

災害対応の初期フェイズにおける無人航空機の活用
- 平成30年7月豪雨における広島県での捜索支援地図の作成事例 -

内山庄一郎*

Demonstration of Utilization of Unmanned Aerial Vehicles in Disaster First Response
- Case study of the creation of a support map for search and rescue in Hiroshima Prefecture
during the heavy rain event of July 2018 -

Shoichiro Uchiyama

**Multi-hazard Risk Assessment Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan
uchiyama@bosai.go.jp*

Abstract

In the southern parts of Hiroshima Prefecture, over 8,000 debris flows were caused by the heavy rain event of July 2018. These led to extensive casualties and other damage. In this study, I created and provided a support map for search and rescue (SM-SAR) to show how unmanned aerial vehicles (UAVs) can be effectively used in disaster response. The following conclusions were obtained. (1) The utilization of UAVs requires the extraction of intelligence by means of map interpretation by the user. Intelligence in this context means effective information, not raw data, that allows decisions to be made in disaster response. This indicated that the utilization of UAVs in disaster response requires skill in handling spatial information as well as in flying UAVs. (2) UAVs are the best tool for information acquisition on the front lines. The information acquired by UAVs is attainable at low cost, easily, quickly, and in high resolution. At present, it is difficult for satellites and aircraft to completely meet the needs that UAVs can. (3) SM-SAR effectively supports decision-making for search and rescue, but the promptitude of its deployment of information on the site is important. Bottlenecks exist at each step, from accessing the site to photographing and creating maps and distributing them; it is necessary to devise measures to address these issues. The deployment of UAVs is progressing, but it remains limited; utilization methods have not caught up to the state of the art. It is necessary to diffuse knowledge about this means of support.

Key words: Unmanned aerial vehicles (UAVs), Support map for search and rescue, Utilization in disaster response, Hiroshima Prefecture, Heavy rain event of July 2018

1. 背景

1.1 活動の背景

自然災害直後の災害現場では、第一に捜索救助活動が行われ、同時並行して道路などのインフラや田畑、林地などの土地利用、宅地や建物など、人間社会の構成要素に対する被害状況の把握が行われる。

そして、これらの活動の後に応急復旧、復旧、復興のフェイズへと状況が進展する。このため、災害対応の初期フェイズの早期完了は、生存救助率の向上のみならず、地域や住民生活のより速い回復を実現する上でも重要である。昨今、南海トラフ地震の切迫性(地震調査研究推進本部, 2018)が指摘される中

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 マルチハザードリスク評価研究部門

で、個々の災害現場における対応能力を高度化し、安全かつ迅速に災害対応の初期フェイズを完了するための技術の社会実装は、喫緊の課題の1つといえる。そのような中、防災科学技術研究所(以下、防災科研)では、自治体をはじめとした災害対応を行う機関向けに、県域から市域にわたる広範囲の概略的、集約的な情報から、個々の災害現場の詳細な情報まで、様々空間スケールで作成された災害関連の空間情報を収集、統合し、発信している(5.6節で後述)。本研究は、その中でも特に、災害現場の最前線で人命救助等に従事する機関に対する、空間分解能の高い情報の迅速な提供をとおして、災害対応における無人航空機の有効な活用方法を実証的に明らかにしようとするものである。先述のとおり、災害対応の初期フェイズは搜索救助活動に限るものではない。しかし、搜索救助活動は、情報取得の迅速性や情報の高分解能性、情報取得活動時の安全確保など、無人航空機の性質(4.2節)が高い次元で求められる活動の代表例の1つである。これが達成できる

ことはすなわち、災害対応の初期フェイズで行われる各種の被害状況の把握においても、無人航空機の活用の道が拓かれると期待される。

1.2 広島市における活動の経緯

平成30(2018)年7月豪雨により発生した多数の土石流等により、広島市およびその周辺地域では、広範囲で多数の人的被害が生じた。著者は過去に、平成26(2014)年8月豪雨による広島市の土石流災害において、搜索救助活動の意思決定を支援するための「搜索支援地図」を作成し、消防、警察、自衛隊、自治体の関係機関に情報を提供した(内山ほか, 2014a)。こうした経緯から、平成30年7月豪雨の災害対応が行われる中、広島市危機管理室(平成26年8月豪雨災害当時の関係者が在籍)より、広島市消防局の依頼として、無人航空機を用いた搜索支援地図作成の依頼を受けた(図1)。防災科研としての活動は、平成30(2018)年7月9日14時に電話連絡を受け、同日15時に茨城県つくば市を出発、22時に広島市消防局に到着したところから開始された。

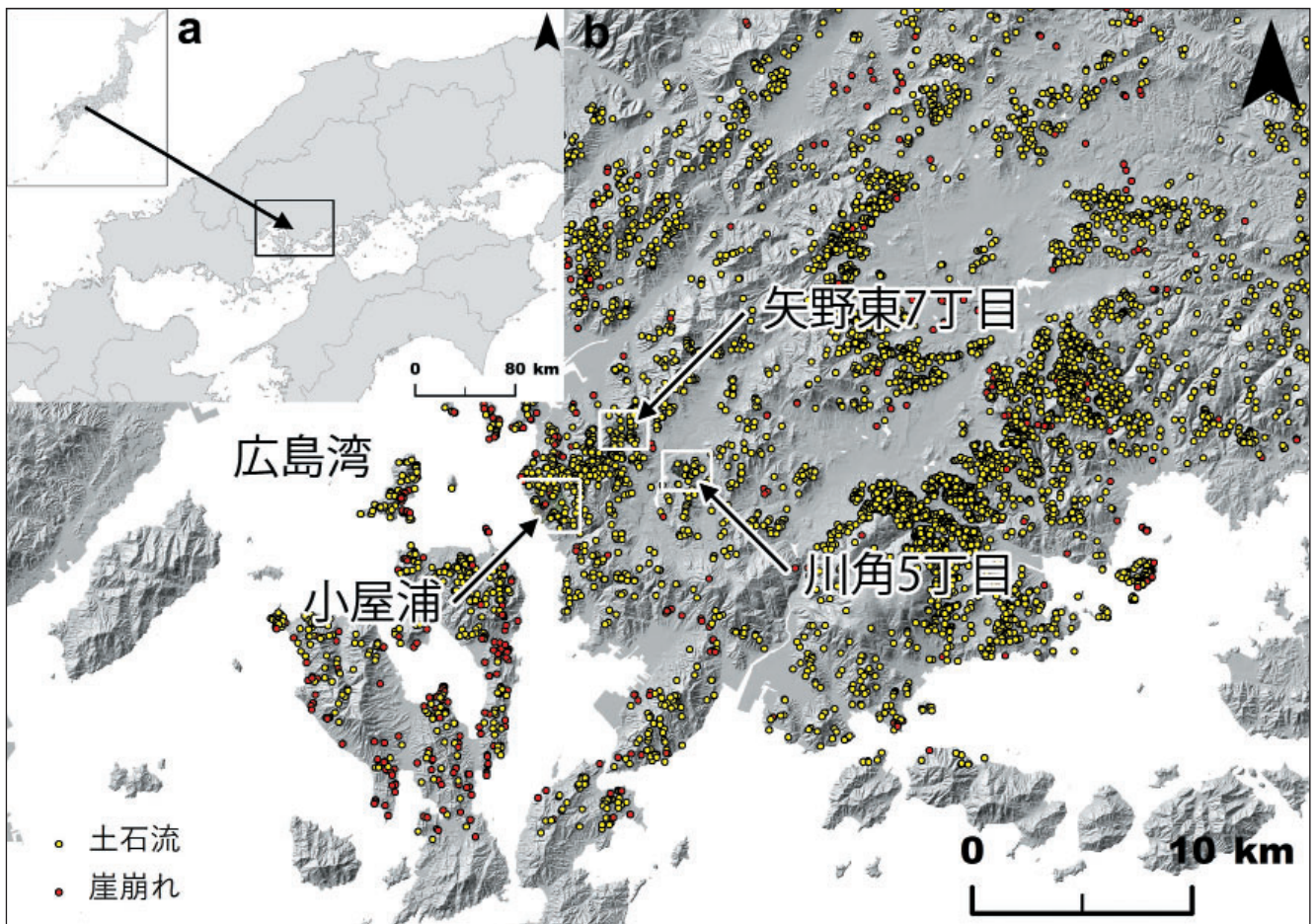


図1 対象地域(土石流・がけ崩れの位置は、広島大学平成30年7月豪雨災害調査団(地理学グループ)(2018)による) aは中部日本の広域図, bは搜索支援地図の作成対象地域(3章)の位置図

Fig. 1 Study area: (a) Chugoku district, Japan. (b) Study area in Hiroshima Prefecture.

1.3 平成30年7月豪雨災害の概要

平成30年7月豪雨(気象庁名称, 同年7月9日命名)は, 平成30(2018)年6月28日から7月8日にかけて, 台風第7号および梅雨前線等の影響により, 西日本を中心として, 北海道や中部地方を含む全国の広い範囲で生じた豪雨である。この豪雨により多数の斜面崩壊が発生し, 悉皆的な調査が行われた。これによれば, 中部地方から四国地方において, 広島県南部では少なくとも8,497個所(広島大学平成30年7月豪雨災害調査団(地理学グループ), 2018), 愛媛県では少なくとも3,410個所(平成30年7月豪雨愛媛大学災害調査団(地理学グループ), 2018)の斜面崩壊が発生したとされる。また, 人的被害としては, 広島県の115名を最多として, 全国14府県で237名の人命が失われた(内閣府, 2019)。

2. 目的

本研究では, 災害現場で活動する機関への情報提供の取り組みを通じて, 災害対応における無人航空機の活用方法および有効性について実証することを目的とする。この目的を達成するために, 災害発生後の初期段階において, 捜索救助活動を行っている広島市消防局に対し, 現場の被害状況を示した空間分解能が高い情報プロダクトを迅速に提供した。また, その活用方法について助言を行った。この情報プロダクトを, ここでは捜索支援地図と呼ぶ。捜索支援地図は, 災害後のオルソモザイク画像を背景図として配置し, 住宅の形状を示す地図レイヤーを重ね合わせた地図を原型とした。捜索支援地図は, 現場の情報ニーズに応じて, 例えば地表面の高さ変化図(内山ほか, 2014a)や, 落水線, 等高線などの他の地図レイヤーが追加されることもある。

2.1 捜索支援地図の情報価値

無人航空機の災害対応における活用方法および有効性の検証に向けて, 次のように捜索支援地図に期待される主要な情報価値を想定する。

災害現場の最前線では, 土石流などにより地表面の状態が著しく乱されており, 既存の地図が用を為さない状況が生じる。また, 人間が容易にアクセスできない場所や, 地上の視点からは見えない場所も多く, 現場の全体像を把握することが難しい。こうした状況把握の困難さは, その後の活動の意思決定の難しさを生む要因にもなる。そこで, こうした災

害現場に捜索支援地図を迅速に提供することにより, 次の4点の情報価値を用いた活動の展開が想定される。

- (1) 状況把握: 捜索対象範囲の被害状況として, 被害を受けた範囲, 内容, 程度を把握することができる。これにより, 被害状況の全体像の把握が可能となる。これには, 土砂や瓦礫に囲まれた中で, 既存の地図と対比できる明確な目標物が得られない状況での, 現場活動者自身の自己位置の把握も含まれる。
- (2) 存在可能性の検討: 要救助者が存在する場所や存在する可能性の高さを, 建物の損壊や土砂堆積状況などの被災状況から推定することができる。これにより, 捜索地点の絞り込みや, 捜索優先度の検討が可能となる。
- (3) 安全管理: 再崩壊の可能性や, その場合の土砂の到達範囲の検討など, 活動場所における二次災害リスクを評価することができる。これにより, 二次災害の危険度に応じたゾーニング(立ち入り禁止エリアの設定)や安全監視員の配置を行うために必要な情報の取得が可能となる。
- (4) 捜索実績の管理: 捜索範囲の分担場所や, 捜索を行った場所を正確に把握することができる。これにより, 不要な繰り返し捜索を避け, 効率的な捜索救助活動の展開が可能となる。

3. 対象地域

広島市消防局の要請により, 広島県広島市安芸区矢野東7丁目, 広島県安芸郡熊野町川角^{かわすみ}5丁目, 広島県安芸郡坂町小屋浦の3地区を対象として, 捜索支援地図の作成を行うこととなった(図1)。なお, 広島市消防局が消防事務の事務委託を受けている同県熊野町および坂町での災害対応についても, 同消防局を主体とした活動が行われた。広島市消防局の管轄内では, 同災害により平成31(2019)年3月現在, 53名の死者および3名の行方不明者が生じた(広島市長談話, 2019)。

4. 手法

4.1 人工衛星・航空機のような既存手法の課題

人工衛星・航空機のような既存手法には, 大別して2つの課題がある。1つは空間分解能が低いこと, もう1つは適時性の問題, つまり撮影タイミングや

撮影場所を任意に決めることができないことである。

検索支援地図の情報価値(2.1節)を得ようとする場合、検索支援地図の背景に用いる災害後のオルソモザイク画像には、地表面の状態が詳細に読み取れるだけの高い空間分解能が求められる。しかしながら、人工衛星や航空機のような既存手法で得られる画像は、例えば地理院地図(国土地理院)で提供されるオルソモザイク画像にみられるように、その空間分解能は60cmであり、これでは空間分解能や画質が十分に高いとはいえない(図2)。さらに、撮影の実施そのものや、撮影を行う場合であっても範囲、時期・タイミングは、人工衛星や航空機の運航者の意図により決定され、個々の現場の要請が必ずしも反映されるとは限らない。また、人工衛星や航空機は、天候条件に恵まれて撮影機会が得られた場合には、広範囲の情報を取得することが可能だが、特に豪雨災害のように雨天の傾向が強い災害の場合、雲の影響を受けて撮影ができない地域が生じる。

4.2 無人航空機を活用した検索支援地図の作成

こうした既存手法の弱点を補完するため、運用が簡便で機動性が高く、10cmを超える高い空間分解能を迅速に得られる無人航空機を使用した。災害現場では、無人航空機により垂直写真を撮影し、その場で SfM (Structure from Motion) 多視点ステレオ写真測量による解析(以下、UAV-SfM)を行い、オルソモザイク画像を作成した。検索支援地図は、UAV-SfMにより作成した災害後のオルソモザイク画像を背景として使用し、これに住宅形状および表札情報を持った住宅地図(株式会社ゼンリン)のラスタデータをオーバーレイ(重ね合わせ)して作成した。住宅地図ラスタデータは、冊子体の住宅地図をスキャンし、GISでジオリファレンス(位置情報の付与)を行うことにより作成した。

検索支援地図の提供に加えて、現場の搜索救助活動の進展に応じて、地図から情報を読み取る方法について助言を行った。さらに、広島市消防局以外の災害対応機関との情報共有を行うため、UAV-SfMにより作成した災害後オルソモザイク画像について、防災科学技術研究所の災害情報集約・共有システムである NIED-CRS (クライシスレスポンス Web サイト)で配信を行なった。

無人航空機には DJI Phantom 4、自律飛行制御ソフトウェアには、Map Pilot for DJI、SfM 解析ソフトウェア

には Agisoft PhotoScan Professional Edition Version 1.4.2 build 6205、GISには ESRI ArcGIS Desktop、コンピュータには Apple MacBook Pro (15-inch, 2017) をそれぞれ使用した。



図2 地理院地図(国土地理院)での災害後オルソモザイク画像(正射画像)の表示例

最大ズームレベル(ズームレベル18、空間分解能は60cm)で表示した状態。これ以上拡大して詳細を確認することはできない。また、土石流の堆積土砂が広がる場所で、サチュレーション(白とび)を生じており、地表面の状態を読み取ることもできない。

Fig. 2 Ortho-mosaic images from after the disaster on GSI-Maps (web map service).

5. 結果

平成30(2018)年7月10日、対象とした3地区(図1)について、UAV-SfMによる災害直後のオルソモザイク画像の作成を行った。UAV-SfMによる作業と並行して、広島大学の地理学グループ(6名)の協力により、住宅地図ラスタデータの作成が行われた。これらのデータを統合し、検索支援地図を作成した。検索支援地図の印刷物とPDFデータは、同日21時ころまでに消防局への提供を完了した。ここでは、検索支援地図の作成までに実施した作業、および地図の活用について、6節に分けて詳細を述べる。

5.1 事前準備：無人航空機の飛行調整

平成30(2018)年7月10日早朝より、広島市消防局の車両に同乗し、対象地域にアクセスした。その移動中、広島県災害対策本部の航空調整班に対し、広島市消防局の要請として無人航空機の飛行調整を行なった。主な調整内容は、飛行目的(要救助者の搜索)、飛行高度(飛行中の最大到達高度)、飛行時

間であった。この中で、無人航空機の飛行時間を30分間とし、これを厳守するよう要請を受けた。同時に、無人航空機は有人航空機から目視が困難であることをふまえ、現場付近を飛行する有人航空機に対し、無人航空機の飛行情報の提供を依頼した。この時期には、有人航空機によるホイスト(吊り上げ)救助はほぼ完了しており、有人航空機の飛行は、主として、物資や人員の輸送、地上の状況把握、マスコミによる取材を目的として行われていた。こうした一連の調整の結果、無人航空機の飛行時間中に、飛行空域内に進入する有人航空機はみられなかった。

5.2 UAV-SfMによるオルソモザイク画像の作成

飛行計画の立案および機材の選定は、限られた飛行時間内に情報の取得を完了させることを目標として行った。飛行時間が厳しく制限されるため、飛行可能な範囲はおのずと限定される。そこで、できるだけ広範囲のオルソモザイク画像を作成するために、写真一枚あたりの撮影範囲を大きくすることを優先させた。使用した機材(4.2節)のカメラの画角は94度であり、対地高度150mでの垂直直下方向の計算上の撮影範囲は、横約258m、縦約194m、空間分解能は6.5cmであった。この空間分解能は、Webマップサービスのズームレベルではレベル21(空間分解能7.5cm)に相当する。今回の活動では、NIED-CRS(5.6節に後述)のWeb地図で公開することをあらかじめ想定し、NIED-CRSで利用可能な最大縮尺に対応した空間分解能が得られることを、飛行計画段階で確認した。

現場でのUAV飛行および撮影は、すべて自律飛行により行った。対象地域は土石流災害が生じた急峻な山岳地であるため、自律飛行制御アプリにより、地形標高を考慮して対地高度を一定に維持した状態で飛行させた。写真は、白飛びや黒つぶれに強いRAW画像で撮影を行った。ただし、RAW画像はファイルサイズが大きく、データの書き込みにかかる時間が長いので、高速で飛行させると写真が欠落することがある。このため、小屋浦地区(図1)は要請された撮影範囲が広いことから、ファイルサイズが小さく速い飛行速度でも記録可能なJpegフォーマットで撮影を行った。また、飛行中の環境光の変化(例:部分的に雲がかかり暗くなる)に合わせて、シャッタースピードを手動で調整することにより、適切な露出を維持した。

SfM解析は、AC電源が利用可能な移動中の車両内で行った。各地区のオルソモザイク画像は、撮影から1時間以内に作成を完了した。SfM解析でのジオリファレンスは、写真のEXIFに付された撮影位置情報を、SfMの外部評定要素として使用することにより行った。この位置情報は、一周波コードシグナルかつ補正情報なしの単独測位GNSS(Global navigation satellite systems: 全球測位衛星システム)により取得されており、期待される水平位置精度は5mである。今回は、オルソモザイク画像の作成を優先目標としたため、地上基準点の設置のような、より高精度な位置情報の付与は実施しなかった。結果として、いずれの地域でも水平方向のズレは1m以内に収まり、ほかの地図レイヤーとの位置ずれなどの、実用上の問題は生じなかった。

次に、各地区でのUAV-SfMの実施結果をまとめる。撮影範囲、空間分解能および解析時間の数値は、SfMソフトウェアが出力した値である。

(1) 矢野東7丁目(広島県広島市安芸区, 図3)

飛行時間は11:35から11:53までの18分間、飛行回数は1フライトであった。RAW画像として、128枚を撮影した。SfMソフトウェアでの総解析時間は14.8分、撮影範囲は、0.682 km²、空間分解能は7.55 cmであった。

(2) 川角5丁目(広島県安芸郡熊野町, 図4)

飛行時間は13:45から14:14までの29分間、飛行回数は2フライトであった。RAW画像として、338枚を撮影した。SfMソフトウェアでの総解析時間は14.3分、撮影範囲は、0.686 km²、空間分解能は7.44 cmであった。

(3) 小屋浦(広島県安芸郡坂町, 図5)

飛行時間は15:42から16:22までの30分間、飛行回数は2フライトであった。Jpeg画像として、368枚を撮影した。SfMソフトウェアでの総解析時間は33.1分、撮影範囲は、1.38 km²、空間分解能は7.43 cmであった。

5.3 住宅地図ラスタデータの作成

住宅地図のラスタデータは、広島市消防局が所有する冊子体の住宅地図から、対象地域の各ページをスキャナーで読み取り、GISでジオリファレンスを行うことにより作成した。この方法では、該当する全ページをジオリファレンスする必要があるため、長時間の作業を要する。対象範囲があまりに広い場

合、搜索救助活動で求められるタイミングで作業を完了できない場合もある(例えば、内山, 2018a)。今回は、7月9日深夜より、広島大学地理学グループの夜を徹した協力により、7月10日の夕方までの比較的短時間で、住宅地図のラスターデータ化を完了させることができた。

住宅地図ラスターデータは、広島市消防局が所有する冊子体の住宅地図を利用して作成されたため、同局以外の機関で利用することはできない。このため、住宅地図ラスターデータを使用して作成した地図には、広島市消防局以外は利用できない旨を、地図の注釈として示した。また、同地図の災害時の利用における複製許可については、冊子体の所有者である同局に依頼した。

5.4 搜索支援地図の作成

7月10日の夕方までに、UAV-SfMによる災害後オルソモザイク画像の作成(5.2節)、および住宅地図ラスターデータの作成(5.3節)が完了し、同日の18時ころから、広島市消防局の一角において、搜索支援地図の作成を開始した。搜索支援地図を構成する地図レイヤーには、次のデータを使用した。なお、基盤地図情報とは、国土地理院が整備する日本全国の地理空間情報である。

- (1) テキストレイヤー(地図名, 地域名, 作成者, 作成日時, 撮影日, 住宅地図の利用に関する注意事項(5.3節))
- (2) スケールバー(50 m 間隔)
- (3) 200 m 格子の方眼線
- (4) 行政区画の境界線(基盤地図情報)
- (5) 建築物の外周線(基盤地図情報)
- (6) 住宅地図ラスターデータ
- (7) 災害後オルソモザイク画像

同日21時ころまでに、縮尺1:1,500の印刷図として3地域の搜索支援地図が完成した。この縮尺は住宅地図と同じである。このため、現地指揮所等では、住宅地図に重ねた透明シートに情報を書き込んで使用することがあるが、こうした現地での活動情報を、そのまま搜索支援地図に重ねて使用することができる。加えて、消防局内でも印刷ができるように、A3サイズに分割したPDFも合わせて提供した。PDFは、上記の各レイヤーの表示・非表示をユーザーが選択できる形式で作成した。矢野東7丁目および川角5丁目は、全域図を合わせてA3サイズでそれ

ぞれ5ページ、小屋浦地区は、同じ構成で15ページとなった。本稿では、著作権の都合上図示できない住宅地図ラスターデータを除き、作成した搜索支援地図の一部を図3から図5に示す。

5.5 搜索支援地図の活用支援

搜索救助の現場では、土石流によって地表面の状態が大きく変化していた。この中で、地形や地物の災害前後の変化を把握するためには、災害後のオルソモザイク画像に写る土石流の痕跡を観察して、地表の変化を丁寧に読み解く必要がある。今回作成したオルソモザイク画像は空間分解能が高いため、地表面の変化に関して得られる情報量が多い。一方で、オルソモザイク画像の場合、高さ方向の情報を読み取ることが難しい。したがって、地表面の変化に関する情報の判読(地図の読み取り)には、土石流の性質に関する基礎的な知識と、真上からの視点の画像を用いた判読に対する慣れも求められる。実際に、現場では、河川の流向を逆方向に判読した例もみられた。こうしたことから、要救助者の位置推定(2.1節)に関連して、災害後のオルソモザイク画像から判読できる地表面の変化について助言を行った。

要救助者の位置推定には、流失した家屋の場所、埋没した家屋の場所、土砂の流れ止まりの場所などについて、それらの位置を把握することが効果的とされる(消防庁, 2015)。ここでは、災害後のオルソモザイク画像を用いて、図6のAからFに着目して判読を行った。最初に、谷の出口(扇状地の扇頂、図6のさらに上流部)から流出した土石流の流路変化に着目した。土石流の発生初期は、既存の小河川を流下したと考えられる(図6のA)。小河川の位置は、災害前の各種地図で確認できる。小河川は、土石流が運んできた土砂、巨礫、流木により埋積された(図6のB)。この埋積は、小さな橋梁(図6のC)の存在がきっかけになった可能性がある。小さな橋梁の周辺には流木が折り重なり、10 mを超える巨礫の分布もみられた。つまり、橋梁により流木や大径の礫が補足され、小河川の埋積が進んだものと考えられる。そして、元の流路を失いあふれた土石流は、東側に新たな流路を形成したと考えられる(図6のD)。この時、新たな流路に接する家屋の一部が、土石流により破壊された(図6のE)。新たな流路は、橋梁(図6のC)を回り込み、元の小河川に合流する経路を流下した。橋梁を回り込んだ土石流は、ここ

でも家屋の一角を破壊した(図6のF)。土石流の堆積物のサイズに着目すると、流路変化のきっかけとなった橋梁(図6のC)を境にして、上流側では巨礫や流木が多く、下流側では泥状のより細粒な堆積物が認められた。これらの点から、上流から流されたものは、橋梁付近(図6のC)とその上流側に残される可能性が高いと考えられる。

この例のように、元の河川の埋積とそれに伴う流路変化、家屋が破壊されたタイミング、土砂に含まれる礫のサイズの違いによる、土砂の流れ止まり位置と堆積物の厚さの想定など、UAV-SfMによる災害直後のオルソモザイク画像から判読できる内容について、解説と助言を行った。なお、煩雑になるため本稿では図示しないが、これらの説明において、元の河川の位置と河川の流量を視覚的に表現する目的で、基盤地図情報数値標高モデル(10 m メッシュ)(国土地理院, 2018)を利用して、GISの「累積流量ラスタの作成」ツールにより、落水線図を作成した。

5.6 NIED-CRS での配信

NIED-CRS の原型は、内山ほか(2012)が自然災害情報の総体的なアーカイブを目的に考案し、防災

科研クライシスレスポンス Web サイト(内山ほか, 2014b; 内山ほか 2015)として試行的に運用されていた、災害関連情報の統合と発信を目的とするシステムである(内山ほか, 2016)。現在は、防災科研のコアコンテンツの1つとして、総合防災情報センターにより運営されている(佐野ほか, 2018)。

このような経緯から、現地で作成した災害後オルソモザイク画像について、NIED-CRS で速やかに公開することをあらかじめ想定して、飛行計画および現地作業を行った。作業後、災害現場からつくばの担当者に UAV-SfM により作成したオルソモザイク画像を送信する際には、携帯電話回線を利用した。データ量を削減するため、オルソモザイク画像のデータ形式を、3 地域で合計約 4 GB になる GeoTIFF 画像から、3 地域で約 130 MB のワールドファイル付き Jpeg 画像に変換した。UAV-SfM によるオルソモザイク画像が公開された NIED-CRS の Web サイトでは、他機関の情報プロダクトとともに一覧で表示されるほか(図7)、それらの情報プロダクトと、任意に重ね合わせて閲覧する機能が提供されている。

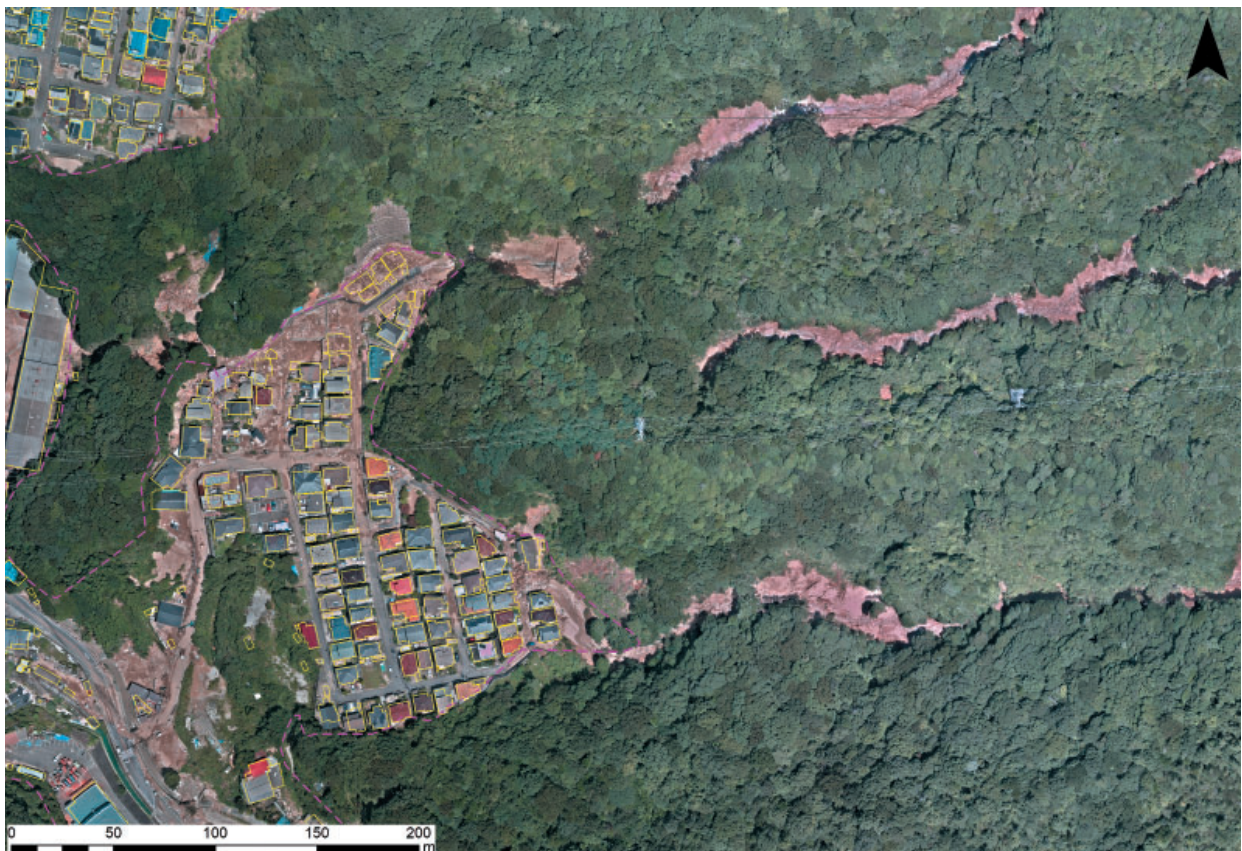


図3 矢野東7丁目(広島県広島市安芸区)の搜索支援地図の一部(住宅地図は非表示)
Fig. 3 A part of the support map for search and rescue in Yano Higashi 7, Hiroshima.



図4 川角5丁目(広島県安芸郡熊野町)の捜索支援地図の一部(住宅地図は非表示)
Fig. 4 A part of the support map for search and rescue in Kawasumi 7, Kumano.



図5 小屋浦(広島県安芸郡坂町)の捜索支援地図の一部(住宅地図は非表示)
Fig. 5 A part of the support map for search and rescue in Koyaura, Saka.

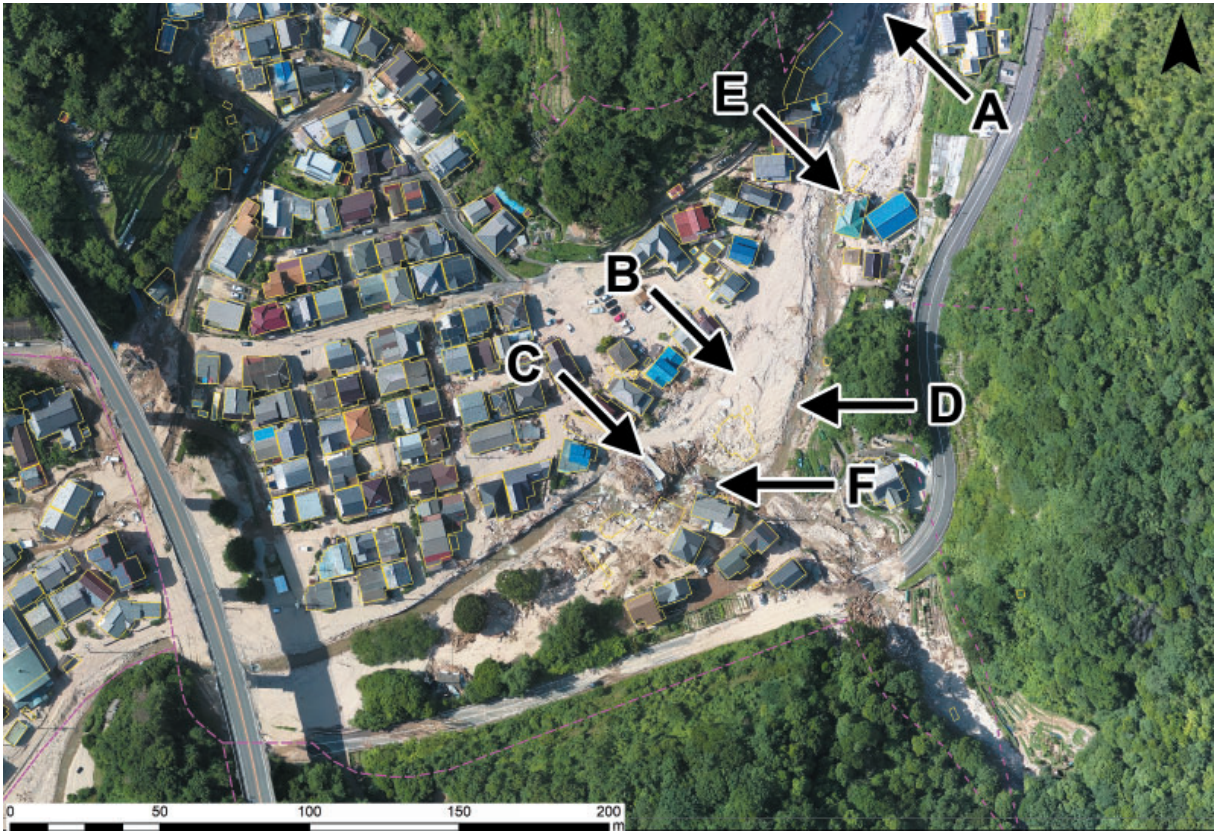


図 6 搜索支援地図活用の支援のための土石流による地形変化の読み取り例
 A：既存の小河川，B：埋積された既存の小河川，C：流木や巨礫を補足した小さな橋梁，D：土石流により形成された新たな流路，E，F：新たな流路を流れた土石流により破壊された家屋の一部

Fig. 6 Interpretation of surface changes by debris flow.



図 7 NIED-CRS での UAV-SfM による災害後オルソモザイク画像の配信 (小屋浦地区の例)

Fig. 7 Web-provided ortho-mosaic image on NIED-CRS (Web map service)
 URL: <https://crs.bosai.go.jp/>

6. 考察

今回の搜索支援地図の作成と活用を通して得られた結果から，無人航空機の災害対応における活用方法および有効性を 4 節に分けて考察する。

6.1 インテリジェンスの抽出：無人航空機の活用に必要な技能

搜索支援地図を用いることにより，災害現場の概略的な状況把握や，現場作業者の自己位置の把握 (2.1 (1) 項)，搜索実績の管理 (2.1 (4) 項) は，専門的な判読の技能がなくとも，比較的容易に実行可能と考えられ，実際に，そのような用途で助言を求められることはなかった。しかしながら，要救助者の存在可能性の検討 (2.1 (2) 項) については，土石流による地表面の変化を，地図から読み取る必要があった (5.5 節)。今回は実施されなかったが，安全管理 (2.1 (2) 項) でも同様の難易度の判読が必要と考えられる。判読の結果，すなわち UAV-SfM によるオルソモザイク画像から読み取った情報の評価の結果は，現場活動の意思決定に直接的に用いられるものであり，

こうした情報はインテリジェンスと呼ばれる(例えば、内山, 2018b)。ここから、災害時における無人航空機の活用は、意思決定に利用できる情報の取得、すなわちインテリジェンスの抽出によって実現されると考えられる。多くの場合、5.5節で示したように、インテリジェンスは、搜索支援地図から目的とする情報を、利用者自身が能動的に読み取ることによって抽出される。つまり、情報プロダクトから何らかのインテリジェンスを得るためには、情報プロダクトの利用者には、判読を行う目的、および地図判読能力の双方が求められる。逆にいえば、明確な目的もなく単に無人航空機を飛行させて撮影するだけでは、無人航空機で得た情報の活用に至ることは難しい。同様に、地図判読能力がない状態で災害後のオルソモザイク画像が得られただけでは、インテリジェンスを抽出することができず、情報が有効活用される機会は生じないだろう。

これらの知見から、現在の無人航空機の運用教育に欠落している視点として、無人航空機活用の原点ともいえる次の2点を指摘できる。1つは、災害対応における無人航空機の活用には、地図の判読をはじめとした基礎的な空間情報の取り扱い技能が求められる。もう1点は、そうした空間情報の取り扱い技能を、一般社会人が後発的に学ぶ機会や、学ぶべき知識体系が、現時点ではほぼ存在しない。現在の多くのドローンスクールでは、無人航空機の基礎的な操縦やメンテナンスを学習するプログラムが提供されているが、空間情報の活用などはその教育プログラムの範疇にはない。例えるならば、自動車学校での運転技能の習得と同様の状況である。したがって、空間情報の取り扱いのような、災害対応に本来必要とされる応用技能を学ぶ機会を得ることは、現時点では容易ではない。この課題に対して、中長期的には、搜索救助活動の最前線で必要とされる情報を自動で抽出する技術の研究開発も必要と考えられる。一方で、無人航空機そのものの現場への配備は、インテリジェンス抽出の技能、すなわち情報価値の本質的な理解よりも先行して進んでいる。このため、既に配備されている無人航空機を有効に活用するためには、基礎的な地図の判読に関する知識の体系化や災害対応機関に向けた知識の普及といった、「飛ばせる、その先へ」(内山, 2018b)を意識した社会実装の取り組みの実践が求められる。

6.2 最前線で必要とされる情報の空間分解能

土石流がもたらした地表面変化の判読には、空間分解能 7.5 cm の UAV-SfM により作成したオルソモザイク画像が有効であった(5.5節)。空間分解能 60 cm の地理院地図(図2)では、分解能が低く、画質も十分ではないため、5.5節で示した内容を判読することは困難である。このように、搜索救助活動に必要なインテリジェンスの抽出には、高い空間分解能を持った情報プロダクトが求められる。

必要とされる情報プロダクトの空間分解能は、上位から下位まで存在する災害対応関係者の意思決定レベル(図8)の性質によって異なると考えられる。実際に、NIED-CRSで収集された情報プロダクトには、様々な空間分解能のデータが並存している。図8に災害対応の意思決定レベルにおける従事者数と、それぞれのレベルで求められる情報の集約度・詳細度の関係を概念的に示した。この図では、三角形の上に向かうほど、情報プロダクトに求められる空間分解能は低くなる一方で、情報プロダクトは集約的、概念的な性質を持つようになる。これに対して、三角形の下側では、災害の全体像のような大局的な情報は、現場の意思決定においてさほど有用ではなく、破断した道路の段差の高さ、住宅の表札情報、転がっている礫のサイズと分布のような、その現場でしか利用されないような、詳細で高分解能な情報が求められることを表している。同時に、大規模な災害になるほど、三角形の下側に属する現場の

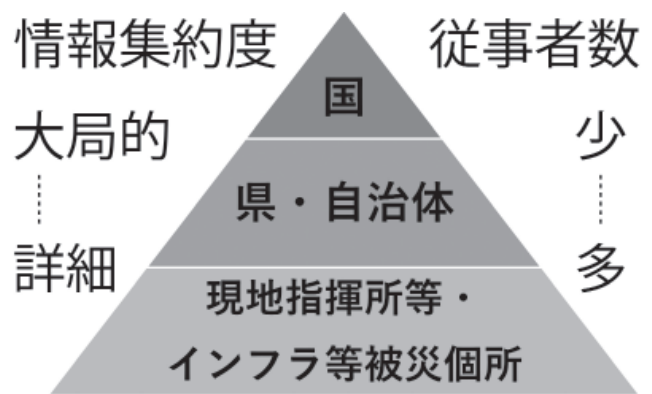


図8 災害情報の三角形
災害対応の意思決定レベルにおける従事者数と、それぞれのレベルで求められる情報の集約度・詳細度の関係を概念的に表したもの

Fig. 8 Conceptual diagram of number of persons in disaster response and resolution of information product required.

数は多くなり、それぞれの現場において、個別に異なる情報取得ニーズが発生することが示唆される。現在のところ、情報収集の簡便性、コスト、機動性の観点で考えると、人工衛星や航空機ではこれらのニーズを完全に満たすことは難しい(4.1節)。このため、個別の現場の高分解能な情報取得という目的において、現状では無人航空機が最適なツールの1つと考えられる。

6.3 情報展開の迅速性

搜索支援地図は、搜索救助活動の意思決定において有効と考えられるが、こうした情報プロダクトが現場に提供されるタイミングが遅ければ、その効果は低下する(内山, 2018a)。生存救助の可能性を高めるには、少しでも早い現場への情報展開が求められる。現時点では、5.2節で示したように、UAV-SfMによる災害直後のオルソモザイク画像の作成に限れば、撮影終了後の1時間以内には完了できる。もし、あらゆる現場で、このスピードで災害後のオルソモザイク画像が得られるならば、実用上、十分に迅速といえるだろう。したがって、迅速性の観点では、無人航空機の飛行やSfM解析に要する時間に関して、大きな課題は存在しないといえる。しかしながら、災害後のオルソモザイク画像を利用して、搜索支援地図を作ろうとした場合には、UAV-SfMに加えて別の地図作成プロセスが必要となり、それぞれのプロセスにおいて、迅速性を阻害する要因(ボトルネック)が存在する。本節では、5つのボトルネックを挙げて考察する。

なお、6.3.3項から6.3.5項、および6.4節は、地図データの作成や情報プロダクトの利用、それらの運用に関する課題と共通の知見でもある。これらについて、本稿では、無人航空機を用いた災害対応の流れの中で説明を行う。

6.3.1 現地へのアクセス

無人航空機を飛行させるには、機材を携えた撮影人員が現場付近まで移動する時間が必要になる。災害時には、渋滞などの交通状況により、目的地までのアクセスに長時間を要する場合がある。撮影人員が緊急走行のできない車両で移動する場合、移動時間を短縮することは難しい。今回対象とした3つの現場への道中は、いずれも渋滞が激しく、一般車両では、短時間で到着は困難であったと思われる。近年、自治体と民間企業等との間で、災害時にお

ける無人航空機の飛行に関する協定が締結される例が多くみられる。しかし、緊急走行ができない一般車両では、現地へのアクセスに多大な時間を要する可能性があることをあらかじめ念頭において、災害時の連携を検討する必要がある。また、長期的には、こうした民間の緊急対応車両の扱いについて、法的な制度の整備も必要かもしれない。また、本研究では、茨城県つくば市から広島県広島市までの移動だけで半日を消費した。本研究のように、撮影機材と撮影者が遠隔地に在住している場合、要請を受けてから現地到着までに要する時間の長さも無視することができない。これらのことから、災害対応は、例えば食品の地産地消のように、地元の力で対応できる、いわば「地産地防」の体制を構築していく必要がある。このためには、無人航空機の飛行に加えて地理空間情報の取り扱いができる技能を持った人材の育成が急務である。

6.3.2 情報の取得

一般的に無人航空機の飛行時間は長くはない。しかし、撮影範囲が広くなれば、それに比例して撮影時間も長くなる。このため、インテリジェンスの抽出に必要な空間分解能を保ちつつ、飛行時間を減じ、撮影範囲を広げる工夫が求められる。本研究では、空間分解能7.5 cmのオルソモザイク画像を作成したが、この空間分解能であれば、現場活動に有用な情報の判読に支障はなかった(5.5節)。逆に、これより高い空間分解能の画像を撮影したとしても、判読できる内容や正確性が劇的に向上するとは限らない。あるいは、過剰に空間分解能を高めることにより、撮影時間やSfM解析時間が長くなったのでは、迅速性の確保や限られた時間内での情報展開という点では、本末転倒となる。また、7.5 cmという空間分解能は、Web地図サービスのズームレベル21に相当するため、Webでの情報共有にも最適であった。これらの点から、空間分解能7.5 cmという値は、搜索支援地図やそれに類する情報プロダクトに求められる空間分解能の1つの基準として用いることができるのではないかと。

最新の無人航空機では、搭載されるカメラの撮像素子の画素数が大きいことから、航空法上の許可・承認無しで飛行可能な対地150 mの高度では、空間分解能が3 cmよりも詳細な機種もある。この場合、飛行高度をより高く設定することにより、広範

囲を効率的に撮影することができる。ただし、対地150 mを超える空域を飛行させる場合は、空域を管理する空港事務所等へ通知しNOTAM(有人航空機に対する航空情報)を発行すること、および場合によっては、事前に航空法上の許可・承認が必要となる。あるいは、より画角の広いレンズを使用することにより、空間分解能は低下するが、撮影範囲を広くする方法も選択肢として挙げられる。本研究では、画角94度の広角カメラを利用し、十分な空間分解能が得られた(5.2節)。なお、画角が90度を大きく超える広角レンズの場合、SfM解析に支障が生じるおそれがあるため、過度に広角な機材選定は、必ずしもメリットとはならない(内山, 2014c)。

6.3.3 地図レイヤーの加工・分析

紙の地図をスキャニングし、ジオリファレンスして地図レイヤーを作成する場合、その作業には長時間を要する。しかし、代替手法がないことから、今回の搜索支援地図作成では、この方法で住宅地図ラスタデータを作成した(5.3節)。今回に限っては、作業には、広島大学地理学グループの協力を得ることができたため、UAV-SfMの作業と同日にデータが完成したが、もしこの助力がなければ、住宅地図ラスタデータのオーバーレイはあきらめざるを得なかったであろう。また、住宅地図は民間企業の製品のため、著作権の処理にも時間を要する場合がある。このため、緊急時の利用に関して、利用主体(今回の場合は、広島市や広島市消防局)が、災害の発生前に当該企業との調整を行っておくことが望ましい。住宅地図が利用できない場合は、基盤地図情報の基本項目(国土地理院)の「建築物の外周線」データをオーバーレイすることにより、被災家屋の位置や戸数といった災害状況が明確に表現される(例えば、図3から図6)。基盤地図情報は無料で、Webからいつでも入手できる。基盤地図情報は、地図レイヤーの作成に要する時間を短縮し、搜索支援地図の情報価値を高めることができる点で有用である。

6.3.4 地図調製

搜索支援地図の特性や使用方法について、その利用者に対し、必ずしも作成者自身が口頭で説明できる機会があるとは限らず、また、作成者の関与しないところで外部機関と共有され、利用される可能性もある。このため、地図のタイトルや用途、凡例、縮尺、作成者名や注意事項など、搜索支援地図の基

本情報を明らかにするために、地図調製(レイアウト)が必要になる。この作業は単純ながら、数時間の作業を要する(5.4節)。一方で、Web地図のようなデジタルメディアの場合、こうした工程の多くを必要とせず、情報の作成後、速やかに現場に情報を展開できる可能性がある。このため、今後の搜索支援地図の有効性の実証研究では、防水・防塵のタブレットPCでの情報提供など、紙地図以外の情報提供の選択肢を用意することも、検討する必要がある。

6.3.5 地図成果のロジスティック(流通)

完成した搜索支援地図を印刷して使用する場合、その印刷作業と、印刷場所から災害現場までの印刷物の輸送に、それぞれ時間を要する。印刷作業では、印刷速度の速さや耐水性・耐久性の観点から、レーザープリンタの利用が主体となる。しかし、レーザープリンタは大型で消費電力も大きいことから、通常は消防署などの拠点施設で印刷し、その後、各隊が活動する災害現場まで輸送することになる。近年は、コンビニエンスストアでのプリントサービスも一般化していることから、こうした施設を印刷拠点として利用することで、輸送にかかる時間を大幅に短縮できる可能性がある。あるいは、前項でも述べたように、デジタルメディアの活用も、データ流通にかかる時間やコストを削減するうえでは、有用な選択肢となりうる。

6.4 他機関との情報共有

搜索救助の現場では、警察や自衛隊、NPO法人などと連携して活動が行われる場合がある。したがって、搜索地点の検討や活動場所の分担などは、当該機関の協議により決定される。この時、現場活動に利用できる共通の地図があれば、参加機関の意思疎通に有用であることは論を待たない。ただし、情報プロダクトを他機関と共有する場合には、著作権の問題を解消する必要がある。本研究では、搜索支援地図に使用した地図レイヤーの一部に、利用機関が限定された著作物(住宅地図)を使用していた。このため、現場での他機関との共有ができない事例があったという。しかし、緊急事態であっても、著作権を無視して情報プロダクトを取り扱うことはできない。また、高分解能なオルソモザイク画像の場合、写り込む個人情報に配慮する必要が生じることもある。このため、情報プロダクトの種類や性質に応じて、適切なアクセス権を設定し、可能な場合には、

CC BY 4.0 (クリエイティブコモンズ)のように、広く共有可能な著作権をあらかじめ設定することも検討すべきであろう。災害時には、情報プロダクトの作成者と連絡を取り、情報利用の許認可を交渉することは、時間的にも容易ではない。このため、著作権や公開の可否に関する意思を、情報プロダクトの注釈や説明とともにあらかじめ表示することは、迅速な情報共有や、情報の活用に有用である。

7. まとめ

本研究では、災害初期対応フェイズにおける無人航空機の活用をテーマとして、特に搜索救助活動に光を当て、そこで求められる情報プロダクトの有効性と課題について論じた。ここでは、平成30(2018)年7月豪雨により発生した土砂災害における、広島市消防局に対する搜索支援地図の提供をとおして、次の結論を得た。

- (1) 無人航空機の活用には、判読を通じたインテリジェンスの抽出が必要である。インテリジェンスは、意思決定に必要な情報を情報プロダクトから能動的に読み取ることによって抽出される。このことから、災害対応における無人航空機の活用には、空間情報の取り扱い技能が必要であることを指摘した。
- (2) 最前線の現場で求められるインテリジェンスの抽出には、無人航空機が有効な情報取得ツールとなりうる。土石流による被害の様相を判読するには、UAV-SfMにより作成した空間分解能7.5 cmのオルソモザイク画像が有効であった。現在のところ、情報収集の簡便性、コスト、機動性の観点において、人工衛星や航空機ではこれらのニーズを完全に満たすことは難しい。
- (3) 搜索支援地図が有効に活用されるためには、現場に情報展開するまでの迅速性が重要である。本研究で用いたUAV-SfMは、オルソモザイク画像の作成については、実用上十分に迅速であった。しかし、現地へのアクセス、情報の取得、地図レイヤーの加工・分析、地図調製、地図成果のロジスティック(流通)の各ステップにおいてボトルネックが指摘でき、これらを解消する工夫が必要である。
- (4) 他機関との情報共有を円滑に行うためには、著作権の問題をクリアする必要がある。災害時に

は、情報プロダクトの作成者に対する許認可を得る時間的余裕がなく、そのために情報共有に支障が生じる場合がある。これを意識して、情報プロダクトには適切な著作権をあらかじめ設定し、情報プロダクトの中にその意思表示を含めるべきである。

ここまで、本研究では搜索救助活動に焦点を当てて議論を行ったが、災害対応の初期フェイズには、様々な現場で、被害状況把握に向けた活動が行われる。それらは、アクセス困難地や、対象とする個所数が多いなど、情報取得には長時間を要する場合がある。加えて、そのような現場で活動できる人的資源は限られており、被害が広域的に発生した場合は、さらに人的資源が不足する。こうしたことから、生存救助率の向上を含め、地域や生活のより速い回復を実現するためには、安全かつ早期に災害対応の初期フェイズを完了するための技術の社会実装が課題となる。その広い社会実装には、最先端だが高コストで普及が困難かつ属人的な技術よりも、低コストで運用の容易な技術を中心とした普及戦略を構築するほうが、より現実的で、実現可能性が高い。現在、無人航空機の配備は進展しているが、その活用方法の普及が追い付いていない状況にある。「飛ばせる、その先へ」に向けて、本項で示した技術的な課題の解決に加えて、無人航空機活用の組織体制や、技術者を養成するための仕組みについても検討を進めたい。

謝辞

広島市消防局には、本研究の実施の機会をいただいた。また、本稿に記した一連の活動について、感謝状をいただいた。広島大学地理学グループには、住宅地図ラスタデータの作成においてご支援をいただいた。また、匿名の読者のコメントにより、原稿の質が向上した。ここに記して感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部(2018): 長期評価による地震発生確率値の更新について。
- 2) 内山庄一郎・井上公・後藤秀昭・中田高・井田康之・梅田篤(2014a): 平成26年8月豪雨による広島土石流災害における空撮写真を用いた搜索支援地図の作成。CSIS DAYS 2014, p.16.

- 3) 広島大学平成30年7月豪雨災害調査団(地理学グループ)(2018): 広島県南部の斜面崩壊発生地点の分布図第4報.
http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201807_report004.pdf, 2018年12月5日閲覧.
- 4) 平成30年7月豪雨愛媛大学災害調査団(地理学グループ)(2018): 愛媛県の斜面崩壊発生地点の分布図.
http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201807_report005.pdf, 2018年12月5日閲覧.
- 5) 内閣府(2019): 平成30年7月豪雨による被害状況等について(第32報).
http://www.bousai.go.jp/updates/h30typhoon7/pdf/310109_1700_h30typhoon7_01.pdf, 2019年3月20日閲覧.
- 6) 松井一實(2019): 広島市長談話. 平成30年7月豪雨の災害対応に関する感謝状贈呈式, 広島市.
- 7) 国土地理院(2018): 地理院地図.
https://maps.gsi.go.jp/#17/34.288371/132.520089/&base=std&ls=std%7C201807H3007gouu_sakachou_0711do&blend=0&disp=11&lcd=201807H3007gouu_sakachou_0711do&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0f1&d=v1, 2018年12月5日閲覧.
- 8) 内山庄一郎(2018a): 災害初期タイムラインにおける災害対応地図の作成と提供ー被害状況の把握のための迅速な航空写真地図化技術の開発ー. 防災科学技術研究所主要災害調査報告, No.51, 43-61.
- 9) 国土地理院(2018b): 基盤地図情報基本項目(行政区画の境界線, 建築物の外周線).
<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php>, 2018年12月5日閲覧.
- 10) 消防庁国民保護・防災部参事官付(2015): 平成26年度救助技術の高度化等検討会報告書: 土砂災害時の救助活動のあり方について(資料編).
- 11) 国土地理院(2018c): 基盤地図情報数値標高モデル(10mメッシュ).
<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>, 2018年12月5日閲覧.
- 12) 内山庄一郎・鈴木比奈子・堀田弥生(2012): 自然災害情報の総合的なアーカイブに向けて. CSIS DAYS 2012 研究アブストラクト集, p.9.
- 13) 内山庄一郎・鈴木比奈子・臼田裕一郎(2014b): 災害発生直後の迅速な情報把握に向けてー平成25年台風26号伊豆大島災害におけるクライシスレスポンス. 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, H-SC25-09.
- 14) 内山庄一郎・折中新・堀田弥生・半田信之・臼田裕一郎・田口仁・鈴木比奈子(2015): 防災科研のクライシスレスポンス: 自然災害情報の整理と集約. 第6回GIS-Landslide研究集会&第2回高解像度地形情報シンポジウム講演要旨集, p.17.
- 15) 内山庄一郎・堀田弥生・折中新・半田信之・田口仁・鈴木比奈子・臼田裕一郎(2016): 災害時における情報の統合と発信ー防災科研クライシスレスポンスWebサイトの取り組みー. 日本地理学会発表要旨集, No.89, p.262.
- 16) 佐野浩彬・佐藤良太・吉森和城・鈴木比奈子・花島誠人・奈倉登・半田信之・池田真幸・田口仁・李泰榮・臼田裕一郎(2018): 2017年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用. 防災科学技術研究資料, No.422, pp.56.
- 17) 内山庄一郎(2018b): 必携ドローン活用ガイド. 東京法令出版.
- 18) 内山庄一郎・井上公・鈴木比奈子(2014c): SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究. 防災科学技術研究所研究報告, No.81, 37-60.

(2019年6月6日原稿受付,
 2019年7月16日改稿受付,
 2019年7月17日原稿受理)

要 旨

災害対応の初期フェイズの早期完了は、地域社会や住民生活の速やかな回復において重要であり、そのための技術の社会実装は喫緊の課題である。本研究では、災害対応初期フェイズにおける無人航空機の活用方法を実証的に明らかにすべく、平成30年7月豪雨において、搜索支援地図の作成と提供を行った。これにより、次の結論を得た。(1) 無人航空機の活用には、意思決定に利用できる情報の能動的な判読、すなわちインテリジェンスの抽出が求められる。(2) 災害現場において、無人航空機は低コスト、簡便、迅速かつ空間分解能が高い、実用的な情報取得手段である。(3) 搜索支援地図の活用には、情報の現場展開の迅速性が重要であり、これを阻害する要因の解消が必要である。無人航空機の配備がインテリジェンス抽出の技能の普及よりも先行する中で、「飛ばせる、その先へ」を意識した、空間情報活用の知識の体系化と普及に向けた取り組みの実践が求められる。

キーワード：無人航空機，搜索支援地図，災害時の活用，広島県，平成30年7月豪雨