影面積と重量より、関係式を算出している。関係式は、「すべての粒子」、「球状粒子」、「繊維状粒子」、「破片状粒子」、「シート状粒子」に区別して算出。環境省実測データは形状別に詳細情報がないため、本検討では「すべての粒子」の関係式を用いた。

Kataoka et al. (2024)の関係式は、粒径が 10 μm 以下(投影面積が 10⁻⁴mm²)になると、重量の換算結果が想定されている上限値を超えてしまうため、過大評価となることに注意が必要(片岡先生ヒアリングより)。



【関係式】

すべての粒子：重量 (mg) = $10^{-1.12} \times \text{投影面積 (mm}^2\text{)}^{1.14}$

球状粒子：重量 (mg) = $10^{-0.49} \times \text{投影面積 (mm}^2\text{)}^{1.17}$

繊維状粒子：重量 (mg) = $10^{-1.62} \times \text{投影面積 (mm}^2\text{)}^{0.82}$

破片状粒子：重量 (mg) = $10^{-1.05} \times \text{投影面積 (mm}^2\text{)}^{1.13}$

シート状粒子：重量 (mg) = $10^{-1.31} \times \text{投影面積 (mm}^2\text{)}^{1.10}$

図表 1-13 投影面積と重量の関係式

⁸ Kataoka, T., Iga, Y., R. A. Baihaqi, H. Hadiyanto, Nihei, Y. (2024). Geometric relationship between the projected surface area and mass of a plastic particle. Water Research, 261, 122061.

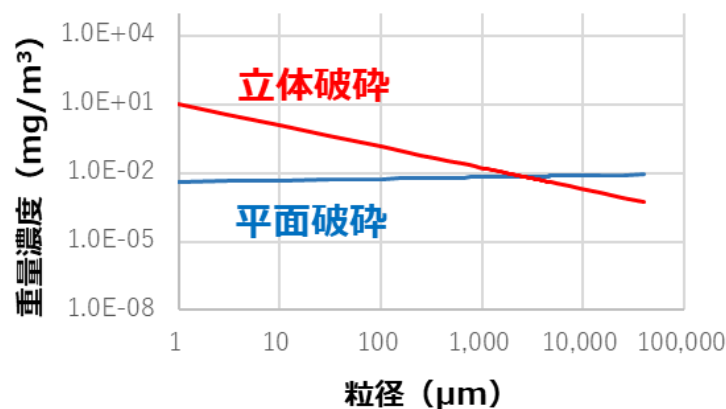
1.3.3. 結果

Tokai et al. (2021)と Kataoka et al. (2024)の関係式を用いて、1.2 節で算出した個数濃度の推計結果から重量濃度への換算を行った。以降、それぞれのモデルの推計結果を示す。

①べき乗則(Cozar モデル)

平面破碎では、粒径に依らず重量がほぼ一定であり、立体破碎では粒径が小さくなるほど重量濃度が大きくなる結果となった。

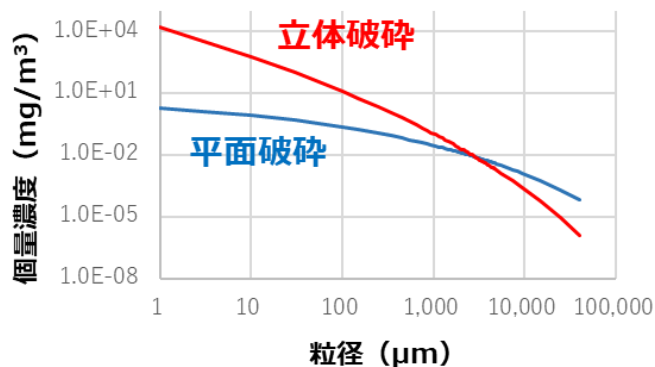
Cozar モデルは粒径ごとに質量が保存されるため、粒径に依らず重量は一定になるはずである。立体破碎はこの仮定から外れているため、立体破碎のみで進行していく可能性は低いと考えられる。



図表 1-14 べき乗則(Cozar モデル)の換算結果

②Kaandorp モデル

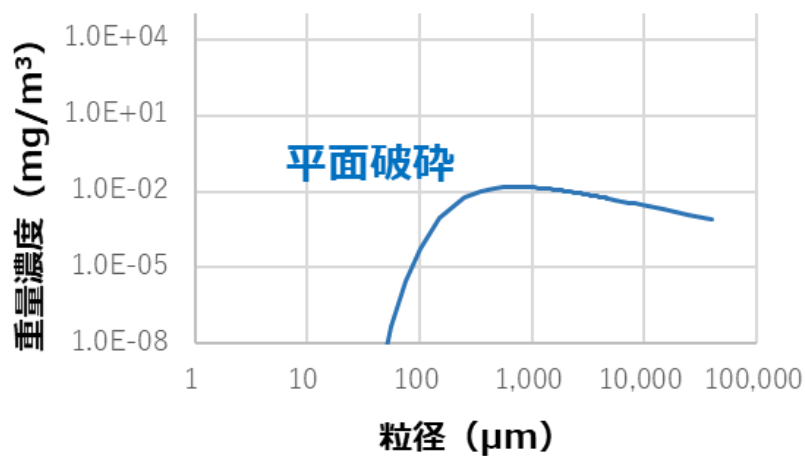
平面破碎、立体破碎ともに粒径が小さくなるほど重量濃度が大きくなる。



図表 1-15 Kaandorp モデルの換算結果

③青木モデル

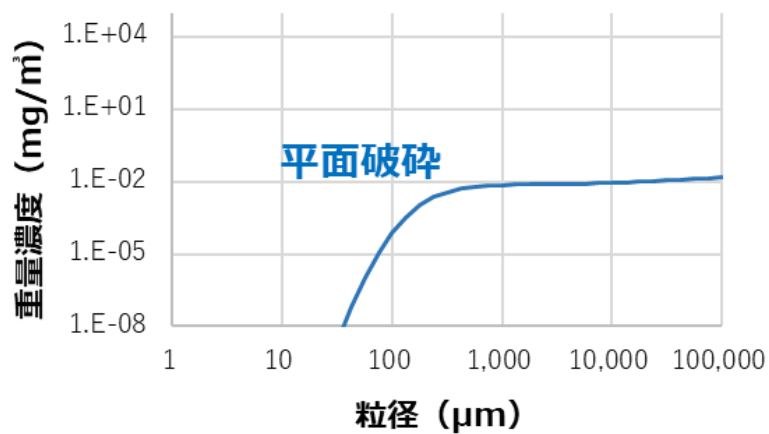
個数濃度と同様に、粒径が小さくなると、重量濃度が小さくなる。



図表 1-16 青木モデルの換算結果

④Sugar Lump モデル

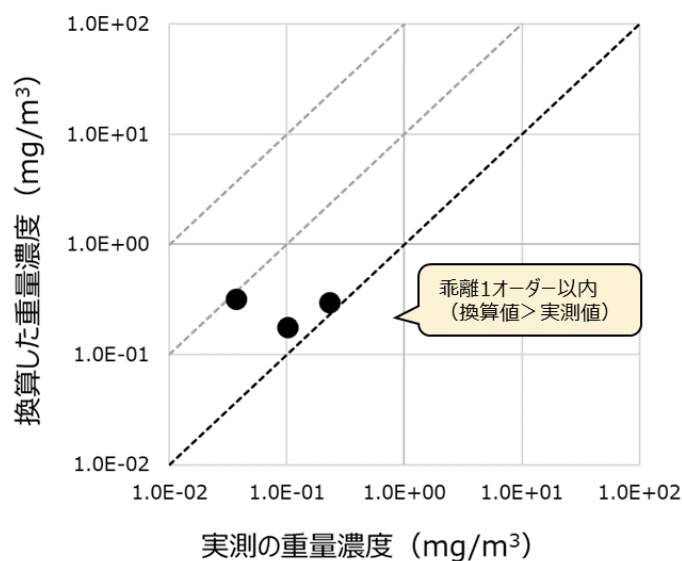
個数濃度と同様に、粒径が小さくなると、重量濃度が小さくなる。



図表 1-17 Sugar Lump モデルの換算結果

(参考)実測値と換算値の比較

環境省の実測データと上記の換算式を用いた換算値の比較を行った。環境省の実測データに関しては、「令和3年度 沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務」における3地点（泊村沖、志賀町沖、赤羽根町沖）の値を用いた。環境省の実測データで重量濃度を測定しているのは粒径1～5 mmの範囲に限られているため、関係式を用いた換算も1～5 mmの範囲で行った。比較の結果、乖離は1オーダー以内（換算値>実測値）におさまった（図表 1-18）。

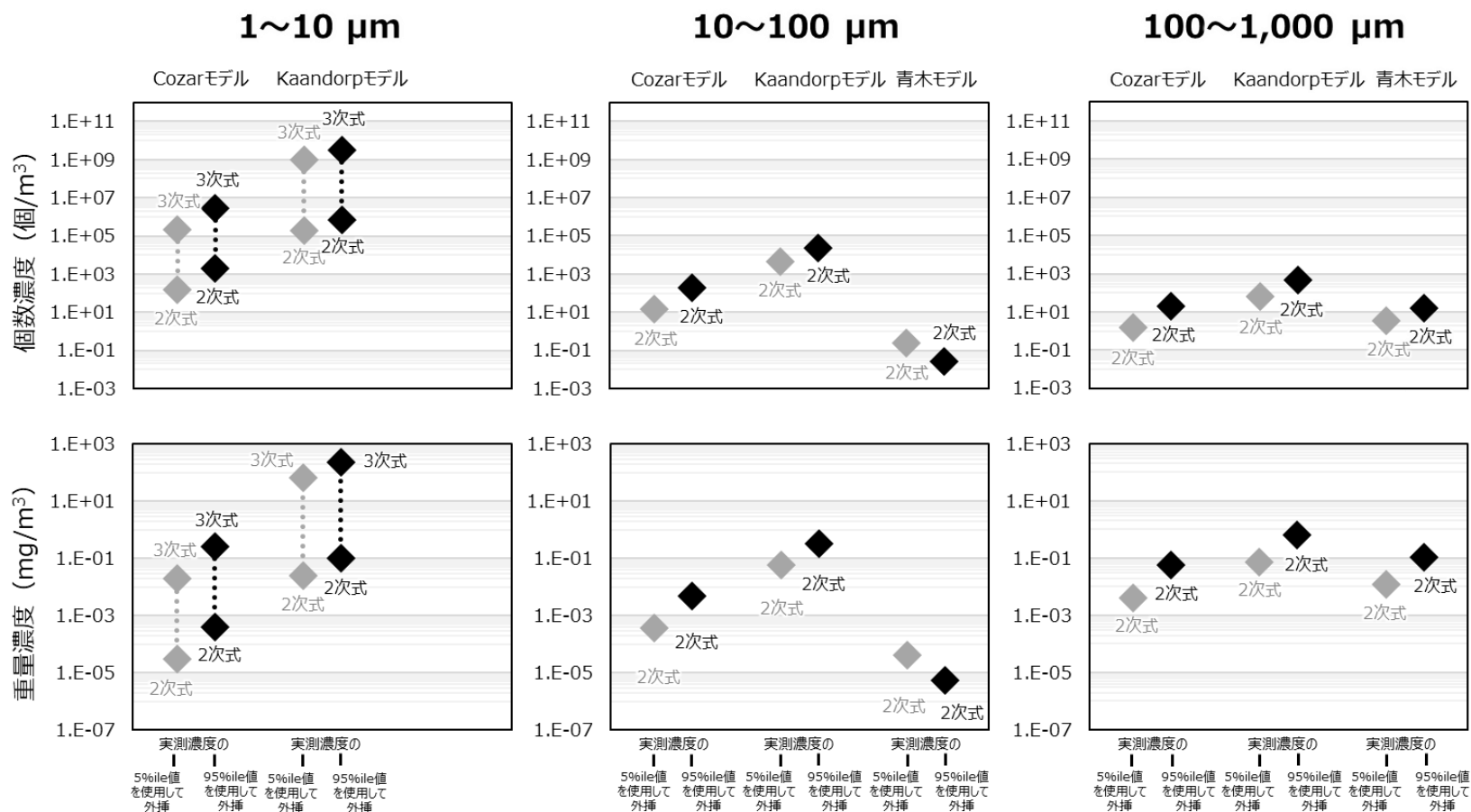


地点	実測の重量濃度 (mg/m³)	換算した重量濃度 (mg/m³)
泊村沖	0.2330	0.1771
志賀町沖	0.1030	0.3186
赤羽根町沖	0.0373	0.2941

図表 1-18 実測値と換算値の比較

1.4. ばく露評価におけるまとめと現状理解

今年度推計を行ったそれぞれのモデルにおいて、1~10 μm 、10~100 μm 、100~1,000 μm の粒径範囲で、海洋表層の個数濃度、重量濃度を合算した推計結果を以下示す。詳細や留意点は以降の「ばく露評価における現状理解」を参照すること。



図表 1-19 海洋表層における個数濃度・重量濃度の推計結果 (1~10 μm 、10~100 μm 、100~1,000 μm の区分ごと)

ばく露評価における現状理解

■海洋表層における個数濃度の推計

- ✓ 海洋表層における個数濃度の推計結果は、令和 3 年度の環境省実測データ（日本近海 89 地点）における海洋表層の MicP（補正済）の個数濃度をモデル式にカーブフィッティングさせ、微細粒径まで外挿した値から計算したものである。モデル式の違いによる推計値の差は大きく、また、粒径が微細になるほど、推計の不確実性は増す。なお、5%ile 値、95%ile 値は、環境省の測定地点による個数濃度の変動を示す。
- ✓ 推計に用いた Cozar モデル、Kaandorp のモデルに関して、海洋表層の MicP は、底質や大気への移行（凝集・沈降・飛散）や、河川・大気からの流入等、系外とのやり取りが発生するが、当該推計式は海洋表層で完結した閉鎖系（砕けた MicP が表層に留まる）という前提条件の下で推計を行っている。
- ✓ しかし、海洋表層の MicP は付着生物等の影響で沈降していくことが考えられ、特に粒径の小さい範囲において、海洋表層の実際の個数濃度は推計結果よりも低い可能性が高い。また、Cozar モデル、Kaandorp のモデルは体積や面積が保存される仮定を置いているため、粒径が小さくなるほど個数濃度は単調に増加する。一方、環境中における物理的な破壊の限界を考えると数 μm から数十 μm の範囲で個数濃度の単調な増加は考えにくく、当該推計結果は上限値に近い値であり、過大評価になっている可能性が考えられる。
- ✓ 破碎形態に関して、海洋の MicP はフレーク状やシート状のものが多く、薄い板が割れていくようなプロセス（2 次元的な破碎）が中心であり、アスペクト比が 1 に近づくと 3 次元的な破碎が進むと想定される。2 次元的な破碎から 3 次元的な破碎に遷移する境界の粒径に関しては現在研究段階にあるが、分科会での専門家判断により、本検討では粒径 $10\mu\text{m}$ 以上に関しては 2 次元的な破碎が主であり、 $10\mu\text{m}$ 以下で 3 次元的な破碎に遷移していくと想定した。よって、図表 1-19 には、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上は 2 次式、 $10\mu\text{m}$ 以下は 2 次式と 3 次式の幅で示している。
- ✓ 青木モデル、Sugar Lump モデルでは、破碎確率が粒径に依存し、粒径が小さくなると、破碎しにくくなる。そのため、両モデルの粒径と個数濃度のグラフでは、ある粒径でピークを持ち、それより微小部分では濃度が小さくなる。微細粒径の実測データの蓄積による適用性の検証が今後の課題である。
- ✓ 青木モデルに関しては、粒径が小さくなると、個数濃度が下がり数値計算の範囲を超えてしまうため、図表 1-19 の粒径 $1\sim 10\mu\text{m}$ の範囲は割愛した。また、Sugar Lump モ

デルに関しては、破碎の閾値となる粒径を自由に設定できるため、粒径のピークが明瞭でないと、フィッティング困難であり、図表 1-19 からは除外した。

■重量濃度への換算

- ✓ Cozar モデルは粒径ごとに質量が保存されると仮定しているので、粒径に依らず重量は一定となるはずである。しかし、経験式（長径と投影面積、及び投影面積と重量の実測値から導かれた関係式）を用いた換算においては、立体破碎（3 次元的な破碎）を仮定した際には、粒径により総重量が変化する結果となった。これは、質量保存の仮定と矛盾しており、実環境中で立体破碎（3 次元的な破碎）のみで進行していく可能性は低いと考えられる。
- ✓ 粒径 1-10 μm の重量濃度については、当該経験式が適応不可の範囲であり、重量濃度が過大評価になっていることに注意が必要。

1.5. 現状の課題点と今後の検討の方向性(案)

今年度の検討を通じて見えてきた、現状の問題点と今後の検討の方向性(案)を以下に示す。

分類	現状の問題点	今後の検討の方向性(案) (次年度以降の環境省事業で取組み可能なものには【◎】を付与)
実測に関して	① 実環境中での微細粒径の MicP の存在状況が未把握 ➢ 現在の測定技術では、海洋表層の微細粒径(数 μm オーダー)の MicP の個数濃度を正確に把握することは困難	➢ 微細粒径の MicP の環境中での存在状況を把握するための採取・分析技術の開発
	② 実環境中での MicP の重量濃度が未把握 ➢ 現状の海洋表層における MicP の実測データは、基本的には個数濃度のみ	➢ 専門家の実測調査における重量濃度の測定 ➢ 環境省実測調査における重量濃度の蓄積【◎】
	③ 実環境中での MicP の偏在状況(水平方向・鉛直方向)に関する情報が限定的 ➢ 発生源に近い沿岸域への偏在は知られているが、高濃度地点の特定には至っていない ➢ MicP の海洋の鉛直方向(水柱、底質等)における濃度分布については情報が限定的	➢ 海洋における水平方向(地理的広がり)・鉛直方向(深さ方向の広がり)における実測データの拡充【◎】
個数濃度の推計に関して	④ Cozar モデル、Kaandorp モデル、青木モデル、Sugar Lump モデルの推計式の適用妥当性の検証が不十分 ➢ Cozar モデル、Kaandorp モデルは、海洋表層で完結した閉鎖系(砕けた MicP が表層に留まる)を想定しており、過大評価の可能性あり ➢ 青木モデル、Sugar Lump モデルは、微細粒径の実測データの蓄積による適用性の検証が今後の課題 ➢ 実環境中での劣化・微細化の実態が未解明であり、粒径ごとの破碎形態(2 次元的な破碎/3 次元的な破碎)に関する情報が限定的	➢ 微細粒径の MicP の環境中濃度推計に関する文献の収集【◎】 ➢ 水環境中での MicP の挙動や破碎メカニズムの解明 ➢ 微細粒径の MicP の実測(特に粒径 1~100 μm 程度)
重量濃度への換算に関して	⑤ 微細粒径における個数から重量への換算式の妥当性が不明 ➢ 粒径 1-10 μm の重量濃度については、経験式が適用不可の範囲であり、重量濃度が過大評価になっている可能性あり	➢ 微細粒径を対象とした、専門家の実測調査における重量濃度の測定 ➢ 微細粒径を対象とした、環境省実測調査における重量濃度の蓄積【◎】

※実測に関しては、過年度からの課題点も含む

1.6. 別添

1.6.1. ヒアリングの開催概要

今年度は5名の有識者にヒアリングを行った。開催概要を以下に示す。

No.	カテゴリー	日付	所属・氏名(敬称略)
1	実測	令和6年12月20日(金)	国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 中嶋 亮太
2	実測	令和7年1月14日(火)	東京大学 大気海洋研究所 山下 麗
3	推計	令和6年12月23日(月)	気象庁気象研究所 全球大気海洋研究部 青木 邦弘
4	推計	令和6年12月23日(月)	東京海洋大学海洋生物資源学部門 東海 正
5	換算	令和7年1月14日(火)	愛媛大学大学院理工学研究科理工学専攻環境建設工学講座 片岡 智哉

1.6.2. ヒアリングでの主なご意見

ヒアリングで得られた主なご意見を以下に示す。

実測・環境挙動
【環境中の MicP のホットスポットについて】 ✓ ホットスポットとは、沿岸部分の局所的な場所(水が滞留する湾内の入り組んだ部分)や、直径数百 km の渦の中など、ミクロとマクロの観点がある。 ✓ 底質にもホットスポットが存在する。海洋の渦の中にマイクロプラスチックが巻き込まれて沈降していく。JAMSTEC は渦(黒潮と親潮)が発生している直下の海底(水深 4900m)にセディメントトラップを設置し、沈降してきたマイクロプラスチック(数十 μm)を捕捉する調査を行った。 ✓ 海峡と渦の真下の2か所で底質のマイクロプラスチックの実測を行った結果、渦の真下の方が高濃度であり、軽いPEが多かった。恐らく、黒潮由来のマイクロプラスチックが沈降したものと考えられる。 【水柱における実測について】 ✓ 水柱のマイクロプラスチック存在状況に関して、水深 2000m 付近の層にも滞留していることが分かってきた。粒径数十 μm のマイクロプラスチックが水深 2000m まで沈むには、物理的には 70 年間程度かかる計算となるため、自然現象では考えにくく供給元があるだろう。動物プランクトンに摂食され排泄物となり、バイオロジカルポンプとして供給されている可能性がある。 ✓ Cozar モデルでは海表面の系から外れない仮定だったが、実際のマイクロプラスチックは動物プランクトンに食べられたり、植物プランクトンに凝集されて海底方向へ向かっていくと考えられる。一方、沈降していく過程で表面の有機物が微生物に分解され、ある時点で裸になって浮力を取り戻す。そうすると、浮きも沈みもしない状態となり、ある一定の水深に留まる可能性がある。また、密度躍層に溜まり、水柱にはマイクロプラスチックが溜まっている一定の深度がある。 【MicP の割れ方に関して】 ✓ そもそもプラスチック製品は平面の形が多い。立体的な形状の場合でも、破碎は表面から起こる。100 μm レベルになると、アスペクト比が1になるので、このレベルより粒径が小さくなると、3次元プロセスになるだろう。2次元破碎は、プレートが折れるイメージである。3次元破碎は、ルービックキューブのように、破片がぼろぼろと剥がれるイメージである。 ✓ 洋上の観測では粒径 10 μm まで検出されているので、3次元破碎が起こっていると推測される。このレベルの小粒径では2次元破碎ではないだろう。 ✓ 破碎の2次元プロセスと3次元プロセスの境目は、イメージとしては 100 μm 辺りだろう。実測値がないので何とも言えない。 ✓ Cozar と Kaandorp の推計モデルは質量保存を仮定しているが、実際のマイクロプラスチックの割れ方は粒径によって変わる。また、海表面からの沈降も粒径によってその挙動が決まるため、粒子サイズに寄らず破

砕確率が一定という仮定は少し無理があるだろう。 ✓ 海洋のマイクロプラスチックはフレーク状やシート状のものが多く、薄い板が割れていくようなプロセス（二次元的に粒子が小さくなる）が主であり、厚み方向が減っていくことはあまり考えられない。 ✓ MicP の環境中の長さや投影面積の関係をみると、粒状やフレーク状の場合はおよそ長さの 2 乗と面積に相関がある。一方、糸状の場合は 1.2 乗程度であり、糸が途中で切れていくイメージであり、裂けるチーズのように糸が細くなっていくことは考えにくい。 ✓ 粒状、シート状、糸状のどの形状であれ、破壊が進むとアスペクト比が 1 に近づいてくる。そうなるとすべて粒状に近づくわけだが、どのサイズまでを「糸状」「シート状」と呼ぶことができるのか。微細化して粒状になると、それ以降は三次元の破壊が進むわけだが、それまでは一次元、二次元、三次元それぞれ別々の破壊形態が考えられる。10 μm より小さくなってくると、割れ方や沈降の挙動などが変わってくるイメージを持っている。 【繊維状 MicP について】 ✓ 海外の論文では糸状のマイクロプラスチックが多く検出されており、魚類の捕食も多いと報告もある。今すぐとはいかないが、今後は糸状のマイクロプラスチックに関しても検討していかなければならない。 ✓ 繊維に関してはコンタミも多く、採取時も分析時もコントロールを取るしかないだろう。船上での採取が最もコンタミが多くなるが、魚の胃の中から繊維が出てくる現状を見ると、やはり海洋中に一定数は存在するのだろう。また、海外の論文では繊維が大量に出てきており、コンタミだけの影響とは考えにくい。	
個数濃度の推計	
【青木モデルについて】 ✓ 粒径が小さくなると個数濃度が減るという現象をどう考えれば良いかというのが着想点である。一定のエネルギーがかかると、破壊がどこまで起こるかを考えており、モデル自体は基礎的な破壊理論、エネルギー理論に基づいている。 ✓ イメージとしては、グライディングプロセス（挽く、すり潰す）が分かり易い。すり潰しが進むにつれて、個数濃度が高くなる粒径が小粒径の方へと変化して行く。そのような実験結果も発表されており、サイズスペクトルの位置は、最初は粒径が大きい所にあるが、すり潰しが進むと、粒径が小さい方へと推移する。すり潰しの実験では、粒径が細かいものは発生しにくいという結果だったので、それに整合するようにモデルを考えた。 ✓ 近年、実測の精度が上がり、ピーク位置が小粒径になってきている。どの程度の粒径で個数濃度がピークになるかは、実測結果が出て来ればある程度予想できるが、実測値は質量保存を満たしていないので、何とも言えない。実測で出ている辺りがピークだろう。	
重量濃度への換算	
【粒子の投影面積と重量の関係式について】 ✓ Kataoka et al. (2024)では、球状、繊維状、破片状の 3 種類の形状を想定し、各粒径において想定される理論上の最大重量、傾き 1.5 の直線を上限値として設定している。投影面積が 10–4 mm² 以下、すなわち粒径が 10 μm 以下になると、重量の換算結果が想定されている上限値を超えてしまう。 ✓ 粒径 1～10 μm の粒子について換算を行う場合は、過大評価であることを留意しつつ、換算結果が上限である傾き 1.5 の直線と下限である傾き 1 の直線の間に収まるように換算式を定義すると良いのではないかと。 ✓ 投影面積と重量の関係式における傾き 1 というのは、厚みが一定で粒子が破碎していることを表しており、傾き 1.5 は立体的に破碎していることを表している。粒径 10 μm で平面破碎と立体破碎の上下関係が逆転するため、10 μm で粒子の破碎形態が変化している可能性が考えられる。 【形状の考慮について】 ✓ 繊維は重量の実測データの不確実性がほかの形状の粒子より大きく、取扱いが難しい。投影面積から重量への換算を行う際は、形状別にそれぞれ換算式を適用するのではなく、様々な形状の粒子を含めた全体の換算式を適用するのがよいだろう。 ✓ 粒子の形状を仮定した体積ベースの換算方法より、投影面積と重量の関係式を適用した換算方法の方が 1 オーダー程度真値に近づくという今年度の換算結果は研究結果と一致しており、換算結果に違和感はない。	

