

平成22年度 卒業論文

火山灰追跡モデルPuffを用いた2010年4月の  
アイスランド火山灰の輸送拡散数値実験

筑波大学生命環境学群地球学類

地球環境学主専攻

200710833

邊見萌乃

2010年2月



# 目 次

要旨	i
Abstract	ii
表目次	iii
図目次	iii
1 はじめに	1
2 目的	3
3 Puff モデルの概要	4
3.1 基本方程式 . . . . .	4
3.2 Puff モデル . . . . .	4
3.3 計算手法及び初期条件 . . . . .	7
4 使用データ	9
5 結果と考察	10
5.1 噴火とシミュレーションの概要 . . . . .	10
5.2 高度場と風 . . . . .	10
5.3 噴煙の分布 . . . . .	11
6 結論	16
7 今後の課題	17
謝辞	18
参考文献	19

# 火山灰追跡モデル Puff を用いた 2010 年 4 月の アイスランド火山灰の輸送拡散数値実験

邊見 萌乃

## 要旨

本研究では、筑波大学計算科学研究センターの火山灰追跡モデル Puff を使用して、2010 年 4 月に発生したアイスランド火山の噴火について火山灰噴煙の詳細な数値シミュレーションを行った。

火山灰は航空機にとって脅威である。一度航空機が火山灰噴煙の中に突入すれば、溶けた灰がエンジンに入り込むことによってエンジンが停止し、大事故の原因となる恐れがある。この理由からヨーロッパの多くの空港が噴火後約一週間閉鎖となり、航空会社は莫大な経済損失を受け、多くの乗客の混乱を招く結果となった。

火山灰追跡モデル Puff は、アラスカの火山観測所で 1991 年、Redoubt 火山噴火の際に開発された。本研究では上層の風のデータセットとして気象庁による GSM 解析値を使用している。またアイスランド沿岸警備隊によると、噴火開始時刻は 2010 年 4 月 14 日 1:00 UTC であり、噴煙は高度 11 km まで到達した。

シミュレーションによると噴煙は西もしくは北西の風によりヨーロッパに到達した。このシミュレーション結果は Google 社から提供される無償ソフト、Google Earth に合成した。このように仮想地球を用いて Puff シミュレーションの結果を表現することは、将来起こりうる噴火による被害を防ぐために役立つだろう。

キーワード: Puff モデル, アイスランド火山, 火山灰噴煙, 航空機, Google Earth

# **Numerical Simulations of Ash Plume from Icelandic Volcano in April 2010 using the Puff Model**

**Moeno HEMMI**

## **Abstract**

In this study, numerical simulations are conducted for the volcanic ash plume which erupted in Iceland on April 2010, using the ash plume tracking model Puff at the Center for Computational Sciences (CCS), University of Tsukuba.

The volcanic ash is a threat for commercial aircrafts. Once an aircraft flies into the ash clouds, the jet engines will stop due to the melting ashes in the engines, leading to serious aviation disasters. For this reason, many airports in Europe had to close for a week, causing great economic loss for air transport companies and passenger frustration.

The volcanic ash tracking model Puff was developed at the Alaska Volcano Observatory (AVO) in 1991 during the eruption of the Redoubt Volcano. In this study, the Global Spectral Model(GSM) re-analysis data provided by the Japan Meteorological Agency was used for the upper air wind data of the Puff model.

According to the Icelandic coast guard, the eruption started at 01:00 UTC on 14th April 2010, and the plume reached an altitude of 11 km. The simulated ash plume drifted towards Europe by the westly or northeastly winds. The simulation results were displayed on the free software Google Earth, provided by Google Inc. . The results would contribute to the planning of disaster prevention efforts in future eruption events.

**Key Words:** Puff model, Iceland volcano, Ash cloud, aircraft, Google Earth

## 表 目 次

1	PUFF モデルに与えた定数と変数 . . . . .	21
---	-----------------------------	----

## 図 目 次

1	Eyjafjallajokull 火山の 2010 年 4 月の噴火における噴煙高度の時間 変化 . . . . .	22
2	Eyjafjallajokull 火山の位置 . . . . .	23
3	2010 年 3 月 24 日の Eyjafjallajokull 火山の噴火の様子 . . . . .	23
4	2010 年 4 月 14 日の Eyjafjallajokull 火山の噴火の様子 . . . . .	24
5	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC) . . . . .	25
6	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC) . . . . .	26
7	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC) . . . . .	27
8	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC) . . . . .	28
9	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC) . . . . .	29
10	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC) . . . . .	30
11	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC) . . . . .	31
12	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC) . . . . .	32
13	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC) . . . . .	33
14	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC) . . . . .	34
15	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC) . . . . .	35
16	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC) . . . . .	36
17	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC) . . . . .	37
18	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC) . . . . .	38
19	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC) . . . . .	39
20	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC) . . . . .	40
21	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC) . . . . .	41
22	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC) . . . . .	42
23	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC) . . . . .	43
24	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC) . . . . .	44
25	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC) . . . . .	45
26	300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 21 日 00:00 UTC) . . . . .	46

27	500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 21 日 00:00 UTC) . . . . .	47
28	850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 21 日 00:00 UTC) . . . . .	48
29	シミュレーション結果と衛星画像の比較 . . . . .	49
30	火山灰の二次元分布 (24 時間後、48 時間後) . . . . .	50
31	火山灰の二次元分布 (72 時間後、96 時間後) . . . . .	51
32	火山灰の二次元分布 (120 時間後、144 時間後) . . . . .	52
33	火山灰の二次元分布 (168 時間後) . . . . .	53
34	火山灰の三次元分布 (24 時間後、48 時間後) . . . . .	54
35	火山灰の三次元分布 (72 時間後、96 時間後) . . . . .	55
36	火山灰の三次元分布 (120 時間後、144 時間後) . . . . .	56
37	火山灰の三次元分布 (168 時間後) . . . . .	57
38	経度-高度分布 . . . . .	58
39	緯度-高度分布 . . . . .	59
40	噴火後 1 週間の降灰分布 . . . . .	60
41	Google Earth に合成した噴火開始から 6 時間後から 36 時間後まで の噴煙分布のシミュレーション結果 . . . . .	61
42	Google Earth に合成した噴火開始から 42 時間後から 60 時間後まで の噴煙分布のシミュレーション結果 . . . . .	62

# 1 はじめに

2010 年 4 月 14 日、アイスランドの南部に位置する Eyjafjallajökull (エイヤフィヤトラヨークトル) 火山で大規模な噴火が発生した。噴煙は高度 10 km 以上に達し、西もしくは北西からの風によりヨーロッパ各国に流れ、国際空港が長期にわたり閉鎖となった (地質被害調査 2010)。この空域の閉鎖は第二次世界大戦以後最も大規模なものとなり、少なくとも 1000 万人の航空機利用者に影響を与えた (Iceland Met Office 2010)。International Air Transport Association (IATA) が報告した Financial Impact of Icelandic Volcano Ash (2010) によると、噴火後の 4 月 15 日から 22 日までの約 1 週間は、10 万便ものフライトがキャンセルされ、航空会社の被害損額は推定 1600 億円にも達し、経済的にも社会的にも大きな打撃を受ける結果となった。

この混乱の理由は、火山灰を航空機のエンジンが吸い込むと、エンジン停止など大事故の発生する危険性が知られているためである。実際、1982 年のインドネシアの Mt. Galunggung、1989 年のアラスカの Mt. Redoubt の噴火で、飛行中の航空機のエンジンに火山灰が入り込み、エンジンが停止するという事故が起きた。幸い降下中にエンジンが再スタートして大事故を免れたが、このような事故は航空機の利用者に被害を与えるだけでなく航空業界全体に対して経済的に大きな損害を与える。被害を最小限に抑えるために、衛星画像、地震計による観測などが行われているが、大気中を移動する噴煙の様子を継続的に把握することは困難である。そこで現在では、火山灰噴煙の位置を予測しリアルタイムで火山灰を追跡するモデルが開発されている。火山灰追跡モデルには、Puff (Searcy *et al.* 1998)、VAFTAD (Heffter *et al.* 1993) などがあるが、本研究では Puff モデルを使用する。Puff モデルは、Tanaka (1994) によって開発された、三次元 Lagrangian 方程式系を利用して、噴煙の移動、乱流拡散、重力落下を計算するモデルである。Puff モデルはその後改良が加えられ、ある程度の予測精度で火山灰を追跡できることが示された (Searcy *et al.* 1998, 山本 2000)。PUFF モデルは、JAL で航空管理システムとして機能しているほか、森林火災による煙のモニタリングシステムとして応用可能である (金高 2003) など、その有用性が示されているモデルである。

Puff モデルは緊急時の予測のためにシミュレーション結果を短時間で出せるようにしている。例えば、シミュレーションの初期条件において、大気中に存在できる最大粒子数を少なくする、また噴煙高度を一定と仮定してシミュレーションを行うなど、短時間で計算が終わるよう工夫されている。しかしより正確な噴煙の

拡散を考える際には噴煙高度のソースデータに時間変化を与える必要がある。また、近年 Puff シミュレーションの結果を Google Earth に合成する試みが Webley *et al.* (2009) などで行われている。Google Earth を使用した火山灰噴煙のシミュレーション結果は Web 上で公開されており、誰でも簡単に噴火に関する情報を得ることが可能である。このような情報は、噴火による被害を緩和するためにも重要なツールであると言える。

## 2 目的

本研究の目的は、リアルタイム火山灰追跡モデル Puff を改良して 2010 年 4 月 14 日に発生した Eyjafjallajökull 火山の噴火について、最も被害の大きかった噴火後 1 週間の噴煙の詳細なシミュレーションを行い、その輸送拡散の実態を解明することである。

シミュレーションに使用するデータは、気象庁の GSM (Global Spectral Model) 解析値、ロンドン火山灰情報センター (London Volcanic Ash Advisory Center: London VAAC) により発表されている 6 時間間隔の噴煙高度の時系列データとする。GSM 解析値を使用して噴火後の 300 hPa、500 hPa、850 hPa の高度と風の図を作成し考察する。また London VAAC により発表されている Eyjafjallajökull 火山の噴煙高度の時系列を cubic spline (Burden *et al.* 1981) で内挿し、なめらかな噴煙高度の時系列データを作成する。この噴煙のソースデータを使用できるように Puff モデルを改良し、噴煙の分布図 (二次元、三次元、緯度-高度、経度-高度)、降灰分布図を作成する。得られたシミュレーション結果を衛星画像と比較し、考察する。更に、3D 地図ソフトウェア (Google Earth) を使用して噴煙を立体的に可視化できる状態にし、考察を行う。



### 3 Puffモデルの概要

#### 3.1 基本方程式

火山灰追跡モデルは汚染物質拡散モデルを火山灰に応用したものである。大気中に浮遊する汚染物質の動向を記述するには、Euler 的な見方と Lagrange 的な見方の 2 通りが考えられる。Eulerian 方程式系で表示すると、火山の連続方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\nabla \cdot q \mathbf{V} - \frac{\partial}{\partial p} q \omega + K_H \nabla^2 q + g^2 \rho K_V \frac{\partial^2 q}{\partial p^2} - g \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial p} + S \quad (1)$$

ここで、 $q$  は火山灰の混合比で、時間と場所の関数として与えられる。 $\rho$  は平均空気密度、 $g$  は重力加速度、 $K_H$ 、 $K_V$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の拡散係数、 $\mathbf{G}$  は重力落下フラックス、 $S$  は火山灰の供給と消失である。例えば、噴火の過程では火山灰の供給にあたり、蒸発等により大気中から消滅する過程は消失にあたる。それに対し、重力落下により地上に到達する過程や、噴火した火山周辺の領域から流れていく過程は、境界を越える収支で表され、供給、消失とは区別される。火山灰の水平、鉛直方向の移動は右辺第 1、2 項の水平、鉛直フラックス収束によって表現される。また、水平、鉛直方向の乱流混合の過程は右辺第 3、4 項の水平、鉛直拡散過程によって表現される。一般に拡散係数は場所の関数である。

#### 3.2 Puffモデル

Puff モデルは、Tanaka (1994) によって作られた三次元 Lagrangian 方程式系のモデルを任意の火山に適用できるよう改良したものである。Puff モデルでは、粒子の位置は輸送、拡散、重力落下によって決定される。時間間隔を  $\Delta t$  とすると、時間  $t$  から  $\Delta t$  後の粒子の位置ベクトルは次のように計算される。

$$\mathbf{r}_i(t + \Delta t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{V}\Delta t + \mathbf{Z}\Delta t + \mathbf{G}\Delta t \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{r}_i(t)$  は時間  $t$  における  $i$  番目の粒子の位置ベクトル、 $\mathbf{V} = V(x, y, z, t)$  は粒子を運ぶその地点での風ベクトル、 $\mathbf{Z} = Z(Z_h, Z_h, Z_v)$  は標準偏差  $(c_h, c_h, c_v)$  の三次元ガウス分布に従う乱数ベクトル、 $\mathbf{G}$  はストークスの法則によって求められる重力落下ベクトルを表す。

PUFF モデルでは、任意の火山でのシミュレーションができるように、Cartesian 座標系を球面座標系に変換してある。したがって、位置ベクトル  $r_i(t)$  は緯度 ( $\theta$ )、経度 ( $\lambda$ ) で表される。単位はラジアンである。水平風  $V$  は以下の関係式で表される。

$$u = \frac{dx}{dt} = a \cos \theta \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = a \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

ここで、 $a$  は地球の半径である。上の 2 式から以下のようなになる。

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{u}{a \cos \theta} \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{a} \quad (6)$$

この関係式によって、風の単位は (m/s) から (rad/s) に変換される。同様に水平拡散速度  $c_h$  の単位も (rad/s) に変換される。鉛直方向の単位は通常の幾何学的高度 (m) を用いている。また、鉛直移流は上昇流のデータが入手困難であるために計算していない。

#### 風のデータおよび移流

移流による火山灰の粒子の移動を計算するために、(2) 式の風ベクトル  $V$  には 3 次元の風のデータを導入する。風のデータの時間間隔、空間間隔はともに広いので内挿して使用する。GPV/JMA を用いる場合は、cubic spline を用いて 6 時間間隔から 3 時間間隔に内挿して、5 分間隔に線形内挿を行う。

#### 拡散

実際の大気では乱流が発生しており、粒子はその小さなスケールでの振動によって拡散する。しかし、風データは解像度が大きいため小さな乱流の渦を取り入れることができない。そのため、Puff モデルでは三次元ガウス分布に基づく乱数ベクトルを与えて拡散を表現している。これは、(2) 式の  $Z$  項にあたる。拡散過程では Eulerian 拡散方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial q}{\partial t} = K \nabla^2 q \quad (7)$$

ここで、 $K$  は拡散係数、 $q$  は火山灰の混合比である。簡単のために 1 次元  $x$  軸だけを考えると、原点に汚染物質がある拡散方程式の解は

$$q(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi K t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 K t}\right) \quad (8)$$

で表される。この解は標準偏差が  $\sigma$  が次式で与えられる正規分布を表している。

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \quad (9)$$

この式から  $\sigma$  で表せる火山灰の広がり時間は時間  $t$  に比例することがわかる。

Lagrangian 方程式で表される random walk process は次のように定義される。

$$\begin{cases} r(0) &= 0 \\ r(t + \Delta t) &= \mathbf{r}(t) + z(t)\Delta t \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{r}(t)$  は火山灰の位置であり、 $t = n\Delta t$ 、( $n = 1, 2, \dots, N$ ) である。 $z(t)$  は標準偏差  $c$ 、平均 0 の正規乱数である。

random walk process では、 $\mathbf{r}(t)$  の標準偏差が次式で表される。

$$\sigma = c\sqrt{t\Delta t} \quad (11)$$

この Lagrangian 方程式の  $\sigma$  を (12) 式の Eulerian 方程式の  $\sigma$  と比較すると、拡散係数  $K$  と拡散速度  $c$  の関係は次式で表される。

$$c = \sqrt{2K/\Delta t} \quad (12)$$

この式から拡散速度  $c$  は拡散係数  $K$  と  $\Delta t$  に依存していることがわかる。

拡散係数  $K$  は風や粒径に依存せず、経験的に選びだされる。したがって、拡散係数  $K$  は衛星画像などの観測結果と Puff シミュレーションの結果とを比較して適合する値を見つける必要がある。

### 重力落下

煙粒子の重力による落下は (2) 式の最後の項、 $G=(0,0,G)$  で与えられている。この終端速度  $G$  は以下の計算から求められ、煙の粒径  $r$  に依存している。物体が落下する時には、排除される静止流体の体積の運動量である慣性力が働き、それは物体の速さの 2 乗に比例する。

$$F = m\frac{v}{\tau} = a_2|v|^2 \quad (13)$$

ここで、 $\tau$  は重力加速度と終端速度から作られる特徴的時間、 $a_2$  は定数である。更に、落下物のサイズが小さい時は、静止物体の粘性のために物体に接している流体は物体とともに運動する。このときに働くのが粘性力であり、落下する物体の速さに比例する。

$$F = m\frac{v}{\tau} = a_1|v| \quad (14)$$

ここで  $a_1$  は定数である。

また観測事実から雨粒や雹の終端速度は、 $r > 600 \mu m$  では慣性力に、 $r < 40 \mu m$  では粘性力に比例するとあり、その間の慣性力、粘性力がともに働く領域に関しては以下の式で統合している。

$$\frac{v_t}{v_o} = \frac{r_o}{r} \left[ \left\{ \left( \frac{r}{r_o} \right)^2 + \frac{1}{4} \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

ここで、 $v_t$  は終端速度、 $v_o$  は速度の次元を持つ定数、 $r_o$  は長さの次元を持つ定数である。本研究では、 $v_o = 1.0 \text{ m/s}$  と与えた。

### 3.3 計算手法及び初期条件

Puff モデルは緊急時にできるだけ早く火山灰の移動を予測するために、モデルに最初から変数が与えられている。シミュレーションの際に与える変数は、火山の位置 (緯度、経度)、火山の標高、噴火開始時刻、噴煙高度、予報時間、火山灰粒子数である。それ以外の変数には初期設定値を与えてある。表 1 に本研究で与えた定数および変数を示してある。

#### 粒子分布と粒径分布

噴煙の位置は火山灰粒子の位置 (緯度、経度、高度) で表される。Puff モデルは、火口から柱状に新しい火山灰粒子をタイムステップ毎に発生させる。従って、粒子の数は落下 ( $z=0$ ) やモデルの計算領域を越えない限り増加する傾向にある。Puff モデルでは、リアルタイム予報システムとして緊急の際により短時間で予報ができるよう、最大粒子数を少なく設定することで計算時間を短くしている。しかし本研究ではより詳細に噴煙の様子を再現すること、及び 1 週間のシミュレーションを目的としているので、最大粒子数は 200,000 個とした。

また設定した粒径分布は、粒径  $d_i$  の対数をとった値が -5.5、標準偏差 1 の正規分布に従うようにした。つまり、火山灰の粒径は、 $3 \mu m$  を中心として 10 倍、1/10 倍を 1 とする粒径分布を与えた。火山が噴火すると、噴煙は高い高度まで一気に噴き上げられる。Puff モデルでは噴煙高度、噴火開始時刻を与えると、噴火開始時刻に火口の位置  $z_1$  から噴煙高度  $z_2$  まで火山粒子が分布するように設定した。このとき、火口から噴煙頂上まで火山灰粒子を一様に与える。

#### 噴煙高度

正確な噴煙高度を測定することは難しいため、緊急警報を出す際には全ての高度での火山灰の位置を表し、その中に実際の噴煙が含まれていれば、事故を未然に防ぐことができると考えられる。しかし噴煙高度をモデルに入れることができれば、より正確な火山灰予報が可能である (山本 2000)。

Eyjafjallajökull 火山の4月の噴火に関して、ロンドン火山灰情報センター (London VAAC) により噴煙高度が4月15日 12:00 UTC から発表されている。しかし Icelandic Coast Guard によれば、実際の噴火開始時刻は4月14日 01:00 UTC からとされている。そこで実際の噴火開始時刻から噴煙高度のデータが発表されるまで (4月14日 01:00 UTC から4月15日 06:00 UTC まで) の噴煙高度は London VAAC が最初に報告した噴煙高度 11 km で一定と仮定した。この噴煙高度の時系列データ (図1 上) は6時間間隔であったため、cubic spline で5分間隔に内挿してなめらかな噴煙高度の時系列データを作成した (図1 下)。また、この噴煙のソースデータを使用できるように Puff モデルを改良した。

#### モデルからの出力

モデルの実行結果は噴火開始から1時間おきにそれぞれの粒子の三次元の位置と粒径をバイナリーファイルで出力している。予報の出力間隔、出力回数、予報回数は自由に変えることができる。この出力結果をグラフィック化することによって火山灰の位置がわかりやすいようにしている。

#### Google Earth

Google Earth とは、Google 社が提供している、世界中の衛星・航空写真を閲覧できる3D地図ソフトウェアである。Google Earth は同社が無償配布しており、同社サイトから誰でも自由にダウンロードできる。Puff モデルのシミュレーション結果を Google Earth に合成する試みは Webley *et al* (2009) などでも行われており、Web で閲覧することが可能である。Google Earth で噴煙を表現するには、ある時間での各火山灰粒子の位置 (緯度、経度、高度) を元に KML ファイルを作成する必要がある。KML は、Google Earth、Google マップ、モバイル Google マップなどの Earth ブラウザで、地理データの表示に使用するファイル形式である。

Google Earth では噴煙の拡がりを見る角度を自由に変えることができ、また空港や主要都市を表示して、噴煙による危険度の高いエリアを確認することが可能となる。噴火に関する情報を随時更新することも可能であり、誰でも簡単に操作が行えることから災害の危機啓発に役立つツールになるといえる。

## 4 使用データ

### データセット

- 気象庁の GSM 解析値

- 水平グリッド間隔:  $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$

- 鉛直グリッド間隔: (16 層) 1000 , 925 , 850 , 700 , 500 , 400 , 300 , 250 , 200 , 150 , 100 , 70 , 50 , 30 , 20 , 10 (hPa)

- 予報時間: 168 時間

- 解析要素: 水平風  $V=(u, v)(\text{m/s})$ 、ジオポテンシャル高度  $Z(\text{m})$

- 解析期間: 2010 年 4 月 14 日 ~ 22 日

### 火口上空の噴煙高度

- London VAAC より発表された 6 時間間隔の噴煙高度時系列データ

噴煙高度の時系列データは NOAA (National Oceanic And Atmospheric Administration) の HP で噴火後に公開されていた London VAAC の VAA ( Volcanic Ash Advisroy) データを使用した。時間間隔は 6 時間で、2010 年 4 月 14 日から同年 5 月 24 日の期間までの Eyjafjallajokull 火山の噴煙高度について掲載されていた。現在掲載は終了されているが、噴火直後であれば過去 90 日分まで閲覧が可能である。

### 衛星画像

- MODIS[AQUA/TERRA]

MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) の衛星画像のデータは USGS (U.S.Geological Survey) の HP により公開されている。MODIS は、NASA の地球観測衛星 AQUA/TERRA に搭載されている放射系であり、TERRA が午前中、AQUA が午後のデータとなっている。多種のプロダクトが選択できるが、今回の研究では MOD09GA、MYD09GQ を使用した。

## 5 結果と考察

### 5.1 噴火とシミュレーションの概要

噴煙シミュレーションの対象火山は Eyjafjallajökull 火山 (緯度、経度: 63.63 °N、19.62 °W、標高: 5465 feet (約 1666 m)) である。Eyjafjallajökull 火山はアイスランド南部の大西洋中央海嶺上に位置する (図 2)。Oroian (2010) によると、Eyjafjallajökull 火山の噴火は 2 つの段階に分けられる。まず、2010 年 3 月 20 日から同年 4 月 12 日、そして 4 月 14 日からの大規模な噴火である。3 月 20 日からの噴火は、100 m ほどの裂け目から粘度の高い溶岩流が流出し、連続的なハワイ式噴火となった。図 3 は 3 月 24 日の噴火の様子を捉えた衛星画像である。赤い噴火口から流れる溶岩流の筋を確認することができる。4 月 14 日からの噴火は、マグマと溶けた氷河による水との反応で厚さ 100 m の氷河が爆発的に噴火した。このマグマ水蒸気爆発の発生によって、噴煙高度は最高で 11 km に達した。図 4 上、図 4 下はそれぞれ 4 月 14 日の 12:30 UTC、同日 14:25 UTC の衛星画像である。火口の位置する氷河から濃く白い噴煙が東に伸びる様子がわかる。この噴火では粒径 5  $\mu\text{m}$  以下の微細な粒子が大半で、大気中での滞留時間が長くなったことにより、4 月 15 日から 4 月 22 日までの約 1 週間でヨーロッパの主要な空港が閉鎖された。この間、10 万 4000 便のフライトが欠航したことで多くの乗客が足止めされ、航空会社の損害はおおよそ 1600 億円に達した。噴火は 5 月 21 日までには収束に向かった。

本研究では、最も被害が大きかったと報告される噴火後約 1 週間の 2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC から同年 4 月 22 日 00:00 UTC をシミュレーション期間とする。また火口上空の噴煙高度が時間変化するように Puff モデルを改良してシミュレーションを行い、300 hPa、500 hPa、850 hPa の高度場と風の図、噴煙の分布を 24 時間間隔で作成した。使用したデータは気象庁 GMS 解析値、London VAAC による火口上空の噴煙高度時系列データである。300、500、850 hPa の高度場はそれぞれ、航空機の航路付近、中層大気、噴火口付近の高度にあたる。結果の出力には THE GMT-SYSTEM Ver.3.3.4 (Wessel et al. 2000) を用いた。

### 5.2 高度場と風

図 5 ~ 図 28 は 2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC から同年 4 月 21 日 00:00 UTC までの 300 hPa、500 hPa、850 hPa の高度場と風の図を 24 時間間隔で作成したもの

である。噴火開始時刻は4月14日の01:00 UTCなので、噴火開始からおよそ1週間の期間である。まず、4月14日00:00 UTCから4月16日00:00 UTCの高度場の図(図5上~図13上)を見ると、この期間の300 hPa、500 hPa、850 hPa高度のそれぞれでアイスランドの南部に高気圧場が存在している。これにより、地衡風はアイスランド南部からスカンディナ비아半島南部まで西から北西の風になっていることが分かる(図5下~図13下)。また同期間の300 hPa、500 hPa、850 hPa高度において、フランスからポーランドの間に明瞭な低気圧場が存在している。この低気圧場の存在により、アイスランド南部から吹く西から北西の風がスカンディナ비아半島を境に大きく向きを変えて北東の風になる。4月17日00:00 UTCから4月21日00:00 UTCの高度場の図(図14上~図28上)を見ると、それ以前に観察されたアイスランド南部の高気圧場の鉛直的な構造は崩れるものの、周囲より気圧は高い傾向にある。また同期間において、アイスランドとスカンディナ비아半島の間に北東側から低気圧場が張り出している。特に張り出しの大きかった18日の300 hPa、500 hPaの風の図(図17下、図18下)を見ると、アイスランド上空の北風が北緯55°N付近で大きく西風に変化するのが分かる。4月17日00:00 UTCから4月21日00:00 UTCの期間においても、アイスランド南部からヨーロッパに向かう風は、西から北西の風であったといえる。

アイスランドが位置する北大西洋の中部では北米大陸やメキシコ湾で発生する低気圧が北米大陸東岸を北東に進み、アイスランド付近の海域で最終段階を終えることから低気圧が卓越する傾向にあり、これはアイスランド低気圧と呼ばれる。また、極と赤道との温度差により、赤道付近で上昇して上空で極に向かって流れる空気が亜熱帯上空で集積し、その一部が沈降することで亜熱帯地域に帯状の高気圧が作られるが、これはアゾレス高気圧と呼ばれる。今回の高度場で観察されたアイスランド南部の高気圧場、アイスランド北東部の低気圧場はそれぞれ、アゾレス高気圧とアイスランド低気圧にあたると考えられ、これにより西から北西の風が維持されたといえる。

### 5.3 噴煙の分布

#### 2次元分布

図29上は2010年4月15日11:00 UTCの噴煙のシミュレーション結果である。これを見ると、高度7500 m以上の粒子はアイスランド南部から東もしくは南東方



向に拡散し、5 °W 付近で南に向きを変えてイギリス北部に噴煙がかかる。その後大きく向きが変わり北東に拡散している。また、高度 2500 m 以下の粒子も同様にアイスランド南部から東もしくは南東方向に拡散しているが、イギリス北部の海上で北東に拡散している。図 29 下は同日 11:35 UTC の MODIS/TERRA の衛星画像である。これを見ると、アイスランドの南部から灰色の噴煙が南東方向に拡散し、イギリス北部の海上からスカンディナ비아半島西部の海上まで広がっている様子がわかる。これはシミュレーションの高度 2500 m 以下の粒子の位置と対応している。衛星画像からはシミュレーションの高度 7500 m 以上の噴煙を観察することはできないが、画像からは確認できない薄い濃度で拡散している可能性もある。

図 30～図 33 は 2010 年 4 月 14 日 01:00 UTC からシミュレーションを開始し、24 時間後から 168 時間後までのシミュレーション結果を 24 時間間隔で出力したものである。シミュレーション結果では火山灰粒子を高度別で色分けして示している。噴火開始から 24 時間後 (図 30 上)、初期に放出された粒子はノルウェー、スウェーデンに到達しており、新しく放出されている粒子は南東方向に向かっている。48 時間後 (図 30 下) には、噴煙がスカンディナ半島全体を覆っている。またデンマークからイギリス南部にかけて、西に進んでいた噴煙が風によって一部東に大きく向きを変えている。この時点でヨーロッパ北部はほぼ噴煙に覆われ、西部、東部の一部にも噴煙がかかっている。72 時間後 (図 31 上)、火山の東側で円を描くように高度 7500 m 以上の粒子が存在している。一方、イギリス、スカンディナ비아半島などは粒子の高度が 2500 m 以下になっている。96 時間後 (図 31 下)、ヨーロッパ全体を囲むように、高度 5000 m 以上の粒子が存在する一方で、その内側の粒子は大半が 2500 m 以下である。120 時間後 (図 32 上)、北緯 40 °から北緯 55 °の間で、高度 7500 m 以上の噴煙が筋状に東西に流れている。また火口付近の粒子の高度はこれまで 7500 m 以上であったが、2500 m ～ 5000 m まで低下しており、噴煙高度のソースデータが時間変化していることがわかる。144 時間後 (図 32 下) では図 32 上 で見られた東西に筋状に流れている高度 7500 m 以上の粒子が減少している。168 時間後 (図 33 上) には 7500 m 以上の粒子がほとんどなくなって高度 2500 m 以下の粒子が東西に広がり、Eyjafjallajökull 火山の南東からスカンディナ비아半島付近に高度 2500 m ～ 7500 m の粒子が広がっている。

### 3 次元分布

図 34～図 37 は 2 次元分布と同じ設定時刻・期間・出力間隔でシミュレーションを行い、その結果を 3 次元的に表現したものである。また 3 次元的に表現した図で

は、地上の黒い領域は灰粒子の位置を地表に投影したものである。シミュレーション開始から 24 時間後 (図 34 上) では、噴煙は高度を約 10000 m ほどで鉛直の構造を崩さず、東から南東方向に進んでいる。48 時間後 (図 34 下) には、火口上空の新しく放出される噴煙高度が約 7500 m 程度まで低下している。72 時間後 (図 35 上) には火口上空の噴煙は図 35 下 と同様に高度約 7500 m 程度であり、高度 2500 m ~ 5000 m 以下の粒子の一部が落下している。96 時間後 (図 35 下) を見ると、高度 7500 m ~ 10000 m 程度まで噴煙が存在する状態で、壁のようにヨーロッパ全体を囲んでいる形になっている。120 時間後 (図 36 上)、144 時間後 (図 36 下) になると、高度 7500 m ~ 10000 m まで存在する粒子がヨーロッパを囲む構造は崩れ、全体的に広がっている。更に 168 時間後 (図 37) には、噴煙高度が全体的に低下し、粒子がヨーロッパ全域に広がっている。

高度場と風の結果から、噴火からおおよそ 2 日間 (2010 年 4 月 14 日 ~ 4 月 16 日) はアイスランド南部の海洋上空に高気圧場、フランスからポーランドの間に低気圧場が存在していた。この 2 つの気圧場は 300、500、850 hPa の全てで観察できたので、鉛直的な構造であったといえる。この二つの気圧場を回りこむような風に流された粒子は、鉛直の構造を崩さずに鳥瞰で見ると筋状に移動したと考えられる。しかし、噴火から 3 日目以降 (2010 年 4 月 17 日 ~ 4 月 21 日) は 2 つの高度場の鉛直的な構造が崩れることと、新しく放出される粒子が高度 5000 m 程度にまで低下したことにより、粒子は高度 7500 m 以下でヨーロッパ全域の広い範囲に拡散したと考えられる。

#### 経度-高度、緯度-高度分布

図 38、図 39 は 2 次元分布と同じ設定時刻・期間・出力間隔でシミュレーションを行い、その結果の噴煙分布を経度-高度、緯度-高度断面で見られるようにした図である。経度-高度断面 (図 38) で噴煙の分布を見ると、シミュレーション開始から 24 時間後、噴煙の高度 11000 m で、全高度の噴煙がほぼ一様に東に進んでいる。地上付近の濃くなっている部分は粒子が落下した地点を表している。48 時間後には、噴煙上部の色が濃くなっているが、これは噴煙が曲がって進む方向が変わることから粒子に重なりができるためである。また、火口上空の噴煙は高度 6000 m 付近まで低下している。72 時間後、噴煙は東西に大きく拡がり高度は 8000 m 付近まで再び上昇する。96 時間後、120 時間後には、それ以前に見られた全高度での一様な拡がりも崩れて全体的噴煙高度が下がり、8000 m 以下に粒子の多くが分布しているように見える。144 時間後、168 時間後にはほとんどの粒子が高度 4000

m 以下に分布している。

図 39 は緯度-高度断面での噴煙分布である。シミュレーション開始から 24 時間後、噴煙は南北に広がっているが、高度の高い部分が低い部分より早く広がっている。48 時間後から噴煙は南に進み、72 時間後には火口上空の噴煙は高度 8000 m 程度まで低下する。96 時間後、火口上空の噴煙高度が確認できないほど、噴煙は濃く分布している。120 時間後には、火口上空の噴煙が高度 5000 m まで低下しているのが分かる。144 時間後、168 時間後には再び火口上空の噴煙高度が確認できないほど火山周辺の噴煙が濃くなっており、特に 50 °N から 65 °N 付近の高度 6000 m 以下に粒子が多く分布していることがわかる。

噴煙の経度-高度、緯度-高度断面図の時間変化から噴煙は緯度方向より経度方向への拡がりの方が早いとわかり、また緯度-高度断面から 40 °N ~ 70 °N で噴煙が濃くプロットされていることがわかる。このことから、Eyjafjallajökull 火山から放出された噴煙は早いスピードで東へ拡散してヨーロッパに到達し、その後のヨーロッパ全域の広い範囲で拡散し長期にわたって滞留していたと考えられる。

#### 降灰分布

噴火から 1 週間の間に落下した灰粒子の数を面積加重で求め格子点毎の粒子の数を算出し、降灰分布図を作成した(図 40 上)。また、1 粒子の重さを 100 kg と仮定し、1 週間で落下した灰の量の密度を求め、その値の対数を取り等値線図を作成した(図 40 下)。図 40 下の等値線図の値は 1m<sup>2</sup> あたりの相対的な灰の量の分布を表した図であるので、もし実際の降灰分布(密度)の情報が得られれば、その値から代表的な灰粒子の密度を求めることが可能となる。

図 40 上を見ると、アイスランドの南西から北東までの広い範囲で粒子が拡散しているとわかる。特にアイスランドの南、南東、東の 3 方向で粒子の落下数が多い。図 40 下を見ると、先ほどの 3 方向の中では特に南東、東方向の等値線の拡がり大きい。例えば 3.6 の等値線は、南では 55 °N 付近までの伸びであるが、南東ではイギリス南部やデンマークとスカンディナ비아半島の間付近まで、東ではフィンランドにまで伸びている。高度場と風の結果から、アイスランド上空では噴火から約 1 週間、西から北西の風が優勢であったと観察されたが、それによってより多くの粒子が東から南東方向に拡散したことで、図 40 のような降灰分布になったと考えられる。

#### Google Earth での噴煙の再現

図 41(a) ~ 41(f)、図 42(a) ~ 42(d) は噴火後 6 時間から 60 時間までの 6 時間間隔の噴煙のシミュレーション結果を Google Earth に合成したものである。それぞれの図のほぼ中心に位置する黄色の目印が Eyjafjallajökull 火山の位置を示し、赤色のドットが粒子を表現している。噴煙の時間変化を見ると、41(a) ~ 41(c) の間に粒子はスカンディナビア半島に到達する。その後イギリスとスカンディナビア半島間の海上付近で粒子の拡散する方向が変化し、図 41(d) ~ 41(f) の間でイギリスに到達する。また、図 41(e) ~ 41(f) で噴煙の拡がり方が上層と下層で分かれてくる様子が見られる。図 42(a) ~ 42(d) の間で噴煙の拡がり方はデンマークからフランスまで南下する。またこの期間に噴煙の上層と下層での拡がり方の違いは明確になり、上層は南に拡がり方が大きく、下層の拡がり方は東から北東方向にまで伸びていることがわかる。このことから Eyjafjallajökull 火山の噴火では風の鉛直シアーが大きく、上層と下層で拡散の方向に違いがあったことがわかる。

## 6 結論

本研究では、2010 年 4 月 14 日に発生した Eyjafjallajökull 火山の噴火による噴煙の輸送拡散のシミュレーションを行った。使用したモデルは Puff モデルであり、三次元 Lagrangian 方程式を基本とした輸送拡散モデルを改良したものである。Puff モデルに使用したデータは気象庁 GSM 解析値と London VAAC による火口上空の噴煙高度時系列データである。

噴煙の移動を高度別で考察するために、300 hPa、500 hPa、850 hPa の高度場と風の図を作成した。噴火後約 1 週間の気圧配置からは、4 月 14 日 00:00 UTC から 4 月 16 日 00:00 UTC まではアイスランド南部の高気圧場、4 月 17 日 00:00 UTC から 4 月 21 日 00:00 UTC まではアイスランド北東の低気圧場の卓越により、アイスランド上空からヨーロッパまで西から北西の強い風が吹いたと考えられる。

噴煙分布のシミュレーション結果と衛星画像を比較すると、シミュレーションの高度の低い粒子と実際の噴煙の拡がりがよく対応していることがわかった。また 24 時間毎にシミュレーションの噴煙分布を見ていくと、噴火開始から 24 時間後までは高度場の図から観察された 2 つの気圧場を回りこむような風に流された粒子が、鉛直の構造を崩さず鳥瞰で見ると筋状に移動していることがわかった。その後、2 つの高度場の鉛直構造が崩れることと火口上空の噴煙高度・風向きが変化することから、ヨーロッパを囲むような形で粒子が拡散した。168 時間後までに、粒子は高度 7500 m 以下でヨーロッパ全域の広い範囲に拡散していった。噴煙の経度-高度分布、緯度-高度分布より、噴煙は経度方向への拡がりが高く、緯度-高度断面での噴煙が濃いことから、Eyjafjallajökull 火山の噴煙は早い段階でヨーロッパに到達し、広範囲で長期にわたり滞留していたとわかる。また噴火後 1 週間の降灰分布図から、粒子の落下量の等値線は東から南東方向に拡がりが大きく、これは西から北西の風が優勢であったことと一致している。また得られた結果を Google Earth に合成し、立体的に噴煙の様子を再現して考察すると、噴火後 30 時間から鉛直シアーが大きくなり、上層と下層で噴煙の拡散の方向が異なることが分かった。

## 7 今後の課題

2010 年 4 月 14 日に発生した Eyjafjallajökull 火山の噴火では、エンジン製造会社など関係機関の見解により、過去の例でエンジン停止が起きた空気中の火山灰濃度  $2 \text{ g/m}^3$  の  $1/1000$  の  $2 \text{ mg/m}^3$  は飛行の許容範囲とされた。これにより 4 月 20 日に、 $2 \text{ mg/m}^3$  を越える空域は”飛行禁止ゾーン”とされ、それ以外の空域での飛行は認められた。より一層の緩和を航空業界が求めたため、the UK Civil Aviation Authority (CAA) により、5 月 17 日には飛行禁止ゾーンが  $4 \text{ mg/m}^3$  を越える空域にまで狭められた (Cities on Volcanoes 6th 2010)。

このように、航空機が飛行可能であるかは空気中の火山灰濃度に左右される。Puff シミュレーションにおいて空気中の火山灰濃度を知るためには、正確な降灰分布図を作り、そこから火山灰濃度を推測する方法がある。本研究では、火山灰粒子を 5 分間隔で一定量噴出させ、粒径分布は空気中に滞留しやすい粒径小さな粒子を設定している。しかし、正確な降灰分布を考える際には、実際の火山灰の噴火量の時間変化をモデルに組み込むことと、すぐに落下してしまう大きい粒径の粒子も考慮してシミュレーションを行うことが必要である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である筑波大学計算科学研究センターの田中博教授には、卒業研究のテーマ設定、研究の進め方、プログラムの作成に至るまで始終丁寧にご指導・ご助言をいただきました。また桜美林大学自然科学系の小野寺三朗教授には、Iceland 火山の噴煙高度に関する情報のご提供と貴重なご意見をいただきました。

さらに、筑波大学計算科学研究センターの天笠俊之准教授には Google Earth の図の作成に関して、同所属の寺崎康児研究員にはプログラムの作成を中心に技術的な面に関して、ご指導・ご助言をいただきました。情報収集の際には、JAL の浦健一氏、JAMSTEC の松枝未遠氏、筑波大学生命環境科学研究科の楊帆氏に大変お世話になりました。また大気科学分野の先生、先輩方には発表やゼミの際に貴重なご意見をいただきました。大気大循環研究室の先輩方には研究の取り組み方を中心に多くのご助言と励ましの言葉をいただきました。

そして地球学類の友人、計算科学研究センターで苦楽を共にした大気科学分野の4年生は研究室内外でよき相談相手となってくれました。

皆様のご厚意に深く感謝すると共に、心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- Burden, R. L., Faires, J. D., and Reynolds, A. C., 1981: *Numerical Analysis*. London, Prindle, Weber, and Schmidt, 598pp.
- Cities on Volcano 6th, Tenerife, 4 June 2010: Assessment of volcanic ash threat: learning and considerations from the Eyjafjallajokull eruption, 4pp.
- Hefter, J. L., and Strunder, B. J., 1993: Volcanic ash forecast and dispersion(VAFTAD) model. *Weath. Forecast*, **8**, 533-541.
- Icelandic Met Office, 2010: A short meteorological overview of the Eyjafjallajokull eruption 14 April-23 May 2010. *Weather*, **65**, 203-207.
- I. Oroian, 2010: Eyjafjallajokull volcano eruption - A brief Approach.*ProEnvironment*, **3**, 5-8.
- Searcy, C., K.Dean, and W.Stringer, 1998: PUFF: A high-resolution volcanic ash tracking model. *J. Volc. and Geotherm. Res.*, **80**, 1-16.
- Tanaka, H. L., 1994: Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt Volcano, Alaska. *Proc. First international symposium on volcanic ash and aviation safety. U. S. Geological Survey, Bulletin*, **2047**, 283-291.
- Webley, P. W., Dean, Kenneson., Bailey, J. E., Dehn, Jon. and Peterson, Rorik., 2009: Automated forecasting of volcanic ash dispersion utilizing Virtual Globes. *Nat Hazards*, **51**, 345-361.
- 金高美咲, 2004: 森林火災による煙のリアルタイムモニタリングシステムの開発. 筑波大学第一学群平成 15 年度卒業論文, 43pp.
- 山本和美, 2000: 衛星データを用いた火山灰拡散モデルの検証実験. 筑波大学第一学群平成 11 年度卒業論文, 87pp.
- 日本地質学会 HP: 地質被害調査 2010 年度 アイスランド火山噴火と噴煙  
<http://www.geosociety.jp/hazard/content0039.html>



International Air Transport Association (IATA) HP: Statement-Financial Impact of Icelandic Volcano Ash

<http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2010-04-16-01.aspx>

the National Aeronautics and Space Administration (NASA) HP: Earth Observatory

<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards>

National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA) HP: NOAA satellite and Information Service

<http://www.ssd.noaa.gov>

U.S.Geological Survey (USGS)HP: USGS Global Visualization Viewer

<http://glovis.usgs.gov>

USGS HP: Understanding plate motion <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/understanding.html>

表 1: PUFF モデルに与えた定数と変数

地球の半径 $a$	6371.22 km
重力加速度 $g$	$9.80616 \text{ ms}^{-2}$
拡散係数 $K$	水平方向; $1.5 \times 10^2$ 、鉛直方向; 1.5
時間間隔 $\Delta t$	5 分
重力落下項の係数 $v_o$	$1.0 \text{ ms}^{-1}$
最大粒子数	200,000 個
$\Delta t$ あたりの火山灰粒子の供給	100 個
粒径分布	平均-4.5、標準偏差 1 の対数正規分布
火山の位置	63.63 °N, 19.62 °W
火山の標高	1666 m
噴火開始時刻	2010 年 4 月 14 日 01:00 UTC
噴煙高度 (最高時)	11 km
予報時間	168 時間

# Plume Height

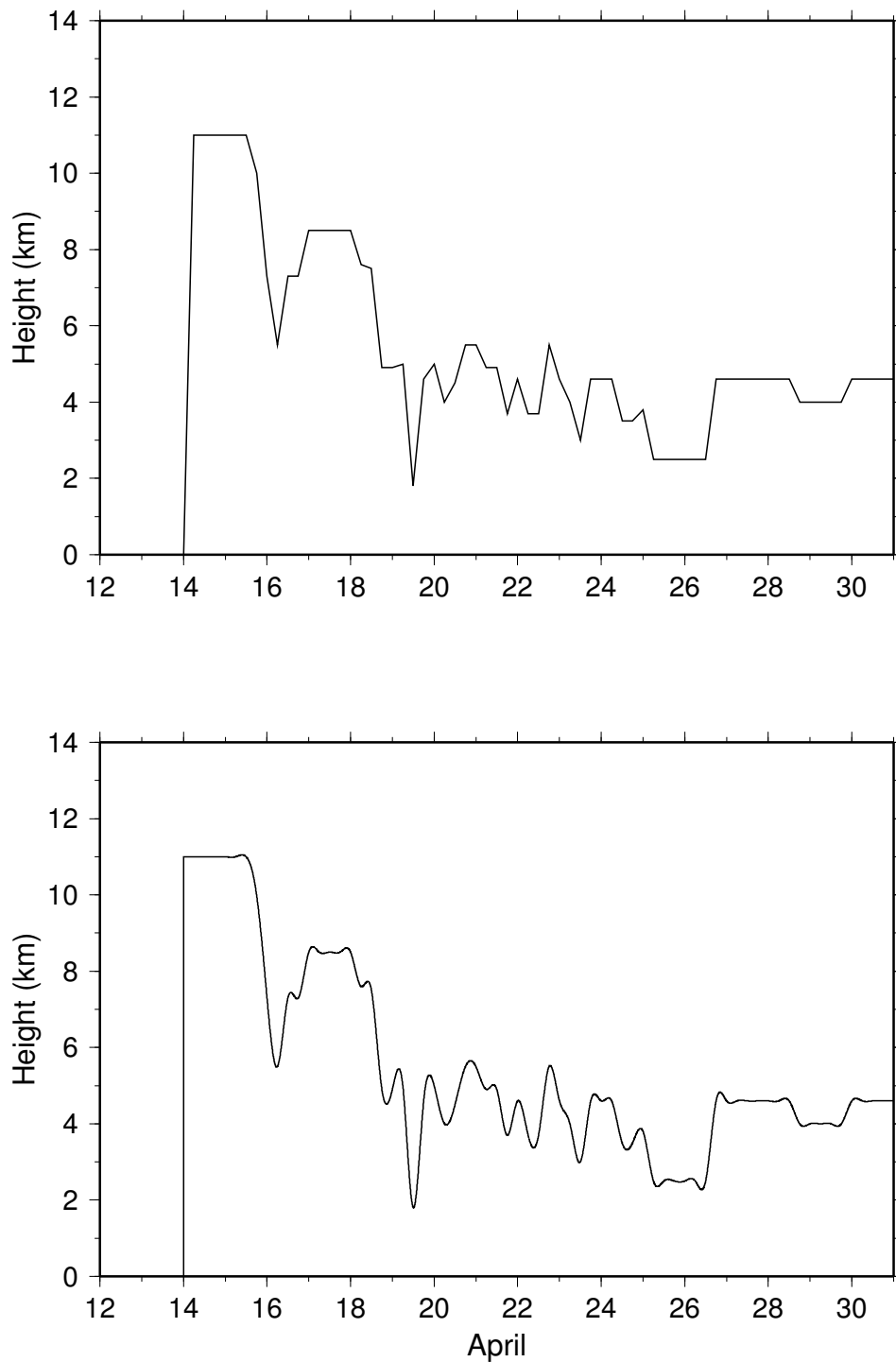


図 1: Eyjafjallajökull 火山の 2010 年 4 月の噴火における噴煙高度の時間変化;  
(上)London VAAC により報告された噴煙高度の時間変化、(下)Cubic Spline で  
内挿した後の噴煙高度の時間変化

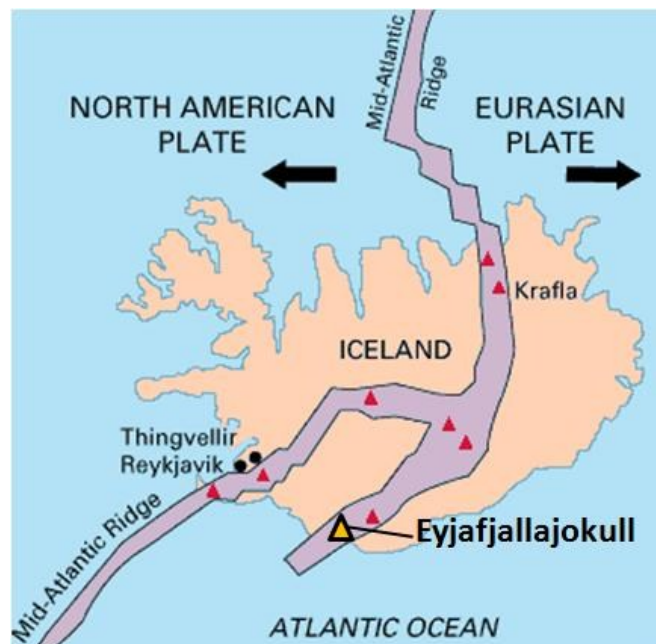


図 2: Eyjafjallajökull 火山の位置 (USGS の HP より引用)

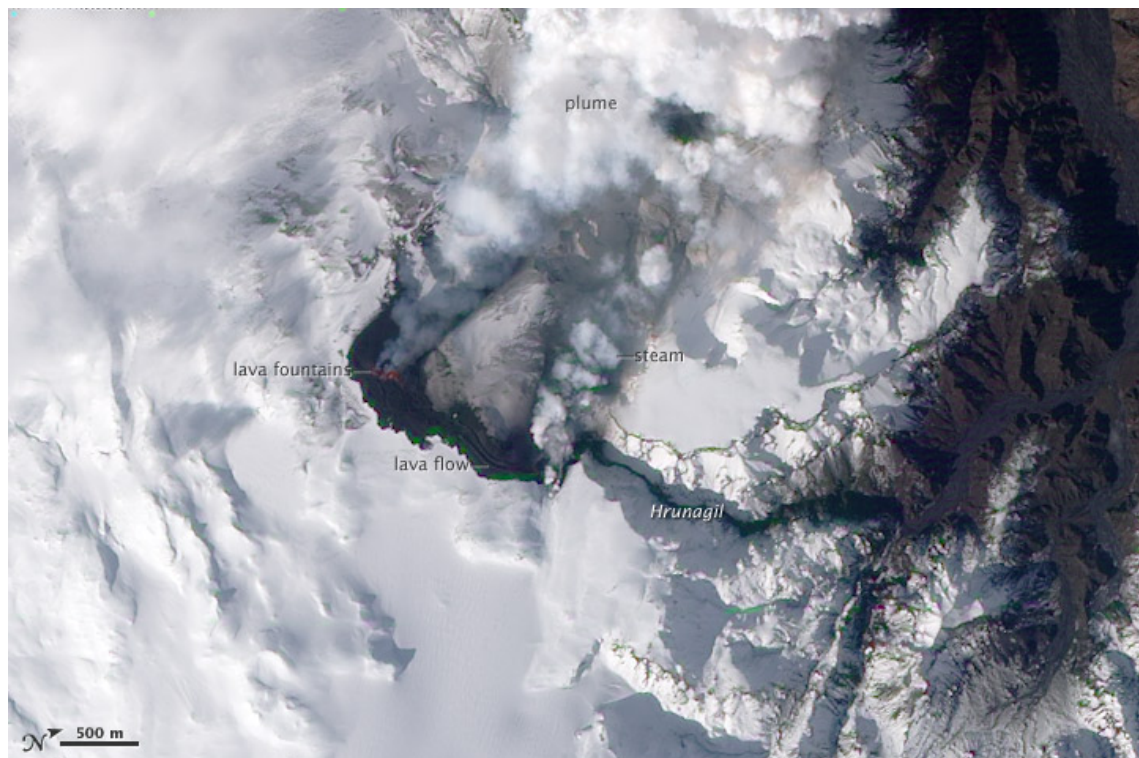


図 3: 2010 年 3 月 24 日の Eyjafjallajökull 火山の噴火の様子

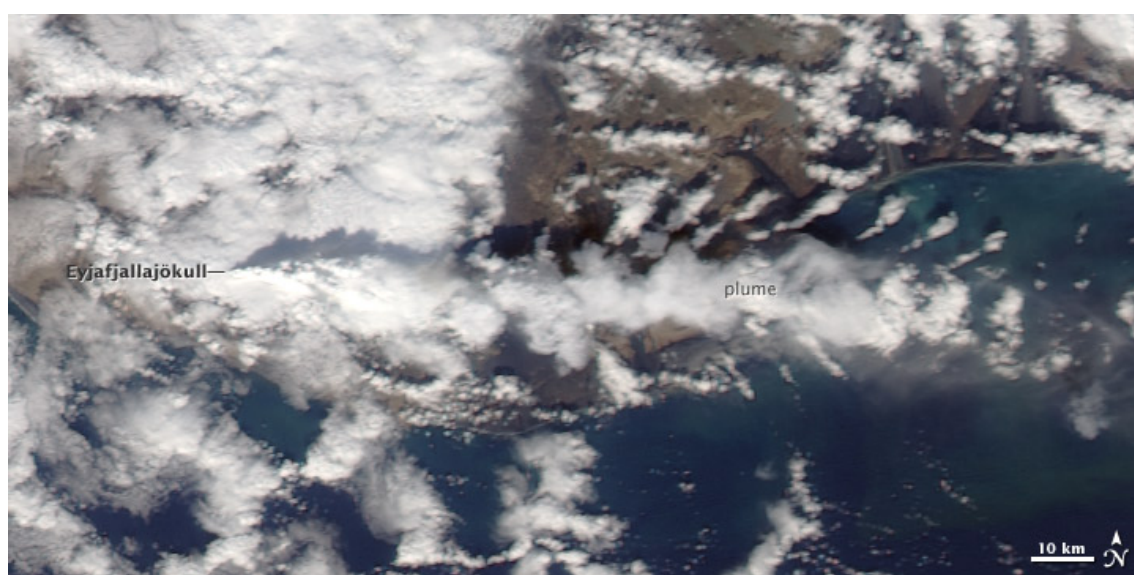
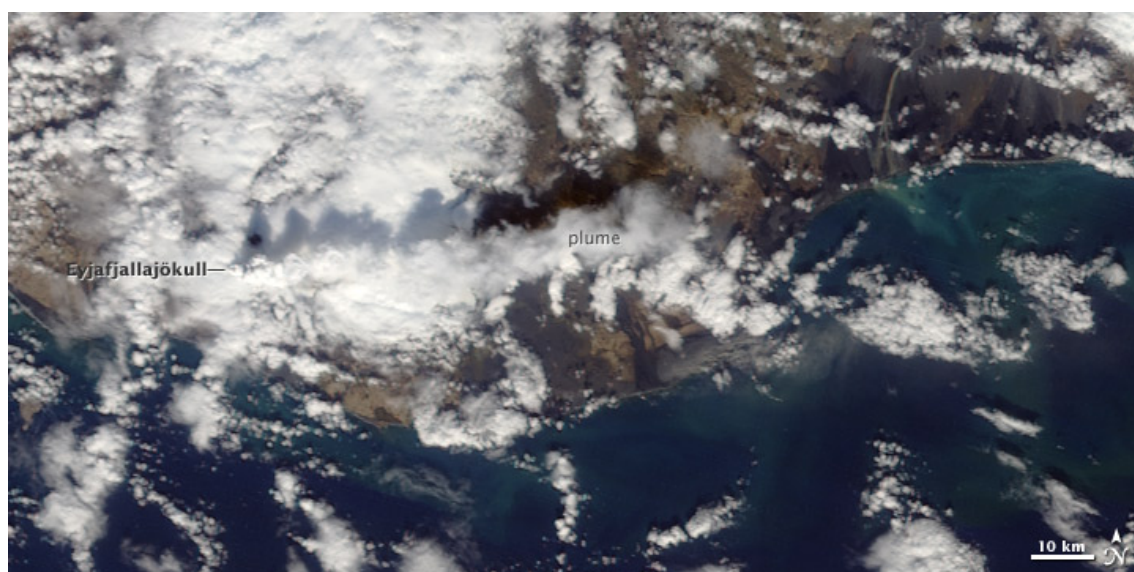


図 4: 2010 年 4 月 14 日の Eyjafjallajökull 火山の噴火の様子; (上)12:30 UTC、  
(下)14:25 UTC

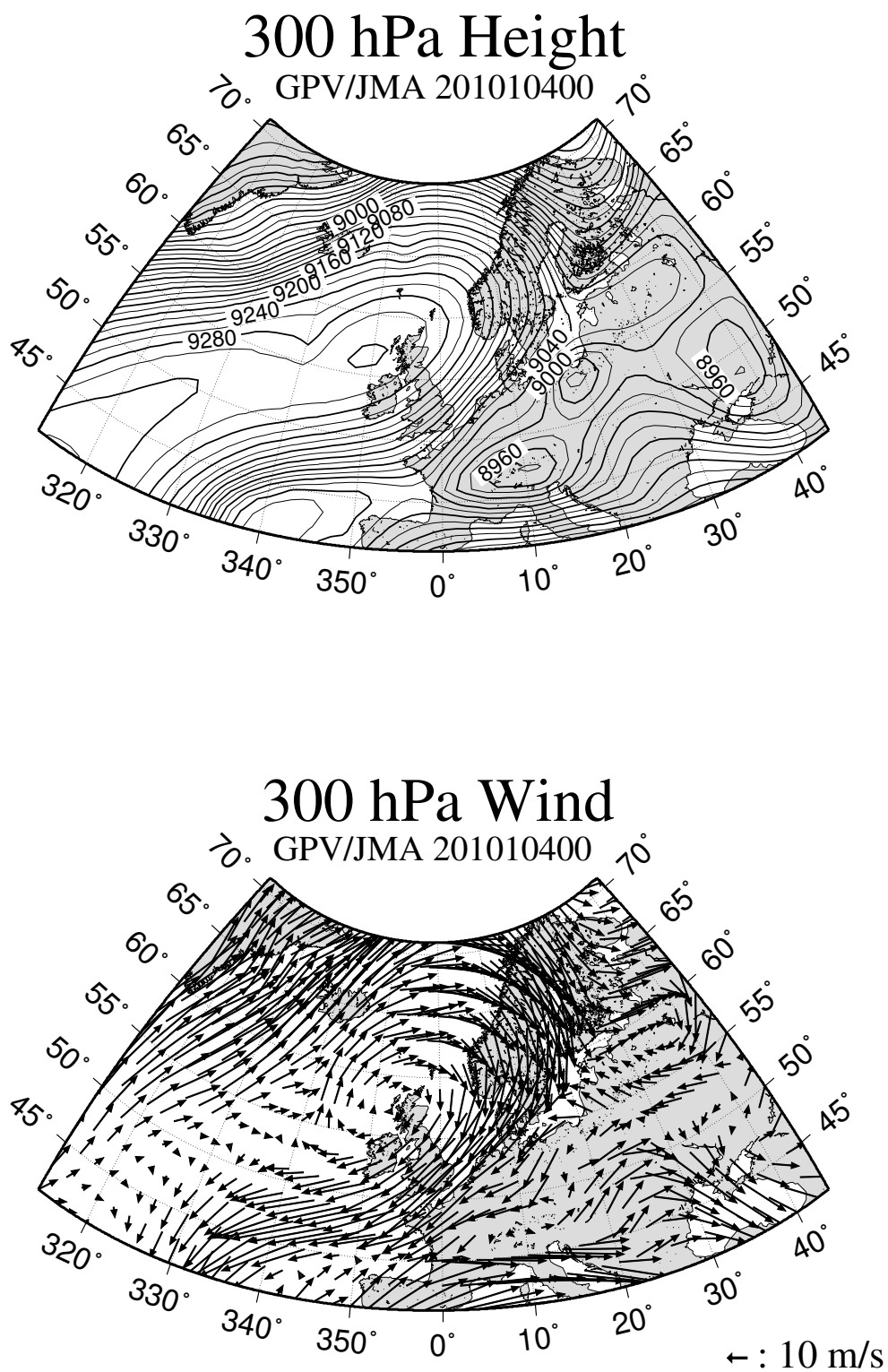


図 5: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、  
(下) 同高度の風の図

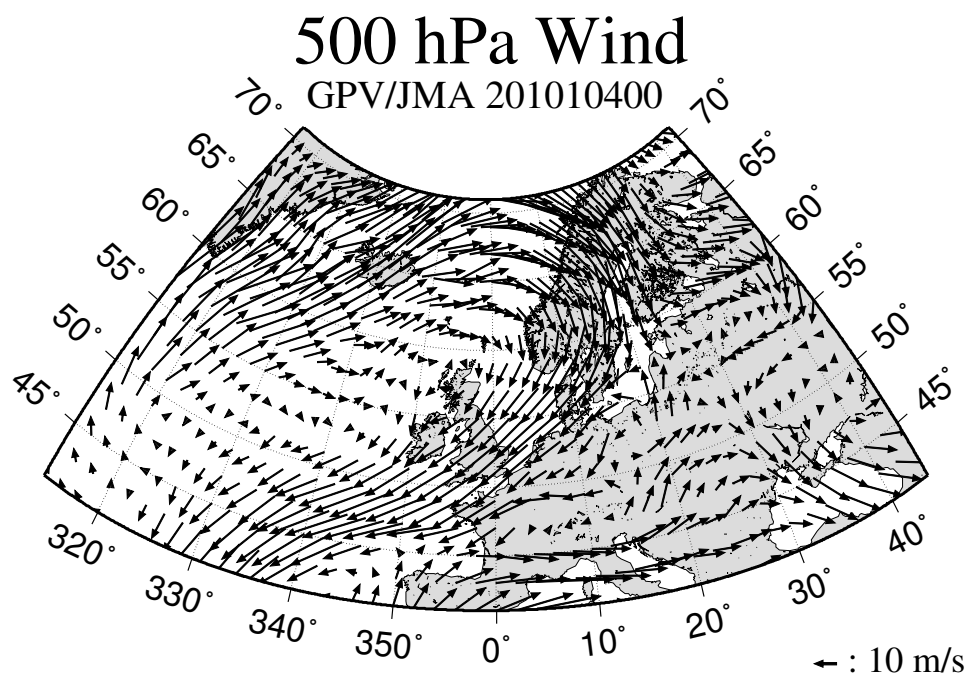
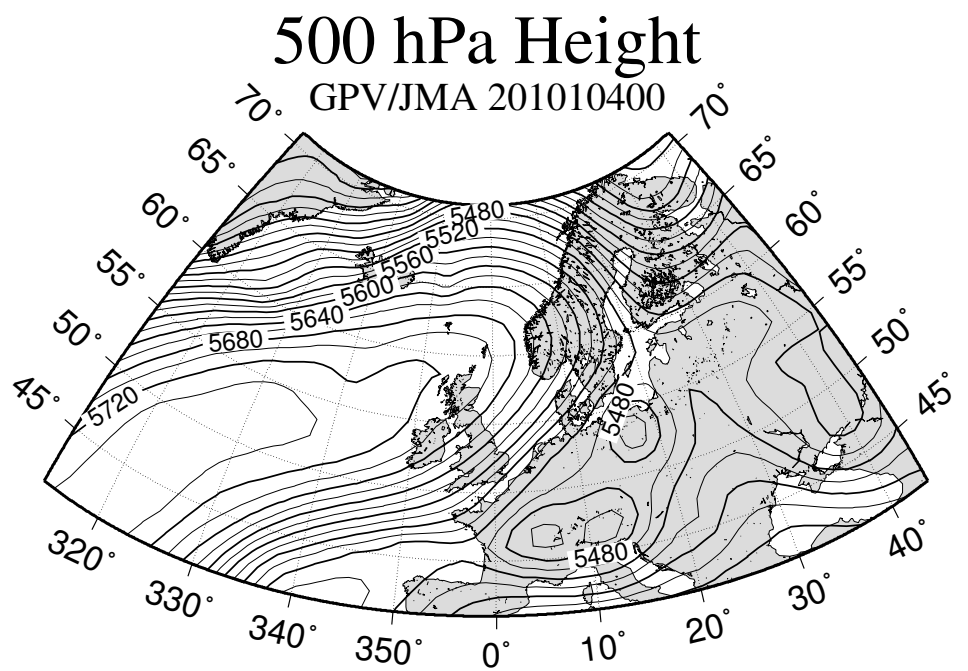


図 6: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、  
(下) 同高度の風の図



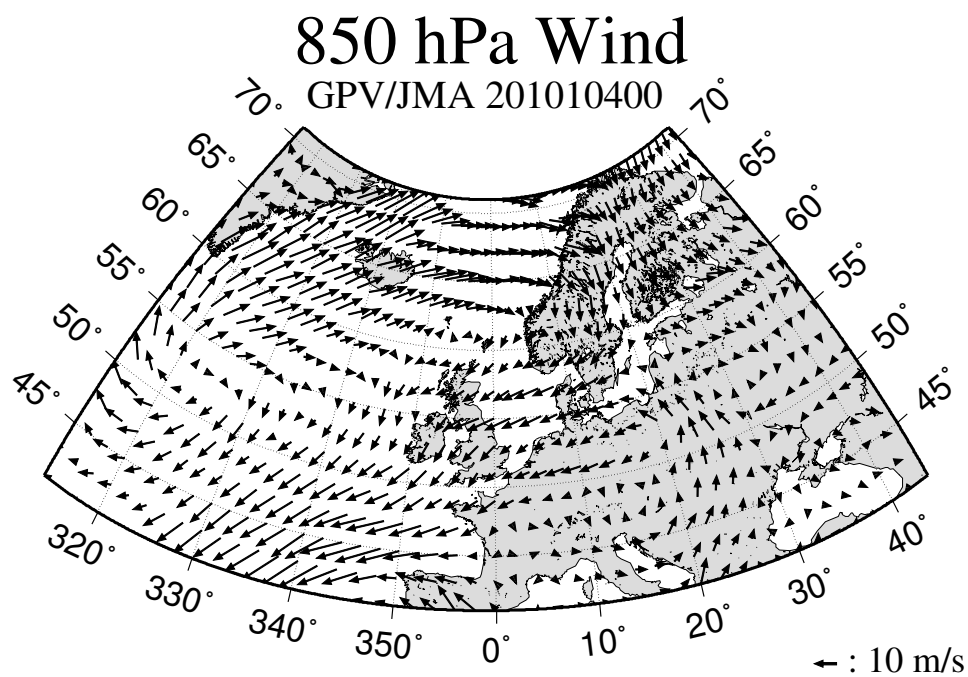
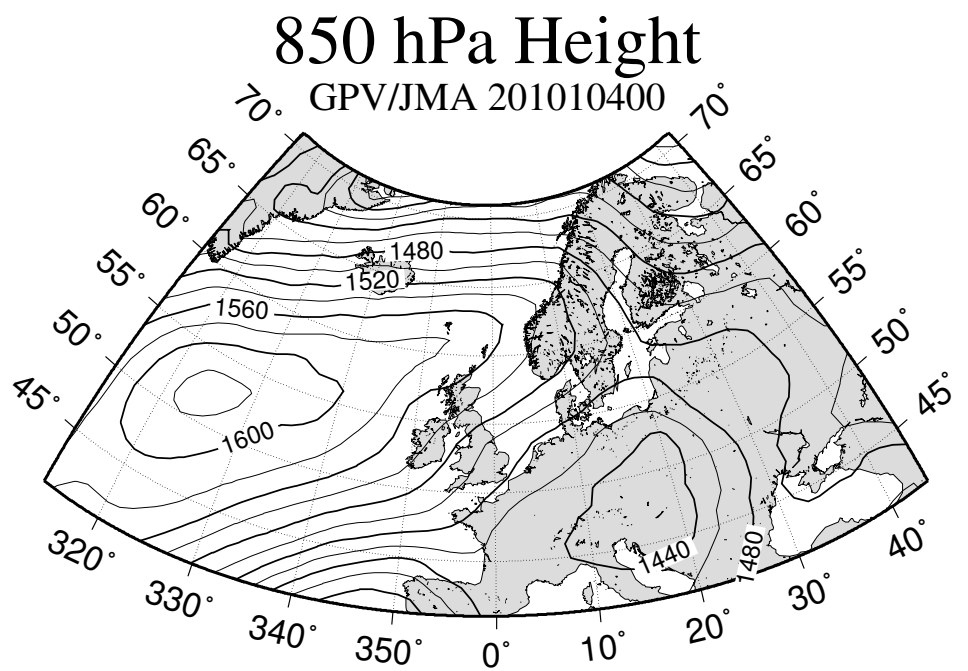


図 7: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 14 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、  
(下) 同高度の風の図



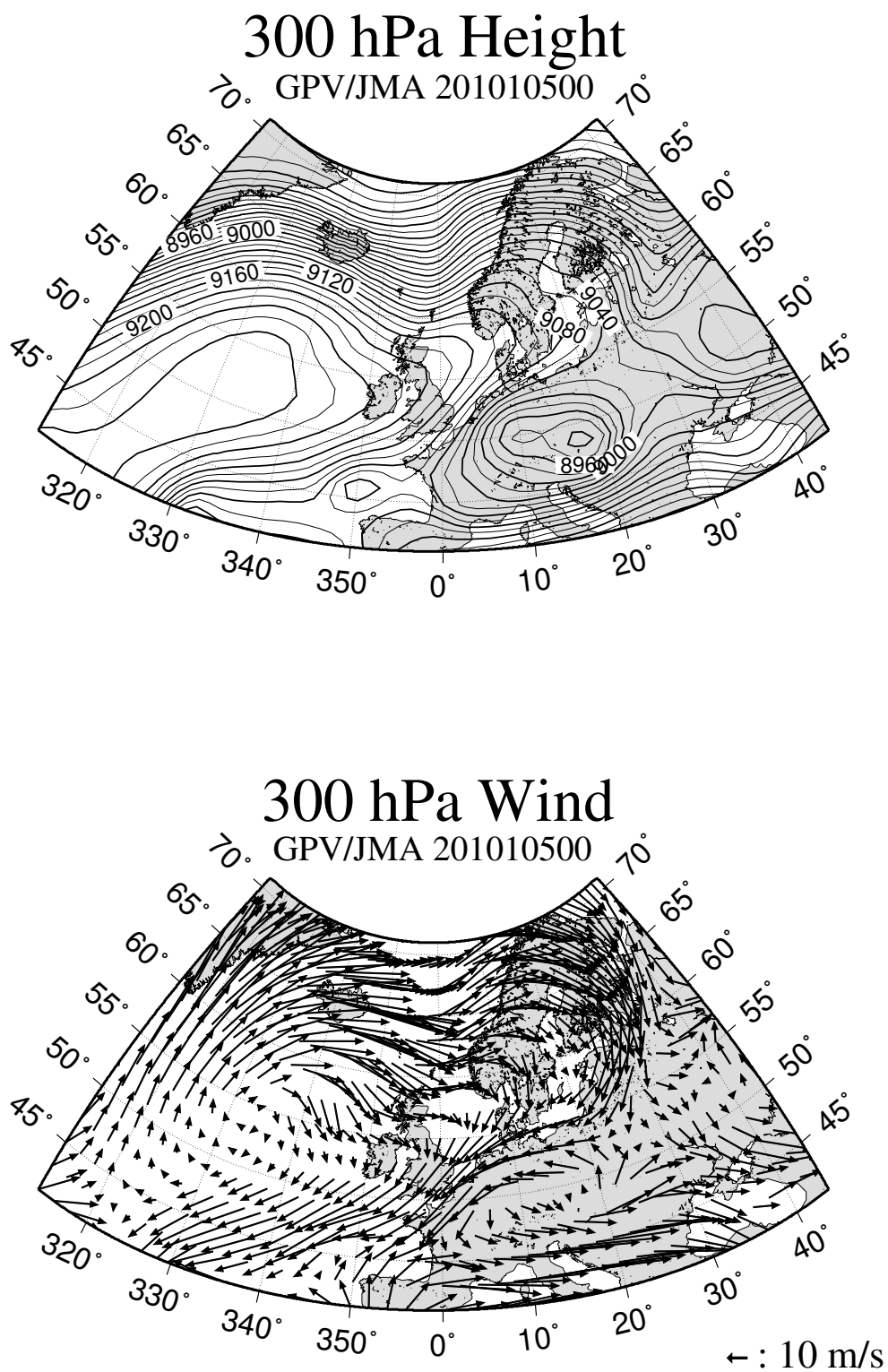


図 8: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、  
(下) 同高度の風の図

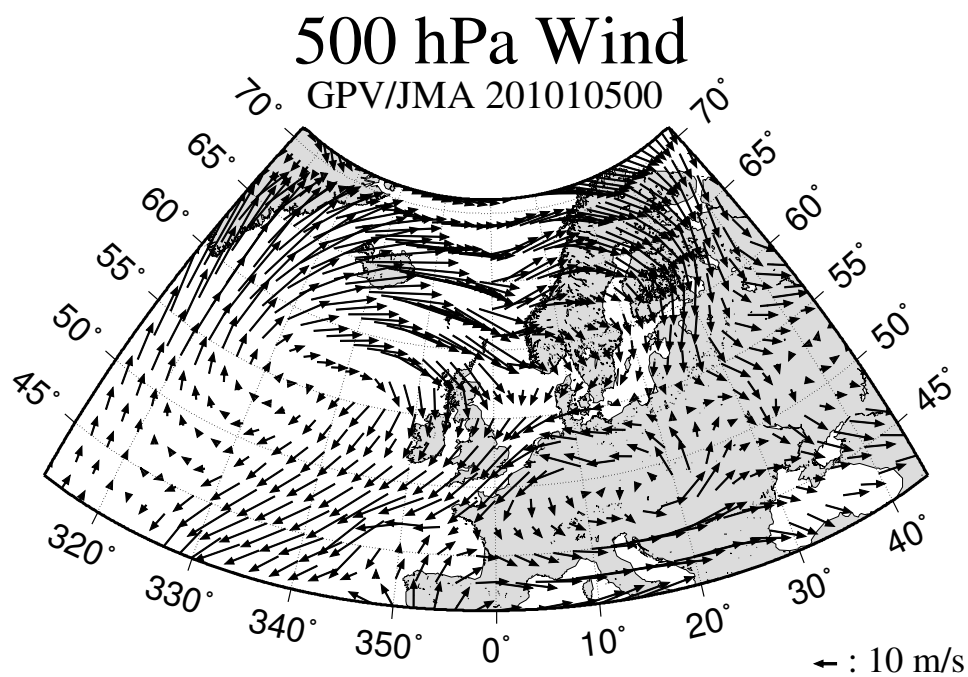
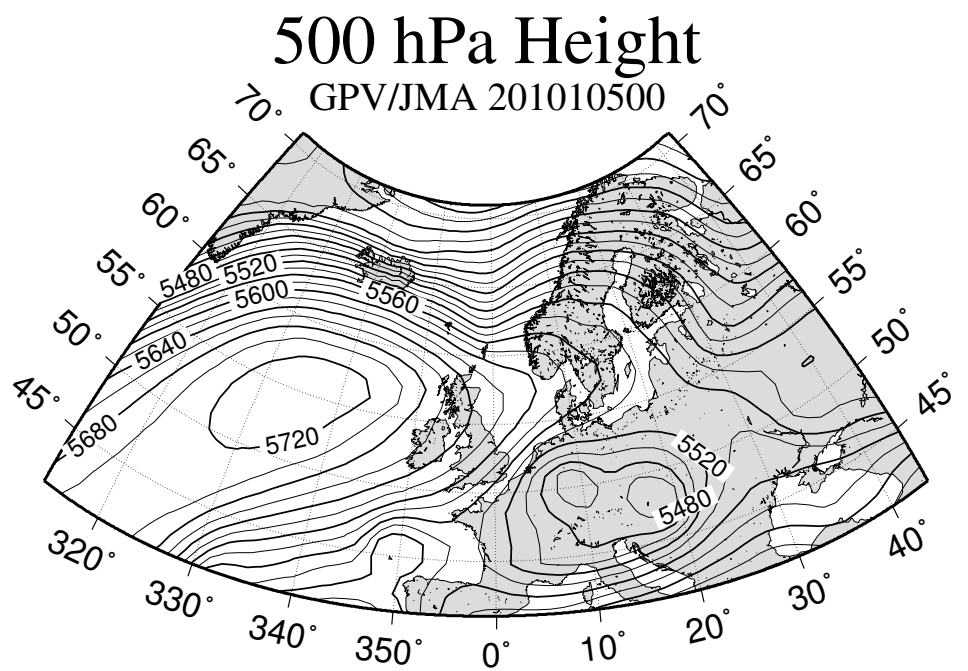


図 9: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、  
(下) 同高度の風の図

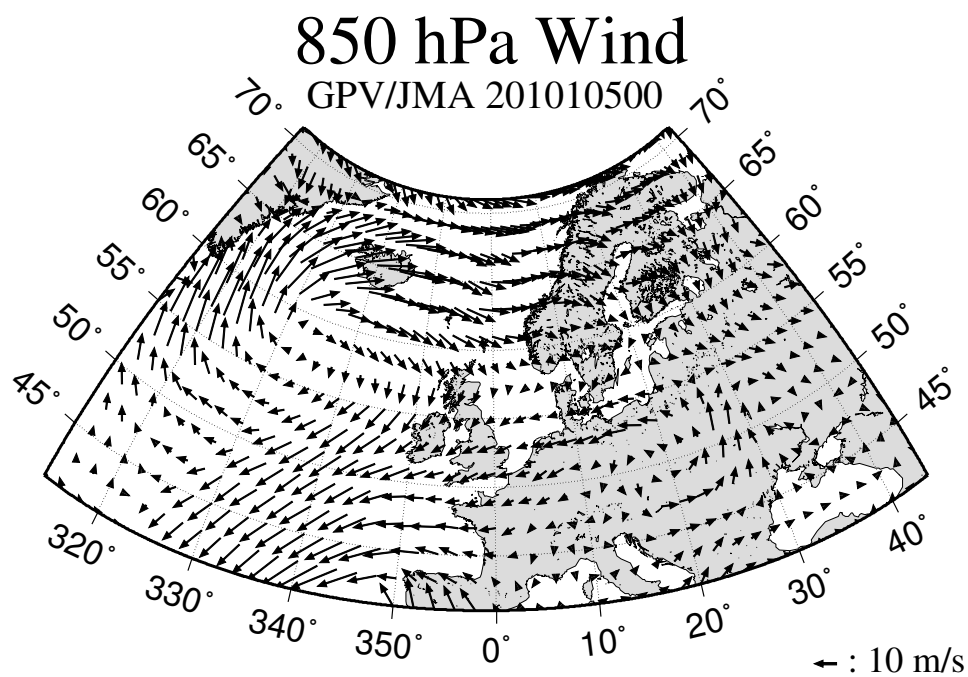
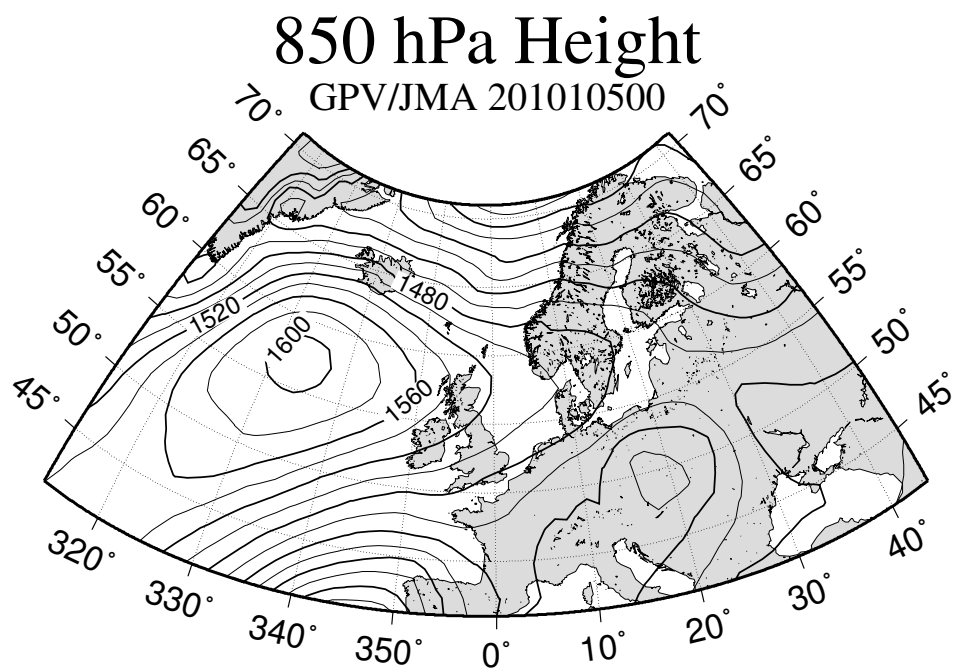


図 10: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 15 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

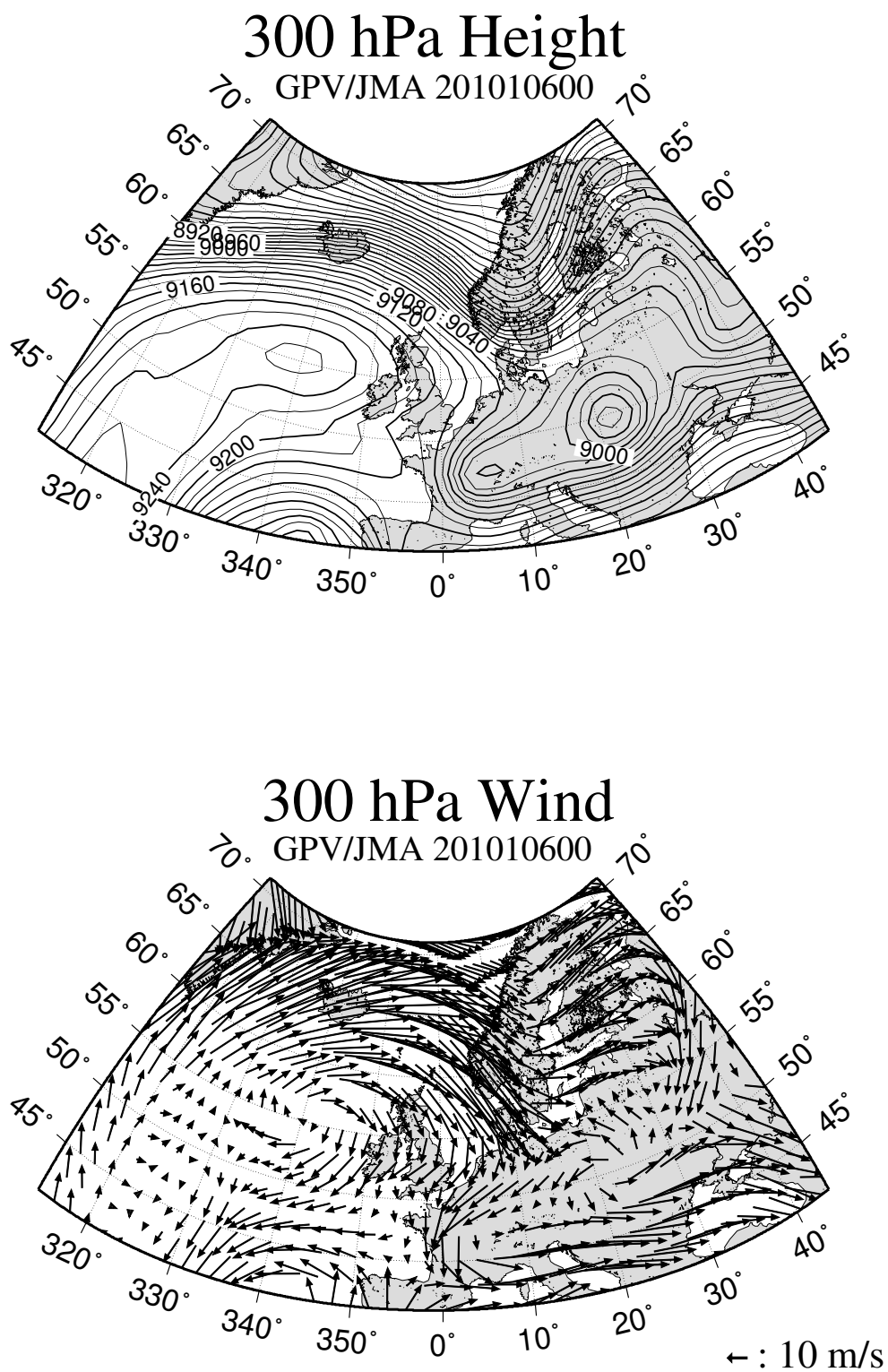


図 11: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

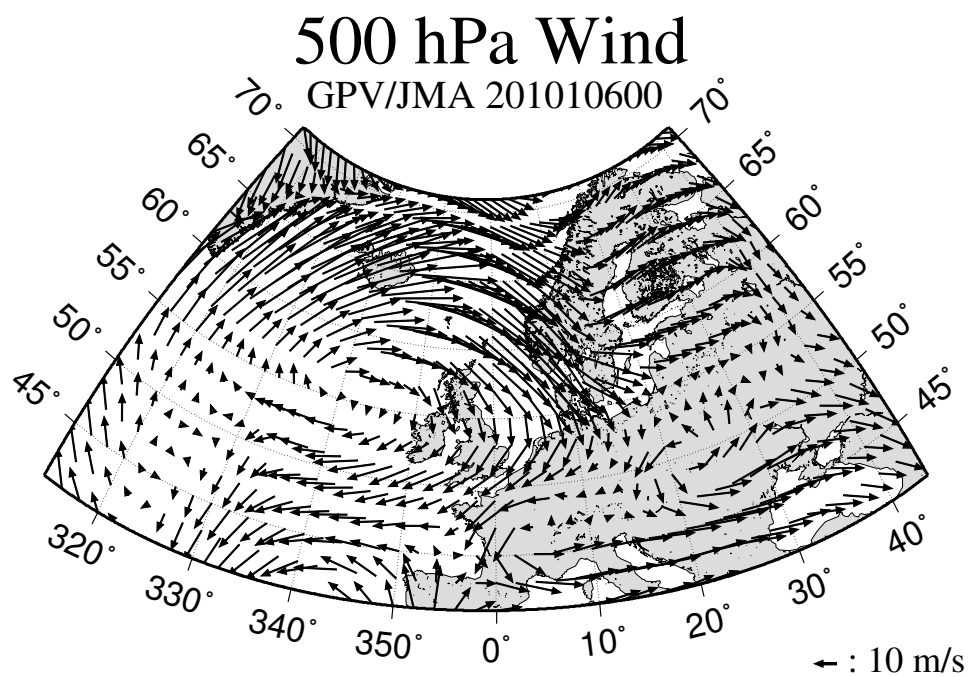
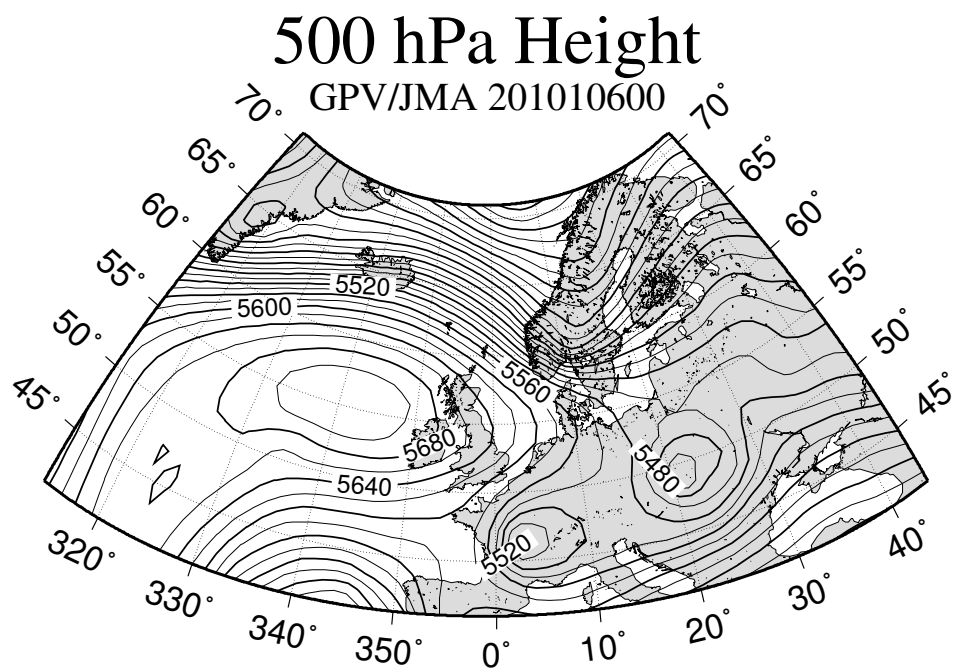


図 12: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

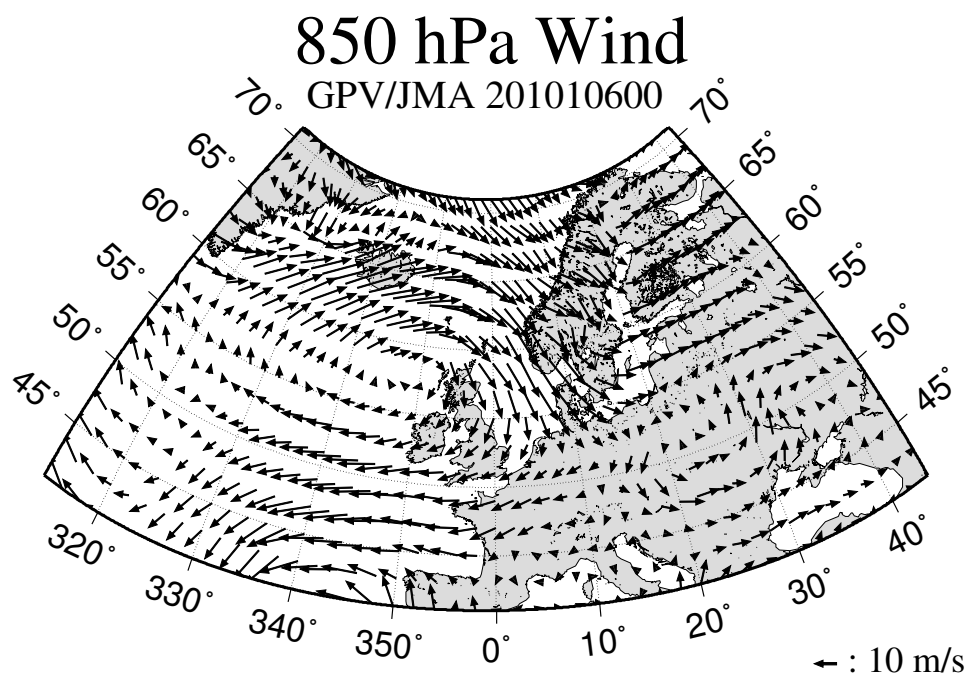
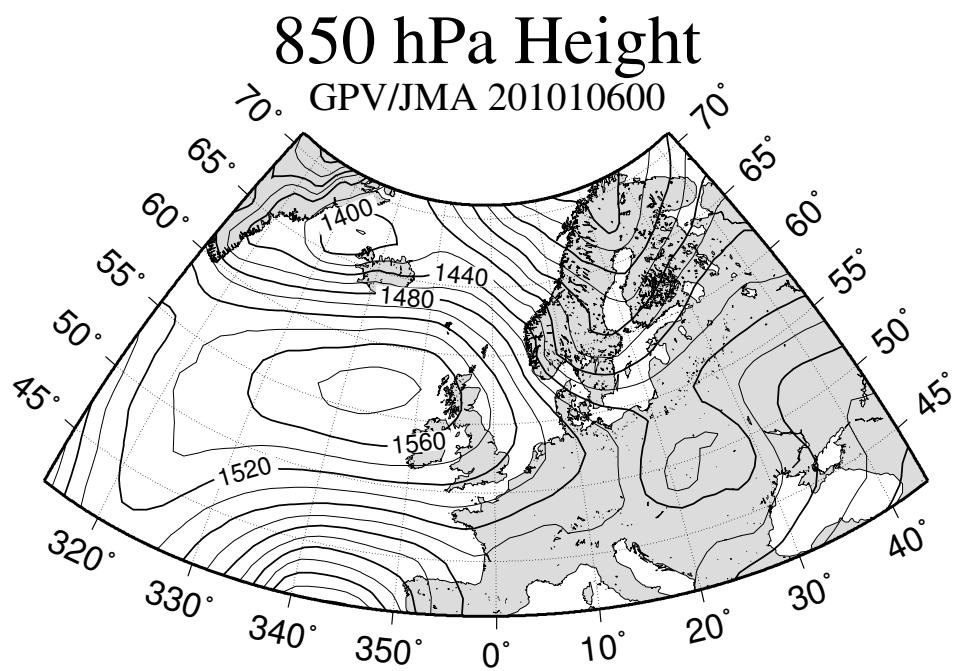


図 13: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 16 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

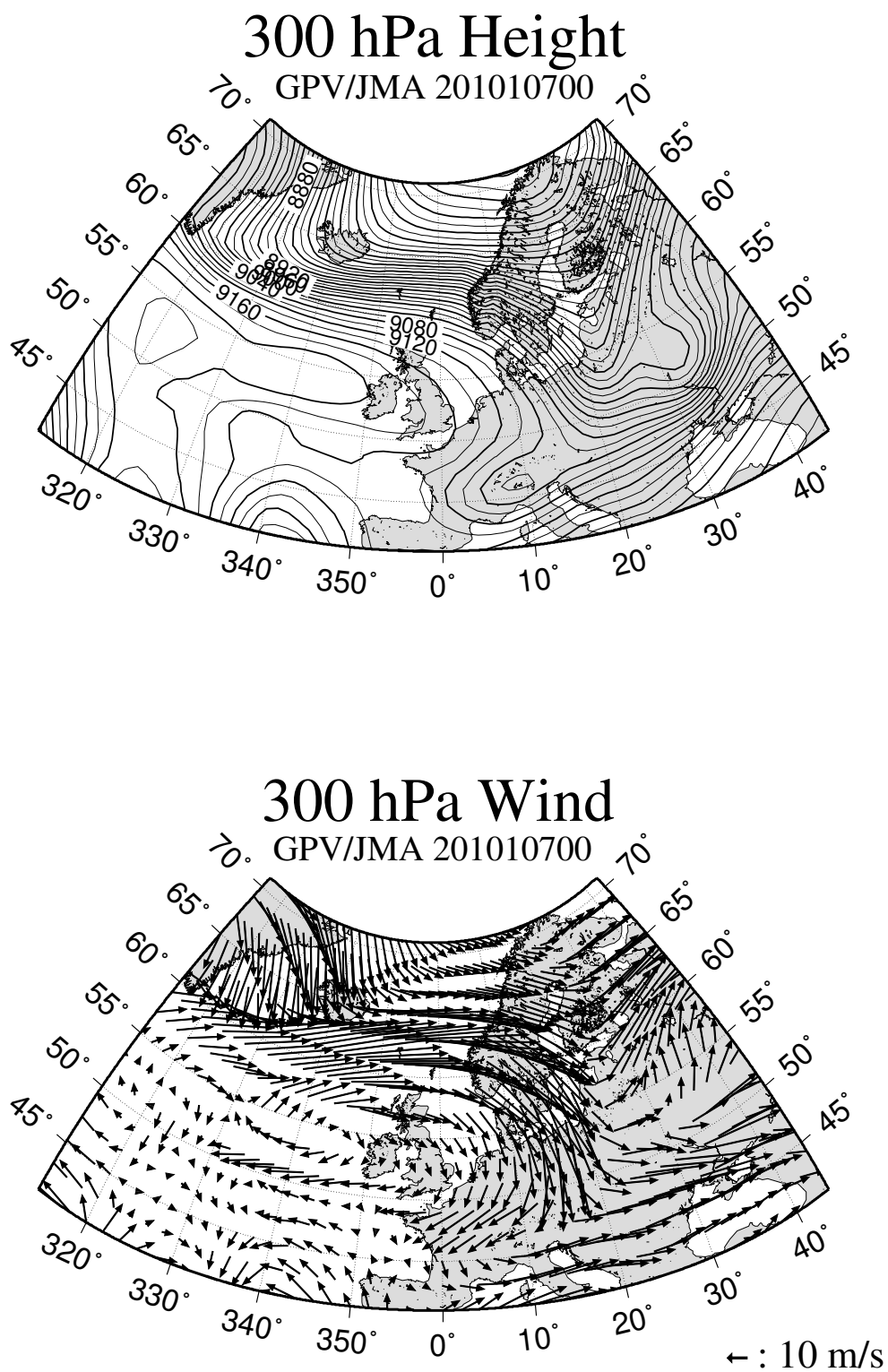


図 14: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

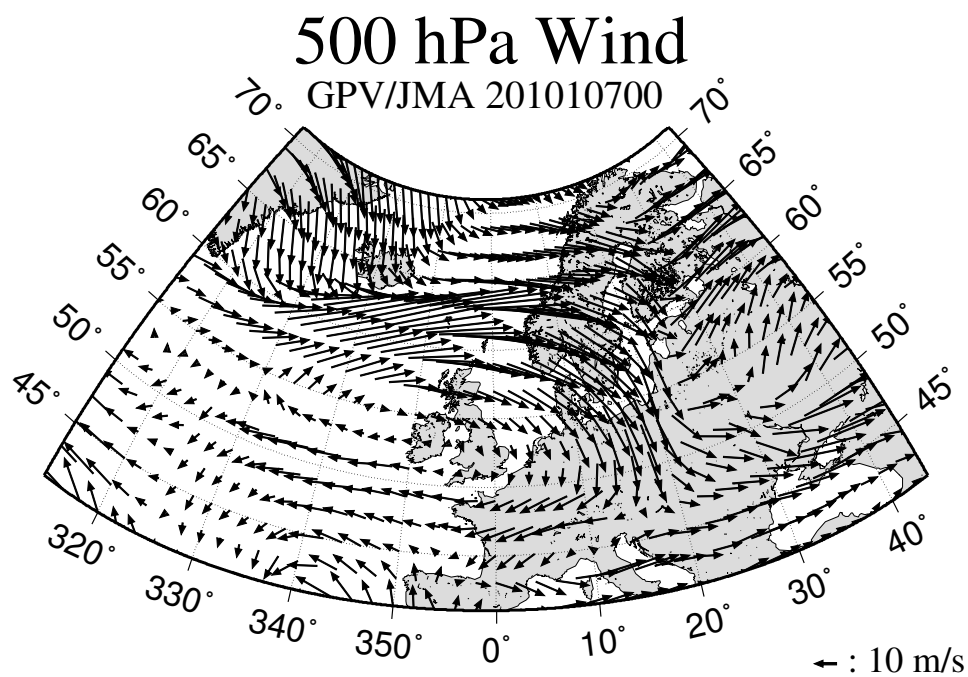
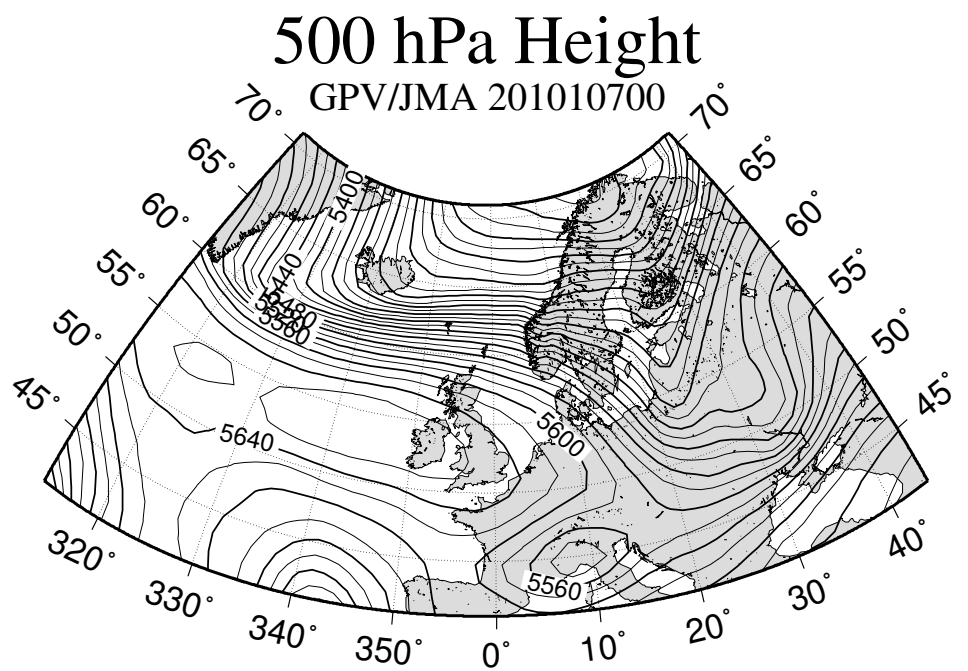


図 15: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図



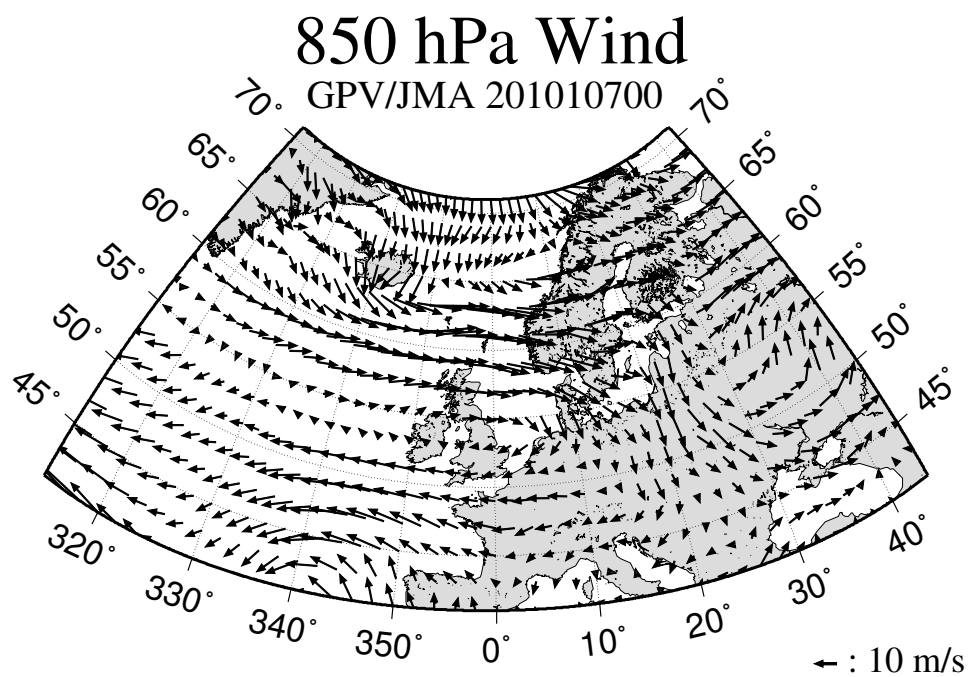
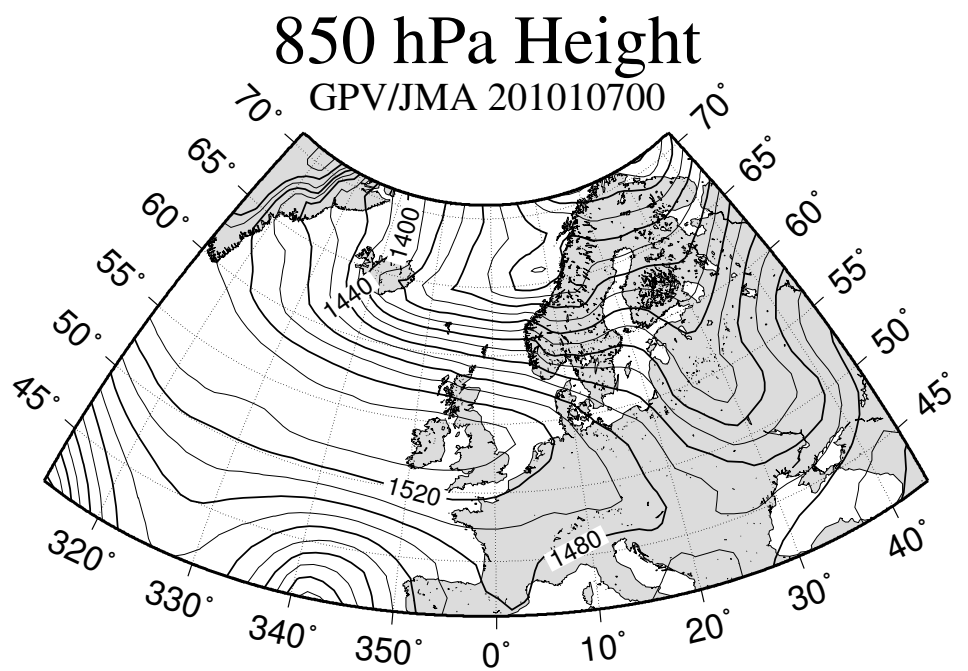


図 16: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 17 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

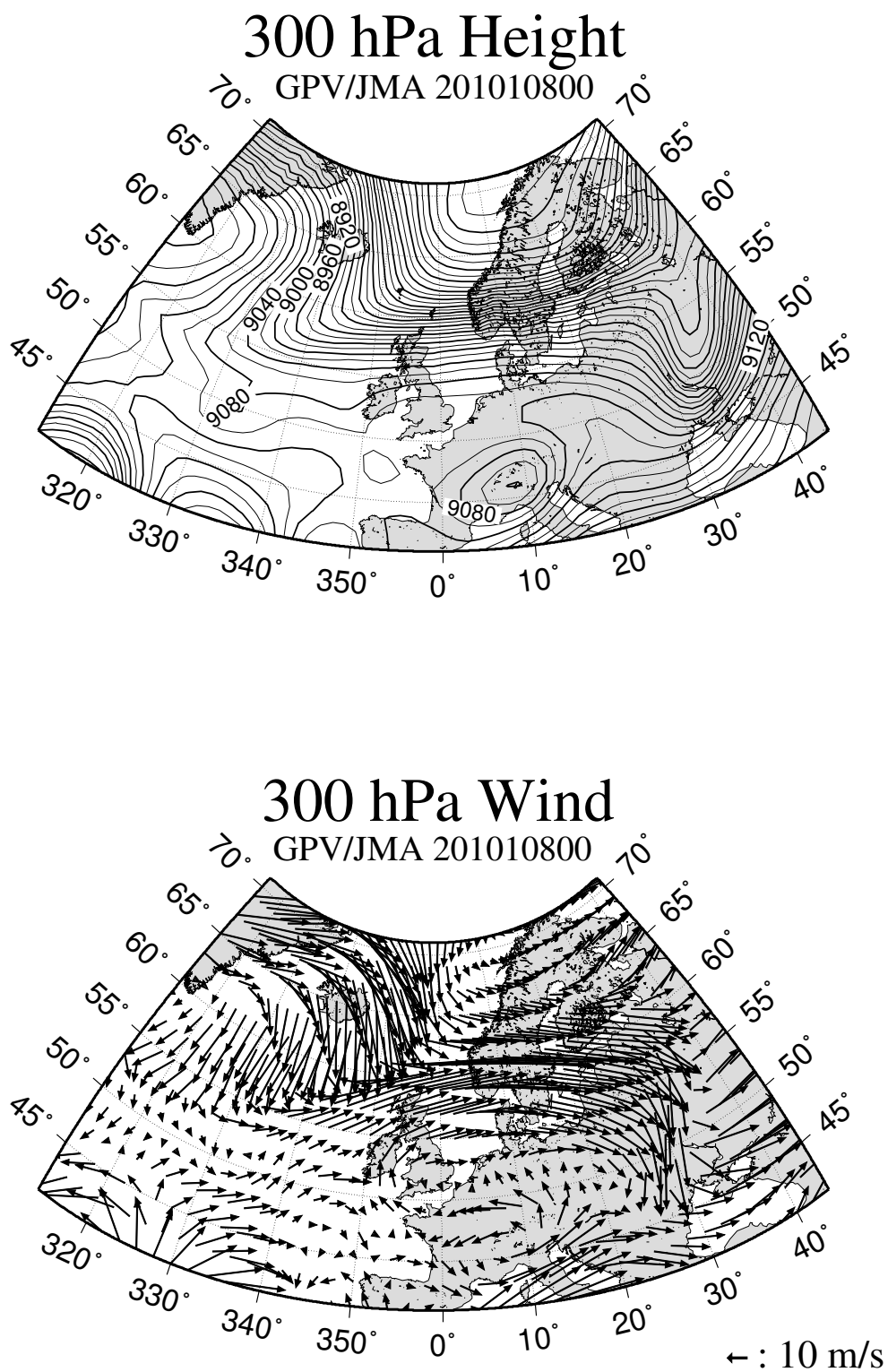


図 17: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

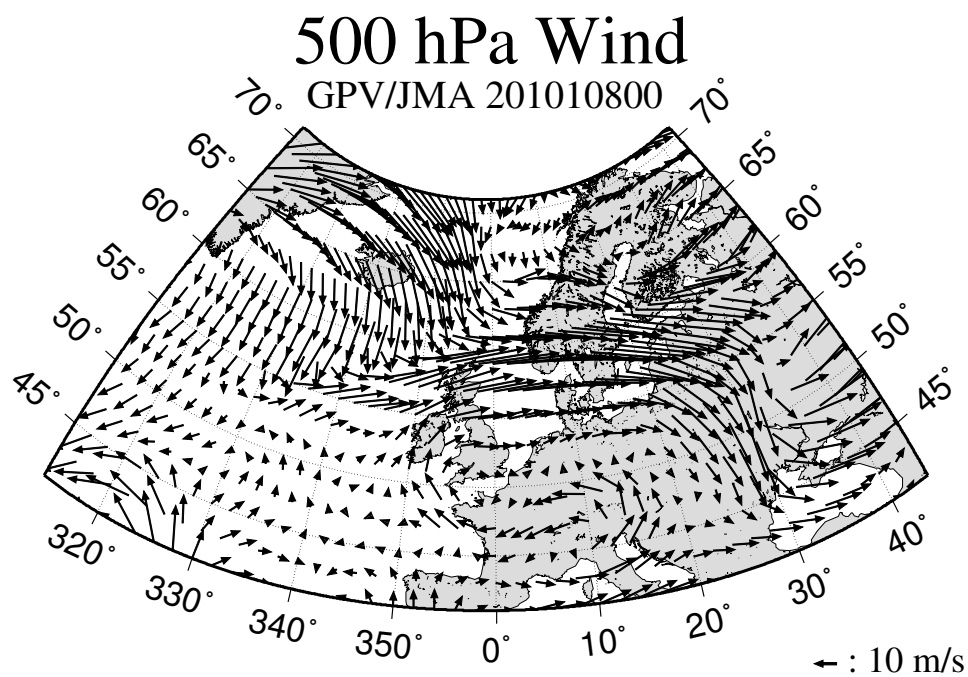
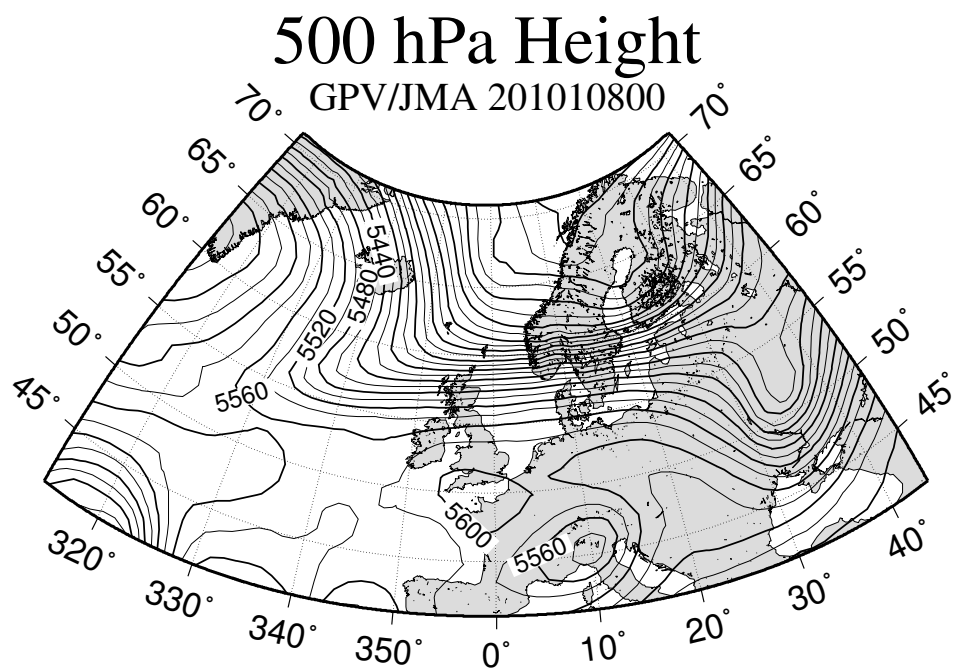


図 18: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

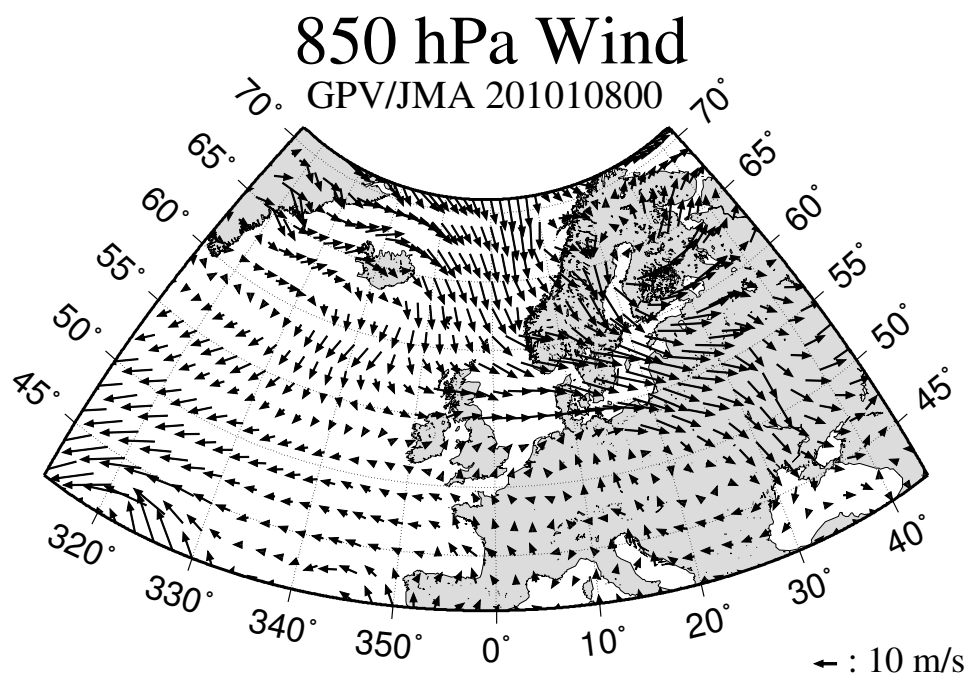
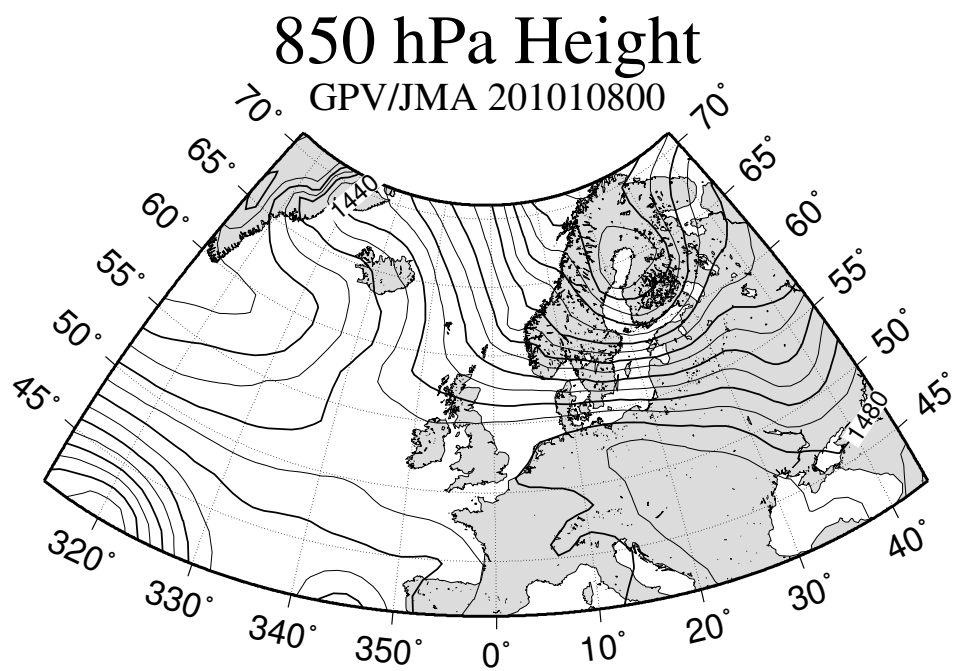


図 19: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 18 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

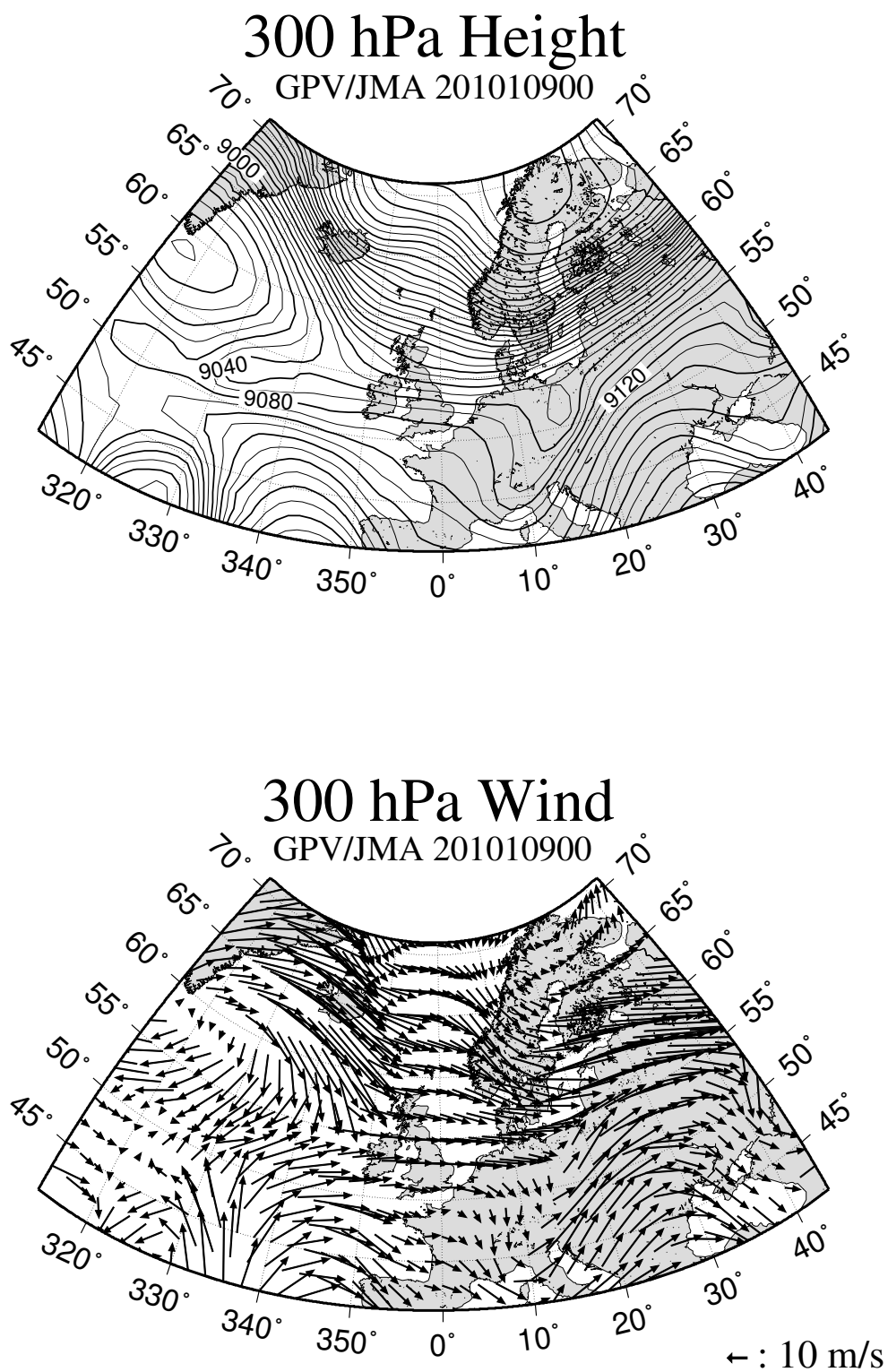


図 20: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

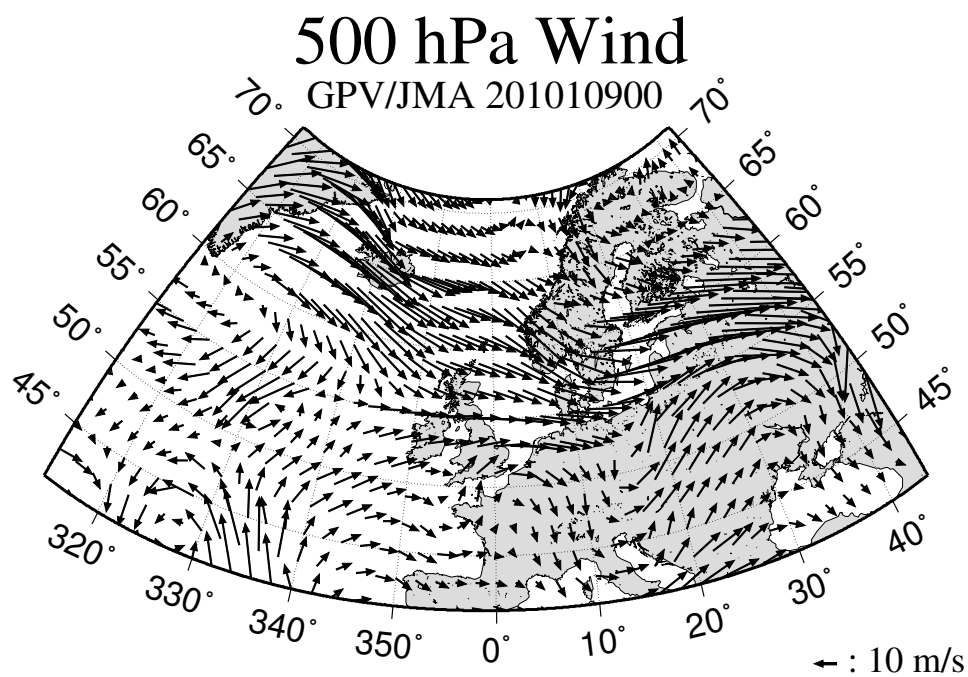
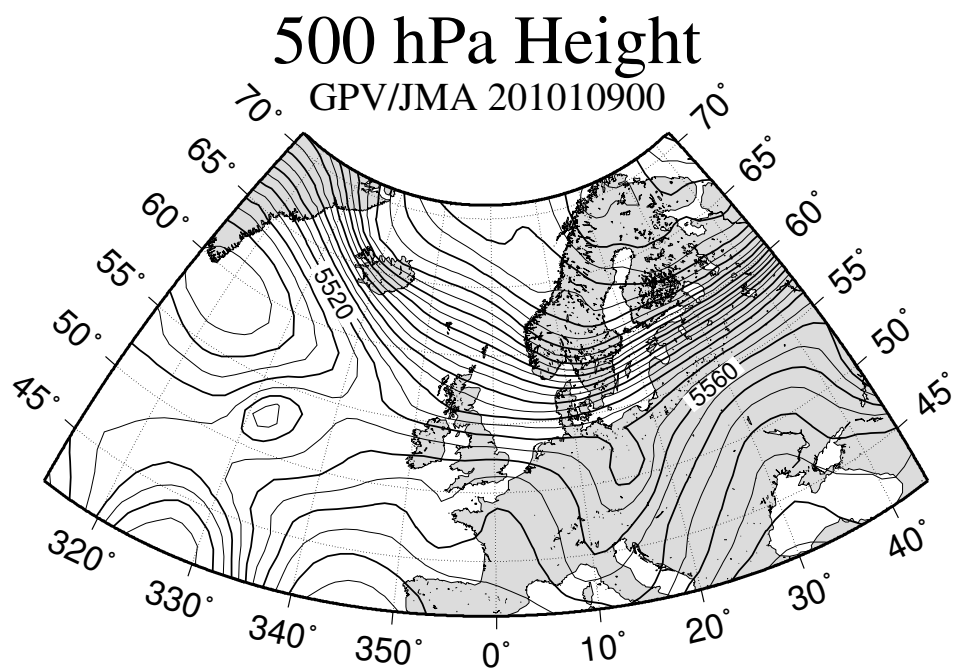


図 21: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

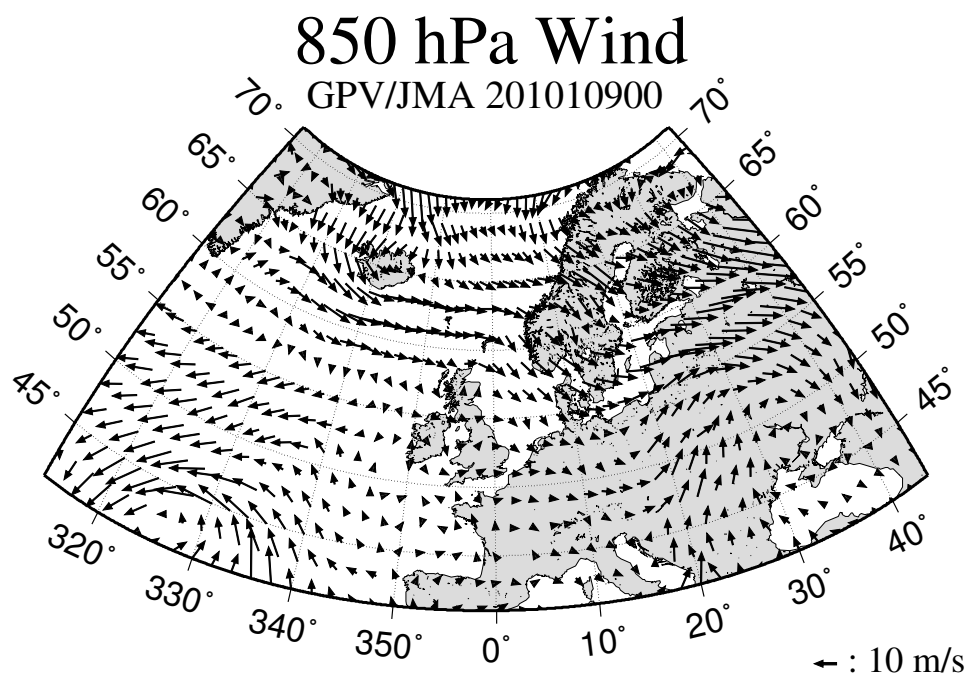
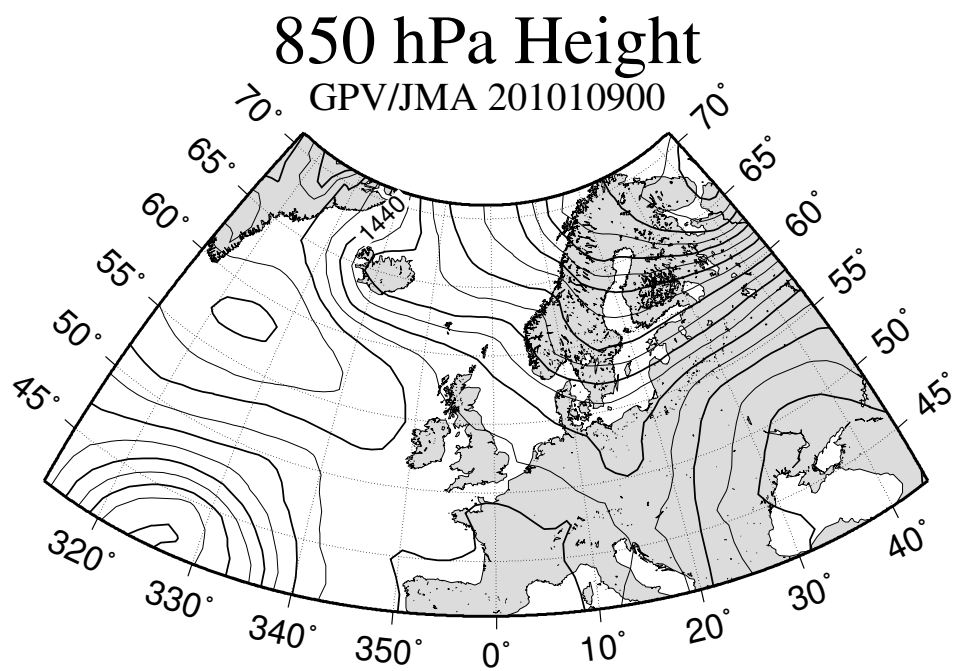


図 22: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 19 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

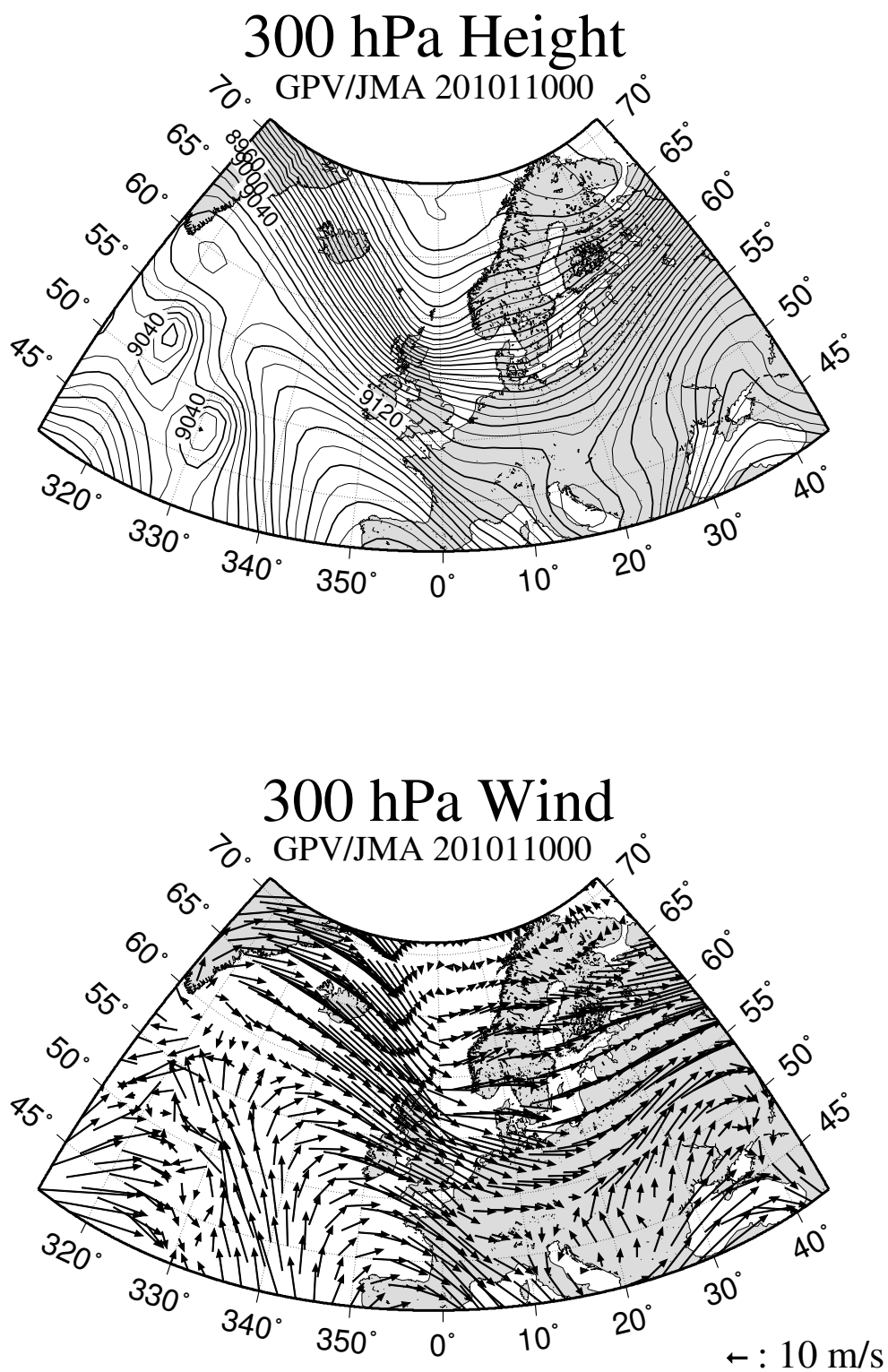


図 23: 300hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC); (上)300 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図



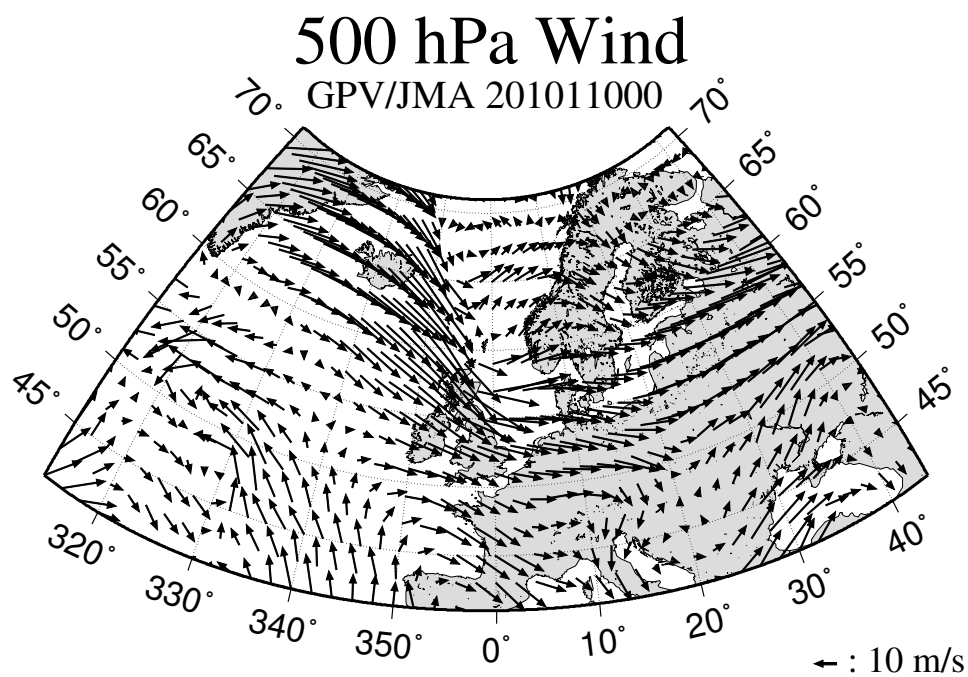
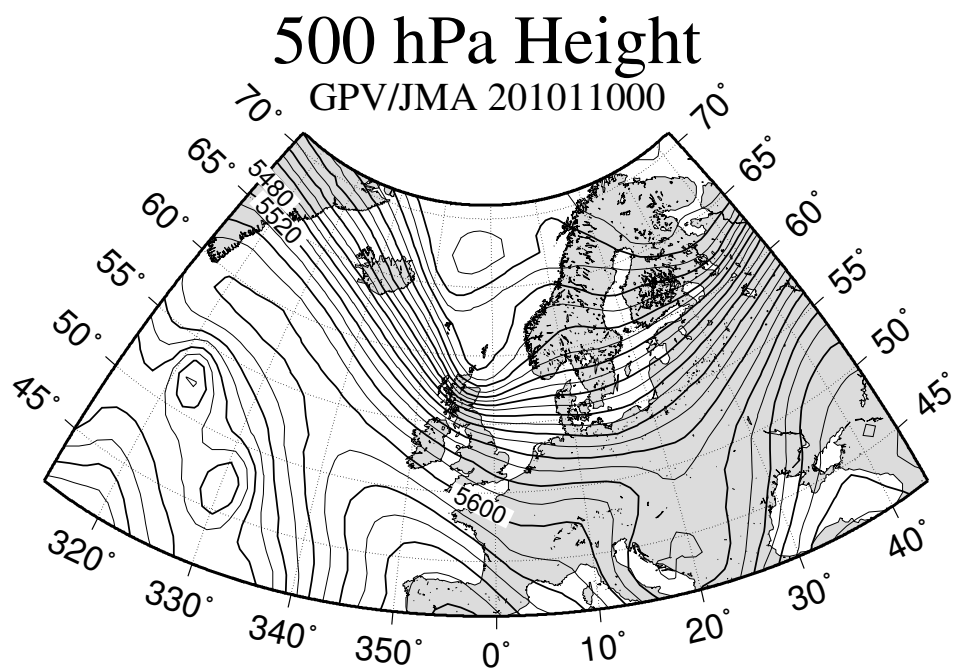


図 24: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

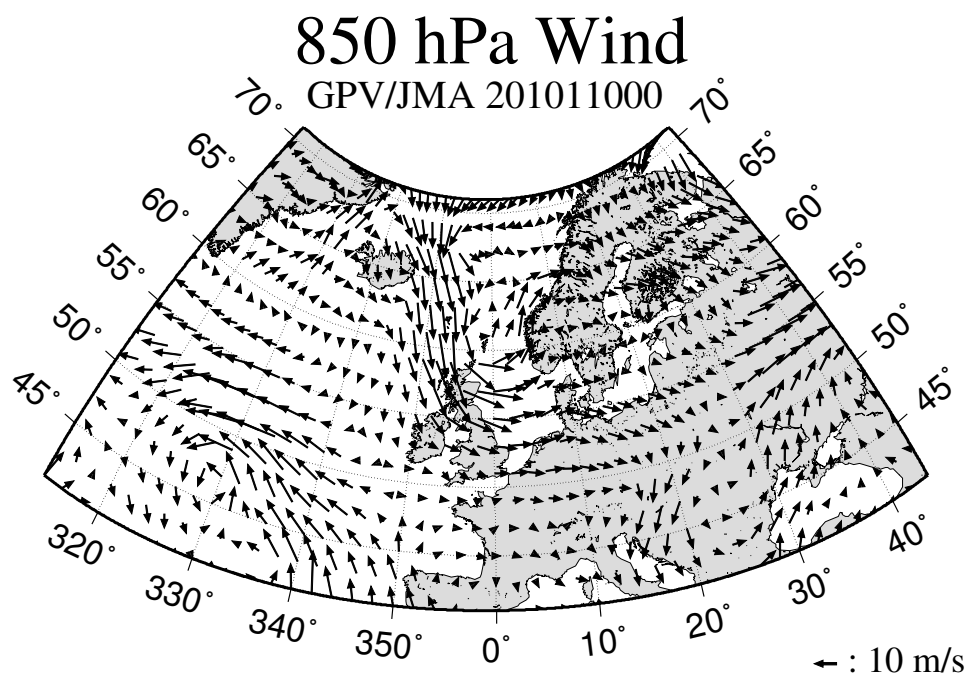
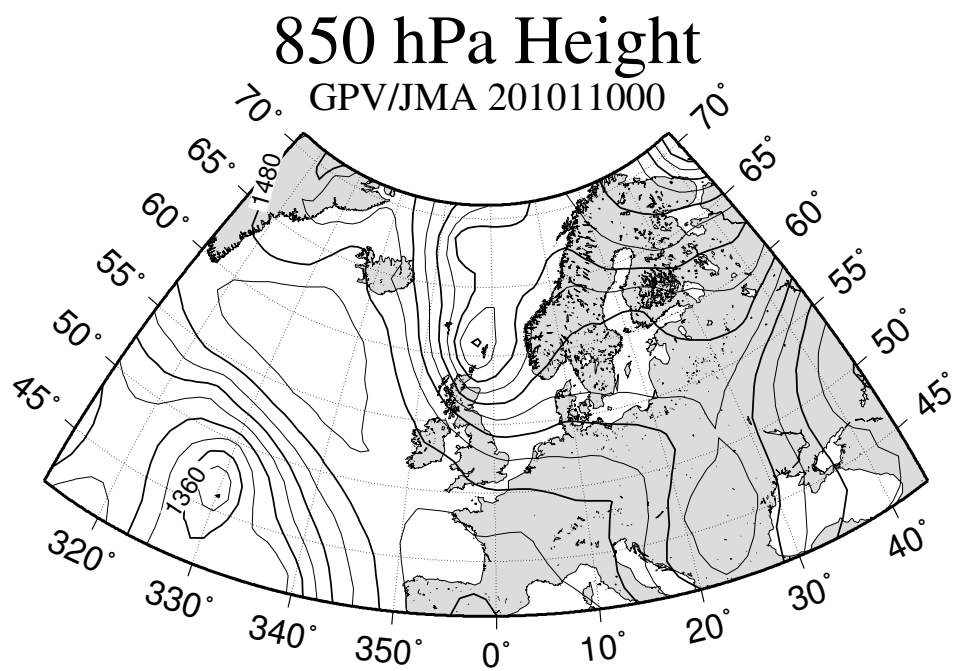
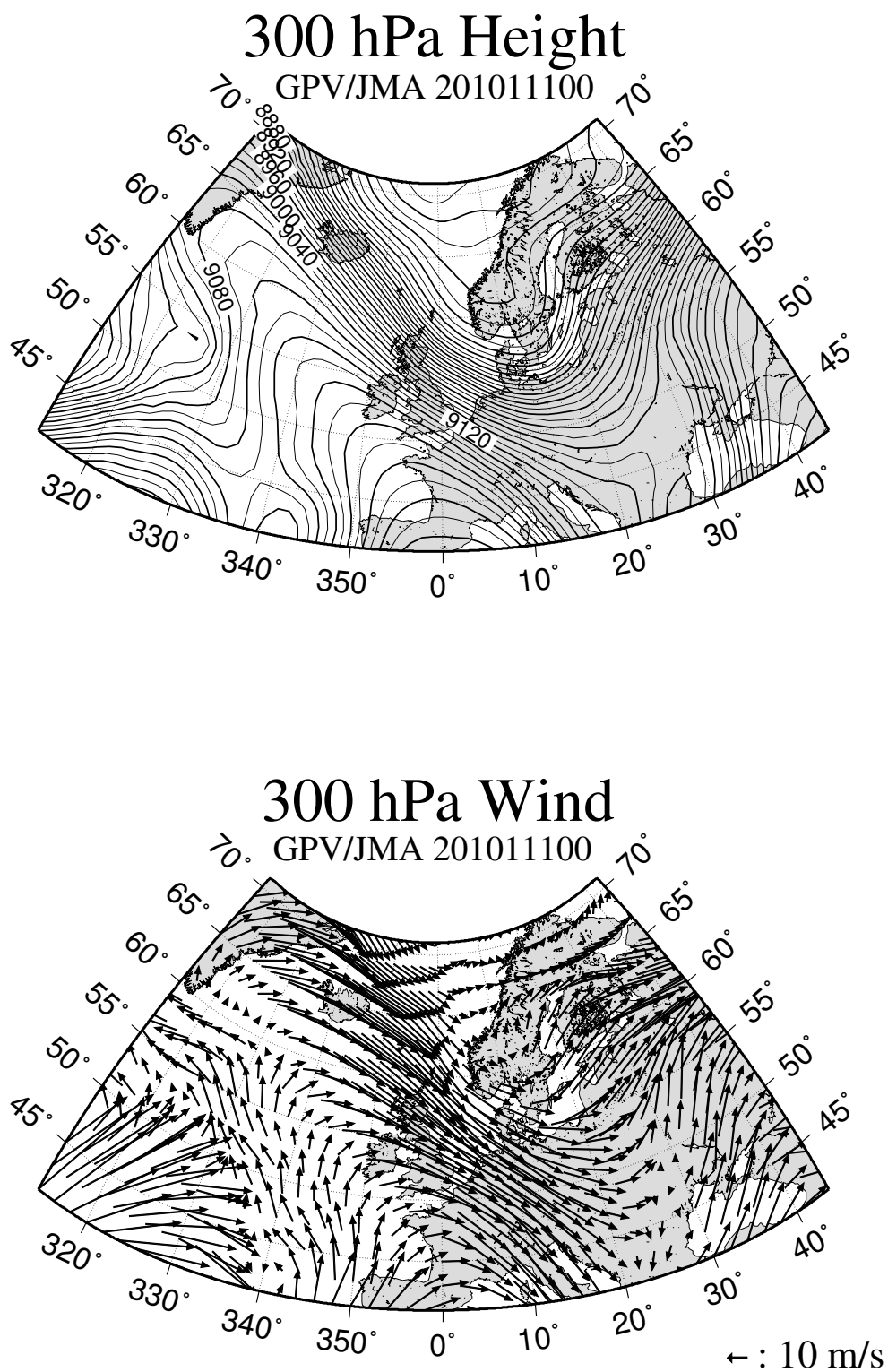


図 25: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 20 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図



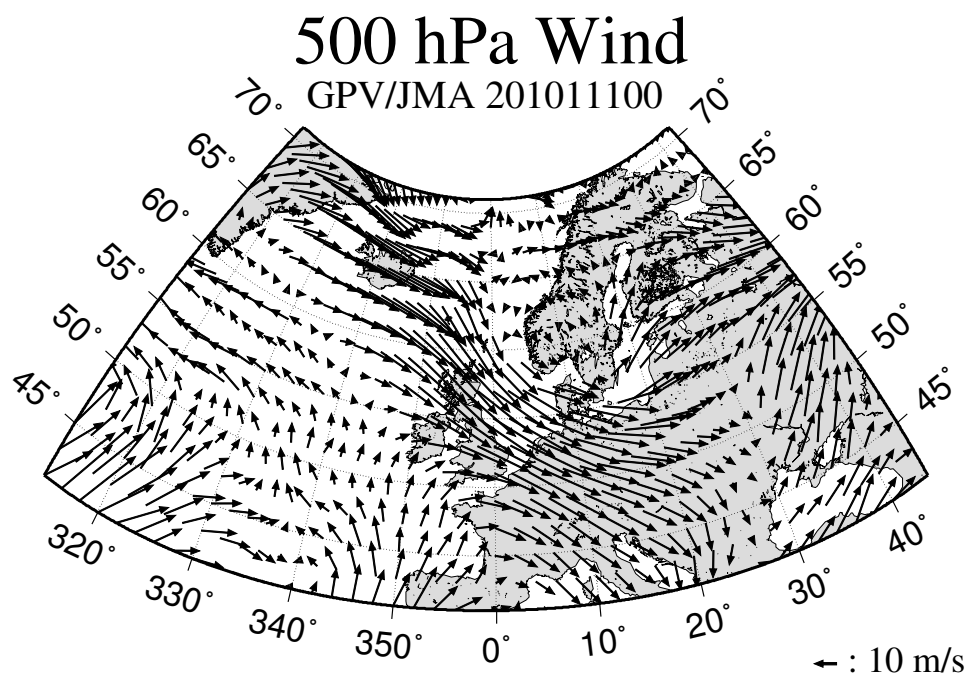
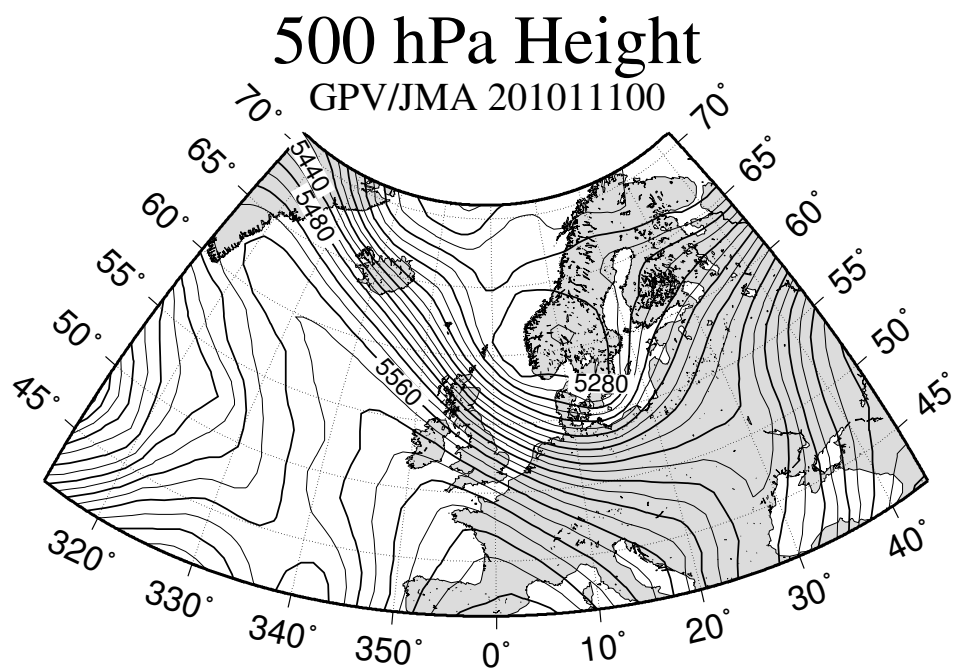


図 27: 500hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 21 日 00:00 UTC); (上)500 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

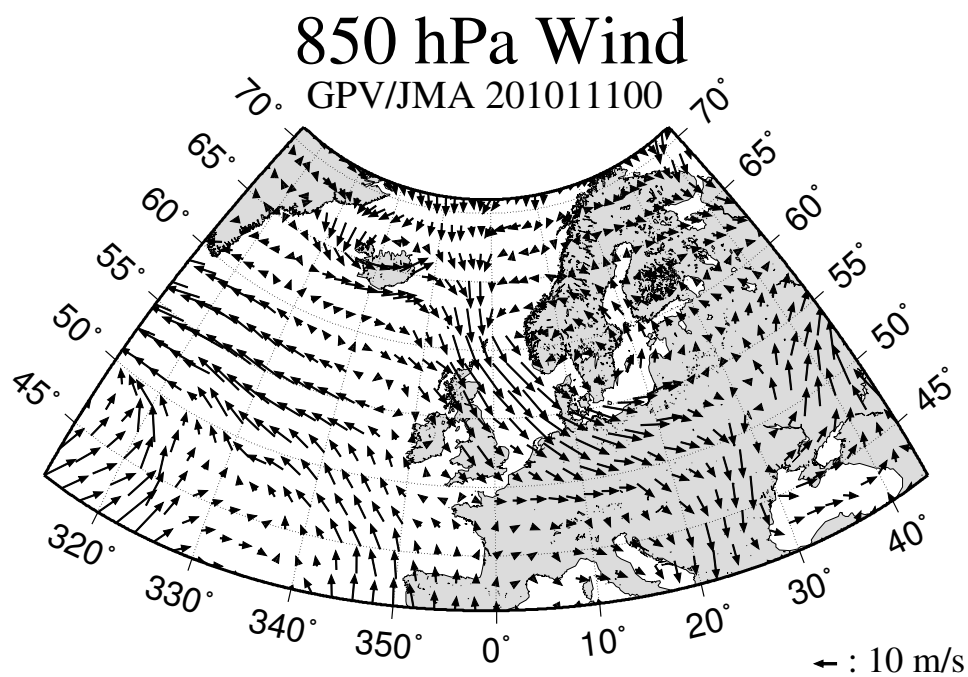
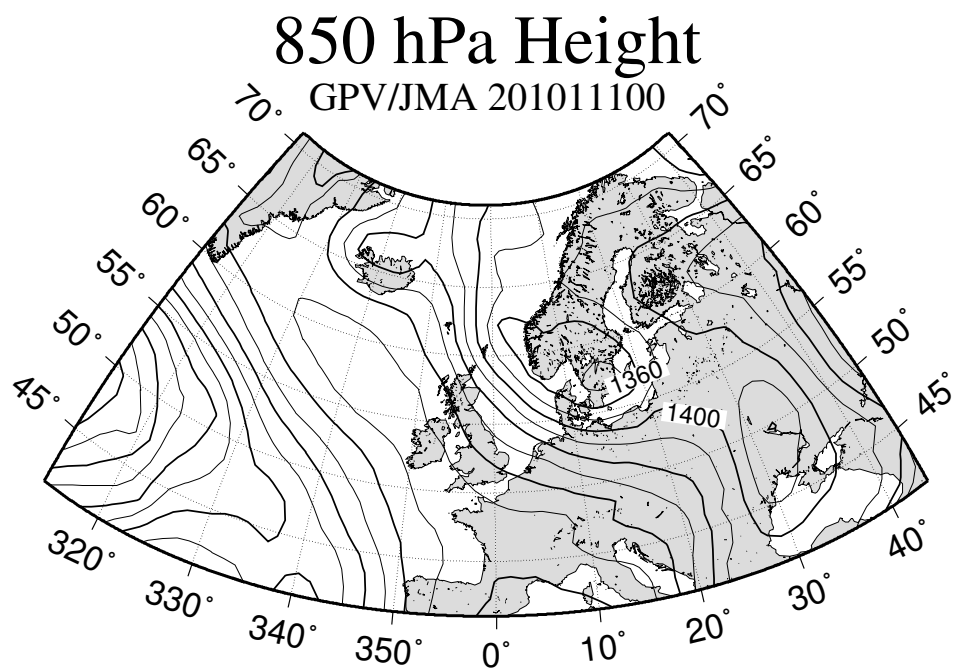


図 28: 850hPa の高度と風の図 (2010 年 4 月 21 日 00:00 UTC); (上)850 hPa 高度図、(下) 同高度の風の図

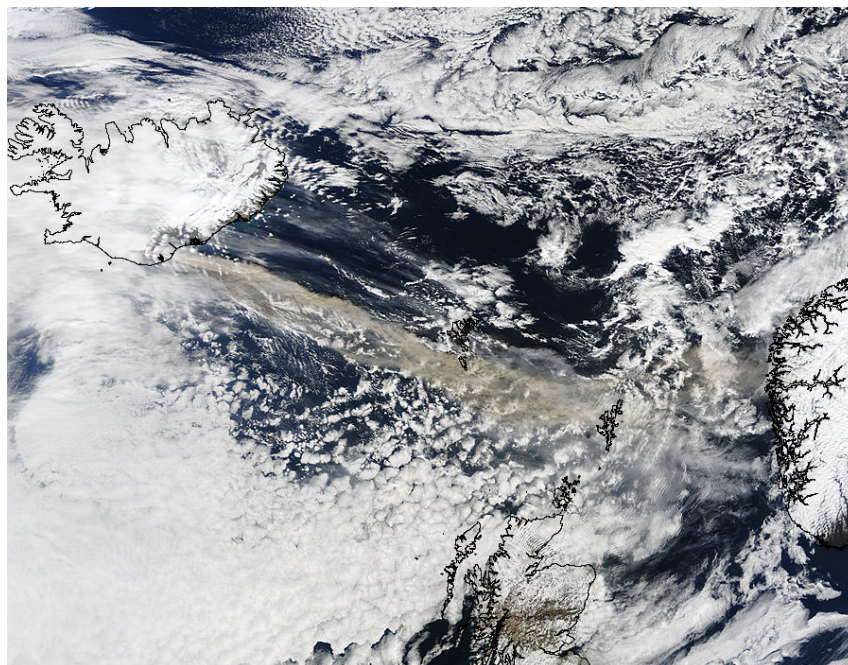
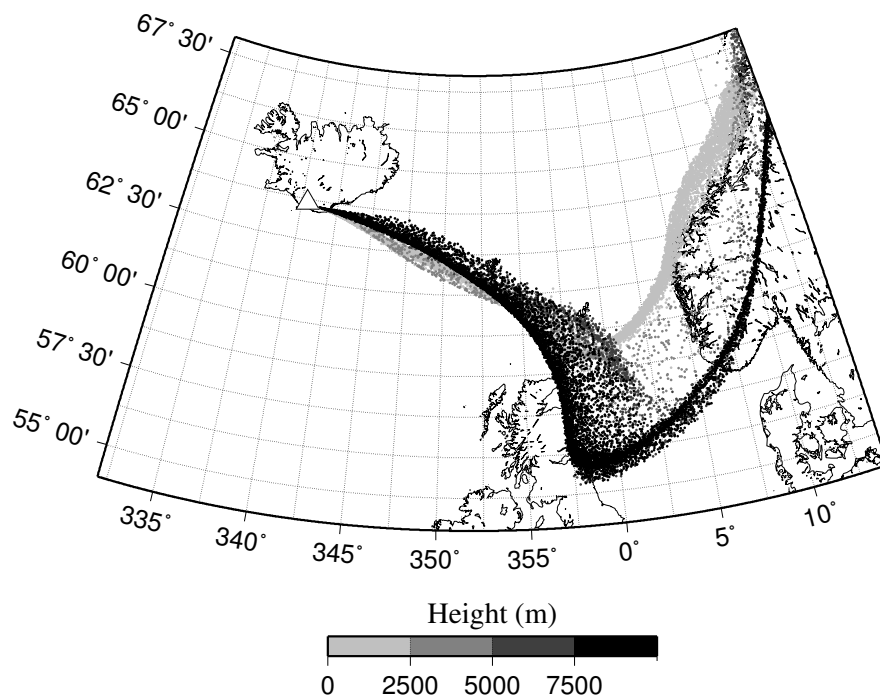
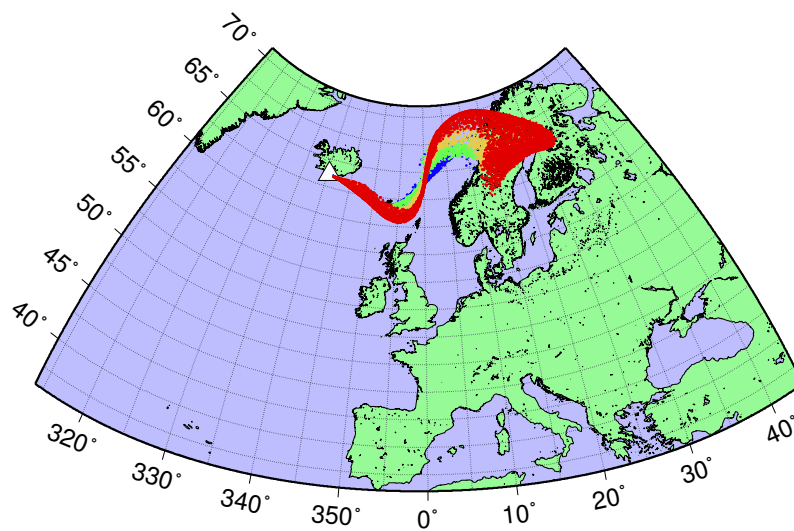


図 29: 2010 年 4 月 15 日 11:00 UTC のシミュレーション結果 (上) と同日 11:35 UTC の衛星画像 (下)

## Iceland\_Volcano

Start Time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +24 hours



Prediction: +48 hours

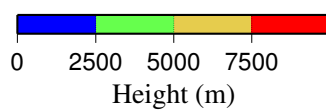
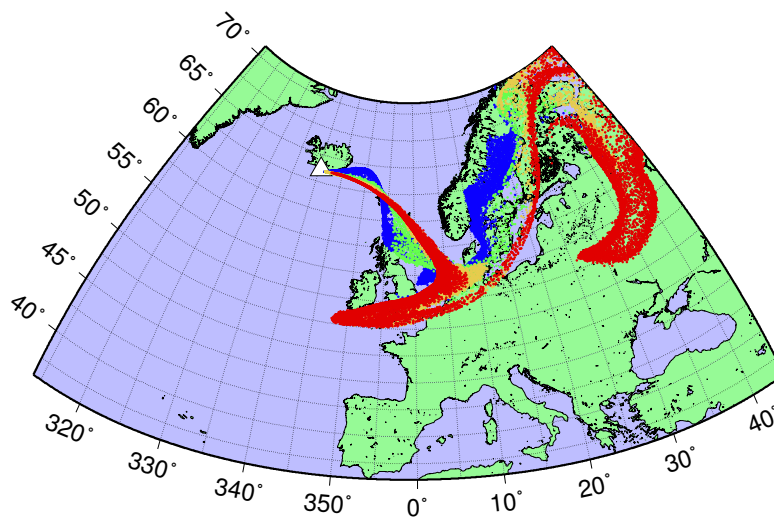


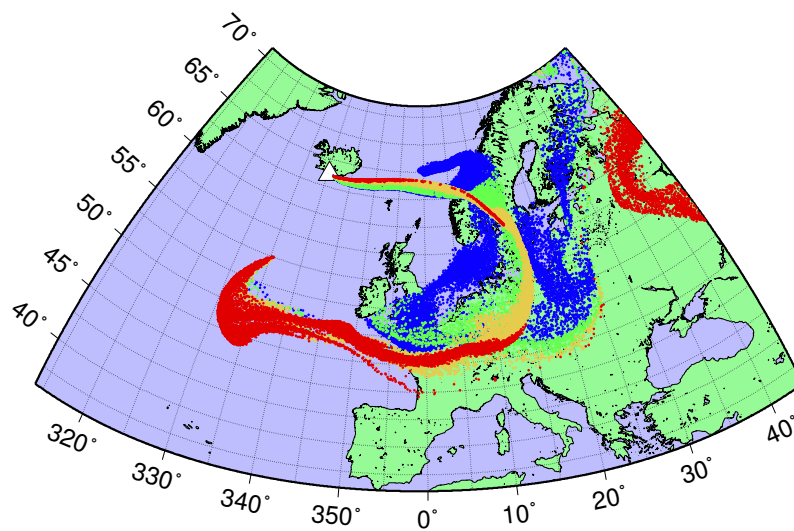
図 30: 火山灰の二次元分布; (上)24 時間後、(下)48 時間後



## Iceland\_Volcano

Start Time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +72 hours



Prediction: +96 hours

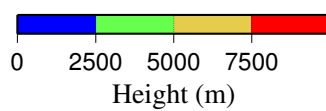
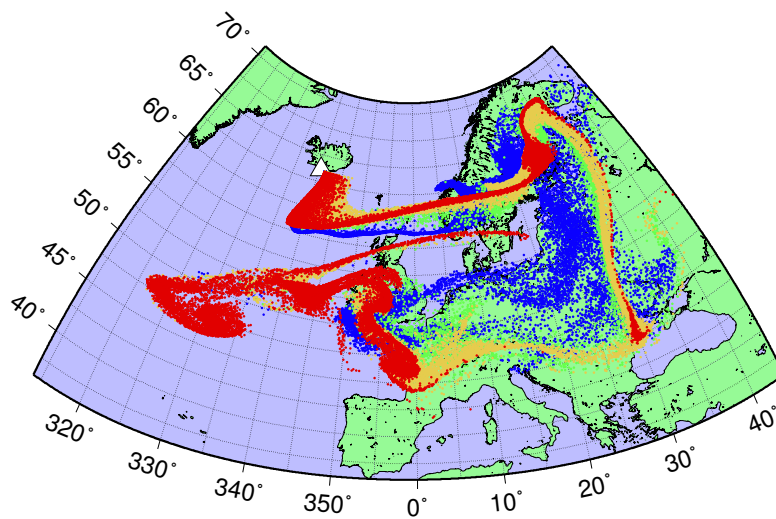


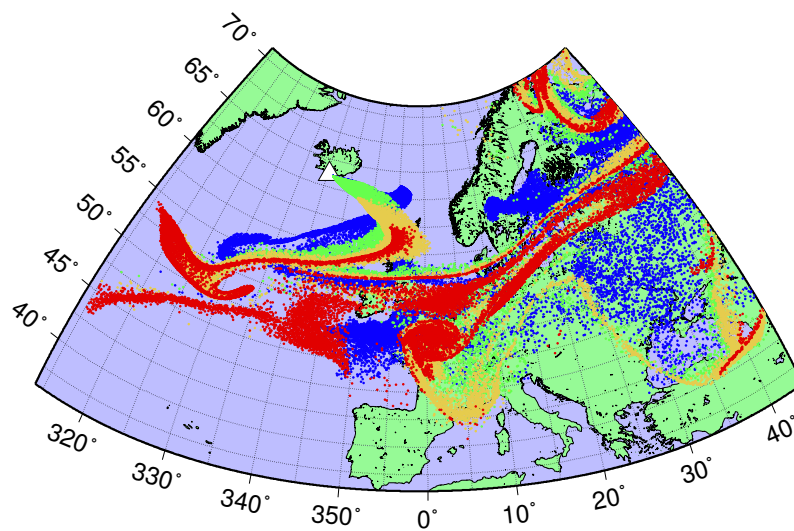
図 31: 火山灰の二次元分布; (上)72 時間後、(下)96 時間後



## Iceland\_Volcano

Start Time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +120 hours



Prediction: +144 hours

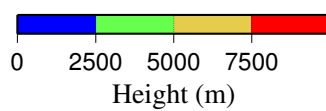
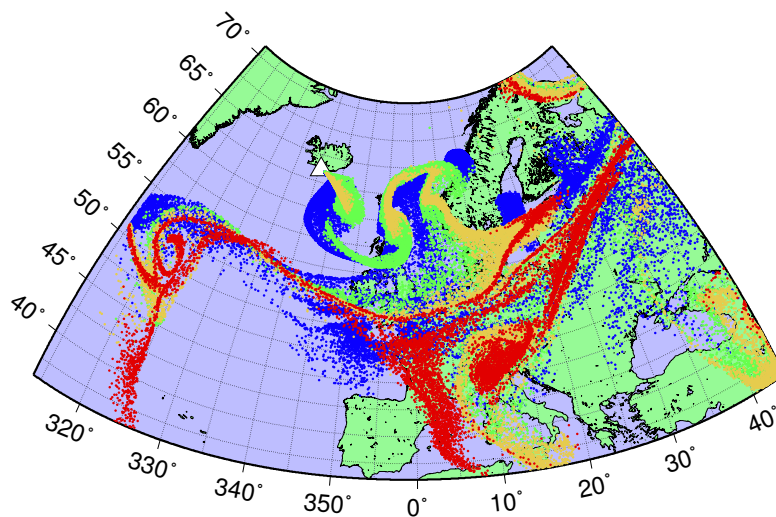


図 32: 火山灰の二次元分布; (上)120 時間後、(下)144 時間後

## Iceland\_Volcano

Start Time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +168 hours

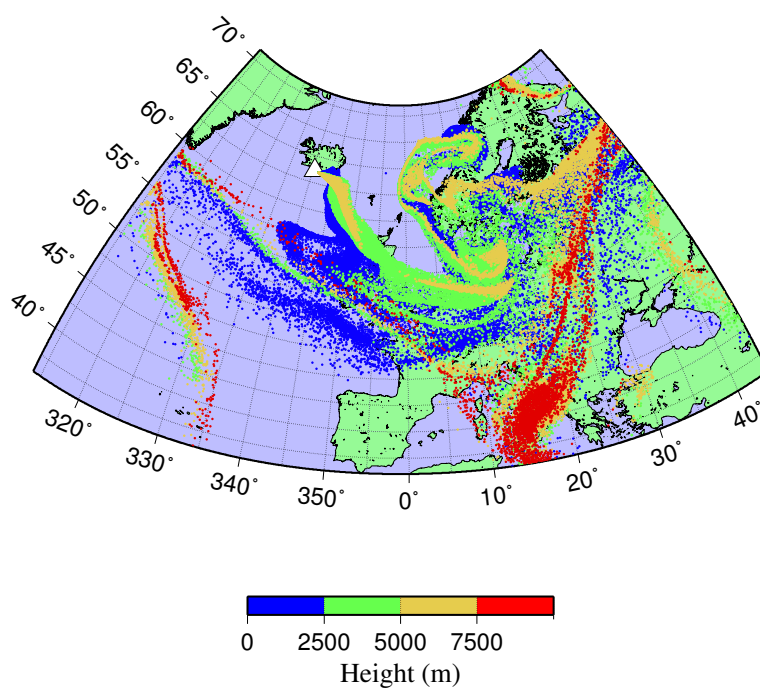
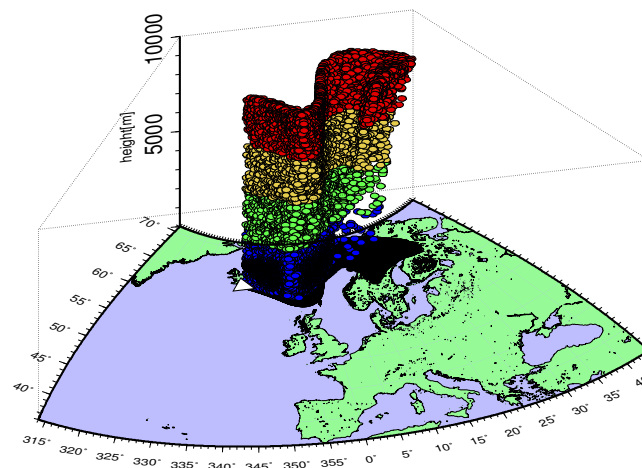


図 33: 火山灰の二次元分布; 168 時間後

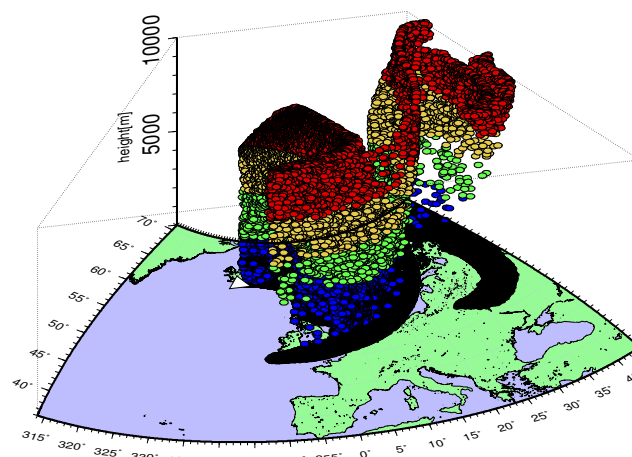
### 3-D image for Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +24 hours



Prediction: +48 hours



Height

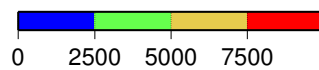
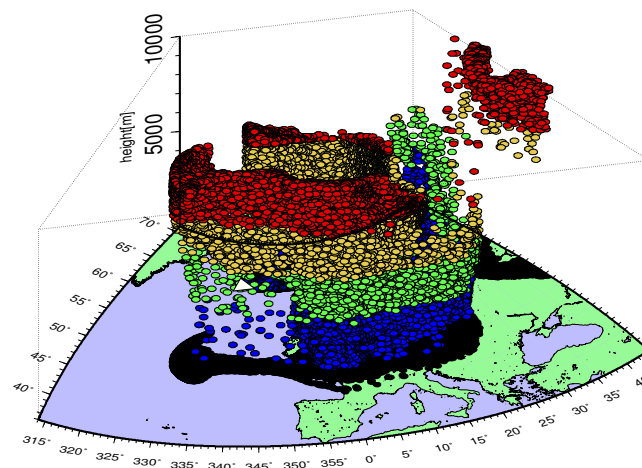


図 34: 火山灰の三次元分布; (上)24 時間後、(下)48 時間後

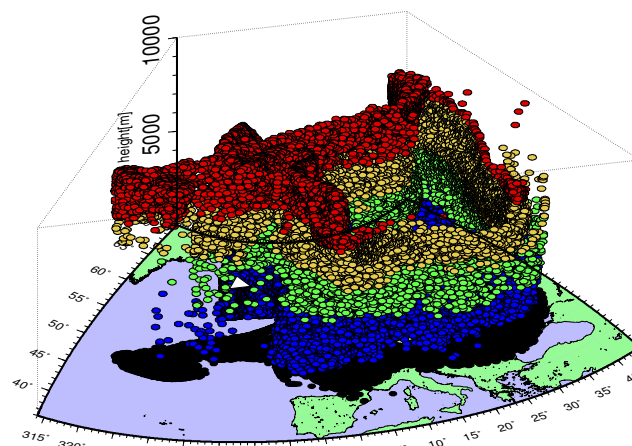
### 3-D image for Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +72 hours



Prediction: +96 hours



Height

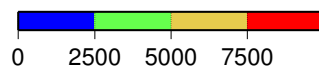
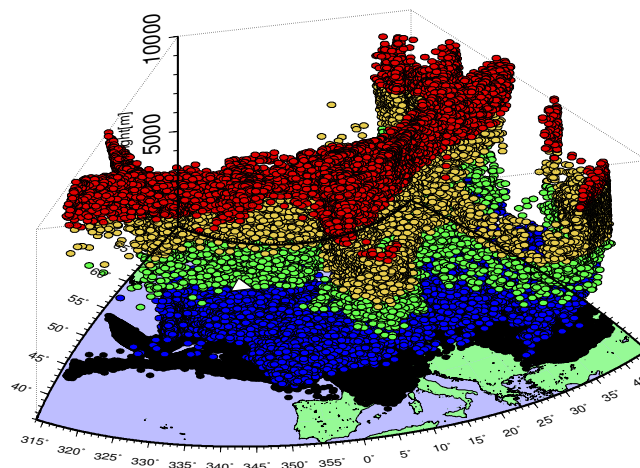


図 35: 火山灰の三次元分布; (上)72 時間後、(下)96 時間後

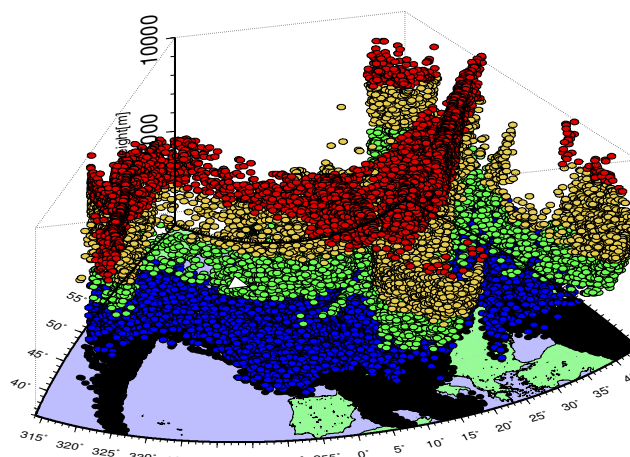
### 3-D image for Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +120 hours



Prediction: +144 hours



Height

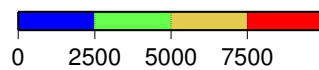


図 36: 火山灰の三次元分布; (上)120 時間後、(下)144 時間後

### 3-D image for Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010

Prediction: +168 hours

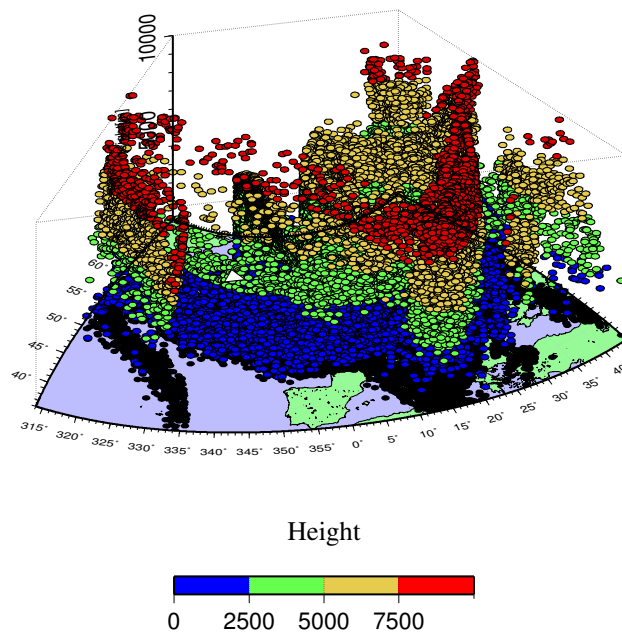


図 37: 火山灰の三次元分布; 168 時間後

# X-Z section for Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010  
Prediction: Every 24 hour from the start time

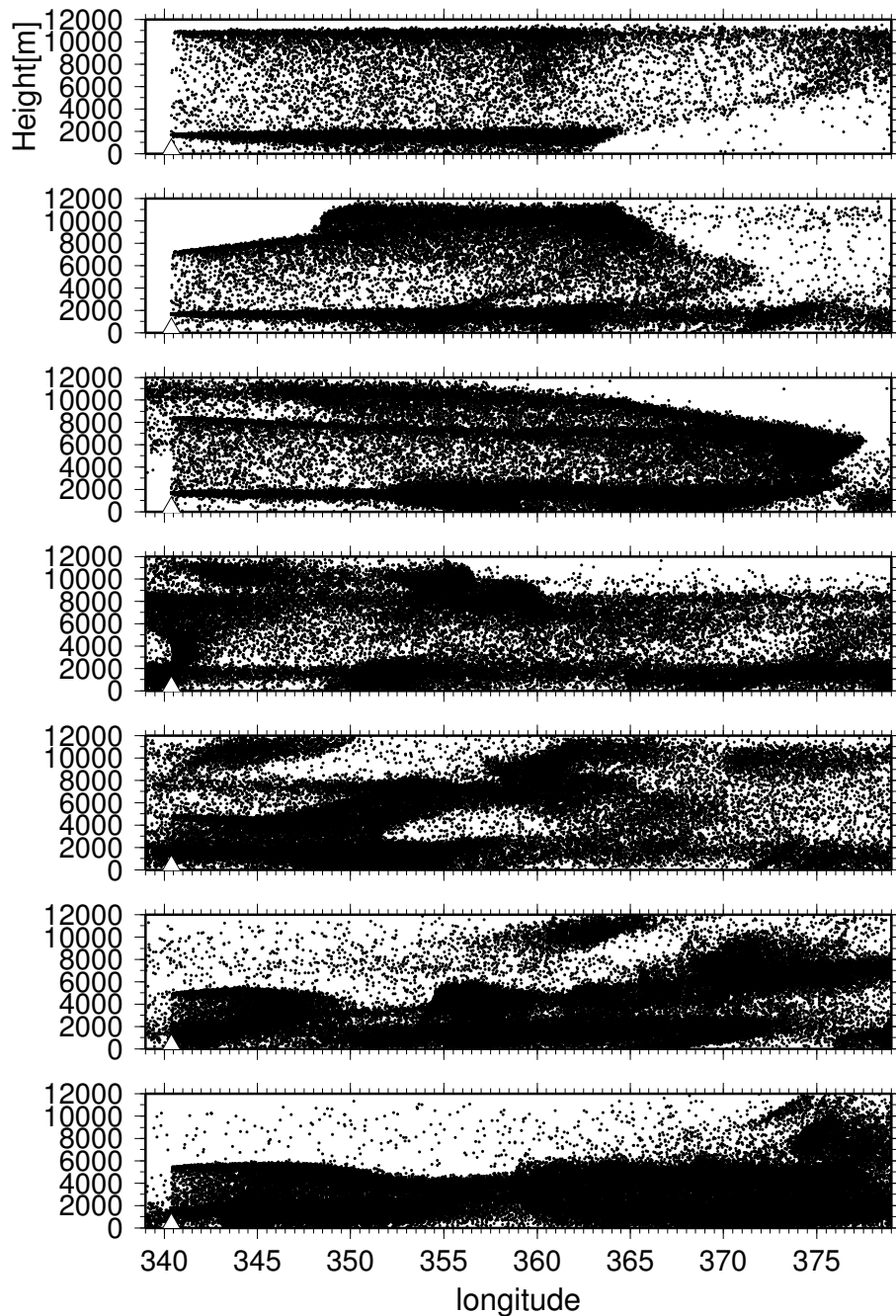


図 38: 噴火から 168 時間後までの噴煙の経度-高度分布; 24 時間間隔

Y-Z section for Iceland\_Volcano  
 Start time: 1:00 UTC 14 April 2010  
 Prediction: Every 24 hour from the start time

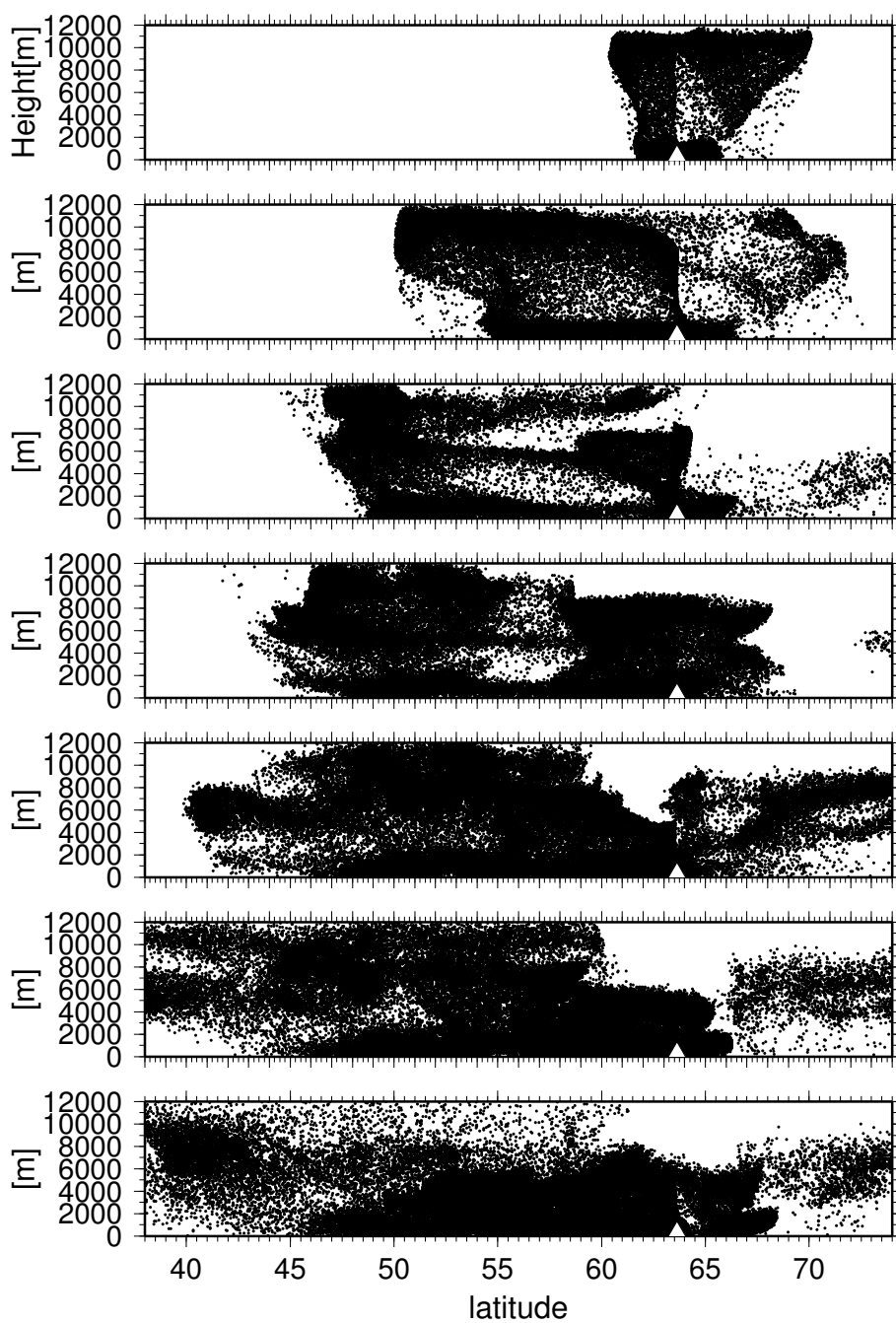


図 39: 噴火から 168 時間後までの噴煙の緯度-高度分布; 24 時間間隔



# Iceland\_Volcano

Start time: 1:00 UTC 14 April 2010  
Duration: + 7 days

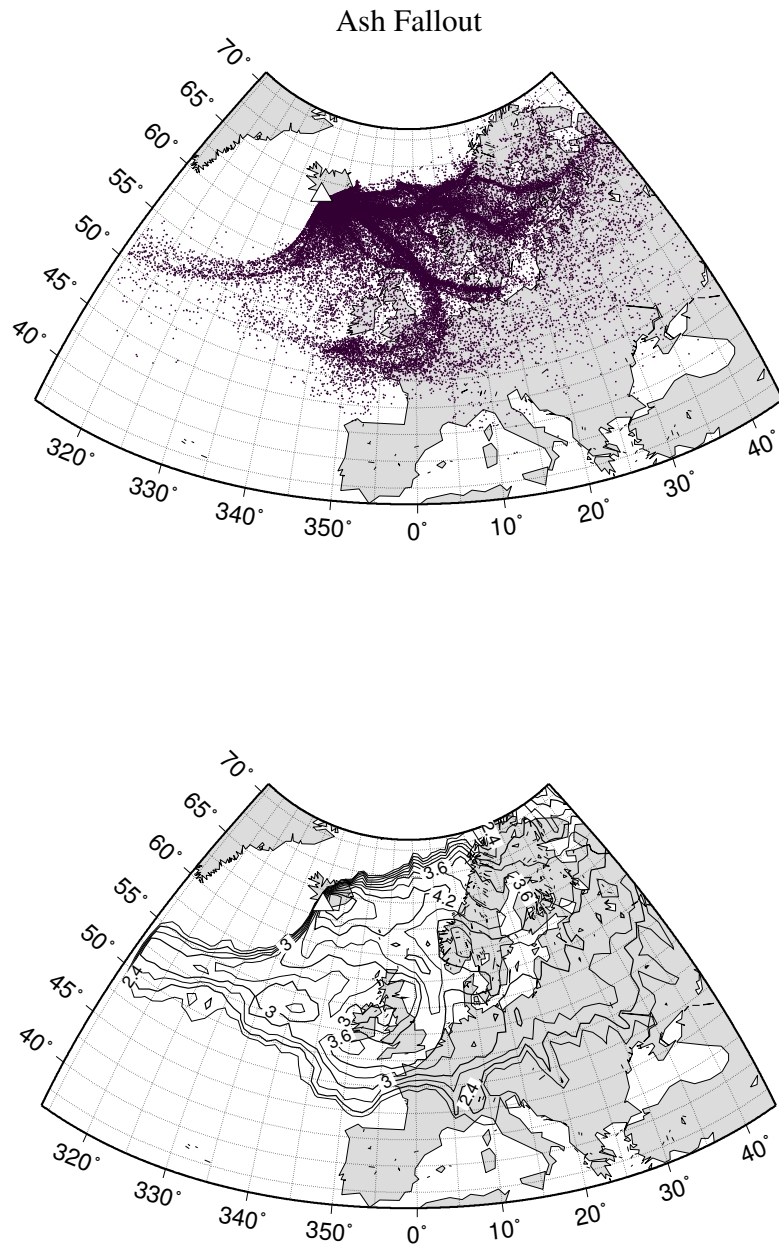
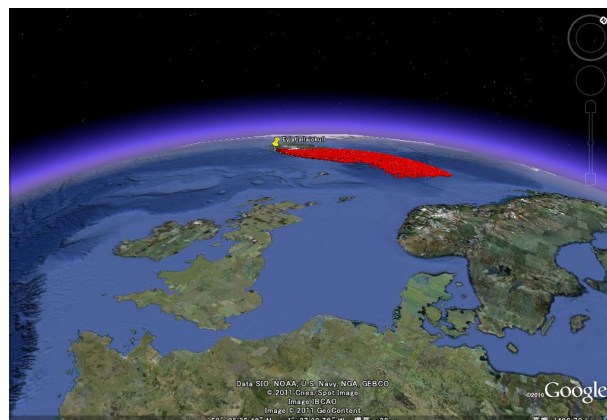


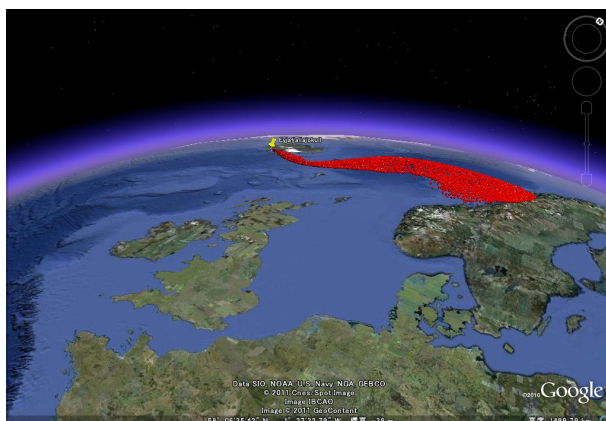
図 40: 噴火後 1 週間の降灰分布; (上) 灰粒子の落下地点のプロット、(下) 落下した灰粒子の数の等値線図 (数は対数)



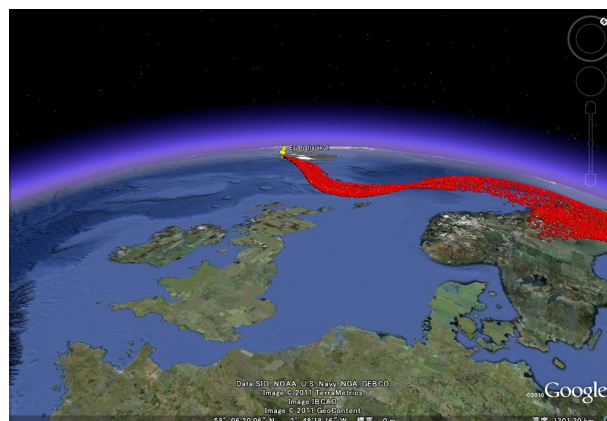
(a) 6 時間後



(b) 12 時間後



(c) 18 時間後



(d) 24 時間後



(e) 30 時間後

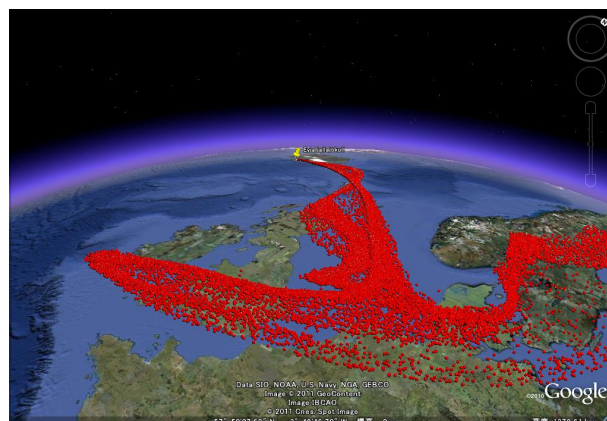


(f) 36 時間後

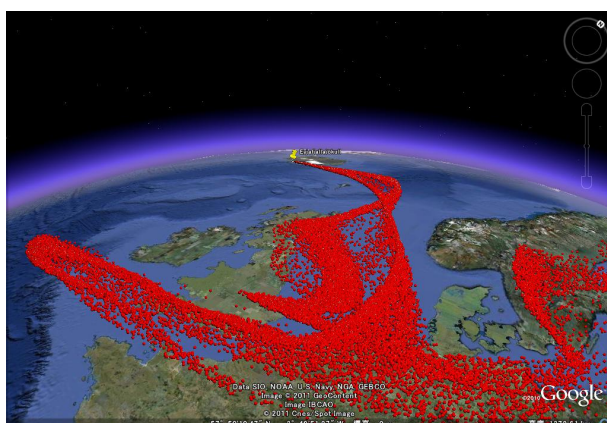
図 41: Google Earth に合成した噴火開始から 6 時間後から 36 時間後までの噴煙分布のシミュレーション結果



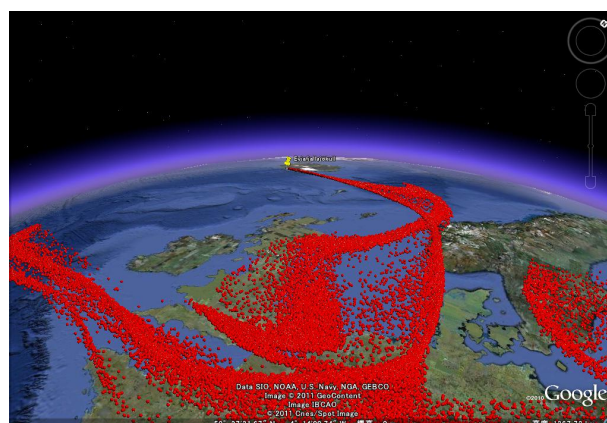
(a) 42 時間後



(b) 48 時間後



(c) 54 時間後



(d) 60 時間後

図 42: Google Earth に合成した噴火開始から 42 時間後から 60 時間後までの噴煙分布のシミュレーション結果