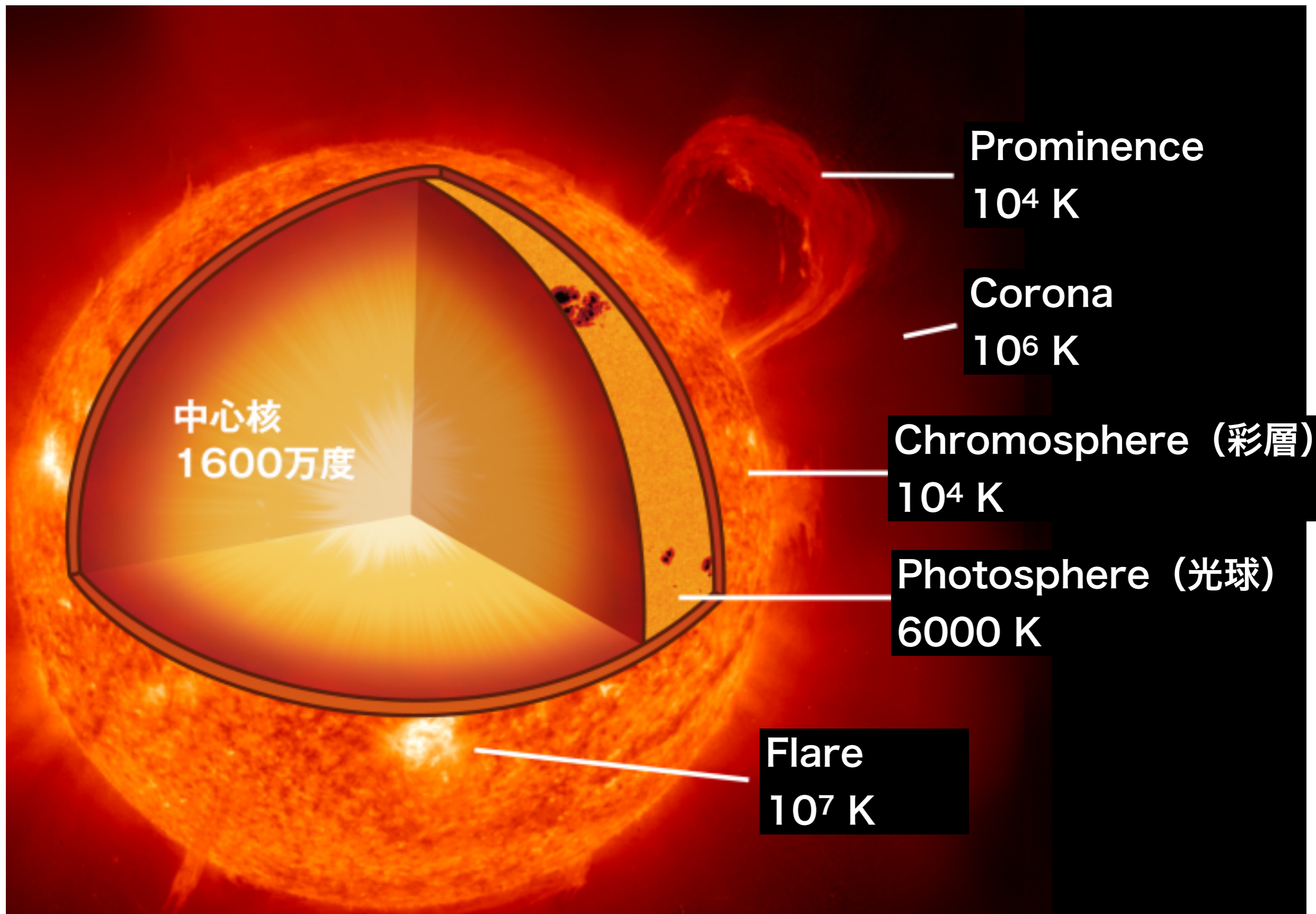


偏光分光観測で挑む 太陽表面乱対流のダイナミクス

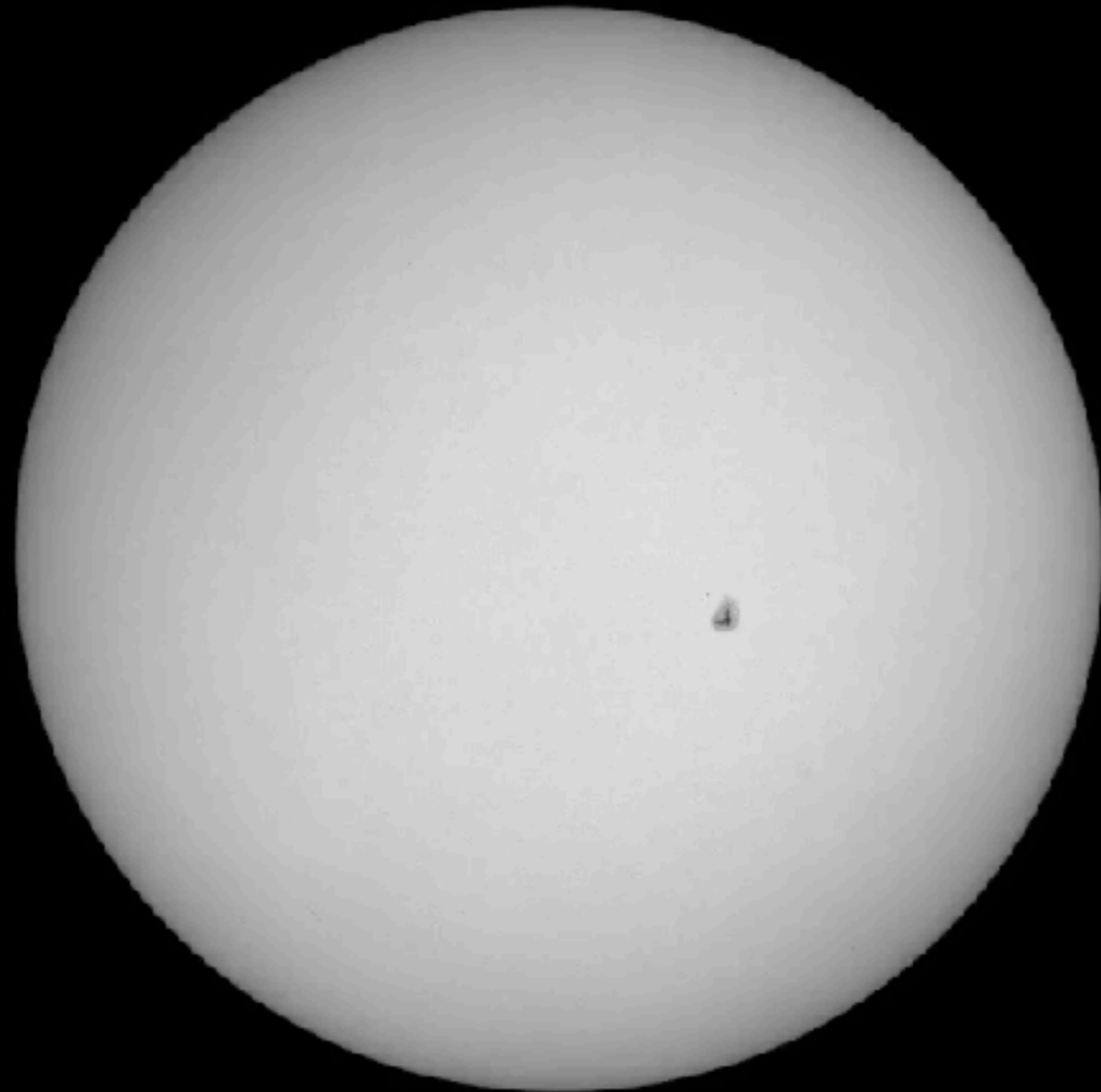
石川 遼太郎
Ryohtaroh T. Ishikawa

核融合科学研究所
メタ階層ダイナミクスユニット

太陽大気

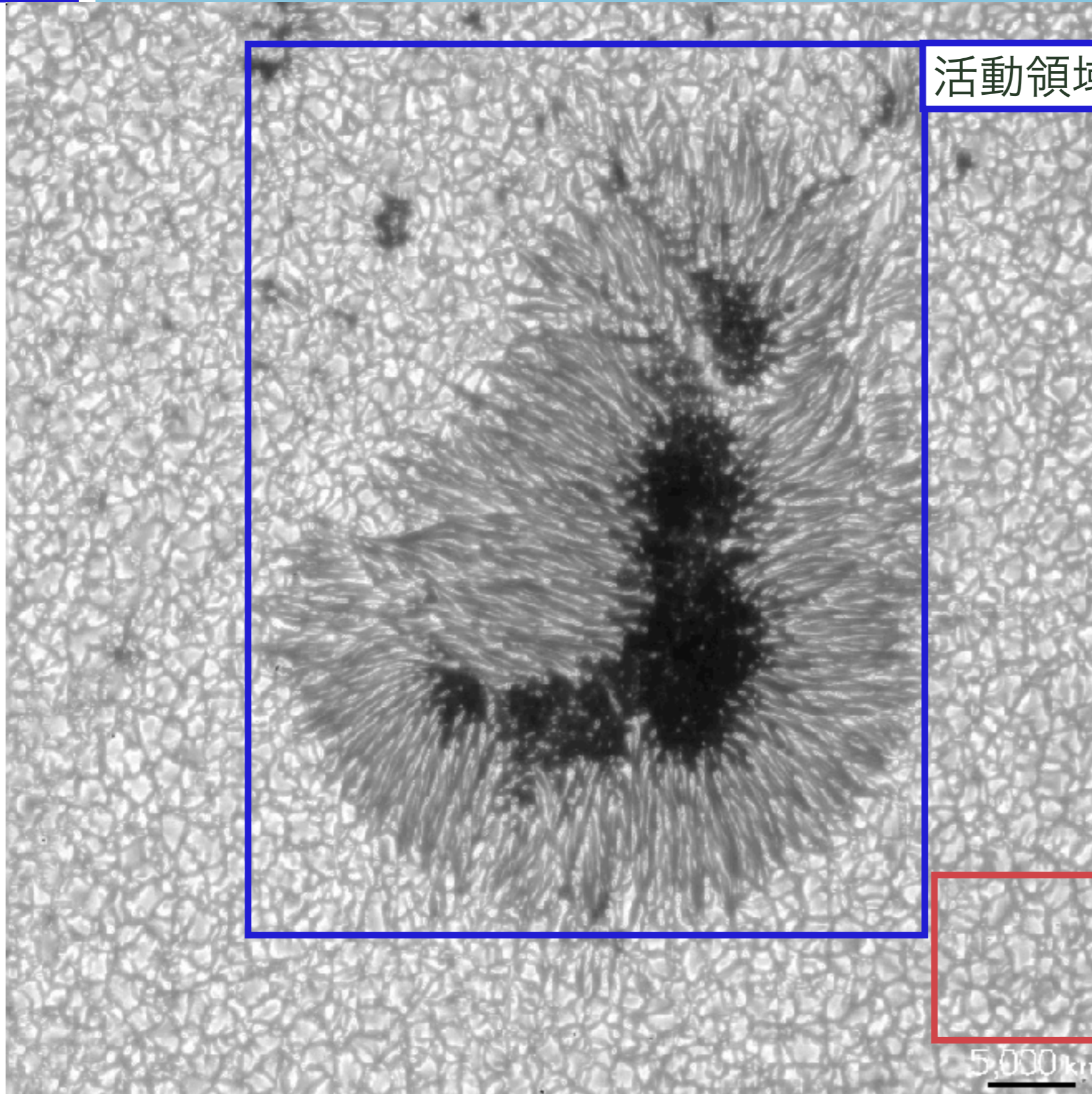


Solar surface



171,000 km

Solar surface



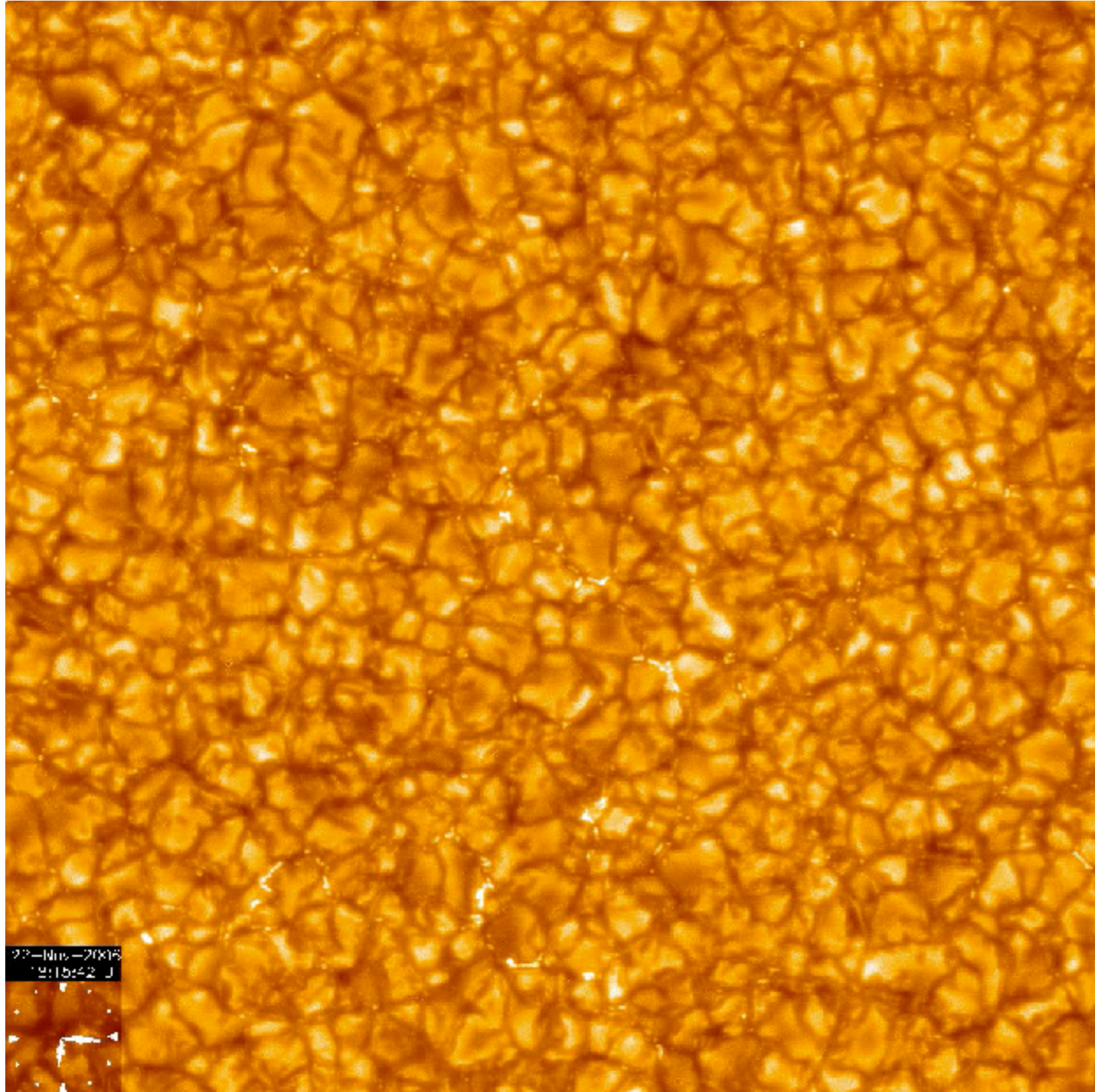
活動領域（黒点）

静穏領域

5,000 km

Hinode Solar Optical Telescope

Granulation: surface convection



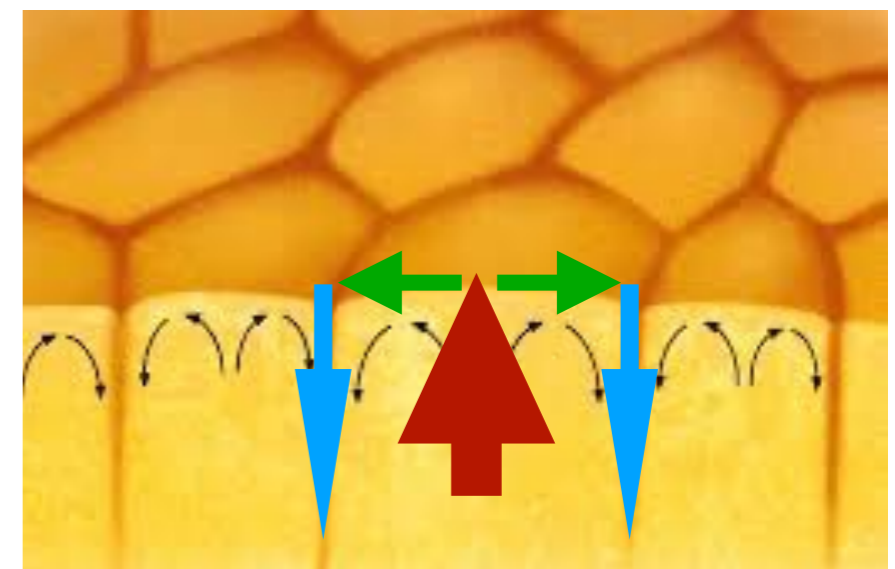
太陽表面は粒状斑と呼ばれる対流セルで埋め尽くされている。

Typical size: ~1000 km

Lifetime: ~ 10 min

粒状斑：上昇流

間隙：下降流



Surface convection

Granulation observed with Hinode-SOT/FG

Interaction w/ magnetic fields



- ▶ 太陽表面では磁場は局在化している
- ▶ 磁場は対流運動に受動的に流され、
間隙領域に掃き集められる。
- ▶ このような小さな領域でプラズマと磁場の
相互作用が起こる。
 - ・ MHD波動の生成
 - ・ 磁場のねじれ
 - ・ 小スケールダイナモ

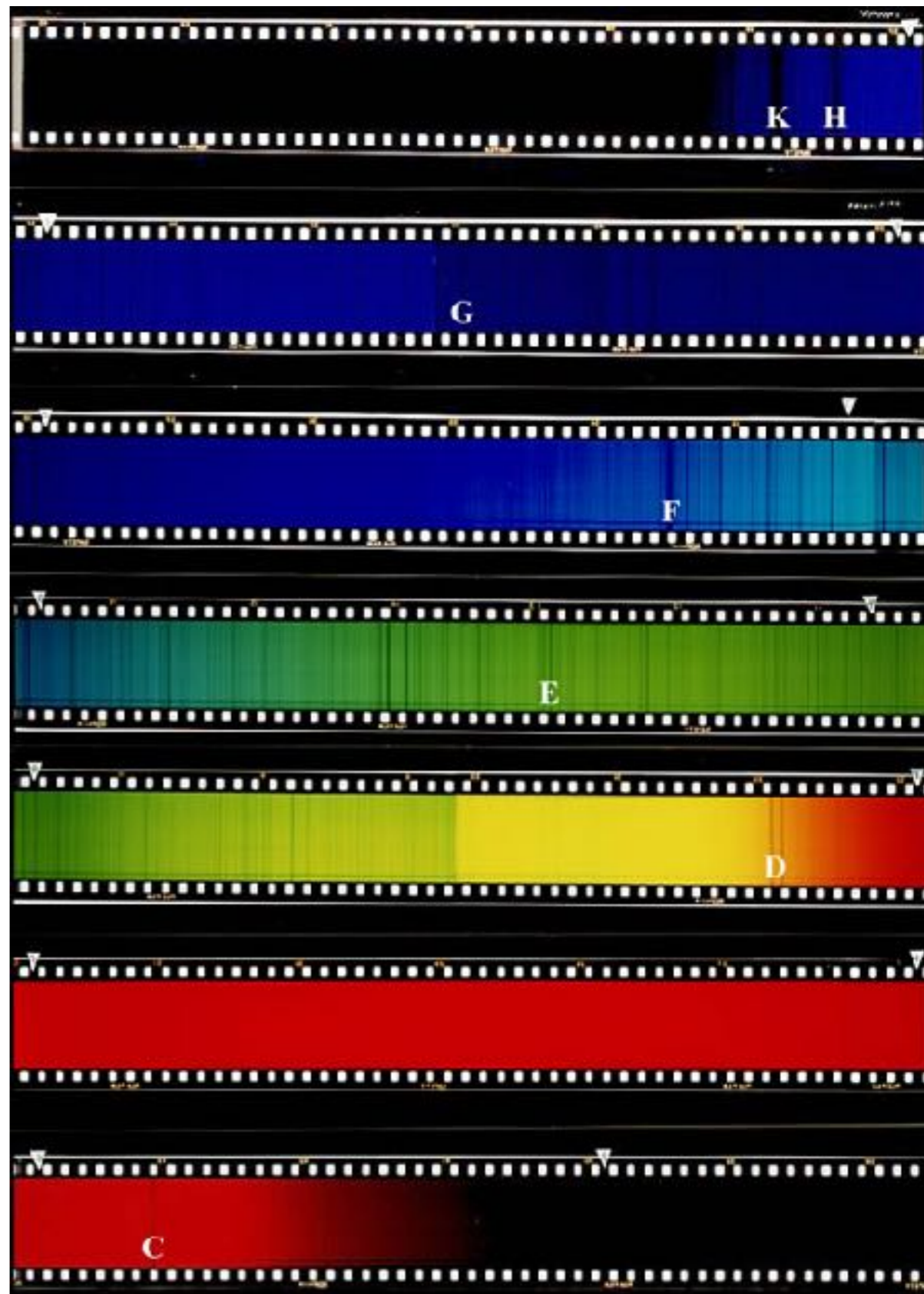
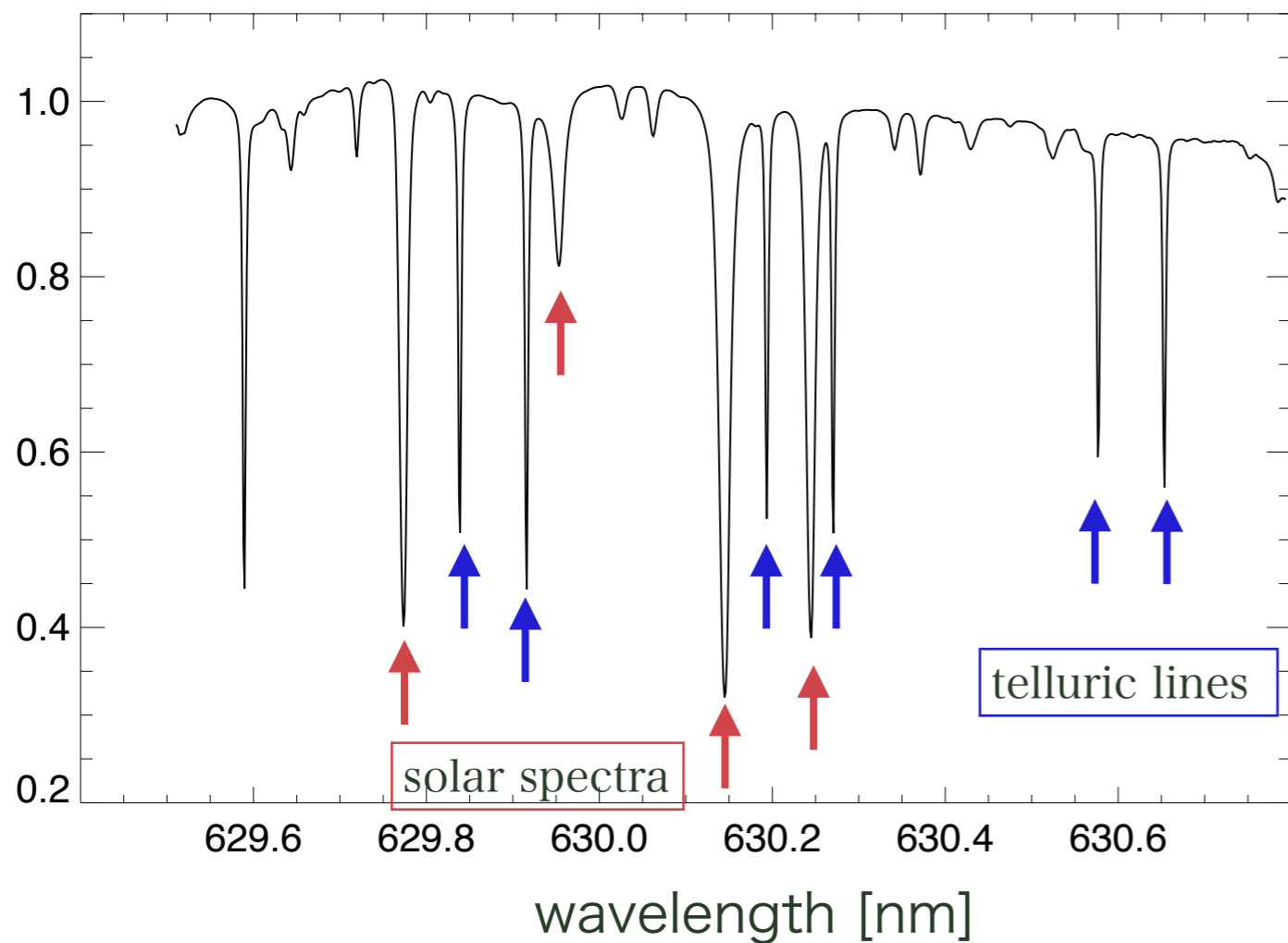
小スケール速度

&

小スケール磁場

太陽スペクトル

直接観測量は光である。
基本的に、光の観測から他の物理量を
推定する必要がある。



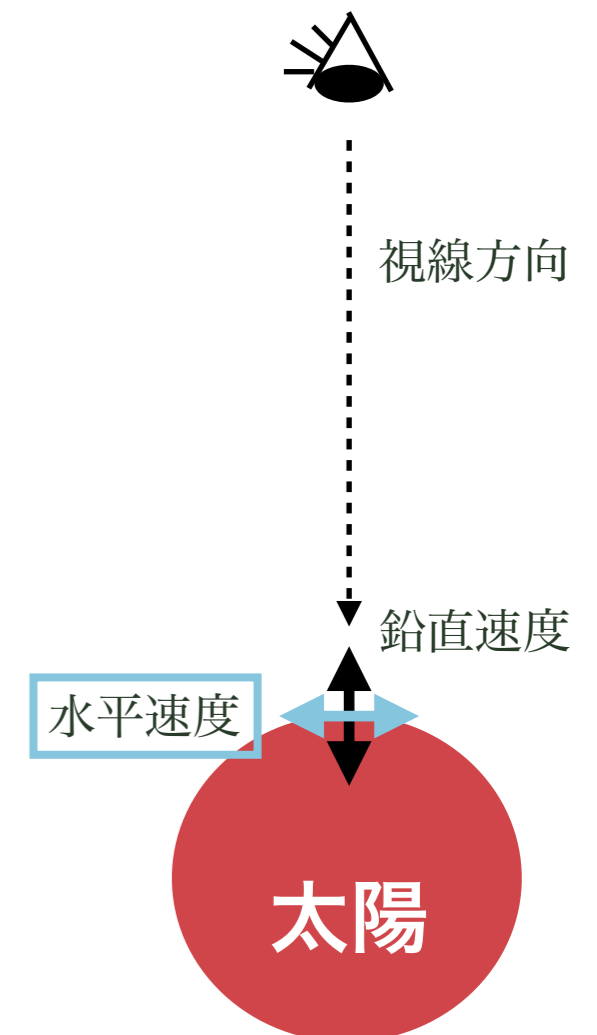
本日の内容

1. 水平速度診断手法

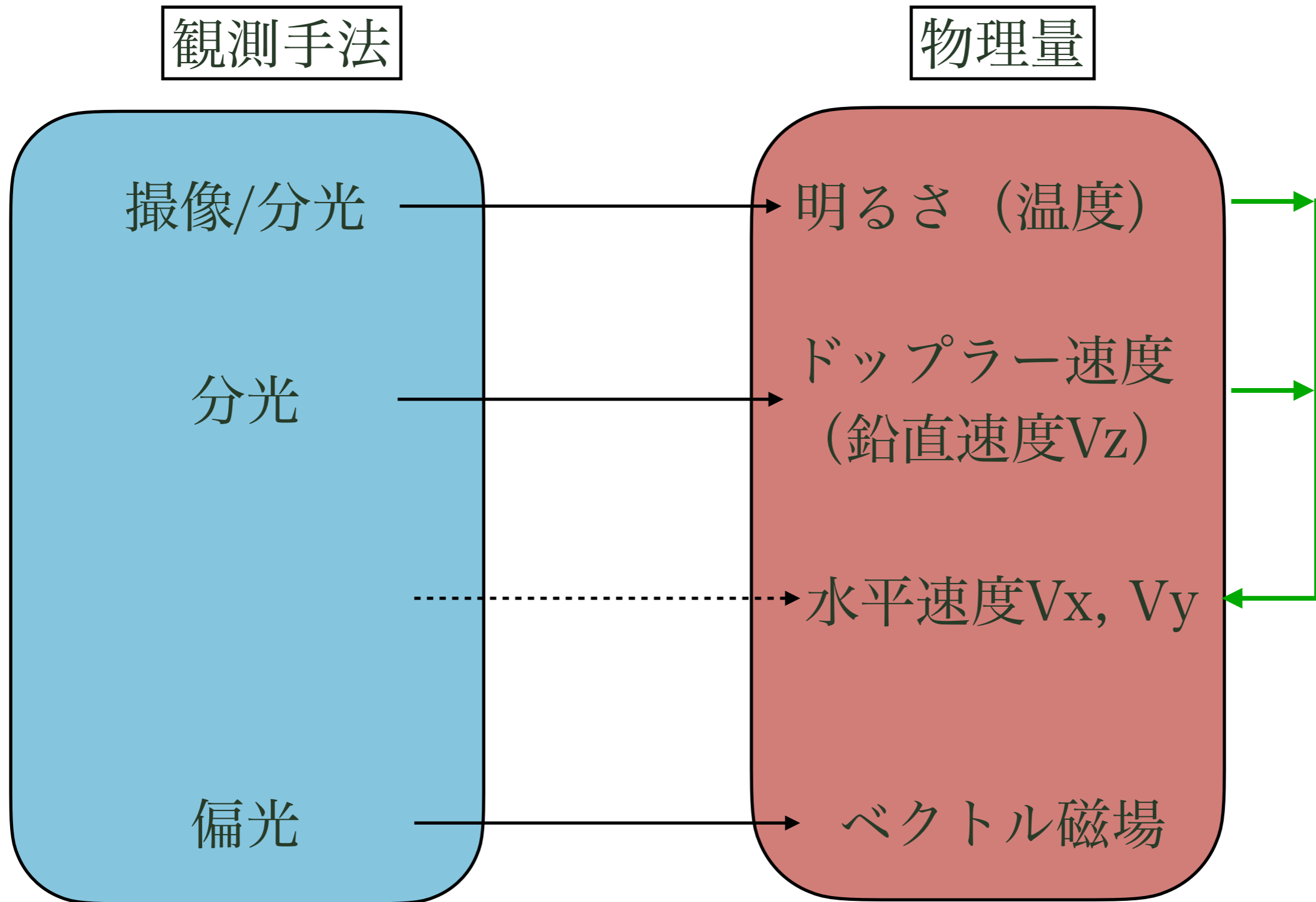
ドップラー効果を用いずにどのように水平速度を推定するか？
深層学習を用いた水平速度診断手法の開発とその性能評価

2. 鉛直速度診断

空間分解できない速度構造をどう推定するか？
スペクトル線解析による速度構造の診断



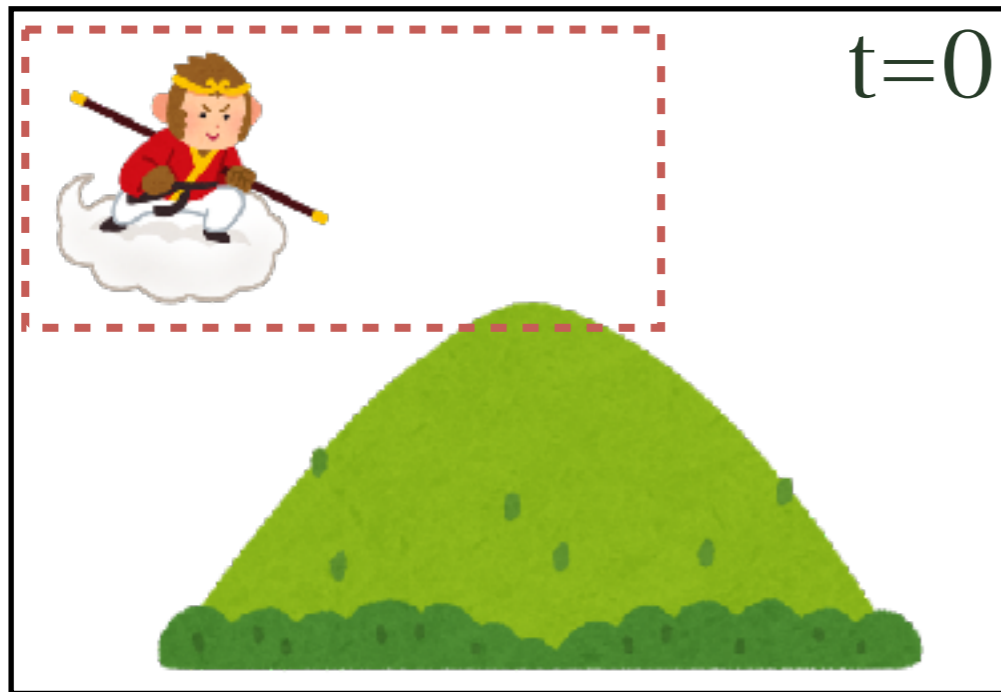
水平速度診断の難しさ



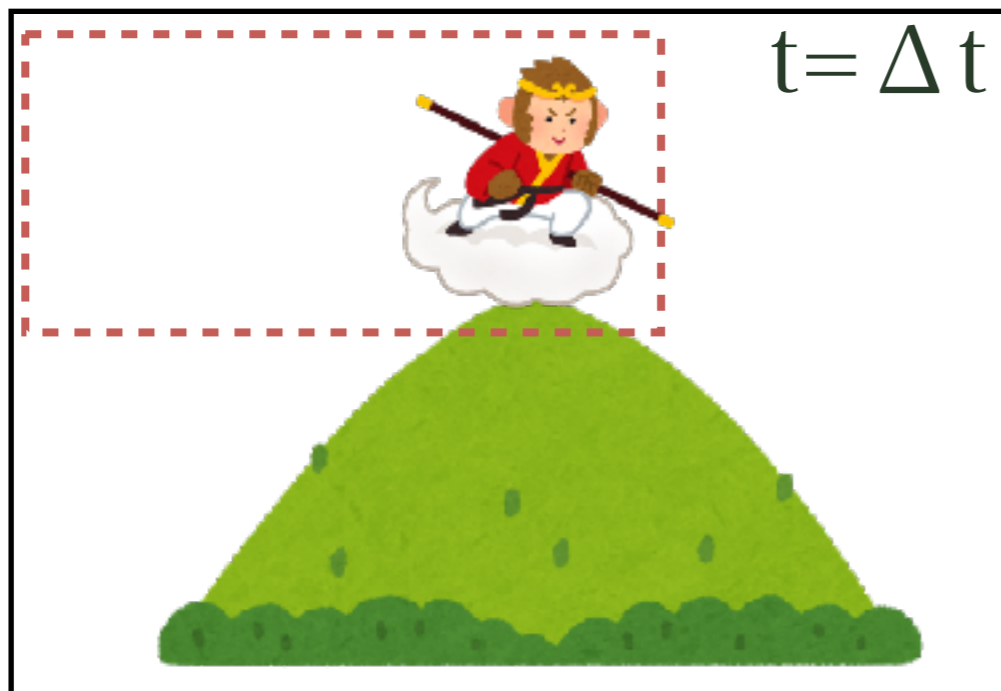
Local Correlation Tracking

2枚の連続する画像の相互相関を計算して速度場を推定する手法。

観測画像

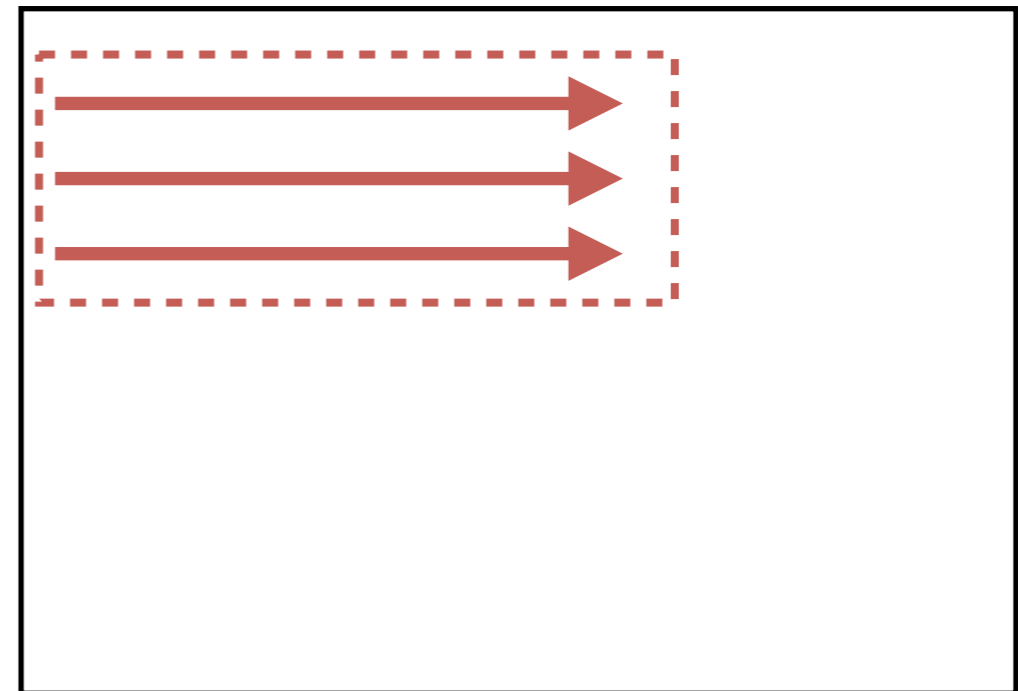


$t=0$



$t = \Delta t$

推定速度場



実験室プラズマ分野で使われるODP-PIVとの性能比較を行い、実験室分野でもLCTは有用そう
Kobayashi et al. (2023, PFR)

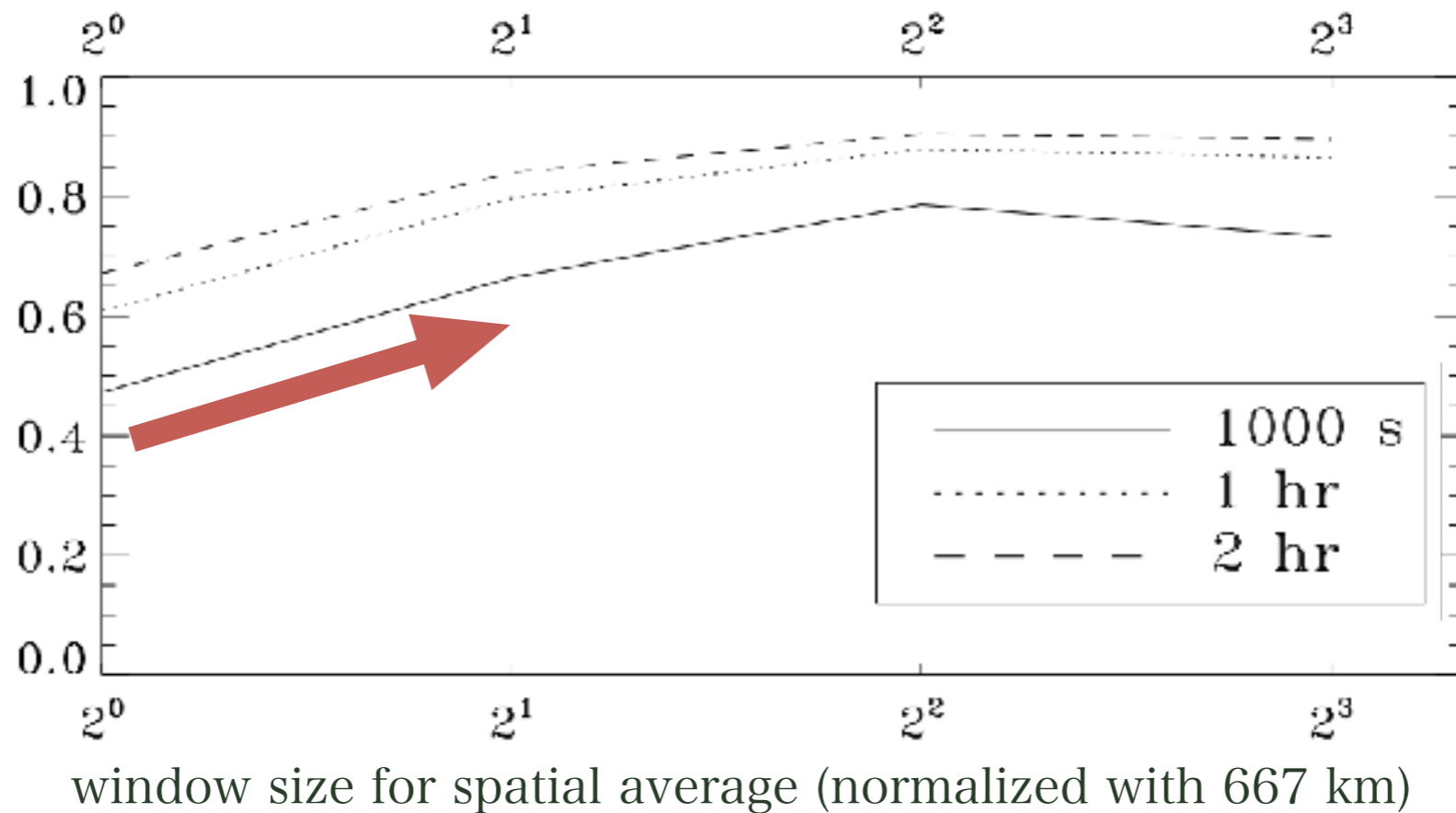
LCTの限界

Local Correlation Tracking

November & Simon (1988)

- ▶ LCT は対流セルよりも大きなスケールの流れ場を推定できる
- ▶ LCT で高い精度を達成するためには、時空間平均が必要
- ▶ LCT は小スケール速度場を過小評価する傾向にある

correlation
coefficient



c.f. typical scale
of granules:
1000 km
5 min

Rieutord et al. (2001)

Deep learning method

DeepVel Asensio Ramos et al. (2017)

- ▶ 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた最初の実時間診断
- ▶ ResNet architecture
- ▶ 時空間平均せずに相関係数は0.8

DeepVelU Tremblay & Attie (2020)

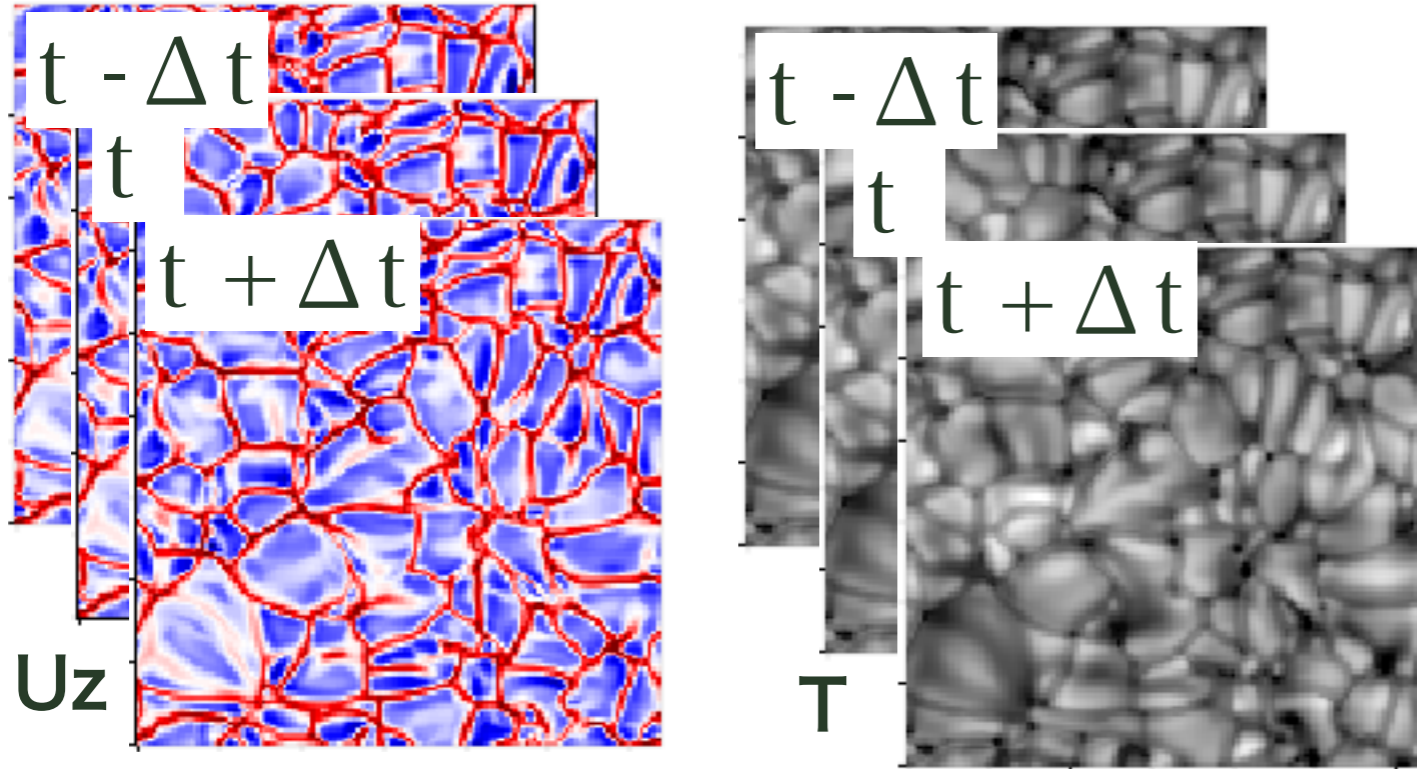
- ▶ U-net architecture
- ▶ 30分平均した速度場に対してはより良い精度

Multi-scale Deep Learning model (MSDL) Ishikawa et al. (2022)

- ▶ Multi-scale deep learning architecture
- ▶ 平均化しないデータで、DeepVelより少し良い

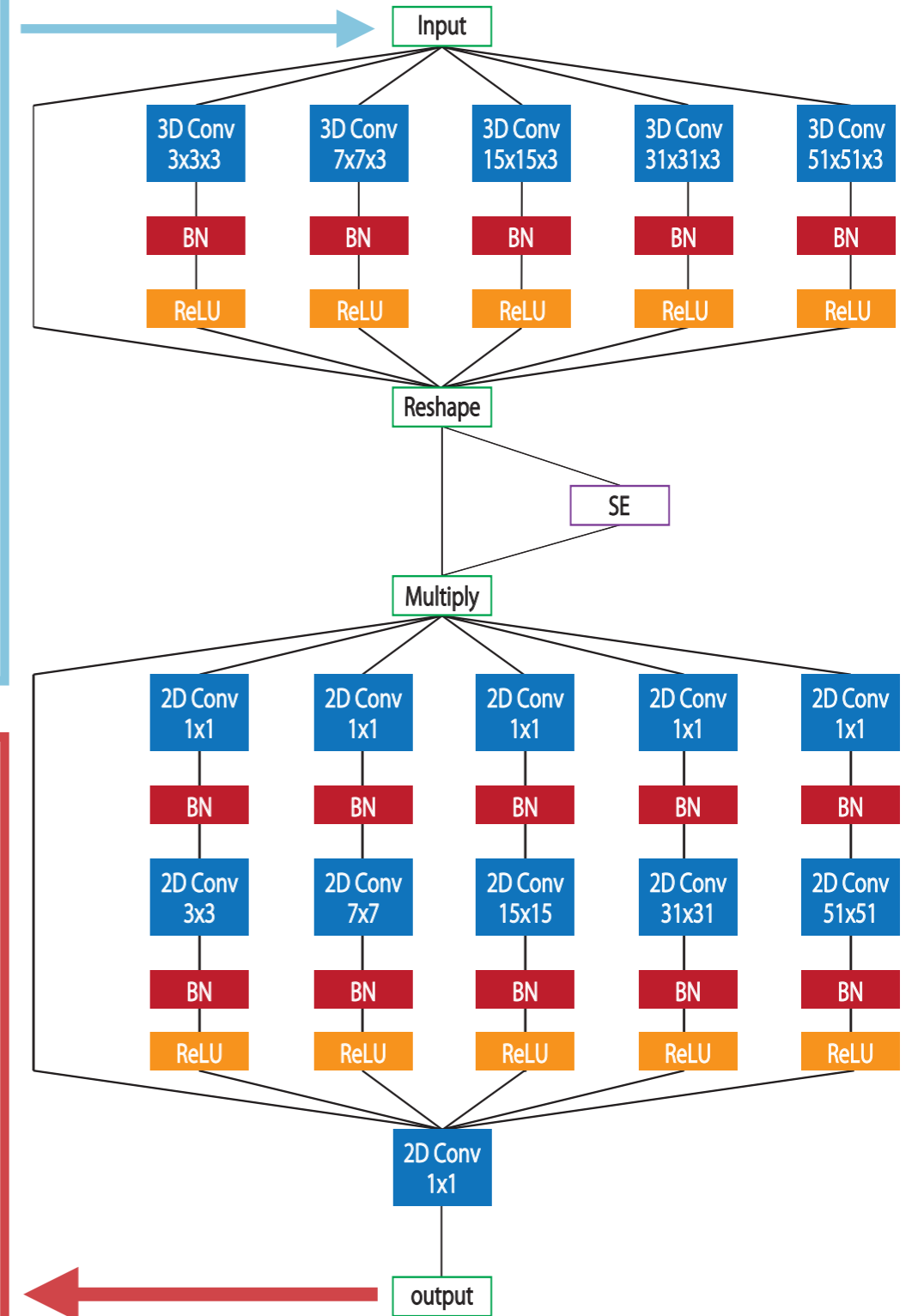
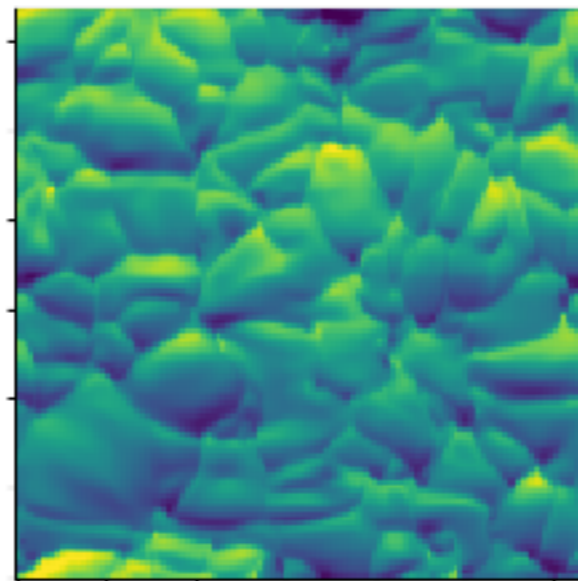
Deep Learning Method

Input



Output

- Spatial distribution of V_y (or V_x)
- Same size as input images



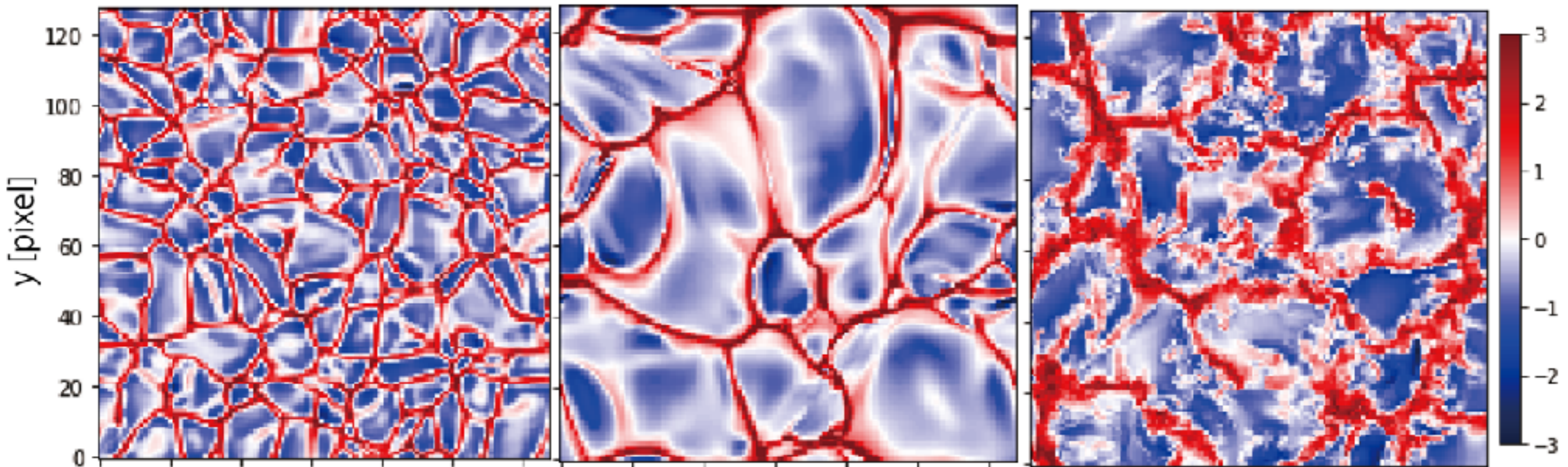
Convection Simulation

パワースペクトルの異なる3つの対流シミュレーションに対して深層学習モデルを学習させて性能の比較を行った。

Non-local

Local

MURaM

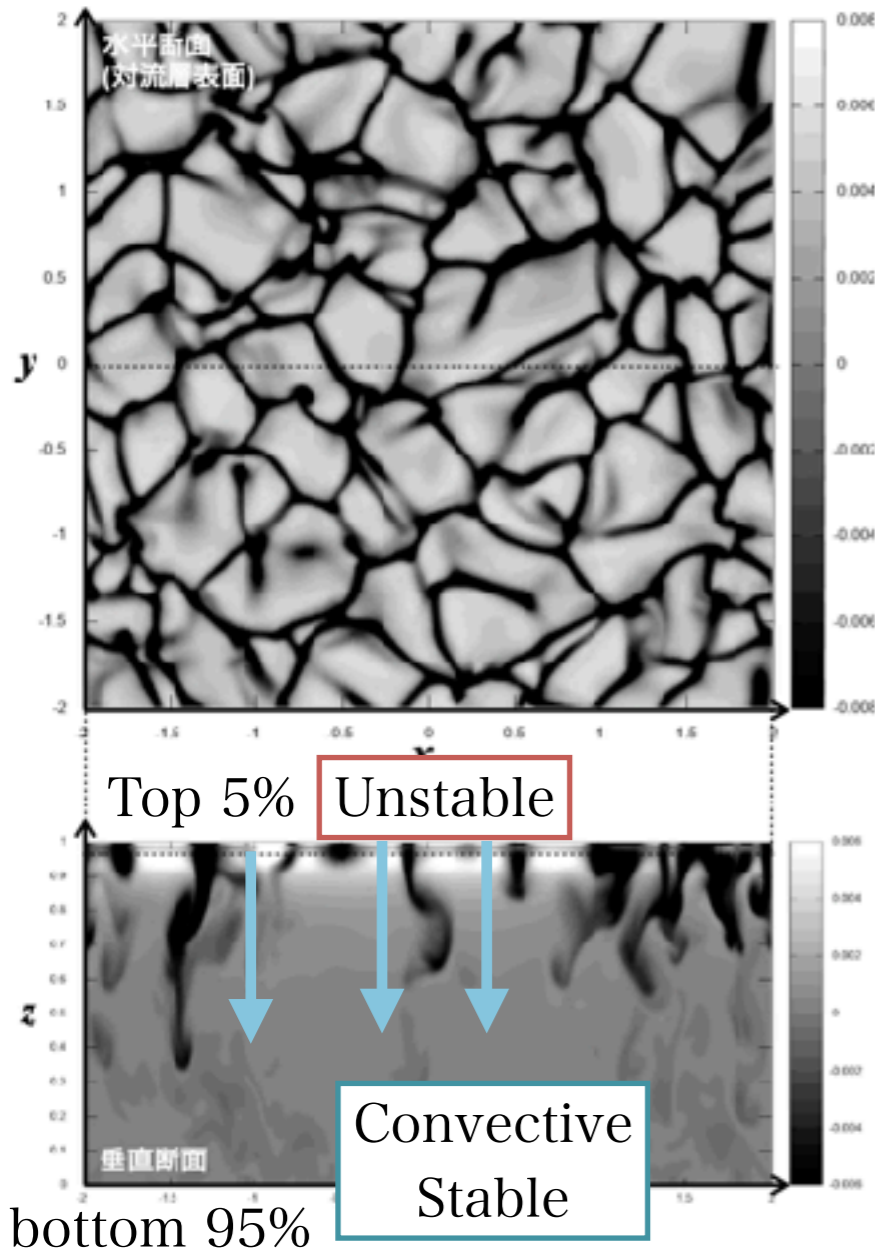


Normalized Vertical Velocity

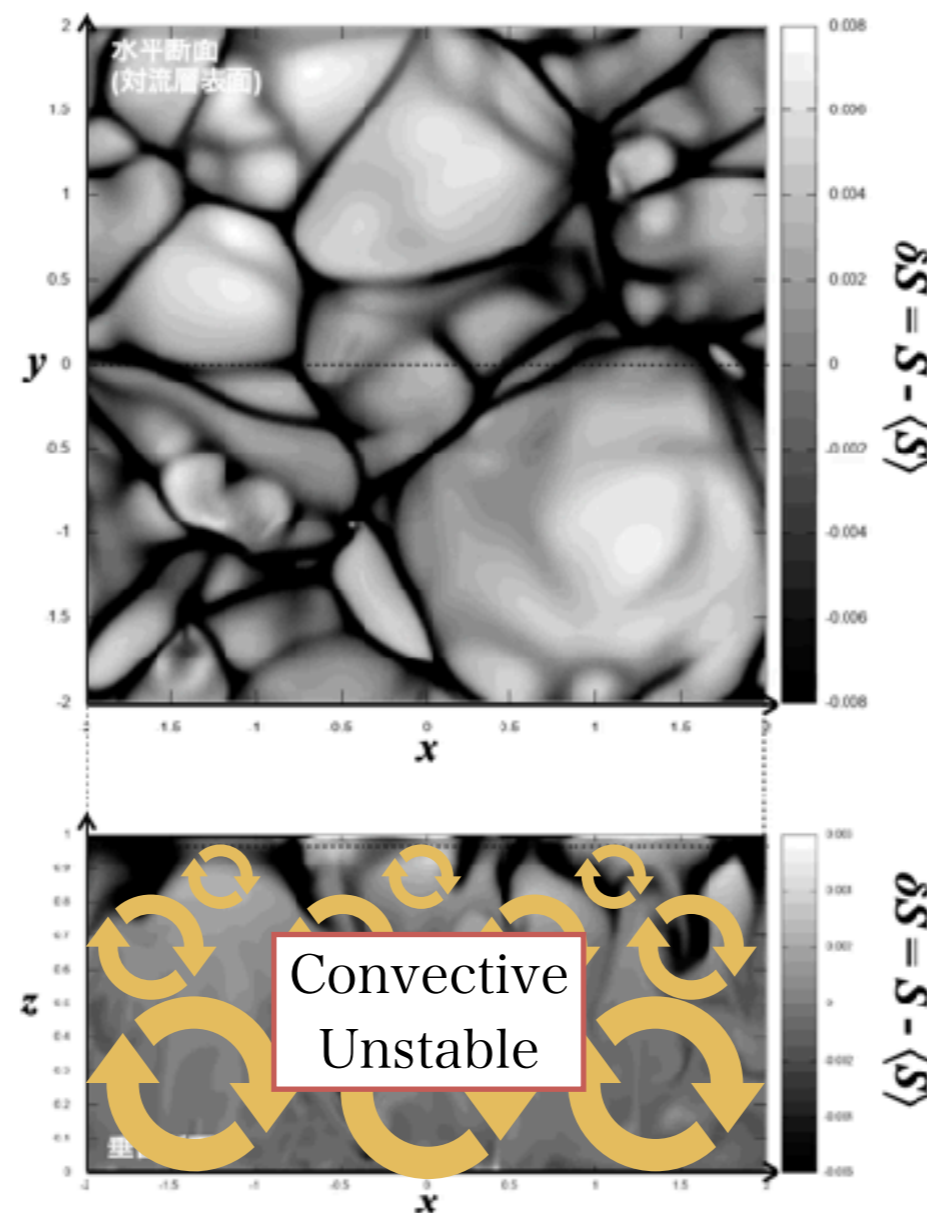
Numerical simulations

The driving mechanisms of convection are different.

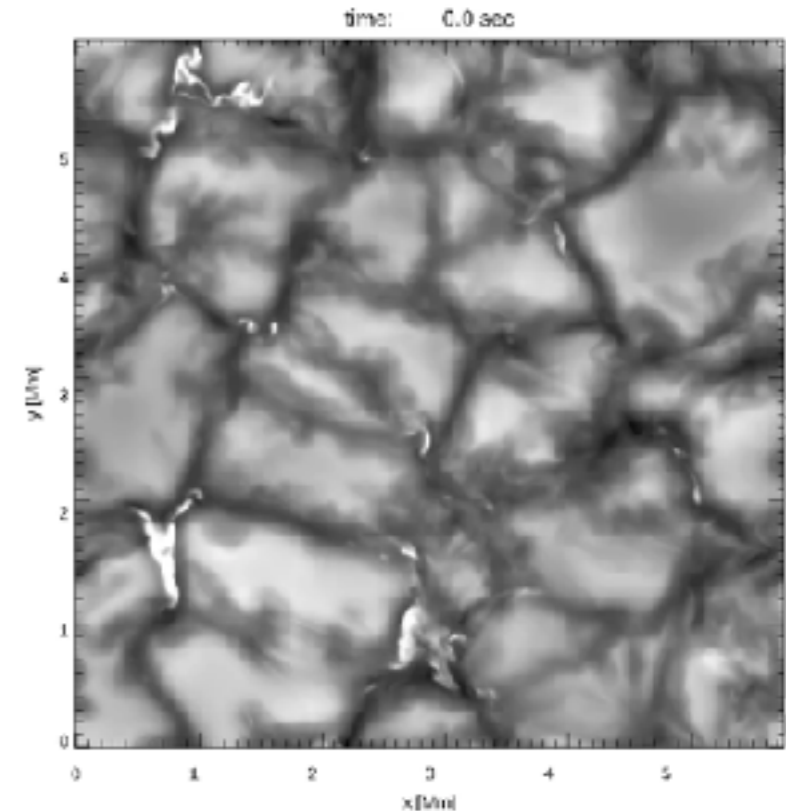
Non-Local



Local



MURaM



- ▶ non-grey radiative transfer
- ▶ temporal cadence: 35 sec
- ▶ 10.4 km/grid \rightarrow 42 km/grid

Yokoi, Masada, & Takiwaki (2021)

Vögler et al. (2005)

Riethmüller et al. (2014)

Power spectra

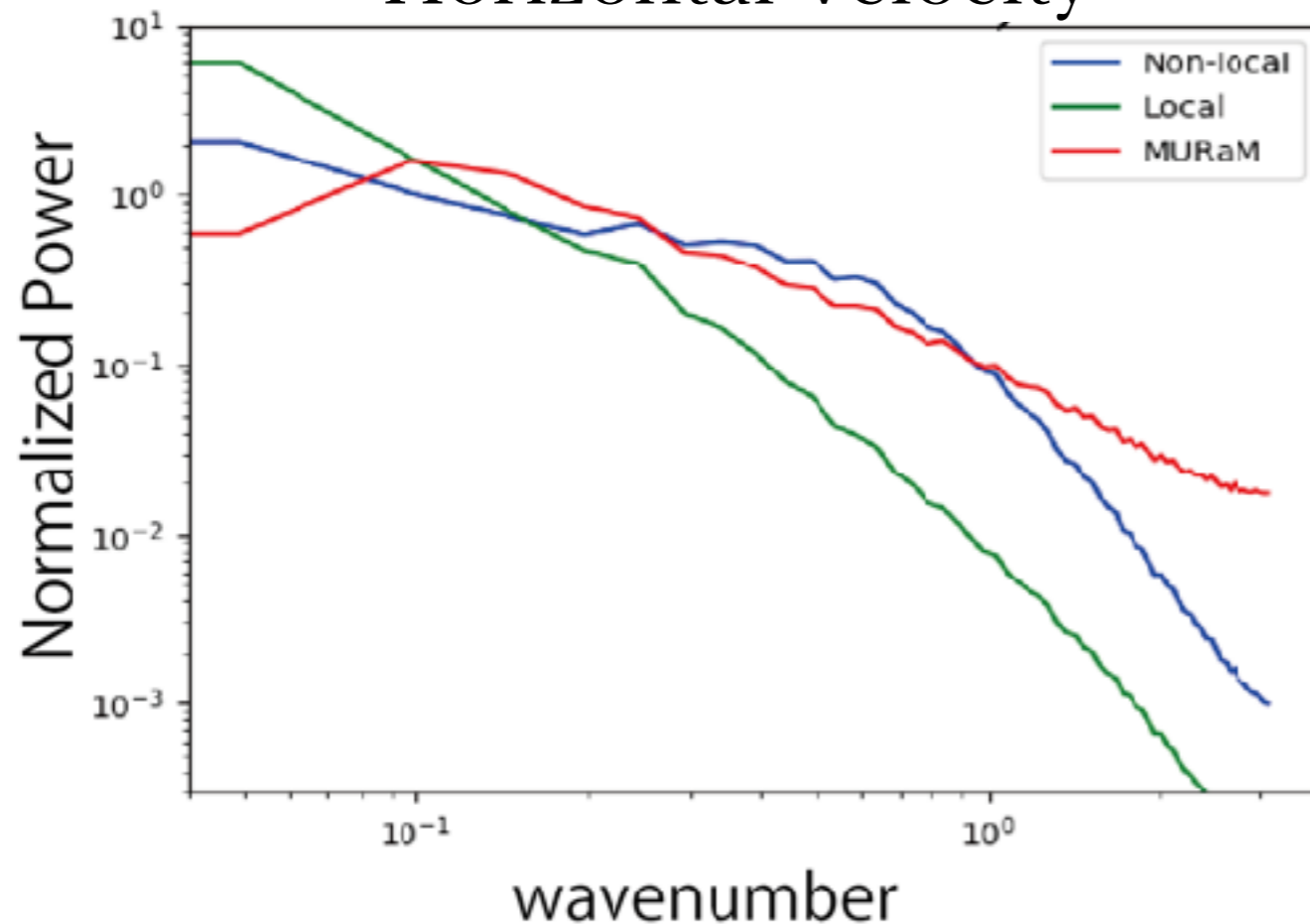
対流を駆動する物理が異なるので、パワースペクトルも異なる。

- ▶ エネルギー注入スケールが異なる

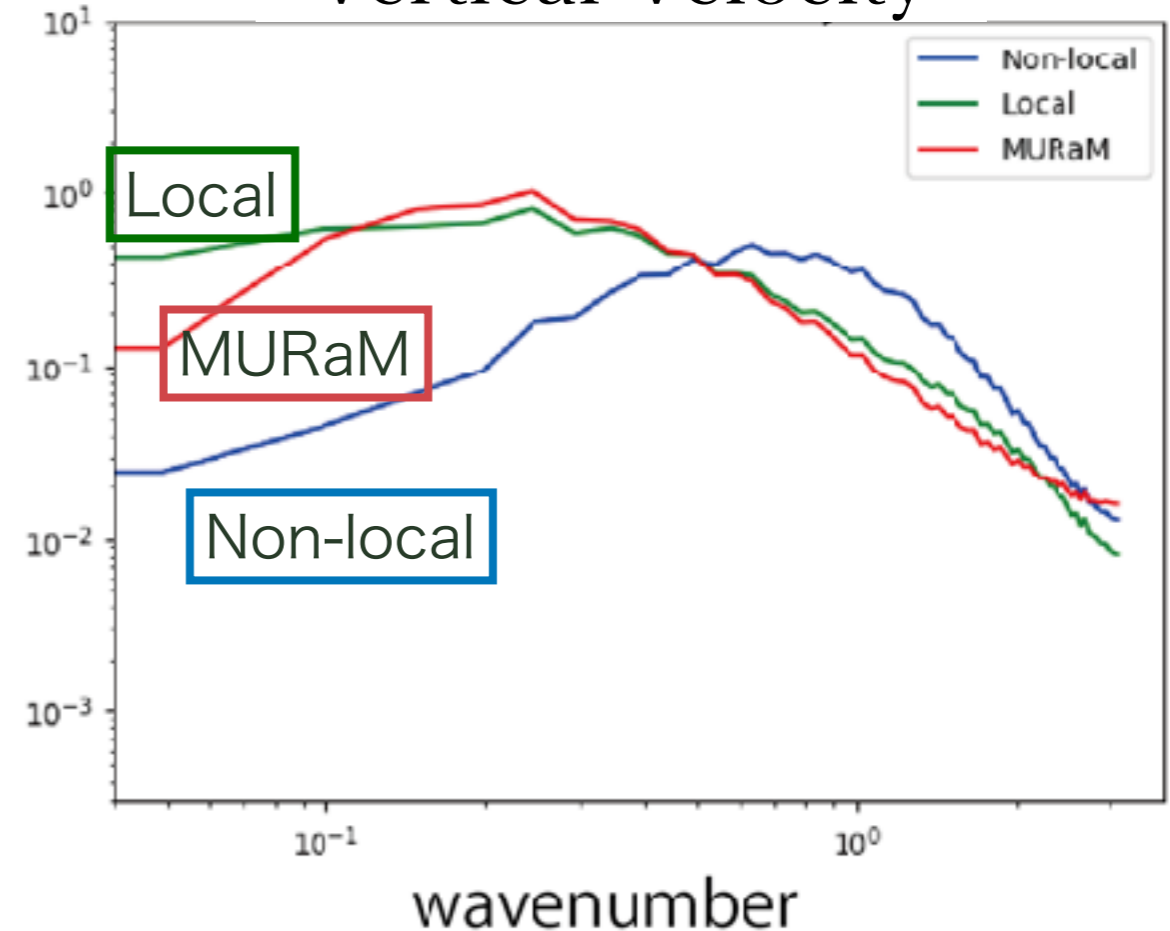
- ▶ スペクトルの傾きが異なる

→ モデルの特徴や汎化性などを調べることができると期待

Horizontal velocity

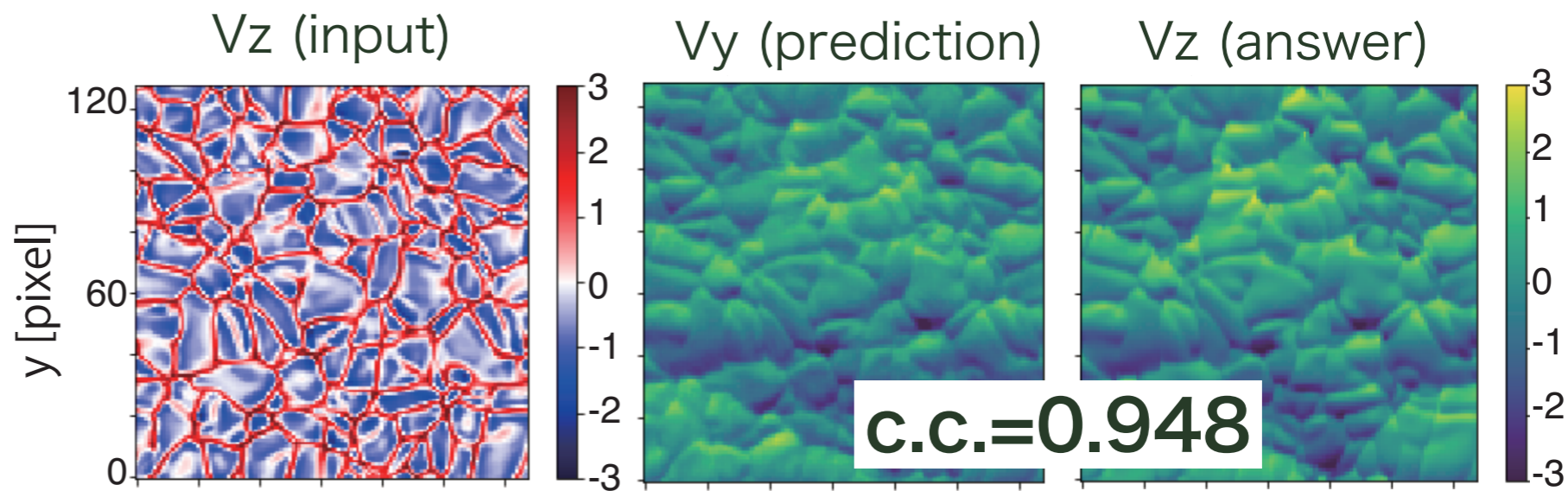


Vertical Velocity

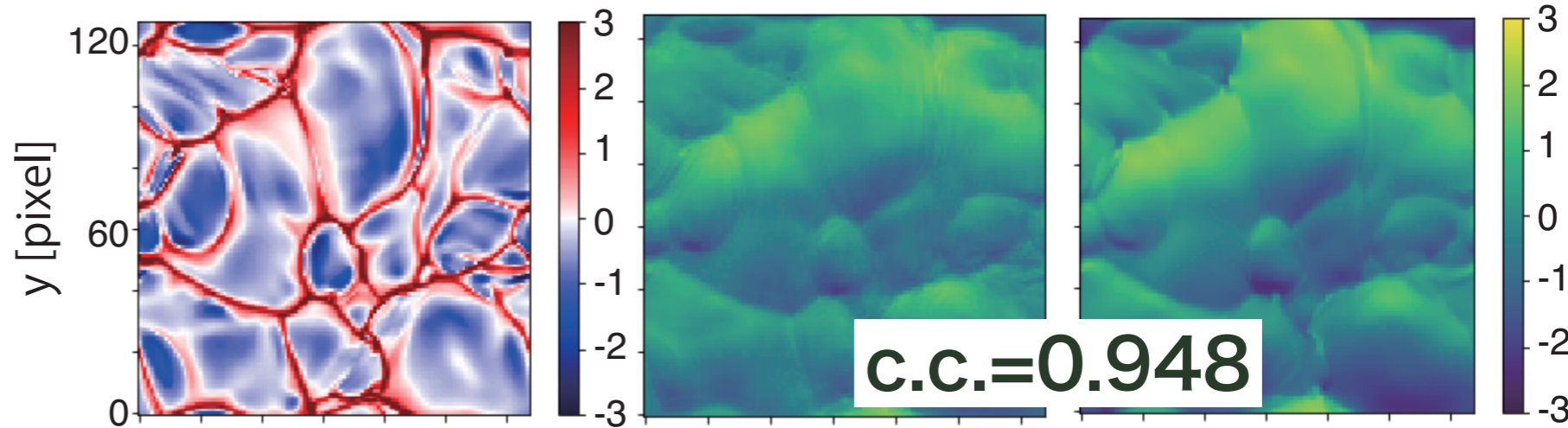


Results

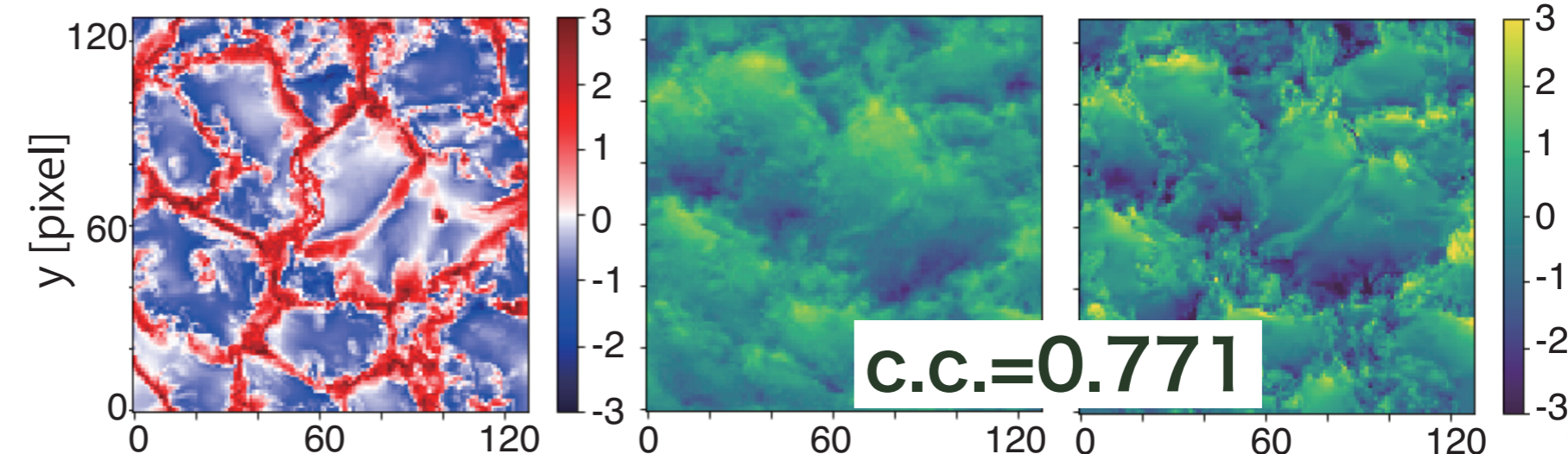
Non-local simulation



Local simulation



MURaM

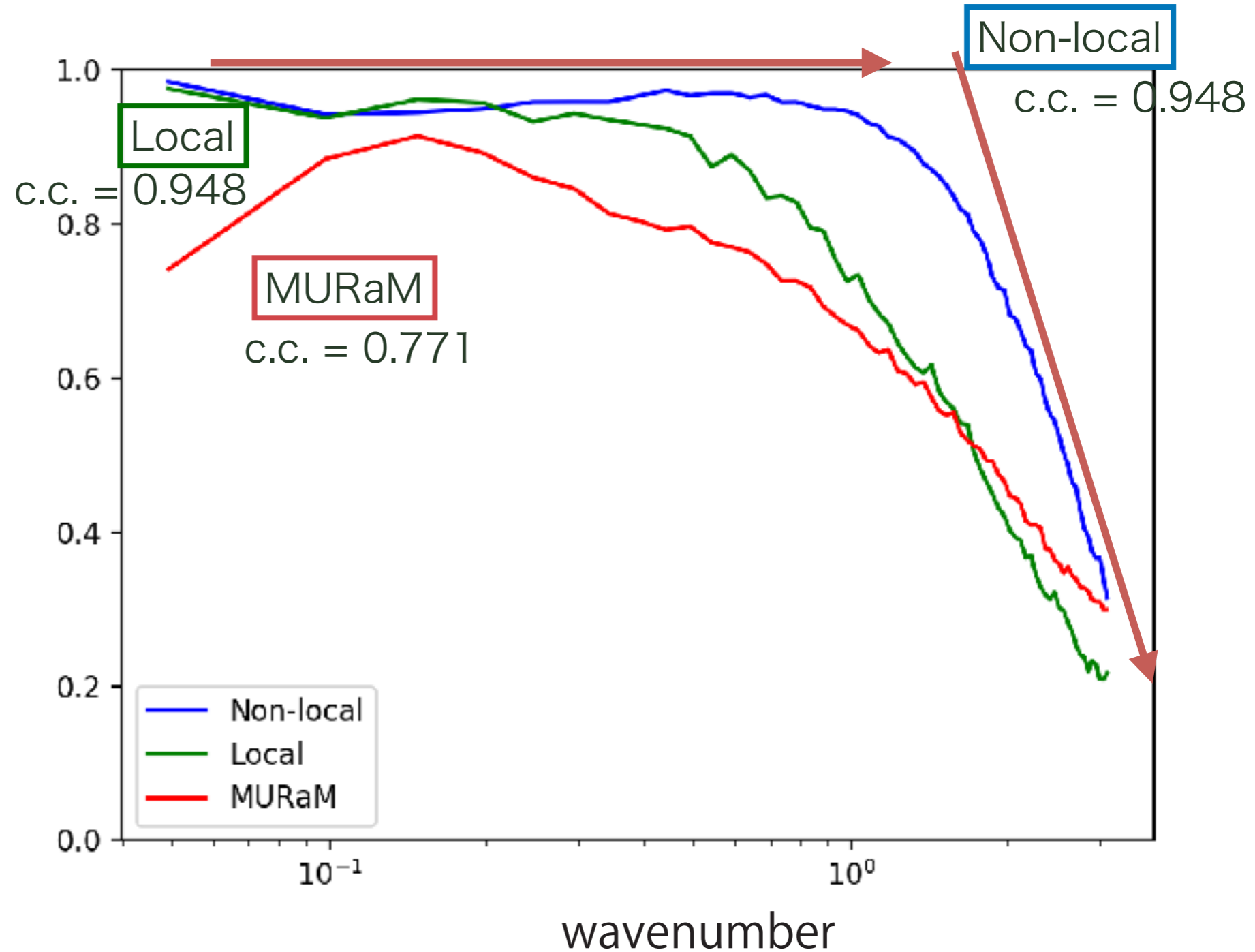


小さい空間スケールで推定精度がどうなっているのか？

Uncertainty Qualification

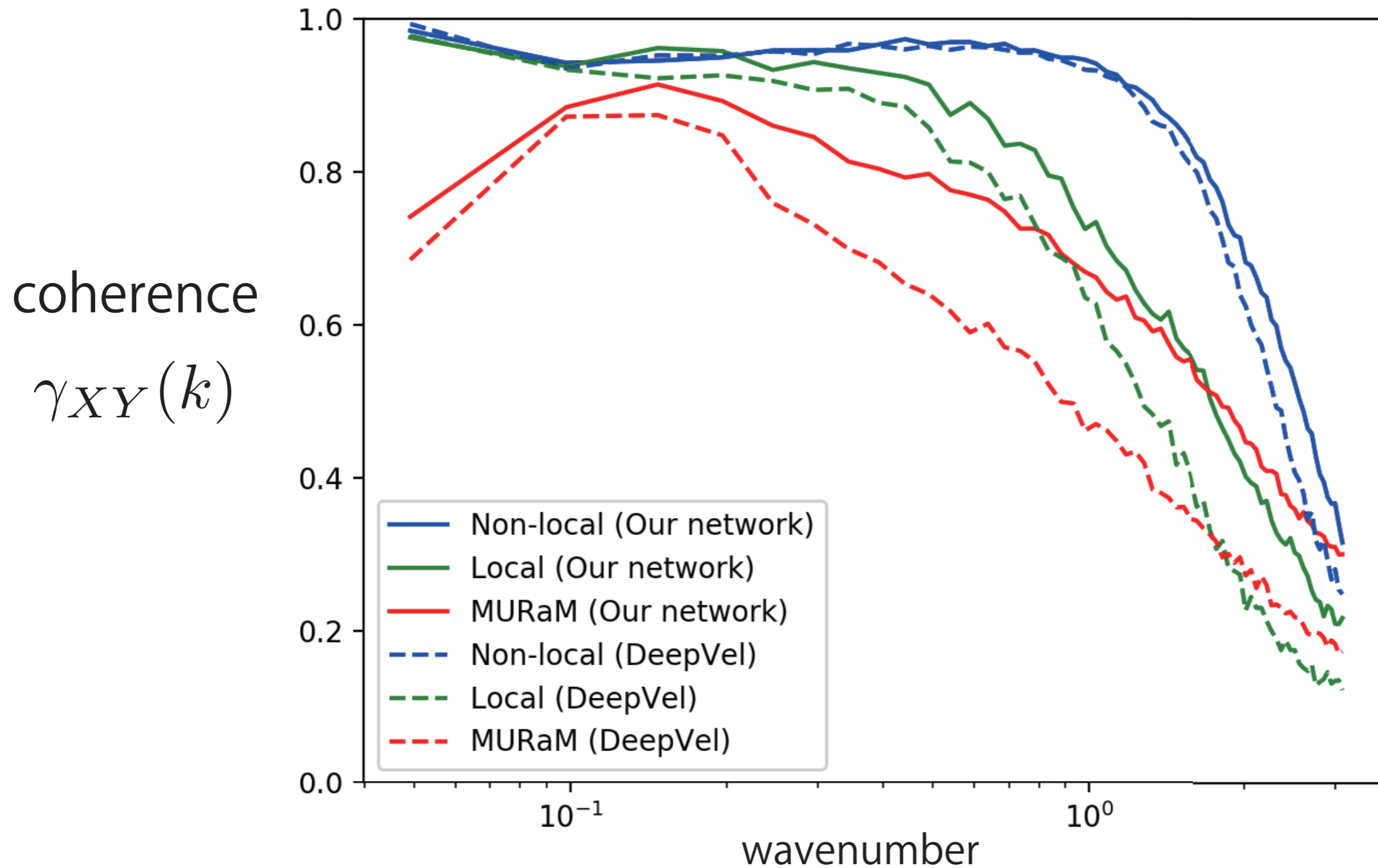
Coherence Spectrumを用いて、各空間スケールでの性能を評価。
推定精度の強い波数依存性を確認した。

coherence $\gamma_{XY}(k)$
(correlation at each scale)



v.s. DeepVel

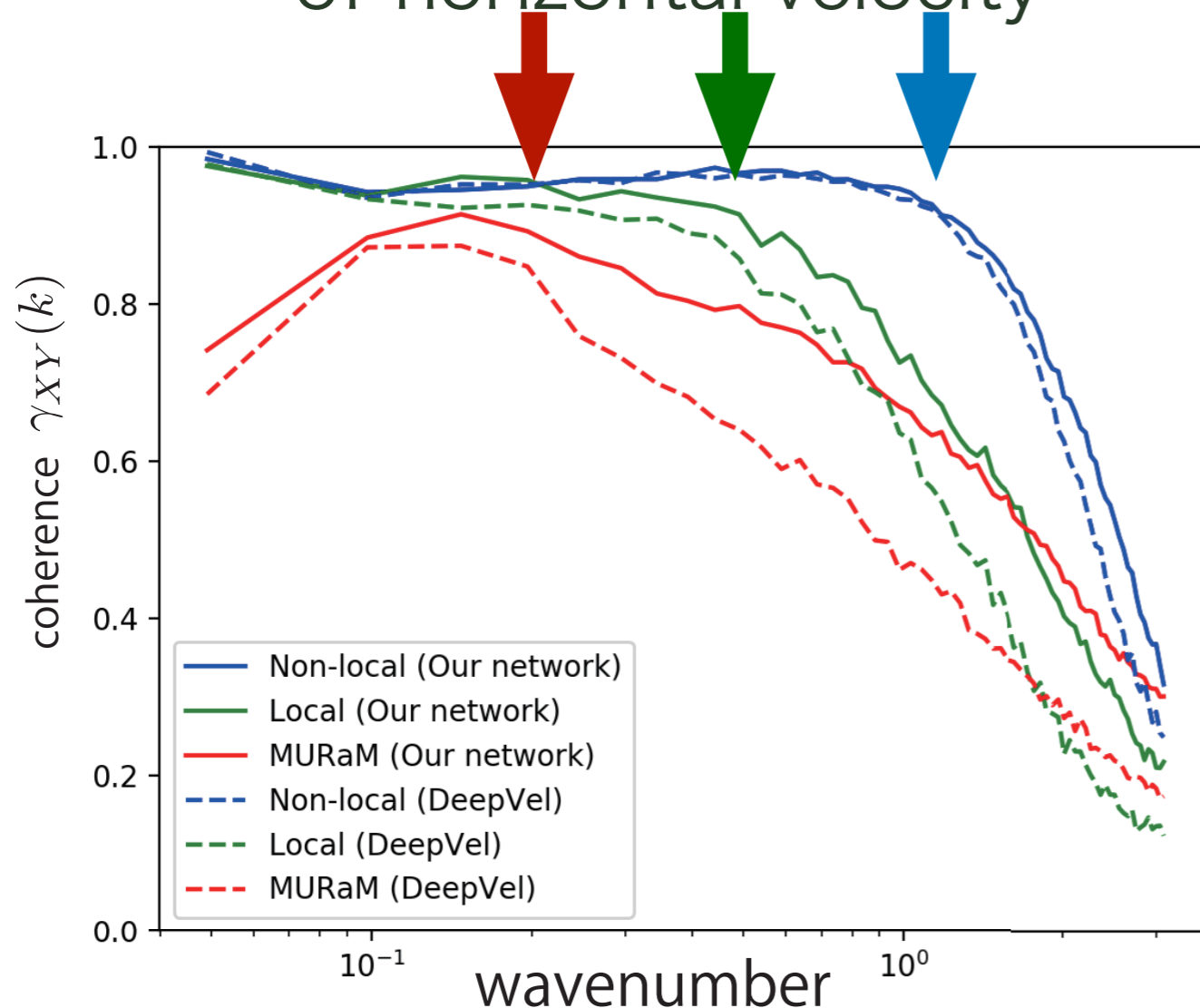
先行研究の深層学習モデルよりもcoherenceは良い。



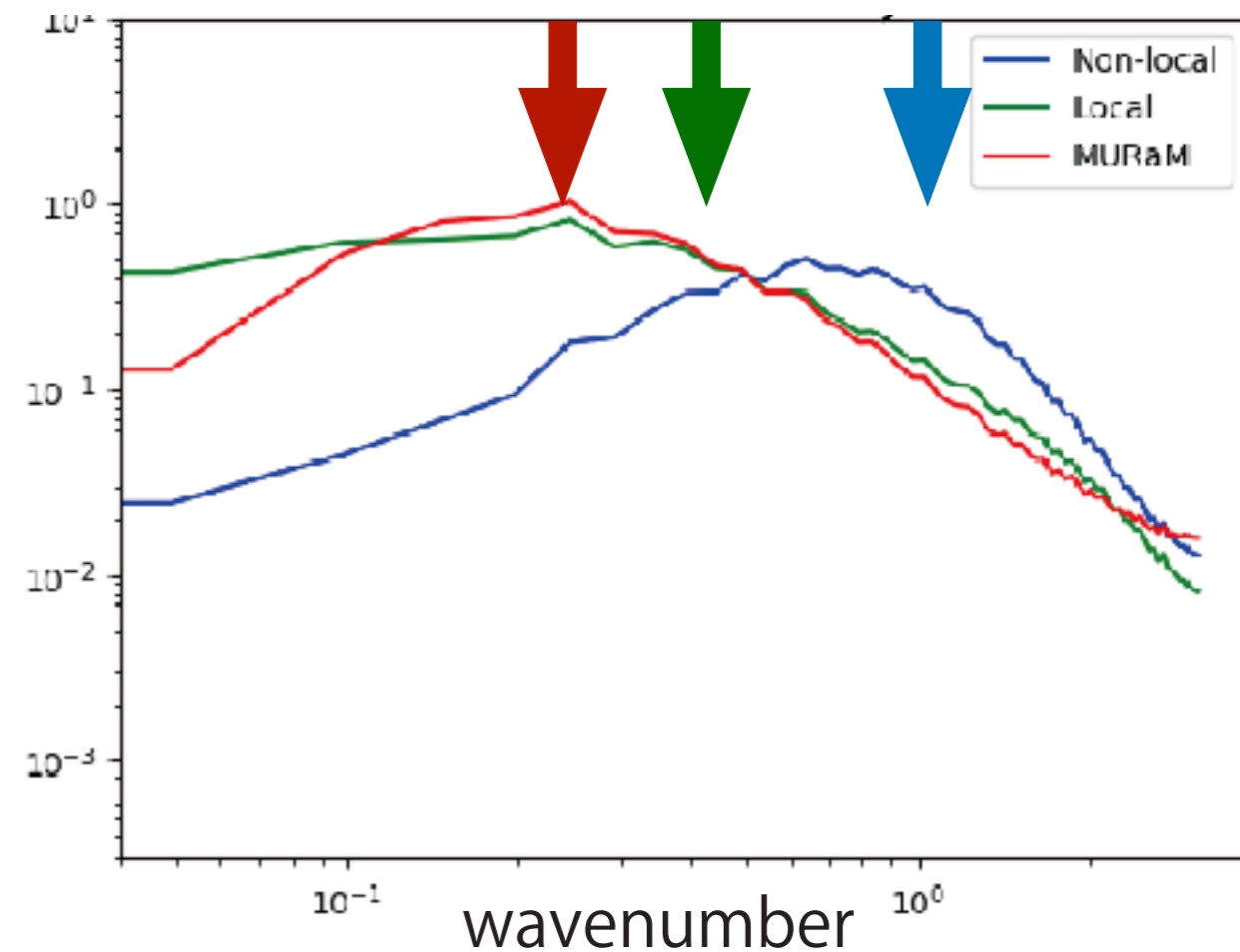
Discussion

エネルギー注入スケールよりも高波数側で
コヒーレンスが急激に低下する。

Coherence Spectrum
of horizontal velocity



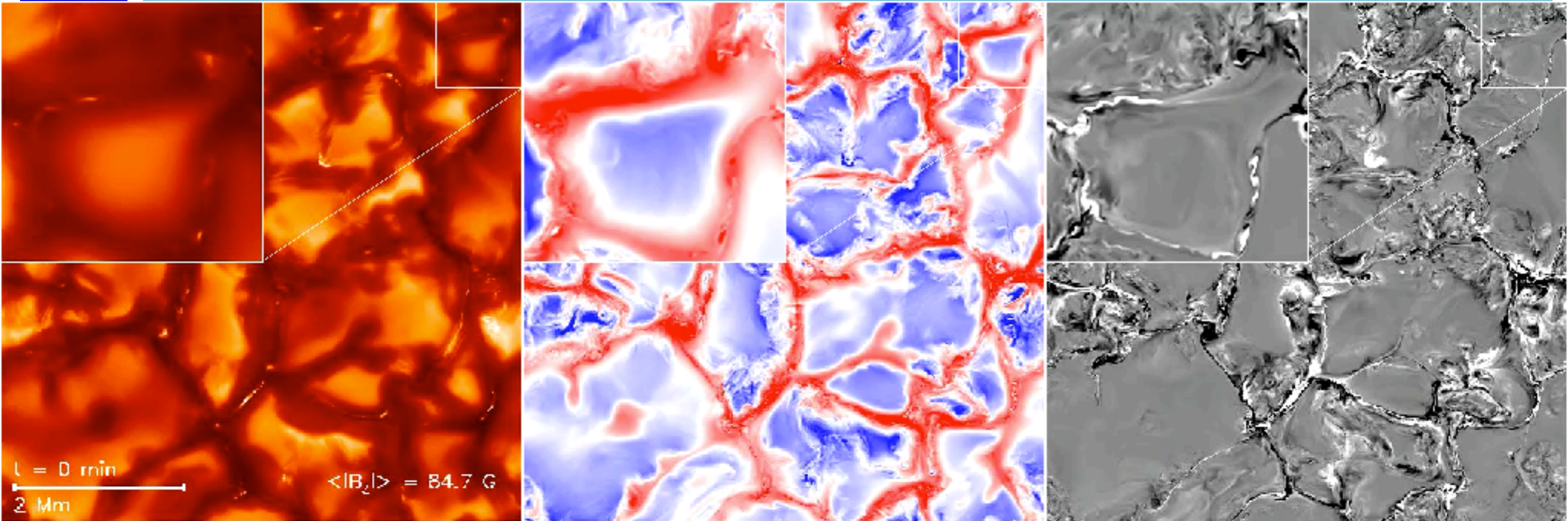
Power Spectrum
of vertical velocity



水平速度診断まとめ

- 深層学習による水平速度場診断手法を開発(MSDL)
- MSDLによる水平速度場推定は既存手法よりも高い精度を達成
- 一方で慣性領域でコヒーレンスが低下していく問題がある
- パワースペクトルの異なるデータについて比較:
傾向は同じ。急峻なほど小スケールの重要性が低いので高精度

空間分解能以下のスケールの速度場



多くの磁気エネルギー・運動エネルギーが100 km以下のスケールにあると示唆 (Rempel 14)
観測では空間分解するのが困難なスケール

<目的>

- いつ、どこで小スケール速度場が発達するのか?
- どうやって観測すれば良いか?
- 小スケール速度場を観測的に推定したい

Spectral line broadening

熱的広がり & 微小乱流項

小スケールの速度場がガウス分布に従うランダム運動だと仮定すると、それに起因するドップラー効果はスペクトル線をガウス関数で広げる。

$$G(\lambda) = A \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_0 - \lambda_D(s))^2}{\Delta\sigma_D^2} \right]$$

ドップラー速度

$$\Delta\sigma_D = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2k_B T(s)}{m} + v_{\text{mic}}^2(s)}$$

熱速度

微小乱流項

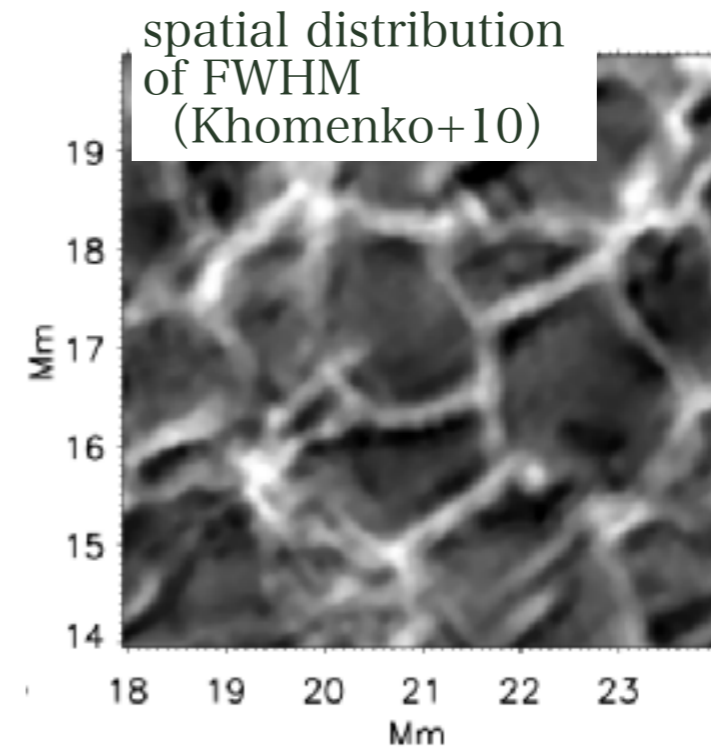
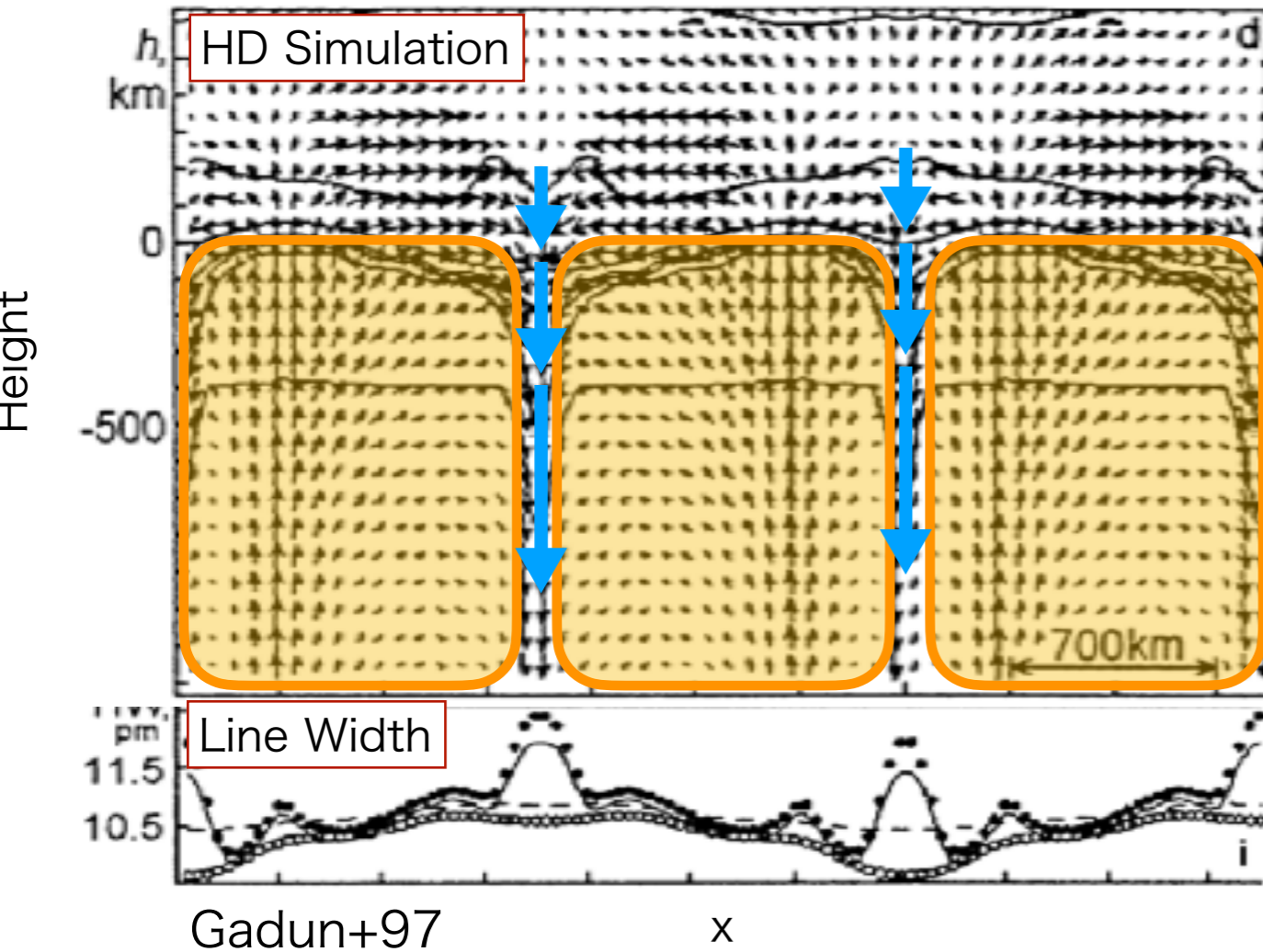
歴史的に微小乱流項は、他の項で説明不可能なスペクトル線幅を説明するための **artificialな項** として導入された。

MHD的（流体力学的）な観点で **何に対応するのか良くわかっていない。**

（あまり真剣に考えられていない）

ナイーブに、「乱流」が微小乱流項の主要起源だと思って良いか？という問題

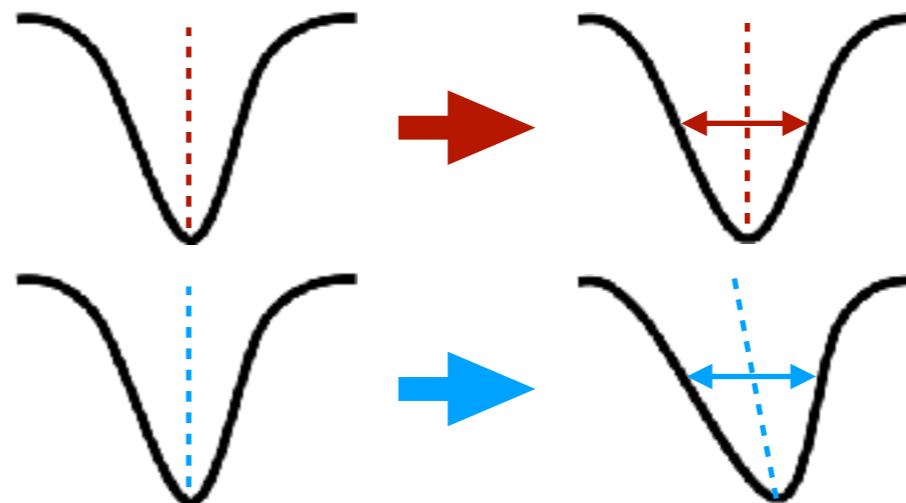
Line broadening mechanism



対流セル境界では下層ほど下降流が早く、この速度勾配が線幅の起源という説がある。「微小乱流項は不要」という主張(に近い)。

Turbulent motions

LOS gradients of Doppler velocity



Symmetric broadening

Asymmetry and broadening

bisector analysis

A classical method to analyze spectral line profiles

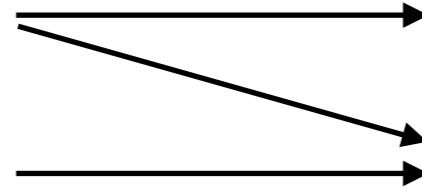
大気の物理量

大きいスケールの
速度勾配
乱流

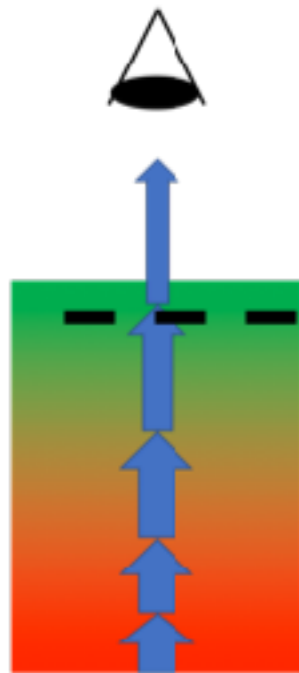
スペクトル線形状

非対称な形状
幅が広がる

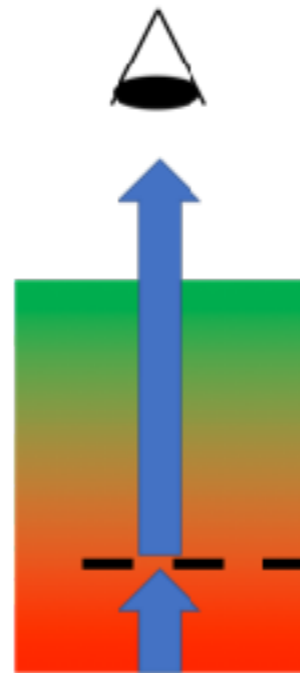
un-resolved
structure



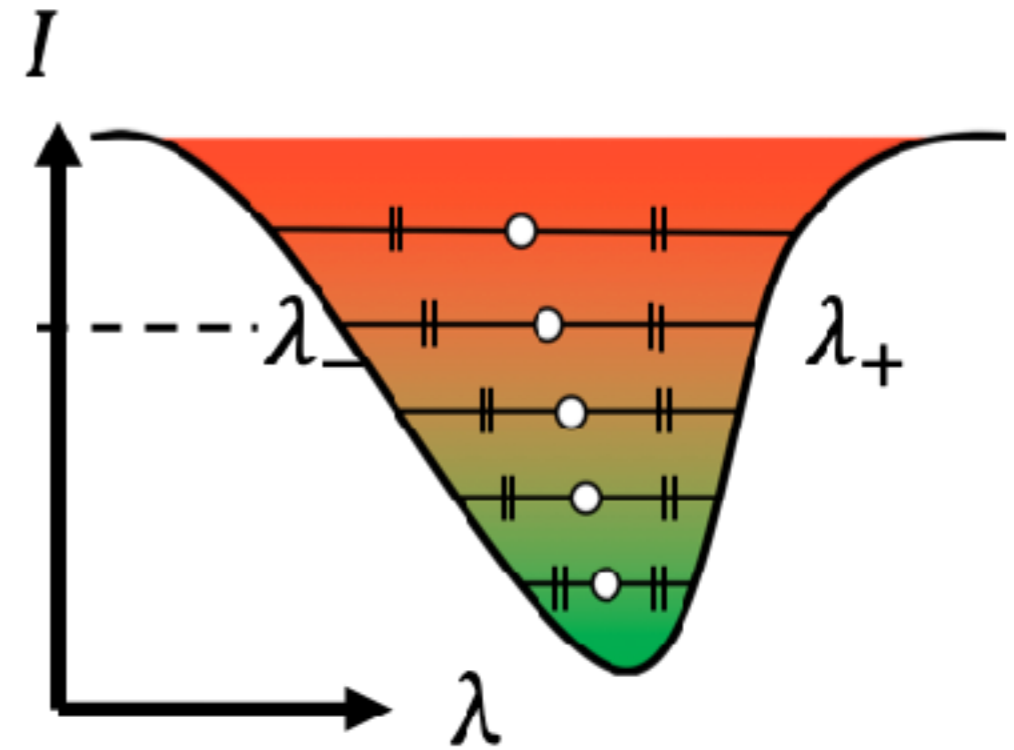
光球上部
↑
高さ
光球下部



線中心



線翼部



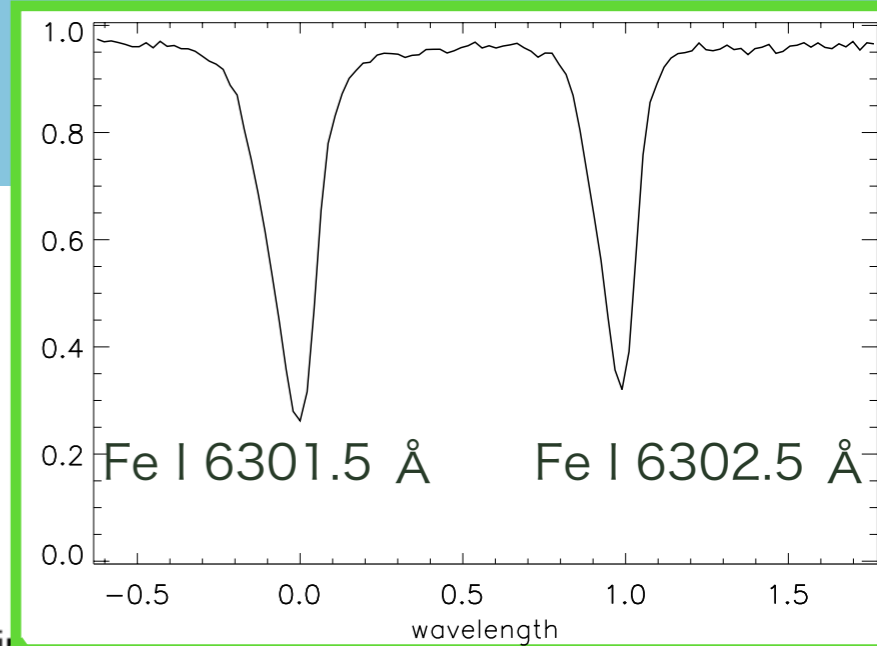
スペクトル線形状

Observation

ひので衛星可視光望遠鏡偏光分光観測装置 (SOT/SP)

(視線方向 = 鉛直方向)

Normal map
FOV: 154" x 163"



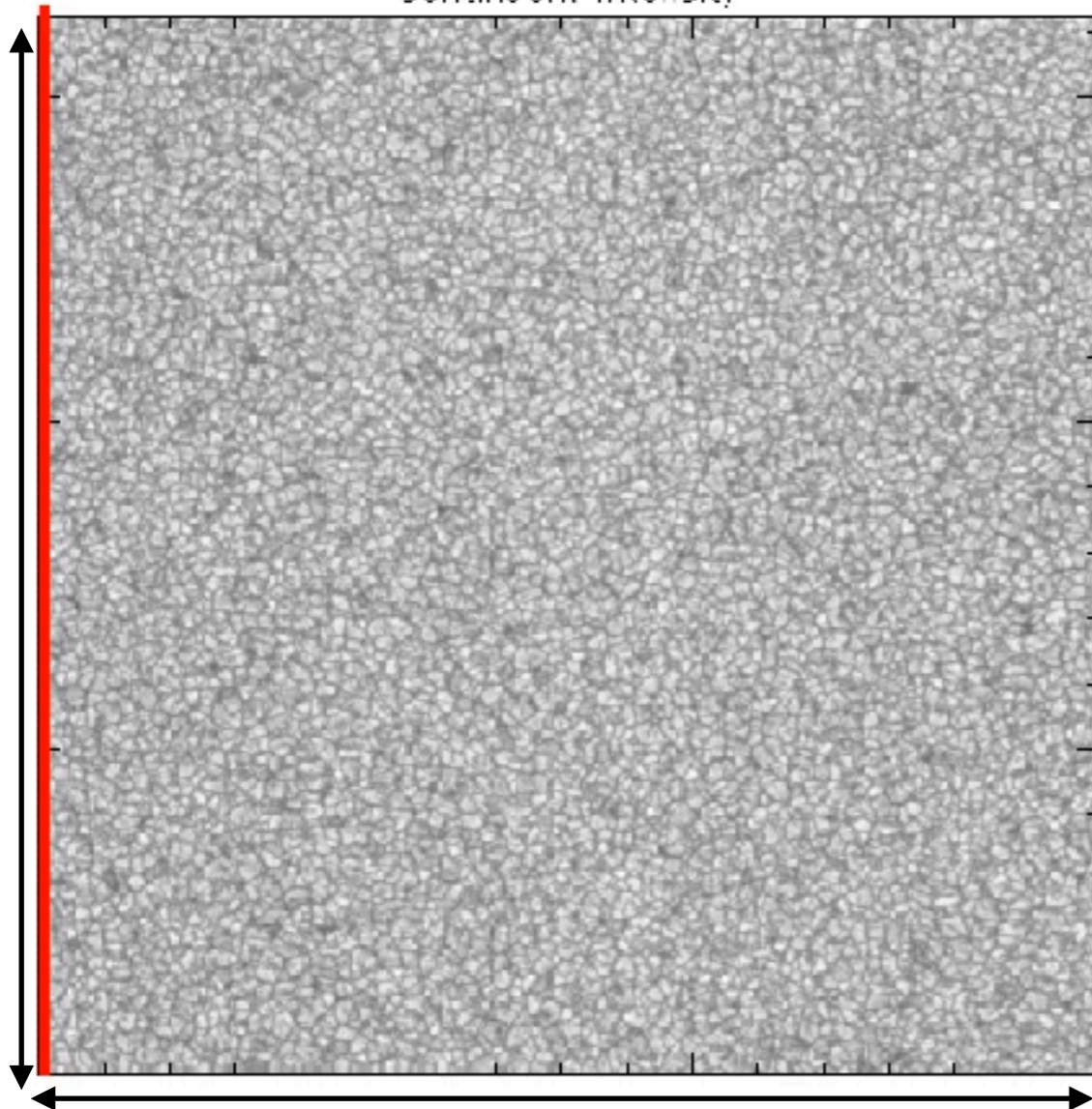
Continuum Intensity

Stokes I

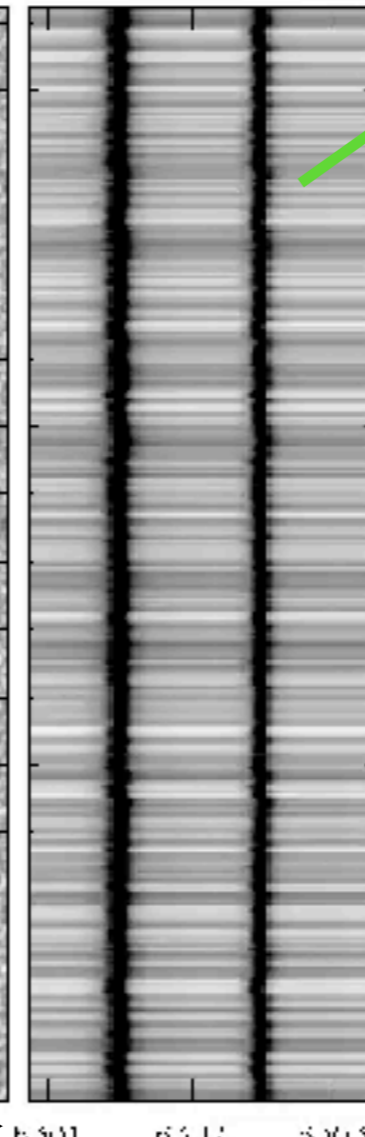
Continuum Intensity

Stokes I

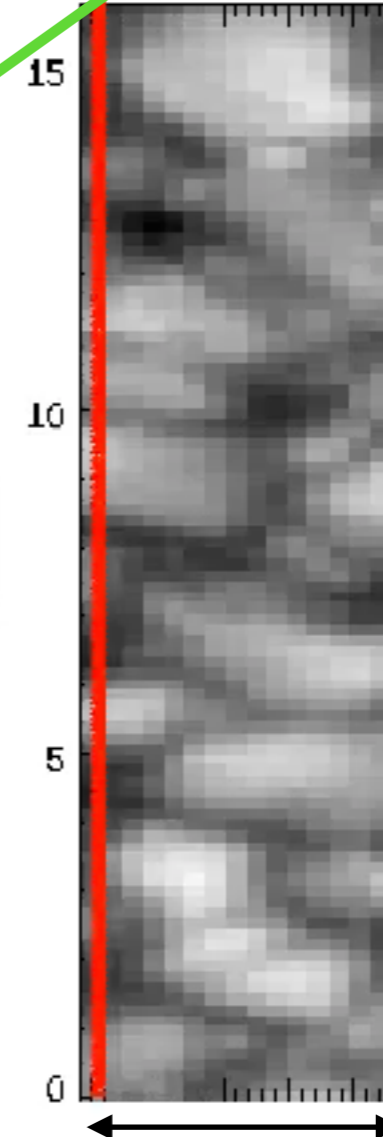
163 arcsec



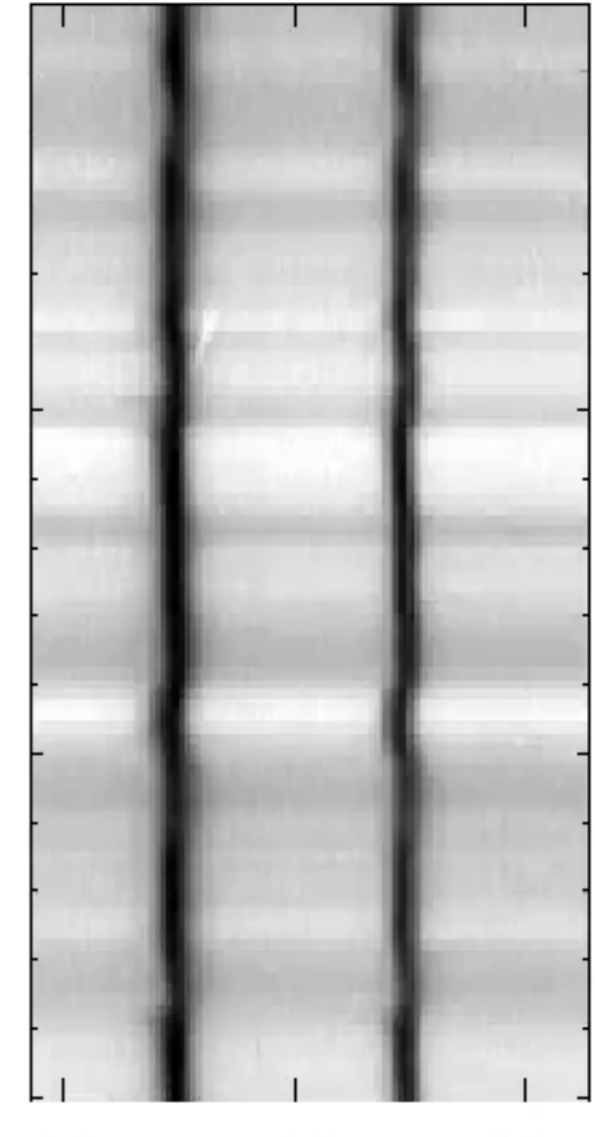
154 arcsec



6301 6302 6303
Å



2.25 arcsec

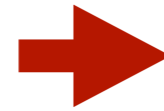


6301 6302 6303
Å

Bisector analysis

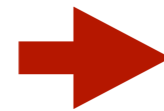
Bisector解析を用いて2つの変数に着目:

velocity difference

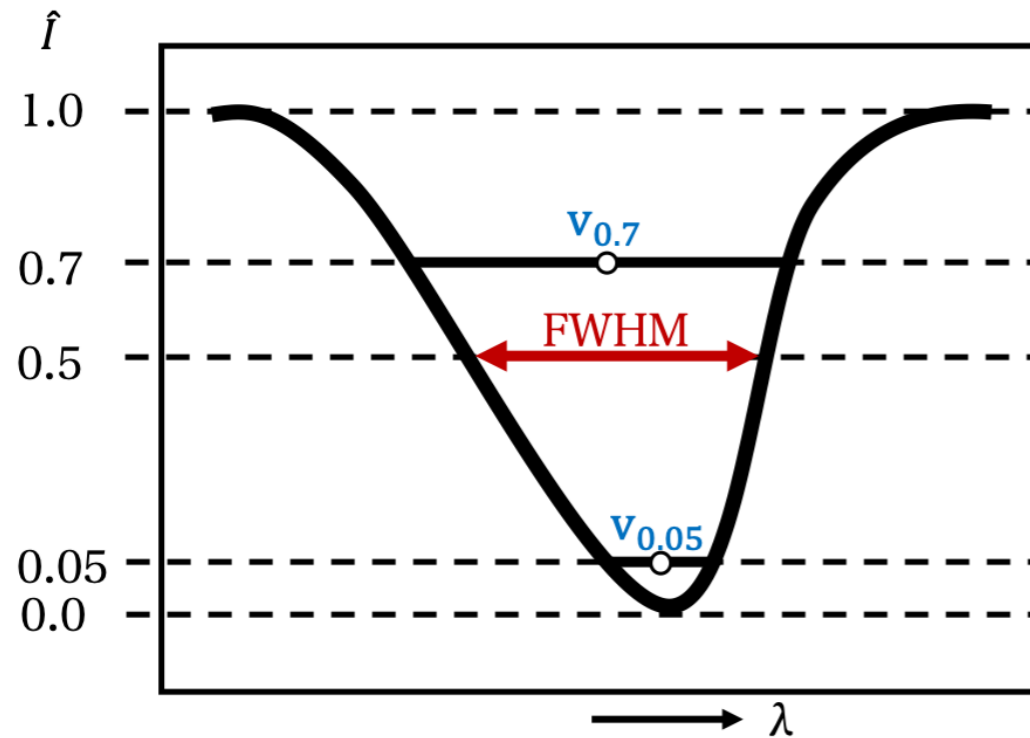


$$\Delta v = v_{0.05} - v_{0.7}$$

line width

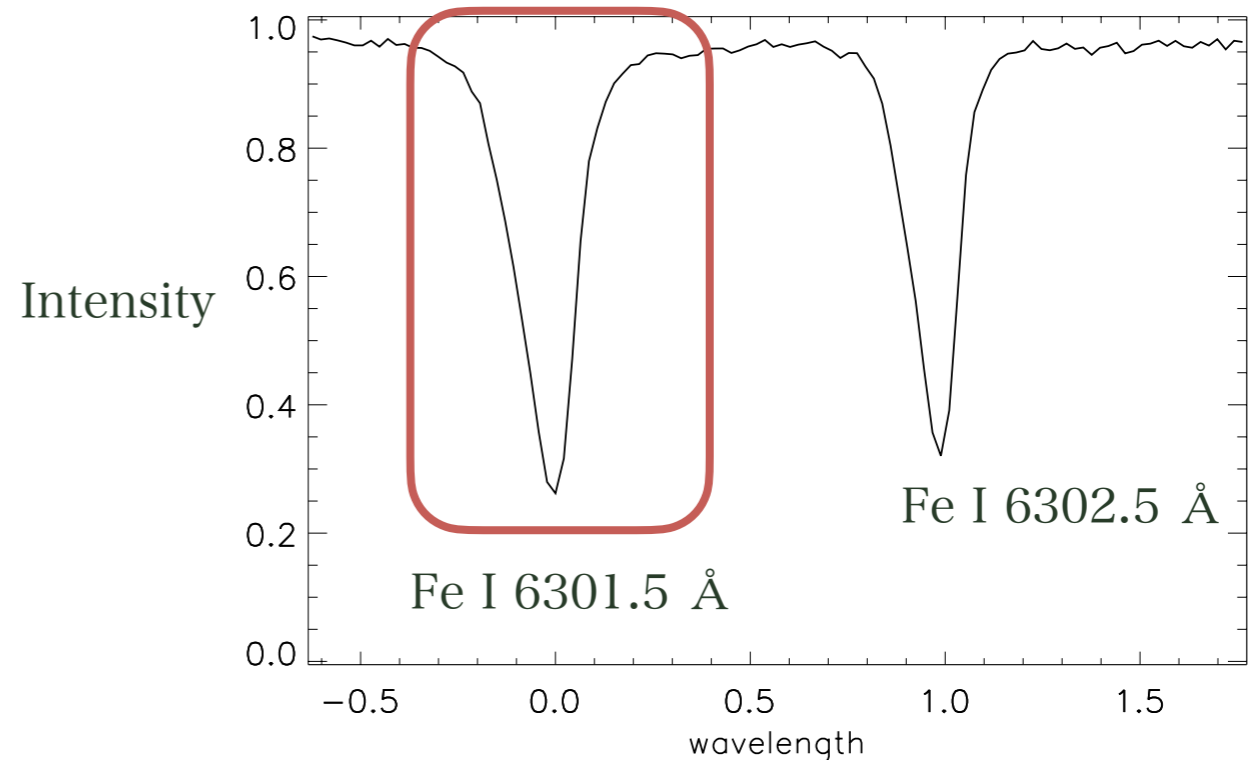


FWHM



bisector parameters

analyze this line



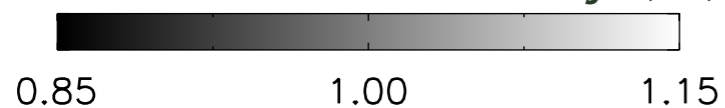
Hinode SOT-SP observation

Spatial distributions

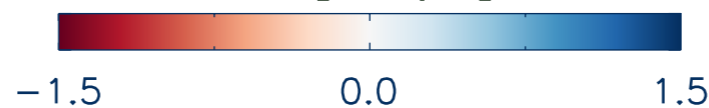
Ic and Δv : 対流パターンが見られる

FWHM: 対流パターンではない (?)

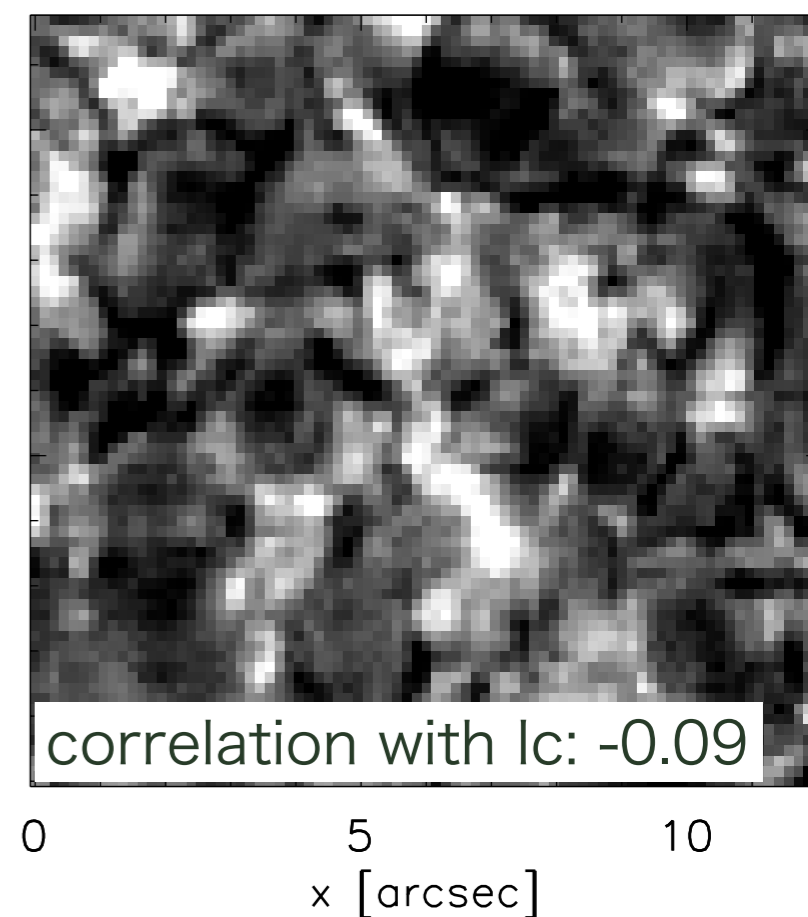
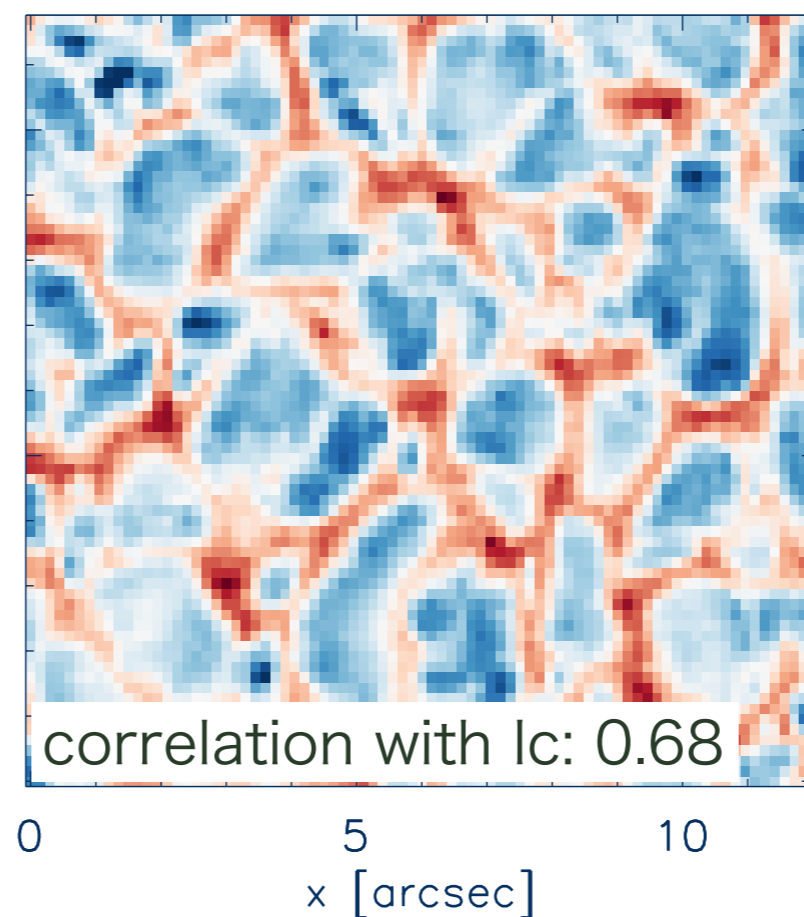
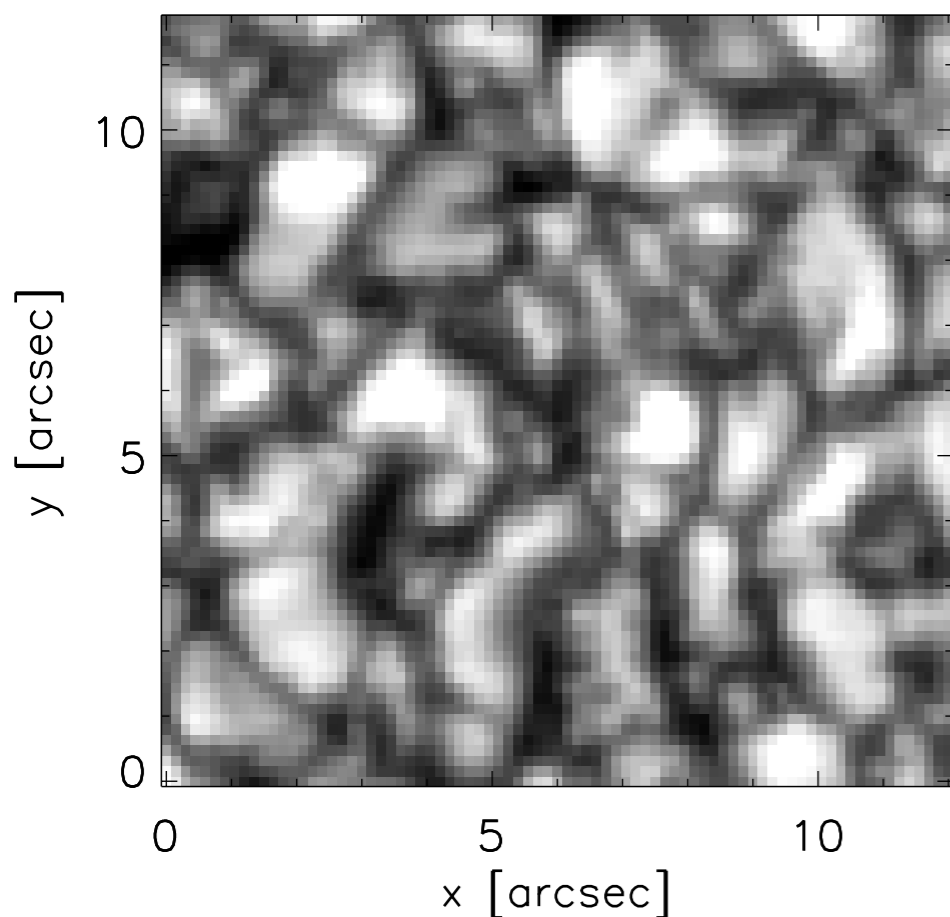
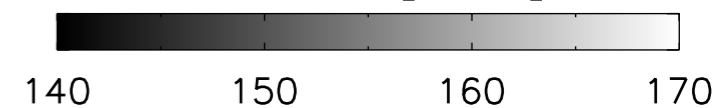
continuum intensity (Ic)



Δv [km/s]



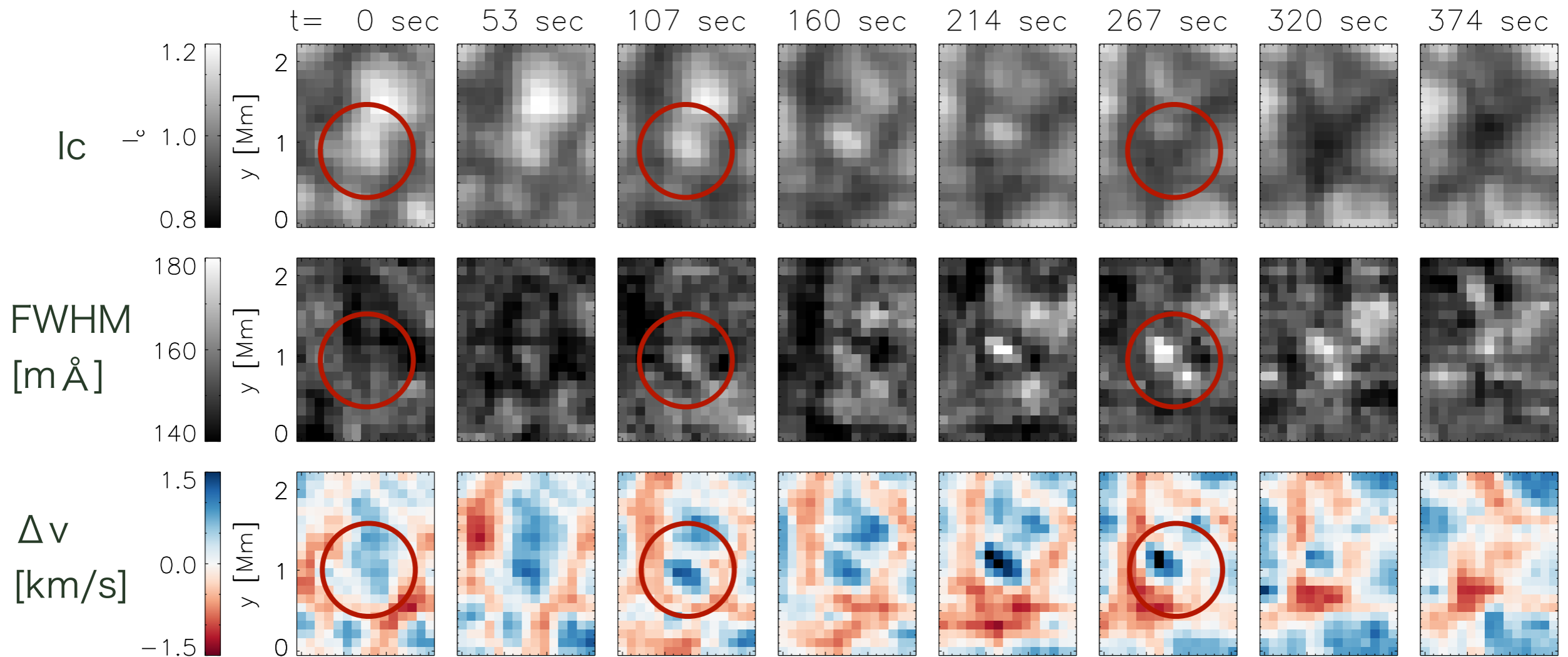
FWHM [mÅ]



Ishikawa et al. (2020a)

Temporal evolution of fading granule

対流セル消滅時に突発的な線幅増大が見られた



Ishikawa et al. (2020a)

微小乱流項は何に対応しているのか

【RMHD simulation】

MURaM (Vögler+05, Riethmüller+14)

MHD & 輻射輸送

対流層浅部から光球を計算

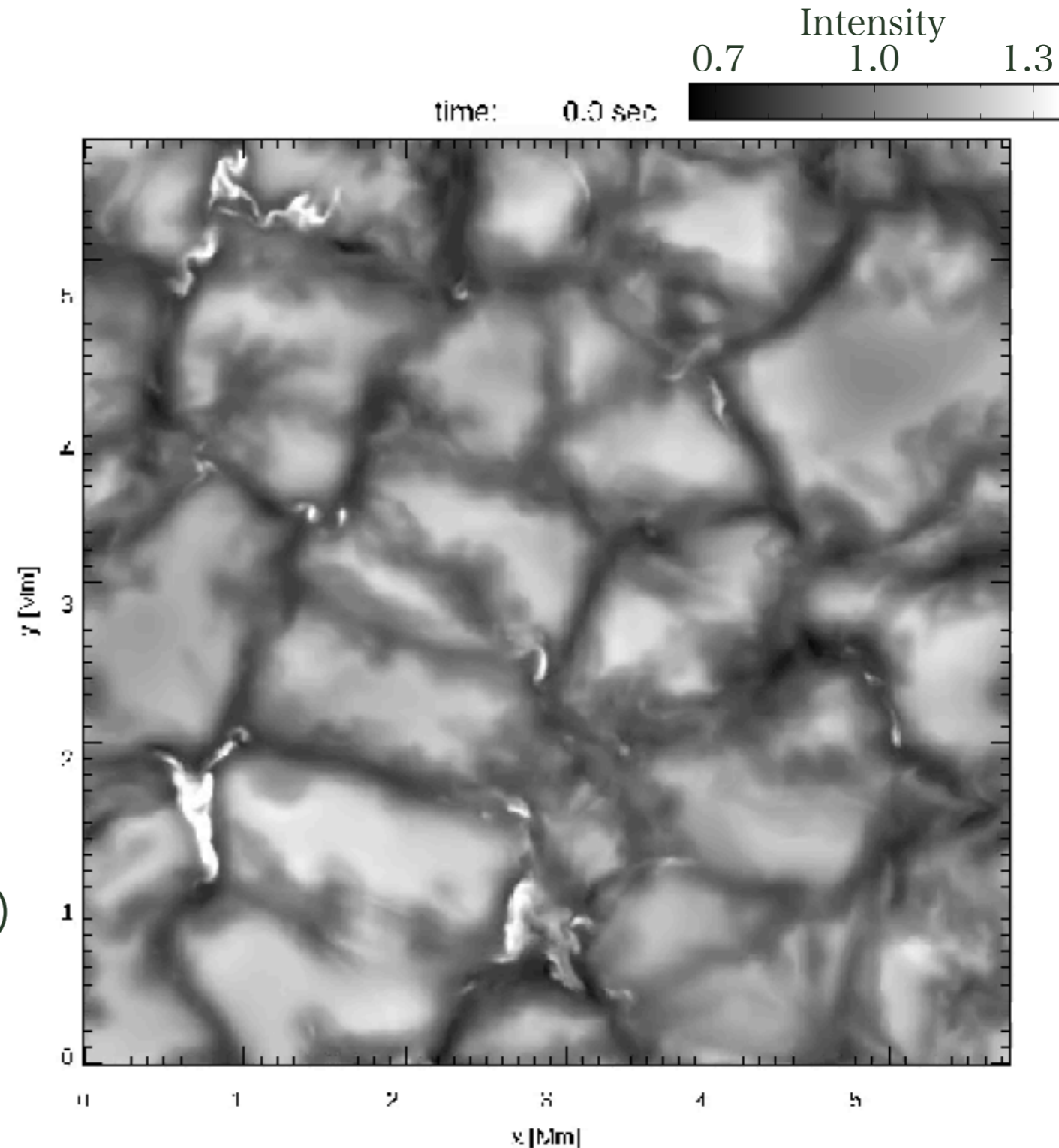
Box: 6 Mm x 6 Mm x 1.6 Mm

Grid: 576 x 576 x 100

【spectral line synthesis】

SIR code (Ruiz Cobo & del Toro Iniesta 92)

Fe I 6301.5 Å, 6302.5 Å



MURaM simulation

Fading granule in MURaM

未発表の内容につき削除します

Fading granule in MURaM

未発表の内容につき削除します

evolution of velocity profiles

未発表の内容につき削除します

FWHM v.s. 速度分散

未発表の内容につき削除します

Summary

- いつ、どこで小スケール速度場が発達するのか？
- どうやって観測することができるか？
- ☑ 突発的な線幅増大が、対流セル消滅時に見られる。
- ☑ 線幅増大は乱流のトレーサーとして使えそうである。
- ☑ 乱流の駆動源は対流セル境界の速度シアの可能性がある。