

火山噴火による航空機災害の防止と軽減

小野寺三朗*・井口正人・石原和弘

*日本航空(株)

要 旨

京都大学と日本航空は火山と空港・航空路とが互いに隣接しあい、火山灰回避の為に時間的余裕が少ない鹿児島空港から桜島周辺地域において、火山活動に起因する航空機災害防止を図る為、桜島火山の活動の事前予測、爆発的噴火の検出、火山灰拡散の予測、及びそれらの情報の鹿児島空港への迅速な情報伝達について共同で研究した。その結果、航空機災害防止に有効なシステムの開発に成功した。

キーワード：桜島、火山活動、噴火、火山灰、航空機、運航

1. はじめに

火山噴火により大気中に放出される火山灰・火山礫等による民間航空機被害が近年多く報告されている。鹿児島空港は大型機を含む旅客機が発着する国内有数の基幹空港であり、また、世界的に最も活動的な火山の一つである桜島火山の近傍に位置していることから、これまで同空港に発着する航空機に度々火山噴火による災害が発生している。

京都大学火山活動研究センター桜島火山観測所と日本航空は桜島火山に起因する航空機災害の防止・軽減に有効なシステム開発と利用とについて共同で研究したのでその結果について報告する。

2. 火山活動に起因する航空機災害

まず、火山活動に起因する航空機災害の歴史と被害内容を以下に概観する。

2.1 航空機災害の歴史

火山活動に起因する最初の航空機災害は 1944 年のイタリア・ベスビオ火山噴火で報告されている。その後約 30 年間は被害報告がなかったが、1970 年代に入り民間航空機の被害が報告され始め、その後も被害報告が相次いでいる (Table 1)。1982 年にはインドネシア・ガルンゲン火山の噴火で B747 型機運航史上初の全エンジン停止被害が、1989 年の米国・リダウト火山噴火では B747 型機運航史上 2 度目の全エンジン停止がそれぞれ発生している。これらの事故では両機とも幸い滑空後緊急着陸に成功している (Moody (1991) ; Campbell (1991))。

これらの事故を契機に ICAO (International Civil Aviation Organization : 国際民間航空機関) を始めとする関係機関はそれぞれの規程に火山灰の項目を追加する等、火山活動に起因する航空機災害防止の対策を進めたが、それにもかかわらず 1991 年のフィリピン・ピナツボ火山噴火では少なくとも 15 件の航空機被害が発生し (Table 2) 被害防止対策が依然として十分でない事が露呈された。

一方国内でも、やはり 1970 年代に入ってから火山噴火による航空機被害が始まった (Table 3)。

Table 1. Partial history of aircraft encounters with volcanic ash (overseas)

Date	Volcano	Aircraft	Remarks
1944. 3.24.	Vesuvius, Italy	B25	88 airplanes destroyed on the ground
1976. 1.22.	Augustine, U. S. A.	F4 (2)	Canopy scoured, wingtip paint sandblasted away
1976. 1.25.	Augustine, U.S.A.	DC8	Center windshield scoured, external radio parts, landing gear, air conditioning systems abraded
1979. 6.24.	Etna, Italy		Oil strainer clogged
1980. 5. 18.	St. Helens, U.S.A.	B737	Peening edges of stages 7 and 8 and sharp blade tips, oil filters blocked, windshield and leading edge abrasion
1980. 5. 18.	St. Helens, U.S.A.	DC9	Outer windshield pitted, leading edge abraded, compressor blade abrasion, oil system contamination
1980. 5.25.	St. Helens, U.S.A.	L382	2 engines failed, ash fused in turbine, high pressure turbine burned up
1980. 5.26.	St. Helens, U.S.A.	B727 (2)	Seizure of midspan shrouds, sharp fan blades
1982. 6.24.	Galunggung, Indonesia	B747	4 engines power loss for 14 minutes, 1 started by 14,000 feet (4270 m), all started by 12,500 feet (3810 m), 4 engines replaced, windshield and leading edge erosion
1982. 7.13.	Galunggung, Indonesia	B747	4 engines thrust loss, 3 shut down, 1 started at 26,000 feet (7920 m), glassy deposits, cooling parts clogged
1985. 5.19.	Soputan, Indonesia	B747	4 engines, 12 windows, navigational computer replaced
1989. 12.15.	Redoubt, U.S.A.	B747	4 engines power loss in approx. 2.5 minutes after setting climb thrust, 2 engines started by 17,000 feet (5180 m), 4 engines, windshields, filters, electronic components, airspeed probes, etc. replaced

Modified Campbell (1991)

Table 2. Mt. Pinatubo, Philippines encounters

Date	Aircraft	Remarks
1991. 6. 12.	B747-300	3 minutes encounter
1991. 6. 12.	DC10	20 minutes encounter
1991. 6. 14.	B747-400	15 minutes encounter
1991. 6. 15.	DC10	25 minutes encounter
1991. 6. 15.	B747-400	All 4 engines damaged and replaced
1991. 6. 15.	B747-SP	Interior contamination
1991. 6. 15.	B747-200	20 minutes encounter. Interior contamination
1991. 6. 15.	B747-200	12 minutes encounter. All 4 engines exhaust gas temperature rose 40 to 50 degrees
1991. 6. 15.	DC10	One engine replaced
1991. 6. 15.	B747-300	29 minutes encounter. Engines 1 and 4 replaced
1991. 6. 15.	B747-200	Details not available
1991. 6. 15.	DC10	25 minutes encounter
1991. 6. 15.	B747-400	Exterior contamination
1991. 6. 17.	B747-200	Engine No.1 surged and was shutdown. Engine No.4 lost power. Engine No.1 replaced
1991. 6. 17.	DC10	No.3 engine shutdown

Modified Campbell (1991)

2.2 航空機災害の概要

航空機が火山礫や火山灰等に遭遇すると、機体表面の損傷や機体内部の電気・電子機器等の汚染・機能障害が発生したりする。その結果、航空機運航に支障が出たり安全が損なわれたりする。特にエンジンに障害が発生した場合は、エンジンは単に推力だけでなく電力の動力源としての役割も果しているところから、航空機の機能は著しく損なわれる事になる。2 発以上のエンジン停止、とりわけ全エンジン停止は航空機を危機状況に陥れる可能性が強い深刻な被害である。

(1) エンジン停止のメカニズム

ここでエンジン停止メカニズムの典型的なものについて触れる。

ジェットエンジン燃焼室内での燃料燃焼温度が火山灰

の融点より高い場合、火山灰がエンジンに吸い込まれると、火山灰は燃焼室内で融解し燃焼室後方のクービン翼表面や冷氣孔に付着しそこに固着する (Photo 1)。この為エンジン内部の正常な空気の流れが乱されたり、エンジン内部の温度が異常に上昇したりする事によって、エンジンの正常な運転を維持することが不可能となり、最終的にエンジン停止に至る。幸い、これまで火山灰によるエンジン停止が原因となる墜落事故は発生していないが、これは僥倖であつたに過ぎないと考えられる。エンジン停止は人間に例えれば心臓停止に相当する事態であり、全エンジン停止は B747 型機ではあり得ないと従来説明されていた程の、通常では考えられない深刻な障害である。また、全エンジン停止ほどではなくても、火山灰による複数エンジンの停止は事故に結び付く危険性のある深刻な機能障害である。

Table 3. Partial history of aircraft encounters with volcanic ash (domestic)

Date	Location	Airport	Aircraft	Remarks
1973. 2. 3.	Asama	Haneda	DC8	Windshield damaged
1975. 2. 5.	Sakurajima	Kagoshima	L1011	Windshield damaged
1977. 8. 7.	Usu	Chitose	DC8 (2)	Windshield damaged
1977. 8. 7.	Usu	Chitose	L1011	Windshield damaged
1977. 8. 7.	Sakurajima	Kagoshima	L1011	Windshield damaged
1977. 11. 19.	Sakurajima	Kagoshima	DC8	Windshield damaged
1977. 12. 25.	Sakurajima	Kagoshima	L1011	Windshield damaged
1978. 12. 4.	Sakurajima	Kagoshima	L1011 W	Windshield damaged
1979. 11. 18.	Sakurajima	Kagoshima	L1011 (2)	Windshield damaged
1979. 12. 24.	Sakurajima	Kagoshima	YS11	Windshield damaged
1982. 11. 23.	Sakurajima	Kagoshima	B727	Windshield damaged
1986. 6.24.	Sakurajima	Kagoshima	DC9	Windshield damaged
1986. 11. 21.	Izu-Oshima	Narita	B747	Static discharge on windshield. Burning smell of wood. No damage
1986. 11.21.	Izu-Oshima	Narita	DC8	Abrasion on windshield and fuselage
1986. 11.21.	Izu-Oshima	Narita	DC10	Abrasion on windshield and fuselage. Volcanic ash deposits in pitot tube
1986. 11.21.	Izu-Oshima	Narita	B747	Windshield damaged
1991. 6. 3.	Sakurajima	Miyazaki	DC9	Abrasion on engine compressor, windshield and fuselage
1991. 6. 3.	Unzen	Kumamoto	A300	No damage
1991. 8. 5.	Sakurajima	Kagoshima	B737	Windshield damaged

Yoshitama (1984), Casadevall (1993), Onodera (1995)

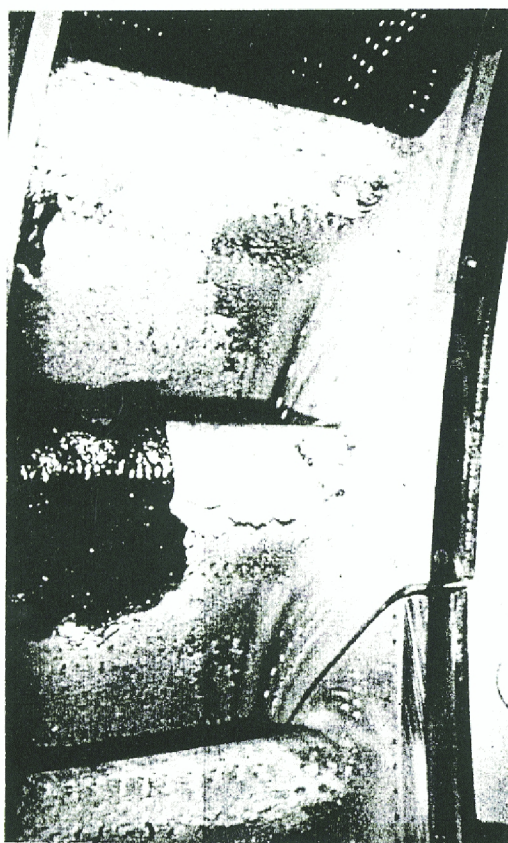


Photo 1. Example of turbine airfoil cooling hole blockage due to the melting and resolidifying of volcanic ash. (Courtesy, The Boeing Company)

これらを防止するには火山灰と航空機との遭遇を先づ回避する事が肝要であり、その為には噴火の事前予測、噴火の確実な観測と通報、および火山灰拡散予測など噴

火の各段階での具体策が必要となってくる。

(2) 国内火山による航空機災害

国内火山に起因する航空機被害を Table 3 に示す。これから国内の航空機災害に共通する幾つかの共通点を読み取れる。

- ① エンジン停止は幸い発生していない。
- ② 機体の被害部位は操縦室前方の風防ガラスに集中している。
- ③ 桜島火山による被害が大部分を占めている。

我が国は国土が狭く、航空路を火山近傍を避けて設定する事が難しい。従って、一旦火山活動が始まると、その影響は直ちに航空路や空港に及ぶ。例えば、有珠山や伊豆大島火山の噴火で発生した被害がそうである。逆に、活火山であっても活動を休止中の火山にあっては航空機災害は発生していない。桜島火山は常時活発な表面活動を続けており、恒常的に航空機被害が発生している。

3. 桜島火山・鹿児島空港に於ける航空機災害の防止と軽減

次に桜島火山・鹿児島空港地域での被害防止の研究について述べる。

3.1 桜島火山・鹿児島空港の立地条件と被害

鹿児島空港は桜島火山の北 25km に位置する。鹿児島空港に着陸する航空機は、滑走路方向及び卓越風向の関係から、通常は桜島火山の北東約 16km の地点を通過し着陸する (Fig. 1)。

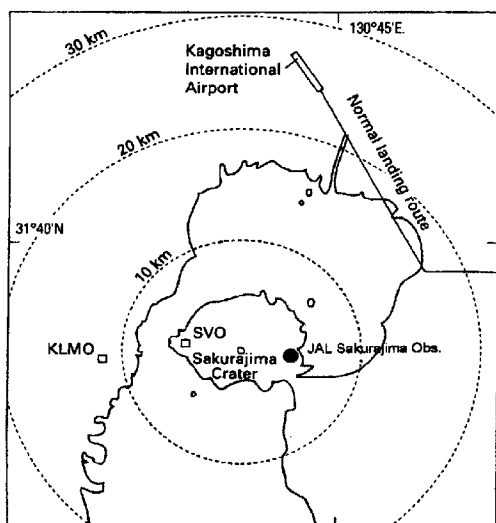


Fig. 1. Location map of Sakurajima Volcano and Kagoshima Airport. SVO, Sakurajima Volcanological Observatory of Kyoto University. KLMO, Kagoshima Local Meteorological Observatory of Japan Meteorological Agency. JAL observation site, Japan Airlines observatory.

この地域での被害の特徴はその殆どが風防ガラスに集中している点にある。また、発生件数が多い割りにエンジン停止等の極めて深刻な被害が発生してないのは、航空機が桜島火山近傍で火山噴出物に遭遇する為、衝突の主たる対象が粒径の比較的大きい噴出物であり、汚染領域の通過時間も短時間である為によると見られる。また、桜島火山では噴火から航空機被害発生までの時間は 10 分程度から、長くとも 30 分以内に発生している。

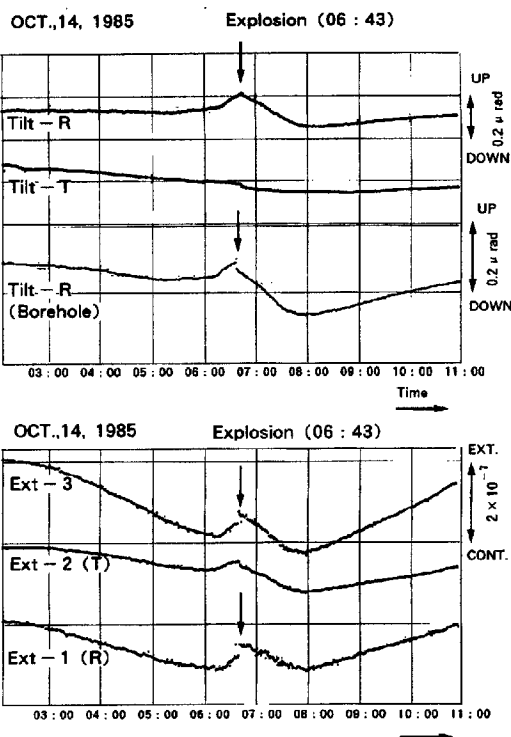


Fig. 3. Record of water tube tiltmeter and extensometer at Sakurajima Volcano.

これは外国の火山灰被害の場合に比べて、火山灰回避の余裕時間が著しく少ない事を意味し、この為、他空港で通用した対策が鹿児島空港では必ずしも通用するとは限らない事になる。一方、鹿児島空港で通用するシステムは他の環境下の空域にも適用できると思われる。

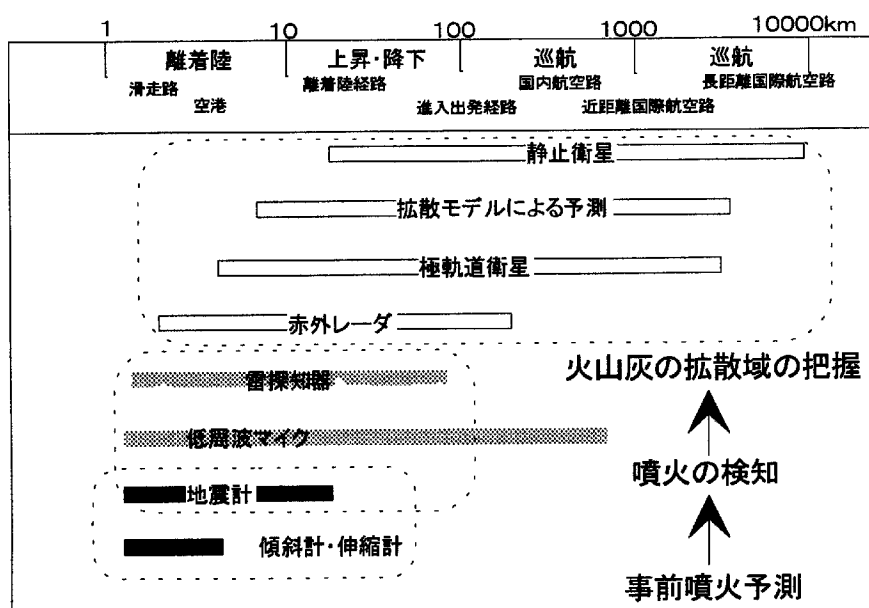


Fig. 2. Scale of countermeasures against volcanic ash encounters.

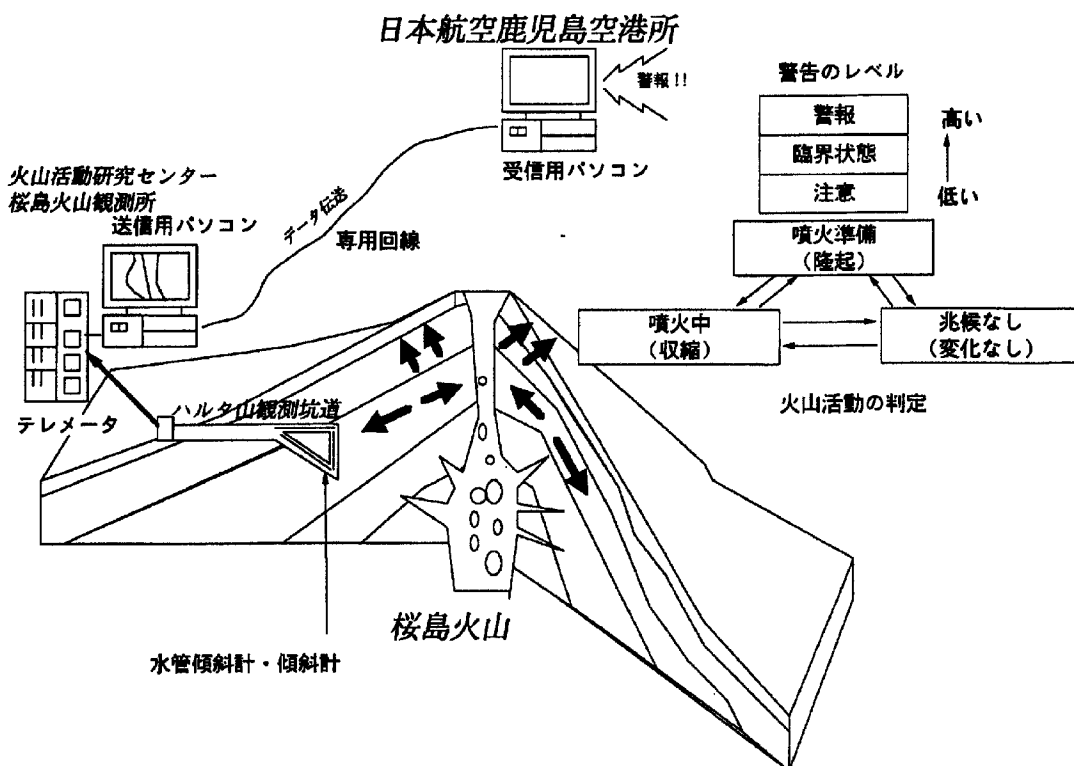


Fig. 4. Schematic diagram of automated system for prediction of summit eruption at Sakurajima volcano.

3.2 研究目的

一般に、火山噴火による航空機災害を軽減する方策は、Fig.2 に示すように、

- (1) 火山噴火の事前予測
- (2) 爆発の検知
- (3) 火山灰拡散範囲の把握

の 3 つのステップに分けて考えられる。航空機災害に限ったことではないが、まず、最初に火山噴火を予測することが災害を軽減するための有効な手段である。このことにより、十分な時間を持って航空機は火山から回避することが可能となる。2 番目に、噴火が発生したときには、速やかにそれを検知し、航空機に伝えて回避行動を取らせることである。これまでの火山噴火による航空機災害は火山噴火の発生を知らずに、航空機が運航されていたことによる場合が多い。3 番目に、火山噴火による火山灰雲の拡散範囲を把握することである。このことにより、はじめて具体的な航空機の航路変更が可能となる。当研究では、桜島火山を対象として同火山の活動に起因する航空機災害を防止・軽減するのに効果的なシステムを開発することを目的とした。特に、火山灰災害防止に有効な上記の情報を即時的に空港で入手できる様にシステム開発を重点的に行った。

(1) 火山噴火の予測

京都大学火山活動研究センターでは、桜島の山頂噴火を予測するために、火口から 2.8km 離れたハルタ山観測坑道に傾斜計および伸縮計を設置し、観測を行っている。Fig. 3 に、爆発前後の傾斜および伸縮変化を示す。この例では、1985 年 10 月 14 日 06:43 の爆発の約 30 分前から傾斜量および伸縮量が増加している。これまでの観測により、爆発の 10 分から 7 時間前に 0.01 から 0.2 μ rad の火口周辺の地盤の隆起を示す傾斜変化が観測されている。

(Ishihara, 1990)。これらのデータは桜島火山観測所に伝送され、パソコンにより自動データ処理が行われる。パソコンは、火口方向の地盤が隆起した事を示す傾斜変化が捕捉されたときは「噴火準備」、沈降したときは、「噴火中」、顕著な変化がないときは「兆候なし」の 3 つの火山活動状態を判断する。更に、「噴火準備」と判断したときは、その傾斜の増加量に応じて、「注意」、「臨界状態」、「警告」の 3 種類の警報を発する。1986 年から行われている実験によれば、パソコンが注意と判断したときは約 70% の確率で山頂噴火が発生している。また、「臨界状態」、「警告」の場合は 100% 山頂噴火に至っている (Kamo and Ishihara, 1989)。

本システムでは、ハルタ山観測坑道から桜島火山観測

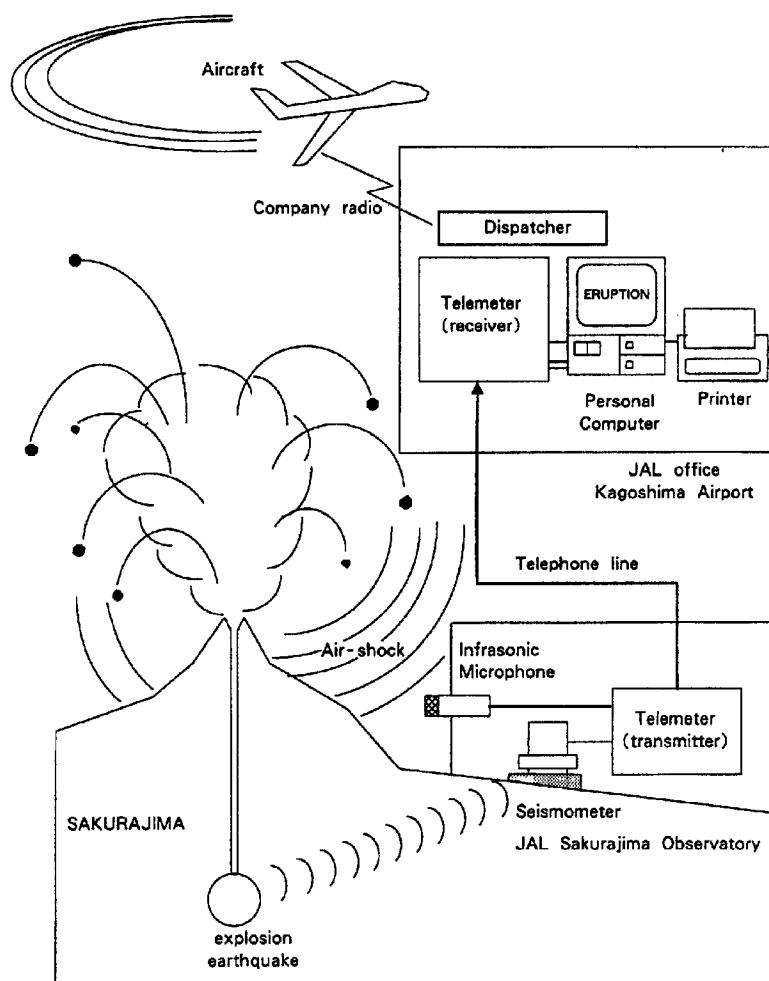


Fig. 5. Block diagram of system for detection of volcanic explosion at Sakurajima. A seismometer and an infrasonic microphone are installed at a station 4 km east of the summit crater. These signals are transmitted to JAL office at Kagoshima airport in real time by leased telephone line. These signals are analyzed by a personal computer and the results and warning are shown on the display.

所まで伝送された信号を更に、鹿児島空港まで伝送し、同じ論理を用いて、火山活動の判断と警報の発令を行っている (Fig. 4)。

(2) 爆発の検知

桜島火山において発生する火山性地震および微動は、次の 5 種類に分類されている。(1)A 型地震：高周波成分が成分が卓越し、P 波、S 波が明瞭な構造性地震に類似した波形の特徴を持つ。(2)BH 型地震：5~8Hz の周波数成分が卓越する。(3)BL 型地震：1~3Hz の低周波成分が卓越する。爆発的噴火活動が活発化する 2~3 日前に火口直下のごく浅い場所において群発し、穏やかな噴煙活動を伴う。(4)爆発地震：2Hz 以下の低周波成分が顕著に見ら

れ、空気振動を伴う。(5)火山性微動：2~4Hz の周波数成分が卓越し、噴煙活動を伴う。

火山性地震の振幅を利用した爆発の警報装置は従来から用いられてきたが、桜島においては BL 型地震もしばしば大振幅に達することがあり、頻繁に警報が発せられることが問題であった。これまでの火山活動研究センターの観測により、火口から 2.8km の距離にあるハルタ山では爆発地震の最大振幅は 10 μ 以上、空気振動は 0.1hPa 以上となることが知られている。そこで、本システムでは、爆発を精度良く判定するため、火山性地震の振幅だけでなく、爆発による空気振動も併用した。システムの概念図を Fig. 5 に示す。地震計と爆発空気振動を検出するため

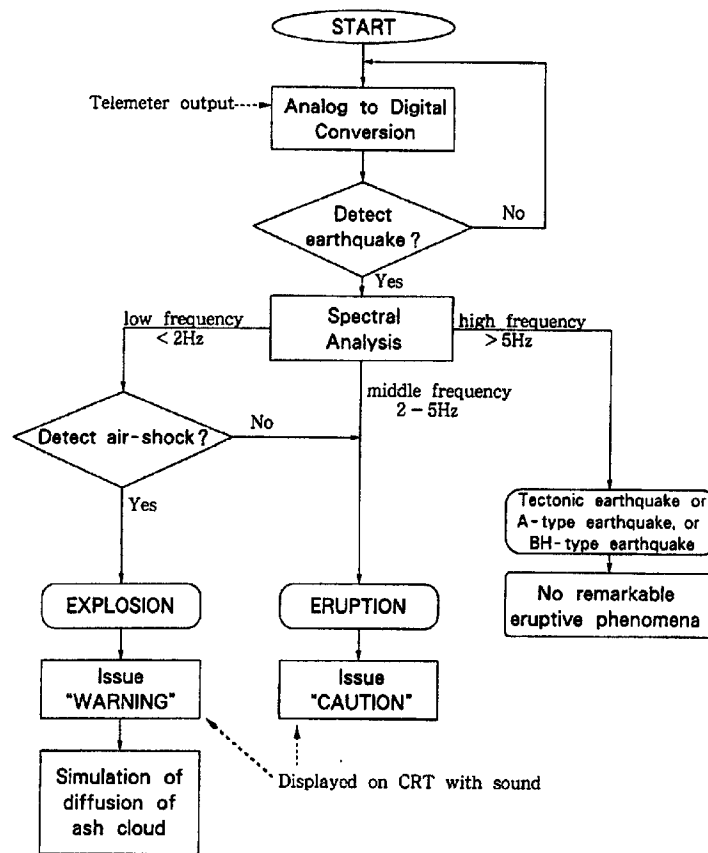


Fig.6. Flow chart for detection of volcanic explosion

の低周波マイクロフォンを火口の東 4km の黒神に設置した (Fig. 1)。これらのデータは専用回線を使用して、常時、鹿児島空港までを伝送され、パソコンに入力される。爆発判定の論理を Fig. 6 に示す。

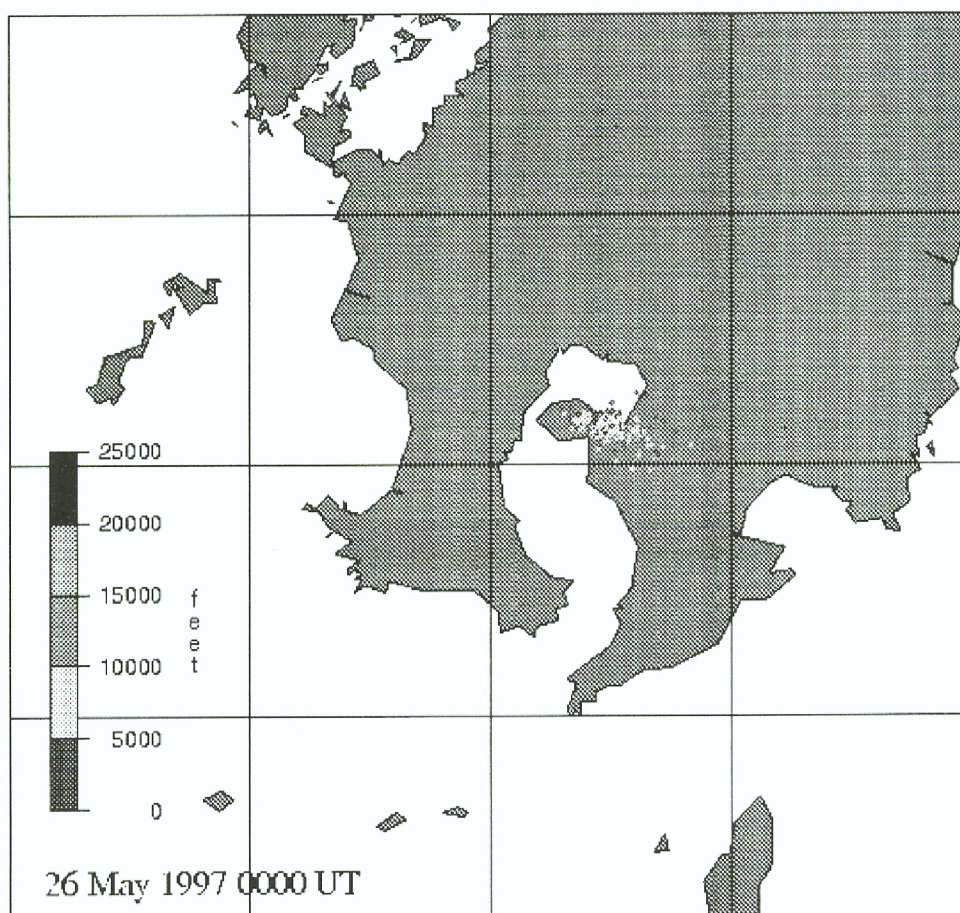
入力された地震および空気振動の信号は 100Hz のサンプリング周波数でデジタル化される。地震動の振幅がある一定レベルを超えたとき、地震と判定し、地震の種類を判定するためのスペクトル解析を行う。卓越周波数が 2Hz 以上で、空気振動の振幅が一定レベルを超えておれば、「爆発」と判断され、警報が発せられる。また、卓越周波数が、2~5Hz、あるいは、卓越周波数が 2Hz 以下でも、空気振動が一定レベルを下回ったときは、上記の火山性地震の分類において BL 型地震または火山性地震の発生に対応する。これらの地震・微動は穏やかではあるが、噴煙活動を伴うので、「噴火」と判断し、「注意」を促す。卓越周波数が 5Hz 以上の時は、構造性地震、A 型地震あるいは BH 型地震が発生したもの判断して、特に、表示しない。1991 年 4 月 1 日~5 月 31 日までに、59 回の爆発が発生した。そのうち、システムのメンテナンス中を除く、56 回の爆発時に、警報システムは動作してい

たが、49 回の「爆発」、7 回は「噴火」と判定した。この期間中では、88%の爆発を検出することが出来た。また、56 回の爆発以外、15 回「爆発」と判定したイベントがあった。これは、いずれも小規模な噴火であった。

(3) 火山灰拡散範囲の予測

火山灰の拡散範囲の予測は、Lagrangian 火山灰追跡モデル (Tanaka, 1994) によっておこなった。この手法では、火山灰粒子を大気の流れに沿って追跡する。本研究では、このモデルを球面座標系に変換し、任意の火山に適用できるように改良したもの (山形・下田モデル) を利用した。

本システムでは、まず、シミュレーションに必要な風向風速予測データを気象協会から ISDN 回線を経由して 1 日 2 回受信する。風向風速については、気象庁 RSM (Regional Spectral Model) を用いた。これらのデータを基に高度 30,000 feet (9140m) 迄を 5 層に分け、30 分ごとに 3 時間後までの火山灰拡散シミュレーションを行う。GMT を用いて地形データへの重ねあわせを行い、Image Magic により、ディスプレイおよびプリンターに出力する。表



HOME

Copyright (c) 1997 Japan Weather Association

Fig.7 Simulation of dispersion of volcanic ash. This is an example for 30 minutes after an eruption of Sakurajima volcano.

示画面の例を Fig. 7 に示す。なお、桜島に関する火山灰拡散シミュレーションの結果の一部は日本気象協会のホームページ上でも公開されており、毎日更新されている (<http://www.jwa.go.jp/sakurajima>)。

本システムは火山活動研究センターにおいて既に準備完了し、近く鹿児島空港に設置し、実際の火山灰の拡散範囲と比較検討することにより、拡散係数等のパラメータの調整を行う予定である。

4. おわりに

京都大学と日本航空は桜島火山の活動による航空機災害防止の為の活動の予測・監視・火山灰拡散予測・それらデータの鹿児島空港への伝送システムの開発に成功した。また、火山灰拡散予測については今後気象衛星写真等を用いてその精度を確認・評価して行く必要がある。

火山活動による航空機災害防止を単一の方法だけで図ることには限界があるので、時空スケールに応じた複合的な対策 (Fig.2) を実施して行く必要がある。

同時に航空関係者に火山活動についての教育啓蒙活動

を広く実施して行く事が火山による航空機災害防止の上で不可欠となろう。

謝 辞

火山活動による航空機災害の防止研究に早くから取り組まれ、また関係者を指導してこられた加茂幸介京都大学名誉教授にはこの共同研究の契機となる励ましを戴き、また当研究の過程で数々の貴重なご助言を賜った。また火山活動研究センターの高山鐵朗技官、故黒岩源三氏には観測点の設置にあたりお世話になった。火山灰拡散モデルについては筑波大学地球科学系の田中博先生のご指導を戴いた。財団法人日本気象協会には火山灰拡散モデルの応用及び上層風予測データの伝送についてご協力を戴いた。特に情報処理部の森本陸世部長、下田晋也氏、及び気象情報部の山形斉子氏には特別のご協力を戴いた。鹿児島空港の機器類の維持管理については、ジャルインフォテック (株) のご協力をいただいた。

本研究は、「民間等との共同研究」(平成 6 年～8 年) に

基づいて行われたものであり、研究費の一部に同研究に係る共同研究経費（校費）を使用した。本研究にご理解いただいた文部省国際学術局にお礼申し上げます。

以上の方々に対し、ここに記して改めて心より感謝申し上げます次第です。

参考文献

- Moody, E. (1991): 1982 年インドネシア・ガルングン火山火山灰迫遇及び B747 全エンジン停止体験談（小野寺三朗訳）、日本航空社内気象懇談会誌 vol.2, 日本航空運航部, pp.12 - 27.
- 小野寺三朗 (1995): 航空機災害、火山の事典（下鶴大輔, 荒巻重雄, 井田喜明編）、朝倉書店, pp.382 - 392.
- 吉玉卓雄 (1984): 桜島噴煙回避運航方式の改善について、航空気象ノート, 気象庁航空気象管理課, No.29, pp.42 - 53.
- Campbell, E. (1991): "Volcanic Ash, The Article in the 1991" 757 and 767 Flight Operations Symposium", The Boeing Company, pp.4.2.1 - 4.2.31.
- Casadevall, T. (1993): Files for the 1991 Unzen and Sakurajima encounters, Personnel communication, December 11, 1993.
- Ishihara, K. (1990): Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano, Sakurajima Volcano, Japan, Magma Transport and Storage, pp. 335-356.
- Kamo, K. and Ishihara, K. (1989): A preliminary experiment on automated Judgement of the stages of eruptive activity using tiltmeter records, IAVCEI Proceedings in Volcanology, Vol. 1, pp. 585-598.
- Lloyd, A. (1990): Vulcan's Blast, Boeing Airliner Magazine, April-June, pp. 15-21.
- Onodera, S. and Kamo, K. (1994): Aviation safety measures for ash clouds in Japan and the system of Japan Airlines for monitoring eruptions at Sakurajima Volcano, Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, U.S. Geological Survey Bulletin 2047, pp. 213-219.
- Tanaka, H. (1994): Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska, Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, U.S. Geological Survey Bulletin 2047, pp. 283. -291.

Prevention and Mitigation of Aircraft Accidents Caused by Volcanic Eruption

Saburo ONODERA *, Masato IGUCHI and Kazuhiro ISHIHARA

*Japan Airlines (Air Flite Japan)

Synopsis

In order to mitigate volcanic ash hazards to aircraft, Kyoto University and Japan Airlines have developed systems at Sakurajima Volcano and in the Kagoshima Airport region by methods of (1) predicting volcanic activities, (2) detecting volcanic eruptions, and (3) predicting volcanic ash trajectory and transport.

The results were successful. This suggests one comprehensive system for the mitigation of volcanic ash hazards in volcano regions that have air routes located in the proximity.

Keywords : Sakurajima Volcano; Volcanic Activity; Volcanic Eruption; Volcanic Ash; Aircraft; Flight Operations.