

災害廃棄物に関する種類別発生量の推定手法の構築

—UAV と画像解析を用いた実証実験—

Volume Estimation Method for Respective Types of Disaster Debris

- In Situ Experiments with UAV and Image Analysis -

前川亮太* 大塚義一** 小河篤史** 大矢好洋*** 濱谷洋平****

要 旨

近年、東日本大震災をはじめ、常総水害、熊本地震等の大規模災害が頻発している。こうした災害の復旧、復興の初期段階として、大量の災害廃棄物の速やかな処理が重要である。本研究では、災害廃棄物の処理計画策定で最初に必要となる、災害廃棄物の発生量の推定手法を構築した。従来の推定手法は、建物倒壊数等から簡易的に災害廃棄物発生量を算出するものであり、発生量の実体に基づいた手法ではなかったため、精度に問題があった。このことから本研究の目的として、①発生した災害廃棄物の量を測量により迅速かつ正確に把握しつつ、②既存手法では困難であった、可燃物や不燃物といった種類別の発生量の把握を掲げた。そこで、今回は UAV を用いた広範囲の迅速な測量と画像解析を併用し、特に画像の持つ色相に着目し開発を進めた。この結果、全体発生量の把握については 3D レーザースキャナと同等の精度で体積を算出できた。さらに色相分布を併用し、災害廃棄物の仮置き表面における種類別分布の推計手法を開発することができた。

キーワード：災害廃棄物、UAV、画像解析、色相

1. 背景と目的

東日本大震災以降、広島土砂災害、常総水害、熊本地震災害、岩手水害等の大規模な災害が頻繁に発生している。こうした災害では、大量の災害廃棄物が発生し、その処理を迅速かつ的確に実行することが被災地での迅速な復旧及び復興に重要となる。

災害廃棄物の処理を計画する上で必要不可欠な情報として、発生量の推定値が挙げられる。既存の発生量推定手法¹⁾²⁾は、発生物の原単位と建物倒壊数等から簡易的に算出するものであり、発生量の実体に基づいた手法ではない。このため、既存の手法は事前の想定やシミュレーションには有効であると考えられるものの、災害直後には、実際に発生した災害廃棄物を対象に、その量を一定以上の正確さで把握する手法が必要であると考えた。

このことから、本研究の目的として、①発生した災害廃棄物の量を測量により迅速かつ正確に把握しつつ、②既存手法では困難であった可燃物や不燃物といった種類別の発生量の把握を掲げた。そこで、今回は UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた広範囲の迅速な測量と画像解析を併用し、特に画像の持つ色相に着目し開発を進めた。

被災地においては、可燃物、土嚢袋に入れられた状態

で集積された土砂及び流木など、多様な種類の災害廃棄物が不規則に集積されている。本研究では、平成 28 年 8 月に発生した台風 10 号により岩手県岩泉町に発生した災害廃棄物を対象に、仮置きされた状態の災害廃棄物等について、久慈地区、中里地区及び小川地区の 3 地区において UAV 測量により体積を推計した。また、体積推計値の比較対象として、地上に設置した 3D レーザースキャナ (以下、LS) による測量も実施した。

災害廃棄物の種類別発生量の推定については、個々の物体が有する色相が環境の明るさの影響を受けにくいことに着眼した。最初に、廃棄物に近接して撮影した画像から廃棄物の種類ごとの色相を特定し、次に UAV による空撮画像に含まれる色相を分析し、主要な種類の災害廃棄物の発生量の推計手法の構築を試みた。

2. 推計手法の概要

2.1 UAV 測量の概要

UAV 測量では、UAV もしくはドローンと呼ばれる無人飛行体に測量機器を搭載し、飛行しながら空中から測量する (写真-1)。

UAV 測量は、土工事を中心に既に様々な工事現場において取り入れられている。本研究で対象とする災害廃

*技術研究所 **土木本部環境技術室 ***土木本部土木営業部 ****東日本支社土木第3部

棄物は、土工事現場の土砂と比較すると、形状の凹凸が細やかであり、材質や色彩が多彩であるという特徴がある。このことから、土工事における UAV 測量と比較すると、体積の正確な把握が難しい。この点を考慮し、本研究では災害廃棄物の体積発生量の推計に適したメッシュ幅に関する検討を行っており、後述する。

前述のとおり、本研究では UAV 測量との比較対象として、従来手法である LS による測量も実施している。UAV 測量と LS 測量の特徴を示す。表一 1 のとおり UAV 測量は LS 測量に対して、現地で実施する計測作業が著しく短いという利点がある。このことが、体積算出までのトータル時間も UAV の方が LS に対して短時間で完了することの要因となっている。計測時間が短いことは、復旧に向けた諸工事が中断なく実施される被災地では大きなメリットとなる。このことが本研究で UAV に着目した理由の一つである。

表一 1 に示す処理時間は解析対象の面積規模のほか、画像解像度やメッシュ間隔の影響を受ける。表一 1 では 1 画素につき地上寸法が 1.2cm の条件で撮影し、画素ごとにメッシュを設定した結果を示している。この解像度は、国土交通省が定めた UAV を用いた土工の管理基準³⁾に則った。解像度及びメッシュ間隔と処理時間の関係については後に詳しく述べる。



写真一 1 UAV 測量装置

表一 1 UAV 測量と LS 測量の所要時間の比較

計測場所	計測方法	所要時間		合計
		計測時間	処理時間 (モデル作成 ノイズ除去 体積算出)	
久慈地区 (36,006m ²)	LS	3時間	5時間	8時間
	UAV (高度50m)	10分	6時間	6時間 10分
小川地区 (12,734m ²)	UAV (高度50m)	10分	6時間	6時間 10分
中里地区 (74,849m ²)	LS	5時間	5時間	10時間
	UAV (高度50m)	2時間※	6時間	8時間
	UAV (高度80m)	10分	5時間	5時間 10分

※計測中の UAV 充電時間を含む

なお表一 1 のうち、中里地区での高度 50m の UAV において計測時間が長い理由は、計測中に 1 回の充電を要したためである。それでも LS と比べて計測時間を大幅に短縮できた。

次に測量対象物の形状について、LS では設置位置から投射するレーザーが届く範囲が測定範囲となり、設置位置から見通せない位置は測定できない。さらに、測定中に機器が安定する設置位置を確保する必要がある。一方、UAV 測量では空中から真下方向で撮影可能な範囲は全て測定範囲となる。この点が UAV 測量の利点である。逆に、垂直面やオーバーハング下は UAV では測定できない。しかしそのような形状は、仮置きされた災害廃棄物には稀有であるため、本研究に UAV 測量が有効であると考えた。

なお、UAV と LS ともに光を用いるため降雨、降雪時には測定が困難となる。さらに、UAV 測量は安定した空中撮影が必要条件であるため、夜間や強風時も測定は困難となる。このように、UAV は LS に対して気象条件から受ける制約が大きいことに留意し、現地の条件に適した手法を選択する必要がある。

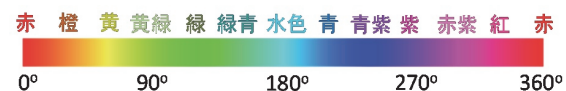
2.2 画像解析の概要

今回の UAV 測量では UAV にデジタルカメラを搭載して空中から 3 次元計測を行い、それらの画像から点群データ、オルソ画像（ひずみを補正した画像）を生成して対象物の体積を測定した。

一方、災害廃棄物の種類の判別については、素材ごとに有する固有色に着目した。デジタルカメラで測定された画像では、日照など気象条件の違いにより被写体の明度が影響を受ける。色相とは色合いのことであり、図一 1 のとおり 0° から 360° の角度で表わされる。個々の物体が有する色相は環境の明るさの影響を受けにくいいため、本研究では色相に着目した³⁾。

ピクセルごとに RGB から HSV 変換し、H (色相) から素材色を推測する。RGB とは光の 3 原色の Red、Green、Blue の頭文字であり、これを HSV (Hue : 色相、Saturation : 彩度、Value : 明度を使った色の表現方法) 形式に変換し、このうちの色相を用いて種々の分析を行った。

色相を 12 種類 (赤、橙、黄、黄緑、緑、緑青、水色、青、青紫、紫、赤紫、紅) に分類する。彩度が低く色相間の差が少なくなる場合は、明度に応じて 3 種類 (黒、灰、白) の計 15 種類に分類する。色相解析結果の例を図一 2 に示す。



図一 1 色相角度図

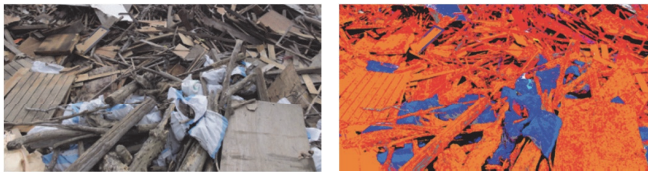


図-2 色相解析結果の例

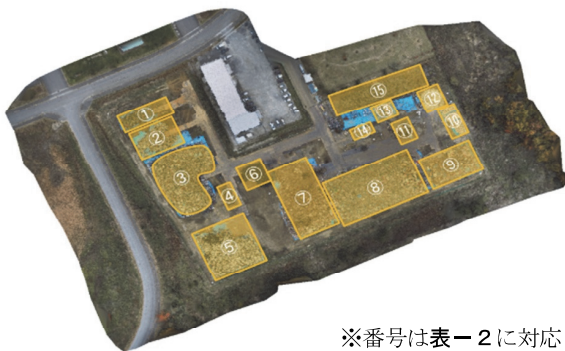
3. 実験結果

3.1 UAV の結果

a. UAV による体積算出結果

UAV による 3 次元計測データから点群データを作成し、体積を算出した。UAV による計測は、対象区域に標定を設置し、その座標を空撮することにより実施した。計測対象とした久慈地区のサイトにおける廃棄物種類別の配置図を図-3 に示す。図中の番号は、表-2 に示す種別に対応している。

次に LS を使用し 3 次元計測を行い、3 次元点群データを作成した。LS による計測は UAV 計測で使用した標定の上に三脚を据えターゲット板を設置することで世界測地系 10 系の座標に統一した。また、LS による計測は UAV 計測と比較し時間がかかるため、当該計測では図-3 仮置場配置図の⑦及び⑧の可燃物を主な計測対象と設定し、計測を行った。⑦及び⑧の可燃物の仮置き概況を図-4 に示す。



※番号は表-2 に対応

図-3 仮置場配置図



図-4 久慈地区可燃物の仮置き状況

表-2 UAV と LS の体積推計値比較

※番号は図-4 に対応

図中 番号	種別	体積推定値 (m ³)		UAV/LS
		UAV	LS	
①	自転車	110.7	—	—
②	家電	192.2	—	—
③	不燃物(大)	2066.7	—	—
④	不燃物(小)	23.2	23.2	1.00
⑤	家電 (リサイクル)	905.2	—	—
⑥	タイヤ	158.9	129.7	1.23
⑦	可燃物 (木くず・家具)	2205.5	2074.8	1.06
⑧	可燃物	2106.1	2115.5	1.00
⑨	たたみ	622.9	—	—
⑩	廃プラ	92.3	—	—
⑪	可燃物(家具)	37.8	34.2	1.11
⑫	石膏ボード	88.5	—	—
⑬	廃プラ	44.3	—	—
⑭	廃プラ	7.5	5.6	1.34
⑮	枝葉	623.7	—	—
合計		9285.5	—	—

UAV と LS それぞれの体積算出結果を表-2 に示す。体積算出のために設定した画像解像度やメッシュ間隔は前述の表-1 と同様である。⑦可燃物 (木くず・家具) については UAV による算出結果が 2205.5m³、LS が 2074.8 m³ となり両者の差が 6% となった。⑧可燃物については UAV が 2161.1m³、LS が 2115.5 m³ となり両者の差が 2% となった。

b. UAV による体積算出手法の効率化

次に、体積計算の効率化と精度の関係について検討した。土工事現場の土砂に比べて災害廃棄物の形状が多彩で細やかであることに着目し、計算の効率化と精度の観点から、災害廃棄物の体積推計に適したメッシュ幅に関する検討を行った。

体積の算出には、手持ちの点群データを適当なメッシュに分割し、一つのメッシュの四隅の標高平均値を用いている。そこで本研究では、点群データの情報量とメッシュ幅をそれぞれ変化させ、それに伴う体積推計値の変化を確認した。具体的には、点群データの解像度について前述の 1.2cm のほか、10cm に間引いたデータの 2 種類を検討対象とした。メッシュ幅については、0.2m から 0.1m 刻みで 1.0m までの 9 種類を検討対象とした。さらに、UAV の飛行高度を 50m と 80m の 2 種類設定した。これらの推計値を、LS によるデータから算出した体積値と比較した。

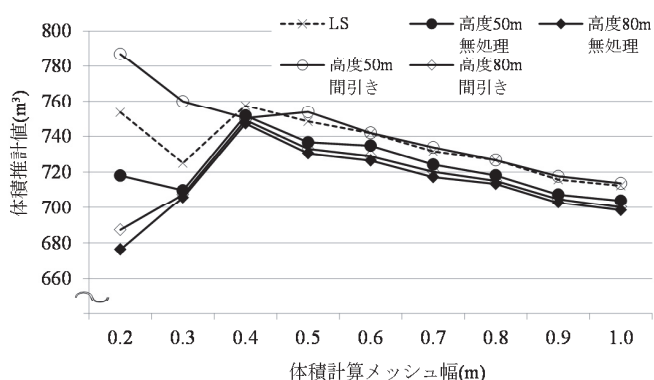


図-5 推定体積とメッシュ幅の関係

体積の推計結果を図-5に示す。ここで体積算出の対象は、中里地区においておよそ1,000m²にわたって仮置きされている、災害で発生した土砂である。

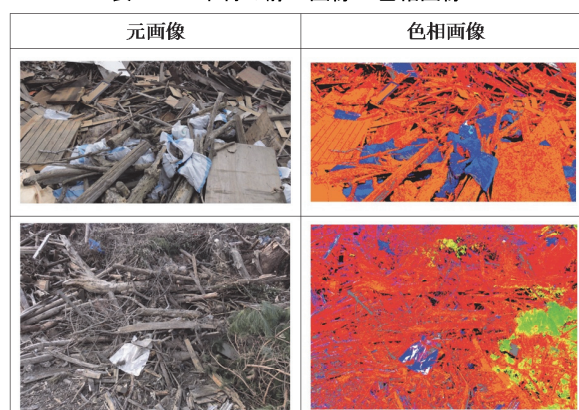
図-5のうちメッシュ幅0.2mについて、LSの結果を基準とすると、飛行高度50mの場合は間引きの有無に関わらず、LSとの差が5%以内となった。この結果は、飛行高度50mの間引き処理なしで実施した、前項の表-2の結果と一致している。これに対し、飛行高度80mの場合は、LSとの相違がおよそ10%となった。このことから、体積計測の精度については、点群データの解像度の間引きよりも飛行高度の影響が卓越していると考えられる。よって、適切な飛行高度を選べば、点群データのメッシュ幅による計算処理の効率化が有効であることが示唆される。

図-5のうちメッシュ幅が0.4mよりも長い、比較的粗い条件であれば、LSとUAVともに体積推計値の差異は小さかった。一般に、体積算出に要する解析処理時間はメッシュ数に比例し、言い換えるとメッシュ幅をn倍すると処理時間を1/n²に短縮することができる。このことから、メッシュ幅を0.4mよりも長くする程度の精度が許容される状況であれば、UAVによる計測はLSとの差異を小さく保ったまま、処理時間を短くするためにメッシュ幅を比較的自由に長くできると考えられる。

また図-5ではいずれの曲線もメッシュ幅0.4mを境に、メッシュ幅を長くするにしたがって体積推計値が一樣に小さくなった。この原因として、メッシュ幅に対する体積推計値のトレンドが被写体表面の形状に依存すると推察される。具体的には、今回の被写体の表面の概形が直線よりは凸型に近かったため、メッシュ幅を長くすることにより任意の二点間の表面の長さを実際より短く算出するに至ったと考えられる。

一方、メッシュ幅0.4m未満の場合について、体積推計値の傾向が曲線ごとに差異が大きくなった原因については更なる精査が必要である。積み上げられている災害廃棄物の一点一点の形状と照らし合わせつつ検証を続ける予定である。

表-3 木材の静止画像と色相画像



3.2 画像解析による種類別発生量の推計結果

a. 静止画像による種類ごと色相分析

災害廃棄物の種類の判別については、前述2.2のとおり、素材ごとに有する固有色に着目した。そのため最初に、①災害廃棄物のうちいくつかの典型的な種類について、UAVではなく近接して静止画を撮影し、種類ごとに卓越する色相を把握し、次に②オルソ画像（UAV撮影後ひずみ補正した画像）から色相分布を読み取り、災害廃棄物の種類ごとの発生量を推測するという手順で検討を実施した。

災害廃棄物の種類ごとの色相の分析を実施するため、中里地区にて木材を撮影した静止画像及び色相画像を表-3に示す。

表-3より、木材の可視光での色が多様であっても、色相として赤色で統一感が強く出力されることが確認できた。また、空隙は光の反射が極端に弱く、明度が下がり黒くなることが確認できた。このことから、色相画像での黒色の面積は木材の空隙率と関係があることが予想される。

さらに、白い化粧板や白い袋の色相が青いことも確認できた。一般に白い樹脂等は蛍光剤が配合されており、蛍光剤は紫外線を受けて青い光を放出するためスペクトル上では青が強調されると考えられる。また、葉の色相は緑であり、これ以外に緑の色相は極端に少ないことが確認できた。

これらをまとめ、木材に関する62枚の画像から種類ごとの色相を分析した結果を表-4に示す。

表-4 木材仮置場の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	74.0	木、土
水色～紫、または白	8.2	ビニール
黄緑～緑青	0.8	葉
黒または灰色	17.0	不明

表-5 可燃物の静止画像と色相分布

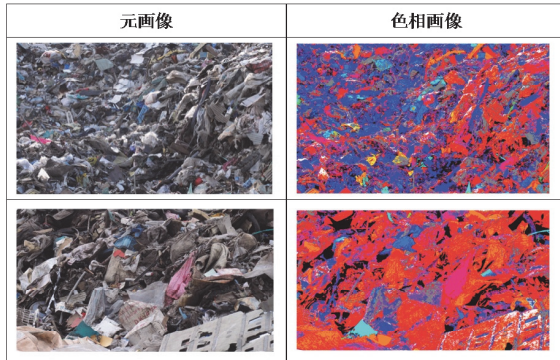


表-6 近接撮影による可燃物の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	40.3	木、土、紙
水色～紫、または白	37.1	ビニール
黄緑～緑青	0.2	プラスチック
黒または灰色	22.6	不明

次に、可燃物を撮影した静止画像及び色相画像を表-5に示す。撮影箇所は前述と同じ中里地区である。

表-5より、ビニール袋に入れられた廃棄物は青い色相となる傾向が確認できた。この場合、内容物の区別は困難となることに留意が必要である。また、泥汚れは色相が赤になる傾向も確認できた。しかし、泥汚れ、赤い樹脂はともに色相が赤となり、色相だけでは識別出来ない場合があることに留意が必要である。

これらをまとめ、可燃物に関する13枚の画像から種類ごとの色相を分析した結果を表-6に示す。

b. UAV 測量画像による仮置き表面の種類分布の推計

前項で把握することができた種類ごとの色相を用いて、UAV 測量による画像から、地上に発生している災害廃棄物の表面に露出している量の種類別分布を推計した。

前項において可燃物の検討を行った中里地区の仮置き場を対象に UAV 画像によるオルソ画像から色相を分析した結果を表-7に示す。

表-7より、災害廃棄物の山のうち日陰部が青の色相となる傾向が把握できた。このことと表-6を照らし合わせると、青の色相は表-6においてビニールに区別されていたため、日陰の発生によりビニールが実際よりも多めに見積もられることになる。UAV 画像からの色相分析にあたってはこのことに留意が必要である。

UAV 画像による色相の分析結果のまとめを表-8に示す。表-6と表-8の比較からわかるとおり、災害廃棄物の種類ごとの区分で見ると「木、土、紙」において UAV による推計と近接撮影による推計との差異が2割程度、ビニールが1割程度となった。

表-7 UAV 画像による色相画像(可燃物)

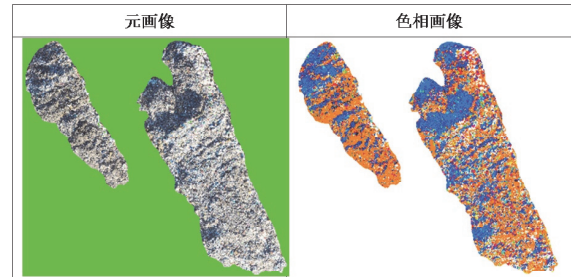


表-8 UAV による可燃物の色相分布

色相	割合(%)	素材
赤紫～黄	48.3	木、土、紙
水色～紫、または白	34.4	ビニール
黄緑～緑青	1.0	プラスチック
黒または灰色	16.3	不明

なお表-8では、前述の日陰部の処理は行っていない。したがって表-8においてビニールと判別された区分が実際よりは多い可能性がある。UAV 画像によるオルソ画像から色相を分析した結果と近接画像の結果との比較にはこのことを鑑みる必要がある。

分析の最後として、災害廃棄物の種類ごと、地区ごとの色相分布を比較する。色相は0°から360°の角度で表現されるため、分布の表現にはレーダーチャートが適切である。無色相に分類される黒、灰、白を省き、有色相だけで合計1.0になるよう正規化した上でレーダーチャート上に表現した。

色相分布の検討の最初として、表-3及び表-5で示した、中里地区で撮影された木材の画像と可燃物画像の色相分布を比較した結果を図-6に示す。図-6から把握できるとおり、木材は赤および橙の色相に集中している一方で、可燃物は赤に加えて青紫色相も強く出ていることが把握できる。これは可燃物には赤色相を示す土と青色相系を示すビニール・プラスチックが含まれているためと考えられる。木材色相、可燃物色相とも緑系色相は極端に少ない。

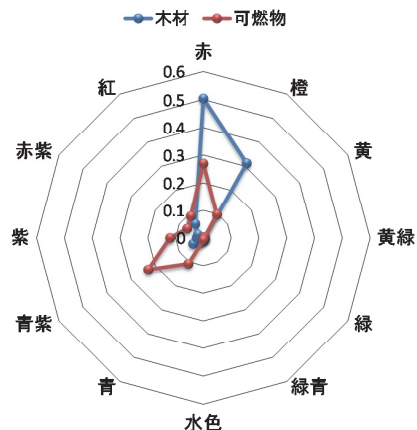


図-6 中里地区の木材と可燃物の色相分布比較

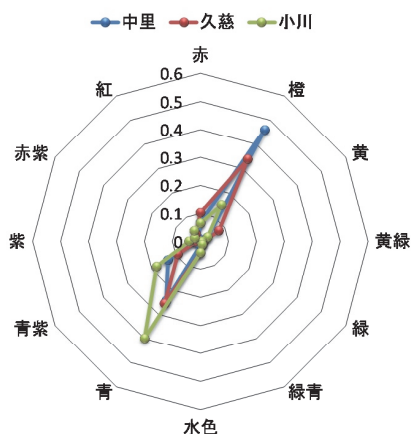


図-7 地区ごとの可燃物の色相分布比較

このように、災害廃棄物ごとに色相の相違を把握することにより、災害廃棄物の表面に露出している量の種類別分布について撮影画像から推計することが可能となる。

次に、可燃物の仮置場を UAV から撮影した画像に基づく色相分布を地区ごとに比較した。その結果を図-7に示す。図-7のうち中里地区については表-7や表-8に示す結果と同一である。これ以外の2箇所（久慈地区及び小川地区）の可燃物仮置場の色相分布を重ねて表示している。

3地区に関する共通の特徴として、橙と青の色相に集中しており、それ以外の色相は極端に少ないことが分かる。地区ごとの分布の相違点として、中里地区は比較的橙が多く、小川地区は比較的青が多い。これらに対して久慈地区はその中間にある。これは中里地区の可燃物は土が多く混ざること赤系の色相が強く出ている一方、小川地区の可燃物は比較的土が少なく、ビニール袋に入れた物が多かったため青系の色相が強く出たものと考えられる。これらから、久慈地区の可燃物は中里地区と小川地区の中間的な組成分布と推定される。

以上のとおり、近接撮影によって得られた種類ごとの色相を用いて、UAVからの撮影により、仮置き表面の種類分布の把握手法を構築することができた。

4. 結論

以上のとおり、平成28年8月に発生した台風10号により岩手県岩泉町に発生した災害廃棄物を対象に、UAV測量を用いた体積推定手法の検討を行った。得られた見解のうち主たるものは下記の3点である。

- i. UAVの活用により、準備、計測、解析の一連の所要時間についてLS計測と比較して短縮できた。特に計測についてはLSが数時間要するところ、UAVにより10分程度に短縮を図ることができた
- ii. 災害廃棄物の体積の推計について、UAV測量による値がLSに対して差異が5%程度となり、UAVが

LSと同等の精度を有することが確認できた。特にメッシュ幅を一定以上（今回の結果によると0.4m以上）とすると、体積推計値についてUAV測量とLSとの差異がより小さくなり、精度を保ちつつ解析時間を短縮させる可能性が見いだせた

- iii. 画像解析において、災害廃棄物の種類を画像の色相によって分類することの有効性が確認できた。

上記i.について、UAV測量においては実績のあるLS計測と比較して計測所要時間の大幅短縮を図ることができた（久慈地区でUAVが10分に対してLSが3時間、中里地区でUAVが2時間に対してLSが5時間）。

上記ii.の計測精度についても、UAVを用いた手法がLSと比較して相違が5%程度と、十分な体積計測精度を有することが確認できた。さらには、災害廃棄物の体積推計に適したデータ採取の条件について検討し、メッシュ幅が小さい条件（今回は0.3m以下）においてはUAVの飛行高度が体積推計値に及ぼす影響が大きいことや、メッシュ幅が大きい条件（今回は0.4m以上）においては、体積推計値に関するLSとの差異が小さくなることが確認できた。

さらに上記iii.の画像情報からの組成分析においては、仮置きされている災害廃棄物の表面に露出している範囲を対象に種類ごとの色相分布を特定することができ、体積分布の推計に資する手順を確立できた。課題として、表面画像の分析では袋や容器の中身の推定が困難であること、仮置場のうち表面に露出していない部分の分布との整合性の確認が必要であること、天候、日照の影響を受けて日陰の対応が必要であること、同色相系を示す物質間の分離が困難であることが考えられる。今後の実用を重ねつつ、異なる原理のセンシング技術を併用することにより、前述の課題の解決に取り組む所存である。

謝辞

今回の検討においては伊藤忠テクノソリューションズ株式会社と連携しつつ、画像解析技術について多大な協力をいただきました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 環境省、「災害廃棄物（避難所ごみ・し尿を除く）の推計方法」、災害廃棄物対策指針、技1-11-1、2014
- 2) 鶴巻峰夫、山本祐吾、吉田 登、「地域の資材ストック量にもとづく災害廃棄物の予測に関する基礎的検討」、土木学会論文集 G（環境）、Vol.71、No.6、pp. II_241-II251、2015
- 3) 村上 治、天野浄行、西山 哲、「カラーターゲットを用いた近接写真測量の効率化について」、写真測量とリモートセンシング、Vol.46、No.1、2007
- 4) 国土交通省、「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）」、2016