

氏 名 石川 遼太郎

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2301 号

学位授与の日付 2022 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Observational Studies on Turbulent Convection in the Solar  
Photosphere

論文審査委員 主 査 鹿野 良平  
天文科学専攻 教授  
石川 遼子  
天文科学専攻 准教授  
町田 真美  
天文科学専攻 准教授  
堀田 英之  
千葉大学 大学院理学研究院 准教授  
飯田 佑輔  
新潟大学 工学部 准教授

## 博士論文の要旨

氏 名 石川 遼太郎

論文題目 Observational Studies on Turbulent Convection in the Solar Photosphere

The dynamics in the solar photosphere are governed by thermally driven convection. This produces cellular patterns termed granules that are observed in visible-light continuum images. The granules with hot rising flows are surrounded by darker and cooler intergranular lanes. Granules repeat birth and death in a finite lifetime, highlighting their dynamic nature. These dynamics of granulation inherently create small-scale flow structures that are smaller than the typical size of granules. These small-scale flows interact with magnetic fields and can produce the Poynting flux upward. This in turn can drive various phenomena, such as explosions, jets, and heating, in the upper atmosphere, chromosphere, and corona. Because of the high plasma- $\beta$  condition in the solar photosphere, the magnetic flux is concentrated in regions smaller than the granular scale. Then the interaction between the magnetic field and gas motion occurs on such small scales. Therefore, it is important to evaluate not only the magnetic fields but also the 3-dimensional velocity fields on scales smaller than the granules in the solar photosphere.

We can obtain the line-of-sight (LOS) component of the flow velocities by a spectroscopic observation via the Doppler effect. Conversely, to date, there are no direct methods for observing the components perpendicular to the LOS. These components correspond to the horizontal velocity on the solar surface in disk center observations. The most commonly used method for estimating the horizontal velocity field is local correlation tracking (LCT). Although the LCT technique can evaluate the horizontal velocity with good accuracy on a larger scale, its accuracy on a scale smaller than granules is limited. In Chapter 2, we developed a convolutional neural network model with a multi-scale deep learning architecture. The method consists of multiple convolutional kernels with various sizes of receptive fields. Furthermore, we introduced a novel coherence spectrum to assess the horizontal velocity fields that were derived at each spatial scale. The multi-scale deep learning method successfully predicts the horizontal velocities for each convection simulation in terms of the global-correlation-coefficient, which is often used for evaluating the prediction accuracy of the methods. The coherence spectrum reveals the strong dependence of the correlation coefficients on the spatial scales. Although the coherence spectra are higher than 0.9 for large-scale structures, they drastically decrease to less than 0.3 for small-scale structures wherein the global-correlation-coefficient indicates a high value of approximately 0.95. By comparing the results of the three convection simulations, we



determined that this decrease in the coherence spectra occurs around the energy injection scales, which are characterized by the peak in the power spectra of the vertical velocities.

Spectral line profiles have information of the LOS velocity on scales smaller than the spatial resolution. In Chapter 3, we perform bisector analysis using spectral line profiles of the Fe I 6301.5 Å line obtained with the spectropolarimeter of the solar optical telescope (SOT) onboard the Hinode satellite and study how both the spectral line widths and the bisector velocities are related with the granulation. We confirm that the LOS gradient of Doppler velocity causes the spectral line broadening, and there exist two types of velocity gradients: faster downward and upward flows in the lower photosphere. The former ones are preferentially seen in the intergranular downflow lanes, and some of them are associated with a strong concentration of magnetic fields. The later ones, on the other hand, have no clear correlation with magnetic fields. We estimate the average turbulent velocity at about 0.9 km/s by discriminating the contributions of the LOS velocity gradient and the turbulent velocity. We examine the temporal evolution of the line widths and velocity gradients related to the granulation, and we confirm that the velocity gradient with faster upward flows develops in the fading granules. The spectral line sometimes becomes so wide that the increase of the line widths cannot be explained only by the velocity gradients, and we interpret it as the broadening induced by the photospheric turbulent motions.

There are multiple possibilities, such as temperature and velocity gradients, in addition to the micro-turbulence to cause the line broadening. It is difficult to investigate the mechanism of the line broadening only by the bisector analysis. In Chapter 4, we conduct spectral line inversion, which enables us to infer the height dependence of the temperature and the Doppler velocity by fitting the observed spectra by calculating radiative transfer. We find two possible scenarios to explain the observed spectral line broadening in fading granules: one is microturbulence of about 1 km/s and the other is large gradients of Doppler velocity along the LOS. Although the height profile of temperature and vertical velocity estimated with and without microturbulence are largely different in fading granules, it is difficult to distinguish them only with the two neutral iron lines observed with SOT. We also analyze the spectral line profiles synthesized with 3D MHD simulation data. Spectral line broadening in fading granules is also seen in the synthesized line profiles. We find that this line broadening is caused by the turbulent flows in the lower photosphere associated with the fading process of a granule. The turbulent motions are driven by the shear flow structures located at the boundary between the granule and intergranular lanes.

## 博士論文審査結果

Name in Full 氏 名 石川 遼太郎

Title 論文題目 Observational Studies on Turbulent Convection in the Solar Photosphere

太陽表面の光球での力学は主に熱対流運動にて支配され、それが作る 1000km 程度のセル状の構造「粒状斑」で光球は広く覆われている。熱対流運動として、粒状斑内部で沸き上がる熱いプラズマが、周囲に移動しつつ冷却され、粒状斑境界で下降するという、大局的な速度構造が正にみられるが、5 分程度の寿命にて生成消滅を繰り返すダイナミックな粒状斑には、その内部にさらに小さな空間スケールでの複雑な速度構造があると考えられている。このような小空間スケール速度構造は、太陽表面の磁場と相互作用し、磁場の増幅（局所ダイナモ機構）や、磁場に与えられた振動・変位が上空に伝搬しての加熱（彩層・コロナ加熱）など、様々な活動現象に関係する構造と考えられている。ただし、観測的には観測装置や解析手法の空間分解能に阻まれ、明らかにするのが難しい状況であった。水平方向速度については、解析手法の限界もあり粒状斑サイズ以下の速度構造を得ることが極めて困難である。また、鉛直方向速度については観測装置の空間分解能以下の構造であっても、視線方向速度の乱雑度がスペクトル線幅の増大として示唆されてきたが、その詳細についてはほとんど議論されていなかった。出願者は本論文にて、この小空間スケールの速度構造を観測的に解明する手法の確立を目指し、さらにそこに示唆される乱流的状況とその発生要因について考察した。

本論文の 2 章にて、太陽光球の放射強度と視線方向速度(=鉛直方向速度)のマップの時系列データから水平方向速度を推定するための新たな畳み込みニューラルネットワークを構築し、そこでは、様々な空間スケールの構造抽出のために複数サイズの畳み込みカーネルを用意した。さらに、特に小スケールの構造の再現性を理解するために、空間スケール毎の再現性「coherence spectra」という新たな評価法を考案した。そして、数値シミュレーションデータによる性能検証では先行研究のネットワークより良好な結果を得ることに成功した。

本論文の 3 章と 4 章にて、ひので衛星による広域で安定した分光データにより、鉛直方向速度を解析した。まず簡便な bisector 法を用いて、多様な粒状斑サンプルでの粒状斑内の様々なポイントでの解析にて、従来言われているような速度の鉛直方向勾配のみでは説明できないスペクトル線幅の増大があることを観測データにて明らかにした。続いて、その傾向が顕著な消失過程にある粒状斑について、詳細な SIR インバージョン法を適用したところ、観測されたスペクトル線幅の増大は、極端な速度勾配でも説明できるが、1km/s 程度の小スケール乱流があれば穏やかな速度勾配でも成立解があることを示した。さらに、数値シミュレーションモデルが示す粒状斑の内部の 3 次元速度構造との比較から、粒状斑消失に伴う鉛直方向速度の乱流構造にこの観測事例が対応し、解析での後者の解を支持することを示した。

これらのモデル構築と解析研究に対して、出願者は主体的に取り組み、その研究成果は、正に観測が開始した **DKIST** 望遠鏡による高空間分解能解析への波及効果も含めて、極めて有用であると評価でき、博士（理学）の学位授与に値すると判断した。