

河川砂防技術研究開発

【成果概要】

研究代表者		氏名(ふりがな)		所属		役職	
		永谷圭司(ながたにけいじ)		東京大学大学院 工学系研究科		特任教授	
技術研究 開発テーマ	名称	火山噴火時を想定した規制区域内の降灰厚分布調査システムの開発					
研究経費 (単位:万円)	令和元年度	令和2年度	令和3年度	研究経費 (単位:万円)			
端数切り捨て。	157万円	160万円	160万円	478万円			
研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)							
氏名		所属機関・役職(令和3年4月1日現在)					
白木繁克		東京農工大学大学院農学研究科 准教授					
羽田靖史		工学院大学工学部 准教授					
皆川淳		国際航業株式会社 主任技師					
島田徹		国際航業株式会社 事業企画担当部長					
銭谷彰		イームズロボティクス株式会社 代表取締役常務					
研究の目的・目標 (目的):噴火活動中の火山周辺域を想定し、無人機器によって火山灰堆積厚さを調査するシステムを開発し、現地での実証実験を通じてシステムの性能確認や運用上の課題などを整理・克服することにより、実際の噴火時に実用できるシステムを構築し、火山噴火に伴って発生する土石流による被害予測精度の向上に資することを目的とする。 (目標):本研究では、調査用デバイスの設置適地の抽出技術の開発と併せ、降灰厚計測デバイスの開発を目指す。 1) 調査用デバイスの設置適地の抽出技術 降灰エリアは、火山灰の噴出量・噴煙柱の高さ・噴火時の風向および風速などにより変化する。UAVは立ち入りの規制される火口周辺において地表の状況(画像)を取得できるので、この画像を利用してデバイス設置の適地抽出を行う。デバイス設置の適地は、設置の障害要素の無い場所と考え、急勾配、植生、地表の凹凸などの障害要素をリモートセンシング技術(SfMと呼ばれるソフトを用いて地形モデルを生成する技術などを活用)により抽出する。なお、迅速な適地選定作業となるように、必要な調査精度と作業効率のバランスについても検討する。 2) 降灰厚計測デバイスの開発 火山噴火の状況に応じて任意の箇所での火山灰の降灰厚計測を可能にするデバイスを開発する。UAVを用いて運搬・設置するため、軽量であること(2kg未満)、傾斜地(勾配30度まで)でも安定して設置できることなどの性能が求められる。 降灰厚の計測は、土砂災害防止法による緊急調査の必要性の判断根拠となる降灰厚1cmを判定できることが求められるため、表層の2cm程度の火山灰を除去し、除去した部分の画像により降灰厚を計測することを目標としている。 取りまとめにあたっては、本研究の成果がより多くの災害対応機関で利用されるように、開発した技術の概要をまとめた動画や、利用方法や利用上の注意点などを要領良くまとめた「火山噴火時の火口周辺における降灰調査の方法と留意点」を作成する。							

研究成果

1) 調査用デバイスの設置適地の抽出技術

降灰の分布は、土石流の発生する原因となる場合があるため、迅速な調査が必要である。しかし、噴火活動により火口周辺エリアは立ち入りが規制されるため、調査はUAVなどを用いた無人ロボットにより実施することが条件となる。

本研究では、UAVを用いて調査用デバイスを運搬・設置することを前提として、デバイスの設置適地を抽出する技術を開発した。

デバイスの設置適地は、設置の障害となる要素の無い場所と考えられる。過去の類似の実験で、障害となる要素は、樹木や灌木などの植生、斜面勾配が大きい急斜面、土地の凹凸などが重要であることが推測されたため、本研究では上記の3要素について抽出方法を実装し、利用した。

調査用デバイスの設置適地の抽出は、図-1に示す作業フローの手順で実施した。この手順に沿って抽出したエリアの事例(片蓋川第2号砂防ダム周辺)を図-2に示す。

上記の抽出結果は、現地条件を概ね表現していると考えられ、客観的で効率的な適地選定の作業に貢献できるものと考えられる。

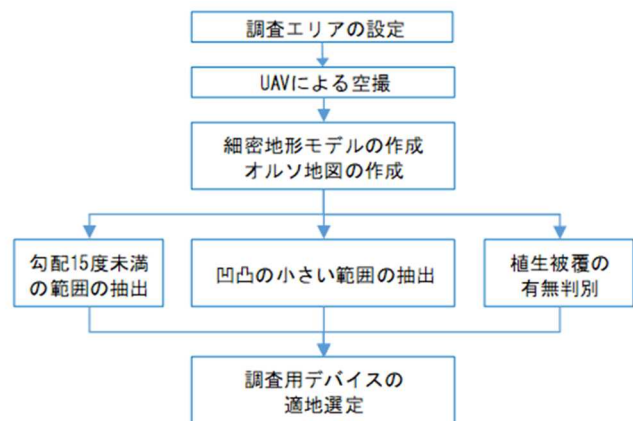
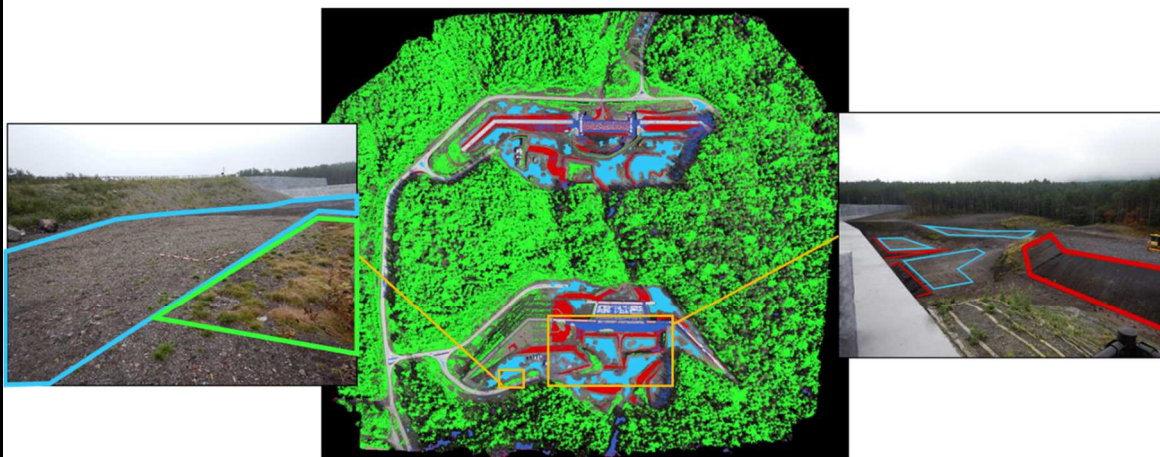


図-1 調査用デバイス設置適地の抽出のため作業フロー



片蓋川工事現場内の結果(格子サイズ:0.25m)

- — 全ての条件を満たす設置領域
- — 凹凸が0.06m以上 (条件B)
- — 傾きが15deg以上 (条件A)
- — 植物の条件に該当 (条件C)

図-2 設置適地の抽出事例

また、観測機器の設置適地選定の基となる三次元データの効率的な取得、及び事前に地上基準点(以下 GCP)を設置できない立ち入り制限区域内の地形情報取得を想定した精度検証を行った。検証は、GCP補正無しでサイドラップ(以下SL)30%のRTK(Real Time Kinematic)によるSfM(Structure from Motion)解析結果と、GCP補正有りのSL60%のSfM解析結果を比較することで、GCP補正無しの地形データの有効性を確認した。

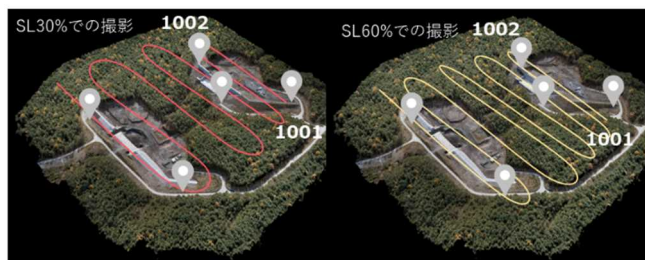


図-3 ラップ率の異なる計測コース

標高断面図

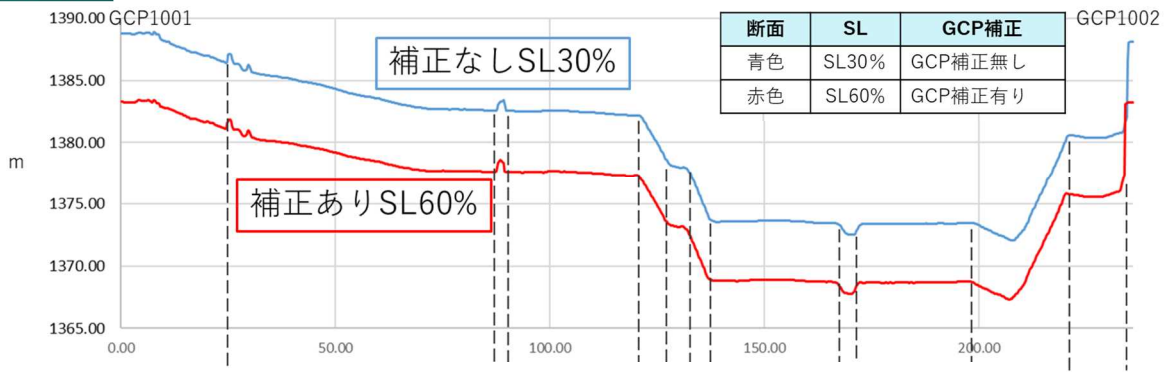


図-4 各撮影諸元の地形断面

図-4に各撮影諸元の地形断面を示す。断面データから地形データの標高値に違いはあるものの、地形の再現性に大きな差はなく、RTKを活用して撮影したSL30%の三次元モデルでも適地選定に必要な地形の勾配や凹凸は十分に再現できることが確認された。

以上より、緊急時に備えて、撮影コース及び撮影枚数を減らす目安を事前に確認しておくことで、効率的な作業が可能となることが示唆された。

2) 降灰厚計測デバイスの開発

本研究で開発したデバイスは、UAVに吊り下げて運搬・設置するため、軽量であること(数kg程度)、傾斜地(勾配30度まで)でも安定して設置できることなどの性能が求められる。また、降灰厚の計測は、土砂災害防止法による緊急調査の必要性の判断根拠となる降灰厚1cmを判定できることが求められるため、表層の2cm程度の火山灰を除去し、除去した部分の画像から降灰厚を計測することを目標とした。

以上の開発目標を踏まえて、デバイスは設置地点の降灰を除去するブラシを降下・回転させる部分を四脚にて支持する機構とし、降灰除去前後の地表形状の差分を三次元距離センサで計測する方法とした(図-5)。このデバイスは重さ3.8kgでUAVに吊下げ、目標とする計測地点に運搬後、UAV用のウインチにより地表面に設置し、降灰状況を計測後にUAVから切り離さず回収する(図-6)。なお、三次元距離センサはインテル社製Realsense Depth Camera D415を使用したほか、周辺の降灰状況を確認するための全方位カメラ(Ricoh Theta V)、計測地点の位置情報を計測するためのGPS等を搭載した。また、降灰を除去するためのブラシは、複数の材質で試験をした上で、湿った灰にも対応できたポリプロピレン製を採用した。

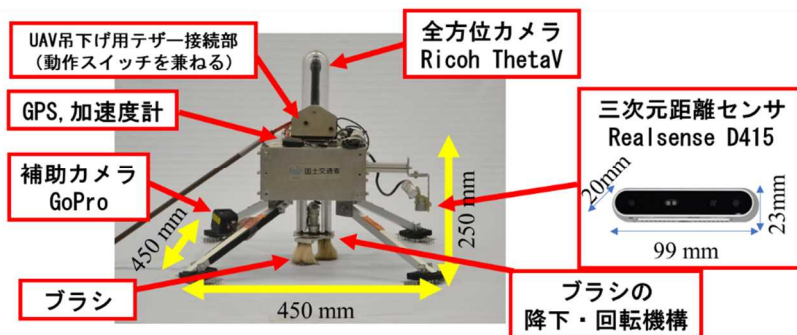


図-5 降灰厚計測デバイスの概要

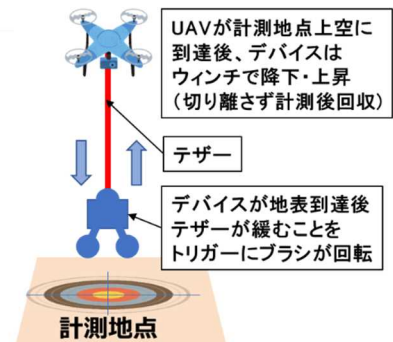


図-6 計測イメージ

R2年度の現地検証では、降灰厚計測デバイスをUAVから吊り下げて運搬・設置・降灰層厚の計測を模擬的に実施する現地実験を19回行い、18回の正常動作を確認した。さらに、三次元距離センサで2cm厚の灰を除去した範囲を計測したところ平均2.20cm標準偏差0.09cmで計測できた。これにより、1割程度の誤差で降灰厚を計測ができることが確認できた。

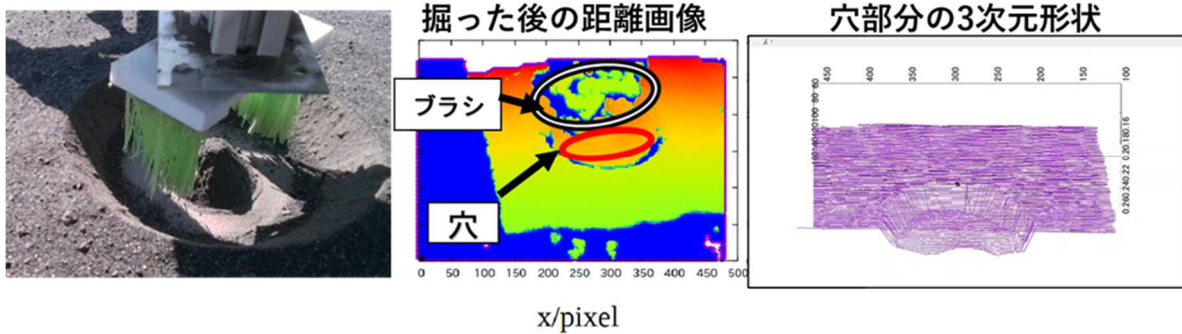


図-7 デバイス計測事例（左：降灰除去状況 中央：三次元距離センサ画像 右：三次元データ）

R2年度の検証において、当初目標としていた2cm程度の火山灰を除去し、厚さを計測することが確認されたため、R3年度では、より厚い降灰に対応できるようにデバイスの改良を行った。目標とした厚さは、既往の噴火事例において、降灰後の土石流が発生する可能性が高くなる10cmとした。

10cmの降灰厚を計測するためには降灰厚の表面から深さ10cmの穴を作成する必要がある。そのため、灰を10cm掘り進めることができるサイズにデバイスを再設計した（図-8）。次に、10cmの厚さの降灰に模した土砂を用意し、ブラシを回転させて土砂の底が目視で確認できるまで掘れるか否かを評価項目として最適なブラシの形状を選定した。ブラシ部分だけでは掘った灰が穴の中に戻ってきてしまうという問題から、掘った灰を穴の外に掻き出す機構として、水平に対して45°に羽をつけたブラシを選定した（図-9）。

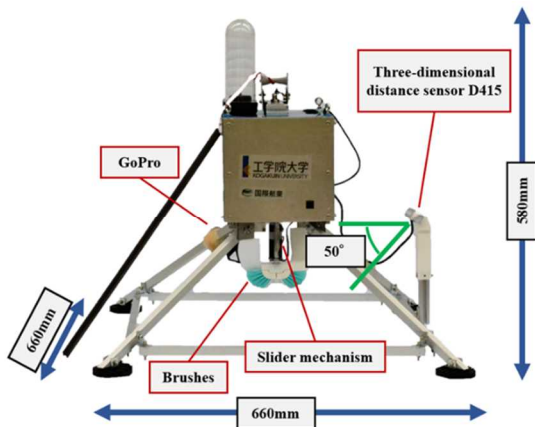


図-8 R3年度の改良降灰厚計測デバイス

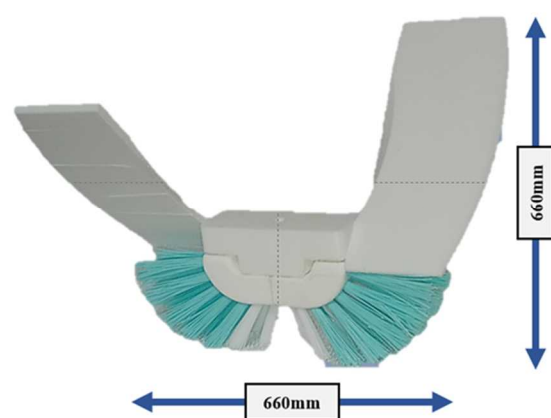


図-9 R3年度の改良ブラシ

以上の改良を踏まえて、R3年度の現地実験にて計測精度の検証を行った。検証は、コンクリート上に9.1cmの灰を堆積させ、上部をならして本デバイスを動作させたものと、掘った穴の写真からSfMにより三次元点群データから算出した穴の深さを比較することで行った。三次元センサを用いた本研究の手法により計測した三次元点群データを図10、216枚の写真からSfMにより三次元化復元を行い、穴の中心付近で地面に対して垂直に切った断面の形状を図11示す。現地検証時は、モータの駆動力不足により10cmまでの掘削は困難であった。算出結果の最深部は3.6cm、SfMによる三次元復元の結果の最深部は3.5cmであった。本研究での手法と三次元復元による手法での結果の誤差は約3%であった。なお、別途予備実験では、8.6cmまでの掘削が可能であった。

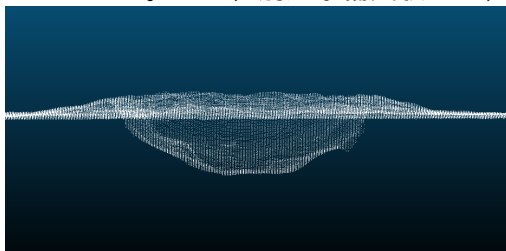


図-10 デバイスの計測結果

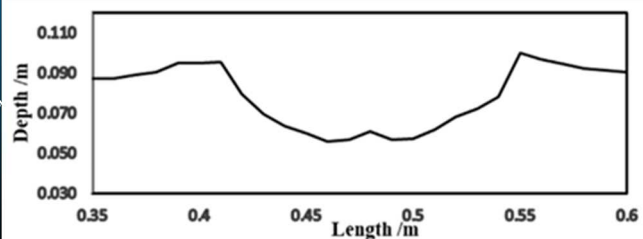


図-11 SfMによる計測結果

3) とりまとめ

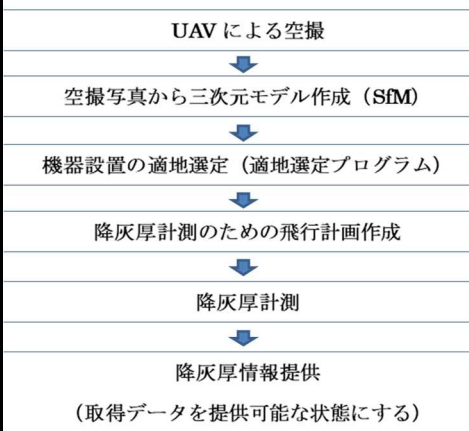
本研究の成果がより多くの災害対応機関で利用されるように、開発した技術の概要をまとめた動画を整理した。動画の内容については、以下のとおりである。

- プロジェクトの目的
- 対応シナリオと成果の活用局面
- 具体の開発成果の現地稼働状況

また、R3年度は降灰厚計測の一連の流れを模擬的に実施し、各作業にかかった時間を計測した。結果として、各種資機材の準備ができていれば最短5時間程度で任意の場所の降灰厚が把握可能であるが、SfM処理がボトルネックとなることが確認された。

その上で、利用方法や利用上の注意点などを要領良くまとめた「火山噴火時の火口周辺における降灰調査の方法と留意点」を作成し、手順書として整理した。手順書の内容は以下のとおりである。

- 全体の作業フロー
- 各作業項目の手順（留意点やポイントを含む）
- 各作業の目安時間（実証実験で要した時間）



3.4. 作業手順

以下に空撮写真から三次元モデル作成における手順を述べるが、Pix4Dmapperでの操作を基に記載する。

3.4.1. 空撮写真を写真測量ソフトウェア搭載のPCに取り込む

写真測量ソフトウェアで三次元モデルを作成するため、写真測量ソフトウェアがインストールされているPCに空撮写真データを取り込む。



○解説・動作のポイント

写真測量ソフトウェア内で写真の位置情報を参照するため、UAVによる空撮写真は位置情報がちゃんと付与されているか確認する。

図-12 全体の作業フロー

図-13 各作業項目の手順事例

表-1 各作業の目安時間

実施項目		日	時間						
実施事項	作業		開始	終了	一時中断	累積時間（一時中断除外）		累積時間（一時中断含む）	
						所要時間	累積	所要時間	累積
現場到着		21	8:00	8:12	0:12				
UAVによる空撮	資機材準備	21	8:13	8:42	0:07	0:22:00	0:22:00	0:29:00	0:29:00
	飛行テスト	21	8:43	8:47		0:04:00	0:26:00	0:04:00	0:33:00
	空撮飛行	21	8:48	9:11	0:09	0:14:00	0:40:00	0:23:00	0:56:00
	撮影成果確認	21	9:12	9:15		0:03:00	0:43:00	0:03:00	0:59:00
	データ移動	21	9:16	9:58	0:37	0:05:00	0:48:00	0:42:00	1:41:00
三次元化処理	使用写真の選定	21	9:59	10:07		0:08:00	0:56:00	0:08:00	1:49:00
	AT処理計算パラメータ設定	21	10:08	10:13		0:05:00	1:01:00	0:05:00	1:54:00
	処理（点群作成まで）	21	10:14	12:14		2:00:00	3:01:00	2:00:00	3:54:00
	結果のエクスポート	21	12:14	12:14		0:00:00	3:01:00	0:00:00	3:54:00
適地選定プログラム	計算準備(点群データ変換)	21	12:15	12:19		0:04:00	3:05:00	0:04:00	3:58:00
	計算準備(ソフト設定編集)	21				0:00:00	3:05:00	0:00:00	3:58:00
	適地選定処理	21	12:20	12:29	0:07	0:02:00	3:07:00	0:09:00	4:07:00
	結果のエクスポート	21	12:30	12:31		0:01:00	3:08:00	0:01:00	4:08:00
降灰厚計測のための飛行計画作成	結果の確認	21	12:32	12:42		0:10:00	3:18:00	0:10:00	4:18:00
	飛行計画の検討作成	21	12:43	13:05	0:12	0:10:00	3:28:00	0:22:00	4:40:00
降灰厚計測（降灰厚計測デバイス）	資機材準備（動作確認）	21	13:06	14:13	0:54	0:13:00	3:41:00	1:07:00	5:47:00
	飛行テスト	21				0:00:00	3:41:00	0:00:00	5:47:00
	デバイス稼働飛行	21	14:14	14:27		0:13:00	3:54:00	0:13:00	6:00:00
	取得成果の変換・確認、降灰厚算定	21	14:28	14:53		0:25:00	4:19:00	0:25:00	6:25:00
降灰情報の提供	報告資料の作成					0:00:00	4:19:00	0:00:00	6:25:00

赤字 = 20分以上かかった工程

研究成果の発表状況・予定

<発表状況>

- 1) 島崎菜都美, 羽田靖史, 金崎裕之, 銭谷彰, "降灰厚自動測定の手法検討", 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2019), 2D1-06, 2019年12月.
- 2) 島崎菜都美, 羽田靖史, 金崎裕之, 銭谷彰, "降灰厚自動測定システムの実証実験", 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会, 117, 2020年3月.
- 3) 横山龍一, 羽田靖史, 永谷圭司, 金崎裕之, 銭谷彰, "UAVを用いた観測センサの見通しを考慮した設置位置の選定法と設置位置誤差の分析", 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会, 304, 2020年3月.
- 4) 北原ほか, "緊急時の観測機器の設置地点選定を目的としたUAV飛行計画の効率化", 令和2年度砂防学会研究発表会概要集 p619-p620, 2020.
- 5) 脇本健太, 神山裕太, 杵山眞之輔, 羽田靖史, 金崎裕之, 銭谷彰, "降灰厚の三次元計測を目的としたデバイスの開発", 日本機械学会関東学生会第60回学生員卒業研究発表講演会, 2021年3月.
- 6) 横山龍一, 羽田靖史, 永谷圭司, "地表性状と見通しを考慮したUAVを用いたセンサ設置位置の選定", 第26回ロボティクスシンポジウム, 2021年3月.
- 7) 皆川ほか, "火山噴火時を想定した規制区域内の降灰厚分布調査デバイスの開発", 令和3年度砂防学会研究発表会概要集 p65-p66, 2021.
- 8) 北原ほか, "緊急時における観測機器設置地点の選定を目的としたUAV飛行計画効率化検証", 令和3年度砂防学会研究発表会概要集 p67-p68, 2021.
- 9) 横山龍一, 羽田靖史, 永谷圭司, "UAVを用いたセンサ設置のための地表性状と見通しを考慮した設置位置選定", 計測自動制御学会論文集, 57(12), 511-518, 2021.
- 10) 横山龍一, 羽田靖史, 永谷圭司, "地表性状と見通しを考慮したUAVを用いたセンサ設置位置の検討", 第26回ロボティクスシンポジウム, 2B1, 2021.
- 11) 横山龍一, 羽田靖史, 永谷圭司, 北原遼太, 銭谷彰, "降灰厚計測と降灰堆積状況の撮影を目的とした無人火山調査手法の開発", 第27回ロボティクスシンポジウム, 4C2, 2022.
- 12) 柳澤恵里佳, 横山龍一, 杵山眞之輔, 羽田靖史, 北原遼太, 銭谷彰, "火山降灰厚の自動計測デバイスの機能拡充", 関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会, 816, 2022.

研究成果の社会への情報発信

火山防災に関する専門家・行政機関の職員の集まる学会(砂防学会など)において開発したシステムを展示し、開発成果の情報発信を予定している。

令和4年度の砂防学会研究発表会の開催予定は以下のとおりである。

令和4年度砂防学会研究発表会「宮崎大会」

期日 令和4年5月10日(火)～13日(金)

URL <https://jsece.or.jp/meeting/2022miyazaki/>

表彰、受賞歴

令和3年度建設コンサルタント業務研究発表会 優秀賞（新技術・新領域）
北原遼太, 立入規制区域内の火山灰堆積状況を無人で調査するデバイスの開発。

研究の今後の課題・展望等

本研究では、火山噴火直後の状態を想定して、土砂災害防止法による緊急調査を実施する判断基準としての降灰厚さについて、立ち入り規制区域外から遠隔・自律動作する調査システムを開発した。本研究の成果により、災害発生直後の初動期の対応力は向上したものと考えられる。

火山噴火活動は、数年単位の長期間におよぶ場合があり、噴火活動に伴う土石流（土砂流出）が高頻度になり、土砂流出の規模が大きくなるのが過去の噴火事例では確認されている。このように、火山活動が長期化した場合には、土石流の発生源となる河口周辺のエリアは立ち入り規制が継続するため、土石流の発生場の状況を詳細・定量的に監視することが必要となるが、こうした技術開発は現状では十分には取り組まれていない。つまり、土石流発生源となるリル・ガリーの成長過程を定量的・経時的に監視する機能と、流下する土石流を流路の途中で観測する機能を開発し、これらをUAV等で立ち入り規制の外から搬入・設置・動作させるシステムが必要となる。

本研究チームでは、今後、上記のような観点から、噴火活動継続期における土石流発生源エリアを監視するシステムの開発に取り組む予定である。

研究成果の河川砂防行政への反映

火山噴火時における情報収集能力の向上を図り、得られた情報により迅速で的確な災害対応に反映することが可能となる。本研究では、火山灰堆積厚さの把握に焦点を当てるが、遠隔・無人調査（映像取得）の技術は、リル・ガリーの発達状況の確認、土石流の発生状況の把握など、土砂災害対策に有効な情報の獲得に効果を上げることが期待される。