

# 「ひので」による太陽の新しい 磁場生成機構の発見について

東京大学/国立天文台 石川遼子

国立天文台 常田佐久

日米ひので可視光望遠鏡チーム

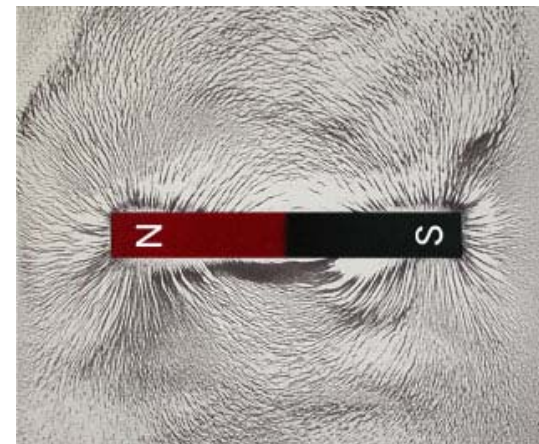
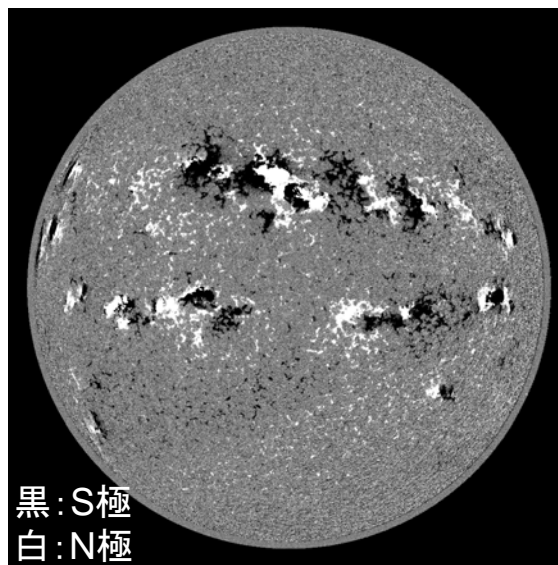
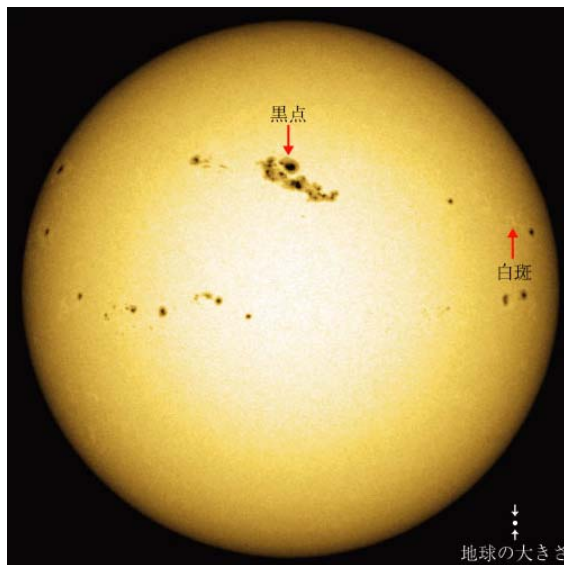
# 発表要旨

- 「ひので」可視光・磁場望遠鏡の観測によって、黒点などとはまったく異なる性質の磁場(短寿命水平磁場)が発見された。この磁場は非常に微細で(1000km)、短寿命(4分)、太陽表面に対して水平である。また、この短寿命水平磁場は太陽全面に大量に存在している。
- これらの短寿命水平磁場の性質は、太陽表面付近の対流に起因する新しい磁場の生成機構があることを示唆する。
- この磁場生成機構は、太陽全面に大量の磁場を供給することから、太陽の様々な活動を引き起こす新しい磁気エネルギー源として期待される。

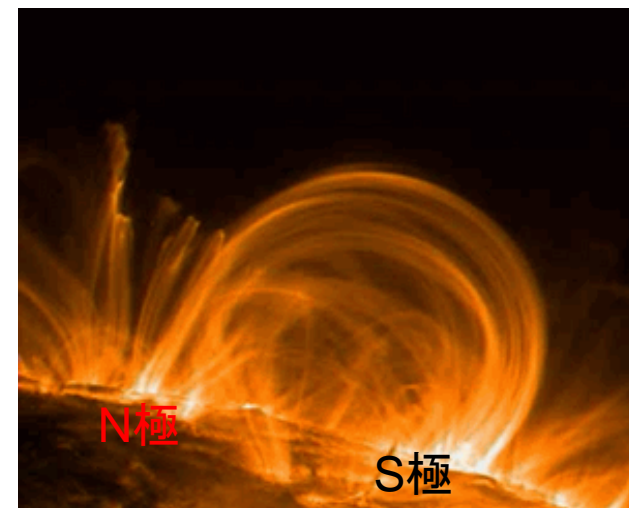
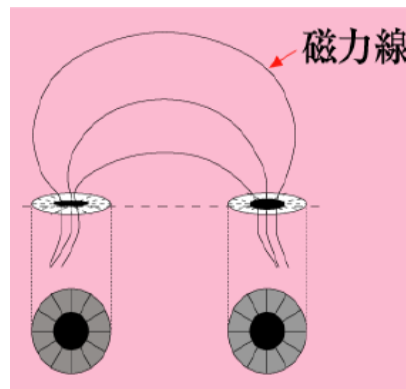
# 太陽の磁場(1)

## 黒点は磁石である

- 太陽黒点は巨大な磁石



黒点は、磁力線の切り口

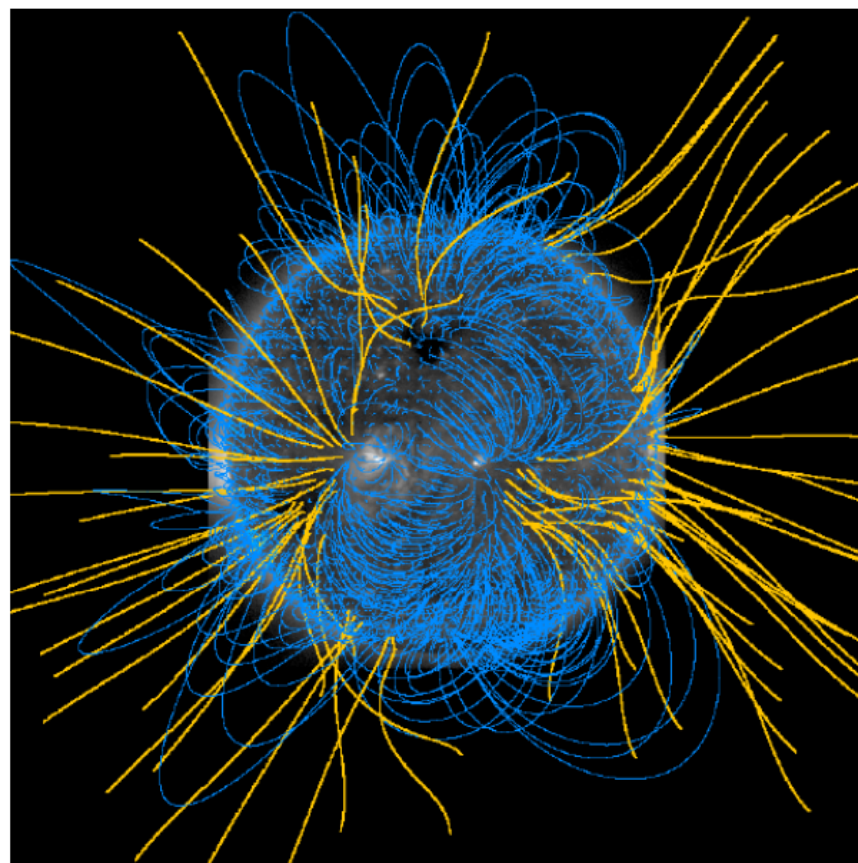


太陽の縁にある磁気ループの様子。それぞれのループの足元には黒点がある。

# 太陽の磁場(2)

## 太陽は磁場である

- 太陽全体を無数の磁力線が覆っている

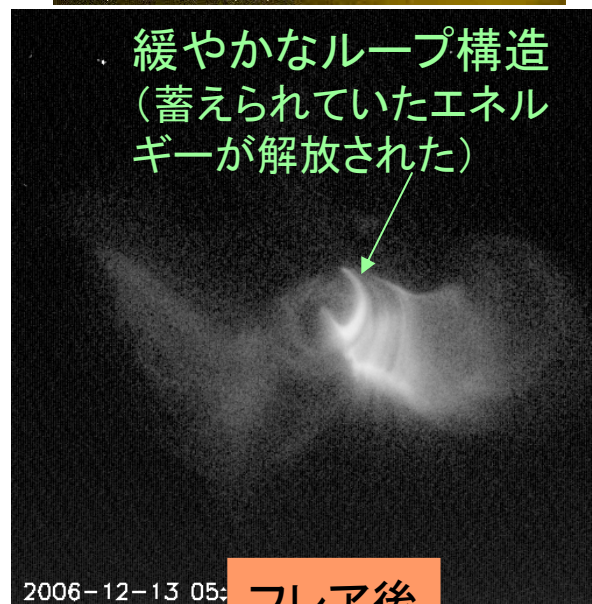
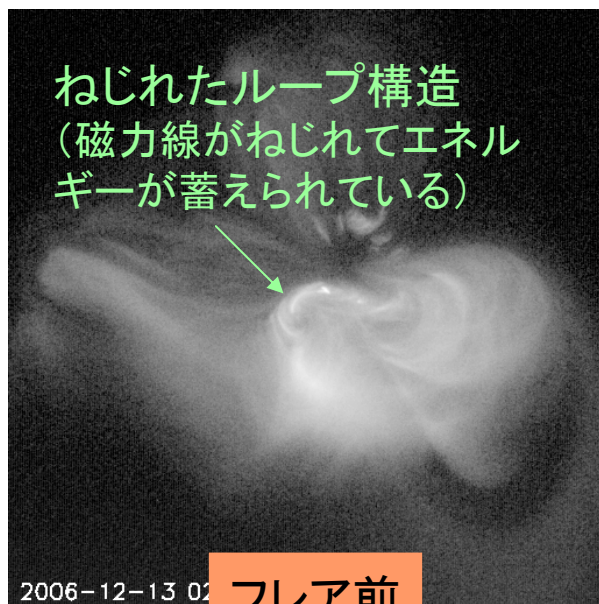
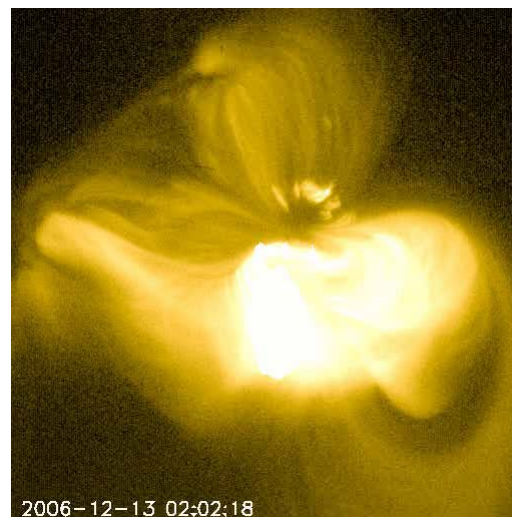


青線: 閉じた(太陽表面から出て、太陽表面へ戻ってくる)磁力線  
黄線: 開いた(太陽表面から出て、宇宙空間へとつながる)磁力線

# 太陽の磁場(3)

## 磁場のエネルギー解放:フレア

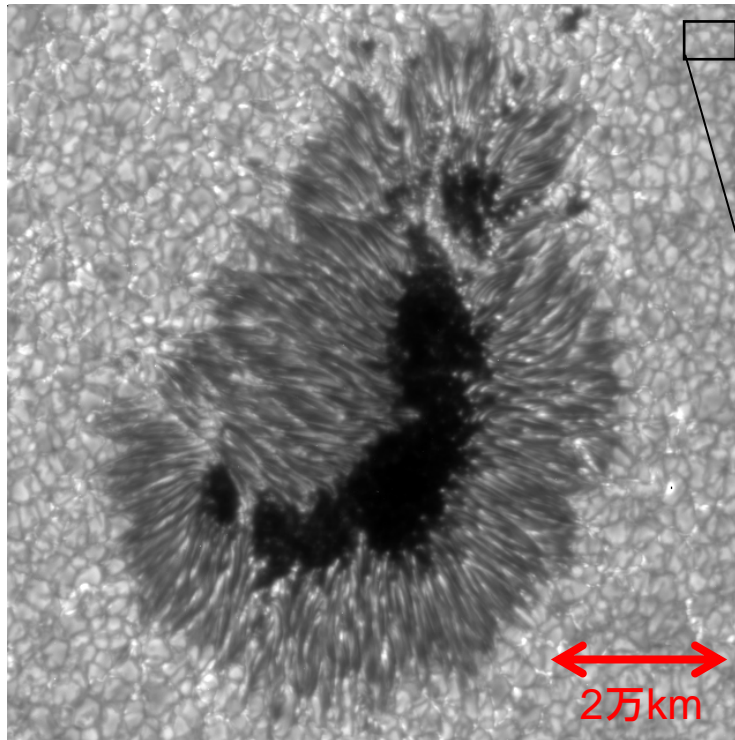
- 太陽コロナ中で起きる大爆発現象であるフレアは、磁場に蓄えられたエネルギーが解放されることによって起きる。



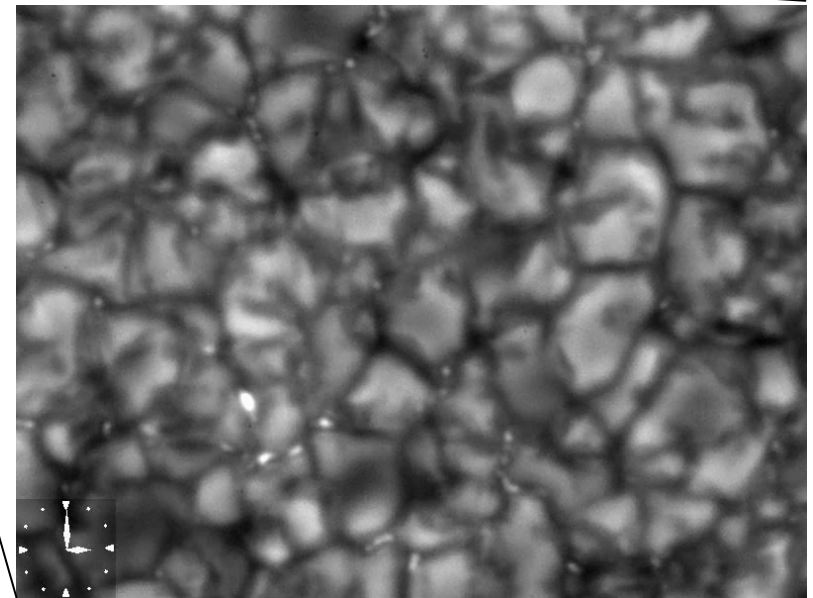
# 活動領域と静穏領域

活動領域: 黒点などの磁場  
がたくさん集まった領域

静穏領域: 磁場がまばら  
にしか存在しない場所



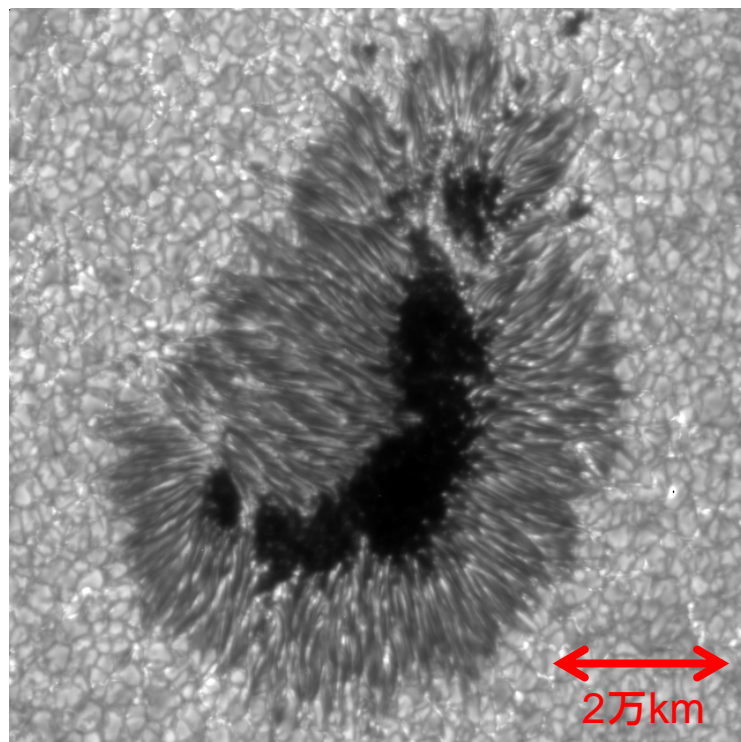
430.5nmを中心とした波長帯で観測



430.5nmを中心とした波長帯で観測

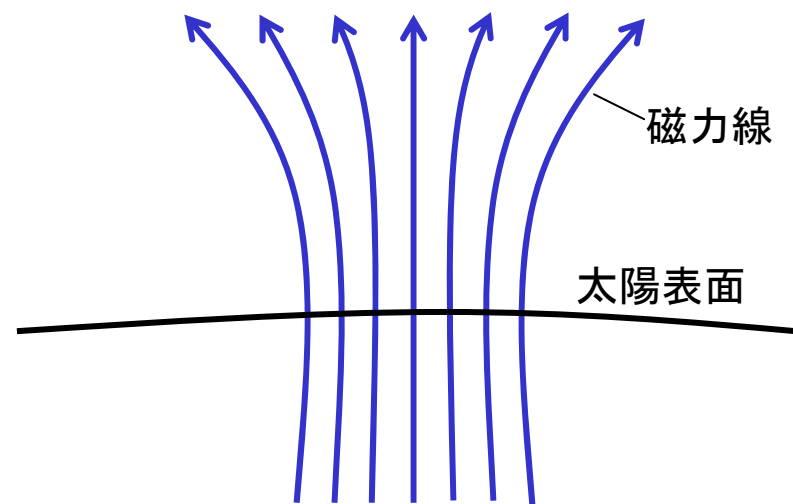
# 黒点の磁場

活動領域:黒点などの磁場  
がたくさん集まった領域



430.5nmを中心とした波長帯で観測

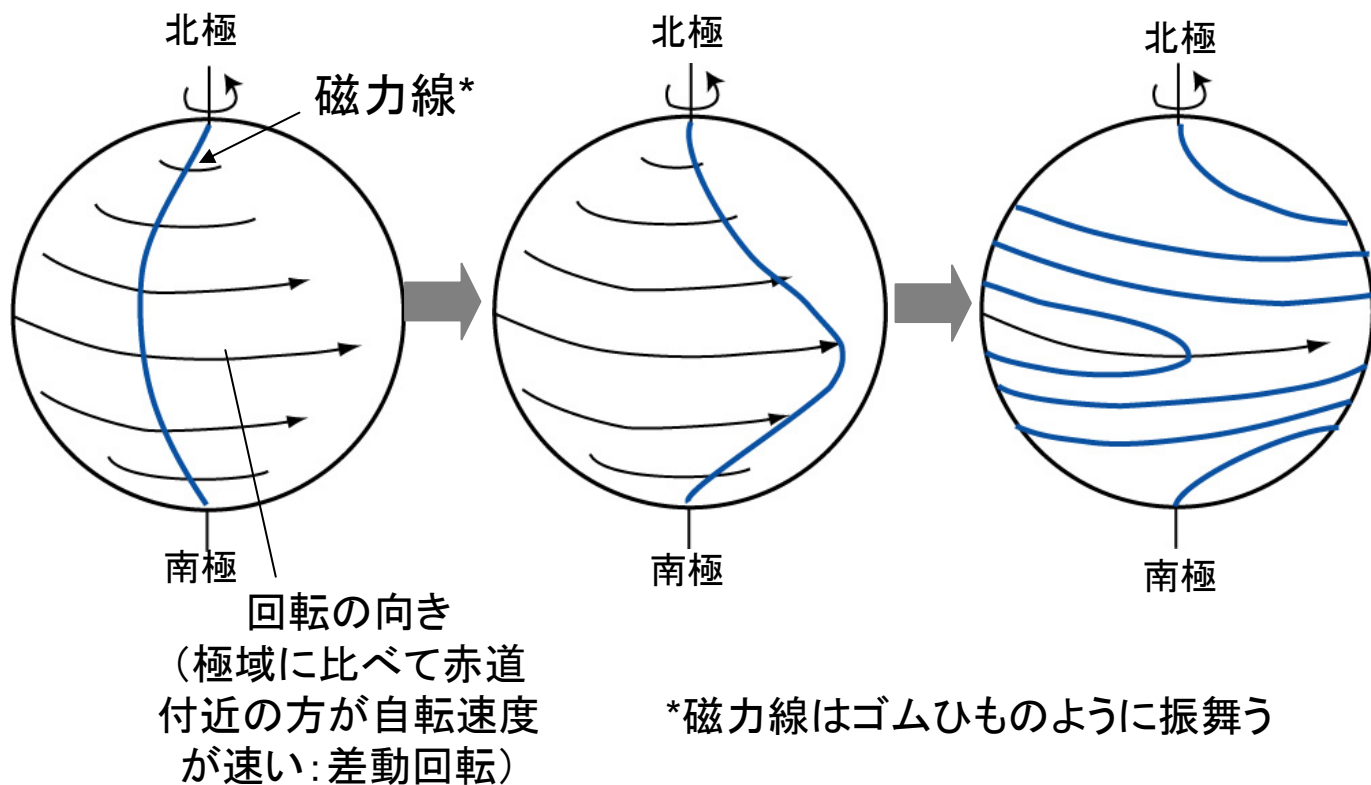
## 黒点磁場の断面図



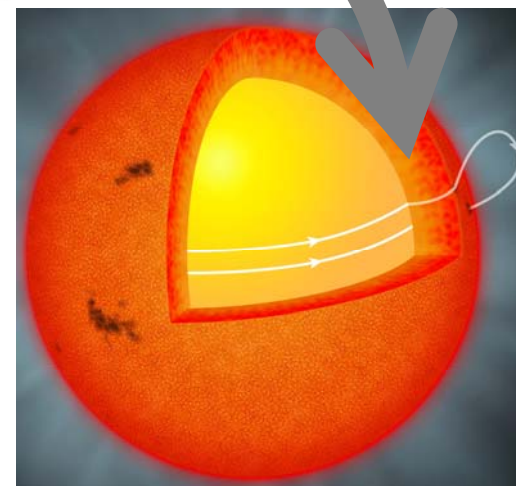
- 黒点をはじめ、磁場は全て太陽表面に対して垂直だと考えられていた

# 黒点磁場を生成する グローバルダイナモ

- 太陽の差動回転により、南北方向の磁場を回転方向に引き伸ばし、増幅させる。

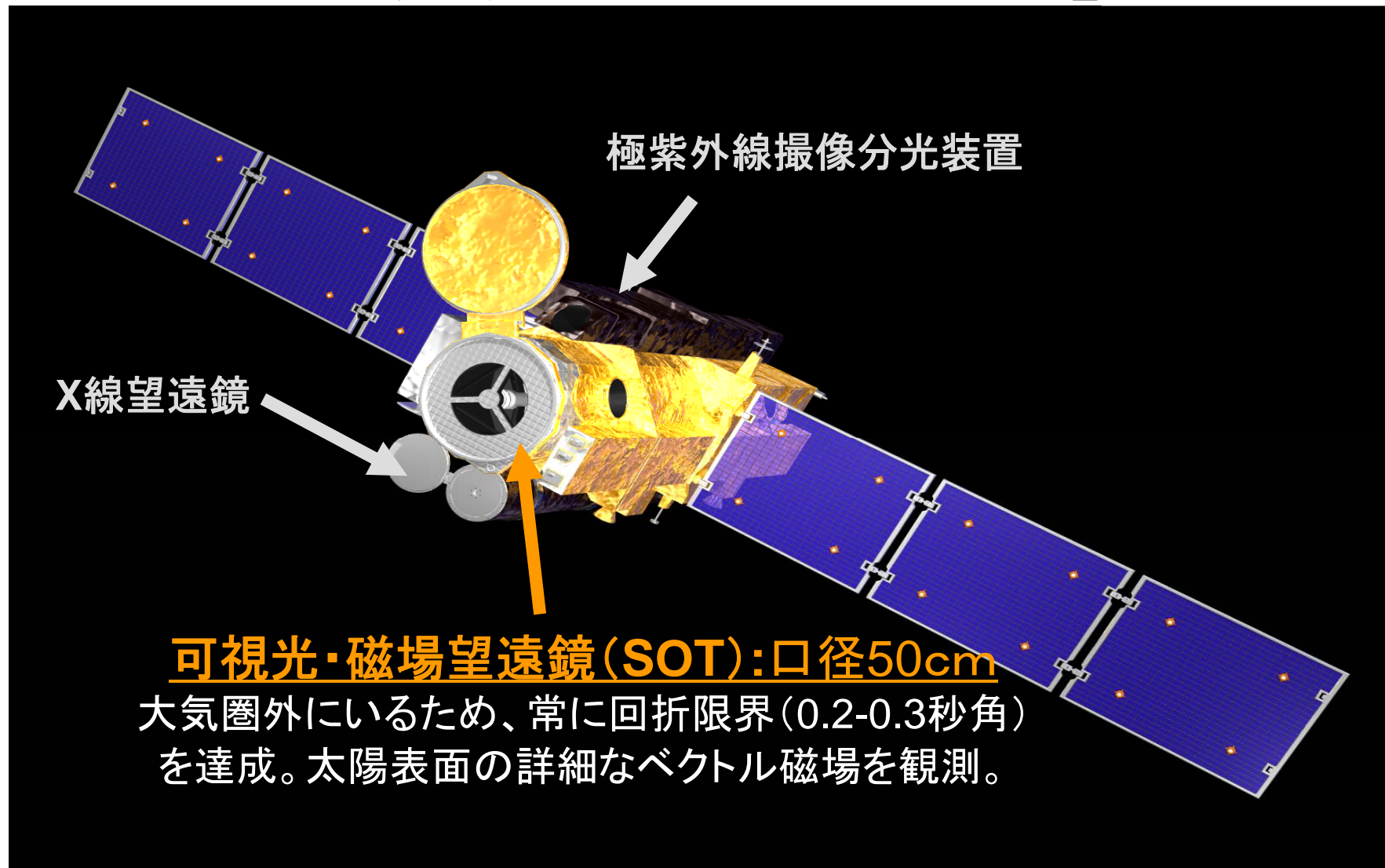


差動回転により、東西方向にリング状になった磁力線の一部が表面に浮かび上がって黒点が形成される





# 新たな磁場生成機構の発見 太陽観測衛星「ひので」



**可視光・磁場望遠鏡(SOT):口径50cm**

大気圏外にいるため、常に回折限界(0.2-0.3秒角)を達成。太陽表面の詳細なベクトル磁場を観測。

# 可視光・磁場望遠鏡の優れた性能

- 宇宙からの観測で大気の影響がないため、磁場測定性能が飛躍的に進歩した

## ー 高解像度

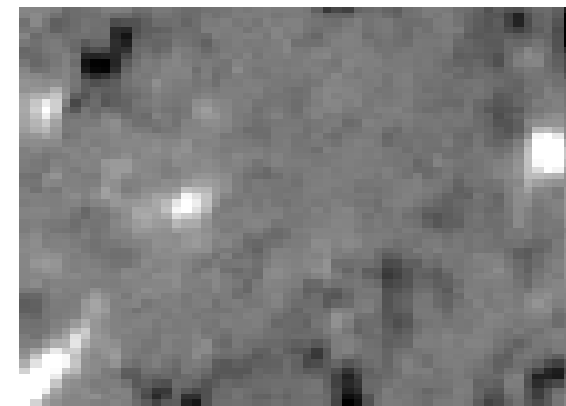
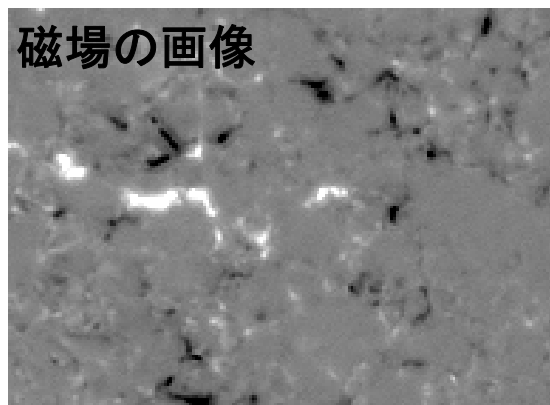
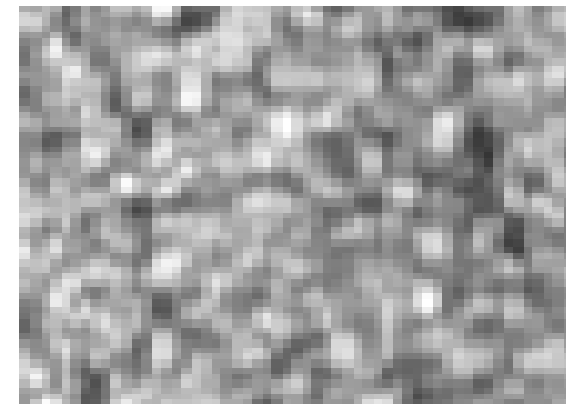
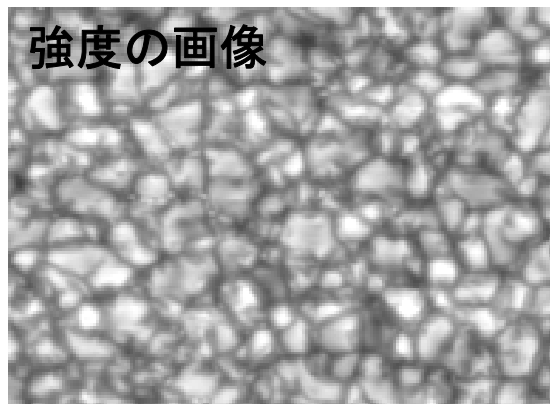
像がぼけず、太陽表面の細かな磁場構造が観測できるようになった

## ー 高感度

弱い磁場の信号まで捉えることができるようになった

## ー 速い時間変化を捉える

常に良質のデータが取れるため、細かな磁場構造の時間変化が追えるようになった

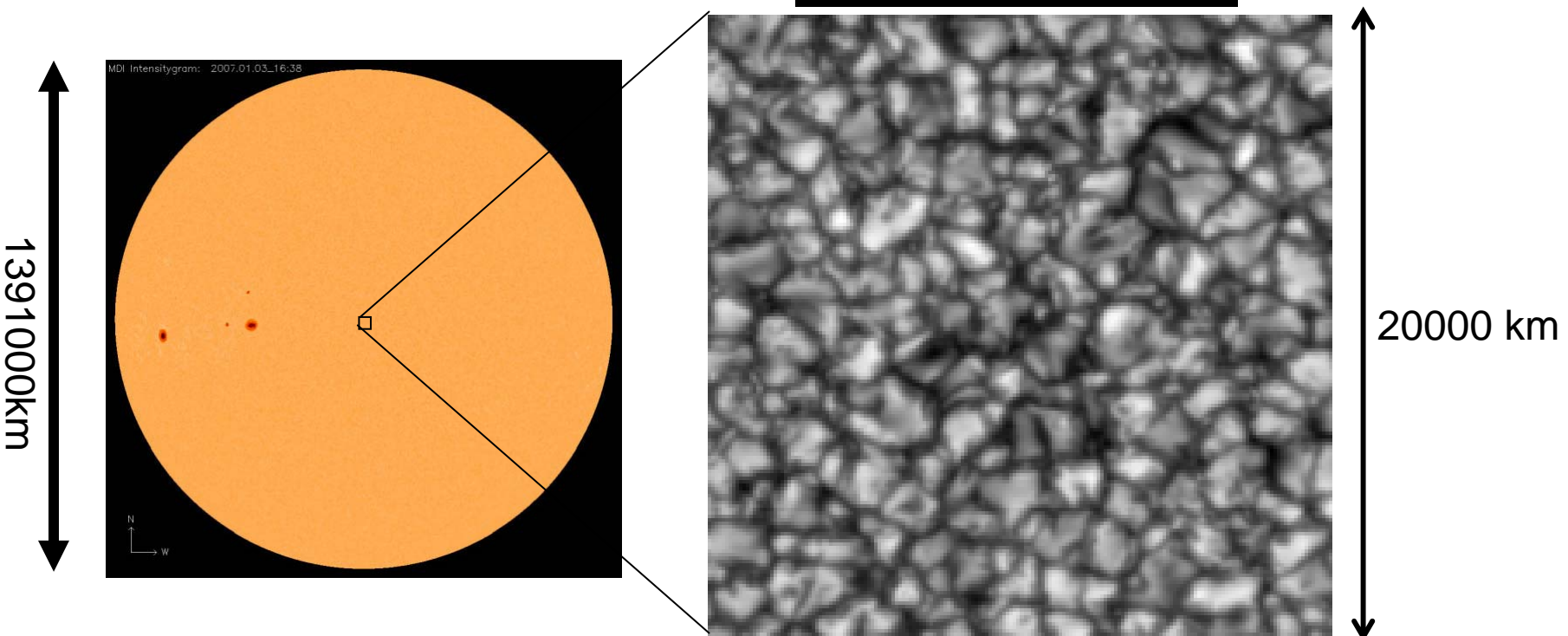


「ひので」

地上観測例  
(米国立太陽天文台)

# 「ひので」による水平磁場の発見 (1/2)

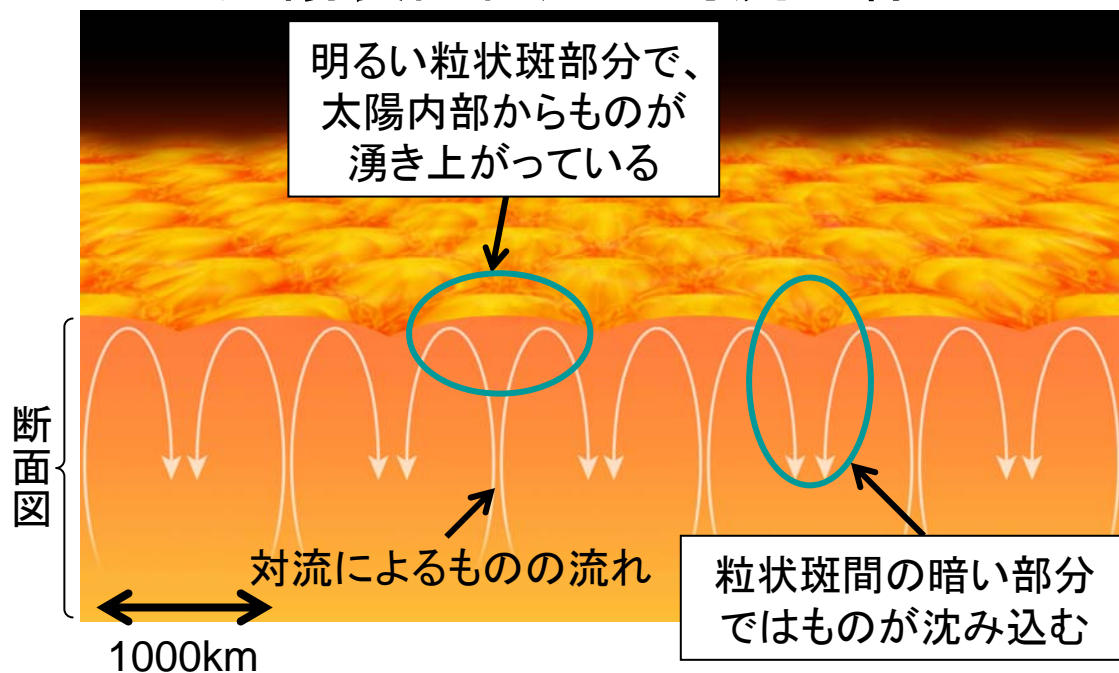
連続光でみた太陽表面



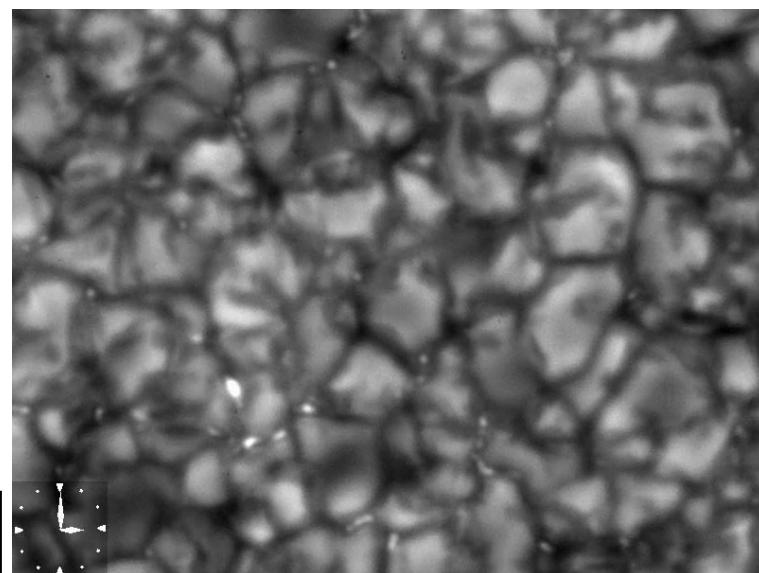
大気の影響がないため、粒状斑と呼ばれる明るいセル状の構造がはっきりと捉えられている。

# 粒状斑の構造

## 太陽表面付近の対流の様子



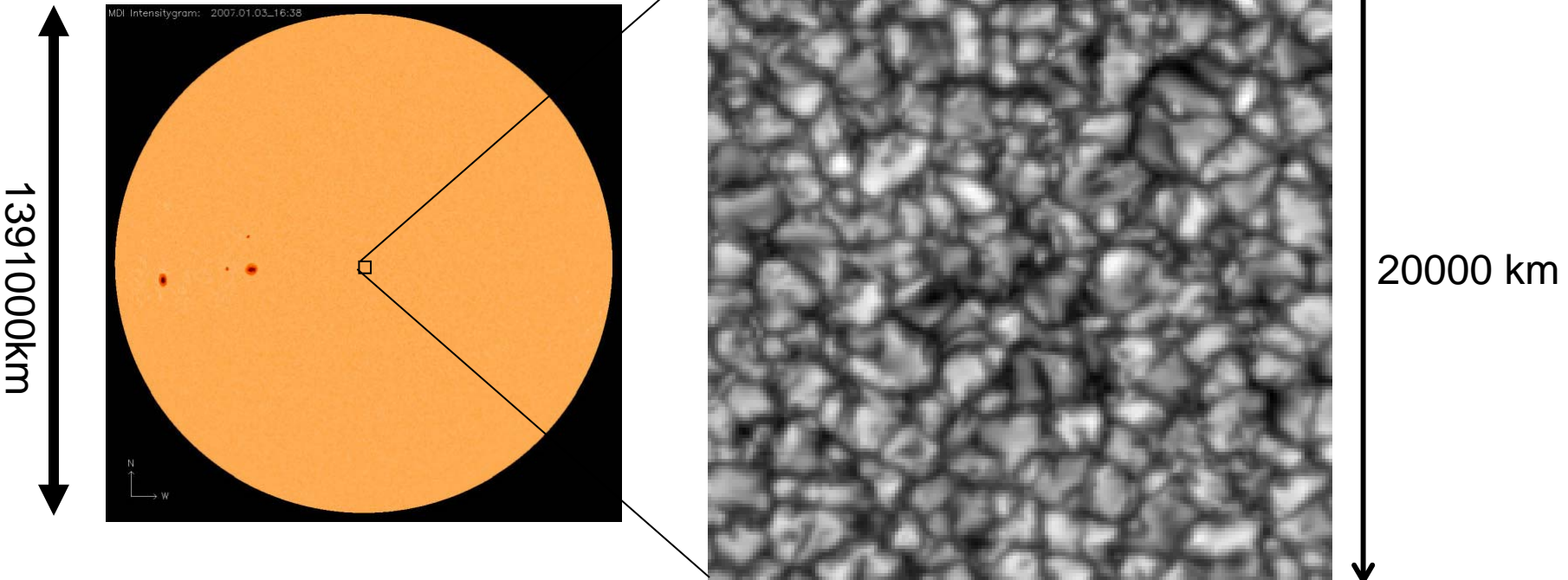
## 「ひので」可視光・磁場望遠鏡でみた太陽表面の様子



可視光で見られる明暗模様は太陽表面で起きている対流運動を表す。明るい部分を「粒状斑」と呼び、ものが太陽内部から湧き上がっている部分に対応している。粒状斑の周囲の暗い部分はものが沈み込んでいる。

# 「ひので」による水平磁場の発見 (1/2)

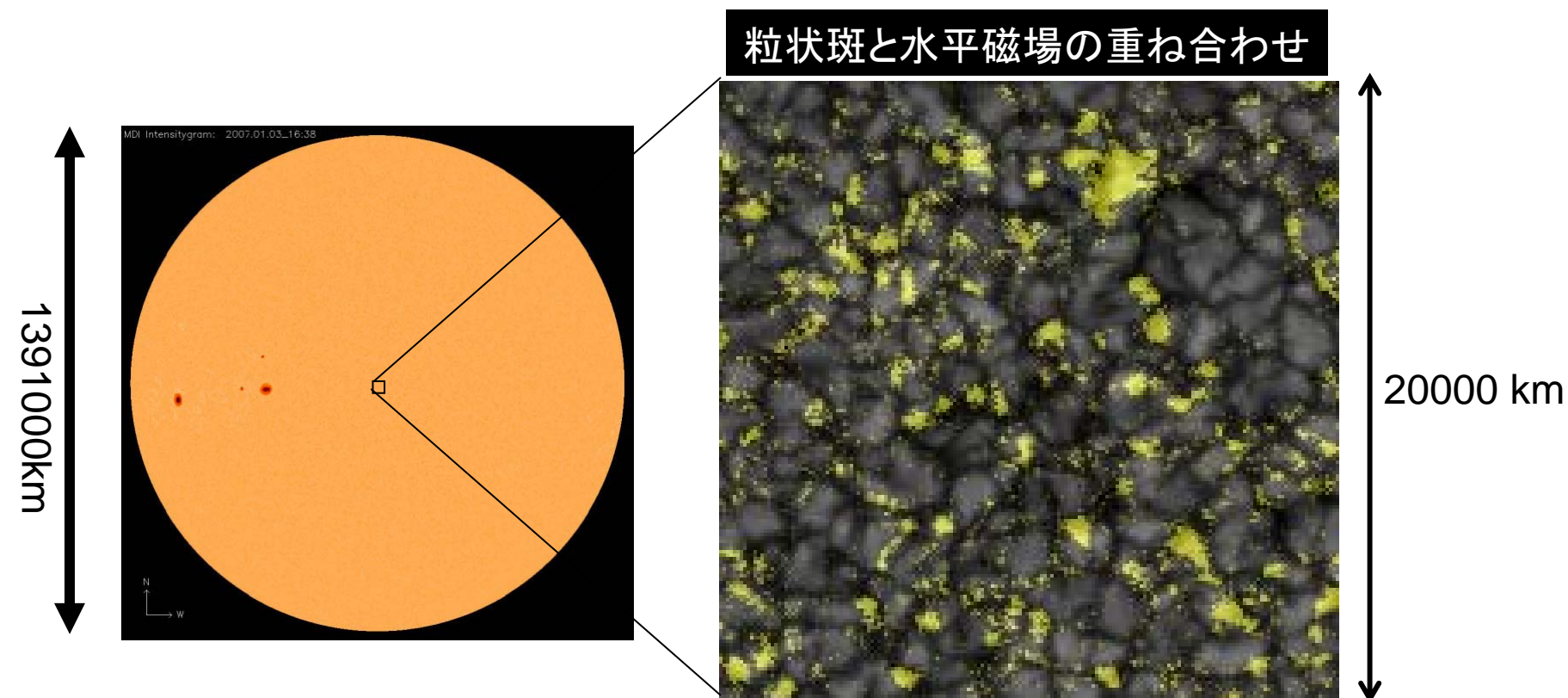
連続光でみた太陽表面



大気の影響がないため、粒状斑と呼ばれる明るいセル状の構造がはっきりと捉えられている。

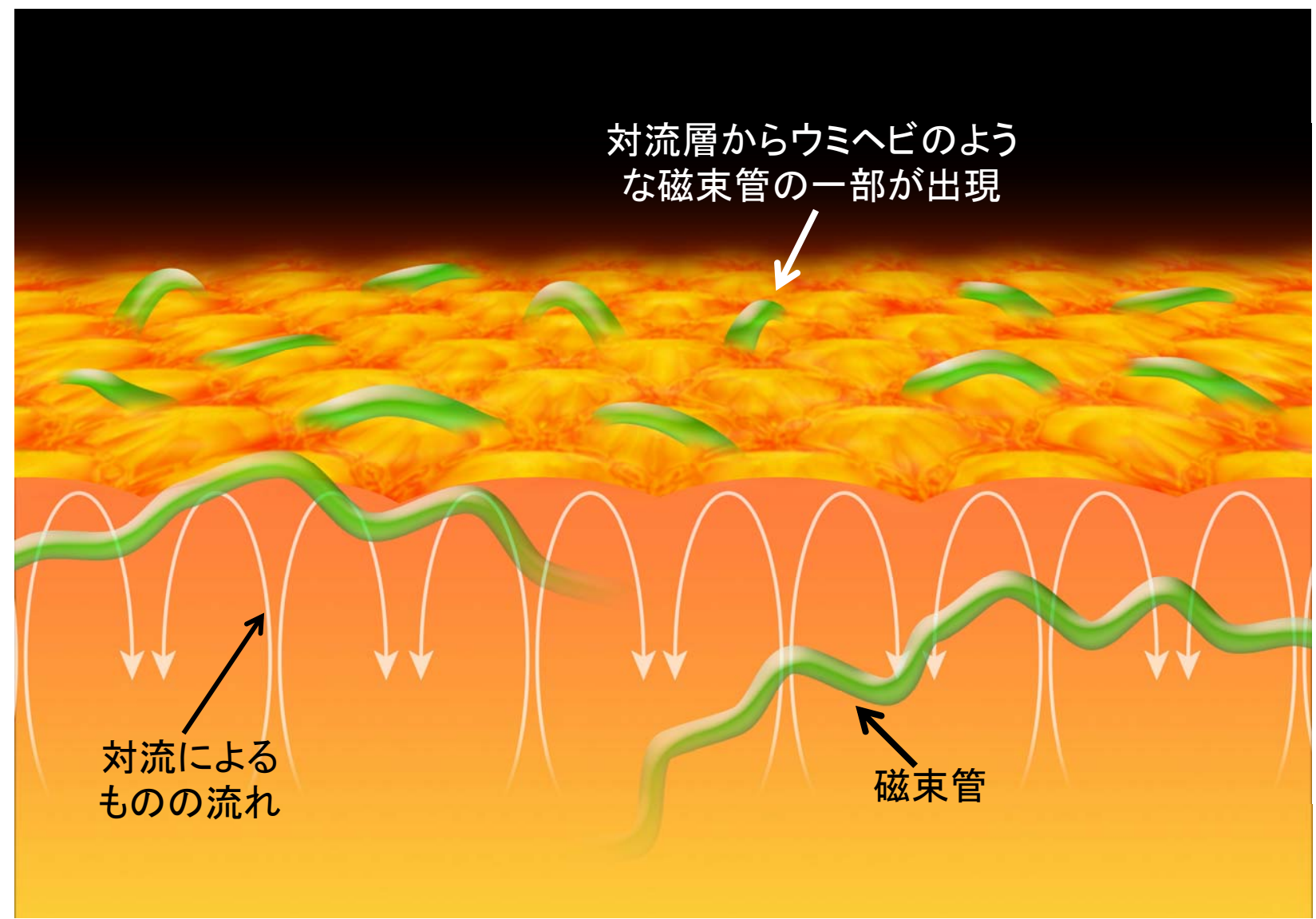
# 「ひので」による水平磁場の発見 (2/2)

可視光望遠鏡でみた、太陽表面に対して水平な磁場の様子。黄色部分が水平磁場の強い領域に対応している。

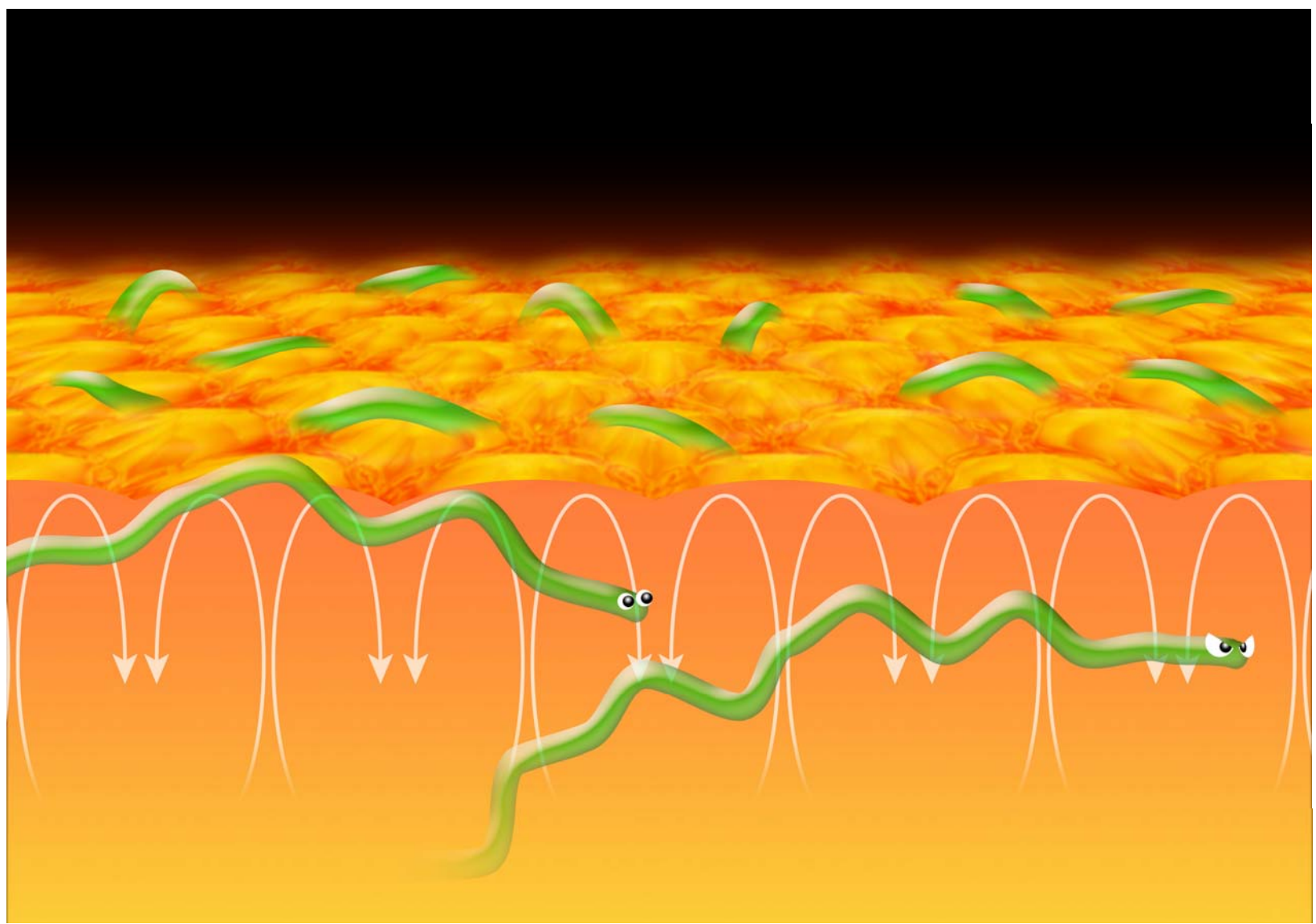


太陽表面に対して**水平な磁場**が太陽表面に点在。  
サイズは**粒状斑より小さい**( $\sim 1000\text{km}$ 以下)。

# 太陽表面と水平磁場の想像図

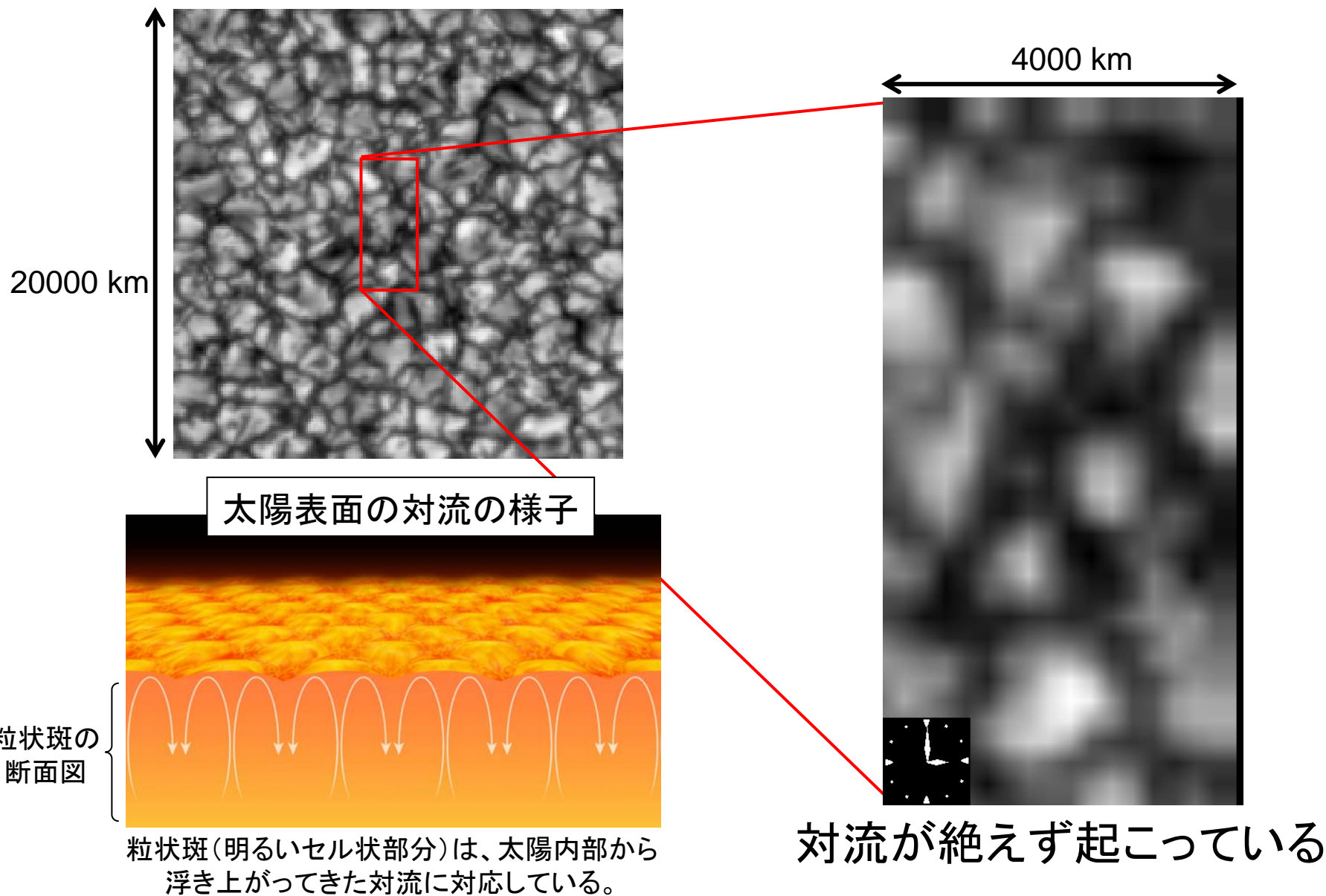


# 太陽表面にウミヘビ発見!?





# 水平磁場の時間変化を追う (1/2)

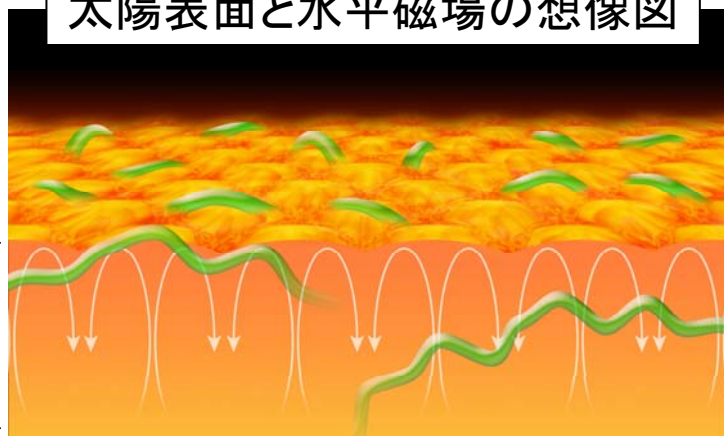


# 水平磁場の時間変化を追う (2/2)

明らかになった水平磁場の性質

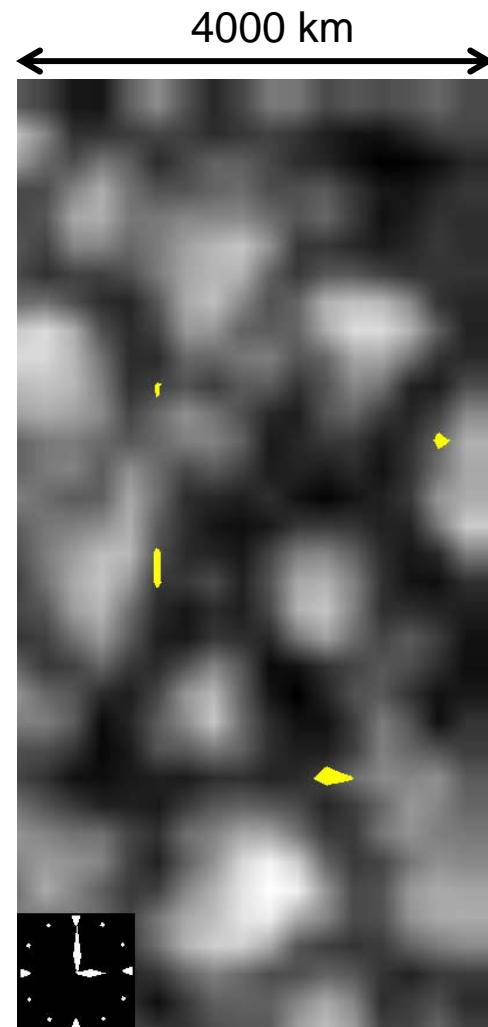
1. 絶えず、出現、消滅を繰り返し、  
発生頻度が非常に高い
2. 大きさが**1000km以下**と非常に小さい
3. 寿命も**平均4分**と短い  
⇒ **短寿命水平磁場**と命名

太陽表面と水平磁場の想像図



粒状斑の  
断面図

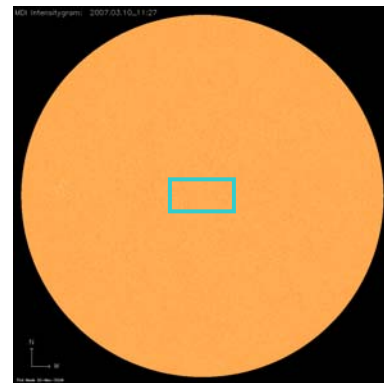
粒状斑(明るいセル状部分)は、太陽内部から浮き上がってきた対流に対応している。



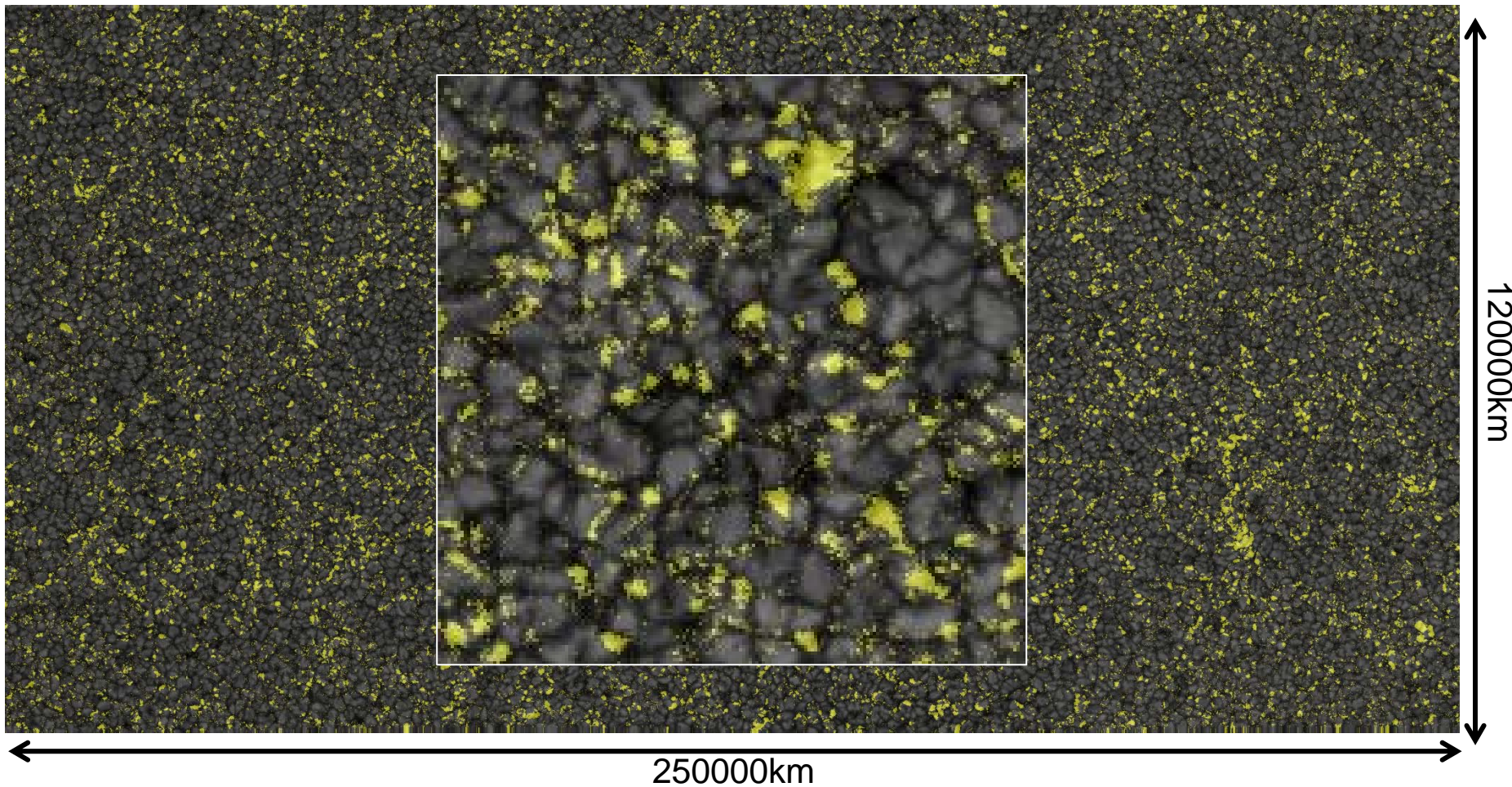
黄色: 水平磁場の強い所(400ガウスくらい)

# ユビキタス短寿命 水平磁場(1/2)

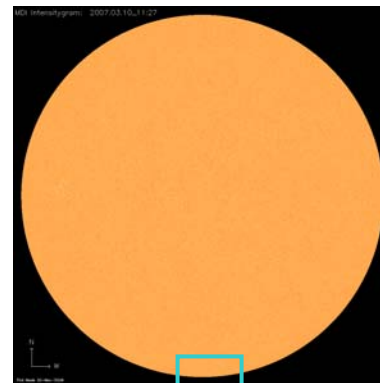
水平磁場が視野全体に分布している。**粒状斑があれば、必ず水平磁場が存在する。**



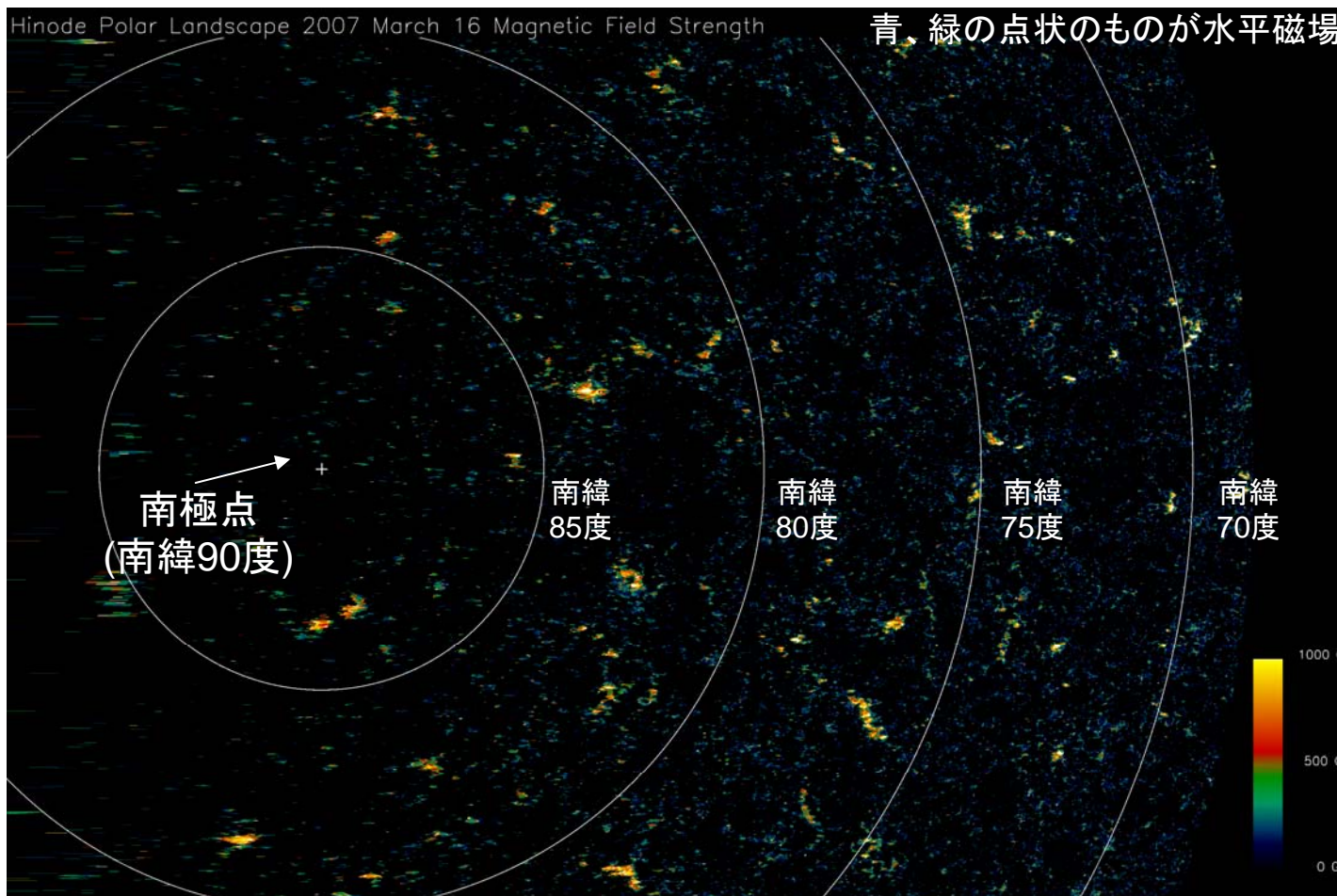
黄色部分が水平磁場の強い領域に対応。



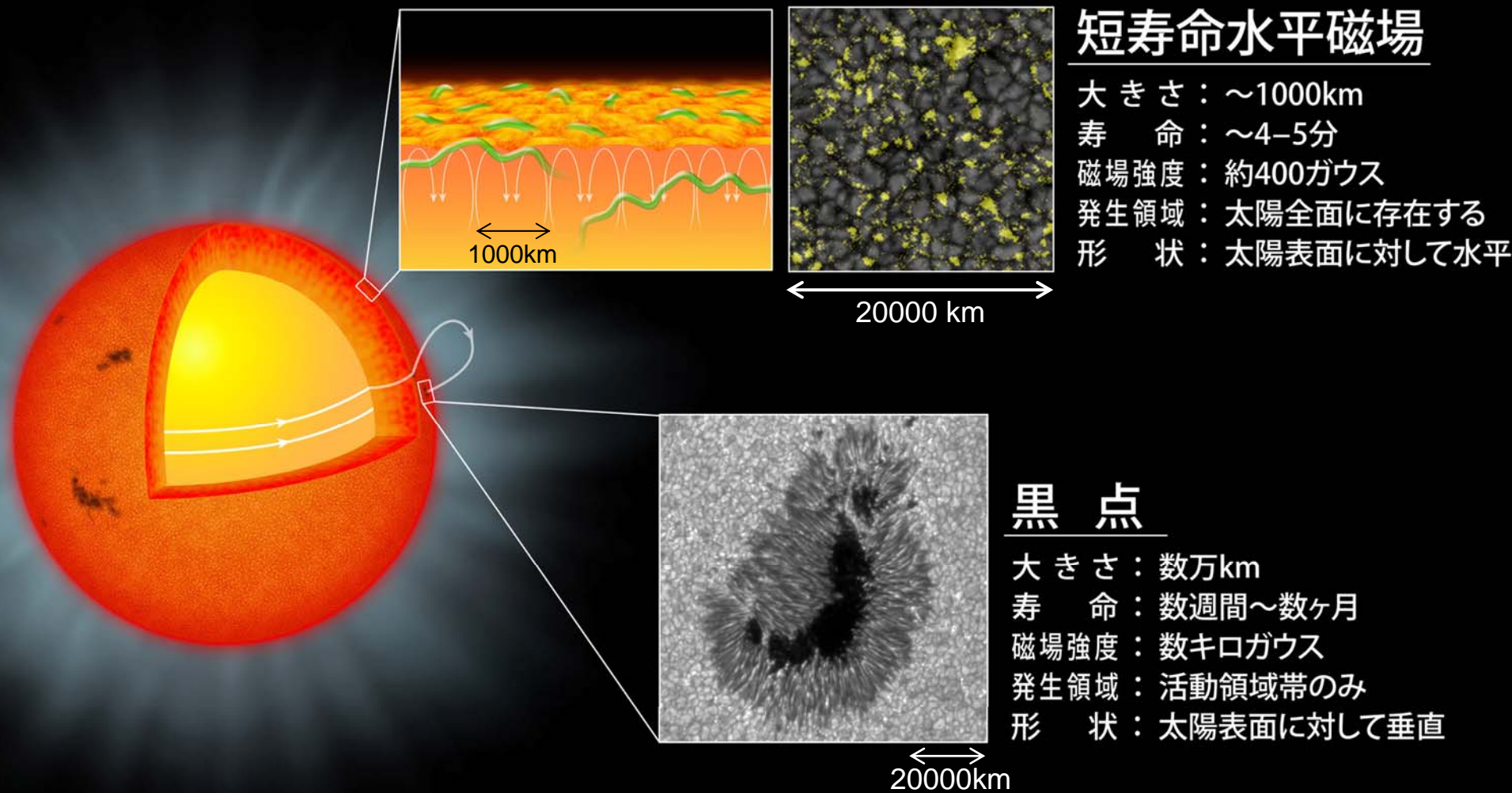
# ユビキタス短寿命 水平磁場 (2/2)



黒点が出現することのない、極域にも  
短寿命水平磁場は存在する

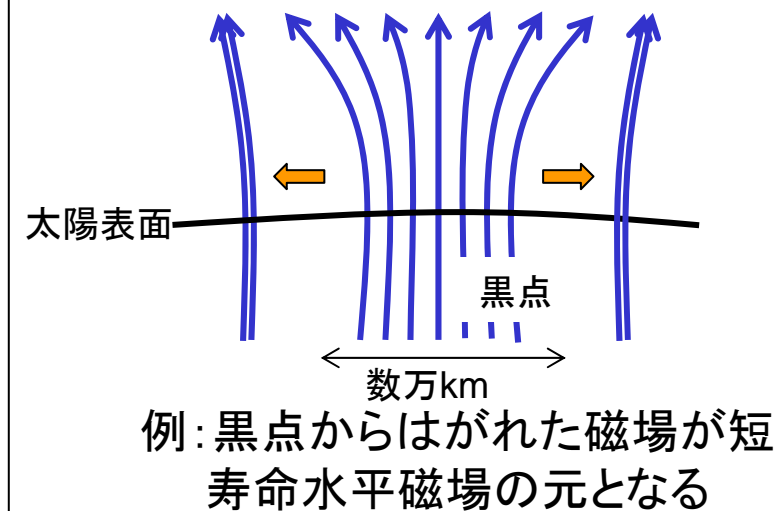


# 黒点と全く異なる短寿命水平磁場の性質



# 短寿命水平磁場の起源を探る

可能性1: 黒点と同じ起源



可能性2: 太陽表面付近の対流による局所的磁場生成機構



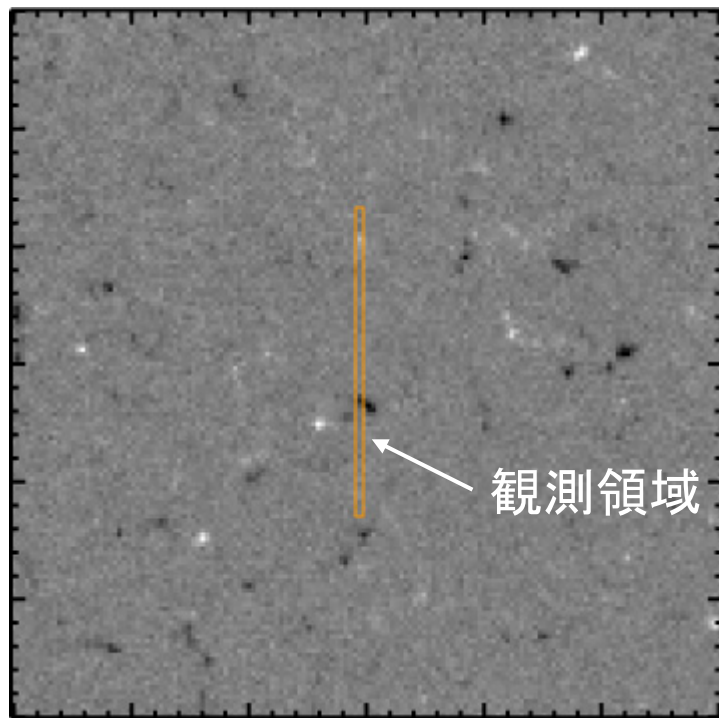
- 活動領域の方が発生頻度が大きければ、
  - 黒点を形成する磁場由来(可能性1)
- 発生頻度が同じならば、
  - 周りの磁場の有無が関係しない可能性2

磁場がたくさん集まった**活動領域**と磁場がまばらにしか存在しない**静穏領域**の水平磁場の性質(特に**発生頻度**)を比較

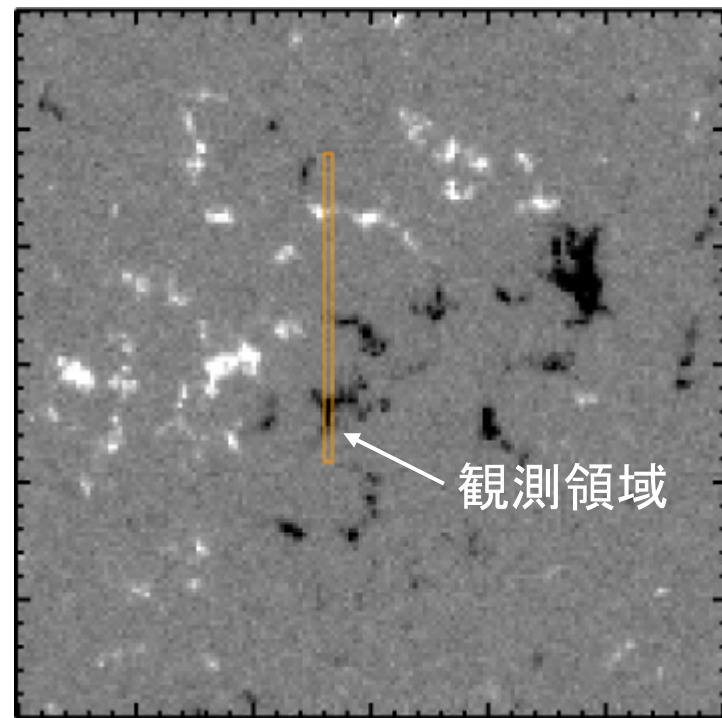
# 「ひので」で観測した2つの領域

## 静穏領域

## 活動領域



黒:S極  
白:N極

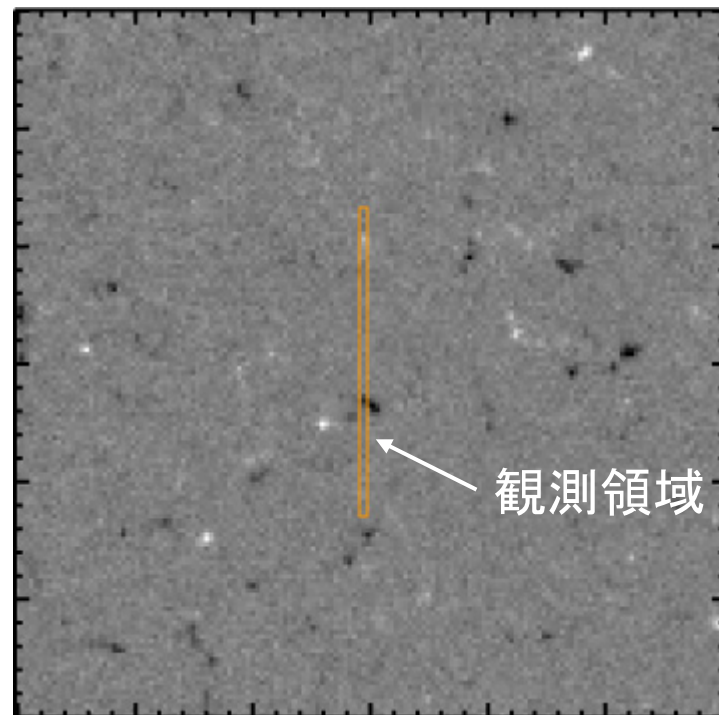


75000km

活動領域には、たくさんの垂直磁場が集中しており、その磁束量は静穏領域の**約8倍**にも達する。

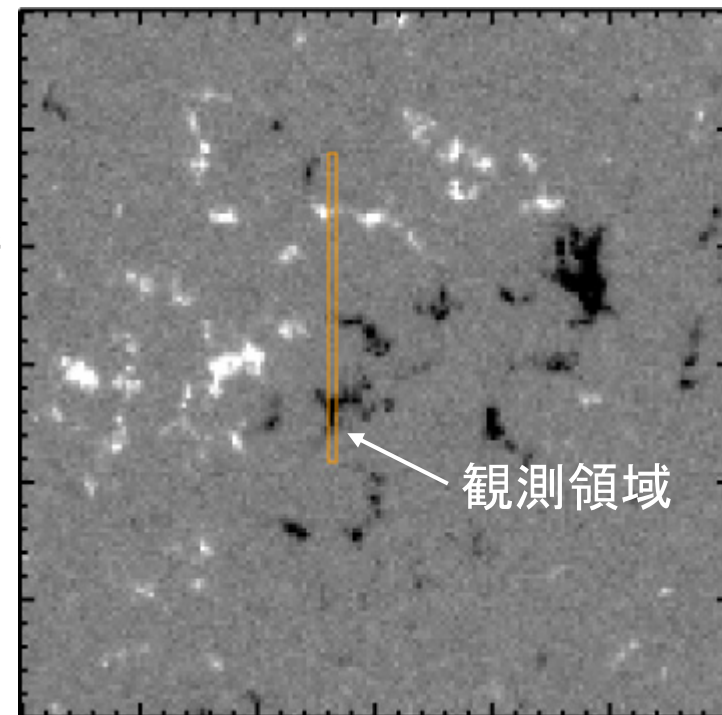
# 比較の結果(1/2)

## 静穏領域



黒:S極  
白:N極

## 活動領域



観測領域

75000km

85分間に95個

(頻度:  $1.1 \times 10^{-4} \text{Mm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

86分間に109個

(頻度:  $1.2 \times 10^{-4} \text{Mm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

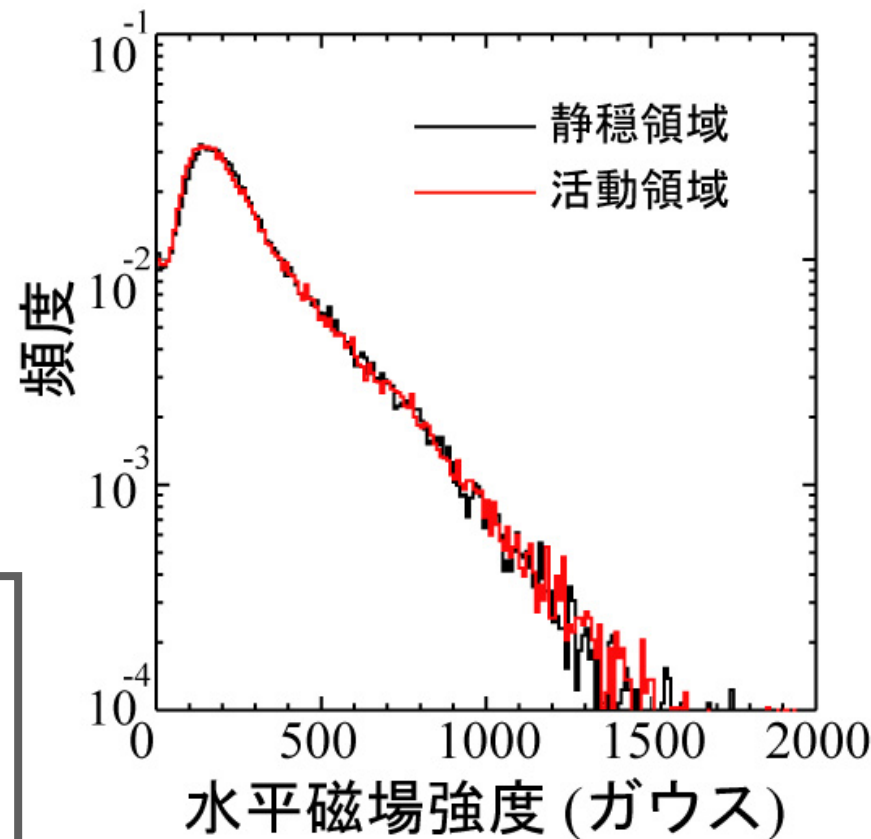
垂直磁束量が8倍あるにも関わらず、  
短寿命水平磁場の発生頻度はほぼ同じ



# 比較の結果(2/2)

## 短寿命水平磁場の磁場強度分布

- 各領域から水平磁場を取り出し、その磁場強度の分布を調べた。
- その結果、静穏領域と活動領域の水平磁場強度分布はぴたりと一致した。

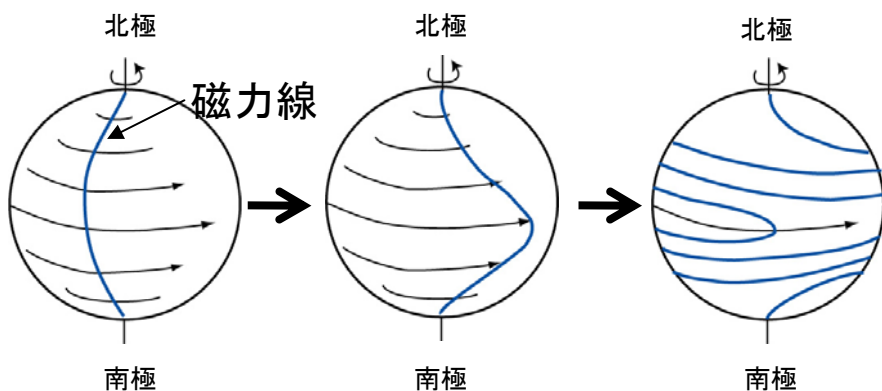


短寿命水平磁場の性質は、  
静穏領域でも活動領域でも  
変わらず**普遍的**である。

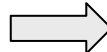
# 黒点と全く異なる短寿命水平磁場の生成機構

## 黒点を形成する磁場の生成機構

- 太陽の差動回転で磁場を増幅する「グローバルダイナモ」



差動回転の  
エネルギー

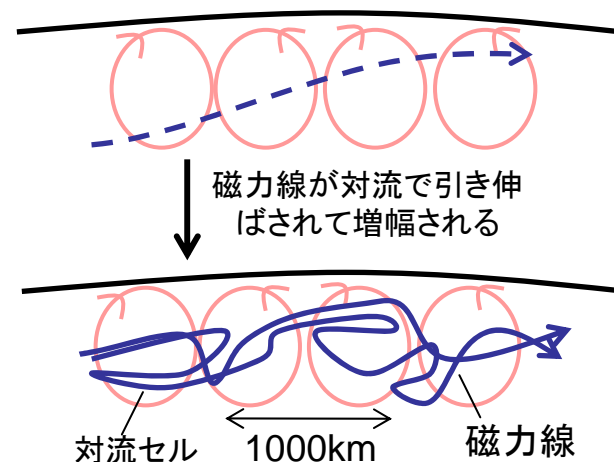


磁場の  
エネルギー

これまで知られていた機構

## 短寿命水平磁場の生成機構

- 粒状斑の対流運動で磁場を増幅する「ローカルダイナモ」



対流の運動  
エネルギー

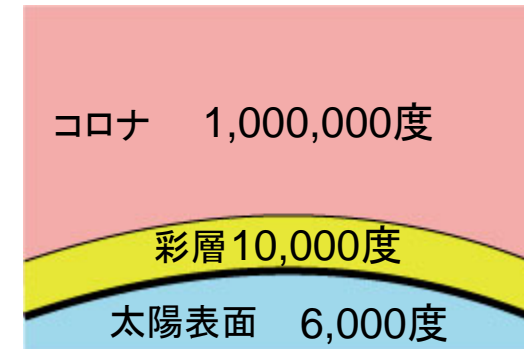


磁場の  
エネルギー

新たに発見された機構

# 短寿命水平磁場の巨大なエネルギー

- 太陽表面は6000度なのに、なぜ、彩層は1万度、コロナは100万度もの高温に加熱されているのか？この問題は、未だ説明されていない。



	静穏領域	活動領域
短寿命水平磁場のエネルギー	$\sim 2 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 5 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
彩層加熱に必要なエネルギー	$\sim 4 \times 10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 2 \times 10^7 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
コロナ加熱に必要なエネルギー	$\sim 3 \times 10^5 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 10^7 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

短寿命水平磁場の持つ磁気エネルギーは、  
彩層やコロナを加熱するのに必要なエネルギーに匹敵する。

# まとめ

- 「ひので」可視光・磁場望遠鏡によって、**短寿命水平磁場が太陽全面**を埋め尽くしていることが発見された。
- 短寿命水平磁場の性質(発生頻度など)は活動領域と静穏領域で差がなく、短寿命水平磁場はどこでも**同じように出現**することがわかった。
- これにより、全く新しい、**太陽表面付近の対流(粒状斑)による磁場増幅機構(ローカルダイナモ機構)**が存在することが明らかとなった。
- 短寿命水平磁場の持つエネルギーは非常に大きく、**彩層・コロナ加熱に必要なエネルギーに匹敵**することがわかった。

# 今後の展望

- 非常に大きな短寿命水平磁場のエネルギーが解放されれば、**彩層・コロナを加熱している可能性**がある。我々は、この短寿命水平磁場に着目し、彩層・コロナ加熱を解明したいと考えている。
- 恒星・原始星・降着円盤・星間分子雲などにも対流が存在する。短寿命水平磁場は、これらの天体の活動現象や進化に影響を及ぼしている可能性がある。

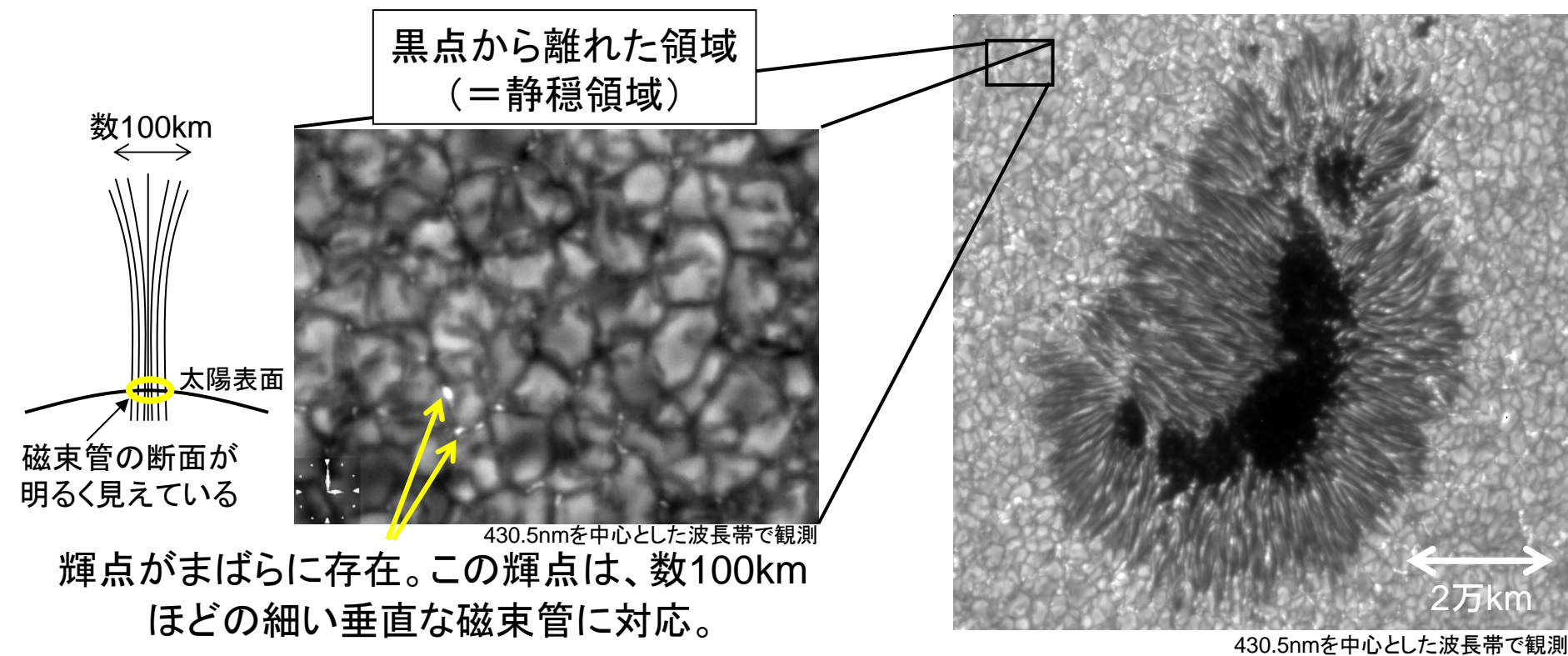
## 参考文献

- Ishikawa, R. and Tsuneta, S.: Comparison of transient horizontal magnetic fields in a plage region and in the quiet Sun, 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 495, 607-612
- Lites, B. W.; Kubo, M.; Socas-Navarro, H.; Berger, T.; Frank, Z.; Shine, R.; Tarbell, T.; Title, A.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Tsuneta, S.; Suematsu, Y.; Shimizu, T.; Nagata, S.: The Horizontal Magnetic Flux of the Quiet-Sun Internetwork as Observed with the Hinode Spectro-Polarimeter, 2008, *ApJ*, 672, 1237-1253
- Lites, B.; Socas-Navarro, H.; Kubo, M.; Berger, T. E.; Frank, Z.; Shine, R. A.; Tarbell, T. D.; Title, A. M.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Tsuneta, S.; Suematsu, Y.; Shimizu, T.; Nagata, S. Hinode Observations of Horizontal Quiet Sun Magnetic Flux and the "Hidden Turbulent Magnetic Flux", 2007, *PASJ*, 59, 571-576
- Orozco Suárez, D.; Bellot Rubio, L. R.; del Toro Iniesta, J. C.; Tsuneta, S.; Lites, B. W.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Nagata, S.; Shimizu, T.; Shine, R. A.; Suematsu, Y.; Tarbell, T. D.; Title, A. M.: Quiet-Sun Internetwork Magnetic Fields from the Inversion of Hinode Measurements, 2007, *ApJ*, 670, L61-L64
- Centeno, R.; Socas-Navarro, H.; Lites, B.; Kubo, M.; Frank, Z.; Shine, R.; Tarbell, T.; Title, A.; Ichimoto, K.; Tsuneta, S.; Katsukawa, Y.; Suematsu, Y.; Shimizu, T.; Nagata, S.: Emergence of Small-Scale Magnetic Loops in the Quiet-Sun Internetwork, 2007, *ApJ*, 666, L137-L140
- Ishikawa, R.; Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Isobe, H.; Katsukawa, Y.; Lites, B. W.; Nagata, S.; Shimizu, T.; Shine, R. A.; Suematsu, Y.; Tarbell, T. D.; Title, A. M.: Transient horizontal magnetic fields in solar plage regions, 2008, *A&A*, 481, L25-L28
- Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Lites, B. W.; Matsuzaki, K.; Nagata, S.; Orozco Suárez, D.; Shimizu, T.; Shimojo, M.; Shine, R. A.; Suematsu, Y.; Suzuki, T. K.; Tarbell, T. D.; Title, A. M.: The Magnetic Landscape of the Sun's Polar Region, 2008, *ApJ*, 688, 1374-1381

# 補足資料

# 「ひので」打ち上げ前の太陽磁場の概念

- 全て太陽表面に対して垂直だと考えられていた

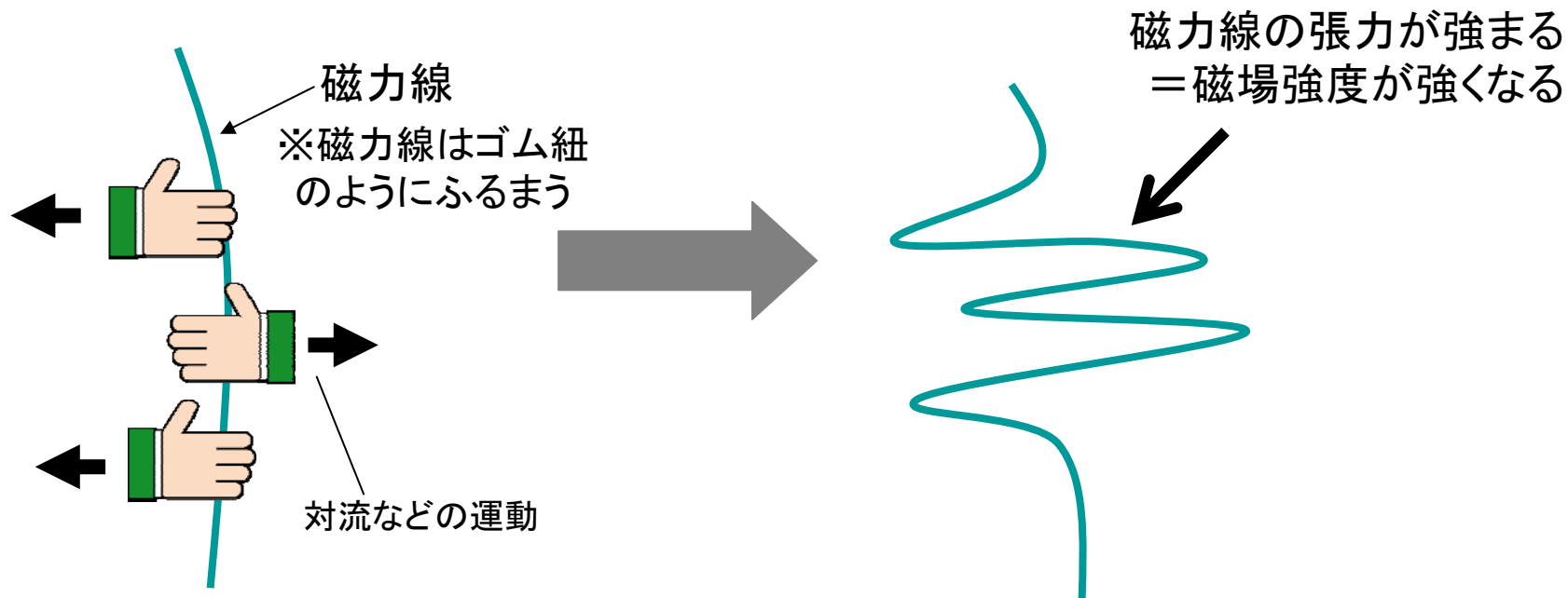


細い磁束管の断面は輝点として、太い磁束管の断面は黒点として見える。  
大ききの差こそあれ、どちらも太陽表面に対して垂直。

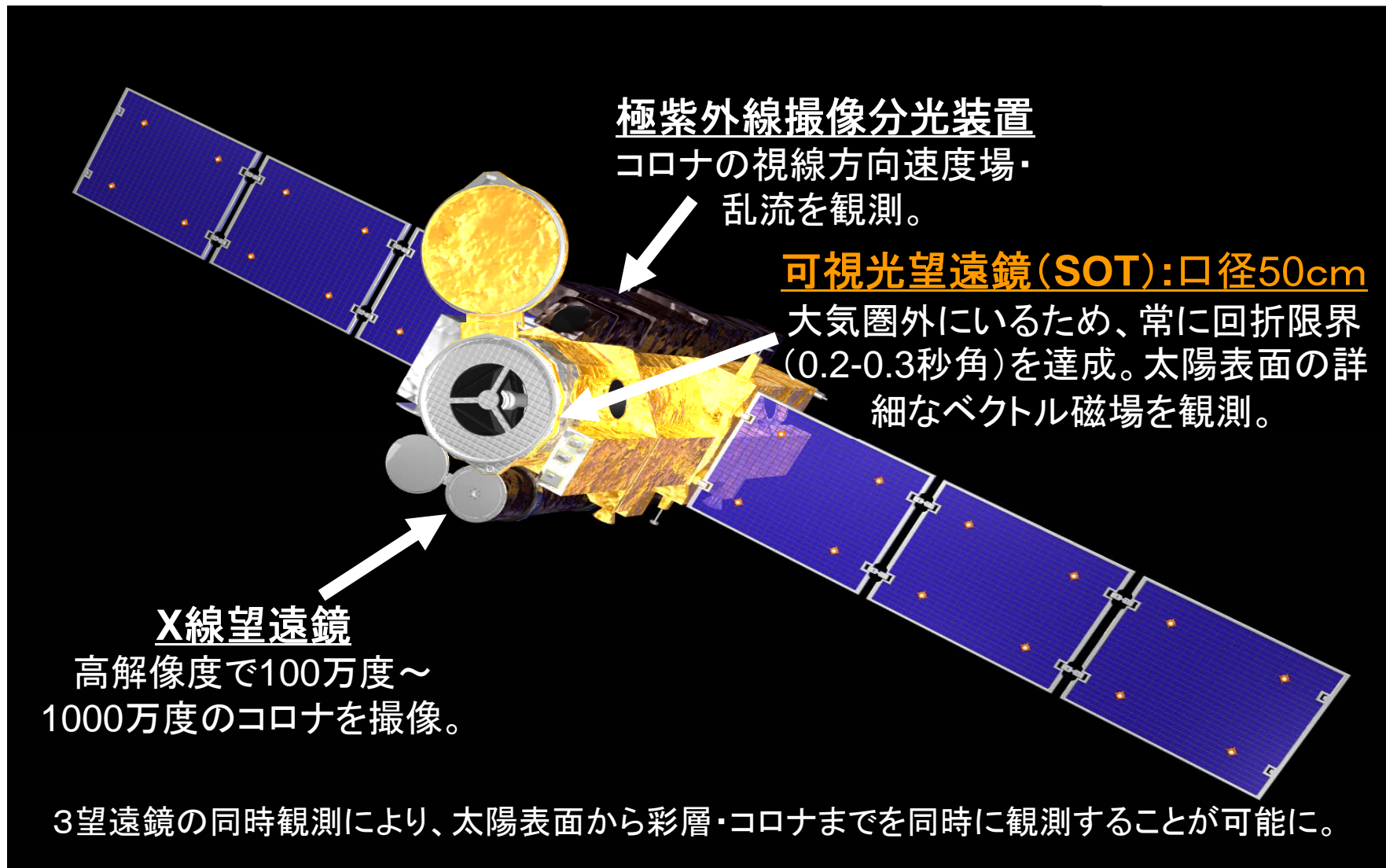


# 磁場を生成する ダイナモ機構

- 自転や対流などの運動が磁力線を引き伸ばして磁場を増幅する。言い換えると、自転や対流の運動エネルギーを磁場のエネルギーに変換している。

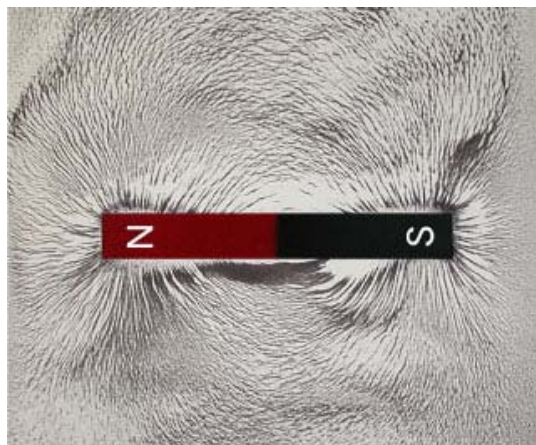


# 太陽観測衛星「ひので」

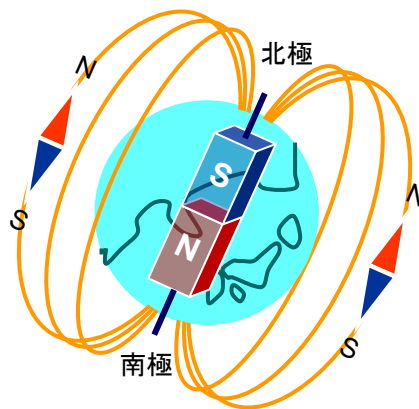


# 磁場の単位(ガウス)

- “ガウス”は磁場を表す単位である。1ガウスは $10^{-4}$ テスラ。

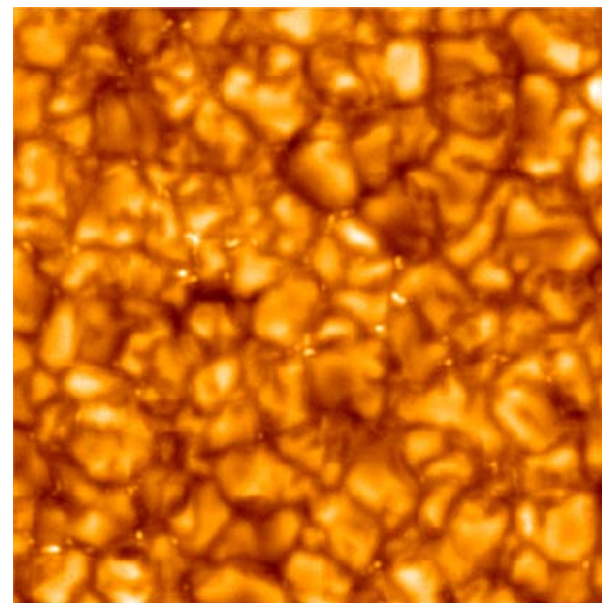
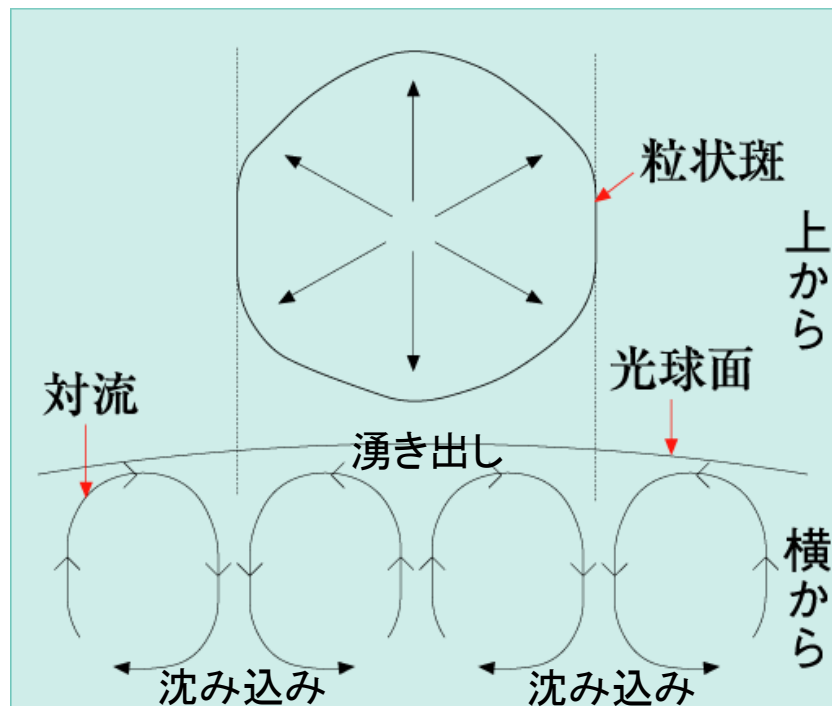


棒磁石: 2500ガウス  
エレキバン: 800ガウス



地球にも磁石がある。  
磁場強度は日本で0.5ガウス。

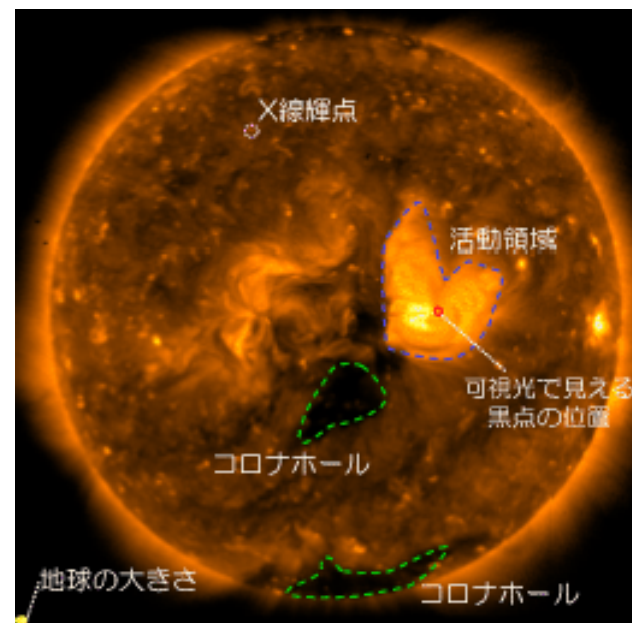
# 粒状斑(対流)



可視光線で見られる明暗模様は太陽表面で起きている対流運動を表し、「粒状斑」と呼ばれる。明るい部分は湧き出し、その周囲の暗い部分は沈み込みになっていることが知られている。

# 静穏領域と活動領域

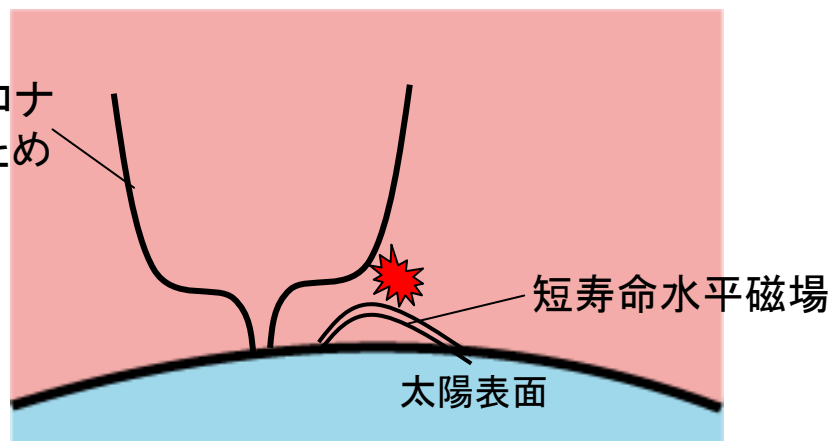
- 活動領域  
たくさんの磁場が存在する場所で、コロナを見ると、非常に明るく、活動的であることがわかる。
- 静穏領域  
磁場がまばらにしか存在しない場所。



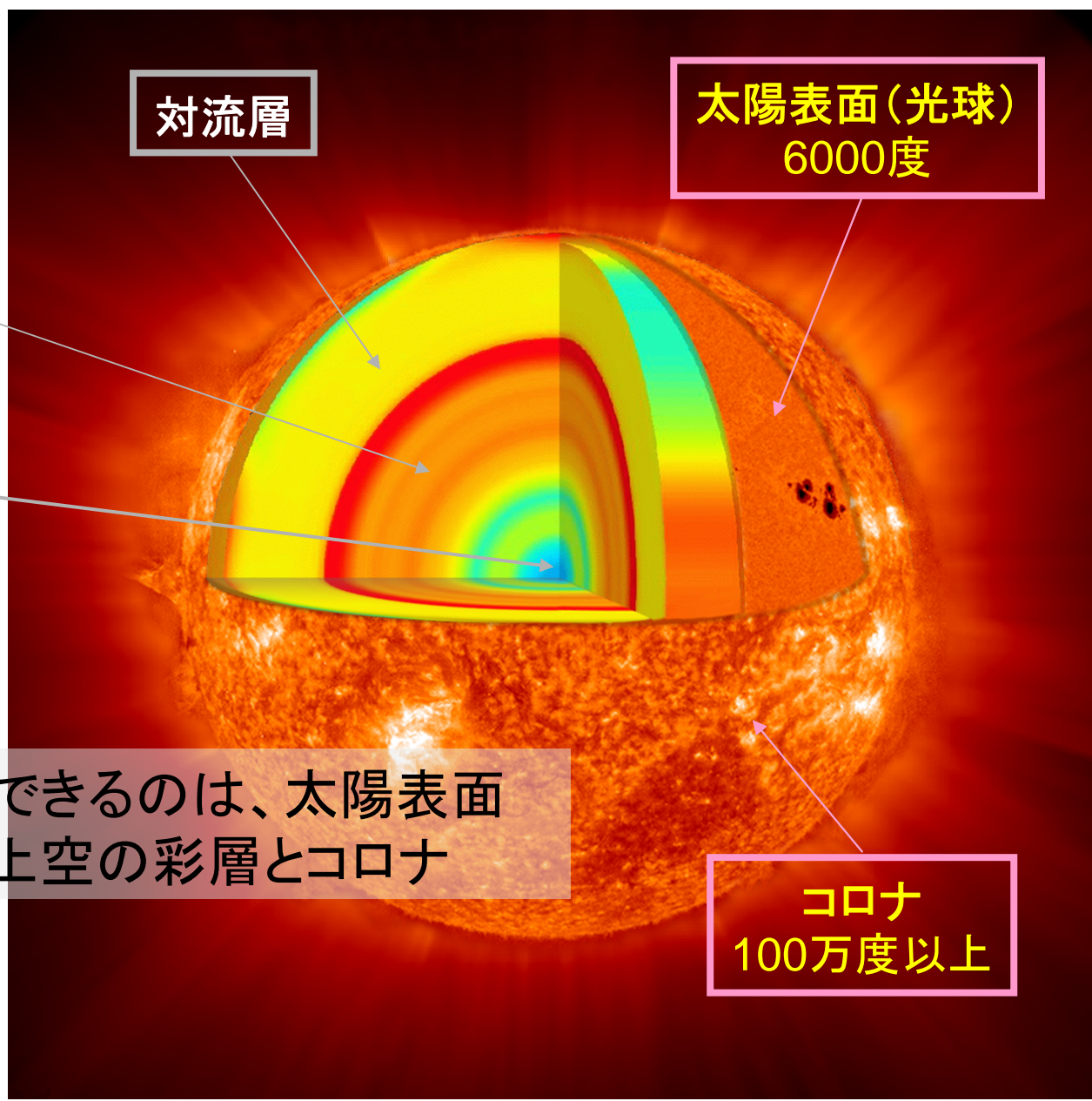
# 短寿命水平磁場の彩層・コロナ加熱の可能性

- 非常に大きな短寿命水平磁場のエネルギーにより、彩層・コロナを加熱している可能性がある。
  - 既存の垂直磁場と短寿命水平磁場がぶつかり、小さな爆発を起こす

既存の垂直磁場。彩層・コロナでは大気の圧力が下がるため磁束管は膨張する。



# 太陽の基本構造



対流層

太陽表面(光球)  
6000度

放射層

中心核  
核融合反応  
1500万度

私たちが観測できるのは、太陽表面(光球)とその上空の彩層とコロナ

コロナ  
100万度以上