

〈ノート〉

車両走行型計測手法を用いた災害廃棄物の定量化手法の開発

吉川 慶¹⁾, 西山 哲²⁾, 藤原 健史³⁾¹⁾(株)ウエスコ 空間情報事業部 地理情報課
(〒700-0033 岡山市北区島田本町2-5-35 E-mail:k-yoshikawa@wesco.co.jp)²⁾岡山大学学術研究院 環境生命科学学域
(〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 E-mail:nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp)³⁾岡山大学学術研究院 環境生命科学学域
(〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1, E-mail:takeshi@cc.okayama-u.ac.jp)

概要

本論文は、浸水痕跡調査により災害廃棄物の排出量を予測するために被災地の災害を区分する手法と、災害廃棄物の暫定排出量を計測する手法を開発した成果をまとめたものである。具体的には、車両にレーザスキャナやデジタルカメラを搭載し、走行しながら周辺の画像と3次元レーザ点群を取得する手法を活用するものであり、廃棄物の処理計画を作り、計画的に処分を実施するために必要となる被災地の現況把握と今後排出される廃棄物量の正確な推定に必要な災害廃棄物の容量を迅速かつ効率的に計測する手法の構築を試みた結果を報告する。

キーワード：災害廃棄物、車載写真レーザ測量システム、浸水痕跡調査、レーザ点群
原稿受付 2021.8.2 原稿受理 2021.9.16

EICA: 26(2・3) 91-98

1. はじめに

近年、地球温暖化により、台風やゲリラ豪雨による水害が多発しており、災害に強い街づくりが求められている。平成30年、台風7号および梅雨前線等の影響により発生した集中豪雨は、同年6月28日から7月8日にかけて、西日本を中心に北海道や中部地方など全国的に広い範囲にわたって、24、48、および72時間の降水量が観測史上第1位となった。消防庁発表の「平成30年7月豪雨及び台風第12号による被害状況及び消防機関等の対応状況(第60報)」によると¹⁾、岡山県内では、①に示すような人的被害が発生した。また、気象庁の発表によると、②に示すような家屋被害が発生しており、風水害による家屋被害として戦後最悪となった²⁾。

①人的被害 死者：73人、行方不明者：3人、
重傷者：16人、軽傷者：161人

②家屋被害 全壊：4830棟、
半壊・一部損壊：4476棟、
床上・床下浸水：7020棟

Fig. 1は、内水氾濫が発生した岡山市花尻地区の災害当時の様子である。また**Fig. 2**は、岡山市国ヶ原地区における旭川の破堤の様子と、それにより浸水被害を受けた住宅から排出された災害廃棄物の積載状況を示している。災害廃棄物は、災害ごみおよび災害がれきに分けられる。災害ごみは、各家庭から出される



Fig. 1 Situation of inland water inundation

壊れた家具や道具類、避難所から出される生活ごみ、し尿などから構成され、今回のような豪雨災害の場合には、これらに水に浸かった畳、衣類などが加わる。また、災害がれきは主に建物の損壊・焼失などに伴って発生するもので、家屋の被害が大きいほど大量に発生する。これら災害ごみとがれきは、道路に積み上げ



Fig. 2 Situation of levee breach and disaster waste

られることで交通の障害となり、衛生面での問題も生じることから、迅速な回収が必要となるため、自治体ではこれらを、いち早く収集・運搬して、適正に処分することが必要になる。そのためには、実際に排出されている災害廃棄物の量を把握するだけでなく、できるだけ早急に家屋などの被害状況や避難状況を把握して、今後発生する災害ごみとがれきの発生見込みを検討する必要がある。こうした被災地の状況把握と災害廃棄物の発生見込みをもとに、災害ごみとがれきについて、仮置き場、運搬経路、最終処分場の決定などから成る処理計画を作成する。本論文は、このような廃棄物の処理計画を作り、計画的に処分を実施するための現況把握と今後排出される廃棄物量の正確な推定に必要な各種データを取得する手法の開発成果を記述するものである。具体的には、災害時に実施される浸水痕跡調査³⁾へ MMS 計測を適用する手法と、災害ごみおよびがれきの暫定排出量算出へ MMS 計測を適用する手法について検討するものである。MMS とは車載写真レーザ測量システム (Mobile Mapping System) のことであり、車両には GNSS (Global Navigation Satellite System) 受信機、慣性計測装置 (IMU: Inertial Measurement Unit)、走行距離計、デジタルカメラ、およびレーザスキャナ等が搭載されている。この車両を用いることで、迅速かつ容易に、走行した箇所周辺の画像と 3 次元レーザ点群データを取得することができる^{4,7)}。本論文では、この MMS を被災地の復旧に必要な被害調査と災害ごみおよびがれきの排出量計測に適用した研究成果を報告する。

2. 計測の概要

2.1 計測手法について

Fig. 3 は、本研究で使用した MMS の概要である。MMS は車両に、GNSS 受信機 3 台、慣性計測装置 (IMU)、走行距離計、デジタルカメラ 3 台、全周囲カメラ、レーザスキャナ 2 台を搭載したものである。車両の自己位置と姿勢データの取得には、この GNSS、IMU および走行距離計を使用する。計測されたレーザデータは、GNSS 時刻を基に精密な同期をとって保存され、GNSS 補正データを用いて座標を与える後処理解析により 3 次元化される。この後処理にかかる時間は計測時間の 8 割～10 割程度であり、日中に計測を実施すれば、そのデータは翌朝までに 3 次元化される。なお、自転車位置姿勢データの後処理には GNSS、IMU、走行距離計の基本観測量を求め、それらを合わせて一括的に位置姿勢計算を行なう Tightly-Coupled 方式を用いる。ビル群やトンネル等の GNSS が十分に受信できない区間においても、IMU と走行距離計で位置計算を行い、GNSS 位置計算と融合処理することにより、自己位置を高精度で測位することができる。また、GNSS 受信状況が悪い区間が連続する場合は、Tightly-Coupled 方式の複合計算を実施したとしても、GNSS 受信状況が良好な区間に比べて精度

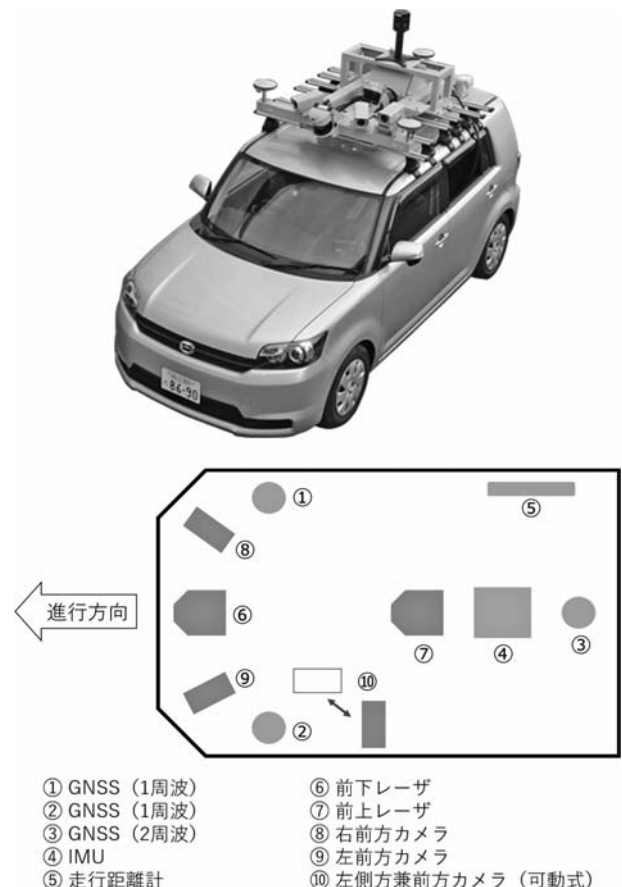


Fig. 3 MMS overview and equipment configuration

が劣化する場合がある。その対策として、精度担保された測量座標を調整用基準点として用いた MMS データの誤差補正処理を実施することで位置精度の向上が可能である⁵⁾。なお Table 1 に車両に搭載した各種機器の仕様を示す。本論文で重要となるのは、災害の様子を取得するためのカメラ類、災害廃棄物の体積を算出するために必要となるレーザスキャナである。

後処理された 3 次元データの精度には、絶対精度、相対精度の 2 つがある。絶対精度は、座標の真値とどれだけ離れているかを表す値であり、災害調査の結果が GIS (地理情報システム) 上で他の調査結果と座標を用いて重畳表示させられることが想定されたため、絶対精度で本手法を評価することにした。

2.2 計測対象箇所について

計測対象箇所は、Fig. 4 に示すとおり、平成 30 年 7 月豪雨により浸水被害を受けた岡山県内の被災地である。当箇所は 7 月 7 日前後に被災しており、その後一週間以内に MMS 計測を実施している。なお、計測開始時期は緊急車両を優先することに配慮し、MMS

が現位置を走行可能と判断された時期を選択したものである。

3. 被災現況把握のための計測

3.1 計測精度の検証

本章では、豪雨災害の被災状況を把握するための痕跡調査に MMS を適用した事例を示す。1999 年以降の水害による災害救助法が適用された市町村に対する災害廃棄物に関するアンケート調査結果に基づいて、住家被害を考慮した災害廃棄物の発生原単位を算出した結果によると、浸水による被災区分である床上浸水、床下浸水では、それぞれ 4.6 (ton/世帯)、0.62 (ton/世帯) の災害廃棄物が発生するものと推定されている⁶⁾。その他の被害では、水害による災害廃棄物発生量原単位は、全壊 12.9 (ton/世帯)、大規模半壊 9.8 (ton/世帯)、半壊 6.5 (ton/世帯)、一部損壊 2.5 (ton/世帯) などが予測されている。このように、洪水の被災区分を確認するための各家屋における水位の状況を確認する痕跡調査は、今後発生する災害廃棄物量を推定するために有用なデータとなる。現在、洪水の痕跡調査は、作業員が現地へ赴き、被災地における植生の状況や泥やゴミ等を基にして、洪水時に冠水したことを示す痕跡を目視で判断し、測量することで実施されている。しかしながら、延長が長距離におよぶ河川で大規模洪水が発生した際には、広大な流域全体において上記の様な現況調査結果が早急に必要であり、多大な労力が必要となることが課題であった。また、人口減少や高齢化によって作業員不足が深刻化しているうえに、頻発する災害によって調査回数が増加しており、本作業を継続させること自体が困難な状況となっている。また、発災後の降雨等により泥やごみ等が流出することによる読み違いも否定できず、正確なデータが取得できない事象を少しでも減らすことも課題である。これらの課題を解決するため、迅速、効率的かつ正確に痕跡調査を実施する手法として、MMS で被災地を計測し机上にて浸水痕跡調査を行うことの有用性を検証することにした。

「公共測量作業規定の準則」(国土地理院)⁷⁾において、MMS の計測データを用いて地図情報レベル 500 の数値図化を実施する場合は、調整用基準点との格差の許容範囲が水平位置で 150 mm 以内、標高で 200 mm 以内と規定されている。これまで、MMS は道路台帳附図の作成などに活用されてきた事例⁸⁾が多く、痕跡調査時の精度、特に重要となる標高値の精度と車両速度の関係に関する知見は乏しい。また、MMS の計測値には一定量の誤差が含まれることが考えられ、その値が定量的に把握されておらず、高精度の計測を実施するためには、計測値の誤差を補正する調整用基

Table 1 Specifications of MMS used in this study

MMS-K320	
カメラ	
搭載台数	3 台
画素数	500 万画素
視野角	1 台あたり 水平方向 80° 垂直方向 64°
最速撮影枚数	10 枚/秒
レーザスキャナ	
搭載台数	標準レーザ (Sick 社製) 2 台
反射強度	取得可能
取得点数	27,100 点/秒 (1 台)
最大到達距離	65 m
視野角	180°
連続記録容量	
データログ	最大 8 時間
カメラ画像	最大 90,000 枚/台
計測精度	
絶対精度	7 m 地点で 10 cm (rms) 以内
相対精度	1 cm (rms) 以内
自己位置精度	6 cm (rms) 以内



Fig. 4 Location measured using MMS



Fig. 5 Locations where the control points were set for accuracy verification

準点を設置する必要がある。被災地での計測を考慮すると、標定点の設置およびその維持管理は困難になることが予想されるので、補正作業をすることなくMMSによる高精度計測が可能であるのかどうかを検証する必要がある。このような背景を鑑み、本研究では車両走行速度と標高値の計測精度の関係を求めることを試みた。

Fig. 5 に示すように、岡山県内の吉井川河口右岸 900 m 区間に基準点を設置し、さらに、それを基に検証点を設置し、その検証点の精度により MMS で取得されるデータを評価した。具体的には、GNSS による 3 級水準測量により W-1, W-2 を設置し、この 3 級水準点を既知点とした 3 級水準測量により等間隔設置された 37 点の検証点の標高値を求めた。MMS は、Fig. 5 に示す区間を下流から上流方向を往路とし、上流から下流方向を復路として同じ経路を 2 度走行してそれぞれの経路から検証点の標高値を求めた。なお走行位置は道路中心付近であり、計測速度は可能な限り一定速度で走行した。その際、時速を 20 km, 時速 30 km, 時速 40 km として、各速度でそれぞれ往路、復路の計測を実施した。また今回の計測では、常に 5 つ以上の GNSS 衛星が受信可能であった。調整用基準点による計測値の補正をすることなく、検証点の標高値を計測した結果を Fig. 6 に示す。MMS により取得した標高値は、車両走行速度に関係なく、基準点に比べ約 45 mm~80 mm 高くなる傾向が確認できた。また、各車両走行速度での標高値の差は、0 mm~約 35 mm 程度であった。以上の結果から、調整用基準点を用いた精度向上処理を実施しなくとも、衛星受信良好区間であれば標高値は 100 mm 以内の精度を得られ、地図情報レベル 500 の規定値 (200 mm) 内であることが確認できた。

3.2 痕跡調査への適用

Fig. 4 に示す計測対象の道路上を MMS にて走行し、

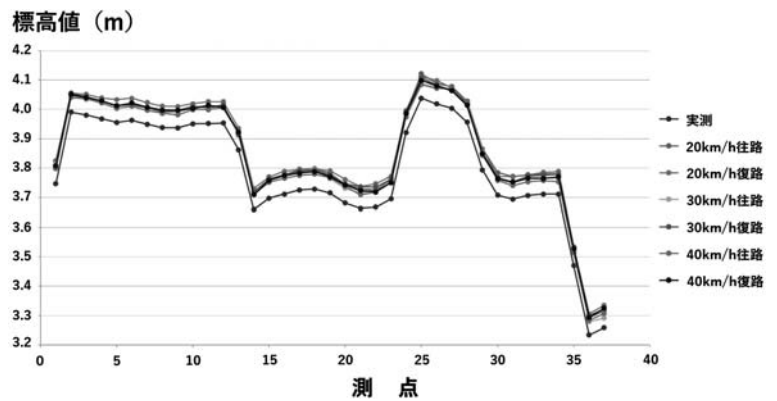


Fig. 6 Altitude measurement results by MMS



Fig. 7 Results of inundation trace survey

浸水痕跡調査を実施した結果を Fig. 7 に示す。右上



Fig. 8 Road flooding situation reproduced by VR technology

の画像が示すような浸水痕跡を全周囲画像から見つけ出し、左上の画像に示す、MMS 計測データから構築した3次元モデルを用いて浸水深を計測した。本手法の痕跡調査の結果を、浸水推定段彩図やハザードマップと比較すると、現地の浸水状況はほぼそれらと同じであることが明らかとなった。また、これらの結果と現地で撮影した写真を組み合わせ、洪水の被災区分を把握するためにVR (Virtual Reality: 人工現実感) の技術を導入して浸水時の状況を再現したものが Fig. 8 と Fig. 9 である。Fig. 8 は道路の冠水状況の再現であり、Fig. 9 は家屋の浸水状況である。これにより、水害による災害廃棄物発生量原単位を決めるにあたって、床上浸水および床下浸水の概要が判断できる。また、MMS の画像から全壊、大規模半壊、半壊さらには一部損壊の区分が可能であれば、住家被害を考慮した災害廃棄物の発生原単位が特定でき、そこから災害廃棄物発生量の推定が可能となる。MMS 画像による調査は、人が現地で行う浸水痕跡調査に比べ詳細性



Fig. 9 Flooding situation of the house reproduced by VR technology

は劣るものの、「床上浸水、床下浸水の詳細な判断」、「家屋倒壊状況の詳細な判断」の課題を解決すれば、迅速かつ正確に被害状況を把握する点で有効と考えら

れる。

4. 災害廃棄物の暫定排出量計測への適用

平成30年7月豪雨災害のような大規模な浸水被害が発生すると、被災した家屋等から一斉に災害廃棄物が排出される。その際に、一時仮置場や暫定仮置場の指定などの廃棄物処理の対応が遅れると、指定場所以外の仮置場が発生し復旧を妨げる恐れがある。平成30年9月18日に倉敷市が策定した平成30年7月豪雨に伴う倉敷市災害廃棄物処理実行計画では、「被災直後から発生している街中の災害廃棄物等の回収や身近な仮置場の早期解消による被災住民の生活環境保全上の支障をなくすこと」が目標として記されている。このことから、災害直後から災害廃棄物の量を把握し、適切な仮置場を指定することは重要である。Fig. 10は、道路沿いに積み上げられた当時の災害廃棄物の状況である。仮置場、運搬経路、最終処分場の決定などから成る処理計画を迅速かつ的確に作成するためには、まずは災害廃棄物の容量すなわち体積を算出す



Fig. 10 Situation of accumulated disaster waste

る必要がある。そこで、MMSによる3次元レーザ点群を使って、災害廃棄物の体積を算出する手法の構築を試みる。この算出法には2つの手順が考えられる。

- ①集積前にMMSデータを取得しておき、災害時に計測したMMSデータとの差分から災害廃棄物の体積を抽出する手法。
- ②災害時にのみMMS計測を実施し、災害廃棄物の体積を算出する手法。

本研究では、前記①の手法による体積の算出を試みる。そこで災害時の痕跡調査のために実施した計測経路の中から災害廃棄物の仮置場になっている箇所を選定してMMSデータを取得した。Fig. 11中の白線は、岡山市国ヶ原地区においてMMSが走行した経路であり、Fig. 12は、その中で代表的な災害廃棄物の集積場における集積時と撤去後の状況を示すものである。

前節までに取得したデータを基に、MMSレーザ点群データから災害廃棄物の体積を算出するアルゴリズムをFig. 13のように構築した。なお、図中のTIN (Triangulated Irregular Network) とは、点群データを結ぶことにより構成される三角網の集合体である。



Fig. 11 Measurement path of MMS

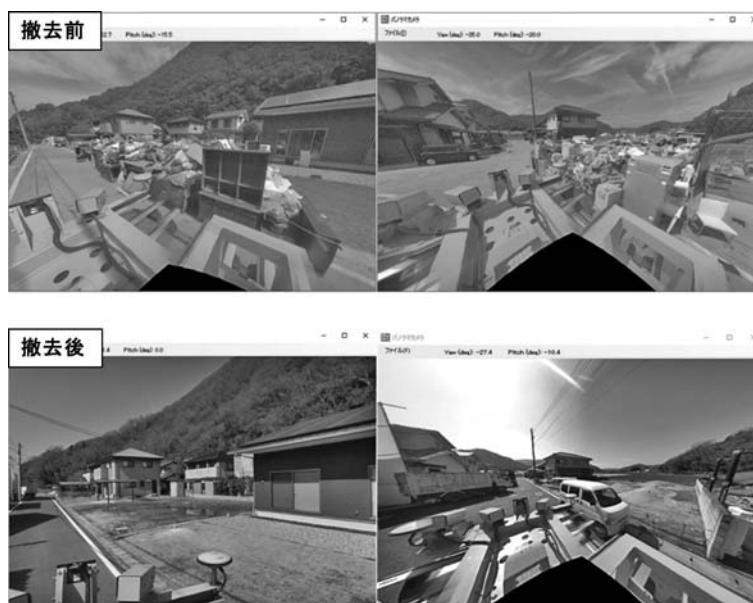


Fig. 12 Situation before and after the accumulation of disaster waste

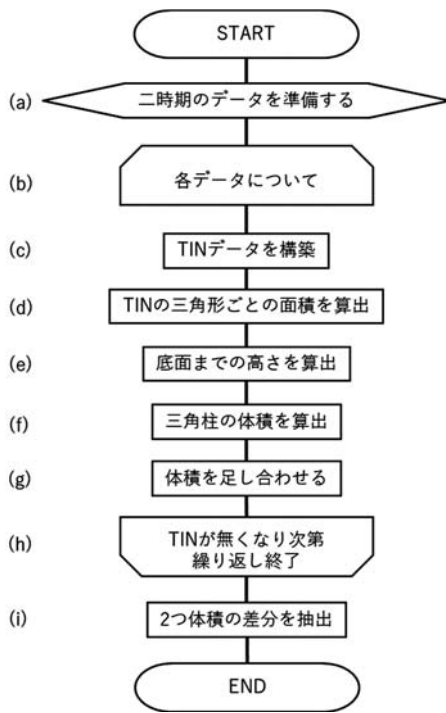


Fig. 13 Algorithm to calculate the volume of disaster waste

Fig. 14 は、本アルゴリズムにより災害廃棄物の体積算出を試みたレーザ点群の状況である。災害廃棄物が無い時に取得したデータが上図、災害廃棄物がある時に取得したデータが下図である。上図は奥行き方向にレーザデータが取得できているのに比べ、下図では災害廃棄物が前面に出ているために、奥行き方向のレーザ点群の密度は少なくなっている。しかしながら、本事例の場合は、レーザ点群密度が密ではないものの、災害廃棄物の裏側にも点群が存在したので体積算出が可能であった。このように、数点でもレーザ点群が奥行き方向に到達すれば、体積の算出は可能である。当時の災害廃棄物を正確に再現することは難しいため計算結果の検証は困難であるが、算出された災害廃棄物の体積は 411m^3 であった。この結果は、平常時に MMS データを取得しておけば、災害発生時に MMS 計測を実施することにより、道端に集積された災害廃棄物の体積が算出可能であることを示唆している。

5. 結 言

本論文は、災害時の災害廃棄物を、いち早く収集・運搬して、適正に処分することを可能にするために、排出される廃棄物量の推定に必要な各種データを取得する手法の開発成果をまとめたものである。具体的には、車両走行型計測である MMS 計測によるデジタル画像と 3 次元レーザ点群から、今後排出される災害廃棄物量を予測するために、被災地の床下および床上浸水状況や家屋の倒壊状況を把握する方法と、災害廃棄物の暫定排出量を計測する方法の開発結果につい

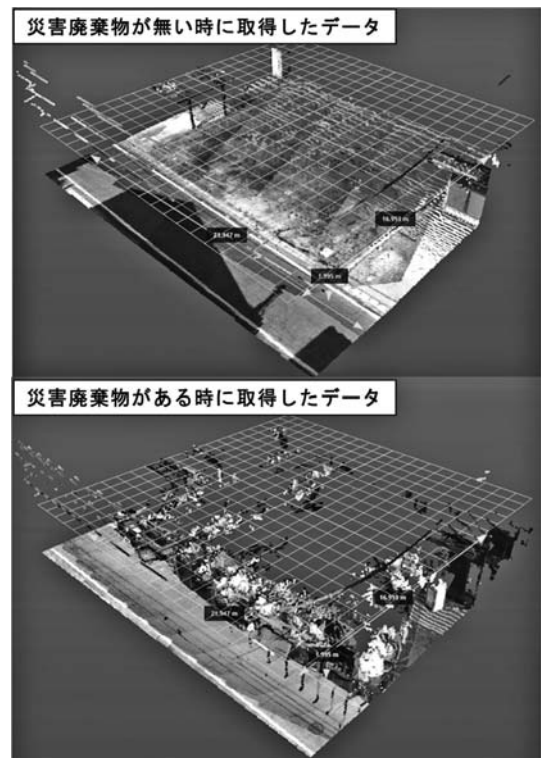


Fig. 14 Distribution of laser point cloud measured by MMS

て報告した。あらためて、研究成果を述べると次の通りである。

- ① MMS が良好な自己測位が可能な状況では、精度調整用の標定点を用いることなく高精度の標高値を得ることが出来ることを明らかにした。
- ② 痕跡調査の結果に VR 技術を導入することで、被災地の災害区分を可視化し、災害廃棄物の排出量の算定を容易にすることができた。
- ③ レーザ点群から集積された災害廃棄物の体積を算出するアルゴリズムを開発した。

これらの成果により、現況把握と今後排出される廃棄物量の正確な推定に必要な各種データを、迅速かつ正確に取得する手法を構築することができた。

謝 辞

痕跡調査・VR 技術に使用したソフトウェアは、岡山理科大学島田英之教授との共同研究成果である。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 消防庁：平成 30 年 7 月豪雨及び台風第 12 号による被害状況及び消防機関等の対応状況（第 60 報）(2019)
- 2) 気象庁 平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等）ホームページ：2021 年 8 月 20 日参照
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成 24 年 7 月九州北部豪雨災害に関する調査、国土技術政策総合研究所資料、No. 758 (2013)
- 4) 橘菊生，間野耕司，島村秀樹，西山哲：河川堤防計測へのモ

- バイルマッピングシステムの適用, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 54, No. 4, pp. 166-177 (2015)
- 5) 間野耕司, 井関禎之, 森田真一, 橘菊生, 西山哲: 移動計測車両による河川堤防高把握の検討, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 73, No. 2, pp. I_53-I_64 (2017)
- 6) 平山修久, 河田恵昭: 水害時における行政の初動対応からみた災害廃棄物発生量の推定手法に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol. 33, pp. 29-36 (2005)
- 7) 国土交通省国土地理院: 公共測量作業既定の準則, p. 67 (2020)
- 8) 公益社団法人日本測量調査技術協会: MMS ガイドブック (車載写真レーザ測量の手引き), p. 21 (2016)

Development of Disaster Waste Quantification Method using Mobile Mapping System

Kei Yoshikawa^{1†}, Satoshi Nishiyama² and Takeshi Fujiwara²

1) Spatial Information Division, Wesco Co., Ltd.

2) Academic field of Environmental and Life Science, Okayama University

† Correspondence should be addressed to Kei Yoshikawa:

(Spatial Information Division, Wesco Co., Ltd.

E-mail: k-yoshikawa@wesco.co.jp)

Abstract

This paper summarizes the results of developing a method for classifying disasters in the disaster area in order to predict the amount of disaster waste discharged by the inundation trace survey and a method for measuring the provisional amount of disaster waste. Specifically, the vehicle is equipped with a laser scanner and a digital camera, and the method of acquiring surrounding images and a 3D laser points cluster while driving is utilized. We report the results of an attempt to establish the quick and efficient measuring method for grasping the current situation that is required for creating waste treatment plan and practicing waste disposal and also the waste volume that is necessary for estimating precisely the weight volume of the disaster waste.

Key words: disaster waste, mobile mapping system, inundation trace survey, laser point cloud