

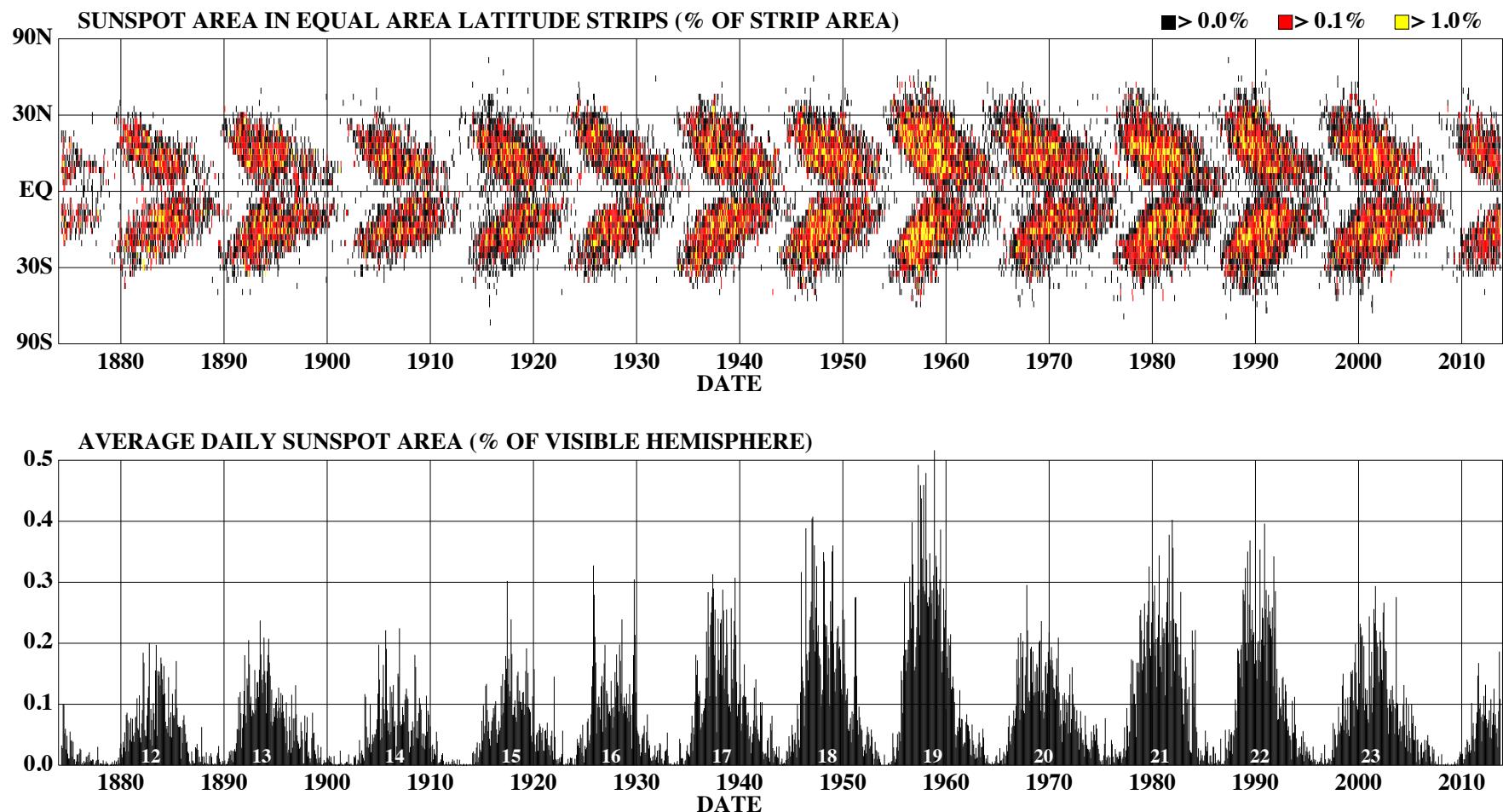


# 数値計算による 太陽対流層差動回転維持機構の解明

東京大学 理学系研究科  
堀田英之

共同研究者 : Matthias Rempel [HAO]  
横山央明[東京大学]

# 黑点周期



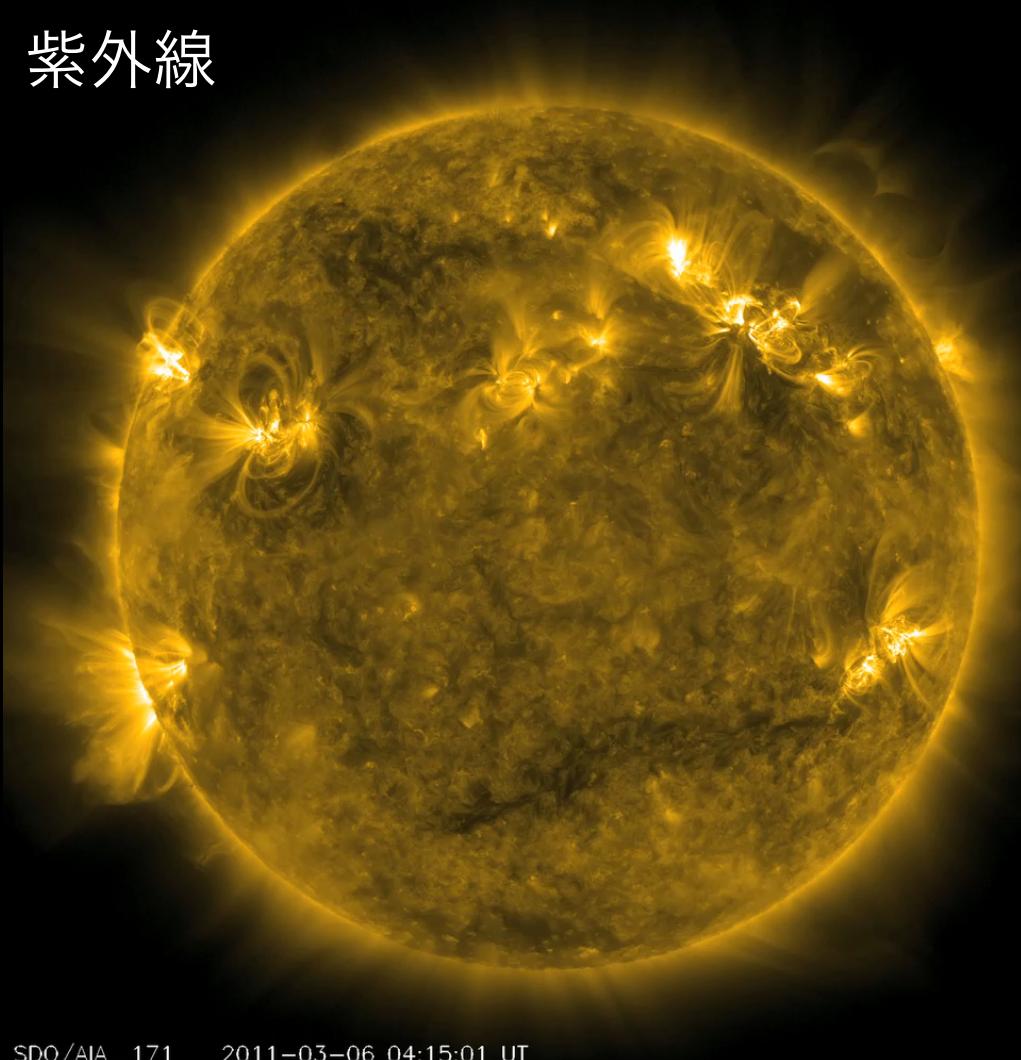
<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/BFLY.PDF>

HATHAWAY/NASA/MSFC 2014/01

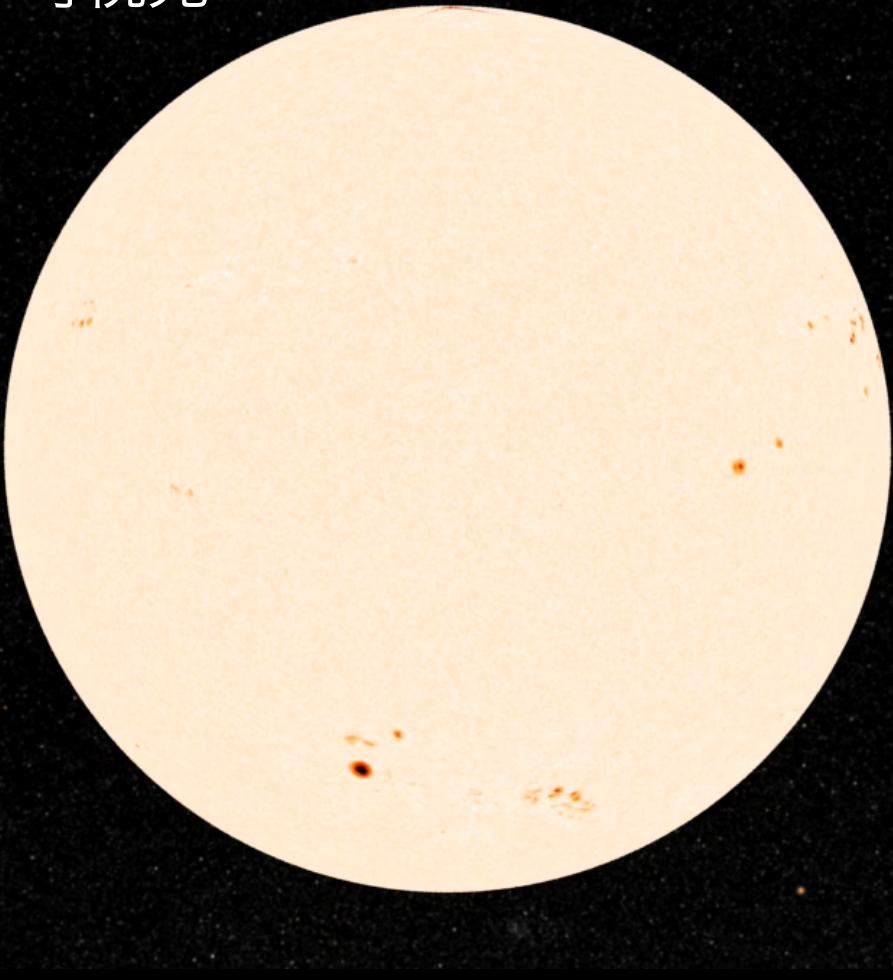
Hathaway web

# 太陽活動と自転

紫外線

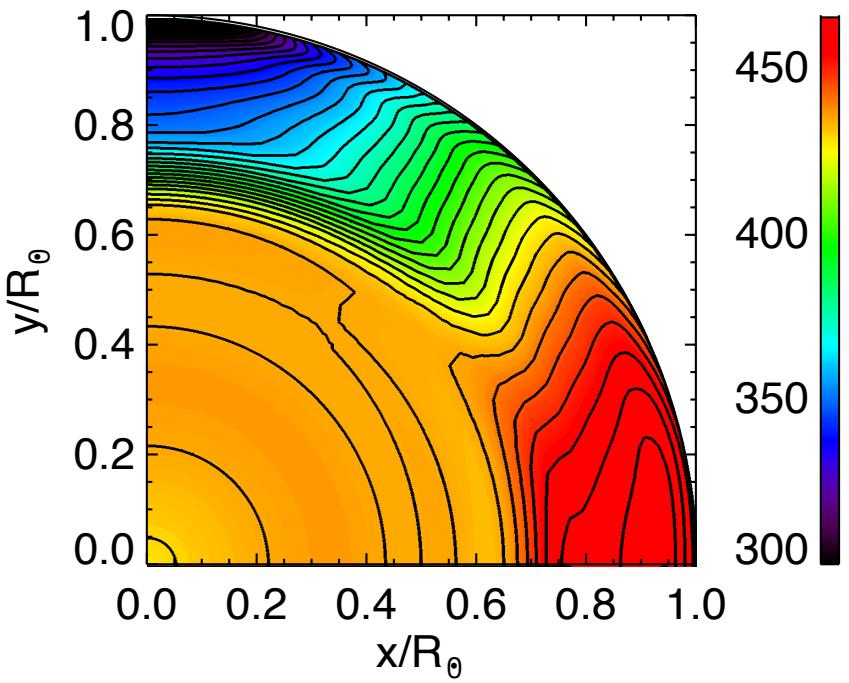


可視光



# 平均場：差動回転 (1/2)

SDO/HMIを用いた  
日震学の結果



Courtesy of R. Howe

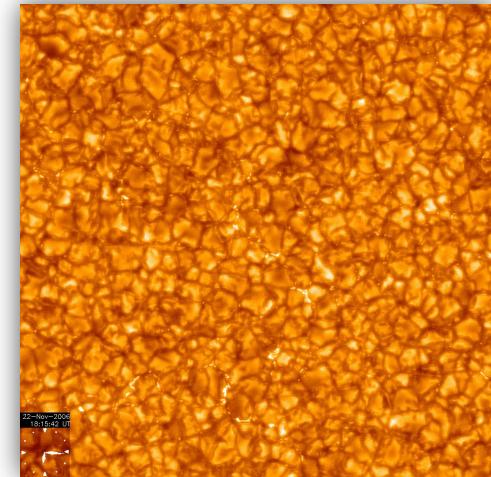
興味深い3つの特徴：

1. 円錐型の分布  
(Rempel, 2005 etc.)

2. タコクライン  
(Brun+2011)

3. 表面勾配層  
(未解決：本講演の主題)

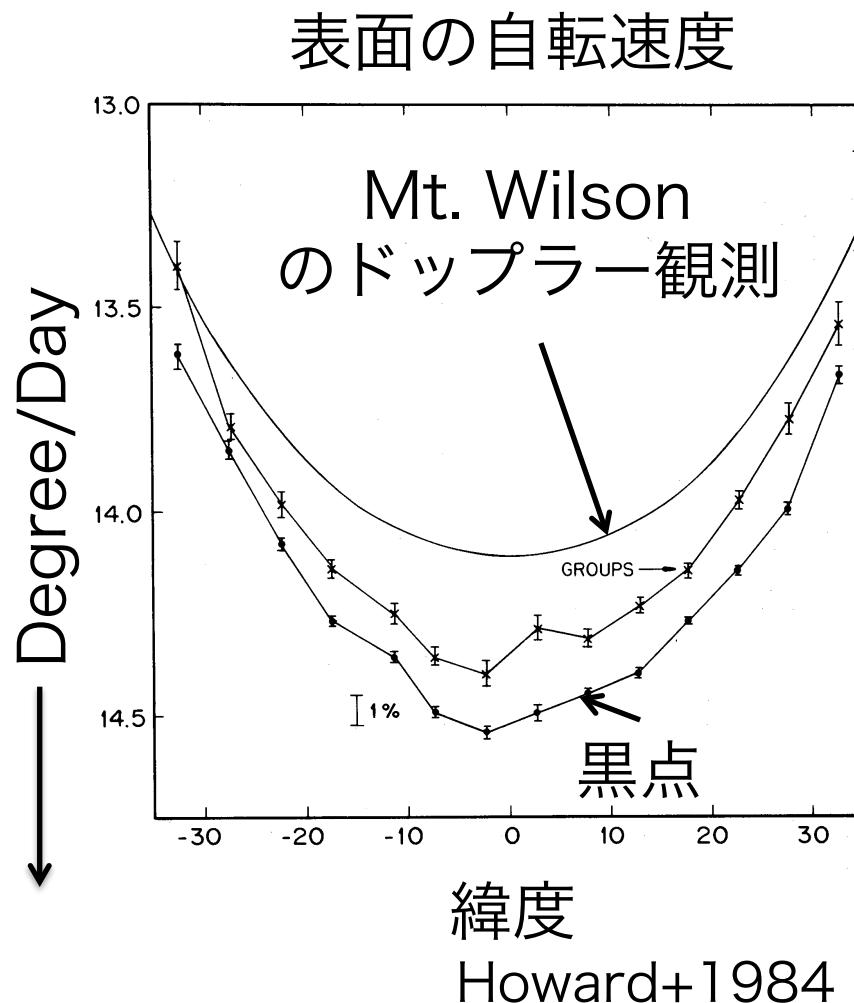
熱対流が  
角運動量を運ぶ



# 平均場：差動回転 (2/2)

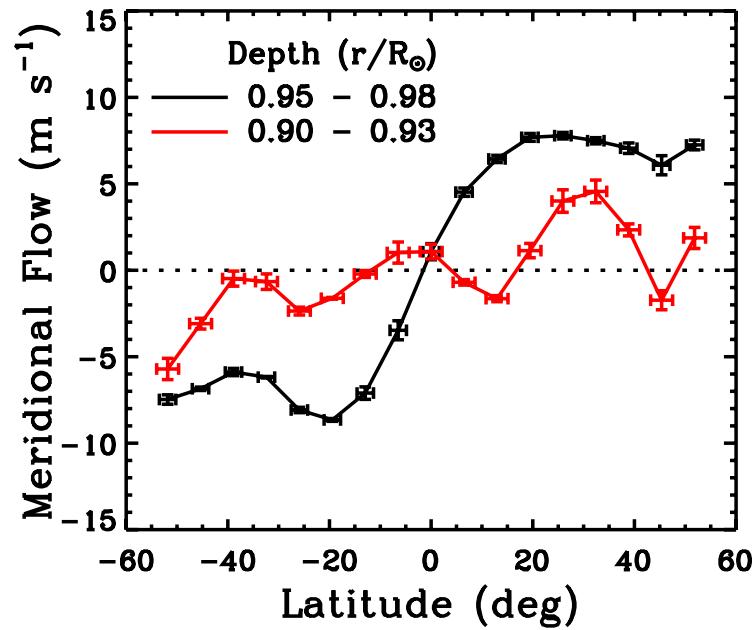
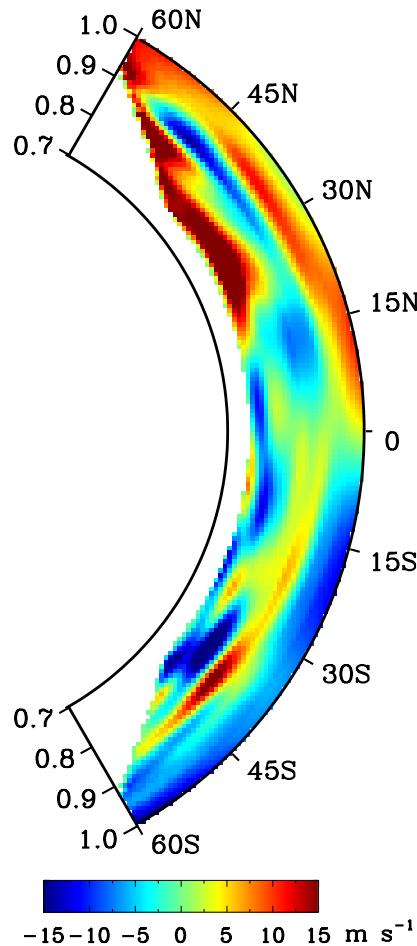
表面勾配層は1980年代から

ドップラー観測による自転速度の見積もりと比べると、黒点を追跡した自転速度は速く自転している事がわかった。  
→黒点の足元は深い所にあり、その速い自転速度に引っ張られている。



# 平均場：子午面還流

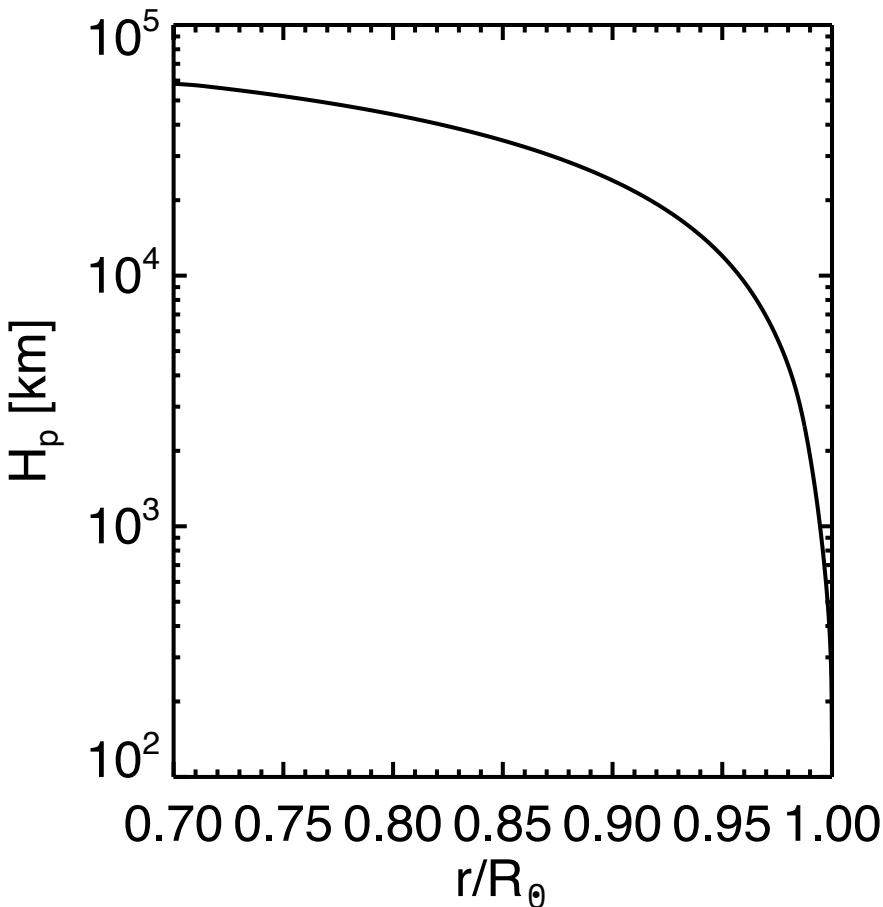
局所日震学からの重要なヒント



極に向かう、動径方向に速さを  
増す流れが観測されている  
(Zhao+2013)

# 表面勾配層解明の困難

圧力スケール長



対流層の中で、典型スケールが  
大きく変わる事

対流層の底で、6万 kmである  
圧力スケール長が、表面では  
300 kmほど。  
太陽の円周が、440万 kmなので  
解像には多くの格子点が必要

# アネラスティック近似と音速抑制法

表面勾配層実現に必要なのは解像度

アネラスティック近似

$$0 = \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v})$$

音速抑制法

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v})$$

これまで、対流層内部の速い音速を回避するために、アネラスティック近似がしばしば使われていた。

(音速：200 km/s 対流速度：50 m/s)

ただ、橢円型方程式のために高解像度化・高並列化困難

これらの容易な音速抑制法をつかう

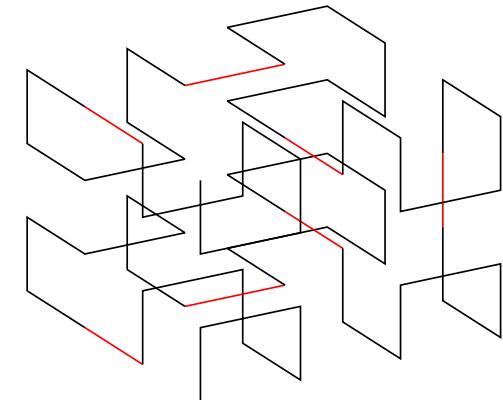
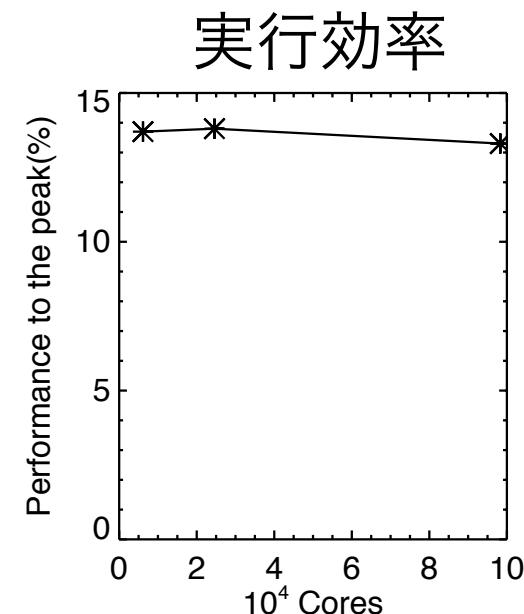
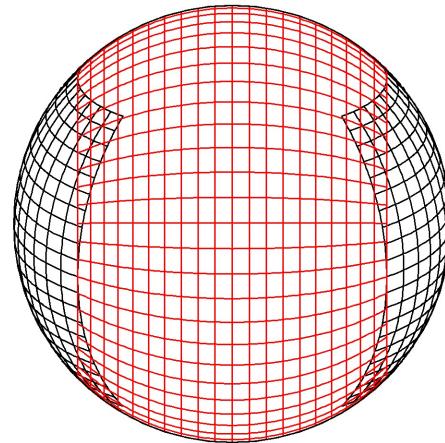
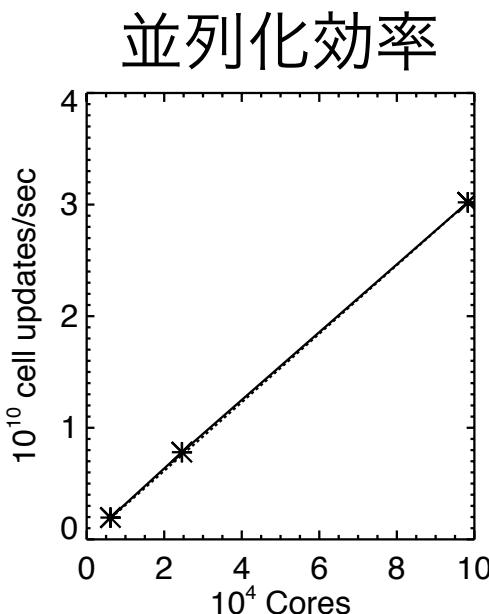
(Hotta et al., 2012, 539, A30)

# コード (1/2)

4次精度の空間微分  
4次精度の時間積分  
+非線形の人工粘性  
(Rempel+2009)

Yin-Yang grid  
(Kageyama+2004)  
太陽標準モデルの  
背景成層  
水素とヘリウムの電離

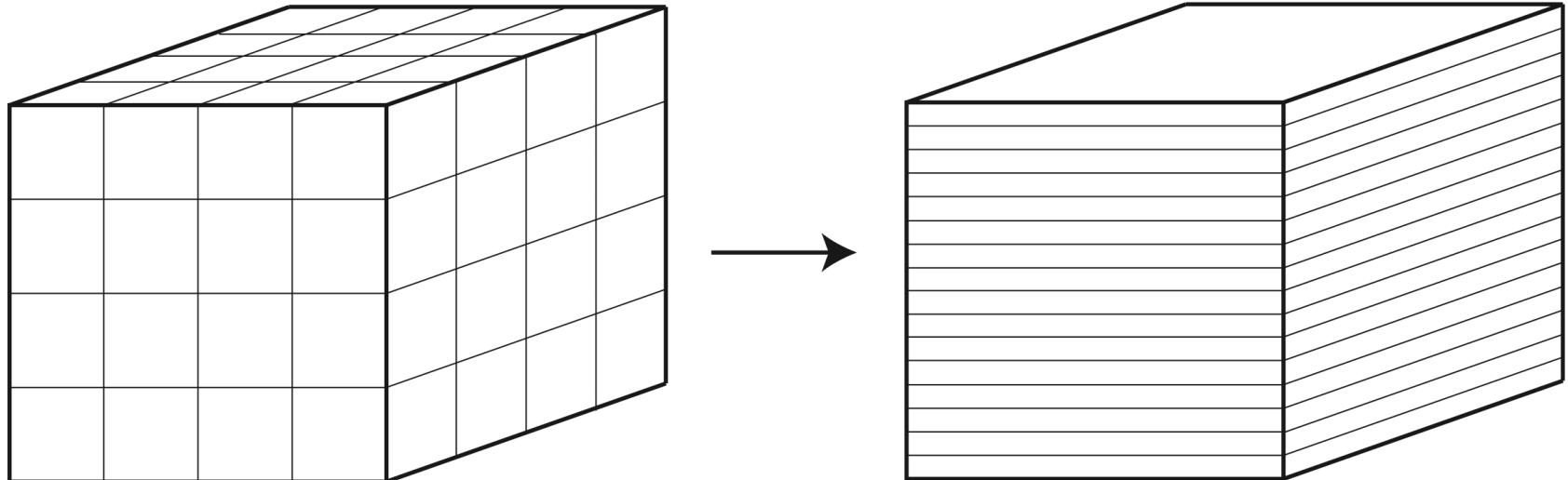
Peano-Hilbert曲線による  
ノード順番付け



# コード (2/2)

---

Peano-Hilbert曲線で並び替えられたデータを、  
解析のために、動径方向に整列するように並び替える。  
それぞれのノードでデータを出力しつつ、水平平均などを  
とる。乱流と平均場の相互作用を見るには都合が良い。



# 計算設定

## 平均場のエネルギーの進化

### 解像度

$384(N_r) \times 648(N_\theta) \times 1944(N_\phi) \times 2$

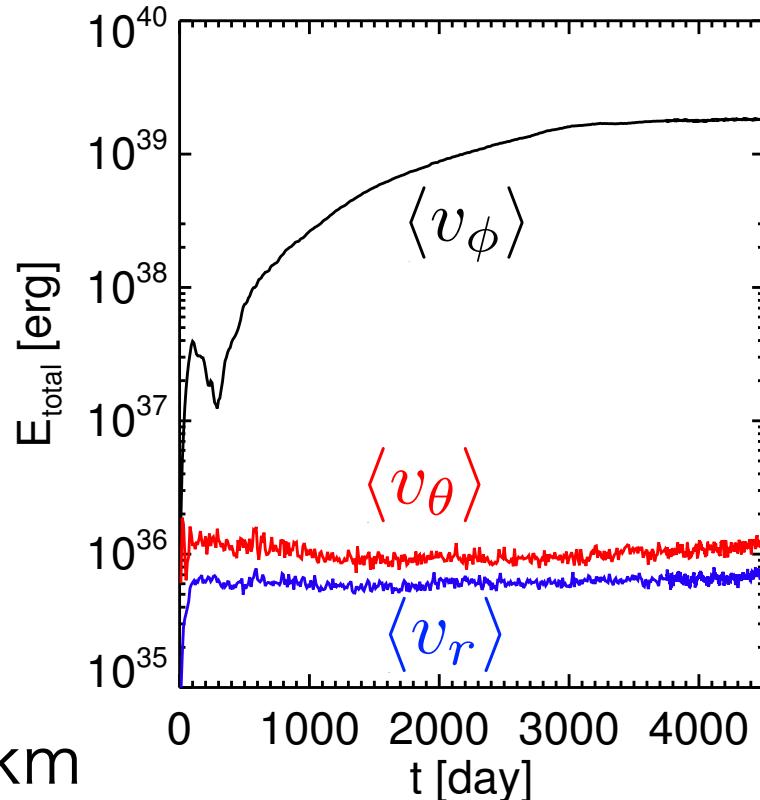
4500日ほど積分( $10^6$  stepほど)  
(解析は4000-4500日を使用)

$512(N_r) \times 1024(N_\theta) \times 3072(N_\phi) \times 2$   
という計算(600日ほど)も実行済み

### 領域

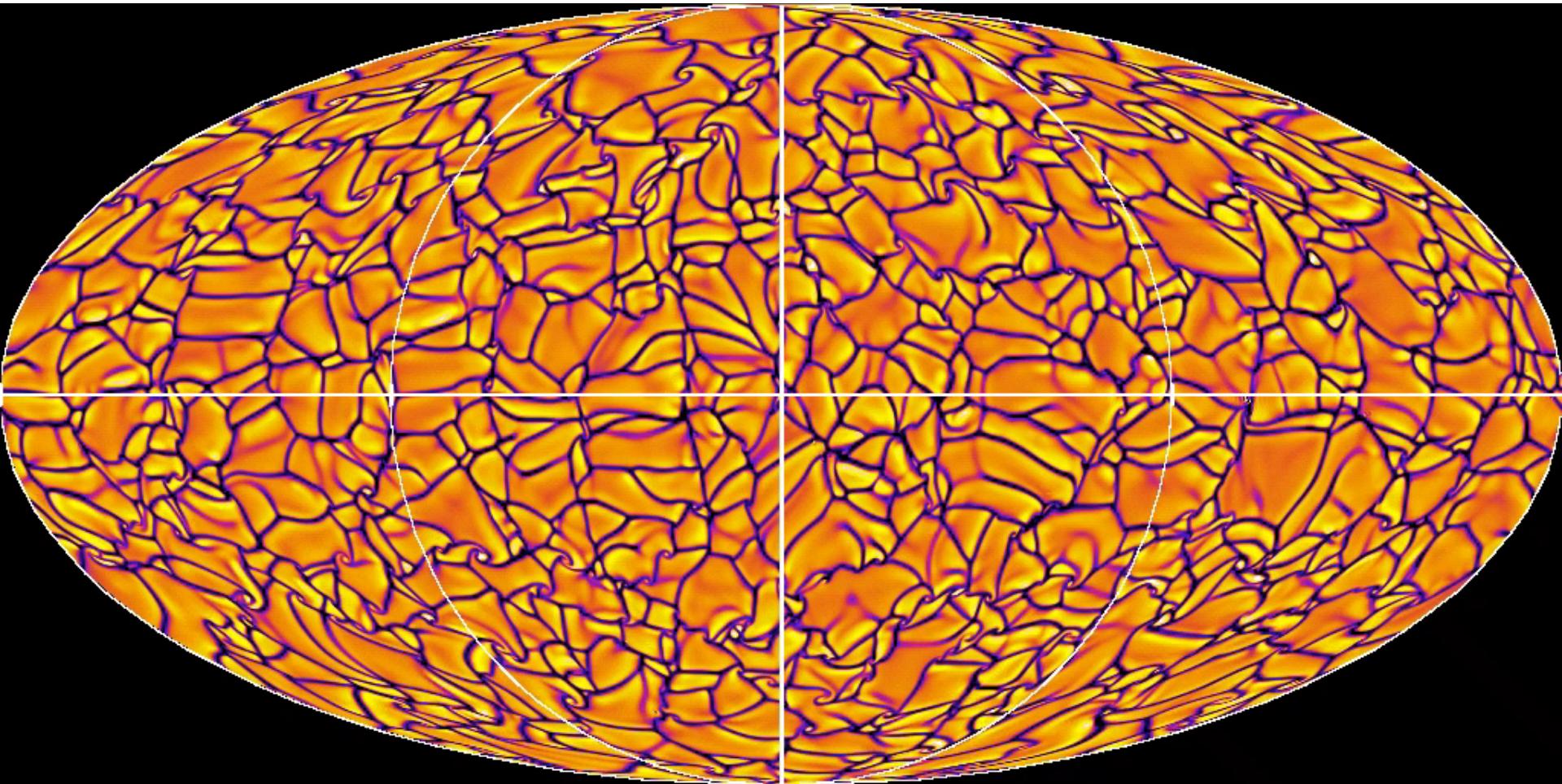
$0.715 < r/R_{\text{sun}} < 0.99$

上の境界での圧力スケール長：1870 km



# 過去の計算結果

これまでの世界最高解像度計算(Miesch et al., 2008)

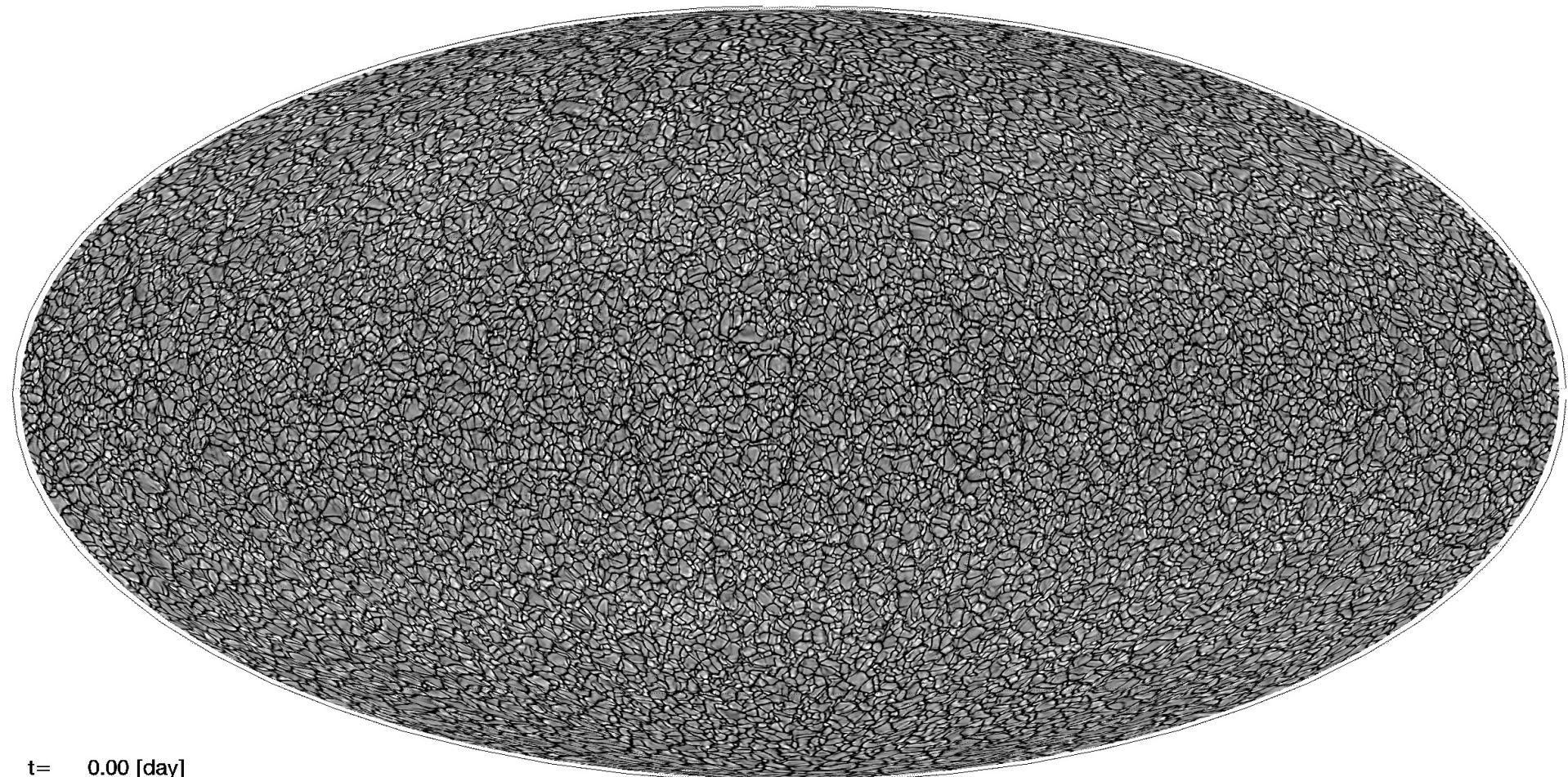


堀田英之

# 今回の計算結果

---

本研究の結果

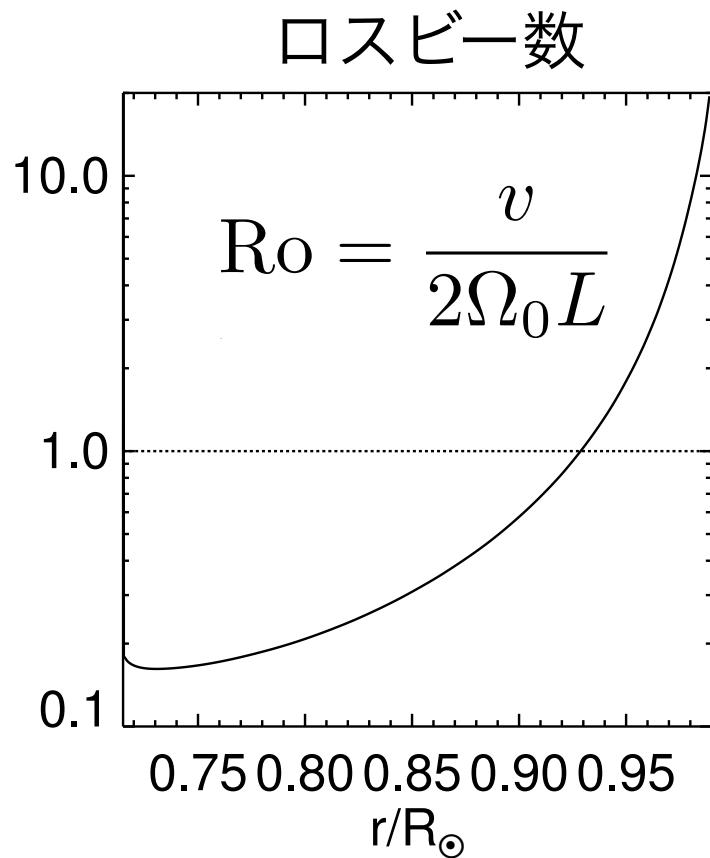


t= 0.00 [day]

堀田英之

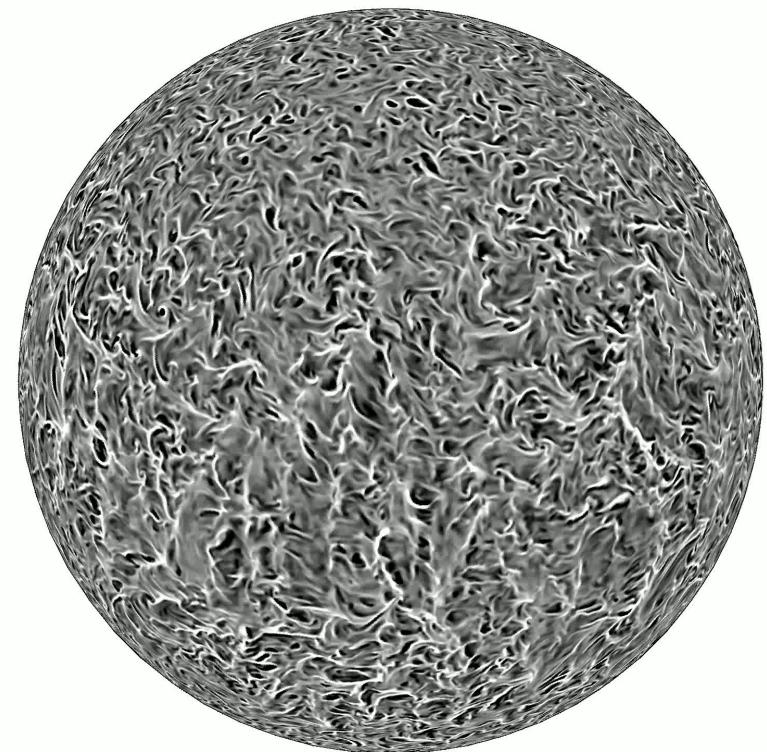
13

# 対流構造



深い相で、回転と熱対流の  
優位性が交代

r = 0.715R

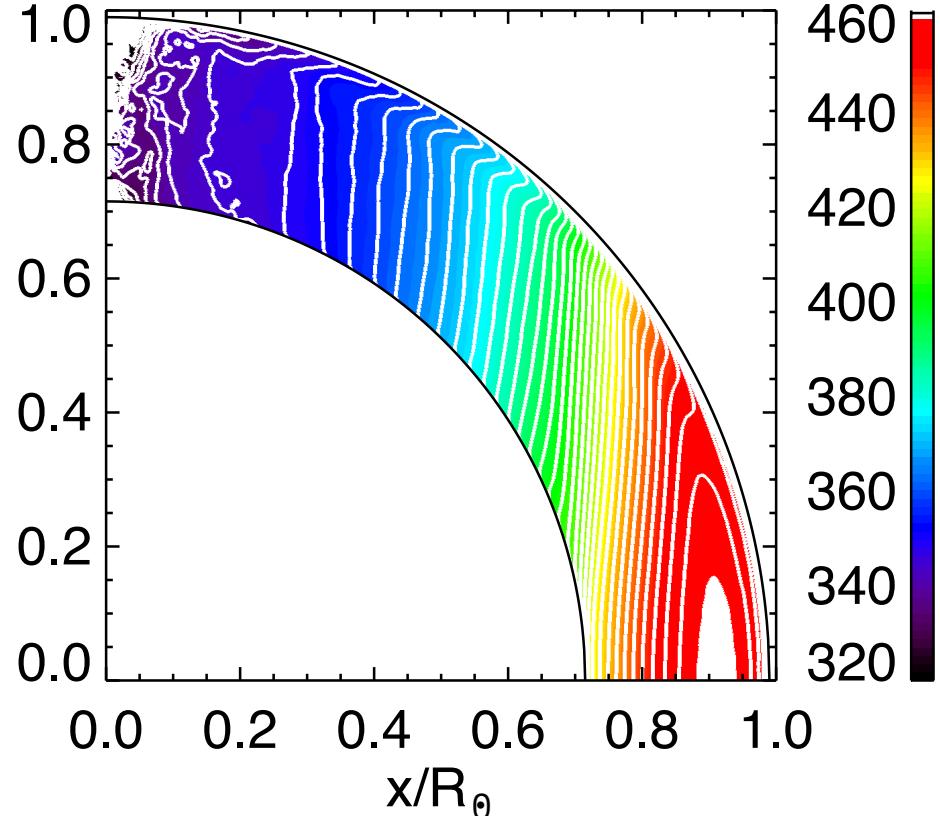


m/s

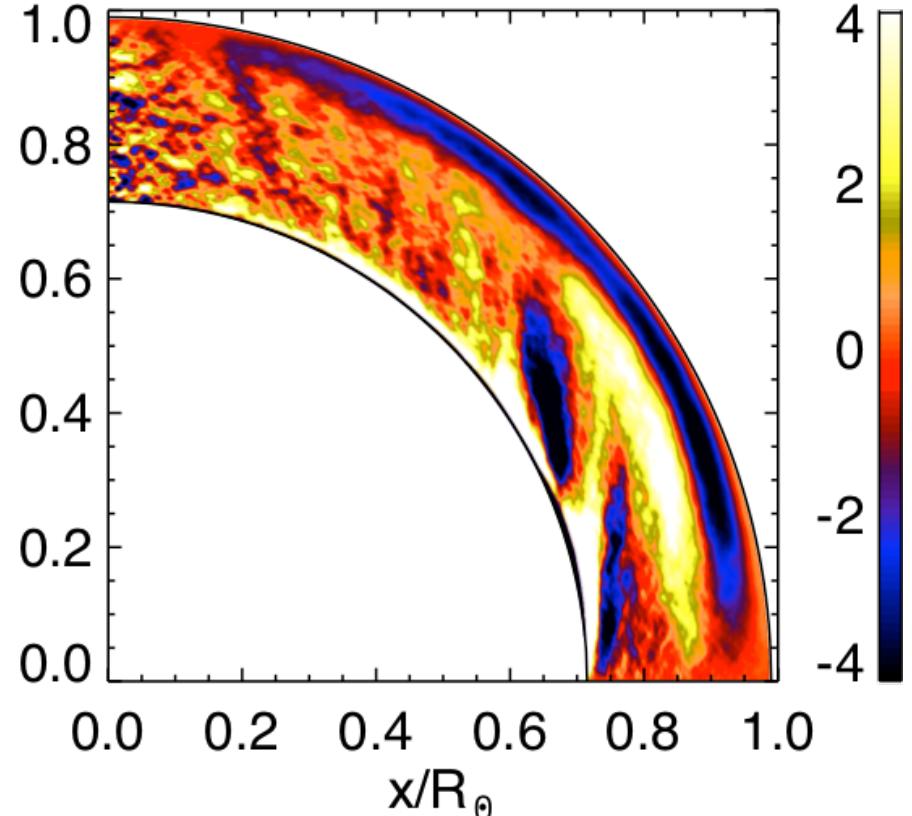
-1 0 1

# 平均流

$\langle \Omega \rangle$  [nHz]



$\rho_0 \langle v_\theta \rangle$  g cm $^{-2}$  s $^{-1}$



数値計算で表面勾配層を達成(世界初)  
極向きの子午面還流も達成

# 表面勾配層維持の物理機構 (1/2)

平均場  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_0 \langle \mathbf{v} \rangle) = -\nabla \cdot (\rho_0 \langle \mathbf{v} \rangle \langle \mathbf{v} \rangle) - \nabla \cdot (\rho_0 \langle \mathbf{v}' \mathbf{v}' \rangle) + [...]$

Reynolds応力

乱流  $\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = -(\mathbf{v}' \cdot \nabla) \langle \mathbf{v} \rangle + 2\mathbf{v}' \times \langle \boldsymbol{\Omega} \rangle + [...]$

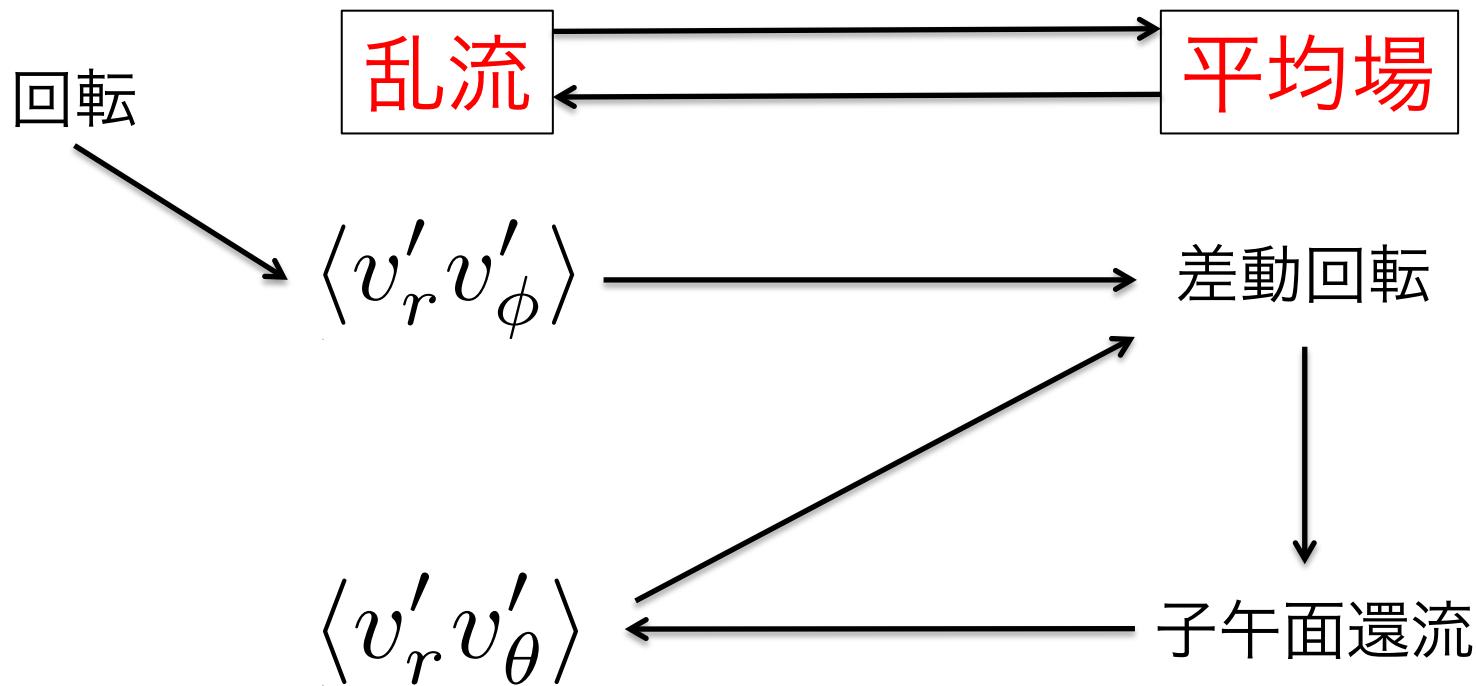
$$\mathbf{v} = \langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}'$$

平均場のシア

回転(コリオリ力)

1. コリオリ力によって、負の相関  $\langle v'_r v'_\phi \rangle$  がつくられ、動径方向内向きに角運動量輸送。
2. 平均的なコリオリ力により極向きの子午面還流
3. 子午面還流のシアにより、表面付近で正の相関  $\langle v'_r v'_\theta \rangle$  がつくられる。対流層深部では負の相関  $\langle v'_r v'_\theta \rangle$
4. これらの相関による応力が表面勾配層を維持

# 表面勾配層維持の物理機構 (2/2)



# まとめと展望

表面勾配層の解明には、**多量の解像度**を要した事からこれまで  
は解明が困難だった

新しく提案した**音速抑制法**を用いたコードにより、世界最高  
の解像度での太陽対流層の数値計算を実行

世界で初めて、**表面勾配層**を達成  
詳細な解析により、その物理機構の全貌を明らかにした

これまで、対流層の計算で黒点の実現を達成した研究は  
ない。今後はそれに挑戦