

# 局所的日震学で探る太陽のダイナミクス

長 島 薫

〈Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford University,  
452 Lomita Mall, Stanford, CA 94305-4085, USA〉  
e-mail: kaorin@stanford.edu



太陽の内部を観測的に調べるほぼ唯一の手段は、太陽の振動を解析する「日震学」である。なかでも、局所的な波の伝播の観測に基づく局所的日震学が近年発展している。特に、時間-距離法と呼ばれる手法では、太陽内を伝わる音波の伝播時間と伝播距離の関係から、内部の音速や流れといった物理量を調べる。この時間-距離法の概要を説明するとともに、太陽観測衛星「ひので」搭載の可視光磁場望遠鏡 (SOT) の高空間分解能データを用いた時間-距離法での解析結果から、彩層での下降流の検出と、太陽極域における対流構造の検出の二つのトピックについて、紹介する。

## 1. 太陽を音で調べる日震学

われわれは、どのような波長の電磁波を用いても太陽の中を見通すことはできない。では、太陽の中を観測的に調べるには、どうしたらよいだろうか？ 実は「音」を使うという手段がある。

太陽の表面では、周波数約 3 mHz、周期にして約 5 分の成分を中心とする振動が見られる。これはガスの圧力を主な復元力とする振動、つまり音波に近い\*1。地球でその「音」を直接聞くことはもちろんできないが、可視光域の吸収線のドップラーシフトを測ることで表面の速度場がわかり、どんな「音」が立っているのかを知ることができる。すなわち、発生している「音」がどのような周波数・波長の成分から構成されているのかを調べることができる。この「5分振動」は、太陽内部の対流層での乱流的対流により励起された、太陽の固有振動である。

固有振動とは、振動している物体そのものの独自の音色である。例えば楽器にはそれぞれ独自の音色があり、それがその楽器の固有振動である。あ

る物体の固有振動は、その物体の物理的性質（例えば音速分布や密度、内部の流れなど）によって決まるので、固有振動の様子がわかれば逆にその物体の物理的性質を知ることでもある。楽器の音色からどんな楽器かを判定するようなものである。このようにして太陽の振動（音波）を使って太陽の内部を調べる手法があり、「日震学 (helioseismology)」と呼ばれている。

太陽の 5 分振動の発見は 1960 年代初頭のことであった。その後、1970 年代にはこれが固有振動の現れであることが明らかになり、振動の観測を利用して内部構造を探る試みが始まった (1980 年代)。これまでに、日震学は太陽内部の大局的な構造モデルの精密化や、内部での自転 (差動回転) の様子を描き出すことなどに貢献し、太陽内部の理解に重要な役割を果たしてきた<sup>1)</sup>。

## 2. 局所的日震学

近年、観測技術の進展に伴って、大局的で定常な構造を調べる手法だけでなく、より局所的（例えば特定の黒点など）・非定常（例えば数時間か

\*1 復元力として重力（浮力）も効いているため、厳密な意味での音波ではないが、本稿中では音波と言うことにする。

ら1日程度の寿命の構造)である表面下構造を調べるのに適した「局所の日震学(local helioseismology)」の手法も開発されてきた。

地震学では、地震波がどう伝わるかを調べてその地震波の伝わった部分の地下構造探査を行う。これと同様に、太陽を伝わる音波の伝播距離と伝播時間の関係から太陽の内部構造を調べる「時間-距離法(time-distance method)」は、この局所の日震学の主要な手法の一つである。

どうして伝播時間と伝播距離の関係から内部構造がわかるのだろうか？

太陽は内側ほど温度が高く、音速が大きい\*2。このため、太陽表面から内部へ向かう音波は屈折し、図1に示すような経路をとる。もしも太陽内部に図2のような音速異常があれば、その部分を通る経路上の伝播時間(BC間)は、何もないところ(AB間)の伝播時間と異なり、この場合はBC間のほうがAB間より伝播時間が短くなる\*3。このようにして、伝播時間の分布から内部の音速異常分布を検出できる。また、流れがある場合は、流れにのる向き(DからE)と流れに逆らう向き(EからD)とで伝播時間に差が生じるので、向きによる伝播時間の違いを調べることで内部の流れを知ることができる。さらに、伝播距離を長くするとその伝播経路はより深くなる(図3参照)ため、さまざまな伝播距離に対する伝播時間を調べれば、さまざまな深さの影響を分解することができる。時間-距離法ではこのような仕組みで内部の流れや構造を調べることができるのである。

地震学で地下構造探査に使うのは、伝統的にはある震源からの単発の地震波である。地震波の伝播時間を測るには、各所に地震計を置いて地震波の到達時刻を調べればよいだろう。しかし、太陽で伝播時間を測るにはこうはいかない。太陽では対流層中の至る所で常に対流運動が起きており、

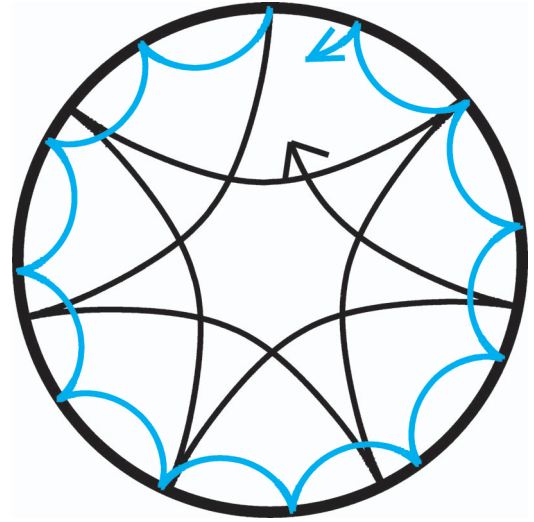


図1 太陽内部の音波の伝わり方の例。入射角と振動数によって異なる経路をとり、ここでは青線と黒線で二例を示している。図は太陽の断面(大円)で、図中の太線の円は太陽表面を表す。

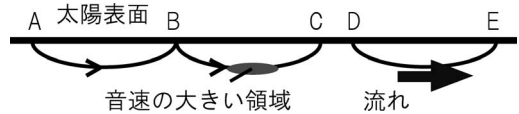


図2 太陽内部を伝わる音波の経路の概念図。

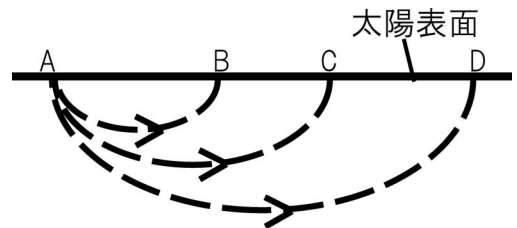


図3 太陽内部を伝わる音波の経路(点線)の伝播距離と深さの関係の概念図。伝播距離を長くすると伝播経路は深くなるので、例えばAからDへの経路は、より近いAからBへの経路と比べて深くまで到達する。

\*2 平均分子量が増大するごく中心付近を除く。

\*3 異常が十分小さい場合は(線形の範囲内では)伝播経路は変わらない。これは、伝播経路は伝播時間が最小になるように決まる(フェルマーの原理)ためである。

そこで放射された音波が常に表面を揺らしているからである。このため、日震学では、振動シグナルの「相関関数」という数学的道具を使って音波の伝播時間を測っている。図2の点AとBの間の伝播時間を測る場合を例にとってみよう。AからBにある時間 $t$ だけかかって波が伝わっていたとすると、Aでの揺れ方とBでの揺れ方はその伝わる時間 $t$ の分だけずれているはずである。逆にその時間 $t$ だけずらすとよく「似ている」はず、すなわち相関が大きいはずである（実際には他の場所で発生した波もAやBを通ることがあるので、どんなにうまく時間をずらしても、両者が一致することはない）。こうして、どれだけ時間をずらせば似ているか、振動の相関関数を調べ、いろいろな二点間を波が伝わる時間を測っている。

### 3. 時間-距離法による流れの検出

図4のように、太陽表面上にある大きさの円環を考え、その中心点から円環へ向かう音波の外向き伝播時間（図の青線の向きの伝播時間）と、円環から中心点へ向かう音波の内向き伝播時間（図の青線と逆向きの伝播時間）を比べる。すると、外向き伝播時間<内向き伝播時間 であれば外向きの流れ（つまり湧き出し流）、外向き伝播時間>内向き伝播時間 であれば内向きの流れ（吸い込み流）があることがわかる。ここで紹介する研究では、一貫してこの円環の領域で平均した振動シグナルとその円の中心の振動シグナルとの相関をとって外向き・内向き伝播時間を測定し、内部の流れの検出を行った。

太陽表面の振動の観測には、太陽観測衛星「ひので」に搭載された可視光磁場望遠鏡 SOT<sup>2)</sup> を用いた。SOT は約 0.2 秒角の高空間分解能で大気に邪魔されない安定した観測を行う、可視光域の望遠鏡である。微小な振動シグナルを長時間安定してとらえることが必要な日震学的解析に適したデータを取得するのに優れているといえる。

図5は太陽の静穏領域における、音波の外向

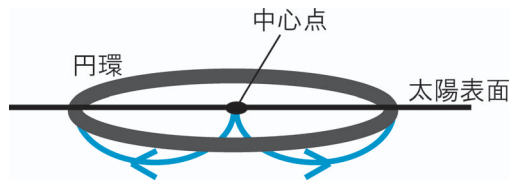


図4 伝播時間を測るのに用いた円環状の領域と、それに対応する(外向きの)音波の伝播経路.

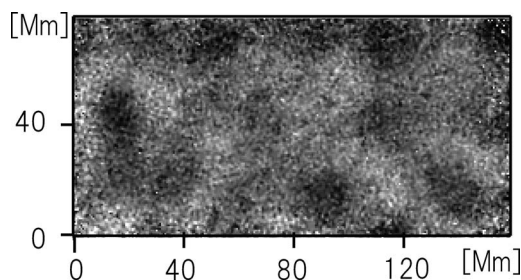


図5 太陽の静穏領域における、外向き・内向きの伝播時間の差のマップ。黒は外向き伝播時間のほうが短い湧き出し流の領域に対応し、逆に白は吸い込み流の領域に対応する。

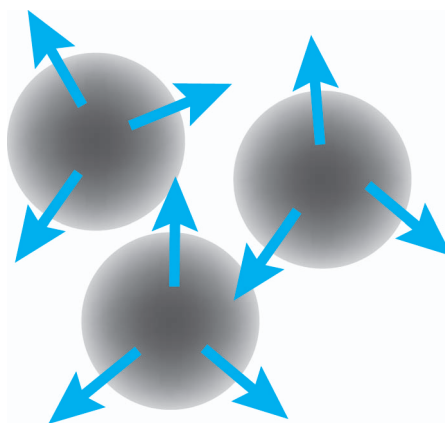


図6 外向き・内向き伝播時間の差のマップ上の黒白のパターンと、それに対応する流れ場(青矢印).

き・内向き伝播時間の差のマップである。伝播時間の測定には半径約 15 Mm (メガメートル) の円環を用いており、図中で黒の領域は外向き伝播時間のほうが短い湧き出しの流れのある領域、白の領域は内向き伝播時間のほうが短い吸い込みの流れのある領域に対応する。この伝播時間マップ上では、大きさ約 30 Mm の黒白のセル構造が見ら

れ、図6のような流れのパターンがあることがわかる。このセル構造は太陽の対流セルの一つとして知られる「超粒状斑」である。

以下では、「ひので」の観測データを用いた時間-距離法での解析成果として、彩層での下降流の検出と、太陽極域での超粒状斑構造の研究を紹介したい。

#### 4. 彩層の下降流の検出<sup>3)</sup>

筆者らはSOTで図7のような太陽の活動領域を観測した。筆者らが解析に用いたのは、光球由来のライン (Fe I 557.6 nm) によるドップラーシフトから求めた速度場データと、彩層由来のライン (Ca II H) の輝度分布データである<sup>\*4</sup>。活動領域は彩層のラインで明るく見える、いわゆるプラージュと呼ばれる領域に対応している。SOHO/MDIの磁場のデータと比較すると、図中

の左上・右下のプラージュの極性が異なり、またその両極間の距離がしだいに拡大していく様子が見えることから、この領域が太陽内部から浮上しつつある磁束管の断面にあたるのがわかる(図8参照)。筆者らはこの領域で音波の伝播時間を測り、外向き・内向き伝播時間の差のマップを図9のように得た。

静穏領域においては、光球と彩層の外向き・内向き伝播時間差マップに特に違いは見られず、約

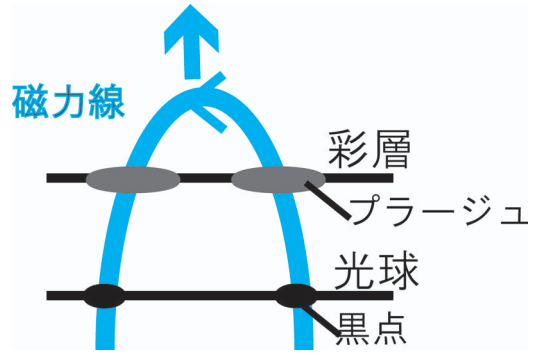


図8 浮上磁場領域の模式図。浮上磁場領域の足元の部分は彩層で明るく見え、いわゆる「プラージュ」として観測されている。

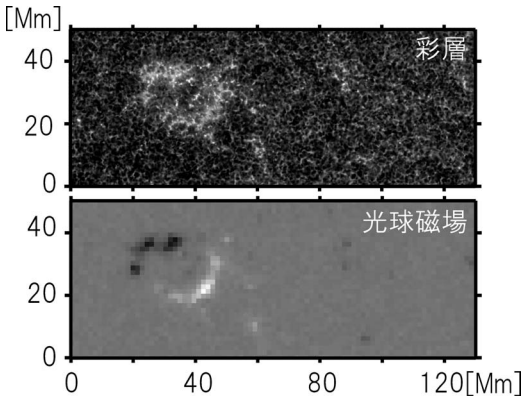


図7 2007年11月23日の太陽の活動領域の彩層ライン (Ca II H line) での輝度マップ(上)とその領域の磁場分布(下)。彩層ラインの輝度データは「ひので」SOT、磁場データはSOHO/MDIにより取得したものである。磁場は白・黒がそれぞれN・S極に対応する。SOHOはESAとNASAの共同プロジェクトである。

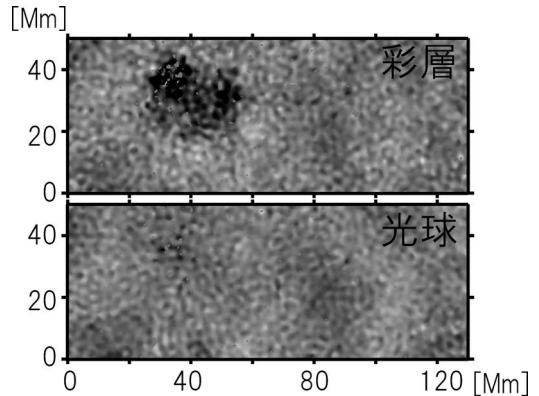


図9 活動領域における外向き・内向きの伝播時間の差のマップ。黒は外向き伝播時間のほうが短い領域、白は内向き伝播時間のほうが短い領域に対応する。

\*4 光球・彩層はそれぞれ太陽の大気層であり、光球は厚さ数百 km、彩層はその上空に厚さ数千 km 程度で広がっている。観測に用いたラインは、それぞれの層の中のある特定の高さの範囲で形成されたものであり、そのラインでの観測は特定の高さの範囲の情報をもっている。Ca II H ラインの形成層は光球から高さ 250 km 付近を中心とする彩層下部にある。本稿中では Ca II H ライン形成層と彩層とを区別せず使っていることをご了承いただきたい。

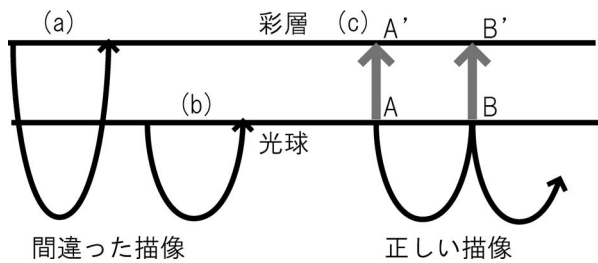


図 10 波の伝わり方の概念図. 左図 (a), (b) のように考えがちであるが、これは誤りで、実際には、右図 (c) のような経路である.

30 Mm の対流セル構造、超粒状斑のパターンが見えている。これは図 5 と同様である。しかし、活動領域においては、光球と彩層のマップが「違う」ことは一目瞭然であろう。彩層データでは伝播時間の差の図上では活動領域が真っ黒になっており、活動領域内で外向きの伝播時間が内向きの伝播時間より短いことがわかった。このように、異なるラインによって伝播時間の分布に差が出る可能性があることは、これまで知られていなかった。

単純に、3 節で述べたのと同様に解釈してみると、彩層データでみる限り、活動領域内には湧き出し流が存在することになる。しかし、光球データでみると、活動領域内には目立った湧き出し流はない。これはどう考えるべきなのだろうか。

音波の伝わり方を考え直すことで行き着いた結論は、活動領域内に「彩層での下降流がある」というものであった。光球のデータでは異常がないのに、より上層の彩層のデータでのみ異常が検出されたのだから、光球より上に原因がある、という直感的想像と結果的には同じであるが、実際は以下のとおり少々複雑であった。

二点間を伝わる音波の伝播時間を測る、というのと、彩層と光球でそれぞれ図 10 の左図の (a), (b) のような音波の伝播経路を考えがちであるが、実は違う。太陽では上空に向かうほど密度が下がるが、そのスケール長に対して波長が長すぎると音波は波としてそれより上空に進めなくなる。このため、ある高さで固定して見ると、ある波長より長い音波、つまりある周波数(カットオフ周波数)

より低い音波は、そこで反射する。太陽の光球付近でのカットオフ周波数は 5.4 mHz 程度である。ここでの解析に使っている音波は太陽の振動の主成分である周波数約 3 mHz (周期約 5 分) の成分であるので、実は光球付近で反射しているはずであり、図 10 の右図 (c) の黒線のような経路になる。反射する層より上はいわゆるエバネッセント領域で、波としては伝わらない。ここで用いた Ca II H ラインの形成層はこの反射層より上である。

しかし、エバネッセントというのは実は理想的な定常波についての性質である。現実の、励起されては一定のタイムスケールのうちに減衰するのを繰り返す太陽の振動では、光球面が「揺れた」という情報は、ある時間の後に上空へ伝わるものが示せる(図 10(c) の灰色線)。したがって、より上空の彩層での二点間の音波の伝播時間というのは、実は図 10(c) のような経路の振動シグナルの時間差に対応している。厳密な意味での「二点間の伝播時間」ではないが、同じところ (A) に端を発した波が、彩層上の二点 (A' と B') に到達するのにかかった時間の差を測っているわけである。(以下では単に彩層での伝播時間と表現する。)

もしも、「揺れた」という情報が光球から彩層へと伝わるのにかかる時間がどこでも同じであれば、光球の二点間で測った伝播時間は彩層の二点間で測った伝播時間と、同じになる。これは、光球上の二点 A, B が電車の駅だと思えば理解しやすいだろうか。彩層上の二点 A', B' へ駅 A, B からそれぞれ 5 分かかるとする。A から B へ電車で

15分であれば、Aを出発してA'へ着いてから、AからBを経由してB'へ着くまでには、AB間と同じ15分かかるだろう。しかし、駅からの所要時間が違う場合はそうはいかない。A'のほうがB'より駅に近いのであれば、A'B'間の時間差は15分より長くなるはずだ。

実際、静穏領域では彩層・光球それぞれで測った伝播時間は違くない。図9に示しているのは外向き・内向き伝播時間の差のマップであるが、差でなく外向き伝播時間（あるいは内向き伝播時間）単独でみても、光球と彩層とで違くないのである。図10の左図(a), (b)のような描像であれば、彩層で測定するほうが経路は長くなり、その分伝播時間も長くなること（実際には50秒程度）が予想されるが、これでは測定値と合わない。

活動領域内で光球から彩層へと上向きに情報が伝わる時間が長くかかると、活動領域内では彩層で測った外向き伝播時間が内向き伝播時間よりも短くなり、図9のような伝播時間異常となることがいえる。上向きに伝わる時間が変わる原因はいろいろ考えられる。例えば、情報は音速で伝わるが、この音速が遅ければ時間が長くかかるはずである。しかし、活動領域では磁場が強いため、実質的な音速はその分だけ速くなるはずであり、逆傾向である。ほかに、彩層-光球間が活動領域内で長いと、伝わるのにかかる時間は長くなる。しかし、活動領域内では磁場の効果のために彩層は下がり気味であることが知られており、これも逆の傾向である。そこで、筆者らは彩層中の下降流が原因だと解釈している。この領域は、前述のとおり磁束管が太陽内部から上昇してきているいわゆる浮上磁場領域である。磁束管が持ち上がるにつれ、その内部をプラズマが落ちていく下降流が発生することは、これまでの彩層観測や浮上磁場シミュレーションなどでよく知られており、その下降流が伝播時間に影響したと考えている。実際、伝播時間の数値から見積もった下降流の速度は8 km/s程度で、他の研究報告例とも合う。ただし、

磁場のために音速が速くなることや彩層-光球間の距離が長いといった、逆傾向になる効果も働いているのだとすると、それを打ち消すためにはより速い下降流の存在が推定されることになる。

本研究では、光球と彩層の両方のラインのデータを用いて音波の伝播時間を活動領域周辺で測り、二つのラインでの伝播時間分布が活動領域内で異なることを示し、彩層のデータでのみ見つかった活動領域内の伝播時間異常は、彩層での下降流に起因するものであると解釈した。下降流の存在自体はよく知られていることであったが、太陽の内部だけでなく、より上層部（彩層）のダイナミクスについても調べることができるという、日震学の時間-距離法の新たな一面を明らかにすることができた。

## 5. 太陽極域の超粒状斑構造

太陽をめぐる謎の一つに、太陽活動度の時間変動が挙げられる。太陽黒点の出現数や太陽フレアの頻度など、太陽の活動度は約11年の周期で増減を繰り返している。しかし、この「11年周期」はそれほど厳密な周期性のあるものではない。変動振幅にも波があり、何十年にもわたって無黒点が続いた1600年代のマウンダー極小期のような例もあるほか、2008-2009年頃に活動が低調な時期が予期しないほど長く続いて話題になったことは記憶に新しい<sup>4)</sup>。この活動度の時間変動は、太陽内部の磁場とプラズマの流れの相互作用である「ダイナモ機構」が駆動しているとされているが、その詳細は観測的にも理論的にもはっきりしていない。観測的には、内部が「見えない」ことが機構解明が困難である原因の一つである。

このため筆者らは、局所の日震学的手法を用いて太陽内部のダイナミクスを描き出すことで、観測的にダイナモ機構を理解したいと考えている。これは大きなテーマであるが、まず手始めに本研究では、「ひので」の高分解能観測データを用いて、太陽極域のダイナミクス、特に対流セル構造

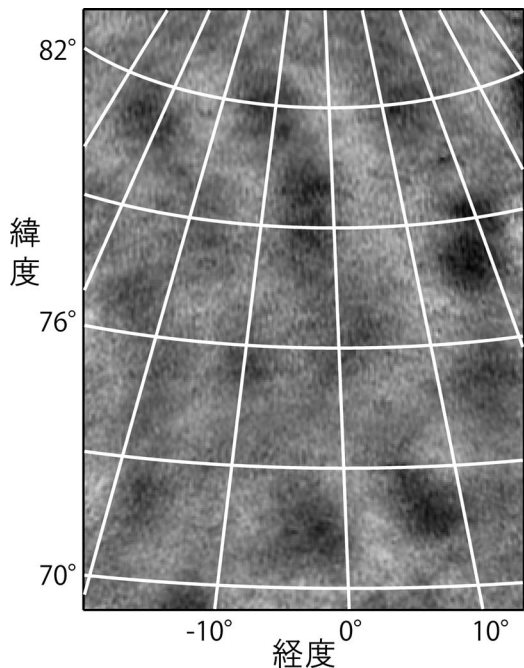


図 11 太陽の北極での外向き・内向きの伝播時間の差のマップ。

を日震学の時間-距離法の手法で調べた<sup>5)</sup>。

太陽は球形であるため、太陽の極域は、地球上を含む黄道面からの観測が最も困難な領域である。ただ、もともと高分解能の SOT では、ディスク中心部には劣ってもそこその分解能で見ることが可能である。「斜め」からの観測であることによるゆがみに関しては射影補正を行い、「真上」から見た姿に焼き直した。そのデータを用いて、音波の伝播時間を測ったのである。

この結果、筆者らが得た音波の伝播時間のマップを図 11 に示す。2009 年 9 月のある日の、太陽の北極にほど近い領域の外向き・内向き伝播時間の差のマップである。図 5 同様に、超粒状斑のセル構造が見えるが、大雑把に言って南北方向にセルが整列しているように見える。

現在までの太陽全体の対流を扱ったシミュレーションでは超粒状斑スケールまでは分解できていないが、ジャイアント・セルと呼ばれるもう 1 桁大きな 100 Mm スケールの対流セルの構造は研

究例がある。これらの研究<sup>6)</sup>によるとジャイアント・セルのスケールの対流構造は、赤道域近辺で南北方向に引き延ばされた「バナナ・セル」と呼ばれる構造になっている。実は、このような低緯度域においては、南北方向に超粒状斑セルが整列している例が Lisle らの研究<sup>7)</sup>で報告されており、彼らは、超粒状斑セルがそのバナナ・セルのセル境界に掃き寄せられた結果であると解釈している。しかし筆者らが観測したような高緯度域では、シミュレーション結果ではバナナ・セルのような特徴ある構造はなく、セル配置がもっとばらばらであるため、筆者らの見つけた南北方向の整列は期待できない。ただ、図 11 はある日の太陽の対流構造のいわばスナップショットであり、これだけからはこの整列の性質がまだはっきりしていない。また、ジャイアント・セルについてはそもそもその存在自体も観測的には確定していないのが現状である。本研究で観測的にその構造に迫っている可能性に期待しつつ、現在、さらに長期にわたるデータの解析を進めているところである。

## 6. 今後の展望

2010 年 2 月、NASA により新しい太陽観測衛星 Solar Dynamics Observatory (SDO) が打ち上げられ、日震学の研究もまた新たな段階に突入した。SDO は 3 台の観測機器を搭載しているが、そのうちのひとつ HMI は、日震学用の太陽全面の速度場観測を全面的磁場観測とともに行う装置である。視野は広くはないが高分解能を誇る「ひので」の SOT と、分解能はそれほど高くないが太陽全面という広視野観測が可能な SDO の HMI を組み合わせることで、局所的な構造と大局的な構造を相補的に調べていくことができると期待している。例えば「ひので」で見つけた高緯度での特徴的構造が、中緯度・低緯度でどうなっているのか、より広い範囲での構造を SDO で調べる、といったことが可能になったのだ。

また、本稿で紹介した時間-距離法をはじめと

する「局所的日震学」は、古くから使われてきた大局的な日震学と比べて、未熟な面もあるのが現状である。そのため、解析手法の開発・改良も今後重要な課題であるといえる。このため筆者らは、時間-距離法で用いる、振動シグナルの相関関数の性質を調べるといったアプローチでの手法の根本からの理解を進めている<sup>5)</sup>。太陽の振動は対流層での乱流的対流が励起したものだということは前で述べたとおりであり、すなわち振動源は時間・空間的にほぼランダムに分布している。このため、観測から得た振動シグナルの相関関数は、理論的に予測される期待値の周りにある程度ばらつく。筆者らの研究ではそのばらつき度合いを示す分布関数を、ランダムな励起機構モデルから数式的に示すことに成功した。これにより、振動シグナルの相関関数自体を理解することにつながられる。現在は相関関数が大きな値をとる時間差を「伝播時間」として取り出してきて内部構造の解析に用いているが、相関関数はそれ以外にもさまざまなパラメーターを含んでいる。それらをひっくるめて、相関関数全体を理解することは時間-距離法の発展には必要不可欠である。日震学のインバージョンの手法で出された結果をきちんと解釈するために、解析で一体何をしているのか一つ一つ解きほぐしていくと、結局のところ相関関数の性質の理解がまず必要なのである。

太陽活動度の時間変動メカニズムの謎は、太陽物理学での最大の謎の一つだと考えている。観測的に内部を調べるほぼ唯一の方法である日震学の手法をより完成度の高いものにし、また最新の観測データを活用して、この謎に挑戦していきたい。

## 謝 辞

本稿は、筆者が総合研究大学院大学在学中にまとめた学位論文の一部に基づくものです。在学中は日本学術振興会から特別研究員として援助していただきました。博士課程における指導教員の関井 隆氏（国立天文台）には、本研究を進めて

いくうえで助言をいただいただけでなく、学生生活全体を支えていただきましたことを、心から感謝しています。共同研究者の Alexander Kosovichev 氏、Junwei Zhao 氏との議論は本研究の中で重要なものでした。Ted Tarbell 氏には本研究で用いた SOT データの取得について有益な助言をいただきました。「ひので」の開発・運用にかかわってきた方々と、筆者の学部・修士・博士課程の各大学での学生生活を支えてくださった皆様に、感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 関井 隆, 1998, 天文月報 91, 92
- 2) Tsuneta T., et al., 2008, *Solar Physics* 249, 167
- 3) Nagashima K., Sekii T., Kosovichev A. G., Zhao J., Tarbell T. D., 2009, *ApJ* 694, L115
- 4) 草野完也, 2010, 「太陽黒点活動は回復するか?」, パリティ 2010年1月号, 50
- 5) Nagashima K., 2010, Ph.D. Thesis, Grad. Univ. for Advanced Studies [SOKENDAI]
- 6) Miesch M. S., Brun A. S., Toomre J., 2006, *ApJ* 641, 618
- 7) Lisle J. P., Rast M. P., Toomre J., 2004, *ApJ* 608, 1167

## Detections of Flow Field in the Sun by Local Helioseismology

Kaori NAGASHIMA

*Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford University, 452 Lomita Mall, Stanford, CA 94305-4085, USA*

Abstract: Helioseismology is the unique way to probe the solar interior structure and dynamics. By measuring travel times of waves between pairs of points on the Sun, we can detect local sound-speed anomaly and/or flows along the wave paths. In this article, we introduce the concept of this time-distance method and show two recent studies using the method: detection of chromospheric flows and investigation of supergranular structure in the polar regions of the Sun.