



Air-borne LiDARによる火山調査の応用事例

秋山幸秀*

1. はじめに

リモートセンシング技術の一つとして定着した航空機搭載スキャナー型LiDAR（光波計測）システム（図.1）は、広域な三次元形状を捉え数値化することが容易であり、地形の特徴を解析することや同一エリアをモニタリングして差分を計算し、知りたい範囲の変化量を求めるなどに利用されている。

LiDARが大規模な火山活動の調査で活躍したのは2000年3月の有珠火山の噴火による地殻変動解析³⁾からで、その後多くの活火山において現場に立ち入ることのできないような状況で大いに利用されている。本稿では火山調査におけるLiDARデータを加工した応用事例を紹介する。

2. データ作成

LiDARデータには幾つかのパルスモード（1st, 2nd, 3rd,..., Last pulse）があり、使用目的に応じて使い分けている。1st pulseは樹木の表面や煙の面などが得られ、Last pulseは地盤への透過率が高く、Second, third pulseなどは1st, Last pulseの中間的特長のデータが得られる。地形を得るにはLast pulseで得られたデータを座標変換して標高値にし地盤を抽出するノイズ処理を行いデータの抜けを内挿計算した格子状のDTM（数値地形モデル；Digital Terrain Model）を作成する。また、Last pulseを標高値に置き換えたデータからノイズ処理をせずに標高値をそのままモ

デル化したLpDEMの陰影はモノクロ写真のように形状を画像化することができる。因みに1st (First) pulseのデータを標高値に置き換え、モデル化した場合は樹木が繁茂している時では樹木の表層を包み込むDSM（数値表層モデル；Digital Surface Model）となる。

火山活動が顕著な場合、有毒ガスや高温で周囲の樹木は立ち枯れや焼失がおきる。活動が沈静化すると逆に新しい成長が生じる。利用方の一つとして、モニタリングしDSMで差分を取ることで樹木の変化を調べることも可能である。

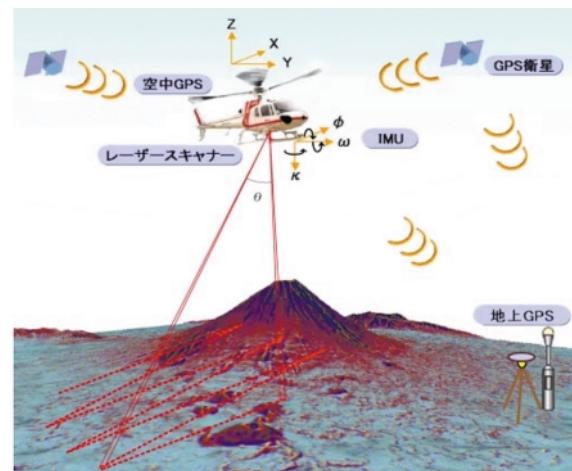


図.1 LiDAR計測飛行イメージ(陰陽図を合成)

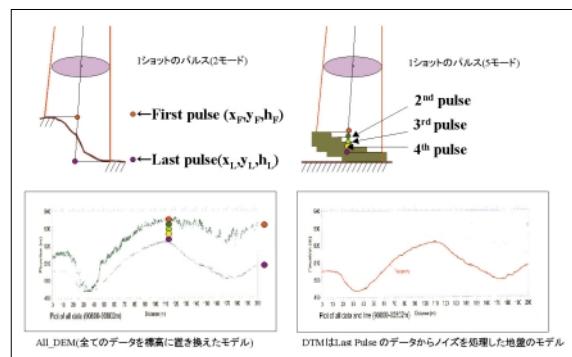


図.2 パルスモードと数値モデル化の概念

* 朝日航洋株式会社

3. 応用事例

データ加工には1つの数値モデルのみで加工する場合と2次期以上の数値モデルの差分を比較する場合がある。2次期の差分の調査も絶対的な変動量解析と相対的な変動量解析で異なる情報を得ることができる。絶対座標での変動は大規模な地殻変動が求められることになり、相対的な変化としては基準点に座標をあわせて降灰厚(量)などが得られる。

また1次期のデータでも地形解析以外に動的な水面の形状などが測れる。ここではLpDEMを使用した噴煙解析の試みなどの応用事例を記す。

3.1 有珠山の場合

有珠山(図.3)は火山性地震の群発後に噴火する特性があると観測で判明している。

北海道大学の岡田弘教授の研究グループがこの噴火兆候を確認して地域住民が避難することができたのはハザードマップによる啓発と日々の観測と研究の成果といえる。同時に噴火前にレーザー計測の準備が行なえたことにより、噴火直前の地形データを得ることができた。平成12年(2000)3月31日の噴火から大規模な地殻変動が始まり有山西山地区の地形標高データを4月26日のデータから差し引くと、標高値が60m以上変わったことを表すことができた。(図.4、5参照)

新火口の位置と変動量から東北東方向地下から図.6の様にマグマが地上に貫入してきたことが推定される。

次に噴火前に計測した有珠山北部のDTMを加工した例を示す。

図7~11は明治43年(1910)に噴火した四十三山火口群である。年月を経て樹木で覆われ図.7の空中写真から火口形状などの地形的情報を得ることは難しい。図.8の地形図は情

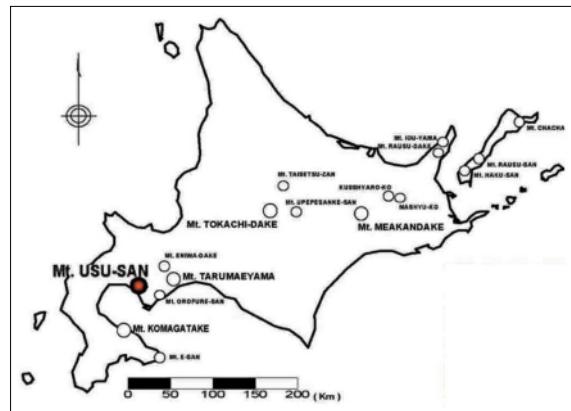


図.3 有珠山の位置

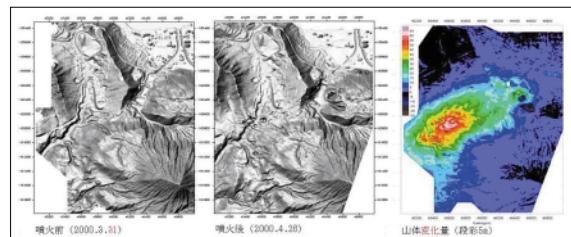


図.4 有珠山の地殻変動と変動量図

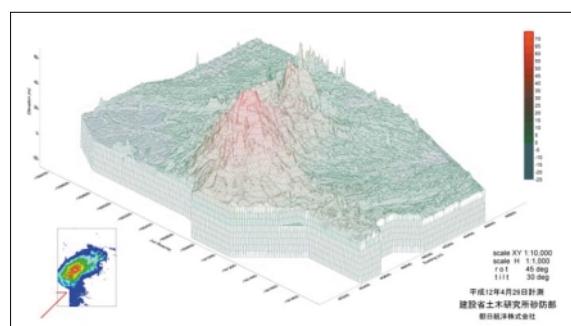


図.5 有珠山地殻変動量
(2000/4/26 - 2000/3/31)

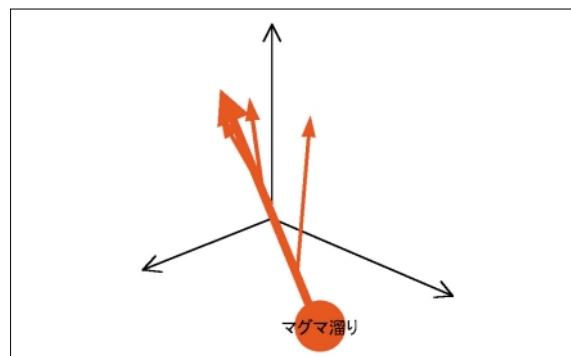


図.6 マグマの貫入モデル

報が記号化されているため間隔の空いた等高線の中などの地形が略されている。このような表現しきれない情報も図9、10のLiDARデ

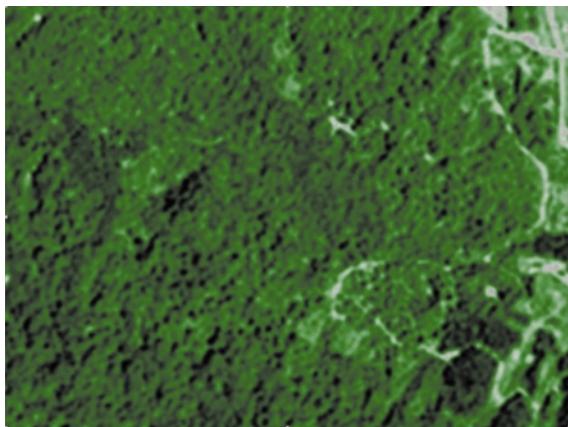


図.7 空中写真(有珠山四十三山火口群)

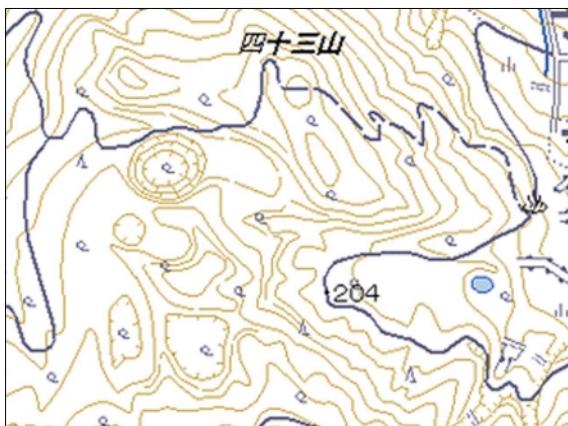
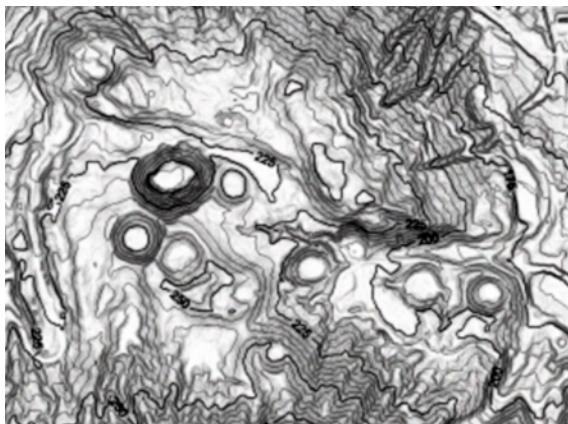
図.8 2万5千分1地形図：虻田[634066]⁶⁾

図.9 陰影(垂直光源) + 等高線図

ータによるDTMの陰影図は細かい形状も可視化しているが、光源の角度により表現できる形状は変わる。図.9は垂直光源の陰影と等高線によって図.8の地形図に近い表現になるが、平坦な箇所の微地形の陰影が消失している。図.10は北西光源で立体感を持たせている

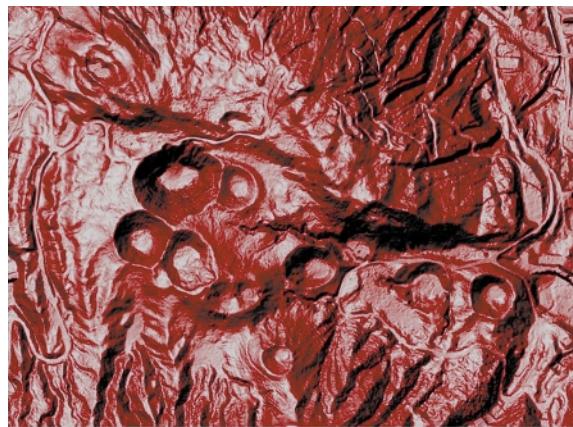


図.10 陰影図(北西光源)

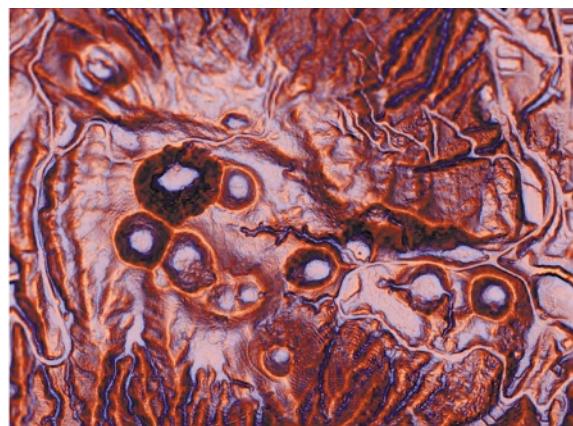


図.11 陰陽図(垂直光源陰影+高低差輝度)

が、光源に平行する地形的变化は表現できない。図.11の陰陽図では輪郭は陰影で、高低差は寒暖の輝度で表現することで稜線や谷線も、特に平坦な箇所の凹凸部など微地形表現に優れていることがわかる。

図.12は2000年噴火前の有珠山麓の陰影図である。図.13、14は周囲の地形の平均値から高低差を求めて寒暖の配色を合成した陰陽図である。平均値を求める範囲を拡大すると長波長の地形的特長を抽出することが可能となり、範囲を狭めると短い波長の地形の特徴が表現される。陰陽図は図.12の陰影図と比較すると地形の凹凸が判別し易くなっているが微地形に波長を合わせた場合、広域の画像を作成すると高低差の配色が周囲に溶け込み表現が緩和される特徴がある。図.11が図.13と比較して平坦地の微地形表現

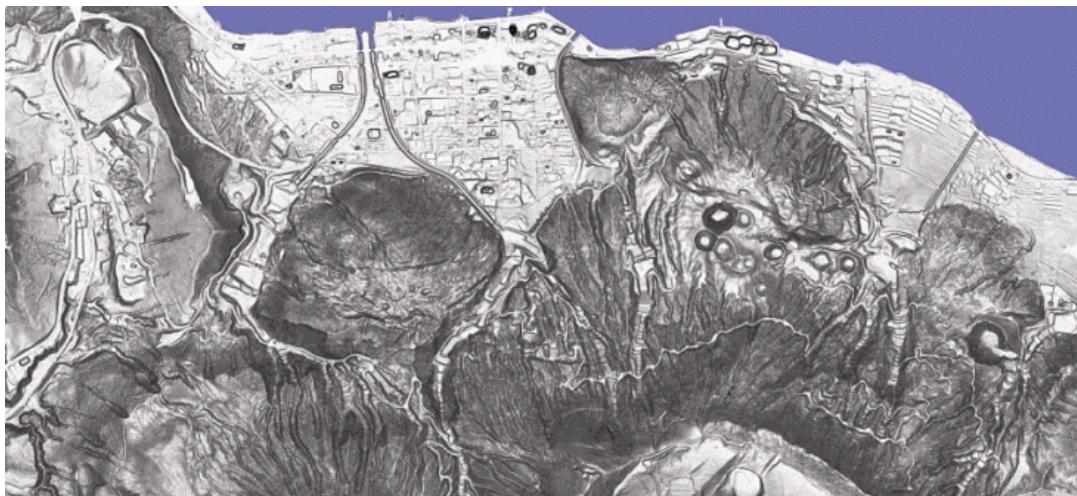


図.12 有珠山麓（洞爺湖側）陰影図

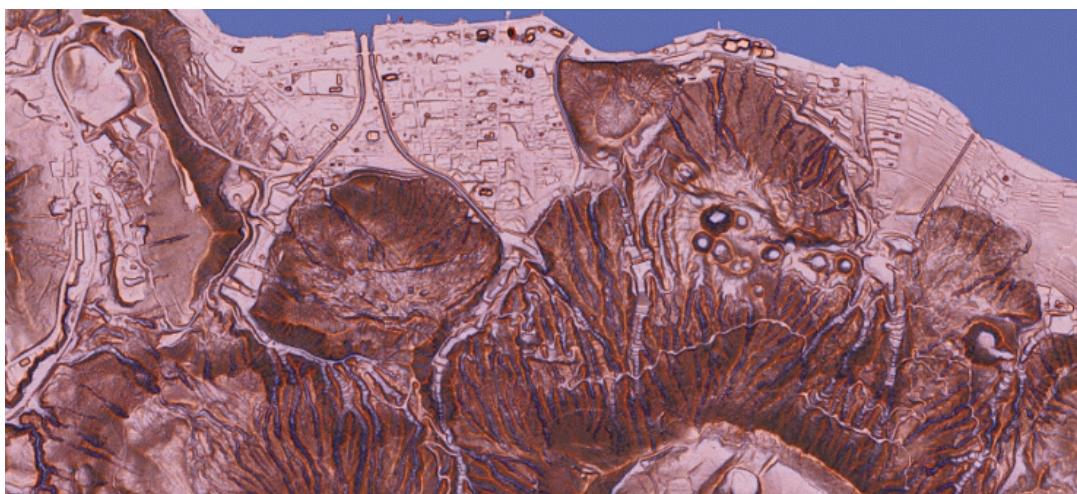


図.13 有珠山麓（洞爺湖側）陰陽図

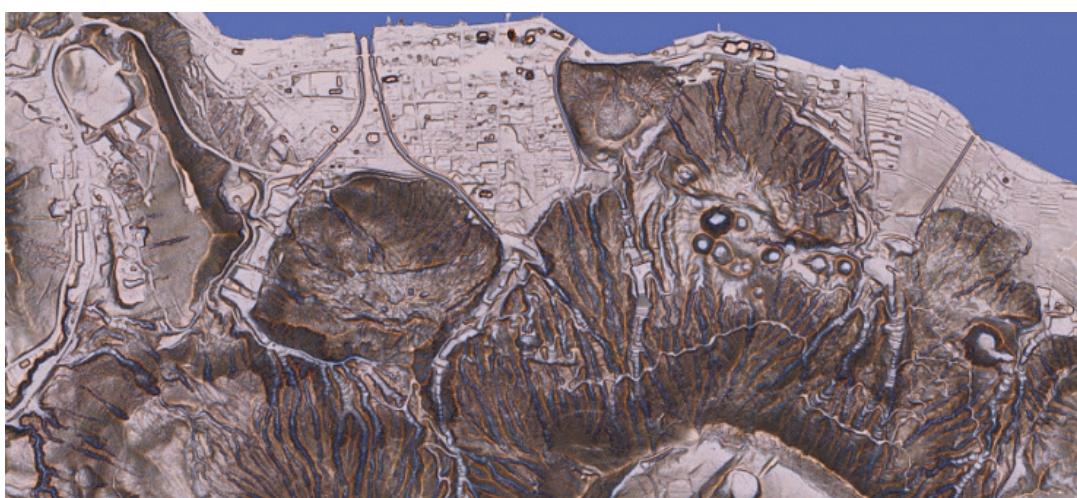


図.14 有珠山麓（洞爺湖側）陰陽図（緑強調）

が細かいことからもわかる。図.14は図.13に色調調整を加え（緑を50%強調）高低差を

区別し易く自然の色調に近くなる様に加工表現している。

3.2 北海道駒ヶ岳の場合

図.15の北海道駒ヶ岳（標高1131m）は有珠山（標高733m）と同様に那須火山帯の北端部に位置しており有珠山の噴火に誘発されるかのように平成12年（2000）9月4日に小規模な水蒸気爆発を起し噴煙をあげ9月28日、10月28日、11月8日も水蒸気爆発を繰り返した。噴火活動中の状況では、安全の為フィールド内に立ち入る事はできない。

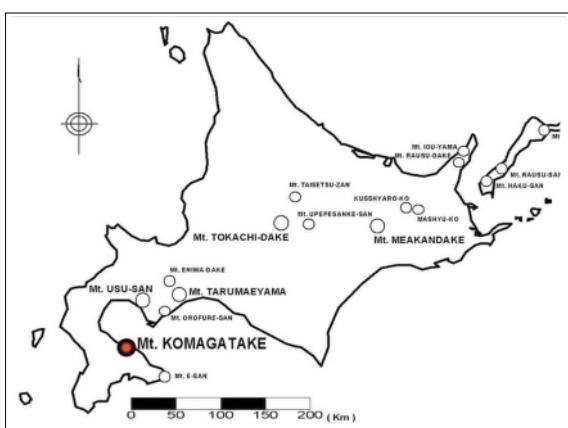


図.15 北海道駒ヶ岳位置図

立ち入り禁止規制がかかっている場合でも火山活動が比較的穏やかな条件では航空機の機動力で空中から調査を行うことができる。写真.1、2、3は北海道駒ヶ岳の火口に接近している状況で並べている。図.16は写真.3と同等のアングルに加工したDTMから作成した鳥瞰図である。火口付近のこのフィールドは写真.3で判るように樹木が少なく、データ編集ノイズ処理の手間の少ない。ラストバルスの標高値のデータから噴煙と樹木を除去して容易にDTMを作成することができた。

細かい格子間隔のDTMを使用することで様々な地形解析が行える。図.17はDTMから特徴のある地形を抽出した断面図である。

断面-1、-2は斜面の勾配方向に水平に発生した縞状の段差が見受けられる。これらは馬蹄カルデラと称される外輪火口内部に堆積していた降灰などの火山碎石物が火山活動に



写真.1 北海道駒ヶ岳遠景
2002年8月12日 撮影：高貴潤一



写真.2 北海道駒ヶ岳火口



写真.3 北海道駒ヶ岳

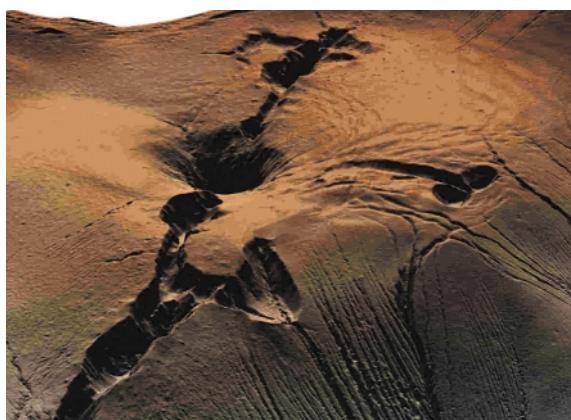


図.16 DTMの鳥瞰図

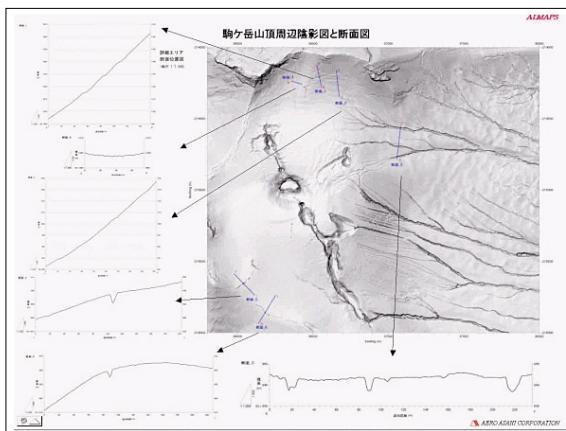


図.17 DTMから作成した地形断面図位置図

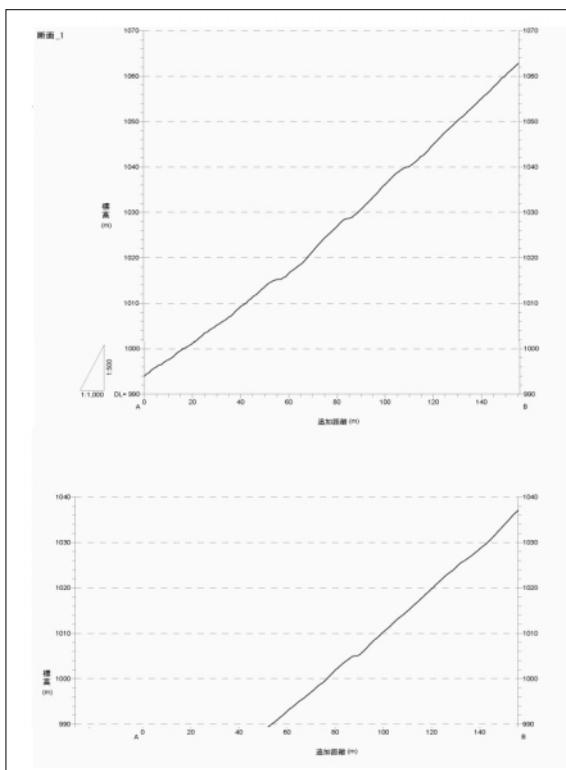


図.18 断面図 -1、-2 (斜面の歪)

より熱で膨張、収縮を繰り返してできた歪と考えられる。

断面-3はガリーの状況で谷の底が鈍角になっているのは降灰などが流れて堆積している様子を表している。断面-4はリルの細かい線状が見て取れる。リルは降雨時には雨水を流し、侵食されてやがてガリーへと成長し、継続して堆積物を運搬していくことになる。

断面-5、-6は一見小さな火口列のようにも見受けられるが、クラックに沿って火山碎

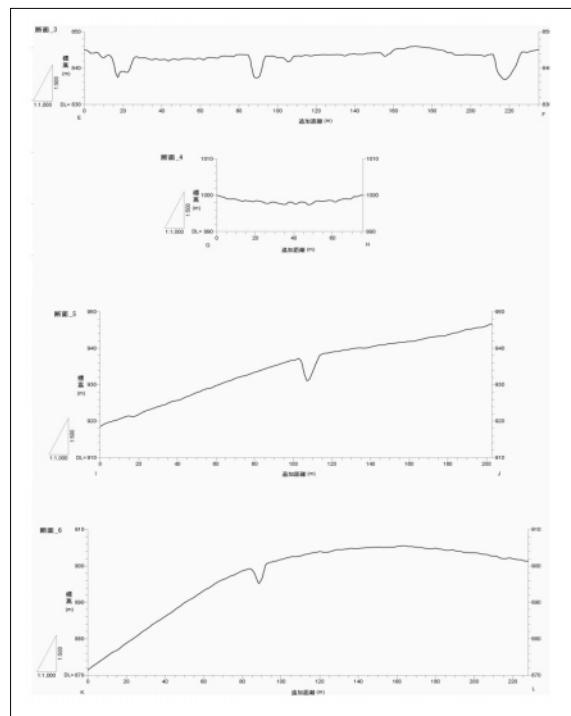


図.19 断面図-3(ガリー)、-4(リル)、-5、-6(クラック)

石物に埋もれている古い火山の稜線が存在しており、表層に覆い被さっている碎石物の熱放散に伴う収縮で地下の稜線を軸に折れるようにな发生したクラックと考えられている。このように現地に立ち入らずに細かい断面解析を行うことができる。

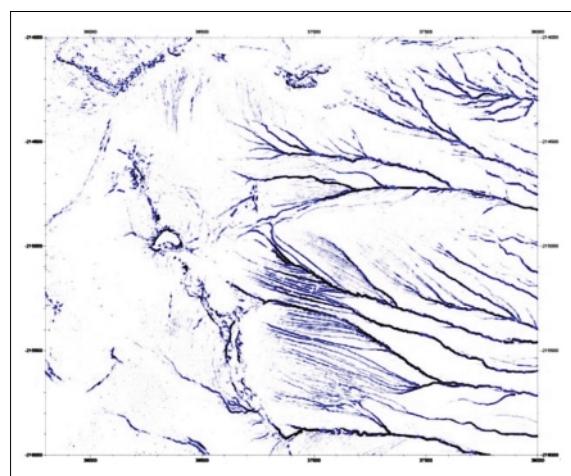


図.20 リル・ガリー自動抽出例

図.20は北海道駒ヶ岳の火口付近のDTMからリル・ガリーなどを自動的に抽出した例である。

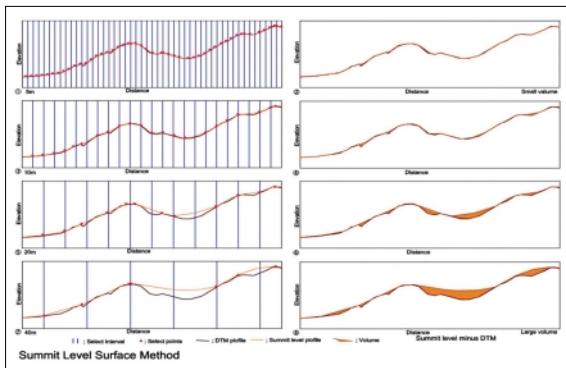


図.21 接峰面解析原理

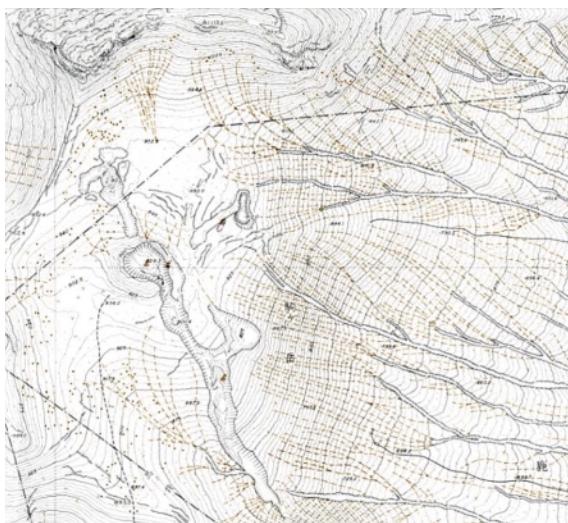
図.22 火山基本図(北海道駒ヶ岳⁷⁾)

図.21は地形の特徴のうち谷形状を抽出する方法として接峰面を利用した原理を画像で表している。つまりDTMのある周波数(データ間隔)の中で高い位置を選んで新たな面を作成し、そのデータと元のDTMの差を計算して描画している。図.21でわかる様に周波数が細くなるほど微地形に対応し、周波数が大きくなるほど大きな地形的特徴に対応している。

図.22は図.20と同一エリアの火山基本図である。これは空中写真から人間が判読した結果を記号で表している。図.20と比べると全体的にはよく対応している様子がわかる。また、DTMを利用してすることで図.19の様に断面図を作成して谷の成長をモニタリングすることや、時期の異なるデータから侵食や堆積状況を求めることもできるようになる。

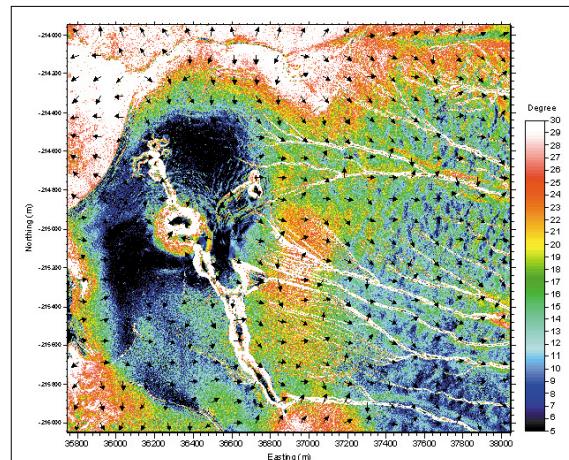


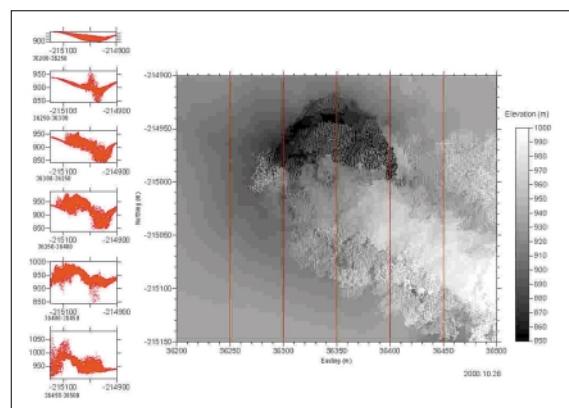
図.23 傾斜勾配図+ベクトル図

また、DTMから地形の傾斜勾配を図化した図.23で示したようにリルはガリーよりも急な傾斜勾配で発達していることがわかる。

次ぎに通常はノイズとなるデータを解析した例を記す。DTMを作成する前のラストパルスのALLデータを格子状の標高の数値モデル(LpDEM)にして標高値のグレイスケールにしたのが、図.24である。火口を真上から俯瞰して噴煙が南東にたなびいている様子を呈している。(写真.4 火口参照)

図.24の左の散布図は縦軸に標高、南北の断面を横軸にして50mごとに表している。赤い断面図ラインの左からみて散布図は上から下に並べてある。

一番上の散布図は噴煙の無い火口の西(左)

図.24 散布図と標高のグレイスケール
(LpDEMでみた火口と噴煙)

側の状況で、二段目の散布図から噴煙の影響による凸部が表されている。使用したレーザー光は1064nmの波長領域であるので、水の中は透過することはできない。水分を含んだ噴煙が隙間無く存在するとその位置を計測することになる。この特性を利用することで噴煙の濃い位置を解析することに利用できる。その位置はすなわち噴煙の上がっている場所と考えられる。

図.25は散布図の断面を更に細かく描画したものである。垂直の矢印は明らかに下からの圧力で突出している位置で、ここで噴煙が噴出していると特定できた。

実際に噴煙が突出していた箇所が2000年9月4日からの火山活動による位置であったことより、新たな火口が生じたのかどうか、また噴出する勢いがどの程度のものかなどの火山の特徴を解析する研究材料として利用でき

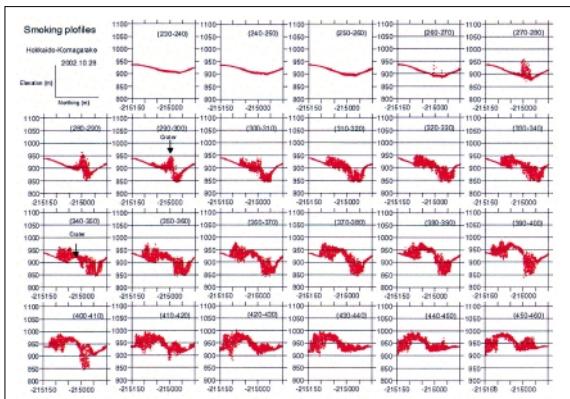


図.25 火口域のデータ散布図



写真.4 大火口の垂直写真

るデータとを考えることができる（ただし、噴火活動が計測飛行に支障をきたす場合は安全のため行なうことはできない）。

3.3 三宅島の場合

三宅島（図.26）の雄山は平成12年（2000）7月に噴火し住民が全島避難をしたことで被害の甚大さが象徴されている。実際非難したあとで全島の各地で二次災害の土石流が発生した。

火山による災害は噴石、溶岩流、火碎流、有毒ガス、または高降灰による農作物への影響のように直接被害を受ける場合とは別に時間を経て二次的に被害を被るものがある。その一つが土石流災害である。山腹に降る火山灰はある程度積もると雨水が地下に沁み込にくくなり直接山腹表層を流れ周囲の土砂を浸食し巻き込んで土石流を発生させる。そこでデータから降灰厚を求める必要が生じる。

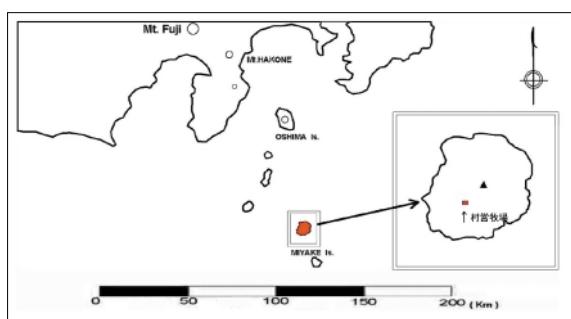


図.26 三宅島位置図



写真.4 大火口の垂直写真

地殻変動を伴う二次期の相対位置の補正には村営牧場の牛舎を物標として使用した。図27は二次期の差分のデータに牛舎を通した断

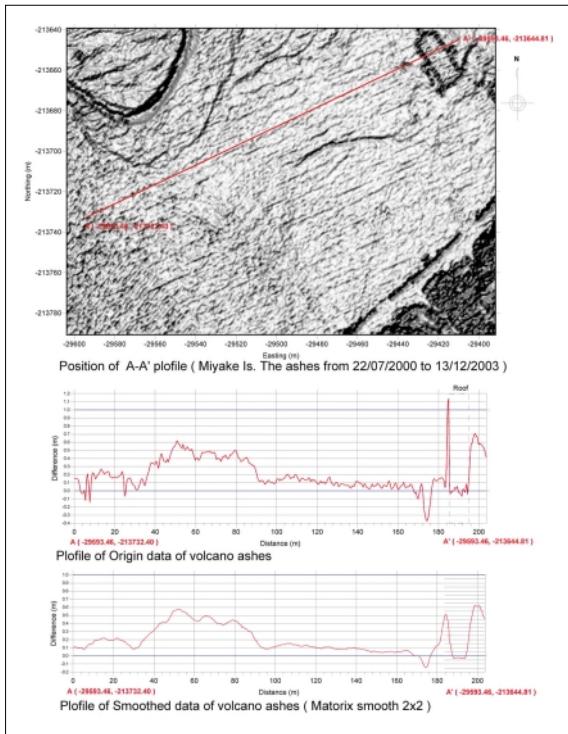


図.27 物標を通る断面位置・図と平均断面図

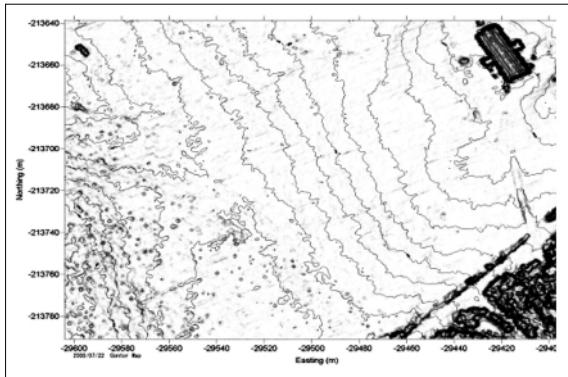


図.28 噴火直後の地形(2000/7/22計測)

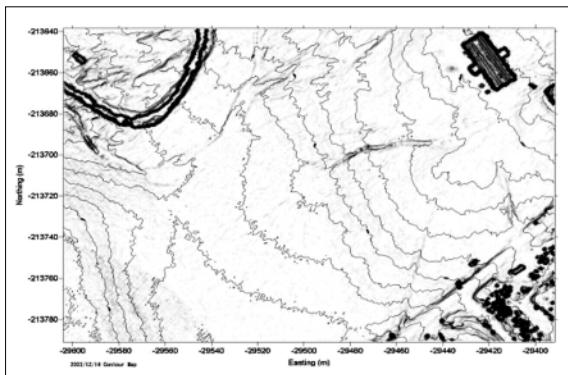


図.29 噴火鎮静時の地形(2003/12/14計測)

面図を表している。二次期の牛舎屋根形状に差が生じないように平行移動することで相対的に座標を合わせる作業を行っている。また、ノンプリズムタイプのLiDARでは1ショットあたり測距値には標準偏差1で $\pm 1.5\text{m}$ の誤差があるためこれを平滑化する目的でスムージング処理を行った。(図.28下段断面図参照)その結果、断面図の右端にある牛舎の屋根が平に補正されている。中央左の厚みは降灰後の浸食堆積された厚みである。

図.28、29、30は村営牧場の噴火直後の地形

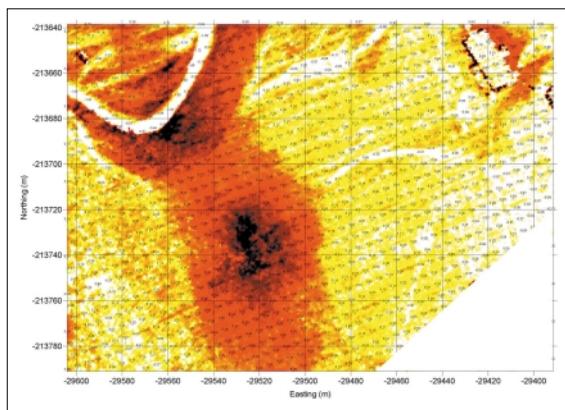


図.30 降灰厚と浸食堆積の分布図

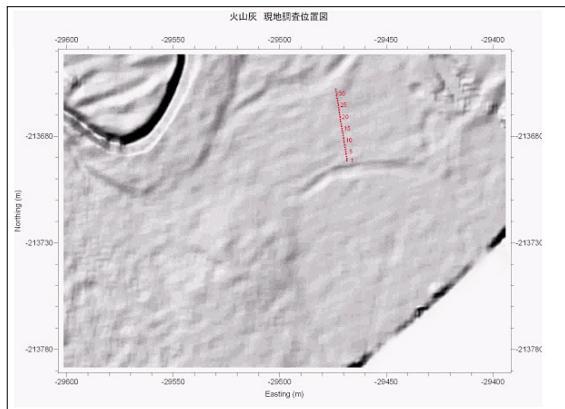


図.31 実測とLiDARの降灰断面図11)

と噴火で降灰し時間が経過した二時期の地形データ差分をカラー段彩図に加工して表現している。図.29でなだらかな勾配であった等高線の上に降灰し、その後浸食を受け図.30で中央に扇状地形が生成されていることが判る。

現地に赴き新しい火山灰の厚さを調査し図.31の赤線（降灰厚が残っている箇所）で現地調査値（実線）とLiDARで求めた値（点線）を比較した結果、数センチの誤差で合致し高精度で降灰厚を求めることができた。

LiDARデータを有効利用して自然現象を記録し表現することもサイエンスであるが降灰厚調査の様に生活において役立つようにデータを解析することも重要な業務である。

例) <<火山調査手法>>

- ・地殻変動調査.
- ・微地形調査.
- ・地形判読.
- ・火口の位置把握調査.
- ・火山灰堆積厚の調査.
- ・e.t.c.



図.32 北海道駒ヶ岳陰影図
(垂直光源)

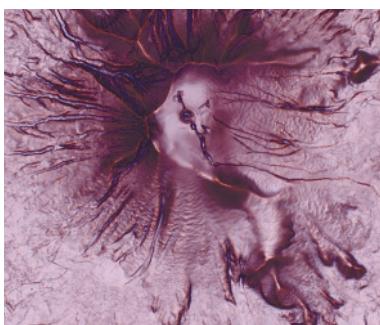


図.33 北海道駒ヶ岳陰陽図

4. まとめ

平成12年（2000年）は火山活動が活発で多くの火山が噴火した。本稿は同年に活動した成層火山〔（富士山型）の火山、山頂火口で噴火が繰り返され、碎屑物と溶岩流が交互に積み重なって成長する〕の事例を使用した。

また本稿で紹介したようにLiDARデータには色々な情報が含まれている。地形編集する前のLpDEMデータを加工することで通常は利用されない噴煙データによる火口の割り出しの試みは一例である。加工後も一時期の、または多時期のDTMデータを利用した火山調査手法は左記のように開発されてきている。

今後もモニタリング調査などを続けることで、火山におけるダイナミックな変動の定量的把握が行える。このことは、災害を防ぐ目的でいかに運用していくかが重要といえる。つまり得られた結果を防災などの危機管理へ展開し啓発に利用する方向で考える必要がある。

また、計測の安全面からも噴火活動中の火

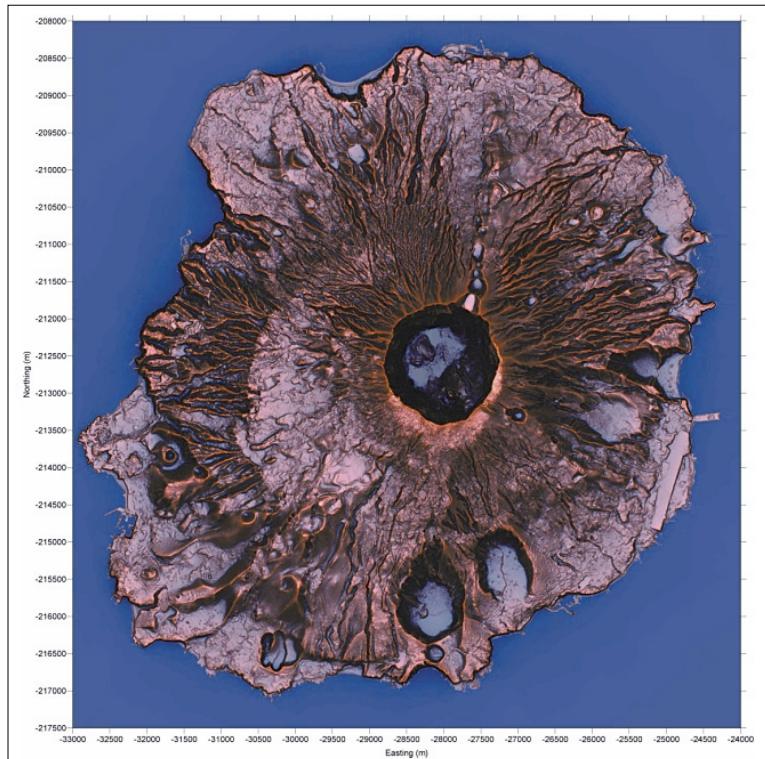


図.34 三宅島陰陽図（形状立体表現）

山に有効な斜めレーザー計測装置が噴煙をよける調査にも利用されることでデータに厚みがだせると考えられる。

解析の側面支援としては画像の表現方法で、一つのDTMから二次元平面で立体的に可視できる陰陽図(図1.11.13.14.33.34)などの手法も開発された。火山調査を含め地形解析にもおおいに役立つことが期待される。

(発表日2005年6月22日)

謝　　辞

土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームの山越隆雄氏には資料提供していただきました。北海道大学大学院理学研究科付属地震火山研究観測センターの岡田弘教授にはご助言をいただきました。計画、準備、計測、撮影、処理、編集、解析など協力して戴いた皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：火山灰堆積厚計測手法に関する研究、pp.2・9、2004
- 2) 秋山幸秀・高貫潤一・藤原輝芳：空中レーザー計測システムの火山砂防への応用、日本写真測量学会、Vol41.04、pp.50-55、2002
- 3) 中野公章・清水孝一・山越隆雄・葛西勝栄・中村剛・秋山幸秀・高貫潤一：2000年有珠山噴火時におけるヘリコプター搭載レーザースキャナーによる地形変化測定：砂新砂防砂防学会誌、Vol.53、No.6、pp.88-94、2001
- 4) 秋山幸秀：空中レーザー高密度地形計測の治山事業における活用方法、治山治水研究会論文集、pp.343-355、1997
- 5) 秋山幸秀：空中レーザー計測システムの治山・砂防関係への応用、写真測量とリモートセンシング、Vol.39、No.2、pp.25-28、2000
- 6) 国土地理院：2万5千分1地形図(虻田)
- 7) 国土地理院 1万分1火山基本図：北海道駒ヶ岳
- 8) 村上昌幸・柴田啓介・木村幸吉・秋山幸秀・藤原輝芳・宮崎充弘：電子基準点を利用したエアボーン・レーザー・プロファイリングによる高密度三次元測位、第20回技術発表会論文集、日本測量調査技術協会、pp.52-59、1998
- 9) 亀井福次・中川勝登・茂木広一・浦部ぼくろう・高橋博将・白戸丈太郎・斎藤重好・岩波英二・秋山幸秀・藤原輝芳：地形測量へのレーザープロファイラーの利用技術に関する研究、第21回技術発表会論文集、日本測量調査技術協会、pp.38-45、1999
- 10) J.TAKANUKI・K.TAKADA・Y.AKIYAMA・M.P.B.Senakasiri : The extraction of canopy-understudy vegetation-topography structure using helicopter-borne LiDAR measurement between a plantation and a broad-leaved forest. IGARSS 2003
- 11) 山越隆雄・笹原克夫・田島靖久・下村幸男・秋山幸秀・井上徹：噴火中の火山における火山灰堆積厚調査方法について JSECE Publication No.42.平成17年度.砂防学会研究発表会概要集、pp.364-365、2005
- 12) 津留浩介・秋山幸秀：進化する山地の空間情報としての地形表現「カメラアイ」写真測量とリモートセンシング.日本写真測量学会、Vol.44、01、pp.4-5、2005
- 13) 秋山幸秀：LiDARによる3次元データの微地形表現手法 - 陰陽図 - 、地球惑星科学関連学会、Y057-007、2005

- 14) 村井俊治・近津博文 監修：デジタル写真測量の理論と実践。社団法人日本測量協会、p186-187、2004
- 15) 秋山幸秀：北海道駒ヶ岳のAirborne LiDARによる形状解析事例、エアボーンリモートセンサー、社団法人 日本写真測量学会、pp.10-15、2002

発表者紹介

秋山 幸秀（あきやま ゆきひで）

所属：朝日航洋株式会社 空間情報事業本部 開発企画室

1963年4月東京都生れ。94年東海大学大学院海洋学研究科海洋科学専攻博士課程修了・理学博士。94年朝日航洋株式会社入社。

リモートセンシング、防災環境調査、開発・研究に関する業務に従事。また、航空機搭載型LiDARの研究開発・利活用関連の業務を行なう。

日本リモートセンシング学会、日本写真測量学会、日本測量協会、日本測地学会、日本地震学会、物理探査学会、砂防学会、太平洋学会などの会員

E-mail : yukihide-akiyama@aeroasahi.co.jp