

1-1 成層圏・対流圏観測実証： 大気観測から社会の安全へのアプローチ

1-1 *Stratosphere-Troposphere Observations; Approach from Atmospheric Remote-sensing to Social Safety*

米国アラスカ州オーガスティン火山の 2006 年噴火における火山雲の変動の予測と検証

Predicting and validating the motion of an ash cloud during the 2006 eruption of Mount Augustine volcano, Alaska, USA.

リチャード L. コリンズ ハビエル フォセサット ケネス サッセン
ピーター W. ウェブレイ デビッド E. アトキンソン
ケネソン G. ディーン キャサリン F. ケイヒル 水谷耕平

R. L. Collins, J. Fochesatto, K. Sassen, P. W. Webley, D. E. Atkinson, K. G. Dean,
C. F. Cahill, and MIZUTANI Kohei

要旨

2006 年 1 月 11 日、アラスカ州南部にあるオーガスティン火山が 20 年ぶりに噴火を開始した。アメリカ気象局 (NWS) のアンカレッジ予報台は 1 月 28 日、コディアック市に対して注意報を出した。気象局がアンカレッジとその周辺地域に対して一連の注意報を出したのを受け、アラスカ航空は 1 月 31 日にアンカレッジを発着するすべての航空便を欠航にした。アラスカ火山観測所 (AVO) は連続噴火の開始を既に発表していた。AVO は北太平洋の約 100 の活火山を監視している。活火山から出る火山雲は航空機に重大な損傷を与える可能性があるほか、地域社会や、極域及びその周囲を飛行する大陸横断航空機にとって大きな脅威となる。AVO では火山灰雲の拡散を追跡する拡散モデルが開発されていた。そのモデル「Puff」はオーガスティンの噴火期間中に AVO によって定常運用された。本稿では、オーガスティン火山による火山灰(あるいはエアロゾル)雲がアラスカで 2006 年 1 月 29 日から 2 月 2 日にかけて拡散する様子について検証する。ここでは総観場、Puff による予測、さらにはエアロゾルサンプラー、レーザレーダ(ライダ)システム及び衛星による観測結果を提示する。アラスカ大学フェアバンクス校(UAF)のエアロゾルサンプラーは、Puff が火山雲の動きを予測した地点の地表面で火山性エアロゾルが存在することを示した。またリモートセンシング衛星のデータは、火山周辺での火山雲の発達の様子が Puff による予測と一致していることを示した。2 基のライダは、アラスカ上空高く上がったと考えられる火山性エアロゾルが存在することを示した。両ライダは、ちぎれ雲があるときや火山雲が薄く拡散していてリモートセンシング衛星のデータでは検知できない場合にもエアロゾルを検知することができた。ライダの観測は Puff の予測と一致した幾つかの火山灰のトラジェクトリー(流跡線)を示した。拡散モデルは、他の方法では検知不能かもしれないが依然として重大な危険源である火山灰雲の動きを予測する。検証作業は、将来の予測の正確さを評価する際のカギとなる。今回の研究では、流れていく火山雲検知にあたって地表面と空中の両面で複数の補足的観測を行った点が大きな特徴である。

成層圏・対流圏観測実証…大気観測から社会の安全へのアプローチ
米国アラスカ州オーガスティン火山の 2006 年噴火における火山雲の変動の予測と検証

On 11 January 2006, Mount Augustine volcano in southern Alaska began erupting after 20-year repose. The Anchorage Forecast Office of the National Weather Service (NWS) issued an advisory on 28 January for Kodiak City. On 31 January, Alaska Airlines cancelled all flights to and from Anchorage after multiple advisories from the NWS for Anchorage and the surrounding region. The Alaska Volcano Observatory (AVO) had reported the onset of the continuous eruption. AVO monitors the approximately 100 active volcanoes in the Northern Pacific. Ash clouds from these volcanoes can cause serious damage to an aircraft and pose a serious threat to the local communities, and to transcontinental air traffic throughout the Arctic and sub-Arctic region. Within AVO, a dispersion model has been developed to track the dispersion of volcanic ash clouds. The model, Puff, was used operational by AVO during the Augustine eruptive period. Here, we examine the dispersion of a volcanic ash (or aerosol) cloud from Mount Augustine across Alaska from 29 January through the 2 February 2006. We present the synoptic meteorology, the Puff predictions, and measurements from aerosol samplers, laser radar (or lidar) systems, and satellites. UAF aerosol samplers revealed the presence of volcanic aerosols at the surface at sites where Puff predicted the ash clouds movement. Remote sensing satellite data showed the development of the ash cloud in close proximity to the volcano consistent with the Puff predictions. Two lidars showed the presence of volcanic aerosol with consistent characteristics aloft over Alaska and were capable of detecting the aerosol, even in the presence of scattered clouds and where the ash cloud is too thin/disperse to be detected by remote sensing satellite data. The lidar measurements revealed the different trajectories of ash consistent with the Puff predictions. Dispersion models provide a forecast of volcanic ash cloud movement that might be undetectable by any other means but are still a significant hazard. Validation is the key to assessing the accuracy of any future predictions. The study highlights the use of multiple and complementary observations used in detecting the trajectory ash cloud, both at the surface and aloft within the atmosphere.

【キーワード】

航空危険, 火山性エアロゾル, ライダー, リモートセンシング
 Aviation hazards, Volcanic aerosols, Lidar, Remote sensing

1 はじめに

2006年1月11日、アラスカ州南部にあるオーガスティン火山(59.36°N、153.435°W)が20年ぶりに噴火を開始した^[1]。20日間で13回の爆発的噴火を起こし、特に1月28日から2月2日までは連続活動期であった。この連続活動期は、協定世界時(UTC)の1月28日0537(アラスカ標準時/ AKSTの1月27日2037)に発生した4回の大きな爆発を始まりとする。この爆発の噴煙は海拔9kmの高さにまで上がった。図1は、1月30日の午後に撮影した火山上空の噴煙である。アメリカ気象局(NWS)のアンカレッジ予報台は、UTC1月28日0555(AKST1月27日2055)にコディアック市の住民に向けて屋内にとどまり灰を浴びないように呼びかける注意報を出した(図2の火山灰注意報)。アンカレッジ予報台がコディアック島、キーナイ半島、プリンスウイリアム湾

西部及びアンカレッジに対して続けざまに降灰情報を出したのを受け、アラスカ航空はUTC1月31日0506(AKST1月30日2006)にアンカレッジを発着するすべての航空便を欠航にした(図3)。

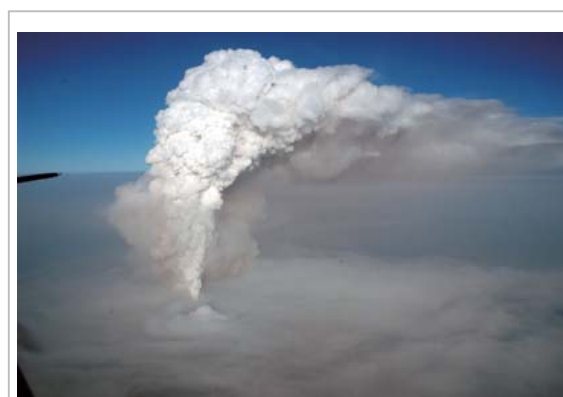


図1 オーガスティン火山の噴煙

UTC 2006年1月30日2200(AKST 1300)に撮影。写真提供者: Game McGimsey氏(AVO/USGS)

気象局の注意報にはアラスカ火山観測所(AVO)が噴火を報告したと書かれている。AVOは米国地質調査所(USGS)とアラスカ大学フェアバンクス校地球物理研究所(UAF-GI)及びアラスカ州地質地球物理調査所(ADGGS)による共同プログラムとして1988年に設立された。北太平洋にある100の活火山を監視することがその役目である。航空機に損傷を与えるか、または航行上の危険性を及ぼす恐れのある火山灰雲の存在を航空機に警告する際には、気象局や連邦航空局(FAA)との通信文を含む、同観測所のレポートが使用される。こうした監視プログラムの必要性がクローズアップされるきっかけとなったのは、1989年12月に起きたリダウト火山の噴火である[2]。この噴火の最中にボーイング747型機がリダウトの火山雲に突入した。火山灰は4基のエンジンすべての運転を停止させた[3][4]。エンジンは衝突の1、2分前に再始動したため犠牲者は出なかった。航空機が受けた損害は8000万ドルと推定された。その後、UAF-GIのAVOグループが「Puff」という火山灰拡散モデルを開発した。これは火山灰雲の動きを予測し、航空機に危険を警告するためのものである[5][6]。

Puffモデルの検証は容易ではない。衛星から火山灰雲が見えるのは噴火口近くで密度が高い間だけである。多くの場合、火山雲はアラスカから南下して太平洋に出てしまうが、そこには火山雲を検知できる観測点の一つもない。また対流圏の雲にまぎれた場合、気象条件によっては火山雲が見えなくなる[7]。2006年のオーガスティン火山噴火時には火山灰の雲がアラスカ南部を周回してからアラスカ内陸部を北上したため、火山付近の各種リモートセンシング装置及びフェアバンクスとチャタニカに近いライダ観測所において火山雲が

検知された。今回の研究では、オーガスティン火山による火山灰雲が2006年1月29日から2月2日にかけてアラスカを縦断しながら拡散する様子について検討する。総観場、Puffによる予測、さらにはエアロゾルサンプラー、レーザーレーダ(ライダー)システム及び衛星による観測結果を提示する。アラスカの主要地を示した地図を図4に示す。

2 オーガスティン火山近辺での火山雲の動き

オーガスティン火山はUTC 1月28日2330(AKST 1430)から連続噴火状態に入った。火山灰を噴出し続け、小規模な火砕流を発生した。また高い地震活動度を示した。噴火期における地表付近の総観場の概況は、弱いながらも持続的な低気圧の中心がキーナイ半島にあって、そこから気圧の谷が北もしくは北西に向かって伸びているというものであった(図5)。1月27日から31日にかけては低気圧及び気圧の谷がほとんど動かず、強さと位置が少し変わる程度であった。キーナイ半島を含む州中南部には東ないし北東からの弱い地表流がはっきりと見られた。上空(250/300mb)に強い一般風はなく、ジェット気流の軸は噴火位置より十分南において東西方向を向いていた。500mbの高度で見ると、噴火期の初めにはキーナイ半島上空に低気圧があった(図6a)。この気圧配置は数日かけてゆっくりと西に移動した(図6bと6c)。風向パターンを見ると、最初の数日間は高度5km(約500mb)に投入された物質はまず南ないし南東方向に移動し、その後周回して火山の西側に戻ってくると予想される。噴火期初期の終わり(1月30日、図6c)になると初期のトラジェ

```

UWAK71 PAFK 280557
NPGAER

URGENT - WEATHER MESSAGE
NATIONAL WEATHER SERVICE ANCHORAGE AK
955 PM AST FRI JAN 27 2006

AKZ171-281800-
KODIAK ISLAND-
INCLUDING - KODIAK CITY
955 PM AST FRI JAN 27 2006

...ASHFALL ADVISORY IN EFFECT UNTIL 8 AM AST SATURDAY MORNING OVER KODIAK ISLAND...

THE ALASKA VOLCANO OBSERVATORY HAS REPORTED THAT AUGUSTINE VOLCANO ERUPTED AROUND 930 PM AST THIS EVENING.

AN ASH CLOUD HAS BEEN DETECTED BY THE NATIONAL WEATHER SERVICE DOPPLER RADAR. ASH IS EXPECTED TO MOVE OVER KODIAK ISLAND TONIGHT AND REMAIN IN THE AREA THROUGH EARLY SATURDAY MORNING. A LIGHT ASH FALL MAY OCCUR.

RESIDENTS SHOULD REMAIN AT HOME OR INDOORS AND REDUCE OUTSIDE ACTIVITY. KEEP WINDOWS AND DOORS CLOSED. DO NOT EXERCISE OUTDOORS.
    
```

図2 アメリカ気象局の火山灰注意報：AKST 2006年1月27日(金) 2055

Alaska Airlines Cancels Anchorage Flights As Result Of Mt. Augustine Volcanic Ash
1/30/2006 8:06 p.m.

ANCHORAGE, ALASKA - Alaska Airlines announced it has canceled all flights to and from Anchorage, Alaska, tonight and early Tuesday morning. The flights were canceled as a safety precaution related to the pattern of ash at altitude created by the Mt. Augustine volcano.

As of 6 p.m. Alaska time, 36 flights were canceled. The airline is monitoring the pattern of ash at altitude on a continuous basis and anticipates resuming Anchorage flights on Tuesday.

図3 アラスカ航空の欠航案内

http://www.alaskasworld.com/Newsroom/ASNews/ASstories/AS_20060130_200557.asp

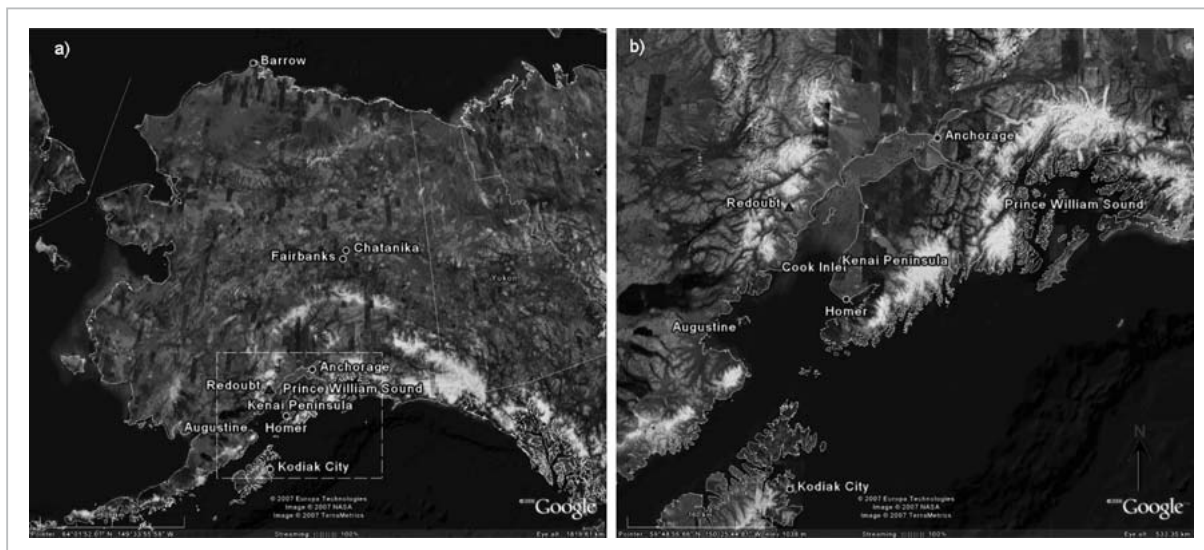


図4 主要位置を示すアラスカの地図

地図素材は Google Earth を使用。(a) アラスカ州と (b) クック湾周辺。記載の地名は次のとおり：Barrow (バロウ：71°18' N, 156°47' W)、Fairbanks (フェアバンクス：64°51' N, 147°43' W)、Chatanika (チャタニカ：65°7' N, 147°28' W)、Anchorage (アンカレッジ：61°13' N, 149°54' W)、Kodiak City (コディアック市：57°47' N, 152°24' W)、Augustine volcano (オーガスティン火山：59°22' N, 153°26' W)、Redoubt volcano (リダウト火山：60°29' N, 152°44' W)、Homer (ホーマ：59°39' N, 151°33' W)、Cook Inlet (クック湾)、Prince William Sound (プリンスウィリアム湾)、Kenai Peninsula (キーナイ半島)

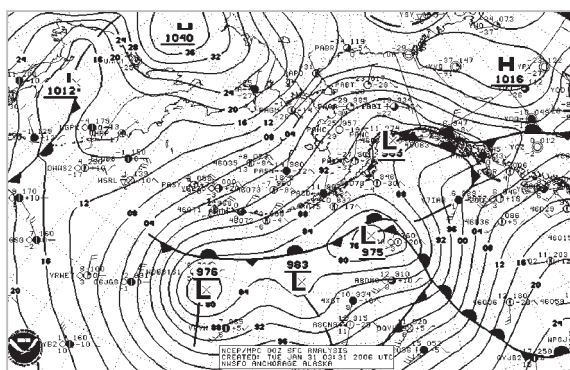


図5 爆発期における代表的な地上気圧配置 (2006年1月31日)

この期間の気流はアラスカの大部分で南東もしくは北東向きの弱いものであった。

クトリーは火山から離れ、弱い北ないし北西方向となった。このパターンは高度 3 km (700 mb) でも見られた。

オーガスティン火山の噴火を受けてアラスカ火山観測所 (AVO) は危険度を「red」とし (多量の火山灰を大気中に放出しながら噴火が続き、危険度の高い噴火が継続中又は差し迫っている)、UAF-GI の AVO グループは火山雲の位置の予測及び航空機への危険警告のために Puff の実行を開始した。Puff の初期値設定として最初の 5 km の噴煙と北米メソスケールモデル (NAM 216) の予報風場を

使用し、2006 年 1 月下旬の連続噴火に対して Puff を実行した。この予報データを最適な状態で使用するため、最初の 24 時間 (UTC 1 月 28 日 2320) に対してモデルを実行したあと次の 24 時間について再実行し、それを 2 月 2 日まで続けた。新しい予測のたびに最新の予報風場が使用された。気象学的な解析と同様、Puff による予測では、火山灰は最初に火山を周回してからアラスカを北に縦断することが示された。Puff の予測による最初の火山雲のトラジェクトリーはコディアック島に向かう南東方向である (図 7a)。この予測は、AVO の実務部門、アンカレッジの火山灰情報センター (VAAC)、アメリカ気象局 (NWS) 航空気象部及びアメリカ気象局 (NWS) 天気予報台間の連絡内容とともに、気象局による火山灰注意報の参考とされた。火山雲のトラジェクトリーは徐々に向きを変えながら北東を向き、次の日にはキーナイ半島を縦断した (図 7b)。3 日目にはクック湾から、アンカレッジ方向にまっすぐ北東方向に向かうトラジェクトリーが出てきた (図 7c)。モデル予測では火山灰の濃度はオーガスティン火山の近くで最大となり、本土を進むにつれて漸減した。

クック湾地区ではアラスカ大学フェアバンクス校 (UAF) の科学者によって地上での降灰が記録さ

れた。8 段式エアロゾル用インパクタ DRUM[8]–[10] をホームに設置し、運用した。試料を分析したところ、同市の地表面に火山灰が存在することが示された。このエアロゾル試料は周囲のエアロゾル(すなわち非火山性のもの)に比べて鉄/カルシウムの比率が高い。衛星観測によってクック湾付近の火山雲分布を測定した。衛星リモートセンシングによる火山雲の検知と追跡には「分離窓」の差分

方式を使用する[11]。半透明の火山灰雲が存在すると T_4 - T_5 の輝度温度差が負値になるが、透明な大気や気象学的な雲を含む大気場合はこの差が一般に正值になる[11][12]。図 8 は、1 月 28 日から 31 日にかけてオーガスティン火山とクック湾地区で検出された火山灰の 1 日ごとの合成画像である。火山雲の当初の動きは 1 月 28 日には南ないし南東方向だったが、翌 29 日の移動方向はより

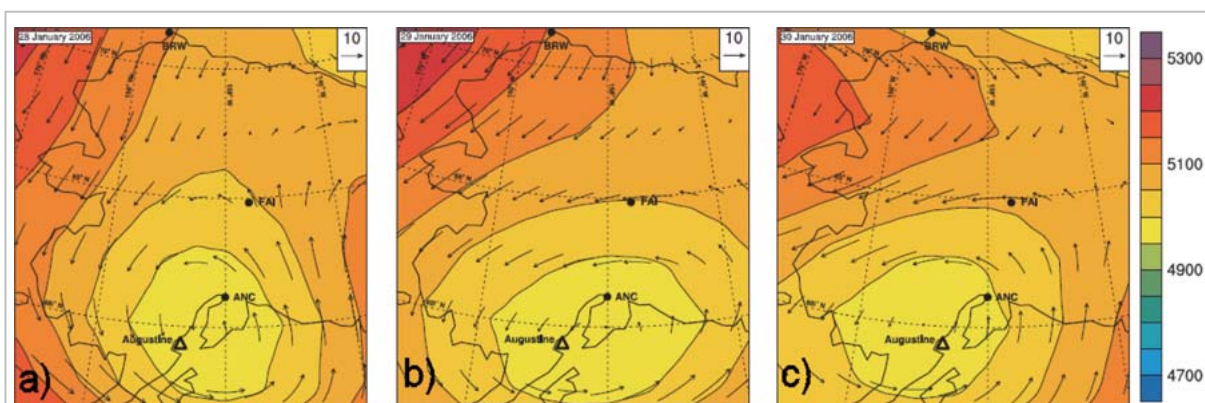


図6 500 mb の高度と 500 mb の風向

右上に秒速 10 m (約 20 ノット) の目盛りを示す。高度は海拔のメートル数。2006 年 (a) 1 月 28 日、(b) 1 月 29 日、(c) 1 月 30 日

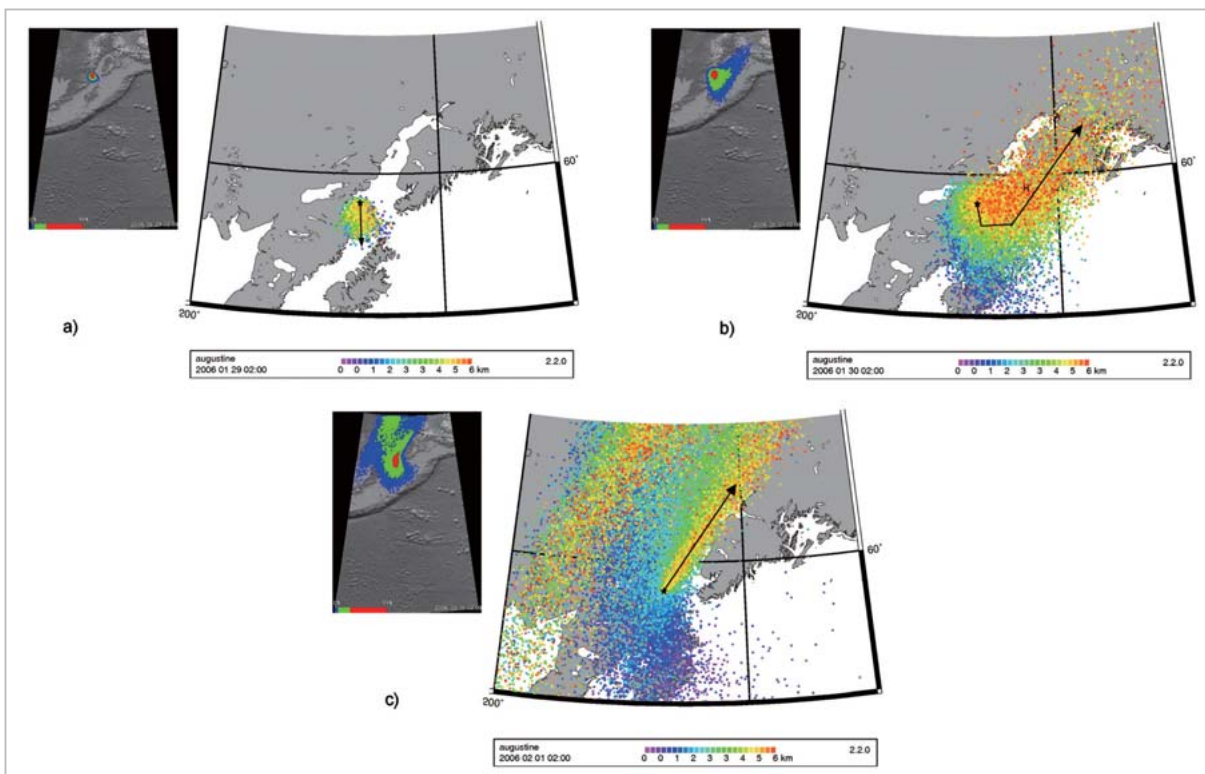


図7 Puff モデルによる火山灰雲予測

空中火山灰濃度と高度別に色分けした空中火山灰分布。(a) UTC 1 月 29 日 0200 (AKST 1 月 28 日 1700)、(b) UTC 1 月 30 日 0200 (AKST 1 月 29 日 1700)、(c) UTC 2 月 1 日 0200 (AKST 1 月 31 日 1700)。各セットのうち左が火山灰濃度、右が高度別に色分けした空中火山灰分布

南向きとなり、1月30日には再び東向きとなつて、最後の1月31日には北東方向になっている。この観測データはこの期間において火山雲は噴火の直後はオーガスティン火山周辺を渦巻くというPuffの予測を支持している。火山雲が火山から離れて広がると、大気中の火山灰濃度は降灰によって低下し、最終的にはリモートセンシングデータの検出限界を下回った。衛星が雲を追跡できたのはクック湾までだった。

1月30日のPuffモデル予測は火山雲がアラスカ上空を北に広がることを示しており、約24時間後(UTC 1月31日1900、AKST 1000まで)にはフェアバンクスに達したあと、引き続き北に移動して北極海に抜ける(UTC 2月1日0400、AKST 1月31日1900)。Puffによる火山雲の予測を図9に示す。UAFのAVOグループはこの予測を基にUAFのライダー研究者に連絡し、条件が許せば2006年1月31日と2月1日に観測を行うよう要請した。

3 アラスカ上空における火山雲の動き

1月31日から2月2日にかけて500 mbの等高度線で閉じられた低気圧(図10)が発達を始め、2月1日には北西で発達中だった大きい低気圧に併合されて気圧の谷の先端部となった。これに

よって南西の気流が定常的に吹き込み、約20~25ノット(秒速10~13 m)で移動した(図6)。フェアバンクス高層気象観測所(PAFA)による気温の状態曲線は、内陸部の700 mbと500 mbの高度におけるこの気流の特徴をよく示している(図11)。この気流パターンの持続は再解析データ及び観測結果の解析の両方に見られ、オーガスティン上空500 mbで放出されたエアロゾルは約24~36時間後にはバロウ周辺に達することになる。これはPuffモデルの予測と一致する。

1回目のライダー観測はUTC 2月1日0300~0500(AKST 1月31日1800~2000)の日没後の時間帯に実施された。フェアバンクスの北東約50 kmにあるチャタニカ(図4に位置表示あり)のポーカフラット実験場(PFRR)では、多波長ライダー(MWL)が運用されている[13]。独立行政法人情報通信研究機構(NICT)とUAF-GIはアラスカプロジェクトの一環としてこの多波長ライダーを運用している。多波長ライダーは2本の偏光ビームを送信し、10チャンネルの受信器を用いて全反射、平行及び垂直偏光並びにラマン散乱の反射信号を検出する(最新のライダー理工学に関する概要については文献[14][15]など最近の概説を参照されたい)。ちぎれ雲が頭上を通過したため空は曇っていた。積分したライダーの反射信号の高度プロファイルを図12aに示す。ライダー信号プロファイルは7 kmと

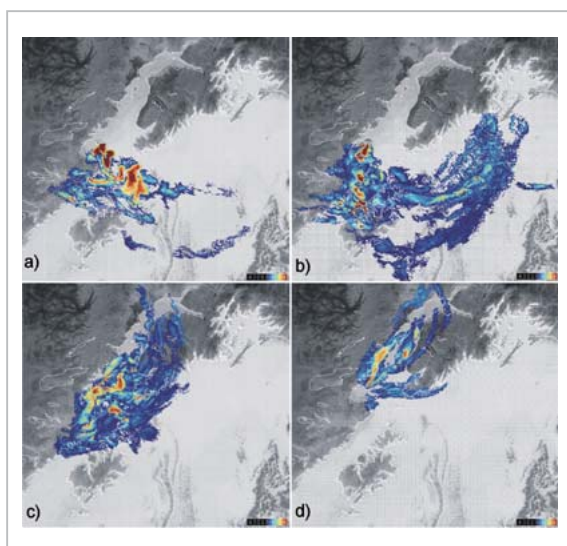


図8 MODIS (中分解能撮像分光放射計) 及び AVHRR (改良型高分解能放射計) によって検出された1日分の火山灰の合成画像

2006年 (a) 1月28日、(b) 1月29日、(c) 1月30日、(d) 1月31日

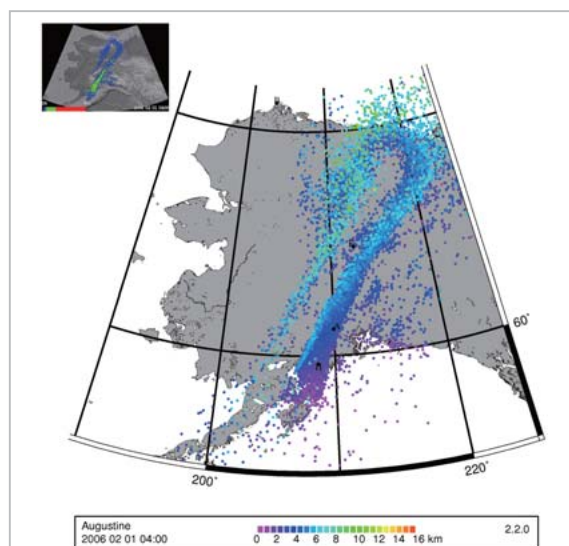


図9 アラスカ上空の火山灰の位置に関するPuff予測: UTC 2006年2月1日0400 (AKST 1月31日19:00)。空中火山灰濃度(左)と高度別に色分けした空中火山灰分布(右)

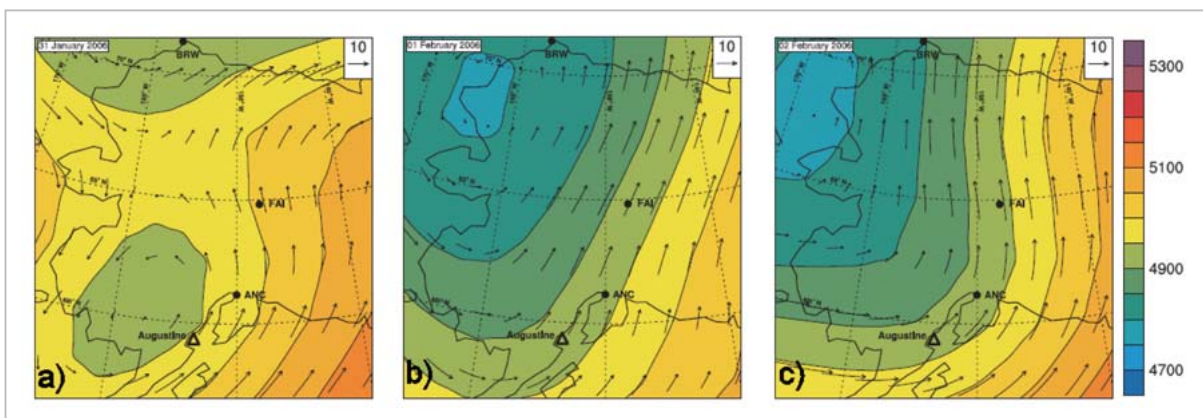


図10 500 mb の高度と 500 mb の風向

右上に秒速 10 m (約 20 ノット) の目盛りを示す。高度は海拔のメートル数。2006 年 (a) 1 月 31 日、(b) 2 月 1 日、(c) 2 月 2 日

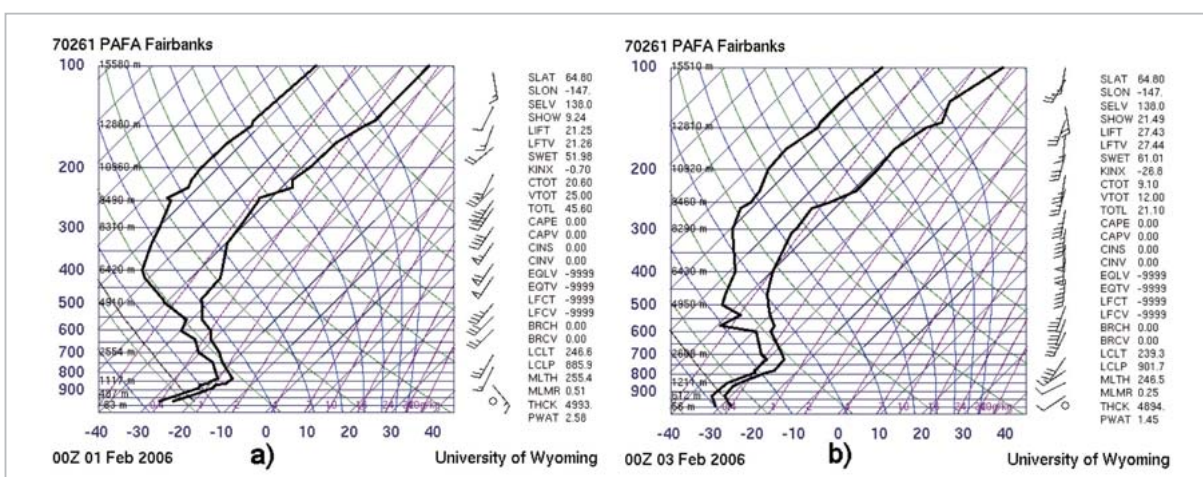


図11 (a) フェアバンクスの気温の状態曲線。UTC (00Z) 2006 年 2 月 1 日 0000。700 mb と 500 mb に強い南西流がある点に注意。(b) 00Z 2 月 3 日のフェアバンクスの気温の状態曲線。00Z 2 月 1 日のパターンに似ている。

(提供元：ワイオミング大学 <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

8 km の間の値を「1」に規格化し、信号を相対的にプロットしたものである。6.2 km までは雲及びエアロゾルからのミー散乱によって反射信号が強くなっている。1.2 km (地面から 0.8 km) より低高度の信号では、レーザ発信器と受信望遠鏡のオーバーラップにより正しい信号が得られない。エアロゾルのない場合の大気について期待されるレイリー散乱信号もプロットする。5 km 以下では信号の大きな増加 (期待されるレイリー散乱信号の 10 倍以上) が観測され、5 km 以上では少しの増加 (期待されるレイリー散乱信号の 2 倍) が観測されている。対応するエアロゾル偏光解消度を高度の関数としてプロットしたのが図 12 b である。5 km までは高い偏光解消度が見られるのに対し、

それより上空では偏光解消度は低い。対応する水蒸気プロファイルを高度の関数としてプロットしたのが図 12 c である。水蒸気は 4.4 km まで検出されている。図 12 では 97 分間の観測時間全体にわたって積分した信号を示している。アラスカ州フェアバンクスには 3 段式 DRUM エアロゾル用インパクタが設置されており、2006 年の UTC 2 月 1 日 0400 (AKST 1 月 31 日 19:00) から UTC 2 月 2 日 0400 (AKST 2 月 1 日 19:00) にかけてエアロゾルを収集した。エアロゾル検出器によって検出された火山灰の鉄/カルシウムの比は、2 月 1 日から 2 日の期間全体にわたって行われたホームでの測定結果と同様であった。

上記期間のライダー信号を調べると、反射信号は

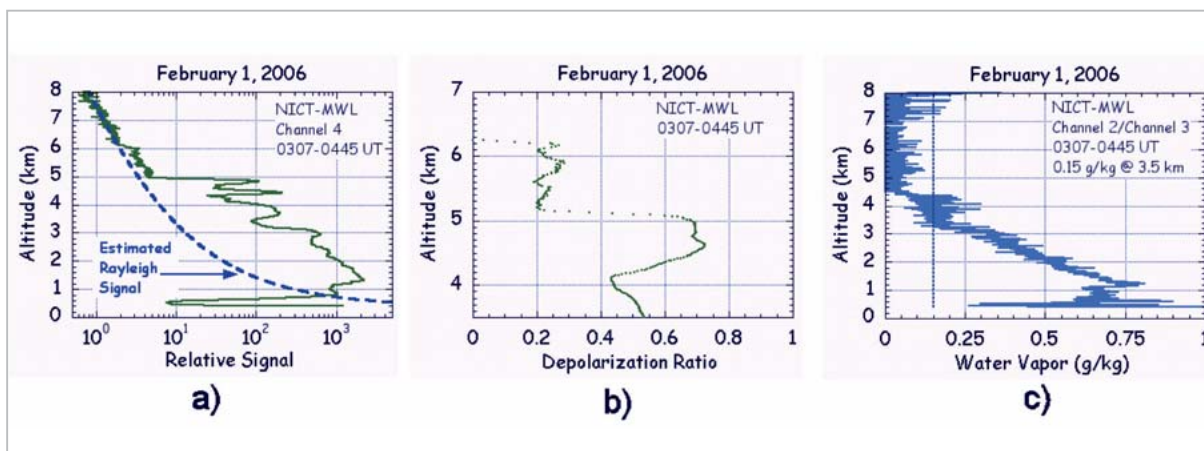


図12 (a) ライダの相対反射信号をチャタニカでの高度の関数としてプロットした曲線(緑の実線)。海拔7 km~8 kmでの値を「1」として規格化してある。期待されるレイリー散乱信号を比較のためにプロットした(青の破線)。(b) 偏光解消度を高度の関数としてプロットした曲線(緑の実線)。平行偏光と垂直偏光の信号プロファイルを0.25 kmの移動平均でスムージングした。(c) 水のラマン信号と窒素のラマン信号の比(青の実線)。信号は3.5 kmの1.5 g/kg(青の破線)に対して規格化している。

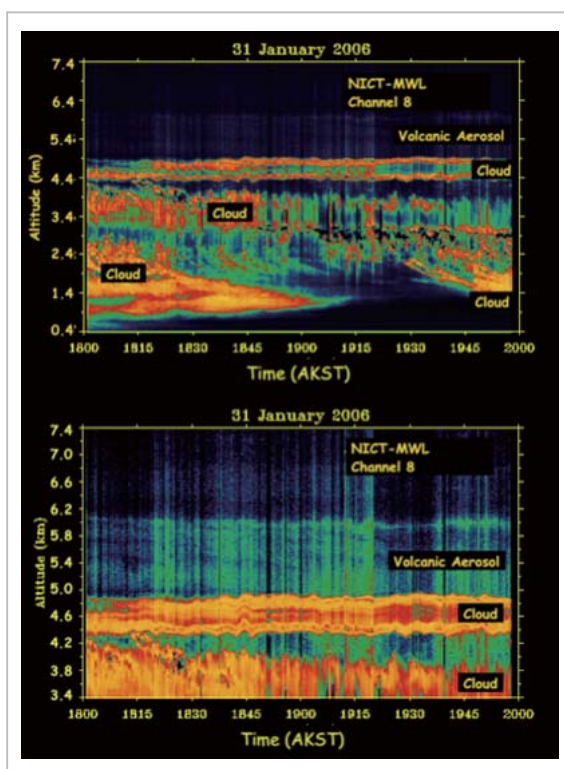


図13 ライダの信号を高度及び時間の関数でプロットした色分けマップ(UTC 2月1日0307~0445、AKST 1月31日1806~1945)

カラースケールの範囲は黒(最小値)から黄色(最大値)。上の図は地面(高度0.4 km)から7.4 kmまでの信号を示す。強いライダ反射信号は真上を通過する雲に対応する。雲の発達の様子がよく分かる。下の図は3.4 kmから7.4 kmまでの信号を示す。巻雲層より上にある火山性エアロゾルが目立つようにカラースケールを変えてある。

高度4.4 kmより上空では各高度で比較的一定であるのに対し、4.4 kmより下では観測期間にわたって反射信号が徐々に下方向に下がっているのが分かる(図13)。筆者らはこのデータを次のように解釈している：4.4 km以下には降下中の雲粒子があり(後方散乱大、偏光解消度大、湿潤)、4.4~5.0 kmには巻雲の層がある(後方散乱大の薄い層、偏光解消度大、乾燥)。さらに5.0~6.0 kmには火山灰がある(後方散乱小、偏光解消度小、乾燥)。火山灰がそれより低い高度にも存在することは間違いないが、雲にまぎれて見えなくなっている。火山灰が雲の核生成を促進している可能性もある。この地方におけるラジオゾンデによる測定温度は2.5 kmで -25°C だったのに対し、4.1 kmで -41°C 、7.6 kmで -50°C であった。これは4~5 kmの間で巻雲が形成されていることを裏付けられると思われる。砂漠の砂塵と巻雲が存在する場合に同様の観測結果がフェアバンクスでのライダ観測でも報告されている[16][17]。上記の期間(UTC 2月1日0400)におけるPuffの予測を図14に示す。モデルはチャタニカの上空6 kmまで火山灰が存在すると予測している。ライダ及びサンプラーの測定結果はモデルの予測と一致する。

ライダ観測の第2期間(UTC 2月2日2200)には南から北に向かってアラスカを縦断する気流パターンが存続し、しかもそれが卓越していた。フェアバンクス(位置は図4を参照)では北極大気調査所(AFARS)の雲偏光ライダ(CPL)が運用さ

れている[16][18]。フェアバンクスの雲偏光ライダーは単波長の偏光ビームを射出し、2チャンネル受信機において平行及び垂直偏光の反射信号を検出する。UTC 2月2日 2110~2230(AKST 1210~1330)の間、フェアバンクスの雲偏光ライダーは晴天条件下で運用された。積分したライダーの反射信号を図15に示す。1.8~3.8 kmの高度領域では大きな散

乱が観測されているが、この高度より上空ではエアロゾル層を示すデータはない。雲偏光ライダーのエアロゾル測定によって得られた偏光解消度は、前日に多波長ライダーを用いて測定したチャタニカ上空のエアロゾル層での値に近い。この期間(UTC 2月2日 2200)における Puff の予測を図16に示す。予測では2月1日から2月2日にかけて火山雲のトラジェクトリーがアラスカ内陸部上空でもっと湾曲することが示されている。モデルはフェアバンクスの上空4 km まで火山灰が存在し、それより上空では火山灰はフェアバンクスの東に通過していると予測している。フェアバンクスの上空4 km までの高度において火山灰が検出される(それ以上の高度では検出されない)点においてライダーの測定結果はモデルの予測と一致する。

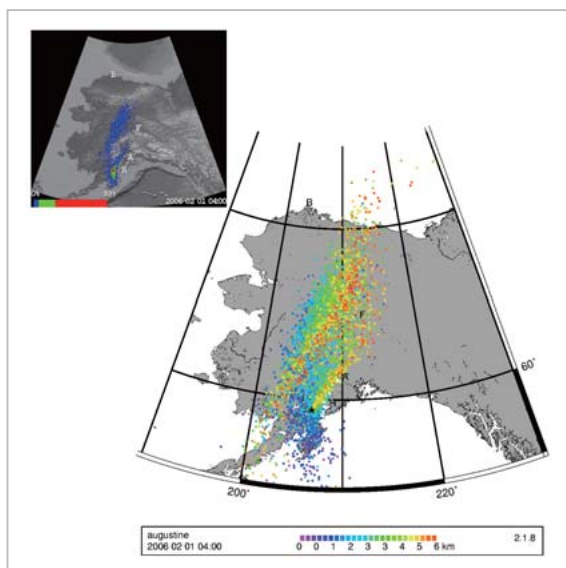


図14 火山灰の位置に関する Puff の予測：UTC 2006年2月1日 0400 (AKST 1月31日 1900)

空中火山灰濃度(左)と高度別に色分けした空中火山灰分布(右)

4 まとめ

2006年にオーガスティン火山で発生した噴火は火山雲拡散モデルの検証を行う格好の機会となった。この火山雲拡散モデルは、火山雲がもたらす航行上の危険性を航空機に警告する目的で運用されている。オーガスティン火山によって生じた火山雲は、奇しくも1月28日から2月2日にかけてアラスカで稼働中の2基のライダーと2基のエア

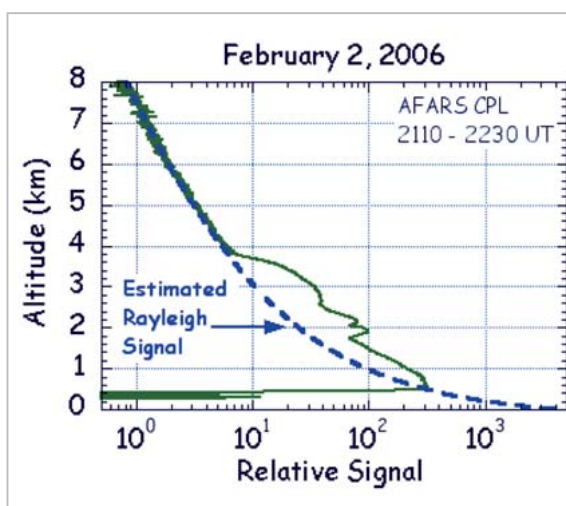


図15 ライダーの相対反射信号をフェアバンクスでの高度の関数としてプロットした曲線(緑の実線)。高度7 km~8 kmでの値を「1」として規格化してある。期待されるレイリー散乱信号を比較のためにプロットした(青の破線)

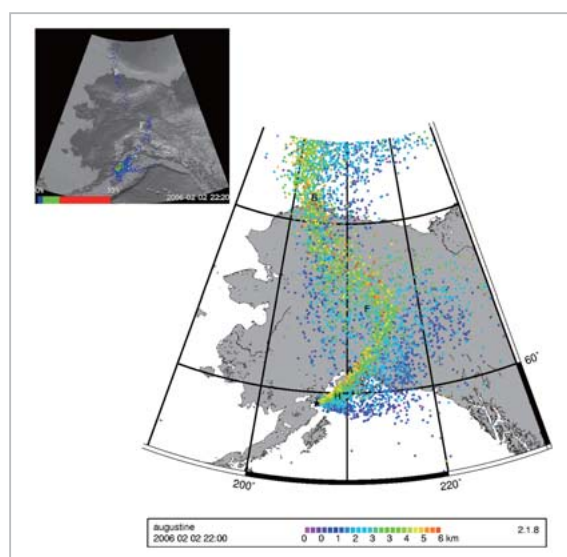


図16 火山灰の位置に関する Puff の予測：UTC 2006年2月2日 2200 (AKST 2月2日 1300)

空中火山灰濃度(左)と高度別に色分けした空中火山灰分布(右)

ロゾルサンプラーの上空を移動した。火山雲は同じ期間中にリモートセンシング衛星によっても検知された。UAF-GI の AVO リモートセンシンググループは、Puff モデルによるこの火山雲のトラジェクトリー予測を実施した。それらの予測がリモートセンシング測定及びサンプリング測定によって検証されたことを筆者らは示した。

観測結果とそれに対応する予測内容を表 1 にまとめる。チャタニカとフェアバンクスのライダ測定結果は、Puff モデルによる 1 月 29 日の予報を受けて収集されたことを付記しておく。Puff モデルによる主な予測内容をまとめると以下のようになる。

- (1) 火山雲は初めに火山を周回しクック湾地区に留まった。
- (2) その後、火山雲はアラスカを北に縦断した。火山灰の高さは地上から高度 6 km までである。
- (3) 火山雲のトラジェクトリーは高高度(> 4 km) の火山灰が低高度(< 4 km) の火山灰と分かれて動き、アラスカ内陸部上を発達した。

主な観測結果は次のとおりである。

- (1) 火山雲が上空を通過すると Puff が予測した地点で、エアロゾルサンプラーは地表面に

火山性エアロゾルの特性(鉄/カルシウム比が大)を持つエアロゾルが存在することを示した。

- (2) リモートセンシング衛星のデータは、オーガスティン火山の周辺で火山雲が発達していることを示した。
- (3) ライダの測定結果は、高く舞い上がったと考えられる火山性エアロゾルがアラスカ上空に存在することを示した。ライダの信号は、ちぎれ雲があるときでさえ、火山雲が薄く(又は分散して)リモートセンシング衛星のデータでは検知できない場合にもエアロゾルを検知することができた。ライダの測定結果は低高度と高高度の火山灰に関する別々のトラジェクトリーが Puff の予測と一致していることを示した。

アラスカ南部にあるオーガスティン火山からアラスカ山脈を越えてアラスカ中央部のフェアバンクスに至る火山灰雲の移動経路(約 400 マイル、650 km)を Puff モデルが正確に予報したことを筆者らは確認することができた。拡散モデルは、他の方法では検知不能かもしれないが依然として重大な危険源である火山灰雲の動きを予報することができる。Puff による予測の検証は、将来予測の

表 1 アラスカ上空におけるオーガスティン火山灰雲の主な測定結果と Puff モデルによる予測 (2006 年 1 月 28 日~2 月 2 日)

Measurement	Timing	Measured Signal	Puff Timing	Prediction
Sampler at Homer	30 January	Ash at surface with high iron to calcium ratio.	0200 30 January	Movement of ash cloud over Homer
Satellite	29 January – 1 February	IR signature of ash cloud over southern Alaska	0200 29 January – 0200 1 February	Movement of ash in Mt Augustine neighborhood
Lidar at Chatanika	0307 – 0445 1 February 2006	Echo profile up to 6 km	0400 1 February 2006	Ash over Chatanika up to 6 km
Sampler at Fairbanks	1-2 February	Ash at surface with high iron to calcium ratio.	0400 February 1 - 2200 February 2.	Movement of ash over Fairbanks neighborhood
Lidar at Fairbanks	2110 – 2230 2 February 2006	Echo profile up to 4km	2200 2 February 2006.	Ash over Fairbanks up to 4 km

All times in UTC (= AKST + 9 hour)

正確さを評価する際のカギとなる。今回の研究では、トラジェクトリー上の火山雲検知にあたって地表面と空中の両面で複数の補足的観測を行った点が大きな特徴である。

謝辞

今回の噴火時には全火山の監視及びオーガスティン噴火データの分析においてアラスカ火山観測所 (AVO)、特に AVO-GI リモートセンシンググループに時間を割いていただいた。ここに感謝

申し上げたい。またオーガスティンの火山灰雲の写真使用を許可していただいた Game McGimsey 氏 (AVO-USGS) に謝意を表したい。多波長ライダーは NICT のアラスカプロジェクトの一環として運用されている。雲偏光ライダー及びサンプラーの測定では、NASA 及び NSF に援助いただいている。AVO は、米国地質調査所 (USGS)、UAF 地球物理研究所 (UAF-GI) 及びアラスカ州地質地球物理調査所 (ADGGS) のサポートを受けている 3 者合同プログラムである。

参考文献

- 1 Power, J. A., C. Y. Nye, M. L. Coombs, R. L. Wessels, P. F. Cervelli, J. Dehn, K. L. Wallace, J. T. Freymueller, and M. P. Doukas, The reawakening of Alaska's Augustine volcano, EOS: Transactions of the American Geophysical Union, 87, 373-377, 2006.
- 2 Miller, T. P., and B. A. Chouet, The 1989-1990 eruptions of Redoubt volcano: an introduction: in Miller, T. P. and Chouet, B. A., (eds.), The 1989-1990 eruptions of Redoubt Volcano, Alaska, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62, (1), 1-10, 1994.
- 3 Steenblik, J. W., Volcanic ash - a rain of terra, Airline Pilot, 59, 9-15, 1990.
- 4 Casadevall, T. J., The 1989-1990 Eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62, pp.301-316, 1994.
- 5 Searcy, C., K. G. Dean, and W. Stringer, Puff: A volcanic ash tracking and prediction model, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 80, 1-16, 1998.
- 6 Dean, K., J. Dehn, K. Engle, P. Izbekov, K. Papp, and M. Patrick, Operational Satellite Monitoring of Volcanoes at the Alaska Volcano Observatory, Advances in Environmental Monitoring and Modeling, 1, 1, 3-35, 2002.
- 7 Dean, K. G., J. Dehn, K. R., Papp, S. Smith, P. Izbekov, R. Peterson, C. Kearney, C. and A. Steffke, Integrated satellite observations of the 2001 eruption of Mt. Cleveland, Alaska. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 135, 51-73, 2004.
- 8 Raabe, O. G., D. A. Braaten, R. L. Axelbaum, S. V. Teague, and T. A. Cahill, Calibration studies of the DRUM impactor, Journal of Aerosol Science., 19 (2) 183-195, 1998.
- 9 Cahill, T. A., and P. Wakabayashi, Compositional analysis of size-segregated aerosol samples, in Measurement Challenges in Atmospheric Chemistry, L. Newman, ed., American Chemical Society, 211-228, 1993.
- 10 Cahill, C. F., Asian Aerosol Transport to Alaska during ACE-Asia. Journal of Geophysical Research, 108 (D23), 8664, doi:10.1029/2002JD003271, 2003.
- 11 Prata, A. J., Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 m window using AVHRR/2 data, International Journal of Remote Sensing, 10, 751-761, 1989.
- 12 Wen, S. and W. I. Rose, Retrieval of Particle sizes and masses in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5, Journal of Geophysical Research, 99, 5421-5431, 1994.

- 13 Aoki T., K. Mizutani, S. Ishii, R. L. Collins, J. Fochesatto, Multiwavelength and depolarization lidar measurements of clouds and aerosols, 23rd International Laser Radar Conference, Nara, Japan, 24-28 Jul.2006.
- 14 Fujii, T., and T. Fukuchi, Laser Remote Sensing, CRC Press, Boca Raton.
- 15 Weitkamp, C, Lidar: range resolved optical remote sensing of the atmosphere, Springer, Singapore, 2005.
- 16 Sassen, K., Dusty ice clouds over Alaska, Nature, 434, 456 doi:10.1038/434456a, 2005.
- 17 Sassen, K., J. Zhu, P. W. Webley, K. Dean and P. Cobb, Volcanic Ash Plume Identification Using Polarization Lidar: Augustine Eruption, Alaska. Geophysical Research Letters. 34, (8). doi:10.1029/2006GL027237, 2007.
- 18 Sassen, K, Polarization in lidar, in Lidar: range resolved optical remote sensing of the atmosphere, C. Weitkamp, ed., Springer, Singapore, 2000.



Richard L. Collins
アラスカ大学 フェアバンクス校准教授
Ph.D.
超高層大気物理学、レーザーリモートセンシング



Javier Fochesatto
アラスカ大学 フェアバンクス校准教授
Ph.D.
気象学、レーザーリモートセンシング

Kenneth Sassen
アラスカ大学 フェアバンクス校教授
Ph.D.
雲物理学、リモートセンシング



Peter W. Webley
アラスカ大学 フェアバンクス校ポストドクター Ph.D.
リモートセンシング、火山学

David E. Atkinson
アラスカ大学 フェアバンクス校助教授
Ph.D.
総観気象学

Kenneson G. Dean
アラスカ大学 フェアバンクス校教授
M.S.
リモートセンシング、火山学



Catherine F. Cahill
アラスカ大学 フェアバンクス校准教授
Ph.D.
エアロゾル化学、物理学



みづたに けいへい
水谷耕平
電磁波計測研究センター環境情報センシング・ネットワークグループ研究マネージャー 理学博士
レーザーリモートセンシング