



日震学の最近の話題から

関 井 隆

〈Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, United Kingdom〉

e-mail: sekii@ast.cam.ac.uk

ESA/NASA による科学衛星 SOHO による結果を中心に、日震学の最近のトピックスを紹介する。

1. はじめに

以前ある人（生物化学が専門）に「太陽は振動しているんですよ」と話したら、「えっ、そうなんですか」とあんまり目を丸くするのでよく聞いてみると、「太陽が宇宙空間で、ヨーヨーみたいに上下に行ったり来たりしているのかと思った」ということがあった。実は、見かけ上そんな風に見える場合もあるのだが、取り敢えずここでいう太陽の「振動」は、「弦の振動」や「膜の振動」等で言う「振動」であって、太陽の（表面を含めた）内部に波が発生して、太陽自体が「ふるえる」現象のことである。あるいは「脈動」と言えば上のような誤解は生じなかったのかも知れない。

そんな波が発生するそもその原因はひとまず置くとして、発生した波が太陽内部を伝わる伝わり方は、媒質としての太陽の性質によって決まる。反対に、この太陽の振動・脈動、特に固有振動（定在波）の観測をもとに太陽内部の構造を探るのが日震学（helioseismology）である。ドップラー効果による吸収線のずれを利用した太陽面速度場の観測から、速度場に約5分の周期で振動する成分（いわゆる太陽の5分振動）が見つかったのは60年代初頭にさかのぼる。その後、この振動成分は太陽の多数の音波的（弾性波的）な固有振動から来ているものであることがわかり、これら固有振動の振動数も測られるようになった。80年代に入る頃までには、固有振動に関する理論と新しいデータ、特に数千、数万という数の固有振動数をもと

に、後で触れるインバージョンの方法を使った本格的な内部構造探査が始まっていたのである。

この天文月報に柴橋・関井の解説記事¹⁾が二回にわたって掲載されたのは93年の秋のことだった。それ以来、GONG計画の観測開始、ESA/NASAの科学衛星SOHOの打ち上げなど、日震学にとっては大きなイベントが続いたので、この辺りで最近の状況を眺めてみよう。

2. 日震学の新しい観測・GONGとSOHO

日震学の一番の基本は、固有振動数の精密測定である。ストップウォッチを片手に、振り子を振らせて周期を測るには、何周期分も振らせて時間を測る方が精度がよい。また、途中で目を離してもいいが、周期にくらべてあまり長い間はいけない。同じように、太陽の固有振動数を精度よく測るには、長い時間出来るだけ続けて観測することが必要なのである。地上の一観測所からでは、これは難しい。夜になると日は沈んでしまうし、天気の悪い日もある。一つの解決法は、地球上の広い範囲にいくつも観測所を置いてネットワークを張り、いつでもどこかから太陽を見ていられるようにすることである。もう一つは、宇宙へ出ることだ。宇宙へ出ると、地球の大気の揺らぎから来るノイズに悩まされなくて済むという利点もある。実際の太陽振動は励起されたり減衰したりしているため、振動の寿命（コヒーレンスを保つ時間）も測定精

度を定める重要なパラメータなのだが、これは太陽の方で決まっていることで、観測する側がどうこう出来ることではない。

地上観測ネットワークの代表である GONG (Global Oscillation Network Group) 計画²⁾は、世界の6ヶ所に同じデザインの望遠鏡を置いてネットワークを張り、95年に本格的な観測を開始して以来、90パーセント以上の時間をカバーすることに成功している。GONGでは256×256のCCDを使い、吸収線のドップラー偏移を利用した速度場の測定をしている。

一方、95年末に打ち上げられたESA/NASAの科学衛星SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)は、地球と太陽の間のラグランジュ点(L1)から太陽の連続観測を行なっている。SOHOはたくさんの観測機器を搭載しているが、そのうち日震学に関わるものはSOI-MDI, VIRGO, GOLFの3群ある。

最初のSOI-MDI (Solar Oscillation Investigation / Michelson-Doppler Imager)は1024×1024のCCDを使い、高分解能で太陽面上の速度と輝度の変動を観測する。デザインの上からも、プロジェクトのスケールの上からも、SOI-MDIはSOHOによる日震学観測の中心的存在である。次のVIRGO (Variability of solar IRradiance and Gravity Oscillations)は数個の観測機器から構成されているが、日震学用のものとして中心となるLOI (Low-degree Oscillation Imager)は、太陽面を12個の部分に分けて輝度の変動を観測し、水平方向の波数の小さな('low-degree'とはこのことを指している)振動成分を輝度の変動から検出する。

このVIRGOの名前の後ろ半分、'Gravity Oscillation'は重力波モード(あるいは浮力モード)のことである。これは水面波と基本的には同じ性質の現象が、太陽内部の密度の勾配(水面と違って密度のジャンプではない)で起こっているもので、上で触れた音波的なモードとは物理的性質が異なっている。音波モードをpモード('pressure mode'の略)と呼ぶのに対して、こちらはgモード('gravity

mode'の略)と呼ばれる。実は、太陽の中心部の状態にはこのgモードの方が敏感なので、太陽の中心部分について調べるためには重要なのだが、今日までgモードが明確な形で検出された例はない。太陽の外側には、エネルギーの輸送が対流によっている部分があって対流層と呼ばれているのだが、gモードはこの対流層内部で減衰してしまうのが、検出を難しくしている。最後のGOLF (Global Oscillations at Low Frequency)はこのgモード探しが主目的である。

表紙の図(左)は l - ν 図と呼ばれ、SOI-MDIによる速度場の観測(60日間)から得られた太陽振動のパワースペクトルを、水平方向の波数に関するパラメータ l と振動数 ν に対して示したものだ。周期5分は振動数で約3ミリヘルツに当たる。左下から右上に走る何本かの曲線(リッジ)に沿って、パワーが集中していることがわかるだろう。それぞれのリッジは、実は沢山のpモードの集まりである。ボケて見える(幅がある)のはモードの寿命が有限なためで、寿命が長くなればなる程、リッジはシャープになる。リッジに下から順番に $n = 0, 1, 2, \dots$ と番号を付けることにすると、実はこの n は、リッジの上にあるモードの固有関数の、動径方向の節の数になっている。横軸の l は一定の半径(例えば表面)に現れる節線の総数なのだが、水平方向の波数を太陽半径を1とする単位で表すと $\sqrt{l(l+1)}$ になるので、この二つはラフな話の中ではよくごっちゃにされる。先程のLOIの説明の所で出て来た'degree'というのは、この l のことである。簡単に言えば、 l - ν 図におけるパワーのピーク的位置から、特定の n と l に対応するモードの振動数を求めることが出来る。

ところで、太陽のような3次元の振動体では、 n や l のような「量子数」は全部で3つあるはずだ。この3つ目の量子数は、一定の半径に現れる節線(総数は l 本)のうち極を通るもの数で、 m と書く習慣になっている。実は、 l - ν 図のリッジを構造の細かいところまで見てやると、一本一本が更に



何本ものリッジに分かれていて、それぞれ違った m に対応していることがわかる（結局はボケて重なりあっているのだが）。つまり、 n と l が同じでも、 m が違えば振動数は僅かに異なるのである。僅かにしか違わないのは、太陽が球対称に非常に近いからだ。太陽が完全に球対称なら、どこを極に選んでも結果は同じはずなので、「極を通る節線の数」などというものは意味がなくなり、振動数は n と l だけで決まってしまう。一方、少しでも球対称からずれていれば振動数に m による差が出て、リッジは分裂する。太陽の場合、この分裂は主として自転によって引き起こされていると考えられる。太陽の自転はゆっくりなので線型摂動論を使うと、自転による振動数のシフトは、 $m \times$ （自転角速度の重みつき平均）に比例することがわかる。太陽の場合、このシフトは最大で $l \times 0.5$ マイクロヘルツ程度と小さい。

3. インバージョン

波の励起・減衰などは考えないことにし（断熱自由振動）、自転のこともしばらく忘れよう。この場合、太陽内部の波の伝播は、体積弾性率と密度の分布を与えれば決まってしまう。これは、（断熱）音速と密度の分布を与えるのと同じだ。この2つが太陽の「媒質としての性質」なのである。太陽のモデルがあってこの2つの量の分布がわかれば、適当な境界条件のもとで固有値問題を解くことによって、実際に固有振動数を求めることができる。一方、このプロセスを逆にして、振動数の観測値から音速や密度を求める問題を逆問題（inverse problem）といい、実際に求める手続きのことをインバージョン（inversion）という。自転を考慮に入れる場合には、前節で触れたように線型摂動論を使って、自転のために振動数がどれ位シフトするかを計算する。シフトの観測値から自転角速度の分布を求める問題が、この場合の逆問題である⁴⁾。

平衡構造の逆問題の場合に、現在もっとも標準的なやり方は次のようになっている。まず基準とな

るリファレンス・モデルを用意し、このモデルについて固有値問題を解いて、固有振動数を計算する。また、モデルの音速と密度を少しだけ変えた時に、この変化が固有振動数にどのように影響するかを見ると、変化が小さい時には振動数の差は、音速や密度の変化量の重みつき平均に比例することがわかる。最後に、リファレンス・モデルの固有振動数と観測値とをくらべて、出て来た差を逆に音速や密度の差に戻す。早い話が、自転を考える場合と同様に、これも線型摂動論を使っているのである。本来は固有値問題の逆問題であるものを、線型摂動の逆問題に置き換えることにより、逆問題も線型になって解の信頼性などの診断も容易になる。自転構造の推定の場合は、振動数のシフトの計算からして線型摂動論に頼っているので、逆問題も最初から線型である。

上のいずれの場合にも、観測データは推定のもとになる拘束条件を提供している。独立な拘束条件がたくさんあればそれだけ、自転角速度なら自転角速度の分布に制限をつけることができる。観測・モデル間の振動数の差や、自転による振動数のシフトが、推定したい量の重みつき平均に比例していることはすでに書いたが、大事なはこの重みのつき方がモードによって違っていることだ。このことによって、モードごとの振動数の観測が独立な情報を提供することが保証される。そうでないと、逆問題はあまり意味のある形では解けない。

図1は、SOI-MDI データ（360日間）のインバージョン⁵⁾から求めた太陽内部の音速をリファレンス・モデル⁶⁾の音速とくらべ、これを2乗の相対差の形でプロットしたものである。縦軸のスケールを見れば、基本的にはモデルは非常によいことがわかる。目を引くのは、 r/R が約 0.7 の所で音速の差が局所的に大きくなっていることだ。実は、ここは先程少し触れた太陽の対流層の底にほぼあたっている。図1の結果は、エネルギーの輸送が放射から対流に切りかわる辺りで、モデルの音速が低すぎることを示しているのである。同様の結果は

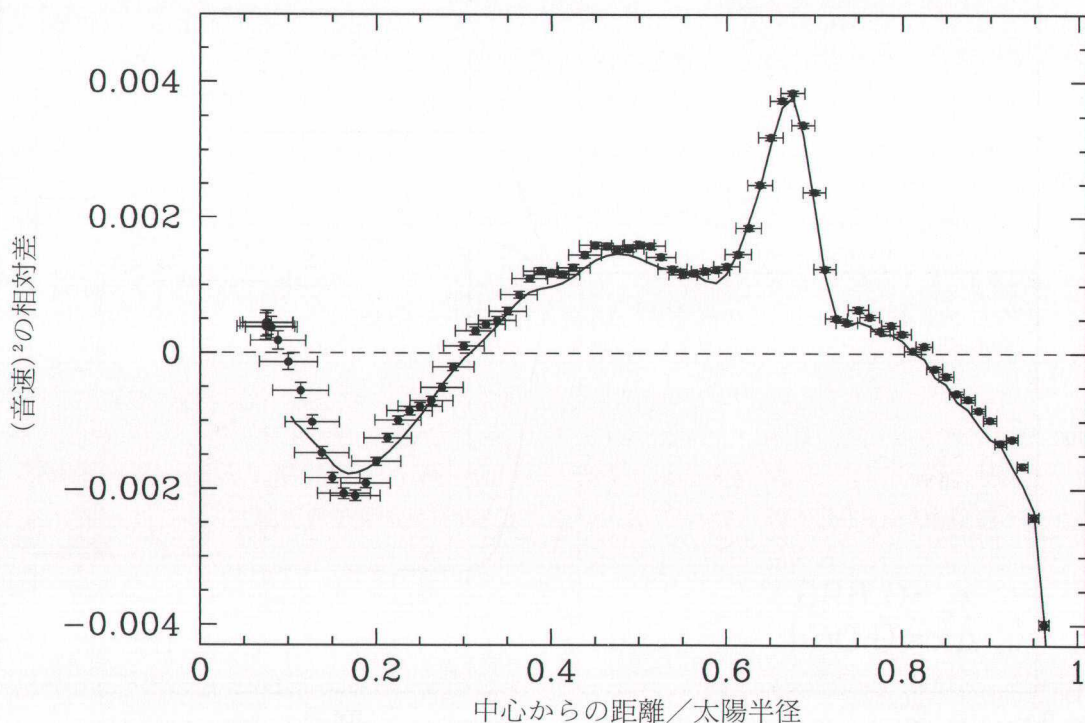


図1 MDIのドップラー速度のデータ(360日間)のインバージョンから求められた、音速のインバージョン。太陽内部の音速の2乗を、リファレンス・モデルの値との相対差にして示してある(黒丸)。縦棒は誤差、横棒は分解能を表している。背後を走る曲線は、データ解析の方法を少し変えた場合の結果(Kosovichev A.G., et al., 1998, in *New Eyes to See Inside the Sun and Stars: Pushing the Limits of Helio-and Asteroseismology with New Observations from the Ground and from Space*, XXIIIrd General Assembly, Kyoto (Kluwer) より転載)。

GONG データからも得られている⁷⁾。

表紙の図(右)は、やはり SOI-MDI データ(144 日間)のインバージョンによる、太陽内部の回転角速度の分布である。ここでもまた、対流層の底にあたる場所がある種の遷移層になっていることが見てとれる。遷移層より外側では角速度の動径方向の変化は小さく、大まかに言えば、表面で見られるような緯度方向の微分回転がずっと深い部分まで続いているのに対し、内側では、ほぼ剛体回転をしているのである。図2は GONG データ⁸⁾に特定の関数形をフィットして、自転角速度だけでなく、遷移層の中心と厚みを求めたものである⁴⁾。ここでは、自転角速度がある深さより下

では一定であること、そこからある厚みの層の中でなめらかに緯度方向の変化が生じて来て、そこから外側では動径方向の変化は階段関数になっていること、等を仮定している。遷移層の中心と厚みとは、自転による振動数のシフトと線型の関係にはないので、これは一種の非線型インバージョンだと言ってもよい。このインバージョンの結果、遷移層の厚みは太陽半径の6.4パーセントと求まっている。

実は、このような遷移層の存在は GONG / SOHO 以前から疑われていた。Spiegel と Zahn⁹⁾は、このような遷移層をタコクライン('tachocline', 「速度の勾配」という意味)と名付け、タコクライン内部で

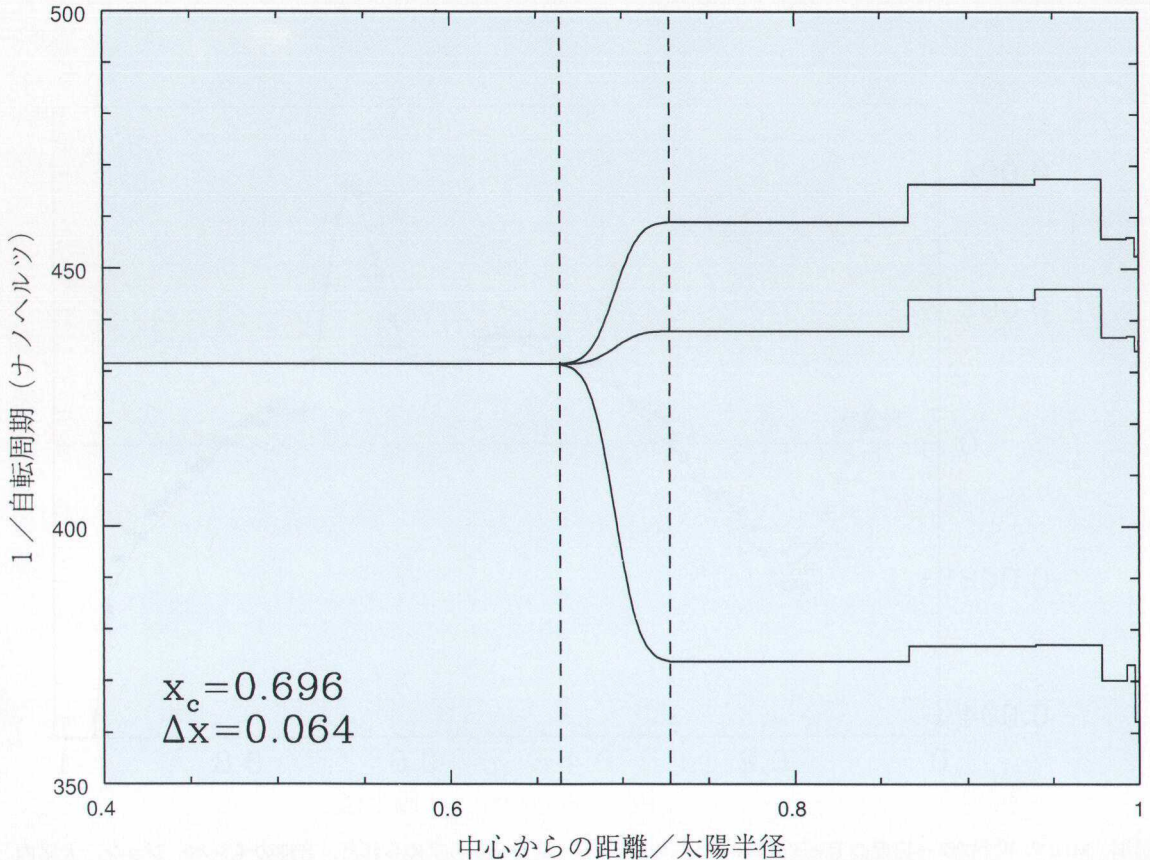


図2 GONG データの非線型インバージョンで求められた、太陽内部の自転角速度の動径方向の変化。上から赤道、緯度 30° 、緯度 60° における変化を示してある。 x_c は遷移層の中心の位置、 Δx は厚み。

は乱流が起こると主張している。インバージョンに見られる遷移層は、本当に Spiegel と Zahn の言う意味でのタコクラインなのだろうか？

平衡構造のインバージョン（図1）に話を戻してみよう。対流層の底の近くで、モデルの音速は低すぎた。音速の2乗は温度を平均分子量で割ったものに比例するので、これは温度が低すぎるか、平均分子量が高すぎるかのどちらか（あるいは両方）でなくてはならない。温度をいじろうとすると、放射層で温度勾配を決めている光吸収係数をいじらなくてはならないが、すべてを光吸収係数の違いで説明しようとする、この違いが丁度うまい具合に、対流層の底の近くに対応する温度・密度で起こっているだけでなく、この領域の外では音速がモ

デルの値にほぼ一致するように勾配を決めている必要がある。そんなうまい偶然があるだろうか？平均分子量はどうだろう。実はリファレンス・モデルでは、水素よりも重いヘリウムが、対流層の底に積もって来ることを計算に入れている。もしタコクラインの中が乱流によってかき回されていると、この積もったヘリウムは対流層内部に戻されるので、これを勘定に入れられないモデルでは、対流層の底でのヘリウム量は多すぎることになる。つまり、モデルではこの層での平均分子量が高すぎることになって、うまく観測／インバージョンの結果を説明するのである。以上の話だけでは、タコクライン内の乱流・元素の混合の決定的な証拠にはならないが、インバージョンから求められた音速

の分布と自転角速度の分布を、うまく結びつける魅力的なシナリオであることは間違いない。

4. その他のトピック

GONG, SOHO ともに、現在観測データを更に蓄積している最中である。データの蓄積につれて、タコクラインの構造や深部の状況など、太陽内部のもっと詳しい事情がわかって来るだけでなく、活動周期につれてどのような変化が見られるか、などもこれまで以上に明らかになって来るだろう。一方、問題も出て来た。

図3は l - ν 図をある特定の l の値でスライスして、その断面をプロットしたものだ。以前は、固有振動数を決める時には基本的にはこうしたプロットに現われるピークを中心を、ローレンツ曲線のフィッティング等を使って求めていた。しかし、このプロットを見るとピークの形は左右非対称になっていて、とてもローレンツ曲線でフィット出来るようなものではないことがわかる。非対称性の存在は既に Duvall たちが気づいていたが¹⁰⁾、こんなにはっきりと示したのは、ノイズレベルの低い SOI-MDI による観測が初めてだった。バックグラウンドのノイズレベルが高いと、ピークの上の方しか見えないからである。

非対称の原因については Duvall たちが最初から、励起のメカニズムとの関連を指摘していた。現在のところ、太陽の振動は対流層内部の乱流による音波の放射が源になっている、という説が広く受け入れられているのだが、Duvall たちは、音波源が太陽の表面に近い薄い層に局在しているとする、ピークの非対称が自然に説明できることを指摘したのだった。しかし、実はもう一つ問題があって、ドップラー速度のデータと輝度によるデータとでは、このピークの非対称の様相が違っているのである。図からわかるように、速度の変動から出て来るパワーのピークは振動数の高い側にシフト（低い

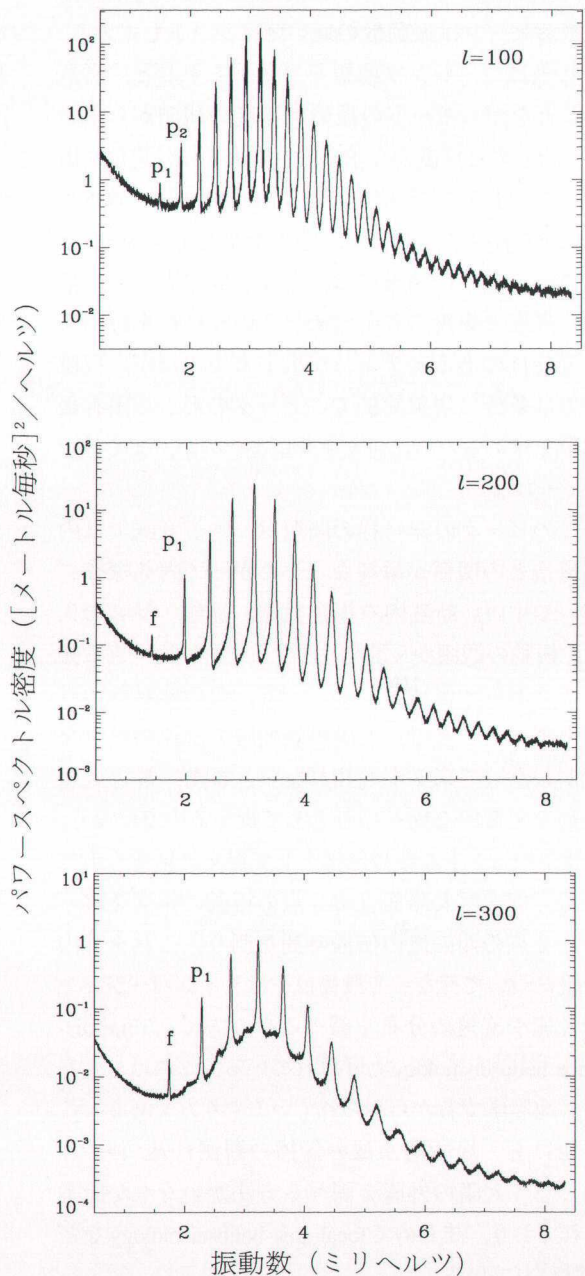


図3 表紙の図(左)のパワースペクトルを特定の l の値のところでスライスしたものの断面図。ピークの形の非対称が現われている。[図は SOHO / SOI-MDI プロジェクト(スタンフォード大学/ロッキード)提供。SOHO は ESA と NASA の共同プロジェクトである]



側の裾が伸びている)のに対し、輝度の方から出て来るピークは振動数の低い側にシフトしている。無邪気にローレンツ曲線をフィットすると、当然のことながらモードの振動数速度の観測から求められたものと輝度から求められたものには違いが出て来てしまう。この差は数字にすればマイクロヘルツ以下の小さなものだが、図1で見たインバージョンの中心近くの結果にはかなり影響が大きい。最近、速度と輝度の差も含めてこの非対称を説明する可能性のあるモデル¹¹⁾が出て来たのだが、现阶段では多分に現象論的で、ピークの形から固有振動数を求めるために何をすればよいのか、までは教えてくれない。

このピークの非対称の問題は、ある意味では内部構造との関係が単純な(したがって内部探査に使いやすい)断熱固有振動数を、励起・減衰の入った振動の観測から導こうとするために出て来る難しさであると言ってよい。一方、この非対称の原因を調べることで、太陽の表面層の乱流の性質などがわかって来るかも知れない。また、最近太陽振動を定常的な固有振動として捉えるのではなく、トランジェントな波の伝播として捉える見方も出て来た。例えば太陽面上の2点の振動の相関を取って、2点の間の波の伝播時間を測り、これを沢山の組について行なって最後はやはりインバージョンで音速や流速の分布を調べるやり方で、'time-distance helioseismology'と呼ばれている。これはもちろん、地震学で昔からやられているやり方である。この他にも、局所的な波の伝播の観測に基づいて、主として太陽の外層を調べる方法がいくつか提案されており、まとめて'local-area helioseismology'などと呼ばれている。

最後に、gモードは果して見つかるのだろうか。SOHOの打ち上げ当初は、宇宙へ出てノイズレベルが下がることで、もしかしたらgモードのピークがバックグラウンドのノイズからきれいに顔を出してくれるかも知れない、という希望があったのだが、これまでの所、残念ながらそうはなっていない。も

っと観測を続ければ相対的にバックグラウンドは下がるが、どれ位待つ必要があるのかはgモードの振幅と寿命がわからなければ知りようがない。取り敢えず、ノイズに埋もれているものを捜す手立てが要りそうだ。これには、gモードの信号の予想される性質、ノイズとの性質の違いなどを利用する他、いろいろ性質の違うデータを組み合わせ、相関をとったりすることも役立つと思われる。このために、例えばSOI-MDIの速度のデータとLOIの輝度のデータを組み合わせる試みが始まっている。

参考文献

- 1) 柴橋博資, 関井 隆 1993, 天文月報 86, 416
柴橋博資, 関井 隆 1993, 天文月報 86, 461
- 2) Harvey J., et al., 1996, Sci 272, 1284
<http://helios.tuc.noao.edu/>
- 3) Domingo V., Fleck B., Poland A.I., 1995, Solar Physics 162, 1
<http://sohowww.nasacom.nasa.gov/>
- 4) Sekii T., 1998, in IAU Symp 181, Sounding Solar and Stellar Interiors, Provost J., Schmitter F.-X. (Kluwer), p.189
- 5) Kosovichev A.G., et al., 1998, in IAU Symp 185, New Eyes to See Inside the Sun and Stars: Pushing the Limits of Helio- and Asteroseismology with New Observations from the Ground and from Space, ed. Deubner F.-L., Christensen-Dalsgaard J., Kurt & D.W. (Kluwer), in press
- 6) Christensen-Dalsgaard J., et al., 1996, Sci 272, 1286
- 7) Gough D.O., et al., 1996, Sci 272, 1296
- 8) Thompson M.J., et al., 1996, Sci 272, 1300
- 9) Spiegel E.A., Zahn J.-P., 1992, AA 265, 106 eds.
- 10) Duvall T. L., Jr., Jefferies S. M., Harvey J. W., Osaki Y., Pomerantz M. A., 1993, ApJ 410, 829
- 11) Roxburgh I.W., Vorontsov S.V., 1997, MNRAS 292, L33
Nigam R., Kosovichev A.G., Scherrer P.H., Schou J., 1998, ApJ, in press

Recent Topics in Helioseismology

Takashi Sekii

Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge CB3 0HA, United Kingdom

Abstract: Selected topics from the recent development in helioseismology are reviewed. The emphasis is on those findings from the SOHO satellite, a joint ESA/NASA mission.