

火星領域気象モデル
CReSS-Mars を用いた
高解像度気象シミュレーション
結果の解析

岡山大学 理学部 地球科学科
05425516 橋本 薪之輔

2017/02/10

要旨

火星大気中に浮遊するダストは、太陽放射を吸収して大気を加熱することで、大気大循環を駆動する一因となるとともに表層環境に大きな影響を及ぼしている。しかし、いつ、どこで、どのような風によって、どれくらいの量のダストが巻き上げられているのかについては、いまだ十分に解明されていない。特に、小さい時空間スケールで吹く風によるダストの巻き上げは、火星大気にダストを供給する主要な過程のひとつと考えられているが、そもそも小さい時空間スケールで吹く風の実態が不明であり、ダスト巻き上げの定量的評価を難しくしている。本研究は、火星領域気象モデル CReSS-Mars を用いておこなわれた高解像度の火星気象シミュレーションの結果を解析し、火星の地表で吹く風の特徴を調べることで、火星のダスト巻き上げについて考察した。高解像度気象シミュレーションでは、クレーター周辺で特定の時刻に強風が吹いていることが見つかった。微小な地形に起因して吹く強風は、ダストを巻き上げる可能性がある。風速の頻度分布には明瞭な日変化が見られることから、地表の風速は太陽放射加熱によって支配されていることが示唆された。解析した範囲において、ダストを巻き上げる速い風はほとんど吹いていなかった。ダストを巻き上げる風が吹かなかった原因は不明だが、より高い空間解像度で気象シミュレーションを実行する必要があるかもしれない。

目次

第1章	火星ダストと表層環境	4
第2章	データ	7
2.1	火星領域気象モデル CReSS-Mars	7
2.2	計算設定	8
第3章	地表の温度	9
3.1	地表温度変化	20
3.2	設定の間違い	20
3.2.1	地表	20
3.2.2	時刻	22
第4章	地表で吹く風	23
4.1	地表の瞬間風速	23
4.1.1	風速と地形	34
4.1.2	風速の空間分布	34
4.2	風速の頻度分布	36
4.2.1	風速頻度分布の特徴	36

高解像度気象シミュレーション結果の解析	3
第5章 考察	51
5.1 ダスト巻き上げ	51
第6章 まとめ	52
謝辞	53
参考文献	53

第1章 火星ダストと表層環境

火星大気中に浮遊するダストは、太陽放射を吸収することによって大気を加熱し、大気大循環を駆動する一因となっている(例えば、Read and Lewis, 2004). 時には火星全体を覆い尽くすところまで発達する巨大な砂嵐(ダスト・ストーム)は、ダストの太陽光吸収が熱源となって駆動された循環がさらなるダストの巻き上げを引き起こすことによって発生すると考えられている。火星のダストは放射過程を通じて表層環境に大きな影響を及ぼしていると言える。

しかし、いつ、どこで、どのような風によって、どれくらいの量のダストが巻き上げられているのかについては、いまだ十分に解明されていない。図1.1はダストを巻き上げるのに必要な風速を描いたものである。ダストの巻き上げに必要な風速は地表にあるダストの粒径に依存する。大きい粒子は重いいため、巻き上げるには速い風が必要とされる。小さい粒子は粒子間の固着力が効くため、やはり巻き上げには速い風が必要となる。粒子間に働く固着力の大きさに依存するが、火星で最も巻き上げられやすいのは100ミクロン程度の大きさの粒子であると考えられている。しかし、火星においては、最も巻き上がりやすい100ミクロン程度の粒子であっても巻き上げには $\sim 20\text{m/s}$ 以上の風速が必要とされる(図1.1)。火星地表の大気圧は地球の $1/200$ しかなく、大気の密度が小さいため、ダストの巻き上げには地球よりも速い風が必要なのである。

一方で、火星の地表で吹く風は数値モデルを用いたシミュレーションによって調べられているが、特に大気大循環モデルを用いた研究では、ダストを巻き上げる風はほとんど吹かないという結果になっている(Newman et al, 2002)。全球規模の大気の流れをシミュレーションする大気大循環モデルの水平解像度は一般に100km程度だが、ダストを巻き上げる風は100kmよりもずっと小さいスケールで吹いているため、大気大循環モデルではダストを巻き上げる風が吹かないのだと考えられている。ダストの巻き上げ過程を解明するには、大気大循環モデルでは表現されない小さいスケールの風について知ることが重要であり、高解像度のシミュレーションによって小さいスケールの風を調べることが必要である。

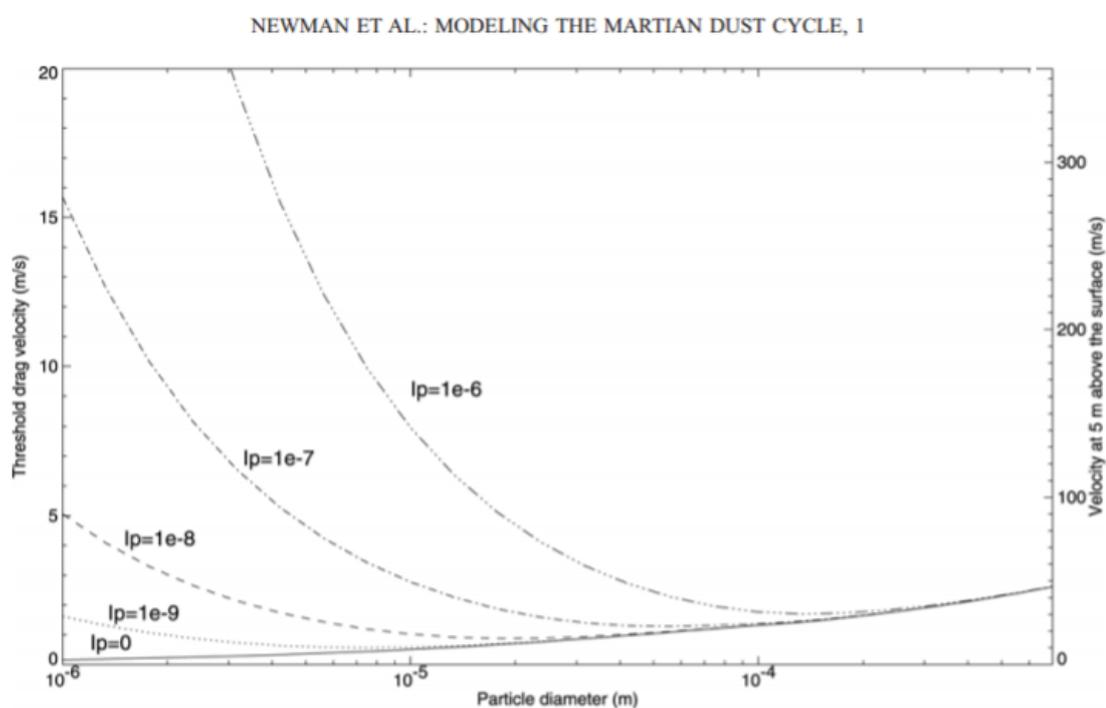


図 1.1: ダスト巻き上げに必要な風速 (Newman et al, 2002 から引用). I_p は粒子間の固着力. 火星では $I_p = 10^{-7} \text{ Nm}^{-1/2}$ 程度と考えられている

本研究は、火星領域気象モデル CReSS-Mars を用いて水平解像度 700m という高解像度でおこなわれた火星気象シミュレーションの結果を解析し、小さい時空間スケールで吹く風について調べた。小さい時空間スケールで吹く風によるダストの巻き上げは、火星大気にダストを供給する主要な過程のひとつと考えられており、小さい時空間スケールで吹く風の実態を明らかにすることで、ダスト巻き上げを定量的に評価するために必要な知見を得ることを目指した。

第2章 データ

本研究で解析したデータは、杉山耕一朗氏 (松江工業高等専門学校) が名古屋大学大型計算機センターの FX1 を用いて計算した結果である。以下、データの生成に用いられたモデルと、計算設定の概略を述べる。

2.1 火星領域気象モデル CReSS-Mars

火星領域気象モデル CReSS-Mars は、地球で実績のある領域気象モデル CReSS(http://rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~tsuboki/cress_html/index_cress.html) を火星で使えるように拡張したものである。運動方程式、熱力学方程式、放射輸送の式などに、サブグリッドスケールのパラメタリゼーションを加えて、大気の流れをシミュレーションする。CReSS は数キロメートルの大きさの積雲を解像するモデルとして開発されているため、キロメートルスケールの風をシミュレーションすることができる。

2.2 計算設定

惑星大気大循環モデル dcpam(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>) で計算した結果を初期値・境界条件に使用するネスティングをおこなった。

計算領域, 格子点数, 時間ステップ, 積分時間は以下のとおりである。

- ・ 計算領域 緯度 : 0.158°S-6.29°S 経度 : 0.11°W-6.29°W
- ・ 格子点数 緯度方向 : 512, 経度方向 : 516, 高さ方向 : 80
- ・ 時間ステップ 0.2 秒
- ・ 積分時間 62 火星時間 (1月0日 22:00 - 1月3日 12:00)

1月1日は北半球の春分である。顕熱, 圧力 ($z = 1.5\text{m}$), 温位 ($z = 1.5\text{m}$), 地表熱フラックス, 上向き長波放射, 下向き長波放射, 表面温度, 東西風速 ($z = 10\text{m}$), 南北風速 ($z = 10\text{m}$), 地表面からの運動量フラックスの x 成分, 地表面からの運動量フラックスの y 成分, 以上について, 全格子点における瞬間値が1時間おきに出力されている。

第3章 地表の温度

図 3.1～図 3.63 は地表温度である．温度のカラーバーの範囲は図ごとに調整をしている．

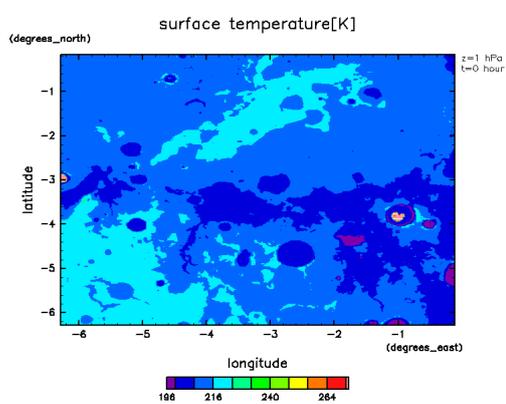


図 3.1: 1月0日 22時

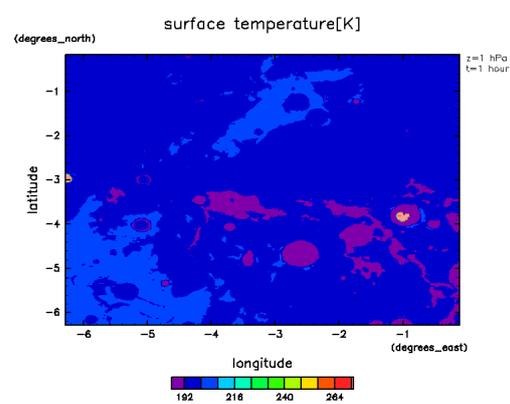


図 3.2: 1月0日 23時

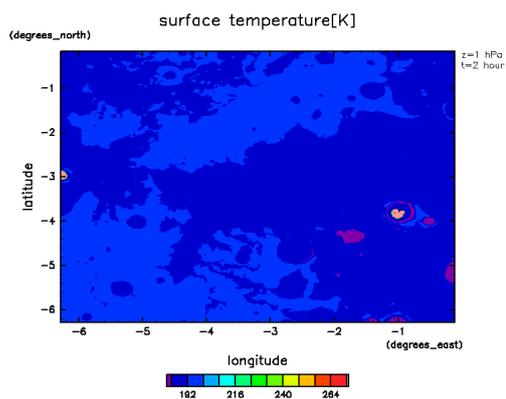


図 3.3: 1月1日 0時

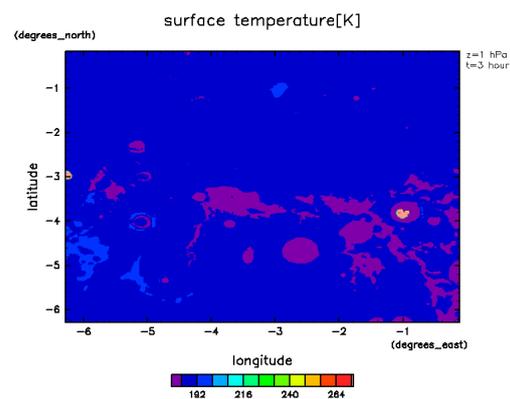


図 3.4: 1月1日 1時

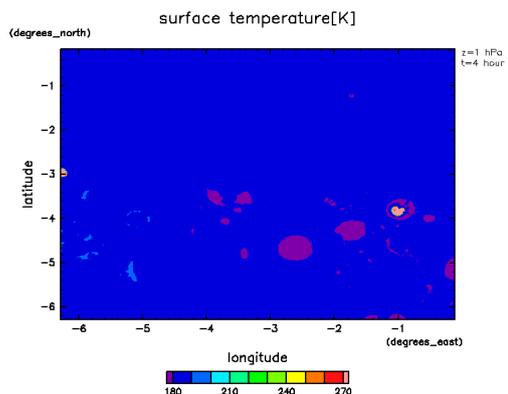


図 3.5: 1月1日 2時

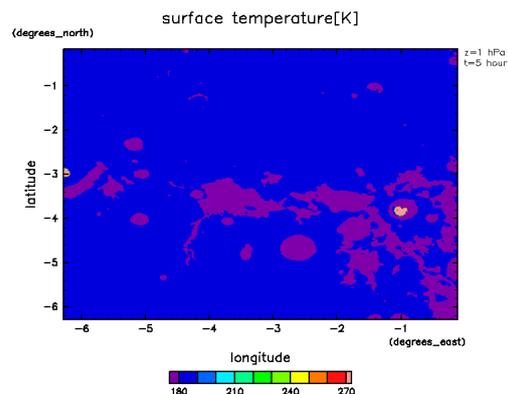


図 3.6: 1月1日 3時

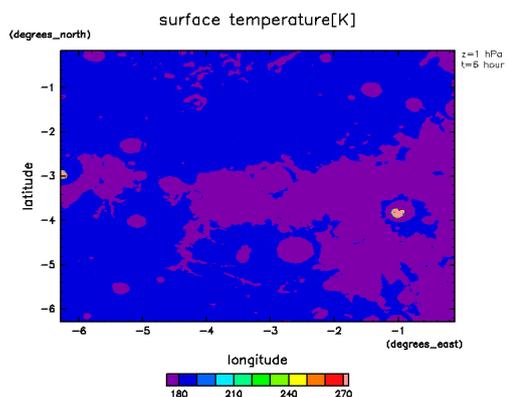


図 3.7: 1月1日 4時

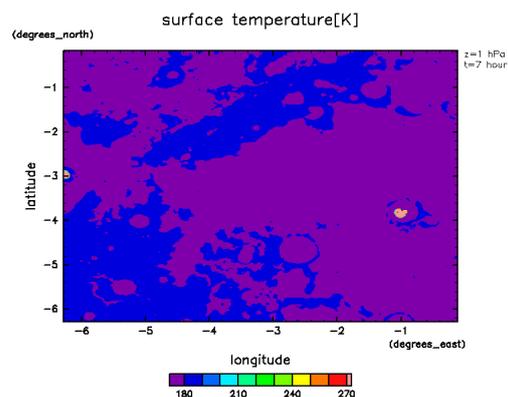


図 3.8: 1月1日 5時

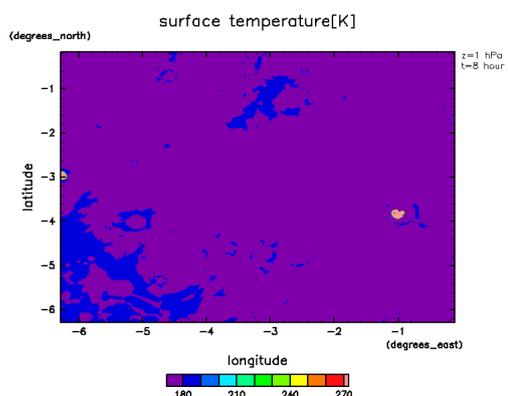


図 3.9: 1月1日 6時

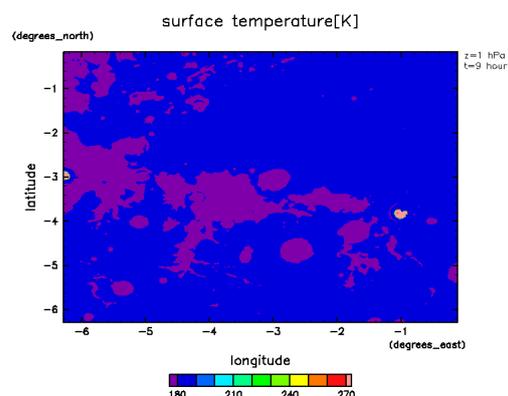


図 3.10: 1月1日 7時

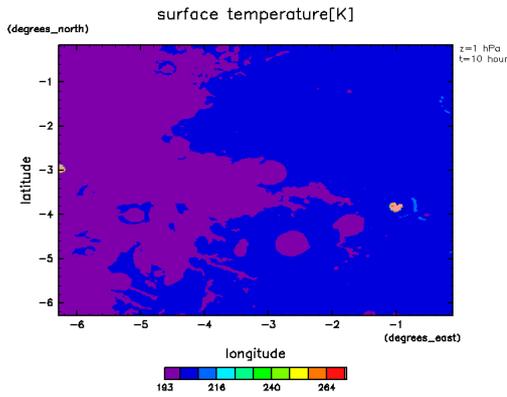


図 3.11: 1月1日 8時

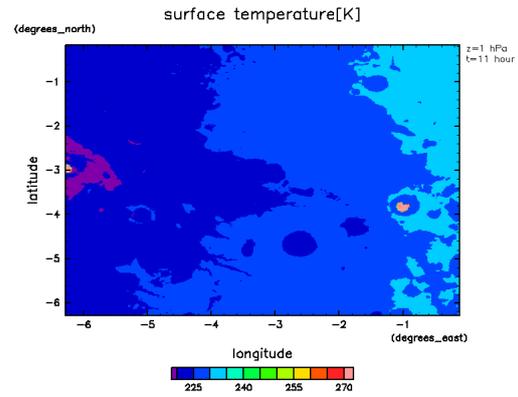


図 3.12: 1月1日 9時

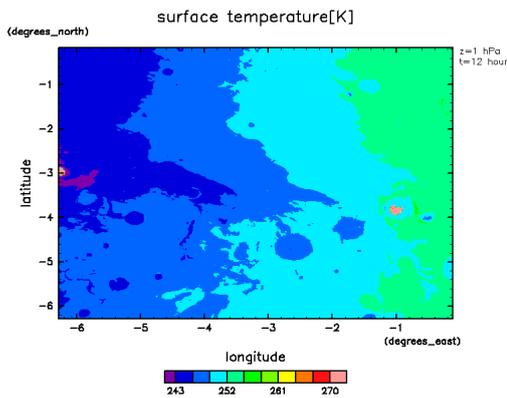


図 3.13: 1月1日 10時

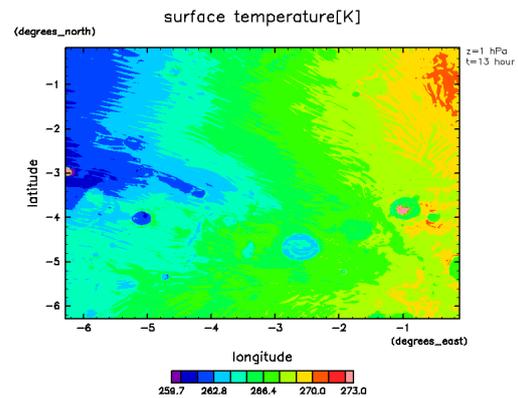


図 3.14: 1月1日 11時

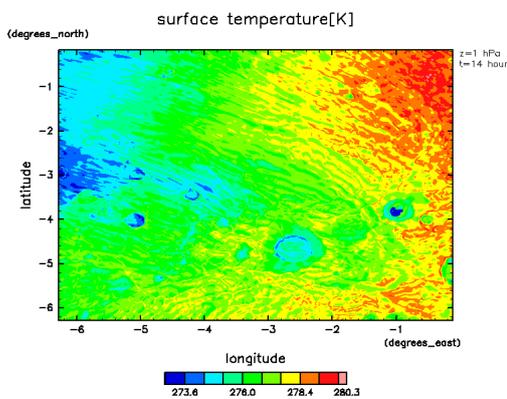


図 3.15: 1月1日 12時

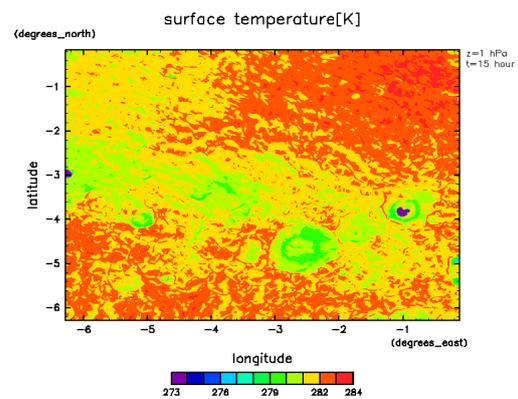


図 3.16: 1月1日 13時

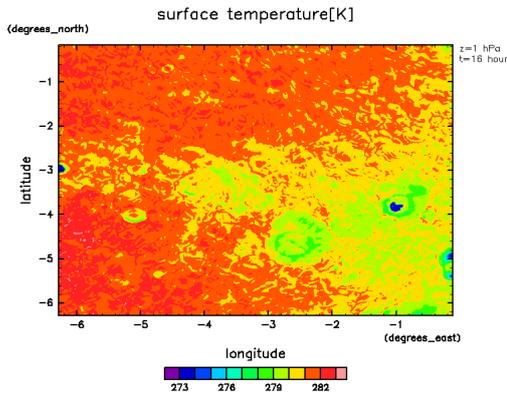


図 3.17: 1月1日 14時

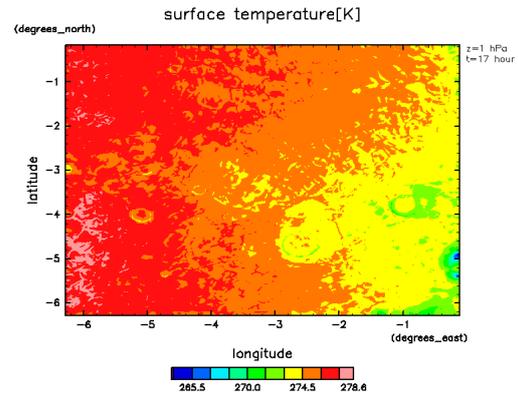


図 3.18: 1月1日 15時

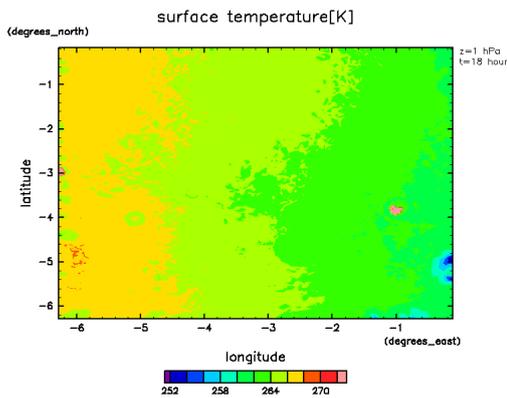


図 3.19: 1月1日 16時

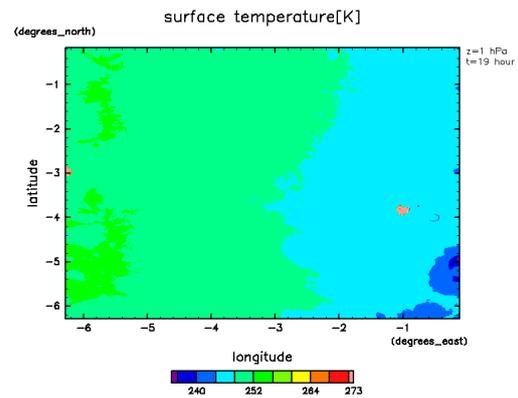


図 3.20: 1月1日 17時

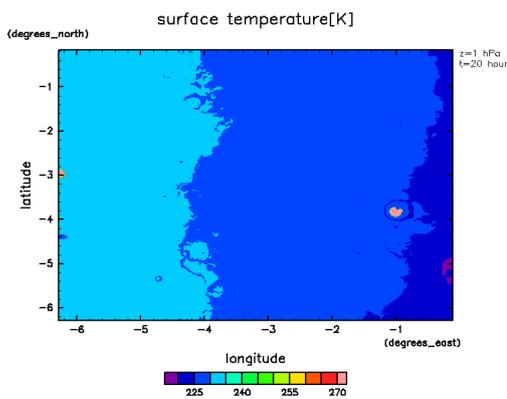


図 3.21: 1月1日 18時

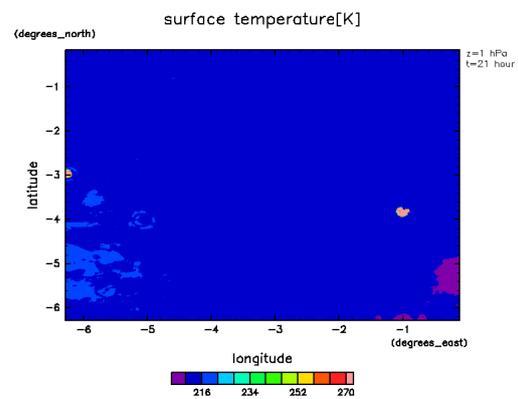


図 3.22: 1月1日 19時

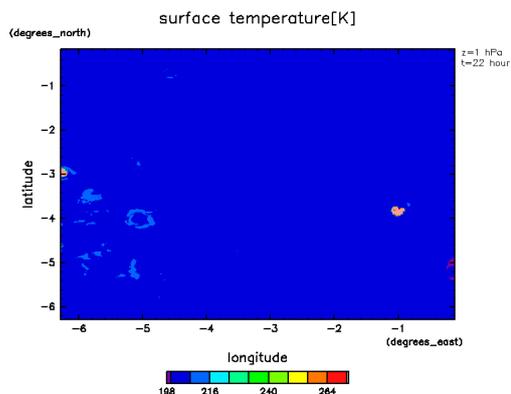


図 3.23: 1月1日 20時

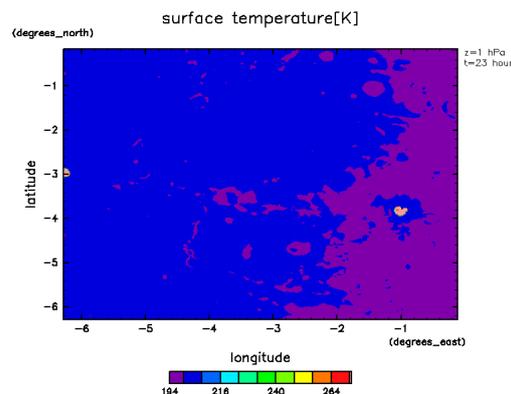


図 3.24: 1月1日 21時

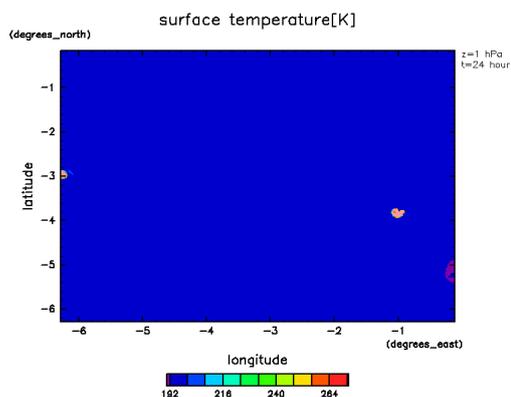


図 3.25: 1月1日 22時

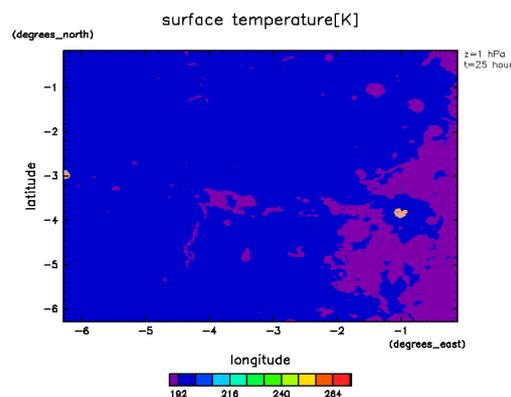


図 3.26: 1月1日 23時

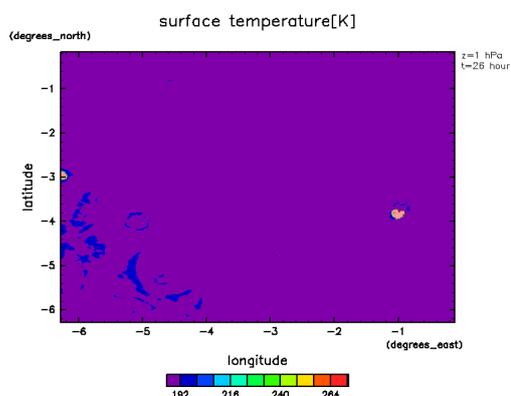


図 3.27: 1月2日 0時

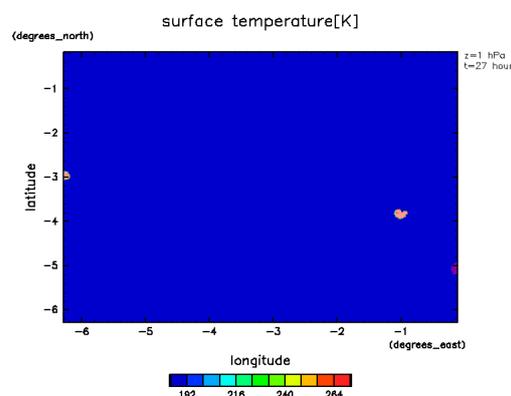


図 3.28: 1月2日 1時

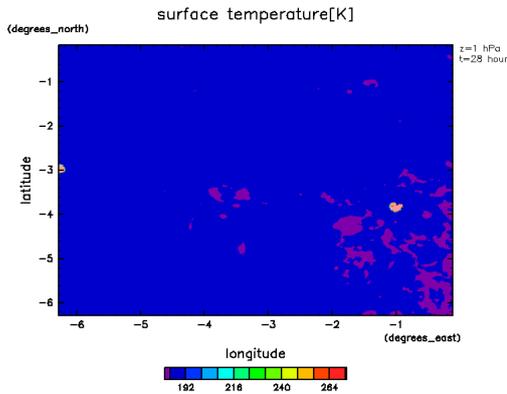


図 3.29: 1月2日2時

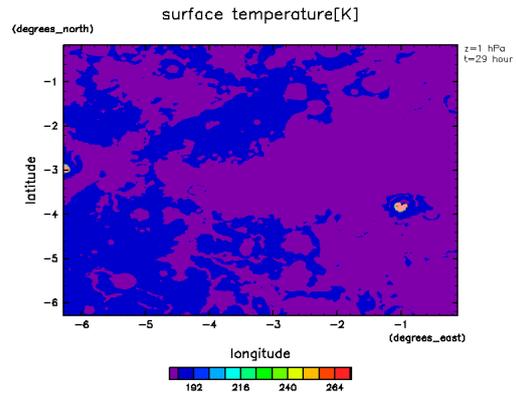


図 3.30: 1月2日3時

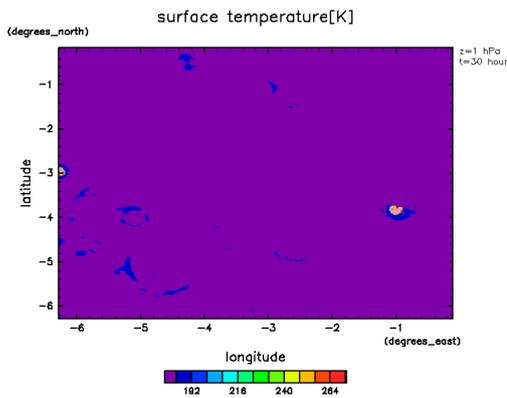


図 3.31: 1月2日4時

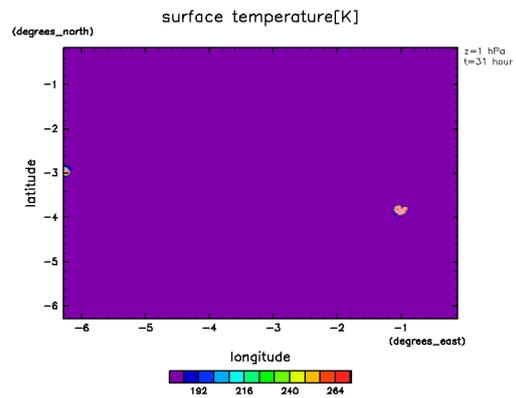


図 3.32: 1月2日5時

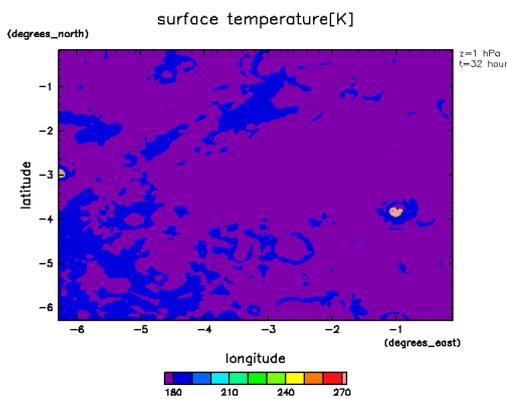


図 3.33: 1月2日6時

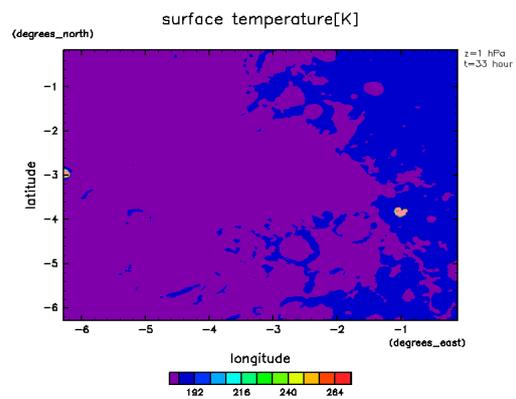


図 3.34: 1月2日7時

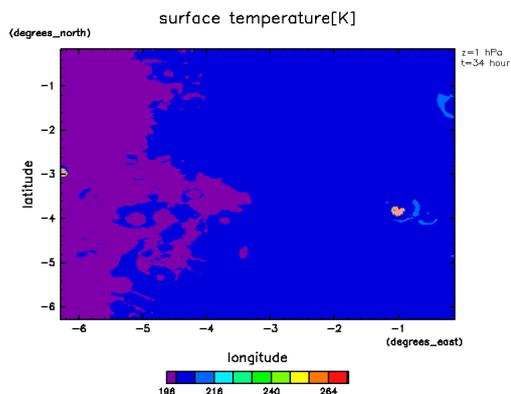


図 3.35: 1月2日 8時

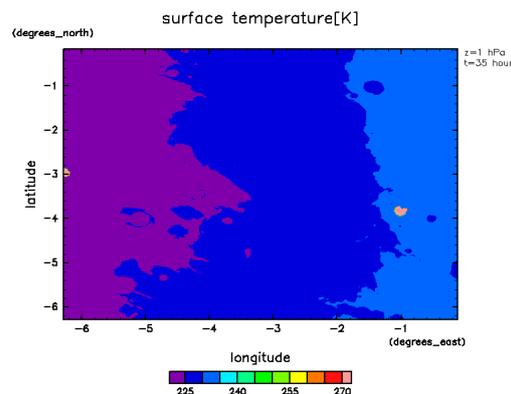


図 3.36: 1月2日 9時

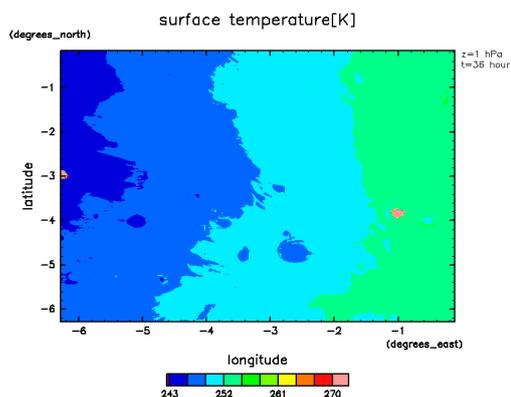


図 3.37: 1月2日 10時

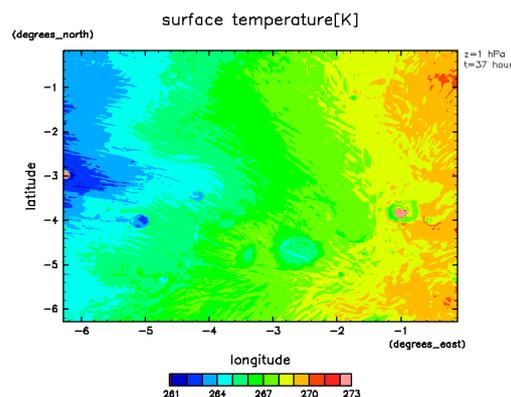


図 3.38: 1月2日 11時

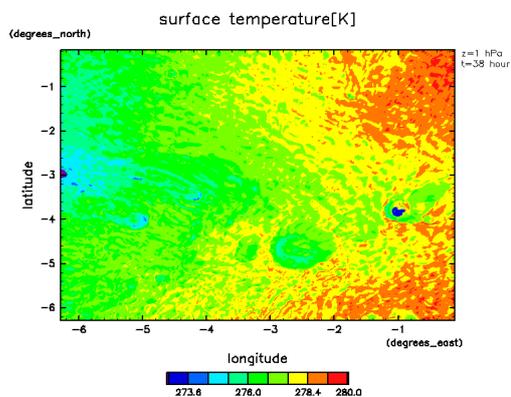


図 3.39: 1月2日 12時

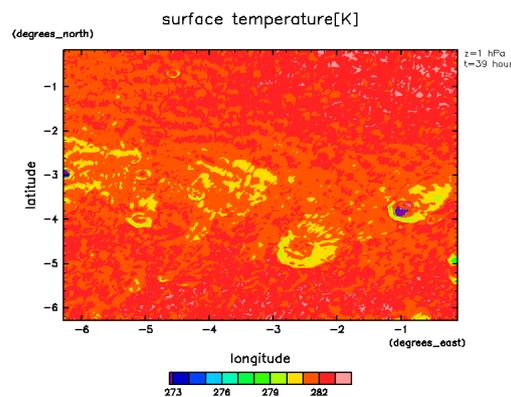


図 3.40: 1月2日 13時

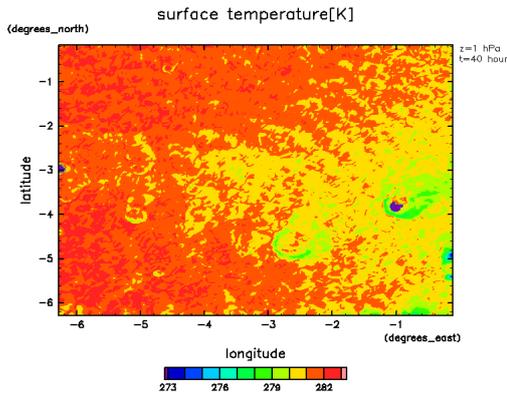


図 3.41: 1月2日 14時

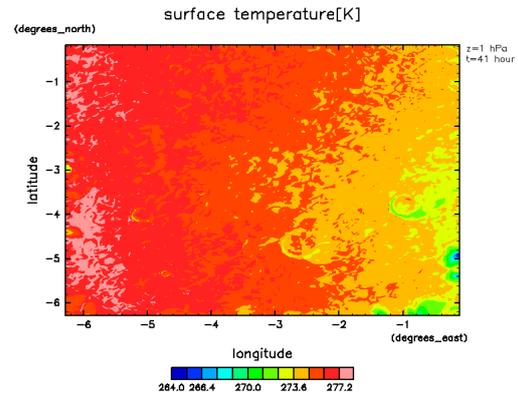


図 3.42: 1月2日 15時

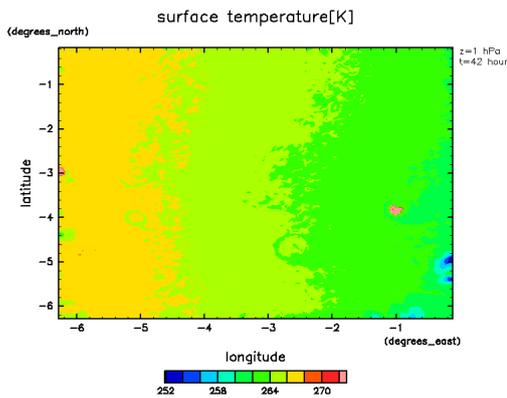


図 3.43: 1月2日 16時

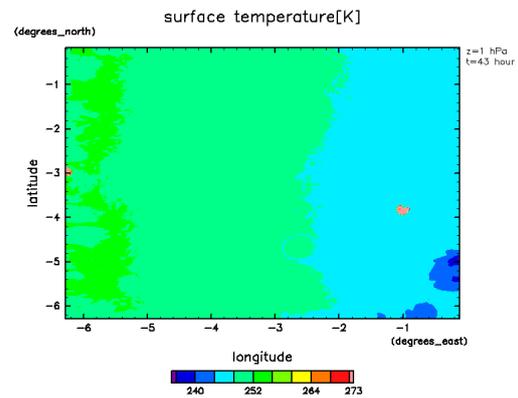


図 3.44: 1月2日 17時

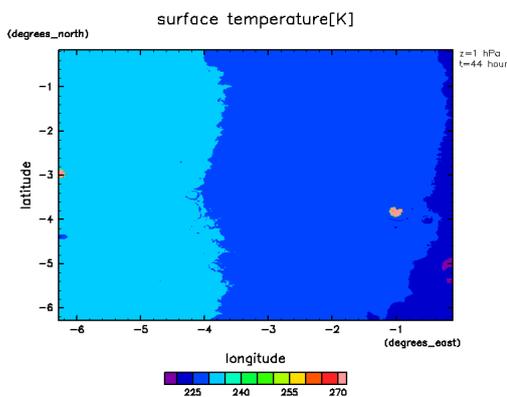


図 3.45: 1月2日 18時

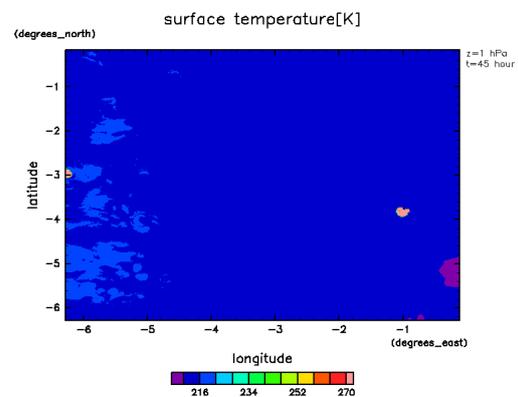


図 3.46: 1月2日 19時

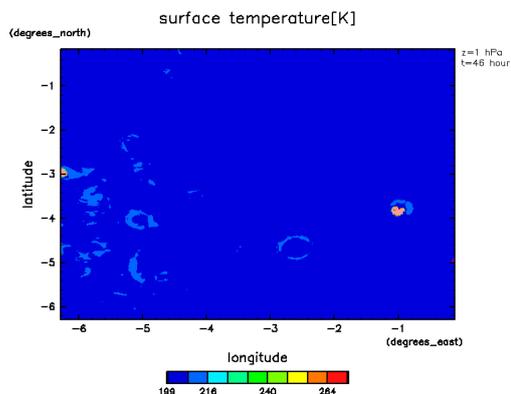


図 3.47: 1月2日 20時

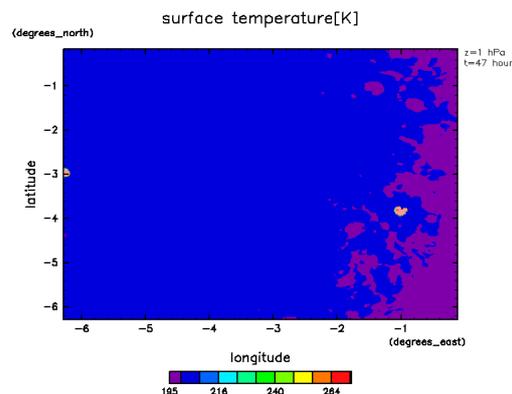


図 3.48: 1月2日 21時

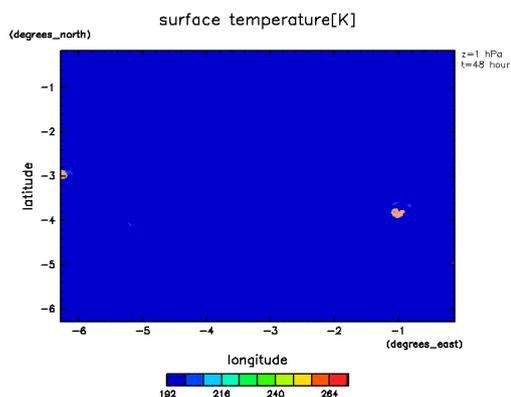


図 3.49: 1月2日 22時

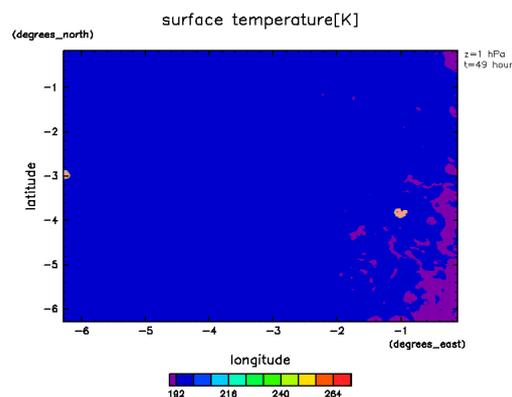


図 3.50: 1月2日 23時

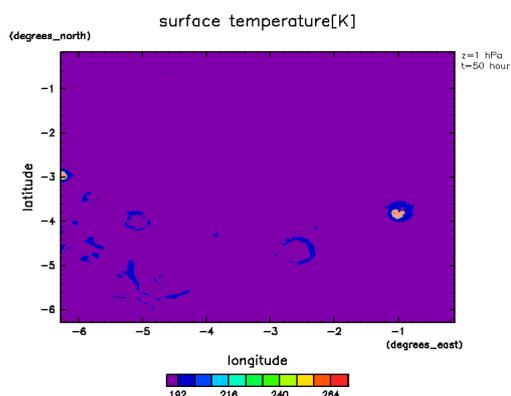


図 3.51: 1月3日 0時

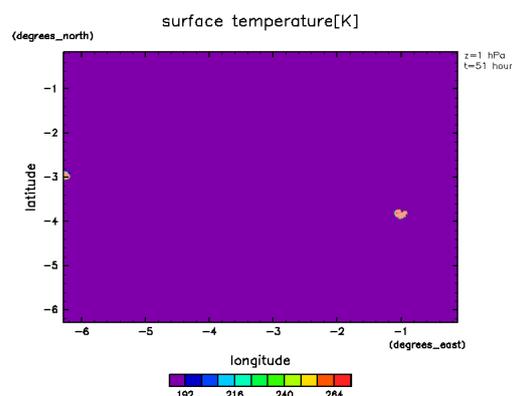


図 3.52: 1月3日 1時

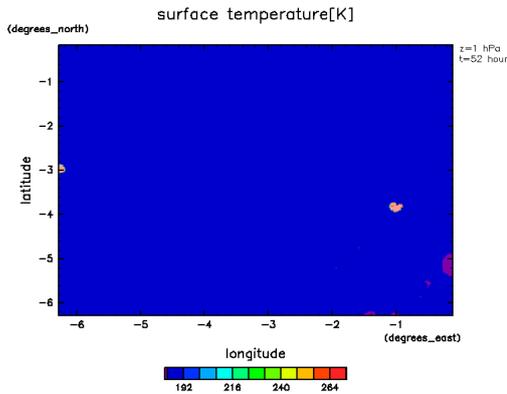


図 3.53: 1月3日2時

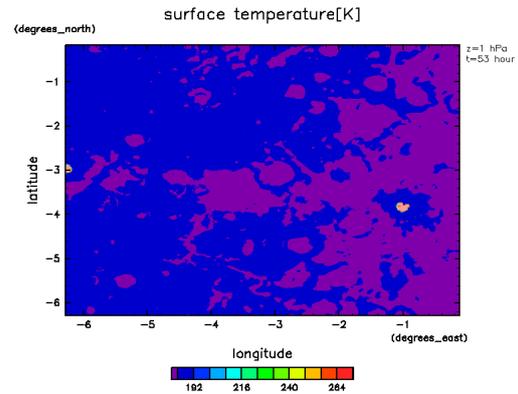


図 3.54: 1月3日3時

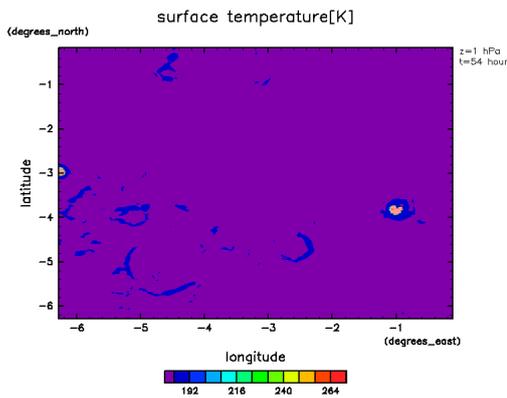


図 3.55: 1月3日4時

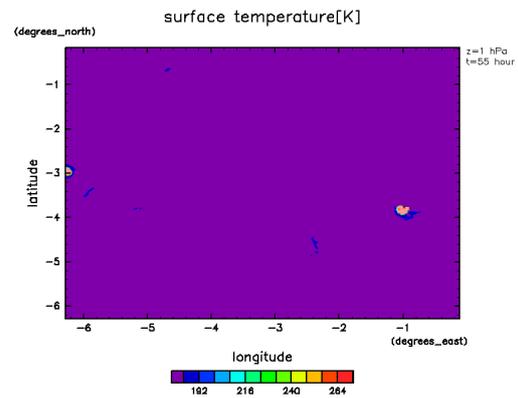


図 3.56: 1月3日5時

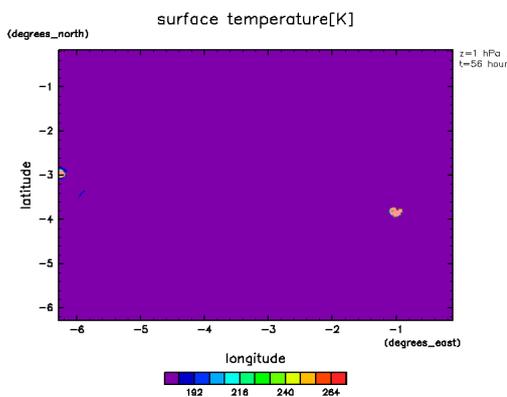


図 3.57: 1月3日6時

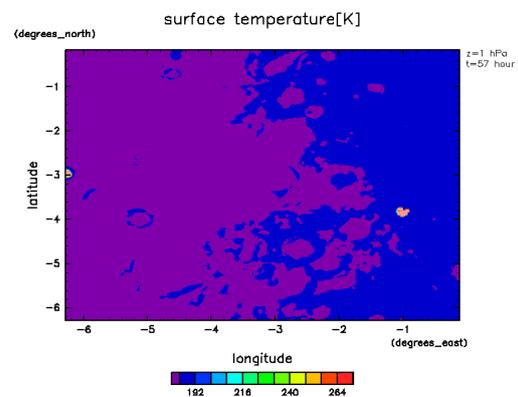


図 3.58: 1月3日7時

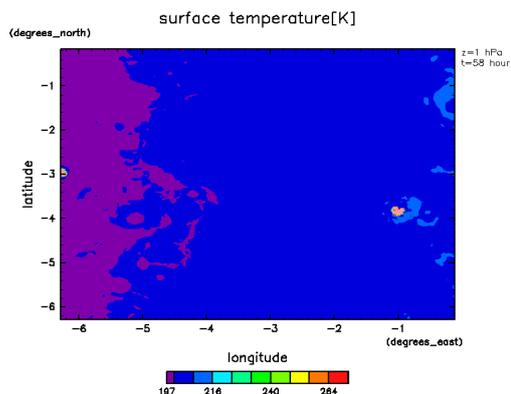


図 3.59: 1月3日 8時

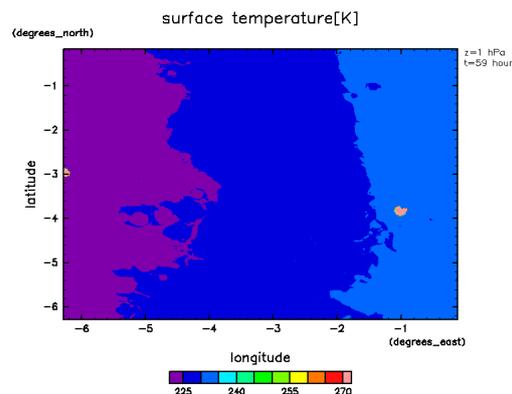


図 3.60: 1月3日 9時

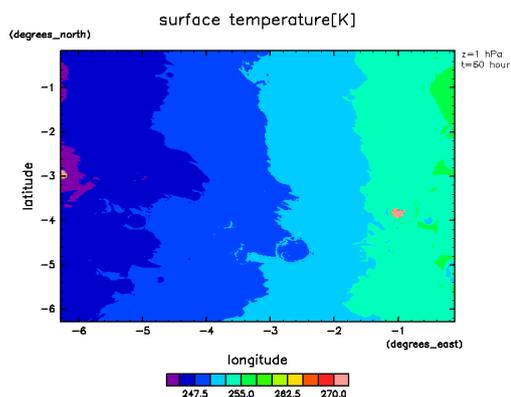


図 3.61: 1月3日 10時

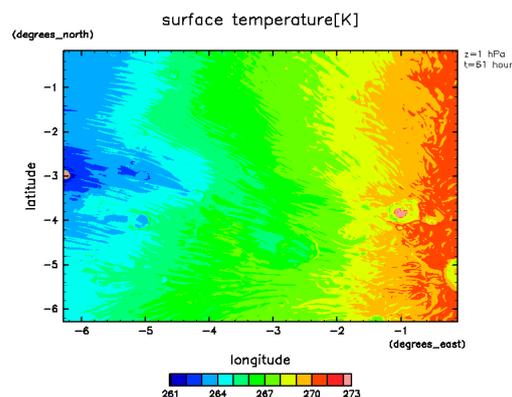


図 3.62: 1月3日 11時

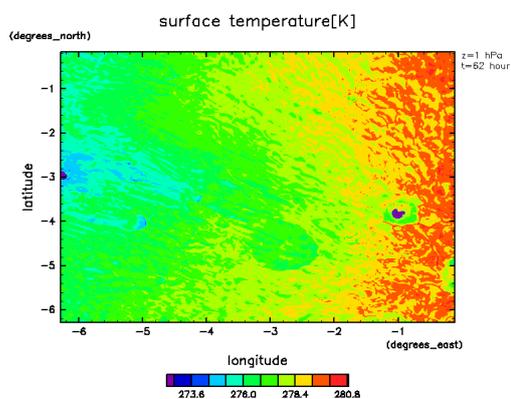


図 3.63: 1月3日 12時

3.1 地表温度変化

図 3.14~図 3.17, 図 3.38~図 3.41 を見るとわかりやすいが, 緯度 4.5°S, 経度 2.5°W, 緯度 4.0°S, 経度 1.8°W, 緯度 4.0°S, 経度 5.0°W のクレーターを見ると, クレーターの中と外では中の方が温度が低くなっていることが分かる

3.2 設定の間違い

CReSS-Mars で行った気象シミュレーションの設定に, 2 つ間違いを発見した.

3.2.1 地表

図 3.64 と図 3.65 はそれぞれ, (A) 緯度 3.0°S, 経度 6.3°W, (B) 緯度 1.0°S, 経度 3.8°W の地点における地表温度の時間変化である. 両地点とも温度変化が~1K と非常に小さく, 明らかに不自然である. CReSS-Mars の計算設定ファイルを確認したところ, -2650m 以下の地点を海とするように設定されており, (A) と (B) の両地点の標高はいずれも-2650m 以下であったため 2 地点とも海として扱われていたことが判明した. 明らかな設定ミスであるが, 問題の生じた範囲は狭く, 大局的な結果への影響は小さいと判断した.

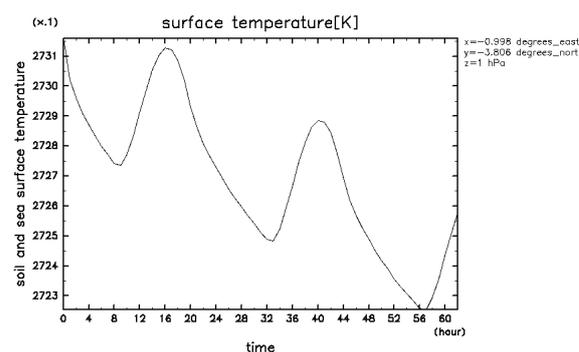
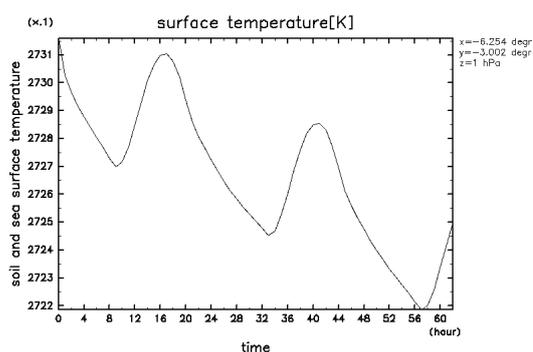


図 3.64: (A) 緯度 3.0°S, 経度 6.3°W

図 3.65: (B) 緯度 1.0°S, 経度 3.8°W

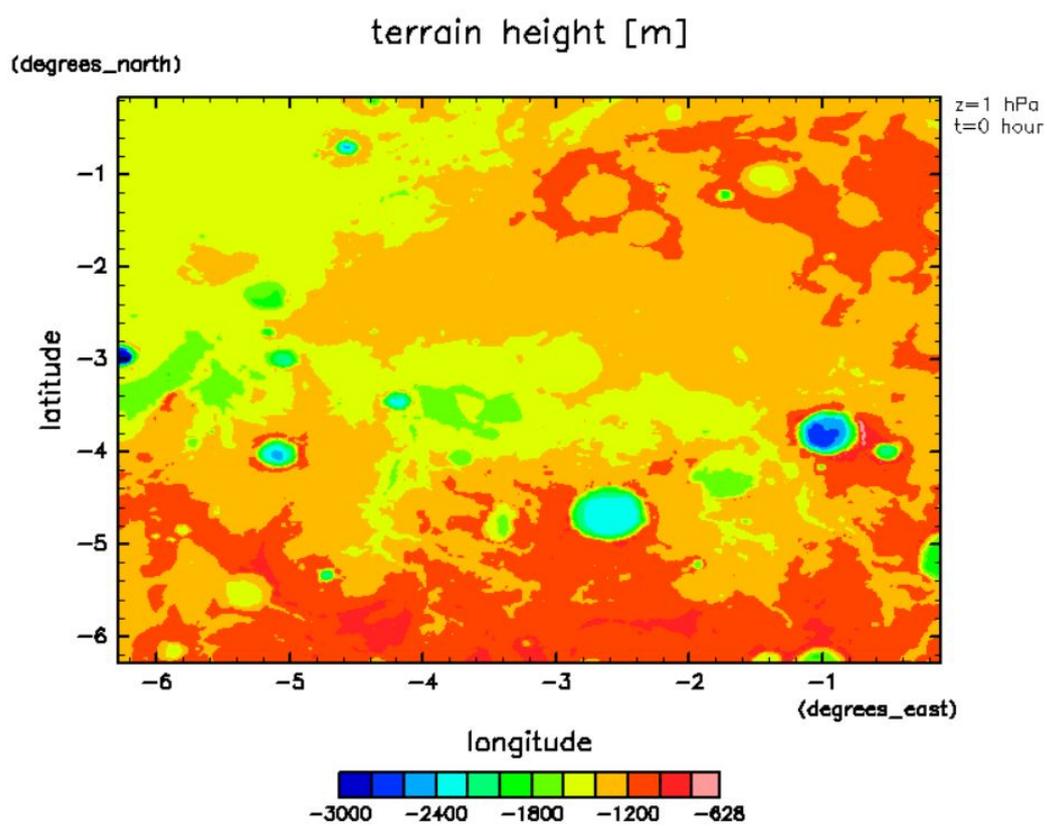


図 3.66: 計算領域の地形図

3.2.2 時刻

図 3.67 と図 3.68 はそれぞれ CReSS-Mars が計算した地表温度の領域平均の日変化と、境界条件として与えた大気大循環モデルの CReSS-Mars が計算した、領域内にある格子点の地表温度の日変化である。日最低温度を記録する時刻は CReSS-Mars は午前 8 時であるのに対し、境界条件は午前 6 時で、明らかに不整合がある。計算領域は緯度、経度ともにほぼ 0° である。すなわち日の出は午前 6 時で、日最低気温は午前 6 時になっているべきである。CReSS-Mars の計算設定ファイルを確認したところ、モデル内で太陽放射を計算する時刻が 2 時間遅れるように設定されていた。結果として、モデル内で計算される太陽放射と境界条件に不整合が生じた。本研究は、日変化を規定する太陽放射の影響が大きいことを鑑みて、時刻はモデル内で太陽放射を計算する時刻を使用することにした。

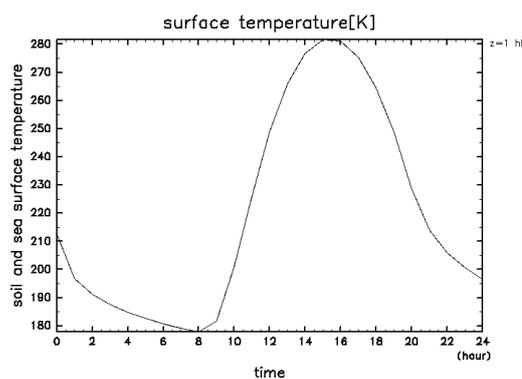


図 3.67: CReSS-Mars の計算で得られた地表温度

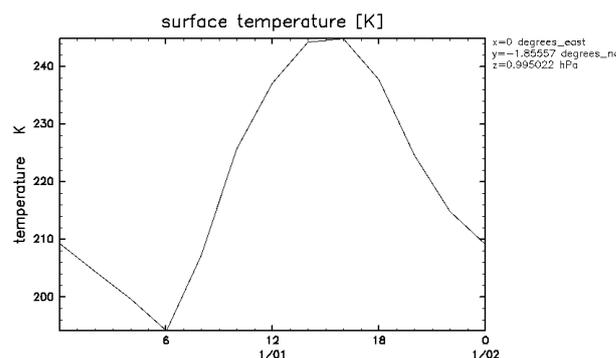


図 3.68: 境界条件の地表温度

第4章 地表で吹く風

4.1 地表の瞬間風速

図 4.1～図 4.63 は地表の瞬間風速である。

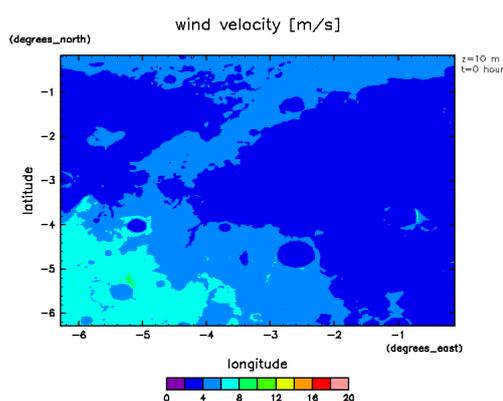


図 4.1: 1月0日 22時

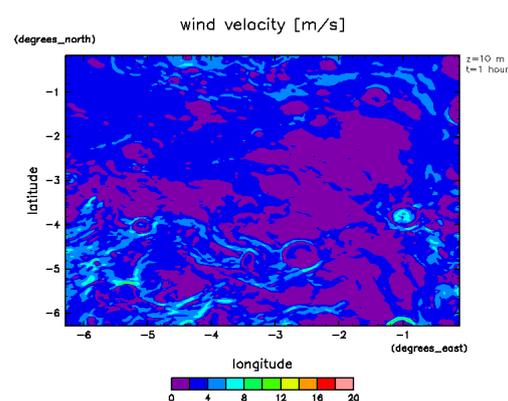


図 4.2: 1月0日 23時

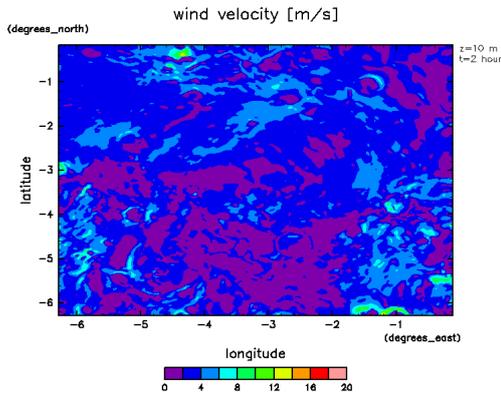


図 4.3: 1月1日0時

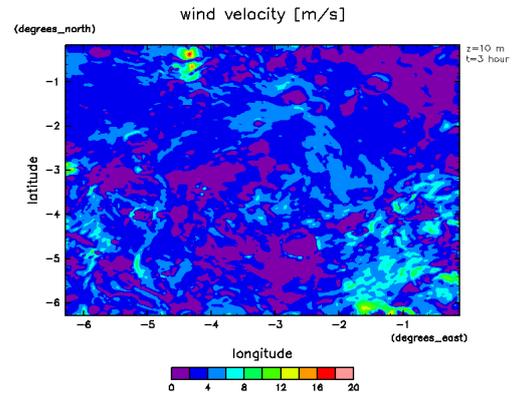


図 4.4: 1月1日1時

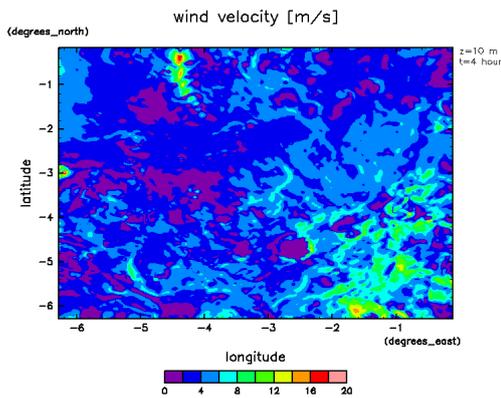


図 4.5: 1月1日2時

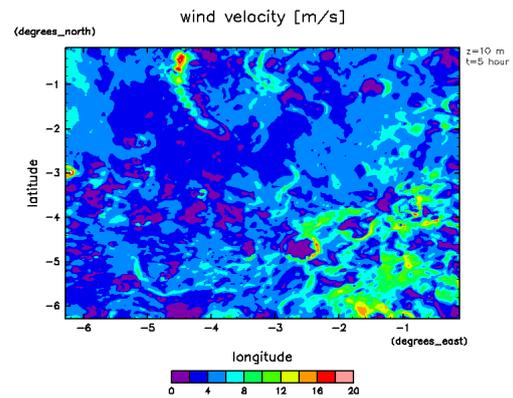


図 4.6: 1月1日3時

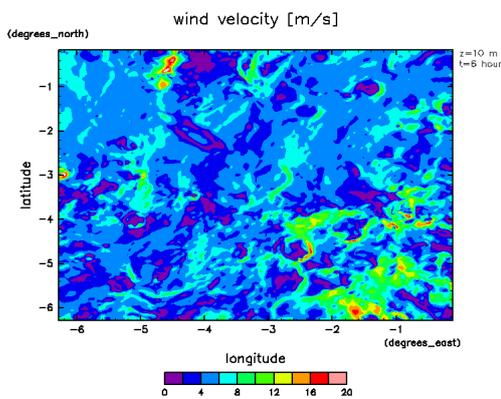


図 4.7: 1月1日4時

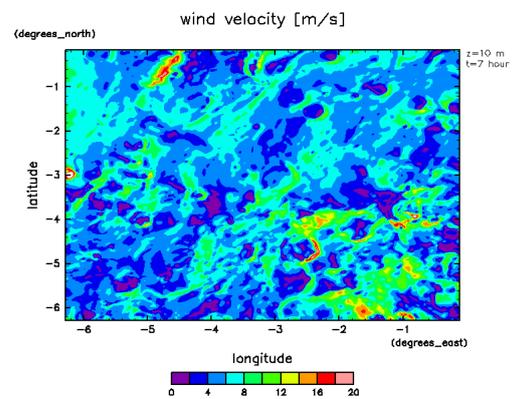


図 4.8: 1月1日5時

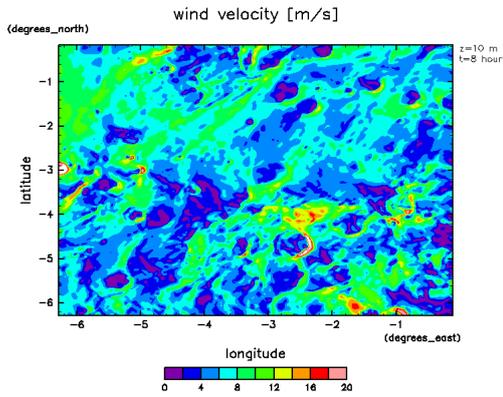


図 4.9: 1月1日6時

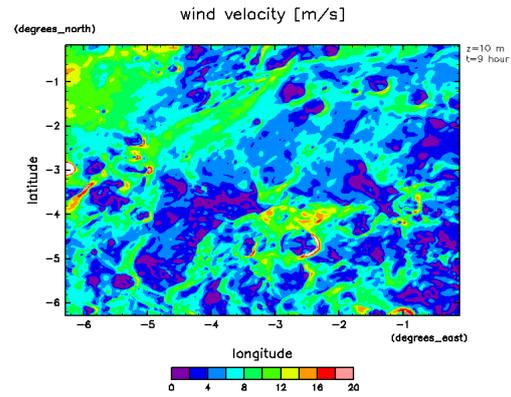


図 4.10: 1月1日7時

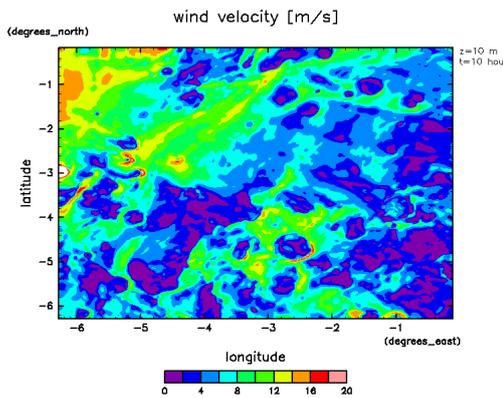


図 4.11: 1月1日8時

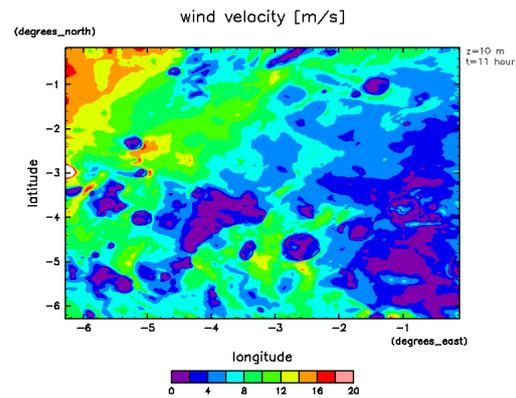


図 4.12: 1月1日9時

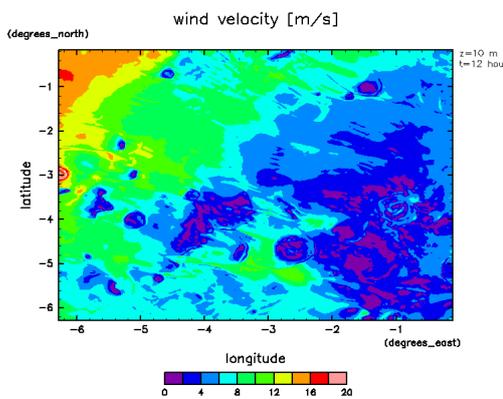


図 4.13: 1月1日10時

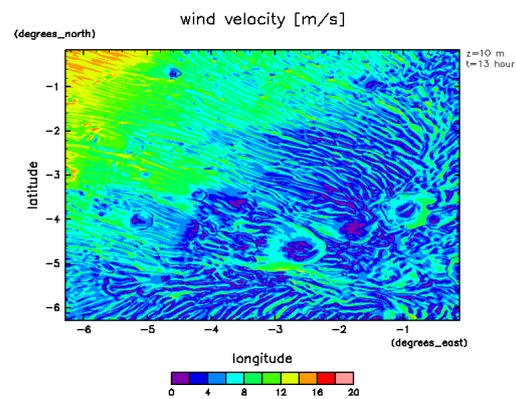


図 4.14: 1月1日11時

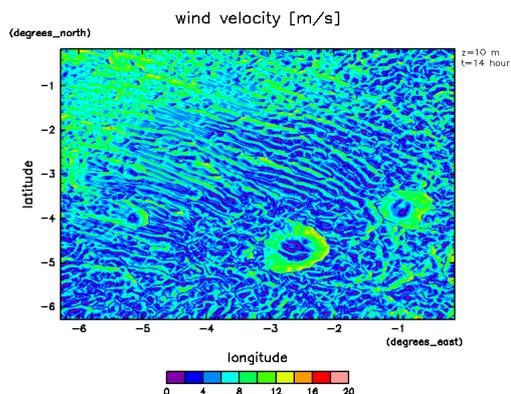


図 4.15: 1月1日12時

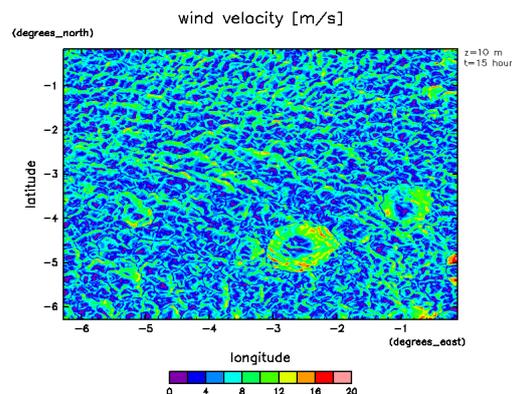


図 4.16: 1月1日13時

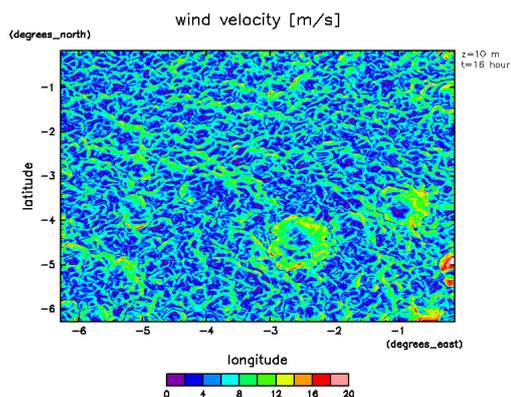


図 4.17: 1月1日14時

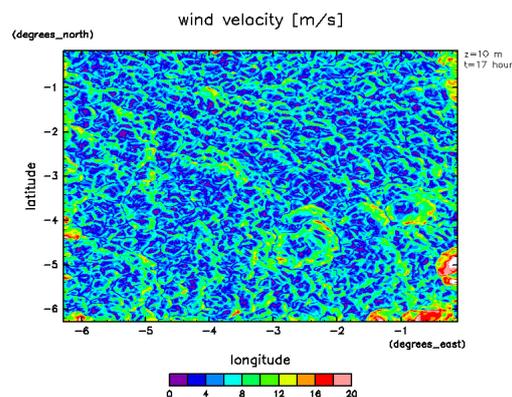


図 4.18: 1月1日15時

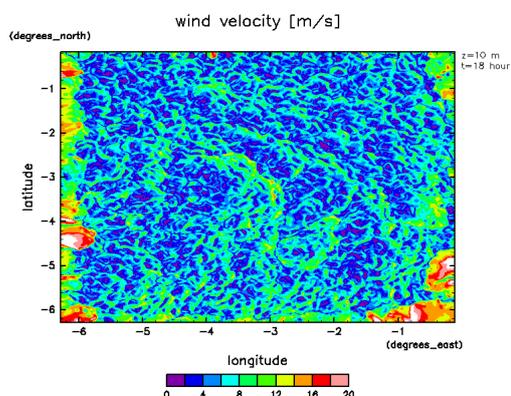


図 4.19: 1月1日16時

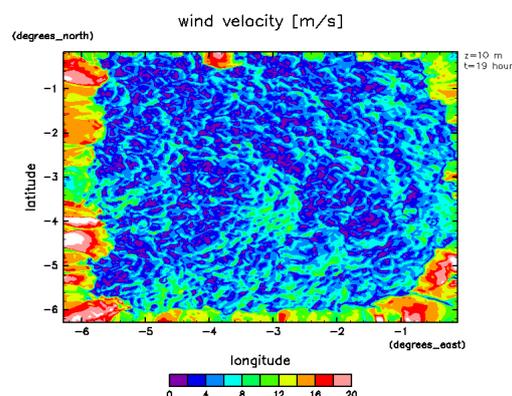


図 4.20: 1月1日17時

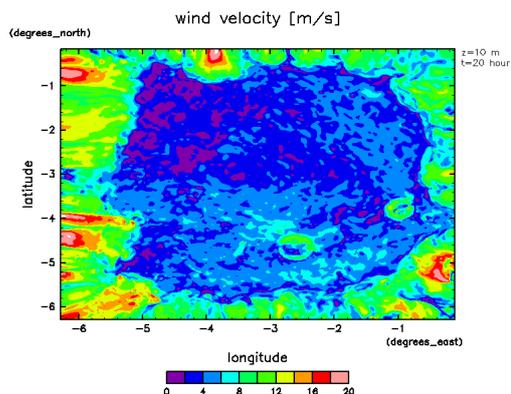


図 4.21: 1月1日 18時

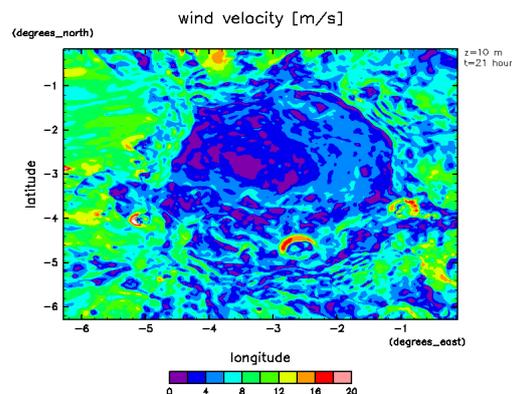


図 4.22: 1月1日 19時

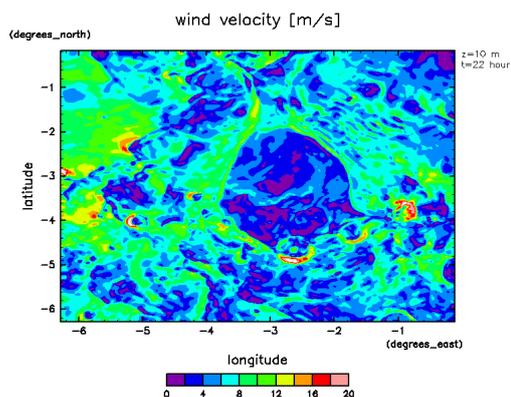


図 4.23: 1月1日 20時

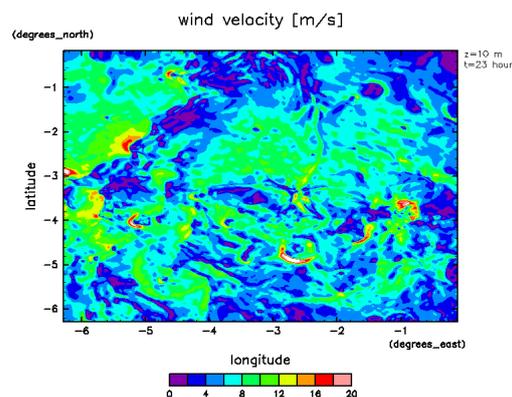


図 4.24: 1月1日 21時

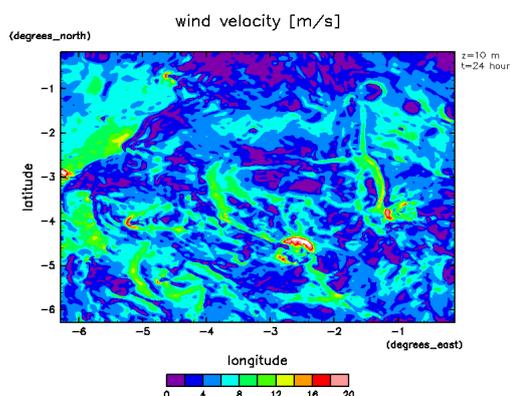


図 4.25: 1月1日 22時

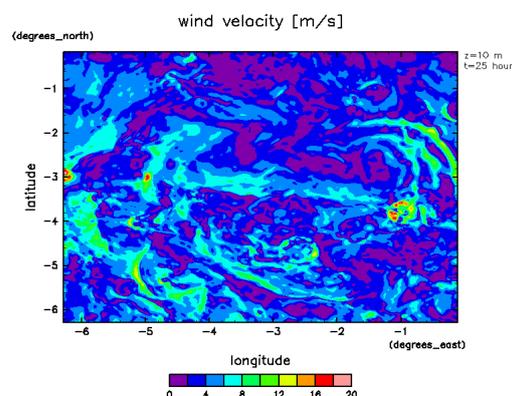


図 4.26: 1月1日 23時

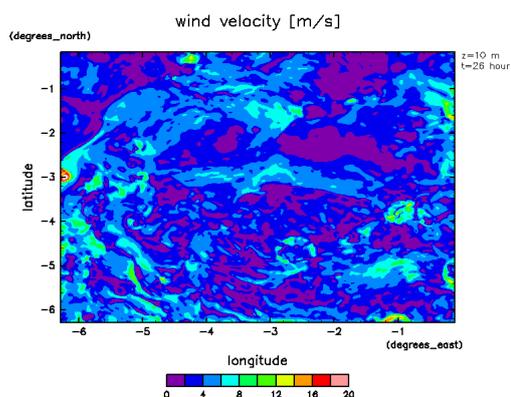


図 4.27: 1月2日0時

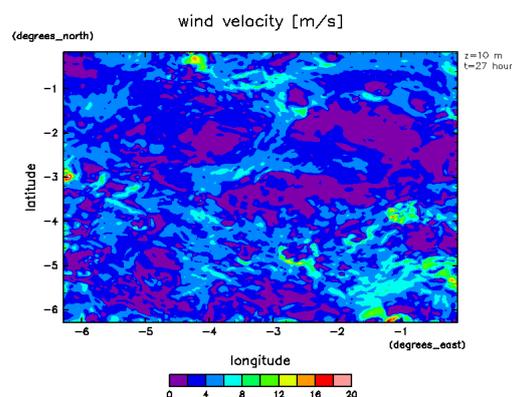


図 4.28: 1月2日1時

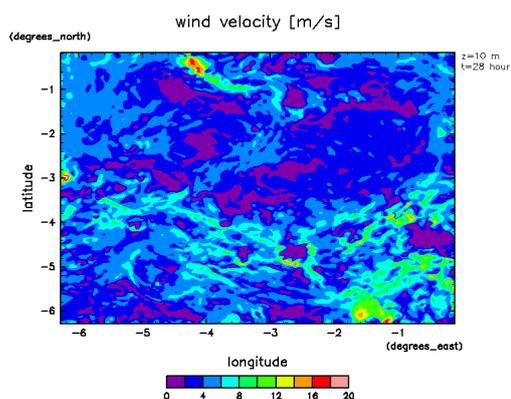


図 4.29: 1月2日2時

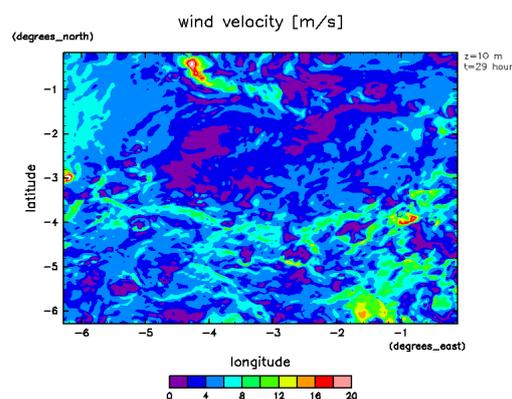


図 4.30: 1月2日3時

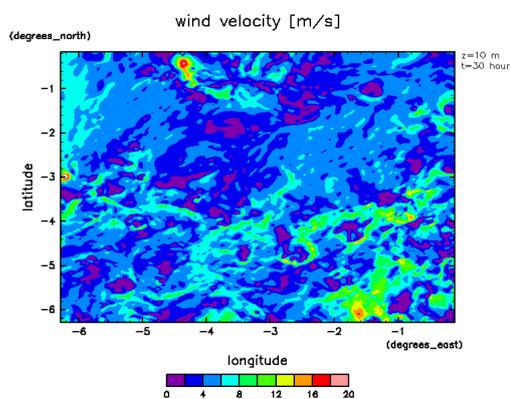


図 4.31: 1月2日4時

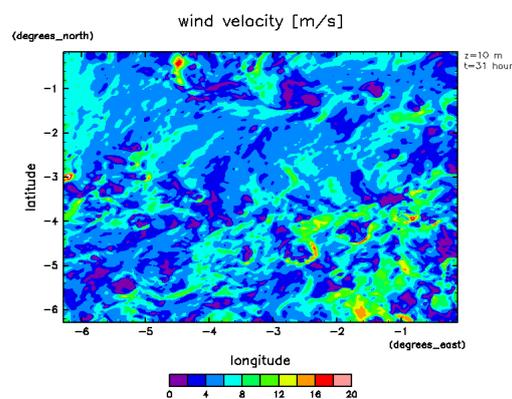


図 4.32: 1月2日5時

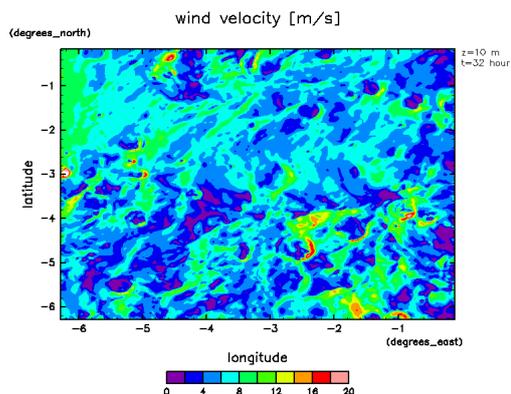


図 4.33: 1月2日6時

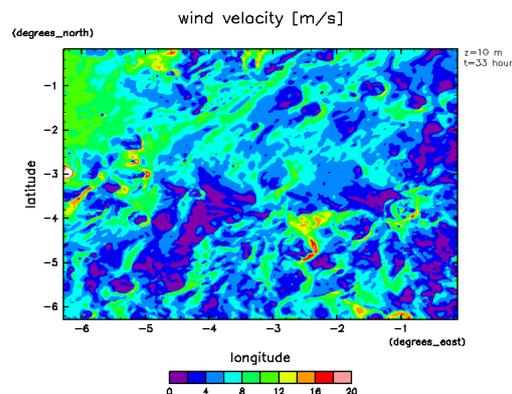


図 4.34: 1月2日7時

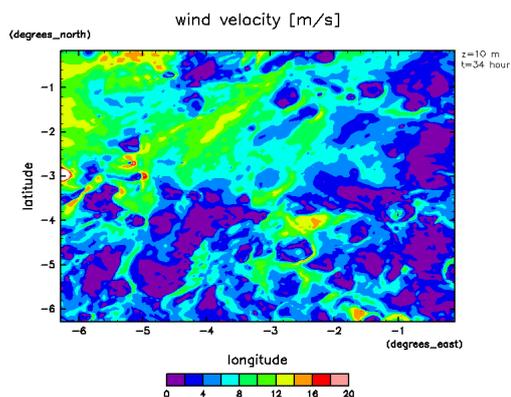


図 4.35: 1月2日8時

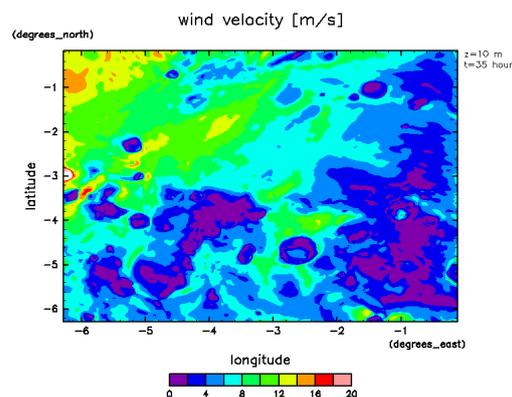


図 4.36: 1月2日9時

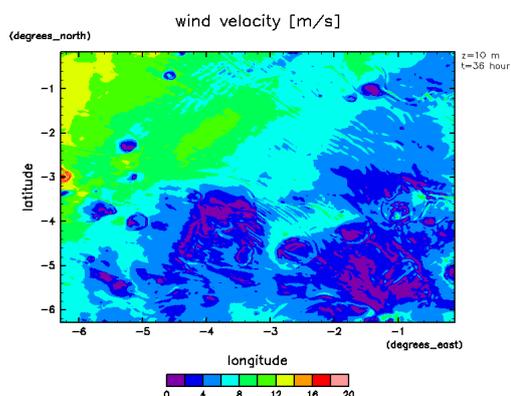


図 4.37: 1月2日10時

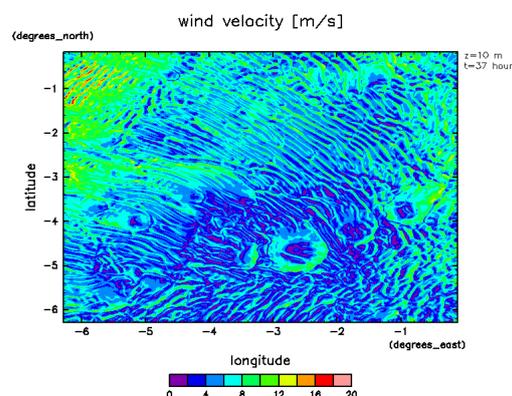


図 4.38: 1月2日11時

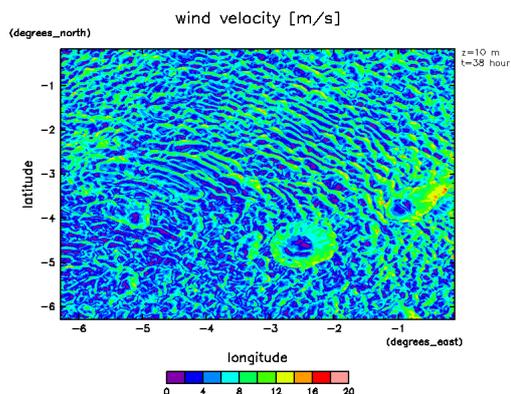


図 4.39: 1月2日 12時

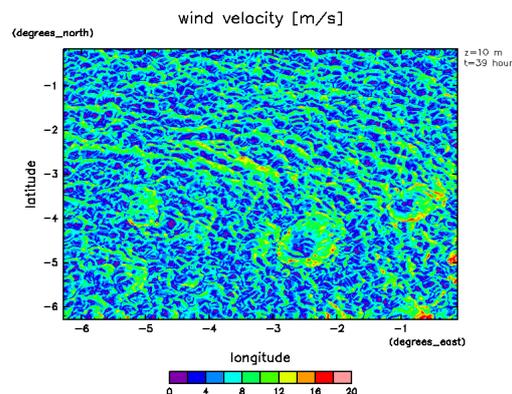


図 4.40: 1月2日 13時

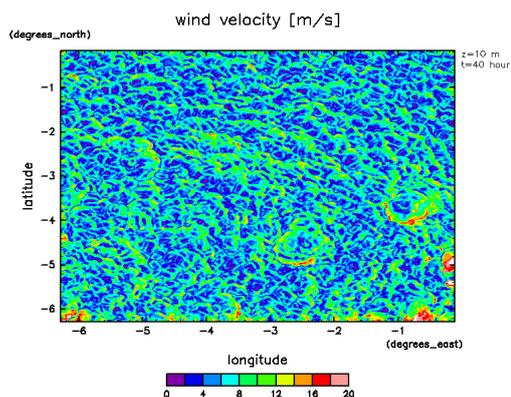


図 4.41: 1月2日 14時

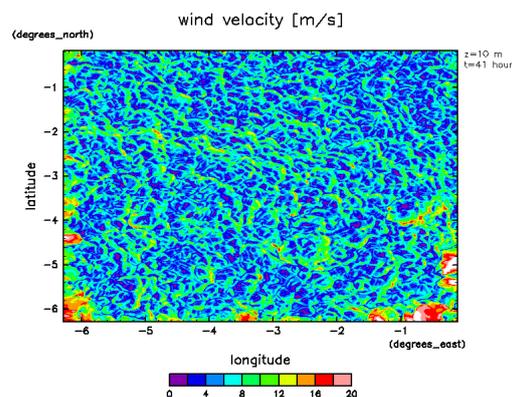


図 4.42: 1月2日 15時

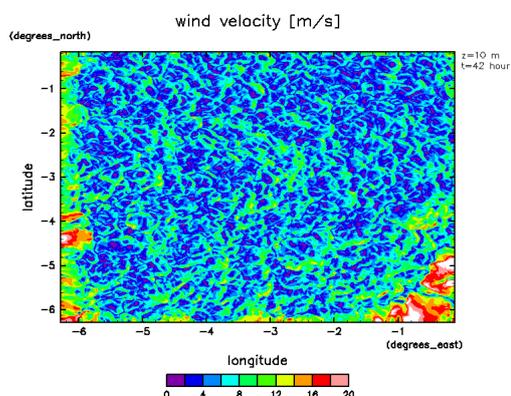


図 4.43: 1月2日 16時

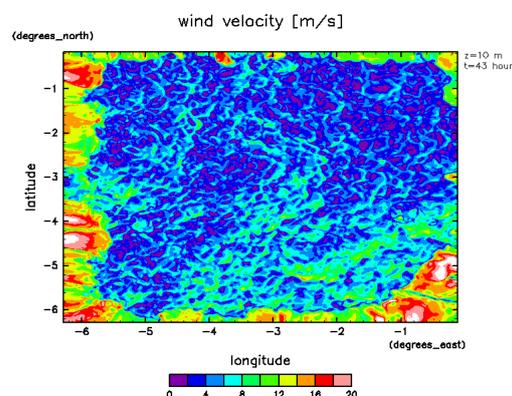


図 4.44: 1月2日 17時

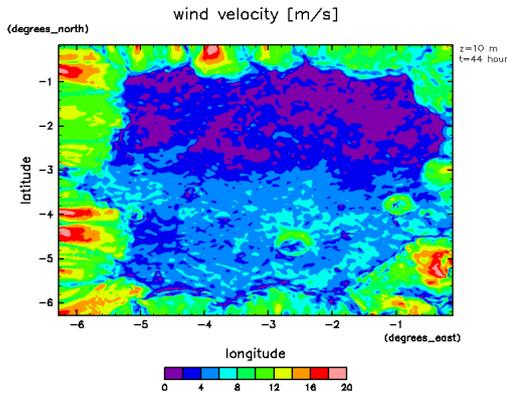


図 4.45: 1月2日 18時

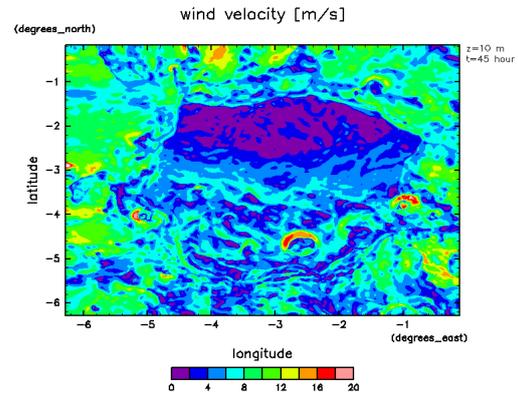


図 4.46: 1月2日 19時

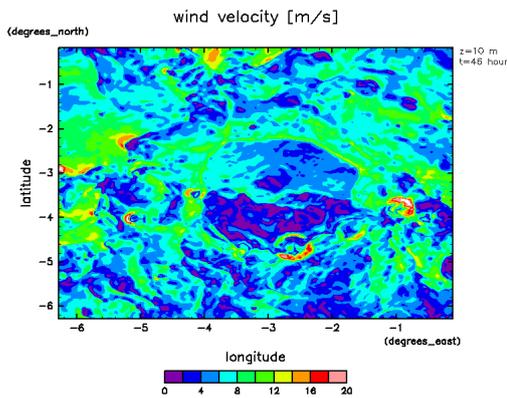


図 4.47: 1月2日 20時

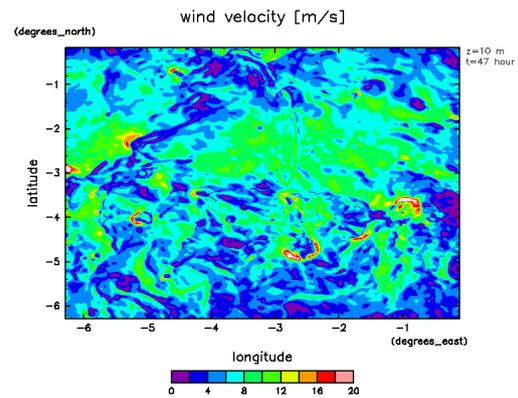


図 4.48: 1月2日 21時

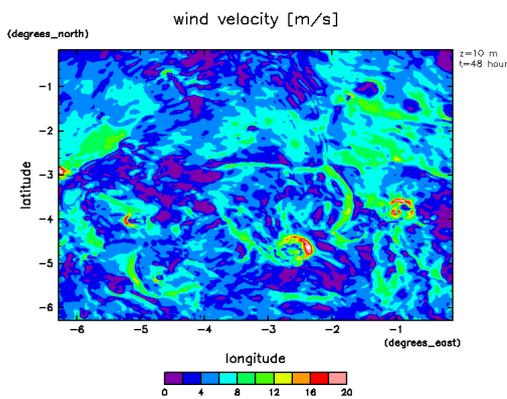


図 4.49: 1月2日 22時

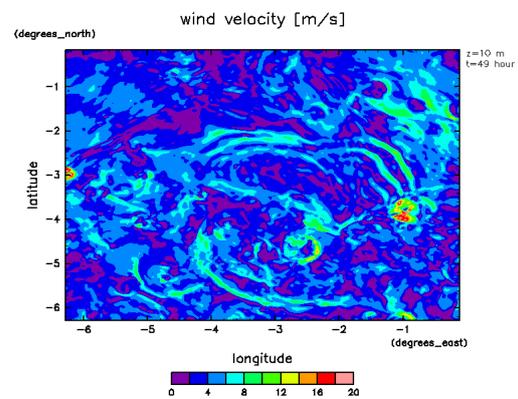


図 4.50: 1月2日 23時

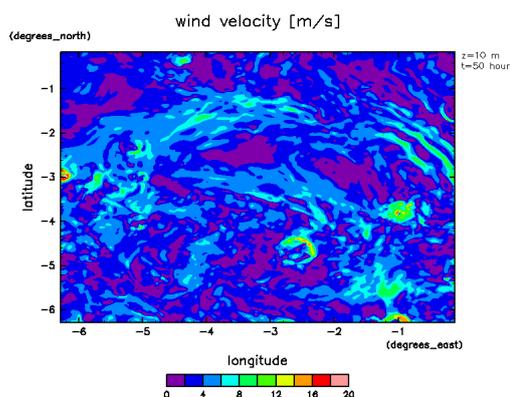


図 4.51: 1月3日0時

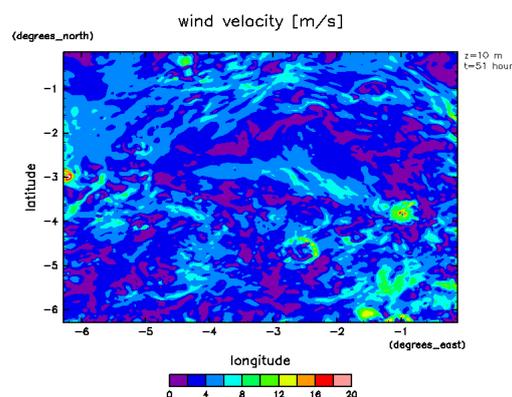


図 4.52: 1月3日1時

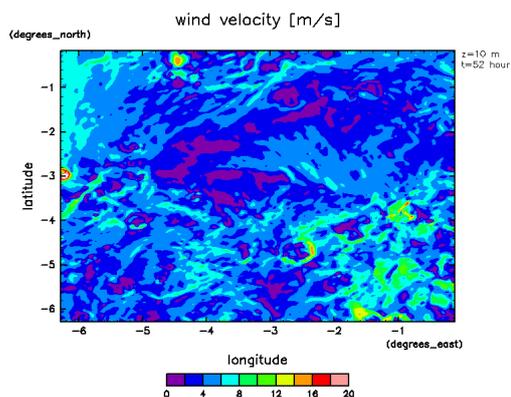


図 4.53: 1月3日2時

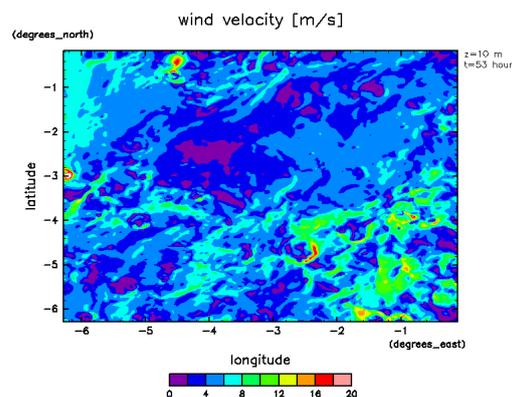


図 4.54: 1月3日3時

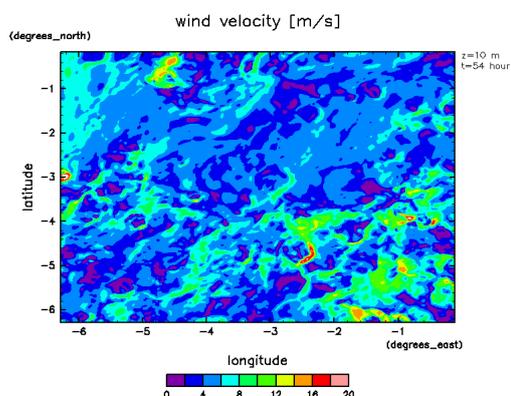


図 4.55: 1月3日4時

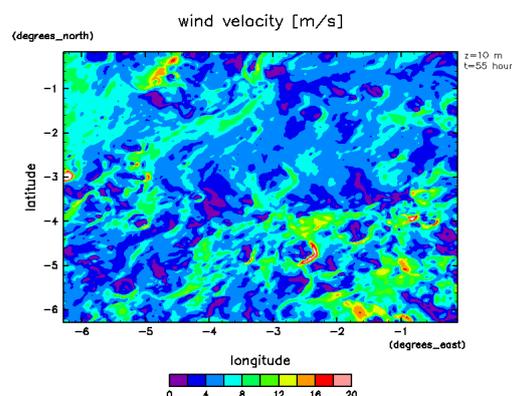


図 4.56: 1月3日5時

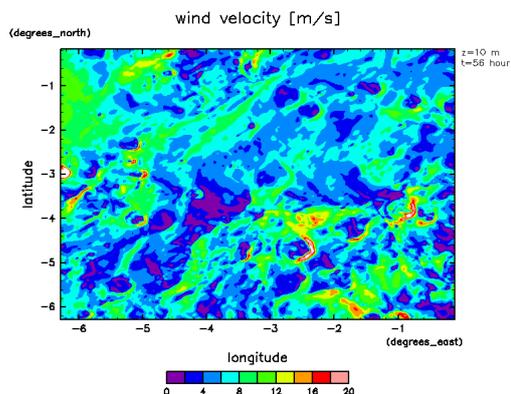


図 4.57: 1月3日6時

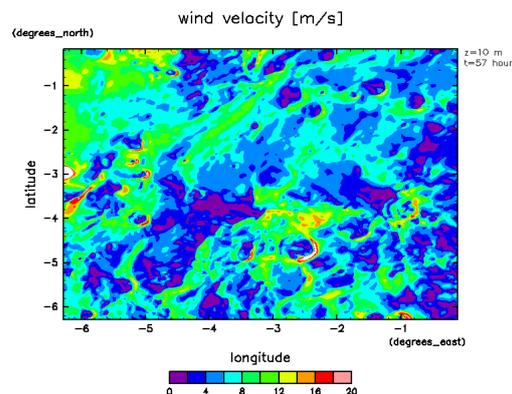


図 4.58: 1月3日7時

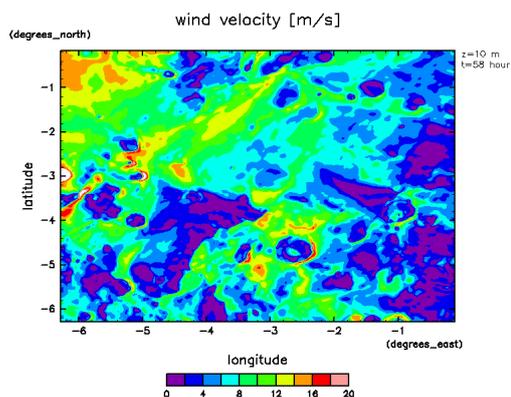


図 4.59: 1月3日8時

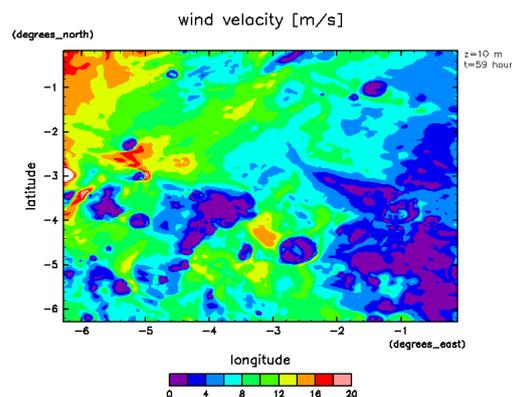


図 4.60: 1月3日9時

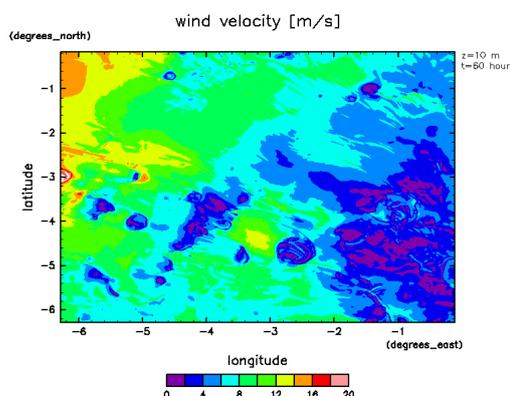


図 4.61: 1月3日10時

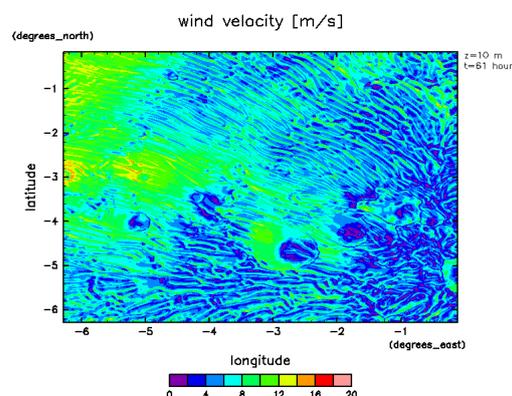


図 4.62: 1月3日11時

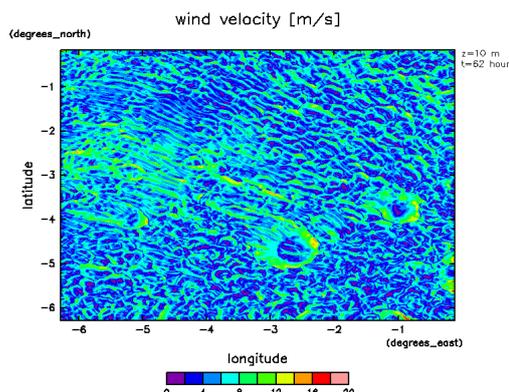


図 4.63: 1月3日12時

4.1.1 風速と地形

緯度 4.5°S 、経度 2.5°W のクレーター付近で、 $\sim 20\text{m/s}$ の風が吹いていることが見つかった。例えば、約2日半の計算期間に午前7時は3回あったが、その3回とも、このクレーターの東側に $\sim 20\text{m/s}$ の風が出現した。この強風はたまたま現れたものではなく、定常的に出現するものであると推測される。地形に起因すると思われる強風については、さらなる解析が必要である。

4.1.2 風速の空間分布

12時～17時(図4.15～図4.20, 図4.39～図4.44, 図4.63)の風速は、鱗状の特徴的な空間分布を示す。太陽放射加熱によって引き起こされた対流が、このような特徴的な風速の空間分布をつくっていると推測される。

17時～20時(図4.20～図4.23, 図4.44～図4.47)は, 計算領域の境界付近で～16m/sの強い風が吹いている. しかし, 境界条件として与えている大気大循環モデルでは, 17時～20時に特別に強い風は吹いていない(図4.64). CReSS-Marsの計算ではアナリシスナッジング(辻野, 2016)を使用して領域全体をナッジングしているので, 境界付近に強い風が出現することは説明がつかない. 計算設定に問題があるのかもしれないが, 原因は特定できていない.

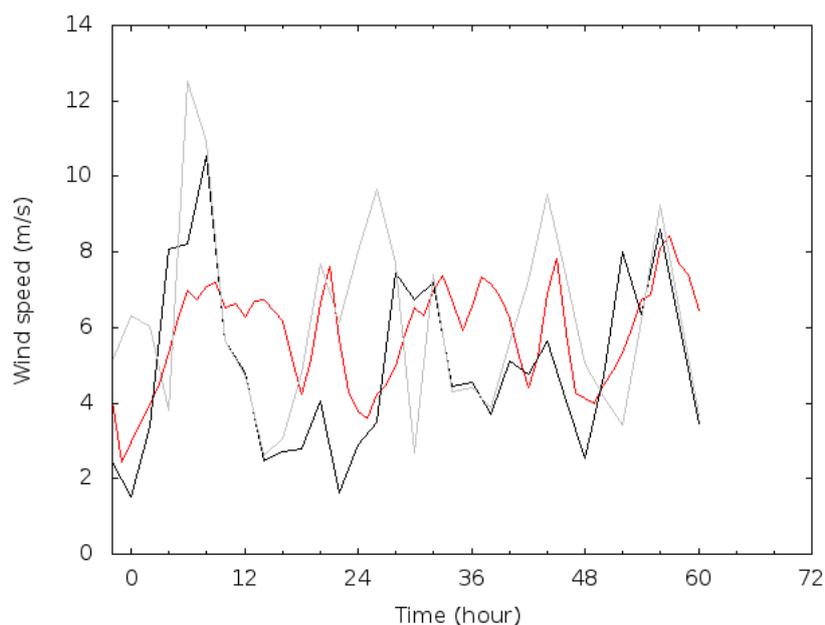


図 4.64: 風速の時間変化. 赤は CReSS-Mars が計算した領域を平均した風速, 黒と灰色は境界条件として与えた大気大循環モデルの大気最下層の風速とその一つ上の層の風速.

4.2 風速の頻度分布

各時刻について、格子点の風速から頻度分布を作成した (図 4.65～図 4.125) 青は CReSS-Mars のシミュレーション結果、赤はシミュレーション結果をワイブル分布にあてはめた結果である (節 4.2.1). 平均風速が速くなったり遅くなったりしているだけでなく、分布の幅も広がったり狭くなったりしている。シミュレーションをおこなった 62 時間において、領域の平均風速は速くても 10m/s に届いていないが、分布に幅があるため平均風速よりかなり速い風が局所的に表れている。ダスト巻き上げを評価するときには、平均風速だけでなく分布の広がりも考えることが重要である。

4.2.1 風速頻度分布の特徴

風速頻度分布の特徴を記述するため、CReSS-Mars のシミュレーションで得られた風速の頻度分布をワイブル分布にあてはめた。ワイブル分布は以下の式で表される。

$$f(x) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right) \quad (4.1)$$

分布の形を決めるパラメタは k と c の 2 つ。 k は形状パラメタ、 c はスケール風速である。スケール風速 c はおおよそ平均風速に対応する。 k は分布の広がり方で、 k の値が大きくなると分布の幅は狭くなる。計算領域の境界が結果に影響している可能性を考え、東西南北の境界から 100 グリッド以上離れた内側の部分だけを解析に使用した。

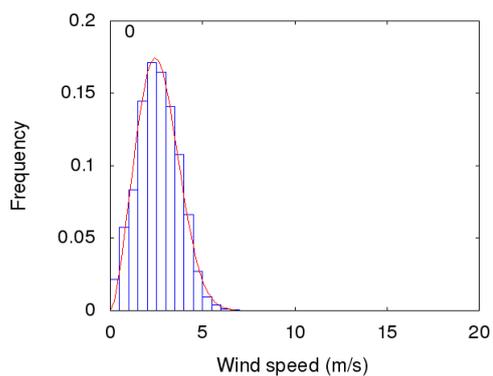


図 4.65: 1 日目 0 時

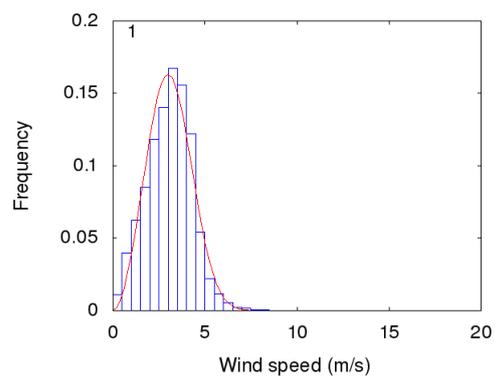


図 4.66: 1 日目 1 時

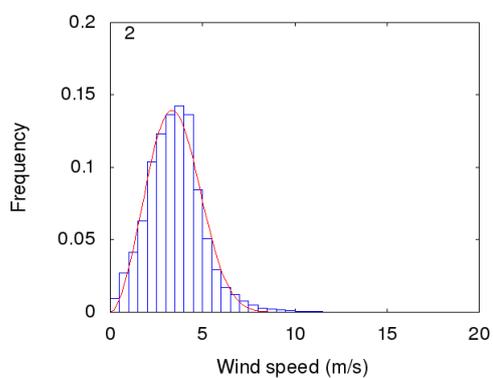


図 4.67: 1 日目 2 時

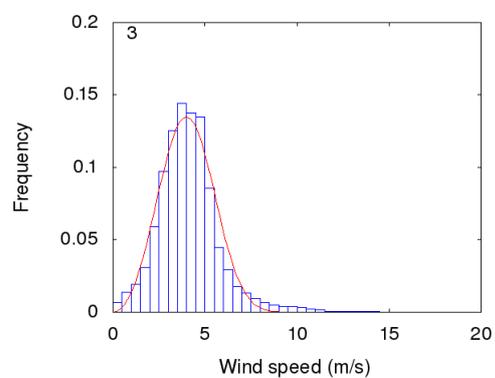


図 4.68: 1 日目 3 時

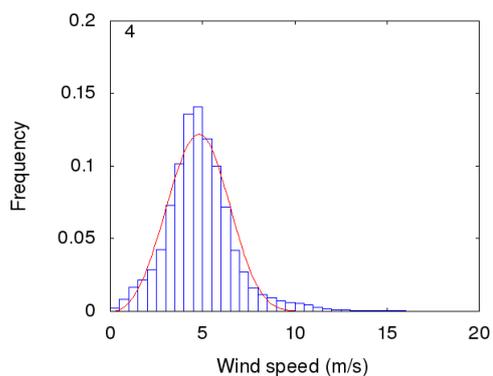


図 4.69: 1 日目 4 時

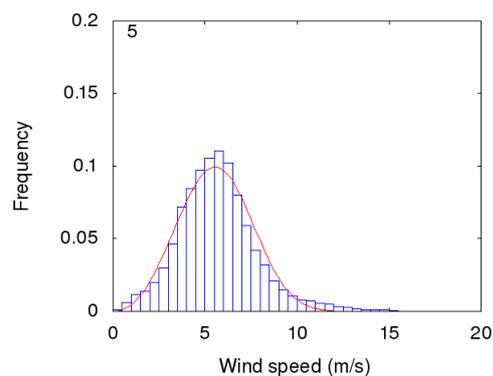


図 4.70: 1 日目 5 時

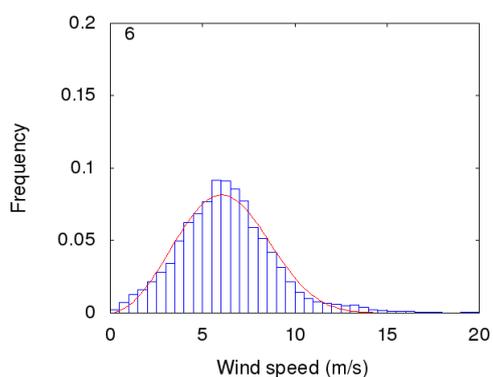


図 4.71: 1 日目 6 時

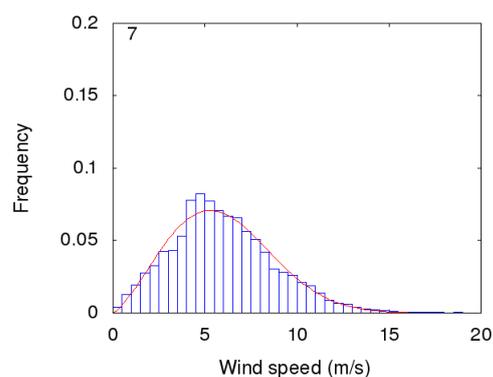


図 4.72: 1 日目 7 時

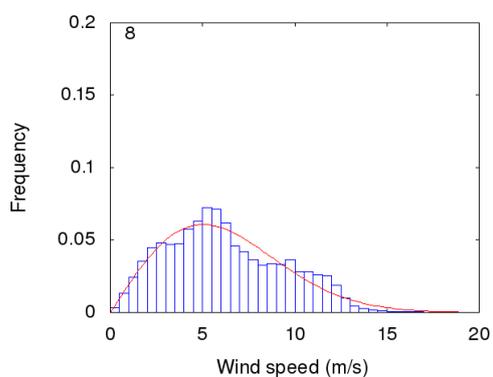


図 4.73: 1 日目 8 時

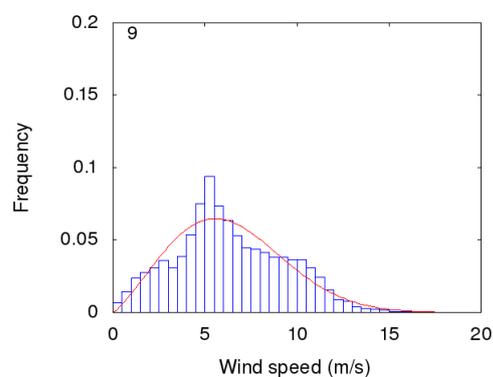


図 4.74: 1 日目 9 時

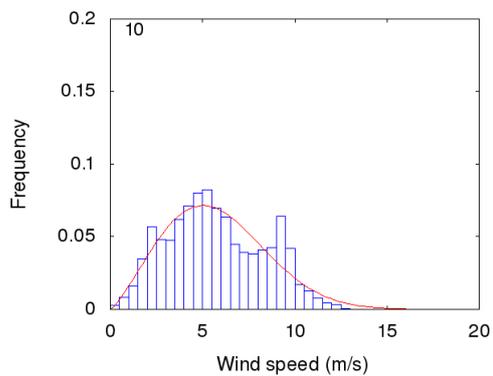


図 4.75: 1 日目 10 時

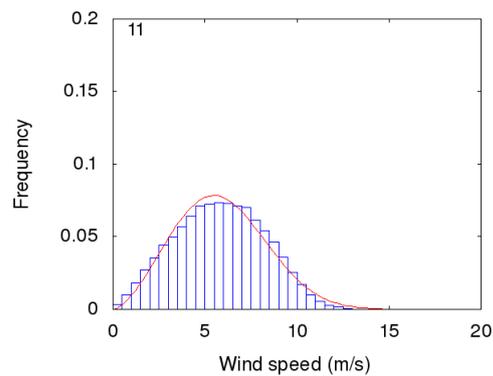


図 4.76: 1 日目 11 時

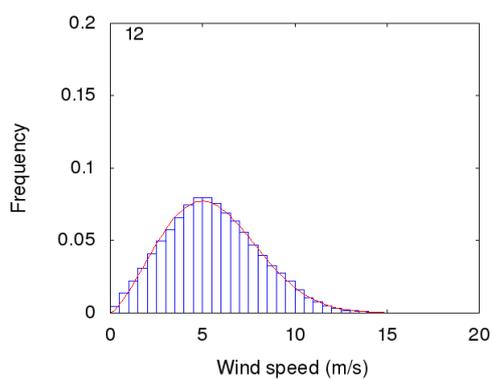


図 4.77: 1 日目 12 時

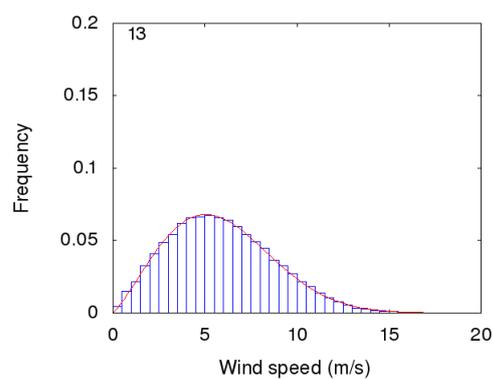


図 4.78: 1 日目 13 時

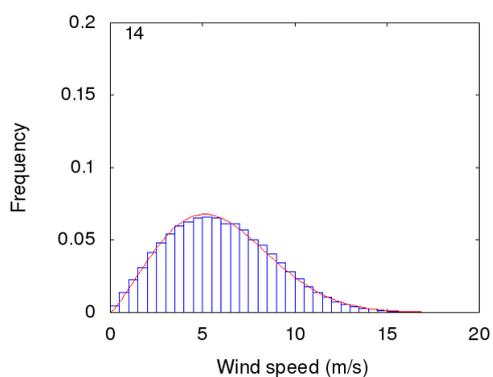


図 4.79: 1 日目 14 時

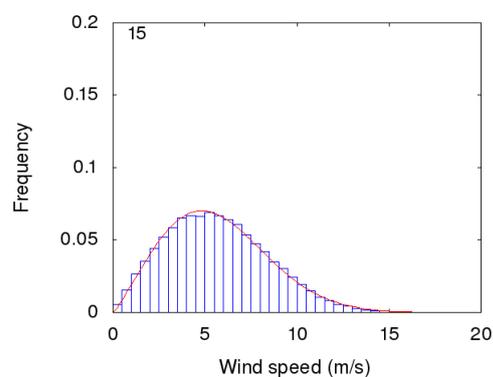


図 4.80: 1 日目 15 時

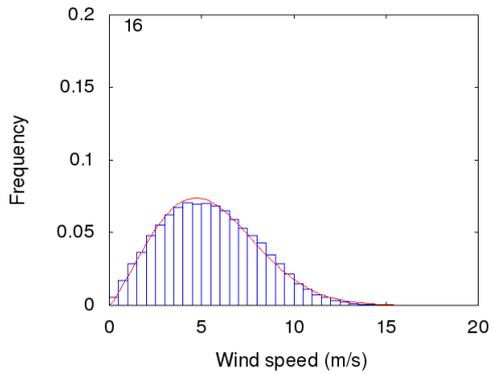


図 4.81: 1 日目 16 時

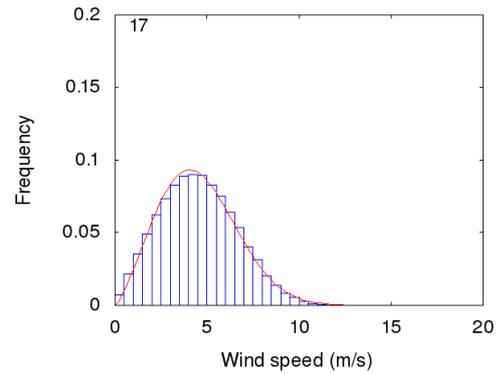


図 4.82: 1 日目 17 時

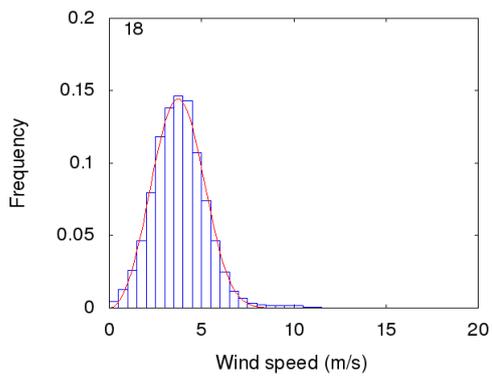


図 4.83: 1 日目 18 時

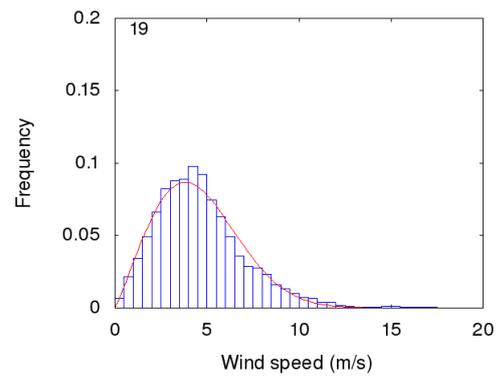


図 4.84: 1 日目 19 時

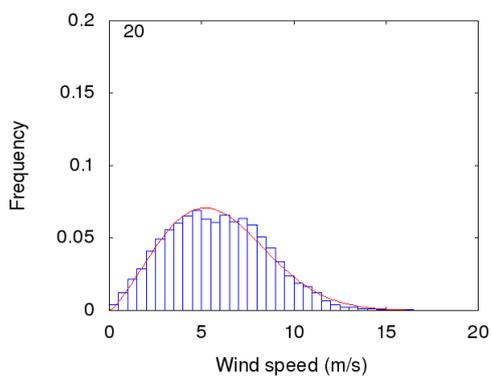


図 4.85: 1 日目 20 時

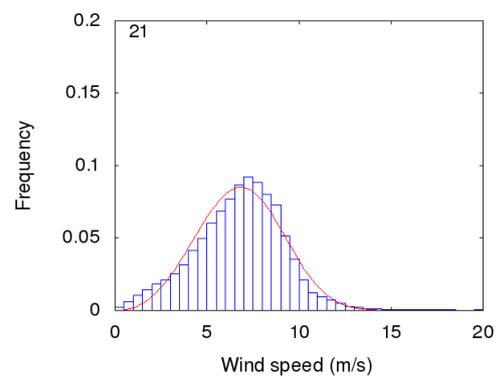


図 4.86: 1 日目 21 時

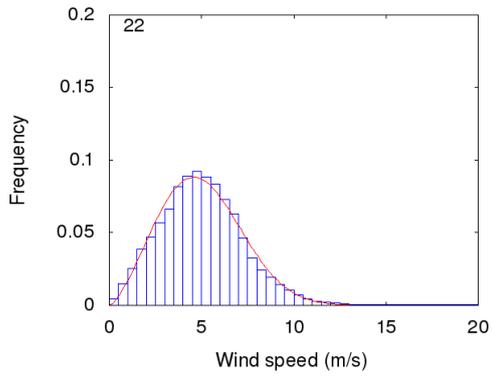


図 4.87: 1 日目 22 時

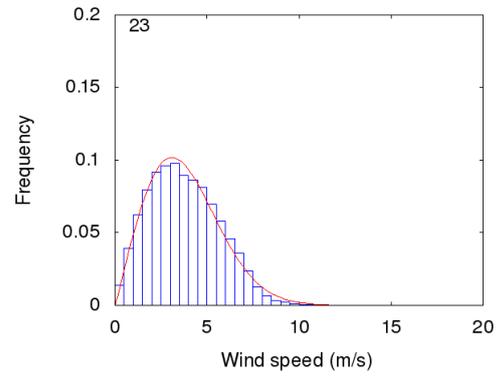


図 4.88: 1 日目 23 時

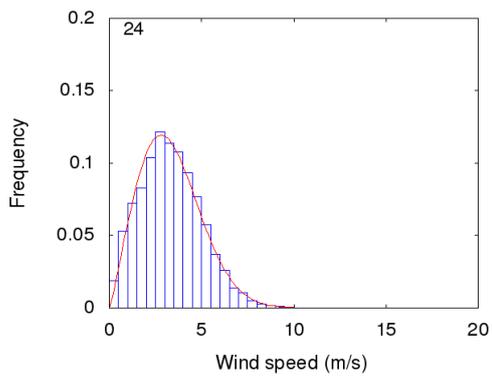


図 4.89: 2 日目 0 時

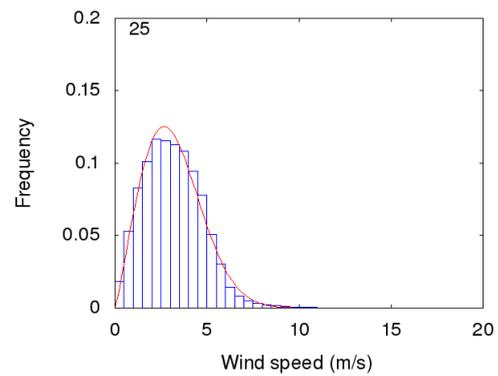


図 4.90: 2 日目 1 時

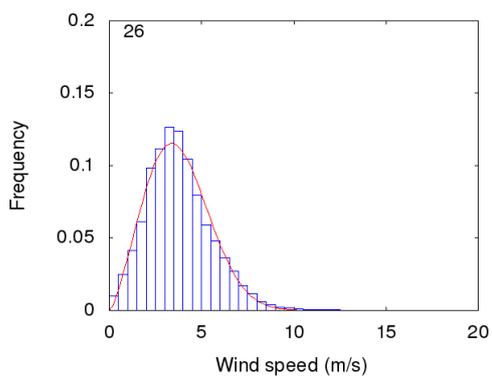


図 4.91: 2 日目 2 時

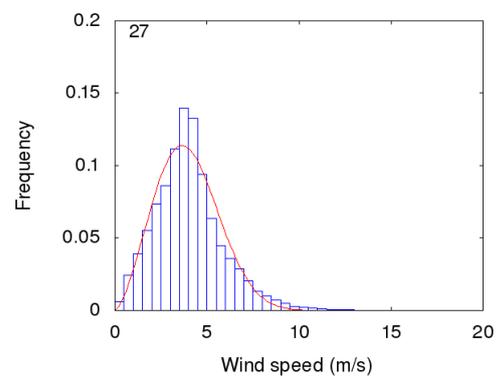


図 4.92: 2 日目 3 時

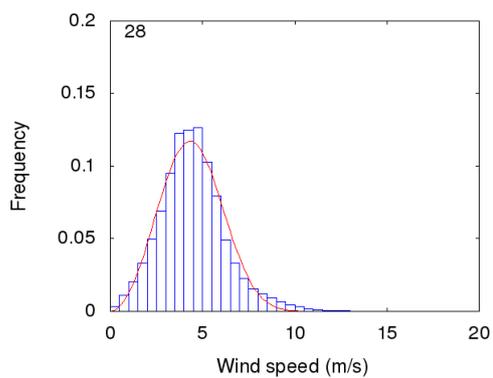


図 4.93: 2 日目 4 時

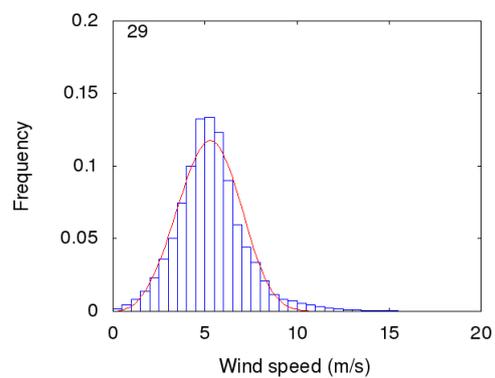


図 4.94: 2 日目 5 時

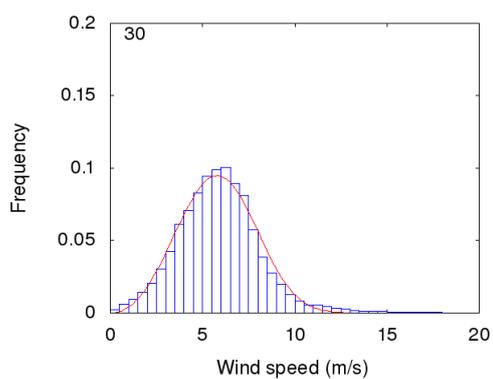


図 4.95: 2 日目 6 時

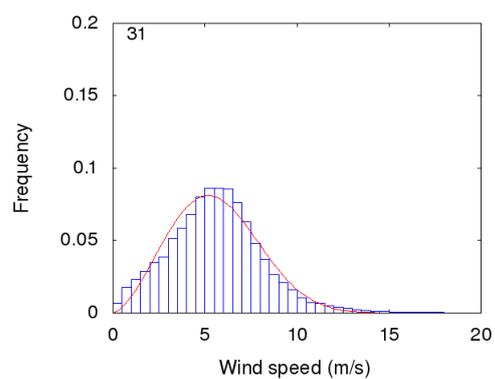


図 4.96: 2 日目 7 時

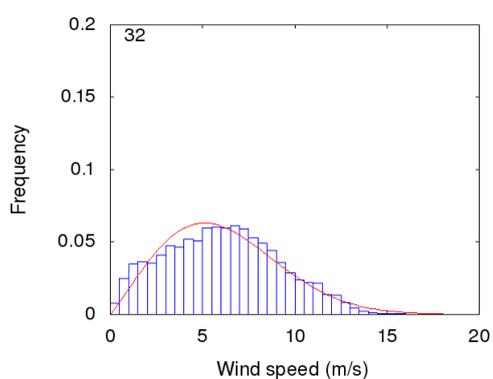


図 4.97: 2 日目 8 時

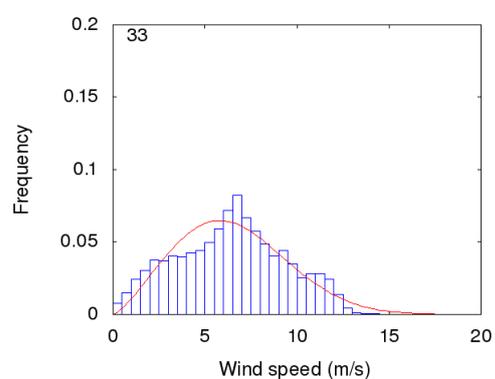


図 4.98: 2 日目 9 時

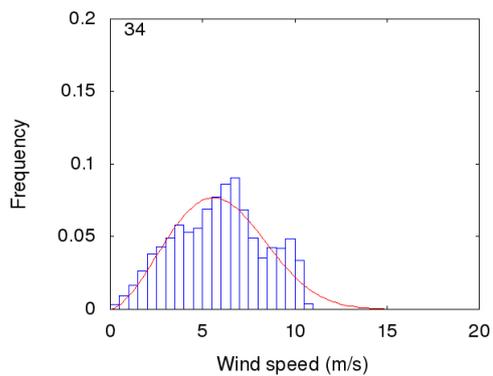


図 4.99: 2 日目 10 時

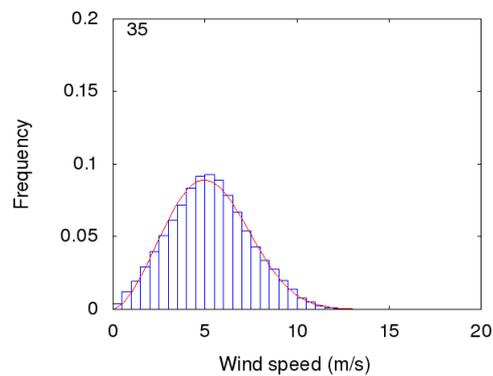


図 4.100: 2 日目 11 時

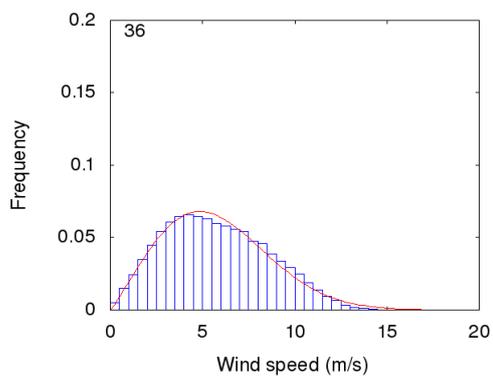


図 4.101: 2 日目 12 時

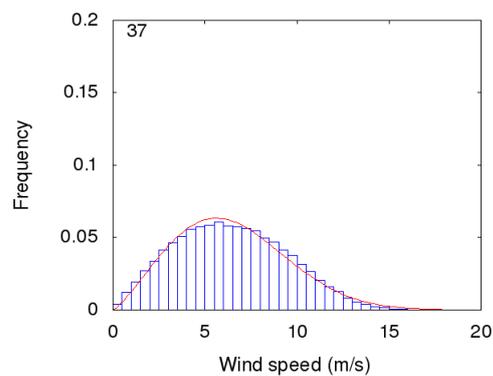


図 4.102: 2 日目 13 時

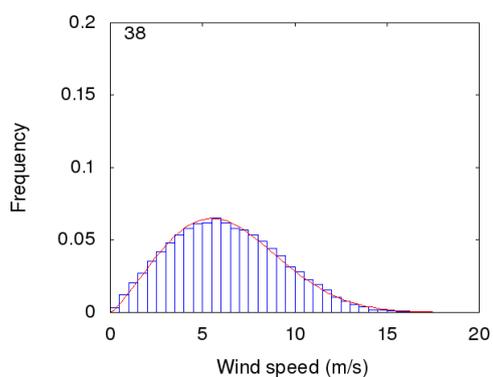


図 4.103: 2 日目 14 時

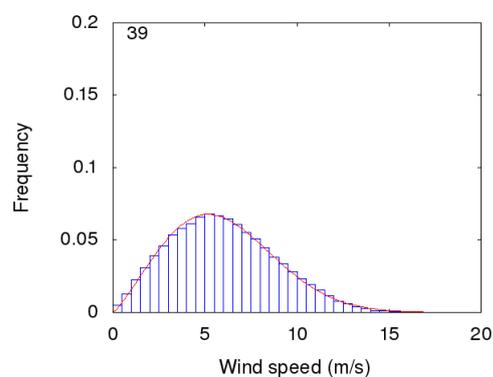


図 4.104: 2 日目 15 時

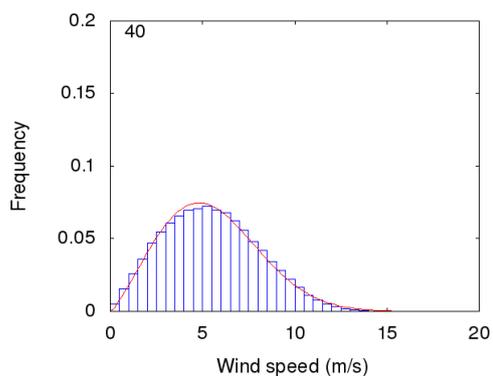


図 4.105: 2 日目 16 時

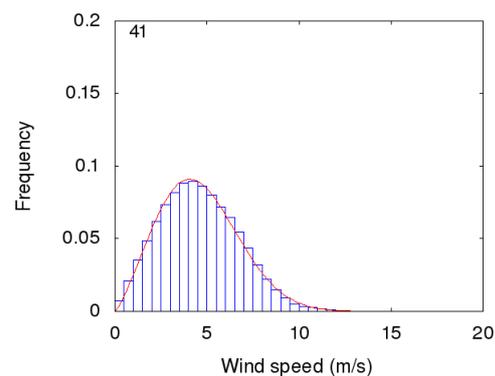


図 4.106: 2 日目 17 時

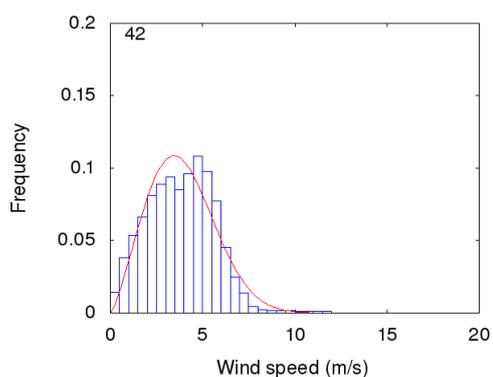


図 4.107: 2 日目 18 時

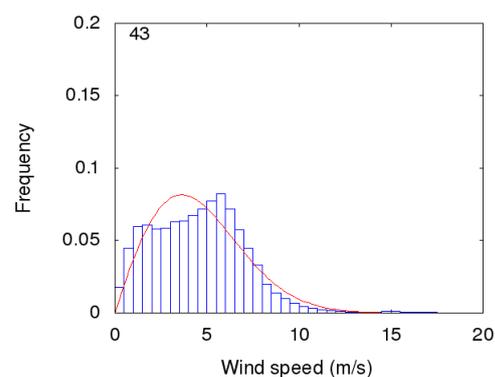


図 4.108: 2 日目 19 時

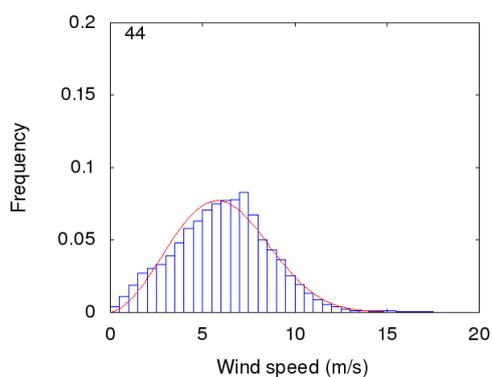


図 4.109: 2 日目 20 時

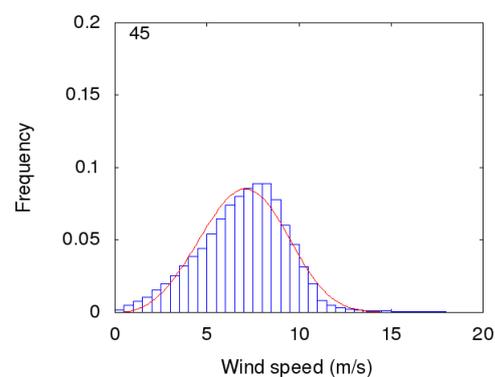


図 4.110: 2 日目 21 時

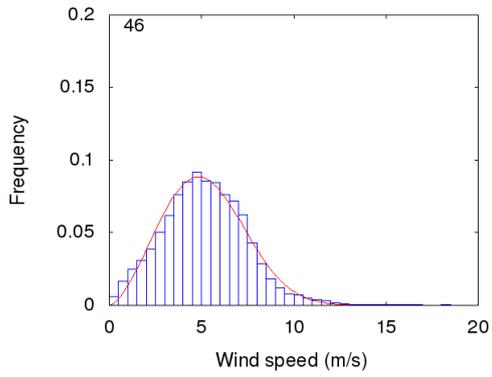


図 4.111: 2 日目 22 時

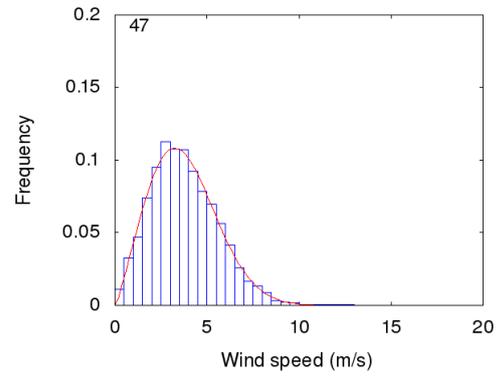


図 4.112: 2 日目 23 時

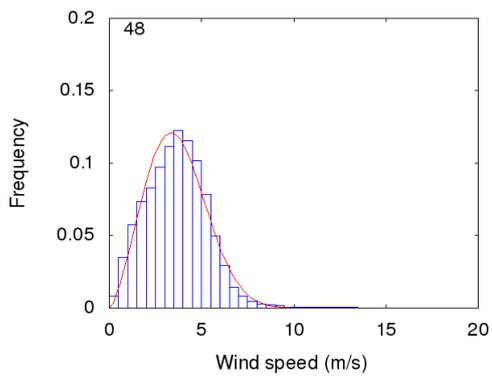


図 4.113: 3 日目 0 時

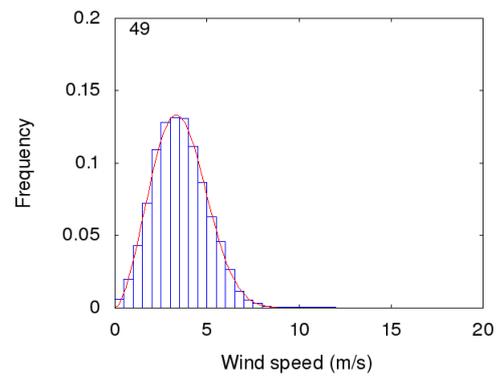


図 4.114: 3 日目 1 時

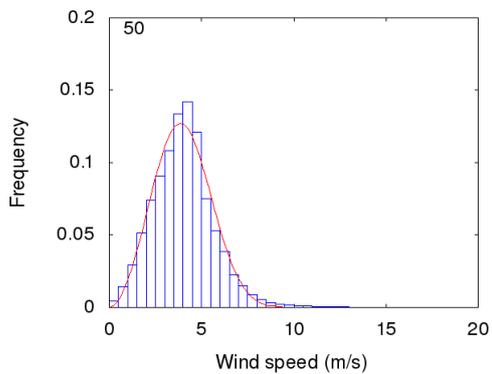


図 4.115: 3 日目 2 時

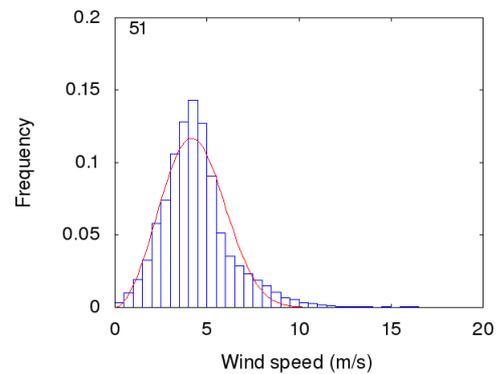


図 4.116: 3 日目 3 時

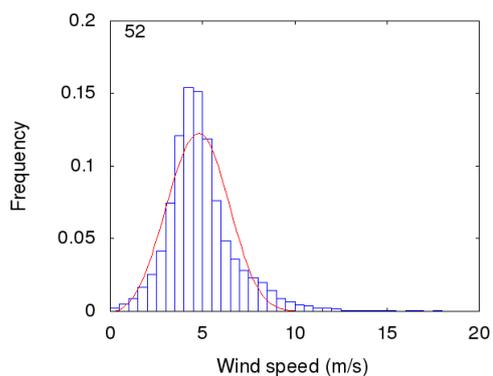


図 4.117: 3 日目 4 時

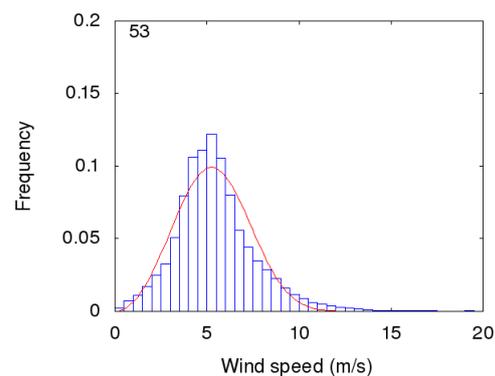


図 4.118: 3 日目 5 時

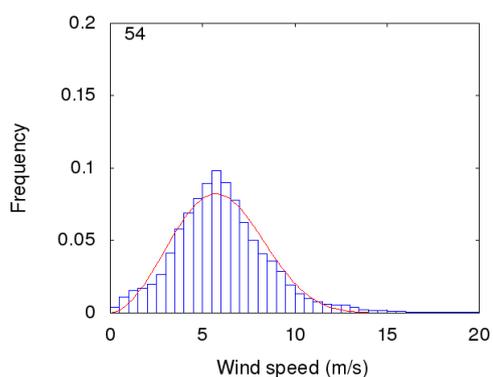


図 4.119: 3 日目 6 時

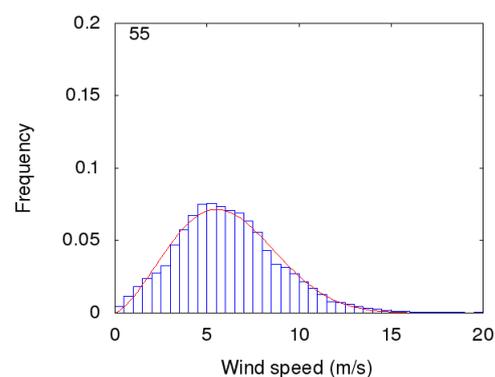


図 4.120: 3 日目 7 時

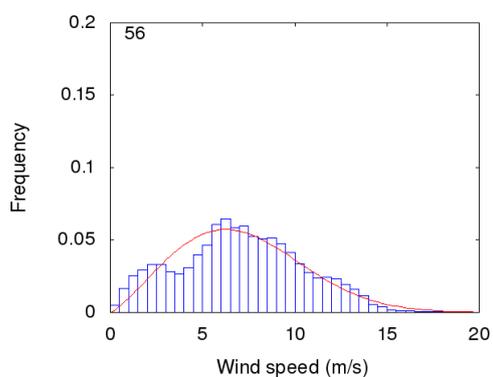


図 4.121: 3 日目 8 時

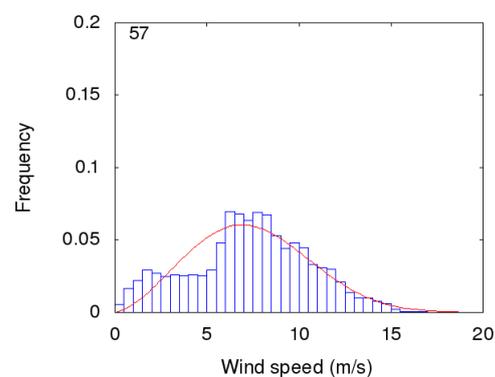


図 4.122: 3 日目 9 時

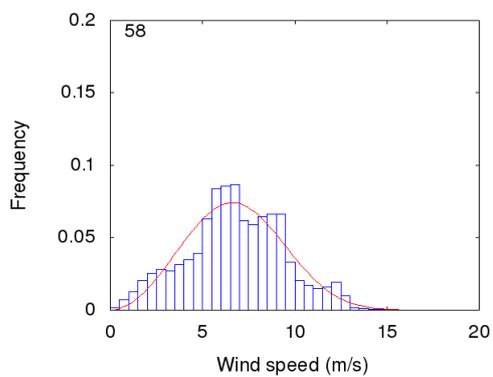


図 4.123: 3 日目 10 時

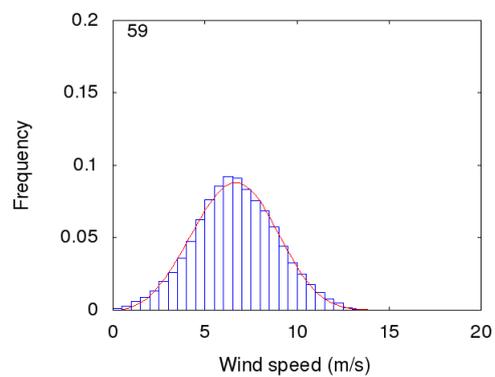


図 4.124: 3 日目 11 時

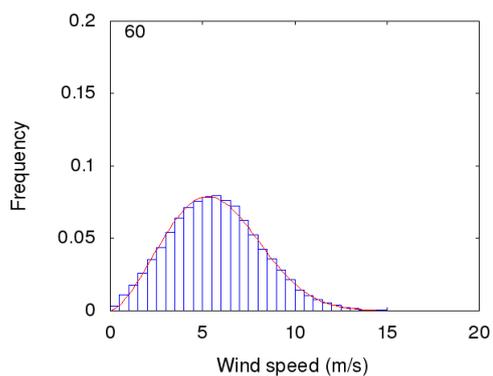


図 4.125: 3 日目 12 時

図 4.126～図 4.128 は、風速頻度分布をワイブル分布にあてはめた時の、スケール風速 c 、形状パラメタ k 、あてはめの残差、それぞれを地方時に対して描いたものである。どの図においても毎日同じような日変化をしており、火星の地表風速の頻度分布は太陽放射加熱による影響を強く受けて決まっていることが示唆される。

残差は、風速の頻度分布がどれくらいワイブル分布にあてはまるかを表わしている。時間によって、ワイブル分布がよくあてはまる時と、あまりよくあてはまらない時があることがわかる。例えば 15 時 (図 4.80, 図 4.104) はワイブル分布によくあてはまり、10 時 (図 4.75, 4.99, 図 4.123) はあまりあてはまらない。地球で観測される風速の時系列データの頻度分布はワイブル分布をしていることが知られており、また、火星についてもバイキング探査機が火星の地表に降りて測定した風速は、やはりワイブル分布をしていると言われている (Lorenz et al. 1996)。今回作成した頻度分布は時系列データから作成したものではないため、厳密には先行研究で議論されている頻度分布に対応しないが、風速の頻度分布はワイブル分布していない可能性も考えられる。先行研究 (例えば, Newman et al, 2002) では風速分布としてワイブル分布を仮定してダストの巻き上げ量を評価しているものもあるが、ワイブル分布以外の分布も考慮する必要があるのかもしれない。

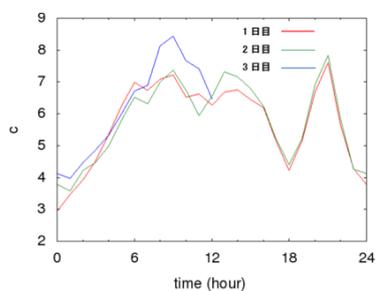


図 4.126: スケール風速

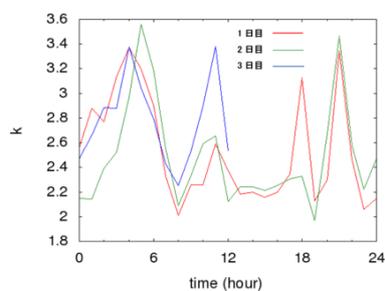


図 4.127: 形状パラメタ

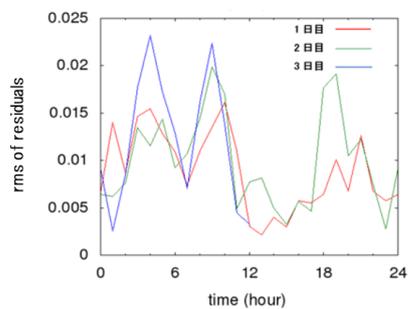


図 4.128: 残差

図 4.129～図 4.131 は、ワイブル分布のパラメタとあてはめの残差の関係を描いたものである。あてはめの残差、形状パラメタ、スケール風速、いずれの間にも明瞭な相関は見られない。すなわち、平均風速と分布の広がりにも相関はなく、平均風速や分布の広がりともワイブル分布が当てはまるかどうかの間にも相関はない。

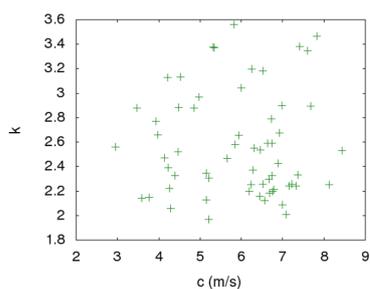


図 4.129: スケール風速と形状パラメタ

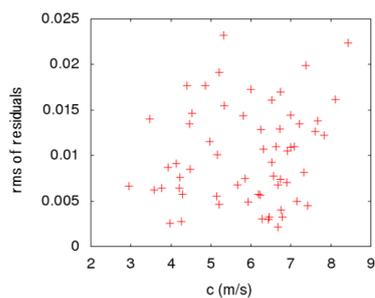


図 4.130: スケール風速とあてはめの残差

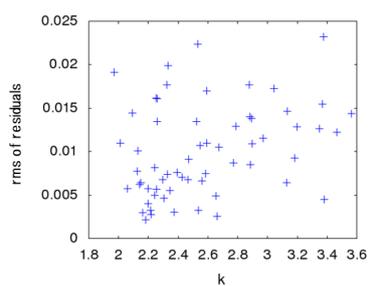


図 4.131: 形状パラメタと残差

第5章 考察

5.1 ダスト巻き上げ

今回解析した範囲において、ダストを巻き上げる風速 20m/s 以上の風はどの時刻を見てもほとんど出現しなかった。ダストを巻き上げる風が出現しなかった原因としては、(1) 積分時間が短くこの計算では強風が発生しなかった、(2) 強風が吹かない季節だった、(3) 強風が吹かない領域だった、(4) 計算の空間解像度が不足していた、などの可能性が考えられる。

第6章 まとめ

火星領域気象モデル CReSS-Mras を用いておこなった高解像度火星気象シミュレーションの結果を解析し、キロメートルスケールで吹く風について調べた。

本研究で、特定の場所で特定の時刻に強風が吹いていることが見つかった。この強風は微小な地形に起因しているものと推測される。こうした小さいスケールで吹く風がダストの巻き上げに大きな寄与をしている可能性が示唆され、強風の発生するメカニズムも含めてさらなる解析が必要である。

風速の頻度分布を作成し、地表で吹く風の特徴を調べた。今回調べた範囲において、風はきれいに日変化しており、地表の風速は太陽放射加熱によって支配されている可能性が示唆された。頻度分布はワイブル分布をする時と、ワイブル分布にならない時があった。また、平均風速と分布の広がりの中に相関は見られず、平均風速とワイブル分布するかどうかの間にも関係は見られなかった。風速分布をどのように表わすべきであるのかについては、さらなる検討が必要である。

今回解析した範囲において、ダストを巻き上げる速い風はほとんど出現しなかった。シミュレーションの空間解像度が足りていなかった可能性があり、さらに解像度をあげた計算を実行する必要があると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導いただきました指導教員である はしもと じょーじ 准教授，松江工業高等専門学校 of 杉山 耕一郎 准教授に深く感謝いたします。また，同研究室の先輩方からも多くの知識を授かりました，感謝いたします。

参考文献

- [1] 堀之内武 (2006) 「GPhys チュートリアル」,
<http://ruby.gfd-dennou.org/products/gphys/tutorial.old/>(2017.2.9 アクセス)
- [2] Lorenz, R. D., J. I. Lunine, J. A. Grier, and M. A. Fisher (1996) : Martian Surface Wind Speeds Described by the Weibull Distribution, *J. Spececr.*, 33, 754-756.
- [3] Newman, C. E., S. R. Lewis, and P. L. Read (2002) : Modeling the Martian dust cycle 1. Representations of dust transport process, *JGR* 107(E12), 5123, doi : 10.1029/2002JE001910.
- [4] Read, P. L., and S. R. Lewis (2004):*The Martian Climate Revisited*, Springer-Verlag, pp.326.
- [5] 高橋 芳幸, 竹広 真一, 檜村 博基, 納多 哲史, 石渡 正樹, 小高 正嗣, 堀之内 武, 中島 健介, 林 祥介 (2016) 「DCPAM」,
<https://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>(2017.2.12 アクセス)
- [6] 坪木和久, 榊原篤志 (2000) 「CReSS ユーザーズガイド 第2版」,
https://www.gfd-dennou.org/GFD_Dennou_Club/dc-arch/cress/doc/cress.guide1.4.pdf (2017.2.9 アクセス)
- [7] 辻野智紀 (2016) 「CReSS モデルへのスペクトルナッジング法の導入」,
https://www.gfd-dennou.org/arch/satoki/Spectral_Nudging_CReSS/main.pdf