

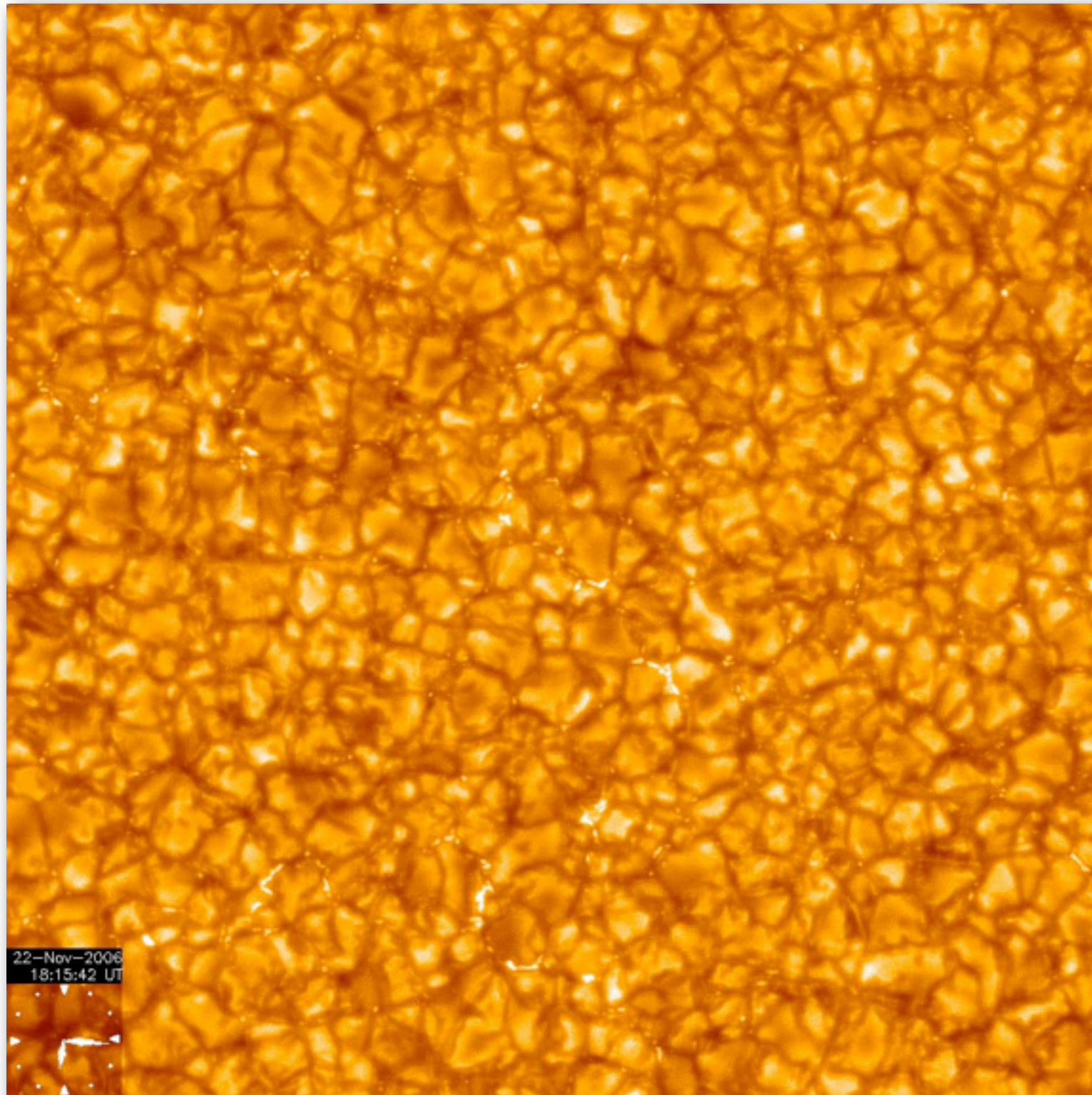
太陽全体の熱対流と表面付近の 熱対流の関係について

東京大学
堀田英之

共同研究者：M. Rempel^[1], 横山央明^[2]

[1] HAO [2] 東京大学

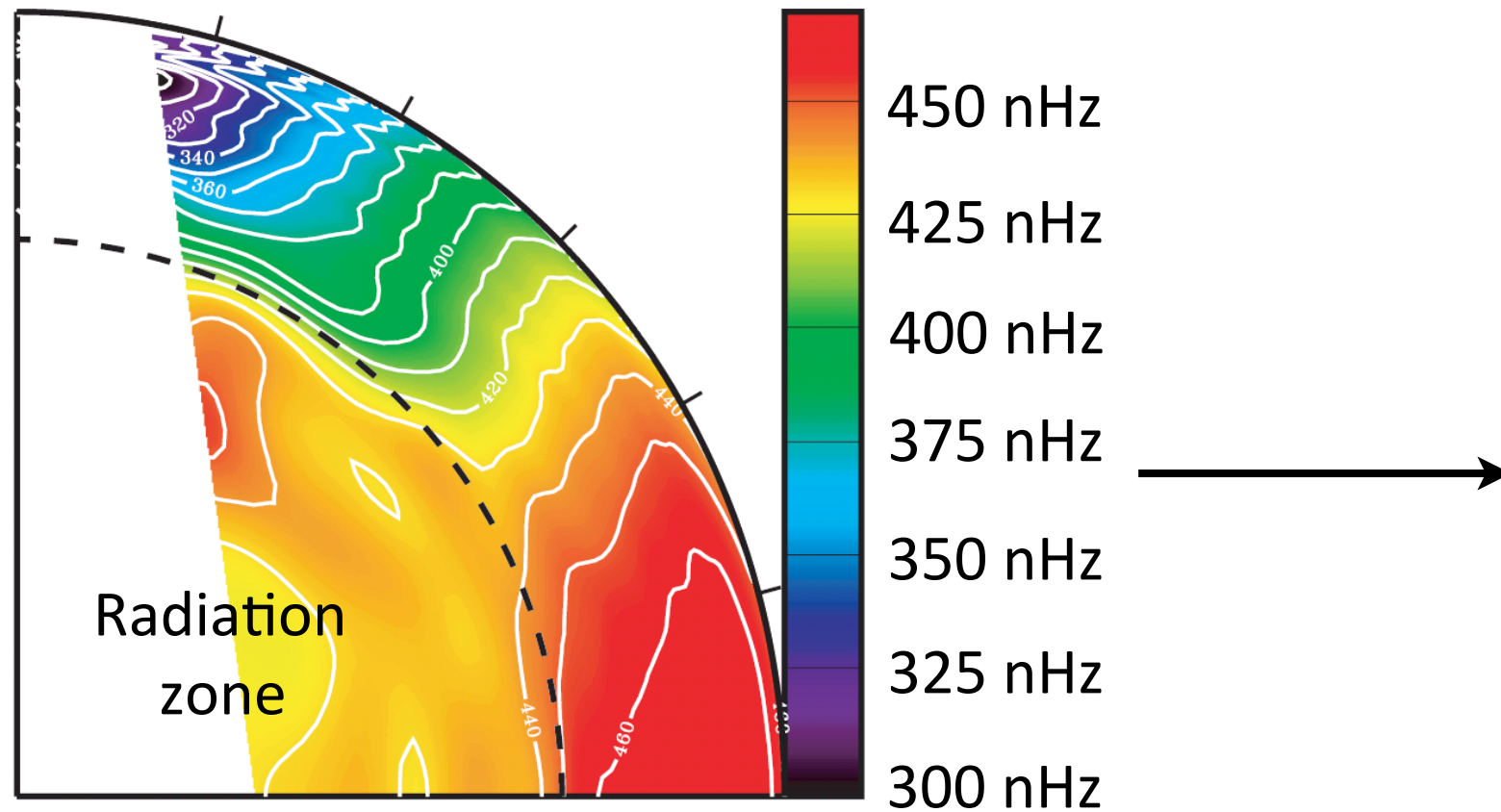
太陽の対流



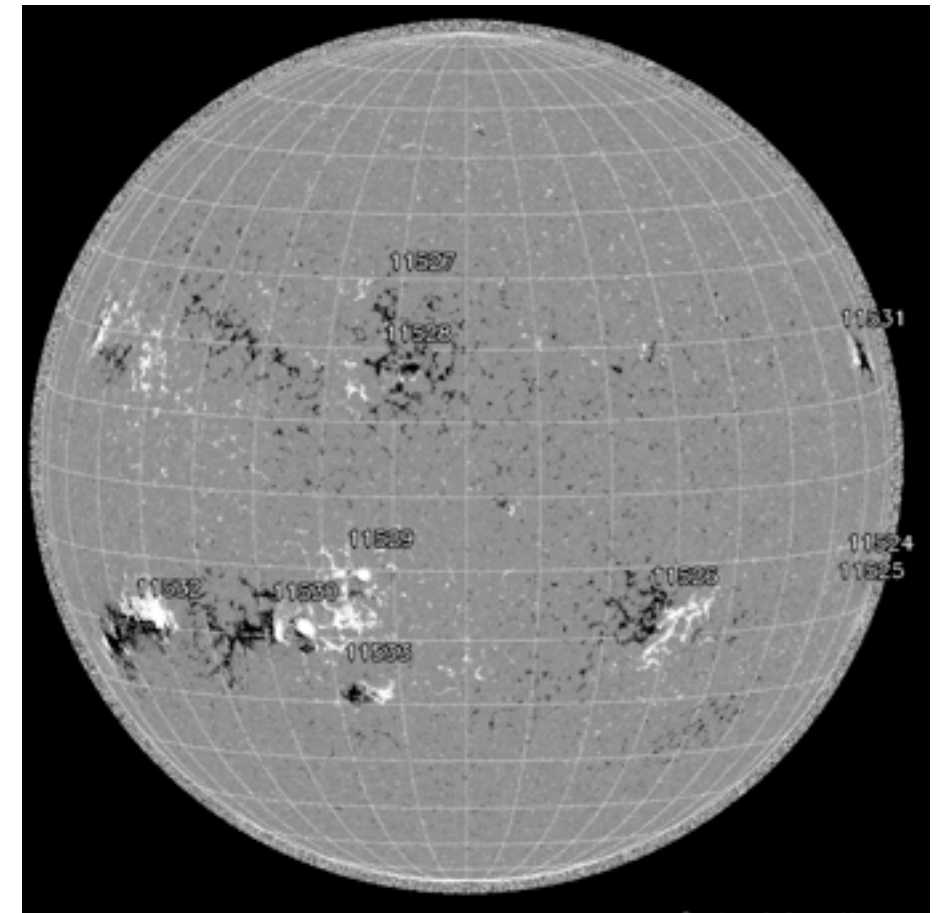
太陽対流層は、コアで核融合により発生したエネルギーを、放射で運ぶことができないために熱対流不安定の状態
→対流層は熱対流に埋め尽くされている。

(Hinode/SOTによる観測)

熱対流と差動回転、子午面還流そして磁場



磁場(の11年周期)

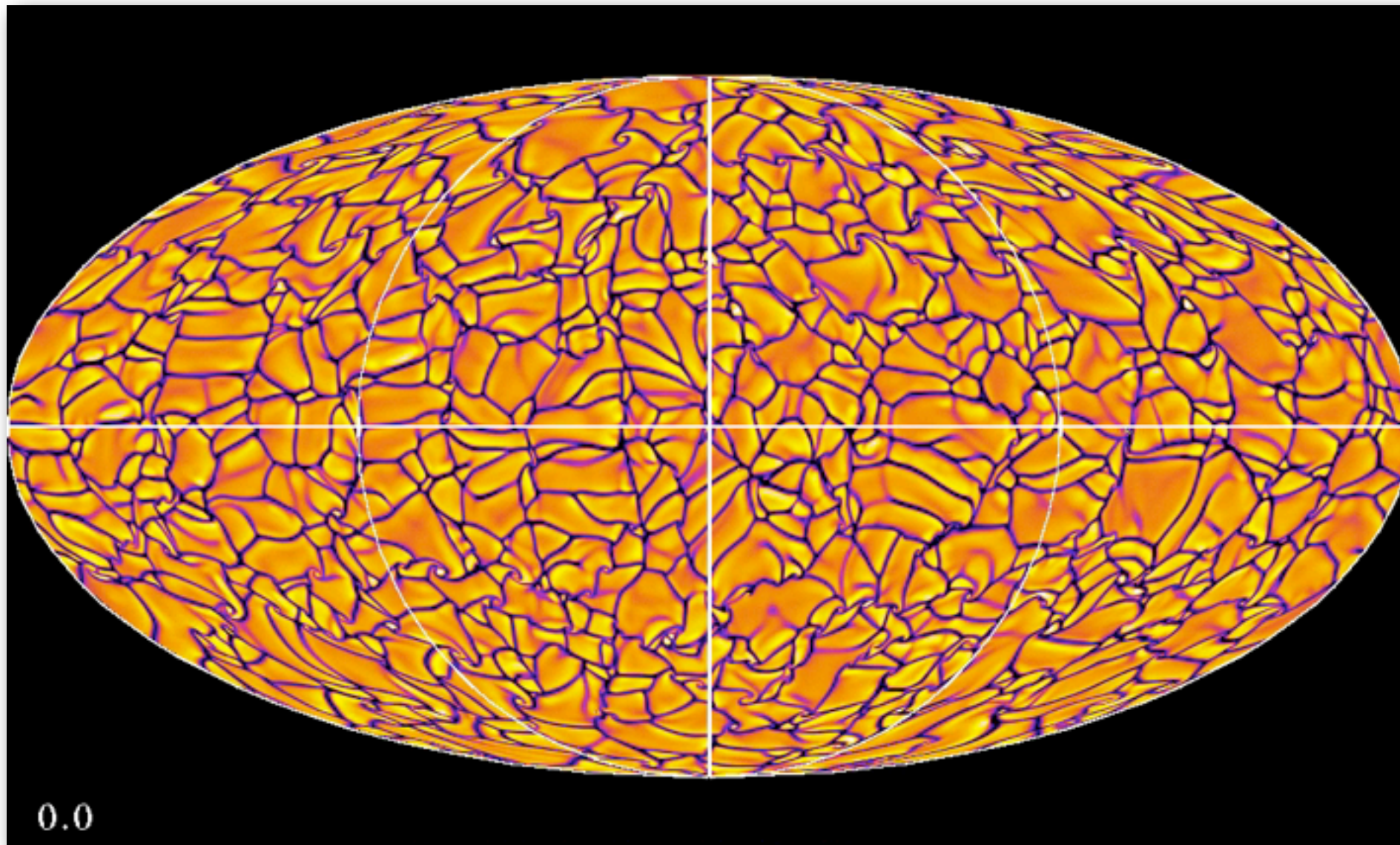


$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} (\rho \langle L \rangle) &= -\nabla \cdot (\rho \langle (\langle \mathbf{v}_m \rangle + \mathbf{v}'_m) (\langle L \rangle + L') \rangle) \\ &= -\nabla \cdot (\rho \langle \mathbf{v}'_m L' \rangle) - \nabla \cdot (\rho \langle \mathbf{v}_m \rangle \langle L \rangle)\end{aligned}$$

アネラスティック近似による全球殻熱対流計算

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

対流層内部では、音速が対流速度に対して
とても速いので音速無限大の仮定で伝搬を解かない

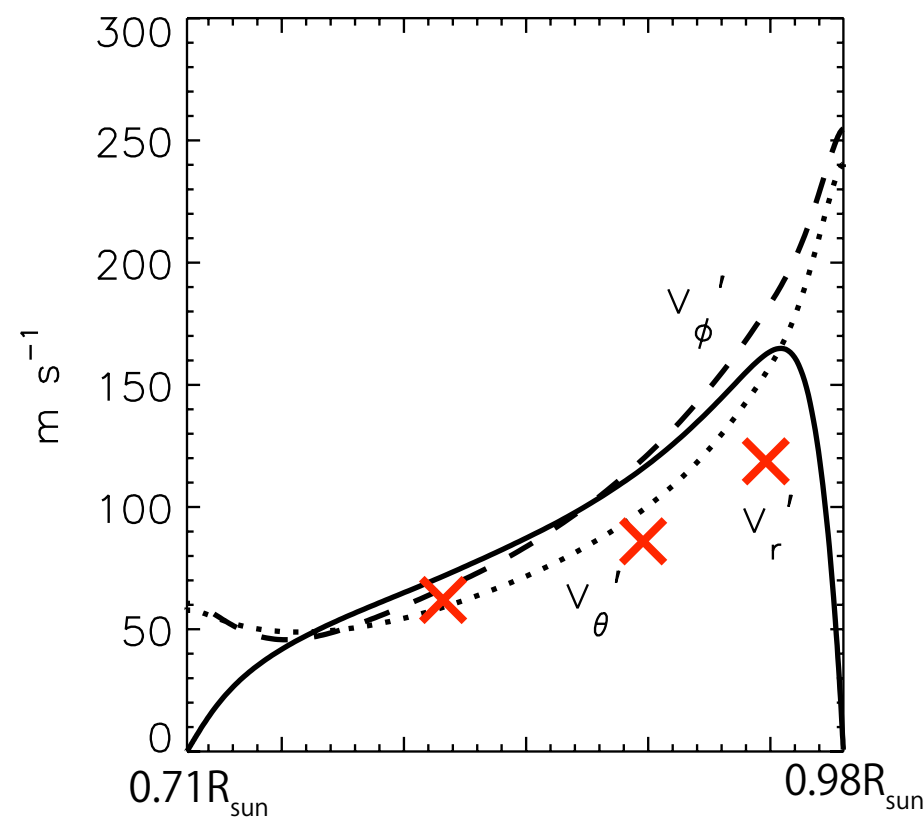


Miesch氏提供

アネラスティック近似によって達成されたこと

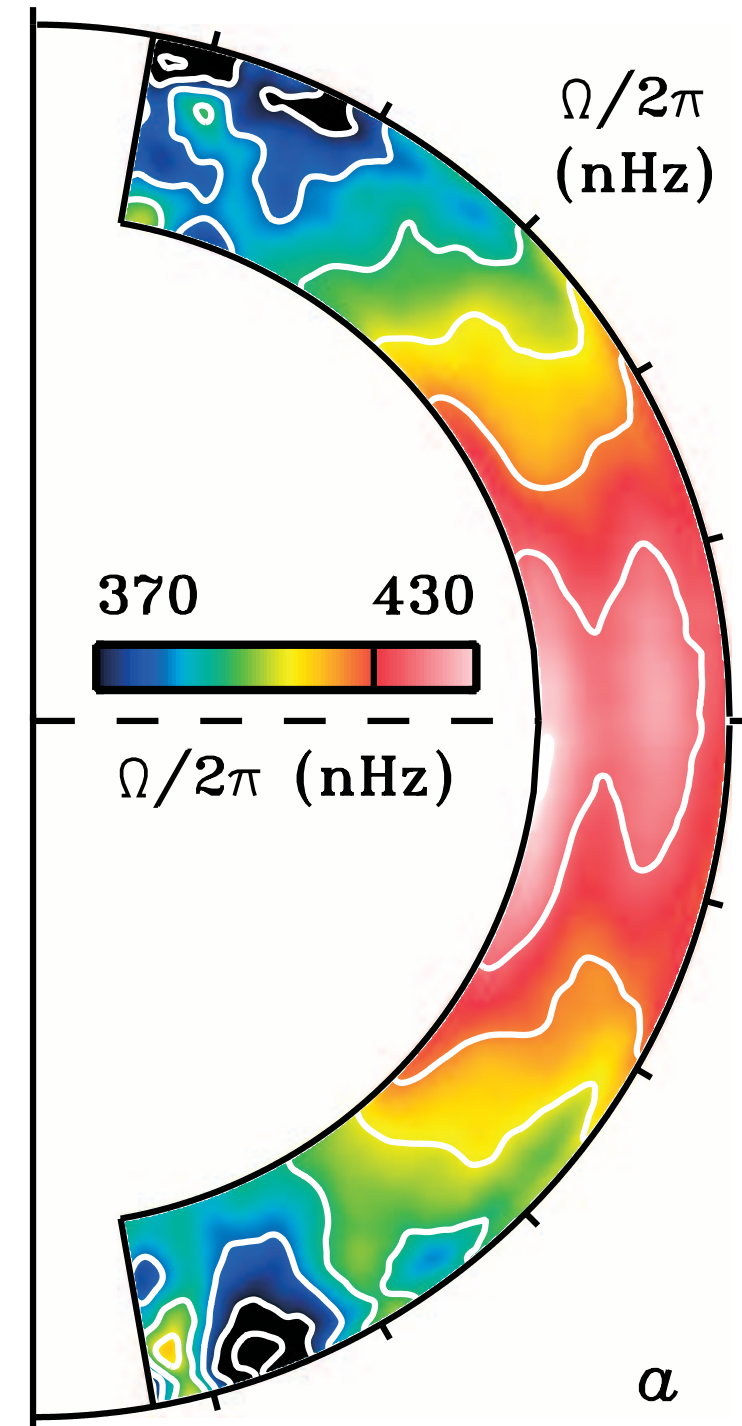
差動回転

RMS velocity

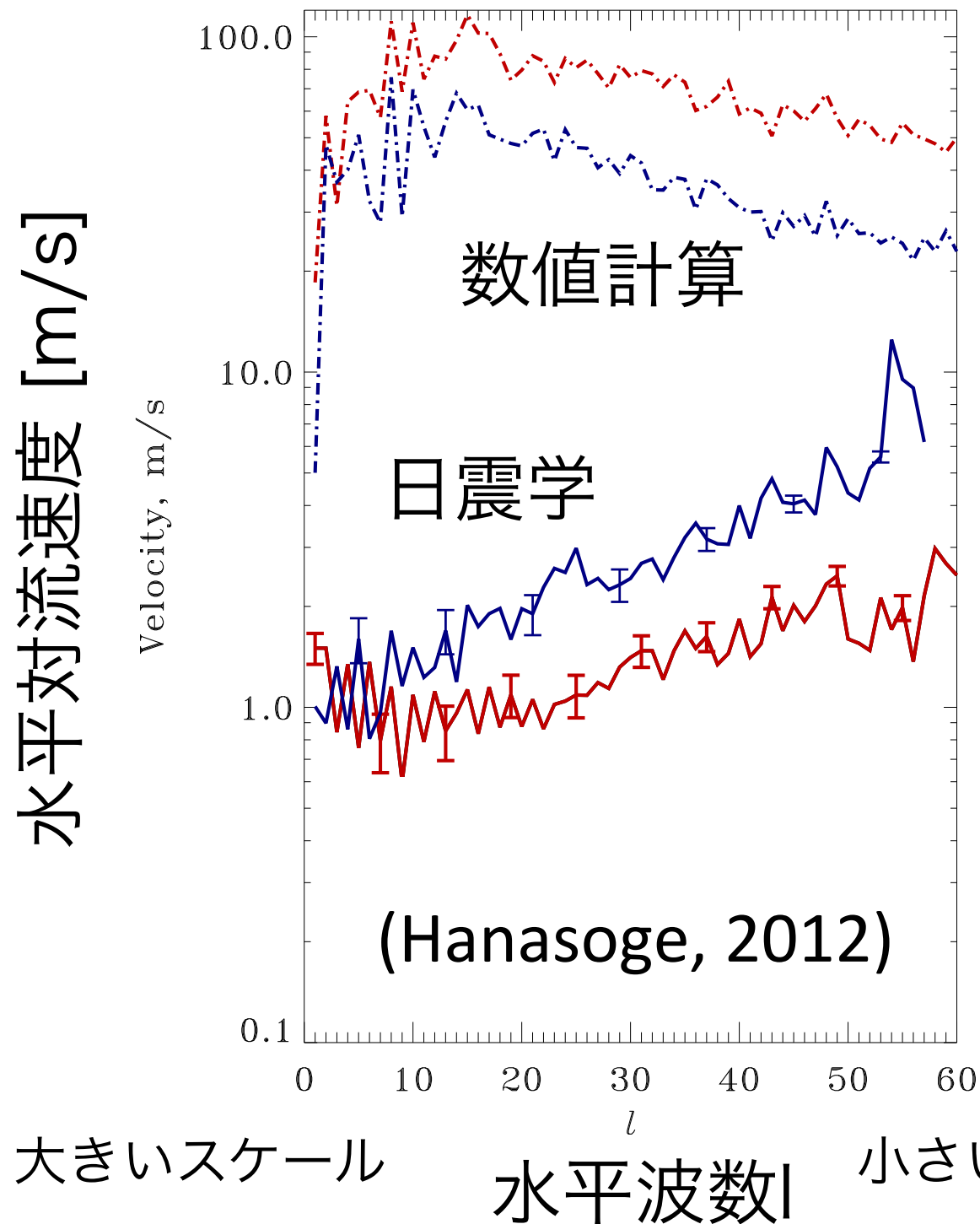


Miesch, 2008

赤印は混合距離理論による予測



アネラスティック近似でうまくいっていなかったこと



局所日震学で見積もられた、
熱対流速度の最大値の制約は、
熱対流直接数値計算の結果に比べて
最大2桁ほど小さかった

→熱対流数値計算で得られていた
熱対流は実際の太陽をうまく再現
できていなかった可能性が高い

--- ASH Simulation, $r/R_{\odot} = 0.979$

--- ASH Simulation, $r/R_{\odot} = 0.92$

— Observational limit, $r/R_{\odot} = 0.92$

— Observational limit, $r/R_{\odot} = 0.96$

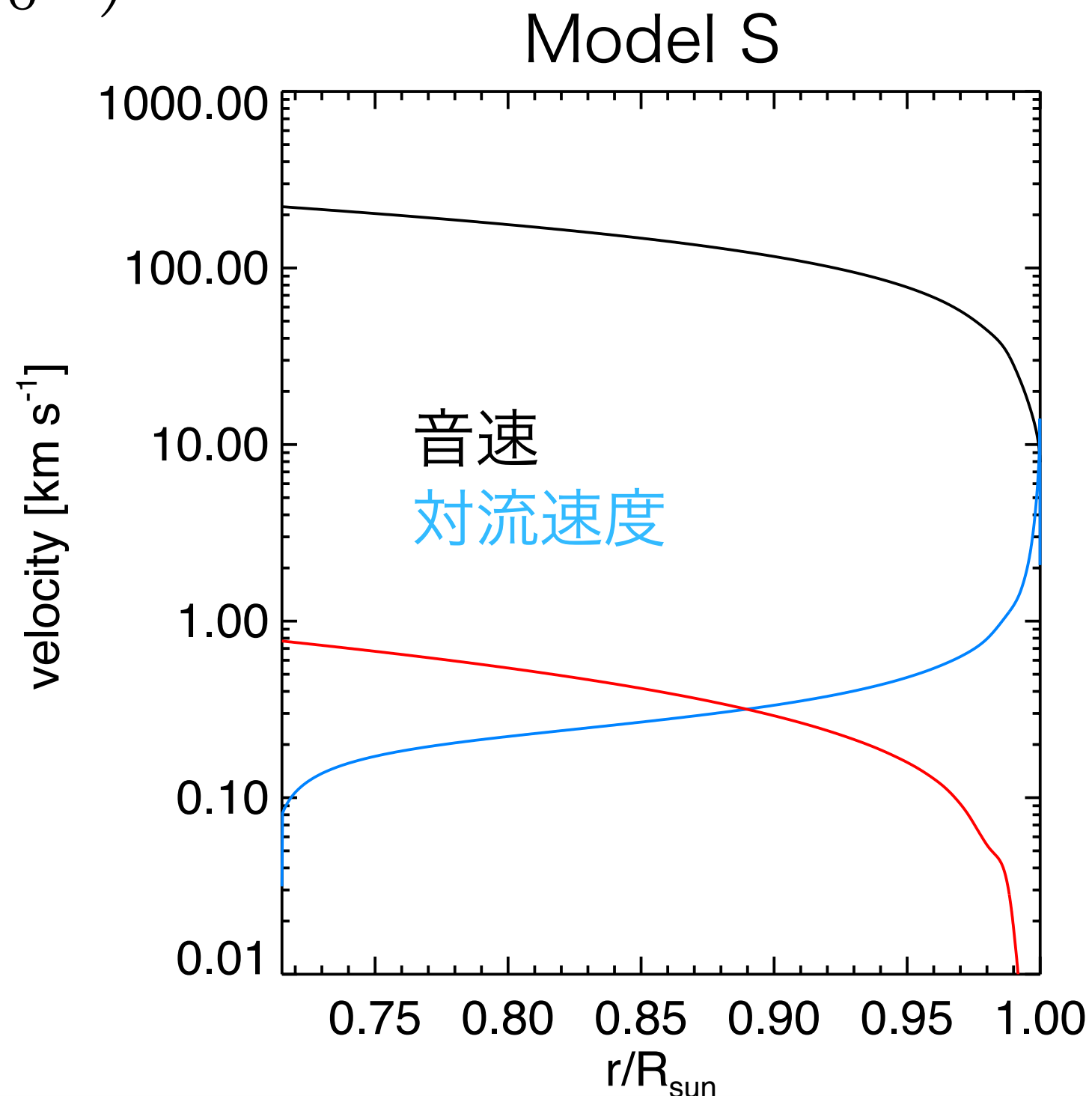
アネラスティック近似で取り扱えない部分

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

アネラスティック近似では、音速が無限大だと仮定している。

しかし、この仮定は表面近くでやぶれる ($>0.98R_{\text{sun}}$)

対流層の底での音速の速さを解決しつつ、表面付近まで解ける方法はないだろうか？



音速抑制法

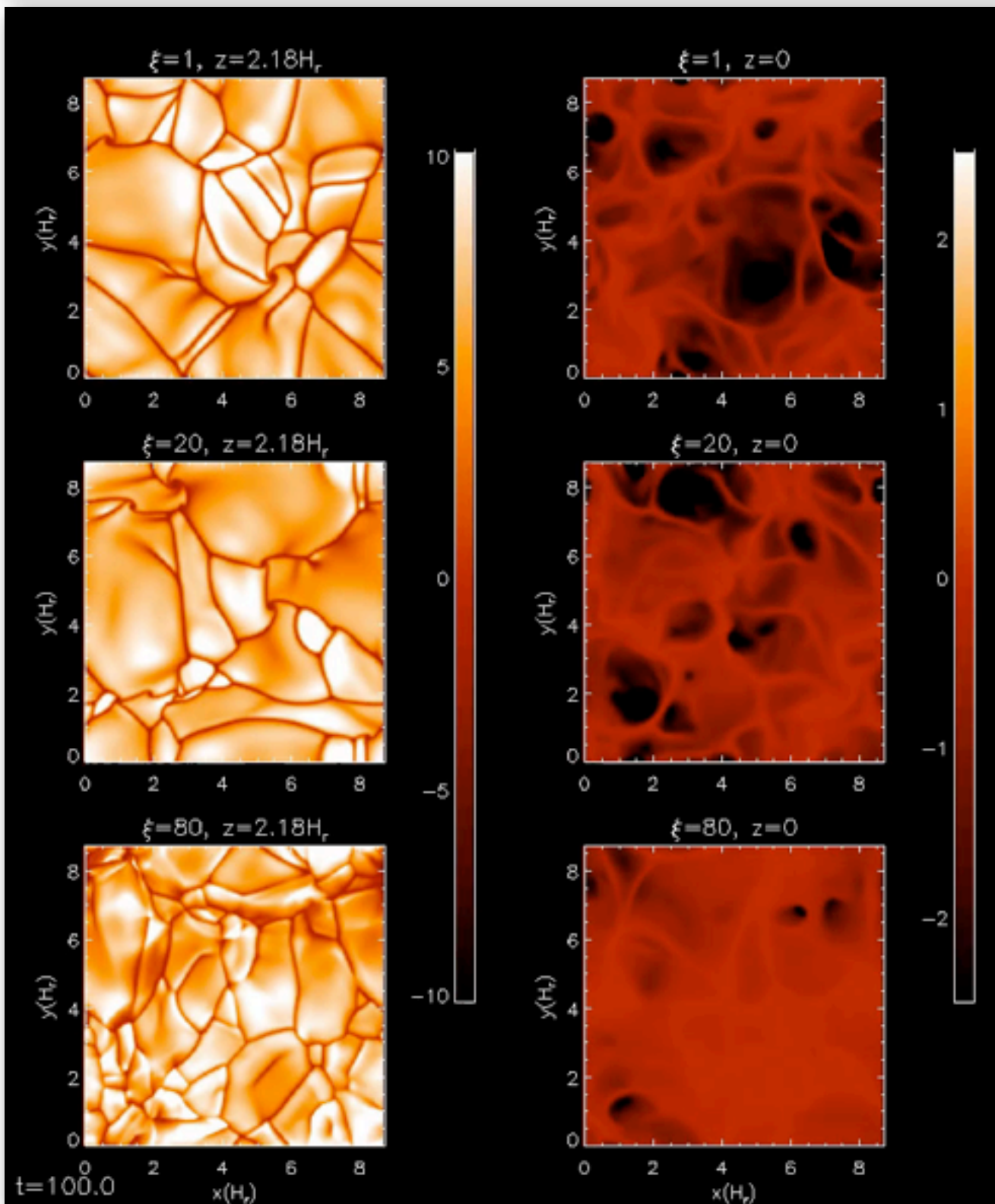


$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v})$$

この方法により、実効的な音速は $1/\xi$ になり、時間幅 Δt も大きくできる。

アネラステック近似に比べて、通信量が少なく並列計算においてスケーリングがいいのも特徴

音速抑制法の妥当性



RMS速度(3成分)、浮力・圧力
による仕事、フーリエ成分
自動判別による対流セルの大き
さは、

$$Ma < 0.7$$

Ma: (対流のRMS速度)/(抑制された音速)
の条件のもとでは、変化しな
かった。

非一様なとも、非保存形の形式
をとることで対流の性質を損な
わずに使用できることがわかつ
た。

→表面近くにアクセス可能！

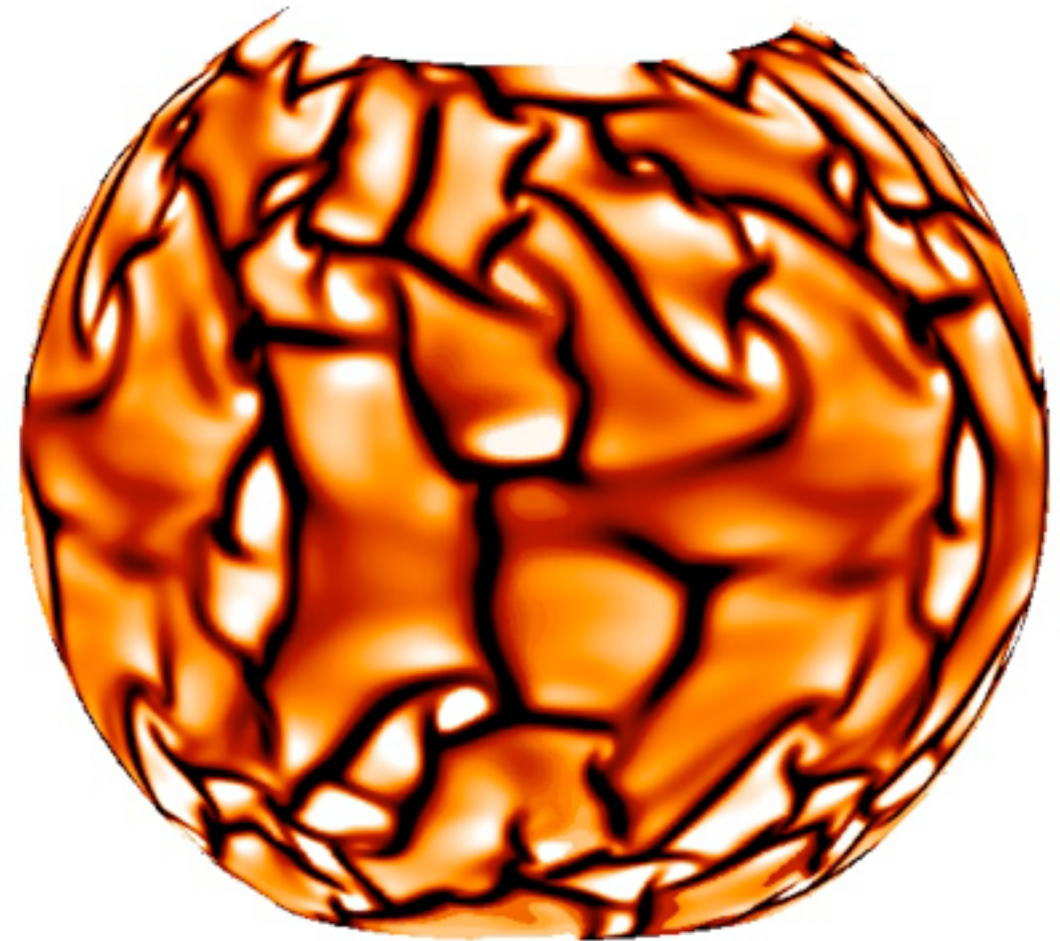
(Hotta et al., 2012, A&A)

音速抑制法を用いた球殻対流数値計算

方程式：
粘性熱伝導あり回転系流体

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_1}{\partial t} &= -\frac{1}{\xi^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - \frac{\nabla p_1}{\rho} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{D}}{\rho} \\ &\quad + \frac{\rho_1 \mathbf{g}}{\rho} + 2(\mathbf{v} \times \boldsymbol{\Omega}) \\ \frac{\partial s_1}{\partial t} &= -(\mathbf{v} \cdot \nabla) s \\ &\quad + \frac{1}{\rho T} \nabla \cdot [\kappa \rho T \nabla s + \kappa_r \rho c_p \nabla T] \\ &\quad + \frac{2\nu}{T} \left[e_{ij} e_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 \right] \\ D_{ij} &= -2\rho\nu \left[e_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \delta_{ij} \right]\end{aligned}$$

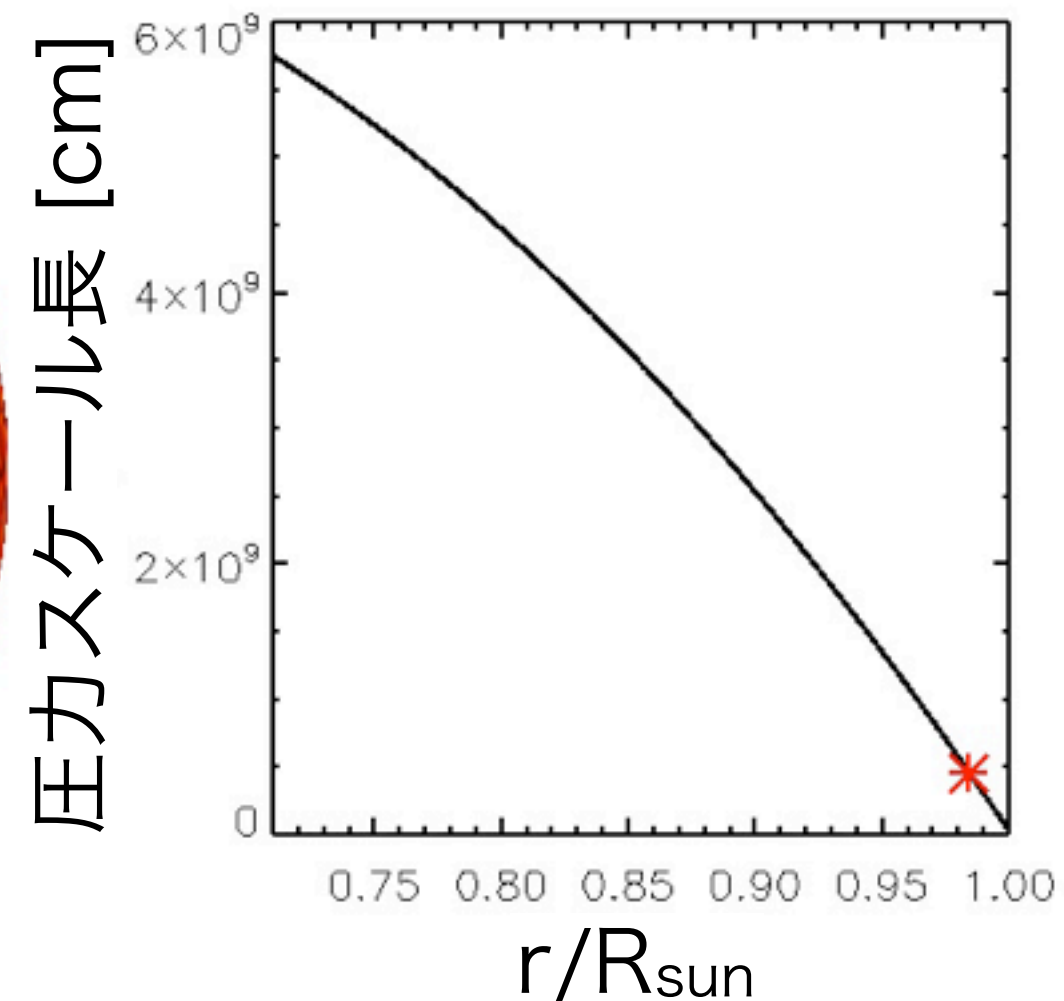
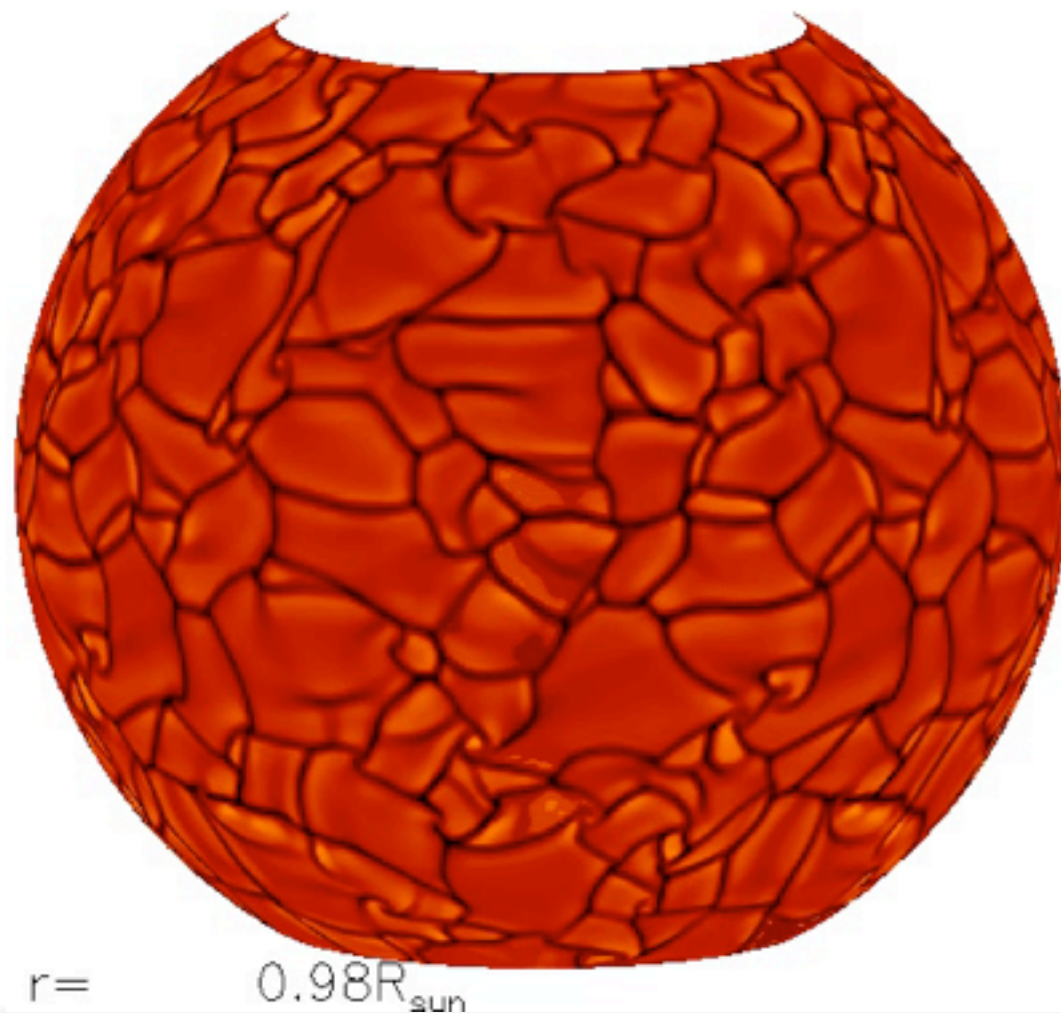
パラメータ依存性など
ASHコードとほぼ同じ依存性を
示している。
(適合細分化格子も導入)



t= 2716.67 [day]

本研究の目的

アネラスティック近似を用いた計算が間違っていることの一つに、**上の境界の位置**がある。
実際に、この位置に正しい位置に変えて行ったときに、熱対流の構造はどう変わるのか調べるのが目的である。



計算設定 1

計算設定

領域の大きさ： $30^{\circ} \sim 150^{\circ}$ (余緯度)、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ (経度)

底の境界： $0.71 R_{\text{sun}}$ (対流層の底)

音速抑制法で
実現した部分



	case 1	case 2	case 3	case 4
上の境界の位置	$0.96 R_{\text{sun}}$	$0.97 R_{\text{sun}}$	$0.98 R_{\text{sun}}$	$0.99 R_{\text{sun}}$
上の境界での 圧力スケール長	11000 km	8400 km	5800 km	3000 km
密度比	29	45	82	220

ちなみに本物の太陽の表面 $r=R_{\text{sun}}$ は圧力スケール長：300 km
密度比：6000ほど

計算結果(動径方向の速度)

表面近く

$0.9R_{\text{sun}}$

$0.8R_{\text{sun}}$

$$r_{\text{max}}=0.99R_{\text{sun}}$$

$$r_{\text{max}}=0.98R_{\text{sun}}$$

$$r_{\text{max}}=0.97R_{\text{sun}}$$

$$r_{\text{max}}=0.96R_{\text{sun}}$$

計算結果(動径方向の速度)

表面近く

$0.9R_{\text{sun}}$

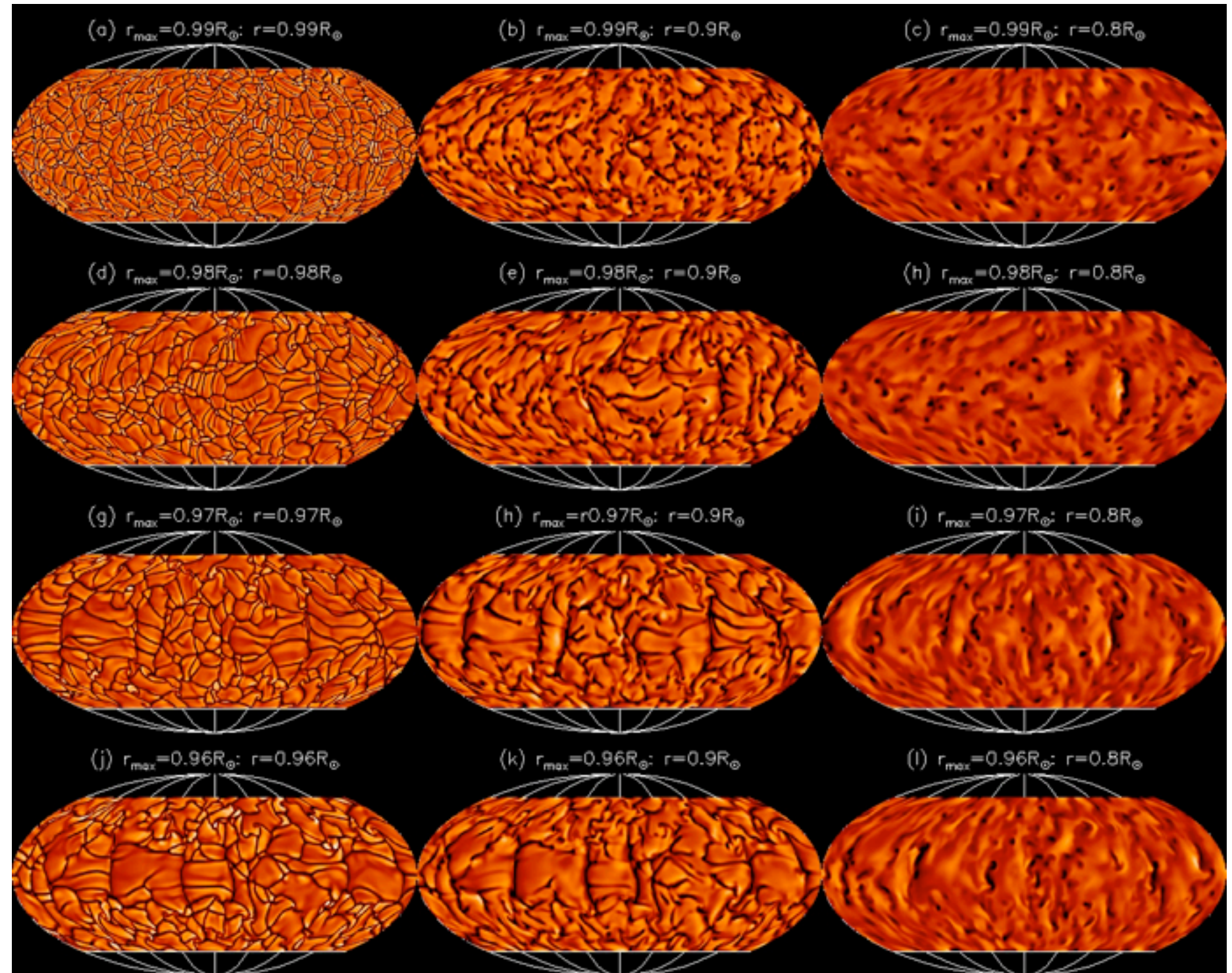
$0.8R_{\text{sun}}$

$r_{\text{max}}=0.99R_{\text{sun}}$

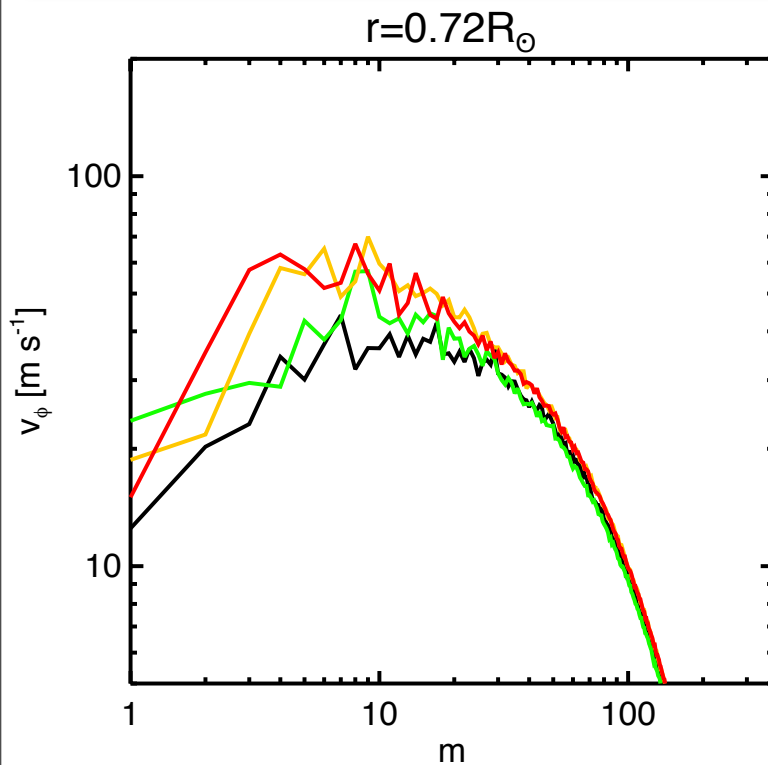
$r_{\text{max}}=0.98R_{\text{sun}}$

$r_{\text{max}}=0.97R_{\text{sun}}$

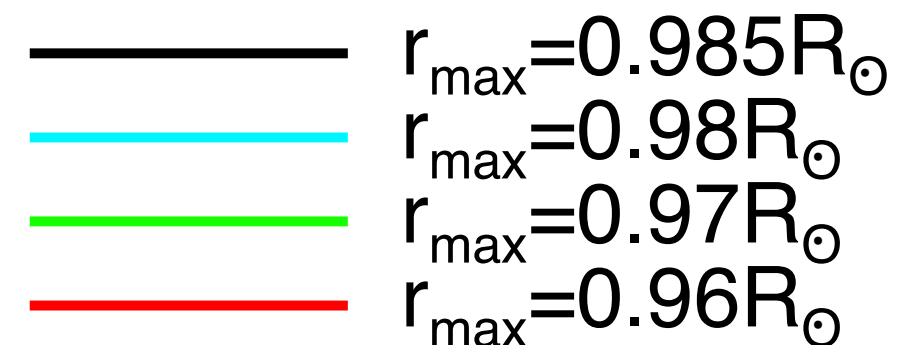
$r_{\text{max}}=0.96R_{\text{sun}}$



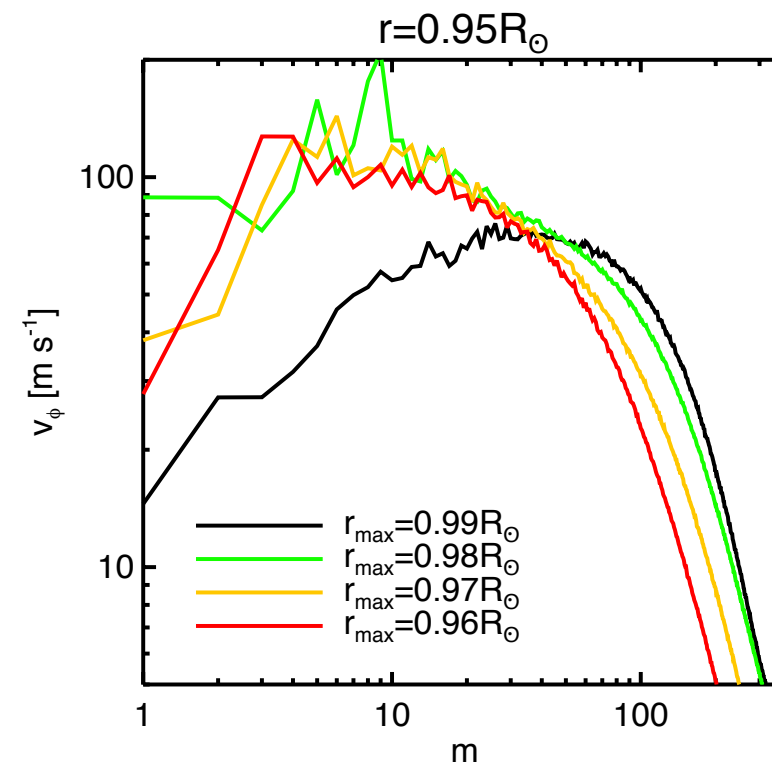
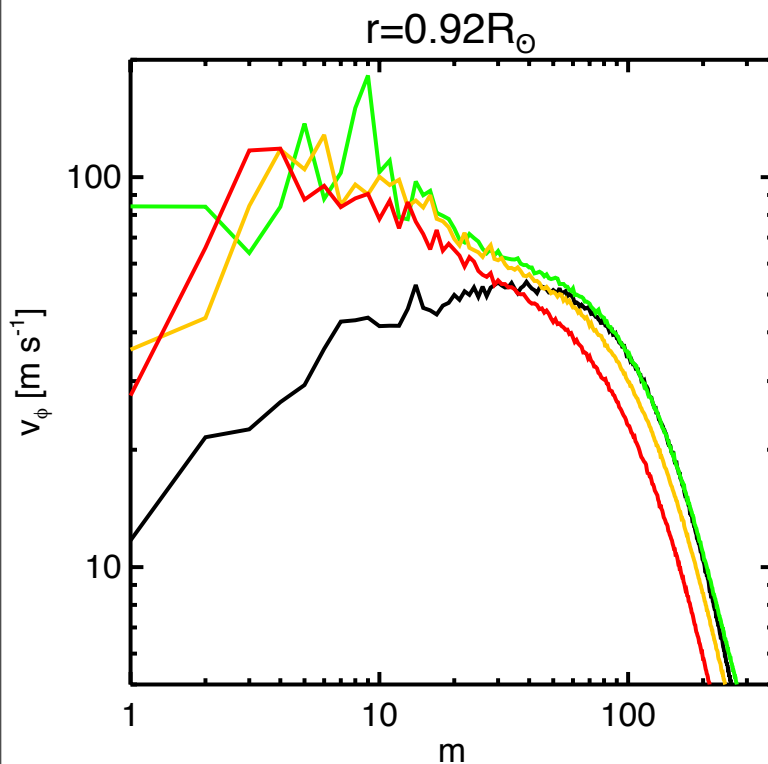
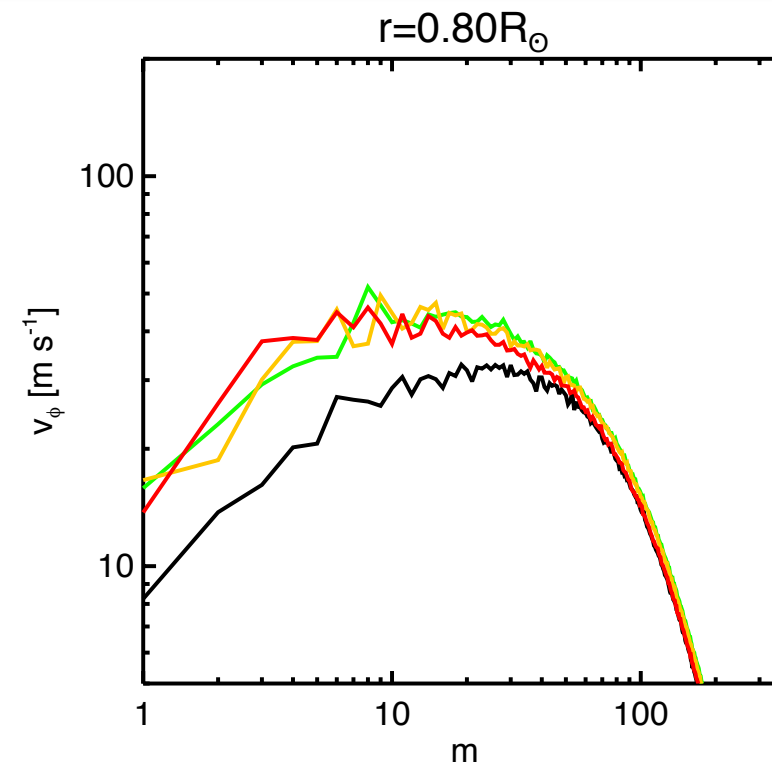
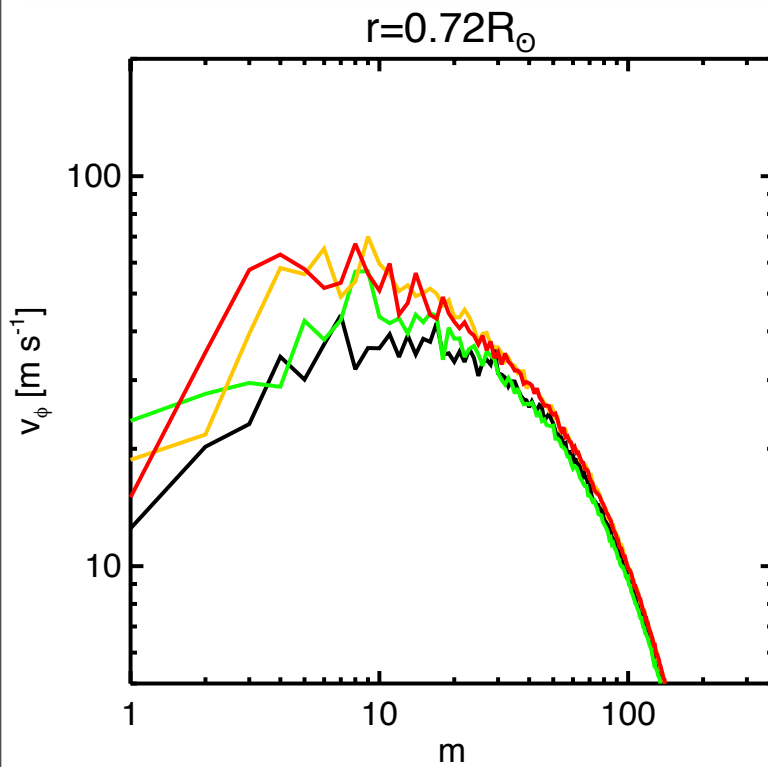
対流スペクトル



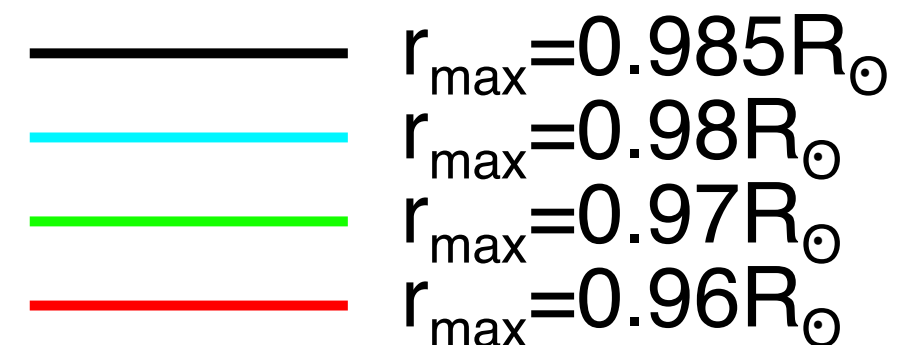
対流層上部では、上の境界が上がると、
スケールの大きな流れが抑えられて、スケールの小さな流れが大きくなる
→日震学との差異を直すセンス



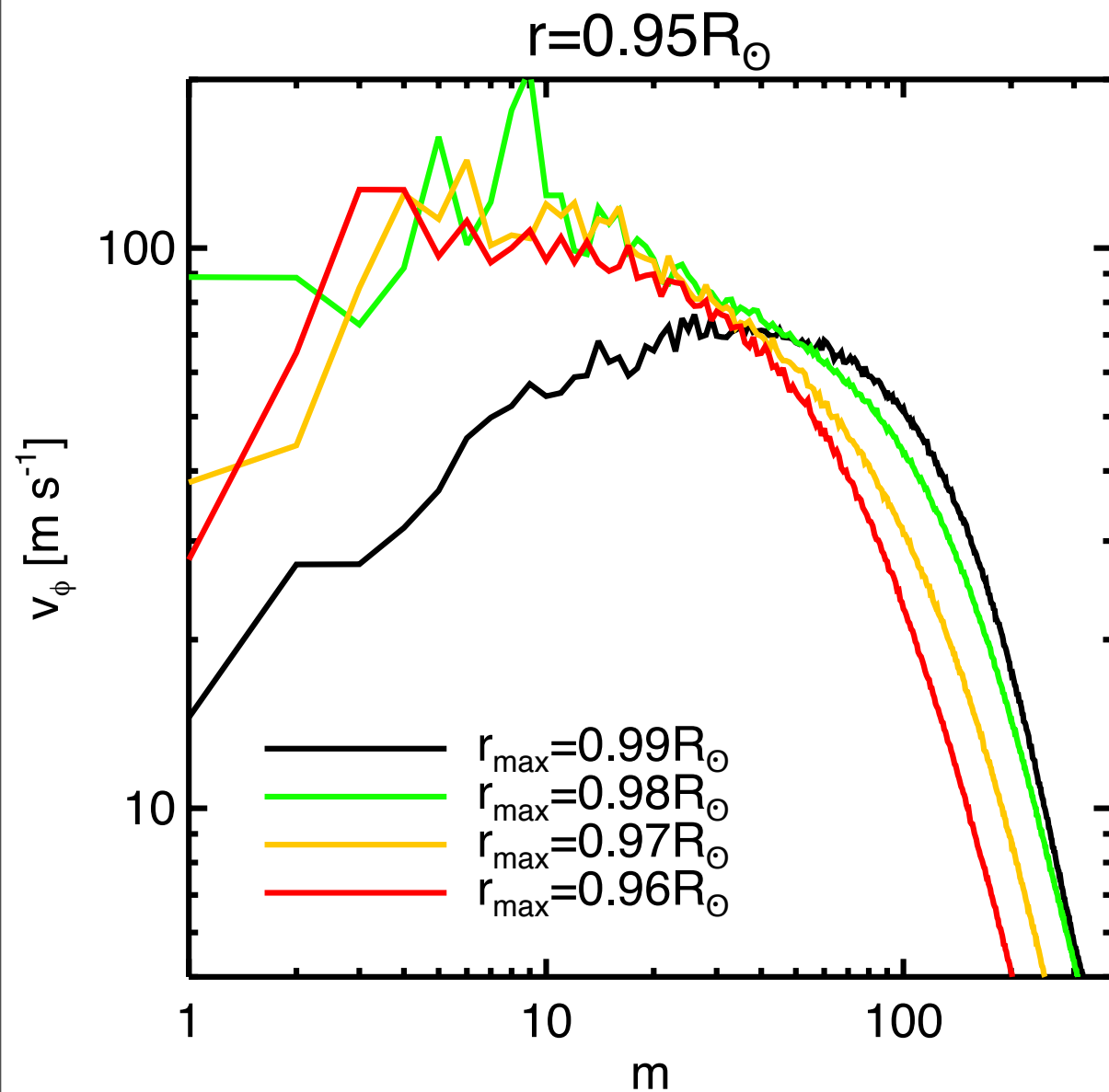
対流スペクトル



対流層上部では、上の境界が上がると、
 スケールの大きな流れが抑えられて、スケールの小さな流れが大きくなる
 →日震学との差異を直すセンス

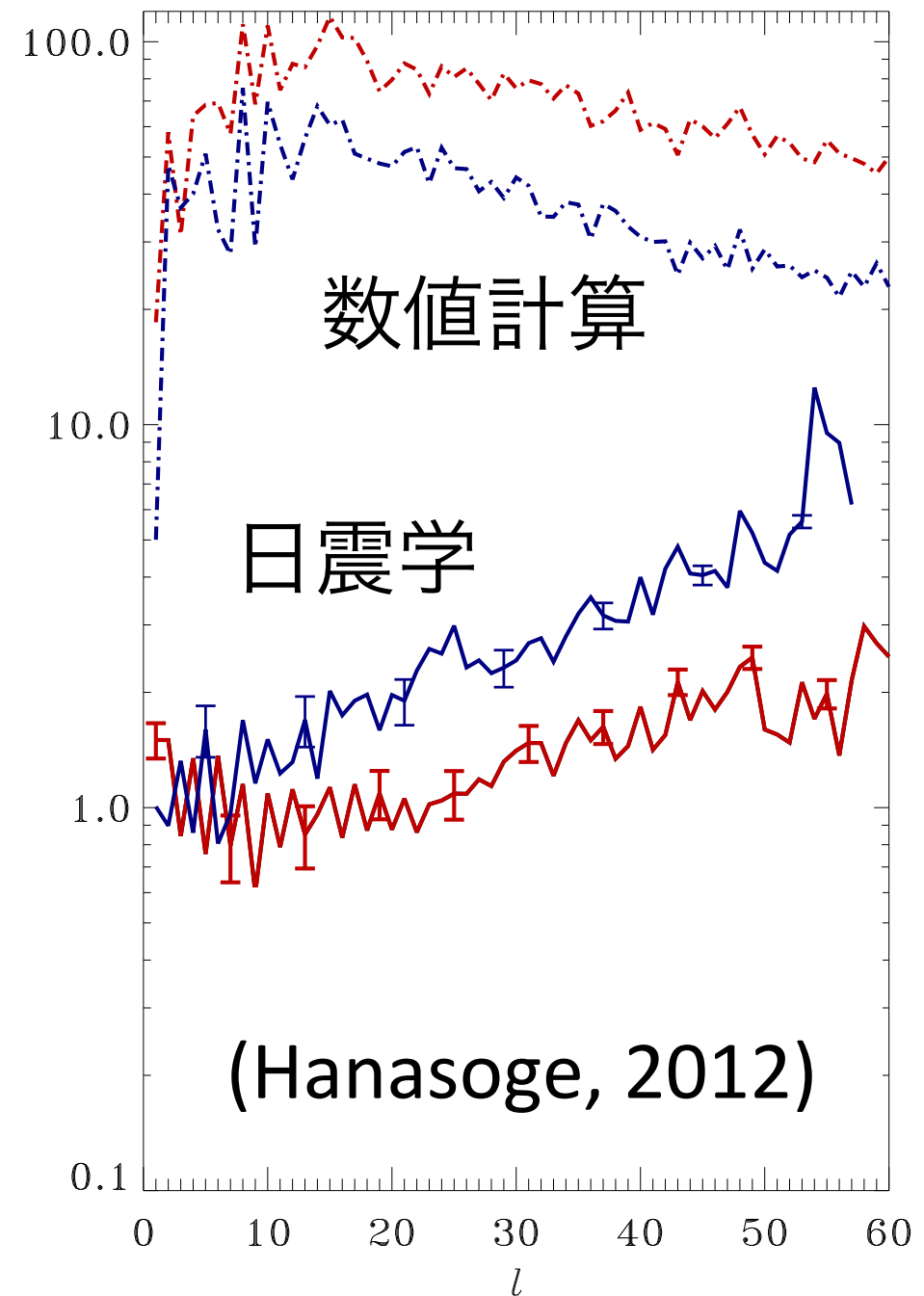


対流スペクトル



水平対流速度 [m/s]

Velocity, m/s

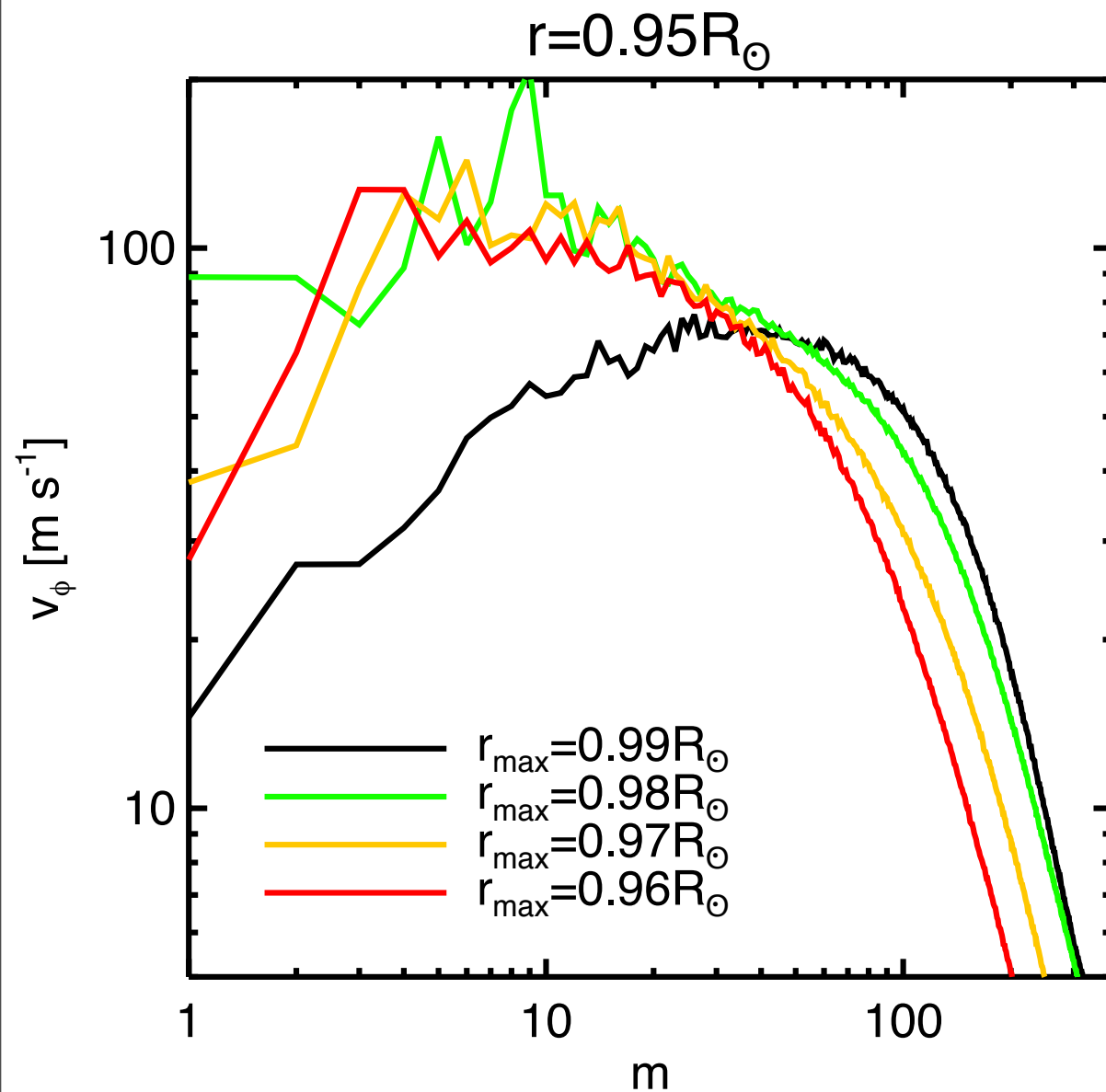


大きいスケール

水平波数 l

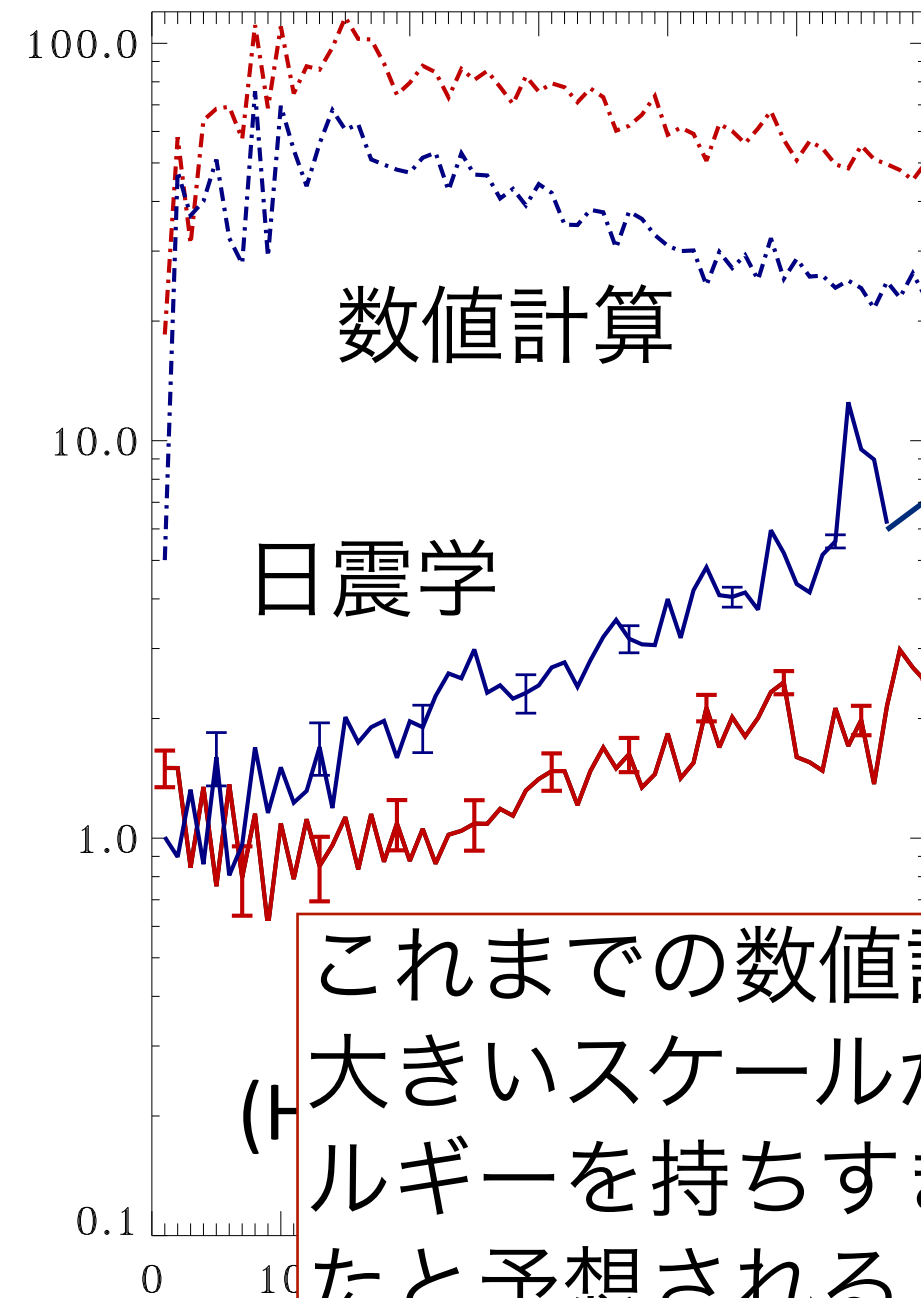
小さいスケール

対流スペクトル



水平対流速度 [m/s]

Velocity, m/s



大きいスケール

水平波数 l

小さいスケール

まとめ

- これまでのアネラスティック近似を用いた計算で、太陽対流層内部の平均速度、差動回転の成因などが明らかになった
- 最近の局所日震学の観測により、アネラスティック近似で導かれた速度場との間でスペクトルに大きな違いがあることがわかった。
- アネラスティック近似では、表面付近は解けない
→音速抑制法を提案
- 音速抑制法を用いて、表面付近をより含んだ計算を実行
- 表面付近を取り入れることによって、やや深い層でも表面の影響を受けて、長波長のエネルギーが落ちて、短波長のエネルギーが上がり観測に近くなっていくことがわかった。