

インドネシア多島海からインド洋におけるマイクロプラスチックの形成に関する研究

河野, 稜平
九州大学総合理工学府大気海洋環境システム学専攻

<https://hdl.handle.net/2324/4776838>

出版情報 : 九州大学, 2021, 修士, 修士
バージョン :
権利関係 :

令和3年度
九州大学大学院総合理工学府
大気海洋環境システム学専攻修士論文

インドネシア多島海からインド洋における
マイクロプラスチックの形成に関する研究

氏名 河野 稜平

指導教員名 磯辺 篤彦 教授

概要

プラスチック製品は我々の生活のあらゆる場面で利用されており、その生産量は年々増加し、2015年は約3.8億トンであった (Geyer et al., 2017)。これらのプラスチックの多くは適切な処理がされない Mismanaged Plastic Waste (以降, MPW) となって、その一部が海洋へ流れ込んでいる。海洋へ流れ込んだ MPW は、海洋生物の誤食を引き起こし、海洋生態系へダメージを与える。さらに、プラスチックは性質上、風や紫外線により劣化・破碎はするが、完全に消滅することはない。劣化・破碎を繰り返し、最終的に粒径 5mm 以下のマイクロプラスチック (以降, MP) へと変化して半永久的に存在し続ける。MP も MPW と同様に、誤嚥などにより海洋の生態系に悪影響を与えている。従って、MPW から MP へと変化する過程を詳細に解明することは急務である。

本研究では、全世界のMPWにおける67%が流出しているアジア地域 (Lebreton et al., 2017) に着目した。インドネシア多島海を中心とするアジア地域は島が多いため、MPWの海岸漂着機会は多くなると考えられる。また、MPWは風圧流の影響を強く受け輸送されるため、季節風が卓越する本地域にて、季節風MP化に寄与する影響を検証した。本実験では、海岸漂着した多量のMPWがMPになるまでを粒子追跡モデル (Particle Tracking Model : PTM) により追跡シミュレーションを行った。マクロプラスチックごみに見立てた粒子をPTM (自作のPythonコード) により、その移動経路を8月流出と2月流出から追跡実験を行った。海洋の表層のみを移動する水平二次元モデルを考え、粒子位置の更新をIsobe et al., (2009)より計算した。また、粒子の海岸漂着・再漂流の判定を、それぞれ1日 (Hinata et al., 2020)・200日 (Kataoka et al., 2011) で $1/e$ となる指数関数で与えた。破碎は、1年・半年・2年で同様の関数を与えた。

追跡結果から、8月流出では風ありの場合は風なしと比較して、北向きに卓越する冬季季節風の影響によりインドネシア多島海からインド洋沖合へ抜ける粒子が減少し、インドネシア西岸での破碎に繋がった。2月粒子では、インドネシア多島海からインド洋沖合へ抜ける粒子は風の有無に関わらず両方で確認できたが、風ありでは日本近海を北上しようとする粒子群を南東夏季季節風が東シナ海へ吹き寄せたからであると考えられた。このように8月粒子群も2月粒子群もともに風によりインドネシア多島海周辺および南・東シナ海に捕捉されることが分かった。加えて、粒子の海岸漂着および破碎は、粒子が流出する月に関わらず、風に強く依存していることが判明した。これは、風により輸送距離が伸びた粒子が風なしと比較して海岸への漂着機会を得やすいためであると考えられる。マクロプラスチックごみは風により輸送距離が伸びたにも関わらず、インドネシア多島海周辺に捕捉されるため、その周辺地域において破碎量が増加する。また、破碎までの時間スケールの違いによる破碎地点の変化は確認できず、破碎量は時間スケールが長いほど大きくなった。以上より、マクロプラスチックごみのMP化は風に大きく依存し、季節性を持っているため、「いつ」マクロプラスチックごみが流出するかがMP化において重要因子となることが分かった。

目次

第1章 序論.....	5
1.1 本研究の背景.....	5
1.1.1 プラスチックごみによる海洋汚染.....	5
1.1.2 マイクロプラスチック.....	6
1.1.3 アジア地域でのマクロプラスチックごみ流出.....	8
1.2 本研究の目的.....	8
1.3 本論文の構成.....	9
第2章 研究方法.....	10
2.1 使用データについて.....	10
2.1.1 表層海流の流速.....	10
2.1.2 風速.....	10
2.1.3 マクロプラスチックごみの流出位置.....	10
2.2 粒子追跡モデル.....	11
2.2.1 モデルの概要.....	11
2.2.2 PTM の設計.....	12
2.2.3 風圧流の流速データへの合算.....	13
2.2.4 マクロプラスチックごみの破碎までの過程.....	14
第3章 風によるマイクロプラスチック化の促進.....	16
3.1 解析方法.....	16
3.1.1 風ありの場合と風なしの場合の比較.....	16
3.1.2 8月投入と2月投入による違い.....	16
3.1.3 海岸での破碎（マイクロプラスチック化）個数の積算.....	17
3.2 結果.....	17
3.2.1 破碎地点の変化.....	17
3.2.2 破碎量の変化.....	19
第4章 破碎までの時間スケールによるマイクロプラスチック化の依存性.....	22
4.1 解析方法.....	22
4.1.1 時間スケールの設定.....	22
4.2 結果.....	22
4.2.1 時間スケールごとの結果.....	22
第5章 マクロプラスチックごみの流路による考察.....	25
5.1 解析方法.....	25
5.1.1 流路のヒートマップ.....	25
5.1.2 インド洋滞留粒子と南シナ海滞留粒子の比較.....	25

5.2 結果.....	26
5.2.1 風の有無，破碎までの時間スケールごとの結果.....	26
5.2.2 粒子位置の比較.....	30
第6章 結論.....	38
参考文献.....	40
図表目次.....	42
式目次.....	44
表目次.....	45
付録.....	46
謝辞.....	51

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 プラスチックごみによる海洋汚染

プラスチック製品は我々の生活のあらゆる場面で使用されており，この意味で現代の人間は「プラスチック時代 (Plastic Age) ; Thompson et al., 2009」に生きている．プラスチック製品として例を挙げると，洋服，ビニール袋，飲料用ペットボトル，自動車，電化製品等，その用途は非常に多岐に渡る．プラスチックは安価に生産できるのに対し，軽く丈夫であることから多くの製品に使用されるまで発展した．2015年には，3億8100万トンものプラスチックが生産され，この生産量は年々増加している（図 1.1.1-1 世界のプラスチック生産量（1950-2015）（Geyer et al., 2017）；Geyer et al., 2017）．

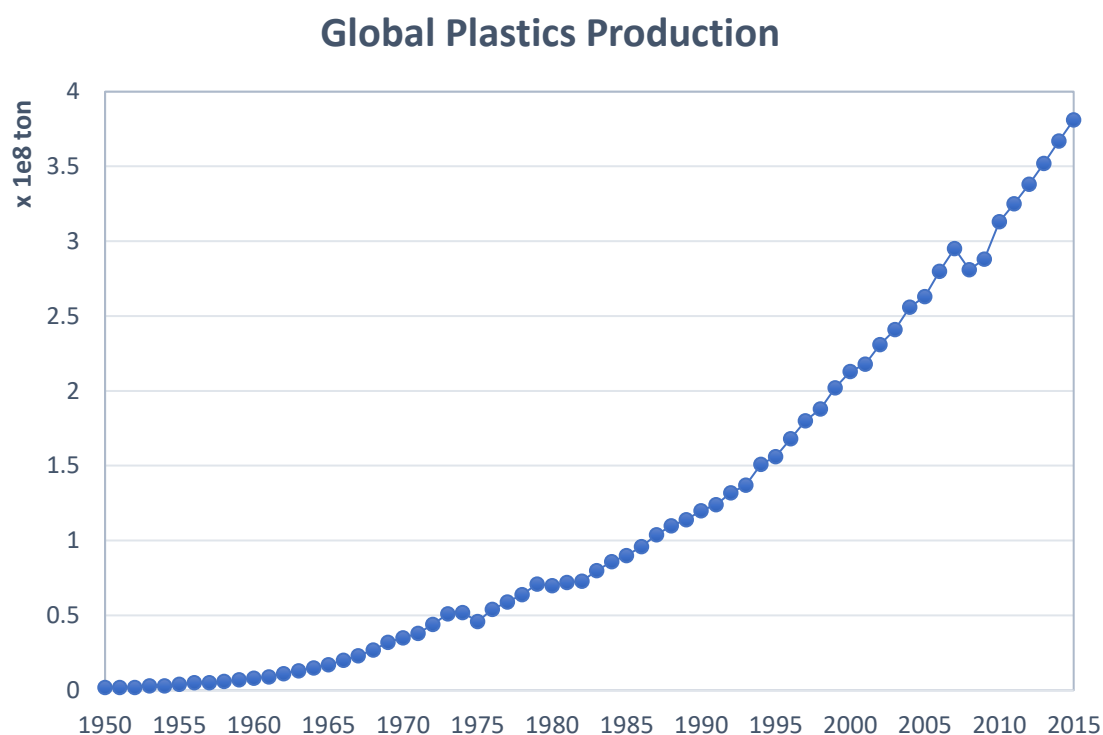


図 1.1.1-1 世界のプラスチック生産量（1950-2015）（Geyer et al., 2017）

この大量のプラスチック製品を利用することは現代を生きる我々の生活において，無くてはならない存在となっている．しかしながら，これらプラスチック製品が使用された後は，多くのプラスチックがごみとして使い捨てされたり，正しい処理がされずに海洋へ直

接捨てられたり、河川に捨てられたものが海洋へと流れ込んだりしている。これらの正しい処理がされなかったプラスチックごみを **Mismanaged Plastic Waste** (以降, **MPW**) と呼ぶ。プラスチックごみが海洋へ与える影響として、海洋へ流れ込んだ **MPW** は、ウミガメや海鳥、魚などがビニール袋を餌と間違えて誤食してしまったり、海洋へ捨てられたネットに絡まったりして、その後に窒息してしまうケースがある。例えば、プラスチックごみを餌と間違えて誤食してしまうケースでは、最大でウミガメの約 52% (Schuyler et al., 2015)、海鳥の約 90% (Wilcox et al., 2015) がプラスチックごみを摂取していると推定されている。さらに、2050 年までには、99% の海鳥がプラスチックを摂取した個体となるとの見立てもある (Wilcox et al., 2015)。プラスチックごみによる海洋汚染はこのように海洋生態系へと大きな影響を与える。それだけではなく、海洋景観や漁業への影響も大きい。プラスチックごみは海洋を漂流したのち海岸へ漂着する。長崎県八朔鼻海岸では、韓国語や中国語が記載されたプラスチックごみが多く発見されている (Kako et al., 2010)。これらの海岸でのごみよる景観悪化は、観光客の減少を引き起こす問題である。また、ネットといった海洋ごみは漁業の魚を殺傷してしまい、海藻といった水産物に海洋ごみが混入すると除去作業が必要となる。2008 年における APEC からの海洋資源に関する報告書によると、アジア太平洋地域では、プラスチックごみによって観光業界で年間約 6.2 億ドル、漁業・養殖業界で年間約 3.6 億ドルの経済損失が発生した。(「WWF Japan - 海洋プラスチック問題について」参照)

1.1.2 マイクロプラスチック

プラスチックを分解可能な微生物は自然界に存在しないため、海洋中へ流出した **MPW** は、主に海岸における波や風による衝撃や紫外線といった自然影響により劣化や破砕はするが、それでも完全に消滅することはない。これより、自然界には **MPW** が破砕を繰り返し、粒径が 5mm 以下であるマイクロプラスチックとなり、半永久的に残り続けると考えられている。マイクロプラスチックの環境被害もマクロプラスチックごみ (>数 cm のサイズのプラスチックごみ) と同様に、海洋生態系にダメージを与えることが知られている。このようなダメージは、例えば、マイクロプラスチックをプランクトンと間違えた魚類や甲殻類などが誤食したり、海洋に生息する哺乳類が海水中を移動するマイクロプラスチックを誤嚥したりすることで発生する。一般的に、海洋に漂う物質は、魚類や甲殻類に摂取されたのち、肉食の魚類や海洋哺乳類、鳥類によって捕食されることで生物濃縮されていく。従って、食物連鎖の上位に存在する生物ほどより濃縮されたマイクロプラスチックを体内に摂取することになり、さらに生物濃縮が進行する。健康被害に関しては、プラスチック自体の健康への有毒性は未だ明らかになってないが、プラスチックは海洋環境に存在する有害物質を吸着する性質があることが明らかになっている (Mato et al., 2001)。よって、マイクロプラスチックが潜在的に健康へ悪影響を及ぼす可能性は高い。そして、海洋中に存在するマイクロプラスチック量は図 1.1.2-1、図 1.1.2-2 のように、マクロプラスチックの海洋への存在量に比例して増加している (Lebreton et al., 2019)。

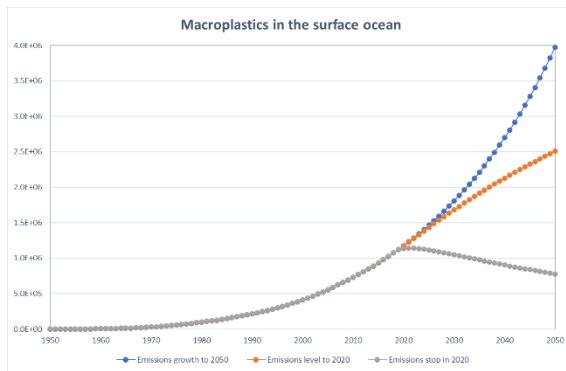


図 1.1.2-1

表層に存在するマクロプラスチック (1950-2050) (Lebreton et al., 2019)

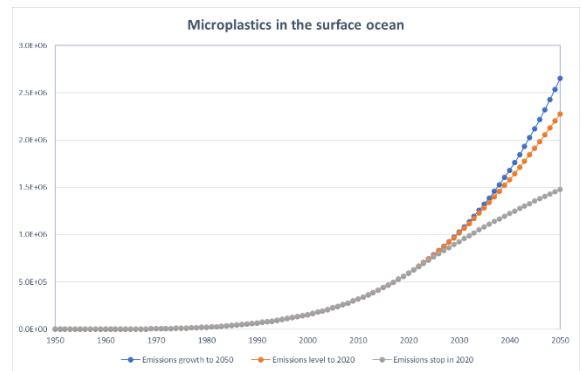


図 1.1.2-2

表層に存在するマイクロプラスチック (1950-2050) (Lebreton et al., 2019)

また、全世界におけるマイクロプラスチックの分布は図 1.1.2-3 の通り (Eriksen et al., 2014) である (カラーバーは 1km 四方あたりの粒子数を表す)。

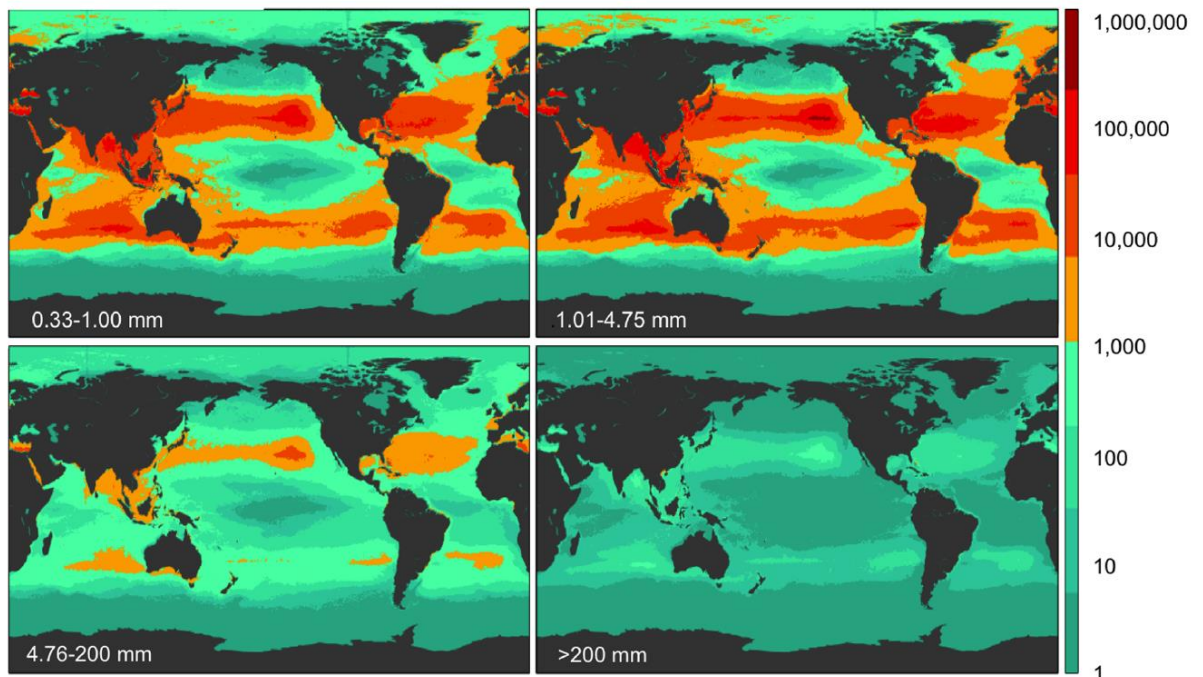


図 1.1.2-3 世界のマイクロプラスチック分布 (pieces per square km) (Eriksen et al., 2014)

これより、マイクロプラスチック粒子数はマクロプラスチックごみよりも大量に海洋中に存在することが分かる。マイクロプラスチックはそのサイズから、マクロプラスチックのように海洋から回収することは困難である。従って、MPW がどのようにマイクロプラスチック化するのかを把握することは重要な問題である。

1.1.3 アジア地域でのマクロプラスチックごみ流出

1.1.1 で述べたように、全世界でのプラスチック生産量は 1950 年からおおよそ連続して増加している。これらが海洋へ流出する MPW はアジア地域から起因するものが多く、世界での MPW 流出の原因となっている全河川のうち、約 67%がアジアに存在する河川からの MPW 流出であることが報告されている (Lebreton et al., 2017)。図 1.1.3-1 の 2010 年推計の MPW の国別分布においても、中国をはじめとしたアジア諸国で最も海洋へプラスチック流出が行われていることが分かる (Jambeck et al., 2015)。従って、アジアから流出する MPW がどのような経路を辿ってどこでマイクロプラスチック化するのかを把握することは重要であり、これは世界のマイクロプラスチック減少へとつながる情報である。

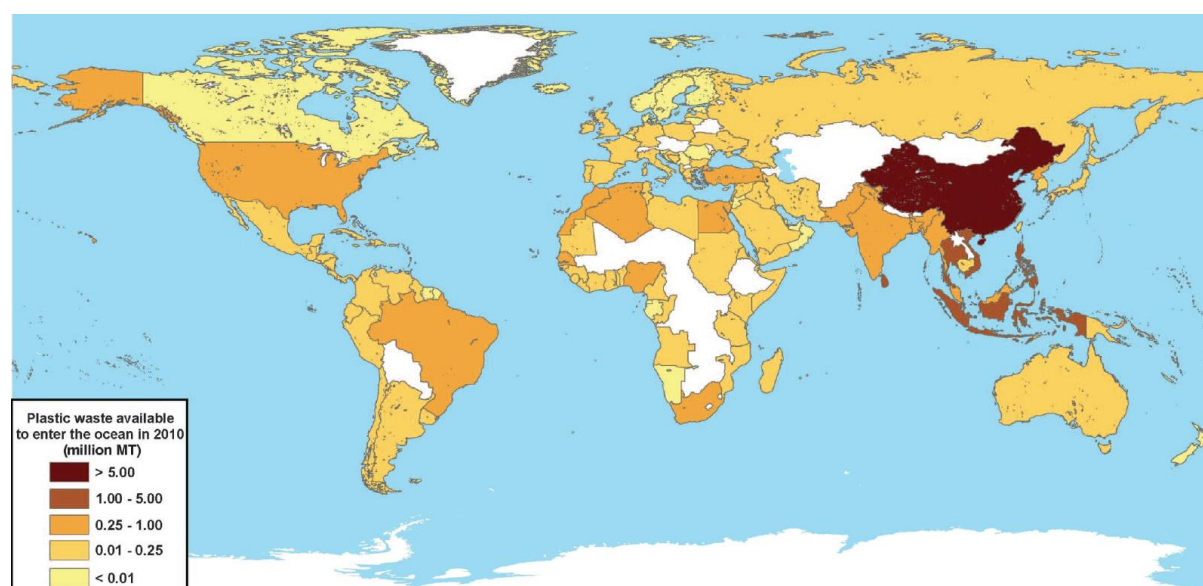


図 1.1.3-1 2010 年推計 MPW の国別分布 (Jambeck et al., 2015)

1.2 本研究の目的

前述の通り、全世界の MPW における 67%がアジア地域から流出していることが明らかになっており、この膨大な量のマクロプラスチックごみが海洋漂流ののち、海岸での漂流を通してマイクロプラスチック化していく。本研究の目的は、特に MPW 流出の多いインドネシア多島海を含むアジア地域において、マクロプラスチックごみが破碎しマイクロプラスチック化することを促進させる条件を明らかにすることにある。インドネシア多島海を中心とするアジア地域は島が多いことに加え、周辺国から排出されるプラスチックごみも多い。従って、排出されたマクロプラスチックごみの海岸漂着機会は多くなると考えられる。このマイクロプラスチック化の促進条件としては、季節変化する海流や風圧流による輸送経路、マクロプラスチックからマイクロプラスチック化する劣

化・破碎の時間スケール，リアス海岸といった海岸形状，マクロプラスチック排出量の月変化などが挙げられるが，本研究ではその中でも季節風の影響とマイクロプラスチック化への時間スケールの2点に着目し，マイクロプラスチック化へと寄与する影響について明らかにした。

1.3 本論文の構成

以下に本論文の構成をまとめる。

第2章では，今回使用したデータの概要・研究手法について述べる。

第3章では，風の有無がマイクロプラスチック化にもたらす変化について述べる。

第4章では，破碎までの時間スケールの違いが引き起こす破碎量の変化について述べる。

第5章では，風の有無，破碎までの時間スケールによるマクロプラスチックごみの流路および粒子位置の比較・解析について述べる。

第6章では，各章で得られた結果をまとめ，本論文の結論を述べる。

第2章 研究方法

2.1 使用データについて

2.1.1 表層海流の流速

本研究では、マクロプラスチックごみは海洋表層を浮かんで移動すると仮定したため、マクロプラスチックごみの輸送を表層海流に運ばれる粒子追跡モデル（後述）で計算する。この表層海流の流速データとして、本研究ではハイブリッド座標海洋モデルである HYCOM と Stokes drift の線形和 (Isobe et al., 2019) を用いた。この空間解像度は、緯度 $1/12^\circ$ × 経度 $1/12^\circ$ であり、時間解像度は月平均である。海洋モデルの境界条件やデータ同化に関しては HYCOM のウェブサイト (<https://www.hycom.org/>) より確認可能である。Stokes drift は衛星風データで駆動した波浪モデルで計算されているが、やはり詳細は Isobe et al., (2019) を参照されたい。

2.1.2 風速

海洋を流れるマクロプラスチックごみは常に海洋中へ沈んでいるとは限らない。例えば、ペットボトルのようなマクロプラスチックごみは多くの体積が空気中に晒されている。従って、マクロプラスチックごみを追跡するときには風圧流による影響を検討する必要がある。本研究においては風圧流の計算に用いる風データに、衛星風データである J-OFRO3 (Tomita et al., 2019) と ASCAT 風速データ (Kako et al., 2011) を用いた。空間解像度は、緯度 $1/4^\circ$ × 経度 $1/4^\circ$ であり、時間解像度は月平均である。データセットのダウンロードはウェブサイト (<https://j-ofuro.isee.nagoya-u.ac.jp/>) より可能である。この風速を 2.1.1 の表層流速と合算する手順は後述している。

2.1.3 マクロプラスチックごみの流出位置

本研究ではマクロプラスチックごみが破碎しマイクロプラスチック化していく過程を粒子追跡によりシミュレーションした。そのために、マクロプラスチックごみの追跡を開始する際の流出位置と流出量を、河川からの年平均プラスチックごみ流出のデータ (Lebreton et al., 2017) より設定した (図 2.1.3-1)。また、粒子を流出するタイミングは、この年平均流出量を粒子追跡開始時にのみ発生させた。以降は開始時に流出させた粒子群の位置更新だけを行い、粒子の追加流出は行っていない。

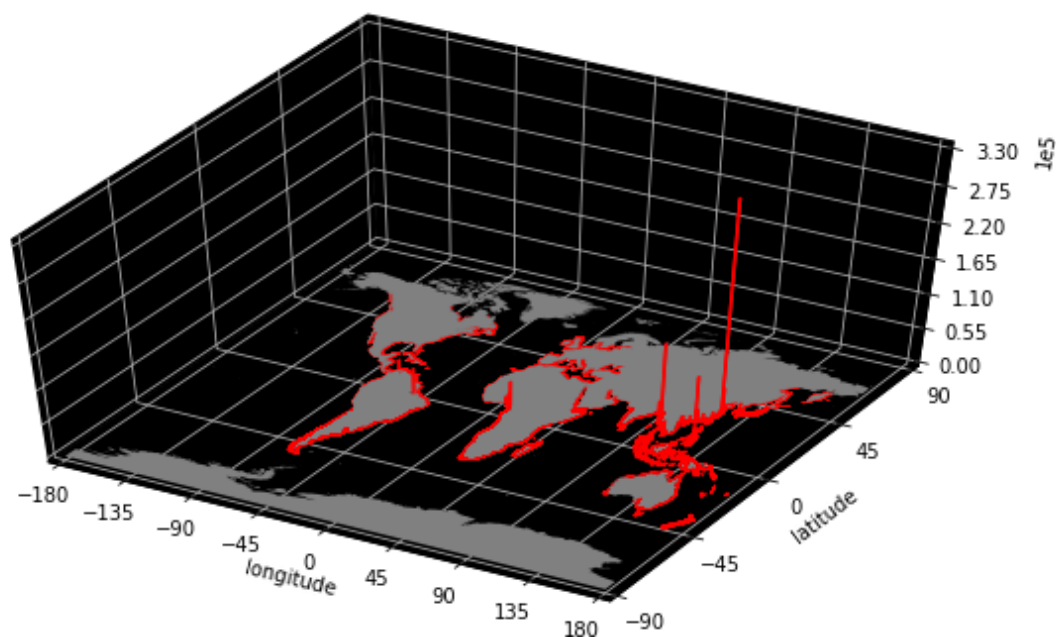


図 2.1.3-1 各河川からの年平均プラスチックごみ流出量. (Lebreton et al., 2017) より作成
(Z 軸はプラスチックごみ流出量 [トン] を表す)

2.2 粒子追跡モデル

2.2.1 モデルの概要

本研究では、河川から流出させたマクロプラスチックごみに見立てた粒子の拡散を追跡するため粒子追跡モデル (Particle Tracking Model : PTM) を用いた。PTM は今回のような海洋ごみ追跡以外にも海洋上に流出した油の拡散や魚卵の移動追跡等をシミュレーションするためにも用いられている。今回の PTM では、海洋表層に浮かぶプラスチックごみ (ポリエチレン, ポリプロピレンといった海水より比重の小さなポリオレフィン) を想定し、表層のみを移動する水平二次元モデルで構築した。計算範囲は下図の通り (経度 : 60.0E~160.0E, 緯度 : 40.0S~40.0N) であり、流速の存在する領域で計算を行った。

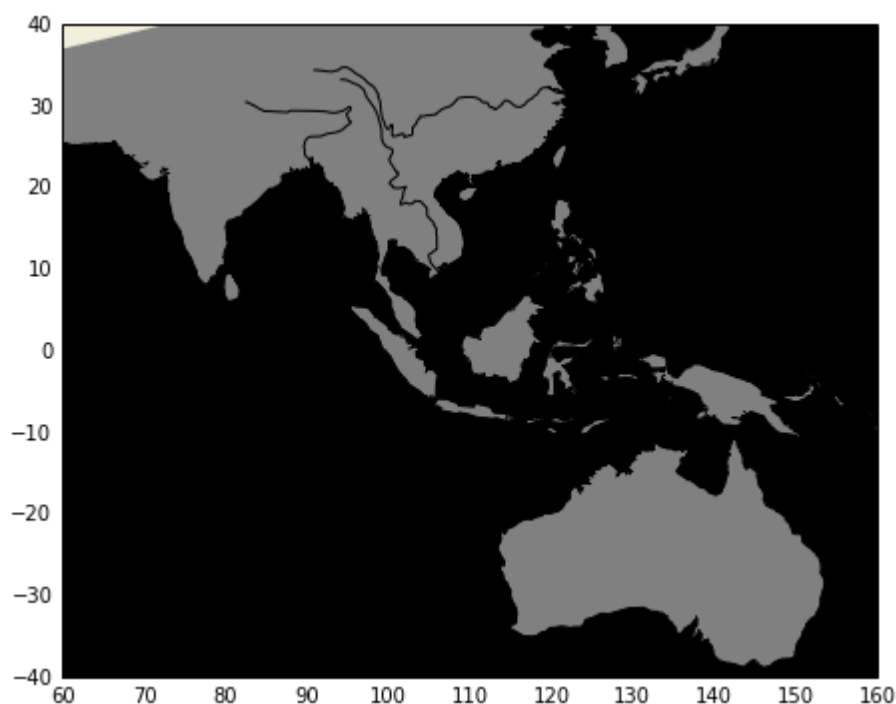


図 2.2.1-1 PTM 計算範囲

また、範囲外に行った粒子はその時点で計算を停止した。

2.2.2 PTM の設計

PTM の粒子追跡の設計について述べる。まず 2.1.3 で述べた年平均プラスチックごみ流出データより、計算範囲内において、マクロプラスチックごみの流出総量の 90% (約 120 万トン) を負荷する河川を選定した。この結果を元に、10 トンの流出マクロプラスチックごみを 1 粒子と見立て、総数約 11 万粒子を各河川のマイクロプラスチックごみの負荷量に按分させて各河口に配置した。次に、配置した粒子位置を、式 2.2.2-1 (Isobe et al., 2009) により更新した。

$$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{X}^t + \mathbf{U}\Delta t + \mathbf{R}\sqrt{2\mathbf{K}_h\Delta t}(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 $\mathbf{X}^{t+\Delta t}$: Δt (s) 後の粒子位置、 \mathbf{X}^t : t (s) 時の粒子位置、 \mathbf{U} : 流速ベクトル、 \mathbf{R} : 平均 0.0, 標準偏差 1.0 に従う正規乱数、 \mathbf{K}_h : 水平拡散係数 (= $1.0 * 10^2$ [m^2/s]) (ただし、10km 空間内の乱流を想定)、 (\mathbf{i}, \mathbf{j}) : 単位ベクトル、であり、時間ステップ Δt は 3 時間で計算した。右辺最終項は水平拡散に伴うランダムウォークを表している。また、2.1.1 で述べたように、流速ベクトルは 0.08° の格子状に与えられているため、粒子位置の計算で用いる流速ベクトルは、粒子位置および計算の時間刻み幅で次のように線形補間して与えた。

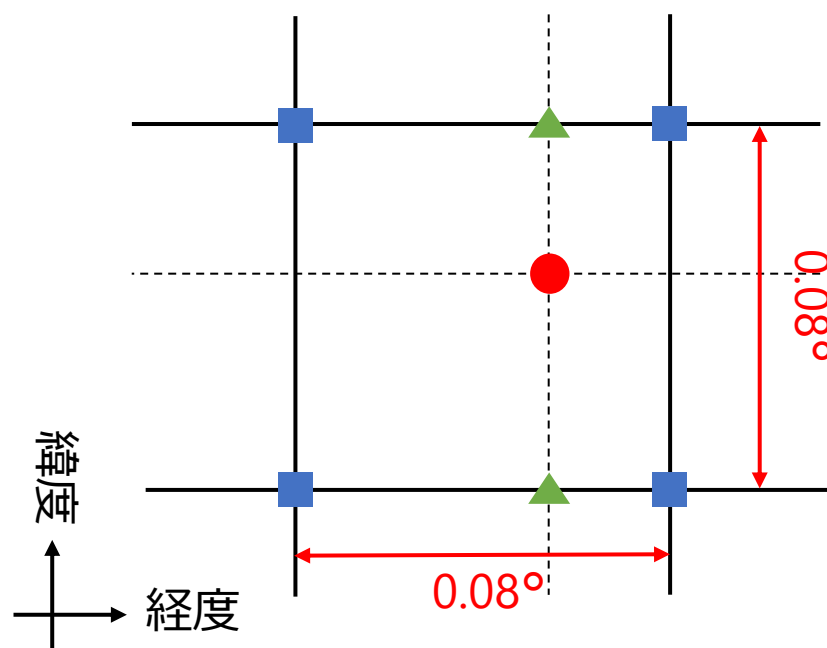


図 2.2.2-1 粒子位置による流速ベクトルの線形補間

ここで、流速ベクトルは図 2.2.2-1 の青正方形で表した格子に存在する。しかし流出粒子の位置は同図の赤丸で示したように格子には存在するとは限らない。そのため、緑三角形で示したように、粒子位置に従って、その粒子を囲む格子に存在する流速ベクトルから、粒子位置と同経度、同緯度地点それぞれの緑三角形位置での流速ベクトルを線形補間により求める。この緑三角形の流速ベクトルから線形補間により赤丸の粒子位置での流速ベクトルを線形補間により求めた。計算の時間刻み幅による流速ベクトルの線形補間についても同様に、計算日時の月によって、計算日時の月初から計算日時、計算日時から翌月初として流速ベクトルを線形補間した。そして、式 2.2.2-1 より、各粒子が時間ステップ 3 時間ごとに移動した地点を計算し、総計算期間が 1 年後となるまで粒子位置の計算を繰り返し行った。

2.2.3 風圧流の流速データへの合算

本研究では、風の有無によるマクロプラスチックごみの破碎地点・破碎量に関する考察を行うため、2.2.2 で述べた計算式における流速ベクトルに対し、海流の流速だけでなく風圧流の流速を合算した流速ベクトルを用いる必要がある。ここで、海流の流速に合算する風圧流の流速を式 2.2.3-1 (Richardson et al., 1997) と表現する。

$$V = \sqrt{\frac{\rho_a C d_a A_a}{\rho_w C d_w A_w}} W_L \quad (2.2.3-1)$$

ただし, ρ_a/ρ_w : 空気, 海水の密度比 ($= 1.15 * 10^{-3}$), Cd_a/Cd_w : 空気, 海水の抵抗係数比 ($= 1.0$), A_a/A_w : 空気, 海水の水平投影面積比 ($= 0$ 以上 10 以下の乱数), W_L : 衛星観測風, である. ここで, 空気と海水の水平投影面積比とは, 海洋上を漂流するマクロプラスチックごみの海洋中の体積と海洋から出ている体積の比を表す. マクロプラスチックごみが完全に空中に浮かんでいる場合は考えないため, 本研究ではその比を 0 以上 10 以下として乱数を設定した. また, その際に海洋中の体積と海洋から出ている体積が等しくなるとき (水平投影面積比 $=1$) を境界とし, 水平投影面積比が 0 より大きく 1 以下の粒子群と 1 以上 10 以下の粒子群の粒子数が同数となるように乱数を与えた. 季節風の影響を見るため, これより, 風ありの粒子追跡実験では海流の流速ベクトルに, 式 2.2.3-1 より計算した風圧流の和を流速ベクトルとして用いた. 風なしの実験では海流の流速ベクトルのみを用いた.

2.2.4 マクロプラスチックごみの破碎までの過程

本研究では, マクロプラスチックごみは, 海岸への漂着中にのみ破碎すると仮定した. マクロプラスチックごみが河口から流出され破碎 (マイクロプラスチック化) するまでには, 海岸への漂着, 海岸からの再漂流, そして海岸にて破碎の過程を経る. これらの過程は, 粒子追跡実験において, 個々の粒子に予め与えられた時間スケールに応じて発生するよう設定した. 個々の粒子に与える時間スケールは指数乱数で設定し, 表 2.2.4-1 に示す e-folding 時間が実現するよう, 時間スケールごとの粒子の個数が配分された. ここで, 漂着と再漂流の e-folding 時間に関しては, それぞれ表のような実海岸での実験結果に基づいている. しかし, 破碎の e-folding 時間に関しては明らかになっておらず, 下表のように 1 年と半年, 2 年と仮定して, 3 通りの実験を行った.

表 2.2.4-1 時間スケールの設定

過程	e-folding となる時間スケール
漂着	海岸への隣接格子に 1 日滞在 (Hinata et al., 2020) したとき漂着. 海岸隣接格子から沖合へ移動した場合, 滞在時間を初期化した.
再漂流	海岸格子に 200 日滞在 (Kataoka et al., 2013) したとき再漂流.
破碎	海岸格子に通算で, ① 1 年 ② 半年 ③ 2 年 滞在したとき破碎 (マイクロプラスチック化). ただし, 再漂流したときにも通算時間は個々の粒子で保存し, 再漂着したときに海岸格子での滞在時間の加算を再開した.

これらの過程を粒子の位置計算が終了した時点で行い, 各過程に対応して漂着・再漂流・

破碎のプロセスを組み込んだ。また、それぞれの粒子が破碎した時点で粒子追跡の計算を停止した。

第3章 風によるマイクロプラスチック化の促進

3.1 解析方法

3.1.1 風ありの場合と風なしの場合の比較

一般的に海上の平均風速は約 24km/h であり，これは海流の平均流速の約 7~8km/h の 4 倍である．そのため，海洋上を漂流するマクロプラスチックごみは風圧流の影響を大きく受け，海流だけと比較して海洋をより移動することが想定される．これにより，風圧流がマクロプラスチックをマイクロプラスチックへと破碎させることへの影響として，次の二つのことが考えられる．①マイクロプラスチックへの破碎地点の変化，②破碎量の増減，である．①について，先述の通り，マクロプラスチックごみは海流と風圧流の両方によって海洋上を漂流する．従って，マイクロプラスチックを生成する破碎地点は，風圧流によってマクロプラスチックの輸送経路が変わることで，海流だけによる破碎地点とは異なる可能性がある．次に②について，風圧流によって流されたマクロプラスチックごみは海流だけと比較して移動速度が速く，また風向の変わる季節風によって多島海の様々な陸地へ漂着機会が多くなるため，破碎量が増加する可能性がある．なお，本節の実験を通して，破碎に至る時間スケールの e-folding 時間は，すべて 1 年で統一する．

3.1.2 8月投入と2月投入による違い

本研究において注目した東アジアと東南アジア，南アジアでは，それぞれ冬季季節風と夏季季節風が発達するため，季節に応じて風圧流を駆動する風速と風向が大きく変化する．冬季には大陸から海洋へ向かって冬季季節風が流れる（図 3.1.2-1 における青矢印）ため，日本近海では北西季節風，東南アジアおよび南アジアでは北東季節風によってマクロプラスチックごみが南方向へ移動すると考えられる．反対に，夏季には海洋から大陸へ向かって夏季季節風が吹く（図 3.1.2-1 における赤矢印）ため，マクロプラスチックごみは北方向へ移動すると考えられる．このように季節に応じて輸送経路が大きく異なることが想定されるため，投入開始月を 8 月投入と 2 月投入に分けることにより，それぞれ冬季季節風と夏季季節風を受けるマクロプラスチックの移動をシミュレーションした．



図 3.1.2-1 アジア地域における季節風分布の模式図

3.1.3 海岸での破碎（マイクロプラスチック化）個数の積算

8月流出と2月流出の実験において、それぞれ風の有無による粒子追跡実験を行った。そして、漂流と漂着を繰り返す粒子が、あらかじめ各粒子で設定された破碎時間を超えて、マイクロプラスチックとなった海岸地点を記録し、経度・緯度ともに1°の海岸格子内での破碎粒子数を3次元バーチャートにプロットした。X軸、Y軸、Z軸はそれぞれ経度、緯度、破碎した粒子の個数（量）を表す。また、風の有無による総破碎量の変化を2次元バーチャートにプロットした。

3.2 結果

3.2.1 破碎地点の変化

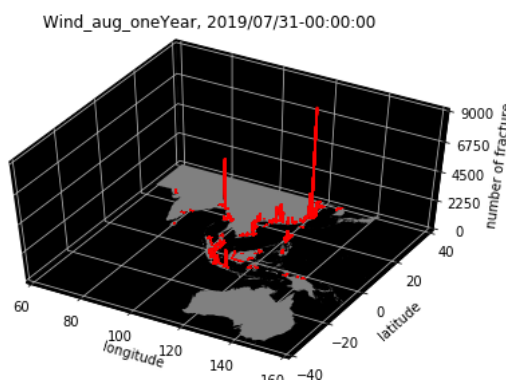


図 3.2.1-1 風あり 8月流出 バーチャート

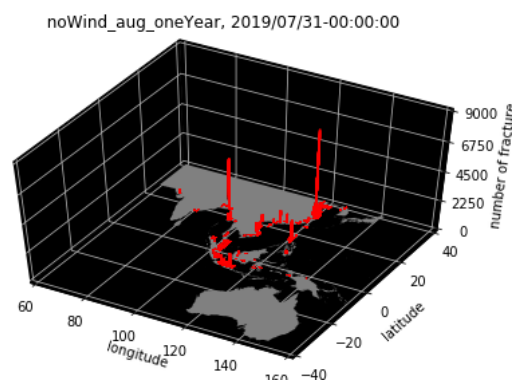


図 3.2.1-2 風なし 8月流出 バーチャート

第3章 風によるマイクロプラスチック化の促進

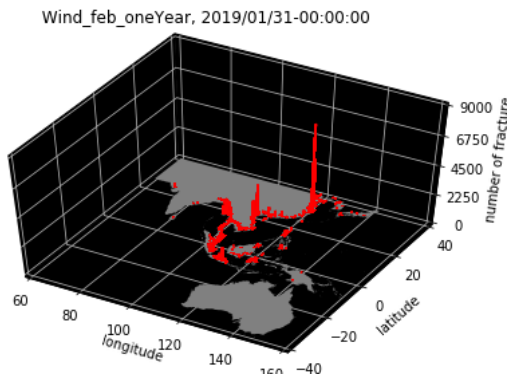


図 3.2.1-3 風あり 2月流出 バーチャート

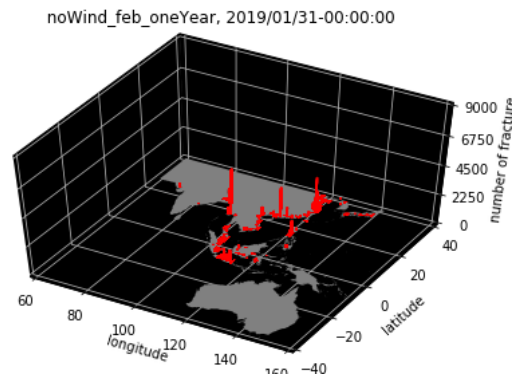


図 3.2.1-4 風なし 2月流出 バーチャート

まず、8月について比較する。図 3.2.1-1 と図 3.2.1-2 より、インドネシア多島海域において、風がある実験が風がない実験に比べて、わずかながらも破碎地点の増加（インドネシアやマレーシア、パプアニューギニアにおいて）および破碎量の増加していることが分かる。同様に、香港からベトナムにかけても破碎量が増加していることが見て取れる。これは、3.1.2 で述べた通り、8月流出後に冬季季節風が北から南へと吹くため、東アジアからのマクロプラスチックごみの漂着機会がインドネシア多島海、香港、ベトナムにおいて増加したため、マクロプラスチックごみの上陸時間が蓄積し破碎が発生したと考えられる。また、図を見れば破碎量の最大値は両図ともに中国長江周辺（120° E, 30° N）であることが分かる。この最大破碎量は風ありの方が風なしのときよりも多い値を示した。これは、長江周辺ではマクロプラスチックごみの流出量が最大であり、これらが風によって岸に吹き寄せられて、漂着機会が増加したためであると考えられる。しかしながら、長江周辺に次いで破碎積算個数が多かったバングラデシュ・メグナ川周辺（90° E, 20° N）における破碎量に大きな変化は見られなかった。これは南アジアにおける夏季季節風は 9 月～10 月ごろまで南西季節風が卓越するため、風ありの状況であっても粒子流出後にメグナ川河口に戻すような風が吹いて南下することができず、破碎量に顕著な差は表れなかったと考えられる。

次に、2月について比較する。図 3.2.1-3 と図 3.2.1-4 より、まず、インドネシア多島海域においては大きな差が見られなかった。僅かながら風ありの方が破碎量が増加しているが、8月流出と比較すると、その増加率は小さい。反対に、香港からベトナム、マレーシアにかけては破碎量の増加が確認できる。長江周辺では著しい破碎量の増加が風によって引き起こされていると分かる。これらの東アジアから東南アジア沿岸にかけての破碎量の増加は、2月流出後に夏季季節風が卓越するとともに、南東風がマクロプラスチックごみを沿岸漂着させる機会が増えたからであると推測される。しかしながら、南アジアを見ると、バングラデシュにおいては風なしの方が 2 月においては破碎量が遥かに多いことを示した。これに関しても、南アジアにおいては北東季節風が 11 月～5 月にまでかけて卓越するため、メグナ川から流出したマクロプラスチックごみは南方へ流され、マレーシアやインドネシア多島海での破碎量の増加へと繋がったと考える。これによって、グラフ内の 2 月のマクロプラスチックごみ破碎量の最大値は 8 月時とは異なり、風ありで

中国・長江周辺，風なしでバングラデシュ・メグナ川周辺となった。

以上より，風があることによるマクロプラスチックごみの破碎地点変化について次にまとめる。

- ① 8月流出（輸送時には冬季季節風が卓越）において，
 - ・香港からベトナム，インドネシア多島海にかけて破碎量が増加した。
 - ・長江周辺での破碎量が増加した。
 - ・南アジア地域での破碎量に変化は見られなかった。
- ② 2月流出（輸送時には夏季季節風が卓越）において，
 - ・インドネシア多島海での破碎量の増加は8月流出時よりも小さく微増であった。
 - ・香港からマレーシアにかけて破碎量が増加した。
 - ・南アジア地域ではメグナ川周辺の破碎量が減少した。

3.2.2 破碎量の変化

風の有無による総破碎量の変化に関するグラフは次に示す通りである。ここでは，破碎までの時間スケール（e-folding 時間）は半年，1年，2年で粒子追跡をした結果を用いている。下図では，X軸が Aug_half, Aug_one, Aug_two, Feb_half, Feb_one, Feb_two, それぞれが8月流出・時間スケール半年，8月流出・時間スケール1年，8月流出・時間スケール2年，2月流出・時間スケール半年，2月流出・時間スケール1年，2月流出・時間スケール2年である。Y軸は，破碎した粒子数（ $\times 10$ トン）を表す。

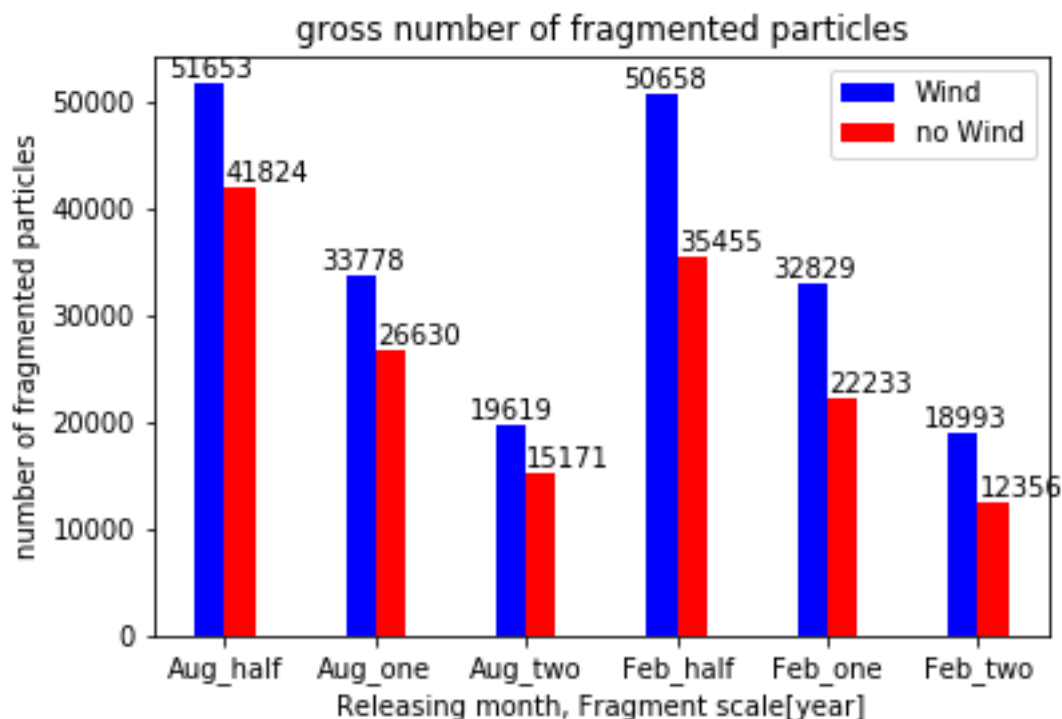


図 3.2.2-1 風の有無による総破砕量変化

図 3.2.2-1 より、すべてのケースにおいて風がある方が破砕量（すなわち、マイクロプラスチック生成量）の多くなることが分かった。これは前述の通り、海上風速は海流流速と比べ対象海域で約 4～5 倍速いため、風ありの状況ではマイクロプラスチックごみが海洋を移動しやすく、岸への漂着機会が増加したためであると推測できる。そして、この漂着機会の増加は破砕までの時間スケールの長さ依存することなく、すべての破砕までの時間スケールにおいて、風がある方がマイクロプラスチックごみの漂着機会が増加することが示されている。破砕量の増加要因として、マイクロプラスチックの漂流経路の違いも考えられるが、これについては第 5 章で詳しく述べる。

次に、この破砕量の違いを風ありと風なしの場合で割合を比較した（表 3.2.2-1）。

表 3.2.2-1 風の有無による総破砕量（単位はトン）比較

	Aug_half	Aug_one	Aug_two	Feb_half	Feb_one	Feb_two
Wind	51653	33778	19619	50658	32829	18993
no Wind	41824	26630	15171	35455	22233	12356
$\frac{\text{Wind}}{\text{no Wind}}$	1.2350	1.2684	1.2932	1.4288	1.4766	1.5371

図 3.2.2-2 より、8月流出、2月流出のどちらにおいても風がある方が破砕量の増えたことが明確である。さらに、8月流出の風なしに対する風ありの割合は約 1.2~1.3 倍であるが、2月流出の風なしに対する風ありの割合は約 1.4~1.5 倍であり、2月流出の方が風の影響を受けていることが判明した。これは、2月に流出したマクロプラスチックごみが受ける夏季季節風の影響であると考え。図 3.2.1-1 で示し、前述したように、夏季季節風は海洋から大陸へ向かって卓越するため、マクロプラスチックごみを陸地へと漂着させる作用が、大陸から海洋へ向かって卓越する冬季季節風と比較して、強いためである。反対に、8月流出は冬季季節風の影響により、海洋沖合へとより流出して行ったため、陸地への漂着作用が2月よりも弱かったと考える。また、破砕までの時間スケールの違いによる考察は次章に述べる。

以上より、風があることによる総破砕量の変化について次にまとめる。

- ① 季節風は対象海域においてマクロプラスチックの破砕量（マイクロプラスチック生成量）を増加させる。
- ② 2月に流出し夏季季節風の影響かにあったマクロプラスチックの方が8月流出のものよりマイクロプラスチック化しやすい。

第4章 破碎までの時間スケールによるマイクロプラスチック化の依存性

4.1 解析方法

4.1.1 時間スケールの設定

マクロプラスチックごみが破碎してマイクロプラスチックへと変化するものの主な原因は、陸地への漂着により風や紫外線といった環境要因の作用を受けるためである。しかしながら、このマイクロプラスチック化が発生するまでに一体どれほどの期間を要するのかは未だ具体的に判明していない。そこで、本研究では、この破碎までの時間スケールを①1年、②半年、③2年、と設定して粒子追跡シミュレーションを行った。これにより、破碎までの時間スケールの違いが破碎量にどのような違いをもたらすかを解析した。流出月や風の有無との相乗効果を見るため、それぞれの時間スケールについて、2月と8月の流出、および風の有無に応じた実験を行った。

4.2 結果

4.2.1 時間スケールごとの結果

下記に時間スケールごとによる破碎量の変化を示した。X軸は、左から Aug_Wind, Aug_noWind, Feb_Wind, Feb_noWind, がそれぞれ8月流出・風あり, 8月流出・風なし, 2月流出・風あり, 2月流出・風なし, である。Y軸は、破碎した粒子数(=×10トン)を表す。

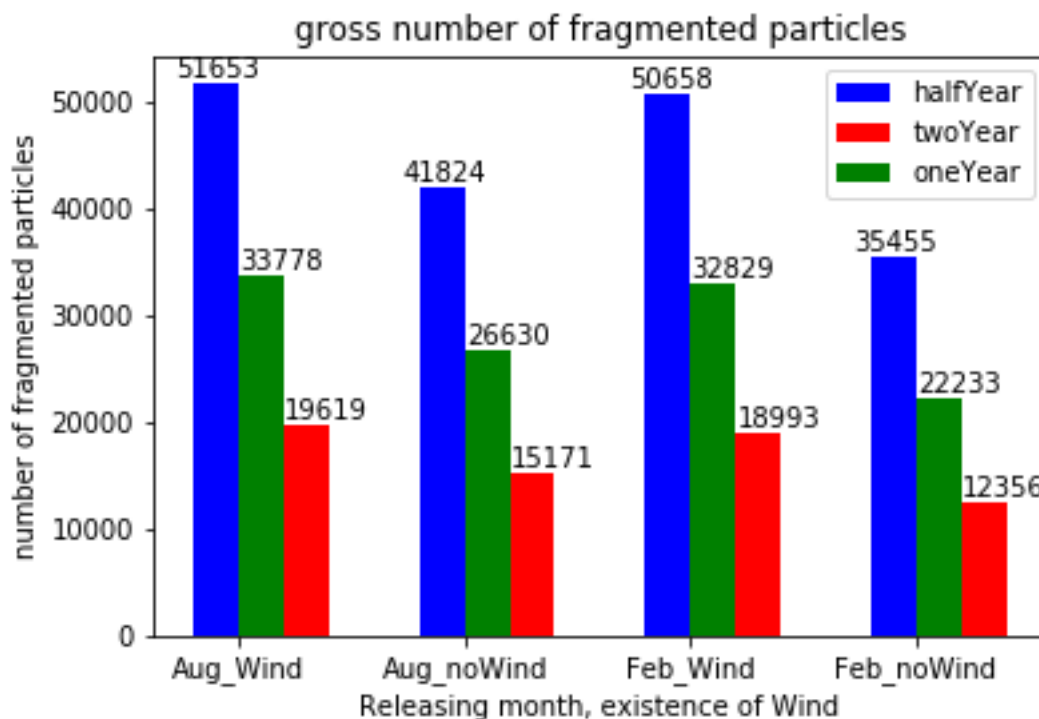


図 4.2.1-1 破碎までの時間スケールによる破碎量変化

図 4.2.1-1 より，時間スケールが短いほど破碎量が多いことが分かる．これは破碎までの時間スケールが短いほど少ない漂着回数で破碎まで達するため妥当な結果である．

次に，時間スケールの違いによる破碎量変化の割合比較を下表で示す．

	Aug_Wind	Aug_noWind	Feb_Wind	Feb_noWind
Half year	51653	41824	50658	35455
One year	33778	26630	32829	22233
Two year	19619	15171	18993	12356
$\frac{\text{Half year}}{\text{One year}}$	1.5292	1.5706	1.5431	1.5947
$\frac{\text{One year}}{\text{Two year}}$	1.7217	1.7553	1.7285	1.7994

表 4.2.1-1 破碎までの時間スケールによる破碎量変化

表 4.2.1-2 より，8月流出，2月流出のいずれのケースにおいてもHalf year/One yearは約 1.55 前後を示し，One year/Two yearは約 1.75 前後を示した．従って，8月流出，2月

第4章 破碎までの時間スケールによるマイクロプラスチック化の変化

流出の違いにおいて、破碎までの時間スケールの長短による破碎量の変化は見られないことが分かる。風の有無の違いにおいては、極僅かであるが風がない方が破碎までの時間スケールが短いほうが破碎しやすいことが判明した。これは風がないときの方が海流だけで移動するため、マイクロプラスチックごみの移動距離が短く、時間スケールが長いとより多くの漂着機会が必要となる。従って、時間スケールが長くなるにつれて、破碎せずに一度沖合まで流出してしまうと、次の漂着機会まで多くの時間を要するためであると考ええる。

また、図 3.2.2-2 より、時間スケールが長くなるにつれ、風ありの方が破碎量の割合が増加する傾向にあることが分かる。これは、時間スケールが長くなるほどマイクロプラスチックごみの移動距離が大きくなり、岸への漂着機会が増加するためであると考えられる。ここで、風なしの場合のマイクロプラスチックごみの動きは、海洋へ沈み込んだマイクロプラスチックごみの動きと同等であると見なせるため、時間スケールが長いマイクロプラスチックごみは、海洋へ沈み込んでいるときより、海表面に出ているときの方が、風の影響により移動距離が増え漂着・破碎を起こしやすいと言える。

以上より、破碎までの時間スケールによる破碎量の変化を次にまとめる。

- ① 時間スケールが短いほど破碎量は増加する。
- ② 流出月の違い（8月流出か2月流出か）では、時間スケールの長短による破碎量の変化は見られない。
- ③ 風がない（あるいは海洋中を沈んで移動する）ときには、時間スケールが短い方が僅かながら破碎しやすい。
- ④ 風ありのときには、時間スケールが長いほどより破碎しやすい。

第5章 マクロプラスチックごみの流路による考察

5.1 解析方法

5.1.1 流路のヒートマップ

前述したように、マクロプラスチックごみは海岸への漂着と再漂流を繰り返し、破碎までの時間スケールの期間を陸上で過ごしてから破碎する。そして、この破碎について、第3章では、マクロプラスチックごみの破碎量の変化を風の有無の条件下で調べ、第4章では、破碎までの時間スケールの違いによる変化を述べた。この章では、第3章と第4章で述べた変化が発生するまでに至った背景として、マクロプラスチックごみの漂流経路が実際に風や季節風の影響を受けて移動したか、またどのような軌跡であったかを解析する。

次に、解析方法について述べる。まず、時間ステップごとに海洋で漂流中のマクロプラスチックごみが到達した地点を経度1度×緯度1度のグリッド格子に分割し、各グリッドに存在する粒子数を計算する。この各グリッドにおいて各時間ステップに存在する粒子数を最終計算日まで加算していく。この格子上に存在した粒子数の総計をヒートマップ形式で表示した。

5.1.2 インド洋滞留粒子と南シナ海滞留粒子の比較

5.1.1 のヒートマップに加え、PTM 解析の結果として得た粒子位置を解析範囲のマップ上にプロットし、GIF 動画を作成した。これにより、マクロプラスチックごみが具体的にどの位置にあったかを図示した。本文では GIF 動画ではなく、2 か月ごとに出力されたプロット図を図 5.2.2-1～図 5.2.2-24 にて記載している。さらに、本研究では特に、インドネシア多島海に着目している。そのため、インドネシア多島海における粒子の流出入を調べるため、インドネシア多島海に境界線を設け、インドネシア多島海以西のインド洋に存在する粒子と、インドネシア多島海以東の南シナ海に存在する粒子とで、その総数を比較した。ここで、この粒子総数には、漂流中の粒子・上陸中の粒子のみを考え、破碎した粒子は含まない。インドネシア多島海は粒子が多く集積しているため、境界線はインドネシア多島海に沿うように次のように定めた。次の 14 地点、(99.0, 1.5), (101, 1.5), (101, -2.0), (104, -2.0), (104, -5.0), (105.5, -5.0), (105.5, -6.5), (108, -6.5), (108, -7.5), (112, -7.5), (112, -8.0), (114, -8.0), (114, -8.5), (130, -8.5) の各点を結ぶ線分で境界線を設定した。ここで、境界線の全体像を図 5.1.2-1 に、詳細を図 5.1.2-2 に示している。

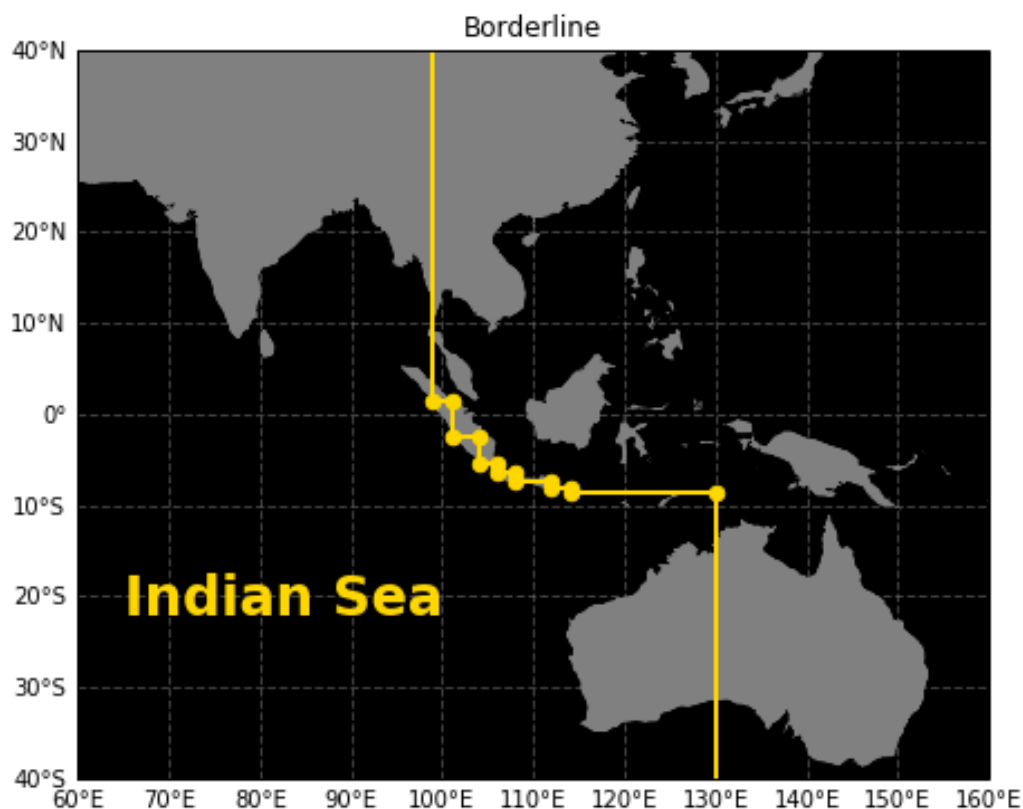


図 5.1.2-1 インドネシア多島海に引いた境界線

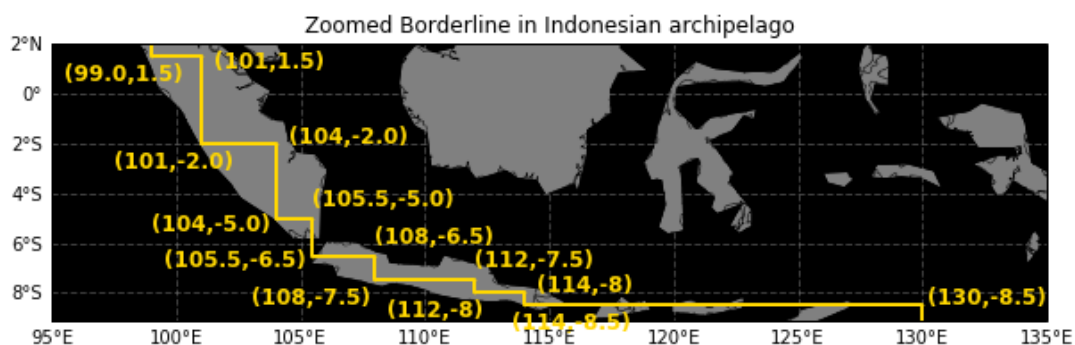


図 5.1.2-2 インドネシア多島海に引いた境界線 - 詳細

5.2 結果

5.2.1 風の有無，破砕までの時間スケールごとの結果

流路のヒートマップを，風の有無と破砕までの時間スケールの違いによって解析した（図 5.2.1-1）．ここで，X 軸は経度，Y 軸は緯度，ヒートマップのカラーバーは粒子数（ $\times 10$ トン）で表示している．ここでカラーバーは 10 を底とする指数表記をしている．

第5章 マクロプラスチックごみの流路

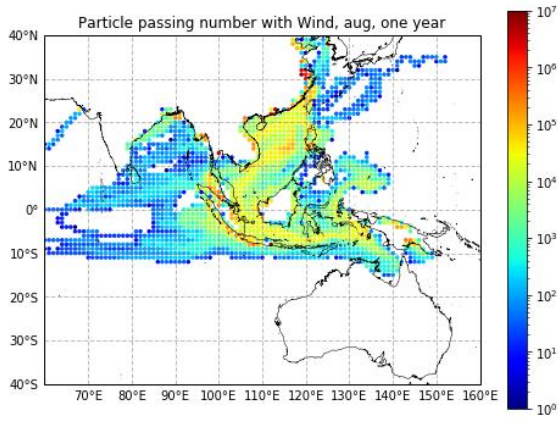


図 5.2.1-1

風あり 8月流出 時間スケール1年

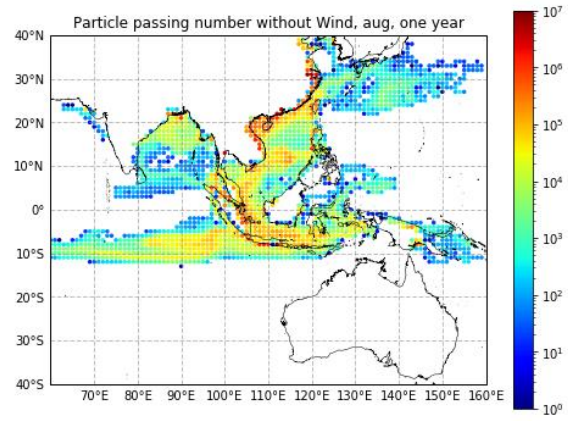


図 5.2.1-2

風なし 8月流出 時間スケール1年

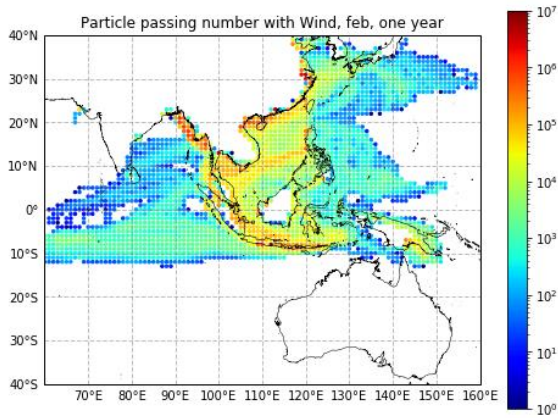


図 5.2.1-3

風あり 2月流出 時間スケール1年

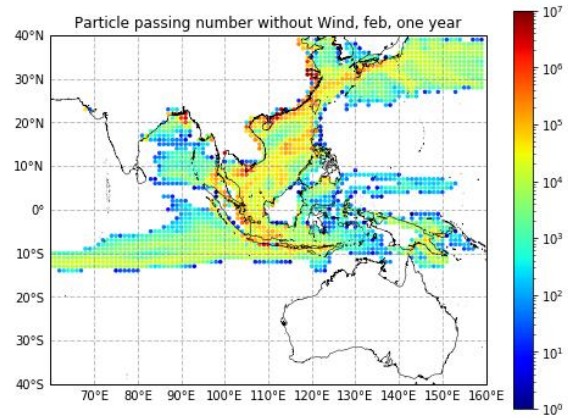


図 5.2.1-4

風なし 2月流出 時間スケール1年

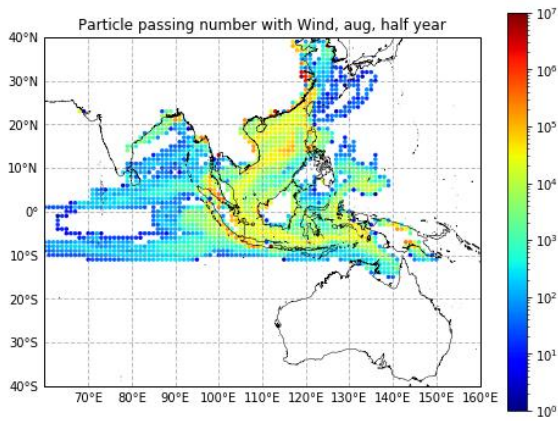


図 5.2.1-5

風あり 8月流出 時間スケール半年

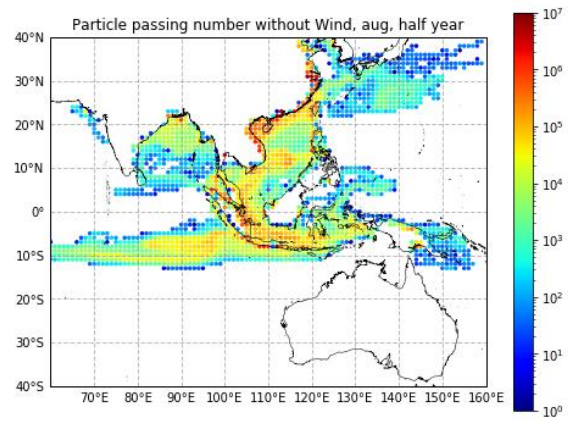


図 5.2.1-6

風なし 8月流出 時間スケール半年

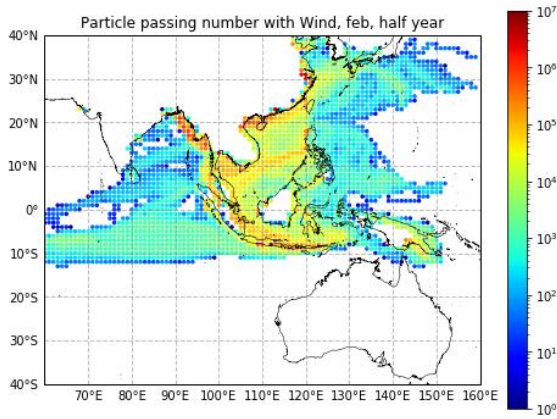


図 5.2.1-7

風あり 2月流出 時間スケール半年

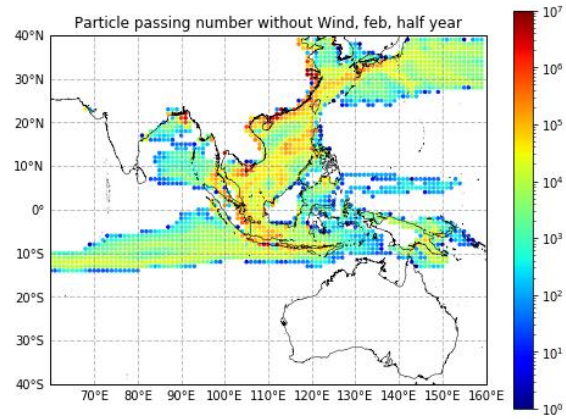


図 5.2.1-8

風なし 2月流出 時間スケール半年

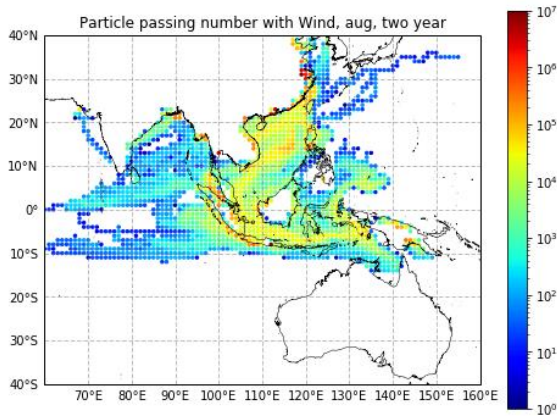


図 5.2.1-9

風あり 8月流出 時間スケール2年

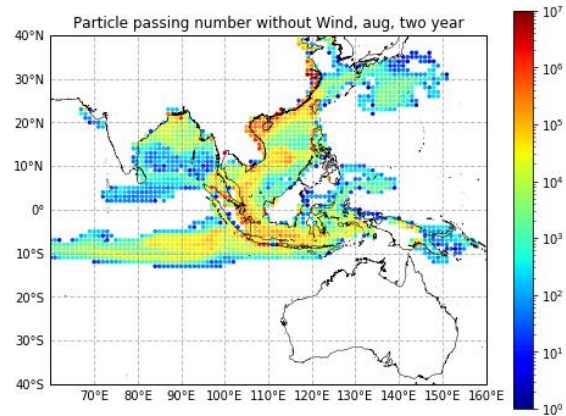


図 5.2.1-10

風なし 8月流出 時間スケール2年

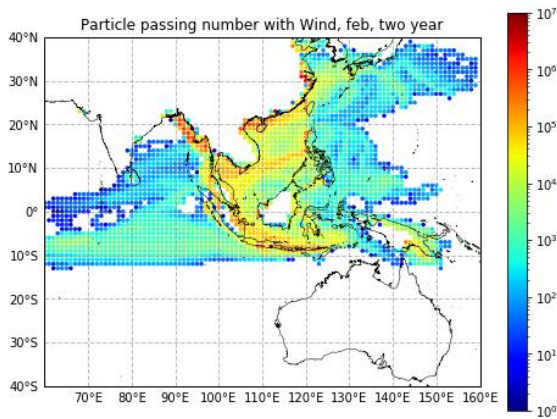


図 5.2.1-11

風あり 2月流出 時間スケール2年

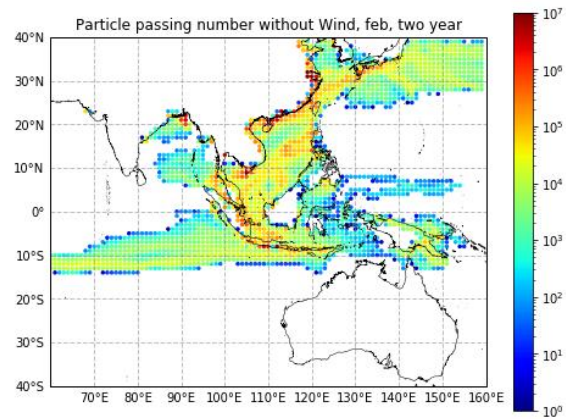


図 5.2.1-12

風なし 2月流出 時間スケール2年

まず、上図において風の有無を比較したときの違いについて述べる。風なしではすべてのケースにおいて、インドネシア多島海からインド洋に向けて、多量の粒子の通過が見られる。一方で、風ありでは風なしと比較して粒子のインド洋への通過量は少なく、より広範に粒子が流布している。特に、インド洋、フィリピン海、東シナ海、太平洋に広がっている。これは、風

ありのケースでは風なしのケースに比べ時間あたりの移動範囲が広いこと、風なしと比較して少量の粒子通過ながらも、広範囲に広がったためと考えられる。第3章における風の存在が破砕量を増加させる結果は、風ありの場合にインド洋に抜けることなく、陸に囲まれて漂着機会を確保しやすいインドネシア多島海や南シナ海に粒子が捕捉されやすくなっていたこと、また、この風の移動距離によって捕捉された海域で粒子が散らばりやすく、これも陸地への漂着機会を増加させる要因になっていたと考えられる。風なしのケースでは、西岸境界流により粒子がアジア東岸を多く通過していることが分かる。

次に、季節ごとの変化を見てみよう。まず、8月流出の風の有無において比較する。8月流出粒子は冬季季節風の影響を受けるため、北から南に大きく粒子の流路が形成されるはずである。図5.2.1-1と図5.2.1-2より、8月流出風なしでは、北日本近海まで粒子が流れ北上していることが見て取れるが、風ありでは日本南岸あたりまでしか粒子が北上していない。また、オーストラリア北部近海（ティモール海やアラフラ海）においても、風なしでは南下していることが確認できないが、風ありでは南下していることが確認でき、8月流出粒子は冬季季節風の影響を受けていることが読み取れる。続いて、図5.2.1-3と図5.2.1-4より、2月の風の有無において比較する。2月流出粒子は夏季季節風の影響を受けるため、8月流出粒子とは反対に、南から北に粒子の流路が形成される。2月流出風ありでは、すべてのケースでフィリピン海に流路が形成されていることが確認できる。この流路は2月流出風なしには存在せず、夏季季節風を受けてインドネシア、フィリピン、パプアニューギニアから流出したマクロプラスチックごみが北上して形成された。また、インドネシア多島海においては強い南西季節風が卓越するため、インドネシア多島海にて漂流していた多量のマクロプラスチックごみが北東方向のフィリピン沿岸に流れていることが分かる。よって、2月流出粒子は夏季季節風の影響を受けて移動したということが確認できた。また、バングラデシュ・メグナ川周辺において、風ありでは粒子が南下しミャンマー沿岸にまで多量の粒子通過が見られる。これより第3章で述べた南アジアでの北東季節風の影響が確認でき、風なしと比較したときにメグナ川での破砕量減少に繋がったと考える。

次に、破砕までの時間スケールの違いによって比較する。図5.2.1-1、図5.2.1-5、図5.2.1-9より、8月流出風ありにおいて、時間スケールの長短によるマクロプラスチックごみの流路の違いは確認できない。同様に、8月流出風なし、2月流出風あり、2月流出風なしにおいても流路の違いは確認できない。つまり、第4章で述べた破砕までの時間スケールによるマクロプラスチックごみの破砕量の違いは、時間スケールによる流路の違いは無いまま発生したと言える。

以上より、流路解析について次にまとめる。

① 風の有無による流路の違い

- ・インド洋に抜ける粒子数が、風ありよりも風なしにおいて顕著に多かった。このことは、風があることで、陸に囲まれて漂着機会の多いインドネシア多島海や南シナ海でのマクロプラスチックの滞留時間を長くし、これがマイクロプラスチックの生成量を増加させる要因となる。
- ・風ありではより広範囲に粒子の流路が形成されていた。このことは、風によってマクロプ

プラスチックは方々に分散しやすくなり、漂着機会が確保されることにつながる。

- ・風なしでは西岸境界流を強く受け、アジア東岸を多く通過していた。

② 8月流出の風の有無による流路の違い

- ・8月流出風ありは冬季季節風の影響を受け、8月流出風なしよりも日本近海において北上できておらず、オーストラリア北部近海まで南下した流路が確認できた。

③ 2月流出の風の有無による流路の違い

- ・2月流出風ありは夏季季節風の影響を受け、2月粒子風なしでは見られないフィリピン海を北上した流路が確認できた。

- ・インドネシア多島海からフィリピン沿岸へ流路が形成されていた。

- ・2月流出風ありでは粒子が北東季節風の影響から南下しミャンマー沿岸へと流路が形成されていた。

④ 破砕までの時間スケールによる流路の違い

- ・破砕までの時間スケールによる流路の違いは確認できず、時間スケールによるマクロプラスチックごみの破砕量の違いは同じ流路上で発生した。

5.2.2 粒子位置の比較

5.2.1 のヒートマップによる流路の結果から、破砕までの時間スケールによって流路に差は生じていなかったため、本項では、時間スケールを1年に統一して結果比較を行った。まず、8月流出の粒子位置を風の有無ごとに、図 5.2.2-1～図 5.2.2-12 に図示した。

第5章 マクロプラスチックごみの流路

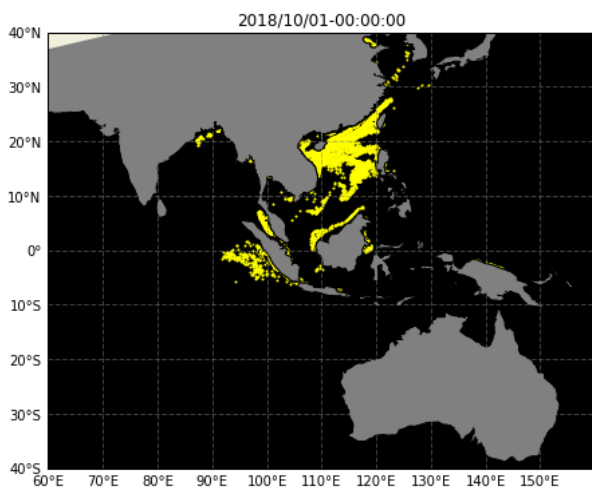


図 5.2.2-1 風あり 8月流出_10月1日

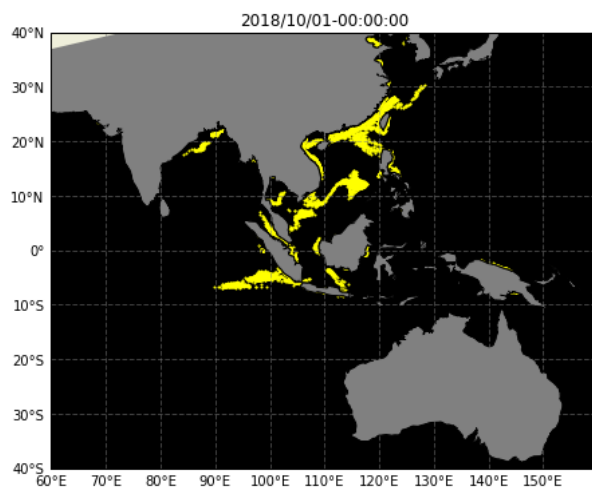


図 5.2.2-2 風なし 8月流出_10月1日

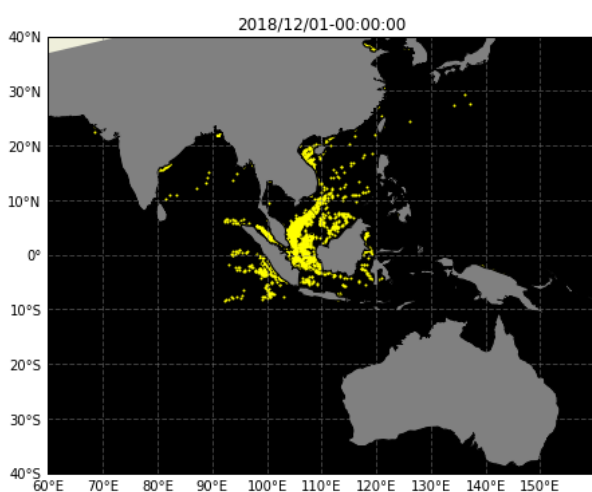


図 5.2.2-3 風あり 8月流出_12月1日

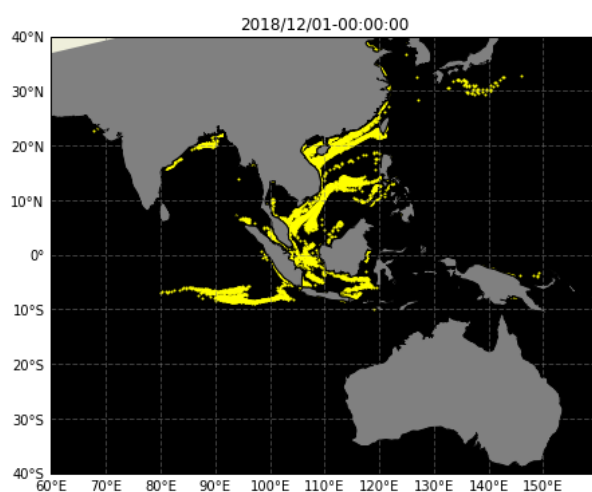


図 5.2.2-4 風なし 8月流出_12月1日

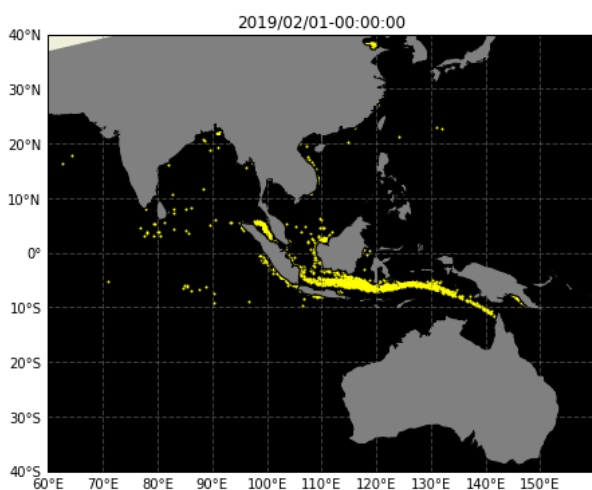


図 5.2.2-5 風あり 8月流出_2月1日

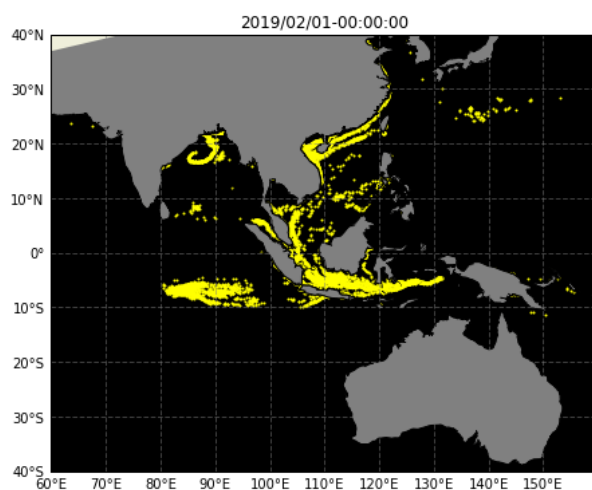


図 5.2.2-6 風なし 8月流出_2月1日

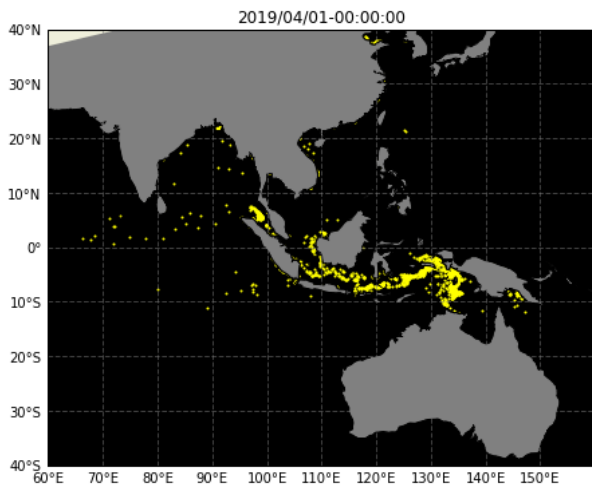


図 5.2.2-7 風あり 8月流出_4月1日

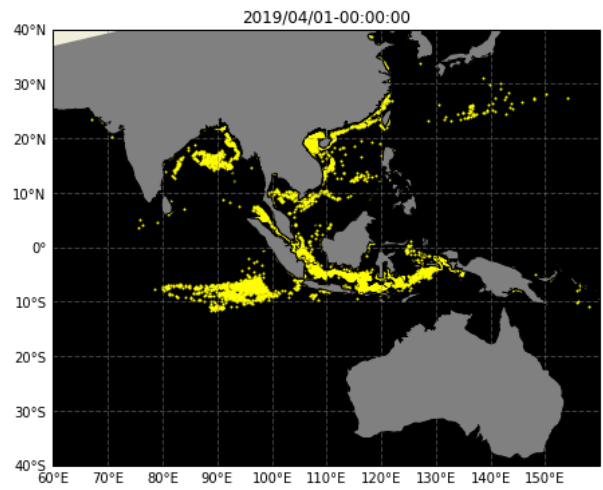


図 5.2.2-8 風なし 8月流出_4月1日

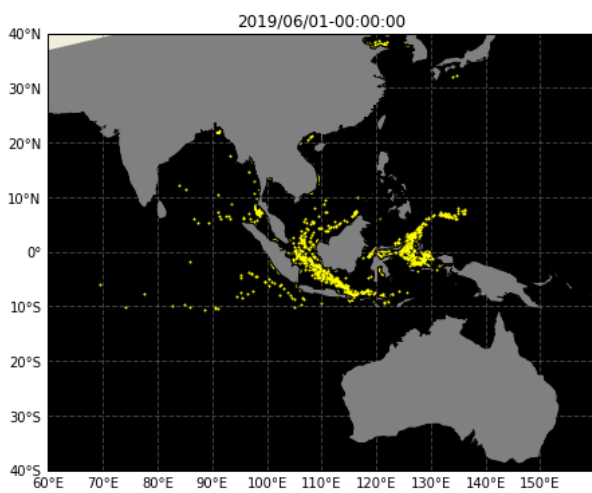


図 5.2.2-9 風あり 8月流出_6月1日

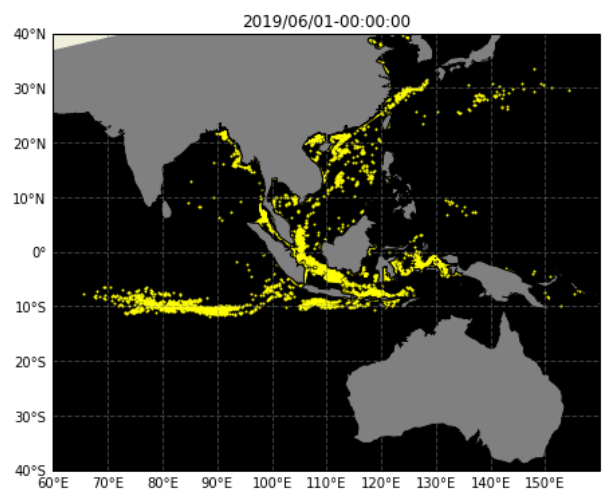


図 5.2.2-10 風なし 8月流出_6月1日

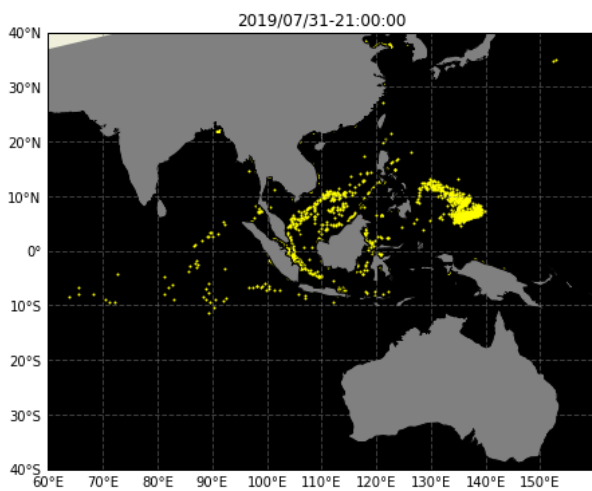


図 5.2.2-11 風あり 8月流出_7月31日

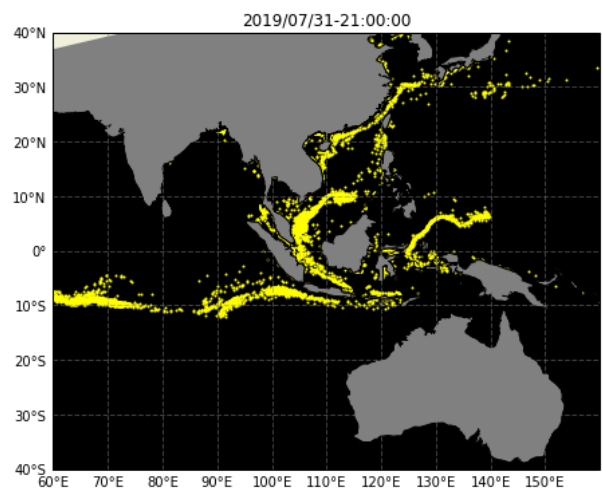


図 5.2.2-12 風なし 8月流出_7月31日

10月～2月の粒子位置の比較から、8月流出粒子群は風ありでインドネシア東岸に吹き寄せら

れていることが分かる。そして、流出時間の経過とともに、インドネシア東岸に吹き寄せられた粒子群は上陸または破碎を発生させたため、4月時点では粒子がほとんど見られない。また、10月時点では、風ありの粒子群は北向きの夏季季節風の影響を受けているため、特に南シナ海で北に吹き寄せられていることが分かる。その後、冬季季節風が南向きに卓越するため、これらの粒子群は12月～4月にかけて南方に移動している。このとき、上陸や破碎を発生していない粒子のほとんどが南方に移動したため、南シナ海北部での粒子が風なしと比較して同時期においても大きく減少していることが分かる。従って、8月流出粒子群では、風なしと比較して、風ありは風の影響による粒子移動が非常に大きく、その移動は風向に依存していると言える。図 5.2.2-5 では、インドネシアを通過し、オーストラリア・クイーンズランド州にまで到達している。また、風あり、風なしともに、流出以降～12月にかけて、インドネシア・ジャカルタ近海 (105° E, 6° S) においてインドネシア多島海からインド洋へ流出する粒子が存在したが、風ありではインド洋へ流出した粒子群が前述のようにインドネシア西岸に吹き寄せられて上陸や破碎を繰り返しインドネシア西岸での破碎量を増加させた。インド洋へ流出した風なしの粒子群はその後、ほぼ同緯度を保ってインド洋沖合にさらに輸送されたため、インドネシア西岸での粒子の集積は見られなかった。この輸送は南赤道海流によって発生したと考える。同海流によって、風なしでは、12月以降にインドネシア南部や東ティモール諸島周辺にまで南下してきた粒子群も同様にインド洋へ流出していくことが見て取れる。しかしながら、風ありでは同時期には粒子数が少ないため風ありでもインドネシア南部に到達した粒子がインド洋へ抜けるかどうか比較は難しい。また、風ありの粒子の方が移動速度は速いため漂流粒子の粒子数が減少する（上陸または破碎した）スピードは顕著であるが、風なしの方がより広範囲に広がっていることが確認できる。この特徴は、時間が経過するにつれ、大きくなっていることが分かる。また、風あり、風なしともに、南下してインドネシア・アラフラ海 (120° E～ 130° E, 0° S～ 10° S) に達した粒子群は、その後、インドネシア多島海を通過し太平洋へと流出して行くことが確認できる。

次に、2月流出の粒子位置を図 5.2.2-13～図 5.2.2-24 に示した。

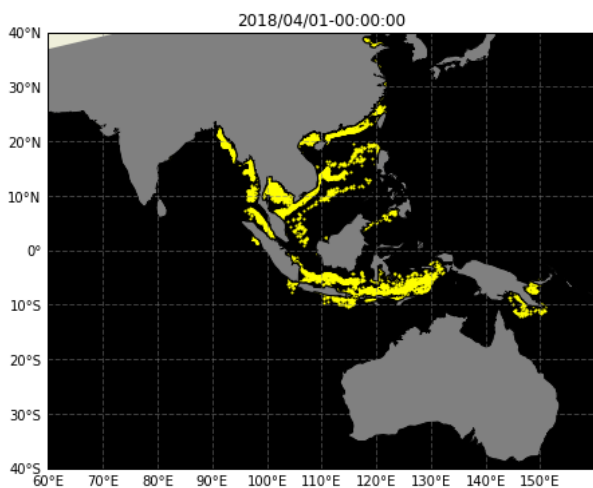


図 5.2.2-13 風あり 2月流出_4月1日

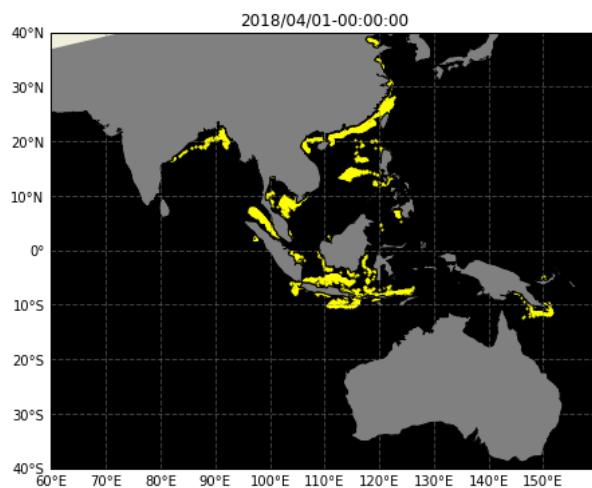


図 5.2.2-14 風なし 2月流出_4月1日

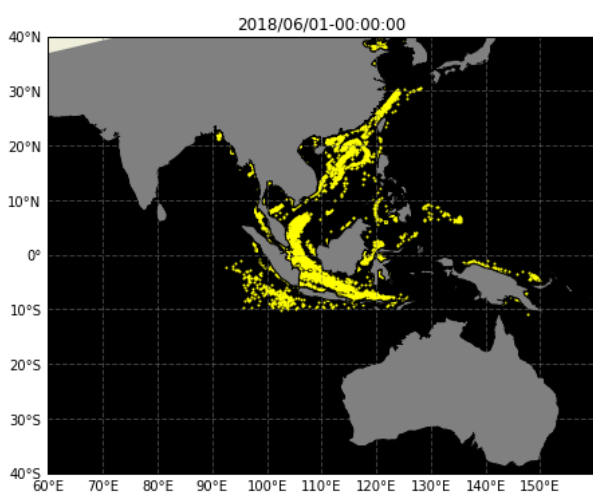


図 5.2.2-15 風あり 2月流出_6月1日

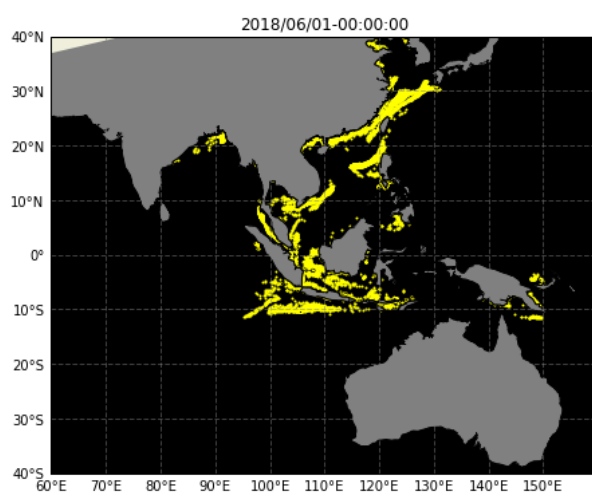


図 5.2.2-16 風なし 2月流出_6月1日

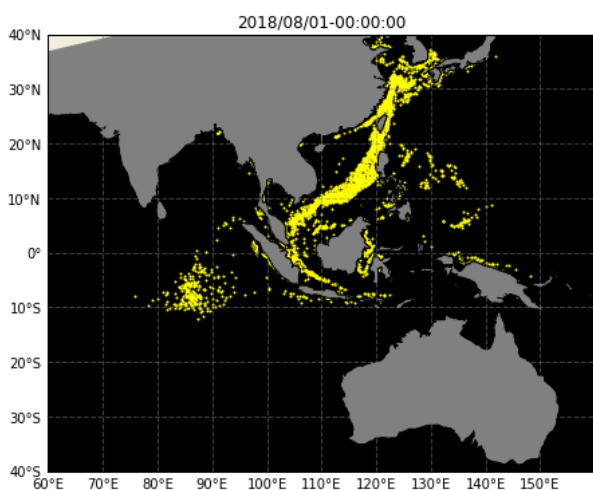


図 5.2.2-17 風あり 2月流出_8月1日

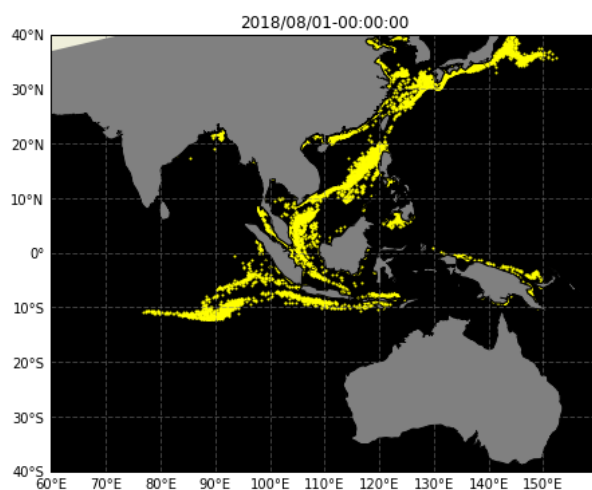


図 5.2.2-18 風なし 2月流出_8月1日

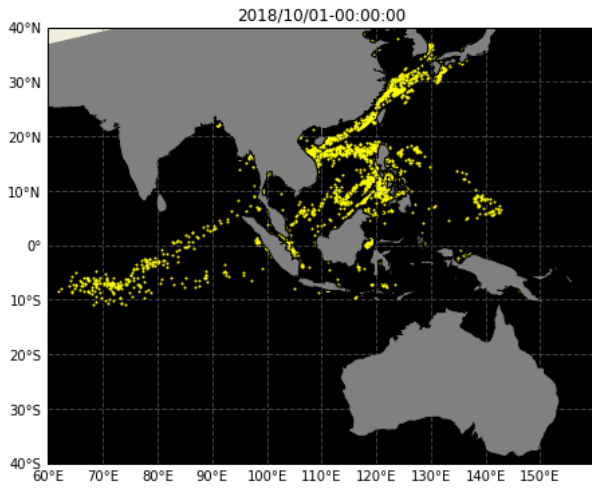


図 5.2.2-19 風あり 2月流出_10月1日

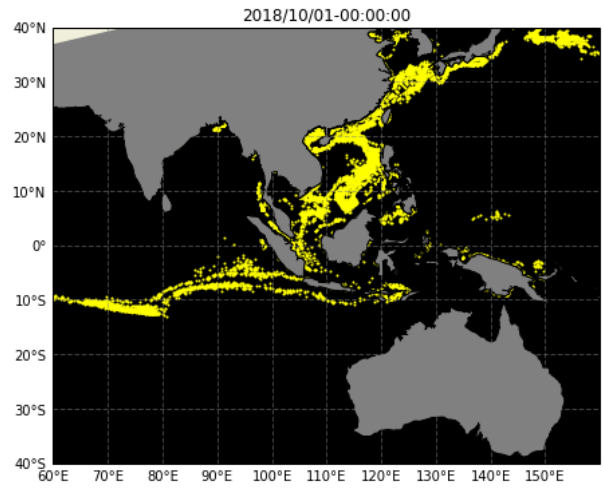


図 5.2.2-20 風なし 2月流出_10月1日

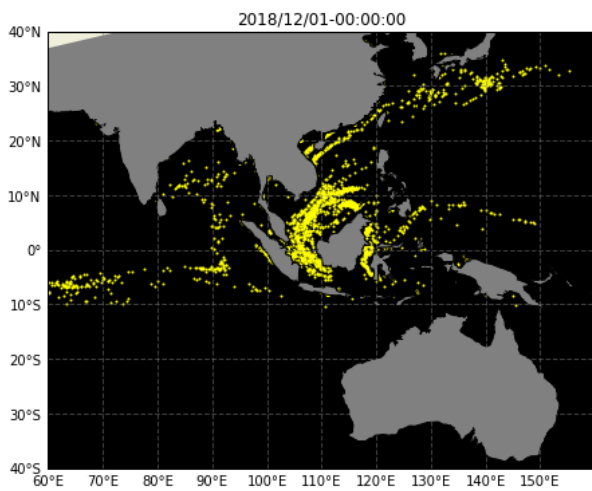


図 5.2.2-21 風あり 2月流出_12月1日

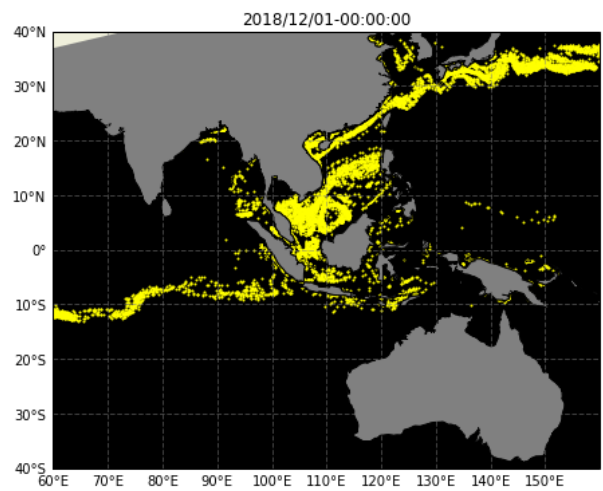


図 5.2.2-22 風なし 2月流出_12月1日

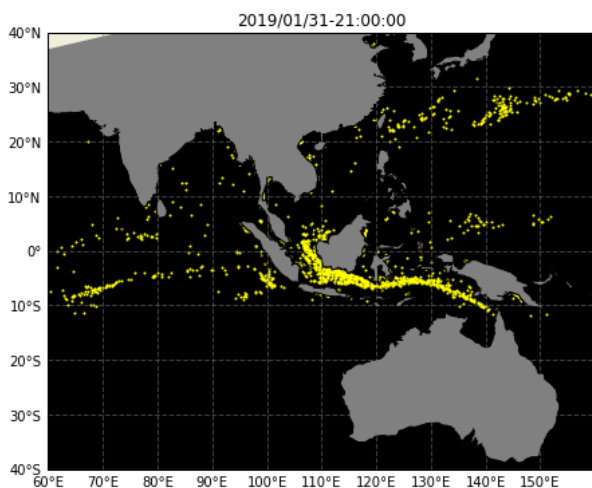


図 5.2.2-23 風あり 2月流出_1月31日

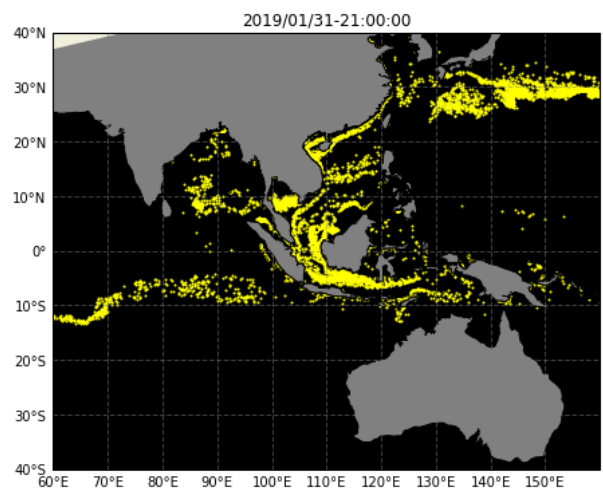


図 5.2.2-24 風なし 2月流出_1月31日

4月～10月では、風ありと風なし、ともに北向きに粒子が輸送されていることが分かるが、

風ありの粒子群は南西夏季季節風の影響により、風なしよりも北に（5° N以北）粒子がより集中していることが分かる。詳細に見ると、風なしではインドネシア南岸下をインド洋に向かって移動している粒子群が存在することが分かるが、風ありではそれらの粒子はインドネシア北東沿岸を通り、ジャワ海から南シナ海に向けて移動している。これは、風なしの粒子群は南赤道海流によってインド洋沖合にまで輸送されるが、風ありでは風圧流の影響の方が大きく、北上していったと考えられる。8月流出でも確認されたインドネシア・ジャカルタ沖、インドネシア南部沿岸からインド洋への粒子の移動については、風の有無に関わらず両方で確認できた。日本近海においては、10月まで、風なしでは黒潮によって日本を沿うように北上しているが、風ありでは九州付近で粒子の北上が停滞している。これは、太平洋から大陸に向かって吹く夏季季節風が日本を北上しようとする粒子群を東シナ海のある中国沿岸に寄せたためと考えられる。また、8月流出粒子でも見られたように、風ありの方が粒子の減少速度は速く、風なしの方が時間経過とともにより広範に広がっていることが分かる。

次に、図 5.1.2-1 にて示した境界線から、インド洋と南シナ海での粒子数のグラフをそれぞれ図 5.2.2-25、図 5.2.2-26 に示した。ただし、X 軸は粒子を流出させてから経過した日数、Y 軸は領域内に存在する粒子数[×10 万トン]を表している。

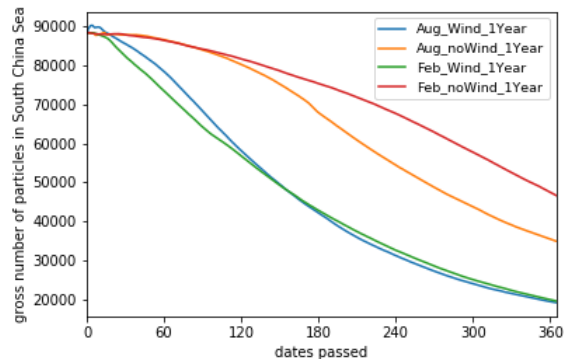
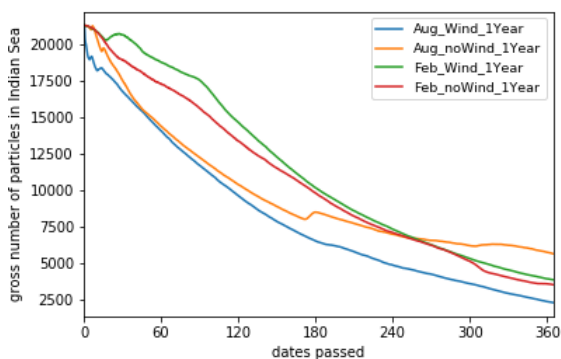


図 5.2.2-25 インド洋での粒子数[×10 万トン]

図 5.2.2-26 南シナ海での粒子数[×10 万トン]

インド洋での粒子数は、8月流出においては、風なしの方が風ありよりも多かった。これは、風ありの方がインドネシア西岸における粒子の破碎がより多かったため違いが生じたと考えられる。また、約180日経過後の風なしでのインド洋に流出した粒子数の増加は、前述したように、インドネシア南部にまで南下した粒子群が南赤道海流によってインド洋へ流出させたからだと考えられる。2月流出においては、反対に、風ありの方が風なしよりも多かった。これは、2月流出では風ありの方がインドネシア・ジャカルタ沖、インドネシア南部沿岸をインド洋へ抜ける粒子数がわずかに多かったことを示している。次に、南シナ海での粒子数は、8月流出、2月流出ともに風なしのほうが大幅に多い。これは、風ありの場合は、風があることで粒子が島や大陸へ漂着する機会が増加し、風なしの粒子が漂着するまでに破碎してしまったためであると考えられる。

以上より、粒子位置の解析について次にまとめる。

① 8月流出について

・風の有無に関わらず、インドネシア・ジャカルタ近海からインド洋へ流出した粒子が確認できたが、風ありではインドネシア西岸でこれらの粒子群は上陸・破碎を発生させたのに対し、風なしでは南赤道海流によってインド洋沖合へ流出して行った。

・同海流によって、風なしでは、インドネシア南部へ到達した粒子群はインド洋へ流出していった。

・アラフラ海に達した粒子群は、インドネシア多島海を通過し太平洋沖合へと流出した。

② 2月流出について

・インドネシア・ジャカルタ近海からインド洋への流出は8月流出同様に風の有無に関わらず確認できた。

・風なしでは、インドネシア南部から南赤道海流によりインド洋へ流出したが、風ありでは、夏季季節風により同流路の流出は見られなかった。

③ 8月・2月流出に共通

・風ありの粒子は移動速度が速いため、風なしよりも漂着機会を得やすく粒子数の減少が大きい。

・風なしの方は粒子数の減少が緩やかなため、より広範囲に広がりやすい。

第6章 結論

以下に、本論文の結論を示す。

第1章では、研究の背景について概説し、本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第2章では、今回使用した海洋表層流速・風速・プラスチックごみ流出データの概要と、PTMシミュレーションの設計について述べた。

第3章では、風の有無によって粒子追跡することにより、季節風がマイクロプラスチック化に寄与する影響と風の有無による破砕量の変化について破砕量の3次元バーチャートを元に述べた。以下に得られた知見を示す。

- ① 冬季季節風の影響を示した8月流出では、香港からインドネシア多島海にかけて、長江周辺にて破砕量が増加した。一方で、南アジア地域では破砕量に変化がなかった。
- ② 夏季季節風の影響を示した2月流出では、香港からマレーシアにかけては破砕量の増加が見られたが、インドネシア多島海では微増に留まった。また、南アジア地域ではメグナ川周辺の破砕量が減少した分がミャンマーにかけて南下し破砕していた。
- ③ 風の存在はマクロプラスチックごみが海岸へ漂着する機会増加をもたらし、破砕量増加へと繋がった。
- ④ 夏季季節風の影響を示す2月流出の方がよりマイクロプラスチック化した。

第4章では、マクロプラスチックごみが破砕するまでの時間スケールの違いによるマイクロプラスチック化への影響について時間スケール別総破砕量のバーチャートより述べた。以下に得られた知見について示す。

- ① 破砕までの時間スケールが短いほど破砕量は増加した。
- ② 時間スケールは流出月の違いには左右されず破砕量に変化はなかった。
- ③ 風がない（あるいは海洋中を沈んで移動する）場合には、時間スケールが短くなるにつれ、僅かに破砕量が増加した。
- ④ 風ありのときには、時間スケールが長いほど、より破砕量が増加した。

第5章では、まず、マクロプラスチックごみが破砕するまでに漂流した位置をヒートマップに図示し流路の解析を行った。以下に得られた知見を示す。

- ① 風ありは風なしと比較して、インドネシア多島海からインド洋に向けて粒子通過量

が減少するとともに、より広範囲に分布が広がっていた。風なしは西岸境界流によりアジア東岸を多く通過した。

- ② 8月流出時は風ありでオーストラリア北部近海まで南下した流路が確認でき、冬季季節風により日本近海も北上できていなかった。
- ③ 2月流出時は風ありでフィリピン海を北上する流路、インドネシア多島海からフィリピン沿岸へと続く流路、南アジアからミャンマー沿岸へと続く流路が形成されていた。
- ④ 破砕までの時間スケールによる流路の違いは確認できなかった。

次に、粒子位置をマッピング、およびインド洋と南シナ海に分けて粒子数を比較解析した。以下に得られた知見を示す。

- ① インドネシア・ジャカルタ近海で粒子がインド洋へ抜けていた。
- ② 8月流出時は、①の粒子群が風ありでインドネシア西岸へ、風なしでインド洋沖合へ到達した。
- ③ アラフラ海に到達した粒子群は太平洋へと流出した。
- ④ 風なしでは、南赤道海流によってインドネシア南部沿岸をかけてインド洋へ抜ける粒子が確認できた。
- ⑤ 風ありの粒子は漂着機会を得て上陸・破砕しやすく、風なしの粒子は広範囲に広がりやすい。

以上のように、マクロプラスチックごみが破砕しマイクロプラスチック化するときには、風の影響を強く受け移動し、漂着機会の増加、漂着場所の変化から破砕量・破砕地点にも変化が生じることが分かった。その変化は風の季節性によって変動するものであり、マクロプラスチックごみが海洋にいつ流出したのかがマイクロプラスチック化の破砕において重要な要因になる。破砕までの時間スケールについても破砕量を左右する大きな因子である。

参考文献

Asia-Pacific Economic Cooperation

<https://www.apec.org/Publications/2008/08/Independent-Assessment-of-the-APEC-Marine-Resource-Conservation-Working-Group-MRCWG>

National Geographic

<https://natgeo.nikkeibp.co.jp/atcl/news/20/073000450/>

Our World in Data – Plastic Pollution

<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

PLASTICS EUROPE

<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2020/>

WWF Japan

<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/3776.html>

Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., ... & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PloS one*, *9*(12), e111913.

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, *3*(7), e1700782.

Isobe, A., Kako, S. I., Chang, P. H., & Matsuno, T. (2009). Two-way particle-tracking model for specifying sources of drifting objects: application to the East China Sea Shelf. *Journal of Atmospheric and oceanic technology*, *26*(8), 1672-1682.

Isobe, A., Iwasaki, S., Uchida, K., & Tokai, T. (2019). Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nature communications*, *10*(1), 1-13.

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, *347*(6223), 768-771.

Kako, S. I., Isobe, A., Seino, S., & Kojima, A. (2010). Inverse estimation of drifting-object outflows using actual observation data. *Journal of oceanography*, *66*(2), 291-297.

- Kako, S. I., Isobe, A., & Kubota, M. (2011). High-resolution ASCAT wind vector data set gridded by applying an optimum interpolation method to the global ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*(D23).
- Lebreton, L., Egger, M., & Slat, B. (2019). A global mass budget for positively buoyant macroplastic debris in the ocean. *Scientific reports*, *9*(1), 1-10.
- Lebreton, L. C., Van Der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature communications*, *8*(1), 1-10.
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental science & technology*, *35*(2), 318-324.
- Richardson, P. L. (1997). Drifting in the wind: leeway error in shipdrift data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, *44*(11), 1877-1903.
- Schuyler, Q. A., Wilcox, C., Townsend, K. A., Wedemeyer-Strombel, K. R., Balazs, G., van Sebille, E., & Hardesty, B. D. (2016). Risk analysis reveals global hotspots for marine debris ingestion by sea turtles. *Global Change Biology*, *22*(2), 567-576.
- Tomita, H., Hihara, T., Kako, S. I., Kubota, M., & Kutsuwada, K. (2019). An introduction to J-OFURO3, a third-generation Japanese ocean flux data set using remote-sensing observations. *Journal of Oceanography*, *75*(2), 171-194.
- Wilcox, C., Van Sebille, E., & Hardesty, B. D. (2015). Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing. *Proceedings of the national academy of sciences*, *112*(38), 11899-11904.

図表目次

図 1.1.1-1	世界のプラスチック生産量 (1950-2015)	5
図 1.1.2-1	表層に存在するマクロプラスチック (1950-2050)	7
図 1.1.2-2	表層に存在するマイクロプラスチック (1950-2050)	7
図 1.1.2-3	世界のマイクロプラスチック分布.....	7
図 1.1.3-1	2010 年推計 MPW の国別分布.....	8
図 2.1.3-1	各河川からの年平均プラスチックごみ流出量	11
図 2.2.1-1	PTM 計算範囲	12
図 2.2.2-1	粒子位置による流速ベクトルの線形補間.....	13
図 3.1.2-1	アジア地域における季節風分布の模式図.....	17
図 3.2.1-1	風あり 8 月流出 バーチャート	17
図 3.2.1-2	風なし 8 月流出 バーチャート	17
図 3.2.1-3	風あり 2 月流出 バーチャート	18
図 3.2.1-4	風なし 2 月流出 バーチャート	18
図 3.2.2-1	風の有無による総破砕量変化.....	20
図 4.2.1-1	破砕までの時間スケールによる破砕量変化.....	23
図 5.1.2-1	インドネシア多島海に引いた境界線.....	26
図 5.1.2-2	インドネシア多島海に引いた境界線 - 詳細.....	26
図 5.2.1-1	風あり 8 月流出 時間スケール 1 年.....	27
図 5.2.1-2	風なし 8 月流出 時間スケール 1 年.....	27
図 5.2.1-3	風あり 2 月流出 時間スケール 1 年.....	27
図 5.2.1-4	風なし 2 月流出 時間スケール 1 年.....	27
図 5.2.1-5	風あり 8 月流出 時間スケール半年.....	27
図 5.2.1-6	風なし 8 月流出 時間スケール半年.....	27
図 5.2.1-7	風あり 2 月流出 時間スケール半年.....	28
図 5.2.1-8	風なし 2 月流出 時間スケール半年.....	28
図 5.2.1-9	風あり 8 月流出 時間スケール 2 年.....	28
図 5.2.1-10	風なし 8 月流出 時間スケール 2 年.....	28
図 5.2.1-11	風あり 2 月流出 時間スケール 2 年.....	28
図 5.2.1-12	風なし 2 月流出 時間スケール 2 年.....	28
図 5.2.2-1	風あり 8 月流出_10 月 1 日	31
図 5.2.2-2	風なし 8 月流出_10 月 1 日	31
図 5.2.2-3	風あり 8 月流出_12 月 1 日	31
図 5.2.2-4	風なし 8 月流出_12 月 1 日	31
図 5.2.2-5	風あり 8 月流出_2 月 1 日	31
図 5.2.2-6	風なし 8 月流出_2 月 1 日	31

図 5.2.2-7	風あり	8月流出_4月1日	32
図 5.2.2-8	風なし	8月流出_4月1日	32
図 5.2.2-9	風あり	8月流出_6月1日	32
図 5.2.2-10	風なし	8月流出_6月1日	32
図 5.2.2-11	風あり	8月流出_7月31日	32
図 5.2.2-12	風なし	8月流出_7月31日	32
図 5.2.2-13	風あり	2月流出_4月1日	34
図 5.2.2-14	風なし	2月流出_4月1日	34
図 5.2.2-15	風あり	2月流出_6月1日	34
図 5.2.2-16	風なし	2月流出_6月1日	34
図 5.2.2-17	風あり	2月流出_8月1日	34
図 5.2.2-18	風なし	2月流出_8月1日	34
図 5.2.2-19	風あり	2月流出_10月1日	35
図 5.2.2-20	風なし	2月流出_10月1日	35
図 5.2.2-21	風あり	2月流出_12月1日	35
図 5.2.2-22	風なし	2月流出_12月1日	35
図 5.2.2-23	風あり	2月流出_1月31日	35
図 5.2.2-24	風なし	2月流出_1月31日	35
図 5.2.2-25	インド洋での粒子数[×10万トン]		36
図 5.2.2-26	南シナ海での粒子数[×10万トン]		36

式目次

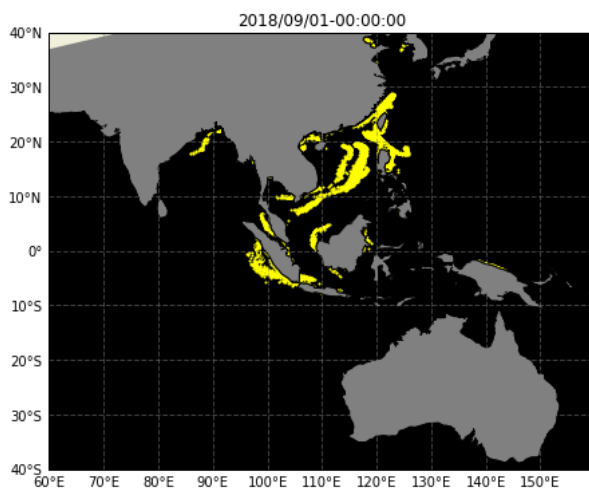
式 2.2.2-1 粒子位置の計算.....	12
式 2.2.3-1 風圧流の計算	13

表目次

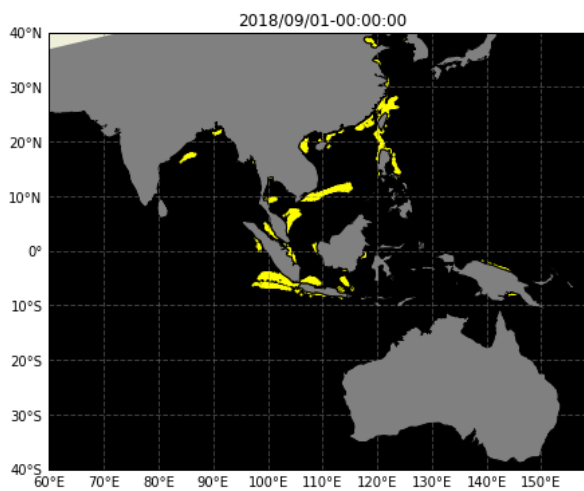
表 2.2.4-1	時間スケールの設定.....	14
表 3.2.2-1	風の有無による総破砕量（単位はトン）比較.....	20
表 4.2.1-1	破砕までの時間スケールによる破砕量変化	23

付録

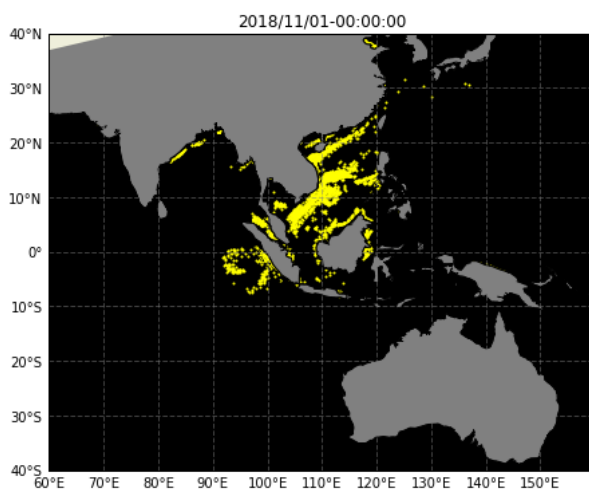
付録として，ここに破碎までの時間スケールが1年における粒子追跡の結果を図示した。マクロプラスチックごみに見立てた粒子が海流と風によってどのような挙動をとるか参照いただきたい。まず，8月流出粒子を記載した。



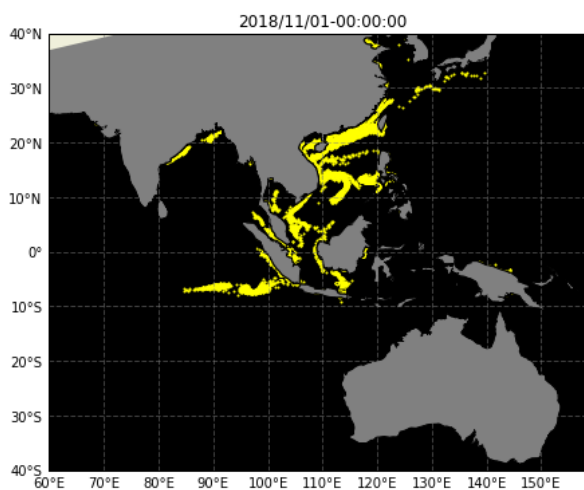
付録 1 風あり 8月流出_9月1日



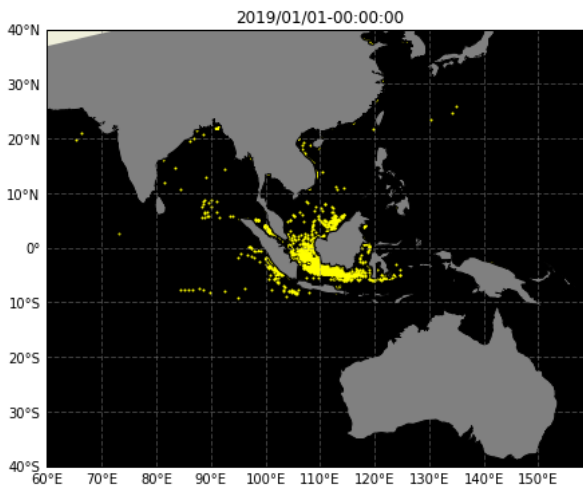
付録 2 風なし 8月流出_9月1日



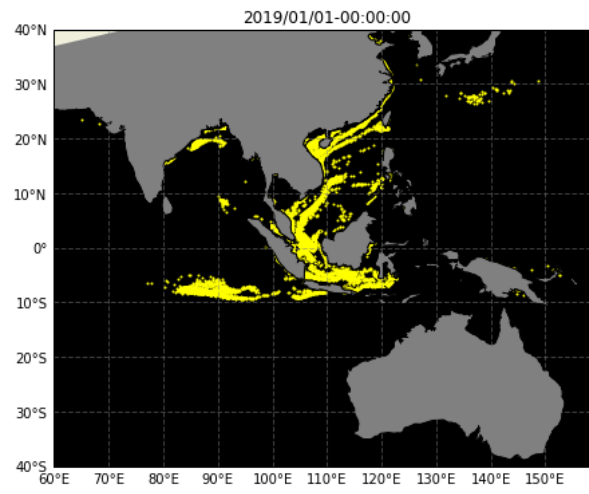
付録 3 風あり 8月流出_11月1日



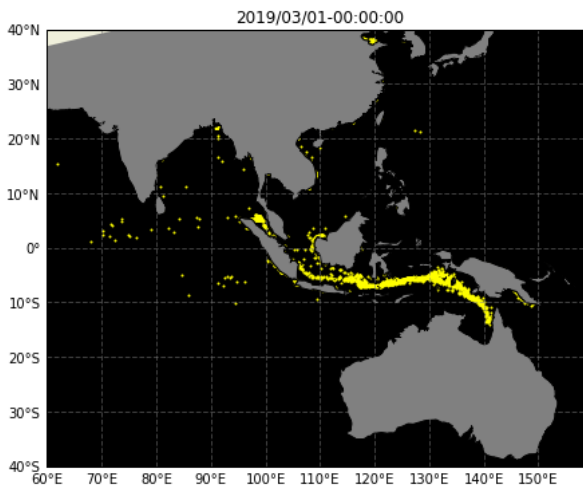
付録 4 風なし 8月流出_11月1日



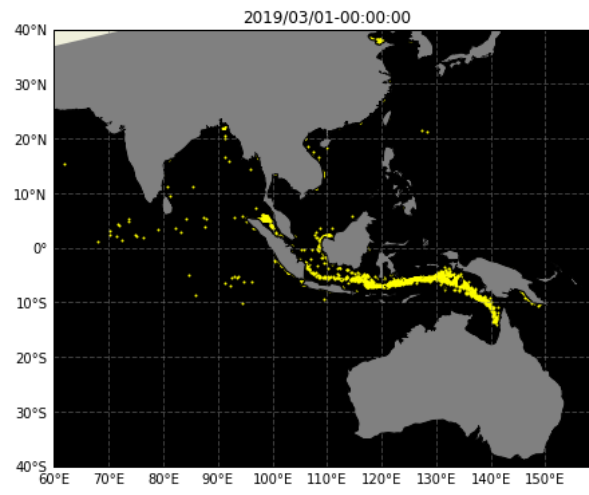
付録 5 風あり 8月流出_1月1日



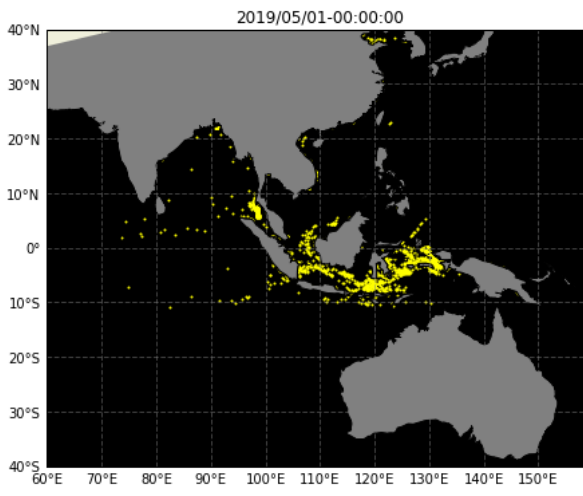
付録 6 風なし 8月流出_1月1日



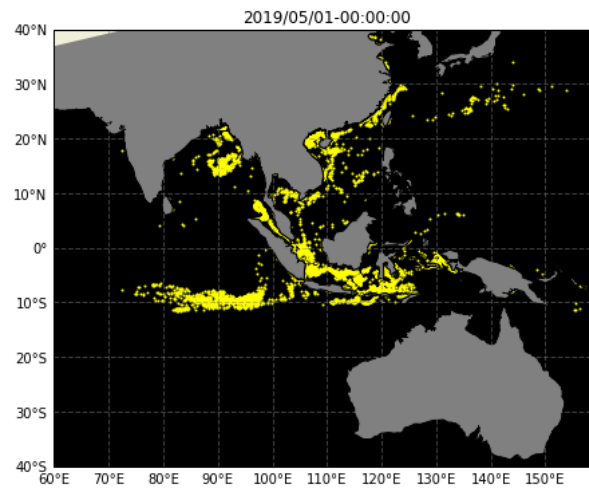
付録 7 風あり 8月流出_3月1日



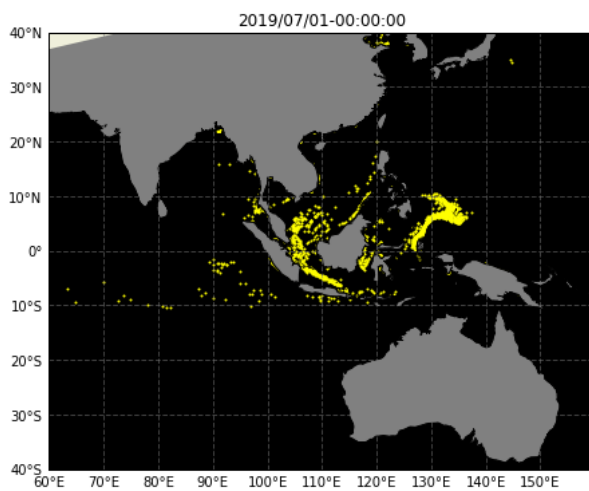
付録 8 風なし 8月流出_3月1日



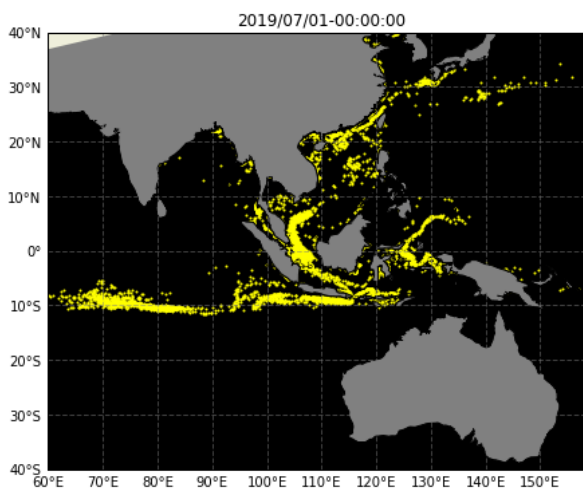
付録 9 風あり 8月流出_5月1日



付録 10 風なし 8月流出_5月1日

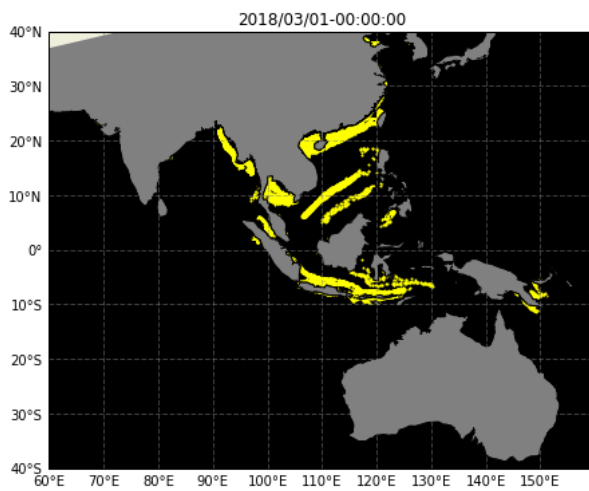


付録 11 風あり 8月流出_7月1日

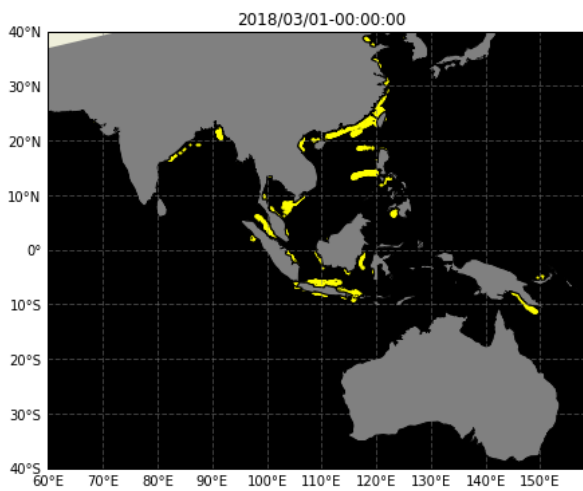


付録 12 風なし 8月流出_7月1日

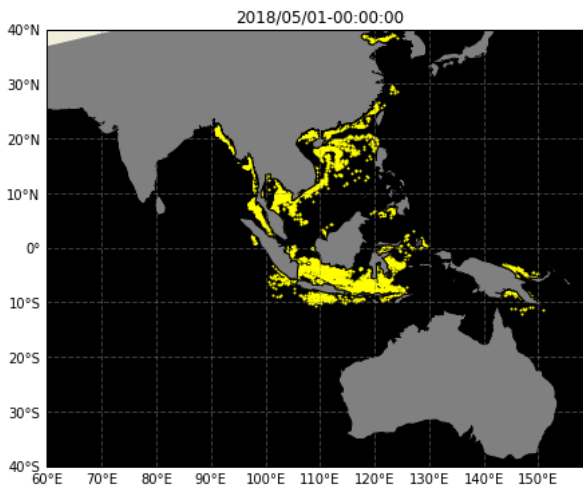
次に、2月流出についての画像を以下に記載する。



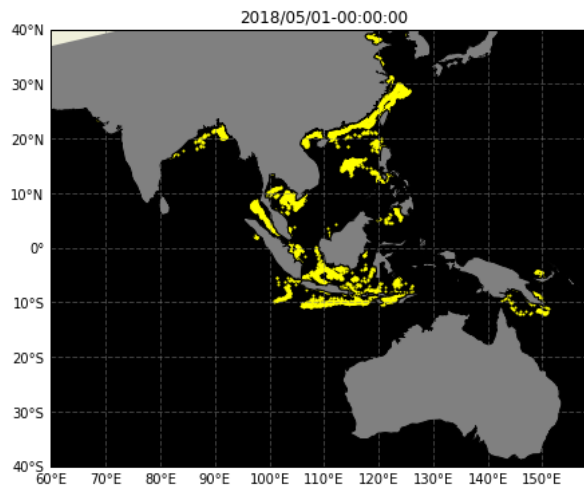
付録 13 風あり 2月流出_3月1日



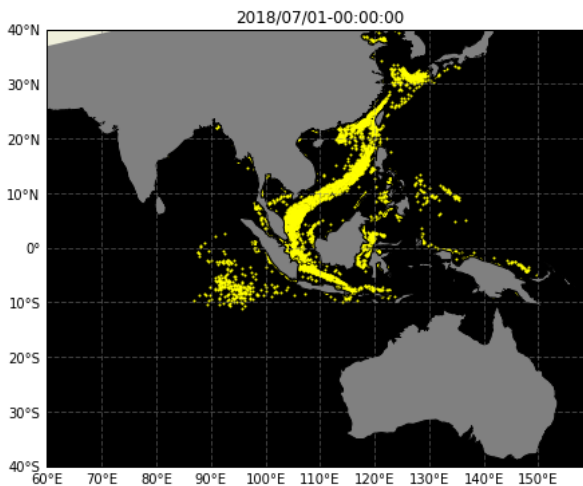
付録 14 風なし 2月流出_3月1日



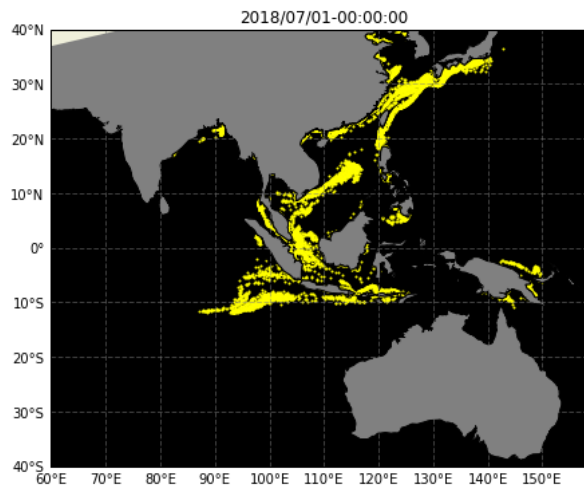
付録 15 風あり 2月流出_5月1日



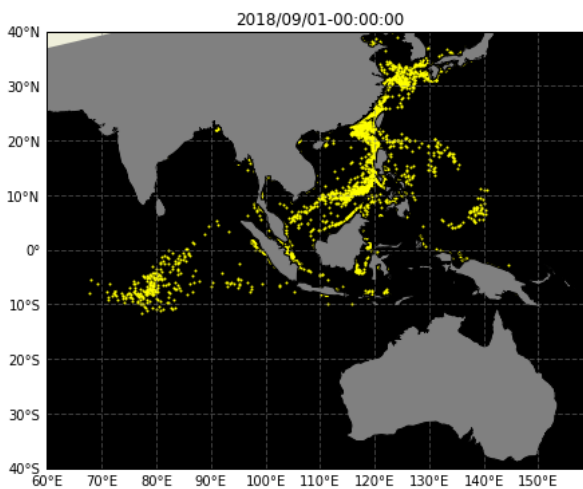
付録 16 風なし 2月流出_5月1日



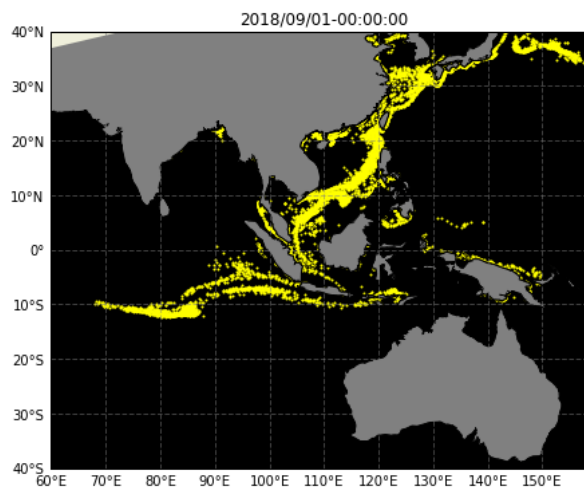
付録 17 風あり 2月流出_7月1日



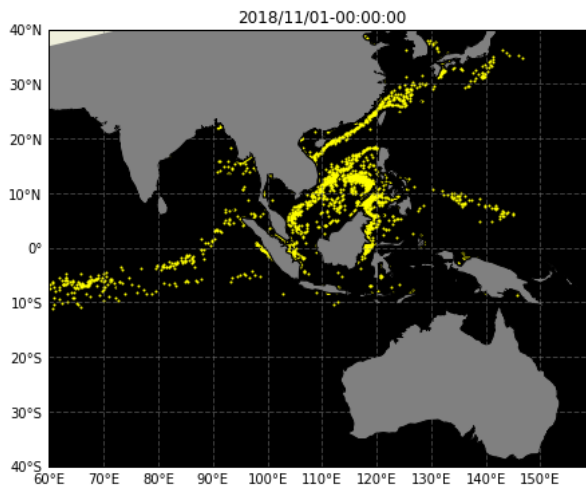
付録 18 風なし 2月流出_7月1日



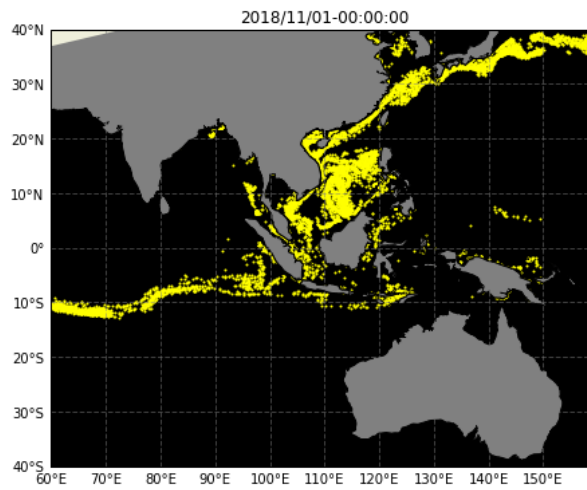
付録 19 風あり 2月流出_9月1日



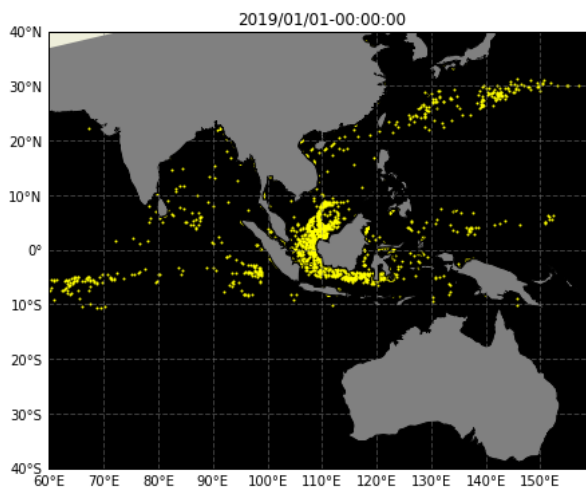
付録 20 風なし 2月流出_9月1日



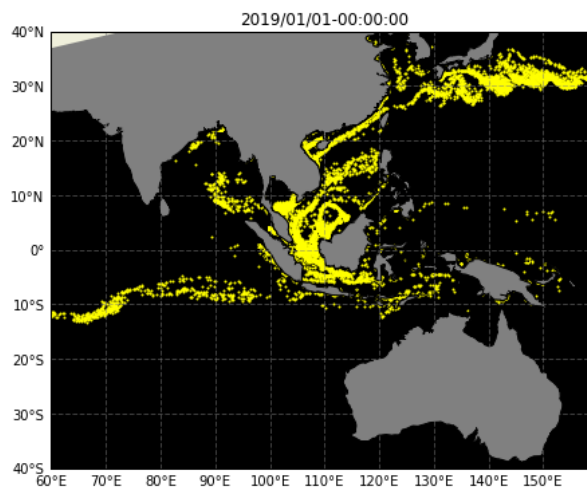
付録 21 風あり 2月流出_11月1日



付録 22 風なし 2月流出_11月1日



付録 23 風あり 2月流出_1月1日



付録 24 風なし 2月流出_1月1日

謝辞

磯辺篤彦 教授

研究室の長として、そして研究活動の指導教員として大変お世話になりました。磯辺先生の下での2年間の研究を通し、地球環境科学だけではなく、プログラミングなども基礎から教えていただきました。実際の研究活動では、プログラムのバグが常に発生し続け、ほとんどがそのバグ解明になってしまっていました。いつも相談に迅速に乗っていただき、とても感謝しています。最後の本論文執筆の段階でようやくバグの原因を見つけることができたときには、とても安心したと同時に研究の楽しさも実感することができました。そして磯辺先生には、コロナ禍という不測の事態にも関わらず、素早くオンラインゼミを導入していただき、学問以外にも学生生活を円滑に進めるためのマネジメントをしてくださりありがとうございました。マイクロプラスチックの研究でしたが実際に回収したりする機会がなかったことがほんの少し心残りです。いつか機会がありましたら是非よろしく願います。2年間、本当にありがとうございました。

木田真一郎 准教授

木田先生は、研究室ゼミや授業でお世話になりました。コロナ禍により急遽導入されたzoomのオンラインゼミの導入は、木田先生のフレキシブルな対応により学生側としても安心してゼミに参加できました。また、木田先生には修士1年次に地球科学のプログラムの基礎をご教授いただき、その成果が修士論文の研究活動に直結し、本論文の執筆に繋がりました。授業も木田先生のは生徒の参加を促し、考えさせるものだったため、論文などに対する観察力や理解力が高まったと感じます。また、木田先生とは同じフロアに研究室があり、研究以外のことも相談や談笑をすることができ、楽しい研究生活でした。今後の益々の活躍を願っています。有意義な研究室生活をありがとうございました。

上原克人 助教授

上原先生も、研究室ゼミや授業でお世話になりました。ゼミでは自分自身でも気づかなかった細かなところにも指摘していただいたり、授業ではオンラインをフル活用して展開していただいたりと、学生のために活動していただいたことがとても心に残っています。授業では、英語の教科書を読むことを課され、そのお陰で英語論文を読むときであっても英語の専門用語をスムーズに読むことができ、とても役に立ちました。2年間の研究生活を支えていただき、大変ありがとうございました。

事務職員、技術職員の皆様

研究活動および研究室生活を円滑に進めるために、事務手続きや連絡事項伝達、コンピューターの使用管理など、様々な援助をしていただきました。加えて、リモートワークの

謝辞

ためのVPN設定も、コロナ禍により必要となった際にもセキュリティ強化やスムーズな接続のための手順説明資料もありがたかったです。2年間お世話になりました。ありがとうございました。

研究室の皆様

研究室の諸先輩方、同期生に対しましては、日常生活において大変お世話になりました。新型コロナウイルスによるリモートワークで実際に研究室に滞在した日数は平常よりも激減しましたが、コミュニケーションが難しい中でSlackやzoomを使いアドバイス等をしていただきました。磯辺研の皆様のお陰で本論文も完成しました。楽しい有意義な2年間をありがとうございました。

最後に

本研究の活動および、本論文を執筆するにあたり、関わっていただいたすべての皆様に感謝します。多くの方のお陰で本論文は完成しました。大変ありがとうございました。