

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 海洋プラスチックごみに係る動態・環境影響の体系的解明と計測手法の高度化に係る研究

(J P M E E R F 1 8 S 2 0 2 0 0)

平成30年度～令和2年度(一部令和3年まで延長)

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

〈戦略研究プロジェクト代表機関〉

国立大学法人 九州大学

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	3
1. はじめに（研究背景等）	3
2. 研究開発目的	4
3. 研究目標	4
4. 研究開発内容	5
5. 研究成果	6
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	17
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表について	
7. 国際共同研究等の状況	19
8. 研究者略歴	20
II. 英文Abstract	21

I. 成果の概要

プロジェクト名 SII-2 海洋プラスチックごみに係る動態・環境影響の体系的解明と計測手法の高度化に係る研究

プロジェクトリーダー 磯辺 篤彦 (国立大学法人九州大学応用力学研究所教授)

研究実施期間 平成30～令和2年度

但し、テーマ1については新型コロナウイルスの影響のため、令和4年3月まで延長、テーマ3については令和3年5月まで延長

研究経費

(千円)

	契約額
平成30年度合計額	89,995
テーマ1	29,995
テーマ2	30,000
テーマ3	30,000
令和元年度合計額	99,985
テーマ1	37,026
テーマ2	32,006
テーマ3	30,953
令和2年度合計額	99,995
テーマ1	36,309
テーマ2	32,373
テーマ3	31,313
令和3年度合計額	
テーマ1	
テーマ2	
テーマ3	
合計額	289,975

研究体制

(テーマ1) 海洋プラスチックごみの沿岸～地球規模で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 (国立大学法人九州大学) (JPMEERF18S20210)

(サブテーマ1)

地球規模でのプラスチック循環モデルの構築と将来予測

(国立大学法人九州大学)

(サブテーマ2)

海洋プラスチックごみの大洋内及び大洋間動態の物理過程のモデル化

(国立大学法人東京大学)

(サブテーマ3)

海洋プラスチックゴミの沿岸海洋における動態解明とモデル化

(国立大学法人愛媛大学)

(サブテーマ4)

海洋プラスチックごみの循環モデルに要するパラメタリゼーションの研究
(国立大学法人東京大学)

(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 (国立大学法人東京農工大学) (JPMEERF18S20220)

(サブテーマ1) 海洋プラスチック及びその含有化学物質の海洋環境における分布と動態

(国立大学法人 東京農工大学)

(サブテーマ2) マイクロプラスチックの生物影響評価

(国立大学法人 九州大学)

(サブテーマ3) 海洋プラスチック (マクロからマイクロまで) の海洋生態系への影響評価

(国立大学法人 北海道大学)

(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 (国立大学法人東京海洋大学) (JPMEERF18S20230)

(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

(国立大学法人東京海洋大学)

(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)

(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)

研究協力機関

なし

本研究のキーワード 海洋プラスチック、粒子追跡モデル、粒子毒性、残留性有機汚染物質、内分泌攪乱化学物質、添加剤、ベクター効果、遺伝子変動、海底堆積物、漂着ごみ

1. はじめに（研究背景等）

海洋プラスチックごみによる海洋生態系への影響が国際的に懸念されており、海洋ごみ問題は国際社会に課せられた地球的課題となっている。2016年1月の世界経済フォーラム（ダボス会議）において、毎年少なくとも800万トン分のプラスチックが海に流出していること、2050年までに海洋中に存在するプラスチックの量が魚の量を上回る試算になること等が報告された。また、ダボス会議に先立ち開催された2015年G7エルマウ・サミットの首脳宣言では、生態系への影響等が懸念されるマイクロプラスチックを含む海洋ごみが世界的課題であるとの認識が共有され、同附属書「海洋ごみ問題に対処するためのG7行動計画」において、G7各国の優先取組課題の一つとして「海洋ごみ問題に取り組むための追加的な研究構想・戦略に対する支援及び要請」が挙げられた。続く2016年のG7伊勢志摩サミットや富山環境大臣会合、2017年6月のボローニャ環境大臣会合においても、上述のG7行動計画及びその効率的な実施の重要性等について再確認された。さらに、2017年7月に開催されたG20ハンブルクサミットや同年6月の国連海洋会議等においても、海洋ごみの重要性やその調査研究の必要性が指摘されたところである。

我が国における海洋プラスチック汚染研究は、いくつかの先駆的研究を基盤としつつ、環境省環境研究総合推進費（【4-1502】沿岸から大洋を漂流するマイクロプラスチックの動態解明と環境リスク評価）によって初めて総合的な形で推進された。その中では、インターナショナルペレットワッチ(IPW)によって集積されたマイクロプラスチックを分析することで、マイクロプラスチックによる有機汚染物質の輸送実態を明らかにした。東京湾で採集されたカタクチイワシの8割にマイクロプラスチックの含有を確認し、沿岸海洋生態系への侵入が進行している事実を確認した。海洋底泥における採集にも取り組み、海洋表層からの沈降を示唆する微細マイクロプラスチックの卓越を見出した。海岸から海洋への流出過程(交換時間)を、現地実験を繰り返すことで定量化した。また、生活圏に最も遠い南極海にもマイクロプラスチックが漂流する事実を世界で初めて確認し、海洋プラスチック汚染が全地球の海洋で進みつつある実態を世界に示した。海洋での観測結果を再現するマイクロプラスチックの輸送シミュレーションの開発にも先鞭をつけている。物理と環境化学の研究者が協同した一連の研究プロジェクトは、我が国の海洋プラスチック汚染研究が世界をリードしていることを十分に示すものであった。

しかし、同時に先行研究プロジェクト【4-1502】は、海洋プラスチック汚染に関して新たにに取り組むべき課題を抽出するものであった。ここで、マイクロプラスチックをはじめとした海洋プラスチックごみ（以下、大型のプラスチックごみも含める）について、三つの研究課題を挙げたい。一つは、「海洋プラスチック循環モデル（シミュレーション）」の確立である。海洋プラスチックごみは、海流や波浪に運ばれるだけではない。微細片にまで破碎する過程、海岸との交換過程、生物に取り込まれる過程、生物付着によって（あるいはデトリタスに含まれることで）海底に沈降する過程、そして高緯度では海水に取り込まれる過程等で、海洋における浮遊濃度が決まる。これら諸過程を通じた海洋プラスチック循環（以下単に「海洋プラスチック循環」と呼ぶ）を総合的・有機的に含むモデリングが、海洋プラスチック汚染の現況再現や将来予測には必須であろう。二つ目は、海洋プラスチックごみによる海洋生態系への影響評価である。先行研究プロジェクト【4-1502】によって、海洋プラスチックごみによる有機汚染物質の輸送過程の一端が明らかになりつつある。しかし、これが各生物種や生態系全体に与える影響等に関する科学的知見は国際的に不足しているのが現状である。本研究プロジェクトに与えられた期間は三年間と限られてはいるものの、低次栄養段階生物生態系から稚仔魚に至る影響評価や、あるいは海鳥等の大型生物への影響評価を見据えた包括的な研究プロジェクトを推進させる必要がある。三つ目はモニタリング技術・手法の高度化である。海岸に漂着・散乱する海洋プラスチックごみの現存量把握のためのモニタリングに加え、海洋に漂流するマイクロプラスチックや海底に堆積するマイクロプラスチックのモニタリングについては、まだ方法論が確立していない状況にある。さらに注視すべきは、既往研究では技術的限界から観測が困難であった数百マイクロメートル以下のマイクロプラスチックやナノプラスチック（以下「極微細片」という。）の現存量評価である。海洋プラスチックごみ（漂着・漂流・海底ごみ）のサンプリング・分析等の計測技術は必ずしも高度化されていないのが現状であり、上

述の科学的知見の集積を深化・加速化させていく上での律速となっている。大型海岸ごみやマイクロプラスチックのモニタリングの自動化や、さらに極微細片の計量技術の確立は、今後の海洋プラスチック汚染研究の高度化・加速化に必須の技術的挑戦である。

2. 研究開発目的

本研究プロジェクトは、海洋プラスチックごみの海洋中での動態及び海洋生物への影響に関する科学的知見を体系的かつ総合的に集積するとともに、現在課題となっている海洋プラスチックごみの各種モニタリング手法の高度化を図ることで海洋プラスチックごみに関する科学的知見の集積を加速化させることを目的とする。得られた知見・成果は、国内における各種海洋ごみ施策・対策に有効に活用するのみならず、様々な国際的な枠組み等を通じて、海洋プラスチックごみの主要排出国である東アジア・東南アジア地域をはじめ世界各国・国際機関に積極的に情報発信・普及啓発を行う。無用の社会不安を起ささないようNPO/NGOや報道機関とも連携を図りつつ、これらの活動を通じて、地球規模での海洋プラスチックごみの実態把握や対策の推進に貢献する。

3. 研究目標

プロジェクト全体目標	<p>全球プラスチック循環モデルを構築し、二世帯程度（～50年程度）将来の全球（極域を含む全海洋）でのマイクロプラスチックの浮遊濃度を予測する。これを参照しつつ、様々なサイズ・存在特性（漂着ごみ・漂流ごみ・海底ごみ）の海洋プラスチックごみ中の化学物質の濃度・存在特性及び吸脱着・溶出特性を明らかにする。さらに、プラスチックを媒介した有害化学物質の生物への移行・蓄積の規模を明らかにし、生物影響を評価する。モデルの精度検証や今後のモニタリングの高度化・加速化のため、海洋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。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マイクロプラスチックの検出及び計測のための基礎技術を確立する。</p>
テーマ1	海洋プラスチックごみの沿岸～地球規模で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
テーマリーダー/ 所属機関	磯辺篤彦 / 国立大学法人九州大学
目標	<p>海洋プラスチックごみ（主にマイクロプラスチックを扱う）の数値輸送モデル（シミュレーション）を構築する。モデルは、廃プラスチックの海域負荷量を文献値で与え、これらが海岸で破碎され微細片が生成される過程や、海流や波浪による物理的な輸送に加えて、海岸との交換や、生物付着に伴う沈降等の海洋プラスチック循環の諸過程を組み込んでいく。これらモデル化のため、生物への取り込み速度や下層への沈降率など、海洋プラスチック循環の諸過程を定量化する循環素過程のプロセス研究を行う。</p>
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
テーマリーダー/ 所属機関	高田秀重 / 国立大学法人東京農工大学

目標	生物中のプラスチックおよびそれらに吸着・含有される有害化学物質の精密かつ網羅的な分析、摂食実験および野外での観測を行い、海洋プラスチックの生物および生態系への影響を評価する。
----	---

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
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	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。

4. 研究開発内容

本研究プロジェクトは、海洋プラスチックごみの沿岸～地球規模での海洋中の分布状況及び動態に関する実態把握及び予測を行う数値モデリング（研究テーマ1）、海洋プラスチックごみ及びそれに含まれる化学物質による生物影響評価（研究テーマ2）、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に関する研究（研究テーマ3）の3つの研究テーマにより構成された。本研究プロジェクトは、これらの研究テーマを相互に関連させ、あるいは成果を相互に活用しつつ、有機的かつ効果的に研究を実施することによりプロジェクト全体としての成果の最大化を図り、海洋プラスチック汚染がもたらす将来の地球規模の環境の現状を捉えて将来を予測するものであり、海洋プラスチックごみに係る動態・環境影響を体系的に解明するというビジョンを持った研究プロジェクトである。本研究プロジェクトでは、現状と将来の海洋プラスチックごみの存在状況や輸送量を明らかにし、特にマイクロプラスチックによる低次から高次の生態系を視野に入れた生物影響を検証した。海洋プラスチックごみの現存量やその将来予測には、海流や波浪による物理的な輸送系だけではなく、生物付着に伴う沈降などを含む新たな「海洋プラスチック循環論」の構築が必須である。本研究プロジェクトで取り組む海洋生態系に対する影響評価は、本研究プロジェクトが確立する海洋プラスチック循環論に裏打ちされた浮遊密度の知見を積極的に取り入れた。

本研究プロジェクトのうち、研究テーマ1は海洋プラスチックごみの数値輸送モデル（シミュレーション）の構築を行った。モデルは、廃プラスチックの海域負荷量を文献値で与え、これらが海岸で破碎され微細片が生成される過程や、海流や波浪による物理的な輸送に加えて、海岸との交換や、生物付着に伴う沈降等の海洋プラスチック循環の諸過程を組み込んでいく。そのために、例えば生物への取り込み速度や下層への沈降率など、海洋プラスチック循環の諸過程をパラメタライズする循環素過程の研究を行った。研究テーマ1が明らかにするマイクロプラスチックの現存量や将来量の見積もりは、研究テーマ2に供された。研究テーマ2では、小魚や節足動物等の比較的低次の生態系から、海鳥等の高次生態系まで幅広い生態系を対象とした。なお、実海域の想定しにくい高濃度での曝露実験は、実海域環境との関係性の観点からの考察が困難であり、科学的意義を見出しにくいことに加え、海洋プラスチック汚染に関する昨今の関心の高まりを鑑み、過度の社会不安をもたらす可能性があることに十分留意する必要がある。

本研究プロジェクトは、研究テーマ1と2が密接に連携を図ることで、より確からしい海洋プラスチ

ック汚染の将来像を、学術分野のみならず行政や社会に向けて提示・発信することが可能となるが、その一方で、海洋循環モデルの精度検証には十分な観測データが必要不可欠である。本研究課題では、すでに成果を上げている推進費4-1502や、並行している環境省沖合海ゴミ調査結果が得たマイクロプラスチックの浮遊密度分布を活用することで、研究テーマ1のモデルについて当座の精度検証を行うことができる。それでも、上記の研究プロジェクトでは、海洋表層(>1 m程度)でしか、マイクロプラスチックのモニタリングをしていない。そこで、研究テーマ3では、モデルの精度検証を多様な海洋セクターで可能にすべく、表層下や海底質にまで対象を広げた、高度化された海洋プラスチックごみのモニタリングを確立させた。さらに、研究テーマ3ではこれまでの海洋プラスチック汚染研究では観測が困難であった極微細片を観測する技術開発に取り組んだ。浮遊極微細片と海底質に含有されるものを対象とした海洋プラスチックごみの分布を明らかにすることで、研究テーマ1に新たな計算対象を、研究テーマ2には生物影響の新たなパスの可能性を与えるものとなった。

本研究プロジェクトは全球的な海洋プラスチック汚染の解明を目指しており、例えば太平洋の特定のゴミ集積海域など研究対象海域を限定することはしないが、実際の調査フィールドとしては、アクセスを鑑みて日本周辺海域(沿岸域を含む)を中心とした西太平洋域を主に取り扱った。研究テーマ3の重点調査海域は、研究テーマ1のモデル結果を見て適宜設定された。なお、研究の普遍性を担保するため、特定の種類の海洋プラスチックごみを選択的に扱うことはせず、その起源は生活ごみから漁具など多様な種類を対象とした。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本プロジェクトの主だった成果は以下のとおりである。

世界初となるマイクロプラスチック浮遊量将来予測を行い、2019年にNature Communications誌に発表した。そこでは、太平洋における浮遊マイクロプラスチックの粒子輸送モデルを構築し、夏季の日本周辺や北太平洋中央部でマイクロプラスチック浮遊量が多くなること、廃棄プラスチックの海洋流出がこのまま増え続けた場合、これらの海域では2030年までに海洋上層での重量濃度が現在の約2倍になること、さらに2060年までには約4倍となることが示された(図1)。特に2060年代に入れば、浮遊する懸濁粒子の中で

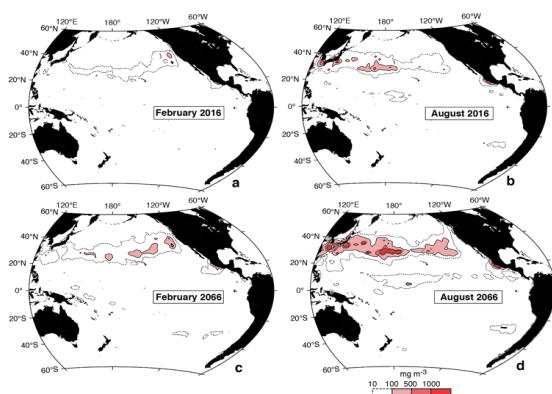


図1 2016年現在と50年後に海面近くを浮遊するマイクロプラスチックの重量濃度(海水1m³あたりの浮遊重量)分布。左側は2月で右側は8月の分布を示す。最も濃い赤のトーンは1g/m³以上の重量濃度を示す海域を表している(Isobe et al., Nat. Comm)。

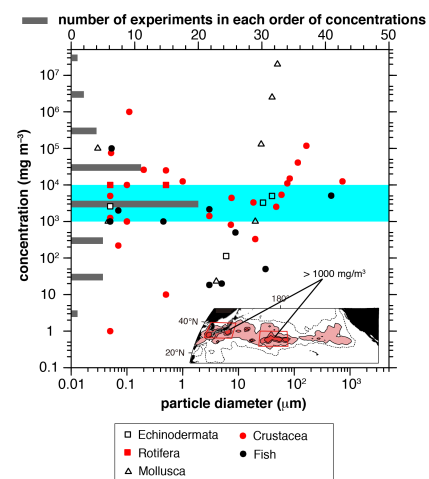


図2 モデルと室内実験の比較。グラフのマークは、一つ一つが水生生物を飼育し、プラスチックビーズを与えた室内水槽実験の結果で、生物に何らかの影響が発現した濃度(縦軸)と、ビーズのサイズ(横軸下)に応じてプロット。青い帯が最も実験数の多かった1-10g/m³の濃度帯であった。グレーのバーは各濃度帯での実験数(横軸上) Isobe et al., (2019, Nat. Comm)。

マイクロプラスチック重量が最も優占すること、海洋生物がマイクロプラスチックによる環境リスクに直面する可能性のある、浮遊濃度1 mg/m³を超える海域が現れることがわかった(図2)。

浮遊マイクロプラスチックの観測・分析ガイドラインを英文で作成し環境省ウェブサイトで公開した。ガイドラインに概ね沿った観測手順で取得された浮遊マイクロプラスチックの曳網調査データを収集し、また一部は未発表のデータを世界の共同研究者より譲り受け、全球海洋における浮遊量データセットを作成した。データセットは全てオープンアクセス論文のSupplementary Dataとして公開されている(テーマ1/サブテーマ1/参考文献8; Springer Natureが発行する Microplastics & Nanoplastics誌に掲載された本論文は2022年4月現在ダウンロード数ランキング1位)。また、独自のウェブでの公開が環境省事業として進行中であり、2023年度中には世界に向けて公開される予定である。

全球海洋で観測したマイクロプラスチック浮遊量を妥当性評価に用いて、全球海洋のマクロプラスチックやマイクロプラスチックを同時に扱う粒子追跡実験を行った(Isobe and Iwasaki, 2022)。海洋プラスチックを、(1) 海洋を漂うマクロプラスチック(=マイクロプラスチックでに破碎する前のプラゴミ)、(2) 海岸に漂着するマクロプラスチック、(3) 海洋のマイクロプラスチック、(4) 海岸に漂着するマイクロプラスチック、(5) 海水より密度の大きいプラスチック片(以下、「重いプラスチック」)、(6) 海岸や海洋上部から除去されたマイクロプラスチックに分類しモデル内で一定の時間スケールで遷移させた。河川と漁業の両方に由来するマクロプラスチック粒子は、1961年から2017年までの各月初めに年間排出量を12で割った月別排出量を海洋に放出した。この結果(図3)、1961年から2017年までに世界の海洋に放出された25.3 MT(百万トン)のマクロプラスチックのうち、最も多いのは破碎が起こった場所に残る重いプラスチック(9.3 ± 1.6 MT、36.9%)で、次いで上層海域や海岸から除去されたマイクロプラスチック(29.8%)であった。

本研究では、歴史的に除去されたマイクロプラスチックのうち7.5 ± 1.7 MTが、その後に世界の海洋と海岸に蓄積されていることが示唆された。海岸のマクロプラスチックは海洋プラスチックの3番目に大きな構成要素(5.9 ± 3.0 MT; 23.4%)であり、海洋に浮遊するマクロプラスチック(0.7 ± 0.3 MT; 2.8%)は海岸のそれと比べておよそ10分の1であった。同様に、海洋のマイクロプラスチック(0.8 ± 0.03 MT)と海岸のマイクロプラスチック(1.0 ± 0.04 MT)はそれぞれ海洋プラスチック全体の3~4%を占めている。

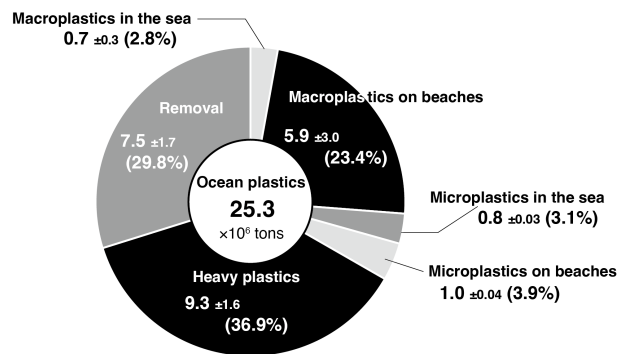


図3 海洋プラスチックの行方。1961年以降に海域投入された総重量の各カテゴリへの振り分けを百万トン単位の重量とパーセンテージで示す(Isobe&Iwasaki, 2022, STOTEN)

上記モデル結果を利用した50年予測計算によれば、プラスチックゴミ流出が現状の伸び率を維持すれば、2060年代には漂着・漂流マクロプラスチックは現在の4倍前後になると予想される。海洋上層に存在する海洋プラスチックの現存量は100年規模の時間軸を見た場合は平衡状態にあるため、現状の海域マクロプラスチック投入量を維持した場合は(100%)、浮遊重量も現状のままとなる。30%にまで減じた場合、2030年代には漂着・漂流量とも現状の1/3程度の平衡状態に落ち着く。たとえ海域投入量を0にしても、それまで蓄積した海洋プラスチックが海洋上層から姿を消すには時間がかかり、漂着ゴミが現状の10%にまで減じるのは2030年代以降になってからである。

海洋プラスチックごみの大洋内及び大洋間動態を再現できる全球海洋プラスチックごみ分散モデルを構築し、海洋プラスチックごみの分布に及ぼす物理諸過程の影響を評価した。太平洋やインド洋内の

海洋プラスチックごみ分布や蓄積量、また両大洋間の輸送には、アジアモンスーンの影響による海流系の季節変動よりも、南シナ海やインドネシア多島海域における海洋プラスチックごみ排出量の季節変動の影響が大きいことが初めて明らかになった(図4)。さらに、南大洋で観測された海洋プラスチックごみの輸送経路について、本サブテーマで構築した分散モデルの結果からは、海洋循環による経路を明確に示すことができず、海洋内で直接輸送されていない可能性が示された。このことは、鉛直輸送過程や、大気輸送、生物輸送なども含めた統合的な検討が今後必要であることを示唆している。

海洋—海岸交換過程に必要なパラメータとして、漂着・再漂流確率、および漂着・再漂流拡散係数を提案し、理論的な検討を加えるとともに、広島湾と日本海沿岸を対象とした数値実験を行なった。特に粒子追跡法については、広島湾の観測結果を季節変動も含め概ね再現することに成功した(図5)。また、サブテーマ1にインプットすることで、全球でのプラスチック収支解析に活用された。トレーサーモデルについては、計算時間を大幅に短縮できることを確認できたが、日本海を対象とした場合、ストックドリフトの導入が課題として挙げられた。複数の河川が流入する別府湾の最深部を対象に、海底への堆積速度を見積もった。1950年代後半からの堆積速度(フラックス)の経年変動について、すなわち線形上昇トレンドと20年変動を明らかにした。特に、20年変動については、湾内の植物プランクトン量との相関関係を明らかにした。また、表層ネットサンプリングの結果と堆積速度から、マイクロプラスチック片

(0.3–2.0 mm)の平均沈降速度を 10^1 – 10^2 m/dと見積もることに成功した。

海洋表層に浮遊するマイクロプラスチックのシンクの過程として、①微細片化、②動物プランクトンの摂食と輸送、③沈降の3つのプロセスに着目し研究を行った。①について、紫外線によるマイクロプラスチックの微細化の過程を明らかにするために、太陽光の暴露実験を数ヶ月間実施した。長崎県平戸市の砂浜で採取されたサイズ約1~2mmのマイクロプラスチックを洗浄した後、7~8片を人工海水で満たされた特注の石英チャンバーに入れ、大型水槽内に海水にぎりぎり浸る程度の高さに固定し、太陽光に暴露した。その結果、重量、サイズともに有意な変化はなく海水中での紫外線による影響は少ない可能性が示された。②に関しては代表的な海産動物プランクトンであるカイアシ類のマイクロビーズに対する摂食実験を行った。マイクロプラスチックの濃度が海水1 mlあたり10個よりも低い環境ではカイア

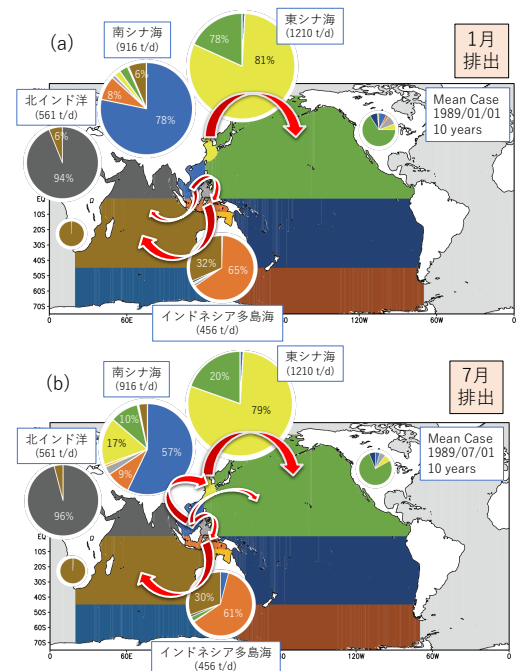


図4: 海洋プラスチックごみの排出量を一定として、海流場の季節変動を考慮した場合の分布の季節依存性。(a) 1月排出ケース、(b) 7月排出ケース。

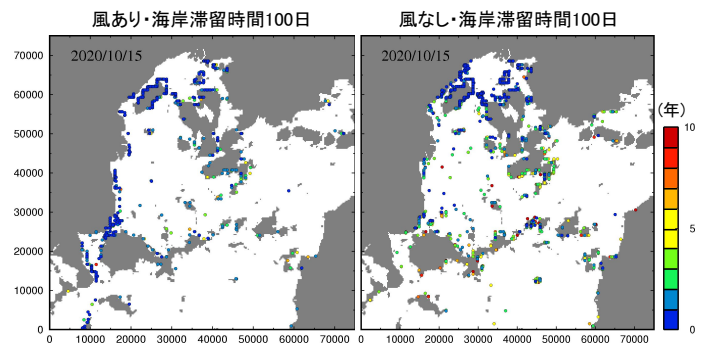


図5 粒子の空間分布。色は海岸経年時間

シ類による摂食はほとんど生じないと考えられた。また、現場海域でのカイアシ類によるマイクロプラスチック摂食についても調べたが、体内からプラスチック粒子は検出されなかった。これらの結果から、カイアシ類の摂餌を介したマイクロプラスチックの鉛直輸送は、プラスチック濃度が高い海域においては一定程度機能していると考えられた。③に関しては沿岸域のマイクロプラスチック粒子の沈降フラックスを計測するため、岩手県大槌湾にてセジメントトラップ観測を実施した。延べ438日の観測の結果(図6) 懸濁物の濃度の増加がマイクロプラスチックの沈降過程を促進していることを示唆した。(以上、テーマ1)

マイクロプラスチックの粒子としての体内動態(取込と排泄)と影響、マイクロプラスチックに含まれる化学物質の特性、マイクロプラスチックを介した化学物質の生物への曝露・移行・蓄積と生物への影響を、低次栄養段階生物から高次栄養段階生物を対象に、3つの機関で研究を行った。全体まとめた主要な成果は以下の通りである。マイクロプラスチックは低次栄養段階生物に取り込まれ、消化管に濃縮され生物濃縮係数は 10^3 程度になるが、多くの粒子は速やかに排泄される。しかし、 $2\ \mu\text{m}$ 以下のマイクロプラスチックは排泄が遅く、体内への長期間の残留が示唆され、細胞間隙への貫入の可能性も考えられた(図7)。マイクロプラスチック自体の魚類の再生産への影響は認められなかったが、細胞接着に関与する遺伝子発現の上昇等、発遺伝子発現の変動が認められた。海鳥の場合は、体重比2%以上のプラスチック摂食があると、体重や肥満度への影響が懸念される。

マイクロプラスチックへのPCBsや多環芳香族炭化水素類(PAHs)等の疎水性の汚染物質の吸着が確認された。プラスチック製品に配合されている添加剤の中で疎水性の高い成分は海洋漂流(図8)および海岸漂着マイクロプラスチック(図9)に残留しており、難燃剤や紫外線吸収剤は散発的(2%程度の出現頻度)に高濃度になることがあり、海洋生物への添加剤の曝露源となっていることが明らかになった。特に海洋漂流マイクロプラスチックの中でも 1mm 以下の微細なマイクロプラスチックにも高濃度に残留していることが明らかになり、低次栄養段階の生物を通して疎水性添加剤が生態系全体に広がっていることが示唆された。

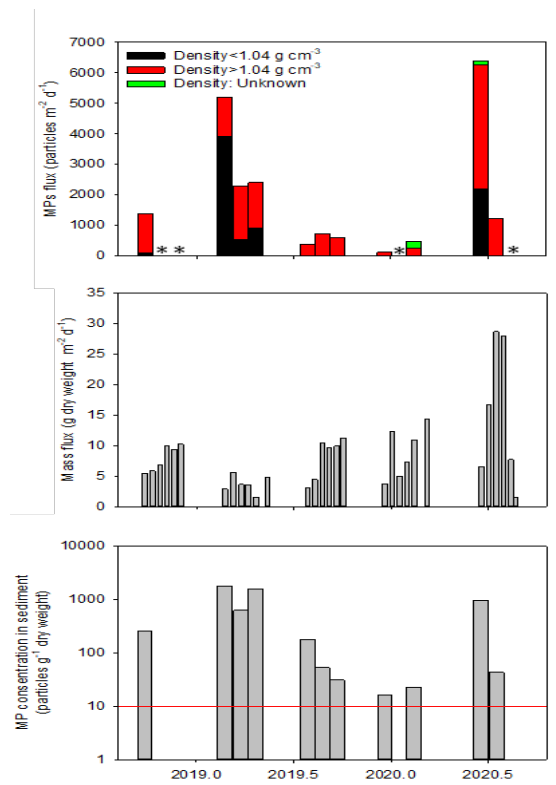


図6 (上段) マイクロプラスチックの沈降フラックス、(中段) 質量フラックス、(下段) 単位乾燥重量当たりのマイクロプラスチック数の経時変化。赤線は堆積物表層(0~1 cm)での単位乾燥重量当たりのマイクロプラスチック数。

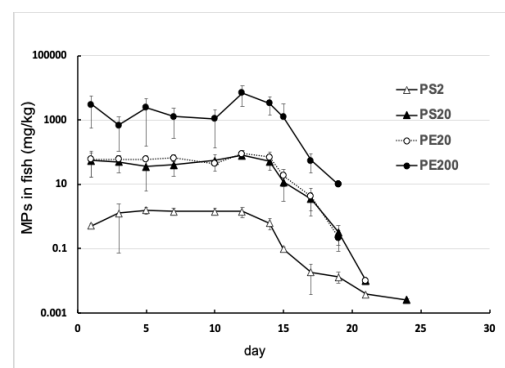


図7. 粒径 $2, 20\ \mu\text{m}$ PS-MP, $20\ \mu\text{m}$ PE-MPおよび $200\ \mu\text{m}$ PE-MPに曝露したメダカにおける

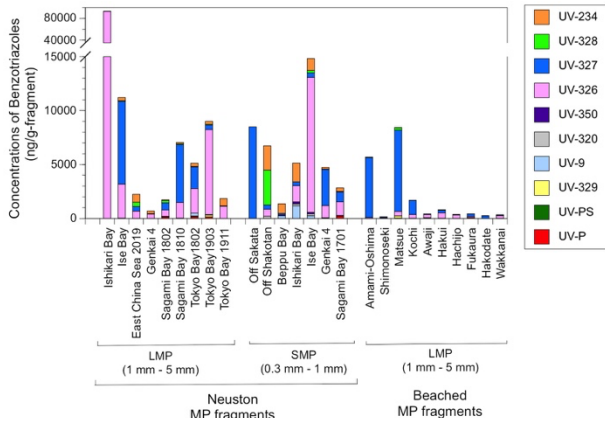


図8. 海洋漂流および海岸漂着マイクロプラスチック中のベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤濃度

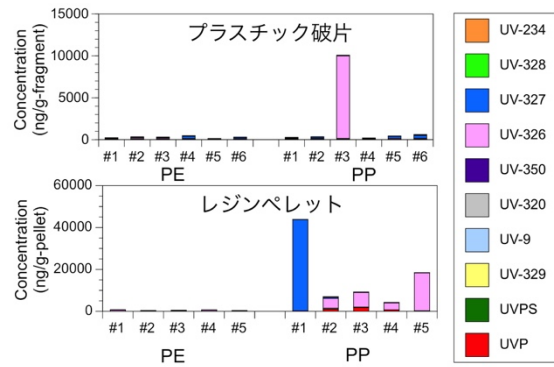


図9. 海岸漂着マイクロプラスチック中のベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤濃度

マイクロプラスチックが疎水性の化学物質を吸着して生物体内に輸送する効果（ベクター効果）はメダカや二枚貝について確認された(図10)。メダカの場合はマイクロプラスチックに輸送された化学物質による生物機能への影響も確認された。

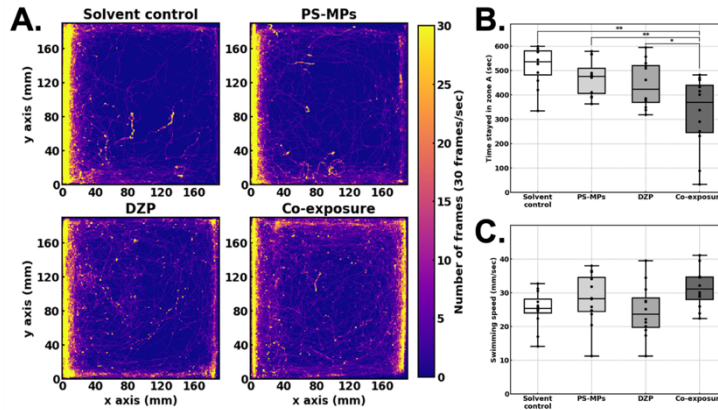


図10 ジアゼパムおよび/または PS-MP に曝露されたメダカの Shoaling behavior 試験の結果 A. メダカの遊泳ポジションのヒートマップ、黄色はメダカが1秒以上(30フレーム以上)留まった位置、B. メダカがゾーンA内に滞在した期間の箱ひげ図、C. メダカの遊泳速度(mm/秒)の箱ひげ図 ボックス内の黒点は、各メダカの実データ、PS-MP; 107 particles/L PS-MP 曝露, DZP; 0.03 mg/L ジアゼパム曝露, Co-exposure; 0.03 mg/L ジアゼパムと 107 particles/L PS-MP の複合曝露, **, P < 0.01, *, P < 0.05

プラスチックに含有される添加剤はプラスチックマトリクスに練り込まれているので、生物への移行はないと考えられてきたが、甲殻類(図11,12)、魚類(図13)、海鳥(図14)の体内に移行し組織に蓄積されることが明らかになった。海鳥については、それらの添加剤による甲状腺ホルモン系や胆汁酸合成系に関連する脂質代謝遺伝子の発現量の変動が示された(図15,16)。

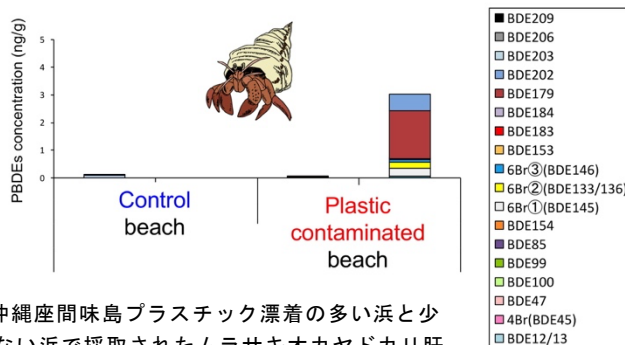


図11. 沖縄座間味島プラスチック漂着の多い浜と少ない浜で採取されたムラサキオカヤドカリ肝臓中のポリ臭素化ジフェニルエーテル濃度

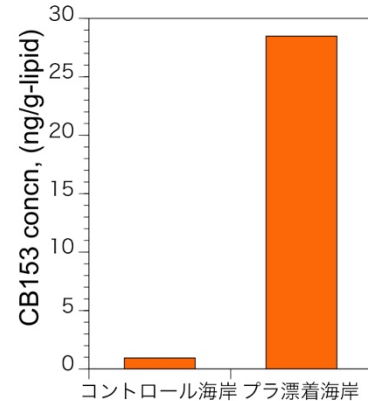


図12. 沖縄座間味島プラスチック漂着の多い浜と少ない浜で採取されたムラサキオカヤドカリ肝臓中のPCBs濃度

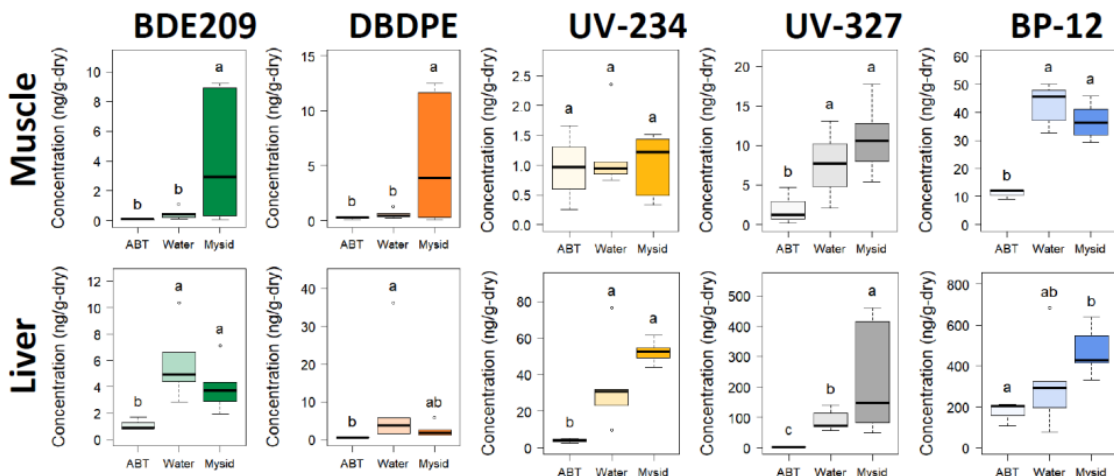


図13 カジカの筋肉(上段)および肝臓(下段)における5種の添加剤の濃度をボックスプロットで示す。ABTは野外から採集して直ちに保存した野外対照区、LCTは添加剤が溶出した海水で飼育したカジカ、MPsは添加剤入りマイクロプラスチックに暴露したアミを捕食させた実験群を示す。事後検定(Tukey's HSD)で有意な差があった群は異なるアルファベット (a, b)で示している。

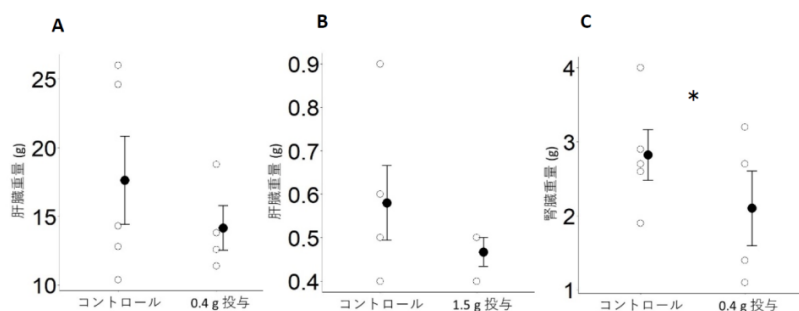


図14.オオズナギリ稚の臓器重量に対するプラスチック投与の影響。A: 2017年の投与後2週間群、B:2017年の投与後1か月群、C:2019年の投与後52日群。*は有意差があったものを示す。

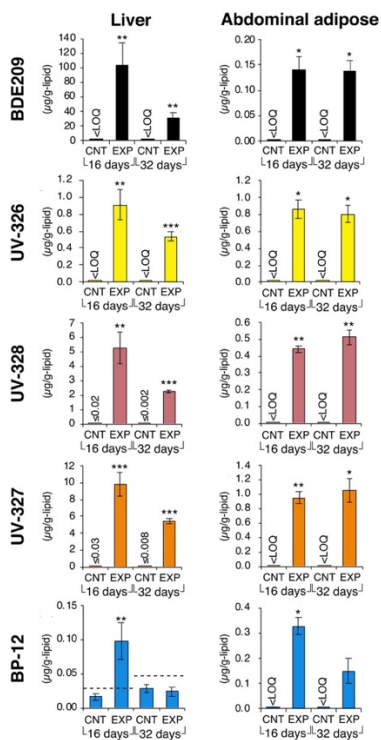


図15.添加剤入りプラスチック摂食実験における海鳥の肝臓と腹腔の添加剤濃度

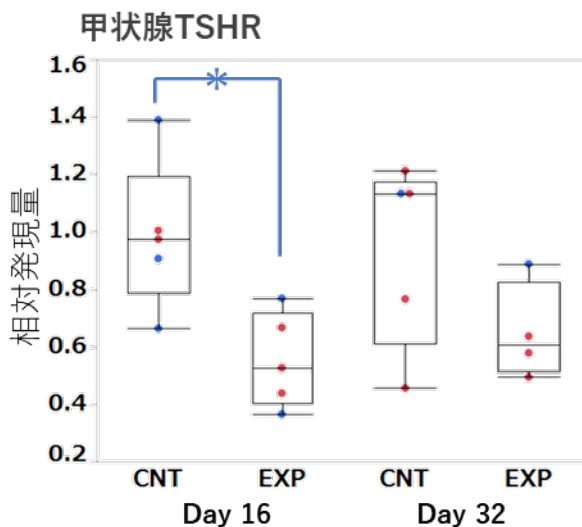


図16.甲状腺に発現する甲状腺刺激ホルモン受容体の発現量。16日目、32日目の甲状腺について、TSHRのmRNA量を定量的PCRによって解析した。CNT、コントロール、EXP、曝露。*は、対照群と曝露群間において統計解析で有意な差を示した(p<0.05)。

(以上、テーマ2)

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。深度別マイクロプラスチック（MPs）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。MOCNESSおよびポンプによる深度別採取は、図16のとおりである。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。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。

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 ≤ 2.00 mmのマイクロプラスチックをより多く収集した。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17)。

光学技術を用いた微小マイクロプラスチック（SMPs $<300\mu\text{m}$ ）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では、蛍光指標として使用したクマリン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。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。②偏光によるMPsの検出では、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 Δ （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 Δ 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。

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。(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

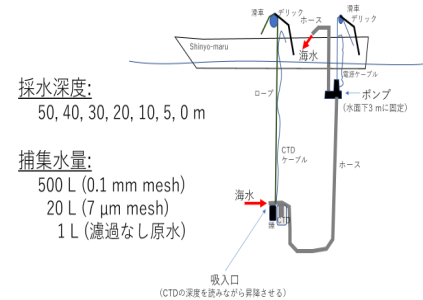


図16 垂表層での採取

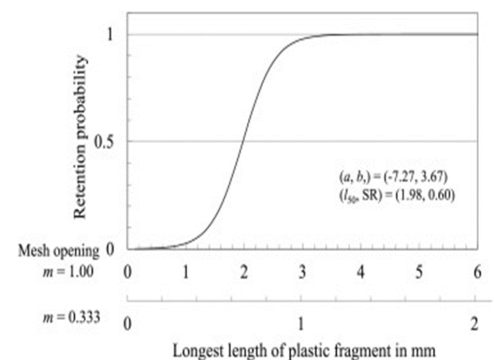


図17 標準的に用いられる目合0.333mm網目のニューストンネットによる破片状マイクロプラスチックの粒径別の網内保持確率

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。④ MP 自動検出手法の開発では、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 18）。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。

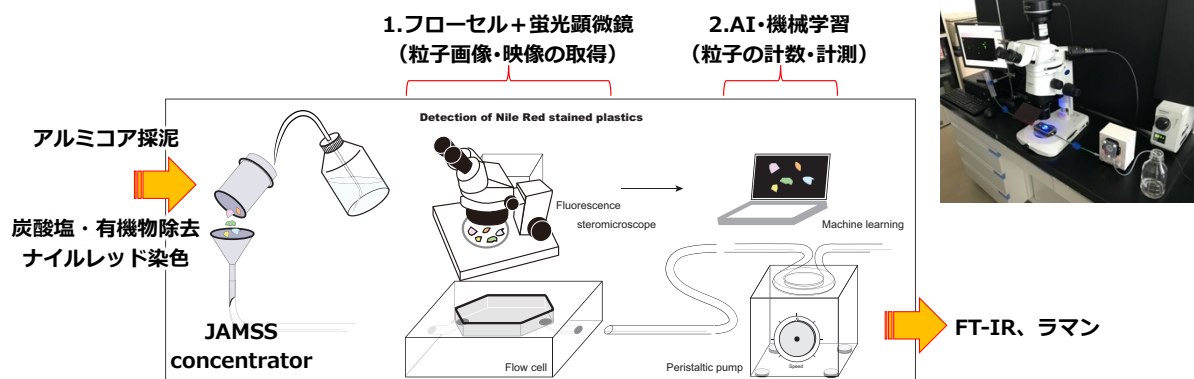


図 18. MPs 自動検出までの分析の流れ。MPs を連続的に流すフローシステム (1) と、検出したマイクロプラスチックを自動判別するシステム (2) の 2 つの要素で構成される。右上の写真は、顕微鏡下にフローセルを設置し、下流側にペリスタポンプを設置した例を示した。

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 19）。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。

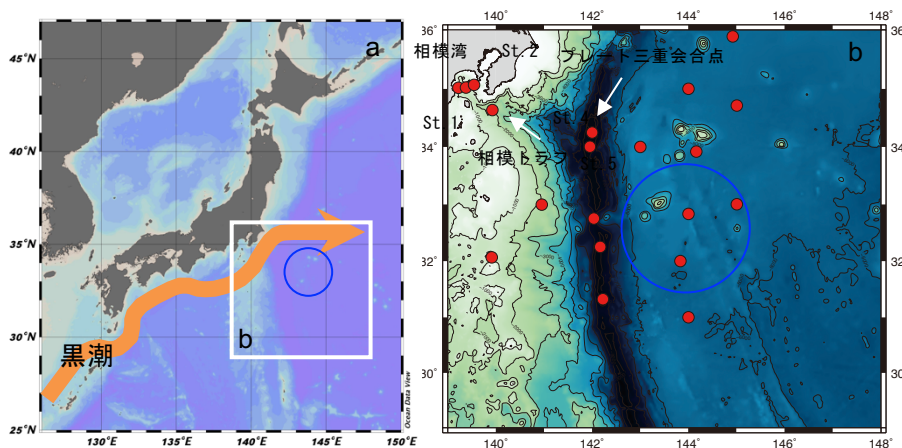


図 19. 調査海域図。(a) 調査海域と黒潮流路の関係。青丸は黒潮統流再循環域に存在するごみ集積の想定位置（＝西太平洋ごみパッチ）。(b) 観測点（赤丸）。各観測点においてニューストーンネット曳網、マルチプルコアラもしくは深海ランダー・「しんかい6500」により海底堆積物試料を採取した。

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、ドローンによる海岸の航空測量と深層学習による漂着ごみの検出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、様々な海岸における本手法の実証実験を実施した。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。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。ドローンで空撮した画像データを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）を構築する方法を確立した。

続いて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ごみ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。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、海岸漂着プラごみの自動検出モデルを構築した。主観的な解析によるプラごみ抽出や、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ごみ情報を抽出可能であることが示された。

以上の成果を踏まえて、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20）。これらはそれぞれ、礫浜、砂浜、および礫浜海岸である。ここでの本手法で自動抽出した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。各海岸における本手法による体積推定は 1.22 m^3 、 8.81 m^3 、 15.65 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 m^3 、 7.95 m^3 、 18.00 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、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。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。この計算処理時間の速さもアドバンテージである。これらの成果は、国際学術論文誌であるMarin Pollution Bulletinに、Kako et al. (2020)として、発表済みである。

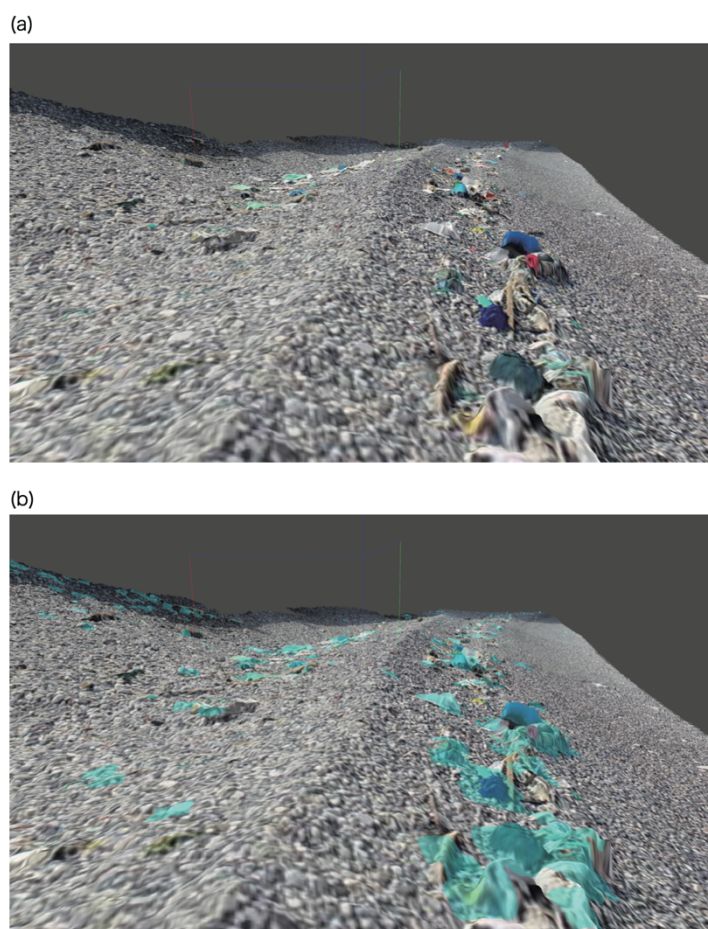


図20 里海岸における(a)Digital Surface Model (DSM) と(b)DSMに深層学習モデルが検出したプラごみ情報を入力した結果。深層学習モデルが検出したプラごみを青色で示す。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

1. 2019年大阪G20サミットにおいて日本学術会議から内閣総理大臣に手交されたサイエンス20ステートメントに、Marine plastic debrisの項が設けられ、本テーマリーダーが執筆に参加

した。

2. 2019年に策定されたプラスチック資源循環戦略(消費者庁・外務省・財務省・文部科学省・厚生労働省・農林水産省・経済産業省・国土交通省・環境省)には、本研究課題で取り組んでいる地球規模のモニタリングの重要性(3. 国際展開②項)について言及された。(4)基盤整備④においても調査・研究等の推進が言及された。
3. 海洋プラスチックについて法的拘束力のある政府間交渉委員会を議決した国際交渉会議第5回国連環境総会再会セッション(UNEA5.2)において、これに科学的助言を与える科学者諮問委員会(2020年2月ナイロビUNEP本部)に本テーマリーダーが招聘された。本委員会が発行した国連環境計画レポート(From Pollution to Solution)には、本課題の成果であるIsobe et al. (2019)を含む本課題参画研究者の4編の主著論文が引用されている。
4. 2021年3月にオンラインで開催された令和2年度海洋プラスチックごみ学術シンポジウムにおいて高田と大嶋が研究成果を紹介し、環境省の海洋プラスチック汚染とその生物影響について認識強化につながった。
5. 2021年1月11日～16日にオンラインで行われたストックホルム条約の第16回残留性有機汚染物質検討委員会(POPRC)とその事前会議に高田が招待され、本研究の対象添加剤の一種ベンゾトリアゾール系紫外線吸収剤UV328について、そのマイクロプラスチック中での分布、海鳥が摂食したプラスチックからのUV328の生物組織への移行・蓄積、UV328の海鳥汚染の地球規模での広がりなどについて、本研究の成果を情報提供し、国際的な枠組みでの化学物質規制に活用された。
6. 2021年6月1日の参議院環境委員会における日本共産党の山下議員の質問に本研究の成果「添加剤が食物連鎖を通してヒトにも曝露される可能性」が紹介され、小泉環境大臣との間での現状認識の共有に活用された。
7. 本研究期間中に行われた115回の講演会の半分以上が地方自治体主催の会や、国家公務員の研修会、国立国会図書館の職員向けの講演であり、そこで本研究成果を紹介し、地方自治体職員、国家公務員、さらには広く市民がプラスチック問題を認識し、その解決策を考えるための意識啓発の材料として本研究成果は活用された。
8. 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。
9. 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。
10. 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。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

1. 浮遊マイクロプラスチックの統合データセット(Isobe et al., 2021)について、2023年まで

に環境省ではインタラクティブなウェブサイトで公開する予定である。本ウェブサイトは研究者のみならず政策決定者など広いユーザーを想定している。また、本データセットは、米国待機海洋局やEUで公開が予定されている類似のデータセットと相互に連携し、地域性を補完することで、世界的な統合データセットへと拡張される見込みである。

2. 本研究課題が中核になって作成した浮遊マイクロプラスチックのガイドライン (<https://www.env.go.jp/press/files/jp/114043.pdf>)は更新を重ねており、今後も世界の海洋プラスチック研究者の指針となる。本ガイドラインは世界の関連論文に数多く引用されることが確実(前述のFrom Pollution to Solutionにも引用)で、海洋プラスチック問題に取り組む世界の中で我が国に一定のプレゼンスを与える。
3. 本研究では「プラスチック自体、およびプラスチックに吸着する化学物質とプラスチック添加剤が生物に影響を及ぼす」ことを明らかにした。個々の添加剤やポリマーについてその有害性の定量的な評価を行い、有害の高い添加剤やポリマーの規制につなげていく必要がある。そのような流れの一つとして、ストックホルム条約の残留性有機汚染物質検討委員会 (POPRC) でのUV328の評価に本研究成果の活用が見込まれる。具体的には2021年7月のPOPRCでの情報提供が見込まれる。このような形で一つ一つの添加剤について条約や既存の化学物質規制の枠組みを使って規制していくことが本研究成果の活用の一つの方向である。同時に、予防原則的な視点と廃棄物管理、資源問題、温暖化抑止の視点から、プラスチックの使用量自体を削減していくための行政的な枠組み作りの際の科学的根拠として本研究が活用される見込みがある。同時にプラスチック使用量削減の意識を広く市民や行政機関が共有するための科学的根拠としても本研究成果は活用される見込みがある。
4. 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。
5. 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。
6. 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。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。

5-3. 研究目標の達成状況

全球プラスチック循環モデルを構築し、二世帯程度 (~50年程度) 将来の全球 (極域を含む全海洋) でのマイクロプラスチックの浮遊濃度を予測した(テーマ1)。これを参照しつつ、様々なサイズ・存在特性 (漂着ごみ・漂流ごみ・海底ごみ) の海洋プラスチックごみ中の化学物質の濃度・存在特性及び吸脱着・溶出特性を明らかにした(テーマ2)。さらに、プラスチックを媒介した有害化学物質の生物への移行・蓄積の規模を明らかにし、生物影響を評価した(テーマ2)。モデルの精度検証や今後のモニタリングの高度化・加速化のため、海洋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した(テーマ1と3)。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(テーマ1と3)、海洋中に存在する数百~数十マイクロサイズのマイク

ロプラスチックの検出及び計測のための基礎技術を確立する(テーマ3)。以上、当初の目標はほぼ達成できた。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

33件(テーマ間の重複を除く)

<主な査読付き論文>

【テーマ1】

- 1) Isobe, A., S. Iwasaki, K. Uchida, and T. Tokai "Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066", *Nature Communications*, **10**, 417, 2019. (IF: 14.919)
- 2) Isobe, A., N. T. Buenaventura, S. Chastain, S. Chavanich, A. Cózar, M. DeLorenzo, P. Hagmann, H. Hinata, N. Kozlovskii, A. L. Lusher, E. Martí, 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 An interlaboratory comparison exercise for the determination of microplastics in standard sample bottle, *Marine Pollution Bulletin*, **146**, 831-837, 2019 (IF: 5.553)
- 3) Isobe, A., T. Azuma, M. Cordova, A. Cózar, F. Galgani, R. Hagita, L. D. Kanhai, K. Imai, S. Iwasaki, S. Kako, N. Kozlovskii, A. Lusher, S. Mason, Y. Michida, T. Mituhasi, Y. Morii, T. Mukai, A. Popova, K. Shimizu, T. Tokai, K. Uchida, M. Yagi, W. Zhang "A multilevel dataset of microplastic abundance in the world's upper ocean and the Laurentian Great Lakes" *Microplastics and Nanoplastics*, **1**, 16, 2021.
- 4) Isobe, A. and S. Iwasaki "The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem?" *Science of the Total Environment*, **825**, 153935, 2022 (IF: 7.963)
- 5) H. HINATA, H. OHNO, N. SAGAWA, T. KATAOKA, and H. TAKEOKA: *Mar. Pollut. Bull.*, **160**, 111548 (2020) Numerical modeling of the beach process of marine plastics: 2. A diagnostic approach with onshore-offshore advection-diffusion equations for buoyant plastics. (IF: 5.553)
- 6) H. HINATA, N. SAGAWA, T. KATAOKA, and H. TAKEOKA: *Mar. Pollut. Bull.*, **152**, 110910 (2020) Numerical modeling of the beach process of marine plastics: A probabilistic and diagnostic approach with a particle tracking method. (IF: 5.553)
- 7) N. SAGAWA, K. KAWAII, and H. HINATA: *Mar. Pollut. Bull.*, **133**, 532-542 (2018) Abundance and size of microplastics in a coastal sea: Comparison among bottom sediment, beach sediment, and surface water. (IF: 5.553)
- 8) Alfonso, M. B., K. Takashima, S. Yamaguchi, M. Tanaka, and A. Isobe "Microplastics on plankton samples: multiple digestion techniques assesment based on weight, size, and FTIR spectoroscopy analyses" *Marine Pollution Bulletin*, **173**, 113027, 2021 (IF: 5.553)
- 9) Song, Y. K., Hong, S. H., Eo, S., Jang, M., Han, G. M., A. Isobe, Shim, W. J. "Horizontal and vertical distribution of microplastics in Korean coastal waters", *Environmental Science & Technology*, **52**, 12188-12197, 2018. (IF: 9.028),

【テーマ2】

- 1) T. Ohgaki, H. Takada, R. Yoshida, K. Mizukawa, B.G. Yeo, M. Alidoust, N. Hirai, R. Yamashita, T. Tokumaru, I. Watanabe, S. Onwona-Agyeman, P. Gardiner, M. Eriksen, J.F. Kelly, C.J. Rodríguez-Sierra, L. Colasse, J. Baztan, F.P. Barretto, G.I. Mendes, D. Abessa, M.P. Zakaria, C.S. Kwan, M. Saha, P.G. Ryan, S. Weerts, J. Ofosu-Anim, E.B. Sabi, L.G. Akita, H. Tait, C. Eriksson, H. Burton: *Environmental Monitoring and Contaminants Research*, 2 in press (2021) International Pellet Watch : Global monitoring

- of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in plastic resin pellets.
- 2) M. Alidoust, G.B. Yeo, K. Mizukawa, H. Takada: *Marine Pollution Bulletin*, 165 112052 (2021) Monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons, hopanes, and polychlorinated biphenyls in the Persian Gulf in plastic resin pellets. (IF:4.05)
 - 3) Y. Liu, X. Qiu, X. Xu, Y. Takai, H. Ogawa, Y. Shimasaki, Y. Oshima: *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212 112007 (2021) Uptake and depuration kinetics of microplastics with different polymer types and particle sizes in Japanese medaka (*Oryzias latipes*). (IF: 4.9)
 - 4) Hasegawa, T. and Nakaoka, M. (2021) Trophic transfer of microplastics from mysids to fish greatly exceeds direct ingestion from the water column. *Environmental Pollution* 273: 116468. Doi: 10.1016/j.envpol.2021.116468 (IF: 6.8)
 - 5) Yu, S-P., Nakaoka, M. and Chan, B.K.K. (2021) The gut retention time of microplastics in nauplius larvae of barnacles from different climatic zones and marine habitats. *Environmental Pollution* 268: 115865. Doi: 10.1016/j.envpol.2020.115865 (IF: 6.8)
 - 6) K. Tanaka, Y. Watanuki, H. Takada, M. Ishizuka, R. Yamashita, M. Kazama, N. Hiki, F. Kashiwada, K. Mizukawa, H. Mizukawa, D. Hyrenbach, M. Hester, Y. Ikenaka, S.M.M. Nakayama: *Current Biology*, 30 (4) 723-728.e3 (2020) In Vivo Accumulation of Plastic-Derived Chemicals into Seabird Tissues. (IF:9.60)
 - 7) M. Assas, X. Qiu, K. Chen, H. Ogawa, H. Xu, Y. Shimasaki, Y. Oshima: *Marine Pollution Bulletin*, 158 111446 (2020) Bioaccumulation and reproductive effects of fluorescent microplastics in medaka fish. (IF:4.05)
 - 8) X. Qiu, S. Saovany, Y. Takai, A. Akasaka, Y. Inoue, N. Yakata, Y. Liu, M. Waseda, Y. Shimasaki, Y. Oshima: *Aquatic Toxicology*, 228 105643 (2020) Quantifying the vector effects of polyethylene microplastics on the accumulation of anthracene to Japanese medaka (*Oryzias latipes*). (IF:3.9)
 - 9) B.G. Yeo, H. Takada, R. Yamashita, Y. Okazaki, K. Uchida, T. Tokai, K. Tanaka, N. Trenholm: *Marine Pollution Bulletin*, 110806 (2019) PCBs and PBDEs in microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of Japan. (IF:4.05)
 - 10) K. Tanaka, J.A. van Franeker, T. Deguchi, H. Takada: *Marine Pollution Bulletin*, **145** 36-41 (2019) Piece-by-piece analysis of additives and manufacturing byproducts in plastics ingested by seabirds: Implication for risk of exposure to seabirds. (IF:4.05)

【テーマ3】

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 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
- 6) 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)

- 7) 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)
- 8) 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. 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）	31件
口頭発表（学会等）	100件
「国民との科学・技術対話」の実施	258件
マスコミ等への公表・報道等	276件
本研究に関連する受賞	13件

国民との科学・技術対話には、一般向け書籍の出版二件を含む

7. 国際共同研究等の状況

海外研究機関：GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel（ドイツ）

国際共同研究計画名：Global Approach by Modular Experiment (モジュール実験による全球的アプローチ)

カウンターパート氏名・所属・国名：Dr. Mark Lenz (GEOMAR・ドイツ)

事業概要：本事業は世界各地の大学院生を対象とした教育研究プログラムで、海洋底生生物を対象とした実験生態学を同じデザインで各地で行い、その結果を比較することで生態学的プロセスの条件依存性を明らかにすることを目的としている。

連携内容：2019年度にはムラサキイガイを対象にマイクロプラスチックと天然鉱物粒子が摂食活動や成長率に与える影響の比較解析をした。

本研究成果にもたらした効果：当該研究で検討・実施された飼育実験手法は、本研究における底生無脊椎動物を対象とした飼育実験の条件設定に有効に生かされた。また、本研究の成果の比較検討に利用された。

海外研究機関：台湾中央研究院

国際共同研究計画名：マイクロプラスチックが解散底生動物に与える影響の広域比較研究

カウンターパート氏名・所属・国名：Dr. Benny K.K> Chan (台湾中央研究院)

連携内容：本共同研究は底生生物によるマイクロプラスチック取り込みの変異について水温や生息場所の環境条件の効果を明らかにするもので、台湾と日本において異なる底生動物（フジツボ）を同じ条件でマイクロプラスチックに暴露し、消化管内におけるマイクロプラスチックの動態を比較解析した。

本研究成果にもたらした効果：当該研究は、本事業の一環として行われ、成果は共同研究の形で国際誌に掲載された(Yu et al. 2021, Environmental Pollution)。当該研究の手法および成果は、本研究の主要な課題の一部である底生無脊椎動物を対象とした実験の方法および考察に有効に活かされた。

8. 研究者略歴

プロジェクトリーダー

磯辺篤彦

愛媛大学工学部卒業、博士(理学)、現在、九州大学応用力学研究所 教授

テーマリーダー

1) 高田秀重

東京都立大学卒業、博士(理学)、現在、国立大学法人東京農工大学 教授

2) 東海 正

京都大学農学部卒業、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

II. 英文Abstract

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

Principal Investigator: Atsuhiko ISOBE

Institution: Kyushu University, Kasuga City, Fukuoka, JAPAN

Tel: +81-92-583-7726 / Fax:+81-92-573-1996

E-mail: aisobe@riam.kyushu-u.ac.jp

Cooperated by:: Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Ocean plastics, Particle tracking model, Particle toxicity, Persistent Organic Pollutants (POPs), Additives, Endocrine disrupting chemicals, Vector effect, Gene expression, Sediment, Drifting debris

A total of 8,218 pelagic microplastic samples from the world's oceans were synthesized to create a dataset composed of raw, calibrated, processed, and gridded data which are made available to the public. Using the dataset for validation, a budget for ocean plastic mass was estimated based on a combination of numerical particle tracking and linear mass-balance models. Integrating the time series of worldwide macroplastic emission from both rivers and the fisheries industry over the period 1961–2017 yielded a total mass of 25.3 million metric tonnes (MMT). Overall, 23.4% of ocean plastics were macroplastics on beaches. Meanwhile, 66.7% of ocean plastics were heavier than seawater or microplastics removed from the upper ocean and beaches, which are difficult to monitor under current observation frameworks adopted worldwide. Part of removal from the upper ocean is caused by settling processes into the deep layers. The settling processes were also evaluated using a sediment trap and sediment cores sampled from the actual ocean.

When medaka fish was exposed to microplastics (MPs) (2, 20, 200 μm), MPs (except 2 μm MP) were rapidly accumulated in and then eliminated from bodies. From the results of MPs exposure studies, no effect was observed in survival and reproduction of medaka and artemia, while some gene expression levels were changed in the medaka intestine and artemia whole body. Ubiquitous occurrence of hydrophobic chemicals such as polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) as well as sporadic occurrence of high concentrations of additives such as brominated flame retardants and benzotriazole UV-stabilizers in neuston and beaches MPs were revealed. Medaka was exposed with anthracene and/or MP. As a result, PE-MPs may act as a vector to concentrate and transfer anthracene to medaka upon ingestion, but the presence of these particles may have limited adverse effects on fish under the co-exposure systems of the type used in this study. It was revealed that benthic invertebrates that ingested MPs accumulated chemical compounds such as PCBs and additives associated with MPs, and that they were transferred to benthic fish through the consumption of prey invertebrates that consumed MPs. Another experiment was conducted that fed plastic to chicks of streaked shearwater demonstrated that plastic ingestion has some negative impacts on its organ weight, and that plastic additives were transferred to the tissue of birds. Analysis using a next-generation sequencer revealed different gene expression patterns in the exposed and control groups of the seabird, especially in the thyroid hormone system and bile acid synthesis system.

We 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. It was found that 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. We proposed and developed a method for estimating marine plastic debris volumes on beaches by combining unmanned aerial vehicle surveys and image processing based on deep learning.