

令和 6 年 3 月 5 日
ばく露等評価分科会

令和 5 年度 ばく露等評価分科会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.	分科会の開催概要.....	2
1.3.	微細 MicP の個数濃度の推計	3
1.3.1.	はじめに	3
1.3.2.	推計方法の検討.....	5
1.3.3.	結果	11
1.4.	個数濃度から重量濃度への換算.....	13
1.4.1.	はじめに	13
1.4.2.	換算方法の検討.....	14
1.4.3.	結果	21
1.5.	現状の問題点と今後の検討の方向性(案)	24
1.6.	別添	25
1.6.1.	委員名簿.....	25
1.6.2.	開催概要.....	26
1.6.3.	環境省の実測データを用いた、実測重量と換算重量の比較	27

1. ばく露等に関する検討結果

1.1. 背景・目的

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 の環境中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。

また、MicP の実測データはほとんどが個数濃度（個/ m^3 ）で報告されている一方、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。

ばく露等評価分科会では、微細 MicP の個数濃度の推計（1.3 節）及び、個数濃度から重量濃度への換算（1.4 節）に関する検討を行った。

1.2. 分科会の開催概要

本年度の検討は 9 名の有識者により（1.6.1 項）、計 3 回開催した（1.6.2 項）。

1.3. 微細 MicP の個数濃度の推計

1.3.1. はじめに

既存文献を参考に、微細な MicP の個数濃度の推計方法を整理するとともに、推計に利用する実測データの粒径範囲、複数の測定地点データの処理方法、破碎形態の仮定、海域区分別の推計の必要性について検討を行った。

本検討では、令和 4 年度のばく露等評価分科会の中で委員から紹介された以下 2 報の文献における推計方法を用いることとした。以下に概要を示す。

- Plastic debris in the open ocean (Cozar A *et al.* 2014) ¹
- Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation (Kaandorp MLA *et al.* 2021) ²

【Cozar の推計モデル】

Cozar の推計モデルを図表 1-1 に示す。Cozar の推計モデルは、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前提のもと、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 3 次曲線に従って増加する。海洋表層で完結した閉鎖系（破碎された MicP が海洋中の同じ層にとどまる）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、過大評価になる可能性がある。

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

A: 存在量、 α : 形状因子、 l : 粒子のサイズ、 c : 定数

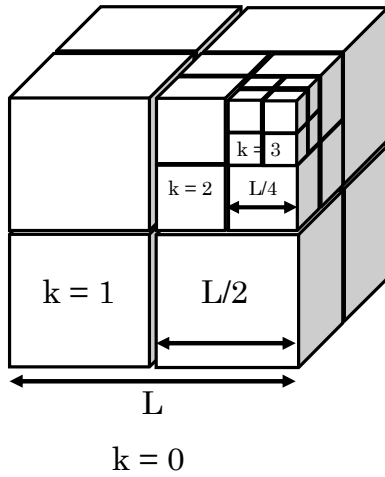
図表 1-1 Cozar の推計モデル

¹ Cozar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J.I., Duarte, C.M., 2014. Plastic debris in the open ocean. *Biological Science* 111, 28, 10239-10244. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1314705111>

² Kaandorp, M.L.A., Dijkstra, H.A., van Sebille, E., 2021. Modelling size distributions of marine plastics under the influence of continuous cascading fragmentation. *Environmental Research Letters* 16, 054075. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abe9ea>

【Kaandorp の推計モデル】

Kaandorp の推計モデルを図表 1-2 に示す。Kaandorp の推計モデルは、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 MicP に適用している。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

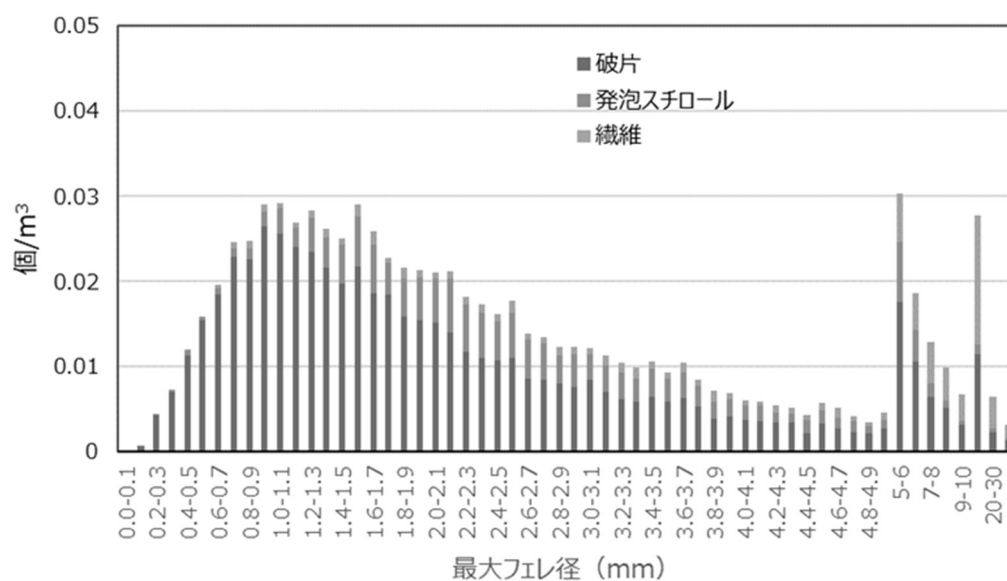
図表 1-2 Kaandorp の推計モデル

1.3.2. 推計方法の検討

(1) 環境省実測データの処理方法の検討

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」における実測データ（粒径 330 μm 以上）を用いた。なお、本調査では海洋表層の MicP を測定しており、底質は対象としていない。

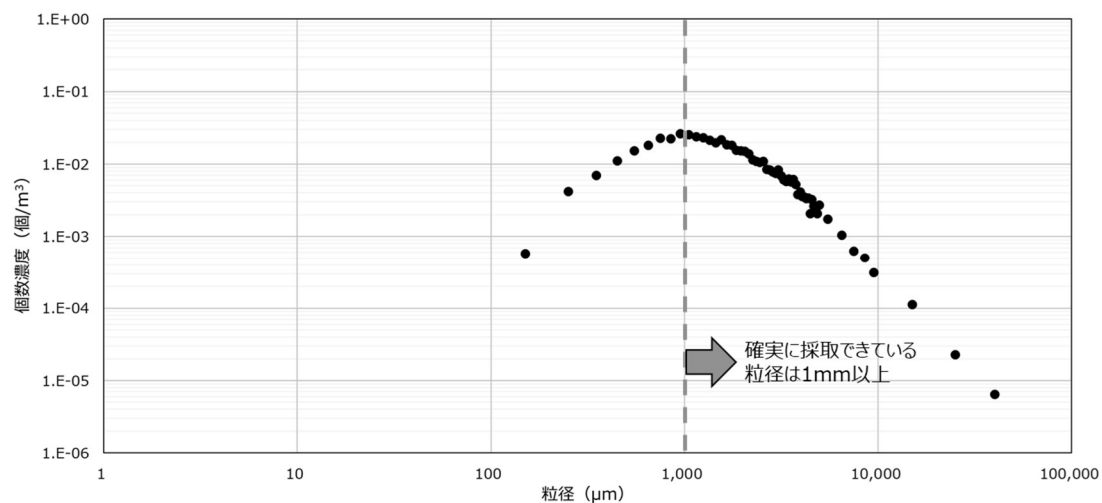
環境省実測データは、2021 年から 2022 年にかけて日本近海 89 地点で採取され、「漂流マイクロプラスチックのモニタリング手法調和ガイドライン」に従って分析されたものである。個数濃度は、基本的に粒径 100 μm ごとの分布として整理されている（図表 1-3）。粒径分布は形状別（破片、発泡スチロール、繊維）に区別されている。本検討では、海洋表層から最も多く検出されており、また、毒性試験においても使用率の高い破片のデータを用いて推計を行うこととした。（発泡スチロールや繊維は、環境中での挙動が複雑であり、破片と比べて毒性試験においても使用率が低いため、今年度は優先順位を下げることにした）



図表 1-3 環境省実測データの粒径別個数濃度分布（全地点平均）

環境省実測データでは、330 μm メッシュのニューストンネットを使用しているため、粒径 1 mm を下回るあたりで個数濃度は下降に転じている（図表 1-4）。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が原因と考えられる。

本検討における推計では、確実に採取・分析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、1 mm 以下のデータは使用しないこととした。

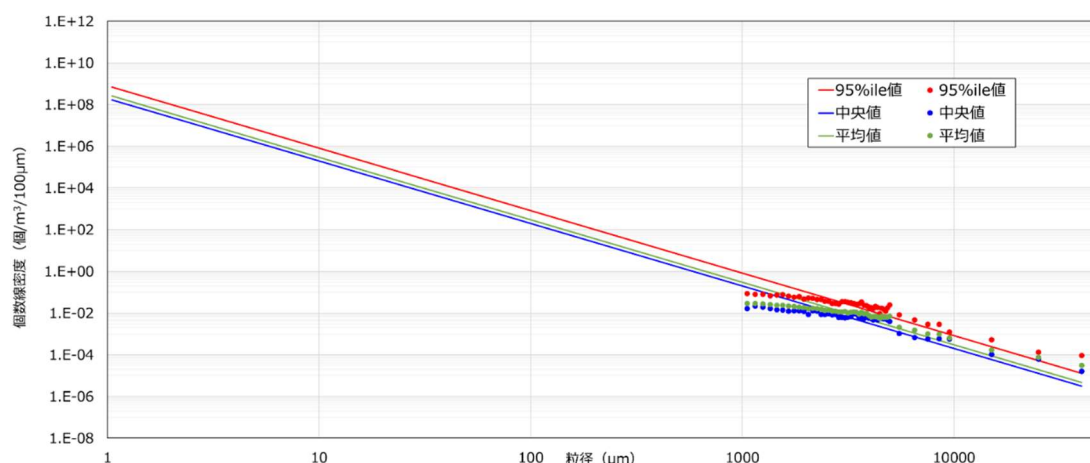


図表 1-4 環境省実測データにおける粒径分布（全地点平均）

また、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。今回は、環境省実測データを元に、粒径 1 μm までの個数濃度を推計するため、各粒径区分における最大値を利用すると、異常値が含まれる場合に、推計結果が大きくなる可能性がある。そのため、安全サイドの評価としては 95%ile 値を採用することとした。

Cozar 3 次式で環境省実測データの 95%ile 値、中央値、平均値を利用して個数濃度を推計した結果を図表 1-5 に示す。その結果、中央値、平均値を利用した場合の推計結果にはほとんど差がなく、95%ile 値を利用した場合は中央値や平均値に比べてわずかに個数濃度が大きくなる結果となった。

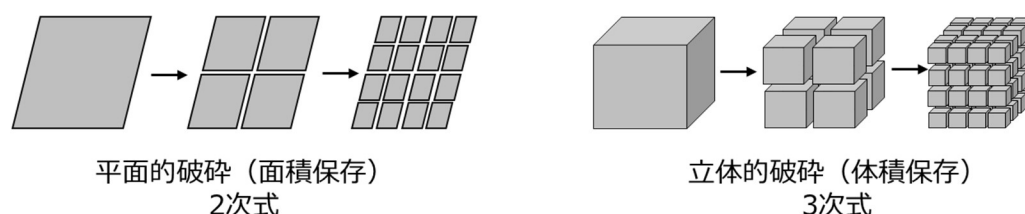
いずれの方法でも推計結果に大きな差は生じなかったことから、本検討では、環境省実測データの 95%ile 値、中央値、平均値を利用する 3 通りの方法の推計結果を併記することとした。



図表 1-5 環境省実測データの 95%ile 値、中央値、平均値を利用した
Cozar 3 次式での推計結果

(2) 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には、シート状の粒子が 2 次的に破碎する平面的破碎とブロック状の粒子が 3 次的に破碎する立体的破碎が考えられる。破碎イメージを図表 1-6 に示す。

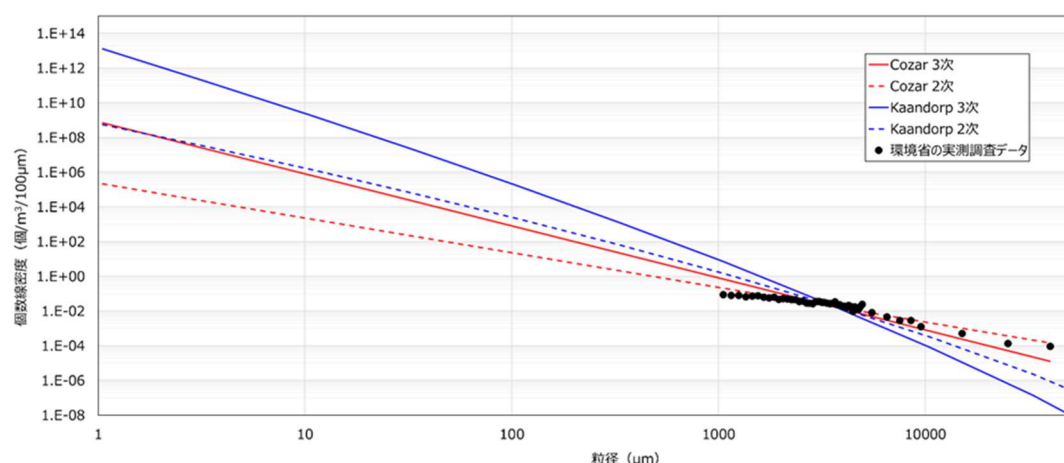


図表 1-6 平面的破碎と立体的破碎のイメージ

個数濃度の推計を行うにあたり、Cozar の推計モデルと Kaandorp の推計モデルそれぞれについて、想定する破碎形態により 2 次式（平面的破碎）、3 次式（立体的破碎）を適用することとした。これら 4 通りの推計方法における各パラメータは、環境省実測データとの最小二乗法でカーブフィッティングを行うことにより決定した。

Cozar の推計モデルと Kaandorp の推計モデルそれぞれについて、2 次式、3 次式を適用して個数濃度を推計した結果を図表 1-7 に示す（環境省実測データは 95%ile 値を使用）。粒径 10,000 μm 以上では Kaandorp よりも Cozar の方が大きな値となっていたが、1,000～10,000 μm の間で大小関係が逆転し、粒径 1 μm 付近では Kaandorp の方が 2 次式、3 次式ともに 4 オーダー程度大きい結果となった。

本検討における推計では、Cozar の推計モデルおよび Kaandorp の推計モデルの 2 次式および 3 次式を併用し（全 4 通り）、幅のあるばく露濃度を算出することとした。

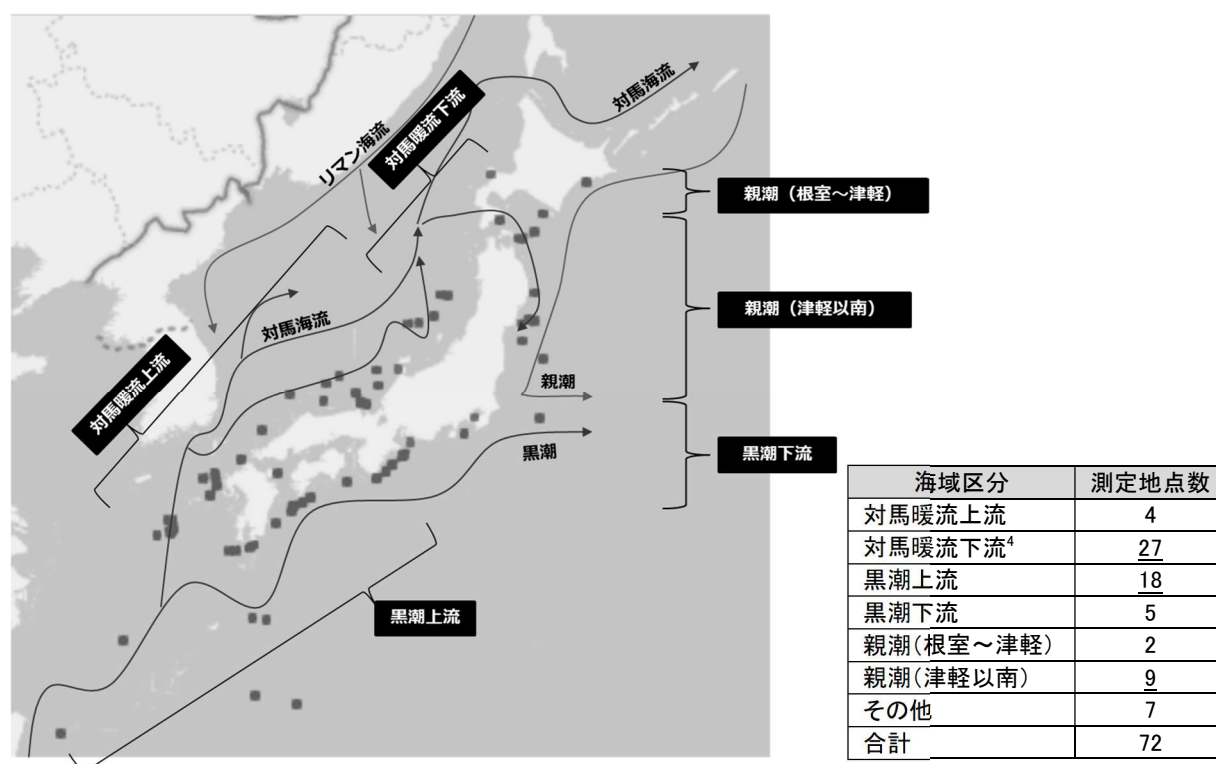


図表 1-7 Cozar、Kaandorp における 2 次式、3 次式の推計結果

(3) 海域区分の検討

MicP の個数濃度は、調査地点によって大きく異なる。そのため、日本近海を 6 つの海域区分に分け、海域区分ごとに個数濃度の推計結果にどの程度の差が生じるのかを検証した。外挿に足るデータ数を確保するため、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」で得られた沖合 89 地点分の実測データに、環境省の「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」で得られた沿岸 3 地点の実測データを追加して検討を行った。

環境省実測調査における調査地点と各海域区分³の測定地点数を図表 1-8 に示す。測定地点数は全 72 地点であるが、海域ごとにばらつきが大きく、推計モデルでの外挿に足る 10 地点程度の実測データが得られている 3 つの海域（対馬暖流下流、黒潮上流、親潮（津軽以南））の推計結果を比較することとした。

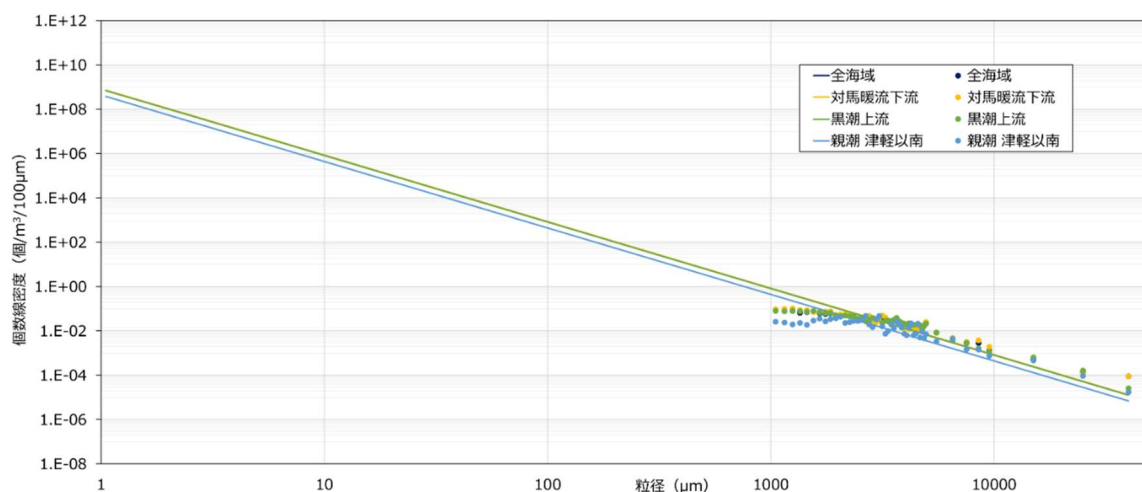


図表 1-8 環境省実測調査における調査地点と各海域区分の測定地点数

³ 令和 3 年度までの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および沖合海域における漂流・海底ごみの分布調査より環境省作成

⁴ 対馬暖流下流の測定地点数には沿岸データ（志賀町沖）を含む。

環境省実測データの 95%ile 値を使用し、海域区分ごとに Cozar の 3 次式で個数濃度を推計した結果を図表 1-9 に示す。オーダーレベルで見ると海域の違いによる推計結果の差はわずかであり、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。



図表 1-9 Cozar 3 次式を用いた、海域区分ごとの推計結果

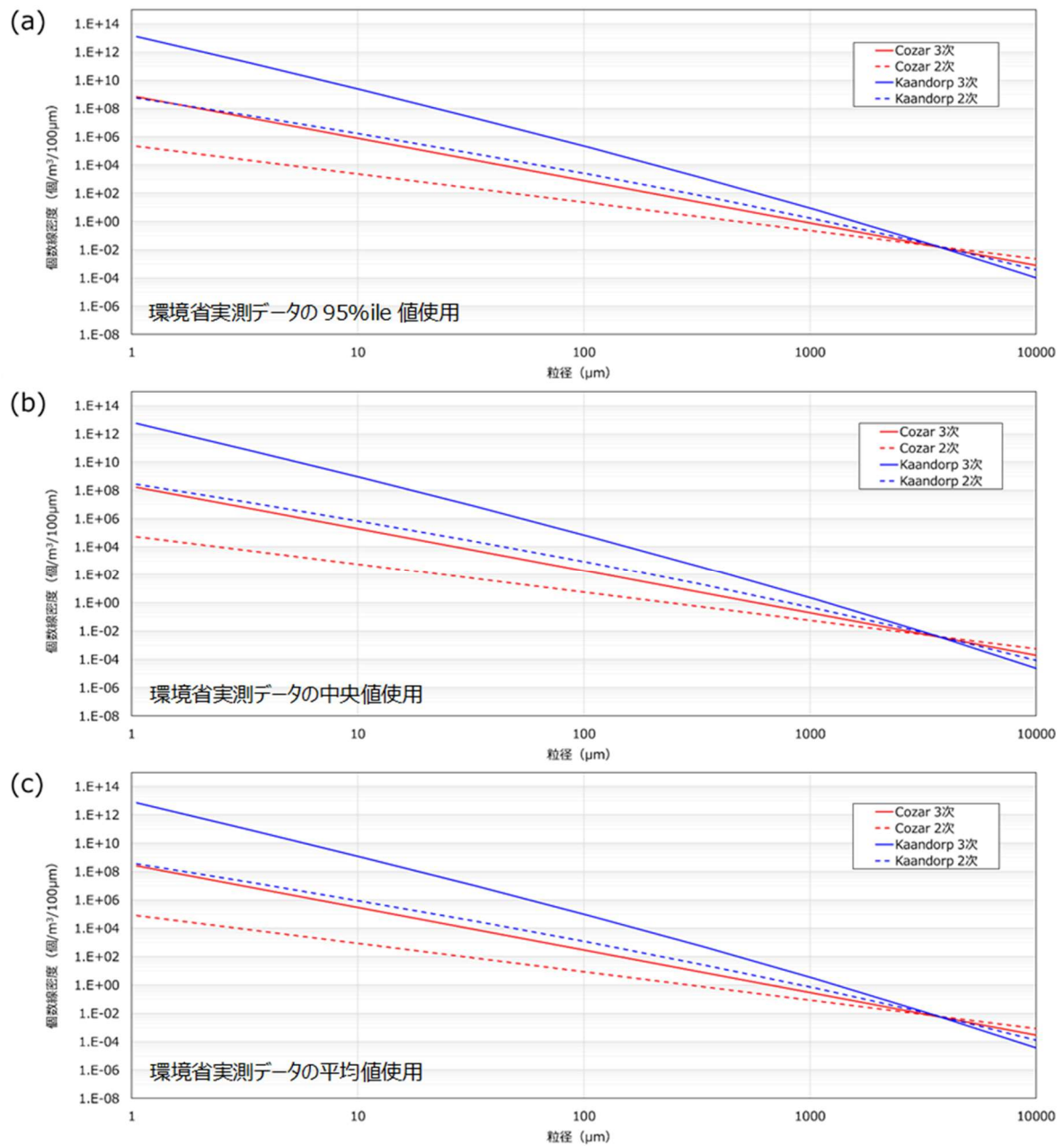
1.3.3. 結果

Cozar の推計モデルおよび Kaandorp の推計モデルのそれぞれについて、3 次式および 2 次式を適用して 1 μm までの微細な MicP の個数濃度を推計した結果を図表 1-11 に示す。粒径 1 μm において、Cozar の推計モデルでは、個数濃度は $10^5\sim 10^9$ 個/ m^3 、Kaandorp の推計モデルでは、個数濃度は $10^9\sim 10^{13}$ 個/ m^3 という結果が得られた。しかしながら、この推計結果は、系外からの MicP の流入と系外への流出が平衡状態であるという海洋表層における閉鎖系を前提としているため、個数濃度は過大評価となっている可能性があることに留意する必要がある。

また、実測データと各推計結果との相関係数を図表 1-10 に示す。Kaandorp の推計モデルよりも Cozar の推計モデルの方が実測データとの相関性が高く、また 3 次式よりも 2 次式の方が実測データとの相関性が高い結果となった。

図表 1-10 各推計方法による推計結果と実測データとの相関係数

推計方法	95%ile 値	中央値	平均値
Cozar 3 次式	0.825	0.806	0.832
Cozar 2 次式	0.910	0.888	0.917
Kaandorp 3 次式	0.706	0.687	0.711
Kaandorp 2 次式	0.793	0.768	0.795



図表 1-11 本検討における個数濃度の推計結果

1.4. 個数濃度から重量濃度への換算

1.4.1. はじめに

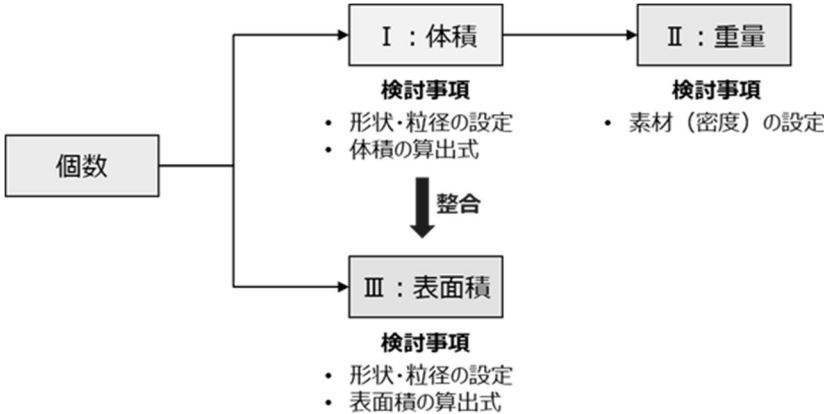
環境中の MicP の実測データはそのほとんどが個数濃度 (個/m³) で報告されている一方、有害性試験は主に重量濃度 (μg/L) で報告されている。ばく露と有害性を比較する際は、実環境中の個数濃度を重量濃度に換算する、あるいは有害性試験の重量濃度を個数濃度に換算する必要がある。

本検討では、個数から体積・重量・表面積への換算を行っている既存文献を参考に、利用可能な換算方法を検討し、個数濃度からの重量濃度への換算を試みた。

1.4.2. 換算方法の検討

個数から体積・重量・表面積への換算を行うにあたり、粒子の形状、粒径、素材（密度）の情報が必要である。換算のイメージを図表 1-12 に示す。しかしながら、現時点では、粒子の形状、粒径、素材（密度）に関して得られる情報は限定的であり（図表 1-13）、本検討で換算を行うにあたっては、それらの仮定を置く必要がある。

ここでは、既存文献における形状や粒径、素材（密度）等の取り扱い方を整理し、今回用いる換算方法を検討した。



図表 1-12 個数から体積・重量・表面積への換算イメージ

図表 1-13 形状、粒径、素材（密度）について入手可能な情報の現状

形状	粒径	素材(密度)
➤ 形状に関する記載がない文献あり ➤ 記載があっても、「破片、フィルム、ペレット、発泡体、繊維、ビーズ」等、文献によって形状の分類方法が様々	➤ 幅を持った粒径分布として得られるが、粒径の区切り方は文献によって様々	➤ 素材に関する記載がないデータがある ➤ 素材に関する記載があるデータでも、検出された粒子のポリマー種類のみを記載しているデータや採取地点別に検出されたポリマー種類とその割合を記載しているデータがあり、情報の粒度は様々

調査対象とした文献と体積・重量・表面積への換算の実施状況を図表 1-14 に示す。「令和 4 年度海洋プラスチックごみによる生物・生態系影響把握等業務」で調査対象とした文献やばく露等評価分科会の中で委員からご紹介いただいた文献の中から、換算方法が異なる近年の文献 6 報を調査対象として選定した。

図表 1-14 調査対象とした文献と換算の実施状況

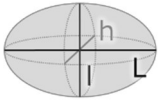
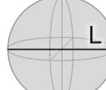
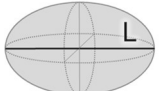
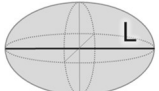
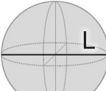
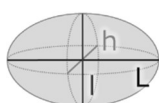
文献 No.	著者・発行年	タイトル	体積	重量	表面積
①	Simon M <i>et al.</i> (2018)	Quantification of microplastic V and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging	○	○	—
②	Eo S <i>et al.</i> (2019)	Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea	○	○	—
③	Pabortsava K <i>et al.</i> (2020)	High concentrations of plastic hidden beneath the surface of the Atlantic Ocean	○	○	—
④	M Sugiura <i>et al.</i> (2021)	Microplastics in urban wastewater and estuarine water: Importance of street runoff	○	○	—
⑤	Zhao S <i>et al.</i> (2022)	Large quantities of small microplastics permeate the surface ocean to abyssal depths in the South Atlantic Gyre	○	○	—
⑥	Thornton Hampton LM <i>et al.</i> (2022)	A living tool for the continued exploration of microplastic toxicity	○	○	○

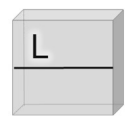
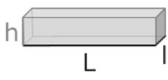
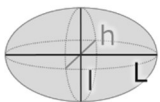
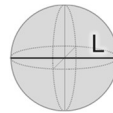
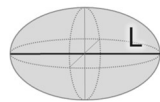
各文献における、体積の算出方法、重量の算出方法、表面積の算出方法を以降に示す。

【体積の算出方法】

形状や粒径の取り扱い方に着目し、各文献における体積の算出方法を整理した（図表 1-15）。形状については、実際に FTIR で観察された粒子の形状に寄らず、球体、楕円体、円柱、フレーク、直方体の 5 通りの仮定が置かれていた。粒径については、粒子の長径はいずれの文献でも FTIR を用いて 1 粒ずつ計測した実測値が換算に利用されていた。短径は実測値を用いている文献と仮定を置いている文献があり、厚みはいずれの文献でも仮定した値が用いられていた。

図表 1-15 各文献における体積の算出方法

文献 No.	換算方法 No.	実際に観察された形状	換算にあたり仮定した形状	換算に用いた値	体積の算出方法
① Simon M et al. (2018)	1	非繊維状	楕円体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 実測に基づいて長径と短径の比を算出し、短径は長径の 0.67 倍と定義 厚み h: 短径と厚みの比は長径と短径の厚みの比に等しいと仮定し、厚みは短径の 0.67 倍、すなわち長径の 0.67 ² 倍と仮定	$V = \pi L l h / 6$ $= \pi L \times 0.67 L \times 0.67^2 L / 6$ $= \pi 0.67^3 L^3 / 6$
	2	繊維状	空隙率 40%の円柱 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 実測に基づいて長径と短径の比を算出し、短径は長径の 0.67 倍と定義	$V = \pi (l/2)^2 L \times 0.4$ $= \pi 0.67^2 L^3 / 4 \times 0.4$
② Eo S et al. (2019)	3	球状	球体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = 4 \pi (L/2)^3 / 3$
	4	破片状	球体が平坦になった形状(楕円体) 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = 4 \pi (L/2)^3 / 3 \times \alpha$ (α : 平坦な形状の体積に対応する係数、 $\alpha = 0.1$)
		フィルム状			
	5	繊維状	円柱 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 繊維の断面の平均半径 r: 10 μm (実測値)	$V = \pi r^2 L$
③ Pabortsava K et al. (2020)	6	記載なし (すべての粒子を球体、楕円体、円柱、フレークの 4 通りの形状に仮定して重量を算出し、比較)	球体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = 4 \pi (L/2)^3 / 3$
	7		楕円体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 1 粒ずつ実測した値 厚み h: 短径に等しいと仮定	$V = \pi L l h / 6 = \pi L l^2 / 6$

文献 No.	換算方法 No.	実際に観察された形状	換算にあたり仮定した形状	換算に用いた値	体積の算出方法
	8		円柱 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 1 粒ずつ実測した値	$V = \pi l (L/2)^2$
	9		フレーク 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = L^3 \times \alpha$ (α : 平坦な形状の体積に対応する係数、 $\alpha = 0.1$)
④ M Sugiura <i>et al.</i> (2021)	10	球状 繊維状	直方体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 1 粒ずつ実測した値 厚み h: 短径に等しいと仮定	$V = Llh = Ll^2$
⑤ Zhao S <i>et al.</i> (2022)	11	記載なし	楕円体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: 1 粒ずつ実測した値 厚み h: 短径の 0.67 倍と仮定 ⁵	$V = \pi Llh/6 = \pi 0.67 Ll^2/6$
⑥ Thornton Hampton LM <i>et al.</i> (2022)	12	球状	球体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = 4\pi (L/2)^3/3$
	13	破片状	球体が平坦になった形状(楕円体) 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$V = \pi L^3/6 \times CSF^2$ (CSF: 平均コーリー形状因子、CSF=高さ/√(長さ×幅)、楕円体の場合は 0.4 ⁶)
	14	繊維状	円柱 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 環境中に存在する繊維状 MicP の断面の平均直径 r: 15 μm ⁶	$V = \pi (r/2)^2 L$

⁵ Simon, M., van Last, N., Vollertsen, J., 2018. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier Transform Infrared (FT-IR) imaging. *Water Research* 142, 1-9.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135418303877>

⁶ Kooi, M., Koelmans, A.A., 2019. Simplifying Microplastic via Continuous Probability Distributions for Size, Shape, and Density. *Environmental Science & Technology Letters* 6, 9, 551-557.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.estlett.9b00379>

【重量の算出方法】

いずれも文献でも、体積に素材の密度を乗じて重量を算出している。各文献における素材（密度）の取り扱い方を整理した（図表 1-16）。FTIR の分析により 1 粒ずつ判定された素材の密度を利用している文献が多かったが、素材分析により密度が大きい PET と PET 以外の 2 種類に分類し、PET には 1.3 g/cm³、PET 以外の粒子には 1 g/cm³ を適用している文献④や環境中に存在する MicP の平均ポリマー密度 1.04 g/cm³ を全粒子に適用している文献②もあった。

図表 1-16 重量への換算における各文献の（密度）の取り扱い方

文献 No.	素材(密度)の取り扱い方	実際に換算に利用した値(g/cm ³)	本検討における利用可能性
① Simon M <i>et al.</i> (2018)	1 粒ずつ FTIR で判定した素材の密度を適用	✓ PE:0.935 ✓ PP:0.905 ✓ PS:1.048 ✓ PVC:1.38 ✓ ポリエステル:1.38 等	粒子 1 粒ごとの素材の判定結果を入手できないため、利用できない
② Eo S <i>et al.</i> (2019)	全粒子を同じ密度(平均ポリマー密度)と仮定	✓ 平均ポリマー密度:1.04 ⁷	全ての粒子に適用可能なため、利用できる
③ Pabortsava K <i>et al.</i> (2020)	FTIR で 1 粒ずつ素材を分析し、分析結果の信頼性が高い PE、PP、PS のみ、それぞれの密度を適用	✓ PE:0.975 ✓ PP:0.946 ✓ PS:1.039	粒子 1 粒ごとの素材の判定結果を入手できないため、利用できない
④ M Sugiura <i>et al.</i> (2021)	1 粒ずつ FTIR で素材を判定し、密度が大きい PET とそれ以外の素材の 2 パターンに分類して密度を仮定	✓ PET:1.3 ✓ PET 以外:1	PET か PET 以外かを 1 粒ごとに判定する必要があるが、全粒子が PET 以外であると仮定し、1 g/cm ³ を適用することはできる
⑤ Zhao S <i>et al.</i> (2022)	1 粒ずつ FTIR で判定した素材の密度を適用	✓ PE:0.94 ✓ PP:0.86 ✓ PS:1.04 ✓ ポリエステル:1.39 ✓ ポリメタクリル酸メチル:1.18 等	粒子 1 粒ごとの素材の判定結果を入手できないため、利用できない
⑥ Thornton Hampton LM <i>et al.</i> (2022)	1 粒ずつ FTIR で判定した素材の風化後の密度 ⁸ を適用	✓ PE:1.01 ✓ PP:0.945 ✓ PS:1.09 ✓ PET:1.385 ✓ PA:1.145 等	粒子 1 粒ごとの素材の判定結果を入手できないため、利用できない

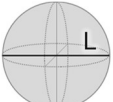
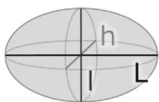
⁷ Andrady A.L., 2011. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62, 8, 1596-1605. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X11003055>, Besseling, E., Quik, J.T.K., Sun, M., Koelmans, A.A., 2017. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study. *Environmental Pollution* 220, A, 540-548. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749116316013> を参照しているが詳細は記載なし

⁸ Koelmans A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Mohamed Nor, N.H., Kooi, M., 2020. Solving the Nonalignment of Methods and Approaches Used in Microplastic Research to Consistently Characterize Risk. *Environmental Science & Technology* 54, 19, 12307-12315. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c02982>

【表面積の算出方法】

表面積への換算を行っていたのは文献⑥のみであり、粒子の形状を球体、楕円体、円柱の3通りに仮定して換算を行っていた（図表 1-17）。

図表 1-17 各文献における表面積の算出方法

文献 No.	実際に観察された形状	換算にあたり仮定した形状	計算に用いた値	表面積の算出方法
⑥ Thornton Hampton LM <i>et al.</i> (2022)	球状	球体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値	$S = 4\pi (L/2)^2$
	破片状	楕円体 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 短径 l: $0.77L^9$ 厚み h: $0.67l^9 = 0.67 \times 0.77L = 0.5159L$	$a = L/2, b = l/2 = 0.77L/2, c = h/2 = 0.5159L/2$ $S = 4\pi \left(\frac{(ab)^{1.6} + (ac)^{1.6} + (bc)^{1.6}}{3} \right)^{1/1.6}$ $= 4\pi \left(\frac{\left(\frac{0.77L^2}{4} \right)^{1.6} + \left(\frac{0.5159L^2}{4} \right)^{1.6} + \left(\frac{0.3972L^2}{4} \right)^{1.6}}{3} \right)^{1/1.6}$
	繊維状	円柱 	長径 L: 1 粒ずつ実測した値 環境中に存在する繊維状 MicP の断面の平均直径 r: $15 \mu m^6$	$S = 2\pi (r/2)L + 2\pi (r/2)^2$

⁹ Kooi, M., Primpke, S., Mintenig, S.M., Lorenz, C., Gerdt, G., Koelmans, A.A., 2021. Characterizing the multidimensionality of microplastics across environmental compartments. *Water Research* 202, 117429. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135421006278>

【本検討で用いる換算方法】

既存文献における体積（図表 1-15）、重量（図表 1-16）、表面積（図表 1-17）への換算方法のうち、入手可能な情報を考慮して今回用いる換算方法を検討した。

形状に関して、繊維状（細長い円柱）に仮定している換算方法については、有害性側で繊維状粒子を用いた毒性試験を対象外としているため、本検討においても対象外とした。また、環境中の実測データでは繊維状、破片状が多く報告されている一方、球状の報告が少ないことから、球状の仮定は適切ではないと考えられるため対象外とした。

粒径に関して、環境省実測データの粒径情報は幅を持った分布であり、1 辺の情報しか利用できないことから、長径の情報のみで体積を算出できる換算方法 No.4、9、13 や短径や厚みに仮定を置いた換算方法 No.1 が利用可能である。

素材（密度）に関して、環境省実測データにおいて採取された粒子 1 粒ずつの素材判定の結果を入手することができないため、文献②のように平均ポリマー密度を利用した換算が適切であると考えられる。

これらの結果を踏まえ、本検討における形状・粒径・素材（密度）の取り扱い方針と換算方法を図表 1-18 に整理した。本検討では、4 通りの換算方法を併記する形とした。

図表 1-18 本検討における形状・粒径・素材（密度）の取り扱い方針と換算方法

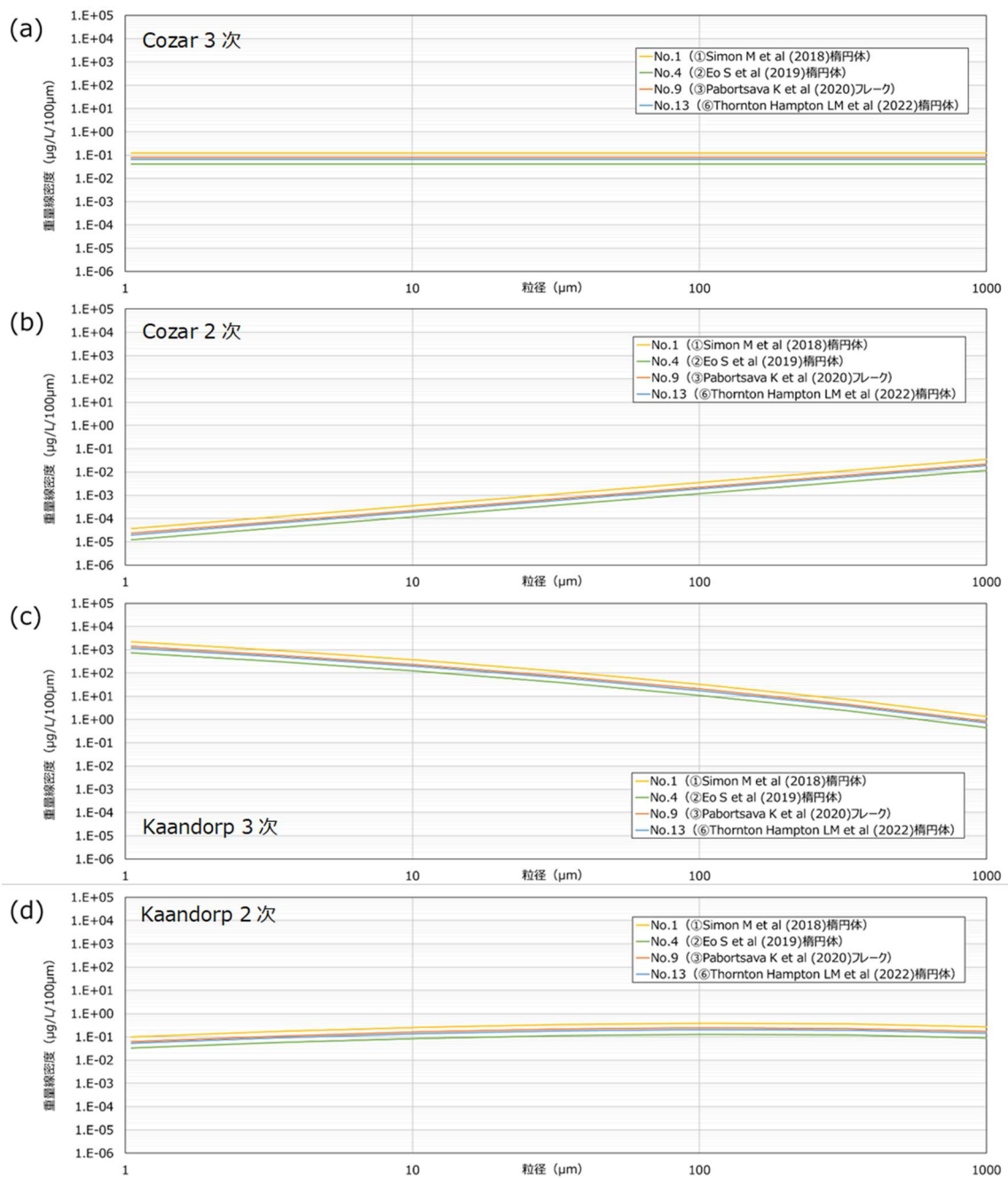
		換算方法			
		1(文献①)	4(文献②)	9(文献③)	13(文献⑥)
形状		楕円体	楕円体(平坦な球体)	フレーク	楕円体(平坦な球体)
粒径		長径: 粒径分布から読み取る 短径: 長径の 0.67 倍 厚み: 長径の 0.67 ² 倍	長径: 粒径分布から読み取る	長径: 粒径分布から読み取る	長径: 粒径分布から読み取る 短径: 長径の 0.77 倍 厚み: 長径の 0.52 倍
素材(密度)		利用する実測データにおける平均ポリマー密度を算出して換算に利用する			
換算式	体積	$V = \pi \cdot 0.67^3 L^3 / 6$	$V = \frac{4}{3} \pi (L/2)^3 \times 0.1$	$V = L^3 \times 0.1$	$V = \pi L^3 / 6 \times 0.4^2$
	重量	$M = V \times \text{平均ポリマー密度}$			
	表面積	—	—	—	$S = 4\pi \left(\frac{\left(\frac{0.77L^2}{4} \right)^{1.6} + \left(\frac{0.5159L^2}{4} \right)^{1.6} + \left(\frac{0.3972L^2}{4} \right)^{1.6}}{3} \right)^{\frac{1}{1.6}}$

1.4.3. 結果

既存文献における換算方法を整理した結果、粒子の形状を楕円体やフレークに仮定している4つの換算方法は、1辺の情報のみから体積を算出できるため、本分科会において利用可能であると考えられた。体積から重量への換算に必要となる粒子の素材（密度）については、個数濃度の実測データから、平均ポリマー密度を算出し、利用することとした。

1.3節で算出した個数濃度の推計結果を用いて重量濃度（重量線密度）への換算を行った。環境省実測データの95%ile値を使用した推計結果を、それぞれ4通りの換算方法で重量濃度に換算した（図表 1-19）。重量濃度は粒径 $1\mu\text{m}$ で $10^{-5}\sim 10^3\mu\text{g/L}$ となり、推計方法による乖離は大きい一方、換算方法による乖離は小さく、1オーダー以内に収まる結果となった。

今回行った換算にはいくつかの不確実性がある。まず、換算方法を調査した文献6報において、いずれも粒子の細孔は考慮されていないため、換算した値は過大評価である可能性があるが、現時点では粒子の劣化に関する情報が不足しており、今回の換算では考慮できていない。また、平均ポリマー密度の算出に利用した素材別検出数には繊維状粒子が含まれており、今回は個数ベースの存在比率から加重平均を取って平均ポリマー密度を算出したため、重量ベースの存在比率から加重平均を算出すると、平均ポリマー密度の値が大きく変動する可能性がある。これらの不確実性に留意しつつ、換算結果を利用する必要がある。



図表 1-19 本検討における重量濃度の換算結果

(補足)グラフの解釈について

Cazar 3 次式

- ✓ 体積保存を想定しているため、重量線密度は粒径に依存せず一定となる。

Cozar 2 次式

- ✓ 面積保存を想定しているため、粒径が 1 桁小さくなるごとに、個数線密度は 2 桁大きくなる。
- ✓ 一方、1 粒子の体積は粒径の 3 乗に比例するので、粒径が 1 桁小さくなるごとに、1 粒子の体積は 3 桁ずつ小さくなる。
- ✓ 重量線密度は個数線密度と 1 粒子の体積の掛け算なので、粒径が 1 桁小さくなるごとに、重量線密度は 1 桁小さくなる。

Kaandorp 3 次式

- ✓ 粒径が 1 桁小さくなるごとに、個数線密度は 4 桁程度大きくなる。
- ✓ 一方、1 粒子の体積は粒径の 3 乗に比例するので、粒径が 1 桁小さくなるごとに、1 粒子の体積は 3 桁ずつ小さくなる。
- ✓ 重量線密度は個数線密度と 1 粒子の体積の掛け算なので、粒径が 1 桁小さくなるごとに、重量線密度は 1 桁程度大きくなる。

Kaandorp 2 次式

- ✓ 粒径が 1 桁小さくなるごとに、個数線密度は 3 桁程度大きくなる。
- ✓ 一方、1 粒子の体積は粒径の 3 乗に比例するので、粒径が 1 桁小さくなるごとに、1 粒子の体積は 3 桁ずつ小さくなる。
- ✓ 重量線密度は個数線密度と 1 粒子の体積の掛け算なので、個数線密度と 1 粒子の体積の増減がバランスし、相殺し合うため、粒径が変わっても重量線密度は大きく変動しない。

1.5. 現状の問題点と今後の検討の方向性(案)

今年度は、環境省実測データを用いて微細 MicP の個数濃度の推計を行った。また、推計結果を重量濃度へ換算し、有害性試験の毒性値と比較可能な形でばく露濃度の算出を行った。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) (次年度すぐに取り組むことができるものには【◎】)
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、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測定技術の開発
	② 実環境中での MicP の重量濃度が未把握 ➤ MicP の実測データは現状、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)が未把握 ➤ 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 の海洋の鉛直方向における濃度分布については知見が不足	➤ 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【◎】
推計に関して	④ Cozar、Kaandorp の推計式の適用妥当性の検証が不十分 ➤ これらの推計式は海洋表層で完結した閉鎖系(砕けた MicP が海洋中の同じ層に留まる)を想定しており、過大評価の可能性あり ➤ 劣化・微細化の実態が未解明であり、2次・3次のどちらの増加曲線が実態に近いのか、推計式がどの粒径まで適用可能なのか判断できない	➤ 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 の挙動や破砕メカニズムの解明 → 挙動や破砕メカニズムを考慮した推計手法の検討 ➤ 微細粒径の MicP の実測(特に粒径 10~100 μm 程度) → 推計式へのフィッティングへの活用に向けた期待
重量への換算に関して	⑤ 個数から重量への換算式の妥当性が不明 ➤ 長径・短径・厚み等のデータが不足 ➤ 平均ポリマー密度の算出に必要なデータが不足 ➤ 実環境中の劣化で生じる細孔や付着生物の影響を考慮できていない	➤ 長径・短径・厚み・素材別重量等のデータの蓄積【◎】 ➤ 実環境中の劣化で生じる細孔等に関するデータの蓄積【◎】

1.6. 別添

1.6.1. 委員名簿

委員名簿は以下の通り。

氏名 (敬称略、五十音順)	所属
磯辺 篤彦 (座長)	九州大学 応用力学研究所 附属大気海洋環境研究センター 教授
亀田 豊	千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 教授
鈴木 剛 (副座長)	国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 資源循環基盤技術研究室 主幹研究員
高橋 一生	東京大学大学院 農学生命研究科・農学部 水圏生物科学専攻 水圏生物環境学研究室 教授
田中 厚資	国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域 研究員
田中 周平	京都大学大学院 地球環境学堂 准教授
中谷 久之	長崎大学大学院 工学研究科 化学・物質工学コース 教授
中田 晴彦	熊本大学大学院 先端科学研究部 准教授
山下 麗	東京大学 大気海洋研究所 海洋生態系科学部門 浮遊生物グループ 特任研究員

1.6.2. 開催概要

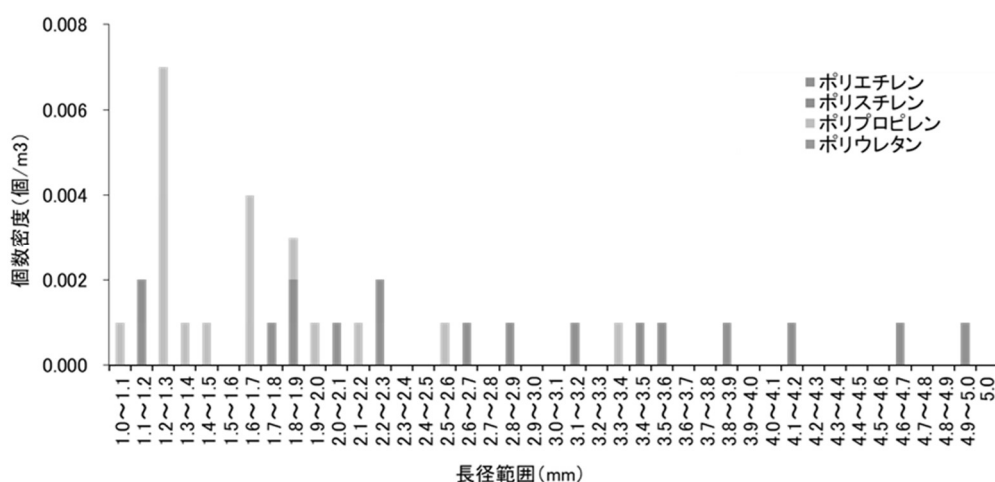
分科会の開催日時と議題は以下の通り。

回数	開催日時	議題
第 1 回	令和 5 年 7 月 27 日 (有害性評価分科会と 合同開催)	(1)分科会の設置について (2)プラスチックと関連化学物質に関する動向について (3)昨年度の振り返りと今年度の検討方針について (4)体制と今後のスケジュールについて
第 2 回	令和 5 年 10 月 20 日	(1)本日の検討事項について (2)微細 MicP の個数濃度の推計について (3)個数から体積、重量、表面積への換算について (4)今後のスケジュール
第 3 回	令和 6 年 2 月 1 日 (有害性評価分科会と 合同開催)	(1)これまでの振り返りについて (2)ばく露等評価分科会の検討結果について (3)有害性評価分科会の検討結果について (4)ばく露と有害性の重ね合わせについて (5)今後のスケジュールについて

1.6.3. 環境省の実測データを用いた、実測重量と換算重量の比較

環境省実測データを用いて、実測重量と換算重量の比較を行った。環境省実測データは、「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」の「漂流マイクロプラスチック調査結果」を利用した。

換算を行うにあたり、環境省実測データから入手可能な粒径情報は図表 1-20 に示す幅をもった分布であるため、長径を仮定する必要がある。粒径分布から粒子の長径を設定する方法として、粒径分布の各階級の最大値を利用する方法（例：2.0～2.1 mm の階級では 2.1 mm を粒子の長径と設定）、最小値を利用する方法（例：2.0～2.1 mm の階級では 2.0 mm を粒子の長径と設定）、平均値を利用する方法（例：2.0～2.1 mm の階級では 2.05 mm を粒子の長径と設定）の 3 通りでそれぞれ換算を行い、実測重量と比較を行った。



図表 1-20 環境省の令和 3 年度沿岸海域における
漂流マイクロプラスチック調査の粒径分布（志賀町沖・春季）¹⁰

¹⁰ 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 報告書

換算に利用する平均ポリマー密度は、「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」において検出された素材（図表 1-21）と各測定地点での個数ベースの検出割合（図表 1-22）の加重平均として算出した。

図表 1-21 検出された素材とその密度（比重）の一覧

素材	密度 (g/cm ³)	素材	密度 (g/cm ³)	素材	密度 (g/cm ³)	素材	密度 (g/cm ³)
ポリエチレン(PE) ⁵	0.935	ポリ塩化ビニル ⁵	1.380	酢酸セルロース ¹¹	1.230	ポリエチレンテレフタレート(PET) ¹²	1.385
ポリスチレン(PS) ⁵	1.048	エポキシ樹脂 ¹³	1.160	アクリロニトリルスチレン ¹⁴	1.070	ポリビニルメチルエーテル ¹⁵	1.030
ポリプロピレン(PP) ⁵	0.905	ポリアミド(PA) ⁵	1.270	ポリメチルメタクリレート ¹⁶	1.180	ブタジエンゴム ¹⁷	0.910
ポリウレタン ⁵	1.087	セルロース ¹⁸	1.500	ポリ酢酸ビニル ⁵	1.190	エチレン酢酸ビニル ⁵	0.931

¹¹ Eo, S., Hong, S.H., Song, Y.K., Han, G.M., Seo, S., Shim, W.J., 2021. Prevalence of small high-density microplastics in the continental shelf and deep sea waters of East Asia. *Water Research* 200, 117238. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004313542100436X>

¹² Thornton Hampton, L.M., Lowman, H., Coffin, S., Darin, E., Frond, H.D., Hermabessiere, L., Miller, E., de Ruijter, V.N., Faltynlova, A., Kotar, S., Monclús, L., Siddiqui S. Völker, J., Brander, S., Koelmans, A.A., Rochman, C.M., Wagner, M., Mehinto, A.C., 2022. A living tool for the continued exploration of microplastic toxicity. *Microplastics and Nanoplastics* 2,13. <https://microplastics.springeropen.com/articles/10.1186/s43591-022-00032-4>

¹³ <https://www.resinlibrary.com/knowledge/article/epoxy-resin/>

¹⁴ 樹脂プラスチック材料環境協会 <https://www.jushiplastic.com/specific-gravity>

¹⁵ <https://www.tcichemicals.com/Jp/ja/p/P0384>

¹⁶ Zhao, S., Zettler, E.R., Bos, R.P., Lin, P., Amaral-Zettler, L.A., Mincer, T.J., 2022. Large quantities of small microplastics permeate the surface ocean to abyssal depths in the South Atlantic Gyre. *Global Change Biology* 28, 2991-3006. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.16089>

¹⁷ <https://powerrubber.com/en/rubber-compounds/rubber-br/>

¹⁸ <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cellulose>

図表 1-22 「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」における素材別検出数（個）

測定地点	季節	PE	PS	PP	ポリウレタン	ポリ塩化ビニル	エポキシ樹脂	ポリアミド	セルロース	酢酸セルロース	アクリロニトリルスチレン	ポリメチルメタクリレート	ポリ酢酸ビニル	PET	ポリビニルメチルエーテル	ブタジエンゴム	エチレン酢酸ビニル	合計
泊村沖	春	5,432	0	1,453	0	350	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	870	8,145
	夏	26,106	241	2,507	0	0	0	200	0	0	0	0	420	320	0	200	1,200	31,194
	秋	10,822	0	3,645	0	400	0	0	0	0	0	2	0	221	0	0	1,144	16,234
	冬	3,488	119	872	3	430	0	2,251	0	0	0	0	0	1	0	0	11,791	18,955
志賀町沖	春	323	92	66	0	28	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	33	581
	夏	12,435	200	590	140	0	10	0	510	0	10	950	10	0	520	0	33,350	48,725
	秋	1,157	153	511	0	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	281	2,262
	冬	3,963	25	688	0	91	0	260	0	0	0	0	0	2	0	0	1,350	6,379
赤羽根町沖	春	1,738	2	4	0	90	0	80	0	60	0	0	160	342	1860	0	190	4,526
	夏	67,567	0	463	0	50	0	50	0	0	0	0	650	20	0	0	1,150	69,950
	秋	91,282	8	3,486	1	720	0	0	0	0	0	0	0	402	0	0	14,7584	243,483
	冬	12,050	65	342	1	480	0	4,720	0	0	0	20	0	21	0	0	19,720	37,419

図表 1-21 に示す密度と図表 1-22 に示す各測定地点における素材別検出数から加重平均を取り、平均ポリマー密度を算出した結果を図表 1-23 に示す。各地点・各季節における平均ポリマー密度の算術平均値は 0.96 g/cm^3 となった。ただし、図表 1-22 に示す素材別検出数には重量の軽い繊維状粒子も含まれている。今回は個数ベースの存在比率から加重平均を取って平均ポリマー密度を算出したため、重量ベースの存在比率から加重平均を算出すると、平均ポリマー密度の値が変動する可能性がある点に留意する必要がある。

図表 1-23 各測定地点における平均ポリマー密度

	泊村沖				志賀町沖				赤羽根町沖				平均
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	
平均ポリマー密度 (g/cm^3)	0.951	0.943	0.945	0.982	1.001	0.945	0.967	0.952	1.036	0.938	0.934	0.981	0.964

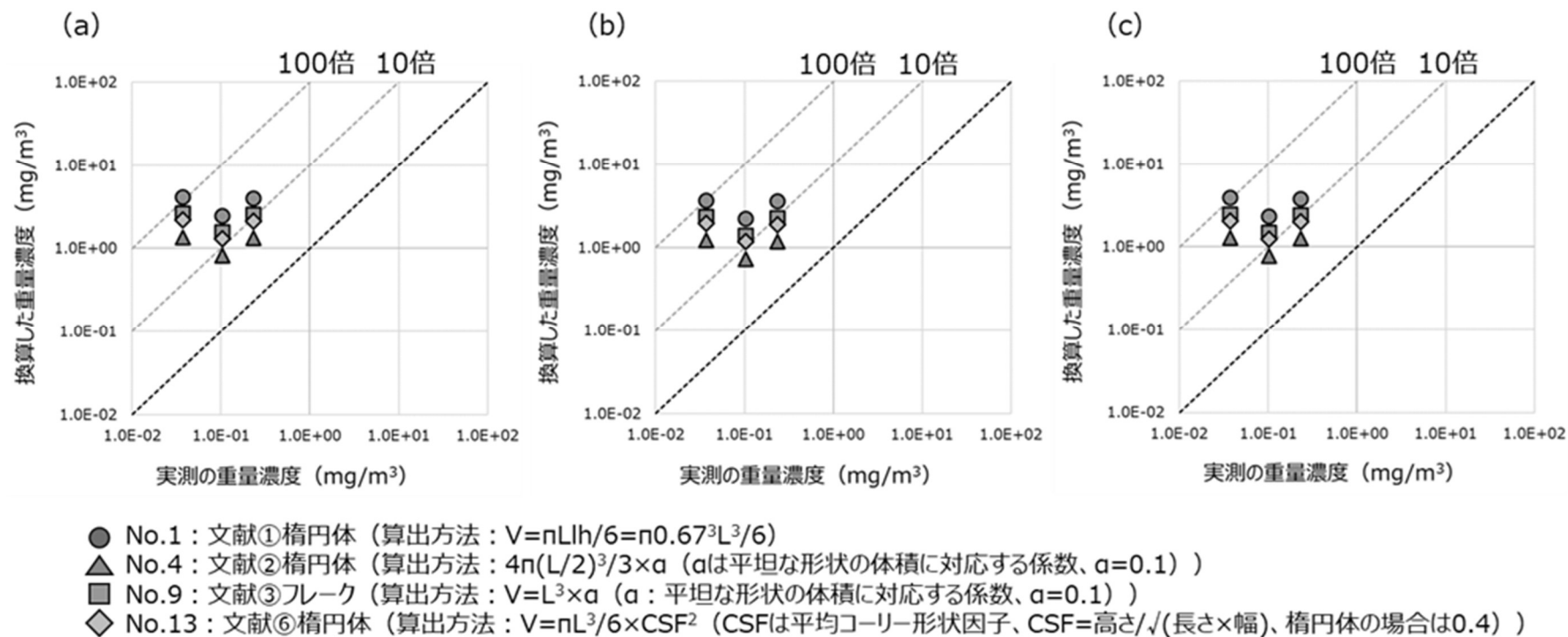
上記で算出した平均ポリマー密度 0.96 g/cm³ と「令和 3 年度 沿岸海域におけるマイクロプラスチックを含む漂流ごみ実態把握調査業務」の粒径分布を利用し、換算方法 No.1、4、9、13 を用いて個数濃度から重量濃度への換算を行った（図表 1-24）。

環境省実測データにおいて、実測重量は、1～5 mm までのすべての粒子の合計として示されている。そのため、粒径 100 μm ごとに換算重量を算出し、1～5 mm までの合計値を実測重量と比較した（図表 1-25）。

その結果、いずれの換算方法でも実測重量よりも換算重量の方が大きく、4 つの換算方法のうち最も実測重量との乖離が小さかったのは換算方法 No.4（文献②楕円体）であった。一方、実測重量と換算重量の乖離は、いずれの方法でも概ね 1～2 オーダー程度に収まっていたことから、安全サイドの換算方法として概ね妥当であることが示唆された。また、長径の設定方法（粒径分布の各階級の最大値、最小値、平均値）による算出結果に大きな差はみられなかった。

図表 1-24 重量濃度への換算結果

	実測値 (mg/m ³)	換算値(mg/m ³)											
		長径は階級の最大値				長径は階級の最小値				長径は階級の平均値			
		1(文献 ①楕円 体)	4(文献 ②楕円 体)	9(文献 ③フレ ーク)	13(文 献⑥楕 円体)	1(文献 ①楕円 体)	4(文献 ②楕円 体)	9(文献 ③フレ ーク)	13(文 献⑥楕 円体)	1(文献 ①楕円 体)	4(文献 ②楕円 体)	9(文献 ③フレ ーク)	13(文 献⑥楕 円体)
泊村沖	0.2330	3.9685	1.3195	2.5200	2.1111	3.5567	1.1826	2.2585	1.8921	3.7582	1.2496	2.3865	1.9993
志賀町 沖	0.1030	2.4465	0.8134	1.5535	1.3015	2.1985	0.7317	1.3961	1.1696	2.3198	0.7713	1.4731	1.2341
赤羽根 町沖	0.0373	4.0946	1.3614	2.6001	2.1782	3.6467	1.2125	2.3156	1.9400	3.8655	1.2852	2.4546	2.0564



図表 1-25 実測重量と換算重量の比較

(a)各階級の最大値を長径と仮定、(b)各階級の最小値を長径と仮定、(c)各階級の平均値を長径と仮定

以上