

太陽中心で核融合反応があまり起こっていないのかも知れないという事すら意味しているのだ。これが太陽ニュートリノ問題として知られる25年来の未解決の重要問題である。解決策は3つしかない。(i)実験が間違っているか、(ii)ニュートリノの性質に関する物理理論が間違っているか、(iii)太陽の内部構造モデルが悪いかである。このうち、(i)の実験については、長らくアメリカのホームステーク金鉱での測定しか無く妥当性を議論するのが難しかったのだが、最近の、東京大学宇宙線研究所を中心とするグループによる神岡鉱山での測定、SAGEと呼ばれるロシアのグループの実験、イタリアのグランサッソ研究所で行なわれているヨーロッパのグループの実験により、疑念の余地は無くなった。残る可能性は2つ。ニュートリノの物理か、太陽モデルかである。ニュートリノの物理は、素粒子の研究者によって色々検討されている。決定打になってはいないが、太陽ニュートリノ問題を解決する有力な答えは用意されている、といったところだろうか。この問題の解決を太陽モデルに押しつけるべきなのかニュートリノ物理に押しつけるべきなのかは、ニュートリノに関しての何か他の実験で制限を付けるか、太陽の内部を見ることによって制限を付けるかしかないような状況である。太陽の内部を見となれば、ここは日震学の出番である。

3. 太陽の中はどう回っているか?

太陽の黒点をトレーサーとして自転周期を測ってみると、太陽は約27日で自転している事が判る。それでは太陽の内部はどのように回っているだろうか。太陽はガスなので、表面と同じ回転をしている必然性はないのである。表面の自転周期にしても赤道から極の方に行くに連れて周期は遅くなっていて、一様に回転している訳ではない。太陽が誕生してからその進化の過程で、中心部は収縮していく。その際角運動量を保存したまま収縮したとすると、丁度フィギュアスケートの選手

がスピンしながら腕の拡がりをもめていくと回転が速くなるように、中心部での回転は速くなっていくだろう。一方表面では、太陽風が角運動量を外に持ち逃げしてしまうから、回転が遅くなっていく。では、定量的にはどうなっているのか? これは実際に見てみない事には判らない。

太陽の黒点活動は約11年の周期性を持っている。これは、太陽の外側、半径にして約3割で起こっている対流と自転の相互作用で磁場が作られ、その作用が11年周期で変化するためであると考えられている。核融合反応で発生したエネルギーは太陽の中をじわじわと輻射で外の方に運ばれて来るのだが、半径にして中心から7割ぐらいまで来ると、輻射吸収率が高くなって、もはや輻射ではエネルギーを運びきれなくなる。代わって、対流が起こり、これがエネルギーを運ぶ荷手となる。半径にして外側3割の領域では、ものが実際に動いてエネルギーを運んでいるのだ。太陽活動の源はこの対流運動と自転の相互作用にあると考えられている。対流層での自転の様子を知るとは、この太陽活動の源を知るためにも重要である。活動に伴って、自転の様相も変わっているであろう。日震学では、こういった変化も捕らえられるかも知れないのだ。

4. 日震学と地震学

地球の地震は突発的に発生し短時間に減衰する。全地球的に見ても大地震が起きていない時間の方が圧倒的に長い。これに対し、太陽面ではいつもいつも約5分ぐらいの周期の振動(5分振動と呼ぶ)が起こっている。太陽は、自然に振動しているのだ。これは太陽の振動と地震の励起機構が違っているからである。実は地震の励起機構に比べて太陽の振動の励起機構はあまり良くは判っていないのだが、大雑把に言ってしまうと、地震が局部的にプレートの歪みが大きくなって遂にその限界に達した時に突然起こるのに対し、太陽の5分振動の方は太陽の表面近くで起こっている対

流運動によって太陽全体がいつも叩かれているから振動しているのだと考えられている。こういった違いから、地震の波から地球を探る方法と太陽の振動から太陽の中を探る方法には少し違いがある。地震の場合には、地球全体がどのように振動するかという情報も使うけれども、局所的な地震の震源から観測点までの地震波の到達時間が、地球の内部を探る主要な情報源になっている。太陽の場合には、いつも振動が起こっているから、太陽全体がどのような振動の仕方をしているかということを中心に、太陽の中を探る。後で述べるが、現実に太陽で観測されている5分振動は太陽の音波であり、太陽全体の振動の仕方を調べるとするのは太陽の音色を聞き分ける事なのだ。それでは、太陽全体がどのように振動しているかをどうやって調べるか？ これは地球全体がどのように振動しているかを調べるよりある意味で簡単である。地球の場合には、観測者自身が振動体の上に乗っている訳だから、振動の様子を遠目に観察する訳にはいかないが、太陽が相手の場合には、振動の様子は謂わば一目で眺められるのだ。かくして、太陽が相手なのに日震学は地震学に負けず劣らずの研究が出来、太陽の内部は詳しく調べられるようになったのである。

5. 太陽の5分振動：太陽の唸り声

振動とは力学平衡状態からずれた時に元の平衡状態に戻ろうとする現象である。戻す力、即ち復元力にはどのようなものがあるかを考えよう。太陽や恒星はガスの圧力勾配と重力が釣り合って力学平衡を成している。この場合の平衡からずれた時の復元力は、ガス圧力と浮力である。ガスは圧縮されると反発する。これがもとで振動となる。これが音波である。水面を少し押し込むと、水面は元に戻ろうと反発して波となる。この場合の復元力は浮力であるが、太陽や恒星の中でもこの力は働き、これによって起こる振動を重力波と呼ぶ。地球の振動の場合には地球が固体なので、捻じれに

対して戻ろうとする弾性力も復元力として働き、話はもっと複雑である。恒星でも中性子星は固相があると考えられるので、地球並みに複雑であろう。そのほか、太陽は回転しているから、回転に伴うコリオリ力も復元力になりえるが、25日程度のゆっくりした回転ではゆっくりした振動しか引き起こせないから今の所考える必要はない。同様に電磁力等も考える必要はない。今問題としている太陽の5分振動を考えるには、結局、ガス圧力による音波と浮力による重力波だけでよく、話は単純である。

重力波の周期は浮力の強さで決まり、浮力が強いほどすぐに元に戻ろうとして振動の周期は短い。浮力の強さは、太陽の中がどのように成層を成しているかによって決まっていて自ずと限界があり、従って重力波振動は或る程度長い周期のものに限られる。太陽の場合、重力波の周期は一番短くても約40分であり、観測されている5分振動はこれに該当しない。一方音波は、ヴァイオリンの弦では開放弦が一番音が低くそれより低い音がないように、或る程度高い周期の波に限られる。太陽の場合、一番低い音波が約50分の周期で、5分振動は高調波の音波に相当する。基準音に比べれば3オクターブ以上も高い音である。とはいえ、周期5分といえは振動数は約0.003ヘルツである。人間の耳で聞き分けられる最重低音は約16ヘルツというから、それよりはるかに低い超低音で太陽は唸っているのである。

太陽面からそのような音を下に向けて発したとしよう。中の方が温度が高く音速も速いから、音波はだんだん外向きに屈折してしまう。その結果、ある深さまで達すると、音波は完全に水平を向くようになり、遂に外に向けて反転してしまう。表面近くまで戻った音波は、そこでは密度勾配がきついため再び反射されてまた下に反転する(第1図)。こうして反射を繰り返す波の位相が丁度うまく合うと、波は定在波となり、太陽に固有の振動となる。太陽という楽器に固有の音という訳で

ある。このような固有振動を一つだけ取り出すと、太陽の表面の振動パターンも規則正しいものになっている。第2図(表紙)は、そのようなパターンの例を示している。深さ方向にも振動パターンは規則正しいものになっている。表面での節目の線の総数(これを l 本としよう)と経度方向にある節の線の数(これを m 本としよう)と深さ方向の節の面の数(これを n としよう)を使ってこのような規則正しい振動のパターンを特徴付ける事にしよう。一本の弦であれば振動を特徴付けるものとしては節の数で、また太鼓のような面の振動なら節となる線を表わす二つの数で、太陽のように立体であれば節の面を表わす三つの数で固有の音を定義する訳である。これをモードと呼ぶ。1つのモードについて1つのパターンと1つの振動数が決まっている。第1図に見るように、細かなパターンの音波モードは太陽の比較的外側の層で反射され、深い領域まで達しない。それに対し、大きなパターンの音波モードは、かなり中心領域まで達する。

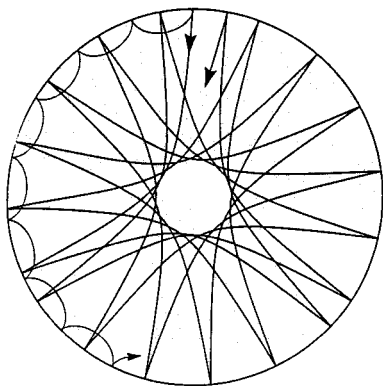


図1 太陽内部を伝わる音波の様子。細かなパターンの音波モードは太陽の比較的外側の層で反射され、深い領域まで達しない。それに対し、大きなパターンの音波モードは、かなり中心領域まで達する。Gough, D. O. 1990, in *Progress of Seismology of the Sun and Stars*, ed. Y. Osaki & H. Shibahashi (Springer-Verlag, Berlin), p. 284より転載。

6. 太陽振動を捉える

実際に観測される太陽の振動は、これらの純な固有振動が沢山重なり合ったものである。この混ざりあった音を聞き取り、それをいわば音響スペクトロメーターで分解すれば良いのだ。恒星や太陽の振動は、表面の明るさの変化および表面の運動として見られる。このうち表面の運動の方は、光のスペクトルの吸収線の波長が規則的にドップラー効果で変化する現象となって現れる。ドップラー効果とは、近付いて来る救急車のサイレンの音は高く救急車が遠ざかる時は低くなるという、あれである。太陽の重低音を聞き分けるには、太陽の表面の明るさあるいは運動を通して太陽面をパターン解析をして、第2図で示したような(l, m)で決まるそれぞれの固有モードのパターンの成分の強さを求め、その強さの時間変化を見れば良い。時間変化を周波数スペクトル分解すれば、モードを指定する残る一つの量子数 n の値によってとびとびの所にピークが現れるであろう。こうして太陽の固有振動が観測的に求められる。

といっても、これはそう簡単ではない。まず、太陽は大きな声では唸っているわけではなく、かすかな囁きを送っているに過ぎない。恒星の中には、セファイドとか琴座RR星型変光星とか、脈動変光星といって、音波モードで振動しながら規則的に変光しているものがある。これらの星の振動の振幅が明るさの変化として目で見て判るほど大きいのに比べ、太陽の振動の振幅はあまりに小さいのだ。それゆえ、太陽が振動していてその振動が捉えられる事など、そもそも予想もされていなかった。実は、太陽が振動している事は、別の目的の観測の結果、偶然に見つかったのである。発見は1960年のこと、カリフォルニア工科大学のレイトン達は、太陽面上に見える粒状斑の観測的研究を行っていた。粒状斑とは、太陽の対流層で起こっている渦を上から見た時に見える模様である。彼らはスペクトル線を使ってこの対流の渦の

速度場を研究しようとしていた。対流の渦は乱流だから、特定のシャープな振動スペクトルは期待していなかったのだが、彼らが見いだしたのは約5分という特定の周期の振動、5分振動、であったのである。

振幅が小さいという事は、他の雑音に埋もれてしまいやすいという事である。太陽の自転速度は赤道で1900 m/秒を超えている。粒状斑や黒点に伴う速度場も数100 m/秒から千数百 m/秒に達する。これに対し、個々の振動モードの速度振幅は数10 cm/秒にすぎない。明るさの変化にしたところで極めて小さい。個々のモードの振幅は 10^{-6} にしかすぎない。太陽を脈動変光星と考えると、その変光の振幅は1マイクロ等級ということになる。それに対し、黒点や白斑などは目で判るほどに周りよりも明るさが異なるのだ。

こんなに小さな振幅でも観測測定出来るのは、振動が周期的だからである。固有モードの太陽表面での振動パターンも規則的だし、時間変化も周期的である。そこで空間パターンにせよ、時間変化にせよ、周期成分を捜す努力をすれば、それ以外の雑音の相対強度は減っていき信号音が聞こえ

て来るという訳である。そのためには、太陽全面を広く眺める事と、長時間にわたって観測を続けるという事が重要になる。振動数の分解能は観測期間に比例するのだ。しかも観測は途切れない方が良い。途切れると、そのぶん分解能は甘くなる。長い観測時間を得て分解能を高めるために、研究者は努力してきた。今も努力を続けている。天気の良い場所で観測を行う。それでも夜になると太陽は見えなくなるから観測は中断してしまう。それではと、南極に行って沈まぬ太陽を追い続ける。或いは、経度が離れた何ヶ所もの観測ステーションが提携して観測の切れ目を少なくする。必要とあらば、新たに観測ステーションを設置してネットワークを作る。或いはまた、天候に左右されない人工衛星から観測をし続ける。かくして、太陽の固有振動モードが非常に精度高く観測されるようになったのである。第3図にこうした努力の賜物である観測データを例としてお見せしよう。これは、カリフォルニア工科大学のグループによる観測の結果とカナリア天文台バーミンガム大学共同グループの観測結果である。横軸に表面のパターンを代表する l 、縦軸に振動数をプロットして

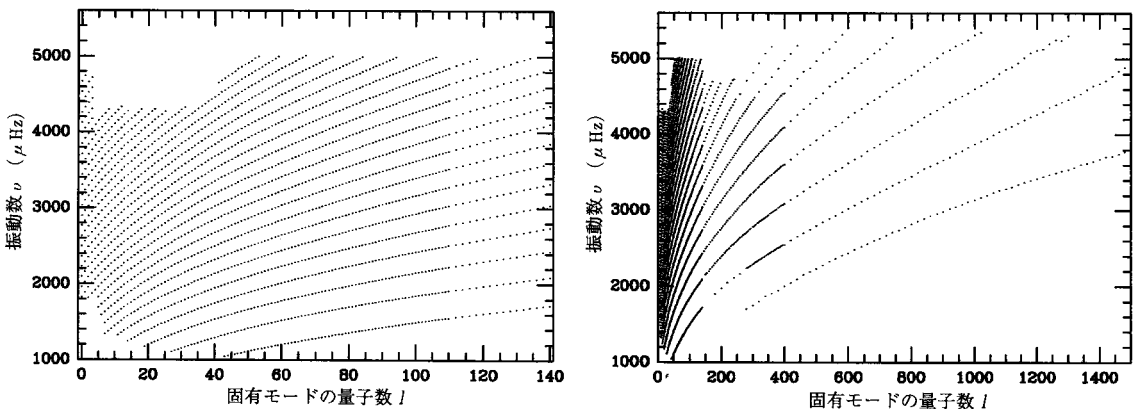


図3 最新の太陽振動の観測データ。固有振動数を太陽表面での節線の数 l の関数としてプロットしたもの。Libbrecht, K. G., Woodard, M. F., & Kaufman, J. M. 1990, *Astrophys. J. Suppl.*, **74**, 1129 及び Jiménez, A., Pallé, P. L., Perez, J. C., Régulo, C., Roca Cortés, T., Isaak, G. R., McLeod, C. P., & van der Raay, H. B. 1988, in *Proc. IAU Symp. No. 123, Advances in Helio- and Asteroseismology*, ed. J. Christensen-Dalsgaard & S. Frandsen (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht), p. 205 による。

ある。一点一点が観測値である。一点一点が固有モードである。前に、太陽は約5分の周期で振動しているとあっさり書いたが、その約5分という時間帯に、第3図に示したような何千もの固有モードが含まれているのだ。

7. 太陽内部の音速診断

これだけ沢山の固有モードの振動数がこれだけ精度良く測られれば太陽の内部診断が出来ようというものだ。日震学の発展初期には、何かをパラメータとして太陽のモデル系列を作り、観測されている固有振動数を一番良くフィット出来るパラメータを捜すという事が行なわれた。これだと捜しているパラメータ範囲でしか物事を言うことが出来ない。現在は、もっと直接に固有振動数から太陽の内部物理状態を解く事が出来る様になってきた。観測されている振動は音波であると書いた。第1図をもう一度見ていただきたい。表面から下に向かった音波は、或る深さまで達してまた表面近くまで戻って来る。伝われる深さは、第1図に見るように、モードごとに異なっているが、この深さは、太陽内部の音速構造によって決められている。そこで、音波モードの振動数のモード依存性を解析する事により、太陽内部の音速分布が判

る事になる。第1図に見るように、横方向に波長の大きい波ほど深くまで伝播する。表面での節線の数 l で言えば、 l が小さいモード程深くまで伝播する。浅い層は様々な横方向の波長のモードが伝播可能であるのに対し、核融合反応が起こりニュートリノが発生するような中心のごく近傍まで伝播する波は l が小さいモードに限られるのだ。従って、音波モードを解析して得られる太陽内部の音速は、浅い層では精度良く決まり、中心近傍になるにつれ残念ながら精度が悪くなる。第4図左に、こうして求めた太陽内部の音速分布を示す。誤差の帯の幅は、観測された振動数の誤差に対応している。中心から約0.7太陽半径ぐらいのところで、図の傾きがガクッと急に変わっている事にお気づきだろうか？ここが輻射層と対流層の境である。輻射層と対流層とでは、温度勾配が異なる。そこで、この様に音速の勾配も急に変化しているのだ。実は次の章で述べるように、対流の理論は完全ではなく、太陽の対流層がどれ位深いかという事は理論的に正確には決める事が出来なかった。日震学による音速診断から初めて太陽の対流層の深さを見る事が出来たのである。

次に述べる標準太陽モデルの音速分布と、こうして求めた現実の太陽内部の音速分布を比べてみ

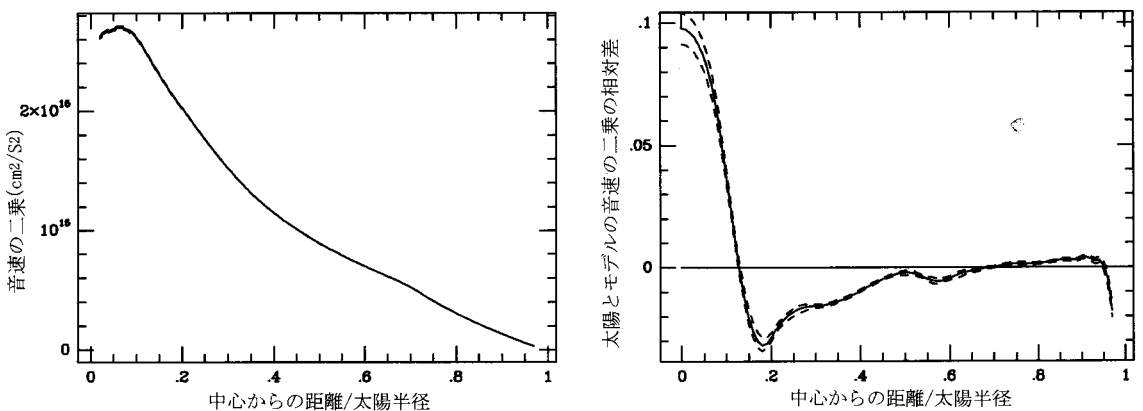


図4 第3図に示した太陽の固有振動から求めた太陽内部の音速の二乗の分布(左)と Shibahashi, H., Noels, A., & Gabriel, M. 1983, *Astron. Astrophys.*, **123**, 283 による太陽モデルの音速の二乗の分布との相対差(右). Vorontsov, S. V. & Shibahashi, H. 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **43**, 739 による。破線は 1σ レベルの誤差範囲。

よう。第4図右は、ある標準太陽モデルと第4図左に示した現実の太陽の相対的差を図示したものである。大雑把に言えば、半径で中心から0.4太陽半径より外側では現実の太陽の方が数パーセント位音速が速く、0.2太陽半径より内側では、音速が速い。

太陽の内部深くでは、温度が高いために、水素とヘリウムはほぼ完全に電離しているが、表面では電離に至らず、その中間の遷移層が表面から僅かに入ったごく浅い所にある。この遷移層では、断熱指数が小さく、そのために、ここでだけ音速の深さ変化も顕著に変わる。そこで、この層での音速の変わり具合を調べる事により、ヘリウムの量が判ると期待される。表面近くでは核融合反応は起きないから、ここでのヘリウム量は太陽が誕生した時以来変わっていないものと考えられる。そこで、こうして決めたヘリウム量は、太陽が誕生した頃の宇宙のヘリウム量を意味していると考えられている。(続く)

参 考 文 献

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. 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 1985, 日経サイエンス, 15(11).]
 柴橋博資 1985, 科学, 55, 551.
 柴橋博資 1988, 日本物理学会誌, 43, 680.
 3. 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).
 4. 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).
 5. 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.
 6. 図の説明中引用文献：Gough, D. O. 1990, in *Progress of Seismology of the Sun and Stars*, ed. Y. Osaki & H. Shibahashi (Springer-Verlag, Berlin), p. 284.
 Jiménez, A., Pallé, P. L., Perez, J. C., Régulo, C., Roca Cortés, T., Isaak, G. R., McLeod, C. P., & van der Raay, H. B. 1988, in *Proc. IAU Symp. No. 123, Advances in Helio- and Asteroseismology*, ed. J. Christensen-Dalsgaard & S. Frandsen (D. Reidel Publ. Co., Dordrecht), p. 205.
 Libbrecht, K. G., Woodard, M. F., & Kaufman, J. M. 1990, *Astrophys. J. Suppl.*, 74, 1129.
 Shibahashi, H., Noels, A., & Gabriel, M. 1983, *Astron. Astrophys.*, 123, 283.
 Vorontsov, S. V. & Shibahashi, H. 1991, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 43, 739.

☆

☆

☆

☆