

斜め写真を利用した新燃岳火口内溶岩の計測

磯部 浩平・本間 信一・阪上 雅之・和久津 龍太・中野 崇 (国際航業株式会社)

1. はじめに

新燃岳は宮崎・鹿児島県の県境に位置し、20を超える成層火山や火砕丘等から成る霧島火山郡の中の活火山である(図1)。2011年1月からの一連の噴火活動は、1月19日未明の小規模な噴火から始まった(表1)。1月26日には、約300年ぶりの本格的なマグマ噴火に移行し、数日後、火口部に溶岩が蓄積していることが確認された。噴火活動の推移を予測するためには、溶岩の体積を算出し、一連の噴火活動に伴うマグマ噴出量を見積る必要があった。しかしながら、空振、噴気や噴火が繰り返し発生したため、火口上空を航空機が飛行できず、また光学衛星による垂直方向の画像取得も困難であった。一方、衛星に搭載された合成開口レーダーや航空機搭載型合成開口レーダーは観測が可能であった(図2)。だが、日々変化する溶岩を計測するには膨大

な費用と労力が必要となり、火山活動が長期化する恐れもあるため、新たな計測手法が求められた。

そこで、調査のために関係者が撮影した民生用デジタルカメラの斜め写真を流用して、写真測量により低コストで短期間に地形計測が実施できる手法を検討した。計測の実施には、予め想定される課題が2点あった。1点目は、斜め撮影の写真が鉛直写真と比較して計測精度が低いこと、2点目は、キャリブレーションが実施されていない民生用デジタルカメラを使うことによる精度の低下である。これらの課題により作成される計測成果が使用に耐えられない可能性があった。これについては、同時期に計測されている合成開口レーダー画像の解析結果と比較して、標高及び体積が妥当な値であるかを検討の結果としてまとめた。また、火山活動が収まってから撮

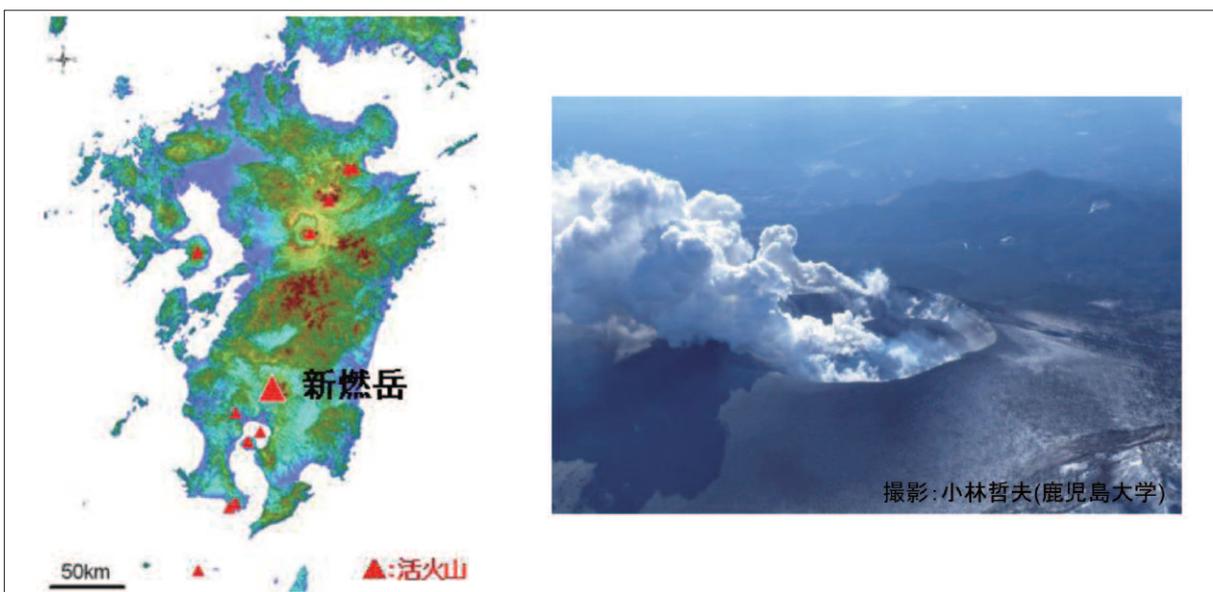


図1 新燃岳の位置と噴火活動時の写真

表1 新燃岳 2011 年の主な火山活動・事象 (清水ほか、2011 を改変)

日時	主な火山活動・事象
1月	19日 マグマ水蒸気爆発と思われる小規模な噴火が発生。
	26日 本格的なマグマ噴火が始まる。多量の火山灰が降る。
	27日 爆発的噴火が始まる。多量の火山灰が降る。
	30日 火口内の溶岩の蓄積拡大が判明。爆発的噴火によって溶岩が破壊され、火砕流が発生することが懸念され
2月	1日 最大の爆発的噴火があり、大きな噴石が火口から3.2kmの遠方まで到達。空振により窓ガラスが割れる被
	2日 爆発的噴火が続く。火口内の溶岩が直径600mに達する。これ以降、溶岩の大きさは変わらなかった。
	9日 噴煙が白色に変わり、これまでの火山灰を放出する噴火の継続が停止する。以降、噴火は断続的になる。
	11日 爆発的噴火が発生。
	14日 爆発的噴火が発生。小さな噴石が上空の強い風に流されて火口から16km遠方まで降下し、車のガラスが破損する被害。
	18日 爆発的噴火が発生。
21日 火口内に蓄積されていた溶岩の表面温度が、噴火が継続していた2月3日に比べ低下していることが確認される。	
3月	1日 爆発的噴火が発生。
	13日 噴火が発生。噴煙が火口縁上4000mまで上がる。小さな噴石が上空の風に流されて火口から9km遠方まで降下。
	22日 火山活動低下の評価に基づき、噴石への警戒範囲を火口から3kmに縮小。
4月	3日 噴火が発生。噴煙が火口縁上3000mまで上がる。
	18日 噴火が発生。噴煙が火口縁上2000mまで上がる。小さな噴石により高原町でガラス割れる被害。
5月	
6月	16日 4月18日以来、約2ヶ月ぶりにごく小規模な噴火が発生。高原町と小林市でごくわずかな降灰が確認された、
	23日 ごく小規模な噴火が発生。小林市で微量の降灰が確認された。
	29日 小規模な噴火が発生。噴煙が火口縁上1000mまで上昇した。降灰は北方向に広がり、50km北方の熊本県五木村でも確認された。なお、噴火は7月1日まで継続した。
7月	
8月	6日 ごく小規模な噴火が発生。降灰は北西のえびの市で確認された、

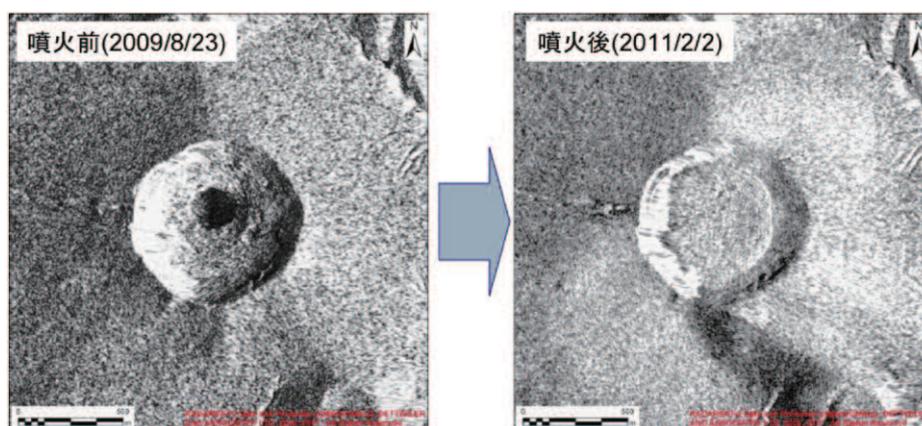


図2 RADARSAT-2 画像で観測された噴火前後の溶岩の状況

影された航空写真より噴火後の地形を計測し、斜め写真で作成された地形の精度について検証した。

2. 溶岩の計測

2.1 ステレオペア写真の選定

はじめにヘリコプターより撮影された民生

用デジタルカメラの写真を集めた。溶岩の計測に使用する写真を溶岩が最も隆起したとされる2011年1月31日の写真より選定した。選定は、以下の条件で実施した。

- ・実体視可能な写真であること
- ・溶岩の基部と頂上部が判読できる写真
- ・基準点が選定可能な地形の特徴が写っている

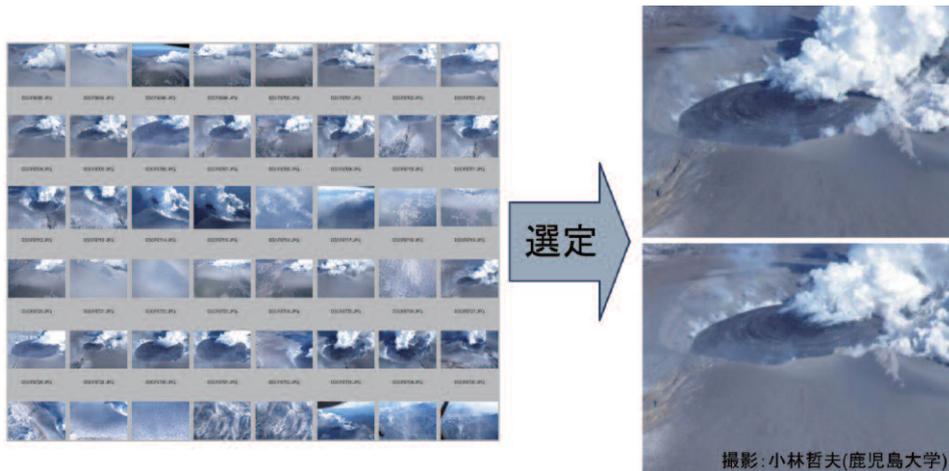


図3 条件に合致した写真の選定

る写真

- ・焦点距離・画像サイズが同一なもの

この条件より選定した写真は、図3に示した斜め写真である。同条件で選定できた写真はいくつかあったが、標定時に適切な標定点を取得できない等の問題により以下の写真に限定された。

2.2 カメラ情報の収集

焦点距離等の内部標定要素は、画像に含まれる Exif (Exchangeable Image File Format) の撮影画像情報より抽出した。

抽出した情報のうち使用した値は「焦点距離」「画像サイズ」「解像度」の3種類である。

以下の表1に抽出した Exif の撮影画像情報の一部を示す。

本来であれば、デジタルカメラ本体も取り寄せてキャリブレーションを実施し正確なカメラ情報を得る方が精度を高めることができると予想されたが、計測結果を早く出すことが重視されていたため、キャリブレーションは省略した。

2.3 斜め写真の標定

デジタル図化機を使用して選択した斜め写真を標定した。前項で収集した内部標定要素を入力し、レンズの歪み等のカメラキャリブ

表2 Exif の撮影画像情報

ファイル名	DSCF8705.JPG
Exif	Exif
JFIF_APP2	FXPR(offset:15437 size:127bytes)
JFIF_APP2	FXPR(offset:15575 size:43bytes)
JFIF_APP2	FXPR(offset:15629 size:24685bytes)
▼メイン情報	
メーカー名	FUJIFILM
機種	FinePix S8100fd
画像方向	左上
幅の解像度	72/1
高さの解像度	72/1
解像度単位	インチ
ソフトウェア	Digital Camera FinePix S8100fd Ver1.00
変更日時	2011:01:31 13:30:36
YCbCrPositioning	一致
Exif 情報オフセット	294
PrintIM IFD	28Bytes
▼サブ情報	
露出時間	1/680 秒
レンズ F 値	F5.6
露出制御モード	プログラム AE
ISO 感度	64
Exif バージョン	0220
オリジナル撮影日時	2011:01:31 13:30:36
デジタル化日時	2011:01:31 13:30:36
各コンポーネントの意味	YCbCr
画像圧縮率	20/10(bit/pixel)
シャッタースピード	1/676 秒
レンズ絞り値	F5.7
対象物の明るさ	EV8.7
露光補正量	EV0.0
開放 F 値	F2.8
自動露出測光モード	分割測光
光源	不明
フラッシュ	発光禁止
レンズの焦点距離	23.90(mm)
カメラの内部情報	FUJIFILM Format:2960Bytes(Offset:1016)
FlashPix のバージョン	0100
色空間情報	sRGB
画像幅	2592
画像高さ	1944
ExifR98 拡張情報	978
CCD 画素密度(X)	4355/1
CCD 画素密度(Y)	4355/1
画素密度の単位	センチメートル

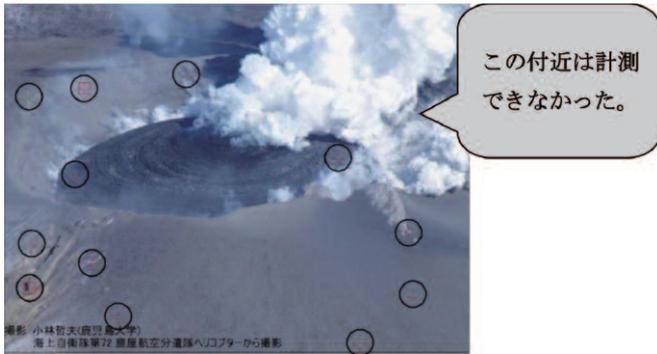


図4 パスポイントの計測箇所



図5 基準点の計測箇所

レーションで得られる情報は0にした。

相互標定では、火口部分を囲むようにパスポイントを12点計測した。図4のとおり写真右上付近は噴煙が多くパスポイントを計測することが困難であった。

絶対標定に使用する基準点は、噴火前に撮影された林野庁の垂直航空写真の成果より特徴点を移写することにより作成した。絶対標定は、写真内で均等に配置する事が望ましいが、火口の東側は噴煙と火山灰の影響で基準点を計測することが困難であった。そのため図5のように不完全な状態で基準点を計測した。

はじめは、特徴のある地形で基準点を多く取得したが、調整計算が収束しないため、基準点の再計測や別の特徴点を基準点として計測することを繰り返したが、計算が収束されなかった。そのため火口部より低い位置にある基準点や、火山灰や噴煙で基準点の位置がはっきりと見えない箇所については除外した。その結果、調整計算は収束し残差は大きいものであるがステレオモデルを形成することができた。以下に調整計算の残差を示す。

高さ方向は、比較的良い結果が得られたが、平面位置は大きな誤差が出ている。また図5のとおり写真の北側で基準点を取得すること

ができなかったため、奥行き方向（遠景）に誤差が大きくなることが懸念された。

2.4 火口内溶岩の図化

作成した標定済みのステレオペア写真より火口内溶岩を図化した(図6)。基準点を配置していない遠景部分は、誤差が大きくなることが想定されるため、基準点に囲まれた範囲を中心に図化した。

また、短時間に溶岩の体積を出す必要があったため溶岩の中心から基部に向けてブレイクラインを取得して溶岩の形状を作成した。他の計測手法によるデータとの比較をするために溶岩の頂上部と基部についても計測した。

図化したデータは、体積等の算出に使用するには精度が悪かったため、標定で使用した基準点を使って幾何補正（アフィン変換）を実施した。その結果、形状については概ね火口の形状と一致することが確認できた（図

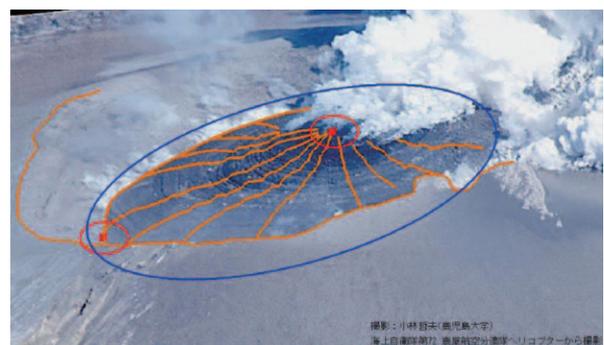


図6 斜め写真より図化したデータ

表3 調整計算の結果

	X	Y	Z	XY
RMSE	19.200m	67.314m	4.208m	49.497m

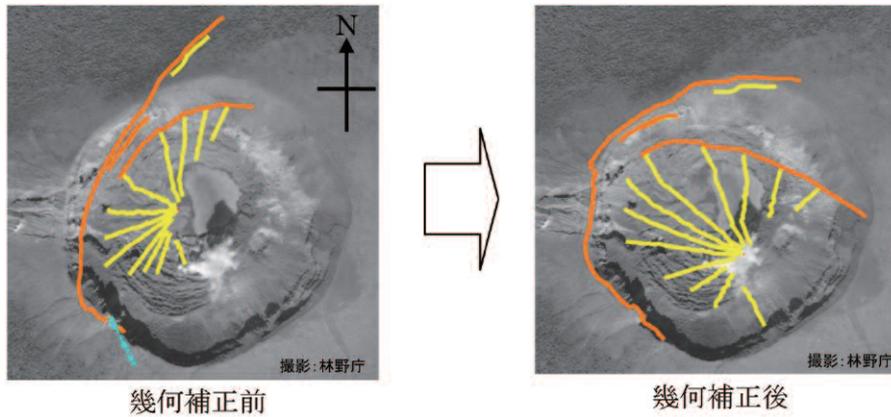


図7 幾何補正した図化データ

7)。

幾何補正された計測データは、平面位置では概ね火口に整合したが、高さ方向のずれも解消する必要があった。調整計算後の高さの誤差は、大きくは出ていないため相対的な精度は悪くないと判断し、斜め写真の溶岩の基部の座標値と垂直航空写真の位置の差分を計測し、その標高差を計測データ反映させて溶岩の座標値を決定した。その結果、火口内溶岩の頂上部は標高約 1,360m となった。

3. 溶岩体積の算出

3.1 溶岩の数値標高モデル作成

放射状に取得した標高値から溶岩の堆積を算出するため、溶岩の数値標高モデルを作成した。今回の事例で計測した溶岩はドーム形状を呈しているため、数値標高モデルでは、取得した標高値に対して誤差が小さくなるよう

にドーム形状となるような楕円体モデルで近似した。計測データによる断面図の例を図8に、断面の位置図及び楕円体モデルとの誤差を図9に示すが、いずれの断面図でも標高1330~1340m付近から傾斜が急になる。溶岩

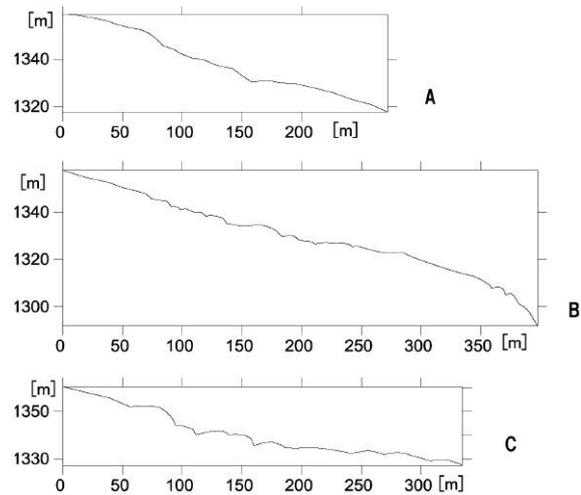


図8 火口内の計測データの断面図 (A、B、Cの位置は、図9の右図を参照のこと)

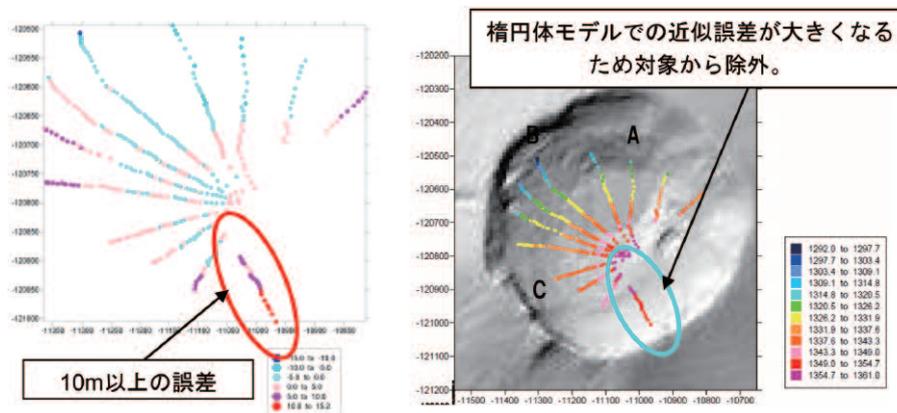


図9 計測したデータと楕円体モデルとの誤差

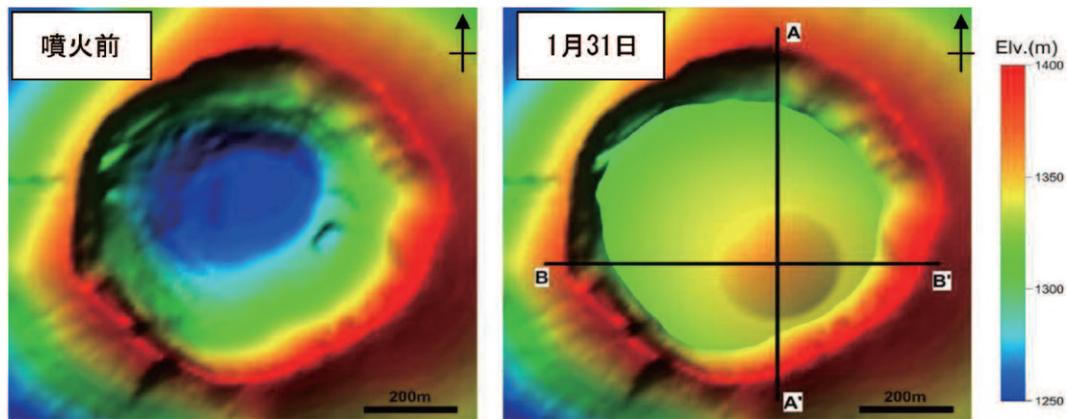


図 10 噴火前後の地形モデル

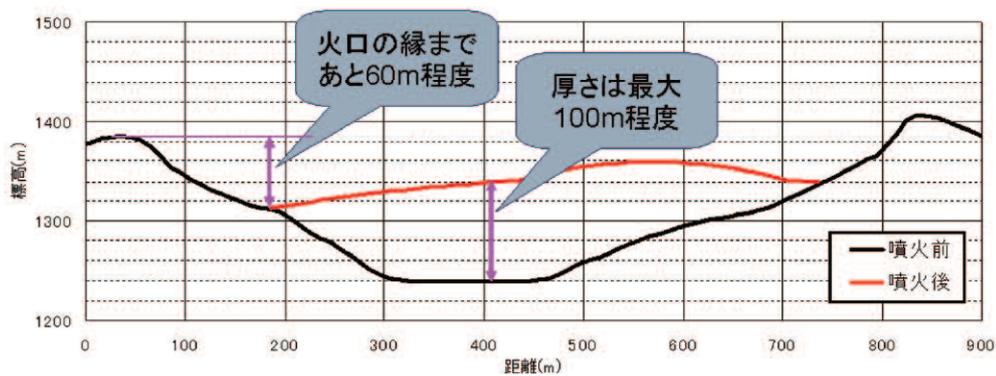


図 11 溶岩の地形モデルの断面図

表 4 合成開口レーダーの計測結果との比較

計測に使用した画像	溶岩の頂上付近の標高	推定した火口内溶岩の体積	撮影日(観測日)
斜め写真	1,360m	1,430 万 m^3	1 月 31 日
航空機搭載型合成開口レーダー	1,350m	1,800 万 m^3	2 月 7 日
衛星搭載型合成開口レーダー	1,370m	1,510 万 m^3	1 月 31 日

※第 118 回火山噴火予知連絡会の資料より

が平坦に分布する楕円体モデルでは、中心付近の誤差が大きくなるため、溶岩の平坦部の上にドーム状の溶岩が重なる楕円体モデル(10m メッシュ)を採用した(図 10)。作成したモデルの RMSE は 2.3m であり、精度良く近似できたと考えられる。

3.2 溶岩体積の推定

作成した楕円モデルと噴火前の地形モデル(国土地理院 10m メッシュ)から、差分を取り、堆積を算出した(GIS で一般的に使われる Cut and Fill を使用)。噴火前・噴火後の数値標高モデル(図 10)の差分から、1 月 31 日

の体積は約 1,430 万 m^3 と推定した。

噴火前と噴火後の地形の比較した結果、溶岩の厚さは最大 100m 程度である事が推定され地形モデルを作成した結果、溶岩が火口をあふれ出すには、60m 程度の上昇が必要であることも推定された(図 11)。

4. 合成開口レーダー画像の解析結果との比較検討

算出した標高(頂上部約 1,360m)と体積(約 1,430 万 m^3)を合成開口レーダーの結果と比較し評価した(表 4)。

合成開口レーダーによる計測結果は、観測

日とセンサーの種類がそれぞれ異なる2つの観測値がある。斜め写真も含めた各手法による計測値はそれぞれ異なっているが、これらの結果から、噴火後の5日間で1日当たり平均約300万 m^3 、その後の7日間では1日当たり平均数十万 m^3 の溶岩が噴出したらしいことが伺える。

衛星搭載型合成開口レーダの観測日は、斜め写真の撮影日と同じであり、計測結果の数値は、標高で10m、体積で80万 m^3 異なっているが、計測手法が異なることや計測時間も厳密には異なることを考慮すると、計測結果には大きな相違がなく、火口内の溶岩体積を把握する手法として斜め写真による計測も有効であると考えられる。

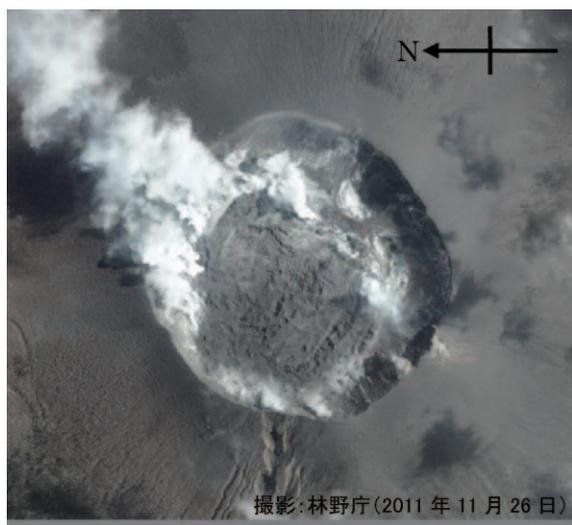


図12 噴火後に撮影された航空写真

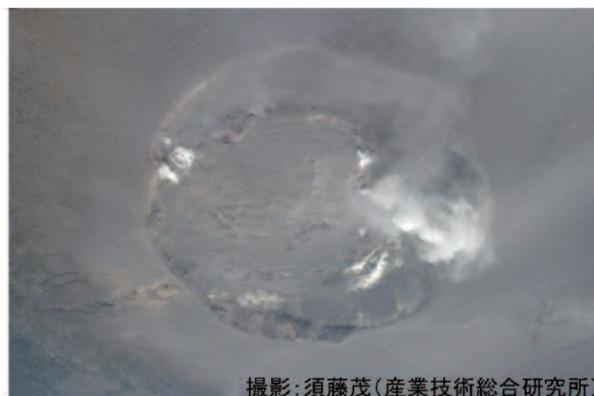


図13 検証に追加で使用した斜め写真

上記の計測結果はどれも第118回火山噴火予知連絡会の資料として提示され、噴火初期のマグマの噴出量の推移を把握する方法として活用された。

この作業にかかる時間は、写真等の資料を得てから溶岩の計測まで2日程度、体積の算出まで2日程度であり低コストで短期間に作業を実施できることがわかった。

5. 噴火後に撮影した垂直航空写真との精度検証

前項での検討後に林野庁にて航空写真が撮影されたため、斜め写真で作成した地形について精度検証を実施した。精度検証は、前項で検証した斜め写真の他に2時期の斜め写真で作成した地形について検証した。

5.1 検証に使用した写真

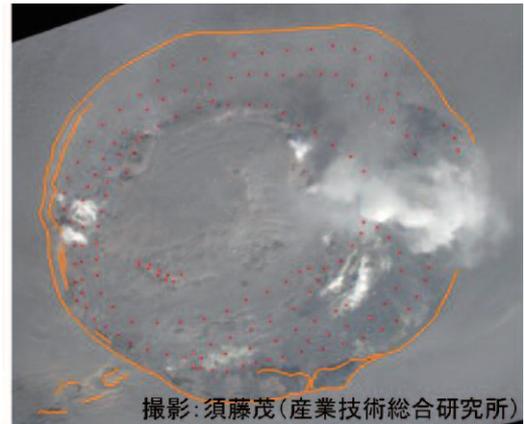
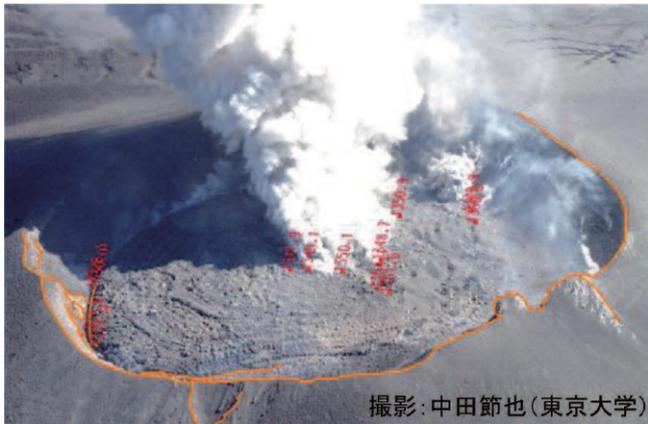
検証に使用した垂直航空写真は、以下の林野庁撮影の写真である(図12)。

他の2時期の斜め写真については以下の写真を使用した(図13)。

いくつかの時期に撮影された斜め写真が存在したが、2.1項で設定した条件に合う写真としてこの2時期の写真を採用した。

5.2 検証用データの計測

位置精度の比較のために各写真で計測を実



撮影: 中田節也 (東京大学)

撮影: 須藤茂 (産業技術総合研究所)

図 14 斜め写真と図化データの重ね合わせ

表5 計測結果の比較

2011年1月31日の写真

点番号	斜め写真(m)			鉛直航空写真(m)			較差((斜め)-(鉛直)) (m)			
	x	y	z	x	y	z	Dx	Dy	Dl	Dz
CP01	-11310.375	-120978.047	1413.123	-11319.966	-120978.111	1415.261	-9.591	-0.064	9.591	-2.138
CP02	-11404.918	-120893.821	1398.704	-11421.974	-120887.412	1396.324	-17.056	6.409	18.220	2.380
CP03	-11350.488	-120950.565	1407.292	-11353.227	-120956.461	1409.213	-2.739	-5.896	6.501	-1.921
CP04	-11164.345	-120315.315	1383.459	-11197.140	-120326.499	1383.655	-32.795	-11.184	34.650	-0.196
CP05	-11450.184	-120611.291	1369.706	-11448.656	-120606.154	1363.442	1.528	5.137	5.359	6.264
平均							-12.131	-1.120	14.864	0.878
標準偏差							13.532	7.434	12.153	3.512
二乗平均誤差									18.415	3.262

2011年2月4日の写真

点番号	斜め写真(m)			鉛直航空写真(m)			較差((斜め)-(鉛直)) (m)			
	x	y	z	x	y	z	Dx	Dy	Dl	Dz
CP06	-10945.064	-121059.032	1412.794	-10945.346	-121057.788	1413.041	-0.282	1.244	1.276	-0.247
CP07	-11326.293	-120985.787	1412.828	-11321.280	-120981.683	1413.052	5.013	4.104	6.479	-0.224
CP08	-11424.336	-120905.661	1397.670	-11421.677	-120887.986	1396.903	2.659	17.675	17.874	0.767
CP09	-11454.003	-120604.290	1366.579	-11448.648	-120605.472	1363.396	5.355	-1.182	5.484	3.183
CP10	-11133.033	-120312.769	1390.048	-11137.730	-120311.070	1393.654	-4.697	1.699	4.995	-3.606
平均							1.610	4.708	7.221	-0.025
標準偏差							4.185	7.488	6.272	2.441
二乗平均誤差									9.144	2.183

2011年4月21日の写真

点番号	斜め写真(m)			鉛直航空写真(m)			較差((斜め)-(鉛直)) (m)			
	x	y	z	x	y	z	Dx	Dy	Dl	Dz
CP11	-11413.790	-120893.286	1373.825	-11420.947	-120886.134	1396.393	-7.157	7.152	10.118	-22.568
CP12	-11345.074	-120952.082	1385.285	-11353.430	-120954.469	1402.630	-8.356	-2.387	8.690	-17.345
CP13	-11177.082	-121075.623	1376.048	-11179.855	-121087.399	1389.541	-2.773	-11.776	12.098	-13.493
CP14	-11403.806	-120479.309	1350.868	-11402.385	-120468.437	1353.782	1.421	10.872	10.964	-2.914
CP15	-11332.294	-120417.096	1359.906	-11321.480	-120402.914	1367.094	10.814	14.182	17.835	-7.188
VCP01			1341.145			1341.148				-0.003
VCP02			1339.261			1339.840				-0.579
VCP03			1344.267			1341.638				2.629
平均							-1.210	3.609	11.941	-7.683
標準偏差							7.752	10.604	3.521	9.161
二乗平均誤差									12.349	11.509

施した。それぞれの写真で共通する箇所として火口の縁の付近を計測した。火口の縁については、噴煙が北東側に流れていることが多いので、南西部を中心として図化し、それ以外についても計測可能な場合は図化した(図14)。図化データは、基準点により幾何補正した。

5.3 データの検証

垂直航空写真と3時期の斜め写真で取得した計測データの座標値を比較して表5にまとめた。斜め写真の計測値を垂直航空写真の計測値と比較し較差を計算した。計測箇所は、噴火前後で地形の変化がないと思われる箇所を選んだ(VCPは除く)。火山灰等による若干の

地形の差異は、この中に含んでいる。

計測した図化データと検証のために取得した計測点を以下の図に示す。

5.4 結果と考察

1月31日の写真は、2章でも懸念していたとおり、基準点の数が少ない事により平面位

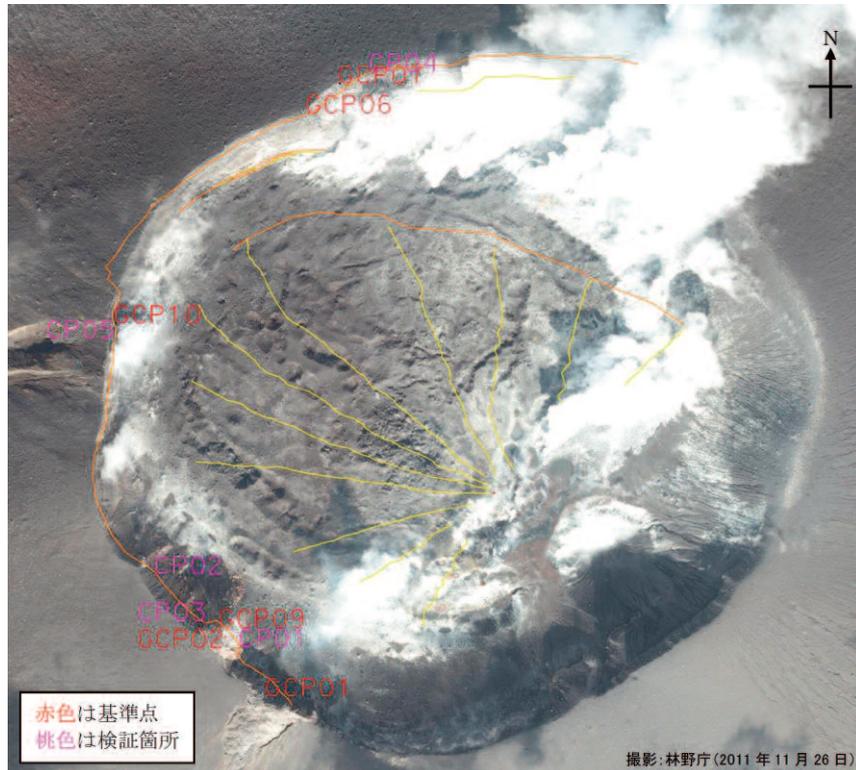


図 15 2011年1月31日の斜め写真で計測したデータと垂直航空写真の重ね合わせ

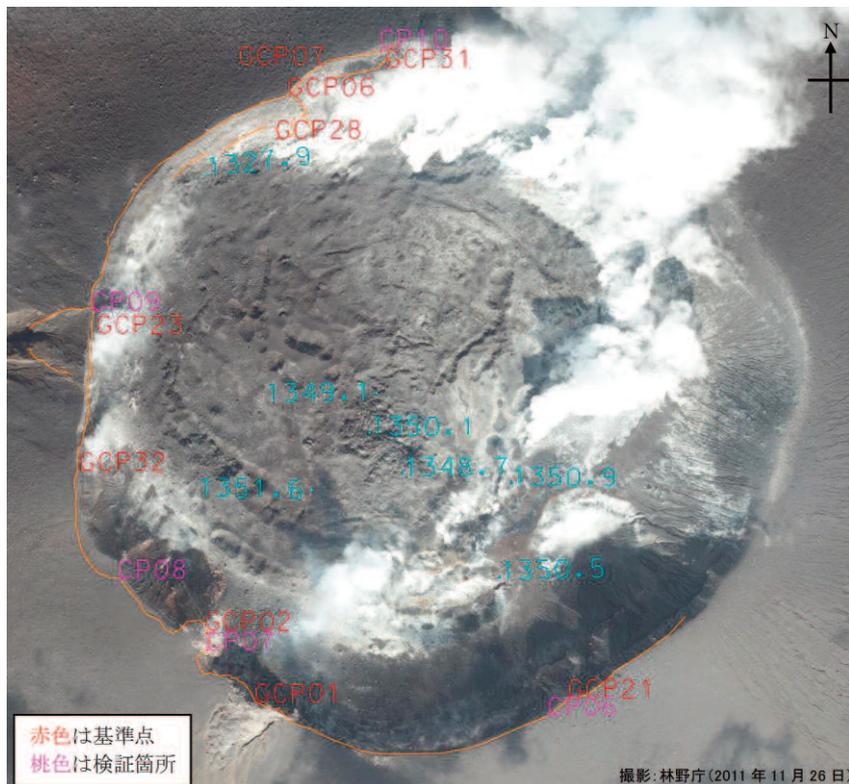


図 16 2011年2月4日の斜め写真で計測したデータと垂直航空写真の重ね合わせ

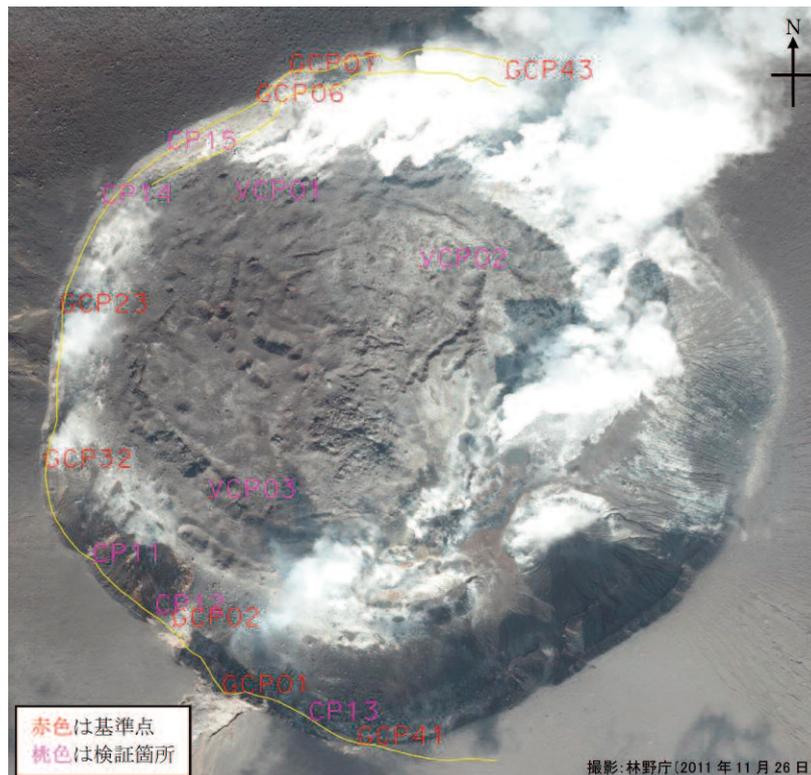


図 17 2011 年 4 月 21 日の斜め写真で計測したデータと垂直航空写真の重ね合わせ

置の較差が大きい。高さの精度は想定していたよりも良好であった。

2月4日の写真は、他時期と比較して遠景部分で基準点を取得できた事と、解像度が高い写真で基準点の判読も他よりも容易であったため、平面位置の精度が比較的良好であった。標高の精度も最も良い結果となった。

4月21日の写真は、もっとも鉛直に近い写真であったが、左右の写真の重複度が高かったため、高さの精度がもっとも悪い結果となった。

4月21日の写真は、溶岩部分が鉛直写真と共通する部分があったので、高さの基準点を3点配置した(VCP01~03)。その基準点については標高の精度が良かった。

この結果より火口については、縁の部分のみでなく火口の内側に基準点を配置できれば、高さの精度が向上すると考えられる。

1月31日と2月4日の高さの精度が良好であったのは、角度が大きく傾いている事に

より高さ方向の計測が容易になった事が要因と考えられる。

検証結果は、図15~17に示す通り写真の北側ではデータが取得できていない。この理由は、その範囲については標定時の基準点が取得できていないことによる。北側は、どの写真でも噴煙があることと、火山灰の蓄積が多く地形的特徴が判読できないため、基準点を取ることができない。基準点の無い範囲は、溶岩モデル作成時にデータを除外したことからとも言えるように大きく精度が低下する事がわかっている。

6. まとめ

斜め写真を使っての計測は、平面位置については、解像度や撮影高度にもよるが基準点の配点が悪くても10m前後の残差が残る。標高は、数mの精度を求められることが確認できた。

この手法は、火山のような噴煙があり鉛直

方向からの撮影が困難な場合の調査に有効であると言える。また時々刻々と変化する対象物には、写真があれば過去に戻って計測が可能なのでこの手法が有効である。さらに調査のために撮影された写真を流用できるので安価にデータを作成することが可能である。

課題としては、高精度な計測は困難なため求められる成果によってはこの方法が使用できないことである。しかし、撮影に使用したカメラを写真と合わせて借用してキャリブレーションを実施する事により、計測精度の改善は望める。今回は、撮影から検証作業を行うまでに期間があいており現時点での精度検証は難しい。今後は、撮影時にキャリブレーションを行うようにしてその効果を検証したい。

以上のように、斜め写真を用いた地形計測は、計測精度の課題が残されているが、溶岩のような計測すること自体が困難な対象物に対しては、最善の計測手法であると考えられる。今後は、同様の災害が発生した場合に、より良い結果を迅速に出せるように作業方法の効率化を求めている。

■謝辞

本研究に当たって斜め写真のご提供及びご協力頂いた東京大学地震研究所の中田節也教授、鹿児島大学の小林哲夫教授、北海道大学地震火山研究観測センターの村上亮教授、独立行政法人産業技術総合研究所の須藤茂氏、並びに、アジア航測株式会社の佐々木寿氏に心より感謝の意を表します。

■参考文献

- 1) 社団法人日本測量協会 (1983) 『現代測量学』 ⑥⑦
- 2) 高橋洋二、近津博文 (2010) 『近接デジタル写真測量における民生用デジタルカメ

ラの精度評価』写真測量とリモートセンシング 49(4), 260p-268p

- 3) 火山噴火予知連絡会 第118回火山噴火予知連絡会資料
- 4) 清水 収、地頭菌 隆、下川 悦郎、山越 隆雄、木佐 洋志、瀧口 茂隆、杉山 光徳 (2011) 『霧島山新燃岳の2011年1月噴火による降灰とその後の土砂移動』新砂防 64(3)、46p-56p

■執筆者

磯部 浩平 (いそべ こうへい)

所属：国際航業株式会社 東日本事業本部 空間情報基盤技術部

E-mail : kohei_isobe@kk-grp.jp



本間 信一

所属：国際航業株式会社 東日本事業本部 第二技術部

E-mail : shinichi_homma@kk-grp.jp

阪上 雅之

所属：国際航業株式会社 東日本事業本部 第二技術部

E-mail : masayuki_sakagami@kk-grp.jp

和久津 龍太

所属：国際航業株式会社 東日本事業本部 空間情報基盤技術部

E-mail : ryuta_wakutsu@kk-grp.jp

中野 崇

所属：国際航業株式会社 西日本事業本部 九州支社

E-mail : takashi_nakano@kk-grp.jp