

日震学への招待 II

柴橋博資

〈東京大学大学院理学系研究科天文学教室 〒113 東京都文京区弥生 2-11-16〉

e-mail: shibahashi%tkyast.decnet@utsun.s.u-tokyo.ac.jp

関井 隆

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

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

地震波から地球の内部構造を探るのと同じ原理で太陽の内部を探ることが出来る。最近の進展により、この試みは、単にパラメーターフィッティングを行うレベルを越えて、より直接的に太陽の内部構造を求める事が出来る段階になった。前月号に続き、この分野の現況を概説しよう。

8. 標準太陽モデル

恒星の内部構造や進化の理論的研究は完成度が高いと前に書いた。それではこの理論体系に沿った太陽の理論モデルとはどんなものだろうか。現在の太陽の質量、半径、光度は、それぞれ精度良く測られている。太陽の年齢は、隕石の年代測定から、約47億年とされる。そこで、年齢47億年で、質量、半径、光度が現在の太陽にマッチする理論モデルを構築することを考えよう。

恒星の進化理論によれば、恒星の進化は星の質量と化学組成に依存している。ある年齢でのその星の光度は、星の質量と化学組成に因っているのだ。誕生から現在に至るまで、太陽の質量は変わっていないとする。だから、モデルの質量は現在の太陽質量を考えればよい。化学組成については、次のように考える。恒星は、その誕生期において、星全体で対流が起こっている林フェーズと呼ばれる時期を経ると考えられていて、対流で内部がかきまわされる結果、この時期には化学組成は星全体で一樣に混ざっていると考えられている。そこで、ゼロ歳の太陽は化学組成一樣と仮定する。化

学組成の重力による拡散分離は少ないと見積られるので、誕生から現在に至るまで、化学組成は太陽内部の核融合反応によってのみ変化してきているとする。核融合反応は高温高密度の太陽の中心部でしか起こらないから、太陽表面での化学組成は誕生以来変わっていないものとする。現在の太陽の表面の化学組成は、分光観測により知ることが出来る。但し、重い元素の水素に対する相対的組成比は良く決まるものの、水素に次いで多いヘリウムの量は決めにくい。そこでヘリウムの組成比はモデルを構築する際のパラメーターとして扱う。そこで重元素と水素の組成比は現在の太陽の表面での値と同じで化学組成一樣の1太陽質量の星のモデルを作る。自転や磁場はないものとして、星は完全に球対称とする。星は重力とガス圧で釣り合っていると、熱的収支のバランスがとれているとする。核融合反応率、輻射吸収率、ガスの状態方程式等の物理素過程については最新のものをを用いる。こうして作った年齢ゼロの星をもとに47億年進化したモデルを計算する。できたモデルを太陽のモデルと見做せるには、モデルの光度が現在の太陽光度になっていて、且つ、半径が現在の太陽半径になっていなければならない。このうち、光度は最初に仮定したヘリウムの組成比に強

Hiromoto Shibahashi, Takashi Sekii: Invitation to helioseismology II.

く依存している。そこで、光度が太陽光度になるように初期のヘリウム組成比を選ぶ。一方半径は、対流のエネルギー運搬効率をどう扱うかに強く依存している。幸か不幸か、対流に関する完璧な理論を我々は未だ持ち合わせておらず、恒星内部での対流の効率はパラメーターとして扱わざるを得ない状況にある。そこで、年齢 47 億年のモデルの半径が丁度太陽半径になるようにこのパラメーターを選ぶ。かくして恒星進化理論に基づく太陽モデルが作られる。これを標準太陽モデルと称する。前に述べた太陽ニュートリノ問題とは、現実測定した太陽ニュートリノフラックス量が、こうして作った標準太陽モデルから予測される値に比べて有意に少ないという問題なのである。

9. 太陽モデルの再構築：太陽は思ったより若い？ 老けている？

日震学による音速診断で見ると、現実の太陽と標準太陽モデルの一致が完全ではない事は明らかだ。より合理的なモデルを構築するために、標準太陽モデルを作る際の仮定をチェックしてみよう。モデルの質量、半径、光度は、太陽の質量、半径、光度になっていなければならないのは自明である。これらの量は精度良く測定されていて、測定誤差は小さい。重力とガス圧が釣り合って静水圧平衡になればならない事も、必ず満たさなければならない条件だ。もし静水圧平衡にないとしても、およそ 1 時間の後には平衡状態に落ち着くからだ。これらの絶対的条件に比べ、他の仮定の実験的或いは理論的基盤は必ずしも揺るぎ難いものとは言えない。実際、これまでにも、太陽ニュートリノ問題の解決を目指して、標準モデルにはない色々な仮定前提に基づいた非標準モデルが幾つも提唱されてきた。ただ、これらの非標準モデルで導入された仮定前提の多くは、標準モデル作成の際の仮定に比べ実験的基盤が強いものではなく、また理論的必然性が強いわけでもなく、また全てに整合性がとれたモデルではなかったがた

めに、標準の座にとって代わるには至らなかったものであった。

日震学でなされた音速診断データも、質量、半径、光度に次ぐ精度良い実験測定データとして、太陽モデルを規定する条件として採用すべきものではなからうか。音速は、圧力と密度と比熱比で表わす事が出来る。このうち、比熱比は、太陽内部の状態方程式は理想気体のそれに近いために、表面の電離層を除く殆どどこでもほぼ 5/3 に等しい。圧力は重力と釣り合う静水圧平衡にあり、重力は密度分布によって決まっている。そこで音速分布という実験データと静水圧平衡という絶対的条件を組み合わせると、太陽内部の圧力、密度分布が決まるのだ。第 5 図に、こうして求めた密度分布、圧力分布の様子を示す。実験データに基づくだけで、太陽内部構造モデルが構築出来たわけである。これを見ると、中心密度は、標準太陽モデルに比べ、かなり低い（標準モデルでは約 150 g/cm^3 ）。標準的進化モデル系列で考えると、太陽は誕生以来、中心部分の密度は段々高くなっていく。標準太陽モデルに比べて中心密度が低いという事は、年齢が若いという事を示唆している。しかし、47 億年という推定年齢は古い隕石の年齢に基づくもので、これより太陽が若いという事はないであろう。年齢が若く見えるというのは、太陽には何か若返る秘密があるという事を示唆しているのだ。さて、この密度分布、圧力分布を用いて、核融合反応でしか化学組成は変わらない、光度は太陽光度に等しい、熱的収支のバランスがとれている、という標準太陽モデルで用いる仮定を採用すると、更に、温度分布、化学組成分布が判る事になる。誕生期には化学組成は一様だったとすると、水素の消費量から年齢が求められる。結果は、核融合反応率、輻射吸収率、状態方程式といった物理素過程に依存するから、これらには最新の信頼されるものを用いる。こうして、密度、圧力、温度、組成分布という太陽内部構造が、信頼に足る実験データと信頼度の高い理論的要請によって

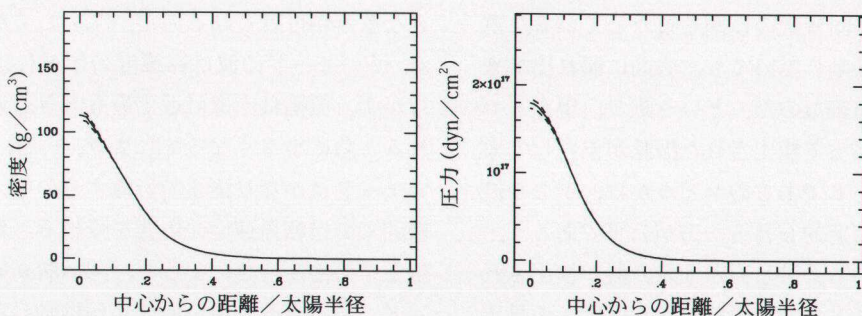


図5 第4図の音速分布を基に決めた太陽内部の密度分布(左)と圧力分布(右)。Shibahashi, H. 1993, in *Frontiers of Neutrino Astrophysics*, ed. Y. Suzuki & K. Nakamura (Universal Academy Press, Tokyo) (印刷中)より転載。

のみで、構築出来る事になる。こうしてこの原稿を書いている現在、温度分布等については計算中であるのだが、こうして作った太陽モデルについてニュートリノフラックスを計算しその値と実験値を比べることによってのみ、太陽ニュートリノ問題は標準太陽モデルの不備に起因するのかニュートリノ物理が間違っているのか、決着できよう。

10. 幻の重力波を捜せ

音波は太陽の表面と内側の反射層の間しか伝わらない(第1図)。太陽の本当の中心近くまで伝播できるのは、 l が小さいモードに限られる。それとて、本当の中心までは伝播しない。太陽ニュートリノが発生している中心部分そのものは、良くは見えておらず、その周りの状況からぼんやりと見えているのに過ぎない。本当はピンボケなのである。実際、日震学でモデルを再構築すると、使う振動データによって、結果が随分違って来る。それでは、何とか中心部まで焦点を合わせて見る事は出来ないだろうか。ここは、選手交代、音波ではなく重力波が登場して貰おう。

重力波は浮力を復元力とした振動である。浮力は対流層では働かない。ガス塊を平衡の位置から断熱的に押し下げたとする。押し下げられて圧力、密度が高くなったガス塊が浮き上がって元の場所に戻ろうとするのは対流安定な輻射層だからであって、対流不安定層ではガス塊はそのまま沈み込

んでいく対流運動となる。そこで重力波モードは、太陽の場合、中心近傍から半径で中心から約7割までの内部深くで振動する。音波モードと違って、太陽中心付近でも振動するのだ。

1976年の事、太陽の重力波モード発見のニュースがセンセーショナルに報告された。アリゾナ大、バーミンガム大、クリミア天文台のグループがそれぞれ独立に発見を報じたのだ。日震学がようやく産声をあげて間もない頃の事である。研究者達は一斉に注目した。しかし、間もなく、多くの人々はこの発見に懐疑の念を持つようになった。バーミンガム大とクリミア天文台のグループが発見した重力波モードと覚しき振動の周期は共に約2時間40分で一致し、更に後にはスタンフォード大のグループもこれと同じ周期を見出したにも拘らずである。理由の一つは、スタンフォード大以外の他のグループによる追観測で確認されなかった事、二つ目は2時間40分が24時間の1/9でデータ解析もしくは地球大気の影響という疑いを免れ得ない事、三つ目は2時間40分振動に対応する重力波モードは高調波であるのに隣接するモードが一つも見つからずに問題のモードだけが検出されるというのが不自然なこと。更に四つ目には、理論的に考えて、発見された振幅から重力波のエネルギーを見積もると、振動エネルギーがとてま大きくなってしまふからである。重力波は輻射層でしか振動しない。観測するのは表面での波動現象である。表面と輻射層の間には対流層が横たわっ

ていて、これが防音壁の役割を果たしている。重力波が内部で振動していても、表面に漏れ出て来る割合は小さい筈なのだ。という訳で、現在4つのグループによって検出された振動が果たして太陽の重力波モードであるのかどうかは、かなり控え目にみても否定的と言った方が公平であろう。

しかし、である。もし万が一重力波が検出されたなら、音波モードだけではピンボケでしか見えなかった太陽中心をはっきりと見るのに有効であるのは間違いなく、それはそれは画期的なものになる。分厚い防音壁を隔てているのだから、重力波なんて見つかる訳ないさ、というクールな考えを持ちつつも、研究者達は幻の重力波を捜す可能性を捨てていない。人工衛星からの観測テーマでも、重要な課題の一つに入っている。

11. 太陽内部の自転診断

固有振動モードの表面パターンを、全節数 l と経度方向の節線の数 m で表わすと書いた。星が完全に球対称だとすると、特に優先的な軸というものがないから、経度をどの軸の周りに測る事にするかは自由である。従って、固有振動は l と半径方向の節面の数 n が同じなら、 m が異なっても互いに対等ということになる。よって m だけが異なっている固有モードの振動数は互いに等しい。しかし、現実の星は自転しているから、自転軸という、意味のある特別な軸が存在する。そこで、 n と l が同じでも m が異なるパターンはもはや対等ではありえず、振動数にも m によって僅かに差が生じる。経度方向に節のあるパターンは、軸の周りに伝わって行く波である。太陽の自転方向に伝わる波は、地球から見ると、振動数が高く、逆に自転に逆らうように伝わる波は、振動数が低く見える。大雑把に言うと、自転の振動数への影響は、 m と、モード固有関数による或る種の重みを掛けた平均自転角速度に比例する。重みの付き方は、固有振動の振幅に関係している。或る領域で振幅が大きい場合、その領域にはそれだけ大

きな重みが付けられるのだ。例えば、 l が大きくて $m=l$ のモードの波は高緯度の領域には伝播して行かず、振幅は赤道付近で最も大きく赤道から離れると急に小さくなってしまふ。一方、 m が小さいモードはかなり極まで伝播するので、広い緯度範囲での自転角速度の影響を受ける。更に、振動数と l の組み合わせによって、深い層まで伝わるモードであったり、浅い所でしか振動しなかったりする(第1図)。これに応じて、どこの深さの自転角速度が振動数に影響するかが変わっている。

n 、 l が同じだが m だけが異なるモードの振動数の違いを解析して、重み付き自転角振動数を求める。結果は、どの (n, l) のモードでやってみても、大体同じで、周期にして約25日である。これは、大雑把に言って、太陽全体の自転速度が表面の自転速度と同じ程度である事を示している。太陽の内部が全体として表面より何倍も速く自転しているという事はないというのだ。では、太陽全体ではなく、特定の狭い領域に関してもそうであろうか？ 自転による振動数の変化分を多数のモードについて詳細に解析すれば、自転角速度が深さや緯度の関数としてどんな形をしているかを求める事が出来る。第6図は、最近の結果を、太陽を自転軸を含む様に輪切りにした面上で、等高線で表わしたものである。もっと深い領域の自転角速度が示されていないのは、意味のある結果を引き出すのが難しいからである。図に表わした中でも、極に近づくにつれて不確定性が大きくなる。深い領域の自転角速度を求めるのが難しいのは、そこまで伝播する音波モードの数が少ない事と、これらのモードは l が小さいから m も小さく、従って m に比例する自転による振動数への影響が小さくて測定も難しいからである。極に近い領域の自転角速度を求めるのが難しいのも、極まで伝わるのは $(l$ の値によらず) m が小さいモードだからで、 m に比例する振動数の自転によるずれが小さくて、測定精度が悪いからである。

日震学で明らかになった第6図の様な自転角速

度分布は、驚きと戸惑いをもたらした。これまで太陽の磁場の11年周期活動を説明する有力と考えられてきたダイナモ理論で想定されていた太陽対流層内の自転角速度構造とは大きく矛盾するからである。また、対流層内の自転角速度の変化率も、考えられていた程には大きくなかったのである。これが契機となって、より詳しいモデルの計算や基礎過程の再検討が行なわれるようになってきている。日震学による自転診断のより正確化も必要であろう。

12. 何が太陽を揺すっているか

ここまでは、太陽が振動しているという事実があるがままに受け入れて、固有振動数の情報から太陽内部を探るといふ議論を行ってきた。それでは、そもそも太陽はどうして沢山のモードで振動しているのだろうか？ 太陽が自然に振動しているという事実そのものも太陽の内部を調べるのに役に立たないだろうか？

恒星の中には、セファイドや琴座RR型星の様に、古くから脈動変光星として知られているものがある。これらの星の脈動の原因は次の様に説明される。星が無限小振幅で振動し圧縮されたとする。温度が上がる。星の殆どの部分ではこの温度上昇により放射吸収係数が小さくなり放射損失が増えるのだが、表面近傍の水素やヘリウムの電離層では逆に放射吸収が増え、放射を一時蓄えて星が膨張に転じた時に吐き出して、振幅を増大させようとする。この電離層の効果がその他の層での放射損失を下回れば、振動は自然に減衰してしまうが、もし電離層の効果が上回れば、振幅は次第に増加していき有限振幅に達する。古典的脈動変光星がHR図上の特定の位置を占めるのは、これらの星だけで電離層での放射のバルブ調節機構が有効に働くからである。

太陽の振動もこれらの古典的脈動変光星の脈動と同じ励起機構によっているのだろうか？ 一時はそうだと考えられた。5分という周期帯のモー

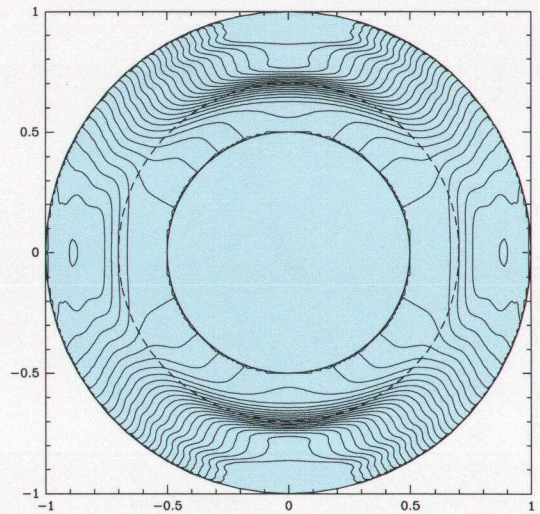


図6 日震学で明らかになった太陽内部の自転構造。自転軸を含む面上での等自転角速度線。縦軸0が赤道、1が北極、-1が南極。横軸0が自転軸。Gough, D. O., Kosovichev, A. G., Sekii, T., Libbrecht, K. G., & Woodard, M. F. 1993, in *Seismic Investigation of the Sun and Stars*, ed. T. M. Brown (Conference series of the Astron. Soc. Pacific) (印刷中)より転載。

ドだけがこの機構により選択的に励起されるというのは魅力的に見えた。しかし太陽表面近傍でのエネルギーの主たる担い手は放射ではなく対流である。このメカニズムがあてはまらない。振動に伴って対流をバルブ調節する機構も考えられるが、理論完成度が高いとは言い難い対流に関する事だから、あまり確定的ではない。という訳で、太陽振動の励起機構を古典的脈動星の励起機構で説明しようという考えは今では分が悪い。

代わりに有力視されているのが、対流層での乱対流による音波の発生機構である。乱流により音波が生じる。この音波は局部的に見ると特定の決まった音だけという訳ではないのだが、太陽というシステム全体がこれに共鳴する固有振動モードだけを拾い出すという考え方だ。乱流が外力として働き、そのスペクトルが結果として5分という特定の周期帯のモードだけを選択的に励起する。この外力がなければ、振動は放射損失により減衰

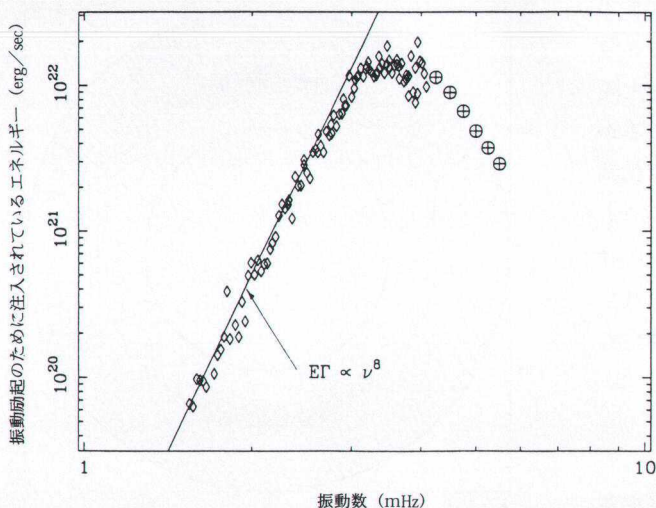


図7 観測的に求めた励起のために注ぎ込まれているエネルギー。振動数の関数としてプロットしてある。Libbrecht, K. G. 1988, in *Seismology of the Sun and Sun-like Stars*, ed. E. Rolfe (ESA SP-286), p. 3 より転載。

しようとするとき、減衰率と励起が丁度釣り合ったところで振幅が決まっていると考える。大筋としては良いように思われている。減衰率は、観測的には振動のパワーを振動数スペクトル分解したパワースペクトルの線幅として決めることが出来る。振幅はパワースペクトルの高さとして決まる。そこでこれらを組み合わせて励起のために注ぎ込まれているエネルギーを観測的に求めることが出来る。万事めでたしか？ そうは問屋が卸さない。対流の理論の方から励起エネルギーを計算すると、第7図に示したような振動数依存性はうまく説明出来るのにも拘らず、観測的に決めたものに比べ、値自身は何桁も小さいのである。励起機構の解明は未だ完全という訳ではなく、これからの進展の余地を大きく残している。

日震学で使える情報源として二種類ある。一つは固有振動数、もう一つがここで述べた励起機構に関する情報である。このうち固有振動数を情報源として用いる方は、前節までで述べてきたように、今や天体物理学としては例外的な精密科学と

なっている。他方、励起機構に関する方は、未だにオーダーさえ合わせるのに苦労している。日震学の二つの側面である。励起機構に関する日震学的アプローチが成功すれば主に対流構造が判ると期待される。対流は恒星に関する基礎的物理現象であるにも拘らずその理論の完成度が低い現状において、日震学がもたらすであろう情報は貴重なものとなるであろう。

13. 長期変動

太陽の多数の固有振動モードが精度良く測られるようになって10年以上経った。この間に太陽活動の極大期も極小期もあった。当然のごとくに、太陽振動が太陽活動と共に変わっているか、変化があるとすればどのように変わっているか、という事が調べられるようになった。相当に難しい観測的チャレンジではある。観測実験グループは、絶えず観測実験機器を良いものにしようとしている。何年も同じ機器方法精度で観測している訳ではない。しかし、長期変動はごく僅かなもので、振動数の場合、後で述べるように、変化量は約数100ナノヘルツのオーダー、相対的变化量としては、数100 nHz/3 mHz $\approx 10^{-4}$ の微々たるものなのだ。これは観測検出限界に近く、異なる実験観測装置によるデータの比較は難しいのだ。

そんな困難を乗り越えて、観測者達は、音波モードの固有振動数が、太陽活動が活発な時には、不活発な時に比べ、僅かながら高い事を明らかにした。第8図左は、多数の音波モードの固有振動数の1986年と1988年間の変化を、モードの振動数の関数としてプロットしたものである。個々のモードについての精度は低いので、似た振動数のモード多数で平均したものが描かれている。図から明らかなように、低い振動数のモードでは、変化は目立たず、振動数が高くなるにつれて顕著となり、振動数が約4 mHzになったところで変

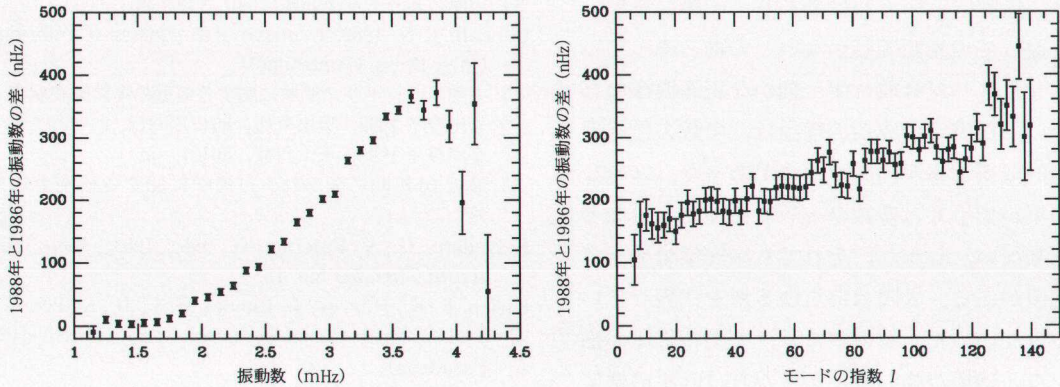


図8 太陽の音波モードの振動数の太陽活動に伴う長期変動。太陽活動が極小期に近い1986年と極大期に向かっていた1988年との振動数の差。左の図では振動数変化を振動数の関数として、右の図では l の関数としてプロットしてある。どちらの図も縦軸の単位は nHz ($=10^{-9}\text{Hz}$)。Libbrecht, K. G. & Woodard, M. F. 1990, *Nature*, 345, 779 より転載。

化量は大きく減少する。同じ1986年と1988年の間の振動数変化を、表面での全節数 l についてプロットしたものが、第8図右である。これも多数のモードについて或る l の範囲で平均したものを扱っている。こちらの図から判る事は、振動数の変化の l 依存性は、振動数依存性に比べると弱い事である。この事は何を意味しているのだろうか？ 第1図に見るように、音波モードの伝播において、外向きに反射する層はモードのパターン l に強く依存する。従って、もしこの反射層程に深い所が構造的に大きく変化していたならば、振動数変化も l に強く依存する事になる。 l 依存性が弱いという事は、太陽内部の構造変化がごく浅い層に限られるという事を意味しているのだ。一方、表面近くでの反射は、音波の垂直方向の波長に比べて密度勾配が急だから起こるのであって、どこかの深さで反射するかは、振動数そのものには依るものの、 l には殆ど依らない。観測された固有振動数の長期変動の l 依存性と振動数依存性の詳しい解析から、太陽内部の構造変化は、光球面下約200 kmより外層でのみ起こっている事が明らかになった。ただ、その変化が物理的に何なのか、或いは更にその原因は何なのかは、未だに良く判って

いない。これらの理解のためには、太陽からの全輻射量の変化、対流パターンの変化、磁場の変化等を総合的に理解する事が必要であろう。

振動数のみでなく、振幅やパワースペクトルの線幅にも長期変化が見られる。太陽活動の最盛期には静かな時期よりも、振幅は小さく、線幅は広がっている。太陽活動が活発な時期の方が、静かな時期よりも、振動の励起効率が低いか減衰率が高いというのだ。定性的定量的解釈解析は今後の課題の一つである。

14. 夜空の星は皆太陽：星震学への発展

日震学が太陽の中を見るのに威力を発揮している事はお解りいただけたであろう。あらためて強調しておきたい事は、日震学は太陽の中を見る唯一の方法だという事である。太陽表面で華々しく見られる磁場に絡んだ諸現象も元を質せば、その本質も太陽の内部にある。その本質的理解にせまる道具立てとしても日震学は欠かせないものとなるだろう。

太陽は沢山の恒星の中の一つに過ぎない。ならば、一般の星に対しても日震学と同じ事が出来な

いか？ 星震学というわけである。一般の星は、太陽と違って点光源でしかない。太陽と違って二次元的なイメージは取れず、細かな表面模様など見えない。日震学の成功の理由は、多数のモードを観測的に得る事が出来たからであった。この点、一般の星が相手では多数のモードを捉える事など期待出来ない。しかし、それでも星震学はやってみる価値がある。太陽はあらゆる星を代表している訳ではないのだ。星の中には、A型特異星の様にやたらと磁場が強い星があったり、Be星の様に自転速度が速くそれに伴う活動現象が顕著であったり、白色矮星の様に内部の物理状態が太陽とは随分違う星があるのである。これらの星の内部を探る事は、日震学とはまた違う意味があるのだ。多くの努力の結果、これらの星でも脈動が、光度変化やスペクトル線の輪郭の変化として捉えられるようになった。しかし、なにしろ、これらの星は従来は脈動星であるとは考えられていなかった星である。極めて小さい振幅の脈動を捜すのだ。そうそう易しい事ではない。しかし、多くの研究者の努力によって、随分沢山のA型特異星やBe星や白色矮星に脈動が検出され、その情報がこれらの星の内部物理の解明に役立ちはじめている。日震学は、今、星震学へと発展しようともしている。

参 考 文 献

日震学に興味をもたれた方のために幾つかの参考文献を挙げておく。

- 1) 日震学の基礎となる恒星の振動の理論を詳説し、日震学のレビューを含む教科書：
Unno, W., Osaki, Y., Ando, H., Saio, H., & Shibahashi, H. 1989, *Nonradial Oscillations of Stars (2nd Edition)* (東京大学出版会)。
- 2) 太陽の内部構造や諸問題に関する教科書：
Cox, A. N., Livingston, W. C., & Matthews, M. S. (ed.) 1991, *Solar Interior and Atmosphere* (Univ. of Arizona Press, Tucson)。
Sturrock, P. A., Holzer, T. E., Mihalas, D. M., & Ulrich, R. K. (ed.) 1986, *Physics of the Sun* (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht)。

- 3) 太陽ニュートリノ問題に関する教科書：
Bahcall, J. N. 1989, *Neutrino Astrophysics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge)。
- 4) 太陽ニュートリノ問題に関する最近の本誌解説記事：
平田慶子 1992, 天文月報, 85(7), 312。
平田慶子 1993, 天文月報, 86(2), 71。
- 5) 最近10年間に開かれた日震学に関する研究会の集録：
Belvedere, G. & Paterno, L. (ed.) 1984, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 55, No. 12。
Ulrich, R. K., Harvey, J., Rhodes, E. J., Jr., & Toomre, J. 1984, *Solar Seismology from Space* (NASA JPL, Pasadena)。
Gough, D. O. (ed.) 1986, *Seismology of the Sun and the Distant Stars* (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht)。
Christensen-Dalsgaard, J. & Frandsen, S. (ed.) 1988, *Proc. IAU Symp. No. 123, Advances in Helio- and Asteroseismology* (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht)。
Rolfe, E. J. (ed.) 1988, *Seismology of the Sun and Sun-like Stars* (ESA Publ. Division, Noordwijk)。
Berthomieu, G. & Cribier, M. (ed.) 1990, *Proc. IAU Colloq. No. 121, Inside the Sun* (Kluwer Academic Publ., Dordrecht)。
Osaki, Y. & Shibahashi, H. (ed.) 1990, *Progress of Seismology of the Sun and Stars* (Springer-Verlag, Berlin)。
Gough, D. O. & Toomre, J. (ed.) 1991, *Challenges to Theories of the Structure of Moderate-Mass Stars* (Springer-Verlag, Berlin)。
Weiss, W. W. & Baglin, A. (ed.) 1993, *Proc. IAU Colloq. No. 137, Inside the Stars* (Conference series of the the Astron. Soc. Pacific, San Francisco)。
Brown, T. M. (ed.) 1993, *Seismic Investigation of the Sun and Stars* (Conference series of the the Astron. Soc. Pacific, San Francisco) (印刷中)。
- 6) その他の手軽な解説記事：
尾崎洋二 1979, 日本物理学会誌, 34, 466。
Leibacher, J. W., Noyes, R. W., Toomre, J., & Ulrich, R. K. 1985, *Scientific American*, 253, 34. [日江井栄二郎 訳 日経サイエンス, 15, 1985年11月号.]
柴橋博資 1985, 科学, 55, 551。
柴橋博資 1988, 日本物理学会誌, 43, 680。