

2000年8月18日の三宅島噴火による航空機と噴煙の遭遇

澤田 可洋*

Encounter Incidents of Aircrafts with Ash Clouds from the
Miyakejima Eruptions on August 18, 2000

Yoshihiro SAWADA*

1. はじめに

1991年の「第1回火山灰(火山灰粒子を含む噴煙, 火山灰雲の意味)と航行の安全に関する国際シンポジウム」から約13年を経た2004年6月に「第2回火山灰と航行安全に関する国際会議」がアメリカで開催された。その概要は小野寺(2004)によって本誌で紹介されている。多くの発表の中で、2000年8月18日0802 UTCに発生した三宅島のマグマ水蒸気噴火の際に複数の国際線大型旅客機が噴煙と遭遇し、うち2機がエンジン交換を含む大きな被害を受けた、という発表があった。

当噴火により深刻な航空機と噴煙の遭遇があったという話が耳に入っただけのもの、当時日本では詳細な資料が全くなかった。今回の会議は火山灰と航行安全の分野における専門家が一同に会した最大規模の国際会議である。そこで発表された論文は本年3月はじめに刊行された *Proceedings* に掲載されており、当時の噴煙遭遇の状況や考察などを把握することができる。

三宅島噴火の際の航空機と噴煙の遭遇については日本の火山関係者の間に十分な情報が伝わっていなかったと思われる。本稿では、まず、飛行中の航空機と噴煙の遭遇による空中火山災害を回避する体制と発表情報を解説し、次に、公表された論文にもとづいて噴煙遭遇の状況を取りまとめた。そして、今後の航空機と噴煙の遭遇防止のために火山、気象、リモートセンシング技術各分野にそれぞれ求められている課題を要約した。

なお、噴煙遭遇の説明などは各論文の記述の全てを厳密に翻訳したものではない。意識をし、原論文では異なる箇所にある重複、あるいは、関連した内容を一括して

あることをお断りしておく。

2. 空中火山災害の回避方策

2-1 航空路火山灰情報センター

1982年のインドネシア、Galunggung 噴火や1989年のアラスカ、Redoubt 噴火の際に国際線ジャンボジェット旅客機が多量の火山灰粒子を含む噴煙と遭遇した。エンジンに吸い込まれた火山灰粒子が内部で溶融したあとタービン翼上や冷却口で固結したためエンジン4基が全て停止してしまった。機体は徐々にではあるが大幅に高度を下げ続け、あわや墜落という危機に面したものの一部のエンジンが作動したことで緊急着陸に成功した(小野寺, 1995)。このほかにも空中で噴煙と遭遇した航空機が機体やエンジンに大きな損傷をこうむる事態が続き、航空関係者の間で火山灰粒子を含む噴煙が飛行中の航空機の安全航行にとって重大な脅威であることが認識された。

このような“空中火山災害”を回避するため、ICAO (International Civil Aviation Organization, 国際民間航空機関) と WMO (World Meteorological Organization, 世界気象機関) により、噴煙を発見・追跡し、その移動方向や拡散範囲を予測し、航空関係機関へ情報を発信する VAAC (Volcanic Ash Advisory Center, 航空路火山灰情報センター) を設置するよう世界で9気象機関が指定された。日本では気象庁が指定され、羽田の東京航空地方気象台に「航空路火山灰情報センター」(国際的には Tokyo VAAC, 以下では東京 VAAC と記す) が発足した。1997年以降、同センターは本庁地震火山部と連携して24時間体制で運用されている。担当する空域はカムチャッカから千島列島、日本列島、伊豆・小笠原諸島、南西諸島、フィリピン北側にかけてである(澤田, 1997)。

東京 VAAC では、国内外の火山観測官署・研究機関

* 〒007-0841 札幌市東区北41条東20丁目1-20-402
1-20-402, Higashi 20, Kita 41, Higashi-ku, Sapporo
007-0841, Japan.

からの噴火情報、PIREP (Pilot Report, 機上気象報告) による飛行中の航空機からの噴火観測報告、隣接するVAAC (Anchorage, Darwin, Washington) からの情報、静止気象衛星「ひまわり」と軌道気象衛星「NOAA」の画像による噴煙の検出・追跡、などにより担当空域における噴煙を監視している。

2-2 噴煙に関する発表情報

東京 VAAC では担当空域内で噴火が発生、または、噴煙が検出された場合に噴煙の実況や拡散予測について VAA (Volcanic Ash Advisory, 航空路火山灰情報) を発表する。VAA は国内の航空気象官署や航空局など航空運航関係機関、海外の 8 つの VAAC や 24 の海外気象監視局などへ配信される。VAA は、航空機の運航に支障を及ぼす異常な気象現象のうち噴火に関する状況を SIGMET や ARMAD という空域悪天情報で発表するための支援情報である。

SIGMET (Significant Meteorological Information) とは国際線運航向けの情報で、日本の空域については成田航空地方気象台 (2000 年の三宅島噴火当時は新東京航空地方気象台と呼称) から発表される。ARMAD (Area Meteorological Advisory) は国内線向けの情報であり、日本周辺の管制空域に対応して北から新千歳航空測候所、東京航空地方気象台、福岡航空測候所、那覇航空測候所からそれぞれ発表される。また、航空局では噴火の状況に対応した飛行制限空域などの情報を NOTAM (Notice to Airmen, 航空情報; 航空機の運行に必要であり時宜を得た提供が運航関係者にとって不可欠なもの) で発表する。現在は NOTAM に噴火や噴煙の状況に特化した ASHTAM という電文が設定されている。これらの情報は航空会社の運航管理部門へ、そして、飛行中の航空機へも伝達される。

VAA には噴煙の到達高度、移動速度、方向などを記述するテキスト形式電文の VAA のほか、衛星画像で検出された噴煙の状況を図形式で表示した VAGI (Volcanic Ash Graphic Information, 火山灰実況図) と、噴煙拡散予測結果 (6, 12, 18 時間後における高度範囲別の噴煙予測領域) を図形式で表示する VAGF (Volcanic Ash Advisory Graphic Format, 火山灰拡散予測図) がある。VAA の続報は少なくとも 00, 06, 12, 18 UTC に、必要であれば 03, 09, 15, 21 UTC にも発表されるほか、噴火状況に変化があった場合に発表が続けられる。

噴煙の実況、予測結果も含め、VAA はテキスト形式電文としてテレタイプ回線で提供される。ただし、現在の通信方式では図情報を配信できないため、電文では観測または予測された噴煙の領域を多角形で近似させ、隅を緯度、経度の座標で表示し、ユーザーはこれをつなげる

ことで噴煙の広がり把握する、という方式がとられている。図情報は希望する国内航空会社に対して参考情報として FAX 出力で提供が行われるとともに、申請等により国内にある外国航空会社も入手が可能である。

3. 2000 年 8 月 18 日の三宅島噴火の際の航空機と噴煙との遭遇に関する記述

3-1 噴煙遭遇の件数

筆者が入手できた論文は、Rossier (2002), Tupper *et al.* (2004a, 2004b), Guffanti *et al.* (2004), Onodera (2004) の 5 篇である。Guffanti *et al.* (2004) の主な記述は、Tupper *et al.* (2004b) を引用している。

各論文の航空機と噴煙との遭遇の記述には遭遇位置や時刻に若干の相違があるが、推測された遭遇や被害無しを含め噴煙と遭遇した航空機は 5 機である。航空機と噴煙との遭遇時刻順に遭遇 A, B, C, D と呼び、各論文の記述の概要を以下にまとめた。推測された噴煙遭遇は遭遇 E とした。このうち重大な被害をこうむった航空機は 2

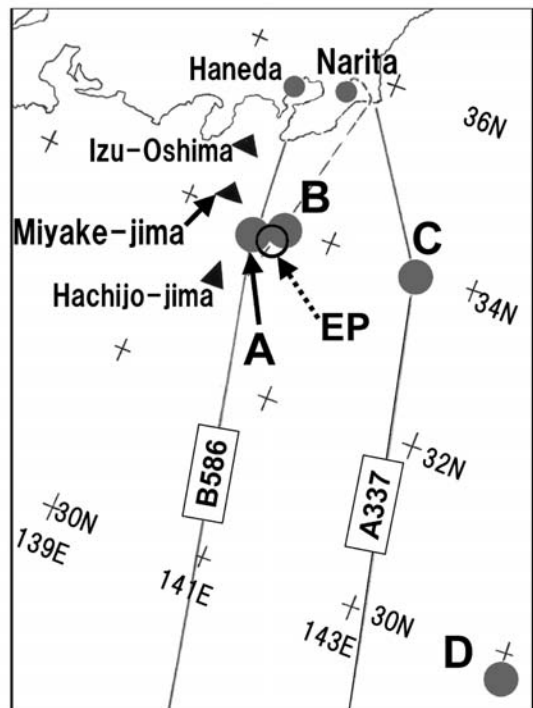


図 1. 航空機と噴煙のおおよその遭遇地点。

A~D (黒丸): Tupper *et al.* (2004b) の Fig. 1 にもとづく 4 遭遇地点

EP (丸印): Onodera (2004) の Fig. 1 にもとづく 2 機の遭遇地点

B586, A337: 成田空港南方面の航空路

機(遭遇A, B)である。

図1にはTupper *et al.* (2004b)による遭遇A~Dの位置をA~Dで、Onodera (2004)による遭遇A, Bをまとめた位置をEPでそれぞれ示した。

3-2 噴煙遭遇の概要

遭遇A: 747型機

サイパンから成田へ向かう747型機は軍用空域に入らない範囲で航路B586から南東側への飛行経路変更が認められ管制誘導が行われていたが(Tupper *et al.*, 2004b), 0930 UTC頃に三宅島の南東約80 kmの北緯34度00分, 東経140度30分, 高度約10 kmで噴煙3(図3および4章参照)と遭遇した。2分後に高度約9 kmで噴煙を脱出し成田空港に緊急着陸。エンジン3基, 操縦室の窓, 客室前方の複数の窓を交換。4基目のエンジンは飛行100時間後に交換を指定された。損害額は500万ドル(Tupper *et al.*, 2004a)。この航空機の噴煙との遭遇はOnodera (2004)では三宅島の南東約92 kmと記述されている(図1, EP)。

遭遇B: 737-800型機

噴煙に遭遇した約10分前にはDC-10型機が何事もなく通過した航路を, グアムからの737-800型機が成田空港に向かって近づいていた。噴煙3との遭遇は0930(Tupper *et al.* (2004a)では0900) UTC頃, 三宅島の南東, 遭遇Aのやや東の高度約11 kmで起こった(Tupper *et al.*, 2004b)。乗組員が何も気づかぬうちに噴煙に入り込み, コックピットと客室にモヤとホコリが充満した。エンジンは作動を続けていたがフライトマネジメントシステムは機能を失いエンジン電子制御装置も作動不能となった。操縦席窓ガラスは火山灰粒子による擦傷のため著しく視界が低下したが, 乗組員は酸素マスクを装着し, 窓の僅かな部分を覗きながら操縦を続け, 3~4分後に清浄な大気中へ脱出でき成田空港へ緊急着陸した。着陸後の検査により, エンジン内部に多量の火山灰粒子が見出され, 翼の前縁部や尾翼は擦傷を受け, レドームとピトー管に損傷があった。エンジン2基と窓ガラスは直ちに交換され, その経費は500万ドルであった(Rossier, 2002)。Tupper *et al.* (2004b)によれば, 同機は噴煙遭遇の直前に航路B586の北東約74 kmへ飛行経路を変更しており, ATC(Air Traffic Control, 航空交通管制機関)や付近の航空機からの警告は何もなかったとされている。Tupper *et al.* (2004a, b)では噴煙との遭遇時刻に相違がみられ, Onodera (2004)は噴煙との遭遇時刻を0932 UTC, 場所を遭遇Aとほぼ同じ地点(図1, EP)としている。

遭遇A, B発生前の飛行状況:

当日の航空機の運航状況を見ると, 遭遇A, Bの地点

周辺を0824 UTCに旅客機が通過したあと, 7分, 18分, 16分, 11分の間隔で合わせて5機が0916 UTCまでなんら支障なく通過し成田空港に着陸している。しかし, 5機目が通過した14分後の0930 UTCに遭遇Aが発生し, その2分後に遭遇Bが発生している(Onodera, 2004の表1)による)。

遭遇C: 747型機

1235 UTC頃に三宅島東方約270 km(北緯33度54分, 東経142度09分)で噴煙4と遭遇(図3)。同機は噴煙回避のため通常航路のB586から東側のA337へ飛行経路を変更していた。強い硫黄臭があり前方窓にスパークが発生した。しかし着陸後の3日間にわたる検査で機体に火山灰粒子や損傷被害は見出されなかった。飛行経路の変更と検査にともなう損害額が200万ドル(Tupper *et al.*, 2004a, b)。

遭遇D: 747型機

2010 UTC頃に北緯28~30度の三宅島南東約800 kmで硫黄臭あり。その位置は流されてきた噴煙3の範囲付近である(図3)。被害なし(Tupper *et al.*, 2004a)。噴煙と遭遇した現象がないため機体はそのまま運用された。同機は遭遇Cの報告を受け, 航路A337から東へ大きく経路を変更していた(Tupper *et al.*, 2004b)。

遭遇E: DC-10型機

報告はされていないが, 0850 UTC頃に三宅島南東でDC-10型機と噴煙3との遭遇が推察される(Tupper *et al.*, 2004a)。他にも航空機が噴煙と遭遇した可能性が考えられるが報告はない(Tupper *et al.*, 2004b)。

4. 衛星画像による噴煙の状況

2000年8月18日0802 UTC頃に発生した噴火では黒灰色の噴煙が09 UTC頃までに高度約15 kmへ上昇した。0832 UTCに東京気象レーダーで最初の噴煙エコーが観測され, その高度は14~16 kmであった(東京航空地方気象台航空路火山灰情報センター, 2003)。噴火発生当時, 三宅島付近はNOAA/AVHRRの通過時間帯からはずれており, TERRA/MODISは作動不調であった。このため, 衛星による噴煙観測はGMS画像が中心であった(Tupper *et al.* 2004a)。

図2にGMS赤外画像(IR1)による8月18日の噴煙を白矢印で示した。0832 UTC(左)の噴煙は南東方向へ流れ, 0932 UTC(右)にはより東側へ大きく広がった。0932 UTCの噴煙の領域には図1で示したA, B, EPの(2機の)噴煙遭遇地点がおおよそ重なる。当時, 三宅島南方では低気圧が急速に発達して東方へ通過し, 北方には衰退した台風が残っていた。対流圏上部の擾乱による複雑な風系のもとで噴煙は高度によって異なる方向へ流

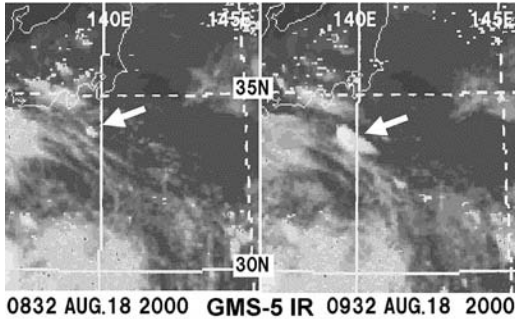


図 2. 2000年8月18日の三宅島噴火の際にGMS 5号の赤外画像(IR1)で観測された噴煙(白矢印). 東京航空地方気象台航空路火山灰情報センター(2003)に加筆, 修正.

されており, 雲のために噴煙領域の観測は時間とともに次第に困難になっていった.

東京航空地方気象台航空路火山灰情報センター(2003)によれば, 噴煙は0832 UTCのGMS画像で初めて観測され, 赤外画像では南東方向へ伸びる明瞭な白く輝く領域として(図2の左), 可視画像では真っ黒な領域として観測された. その推測高度は約14 kmであった. 0932 UTCには東南東方向へ広がった明瞭な噴煙塊が観測され(図2の右), その推測高度は約15 kmであり以降の観測も含め最高高度を示した. その後も噴煙は東南東方向へ拡散したが全体としては南東方向へ流れた. その先端領域は1432 UTCには対流雲と重なって不明瞭となり, 以降は不明となった.

1432 UTCの画像には前記とは別の三宅島から南東へ流れた噴煙領域が観測された. この噴煙塊は以降の画像でも観測され, 発達した低気圧の中心に向かって反時計回りに流された. その後2032 UTCの画像では南南東方向へ, 19日0232 UTCの画像では同島の南~南南西方向へ流された状況が把握された.

Tupper *et al.* (2004a) は, GMS 画像によって次の4種類の噴煙の移動を解析した(図3の1~4. 図のAB, C, Dは3項における遭遇AとB, 遭遇C, 遭遇Dの航空機と噴煙との遭遇地点);

噴煙1: 到達高度15 km以上, 南~南西方向へ約9 m/sで移動. 18日1830 UTCには北緯31度, 東経139度付近まで延びて雲に入った.

噴煙2: Aとはほぼ同じコースを到達高度5~8 km, 4 m/sで南へ移動. 19日1430 UTCには北緯29度, 東経139度付近まで延びて雲に入った.

噴煙3: 到達高度9~11 km, 約25 m/sで南東方向へ移動. 高層雲により不鮮明な部分があったが, より表面温

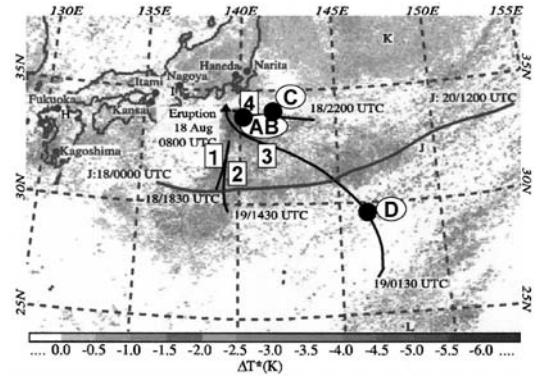


図 3. 解析された4種類の噴煙移動経路(1~4を付した実線). ABは遭遇AとB, CとDは遭遇CとDのおおよその位置をそれぞれ表す. Tupper *et al.* (2004a)のFig. 5に加筆, 修正.

度が高い下層の雲の上を移動したために検出され, 19日0130 UTCに北緯27度, 東経146度付近まで追跡された.

噴煙4: 到達高度8~9 km, 拡散しており, 東南東へ移動. 18日2200 UTCには北緯34度, 東経144度付近まで延びた.

5. 噴煙についての情報の発表

わが国で最も航空交通量が多く, 航空路が輻輳し, しかも活火山に近接した空域で2機の大型旅客機が噴煙と遭遇しエンジンや機体に重大な被害を受けた(Onodera, 2004). この噴火に際して東京VAAC, 新東京(現成田)及び東京の両航空地方気象台からは噴煙に関する情報が発表された. 表1には噴火発生後約28時間にわたって発表されたVAA, SIGMET, ARMADのそれぞれの発表時刻と記事の概要をまとめた. これらテキスト形式情報のほか, 東京VAACからはGMS画像の取得のたびに(ほぼ1時間毎)観測された噴煙の実況と, 噴煙拡散予測実施の際に高度範囲別の噴煙予測領域がそれぞれ図形式情報として適時発表されている.

噴火発生から13分後にはVAA1が, 引き続きARMAD1, SIGMET1が発表された. その後PIREPなどにもとづく噴煙高度などの更新がそれぞれの情報第2号として0840 UTCまでに発表されている. ATCは噴煙回避措置として成田空港の南側を発着する全航空機に対して航路B586から南東側へ軍用空域ぎりぎりまでの航路への管制誘導を行った. この経路は当初は安全であり噴火発生後であっても数機が何の支障もなく通過している(Onodera, 2004). しかし, その間に噴煙が広がりつつこの経路へ移動してきたために2機が噴煙と遭遇してし

表 1. 2000年8月18日の三宅島噴火の際に発表された VAA, SIGMET, ARMAD 情報と記述の概要. 発表順に番号を付した. 時刻は UTC. Tupper *et al.* (2004a), Onodera (2004), 鎌田(私信)にもとづいて作成.

| 情報名 | 発表時刻 | 記 事 |
|----------|-------------|--|
| VAA 1 | 18日 0815 | 0800に噴煙高度19000ft以上で噴火. |
| ARMAD 1 | 0820 | 0802観測の噴煙高度19000ft, 移動方向不明, 噴火規模不明. |
| SIGMET 1 | 0825 | 0802観測の噴煙高度19000ft, 移動方向不明, 噴火規模拡大中. |
| VAA 2 | 0835 | 0829のAIREP(航空機からの観測報告)では噴煙高度40000ft以上, 南東へ広がる. |
| ARMAD 2 | 0840 | 0829のB747型機による観測では噴煙高度40000ft以上, 東～南東へ移動. 噴火規模拡大中. |
| SIGMET 2 | 0840 | 0829のB747型機による観測では噴煙高度40000ft以上, 東～南東へ移動. 噴火規模拡大中. |
| SIGMET 3 | 0855 | 0829のB747型機による観測では噴煙高度40000ft以上, 東～南東へ移動. 噴火規模拡大中. |
| VAA 3 | 0925 | 0832のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度46000ft. 12, 18UTC, 19日00UTCにおける噴煙拡散予測情報. |
| VAA 4 | 1155 | 1102のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度47000ft, 南東へ40ktで移動. 18UTC, 19日00, 06UTCにおける噴煙拡散予測情報. |
| VAA 5 | 1420 | 1332のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度41000ft. |
| ARMAD 3 | 1430 | 1332の衛星画像で噴煙高度41000ft, 東南東へ移動. 噴火規模に変化なし. |
| SIGMET 4 | 1440 | 1332の衛星画像で噴煙高度41000ft, 東南東へ移動. 噴火規模に変化なし. |
| VAA 6 | 1800 | 1702のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度35000ft. 雲のためGMS画像での噴煙検出が困難. 19日00, 06, 12UTCにおける噴煙拡散予測情報(35000ftより上に噴煙は予測されず). |
| VAA 7 | 2015 | 1932のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度19000ft. 雲のためGMS画像での噴煙検出が困難. |
| ARMAD 4 | 2025 | 1932の衛星画像で噴煙高度19000ft, 移動方向不明. 活動規模弱まる. |
| SIGMET 5 | 2030 | 1932の衛星画像で噴煙高度19000ft, 移動方向不明. 活動規模弱まる. |
| VAA 8 | 19日 0005 | 2302のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度19000ft以上. 19日06, 12, 18UTCにおける噴煙拡散予測情報(噴煙高度を25000ftに想定). 35000ft以上に噴煙は観測されず. |
| VAA 9 | 0315 | 0232のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度19000ft以上, 南南西へ10ktで移動. |
| VAA 10 | 0645 | 0532のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度19000ft以上. 12, 18UTC, 20日00UTCにおける噴煙拡散予測情報(噴煙高度を25000ftに想定). 35000ft以上に噴煙は観測されず. |
| VAA 11 | 1015 | 0932のGMS画像による噴煙領域の実況. 噴煙高度19000ft以上, 南南西へ10ktで移動. |
| VAA 12 | 1215 | 1102, 1132のGMS画像に高度16000ft以上の噴煙は検出されない. 新たに顕著な情報がない限りVAA発表を終了する. |

まった。

噴煙遭遇発生の経緯については、各論文のなかでも Tupper *et al.* (2004a, 2004b) が詳しい考察を展開している。それらの論文では、当初の VAA など提供された低い噴煙高度はその後 PIREP にもとづいて修正されてはいるが、SIGMET に噴煙予測が含まれておらず、VAA 3 での予測情報発表は噴煙遭遇直前であったこと、ATC の誘導措置は噴火初期の古い情報によっていたのではないかということ、噴煙遭遇は全て外国機だけであったこと、外国航空会社へは凶情報はじめ十分な情報提供がなかったこと、衛星画像で噴煙が検出されなくなった後に噴煙遭遇があったこと、などを指摘している。

これらの指摘のうち、噴煙の動向を的確に識別・把握すること、より正確な噴煙拡散予測情報を迅速に提供すること、噴煙の移動状況を勘案しつつ次善の航路変更を指示すること、画像で検出できなくなった噴煙の航行に対する安全性の確認などは、日本のみならず国際的にも今後の噴煙遭遇回避に向けて実現すべき大きな課題であるといえよう。しかし、当時の ATC の措置や国内航空会社の対応、そして、外国航空会社は情報を十分に入手できていなかった（だから外国機だけが噴煙に遭遇した）などの記述については、多分に誤った認識があったのではないかと推察している。ただし、本稿はそれらを検証することが目的ではない。VAAC, ATC, ICAO など関連する機関や会議で情報の記述内容、提供方策も含め今後どうあるべきかという観点での検討を期待したい。

なお、噴煙に入り込んだ2機のパイロットは、噴煙遭遇時の ICAO マニュアルにもとづいてエンジンを絞りを緩速運転に切り替えるなどの適切な操縦を行った。これにより深刻な航行障害の中でエンジン停止に至ることなく旅客機を成田空港へ無事に着陸させている。このことは火山灰粒子を含む噴煙の脅威から航空機が無事に脱出できることを証明したものであり、重大な危機を回避した乗組員の判断、措置は高く評価されるべきである。

6. 空中火山災害防止・軽減のための噴煙の把握・予測に向けて

航空機と噴煙の遭遇を回避するためには多くの方策があり、その中でも情報、特に噴煙の動向に関する情報は重要な役割を果たす。ここでは噴煙の観測、予測に大きくかわる火山学、気象学、リモートセンシング技術の3分野について、すぐさま実現することは困難であるとしても、強い期待が寄せられている課題を記述しておく。

6-1 火山学の分野

噴煙回避のためにまず行うべきことは噴煙の状況（広がり、高度、移動速度、方向など）の即時的把握である。

理想としては、噴火発生の初期段階において観測された諸現象から噴煙がどの範囲やどの程度の高度まで発達するのかを予測する手法が望まれる。このうち噴煙高度については、噴煙柱の発達モデルにもとづき噴煙の温度、噴出率などを計測し到達すべき高度を評価することが可能と考えられる。しかし、即時的手法はまだ実用化に至っておらず、現時点では、噴火の発生、噴火活動の推移を確実に観測、解析し、情報発表に反映させることが肝要である。

上昇した噴煙の拡散予測数値モデルは気象学の成果にもとづいて開発され運用されている。その精度向上を図るうえで解析の初期条件である定量的な噴煙パラメーターが重要である。噴煙パラメーターとは、噴煙の広がり、噴煙最上部と最低部の高度、噴煙柱の体積、放出された火山灰粒子の総量、火山灰粒子の粒径分布や分布密度と噴煙内の鉛直分布、噴煙内の湿潤の程度、火山灰粒子の凝集と脱落の状況など、そして、それらの噴火後の経時変化である。運用においては噴煙パラメーターの一部を想定するとしても、火山学分野には発生した噴火と活動の推移に対応したこれらの数値の提供が望まれている。

このような要請にこたえることは、噴火現象の本質を解明するという火山学の目的そのものへの取り組みでもある。

6-2 気象学の分野

噴火発生という切迫した状況のもとで、航空機の経路変更や引き続き飛行計画を限られた時間で決定しなければならない航空交通管制や運航管理にとって、噴煙の実況把握とともに精度の高い噴煙の拡散予測情報が切に望まれるところである。噴煙拡散予測モデルが目指すべきゴールは、「特定の位置、時刻、高度において、噴火発生から〇△分後の噴煙の状態として、火山灰粒子の粒径分布と分布密度、噴煙塊の上下水平方向の広がりを求めること」であると言えよう。

気象学の分野において噴煙の拡散予測精度をより厳密に向上させるためには、前記の定量的噴煙パラメーターを使用することに加え、現実の気象現象や地形を考慮した数値モデルの開発が必要であろう。そのような数値モデルの能力としては、大気状態の要素に気圧変化のほか高度別の気温、風、湿度を用い、大気安定度など現実の気象現象を反映させ、より細かな格子間隔で計算し、高度 1,000~2,000 m 級の山岳地形も有義に反映できる分解能を有し、噴煙移流時における火山灰粒子の凝集・降下・脱落を評価すること、などがあげられる。同時に、噴火状況の変化に応じできるだけ短時間で噴煙の拡散予測を解析処理し、その結果をタイミングよく発表・提供

できるモデルであることが望まれる。

6-3 リモートセンシング技術の分野

広域に広がる噴煙の検出・追跡にリモートセンシング技術は不可欠であり、また、観測データから即時的に噴煙の火山灰粒子含有量など対象の特性をある程度解析、推定する技術としても重要である。今後ともより確実な噴煙の検出、識別、追跡を図るとともに、噴煙内の火山灰粒子の粒径分布や総量などを推測する手法の研究をさらに進める必要がある。衛星画像による噴煙の状況や熱現象の観測、気象レーダーでの噴煙エコー観測などにもとづく噴火活動の推移把握の精度向上もまた重要な課題である。

なお、氷粒子が大量に含まれる噴煙の識別や、噴煙高度の即時把握は依然として大きな課題のまま残されている。TERRA衛星搭載のASTERはじめ近年の地球観測衛星の搭載センサーの中には立体視機能を有し、熱現象の観測や赤外領域でのSO₂測定が可能なものがあり、これらのデータの組み合わせによる噴煙識別能力の向上や高度の即時把握への適用が期待される。

噴煙縁辺の確実な検出や薄い噴煙の検出もまた重要である。噴煙が風で流される間に噴煙そのものが薄くなり地球表面の放射が部分的に透過することで噴煙塊の輝度や温度は周辺とのコントラストが低下し、可視域や赤外域の衛星画像での噴煙検出が困難になる(澤田, 2002)。このため、衛星画像の分解能向上、マルチスペクトル化など新たなセンサーの開発とより高度なデータ処理手法の研究が強く望まれるところであり、合わせて、大量のデータを迅速に処理するシステムの開発が必要である。

7. おわりに

筆者は静止気象衛星「ひまわり」(GMS)の画像で噴煙の追跡手法などを研究してきた関係で第1回シンポジウムに参加した。このシンポジウムの後に世界の9ヶ所でVAACが発足し、その噴煙監視や拡散予測の技術も年々向上してきた。そのような情勢のもとでも2000年の三宅島噴火の事例を含め各国で噴煙と航空機の遭遇が発生している(Guffanti *et al.*, 2004)。VAAC発足から約10年を経た現在まで多くの改善措置が取られてきてはいるが、航空機が噴煙を回避するうえで噴煙の観測・解析・予測、情報の内容・発表・提供などにおいて、なお改善・向上を図るべき課題があることを改めて認識したところである。第2回会議では、噴煙が大型旅客機の巡航高度に上昇するまでの所要時間が約5分であることから、噴煙遭遇回避のために「5 minutes reporting into aviation system」という一種のスローガンが使われた。緊急事態の場合に提供する情報は、危機管理を行う当事者に

って有効、有益でなければならず、「正しく、早く、わかりやすく、タイムリーに」は情報提供の上で変わらぬ留意点である。

謝 辞

本稿をまとめるにあたり、日本航空(株)小野寺三朗氏から貴重な文献や資料の提供をいただくとともに有益な意見交換をさせていただいた。東京VAACの鎌田靖宏技術専門官にはVAAC業務の現状などを、また、日本航空(株)藤堂憲幸氏からは当時の状況などについてそれぞれご教示いただいた。このほか匿名の方々から資料提供などのご協力をいただいた。匿名の編集委員の方に本稿の査読を行っていただくとともに、京都大学井口正人助教授には本稿の構成等についてご指導をいただいた。ここに記して心から御礼を申し上げます。

引用文献

- Guffanti, M., Casadevall, T. J. and Mayberry, G. C. (2004) Reducing encounters of aircraft with volcanic-ash clouds. In *Proceedings of The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, Session1-Page 17-21*, OFCM (Office of The Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research).
- 小野寺三朗 (1995) 航空機災害, 12 火山災害. 火山の事典 (下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明編集), 朝倉書店, 382-392.
- 小野寺三朗 (2004) 火山灰と航空安全に関する第2回国際会議参加報告. 火山, **49**, 383-387.
- Onodera, S. (2004) Prevention of volcanic ash encounters in the proximity area between active volcanoes and heavy air traffic routes. In *Proceedings of The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, Session 5-Page 21-25*, OFCM.
- Rossier, R. N. (2002) Volcanic ash: avoid at all cost. *Business & Commercial Aviation*, February 2002, 70-75.
- 澤田可洋 (1997) 航空路火山灰情報センター業務の発足. 気象, **482**, 10-15.
- 澤田可洋 (2002) 静止気象衛星「ひまわり」の画像による噴火噴煙の解析. 地学雑, **111**, 374-394.
- 東京航空地方気象台航空路火山灰情報センター (2003) 4.6 三宅島の事例. 1997年~2001年気象衛星画像による火山灰雲の検知と事例, 東京航空地方気象台, CD-ROM版.
- Tupper, A., Carn, S., Davey, J., Kamada, Y., Potts, R., Prata, F. and Tokuno, M. (2004a) An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western "Ring of Fire". *Remote Sensing of Environment*, **91**, 27-46.
- Tupper, A., Kamada, Y., Todo, N. and Miller, E. (2004b) Aircraft encounters from the 18 August 2000 eruption at Miyakejima, Japan. In *Proceedings of The 2nd International Conference on Volcanic Ash and Aviation Safety, Session1-Page 5-9*, OFCM.