

電離圏擾乱から見る 火山爆発スケールの推測

平成 27 年度卒業論文
北海道大学理学部地球惑星科学科 4 年
宇宙測地学研究室
学生番号 02122070

藤田進悟

指導教官名 日置幸介

概要

GPS を代表とする GNSS は日本国内約 1200 点で、主に地殻変動を観測しているが、GNSS 衛星から送信される位置、時刻情報を持つマイクロ波を利用してそのマイクロ波の経路上の電子数(TEC)を計算することができる。

火山が大規模な爆発を伴う噴火をすると、噴火によって発生した比較的低周波の音波が F 層に到達し、F 層の電子密度に濃淡を発生させる。すると濃淡が発生している波面を浅い角度で貫くマイクロ波について TEC を計算した際に電子密度の濃淡が擾乱として観測できる。このことを利用して本研究では、現在火山噴火のスケールとして広く用いられている噴出量を観測量として表す VEI とは異なる、TEC の擾乱を観測量として火山爆発の規模を表す”F スケール”を提案する。F スケールは、既存の GPS 観測網とそのデータを解析する計算機があれば簡単に求めることができ、単純に火山の爆発の規模をスケール化できるというメリットがある。しかし一方で、噴火した火山付近に電子基準点等の GPS 観測網が存在して、それらの RINEX データが公開されていなければそもそも計算することができないデメリットがある。また、噴火に伴う爆発がかなり大規模でなければ電離圏での擾乱が観測できないため、本研究において日本国内で擾乱が観測できた火山爆発も 5 例にとどまっている。

本研究では、擾乱の観測できた 2004 年 9 月の浅間山の噴火、2009 年 10 月 3 日の桜島の噴火、2011 年 1 月 31 日と 2011 年 2 月 11 日の新燃岳の噴火、2015 年 5 月の口永良部島の噴火の 5 例について解析を行い観測された擾乱が火山起源の伝搬される擾乱であることを確認し、F スケールを用いて爆発の規模を表した。

また、比較的低周波数の高い音波は火山の近傍において空震計で観測されていることから、その値と F スケールの相関を調べた。距離で規格化した空震計の値と F スケールの相関係数は 0.526 と比較的高い値が得られた。そして F スケールはある程度爆発の大きさを調和的にスケール化できていると推測できた。

目次

概要.....	2
1. はじめに.....	4
1-1 GPS.....	4
1-2 TEC.....	5
1-2-1 TEC を計算する.....	6
1-2-2 STEC と VTEC.....	7
1-3 既存の噴火スケールと新しいスケールの意義.....	8
1-3-1 VEI.....	8
1-3-2 F スケール.....	9
2. 観測の原理と方法.....	11
2-1 擾乱が発生する原理.....	11
2-2 電離圏擾乱から火山爆発をみた研究例.....	12
2-3 擾乱の伝搬指向性.....	13
2-4 観測手順.....	15
3. 観測結果.....	16
3-1 擾乱を観測した火山.....	16
3-2 観測結果.....	17
3-2-1 2015年5月29日の口永良部島の噴火.....	17
3-2-2 2009年10月3日の桜島の噴火.....	24
3-2-3 2011年1月31日の新燃岳の噴火.....	27
3-2-4 2011年2月11日の新燃岳の噴火.....	32
3-3 地上観測との相関.....	36
4. まとめ.....	38
4.1 F スケールの利点と欠点.....	38
4.2 将来の展望.....	38
5. 謝辞.....	39

1.はじめに

1-1GPS

GPS (全地球測位システム Global Positioning System)は全地球航法衛星システム (GNSS: Global Navigation Satellite System)の一つであり、アメリカ合衆国が運用している。図 1-1 のような電子基準点が日本国内にはたくさん設置されている。これの先端部には GNSS 衛星が発信する電波信号を受信するアンテナが取り付けられており、内部には GNSS 受信機と受信データを転送する通信機器などが格納されている。実際には GPS 以外にロシアの運用している GLONASS や日本が運用している測位衛星である QZSS のデータも電子基準点の受信機で取得されているが、本研究では GPS のデータのみを解析したため、以後簡単のため GPS で GNSS を代表させることにする。

GPS は高度およそ 2 万 km を周回している GPS 衛星と電子基準点のような受信機からなっており、およそ 30 個の衛星は 24 時間連続して位置と時刻情報をのせたマイクロ波を 30 秒周期で送信している。受信機の位置を求めるためには、受信されたマイクロ波から衛星と受信機の距離を計算できるため、3 つ以上の衛星からのデータを利用すると位置が決まるはずであるが、実際には受信機の時刻に誤差を補正するため、4 つ以上の衛星のデータが必要になる。



図 1-1 実際に設置されている電子基準点。これは小樽市若松町平磯公園にあり、基準点番号は 940013。このような基準点が日本国内に約 1200 箇所あり、主に地殻変動を監視している。

1-2 TEC

電離圏全電子数 TEC (Total Electron Content)は、1-1 で述べた GPS 衛星のマイクロ波の経路上の底面積 $1/2$ の円柱中に存在する電子数であり、1 TECU (TEC Unit)= 10^{16} 個を単位としている。

ある地点の TEC は日周変化しており、日本のような中緯度地帯では昼間はおよそ十から数十 TECU、夜間は数 TECU ほどである。電子は地上 80 km 程度から 500 km 以上の上空まで広い範囲に存在しているが、本研究では計算の都合上すべての電子が高度 300 km の薄い層に凝縮に存在していると仮定して様々な計算を行った。GPS 衛星と地上局を結ぶ線がその面と交わる点を地上に投影したものを SIP (Sub Ionospheric Point)という。

1-2-1 TEC を計算する

GPS 衛星から送られてくるデータから TEC を求めるためには、異なる 2 周波の搬送波位相データを用いて計算する必要がある。GPS が 2 周波の搬送波(f_1 と f_2)を送信している理由は、電離圏遅延と呼ばれるマイクロ波がプラズマ中を伝播する過程で周波数の 2 乗に反比例した遅延を受けるため、2 周波の位相を比較すれば電離圏遅延が除去できるからである。GPS のそれらの周波数は、 $f_1 \sim 1.5\text{GHz}$ 、 $f_2 \sim 1.2\text{GHz}$ である。

電離大気中のマイクロ波の屈折率を n とすると、 n は

$$n = 1 + \frac{40.308 N}{f^2} \quad (1)$$

で表すことができる。

ここで、 ω は搬送波の角振動数、 e は電子電荷で $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ 、 m_e は電子質量で $m_e = 9.109 \times 10^{-31}\text{kg}$ 、 ϵ_0 は真空の誘電率で $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\text{F/m}$ 、 N は単位体積当たりの電子数を表す。

f を搬送波の振動数とすると $\omega = 2\pi f$ であるから、上の値を代入すると n は f と N を用いて次のように表せる。

$$n = 1 + 40.308 \frac{N}{f^2} \quad (2)$$

また、TEC はその定義から sat を衛星の位置、rec を受信機の位置、 s をマイクロ波の経路とすると N を用いて

$$\text{TEC} = \int_{\text{sat}}^{\text{rec}} N ds \quad (3)$$

と表せるから、(2)と(3)から屈折により位相変化 δ を考えると、 c を光速として、

$$\delta = 40.308 \frac{N}{f^2} \text{TEC} \quad (4)$$

で表せる。(4)で得られた距離変化を加味すると搬送波の位相 Φ は

$$\Phi = f \left[\frac{2\pi}{c} \rho + N + 40.308 \frac{N}{f^2} \text{TEC} \right] \quad (5)$$

で求められる。ただし N は整数、 ρ は受信機と衛星の間の距離である。

この Φ に波長をかけて長さ(m)の単位に変換させたものを L として、

$$L = \frac{c}{f} \Phi \quad (6)$$

とし、 σ_1 と σ_2 について連立方程式を解くと、TEC は

$$\text{TEC} = 140.308 \sigma_1 \sigma_2 (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)^{-1/4} \quad (7)$$

と計算できる。

式(1)から(5)は宇宙測地学 講義ノート(古屋正人)より引用した。

1-2-2 STEC と VTEC

1-2-1 で TEC を計算したが、式(3)からわかるように、TEC はマイクロ波の視線に大きく依存する。

GPS 衛星からのマイクロ波が高度 300km の薄い電離層を斜めに貫いたとして、その時の TEC を STEC (斜め TEC, Slant TEC)と呼ぶ。電離層への入射角を θ とすると、マイクロ波が電離層を鉛直方向に貫いたと仮定した場合の TEC である VTEC (鉛直 TEC, Vertical TEC)は、STEC に $\cos \theta$ をかけることによって得られる。VTEC の全球分布の例を図 1-2 に示す。

STEC はマイクロ波の貫く角度によって大きく変化してしまうため、衛星が移動することによって見かけ上の変化をする。一方 VTEC は電離層を鉛直方向に貫いているので、SIP の上空における電子数そのものを表している。この STEC と VTEC から本研究では新しい火山爆発スケール”F スケール”を推測する。

Vertical TEC

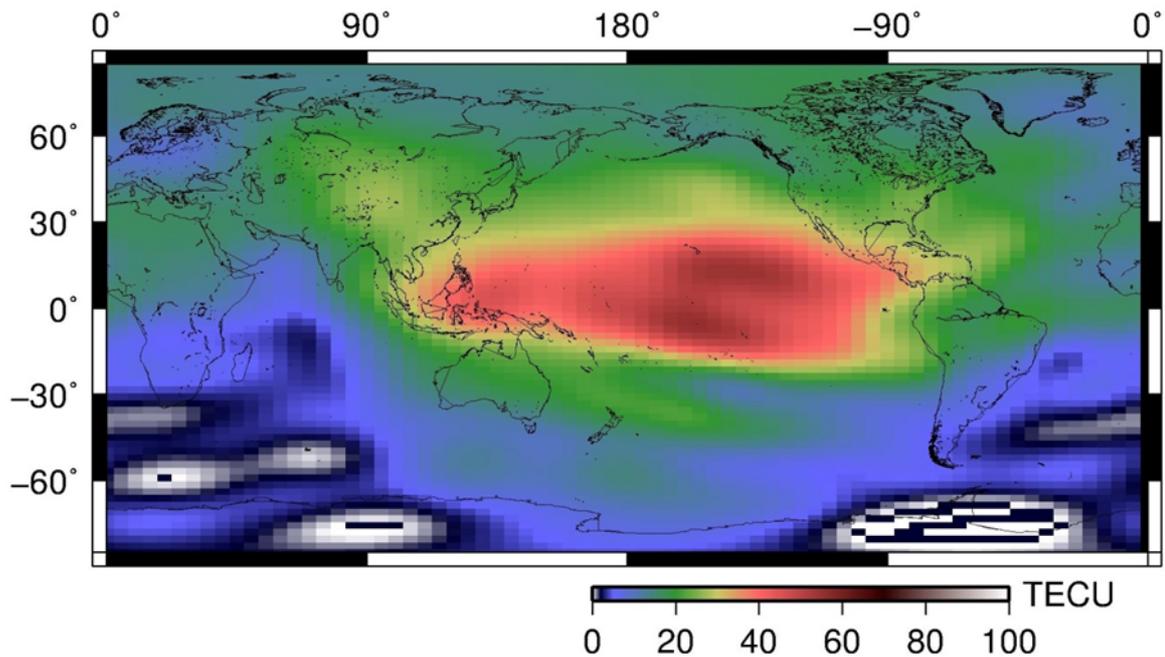


図 1-2 2015 年 5 月 29 日 1:10(UT)における VTEC の全球分布の例を表したもの。ベルン大学の解析センターからダウンロードした全球電離圏モデルを用いて描いた。

1-3 既存の噴火スケールと新しいスケールの意義

ここでは広く用いられている噴火の規模を示すスケール VEI (Volcanic Explosivity Index)の特徴などに触れ、本研究で推測する F スケールの意義等について述べる。

1-3-1 VEI

現在広く用いられている、火山噴火の大きさを表すスケールとしては VEI がある。VEI は噴出物の量から火山噴火の規模を定義するものである。このスケールを利用するメリットとしては、図 1-3-1 で示した様々な噴火様式のすべてについて適用することが可能であり、噴火機構のよくわからない有史以前の噴火についても地質学的な調査に基づいてスケールを与えることができるという点が挙げられる。一方で、基準が噴出物の量であるので、火山爆発のエネルギーの指標とはなりえない。

噴火のタイプ

噴火で立ち上る噴煙柱のエネルギー源は、膨張した水蒸気以外にもある。噴き出したマグマが周囲の大気に熱を与え、軽くなった大気が噴煙柱に取り込まれてさらに噴煙柱に浮力を与え、大きなエネルギーを生み出す。また、マグマが火道を上昇するときに、中のガスが地中に逃げることもあり、その場合は穏やかな噴火になる。



図 1-3-1 噴火の様々な様式(<http://ameblo.jp/hiroy1208/entry-11999721286.html> より引用)。本研究では主にブルカノ式噴火の爆発の規模について論じる。

1-3-2 F スケール

1-3-1 では既存のスケールとして VEI について紹介した。ここでは、今回の研究で新たに定義する F スケールについて説明する。なお F は著者の頭文字と、電離圏の F 領域の両方を表している。

F スケールは火山爆発のエネルギー比べるために TEC の擾乱を観測量としている。具体的には、火山が爆発したことで発生した音波が上方に伝播し、そこで生じた電離圏の電子密度の濃淡を地上から GPS 受信機で観測し、STEC に見られた変化の振幅をその指標とする。しかし、1-2 でも述べたように TEC の絶対値は場所や時刻に大きく依存しているため、TEC の大きいときに生じた擾乱と小さなきに生じた擾乱を同列に論じることはできない。そこで噴火時の VTEC から、その地点の上空にある電子の総数を求め、STEC 変化分を VTEC で正規化することによってスケールを定義することを提案する。

F スケールのスケール値 F を具体的に式(0)で定義する。

$$F = \Delta \text{TECU} \times 100 \quad (0)$$

ここで ΔTECU は観測された STEC 変化の peak-to-peak の振幅であり、VTEC は擾乱開始時の VTEC の絶対値である。

このスケールを利用するメリットとしては、後程述べる手順を踏むことによって、既存の GPS 観測網とそのデータを解析する計算機があれば簡単に求めることができる点が挙げられる。またこのスケールは、噴出物の大小に依らず単純に火山の爆発の規模の指標を与えられるという点も大きなメリットである。一方デメリットとしては、GPS の生データ(多くの場合 RINEX(Receiver Independent Exchange format)と呼ばれる形式で保存されている)を利用する都合上、その火山付近に電子基準点等の GPS 網が存在して、それらの RINEX データが公開されていなければそもそも計算することができない点が挙げられる。また、噴火に伴う爆発が比較的小規模で電離圏での擾乱が観測できない場合には使えないという短所もある。特に後者については、かなり大きな爆発でなければ擾乱が観測できないため、本研究において日本国内で擾乱が観測できた火山爆発も 5 例にとどまっている。

2.観測の原理と方法

2-1 擾乱が発生する原理

火山が噴火、その中でも爆発的なブルカノ式噴火が起こることで火口上空に音波が発生する。比較的周波数の高い音波は火山の近傍において空震として観測される。高い周波数の音波は大気の粘性による大きな減衰を受けるため、周波数の低い音波だけがそれほど減衰せずに超高層大気へと到達する。この電離圏に到達した音波は、電子の濃淡を発生させる。衛星と受信機とを結ぶ視線が電子の濃淡の波面を浅い角度で貫くと、その衛星で観測された TEC に変動が観測される。実際に観測された擾乱例を図 2-1 に示す。

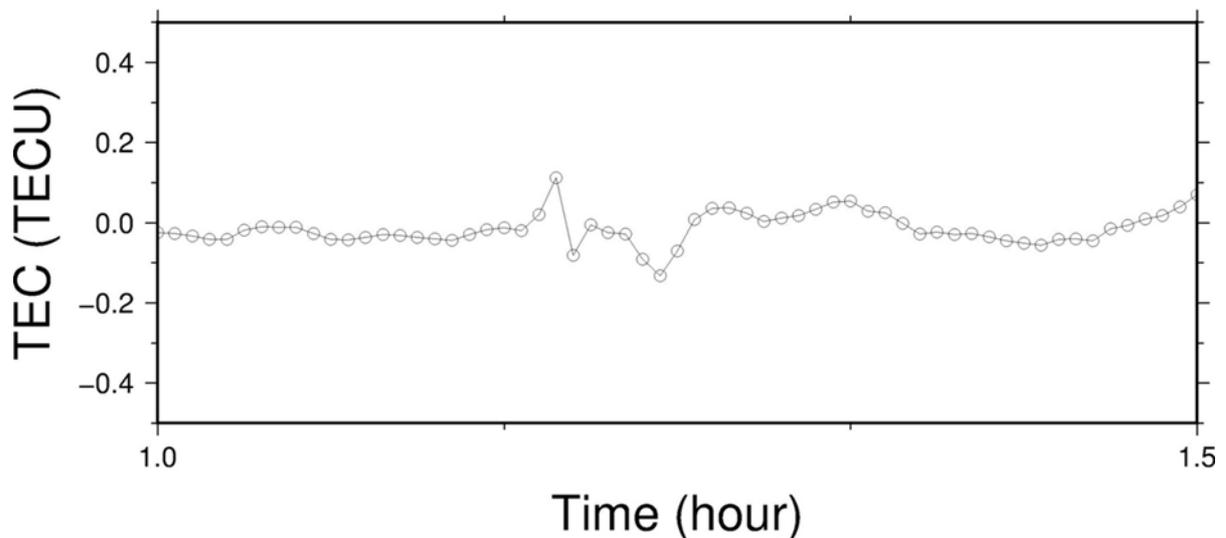


図 2-1 2015 年 5 月 29 日の口永良部島の噴火によって発生した電離圏擾乱の例を示したもので、これは電子基準点名瀬から GPS14 番衛星を見て観測されたものである。

2-2 電離圏擾乱から火山爆発をみた研究例

Heki (2006)は 2004 年の浅間山の爆発的噴火に引き続いて生じた電離圏擾乱を、電子基準点から成る国土地理院の連続観測網 GEONET (GNSS Earth Observation Network System)を用いて観測し、TEC 変化の振幅をエネルギー既知の爆発によって生じた擾乱の振幅と比較することにより、火山爆発のエネルギーを推定した。その後、Dautermann et al. (2009)は、2003 年の小アンチル列島にある Montserrat 島火山の爆発的噴火による電離圏擾乱から火山爆発エネルギーを推定している。

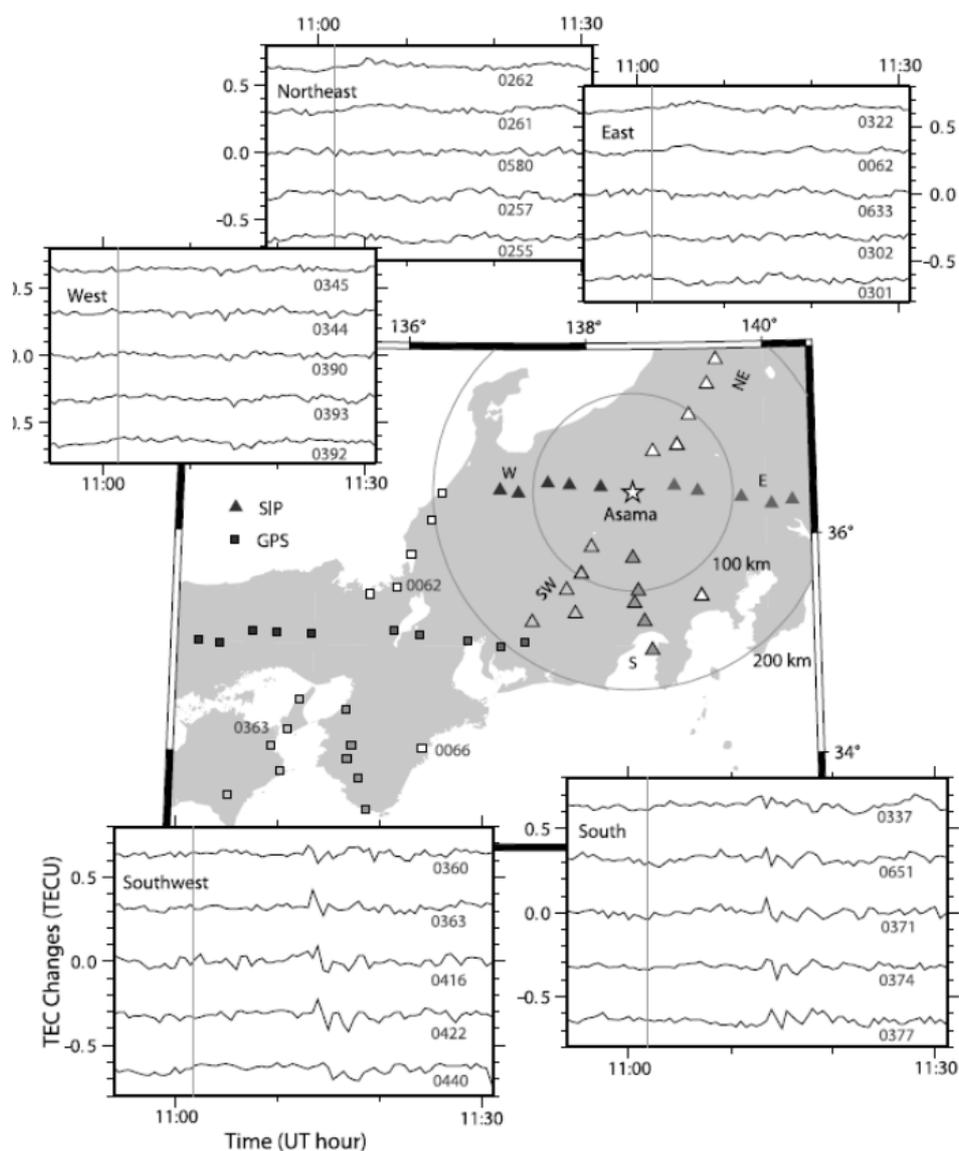


図 2-2 2004 年 9 月の浅間山噴火によって発生した音波が電離圏の電子密度に濃淡を発生させ、それが南および南西方向に伝播していることが観測された(Heki 2006)。

2-3 電離圏擾乱の伝搬指向性

音波が電離圏に到達することによる電離圏擾乱は、しばしば特定の方位のみで観測される。すなわち電離圏擾乱の伝搬は指向性を持っている。このことを Rolland et al. (2013) で展開されている議論を例に挙げて説明する。

Rolland et al. (2013)は、2011年にトルコ南東部で発生した $M_w7.1$ の Van 地震の際に発生した電離圏擾乱から、電離圏の擾乱の伝搬方位は断層の向きではなく地球磁場によって支配されていることを述べている。電離圏中の音波は中性分子を介して伝搬していくが、質量の少ない荷電粒子である電子は磁場の方向にしか振動できない。図 2-3-1 は震源を含む南北方向の鉛直面上における電離圏擾乱の程度(TEC の変化量)を示している。北半球においては地磁気が北向きかつ下向きの仰角を持っているため、震源の北側における音波の振動方向と磁場が直交してしまう。そのため北側では電子が振動できず、電子密度の擾乱も発生しない。したがって音波の振動方向と磁場が平行となる震源の南側でのみ電子密度の擾乱が見られることとなる。

図 2-3-2 は、水平面内での TEC 変化量の方位依存性を示したものである。地磁気がある場合とない場合を比較しており、磁場の有無によって擾乱の伝播の程度がどれだけ変化するかを示している。地磁気がない場合は擾乱の伝播は等方的であるが、地磁気がある場合は北側の擾乱が大きく減衰しており、大きな擾乱は南側でのみ見られる。ただし北側では擾乱が全く見られないわけではなく、小さな負の擾乱が見られることが指摘されている。詳しくは 3-2-1 で後述するが、本研究でも噴火した火山の北側において小さな負の変動のみを示す擾乱が確認できた。

Rolland et al. (2013)で述べられているのは地震時地殻変動に伴って発生した音波による電離圏擾乱であるが、これはブルカノ式の火山爆発によって発生した電離圏擾乱についても同じような指向性が生じることが予想される。そのため、噴火した火山の北側における STEC 変化は、図 2-3-2 d)の真偽および伝搬指向性を確認するために、2015年口永良部島の噴火の事例で解析したが、ほかの噴火では火山北側における電離圏擾乱は調べていない。

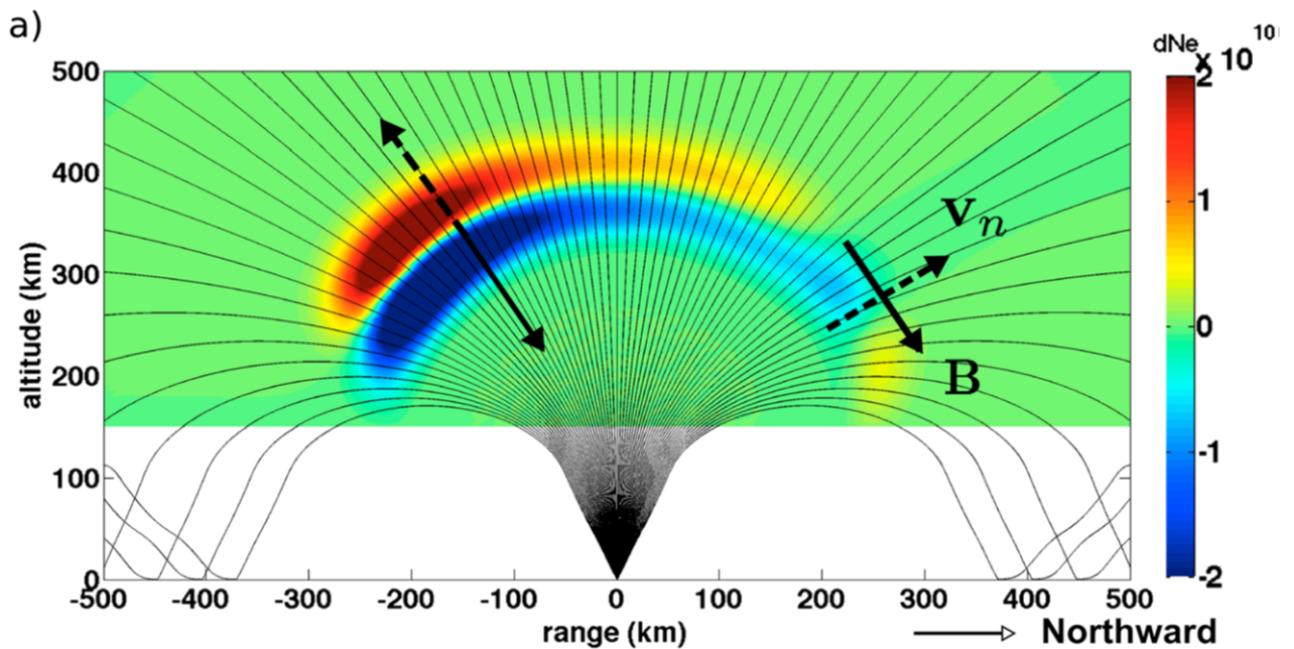


図 2-3-1 トルコ南東部で発生した Van 地震の、地震発生 13 分後における電離圏擾乱を計算したもの(Rolland et al. 2013)。南北方向の鉛直面において、発生した音波を追跡(グレーの実線)し、それぞれの点における電子密度の変化の計算結果を色で示しており、正の変化は赤で、負の変化は青で表されている。B は地磁気ベクトルを、 \vec{v}_n は音波の振動に伴う電子の振動方向を表す。

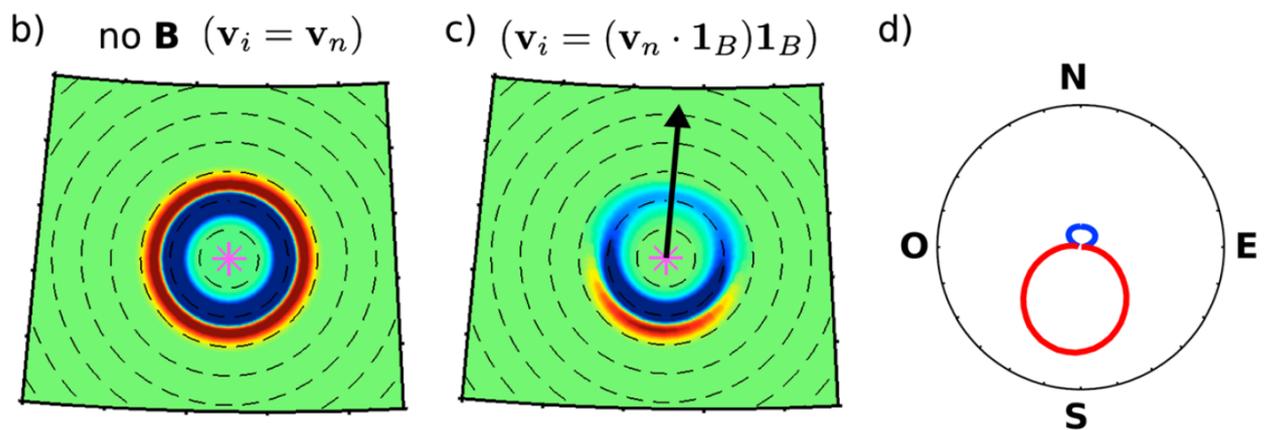


図 2-3-2 図 2-3-1 と同じ計算結果を高度 280km の水平面における電子密度の変化として表したもの(Rolland et al. 2013)。b)は地磁気を考慮しない場合、c)は地磁気(黒矢印の方向)を考慮した場合を示す。d)は高度 280km、震央距離 200km の点において伝播の強さを原点からの距離で表したもので、南向きの指向性が顕著である。

2-4 擾乱を観測する手順

まずは、比較的大規模なブルカノ式火山爆発が起こった事例を選び、電離圏擾乱が発生している可能性が高い電子基準点について、国土地理院のホームページ (terras.gsi.go.jp)より RINEX 形式の生データファイルをダウンロードによって入手する。その後、GPS 衛星の軌道情報から、各衛星が噴火前後にどのあたりを飛んでいるか SIP の軌跡を地図上にプロットし、擾乱が何番の衛星で見えるかをあらかじめ推測しておく。

次に 1-2-1 の手順を踏み、RINEX ファイルから STEC を計算する。ここでは北海道大学宇宙測地学研究室から一般公開されている FORTRAN プログラム `rdrnx.f` を用いた (<http://www.epi.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>)。STEC そのままでは、衛星の移動に伴う U 字型の見かけ上の変化や、太陽の天頂角の日周変化に伴うゆっくりした変化が大きく見えており、火山爆発に伴う弱い TEC 変動の信号が見えにくい。そのため、噴火前後の適当な時間窓の中の時系列データを時間の多項式で近似し、そこからの残差を取り出すことによって実質的にハイパスフィルターを施した。時間窓は 2 時間を取り、多項式の次数は 7 次として近似した。

このようにしてハイパスフィルターを施した STEC をプロットし、幾何学的な位置関係から擾乱が見えていると推測される衛星で、噴火後約 10~15 分に擾乱が見えているか探す。この時間の遅れは音波が電離層の F 領域まで伝搬する時間に相当する。次に、擾乱が見られた衛星で STEC 変化の **peak to peak** 振幅を読み取り、それを噴火における擾乱の振幅とする。また、同時に近傍にある電子基準点についても同様の計算を行い、実際に擾乱が火山から放射状に伝播していることを確認する。

最後に、STEC で見た擾乱の振幅を正規化するために、その時刻における火山上空の電離圏の VTEC の値が必要となる。本研究においては、ベルン大学の ftp サイト (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub>)から、全球電離圏マップ(GIM, Global Ionospheric Map)をダウンロードしてそこから火山噴火の時刻における火山上空の VTEC 値を計算した。

3.観測結果

3-1 擾乱を観測した火山

今回ブルカノ式の爆発的な火山噴火による電離圏擾乱が見られた例として鹿児島県の桜島の噴火、鹿児島県と宮崎県の県境に位置する霧島新燃岳の2回の噴火、屋久島の西に位置する口永良部島の噴火の計4例の観測結果を紹介する。図3-1にそれらの火山と Heki (2006)で論じられていた浅間山の位置を示す。図3-2には本研究で使用した電子基準点の位置を示す。

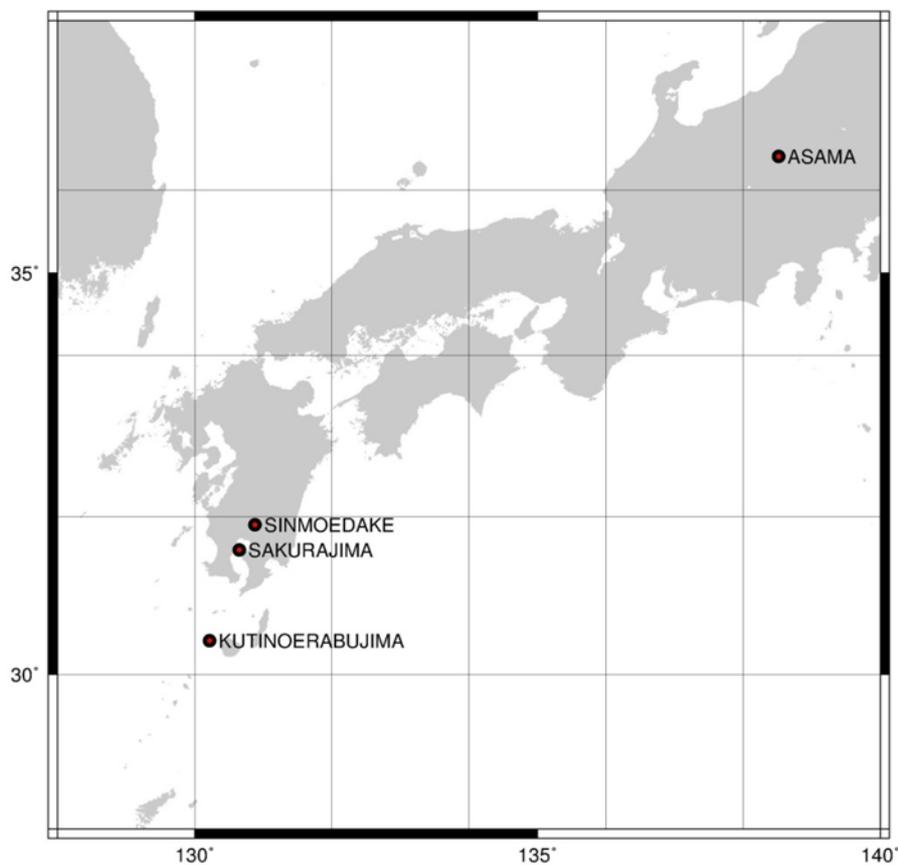


図 3-1 本研究において噴火に伴う電離圏擾乱を観測した火山。実際に解析を行ったのは桜島、新燃岳、口永良部島であり、浅間山は Heki (2006)で論じられている STEC の振幅を引用した。

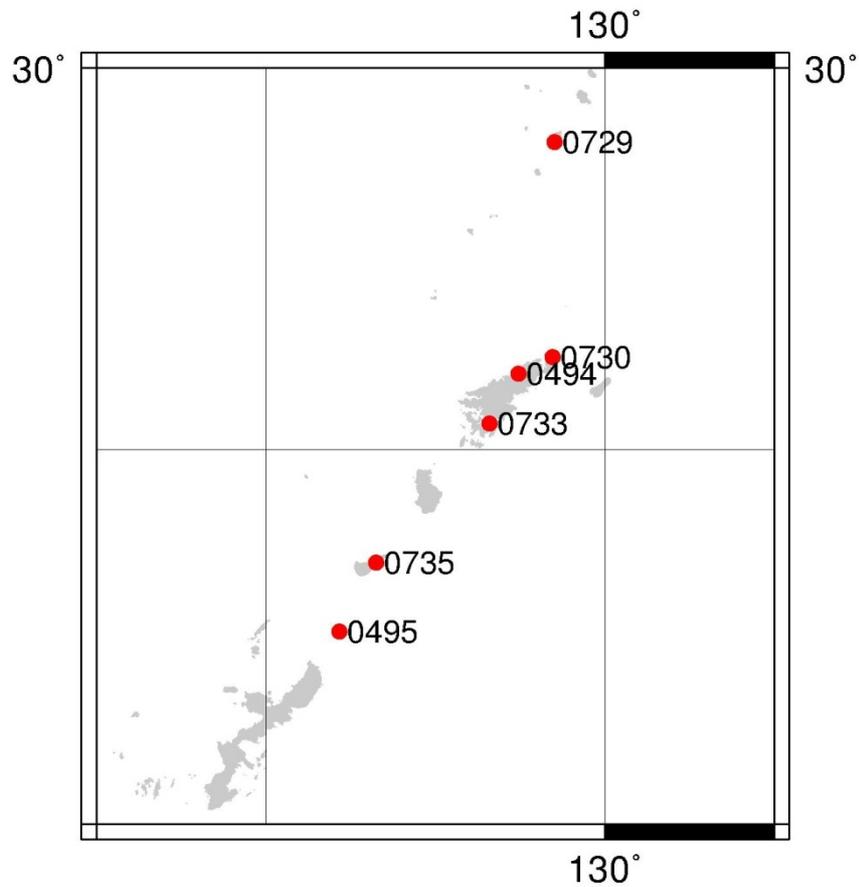


図 3-2 本研究で使用した電子基準点の一覧を表しており、960729 鹿児島十島(0729)、960730 笠利(0730)、950494 名瀬(0494)、960733 瀬戸内(0733)、960735 和泊(0735)、950495 与論(0495)である。

3-2-1 2015 年 5 月 29 日の口永良部島の噴火に伴う擾乱

口永良部島は鹿児島県屋久島町、北緯 $30^{\circ} 26'36''$ 、東経 $130^{\circ} 13'02''$ にある活火山である。今回は 2015 年 5 月 29 日の 0:59UT に発生した口永良部島火山の爆発的噴火に伴う電離圏擾乱を調べた。

気象庁がウェブで公開している火山活動解説資料(平成 27 年 5 月)によると、口永良部島の爆発的噴火によって発生した噴煙は火口縁上 9,000m 以上に上がり、噴火に伴い発生した火砕流は新岳の北西部(向江浜地区)では海岸にまで達した。この噴火を受け、気象庁は噴火警報を発表し、噴火警戒レベルを 3(入山規制)から 5(避難)に引き上げ、火山現象に関する海上警報を発表した。また、新岳火口から北東約 2.3km に設置している新岳北東山麓観測点の空震計では最大で 62.2Pa 以上(振り切れ)の空震を観測した。

まずは 2-3 において述べた電離圏擾乱の伝搬指向性について、実際に北半球において火山の南側でのみ大きな電離圏擾乱が見られ、北側では振幅の小さな負の擾乱のみが見られるのかを調べてみる。火山の北側の電子基準点として鹿児島県南部の指宿電子基準点(950490)を、南側の電子基準点として奄美大島にある名瀬電子基準点(950494)を例にとった。口永良部島の噴火前後の衛星の SIP を図 3-2-1-1 (指宿から見たもの) と図 3-2-1-3 (名瀬から見たもの) に示す。また指宿電子基準点から見た TEC 擾乱を図 3-2-1-2 に、名瀬電子基準点から見た TEC 擾乱を図 3-2-1-4-1 と図 3-2-1-4-2 に示す。

それぞれの図から指宿電子基準点から GPS14 番衛星を見た場合は火山の北側の電離圏を、また名瀬電子基準点から GPS14 番および 25 番衛星を見た場合は火山の南側の電離圏の変化を見ていることが推測される。指宿電子基準点から GPS14 番衛星を見て得られた STEC 時系列に、多項式を用いてハイパスフィルターをかけたものを図 3-2-1-2 に示す。同じく名瀬電子基準点から GPS25 番衛星を見て得られた STEC の時系列を図 3-2-1-4-1 に示す。図 3-2-1-2 および図 3-2-1-4-1 から火山噴火の約 15 分後 (1:10UT 過ぎ) に擾乱が発生していることわかる。2-3 で述べたとおり、北半球においては火山の南側で電離圏擾乱が見られ、北側においては負のみの擾乱が見られた。

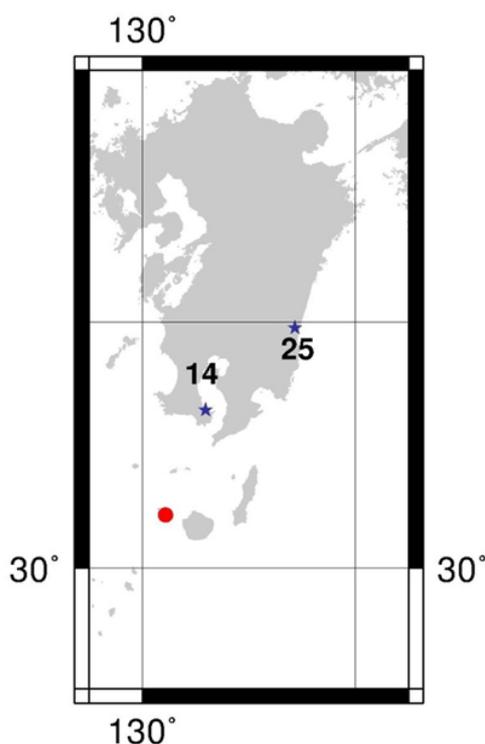


図 3-2-1-1 口永良部島噴火前後の衛星の SIP を示したもので、数字は衛星番号、赤い丸が口永良部島を示し、14 と書かれた青い星印の位置の少し南に鹿児島県南部の指宿電子基準点(950490)があり、青い星印は噴火時刻の SIP 点を示している。

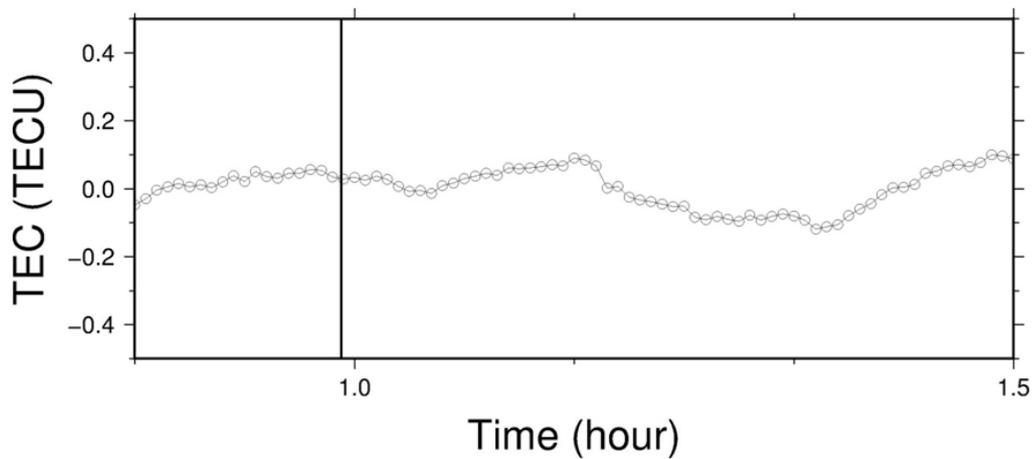


図 3-2-1-2 指宿 GNSS 局から GPS14 番衛星を見て得られた STEC に、多項式を利用したハイパスフィルターを施し、拡大した図。縦の直線は噴火時刻(0:59UT)を表す。噴火約十分後にわずかな負の擾乱が見える。

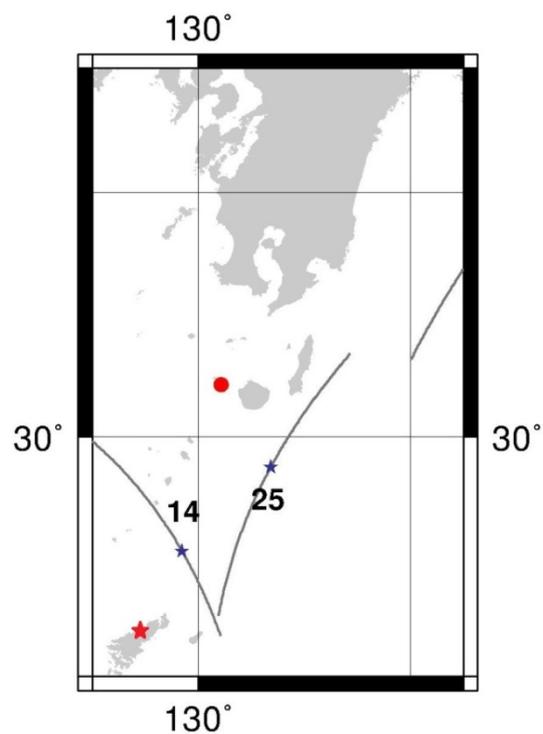


図 3-2-1-3 口永良部島噴火前後の衛星を名瀬から見た時の SIP を示した図。数字は衛星番号、赤い丸が口永良部島、赤い星印は奄美大島にある名瀬電子基準点(950494)、青い星印は噴火時刻の SIP 点を示している。

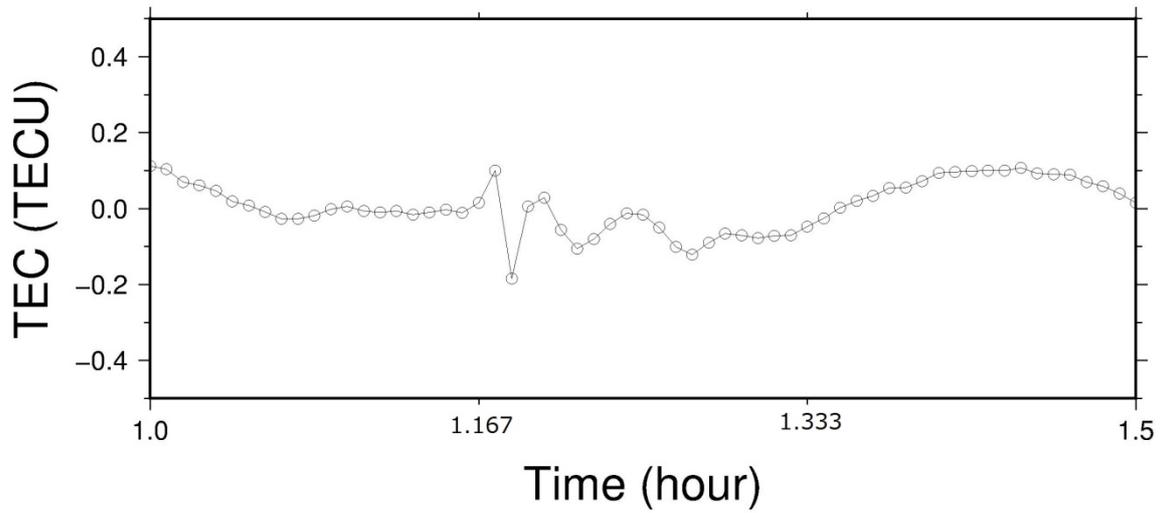


図 3-2-1-4-1 名瀬 GNSS 局から GPS25 番衛星を見て得られ、ハイパスフィルターを施した STEC の時系列を取り出して拡大した図。

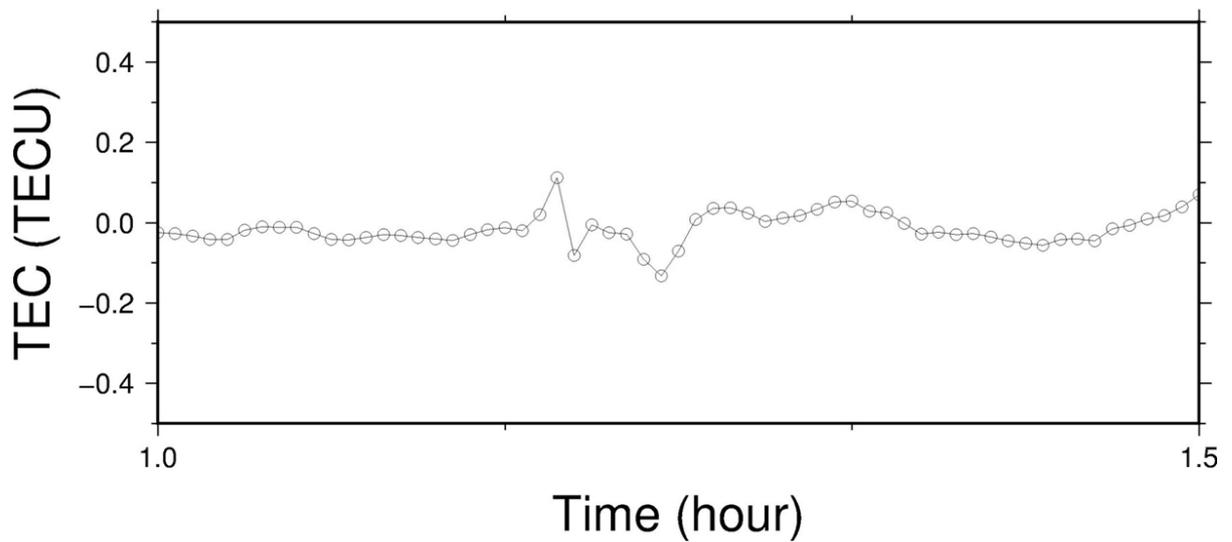


図 3-2-1-4-2 名瀬 GNSS 局から GPS14 番衛星を見て得られた STEC 時系列にハイパスフィルターを施して拡大した図(図 2-1 再掲)。

次に、この観測された擾乱が偶然起こったものではなく、実際に火山噴火を起源とする擾乱であることを、火山の南側の観測点で得られた STEC の擾乱の時系列データを比較することによって確認する。図 3-2-1-5 は奄美大島にある名瀬電子基準点、笠利電子基準点(960730)、瀬戸内電子基準点(960733)と奄美大島の南に位置する和泊電子基準点(960735)、与論電子基準点(950495)の 5 つの電子基準点から GPS25 番衛星を見た時の SIP の位置を示す。それらの観測点で得られた STEC 時系列にハイパスフィルターを施したものを、火山から近い順に名瀬、笠利、瀬戸内、和泊、与論の順番で並べたものが図 3-2-1-6 である。この図から SIP が火山から遠い局で観測された VTEC データほど擾乱が遅い時刻に現れていることがわかる。このことは、この GPS25 番衛星で見られた擾乱が火山噴火を起源としていることの証拠となる。

また、SIP 点の上空にあたる、マイクロ波と F 層との交点と火山との間の距離を計算し、各地点での擾乱の開始時刻を推測し時間差および距離差を考えると、この擾乱は~1 km/s で伝搬していることが分かった。地上における音波の速度はおおよそ 340m/s であるが、F 層における音波の速度はおおよそ 1 km/s であるので、この伝搬は音波が担っていることを示している。よって図 3-2-1-4 で示した擾乱は火山噴火を起源とするものであり、2-3 で述べた伝搬指向性とも合致するものである。

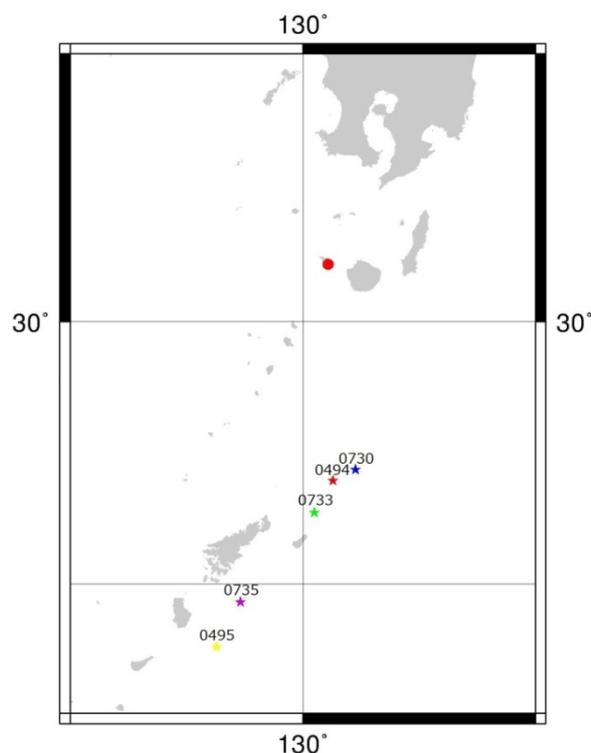


図 3-2-1-5 次の図で示す五個の電子基準点から GPS25 番衛星を見たときの SIP の位置を星印で示したもので、数字はその電子基準点番号を表している。

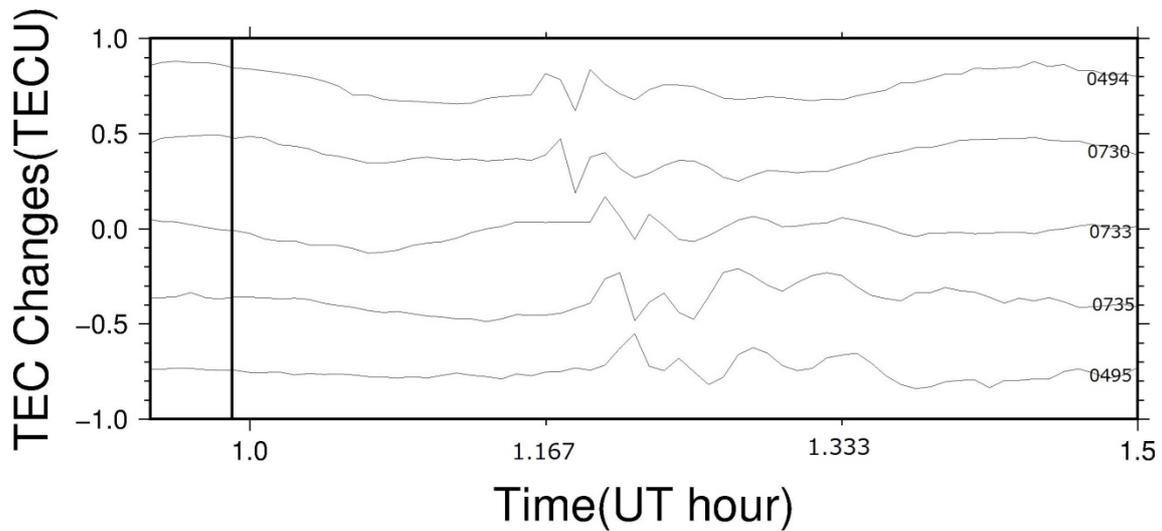


図 3-2-1-6 五個に異なる地上局から GPS25 番衛星を用いて観測された STEC の擾乱を比較したもの。擾乱がある速度で南に伝搬していく様子がわかる。数字は電子基準点番号を表し、SIP が火山から近い順に上から並べてある。

図 3-2-1-7 に電子基準点名瀬から各 GPS 衛星を見て得られた STEC 時系列に、多項式を用いたハイパスフィルターを施したものを示す。この図と、図 3-2-1-3 から、確かに 14 番衛星と 25 番衛星以外では火山噴火起源の電離圏擾乱は見られないことがわかる。図 3-2-1-4 で得られた振幅を図 3-2-1-8 で得られた鉛直 TEC で割ると、口永良部島の噴火の F スケールが計算できる。この場合 $\Delta\text{STEC}=0.22\text{TECU}$ であり、 $\text{VTEC}=27.0\text{TECU}$ なので、 $F=0.22 \times 100/27.0=0.8$ が得られる。

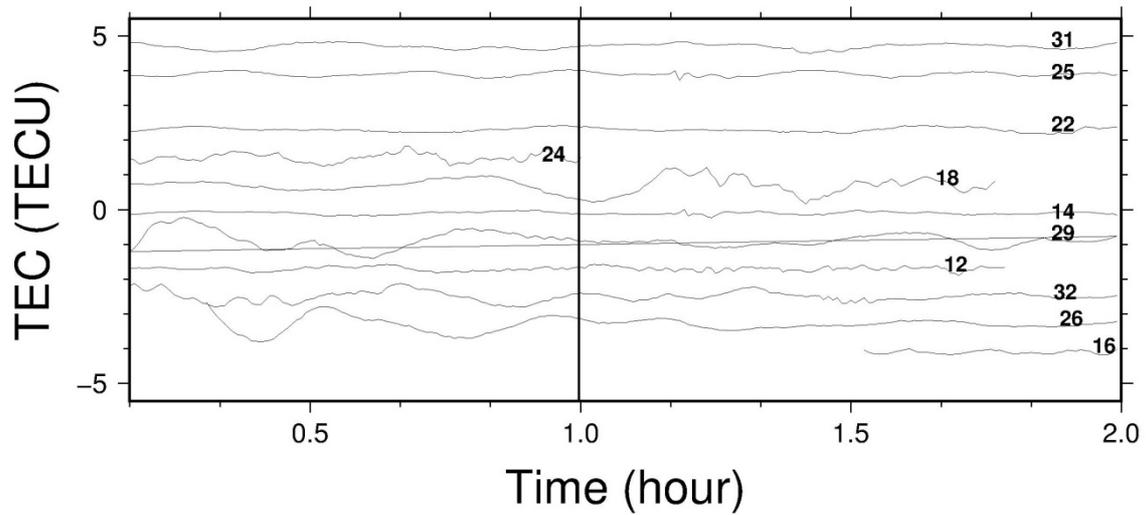


図 3-2-1-7 名瀬 GNSS 局から各 GPS 衛星を見て得られた噴火前後の STEC の時系列。多項式を用いてハイパスフィルターをかけてある。数字は衛星番号、黒い縦線は噴火時刻を表しており、14 番衛星と 25 番衛星のみで噴火後約 15 分に明瞭な擾乱が認められる。

Vertical TEC

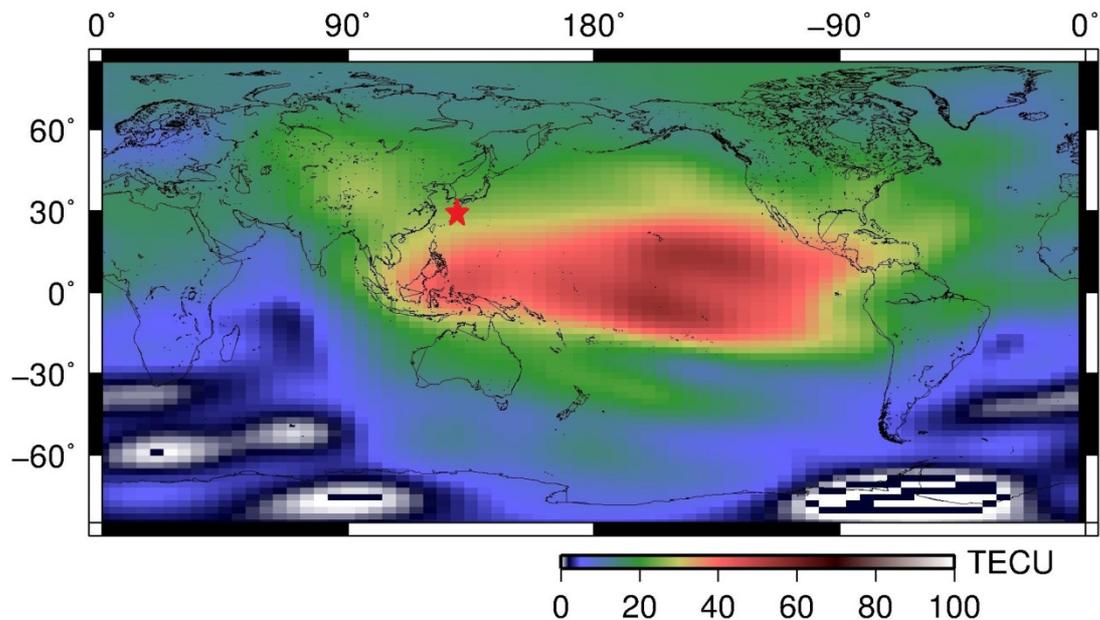


図 3-2-1-8 2015 年 5 月の口永良部島噴火の約 15 分後(1:10UT)の VTEC の全球分布を示したもので、赤い星印は口永良部島を示している。ベルン大学からダウンロードした全球電離圏マップを用いて描いた。

3-2-2 2009 年 10 月 3 日の桜島噴火の例

桜島は鹿児島県鹿児島市、北緯 $31^{\circ} 35'33''$ 東経 $130^{\circ} 39'24''$ に位置している活火山である。数多く噴火している桜島であるが、今回は 2009 年 10 月 3 日 7:45 (UT) に発生した桜島火山の爆発的噴火に伴う電離圏擾乱を調べた。

気象庁がウェブで公開している火山活動解説資料(2009 年 10 月)によると、2009 年 10 月の 1 か月間に桜島の昭和火口では噴火が 125 回発生し、そのうち 101 回は爆発的噴火であったが、今回擾乱を観測できた 10 月 3 日 16 時 45 分(日本時間)に発生した噴火は南岳山頂火口で発生した比較的大規模な爆発的噴火であり、噴煙の高さは火口縁上 3000m まで達し、噴煙量も多量であった。火口の南東約 5km に設置されている空震計は 294.5Pa を観測した。

今回の噴火については奄美大島にある名瀬電子基準点(950494)で得られた結果を中心に議論する。桜島の噴火前後の、名瀬電子基準点から見た GPS 衛星の SIP を図 3-2-2-1 に示す。この図から、GPS11 番衛星において電離圏擾乱が観測できることが予想される。その時系列にハイパスフィルターをかけたものを図 3-2-2-2 に示す。この図から、火山噴火の約 15 分後(8:00UT 頃)に明瞭な変動が発生していることわかる。

図 3-2-2-3 に電子基準点名瀬からすべての GPS 衛星を見て得られた STEC 時系列(ハイパスフィルターを施した)を示す。この図と、図 3-2-2-1 から 11 番衛星以外では火山噴火を起源とする電離圏擾乱は見られず(8 番衛星にはわずかに擾乱がみえる)、太陽フレア等による変動ではないことがわかる。

口野永良部島のケースと同じ方法で、この桜島噴火の F スケールを計算すると、図 3-2-2-2 と図 3-2-2-4 より得た $\Delta\text{STEC}=0.28\text{TECU}$ および、 $\text{VTEC}=14.0\text{TECU}$ の値を用いて、 $F=0.28 \times 100 / 14.0 = 2.0$ が得られる。

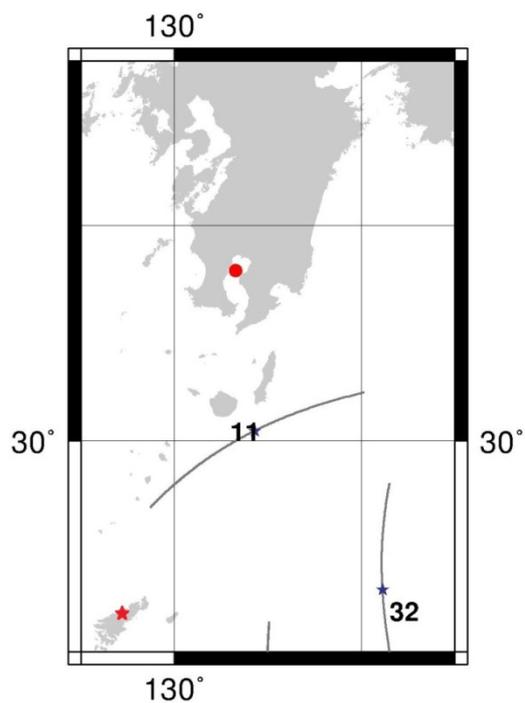


図 3-2-2-1 2009 年十月の桜島の爆発的噴火前後の衛星の SIP の軌跡を示したもので、赤い丸は桜島を、赤い星印は電子基準点名瀬を、青い星印は噴火時の SIP の位置を示している。

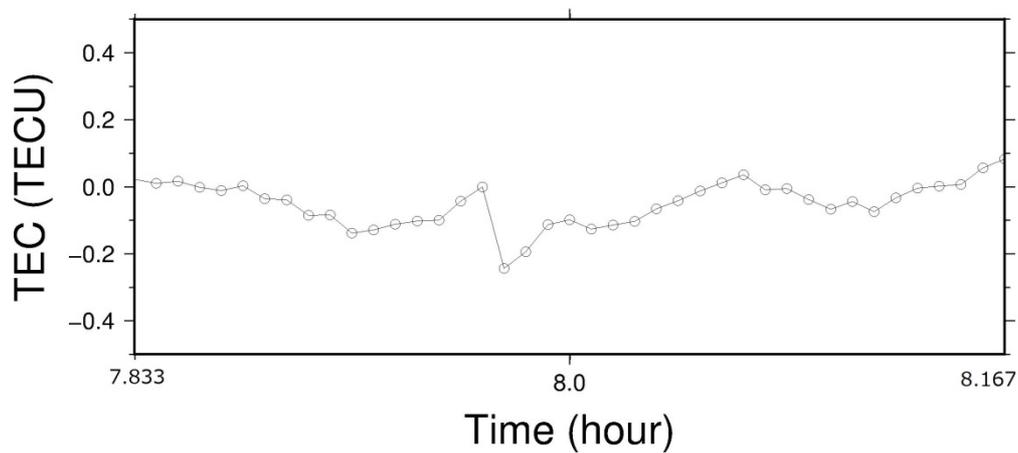


図 3-2-2-2 名瀬 GNSS 局から GPS11 番衛星を見て得られた STEC の時系列に、多項式を用いてハイパスフィルターを施したもの。噴火時刻は 7.75UT で図の外にある。

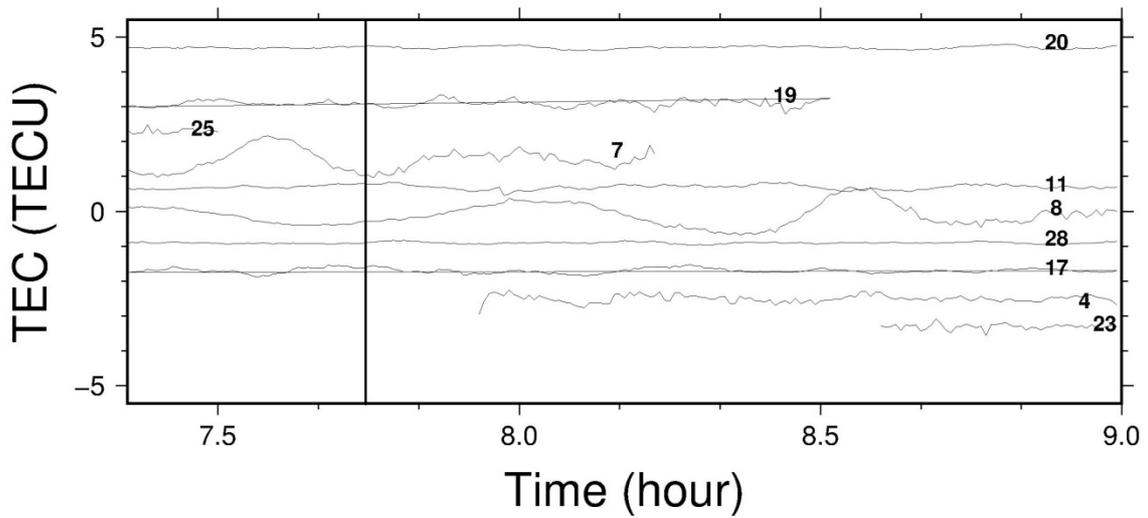


図 3-2-2-3 名瀬 GNSS 局からみえる全ての GPS 衛星の STEC 時系列にハイパスフィルターを施したものを。縦の直線は噴火時刻を示している。11 番衛星の噴火約 13 分後に明瞭な擾乱が見える。

Vertical TEC

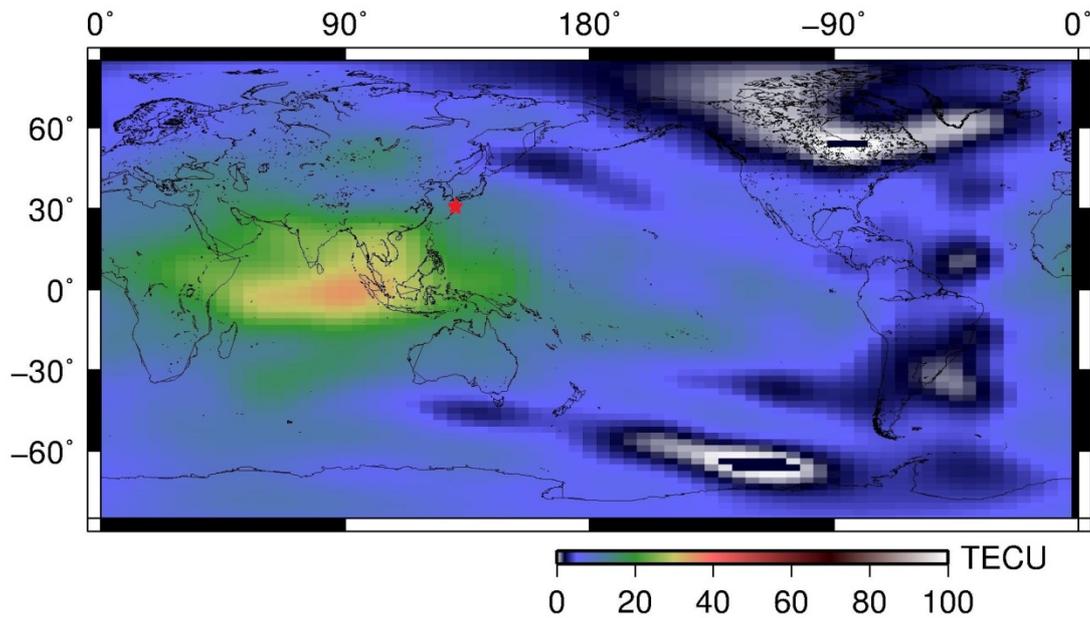


図 3-2-2-4 桜島噴火の約 15 分後(8:00UT)の VTEC の全球分布を示したもので、赤い星印は桜島を表している。ベルン大学からダウンロードした全球電離圏モデルを用いて描いたもの。

3-2-3 2011年1月31日の新燃岳噴火

霧島新燃岳は宮崎・鹿児島県境にある、北緯 $31^{\circ} 54'34''$ 、東経 $130^{\circ} 53'11''$ に位置する活火山ある。ここでは 2011 年 1 月 31 日 22:54 (UT) に発生した霧島新燃岳の爆発的噴火に伴う電離圏擾乱を調べる。

気象庁のウェブで公開されている火山活動解説資料(2011 年 1 月)によると、新燃岳では 2011 年 1 月 26 日から本格的なマグマ噴火が始まり、多量の火山灰等を放出する噴火活動が起き、火口内に溶岩が噴出、爆発的な噴火が繰り返され、ほぼ連続的に火山灰を放出した。その中でも、今回擾乱を観測した 2011 年 1 月 31 日 22 時 54 分(UT)に発生した爆発的噴火によって発生した噴煙は火口縁上 2000 m まで達した。気象庁機動調査班が実施した現地調査では、新燃岳火口から南西 3.2 km 付近で直径 70 cm 短径 50 cm の大きな噴石を確認した。また、九州の広い範囲で空震が観測され、新燃岳火口の南西約 8 km の湯之野に設置されている空震計では 458.4 Pa を観測し、鹿児島県霧島市で空震により窓ガラスが破損する被害が発生した。

今回の噴火については奄美大島にある笠利電子基準点(960730)で得られた結果を中心にして議論する。新燃岳の噴火前後の衛星の笠利電子基準点から見た SIP の図(図 3-2-3-1)から、GPS24 番衛星において電離圏擾乱が見えそうである。図 3-2-3-2 は、笠利電子基準点から GPS24 番衛星を見て得られた STEC の時系列である。例によって多項式を用いてハイパスフィルターを施した。この図から、火山噴火の約 15 分後(23:10UT 頃)に明瞭な擾乱が発生していることわかる。

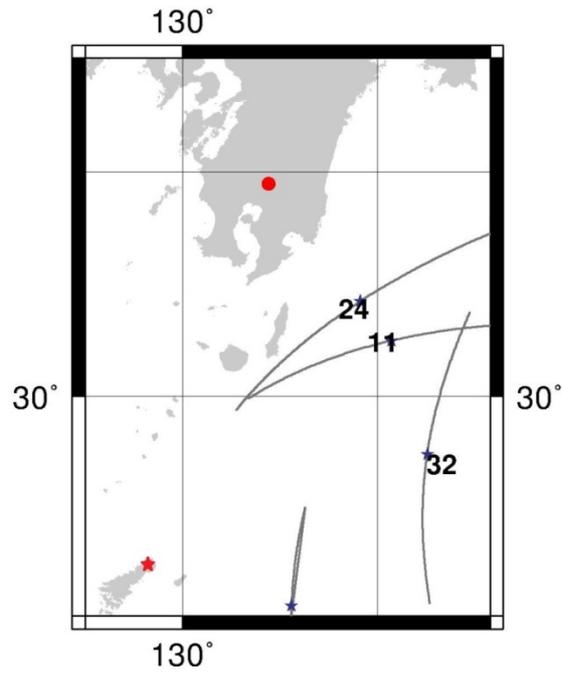


図 3-2-3-1 新燃岳噴火前後の笠利からみた GPS 衛星の SIP の軌跡を示したもので、数字は衛星番号、赤い丸は新燃岳を、赤い星印は電子基準点笠利を、青い星印は噴火時の衛星の SIP 位置を表している。

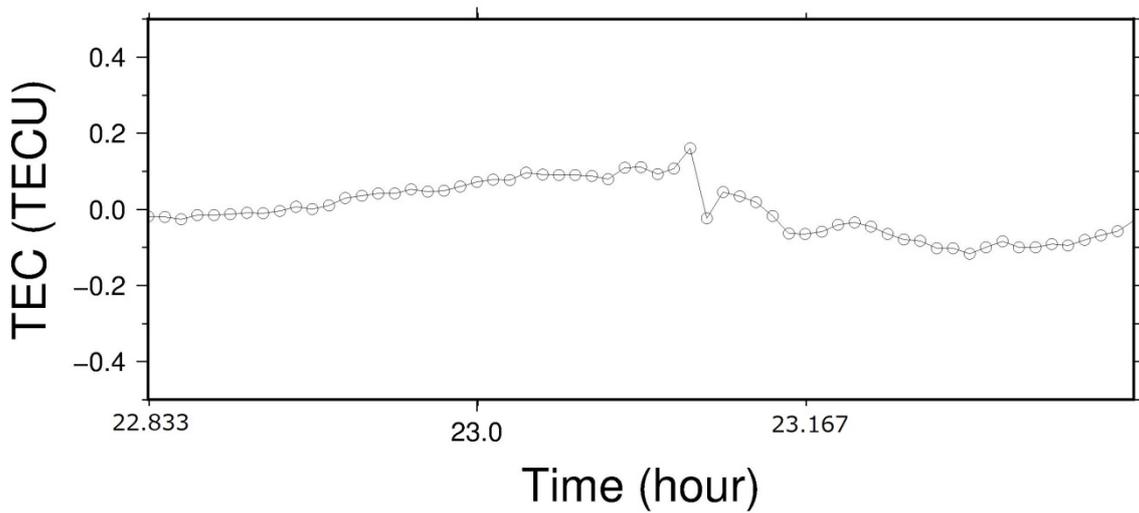


図 3-2-3-2 笠利 GNSS 局から GPS24 番衛星を見て得られた STEC の時系列。

次に、口永良部島の噴火と同じような手順で、この観測された値の変動が偶々観測されたものでなく火山噴火を起源とする擾乱であることを確かめる。図 3-2-3-3 は奄美大島にある名瀬電子基準点、笠利電子基準点、瀬戸内電子基準点と奄美大島の南に位置する和泊電子基準点、与論電子基準点の 5 つの電子基準点から GPS24 番衛星を見て得られた STEC の時系列を比較したものである。各電子基準点から GPS24 番衛星を見た時の SIP は図 3-2-3-4 に示してある。図 3-2-3-4 から、SIP は新燃岳火山から名瀬、笠利、瀬戸内、和泊、与論の順に遠ざかっており、図 3-2-3-3 を見ると、火山からの距離が増大するにつれて同じような波形の擾乱が、すこしずつ遅い時刻に発生していることがわかる。このことはこの GPS24 番衛星で見られた擾乱が火山噴火を起源としており、そこから伝搬してきた波であることの証拠となる。

また、SIP 点の上空にあたる、マイクロ波と F 層との交点と火山との間の距離を計算し、各地点での擾乱の開始時刻の時間差と SIP 間の距離を考えると、この擾乱は~1 km/s で伝搬していることが分かり、音波であることが示唆される。よって図 3-2-3-2 で示した擾乱は火山噴火を起源とする擾乱である。

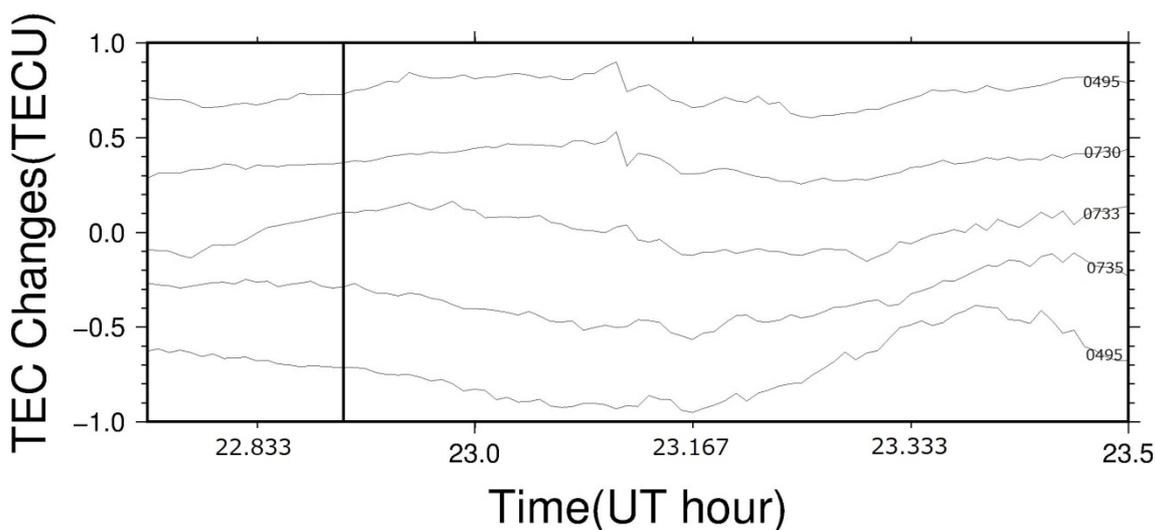


図 3-2-3-3 GPS24 番衛星で見られる擾乱が伝搬していく様子を示したもので、数字は電子基準点番号を示し、上から SIP が火山に近い順に並べてある。

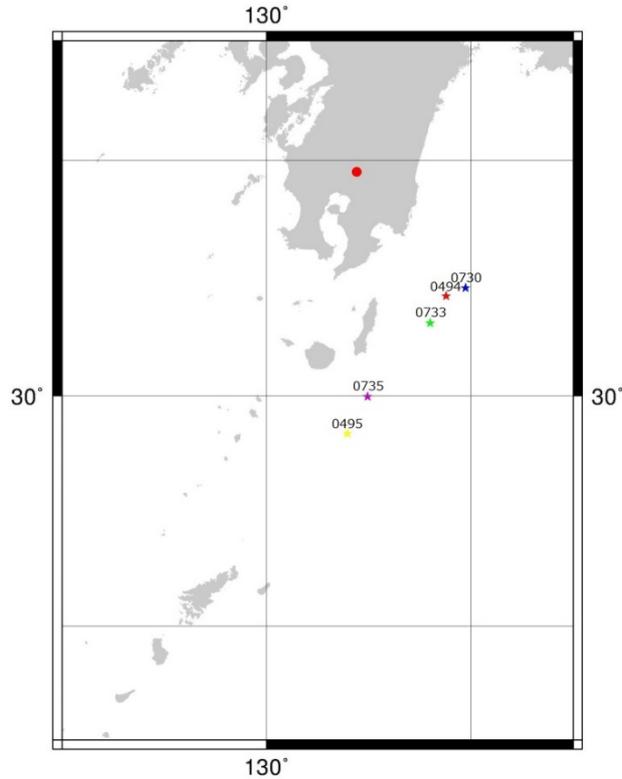


図 3-2-3-4 五つの異なる電子基準点から GPS24 番衛星を見たときの SIP を星で示したもので、数字は電子基準点番号を表す。

笠利電子基準点から他のすべての GPS 衛星を見て得られた STEC の時系列を図 3-2-3-5 に示す。11 番衛星にも弱い擾乱が見られるが、24 番衛星における信号が最も明瞭である。また、今回の新燃岳の噴火の F スケールを計算する。図 3-2-3-2 より $\Delta\text{STEC} = 0.26\text{TECU}$ であり、図 3-2-3-6 より $\text{VTEC} = 9.6\text{TECU}$ が得られる。それらの値から $F = 0.26 \times 100 / 9.6 = 2.8$ が得られる。

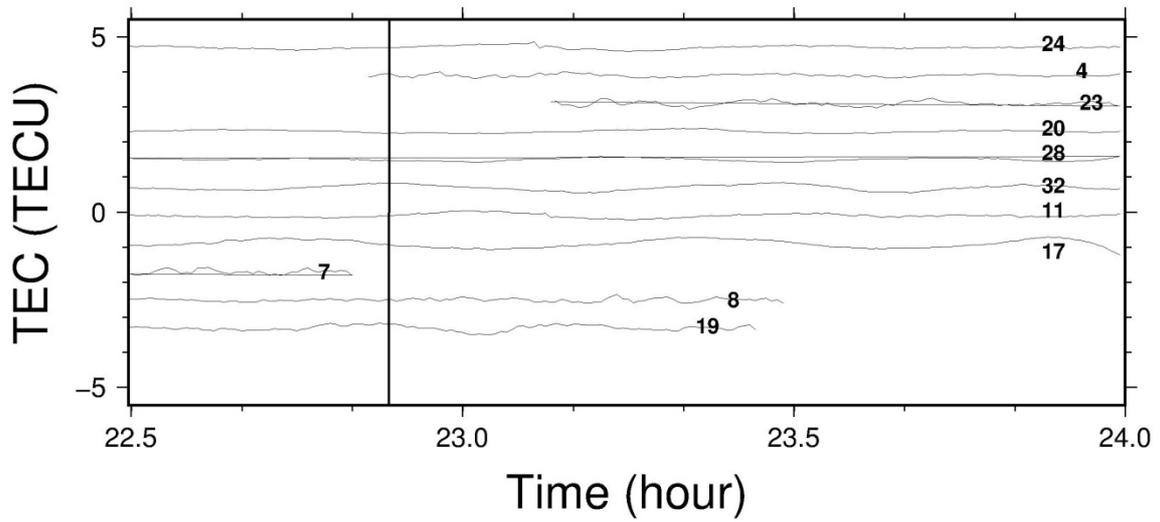


図 3-2-3-5 笠利 GNSS 局から各 GPS 衛星を見て得られた噴火前後の STEC の時系列で、数字は衛星番号、黒い縦線は噴火時刻を表しており、24 番衛星で噴火後約 15 分に擾乱が確認できる。

Vertical TEC

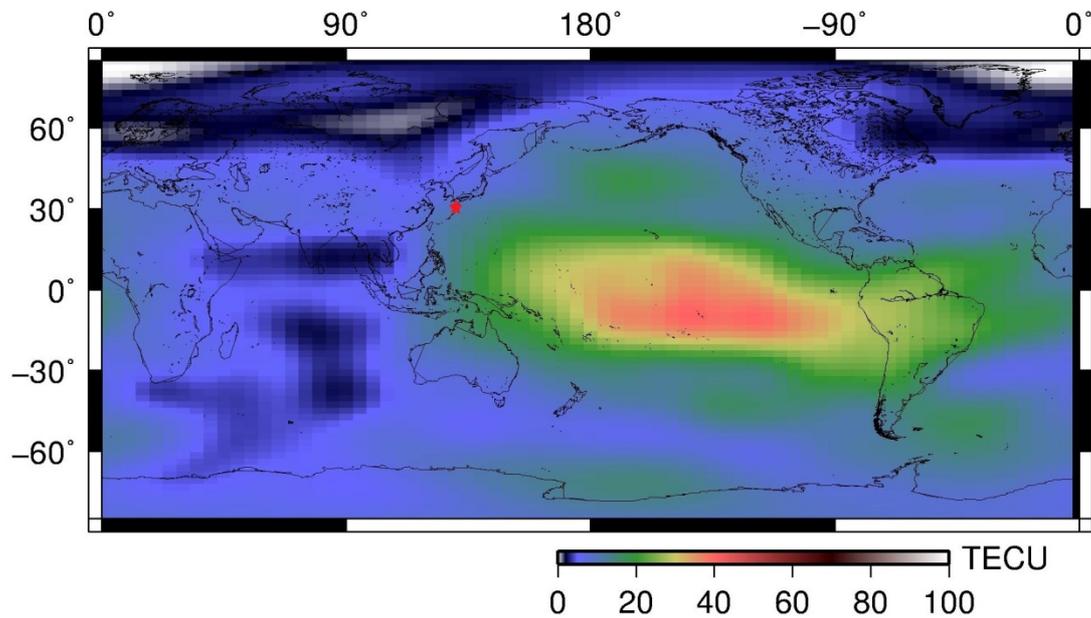


図 3-2-3-6 新燃岳噴火の約 15 分後(23:09UT)の VTEC の全球分布を示したもので、赤い星印は新燃岳を表している。ベルン大学からダウンロードした全球電離圏モデルを用いて描いたもの。

3-2-4 2011年2月11日の新燃岳噴火

新燃岳では3-2-3で述べた噴火の他に2011年2月11日2:36(UT)の爆発的噴火でも電離圏擾乱が観測できた。

気象庁がウェブで公開している火山活動解説資料(2011年2月)によると、2月9日頃から噴火が断続的になり、その後は、時々爆発的噴火を含む小規模な噴火が発生したが、一時期噴火の頻度は下がったものの、28日17時08分(日本時間)から再び、ごく小規模の連続的な噴火が発生した。その中でも、今回擾乱を観測した2月11日11時36分(日本時間)に発生した爆発的噴火は噴火の規模としては小規模であったが、中量の噴煙が火口縁上2500mまで達し、湯之野に設置されている空震計では244.3Paを観測した。

今回の噴火についてはトカラ列島にある鹿児島十島電子基準点(960729)で得られた結果を中心に議論する。図3-2-4-1は新燃岳の噴火前後の衛星の鹿児島十島電子基準点から見たGPS10番衛星のSIPの図である。鹿児島十島電子基準点からGPS10番衛星を見て得られたSTECの時系列を図3-2-4-2に示す。図3-2-4-2から火山噴火の約15分後(2:50UT頃)に火山噴火による電離圏擾乱らしき変動が見える。

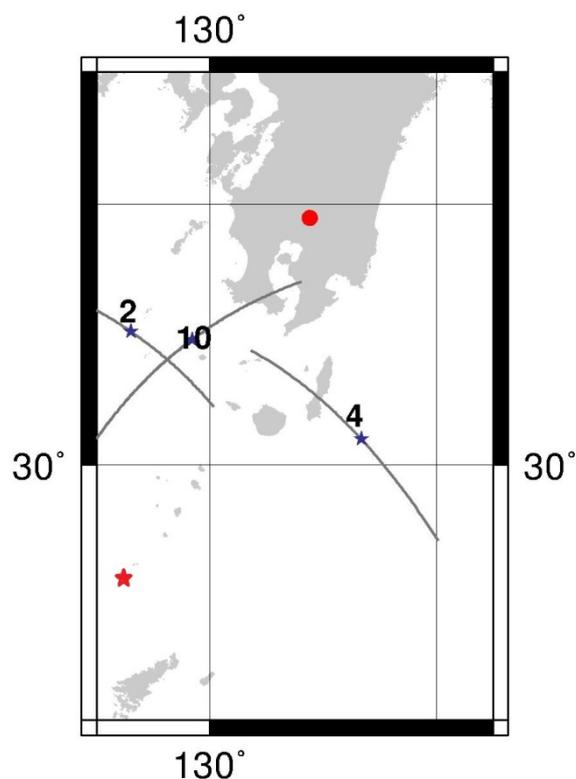


図3-2-4-1 新燃岳噴火前後の衛星2, 4, 10のSIP軌跡を示したもの。数字はGPS衛星番号を、赤い丸は新燃岳を、赤い星印は電子基準点鹿児島十島を、青い星印は噴火時のSIP点を示している。

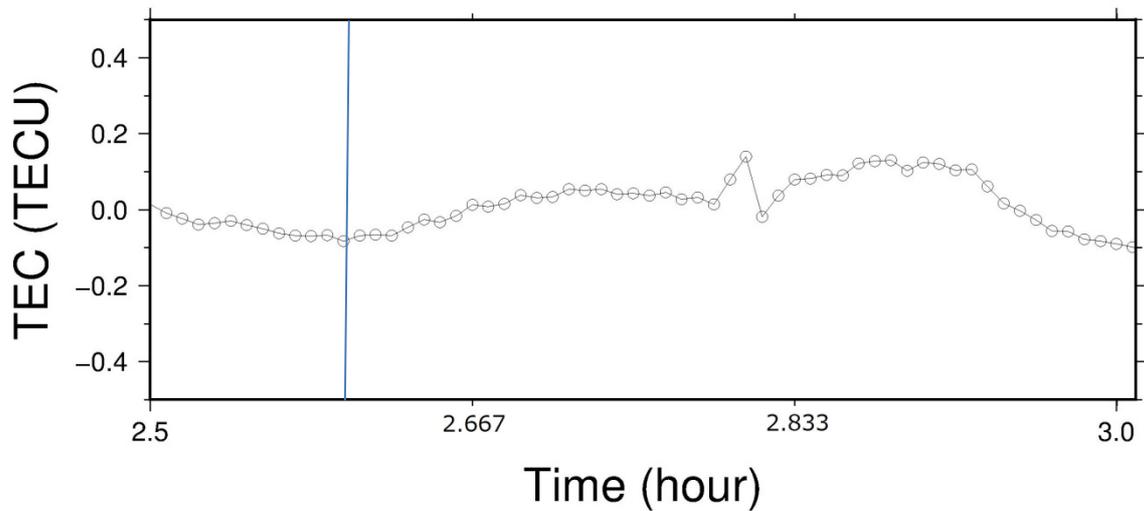


図 3-2-4-2 鹿児島十島 GNSS 局から GPS10 番衛星を見て得られた STEC の時系列。噴火は 2.6 UT に発生した。

次に、観測された変動が火山から有限な速度で伝搬している様子を複数の局の STEC 時系列を比較することによって確認する。図 3-2-4-3 は鹿児島十島電子基準点に加え、奄美大島にある名瀬電子基準点、笠利電子基準点、瀬戸内電子基準点を入れた計 4 つの電子基準点から GPS10 番衛星を見て得られた STEC の時系列である。また図 3-2-4-4 は各電子基準点から GPS10 番衛星を見た時の噴火時の SIP の位置を示したものである。図 3-2-4-4 から SIP は火山から鹿児島十島、名瀬、笠利、瀬戸内の順に遠くなっており、図 3-2-4-3 と比較すると火山からの距離が遠い局ほど擾乱が遅れて発生していることがわかる。また、この擾乱は $\sim 1 \text{ km/s}$ で伝搬していることから、音波であることが示唆される。

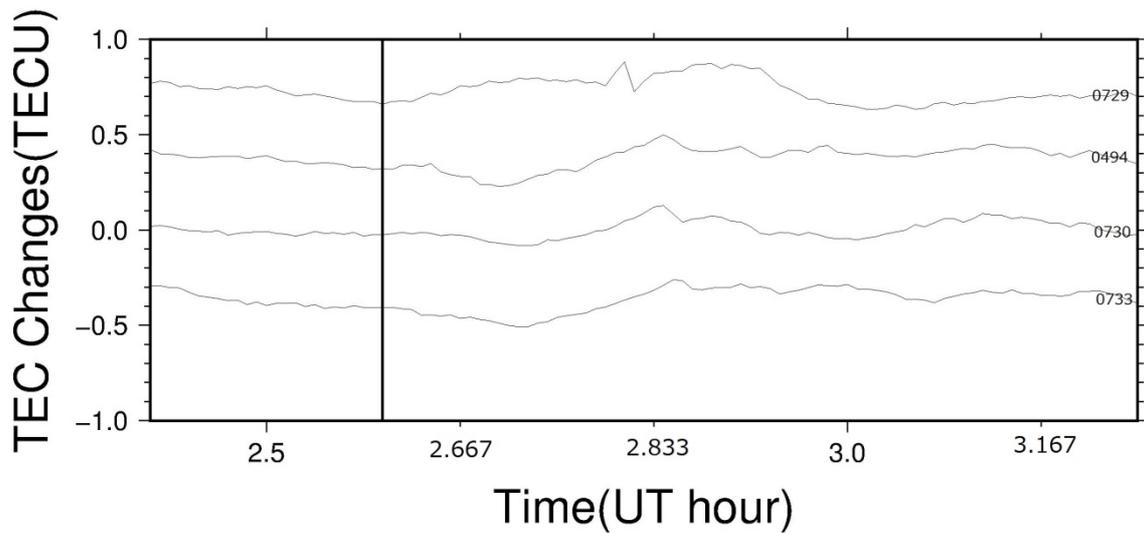


図 3-2-4-3 GPS10 番衛星で見られる擾乱が伝搬していく様子を四か所の GNSS 局の STEC 時系列を比較することによって示した図。数字は電子基準点番号を表し、噴火時刻の SIP 位置が火山に近い順に並べてある。縦線は噴火が発生した 2.6 UT を示す。

図 3-2-4-5 に鹿児島十島電子基準点からみた様々な GPS 衛星で得られた STEC の時系列を示す。10 番衛星以外でも 4 番衛星や 13 番衛星でも火山噴火を起源とする電離圏擾乱が見られる。

今回の新燃岳の噴火の F スケールを計算すると、図 3-2-4-2 より得られた $\Delta \text{STEC} = 0.25 \text{TECU}$ と、図 3-2-4-6 より得られた $\text{VTEC} = 22.5 \text{TECU}$ を組み合わせて、 $F = 0.25 \times 100 / 22.5 = 1.1$ が得られた。

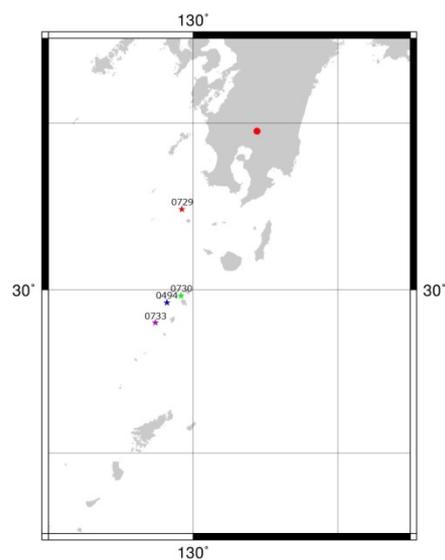


図 3-2-4-4 各電子基準点から GPS10 番衛星を見たときの SIP の位置を星で示したもので、数字は電子基準点番号を表している。赤丸は新燃岳の位置。

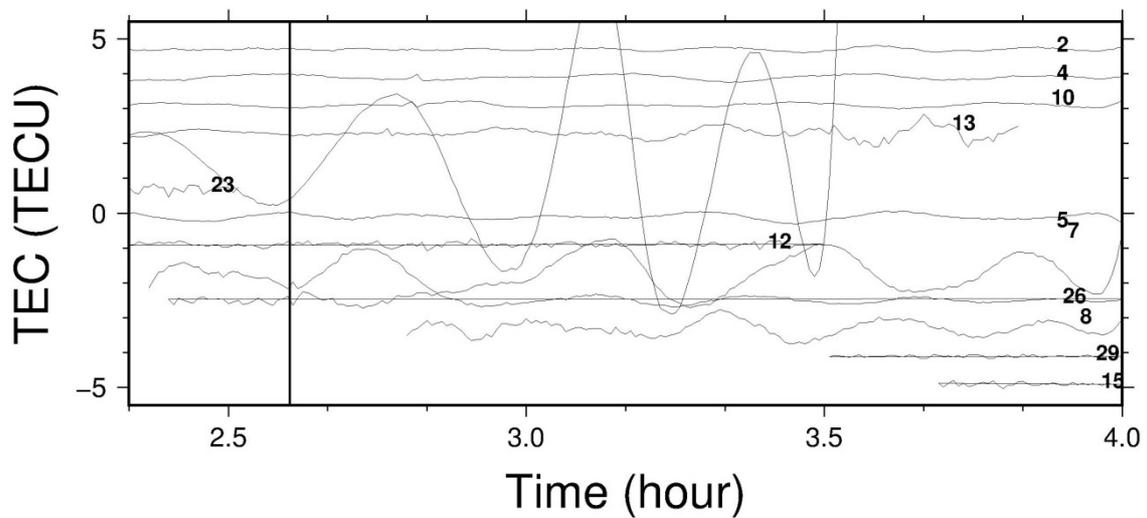


図 3-2-4-5 鹿児島十島 GNSS 局から各 GPS 衛星を見て得られたものに 2-4 で述べたハイパスフィルターをかけた噴火前後の STEC の時系列を示したもので、数字は衛星番号、黒い縦線は噴火時刻を表しており、10 番衛星、4 番衛星、13 番衛星等で噴火後 10 分から 15 分後に擾乱が見える。

Vertical TEC

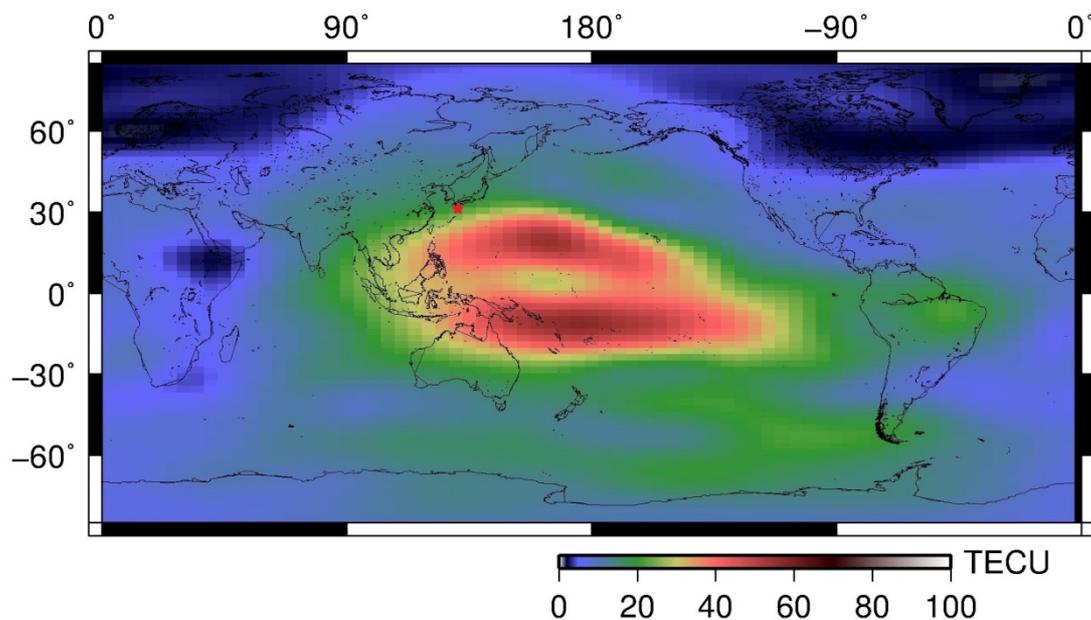


図 3-2-4-6 新燃岳噴火の約 15 分後(2:51UT)の VTEC の全球分布を示したもので、赤い星印は新燃岳を表している。ベルン大学の全球電離圏モデルをダウンロードして描いた。

3-3 地上観測との相関

ここまででは GPS-TEC 技術を利用して、噴火後に生じる電離圏擾乱から火山爆発の大きさの指標と求めてきた。ここでは気象庁等が火山周辺に設置している空震計で観測されたデータに触れ、火山爆発による空気の擾乱を地上で見た場合と超高層大気から見た場合、それぞれのデータがどのように相関を持っているかを調べる。

空震計と電離圏の擾乱では観測できる周波数が異なっている。空震計は一般に可聴周波数までの比較的高い周波数帯を記録できるが、電離圏擾乱は周期数分の極めて低い周波数帯しか持っていない。この 2 つの観測でみられた振幅の間に高い相関があれば、F スケールはの信頼性が向上するだろう。

気象庁のウェブサイト(www.jma.go.jp)で公開されている火山活動解説資料に記されている空震計観測のデータをまとめると表 3-3 のようになる。2 回擾乱が観測された新燃岳については便宜上噴火日から新燃岳 031 と新燃岳 042 と呼ぶことにする。空震は球面波である。振幅の二乗に比例する波動のエネルギーを球面上で積分した値が保存されえると仮定する。球の表面積が距離の二乗に比例するため、球面上の単位面積あたりのエネルギーは距離の二乗に反比例する。すると、振幅はエネルギーの平方根に比例するから、擾乱の振幅は距離と反比例する。ここでは、火山からの距離が様々な空震計の振幅を単純に比較することができないため、この関係を利用して実際の振幅を火口からの距離 10 km における振幅に変換した。

またここで、Heki (2008)に報告されている浅間山の噴火について、改めて F スケールを求める。浅間の例については論文から $\Delta\text{STEC}=0.2 \text{ TECU}$ とある。また、全球電離圏モデルから $\text{VTEC}=12.3 \text{ TECU}$ であるため、 $F=1.6\%$ である。

表 3-3 でまとめた規格化された空震計の値と F スケールをまとめてプロットすると図 3-3 のようになった。ちなみに口永良部島の 2015 年噴火では空震計が振り切れているため、振幅はこの値以上としか言えない。電離圏擾乱に基づく F スケールと空震計の 10 km 値の振幅の間の相関係数を計算すると、0.526 と比較的高い相関係数が得られた。データ数が少ないため判断は難しいが、F スケールと空震計の値の間にはある程度の相関があると認められる。

表 3-3 空震計の観測データと距離 10km で規格化した値をまとめた表。

火山	振幅(Pa)	火口からの距離(km)	距離 10 km で規格化した振幅 (Pa)
浅間山	205	8.0	164
口永良部島	>62.2*	2.8	>14.3*
桜島	294.5	5.0	147
新燃岳 031	458.4	3.0	137.5
新燃岳 042	244.3	3.0	73.3

*口永良部島においては空震計が振り切れていたため、この値以上であることしかわからない。

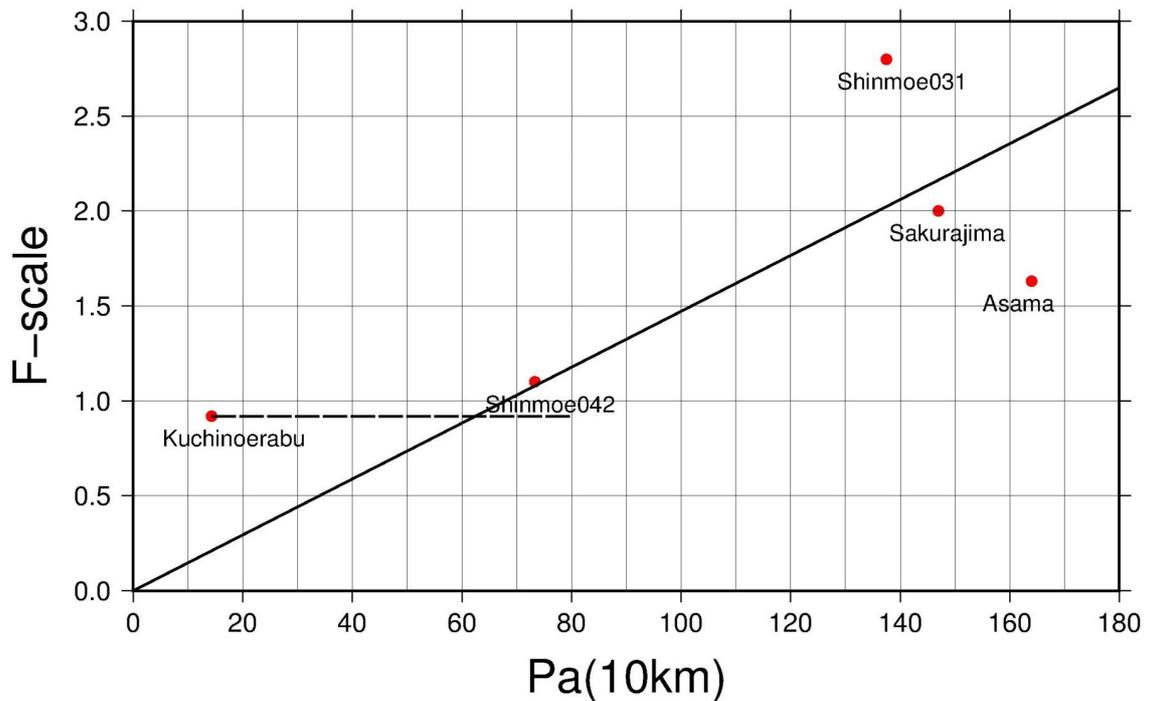


図 3-3 表 3-3 のデータをプロットしたもの。黒い直線は原点と口永良部島以外の各点との間の傾きの平均を表している。口永良部島では空震計が振り切れていたため、取りうる点を破線で示している。

4.まとめ

4.1 F スケールの利点と欠点

ここまでで火山の爆発的噴火の 10-15 分後に生じる電離圏擾乱の振幅を観測量とする F スケールを考えてきた。従来の火山噴火に伴う空気振動の観測は、地上における空震計による観測が主であった。しかしそれらは地形などの影響を受けやすく、また空震計の型式によって周波数特性等に違いがあり、統一的な爆発エネルギーの指標としては使われてこなかった。この F スケールは、火口からそのまま空气中を上空に伝わった波動に注目するものであるため、地形の影響はなく、観測装置の違いによる差も存在しない。そのことから、F スケールは空震計に比べてより火山爆発の規模の推定に適していると考えられる。ただしいくつかの問題点もある。

その一つは、とても大規模な爆発でなければそもそも電離圏擾乱を確認できないことだ。そのため、このスケールは規模の大きなブルカノ式噴火以外に適用することはできず、小さな噴火にも用いることができるスケールとはなりえない。また、電子数の比較的多い昼間に発生した火山噴火と電子数の比較的少ない夜間に発生した火山噴火では、後者では擾乱が見えにくくなることも難点であろう。

4.2 将来への展望

本研究において、 ΔSTEC の値は火山からの距離と関係なく電離圏擾乱が一番はつきりと観測できた電子基準点における値から求め、F スケールを計算した。図 3-2-1-5 と図 3-2-1-6 から、この程度の距離範囲では伝搬によって振幅が大幅に変わることはないと言える。しかし、原理的に火山から遠ざかるにつれて少しずつではあるが擾乱の振幅は小さくなるはずである。また分散性によって擾乱のシグナルが間延びしていく可能性も考えられる。これらを考慮し、スケールを計算する上でのわかりやすさと統一性のために、SIP と火口の距離の影響を考慮に入れるべきかもしれない。

火山爆発によって発生する音波は単一周期の単一の波であるとして計算、考察を進めてきたが、GPS 衛星のサンプリング周期が 30 秒なので、本来の波形をきちんととらえられていない可能性がある。一つの電子基準点の情報からでは、複数周期の音波が火山爆発によって発生していたとしても現在の 30 秒サンプリングで調べることには限界があるため、1 秒サンプリングの GPS データを利用することが望ましい。また、複数の電子基準点での観測結果を重ね合わせることでさらにスケールとしての精度が増すのではないだろうか。F スケールはまだ改良や考察の余地がある指標であると思われるが、火山爆発の大きさの新しいスケールとして今後のさらなる研究に値すると言えるのではないだろうか。

5. 謝辞

本研究において使用した GPS の観測データは国土地理院より提供していただきました。また、全球電離圏マップはベルン大学より提供していただきました。各種火山に関するデータは気象庁より提供していただきました。ここに、感謝の意を申し上げます。

私の知識が足りなくわからないことがたくさんありまして、本研究を進めるうえで多くの方々にお世話になりました。特に指導教官の日置幸介教授には研究に関することをたくさん教わりました。本当にありがとうございます。固体ゼミの中間発表では、私の至らないところがたくさんありましたが、固体ゼミの先生方や先輩方にたくさんの有意義な指摘、助言をいただきました。ありがとうございました。

参考文献

- 日置幸介、菅原守、大関優、岡崎郁也 GPS-TEC 法による地球物理学、測地学会誌, 56 (解説・入門講座)、125-134, 2010.
- Rolland, L. M., M. Vergnolle, J. M. Nocquet, A. Sladen, J. X. Dessa, F. Tavakoli, H. R. Nankali, and F. Cappa Discriminating the tectonic and non-tectonic contributions in the ionospheric signature of the 2011, M_w 7.1, dip-slip Van earthquake, Eastern Turkey, *Geophys. Res.*, 40, 2518-2522, doi:10.1002/grl.50544, 2013.
- Dautermann, T., E. Calais, and G. S. Mattioli, Global Positioning System detection and energy estimation of the ionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, *J. Geophys. Res.*, 114, B02202, doi:10.1029/2008JB005722, 2009
- Heki, K., Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14303, doi:10.1029/2006GL026249, 2008.
- 古屋正人, 宇宙測地学 講義ノート (<https://www.sci.hokudai.ac.jp/~furuya/lecture/>).
- 気象庁 HP (www.jma.go.jp).
- 国土地理院 HP (www.gsi.go.jp).