

ドローンを活用した海岸漂着ごみ調査の実証試験結果

1 実証試験の目的

本実証試験の目的は、以下表 1 の観点から本ガイドライン・附属書セクション I.1 及びセクション II の実用性を確保することである。

表 1 実用性確保のポイント

具体性	ガイドラインの手順が十分に具体的に記載されているかを確認する。
汎用性	使用する機器や調査環境が違っていても参考となる内容とする。
先進性	既存調査の課題である効率性、正確性、再現性を解決できるものであるかを検証する。

2 調査の概要

調査の概要は表 2 のとおりである。

表 2 調査の概要 (1/2)

項目	概要
調査時期・頻度	2023 年 7 月 23~29 日、1 回/各海岸
調査地点	A：愛媛県伊予市（図 1） B：愛媛県宇和島市（図 2）の礫浜海岸
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）
調査方法 (詳細は別添資料 A 参照)	海岸漂着ごみの量及び種類について、以下の 4 つの方法により調査・解析した。 I ドローン調査&AI によるごみの自動検出・定量 II ドローン調査&撮影画像目視によるごみの検出・定量 III 目視調査（「水辺の散乱ゴミの指標評価手法（海岸版）」（国土交通省東北地方整備局ほか）を参考） IV 回収調査（「地方公共団体向け漂着ごみ組成調査ガイドライン（令和 5 年 6 月 第 3 版）」を参考） * 手法 III 及び IV については、経験者によるガイドにより一般の人々も実施することが可能な場合がある。

表 2 調査の概要 (2/2)

調査対象	I 海岸漂着ごみ（自然物を含む）の体積、オブジェクト数 II~III 海岸漂着ごみ（自然物を含む）の体積 IV 海岸漂着ごみ（自然物を含む）の個数、体積、重量
調査実施者	日本エヌ・ユー・エス株式会社、ふたば株式会社、鹿児島大学加古研究室
画像処理・解析者	画像処理：ふたば株式会社 画像解析：鹿児島大学加古教授
結果の整理方法	- I について、ドローンカメラの解像度及び AI で検出可能なサイズに限定した海岸漂着ごみを対象に、IV と定量化の結果を比較整理 - I、II、III について、IV と同じすべてのマクロ海岸漂着ごみを対象に、IV との体積推定結果を比較整理 - I について、IV と同じすべてのマクロ海岸漂着ごみを対象に、IV との個数推定結果を比較整理 - II、III の調査を複数名で各々実施することにより、作業者間の体積推定に関する人為的誤差を比較整理 - I~IV の各手法の作業時間を調査範囲の異なる地点ごとに整理 - I~IV の各手法の調査・解析費用を調査範囲の異なる地点ごとに整理

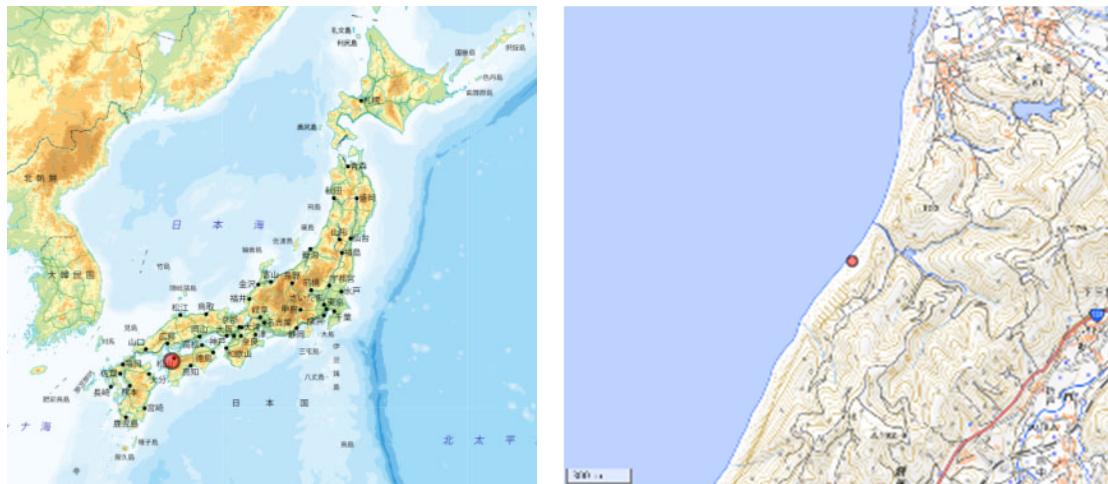


図 1 調査地点の位置図（愛媛県伊予市森海岸）

（国土地理院地図より作成）



図 2 調査地点の位置図（愛媛県宇和島市平井海岸）
 （国土地理院地図より作成）

3 実証試験の結果

3.1 各手法により推定した海岸漂着ごみの量の比較

3.1.1 ドローン及び AI で検出可能なサイズの海岸漂着ごみに限定した推定結果の比較

実証試験で使用した AI が検出できるごみの解像度は約 30 ピクセル (5 x 6 cm) であるため、まずドローン&AI (手法 I) の結果を、概ね検出可能なサイズ (5 x 6 cm、または 100 cm³) 以上の海岸漂着ごみに限定した回収調査 (手法 IV) の結果 (体積) と比較した。

その結果、表 3 のとおり、実測値の人工ごみの約 66~82% (体積ベース) を検出することができた。表 4 のとおり、個数ベースでも同様に人工ごみを検出することができた。B 地点の検出率が A 地点より低い理由は、人工ごみが漂着した流木に覆われており、B 地点での検出が困難であったためであると考えられる (図 3 参照)。

表 3 ドローン&AI と海岸漂着ごみ回収調査結果の比較 (ドローン&AI で検出可能なサイズの人工ごみに限定) (単位: m³)

調査地点	ドローン& AI	海岸漂着ごみ回収
A (伊予)	0.04	0.049
B (宇和島)	0.19	0.288

備考:

- 1 海岸漂着ごみ回収調査結果については、小数点第 4 位を四捨五入
- 2 これらの推定結果にはごみでないものをごみとして検出し、あるいはごみを検出し損ねたことに起因する不確実性が含まれる。
- 3 人工ごみである木材については、AI が流木と区別することが難しいと考えられたため、海岸漂着ごみ回収 (手法 IV) の値から除外した。
- 4 地点 A のドローン&AI による人工ごみの推定体積は 0.11 m³ であったが、AI の検出結果の見直し時に 0.07 m³ の流木が誤って人工ごみとして検出されていたことから、人工ごみの推定体積は 0.04 m³ とした。
- 5 海岸漂着ごみ回収調査手法については、別添資料 A の IV. 海岸漂着ごみ回収調査を参照

表 4 ドローン&AI と海岸漂着ごみ回収調査結果の比較 (ドローン&AI で検出可能なサイズの人工ごみに限定) (単位: 個)

調査地点	ドローン& AI	海岸漂着ごみ回収
A (伊予)	61	67
B (宇和島)	517	625

備考:

- 1 人工ごみである木材については、AI が流木と区別することが難しいと考えられたため、海岸漂着ごみ回収結果から除外した。
- 2 海岸漂着ごみ回収結果について、同じ品目のごみの平均体積が 100 cm³ 以上の品目のみ個数を計測した。したがって、海岸漂着ごみ回収結果の個数には、ドローン&AI で検出できないサイズのごみも若干含まれている。
- 3 ドローン&AI の手法では複数のごみを 1 つの物体として計数している可能性がある。
- 4 これらの推定結果にはごみでないものをごみとして検出し、あるいはごみを検出し損ねたことに起因する不確実性が含まれる。



図 3 地点 B に漂着した流木により一部の人工ごみが覆われている状態

3.1.2 全ての調査対象のごみの体積推定結果の比較

次にドローン&AI で検出不可能なサイズのごみを含む 2.5 cm 以上の海岸漂着ごみを対象に、各手法による海岸漂着ごみの体積推定の結果（表 5、表 7）を調査地点ごとに実測値（表 6、表 8）と比較した。

その結果、ドローン&AI による推定値と実測値の差は、前述の推定値と実測値の差よりも拡大した。これは、より細かいごみが調査対象に含まれることで、ごみ検出の妨げとなる解像度や流木による被覆の影響を受けやすくなったためであると考えられる（図 3 参照）。これは現時点のリモートセンシング技術や AI の技術的限界ではあるが、今後のそれらの技術発展による課題解決が期待される場所である。

これらの理由により、地点 B のような漂着密度の高い海岸においては、正確に人工ごみと自然物の体積を推定することが困難であるが、海岸漂着物全体の体積に着目すると、海岸漂着ごみ回収調査結果の 1.243 m³（表 8 参照）に対し、ドローン&AI の値は 1.55 m³（表 7 参照）と比較的近しい値が推定できていることが確認された。

表 5 地点 A における各手法による海岸漂着ごみ体積推定結果（単位：m³）

分類	ドローン& AI	ドローン&画像 目視	海岸目視
人工ごみ	0.04	0-0.1	0.058
自然物	0.66	0.8-6.4	1.875

備考：

- 1 海岸目視調査の結果は小数点第 4 位を四捨五入
- 2 これらの推定結果にはごみでないものをごみとして検出し、あるいはごみを検出し損ねたことに起因する不確実性が含まれる。
- 3 地点 A のドローン&AI による自然物の推定体積は 0.59 m³であったが、AI の検出結果の見直し時に 0.07 m³ の流木が誤って人工ごみとして検出されていたことから、自然物の推定体積は 0.66 m³とした。
- 4 ドローン&画像目視調査については、空撮画像から体積を推定することによる不確実性を考慮し、幅のある値で推定値を示した（表 20 参照）。
- 5 海岸目視調査の結果は複数の調査者の推定値の平均とした（詳細は表 10 参照）。
- 6 各手法の詳細は別添資料 A の I-III を参照

表 6 地点 A における海岸漂着ごみ回収調査結果（単位：m³）

分類	海岸漂着ごみ回収
人工ごみ	0.115
自然物	3.854

備考：

- 1 小数点第 4 位を四捨五入
- 2 海岸漂着ごみ回収調査手法については、別添資料 A の IV 海岸漂着ごみ回収調査を参照

表 7 地点 B における各手法による海岸漂着ごみ体積推定結果（単位：m³）

分類	ドローン& AI	ドローン&画像 目視	海岸目視
人工ごみ	0.19	0.04-0.32	0.223
自然物	1.36	0.32-2.56	0.795

備考：

- 1 小数点第 4 位を四捨五入
- 2 これらの推定結果にはごみでないものをごみとして検出し、あるいはごみを検出し損ねたことに起因する不確実性が含まれる。
- 3 ドローン&画像目視調査については、空撮画像から体積を推定することによる不確実性を考慮し、幅のある値で推定値を示した（表 20 参照）。
- 4 海岸目視調査の結果は複数の調査者の推定値の平均とした（詳細は表 10 参照）。
- 5 各手法の詳細は別添資料 A の I-III を参照

表 8 地点 B における海岸漂着ごみ回収調査結果（単位：m³）

分類	海岸漂着ごみ回収
人工ごみ	0.469
自然物	0.774

備考：

- 1 小数点第 4 位を四捨五入
- 2 海岸漂着ごみ回収調査手法については、別添資料 A の IV 海岸漂着ごみ回収調査を参照

3.1.3 全ての調査対象のごみの個数推定結果の比較

次に、ドローン&AI で検出不可能なサイズのごみを含む 2.5 cm 以上の海岸漂着ごみを対象に、ドローン&AI による人工ごみの個数の推定値と海岸漂着ごみ回収調査結果を調査地点ごとに比較した。

その結果、推定値と実測値の差は拡大した（表 9 参照）。これは、より細かいごみが調査対象に含まれることで、ごみ検出の妨げとなる解像度や流木による被覆の影響を受けやすくなったためであると考えられる（図 3 参照）。また、実証試験で使用した AI による画像解析の方法はセマンティックセグメンテーションを用いており、矩形による物体検出と比較してごみの個数の計測には適していないことが理由として挙げられる。特に今回の調査地点のような漂着密度の高い海岸においては、セマンティックセグメンテーションによる個数の推定値は過小評価になる傾向がある。逆に、漂着密度の低い海岸においては、各海岸漂着ごみの境界が明確であるため、AI による自動検出が適していると考えられる。

表 9 ドローン&AI による人工ごみの個数の推定値と海岸漂着ごみ回収調査結果の比較
（単位：個）

調査地点	ドローン& AI	海岸漂着ごみ回収
A（伊予）	61	2,027
B（宇和島）	517	2,477

備考：

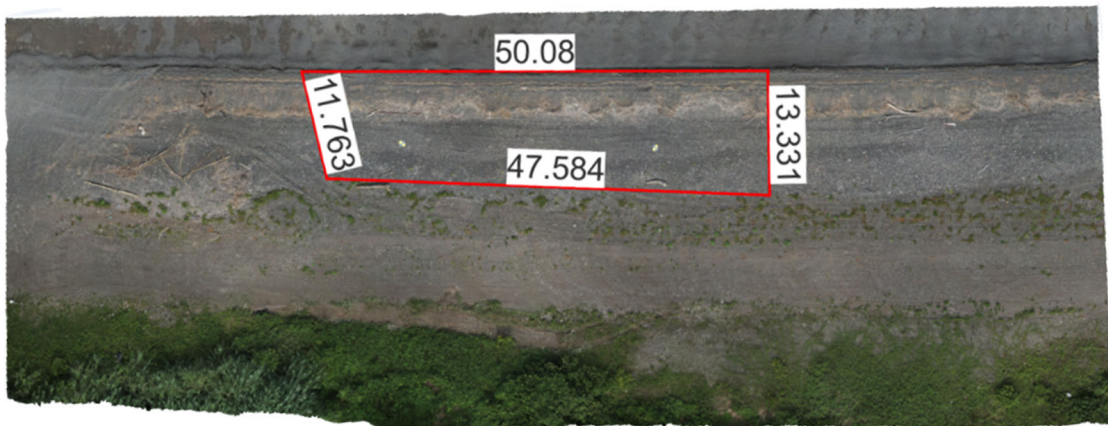
- 1 ドローン& AI の手法では複数のごみを 1 つの物体として計数している可能性がある。
- 2 これらの推定結果にはごみでないものをごみとして検出し、あるいはごみを検出し損ねたことに起因する不確実性が含まれる。
- 3 海岸漂着ごみ回収調査では、灌木や破片類は計数していないが、実証試験ではプラスチック（発泡スチロールを除く）に限り個数を計測した。



回収前



回収後



地点 A のオルソ画像（赤枠が調査範囲、値は長さ (m)）

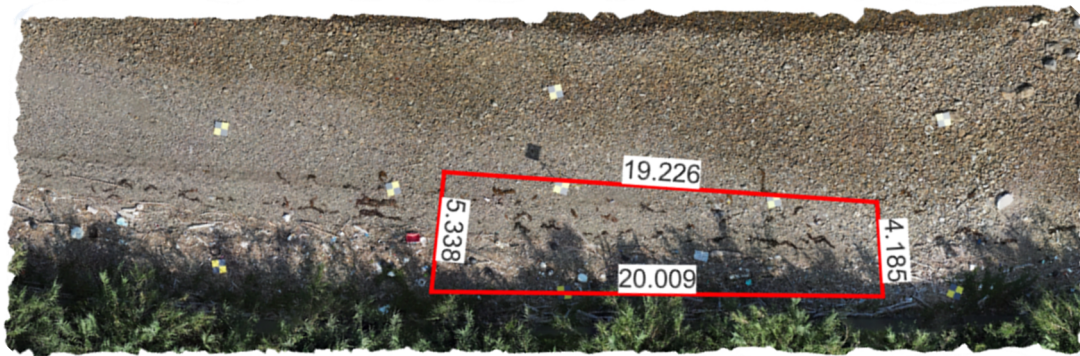
図 4 地点 A の調査範囲



回収前



回収後



地点 B のオルソ画像（赤枠が調査範囲、値は長さ（m））

図 5 地点 B の調査範囲

3.2 目視調査における人為的誤差の比較

表 10 海岸目視調査（手法Ⅲ）の結果に関する調査者間のばらつき

調査地点	調査者	人 工 ご み (m ³) の目 視調査結果	人 工 ご み (m ³) の回収 調査結果	自然物 (m ³) の目視調査結 果	自然物 (m ³) の回収調査結 果
A 50 m 幅	α	0.05	0.115	1.5	3.854
	β	0.065		2.25	
B 20 m 幅	α	0.175	0.469	0.83	0.774
	γ	0.27		0.76	

備考：

- 1 小数点第 4 位を四捨五入
- 2 地点 B では調査未経験者がいるため、目合わせを行った（表 21 参照）。

表 11 ドローン&画像目視調査（手法Ⅱ）の結果に関する調査者間のばらつき

調査地点	調査者	人工ごみ (m ³) の目視調査結 果	人 工 ご み (m ³) の回 収調査結果	自然物 (m ³) の目視調査結 果	自然物 (m ³) の回収調査 結果
A 50 m 幅	α	0.045 (0-0.1)	0.115	2.5 (0.8-6.4)	3.854
	β	0.035 (0-0.1)		6.383 (0.8-6.4)	
B 20 m 幅	α	0.265 (0.04-0.32)	469	1 (0.32-2.56)	0.774
	β	0.231 (0.04-0.32)		1.4 (0.32-2.56)	

備考：

- 1 括弧内の値はランク表を用いた体積推定の結果を示している（表 20 参照）。
- 2 小数点第 4 位を四捨五入

3.3 調査・解析時間の比較

表 12 地点 A の調査・解析に要した時間

調査方法		データ入手（単位：時）			データ処理・解析（単位：時）		合計作業時間
		準備	測量	入手	処理	検出、分類、定量	
I	ドローン & AI	2 (3 人)	1 (3 人)	1 (3 人)	8.2 (1 人)	10 (1 人)	30.2
II	ドローン & 画像目視					0.63 (1 人)	20.82
III	海岸目視	0.5 (7 人)	0	0.2 (1 人)	0	0	3.7
IV	海岸漂着 ごみ回収		0	2.25 (13 人)	0.25 (2 人)	2.66 (12 人)	65.17

備考：

- 1 海岸漂着ごみ回収調査において計測に要した労力は体積だけでなく、個数及び重量の計測を含む。
- 2 データ処理の作業時間について、コンピュータのみによる自動処理時間は除く。
- 3 海岸漂着ごみ回収調査ではごみを 42 品目に分類し、その他の調査手法では 2 品目（自然物/人工ごみ）に分類
- 4 各作業員が異なる作業を行った場合、各々1人の作業員として記載（例：14 日間要する画像解析作業について作業員 α が 1~7 日目に、作業員 β が 8~14 日目に作業した場合、合計作業人日は 14 日（1 人）となる）
- 5 日本ではドローンスクールで操縦方法を学ぶ場合、コースにもよるが 20 時間程度は要するものと思われる。また、海岸漂着ごみを自動検出する AI の開発に必要となる教師データ作成は大量の画像と作業時間を要する作業である。例えば、3,500 枚のセマンティックセグメンテーション用のデータセット Beach Litter Dataset の作成には、作業員 15 人で作業して約 2 か月を要した。したがって、作業量を考慮すると、教師データには既存の公開データを活用することが現実的である。

表 13 地点 B の調査・解析に要した時間

調査方法		データ入手（単位：時）			データ処理・解析（単位：時）		合 計 作 業時間
		準備	測量	入手	処理	検出、分類、定 量	
I	ドローン & AI	2 (3 人)	1.5 (3 人)	0.33 (3 人)	8.21 (1 人)	14.5 (1 人)	34.19
II	ドローン & 画像目 視					0.48 (1 人)	20.16
III	海岸目視	1.05 (3 人)	0	0.23 (2 人)	0	0	3.61
IV	海岸漂着 ごみ回収	0.5 (2 人)	0	3.25 (4 人)	0.25 (2 人)	4.5 (7 人)	46

備考：

- 1 海岸漂着ごみ回収調査において計測に要した労力は体積だけでなく、個数及び重量の計測を含む。
- 2 データ処理の作業時間について、コンピュータのみによる自動処理時間は除く。
- 3 海岸漂着ごみ回収調査ではごみを 42 品目に分類し、その他の調査手法では 2 品目（自然物/人工ごみ）に分類
- 4 各作業員が異なる作業を行った場合、各々 1 人の作業員として記載（例：14 日間要する画像解析作業について作業員 α が 1~7 日目に、作業員 β が 8~14 日目に作業した場合、合計作業人日は 14 日（1 人）となる）
- 5 日本ではドローンスクールで操縦方法を学ぶ場合、コースにもよるが 20 時間程度は要するものと思われる。また、海岸漂着ごみを自動検出する AI の開発に必要な教師データ作成は大量の画像と作業時間を要する作業である。例えば、3,500 枚のセマンティックセグメンテーション用のデータセット Beach Litter Dataset の作成には、作業員 15 人で作業して約 2 か月を要した。したがって、作業量を考慮すると、教師データには既存の公開データを活用することが現実的である。

3.4 調査・解析費用の比較

表 14 地点 A の調査・解析費用

(単位：千円)

調査方法		イニシャルコスト			ランニングコスト					合計
		機材費（レンタルを含む）	ソフトウェア費	免許/機体登録/講習の費用	機材輸送費	交通費	維持管理費	人件費	ごみ処理費	
I	ドローン& AI	66 ~236	950	201 ~301	68	139	170 ~370	163	0	1,757 ~2,227
II	ドローン&画像目視		500				100 ~300	112		1,186 ~1,656
III	海岸目視	56	0	0	0		0	20	0	215
IV	海岸漂着ごみ回収	212	0	0	16		14	351	66	799

備考：

- 1 ドローンの費用は実態を踏まえ1週間分のレンタル費用とした。なお、費用はレンタル先やドローンの機種により異なる。また、ドローンを購入する場合は、約100~300万円程度の費用を要するものと思われる。
- 2 A地点ではRTK機能を有するドローンを使用しており、RTK基地局等の関連機器は機材費に含める。
- 3 実証試験では、画像処理と解析の主体が異なり、ソフトウェア費用が2つ分計上されているため、実際のソフトウェア費用は上記よりも低いものと考えられる。
- 4 ランニングコストから作業員の宿泊費及び日当は除く。
- 5 交通費については、愛媛県内のもののみを計上
- 6 維持管理費に含まれるドローンの保険料は、対人2億円、対物5億円のプランを想定
- 7 維持管理費には消耗品の費用を含む。
- 8 人件費は、令和5年度設計業務委託等技術者単価（国土交通省）を適用して算出した。1時間当たりの人件費は測量業務の測量主任技師、測量技師、測量技師補を平均して約5,387円とした。この人件費には諸経費は含まれていない。
- 9 単位は千円未満を四捨五入しているため、各項目の合計値が右列の合計値と一致しないことがある。

表 15 地点 B の調査・解析費用

(単位：千円)

調査方法		イニシャルコスト			ランニングコスト				合計	
		機材費（レンタルを含む）	ソフトウェア費	免許/機体登録/講習の費用	機材輸送費	交通費	維持管理費	人件費		ごみ処理費
I	ドローン& AI	72 ~242	950	201 ~301	68	159	170 ~370	184	0	1,804 ~2,274
II	ドローン&画像目視		500				100 ~300	109		1,208 ~1,678
III	海岸目視	62	0	0	0		0	19	1	242
IV	海岸漂着ごみ回収	201	0	0	16		22	248	7	653

備考：

- 1 ドローンの費用は実態を踏まえ 1 週間分のレンタル費用とした。なお、費用はレンタル先やドローンの機種により異なる。また、ドローンを購入する場合は、約 100~300 万円程度の費用を要するものと思われる。
- 2 1 回の調査のために 150 万円程度の購入費用を要すると思われるトータルステーションを購入することは現実的ではないため、機材費に地点 B で使用したトータルステーションの分は含まない。
- 3 実証試験では、画像処理と解析の主体が異なり、ソフトウェア費用が 2 つ分計上されているため、実際のソフトウェア費用は上記よりも低いものと考えられる。
- 4 ランニングコストから作業員の宿泊費及び日当は除く。
- 5 交通費については、愛媛県内のもののみを計上
- 6 維持管理費に含まれるドローンの保険料は、対人 2 億円、対物 5 億円のプランを想定
- 7 維持管理費には消耗品の費用を含む。
- 8 人件費は、令和 5 年度設計業務委託等技術者単価（国土交通省）を適用して算出した。1 時間当たりの人件費は測量業務の測量主任技師、測量技師、測量技師補を平均して約 5,387 円とした。この人件費には諸経費は含まれていない。
- 9 単位は千円未満を四捨五入しているため、各項目の合計値が右列の合計値と一致しないことがある。

4 海外の研究者の AI によるごみ検出可能性の検証

国際ガイドライン附属書にしたがって撮影された画像を用いて、Topouzelis 委員の海岸漂着ごみ自動検出手法を適用したところ、物体検出が機能したことを確認した。

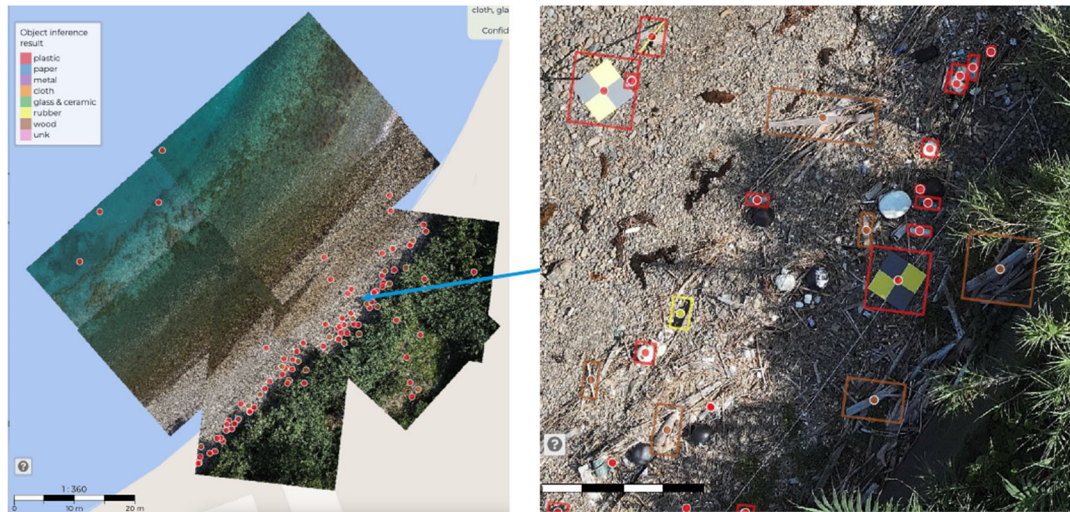


図 6 実証試験で撮影した画像の物体検出による解析

出典：Coastal Marine Litter Observatory (CMLO) <https://cmlo.aegean.gr/>: Case study in Japan (August 2023, Konstantinos Topouzelis & Shin'ichiro Kako)

5 結論

実証試験の結果、国際ガイドライン骨子案に基づき空中ドローンにより撮影した海岸漂着ごみの空撮画像が国内外の異なる画像解析方法によって、海岸漂着ごみを検出・定量化に活用できたことを確認した。実証試験により明らかとなった、現時点のリモートセンシング技術及び AI で可能な海岸漂着ごみのモニタリング内容とその技術的限界は表 16 のとおりである。

その他、実証試験の計画、準備、実施の各段階において、留意すべき点が抽出されたため、それらを国際ガイドライン附属書 1 のセクション I 及び II に反映した（表 17 参照）。

各手法の調査・解析費用の比較の結果、ドローンによる調査方法は、初期費用が高いため、人力による方法よりも費用が高いが、調査範囲が広くなるにつれて、人力による調査方法との費用差が小さくなることを考慮すると、ドローン&AI による調査は、調査範囲が広くなるにつれて、人力による調査・解析よりも作業量及び費用が減少することが期待される。

表 16 ドローン&AI で実施可能なこと及び技術的限界

海岸漂着ごみ調査においてドローン&AI で実施可能なこと	現時点の技術的限界
検出可能なサイズの人工ごみの定量化* * セマンティックセグメンテーションは、漂着密度の高い海岸において体積を推定することに適している。物体検出は、漂着密度の低い海岸においてごみの個数を検出することに適している。	ドローンや AI の検出下限値未満のごみや上空から見えないごみの検出はできない。 本実証試験で使用したドローンの GSD は 0.5 cm、AI で検出可能なサイズは約 5 x 6 cm 以上のごみであった。検出可能なサイズは、カメラの解像度や画像解析のモデルにより異なる。高さ方向については、実証試験の調査範囲における検証点の誤差を考慮すると 2~3 cm 以上であれば概ね検出が可能であると考えられる（表 19 参照）。 また、人力による調査と比較して分類精度は高くない。
物体検出による自動的な品目ごとのごみ分布の把握（図 7 参照）	
セマンティックセグメンテーションによる自動的な海岸漂着物全体の体積推定	細かいごみが低密度、低高度で漂着している場合は推定誤差が大きくなるおそれがある。一方で、漂着密度が高い場合は、人工ごみと自然物の分類が困難なことがある。

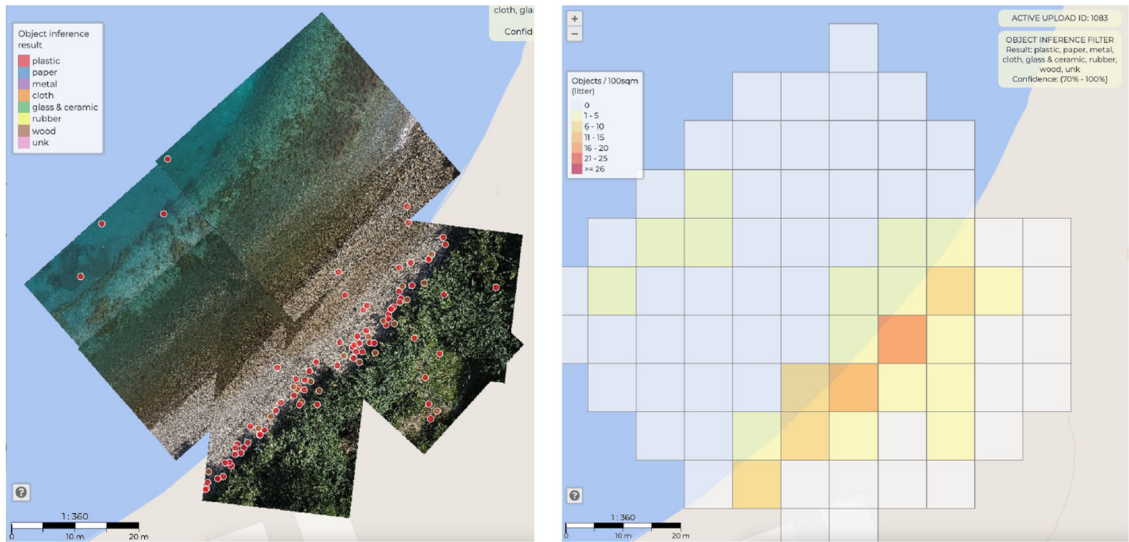


図 7 品目ごとの海岸漂着ごみ分布の把握

出典：Coastal Marine Litter Observatory (CMLO): Case study in Japan (August 2023, Konstantinos Topouzelis & Shin'ichiro Kako)

表 17 ガイドライン附属書 1.1 に追記すべき事項(1/2)

1 調査地点の選定
- 調査範囲内において第三者の利用が調査時にはない海岸である必要がある（立入を制限する等して安全の確保が必要）。 - 後背地に崖のある海岸については、電波が遮断されることがあるため、適地とはいえない。また、安全面からも崖から 10~20 m は離れて飛行する。 - 観測対象の真上に後背地から突き出した植物が存在している場合、撮影できないおそれがある。
2 飛行計画
- 体積を推定するために 3D モデルを作るので、撮影角度は-90°だけでなく斜めアングル撮影も必要である（撮影角度-70°）。 図 8 ドローンによる斜め撮影画像 (左は進行方向：汀線垂直方向、右は進行方向：汀線水平方向) - 飛行ルートについて、写真枚数が少なすぎると、カメラの位置情報が少なく位置補正の精度が下がる。また、重なりが少ないとオルソ画像に空白ができる。海岸線に平行の飛行と垂直の飛行を組み合わせることで撮影場所を増やす方が良い。 図 9 飛行ルート（左：変更前、右：変更後）

表 17 ガイドライン附属書 1.1 に追記すべき事項(2/2)

- 立体対空標識の配置について、あまり直線的にならない配置とする。



図 10 標定点等の配置（左：変更前、右：変更後）

3 ドローンの設定

- ドローンで設定する飛行高度は離陸地点からの高度になるため、離陸地点と海岸の高さが異なる場合にはその高低差を考慮してドローンの飛行高度を設定する必要がある。
- ドローンのカメラ設定については基本的には自動で最適な設定がなされるが、撮影中に画像の明るさが暗く対象とするごみが見えづらいつと感じた場合には、一時的に撮影を中断してカメラ設定をマニュアルで変更することも考えられる。

4 安全確認

- 飛行ルート of 安全確認を行う。飛行ルートに第三者がいらないか、ルート内に障害物（木の枝等）がないか目視で確認する。
- ドローンのプロペラに損傷がないか確認する。また、プロペラを手で回して、関節部に異常がないか、モーター等に異音がないか確認する。

5 飛行の実施

- 離着陸地点は、故障防止のため、砂の巻き上がりが発生しにくい地点（舗装された地面が理想的）を選定する。また、上空が開けている必要がある。
- バッテリーが 25%程度になったら、安全のため飛行を終了する。

6 その他

- ドローンの輸送について、大容量バッテリーの場合空輸できないこともあり陸送する必要があるが、その場合到着までに時間がかかるため、スケジュールに余裕を持って輸送する必要がある。

各調査手法の詳細情報

I（及びII） ドローン調査

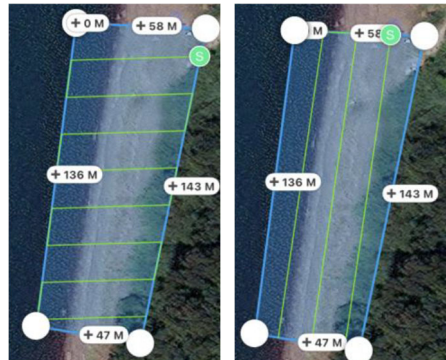


図 11 調査地点 A のドローン調査写真



図 12 調査地点 B のドローン調査写真

表 18 ドローン調査データ

調査計画・準備	調査日時	A : 2023 年 7 月 24 日 午前 8 時 天気 : 晴れ (干潮時間 : 午前 6 時) B : 2023 年 7 月 27 日 午前 9 時 天気 : 晴れ (干潮時間 : 午前 7 時)
	調査対象	2.5 cm 以上の人工ごみ (カキ養殖用 まめ管 (長さ 1.5 cm) 及びたばこ吸 い殻 (フィルター) を含む) 及び自然 物 (流木、灌木)
	飛行の法令規制対応	- ドローン機体の登録番号 - 調査範囲内に第三者がいる場合の 飛行禁止 - 海岸管理者へ飛行計画の提出 (任 意)
	調査者の役割分担	ドローン操縦士 : 1 人 モニター観測者 : 1 人 ドローン観測者 : 1 人
	飛行ルート	
ドローン設定	飛行高度	約 40 m (A : 39.4 m B : 41 m)
	ピクセルサイズ (GSD)	A : 4.99 mm/pix B : 5.13 mm/pix
	画像サイズ	8,192 x 5,460 pix
	ジンバルの角度	-90° (体積推定のため-75°でも撮 影)
	オーバーラップ率	オーバーラップ : 80 % (海外研究者用に 20 %でも撮影) サイドラップ : 60 % (海外研究者用に 20 %でも撮影)
	撮影方法	☐ 撮影時に移動を停止して撮影 ☒ 移動しながら等秒間隔で撮影

	カメラ設定方法	☒ 自動設定 ☐ 手動設定
	カメラの設定	ZenmuseP1 (35 mm) - シャッタースピード：1/1000 - F 値：5.6 - ISO：100~800
調査の実施	調査設備の設置(標定点、検証点、RTK 基地局)	図 13 に標定点 (GCPs) や検証点の配置を、表 19 に標定点及び検証点の 2 乗平均平方根誤差 (RMSE) を記載。測量のため A 地点では RTK を、B 地点ではトータルステーションを使用した。
	撮影枚数	A：560 B：319
	撮影面積	A：5,180 m ² B：706 m ²
画像処理	ソフトウェア	Agisoft Metashape Professional
	ソフトウェアバージョン	1.8.4 build 14856
	OS	Windows 64 bit
	RAM	127.92 GB
	CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2699 v4 @ 2.20GHz
	GPU	Quadro P6000
画像解析	I. AI によるごみ検出	鹿児島大学加古教授の開発した AI により海岸漂着ごみを検出した。体積推定には Terra Mapper (ドローン空撮画像を用いて 3D データの作成が可能なソフトウェア) が使用された (図 14 参照)。
	II. 画像目視によるごみ検出	オルソ画像から体積を推定することは誤差が大きくなるおそれがあるため、ごみ袋数に対応したランク表を用いて体積を推定した。上記の難点を考慮し、愛媛県の既存事例を参考に、ランク表を使用した (表 20 参照)。



図 13 各調査地点の標定点及び検証点（左：A 地点、右：B 地点）

表 19 各地点の RMSE

地点	標定点、検証点の数	X 誤差 (mm)	Y 誤差 (mm)	Z 誤差 (mm)	XY 誤差 (mm)	合計 (mm)
A	2 検証点	0.0189119	0.13978	0.387375	0.141053	0.412257
B	6 標定点	1.95466	8.76064	22.631	8.97606	24.3461
	2 検証点	3.2263	7.24915	12.4205	7.93469	14.7387

備考：X－東経, Y－北緯, Z－高度

表 20 推計ランク表（手法Ⅱで使用）

推定ランク	20 リットルごみ袋数（袋数/10 m）	かさ容量（範囲）（m ³ /10 m）
0	0	0
1	0~1	0~0.02
2	1~8	0.02~0.16
3	8~64	0.16~1.28
4	64~	1.28~(*)

* 愛媛県の事例同様、体積は最大（ランク 4）でも 2.2 m³/10 m とした。

出典：海岸漂着ごみエリア実態調査・分析事業委託業務報告書（令和 5 年 3 月 愛媛県、日本エヌ・ユー・エス株式会社）

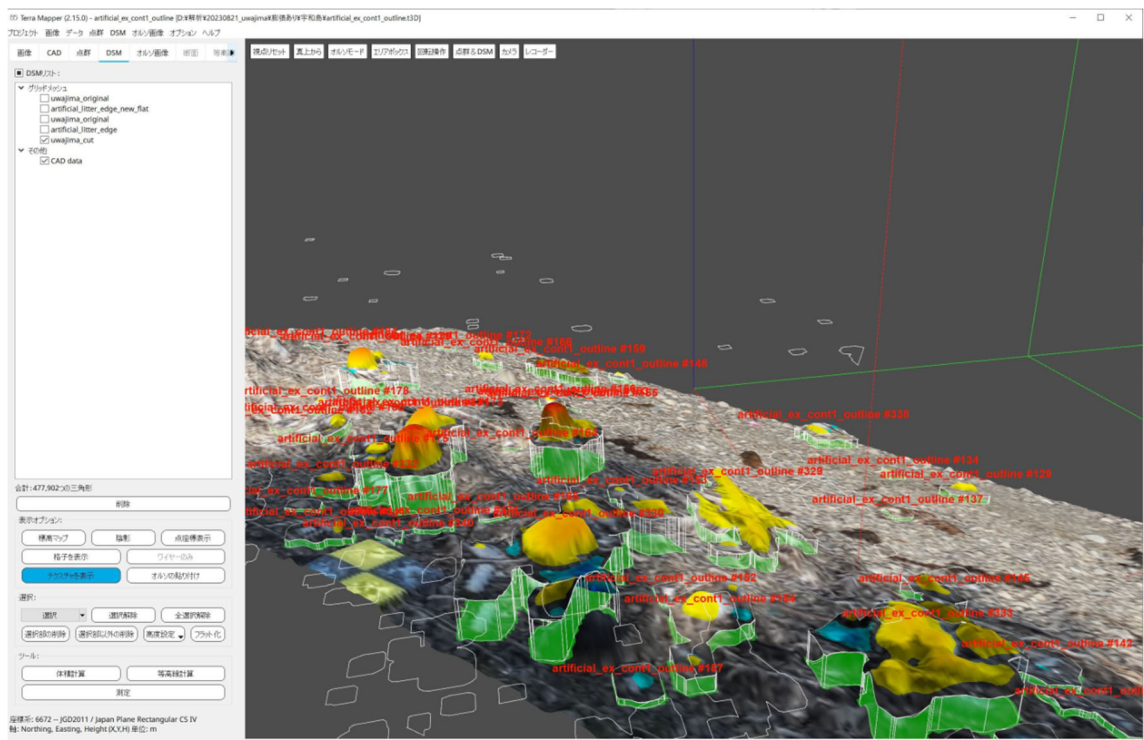


図 14 AI による海岸漂着ごみの検出及び体積推定のイメージ

出典：加古教授より提供

III 海岸目視調査

(1) 目合わせ

海岸漂着ごみ回収活動の経験を有する者が海岸目視調査を実施したが、調査地点 B においては調査員 γ が同活動の未経験者であったため、経験者の指導の下、目合わせ（目視による体積推定の結果と実際のごみのかさ容量を比較することにより、誤差を補正）を実施した。

表 21 目合わせの結果

調査地点	調査員	人工ごみの目視結果 (L)	実際の人工ごみの体積 (L)	自然物の目視結果 (L)	実際の自然物の体積 (L)
B (5 m 幅)	α	81	50	338	258
	γ (未経験者)	20		35	

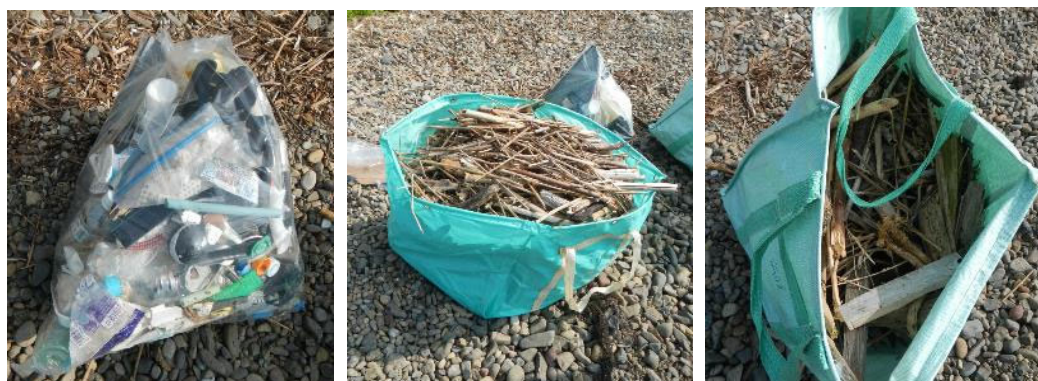


図 15 目合わせによる補正のために回収した海岸漂着ごみ

(2) 推定方法

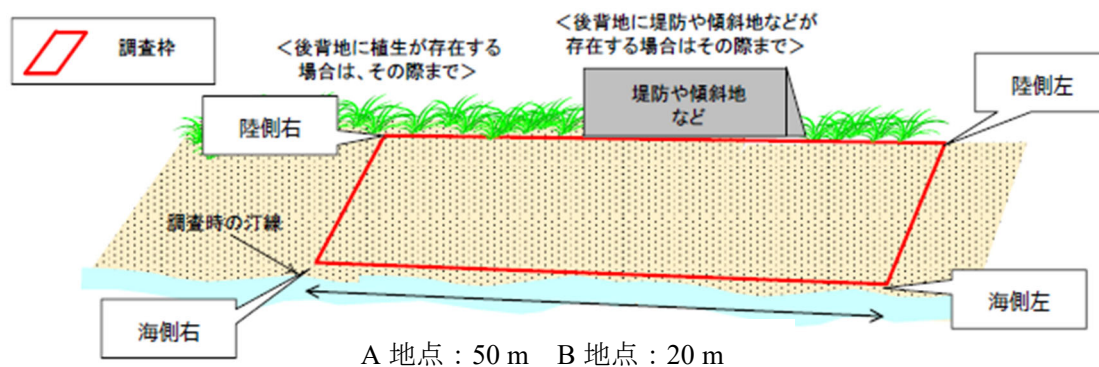
A 地点については 50 m 幅を 5 区画に、B 地点については 20 m 幅を 4 区画にそれぞれ分けて、体積の推定を行った。体積の推定は、45 L ごみ袋換算で何袋分のごみが漂着しているのかを人工ごみと自然物に分けてそれぞれ実施した。また、目視調査における人為的誤差を検証するため（表 10 を参照）、ランク表を使用せずに体積の推定を試みた。



図 16 海岸目視調査の様子

IV 海岸漂着ごみ回収調査

(1) 調査区画の設置



出典：地方公共団体向け漂着ごみ組成調査ガイドライン（令和5年6月第3版）より作成

(2) 海岸漂着ごみの回収

2.5 cm 以上の人工ごみ（カキ養殖用まめ管（長さ 1.5 cm）及びたばこ吸い殻（フィルター）を含む）及び自然物（流木、灌木）を人力で回収する。人力で回収できない大型漂着物については、寸法を計測し、体積を推定の上、重量換算する。



(3) 海岸漂着ごみの分類

分類表に基づき、海岸漂着ごみを分類した（表 22 参照）。

分類品目は、地方公共団体向け漂着ごみ組成調査ガイドラインの必須項目をベースに、既存の海岸漂着ごみドローン調査のうち分類品目が 10 以上の事例（Martin et al. 2018; Fallati et al. 2019; Martin et al. 2021; Andriolo et al. 2021）及び専門家へのセクション I.1 に記載のアンケート結果を参考に、国際的にあまり採用されていない品目は除外した。ただし、地域特性上頻出が予想される品目については分類表に残した。



(4) 海岸漂着ごみの計測

品目ごとに海岸漂着ごみの個数、体積、重量を計測した。なお、漂着ごみ組成調査のガイドラインでは、破片類の計数はしないこととなっているが、国際的にはそれらの個数も数えることが多いため、今回はプラスチックの品目については破片類も含めてすべて個数を計測した（表 23、表 24 参照）。



(5) 調査結果の記録

品目ごとに写真を撮影し、メタデータ（調査日、海岸基質、緯度経度等）と合わせて計測結果をデータシートに記録した。



表 22 実証試験で使した海岸漂着ごみ回収調査の分類表

大分類	必須項目	
プラスチック	ボトルのキャップ、ふた	
	ボトル	飲料用(ペットボトル)
		その他のプラボトル
	ストロー	
	マドラー、フォーク、ナイフ、スプーン等	
	食品容器(ファーストフード、コップ、ランチボックス、それに類するもの)	
	ポリ袋(不透明、透明)	
	ライター	
	テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)	
	シートや袋の破片	
	硬質プラスチック破片	
	ウレタン	
	浮子(ブイ)(漁具)	
	ロープ・ひも(漁具)	
	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)	
	カキ養殖用まめ管(長さ1.5cm)(漁具)	
	カキ養殖用パイプ(長さ10-20cm)(漁具)	
	漁網(漁具)	
	その他の漁具(漁具)	
	釣具	
	たばこ吸殻(フィルター)	
	生活雑貨(歯ブラシ等)	
	苗木ポット	
	その他	
(発泡スチロール)	発泡スチロール製フロート、浮子(ブイ)	
	発泡スチロールの破片	
	その他	

大分類	必須項目		
ゴム ※2	靴(サンダル、靴底含む)		
	ゴムの破片		
	その他		
ガラス、陶器 ※	ガラス、陶器の破片		
	その他		
金属 ※2	缶類(飲料缶、ガスボンベ、ドラム缶、バケツ等)		
	金属片		
	その他		
紙、ダンボール ※2	紙製容器(飲料用紙パック等)		
	紙片		
	その他		
布類	布類		
木(木材等)	木(木材等)		
自然物	自然物		
その他	その他		
人力で動かせない物	緯度:	経度:	ごみの種類

※ 赤字は国内の調査ガイドラインからの変更箇所を示している。

表 23 地点 A の海岸漂着ごみ回収調査結果

大分類	必須項目		個数	容量(L)	重量(kg)
プラスチック	ボトルのキャップ、ふた		94	1.9	0.23
	ボトル	飲料用(ペットボトル)	44	36	1.6
		その他のプラボトル	2	1.5	0.32
	ストロー		11	0.05	0.008
	マドラー、フォーク、ナイフ、スプーン等		0	0	0
	食品容器(ファーストフード、コップ、ランチボックス、それに類するもの)		11	0.75	0.075
	ポリ袋(不透明、透明)		30	1.8	0.043
	ライター		6	0.2	0.064
	テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)		0	0	0
	シートや袋の破片		128	10	0.118
	硬質プラスチック破片		277	4	0.57
	ウレタン		5	2.5	0.098
	浮子(ブイ)(漁具)		2	0.15	0.032
	ロープ・ひも(漁具)		21	1.5	0.036
	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)		0	0	0
	カキ養殖用まめ管(長さ1.5cm)(漁具)		956	4	0.683
	カキ養殖用パイプ(長さ10-20cm)(漁具)		183	10.5	1.245
	漁網(漁具)		0	0	0
	その他の漁具(漁具)		67	0.2	0.058
	釣具		2	0.02	0.015
	たばこ吸殻(フィルター)		1	0.01	0.002
	生活雑貨(歯ブラシ等)		28	1.8	0.172
	苗木ポット		1	1	0.011
	その他		26	0.5	0.024
(発泡スチロール)	発泡スチロール製フロート、浮子(ブイ)		0	0	0
	発泡スチロールの破片			21	0.212
	その他		97	7	0.049
ゴム	靴(サンダル、靴底含む)		1	0.8	0.091
	ゴムの破片			0.02	0.003
	その他		0	0	0
ガラス、陶器	ガラス、陶器の破片			0.072	0.063
	その他		4	3	0.676
金属	缶類(飲料缶、ガスボンベ、ドラム缶、バケツ等)		10	4	0.25
	金属片			0.02	0.011
	その他		2	0.05	0.009
紙、ダンボール	紙製容器(飲料用紙パック等)		0	0	0
	紙片			0	0
	その他		0	0	0
布類	布類	1	0.01	0.002	
木(木材等)	木(木材等)	1	0.1	0.027	
自然物	自然物		3594.05	253.635	
その他	その他	15	0.3	0.087	
人力で動かせない物	緯度： 経度： ごみの種類(流木)	1	260	96.2	
			2027	3968.8	356.719

表 24 地点 B の海岸漂着ごみ回収調査結果

大分類	必須項目		個数	容量(L)	重量(kg)	
プラスチック	ボトルのキャップ、ふた		150	2.6	0.41	
	ボトル	飲料用(ペットボトル)	32	40	1.2	
		その他のプラボトル	22	25	0.65	
	ストロー		40	0.4	0.018	
	マドラー、フォーク、ナイフ、スプーン等		12	0.15	0.022	
	食品容器(ファーストフード、コップ、ランチボックス、それに類するもの)		40	1.45	0.284	
	ポリ袋(不透明、透明)		72	7	0.088	
	ライター		7	0.21	0.07	
	テープ(荷造りバンド、ビニールテープ)		32	1.6	0.024	
	シートや袋の破片		183	9	0.136	
	硬質プラスチック破片		612	30	3.03	
	ウレタン		28	5	0.042	
	浮子(ブイ)(漁具)		20	100	8.7	
	ロープ・ひも(漁具)		107	11	1.014	
	アナゴ筒(フタ、筒)(漁具)		1	1	0.056	
	カキ養殖用まめ管(長さ1.5cm)(漁具)		302	1.3	0.21	
	カキ養殖用パイプ(長さ10~20cm)(漁具)		190	11	1.402	
	漁網(漁具)		3	0.1	0.006	
	その他の漁具(漁具)		47	0.6	0.079	
	釣具		9	0.3	0.051	
	たばこ吸殻(フィルター)		0	0	0	
	生活雑貨(歯ブラシ等)		34	0.61	0.192	
	苗木ポット		5	0.8	0.016	
	その他		251	24	1.315	
	(発泡スチロール)	発泡スチロール製フロート、浮子(ブイ)		7	52	0.78
		発泡スチロールの破片			40	0.55
		その他		53	7	0.072
	ゴム	靴(サンダル、靴底含む)		6	1	0.191
		ゴムの破片			0	0
		その他		5	6.8	0.51
ガラス、陶器	ガラス、陶器の破片			0.05	0.075	
	その他		5	1.5	0.691	
金属	缶類(飲料缶、ガスボンベ、ドラム缶、バケツ等)		7	4	0.237	
	金属片			0.5	0.166	
	その他		1	0.15	0.021	
紙、ダンボール	紙製容器(飲料用紙パック等)		1	0.03	0.002	
	紙片			0.002	0	
	その他		0	0	0	
布類	布類	3	2	0.106		
木(木材等)	木(木材等)	94	70	11.9		
自然物	自然物		750	88.89		
その他	その他	95	5.25	0.906		
人力で動かさない物	緯度: 経度: ごみの種類(塩ビパイプ、流木)		2	29.4	9.138	

2478 1242.8 133.25