2. 岩盤斜面評価精度向上のための調査手法の検討

2.1 岩盤斜面ワーキング設置の目的と活動の概要

2.1.1 設置の目的

北海道においては、平成 8 年 2 月に発生した豊浜トンネルの崩落以降、第 2 白糸トンネルの崩壊、北見市北陽土砂崩落、えりも町斜面災害で崩壊土量 10,000m³ を超える崩壊が発生している。表 2.1 には豊浜トンネルの崩落以降の岩盤斜面災害（崩壊土量 1,000m³ 以上）を示しているが、これらのうち、前述の 4 箇所での災害では、事故調査委員会が組織され、事故原因の究明とともに、今後に向けた提言がなされている（表 2.2)。各事故調査委員会で述べられた提言は、いずれも重要なものであり、それと同時に解決が困難な課題も多く含まれている。また、豊浜トンネル崩壊の翌年に発足した「北海道日本海沿岸地域における大規模岩盤崩落検討委員会」のように、岩盤斜面の調査や評価精度の向上を目的とした複数の委員会が組織され、新たな点検や調査の手法が提言されている。

岩盤斜面ワーキングは、上記のような背景の下、積雪寒冷地という北海道特有の気象条件に適した岩盤斜面の調査手法を検討することを目的として設置されたものである。

表 2.1　豊浜トンネルの崩落以降の岩盤斜面災害の概要（崩壊土量 1,000m³ 以上）[1)]

	発生年月日	場所	規模(m³)	地域区分	地質	備考
1	1996.2.10	豊浜トンネル	11,000	日本海沿岸	火砕岩	死者 20 名
2	1996.3.15	宇遠別第 1 覆道	1,000	黄金道路	ホルンフェルス	
3	1997.3.4	宇遠別第 1 覆道	2,000	黄金道路	ホルンフェルス	
4	1997.6.7	ほしば覆道	5,450	黄金道路	ホルンフェルス	
5	1997.8.25 1997.8.29	第 2 白糸トンネル	56,000	日本海沿岸	火砕岩	
6	2001.10.4	北見市北陽	24,000	常呂帯	付加体堆積物	死者 2 名
7	2003.9.26	ほしば覆道	2,400	黄金道路	ホルンフェルス	十勝沖地震
8	2003.9.26	浜フンベ	1,500	黄金道路	砂岩・頁岩	十勝沖地震
9	2003.9.26	美幌	1,000	黄金道路	砂岩・頁岩	十勝沖地震
10	2003.10.1	静内ダム湖斜面	5,000	日高地方	酸性岩	
11	2004.1.13	えりも町 宇遠別第 1 覆道	42,000	黄金道路	ホルンフェルス	死者 1 名、 負傷者 1 名
12	2006.5	礼文島	10,000	日本海沿岸	火砕岩	
13	2021.6.6	乙部町館浦	2,900	日本海沿岸	堆積岩	※
14	2022.3.15	千歳市美笛峠	1,200	内陸	火砕岩	※

※：文献 1）に追記

表 2.2　国道沿線で発生した災害の事故調査委員会での提言 [1)]

	委員会名	提言内容など
1	豊浜トンネル崩落 （1996.2.10）	①　岩盤生成過程や地形発達過程などの地球化学的な知見をより一層活用すること ②　変化する自然の姿を的確に捉えるために斜面の長期的な経時変化を追跡すること ③　軟岩で構成される急崖斜面に対してきめ細やかな点検を実施すること ④　テストフィールドを選定して長期モニタリングを行うこと ⑤　予知予測に関する研究を一層促進すること ⑥　地域防災体制や道路防災情報システムを構築すること
2	第 2 白糸トンネル崩落 （1997.8.25） （1997.8.29）	①　大規模岩盤崩落の予知予測に関する研究の推進 ②　岩盤監視システムの構築 ③　道路管理体制の充実化 ④　地域防災体制の構築
3	北陽土砂崩落 （2001.10.4）	①　「常呂帯」のような複雑な地質における岩盤斜面の研究及び技術開発 ②　道路災害防止に向けたソフト対策
4	えりも町斜面災害 （宇遠別第 1 覆道） （2004.1.13）	①　地形判読と地形形成過程の検討 ②　地質学的にみた岩石劣化と岩盤物性に関する調査・研究 ③　北海道における防災点検の充実

2.1.2 活動の概要

(1) 岩盤斜面ワーキング委員の構成

本ワーキングは以下の委員により構成される（令和 7 年 8 月現在：敬称略）

座長	藤井　義明	北海道大学大学院　工学研究院　特任教授
委員	石丸　聡	（地独）北海道立総合研究機構 エネルギー･環境･地質研究所　地域地質部長
委員	児玉　淳一	北海道大学大学院　工学研究院　特任教授

(2) 岩盤斜面ワーキング活動の概要

当ワーキングの活動概要を表 2.3 に示す。令和 4 年度～令和 6 年度の活動は、航空レーザープロファイラーの利活用について、モデル地区現地検討会を実施し、総合的な岩盤斜面評価手法を取りまとめる作業と、新たな活動として、表.2.2 の 4 つの災害での提言を受けてから 20 年以上が経過していることから、最近の新技術について岩盤斜面の調査・点検に活用できるか整理した。

表 2.3　岩盤斜面ワーキング活動の概要

	モデル地区現地検討会	地質調査技術ガイドライン	岩盤計測手法の現地実験	航空レーザープロファイラーの利活用	最近の新技術の動向
2004	○				
2005	○				
2006	○				
2007	○				
2008	○	○			
2009	○	○			
2010	○	○			
2011	○	○			
2012	○	○	○		
2013	○		○		
2014	○		○		
2015	○				
2016	○				
2017	○	○			
2018	○	○			
2019	○				
2020				○	
2021	○			○	
2022	○		○	○	
2023	○			○	○
2024	○			○	○

2.2　航空レーザープロファイラーの利活用に関する検討

2.2.1　オーバーハング箇所の調査方法

ワーキングでは、令和 2 年度より「航空レーザープロファイラーの利活用に関する検討」を実施してきており、航空レーザープロファイラーデータについて、災害時に特化した利活用方法の検討を中心に進めてきた。

成果として、「災害時を想定した航空レーザープロファイラーの利活用方法（案）」を作成するにあたり、オーバーハング地形箇所での利活用について未検証であったため、テストフィールドを選定し利活用に関する検討を行った。

(1)　テストフィールドの選定

令和 4 年 3 月 15 日に一般国道 276 号千歳市美笛峠で雪崩を伴う岩盤崩壊が発生し、オーバーハング地形が形成されたことから、当該斜面をテストフィールドとして選定した。

(2)　岩盤崩壊の概要

岩盤崩壊は、令和 4 年 3 月 15 日と令和 4 年 4 月 17 日の 2 回発生した。

以下に、それぞれの崩壊時の概要を示す。

1)　令和 4 年 3 月 15 日の崩壊

・発生場所：一般国道 276 号　千歳市美笛峠

・発生日時：令和 4 年 3 月 15 日（火曜日）

・規　　模：全体体積＝1,200m^3、道路上体積＝700m^3



写真 2.1　令和 4 年 3 月 15 日の崩壊

2)　令和 4 年 4 月 17 日の崩壊

・発生場所：一般国道 276 号　千歳市美笛峠

・発生日時：令和 4 年 4 月 17 日（日曜日）

・災害規模：幅 12m×高さ 8m×奥行き 3m の岩盤崩壊（V＝300m^3）が発生



写真 2.2　令和 4 年 4 月 17 日の崩壊

(3)　UAV による地形データ取得の検討

地形の経時変化を、UAV による地形データで確認する目的で、被災後の地形データを得るため現地検討を行った。現地検討当日、UAV 飛行ができなかったため、令和 4 年 7 月 15 日に撮影された UAV 写真の既存地形データで比較検討を行った。

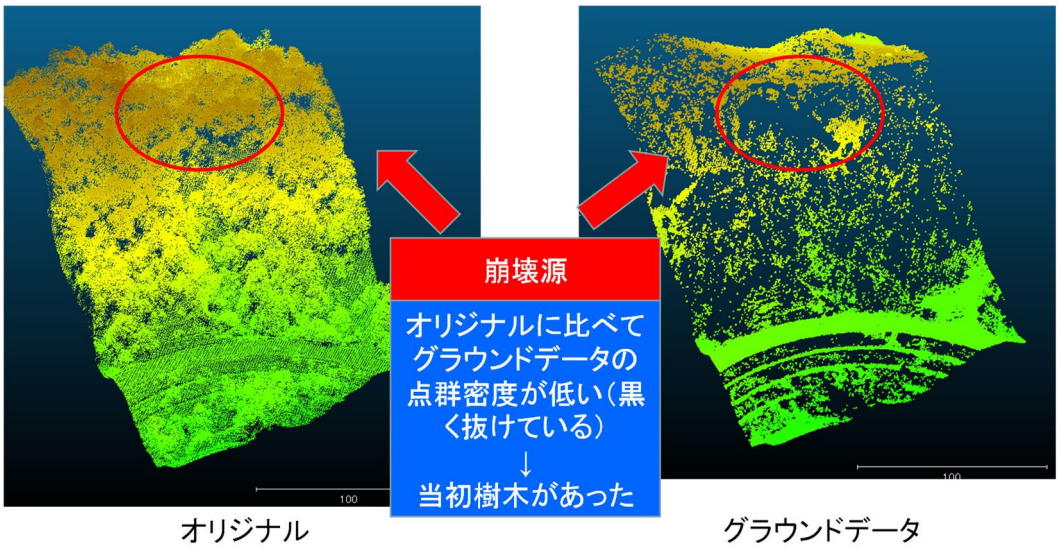

図 2.1　平成 30 年 10 月頃撮影の既存 LP データ

図 2.1 に、平成 30 年度に航空機で取得された既存 LP データのオリジナルとグラウンドデータを示す。崩壊発生源付近に着目すると、オリジナルに比べてグラウンドデータの点群密度が低く（黒く抜けている）、当該箇所がオーバーハング地形を形成していることから、地形の影響と推察される。このように、航空機で鉛直方向に取得した LP は急崖・オーバーハングの情報を得られないことがあるため、グラウンドデータを確認する必要がある。

一方、令和 4 年 7 月 15 日に撮影された UAV 写真による既存地形データ（グラウンドデータ）は、平成 30 年のグラウンドデータと比較すると、崩壊発生源付近の点群密度が高い（黒く抜けているところが少ない）（図 2.2）。

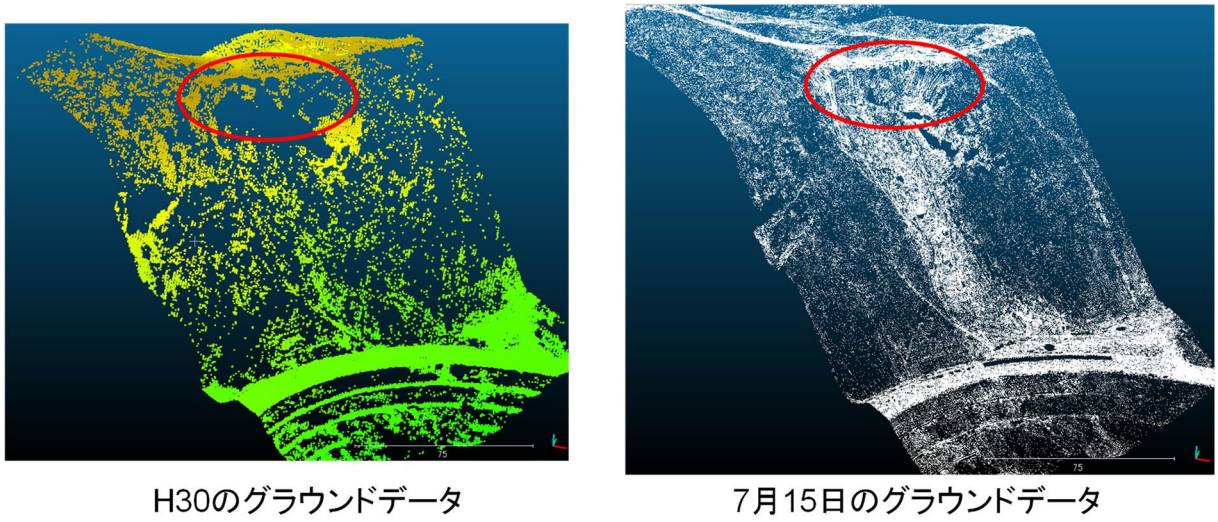

図 2.2　平成 30 年と令和 4 年 7 月 15 日のグラウンドデータの比較

(4)　オーバーハング地形箇所での利活用への適用性のポイント

この結果、オーバーハング地形箇所での地形データの利活用は、UAV の撮影高度・方向、地上 LP との組み合わせなど、状況にあわせた工夫が必要であると考えられる（図 2.3）。

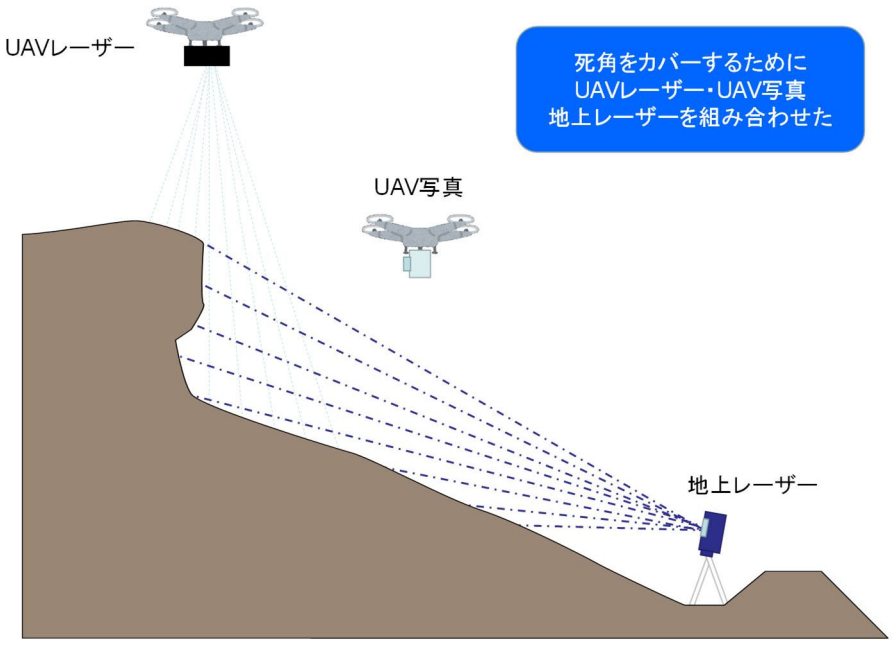

図 2.3　オーバーハング地形箇所での利活用のイメージ図

2.2.2 最近の地質調査技術ガイドライン－災害時を想定した航空レーザープロファイラーの利活用方法（案）

当ワーキングでは、活動テーマに関連する現地検討会等を実施する過程で、急崖斜面の調査や評価に際しての優れた技術について、道路管理者の参考資料としてガイドラインの取りまとめを行ってきた。

北海道開発局では、国道沿線の斜面を対象として航空レーザー測量を実施し、地形データ（以下「航空 LP」）を取得している。これらは、道路防災総点検における災害要因の抽出や道路設計の基礎資料として利活用されている。航空 LP は、道路敷地外を含む広い範囲の地形データにより構成されており、道路管理の様々な場面で利活用が期待できる。このため、航空 LP の災害時における活用方法について検討を行い、その結果を本ガイドラインとしてまとめた。

以下、その概要について述べる。

(1) ガイドラインの目次構成

目次は以下の通りとした。

【最近の地質調査技術ガイドライン-災害時を想定した航空レーザープロファイラーの利活用方法（案）目次】

1. 総則
   - 1.1. 適用範囲
   - 1.2. 用語の定義
2. 航空 LP の概要
   - 2.1. 航空 LP の方法
   - 2.2. 航空 LP の基準
   - 2.3. 航空 LP の規格と精度
   - 2.4. 航空 LP のデータ
     - 2.4.1. 数値地形図
     - 2.4.2. オルソフォト
     - 2.4.3. 等高線図
3. 斜面災害時の航空 LP の利活用
   - 3.1. 作業の流れ
   - 3.2. UAV による被災後地形取得
     - 3.2.1. UAV 写真撮影
     - 3.2.2. UAV 写真撮影時の法令順守と安全管理
     - 3.2.3. SfM 解析
   - 3.3. 航空 LP と被災後地形の重ね合わせ
     - 3.3.1. 使用するデータ
     - 3.3.2. データの重ね合わせ
4. 参照文献

(2) 総則

「1.総則」では、「適用範囲」、「用語の定義」を紹介した。

「1.1 適用範囲」では、「近年整備が進む航空レーザープロファイラーについてその概要を紹介する」とし、災害時を想定して、航空レーザープロファイラーと UAV 航空写真測量と組み合わせることにより、対応の迅速化・高度化に寄与する手法について紹介した。

「1.2 用語の定義」では、本ガイドラインで用いる用語の定義について述べた。

(3) 航空 LP の概要

「2.航空 LP の概要」では、「航空 LP の方法」、「航空 LP の基準」、「航空 LP の規格と精度」、「航空 LP のデータ」について述べた。

「2.1 航空 LP の方法」では、航空 LP について述べ、「2.2 航空 LP の基準」では「作業規定の準則　国土地理院　令和 5 年 3 月」（以下「作業規定」）に従って取得されていることを述べた。

「2.3 航空 LP の規格と精度」では、規格について「作業規定」と特記仕様書において定められていることを述べ、精度については岩盤斜面の急崖部などでは、地図情報レベルに示す格子間隔では地形状況を十分に表現できないことが想定されるため、地図情報レベルと格子間隔と地図情報レベル 500 の精度 について紹介した（表 2.4、2.5）。

表 2.4　地図情報レベルと格子間隔

地図情報レベル	格子間隔
500	0.5m 以内
1000	1m 以内
2500	2m 以内
5000	5m 以内

表 2.5　地図情報レベル 500 の精度

項目	精度
地理情報レベル	500
格子間隔	0.5m 以内
水平位置の標準偏差	0.25m 以内
標高点の標準偏差	0.25m 以内
等高線の標準偏差	0.5m 以内

「2.4 航空 LP のデータ」では、航空 LP の成果品として「数値地形図」、「オルソフォト」、「等高線図」などにより構成されることを紹介した。また、「数値地形図」については、データ処理レベルの異なるオリジナルデータ・グラウンドデータ・グリッドデータがあることを紹介した（図 2.4）。



数値地形図のうちオリジナルデータの例



オルソフォトの例



等高線図の例

図 2.4　航空 LP のデータの例

(4) 斜面災害時の航空 LP の利活用

「3.斜面災害時の航空 LP の利活用」では、航空 LP の利活用方法として、災害時に UAV 写真測量と航空 LP を組み合わせ、周辺の地形情報を 3 次元的に把握する手法について「作業の流れ」、「UAV による被災後地形取得」、「航空 LP と被災後地形の重ね合わせ」を記述した。

「3.1 作業の流れ」では、図 2.5 に示すように航空 LP と UAV による空中写真測量を組み合わせた災害対応の流れを提示した。

「3.2UAV による被災後地形取得」では、地形取得に関わる留意点について述べた。「UAV 写真撮影」では、被災箇所を十分に網羅する範囲の重複率（図 2.6）と、撮影高度と解像度との関係（図 2.7）について紹介し、急崖部では地上設置型のレーザープロファイラーなど、他の手法と組み合わせる方法も有効であると述べた。また、地形情報の精度確保のために、地上標定点の設置と観測について、地上標定点の配置例を紹介した。「UAV 写真撮影時の法令順守と安全管理」では、UAV 写真撮影時に関する法令や安全管理について、一般的な飛行において注意を要する点、災害時特有の事情、気象条件、人員配置について紹介した。「SfM 解析」では、UAV で撮影した写真から SfM ソフトウエアを用いて 3 次元地形情報を取得する方法について紹介した。

「3.3 航空 LP と被災後地形の重ね合わせ」では、「使用するデータ」、「データの重ね合わせ」について紹介した。「使用するデータ」については、航空 LP には様々なデータ形式のファイルが納品されており、地形情報の重ね合わせ処理には、データが均質で軽量なグリッドデータを用いることとした。重ね合わせる被災後地形のデータは、UAV 写真から作成した点群データを用いることとした（図 2.8）。「データの重ね合わせ」では、航空 LP と被災後の地形は、点群処理データを用いて重ね合わせて、解析処理する方法について紹介した（図 2.9）。

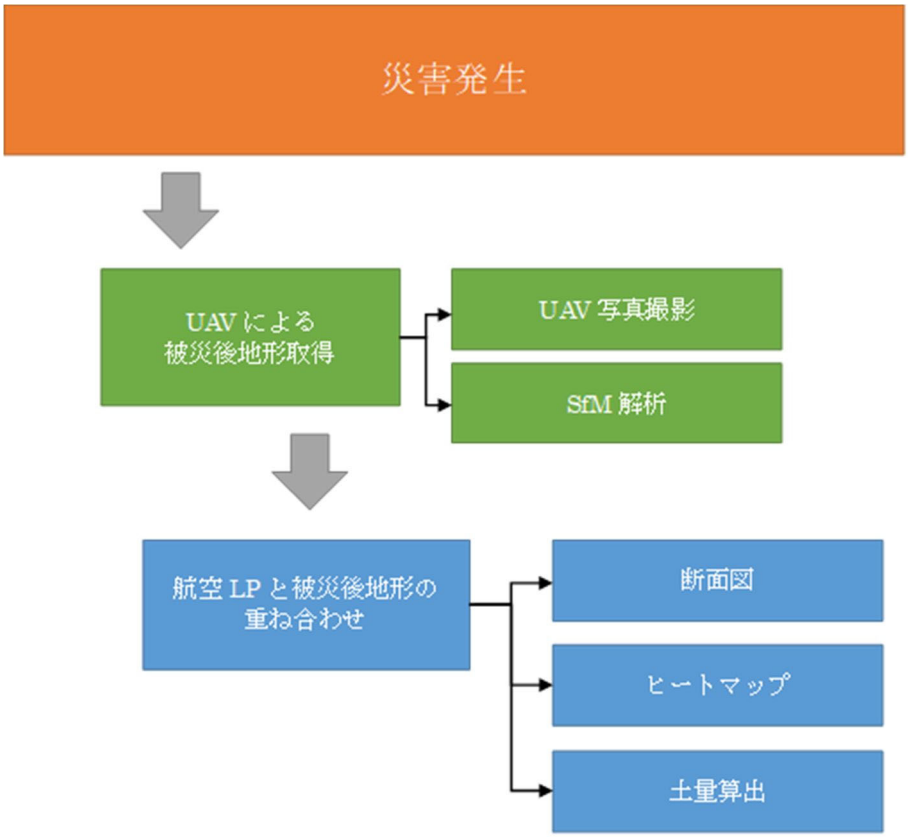

図 2.5　航空 LP と UAV による空中写真測量を組み合わせた災害対応の流れの例

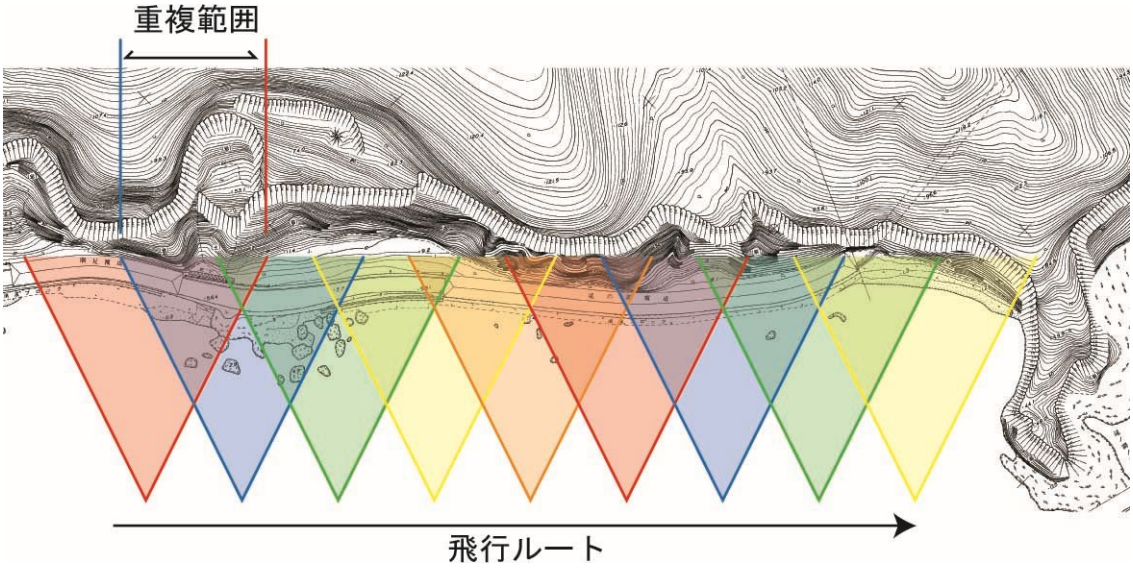

図 2.6　重複率の説明図

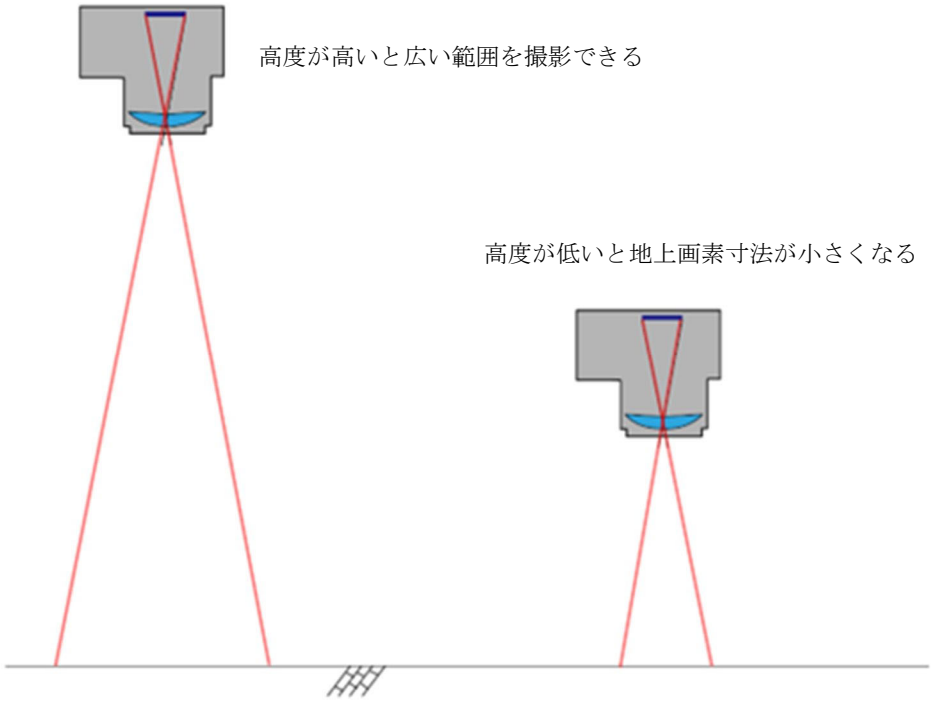

図 2.7　複数の手法を組み合わせて地形情報を取得する方法のイメージ図

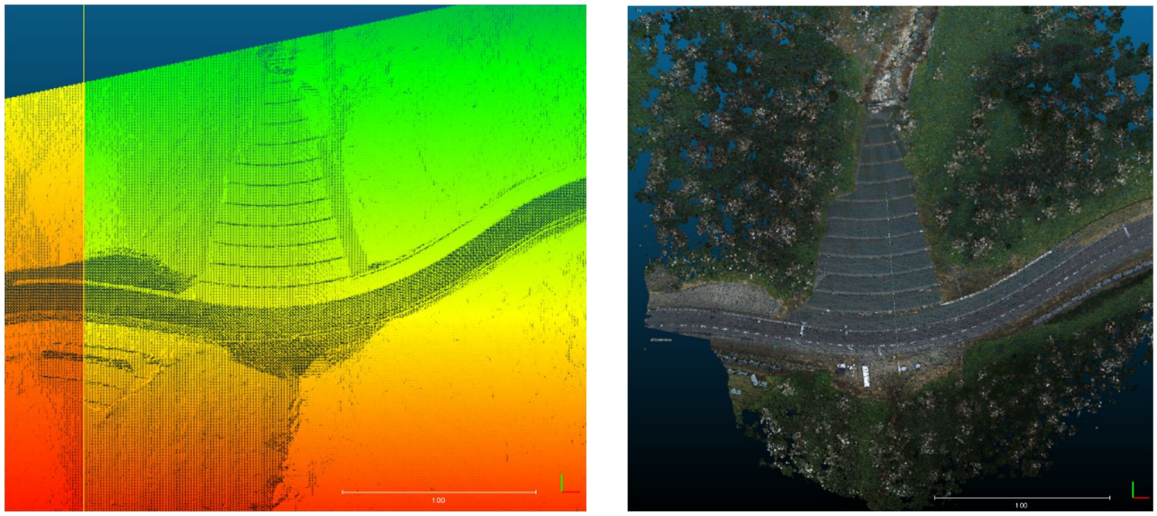

図 2.8　航空 LP（左）と UAV 写真から作成した点群データ（右）の例

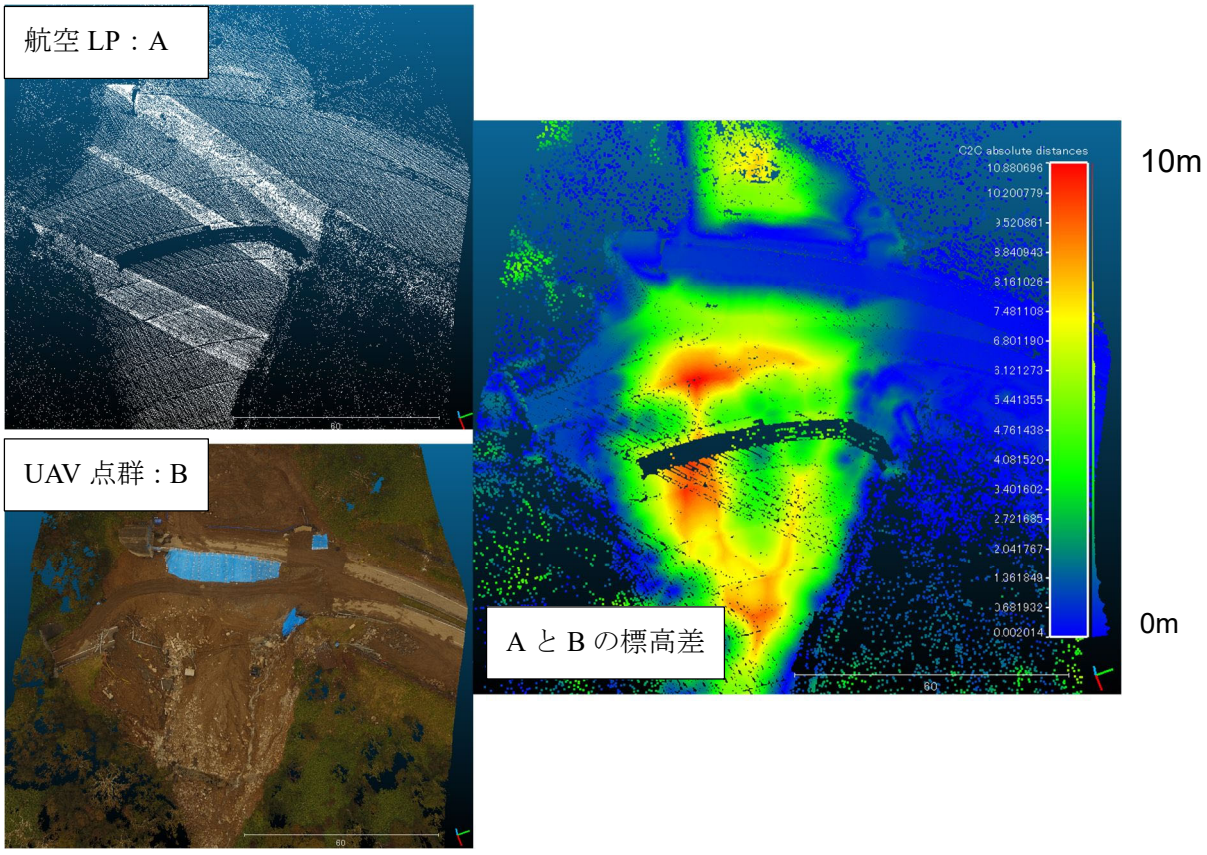

図 2.9　航空 LP と UAV 点群の地形変化量のヒートマップ作成例

2.2.3　現地検討会

ワーキングでは、「災害時における航空レーザープロファイラーの利活用に関する検討」の一環として、UAV の利活用方法を検討する目的で、令和 5 年 9 月 6 日～7 日（積丹町、島牧村）、令和 6 年 9 月 17 日～18 日（乙部町）の 2 回現地検討会を実施した。現地検討会位置図を図 2.10 に示す。



図 2.10　現地検討会位置図

令和 5 年 9 月 6 日～7 日の現地検討会は、島牧村栄浜地区において、岩盤崩落箇所で既存 LP データと UAV 写真からの地形データとの比較、及び平成 9 年の空撮写真から地形モデルを作成し、既存 LP データと UAV 写真からの地形モデルとの比較を行うための UAV 写真撮影を実施した。また、積丹町神岬地区において、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所から令和 5 年 9 月に出された「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル（案）」に則り、UAV 写真を用いた斜面点検手法を行うための UAV 写真撮影を実施した。実施状況を写真 2.3 に、概要を以下に示す。

実施日　令和 5 年 9 月 6 日～7 日

参加者　藤井委員（岩盤斜面ワーキング座長）

専門技術者 5 名、現場補助 1 名、事務局 4 名

合計　11 名



写真 2.3　現地検討会の状況

(1) 島牧村栄浜地区

① UAV 地形モデルの作成

撮影された 182 枚の写真から空中写真図化(SfM)ソフトを用いて地形モデルを作成した。作成した地形モデルを図 2.11 に示す。また、この地形モデルに地質・亀裂等を表現したものを図 2.12、2.13 に示す。

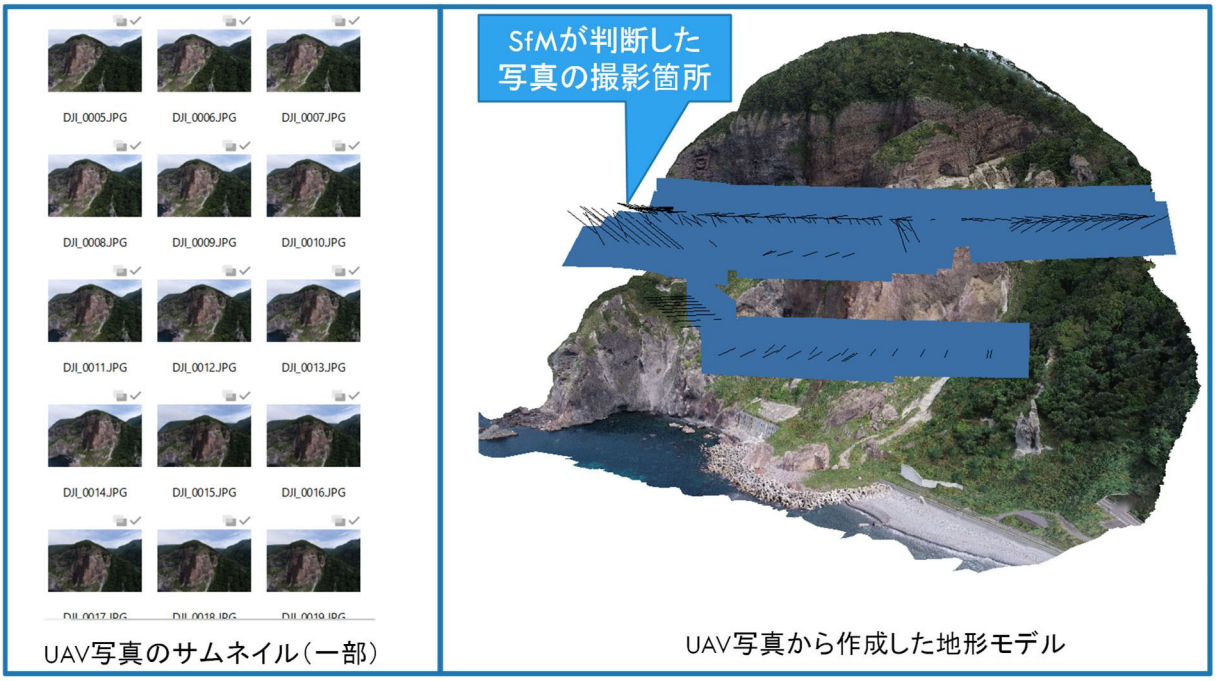

図 2.11　UAV 写真から作成した地形モデル

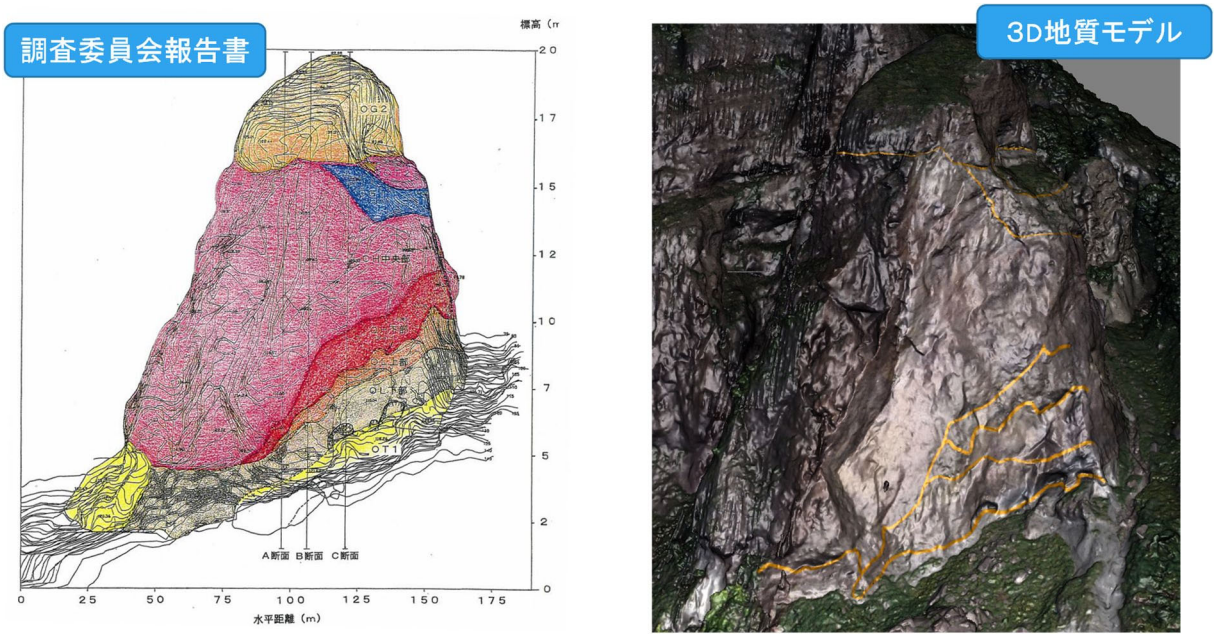

図 2.12　UAV 写真地形モデルの地質境界（崩落事故調査委員会報告書に基づく）

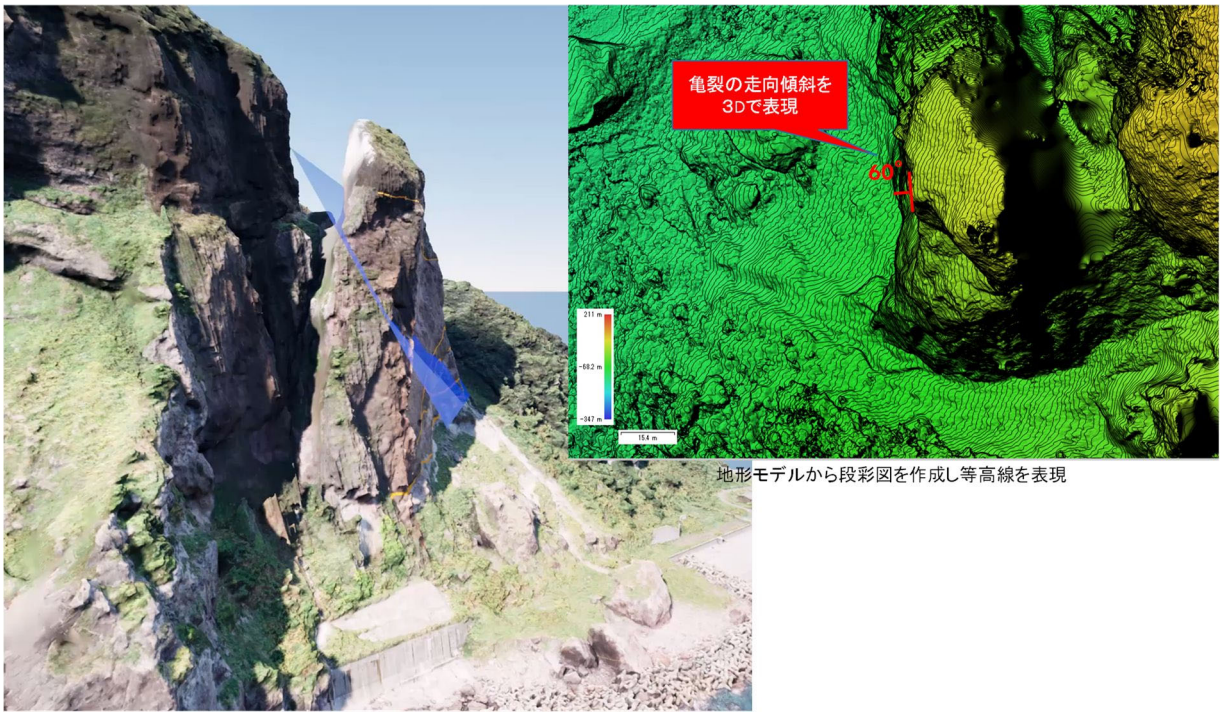

図 2.13　UAV 地形モデルに亀裂面を投影（斜面との位置関係を示すために亀裂面を延長展開）

②　既存 LP データと UAV 写真からの地形モデルとの比較

既存 LP データ（平成 31 年［令和元年］）と、今回撮影（令和 5 年 9 月）した UAV 写真からの地形モデルの比較を行った。その結果、既存の LP データはオーバーハングの表現に乏しいものの背後斜面は表現されており、UAV 写真からの地形モデルは既存 LP データと反対の結果となった（図 2.14）。これより、LP は広い範囲を網羅する特徴が、UAV は狭い範囲を細かく捉える特徴があると考えられる。

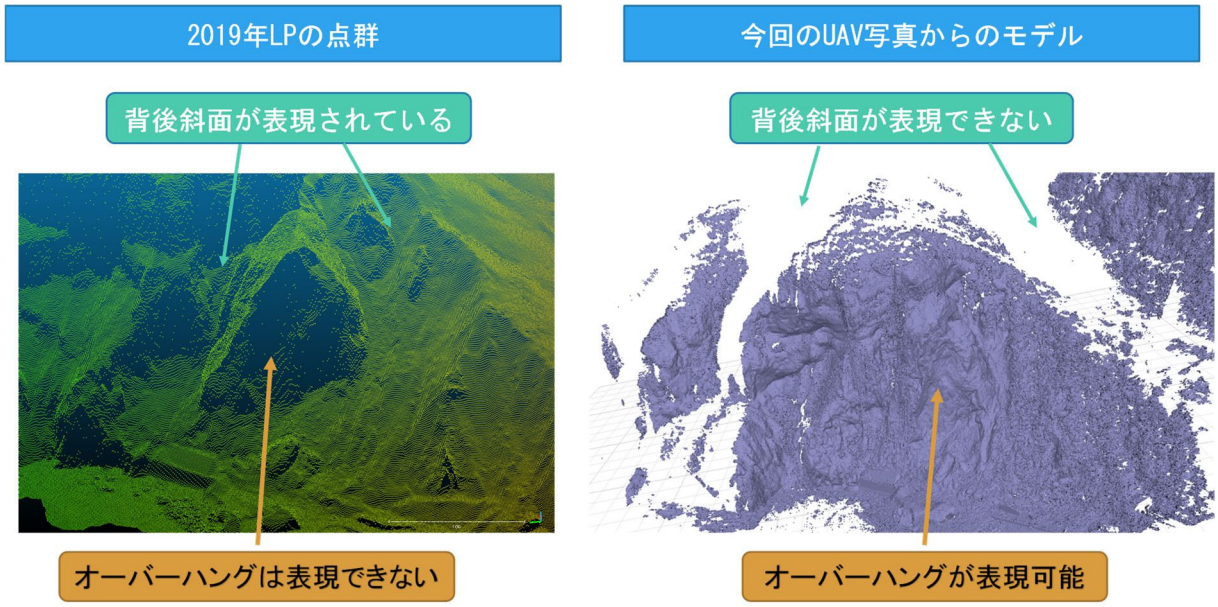

図 2.14　既存 LP データと UAV 写真からの地形モデルとの比較

③　平成 9 年の空撮写真からの地形モデル作成

平成 9 年 8 月に撮影された 46 枚の写真（PDF ファイル）から空中写真図化(SfM)ソフトを用いて地形モデルを作成した（図 2.15）。

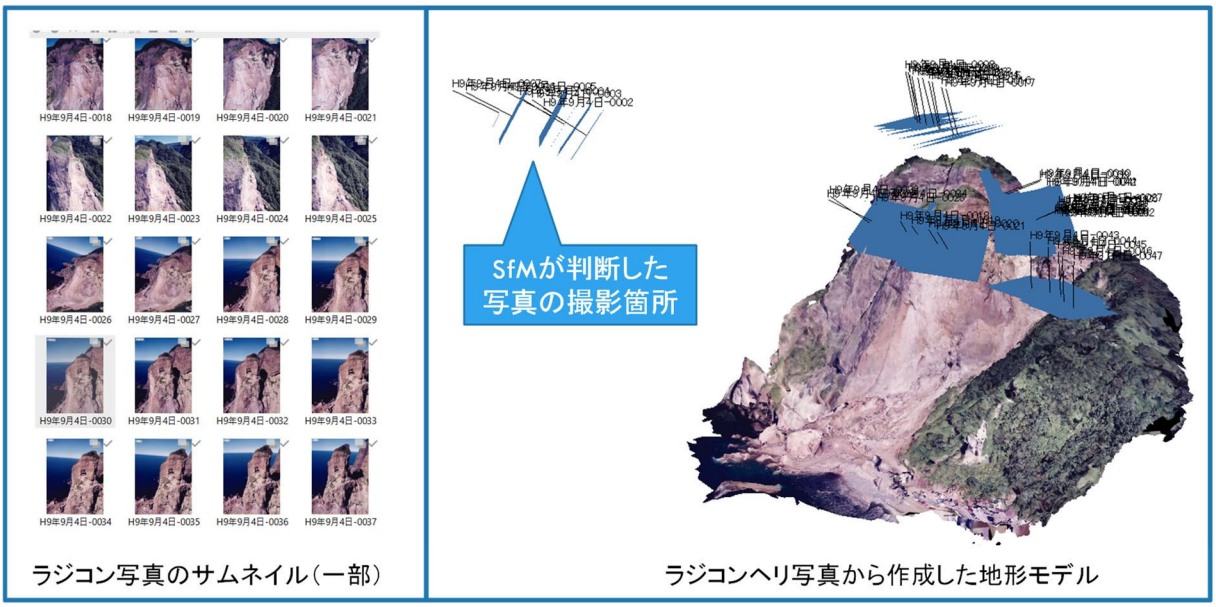

図 2.15　空撮写真から作成した地形モデル

④　令和 5 年 UAV 写真と平成 9 年空撮写真の地形変化量算出

平成 9 年空撮写真からの点群と令和 5 年 UAV 写真の点群から、地形変化量（差分）の算定を行った。地形変化量（差分）の算定にあたり、平成 9 年の空撮写真モデル（以後、H9 モデル）は写真には座標などの位置情報が記録されておらず、地形モデルにもスケール・座標がないことから、座標のある令和 5 年 UAV 写真モデル（以後、R5 モデル）と H9 モデルを見比べて同じポイントを探し、R5 モデルの座標を H9 モデルに読み込んだ（図 2.16）。

座標付きの H9 モデルと R5 モデルを重ねて差分を計算した結果を図 2.17 に示す。この結果、崩壊から 27 年が経過し、露岩部で侵食が進んでいる結果が得られた。ただし、本結果は座標などの位置情報が記録されていなかった地形データとの差分であるため、使用する際は十分留意する必要がある。

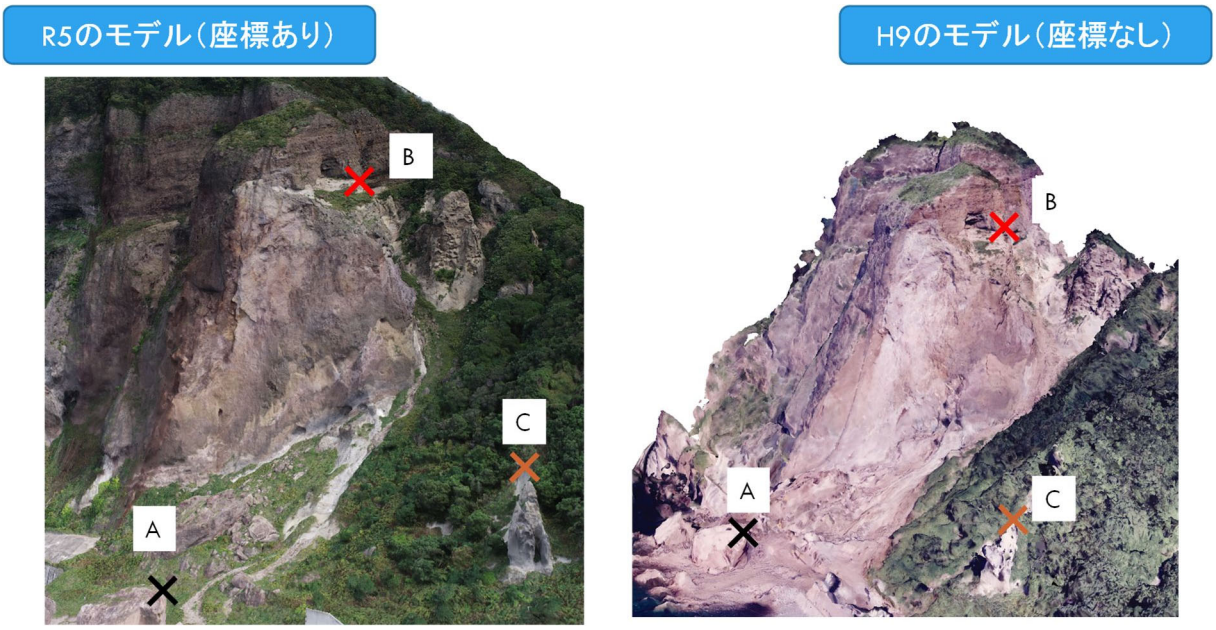

図 2.16　R5 モデルと H9 モデルの同ポイント設定

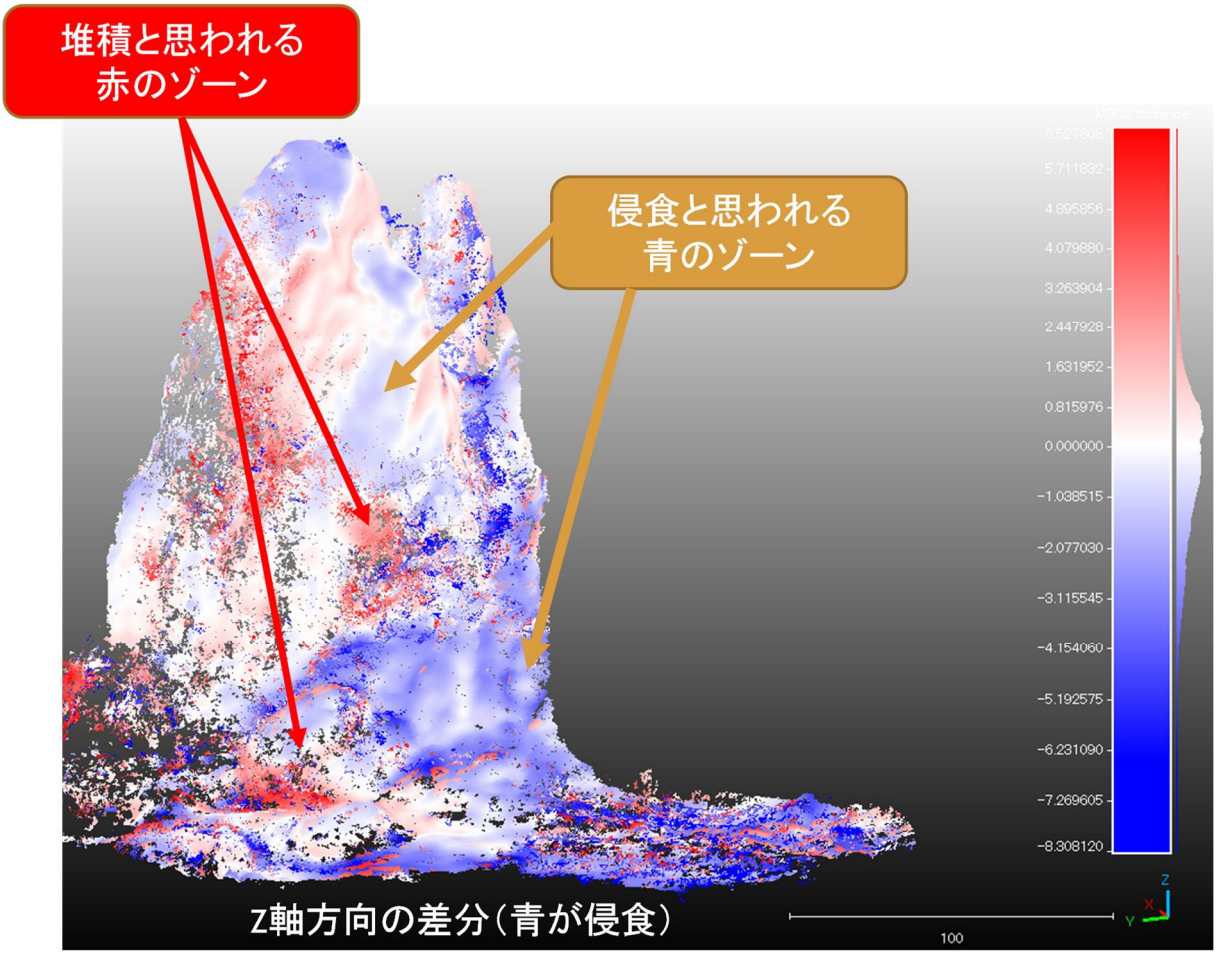

図 2.17　R5 モデルと H9 モデルの地形変化量

(2) 積丹町神岬地区

積丹町神岬地区では、「写真計測技術を活用した 斜面点検マニュアル（案）」（寒地土木研究所）に基づき UAV 写真を撮影し、既存の写真と比較して変状箇所の抽出を試みた。対象としたのは、比高 150m 付近に分布する急崖露岩部とした（写真 2.4）。なお、既存の写真データは、寒地土木研究所より提供頂いた写真を使用した。



写真 2.4　対象斜面状況

変状箇所の抽出方法は、写真処理ソフトを使用して比較する 2 枚の写真を重ね合わせ、「差の絶対値」を表示させて背景差分により変状箇所を抽出する（図 2.18）。

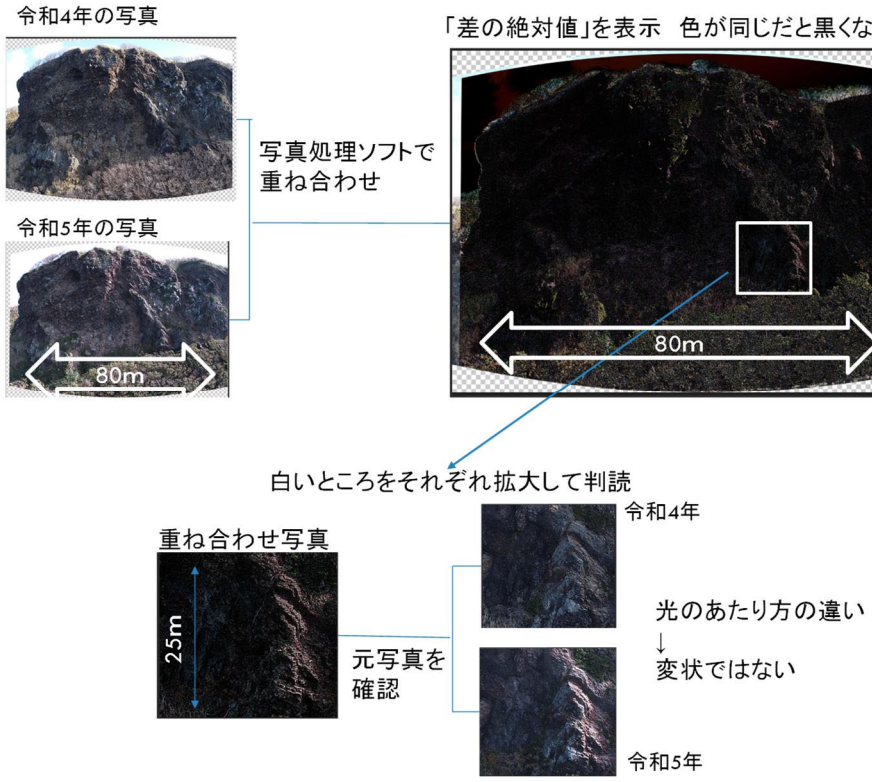

図 2.18　変状箇所の抽出方法

この結果、標高の高い急な崖斜面においても時期の異なる写真を重ね合わせ背景差分を取ることにより、地上からは確認が困難な変状も点検できることが確認できた（図 2.19）。



図 2.19　変状箇所の抽出結果

令和 6 年 9 月 17 日～18 日の現地検討会は、地盤部会土砂災害ワーキングと合同で実施した。当ワーキングでは乙部町館浦地区において、立面オルソを用いた変状箇所の抽出を目的に UAV 写真撮影を行った。実施状況を写真 2.5 に、概要を以下に示す。

実施日　令和 6 年 9 月 17 日～18 日

参加者　木幡委員長、藤井委員（岩盤斜面ワーキング座長）、児玉委員、山下委員、
中川委員、石川委員
専門技術者 11 名
現場補助 1 名
事務局 3 名
合計　21 名



写真 2.5　現地検討会の状況

図 2.20 に示すよう、垂直オルソフォトでは急崖が判読できないことから、「写真計測技術を活用した斜面点検マニュアル（案）」に基づき立面オルソフォトを作成し、背景差分画像の判読を行った。

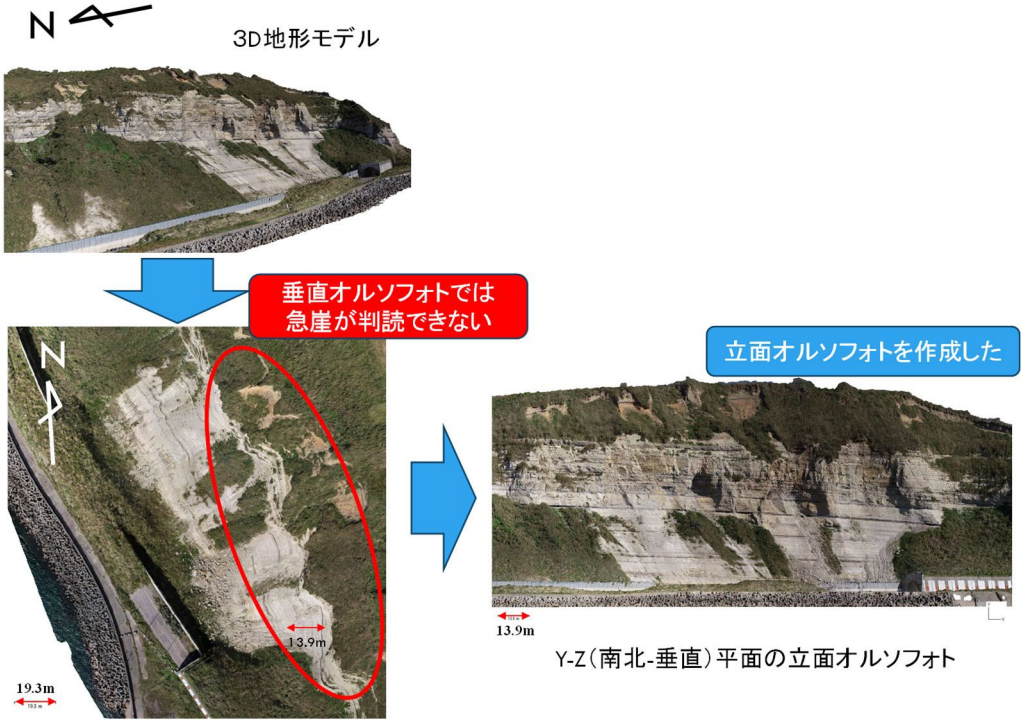

図 2.20　急崖部の垂直オルソフォトと立面オルソフォト

背景差分画像の判読は、令和 3 年 11 月撮影の画像（寒地土木研究所より貸与）と令和 6 年 9 月に撮影した水平写真を使用した。その結果、全体で約 90 箇所の変状を確認した。判読図の図郭を図 2.21 に、図郭 3 の変状箇所を図 2.22 に示す。

このほか、令和 3 年 11 月撮影写真に基づく点群（寒地土木研究所より貸与）と令和 6 年 9 月に撮影写真（193 枚）に基づく点群を用いて変化量の算出を行った（ヒートマップの作成）。変化量の算出にあたり、重ね合わせの精度を高めるため、共通する GCP（標定点）を導入した（図 2.23）。この結果、崩積土の判別は Z 方向のヒートマップ（図 2.24）が、発生源の判別は X 方向のヒートマップ（図 2.25）が判別しやすい結果を得られた。

オーバーハング岩体の点群データ取り扱い時の注意点を以下に示す。

- ヒートマップ作成時には Z 方向以外に X・Y 方向の差分も考慮する
- 体積計算時には Z 方向以外に X・Y 方向も算出してみる
- データ解析時には測量系以外のソフトウエアの利用も考慮する
  （オーバーハングは測量系ソフトウエアでは表現できない）

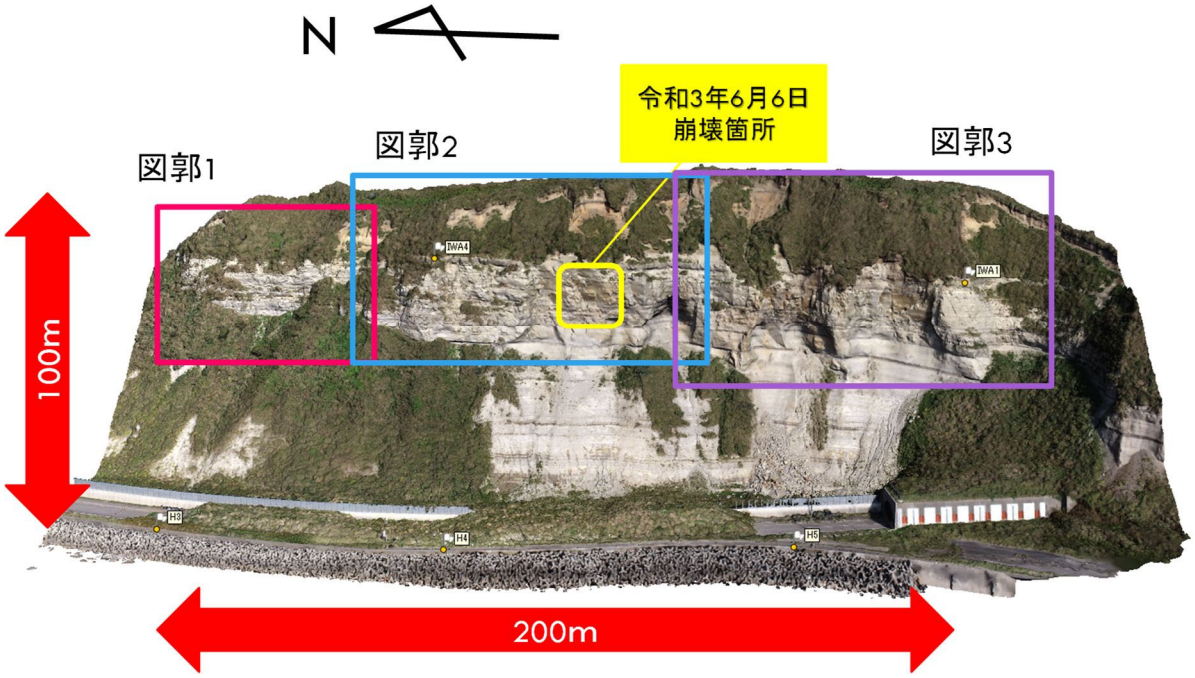

図 2.21　判読図の図郭

図郭3

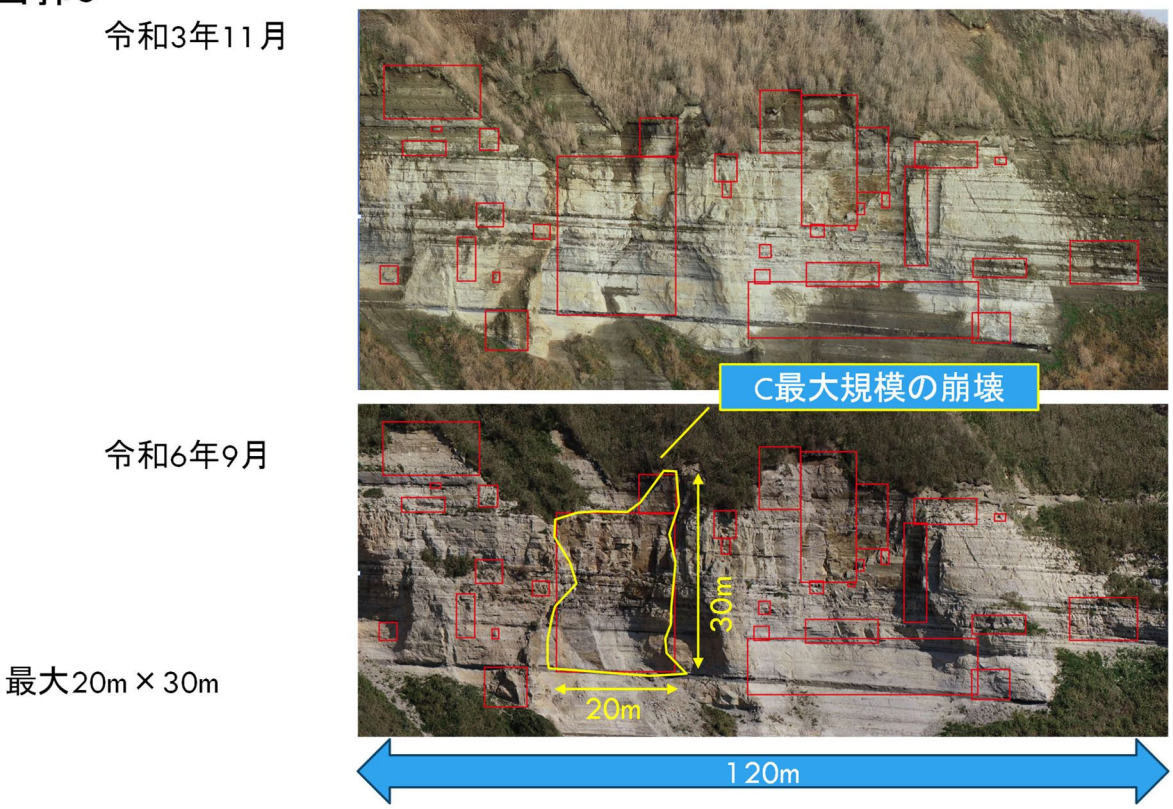

図 2.22　立面オルソから判読した変状箇所

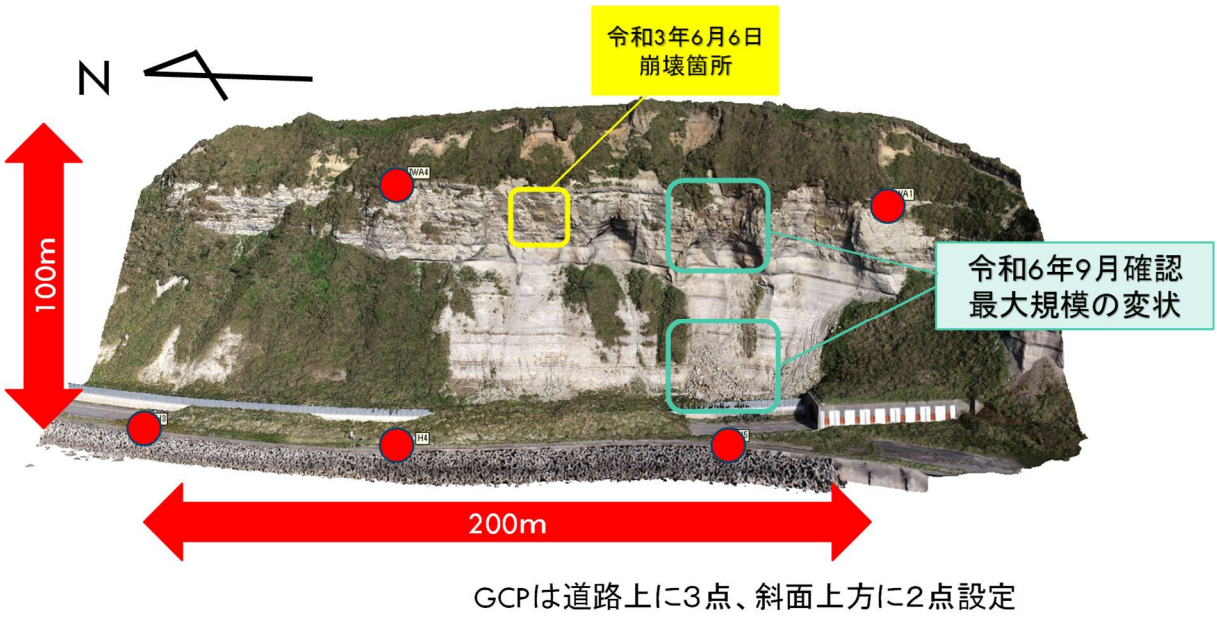

図 2.23　共通 GCP の位置

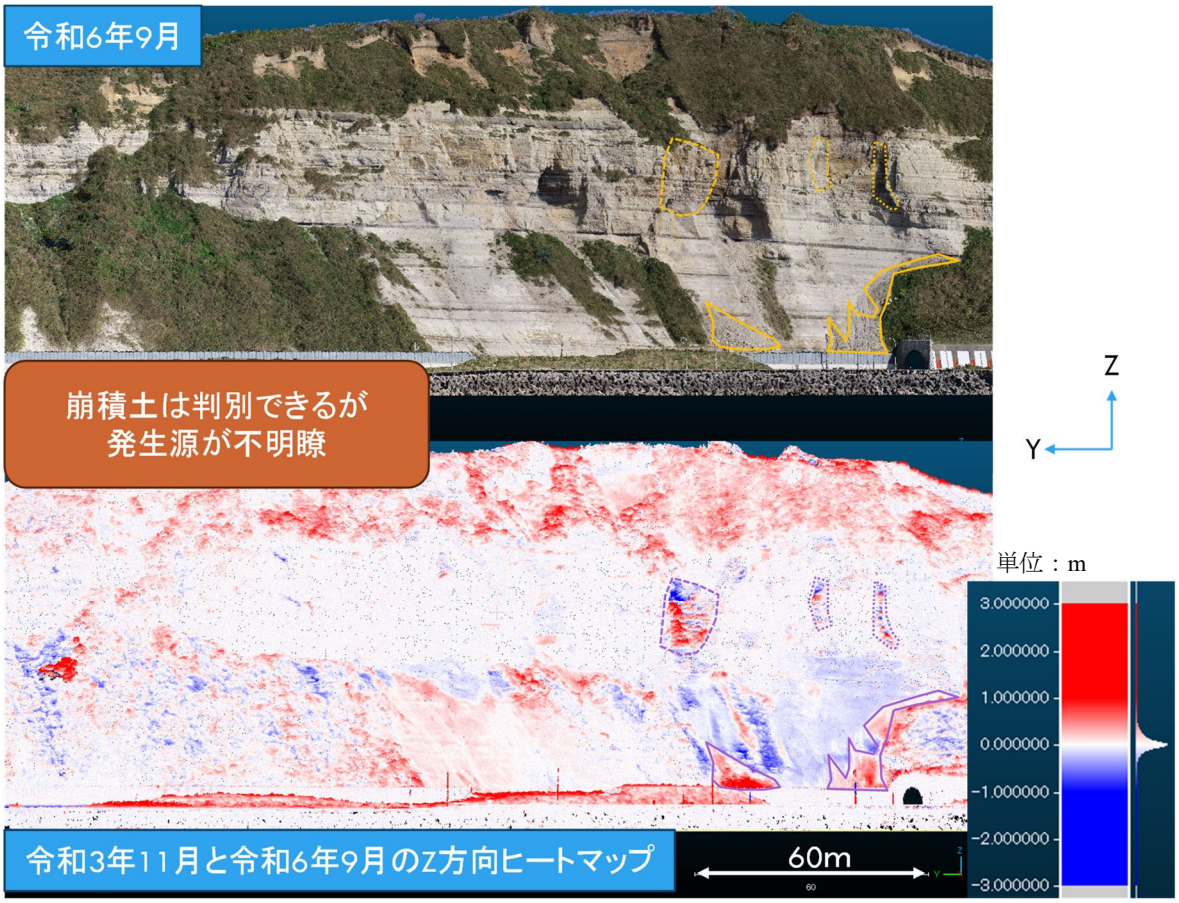

図 2.24　Z 方向のヒートマップ

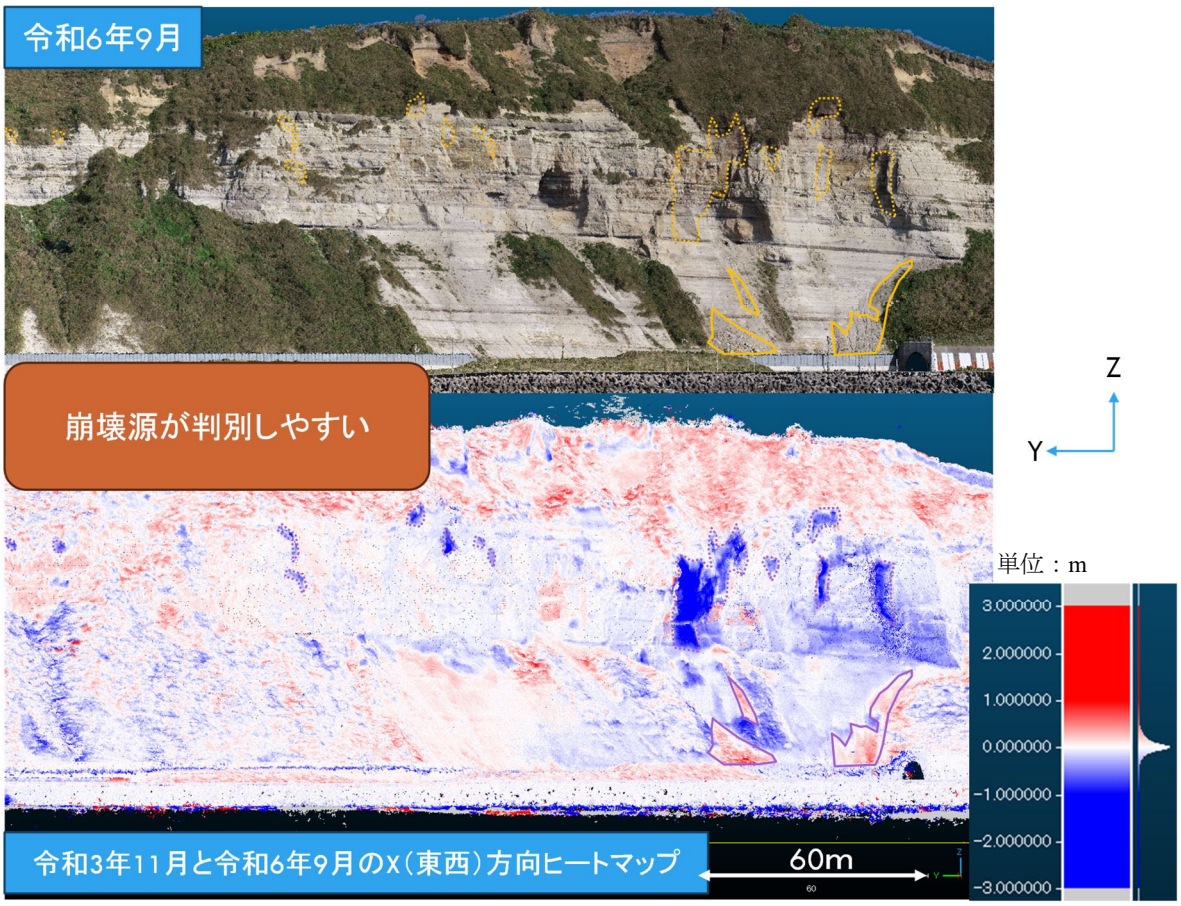

図 2.25　X 方向のヒートマップ

2.3 最近の新技術の動向に関する情報収集

北海道における 4 大災害での提言を受け 20 年近く経過しているが、現在の技術であれば、どこまで課題に対応できるのかを、当委員会の取組みとして整理する必要がある。そこで岩盤斜面ワーキングでは、事故調査委員会（4 大災害）での提言について課題を整理するため、最近の新技術に着目し、その新技術がどのようなものであるか整理することとした。

整理の方法として、アンケート調査、文献調査、取りまとめ項目の洗い出し、事例調査、資料集取りまとめ等を行い、現時点での技術であれば課題に対してどのような対応・点検など可能か情報収集を行った。

2.3.1 アンケート調査

(1) アンケート調査の目的

現時点での技術であれば岩盤斜面調査に関してどのように利活用できるか模索することを目的に、道路管理技術委員会地盤部会の委員、アドバイザー、専門技術者を対象に実施した。

(2) アンケート調査内容

アンケート内容は、技術のほか、活用場面、利便性、安全性、経済性など下記の内容とした。

Q1）斜面を対象とした最近の調査でよく利用する技術はありますか？
Q2）その技術はどのような調査（場面［被災時・調査時・対策時］）に利用されましたか？
Q3）その技術はどのような人でも扱えるでしょうか？
Q4）その技術は安全に利用できるでしょうか？
Q5）その技術は他の分野にも応用できるでしょうか？
Q6）調査費用は 1 箇所あたりどの程度（〇万円程等）でしょうか？
Q7）その他実施に際する課題があればお答えください。

(3) アンケート調査結果

アンケート調査結果、得られた調査技術について以下に示す。活用場面、利便性、安全性、経済性などについては、取りまとめる資料集に掲載する。

＜計測＞

・UAV 空中写真撮影
・UAV＋SfM ソフト
・UAV を用いた熱赤外線計測
・ドローン＋地上設置型 LiDAR
・LiDAR 付き UAV
・LP 測量(UAV、地上)
・i-pad pro の LiDAR
・LiDAR スマーフォンと測量アプリを組み合わせたによる点群測定
・衛星 SAR と地上設置型 SAR による斜面の現地観測
・高精度レーザー測量データを用いて作成した赤色立体地図
・3D レーザースキャナーによる立体図・平面図・断面図の作成

＜調査・点検＞
・ロープアクセス調査
・スマートグラス
・ウェアラブルカメラ
・360 度カメラ
・レーザー距離計

アンケート調査の結果、最近の新技術として以下のキーワードを抽出した。
・UAV
・LiDAR
・SAR
・熱赤外線計測
・赤色立体図
・ロープアクセス調査

2.3.2 文献検索

(1) 文献検索の目的

アンケート結果で得られたキーワードに関して、視野を広めるために国内の研究の動向を把握することを目的に、土木学会誌（論文集 C）、地盤工学会誌、応用地質学会誌等の各種学会誌のタイトルを 10 年ほど遡って、関連しそうな論文を検索した。

(2) 文献検索の方法

日本で発行されている主な学会誌を網羅した検索システム（J-stage）で検索を行った。検索期間は平成 12 年から令和 6 年とした。

(3) 文献検索結果

アンケート調査の結果、キーワードとして抽出した「UAV」について文献検索を行った。広く検索するため、最初のワードは「斜面」とし、続くワードを「UAV」、「ドローン」、「航空レーザー」とした。その後、最初のワードを「岩盤斜面」と絞り、同様に検索を行った。その結果を図 2.26、2.27 に示す。

「斜面-○○○」の検索結果（図 2.26）では、平成 12 年以降、各キーワード検索で 300 件以上抽出された。一方、「岩盤斜面-○○○」の検索結果（図 2.27）は、「斜面-○○○」の 3～5%の件数となった。「岩盤斜面」と「斜面」のヒット件数の違いは、「斜面」が、地すべりや土砂崩壊、その他のテーマが含まれるためと推察される。

また、「UAV」に次いで多かった「LiDAR」について、「斜面-LiDAR」、「岩盤斜面-LiDAR」で検索を行った。その結果（図 2.28）、航空レーザーと同じような傾向が確認された。

検索結果得られた論文数

「斜面　UAV」 611件
「斜面　ドローン」 503件
「斜面　航空レーザー」 331件

- 「斜面-〇〇〇」だと、平成12年以降各キーワード検索で300件以上
- 「斜面-UAV」、「斜面-ドローン」：ヒット数は異なるが、平成28年頃から急激に増え始め令和4、5年頃ピーク
- 「斜面-航空レーザー」：平成12年頃から徐々に現れ始め、平成17年以降年間10～20本ほどの論文が出される

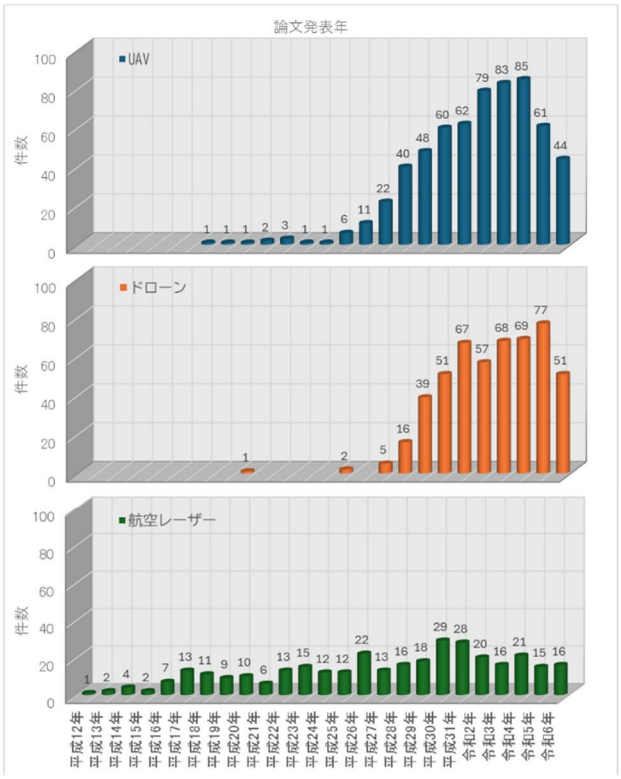

図 2.26　「斜面-〇〇〇」の検索結果

検索結果得られた論文数

「岩盤斜面　UAV」 19件
「岩盤斜面　ドローン」 16件
「岩盤斜面　航空レーザー」 17件

- 「岩盤斜面-〇〇〇」：「斜面-〇〇〇」の3～5%の件数
- 「岩盤斜面-〇〇〇」：「斜面-〇〇〇」の論文発表年とほぼ同じ傾向
- 「岩盤斜面」、「斜面」：違いは何か？
  ⇒　斜面は、地すべりや土砂崩壊、外のテーマもあるからか？

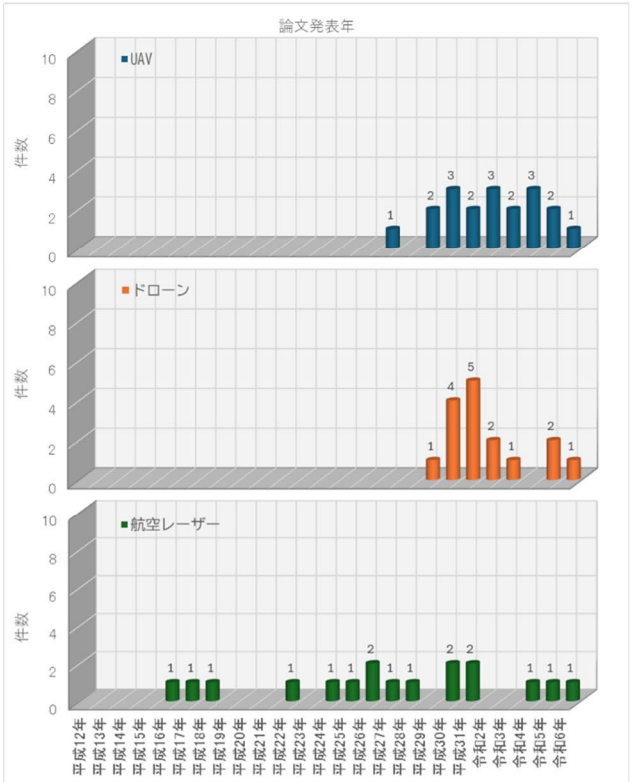

図 2.27　「岩盤斜面-〇〇〇」の検索結果

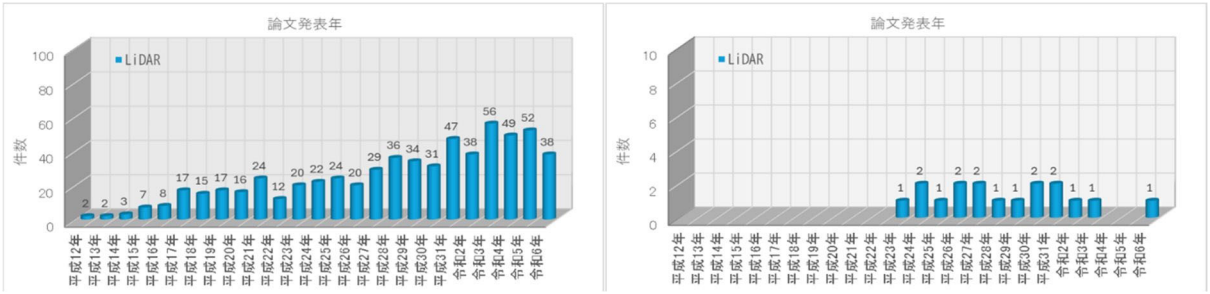

図 2.28　「斜面-LiDAR」、「岩盤斜面-LiDAR」の検索結果

(4)　AI を活用した岩盤斜面の調査・評価手法のレビュー

過去 10 年間（平成 26 年～令和 6 年）に学術文献において発表された、岩盤斜面の安定性評価および点検に関する主要な新技術と方法論の確認と、アンケート調査結果から見えてきた傾向を確認する目的で、AI を活用した岩盤斜面の調査・評価手法のレビューを行った。

レビューには、「Gemini」を使用し、岩盤斜面の斜面安定度や点検の調査・評価に関して、我が国及び海外における過去 10 年程度の新技術について、学術論文からレビューして、代表的なそれぞれの代表的な出典の URL をまとめた。

その結果、岩盤斜面の特性評価とモニタリングにおけるリモートセンシング技術の進展として、以下の技術が挙げられた。

- UAV（無人航空機）写真測量と SfM（Structure from Motion）
- LiDAR（Light Detection and Ranging）
- InSAR（干渉合成開口レーダ）

これらはアンケート調査結果から得られたキーワードと一致し、傾向が一致することを確認した。岩盤斜面評価のためのリモートセンシング技術の概要を図 2.29 に示す。

技術	原理	主要な進展（過去10年）	岩盤斜面への応用	利点	欠点
UAV-SfM R2～R6の活動	重複する空中写真からSfMアルゴリズムにより3D点群とモデルを生成	UAVプラットフォームの高性能化、SfMソフトウェアの高度化、変化検出技術、不連続面抽出技術	詳細な3D地形モデル作成、地形変化・落石モニタリング、地質構造マッピング、安定性解析入力	低コスト、迅速、高解像度、アクセス困難箇所への適用	天候依存、専門知識要、植生下での精度低下の可能性
LiDAR (TLS/ALS)	レーザーパルスで距離を直接測定し、高精度な3D点群を生成	点密度・精度・範囲向上、点群処理アルゴリズム改善、モバイルLiDAR、スマートフォンLiDAR	高精度岩盤露頭キャラクタリゼーション、地質構造マッピング、落石量定量化、変形モニタリング	高精度、照明条件非依存、一部植生透過可能	面積あたりの費用が割高（特にALS）、データ量大、専門機器・知識要
InSAR (衛星/地上)	SAR画像の位相差から地表面変動を広域・高精度に測定	SAR衛星コンステレーション拡充、時系列解析アルゴリズム改善（SBAS等）、地上型InSARの発展、大気補正技術	広域の緩慢な地すべり・斜面変動モニタリング、先行変位検出、地すべりハザードマッピング	広域観測、ミリメートル級精度、非接触、全天候型（衛星）	デコヒーレンス（植生、急変動）、大気遅延の影響、専門的処理技術要

図 2.29　岩盤斜面評価のためのリモートセンシング技術の概要

2.3.3　事例紹介

最近の新技術の動向として、アンケート調査の結果抽出されたキーワード「LiDAR」について、「LiDAR」論文のカテゴリー分けを行い、事例紹介を行った。

(1) カテゴリー分け

カテゴリー分けは、日本で発行されている主な学会誌を網羅した検索システム（J-stage）で、「岩盤斜面 LiDAR　、岩盤斜面 航空レーザー、岩盤斜面 地上レーザー」で検索を行った。その結果、29 件の論文が抽出されたが、13 件は手法紹介やレビューであり、カテゴリー分けに利用できる論文は実質 16 件であった。表 2.6 に 16 件分のカテゴリー分け一覧を示す。

表 2.6　カテゴリー分け一覧（LiDAR）

カテゴリー	論文数	地形判読	差分解析	その他	その他備考
岩盤斜面	3	1	1	1	システム開発
地すべり	2	1	1		
深層崩壊	4	4			
落石	1	1			
土石流･土砂堆積	3	1	2		
斜面崩壊	2	1		1	性能比較
設備	1	1			

(2) 事例紹介

「LiDAR」に関して、今後、岩盤斜面ワーキングで事例調査を実施するにあたって指標となる事例紹介を行った。事例紹介は、日本リモートセンシング学会誌（2020 年、40 巻、3 号、141-146）に掲載された、「UAV 搭載型 LiDAR システムの開発と災害対応をはじめとする精密地形計測への取り組み（宮坂 聡, 髙橋 弘, 宇野女 草太, 田村 恵子, 笠 けやき, 國枝 信吾, 中舎 哉, 鈴木 浩二）」とした。以下に、引用した論文内容を示す。

① **背景**

航空レーザー測量は実施するための費用が高額（小面積でも一定の運航費用・機材損料がかかり、面積あたりの費用が割高になる傾向）であったが、平成 26 年に UAV をターゲットとした軽量小型かつ高性能を備えた装置が開発されたため、検証を行った（図 2.30）。

② **性能確認及び精度検証**（図 2.31）

照射点密度の比較では、従来の航空機より 1 桁以上の高密度で計測ができ、高さ精度の検証では、1cm の段差の識別が可能な結果が得られた。また、樹木下の地面の検出においては、草丈 60cm の笹の下部の地面も捉えることができた。

③ **実利用事例**（図 2.32）

崩壊規模が幅約 200m、長さ約 240m の災害現場で、計測は 0.1m×0.1m に 1 点のデータを取得できるよう計画し実施した。その結果、樹木のフィルタリング処理と、下層部のオリジナルデータを再統合処理した S-DEM（Substratum Digital Elevation Model）の追加処理を行い、一般の地形モデルからでは確認が困難な亀裂や浮石の状況を可視化することができた。

Table 1　UAV 搭載型 LiDAR の性能諸元

装置名	VUX-1(RIEGL 社製)
最短距離	3m
アイセーフ	レーザクラス 1(JIS C 6802)
有効測定レート	500,000 測定/秒まで
視野角(FOV)	330°
最大作動飛行高度(AGL)	350m/1,150ft



Fig. 1　小型 LiDAR VUX-1 の概観



Fig. 2　UAV 搭載型 LiDAR に用いる機体
上：ヘリコプター型ラジコン機 / 下：マルチロータ型 UAV

図 2.30　UAV 搭載型 LiDAR の諸元と UAV 搭載型 LiDAR に用いる機体

• 照射点密度の比較

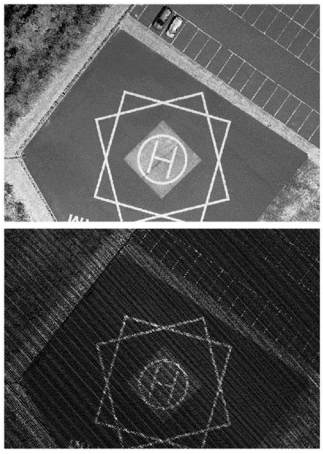

Fig. 3　照射点密度の比較（反射強度画像）
上：UAV（320 点/m²），下：ヘリコプター（28 点/m²）

従来の航空機より1桁以上の高密度で計測

• 高さ精度の検証

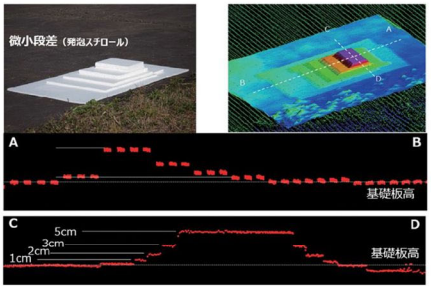

Plate 1　高さ精度検証結果
左上：検証に用いた構造物 / 右上：標高段彩図
中段・下段：左上 A-B，C-D の点群断面図

1cmの段差の識別が可能

• 樹木下の地面検出

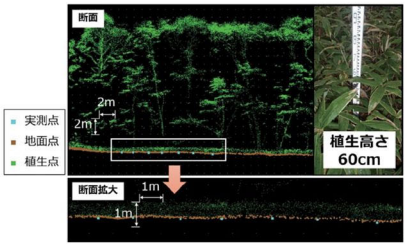

Plate 2　植生下での地面検出状況
点群断面図と下層植生の状況（右上）

草丈60cmの笹の下部の地面も捉える

図 2.31　性能確認及び精度検証結果

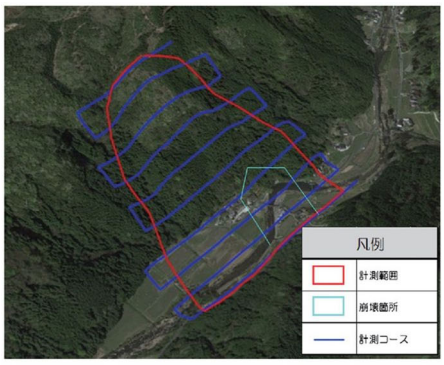

Plate 4　計測範囲および計測コース
＊大分県中津市耶馬渓町

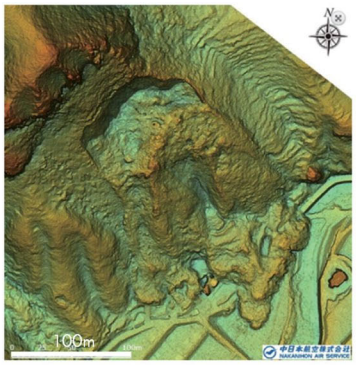

Plate 5　UAV 計測による地形起伏図

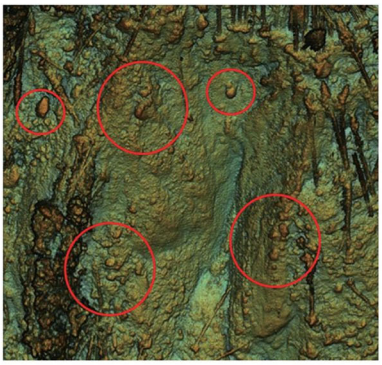

Plate 6　S-DEM による二次災害の恐れのある浮石等の判読例
＊赤丸内に浮石と思われる塊状の物体が確認できる

図 2.32　実利用事例

〔引用文献〕

1）伊東佳彦：北海道における岩盤斜面の調査・対策の現状，自動車技術，Vol.61,No.5,2007