

リモートセンシング技術を用いた海洋ごみ モニタリングの手法調和ガイドライン



環境省

Version 1.0, 2024 年 7 月

リモートセンシング技術を用いた海洋ごみ モニタリングの手法調和ガイドライン

リモートセンシング技術を活用したモニタリング手法等に関する国際専門家
会合 委員：

ISOBE Atsuhiko¹, ALIANI Stefano², ANDRIOLO Umberto^{3,4}, DIERSEN Heidi⁵, GAMA
MONTEIRO João^{6,7}, GONÇALVES Gil^{3,4}, HIDAKA Mitsuko^{8,9}, KAKO Shin'ichiro⁸, KATAOKA
Tomoya¹⁰, MARTINEZ-VICENTE Victor¹¹, MATSUOKA Daisuke^{8,9}, MISHRA Pravakar¹²,
STREETT Davida¹³, TAKAHASHI Yukihiro¹⁴, TOPOUZELIS Konstantinos¹⁵, VAN EMMERIK
Tim H.M¹⁶

¹Kyushu University, Japan

²National Research Council of Italy, Italy

³University of Coimbra, Portugal

⁴Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, University of Coimbra, Portugal

⁵University of Connecticut, USA

⁶University of Madeira, Portugal

⁷Marine and Environmental Research Centre, Portugal

⁸Kagoshima University, Japan

⁹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan

¹⁰Ehime University, Japan

¹¹Plymouth Marine Laboratory, United Kingdom

¹²National Centre for Coastal Research, India

¹³National Oceanic and Atmospheric Administration, USA

¹⁴Hokkaido University, Japan

¹⁵University of the Aegean, Greece

¹⁶Wageningen University, Netherlands

本ガイドラインの推奨引用表記：

磯辺他（2024）リモートセンシング技術を用いた海洋ごみモニタリングの手法調和ガイド
ライン ver.1.0. 環境省, 89 pp（附属書、別添含む）。

問い合わせ先：

環境省 水・大気環境局 海洋環境課 海洋プラスチック汚染対策室
〒100-8975 東京都千代田区霞ヶ関 1-2-2

謝辞：

附属書「リモートセンシング技術におけるモニタリング/調査の計画・準備・実施等、並びに調査データの解析及び公開」セクション I 1.1 ドローンを用いた海岸漂着ごみ調査手法の作成に当たり調査にご協力いただいた、ドローンによる海岸漂着ごみ調査経験のある専門家・企業

ALIANI Stefano¹, ALMEIDA Sílvia², ANDRIOLO Umberto^{3,4}, CHIRAYATH Ved⁵, GAMA MONTEIRO João^{2,6}, GONÇALVES Gil^{3,4}, KAKO Shinichiro⁷, KOZUKA Akira⁸, MATA Aser⁹, MERLINO Silvia¹, MISHRA Pravakar¹⁰, PATERNI Marco¹, TOPOUZELIS Konstantinos¹¹, VAN EMMERIK Tim¹², WAKAIZUMI Takuma¹³, ÁLVAREZ Soledad²,

¹National Research Council of Italy, Italy

²Marine and Environmental Research Centre, Portugal

³University of Coimbra, Portugal

⁴Institute for Systems Engineering and Computers at Coimbra, University of Coimbra, Portugal

⁵University of Miami, USA

⁶University of Madeira, Portugal

⁷Kagoshima University, Japan

⁸Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center, Japan

⁹Plymouth marine Laboratory, United Kingdom

¹⁰National Centre for Coastal Research, India

¹¹University of the Aegean, Greece

¹²Wageningen University, Netherlands

¹³Asia air survey co., LTD, Japan

目次

ガイドライン ver.1.0

CHAPTER I 導入部.....	1
1.1 背景.....	1
1.2 ガイドラインの構成.....	1
1.3 用語とその定義.....	2
1.4 ガイドラインの目的.....	9
1.5 ガイドラインの範囲.....	9
CHAPTER II モニタリングの目的と調査手法の選定.....	13
2.1 モニタリングの目的.....	13
2.2 モニタリング手法の選定方法.....	13
2.3 政策課題に対処するためのモニタリング手法の例.....	15
CHAPTER III モニタリング手法.....	16
3.1 現在のモニタリング手法の技術的成熟度.....	16
3.2 現在のモニタリング手法の課題と展望.....	18
3.3 ガイドラインの改訂.....	19

附属書 各リモートセンシング技術におけるモニタリング/調査の計画・準備・実施等、並びに調査データの解析及び公開

セクションI 各リモートセンシング技術におけるモニタリング/調査の計画・準備・実施等

- 1.1 ドローンを用いた海岸漂着ごみ調査手法
 - 1.1.1 調査の計画・準備
 - 1.1.2 調査の実施

セクションII 調査データの解析及び公開

- 2.1 データ解析
 - 2.1.1 画像からの海岸漂着ごみの検出
 - 2.1.2 海岸漂着ごみの定量化
- 2.2 データの公開
 - 2.2.1 データの単位
 - 2.2.2 データの公開

別添 1：ドローンを活用した海岸漂着ごみ調査の実証試験結果

チャプターⅠ 導入部

1.1 背景

プラスチックを含む海洋ごみ対策への国際的な関心が高まっており、プラスチック汚染を終わらせるための法的拘束力のある国際文書（条約）の締結に向けた議論が、政府間交渉委員会（the Intergovernmental Negotiating Committee, INC）で進められている。このような状況下、対策立案・評価の基礎となる科学的知見を発展させる手段として海洋ごみのモニタリングの必要性が強調されており、広域での継続的かつ効率的なモニタリングを可能とする手法の確立が不可欠である。

そこで、海洋ごみモニタリングの網羅性と効率性を更に向上させるため、リモートセンシング技術を用いた海洋ごみモニタリング・分析手法に関する国際的なガイドラインを新たに策定した。このような技術は近年研究が進み、関連する知見と経験が蓄積されつつある（表 1 参照）。

表 1 リモートセンシング技術を用いた海洋ごみのモニタリング技術に関する
 主な研究の数

測定場所	データ取得方法（リモートセンシング技術）							画像解析			
	プラットフォーム							手動 (目視)	自動		
	固定カメラ	ドローン	気球	航空機	衛星	船舶	その他		矩形による 物体検出	セマン ティックセ グメンテー ション	その他
	センサー										
	RGB	RGB	RGB	マルチスペ クトル/ハ イパースペ クトル、 LIDAR	マルチスペ クトル/ハ イパースペ クトル	RGB, LIDAR					
海岸 ^{*1}	2	13 (6)	2	1				5 (2)	5 (1)	5 (3)	9 (2)
海面			1	1				1			1
海水柱											
海底 ^{*2}											
河口											
河岸/湖岸	1	1						1	1		1
河川表層	1	4					1	3			4
河川水柱							2				2
河底 ^{*2}											
陸域											

備考：

上記の数字は、Kako et al (2024)で参考文献として取り上げている論文の数である。この数字はレビューペーパーが公表された後に変わる可能性がある。

^{*1} 本ガイドラインにおける「海岸」とは、砂や小石で覆われた部分だけでなく、砂丘や、マングローブなどの植生も含む。括弧内の数値は、測定地域における砂丘を対象とした文献の数である。

^{*2} 現在の技術の水準では、リモートセンシング技術による海底や河底のごみの測定は限定的であると困難と考えられる。

1.2 ガイドラインの構成

本ガイドラインは、本編、附属書、別添の 3 つの部分からなる。本編には複数のリモートセンシング技術にまたがる海洋ごみ測定手法に関する事項を記載している。附属書には各リモートセンシング技術に関する詳細な手法、別添には、附属書の手法の実用性を確認するために行った実証実験の結果を示している。

1.3 用語とその定義

本ガイドラインにおける用語を、以下のように定義する。

(i) リモートセンシング技術

リモートセンシング技術は、直接物理的な接触なしに対象物に関する情報を収集し、処理するために使用される技術である（ASPRS 2024）。本ガイドラインでは、以下のプラットフォームを用いたリモートセンシング技術を対象とする。対象は今後変更する可能性がある。

- 固定カメラ（海岸線に足場を組んで設置したり、橋梁に固定したりする等、環境中にカメラを設置し、その場所で時系列に画像データを取得するもの）
- ドローン（UAV）
- 航空機
- 衛星
- 船舶

参考までに表 2-1～表 2-5 に各プラットフォームの調査（モニタリング）事例を示す。

(ii) 画像処理・解析

リモートセンシング技術で得られたデータを画像処理し、画像解析によりごみの種類や量を自動検出する。本ガイドラインにおける関連用語の定義は以下のとおりである。

- 画像処理
リモートセンシング技術により撮影された画像を、ごみを検出できる形に加工すること。色調補正、ノイズ除去、オルソ補正、他の画像との合成処理（オルソモザイクなど）が含まれる。
- オルソ画像
リモートセンシング技術で撮影された空撮画像を、撮影位置、レンズの歪み、撮影方向などを補正し、地上座標と一致させた画像のこと。補正されていない航空画像とは異なり、地表までの距離を正確に表現することができる。
- オルソモザイク
重なり合った複数のオルソ画像を、色を調整した上で、統合して一枚のオルソ画像を作成すること。
- 画像解析
画像処理された画像から、ごみの種類や量、個数などの情報を抽出すること。近年、機械学習やディープラーニングを用いたプラスチックごみ定量化のための画像処理技術が登場している。これらの手法においては、大規模なデータセットを利用して画像の色や形などの複雑な特徴を検出できるモデルが開発され、より柔軟なごみの検出が可能となっている（Kako et al. 2024）。このような画像解析手法には、「矩形による物体検出」や「セマンティックセグメンテーション」などがある（図 1 に概要を記載した）。また「画像解析」という言葉には、画像から手作業でごみを検出することも含まれる。

(iii) 調査とモニタリング

本ガイドラインでは、「調査」とはピンポイントでのある特定の時点における環境状態を把握するための測定と定義している。一方、「モニタリング」とは、環境またはその挙動の特性を繰り返し測定し、そこから空間的または時間的な傾向を検出することと定義している（GESAMP 2019）。

(iv) ごみ

本ガイドラインのモニタリング対象は、環境中のごみ（海洋ごみを含む）とする。

－ **環境中のごみ**

本ガイドラインのモニタリング対象は環境中のごみである管理が不適切な廃棄物（例えば、管理されていないごみ捨て場でのごみの野焼きや投棄）、環境中で分解してマイクロプラスチックになる可能性のあるマクロのプラスチックごみ、その他の人間や生物・非生物環境に悪影響を及ぼす可能性のある物体の流出や蓄積が含まれる。

－ **海洋ごみ**

環境中のごみのうち、外洋、沿岸、内陸の水域に直接または間接的に廃棄、処分、放棄された難分解性の製造、加工された固形物のことをいう（UNEP 1995）。

表 2-1 調査事例：固定カメラ

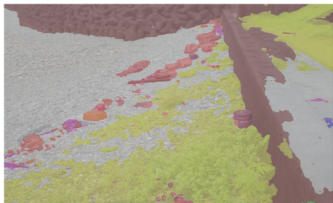
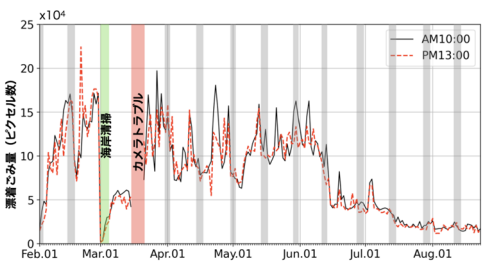
事例	鹿児島大学 ”街・海・宇宙からみるプラスチックごみ監視システム研究講座”ウェブサイト https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/mpl/analysis/test/ （参照 2024-6-30）
調査の目的と概要	海岸ごみの時系列の画像を固定カメラで撮影し、その画像をセマンティックセグメンテーションによって処理している。時系列のごみ情報が得られるため、ごみの経年変化の把握や清掃活動の実施時期の判断に活用できる。
場所と調査時期（期間、頻度）	日本国内の海岸 2022 年 1 月 26 日～ 画像は毎日午前 6 時～午後 7 時の時間帯で、1 時間ごとに撮影される。
範囲	約 100 m ²
カメラ	HykeCame LT4G （RBG カメラ）
GSD (Ground sample distance, 地上解像度)	> 1 mm
得られるごみの情報	ごみの個数、被覆面積、種類
画像	(a)  (a) 固定カメラで撮影された画像 (b)  (b) (a)のセマンティックセグメンテーション解析画像  海岸漂着ごみ量の時系列  固定カメラ

表 2-2 調査事例：ドローン

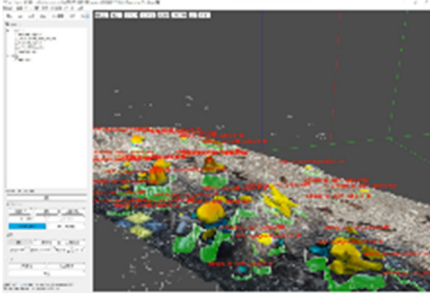
事例	ドローンを用いた海岸漂着ごみ調査の実証試験（実施者：鹿児島大学加古教授、日本エヌ・ユー・エス株式会社、株式会社ふたば） （詳細は別添 1 を参照）
調査の目的と概要	本ガイドラインの実用性を確認するため、実証試験を行った（詳細は別添 1 参照）。 流木を含む海岸漂着ごみをドローンで撮影し、その画像データを合成処理した。加古教授らが開発した AI を用いて海岸漂着ごみを自動検出し、個数、面積、体積を推定した。
場所と調査時期（期間、頻度）	日本国内の海岸 A：愛媛県伊予市森海岸：2023 年 7 月 24 日午前 8 時（干潮） B：愛媛県宇和島市平井海岸：2023 年 7 月 27 日午前 9 時（干潮）
範囲	画像撮影範囲：A：5,180 m ² B：706 m ² 調査範囲：A：50 x 17.1 m B：20 x 4.3 m（汀線水平方向 x 汀線垂直方向）
カメラ	DJI Zenmuse P1（RBG カメラ）
GSD	5 mm/pix
得られるごみの情報	ごみの個数、被覆面積、体積
画像	 ドローン  ドローンの飛行  ドローン撮影画像  海岸漂着ごみの検出結果  体積推定のイメージ

表 2-3 調査事例：航空機

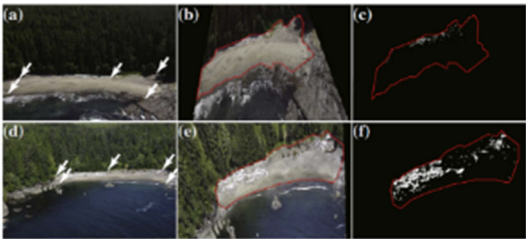
事例	Kataoka et al. (2018)
調査の目的と概要	航空機から斜め方向に撮影した画像について位置情報補正のための画像処理を行い、その後、背景となる砂浜と色の違いから、海岸漂着ごみのピクセルを抽出した。海岸漂着ごみごみの多さは、ごみで覆われた面積と海岸の面積の比率（カバー率）で評価できる。推定された海岸漂着ごみの被覆率のデータは、広い範囲にわたって、海洋ごみの対策を優先的に進める場所を決定するのに有効な情報となる。
場所と調査時期（期間、頻度）	カナダの海岸 - バンクーバー島西海岸：2014年10月7日、12月3日 - セントラルコースト、ハイダグワイ：2015年1月30日、3月2日
範囲	海岸線 1,500 km 以上
カメラ	Nikon D750（RGB カメラ）
GSD	0.1 x 0.1 m
得られるごみの情報	ごみの被覆面積
画像	 航空機での撮影画像 Acknowledgement: Lightspeed Digital for Government of Japan/North Pacific Marine Science Organization (PICES 2015)  画像処理 Cheewat Beach: (a), (b), (c) Clo-oose Beach: (d), (e), (f) (a), (d)：元の航空画像（白い矢は本調査で射影変換のために設定した5つの標準点） (b), (e)：それぞれ(a)と(d)の射影変換の処理をした画像 (c), (f)：画像解析で検出した海洋ごみを白いピクセルで表したもの (Kataoka et al. 2018 Fig. 2.)

表 2-4 調査事例：衛星

事例	Themistocleous et al. (2020)
調査の目的と概要	Sentinel-2（衛星）のデータを用いたリモートセンシング技術により、海面上のプラスチック対象物を検出できるかどうかを調べるためのパイロットスタディである。表面の大きさが 3 m x 10 m のペットボトルからなるターゲットを作成し、海面に設置している（以下、Themistocleous et al. 2020 Figure 3）。Sentinel-2 より得られたプラスチックごみと海水のスペクトルの特定の波長を用いて、プラスチックを効果的に識別するための方程式「Plastic Index」を確立した。
場所と調査時期（期間、頻度）	キプロスの海面 2018 年 12 月 15 日
範囲	-
カメラ	SVC HR-1024 spectroradiometer（マルチスペクトルカメラ）
GSD	Sentinel-2 の解像度は 10 x 10 m ² だが、本調査では Plastic Index を設定することにより、より小さい 3x 10 m のペットボトルからなるターゲットを検出している。
得られるごみの情報	ごみの種類（プラスチック）
画像	 Figure 3. Divers moving target 200 meters from shoreline. Kyriacos Themistocleous. 3 x 10 m のプラスチックごみのターゲット (Themistocleous et al. 2020 Figure 3)  Figure 11. Plastic index (PI) was used to identify the target, which is circled in yellow. Sentinel-2 のデータから Plastic index により特定されたターゲットのイメージ (Themistocleous et al. 2020 Figure 11)

表 2-5 調査事例：船舶

事例	Papachristopoulou et al. (2020)
調査の目的と概要	合計 62 の海岸について、船舶の上からの写真撮影を行い、その画像を継ぎ目のないパノラマ画像に統合した。うち 4 つの海岸では手動での海岸漂着ごみ回収による調査を行い、船舶による調査のデータの較正と検証を行った。
場所と調査時期（期間、頻度）	ギリシャの海岸 船舶による撮影の作業時間：20 時間（手動での回収調査も含めた研究全体の期間は 2017 年 8 月～2018 年 8 月）
範囲	海岸延長 約 8.5 マイル（約 15.7 km）
カメラ	Nikon D80（RGB カメラ）
GSD	-
得られるごみの情報	ごみの種類、個数
画像	 Fig. 2. Example of photomosaic digitizing process in QGIS environment. Black points represent the BL items registered in the A-B area. White squares indicate zoomed example areas, while 1-9 numbers show samples of different identified item categories. 1: Plastic water bottle, 2: Plastic cap/lid drink, 3: Plastic cup, 4: Rope, 5: Cigarette filter, 6: Straw, 7: Float for fishing net, 8: Plastic cup and 9: Cup lid. 画像処理した写真 (Papachristopoulou et al. 2020 Fig. 2.)

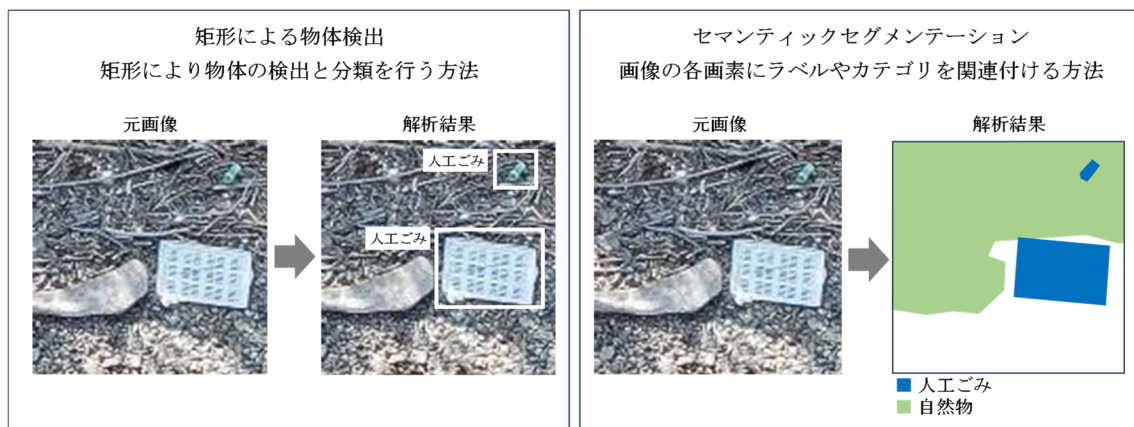


図1 画像解析の説明

1.4 ガイドラインの目的

本ガイドラインの目的は、広範囲にわたって継続的かつ効率的なモニタリングを可能にするリモートセンシング技術を用いた調和されたモニタリング手法を開発し、その包括的な利用を推進するとともに、国際的な海洋ごみの実態把握に貢献することである。

1.5 ガイドラインの範囲

1.5.1 モニタリングの場所、データ取得、画像解析方法

ガイドラインで取り扱う範囲は図2、表3のとおりである。本ガイドラインは、利用可能な最良の科学的知見に基づいて、今後範囲の拡大及び更新をする予定である。本ガイドラインは、主に学術機関・研究機関、民間産業・NGO、政策立案者、市民科学者が活用することを目的としている。

本ガイドラインで取り扱う海域は、The International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG) など他団体の海洋ごみモニタリングに関する既存の取組との重複を避けるため、主に沿岸域を対象としている。



図2 モニタリングの場所とリモートセンシング技術

表3 本ガイドラインで扱うモニタリング手法、データ取得方法、画像解析手法の範囲

測定場所	データ取得方法						手動 (目視)	画像解析		
	リモートセンシング技術							自動		
	プラットフォーム							矩形による 物体検出	セマン ティックセ グメンテー ション	その他
	固定カメラ	ドローン	航空機	衛星	船舶	その他				
	センサー									
RGB	RGB	マルチスペク トル/ハイパー スペクトル, LIDAR	マルチスペク トル/ハイパー スペクトル	RGB, LIDAR						
海岸 (砂丘)										
海面										
海水柱										
海底										
河口										
河岸/湖岸										
河川表層										
河川水柱										
河底										
陸域										

ガイドラインVersion 1.0に追加
検討中
他の機関により議論中 (例: IOCCG Task Force on Remote Sensing of Marine Litter)

1.5.2 ガイドラインの利用者

現時点で本ガイドラインにおける各技術の記載内容を主に参考にとすると想定される機関を以下の表（表 4-1, 4-2）に整理した。これらの表は、各機関が実施しているリモートセンシング技術を用いたごみに関する調査・研究の実績をもとに作成した。

表 4-1 ガイドラインの主な利用者として想定される機関

機関	リモートセンシング技術					画像解析	
	固定カメラ	ドローン	航空機	衛星	船舶	手動*1	自動*2
学術機関及び研究機関							
民間産業及びNGO							
政策立案者（地方公共団体を含む）							
市民科学者							

■主に記載内容を参考にすると想定される主体

■記載内容を一定程度参考にすると想定される主体

備考：

利用者の技術・予算や使用目的によってはより広い主体による活用が想定される場合もある。

*1 手動：画像からの手動による海洋ごみの抽出・判別であれば広いユーザーにより実施可能である。ただし、単位面積あたり当たりの海洋ごみの量を定量的に把握するには測量技術が求められ、学術機関や専門の企業の協力が一般的に必要であると考えられる。

*2 自動：ユーザーインターフェース（UI）が整備され、閾値や画像の簡単な調整で利用可能なアプリケーションがある場合は、広いユーザーによる活用が可能である。しかしながら、UIが整備されていない、または、既存のアプリケーションが対応しておらずプログラミングや機械学習モデルの学習等を行う場合は専門知識が求められ、学術機関や専門の企業の協力が一般的に必要であると考えられる。

表 4-2 表 4-1 における機関を主なガイドラインの対象と想定する理由

リモートセンシング技術	費用 (画像解析にかかる費用は含まない)	専門技術	遵守要件 (許認可手続きの困難さや、実施時の注意事項)	アクセシビリティ (事例の多寡や、プラットフォームやサービスの入手が容易かどうか)
固定カメラ	直営で導入・運用する場合の費用は比較的安価である。 ^{*1}	カメラの設置時の設定やメンテナンスに技術が必要である。	カメラの設置に許認可が必要な場合がある。	市販品を活用できる。
ドローン	直営で導入・運用する場合の費用は比較的高価である。 ^{*2}	専用のアプリケーション等を用いることで簡単に自律飛行を行うことができるため、広いユーザーにより活用可能であると考えられる。一方、RTK (Real-time kinematic) ^{*5} 搭載機器でない場合は、測量技術を用いた位置情報補正の処理が必要である。	飛行に許認可が必要である場合が多い。	市販品を活用できる。
航空機	調査1回当たりの委託費用が高価である。 ^{*3}	操縦に特殊な技術や免許を要する(航空機の操縦は一般的に委託する)。	操縦に許認可が必要である(航空機の操縦は一般的に委託する)。	海洋ごみに関する事例は限られているものの、航空測量など、航空機に固定されたカメラで直下を撮影する技術は広く活用されている。
衛星	最小単位で数百ドル(数万円)や無料で活用できるデータソースが存在する(測定範囲や解像度等により異なる)。	ごみの挙動や分布の把握に関しては、専門的な知識や技術がないユーザーにより活用可能であると考えられる。一方で、ごみの分類に関しては、測定可能性について主に学術機関や企業によって研究が進められている。	データを利用する観点からは許認可等は不要である。	インターネットにより容易にアクセス可能なソースも存在する。
船舶	船舶をチャーター(傭船)する場合は、船舶の種類により異なるが比較的安価である。 ^{*4}	船を動かしながら船上で撮影する方法や、撮影条件の設定に技術が必要である(船舶の操縦は委託する場合が多いと考えられる)。	場所や船舶の大きさにより許認可が必要な場合がある(船舶の操縦は委託する場合が多いと考えられる)。	研究事例が現時点で非常に限られており手法が普及していないため、主に学術機関による活用が考えられる。ただし、例えば、マングローブ林等の上空からの撮影が困難であり、また陸域での手動調査も困難と考えられる環境では有効であると考えられる。

備考:

これらの基準はあくまで目安であり、方法、国や地域、調査場所の環境等によって異なる場合がある。
なお、プラットフォームの操縦・操作については、ユーザーの技術や予算によって委託する場合がある。

*1 日本における一般的な事例では、導入費用は 30-40 万円程度、運用費用は 5-10 万円/年程度である。

*2 日本における一般的な事例では、導入費用は 200 万円程度、運用費用は 20-30 万円/年程度である。

*3 日本における一般的な事例では、1 回の飛行当たりの委託費用は 200-300 万円程度である。

*4 日本における一般的な事例では、1 回当たりの船舶のチャーター費用は 1-5 万円程度、カメラの購入費用は 20-30 万円程度である。

*5 RTK は GPS 測定 (より一般的には GNSS (全球測位衛星技術) 測定) に基づく位置測定手法であり、センチメートルのレベルの精度でリアルタイムに位置情報を測定可能である (引用: IAG (International Association of Geodesy) ウェブサイト)。

チャプターII モニタリングの目的と調査手法の選定

2.1 モニタリングの目的と目標

モニタリングの主目的は、政策関連の課題に活用することである。政策関連の課題には、政策立案（例：発生源の特定、総量把握）や施策（例：使い捨てプラスチック製品の市場流通禁止、拡大生産者責任等）、普及啓発（例：環境教育）、海岸清掃活動、及びこれら対策の効果検証を含む。環境中のごみのモニタリングの具体的な目標は、以下のよう
に考えられる。

- 環境中のごみの量の把握
- 環境中のごみの種類の把握
- 環境中のごみの挙動（輸送、集積）の把握
- 環境中のごみの集積場所の特定

2.2 モニタリング手法の選定方法

図 3-1、3-2 は、それぞれの調査目的に応じて適切なプラットフォームを選択する考え方を示している。一般的に、調査範囲と得られる画像の解像度は相反の関係にある。そのため、調査目的に応じた適切なリモートセンシング技術を選択する必要がある。リモートセンシング技術は検出能力に限界があるため、ごみの発生源の特定や詳細な組成調査には手動での調査が推奨される。ただし、調査手法のデザインや調査結果の組み合わせによっては、リモートセンシング技術により得られたデータをより広い目的に活用できる可能性がある。

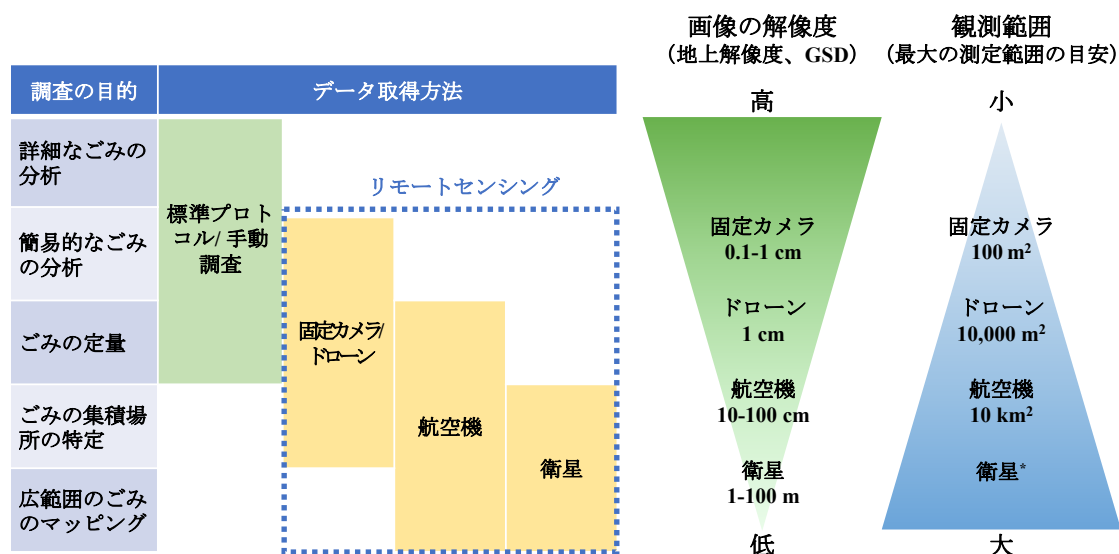


図 3-1 各プラットフォームにおける調査目的と調査範囲、画像解像度の目安

備考：

本図での解像度とエリアの範囲は、各プラットフォームを用いる調査・研究において典型的な値をオーダー単位で記載している。

* 衛星は、特定の河川や海岸といった狭い範囲から、全球単位といった広い範囲まで活用され得ると考えられる。

固定カメラ
 ペットボトル(河川) GSD : 1 mm
 苗木ポット(海岸) GSD : 1 mm

ドローン
 ペットボトル(道路) 高度 : 40m GSD : 5 mm
 ペットボトルの蓋(道路) 高度 : 40m GSD : 5 mm

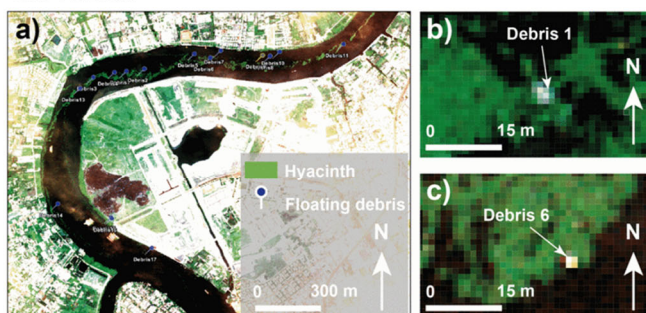


航空機
 タイヤ(海岸) 高度 : 610 m GSD : 2 cm
 プラスチック(海岸) 高度 : 610 m GSD : 2 cm



出典 : Moy et al. 2021 Figure 2から
 一部抽出

衛星
 プラスチック(河川) GSD : 1.24 m



サイゴン川における浮遊ごみの検出

a) 確認された浮遊物の概要。b) c) 2つの浮遊物の拡大図。

衛星画像はトゥルーカラー合成で表示されている。

出典 : Schreyers et.al. 2022 Fig .1 (2020年3月4日のworldview-3

画像©2020 maxar)

図 3-2 各プラットフォームの一般的な画像例

図 3-1 に記載の目的に加えて、固定カメラや衛星は高頻度で測定が可能のため、環境中のごみの挙動（輸送、集積のシステム）の把握に適していると考えられる。各プラットフォームの適切な測定の間隔は、Kako et al. (2024)を参照。

また、マルチスペクトルセンサーやハイパースペクトルセンサーを使用したごみの判別は現在研究段階だが、将来的には波長の特性からプラスチックごみ等の分類が、プラットフォームの解像度によらずできるようになる可能性がある。

2.3 政策課題に対処するためのモニタリング手法の例

表 5 政策課題の例

何を知りたいか *	なぜ知りたいか	政策課題に対処するための方法	政策課題にどのように対処するか
国が管轄する海域における海洋ごみの量	ごみの削減対策の進捗管理や影響の把握	-	-
海洋ごみの種類と発生源	海洋プラスチック汚染に対する効果的かつ効率的な発生抑制対策を検討するため。	-	-
発生抑制対策の効果		固定カメラ @河川	陸域からのごみの河川への流出量の増減の傾向を把握する。
ごみの集積の特定	プラスチック汚染の現状把握、対策の優先順位付け、効率的な対策を推進（清掃活動の効率化を含む）するため。	ドローン @海岸	都道府県単位で主要な海岸における海洋プラスチックの分布を把握し、清掃活動の優先順位を明確にする。
		航空機 @海岸	都道府県単位で全海岸線の海洋プラスチックの分布を把握し、清掃活動の優先順位を明確にする。
		固定カメラ @海岸	特定の海岸におけるごみの増減の傾向を詳細に把握し、限られた清掃回数の中で、回収の効率化を図る。

* 表の最左列の政策課題の項目は GESAMP (2019)を参照した。

CHAPTER III モニタリング手法

3.1 現在のモニタリング手法の技術的成熟度

本ガイドラインでは多くの主体に対し、最新の知見から、より高解像度の時空間情報の把握を可能とするモニタリング手法について情報提供し、環境中のごみの更なる実態把握に資することを目的としている。そのため、既存のリモートセンシング技術によるモニタリング手法の技術的な成熟度、実用性が高いものから段階的に、本ガイドラインの附属書でその具体的な手法を解説する。

成熟度の評価に当たっては、近年海洋ごみ関連の研究でも導入が検討され始めているTRL（Technological Readiness Level, 技術成熟度）*という手法を活用する（Bellou et al. 2021）TRLは9つのレベルに分類され、TRL 1が最も低く、TRL 9が最も高い。本ガイドラインでは、図4の定義に従って、Kako et al. (2024)で参照されている既存の海洋ごみ調査や研究に基づき、各技術のTRLを評価した（表6-1）。

画像解析技術については、現時点で一般的に使用されている用途（タスク）を表6-2に整理した。なお、本分野は近年研究が加速しており、各技術の成熟度も今後変化していく可能性があることに留意が必要である。

* TRLは、NASAが開発した、特定の技術の成熟度を評価するために用いられる指標の一種であり、様々な技術分野に一般的に応用されている。

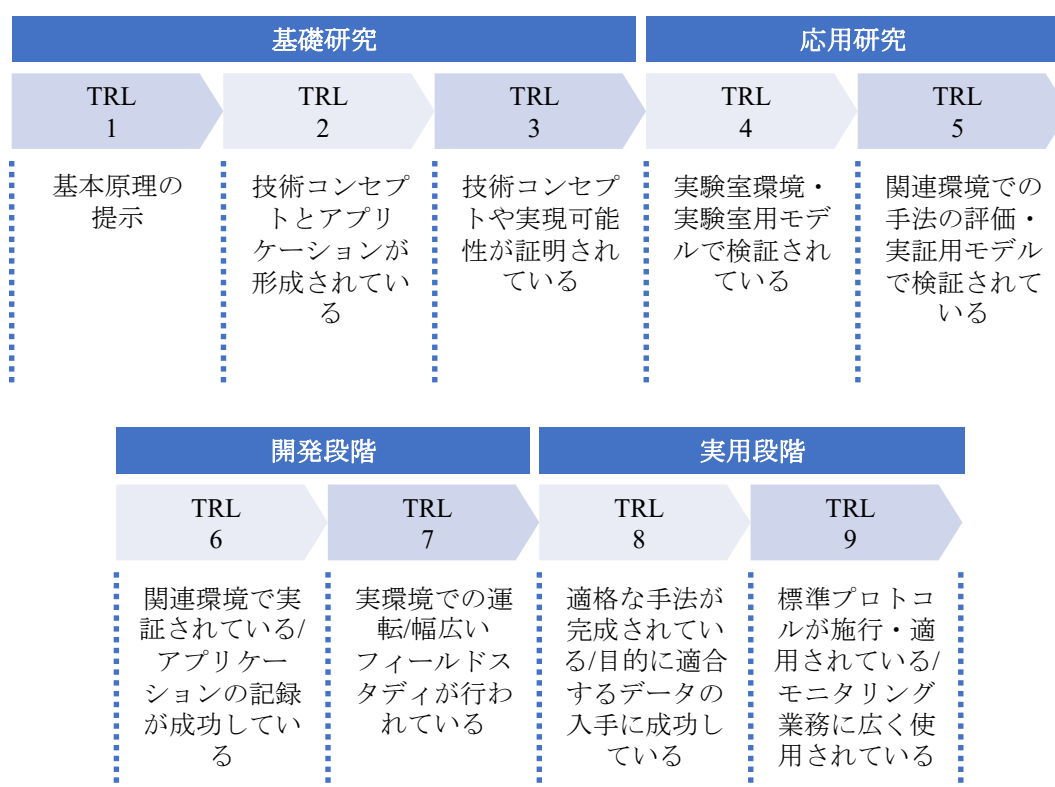


図4 ごみのモニタリングに使用されるリモートセンシング技術に関する技術成熟度（TRL）の説明（Aliani et al. 2023）

表 6-1 各プラットフォームの技術成熟度（TRL）

	ドローン	固定カメラ	航空機	衛星
海岸/ 河岸/湖岸/ 陸域	8	7	7	TBD (To Be Discussed)
海面/河口	6	N/A (Not applicable)	TBD	TBD
河川表層	6	7	N/A	TBD

備考：

TRL の評価は Kako et al. (2024) で参照されている既存の海洋ごみ調査や研究、その他確認された事例に基づいて行った。

表 6-2 タスクと画像解析技術の対応表

	矩形による物体検出	セマンティックセグメンテーション
ごみの面積評価（体積と質量の推計）	N/A (Not applicable)	++ *1
ごみの個数の集計	++	N/A
ごみの分類	++	+*2

備考：

*1 面積（Hidaka et al. 2022）と体積（Kako et al. 2020）を推定するには、単位長さ当たりのピクセル数の情報や技術による位置情報が必要となる。質量（Kataoka et al. 2020）を推定するには実際に現地でごみを回収し、単位体積当たりの質量を求める必要がある。

*2 人工ごみと自然物の分類は行われているが、現時点ではそれ以上の詳細な分類はできない（Kako et al. 2024）。

3.2 現在のモニタリング手法の課題と展望

3.2.1 リモートセンシング技術のプラットフォーム

リモートセンシング技術については、図 3-1 に示したとおり、画像解像度と調査可能な範囲は一般的に反比例する。リモートセンシング技術は手動調査と比較して広範囲のごみのデータを入手できるが、画像解像度が低いため手動調査のように詳細なごみの分類は困難である。その他、リモートセンシング技術の典型的な技術的課題と、これらを踏まえた将来の展望を表 7 に示す。

表 7 リモートセンシング技術の典型的な技術的課題と将来の展望
(Kako et al. 2024)

	典型的な技術的課題	将来の展望
固定カメラ	固定カメラは画角が限られており、海岸全体を捉えることができない。	固定カメラとドローンを組み合わせ、それぞれごみの量の時間的変化を得るためのリアルタイム観測と、量の空間分布を記録するための一定間隔でのスナップショットを撮影することが有効であると考えられる。
ドローン	ドローンによる測定は、10,000 m ² オーダーの範囲の海岸でも準備開始から測定完了まで半日程度かかり、撮影後のデータ処理にも時間を要する。	
航空機、衛星	RGB カメラなどを使った広範囲なごみ測定の手法がまだ確立されていない。	両プラットフォームとも広域を一括で測定するには非常に優れているので、ドローンでより詳細な測定を行うとともに、航空機や衛星を使ってごみが溜まりやすい場所の精度を評価することも有効であると考えられる。

3.2.2 画像解析

機械学習とディープラーニングに基づく画像処理技術については、大規模なデータセットを活用して、画像の色や形などの複雑な特徴を検出できるモデルが開発され、より柔軟なごみの検出が可能となっている。しかしながら、学習データの作成には高いコストがかかるため、プラットフォームを問わず、これらのデータセットを共有することが不可欠である。また、手作業による方法では、あらゆる大きさの対象物を識別できるが、画像処理による方法では、ごみの大きさが比較的小さい場合や、障害物がある場合（ごみが他の物体に隠れるなど）は解析するのが困難である（Kako et al. 2024）。

3.2.3 リモートセンシング技術による総合的なモニタリング

モニタリングによる定量化の最終的な目標の一つは、陸域のごみが河川を經由してどの程度海洋に流出しているかなど、ごみの流れを解明することである。そのためには、定量化の単位を統一する必要があるが、様々なプラットフォームから得られるデータは、GSD や得られる情報（高度の有無）が異なるため、現状では困難である（Kako et al. 2024）。

また、利用者が活用可能な技術は、利用者の専門性やリソースに応じて異なる（表 4-1、4-2 参照）。それぞれの技術の特徴やメリット、デメリットを把握したうえで、目的や各利

用者の状況に合った手法を選択していくことが重要である。各技術の活用範囲や容易に使用できる者の範囲は技術の発展とともに変化する可能性があることに留意する必要がある。

3.3 ガイドラインの改訂

本ガイドラインはリモートセンシング技術の発展に伴って、随時更新していく予定である。附属書に関しては、表 3 及び表 6-1 に示したとおり、固定カメラ、航空機、衛星について今後追加していく予定である。

引用文献

- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), “What is ASPRS?“, <https://www.asprs.org/organization/what-is-asprs.html> (参照 2024-6-30)
- Aliani S., Lusher A., Galgani F., Herzke, D., Nikiforov, V., Primpke, S., Roscher, L., da Silva, V.H., Strand, J., Suaria, G., Vanavermaete, D., Verlé, K., De Witte, B., Van Bavel, B. (2023). Reproducible pipelines and readiness levels in plastic monitoring. *Nat Rev Earth Environ* 4(5), 290-291.
- Bellou, N., Gambardella, C., Karantzas, K. Monteiro, J.G., Canning-Clode, J., Kemna, S., Arrieta-Giron, C.A., Lemmen, C. (2021). Global assessment of innovative solutions to tackle marine litter. *Nat Sustain* 4, 516-524.
- GESAMP. (2019). Guidelines for the Monitoring and Assessment of Plastic Litter in the Ocean. (P.J. Kershaw, A. Turra and F. Galgani, eds). (IMO/FAO/UNESCO IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). GESAMP Rep. Stud. No. 99.
- Hidaka, M., Matsuoka, D., Sugiyama, D., Murakami, K., Kako, S. (2022). Pixel-level image classification for detecting beach litter using a deep learning approach. *Mar. Pollut. Bull.* 175, 113371.
- International Association of Geodesy (IAG), Commission 4: Positioning & Applications, Sub-Commission 4.5: Next Generation RTK, Working Group 4.5.1: Network RTK (2003-2007). <https://www.wasoft.de/e/iagwg451/intro/introduction.html> (参照 2024-6-30)
- Kagoshima University "Research Chair of Plastic Litter Monitoring System from the City, Sea, and Space" Website <https://www.oce.kagoshima-u.ac.jp/~kako/mpl/analysis/test/> (参照 2024-6-30)
- Kako, S., Morita, S., Taneda, T. (2020). Estimation of plastic marine debris volumes on beaches using unmanned aerial vehicles and image processing based on deep learning. *Mar. Pollut. Bull.* 155, 111127.
- Kako S., Kataoka, T., Matsuoka, D., Takahashi, Y., Hidaka, M., Aliani S., Andriolo, U., Dierssen, H., van Emmerik, T., Gonçalves, G., Martinez-Vicente, V., Mishra, P., Monteiro, J.G., Streett, D., Konstantinos, T., Isobe, A. (2024). Advances in plastic litter diagnostics using remote sensing and image processing. (draft as of June 2024)
- Kataoka, T., Murray, C.C., Isobe, A. (2018). Quantification of marine macro-litter abundance around Vancouver Island, Canada, based on archived aerial photographs processed by projective transformation. *Marine Pollution- Bulletin* 132, 44-51.
- Kataoka, T., Nihei, Y. (2020). Quantification of floating riverine macro-debris transport using an image processing approach. *Sci Rep.* 10, 2198.
- Moy, K., Neilson, B., Chung, A., Meadows, A., Castrence, M., Ambagis, S., Davidson, K. (2018). Mapping coastal marine debris using aerial imagery and spatial analysis. *Mar. Pollut. Bull.* 132, 52-59.
- Papachristopoulou, I., Filippides, A., Fakiris, E., Papatheodorou, G. (2020). Vessel-based photographic assessment of beach litter in remote coasts. A wide scale application in Saronikos Gulf, Greece. *Marine Pollution Bulletin.* 150, 110684

Schreyers, L., van Emmerik, T., Biermann, L., van der Ploeg, M. (2022). Direct and Indirect River Plastic Detection from Space. *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.

Themistocleous, K., Papousta, C., Michaelides S, Hadjimistsis D. (2020). Investigating detection of floating plastic litter from space using Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing* 12(16) 2648.

UNEP. (1995). Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from land-based Activities, United Nations Environment Programme, Nairobi.