

氏 名 長島 薫

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1320 号

学位授与の日付 平成 22 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 Local Helioseismology with Solar Optical  
Telescope onboard Hinode

論文審査委員 主 査 教授 櫻井 隆  
教授 安藤 裕康  
准教授 末松 芳法  
教授 一本 潔（京都大学）  
教授 草野 完也（名古屋大学）

Helioseismology is the unique way to probe the solar interior by measuring the surface oscillation signals. We have carried out local helioseismology analyses, exploiting the recent *Hinode/SOT* data, ultimately motivated by a desire to understand the activity phenomena on the Sun. Part of our endeavour has been in theoretical regime as well.

Mechanism of solar activity is one of the biggest remaining mysteries of the Sun. Sometimes sunspots appear on the Sun and explosions in the solar atmosphere are observed around them. Sunspots are manifestation of the solar magnetic fields which have floated from the deep interior of the Sun. Interaction between magnetic field and flows is considered to play a key role in the mechanism driving the solar activity and its cycle, although we cannot see through the subsurface layers of the Sun where the magnetic field is generated and interacts with flows, unless we use the helioseismological techniques.

The Solar Optical Telescope (SOT) onboard the *Hinode* satellite is capable of observing the Sun with the highest-resolution from a space-borne instrument. The dataset obtained by SOT is not designed for, but potentially very useful for helioseismology observation, although the field of view is not so large. Therefore, we have set out to carry out local helioseismology analyses by SOT data.

First, we have examined the solar oscillation itself in SOT signal, focusing on the oscillations in sunspots. In the umbrae of sunspots, we have detected 3-minute oscillation in the chromospheric lines, the so-called 'umbral flash'. All the sunspots investigated have shown the umbral flash, although the strength of the signal varies. One of the sunspots we have examined, a nearly circular one, showed the oscillation power deficit around the centre of the umbra. Such a feature has never been reported and is not readily explained by existent models of the umbral flash. We have also examined the oscillation signals using other instruments, namely, *SOHO/MDI* and Nobeyama Radio Heliograph, and have compared signals with those detected by *Hinode/SOT*. By these analyses, we have established that the peak frequency of the oscillation is higher in the inner part of the sunspot, as well as confirmed that the umbral flash propagates mainly outwards. These results give important constraints on the sunspot models, although Dopplergram datasets with higher cadence are required for further study.

Second, we have investigated an emerging active region on the Sun by measuring acoustic travel times. We have found a signature of chromospheric downflows by combining chromospheric and photospheric datasets; we have found a travel-time anomaly in the chromospheric measurement of the active region, but not in the photospheric measurement. We discuss the behaviour of the supposedly evanescent acoustic waves in the solar atmosphere, and how it impacts on interpretation of

travel-time measurement. We then interpret this travel-time anomaly as evidence for chromospheric downflow. The downflow speed we have obtained is 5-8 km/s, which is consistent with magnetohydrodynamic numerical simulations of emerging active regions and chromospheric observations in the past. This result demonstrates a new possibility of studying dynamics not only in the subsurface layers but also in the upper atmosphere by multiwavelength time-distance helioseismology. This kind of signature reminds us that chromospheric helioseismology data may include information of dynamics in the chromosphere as well as in the subsurface layers. This needs to be taken into account in time-distance analyses, but it has not been considered sufficiently in the past.

Third, we consider the statistical property of the cross-correlation function, which is used to measure the acoustic travel times in time-distance method. By modelling the stochastic excitation of the solar oscillation, we discuss that the distribution function of cross-correlation function is a normal distribution, and have acquired expressions for average and variance of the distribution. This would enable us to do forward *statistical* modelling of cross-correlation function, and provide us with means to estimate the error in the travel times as well as the inversion results.

Finally, we have studied the supergranulation in the polar region of the Sun. It is difficult to observe the polar regions of the Sun in details because of foreshortening. The high-resolution of SOT gives us an advantage in this regard. By time-distance helioseismology technique, we investigated the structure of supergranular cells, and have found the tendency that the east-west width is smaller and the depth is larger, in the higher-latitude regions, compared to the equatorial region. Moreover, we found some kind of cell alignment in higher-latitude regions. We need further data and work for confirmation, but it may be an indication of giant cells, the largest convection cell of the Sun. To understand polar region dynamics is of great importance in comprehending how the solar dynamo mechanism works.

直接見ることができない太陽の内部を、表面で観測される振動場をもとに診断する手法が日震学である。長島薫氏の学位論文は「ひので衛星搭載可視光望遠鏡による局所の日震学」と題される。1960年代に始まる日震学の大きな成果として、内部構造や自転速度分布など太陽全体にわたる構造の決定が挙げられる。一方最近では、局所の日震学と呼ばれる新しい研究手法が発展を見せている。本論文は、2006年に打ち上げられた「ひので」衛星搭載の可視光望遠鏡のデータを用い、局所の日震学の研究を展開したものである。

第1章は概観で、日震学の発展の歴史と、太陽活動や磁場生成機構（ダイナモ機構）の研究において日震学が占める重要性について述べている。

第2章は、ひので衛星で観測された黒点暗部の振動を解析したものである。ひので衛星の観測データは5個の黒点における波長397nm（彩層底部起源のカルシウムH線）の輝度変化で、そのパワースペクトル解析から、振動の周波数は平均4mHz程度であるが、黒点暗部の中央付近で高く、周辺に向かって減少傾向にあることがわかった。また1個の黒点について、振動のパワーが黒点暗部中央に局所極小を持つことを見だし、振動を励起する音波衝撃波が黒点の曲がった磁力線に沿って伝播するためと解釈した。

第3章は、局所の日震学の一手法である、2点間の信号の相関から伝播時間を求め内部診断を行うtime-distance法についてまとめたもので、後の第4～6章の準備である。

第4章では、活動領域2例について、光球でのドップラー速度と彩層下部の輝度振動から伝播時間の分布を求めたところ、彩層下部を起源とするカルシウムH線のデータのみ、活動領域に入る向きの伝播時間が長いという結果を得た。そしてこれは活動領域彩層での下降流で説明できることを示した。観測された振動数（4mHz程度）の波は彩層では伝播しないので伝播時間差は生じないと考えがちであるが、波動伝播の注意深い考察によりこの結論を導き出した。

第5章では、ランダムな振動場の2点相関関数の統計的性質について数学的に考察し、ゆらぎが近似的に正規分布となることを示し、その平均と分散を表す式を導いた。これは将来の応用に向けての布石と位置づけられる。

第6章では、ひので衛星可視光望遠鏡の高分解能を活かして、極域の超粒状斑対流を局所の日震学により解析した。流れの発散から求めた超粒状斑対流渦の分布はほぼ南北方向に整列する傾向が見られ、自転方向に伸びた巨大対流（存在が予言されている）の影響を示唆するが、さらに追試が必要である。また深さ方向の速度分布を求め、超粒状斑対流は極域のほうが赤道域に比べて小さく深いことを見いだした。

第7章はまとめと将来への展望を述べたもので、ひので衛星を用いた研究計画のほか、NASAのSDO衛星や将来のSolar-Cミッションに向けた日震学の研究テーマを提案している。

以上のように本論文は、ひので衛星可視光望遠鏡によるカルシウムH線の輝度観測が日震学の有用な手段であることを示し、黒点暗部の振動、活動領域彩層の音波伝播時間異常と下降流の検出、極域の超粒状斑対流の3次元構造や幾何学的整列など、新たな発見を達成したものである。得られた知見は太陽物理学に大きな進歩をもたらすものであり、審査委員会は全員一致で本論文が博士学位論文として十分な価値を有し、合格であると判定し

た。なお、この研究の一部は、Publications of the Astronomical Society of Japan および Astrophysical Journal 誌に発表されている。