

氏 名 大場 崇義

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1987 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Three-dimensional convective velocity fields in the solar
photosphere

論文審査委員 主 査 准教授 末松 芳法
准教授 坂尾 太郎
教授 佐藤 毅彦
准教授 松崎 恵一
准教授 清水 敏文 宇宙科学研究所
助教 今田 晋亮 名古屋大学 宇宙地球環
境
研究所

Summary (Abstract) of doctoral thesis contents

The solar photosphere is well-defined as the solar surface layer, covered by enormous number of bright rice-grain-like spot called granule and the surrounding dark lane called intergranular lane, which is a visible manifestation of convection. A simple scenario of the granulation is as follows. Hot gas parcel rises to the surface owing to an upward buoyant force and forms a bright granule. The parcel decreases its temperature through the radiation emitted to the space and its density increases to satisfy the pressure balance with the surrounding. The resulting negative buoyant force works on the parcel to return back into the subsurface, forming a dark intergranular lane.

The enormous amount of the kinetic energy deposited in the granulation is responsible for various kinds of astrophysical phenomena, e.g., heating the outer atmospheres (the chromosphere and the corona). To disentangle such granulation-driven phenomena, an essential step is to understand the three-dimensional convective structure by improving our current understanding, such as the above-mentioned simple scenario.

Unfortunately, our current observational access is severely limited and is far from that objective, leaving open questions related to vertical and horizontal flows in the granulation. The first issue is several discrepancies in the vertical flows derived from the observation and numerical simulation. Past observational studies reported a typical magnitude relation, e.g., faster upflow and slower downflow, with typical speeds of ≈ 1 km/s in both directions. This faster upflow trend is opposite to that in numerical simulations, in which downflow is faster than upflow imposed by gravitational attraction and gas pressure gradients. Besides, the flow speeds in numerical simulation are much faster than those in the observation. The second issue is that, while determining the amplitude of the horizontal flow is a key element in understanding the three-dimensional convective structure, this amplitude is severely hindered. The energy injection from the photosphere into the corona depends strongly on this amplitude. While preexisting numerical models successfully reproduce the hot corona by adopting amplitude of typically 1 km/s, previous observational works reported a few hundred m/s.

For tackling those two questions, attaining high spatial resolution is a key to success. Insufficient resolution blends the signals from granules and intergranular lanes each other, which makes downflow signals from narrow intergranular lanes preferentially canceled with upflow ones. The required spatial resolution is even demanding for a derivation of the horizontal flows. Their Doppler signals can be recorded at the solar limb, where the line-of-sight (LOS) of an observer is aligned with the horizontal direction to the solar surface. Any solar limb observations are subjected grossly to the spatial degradation effect, namely the foreshortening effect.

Unfortunately, the resolution performance of the current observational instruments is still insufficient for this purpose, even with the Hinode spacecraft, which has the highest spatial resolution among the current space-borne telescopes. The author challenges to improve the image quality by developing a deconvolution technique, which is a compensation method for optical distortion, diffraction, and scattering of light in an imaging instrument. While conventional

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

deconvolution techniques have a problem in amplifying the noise signal, our deconvolution technique adopts a regularization term designated to suppress the noise amplification. Through a verification work with a synthesized granulation image, our deconvolution technique is confirmed to retrieve a non-degraded image by successfully avoiding the noise enhancement.

This study uses spectral data provided by the Hinode satellite, and its data quality is improved by our deconvolution technique. The examined dataset covers almost all the angles from the solar disk to the limb (0° - 83° in the solar latitude) so that we reasonably diagnose the horizontal flow with multiple LOS angles to the granulation.

We summarize separately the scientific results of the vertical and horizontal flows.

(i) Vertical flows

Our deconvolution provides a tiny scale of intergranular downflowing distribution. Upflows in the edge of each granule transform to downflows. Regarding downflows, we detect two different phenomena with the deconvolution: pre-existent intergranular lanes become generally wider, occupying larger areas, but also narrow intergranular lanes, hindered by the scattered light contamination, newly appear. The LOS velocity ranges from -3.0 km/s (upward) to $+3.0$ km/s (downward) after the deconvolution while it does from -2.0 km/s to $+1.5$ km/s before the deconvolution. The downflow speed is more enhanced than upflow one. This is because the deconvolution processing reasonably corrects for a preferential cancellation of Doppler signals in darker intergranular lanes. Thus, deconvolution changes the magnitude relation from faster upflow and slower downflow to almost comparable. These characteristics, i.e., up- and downflow magnitude relation and their flow speeds after deconvolution, match closer to those derived from numerical simulations. Therefore, correcting the instrumental scattered light contamination produces results that are in agreement with those predicted by numerical simulations.

(ii) Horizontal flows

Our deconvolution technique relaxes the foreshortening degradation, providing accessible solar latitudes from 0° (purely vertical to the observer) to 53° . In root-mean-squared (RMS) amplitude, the measured LOS velocity monotonically increases from 0.9 km/s to 1.6 km/s along the latitude of 0° to 53° . A horizontal flow of $1.6 - 1.9$ km/s in RMS matches the above amplitude variation, which is two or three times larger than those reported before. Our amplitude exceeds theoretically-required values in all the preexisting coronal heating models for reaching the typical coronal temperature (e.g., one million degree).

(iii) Three-dimensional convective velocity field

The granulation generally represents a radial divergent flow from a granular center, and small parts of the flow streams along the azimuthal direction. From the three-dimensional convective flow structure, derived with deconvolution, we discover the fastest horizontal flow in intergranular lane.

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

While our conventional understanding regarded intergranular lanes as simply-downflowing region, this study suggests that the horizontal flow, initially accelerated from the center of granular cells, moves outwards until it reaches intergranular lanes.

Our deconvolution technique makes it possible to describe the solar surface convection with unprecedented high data quality. Consequently, this study remarkably pushed forward our understanding of not only the granulation but also the granulation-driven phenomena pervading the sun.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

太陽のような晩期型の恒星では対流層が光球直下にあり、そこで発生する運動エネルギーが磁力線を介して上空に運ばれ、彩層、コロナで熱化され、光球（温度 6 千度）よりも高温（彩層 1 万度、コロナ 100 万度）の大気が形成されると考えられている。太陽では光球直下の対流構造を明暗の斑模様（粒状斑）として観測することができ、その鉛直・水平運動速度を求めることができるが、これまで空間分解能が不十分であったり、散乱光の影響が大きかったりしたため、定量的に信頼できる結果が得られていなかった。本博士論文は、太陽光球でみられる対流運動を太陽観測衛星「ひので」の光球分光スペクトル線を用いて、詳細かつユニークな解析の元、今までになく高分解能の速度場構造を定量的に導出し、彩層・コロナ加熱に十分な運動エネルギーが対流運動にあることを示したものである。

対流運動をスペクトル線のドップラー変位で求めるときに問題となるのは、明暗構造で速度の向きが異なるため、明暗構造が分解できていない、或いは散乱で明暗構造のスペクトル線が混じり合うと、得られるドップラー変位が小さくなってしまうことである。「ひので」分光装置は 0.32 秒角の空間分解能を持つが、1-2 秒角の粒状斑・粒状斑間隙の大きさに対して十分でなく、回折による散乱の影響（PSF）が無視できない。このため、本博士論文では、散乱（PSF による光の広がり）の影響を取り除くデコンボリューションの手法を分光データに適用した。デコンボリューションは像改善のために広く用いられている手法であるが、解析に用いた太陽面スリットスキャンされた 2 次元分光データに適用するため、「ひので」分光データの取得観測案を独自に提案し、スペクトル線の再現に独自の手法を開発している（出願者主著査読論文として出版済み）。このデコンボリューションにより、太陽中心面近くの対流鉛直運動速度、太陽縁寄りの対流水平運動を高分解能、高精度で求めることを可能にした。

加えて、スペクトル線が形成される大気高度が、線強度で異なる（スペクトル線の中心ほど浅い大気層を反映する）、また太陽面中心から縁に向かってより上層を観測できることを利用し、スペクトル線バイセクター法により、光球での対流運動速度の深さ方向の分布の詳細導出を可能とした。

結果、対流鉛直速度については、これまで上昇速度が下降速度より速い結果になっていたものが、両者がほぼ等しい結果となり、連続の式の関係と整合する結果を得た。また、速度自体もファクター 2 程度大きい結果で、深さとともに $\pm 3\text{km/s}$ と光球での音速の半分近くに達する、ダイナミックな対流の描像が得られた。対流高速下降流は、磁束管内の下降流を磁気ポンピング効果で誘発し、強いリバウンド衝撃波として彩層・コロナを伝播・加熱すると予想される。一方、対流水平速度は、粒状斑間隙内で最大となることを初めて明らかにし、二乗平均平方根(rms)速度 2 km/s 弱とこれまでより、大きな速度が得られた。水平速度は粒状斑間隙に達していることから、そこに存在する磁束管を移動、揺らす元となり、上向きのポインティングフラックスとして、運動エネルギー輸送が期待される。これまでの数値シミュレーションでは 1km/s 程度の速度場があると、太陽コロナ加熱に十分なエネルギー輸送が起こると示唆しており、本結果は数値計算を観測的に支持する結果である。

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

本博士論文は「ひので」可視光望遠鏡・分光観測を有効に使い、太陽表面のダイナミックな対流運動に関する新しい知見をもたらし、未解明の彩層・コロナ加熱機構への対流運動の役割を定量的に示唆したものである。出願者が本博士論文において、データ取得、解析から結果議論にいたるまで主体的に研究を進めたことも十分に認められた。また、審査会においては、出願者より研究テーマの背景、観測データ解析手法の詳細、および導出結果の理論的解釈が明快に述べられ、恒星対流運動の3次元構造研究及び上層の彩層・コロナ加熱機構解明における本研究の意義について深く理解していることが明らかであった。多くの質疑にも適切かつ明快な回答があり、研究発表および議論の能力においても博士学位に十分な力量があると判断した。提出博士論文は簡潔な英文で書かれており、出願者主著による英語査読論文が2編出版済み、また国際学会における英語口頭発表も経験しており、英語による研究成果発表能力も十分に備わっていると判断した。

以上の結果を総合し、審査委員会は全会一致で、本論文が博士論文として優れたものであり出願者は博士(理学)の学位授与にふさわしい知識と学力を有していると認め、合格と判定した。