

修士論文

火星大気 LES から得られる境界層内の流れ
- 空間解像度に応じて表現される流れ場の違い -

北海道大学大学院理学院 宇宙理学専攻
惑星宇宙グループ 地球流体力学研究室
修士課程 2 年

学生番号 20163072

須藤康平

平成 30 年 2 月 27 日

要旨

火星大気にはダスト（塵）が定常的に存在している。ダストは太陽放射や赤外放射を吸収、散乱、射出しており、火星大気加熱率に大きな影響を及ぼすため、火星大気の熱的状态や循環を考える上でダストの存在は無視できないものとなっている (Smith, 2009)。火星大気中の平均的なダスト量はダストデビル（塵旋風）といった空間スケールの小さな現象によるダスト巻き上げ過程により維持されている (Rafkin et al., 2013)。このため、空間スケールが 1 km に満たないような小さな現象により地表面から大気中へ供給されるダスト量の正確な見積もりが火星大気循環を考える上で重要となる。数値モデルではダスト巻き上げ過程の効果をパラメタライズして見積もり、計算に取り込んでいるが、ダスト巻き上げを起こすような小スケールの現象そのものに対する理解不足から、この見積もりも正確性を欠いたものになっている。パラメタリゼーションで取り込まれる小スケールのダスト巻き上げ過程の効果の見積もりをより正確なものにするには、小スケールの現象によるダスト巻き上げ過程への理解を深める必要がある。小スケールの現象の研究手段の 1 つとして、乱流渦による効果を入れた数値計算法である LES (Large-Eddy Simulation) を用いた研究が行われている。

Nishizawa et al. (2016) が行った火星大気 LES 計算では、現時点で最も高い空間解像度 (5 m 解像度) を含む 5 つの解像度 (5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m) と、19.2 km x 19.2 km x 21 km というそれ以前の火星大気 LES 計算に比べて大きな計算領域が用いられた。Nishizawa et al. (2016) で行われた LES 計算は計算モデルに SCALE-LES を使用しており、方程式系は 3 次元完全圧縮流体方程式、空間差分は 4 次中央差分、時間差分は 3 段ルンゲクッタスキーム (3 次) である。計算では外部から熱強制を与え、初期条件は安定成層した静止大気に微細な温度擾乱を加えている。Nishizawa et al. (2016) では各解像度で渦半径などの統計量が調べられたものの、ダスト巻き上げに最も関わる地表面付近の調査は行われなかった。村橋 他 (2017) は Nishizawa et al. (2016) の 5 m 解像度実験結果の解析を行い、地表面応力が大きい地点での流れ場の特徴や解像度間の応力頻度分布を調べた。村橋 他 (2017) の解析から、地表面応力が大きい地点では孤立渦が見られる地点と孤立渦が見られない地点があり、それぞれの地点は 5 : 5 の割合で存在することがわかった。また 5 m 解像度実験で見られる典型的な孤立渦の特徴は渦直径が 100 m、高さが 1-2 km であった。村橋 他 (2017) では 5 m 解像度以外の解像度の実験結果についての流れ場の調査が行われておらず、5 m 解像度実験結果の解析から得られた流れ場の特徴が他の解像度でも共通して見られるかどうか不明であった。

本研究では、Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうち、10 m から 100 m の各解像度結果について解析を行い、地表面応力の大きい地点の流れ場の特徴に 5 m 解像度を含む各解像度間で解像度依存性があるかどうかを調べることを目的とした。解像度依存性を調べる理由は、解像度間で流れ場の特徴を比較することで、パラメタリゼーションの改善に向けた有益な情報を得られると考えるためである。本研究

の解析では Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうち、10 m, 25 m, 50 m, 100 m の各解像度実験の LT = 14:30 の瞬間値を用いる。解析方法は、各解像度実験結果から地表面応力の大きい地点の位置を求めて、その地点の流れ場の特徴を調べた。調査地点は、地表面応力の閾値を設定してこれを上回る地表面応力をもつ格子点の座標を調べることで選出した。各地点の流れ場の様子は水平風ベクトルや渦度等値線などを描いた水平断面図や鉛直断面図から調査し、孤立渦が見られるかどうかについて調べた。孤立渦がある場合は渦の直径や高さについて調べた。

解析結果から流れ場の様子について次のような特徴があることがわかった。まず、地表面応力の大きい地点では孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比がほぼ 5 : 5 であった。この特徴は村橋 他 (2017) の 5 m 解像度解析結果でも見られた特徴であり、10 m から 100 m までの各解像度で共通して見られた。また、各解像度で見られる孤立渦の特徴を調べたところ、各解像度で流れ場の構造は共通していたものの、渦の直径のみが異なっていた。流れ場の構造は、いずれの解像度においても、孤立渦の周囲に上昇流が存在し渦の中心付近には下降流が見られるという構造が共通して見られた。それに対し、孤立渦の直径の特徴は高解像度と低解像度で別々の特徴が見られた。10 m, 25 m 解像度で見られた孤立渦の直径は 100 m 程度であり、5 m 解像度で見られた渦の直径と同じくらいの渦が見られた。しかし、50 m, 100 m 解像度では直径 300 - 400 m の渦が見られ、5 m 解像度で見られた渦より大きな直径の渦が存在していた。また、各解像度での地表面応力の大きさの特徴として、解像度が低くなるにつれて地表面応力の値が小さくなる傾向にあることが言える。これは村橋 他 (2017) の調査した解像度間の地表面応力頻度分布に見られた傾向と合致する。

本研究の結果から、村橋 他 (2017) で得られた 5 m 解像度実験の地表面応力の大きい地点における流れ場の特徴は他の解像度でもよく見られることがわかった。これより、ダスト巻き上げ過程を考えるうえで解像度依存性があると思われる流れ場の特徴について考慮すべきであることが主張できる。具体的には、孤立渦が見られた地点数と見られない地点数の比が 5 : 5 であったことから、地表面応力の大きい地点では渦によるダスト巻き上げだけでなく渦以外の流れ場によるダストの巻き上げについても考慮する必要があることが示唆された。また、本研究の解析結果のみを用いて解像度間で渦の大きさや強さを見積もることは難しいと思われる。この理由は各解像度で見られた渦が他解像度のどの応力値における渦と対応しているかが不明であるためである。解像度間で渦の見積もりを行うには、地表面応力と渦の特徴との関係を調べることが必要となる。今後 5 m 解像度実験における地表面応力値と渦の特徴との関係を調べたり、各解像度の応力値等について統計量を求めて解像度間比較を行ったりすることで、見積もりを行える可能性があると思われる。更に、本研究では Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうち LT = 14:30 のデータのみを解析したため、本研究で得られた流れ場の特徴がこの時刻のみで見られるものかどうかは不明である。従って、他の時刻のデータについても解析を行い、本研究と共通する流れ場の特徴が見られるかどうかを調べることも重要と思われる。

目次

第1章 序論	8
1.1 火星大気におけるダストの影響	8
1.2 火星大気境界層における LES を利用した研究	10
1.2.1 火星大気 LES 計算の先行研究	10
1.2.2 最も高解像度の火星大気 LES 計算	11
1.3 高解像度 LES 計算結果から得られた火星大気境界層の流れ場の特徴	12
1.4 本研究の目的	13
1.5 本論文の構成	14
第2章 解析に用いたデータ	15
2.1 Nishizawa et al. (2016) の LES 計算に使用された数値モデル	15
2.2 計算設定	15
2.3 本研究の解析に用いたデータ	16
第3章 解析方法	17
第4章 解析結果	18
4.1 5 m 解像度	18
4.1.1 地表面応力が大きい地点の分布	18
4.1.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子	19

4.2	10 m 解像度	28
4.2.1	地表面応力が大きい地点の分布	28
4.2.2	地表面応力が大きい地点での流れ場の様子	29
4.3	25 m 解像度	41
4.3.1	地表面応力が大きい地点の分布	41
4.3.2	地表面応力が大きい地点での流れ場の様子	42
4.4	50 m 解像度	48
4.4.1	地表面応力が大きい地点の分布	48
4.4.2	地表面応力が大きい地点での流れ場の様子	48
4.5	100 m 解像度	55
4.5.1	地表面応力が大きい地点の分布	55
4.5.2	地表面応力が大きい地点での流れ場の様子	55
4.6	結果のまとめと考察	61
第5章 まとめ		65

図目次

1.1	Mars Odyssey による観測から得られた図. 縦軸は緯度, 横軸は季節変化を表し, MY (火星年) 26 から 29 の時間範囲において東西平均された値が示されている. 上図はダストの光学的深さ (波長!), 中図は温度 (波長!), 下図は水氷の光学的深さ (波長!) を示す. (Smith, 2009, Fig.6 より引用)	9
1.2	5 m 解像度実験結果の LT = 14:30 における一部領域の渦度の 3 次元分布図. 描画された領域の大きさは 1 km x 1 km x 300 m (高度 62.5 m 面を底面としている) である. (Nishizawa et al., 2016, Figure 1(b) より引用)	11

1.3 5 m から 100 m までの各解像度の渦半径頻度分布. 横軸は渦の半径 [m], 縦軸は数密度 [$1/\text{km}^2$] を表す. (Nishizawa et al., 2016, Figure 3(a) より引用) 12

1.4 各解像度実験における地表面応力の確率密度分布. 横軸は応力のランク [Pa], 縦軸は確率密度 [$1/\text{Pa}$] を表す. ただし縦軸は log スケールである. 各色のグラフは各解像度に対応しており, 赤色は 5 m 解像度, 青色は 10 m 解像度, 橙色は 25 m 解像度, 桃色は 50 m 解像度, 紫色は 100 m 解像度を表す. (村橋 他, 2017 より引用) 13

4.1 5 m 解像度実験, LT = 14:30 における地表面 (高度 2.5 m) の鉛直風速の分布. 描画領域は地表面全体 ($19.2 \text{ km} \times 19.2 \text{ km}$) である. 明色は上昇流, 暗色は下降流を表す. (村橋 他, 2017 より引用) 19

4.2 5 m 解像度実験, LT = 14:30 における高度 52.5 m での地表面応力の大きい地点, 渦, 上昇流の分布を示す. 図中の黒い点, 青い + 印, 赤い領域はそれぞれ, 応力の大きい地点 (0.015 Pa 以上), 渦 (Nishizawa et al. (2016) 内で渦判別法を用いて渦と判別されたもの), 上昇流を表す. (村橋 他, 2017 より引用) 20

4.3 5 m 解像度実験結果における地表面応力 0.025 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す. 21

4.4 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーンは鉛直風速 [m/s] (赤は上昇流, 青は下降流), 等値線は渦度 [$1/\text{s}$] (実線は正の渦度, 破線は負の渦度), 矢印は水平風速 [m/s] を表す. (村橋 他, 2017 より引用) 22

4.5 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 100 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. 23

4.6 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図. トーンは鉛直風速 [m/s] (赤は上昇流, 青は下降流), 等値線は渦度 [$1/\text{s}$] (実線は正の渦度, 破線は負の渦度) を表す. (村橋 他, 2017 より引用) 24

4.7 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. (村橋 他, 2017 より引用) 25

4.8 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 100 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. 26

4.9	5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様. (村橋 他, 2017 より引用) . . .	27
4.10	10 m 解像度実験結果における地表面応力 0.017 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.	28
4.11	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	29
4.12	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	30
4.13	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	31
4.14	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	32
4.15	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	33
4.16	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	34
4.17	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	35
4.18	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	36
4.19	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	37
4.20	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	38
4.21	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	39
4.22	10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	40

4.23	25 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0115 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.	41
4.24	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	42
4.25	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	43
4.26	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	44
4.27	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	45
4.28	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	46
4.29	25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	47
4.30	50 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0068 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.	48
4.31	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	49
4.32	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	50
4.33	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	51
4.34	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	52
4.35	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.	53
4.36	50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.	54

4.37 100 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0042 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す. 55

4.38 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. 56

4.39 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. . . 57

4.40 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様. 58

4.41 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. 59

4.42 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. 60

4.43 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様. 61

表目次

1.2.1 火星設定で行われた各 LES 計算の計算設定と計算結果から得られた対流渦の要素. 各要素は各計算での最大値が記されている. 格子間隔の設定や背景風の違いがあるため, 各要素はオーダーのみを比較するとよい. Δx は LES の水平格子間隔, $N_{x,y}$ は水平方向 (x 軸と y 軸) の格子点数, Z は計算領域の高度の最大値, N_z は高度方向の格子点数, $[w', v']$ は対流渦の鉛直風速および接線風速, $[P', \zeta']$ は圧力降下および渦度を表す. (Spiga et al., 2016, Table 2 より引用) 10

4.1.1 5 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す. 21

4.2.2 10 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.	35
4.3.3 25 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.	45
4.4.4 50 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.	52
4.5.5 100 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.	59
4.6.6 地表面応力の大きい地点の流れ場の解析から得られた, 流れ場の特徴の解像度別まとめ	62
4.6.7 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m の各解像度実験の地表面応力上位 10 グループにおける, 各地点の最大応力値 [Pa]. * 印が付いた応力値では孤立渦が見られたことを示す	62

第1章 序論

1.1 火星大気におけるダストの影響

火星大気にはダスト（塵）が定常的に存在している。ダストは太陽放射を吸収、散乱して、赤外放射を吸収、射出しており、大気の加熱率に大きな影響を及ぼしている。このため、火星大気中のダストは大気の熱的状态や循環に影響を及ぼしている (Smith, 2009)。図 1.1 は Mars Odyssey による観測結果から、大気中のダストの光学的深さの子午面分布 (上図) と温度場の子午面分布 (中図) を示している。上図と中図を比較すると、各年の $L_s = 270$ (北半球の冬至) にてよく見られるように、大気中のダスト量の増大と温度の上昇が同時期に起こっていると言える。

火星大気の循環を理解するためには、ダストが大気に及ぼす影響を正確に見積もる必要がある。このためには、大気中に存在するダスト量の正確な推定が必要となる。大気中のダスト量はダストデビル（塵旋風）や突風といった空間スケールの小さな現象によるダスト巻き上げ過程により維持されている (Rafkin et al., 2013)。このため、こうした小スケールのダスト巻き上げ過程により地表面から大気中へ供給されるダスト量の正確な見積もりが火星大気の循環には重要だと言える。

数値モデルを用いて現象について研究する場合、数値モデルは連続量を扱うことができないため、空間および時間について離散化する必要がある。空間格子点の間隔よりも小さいスケール（サブグリッドスケール）における現象を表現することができない。そこで、サブグリッドスケールにおける現象の影響を取り込むために、そのスケールの現象に関する物理量を格子点値から見積もることで格子点における物理量と関連付けて扱う方法（パラメタリゼーション）が考えられている。ダスト巻き上げパラメタリゼーションでは、対流運動を熱源が顕熱である熱機関と仮定し、その仕事量からダスト巻き上げを見積もる方法 (Rennó et al., 1998) などが用いられている。しかし、惑星全球規模の大気循環などといった大規模の流れを表現するような解像度から小スケールのダスト巻き上げ過程を見積もるのは難しく、また小スケールの巻き上げ過程自体についての理解も不足しているため、パラメタリゼーションは不正確なものとなっている。

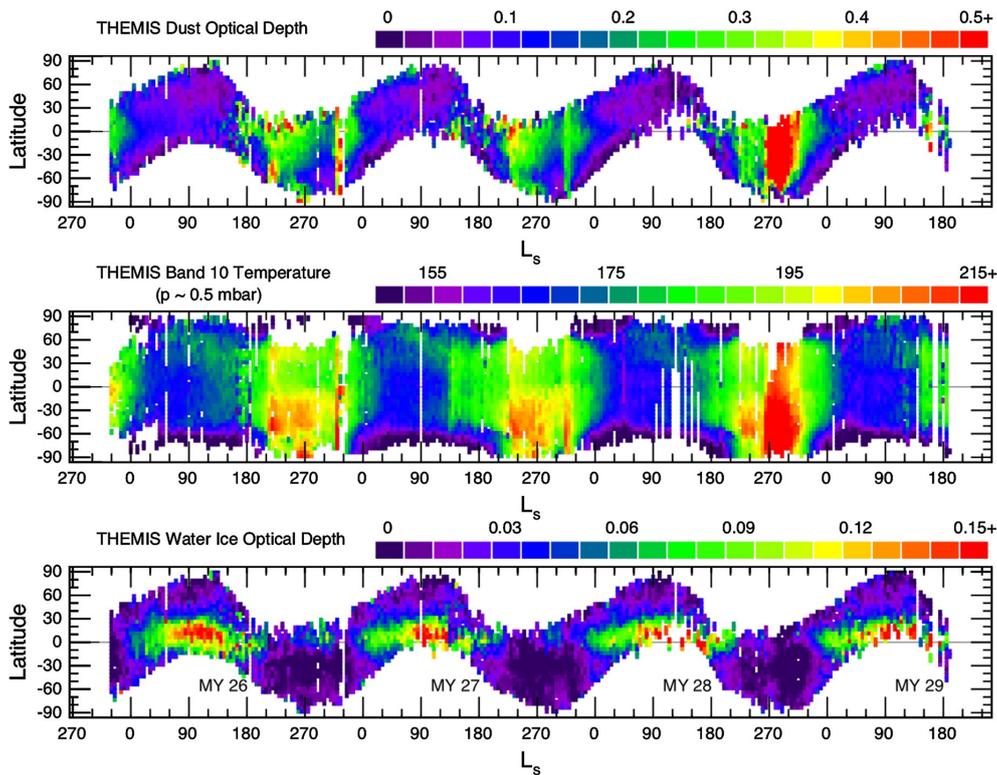


図 1.1: Mars Odyssey による観測から得られた図. 縦軸は緯度, 横軸は季節変化を表し, MY (火星年) 26 から 29 の時間範囲において東西平均された値が示されている. 上図はダストの光学的深さ (波長!), 中図は温度 (波長!), 下図は水氷の光学的深さ (波長!) を示す. (Smith, 2009, Fig.6 より引用)

パラメタリゼーションで取り込まれる小スケールのダスト巻き上げ過程の効果の見積もりをより正確なものにするには, 小スケールの現象によるダスト巻き上げ過程への理解を更に深める必要がある. その具体的な内容として考えられるものの一つに, 境界層での大気運動について理解を深め, 小スケール現象によって地表面から大気中に巻き上げられるダスト量の推定をより正確に行うことが考えられる. このためにはダストデビルなどの小スケールの現象の効果, パラメタライズではなく直接取り込んで大気の運動を研究することが重要となる.

Paper	Dyn. core	dx (m)	$N_{x,y}$	Z (km)	N_z	w' (m/s)	v' (m/s)	P' (Pa)	ζ (s^{-1})
Rafkin et al. (2001)	RAMS	100	180	9	36	10	10	2	0.3
Toigo et al. (2003)	MM5	10	200	6	140	7	9	1	0.06
Toigo and Richardson (2003)	MM5	100	100	7.5	57	7	5	-	-
Michaels and Rafkin (2004)	RAMS	30	200	2.3	61	5	10	2	0.2
Michaels (2006)	RAMS	25	102	8	120	12	19	6.5	-
Spiga and Forget (2009)	WRF	100	150	9.5	71	8	10	1.5	-
Spiga and Lewis (2010)	WRF	50	145	12	201	12	10	2	-
Gheynani and Taylor (2011)	NCAR	25	200	10	60	4	15	2.5	0.7
Nishizawa et al. (2016)	SCALE	5	4000	21	4000	10	20	4.2	2

表 1.2.1: 火星設定で行われた各 LES 計算の計算設定と計算結果から得られた対流渦の要素. 各要素は各計算での最大値が記されている. 格子間隔の設定や背景風の違いがあるため, 各要素はオーダーのみを比較するとよい. dx は LES の水平格子間隔, $N_{x,y}$ は水平方向 (x 軸と y 軸) の格子点数, Z は計算領域の高度の最大値, N_z は高度方向の格子点数, $[w', v']$ は対流渦の鉛直風速および接線風速, $[P', \zeta']$ は圧力降下および渦度を表す. (Spiga et al., 2016, Table 2 より引用)

1.2 火星大気境界層における LES を利用した研究

1.2.1 火星大気 LES 計算の先行研究

数値計算において, ダストデビルなどの比較的小スケールの現象を直接表現するには LES (Large-Eddy Simulation) を用いる. LES とは乱流渦による効果を入れた数値計算法である. Spiga et al. (2016) によれば, これまで行われた火星大気における LES は様々な計算設定により行われてきた. 表 1.2.1 は先行研究の計算設定やその計算結果から得られた対流渦の各要素である. 表 1.2.1 から空間解像度 (表中の dx に相当) と水平面の計算領域の大きさ (水平面の計算領域の一辺の長さを見る. 表中の $N_{x,y} \times dx$ に相当) の値を各研究間で比べることで計算設定の特徴を見ていく. Nishizawa et al. (2016) 以前の LES 計算では, 空間解像度は 10 m (Toigo et al., 2003) から 100 m (Rafkin et al., 2001; Spiga and Forget, 2009), 計算領域の大きさは 2000 m (Toigo et al., 2003) から 18,000 m (Rafkin et al., 2001) の範囲にある. 各研究間の比較から読み取れる特徴として, 空間解像度が高いものは計算領域が比較的小

さく、空間解像度が低いものは比較的大きいといえるが、空間解像度の高さと計算領域の大きさを両方兼ね備えたものがなかったことがわかる。この理由として両方を兼ね備えるには計算資源面での制約が大きくかかることが考えられる。

1.2.2 最も高解像度の火星大気 LES 計算

前節で見た先行 LES 計算の特徴に対し、Nishizawa et al. (2016) が行った LES 計算 (以降、Nishizawa et al. (2016) 実験と記述する) の設定は、空間解像度が 5 m、計算領域の大きさが 20,000 m といずれも他の火星大気 LES 計算を大きく上回るものであった。Nishizawa et al. (2016) 実験は現時点における火星大気 LES 計算で最も高解像度であり、空間解像度の高さと計算領域の大きさを兼ね備えたものである。

Nishizawa et al. (2016) 実験では 5 m から 100 m まで 5 つの解像度で計算が行われ (Nishizawa et al. (2016) 実験の計算設定の詳細は第 2 章で述べる)、火星大気境界層における各物理量の分布が示され、渦の半径や渦度などの統計量がまとめられた。図 1.2 は 5 m 解像度実験での LT (現地時間) = 14:30 における一部領域の渦度の 3 次元分布を示す。この図で描画されている領域は水平領域が 1 km 四方、深さが 300 m と全計算領域の一部のみだが、乱流渦がいくつも存在している様子が図から読み取れる。図 1.3 は LT = 14:30 における各解像度の渦半径の頻度分布を示す。

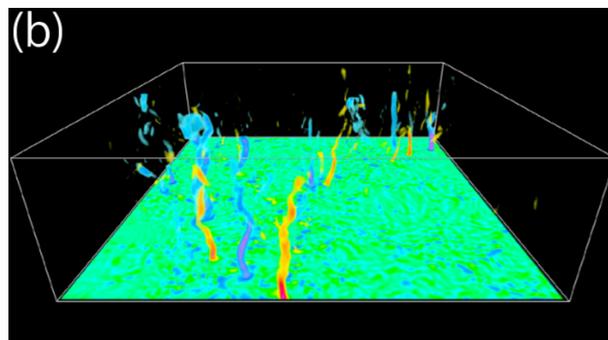


図 1.2: 5 m 解像度実験結果の LT = 14:30 における一部領域の渦度の 3 次元分布図。描画された領域の大きさは 1 km x 1 km x 300 m (高度 62.5 m 面を底面としている) である。(Nishizawa et al., 2016, Figure 1(b) より引用)

Nishizawa et al. (2016) では各解像度実験間の比較のため高度 62.5 m 付近などにおける物理量の分布が調査されているものの、ダスト巻き上げに最も関係する地表面付近の速度場や応力場については調査されていない。この点に着目し、村橋 他 (2017) は Nishizawa et al. (2016) 実験の 5 m 解像度実験結果の地表面付近における

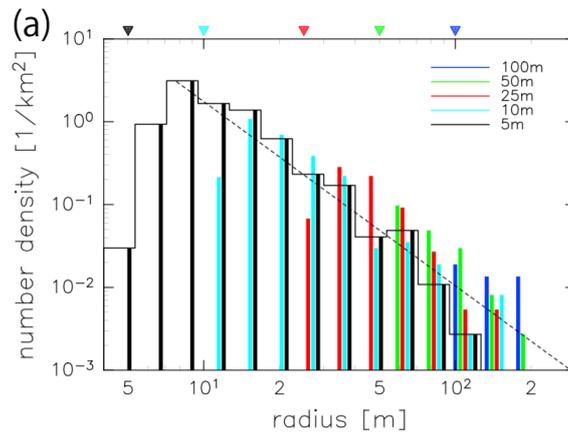


図 1.3: 5 m から 100 m までの各解像度の渦半径頻度分布. 横軸は渦の半径 [m], 縦軸は数密度 [$1/\text{km}^2$] を表す. (Nishizawa et al., 2016, Figure 3(a) より引用)

解析を行った. その結果と村橋 他 (2017) が主張する地表面の流れ場の特徴については次節にて記述する.

1.3 高解像度 LES 計算結果から得られた火星大気境界層の流れ場の特徴

村橋 他 (2017) による研究では, Nishizawa et al. (2016) で未調査の地表面付近の流れ場について調査し, その特徴がまとめられた. この研究ではダストの巻き上げを考える上で重要となる地表面応力に着目し, 地表面応力が大きい地点における流れ場の様子が調べられた. 村橋 他 (2017) のまとめた流れ場の特徴については 4.1 節にて述べる. Nishizawa et al. (2016) では孤立渦の統計量についての解析結果が示されたが, 村橋 他 (2017) は個々の孤立渦の流れ場についても調査し, 小スケールの現象への理解を進めている.

また, 村橋 他 (2017) は 5 m 解像度以外での解像度実験でダスト巻き上げの閾値を超える地点がどのくらいあるか調べるため, 各解像度実験における地表面応力の頻度分布についても調査している. 図 1.4 は各解像度実験における地表面応力の確率密度¹⁾分布である. 図 1.4 から, 5 m 解像度実験と 10 m 以上の解像度実験のグラフ

¹⁾確率密度は $\frac{dn}{N dr}$ で計算される. ただし, dn はビンに含まれる格子点数, N は全格子点数, dr はビンの幅 (0.002 Pa) を表す.

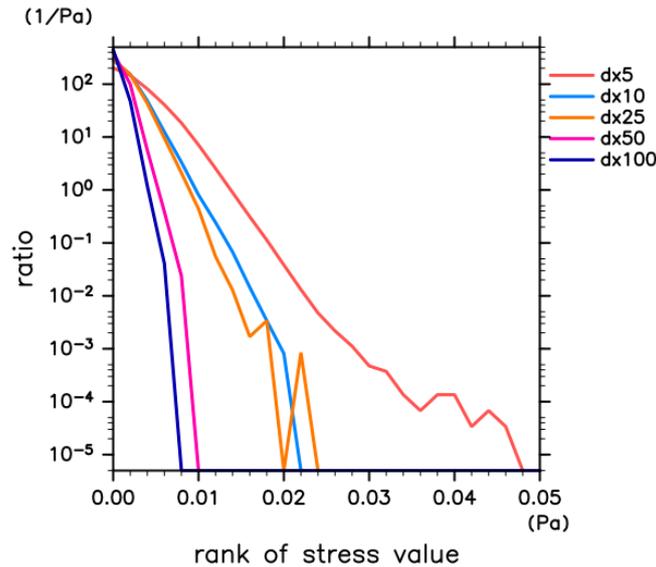


図 1.4: 各解像度実験における地表面応力の確率密度分布. 横軸は応力のランク [Pa], 縦軸は確率密度 [1/Pa] を表す. ただし縦軸は log スケールである. 各色のグラフは各解像度に対応しており, 赤色は 5 m 解像度, 青色は 10 m 解像度, 橙色は 25 m 解像度, 桃色は 50 m 解像度, 紫色は 100 m 解像度を表す. (村橋 他, 2017 より引用)

の概形は大きく異なっていた. 村橋 他 (2017) の研究では Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうち, 5 m 解像度実験における地表面付近の流れ場の特徴が調査されたが, その他の解像度実験の流れ場については調査されなかった.

1.4 本研究の目的

空間スケールの小さな現象について研究する究極的な目標は, LES で解像されるような空間スケールの小さな現象の効果を惑星全球規模の大気循環を計算する上でどのように格子点値から見積もるとよいかを理解し, パラメタリゼーションの改善を行うことである. しかし, それに向けたアプローチの手法はよくわかっていない.

本研究では, 各解像度の流れ場の特徴に解像度依存性があるかどうかを調べることを目的に, Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果の解析を行った. 解像度依存性を

調べる理由は、パラメタリゼーションの改善に向けた情報を得るためである。もし各解像度実験での流れ場の様子を比較することにより、低い解像度実験の結果から高い解像度実験での渦の振る舞いについて見積もることができれば、その解像度間でパラメタリゼーションが達成できる。またその段階までいかなくとも、解像度間で共通する流れ場の特徴が存在するならば、それはパラメタリゼーションの改善に向けて有益な情報となると考える。このような考えから流れ場の特徴の解像度依存性を調べる。

本研究の内容は、Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうち、5 m 解像度以外の各解像度について地表面応力の大きい地点の流れ場の様子を調査し、各解像度の特徴を比較することである。流れ場の様子の調査では、各地点の流れ場について村橋他 (2017) の解析で見られたような孤立渦が見られるかどうかを調べた。また孤立渦が存在する場合はその直径や高さについて調査し、最後に各解像度の特徴を比較した。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。第2章では解析に用いたデータについて説明する。第3章では村橋他 (2017) が解析した高解像度実験結果とは異なる解像度実験結果について、本研究で行った解析方法を説明する。第4章では解析結果を示し、各解像度での地表面応力の強度の特徴や境界層の流れ場の特徴を比較する。第5章では、本研究に関するまとめを行う。

第2章 解析に用いたデータ

本章では本研究の解析に用いたデータについて説明する。本研究では Nishizawa et al. (2016) が行った LES 計算結果の一部を使用した。そこで、まず Nishizawa et al. (2016) が行った LES 計算で使用された数値計算モデルと計算設定について説明し、次に本研究の解析で Nishizawa et al. (2016) の LES 計算結果のうちどのデータを用いたかを述べる。

2.1 Nishizawa et al. (2016) の LES 計算に使用された数値モデル

本研究が計算結果を利用する Nishizawa et al. (2016) の計算では、SCALE-LES モデルが火星設定で使用されている。SCALE-LES は利権計算科学研究気候が開発した次世代気象気候科学における基盤ライブラリである SCALE のうち、LES のパッケージである。方程式系は 3 次元完全圧縮流体方程式、空間差分は 4 次中央差分、時間差分は 3 段ルンゲクッタスキーム (3 次) である。

2.2 計算設定

Nishizawa et al. (2016) の LES 計算で使用された計算設定は次の通りである。

空間解像度

x, y, z 各方向ともに 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m

ただし、z 方向の解像度については所定の高度以上で高度と共に増加する (所定の高度は各解像度で異なり、5 m, 10 m, 25 m 解像度では 15 km, 50 m 解像度では 16.2 km, 100 m 解像度では 16.7 km である)

計算領域

水平方向 19.2 km × 19.2 km, 鉛直方向 21 km (側面境界は周期境界条件)

熱強制

Odaka et al. (2001) の 1 次元計算から得られた地表面温度及び大気加熱率分布を与える

初期条件

安定成層した静止大気に微細な温度擾乱を加えたもの

計算時間

LT = 0:00 から 1 火星日分シミュレーションを行う

ただし, 5 m 解像度のみ LT = 14:00 から 1 時間分のシミュレーションを行う.
このとき初期値は 10 m 解像度実験の LT = 14:00 の結果を用いる.

2.3 本研究の解析に用いたデータ

本研究の解析では, Nishizawa et al. (2016) 実験結果のうち, 5 m 解像度実験以外の各解像度実験 (10 m, 25 m, 50 m, 100 m) の LT = 14:30 の結果を用いる. LT = 14:30 は対流層の厚さが最大となる時間帯であり, Nishizawa et al. (2016) や村橋 他 (2017) の解析でもこの時間のデータが用いられた.

第3章 解析方法

本章では本研究で行った解析方法について述べる。解析の流れとしては、各解像度実験結果から地表面応力の大きい地点の位置を求めて、その地点の流れ場の様子を調べた。以下、解析方法の具体的な内容を述べる。

まず地表面応力の大きい地点の位置の調査では、各解像度実験結果について、地表面応力の閾値を設けてこれを上回る地表面応力をもつ格子点の座標を調べた。次に、地表面応力の大きい地点の流れ場の様子を調査のため、いくつかの物理量について図を描いた。描画したのは次の3つの図である。

1. 鉛直風速トーンと水平風速ベクトルと渦度等値線を描いた、地表面から高度1,000 m までの高度断面図 (600 m 四方の水平領域)
2. 鉛直風速トーンと渦度等値線を描いた鉛直断面図

これらの図から、各地点にて孤立渦のような構造がみられるかどうか、そして孤立渦がある場合は直径や渦の高さといった特徴について調査した。

また、各地点の流れ場の様子を調べたところ、地表面応力の閾値を上回る格子点の分布は局在しており、数点から数十点の格子点がグループを作っていることがわかった。更にそれぞれの格子点のグループが同一の流れ場の構造に含まれていることがわかった。そこで、位置のまとめり毎に格子点をグループ化し、各解像度で地表面応力の上位10グループの情報をまとめた。各グループでグループに含まれる格子点数¹⁾とグループ内の格子点の中での最も大きな地表面応力値、孤立渦の有無を表にまとめた。格子点のグループ化では地表面応力の閾値を上回る格子点の位置の分布を目で見てグループの判別を行った。ただし、格子点間の距離が各解像度で設定した基準値²⁾より離れた点については別グループとした。

¹⁾なお、閾値を超えた格子点のグループ数が10グループ以上見られた解像度もあったため、閾値を超えた格子点数と各グループに含まれる格子点数の和に差があることがある。

²⁾5 m 解像度、10 m 解像度は100 m を基準値に、25 m 解像度は200 m を基準値に、50 m 解像度、100 m 解像度は300 m を基準値に設定した。

第4章 解析結果

本章では Nishizawa et al. (2016) 実験のうち 10 m, 25 m, 50 m, 100 m 解像度実験の LT = 14:30 の結果から各解像度の気境界層の流れ場を調べた結果を示す。各節では前章で述べた解析方法で各解像度実験結果から地表面応力の大きい地点の位置を調査し、その中のいくつかの地点について図を示しながら流れ場の特徴を述べる。なお、解像度間の流れ場の特徴を比較するため、10 m から 100 m 解像度実験の解析結果を示す前に村橋 他 (2017) の調べた 5 m 解像度実験解析結果を掲載する。

4.1 5 m 解像度

5 m 解像度実験の最下層は高度 2.5 m であり、本節で最下層と言う場合はこの高度面のデータを指す。x, y 各方向の格子点数は 4,096 であるため、高度断面のもつ格子点数は約 1700 万点である。図 4.1 は 5 m 解像度実験の LT = 14:30 における地表面 (高度 2.5 m) 全体での鉛直風の分布である。村橋 他 (2017) は地表面の鉛直風の分布について、ネットワーク状の上昇流領域が見られるとしている。対流セルは水平方向で数 km の大きさを持ち、この構造に埋め込まれる小さな構造もあとみられる。

4.1.1 地表面応力が大きい地点の分布

図 4.2 は高度 52.5 m における地表面応力の大きい地点、渦、上昇流それぞれの分布を示す。図 4.2 から、地表面応力の大きい地点や渦の分布は局在しており、その多くが対流セル境界の上に分布していることがわかった。また、地表面応力の大きい地点の中には渦の分布と一致する場所もあった。

村橋 他 (2017) は地表面応力の大きさが 0.025 Pa を上回る格子点の流れ場の様子を調査した。地表面応力が大きい地点での流れ場の様子は 2 つに分類され、孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の 2 種類があった。図 4.3 は地表面応力が 0.025 Pa を超える格子点の分布を示す。閾値を超えた格子点数は 199 点で、

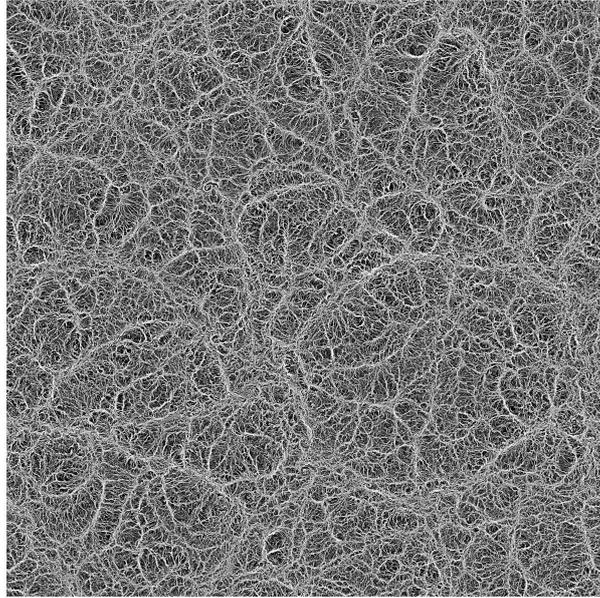


図 4.1: 5 m 解像度実験, LT = 14:30 における地表面 (高度 2.5 m) の鉛直風速の分布. 描画領域は地表面全体 (19.2 km × 19.2 km) である. 明色は上昇流, 暗色は下降流を表す. (村橋 他, 2017 より引用)

最下層の全格子点中の約 0.001 % にあたる.

4.1.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子

地表面応力が大きい地点では, 孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の両方が存在した. 以下では, 孤立渦が見られた地点, 孤立渦が見られなかった地点それぞれの地点での流れ場の様子を示す.

1. 孤立渦が見られた地点の流れ場の様子

図 4.4 から 4.6 は孤立渦が見られた地点の流れ場である. 最下層の流れ場の様子, 高度 100 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した. 最下層図に着目すると直径 100 m 程度の渦が存在し, 高度が大きくなっても同様の渦構造が見られた. また鉛直断面に着目すると, 高さ 1,200 m 程度であることがわかる. 更に, 流れ場の構造に着目すると, 孤立渦の周囲に上昇流が存在し, 渦の内部には下降流が存在している様子が見られる.

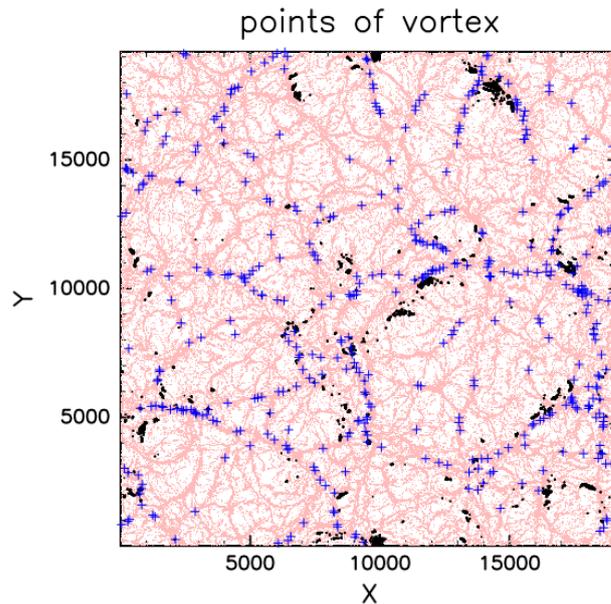


図 4.2: 5 m 解像度実験, LT = 14:30 における高度 52.5 m での地表面応力の大きい地点, 渦, 上昇流の分布を示す. 図中の黒い点, 青い + 印, 赤い領域はそれぞれ, 応力の大きい地点 (0.015 Pa 以上), 渦 (Nishizawa et al. (2016) 内で渦判別法を用いて渦と判別されたもの), 上昇流を表す. (村橋 他, 2017 より引用)

2. 孤立渦が見られなかった地点の流れ場の様子

図 4.7 から 4.9 は孤立渦が見られた地点の流れ場である. 各地点毎に最下層の流れ場の様子, 高度 100 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した. この地点で見られる特徴として, 最下層の水平風に着目するとほぼ一様な方向の水平風が存在していた. また鉛直断面図や高度 300 m 以上の高度断面図に着目するとほぼ一様に上昇流が存在していた.

3. 孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

位置のまとまりが見られた地点をグループ化した結果を記す. 表 4.1.1 は各グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大地表面応力値, 渦の有無を示す. 表 4.1.1 から, 孤立渦が見られたグループ数は 5 つ, 孤立渦が見られなかったグルー

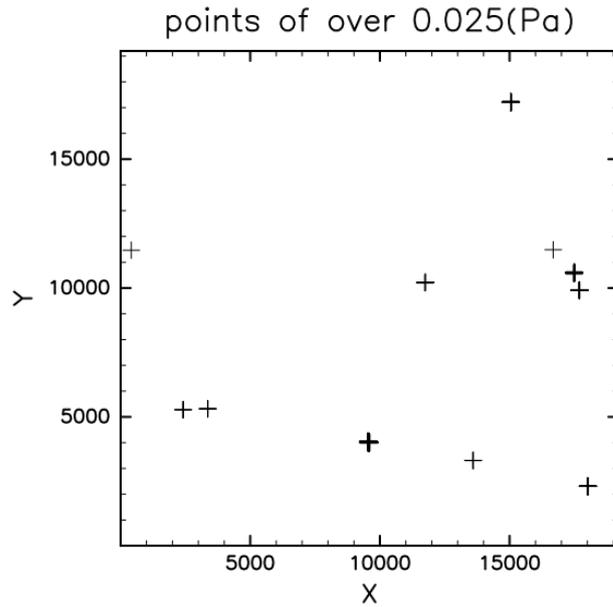


図 4.3: 5 m 解像度実験結果における地表面応力 0.025 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.

プ数は5つであった. これより, 地表面応力が大きい地点をグループにまとめると, 孤立渦が見られたグループ数と見られないグループ数は同数であった.

グループ	*1	*2	3	*4	5
格子点数	13	105	34	3	4
最大応力値 [Pa]	0.04674	0.04148	0.03141	0.02791	0.02722
	6	*7	8	*9	10
	14	4	6	3	1
	0.02702	0.02701	* 0.02637	0.02577	0.02526

表 4.1.1: 5 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.

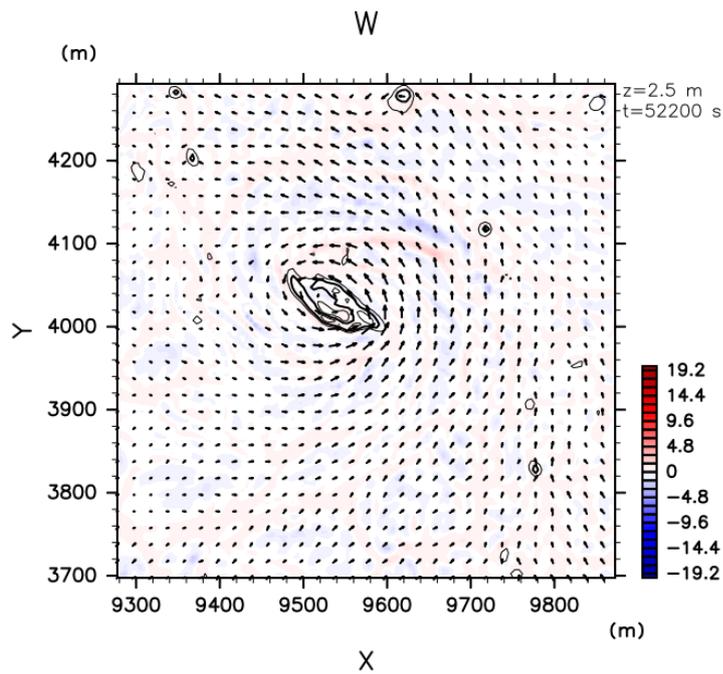


図 4.4: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーンは鉛直風速 [m/s] (赤は上昇流, 青は下降流), 等値線は渦度 [1/s] (実線は正の渦度, 破線は負の渦度), 矢印は水平風速 [m/s] を表す. (村橋 他, 2017 より引用)

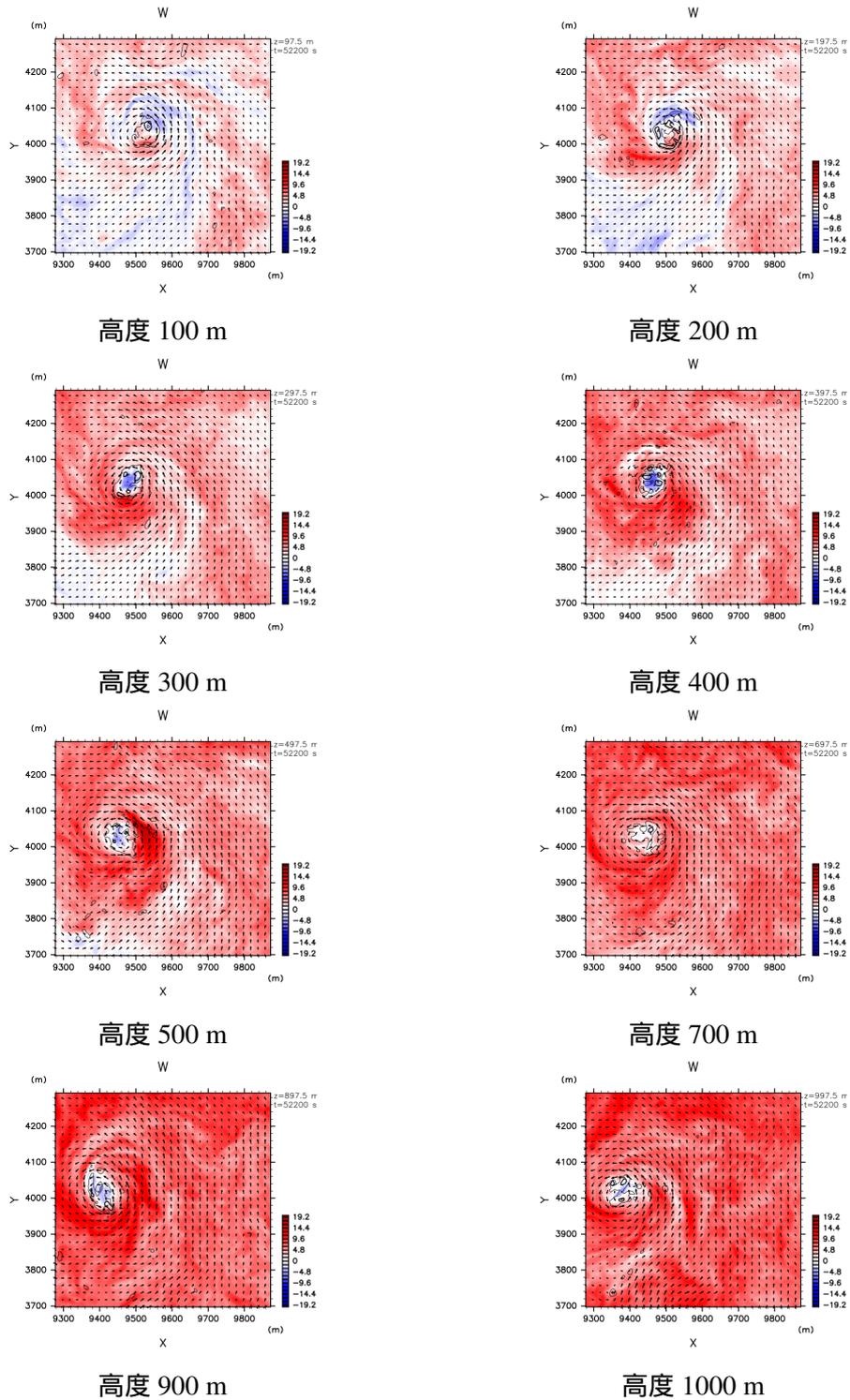


図 4.5: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 100 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は 図 4.4 と同様.

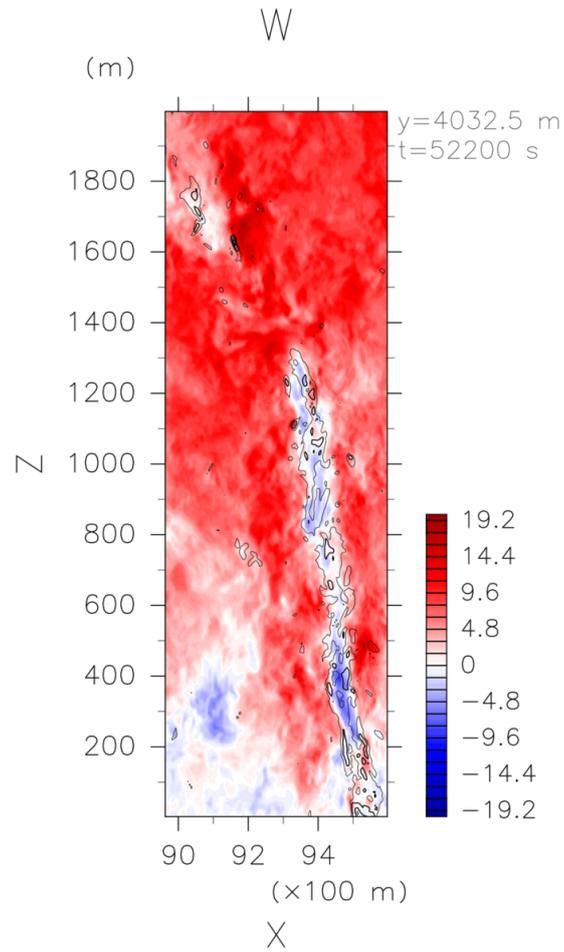


図 4.6: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図. トーンは鉛直風速 [m/s] (赤は上昇流, 青は下降流), 等値線は渦度 [1/s] (実線は正の渦度, 破線は負の渦度) を表す. (村橋 他, 2017 より引用)

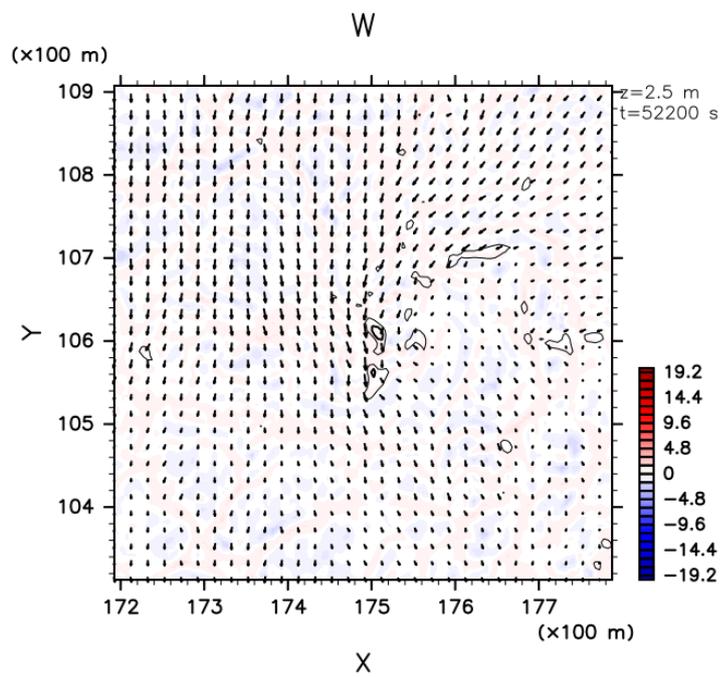


図 4.7: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層図.
トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様. (村橋 他,
2017 より引用)

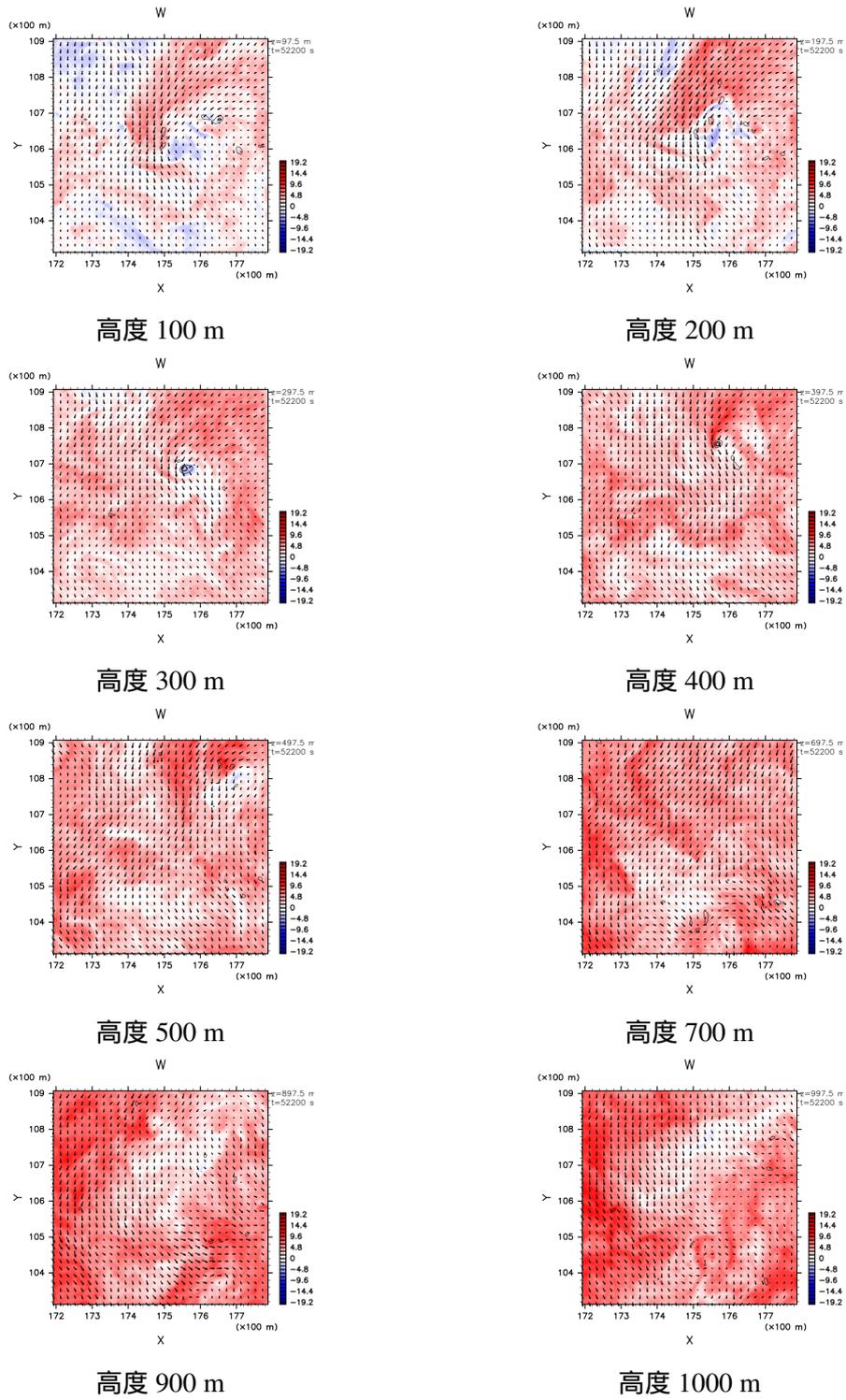


図 4.8: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 100 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

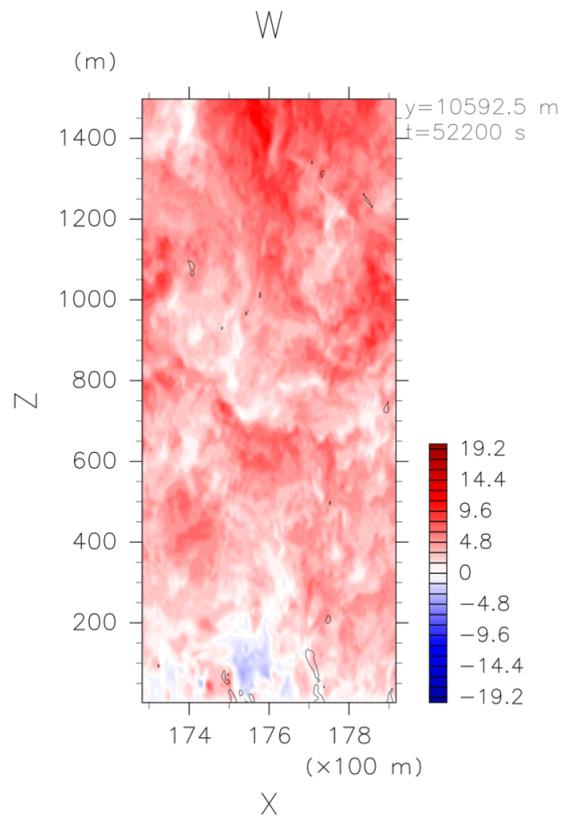


図 4.9: 5 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面
 図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様. (村橋 他,
 2017 より引用)

4.2 10 m 解像度

10 m 解像度実験の最下層は高度 5 m であり, 本節で最下層と言う場合はこの高度面のデータを指す. x, y 各方向の格子点数は 1,920 であるため, 高度断面のもつ格子点数は約 370 万点である.

4.2.1 地表面応力が大きい地点の分布

図 4.10 は地表面応力が 0.017 Pa を超える格子点の分布を示す. 閾値を超えた格子

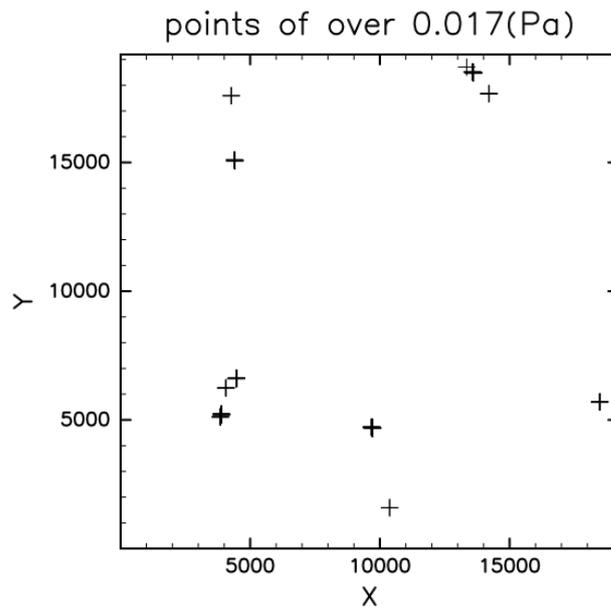


図 4.10: 10 m 解像度実験結果における地表面応力 0.017 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.

点数は 73 点で, 最下層の全格子点中の約 0.002 % にあたる.

4.2.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子

地表面応力が大きい地点での流れ場を調査したところ、孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の両方が存在した。以下では、孤立渦が見られた地点、孤立渦が見られなかった地点それぞれの地点での流れ場の様子を示す。

1. 孤立渦が見られた地点の流れ場の様子

図 4.11 から 4.16 は孤立渦が見られた 2 地点の流れ場である。各地点毎に最下層の流れ場の様子、高度 25 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子、鉛直断面の流れ場の様子を示した。1 地点目、2 地点目それぞれの最下層図に着目すると、どちらの地点においても直径 100 m 程度の渦が存在していることがわかる。また鉛直断面に着目すると、1 地点目は高さ 1200 m 程度、2 地点目は高さ 900 m 程度であることがわかる。更に、流れ場の構造に着目すると、いずれの地点においても、孤立渦の周囲に上昇流が存在し、渦の内部には下降流が存在している様子がわかる。10 m 解像度で見られた渦の直径や高さ、流れ場の構造は 5 m 解像度で見られたものと同様であった。

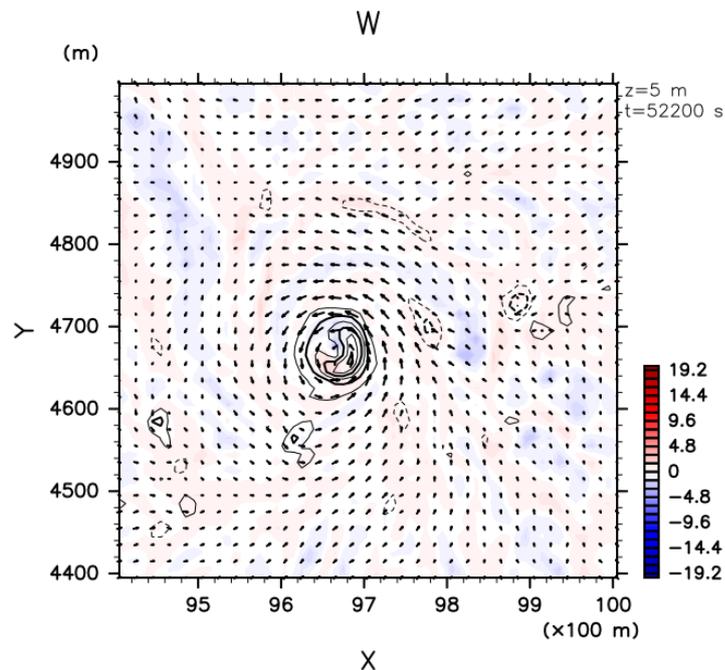


図 4.11: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の最下層図。
トーン、等値線、矢印の表す物理量は図 4.4 と同様。

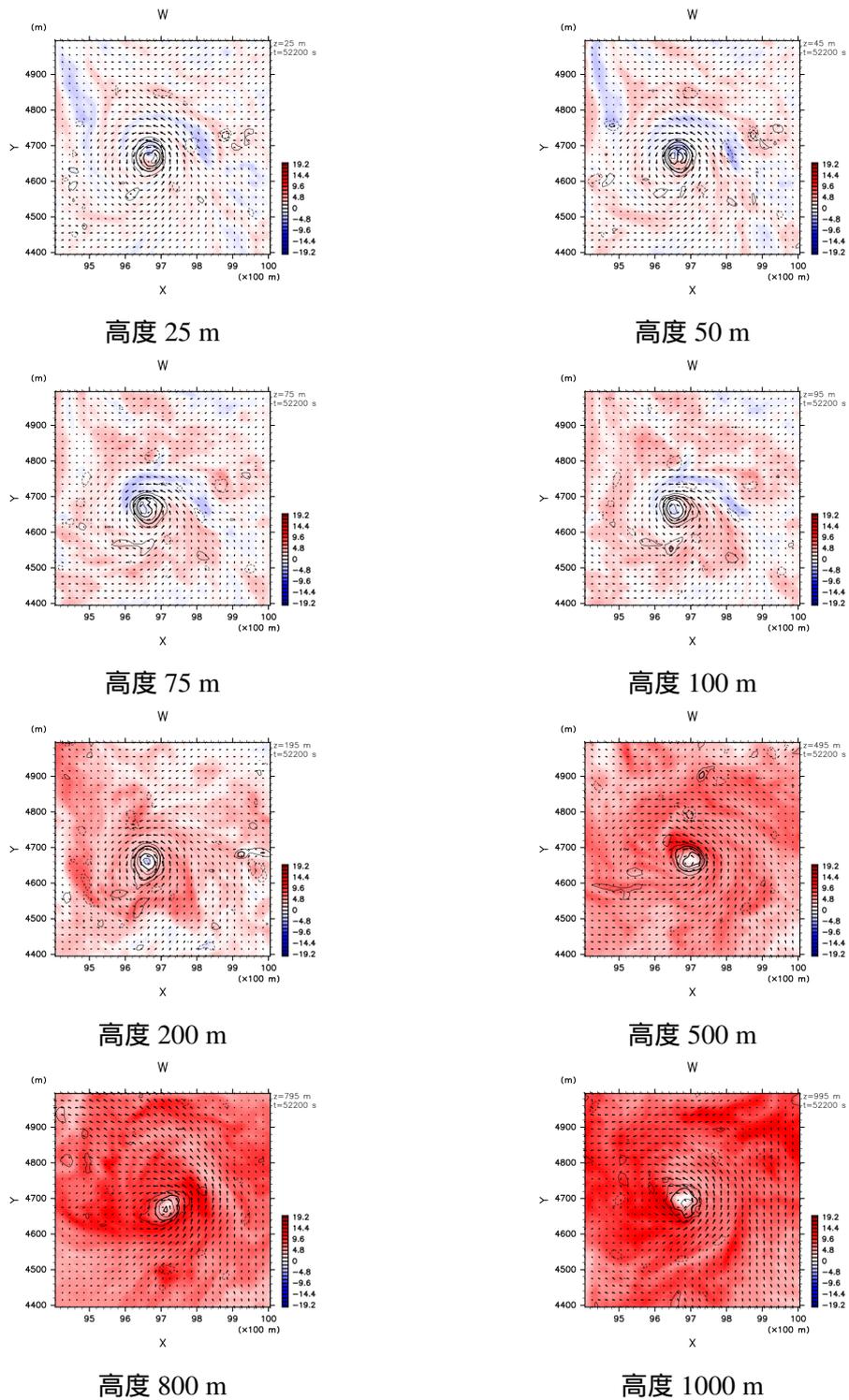


図 4.12: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

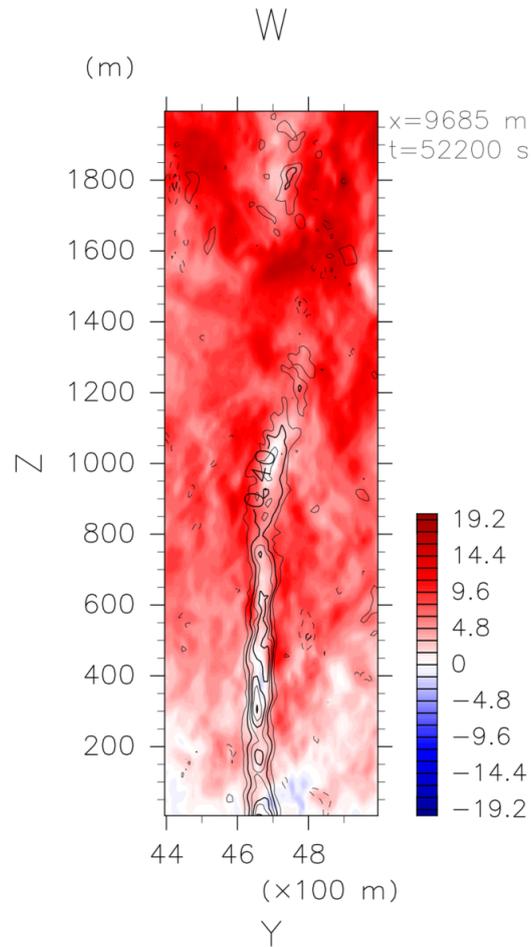


図 4.13: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 1 地点目の鉛直断面
 図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

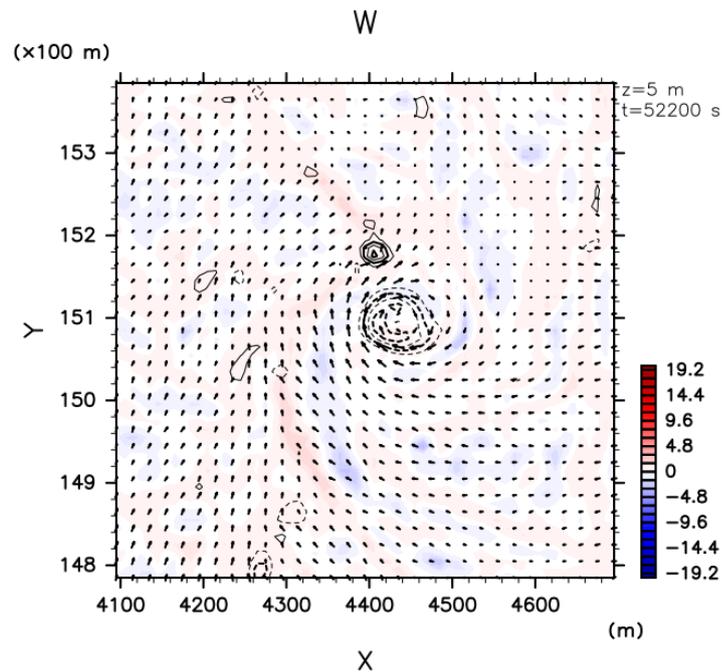


図 4.14: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の最下層図.
トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

2. 孤立渦が見られなかった地点の流れ場の様子

図 4.17 から 4.22 は孤立渦が見られた 2 地点の流れ場である. 各地点毎に最下層の流れ場の様子, 高度 25 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した. 1 地点目, 2 地点目ともに見られる特徴としては, 最下層の水平風に注目するとほぼ一樣な方向の風があること, また鉛直断面図や高度断面図の比較的高い高度の図を見ると上昇流と下降流ではっきりと領域が二分されていることが挙げられる.

3. 孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

位置のまとまりが見られた地点をグループ化した結果を記す. 表 4.2.2 は各グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大地表面応力値, 渦の有無を示す. 表 4.2.2 から, 孤立渦が見られたグループ数は 5 つ, 孤立渦が見られなかったグループ数は 5 つであった. これより, 地表面応力が大きい地点をグループにまとめると, 孤立渦が見られたグループ数と見られないグループ数は 5 m 解像度実験の結果と同じく, 同数であった.

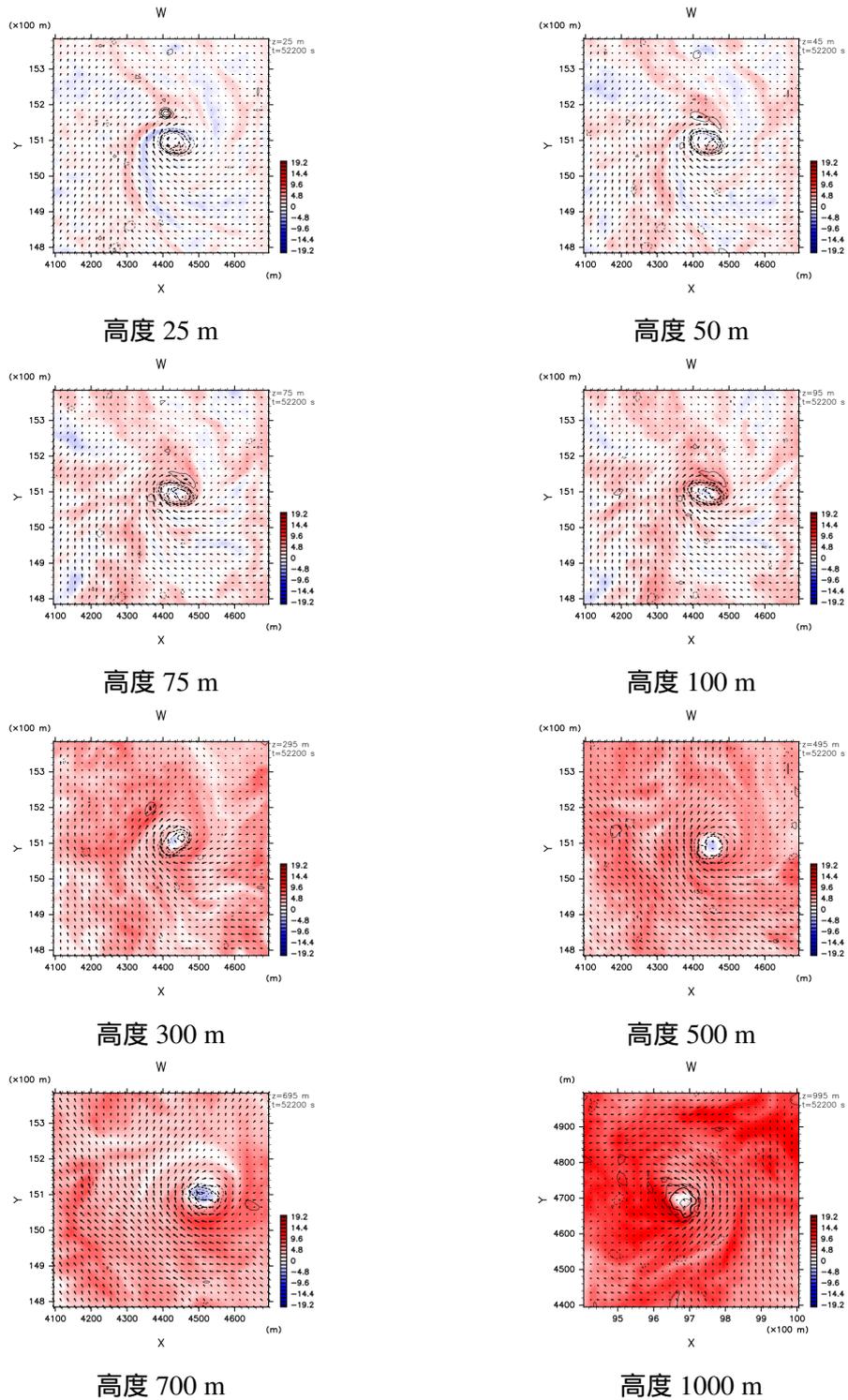


図 4.15: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

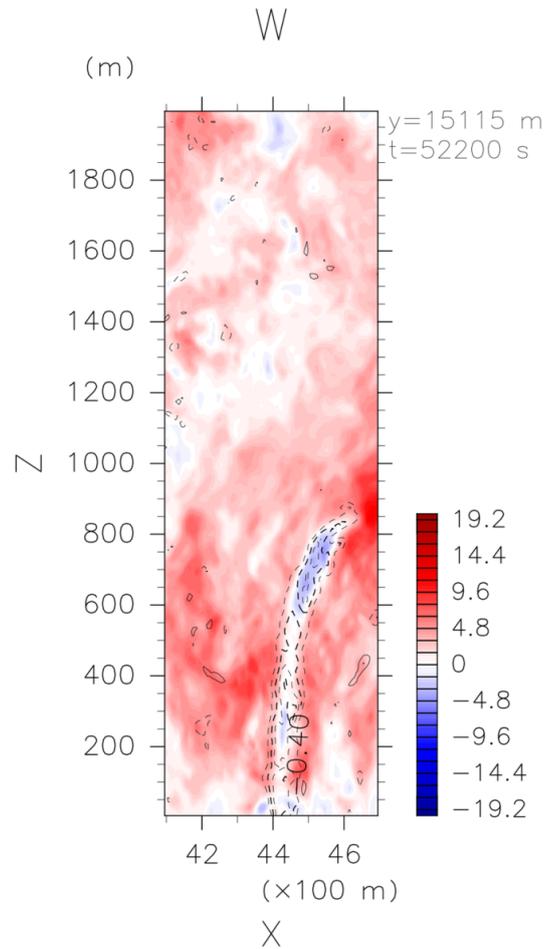


図 4.16: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られた 2 地点目の鉛直断面
 図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

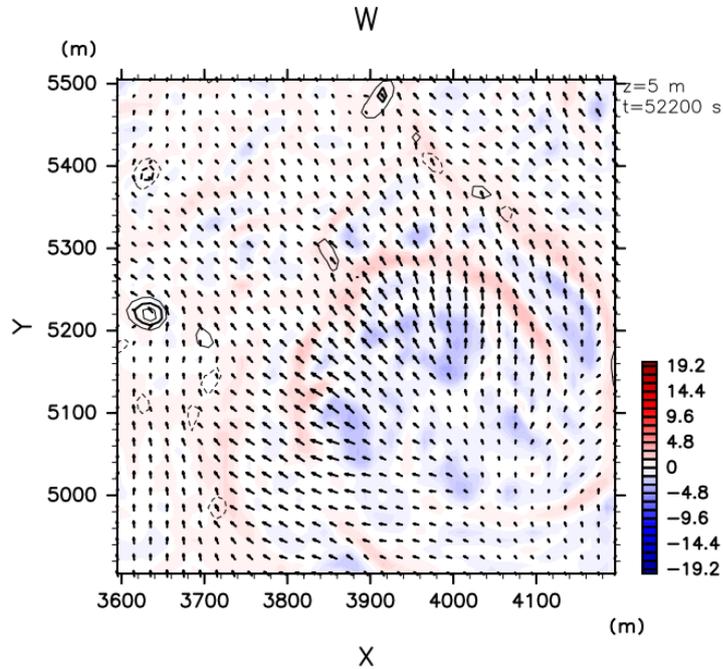


図 4.17: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

グループ	*1	2	*3	*4	*5
格子点数	2	20	14	4	3
最大応力値 [Pa]	0.02142	0.02039	0.01928	0.01855	0.01825
	6	7	*8	9	10
	7	2	3	10	7
	0.01785	0.01777	0.01738	0.01726	0.01716

表 4.2.2: 10 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.

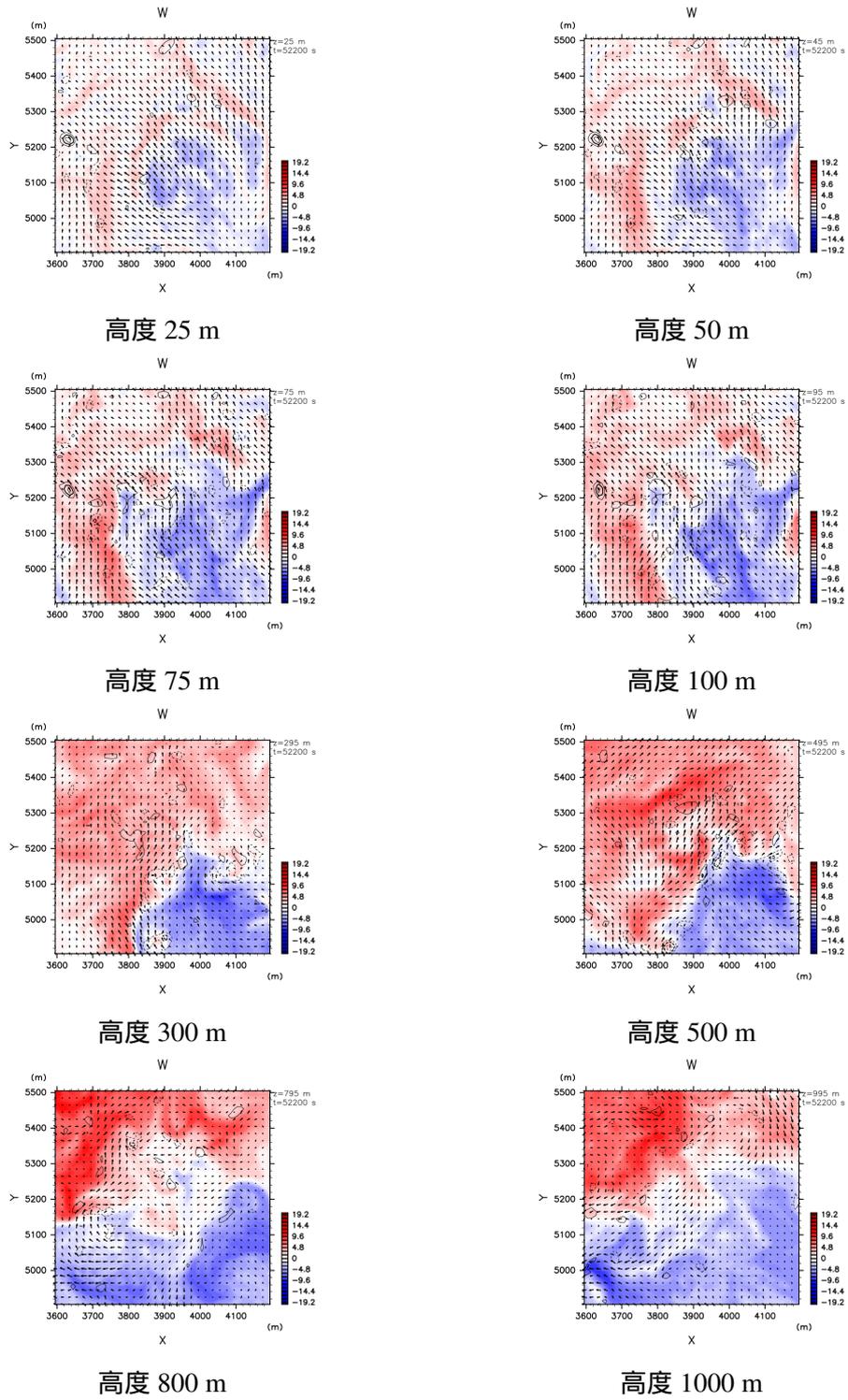


図 4.18: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

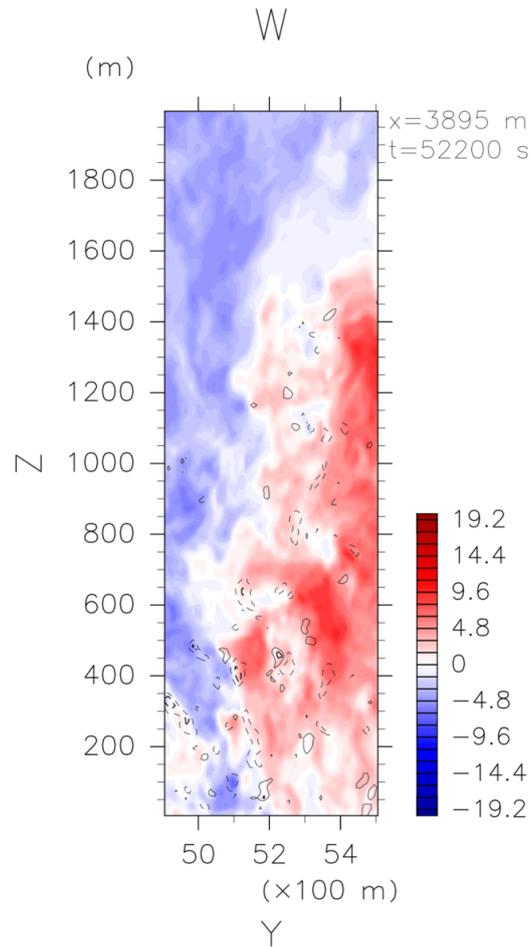


図 4.19: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 1 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

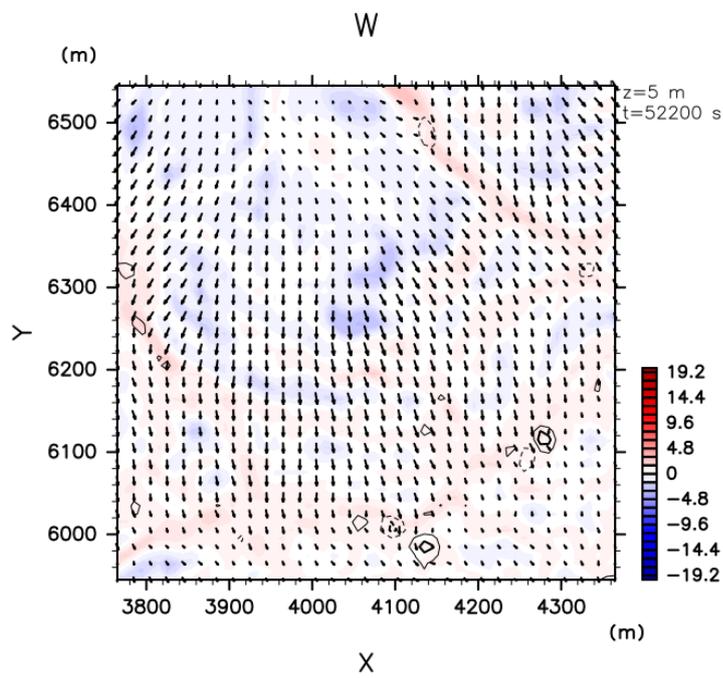


図 4.20: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

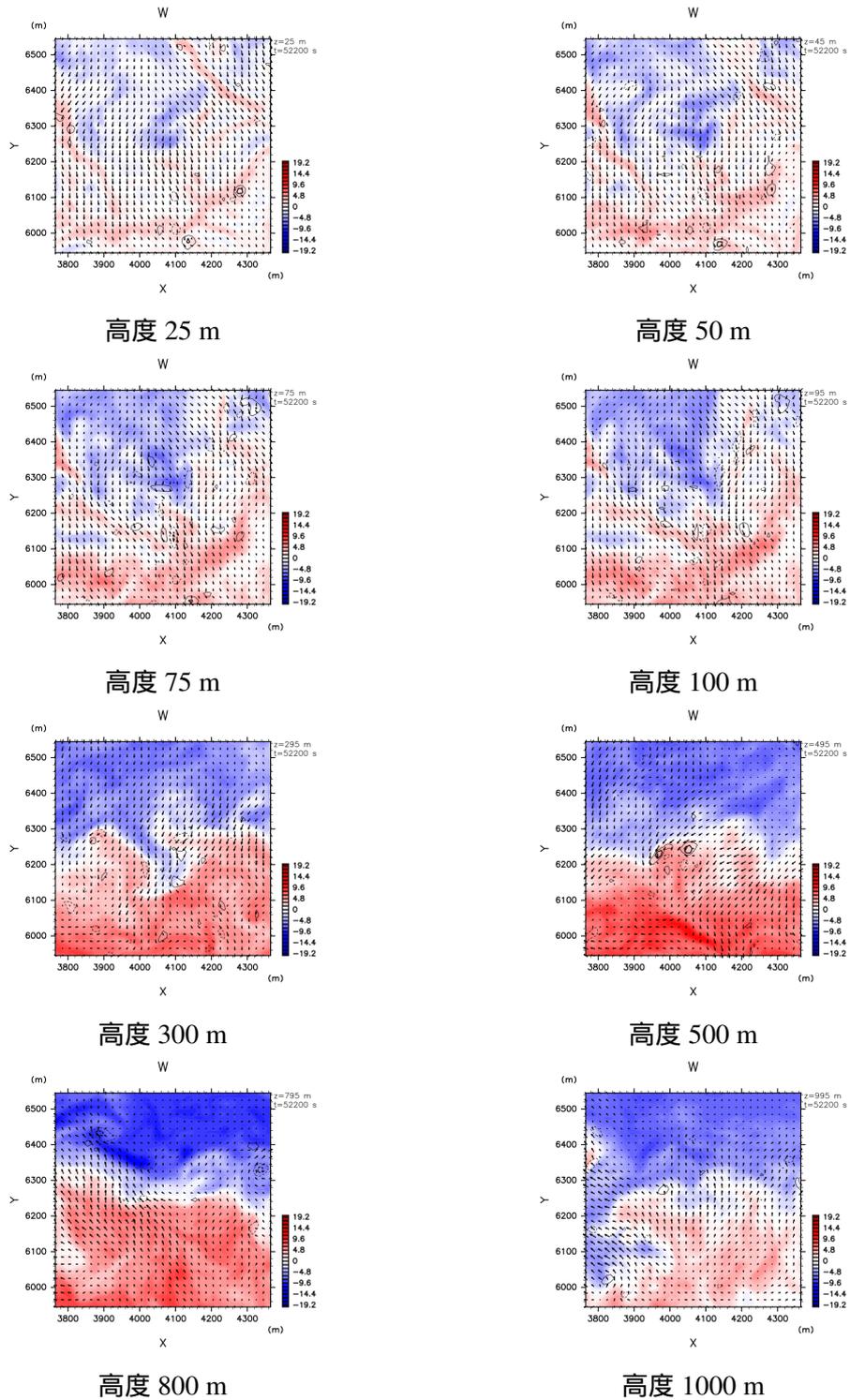


図 4.21: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

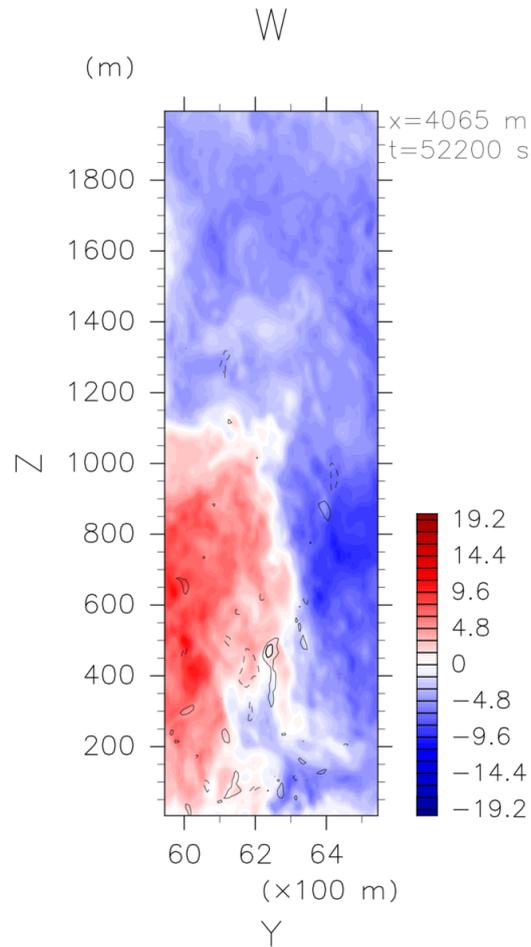


図 4.22: 10 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった 2 地点目の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

4.3 25 m 解像度

25 m 解像度実験の最下層は高度 12.5 m であり, 本節で最下層と言う場合はこの高度面のデータを指す. x, y 各方向の格子点数は 768 であるため, 高度断面のもつ格子点数は約 59 万点である.

4.3.1 地表面応力が大きい地点の分布

図 4.23 は地表面応力が 0.0115 Pa を超える格子点の分布を示す. 閾値を超えた格子

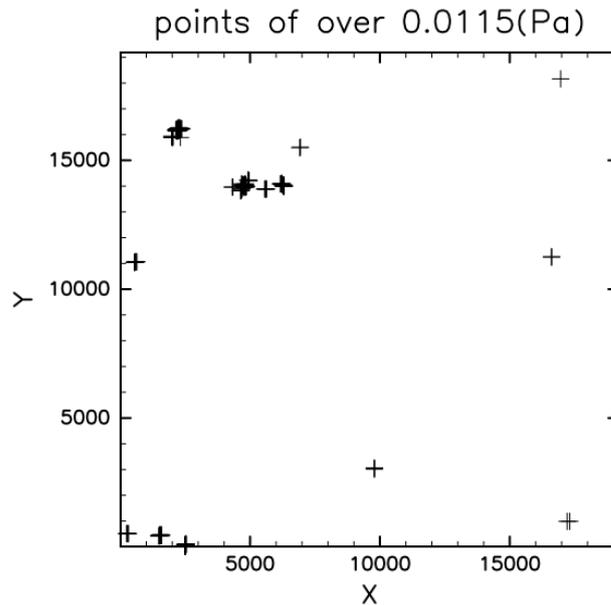


図 4.23: 25 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0115 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.

点数は 136 点で, 最下層の全格子点中の約 0.0231 % にあたる.

4.3.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子

地表面応力が大きい地点での流れ場を調査したところ、孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の両方が存在した。以下では、孤立渦が見られた地点、孤立渦が見られなかった地点それぞれの地点での流れ場の様子を示す。

1. 孤立渦が見られた地点の流れ場の様子

図 4.24 から 4.26 は孤立渦が見られた地点の流れ場である。各地点毎に最下層の流れ場の様子、高度 25 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子、鉛直断面の流れ場の様子を示した。最下層図に着目すると、直径 100 m 程度の孤立渦があることがわかる。この特徴は 5 m 解像度で見られた渦の特徴と合致する。また流れ場の構造に着目すると、5 m 解像度で見られたような渦の内部の下降流は見られないが、渦が存在する地点では渦の周囲に上昇流が存在していた。

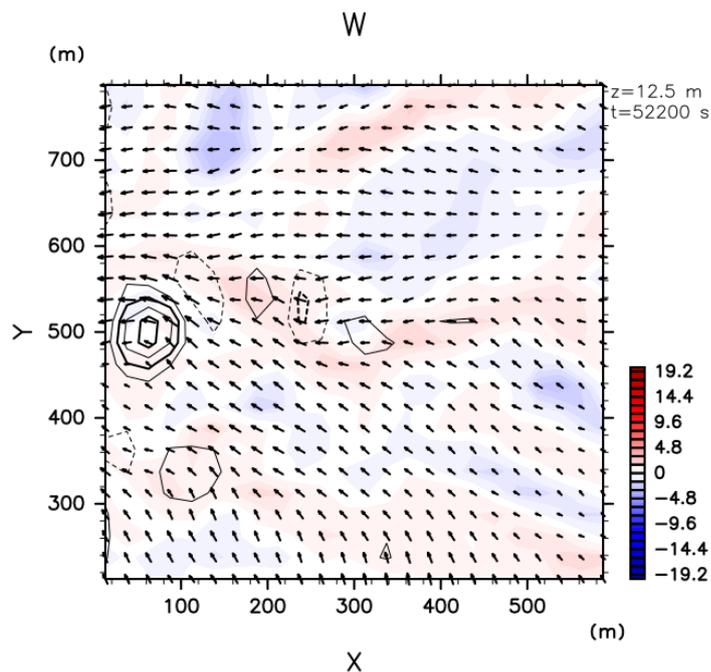


図 4.24: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

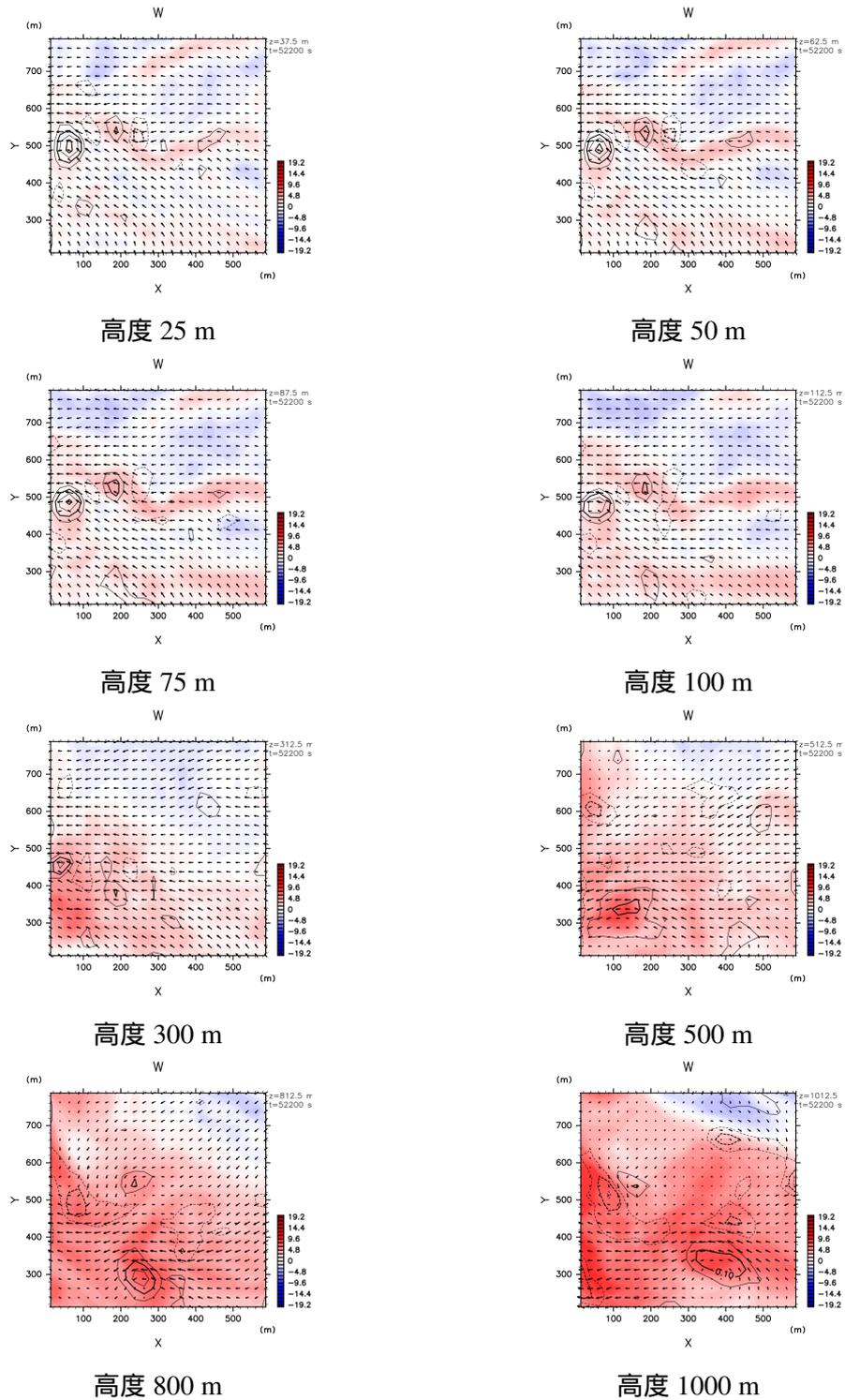


図 4.25: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

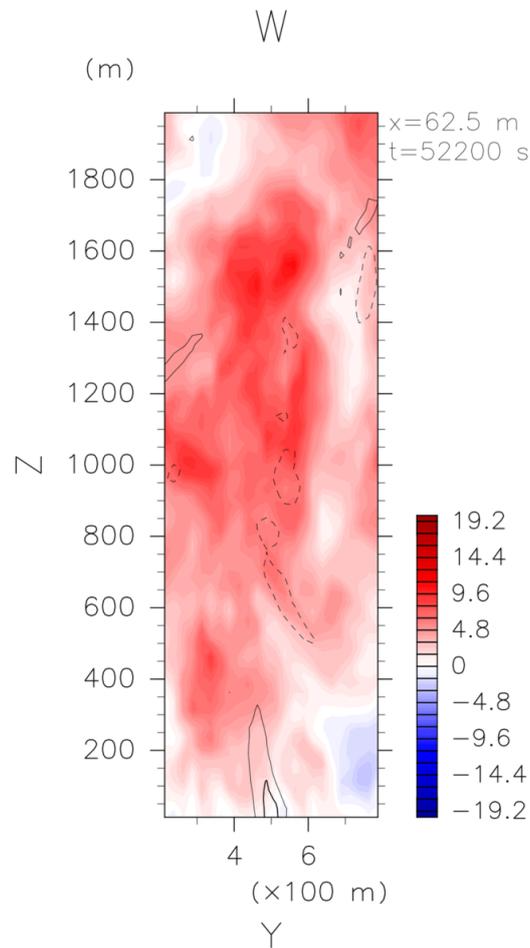


図 4.26: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図.
 トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

2. 孤立渦が見られなかった地点の流れ場の様子

図 4.27 から 4.29 は孤立渦が見られなかった地点の流れ場である. 最下層の流れ場の様子, 高度 25 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した. この地点に見られる特徴としては, 5 m 解像度の孤立渦が見られなかった図と同じように, 最下層の水平風に注目するとほぼ一樣な方向の風があることが挙げられる.

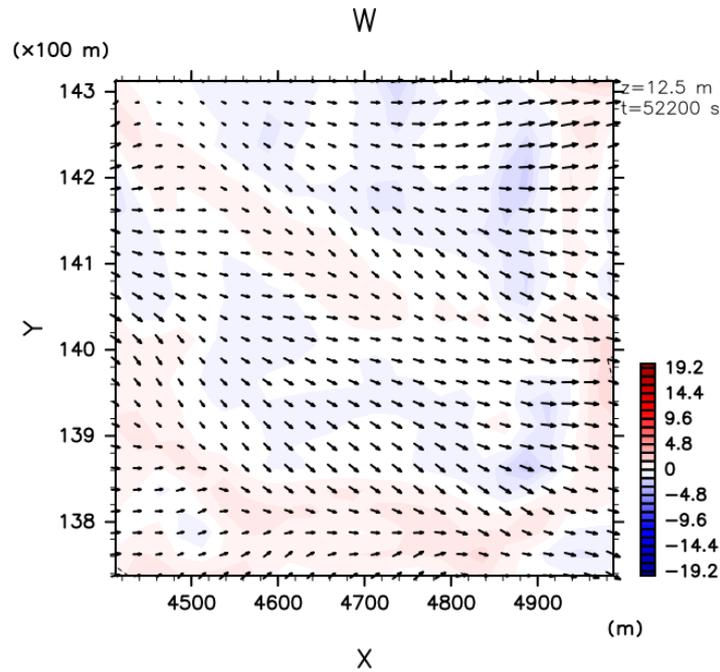


図 4.27: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層
 図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

3. 孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

位置のまとまりが見られた地点をグループ化した結果を記す. 表 4.3.3 は各グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大地表面応力値, 渦の有無を示す. 表 4.3.3 から, 孤立渦が見られたグループ数は 6 つ, 孤立渦が見られなかったグループ数は 4 つであった. これより, 地表面応力が大きい地点をグループにまとめると, 孤立渦が見られたグループ数と見られないグループ数はほぼ同数であった.

グループ	*1	*2	*3	4	*5
格子点数	11	40	10	36	2
応力値 [Pa]	0.02285	0.01707	0.01522	0.01337	0.01255
	*6	7	*8	9	10
	4	13	2	3	2
	0.01232	0.01225	0.01207	0.01202	0.01196

表 4.3.3: 25 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる
 格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印
 が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.

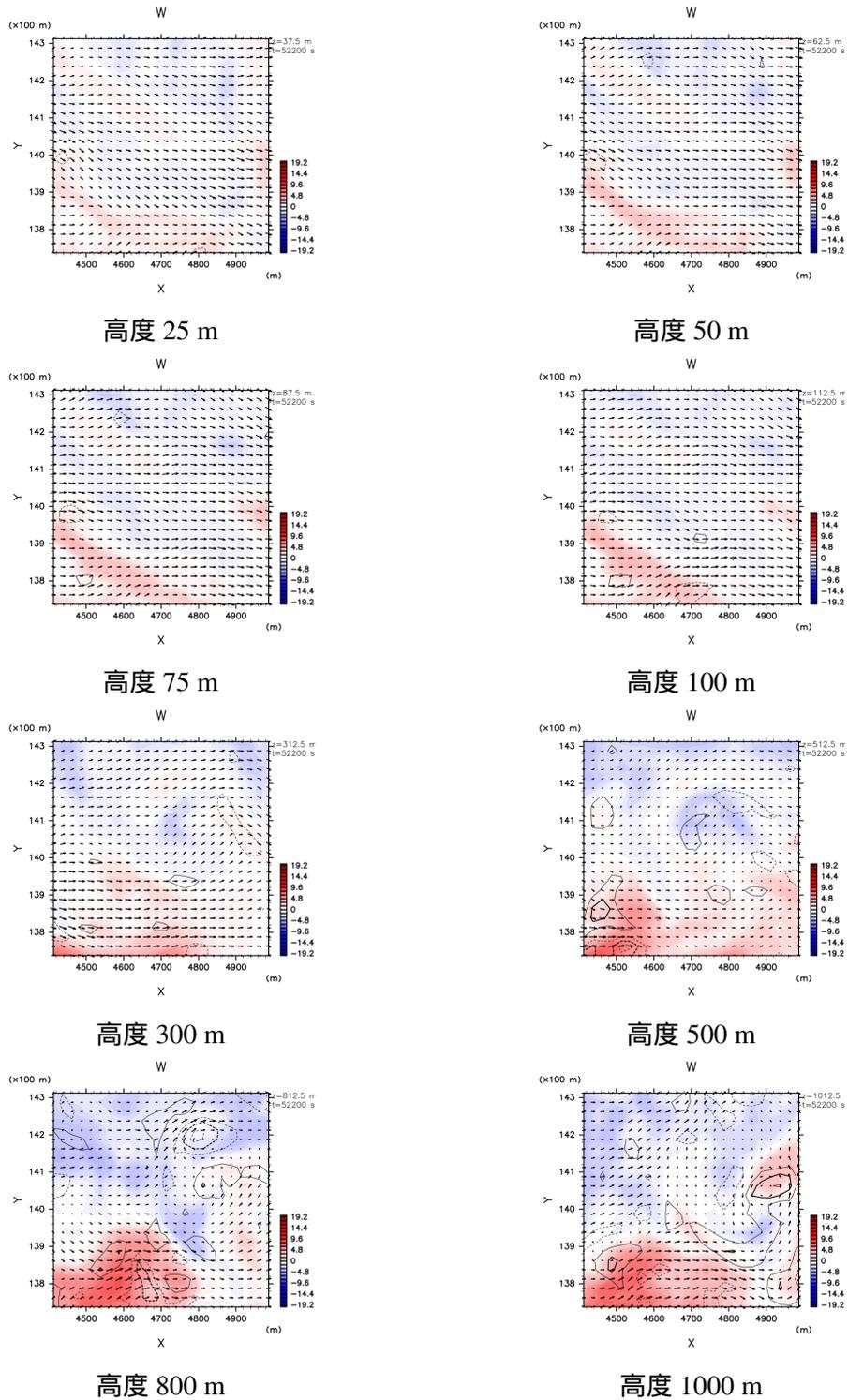


図 4.28: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

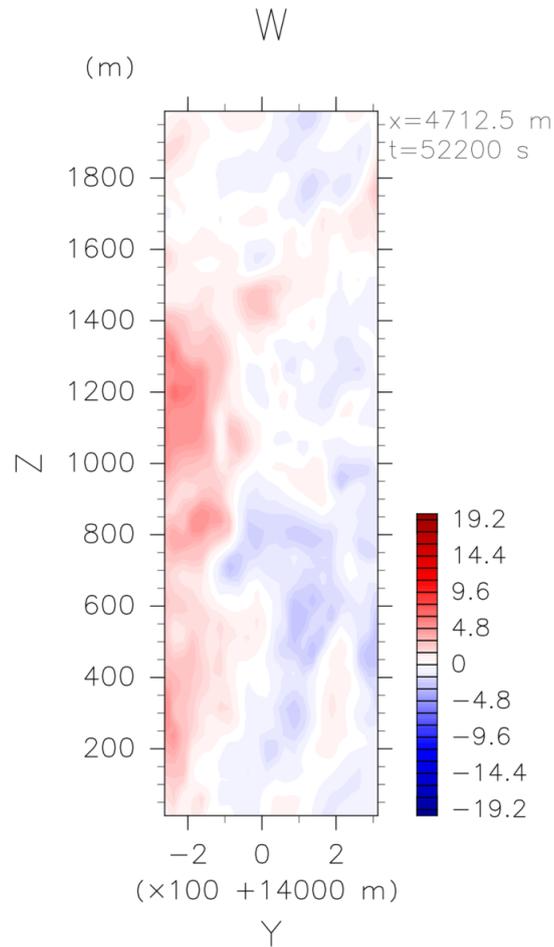


図 4.29: 25 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

4.4 50 m 解像度

x, y 各方向の格子点数は 384 であるため、高度断面のもつ格子点数は約 15 万点である。

4.4.1 地表面応力が大きい地点の分布

図 4.30 は地表面応力が 0.0068 Pa を超える格子点の分布を示す。閾値を超えた格子

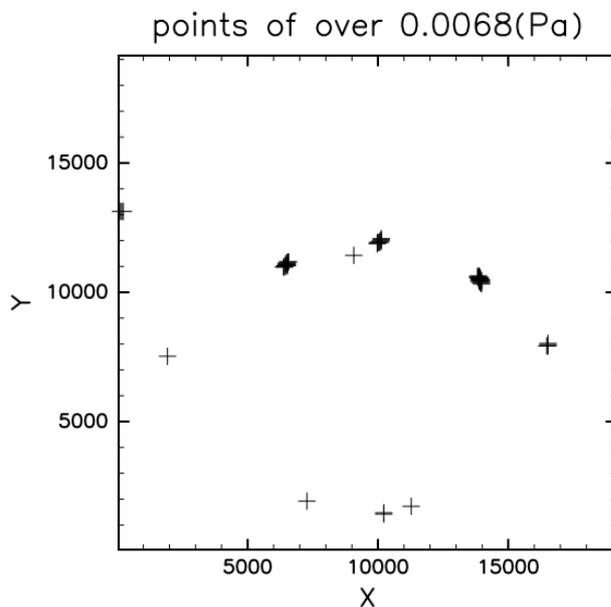


図 4.30: 50 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0068 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す。

点数は 48 点で、最下層の全格子点中の約 0.033 % にあたる。

4.4.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子

地表面応力が大きい地点での流れ場を調査したところ、孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の両方が存在した。以下では、孤立渦が見られた地点、孤

立渦が見られなかった地点それぞれの地点での流れ場の様子を示す。

1. 孤立渦が見られた地点の流れ場の様子

図 4.31 から 4.33 は孤立渦が見られた地点の流れ場である。各地点毎に最下層の流れ場の様子, 高度 300 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した。最下層図に着目すると, 直径 300 m 程度の孤立渦が見られた。これは 5 m 解像度で見られた孤立渦の直径よりも大きな値である。また鉛直断面図に着目すると, 渦の高さは 2 km まで届いている。更に, 流れ場の構造に着目すると孤立渦の周囲に上昇流が存在し, 渦の内部には下降流が存在している様子がわかる。この流れ場の構造は 5 m 解像度で見られたものと同様であった。

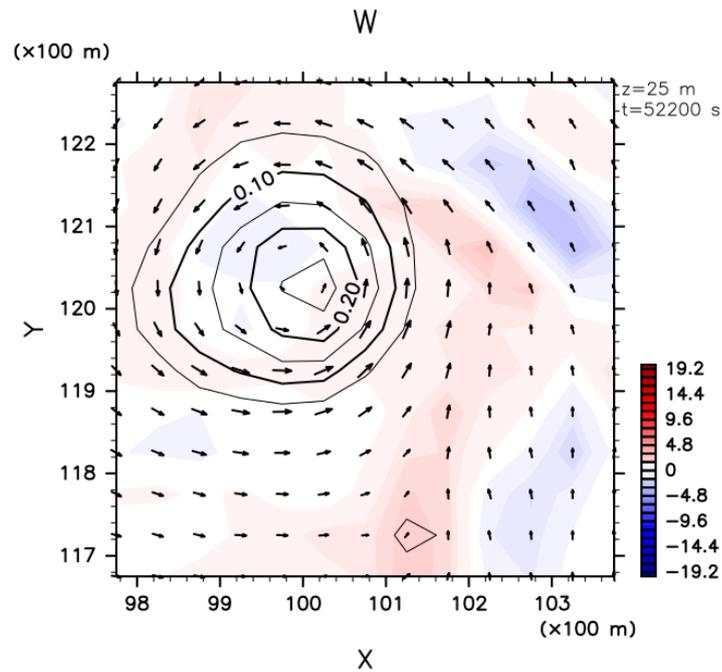


図 4.31: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図。トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様。

2. 孤立渦が見られなかった地点の流れ場の様子

図 4.34 から 4.36 は孤立渦が見られなかった地点の流れ場である。最下層の流れ場の様子, 高度 300 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した。最下層の水平風に注目するとほぼ一様な方向の水平風が存在し

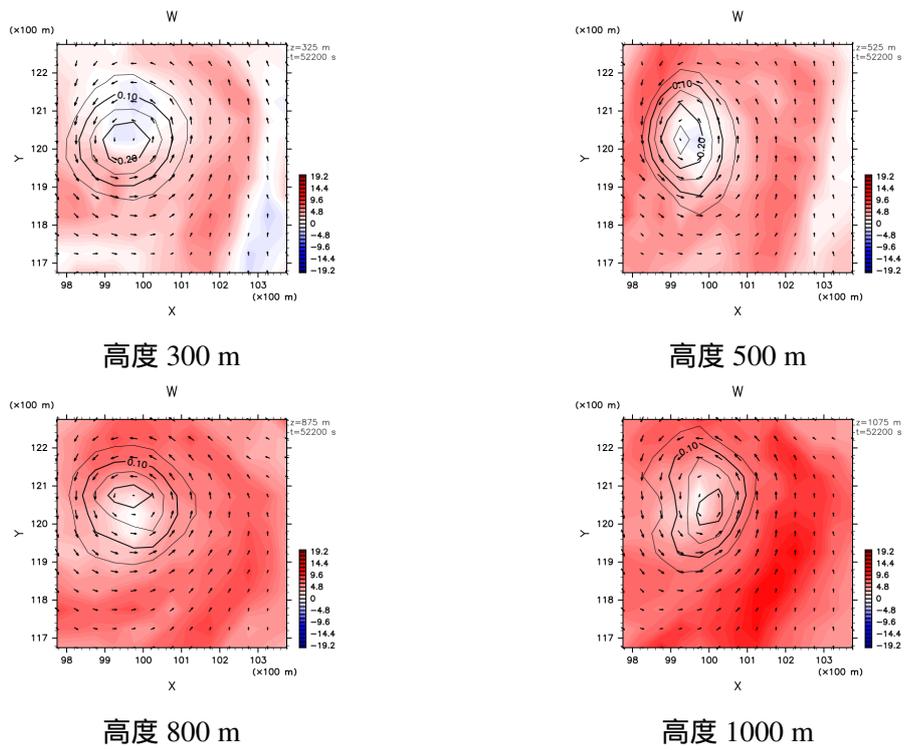


図 4.32: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

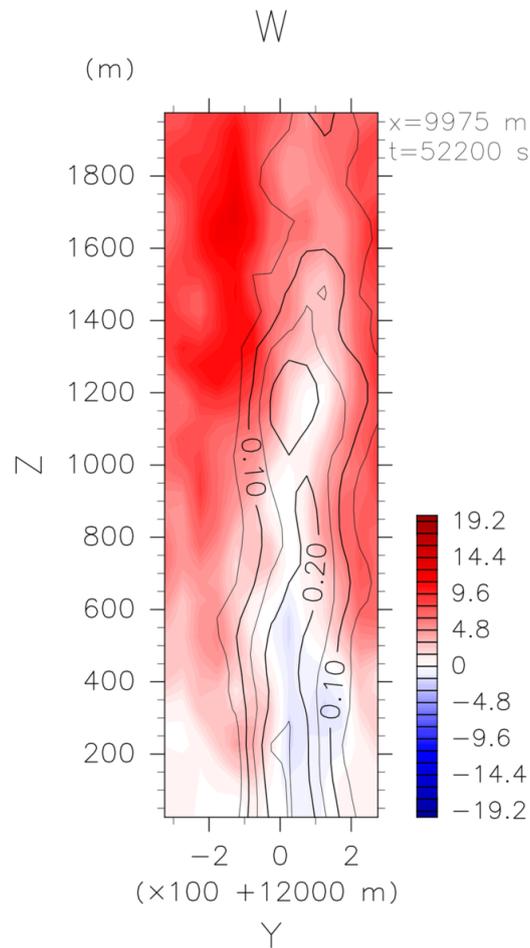


図 4.33: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図.
トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

ている. また鉛直断面図や高度断面図に着目すると, 上昇流と下降流ではっきりと領域が二分されている様子が見て取れる.

3. 孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

位置のまとまりが見られた地点をグループ化した結果を記す. 表 4.4.4 は各グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大地表面応力値, 渦の有無を示す. 表 4.4.4 から, 孤立渦が見られたグループ数は 6 つ, 孤立渦が見られなかったグルー

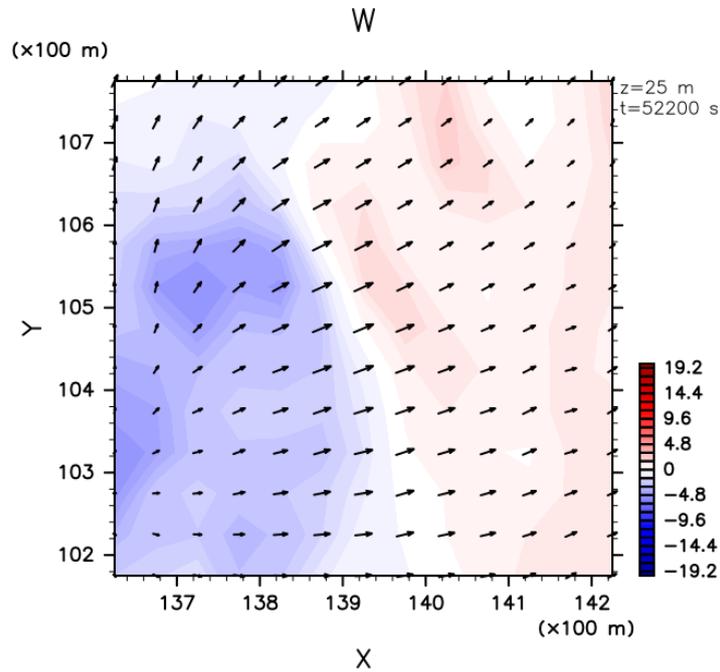


図 4.34: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層
 図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

ブ数は4つであった. これより, 地表面応力が大きい地点をグループにまとめると, 孤立渦が見られたグループ数と見られないグループ数はほぼ同数であった.

グループ	1	*2	3	*4	*5
格子点数	16	11	8	3	1
最大応力値 [Pa]	0.00850	0.00842	0.00811	0.00769	0.00753
	*6	*7	8	9	*10
	1	2	4	1	1
	0.00752	0.00741	0.00734	0.00697	0.00692

表 4.4.4: 50 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる
 格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値. * 印
 が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.

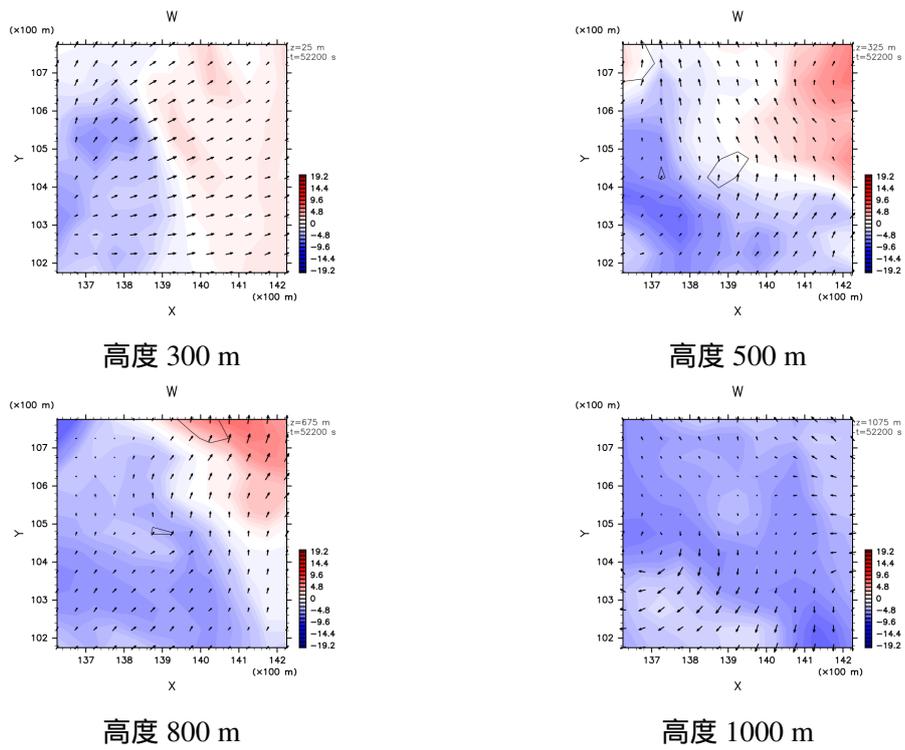


図 4.35: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

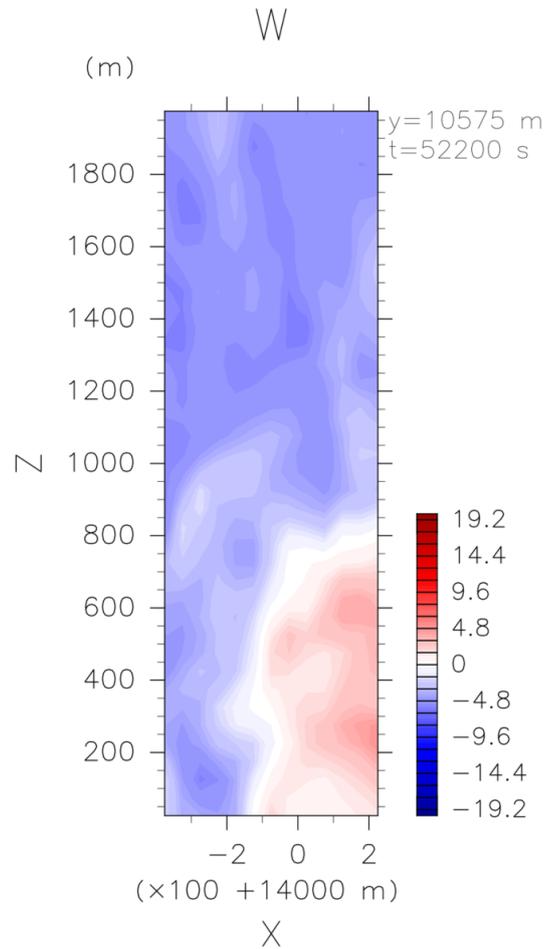


図 4.36: 50 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

4.5 100 m 解像度

x, y 各方向の格子点数は 192 であるため, 高度断面のもつ格子点数は約 4 万点である.

4.5.1 地表面応力が大きい地点の分布

図 4.37 は地表面応力が 0.0042 Pa を超える格子点の分布を示す. 閾値を超えた格子

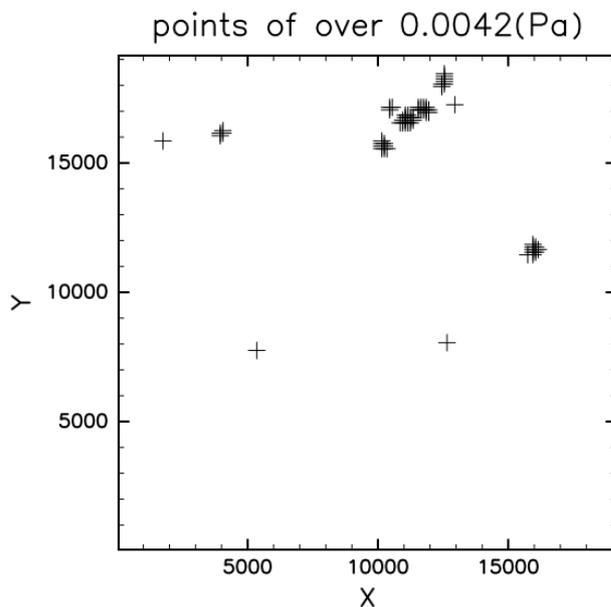


図 4.37: 100 m 解像度実験結果における地表面応力 0.0042 Pa を超える格子点の最下層の全体領域分布. + 印は閾値を超える格子点の位置を示す.

点数は 63 点で, 最下層の全格子点中の約 0.171 % にあたる.

4.5.2 地表面応力が大きい地点での流れ場の様子

地表面応力が大きい地点での流れ場を調査したところ, 孤立渦が見られた地点と孤立渦が見られなかった地点の両方が存在した. 以下では, 孤立渦が見られた地点, 孤

立渦が見られなかった地点それぞれの地点での流れ場の様子を示す。

1. 孤立渦が見られた地点の流れ場の様子

図 4.38 から 4.40 は孤立渦が見られた地点の流れ場である。各地点毎に最下層の流れ場の様子, 高度 300 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛直断面の流れ場の様子を示した。最下層図に着目すると, 直径 400 m 程度の孤立渦が見られた。これは 5 m 解像度で見られた孤立渦の直径よりも大きな値である。また鉛直断面図に着目すると, 渦の高さは 1.6 km であった。更に, 流れ場の構造に着目すると孤立渦の周囲に上昇流が存在し, 渦の内部には下降流が存在している様子がわかる。この流れ場の構造は 5 m 解像度で見られたものと同様であった。

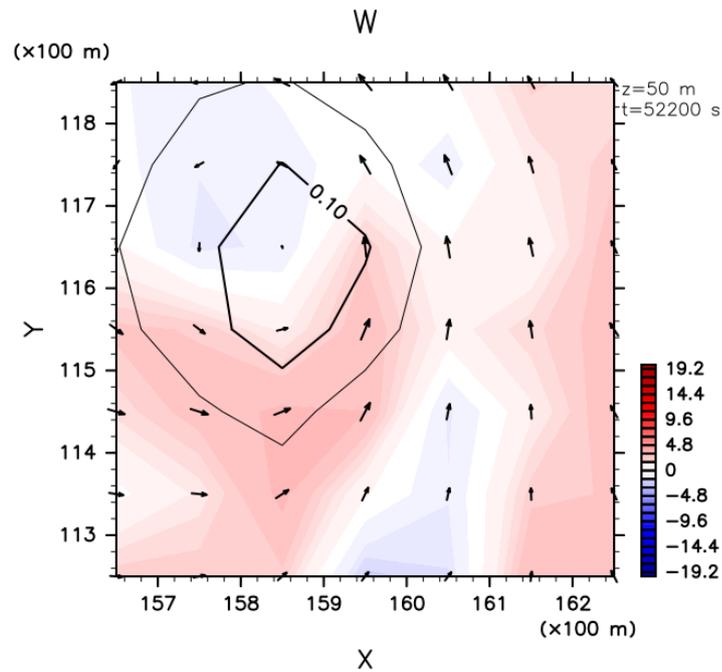
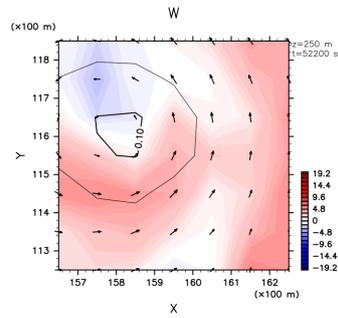


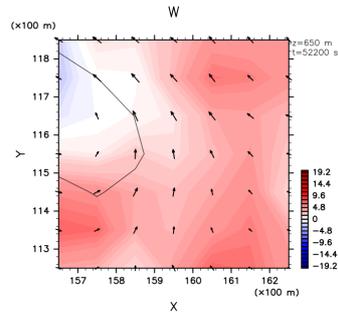
図 4.38: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の最下層図。トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様。

2. 孤立渦が見られなかった地点の流れ場の様子

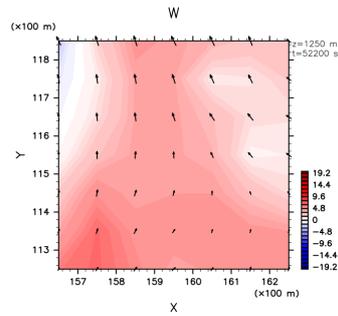
図 4.41 から 4.43 ははっきりと孤立渦が見取れなかった地点の流れ場である。最下層の流れ場の様子, 高度 300 m から 1000 m までの高度断面の流れ場の様子, 鉛



高度 300 m



高度 800 m



高度 1000 m

図 4.39: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の高度 25 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

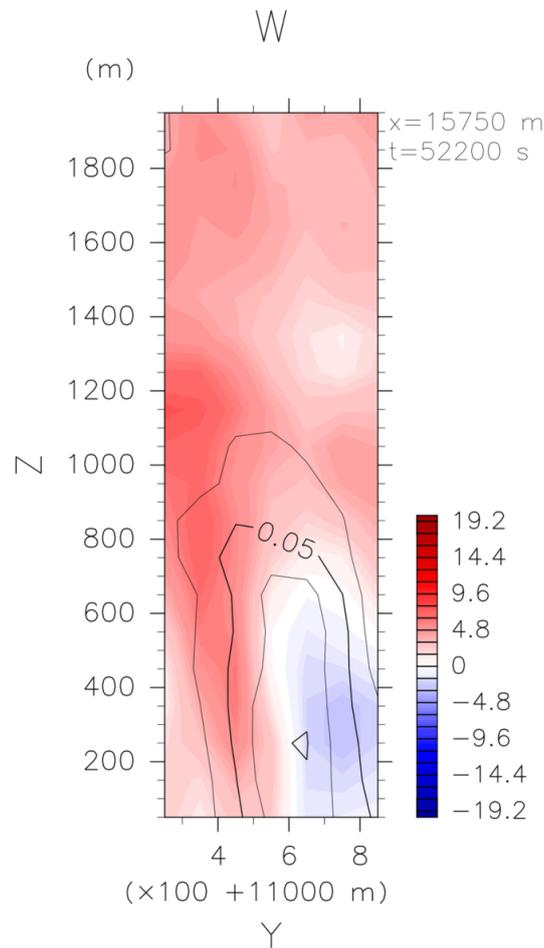


図 4.40: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られた地点の鉛直断面図.
トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

直断面の流れ場の様子を示した. 最下層の水平風に注目するとほぼ一様な方向の水平風が存在している.

3. 孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

位置のまとまりが見られた地点をグループ化した結果を記す. 表 4.5.5 は各グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大地表面応力値, 渦の有無を示す. 表 4.5.5 から, 孤立渦が見られたグループ数は 5 つ, 孤立渦が見られなかったグループ

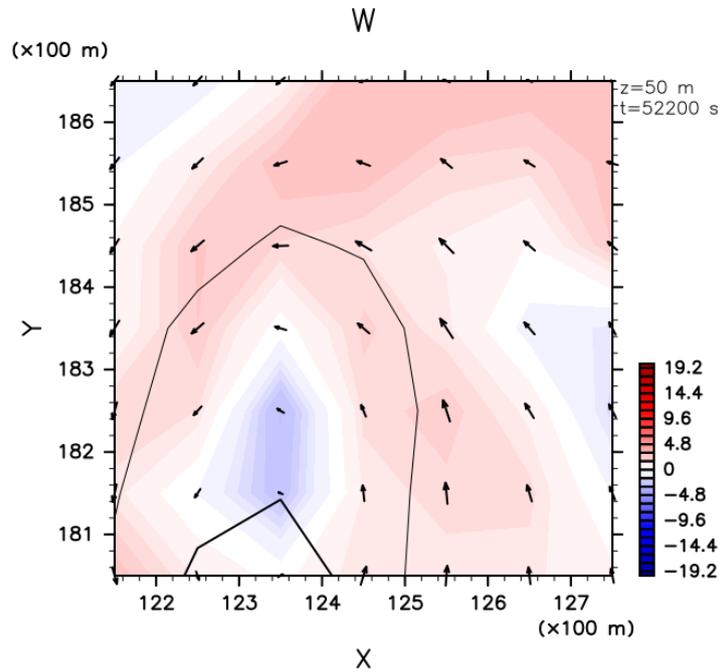
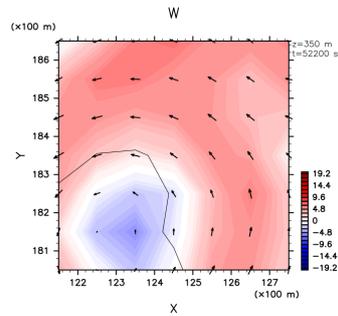


図 4.41: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の最下層
 図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

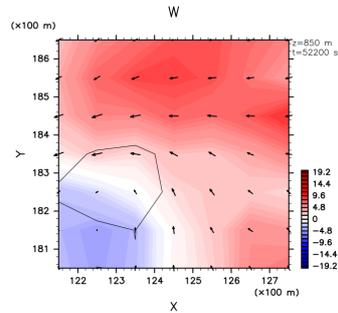
ブ数は5つであった. これより, 地表面応力が大きい地点をグループにまとめると, 孤立渦が見られたグループ数と見られないグループ数は5 m 解像度の結果と同じく, 同数であった.

グループ	*1	*2	3	4	5
格子点数	7	10	16	8	11
最大応力値 [Pa]	0.00653	0.00622	0.00537	0.00482	0.00478
	*6	*7	8	*9	10
	3	4	1	1	1
	0.000454	0.00440	0.00434	0.00423	0.00421

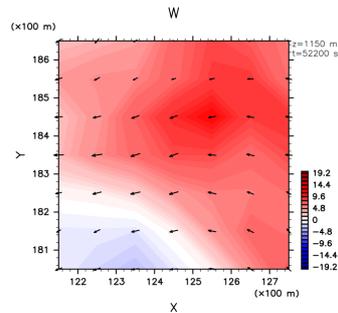
表 4.5.5: 100 m 解像度実験の地表面応力上位 10 グループに含まれる格子点数とグループ内の格子点の最大値表面応力値.
 * 印が付いたグループ番号では孤立渦が見られたことを示す.



高度 300 m



高度 500 m



高度 1000 m

図 4.42: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の高度 300 m から 1000 m の高度断面図. トーン, 等値線, 矢印の表す物理量は図 4.4 と同様.

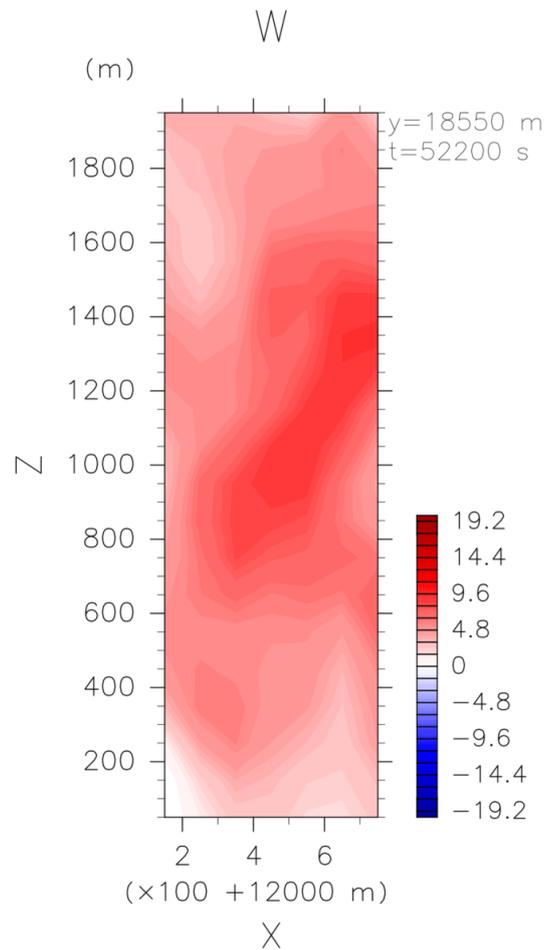


図 4.43: 100 m 解像度実験, 孤立渦が見られなかった地点の鉛直断面図. トーン, 等値線の表す物理量は図 4.6 と同様.

4.6 結果のまとめと考察

10 m 解像度から 100 m 解像度までの地表面応力の大きい地点における流れ場の解析から得られた結果について考察する. 前節までの解析結果から, 表 4.6.6 には各解像度の地表面応力の大きい地点の流れ場の特徴をまとめた. また, 4.6.7 には各解像度で解析を行った 10 グループにおける最大応力値をまとめた. なお, 表 4.6.6 および表 4.6.7 には比較のため 5 m 解像度での特徴も記載している, 以下ではそれぞれの項目について解像度間の比較を行い, 解像度に依らず共通した特徴があるかな

どについて議論する.

解像度	5 m	10 m	25 m	50 m	100 m
孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比	5 : 5	5 : 5	6 : 4	6 : 4	5 : 5
典型的な孤立渦の直径 [m]	100	100	100	300	400
典型的な孤立渦の高さ [km]	1-2	1-2	1-2	1-2	1

表 4.6.6: 地表面応力の大きい地点の流れ場の解析から得られた, 流れ場の特徴の解像度別まとめ

グループ \ 解像度	5 m	10 m	25 m	50 m	100 m
1	* 0.04674	* 0.02142	* 0.02285	0.00850	* 0.00653
2	* 0.04148	0.02039	* 0.01707	* 0.00842	* 0.00622
3	0.03141	* 0.01928	* 0.01522	0.00811	0.00537
4	* 0.02791	* 0.01855	0.01337	* 0.00769	0.00482
5	0.02722	* 0.01825	* 0.01255	* 0.00753	0.00478
6	0.02702	0.01785	* 0.01232	* 0.00752	* 0.00454
7	* 0.02701	0.01777	0.01225	* 0.00741	* 0.00440
8	0.02637	* 0.01738	* 0.01207	0.00734	0.00434
9	* 0.02577	0.01726	0.01202	0.00697	* 0.00423
10	0.02526	0.01726	0.01196	* 0.00692	0.00421

表 4.6.7: 5 m, 10 m, 25 m, 50 m, 100 m の各解像度実験の地表面応力上位 10 グループにおける, 各地点の最大応力値 [Pa]. * 印が付いた応力値では孤立渦が見られたことを示す

孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比

孤立渦が見られた地点数と孤立渦が見られなかった地点数の比を見ると, 10 m から 100 m のすべての解像度でおよそ 5 : 5 となった. この結果は村橋 他 (2017) の 5 m 解像度実験結果の解析で見られた特徴と同じである.

典型的な孤立渦の直径と高さ

解像度毎の渦に見られる典型的な孤立渦の直径と高さについてその特徴を見ると、解析を行った 10 m から 100 m の各解像度は大きく二分される。すなわち、5 m 解像度にて見られた孤立渦の特徴と合致する 10 m, 25 m 解像度と、5 m 解像度で見られたような直径の孤立渦は見られなかった 50 m, 100 m 解像度とに分けられる。それに対し、いずれの解像度で見られた孤立渦でも、渦の周囲に上昇流が存在し渦の中心付近には下降流が見られるものもあるという共通した渦の構造が認められた。よって、表現できる渦のサイズには解像度によって違いがあるものの、渦の構造はいずれの解像度でも共通していたため、解像度間で見られる渦の種類に違いはないと言えると思われる。

各解像度の応力値の比較

解像度間での応力値を比較すると、解像度が低くなるにつれて地表面応力の値は小さくなる傾向にあると言える。これは村橋 他 (2017) の調査した解像度間の地表面応力頻度分布に見られた傾向と合致する。

考察

解析結果からまとめられた解像度間に見られる特徴から、今回の解析で対象とした解像度以外の解像度に対しても主張可能なことや、もしくは主張するためにどのような研究が更に必要かを考える。

まず、地表面応力の大きい場所では孤立渦を伴う地点と孤立渦を伴わない地点が半々となるという特徴が各解像度に共通して見られたことから、この特徴は 5 m から 100 m 以外の解像度にも見られると考えられる。これより、ダスト巻き上げパラメタライズを考える際は地表面応力の大きい地点では渦のみを想定するのではなく、渦構造を伴わない流れ場についても考慮すべきだと言える。

次に、各解像度で見られた孤立渦の特徴の比較から考察する。5 m 解像度で見られた渦の特徴と 10 m, 25 m 解像度で見られた渦の特徴が一致したが、10 m, 25 m 解像度の結果から 5 m 解像度の渦について見積もり可能かどうかはこの結果のみからは判断できないと思われる。その理由としては、10 m, 25 m 解像度で見られた 100 m サイズの渦が、5 m 解像度の地表面応力の上位地点で見られた渦に対応しているのか、それともより小さい地表面応力を持った渦に対応しているのかが不明であることが挙げられる。これを検証するためには、次の内容について調査することが考

えられる。5 m 解像度実験結果において、地表応力値の上位地点以外に 10 m, 25 m 解像度で渦が見られた地表面応力 (0.02 Pa 程度) を含む様々な地表面応力値を持つ地点での流れ場の構造を調査する。この調査において地表面応力の値に応じて渦構造の変化があるかどうかを調べることで、地表面応力の上位地点に解像度間で共通する渦構造が存在するかどうか評価できると考える。

また、解像度間の応力値比較では解像度が低くなるにつれて地表面応力の値は小さくなる傾向が見られたが、各解像度間での地表面応力の低下の仕方を求めるには本研究の結果のみでは不十分である。これを求めるには各解像度で実験設定を今回と同じくした LES 実験を多数回行うことから得られる統計値を求める必要があると思われる。

第5章 まとめ

本研究では Nishizawa et al. (2016) が行った世界最高解像度の火星大気 LES 計算結果を用いて、10 m 解像度から 100 m 解像度までの各解像度の地表面付近の流れ場について解析した。そして、この解析結果と村橋 他 (2017) の行った 5 m 解像度の解析結果との比較を行うことで地表面応力の大きい地点の流れ場の解像度依存性を調べた。

本研究の結果得られた、地表面応力の大きい地点における流れ場の特徴について各解像度で共通していたものと異なっていたものを以下にまとめる。まず、各解像度で共通して見られた特徴は、どの解像度でも孤立渦が見られ、その渦構造も共通していたこと、また孤立渦がある地点数と無い地点数の割合はおよそ 5 : 5 であったことである。これらは村橋 他 (2017) の 5 m 解像度解析結果で見られた特徴と合致していた。次に、各解像度で異なっていた特徴は、孤立渦のサイズである。10 m、25 m 解像度と 50 m、100 m 解像度で差異が見られ、前者では 5 m 解像度で見られた孤立渦の特徴と合致する 100 m サイズの渦が見られたが、後者では 300 - 400 m のサイズの渦が見られた。

また、各解像度での地表面応力の特徴については、解像度が低くなるにつれて地表面応力の値が小さくなる傾向にあることが言える。これは村橋 他 (2017) の調査した解像度間の地表面応力頻度分布に見られた傾向と合致する。

本研究の結果から、5 m 解像度実験の解析で得られた地表面応力の大きい地点における流れ場の特徴は他の解像度でもよく見られることがわかった。これより、ダスト巻き上げ過程を考える際には解像度依存性があると思われる流れ場の特徴について考慮すべきであると主張できる。具体的には、孤立渦が見られた地点数と見られない地点数の比が 5 : 5 であったことから、解像度に依らず孤立渦を持つ場合と渦以外の流れ場を持つ場合との両方を考慮する必要があることが示唆された。また、今回得られた解析結果のみを用いて、渦の大きさや強さなどについての解像度間の相関を見積もるのは難しいと思われる。この理由は各解像度で見られた渦が他解像度のどの応力値における渦と対応しているかが不明であるためである。解像度間で渦の見積もりを行うには、地表面応力と渦の特徴との関係を調べることが必要となる。今後 5 m 解像度実験で地表面応力値と渦の特徴との関係を調べたり、各解像度の応力値などについて統計量を求めて解像度間の比較を行ったりすることで

見積もりができるようになる可能性があると思われる。また、本研究は LES 実験結果のうち $LT = 14:30$ におけるデータのみを解析したため、本研究で得られた流れ場の特徴がこの時刻でのみ見られるものなのか、他の時刻とも共通して見られるものなのかは不明である。従って、他の時間について今回の研究と同様の解析を行うことで得られる結果についても調査し、今回の解析結果と同様の特徴が見られるかを確認することも重要と思われる。

参考文献

Nishizawa, S., M. Odaka, Y. O. Takahashi, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, S. Takehiro, H. Yashiro, Y. Sato, H. Tomita, and Y.-Y. Hayashi, 2016: Martian dust devil statistic from high-resolution large-eddy, *Geophys. Res. Lett.*, **Vol. 43, Issue 9**, 4180-4188.

Nishizawa, S., H. Tomita, and Team SCALE, 2016: The detail formulation of SCALE-LES, https://scale.aics.riken.jp/doc/scale_les_description.pdf.

Odaka, M., K. Nakajima, M. Ishiwatari, and Y.-Y. Hayashi., 2001: A numerical simulation of thermal convection in the Martian lower atmosphere with a two-dimensional anelastic model, *Nagare Multimedia*, <http://www2.nagare.or.jp/mm/2001/odaka/index.htm>.

Rafkin, S. C., J. L. Hollingsworth, M. A. Mischna, C. E. Newman, and M. I. Richardson, 2013: Mars: Atmosphere and Climate Overview, Comparative Climatology of Terrestrial Planets, *University of Arizona Press, Tucson*, Comparative Climatology of Terrestrial Planets, 55-89.

Rennó, N. O., M. L. Burkett, and M. P. Larkin, 1998: A simple thermodynamical theory for dust devils, *J. Atmospheric. Sci.*, **55, Issue 21**, 3244-3252.

Smith, M. D. , 2009: THEMIS observations of Mars aerosol optical depth from 2002-2008, *Icarus*, **202, Issue 2**, 444-452.

Spiga, A., E. Barth, Z. Gu, F. Hoffman, J. Ito, B. J. Smith, M. Klose, S. Nishizawa, S. Raasch, S. Rafkin, T. Takemi, D. Tyler, and W. Wei, 2016: Large-Eddy Simulations of Dust Devils and Convective Vortices, *Space. Sci. Rev.*, **203**, 245-275.

村橋究理基, 西澤誠也, 石渡正樹, 小高正嗣, 須藤康平, 中島健介, 竹広真一, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 高解像度 LES によって得られた火星大気境界層における循環構造 (The circulation structure in the Martian atmospheric boundary layer

obtained by high resolution LES), JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 講演番号 MGI32-P01.

村橋究理基, 西澤誠也, 石渡正樹, 小高正嗣, 須藤康平, 中島健介, 竹広真一, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 火星大気を想定した高解像度 LES で得られた地表面応力分布, 日本気象学会 2017 年度春季大会, 講演番号 B165.

村橋究理基, 須藤康平, 西澤誠也, 石渡正樹, 小高正嗣, 中島健介, 竹広真一, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 高解像度の火星大気ラージエディースミュレーションで得られた地表面応力, 日本惑星科学会 2017 年秋季講演会, 講演番号 D8.

村橋究理基, 須藤康平, 西澤誠也, 石渡正樹, 小高正嗣, 中島健介, 竹広真一, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 火星大気境界層高解像度 LES によって得られた強い地表面応力の空間分布, 日本気象学会 2017 年度秋季大会, 講演番号 P261.

村橋究理基, 須藤康平, 西澤誠也, 石渡正樹, 小高正嗣, 中島健介, 竹広真一, 杉山耕一郎, 高橋芳幸, 林祥介, 2017: 火星大気境界層 LES で表現された対流と渦, 大気乱流層ミニワークショップ, 2017/11/20, 惑星科学研究センター.