

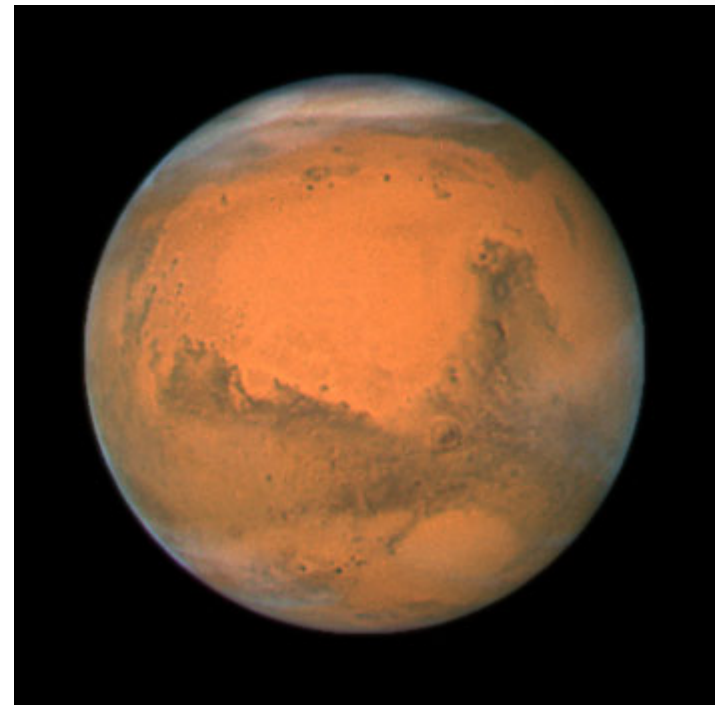
火星大気境界層 の高解像度実験

西澤誠也，八代尚，小高正嗣，高橋芳幸，
竹広真一，石渡正樹，中島健介，佐藤陽祐，杉山耕
一朗，富田浩文，林祥介

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



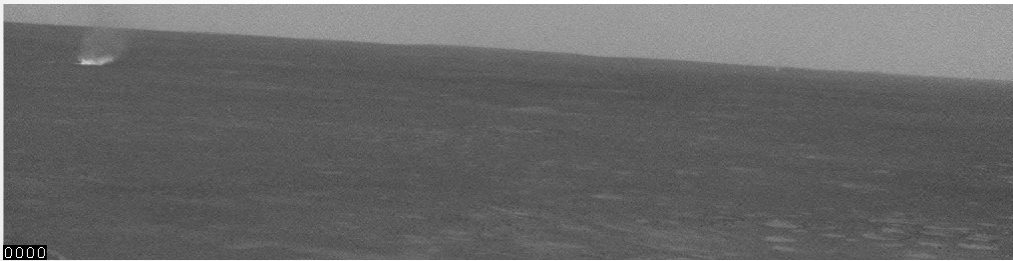
© NASA, ESA, the Hubble Heritage Team



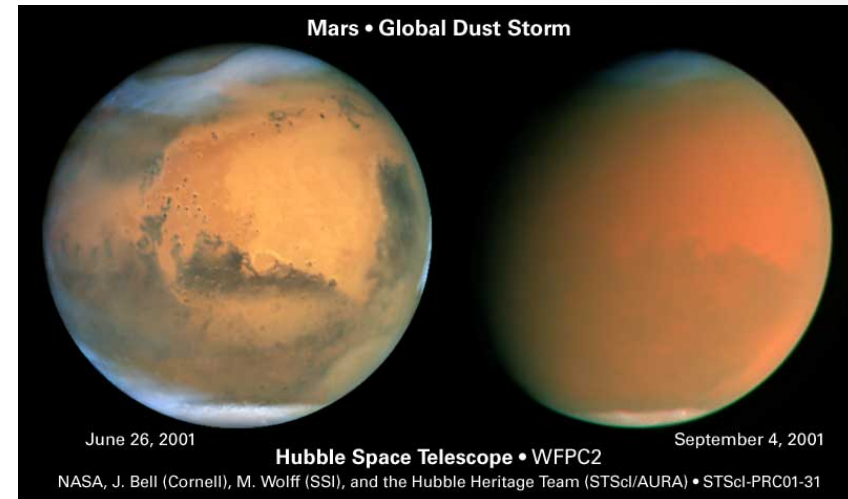
はじめに 2

• 火星大気境界層

- 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 (着地船に影響)
- 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)
- 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/



はじめに 3

- 本研究の目的

- 火星地表面付近(境界層)の大気運動の把握

- 地表面との熱・運動量・物質（ダスト）の交換

- 陣旋風（ダストデビル）

- 火星探査機・観測機器の設計や観測計画立案において、出来るだけ詳細な乱流強度の把握が必要

- 境界層内乱流は下層ほど細かな渦→

高解像度のラージエディーションシミュレーション実験が有効

シミュレーションモデル



- SCALE-LES
 - 理研AICSで開発されたLESモデル
 - 完全圧縮方程式系
 - オープンソフトウェア
- 実験で用いたスキーム
 - 力学: 完全陽解法 (HE-VE), 3段RK
 - SGS乱流: Smagorinsky type
 - 地表面flux: Louis type



実験設定

• 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
- 放射加熱・地表面温度: 鉛直1次元モデル(Odaka et al. 2001) で得られた放射加熱分布を強制として与える
- ダストの光学的厚さ (τ): 0.2 (一部の実験で0.0, 1.0 も実行)

• 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、解像度 5m実験については、10m実験の14:00LT
 - ・ 以下の解析はすべて 14:30LT のデータを使用

• 実験パラメーター

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

過去の研究では、この規模の領域の計算では解像度は数10m程度

計算例

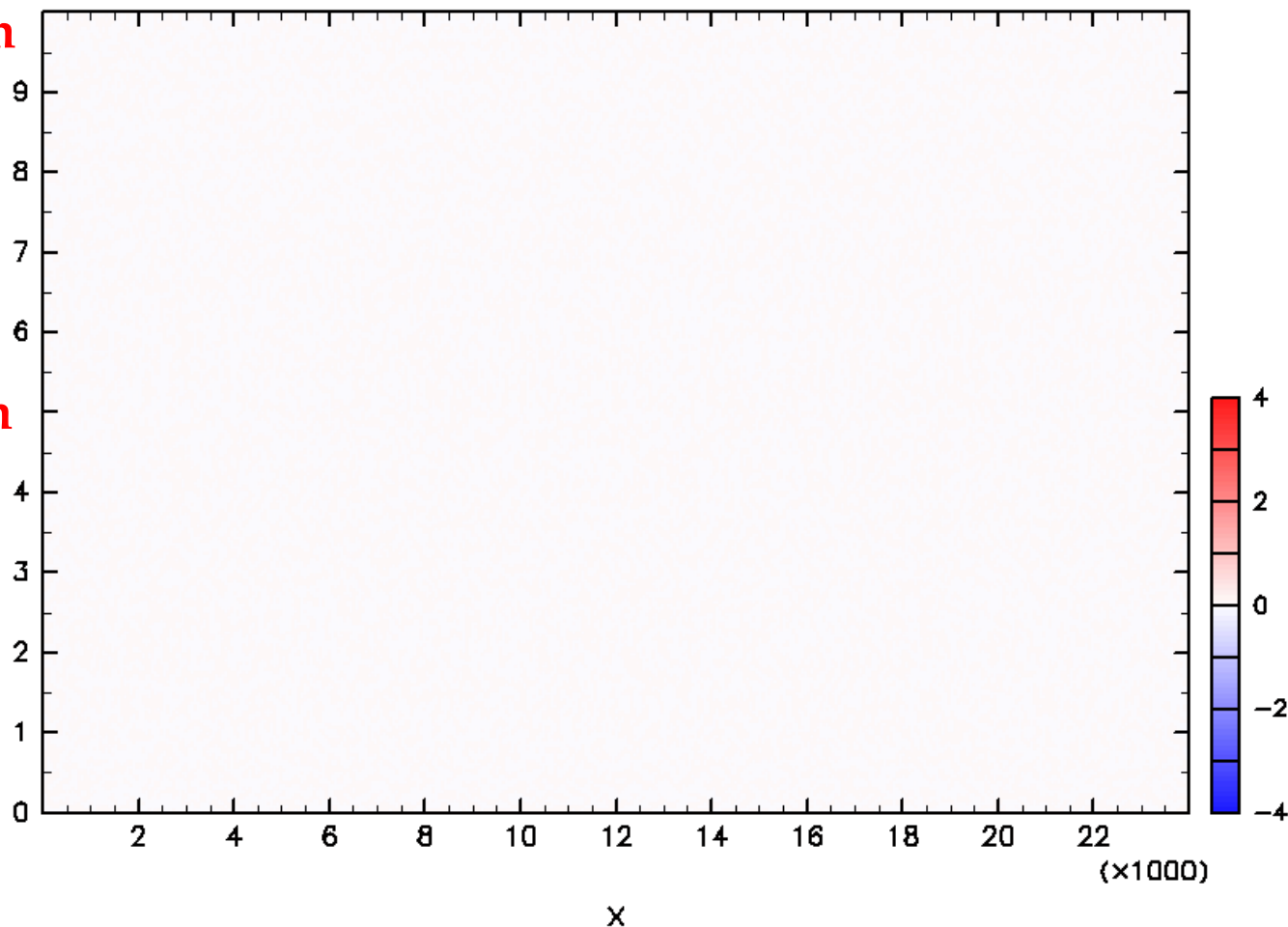
$\tau=0.2$, $\Delta xyz=25\text{m}$, $y=0$

$t=0.50$

($\times 1000$)

10 km

5 km



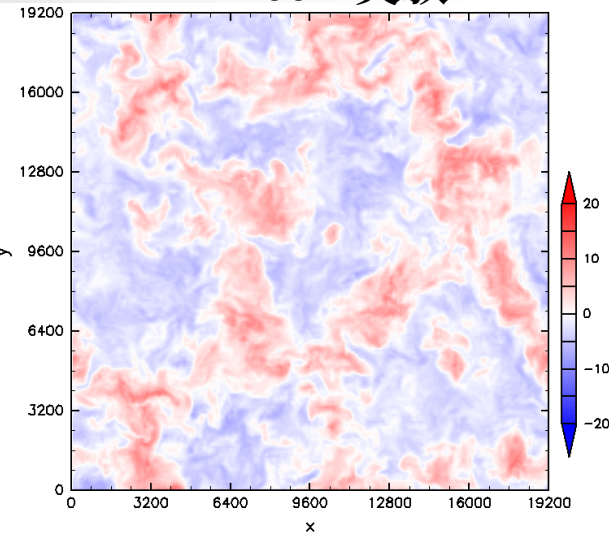
鉛直速度分布

...

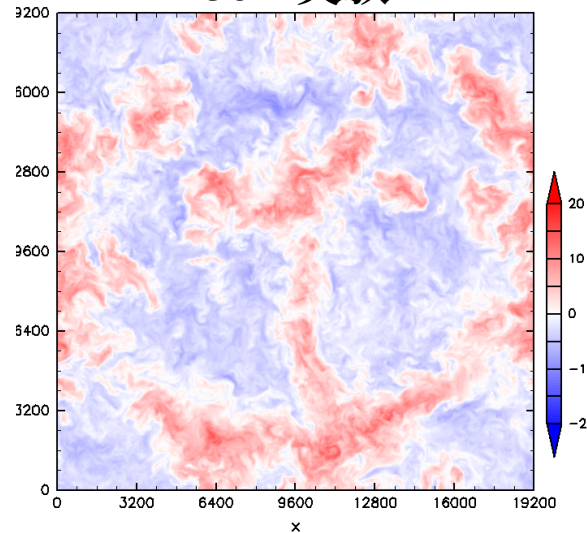


鉛直速度 解像度依存性 ($z=2\text{km}$)

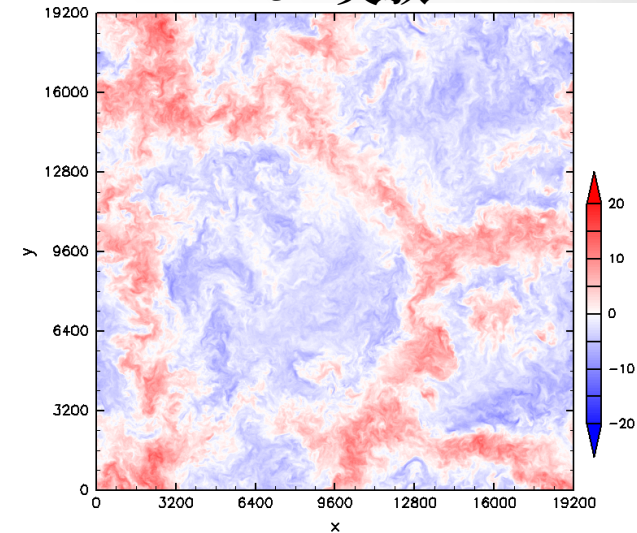
100m実験



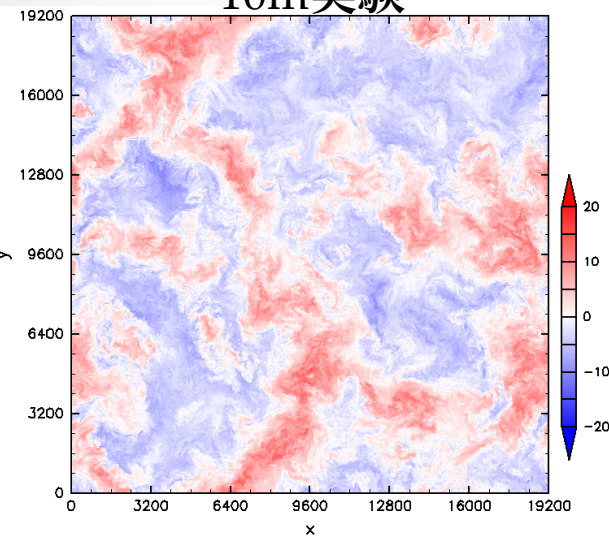
50m実験



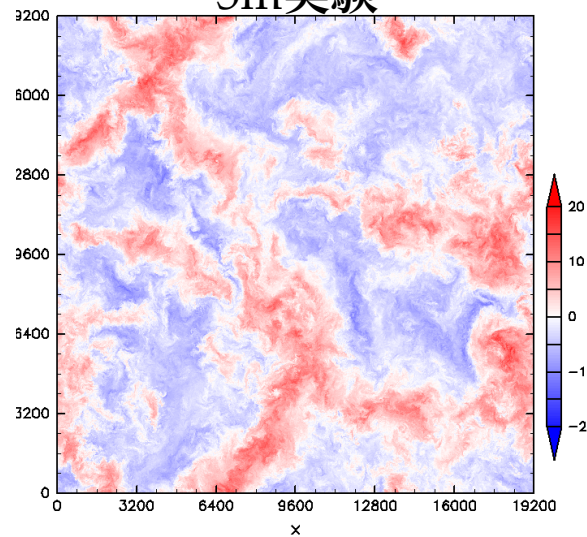
25m実験



10m実験



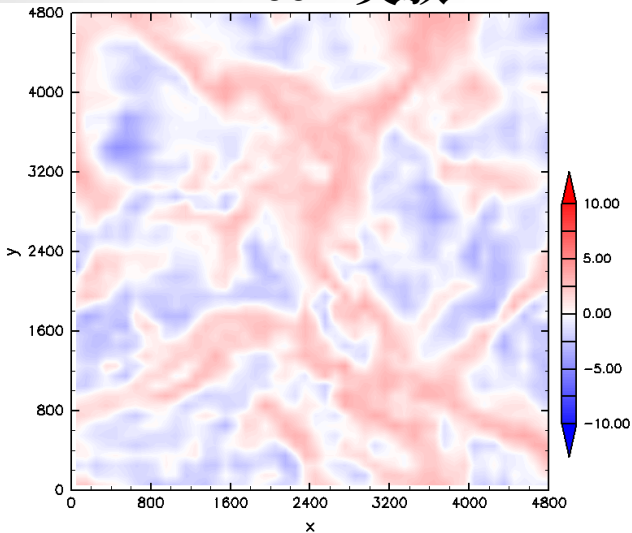
5m実験



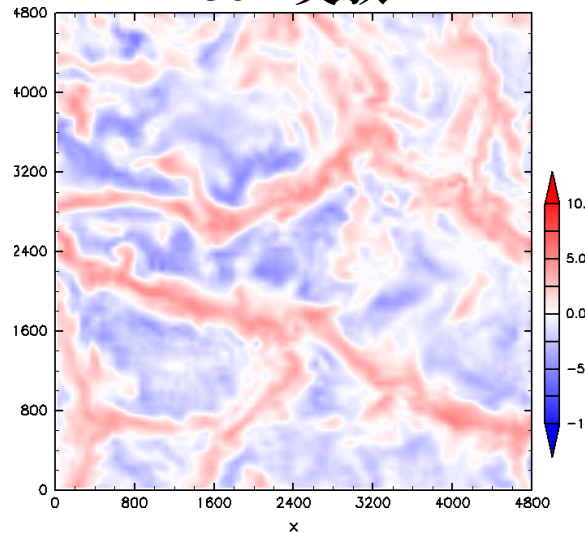
14:30LT
(初期値から14.5h後)

鉛直速度 解像度依存性 ($z=200\text{m}$)

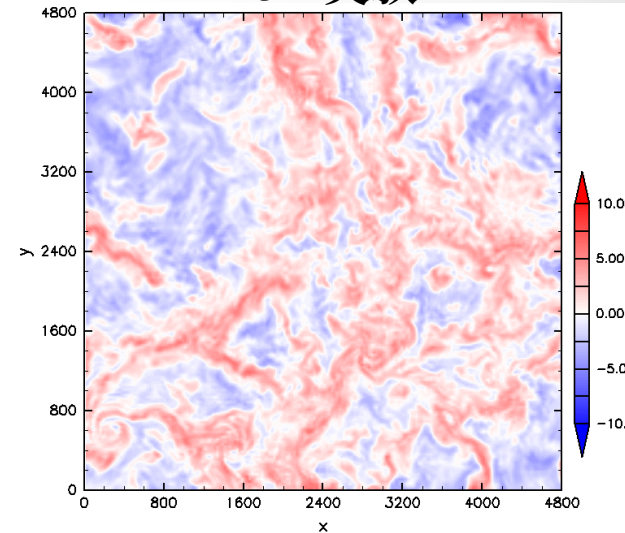
100m実験



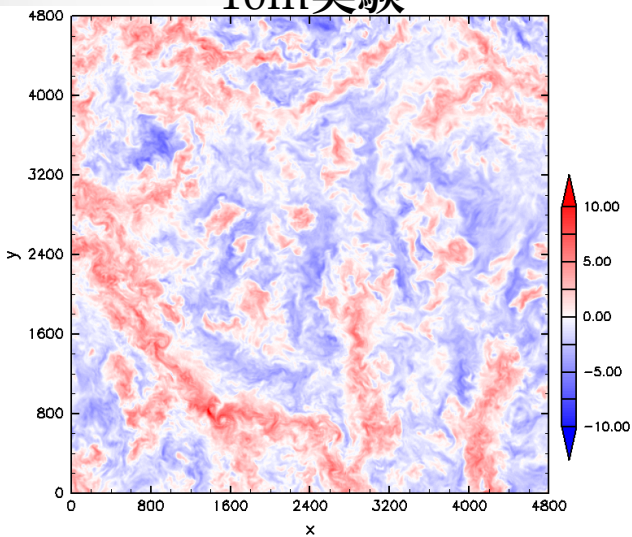
50m実験



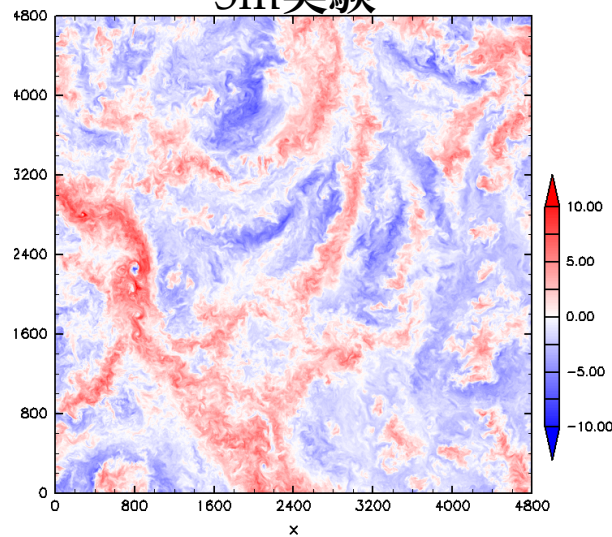
25m実験



10m実験

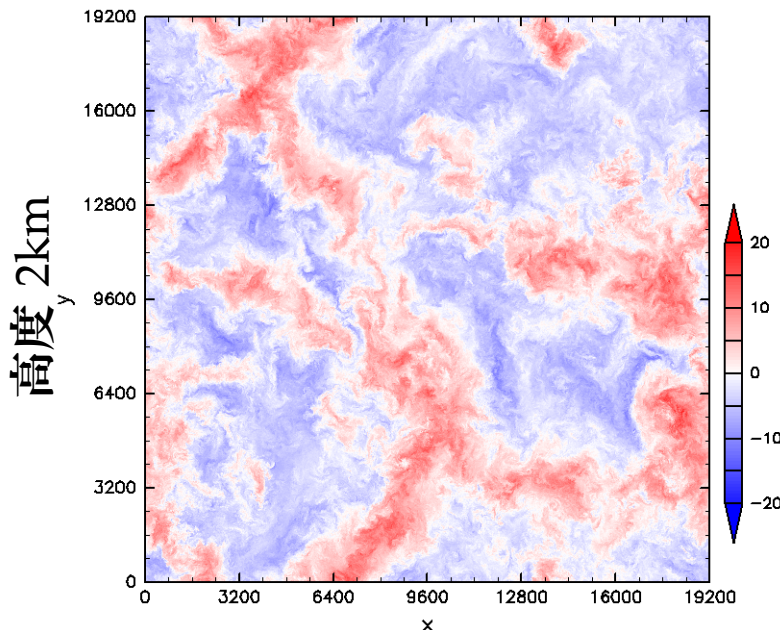
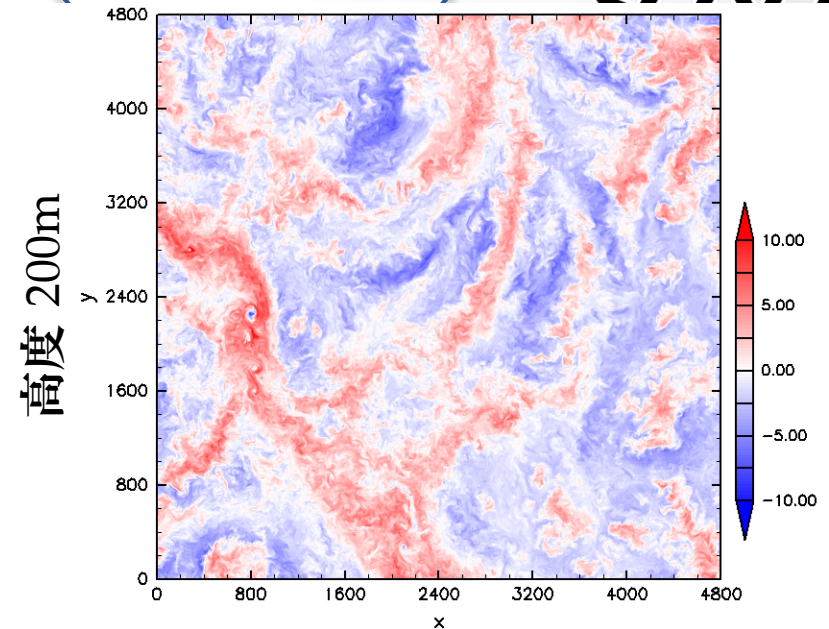
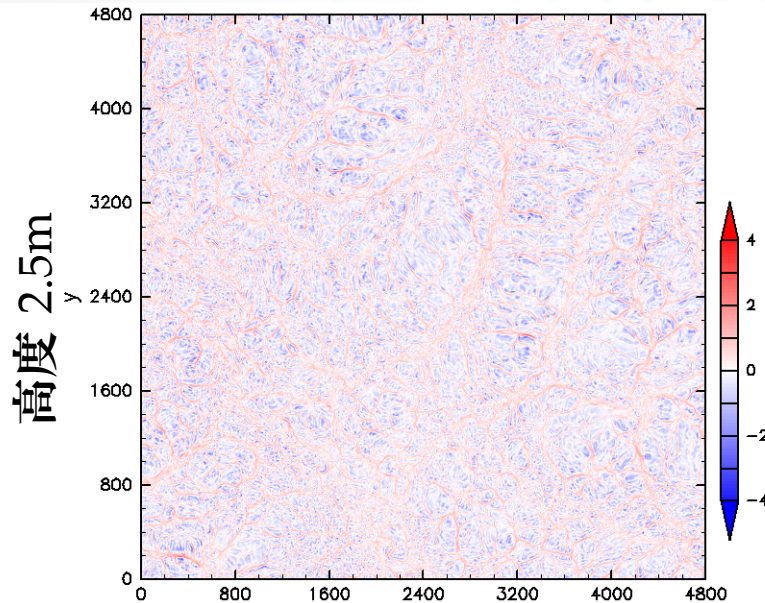


5m実験



1/16領域
14:30LT
(初期値から14.5h後)

鉛直速度・各高度 (5m実験)



赤: 上昇流, 青: 下降流

- 上昇流域の方が狭く、強さは上昇流のほうが強い
- 地表に近いほど構造が細かい

地表付近の運動を再現するためには高解像度が必須である

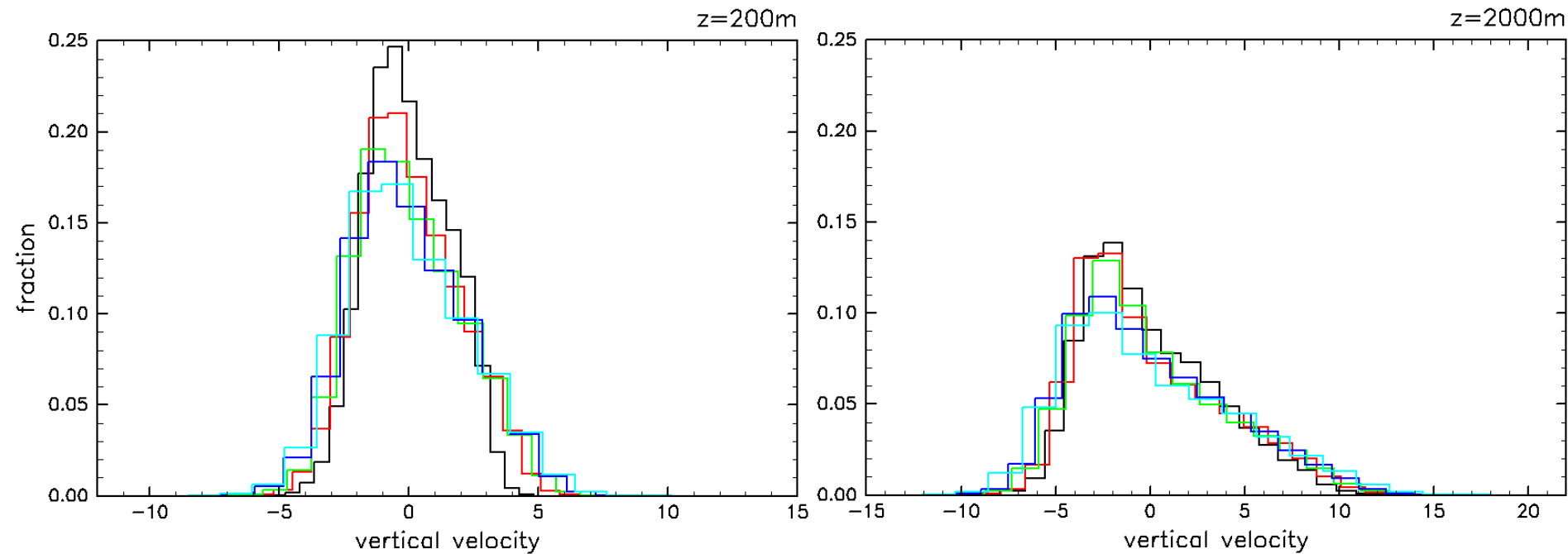
1/16領域
14:30LT



上昇流頻度分布解像度依存性

高度 200 m

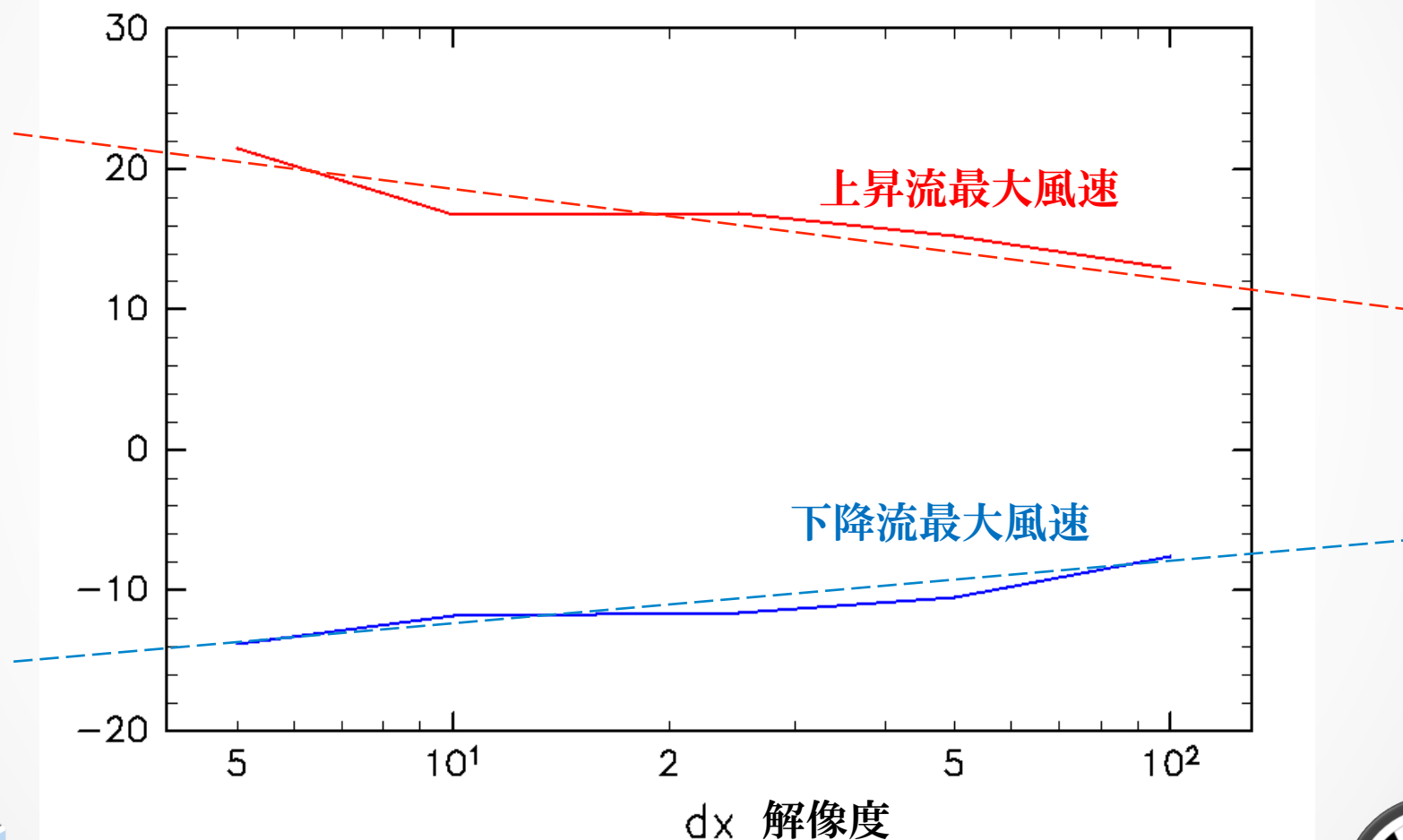
高度 2 km



5m実験 10m実験 25m実験 50m実験 100m実験

上昇流最大瞬間風速解像度依存性

高度 2k m

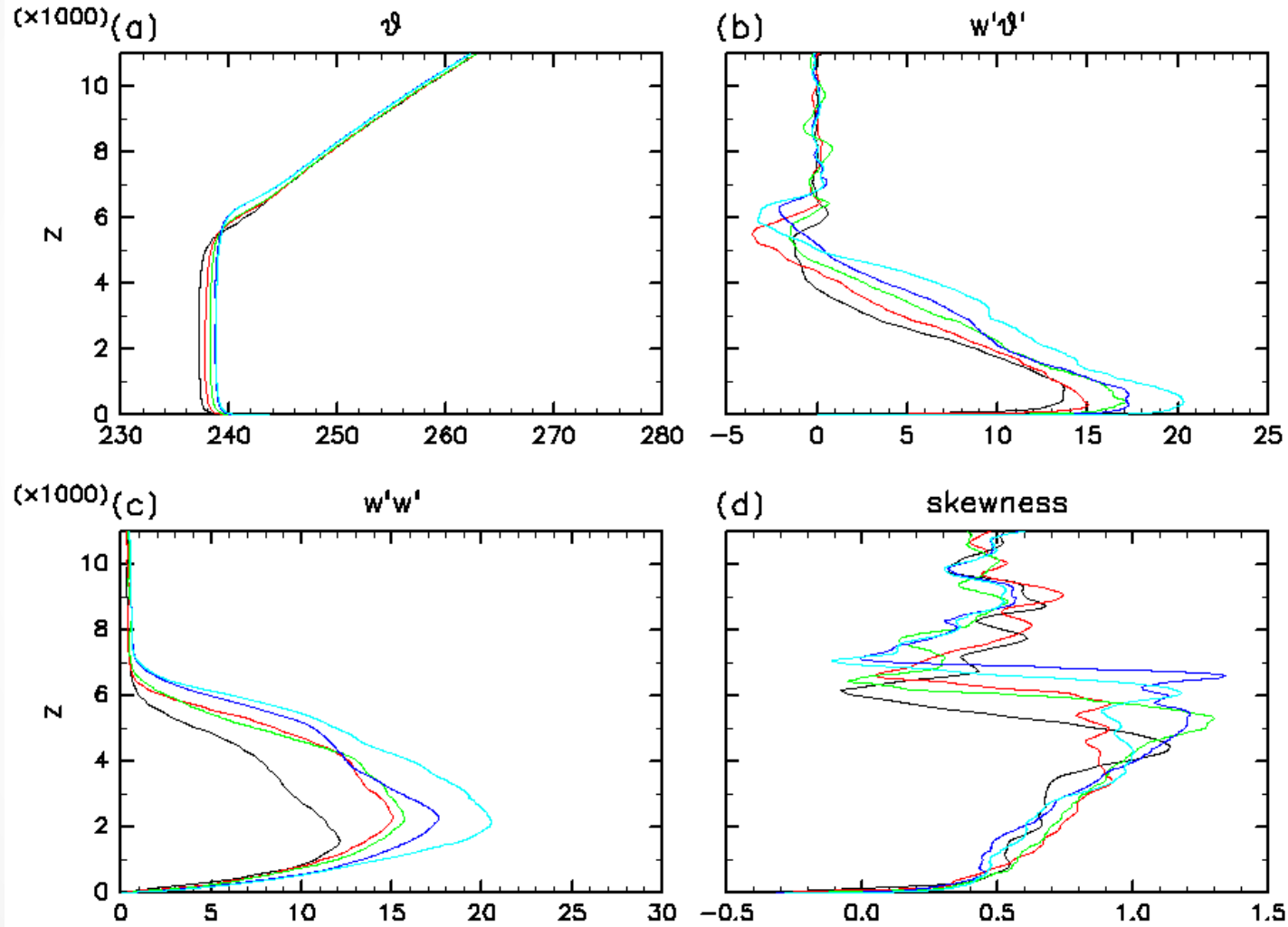


乱流統計量

...

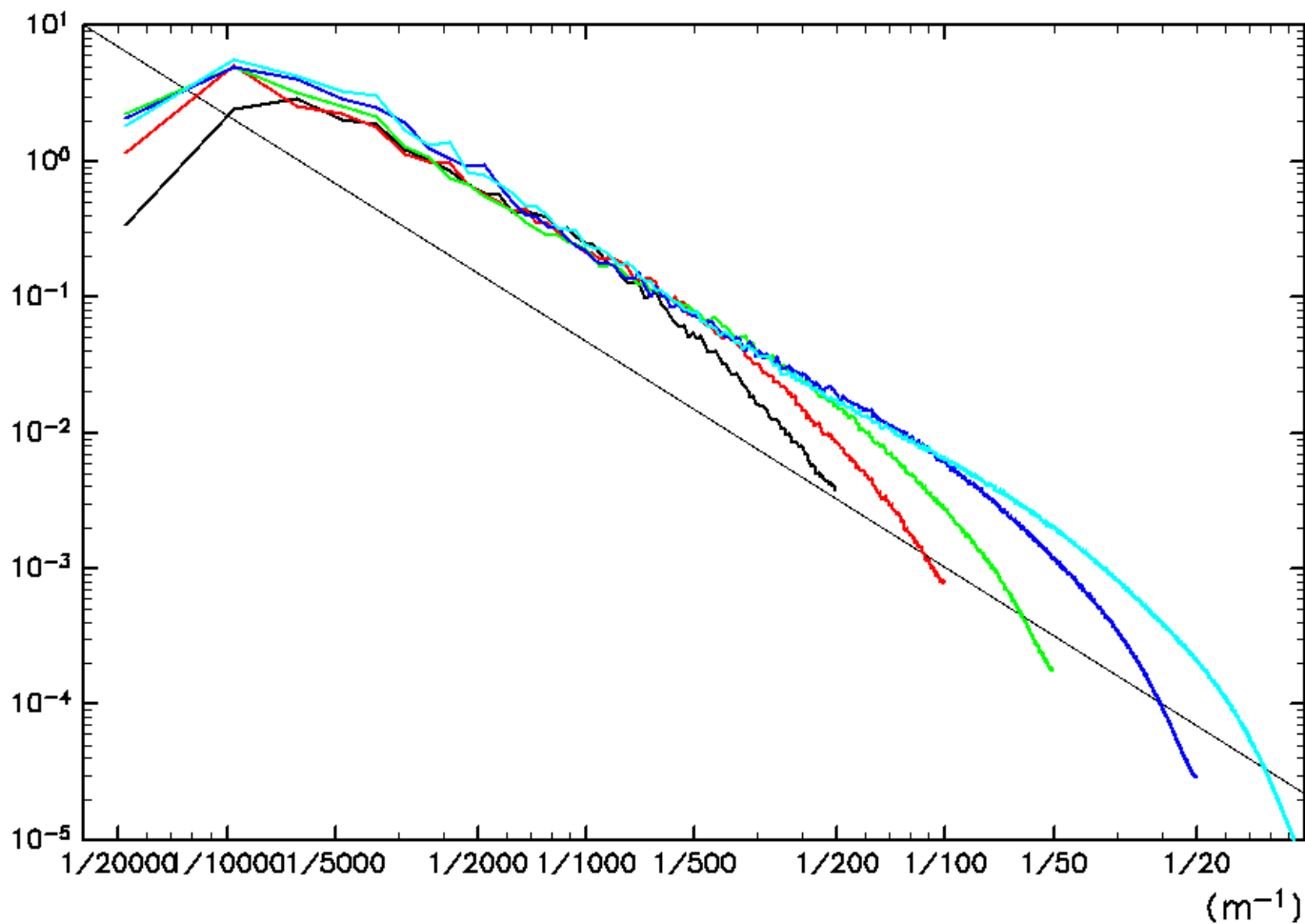


乱流統計量鉛直プロファイル



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

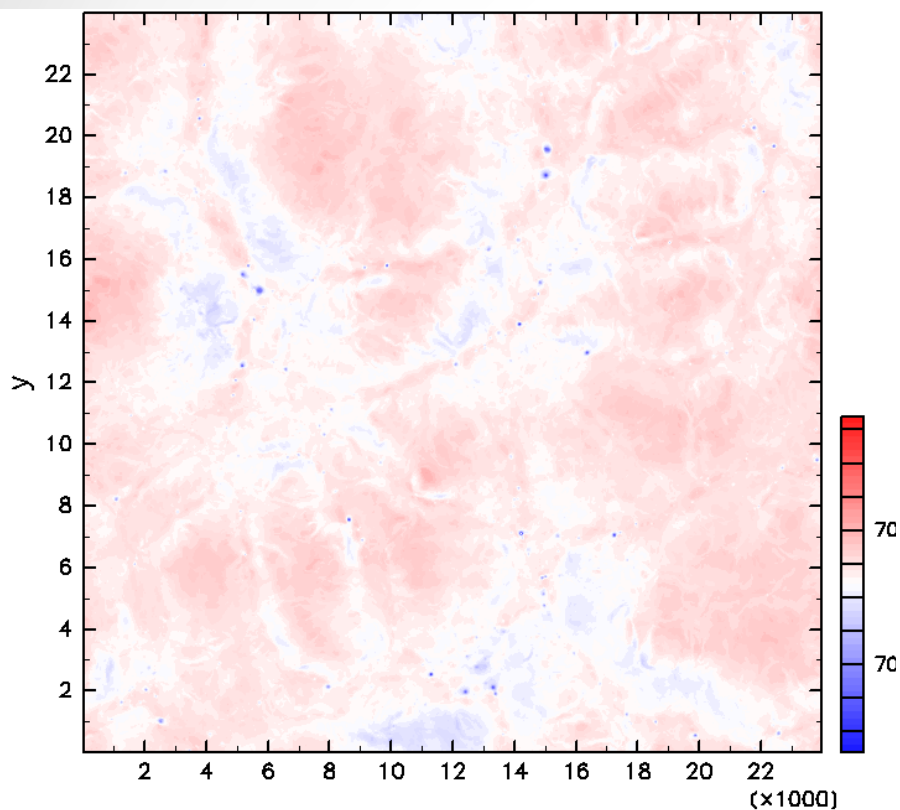
水平エネルギースペクトル



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

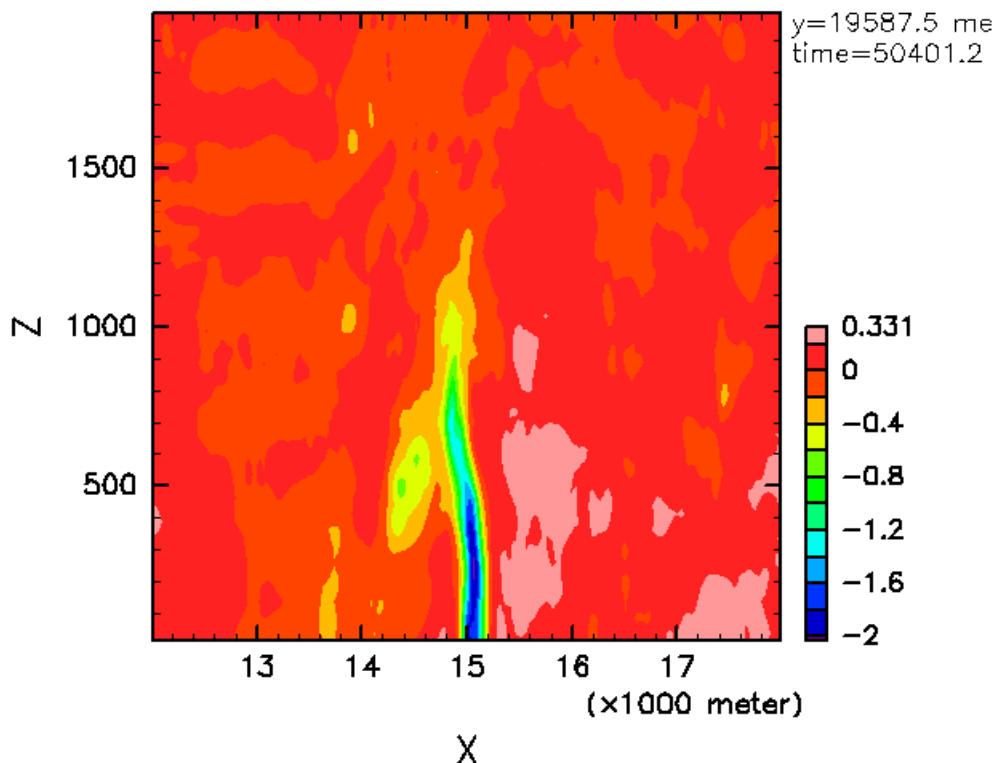
渦
...

気圧分布



$\tau=0.2$, $\Delta xyz=25\text{m}$, $z=12.5\text{m}$, $t=14:00$

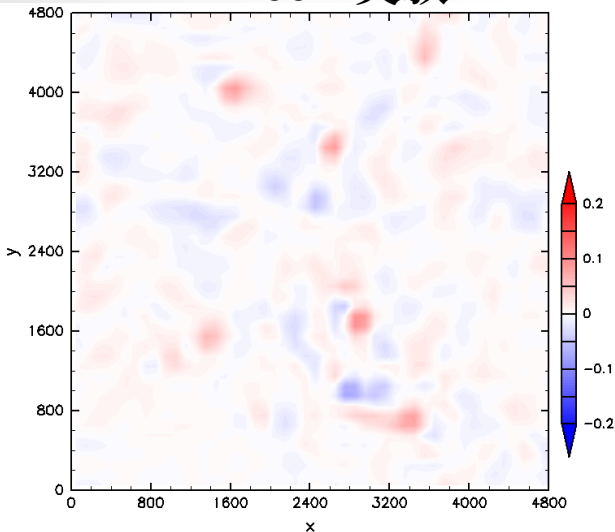
(meter)



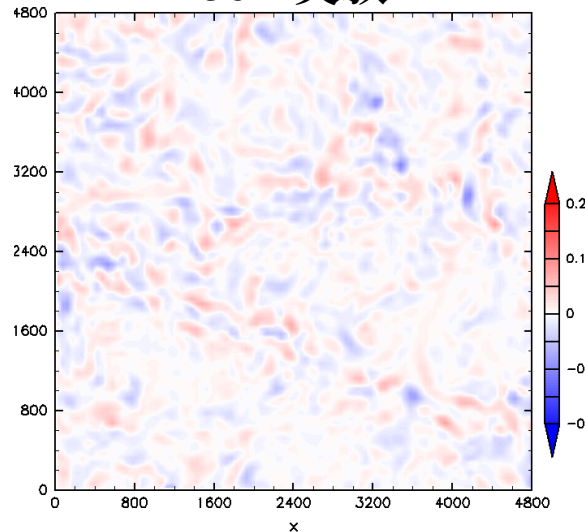
$\tau=0.2$, $\Delta xyz=25\text{m}$, $y=20\text{km}$, $t=14:00$

鉛直渦度 解像度依存性 ($z=200\text{m}$)

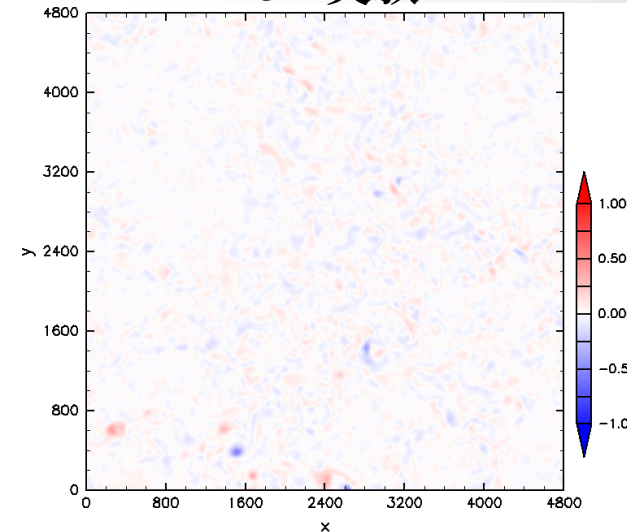
100m実験



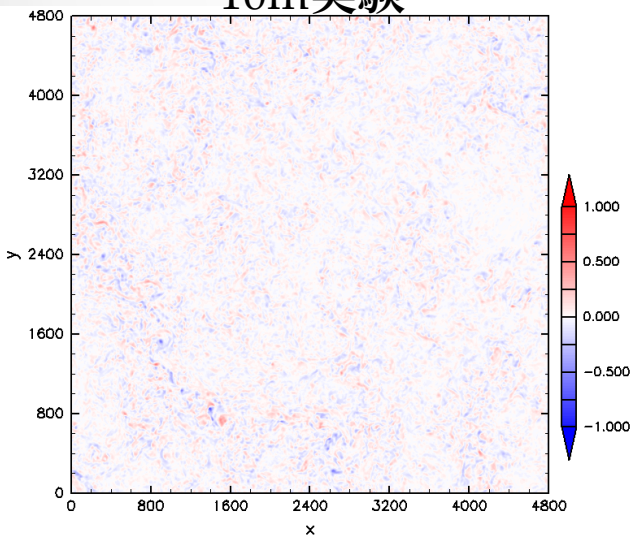
50m実験



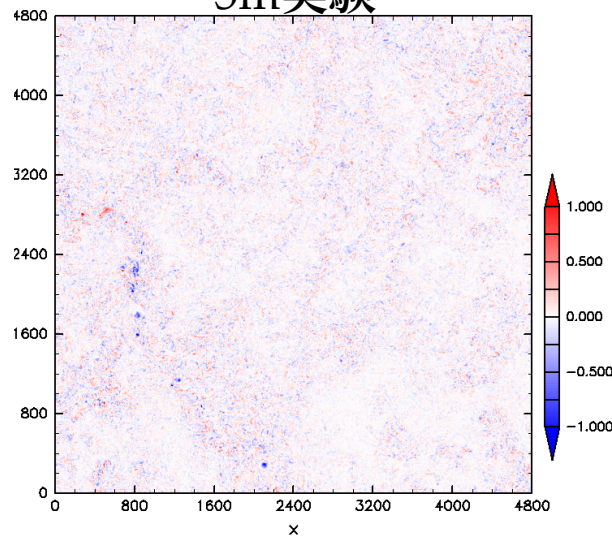
25m実験



10m実験

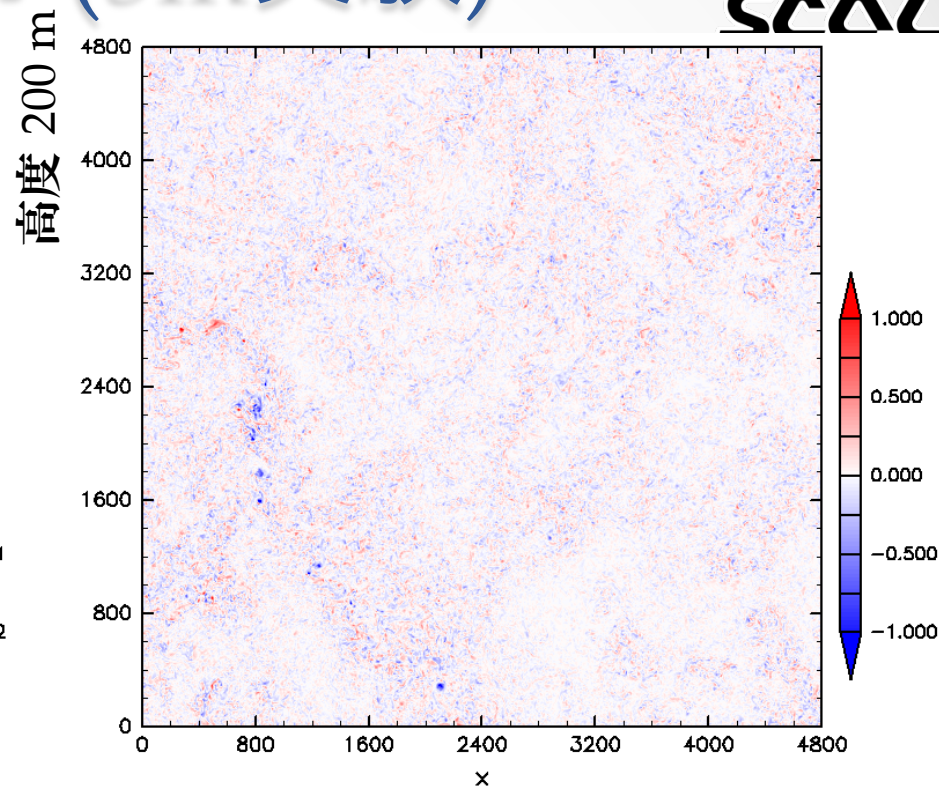
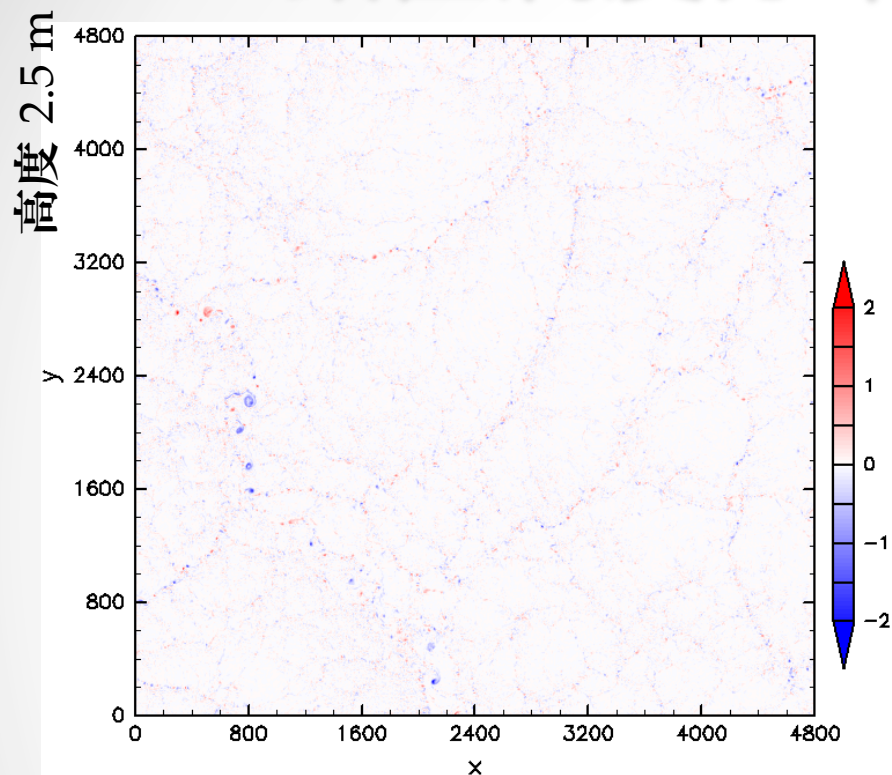


5m実験

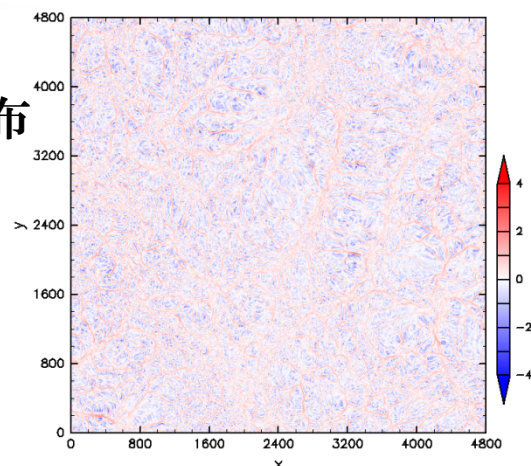


1/16領域
色階調が異なって
いることに注意

鉛直渦度分布 (5m実験)



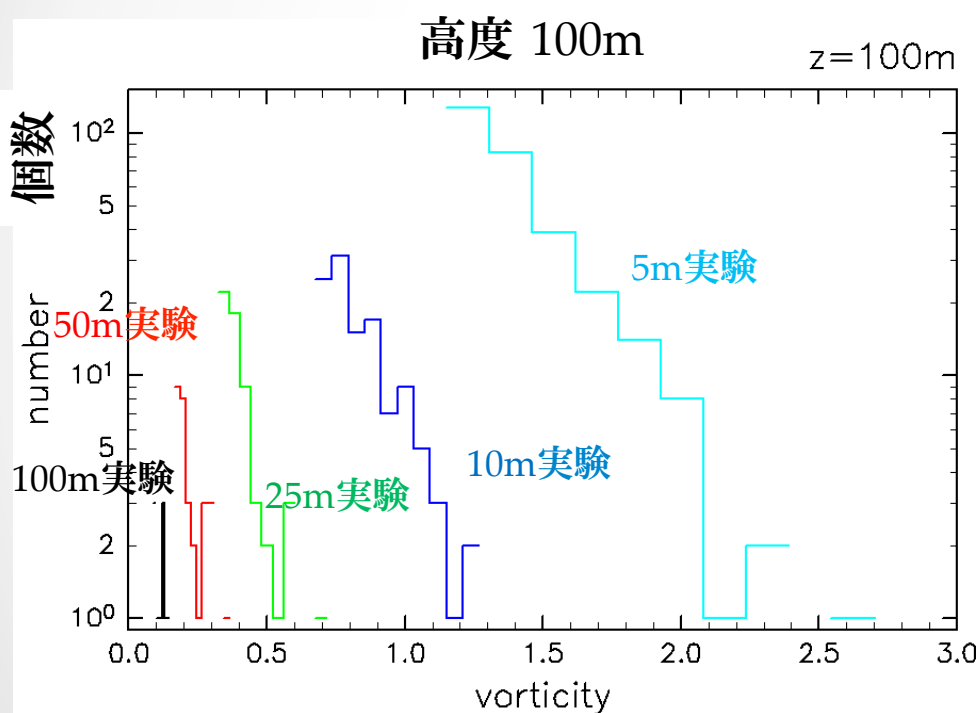
鉛直風速分布
(高度 2.5m)



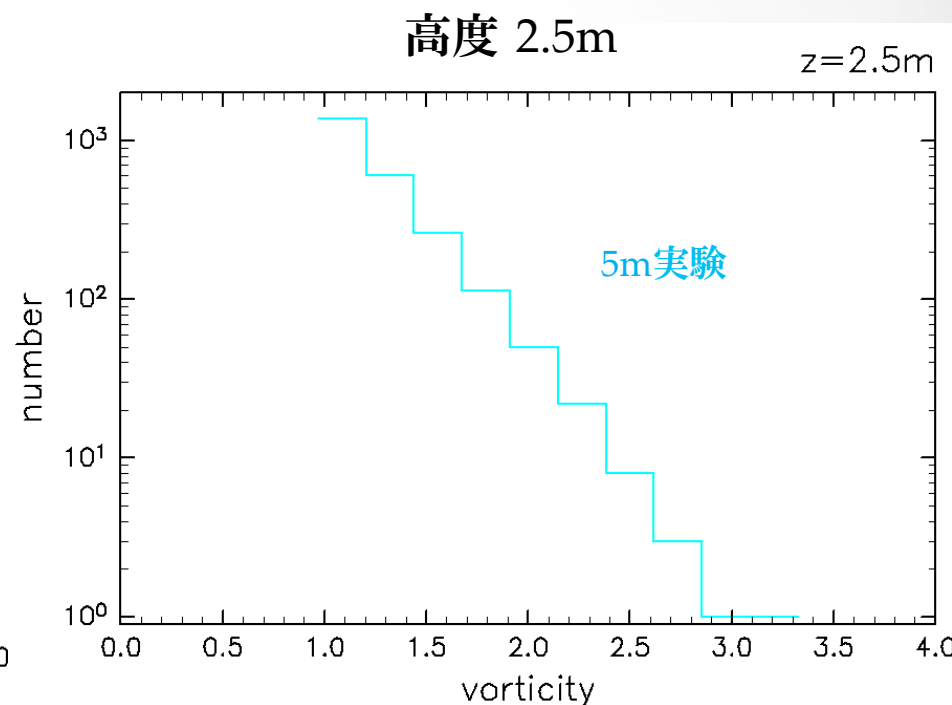
- 局所的な強い孤立渦を再現
 - 鉛直方向に数百mの高さをもつ
 - 地表に近いほど渦度が大きい
 - 上昇流域に集中

孤立渦の強度分布

孤立渦の個数頻度分布図



最大渦度



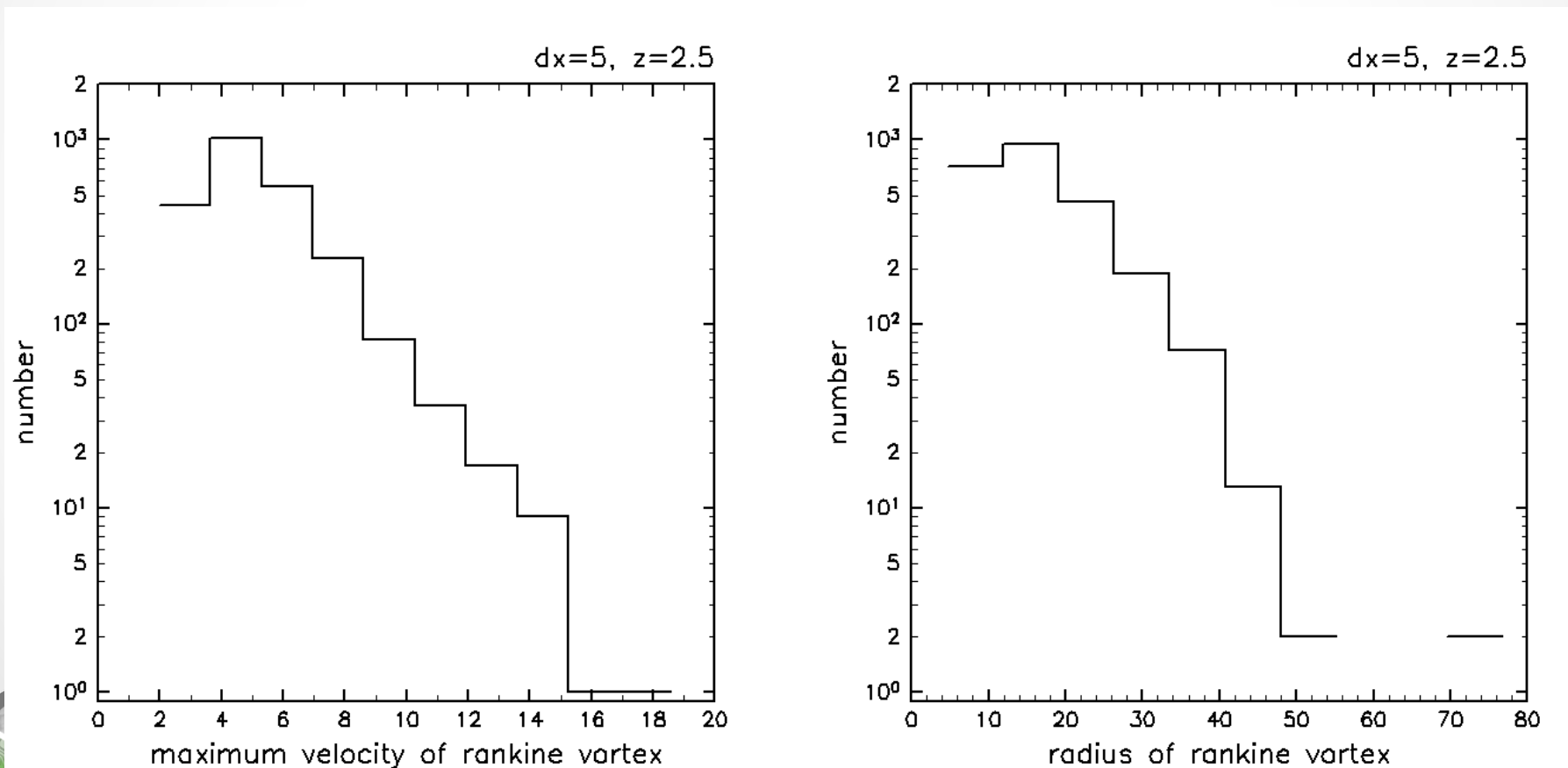
最大渦度

孤立渦の最大渦度に対する個数の対数則が得られた

ランキン渦を仮定した際の個数頻度分布図 (5m実験, 高度2.5m)

最大風速

半径



おおむね対数則にしたがっている

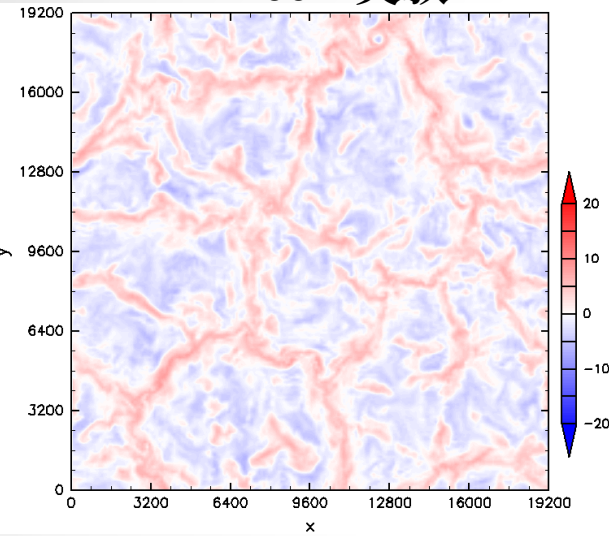
まとめ

- 火星境界層の大気運動の詳細を高解像度
ラージエディーションシミュレーションにより
明らかにした
 - 20km四方の領域で5m という高解像度の実験を実施
 - 微細構造をもつ強い現象の表現には、5mという高解像度が特に有効
 - 最大風速
 - 孤立渦

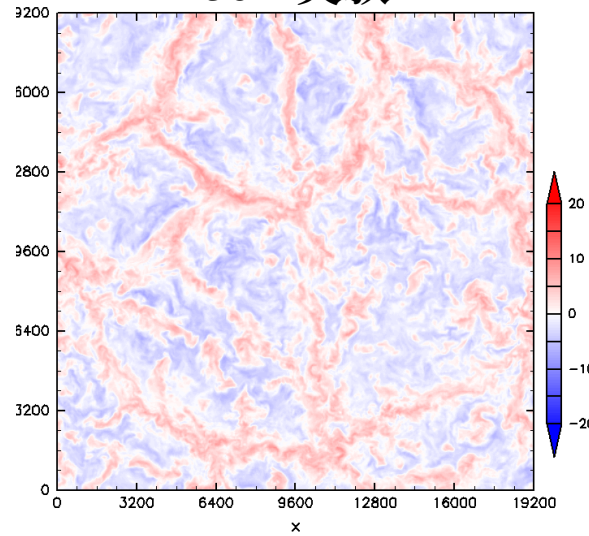
- 以下予備の図

鉛直速度 高度500m 解像度依存性

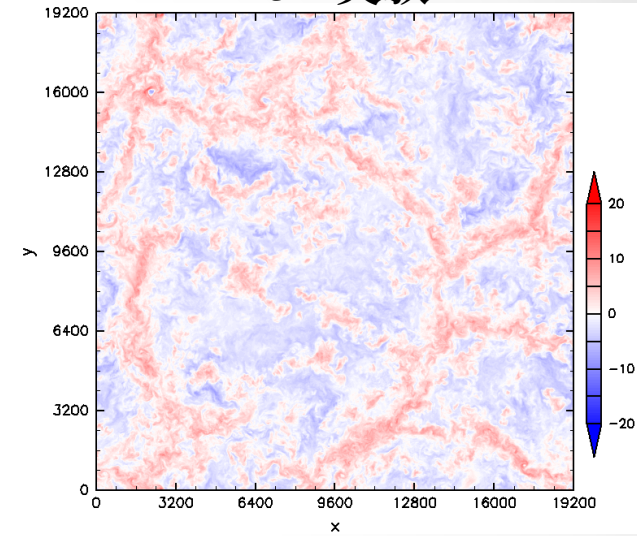
100m実験



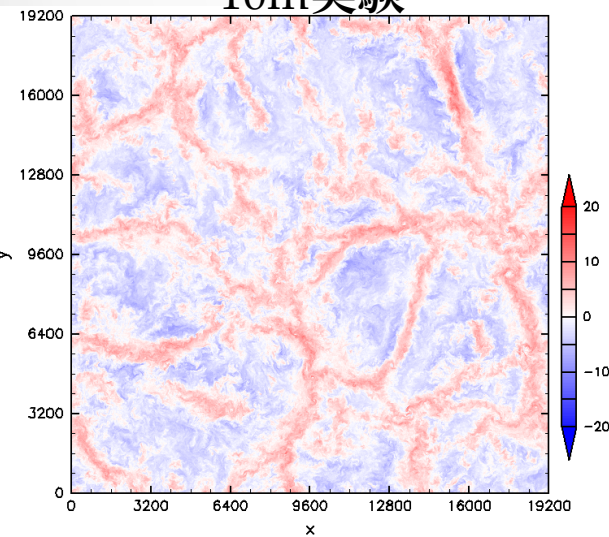
50m実験



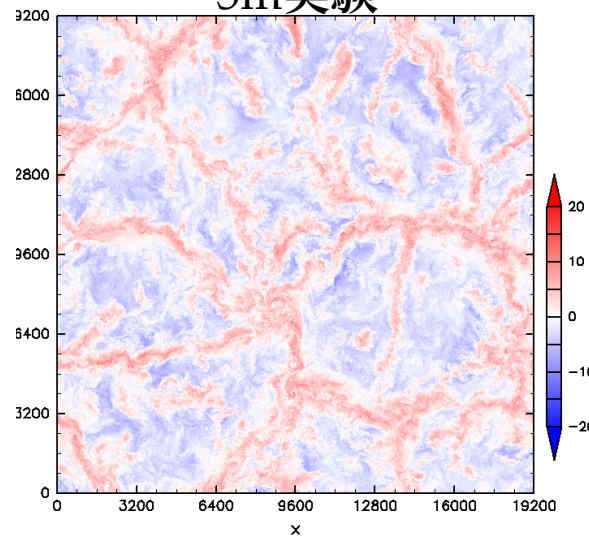
25m実験



10m実験

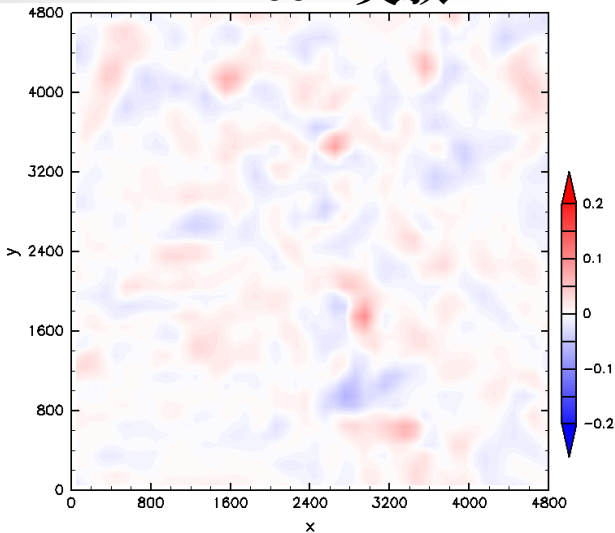


5m実験

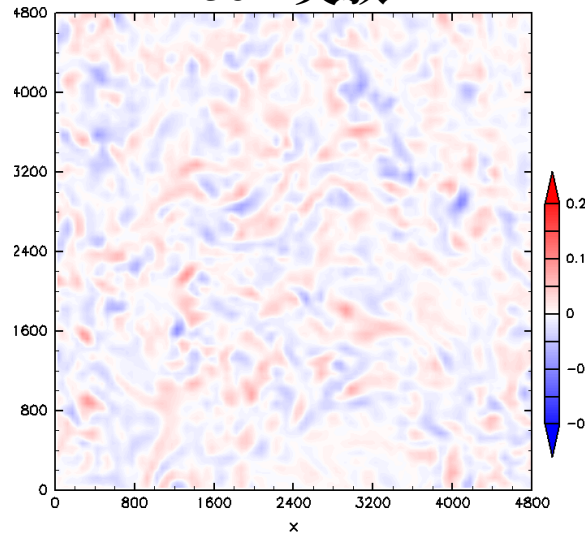


渦度 500m 解像度依存性

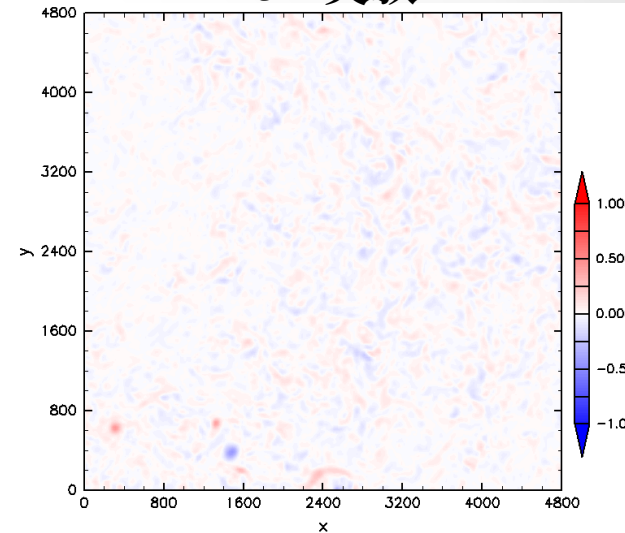
100m実験



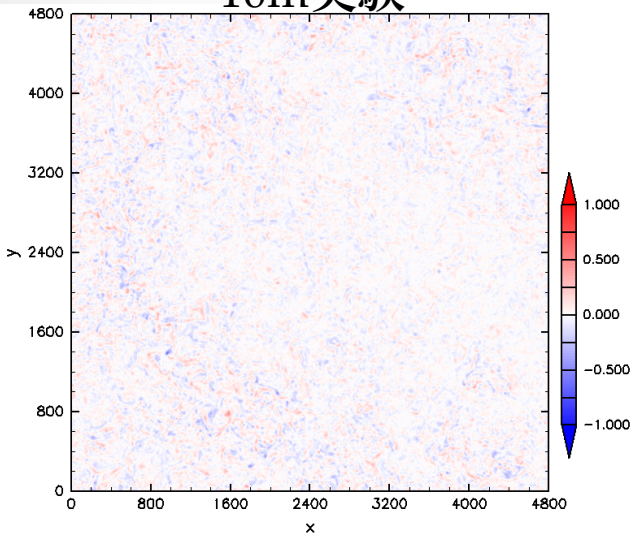
50m実験



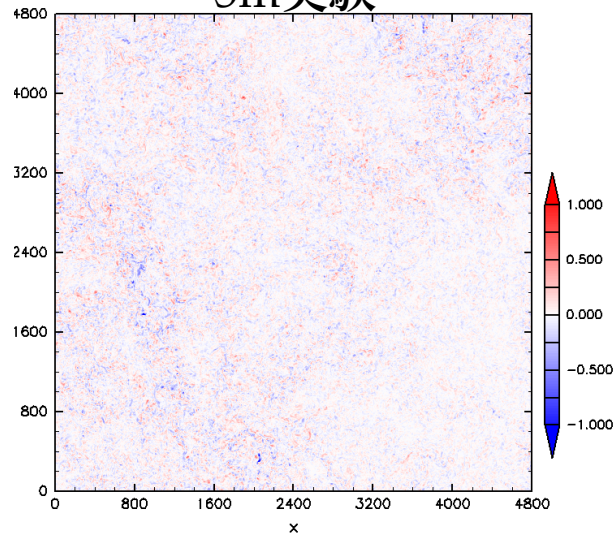
25m実験



10m実験



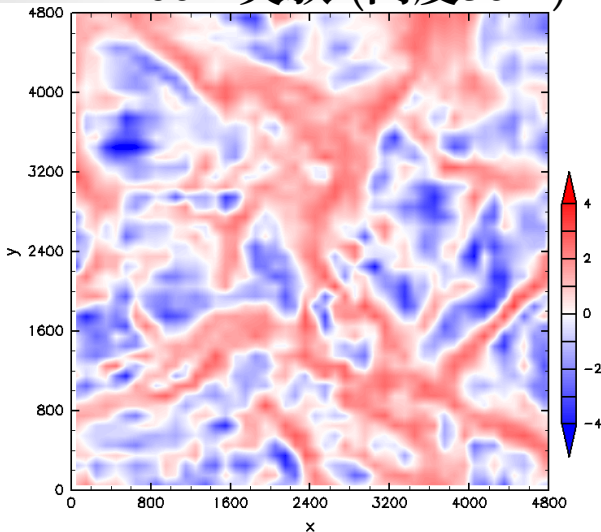
5m実験



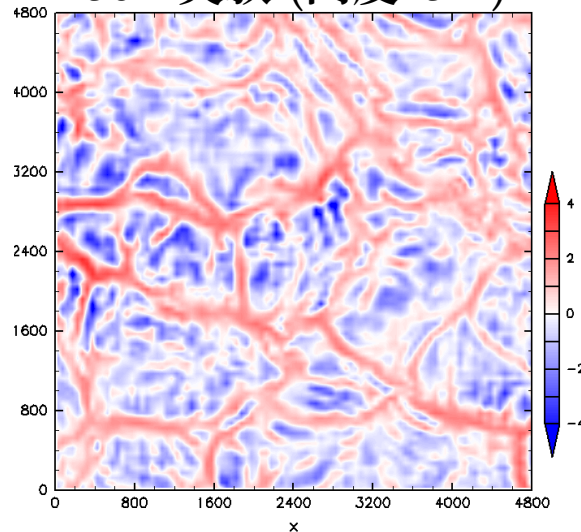
1/16領域
色階調が異なって
いることに注意

鉛直速度 最下層 解像度依存性

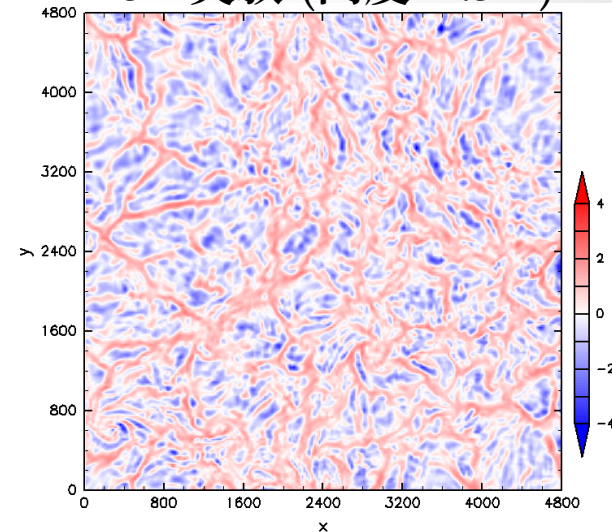
100m実験 (高度50m)



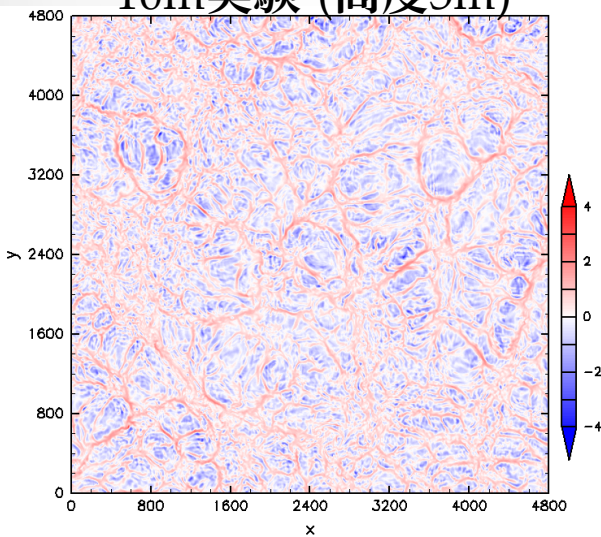
50m実験 (高度25m)



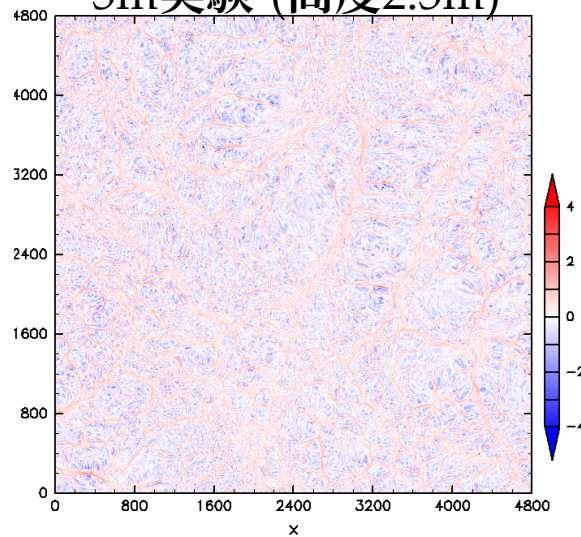
25m実験 (高度12.5m)



10m実験 (高度5m)



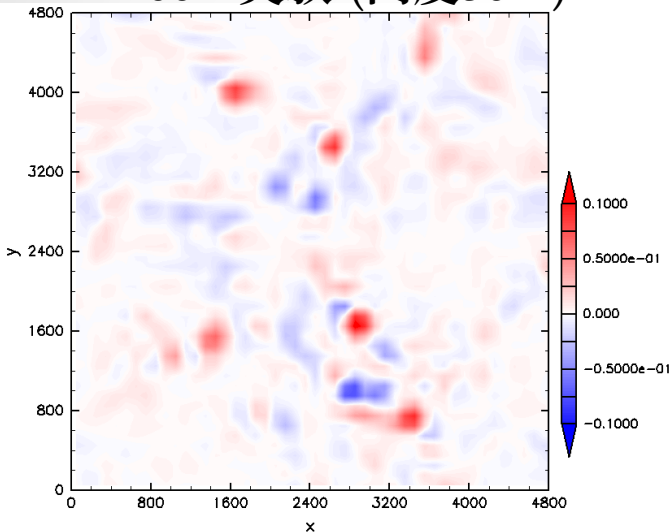
5m実験 (高度2.5m)



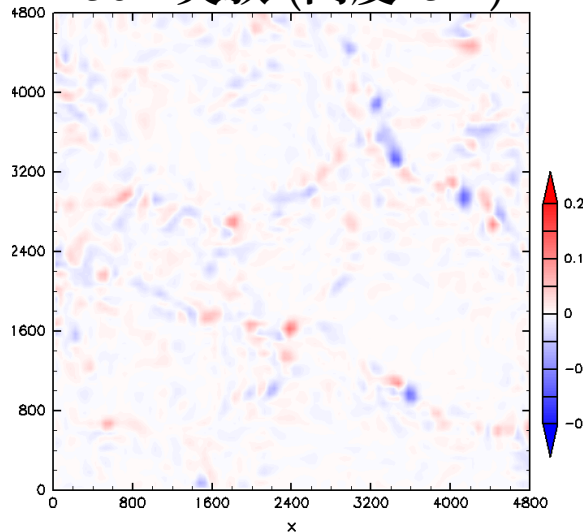
1/16領域
14:30LT
(初期値から14.5h後)

渦度 解像度依存性 (最下層)

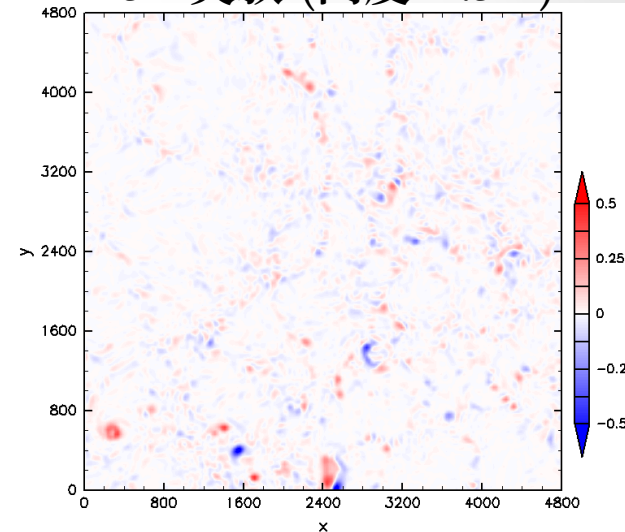
100m実験 (高度50m)



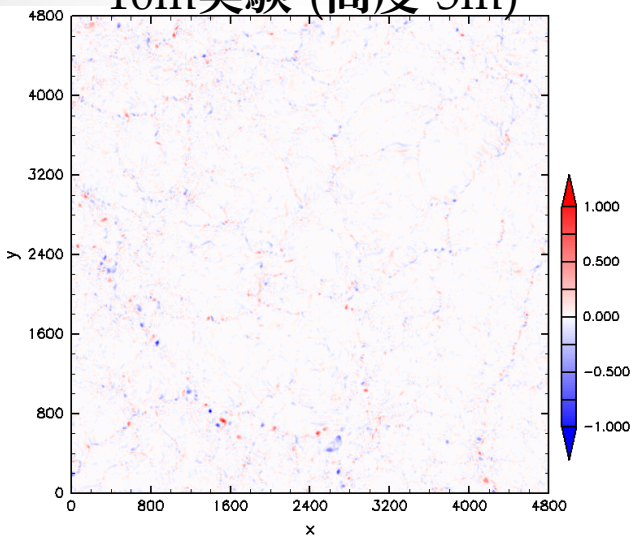
50m実験 (高度25m)



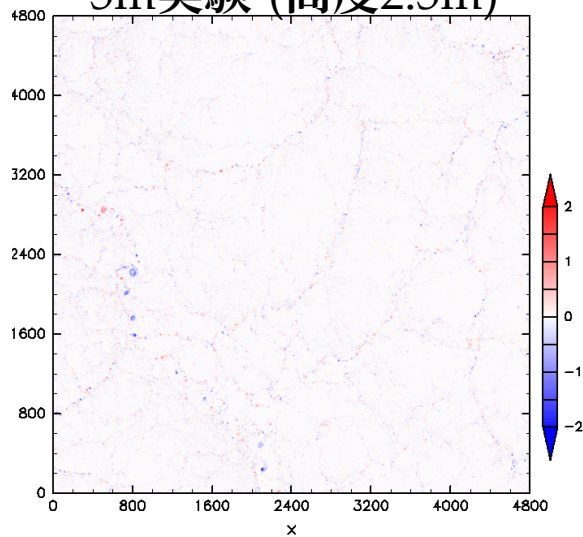
25m実験 (高度12.5m)



10m実験 (高度 5m)



5m実験 (高度2.5m)



1/16領域
色階調が異なって
いることに注意

計算概要

- 火星大気の境界層の高解像度ラージエディーションシミュレーション(LES)
 - 使用モデル: 理研AICSソフトウェア “SCALE-LES”
 - 構造格子 有限体積法
 - 完全陽解法 3 段RK(大域通信の必要無し)
 - 最大問題規模: 約500億格子
- 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

