

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

### SII-2-3 海洋プラスチックごみのモニタリング・計測手法等の高度化 (JPMEERF18S20211)

平成30年度～令和2年度

英文課題名/ Comprehensive Studies on Oceanic Transport, Environmental Risk, and Advanced Monitoring of Marine Plastic Debris

〈研究代表機関〉

国立大学法人東京海洋大学

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人海洋研究開発機構  
国立大学法人鹿児島大学

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年7月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 各種技術等を活用した漂流ごみ等（マイクロプラスチックを含む）のモニタリング・計測手法の高度化 （国立大学法人東京海洋大学）	16
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化 （国立研究開発法人海洋研究開発機構）	26
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-3 漂着ごみ等のモニタリング・計測手法の高度化 （国立大学法人鹿児島大学）	39

## 要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細	.....	52
IV. 英文Abstract	.....	60

## I. 成果の概要

課題名 SII-2-3 海洋プラスチックごみのモニタリング・計測手法等の高度化

課題代表者名 東海 正 (国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 教授)

研究実施期間 平成30年度～令和2年度

但し、新型コロナウイルスの影響のため、令和3年5月まで延長

研究経費

(千円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成30年度	30,000	30,000
令和元年度	30,953	30,953
令和2年度	30,965	30,965
令和3年度	348	348
<b>合計額</b>	<b>92,266</b>	<b>92,266</b>

本研究のキーワード 海洋プラスチックごみ、モニタリング、マイクロプラスチック、計測手法、漂流ごみ、海底堆積物、漂着ごみ、高度化

研究体制

(サブテーマ1) 各種技術等を活用した漂流ごみ等(マイクロプラスチックを含む)のモニタリング・計測手法の高度化(東京海洋大学)(SII-2-3)

(サブテーマ2) 海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化(国立研究開発法人海洋研究開発機構)(SII-2-3)

(サブテーマ3) 漂着ごみ等のモニタリング・計測手法の高度化(国立大学法人鹿児島大学)(SII-2-3)

研究協力機関

研究協力機関はない。

### 1. はじめに(研究背景等)

G20 大阪サミットでは、海洋プラスチックごみによる新たな汚染を 2050 年までにゼロにすることを目指す「大阪ブルー・オーシャン・ビジョン」が表明された。この実現のためには海洋中のプラスチックごみ・マイクロプラスチックについてその分布を正確に把握する必要がある。

これまでに、海表面に漂流するマイクロプラスチック(以下、MPs)については、350 $\mu$ mの目合のニューストーンネット(あるいはマンタネット)による採取が標準的に用いられて、持ち帰った採取物から目視による標本の拾い出しとFTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)による材質確認を一粒ごとに行うという手間を要する作業を通じて分布調査が行われている。しかし、MPsについては、海中や海底における分布に関する情報はほとんどなく、かつ350 $\mu$ mの目合を抜けるサイズの微細なマイクロプラスチック(以下、SMPs)の分布動態は明らかでない。また、海岸に漂着したプラスチックごみについては、自治体等により海岸清掃で回収された量などの情報が蓄積されつつあるが、清掃・回収が行われる海岸は限られており、各地の海岸の漂着ごみ量を系統的に推計する手法が確立されておらず、全国的な漂着ごみ量の現存量の把握ができていない。このように、現行の漂流・海岸漂着ごみの調査、MPs

の曳網調査や堆積物調査及びそこからMPsの採取・分析方法等では、観測の効率を上げて調査密度を高めることやさらにはデータ精度の向上に限界があることが認識されている。

## 2. 研究開発目的

本研究課題では、サブテーマ(1)として、多段式ネットを用いて深度別に海表面から海中面に漂流するMPsを採取する手法を確立する。また、このときに目合の細かなネットを用いて、これまでより微細な(350 $\mu\text{m}$ 以下)のSMPsの採取を行うとともに、まずは研究室内で光学技術などを用いた検出技術の基礎を確立する。本研究で得られる多段式ネットによる採取手法は、現在環境省で実施されている沖合域での海洋ごみ調査に適宜導入するなど、標本・データの蓄積と手法の確立に努める。また、サブテーマ(2)として、海底におけるMPsについて、その採取の実施とともに検出の自動化について手法を確立する。さらに、サブテーマ(3)として、プラスチックがマイクロ化、マイクロ化する過程で紫外線劣化の影響を大きく受ける海岸に漂着しているプラスチックごみについて、自律式マルチコプター等からの観測によって現存量を推定する方法を確立する。なお、本研究で開発する新たな手法・技術の確立に当たっては、それらの手法等が一定の普遍性をもって国際的に標準化・統一化されることも視野に入れつつ研究を進めることとする。

## 3. 研究目標

全体目標	既存のサンプリング・調査手法では困難であった微細なプラスチック粒子の収集と検出、効率的な堆積物中の粒子計測および漂着プラスチックごみデータ収集を実現するモニタリング・計測手法を開発する。これらのモニタリングや計測手法の高度化を通して、海洋中や海底に現存するマイクロプラスチック密度の情報を二次元/三次元マップに基づく物理モデル研究および生物に及ぼす影響の研究に供するとともに、海岸漂着ごみ量の全国マップ作成に手法を提供することで、環境政策への情報提供ならびに世界での手法の標準化に貢献する。
サブテーマ1	各種技術等を活用した漂流ごみ等(マイクロプラスチックを含む)のモニタリング・計測手法の高度化
サブテーマリーダー/所属機関	東海 正/国立大学法人東京海洋大学
目標	多段式ネット(目合65 $\mu\text{m}$ )やポンプによる採集法を用いて、海表面から海中に漂流する微細なマイクロプラスチックを水深別に採取する手法を確立する。これまで標準的に用いられてきた目合330 $\mu\text{m}$ のニューストンネットでは採集できなかったより微細なマイクロプラスチックの検出法について、採集された標本の前処理工程および顕微FTIRの効率的な使用方法を確立する。また光学技術(蛍光および偏光)などを用いた検出技術の基礎を構築する。
サブテーマ2	海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化
サブテーマリーダー/所属機関	土屋 正史/国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター 海洋プラスチック動態研究グループ
目標	海底堆積物中のマイクロプラスチック(MP)の分析を、イメージングフローサイトメーターなどを用いて、正確かつ効率的に実施するための方法を確立する。前処理工程では堆積物を含む混入物を除去するために、溶液の比重調整に

	よる密度分離や化学処理による有機物・無機物除去及び篩による選別等を行い、検出工程では流体の最適流速、画像撮影の最適感度あるいは照度などを試行して最適化を図る。蛍光染色したMPを画像データから判別し、個数や形状、大きさを自動的に計測するシステムを開発する。
--	---

サブテーマ3	漂着ごみ等のモニタリング・計測手法の高度化
サブテーマリーダー/所属機関	加古 真一郎／国立大学法人鹿児島大学 理工学域工学系
目標	機動性の高い自律式マルチコプターによる海岸の航空測量と、ディープラーニングを基盤とした画像解析を組み合わせることで、場所やごみの種類に依存することなく適用可能な、海岸漂着プラスチックごみ定量化手法を構築する。本研究の最終目標は、研究者だけでなく、地方自治体等が参画できる全国海岸漂着ごみ自動計量システムを提案することにあるため、地方自治体と協働し（例：南さつま市）、上記で提案した手法の実証実験及び精度検証を行う。

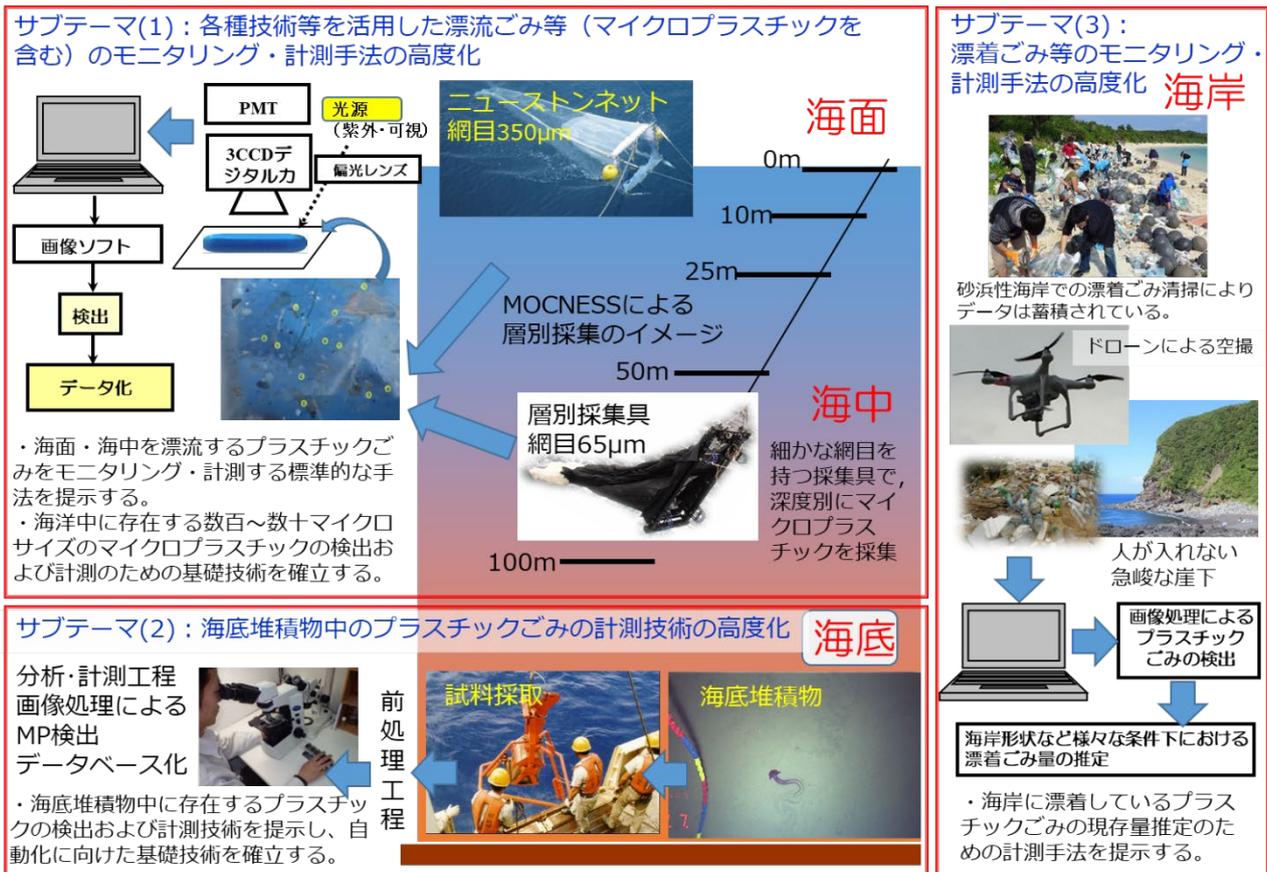
#### 4. 研究開発内容

テーマ3 サブテーマ(1)では、海洋中の各種プラスチックごみをモニタリング・計測する標準的な手法を提示するとともに、海洋中に存在する数百～数十マイクロサイズの微細なマイクロプラスチック（以下 SMPs）の検出および計測のための基礎技術を確立する。まず MPs の表層・中層からの採取方法を確立するため、標準の 350 $\mu$ m よりも小さな目合のネット（65 $\mu$ m の目合を想定）を用いて、海洋大が保有する多段式自動開閉ネット MOCNESS およびポンプ式採水によって海表面だけでなく海中から深度帯別（まずは深度 200m から表面まで）に MPs の採取を行う。この調査によって、MPs の鉛直方向の密度変化を明らかにし、手法の整備に取り組む。またここでは、SMPs を取り扱うため、ネット採集物からの標本の抽出がより困難になると考えられる。そこで、夾雑物の取り除く前処理あるいは大きさ別の分画処理を施した後に、光学的な手法を用いた検出に取り組み、SMPs のより高度で効率的な検出、分析技術の開発、整備に取り組む。なお、夾雑物の取り除く処理や大きさ別の分画処理を施すなどの前処理を、統計的な処理を含めて、検討する。また、新たな検出方法で抽出した物がプラスチックであるか、またその材質を確認するために、偏光を利用した検出、蛍光染色による検出法を開発する。

テーマ3 サブテーマ(2)として、これまで海底堆積物や堆積物中のメイオベントスを対象にして蓄積してきた、流体中の粒子の画像取得及び計数が可能な Imaging Flow Cytometer (IFC) を利用し、堆積物中の MPs を画像データにより自動検出することを試みる。まず、MPs が海底堆積物中に蓄積されていることを実証するため、複数の対象海域で試料の採取を行い、本 IFC 分析方法の定量性を検証するため、従来行なわれている手分析の結果と比較して、有効性及び課題の抽出を行なう。また開発した手法により、特定のフィールドにおける海底堆積物中の MPs の分布状況の把握（二次元マップ化）、データベース化を行うとともに、モデル再現性検証や生態系への影響調査など、テーマ1及び2への基礎データの提供を行なう。さらに開発した手法を標準化するために国内外に広く公開する。具体的には、①海底堆積物中の MPs 採取と検出方法の整備、②海底における MPs の採取調査の実施、③調査の継続と海底における分布の解明、結果とりまとめを行う。①では、MPs の定量化に用いる IFC 分析の効率化あるいは精度向上のために、海底堆積物を採取し適切な前処理工程の確立と分析条件の最適化をはかる。②ではテーマ間で連携を図った上でフィールド調査を行い、IFC 分析の有効性を検証するとともに実データを取得する。③ではフィールド調査を継続するとともに MPs 分布の二次元マップ及びデータベースを作成し、テーマ1・2への情報提供を行う。また、当該技術の標準化を視野に入れ、国内外の学会やシンポジウム、論文、ホームページなどで IFC 分析法を公表する。

テーマ 3 サブテーマ(3) では、機動性の高いドローンによる海岸空撮と現地測量の結果を基に海岸全体を立体化し、そこから画像識別プログラムを用いて漂着プラスチックごみ情報を抽出することで、その体積を推定する手法を確立する。まず、本手法では、ドローン観測で得られた海岸の位置情報を、現地測量の結果を元に補正する。次に、その補正データを用いて、空中三角測量の原理(≒Structure from Motion 技術)を元に、空撮画像の各画素における高さを推定し海岸を立体化する。この際、海岸のオルソ画像(幾何補正により空撮画像の歪みを補正し、真上から見た画像に変換したもの)も同時に作成する。そして、このオルソ画像を次の二つの画像解析手法に供し、漂着プラスチックごみ情報のみを抽出する。一つ目の画像解析手法は、漂着ごみが持つ色情報を元にデータベースを参照し対象物を検知する画像解析であり、もう一つは、漂着ごみの高さ情報を判定基準とする特徴抽出である。ここでは、色情報として HSV(色相: Hue、彩度: Saturation、明度: Value of Lightness)色空間を使用する。一方、高さ情報としては、ドローンから得られた三次元位置情報をオルソ画像に変換したものを用いる。この処理は、海岸上にある物体のエッジ(高さが大きく変化する画素)を強調させるためのものである。この二つの情報を組み合わせて、影や照り返しの除去、さらには、流木・岩等の自然物の除去を行うと共に、漂着プラスチックごみのエッジを検出する。最後に、この画像解析プログラムを施したオルソ画像に、ドローン観測の結果から得られた水平・鉛直方向の位置情報を与えることで、エッジ内における各ピクセルの高さと底面積を算出し、漂着プラスチックごみの体積を推定する。サブテーマ(3)では全国各地の海岸でドローン空撮された画像に対して本手法を適用し、その汎用性の高さを証明する。また、過去に提案された画像解析手法との比較を通して、本手法の有用性も示す。

テーマ 3 : 海洋プラスチックごみのモニタリング・計測手法等の高度化



## 5. 研究成果（この項目までで最大15ページ）

### 5-1. 成果の概要

テーマ3サブテーマ(1)：各種技術等を活用した漂流ごみ等（マイクロプラスチックを含む）のモニタリング・計測手法の高度化に取り組んだ。このサブテーマは、(1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法、(2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法検討、および(3) 光学技術を用いたSMPs検出技術、で構成される。

(1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法では、①MOCNESSおよびポンプによる深度別採取および②表面採取について取り組んだ。

①MOCNESSおよびポンプによる深度別採取：深度別の粒子の採取は、MOCNESS(Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensing System) およびポンプを利用して行った。両者による採取は2018年7月に日本海においてMOCNESSで3測点、ポンプ2測点で行った。MOCNESSは目合65 $\mu$ mのネットを取り付けた。採取方法は、MOCNESSを船尾より投入し、最大深度(1000m)まで降下した後、巻揚げながら深度帯ごとに採集を行った。そして最後に表層での採集を120~180秒間行った後に回収した。ポンプでは50m-表層にかけて10mもしくは5m間隔で静止し、船上へ揚水した(図1)。船上で0.7mmメッシュおよび7 $\mu$ mメッシュで濾して採取した。いずれの手法でも多量の粒子を採取できた。MOCNESSはニューストンネットより微細な粒子を採取できた。また、MOCNESSによるMPsの鉛直濃度分布をみると水深80mで極大値を示した。水深700mで表層と同程度のMPsが見られた。表層(水深15m) および40mではPPとPETが大きな割合を占めているが、80mではPEの割合が急増した。水深700mでは、PPが見られなくなった。

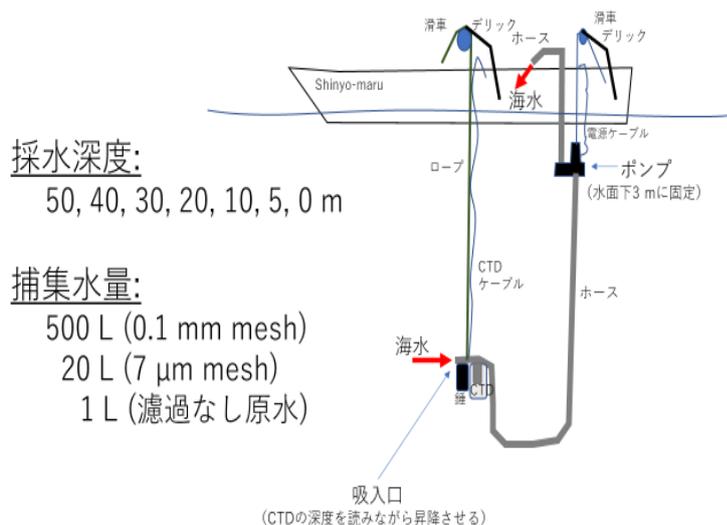


図1-3 ポンプ採取の概念図

②表面採取：ニューストンネット(1.00 mm, 0.333 mm)のメッシュ選択性について検討した。0.333 mmのネットは、1.00 mmのネットよりも最長長 $\leq$ 2.00 mmのマイクロプラスチックをより多く収集しました。0.333 mmのネットは、0.4-1.0 mmで約60%がメッシュを通過し、0.4 mm以下のマイクロプラスチックはあまり保持しないことが分かった(図2)。

表層のSMPsの採取方法の確立を目的として、ポンプ(マキタ社製)による採取を行った。ポンプで海面付近の海水を揚水し、350 $\mu$ m、50 $\mu$ mのネットで分画し分析したところ、ニューストンネットによる従来の知見では見られないプラスチック組成であった。また表面水のみを集める装置によってサンプル採取したところ、この結果もニューストンネットの結果と一致しなかった。このことから、目合の異なる2枚のニューストンネット(2重ネット、350 $\mu$ m、50 $\mu$ m)によって従来取れていなかった350 $\mu$ m以下のMPs採取を行った。MPsの採取は2020年9月に日本の太平洋沿岸3点で行った。2重ネットの350 $\mu$ m以上の粒子数は従来のニューストンネットと有意な差はなかった。50-350 $\mu$ mのMPsの濃度は350 $\mu$ m以上濃度の約20000倍であった。SMPsは粒径が小さいほど多かった。また、350 $\mu$ m以上ではPSなどが多く検出されたが、50-350 $\mu$ mでは、350 $\mu$ m以上のMPsに見られなかった種類が多かった。

これらは塗料に含まれるものと考えられた。

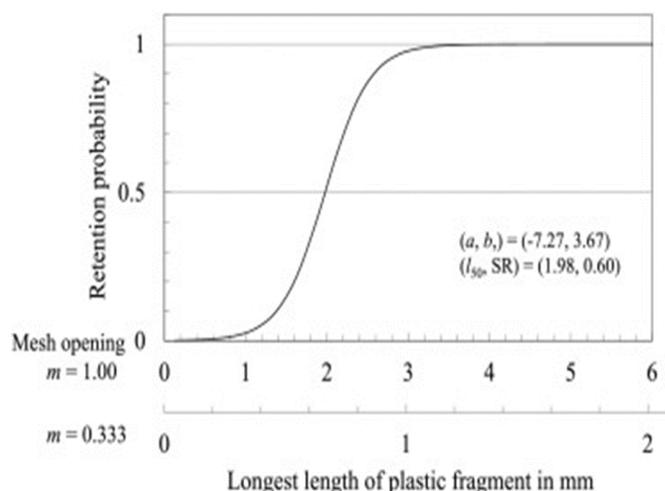


図1-10 標準的に用いられる目合0.333mm網目のニューストンネットによる破片状マイクロプラスチックの粒径別の網内保持確率

(2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法検討では、①サンプルの前処理の検討および②SMPsの分析法の検討に取り組んだ。

①サンプルの前処理の検討：まず酸化処理、密度分離の手法について検討した。海水サンプルの酸化処理では、フェントン反応を使ったNOAAの手法(Masura,2015)で、有機物等の夾雑物を除去できた。また密度分離はNaI溶液による手法(Masura,2015)が適していた。

350 $\mu$ m以上のMPsは洗浄、自然乾燥後、FTIR (ATR) でプラスチックの種類を決定した。350 $\mu$ mより小さなMPsはフィルターで適宜ろ過し、顕微FTIRで計測した。フィルターで捕集する粒子量が多すぎる場合、粒子の重なりによって、種類の決定やサイズに影響が出ると考えられる。ここでは、フィルターでろ過する最適な粒子量を数値実験により検討した。粒子数が多いほど、粒径が大きいほど、粒子同士が重なる。直径10mmのフィルター上で重なる粒子が1%以下とするためには、粒径50 $\mu$ mで200個以下、粒径200 $\mu$ mで20個以下であることがわかった。

②SMPsの分析法の検討：350 $\mu$ mより小さなSMPsの分析では、微細な粒子の吸収を測定するため透過法を用いた。まず、セルロース、ポリカーボネート、PTFE製のフィルター赤外線吸収スペクトルを比較し、フィルターの選定を行った。セルロース製フィルターは、水酸基(OH)によるブロードな吸収、メチル基(CH)による吸収、また1500 $\text{cm}^{-1}$ 以下の指紋領域においても多数のピークが見られた。また、ポリカーボネートの場合、メチル基(CH)による吸収、エステル結合(C=O)による吸収、芳香族による吸収、炭素と酸素の結合(C-O)による吸収が見られた。一方、PTFEの場合、プラスチックに重なる吸収ピーク見られなかった。プラスチックを透過法で測定する場合、PTFEフィルターが適すると判断した。

次に、測定条件を決定した。1.試料なしの状態(空気)の測定により得た128個のスペクトルを用いたアンサンブル平均を算出し、背景スペクトルとした。2.PTFEフィルターを計測位置に設置し、赤外線吸収スペクトルを測定した。平均に用いたスペクトル数は、6回とした。機器による最大測定可能エリアである4mm $\times$ 4mmの領域における測定時間を調べた。プラスチックに含まれる炭素と水素の分子結合(CH<sub>2</sub>)が強く赤外線を吸収する波長2800 - 3000  $\text{cm}^{-1}$ において吸光スペクトルにおけるノイズを求めた。4mm $\times$ 4mmの領域において8個の測定を用いた場合160分(2時間40分)を要することが分かった。

PTFEフィルターに捕集した試料の赤外線吸収スペクトルをリニアアレイ式の検出器で測定したデータから、粒子サイズおよびそのポリマータイプを同定した。まず測定により得たスペクトルおよび代表的なプラスチックのスペクトルについて一次微分値を算出し、その相関係数を求めた。相関係数を求める際はプラスチックごとにその範囲を変更した。次に、相関係数の水平マップを作成しMPsの候補となる粒子を検出する。検出時にはプラスチックごとに求めた相関係数を用いて平均値と標準偏差の3倍の和を求め、その境界値より大きい領域を候補粒子とみなした。この境界値を用いて、水平マップを二値化した。二値化画像に対し、画像解析ソフトImageJの楕円フィッティングを用いることで粒子サイズ

を求めた。検出素子による最小分解能は $12.5\mu\text{m}$ であるから、素子分解能の2倍に当たる $25\mu\text{m}$ を長さの検出限界であると仮定した。各粒子のスペクトルについて、KnowItAllを用いて再度検証しその粒子のプラスチックの種類を確認した。

(3) 光学技術を用いたSMPs検出技術では、①蛍光手法による分析および②偏光によるMPsの検出について取り組んだ。

①蛍光手法による分析：蛍光指標としてクマリン6を使用することとした。クマリン6は10種（HDPE, LDPE, PP, PVC, PS, PC, PMMA, Forming PS, PA, PET）のプラスチックを染色できた（図3, 4）。この蛍光はNile RedやRose Bengalより強かった。さらに最適な溶媒、濃度、染色時間を検討し、短時間で効率的に染色できることを確認した。このクマリン溶液で、海水、底泥、および海岸砂浜のプラスチックを染色し、蛍光顕微鏡で濃度およびサイズの計測ができることを確認した。

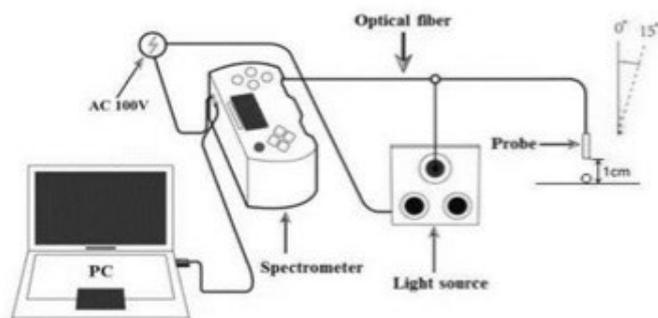


図1-7 蛍光スペクトルの測定システム

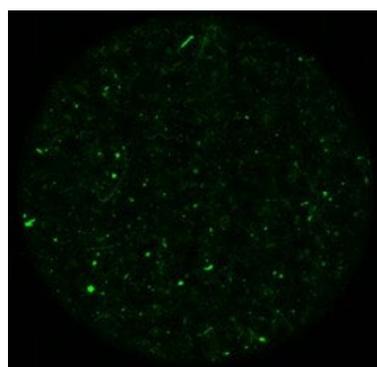


図1-12 蛍光検出の様子

②偏光によるMPsの検出：偏光特性によって水中のMPsを直接検出することを試みた。後方散乱偏光特性測定装置を構築した。この装置は、レーザー光に各種（7種）の偏光を与えて、試水に照射し、試水の散乱光を各種の偏光素子（7種）を通してCCDカメラで撮影することによって、散乱光の偏光の変化を調べられる。画像からミューラーマトリックス要素（MM）を算出した。さらに偏光の変化を詳しく検討するために、偏光パラメータ $\Delta$ （偏光解消度）、 $R$ （位相遅れ）、 $d$ （減衰）を求めた。MPsの濃度の増加に伴って $\Delta$ が増加すること、MPsが懸濁するとき、 $R$ が増加することが示された。

これらの結果により、SMPsの採取、サンプル処理、および検出について高度化することができたと考えている。

テーマ3 サブテーマ(2)：本サブテーマでは、海底堆積物中のマイクロプラスチック（MPs）ごみの計測技術の高度化に取り組んだ。本サブテーマは、(1)海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備、(2)海底におけるMPsの採取調査の実施、(3)調査の継続と海底における分布の解明の3項目で構成され、それぞれ研究開発を進めた。

(1) 海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備では、①アルミ製プッシュコア・マルチプルコアラー用アルミチューブの製作と実海域試料採取、②密度分離器の製作と前処理工程の効率化、③濃縮器の製作と前処理工程の簡素化、④MPsの自動検出法開発に取り組んだ。堆積物内MPsの前処理法は、多くの手法が考案されているが、標準的な手法が考案されているわけではない。このため、煩雑な

工程が必要な機器が利用され、作業効率の問題が残されていた。このため、既往研究における問題を整理し、堆積物採取時のMPs汚染を低減する機器や、簡便かつ効率的にMPsを分離する前処理法及び機器を開発した。

① **アルミ製プッシュコア・マルチプルコアラー用アルミチューブの製作と実海域試料採取**：堆積物中のMPsを採取する際に用いるコアチューブはプラスチック製であるため、分析試料中へのMPsの汚染が生じる。そこでMPs汚染のないアルミ製コアチューブを作成し、実海域試験の観測手法と合わせて論文として報告した<sup>1)</sup>。

② **密度分離器（JAMSS）の製作と前処理工程の簡素化**：採取した堆積物からMPsを分取するために、操作が容易で安価であり、堆積物の再懸濁が生じないガラス製の密度分離器を開発した<sup>2)</sup>（図2-5）。

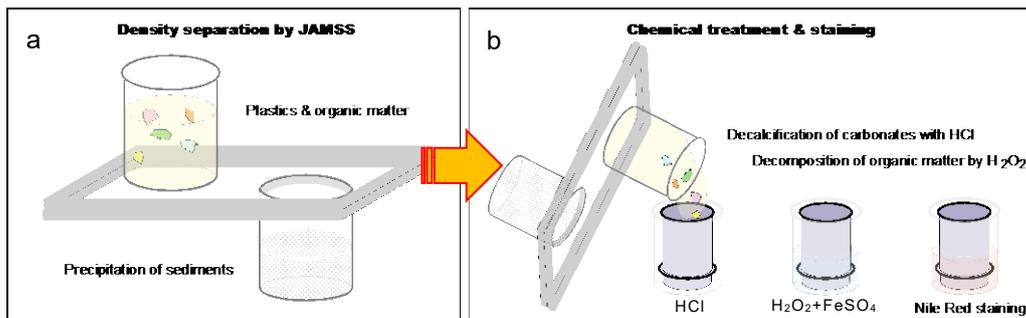


図2-5. JAMSSによる密度分離から濃縮器による化学処理までの概略図。(a) JAMSSにより密度分離したMPsは、(b) 一つの濃縮器へ移し、塩酸や過酸化水素・フェントン処理、ナイルレッドによるMPs染色の工程を行う。1つの濃縮器を用い、異なる試薬を入れたビーカーにそれぞれ移し替えることで、MPsの汚染や散逸のリスク軽減を達成でき、処理時間の短縮にも貢献できる（土屋原図）。

③ **濃縮器の製作と前処理工程の簡素化**：堆積物の前処理工程では、化学処理を行う際に複数の工程を行うため、汚染のリスクやMPsを紛失するリスクが増加する。そこでビーカーにフィットする大きさの金属製メッシュ（篩）を開発し、前処理で必要となる複数の工程を、一つのメッシュ上で実施できるようにした<sup>3)</sup>。

④ **MP自動検出手法の開発**：海底堆積物中に存在するプラスチックの検出および計測技術を提示し、自動化に向けた基礎技術を確認した。具体的には、ステンレス製のフローセルを作成し、フローセル内を流れるMPを撮影後、MPsの形状判別（粒子状か繊維状かの分類）と計数（粒子数・長径の計測）を自動的に行うシステムの開発を行った（図2-8、2-9）。構築システムにより1分間に60個以上のMPを検出するとともに、繊維・粒状をあわせて、98%の正答率で分類できる。

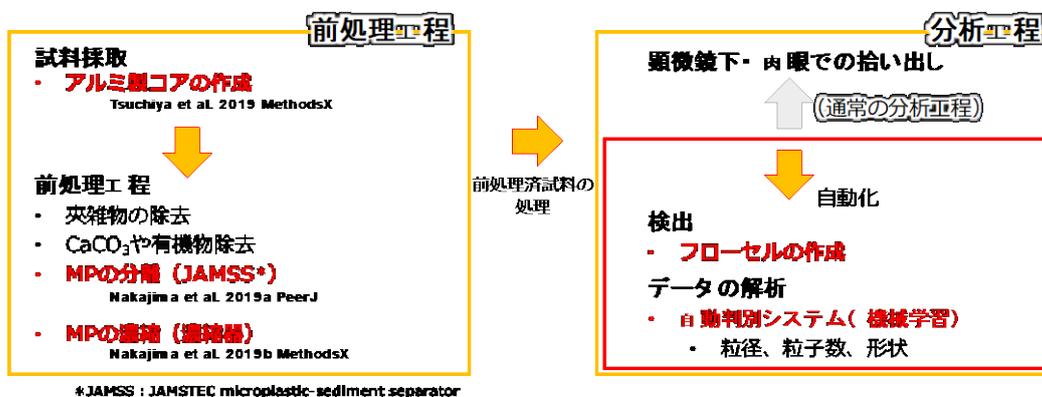


図2-8. 堆積物内のMPs分析の流れ。前処理工程では、1) で開発した機器を用いて前処理を行い、分析工程での自動化を目指した。

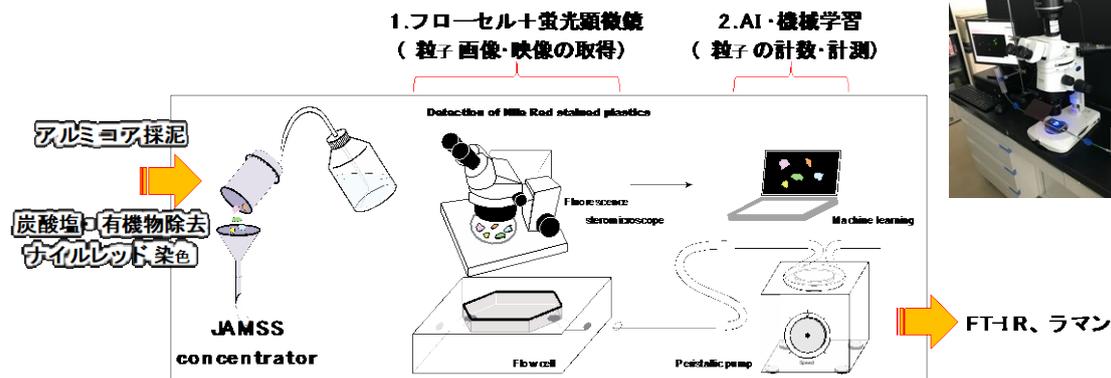


図2-9. MPs自動検出までの分析の流れ。MPsを連続的に流すフローシステム(1)と、検出したマイクロプラスチックを自動判別するシステム(2)の2つの要素で構成される。右上の写真は、顕微鏡下にフローセルを設置し、下流側にペリスタポンプを設置した例を示した。

(2) 海底におけるMPs粒子の採取調査の実施：2019年に海洋研究開発機構の深海潜水調査船支援母船「よこすか」および有人潜水調査船「しんかい6500」による調査を実施し、2020年に海底広域研究船「かいめい」による調査を実施した(図2-11)。

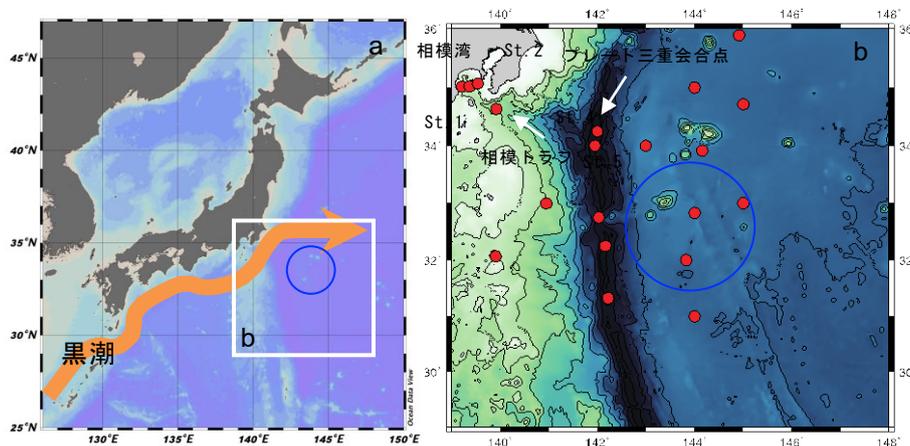


図2-11. 調査海域図。(a) 調査海域と黒潮流路の関係。青丸は黒潮統流再循環域に存在するごみ集積の想定位置(=西太平洋ごみパッチ)。(b) 観測点(赤丸)。各観測点においてニューストーンネット曳網、マルチプルコアラーもしくは深海ランダー・「しんかい6500」により海底堆積物試料を採取した。

(3) 調査の継続と海底における分布の解明：(2)において、相模湾や日本海溝、プレート三重会合点、深海平原の深海底におけるMPsの分布調査を実施した。日本海溝プレート三重会合点は、沿岸からも近く、急崖となっているため、海底堆積物がタービダイト(乱泥流)に伴い供給されやすいと考えられ、このような堆積物の挙動とMPsの挙動に共通性が見られた。

上記の研究開発により、実海域海底堆積物の分布実態把握および前処理法、自動検出手法の開発を行うことで、海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化を実現できた。アルミ製コアについては、海外研究者からコアの利用法や設計図についての問い合わせがあった。密度分離装置については、多くの問い合わせがあり、一部で実際に使用してもらうとともに、製作会社を紹介して購入に至るなど反響が大きい。今後、堆積物試料中のMPs分析手法の標準化への貢献が期待できる。

テーマ3サブテーマ(3)：ドローンによる航空測量と人工知能(深層学習)による画像解析を組み合わせ、海岸に漂着したマクロプラスチックごみ(以下、漂着プラごみ)のモニタリング・計測手法の高度化に取り組んだ。このサブテーマは、(1) ドローンによる海岸の航空測量、(2) 深層学習に

よる漂着ごみの検出、(3) (1)と(2)を組み合わせた漂着プラごみの体積推定、および精度評価、(4) 様々な海岸における本手法の実証実験、で構成される。

### (1) ドローンによる海岸の航空測量

ドローンによる海岸測量は、DJI社製のPhantom 4 Pro, Phantom 4 Real Time Kinematic, P4 Multispectral (P4M)などを用いて行った(図3.2)。フライト高度や速度を決定するためのテスト観測は、鹿児島県日置市吹上浜で実施した。ドローンのオペレーションは、DJI社製のiPad用アプリケーションによる自動飛行・撮影機能を用いて行なった。複数回のテスト観測を経て、ドローン観測を実施する際の各パラメータを次のように決定した。飛行スピードは1 m/s、飛行高度は17 m、地上画素寸法は5 mm/pixel、画像のオーバーラップ率は海岸線の直行方向に90%、同並行方向に60%である。ただし、phantom 4 RTKとP4Mにおいては、両方向共に80%とした。この設定であれば、ドローンに搭載されたカメラの性能・解像度を活用して、航空測量による海岸の立体的な再現が、高精度で可能である。またこの高度であれば、ペットボトル程度の漂着プラごみも認識可能である。

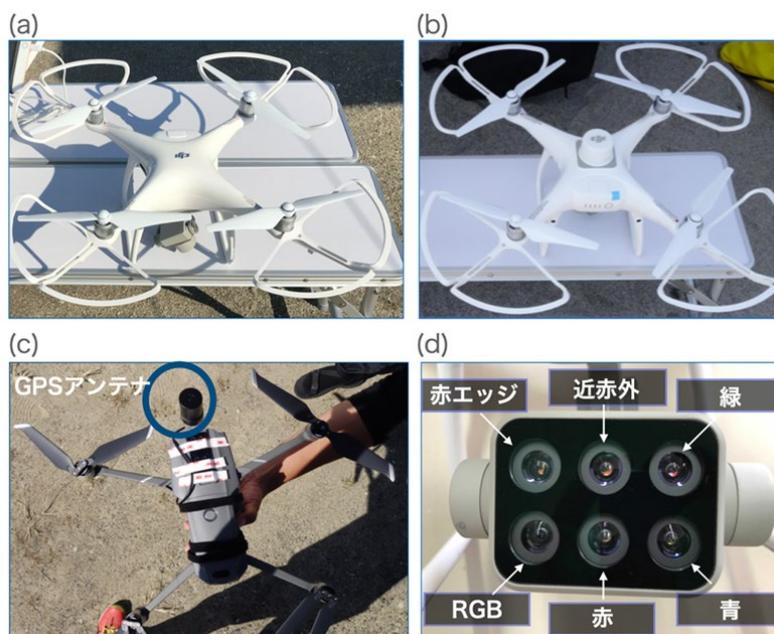


図3-2 観測に使用したドローン  
(a) Phantom4 Pro, (b) Phantom4 Real Time Kinematic, (c) Mavic2 Pro, (d) P4 Multispectralに搭載のマルチスペクトルカメラ

Global Positioning System (GPS)から得られた位置情報には、様々な要因により誤差が含まれる(Kako et al., 2010)。ドローンに搭載されたGPSも例外ではなく、Real Time Kinematic(RTK)方式等による自動位置補正機能が搭載されていないドローン(Phantom 4 proやMavic 2 proなど)から得られた位置情報には、多くの誤差が含まれる。実際、本研究が実施したトータルステーション(TS)による現地測量との比較結果からは、水平方向には5～6 cm/10 m程度、高さ方向には最大で90 cm程度の誤差の存在が確認された。本研究では、このようなGPS観測に包含された誤差は、TSによる現地測量の結果を用いることで補正した。一方、RTK方式による自動位置補正機能が搭載されているドローン(Phantom4 RTK, P4M)の誤差は、1 cm/ 50 m以下であり、非常に高精度であった。また、使用地域に縛られないDifferential GPS方式による位置補正は、RTKドローンとほぼ同精度の航空測量が、条件付き(受信する衛星、信号の種類、仰角マスクなどの最適な選択)ではあるものの、可能であることがわかった。

これら補正後のデータをStructure from Motion(幾何補正や空中三角測量などにより、全てのピクセルの緯度・経度・高さ情報を推定する方法)に適用することで、高精度な海岸の立体的モデル

(Digital Surface Model: DSM)を構築する方法も確立した。DSMの構築は、上記の吹上浜でのテスト観測に加えて、鹿児島県薩摩川内市上甕島里海岸、同県南さつま市越路海岸、および長崎県五島市奈留島大串海岸での観測から得られたデータを用いて実施したが、全ての海岸で問題なく成功した。

また、精度も現場観測とよく一致することを示した。以上の結果から、我々は、ドローンによる海岸の高精度な立体化再現手法を構築したと結論付けられる。過去の研究では、バルーンや小型飛行機から得られた数枚の航空画像を合成することでオルソ画（像真上から撮影したように幾何補正した画像）を作成し、海岸漂着プラスチックの被覆面積を推定する手法が用いられていた（Kako et al., 2012, Kataoka et al., 2018）。これらの方法の問題点は、真上からの情報のみしか得られないという点に加えて、航空測量による誤差を補正しきれていない点も挙げられる。本研究で構築した手法を用いれば、被覆面積のみならず、対象物の体積を高精度で推定することも可能であるため（後述）、過去の手法と比べて海岸の航空測量技術を大きく高度化させたといえよう。

## (2) 深層学習による漂着プラスチックの検出

海岸における対象物の様々な色情報を学習データとし、画像中から漂着プラスチックを自動検出する深層学習モデルを構築した。この際、学習データとして必要な色情報は、海岸のオルソ画像から得た。オルソ画像は、DSMを構築する際、同時に作成したものである。学習データのアノテーション（画像中のどこにプラスチックが存在するかをラベル付することは、画像中の背景（海岸）と対象物（プラスチック）を主観で塗り分けるという作業を通して行った（海岸を黒、対象物であるプラスチックを白として、全てのピクセルを手作業で塗り分け）。本研究では、RGB(Red, Green, Blue)色空間上で表現された学習データを、HSV色空間上（色相:Hue、彩度:Saturation、明度:Value of Lightness）に置き換えたのち、3層のニューラルネットワークから成る深層学習モデルに供し、512サンプルのミニバッチで20エポックの訓練（20回の繰り返し学習）を実施することで、海岸漂着プラスチックの自動検出モデルを構築した。主観的な解析によるプラスチック抽出や、過去に提案されたcolor referenceを参照する手法(Kako et al., 2012, Kataoka et al., 2012など)との比較から、本手法はこれらと比べて高精度にプラスチック情報を抽出可能であることが示された。

しかしながら、この深層学習モデルのみでは、背景海岸とプラスチックの色情報が非常に近い場合、プラスチックを正しく検出できない場合がある。過去の研究では、手作業で基準となるcolor referenceを季節毎に作成したり（Kataoka et al., 2012）、画像全体の輝度値を調整したりする主観的な処理を施すことで、対象物の抽出を行ってきた(Nakashima et al., 2011)。本研究では、より客観的に対象物を抽出するために、ドローン観測から得られた海岸の高さ情報を用いて海岸勾配を計算し、それを判定基準に取り入れた。この情報を用いれば、高さ情報がないピクセルを「海岸」と判断することが可能となり、色の類似に起因したプラスチックの誤検出を防ぐことが可能となる。加えて、影や照り返しの影響も画像中から除去できる（図3.12）。また、マルチスペクトルカメラを搭載したドローン観測では、RGB画像のみを学習データとした場合、抽出できなかった流木の情報を、容易に検出可能となることを明らかとした（図3.14）。以上の結果より、画像解析による海岸漂着プラスチックの自動検出技術を大幅に発展・高度化させたと言える。

## (3) (1)と(2)を組み合わせた漂着プラスチックごみの体積推定、および精度評価

(2)で作成した深層学習モデルから得られた結果を、(1)で構築したDSMに入力することで、対象物の体積を推定する方法を確立した。(2)の画像解析では、対象物を抽出する際に、Canny法（Canny, 1986）によってその輪郭を同時に得ている。この結果をDSMに入力することで、輪郭内の対象物の体積を個々に（ピクセルごと）に推定することができる。たとえ、海岸がその輪郭内に含まれていたとしても、そこには高さ情報がないため体積推定には反映されない。また、海岸が傾いた場合であっても、任意に決定した基準点をもとにフラット化することで、正確に体積推定が可能である。この手法の精度は、体積既知の疑似プラスチックごみを、本研究で開発した手法で推定することで評価した。その結果、計9回のテスト観測から得られた本手法の誤差は、-1~16%程度であった。ただし、誤差が10%を超えたケースでは、高さ方向の補正を施していないため（最初の1,2回目のフライト。高さ方向の補正の重要性が明らかでなかった）、この補正を施した結果に限れば、概ね10%以下の誤差で、対象物の体積を推定可能であることが示された。Nakashima et al. (2011)が提案したバルーンによる航空観測と海岸踏査を組み合わせた手法の精度が約±35%であることから、本手法の精度は非常に高精度である結論付けられる。

#### (4) 様々な海岸における本手法の実験

(3)における精度評価は、平坦な砂浜海岸に設置した擬似プラごみに関する精度であり、理想化実験の結果とも考えられる。そこで、実際に海岸に漂着したプラごみの体積推定を、(1)で示した3つの海岸（里海岸、越路海岸、大串海岸）において行った（図3.1）。これらはそれぞれ、磯浜、砂浜、および磯浜海岸である。ここでの本手法による漂着プラごみ体積の推定精度は、主観解析（画像中に映ったプラごみを、全て目視で抽出する）による漂着プラごみの抽出結果との比較を通して検証した。ただし、越路海岸においては、プラごみがほぼ漂着していなかったため、漂着流木の体積推定を行った（この観測は、南さつま市役所と協働したものであり、観測終了後、市と連携して海岸清掃を実施した）。各海岸における本手法による体積推定は $1.22 \text{ m}^3$ 、 $8.81 \text{ m}^3$ 、 $15.65 \text{ m}^3$ であった。一方、オルソ画像から目視で抽出した結果は、 $1.72 \text{ m}^3$ 、 $7.95 \text{ m}^3$ 、 $18.00 \text{ m}^3$ であった。これを誤差で表すと、 $-29.07\%$ 、 $+10.82\%$ 、及び $-13.05\%$ となり、里海岸では若干誤差が大きいものの、概ね疑似プラごみを用いた精度検証に近い結果が得られた。里海岸においては、他の海岸と比べて精度の低下が見られたが、これは、深層学習モデルが、白色ごみを海岸と判断したこと起因する過小評価である。観測当日は、照り返しの影響が強く、撮影された白色プラごみを海岸と区別することは、目視でも一見しただけでは困難であった。このような事態を避けるには、照り返しの影響が少ない時間帯や、曇天下において観測を実施すればよい。しかしながら、このような状況下でも、本手法の精度は Nakashima et al. (2011) と比べて、倍以上精度が高い。

加えて、主観解析と本手法の決定的な違いは解析時間にある。4k 画像を100枚以上組み合わせた画像からプラごみのみを目視で抽出する作業は、想像以上に困難であり、1日では完了せず、全ての処理を終えるのに各海岸で数日間を要した。一方、深層学習による解析に要する時間は、GPU(Graphical Computing Unit)計算を用いれば、数分程度である。正確さもさることながら、この計算処理時間の速さも、本研究の開発した手法の特徴の一つといえよう。

以上の4項目の成果をまとめる。本研究は、実海岸に漂着したプラごみの体積を高精度に推定する方法を、ドローンによる航空測量を用いた海岸の立体化と、深層学習を基盤とした画像解析による対象物（プラごみ）の自動抽出によって確立した。この方法は、過去の研究成果と比べて、非常に高精度であることが現地観測や主観解析との比較結果から示された。また、データ処理に要する時間も大幅な短縮を達成したことからも、漂着プラごみ計測手法を高度化させたと結論付けることができる。これらの成果は、国際学術論文誌である *Marine Pollution Bulletin* に、Kako et al. (2020) として、発表済みである。

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

- ・令和元年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書（環境省）において、テーマ1との共同の成果のひとつが、コラム：海洋における将来のマイクロプラスチック浮遊量の将来予測として掲載され、国民に対して海洋におけるマイクロプラスチック浮遊とともにプラスチック排出抑制対策の必要性を知らせることとなった。
- ・環境省が「海洋プラスチックごみ対策アクションプラン」の一つである国際貢献・実態把握の対策分野として開催されている「マイクロプラスチックモニタリング手法の調和化に関する国際専門家会合」において、参加した本課題の研究者から適宜、最新の研究成果の情報を提供して、環境省発行の「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」の策定に活用された。
- ・環境省が行う海洋ごみ実態把握調査（海洋ごみの実態把握及び生物影響把握等に関する総合検討業務、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、沖合海域にお

ける漂流・海底ごみの分布調査検討業務など)の検討会において、委員として参加した研究代表者から最新の研究成果の情報を適宜提供することで、海洋ごみ実態把握等の調査方法の検討に活用されている。

- ・令和3年度の環境省の「海洋ごみ実態把握調査」のうち「沖合海域における漂流・海底ごみの分布調査検討業務」に、本研究で開発した手法の一部が採用される予定である。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

#### サブテーマ(1)

- ・海表面を漂う浮遊マイクロプラスチック (MPs) の現在の標準的な採集方法であるニューストーンネット (マンタネットを含む) を使った採集方法では、特に網の目合0.333mmによって採集できる浮遊MPsの粒径の限界が示され、また採集できた最小粒径以上の海表面に浮遊するMPsの粒径組成を推定する方法を示すことができた。これにより、これまでに蓄積したデータから、より正確にまたより小さな粒径の浮遊MPsの分布の推定が可能となり、浮遊MPsに対してより正しい認識の下での政策立案につながることを期待される。
- ・ネットの網目を抜ける海表面から海中に浮遊する微細なMPsの採取方法として、ポンプ採集や2重ネットによる採集方法と採集された微細なMPsの前処理工程及び検出方法を提示することができた。これらの方法を普及することで、生物や生態系への影響が懸念される極微細なMPsの採取及び検出を通じた実態解明等が期待される。
- ・環境省の「海洋ごみ実態把握調査」などで行われる海面を漂流する浮遊MPsのサンプリング調査に、本サブテーマで開発した手法の適用によって、より詳細な実態解明につながることを期待される。
- ・海表面のみならず、海中における分布を鉛直的に把握する方法としてMOCNESSの有効性を示した。今後、比重が小さく海面に浮くポリエチレン (PE) やポリプロピレン (PP) だけでなく、これらに次いで大量に生産されているポリスチレン (PS) やポリエチレンテレフタレート (PET) の海中での分布、挙動が明らかにされることで、比重の軽いプラスチック素材・材料にとどまらず、多様なプラスチック素材・材料について海洋プラスチックごみとなる実態を明らかにすることで、その排出抑制と循環利用の必要性を国民に示して、取り組みや活動の活発化を促すことが期待される。
- ・環境省が主導してきた「マイクロプラスチックモニタリング手法の調和化に関する国際専門家会合」で作成し、環境省が発行している「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」(令和2年改定)に、本サブテーマの研究成果を導入することで、その内容を更新することが可能となり、世界で用いられる手法の調和化、標準化への貢献が期待される。

#### サブテーマ(2)

- ・本サブテーマで開発したマイクロプラスチック (MPs) 自動分析手法は、比較的安価で迅速にMPsの量や形、大きさを分析することができる。そのため、高額機械の利用が難しいNPO、教育現場、各研究機関等が用いることで、MPsの材質の分析はできないものの、MPsの分布把握を迅速かつ広域にデータ集積できることが期待される。
- ・前処理法や自動分析手法は、効率的に一次情報を集積できるため、海洋MPsの実態把握や深海底におけるMPsの供給源の理解が進み、SDGs14.1などの目標達成を促す政策決定のための情報収集の加速が期待される。
- ・海洋表面のMPs採取・分析手法については、前述した「マイクロプラスチックモニタリング手法の調和化に関する国際専門家会合」において手法が調和されて、ガイドラインが環境省によって発行されているが (Michida et al. 2019 *Guidelines for Harmonizing Ocean Surface Microplastic Monitoring Methods*. Ministry of the Environment Japan, 71 pp.)、海底堆積物中のMPsの採取・分析手法については、現在のところ国際的に標準的な手法が整備されていない。そのため、本サブテーマでの成果は、堆積物試料中のMPs分析手法の国際的な標準化に大きく貢献することが期待される。

- ・サブテーマ(1)と同様に、海表面で採取されるPPやPEのものとは異なる比重の重いプラスチック素材・材料について、そのMPsの海底での分布実態を明らかにすることで、PEやPP以外のプラスチックの排出の抑制と循環利用の重要性および必要性を、国民に広く示すことでそうした取り組み、活動を促すことが期待される。

### サブテーマ(3)

- ・これまで海岸漂着ごみの調査のほとんどは、ごみ回収への多くの参加者が容易に海岸に近づくことが可能な、また回収のための重機類が持ち込みやすい砂浜性の海岸で実施されてきており、人が容易に近づけない崖下や岩礁性の海岸での調査が行われてきていない。また、砂浜性の海岸でも、都市部から離れてごみ回収の人員を確保できない場合や海岸が広大な場合には、漂着ごみの調査は実施されてきていない現状にある。本サブテーマで開発されたドローンによる漂着ごみは、こうした人が近づけない海岸や広い砂浜性の海岸での漂着ごみの量を、少数の自治体職員によって把握することが期待される。
- ・また、ドローンを用いた海岸観測による漂着ごみ量の一括把握を標準的な方法として実施することで、我が国の沿岸漂着ごみの正確な算出に大きく貢献することが期待される。
- ・上記の結果を元にした、海岸漂着ごみの撤去費用の算出や重点的なごみ回収海岸の選定などを始め、効果的かつ、費用対効果の高い海岸漂着ごみ回収事業の策定への活用が見込まれる。
- ・海洋プラスチックごみの陸域から海への排出が多いとされる東南アジア諸国でも、海洋プラスチックごみ問題への対策のひとつとして、海岸漂着ごみの回収に向けて海岸漂着ごみ量の算出が必要となり、特にドローンを活用した漂着ごみ量の推定は国際的にも注目されているところであることから、本研究成果はこうした国際貢献が期待される。

## 5-3. 研究目標の達成状況

新たなモニタリング及び計測の手法として、これまで行われてきたニューストンネットによるマイクロプラスチック(MPs)の採集方法による採集が困難であった微細な粒子の収集と検出、および堆積物からの採取方法と効率的な粒子計測、そして、海岸漂着プラスチックごみについてドローンを用いた効率の良いデータ収集方法の開発を行い、これらのモニタリング及び計測手法の高度化を通して、海表面や海底に現存するMPs密度の情報を二次元/三次元マップに基づく物理モデル研究及び生物に及ぼす影響の研究に供するとともに、海岸漂着ごみ量の全国マップ作成に手法を提供することで、環境政策への情報提供ならびに世界でのモニタリング及び計測手法の標準化に貢献することを全体目標としてきた。研究開発の全体として、目標に掲げた新たなモニタリング及び計測手法の開発がそれぞれのサブテーマで行うことができ、目標を達成することができたと考える。詳細はそれぞれのサブテーマでの達成状況に譲るが、概要は以下の通りである。

サブテーマ(1)では、多段式ネットMOCNESS(目合65 $\mu$ m)やポンプによる採集法を用いて、海中に漂流する微細なMPsを水深別に採取する手法を確立できた。また、海表面に関しては従来のニューストンネットの捕集能力を検討し、当初の計画にはなかった2重ネットにより微細な浮遊MPsの採取が可能であることを示した。さらに、採集したサンプルの前処理工程を含めて、微細なMPsの検出方法として、顕微FTIR(MicroFTIR)の活用方法及び光学技術(蛍光および偏光)などを用いた検出技術の基礎を構築して、当初の目標を達成している。

サブテーマ(2)では、「(3) 調査の継続と海底における分布の解明」について、深海底におけるMPs分布の実態を把握でき、SDGs14.1にも貢献できた。海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備では、計画を前倒しして論文として公表できた項目があり、海底堆積物を採取し適切な前処理法を確立し、分析条件の最適化を図ることができた。また、成果公表をした前処理機器に多くの問い合わせがあるなど、期待以上の成果を創出できたと判断できる。海底堆積物中のMPs分布把握については、分布実態を把握し、学会等で公表できたことから、期待通りの成果を得たと判断できる。

サブテーマ(3)では、ドローンによる海岸観測から得られた画像と位置情報を用いて、高解像・高

精度な海岸の立体的モデルを構築する手法を確立し、また深層学習を用いて漂着プラスチックごみ情報を抽出することで、漂着プラスチックごみの自動検出を実現し、かつその体積を推定する手法を世界に先駆けて構築した。本技術をまとめた論文の被引用率はトップ4%と国際的な評価が非常に高く、国内のみならず海外でも活用される可能性がある。このように、当初の目標は十分に達成し、今後の可能性から当初の目標以上の達成と考えられる。

研究体制と課題管理（サブテーマ間、テーマ間の協力）、研究資金の運用に関して効率的に実施した点、工夫した点について、以下の通りである。

サブテーマ(1)と(2)では、対象とするMPsが海面・海中浮遊と海底堆積という存在場所が異なるものの、その検出技術には同じような前処理を行うところがあり、情報共有によって利用しあうような技術があったことは特に記しておきたい。

特に、サブテーマ(1)と(2)では、船を使った海上での採集が必須であり、これについては本課題による予算だけでは実行できないところを、それぞれの研究機関の交付金などによる航海の機会を活用することで効果的に調査、研究が進んだことは特筆すべきことと考える。

サブテーマ(1)での東京海洋大学練習船による調査で得られた海面を漂うMPsのネット採集データは、テーマ(1)の海洋中の分布状況及び動態に関する実態把握及びモデル化に用いられている。また、テーマ(2)の生物に及ぼす影響が調べられる中ではこれまでのネット採集では検出できていない微小サイズ50 $\mu\text{m}$ 以下のMPsの影響が示唆されているのに対して、こうしたサイズのMPsの検出方法を整備し、実際の海域でこうしたサイズのMPsの密度が350 $\mu\text{m}$ 以上のMPsの4桁程度高いことを示した。これによりテーマ(2)における生物への影響実験に用いられる密度が現実が生じている可能性を示すことができた。このようにサブテーマ間のみならず、テーマ間でそれぞれの研究を進めるためデータの提供やアドバイザーボード会合などでの成果の情報共有が図られた。

また、「国民との科学・技術対話」として、それぞれの研究機関によるシンポジウムなどの機会を活用したアウトリーチ活動はもとより、外部からの講演依頼や取材にも積極的に引き受けて、国民に向けた科学・技術対話を多彩に行うことができた。

サブテーマ(3)でも、特に開発したドローンの活用について自治体との連携に積極的に取り組み、マスコミでも紹介されるなど、実際の応用と国民との科学・技術対話に努めた。また、ここで開発された手法は、「海洋プラスチックの実態を解明と科学的根拠に基づく政策立案」を目指すJST-JICA SATREPS課題「東南アジア海域における海洋プラスチック汚染研究の拠点形成」において東南アジアでの海岸漂着ごみの調査への活用が具体的に検討されるなど、今後の国際貢献が期待される。

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

10 件

<主な査読付き論文>

- 1) A. ISOBE, S. IWASAKI, K. UCHIDA, T. TOKAI : Nature Communications, 10, 417, (2019)  
Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. (DOI:  
10.1038/s41467-019-08316-9) (IF:12.1)
- 2) A. ISOBE, N. T. BUENAVENTURA, S. CHASTAIN, S. CHAVANICH, A. COZAR, M.  
DELORENZO, P. HAGMANN, H. HINATA, N. KOZLOVSKII, A. L. LUSHER, E. MARTI, Y.  
MICHIDA, J. MU, M. OHNO, G. POTTER, P. S. ROSS, N. SAGAWA, W. J. SHIM, Y. K. SONG,  
H. TAKADA, T. TOKAI, T. TORII, K. UCHIDA, K. VASSILLENKO, V. VIYAKARN, W.  
ZHANG: Marine Pollution Bulletin, 146, 831-837, (2019) An interlaboratory comparison exercise  
for the determination of microplastics in standard sample bottles, DOI:  
10.1016/j.marpolbul.2019.07.033 (IF: 4.049)
- 3) R. NAKAJIMA, D. J. LINDSAY, M. TSUCHIYA, R. MATSUI, T. KITAHASHI, K. FUJIKURA, T.  
FUKUSHIMA: MethodsX, 6, 1677-1682 (2019a) A small, stainless-steel sieve optimized for  
laboratory beaker-based extraction of microplastics from environmental samples.  
doi.org/10.1016/j.mex.2019.07.012 (IF: 0.381)
- 4) R. NAKAJIMA, M. TSUCHIYA, D.J. LINDSAY, T. KITAHASHI, K. FUJIKURA, T. FUKUSHIMA:  
PeerJ, 7, e7915 (2019b) A small new device made of glass for separating microplastics from  
marine and freshwater sediments. doi: 10.7717/peerj.7915 (IF: 2.379)
- 5) M. TSUCHIYA, H. NOMAKI, T. KITAHASHI, R. NAKAJIMA, K. FUJIKURA: MethodsX, 6, 2662-  
2668 (2019) Sediment sampling with a core sampler equipped with aluminum tubes and an  
onboard processing protocol to avoid plastic contamination. doi.org/10.1016/j.mex.2019.10.027  
(IF:0.381)
- 6) B. G. YEO, H. TAKADA, R. YAMASHITA, Y. OKAZAKI, K. UCHIDA, T. TOKAI, K. TANAKA,  
N. TRENHOLM: Marine Pollution Bulletin, 151, 110806 (2020) PCBs and PBDEs in  
microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of  
Japan. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110806 (IF: 4.049)
- 7) 中嶋亮太、山下 麗 : 海の研究, 29(5), 129-151, DOI 10.5928/kaiyou.29.5\_129 (2020)  
海洋マイクロプラスチックの採取・前処理・定量方法
- 8) S. KAKO, S. MORITA, T. TANEDA: Marine Pollution Bulletin, 155, 111127 (2020), Estimation of  
plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing  
based on deep learning. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111127 (IF: 4.049)
- 9) H. NAKANO, H. ARAKAWA, T. TOKAI; Marine Pollution Bulletin, 162, 111887 (2021)  
Microplastics on the sea surface of the semi-closed Tokyo Bay.  
doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111887 (IF:4.049)
- 10) T. TOKAI, K. UCHIDA, M. KURODA, A. ISOBE: Marine Pollution Bulletin, 165, 112111 (2021)  
Mesh selectivity of neuston nets for microplastics. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112111  
(IF:4.049)

### 6-2. 知的財産権

- 1) 1. 荒川久幸、中野知香、程一鵬, 東京海洋大学、【発明の名称】染色液、プラスチック検

出方法、処理装置及びプログラム、2021年5月13日出願、特許・特願2021-081883、国内

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0 件
その他誌上発表（査読なし）	10 件
口頭発表（学会等）	45件
「国民との科学・技術対話」の実施	49 件
マスコミ等への公表・報道等	11 件
本研究に関連する受賞	2 件

### 7. 国際共同研究等の状況

「特に記載すべき事項はない。」

### 8. 研究者略歴

研究代表者

東海 正

京都大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士、現在、国立大学法人東京海洋大学 学術研究院 教授

研究分担者

土屋 正史

静岡大学大学院理工学研究科卒業、博士（理学）、現在、国立研究開発法人海洋研究開発機構 海洋プラスチック動態研究グループ グループリーダー代理

加古 真一郎

東海大学大学院海洋学研究科卒業、博士（工学）、現在、国立大学法人鹿児島大学 理工学域工学系 准教授

## II. 成果の詳細

### II-1 各種技術等を活用した漂流ごみ等（マイクロプラスチックを含む）のモニタリング・計測手法の高度化

国立大学法人東京海洋大学

学術研究院 海洋生物資源学部門	東海 正
学術研究院 海洋生物資源学部門	北門 利英
学術研究院 海洋環境科学部門	田中 祐志
学術研究院 海洋環境科学部門	荒川 久幸
学術研究院 海洋資源エネルギー部門	内田 圭一
船舶・海洋オペレーションセンター	林 敏史
船舶・海洋オペレーションセンター	宮崎 唯史

<研究協力者>

博士研究員	中野 知香
日本学術振興会特別研究員（DC）	黒田 真央

#### [要旨]

テーマ3サブテーマ(1)では、海洋中の各種プラスチックごみをモニタリング・計測する標準的な手法を提示するとともに、海洋中に存在する数百～数十マイクロサイズの微細なマイクロプラスチック（以下SMPs）の検出および計測のための基礎技術を確立することを目的とした。まずMPsの表層・中層からの採取方法を確立するため、標準の350 $\mu\text{m}$ よりも小さな目合のネット（65 $\mu\text{m}$ の目合を想定）を用いて、多段式自動開閉ネットMOCNESSおよびポンプ式採水によって海表面だけでなく海中から深度帯別（まずは深度200mから表面まで）にMPsの採取を行った。さらにニューストンネットのメッシュによる選択制の検討、微細なMPsの採取方法の検討を行い微細なMPsの濃度を明らかにした。

また、夾雑物の取り除く前処理あるいは大きさ別の分画処理を施した後に、光学的な手法を用いた検出に取り組み、SMPsのより高度で効率的な検出、分析技術、夾雑物の取り除く処理や大きさ別の分画処理を施すなどの前処理を、統計的な処理を含めて、検討した。また、新たな検出方法で抽出した物がプラスチックであるか、またその材質を確認するために、偏光を利用した検出、蛍光染色による検出法を開発した。

#### 1. 研究開発目的

サブテーマ(1)として、多段式ネットを用いて深度別に海表面から海中面に漂流するMPsを採取する手法を確立する。また、このときに目合の細かなネットを用いて、これまでより微細な（350 $\mu\text{m}$ 以下）のSMPsの採取を行うとともに、まずは研究室内で光学技術などを用いた検出技術の基礎を確立する。本研究で得られる多段式ネットによる採取手法は、現在環境省で実施されている沖合域での海洋ごみ調査に適宜導入するなど、標本・データの蓄積と手法の確立に努める。

#### 2. 研究目標

多段式ネット(目合65 $\mu\text{m}$ ) やポンプによる採集法を用いて、海表面から海中に漂流する微細なマイクロプラスチックを水深別に採取する手法を確立する。これまで標準的に用いられてきた目合330  $\mu\text{m}$ のニューストンネットでは採集できなかったより微細なマイクロプラスチックの検出法について、採集された標本の前処理工程および顕微FTIRの効率的な使用法を確立する。また光学技術(蛍光および偏光)などを用いた検出技術の基礎を構築する。

#### 3. 研究開発内容

研究開発内容は、(1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法、(2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法

検討、および (3) 光学技術を用いたSMPs検出技術、である。それぞれの検討項目を表1にまとめた。

当初計画	検討項目	2018	2019	2020
(1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法	①MOCNESSおよびポンプによる深度別採取	深度別採取	深度別サンプル分析	深度別サンプル分析
	②表面採取	ポンプ採取	表面採取法検討	2重ネット採取
(2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法検討	①前処理の検討	酸化処理 密度分離	フィルタ選択	最適粒子量検討
	②SMPsの分析法の検討(透過法)	顕微FTIR設定決定	プラスチック種類 決定法の検討	現場サンプル分析
(3) 光学技術を用いたSMPs検出技術	①蛍光手法による分析	蛍光指標の決定	染色条件の決定	現場サンプル分析
	②偏光によるMPsの検出	偏光散乱装置作製	画像解析方法検討	偏光パラメータ解析

表1 テーマ3サブテーマ (1) での検討項目

(1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法では、①MOCNESSおよびポンプによる深度別採取および②表面採取について取り組んだ。

①MOCNESSおよびポンプによる深度別採取：深度別の粒子の採取は、MOCNESS(Multiple Opening/Closing Net and Environmental Sensing System) およびポンプを利用して行った。両者による採取は2018年7月に日本海においてMOCNESSで3測点、ポンプ2測点で行った(図1-1)。MOCNESSは目合65 $\mu$ mのネットを取り付けた。採取方法は、MOCNESSを船尾より投入し、最大深度(1000m)まで降下した後、巻揚げながら深度帯ごとに採集を行った。そして最後に表層での採集を120~180秒間行った後に回収した(図1-2)。ポンプでは50m-表層にかけて10mもしくは5m間隔で静止し、船上へ揚水した(図1-3)。船上で0.7mmメッシュおよび7 $\mu$ mメッシュで濾して採取した。

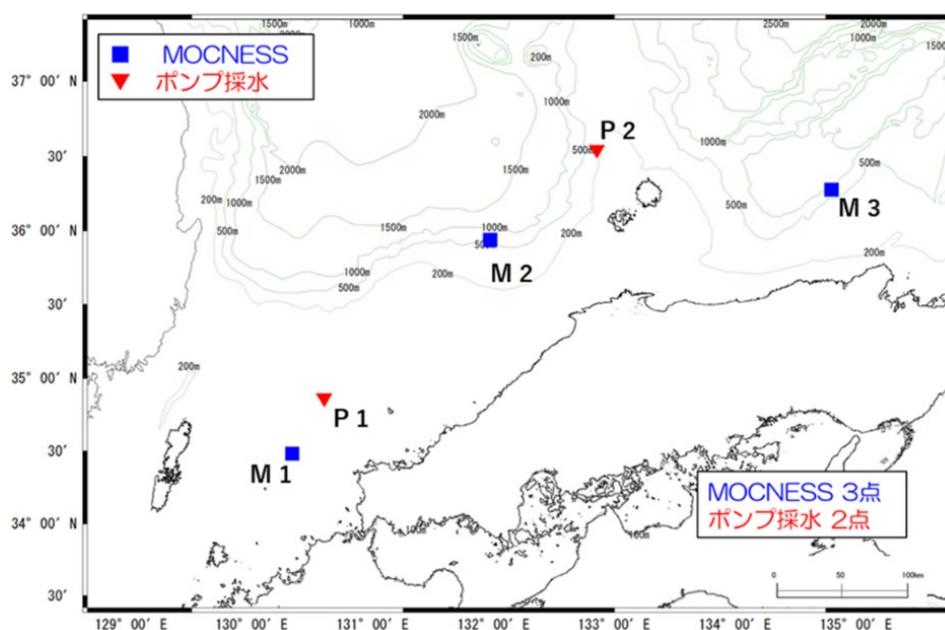


図 1-1 MOCNESSおよびポンプの観測点

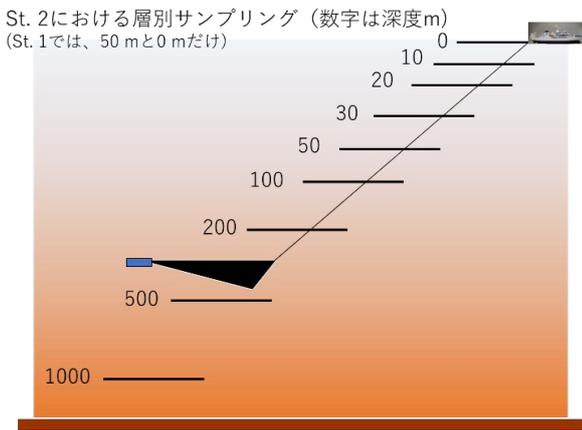


図1-2 MOCNESSによる採取のイメージ

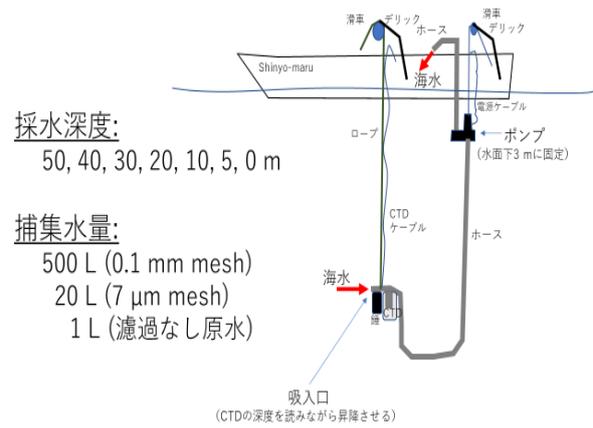


図1-3 ポンプ採取の概念図

②表面採取：ニューストンネット(1.00 mm, 0.333 mm)のメッシュ選択性について検討した。観測は東京湾湾奥で行った。船首両舷より目開き1.00mmおよび0.333mmのニューストンネットを海中に降ろし20分間曳航した（図1-4）。採取後のサンプルは研究室に持ち帰り、MPsをピックアップした。

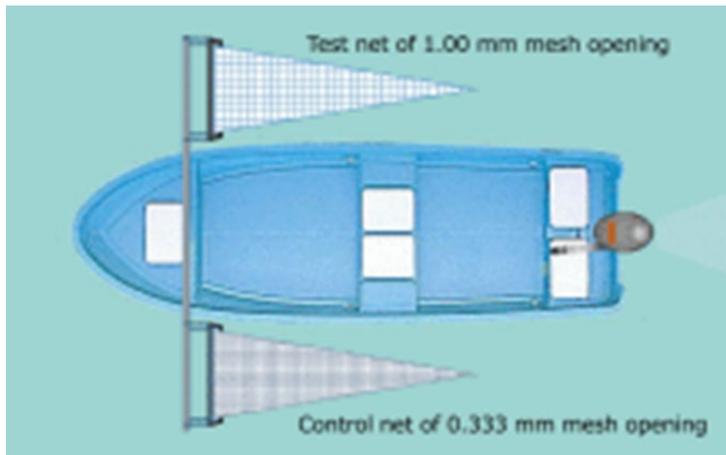


図 1-4 目合1.00 mm, 0.333 mmのネットによる同時曳網実験法

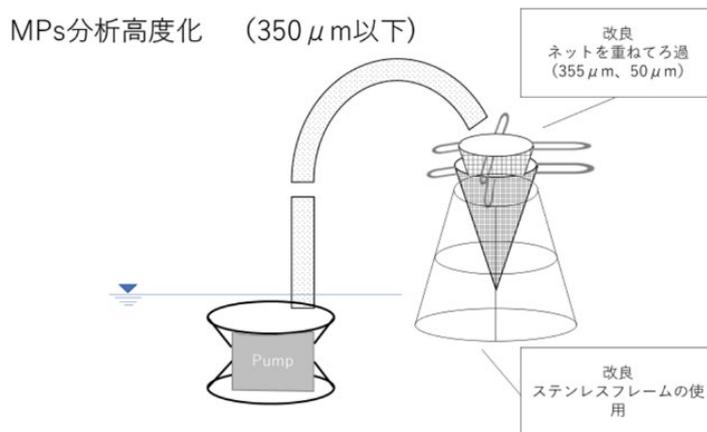


図 1-5 ポンプによる表層MPs採取

また、表層のSMPsの採取方法の確立を目的として、ポンプ（マキタ社製）による採取を行った。ポンプで海面付近の海水を揚水し、350 $\mu$ m、50 $\mu$ mのネットで分画し、それぞれ研究室に持ち帰った。さらに表面水のみを集める装置を試作した。ポンプおよび表面水採取装置の試験は東京湾奥で行った。

このほかに、目合の異なる2枚のニューストーンネット（2重ネット、350 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$ ）によって従来取れていなかった350 $\mu\text{m}$ 以下のMPs採取を行った。MPsの採取は2020年9月に日本の太平洋沿岸3点（図1-6）で行った。

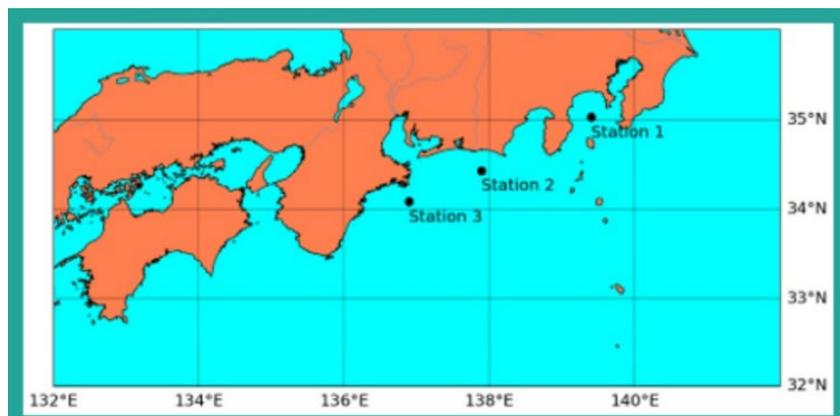


図 1-6 2重ネット  
による採取の観測点

(2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法検討では、①サンプルの前処理の検討および②SMPsの分析法の検討に取り組んだ。

①サンプルの前処理の検討：まず酸化処理、密度分離の手法について検討した。その処理後のサンプルは、350 $\mu\text{m}$ 以上のMPsでは洗浄、自然乾燥後、FTIR（ATR）でプラスチックの種類を決定した。350 $\mu\text{m}$ より小さなMPsではフィルターで適宜ろ過し、顕微FTIRで計測した。

フィルターで捕集する粒子量が多すぎる場合、粒子の重なりによって、種類の決定やサイズに影響が出ると考えられる。ここでは、フィルターでろ過する最適な粒子量を数値実験により検討した。

②SMPsの分析法の検討：350 $\mu\text{m}$ 以上のMPsは、酸化処理、密度分離後、洗浄、自然乾燥し、FTIR（ATR）でプラスチックの種類を決定した。

350 $\mu\text{m}$ より小さなSMPsの分析では、微細な粒子の吸収を測定するため透過法を用いた。まず、セルロース、ポリカーボネート、PTFE製のフィルター赤外線吸収スペクトルを比較し、フィルターの選定を行った。セルロース製フィルターは、水酸基(OH)によるブロードな吸収、メチル基(CH)による吸収、また1500 $\text{cm}^{-1}$ 以下の指紋領域においても多数のピークが見られた。また、ポリカーボネートの場合、メチル基(CH)による吸収、エステル結合(C=O)による吸収、芳香族による吸収、炭素と酸素の結合(C-O)による吸収が見られた。

次に、測定条件を決定した。1.試料なしの状態(空気)の測定により得た128個のスペクトルを用いアンサンプル平均を算出し、背景スペクトルとした。2.PTFEフィルターを計測位置に設置し、赤外線吸収スペクトルを測定した。平均に用いたスペクトル数は、6回とした。機器による最大測定可能エリアである4mm×4mmの領域における測定時間を調べた。プラスチックに含まれる炭素と水素の分子結合(CH<sub>2</sub>)が強く赤外線を吸収する波長2800 – 3000  $\text{cm}^{-1}$ において吸光スペクトルにおけるノイズを求めた。4mm×4mmの領域において8個の測定を用いた場合160分（2時間40分）を要することが分かった。

PTFEフィルターに捕集した試料の赤外線吸収スペクトルをリニアアレイ式の検出器で測定したデータから、粒子サイズおよびそのポリマータイプを同定した。まず測定により得たスペクトルおよび代表的なプラスチックのスペクトルについて一次微分値を算出し、その相関係数を求めた。相関係数を求める際はプラスチックごとにその範囲を変更した。次に、相関係数の水平マップを作成しMPsの候補となる粒子を検出する。検出時にはプラスチックごとに求めた相関係数を用いて平均値と標準偏差の3倍の和を求め、その境界値より大きい領域を候補粒子とみなした。この境界値を用いて、水平マップを二値化した。二値化画像に対し、画像解析ソフトImageJの楕円フィッティングを用いることで粒子サイズを求めた。検出素子による最小分解能は12.5 $\mu\text{m}$ であるから、素子分解能の2倍に当たる25  $\mu\text{m}$ を長さの検出限界であると仮定した。各粒子のスペクトルについて、KnowItAllを用いて再度検証しその粒子のプラスチックの種類を確認した。

(3) 光学技術を用いたSMPs検出技術では、①蛍光手法による分析および②偏光によるMPsの検出について取り組んだ。

①蛍光手法による分析：蛍光指標としてクマリン6を使用することとした。蛍光の検出には分光計 JAZ (Ocean optics, Florida, USA) を使用した (図1-7)。励起光の波長は365 nmであり、測定波長は400-750nmである。

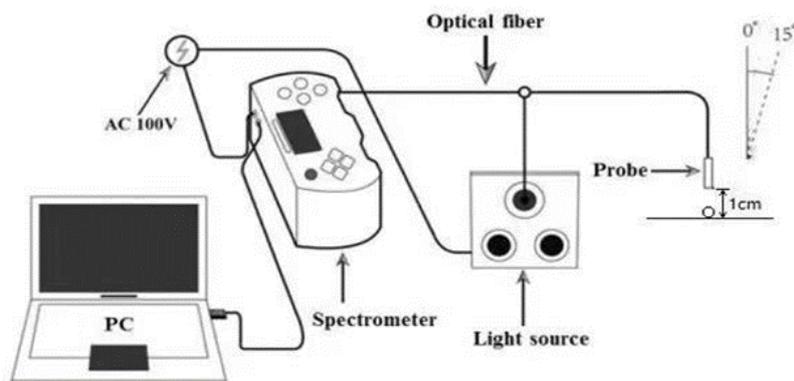


図 1-7 蛍光スペクトルの測定システム

②偏光によるMPsの検出：偏光特性によって水中のMPsを直接検出することを試みた。後方散乱偏光特性測定装置を構築した。この装置は、レーザー光に各種 (PSG;7種) の偏光を与えて、試水に照射し、試水の散乱光を各種の偏光素子 (PSA;7種) を通してCCDカメラで撮影することによって、散乱光の偏光の変化を調べられる。画像からミューラーマトリックス要素 (MM) を算出した。PSGとPSAの偏光子は、偏光子無し、 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $+45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、右回りおよび左回りである (図1-8)。

サンプルは迷光を防ぐために黒塗りし、ビームポケットを設置したビーカーに入れて撮影を行なう。さらに偏光の変化を詳しく検討するために、偏光パラメータ $\Delta$  (偏光解消度)、 $R$  (位相遅れ)、 $d$  (減衰) を求めた。

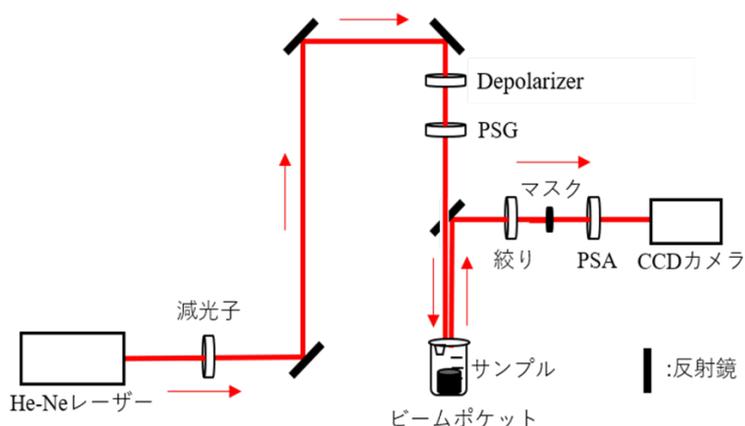


図 1-8 後方散乱偏光特性測定装置

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 深度別マイクロプラスチックの採取手法

①いずれの手法でも多量の粒子を採取できた。MOCNESS (メッシュサイズ;  $65\mu\text{m}$ ) はニューストーンネット ( $350\mu\text{m}$ ) より微細な粒子を採取できた。

MOCNESSによるMPsの鉛直濃度分布をみると水深80mで極大値を示した。水深700mで表層と同程

度のMPsが見られた。表層（水深15m）および40mではPPとPETが大きな割合を占めているが、80mではPEの割合が急増した。水深700mでは、PPが見られなくなった（図1-9）。

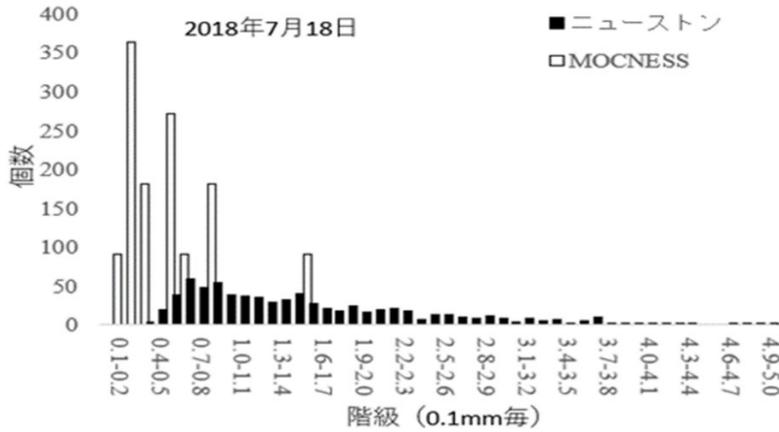


図 1-9 ニューストンネット（目合350µm）とMOCNESS（65µm）で採集されたMPs粒径組成の比較

②表面採取：0.333 mmと1.00 mmの目開きのネットによるMPsの比較は以下のものであった。0.333 mmのネットは、1.00 mmのネットよりも最長長 $\leq 2.00$  mmのマイクロプラスチックをより多く収集した（図9）。0.333 mmのネットは、0.4-1.0 mmで約60%がメッシュを通過し、0.4 mm以下のマイクロプラスチックはあまり保持しないことが分かった（図1-10, 11）。

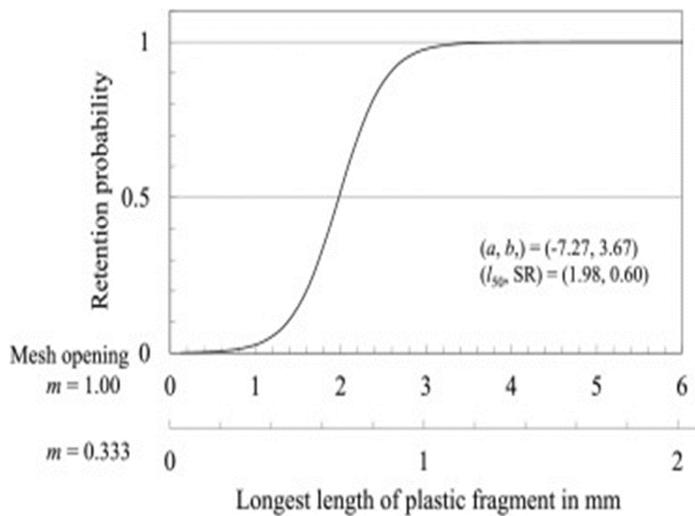


図 1-10 標準的に用いられる目合0.333mm網目のニューストンネットによる破片状マイクロプラスチックの粒径別の網内保持確率

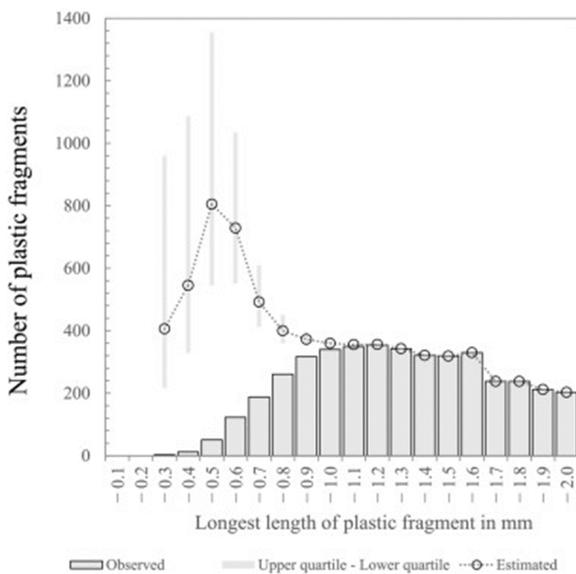


図 1-11 標準的に用いられる目合0.333mm網目のニューストンネットによる破片状マイクロプラスチックの粒径組成（ヒストグラム）、および網内保持確率から推定した網目を抜けたマイクロプラスチックの粒径組成（点線）

2重ネットの350 $\mu\text{m}$ 以上の粒子数は従来のニューストーンネットと有意な差( $P<0.05$ )はなかった。50-350 $\mu\text{m}$ のMPsの濃度は350 $\mu\text{m}$ 以上濃度の約20000倍であった。SMPsは粒径が小さいほど多かった。また、350 $\mu\text{m}$ 以上ではPSなどが多く検出されたが、50-350 $\mu\text{m}$ では、350 $\mu\text{m}$ 以上のMPsに見られなかった種類が多かった。これらは塗料などに含まれるものと考えられた。

## (2) 夾雑物処理・顕微FTIR分析法検討

①前処理の検討：海水サンプルの酸化処理では、フェントン反応を使ったNOAAの手法<sup>1)</sup>で、有機物等の夾雑物を除去できた。また密度分離はNaI溶液による手法<sup>1)</sup>が適していた。

### フィルター上への粒子数の検討：

粒子数が多いほど、粒径が大きいほど、粒子同士が重なる。直径10mmのフィルター上で重なる粒子が1%以下とするためには、粒径50 $\mu\text{m}$ で200個以下、粒径200 $\mu\text{m}$ で20個以下であることがわかった。

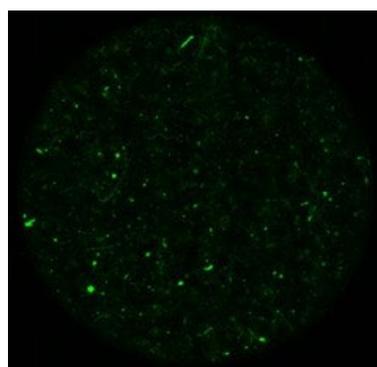
### ②SMPsの分析法の検討（透過法）

350 $\mu\text{m}$ より小さなSMPsの分析では、微細な粒子の吸収を測定するため、透過法を用いた。100mL程度に濃縮されは粒子を含む試水は、酸化処理と密度分離を行った。その処理試水の上澄み中の粒子をフィルターに捕集した。フィルターはその透過特性からPTFEフィルターが適すると判断した。そのフィルターを顕微FTIRで計測した。その結果をもとに、ポリマータイプ、粒径が測定できることを確認した。

## (3) 光学技術を用いたSMPs検出技術：

### ① 蛍光手法による分析

クマリン6は10種（HDPE, LDPE, PP, PVC, PS, PC, PMMA, Forming PS, PA, PET）のプラスチックを染色できた。この蛍光はNile RedやRose Bengalより強かった。さらに最適な溶媒、濃度、染色時間を検討し、短時間で効率的に染色できることを確認した。このクマリン溶液で、海水、底泥、および海岸砂浜のプラスチックを染色し、蛍光顕微鏡で濃度およびサイズの計測ができることを確認した（図1-12）。



12.5 mm

図1-12 蛍光検出の様子

### ② 偏光によるMPsの検出

MPsの濃度の増加に伴って偏光解消 $\Delta$ が増加すること、MPsが懸濁するとき、位相遅れRが増加することが示された。

これらの結果により、SMPsの採取、サンプル処理、および検出について高度化することができたと考えている。

## 5. 研究目標の達成状況

多段式ネットMOCNESS(目合65 $\mu\text{m}$ ) やポンプによる採集法を用いて、いずれの手法でも多量のMPsを採取できた。特にMOCNESS (メッシュサイズ ; 65 $\mu\text{m}$ ) はニューストーンネット (350 $\mu\text{m}$ ) より微細な粒子を採取できた。また、MOCNESSによって、水深700mまでMPsの浮遊を確認し、MPsの材料別の鉛直濃度分布の特徴を捉えることができた。このことから、ひとつ目の目標である、海中に漂流する微細なマイクロプラスチックを水深別に採取する手法を確立できたと考えている。なお 海表面に関しては従来から標準的に用いられている目合350 $\mu\text{m}$  (330 $\mu\text{m}$ ) のニューストーンネットの粒径別の捕集能力を検討し、当初の計画にはなかった2重ネットを新たに提案して、これにより微細なMPsの採取が可能となった。

微細なMPsを顕微FTIRにより分析するため、まず前処理を整備するとともに、顕微FTIRによる分析をより効率的に運用するためにフィルターに配置する最適なMPs粒子数を定めるなど、その活用条件を決定した。この方法を用いて上述した2重ネットでの採集結果を分析することで、微小な50 $\mu\text{m}$ 以下のMPsの密度が350 $\mu\text{m}$ 以上のMPsの4桁程度高いことを示し、生物影響が懸念されるサイズのMPsが現実に大量に浮遊していることを示した。この情報はアドバイザーボード会合などを通じて、テーマ2「海洋プラスチックごみ及びその含有化学物質による生態影響評価」に受け渡すことができた。

また光学技術(蛍光および偏光)などを用いた検出技術の基礎を構築した。特に効果的、効率的に蛍光させることができる染色材を見つけ出し、これを基礎とした方法の特許出願に至った。この蛍光法は、サブテーマ2とも情報共有して、海表面や海中に限らず、海底堆積物中のMPsへの適用も検討されるなど連携した活用につながっている。

これらのことから、各項目について当初の目標を十分に達成したものと考えている。

## 6. 引用文献

1) Masura J., Baker J., Foster G., and Courtney A. (2015) : Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.

## II-2 海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター	土屋 正史
地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター	福島 朋彦（平成30～令和元年度）
地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター	藤倉 克則
地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター	中嶋 亮太
超先鋭研究開発部門 超先鋭技術開発プログラム	Dhugal J. Lindsay

<研究協力者>

地球環境部門 海洋生物環境影響研究センター	北橋 倫
-----------------------	------

### 【要旨】

マイクロプラスチック（MPs）の挙動を解明することは、地球規模の喫緊の課題である。広域に渡る大量のサンプルを迅速に処理するためには、手作業や人の目による計数から、自動的に計数するようなシステムへの移行が必須であり、MPsの判別と計数（粒子数・長径の計測、粒子状か繊維状かの分類）を行うシステムの開発が必要となる。本サブテーマでは、海底堆積物中に存在するMPsを含むプラスチックごみの採取・検出および計測技術を提示し、自動化に向けた基礎技術を確立することを目的とし、海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化に取り組んだ。本サブテーマは(1)海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備、(2)海底におけるMPsの採取調査の実施、(3)調査の継続と海底における分布の解明の3項目で構成され、それぞれ研究開発を進めた。(1)では、アルミ製コアチューブ、密度分離器、濃縮器を作成することで、MPsの汚染を防止した採取法の提案や前処理工程の簡素化・効率化を達成できた<sup>1) 2) 3)</sup>。また、MPs自動検出手法の開発では、海底堆積物中に存在するMPsの検出および計測技術を提示し、自動化に向けた基礎技術の確立を目標とし、MPsの形状判別（粒子状か繊維状かの分類）と計数（粒子数・長径の計測）を自動的に行うシステムを開発した。項目(1)の成果の一部は査読付き国際雑誌に論文として掲載されるとともに、前処理工程で開発した機器の一部は国内外からの反響が大きく、普及周知を図れた。堆積物試料中のMPs分析手法の標準化への貢献が期待できる。(2)では、有人潜水調査船「しんかい6500」や海底広域研究船「かいめい」による調査を実施し、(3)では、(2)で採取した深海底堆積物中のMPsの分布実態を把握した。日本海溝プレート三重会合点は、沿岸からも近く、急崖となっているため、海底堆積物がタービダイトに伴い供給されやすく、海底の微地形により堆積物およびMPsの供給量が変わる可能性が示唆された。

### 1. 研究開発目的

本課題では、「海底堆積物中のプラスチックごみの計測技術の高度化」のテーマのもと、海底堆積物中に存在するマイクロプラスチック（MPs）を含むプラスチックごみの採取・検出および計測技術を提示し、自動化に向けた基礎技術を確立することを目的とした。MPsの挙動を解明することは、地球規模の喫緊の課題である。広域に渡る大量のサンプルを迅速に処理するためには、手作業や人の目による計数から、自動的に計数するようなシステムへの移行が必須であり、MPsの判別と計数（粒子数・長径の計測、粒子状か繊維状かの分類）を行うシステムの開発が必要となる。また、既往研究ではニューストンネットの目合い（330 μm）が基準であったため、海底堆積物を対象とした研究においても、そのサイズ以下の粒子を対象とした研究例は多くはない。JAMSTECにおける観測・分析では、深海底堆積物には100 μm以下の粒子が多いことが示唆されており、より微細な粒子の検出が必要となる。そこで、本サブテーマでは、上記自動化に向けた基礎技術の確立に向けて、(1)海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備、(2)海底におけるMPsの採取調査の実施、(3)調査の継続と海底における分布の解明の三項目について研究開発を行った。

## 2. 研究目標

海底堆積物中のマイクロプラスチック（MPs）の分析を、イメージングフローサイトメーターなどを用いて、正確かつ効率的に実施するための方法を確立する。前処理工程では堆積物を含む混入物を除去するために、溶液の比重調整による密度分離や化学処理による有機物・無機物除去及び篩による選別等を行い、検出工程では流体の最適流速、画像撮影の最適感度あるいは照度などを試行して最適化を図る。蛍光染色したMPsを画像データから判別し、個数や形状、大きさを自動的に計測するシステムを開発する。

## 3. 研究開発内容

本サブテーマでは、（1）海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備、（2）海底におけるMPsの採取調査の実施、（3）調査の継続と海底における分布の解明の三項目について、それぞれ研究開発を進めた。

### （1）海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備

堆積物中のMPs分析前処理法は、多くの手法が考案されている。しかし、標準的な手法が考案されているわけではなく、煩雑な機器の利用など、多くの問題が残されている。前処理法の問題点を解決するために、本項目では、①アルミ製プッシュコア・マルチプルコアラール用アルミチューブの製作と実海域試料採取、②密度分離器の製作と前処理工程の効率化、③濃縮器の製作と前処理工程の簡素化を実現し、これらの前処理手法を組み込み、④MPsの自動検出法開発を行った。

#### ① アルミ製プッシュコア・マルチプルコアラール用アルミチューブの製作と実海域試料採取

堆積物中のMPsを採取する際には、プラスチック製のコアチューブを採用した各種柱状採泥器（コアラール）が用いられているが、コアチューブから堆積物試料へのMPsの汚染が生じる可能性が高い。コアチューブからの汚染を排除するためのアルミ製コアチューブを作成し、実海域試験において観測手法を開発した<sup>1)</sup>。

#### ② 密度分離器の製作と前処理工程の簡素化

採取した堆積物からMPsを分取するには、一般的に密度分離法が用いられているが、既往研究の手法では、沈殿した堆積物が再懸濁したり、処理量が少ないなどの問題点があった。これらの問題を解決するため、操作が容易で安価であり、堆積物の再懸濁が生じないガラス製の密度分離器を開発した<sup>2)</sup>。

#### ③ 濃縮器の製作と前処理工程の簡素化

堆積物の前処理工程では、化学処理を行う際に複数の工程を行うため、汚染のリスクやMPsの紛失の恐れもある。これを解決するために、200 mlのビーカーにフィットする大きさの金属製メッシュ（篩）を開発した<sup>3)</sup>。これにより、前処理工程における複数の工程を、一つのメッシュ上で実施できるようにした。

#### ④ MPs自動検出手法の開発

海底堆積物中に存在するプラスチックの検出および計測技術を提示し、自動化に向けた基礎技術を確立することを目標とした。広域に渡る大量のサンプルを迅速に処理するためには、手作業や人の目による計数から、自動的に計数するようなシステムへの移行が必要となる。このため、本項目では、MPsの形状判別（粒子状か繊維状かの分類）と計数（粒子数・長径の計測）を自動的に行うシステムの開発を行なった。

### （2）海底におけるMPsの採取調査の実施

2019年には海洋研究開発機構の深海潜水調査船支援母船「よこすか」および有人潜水調査船「しんかい6500」による調査を実施し、2020年には海底広域研究船「かいめい」による調査を実施した。調

査は、相模湾・駿河湾・伊豆小笠原諸島明神海丘、日本海溝プレート三重会合点、黒潮再循環域の西太平洋ごみパッチで実施し、各海域の海底堆積物を採取して分析を行った。

### (3) 調査の継続と海底における分布の解明

(2) において採取した試料について、特に、日本最大の人口密集地を後背地に有し、プラスチックごみの流入が多いと想定される相模湾を中心に、相模トラフを経て、日本海溝プレート三重会合点に至る輸送が生じることを作業仮説として検証し、MPsの輸送が生じている場合にはどのような粒子がどのような地形に溜まりうるのかを推察した。

当初計画：

当初計画では、3年間の計画で実施した。前処理法の検討については、要素を4項目に分割し、そのうち3項目は、実施計画を前倒して成果の公表に繋げた。一方、新型コロナウイルス感染症による出勤日数の制限から、自動検出法について十分に検証時間を確保できなかったため、2021年度の2ヶ月間を延長期間として認めていただき計画を遂行した。

表2-1 テーマ3サブテーマ (2) の実施内容 (当初計画の概要を記載)

2018年度	2019年度	2020年度	2021年度 (4~5月)
海底堆積物中のMPsの採取と分析手法の定量的検討	海底堆積物のMPsの採取と分析手法の定性的検討	調査継続・分析手法の完成・取り纏めと普及周知、テーマ連携推進	分析データの追加取得、分析手法完成、取り纏め
(1) IFCの最適手法を前処理と分析工程に分けて検証。有効性及び課題抽出。 (2) 試料採取・分析 (3) 堆積物中MPsの蓄積を実証。テーマ内協力・国内外情報収集。	(1) MPs粒子とSMPs粒子の検出手法とIFC分析結果と比較。手法の有効性及び課題抽出。 (2) 対象海域の堆積物試料を採取及び(3)分析。テーマ内協力・海外情報収集。	(1) 本分析手法完成。 (2) 対象海域での試料採取を継続及び(3)対象海域のMPs分布の可視化とデータ整理。テーマ連携。3ヶ年の結果の取り纏めと普及周知。	(1) MPs自動検出システムによる検出と自動判別、粒子の回収率算出。手作業による従来法比較し有効性を検証。自動化に向けた基礎技術を確立。 ・論文取り纏め。

表2-2 テーマ3サブテーマ (2) における各項目の当初予定 (黒矢印) と実施期間 (青矢印)。

項目	2018		2019		2020		2021
	4~9月	10~3月	4~9月	10~3月	4~9月	10~3月	4~5月
(1) 海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備	←————→						
①アルミ製コア製作・調査	←————→			*			
②密度分離器の製作・検証	←————→		†	*			
③濃縮器の制作・検証	←————→		*				
④MPs自動検出手法の開発	←————→						†
(2) 海底におけるMPsの採取調査の実施			←—→			←—→	
(3) 調査の継続と海底における分布の解明	←————→						†
					†	†	†

\*：論文公表時期、†：成果学会発表、黒矢印：当初計画、黒矢印（点線）：調査航海、青矢印：実施期間、ハッチ：Covid-19の影響

※高度な専門用語や特定の分野で用いる略号・略称には、必ず注釈を入れてください。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備

###### ① アルミ製プッシュコア・マルチプルコアラー用アルミチューブの製作と実海域試料採取

堆積物中のMPsを採取する際には、プラスチック製のコアチューブを採用した各種柱状採泥器（コアラー）が用いられているが（例えば、<sup>4) 5)</sup> など）、コアチューブから分析試料へのMPsの汚染が生じる可能性が高い。多くのコアチューブは、アクリルやポリカーボネート、ポリ塩化ビニルなどプラスチック材料で製作されており、堆積物分取の際には、コアチューブの内壁面に接する約1 cmを削り取り分析に供している。一方、深海域における堆積物の採取は、深海へのアクセスの困難さや、観測時間や観測項目の制約から、1回のキャスト（標準的なマルチプルコアラーの場合、一回につき最大8本の堆積物柱状試料の採取が可能）から、1本のみしか分取できないこともある。また、深海域の堆積物には、数ミリメートル程度のMPsは少なく、より微細化したMPsが存在しており（詳細は項目(3)に記載）、コアチューブ1本の面積では分析に十分な量を確保できないことが危惧される。コアチューブは複数回の使用を経過すると、堆積物粒子による摩耗によって内壁面に傷がつくことから、コアチューブから生じたMPs汚染により試料中のMPs濃度を過大評価してしまう恐れがある（図2-1）。本項目では、コアチューブからの汚染を排除するためのアルミ製コアチューブを制作し、実海域試験の観測手法と合わせて論文として報告した<sup>1)</sup>。

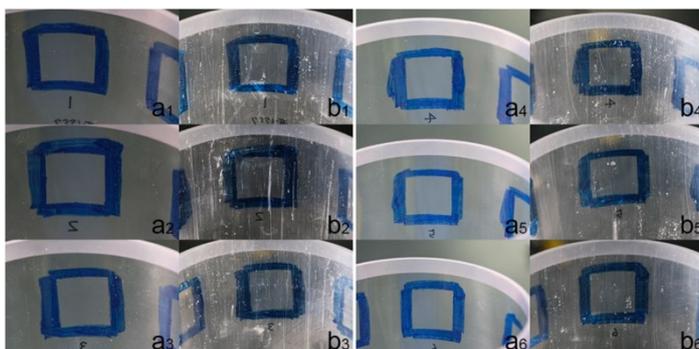


図2-1. ポリカーボネート製コアチューブの内壁面。(a) 新品のコアの内壁面と (b) 1回使用した後の内壁面を示し、青枠は1 cmの方形枠を示す。6本のコアチューブについて、内壁面の様子を観察した。<sup>1)</sup>を引用 (CC-BY 4.0)。

研究開発機構等の船舶による調査に対応するため、2種類のアルミ製コアチューブを作成した。有人潜水調査船や無人探査機での使用を想定したH式プッシュコア用アルミチューブと、船上から測器を垂下して採取を行うマルチコアラー用アルミ製コアチューブである（図2-2）。

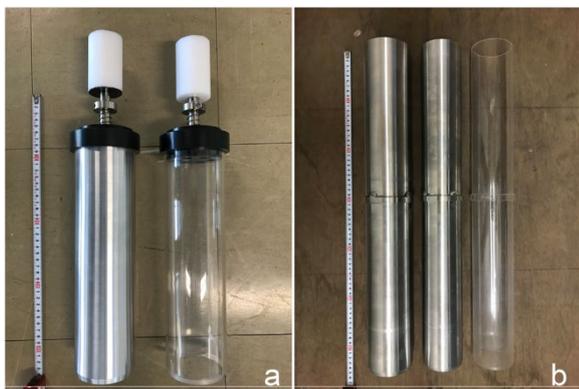


図2-2. アルミ製コアチューブとポリカーボネート製コアチューブ。(a) H式プッシュコアラー、(b) マルチプルコアラー用コアチューブ。マルチプルコアラー用アルミコアチューブは、直径8.2 cm（東京大学大気海洋研究所所有のマルチプルコアラーの仕様）と直径7.4 cm（JAMSTEC所有のマルチプルコアラーの仕様）の2種類を作成した。<sup>1)</sup>を引用 (CC-BY 4.0)。

作成したアルミ製コアチューブを有人潜水調査船「しんかい6500」（図2-3a,b）およびマルチプルコアラー（図2-3c）を用いて堆積物を採取した。「しんかい6500」やその他の無人探査機を利用する場合、アルミ製コアチューブではチューブ内の様子を確認できず、乱れのない堆積物採取が難しい。このため、まず通常のポリカーボネートチューブ製プッシュコアを堆積物に挿入し、堆積物の硬さや挿入深度を確認し、その後、アルミ製プッシュコアを堆積物に挿入するなどのオペレーションが必要であった。また、

アルミ製コアチューブは空中重量が2.5 kgあり、通常のポリカーボネートチューブの同1.2 kgに比べて重く、潜水調査船のマニピュレータによる採泥作業中にコアラーを落とすなどの操作上の問題が生じることも明らかになった。操作の際には、アルミコアチューブの重量とマニピュレータの握力のバランスを考慮したオペレーションが必要である。さらに、マルチプルコアラーでアルミ製コアチューブを利用する際には、測器の中心に対して、対角線上に配置するなど、重量バランスを考慮して採泥する必要があることも明らかになった。プラスチック製のコアチューブを利用し、チューブの内壁面と接する堆積物を幅1 cmに渡って取り除く場合、体積の43%を失うことになる。これに対して、アルミコアチューブを利用する場合、すべての堆積物試料を利用できることになり、貴重な深海堆積物を無駄なく利用できる。

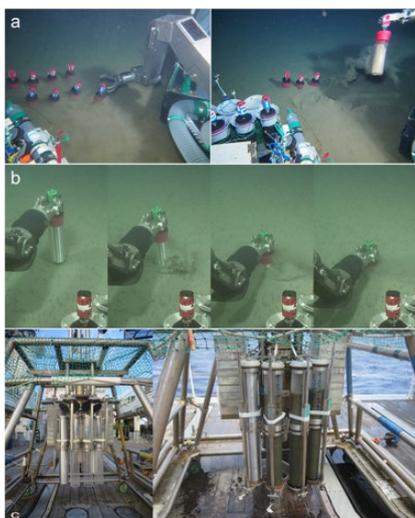


図2-3. アルミ製のコアチューブを利用した深海堆積物採取の様子。  
 (a) 有人潜水調査船「しんかい6500」によるコア採取の様子。(b) 無人探査機「ハイパードルフィン」によるコア採取の様子。(c) マルチプルコアラーによる採泥。マルチプルコアラーは8本採取でき、アルミチューブは対角線上に配置した。<sup>1)</sup>を引用(CC-BY 4.0)。

## ② 密度分離器の製作と前処理工程の簡素化

採取した堆積物からMPsを分取するには、一般的に密度分離法が用いられているが、いくつかの問題点が指摘されている。例えば、ビーカーを用いてMPsを含む上清をデカンテーションで回収する場合、沈殿した堆積物が再懸濁したり<sup>6)</sup>、漏斗を使う場合には、処理量を増やせないなどの問題である<sup>7)</sup>。また、ビーカーで回収する場合、回収率が低いため(約40%)、行程の繰り返しが3-5回ほど必要となる。これらの問題を解決するために、ステンレス製(MicroPlastic Sediment Separator : MPSS)<sup>8)</sup>やポリ塩化ビニル製(Sediment-Microplastic Isolation unit : SMI)<sup>9)</sup>の分離装置が考案されたが、前者は重く分解や洗浄が煩雑であること、後者はプラスチック材料であるため、機器を構成するプラスチック材料の摩耗により微細化したMPsの汚染が生じる可能性がある。また、化学物質の浸出が生じるため、分離後にプラスチックに含まれる化学物質や吸着する化学物質を分析する際にも、汚染が生じる恐れがある。これらの問題を解決するために、操作が容易で安価であり、堆積物の再懸濁が生じないガラス製の密度分離器(JAMSS : JAMSTEC Microplastic-Sediment Separator)を開発し、成果を論文として報告した<sup>2)</sup>。本システムでは、最大で堆積物コア1試料分(内径8.2 cm、堆積物深度1.0 cm : 約50 ml)を一度に処理できる100 mlの分離器を作成するとともに、30 ml、60 mlの容器も作成し、堆積物量に応じた分離器を作成した。

新たに開発したJAMSSは上部と下部の2つの部位で構成され、それぞれにガラス管を装着させたものである。上部と下部を重ね合わせると1つの筒となり、ここに堆積物とヨウ化ナトリウム等の比重の大きい液体を入れてMPsを密度分離させるものである。処理の際には、下部の容器にガラス製のスターラーを入れ緩やかに攪拌し、その後静置させることで、上部にはMPsが浮遊し、下部には堆積物が沈殿する。数時間静置させ、微小な堆積物粒子が沈殿した段階で、上部と下部をスライドさせることで、上部にはMPsのみが、下部には堆積物のみがガラスプレート内に封じ込めることが可能となる。MPsを含む上清をデカンテーションで別容器に移しても、下部の堆積物が再懸濁することなく、容易に回収でき

るようになった。

異なる材質（ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリ塩化ビニル、ポリエチレンテレフタレート）やサイズ（100-500  $\mu\text{m}$ 、500-1,000  $\mu\text{m}$ 、1,000-2,000  $\mu\text{m}$ ）を観賞魚用の堆積物に1試料につき40粒子ずつ混ぜ回収率を算出した。分析の結果、各サイズ分画の回収率は、100-500  $\mu\text{m}$ のサイズ分画で平均94.0%  $\pm$  1.5%、500-1,000  $\mu\text{m}$ のMPsでは平均97.8 $\pm$ 1.3%、1,000-2,000  $\mu\text{m}$ のMPsでは平均99.1 $\pm$ 1.0%であった。小さい粒子では回収率が減少する傾向にあるが、全体の平均は、98.2 $\pm$ 1.5%であり、いずれの場合も1回の処理によって高い回収率を示したことは特筆すべき点である。この回収率は、既存のMPSS（回収率95.5%）やSMI（同95.8%）、ピーカーによる回収（同40%）よりも高い値を示した。JAMSSは小さくポータブルな器具で複雑な機構がなく洗浄が容易である。また、細かい粒子（泥やシルト）から粗い粒子（極細粒砂～細礫）まで様々な堆積物が利用可能であり、さらに、ガラス製のため回収したMPsの吸着化学物質分析にも供することが可能である。

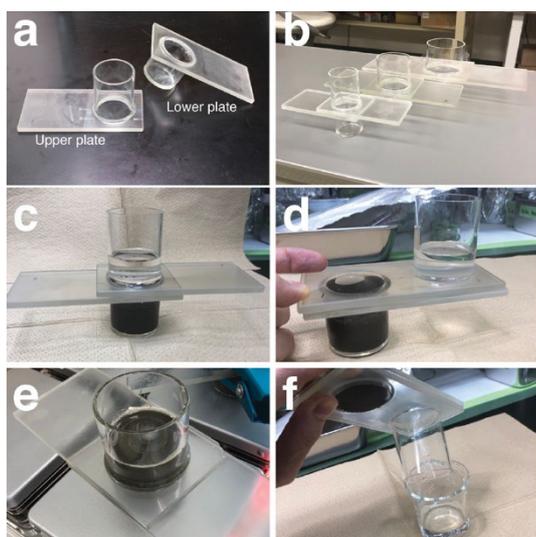


図2-4. JAMSTEC Microplastic-Sediment Separator

(JAMSS) ユニットの外観と操作手法。(a) JAMSSは上部と下部の2つの要素で構成される。(b) 試料の処理量に応じて異なる3つのサイズを作成した。(c) JAMSSの容器を上下で合わせ一つの筒状にし、堆積物にヨウ化ナトリウムを加え懸濁させ、数時間静置し堆積物の沈殿と上清のMPsを分離させる。(d) 上部プレートをスライドさせ、下部の容器に沈殿した堆積物を上部のガラスプレートで封じ込むことができる。(e) cの状態ではガラス製のスターラーで懸濁させ、堆積物に吸着しているMPsを分離させることができる。(f) dで堆積物を封じ込めているため、上清に溜まったMPsのみを回収することができる。<sup>2)</sup> を引用 (CC-BY 4.0)。

### ③ 濃縮器の製作と前処理工程の簡素化

堆積物の前処理工程では、化学処理を行う際に複数の工程を行うため、汚染のリスクが増加する。また、MPsを分取するには、化学処理を行うたびに異なるメンブレンフィルターにMPsを捕集する必要があるため、MPsが紛失する恐れもある。これを解決するために、200 mlのピーカーにフィットする大きさの金属製メッシュ（篩）を開発した。これにより、貝殻片などの炭酸塩や有機物の除去、MPsを蛍光観察するためのナイルレッド染色などの複数の工程を、一つのメッシュ上で実施できるようにした<sup>3)</sup>。

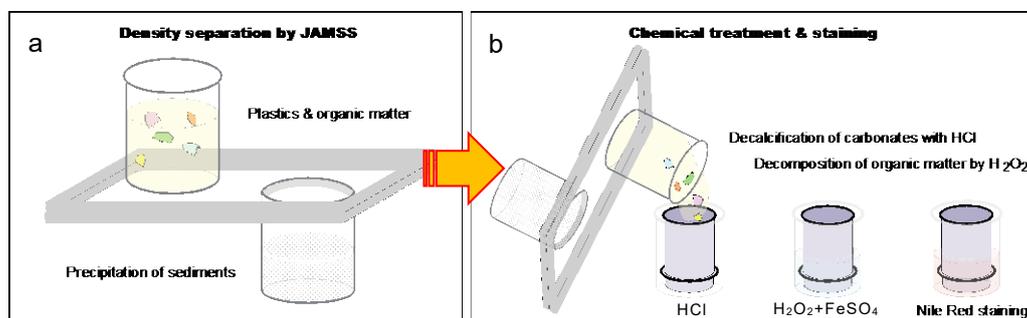


図2-5. JAMSSによる密度分離から濃縮器による化学処理までの概略図。(a)JAMSSにより密度分離したMPsは、(b) 一つの濃縮器へ移し、塩酸や過酸化水素・フェントン処理、ナイルレッドによるMPs染色の工程を行う。1つの濃縮器を用い、異なる試薬を入れたピーカーにそれぞれ移し替えることで、MPsの汚染や散逸のリスク軽減を達成でき、処理時間の短縮にも貢献できる（土屋原図）。

新たに開発したステンレス製の篩（図2-6a,b）は、実験用ピーカー（200 ml）に入れることができ

(図2-6c)、堆積物試料の化学処理工程間を篩ごと移動させることだけで処理できる。なお、現時点ではメッシュの目合を $32\ \mu\text{m}$ にしてあり、顕微FTIRの検出下限に近い粒子まで捕集できるようにしているが、メッシュの目合をより小さいものにして作成することも可能である。

MPsの回収率は、異なるサイズのマイクロプラスチック粒子に対して、一般的に使用されているフィルター法よりも、ステンレス製の小型の篩を使用した方が有意に高い結果となった。回収率は、 $100\text{--}500\ \mu\text{m}$ のサイズ分画では $99.0\pm 2.3\%$ 、 $500\text{--}1,000\ \mu\text{m}$ のMPsでは $99.7\pm 1.1\%$ であった(図2-7a)。この篩を利用することで、試料の洗浄や濾過工程を簡略化できるようになり、MPsの紛失を低減することができる。さらに、新しく開発した篩を用いた場合の所要時間は、メンブレンフィルター等を用いた既存の方法に比べて大幅に短縮(約60%)できた(図2-7b)。

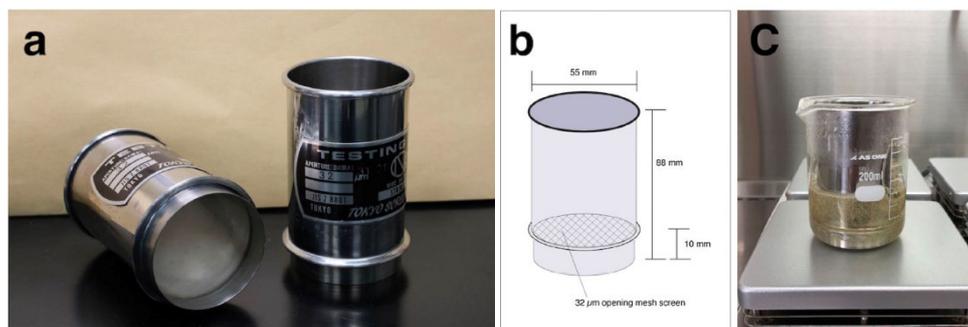


図2-6. 新たに開発したステンレス製の小型の篩。(a) 篩の外観。(b) 篩は200 mlのビーカーにフィットする形状とした。(c) ステンレス製の小型の篩をガラスビーカーに設置し、過酸化水素、硫酸鉄混合溶液による処理(フェントン反応)の実施例。<sup>3)</sup>を引用(CC-BY 4.0)。

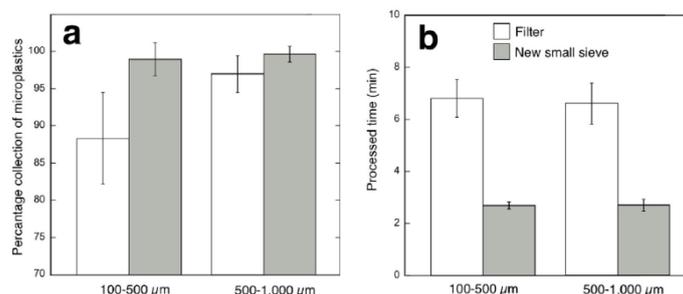


図2-7. 既往研究のフィルター濾過手法(白)と新規開発したステンレス製の小型篩について、(a) 各粒子サイズの回収率と、(b) 処理時間の比較。<sup>3)</sup>を引用(CC-BY 4.0)

### ⑤ MPs自動検出手法の開発

MPsの挙動を解明することは、地球規模の喫緊の課題である。広域に渡る大量のサンプルを迅速に処理するためには、手作業や人の目による計数から、自動的に計数するようなシステムへの移行が必須であり、MPsの判別と計数(粒子数・長径の計測、粒子状か繊維状かの分類)を行うシステムの開発が必要となる。堆積物中のMPsは、前処理工程と分析工程の主に2つの工程で検出する。通常は、顕微鏡や目視で粒子をカウントしたり、一つずつ拾い出す作業を行うが、本項目では、分析工程について粒子の形状と数、大きさの計測を自動化するシステムを開発した(図2-8)。また、既往研究ではニューストネットの目合い( $330\ \mu\text{m}$ )が基準であったため、海底堆積物を対象とした研究においても、そのサイズ以下の粒子を対象とした研究例は多くはない。JAMSTECにおける観測・分析では、深海堆積物には $100\ \mu\text{m}$ 以下の粒子が多いことが示唆されており、より微細な粒子の検出が必要となる。

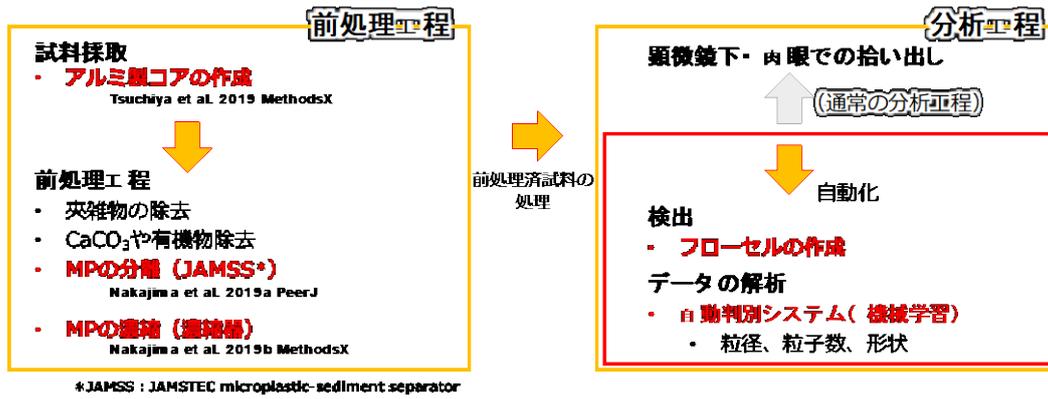


図2-8. 堆積物内のMPs分析の流れ。前処理工程では、1) で開発した機器を用いて前処理を行い、分析工程での自動化を目指した。

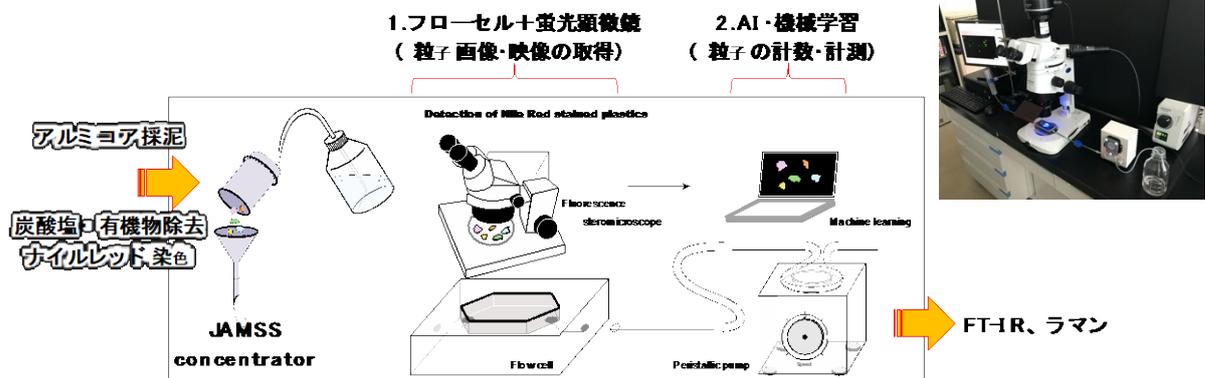


図2-9. MPs自動検出までの分析の流れ。MPsを連続的に流すフローシステム(1)と、検出したマイクロプラスチックを自動判別するシステム(2)の2つの要素で構成される。右上の写真は、顕微鏡下にフローセルを設置し、下流側にペリスタポンプを設置した例を示した。

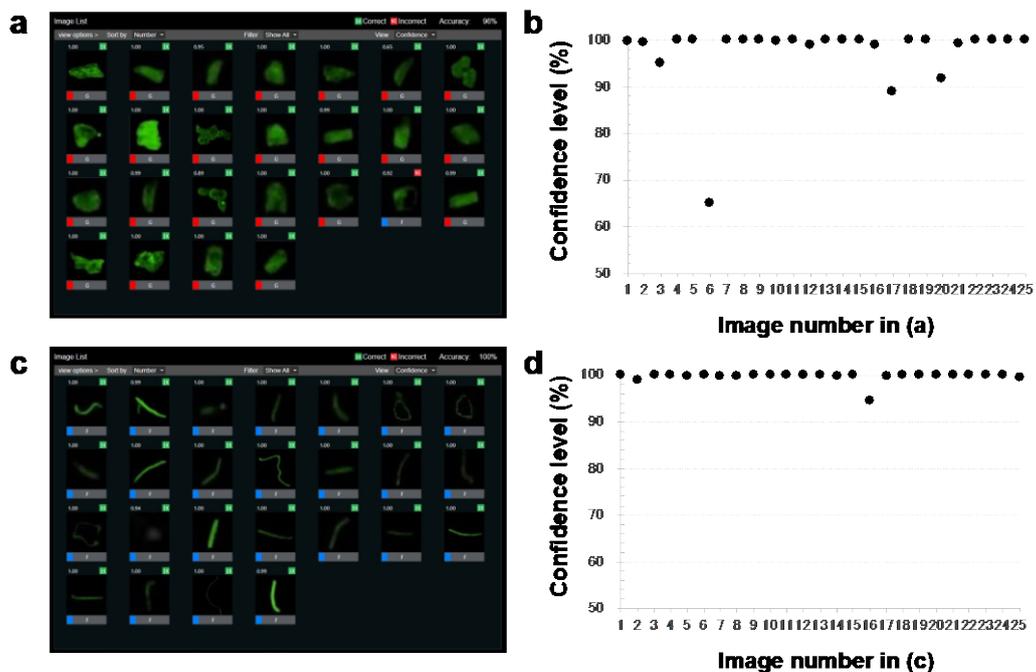


図2-10. 深層学習ソフトウェアRAPID機械学習による粒子と繊維の分類結果と確信度。(a)粒子と(c)繊維の各25枚の画像を評価し判定した出力画像データ。(b)粒子と(d)繊維の各画像の確信度(%)を示す。横軸は画像番号、縦軸は確信度(%)。

本自動検出システムは、ナイルレッド染色したMPsをフローセル内に連続的に検出するフローシステムと、機械学習による判別と計数を行う2つ要素で構成される（図2-9）。上記3項目の前処理法<sup>1) 2) 3)</sup>によって処理された試料をフローシステムに導入することを前提として開発した。解析では、粒子と繊維の各250枚からランダムに90枚を抽出した学習用画像を使用し、さらに、それぞれ25枚の画像を用いて検出の精度を検証した。

開発したシステムによる解析の結果、粒子状・繊維状のMPsを教師データとして利用し、機械学習システムと組み合わせることで、高い正答率を取得できるシステムが構築できた。各粒子カテゴリーの確信度は、粒子状のMPsの場合、24粒子は90%以上の確信度を示したが、1粒子は65%の確信度となり、繊維との判別が難しい場合があった（図2-10a,b）。これは、粒子の周縁部のみが染色され、線状（繊維状）に蛍光を検出したことが影響していることが明らかになった。一方、繊維の場合は、全ての粒子で94%以上の確信度が得られた（図2-10c,d）。

粒子判別の確信度が90%以上を正解とした場合、粒子は96%の正答率、繊維は100%の正答率となり、全体として98%の正答率で分類できるシステムを構築できた（表3）。また、1分間に60個以上の粒子について、MPsの数、形状、大きさを分類することができ、材質は判別できないものの、大量の試料から短時間にMPsの計数と形状の分類が可能なシステムとなった。開発の過程では、同一の粒子を重複計数したり、動きの異なる複数の粒子が接触することで、一つの粒子として計数するなどの問題点があったが、フローセルの内表面を清浄にしたり、流す粒子数や流速を調整することで軽減することができた。一方、染色具合に依存した蛍光強度の違いにより粒子が繊維に分類される誤認識が新たに生じた。流速や濃度、染色法を調整するとともに、教師データの数を増やすことで問題を解決することが可能である<sup>10) 11) 12)</sup>。

表3. 粒子と繊維それぞれの評価用画像25枚ずつの分類結果

評価用画像		Grain判定	Fiber判定	正答率 (%)	
Grain	25	24	1	96.0	98.0
Fiber	25	0	25	100.0	

## (2) 海底におけるMPs粒子の採取調査の実施

深海堆積物中のMPsは、世界各地から報告がなされ、100 μm程度の粒子が多く含まれていることが示されつつある（例えば、<sup>4) 13) 14) 15) 16)</sup>など）。しかし、その挙動については、十分に理解されない。また、日本周辺は黒潮流路に沿ったプラスチックごみの流入が多くあるのに加えて、定常的に発達する四国沖の黒潮再循環域や房総半島沖の黒潮続流再循環域の大規模渦に多くのプラスチックごみが集積し<sup>17) 18)</sup>など、黒潮続流再循環域の直下には多くのマクロプラスチックごみが堆積していることが明らかになっている<sup>19)</sup>（図2-11a）。海底はMPsを含むプラスチックごみのシンクの一つと考えられるため、その分布実態を把握することでMPsの挙動の理解にも繋がる。日本国内で最大の人口密集地近傍には、水深1400 mの相模湾が存在し、さらに相模トラフ、水深9000 mを超えるプレート三重会合点が存在する世界でも稀な海洋セッティングであるため、後背地から排出されたMPsの海底における挙動を理解するには、適した環境であると言える（図2-11b）。実際、プレート三重会合点の堆積構造は、複数のイベント堆積物（地震動などによる海底地すべり堆積物など）が確認されており、浅海からのMPsのインプットに海底地形や地球科学的イベント、堆積物の粒度ごとの挙動などが大きく関係している可能性がある<sup>20)</sup>。このため、解析では、表層海流やそれに伴うプラスチックごみや海底マクロプラスチックごみの集積と海底MPsの分布実態把握を行いMPsの挙動を推測すること、海底地形に関連したMPsのインプットが生じるのかを検証することを目的に分析を進めた<sup>21)</sup>。試料採取及び分析前処理は、上述の新たに開発した手法を用いて分析に供し、ナイルレッド染色後に蛍光実体顕微鏡下でMPsの量と大きさを計測した。

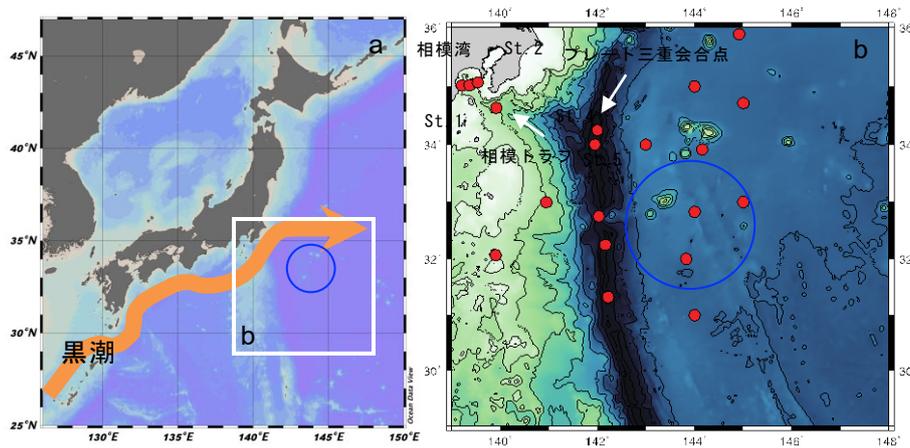


図2-11. 調査海域図。(a) 調査海域と黒潮流路の関係。青丸は黒潮続流再循環域に存在するゴミ集積の想定位置(=西太平洋ゴミパッチ)。(b) 観測点(赤丸)。各観測点においてニューストーンネット曳網、マルチプルコアラーもしくは深海ランダー・「しんかい6500」により海底堆積物試料を採取した。

### (3) 調査の継続と海底における分布の解明

採取試料のうち4観測点について(図2-11b)、堆積物表層1 cm(堆積物深度0~1 cm)を分析した結果、堆積物乾重量当たりのMPsの数は、それぞれ相模湾初島沖(St.1)で25.5個/g、相模湾湾央部(St.2)で67.5個/g、プレート三重会合点北側測点(St.4)で26.6個/g、プレート三重会合点南側測点(St.5)で48.8個/gであった(図2-12)。相模湾湾央部で最も多いMPsが検出されたが、人間活動から離れたプレート三重会合点の2地点では相模湾の2地点と同程度のMPsが検出された。また、プレート三重会合点の2地点では、直径300  $\mu\text{m}$ 以上の粒子は検出されず、相模湾2地点より平均直径が小さい傾向があった(図2-13)。300  $\mu\text{m}$ を境とする粒子サイズ分布と数に違いがあることから、MPsの集積は、堆積場の違いによって生じることが可能性が示唆される。St.4とSt.5は近接しているにも関わらず、MPsの個数に違いが見られた。これは、St.5が相模トラフと直接面しているのに対して、St.4はSt.5との間に小さな高まりが存在することがMPs供給量に違いをもたらした可能性ある<sup>21)</sup>。実際、海底堆積物柱状試料のCTスキャン画像を見ると、イベント堆積物であるタービダイト層は、St.5に厚く見られるのに対して、St.4では薄い層が複数存在することからも、堆積物の輸送及び供給量との因果関係が示唆される<sup>20)</sup>。これらの結果を踏まえると、プレート三重会合点のMPsは海底谷を経て輸送されており、輸送過程でMPsのサイズの分別が起きていると推測できる<sup>21) 22) 23)</sup>。

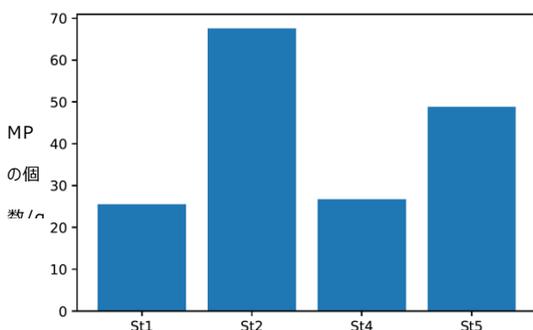


図2-12. 図2-11bの各観測点(St.1~4)におけるMPsの個数<sup>21)</sup>。

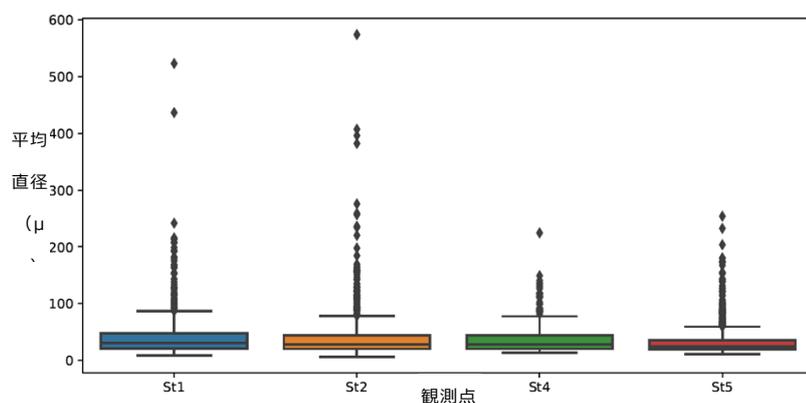


図2-13. MPsはどの地点でも50  $\mu\text{m}$ 付近に頻度が高いが、プレート三重会合点の2測点 (St.4, 5) では、250  $\mu\text{m}$ 以上の粒子サイズがないことがわかる<sup>21)</sup>。

## 5. 研究目標の達成状況

海底堆積物中のマイクロプラスチック (MPs) の分析を、イメージングフローサイトメーターなどを用いて、正確かつ効率的に実施するための方法の確立は、研究の全体目標として、当初目標通り達成できた。

### (1) 海底堆積物中のMPs採取と検出方法の整備

前処理工程や検出工程の最適化では、既往研究の問題点を洗い出し、堆積物を含む混入物を除去するために、溶液の比重調整による密度分離や化学処理による有機物・無機物除去及び篩による選別等を行った。具体的には、新たに試料採取と前処理に関わる機器を3件開発し、MPs汚染の恐れを低減し分析処理時間を削減した効率的な分析手法を確立した。これらの成果は、3件の査読付き国際誌に掲載された。アルミコアチューブは、アルフレッド・ウェグナー極地海洋研究所の研究者などから問い合わせがあり、設計図を開示し手法を提供するなど、普及周知が図られた。密度分離装置については、十数件の問い合わせがあり、製作会社を紹介して購入に至るなど、国内外からの反響が大きいものとなった。前処理工程については、計画を前倒して論文としても公表できたことから、当初目標以上の成果を創出できた。

イメージングフローサイトメーターなどを用いたMPs分析手法の確立では、自動分析手法の検出工程において流体の最適流速、画像撮影の最適感度あるいは照度などを試行して最適化を図った。具体的には、蛍光染色したMPsを画像データから判別し、個数や形状、大きさを自動的に計測するシステムを開発できた。成果は、第54回・第55回水環境学会や日本地球惑星科学連合2021年大会で成果を公表するとともに<sup>22) 23) 24)</sup>、英語査読付き論文への投稿を準備しており、当初計画通りの成果が得られた。

### (2) 海底におけるMP粒子の採取調査の実施

交付金による研究航海の機会を活用したため、この課題予算だけでは実行できない調査が進み、黒潮続流再循環域直下の海底堆積物、および、人口密集地近傍の相模湾～プレート三重会合点の広範囲の試料を採取でき、当初計画通りに実施できた。

### (3) 調査の継続と海底における分布の解明

深海底におけるMPsの分布実態を把握し、その成果を第55回水環境学会や日本地球惑星科学連合2021年大会で公表した<sup>20) 22) 23)</sup>。これらの深海底におけるMPs分布の実態把握の結果は、SDGs14.1にも貢献できるものである。また、房総半島沖の西太平洋ごみパッチ直下のマイクロプラスチックごみの量と分布に関する成果をMarine Pollution Bulletinに公表した<sup>16)</sup>。さらに、同一の航海で採取した試料中の含有化学物質分析について分析し、深海において多量の化学物質の溶出の恐れがあることをScience of the Total Environmentに公表した<sup>24)</sup>。このように、プロジェクトの成果と連携した研究を展開し、成果を公表するなど、当初目標通りの成果を得ることができた。

## 6. 引用文献

- 1) M. Tsuchiya, H. Nomaki, T. Kitahashi, R. Nakajima and K. Fujikura: *MethodsX* 6, 2662–2668, DOI 10.1016/j.mex.2019.10.027 (2019) Sediment sampling with a core sampler equipped with aluminum tubes and an onboard processing protocol to avoid plastic contamination.
- 2) R. Nakajima, M. Tsuchiya, D.J. Lindsay, T. Kitahashi, K. Fujikura and T. Fukushima: *PeerJ*, 7, e7915, DOI 10.7717/peerj.7915 (2019) A new small device made of glass for separating microplastics from marine and freshwater sediments.
- 3) R. Nakajima, D.J. Lindsay, M. Tsuchiya, R. Matsui, T. Kitahashi, K. Fujikura and T. Fukushima: *MethodsX* 6, 1677–1682, DOI 10.1016/j.mex.2019.07.012 (2019) A small, stainless-steel sieve optimized for laboratory beaker-based extraction of microplastics from environmental samples. *MethodsX* 6, 1677–1682, DOI 10.1016/j.mex.2019.07.012
- 4) M. Bergmann, V. Wirzberger, T. Krumpfen, C. Lorenz, S. Primpke, M.B. Tekman and G. Gerdt: *Environmental Science & Technology* 51, 11000–11010, DOI 10.1021/acs.est.7b03331 (2017) High quantities of microplastic in Arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN observatory.
- 5) Y. Matsuguma, H. Takada, H. Kumata, H. Kanke, S. Sakurai, T. Suzuki, M. Itoh, Y. Okazaki, R. Boonyatumanond, M.P. Zakaria, S. Weerts and B. Newman: *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73, 230–239, DOI 10.1007/s00244-017-0414-9 (2017) Microplastics in sediment cores from Asia and Africa as indicators of temporal trends in plastic pollution.
- 6) A. Dyachenko, J. Mitchell and N. Arsem: *Analytical Methods* 9, 1412–1418, DOI 10.1039/C6AY02397E (2017) Extraction and identification of microplastic particles from secondary wastewater treatment plant (WWTP) effluent.
- 7) J. Masura, J.E. Baker, G.D. Foster, C. Arthur and C. Herring: NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48 (2015) Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for Quantifying Synthetic Particles in Waters and Sediments.
- 8) H.K. Imhof, J. Schmid, R. Niessner, N.P. Ivleva and C. Laforsch: *Limnology and Oceanography: Methods* 10(7), 524–537, DOI 10.4319/lom.2012.10.524 (2012) A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments.
- 9) R.L. Coppock, M. Cole, P.K. Lindeque, A.M. Queirós and T.S. Galloway: *Environmental Pollution* 230, 829–837, DOI 10.1016/j.envpol.2017.07.017 (2017) A small-scale, portable method for extracting microplastics from marine sediments.
- 10) 土屋正史、北橋 倫、平 陽介、斎藤仁志、中嶋亮太、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦：第54回日本水環境学会（2020）ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出法開発
- 11) 土屋正史、北橋 倫、小栗一将、中嶋亮太、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦、平 陽介、斎藤仁志：第55回日本水環境学会（2021）ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出法開発とその有用性
- 12) 土屋正史、北橋 倫、平 陽介、斎藤仁志、小栗一将、中嶋亮太、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦：日本地球惑星科学連合2021年大会（2021）ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出
- 13) L. Van Cauwenberghe, A. Vanreusel, J. Mees and C.R. Janssen: *Environmental Pollution* 182, 495–499, DOI 10.1016/j.envpol.2013.08.013 (2013) Microplastic pollution in deep-sea sediments.
- 14) J. Barrett, Z. Chase, J. Zhang, M.M.B. Holl, L. Willis, A. Williams, B.D. Hardesty and C. Wilcox: *Frontiers in Marine Science* 7, DOI 10.3389/fmars.2020.576170, 576170. 2020. Microplastic pollution in deep-sea sediments from the Great Australian Bight.
- 15) W. Courtene-Jones, B. Quinn, C. Ewins, S.F. Gary and B.E. Narayanaswamy: *Marine Pollution Bulletin* 154, 111092, DOI 10.1016/j.marpolbul.2020.111092 (2020) Microplastic accumulation in deep-sea sediments from the Rockall Trough.

- 16) E.M. Cunningham, S.M. Ehlers, J.T.A. Dick, J.D. Sigwart, K. Linse, J.J. Dick and K. Kiriakoulakis: *Environmental Science & Technology* 54, 13661–13671, DOI 10.1021/acs.est.0c03441 (2020) High abundances of microplastic pollution in deep-sea sediments: Evidence from Antarctica and the Southern Ocean.
- 17) A. Isobe, S. Iwasaki, K. Uchida and T. Tokai: *Nature Communications* 10, 417, DOI 10.1038/s41467-019-08316-9 (2019) Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066.
- 18) Nakajima, Tsuchiya, Kitahashi, Fujikura et al. (in prep.) Cyclonic eddy can increase accumulation of microplastic in the Kuroshio Extension Recirculation Gyre.
- 19) R. Nakajima, M. Tsuchiya, A. Yabuki, S. Masuda, T. Kitahashi, Y. Nagano, T. Ikuta, N. Isobe, H. Nakata, H. Ritchie, K. Oguri, S. Osafune, K. Kawamura, M. Suzukawa, T. Yamauchi, K. Iijima, T. Yoshida, S. Chiba and K. Fujikura: *Marine Pollution Bulletin* 166, 112188, DOI 10.1016/j.marpolbul.2021.112188 (2021) Massive occurrence of benthic plastic debris at the abyssal seafloor beneath the Kuroshio Extension, the North West Pacific.
- 20) K. Oguri, M. Tsuchiya, K. Kawamura, M. Murayama, A. Yabuki, Y. Maeda, H. Nomkaki, S. Kawagucci, A. Nakamura and S. Chiba (in prep.) Characteristics of surface sediments in Sagami Bay, Japan Trench, Trench-Trench-Trench-type triple junction, Izu-Ogasawara Trench and deep-sea plain: Toward understanding the process of microplastics burial in deep-sea sediments.
- 21) T. Kitahashi, M. Tsuchiya, R. Nakajima, R. Matsui, K. Oguri, K. Kawamura, Y. Maeda, S. Chiba and K. Fujikura (in prep.) Distribution of Microplastics in the Deep-sea Sediments.
- 22) 北橋 倫、土屋 正史、中嶋 亮太、松井 理恵、小栗 一将、川村 喜一郎、前田 洋作、千葉 早苗、藤倉 克則：2021年地球惑星科学連合大会（2021）深海底堆積物中のマイクロプラスチックの分布
- 23) 北橋 倫、土屋正史、中嶋亮太、松井理恵、小栗一将、前田洋作、千葉早苗、藤倉克則：第55回日本水環境学会北橋水環境（2021）深海底堆積物中のマイクロプラスチックの分布
- 24) Nurlatifah, T. Yamauchi, R. Nakajima, M. Tsuchiya, A. Yabuki, T. Kitahashi, Y. Nagano, N. Isobe and H. Nakata: *Science of the Total Environment* 768, 144537, DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.144537 (2021) Plastic additives in deep-sea debris collected from the western North Pacific and estimation for their environmental loads.

## II-3 漂着ごみ等のモニタリング・計測手法の高度化

国立大学法人 鹿児島大学

理工学域工学系

加古 真一郎

〈研究協力者〉

鹿児島大学大学院 理工学研究科技術部 種田哲也

### 【要旨】

海岸漂着プラスチックごみ（以下、プラごみ）は、現在最も深刻な地球環境問題の一つであるが、これを定量的・客観的に精度良く推定する方法は確立されていない。そこで本研究は、人の手によるごみ回収に変わる新しい観測・定量化手法として、ドローン空撮と深層学習を基盤とした画像解析を組み合わせる手法を構築した。過去の手法は、漂着ごみの被覆面積や数のみしか定量できなかったが、本手法は、ドローンから得られた海岸の3次元情報を用いることで、海岸漂着プラごみの体積を推定可能である。本研究では、はじめに、ドローン空撮から得られた位置情報に含まれる誤差を、トータルステーションによる現地測量や、Real Time Kinematic方式等によって補正した。次に、この情報とStructure from Motionを用いて、対象海岸全体を立体的に再現した。これはDigital Surface Model (DSM)と呼ばれ、全ての格子の頂点に位置情報（緯度、経度、高さ）が含まれる。DSMを構築する際、海岸を真上から撮影したように変換したオルソ画像も同時に作成し、このオルソ画像中から、漂着プラごみを自動検出する深層学習モデルを、漂着ごみや海岸の色情報を学習データとして用いることで構築した。この深層学習モデルを用いて、ドローンで撮影された画像中の海岸漂着プラごみを自動検出した後、そのエッジ（輪郭）を特定した。そして、その情報をDSMに入力することで、エッジ内のプラごみの体積を推定した。この際、エッジ内に海岸が含まれていたとしても、そこには高さ情報がないので、体積計算には反映されない。この手法の体積推定精度は、体積既知の疑似プラごみを、本手法で推定することで評価した。その結果、本研究で構築した手法は、漂着プラごみの体積を10%以下の誤差で推定可能であることが示された。さらに、この手法を九州の3つの海岸において、実際に漂着したごみに適用した。その結果、海岸の照り返しの影響や影などの影響が強い海岸においても、海岸の高さ情報から計算した海岸勾配と、深層学習モデルを組み合わせることで、漂着プラごみの情報を抽出可能であることが示された。加えて、流木の情報を抽出・除去する場合には、マルチスペクトルカメラから得られた画像を深層学習モデルの学習データとすることが効果的であることも示された。また、本手法の各海岸における体積推定精度を、主観解析の結果と比べてところ、照り返しの影響の強い磯浜海岸では約29%の誤差で、そうでない海岸では疑似プラごみと同程度の10%程度の誤差で、体積推定が可能であった。この精度は、過去の研究と比べて非常に高い。

### 1. 研究開発目的

主に沿岸近くに暮らす人々を苦しめる海岸漂着ごみは、早急に対策が必要な地球環境問題の一つである。実際、国際的な枠組みではSDGsの14番目の項目（海の豊かさを守ろう）の第一項に海ごみに関する言及があり、国内においても内閣府による「経済財政運営と改革の基本方針2017<sup>1)</sup>」には、「海洋ごみ対策に関する研究」の推進が、地球環境への貢献のために掲げられている。しかし実際のところ、海岸漂着ごみ量の精度良い実態調査手法は未だ確立されたものではない。これまで海岸調査が多くの方自治体や国内外の研究者によって行われてきたが(例えば、Derraik, 2002<sup>2)</sup>, Kako et al, 2010a<sup>3)</sup>)、人手によるごみ回収に基づいたこれらは、統一した方法が取られていないため、蓄積されたデータに精度の一貫性がなく、データ間の比較が難しい。また、多大な経済的負荷あるいは人的資源の制約により高頻度の調査は困難で、人の手に頼っている以上、精度の向上にも限界がある。人が立ち入れない海岸に至っては調査すら実施できないため、データ自体が存在しない海岸も多い。

このような状況を打破すべく、Kako et al. (2010b<sup>4)</sup>, 2012<sup>5)</sup>)では、ウェブカメラやバルーンを用いた海岸のリモートセンシングと、画像解析を組み合わせた新たな海岸漂着ごみ定量化手法の開発に取り組んだ。しかしながらこれらの手法は、研究者のみならず多くの自治体やNGOなどにも利用可能という点では、難点が残っていると看做されるを得ない。ウェブカメラによる撮影は、連続観測が可能ではあるものの、画角が限られるため、海岸全体を撮影することができない。バルーンの移動は、人的な曳航に

依存するため、機動性に欠けて撮影範囲が制限される。加えて、撮影や観測にもある程度の熟練と人手が必要という問題点もある。画像解析には、海ごみと背景海岸を分離する判定基準に主観が混じる難点が存在する。

近年では、Martin et al. (2018)<sup>6)</sup>やFallati et al.(2019)<sup>7)</sup>によって、自律式マルチコプター（ドローン）と機械学習/深層学習を組み合わせた海岸漂着プラスチックごみ（以下、プラごみ）の定量化手法が提案された。彼らの成果は、この組み合わせが漂着プラごみの定量化に適していることを明確に示す実例である。しかしながら、彼らの定量化手法は、漂着ごみのカウントであり(個数/m<sup>2</sup>)、漂着プラごみ量の観測に有益であろう、ドローン観測から得られる3次元情報を十分に活用していない。

本研究では、上記の難点・問題点を克服した、リモートセンシングと画像解析による海岸漂着プラごみ定量化手法を構築する。キーワードは、広範な海岸をカバーする機動性、海ごみ判定の客観性、そして誰でも利用できる汎用性である。これらを実現するため、本研究では、ドローンによる観測と、深層学習を基盤とした画像解析技術を複合させる。そして、海岸漂着ごみの7割を占めるとされる

(Derraik, 2002<sup>2)</sup>) プラごみを定量化する手法を構築する。本研究の新規制は、高解像度・高精度な海岸を立体的にデジタルデータとして再現することで、海岸漂着プラごみの総体積を推定する点にある。この情報は、より効果的な海岸清掃の実施や、漂着プラごみの撤去費用の算定、漂着ごみ回収作業の重点実施海岸の選定などにおいて、非常に重要なものとなる。本研究を通して、全ての海岸の如何なる形状・種類のごみに対しても適用可能な、漂着プラごみ現存量の推定方法の確立を実現させることが目的である。

## 2. 研究目標

機動性の高いドローンによる海岸の航空測量と、深層学習を基盤とした画像解析を組み合わせることで、場所やごみの種類に依存することなく適用可能な、海岸漂着プラごみ定量化手法を構築する。本研究の最終目標は、研究者だけでなく、地方自治体等が参画できる全国海岸漂着ごみ自動計量システムを提案することにあるため、地方自治体と協働し（例：南さつま市）、上記で提案した手法の実証実験及び精度検証を行う。

## 3. 研究開発内容

### 3-1 ドローンによる海岸の航空測量

鹿児島県日置市吹上浜、同県薩摩川内市上甕島、南さつま市越路海岸、および長崎県五島市奈留島大串海岸にて（図3.1）、DJI社製のドローン「Phantom 4 pro」、「Phantom 4 RTK (Real Time Kinematic)」、「Mavic2 Pro」、「P4 Multispectral（以下、P4M）」などを用いた海岸の一括観測を行なった（図3.2）。吹上浜での観測は、ドローンの操作・機能性、観測に要する時間、最適な撮影高度、ドローンに搭載されたGPSの精度等を明らかにするためのテスト観測である。また、体積既知の疑似プラごみ（図3.3）を海岸に設置し、その体積を本研究が提案する手法で推定するための観測も行なった。一方、上甕島、南さつま市、奈留島での観測は、実際に漂着しているプラごみを定量化するための観測である。南さつま市の越路海岸と、五島市奈留島の大串海岸においては、P4Mによる観測も実施した。P4Mを除く全てのドローンには、4Kカメラが搭載されている。一方、P4MのRGBカメラは、2メガピクセルではあるものの、それに加えて、赤、青、緑、赤エッジ、近赤外、の5つのチャンネル（図3.2d）を有しており、それぞれを組み合わせることで、対象物検知に適切な画像を作成することができる。

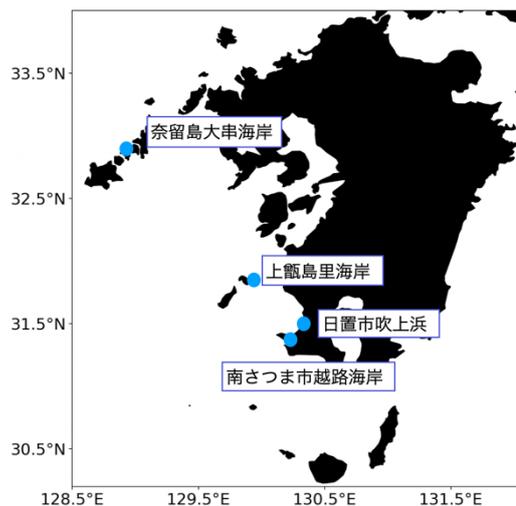


図3.1 ドローンによる観測を実施した海岸

ドローンによる航空測量は、DJI社製iPad用アプリケーションDJI Ground Station PRO (<https://www.dji.com/it/ground-station-pro>; iPad GS-PRO)を用いて行った。このiPadアプリケーションを使えば、撮影範囲と解像度の設定、および自動飛行・撮影が、ドローンの特別な操縦スキルなしに実現可能である。我々は、この機能を用いて海岸の一括観測（最大で150m × 70 mの範囲）を行った。

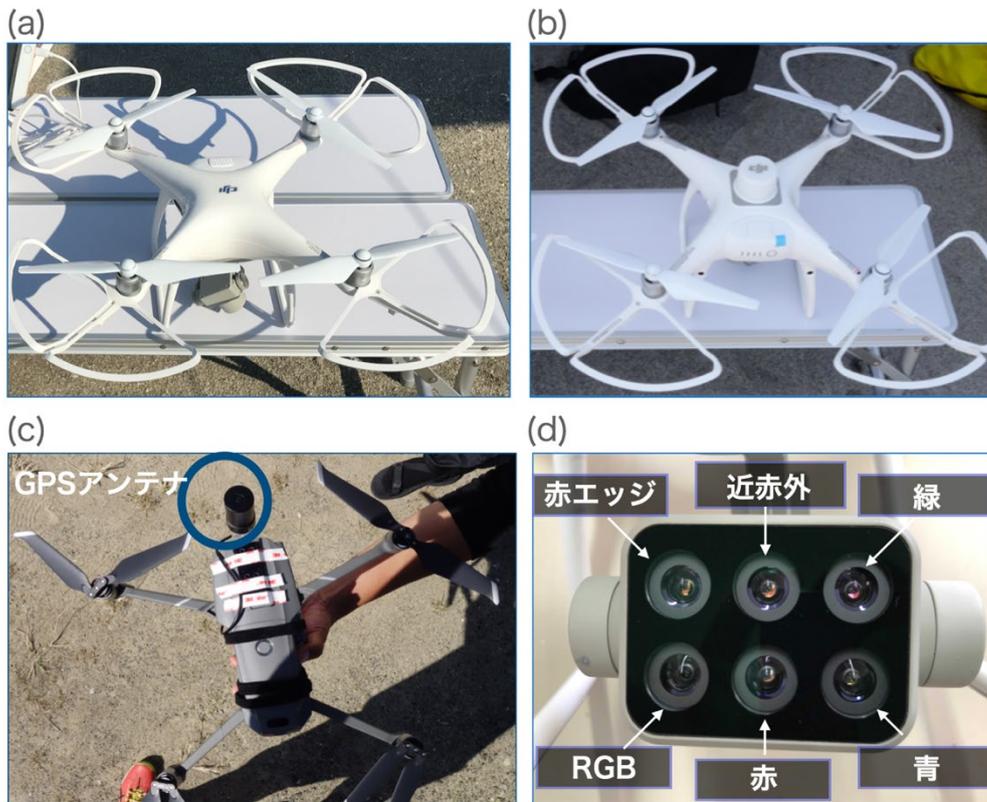


図3.2 観測に使用したドローン (a) Phantom4 Pro, (b) Phantom4 Real Time Kinematic, (c) Mavic2 Pro, (d) P4 Multispectralに搭載のマルチスペクトルカメラ

本研究が使用したドローン飛行・撮影のための諸設定は、飛行速度が1 m/s、画像のオーバーラップ率は海岸と垂直な方向には90%、平行な方向には60% (RTKとP4Mは、両方向共80%)、地上画素寸法が5 mmである。5 mmという地上画素寸法は、国土地理院が発行している「UAVを用いた公共測量マニュアル (平成29年度)<sup>8)</sup>」に記載された「三次元点群の位置精度に応じた地上画素寸法」を参考に設定した(表3.1)。我々のケースでは、地上画素寸法をiPad GS-PRO上で5 mmと決定すると、撮影高度は自動的に上空17 mと設定された。ただし、航空測量の精度が低い場合には、表3.1に示された様な位置精度は得られない。そこで、上記のマニュアルは、基準点(任意)から対象物の周りに設置した対空標識(図3.4)までの距離をトータルステーション(TS)等で現地測量し、その結果を元に空撮画像の位置情報を補正することを推奨している。故に、我々も同様の補正を行った。この際、水平、高さ方向それぞれの正確な位置情報は、対象物周辺に設置された対空標識(図



図3.3 体積既知の疑似プラスチックごみ

3.4a、赤丸内) や、海岸の両端に設置した立体対空標識 (図3.4b) の位置情報をTSで現地測量することにより得た。ただし、この処理を施さない画像解析も同様に行ない、位置補正の重要性も検討した。

さらに、地上基準局から転送される誤差情報を利用するなどして、ドローンから得られた位置情報を補正するRTK方式 (Phantom 4 RTKとP4Mにこの機能が搭載。位置情報は自動補正される; 図3.2b) と、Differential GPS方式 (DGPS: 本研究において測器を作成。図3.2c参照。観測後、補正に使用する衛星などを決定する後補正) による位置補正も実施し、それらの有用性も検討した。

表3.1 位置精度と地上画素寸法の関係  
(UAVを用いた公共測量マニュアルより引用)

位置精度	地上画素寸法
0.05m 以内	0.01m 以内
0.10m 以内	0.02m 以内
0.20m 以内	0.03m 以内

### 3-2 ドローン測量による海岸の3次元立体モデルの構築

ドローン空撮から得られた画像 (以下、ドローン画像) は、はじめに、Structure from Motion (SfM; 幾何補正や空中三角測量などにより、全てのピクセルの緯度・経度・高さ情報を推定する方法) ソフトウェアであるテラドローン社製のTerra Mapper を用いて画像処理された (Terra Drone Corporation; <https://mapper.terra-drone.net/en/>)。Terra Mapperは、海岸の3次元点群、デジタルサーフェスモデル (DSM)、オルソ画像 (幾何補正により空撮画像の歪みを補正し、真上から撮影した様に変換した画像) を得るために使用した。Terra Mapperによる画像解析は次の3つのステップから成る。

一つ目のステップは、3次元点群の作成である。3次元点群データは、実海岸の3次元的特徴 (位置情

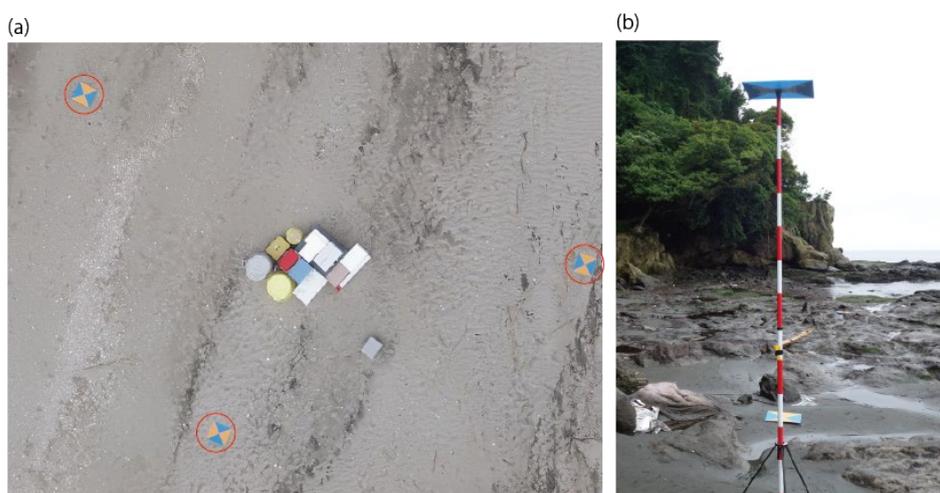


図3.4 疑似プラスチックごみの周辺に設置した(a) 対空標識 (赤丸内) と(b) 高さ補正のための立体対空標識

報含む) を反映したデータセットである。故に、このデータセットの精度良い構築が、高精度体積推定の鍵となる。SfM は画像中の各ピクセルの地位置情報を決定するために用いられる方法 (すなわち、ジオリファレンス) であり、3次元点群データは、ドローン観測から得られた位置情報、高度、焦点距離などからSfM を通して構築される (焦点距離は、レンズの歪みの影響を補正するレンズキャリブレーションに使用)。ドローン画像は斜め上空から撮影されているため、画像中の対象物の正確な位置や大きさを推定するためには、この作業が必須である。次のステップは、3次元点群を用いたDSMの構築である。DSMは、海岸の3次元立体モデルであり、水平位置情報に加えて、海岸の高さ情報も含んでいる。DSMは、3次元点群を補間し、それに面を持たせることによって作成される。最後に、解像度が1 cm/pixelのオルソ画像をDSMから作成する。これらの処理は、Terra Mapperを用いることで全て実行す

ることが可能である。

### 3-3 深層学習を基盤とした画像解析による漂着プラごみの自動検出

画像解析の目的は、ドローン画像上の海岸プラごみを自動検出することにある。これを実現するために、海岸プラごみと背景である海岸の色の違いを学習する深層学習モデルを構築した。本研究では、Python用の深層学習フレームワークであるKeras(<https://keras.io>)を使用して深層学習モデルを訓練し、漂着プラごみの自動検出を行った。Kerasによる一般的なワークフローは以下の通りである (Chollet, 2017<sup>9)</sup>)。

1. 学習用のデータを準備する。
2. 学習データを入力するための、複数の層からなるネットワークモデルを定義する。
3. 損失関数、オプティマイザなどの学習結果を監視するための指標を決定する。
4. データの繰り返し学習を行う。

このワークフローに従って、まず、学習データを作成した。ここでは、RGB (Red, Blue, Green) 色空間上で表されたドローン画像を、HSV(色相:Hue、彩度:Saturation、明度:Value of Lightness)色空間上に置き換えたものを用いた。日置市吹上浜でのテストケースにおいては、2018年6月6日に実施した海岸観測データを学習データとして用いた。その他の海岸での観測においては、海岸の一部のみを切り出し、学習データに使用した。例として、図3.5に、吹上浜における学習データと、そのラベルリング結果(海岸とプラごみの塗り分け)を示す。このラベリングは、手作業で実施した。

本手法では、深層学習の訓練を行う前に、学習データを二値ベクトルデータ(0 or 1)に変換する。例えば、あるピクセルにおいて、学習データの値が  $H = 12, S = 80, V = 80$ であった場合、256の配列数のベクトルのうち、この番号の要素のみが1となり、それ以外は0となる。ここで配列数を256とした理由は、OpenCVのHSV値の最大値が256であることに起因する。OpenCVは、BSDライセンス下のオープンソースライブラリであり、Kerasを含む様々なニューラルネットワークAPIでの画像処理をサポートしている。この処理の後、学習データを、7万ピクセルの訓練データと、4万ピクセルの検証データに任意に分割した。この時、画像中の海岸と漂着プラごみが占める割合を同程度にすると、効率的な深層学習モデルの訓練を行うことが可能である。

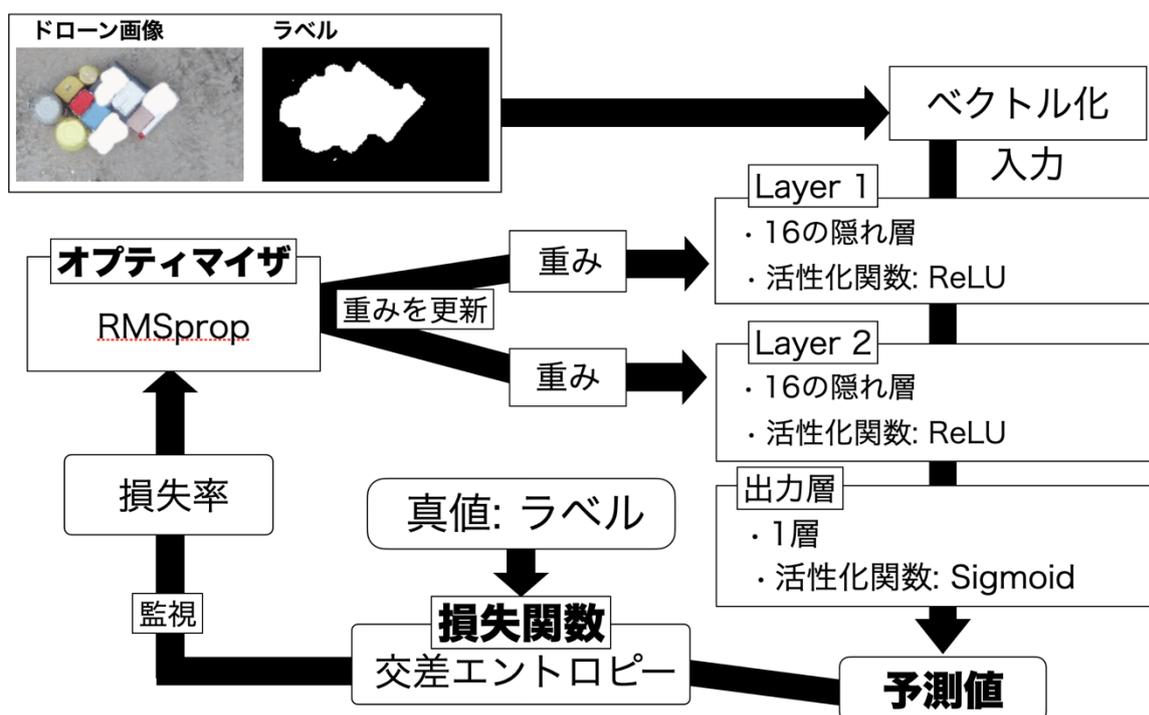


図3.5 本研究で使用した深層学習モデルの構成

次に、ニューラルネットワークモデルの構成を決定した。図3.5に本モデルの構成図を示す。3層のニューラルネットワークからなる本モデルは、それぞれ16の隠れ層を持つ二つの中間層とひとつの出力層で構成され、中間層ではReLU (Rectified Linear Unit)が、出力層では予測値のスコア(0から1の間の値)を出力するためにシグモイドが活性化関数として適用されている。損失関数とオプティマイザは、Chollet (2017)<sup>9)</sup>に従い、二値交差エントロピーとRMSpropをそれぞれ用いた。本研究では、真値(ラベリングデータ)と予測値の確率分布の距離が、交差エントロピーである。損失関数は、トレーニングを完了した際に最小となるものであり、オプティマイザはその結果を踏まえて、ネットワークをアップデートする。つまり、オプティマイザは毎エポック予測値を改善するために重みを更新する。学習過程では、深層学習モデルを512サンプルのミニバッチで20エポックの訓練をすると同時に、検証データを使ってモデルの損失率と精度(正解率)の確認を行った。最後に、オルソ画像から抽出された漂着ごみのエッジをCanny法(Canny,1986<sup>10)</sup>)によって検出し、それをDSMに入力することで、エッジに囲まれた範囲の底面積と高さ(すなわち、体積)を推定した。

#### 4. 結果及び考察

##### 4-1. ドローン観測と3次元写真測量の結果

吹上浜に設置した疑似プラごみとDSM上で再現された疑似プラごみの例を図3.6に示す。また、オルソ画像の例を図3.7に示す。これ以降、例として示す吹上浜の画像は全て2019年6月6日に撮影したものである。図3.6が示すように、疑似プラごみや海岸の形状は、DSM上で正確に3次的に再現されている(詳しい精度は後述)。またこの図は、高度17 mからの撮影であっても、ペットボトルやプラバケツなどの疑似プラごみを、十分に認識可能であることを示している。テスト観測として、飛行高度を17 m以上と設定した場合では、ペットボトルサイズの対象物の認識率が著しく低下した。また、高度をこれ以上上げると、当該海岸周辺では、丘や植生の影響でドローンの操縦が困難であった。植生などの影響がない当該海岸の一部において、スポット的に10 m 高度での観測を実施したが、画像の枚数が増えるのみで、対象物の認識率には大きな変化が見られなかった。故に、飛行高度17 m(すなわち、地上画素寸法 = 5 mm/pixel)は、漂着プラごみを認識するための飛行高度として適しているといえよう。このようなドローンを用いた観測の所要時間は、準備から撤収と、TSによる現地測量まで含めて、約4時間である。(海浜測量: 約2時間、ドローン空撮: 約30分、準備・撤収: 約1時間)。これは、バルーンを使った海岸観測の半分以下の所要時間である。

図3.6のDSMと図3.7のオルソ画像は、ドローン空撮から得られた画像、約130枚を合成することによって得られたものである。ただし、これらを作成する前に、現地測量の結果を用いて、ドローンの位置情報は補正した。構築したDMSの例として、吹上浜と比べて地形がより複雑な、五島市奈留島の大串海岸のものを、アニメーションとして<https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/Drone/goto/DSM-1.mov>に示す(動画1)。

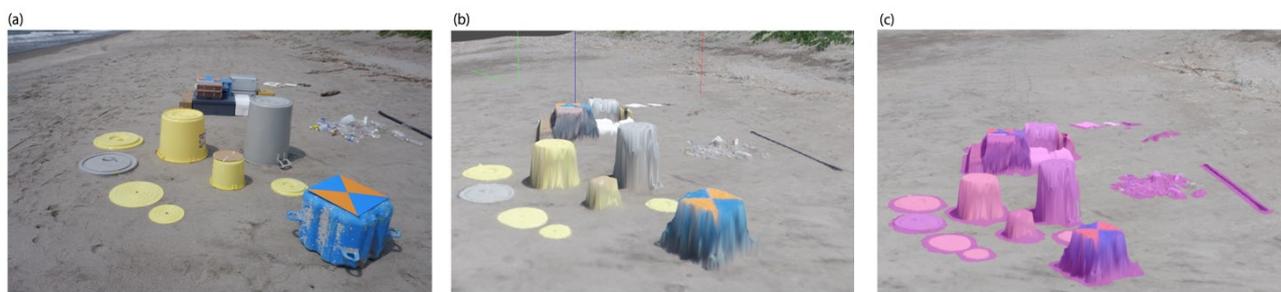


図3.6 海岸で撮影された疑似プラごみ(a)カメラで撮影したもの (b)DSMで再現したもの (c)DSMで再現した海岸上の疑似プラごみを深層学習モデルの結果をもとに赤く色付けしたもの。

海岸の3次元モデルの高精度化を実現する上での、ドローンから得られた位置情報補正の重要性を検証するため、TSによる補正有りとし無しの条件でそれぞれDSMを構築し、それらの対空標識間の距離と高さを比較した。図3.8は、TSによる補正を施さない場合、最大で30cm程度（10mあたり約5～6cm）の誤差が現れることを示している。高さに至っては、誤差がさらに大きく、TS補正なしのDSMは、約90cmの過大評価である。これは、ドローンに搭載された気圧計から求めた高度情報に、大きな誤差が含まれていることを示唆している。Kako et al.(2012)<sup>5)</sup>におけるGPSの誤差も上記と同程度なので、これらはGPSが本来包含するものであろう。しかし、ペットボトルや漁業浮き、プラスチック袋などの体積推定を行う上では、この誤差は許容できない。故に、ドローンから得られた位置情報の補正は必須である。

一方、Phantom 4 RTKによる自動位置補正は精度が高く、その誤差は50 mあたり1 cm程度と、TSによる補正と遜色ないものであった。DGPS方式による補正は、RTKよりも若干精度が劣るものの、大きく位置精度を向上させることが可能であった（図なし）。しかしながら、その補正の有効性は、近傍の

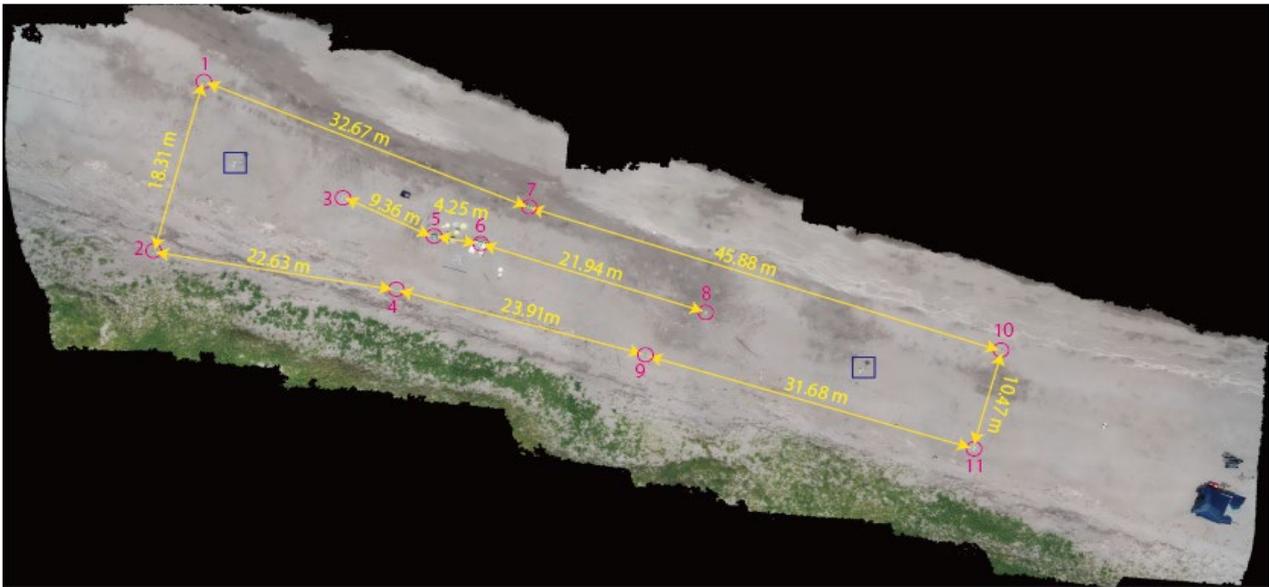


図3.7 吹上浜におけるオルソ画像の例。海岸に設置された対空標識は桃色の円で、立体対空標識は青色の四角で囲まれている。トータルステーション(TS)によって測定された対空標識間の距離は、黄色で示されている。対空標識番号9が、TSを設置した基準点である。

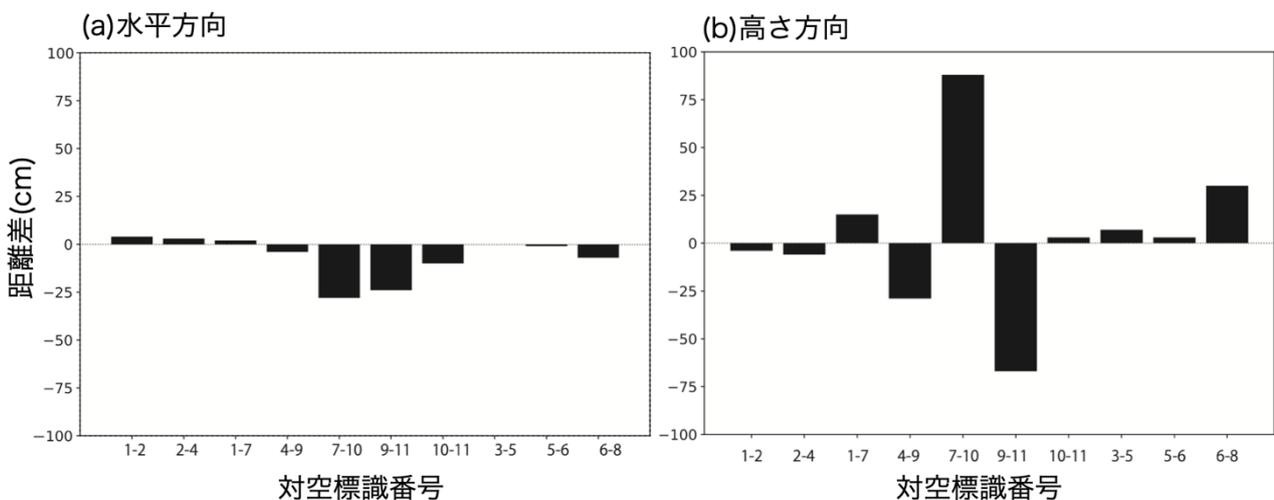


図3.8 トータルステーションによる現地測量の結果がある場合とない場合におけるDigital Surface Model内の対空標識間の(a)距離と(b)高さの差。

電子基準点を基準局とした場合は、精度が著しく低下した。これは、電子基準点とドローン間の距離が長くなることや、電子基準局の受信頻度が粗い（30秒毎）ことに起因する。また、後補正を成功させるには、受信する衛星、信号の種類、仰角マスクなどの組み合わせを、トライアンドエラーによって選択する必要がある。つまり、DGPS方式による補正の一部は、人の主観や経験知に大きく依存する。以上の結果を踏まえて、これ以降の結果は、水平・鉛直方向共に、TSもしくはRTK方式による補正を施した画像の解析結果のみを示す。

#### 4.2 深層学習を基盤とした海岸漂着プラスチックごみの体積推定。

深層学習を用いた画像解析の目的は、オルソ画像上の様々な色のプラスチックごみを自動的に抽出すること（プラごみを示すピクセルを検出すること）と、それらのエッジ（輪郭）を特定することにある。エッジを検出することで、その範囲内の底面積と高さから、対象物の体積をピクセル単位で求めることが可能となる。この手法を用いれば、全体の体積だけでなく、個々の対象物の体積も算出可能である。

図3.9は、深層学習モデルの訓練結果を示す。これが示すように、深層学習モデルの精度は、訓練の度に上昇し、20エポックで最大(0.98)となる。エポックの途中で精度が低下する場合は、過学習に陥っている可能性があるため、この図のような訓練過程を監視することは非常に重要である

(Chollet,2017<sup>9)</sup>)。

図3.10は、海岸のオルソ画像の一部と、それに深層学習による画像解析を適用し、疑似プラごみを検出した結果である。ここでは、疑似プラごみ以外を黒で塗り潰している。また、深層学習による画像解析に加えて、主観的に作成した色基準（color reference: Kataoka et al., 2012<sup>5)</sup>、海岸と漂着プラごみを区別する閾値を、目視による主観で決定）を元に、海岸と疑似プラごみを分離した結果も同時に示す。これらのデータは学習データと独立したものであることに注意されたい。この図から、どちらの画像解析手法を用いても、疑似プラごみを精度良く抽出できることがわかる。しかし、深層学習モデルから得られた結果は、ペットボトルやプラスチックパイプ等を、主観解析と比べて、正しく抽出できることも確認できる（図3.10赤枠内）。

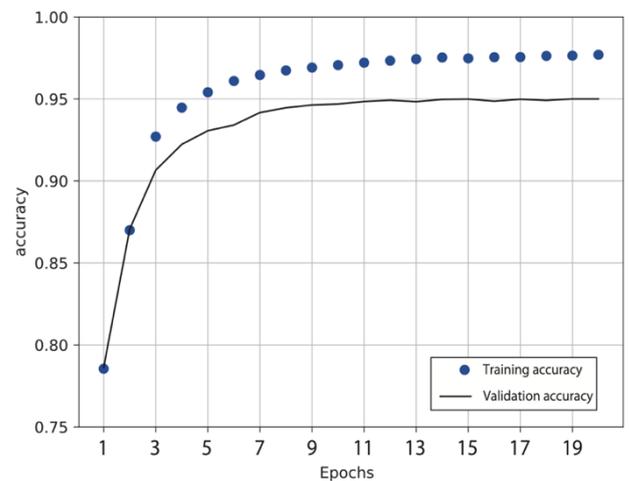
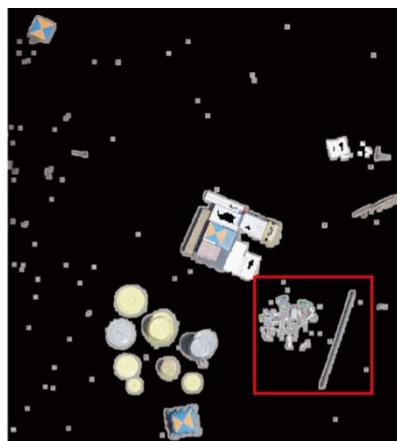


図3.9 深層学習モデルの学習曲線

(a) オリジナル画像



(b) 深層学習による検出結果



(c) 主観解析による検出結果



図3.10 海岸のオルソ画像。(a) 画像解析適用前、(b) 深層学習によって検出されて疑似プラごみ。(c) Kako et al. (2012)と同様の主観解析による疑似プラごみの検出結果。(b), (c)においては、画像解析によって、海岸を示すピクセルを黒で塗り潰している。

このような差が出る要因としては、画像解析における対象物の特定方法の違いを挙げることができる。深層学習モデルは、色情報を繰り返し学習する上で、未知の色を正確に二値分類する様に最適化される。一方で、主観的な解析の結果は、トライアンドエラーによるcolor referenceの手作業による繰り返しの作成に、その精度が大きく依存する。当然、未知の色（color referenceに無い色）への対応はできない。つまり、全ての漂着ごみの抽出に適した主観的なcolor referenceの作成には、限界がある。深層学習モデルは、流木や小石、海岸の照り返しの影響等を漂着プラごみとして誤検出しているものの（図3.10b）、これらの高さは非常に低いため体積推定には影響しない。

図3.11は、図3.10(b)からCanny法 (Canny, 1986<sup>10</sup>)を用いて検出した疑似プラごみのエッジであり、図3.10(b)との比較からそのエッジを精度良く検出していることがわかる。しかしこのオルソ画像は、単なる画像であるため、位置情報を持たない。そこで、対空標識の位置情報を元にAutoCADを用いて画像のサイズ調整を行い、それをDSMに入力することで水平・鉛直方向の位置情報を再度持たせる（図3.6c）。この処理を行うことで、エッジで囲まれた部分の高さおよび底辺の面積が算出できるため、対象物（＝漂着プラごみ）の体積を求めることが可能となる。この際、漂着ごみの周りを大まかに抽出できれば、高さ情報を元に海岸部分は除去できるため、厳密にプラスチックのエッジを検出する必要はない。たとえ背景海岸部分を誤検出しても、その高さ情報は非常に低いので、体積推定の精度には影響しない。我々が提案する手法は、たとえ対象物の中身が空洞であっても、その全体の体積を推定する。この値は、海岸漂着プラごみの真の体積を知るよりも、効率的な海岸清掃の実施計画立案の上では、より有用である。

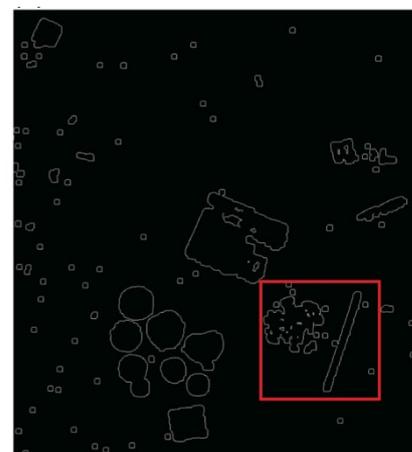


図3.11 Canny法によって、図3.10(b)で検出した疑似プラごみのエッジを検出した結果。

表3.2に、海岸に設置した疑似プラごみの体積を本手法によって推定した結果と、実測値の比較結果を示す。1,2回目の誤差は、他の結果と比べて比較的大きな値を示すが、これは高さ情報を修正するための立体対空標識(図3.4b)を設置しなかったことに起因する。つまり、立体対空標識を使った高さの補正は、体積の推定精度に大きな影響を及ぼす。これを除けば、本手法は10%以下の誤差で漂着プラごみの体積を見積もることが可能である。また、Phantom 4 RTKによって自動位置補正が施されたデータによって推定された体積の精度は、TSで位置補正したものと比べても遜色ないものであった。故に、Phantom 4 RTKを使用した場合は、その位置情報を現地測量の結果を用いて修正せずとも、体積推定を高精度に行うことが可能である。

表3.2 本手法による疑似プラごみの体積推定結果と実測値の比較。単位は、 $m^3$

使用ドローン	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 Pro	phantom4 RTK	phantom4 RTK
実測値	0.87	0.87	0.69	0.89	0.89	1.04	1.04	1.04	1.04
推定値	0.98	1.01	0.71	0.98	0.94	1.00	1.08	1.05	1.06
誤差	0.11 (+13%)	0.14 (+16%)	0.02 (+3%)	0.09 (+10%)	0.05 (+6%)	-0.04 (-4%)	+0.04 (+4%)	0.01 (+1%)	0.02 (+2%)

### 4.3 高さ情報による特徴抽出

上記の深層学習モデルは、背景海岸とプラスチックの色情報が近い場合、プラスチックを正しく検出できないケースが存在する。実際、上甕島里海岸での観測では、礫浜の照り返しの影響が強く、色情報だけでプラスチック情報を抽出することは難しかった。過去の手法(Kataoka et al., 2012<sup>11</sup>)等では、主観的なcolor reference (色差とその影響半径) や、輝度差等の閾値をケース毎に作ることでそれに対処したが、本研究ではより客観的な画像処理を行うため、二つ目の方法として、三次元点群より得られる海岸の高さ情報から算出した「海岸勾配」を判定基準に取り入れた。各格子の頂点ごとに得られる高さ情報は、ドローンによる航空測量特有のものである。この情報を用いれば、海岸上の対象物の検知のみならず、過去の手法ではその対応に苦慮した(Kako et al., 2010b<sup>4</sup>); Kataoka et al., 2012<sup>11</sup>)等)、影や照り返しの除去も容易である。

疑似プラスチックの影が海岸上に存在する例を図3.12aに示す。三次元点群より得られた高さデータは、影の影響なしに海岸上の対象物を認識可能であることがわかる(図3.12b)。ただし、海岸は傾いているので、このデータをそのまま使うことは難しい。なぜなら、疑似ごみの左のエッジ付近と画像の右端付近の高さ(すなわち色)が近いためである。しかし、各ピクセルにおいて海岸勾配を計算すれば対象物のエッジが強調されるので、例え海岸が傾いていても、対象物を検知できる。図3.12cに示すように、海岸に対象物しかなければ、背景(砂浜、礫浜、植生)に関わらず、海岸勾配の算出のみで、影や照り返しの影響も受けず、対象物のエッジ検出が可能である。しかしながら、海岸勾配を利用したエッジ検出は、流木や岩等も同時に検出する。また、高さが凡そ5 cm以上程度なければ、対象物を抽出できない。言い換えれば、プラスチック製の袋のように、非常に薄い対象物は海岸勾配のみでは抽出できない。故に、この海岸勾配と深層学習モデルとの組み合わせが、海岸漂着プラスチック検出には有用である。

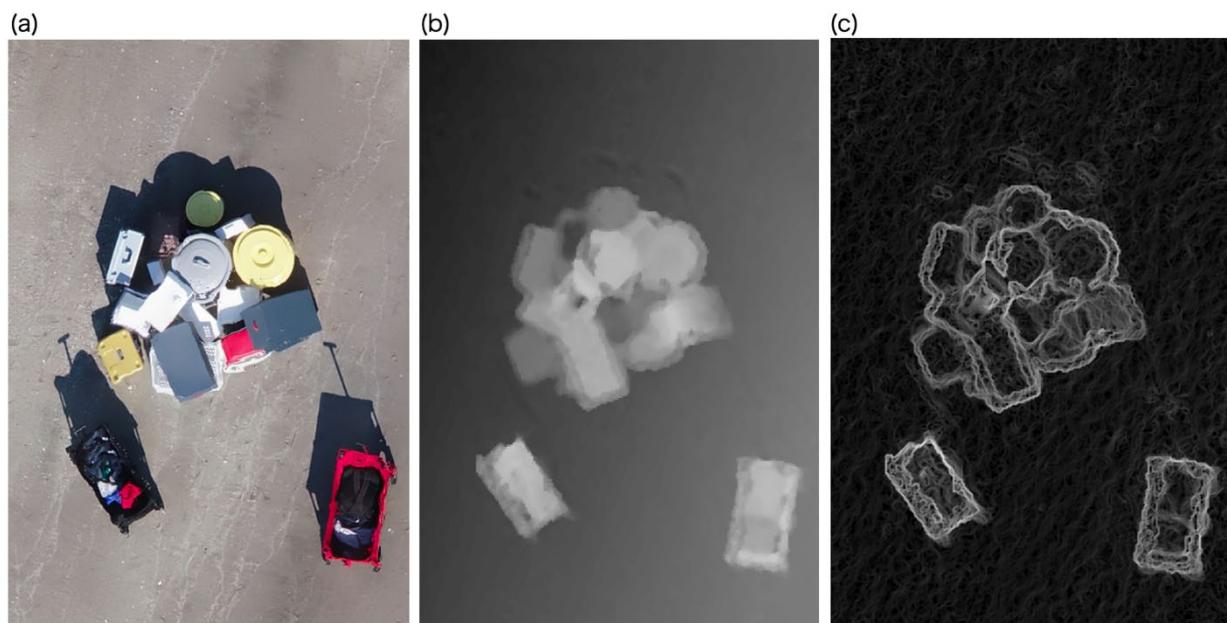


図3.12 疑似プラスチックの影が存在する例。(a)オリジナル画像、(b)基準点からの距離をグレースケールで表したものの。(c) (b)から計算した海岸勾配。

### 4.4 様々な形状の海岸における漂着プラスチックの定量化

吹上浜におけるテスト観測は理想下での実験とも言える。なぜなら、この海岸はほぼ平坦で漂着プラスチックと疑似ごみの色も大きく異なるためである。本手法の有効性を、実際に海岸に漂着したプラスチックを用いて評価するために、図3.1に示した3つの海岸(里海岸; 礫浜、越路海岸; 砂浜、大串海岸; 礫浜)においてドローン観測を行った。これらの海岸は、吹上浜と比べて起伏も激しく(付録動画1参照)、海

岸と漂着ごみの色の違いも小さいため、実証実験に適していると言えよう。特に、里海岸においては、上述したように、HSV色情報のみでの海岸と漂着プラごみの分離ができなかった。故に、里海岸では、漂着白色プラごみを検出するために、深層学習モデルを用いる前に、海岸を表すピクセルを、海岸勾配を用いて除去した。一方、他の二つの海岸では深層学習モデルのみで、漂着ごみを検出することが可能であった。ただし、南さつま市役所と協働して行った越路海岸での観測においては、ほぼプラごみが漂着していなかったため、この観測事例においては、漂着した流木の体積を算出した。この時、RGBカメラに加えて、マルチスペクトルカメラを用いた海岸空撮を行い、自然物を検出・除去する上でのマルチスペクトルカメラの有効性を検討した。

上甌島里海岸におけるDSMと漂着プラごみのDSM上での検出例を図3.13に、最も漂着プラごみ量が多かった大串海岸における検出例をアニメーションにしたものとして、以下に公開する<https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/Drone/goto/DSM-2.mov>（付録動画2）。これらの海岸に漂着したプラごみ量の、深層学習と主観解析による推定結果の比較を表3.3に示す。里海岸での誤差は約-29%と、吹上浜における実験結果と比べて大きくなった。しかし、他の二つの海岸では、テスト観測と概ね同程度の成果が得られた。里海岸において、過小評価が大きくなる要因は、海岸勾配だけでは照り返しの影響を除去できず、深層学習が白色ごみを海岸と誤認知したためである。このような影響を除くための最もシンプルな方法は、照り返しの無い時間や、曇天下に観測を行うことである。また、越路海岸における観測においては、流木情報の検出・除去に対して、マルチスペクトルカメラの利用が有効であることが示された。図3.14に示すように、RGBカメラでは海岸と流木の色の区別がつかないが、マルチスペクトルカメラを通せば、この二つの違いを明確に認識することができる。故に、流木とプラごみが混在するような海岸においては、このカメラの利用が有用であろう。里海岸では、テスト実験と比べて誤差が大きくなったものの、それでもバルーンおよび現地観測と画像解析を組み合わせた既往研究（誤差約 $\pm 35\%$ ; Nakashima et al., 2011<sup>12)</sup>, 2012<sup>13)</sup>）と比べれば、本手法は非常に高精度である。

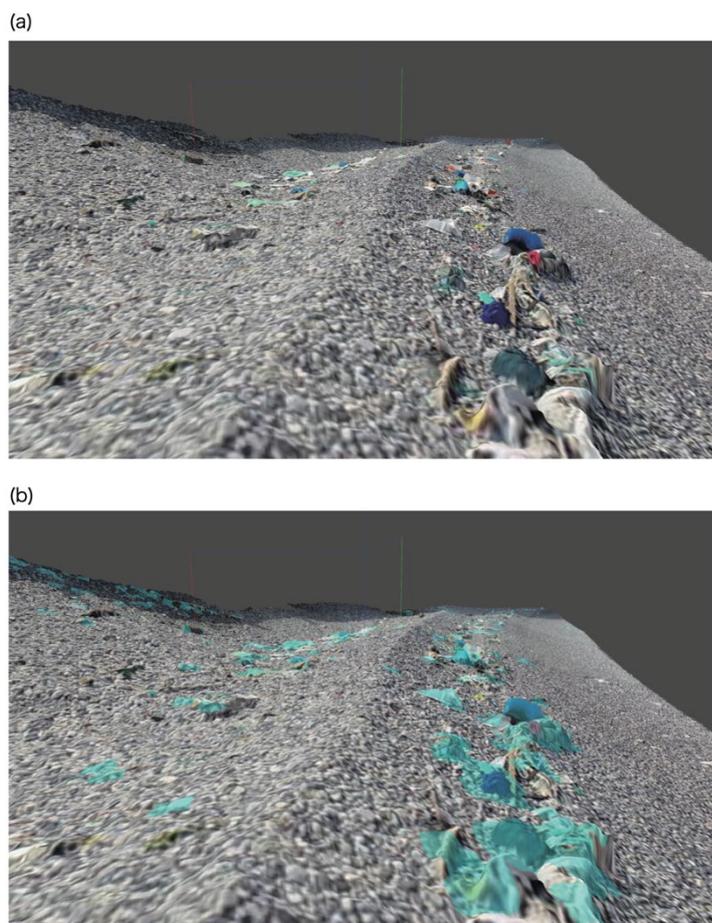


図3.13 里海岸における(a)Digital Surface Model (DSM) と (b)DSMに深層学習モデルが検出したプラごみ情報を入力した結果。深層学習モデルが検出したプラごみを青色で示す。

表3.3 深層学習モデルと主観解析の比較。

	深層学習による 推定値 (m <sup>3</sup> )	主観解析による 推定値 (m <sup>3</sup> )	深層学習と 主観解析の差
里海岸	1.22	1.72	-29.07%
越路海岸	8.81	7.95	10.82%
大串海岸	15.65	18.00	-13.05%

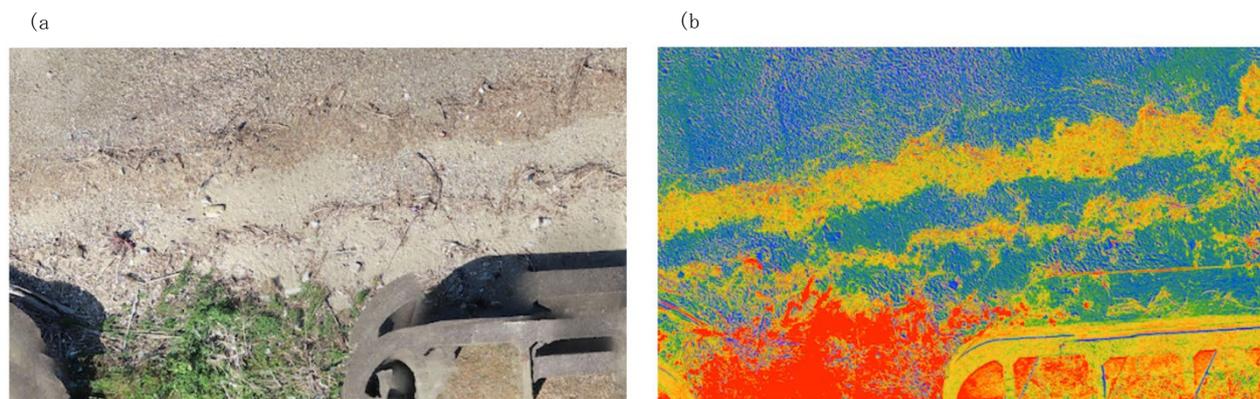


図3.14 (a)RGBカメラと(b)マルチスペクトルカメラによって撮影された越路海岸

#### 4.5 まとめ

本研究は、ドローン観測と深層学習を基盤とした画像解析技術を組み合わせることで、海岸漂着プラスチックごみ量を体積として客観的に推定する手法を構築した。本手法は、海岸が平坦な場合では10%以下の誤差で、起伏の大きい照り返しの強い礫浜海岸でも、30%未満の誤差で漂着プラごみの体積推定が可能である。今後も様々な形状の海岸で観測を継続し、誤差評価と精度の改善、新しい深層学習モデルの導入などを続けることが重要ではあるが、ドローン観測と深層学習を組み合わせれば、漂着ごみの体積を、過去に提案された手法と比べて、高精度で推定可能であることを明確に示した。

### 5. 研究目標の達成状況

ドローンによる海岸観測から得られた画像と位置情報を用いて、高解像・高精度な海岸の立体的モデルを構築する手法を確立した。また、深層学習を用いて漂着プラごみ情報を抽出し、その体積を推定する手法を世界に先駆けて構築した。我々の手法を用いれば、如何なる形状の海岸であっても、ドローンを飛ばすことさえできれば、高精度な位置情報と共に海岸を立体的に再現し、体積推定が可能である。深層学習モデルに関しては、汎用性を検証するという課題が残るものの、観測を実施した全ての海岸において、漂着プラごみの自動検出を実現した。このアニメーション<https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/Drone/goto/DSM-2.mov>からも、その精度の高さがわかる。また、我々の手法は、誤差約

10%程度で漂着ごみの体積を推定可能であった。これは、体積既知の疑似ごみを、本手法によって体積推定することや、主観解析との比較結果などから証明された（照り返しの強い海岸では、その影響が大きくなる時間の観測を避ける必要有）。また、本研究が構築した深層学習モデルは、GPU（Graphical Processing Unit）計算を基盤としているため、画像処理に要する時間は数分程度である。海岸全体を塗り分けるのに数日を必要とする主観解析とは比較にならないほど、迅速なデータ処理が可能である。

本手法は漂着プラごみの体積を推定するために提案された世界で初めての手法で、Kako et al. (2020)としてMarine Pollution Bulletinに掲載されている。そして、この論文の被引用率はトップ4%と非常に高く、国際的な評価も高い。2020年度開始時点で、9つの自治体との協働観測が決定し、実証実験の実施を予定していたものの、コロナ禍の影響でそのほとんどが中止となり、協働観測を実施したのは南さつま市との1件だけであった。しかし、自治体と協働し、漂着プラごみを定量化可能であることは明確に示した。

ドローンによる海岸観測は自動飛行・撮影機能が充実しているため、地方自治体やNPO等でも容易に参画できる。今後、地方自治体等と協働して、このようなドローン観測を全国各地の海岸で実施し、その結果を我々のサーバ上に転送した後、画像解析を施すシステムを構築すれば、自治体などが精度良く海ごみ漂着量をモニターできるようになるであろう。加えて、今まで知ることができなかった全国的な漂着ごみ現存量を推定することも可能となる。また、本手法を用いてプラスチックごみ堆積量の正確かつ迅速な推定が可能となれば、重点的なごみ回収海岸の選定や、効率的かつ経済的なごみ回収事業の策

定に資することも可能となる。

## 6. 引用文献

- 1) 経済財政運営と改革の基本方針 2017. 内閣府、 [https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2017/2017\\_basicpolicies\\_ja.pdf](https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2017/2017_basicpolicies_ja.pdf)
- 2) Derraik, J.G.B., 2002. The pollution of the marine environmental by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 842–852. [https://doi.org/10.1016/s0025-326x\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/s0025-326x(02)00220-5).
- 3) Kako, S., Isobe, A., Seino, S., Kojima, A., 2010a. Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data. *Journal of Oceanography*, 66, 291–297. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0025-9>.
- 4) Kako, S., Isobe, A., Magome, S., 2010b. Sequential monitoring of beach litter using webcams. *Marine Pollution Bulletin*, 60, 775–779. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.03.009>.
- 5) Kako, S., Isobe, A., Magome, S., 2012. Low altitude remote-sensing method to monitor marine and beach litter of various colors using a balloon equipped with a digital camera. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1156–1162.
- 6) Martin, C., Parkes, S., Zhang, Q., Zhang, X., McCabe, M.F., Duarte, C.M., 2018. Use of unmanned aerial vehicles for efficient beach litter monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 131, 662–673. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.045>.
- 7) Fallati, F., Polidori, A., Salvatore, C., Saponari, C., 2019. Anthropogenic marine debris assessment with unmanned aerial vehicle imagery and deep learning: A case study along the beaches of the Republic of Maldives. *Science of the Total Environment*, 693, 133581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133581>.
- 8) UAVを用いた公共測量マニュアル (平成29年度). 国土地理院、 <https://www.gsi.go.jp/common/000186712.pdf>.
- 9) Chollet, F., 2017. *Deep Learning with Python*. Manning Publications Co., Greenwich, CT, USA; 384 pp.
- 10) Canny, J., 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), 679–698. <https://doi.org/10.1109/tpami.1986.4767851>.
- 11) Kataoka, T., Hinata, H., Kako, S., 2012. A new technique for detecting colored macro plastic debris on beaches using webcam images and CIELUV. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1829–1836. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.06.006>.
- 12) Nakashima, E., Isobe, A., Magome, S., Kako, S., Deki, N., 2011. Using aerial photography and in situ measurements to estimate the quantity of macro-litter on beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 762–769. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.01.006>
- 13) Nakashima, E., Isobe, A., Kako, S., Itai, T., Takahashi, S., 2012. Qualification of toxic metals derived from macroplastic litter on Ookushi beach, Japan. *Environmental Science and Technology*, 46, 10099–10105. <https://doi.org/10.1021/es301362g>.

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

##### 【サブテーマ 1】

- 1) A. ISOBE, S. IWASAKI, K. UCHIDA and T. TOKAI: Nature Communications, 10, 417 (2019) (IF: 12.121) Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. DOI: 10.1038/s41467-019-08316-9
- 2) A. ISOBE, N. T. BUENAVENTURA, S. CHASTAIN, S. CHAVANICH, A. COZAR, M. DELORENZO, P. HAGMANN, H. HINATA, N. KOZLOVSKII, A. L. LUSHER, E. MARTI, Y. MICHIDA, J. MU, M. OHNO, G. POTTER, P. S. ROSS, N. SAGAWA, W. J. SHIM, Y. K. SONG, H. TAKADA, T. TOKAI, T. TORII, K. UCHIDA, K. VASSILLENKO, V. VIYAKARN, W. ZHANG: Marine Pollution Bulletin, 146, 831-837 (2019) (IF: 4.049) An interlaboratory comparison exercise for the determination of microplastics in standard sample bottles, DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.07.033
- 3) B. G. YEO, H. TAKADA, R. YAMASHITA, Y. OKAZAKI, K. UCHIDA, T. TOKAI, K. TANAKA, N. TRENHOLM: Marine Pollution Bulletin, 151, 110806 (2020) (IF: 4.049) PCBs and PBDEs in microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of Japan. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110806>
- 4) H. NAKANO, H. ARAKAWA, T. TOKAI; Marine Pollution Bulletin, 162, 111887 (2021) (IF:4.049) Microplastics on the sea surface of the semi-closed Tokyo Bay. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111887>
- 5) T. TOKAI, K. UCHIDA, M. KURODA, A. ISOBE: Marine Pollution Bulletin, 165, 112111 (2021) (IF:4.049) Mesh selectivity of neuston nets for microplastics. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112111>

##### 【サブテーマ 2】

- 1) R. Nakajima, D.J. Lindsay, M. Tsuchiya, R. Matsui, T. Kitahashi, K. Fujikura and T. Fukushima: MethodsX, 6, 1677–1682, DOI 10.1016/j.mex.2019.07.012 (2019) (IF:1.55)  
A small, stainless-steel sieve optimized for laboratory beaker-based extraction of microplastics from environmental samples.
- 2) R. Nakajima, M. Tsuchiya, D.J. Lindsay, T. Kitahashi, K. Fujikura and T. Fukushima: PeerJ, e7915, DOI 10.7717/peerj.7915 (2019) (IF:2.38)  
A new small device made of glass for separating microplastics from marine and freshwater sediments.
- 3) M. Tsuchiya, H. Nomaki, T. Kitahashi, R. Nakajima and K. Fujikura: 2019. MethodsX, 6, 2662–2668, DOI 10.1016/j.mex.2019.10.027 (2019) (IF:1.55)  
Sediment sampling with a core sampler equipped with aluminum tubes and an onboard processing protocol to avoid plastic contamination.
- 4) 中嶋亮太、山下 麗：海の研究，29(5)，129–151，DOI 10.5928/kaiyou.29.5\_129 (2020)  
海洋マイクロプラスチックの採取・前処理・定量方法

##### 【サブテーマ 3】

- 1) Kako, S., S. Morita, and T. Taneda, Estimation of plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning. Marine Pollution Bulletin, Vol.155, June 2020, pp 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111127>. Impact factor =

4.049

## &lt;査読付論文に準ずる成果発表&gt;

## &lt;その他誌上発表（査読なし）&gt;

## 【サブテーマ1】

- 1) 黒田真央, 内田圭一、樂水 866, 17-23. (2019) 「日本周辺海域の海洋ごみの現状」
- 2) Y. Michida, C. Suchana, C.C. Andrés, H. Pascal, H. Hinata, A. Isobe, P. Kershaw, N. Kozlovskii, D. Li, A. L. Lusher, E. Martí, S. A. Mason, J. Mu, H. Saito, W. J. Shim, A. D. Syakti, H. Takada, R. Thompson, T. Tokai, K. Uchida, K. Vasilenko, J. Wang (2019). Guidelines for Harmonizing Ocean Surface Microplastic Monitoring Methods(海面を漂うマイクロプラスチックのモニタリング手法標準化に向けたガイドライン). Ministry of the Environment Japan, 71頁
- 3) 内田圭一, 環境情報科学 48-3. (2019) 特集「プラスチック資源循環の現状と戦略」, 「沖合域における海洋プラスチック汚染の調査手法の現状と今後の課題」
- 4) 内田圭一, Journal of EICA 24-4. (2019) 特集「マイクロプラスチック汚染」 「海洋プラスチック汚染調査の現状と課題」
- 5) 荒川久幸, 海洋調査, 138, 27-32. (2019) 「人間活動によって発生した粒子が海洋生物へ及ぼす影響について」
- 6) 内田圭一, 子どもと読書, 442, 7-10. (2020) 「船からみたマイクロプラスチックーみんなのできるSDGsー」
- 7) 中野知香 樂水 874, 26-30. (2021) 「東京湾の浮遊マイクロプラスチック」
- 8) 海洋生分解性プラスチック技術編集委員会編集, 株式会社テクノシステム発行「最新の海洋生分解性プラスチックの研究開発動向ープラごみ・MPsの現状と対策ー」 (2021), 「第3節 海洋プラスチックごみの現状と今後の課題 (執筆担当: 内田圭一)」

## 【サブテーマ2】特に記載すべき事項はない

## 【サブテーマ3】

- 1) 加古真一郎, 有働冬采, 森田翔平, 種田哲也, 機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築. 信学技報, vol. 118, no. 197, 2018年8月. pp.51-54.
- 2) 森田翔平, 種田哲也, 加古真一郎, ドローンを用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築. 信学技報, vol. 119, no. 202, 2019年9月, pp.51-54.

## (2) 口頭発表 (学会等)

## 【サブテーマ1】

- 1) 中野知香, 荒川久幸, 内田圭一, 東海 正: 2019年度日仏海洋学会 (2019) 「マイクロプラスチックの前処理手法の検討と既往手法との比較」
- 2) 東海 正, 田中小華, 中野航平, 黒田真央, 内田圭一: 2019年度水産工学会学術講演会(2019) 「マイクロプラスチックに対するニューストンネットとマンタネットの採集性能の比較について」
- 3) 黒田真央, 内田圭一, 東海 正, 向井 徹, 今井圭理, 森井康宏, 八木光晴, 清水健一, 三橋延央, 内山正樹, 東 隆文: 2019年日本水産工学会学術講演会 (2019) 「日本周辺沖合域における海底ごみの現状」
- 4) 鈴木稜平, 内田圭一, 黒田真央, 塩出大輔, 宮本佳則: 2019年度水産工学会学術講演会 (2019) 「ビデオカメラを用いた海洋ごみ調査の基礎的研究」
- 5) T. TOKAI, K. UCHIDA, M. KURODA, T. KITAKADO, H. ARAKAWA, Y. TANAKA, T.

- MIYAZAKI, T. HAYASHI, A. NODA: International Conference of Fisheries Engineering 2019 (2019) “Studies by TUMSAT on marine plastic debris, including micro-plastics”.
- 6) M. KURODA, K. UCHIDA, T. KITAKADO Y. YASUHARA, T. TOKAI, Y. MIYAMOTO: International Conference of Fisheries Engineering 2019 (2019) “Visual survey results of floating marine debris in the offshore area around Japan”.
- 7) 田野入開, 中野知香, 荒川久幸, 横田賢史: 2020年度日本水産学会春季大会(2020) 「底生動物におけるマイクロプラスチックの影響評価へ向けた定量的手法の開発」
- 8) 大沼美里, 山岸進, 荒川久幸: 2019年度日本水産学会秋季大会 (2019) 「マイクロプラスチックの後方散乱の偏光特性について」
- 9) 荒川久幸: 海洋調査協会技術発表特別講演 (2019) 「人間活動によって発生した粒子が海洋生物へ及ぼす影響について」
- 10) Y. WANG, H. NAKANO, H. ARAKAWA: JpGU (2020) “Microplastic concentration in sediments of Tokyo Bay”.
- 11) H. NAKANO, R. K. GURES, Y. TANAKA, H. ARAKAWA, M. KURODA, K. UCHIDA, T. AIKAWA, T. HAYASHI, T. TOKAI: JpGU (2020) “Detection of microplastics less than 330  $\mu\text{m}$  using  $\mu\text{FTIR}$ ”.
- 12) 中野知香, 荒川久幸: JpGU (2020) 「東京湾表層のマイクロプラスチック」
- 13) 王業浩, 中野知香, 荒川久幸: 2020年度日仏海洋学会(2020) 「東京湾の海底堆積物のマイクロプラスチック濃度」
- 14) R.K. GURSES, T. OMURA, T. AKIBA, Y. TANAKA: 2020年度日仏海洋学会 (2020) “Microplastic ingestion capacity of *Daphnia magna* in different food conditions”
- 15) 田野入開, 倉前鷹彦, 中野知香, 荒川久幸, 横田賢史: 2021年度日本水産学会春季大会 (2021) 「鶴見川河口干潟におけるマイクロプラスチックの生物濃縮の確認」
- 16) 田野入開, 中野知香, 荒川久幸, 横田賢史: 2021年度日本水産学会春季大会 (2021) 「鶴見川河口干潟におけるマイクロプラスチックの粒子形状評価」
- 17) H. XU, H. NAKANO, T. TOKAI, H. ARAKAWA: JpGU (2021) “ A trial of small microplastics collection by neuston net”
- 18) M. Celik, H. Nakano, A. Isobe, H. Arakawa : 2021年度日仏海洋学会 (2021) “Carbonyl index of microplastics around Japan sea area”.
- 19) Y. Cheng, H. Nakano, H. Arakawa : 2021年度日仏海洋学会 (2021) “New detection method of microplastics by coumarin 6 staining”.
- 20) 田野入開, 津山透, 内田結那, 荒川久幸, 横田賢史: 2021年度日仏海洋学会 (2021) 「巻貝 (*Reticunassa festiba*)におけるマイクロプラスチック取り込みの国内初観測例: 特性やリスクの可能性について」.
- 21) 山崎 涼, 尤 鑫星, 胡 夫祥, 塩出 大輔, 東海 正: 日本水産工学会2021年度学術講演会 (2021) 「海洋マイクロプラスチック調査用採集具周りの流れの可視化と濾水率の推定」.
- 22) 黒田 真央, 東海 正, 内田 圭一, 宮本 佳則: 日本水産工学会2021年度学術講演会 (2021) 「繊維状マイクロプラスチックに対するニューズトンネットの網目選択性」.
- 23) 黒田 真央, 東海 正, 内田 圭一, 宮本 佳則: 日本水産工学会2021年度学術講演会 (2021) 「複数目合(0.350 mm、0.200 mm、0.100 mm)の比較曳網実験に基づいたマイクロプラスチックに対するニューズトンネットの網目選択性の推定」.

## 【サブテーマ2】

- 1) 藤倉克則: 日本光学会年次学術講演会 (大阪大学) (2019) 「海のSDGs:プラスチックと海洋保護区」
- 2) 北橋 倫, 中嶋亮太, 野牧秀隆, 小栗一将, 土屋正史, 千葉早苗, 藤倉克則: 第28回海洋工学

- シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会 (2020)  
「海洋マイクロプラスチックの調査・分析手法」
- 3) 北橋 倫、土屋正史、中嶋亮太、松井理恵、小栗一将、前田洋作、千葉早苗、藤倉克則：海と地球のシンポジウム2020 (2020)  
「超深海域へのマイクロプラスチックの集積」
  - 4) 北橋 倫、土屋正史、中嶋亮太、松井理恵、小栗一将、前田洋作、千葉早苗、藤倉克則：第55回日本水環境学会 (2021)  
「深海底堆積物中のマイクロプラスチックの分布」
  - 5) 北橋 倫、土屋正史、中嶋亮太、松井理恵、小栗一将、川村喜一郎、前田洋作、千葉早苗、藤倉克則：日本地球惑星科学連合大会2021 (2021)  
「深海底堆積物中のマイクロプラスチックの分布」
  - 6) 小菅溪太、中嶋亮太、土屋正史、野牧秀隆、北橋 倫、菊池知彦、下出信次：日本プランクトン学会・ベントス学会合同学会 (2020)  
「相模湾におけるマイクロプラスチックのサイズと材料組成の季節変化」
  - 7) 中嶋亮太、土屋正史、北橋 倫、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦：第53回日本水環境学会 (2019)  
「海底堆積物からマイクロプラスチックを分離するための新しい器具の考案」
  - 8) 中嶋亮太、北橋 倫、長野由梨子、磯部紀之、美山 透、青木邦弘、小栗一将、生田哲郎、吉田尊雄、Parker Heather、前田洋作、山内拓也、川村喜一郎、鈴川真季、土屋正史、矢吹彬憲：日本地球惑星科学連合2020年大会 (2020)  
「台風通過に伴うマイクロプラスチック濃度の変化—相模湾におけるケーススタディ」
  - 9) 中嶋亮太、美山 透、北橋倫、長野由梨子、磯部紀之、小栗一将、生田哲朗、吉田尊雄、Heather Ritchie、前田洋作、山内拓也、川村喜一郎、鈴川真季、青木邦弘、土屋正史、矢吹彬憲：2020年日本海洋学会秋季大会 (2020)  
「災害による海洋ごみの大量流出台風通過に伴うマイクロプラスチックの流出を例に」
  - 10) 小栗一将、土屋正史、川村喜一郎、村山雅史、矢吹彬憲、前田洋作、野牧秀隆、川口慎介、中村明夢、千葉早苗：日本地球惑星科学連合2020年大会 (2020)  
「相模湾、日本海溝プレート三重会合点、伊豆・小笠原海溝および太平洋深海平原の表層堆積物の特徴:マイクロプラスチックが深海堆積物に埋没する過程の理解にむけて」
  - 11) 土屋正史、北橋 倫、平陽介、斎藤 仁志、中嶋亮太、Lindsay DJ、藤倉克則、福島朋彦：第54回水環境学会 (2020)  
「ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出法開発」
  - 12) 土屋正史、北橋 倫、小栗一将、中嶋亮太、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦、平陽介、斎藤 仁志：第55回日本水環境学会 (2021)  
「ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出法開発とその有用性」
  - 13) 土屋正史、北橋 倫、平陽介、斎藤 仁志、小栗一将、中嶋亮太、Lindsay, DJ、藤倉克則、福島朋彦：日本地球惑星科学連合大会2021 (2021)  
「ナイルレッド染色したマイクロプラスチックの自動検出」
  - 14) 矢吹彬憲、土屋正史、中嶋亮太、北橋 倫、生田哲朗、小栗一将、吉田尊雄、長野由梨子、磯部紀之、Heather Ritchie-Parker、前田洋作、川村喜一郎、鈴川真季、中田晴彦、山内拓也、森岡美樹；海と地球のシンポジウム2020 (2020)  
「YK19-11 航海概要：海洋汚染物質の実態把握と海洋生態系への影響評価」

### 【サブテーマ3】

- 1) 加古真一郎、有働冬采、森田翔平、種田哲也: 人工知能と知識処理研究会 電子情報通信学会

- (2018)「機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築」.
- 2) 加古真一郎、森田翔平、種田哲也、磯辺篤彦: 海洋プラスチック官民イノベーション協力体制意見交換会(2019)「ドローンを用いた漂着プラスチックごみ監視技術の開発
  - 3) 森田翔平・種田哲也・加古真一郎: 人工知能と知識処理研究会 電子情報通信学会 (2019)「ドローンを用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築」
  - 4) 森田翔平・種田哲也・加古真一郎: 日本海洋学会秋季大会 日本海洋学会 (2019)「ドローンを用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築」
  - 5) 森田翔平・種田哲也・加古真一郎: 水産海洋学会・日本海洋学会九州沖縄地区合同シンポジウム(2019)「ドローンと機械学習を用いた海岸漂着ごみ定量化手法の構築」
  - 6) Kako, S., S. Morita, and T. Taneda: Counter MEASURE for plastic free rivers (2020) “Estimation of plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning”
  - 7) 加古真一郎・森田翔平・種田哲也: JpGU-AGU Joint Meeting 2020「ドローンとディープラーニングを用いた海岸漂着プラスチックごみ定量化手法の構築」
  - 8) 加古真一郎・種田哲也・森田翔平・西部留奈: 令和2年度海洋プラスチックごみ学術シンポジウム (2021)「ドローンとディープラーニングを用いた海岸漂着プラスチックごみ定量化手法の構築」

### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

#### 【サブテーマ1】

- 1) 内田圭一，鹿児島環境未来館，2019「海はごみ箱?～知られざる大海原の魅力とプカプカ漂うプラスチックのおはなし～」にて講演
- 2) 東海 正，気仙沼市・東京海洋大学連携事業“海と生きる”連続水産セミナー5thシーズン第5回講演会，2019，「海洋プラスチックごみに関する調査研究の現状と課題～マイクロプラスチックについて分かっていること，まだ分からないこと」
- 3) 東海 正，天王洲キャナルフェス2019こども大学、「海についてのたのしく学ぼう」2019年7月
- 4) 東海 正，天王洲の水辺の勉強会，2019，「海洋プラスチックごみを減らすために」
- 5) 東海 正，ごみ減量サポーター養成講座（第1回）焼津市小川公民館大集会室，2019，「海洋プラスチックごみの現状～調査研究で分かってきたこと」
- 6) 東海 正，宮城県環境衛生技術職員研修，2020「海洋プラスチックごみの現状と対策～調査研究から分かってきたこと」
- 7) 内田圭一，東京都小中学校環境教育研究会 総会@杉並区立浜田山小学校，2019，「海洋におけるプラスチックごみ問題について」
- 8) 内田圭一，第763回仏教文化講座，2019，「日本周辺海域の海洋ごみの実態とそれを取り巻く情勢」
- 9) 内田圭一，SEAFDEC Training Department@Thailand，2019，”Lecture on Floating marine debris survey”
- 10) 内田圭一，かわさき市民アカデミー，2019，「世界が注目する海洋プラスチックごみ問題—日本の周辺海域の実態は—」
- 11) 荒川久幸，いわき海星高校，2019，「海洋環境変化と生物への影響」
- 12) 中野知香，東京海洋大学，2019，筑波大学附属駒場高等学校学生への説明会
- 13) 荒川久幸，宇田道隆資料保存会調査検討会（東京海洋大学），2019，「海洋プラスチックに関する問題」
- 14) 内田圭一，気仙沼市立松岩小学校（2020）講話「海洋プラスチック問題の現状」4-6年生（170名）対象、2020年10月30日
- 15) 東京海洋大学、日本セーリング連盟 2020年発行 海洋マイクロプラスチックに関する環境学

習教材「こども達の輝く未来に」パンフレット<https://www.kaiyodai.ac.jp/overview/img/web-m120201105light.pdf> 及び Youtube動画<https://www.youtube.com/watch?v=EwLEdCOoKfl> を黒田真央、内田圭一が編集、執筆。

- 16) 中野知香, 筑波大学付属駒場高等学校SSH講演, 2021, 「海洋プラスチックごみ問題について」
- 17) 内田圭一、港区3R推進行動会議（みんなと3r）、【みんなと3R！知っ得情報：海洋プラスチックごみ問題啓発リレー①～④】、2021年2月5日、12日、19日、26日
- 18) 東海 正、令和2年度海洋プラスチックごみ学術シンポジウム2020、セッションモデレータ・セッションA「分布把握と予測」及びパネリスト「セッションテーマに関する総括及び今後の展望」、[http://www.env.go.jp/water/post\\_85.html](http://www.env.go.jp/water/post_85.html)、2021年3月3日
- 19) 東海 正、宗像国際環境会議海洋プラスチック問題政策ワークショップ、2021、「我が国における海洋プラスチックごみの現状と回収に向けて－調査研究から分かってきたこと」、2021年6月5日
- 20) 東海 正、2021、エコキャップと連動したミニティア等の小型プラ容器のアップサイクルプロジェクトキックオフオンラインミーティング「海洋プラスチックの現状」、2021年6月24日
- 21) 内田圭一、横須賀市市民大学、2021、海洋プラスチックごみ、2021年6月27日

## 【サブテーマ2】

- 1) 第66回GODACセミナー「海を漂うマイクロプラスチック」（主催：GODAC、聴講者数124名、2018年8月12日、中嶋亮太）にて講演
- 2) 第66回GODACセミナー「海を漂うマイクロプラスチック」について、講演内容を琉球新報が紹介（2018年8月17日、中嶋亮太）
- 3) NPO法人チームくじら号主催の「うみの環境しらべ隊～鎌倉の海岸・秋篇」（主催：NPO法人チームくじら号）にて講演：聴講者数約20名（2018年11月10日、中嶋亮太）。
- 4) 第68回GODACセミナー「海にひそむプラスチックごみとその影響」（主催：GODAC、聴講者数68名、2019年2月9日、土屋正史）にて講演しました。
- 5) 第6回全国海洋教育サミットにて海洋プラスチックについて講演（2019年2月9日、藤倉克則）
- 6) うみコン2019 海洋研究開発機構（JAMSTEC）ブース内で開催されたミニセミナーで、「海に広がるプラスチックの暗黒面（ダークサイド）」について講演：聴講者数約15名（2019年2月15日、中嶋亮太）
- 7) 三鷹市の環境講座にて「海洋プラスチックごみの実態と海洋生物への影響」について講演：聴講者数55名（2019年3月1日、土屋正史）
- 8) 第16回 地球環境シリーズ講演会「脱プラスチックオーシャン ～海洋科学者と一緒に考えよう～」（主催：JAMSTEC地球環境部門、2019年7月30日、新橋、ヤクルトホール、聴講者数482名）にて講演（中嶋亮太、北橋 倫、藤倉克則、土屋正史）
- 9) 日本政府のfacebookアカウントにて「JAMSTECの海洋プラスチック研究の取り組み」（日本政府、2019年7月5日）が紹介
- 10) 船の科学館「海の学び舎・わくわくキッズパーク：海に広がるプラスチックごみって、どんなもの？」（主催：船の科学館、2019年7月20日、品川区、船の科学館）講演・ミニ実験（土屋正史）
- 11) 書籍出版『海洋プラスチック汚染 プラなし博士、ゴミを語る』（2019年9月24日、中嶋亮太）
- 12) 第80回旅の学校にて、「私たちにできることは何？海のプラごみ教室」で講演：聴講者数約50名（2019年12月5日、中嶋亮太）
- 13) 第27回木原記念こども科学賞小さい実験「海岸の砂浜からマイクロプラスチックを見つけようー海の生き物は困っているぞ！！ー」（主催：木原記念横浜生命科学振興財団、2019年12月8日、北橋倫）
- 14) 神保町ブックセンターにて、『海洋プラスチック汚染 プラなし博士、ゴミを語る』につい

- てトークイベント開催（2020年2月27日、中嶋亮太）
- 15) 横須賀市総合福祉会館「プログラミングで海のSDGs！」にて、「海洋科学者と一緒に考えよう！海にただよ海洋プラスチックごみの話」と題して講演：聴講者数約100名（2020年9月20日、中嶋亮太）
  - 16) 福島中央テレビにて、福島県内の子供たちを対象に海洋ごみ問題について紹介（2020年10月4日、藤倉克則）
  - 17) 第1回海洋プラスチック研究会（日本工学アカデミー）にて講演（2020年10月7日、藤倉克則）
  - 18) 全国漁業共同組合連合会（全漁連女性部が組織されている都道府県33会員向け。聴講者10名）にて、「プラスチックごみについて考えよう—私たちの生活から見えるもの—」講演（2020年10月8日、中嶋亮太）
  - 19) 創価大学にて「「プラなし」博士が語る、地球規模プラスチック汚染の実態～問題を乗り越えていくための生活のヒント～」講演：聴講者数126名（2020年10月16日、中嶋亮太）
  - 20) JASIS2020オープンソリューションフォーラムにて、「海洋プラスチック問題に科学技術で挑む」基調講演：聴講者数65名（2020年11月11日、中嶋亮太）
  - 21) 先端材料技術協会 第3回技術情報交換会にて、「地球規模プラスチック汚染の現状とこれから」講演（2020年12月4日、中嶋亮太）
  - 22) 東京大学生産技術研究所にて「深海の生きものと海洋プラスチック、そしてSDGs」講演（2020年12月7日、藤倉克則）
  - 23) 未来屋書店北戸田店にて、著書『海洋プラスチック汚染「プラなし」博士、ごみを語る』について講演：聴講者数約20名（2020年12月12日、中嶋亮太）
  - 24) 朝日新聞GLOBE+ オンラインイベントにて、海洋プラスチックごみの実態と問題解決のために必要なこと、JAMSTECの海洋プラスチック研究の取り組みについて講演（2021年4月15日、中嶋亮太）
  - 25) 【予定】土屋正史、（2021）藤原ナチュラルヒストリー振興財団シンポジウムにて、「海洋マイクロプラスチック汚染問題にどう取り組むか」と題して公演予定（2021年10月24日、土屋正史）

### 【サブテーマ3】

- 1) 「ドローンを活用した漂着ごみの新たな観測技術開発」：北海道苫小牧市，埼玉県環境部，千葉県市川市，富山県黒部市，富山県射水市，福岡県宗像市，宮崎県新富町，鹿児島県南さつま市との協働（南さつま市以外は中止），2020年.
- 2) 「長崎県生活協同組合連合会第49回生協大会講演会」講師，2019年.
- 3) 「江ノ島の海岸清掃活動」，NPO法人「海さくら」との協働した清掃活動，2019年

## （4）マスコミ等への公表・報道等＞

### 【サブテーマ1】

- 1) Newton（2019年10月）「海を汚染するマイクロプラスチック-2050年の海では、魚よりプラスチックの方が多くなる？」
- 2) KAIUN（総合物流情報誌 海運）No.1104、50-53頁（2019年9月、一般社団法人日本海運集会所特別企画Q&Aで読む「本当に知ってますか？海洋プラスチックごみ問題」）
- 3) 港区資料（監修）「海洋プラスチックについて考えてみよう」
- 4) 御堂さん、15-17頁、（2019年8月、本願寺津村別院「海を守るため」「大海の真ただ中を漂う微細なプラスチックごみ」）
- 5) 日経新聞（2020年4月11日、「今を読み解く-海洋プラごみが問う未来~市民の意識変革が必要

に」) <https://style.nikkei.com/article/DGXXKZO57917330Q0A410C2MY5000/>

### 【サブテーマ2】

- 1) 日本電気株式会社プレスリリース (2020年7月7日、  
[https://jpn.nec.com/press/202007/20200703\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202007/20200703_01.html) 「海洋研究開発機構とともに、AIを活用した海洋マイクロプラスチック計測システムを開発～自動検出・分析手法の確立を目指す海洋研究開発機構の研究開発を支援～」)

### 【サブテーマ3】

- 1) 「ドローンで漂着ごみ調査 鹿児島大と南さつま市、効率的な回収探る」, 南日本新聞, 2020年10月14日付.
- 2) 「ドローンとAIによる海岸漂着ごみの定量化」, NHK (全国放送) 「にっぽんぐるり」, 2019年10月24日付.
- 3) 「ドローンによる海岸漂着ごみ定量化の試み」, KKB 「Jチャンプラス」, 2019年7月30日付.
- 4) 「ドローンで海ごみを観測」, 環境新聞, 2019年4月24日付.
- 5) 「ドローンを使い海洋プラ監視, 環境省提案, 漁業者と回収」, 日刊水産経済新聞, 2019年4月23日付.

### (5) 本研究費の研究成果による受賞

- 1) 内田圭一 日中韓環境協力功労者表彰, 環境省, 2019年11月24日,
- 2) M. KURODA, K. UCHIDA, T. KITAKADO, Y. YASUHARA, T. TOKAI, Y. MIYAMOTO, Best poster award, International Conference on Fisheries Engineering 2019, Visual survey results of floating marine debris in the offshore area around Japan, September 2019.

## IV. 英文Abstract

**Comprehensive Studies on Oceanic Transport, Environmental Risk, and Advanced Monitoring of Marine Plastic Debris**

Principal Investigator: Tadashi TOKAI

Institution: Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo,  
JAPAN

Tel: 81-3-5463-0474 / Fax:81-3-5463-0399

E-mail: tokai@kaiyodai.ac.jp

Cooperated by: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kagoshima University.

[Abstract]

Key Words: Marine plastic debris, Monitoring, Microplastics, Measurement methods, Floating debris, Sediment, Drifting debris, Upgrading, UAV, Deep learning, Image processing

Recently, there has been concern regarding marine litter, particularly marine plastic debris (MPD) and microplastics (MPs). However, scientific data and information concerning MPD are still insufficient. Until now, MP surveys have primarily relied on neuston net sampling, and thus have focused on MPs floating on the sea surface, particularly those larger than the net mesh size. Besides, there is no efficient survey method to estimate the exact amount of MPD accumulated on beaches and reefs, where people cannot approach. To solve these issues regarding MPD including MPs, we have developed new monitoring and measurement methods for collecting and detecting MPs of finer size floating on the sea surface and in the water column of the ocean (Subtheme 1) for detecting MPs in marine sediments (Subtheme 2) and estimating volumes of MPD accumulated on the coast (Subtheme 3).

Subtheme 1 developed a method for collecting fine MPs distributed on the sea surface to a depth of 800 m using a multiple open/close net and a deep-sea pump, as well as a pretreatment process for the collected specimens and an efficient microscopic Fourier transform infrared operation method for detecting fine MPs. Furthermore, the effectiveness of coumarin as a fluorescence index was clarified in detection using optical characteristics of MPs, and a detection method based on polarization parameters of MPs was suggested to be effective for detecting MPs in water.

Subtheme 2 successfully collected samples from deep seafloor using a newly developed aluminum tube device for push and multiple corers and a density separator and concentrator to simplify the pretreatment process for MPs detection in sediment. Notably, this subtheme found MPs in sediment samples of the trench-trench-trench type triple junction in the Japan Trench and suggested that MPs may have been supplied to the trench via sediment flow from shallower waters close to the coastlines of Japan. In addition, an automatic MPs detection method was developed to clarify particulate or fibrous material and measure the number and length of MPs.

Subtheme 3 proposed and developed a method for estimating MPD volumes on beaches by combining unmanned aerial vehicle surveys and image processing based on deep learning. This method can be used to improve the efficiency of MPD beach surveys and identify beaches that require preferential cleaning.