課題番号：1-2201

研究課題名：長期時系列試料解析に基づく海洋マイクロプラスチック微細化・表層除去過程の解明

研究代表者名：高橋一生（東京大学）

体系的番号：JPMEERF20221001
重点課題：グローバルな課題の解決に貢献する研究・技術開発(「海洋プラスチックごみ問題への対応」）
行政ニーズ：(1-1)生物への曝露量予測のための微細なマイクロプラスチックの実態把握と将来予測
研究実施期間：2022年度～2024年度

【研究体制】

サブテーマ１
高橋一生（東京大学）
片山智代（東京大学）

サブテーマ２
小川浩史（東京大学）
津田　敦（東京大学）
西部裕一郎（東京大学）

サブテーマ３
伊藤進一　（東京大学）
松村義正　（東京大学）

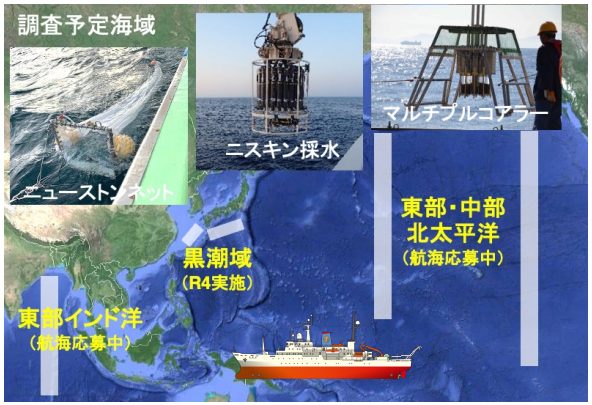
1.研究背景および研究開発目的および研究目標

【研究背景】
海洋へ流出したプラスチックは、漂流過程で細分化を繰り返し、やがて300 μm未満の微細マイクロプラスチック（MP）となり、沈降によって表層から除去されているという過程が提示されている。しかしながら現場海域における微細MPの分布や除去過程に関する理解は進んでいない。現場海域における微細MPの動態把握が困難である背景のひとつに実海域におけるMPの細分化および、微細MPの密度変化に関する時系列データが存在しないことが挙げられ、精度の高い海洋シミュレーションモデルの構築の妨げとなっている。

【研究開発目的】
国立研究開発法人水産研究・教育機構（旧水産庁水産研究所）が、終戦直後から実施してきた資源加入調査70年分の表層曳試料を利用して、海洋にMPが出現して以降、現在に至るまでの現場環境下におけるMP濃度変遷、微細化過程の長期変化を世界で初めて明らかにする。また同試料に含まれる動物プランクトン消化管内容物分析により微細MPの現場濃度変遷を併せて明らかにする。さらに、これらの結果と現場観測・実験、輸送シミュレーションモデルを組み合わせることで微細画分を含めたMPの海水面、海中及び海底存在量の現状把握および将来予測を行うことを目的とする。

1.研究背景および研究開発目的および研究目標

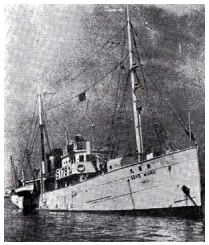
【研究目標（全体の目標）】
長期時系列データと現場観測・実験に基づいて得られたデータに基づき、微小画分を含む海洋ＭＰの海水面、沈降 海中及び海底を含む海洋シミュレーションモデルの構築による存在量の将来予測を行う。とくに日本、東南アジア等から流入するプラゴミが集積する黒潮周辺海域における高精度分布予測を実現させ、生態系に対するリスク評価の基礎情報を提供する。

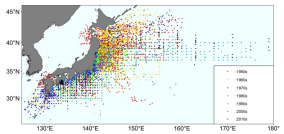


サブテーマ１
長期時系列試料解析に基づくMP微細化過程および現場微細MP濃度変遷の復元

東京大学大学院農学生命科学研究科

過去試料解析





水研機構(塩釜)：1949年から現在に至る浮魚産卵調査試料を整理・収蔵

微細画分を含む
過去から現在までの
MP濃度復元値

微細化モデルの提示

サブテーマ２
現場観測および実験に基づく微細MPの表層からの除去過程の解明

東京大学大気海洋研究所
浮遊生物分野・生元素動態分野

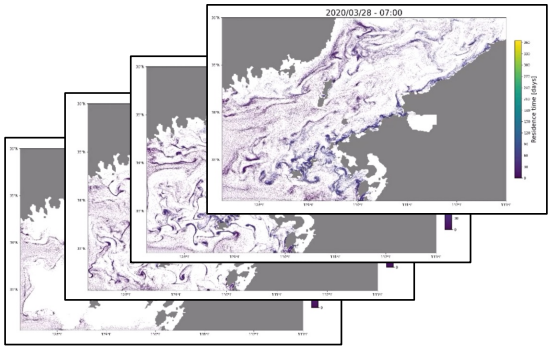
現場・実験室での検証

微細MP分布
除去沈降過程

サブテーマ３
微細画分を含むMP分布海洋シミュレーションモデルの構築

東京大学大気海洋研究所
海洋生物資源部門

分布動態予測



2.研究目標の進捗状況
(1)進捗状況に対する自己評価(サブテーマ１)

サブテーマ1：長期時系列試料解析に基づくMP微細化過程および現場微細MP濃度変遷の復元

【サブテーマ1の研究目標】

- 1949年～2020年の間に得られた長期時系列表層曳試料70年分を解析し日本周辺海域、とくに黒潮、黒潮-親潮移行域におけるMP分布の経年変化データベースを構築する。
- 動物プランクトン（サルパ類主要3種）の消化管内容物解析に基づく微細MP現場濃度推定手法を確立する。
- サルパ類消化管内容物解析より、現場微細MP濃度・組成の長期変遷を世界で初めて明らかにする。
- 素材、形状、劣化度、表面微細構造、付着微生物相の解析から、微細MP生成モデルを提案する。

【令和4年度研究計画】
・時系列データの整理、サイズ・形状計測、組成分析（ポリマータイプ）
・高精細顕微鏡による表面形状、付着生物相の観察（直近10年間分）
・付着微生物相分析準備（フォルマリン試料を用いたDNA解析）

【令和5年度研究計画】
・高精細顕微鏡による表面形状、付着生物相の観察（70年間分）
・DNA解析によるMP付着微生物相と粒子劣化度の把握、分布の時空間変動解析
・サルパ類摂餌生態把握、消化管内微細MP観察と現場濃度推定（3種以上）

【令和6年度研究計画】
・微細画分を含む現場MP濃度の長期変動データベース構築（70年間分）
・サルパ類排糞による微細MP沈降量推定（3種以上）
・MP細分化・微細MP生成モデル構築

【自己評価】計画以上の進展がある

2.研究目標の進捗状況
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ１)

サブテーマ1：長期時系列試料解析に基づくMP微細化過程および現場微細MP濃度変遷の復元

【具体的な理由根拠】

- 海洋プラスチックごみ長期時系列変動の解明：日本周辺MP汚染は時代毎に大きく三つのフェイズに分けられることが初めて明らかになった。この増加には社会的な要因に加えて、自然科学的な要因も関わっている可能性を見出した。

- 日本周辺の汚染海域拡大時系列把握： MP汚染は戦後から現代まで断続的に進行してきたことを明らかにした。また優占する形状が時代毎に変化していたことを示した。黒潮ではポリエステル、ポリプロピレンに加えポリスチレンの寄与が比較的高いことを示した。

2.研究目標の進捗状況
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ１)

サブテーマ1：長期時系列試料解析に基づくMP微細化過程および現場微細MP濃度変遷の復元

【具体的な理由根拠】

- 表面形状観察に基づく細分化過程復元：劣化が進んだMPほど、ひび割れ密度が高く、小型で表面が滑らかという特長をもつことが明らかとなり、表面から細かい破片が剥離する過程が微細MP生成に重要であることが示された。

- 付着生物相観察：デジタル顕微鏡、走査電顕、DNAメタバーコーディング解析によりMP上に多様な生物の付着を確認。特に付着率の高い珪藻およびラン藻様生物はMPの浮力や表面構造変化に大きな影響をもつ可能性を示した。

- サルパ類胃内容物に基づく微細MP濃度推定：胃中にMPが存在することが確認された3種について現場MP推定法を確立した。これに基づき黒潮域の微細MP濃度を推定した。

【目標達成の見通し】長期時系列試料の解析については予想以上の進展があったことから近年のデータの充実化を進めており、計画年度内には精度の高いデータベースの構築が見込まれる。その変動要因についても新規性の高いデータが得られている。微細化モデル提案は予定よりも早く進展している。サルパ胃内容物を用いた微細MP濃度復元方法確立も想定より早く達成され、過去試料解析への道筋がついた。各項目を進めることで最終目標は十分に達成できると考えている。

2.研究目標の進捗状況
(1)進捗状況に対する自己評価(サブテーマ2)

サブテーマ2：現場観測および実験に基づく微細MPの表層からの除去過程の解明

【サブテーマ2の研究目標】

- 海水および海底堆積物中の微細MP（<300 μm）の前処理・分析手法を確立する
- 外洋域の海表面、水柱内および堆積物中における微細画分を含むMPの分布を調査し、沈降過程を推定する
- 実海域から採取したプラスチック片を用いた室内実験により、微細化・溶存化の過程を解析する
- 劣化度や生物付着度の異なるMPを用いて、プランクトン起源粒子と共沈し易いMPの物理化学的な特徴を明らかにする

	令和4年度	令和5年度	令和6年度
研究計画	微細MPの前処理・分析手法の確立→**終了**		
	黒潮域における微細MPの分布解析(10試料以上)→**終了**	東部インド洋における微細MPの分布解析 (10試料以上)→**海域変更**	北太平洋亜熱帯循環における微細MPの分布解析（10試料以上）
	プラスチック片の微細化・溶存化実験	MPとプランクトン起源粒子の共沈過程解析	現場観測と室内実験の統合的解析

【自己評価】計画通り進展している

2.研究目標の進捗状況
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ2)

サブテーマ2：現場観測および実験に基づく微細MPの表層からの除去過程の解明

【具体的な理由・根拠】

- 微細MPの前処理・分析手法の確立: 試料汚染の抑制と高い回収率(73-90%)を両立させた手法を開発
- 黒潮域における微細MPの分布解析: 開発した手法を適用し、微細MPの分布を調査 (>30試料を分析)．<100 μmの微細MPが優占することを解明 (図1)
- 現場濾過器を用いた海水中の微細MP採取の検討: >100 mでは十分な濾過量(>200 L)を確保．中深層での有効な微細MP採取手段であることを確認
- 太陽光暴露実験によるMPの微細化の検討: 太陽光暴露と遮光したコントロールでは両者ともMPの重量低下が見られ、MPの海水への溶出プロセスの可能性を示唆
- MPのプランクトン起源凝集物の沈着過程の解析:MPの表面の劣化度と、凝集物への沈着し易さの関係を調べたところ劣化度による有意な変化は無いことを確認（図2）

【目標達成の見通し】

- 信頼性の高い前処理・分析法を確立し、黒潮域を含む外洋域での試料採取・分析も順調に進んでいる(研究航海延期のためR5年度の調査海域を西部北太平洋に変更)。また、室内実験については手法が確立され、今後、条件を様々に変えた実験を追加していくことで目標達成は十分可能である。

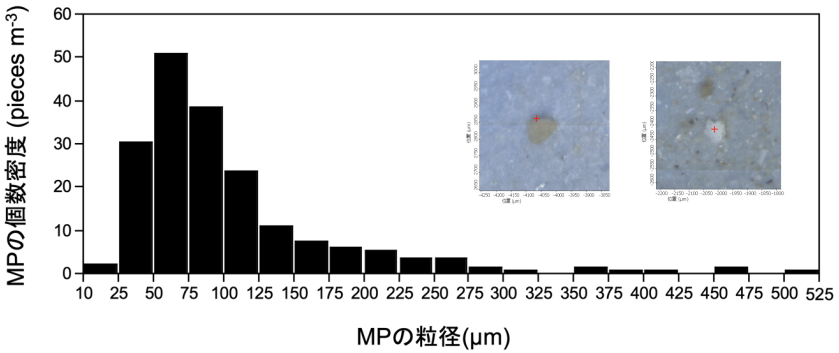


図1. 黒潮域表層におけるマイクロプラスチックのサイズ分布

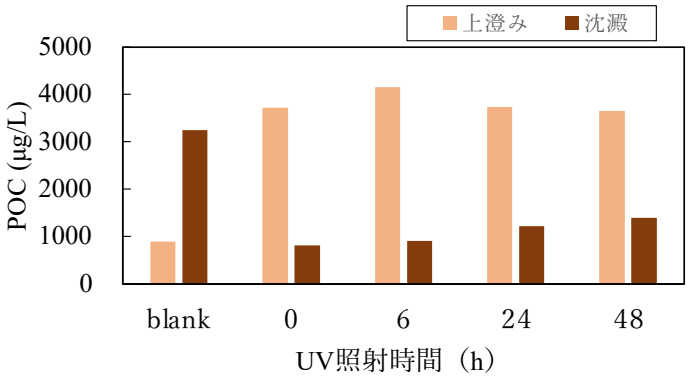


図2. UV暴露時間に伴うMPの劣化度進行と、MPへ凝集する有機物量（POC)との関係

2.研究目標の進捗状況
(1)進捗状況に対する自己評価(サブテーマ３)

サブテーマ３：微細画分を含むMP分布海洋シミュレーションモデルの構築

【サブテーマ３の研究目標】
・海洋再解析値を用いて、再解析値を作成しているモデルと同じモデルシステムを用いて、海洋プラスチックの水平移流・分解モデルを構築する。
・過去再現実験を実施し、サブテーマ１から導出される粒径および材質の分布時間変化を再現するために必要な分解速度を求める。
・現在再現実験を実施し、サブテーマ２から導出される水中鉛直分布，堆積物中分布を再現するために必要な鉛直方向の沈降速度を求める。
・求めた分解速度、鉛直方向沈降速度を用いて、将来シミュレーションを実施し、微細画分を含めたMPの黒潮周辺海域での海水面、海中及び海底存在量の将来予測を行う。

【令和4年度研究計画】
・海洋再解析値を作成しているモデルと同じモデルシステムを用いた、海洋プラスチックの水平移流・分解モデルの構築
【令和5年度研究計画】
・過去再現実験を実施：サブテーマ１から導出され粒径および材質の分布時間変化を再現するために必要な分解速度の導出（30年分以上）
【令和6年度研究計画】
・サブテーマ２から導出される水中鉛直分布，堆積物中分布を再現するために必要な鉛直方向の沈降速度の導出：黒潮周辺海域での海水面、海中及び海底存在量の将来予測の実施（30年後）

【自己評価】計画以上の進展がある

2.研究目標の進捗状況
(2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ３)

【具体的な理由・根拠】
初年度に計画していた海洋再解析値を作成しているモデルと同じモデルシステムを用いた海洋プラスチックの水平移流・分解モデルの構築が順調に進み、過去再現実験を実施した。65年間におよぶ浮遊性マイクロプラスチックを想定した数値シミュレーションは当初の予定である30年分以上をはるかに超える計算量である。これに加え、沈降性マイクロプラスチックのシミュレーションも実施した点で、計画以上の進展があると判断される。

【目標達成の見通し】
排出シナリオに基づいたマイクロプラスチックの分布評価が、労力をかけないで可能となるように設計したため、計算負荷をかなり削減することができた。今年度の後半は、サブテーマ１から得られる観測データと比較することによって、浮遊性マイクロプラスチックの分解速度を推定する予定であるが、この推定においても同様の方法で実施できるため、かなりの計算負荷削減につながる。来年度実施予定のサブテーマ２の観測結果との比較による沈降速度の推定においては、モデル再計算が必要となるが、沈降性マイクロプラスチックの数値シミュレーションを既に実施しているため、沈降速度の初期推定が速やかにできることが期待される。これらのことから、最終的な目標達成に十分な寄与ができると見込んでいる。

3. 研究成果のアウトカム
（環境政策等の貢献）

【行政等が活用することが見込まれる成果】

・プラスチック汚染モニタリング体制の構築推進

本研究で得られた世界最長である本研究の長期変動データセットを継続させるため、様々な調査船を利用したプログラム体制を確立し、そのデータ・分析を一括管理するシステムを構築する。得られたデータはオンライン上で公開し世界の環境研究者に利用可能なデータベースを提供する。世界最長最古の時系列データが存在する日本周辺海域において、今後もモニタリングを続けることは、国際的な責務でもある。例えば現在実施されているプラスチックごみ削減ための諸政策や対策の有効性、追加対策の必要性などを検証、議論するには、長期的な調査結果に基づく明確な証拠が必要であり、この点において本データに続くモニタリングシステム構築は明確な国際貢献として国外に大きくアピールできる。

・微小MPモニタリング機器の開発推進

本研究により日本周辺の海洋には表層だけでなく、表層以深にもネットサンプリングでは採集することのできない300μm以下のプラスチックが普遍的に分布していることが示された。このサイズのプラスチックの定量には多大な時間と労力を必要とするため、技術的な問題を克服した現場設置型のモニタリング機器の開発を推進することを提案する。このようなシステムは海外でも存在しておらず、世界に先駆けて開発することで海洋モニタリングの標準法となる可能性が高く、世界的な環境政策、対策に貢献できる。

・魚類分布影響解析への応用：

サブテーマ３から推定されるマイクロプラスチックの分布情報は、魚類の分布情報との重複を解析することで魚類のマイクロプラスチック暴露ポテンシャルを推定することが可能となる。IPCCに関連している魚類生産モデル比較実験FIS-MIPにおいて、温暖化、貧酸素化、酸性化に加えての第４のストレッサー情報としての利用が見込まれる。

【行政等が既に活用した成果】海洋プラスチックごみによる生物・生態系影響把握業務影響、ばく露評価委員会(2022年10月21日)において、本研究成果である「サルパ類消化管内容物を利用した微小マイクロプラスチック現場密度推定の試み」について手法および結果予報を提示し、微小MP評価手法のレビュー作成および適切な環境評価指標の議論推進に貢献した

4. 研究成果の発表状況

【誌上発表（査読有り）：３件】

・Gamage, G. N. T., K. Miyazono, T. Sato, R. Yamashita, A. Takasuka, M. Watai, T. Yasuda, H. Kuroda, and K. Takahashi (2023) Floating plastic accumulation and distribution around Kuroshio Current, western North Pacific. Marine Pollution Bulletin, 188: 114604

・Wang Y., R. Yamashita, Y. Matsumura, S. Ito, K. Komatsu (2023) Dynamics of microplastic transport and accumulation in a rural coastal area: Insights from the Otsuchi Bay, a small ria in Sanriku, Japan. Regional Studies in Marine Science, 62, 102964.

・伊藤進一・道田豊・山下麗・松村義正 (2022) 海洋マイクロプラスチック実態把握研究の動向. 海洋調査技術, 32, 7-13.

【口頭発表（学会等）：6件】

・Gamage. G. N. T., K. Miyazono, R. Yamashita, A. Takasuka, M. Watai, T. Yasuda,K. Takahashi: Prevalence and characterization of floating plastics in Kuroshio area of the western North Pacific. ECSA 59 International Conference, Sept. 2022, Madrid, Spain

・Miyazono, K. Tadokoro, H. Miyamoto, K. Takahashi: Long-term change of distribution and composition of floating marine　plastic debris around Japan from 1949 to 2016. ECSA 59 International Conference, Sept. 2022, Madrid, Spain

・江上賢悟・宮園健太郎・山下麗・若林香織・高橋一生：サルパ類消化管内容物を利用した微小マイクロプラスチック現場密度推定の試み. 日本海洋学会海洋生物シンポジウム2023 2023年3月20日　東京海洋大学（学生優秀発表賞受賞）

・Ito S., Y. Matsumura, H. Xu, N. Ogawa, K. Hayama, M. Asari: Toward a less plastic ocean: connecting science and communities. PICES 2023, Oct. 2023, Seattle, USA （予定）

・許浩東・松村義正・山下麗・伊藤幸彦・中野英之・伊藤進一：海底堆積物中のマイクロプラスチック分布に関する数値実験. 日本海洋学会2023年度秋季大会, 2023年9月京都大学（予定）

・許浩東・松村義正・中野英之・高橋一生・伊藤進一：微細画分マイクロプラスチックを想定した海洋シミュレーションモデルの構　　築. 日本海洋学会2023年度秋季大会,2023年9月京都大学（予定）

【国民との科学・技術対話：３件】

・「プラスチックゴミ汚染問題の実態について」（令和4年11月25日、聴講者6名）
公益社団法人MORIUMIUS（宮城県石巻市）漁村留学プログラム（中学生）特別授業

・「マイクロプラスチックの分析体験」（令和5年3月27日、参加者13名）
東京大学「東大の研究室をのぞいてみよう！ 多様な学生を東大に 」プログラム・高校生公募企画

・「作って学ぼう！アサリの3D模型－小さなエサを利用する生物の秘密－」（令和4年10月3日、参加者50名）
東京大学大気海洋研究所一般公開企画　（親子25組、計50名公募）

5. 研究の効率性

【研究体制】
研究は、東京大学弥生キャンパス（サブグループ１）および東京大学柏キャンパス（サブグループ２，３）で主に実施された。それぞれのサブグループには各テーマを専門とする複数名の常勤研究者が所属しており、その研究者が指導する大学院生とともに、研究課題を推進した。研究者、学生は日頃から会議や講義で交流する機会が多く、緊密な連携をとることができた。またサブグループ２，３の研究者が所属する大気海洋研究所は、研究船を運航していることから研究航海への参加機会が多く、これによって観測機器のテストや分析試料の採取などを円滑に実施することができた。

【課題管理】
サブグループ間の連携を密にするため、解析を担当する各サブグループの研究者、学生が集まり計３回の対面またはハイブリッドのワークショップを開催した（4/25，12/23, 2/22）。 このワークショップでは、新規に導入した高精細デジタルマイクロスコープ使用方法のインストラクション、共通データシート作成、微細化に深く関わる表面構造解析の適切なパラメータ選択の議論、などが実施された。これにより研究チーム内のデータ共有が容易になり解析が効率化されることで研究が大きく進展した

【研究資金の運用】
また高い分析技術を要する顕微FTIRの分析には研究開始当初、柏キャンパス所有の機器を共用で使い、経験のある研究者の指導を受けることで統一的かつ高度な技術の習得に努めた。技術が習得できた2年目に弥生キャンパスに同じ機種を導入する計画であり、精度の高いデータを効率的に取得することができる見込みである。また初年度に購入した現場濾過器は物価高騰により当初の購入予定金額を超えてしまったが、同観測から得られるデータをモデル計算に使用するサブテーマ３の予算と合算することにより、購入することができた。無事納入された現場濾過器は本年6月、7月に実際に航海で使用され、良質の試料を採集することができた。