

GPS 電波掩蔽観測で捉えた火山噴火に伴う短期的・局所的気温変動：

2010年アイスランド噴火と2011年チリ噴火の事例

**Instantaneous and localized temperature changes in atmosphere
associated with volcanic eruption observed by GPS radio occultation:
2010 Icelandic and 2011 Chilean cases”**

北海道大学大学院 理学院
自然史科学専攻 宇宙測地学研究室

岡崎 郁也

Ikuya Okazaki

2012年2月23日

要旨

GPS 電波掩蔽観測(GPS radio occultation)とは、低軌道衛星で地平線に沈む直前や昇った直後に地球大気をかすめて到来する GPS 衛星からの電波を受信し、その搬送波位相の変化から大気的气温・水蒸気量、電子密度等に依存する屈折率高度プロファイルを推定する手法である。ラジオゾンデに匹敵する精度と鉛直方向の高分解能、陸・海を問わず全球を観測できる利点があり、近年有力な大気観測手法となっている。2006年4月に台湾と米国によって打ち上げられた FORMOSAT-3/COSMIC 衛星は、6機の受信衛星を用いて1日あたり約2500の高度プロファイルを取得できる。GPS 電波掩蔽観測の利用の一つとして Wang et al. (2009) は COSMIC 衛星によって取得された気温プロファイルを解析して、2008年5月に起こったチリ、チャイテン火山噴火の噴煙による一時的、局所的な下部成層圏での気温低下と対流圏での気温上昇の観測を報告した。火山ガスの主成分である二酸化硫黄は大気中での化学反応によって硫酸エアロゾルに変化し、下部成層圏に長期間滞留することで、日射を遮る日傘効果や温室効果などといった影響をもたらす(McCormick et al., 1995)。また、火山ガスに多く含まれる水蒸気も温室効果ガスの一種であり、対流圏の温度上昇と成層圏の温度低下に寄与することが知られている。しかし、Wang et al. (2009)で報告された例のように噴火直後に即効性の変化が生じる具体的な機構についてはまだよく分かっていない。

本研究では2010年4月のアイスランド、エイヤフィヤトラヨークトル噴火と2011年6月のチリ、プジェウエ噴火の二つの事例について、COSMIC 衛星の気温プロファイルを用いて噴煙に伴う局所的な気温変動の検出を試み、前述の Wang et al. (2009)の結果も合わせて比較する。変動を求めるにあたって、COSMIC の1日分の気温プロファイルデータを基に250 hPa 平面における日平均気温分布を算出し、NCEP GFS (Global Forecast System) Model 再予報データによる噴火前日からの予測値を噴火の影響を含まない基準として差し引き、残差を求めた。また、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer: 中分解能撮像分光放射計)観測を用いて噴煙中のエアロゾルの分布を求め、上記の気温変動の分布と比較した。その結果、2010年アイスランド噴火では噴火翌日、火口周辺において MODIS でみたエアロゾル分布とよく一致する明瞭な負の気温異常が確認できた。2011年チリ噴火では噴火前日から火口周辺に存在していた異常によって不明瞭ではあったものの、噴火翌々日の火口近辺での異常はアイスランド噴火と同様にエアロゾル分布とよく一致していた。しかし、上記の解析だけでは異常の要因の判別は不可能であり、当日の気象状況によるモデル予測との誤差が結果に大きく影響してしまう可能性がある。また、水平分布に加えて噴火翌日、火口風下地域における高度プロファイルによる比較も行ったところ、両噴火において圏界面付近での気温の明瞭な低下が確認された。気温低下の極大高度は噴火によって異なっており、2008年チャイテン噴火では14 km、2010年アイスランド噴火では10.5 km、2011年プジェウエ噴火では11.5 kmであった。この結果は各噴火の噴煙高度の大小とほぼ対応しており、本研究の結果が噴煙による異常を捉えたものであることを裏付けている。

Abstract

Volcanic plumes modify atmospheric temperatures. Wang et al. [2009] reported localized temperature changes associated with the Mt Chaiten eruption, southern Chile, in May 2008 using the deviation of GPS radio occultation data from the NCEP global forecast system model. On 14 April 2010, a large scale eruption started under the glacier Eyjafjallajökull in Southern Iceland, and Puyehue-Cordón Caulle (Puyehue), in central Chile, started eruption on 4 June, 2011. Here we study instantaneous and localized temperature changes with these two eruptions following the method of Wang et al. [2009]. Post-eruption negative temperature anomalies at the 250 hPa plane were clearly observed in the Eyjafjallajökull eruption. In the Puyehue eruption, however, such anomalies were not so clear due possibly to complex weather conditions. By comparing the temperature profiles in the downwind areas of the two eruptions, we found that significant temperature decreases occurred at ~ 10.5 and ~ 11.5 km altitude in the Eyjafjallajökull and the Puyehue cases, respectively. These results generally agree with Wang et al. [2009], but post-eruption temperature changes seem to be influenced by additional factors, e.g. volcanic explosivity and local climatology.

目次

1.	はじめに	4
1.1	火山噴火に伴う気温変動	4
1.2	観測事例 (Pinatubo, Philippine 1991)	6
2.	観測・解析手法	8
2.1	GPS 電波掩蔽観測 GPS Radio Occultation Observation	8
2.1.1	GPS (Global positioning system)とは	
2.1.2	GPS 電波掩蔽観測	
2.1.3	FORMOSAT3/COSMIC	
2.1.4	観測例	
2.3	NCEP GFS (Global Forecast System) Model	15
2.4	MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer)	16
2.5	先行研究 (Wang et al., 2009)	17
2.6	解析手順	21
3.	観測・解析結果	23
3.1	Eyjafjallajökull, Iceland 2010	23
3.1.1	概要	
3.1.2	観測・解析結果	
3.2	Puyehue-Cordón Caulle, Chile 2011	35
3.2.1	概要	
3.2.2	観測・解析結果	
3.3	プロファイル比較	47
4.	まとめと考察	49
5.	謝辞	51
6.	参考文献	52

1. はじめに

火山噴火は、時として地球大気の大気温度に大きな影響を及ぼす。とりわけ大規模な噴火の場合、その影響は地球全体の気候を長期にわたって変化させ、我々人類を含む生命の存続に致命的な打撃を与えることもある。本章では *McCormick et al. (1995)* に基づき、火山噴火によって生じる地球大気の大気温度変動のメカニズムと、全球規模の気候変動が観測された近年最大の噴火である 1991 年ピナツボ噴火の事例について記述する。

1.1 火山噴火に伴う気候変動

火山噴火に伴う気候変動には、噴煙に含まれる様々な物質の大気中での物理的・化学的作用が関わっており、非常に複雑である。本項ではそれらの中でも特に寄与度の高い、エアロゾルの大気放射への作用について主に述べる。

火山の噴煙は主に火山灰、水蒸気(H_2O)、塩酸(HCl)、二酸化硫黄(SO_2)といった成分で構成されており、大規模な噴火が発生するとこれらの成分が大気中に大量に注入される。このうち、火山灰などの固体成分や水蒸気が凝結した水、塩酸などの液体成分は降水によって比較的短い期間で地表に落ち、大気中から取り除かれる。一方、気体成分の主要物質である二酸化硫黄は大気中の水酸化物との光化学反応によって硫酸液滴($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}$)のエアロゾルへと変化する。噴煙が成層圏(高度約 11km 以上)まで到達するような大規模な噴火の場合、このエアロゾルが下部成層圏に拡散し、長期にわたって滞留することが知られている。

エアロゾルには太陽からの放射を反射・吸収して地表に届く日射を減少させる効果があり、これを日傘効果(*Parasol effect*)という。日傘効果によって太陽からの入射が減少することで、下層の対流圏の大気温度は低下する(反対に、成層圏上部では反射された太陽放射による大気温度の上昇も観測される)。また、エアロゾルは地表からの放射を吸収して大気中に留める温室効果(*Greenhouse effect*)も併せ持つ。温室効果による大気温度への作用は前述の日傘効果によるものとは対照的であり、対流圏で大気温度は上昇し、成層圏では低下する。

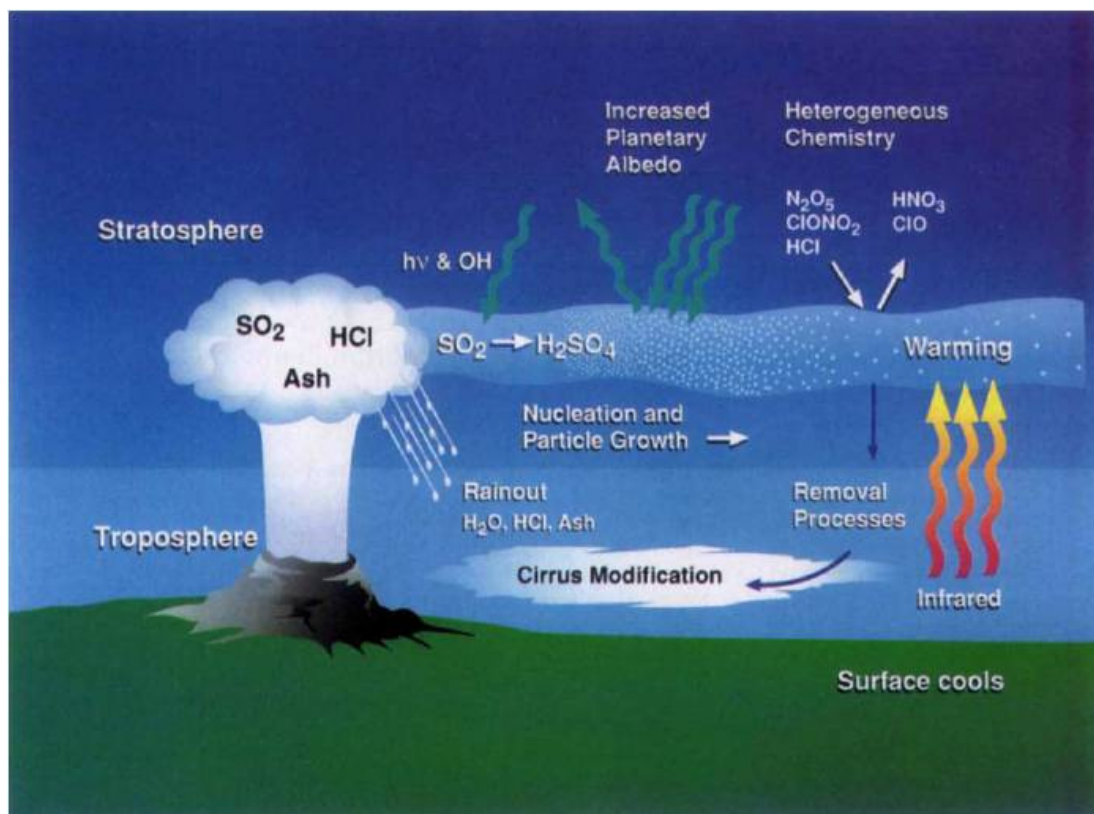


図 1-1 火山噴火に伴う気温変動の模式図.
(McComick et al. 1995 より)

これら2つの効果のうち、どちらが卓越するかはエアロゾルの粒子径によって決定されることが分かっている。エアロゾルの粒子径がおおよそ $2\mu\text{m}$ 以下の場合、対流圏の気温を低下させる日傘効果が卓越するが、粒子の成長によって径が $2\mu\text{m}$ を超えると気温を上昇させる温室効果の寄与が日傘効果を上回る。McComick et al. (1995)によると、火山噴火由来の硫酸エアロゾルの場合、粒子径の成長は平均して $1\mu\text{m}$ 程度までであるということが求められており、温室効果の影響は小さい。すなわち、火山噴火によって生成される硫酸エアロゾルは、その日傘効果の卓越によって巨視的には対流圏での気温低下と成層圏上部での気温上昇を引き起こすということが分かる。

硫酸エアロゾルによる気温変動の概要は上記の通りである。さらに、大気中の放射に影響を及ぼす物質としては水蒸気も挙げられる。噴煙成分の多くを占める水蒸気は非常に強力な温室効果ガス的一种であるため、対流圏の気温を上昇させる効果がある。また、火山周辺においては火山灰などの固体成分そのものによる日射の障害も影響する。これらは前述の通り短時間で大気中から取り除かれてしまうため長期的な影響は無いが、噴火直後の短期的かつ局所的なスケールにおいては火山周辺における気温変動の大きな要因となる。しかし、これらの要素が総合的に気温変動にどのように寄与するのかは詳細な観測事例が少なく、まだよく分かっていない。

1.2 観測事例 (Pinatubo, Philippine 1991)

1991年6月15日に起こったフィリピン共和国ルソン島、ピナツボ火山(Mt Pinatubo: 15°N,121°E)の大噴火は、噴煙による全球規模の長期的な気候変動が観測された代表的な事例である。この噴火は20世紀における最大の火山災害であり、300人余りが死亡、20万人以上の人々が避難を強いられた。火山爆発の規模を噴出物の量で区分する火山爆発指数(VEI: Volcanic Explosivity Index)(表1-1)の値は6、発生した噴煙柱の高さは高度30kmを越え、大量の二酸化硫黄が硫酸エアロゾルとなって成層圏に放出された。その量は最大で $30 \times 10^{12} \text{g}$ (30Tg)と推定されており(McCormick et al. 1992)、エアロゾルの生成量でも20世紀最大規模であった。このエアロゾルの影響により、北半球で地表平均気温が最大約0.5°C下がり、全球平均では約0.4°C低下した。

噴出物の量	VEI	噴煙の高さ	発生頻度	噴火例
<10,000m ³	0	<100m	ほぼ毎日	Kilauea
>10,000m ³	1	100-1,000m	ほぼ毎日	Stromboli
>1,000,000m ³	2	1-5km	ほぼ毎週	Galeras, 1992
>10,000,000m ³	3	3-15km	ほぼ毎年	Ruiz, 1985
>0.1km ³	4	10-25km	≥10年	Eyjafjallajökull, 2010
>1km ³	5	>25km	≥50年	Chaitén, 2008
>10km ³	6	>25km	≥100年	Pinatubo, 1991
>100km ³	7	>25km	≥1,000年	Tambora, 1815
>1,000km ³	8	>25km	≥10,000年	Yellowstone, 2Ma

表 1-1 VEI の分類表. 噴出物の量によって区分される.

図1-2は北緯30-40°でのピナツボ噴火による硫酸エアロゾル密度の増加と気温の低下の様子である。1982年1月から1998年9月までの200ヶ月間における北緯30-40°の緯度帯の月平均温度偏差(1982年1月から1990年12月の各月の平均値を基準として差し引いた値)とその15ヶ月移動平均、そしてエアロゾルの密度をそれぞれ橙、赤、緑の折れ線で表している。縦の破線はピナツボ噴火の発生日を示す。1991年6月の噴火以降、硫酸エアロゾル密度の急激な増加に追隨して気温が急激に低下したことがわかる。

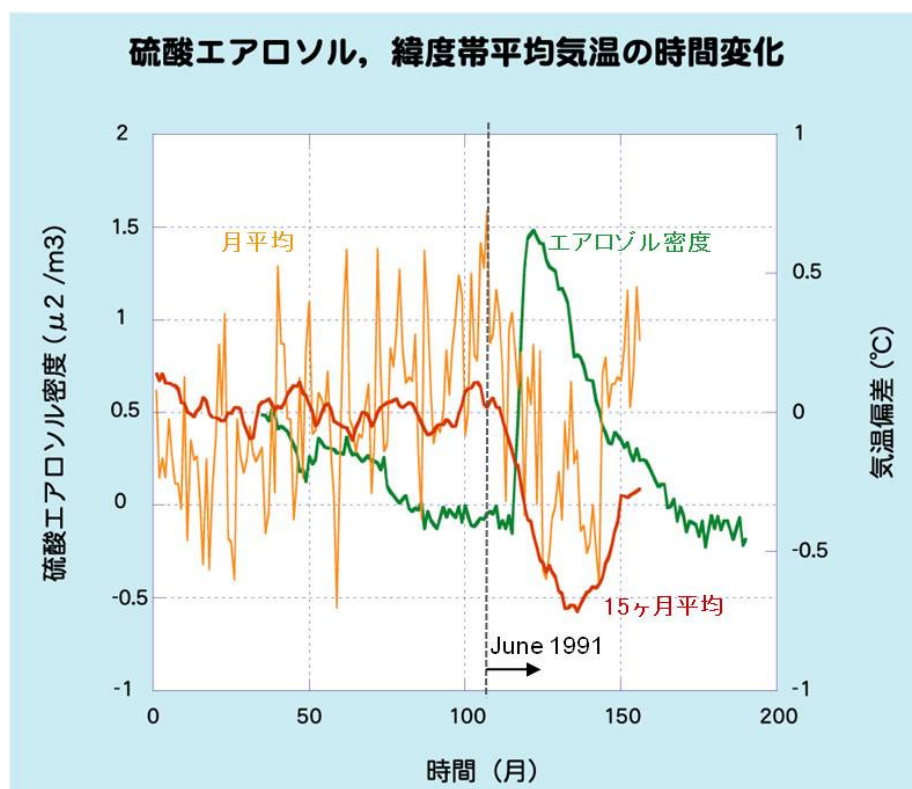


図1-2 北緯30-40°でのピナツボ噴火による硫酸エアロゾル密度の増加と、平均気温の低下の様子。緯度帯月平均温度偏差を橙色、その15ヶ月移動平均を赤、硫酸エアロゾル密度の変動を緑で示す。(九州大学総合研究博物館オンライン版より)

以上、*McCormick et al. (1995)*の報告に基づいて火山噴火に伴う気温変動のメカニズムと、1991年のピナツボ噴火の事例について述べた。このように、非常に大規模かつ長期的な“気候”スケールの気温の変動に関してはピナツボ噴火を通して詳細な観測・解析がなされた。一方で、噴火後数日程度の短い時間スケールに噴煙分布域で局所的に起こりうる気温の変動、特に地表気温だけでなく、成層圏まで含んだ鉛直構造(高度分布)などはまだよく分かっていなかった。

しかし、近年GPS衛星から到来する電波を利用したGPS電波掩蔽観測(GPS Radio Occultation Observation)と呼ばれる高密度の大気プロファイル観測手法の確立によってこれらの観測が可能となっており、*Wang et al. (2009)*によって最初の事例が報告されている(第2章で詳しく記述)。本研究では、2010年4月のアイスランドと2011年6月のチリで起こった新たな二つの大規模噴火について、*Wang et al. (2009)*の手法に倣って気温変動の解析を行い、それぞれを比較、考察する。

2. 観測・解析手法

2.1 GPS 電波掩蔽観測 GPS Radio Occultation Observation

GPS 電波掩蔽観測(GPS Radio Occultation Observation)とは、名前の通り GPS 衛星の電波を用いることで地球大気の大気温度や水蒸気などの高度プロファイルを推定する手法である。従来のラジオゾンデ観測より遥かに高い時空間密度での観測が可能であり、噴火直後の局所的な気温変動を捉える手法として適当である。本項では、その概要と大気パラメータの導出方法について記述する。

2.1.1 GPS (Global Positioning System)とは

GPS (Global Positioning System)とは全球測位システムともいい、地球上での正確な現在位置や時刻を知るための衛星システム群の総称である。複数の衛星から送られる電波を地球上の受信機で受信し、各電波の到達時間を計測することで高精度の位置決定を可能にしている。アメリカ合衆国が 1978 年から軍事上の航法支援を目的として打ち上げを開始、高度 2 万 km の軌道を約 12 時間周期で周回する 30 機ほどの衛星で構成されている。現在では本来の目的である位置決定の技術を用いた船舶・航空機の運行管理やカーナビゲーション、地殻変動検出等の利用の他、大気中の電波の屈折遅延を利用した気温や水蒸気量、電離圏の電子数等の観測(後述)も可能となっている。



図 2-1 GPS のイメージ。(国土地理院より)

GPS 衛星には安定度の高い原子時計が搭載されており、正確な時刻を常時発信している。もし、地上の受信機の時刻が衛星と完全に同期していれば、衛星の発信時刻と受信機の到達時刻の差に光速を掛けることで正確な距離を割り出せる。空間上の座標を決定するには三点からの距離を求める必要があるため、最低でも三機の衛星との距離が同時に分かれば位置決定が可能となる。しかし、衛星と受信機で時刻を完全に同期させることは厳密には不可能で

あるため、四機以上の GPS 衛星からの電波を受信することで受信機との時計の誤差を校正しつつ測位する。実際には、精度を上げるために全地球上で最低でも 4-6 機程度の衛星からの電波が常に受信できるように、衛星の数と軌道面が確保されている。

2.1.2 GPS 電波掩蔽観測

・概要

GPS 衛星から到来する電波は地球大気を通過する際に屈折する。屈折によって電波の伝達経路がわずかに長くなることと、大気中の伝搬速度が遅くなることの相乗効果で、真空中と比べて伝達時間が遅れる(大気遅延)。遅延は主に乾燥大気、水蒸気、そして電離圏の電子によって起こる。これらは地球上での正確な位置決定を行う上では深刻な誤差となり得るため様々な方法で補正されるが、逆にこれらの遅延パラメータを取り出すことで GPS を用いて地球大気を観測することができる。これを利用したのが GPS 電波掩蔽観測である。

掩蔽とは、月や惑星等の近くの天体に遠くの天体が隠れる現象であり、これを地球大気の観測に利用したのが GPS 電波掩蔽観測である。発信源の GPS 衛星と、受信機である低軌道 (LEO: Low-Earth Orbiting) 衛星で構成される。LEO 衛星から見て GPS 衛星が地球の地平線に沈む、または昇る際に電波は大気を掠めながらわずかに屈折、遅延する。この電波を受信し、屈折特性を解析することで大気の温度、水蒸気量、電離圏の電子密度に依存する屈折率高度プロファイルを得る。ラジオゾンデ等の従来の地上観測に勝る高い精度と鉛直方向の高分解能に加え、地上設備の不要な宇宙型観測であるため陸海、極域を問わず全球を定期的に観測することができる。

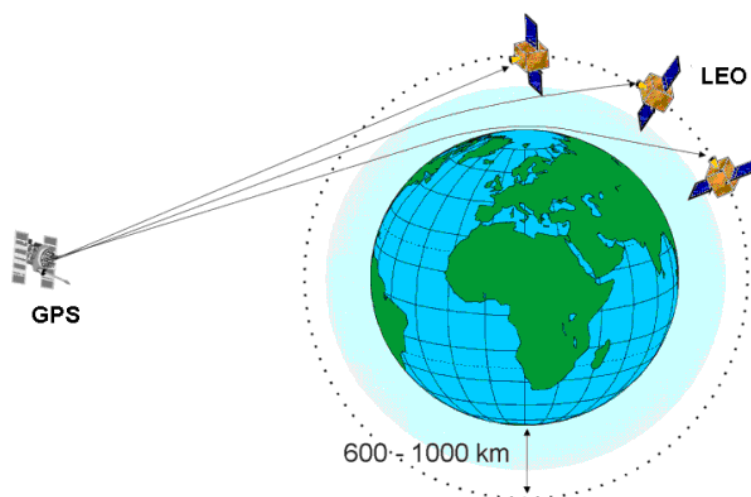


図 2-2 GPS 電波掩蔽観測の模式図。(Geodetic Data Archiving Facility より)

電波掩蔽観測の技術は最初、地球の遠方にある水星や金星等の惑星大気の構造を知る手段として 1960 年代にアメリカ合衆国で開発された(Mariner 計画)。同時に、発信衛星と受信衛星のペアによる地球大気の掩蔽観測の理論も提唱されていたが、高い軌道精度を有する複数の衛星の開発、打ち上げには当時の関心に比して莫大な費用がかかったため、実行されることはなかった。しかし、最近になって GPS 衛星網が発達したことで、これを発信源として利用する比較的低コストかつ安定した手法が確立され、地球大気の掩蔽観測が実現した。

・データ導出方法

掩蔽観測で得られるデータから屈折率プロファイルを求め、さらにそこから大気的气温、水蒸気量、電子密度等の各パラメータを導出する過程は実際には非常に複雑である。ここではその全ては記載せず、*Kursinski et al. (1997)*で述べられた手順を基に簡潔に説明する。

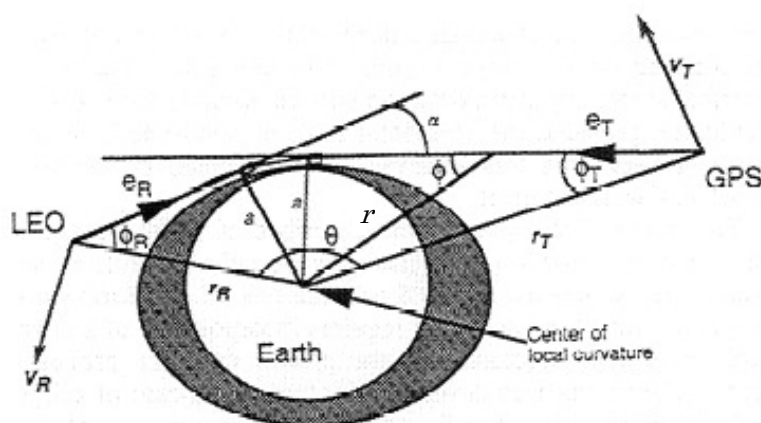


Figure 1. Instantaneous occultation geometry for the Global Positioning System (GPS) and low Earth orbiter (LEO) satellites defining variables for the derivation of α and a from Doppler shift, spacecraft position, and spacecraft velocity measurements.

図 2-3 掩蔽観測における各衛星、観測点の位置関係。屈折率高度プロファイルを得るには総屈折角 (Total Bending Angle) α を求める必要がある。(Kursinski et al., 1997)

・屈折率高度プロファイルの導出

屈折率は総屈折角 (Total Bending Angle) の Abel 変換で求められる。Total Bending Angle α は屈折率 $n(r)$ の積分として以下の式で表せる。

$$\alpha(a) = 2 \int_{r_i}^{\infty} d\alpha = 2a \int_{r_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n(r)^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (1)$$

r : 地球重心から搬送波経路までの距離

r_i は搬送波が通過した大気経路のうちの最も地球重心に近い点までの距離(r の最小値)である。地球重心から見て r_i 以遠での屈折を大気突入時と脱出時について積分している。(1)式は Abel 変換を用いて $n(r)$ についての積分式(2)に変換できる。

$$n(r) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{a^2 - a_1^2}} da \right] \quad (2)$$

つまり、様々な a に対して実際に得られる観測量から Total Bending Angle α を導出できれば、その時点での大気の屈折率の高度分布が分かる。ここで α は図 2-3 より、(3)式で表せる。

$$\alpha = \phi_T + \phi_R + \theta - \pi \quad (3)$$

θ は GPS・LEO 両衛星の位置から分かるので、二つの未知量 $\phi_T \cdot \phi_R$ を受信データから求めればよい。受信機が受け取る GPS 衛星からの電波は、ドップラーシフトによって周波数が増える。変化後の周波数を f_d (Doppler)、変化前を f_T (Transmitter)とすると f_d は(4)式で表せる。

$$f_d = \frac{f_T}{c} (V_T \cdot \hat{e}_T + V_R \cdot \hat{e}_R) =$$

$$- \frac{f_T}{c} (V_T^r \cos \phi_T + V_T^\theta \sin \phi_T + V_R^r \cos \phi_R - V_R^\theta \sin \phi_R) \quad (4)$$

c : 光速

また、大気の球対称(水平方向に一様)を仮定すると、スネルの法則より

$$nr \sin \phi = \text{const} = a = nr_i \quad (5)$$

である。 $r \rightarrow \infty$ のとき、つまり $\phi = \phi_T$ または ϕ_R のとき、 $n=1$ であるから $\phi_T \cdot \phi_R$ は(5)式より

$$r_T \sin \phi_T = r_R \sin \phi_R = a \quad (6)$$

つまり(3)(4)(6)式より、実際の観測量であるドップラーシフトした搬送波の周波数 f_d から Total Bending Angle α が求められる。こうして様々な a について α が求められれば、(2)式

を用いて高度の関数としての屈折率 $n(r)$ を求めることができる。(5)式が成り立つこと、つまり大気の球対称を前提としているため、水平方向の変化は値に含まれない。そのため、得られる屈折率はある程度の広がり(約 200-300km 四方)を持つ水平面での平均値である。また、現実には地球は楕円体であるため、球対称を仮定して計算された掩蔽観測のデータには、精度にほとんど影響は無い程度のわずかな誤差が生じる。

実際の GPS 電波掩蔽観測では、衛星同士的位置関係によって電波の経路が地表-大気圏外の間を時間と共に通過していく。この時の α の時間変化を追うことで n の高度による違い、つまり屈折率の高度プロファイルを得ることができるのである。

・パラメータの分離

今、ある高度での屈折率 N は依存するパラメータの値を用いて以下の式で表せる。

$$N = (n - 1) \times 10^6 = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} + 4.03 \times 10^7 \frac{n_e}{f^2} + 1.4W \quad (7)$$

T が気温、 P が大気圧、 P_w が水蒸気圧、 n_e が電子密度、 f が搬送波の周波数、 W が大気中の微粒子(主に液体の水粒)の密度である。この(7)式から気温の値を求めるためには、電子密度と水蒸気圧のパラメータを推定し、それらを分離すればよい(微粒子密度 W の項は極めて微小であり完全に無視できる)。このうち、電子の影響については周波数依存性を利用して求めることができる。(7)式を見れば分かるように屈折率 N は搬送波の周波数に依存している。GPS 衛星の搬送波は、この性質を利用するために L1 (=1575.42Mhz) 及び L2 (=1227.60Mhz) という二つのバンド(周波数帯)が設定されている。二種類の搬送波の周波数をそれぞれ $f_1 \cdot f_2$ とすると、電子密度 n_e は屈折率の差をとることで(8)式で求められる。

$$n_e = \frac{N_2 - N_1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (8)$$

(A=4.03×10⁷)

次に、水蒸気 P_w の影響の分離であるが、これには独立した別の観測値、または予報値を代入する必要がある。つまり、厳密には掩蔽観測単独による気温と水蒸気量の推定は不可能である。しかし、高高度などの水蒸気が非常に少なく(混合比<10⁻⁴)、影響を無視できる好条件においては、誤差 0.5℃以下という非常に高い精度での気温の推定が可能である(Kursinski et al., 1996)。一方で、水蒸気が豊富な低高度かつ低緯度の地域では観測誤差が大きく、観測値には注意が必要である。本研究は中、高緯度地域の高層大気が主な対象であるため、観測値の精度に大きな問題は無いといえる。

2.1.3 FORMOSAT-3/COSMIC 衛星

本研究では、2006年4月に米国と台湾の共同で打ち上げられた FORMOSAT-3/COSMIC (Taiwan 's Formosa Satellite Mission #3/Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate) 衛星の気温高度プロファイルデータを CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center Version 3.0 (<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac>)よりダウンロードして用いる。FORMOSAT-3/COSMIC は周期 95 分、高度 520km、軌道傾斜角 72° の円軌道を周回する LEO(低軌道)衛星を、軌道面の昇交点傾度をずらした三つの軌道に 2 機ずつ、計 6 機配置することで、1 日あたり約 2500 の鉛直プロファイルデータを全球にわたって得ることができる。

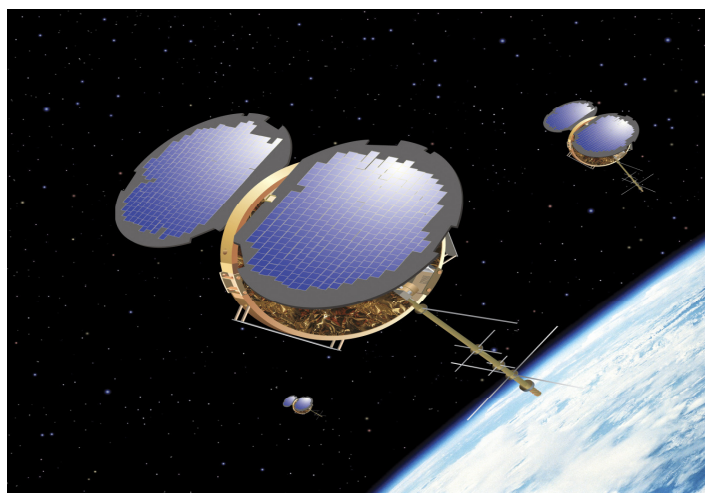


図 2-4 FORMOSAT-3/COSMIC 衛星。
(COSMIC web page より)

Occultation Locations for COSMIC, 6 S/C, 6 Planes, 24 Hrs

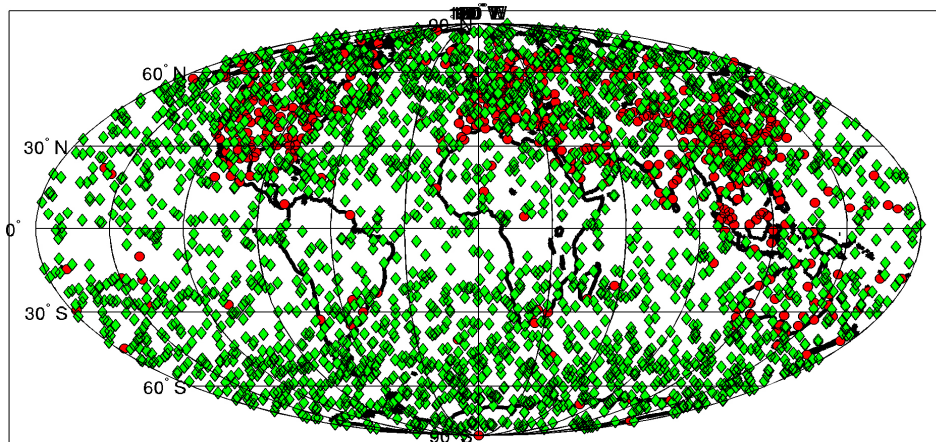


図 2-5 FORMOSAT-3/COSMIC による一日の観測点数(緑).
赤はラジオゾンデの観測点. 軌道の性質上,赤道付近
のデータ密度が低い. (COSMIC web page より)

2.1.4 観測例

FORMOSAT-3/COSMIC 衛星の観測で得られた気温高度プロファイルの例を下図に示す。

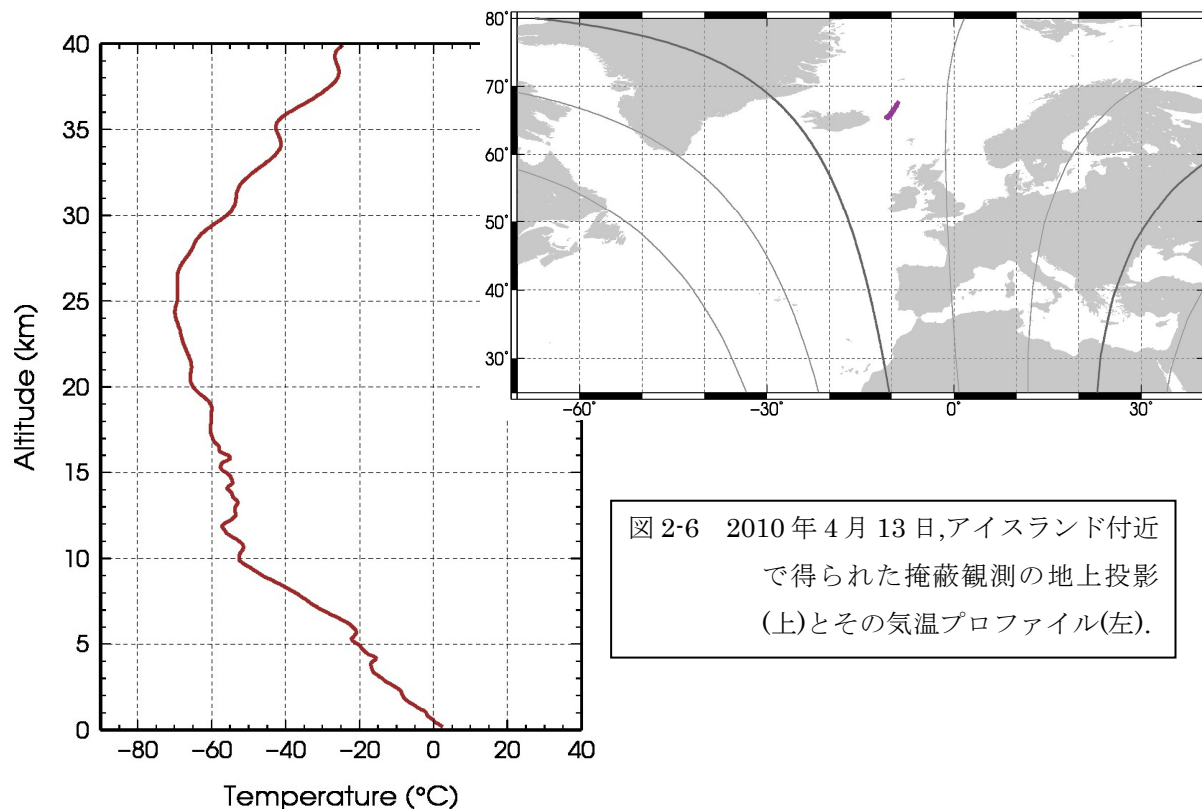


図 2-6 2010 年 4 月 13 日,アイスランド付近
で得られた掩蔽観測の地上投影
(上)とその気温プロファイル(左).

図 2-6 は 2010 年 4 月 13 日 6 時 27 分 UTC にアイスランド付近で観測されたプロファイル(左)とその観測域を地上に投影した図(上)である。GPS 電波掩蔽観測は GPS 衛星と LEO 衛星が移動しながら観測を行うため、観測域は図のように水平方向に長さをもつ。気温プロファイルを見ると、高度およそ 10-11km 付近に対流圏と成層圏の境界である対流圏界面がはっきり分かる。また、高度 10-15km には大気波動によるものと見られる揺らぎの構造も確認できる。GPS 電波掩蔽観測は数 10m から数 100m という非常に高い鉛直分解能をもつため、このような地球大気の鉛直構造の詳細な観測が可能である。

2.3 NCEP GFS (Global Forecast System) Model

本研究では噴火に伴う気温変動を捉える際の基準として、National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast system (GFS) model の予報値を用いる。データは National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL) (<http://www.esrl.noaa.gov>) の再予報(reforecast)ダウンロードシステムより取得した。NCEP GFS model は特定気圧平面の気温、降水、高度、風速などをグリッド数で経度方向 192 点、緯度方向 94 点の水平分解能で 12 時間ごとに 15 日先まで予測可能である。

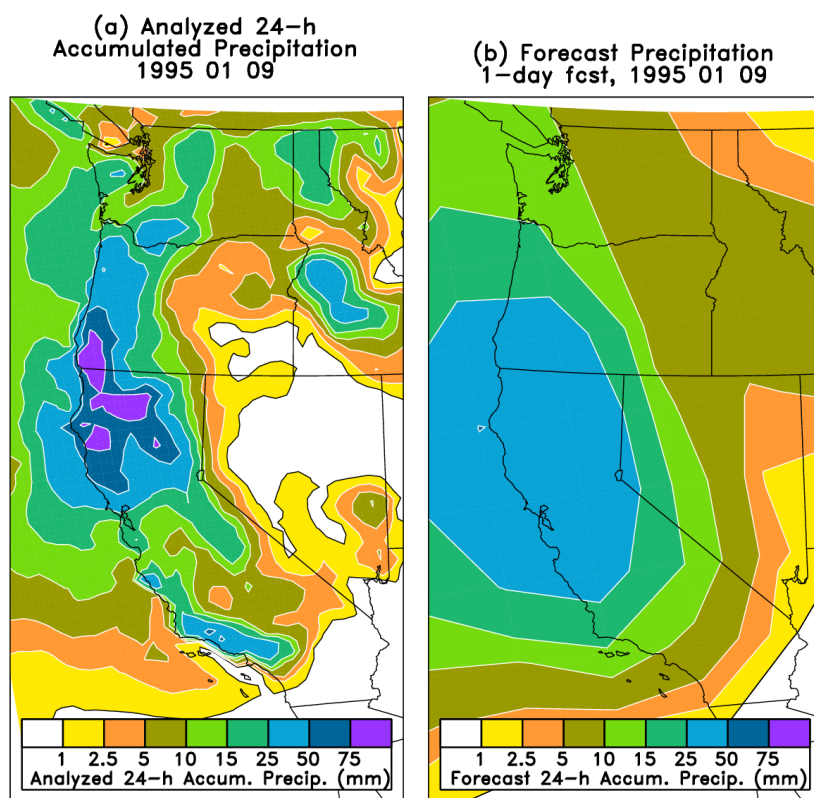


図 2-7 アメリカ西海岸の日降水量の解析値(a)と NCEP GFS model による再予報値(b)の比較例. (Earth System research Laboratory web page より)

なお、NCEP GFS model についての具体的な解説は、本研究の主旨から外れるため上記の概要に留める。詳細な情報については Details of GFS Model Version used in ESRL/PSD Reforecast Project (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/reforecast/details.html>)、Caplan *et al.* (1997) や Hagedorn *et al.* (2008) などを参照のこと。

2.4 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer)

噴煙の水平分布を求める手法として、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer: 中分解能撮像分光放射計)によるエアロゾル観測を用いる。MODIS とは、National Aeronautics and Space Administration (NASA)の地球観測衛星 Terra (1999~) 及び Aqua (2002~)に搭載されている放射計の総称である。0.4 μm - 14.4 μm の範囲に 36 バンドの観測周波数を持ち、大気中の雲やエアロゾルの分布、海面水温や海色、地表の積雪分布や植生指数など、様々な地球環境数値の観測が可能である。

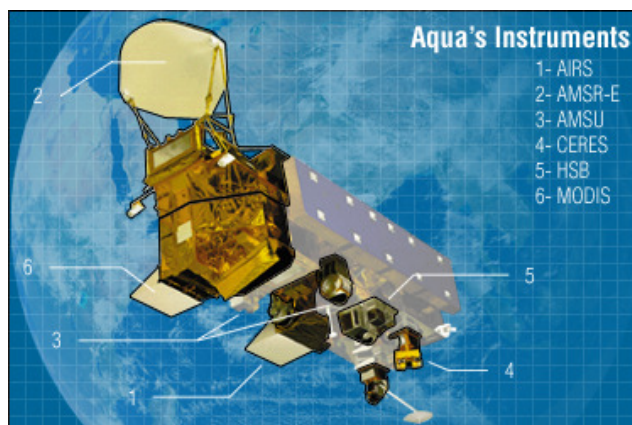
搭載する Terra/Aqua 衛星はそれぞれ進行方向が Descending(北から南)/Ascending(南から北)の太陽同期準回帰軌道で、いずれも高度 705km、軌道傾斜角 98°、回帰日数 16 日、周期 99 分である。観測頻度が高く、比較的短い時間スケールの時系列変化を捉えることができる。

本研究では、550 nm (0.55 μm)の可視波長で噴火後のエアロゾル光学厚さ(Optical Depth)分布を求める。データは NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (<http://daac.gsfc.nasa.gov/>)から取得した。



図 2-8 Terra 衛星. (NASA, Terra web page より)

図 2-9 Aqua 衛星. (NASA, Aqua web page より)



2.5 先行研究 (Wang et al., 2009)

本項では、GPS 電波掩蔽観測を用いて火山噴火に伴う局所的な気温変動の検出を試みた唯一の先行研究である、*Wang et al. (2009)*を紹介する。対象とする噴火は2008年5月2日に発生した南米チリの南部にある、チャイテン火山(Mt Chaitén: 43°S, 73°W)の噴火である。近年の火山噴火の中では1991年のピナツボ噴火に次ぐ規模であり、VEI (表 1-1)は5、噴煙柱は高度 20 km に達した。

報告によると、噴煙が分布する火口の風下地域において、下部成層圏に該当する高度 15 km 平面での気温低下が捉えられた。また、該当地域の高度プロファイルから、噴煙による局所的な気温変動として、対流圏界面-下部成層圏にかけての気温低下に加え、下部対流圏の上昇という高度分布が求められた。しかし、これらは噴火だけでなく当時の気象状況の影響も多分に含まれることから、不確かな部分も多い。

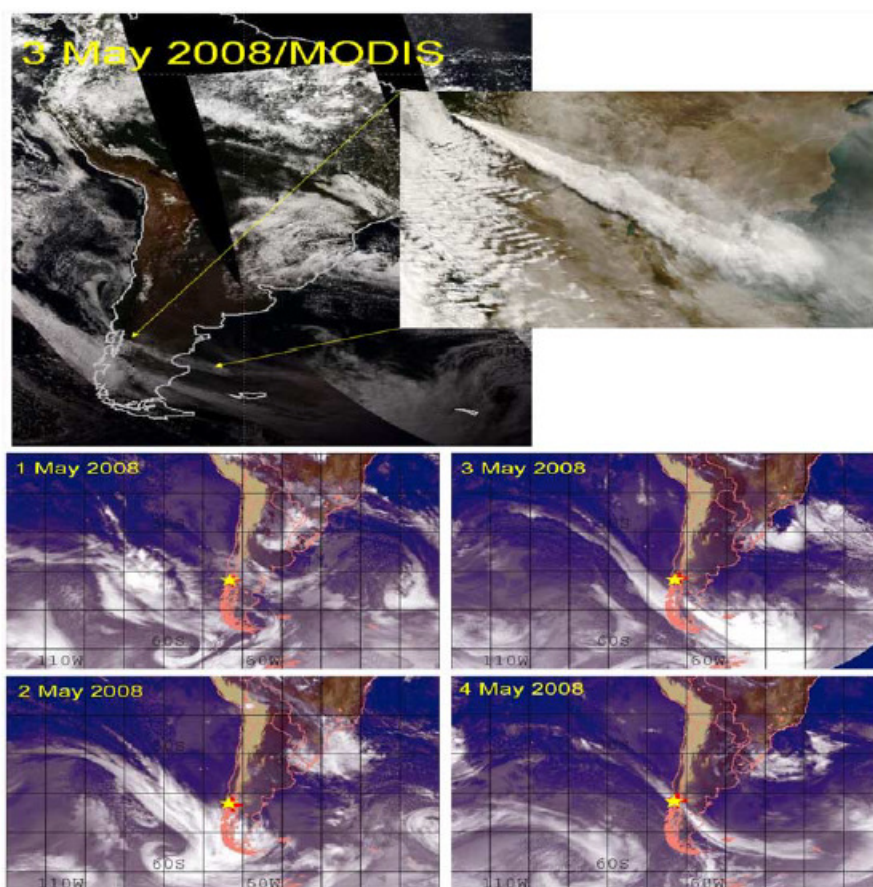


Figure 1. (top) The volcanic plume following the Mt Chaitén eruption observed by MODIS at 1435 UTC on 3 May 2008, about 32–34 hours after the initial eruption (<http://earthobservatory.nasa.gov>). (bottom) Multi-satellite infrared cloud images at 1200 UTC of each day of 1–4 May 2008. Yellow stars indicate location of Mt Chaitén. Original image sources: Naval Research Laboratory (<http://www.nrlmry.navy.mil>).

図 2-10 MODIS が捉えた 2008 年 5 月 3 日チャイテン噴火の噴煙の様子(上段)と、5月1日～4日の気象衛星による赤外雲画像(下段)。星印で火口の位置を示す。東向きの風によって噴煙が移動している(Wang et al., 2009)。

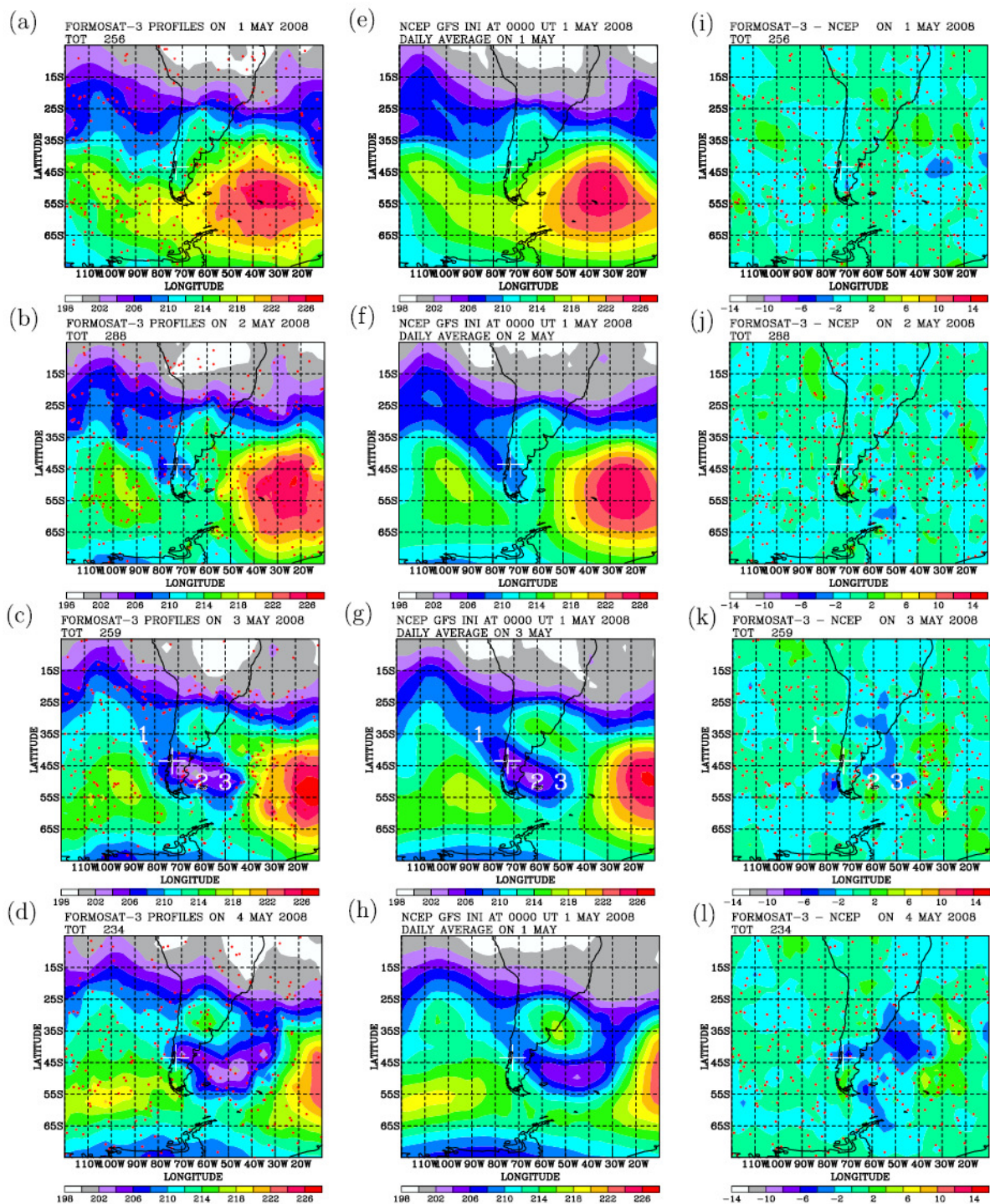


Figure 3. Daily average temperature analyses at 15 km altitude from the FS3/C profiles (red dots) for (a) 1, (b) 2, (c) 3, and (d) 4 May 2008. Daily average temperature distribution from the NCEP GFS model on (e) 1 May, and the subsequent predictions at 15 km altitude for (f) 2, (g) 3, and (h) 4 May. (i-l) Difference between the FS3/C analysis and the NCEP GFS model. The crosses on each plot indicates the location of Mt Chaiten.

図 2-11 (左列,a-d)噴火前日の 5 月 1 日から翌々日 4 日までの FORMOSAT-3/COSMIC 掩蔽観測気温プロファイルから求めた高度 15 km 平面における日平均気温分布。(中央,e-h) NCEP GFS model の噴火前日 0 時を初期値とする各日の気温分布予測。(右列,i-l) 掩蔽観測とモデル予測値の差。図中の赤点は掩蔽観測点,白の十字は火口位置,数字は図 2-12 で示す気温プロファイルの位置をそれぞれ示す(Wang et al., 2009)。

図 2-10 は 2008 年チャイテン噴火翌日の噴煙と、噴火前日から 4 日間における周辺の雲の様子である。噴煙は風によって東向きに流れている。また、噴火前後 4 日間の雲の動きから、火口上空を北西から南東の方向に流れる大きな気流が存在していることが分かる。当然、噴煙とその周囲の気温もこの気流の影響を受けているものと考えられる。

図 2-11 は噴火前日の 5 月 1 日から翌々日 4 日までのチャイテン周辺の高度 15 km 平面における日平均気温分布である。左列が FORMOSAT-3/COSMIC の掩蔽観測、中央が NCEP GFS model の予測、右列がそれらの差を表す。掩蔽観測の気温分布(a-d)を見ると、図 2-10 の雲画像で見られた北西から南東方向の気流に沿って低緯度帯から気温の低い領域が伸びている。同様の構造はモデル予測 e-h からも確認でき、NCEP GFS model による予測は掩蔽観測とよく一致していることが分かる。しかし、それらの差を見てみると噴火翌日以降、火口東側に明らかな負の異常が見られる(k,l)。これは、気流によって東側に流された噴煙によって高度 15 km において気温が低下したことを示している。

噴火翌日、5 月 3 日の火口周辺の日平均気温プロファイルを図 2-12(a-c)に示す。図 2-11 には(a)、(b)、(c)それぞれの位置が数字 1、2、3 で示してある。それぞれを比較してみると、火口風上の(a)の値は過去の最大、最小幅の中に収まっているのに対して、(b)と(c)は高度 14 km をピークとして明らかに気温が低くなっていることが分かる。また、(c)では高度約 10 km 以下の対流圏における気温の上昇も見られる。このように、火口風上と風下のプロファイルの比較からも噴煙によって気温の局所的な変動が起こったことが確かめられる。

プロファイル(c)から求めた、地点 3 における気温変動の高度分布が(d)である。高度 14 km 付近、下部成層圏での気温低下と、10 km 以下、対流圏での上昇、という分布が得られた。

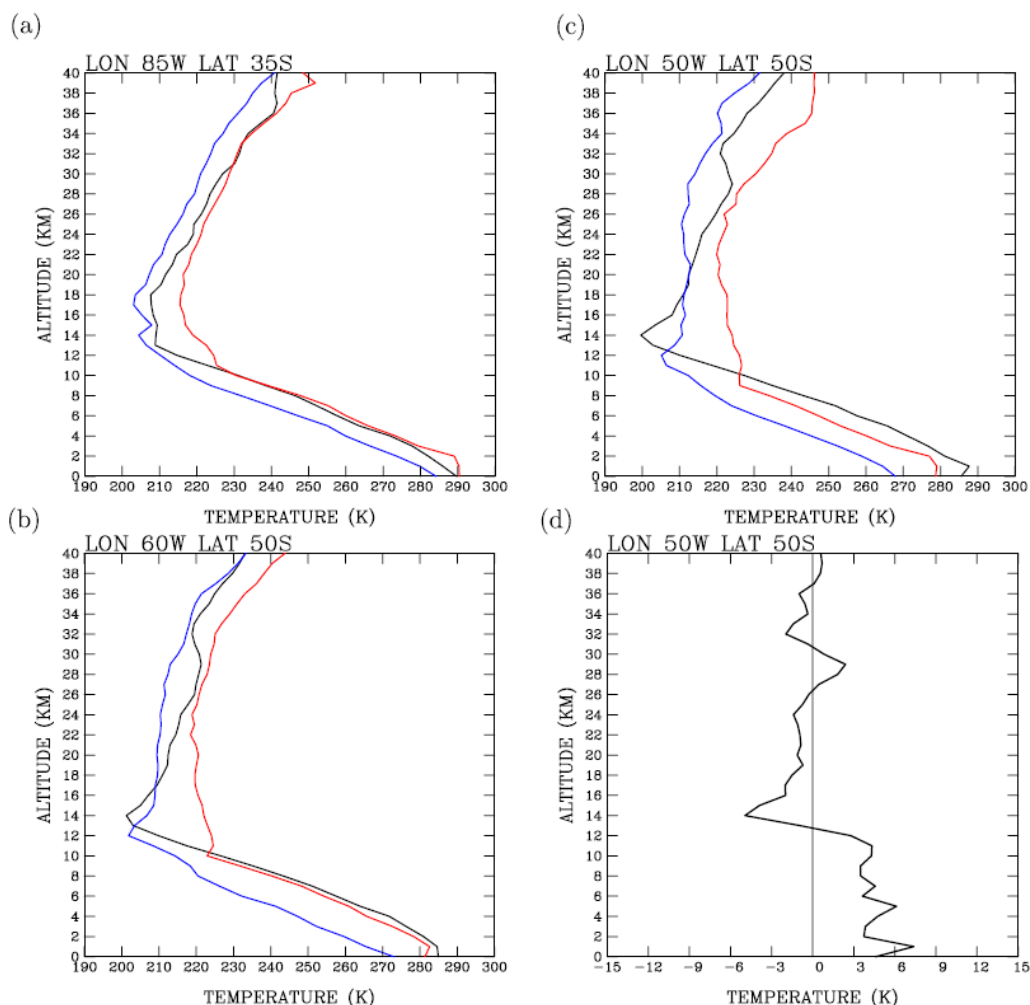


Figure 4. (a) Profiles of maximum (red) and minimum (blue) temperatures for the periods of 25 April-9 May 2007 and 25 April-2 May 2008, and the 24-h average temperatures on 3 May 2008 (black) from the FS3/C analysis at Location 1 (85°W, 35°S), upwind of Mt Chaiten. (b) The same as in Figure 4a but for Location 2 (60°W, 50°S), downwind of Mt Chaiten. (c) The same as in Figure 4a but for Location 3 (50°W, 50°S), further downwind of Mt Chaiten. (d) Profile of temperature difference between the FS3/C analysis and the NCEP GFS model at Location 3 on 3 May 2008. Locations 1, 2, and 3 are marked in Figure 3.

図 2-12 (a-c)噴火翌日、5月3日の各地点における日平均気温高度プロファイル(黒)と、2007-2009年の同時期、同地点における最大値(赤)と最小値(青)。a,b,cの位置を図 2-11中の地点1,2,3でそれぞれ示す。(a)は火口の風上,(b),(c)は風下にある。(d)プロファイル(c)からNCEP GFS model 予測値を差し引いた変位分ブプロファイル(Wang et al., 2009)。

以上が先行研究 *Wang et al.* (2009)の概要である。上記の内容から、GPS 電波掩蔽観測と NCEP GFS model を比較する手法は、噴火に伴う日単位の局所的な変動を捉えるうえで有効であるといえる。しかし、この変動の具体的なメカニズムについてはまだよく分かっていない。また、噴煙による効果以外にも前述の低緯度地域から火口上空に伸びる気流の存在が観測とモデル予測の誤差に影響を及ぼした可能性が十分にある、とも記述されている。

本研究で解析事例を増やし、それらを比較することでさらに詳しく検証していきたい。

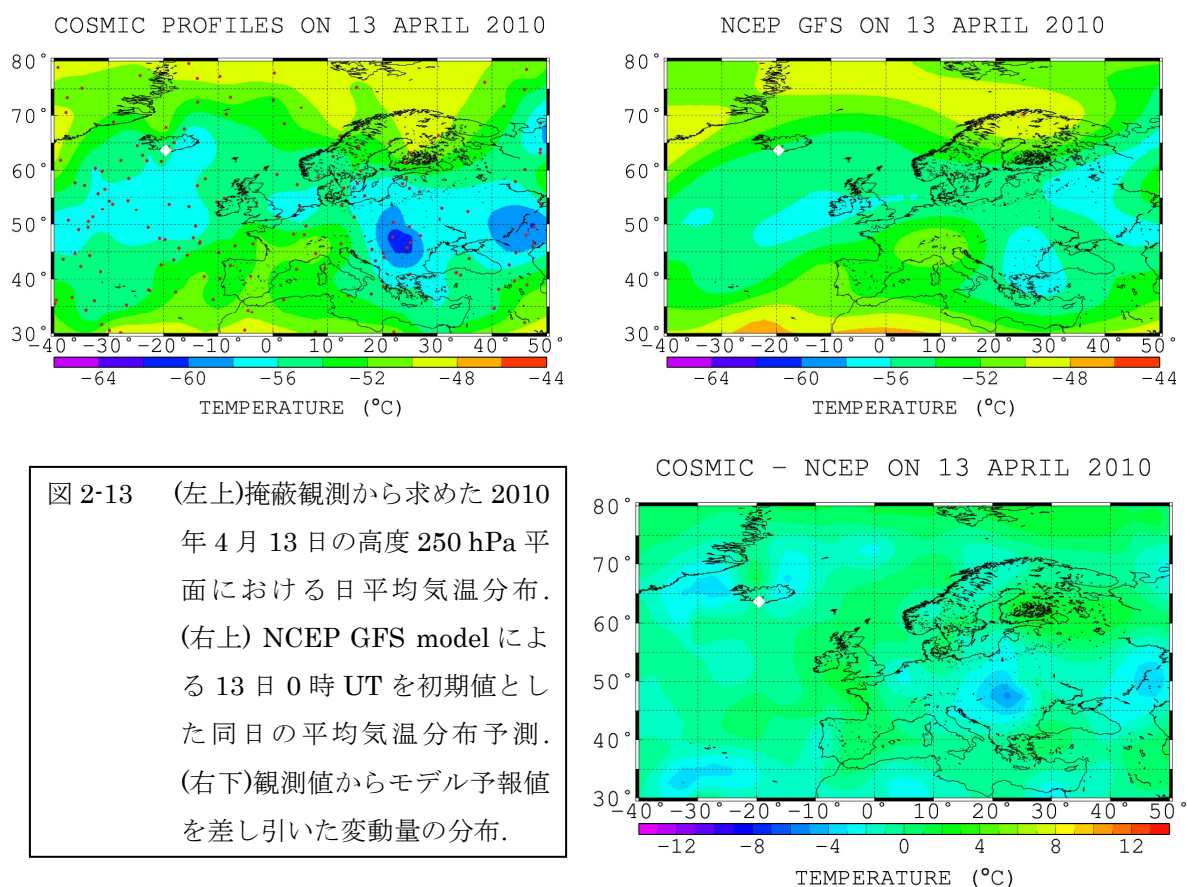
2.6 解析手順

本研究の対象は2010年4月14日に起こったアイスランド、エイヤフィヤトラヨークトル (Eyjafjallajökull) 氷河の噴火(VEI=4)と、2011年6月4日に起こったチリ、プジェウェ火山 (Puyehue-Cordón Caulle)の噴火(VEI=4)である。両噴火とも、FORMOSAT-3/COSMIC 衛星打ち上げの2006年4月以降では前述のチリ、チャイテン噴火に次ぐ大規模な噴火である。解析手法は前項で紹介した *Wang et al. (2009)*を参考に、噴火前後における気温の水平分布と高度プロファイルによる解析を行った。それぞれの手順は以下の通りである。

・水平分布

全球で得られた一日分の掩蔽観測気温プロファイルの特定高度平面における値を取り出す。これらの値は平面内での座標も観測時刻も無作為であるため、平面内において内挿処理を施すことでその日の全ての値を時空間的に均一化し、これを日平均気温分布とする。また、噴火による気温変動を求めるため、基準値として NCEP GFS model の予報値を用いる。予報の初期値は、噴火の影響がモデルに含まれないように噴火前日の0時 UT とする。本研究では、観測、予報ともに高度 250 hPa 等圧面で解析を行った。

上記の手法で求めた水平気温分布からモデル予報値を差し引くことで、噴火後の局所的な変動を検出する。また、MODIS による噴煙中のエアロゾル水平分布との比較も行う。



・高度プロファイル

単独の掩蔽観測気温プロファイルは特定の時刻における値であり、観測点も限られるため、比較検討に用いるのには相応しくない。そこで、噴煙分布域の任意の地点における日平均気温高度プロファイルを求める方法として、上記の水平面内挿を地表から高度 40 km まで 100 m ごとに求め、それらを積層した 3 次元日平均気温分布から特定の緯度経度の値を取り出す。

プロファイルの変動量の基準として、2010 年アイスランド噴火では 2007-2009 の過去 3 年間、2011 年チリ噴火では 2007-2010 年の過去 4 年間の同時期、同地点における高度プロファイルの平均とその標準偏差を求めた。

また、本研究の 2 つの噴火の解析結果と、Wang et al. (2009)の結果の合計 3 つの噴火事例を比較した。

以上の結果から、火山噴火に伴う局所的な気温変動の様相を明らかにし、考察を行う。

3. 観測・解析結果

3.1 Eyjafjallajökull, Iceland 2010

3.1.1 概要

2010年4月14日、アイスランド南端の山岳氷河エイヤフィヤトラヨークトル (Eyjafjallajökull: 64°N, 20°W)の直下で過去の噴火から190年ぶりに開始、溶岩の流出と噴煙の発生がおおよそ1ヶ月継続した。1991年のピナツゴ噴火に比べると規模の小さい噴火であったが、発生した噴煙柱は噴火初期に最大高度11 kmまで到達し、西寄りの風によって欧州全域に運ばれて航空網に大きな混乱をもたらした。この噴火による火山噴出物の総量は約2億5000万 m³、VEIは4に該当する (Global Volcanism Program: <http://www.volcano.si.edu/index.cfm>)。

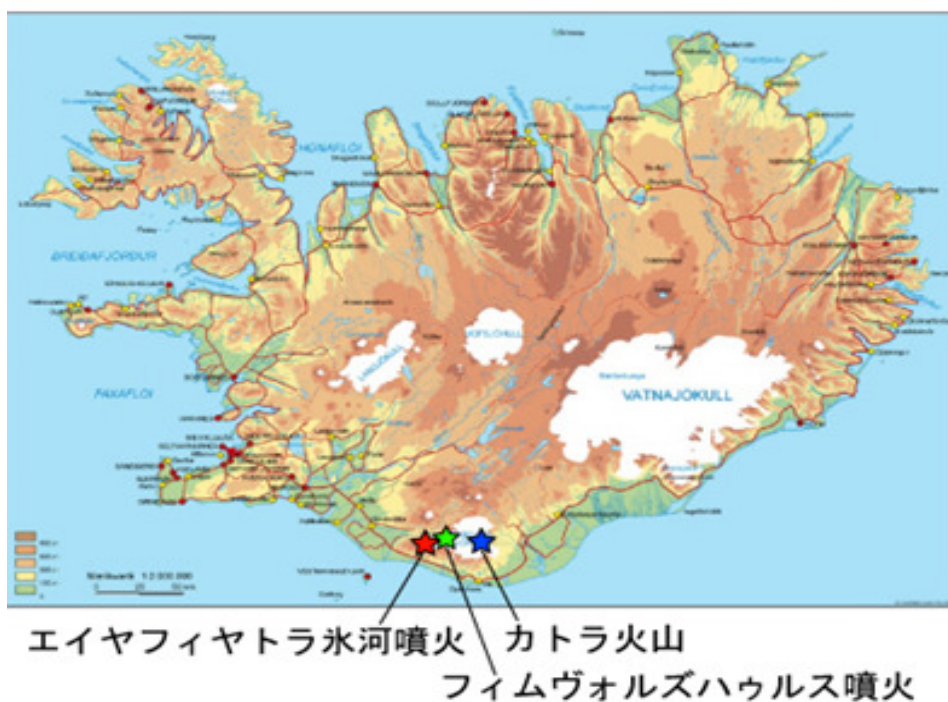


図 3-1 噴火が起こったアイスランド,エイヤフィヤトラヨークトル氷河の位置(赤星). (日本地質学会 web page より)

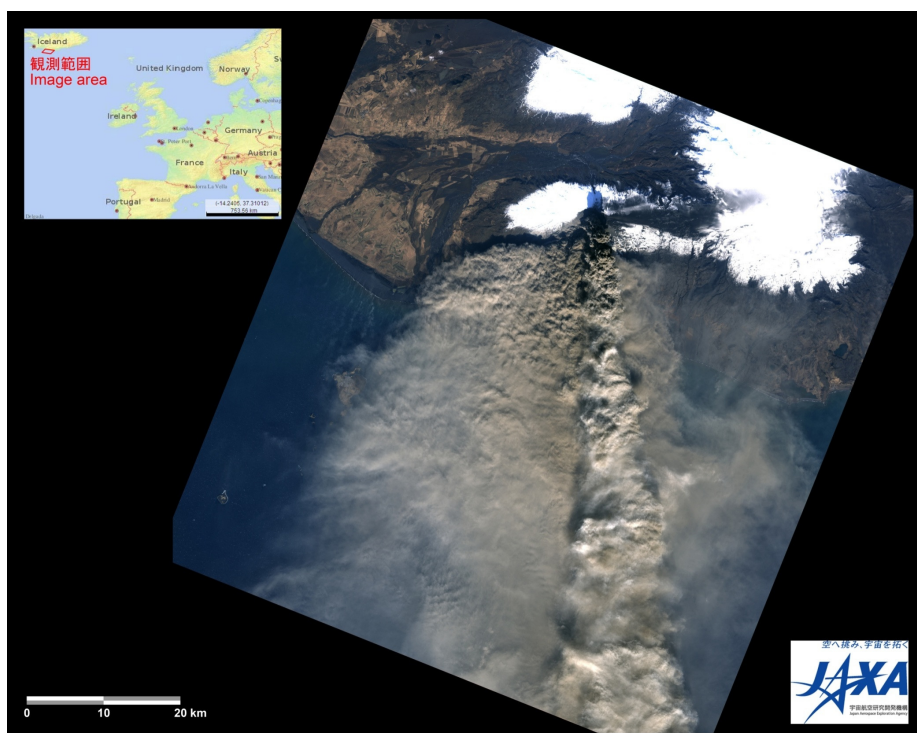


図 3-2 2010 年 4 月 17 日 22 時 14 分 JST, 陸域観測衛星だいちによって撮影された噴煙の様子. (JAXA web page より)

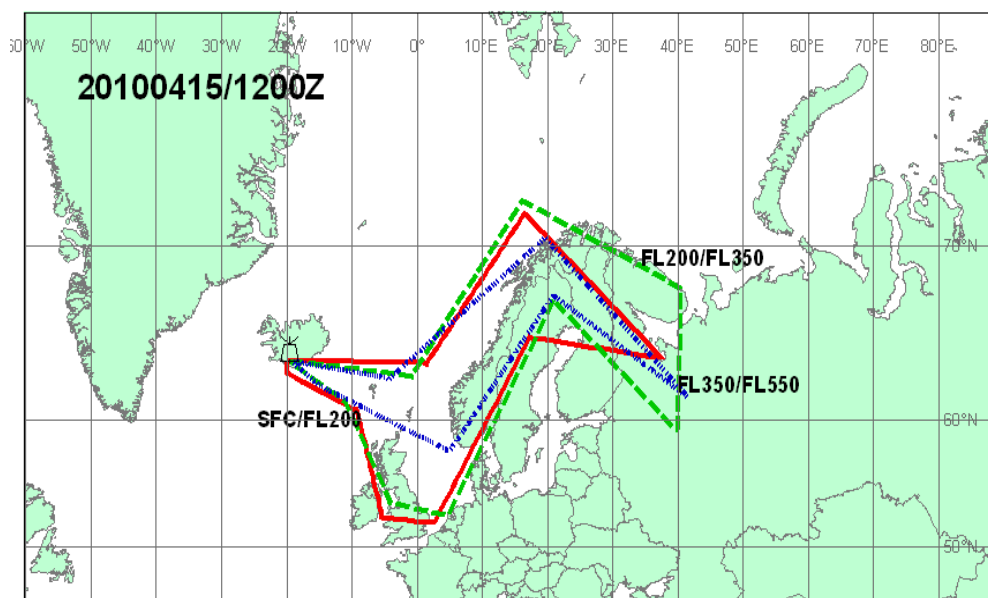


図 3-3 イギリス気象庁による 2010 年 4 月 15 日 12 時 UTC において推定された噴煙の分布. (Met Office web page より)

3.1.2 観測・解析結果

・MODIS

まず、MODISによる噴火前と後のエアロゾル観測の結果を図3-4に示す。噴火後にエアロゾルの特に多い領域が火口から東南東方向に伸びており、噴煙由来のものであると思われる。また、西側にも若干の分布が確認できる。

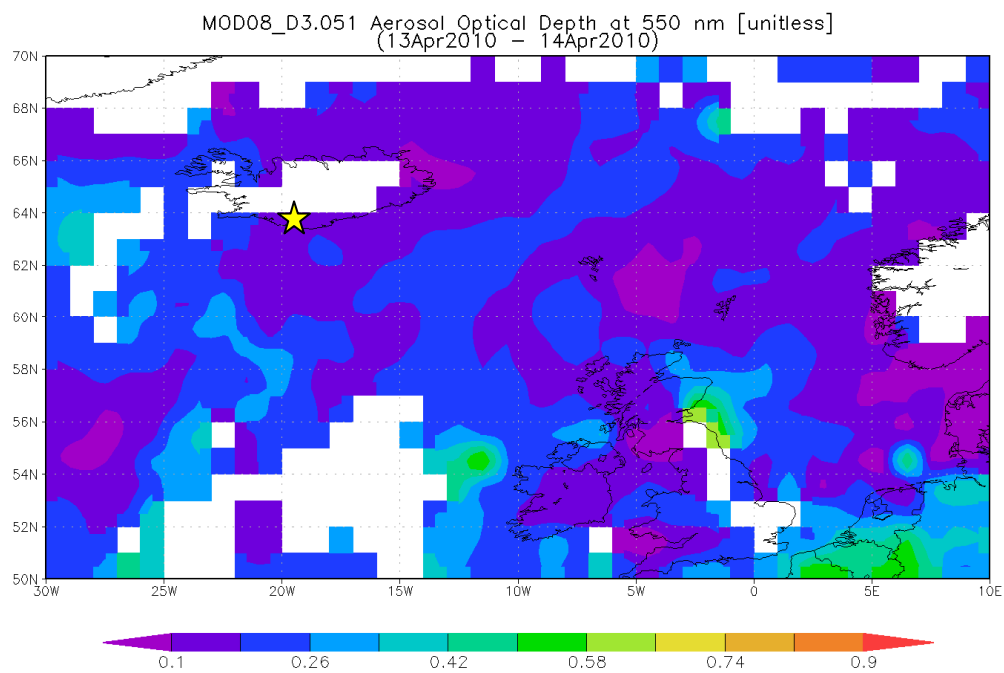
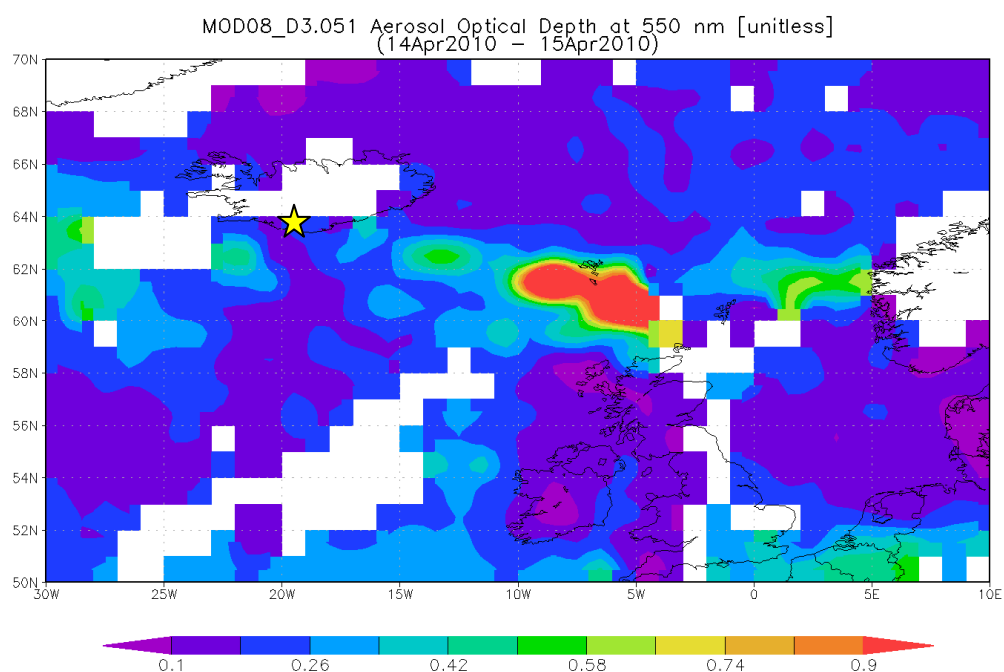


図3-4 噴火直前(2010年4月13-14日)のエアロゾル光学厚さ分布(上)と噴火直後(2010年4月14-15日)の同図(下). 火口位置を星印で示す.



・ GPS Radio Occultation

次に、FORMOSAT-3/COSMIC の GPS 電波掩蔽観測による 2010 年 4 月 13 日(噴火前日)から 16 日(翌々日)までの 4 日間における 250 hPa 平面日平均気温分布を図 3-5~3-8 に示す。噴火前の火口周辺、アイスランド南端における気温は -54°C から -58°C である(図 3-5)。噴火当日になると、火口周辺には東西に伸びる -58° 以下の低温の領域が現れる(図 3-6)。低温の領域は噴火翌日にさらに強くなるが、火口の南東において特に顕著であり、 -62°C 以下まで低下している(図 3-7)。また、図 3-8 から、この低温領域が徐々に東に移動していることが分かる。

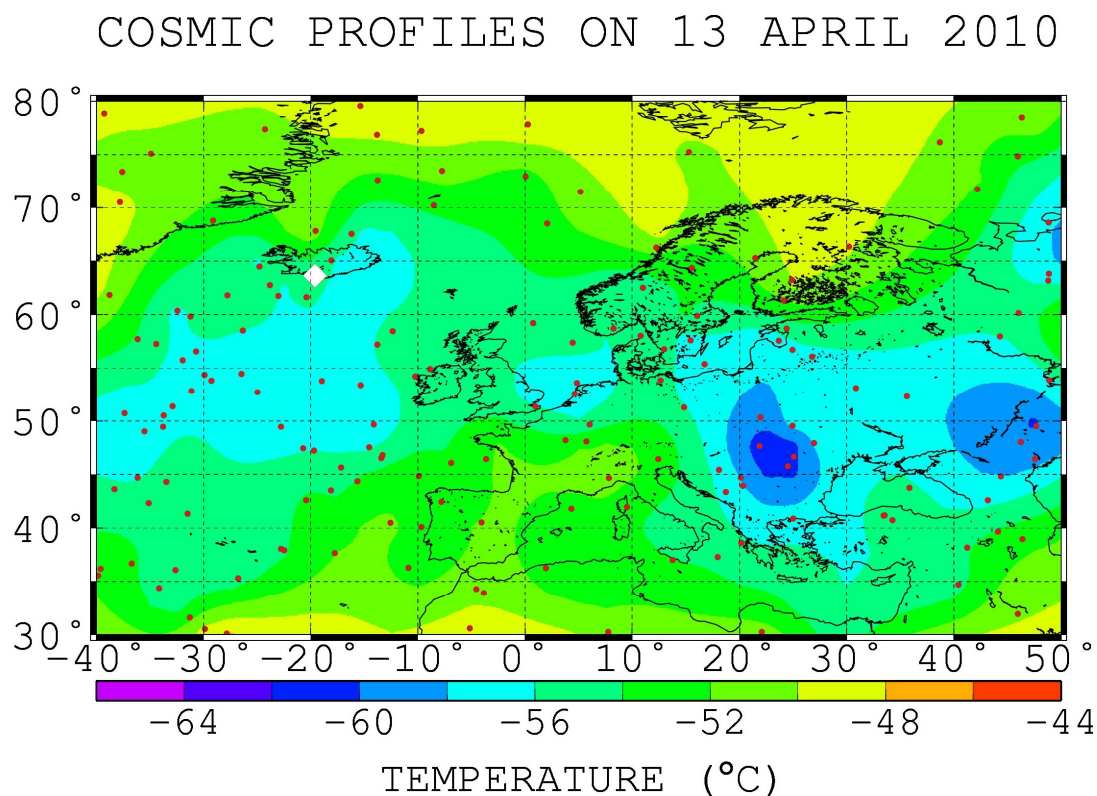


図 3-5 GPS 電波掩蔽観測から得られた噴火前日(2010 年 4 月 13 日)の 250 hPa 平面における日平均気温分布。掩蔽観測点を赤色の点、火口位置を白色の菱形で示す。

COSMIC PROFILES ON 14 APRIL 2010

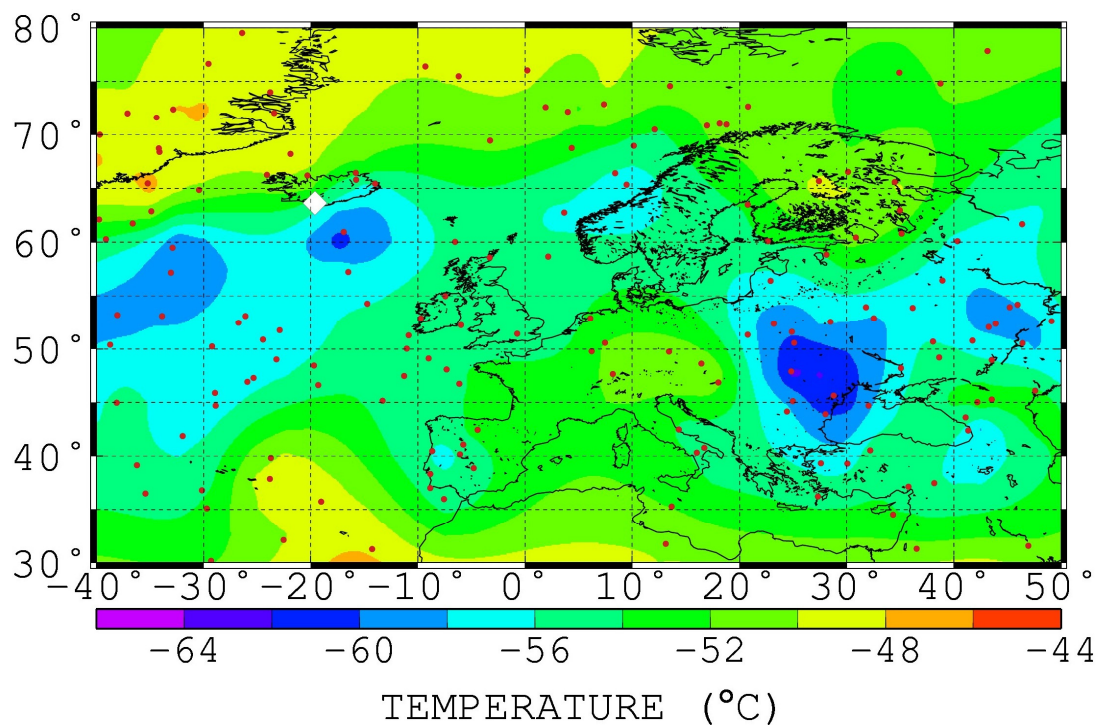


図 3-6 噴火当日(2010年4月14日)の同図.

COSMIC PROFILES ON 15 APRIL 2010

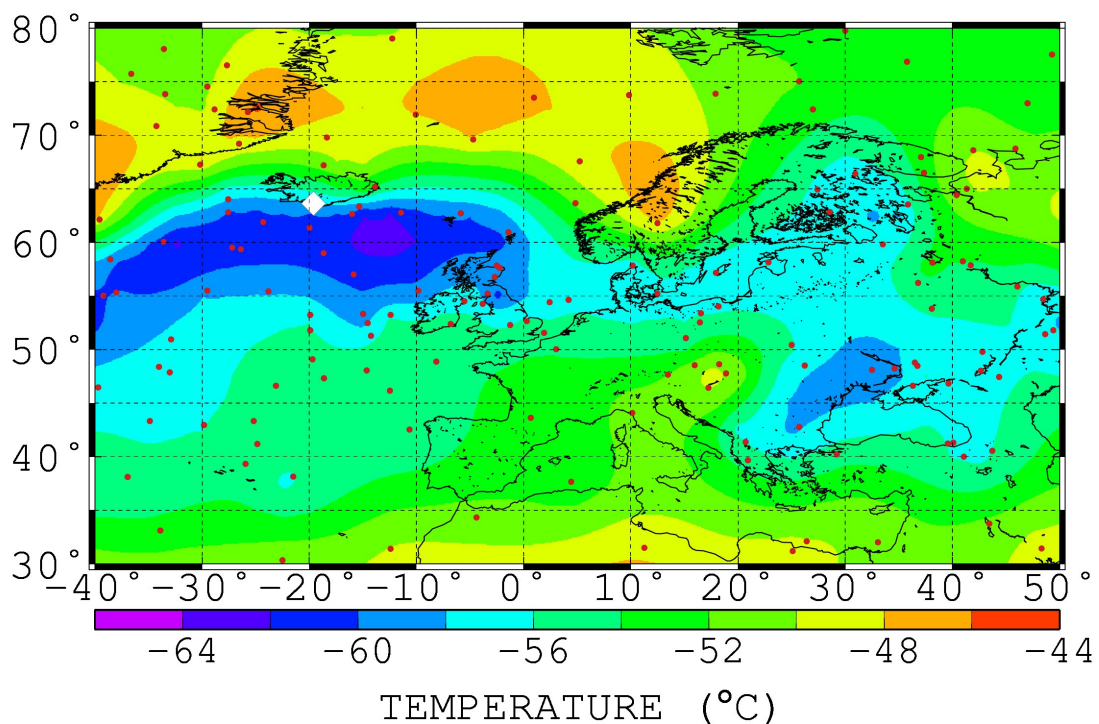


図 3-7 噴火翌日(2010年4月15日)の同図.

COSMIC PROFILES ON 16 APRIL 2010

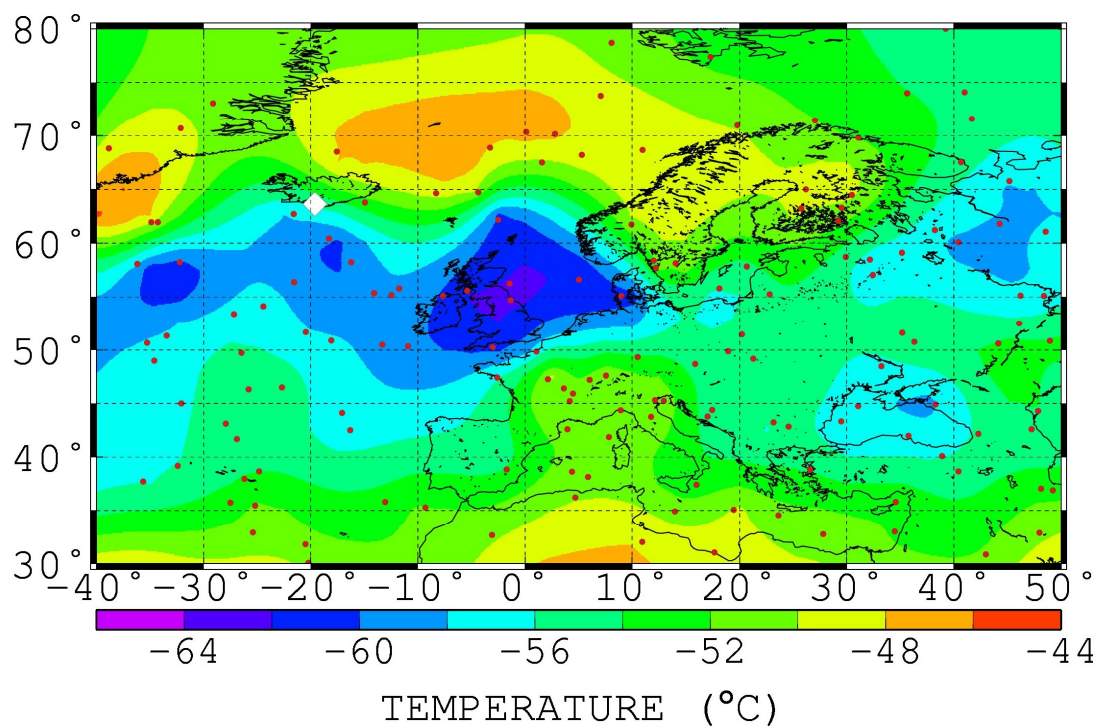


図3-8 噴火翌々日(2010年4月16日)の同図.

・ NCEP GFS Model

続いて、NCEP GFS Model による噴火前日の 2010 年 4 月 13 日 0 時 00 分 UTC を初期値とした 4 日間の日平均気温分布の予測値を、前述の GPS 電波掩蔽観測と同様に図 3-9～3-12 に示す。結果はおおむね掩蔽観測の値(図 3-5～3-8)と一致しているが、噴火翌日以降(図 3-7、3-8)に見られるような火口周辺の低温領域は確認できない(図 3-11、3-12)。

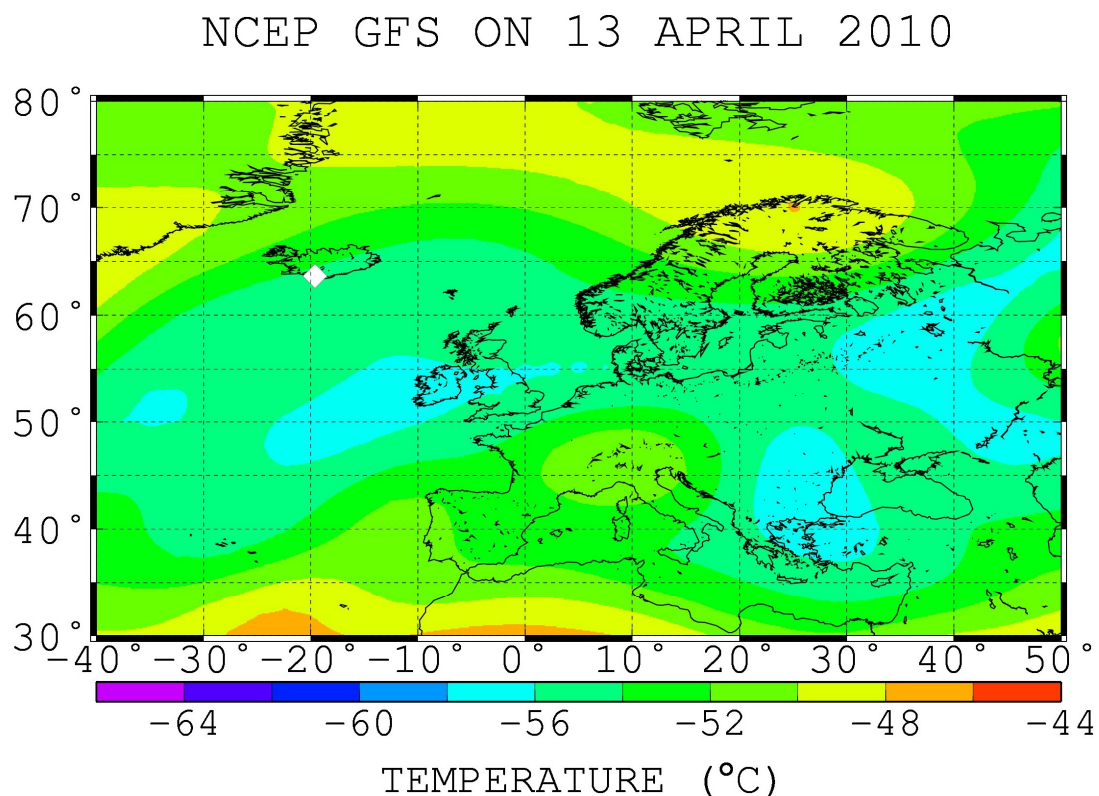


図 3-9 NCEP GFS Model による噴火前日(2010 年 4 月 13 日)0 時 0 分 UTC を初期値とした噴火前日(4 月 13 日)の高度 250 hPa 平面における日平均気温分布の予測値. 火口位置を白色の菱形で示す.

NCEP GFS ON 14 APRIL 2010

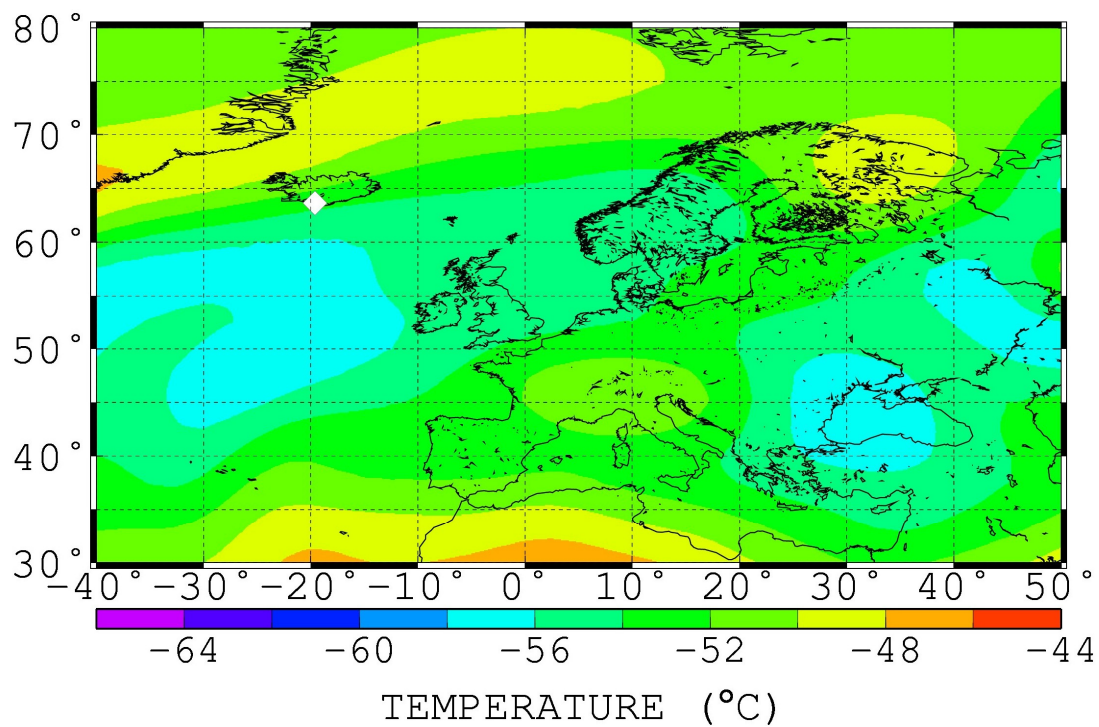


図 3-10 噴火当日(2010年4月14日)の同図.

NCEP GFS ON 15 APRIL 2010

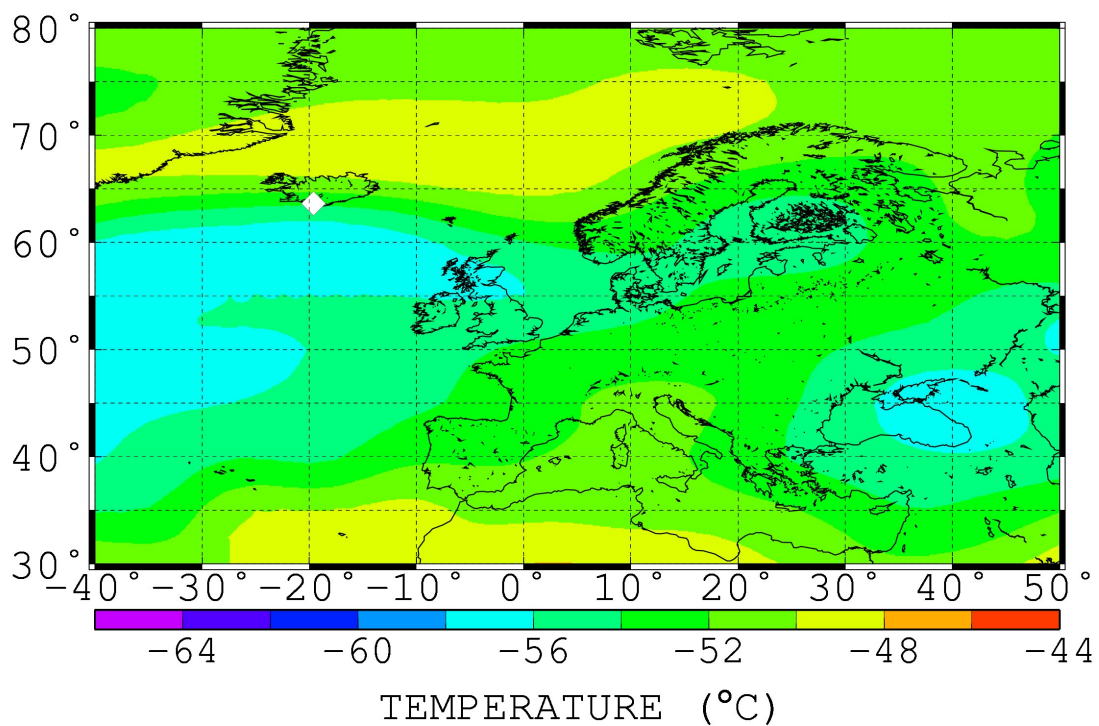


図 3-11 噴火翌日(2010年4月15日)の同図.

NCEP GFS ON 16 APRIL 2010

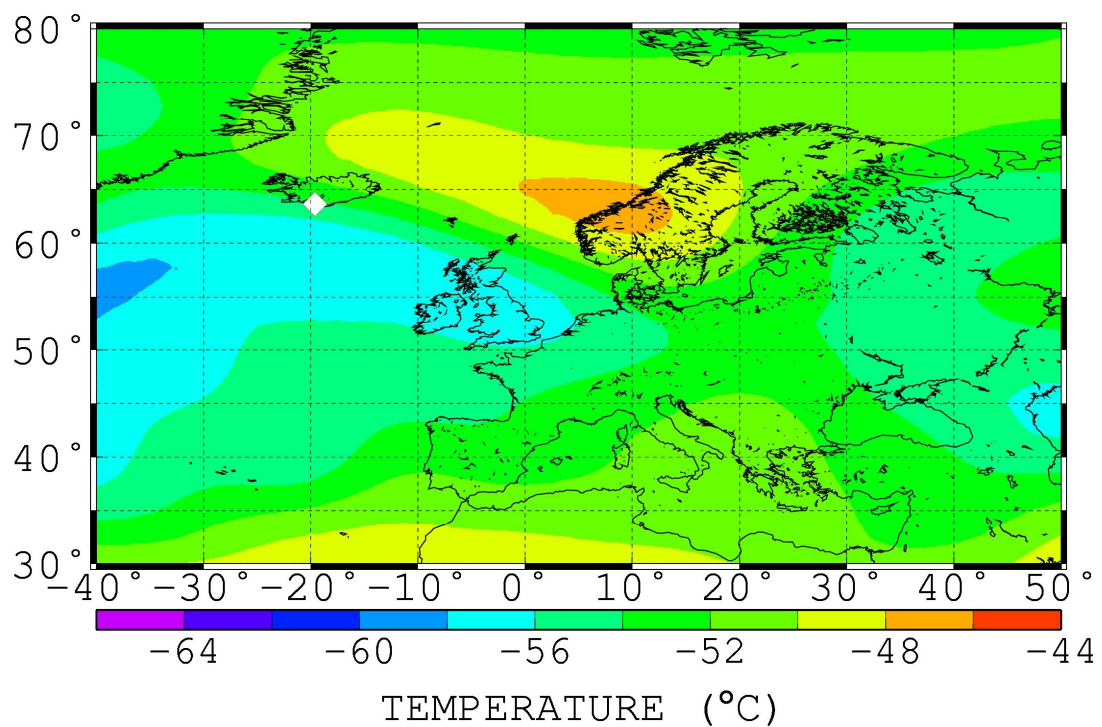


図 3-12 噴火翌々日(2010年4月16日)の同図.

・ Difference

噴火前日から翌々日までの GPS 電波掩蔽観測の観測値から NCEP GFS Model による予測値を差し引いた変動量の分布を図 3-13~3-16 に示す。観測値と予測値は噴火前ではよく一致している(図 3-13)が、噴火翌日になると火口の東側と西側に明瞭な負の異常が現れている(図 3-15)。また、この異常は噴火翌々日(4月 16 日)になると東へ移動していることも分かる(図 3-16)。モデル予測値は噴火前日の 0 時を初期値としており、噴火の影響を含んでいないことから、これらの負の異常は火山噴火の噴煙による可能性が高い。

また、MODIS による噴火後のエアロゾル分布(図 3-4 下段)と噴火翌日における -7°C を超える負の異常の分布(図 3-15)を比較してみると、両者は非常によく一致していることも分かる。

これらの解析結果から、アイスランド、エイヤフィヤトラヨークトル噴火の噴煙による高度 250 hPa 付近の局所的な気温低下が捉えられたといえる。

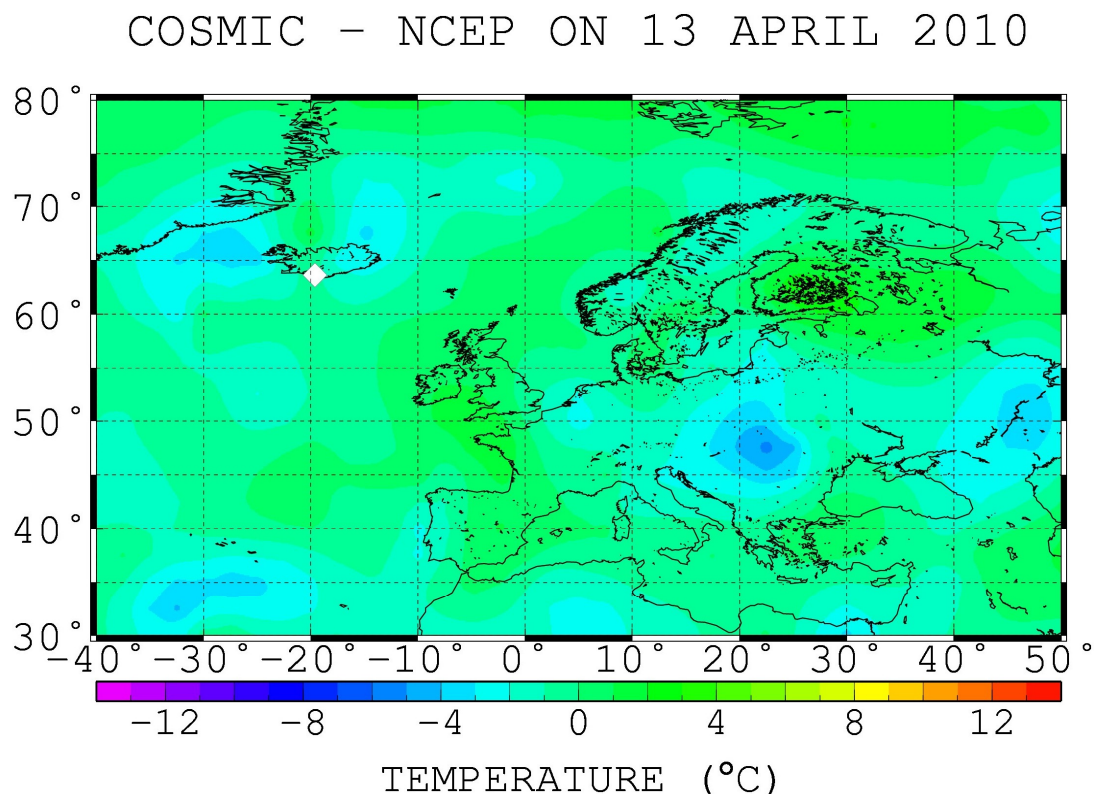


図 3-13 GPS 電波掩蔽観測の観測値から NCEP GFS Model による予測値を差し引いた、高度 250 hPa 平面における噴火前日(2010 年 4 月 13 日)の気温変動。白色の菱形は火口位置。

COSMIC - NCEP ON 14 APRIL 2010

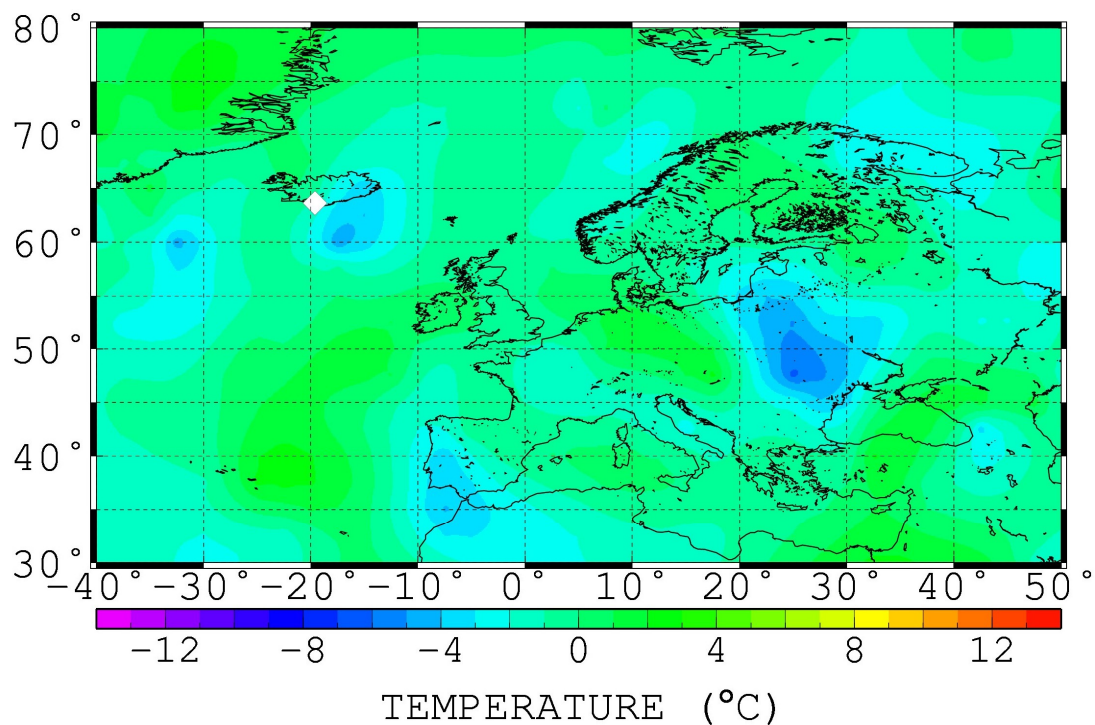


図 3-14 噴火当日(2010年4月14日)の同図.

COSMIC - NCEP ON 15 APRIL 2010

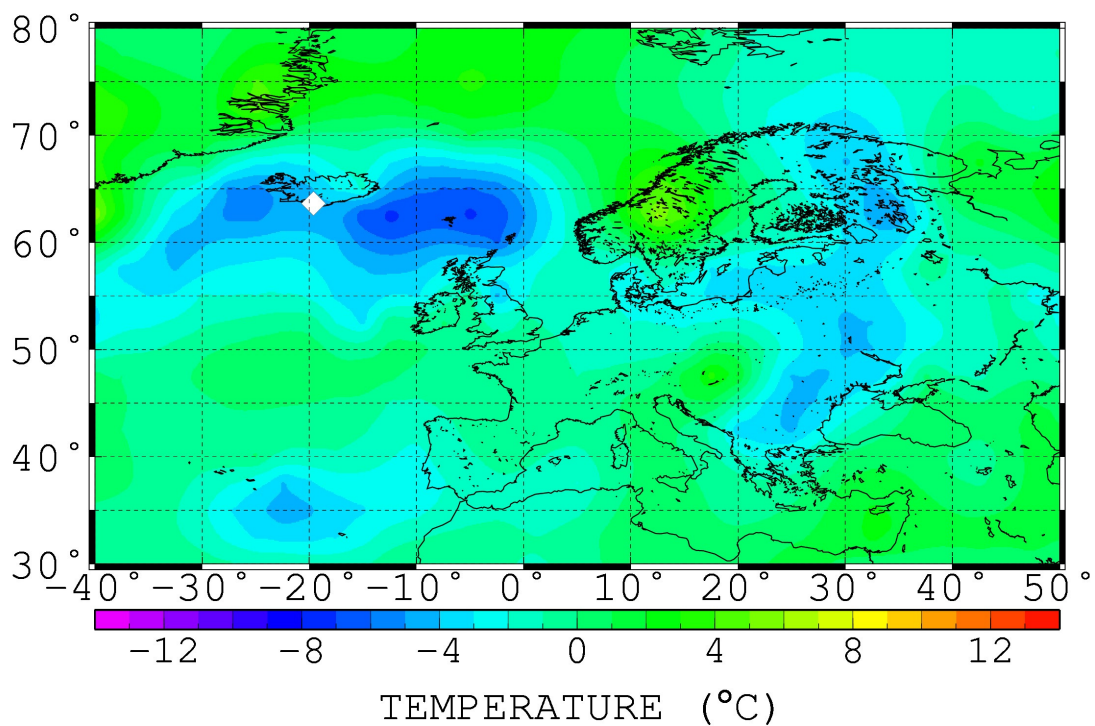


図 3-15 噴火翌日(2010年4月15日)の同図.

COSMIC - NCEP ON 16 APRIL 2010

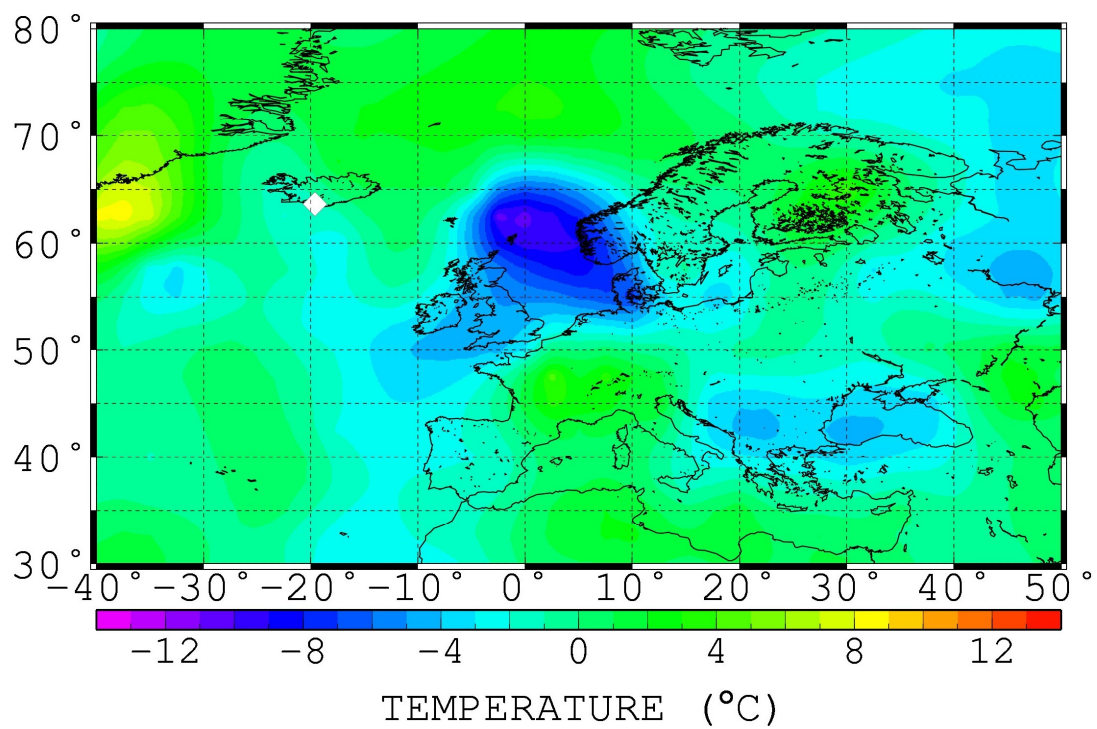


図3-16 噴火翌々日(2010年4月16日)の同図.

3.2 Puyehue-Cordón Caulle, Chile 2011

3.2.1 概要

該当の噴火は 2011 年 6 月 4 日、チリ南部のアンデス山脈に位置するプジェウエ・コルドンカウジェ火山群(Puyehue-Cordón Caulle: 41°S, 72°W)で起こった。およそ 50 年ぶりの大規模噴火で、噴煙柱の高度は最大で 14 km 程度まで到達した。大量の噴煙が風によって南半球を東へと運ばれていき、その先端は噴火から一週間後の 11 日にはオーストラリアを越えニュージーランドまで到達したことが報告されている(Global Volcanism Program)。この噴火の VEI は 4 に相当し、本研究のもう一つの解析事例である 2010 年アイスランド噴火と近い規模の噴火である。

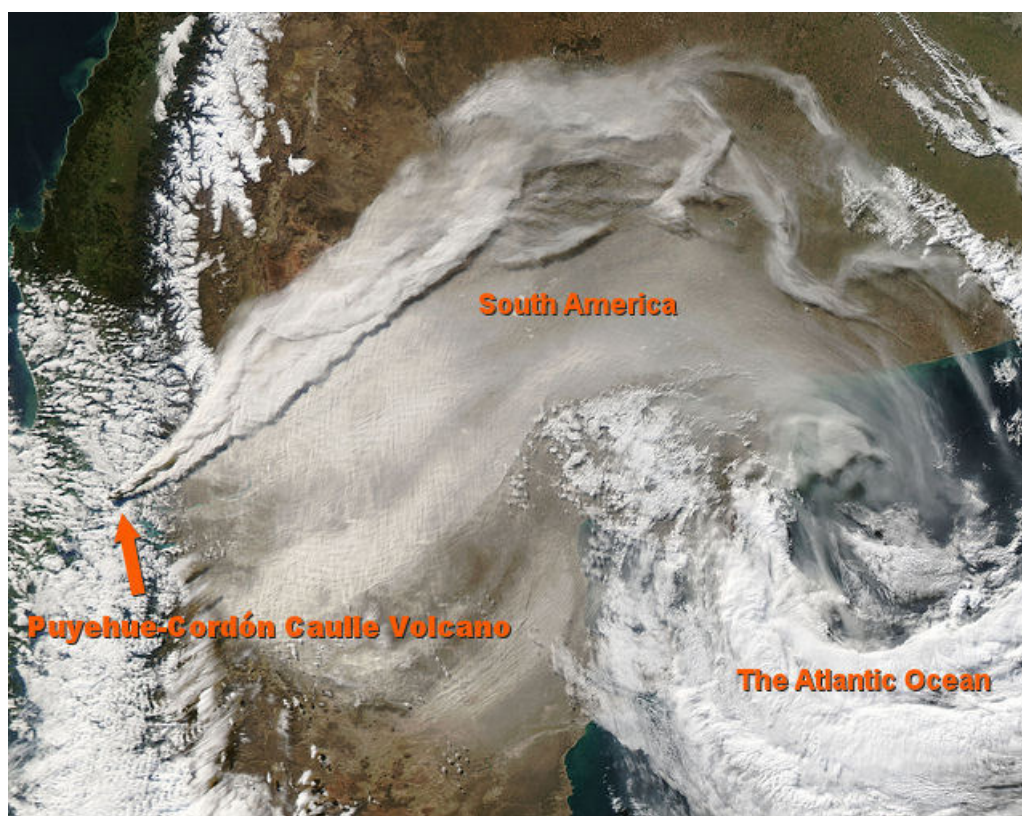


図 3-17 2011 年 6 月 12 日 18 時 05 分 UTC に、NASA Aqua 衛星によって撮影された噴煙の様子。(NASA Goddard Space Flight Center より)

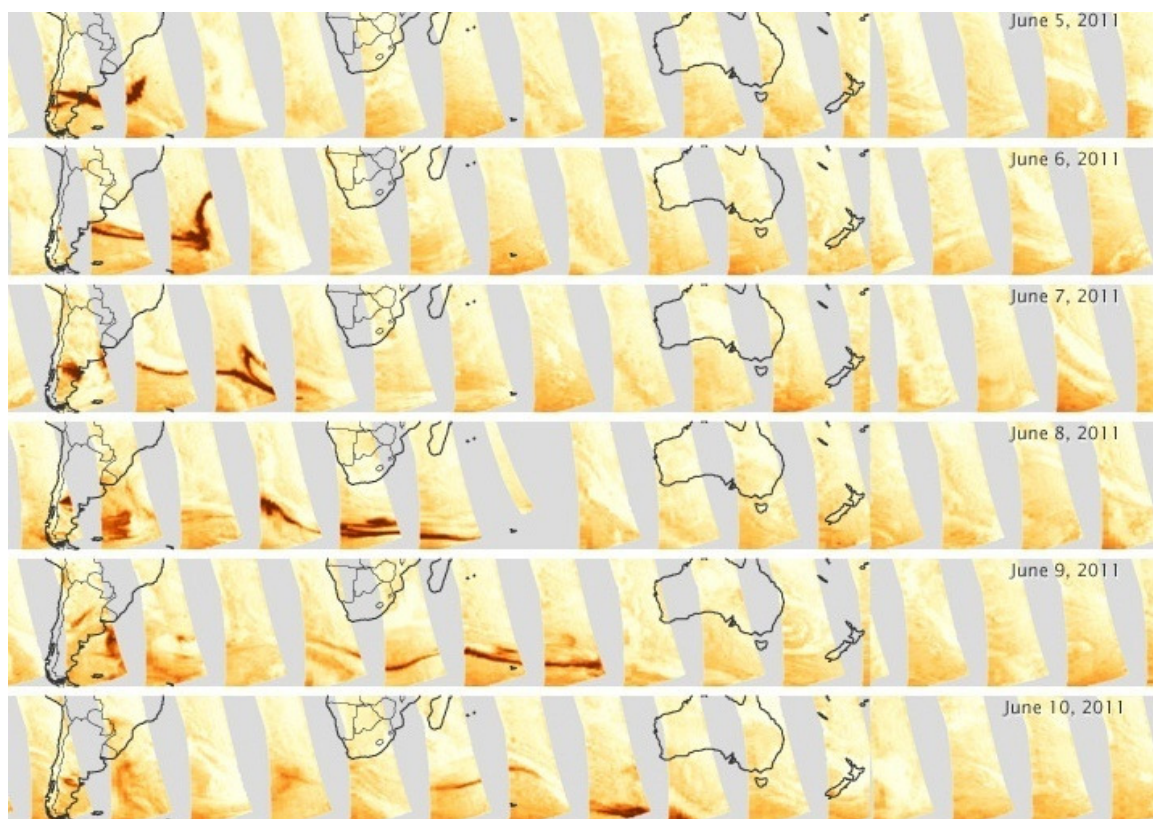


図 3-18 NASA Aura 衛星が捉えた噴火翌日の 2011 年 6 月 5 日から 10 日までにおける 1 日ごとの噴煙中のエアロゾル分布。(NASA Earth Observatory より)

3.2.2 観測・解析結果

・MODIS

まず、MODISによる噴火前と後のエアロゾル観測の結果を図3-19に示す。45°S以南の地域で観測が欠損しているものの、噴火後に火口からほぼ真東に伸びるエアロゾルの分布が確認できる。

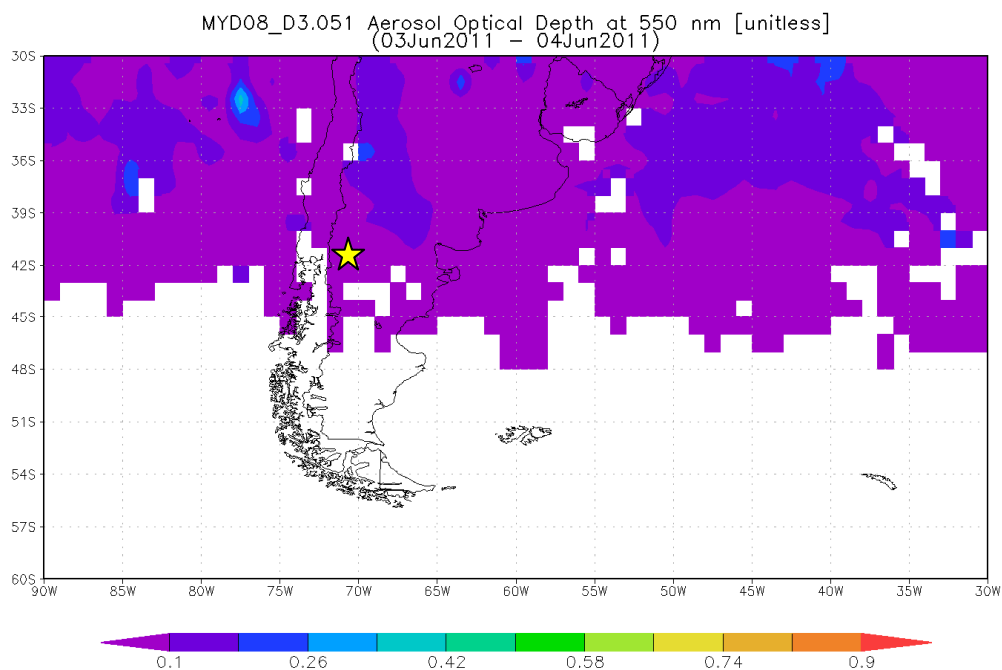
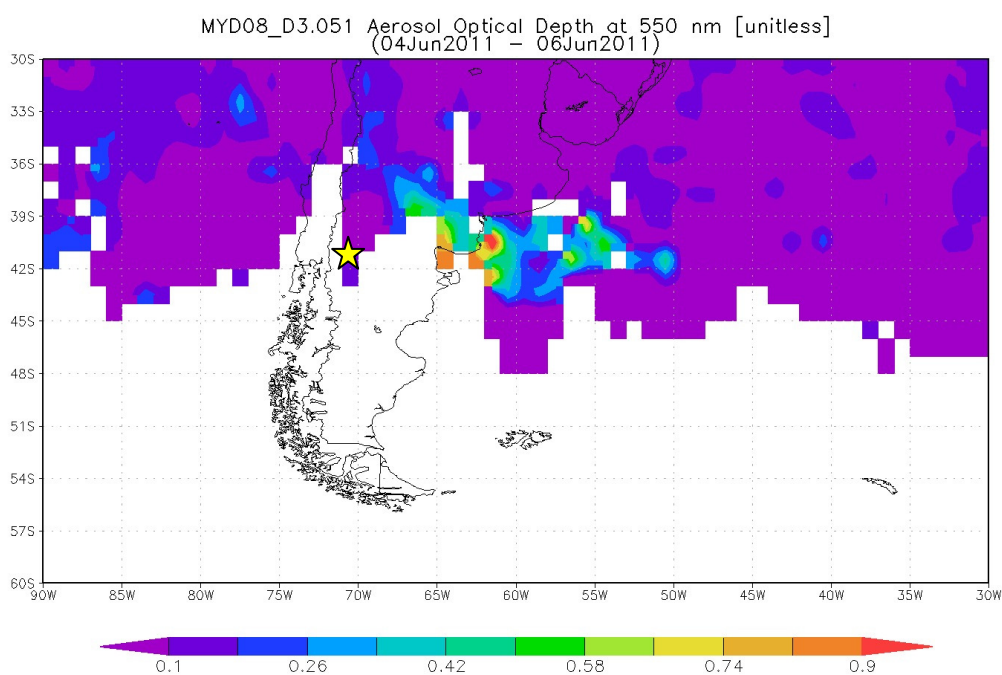


図3-19 噴火直前(2011年6月3-4日)のエアロゾル光学厚さ分布(上)と噴火直後(2011年6月4-6日)の同図(下). 火口位置を星印で示す.



・ GPS Radio Occultation

次に、アイスランド噴火と FORMOSAT-3/COSMIC の GPS 電波掩蔽観測による 2011 年 6 月 3 日(噴火前日)から 6 日(翌々日)までの 4 日間における 250 hPa 平面日平均気温分布をアイスランド噴火と同様に図 3-20~3-23 に示す。極域からアーチ状に伸びる低温の領域が南アメリカ大陸の南端を西から東へ通過しており、一部は火口上空にも達していることが分かる(図 3-20~3-23)。噴火後の火口周辺における明瞭な異常は確認できない。

COSMIC PROFILES ON 3 JUNE 2011

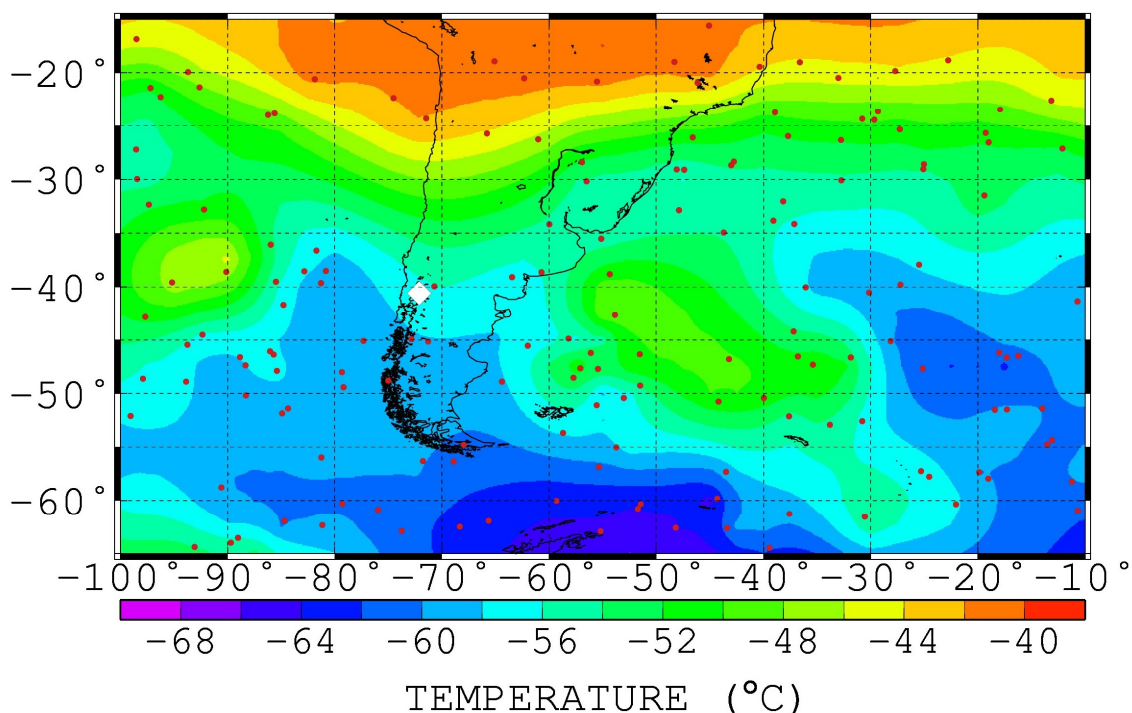


図 3-20 GPS 電波掩蔽観測から得られた噴火前日(2011 年 6 月 3 日)の 250 hPa 平面における日平均気温分布. 掩蔽観測点を赤色の点,火口位置を白色の菱形で示す.

COSMIC PROFILES ON 4 JUNE 2011

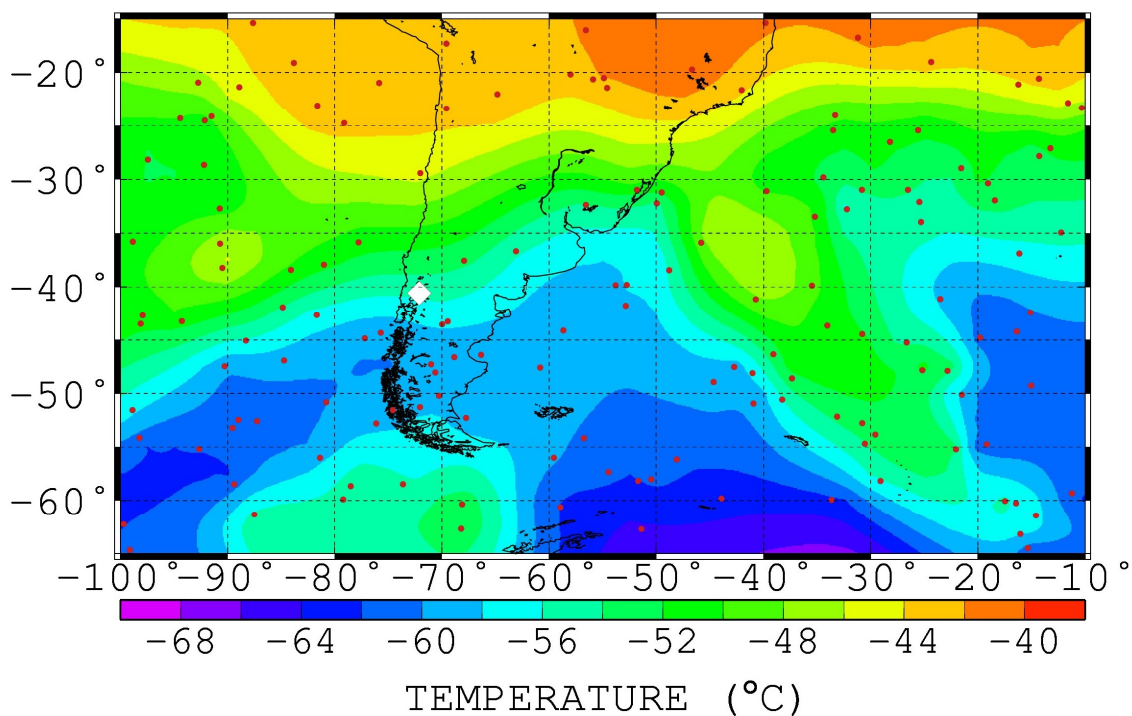


図 3-21 噴火当日(2011年6月4日)の同図.

COSMIC PROFILES ON 5 JUNE 2011

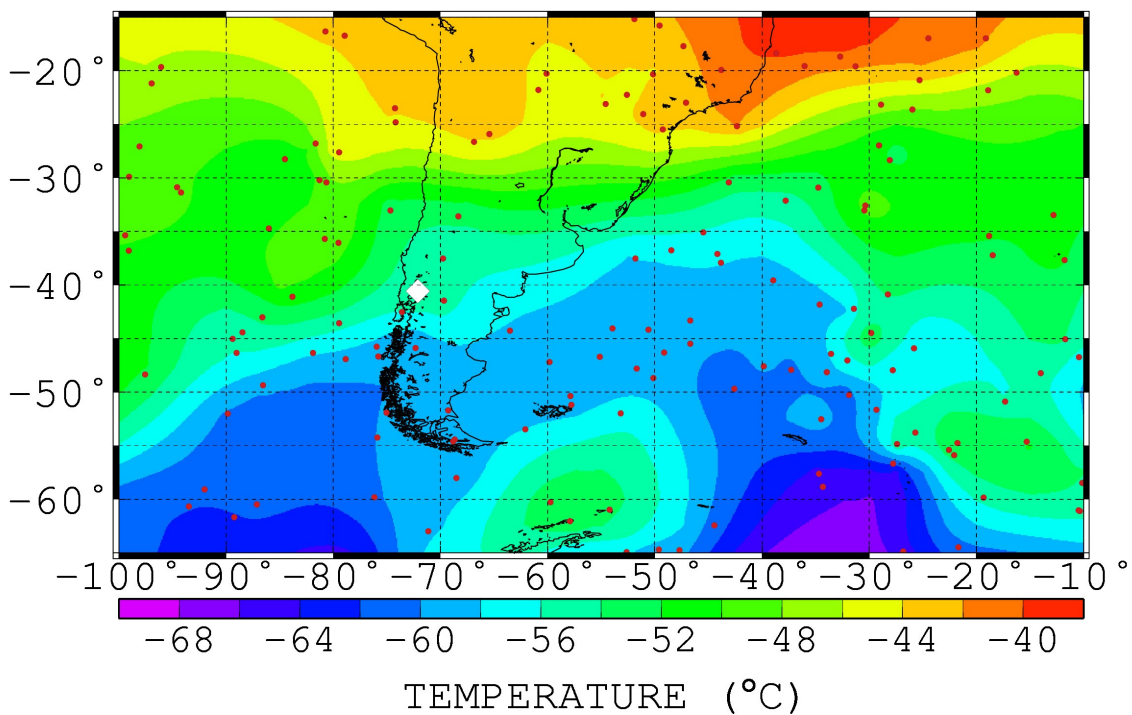


図 3-22 噴火翌日(2011年6月5日)の同図.

COSMIC PROFILES ON 6 JUNE 2011

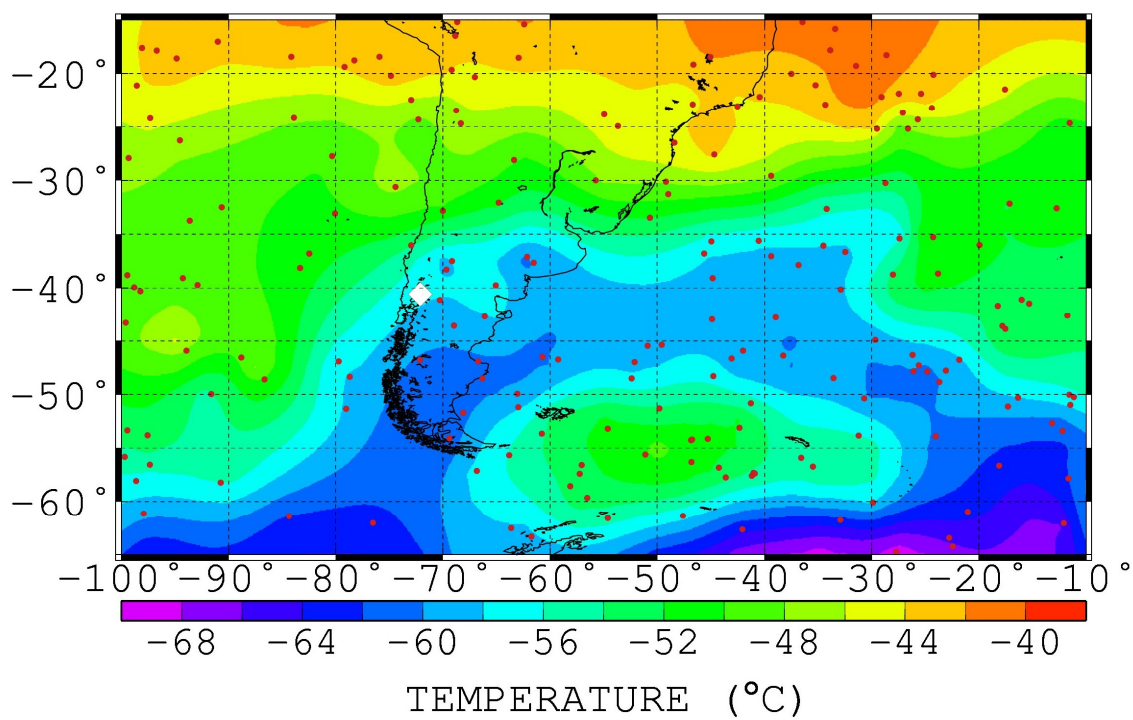


図 3-23 噴火翌々日(2011年6月6日)の同図.

・ NCEP GFS Model

続いて、NCEP GFS Modelによる噴火前日の2011年6月3日0時00分UTCを初期値とした4日間の日平均気温分布の予測値を、同様に図3-24～3-27に示す。極域から伸びる低温の領域は図3-20～3-23で示した掩蔽観測の様子と比較すると弱い(図3-24～3-27)。例えば、噴火前日の6月3日を比較してみると、観測(図3-20)では低温域はチリ南部の火口西側付近まで大きくせり出しているのに対してモデル予測(図3-24)では見られない。このことから、噴火とは異なる何らかの要因による誤差が生じている可能性が高い。

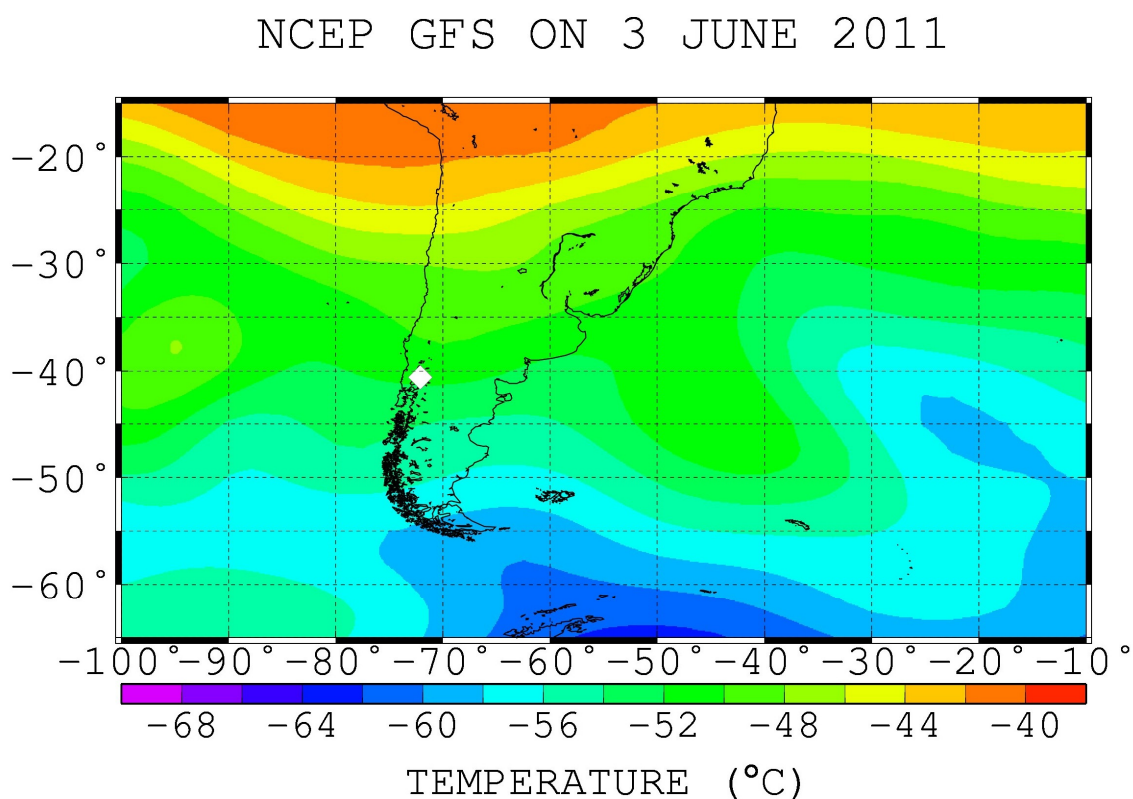


図3-24 NCEP GFS Modelによる噴火前日(2011年6月3日)0時0分UTCを初期値とした噴火前日(6月3日)の高度250 hPa平面における日平均気温分布の予測値. 火口位置を白色の菱形で示す.

NCEP GFS ON 4 JUNE 2011

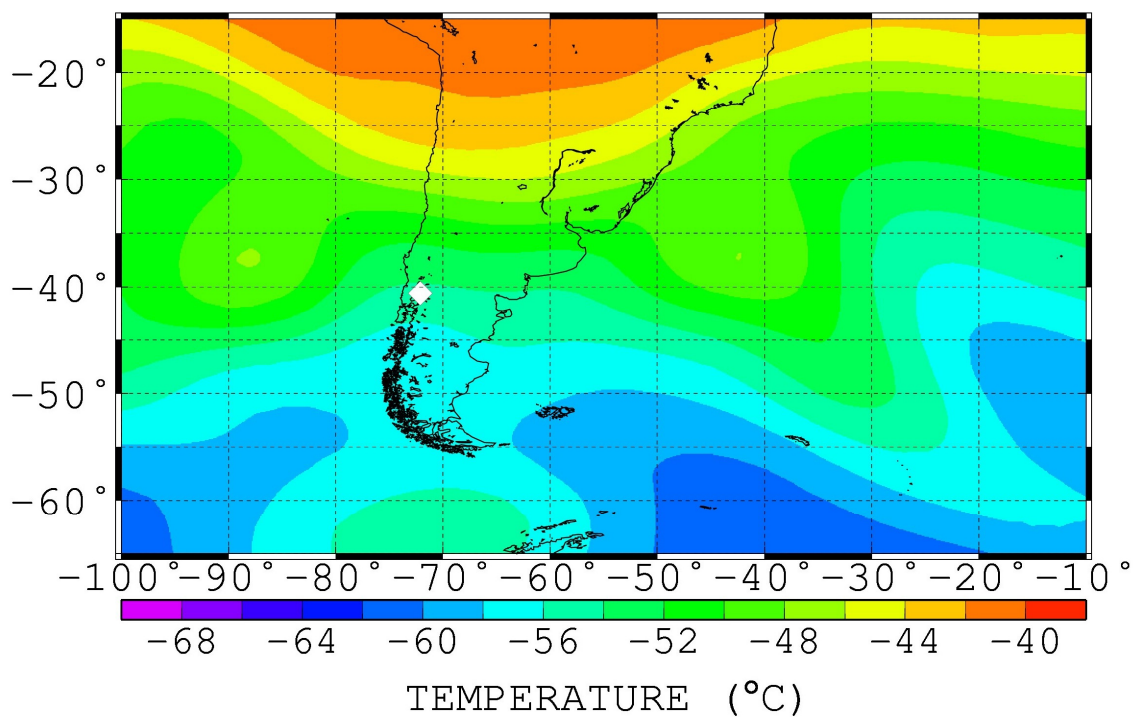


図 3-25 噴火当日(2011年6月4日)の同図.

NCEP GFS ON 5 JUNE 2011

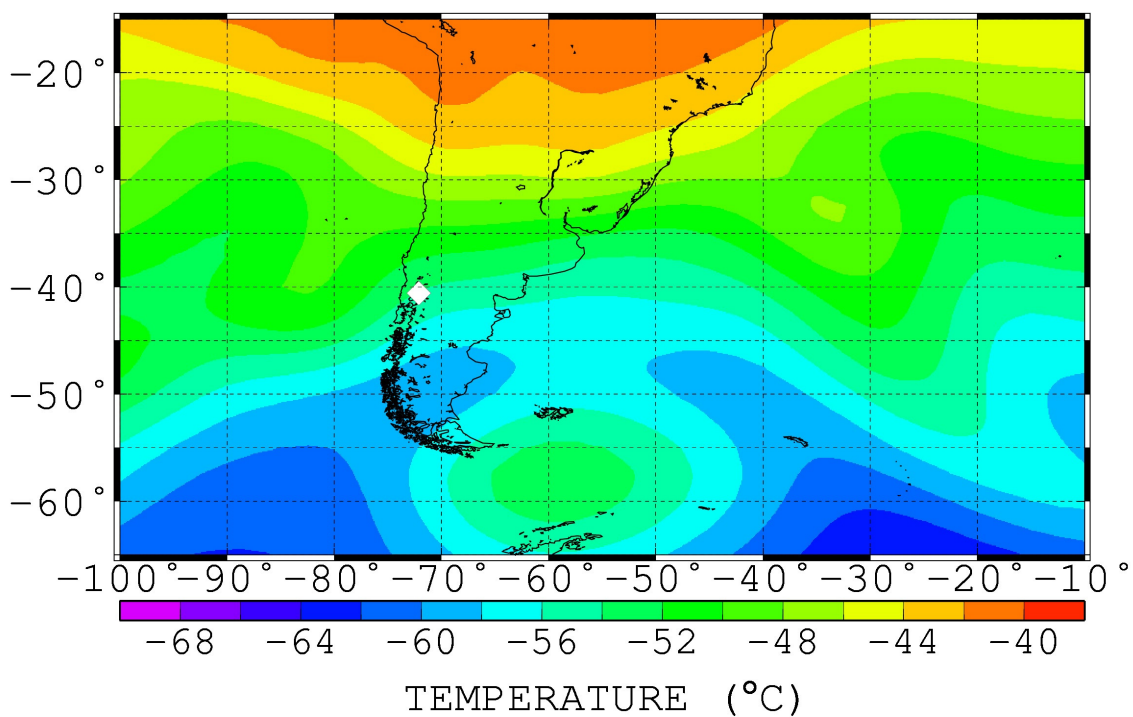


図 3-26 噴火翌日(2011年6月5日)の同図.

NCEP GFS ON 6 JUNE 2011

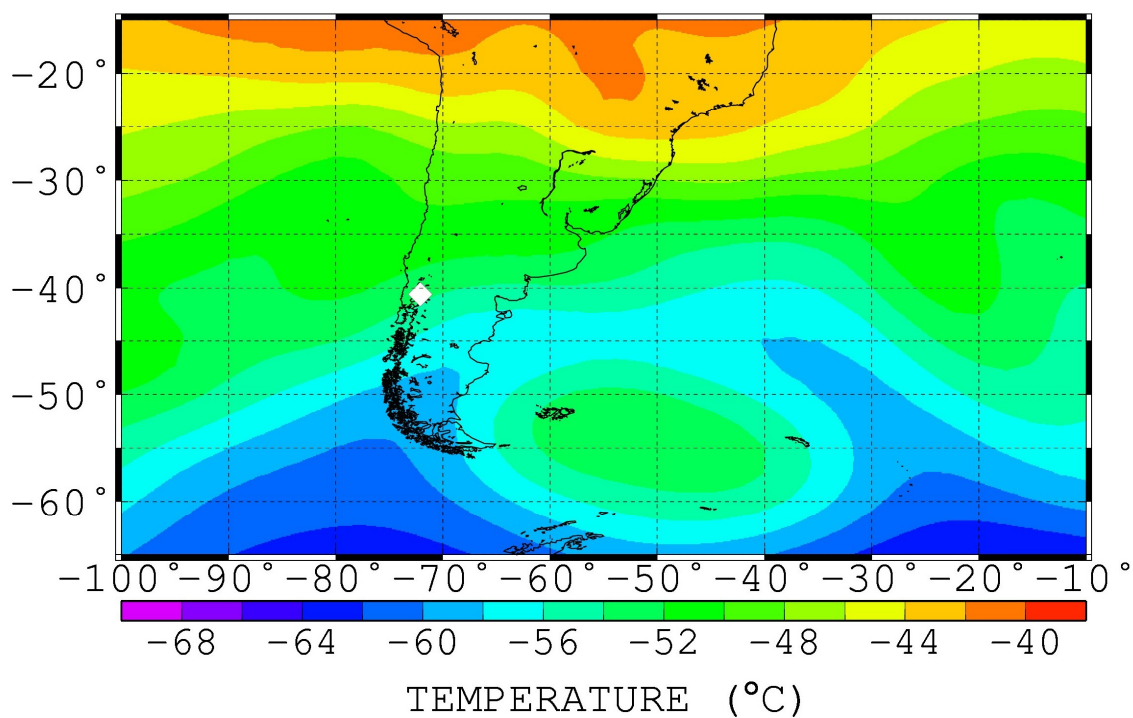


図 3-27 噴火翌々日(2011年6月6日)の同図.

・ Difference

噴火前日から翌々日までの GPS 電波掩蔽観測の観測値から NCEP GFS Model による予測値を差し引いた変動量の分布を図 3-28~3-31 に示す。前項のアイスランド噴火の事例とは異なり、噴火前日の 6 月 3 日に最大 $-7^{\circ}\text{C}\sim-8^{\circ}\text{C}$ の負の異常が火口風上の 40°S 、 80°W 付近に既に存在している(図 3-28)。この異常は噴火とは無関係に緯度帯 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{S}$ をほぼ真東に移動しており(図 3-29~3-31)、明らかに噴煙による異常ではないと考えられる(第 4 章にも記述)。

しかし、噴火翌日の 6 月 5 日(図 3-30)に火口の北東側近傍(35°S 、 70°W)で発生し、翌々日(図 3-31)に 60°W まで伸びてより顕著になる負の異常の分布は、図 3-19 下段で示した MODIS 観測による噴火後のエアロゾル分布とよく一致している。

以上の結果はチリ、プジェウエ噴火の噴煙による火口付近での気温の局所的な気温低下を捉えたといえるが、同時に噴火前日から存在する非噴煙由来の負の異常も含まれてしまった。

COSMIC - NCEP ON 3 JUNE 2011

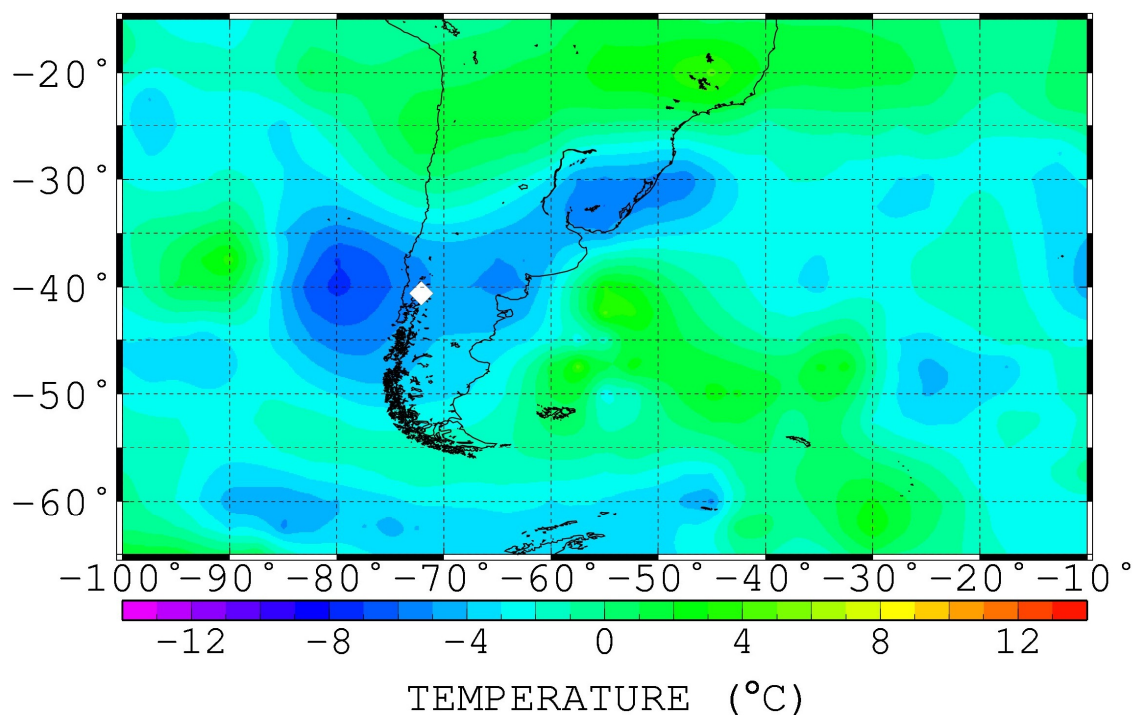


図 3-28 GPS 電波掩蔽観測の観測値から NCEP GFS Model による予測値を差し引いた、高度 250 hPa 平面における噴火前日(2011 年 6 月 3 日)の気温変動。白色の菱形は火口位置。

COSMIC - NCEP ON 4 JUNE 2011

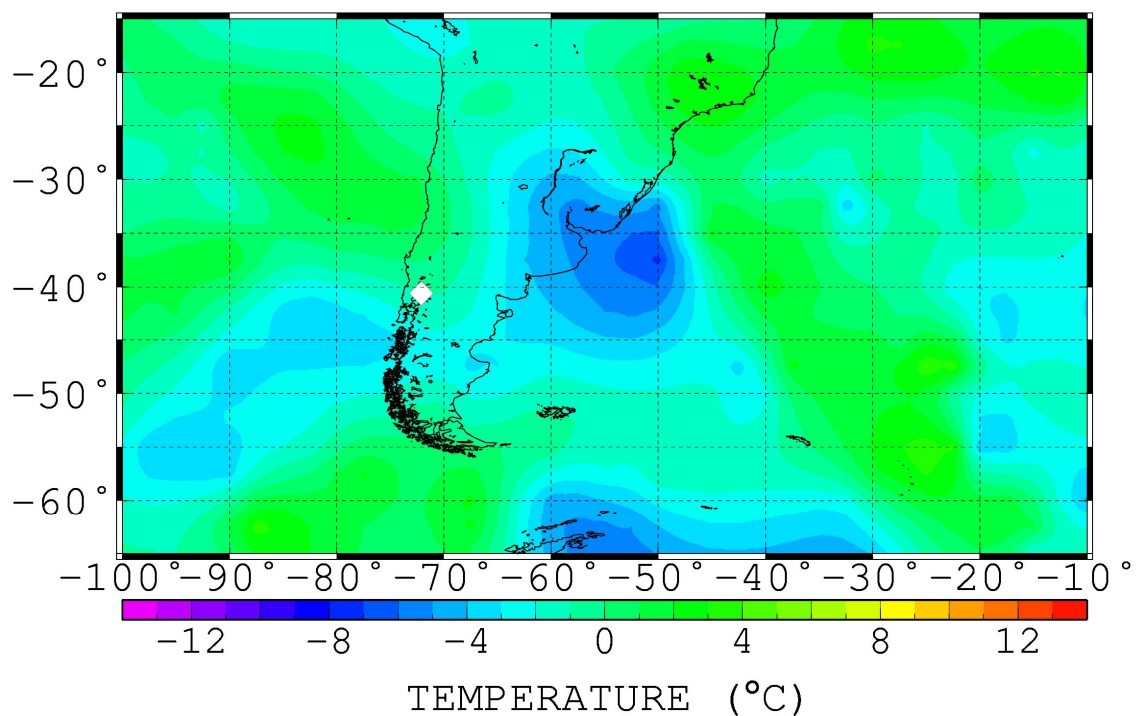


図 3-29 噴火当日(2011年6月4日)の同図.

COSMIC - NCEP ON 5 JUNE 2011

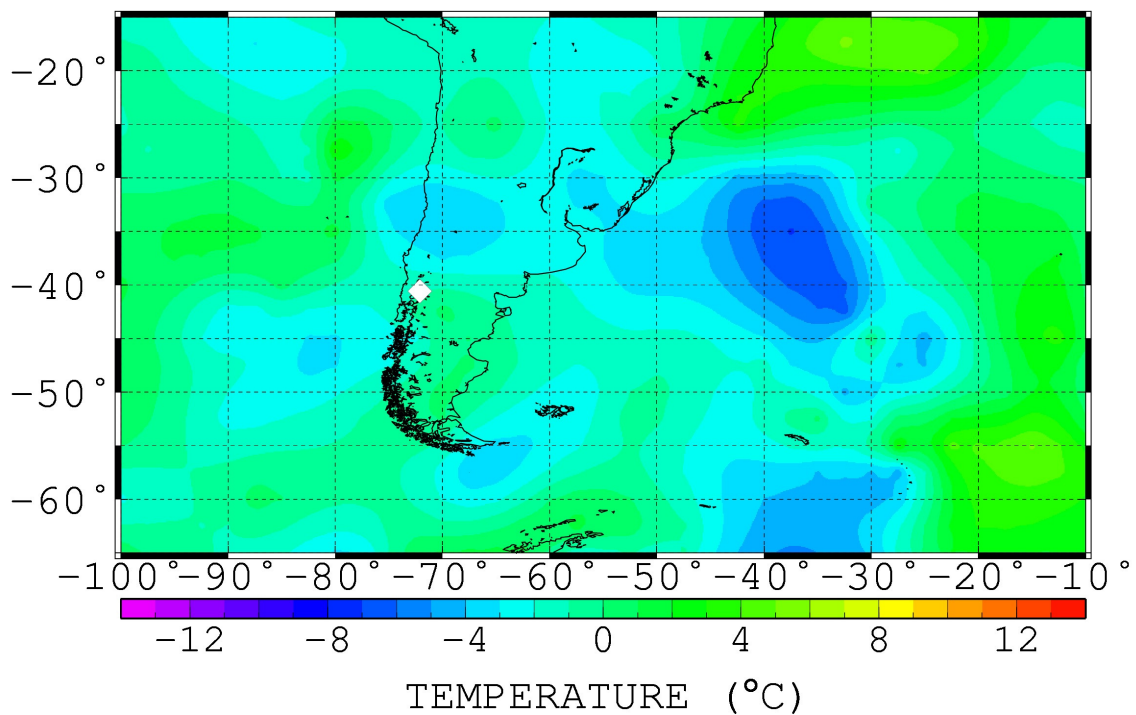


図 3-30 噴火翌日(2011年6月5日)の同図.

COSMIC - NCEP ON 6 JUNE 2011

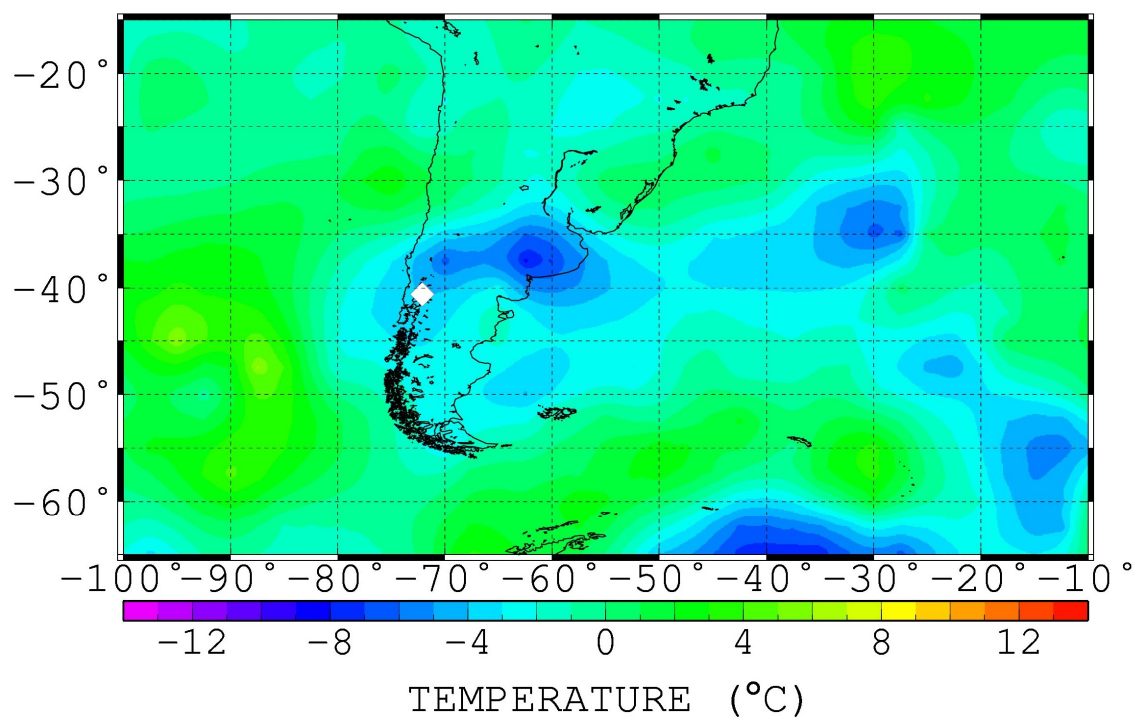


図 3-31 噴火翌々日(2011年6月6日)の同図.

3.3 プロファイル比較

最後に、噴火後の火口風下地域における高度プロファイルと比較する。2010年のアイスランド、エイヤフィヤトラヨークトル噴火と2011年のチリ、プジェウエ噴火、それぞれの噴火の翌日の火口風下地域における日平均気温高度プロファイルを図3-32と3-33に示す。

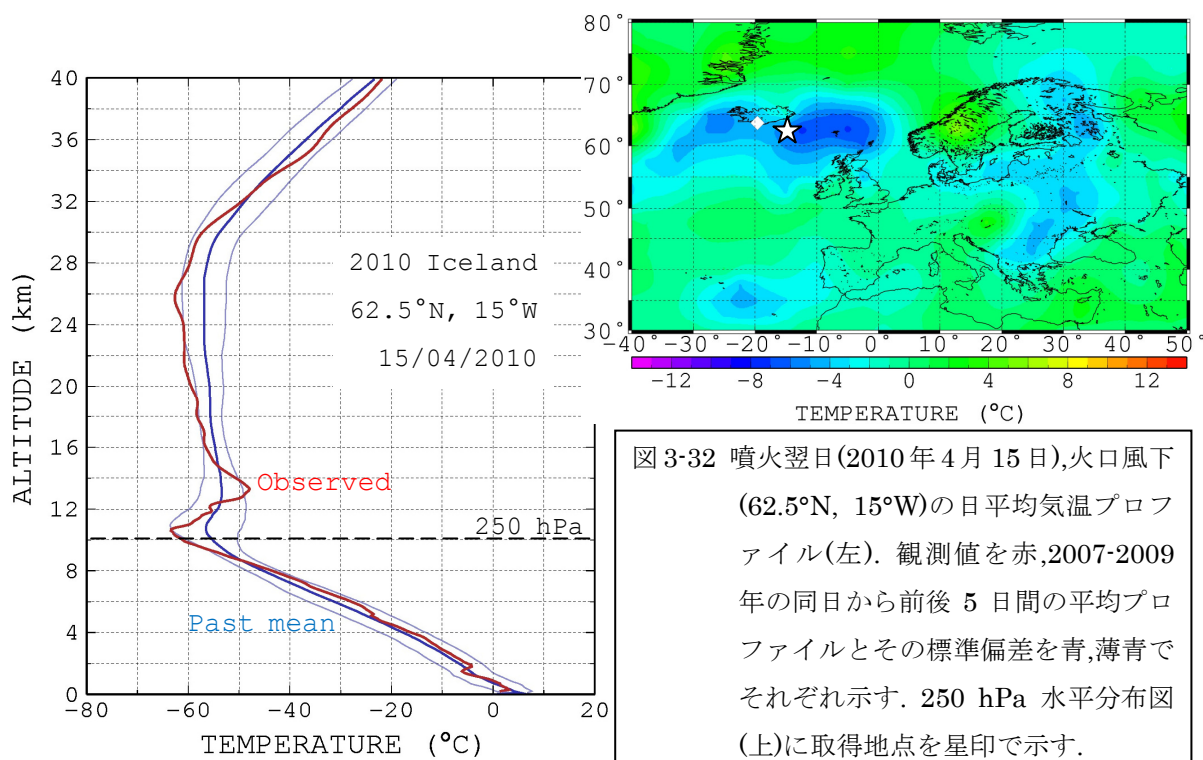


図3-32 噴火翌日(2010年4月15日),火口風下(62.5°N, 15°W)の日平均気温プロファイル(左). 観測値を赤,2007-2009年の同日から前後5日間の平均プロファイルとその標準偏差を青,薄青でそれぞれ示す. 250 hPa 水平分布図(上)に取得地点を星印で示す.

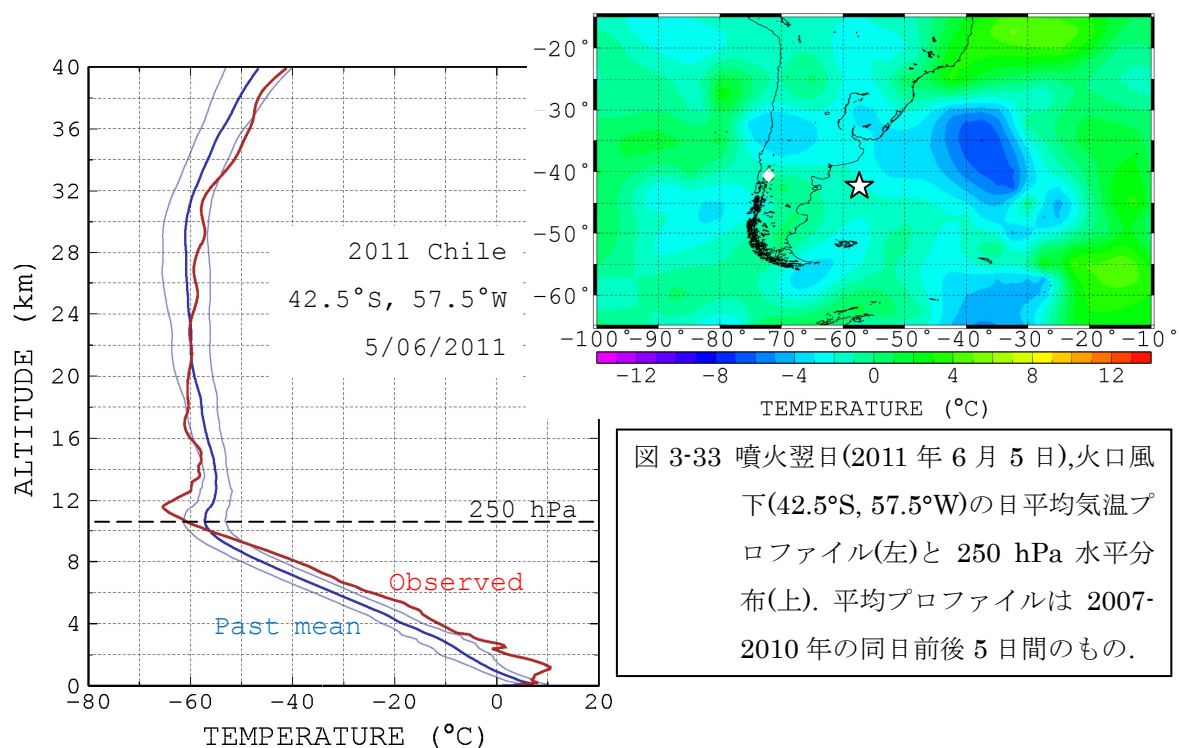


図3-33 噴火翌日(2011年6月5日),火口風下(42.5°S, 57.5°W)の日平均気温プロファイル(左)と250 hPa 水平分布(上). 平均プロファイルは2007-2010年の同日前後5日間のもの.

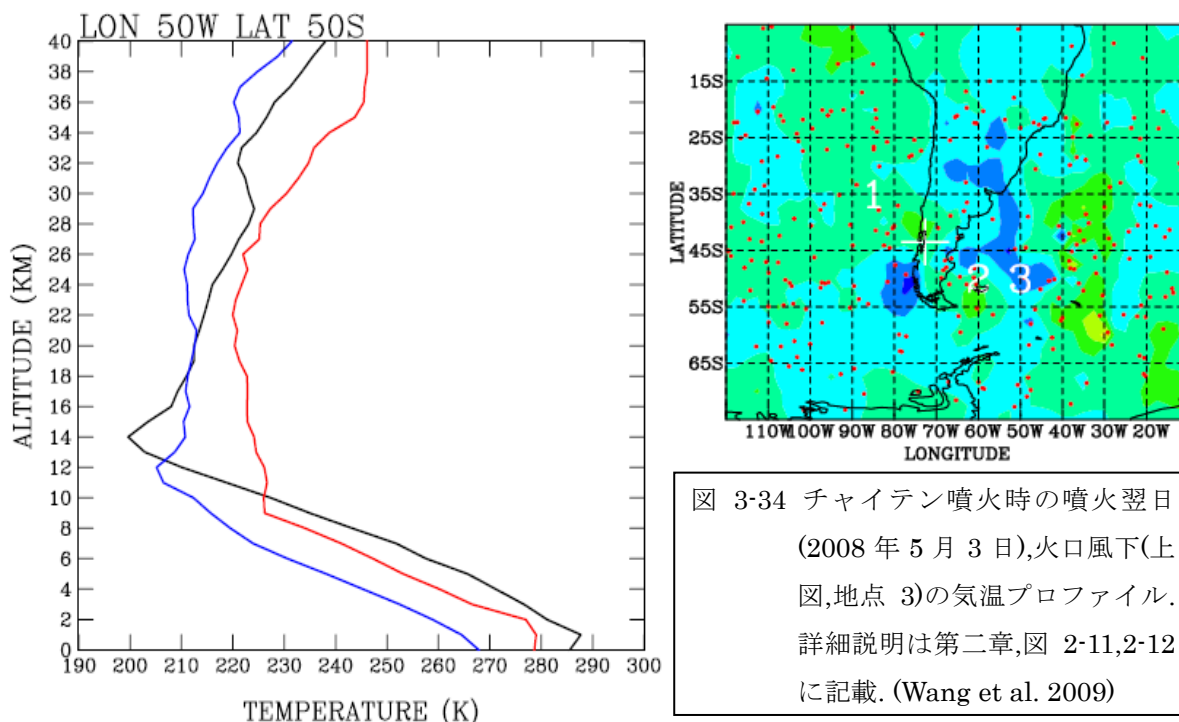


図 3-34 チャイテン噴火時の噴火翌日 (2008年5月3日)、火口風下(上図、地点3)の気温プロファイル。詳細説明は第二章、図 2-11, 2-12 に記載。(Wang et al. 2009)

さらに、第二章で紹介した先行研究、*Wang et al. (2009)*の2008年チリ、チャイテン噴火での噴火翌日の気温プロファイルも図 3-34 に示す。

2010年アイスランド、2011年チリのどちらも対流圏界面の気温が過去の平均に比べて大きく低下しており、これは *Wang et al. (2009)*の傾向とよく一致している(図 3-32, 3-33)。しかし、*Wang et al. (2009)*で見られた対流圏の気温上昇については図 3-32 のアイスランド噴火においては確認できない。図 3-33 のチリ噴火については若干確認できるが、標準偏差の範囲にほぼ留まっている。気温低下の極大高度は2010年アイスランド噴火が高度およそ 10.5 km、2011年チリ噴火がおよそ 11.5 km であった(詳細な考察は第4章で記述する)。

なお、両噴火ともに変動量は標準偏差と比べると顕著であるとは言い難いが、これは過去3、ないし4年間の同時期における気象状態の変動の目安でしかない。噴火に伴う変動量を捉えるうえで重要なのは、あくまで当日の(噴火による影響以外の)気象状況を反映したモデルによる予測値との差であることに注意したい。

4. まとめと考察

FORMOSAT-3/COSMIC 衛星の GPS 電波掩蔽観測気温高度プロファイルデータを用いて、近年の二つの大規模噴火事例である 2010 年アイスランド、エイヤフィヤトラヨークトル氷河の噴火と 2011 年チリ、プジェウエ火山の噴火について、噴火に伴う局所的な気温変動を水平分布と高度分布の二つの視点から捉えた。以下に本研究の結果をまとめ、考察や課題等について述べる。

・水平分布

GPS 電波掩蔽観測の高度プロファイルデータを基に、高度 250hPa 平面の日平均気温分布を求め、NCEP GFS Model の噴火前日 0 時を初期値とする再予報データの値を差し引くことで噴火後の局所的な気温変動の検出を試みた。

2010 年アイスランド噴火では噴火前は GPS 電波掩蔽観測と NCEP GFS Model の分布はよく一致しており、異常は見られなかった(図 3-13,3-14)。しかし、噴火翌日以降になると高度 250 hPa 平面において火口付近、風下の地域に最大-8℃程度の明瞭な負の気温異常が現れた(図 3-15,3-16)。特に噴火翌日においては負の気温異常の水平分布が MODIS 観測によって捉えた噴煙に含まれるエアロゾルの分布(図 3-4)と非常によく一致していた。これらの結果から、GPS 電波掩蔽観測によって捉えられた噴火翌日以降の火口周辺における局所的な負の気温異常が火山噴火の噴煙によって発生したものである可能性は非常に高いといえるだろう。

2011 年チリ噴火でも解析を行ったところ、2010 年アイスランド噴火と同様にエアロゾル分布(図 3-19)に対応する負の異常が噴火翌日以降に確認できた(図 3-31)。しかし、2010 年アイスランド噴火の事例とは異なり、噴火に伴う変動ではない別の顕著な負の異常が火口周辺に見られた(図 3-28~3-31)。これらの異常は噴火前日から存在し、噴煙とは無関係に火口の西側から東にかけて移動していることから、明らかに火山噴火によるものではない。GPS 電波掩蔽観測によると、解析期間中は火口周辺に極域から伸びる低温の領域が存在し、大きく移動している(図 3-20~3-23)が、モデル予測ではあまり顕著ではない(図 3-24~3-27)。このことから、噴火前日から存在する負の異常の要因はこの気流に伴う気象的な変動をモデル予測が正しく反映していないためであると考えられる。

このようなモデル予測誤差の原因として、当事例は太平洋に面した南米、チリで起こった噴火であるため、モデル予測の初期値に用いる精度の高い地上観測点が解析地域の西側において非常に乏しいという点が挙げられる。2008 年チリ、チャイテン噴火の解析においても同様の問題点が述べられており(Wang et al., 2009)、当手法では解析を行う地域によっては当日の気象状況に十分注意する必要がある。また、平時におけるモデル予測精度の検証や、誤差を抑制するためのなんらかの補正を行うことが望ましい。

・高度分布

GPS 電波掩蔽観測の日平均気温分布から噴火翌日の火口風上地域における日平均高度プロファイルを求め、それらの比較を行った。

2010年アイスランド噴火と2011年チリ噴火の両事例において、対流圏界面～成層圏下部における顕著な気温低下が確認できた(図3-32,3-33)。この結果は、先行研究の *Wang et al.* (2009)によって報告された2008年チャイテン噴火の傾向と一致している。しかし、気温低下の極大高度はそれぞれの噴火ごとに異なっており、2010年アイスランド噴火では約10.5 km、2011年チリ噴火では約11.5 kmであった。また、2008年チリ、チャイテン噴火では約14 kmとなっている(*Wang et al.*, 2009)。これらの差異は、それぞれの噴火の噴煙到達高度が影響しているものと思われる。Global Volcanism Program (<http://www.volcano.si.edu/index.cfm>)によると、噴火翌日の噴煙到達高度は2010年アイスランド噴火でおよそ8-11 km、2011年チリ、プジェウエ噴火でおよそ11-14 km、2008年チリ、チャイテン噴火で14-20 kmとなっており、気温低下極大高度の上下関係とおおむね対応していることが分かる。このことから、本研究で求めた上層大気で起こる気温低下が火山噴火の噴煙によって引き起こされたものであることを裏付けているといえる。

一方、2008年チャイテン噴火でみられた対流圏の顕著な気温上昇は2010年アイスランド噴火では確認できず、2011年チリ噴火では小規模であった(図3-32,3-33)。*Wang et al.* (2009)では、対流圏は平時の気象変化による変動が非常に大きく、噴煙による影響を求めるのは困難であると述べられていることから、対流圏の気温変動についての議論は尚早であるといえよう。また、第2章で述べた通りGPS電波掩蔽観測では屈折率に対する大気温度の影響と水蒸気の影響の分離が困難である。水蒸気の非常に少ない上層大気とは異なり、対流圏下部では水蒸気を与える屈折率への影響は最大30% (*Kursinski et al.*, 1997)となり、無視できない大きさである。このため、対流圏下部では火山噴火の噴煙による急激な水蒸気量の増加が見かけ上の気温の上昇として現れてしまう可能性がある。こうした誤差要因を取り除き、より精密な解析を行うためには周辺の地上GPS局を用いた大気遅延観測など、他の地上型観測手法とGPS電波掩蔽観測を組み合わせた複合的な観測が必要であろう。

本研究は従来の観測手法では捉えられなかった火山噴火に伴う短期的、局所的な気温の変動をGPS電波掩蔽観測で捉えた新たな二つの報告事例である。しかし、噴火直後に局所的な変動が起こるメカニズムの詳細はまだよく分かっていない。火山噴火に伴う気温の変動には、*McCormick et al.* (1995) で述べられた硫酸エアロゾルによる変動や水蒸気の影響などの非常に複雑な要素が含まれており、解明には多くの解析事例が必要であろう。今後、大規模噴火が起こった際の新たな解析事例の追加と、それによる本課題の更なる発展に期待したい。

5. 謝辞

本研究を進めていくに当たり、多くの方々にお世話になりました。ここに感謝の意を表したいと思います。

まず、指導教官の日置幸介教授には私の研究室所属から現在に至るまで、多大なるご支援を頂きました。研究を始めたばかりの頃にはテーマの相談から始まり、簡単なプログラミングの練習や論文の購読など、毎週適度なペースで課題を与えて頂きその都度ご指導して下さいたことで、研究活動の基礎を身につけることができました。また、学会発表などにおいて度重なるスライド資料の修正や発表練習に快く協力して頂いたことで、プレゼンテーションについても多くを学ぶことができました。特に、国際学会での発表は生涯忘れることのない非常に貴重な経験でありました。このような機会を与えて下さったことにも大変感謝しております。本当にお世話になりました。改めてお礼申し上げたいと思います。

続いて、宇宙測地学研究室の古屋正人教授と、固体系ゼミの蓬田清教授、小山順二教授、吉澤和範准教授、勝俣啓准教授、山田卓司助教には主にゼミ発表の場において貴重な助言をして頂きました。学会発表に常に安心して臨むことができたのは、直前練習での先生方の的確なご指摘のお陰です。改めて感謝申し上げます。

最後に、一緒に研究活動を進めていく中で相談に乗って頂いたり、暖かく接して下さいた本研究室の学生の皆様にも深く感謝申し上げます。中でも、松尾功二先輩には研究のことで何度も質問や相談をさせて頂きました。また、既にご卒業された大関優先先輩は研究に関する質問だけでなく、就職についての相談などにも応じて頂きました。ご迷惑をお掛けしたこともあったかと思いますが、学生の皆様には本当に感謝しております。

私は卒業し、この4月から社会人として世に出て働き始めますが、この宇宙測地学研究室での研究を通して学んだこと、身に付けたことは、社会に出ていくうえで非常に役立つ貴重な財産であり、大切な思い出でもあります。皆様、本当にありがとうございました。

6. 参考文献

- Caplan, P., J. Derber, W. Gemmill, S.-Y. Hong, H.-L. Pan, D. Parrish, (1997), Changes to the 1995 NCEP Operational Medium-Range Forecast Model Analysis–Forecast System. *Wea. Forecasting*, 12, 581–594.
- Hagedorn, R., T. M. Hamill, and J. S. Whitaker, (2008) Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble forecasts. Part I: 2-meter temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 2608-2619.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, T. Schofield, R. P. Linfield, K. R. Hardy, (1997), Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *JGR*, 102, 23,429-23,465.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, W. I. Bertiger, S. S. Leroy, T. K. Meehan, L. J. Romans, J. T. Schofield, D. J. McCleese, W. G. Melbourne, C. L. Thornton, T. P. Yunck, J. R. Eyre and R. N. Nagatani, (1996), Initial Results of Radio Occultation Observations for Earth's Atmosphere Using the Global Positioning System, *Science*, Vol.271 no.5252 pp.1107-1110, doi:10.1126/science.271.5252.1107
- McCormick, M. P., L. W. Thomason, and C. R. Trepte (1995), Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption, *Nature*, 373, 399–404.
- McCormick, M. P., and R. E. Veiga (1992), SAGE II measurements of early Pinatubo aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, 19(2), doi:10.1029/91GL02790.
- Wang, K.-Y., S.-C. Lin, and L.-C. Lee (2009), Immediate impact of the Mt Chaiten eruption on atmosphere from FORMOSAT-3/COSMIC constellation, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03808, doi:10.1029/2008GL036802.

CDAAC: COSMIC Data Analysis and Archive Center Version 3.0

【<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac>】

COSMIC: Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate

【<http://www.cosmic.ucar.edu/>】

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 JAXA 【 <http://www.jaxa.jp/>】

Global Volcanism Program 【<http://www.volcano.si.edu/index.cfm>】

国土交通省国土地理院 【<http://www.gsi.go.jp/>】

九州大学総合研究博物館オンライン版

【<http://www.museum.kyushu-u.ac.jp/PLANET/welcome.html>】

Met Office 【<http://www.metoffice.gov.uk/>】

NASA Aqua Project Science 【<http://aqua.nasa.gov/>】

NASA Earth Observatory 【<http://earthobservatory.nasa.gov/>】

NASA GFS DISC: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center

【<http://daac.gsfc.nasa.gov/>】

NASA Goddard Space Flight Center

【<http://www.nasa.gov/centers/goddard/home/index.html>】

NASA Terra 【<http://terra.nasa.gov/>】

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research
Laboratory (ESRL) 【<http://www.esrl.noaa.gov/>】