

ひので／SOTによる日震学

長 島 薫

〈Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von-Liebig-Weg 3,
37077 Göttingen, Germany〉
e-mail: nagashima@mps.mpg.de



太陽の振動を解析して太陽内部を探る—それが「日震学」の手法である。「ひので」での日震学の解析には主に可視光磁場望遠鏡（SOT）で取得された輝度データが用いられてきた。本稿では、多波長観測データを使った太陽大気中の流れ場の検出、SOTの高空間分解能を活かした極域の対流セル構造の解析、また黒点の内部構造解析など、ひのでによる日震学のこれまでの主な成果を紹介する。

1. 日震学（Helioseismology）

太陽表面で周期約5分（周波数にして約3 mHz）の振動が発見されたのは1960年代のことであった。後にそれは太陽の固有振動と判明し、その振動を分析して内部を探る「日震学」の手法による太陽内部探査が行われるようになった。太陽の振動は、対流層における乱流的対流により励起されたもので、基本的にはガスの圧力を復元力とする音波的振動であり、いわば太陽の「音色」の分析で内部を探るのが日震学の手法である。

日震学は、太陽内部の構造モデルの精密化や内部の自転（差動回転）速度分布の測定など、主に時間・空間的に大規模な内部構造・ダイナミクス解析を中心に、ダイナモ駆動機構に深く関係する太陽内部の理解に向けて重要な貢献をしてきた^{1), 2)}。特に1990年代には、日震学用にある程度特化された、地上観測ネットワークのGONGや太陽観測衛星SOHO搭載のMDIなど、太陽全面に及ぶ広い視野で月や年の単位で連続して取得された均質なデータも活用され、大きな成果を上げた。

またそういった質の高い観測データが取得できるようになったことで、時間・空間的によりローカルな現象を捉えるのに適した「局所の日震学

（local helioseismology）」と呼ばれる手法での解析が可能になった。ひので搭載の可視光磁場望遠鏡（SOT）のデータは太陽全面観測ではなく視野が限られるので、自然とこの手法による解析が主となり、本稿で紹介するのもこの局所の日震学の成果である。局所の日震学の手法にもいくつかの種類があるが、本稿で取り上げた成果で使われているのは「時間-距離法（time-distance method）」である。これは、地震波の伝わる様子から地球の内部を調べる地震学の手法と同様に、太陽を伝わる音波の伝播時間と伝播距離の関係から内部構造を調べる手法である。内部ほど音速が大きい球構造である太陽の場合、その表面のある点を通った波は、内部を屈折しながら進み、いつか再び表面まで達し、反射する。このため、太陽表面での2点間の振動の相関をとってその2点間の伝播時間を解析することで、2点間を結ぶ波の経路上（太陽内部）の物理的情報（たとえば音速や流れ場など）を得ることができるのである。時間-距離法のより詳細については、紙面の都合上、筆者の以前の天文月報記事³⁾などに譲らせていただきたい。

2. 当初の目的

ひのでのSOTは日震学解析用に特化した観測

装置ではなく、それまでに日震学で使われてきたデータとは性質が異なる。特に太陽全面観測ではなく視野が限られるために、距離-時間法で調べられるのは浅い部分(～8 Mm)⁴⁾に限られると見積もられた。しかしながら、地球大気の影響を受けずに長時間安定したデータがとれる点と、空間分解能が非常に高い点は、振動解析において利点となる⁴⁾。さらに、SOTの狭帯域フィルターグラフ(NFI)の観測波長の一つのFe I 5576 Åの吸収線はランダのg因子が0であって磁場によるゼーマン効果の影響を受けないため、磁場の強い黒点などの解析にそのドップラーグラムの活用が期待されていた。日震学解析用に取得されているドップラーグラムが、SOHO/MDI, GONG, またSOHO/MDIの後継機である太陽観測衛星SDO搭載のHMIのいずれも、ゼーマン効果を利用した磁場データを同時に取得するために磁場の影響を受ける吸収線が使われており、その影響が懸念材料でもあったためである。

3. 成 果

NFIのフィルター内に発生した問題でFe I 5576 Åのドップラーグラムの取得が限定的となったことから、日震学解析は主にSOTの広帯域フィルターグラフ(BFI)で取得された輝度データを用いて行われた。以下では、それらの成果のいくつかを、主に時系列に沿って四つのトピックに分けて紹介する。

3.1 成果1: 輝度データを使った光球・彩層の振動解析

日震学の解析では太陽面上での振動の速度場そのものが測れるドップラーグラムのほうが解釈はしやすいが、振動による気体の圧縮・膨張で表面輝度も振動するため、輝度データでも振動解析は可能である。日震学で使うような振動シグナルがBFIで得られたG-band(光球)やCa II H線(彩層低層部)の輝度データでも検出可能なことは初期成果論文⁵⁾で報告された。またこの二つの振

動シグナルの位相差についての研究で、表面波モード(f mode)と音波モード(p mode)で振る舞いが違うという思いがけない成果も出ている⁶⁾。

3.2 成果2: 多波長観測データによる太陽大気中の流れ場の測定

その後、Fe I 5576 Åのドップラーグラムも限定的に入手できたので、筆者らのグループでは、Ca II H線の輝度データとともに活用し、発達中の活動領域について音波の伝播時間測定を行った⁷⁾。この解析結果で、彩層低層部の輝度データには光球(Fe I 5576 Å)のドップラーグラムでは見られない伝播時間異常が検出され、これが彩層における下降流に由来すると解釈できたことは、天文月報の記事³⁾で解説したとおりである。普通は太陽の内部を調べる日震学の手法で、多波長観測データを使うことで太陽大気中の流れ場を捉えた、という一風変わった成果であった。

3.3 成果3: 極域の超粒状斑構造

太陽の極域は、地球の位置する黄道面上からの観測では斜めからしか見ることができないために、太陽面中心に近い領域と比べて実質的な空間分解能が落ちてしまい観測しづらい。しかしながら黄道面を脱出して太陽の撮像を行った例はいまだなく、極域の観測は现阶段では困難である。地球周回軌道上のひので衛星も黄道面からの観測にはなるが、空間分解能が高いため、極域でも今まで見えなかった細かい構造まで捉えられると期待できた。日震学以外でもSOTやX線望遠鏡(XRT)での極域磁場の研究が行われているように⁸⁾、極域は注目度の高い領域である。

太陽の自転軸と地球の公転面の角度の関係で、地球から見える太陽面は1年で緯度にして±7度程度南北に揺れる。これを利用して、特に南極側がよく見える3月と北極側がよく見える9月に集中的に観測を行い、できる限り極に近い領域の流れ場を音波の伝播時間測定から解析し、特に直径20,000 kmほどの対流セル、超粒状斑の構造を調べた⁹⁾。図1に、2010年9月頃の約1カ月間の

データから得た、北極域の超粒状斑構造を示す。超粒状斑を分解できるほどの全球の対流シミュレーションはいまだないが、1桁大きなジャイアント・セルと呼ばれる対流セルについては、低緯度でのセルの整列が見られる¹⁰⁾。しかし、この極域の観測ではむしろ極域に南北方向に整列する様子が見られた。その原因や太陽活動との関係など詳細は未解明である。

3.4 成果4: 黒点の構造解析

筆者自身も博士論文研究では黒点の解析を行いたいと考えていたが、その頃は予想外に黒点の出現しない時期が続いた。NFIフィルターの問題による制限とこの無黒点時期のため、磁場の影響を受けないドップラグラムでの黒点データ解析は行えていないが、SOTの輝度データでの振動解析には、その高い分解能を活かして黒点暗部振動

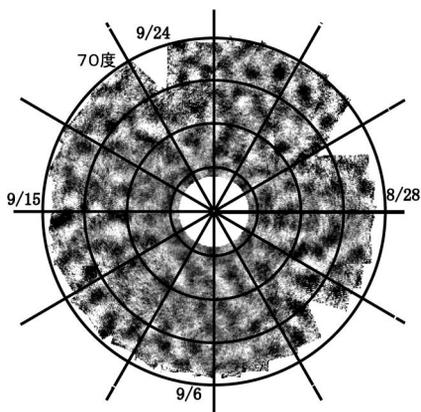


図1 2010年8月末から約1カ月間の北極域の超粒状斑構造マップ。3時方向から時計回りに時系列となっている。物理量としては、特定の距離(14.4 Mm)を外向きに伝播する場合と内向きに伝播する場合との時間差を用いており、黒(外向きの方が伝播時間が短い)は湧き出し流の領域で対流セル中心にあたり、白は逆に吸い込み流の領域のセル境界にあたる。同心円は外側から北緯70度から5度ごとに引いた等緯度線であり、中心点は太陽の北極点にあたる。1回に観測できる領域は北緯75度でもせいぜい東西の経度±20度以内程度に限られ、この図は約1カ月に及ぶデータを北極点を中心とする正距方位図法で合成したものである。

の微細構造を調べた研究¹¹⁾や太陽での“地震”、太陽震(Sunquake)の研究¹²⁾などがある。

黒点の周囲では、ときに爆発現象フレアが起こることはよく知られている。こういった爆発現象に伴い、フレアの発生場所付近から基本的には同心円状に波紋のように広がる磁気流体波の振動がまれに観測される。これが太陽震であり、その一例がSOTのCa II Hの輝度データで捉えられた¹²⁾。波の伝わり方を調べることでその波の正体が磁気流体波の一種であることが推察されるが、逆にその伝わり方から周囲の磁場構造などを調べられる可能性がある。黒点の磁場構造は非常に複雑であり、こういった波とその複雑な磁場の相互作用は興味深い。

黒点の内部構造の日震学的解析は、SOHO/MDIやSDO/HMIなどのデータでも行われてきたが、手法についてもその解析結果についても、まだ統一見解は得られていないというのが正直なところである。磁場が強い黒点ではドップラグラムから磁場の影響を完全には分離できない問題もある。しかしそれ以上に、精密化の進んだ静穏領域の大局的な太陽内部モデルと違って、黒点の統一的な内部構造モデルが现阶段ではないため、黒点内部は「想定したモデルからのずれが十分小さい」場合に使える線形計算では不十分であることも原因に挙げられる。このような現状ではあるが、SOTのデータを使って日本列島に似たような複雑な形状をした黒点の内部構造解析を行った研究例もある¹³⁾。この論文における内部構造解析結果では、より低空間分解能のSOHO/MDIなどでも見られていた黒点表面下の大局的な流れ構造に加えて、黒点暗部に見られた明るい部分、ライトブリッジの下に“熱い”(音速の速い)部分があることやこの部分からの湧き出し流が見られるなど、黒点の微細構造に関連した流れ場も報告されている。

4. 今後の見通し

局所の日震学の手法で最近問題となっているのが、前章で挙げた磁場の強い領域での解析の困難

さと、太陽面中心からの距離などに依存する原因未解明の系統誤差の問題 (center-to-limb variation) だ。後者は日震学の解析結果 (伝播時間やそれから計算した流れ場など) がディスク上の位置に依存してしまうというものである。もしこの補正をしないで解析を行うと、たとえば、同一緯度線上では自転の速さはほぼ一定であるはずの静穏期の太陽でも、大きな経度依存性があるように見える、といった誤った結果を得てしまう。これは、SOTのデータやわれわれのグループの手法に限ったものではなく、ほかの観測装置データ・解析手法でも見られ、また観測量によって振る舞いが異なることも知られている¹⁴⁾。この系統誤差にはいろいろな原因が考えられる。比較的単純な例を挙げると、ディスク中心から離れるに従って分解能が方向によって異なる落ち方をする効果、またディスク中心から離れるに従って見通す大気の厚さが厚くなるために形成層がより上層になる効果、などがあるが、そういった単一の原因やその簡単な組み合わせで説明がつくほどに単純ではなさそうであることがわかってきた。太陽全面を観測しているSDO/HMIなどの場合は、原因の理解はともかくとして経験的にデータを補正する、ということも可能は可能だが¹⁴⁾、SOTのように視野が限られたデータの場合、この補正は原因の解明ができていない段階では困難であり、特に極域の解析にはこの問題が無視できないため、より慎重な解析が求められることとなった*1。

局所の日震学は日震学の中でもまだ「若い」方法であり、SOTデータ解析に限らず、上述のように解析手法にまだ改善の余地がある、と院生時代から感じている。筆者の博士論文でのSOTデータの日震学解析では日震学向けのデータとのさまざまな違いにも苦労したが、貴重な経験となったことは感謝している。その経験を活かし

て、手法のさらなる改善を目指して局所の日震学の研究を進めていきたい。

謝 辞

筆者はEU FP7 Collaborative Project “Exploitation of Space Data for Innovative Helio- and Astero-seismology” (SPACEINN) から補助を受けた。関井隆氏には原稿について有益なコメントをいただいたことを感謝する。

参考文献

- 1) 関井隆, 1998, 天文月報91, 92
- 2) 関井隆, 2009, 科学 (岩波書店) 79, 1357
- 3) 長島薫, 2010, 天文月報103, 756
- 4) Sekii T., 2004, Astronomical Society of Pacific Conference Series 325, 87
- 5) Sekii T., et al., 2007, PASJ 59, S637
- 6) Mitra-Kraev U., et al., 2008, A&A 481, L1
- 7) Nagashima K., et al., 2009, ApJ 694, L115
- 8) 常田佐久, 2008, 天文月報101, 638など
- 9) Nagashima K., et al., 2011, ApJ 726, L17
- 10) Miesch M. S., et al., 2006, ApJ 641, 618
- 11) Nagashima K., et al., 2007, PASJ 59, S631
- 12) Kosovichev A. G., Sekii T., 2007, ApJ 670, L147
- 13) Zhao J., et al., 2010, ApJ 708, 304
- 14) Zhao J., et al., 2012, ApJ 749, L5

Helioseismology Analyses with Hinode/SOT Datasets

Kaori NAGASHIMA

*Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung,
Justus-von-Liebig-Weg 3, 37077 Göttingen, Germany*

Abstract: Helioseismology provides us with a unique tool to probe the interior of the Sun. In this article I introduce what we have got so far from the helioseismology analyses of the datasets obtained by the Solar Optical Telescope (SOT) on Hinode, such as helioseismic detection of atmospheric downflows using multiwavelength observation datasets, illustration of the convection-cell structure in the polar regions, and sunspot analyses.

*1 前述の極域の超粒状斑構造の解析結果については、各地点での湧き出し流を測るのにその点を取り囲む円環上での振動シグナルの平均を使っている^{3), 9)} 関係で、この系統誤差の影響は小さいと考えられる。しかし、たとえば東西方向の自転や南北方向の子午面還流といった流れ場を出そうとすると、この補正が必須となる。