



火星大気の Large-eddy simulation - 境界層乱流およびダストデビルの解明に向けて -

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

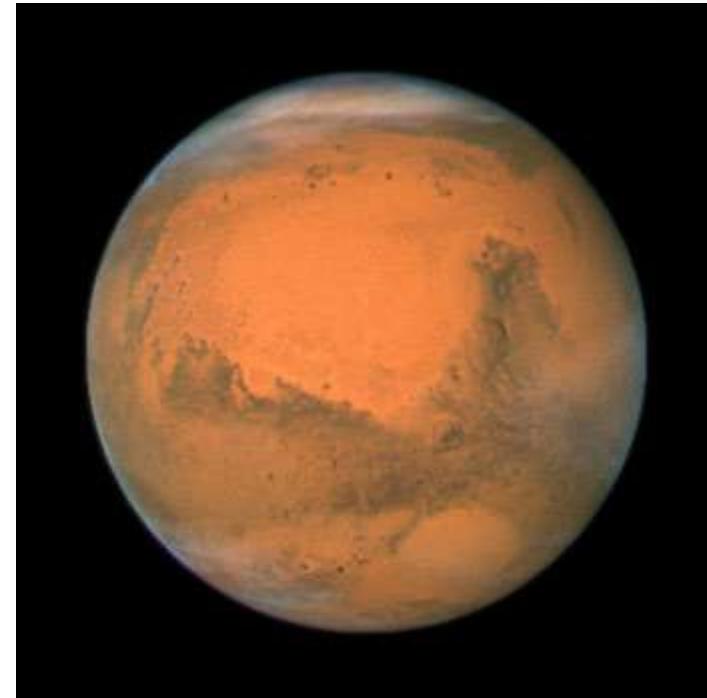


はじめに 1



・ 火星とは

- 軌道長半径: 約 1.5AU
- 公転周期 : 約 1.88 地球年
- 自転周期 : 約 1.026 地球日
- 赤道半径 : 約 3396km
- 大気組成 : 二酸化炭素 約95%
- 地表大気圧: 約 7hPa
- 地表温度 : 130-300K



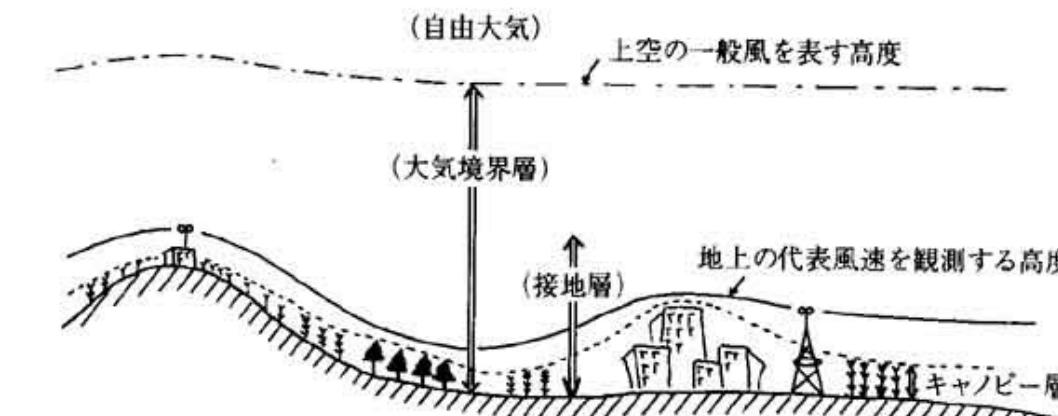
© NASA, ESA, the Hubble Heritage Team



はじめに 2



- 惑星境界層 (Planetary boundary layer)
 - 地表面付近の良く混合した大気層 (太陽光による地表面加熱が原因)
 - 強い対流・乱流が存在
 - 地表面-大気間のエネルギー・物質交換を決定 (大循環に影響)

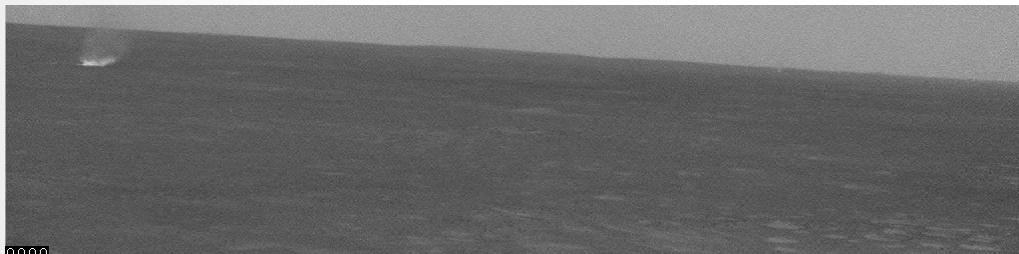


近藤 (1987)

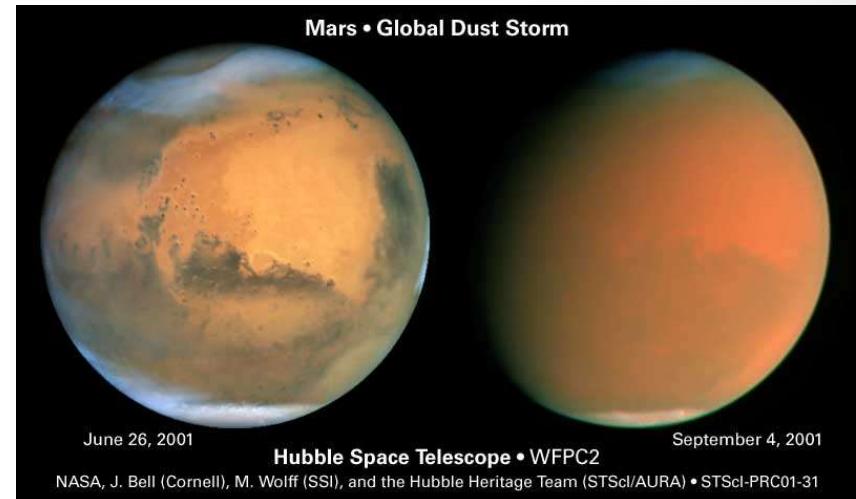
はじめに 3



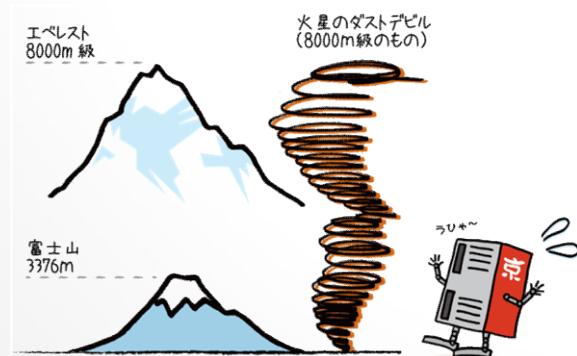
- 対流渦、ダストデビル
 - 渦等によりダスト(砂)を巻き上げ、ダストストームを引き起こす
 - 全球を覆うようなダストストームに発展することもある



<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20050527a.html>



http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast11oct_2/



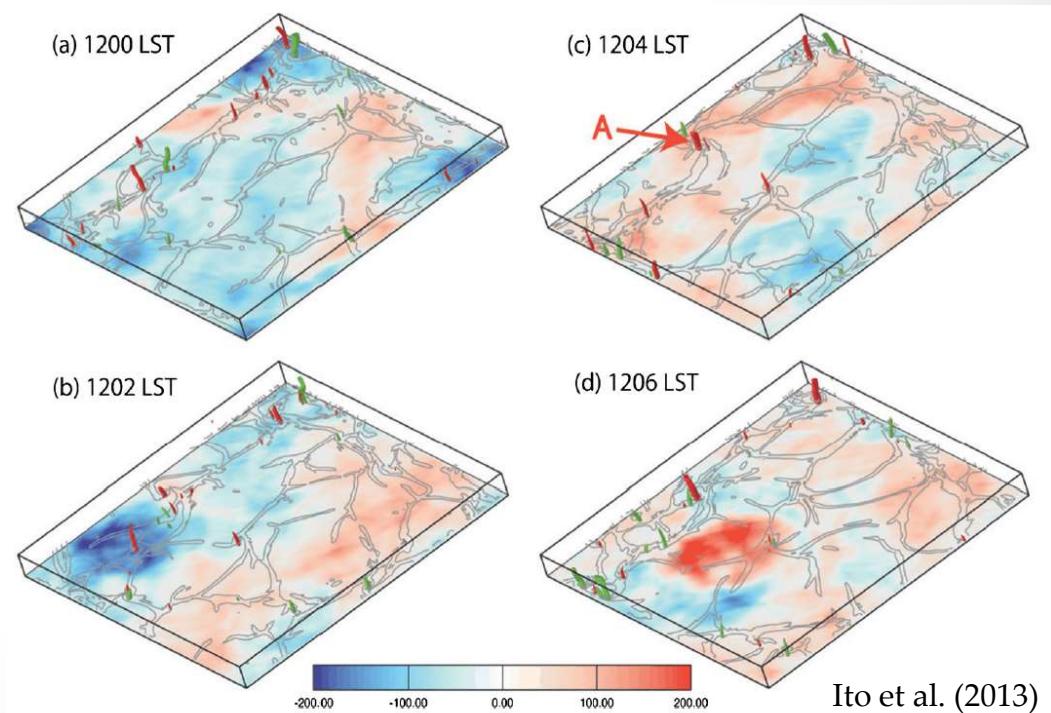
<http://www.aics.riken.jp/jp/science/research-highlights/mars.html>



はじめに 4



- ・火星の対流渦(ダストデビル)のシミュレーションには広領域・高解像度実験が必要
 - 広領域
 - ・ダストデビルは境界層内の対流活動と密接に関係している
 - ・よく発達した境界層の水平スケールは10 km程度
 - 地球では1 km程度



はじめに 4



- 高解像度

- 境界層内の対流渦や乱流は、さまざまな時空間スケールのものが存在し、数 m スケールのものも珍しくない



... Dust fronts ... Regional dust storms ... Local gusts ... Dust devils ...

10000 km 1000 km 100 km 10 km 1 km 100 m 10m 1m

Global Circulation Models

Mesoscale Models

Large-Eddy Simulations

• 過去研究

○ 地球

- Kanak et al. (2000) : $dx = 35 \text{ m}$, $Lx = 3.01 \text{ km}$
- Kanak (2005) : $dx = 2 \text{ m}$, $Lx = 0.74 \text{ km}$
- Ohno and Takemi (2010a) : $dx = 3 \text{ m}$, $Lx = 0.999 \text{ km}$
- Ohno and Takemi (2010b) : $dx = 10 \text{ m}$, $Lx = 2 \text{ km}$
- Ito et al. (2010) : $dx = 50 \text{ m}$, $Lx = 4.5 \text{ km}$
- Raasch and Franke (2011) : $dx = 2 \text{ m}$, $Lx = 4 \text{ km}$
- Ito et al. (2013) : $dx = 5 \text{ m}$, $Lx = 1.8 \text{ km}$

○ 火星

- Rafkin et al. (2001) : $dx = 100 \text{ m}$, $Lx = 18 \text{ km}$
- Taigo et al. (2003) : $dx = 10 \text{ m}$, $Lx = 2 \text{ km}$
- Taigo and Richardson (2003) : $dx = 100 \text{ m}$, $Lx = 10 \text{ km}$

Nishizawa et al. (2015): $dx = 5 \text{ m}$, $Lx = 19.2 \text{ km}$

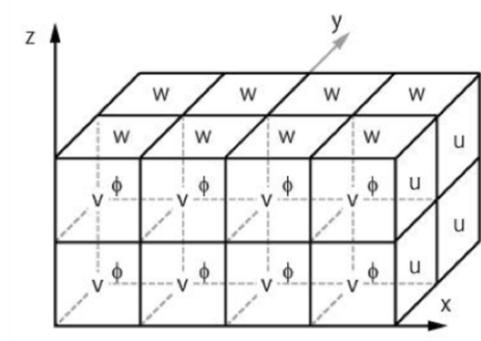
- Michaels (2006) : $dx = 25 \text{ m}$, $Lx = 2.55 \text{ km}$
- Spiga and Forget (2009) : $dx = 100 \text{ m}$, $Lx = 15 \text{ km}$
- Spiga and Lewis (2010) : $dx = 50 \text{ m}$, $Lx = 7.25 \text{ km}$
- Gheynami and Taylor (2011) : $dx = 25 \text{ m}$, $Lx = 5 \text{ km}$

Spiga et al. (2016) より

Model



- SCALE-LES ver. 3
 - RIKEN AICS で開発したの Large-Eddy Simulation (LES) モデル
 - 超並列計算機での高い並列性能 (弱並列効率 99%@「京」)
 - 計算機科学の専門家とのコデザインによる開発
 - オープンソース (<http://scale.aics.riken.jp/>)
- 構成
 - 非静力完全圧縮方程式系
 - 完全陽解法(HEVE) / 鉛直陰解法(HEVI)
 - 有限体積法 (Arakawa-C 格子)
 - 移流スキーム: 4次中央差分 + FCT
 - 時間積分スキーム: 陽的3段ルンゲ・クッタ



計算高速化



- シミュレーションモデル
 - 単体性能最適化
 - バンド幅をできるだけ使うような構造に
 - 並列化
 - MPI (水平2次元空間分割)
 - ファイルI/O もプロセス毎
 - ほとんど隣接通信のみ
 - コンパイラ自動スレッド並列 (指示行による最適化)
- 解析プログラム
 - MPI による並列化 (ruby+MPI)
 - 計算速度よりもファイルの読み込み速度向上のため (分散ファイルシステム利用)
 - 5-m 実験で 60TB 程度



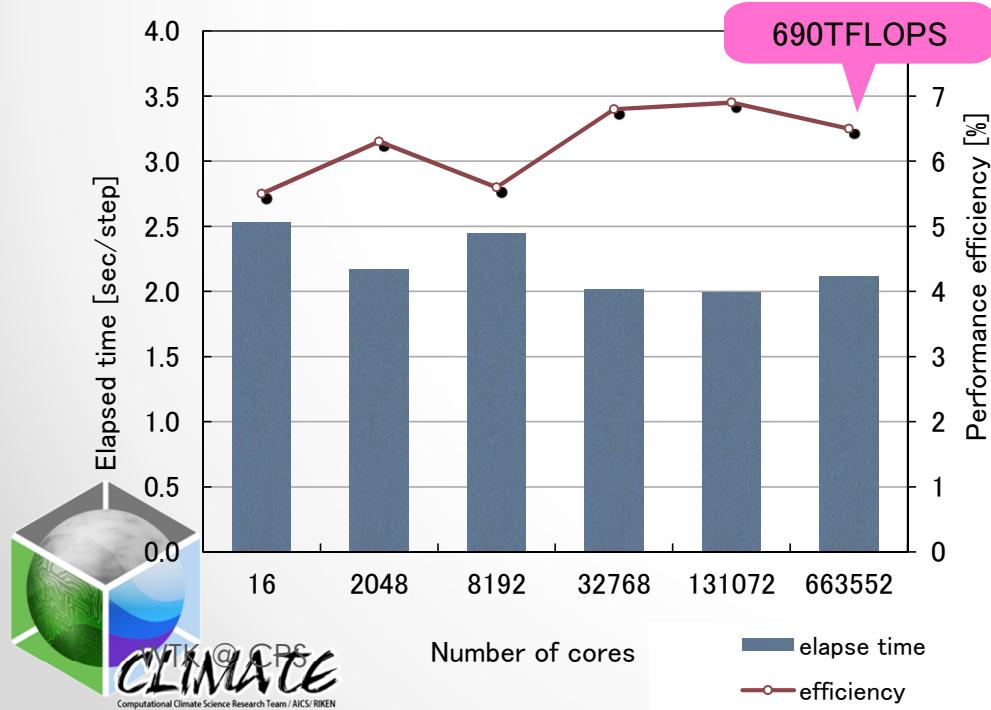
SCALE Computational performance



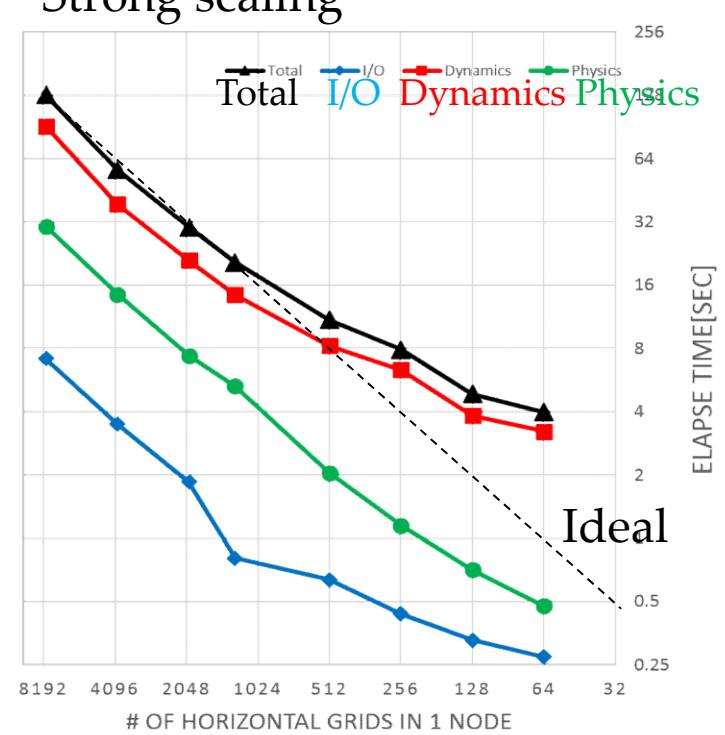
performance @ K computer

- above 10% of peak performance (dynamical core)
 - 5~8% for full simulation (including I/O)
- about 100% weak scaling up to full system (663,552 cores)
- good strong scaling

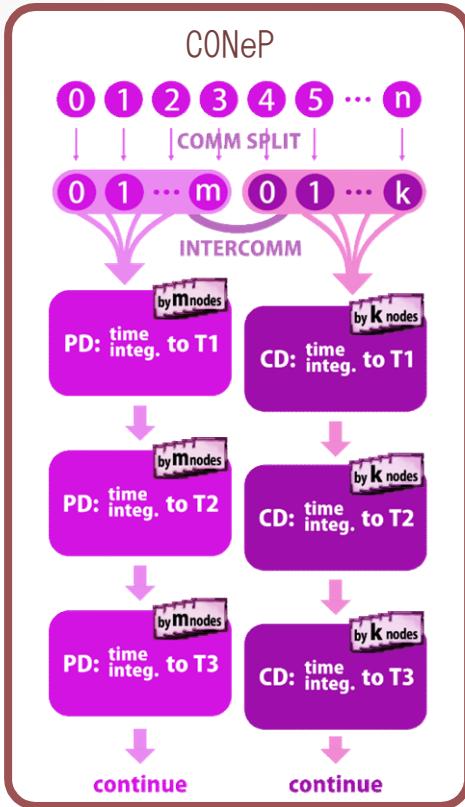
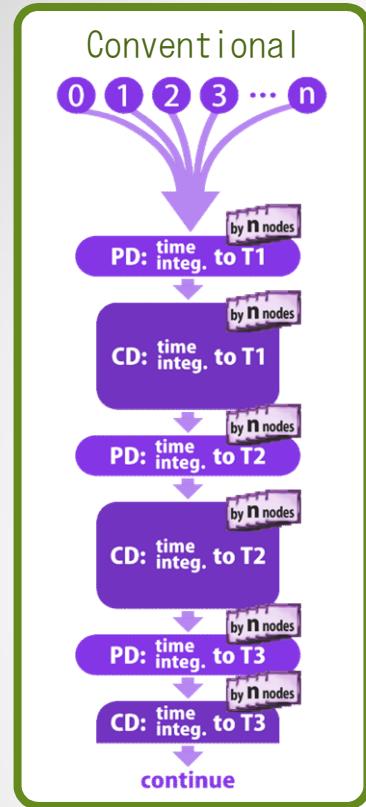
Weak scaling



Strong scaling



A Cost-effective Online Nesting Procedure



Common	domain 1	domain 2	domain 3
grid space	27 km	9 km	3 km
#grid (nx, ny, nz)	80, 80, 48	80, 80, 64	80, 80, 80
time interval	27 s	9 s	3 s
time steps	50	150	450

CNV	domain 1	domain 2	domain 3
#node (mx, my)	10, 10	10, 10	10, 10
#grid /tile (lx, ly)	4, 4	6, 6	10, 10

CONeP	domain 1	domain 2	domain 3
#node (mx, my)	2, 2	4, 4	8, 10
#grid/tile (lx, ly)	40, 40	20, 20	10, 8

Performance Experiment on K computer 1350s time integration

Three domains	CNV	CONeP
elapsed time	20.9 s	16.8 s

20% faster!

Four domains	CNV	CONeP
elapsed time	61.3 s	44.9 s

27% faster!

Yoshida et al., 2017: CONeP: A cost-effective online nesting procedure for regional atmospheric models, Parallel Computing.



実験設定



• 物理過程

- SGS乱流モデル: Smagorinsky-Lilly type, Brown et al. (1994)
- 地表面フラックス: Louis (1979), Uno et al. (1995)
- 放射, 地表面温度(offline計算): Odaka et al. (2001) (1Dモデル)

• 実験設定

- 計算領域: 19.2km x 19.2km x 21km
- 下端境界: 平坦地形, 粗度一定
- 大気: 乾燥条件

• 実験パラメータ

- 解像度 (Δxyz): 100m, 50m, 25m, 10m, 5m (等方格子)

• 初期値

- 鉛直温度分布(Odaka et al. 2001), 静止 (+擾乱)
 - 00:00 ローカルタイム
- ただし、5m 実験に関しては 10m 実験の 14:00 のデータ



計算概要



- 計算諸情報

- 使用計算機: 京
- 演算実効効率: 7.9% (5m解像度計算時)

	100m実験	50m実験	25m実験	10m実験	5m実験
積分時間	24時間 x 3	24時間 x 3	24時間 x 3	19時間	1時間
Δt	0.12 s	0.06 s	0.03 s	0.012 s	0.006 s
時間ステップ数	720K x 3	1.4M x 3	2.9M x 3	5.7 M	600K
格子数	6.8M	52M	410M	6.3G	49G
使用コア数	96	1,152	18,432	115,200	57,600
Elapse time	100 h	100 h	100 h	200 h	200 h



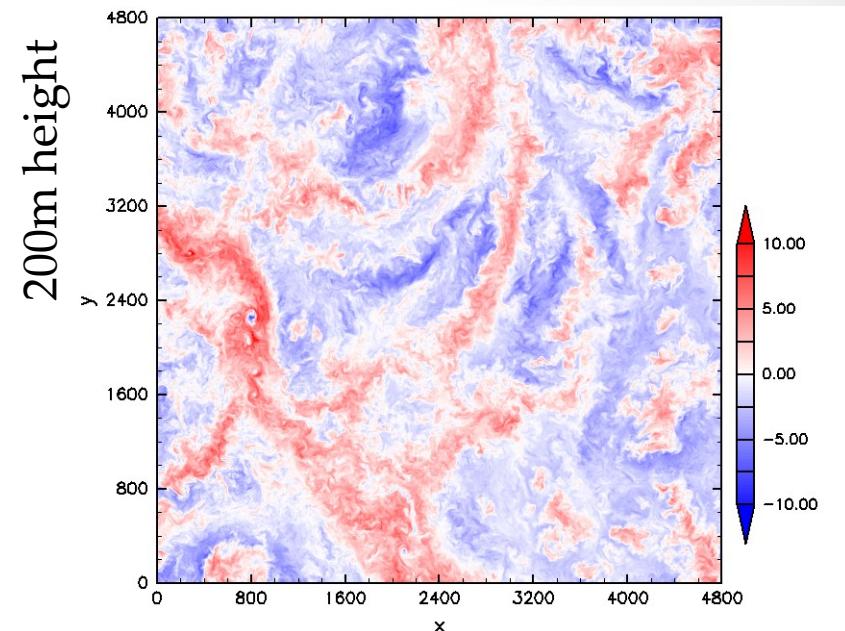
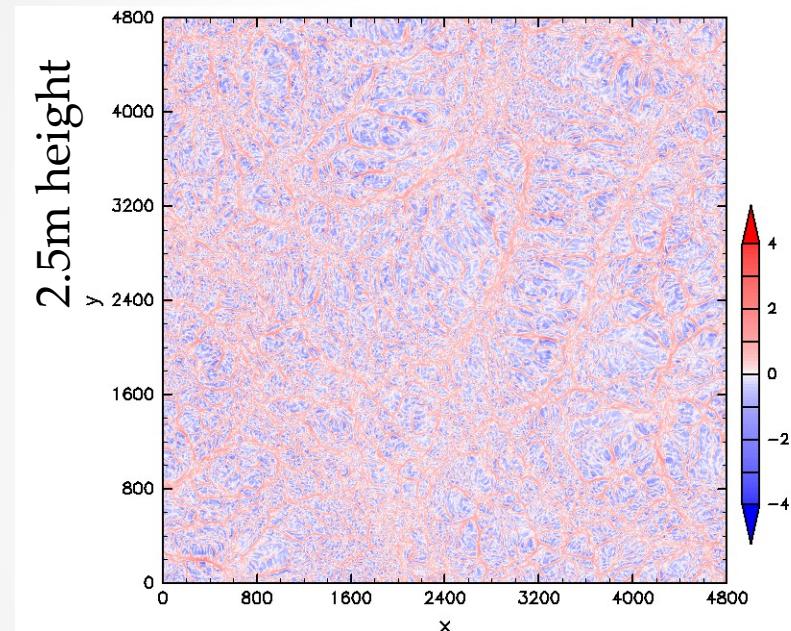


Vertical velocity distribution

...



Dependency on height (5m run)



red: upflow, blue: downflow

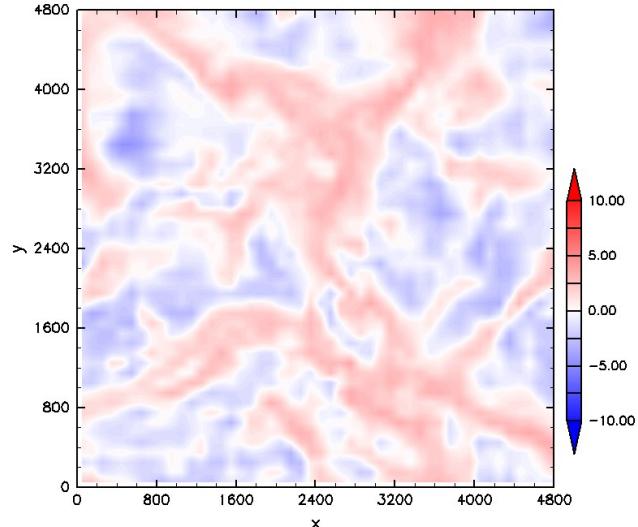
1/16 domain
14:30LT

- Narrow and strong upward flow
- Finer structure at lower level

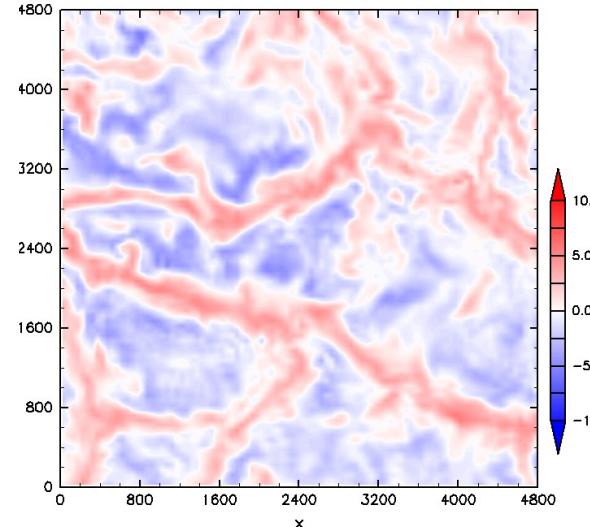
Dependency on resolution ($z=200\text{m}$)



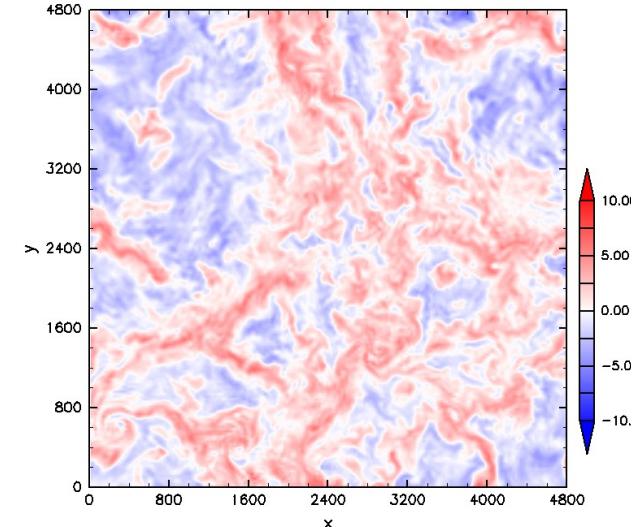
100m run



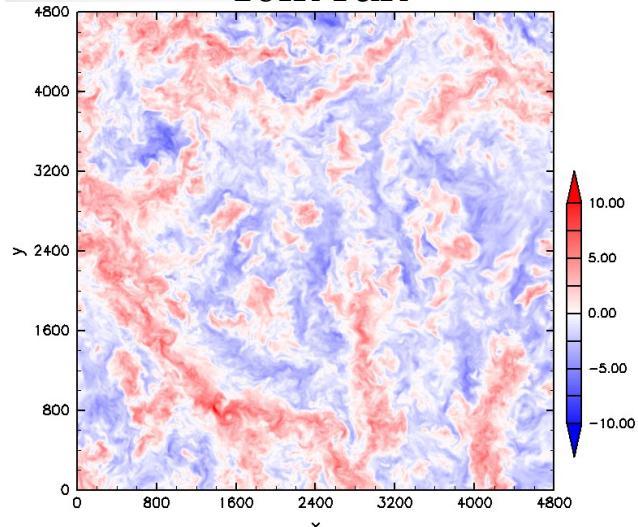
50m run



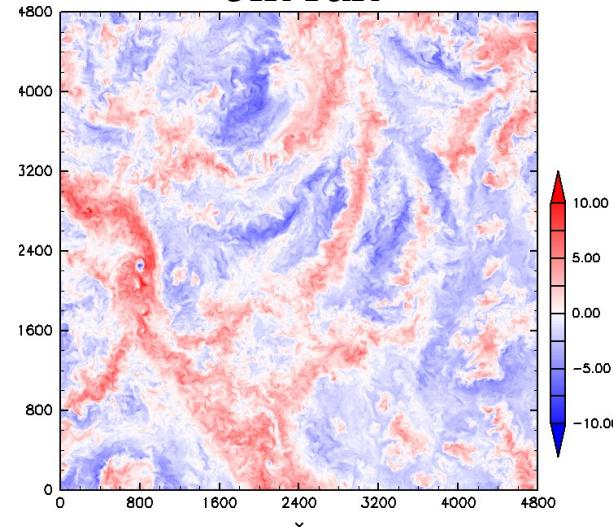
25m run



10m run



5m run



1/16 domain
14:30LT



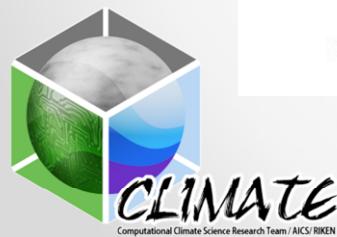
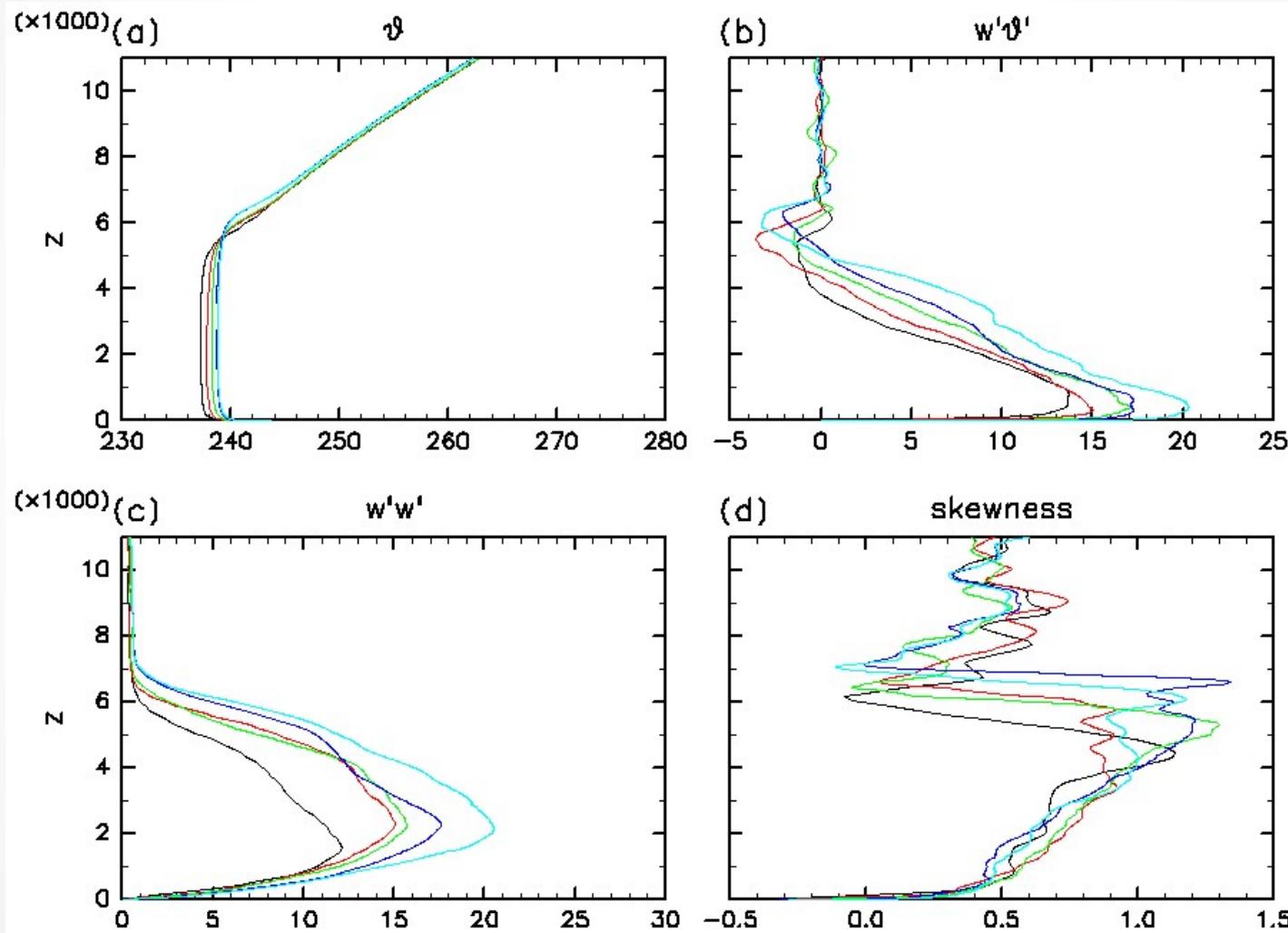


Turbulent statistics

...



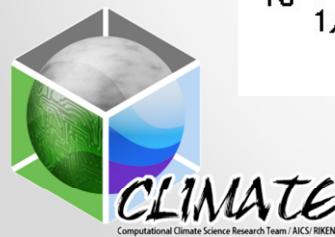
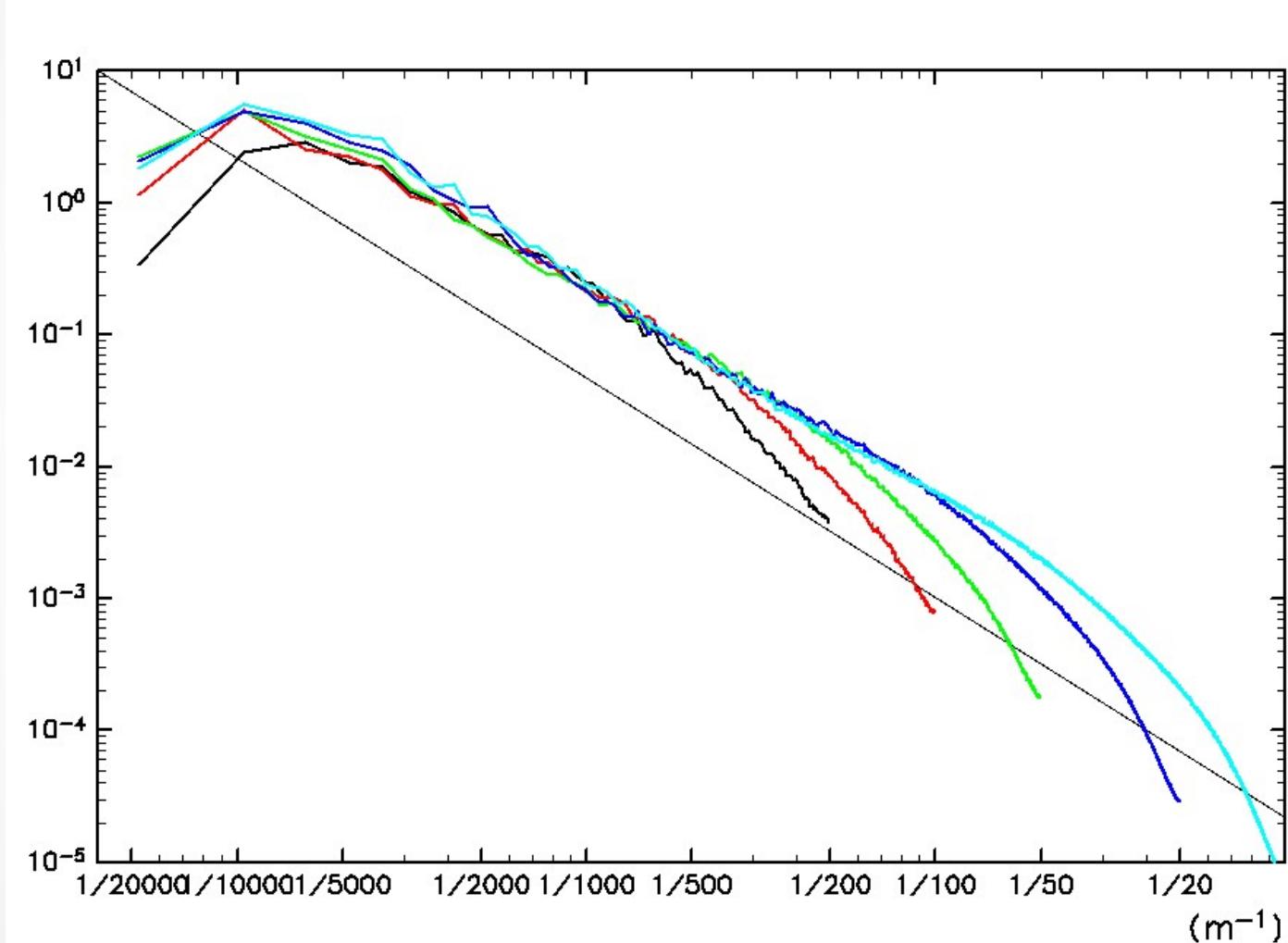
Vertical profiles



$\Delta xyz = 100m, 50m, 25m, 10m, 5m$



Energy spectrum



$z=2\text{km}$, $\Delta xyz=100\text{m}$, 50m, 25m, 10m, 5m



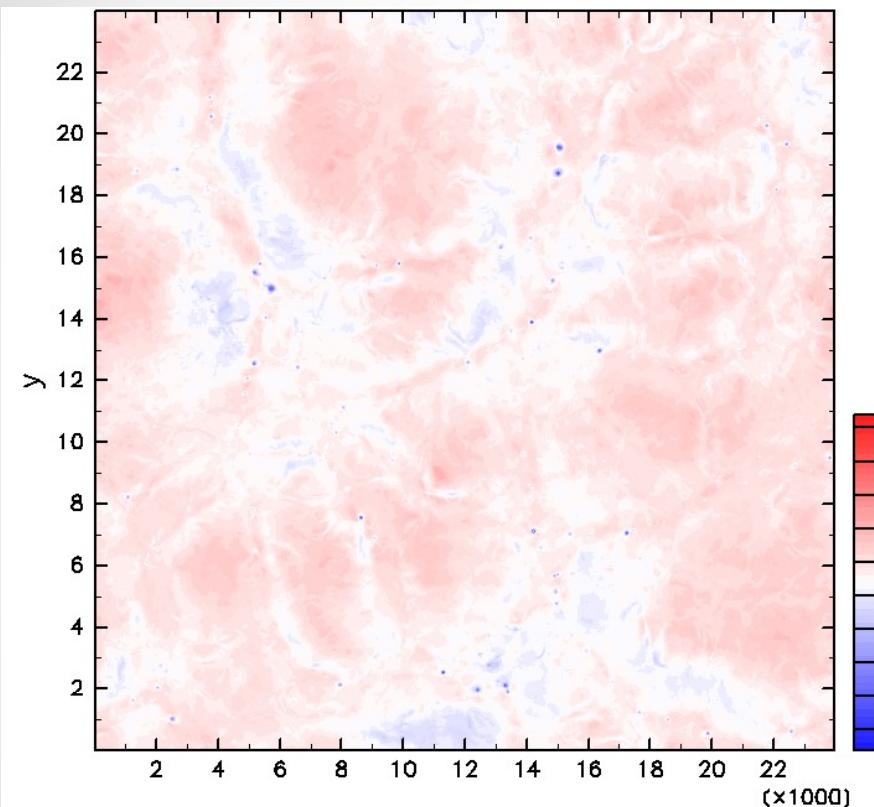


Convective vortices

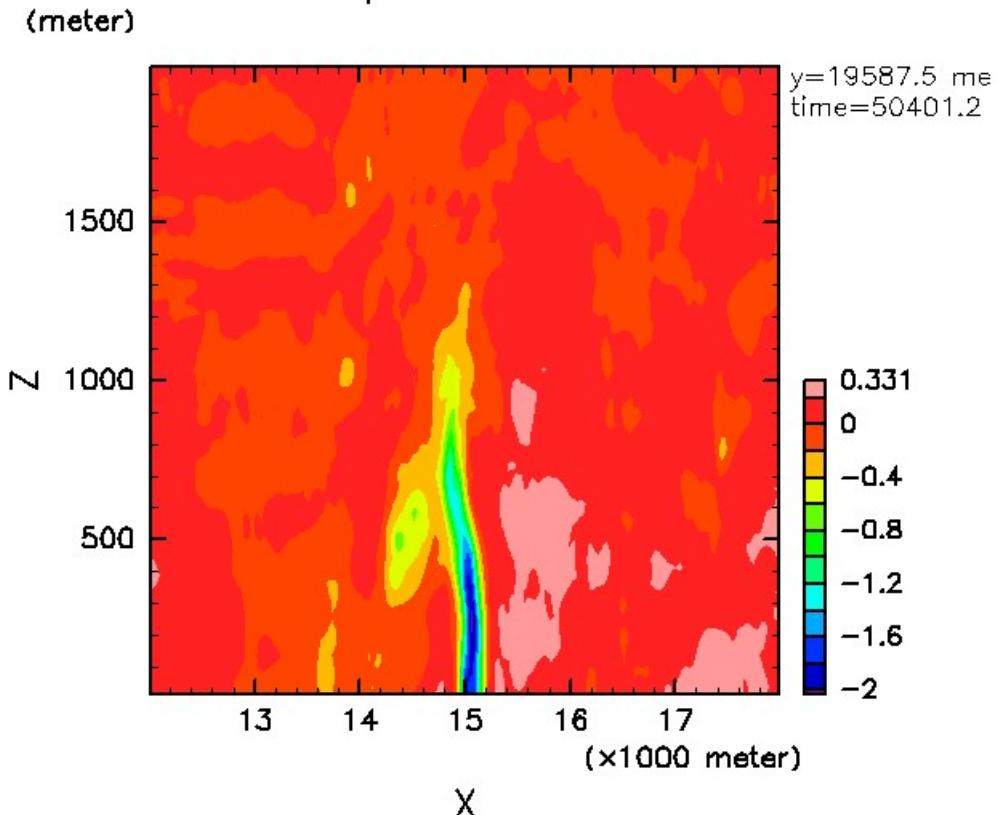
...



Pressure distribution



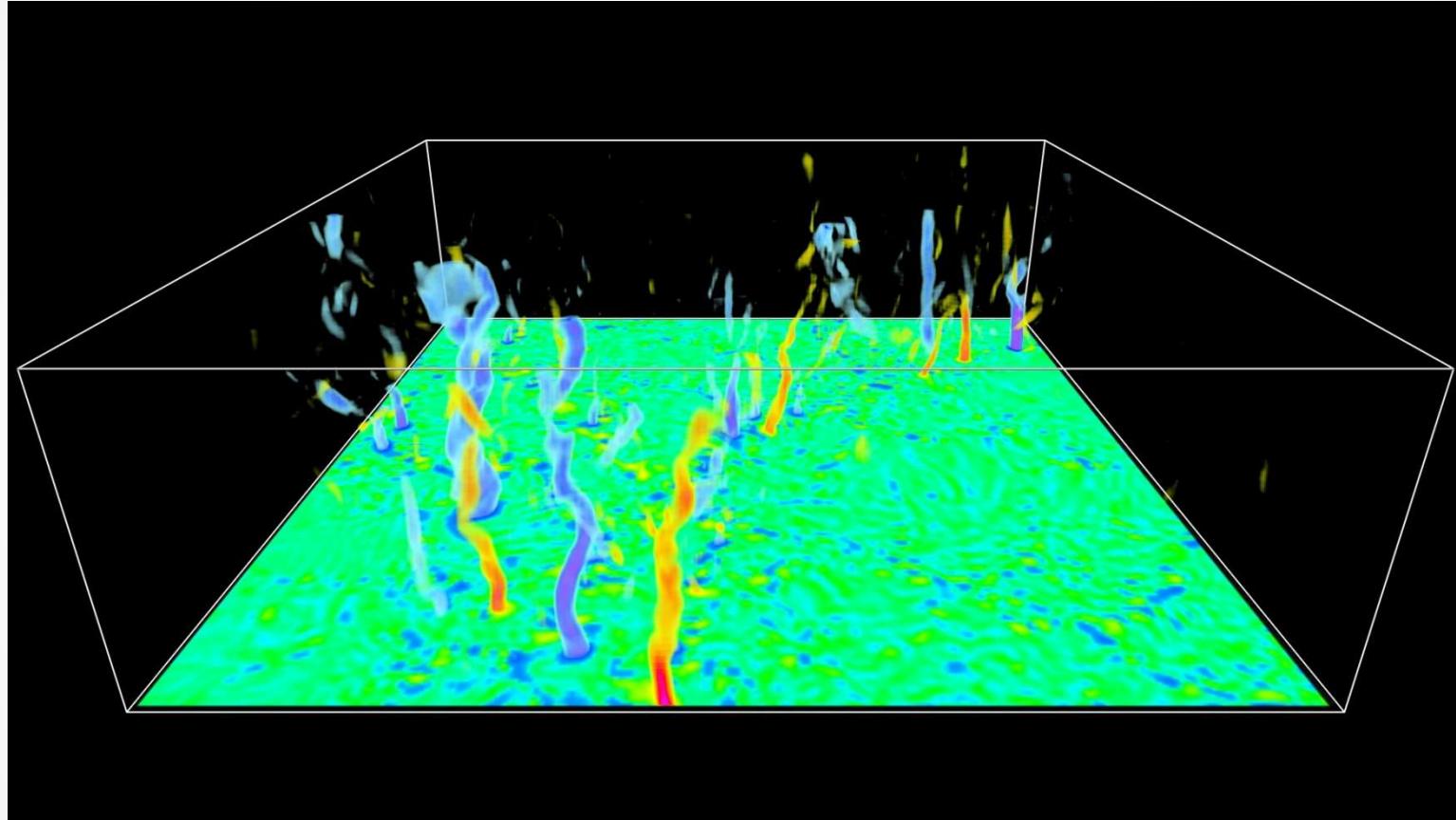
$\Delta xyz=25m$, $z=12.5m$, $t=14:00$

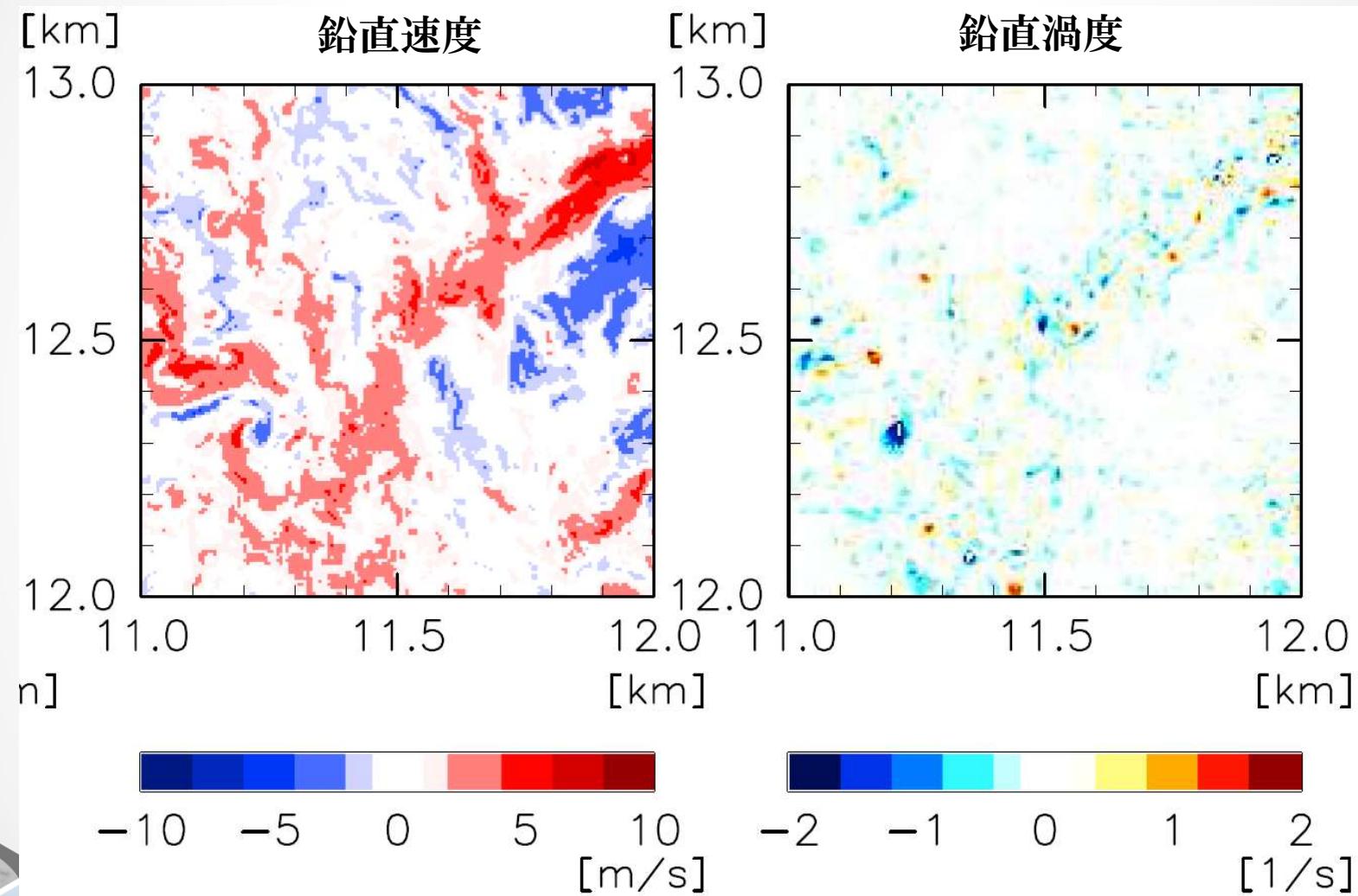


$\Delta xyz=25m$, $y=20km$, $t=14:00$



Vertical vorticity (5-m run)



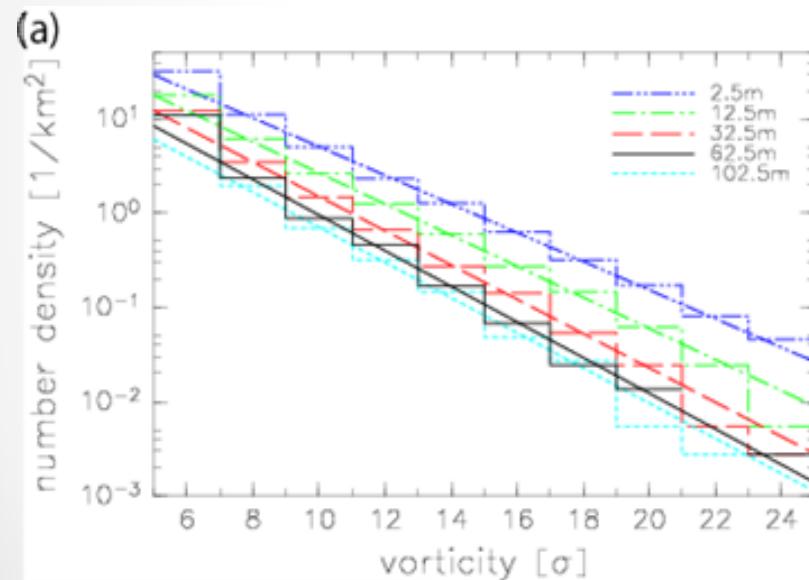


Frequency distribution

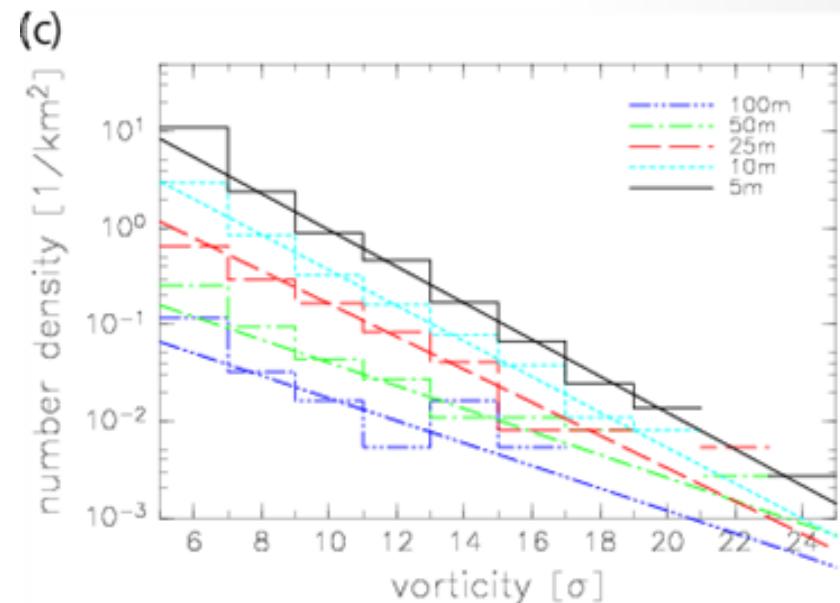


Number frequency distribution of isolated vortices

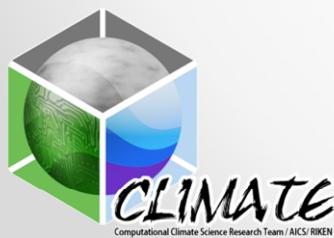
height dependency ($dx=5m$)



resolution dependency ($z=62.5$)

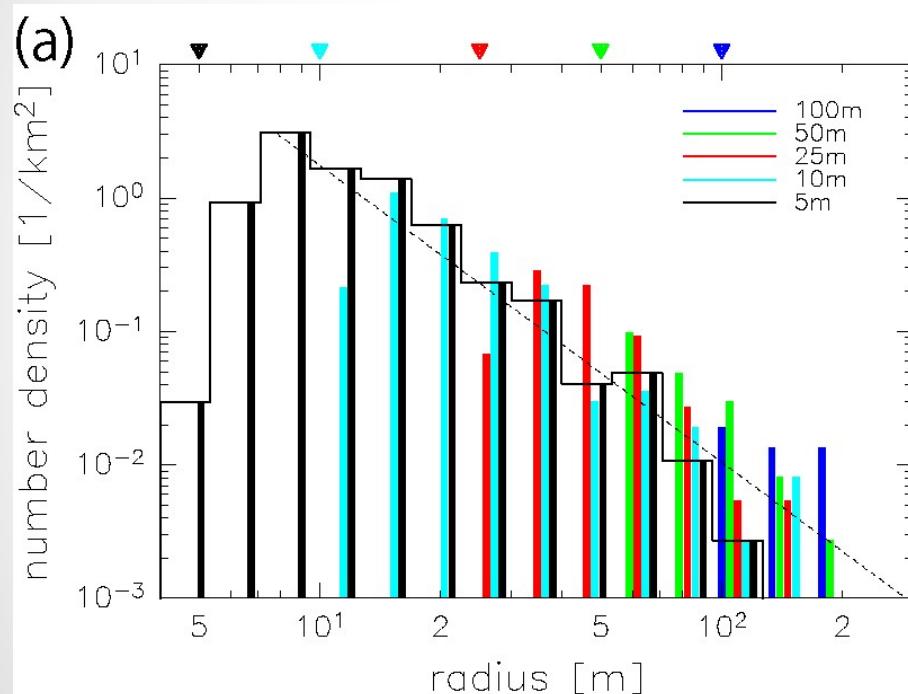


A logarithmic law can be seen (exponential distribution)

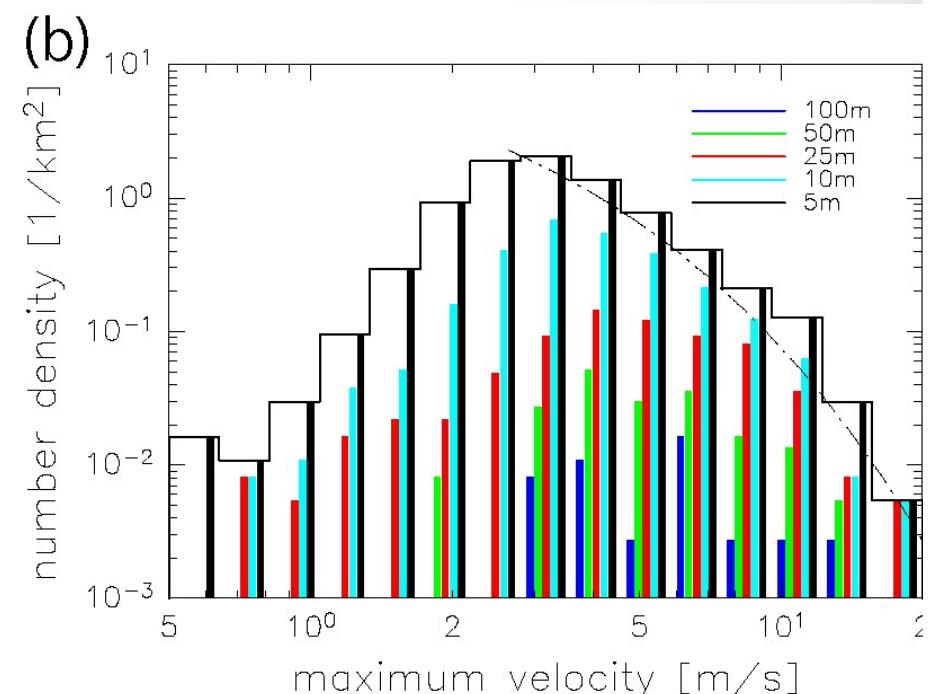


Assuming the Rankine's vortex (5m run, 62.5m height)

Radius



Maximum wind speed



Summary



- 20x20km² domain PBL experiment with 5-m resolutions
 - Fine structure at lower level is represented with such high resolution simulation
 - It affects on surface flux
 - Frequency distributions of convective vortices are obtained
 - A exponential distribution: intensity of vorticity
 - A power law distribution: radius, circulation
 - A Weibull distribution: maximum speed, pressure drop



Nishizawa et al. (2016) GRL doi:10.1002/2016GL068896

