

<研究ノート>

SDO/HMI の連続光画像による粒状斑の面積分布と 長期変動の研究

パンタ ボーラ*・政田 洋平**

A study on area distribution and long-term variation of solar granules,
using SDO/HMI images

Bhola PANTA* and Youhei MASADA**

抄 録

太陽表面の熱対流構造である粒状斑について様々な研究されているが、長期的な進化に関する研究は少ない。地上観測では均質なデータが得られにくく、これが研究の進展を妨げてきた。最近では、Ballot et al. [1] が SDO/HMI の連続光データを使って、太陽活動サイクルをカバーする長期間の粒状斑面積の変化を調査している。本研究では先行研究を参考に、オープンソースの画像処理ライブラリ (OpenCV) を用いて、2011 年～2022 年の 12 年間、4386 件の SDO/HMI の連続光画像データを解析し粒状斑の性質が太陽活動サイクルにわたってどのように変化するかを調べた。先行研究と異なる点は、粒状斑の抽出に、実装が容易な画像処理技術を使った点、Ballot らが視野内の粒状斑の個数や平均面積に注目したのに対し、本研究では粒状斑面積の頻度分布を特徴づける“べき指数”の変化に着目した。研究の結果、太陽活動サイクルと粒状斑面積のべき指数の間に相関があることを見出した。

キーワード：粒状斑、熱対流構造、太陽プラズマ、画像処理、OpenCV、SDO/HMI

1. はじめに

天体の中で太陽は表面の熱対流構造 (粒状斑) を空間・時間分解して観測できる唯一の恒星である (図1)。太陽表面 (光球) に見られる対流によって生じた小さな斑点状の構造であり、太陽の表面で熱が伝わる際に、熱いガスが下層から浮かび上がり、冷えて再び沈む対流現

象が起こり、その流れの一部が粒状斑となる。

粒状斑は細かい斑点状で、中央が明るく周囲が暗いのが特徴であり、平均的な大きさは直径1000～1500kmほどで、ひとつの粒が持つ寿命は約10～20分程度と言われている。

粒状斑は、太陽の表層で発生する熱対流の影響で、内部からのエネルギーが外側へ運ばれる過程で現れる。対流が起こると、熱いプラ

* 日本国際学園大学 経営情報学部、Japan International University

** 福岡大学、Fukuoka University

ズマが下層から上昇してきて冷えると暗くなり、周囲に押し出されて下降していくというサイクルの繰り返しになる。粒状斑は地上からの高解像度観測でも見える構造であるが、近年は宇宙望遠鏡などを用いてその変化や密度の違いがより詳細に調査されている。

粒状斑の研究は、太陽内部の対流層や太陽活動のメカニズム解明に役立つ。たとえば、太陽黒点の形成や磁場構造の変化が、粒状斑の分布や面積にどのように影響するかを研究することで、太陽フレアやコロナ質量放出といった現象の予測や理解が進んでいる。

この報告では、NASAのSDO (Solar Dynamics Observatory) 衛星のHMI (Helioseismic and Magnetic Imager) 装置で観測された連続光画像による粒状斑の面積分布とその長期変動の研究の初期段階の結果を報告する。

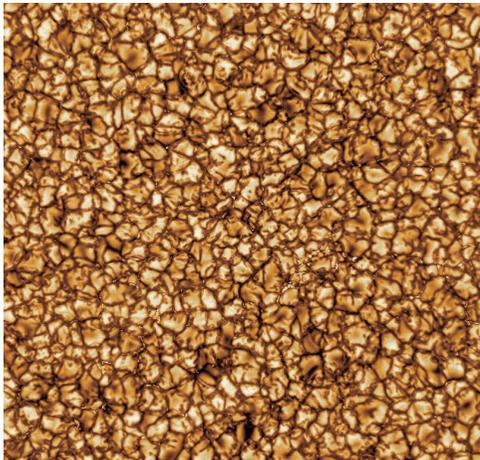


図1 ダニエル・K・イノウエ太陽望遠鏡 (DKIST) が撮影した太陽表面の高解像度画像 (Wikipedia)

2. 先行研究

粒状斑の基本的な性質については Nordlund et al. [2] 及び Lagg et al. [3] がよく調べている。しかし、長期間 (太陽サイクルの期間) にわたる粒状斑の性質の変動についての研究は

いまま限定的である (Roudier & Reardon [4] と Muller et al [5])。その理由は、大気の影響 (シーイング)、天候の制約、時間的な制約で地上観測の時代には均質なデータセットを用意するのが難しかったからである。

Lefebvre et al. [6] は GOLF (Global Oscillation at Low Frequencies) のデータを使用して粒状斑の長期進化について研究したが、太陽サイクルに付随した粒状斑の変化は発見できなかった。Muller et al. [5] は Hinode のデータを使用し粒状斑のスケール (スペクトルの平均的な波数の逆数) が、太陽活動の極大と極小で3%以上変化していることを見出したが、周期性については言及していない。

Ballot et al.[1] は SDO/HMI の連続光画像データを使用し、太陽活動サイクルをカバーする長期間にわたり粒状斑の変化を調査した。その結果、(1) 粒状斑の密度 (視野面積で割った個数) は極大期に最大になる一方、粒状斑の平均面積は極大期で最小になること、(2) 極大期と極小期の粒状斑の密度や平均面積の変化幅は約2%程度であること、(3) 平均密度が最大になる時期は黒点数が最大になる時期より1年ほど遅れること、などを見出した。

3. データ解析手法

本研究では、Ballot の研究を参考に、SDO/HMI のデータから粒状斑の性質が太陽サイクルでどのように変化するかを調べた。

先行研究と本研究の違いは以下に示す。

(1) 粒状斑検出方法の違い

Ballot らは「凹凸検出」と呼ばれる輪郭抽出アルゴリズムを使用している。それに対し、本研究では Python/OpenCV ライブラリの contour (輪郭) メソッドを採用した。

(2) 着目する物理量

Ballot らは視野内の粒状斑の個数や平均面積に着目している。それに対し、本研究では機

機械的に抽出した粒状斑面積（直径）のヒストグラムの傾きに着目した（図2）。

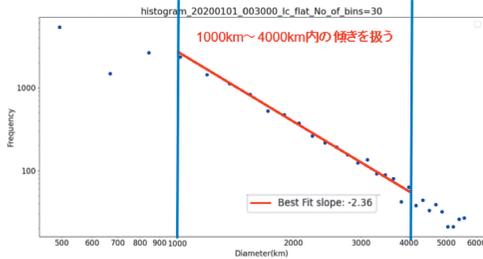


図2 本研究で着目する物理量は粒状斑の直径（X-軸）と度数（Y-軸）のヒストグラムの傾き

4. 画像処理

本研究では画像処理業界のユーザー数が多い OpenCV (Open Source Computer Vision) ライブラリを使用した。OpenCV はインテルが開発・公開したオープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリである。以下、本研究の画像処理の流れを記述する。

4.1 適切サイズに加工

まず、SDO のホームページ (<http://jsoc.stanford.edu/data/hmi/images>) から連続光画像データをダウンロードする。次に、この画像のサイズが4096x4096であるので処理しやすいサイズに加工する。投影効果を制限するため、画像の中心部の1024x1024の領域を切り取る（図3）。

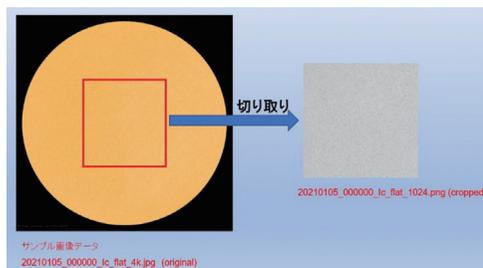


図3 太陽全体画像（4096x4096ピクセル）から中心領域（1024x1024ピクセル）を切り取ることで投影効果を抑える

4.2 逆畳み込み手法によるシャープネスの向上

逆畳み込み（デコンボリューション）は、画像処理において、撮影システムや撮影環境により発生したぼやけを取り除くために使用される手法である。デコンボリューションはレンズのぼやけ特性（ポイントスプレッド関数、PSF）を推定して逆算することで、歪みを補正する。今回はカーネル長=5、 $\sigma=3$ (σ^2 は分散) を指定し、2次元のガウシアンカーネルの PSF を用意した（図4）。

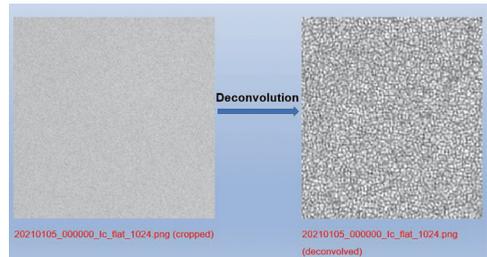


図4 デコンボリューション処理。処理後、シャープネスの向上が確認できる

4.3 二値化 (thresholding)

OpenCV では、輪廓を見つけることは、黒い背景から白い物体を見つけるようなものである。よって、見つけるべきオブジェクトは白で、背景は黒でなければならない。そのため、デコンボリューション済み画像の二値化処理（画像を前景と背景に分ける処理）が必要である。二値化処理は大津の手法で行った（図5）。

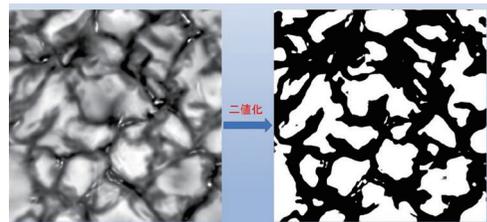


図5 前景と背景に分ける処理（DKIST 図）

4.4 輪廓の検出と面積計算

本研究では Python/OpenCV の findContours メソッドで輪廓を検出し、contourArea メソッドで

粒状斑の面積を計算した。途中まで Python/ Scikit Image を使用していたが、画像処理ユーザーコミュニティの書き込み、Q & A など Web 上での資料では OpenCV の方が圧倒的多かったので OpenCV を採用することにした。図6では、粒状斑の面積の計算部分のアルゴリズムを表示している。

```
#####
### Calculate area using OpenCV
#####
contours, hierarchy = cv2.findContours
..... (img, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
eqv_d = []
for c in contours:
    area = cv2.contourArea(c)
    d = 2*np.sqrt(area/3.14)
    d = round(d.* px_to_km)
    eqv_d.append(d)
df = pd.DataFrame(eqv_d)
```

図6 輪郭の面積（直径）を計算するスクリプト

4.5 データ解析

図2に、二値化された画像から得られた粒状斑の直径（横軸）と度数（縦軸）のヒストグラム（log-log プロット）を表示している。スケールの大きい側はべき乗則分布になっていることが期

待できる。小さいスケール側のデータは誤差が多い可能性があるので、1000-4000km の範囲に限定してヒストグラムの傾きを求める。ヒストグラムの傾きは縦軸を y、横軸を x とした時、べき乗則式 $y = x^a$ の「a」である。画像データは1データファイル/日を使用したので2011 ~ 2022年分処理し、その長期間の変化を確認する。

5. 考察

図7では、黒点数（右 Y-軸）と、粒状斑の面積分布の傾き（左 Y-軸）の2011-2022年間の変化を表示する。粒状斑の面積分布の傾きを smoothing すると、べき指数は約5%の幅で周期的に変動しているように見える。この結果は、Ballot らの結果と整合的である。

図8では傾き a の変化によって、粒状斑の度数と面積の関係を説明する。傾き a の値が小さく（大きい負値）なると分布は急峻になる。これは、相対的に大きい面積の粒状斑が少なく、小さな面積の粒状斑が多いことを意味する。よって、粒状斑の平均的な面積は小さくなる。

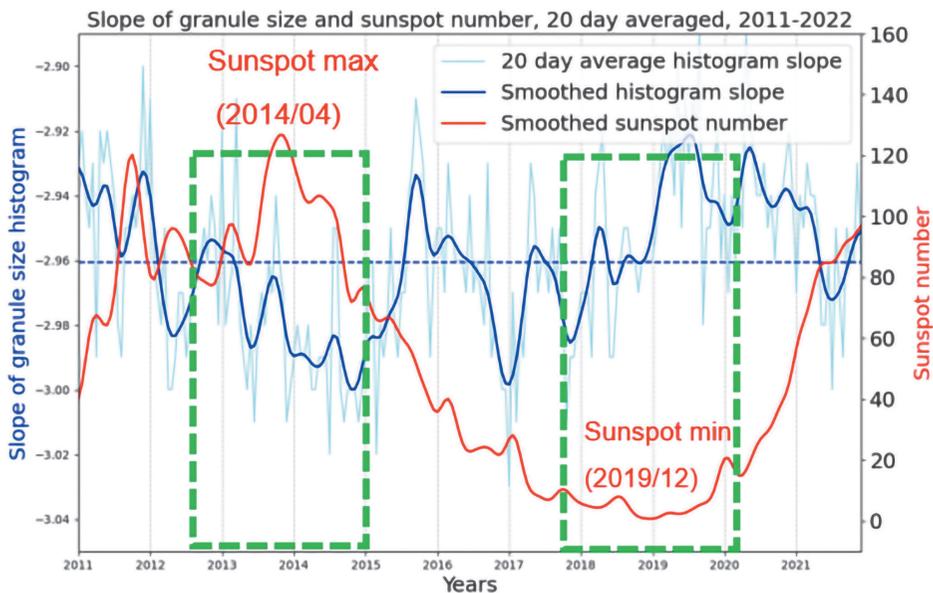


図7 粒状斑の面積（青線）の分布と長期変動

一方、 a の値が大きく（小さい負値）なると分布は穏やかになる。穏やかな分布は相対的に大きい面積の粒状斑が多く、小さな面積の粒状斑が少ないことを意味する。よって、粒状斑の平均的な面積は大きくなる。

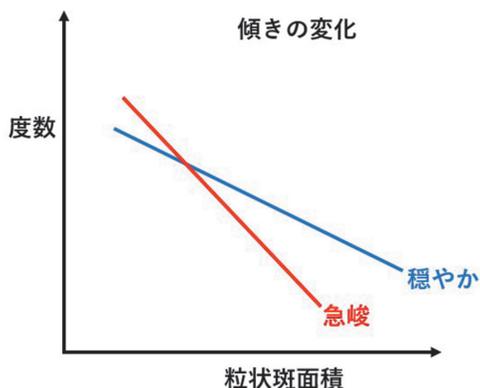


図8 傾き a の変化、粒状斑の度数と面積の関係

6. 残課題と注意点

- (1) データに黒点が含まれている場合がある。今回の解析では直径 4000km から 6000km の間にある粒状斑については、フィッティングに含めないで問題ないものの、4000km より小さいデータには小さい黒点成分が混入しているかもしれない。
- (2) データの扱い方にはまだ多くの課題が残っている。たとえば、衛星と太陽の間の距離の変化に起因する変動に対する補正も必要かもしれない。

7. まとめ

この報告では、長期間にわたる均質な宇宙観測データが揃った「いま」が良いタイミングと捉え、これまであまり研究されていなかった粒状斑の長期的な進化を明らかにした。研究で用いた比較的単純な画像解析手法でも、粒状斑分布に関する系統的な研究が可能であることが示唆

され、今後のさらなる展開が期待される。

また、この報告では、粒状斑分布のヒストグラムに周期的な傾きの変化が存在する可能性を初めて示唆した。具体的には、傾きの極大・極小が太陽黒点数の極大・極小と比較して約1年程度遅れることも示され、太陽活動との関係性が示唆された。

さらに、縦磁場が存在すると粒状斑の面積が小さくなる傾向があることが示唆され、太陽活動が極大へ向かうにつれて、光球面を貫く平均磁場が強くなり、結果として粒状斑の面積が減少する可能性も考えられる。これにより、分布が急峻化することが予測される。

今後は、研究で構築した粒状斑の抽出アルゴリズムを基盤に、さまざまな機械学習手法を活用して太陽熱対流の特性についての理解を深める研究を推進していく。

謝辞

本研究ノートの作成にあたり、丁寧にコメントを下さった審査員先生に心から感謝申し上げます。さらに、データを提供していただきました SDO/HMI チーム、ベルギー王立天文台 WDC-SILSO チームに感謝申し上げます。

この研究の一部は、2024 年度日本国際学園大学共同研究資金の補助を受けて実施されています。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] J. Ballot, T. Roudier, J. M. Malherbe and Z. Frank (2021)
“Changes in granulation scales over the solar cycle seen with SDO/HMI and Hinode/SOT”
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039436>
- [2] A. Nordlund, R. F. Stein, M. Asplund (2009)
“Solar Surface Convection”
Living Rev. Solar Phys., 6, 2
<http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-2>
- [3] Andreas Lagg, Sami K. Solanki, Michiel van Noort and Sanja Danilovic (2014),

- “Vigorous convection in a sunspot granular light bridge” *A&A* 568, A60
DOI: 10.1051/0004-6361/201424071
- [4] Th. Roudier & R. Reardon (1998)
“Variation of the Solar Granulation Over the Cycle: Previous Results and Future Observations”
<https://adsabs.harvard.edu/full/1998ASPC.140..455R>
- [5] R. Muller, A. Hanslmeier, D. Utz and K. Ichimoto (2018)
“Does the solar granulation change with the activity cycle?”
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732085>
- [6] S. Lefebvre, R. A. García, S. J. Jiménez-Reyes, S. Turck-Chièze and S. Mathur (2008)
“Variations of the solar granulation motions with height using the GOLF/SoHO Experiment”
<https://doi.org/10.48550/arXiv.0808.0422>