

GNSS 受信機による座標計測と SfM の写真解析試験

Topographic analysis tests using SfM photogrammetry
based on coordinate measuring by GNSS Receiver

黒 木 貴 一

Takahito KUROKI
福岡教育大学
社会科教育ユニット

後 藤 健 介

Kensuke GOTO
大阪教育大学

池 見 洋 明

Hiroaki IKEMI
日本文理大学

(令和元年9月6日受付, 令和元年12月12日受理)

抄 録

GNSS 受信機を使用した地形モデル作成の精度向上と, それによる地形変化検討の可能性を確認した。基礎的な計測試験は, 三角点, キャンパス内道路, 遺跡トレンチを活用した。その結果, GNSS 受信機では座標を数 cm 誤差で計測できること, 基盤地図情報の座標は正しい座標から約 1 m のずれを想定する必要があること, さらにその座標を用いた地形モデル解析後の結果表示ではフリー GIS が十分活用できることを確認した。次に応用的な計測試験は, 雲仙東山麓, 福岡教育大学周辺, 附属幼稚園に対し実施した。GNSS 受信機による座標を利用し, 市販の空中写真では 0.5 m 前後の標高変化が議論でき, その上昇としては樹木等の成長, 家屋等の建物設置, 低下としては樹木等の伐採, 地形改変, 伐木, 家屋撤去が識別された。UAV で撮影した空中写真では数 cm 以上の標高変化は議論でき, 築山の標高変化は雑草の繁茂のほか, 自然及び児童の遊びによる侵食と山麓での堆積であることが識別された。

キーワード: 全球測位衛星システム, 固定基準点, 座標, 多視点 3 次元復元, 数値標高モデル

1. はじめに

地形を記録する本邦の地図は, 明治時代以前は絵図, 明治から昭和時代は地形図 (Topographic Map), 平成時代は数値地形モデル (DEM: Digital Elevation Model) が中心となり, 今日までその正確さを追究する歴史があった。絵図は, 伊能忠敬による測量事業による伊能図¹⁾で技術的には最終段階を迎えた。等高線を持つ地形図は, 三角測量に基づく基準点設置と平板測量²⁾に続き, 昭和時代に航空機から撮影した空中写真による作成³⁾に変わったが, 平成時代には人工衛星の活用⁴⁾も模索された。そして昭和時代後期から開始された地形情報のデジタル記録⁵⁾は, 解像度約 250 m から令和時代現在の基盤地図情報の数値標高モデル (DEM) の約 5 m にまでそ

の精度を向上させた。

DEM は, 地形図の等高線で示される地形情報以上に詳細になれば, 地形形状やその形成過程の理解が格段に進む。DEM は空中写真や航空レーザー計測で作成されており, 基盤地図情報として公開されており, 自在に活用できるが, 研究者独自でも今日取得できるようになった。例えば簡易レーザー距離計による三辺測量⁶⁾, 地上型レーザーでの計測⁷⁾, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) で撮影した写真の解析⁸⁾, GNSS (Global Navigation Satellite System) 計測によるキネマティック測量⁹⁾などがある。

地形形成過程の議論は, 地形形状からは推定に止まり十分な理解に至らないため, 標高変化量の把握が必要となる。このため広範囲に対しては空

中写真や衛星データなどリモートセンシング技術が利用され^{10),11)}，狭範囲に対しては現地測量など各種計測が適用され^{12),13),14)}，その変化量が明らかにされ，各種の防災等対策に活かされてきた。このように広がり合わせた各手法で，その時点の地形形状の把握はできるが，地形変化の激しい場所に対し，その把握に必要な固定基準点（GCP：Ground Control Point）の設置は難しい。このため標高変化量の把握は，随時設置されるGCP座標の精度に影響を受ける。

近年，氾濫や斜面崩壊等の自然災害が生じ，時には数十年を隔てて再来し，激しい標高変化を伴う地形変化を生じる。その標高変化量の把握は精度良いGCP座標が不可欠である。またテフクロロジーや年代測定では評価しにくい10³年程度の再来間隔を持つ標高変化量の把握でも同様の問題がある。そこでGNSS受信機のGCP座標計測の精度を確認し，それによる地形形状や標高変化量の把握を様々な条件下で試みた。本研究では，その成果の特徴を整理し，さらに地形学的な議論を展開する際の課題を確認した。

2. 試験方法

2. 1 使用機材とソフト

GNSS受信機はTrimble R2を，GCP座標の計算には座標計算ソフト（SPSO：Spectra Precision Survey Office）を，空中写真撮影にはDJIのUAVのPhantom2に搭載したGoPro HERO3を，3Dモデル計算ではSfM（Agisoft社のPhotoScan Professional）を利用した。

2. 2 座標計算までの手順

GNSS受信機による各GCPでの計測は6分間とし，データ解析には国土地理院提供の電子基準点データ提供サービスや基準点成果等閲覧サービスを利用した。SPSOの解析では電子基準点3点のデータを利用する。

2. 3 試験概要

福岡県宗像市と東峰村，長崎県島原市を対象に，6種類の計測と解析を試行した。それぞれ基本的な計測試験として，①三角点での計測，②キャンパスの道路交点での計測，③遺跡トレンチでの作業時間確認試験，を行った。空中写真を使用する応用的な計測試験として，④空中写真による雲仙東山麓での地形変化分析，⑤空中写真によるキャンパス周辺の経年変化の分析，⑥UAVによる空中写真を活用する実践的な使用試行，を

行った。④では国土地理院の1975年1-2月撮影と2015年5月撮影のカラー空中写真を使用した。⑤では国土地理院の1981年撮影及び宗像市の2002年撮影のカラー空中写真を使用した。

3. 基本的な計測試験の結果

3. 1 三角点での計測

国土地理院のホームページで座標が示されている三等三角点「城山」と，四等三角点「三郎丸」の座標を計測した（写真1）。「城山」は明治29年設置，四等三角点「三郎丸」は昭和50年設



写真1 三角点の状況

表1 三角点での計測結果と地理院の情報

(1)城山		計測1	差(m)	計測2	差(m)
x	90864.922	90864.809	0.113	90864.829	0.093
y	-37907.313	-37907.337	0.024	-37907.340	0.027
z	369.150	369.176	-0.026	369.185	-0.035
		二乗和平方根	0.119	二乗和平方根	0.103
(2)三郎丸		計測1	差(m)	計測2	差(m)
x	90090.006	90089.919	0.087	90089.925	0.081
y	-38612.468	-38612.517	0.049	-38612.517	0.049
z	46.750	46.812	-0.062	46.780	-0.030
		二乗和平方根	0.118	二乗和平方根	0.099

置である。GNSS 受信機による計測はそれぞれ 2 回行った。SPSO の解析では、電子基準点の「古賀」,「直方」,「北九州 1」のデータを使用した。

計測結果と基準点成果等閲覧サービスの座標値及び両者の差、加えて両者の差の二乗和平方根を計算した(表 1)。2 回の計測結果は、ほぼ同じ座標値を示す。なお、計測における「城山」での水平精度は約 1.4 cm で垂直精度は約 3.0 cm,「三郎丸」での水平精度は約 1.9 cm で垂直精度は約 2.1 cm だった。「城山」では基準点成果に対し、x は約 10.3 cm, y は約 2.6 cm, z は約 3.5 cm 差があり、その二乗和平方根は約 11.1 cm だった。「三郎丸」では基準点成果に対し、x は約 8.4 cm, y は約 4.9 cm, z は約 4.5 cm 差があり、その二乗和平方根は約 10.9 cm だった。これらの差及び二乗和平方根は、計測に伴う精度を大きく越えているため、実際に三角点の座標が少しずれていると思われる。両計測値の xy 座標を見ると、基準点成果に対しおおよそ系統的に南西にずれているため、このずれは設置以降にこの地が受けた地殻変動の影響の可能性が考えられる。

このように GNSS 受信機は公表された三角点の座標よりも現実に近い値を高精度(数 cm 誤差で)計測できた。

3. 2 キャンパスの道路交点での計測

基盤地図情報の座標は、SfM で地形モデルを作成する際に使用される場合がある。そこで福岡教育大学キャンパスの道路交点 8 点を GCP とし(図 1)、GNSS 受信機による計測結果と基盤地図情報から取得できる座標とを比較し、基盤地図情報から得る座標の持つずれの幅を確認した。1 は理科教棟南東にある通用路十字路の中心、2 は理科教棟教入り口スロープが本道と接続する中心、3 は図書館東側面と事務棟西側面の中心、4 は体育館前道路が正門本道と接続する中心、5 は武道館と体育館中央道と体育館前道路の交差中心、6 は西門の中央点、7 は体育館前道路と定年坂の交差中心、8 はプール西道路と音楽教棟前道路の交差中心である。

基盤地図情報と計測結果の座標値及び両者の差、加えて両者の差等を計算した(表 2)。計測における各点の水平精度は 1.1 ~ 2.9 cm で平均約 1.6 cm、垂直精度は 2 ~ 6.4 cm で平均約 3.1 cm だった。計測と基盤地図情報とを比較すると、その差は x が -57.3 ~ 46.4 cm, y が -161.5 ~ 188.8 cm, z が -51.9 ~ 24.9 cm となった。単純平均ではそれぞれ -5.2 cm, 32.4 cm,

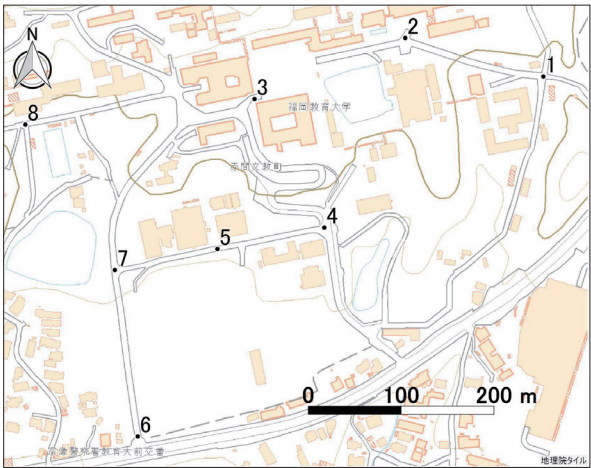


図 1 キャンパス内の GCP 分布

表 2 キャンパス内の基盤地図情報と計測の結果

no	基盤地図情報			計測			計測と基盤地図情報の差(m)			
	x	y	z	x	y	z	Δx	Δy	Δz	二乗和平方根
1	-37252.781	90182.847	50.105	-37252.334	90183.342	49.819	0.447	0.495	-0.286	0.725
2	-37401.297	90223.824	57.224	-37401.045	90224.781	57.371	0.252	0.957	0.147	1.000
3	-37563.126	90160.694	58.539	-37563.336	90159.079	58.365	-0.210	-1.615	-0.174	1.638
4	-37488.660	90018.834	45.614	-37488.196	90020.722	45.351	0.464	1.888	-0.263	1.962
5	-37603.167	89998.138	40.296	-37603.298	89997.693	40.545	-0.131	-0.445	0.249	0.526
6	-37688.866	89795.123	33.880	-37689.079	89796.078	33.361	-0.213	0.955	-0.519	1.107
7	-37713.203	89974.841	44.595	-37713.776	89975.082	44.245	-0.573	0.241	-0.350	0.714
8	-37809.717	90131.469	50.609	-37810.168	90131.589	50.427	-0.451	0.120	-0.182	0.501
絶対値平均→							0.343	0.839	0.271	1.022

-17.2 cm だが、正負がない絶対値平均では 34.3 cm, 83.9 cm, 27.1 cm だった。また各 GCP の差の二乗和平方根は 50 cm ~ 196 cm で、その平均は 102 cm である。

したがって基盤地図情報の座標値を GCP として地形解析に使用する場合、正しい座標から約 1 m のずれがあることを考慮する必要がある。

3. 3 遺跡トレンチでの作業時間確認試験

東峰村宝珠山では 2017 年九州北部豪雨時に大肥川支流の河岸侵食が進んだ場所があり、そこに直径約 60 cm の樹幹を持つ埋没樹木が数本発見されたため、遺跡トレンチによる調査が行われた。写真 2 はその現場景観である。大肥川支流か

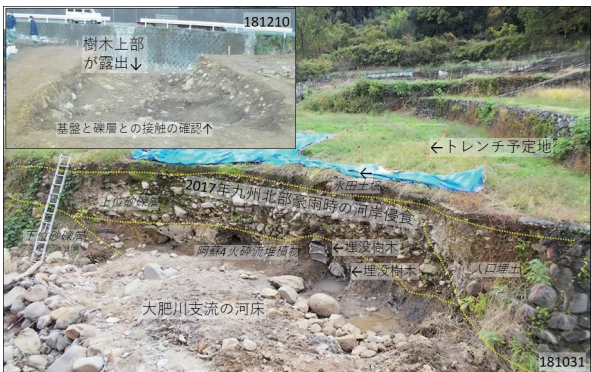


写真 2 東峰村の遺跡トレンチ

と、両者の差の二乗和平方根を求めた。GNSS 計測後の SPSS による座標計算の精度は、水平 1.2–5.1 cm, 垂直約 2.2–15.3 cm となった。極端に精度の悪い no.21 は利用が放棄され雑木林となった林内計測を余儀なくされた点であり、それを除けば約 3 cm 以下の精度を保っている。また基盤地図情報と GNSS 計測からの GCP 座標の差の二乗和平方根は、0.2 ~ 10 m までとばらつき、平均は約 3 m だった。

写真 3 は、GCP で計測する際に注意を要した

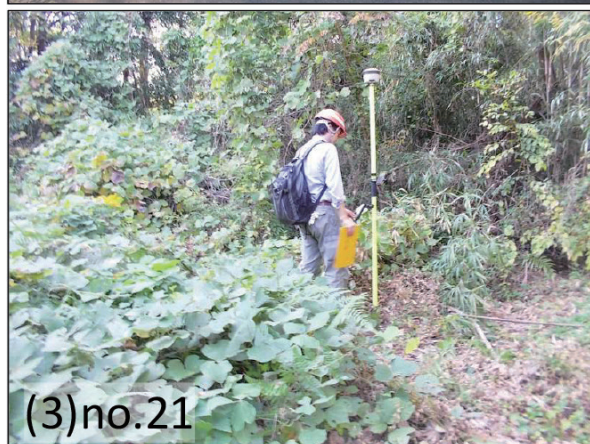


写真 3 雲仙東山麓の GCP 景観例

箇所を例示した。no.7 は道路の交差関係は同じだが拡幅が想定された。そこで周囲の建物敷地境界、道路中心線を参考とし 1974 年と同じ場所に GNSS 機器を設置した。しかし 1974 年の地点は歩道中心になく拡幅で車道に接近したため安全な計測が難しかった。no.12 は丁字路の中心に設置したが、6 分間の計測時間に車両通過が数台あり、GNSS 機器を運転者に避けていただき計測中断を回避した。no.21 は、1974 年に地図記載はあるが森林下で、2015 年はアスファルト舗装された道路屈曲点だった。調査時点は利用頻度が低下して久しく、植物が繁茂しアクセスに困難があり、雑木による被覆も多く天空率が低かった。つまり GCP を道路に設定する場合、1974 年当時と近い状態が現在まで維持され、当時から比較的幅が広く、しかし現在の交通量が比較的少ない条件が必要である。さらに道路整備後に周囲が荒地化した場所は極力避けたい。

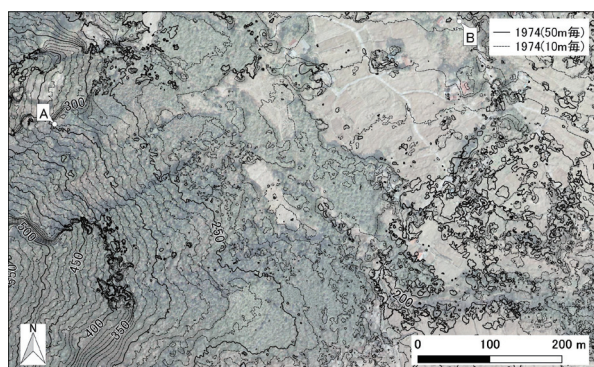
次に SfM 解析の地形モデル計算での RMSE 誤差を見る。それぞれの GCP 座標を用いた SfM 解析の RMSE (二乗平均平方根誤差) は、2015 年写真の場合 1.86 m から 0.16 m へ、1974 年写真では 1.96 m から 0.62 m へと大幅に改善されたが、これは GNSS 計測による GCP の座標精度向上の効果と考えられる。

このように 2 時点間の空中写真による地形変化解析では、火山活動に伴う土砂による地形変化に加え交通量は増し道路拡幅される都市化や利用放棄による天空率低下等の GCP の条件変化が著しい問題はある。しかし SfM 解析では GNSS 計測による GCP 座標の使用で地形モデルの解析精度の向上が十分見込まれる。また RMSE 値から考えれば使用した空中写真では 0.5 m 前後の標高変化までは議論できると思われる。

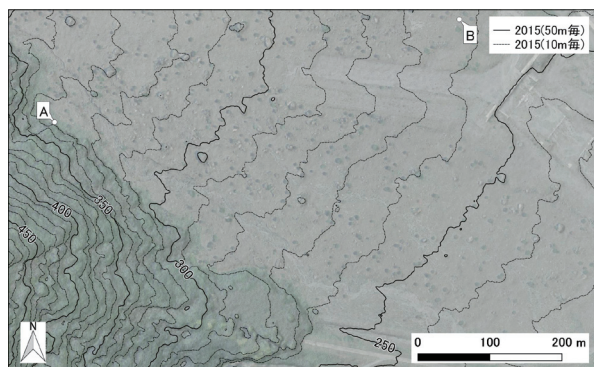
図 4 は、図 3 の四角枠範囲の 1974 年標高と 2015 年標高及び両時点の標高変化を示し、背景には各年のオルソ画像と陰影図を置いた。

図 4 (1) では、南東に向く標高 250 m から 200 m で幅約 200 m の谷中に、集落や棚田が広がる里山風景があった。地形モデルは樹冠を捉えており凸地形とみなされる場所もある。

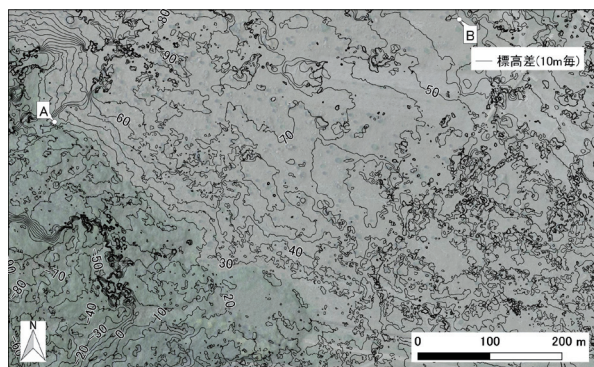
図 4 (2) では、集落と棚田は火砕流や土石流による土砂により完全に埋められた。その結果、東南東に傾斜する標高約 400 m を頂部とし約 230 m を末端とする半円錐形を示す火山山麓の緩斜面が現れた。緩斜面上では砂防ダムや導流堤を設置する復旧工事による人工改変による地形変化が目立つが、掃流や土石流などの地形プロセスに



(1) 1974 年時点



(2) 2015 年時点



(3) 両時点の標高変化

図4 雲仙東麓の標高と変化

よる穏やかな地形変化も継続している¹⁶⁾。等高線で見ると、10 m 程度波長での地形凹凸が多くあるが、これらは巨大な溶岩塊や回復した植生と、線的侵食により形成されたガリの存在を示している。

図4 (3) は両時点の標高変化である。地形モデルが良く形成されなかった南西部の山地部を除く範囲を見る。図の中心で土砂は厚く堆積しているが、大凡 60 m 程度、最大 90 m 以上堆積した。図の中心から西南西、東北東に向かって堆積土砂が少なくなるため、1974 年の谷を埋積した状況を三次元的に理解しやすい。そこで QGIS のプラグイン「VoGIS Profile tool」により、図4のA,B

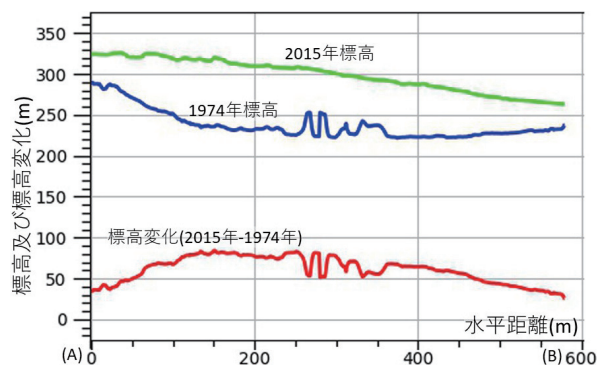


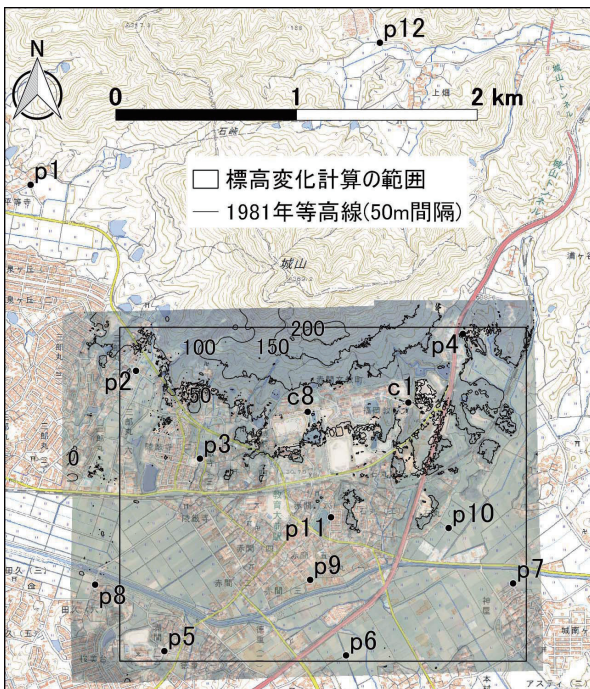
図5 地形と標高変化量の断面

間の地形と標高変化量の断面図を作成した(図5)。1974 年標高の断面が凹形状に対し 2015 年標高のそれは凸形状であり、地形は大きく変化した。一方両年の標高変化は、凸形状だが非対称であり、山地に近づく A に向かう西南西向きは、B に向かう東北東向きに比べ堆積土砂が急に少なくなる。

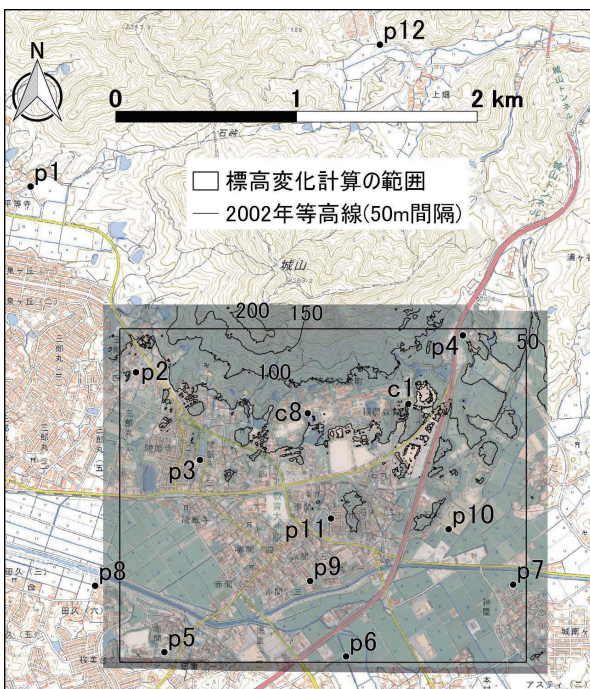
このように GIS を適宜活用することで、GNSS 計測による GCP 座標を用いた空中写真の SfM 解析から、基盤地図情報を使用する以上の精度を持つ標高や標高変化を示し地形変化を検討できる。

4. 2 空中写真によるキャンパス周辺の経年変化の分析

福岡教育大学のキャンパス周辺で 12 点を 4 時間かけて GNSS 計測した。p1 は平等寺、p2 は三郎丸、p3 は陵巖寺、p4 は中里、p5 は赤間小、p6 は末永、p7 は城南ヶ丘、p8 は田久、p9 は石丸、p10 は石丸 4、p11 は熊越池、p12 は上畑に設定しており、平均の水平誤差は約 1.7 cm で平均の垂直誤差は約 3.2 cm だった。次にキャンパス周辺の 12 点と第 3 章 2 節で使用したキャンパス内 2 点の計 14 点を用いて、2 時期の空中写真から SfM で 1 m 解像度の DEM と 0.5 m 解像度のオルソ画像を作成した。キャンパス内 2 点は理科教棟南東にある通用路十字路の中心 1 とプール西道路と音楽教棟前道路の交差中心 8 で、それぞれ c1 と c8 と示す。各 GCP 座標を用いた SfM 解析の RMSE 値は、1981 年写真は 1.34 m、2002 年写真は 1.83 m となった。SfM 解析中に RMSE 値を増加させる p4 中里の値は除外した。これはバイパス国道 3 号線に近接する GCP であり、1981 年と道路形状は近似していたが、拡張工事で道路屈曲点の位置が変化したと考えられたためである。



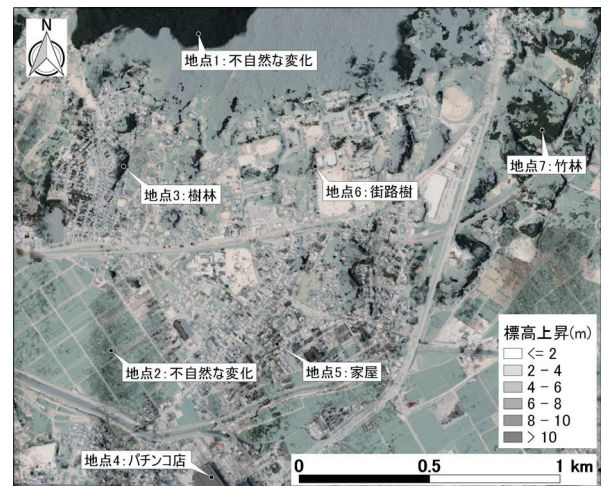
(1) 1981 年



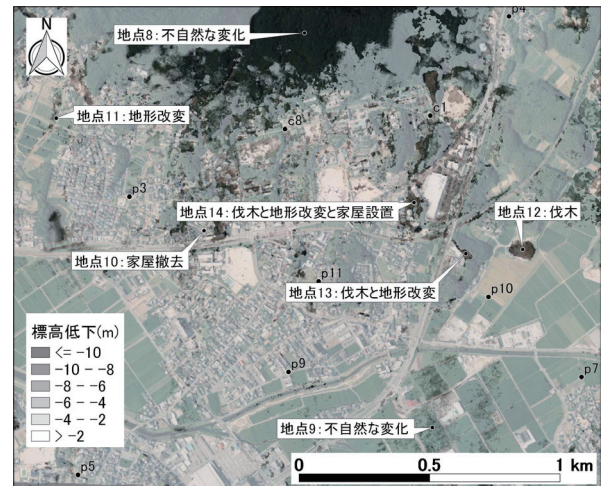
(2) 2002 年

図6 キャンパス周辺での GCP 配置と等高線

図6はGCP14点とSfMによる解析結果のオルソ画像と50m間隔の等高線を地理院地図に重ねて示す。図6の周辺部で、地形モデルが上手く形成されず等高線は不自然な形状を示すが、地理院地図の等高線とほぼ同じ位置に解析結果の等高線は両年(1)(2)ともに計算された。ただオルソ画像では植物や建物の分布が両年で異なることも



(1) 標高上昇



(2) 標高低下

図7 キャンパス周辺での標高変化

判別できる。そこで両年の標高変化を詳しく求め、変化の要因をオルソ画像に重ねて検討する。

図7は、2002年のオルソ画像を背景に標高変化を2m間隔で示した。標高変化の値と変化域の分布、加えて1981年のオルソ画像との比較から、標高変化の要因を検討する。

図7(1)は標高上昇の分布を示す。地点1が示す辺りは、10mを越す上昇域であり、所により90mを越す値もあり不自然な変化が示される。空中写真の重なりが十分ではなく地形モデルが上手く形成されず、さらに急傾斜領域で地形モデルの位置ずれがあり、大きな標高変化を生じたと思われる。地点2が示す辺りは、幅数100mで4m前後の上昇域が南北に連続して不自然な変化を示す。図の東にも同じ現象が現れた。同一点を示す空中写真数が東西方向に十分ではなく、地形モデルが東西方向に対し上手く形成されなかった

可能性がある。

不自然な変化を示す範囲以外での顕著な標高上昇の背景を検討する。地点3が示す辺りは、住宅地の東縁の崖にある10 m前後の標高上昇域である。宅地開発の縁部にて2時期間に樹林が成長したことを示す。地点4が示す辺りは、20 m前後の上昇域であり、10 mを越す標高上昇域が長方形範囲で示された。それは2時期間に建設された巨大なパチンコ店の建物を示す。地点5が示す辺りは、6-7 m前後の標高上昇域が多くあり、それぞれ道路に重ならず分散している。上昇域は約10 m四方の範囲で、建物1棟1棟によく重なるため、この間に建てられた家屋を示す。地点6が示す辺りは、3-10 mの標高上昇域が多くあり、それらは道路に沿って南北に並ぶため、この間の街路樹の成長を示している。平均約5 mの上昇量とすれば、樹高が1年あたり約25 cm高まったことになる。地点7が示す辺りは、15-20 mの標高上昇域が密集しており、10 mを越す標高上昇域が200 m四方に広がっている。2時期のオルソ画像からそこが荒地から竹林に変化したことが読み取れる。

図7(2)は標高低下の分布を示す。地点8が示す辺りは、-10 mを越す低下域であり、最大で-90 mを越す値もあり不自然な変化が示される。地点1と同様の理由から大きな標高変化として現れた場所と思われる。地点9が示す辺りは、地点2と似た分布を示す-3 m前後の低下域で不自然な変化を示す。地点2と同様の理由から南北性の帯状の標高変化域が現れたものと思われる。

不自然な変化を示す範囲以外で顕著な標高低下を示す場所の背景を検討する。地点10が示す辺りは、約10 m四方の範囲で-5 m前後の低下域である。1981年のオルソ画像には2002年にはない家屋があるので、標高低下は家屋撤去を表している。地点11が示す辺りは、-5 m前後の低下域である。低下域の東西方向約30 m間で見ると、中央で値が大きく両端で小さい。最大で-10 mを越す低下を示す場所もある。1981年はこの辺りは西に傾斜する棚田があったので、2時期間で耕地の地形改変が行われたことが、低下域の現れた背景と思われる。地点12が示す辺りは、-15 mから-20 mの標高低下域が密集し、それが約100 m四方の広がりを持つ。2時期のオルソ画像から、標高低下域では樹林が伐採され裸地に変化したことが分かる。地点13が示す辺りは、-15 m前後の標高低下域で最大で-20 mを越す低下を示す場所もある。1981年はこの辺りは樹

林だったが、2002年のオルソ画像では伐採が進み地形改変もなされた。これが標高低下域の背景と思われる。地点14が示す辺りは、-20 m前後の標高低下域で最大で約-30 mの低下を示す場所もある。1981年はこの辺りは樹林だったが、2002年のオルソ画像では伐採が進み地形改変がなされた。これが標高低下域の背景と思われる。さらにそこに家屋が設置されたが、標高低下を上昇に転じるほどではなかった。

このように、GNSS計測のGCPに基づく空中写真による地形解析では、空中写真の不足や地形モデルの位置ずれが要因と思われる不自然な標高変化を示す結果が得られた。しかし、樹木等の成長、家屋等の建物設置による標高上昇、樹木等の伐採、地形改変、伐木、家屋撤去による標高低下を示す結果が識別された。

4. 3 UAVによる空中写真を活用する実践的な使用試行

福岡教育大学附属幼稚園の築山に対し、2018年12月25日(1回目)と2019年7月22日(2回目)にそれぞれGNSS計測とUAVによる空中写真撮影を行った。1回目は、築山を囲むGCP6点に対しGNSS計測を実施した。水平誤差は平均約1.5 cmで垂直誤差は平均約3.5 cmだった。SfM解析では魚眼設定により39枚の写真で地形モデルを求めた。この時、SfM解析のRMSE値は1.3 cmであり、1.5 cm解像度のDEMと0.5 cm解像度のオルソ画像、DEMからの10 cm間隔の等高線を作成した。

図8は半透明化した陰影図やオルソ画像を背

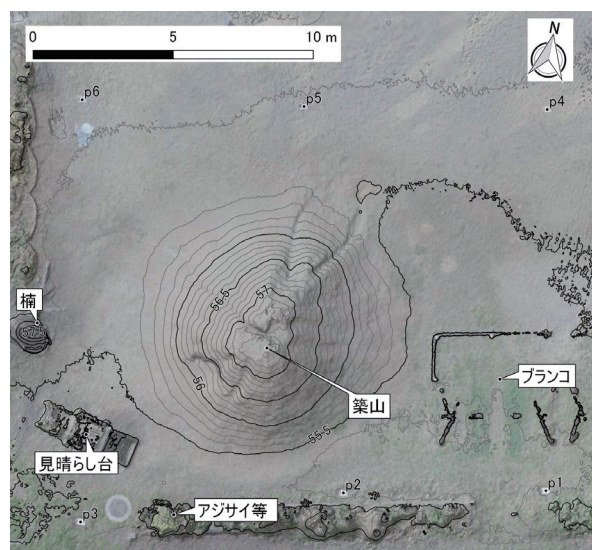


図8 1回目計測結果と園庭の状況

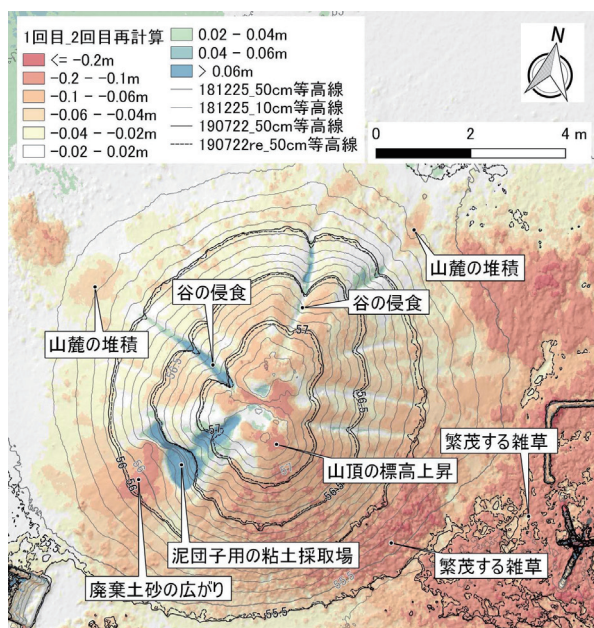


図9 各計算結果の等高線と標高変化

景に、10 cm 間隔の等高線と GCP を重ねた。図8の中央に築山がある。図の西から南では、楠やアジサイ等の植栽により、東ではブランコ、南西では見晴らし台により若干の高まりが現れた。この時、築山は 55.5 m の園庭基部から盛土された頂上が 57.3 m で、直径約 10 m で標高約 1.8 m だった。築山には頂上から放射状に発達する谷が見られる。それぞれ東に延びる浅い谷、中腹から北東に延びる狭長な谷、南西山麓に発達する深い谷である。

2 回目は、GCP6 点を再設し GNSS 計測を実施した。SfM 解析では魚眼設定により 73 枚の写真で地形モデルを計算した。この時、SfM 解析の RMSE 値は 2.5 cm であり、前回より RMSE 値は大きくなった。1.5 cm 解像度の DEM と 0.5 cm 解像度のオルソ画像、DEM からの 10 cm 間隔の等高線を作成した。2 回目に関し SfM で 25 枚少ない 48 枚の写真を使用し、その他は同条件で地形モデルの再計算を行った。この時、SfM 解析の RMSE 値は 1.3 cm で 1 回目と同じ値となった。この時点で写真数の多さが RMSE 値の高まる要因の一つと分かった。そして 1.5 cm 解像度の DEM と 0.5 cm 解像度のオルソ画像、DEM からの 10 cm 間隔の等高線を作成した。さらに、1 回目の DEM から 2 回目再計算の DEM の差分も求めた。

図9は、築山を中心として2回目再計算結果の陰影図に1回目と2回目再計算の標高差を表示した。その上に、50 cm 間隔の等高線（1回目、2



写真4 園庭の築山景観

回目、2 回目再計算）と 1 回目の 10 cm 間隔の等高線を重ねた。1 回目の 50 cm 間隔の等高線を中心にみると、2 回目のその等高線は外側にあるが、10 cm 低いことを示す等高線には届かない。築山の山腹の傾斜がほぼ一定なので、2 回目は 5 cm 程度全体的に高まった。しかし 2 回目再計算で求めた等高線は、1 回目と 2 回目の中間にあり、1 回目に対する標高の高まり度は半減した。放射状に延びる谷に注目すると、2 回目の 50 cm 間隔の等高線が対応する 1 回目の等高線の内側に達し、侵食を示す場所もある。このため GNSS 計測と SfM 解析双方の精度を考慮すれば、1 回目と 2 回目再計算結果の間に生じた、数 cm 以上の標高変化は実際の景観変化と対応付けが可能と思われる。その参考とするために園庭の築山景観を示す（写真4）。

築山に放射状に発達する谷の標高変化を見る。谷の山頂近傍に侵食を示す低下域が、山麓には土砂堆積を示す上昇域がある。その両者の中間は標高変化が見られず平衡状態が示されている。南西では園児の泥団子用の粘土採取場を示す穴が低下（最大約 50 cm）を示し、その穴からの廃棄土砂（最大約 12 cm）が南西の山麓全体に広がっている様子も示された。これは本年5月末から子供たちが粘土採取場を中心に頂上から水を流す遊びを開始し、築山が激しく侵食された結果、土砂堆積が山麓で著しく進行したことが背景にある。南西及び東は約 10 cm の上昇が示されたが、それは冬季以降に繁茂した雑草が原因である。実際は雑

草に土砂が捕捉されて標高が上昇する場合もある。なお全体が数 cm 高く計算された他、山頂部に約 10 cm の上昇を示す不自然な地点も残るなど地形モデル構築の過程では課題が残った。

したがって写真数を 2 時期双方で近づけることで、比較可能な現実的な地形モデルを解析でき、結果、標高変化を議論しやすくなることが分かった。そして築山で生じた約半年間の数 cm 以上の大凡の標高変化量とその分布、通常の降雨による侵食に加え園児の活動による侵食、各対となる堆積土砂の分布、雑草の繁茂状況を明らかにできた。さらに簡易 GPS に基づく基準点を用い、窓ふきの棒から吊り下げたカメラによる撮影写真を地形モデルとした 2015 年度の実験結果¹⁷⁾とも比較したが、XY 座標のずれが約 5 m 以上あり標高変化を計算できなかった。

今後は、GNSS 計測の精度の下で、SfM 解析でより現実的な地形モデルを構築できる計測条件を探り、標高変化のような地形量評価を実現したい。その他、2 回目では比較的強い風があり、UAV の動揺が大きく、コースの直線性や一定高度を保つことが難しかった。写真の撮影角度、高度、重複割合がばらつくことも解析される標高が不自然となる背景の可能性もある。

5. まとめ

GNSS 受信機使用による地形モデル作成の精度向上と、それによる地形変化検討の可能性を確認した。

基礎的な計測試験の結果は以下の通りである。

- 1) GNSS 受信機は、公表された三角点の座標よりも現実に近い値を数 cm 誤差で計測できる。
- 2) 基盤地図情報の座標値を GCP として地形解析に使用する場合、キャンパス内道路を使用する時、正しい座標から約 1 m のずれが想定されることを念頭に置く必要がある。
- 3) 遺跡トレンチでの実験で、高精度の GCP 座標により精度良い地形モデルが作成でき、フリー GIS による図面調整も短時間でできることを確認した。

応用的な計測試験の結果は以下の通りである。

- 4) 雲仙東山麓での市販の空中写真による実験では、基盤地図情報を利用する場合より、GNSS 計測による GCP 座標の方が、地形モデルの解析精度が向上することを確認した。この時、使用した空中写真では 0.5 m 前後の標高変化までが議論でき、火山活動および終息後の地形変化の量と分布に関し検討が容易になることがわ

かった。

- 5) 福岡教育大学周辺での市販の空中写真による実験では、空中写真の不足や地形モデルの位置ずれが要因と思われる不自然な標高変化は生じたが、樹木等の成長、家屋等の建物設置による標高上昇、樹木等の伐採、地形改変、伐木、家屋撤去による標高低下を示すことができた。
- 6) 附属幼稚園の築山での UAV の空中写真による実験では、空中写真数を 2 時期双方で近づければ、より現実的な地形モデル比較が可能で、標高変化を議論しやすくなることが分かった。実際数 cm 以上であれば、約半年間の標高変化量とその分布を示すことができた。

謝辞

本研究では、基盤研究 B「120 年雨量データベース構築と地理空間情報の統合化による水害常襲地のリスク評価」(代表：山本晴彦)及び基盤研究 C「未離水面認定の再検討と高精度化に関する評価・展開」(代表：黒木貴一)を使用した。附属幼稚園での実験では教職員の皆様に配慮いただき、自然地理学演習の平成 30 年度受講生の全君(交換留学生)、令和元年度受講生の松久保君、石河君、山本さんの支援を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鈴木純子(2004)：伊能図のあらまし。地図中心，380，19-21。
- 2) 測量・地図百年史編集委員会(1970)：測量・地図百年史。日本測量協会，673p。
- 3) 金窪敏知(2014)：陸地測量部から地理調査所へ。地図，52-1，13-18。
- 4) 水田良幸・笹川啓・小井戸今朝己・浦部ぼくろう・田中宏明(2007)：ALOS/PRISM データの 2 万 5 千分 1 地形図作成・修正への適用性の検証—標定精度及び標高抽出精度の検証—。国土地理院時報，111，119-124。
- 5) 国土庁計画・調整局・建設省国土地理院(1987)：国土数値情報。大蔵省印刷局，130p。
- 6) 黒木貴一・塚本嵩史・黒田圭介(2011)：簡易レーザー距離計を用いた斜面崩壊地形の計測方法。地図，49-4，1-6。
- 7) 高山知美・早川裕式・小口高(2013)：3 次元レーザースキャナーを用いた鍾乳石の空間分布と形状の解析。地形，34，p88。
- 8) 齋藤仁・内山庄一郎・小花和宏之・早川裕式

- (2016)：平成 24 年（2012 年）7 月九州北部豪雨に伴う阿蘇火山地域での土砂生産量の推定— UAV と SfM 多視点ステレオ写真測量を用いた高精細地形データの活用—, 地理学評論, 89, 347-359.
- 9) 小岩直人・高橋未央・大高明史・伊藤晶文・武田開 (2016)：通常の潮汐・波浪条件下で進行する砂嘴形成プロセス—タイ南西部パカラン岬における 2004 年インド洋大津波後の事例—, 日本地理学会発表要旨集, 90, p102.
- 10) 広瀬典昭・井上公夫 (1984)：ピナツボ火山噴火後の地形変化と土砂災害, 地形, 20, 431-448.
- 11) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久 (1998)：雲仙普賢岳における火砕流堆積とガリー侵食の相互作用による地形変化, 地形, 19, 35-48.
- 12) 山本博 (1984)：有珠山の一斜面における 1977-1978 年降下火砕堆積物の侵食, 地形, 5, 111-124.
- 13) 土井康弘・山越隆雄・若林栄一・小山内信智・西本晴男 (2004)：三宅島における噴火後の谷地形変化, 地形, 25, 284-285.
- 14) 黒木貴一・磯望・宗建郎・黒田圭介・出口将夫 (2016)：2011 年新燃岳噴火後 5 年間の開析谷の地形変化と降下テフラ移動, 第 8 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 13-18.
- 15) 下川悦郎・地頭蘭隆 (1994)：普賢岳火山活動にともなう崩壊・土石流の履歴に関する研究, 雲仙火山砂防研究報告, 1, 47-55.
- 16) 黒木貴一 (2019)：土砂災害に関わる微地形とハザードマップの地域区分, 第四紀研究, 58-2, 137-148.
- 17) 黒木貴一・黒田圭介 (2015)：狭範囲に対する写真撮影と SfM 利用方法の検討, 九州応用地質学会, 平成 27 年度（第 31 回）研究発表会論文集, 7-10.

