

桜島火山における噴火予知の研究

加 茂 幸 介

1. はじめに

私が桜島とかかわり始めたのは、そしてこれはまた活火山との初めての出会いでもありましたが、大学院修士の終わり頃、桜島で山頂噴火活動が始った翌年の1956年(S31)でした。以来、37年という事になります。1969年(S44)に桜島へ赴任してから間もなく、日本における噴火予知計画が始まりましたが、それから20年間、噴火予知5ヶ年計画を4次に渡りかかわってきたことになります。

観測所の使命には2つの任務があると教えられ、また、自分でもその様に納得してきました。大学の一組織でありますから、当然、教育と研究の任務があり、それに加えて、地球の営みである火山活動の観測データを収集する任務があります。この任務は、研究者個人の興味だけで選択できるものでなく、人間の寿命をはるかに越える長い期間の地球の営みを記録し、後世の研究者にも役立つよう、すなわち、継承の学問としての記録を残すことであります。

このような観点から、本日は、桜島火山観測所に在任中の火山噴火予知計画に基づいて、どのように観測施設と設備を構築し、それによって、どのような事が分かってきたかを述べたいと思います。申し上げるまでもなく、ここで取り上げました研究結果は、観測所スタッフの努力の成果であります。また、予知は火山災害の軽減と防止の基本とされていますが、火山災害の軽減と防止に関する研究の一端も述べたいと思います。同時に、桜島火山観測所は、防災研究所のもっとも遠い遠隔地の研究施設であり、キャンパスの所員の皆さんに観測所の全貌を認識して頂ける良い機会とも思われます。

2. 火山観測の略史

2.1 はじまり

計器による火山観測の歴史について簡単に触れますと、1845年にイタリアのベスピオに火山観測所が設置されて、1861年には地震計による観測が始められております。また、1911年にはハワイ観測所、1921年にはインドネシアのメラピ火山観測所等が設置され、計器による火山観測が行われています。一方我が国では、1888年(M21)に発生した磐梯山の噴火で関谷清景が地震観測を行い、その後1902年(M35)の鳥島噴火を契機に火山現象の調査の気運が高まり、1910年(M43)の有珠山の噴火で大森房吉が微動計による火山観測を行いました。1911年(M44)には震災予防調査会により浅間山に火山観測所が設置されて、地震の連続観測が始められました¹⁾。

2.2 大学の火山観測所

昭和の初期、当時のInternational Association of Volcanologyの会長であったフランスのA. Lacroix(1922-1927)とアメリカのA. L. Dayは活動中の阿蘇火山を視察して火山研究所の設立を勧奨しました。その結果、1928年(S3)に現在の理学部附属火山研究施設が設立され、1933年(S8)には東京大学地震研究所に、現在の浅間火山観測所が設立されました。

この体制が戦後まで続き、1960年(S35)には防災研究所附属桜島火山観測所、1964年(S39)に東京大

学地震研究所霧島火山観測所, 1971年(S46)に九州大学理学部附属島原火山観測所が次々に設置されました。

噴火予知計画が発足してからは, 1977年(S52)に北海道大学理学部附属有珠火山観測所, 1981年(S56)に弘前大学理学部附属地震火山観測所が新設され, 1984年(S59)には九州大学理学部附属地震火山観測所に改組, 東京大学地震研究所伊豆大島火山観測所に改組, 1986年(S61)に東京工業大学草津白根火山観測所が新設され, 1987年(S62)に東北大学理学部附属地震予知・噴火予知観測センターが改組されています。

このように戦前から, 我が国では火山の観測と研究が大学の研究者によって推進められてきています。世界を見るとイタリアと南米の一部で大学が観測所を持っていて, 多くの火山国では行政機関(例えば地質調査所)による観測と研究が行われています。我が国では, 後者に相当する機関は気象庁所属の火山観測業務を実施している地方气象台・測候所です。このような一種の二重体制は, 対象の本質を究める研究を進めるとともに人間社会にとって当面それによる損失なり被害を食止めなければならないような問題に対処するには, むしろ適当であると思います。よく例として引用するのですが, 病理と治療を確立するために, 大学附属病院と保健所と一般病院が並存しているのと似ているのではないかと考えられます。

3. 桜島火山の噴火予知の先駆的研究

桜島火山において噴火予知の研究に携っていて, 繰返し読み直した先人の教科書的研究が幾つかあります。

大森房吉による桜島火山の大正3年(1914)の噴火についての調査研究²⁾では, 前年の南九州での地震の頻発, その震源域の移動, 霧島火山の噴火等を根拠に桜島火山の噴火の可能性を警告していました。噴火後の調査研究では, 南九州全域におよぶ広域地殻変動から始良カルデラを中心とする隆起・沈降と桜島周辺の水平変動からその噴火が割れ目噴火であることを実証しました。これらは, 桜島の地球物理学的研究の教訓であり, また大森の噴火現象の観察記録は, 小藤文治郎の調査・研究³⁾とともに噴火過程を詳細にわたっておりまして, 山腹噴火の経験のない現状において観測体制を構築する場合に貴重な継承的経験となるものがあります。

本間不二男⁴⁾は, 昭和10年という早い時期に, 文明・安永・大正の噴火間隔が係数約2.3の等比級数的減少していることと山口謙次の桜島火山岩の分析値とをあわせ考察して, 火山岩岩石学的噴火予知を試みております。すなわち, 次のような場合を示しました。

- (1) 大正溶岩に似た成分(塩基性)の溶岩を流出の場合は, 1973年(S48)前後に山腹噴火を予測
- (2) 文明溶岩に似た成分(酸性)の溶岩を流出の場合は, 700~1600年の沈静期が継続し, その後, なお山腹噴火の潜在能力があらうと予測
- (3) 大正溶岩よりさらに塩基性の溶岩流出の場合は, 従来の火山活動の別シリーズで, 爆発性は1973年頃よりの休止期に比例するであらうと予測
- (4) 大正噴火後の沈降量の回復量から見て, 地力学的に近い大噴火はなく, ある場合には, 前駆現象として小噴火があり少なくとも火山性地震の頻発を指摘

実際に, 1955年に山頂噴火が始まり一旦鎮静化の後, 予測の1973年から多量の噴出物を伴う山頂噴火の激化となったことは興味深いものです。

佐々憲三による阿蘇火山の火山性微動の研究および火山地域における地殻変動の研究は火山物理学の研究に多くの示唆を与えるものであります⁵⁾。とりわけ, 桜島に関しては山頂噴火による噴出物量が始良カルデラの停滞・沈降に関与するであらうことを予測しています。佐々⁶⁾は1956年(S31)にFig. 1を示しています。この中で, 山頂噴火の始りの時点で, カルデラ周辺の地盤の上下変動に山頂噴火による停滞・沈降の可能性を示しています。事実, 後に示すように年間400回の以上の爆発的噴火が発生するとカルデラ周辺の

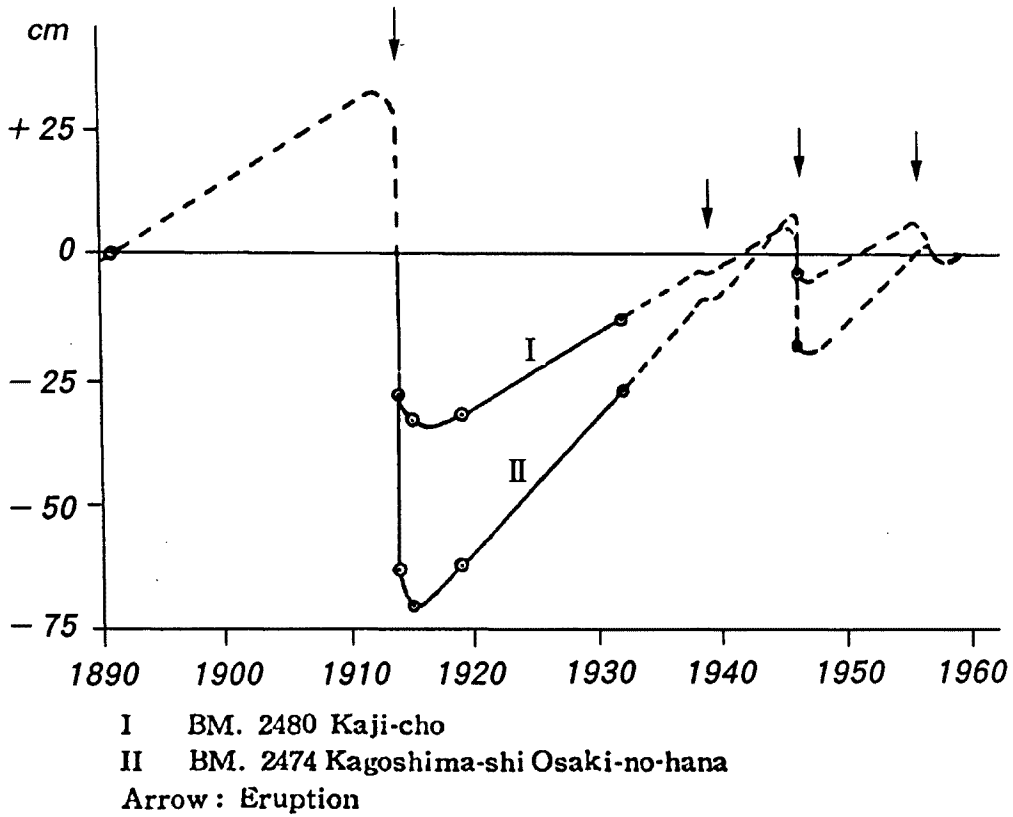


Fig. 1 Crustal deformation accompanied by eruptions of the Volcano Sakurajima

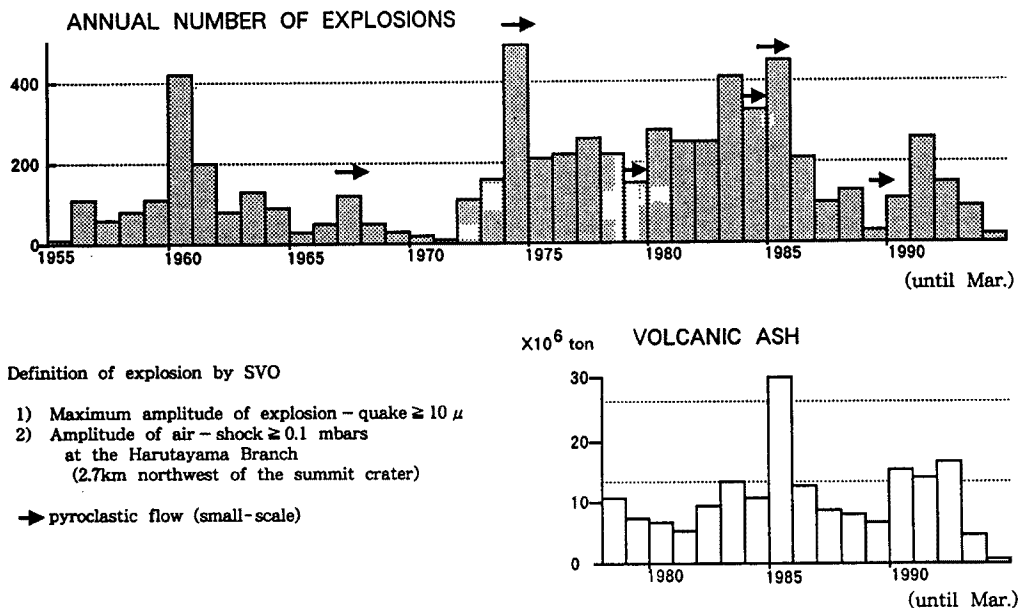


Fig. 2 Annual number of the explosive eruption at the summit crater of Sakurajima volcano since 1955 and annually total weight of the volcanic ash ejected since 1978

隆起運動は停滞乃至は沈降によっていきます。

水上 武⁷⁾による火山性地震の分類は、現在もそのまま使われております。茂木清夫⁸⁾による始良カルデラの隆起沈降運動の力学的モデルは、教科書の成果であり、吉川圭三⁹⁾による桜島の地殻変動の研究では、山頂噴火による桜島島内における変動を説明するため2力源モデルを導入しています。

これらの研究成果は、桜島火山の噴火予知のための観測体制を構築して行く上で、多くの示唆を含んでいまして、予知計画立案の指導書でありました。また、防災的研究として溶岩流のシミュレーションと取組んだときに、永田 武¹⁰⁾や水上 武¹¹⁾等による桜島と伊豆大島における溶岩流下時の粘性係数の観測的測定値がいかに妥当なものかを知り、基礎研究の重要性を再認識しました。

4. 火山噴火予知計画

桜島の火山活動は1955年10月の山頂噴火にはじまりましたが、その後の年間の爆発的噴火の発生頻度を降灰状況と共に Fig. 2 に示します。1960年に年間400回を越す爆発的噴火の発生があり次第に沈静化の傾向が見られました。ところが、1972年(S47)から山頂噴火活動が再び激化して、諸種の火山災害が発生し始めました。1971年迄のいわば前期は爆発的噴火に伴い主として噴石と火山灰を噴出する噴火形態でありましたが、1972年以降の後期には噴火形態が変わり、爆発的噴火と連続噴煙噴出を繰返す様になりました。年間400回の爆発的噴火の発生は1974, 1983, 1985年に見られ、降灰量も増加し平均して年間1,000万トン、1985年には3,000万トンを越える状態でありました。その間、小規模の火砕流の発生、噴石による被害、降灰による各種の被害が発生し続けています。

我が国の噴火予知計画は、桜島の山頂噴火活動の後期の始りの1973年(S48)から検討が始められて、翌1974年(S49)から5ヶ年計画として実施に移されました。簡単に、火山噴火予知計画の策定の方針の経緯を説明いたします。

第1次計画(S49~53)では火山噴火予知の現状を検討して推進すべき課題としまして、

1. マグマの動きの探知のための火山観測：火山性地震・脈動、地殻変動、重力、地磁気、熱、噴出物
2. 研究観測施設等の整備：観測所、監視体制、新設
3. 移動観測班：北海道、東北、関東・甲信越・伊豆七島、九州・薩南諸島
機動観測班：気象庁
4. 重要課題の推進：熱的状态の隔測、最適機器の開発、無人赤外写真伝送
5. 火山噴火予知連絡会の設置
6. 人材の養成

が取上げられました。第1次計画発足後翌年には見直し(S50)が行われて、次のような整備すべき事項が検討されました。

1. 火山観測所の新設：有珠山
2. 既設観測所の整備：浅間山・霧島山・雲仙岳等
3. 特定火山集中総合観測：桜島・伊豆大島・三宅島・浅間山・阿蘇山・有珠山・富士山
4. 研究開発の推進
5. 観測要員の増強

第2次計画(S54~58)では、次のような事項が推進すべき課題となっています。

1. 火山観測研究の拡充強化：特に活動的な火山：6, その他の火山
2. 予知手法等の開発・基礎的研究等の推進
3. 噴火予知体制の強化

第3次計画(S59~63)と第4次計画(H1~5)では、火山の分類を見直した上で、次のような重要課題を

取上げております。

1. 火山観測研究の拡充強化：

活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山：12, 活動的火山・潜在的爆発活力を有する火山：23, その他の火山

特定火山集中総合観測

2. 予知手法等の開発の推進, 基礎的研究の推進, 基礎資料の整備

3. 噴火予知体制の強化：観測研究体制の充実, 連絡会の機能強化人材の養成・確保, 国際協力の推進

火山噴火予知計画では, 計画の内容で具体的に実施項目を示しておりますが, 第1次計画は「基盤整備の段階」, 見直しは「基盤整備の強化の段階」, 第2次計画は「充実と近代化の段階」, 第3次計画は「観測の

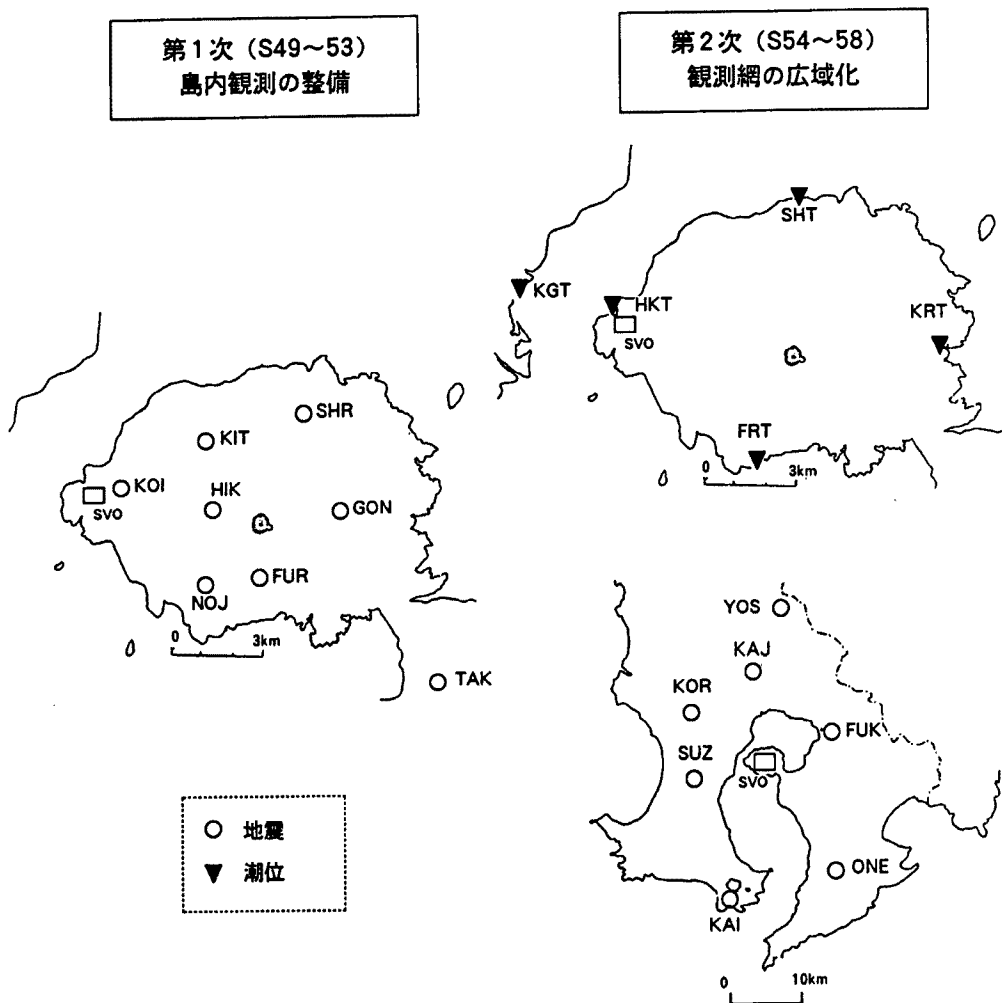


Fig. 3 Seismic and sea-tidal networks established in the 1st five year project for Volcanic Eruptions Prediction ('74-'78) and the 2nd ('79-'83), respectively.

広域化・データの良質化の段階」, 第4次計画は「データの高品位化・直前予知の実用化の段階」という内容となっております。

5. 桜島における火山観測網の構築

我が国の火山噴火予知計画が発足する際に計画した事は, 現実に行進している山頂噴火活動を的確に観測する地震・地盤変動観測を主とする島内の観測体制として, 中域火山観測網, 将来の山腹噴火に対処する広

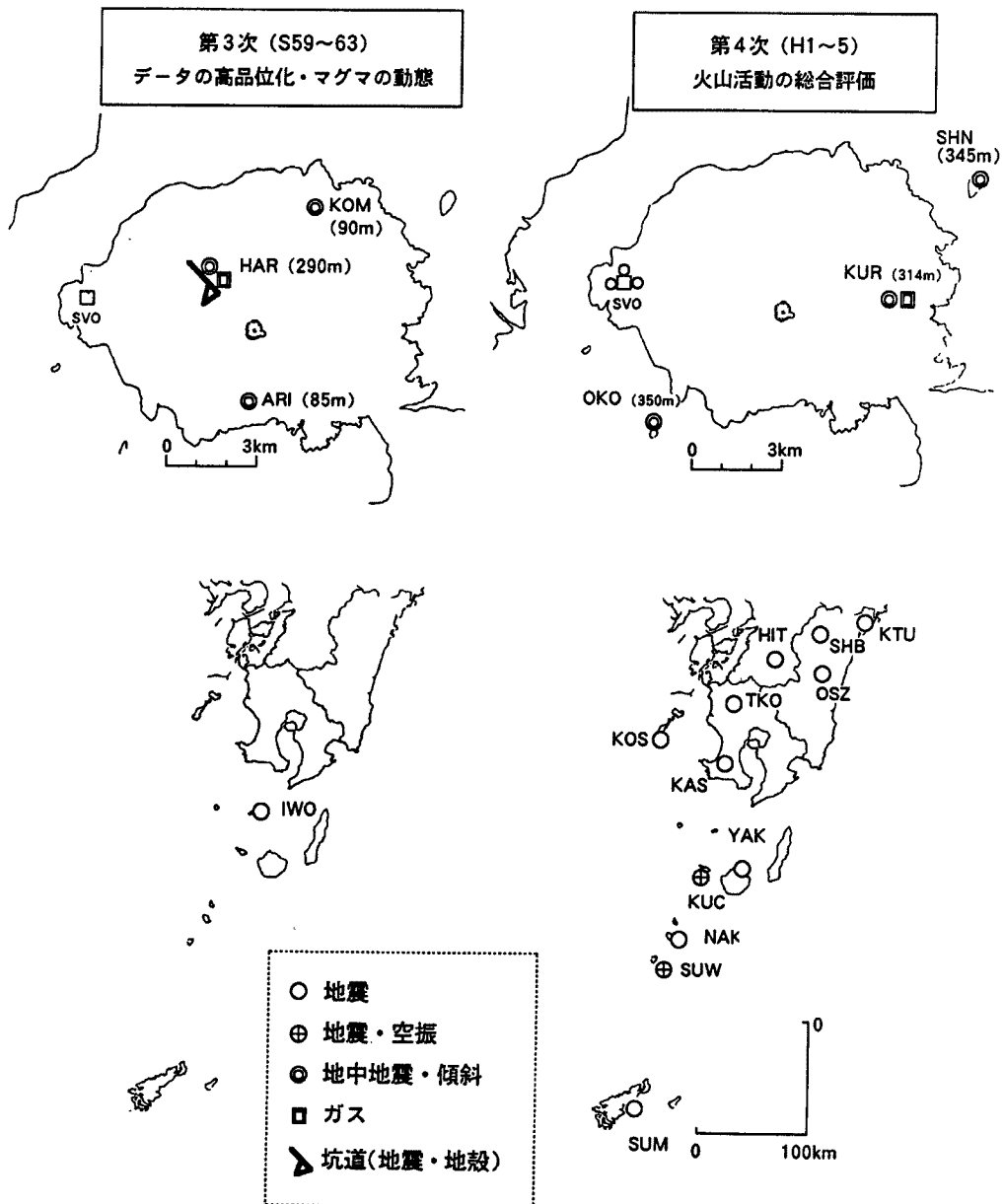


Fig. 4 Networks for earthquakes, air-shock, bore hole seismic/tilt, volcanic gas and tunnel established in the 3rd ('84-'88) and the 4th ('89-'93), respectively.

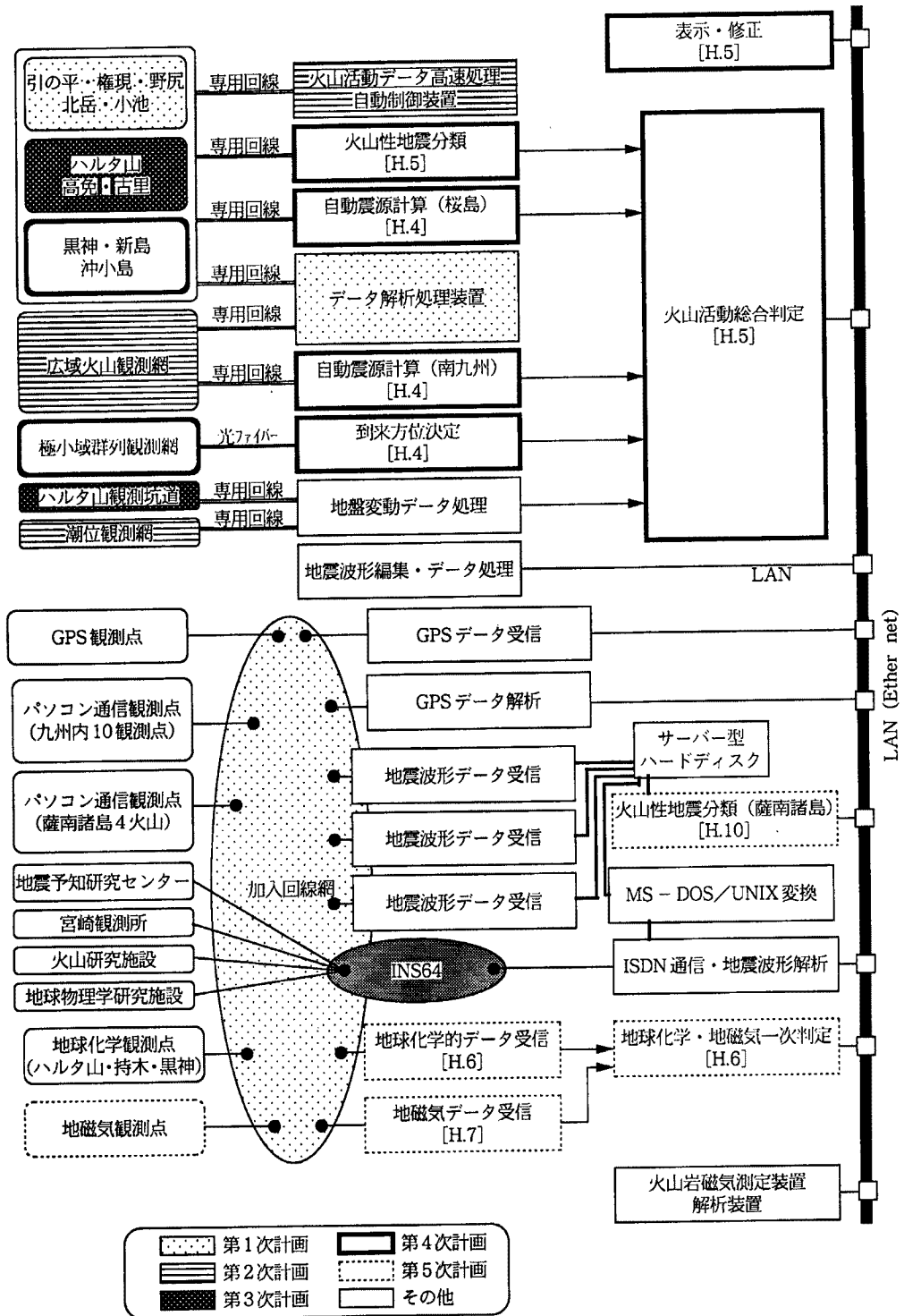


Fig. 5 Total system for data processing at Sakurajima Volcanological Observatory, Kyoto Univ.

域火山観測網・潮位観測網の構築, さらに観測環境を良くする観測坑道の設置, 緊急時に活動の推移を追跡する極小域観測網の構築でありました。また, 上記の観測網による観測・測定の外に, 測地測量のくり返し, 移動観測等を考えておりました。当初, 5ヶ年計画として継続される事が決まっていたわけではありまませんで盛り沢山の計画を立案しましたが, 上に述べた内容は4次に渡る20年をかけて構築することになりました。

第1次計画(S49~53)では, 山頂噴火活動を対象にして火山体周辺に地上設置型の中域火山観測網を整備し, データ処理解析装置を導入し, 移動観測班を新設し, 集中観測を実施しました。続く第2次計画(S54~58)では, 山腹噴火を対象に加久藤, 始良および阿多カルデラを包含する広域火山観測網, 連続地殻変動観測となる潮位観測網を構築し, 火山活動データ高速処理制御装置を導入し, 引き続き移動・集中観測を実施しました。第1次および第2次計画で構築された火山観測網を Fig. 3 に示しています。

第3次計画(S59~63)では, 策定の方針にしたがって水管傾斜計, 伸縮計を設置する観測坑道を設置し, 中域観測網の一部に傾斜計・温度計を含む地中地震計を導入して火山体内標高約60mの平面に3点観測網を構築し, また, 東工大・草津白根火山観測所の協力を得て火山ガスの観測も始めました。さらにデータ処理は定性的解析から定量的解析を目指して整備されました。次の第4次計画(H1~5)では, 海水面下約300mの平面に地震・傾斜・温度の3点観測網を構築し, 在来の観測網とあわせて立体観測網を形成する事になりました。また, 念願の極小域地震観測網も設置しました。データ処理については火山活動総合判定装置が導入されて, 噴火予知の実用化の実験的研究を始めました。第3・4次計画を通して, パソコン通信を利用した準リアルタイム観測網をトカラ列島(火山島)と薩南諸島を含む南九州に展開しました。火山島には空振計も同時に設置しました。第3次および第4次計画中に構築された観測網は Fig. 4 に示してあります。なお, 第4次計画の最終年度には, 霧島火山帯GPS観測網が構築され, また基礎研究として火山岩岩石磁気測定装置と磁気遮蔽測定室を設置する事が出来ました。桜島火山観測所における観測データ処理系統図を Fig. 5 に示してありますが, INS64高速通信回線で, 桜島火山観測所(鹿児島), 地震予知研究センター(宇治), 宮崎観測所(宮崎), 理学部火山研究施設(阿蘇), 理学部地球物理学研究施設(別府)の5ヶ所間のデータ相互通信の準備も出来ております。

以上のように, 4次20年にわたって構築された観測網は, 地上設置型4点, 100m深級4点と300m深級3点からなる立体的中域火山観測網, 8点の坑道(20m長)からなる広域火山観測網, 100m深極小域3点観測網, 3点の火山ガス観測網, 5点からなる潮位観測網, 200m長観測坑道による精密地殻変動観測室および14点からなる準リアルタイム観測網であります。多項目観測を目指してきましたが, 地震, 傾斜, 伸縮, 潮位, 空振, 地磁気, 温度, 水位, 水中音響, 火山ガス等の観測を実施しています。これらの全体像を Fig. 6 にまとめて示してあります。

6. 観測・研究の成果

前節で示してきました観測網による観測結果を用いた多くの研究から, 現在我々が描いている始良カルデラ含む桜島のイメージは Fig. 7 に示すようなものであります¹²⁾。このような絵を描くに至った代表的な研究結果について, 順次お示ししていきたいとおもいます。

6.1 観測研究成果1:地震

桜島火山において観測される震動現象は, 先に述べたように水上の火山性地震の分類⁷⁾に準じておりますが, Fig. 8 に示しますように震源がやや深く自然地震に似た波形を持つA型地震, 火口直下で発生し高周波成分が卓越するBH型地震, 低周波成分が卓越するBL型地震, 爆発的噴火に伴って発生する爆発地震, 単振動あるいはその重畳の波形の微動と見られるC型および連続噴煙放出に伴う微動D'型の6種類に分けております¹³⁾。観測網の構築にあたって, 地中地震計を採用してきましたが, その理由は Fig. 9 に地上と

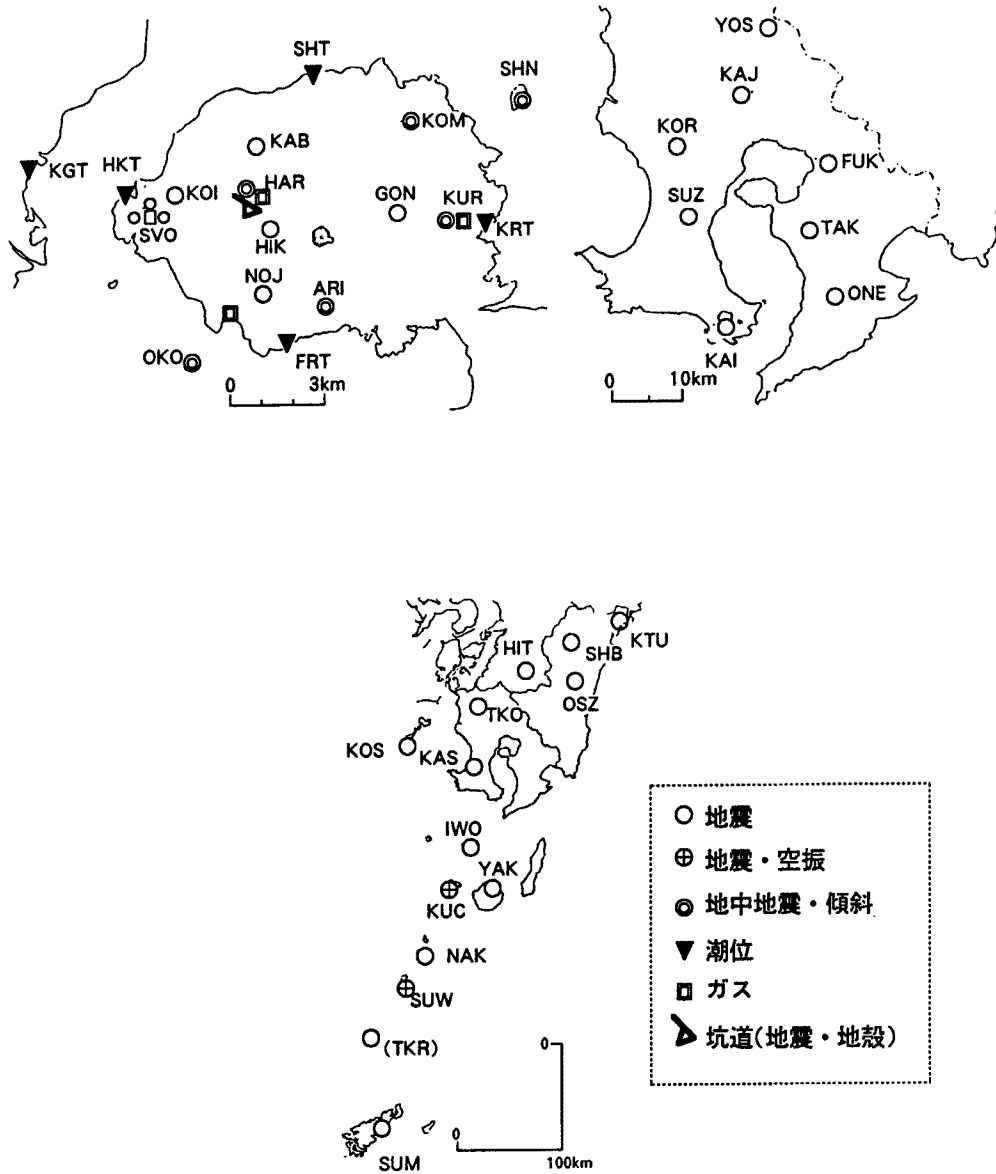


Fig. 6 The total procedure for volcano monitoring in southern Kyushu, Japan established during 1974-1993

孔底に設置した地震計が捉えた波形を比較すればおわかりいただけると思います。このように孔底設置の地中地震計により、B型地震の震源決定およびBHとBLの識別が可能となりました。また、Fig. 10に示したようにA型地震と爆発地震の空間分布もわかり¹⁴⁾、爆発的噴火の多発時にA型地震が深部より火口直下に震源移動してくることやマグマの通路や溜りを示唆する分布をしていることがわかりました¹⁵⁾。さらに、爆発地震の震源が爆発の始点と仮定するなら爆発源は火口直下の深さ1~3kmに分布していて、従来表面的現象と考えられていたのと様子が異なることもわかりました。

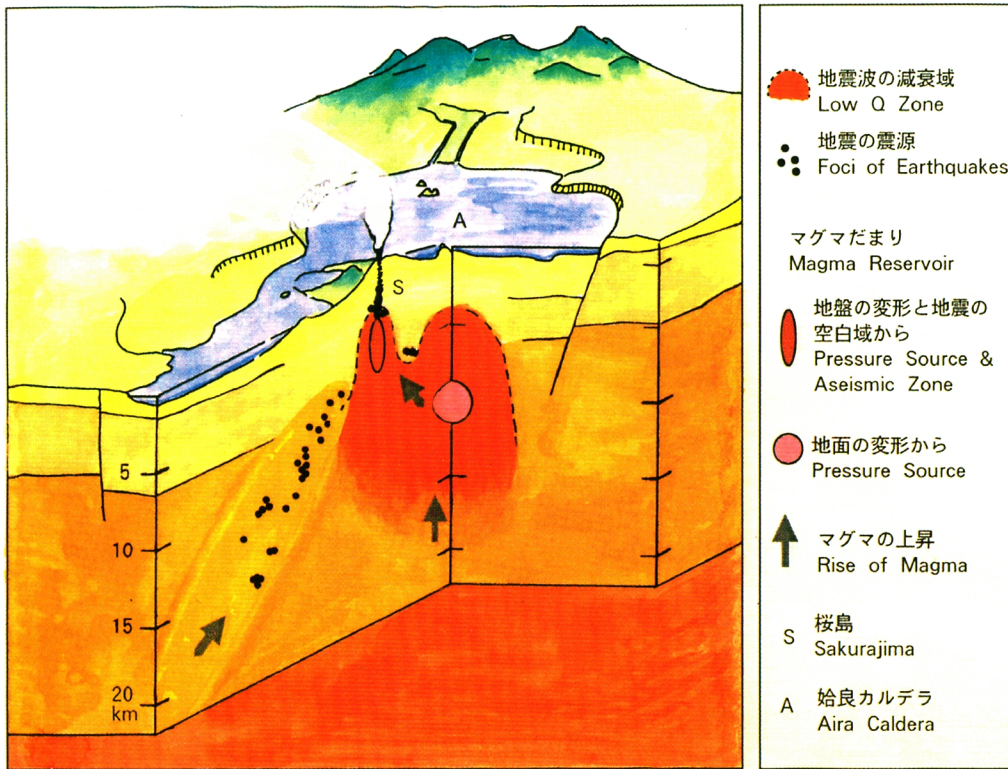


Fig. 7 An imaged model reduced from results of research by use of the data from the monitoring networks in Fig. 6

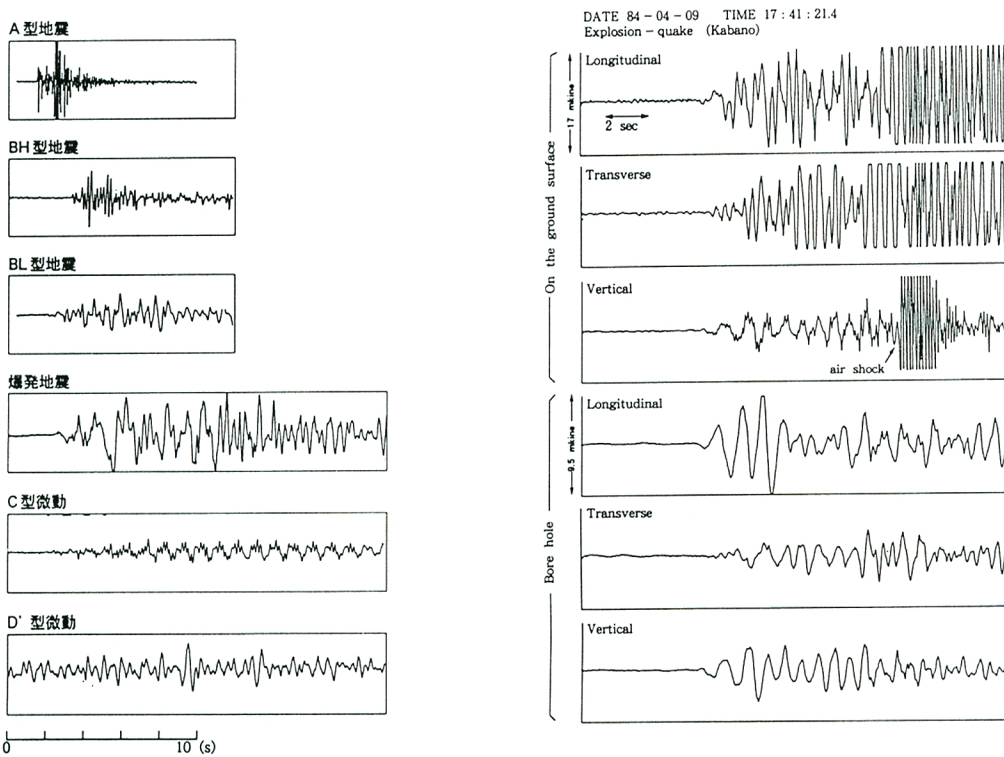


Fig. 8 Classification of earth's vibration observed at Sakurajima volcano

Fig. 9 Comparison of seismic wave form of explosion-quake by bore hole seismograph with by grand-surface based one

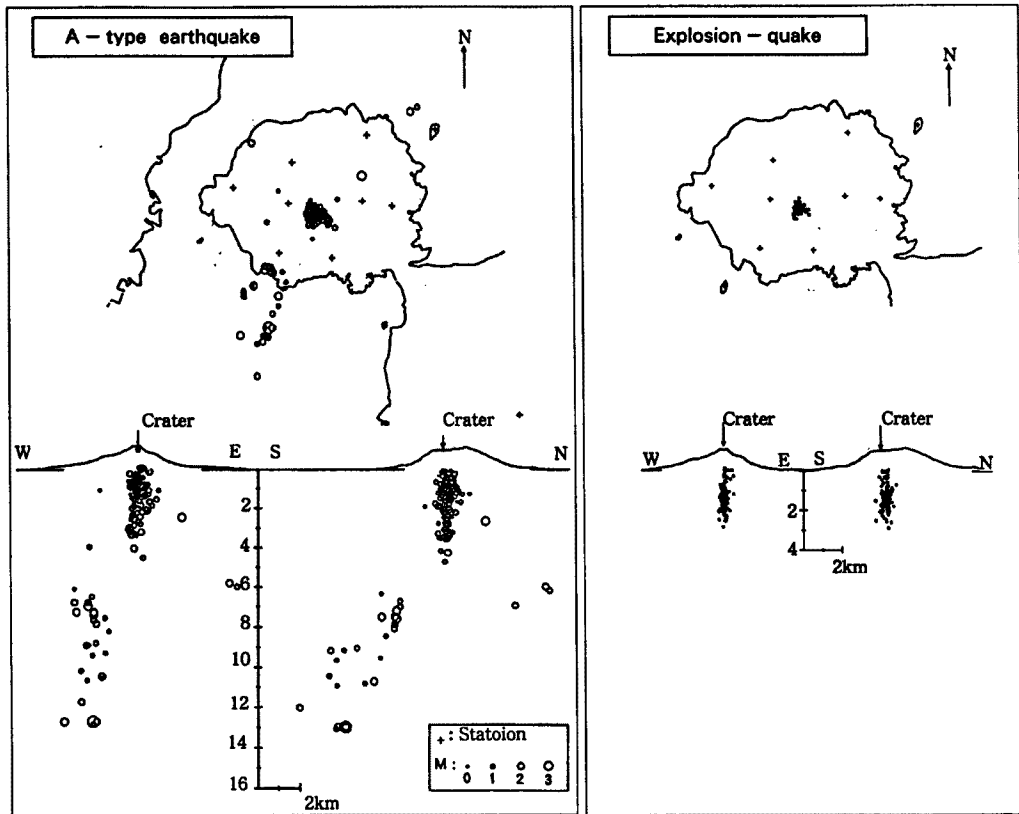


Fig. 10 Focal distribution of A-type earthquakes (left side) and explosion-quakes (right side) at Sakurajima volcano during 1974-1992

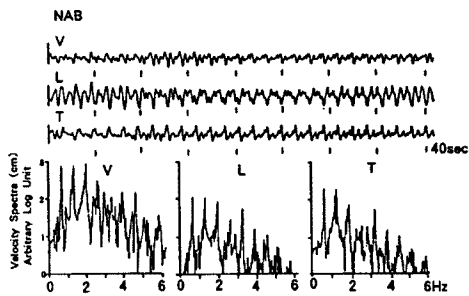


Fig. 11 An example of C-type volcanic micro-tremors and Fourier spectra

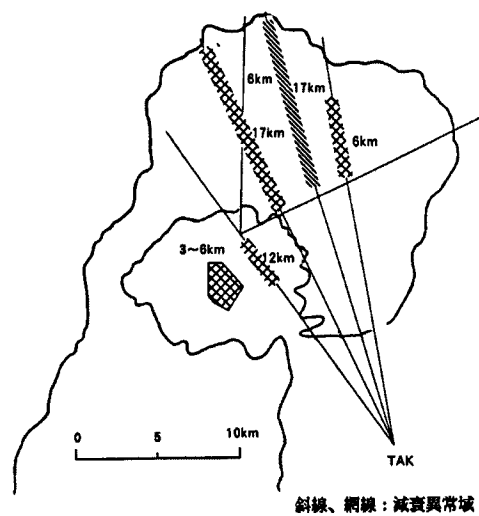


Fig. 12 Absorptive area for seismic waves in Aira caldera

C型微動は火口底にマグマが上昇してきて、火孔が閉鎖状態の時に発生していることが確認されていますが、Fig. 11 にそのスペクトル構造を示していますように整数倍の高調波を含んでいることから、両端固定型の弦振動と考えられ、長時間くり返し発生しているときは基本周波数が時間的に増加していくことから振動源のディメンションも小さくならなければなりません¹⁶⁾。物理的イメージについては未だよくわかりません。

常時観測を用いて地震波の減衰異常域をみてみますと、Fig. 12 に示していますように桜島の北部始良カルデラの中央部と桜島火口直下に存在しています¹⁷⁾。この異常域は破碎帯の可能性もありますが、非固体あるいはマグマが関与していると解釈するほうが適当のように思います。

広域火山観測網と準リアルタイム観測網のデータから、南九州の震源分布と発震機構から求めた応力場をFig. 13 に示しました。浅い地震は日向灘と鹿児島県西方に、やや深発地震は薩摩半島南部から桜島直下にかけて見られます。地震帯の傾斜は深さ 60km 迄が約 30°、60km 以深では約 70° となっていて、深さ 140~160km の発生頻度が大きい様に見られます。特に、火山直下の深さ 100km 付近で応力場が水平方向を示していることは、マグマの発生と関連しているようにも考えられます¹⁸⁾。岩石学的研究では脱水分解反応あるいは加水反応が起こりうる深さ¹⁹⁾に相当しているようであり、今後の研究に期待されるところです。

6. 2 観測研究成果 2 : 地殻変動

桜島周辺の地殻変動測量網を Fig. 14 に示しますが、水準測量と測距測量 (EDM) がくり返し実施されてきています。カルデラの上下変動については 100 年間のデータがあり²⁰⁾、山腹噴火に伴う流出溶岩量と変動量との関係は火山学の教科書となっています。その関係を Fig. 15 に示しました。特徴的なことは溶岩流出に伴うカルデラの隆起・沈降の力源はカルデラの中心であり、噴火活動との関係からはマグマの恒常的供給を示唆していることです。新しい知見としては、1955 年以降の溶岩流出を伴わない山頂噴火でも噴出物量と変動量と同じ関係が成り立っていることです。この事は潮位観測結果を入れて表現を変えた Fig. 16 でも読み取れます²¹⁾。島自体の浮沈とカルデラの中心部に近い桜島北部の沈降が見られます。特に海水に囲まれた火山では、潮位観測が大規模な水管傾斜計の機能を果たしていることになります。一方、Fig. 14 に示された測距測量網による水平変動の様子を Fig. 17 に示しました。ここでは上下変動に呼応して、活動期には伸び、カルデラの沈降時には収縮を示しています²¹⁾。以上みてきましたように、カルデラの隆起・沈降はマグマの供給と噴出のバランスを反映していることになります。この関係を過去の噴火にも適用して、歴史的地殻変動を推定してみた結果を Fig. 18 に示します。この図で見られますように噴出量と溜込期間の関係から長期予測が可能であり、現時点で溶岩流出が発生したとしても、大正噴火の 1/2 乃至 1/3 程度と推測されます²²⁾。

6. 3 観測研究成果 3 : 山頂噴火と複合観測

桜島火山における火山噴火予知計画の当初案にも、観測坑道の計画が盛り込まれていたが、これは観測担当者が常識的にセンサー設置環境を良くする原則で考えていたものです。ところが、1979 年 (S54) に気泡型 2 軸傾斜計を活動火口より 2.8km 離れたハルタ山観測所に設置して観測していると、気象条件のいい擾乱の少ないときに、爆発的噴火の発生前に火口方向が持ち上がる観測例が幾つか捕捉できました。その例を Fig. 19 に示します。この事は、カルデラの隆起・沈降現象が、山頂噴火時に小規模に山頂付近で起こっている想像から出発したものでした。事実がわかると、観測坑道設置が積極的計画となり、山頂噴火の直前予測の計画となっていきました。山頂の標高が 1mm 変化したときの傾斜をハルタ山観測所で捕捉する基本設計としました。出来上がってみると実際にはその 1/10 の精度で観測できています。その一例を Fig. 20 に示します。爆発的噴火の前後における山頂膨張・収縮の記録例ですが、傾斜と伸縮量の比から力源の深さの推定出来ますし、伸縮計に見られるステップの大きさから噴出物量による爆発規模の推定も可能であることがわかってきました^{23), 24)}。

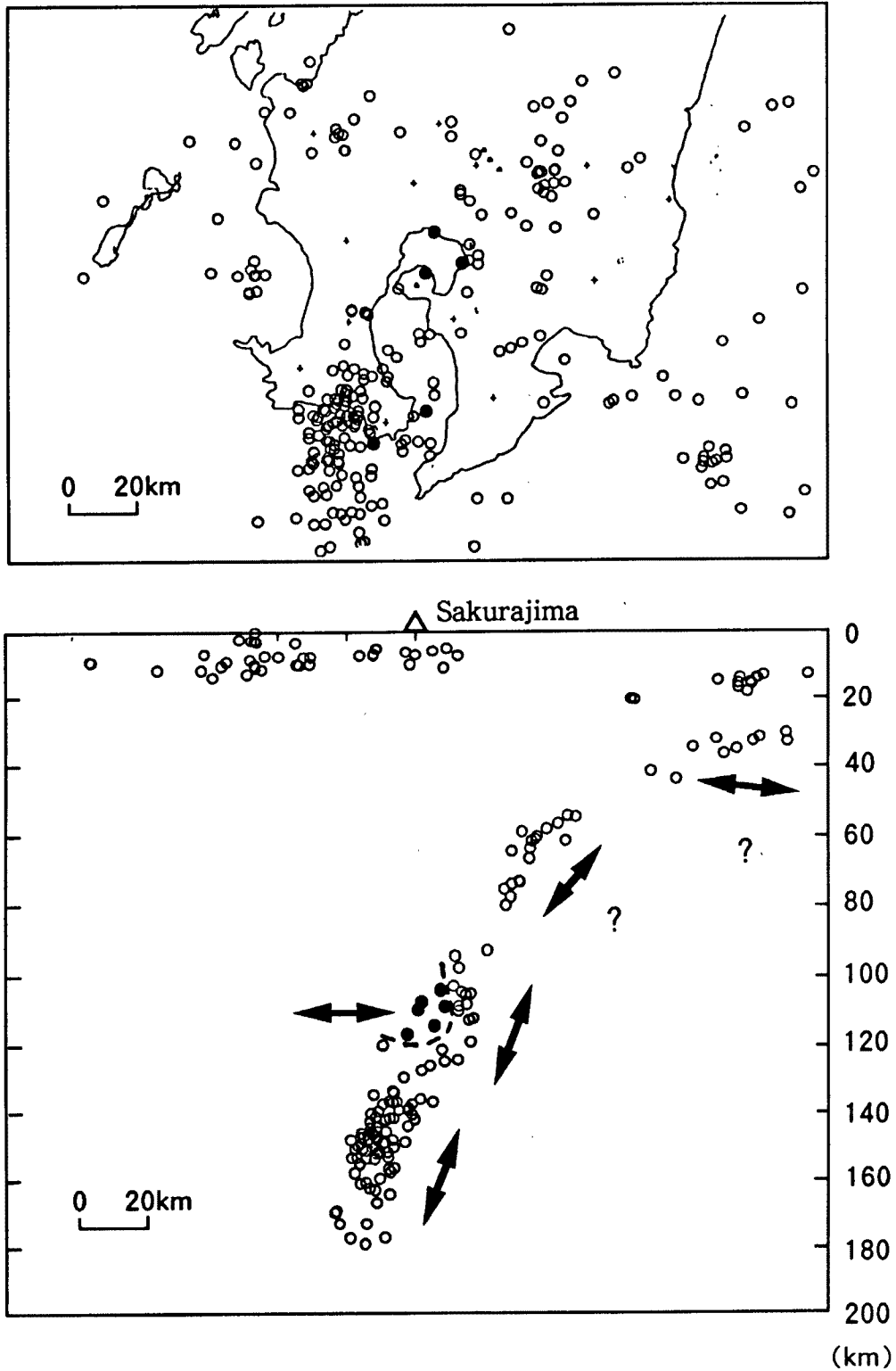


Fig. 13 Focal distribution of earthquakes at the southern Kyushu Is.

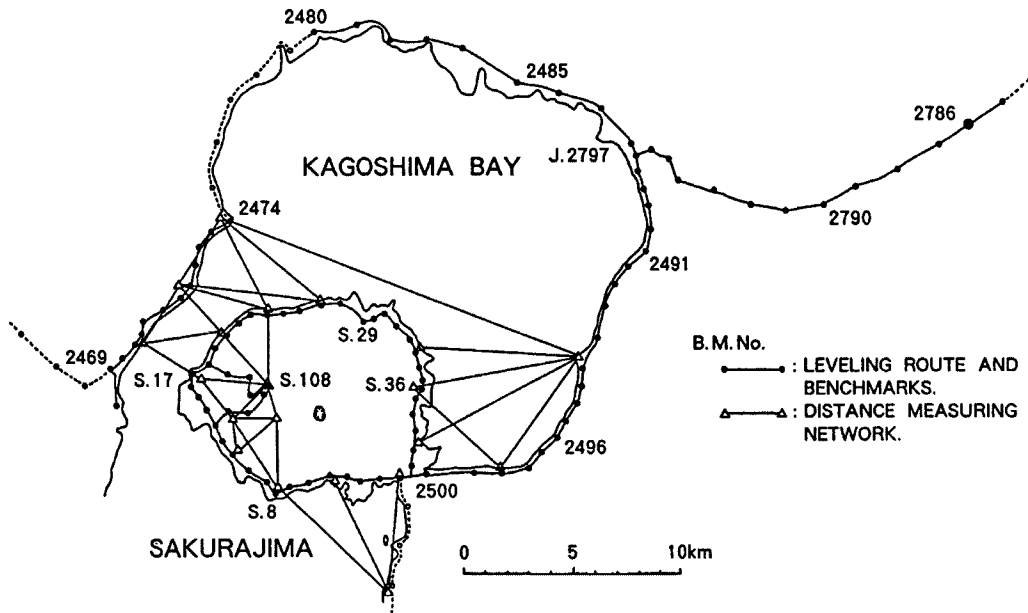


Fig. 14 Precise leveling route and EDM networks at Aira caldera and Sakurajima volcano

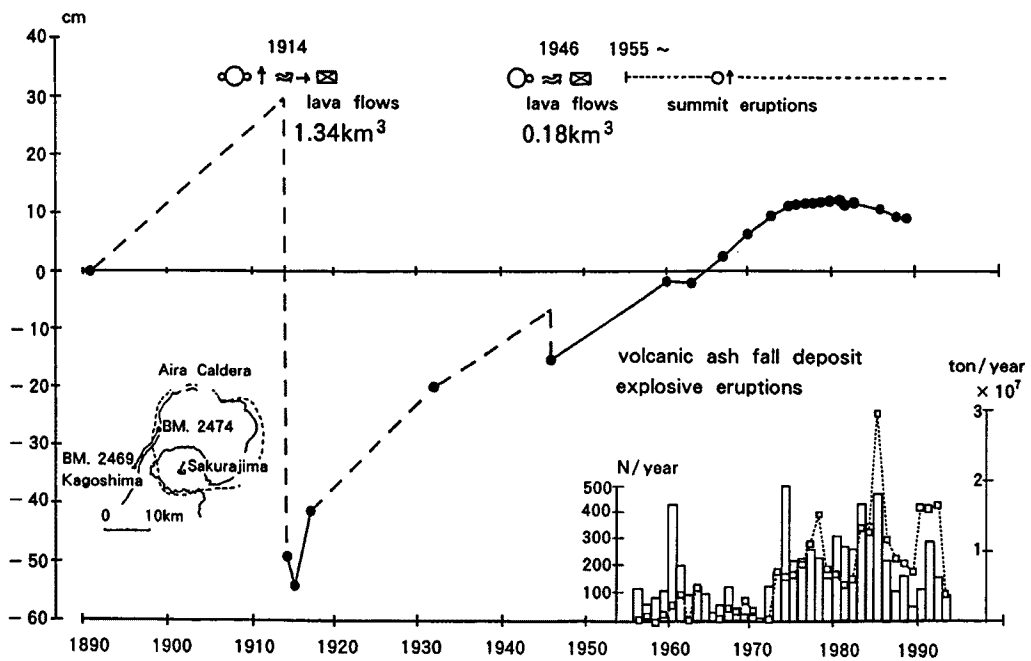


Fig. 15 Vertical deformation of ground around Sakurajima volcano with annual number of explosive eruption and annually total weight of volcanic ash ejected

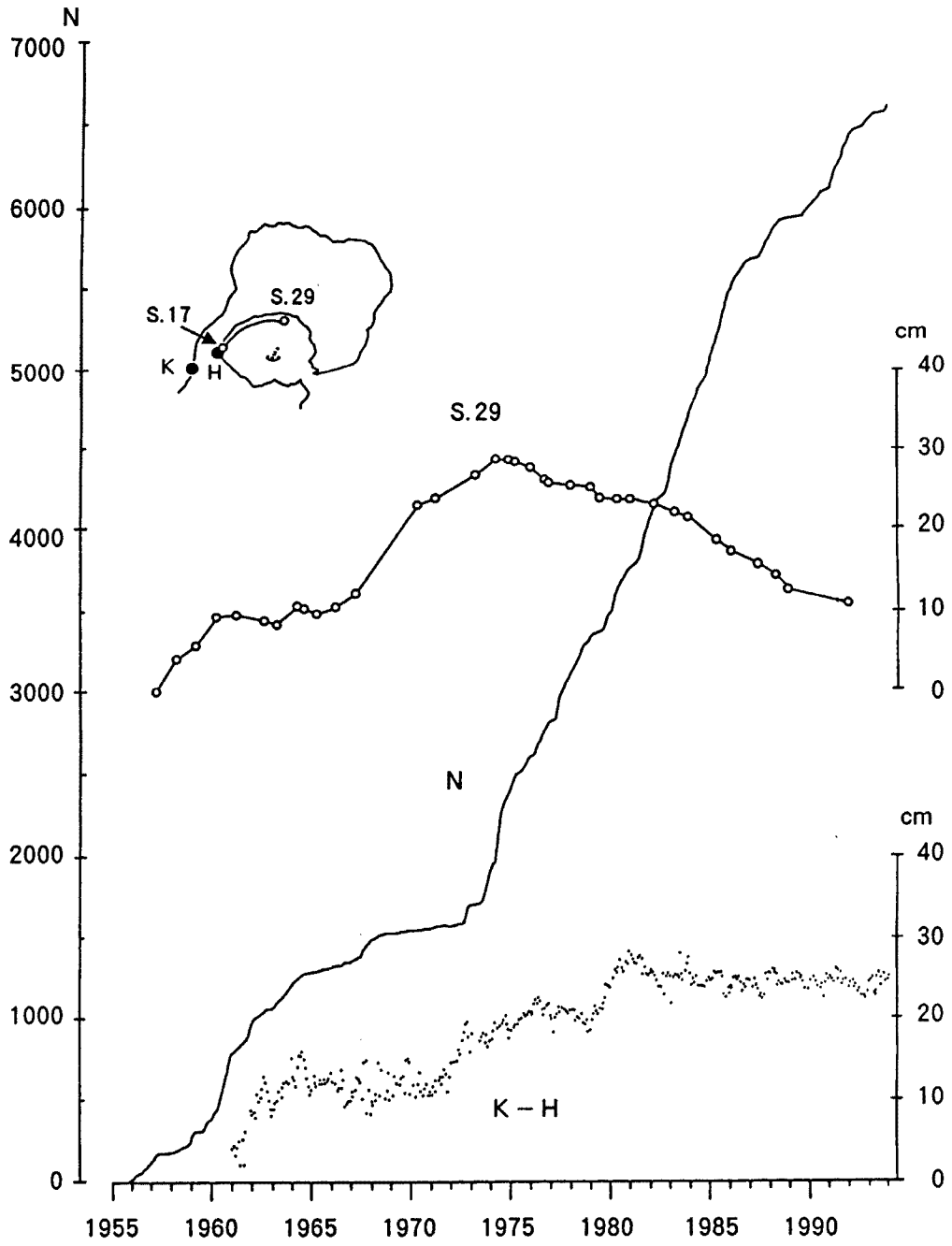


Fig. 16 Vertical deformation (S29), Accumulated number (N) of explosive eruptions and the difference (K-H) of sea-levels between volcano Is. (H) and caldera rim (K)

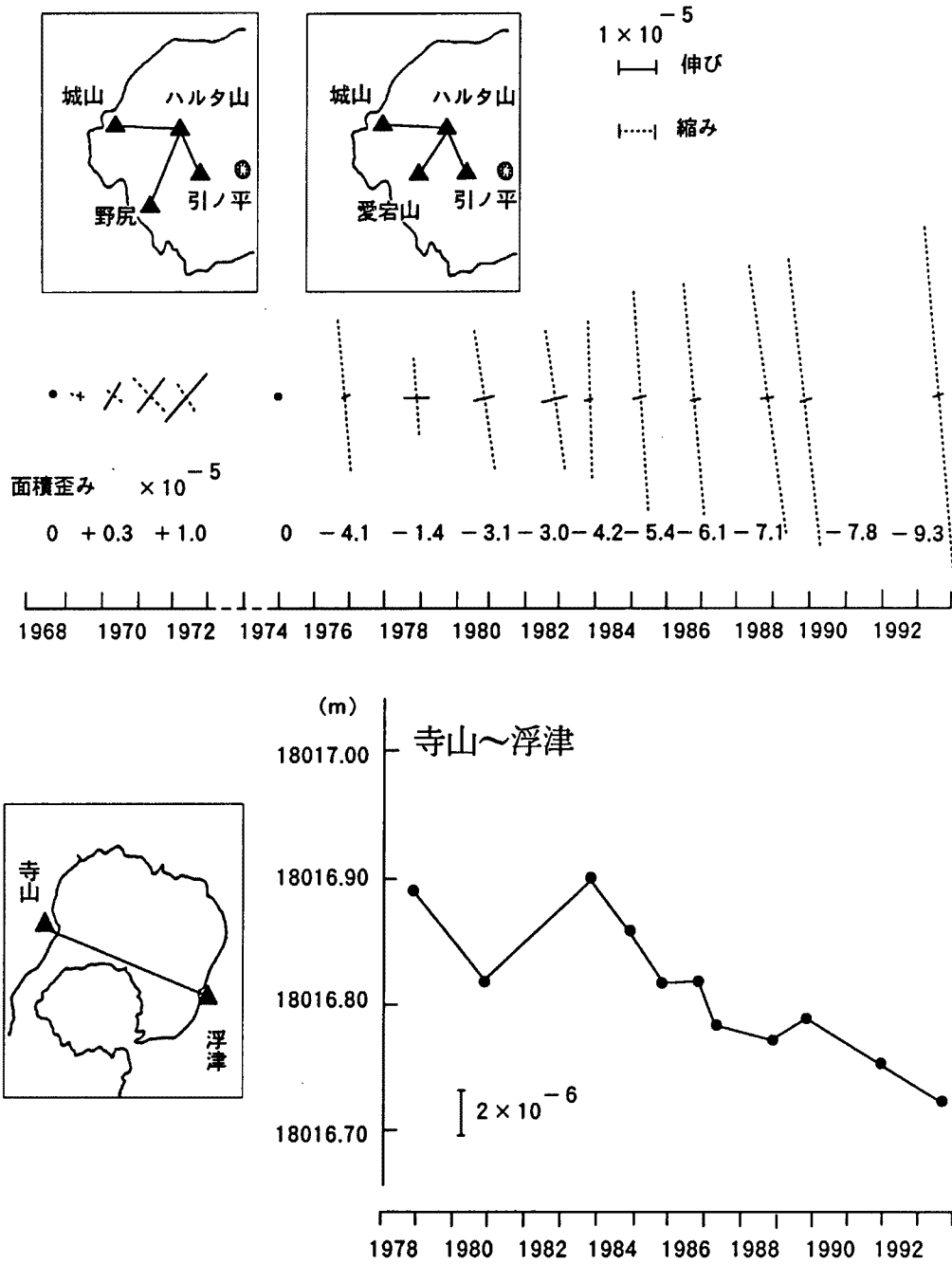


Fig. 17 Horizontal deformation of ground in Sakurajima Is. (above) and in crossing line of Aira caldera (bottom) by EDM

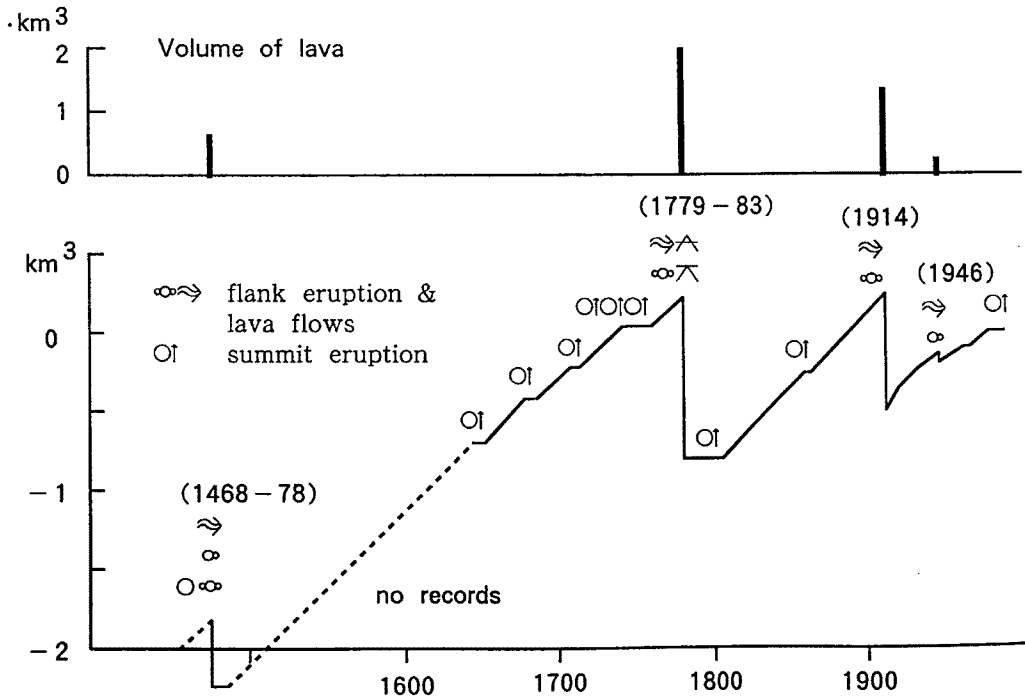


Fig. 18 Vertical deformation of ground for the historical eruptions accompanied by huge lava flow

これらの研究の結果は山頂噴火の自動予知システムの構築に発展していきました。山頂の膨張速度と膨張積算量を継続的に観測しながら、経験的にスライスレベルを決めて、注意、臨界、警報のレベルを自動的に判断させることにしました。このシステムの概要を Fig. 21 に示しました。また、このシステムによる予測実験結果を Table 1 に示しました。「注意」では60~70%、「臨界・警報」ではほぼ100%の的中率となっています。このシステムでは膨張積算量から次の噴火による噴出火山物質総量の規模を推定できますが、噴出物の種別は出来ません。また、山頂部の膨張が始まって警報表示がなされてから、噴火時刻の予測が困難ですが、経験的には10分から数時間で爆発的噴火が発生しています。傾斜・伸縮以外の多項目観測データを加味した総合判定が必要になると考えます。特に、物質科学的データを取り込まないと、噴出物の種別、時刻予測は出来ないように思われます。

Fig. 21 には、火山性地震の観測結果と山頂の膨張・収縮を組み合わせた研究結果も表示されております¹⁸⁾。火道付近の火山性地震の住み分けと膨張・収縮からマグマの動きを関係づけています。すなわち、爆発的噴火の前後では隆起・膨張と沈降・収縮の変形があり、BL型地震の発生は沈降・収縮過程で発生しマグマの火口底への上昇・噴出が対応し、BH型地震の発生は隆起・膨張過程に発生しマグマの火道への貫入に対応しA型地震の発生は変形を伴わずマグマの貫入により岩石の破壊を起こしている現象であろうと考えられます。地震と変形の2項目の観測データの総合的解釈の例であります。

6.4 防災的研究

溶岩流シミュレーションを行うことは、電算機が導入されていない時期から計画されていました。思考錯誤していましたが、1983年三宅島噴火による溶岩流の発生と電算機の導入が契機となり、手法の確立²⁵⁾が出来ました。数値化地図の作成に始まり、流下プログラムの開発、特に、粘性係数と冷却効果の見積もりに

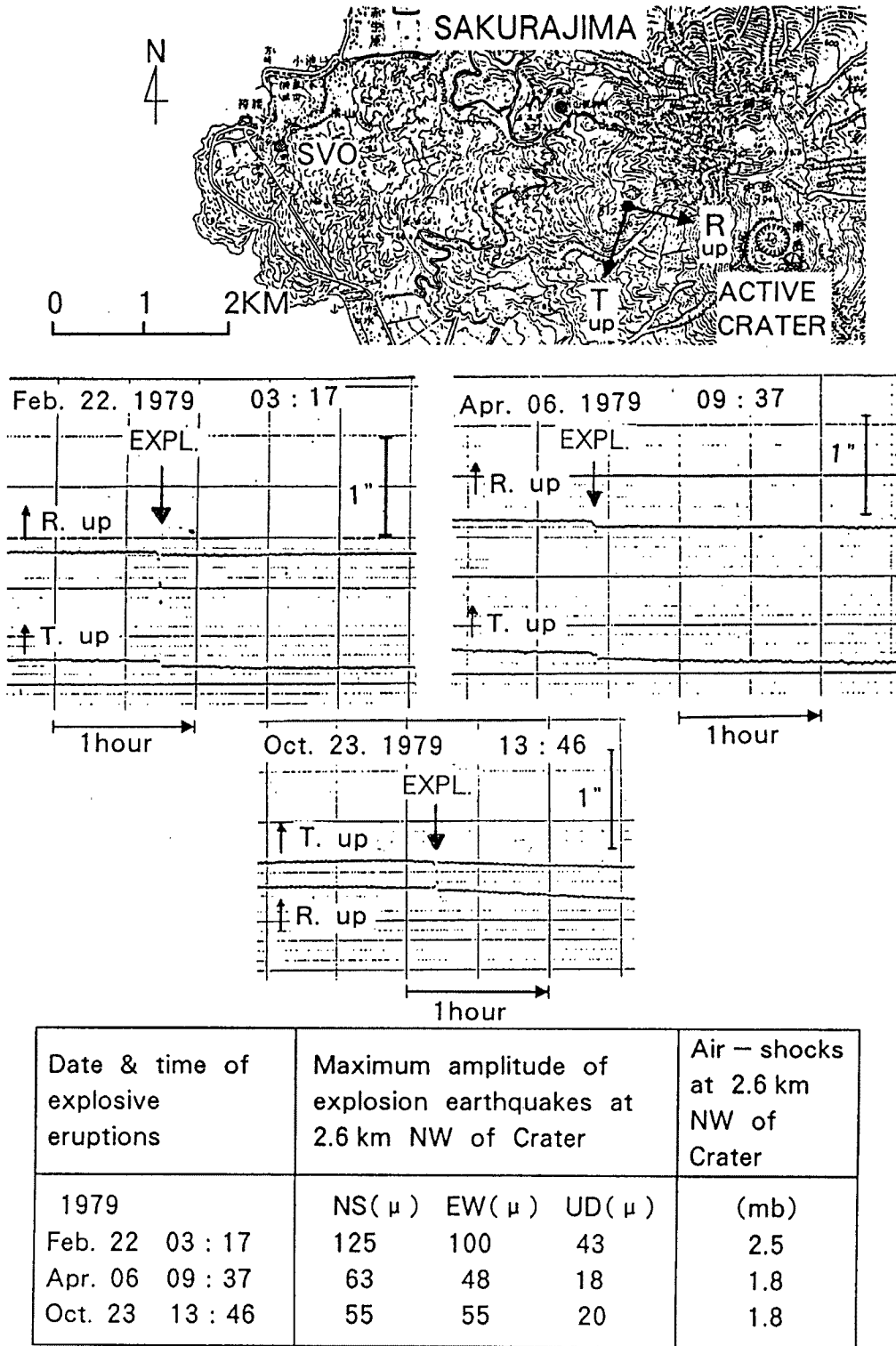


Fig. 19 Examples of record showing the inflation of summit area just before explosive eruption occurred by bi-axial tiltmeter based on the ground.

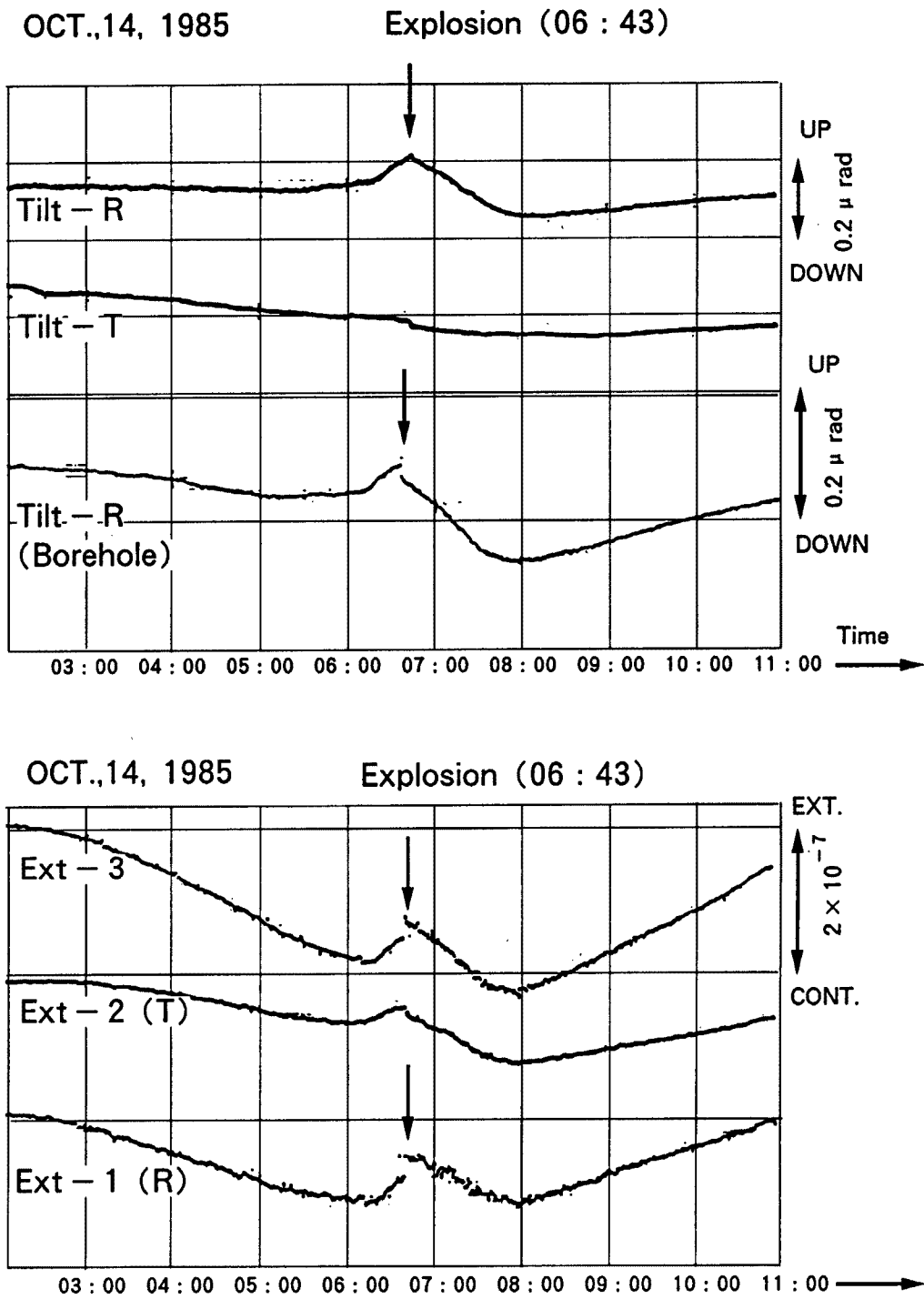


Fig. 20 Example of record showing the inflation of summit area just before explosive eruption observed by tiltmeters and extensometers installed in a tunnel with 200m depth

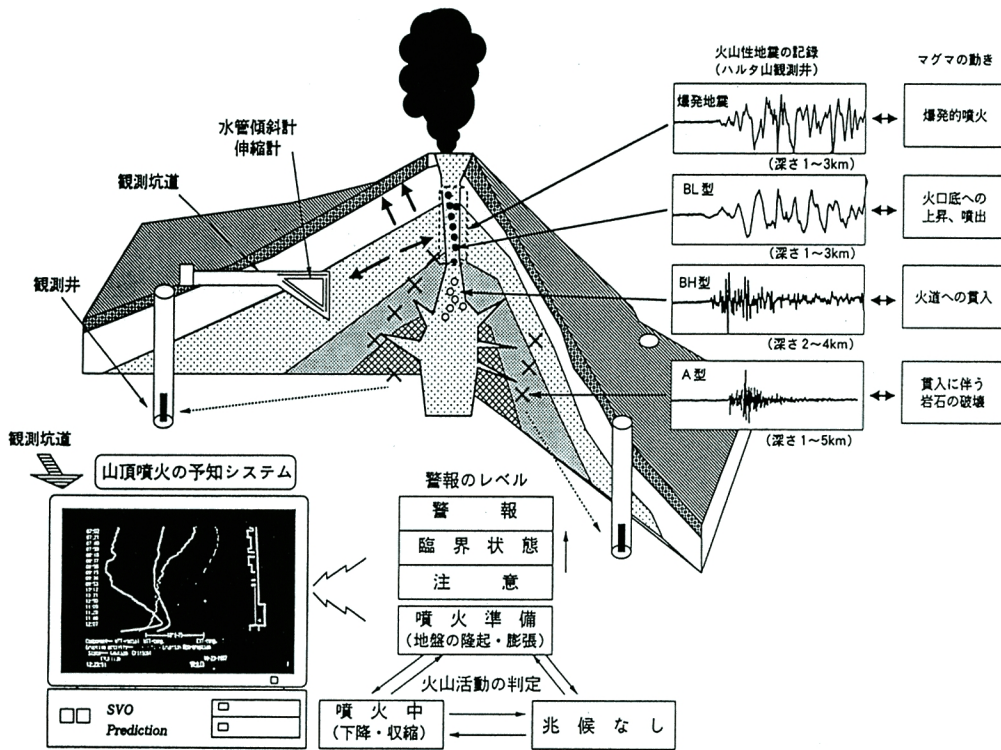


Fig. 21 Early warning system for summit explosive eruption and the occupied portion by various type of volcanic earthquakes generating along the conduit beneath the summit crater

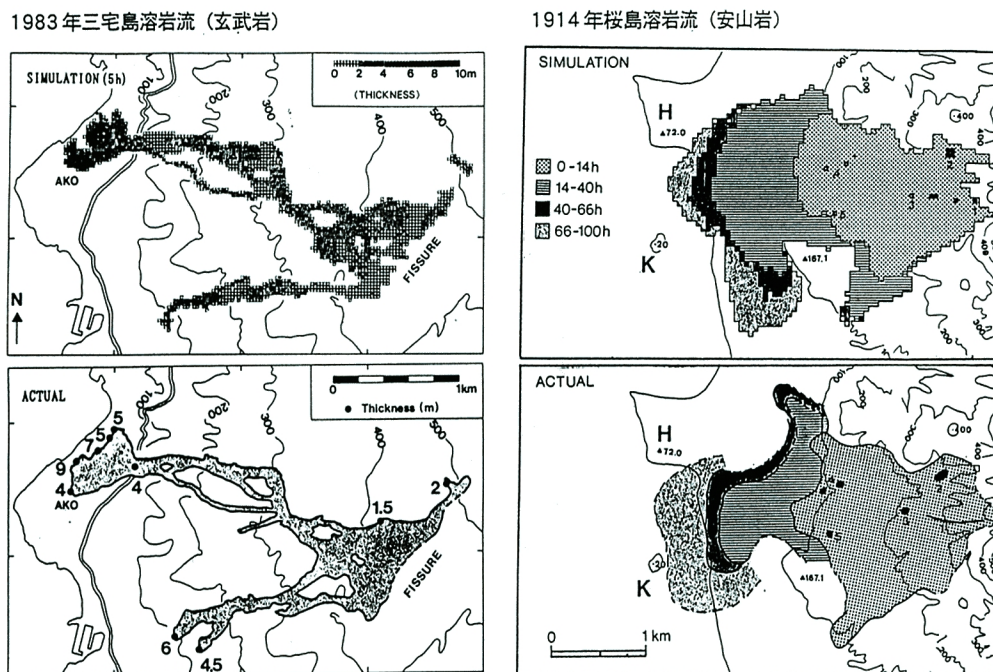


Fig. 22 Comparison of simulated results of lava flows with the actual one on 1914 Sakurajima eruption and 1983 Miyakejima eruption, respectively

Table 1. Summary of experimental automated-warning for summit explosive eruption at Sakurajima volcano.

Period	CAUTION				CRITICAL				WARNING							
	Total	Explo- sion	Eruption	Tremor No eruption	Rate	Total	Explo- sion	Eruption	Tremor No eruption	Rate	Total	Explo- sion	Eruption	Tremor No eruption	Rate	
Jul.-Dec., 1986	609	21	47	302	228	62%	6	5	1	100%	5	5		5	100%	
1991																
Jan.	55	3	15	15	22	60%										
Feb.	39	1	9	11	18	54%										
Mar.	64	15	12	18	18	71%										
Apr.	54	11	18	6	16	69%	3	1	1	100%	1	1		1	100%	
May	57	2	13	14	25	54%	2	1	1	100%	1	1		1	100%	
Jun.	101	16	30	23	27	72%	5	3	1	80%	1	1		1	100%	
Jul.	43	1	7	8	21	43%	5	5		100%	1	1		1	100%	
Aug.	60	3	8	25	16	69%	6	5	1	100%	2	2		2	100%	
Sep.	77	9	11	25	31	59%	1	1	1	100%						
Oct.	79	13	12	20	34	57%										
Nov.	83	11	14	44	14	83%										
Dec.	110	22	26	38	17	83%	6	2	1	100%	1	1		1	100%	
1992																
Jan.	136	26	50	32	19	85%	5	5								
Feb.	122	5	30	65	18	85%	3	2	1	100%	4	4		4	100%	
Mar.	94	1	30	23	36	60%	2	2	2	100%	1	1		1	100%	
Apr.	96	5	17	43	28	70%	3	1	1	100%	2	2		2	100%	
May	79	2	26	23	26	66%	2	2	1	100%	3	3		3	100%	
Jun.	77	1	21	22	27	62%	3	3	3	100%	1	1		1	100%	
Jul.	101	3	15	44	36	63%	2	2	2	100%	1	1		1	100%	
Aug.	63	55	16	24	15	73%	4	4	4	100%	4	4		4	75%	
Sep.	57	55	10	7	36	35%	1	1	1	100%	1	1		1	0%	
Oct.	80	76	11	30	5	61%	3	1	1	67%	1	1		1	100%	
Nov.	66	60	3	13	31	48%	3	2	1	100%	3	3		3	100%	
Dec.	83	80	5	13	36	68%	1	1	1	100%	2	2		2	100%	
1991/92	1786	171	446	584	587	67%	60	28	10	20	2	28	17	1	8	93%

困難がありました。粘性係数については先に述べたように、マクロ的計測値に妥当性があるようです。噴火口の位置と形態、マグマの単位噴出量、噴出継続時間を仮定として、計算結果として流路、流速、堆積厚み、到達時間、被覆範囲を求めるようにしました。1983年の三宅島玄武岩溶岩流と1914年桜島安山岩溶岩流シミュレーション結果と実際に流下して分布している状態とを比較して Fig. 22 に示しました。三宅島阿古集落移転計画立案時に、将来の噴火を想定した溶岩流シミュレーション結果が参考とされましたし、手法の確立は、後に、我が国での火山災害危険区域予測図作成の契機となりました。三宅島については、地形が単純であったために、ある地域に溶岩流が流入する可能性のある噴火口位置の集合すなわち地雷源を表示する hazard map も作成しました。桜島については山腹噴火の割れ目の方位を8つ想定して、溶岩流シミュレーションを行い、将来の山腹噴火の場合の防災作戦シートを作成しました。映像観測により噴石の飛跡や shock wave を解析し^{26),27)}、最大飛距離が射出角63°であること²⁸⁾などがわかり、hazard map 作成の基礎資料となりました。

噴火による火山灰雲が与える航空機災害は重要な問題であり、如何に早く噴火の発生を知って如何に早く飛行中の航空機に情報を伝えるかが災害防止策であります。shock wave を多点観測して、噴火の位置と規模を捕捉する PEGASAS 計画を提案しました²⁹⁾。

7. おわりに

以上、予知計画20年で行ってきたことを概略お話してきましたが、丁度、第4次5ヶ年計画の区切りに現役を去ることになりましたが、次の第5次計画の立案にも携ってきましたので、触れておきたいと思えます。第5次噴火予知計画では、活動的で特に重点的に観測研究を行うべき火山が13火山となり、従来の策定方針に加えて火山体構造把握を中心とした基礎的研究を全国共同研究として取組むことになっております。平成5年度補正予算で構築される施設と観測網は私にとって無縁となるものでありますが、要求段階での目論見をお話しておきます。施設としては「磁気遮蔽室」が出来ます。これは現在の地球磁場の影響を遮断して各種の測定が可能となります。火山では古地磁気を測定することにより過去の火山活動様式を年代決定とともに見てみようとするものです。また、「霧島火山帯 GPS 観測網」が出来ますが、これはトカラ列島の火山を含む霧島火山帯の火山フロントの、また、薩摩半島と大隅半島に挟まれる地溝帯の動態を検証しようとするものであります。さらに、始良カルデラを含む「桜島 GPS 観測網」は、先に話してきたような火山周辺の広域地殻変動の連続観測により、地殻変動データをリアルタイムで把握して、桜島の山腹噴火予知の実用化を目指すものです。置土産になりますが、成果を期待したいものです。

最後に、37年を振り返り自然現象の予測が如何に難しいものかを知り得たと言うのが、正直な実感です。象徴的な言方をしますと、昭和30年以来、本年1月末で6,605回の爆発的噴火を経験して、お話してきたような山頂噴火予知についての研究結果が得られました。突発的自然現象の山頂噴火を数多く経験した数少ない火山研究者であり、また、火山研究者として、恵まれそして幸運であったと自覚していますが、ここまで分かったとも言えるし、ここまでしか分からなかったともいえるのではないかと思います。桜島の火山活動を対象とした継承の火山学の中継者として、どれだけ評価してもらえるか甚だ心許ない印象です。

理学の研究者として、嬉しかったことは「すぐ役にたつた研究」として、溶岩流シミュレーションが三宅島阿古集落復興計画に役立ち、火山災害予測図作成の気運となったこと、また、山頂噴火予知システムのデータが気象庁・建設省に伝送されて実務に役立ち、まもなく鹿児島空港へも伝送されて火山噴火による航空機災害の防止に役立つ日が近いことでもあります。

一方、爆発的山頂噴火予知の研究結果を通して、地球物理学的噴火予知の限界を感じ、多項目観測とその中に物質科学を取入れていく必要を痛感しました。これが、今後の噴火予知研究の進むべき方向であろうと確信しています。

参考文献

- 1) 「日本測地学研究の変遷と動向」研究委員会：日本の測地学の変遷と動向，1988，笹気出版印刷 K.K.
- 2) Oomori, F. : The Sakura-Jima Eruption and Earthquakes. I~VI, Bull. Imp. Earthq. Invest. Comm., Vol. 8, No. 1~6, 1914~1922, pp.1-525.
- 3) Koto, B. : The great eruption of Sakura-jima in 1914, J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, Vol. 38, 1916, pp.1-237.
- 4) 本間不二男：櫻島噴火の豫想，地球，第24巻，第5号，1935，pp.36-45.
- 5) Sassa, K. : Geophysical Studies on the Volcano Aso, Part 1 and Part 2, Mem. Fac. Science, Kyoto Univ. Series A, Vol. 18, 1935, pp.255-293 and Vol. 19, 1936, pp.11-62.
- 6) 佐々憲三：地震予知に関する2, 3の問題，防災研創立5周年記念論文集，1956，pp.3-7.
- 7) Minakami, T. : Seismological studies volcano Asama Part 1, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 48, 1970, pp.235-301.
- 8) Mogi, K. : Relation between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 36, 1958, pp.99-134.
- 9) Yoshikawa, K. : On the Crustal Movement Accompanying with the Recent Activity of the Volcano Sakurajima, Part 1, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., No. 48, 1961, pp.1-15.
- 10) 永田 武・佐久間修三・福島 直：櫻島新噴出熔岩流について，地震研究所彙報，第24巻，1946，pp.161-169.
- 11) Minakami, T. : On the temperature and viscosity of the fresh lava extruded in the 1951 Oo-shima eruption, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, Vol. 29, 1951, pp.487-498.
- 12) Kamo, K. : A DIALOGUE WITH SAKURAJIMA VOLCANO, Proc. Kagoshima Int. Conf. Volcanoes, 1988, pp.3-11.
- 13) Iguchi, M. : A Vertical Expansion Source Model for the Mechanisms of Earthquakes Originated in the Magma Conduit of an Andestic Volcano : Sakurajima, Japan, Bull. Volc. Soc. Jap., Vol. 39, 1994, pp.49-67.
- 14) Ishihara, K. : Geophysics, A Guide Book for Sakurajima Volcano, 1988, pp.29-92.
- 15) 加茂幸介：桜島における噴火の前駆現象と予知，火山，第2集，第23巻，1978，pp.53-64.
- 16) 加茂幸介・古澤 保・赤松純平：桜島の火山性微動の性質について，火山，第2集，第22巻，1977，pp.41-58.
- 17) 加茂幸介・西 潔・古澤 保・赤松純平・菊池茂智・小野博尉・須藤靖明・高木章雄：始良カルデラ周辺の地震活動と地震波の異常伝搬域の検出について，第2回桜島火山の集中総合観測，1977，pp.13-20.
- 18) 井口正人・石原和弘・西 潔・須藤靖明：九州地域の沈み込みスラブ付近の力学的状態と構造に関する研究—桜島・開聞岳付近の稍深発地震の震源分布と発震機構について—，地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集，p.55.
- 19) 巽 好幸：沈み込み帯マグマの成因，火山，第2集，第30巻，特別号，1986，pp.S153-S172.
- 20) 桜島火山観測所：桜島火山の地盤変動（Ⅲ），火山噴火予知連絡会会報，第36号，1986，pp.11-14.
- 21) 江頭庸夫：桜島火山周辺における地盤変動—1985年~1988年—，第7回桜島火山の集中総合観測，1989，pp.13-19.
- 22) 加茂幸介・石原和弘：地盤変動からみた桜島の火山活動，桜島地域学術調査協議会調査報告，1980，pp.19-28.
- 23) Kamo, K. and K. Ishihara : A Preliminary Experiment on Automated Judgement of the Stages of

- Eruptive Activity Using Tiltmeter Records at Sakurajima, Japan, IAVCEI Proceedings Volcanology 1, Volcanic Hazards, ed. J. H. Latter, Springer-Verlag, 1989, pp.585-598.
- 24) Ishihara, K. : Pressure source and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano, Sakurajima volcano, Japan, Magma Transport and Storage, ed. M. P. Ryan, John Wiley & Sons, 1990, pp.335-356.
- 25) Ishihara, K., M. Iguchi and K. Kamo : Numerical Simulation of Lava Flows on Some Volcanoes in Japan, IAVCEI Proceedings Volcanology 2, Lava Flows and Domes, ed. J. H. Fink, Springer-Verlag, 1990, pp.174-207.
- 26) 井口正人・石原和弘・加茂幸介：火山弾の飛跡の解析—放出速度と爆発圧力について—, 京大防災研年報, 第26号B-1, 1983, pp.9-21.
- 27) Tahira M., M. Nomura, Y. Sawada and K. Kamo : Infrasonic and acoustic-gravity waves generated by Mount Pinatubo eruption of June 15, 1991, USGS Professional Paper, 1993 (in Press).
- 28) 井口正人・加茂幸介：火山爆発により放出される火山岩・レキの到達距離, 京大防災研年報, 第27号B-1, 1984, pp.15-27.
- 29) Kamo, K., K. Ishihara and M. Tahira : Infrasonic and seismic detection of explosive eruptions at Sakurajima volcano, Japan and the PEGASAS-VE early-warning system, Proc., 1st Int. Symp. on Volcanic Ash and Aviation Safety, U. S. Geological Survey Bulletin 2047, 1994, pp.213-219.

PROJECT ON THE VOLCANIC ERUPTION PREDICTION IN THE PERIOD FROM 1974 TO 1993

By *Kosuke* KAMO

Synopsis

The National Project for the Volcanic Eruptions Prediction in Japan has started in 1974. The 1st five year project was achieved in 1974-1978, the 2nd in 1979-1983, the 3rd in 1984-1988 and the 4th in 1989-1993. The outline of individual program based on the National Project at Sakurajima volcano is described in this paper during last twenty years.

Totally, a three-dimensional network in and around the volcano edifice by 4 sites on ground based, 4 bore holes with 100m in depth and 3 bore holes with 300m in depth, a wide area network covering three calderas of Kakuto, Aira and Ata by 8 sites of shallow pit with 20m in depth, an array with short span by 3 bore holes with 100m in depth, 3 stations for soil gas, 5 sea-tidal stations around the volcano island, 14 seismic stations covering Kirishima Volcanic Belt-zone using PC-communication system and a precise monitoring site for ground deformation of the summit area using water-tube tiltmeters and extensometers have been established. Our monitoring items by above mentioned networks are earthquake, tilt, extension and contraction, sea level, shock wave, telluric magnetism, ground temperature, water level in bore hole, volcanic gas and hydro-acoustics.

Also, the outline of researches concerning the prediction of volcanic eruptions and reducing volcanic hazards are introduced. For example, the automated warning system for the summit explosive eruption, the lava flow simulation, the generating procedure of volcanic earthquakes along the conduit beneath the summit crater and a model of Sakurajima volcano composed by the results obtained such researches as above mentioned.