

## 論文の内容の要旨

論文題目 多時期の高分解能な写真測量手法による地表環境変動の定量化  
(Quantification of surface environmental changes by high resolution photogrammetry method at multiple times)

氏 名 柳場庄一郎

人々の生活の場としての地表環境の変動を理解することは、地域の自然が、今後どのように変化するかを予測するために必要であり、また、自然災害の被害を軽減し、地域社会を維持していくためにも重要である。こうした地表環境の変動メカニズムは、自然環境の観測と定量化をとおして理解が進められる。本研究では、高分解能な写真測量手法を適用し、多時期の地表環境変動の定量化を行った。これにより、自然環境のメカニズム解明や既存の知見の改良に貢献することを目的とした。

地表環境の変動メカニズムを理解しようとするとき、対象とする現象の外見や形態の計測と、構成要素の状態や属性の分析が行われる。地表環境変動の観測手法は、技術の進歩とともに多様化し、より広域を、より細かく見ることができるよう発展してきた。これらの観測手法を対象物との距離で分類すると、遠いところから順に、人工衛星によるリモートセンシング、航空機による撮影やセンシング、人間による現地踏査の3種類が挙げられる。観測手法の一般的な傾向として、観測対象との距離が大きくなるほど広域を観測でき、空間分解能は低下する。また、一般的には、人工衛星や航空機による観測は、空間分解能などの観測の諸元、観測場所、実施時期、観測頻度は、すべて他者に委ねられている。このため、人工衛星および航空機と、現地踏査との間には、観測対象や範囲、空間分解能、観測機会のそれぞれを決める自由度に、大きなギャップが存在する。換言すれば、ユーザー自身が観測対象と観測時期を決めて、高い空間分解能で観測できる手法が欠落しているといえることができる。このため、現在の観測手法の体系は、空間分解能の低さにより、小規模な現象を特定できないことや、観測頻度の低さにより、複数の地表変動の影響を分離できないことが課題である。これに加えて、実際に観測を行う場合には、観測コストの制約を避けることもできない。これらの制約を克服するために、観測対象を細部まで観察できる高い空間分解能を持ち、スナップショットを撮るように、一時期の状態を何度も捉えることのできる、低コストで簡略な観測手法として、無人航空機 (UAV: Unmanned aerial vehicle) と SfM 多視点ステレオ写真測量 (SfM: Structure from Motion) (以降、UAV-SfM) を統合した手法を活用し、地表環境変動の観測を行った。UAV-SfM の適用により、人工衛星・航空機と、現地踏査との間にある、観測手法の特性のギャップが補間されることが期待される。本研究では、UAV-SfM に

よる観測を用いて、既存の観測手法では扱うことが難しかった地表環境の形状変化を捉え、その定量化をとおして地表環境変動現象の解明を目指した。ここでは、それぞれに変化の時間スケールが異なる、土石流、雪崩、マングローブ林の大規模な倒木現象の3つの地表環境変動の事例を対象として、UAV-SfMによる観測・分析を実施した。

第一の事例は、平成26年8月の豪雨により発生した広島県広島市の土石流災害であり、土砂量の計測と被害の実態把握を目的としてUAV-SfM調査を実施した。この結果、人的被害および建物被害は、谷出口から平均で132 mの範囲内に集中した。被害の分布から、上流側ほど土石流の侵食・破壊エネルギーが大きく、被害は流路に沿って生じることが示された。また、人工的に改変された地形を表す、基盤地図情報数値標高モデル5 mメッシュ（国土地理院）から算出した落水線が、土石流の主流路となった。これらのことから、建物・植生・土石流の運動エネルギー減衰を考慮したシミュレーションの防災上の有用性を指摘した。

第二の事例は、平成29年3月27日に栃木県那須町で発生した雪崩災害であり、雪崩を構成する発生区、走路、堆積区の範囲を明らかにすることを目的として、UAV-SfM調査を実施した。この結果、ササの被覆域以外では、雪崩発生から6日後の積雪深分布が、10 cmの精度で示された。また、これまで着目されてこなかった、積雪表面に存在する微小な形態のマッピングが実現し、これを積雪表面形態と称した。これらの知見から、積雪深が急減する領域を発生区として、そして、積雪表面形態の空間分布から積雪に対する応力分布を推定し、雪崩の範囲を推定した。

第三の事例は、沖縄県竹富町の西表島にある仲間川マングローブ林における大規模な倒木現象であり、倒木の原因や性質の解明を目的として調査を実施した。この結果、現在の仲間川マングローブ林は、戦後にかけての一時期に行われた間伐により、最盛期と比して、樹木密度で77.3 %の森林が破壊され、その後の約60年間で、立地と樹勢を回復した再生林であった。しかし、2006年9月の台風を契機として大規模な倒木が始まった。以降、少なくとも3度の強大な台風が調査地の直上や近傍を通過し、倒木範囲が拡大した。倒木の開始から2015年12月までの9.3年間で、倒木範囲は4,308 m<sup>2</sup>/年の速度で拡大しており、現時点で回復の傾向は見られなかった。

これら3つの事例研究では、UAV-SfMを中心とした調査により、新たな地表環境変動プロセスの存在が示唆されたり、既存手法では捉えることが難しかった、短期的な変化が定量化されたりするなど、地表環境変動研究における新たな知見もたらされた。これらの事例研究の成果をもたらしUAV-SfMの特性を、適時性、連続性、高分解能性、三次元情報、非代替性という5つの要素として整理した。

1. 適時性とは、必要なタイミングで観測ができる性質である。これを実現するための条件は、手法が簡略かつ低コストで、個人レベルで運用ができることである。制約要因となるものは、観測時の気象条件や、UAVプラットフォームの運航限界（性能）

と関連法規が挙げられる。適時性は、地表環境の変動の直後を捉える必要がある時に効果を発揮した。適切なタイミングで観測を実施することで、観測結果の中に、対象とする現象とは無関係な変動の混在を抑えることができた。

2. 連続性とは、繰り返しの観測により、現象の変化を細分化して記録できる性質である。これを実現するための条件および制約要因は、適時性と同様である。連続的に地表環境の変化を捉えるには、多時期のデータアーカイブの構築が有効であった。連続観測によって観測の空白期間を短縮し、データ取得の時間軸の間隔を密にすることにより、変動現象を四次元的に定量化することができた。

3. 高分解能性とは、面的に高精細な観測ができる性質である。これを実現するための条件は、遠隔から観測する手法であることが挙げられる。制約要因となるものは、観測に用いるセンサーの性能、対象物とセンサーとの距離が挙げられる。UAVによる観測の空間分解能は、人工衛星や航空機による観測の10倍から1,000倍ほど高くなる。高い空間分解能から得られる情報は、調査者自身の目と手で確認しながら情報を得る直接的な調査に、より近いものとなった。高分解能なデータを、時間をかけて観察、検討することにより、現地踏査に次ぐ、第二のグラウンドトゥルースとして活用した。

4. 三次元情報とは、地物の高さを計測できる情報である。これを実現するための条件は、観測データが複数枚の高品質な写真群で構成されること、地理座標のリファレンスとして高精度な位置情報が得られることが挙げられる。制約要因としては、単画像のデータや、撮り直しができない古い写真では、三次元的な計測の条件が達成できない場合があることが挙げられる。

5. 非代替性とは、UAV-SfMにより、上記4点の要素を兼ね備えた、高品質な観測データを得られること、および手法のコストと実用性が既存の手法に比して優れていることにより、他の手法では代替が難しいことを意味する。

UAV-SfMの持つこれらの特性は、旧来の人工衛星、航空機、現地踏査といった観測手法の体系にはない性質であることから、UAV-SfMを人工衛星・航空機と現地踏査との間を埋める、新しい手法としての地位を確立しつつあると位置づけた。

本研究で取り上げた事例研究では、UAV-SfMで得た三次元的な基盤地図を柱として、地理学的な視点から、複数の分野との協働により分析や考察を行った。これが実現された背景には、高い空間分解能で、オルソモザイク画像と三次元情報が同時に得られることに意味があると考えた。高い空間分解能によって地物の形態と属性が判別できることは、多圏間プロセスに関する情報が複合的に取得されていることを意味する。こうして、複合的な情報から対象とする現象を高純度に抽出し、観測結果の確信度を高めることにつながった。つまり、UAV-SfMの観測データにより、これまで各分野で個別に扱ってきたフィールド情報を、一つの数値モデルとして扱える道が拓けた。こうした特性が、地形、植生、気象、シミュレーションなどの自然科学的な研究分野の橋渡しとして機能

した。

今後、UAV-SfMで取得した基盤地図の活用が、自然環境の総合的な理解の促進に貢献することが期待される。しかしながら、地表環境の諸問題を考えるとき、自然環境の理解だけで有効な解決策を得ることはできない。さらに、そこで実践可能な最善の解は、地域と自然環境との関係性により異なり、異なる地域に対して単一のアプローチで解決できるものでもない。そのような中で、高分解能で取り回しのよいUAV-SfMによる地域の自然環境に関する基盤地図の提供が、研究と社会の知見の総合に活用され、課題解決の糸口の一つとして貢献することが期待される。