

## サイエンスネット

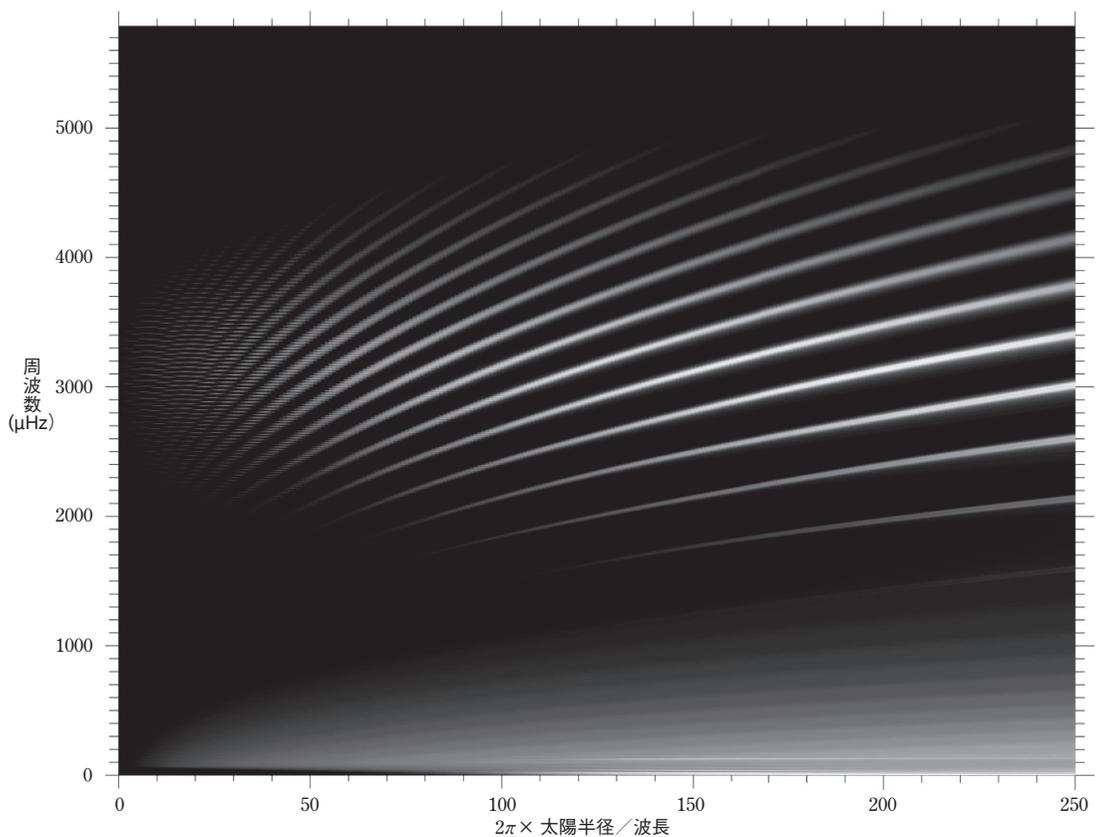
物(化)生(地)...

数研出版株式会社

SCIENCE NET

Contents

- |        |          |        |           |
|--------|----------|--------|-----------|
| ▶ 特集 1 | ／ 細 将貴…2 | ▶ 特集 3 | ／ 卜部吉庸…10 |
| ▶ 特集 2 | ／ 関井 隆…6 | ▶ コラム  | ／ 秋山繁治…14 |



## 太陽の音色

国立天文台太陽天体プラズマ研究部 関井 隆

太陽内部を駆けめぐる音波が太陽表面にやってくると、太陽の表面をゆらすことになる。この図はそのゆれ方の強度分布(パワースペクトル)である。横軸は太陽を一周する長さを、表面における波の波長でわったもの、縦軸は周波数(単位:  $\mu\text{Hz}$ )である。周期にして約5分、周波数で  $3000 \mu\text{Hz}$  付近のバンドに強度が集中しているのは、音波の発生と減衰とのバランスで決まっている。一方、このバンドの中でも強度は左下から右上に走る「リッジ」上で強い。これは太陽の固有振動に対応している。

## 日震学の進展

国立天文台太陽天体プラズマ研究部 関井 隆

### 1. 日震学とは

日震学というのは日本では研究者の極端に少ない分野だが、最近では少し認知度が高まってきているのはありがたい。地震波の伝わり方を研究して地球内部を探査するのが地震学なら、太陽における波動現象の研究から太陽内部を探るのが、日震学である。ではなぜ、太陽内部を探りたいのか？

太陽という天体が、研究対象として重要な理由は2つある。ひとつには、われわれに最も近く、そのために詳しく調べることのできる恒星として、である。もうひとつには、地球上に暮らすわれわれに大きな影響をもつ天体として、だ。

恒星は宇宙の構成単位ともいえる。その恒星の構造や進化を理解するためには、われわれはまず「例題」として、太陽の構造や進化がよく理解できていなくてはならない。また、太陽には磁場があり、これが黒点を形成したり、フレアなどの爆発現象を起こしたりする。これを「磁氣的活動」というが、太陽は磁氣的活動性を示す星の「例題」でもある。この磁氣的活動性が、太陽研究が重要な第二の理由の大きな部分を占めている。それは、巨大なフレアやこれに伴って起きるコロナ質量放出とよばれる現象が、地球に影響を及ぼすことがあるからだ。では、太陽について何を知りたいのか？

まずは太陽の静的構造である。太陽は半径70万kmの球で、表面温度は約6000K、中心部では温度は1500万Kに達し、水素の核融合反応が起きており、これが太陽のエネルギー源である・・・という話はご存じだと思う。こうした特徴に加えて、中心からの距離の関数として温度や密度の分布を決めれば、太陽の球対称な静的構造がわかったことになる。これは恒星としての太陽を知ることに相当する。

一方、太陽は自転しているし、外側の方では対流が熱を運んでいる。また、子午面循環流とよばれる流れも存在している。「さまざまな流れがある」といってもよいし、これを括って太陽の動的構造といってもよいだろう。実はこの動的構造こそが、太陽の磁氣的活動のカギを握っていると考えられてい

る。したがって、われわれは星として太陽の静的構造と、磁氣的活動のカギとしての動的構造と、その両方を調べたいことになる。

ところが、どんな波長の電磁波で見ても、太陽ははなはだ不透明で、中を見通すことはできない。中を見通すための有力な手段が、太陽内部を伝わる音波を使って内部を探ることで、これが日震学である。

### 2. 太陽内部の音波と5分振動

太陽内部を伝わる音波というが、どうして太陽内部で音波が発生するのか。それは先ほども少し出てきた、太陽外層の対流のせいである。太陽中心の核融合反応で生まれたエネルギーは、最初は放射として外へ運ばれるが、太陽の外側、半径にして3割程度の領域では対流として運ばれる。火にかけた鍋の中の水の対流と同様に、熱いガスの塊が上昇し、冷えたガスの塊が下降することで熱を外側へと運んでいる。その証拠が、太陽表面に見られる「粒状斑」であるが、このガスの「おしあいへしあい」が粗密波である音波を発生させる。太陽表面は対流(粒状斑)のために常に動いているのだが、この対流による運動の上に、実はこの音波振動による成分も乗っていることを発見したのは、カリフォルニア工科大学のレイトンたちで、もうおよそ50年前のことである。彼らはドップラー効果を利用して、太陽表面のガスの視線方向の速度を測定した。振動の周期は単一でなく、広がった分布をしているが、5分程度の周期の成分が最も強かったので、これは「5分振動」とよばれることになった(図1)。5分程度の周期の成分が強いのは音波の生成と減衰とのバランスによる。

また、どんな物体にも特有の固有振動が存在し、太陽も例外ではない。表紙に示したのは、太陽振動の強度(パワースペクトル)である。太陽表面に見られる波動パターンを、波長と振動数に分解し、波長かわりに導入した無次元の指数( $= 2\pi \times$  太陽半径/波長)と振動数の関数としてプロットしたものだ。左下から右上に走る何本ものリッジの上で、強

度が大きいことがわかる。これがこの図の上での太陽の固有振動モードの場所を表している。「太陽の音色」というわけだ。

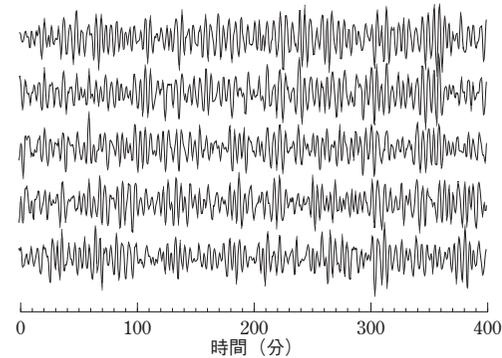


図1 太陽表面の視線方向速度の時間変化(縦軸のスケールは省略)。およそ350kmの間隔をおいた5点について示してある(データは米航空宇宙局のSDO/HMIによる)

### 3. 日震学による太陽内部構造探査

さて、不透明な太陽内部に関する手がかりがもうひとつある。中心部で起こる核融合反応に伴ってできるニュートリノという粒子は、他の物質とあまり相互作用をしないので、太陽中心部で生まれたままの状態太陽の外まで出てきて、地球へやってくる(と思われていた)。ところが地球へやってくるニュートリノ数が何だか足りない、というのが有名な太陽ニュートリノ問題である。太陽ニュートリノ問題は、「ニュートリノ振動」という現象の確立によって一応の解決をみた。太陽中心部で生まれた電子型のニュートリノは、地球に飛んでくるまでの間に他の型のニュートリノに化けてしまっていたわけなので「生まれたままの状態で」というのは誤りであったことになる。

しかし、太陽ニュートリノ問題の解決には長い年月を要したので、この間には「われわれの太陽内部構造の理解に誤りがあるのではないか」という疑念が当然のように生じた。そこで、日震学を使って太陽モデルを検証しようという機運が高まったのである。

検証に使われるのは、固有振動数だ。通常、使われるモードの数は4000個程度までである。この4000個の固有振動数についての観測値と、太陽モデルからの計算値とが合えば、モデルは正しいと思ってよいだろう、というわけである。

これは次のようなプロセスと基本的には同じであ

る。弦に一定の張力が加わっている場合を考えよう。弦の線密度が一樣なら、基本振動の振動数からその線密度は計算できるし、2倍振動、3倍振動の振動数は基本振動の振動数の2倍、3倍になるだけである。ところがもし、弦が一樣でないとしたら？このときは、 $N$ 倍振動の振動数は基本振動の振動数の $N$ 倍からずれる。たくさんの振動モードについて、振動数を測ってやれば、弦の線密度分布を一樣と思ってよいかどうか、わかるだろう。あるいは、線密度のモデルに基づいて振動数を計算し、測定値とくらべればそのモデルが正しいかがわかる。太陽に関しても、それは可能なのである。

さて、太陽の固有振動数の観測値と計算値とは、合わなかった。重要なのは合わないことではなく、「モデルをどう改良すれば、合うようになるのか」を知ることである。もちろん、「計算方法をこう変えれば合います」などという答えはどうしたって得られない。だが「この場所の音速をこれ位高くしたら」「この場所の密度をこれ位低くしたら」という答えを得る方法はあって、インバージョンとよばれている。音速や密度がどういう値なら合うようになるかをいえるということは、太陽内部の音速や密度を測っているのだといってもよい。インバージョンをもとに、モデル計算の改良を続けた結果、太陽のモデルはかなり正しいと自信をもっていえるようになった。なので、太陽ニュートリノ問題の解決がニュートリノ振動によってもたらされたことは天体物理学者たちにとって、それほど驚きではなかったのである。

ここで「音速」に関して少し補足しておきたい。厳密には「断熱音速」という熱力学的量のひとつである。断熱音速を二乗すると、理想気体であれば温度に関係した量になる。「太陽内部の温度を測る」の方がわかりやすいので、こちらを使いたくなることもあるが、やはり音速は音速なのでそうもいかない。

### 4. 太陽の動的構造とダイナモ

太陽の固有振動数の測定から内部の静的構造を求めるのは、弦の振動数から線密度を求めるのと同じだと書いた。では、太陽の動的構造に関してはどうだろう。

昔はどんな学校でも、理科室や物理実験室には鐘があった。中には、紐をつけてぶら下げることので

きるものも珍しくなかった。そうした鐘をぶら下げて、回転させることができるようにしたとしよう(図2)。この鐘を、最初は回さずに、ただ棒で叩いてやると、カーンと鳴る。この振動数はもちろん、鐘の固有振動数である。次に、この鐘を回転させてから棒で叩くと、今度はただの「カーン」ではなく、うなりが聞こえるはずである。回転数を上げると、このうなりの周波数も高くなる。これは次のようなわけである。

鐘のような複雑な形状をした物体の中を、どう波が伝わるのかは簡単でないが、(上から見たときに)時計回りに伝わる波と、反時計回りに伝わる波があるだろうことは想像できる。鐘が時計回りに回っているとすると、時計回りに進む波はいわば追い風に乗って速く進む。反時計回りの波は向かい風で、遅く進む。このことが、時計回りの波から構成される固有モードの振動数を高く、反時計回りの波から構成される固有モードの振動数を低くするのである。振動数のずれは、鐘の回転周波数に比例する。

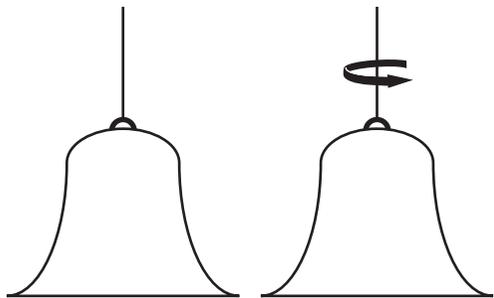


図2 釣り鐘を静止したまま鳴らすのと、回転させてから鳴らすのでは鳴り方が異なる。

太陽内部の音波の伝わり方も、太陽内部の自転による流れに乗っているとき(追い風)と、反対向き(向かい風)のときとで、違いが出る。したがって、固有振動数もこれにしたがって少しずれるのである。表紙の図では実はこのずれは修正してあるので、読み取ることはできない。このずれの測定からインバージョンによって図3のような、太陽内部の自転速度の分布を知ることができるのである。

太陽の動的構造は、太陽の磁気的活動の「カギを握っている」と書いた。ダイナモ機構とよばれる、電離したガス(プラズマ)の流れと磁場との相互作用がその根源にあると考えられているのだが、この2つの関係は太陽表面の密度の薄いところでは磁場が流れをコントロールし、逆に太陽内部の密度の高いと

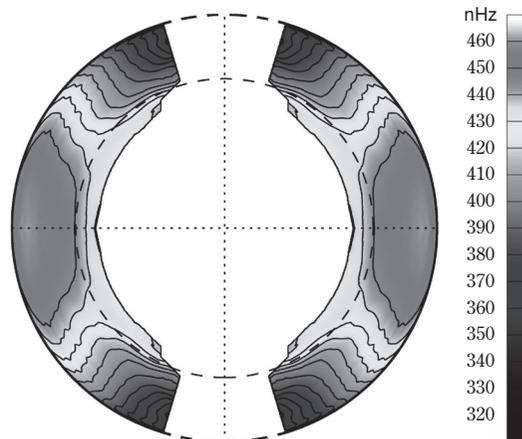


図3 インバージョンで求めた太陽内部の自転速度の分布を自転周波数(単位:nHz)で表した。

ころでは流れが磁場をコントロールし、全体としては対等な関係になっている。

太陽内部の自転はダイナモ機構というガスの流れのひとつの重要な成分であるが、自転速度の分布がわかっても、それですぐに太陽の磁気的活動が理解できたことにはならないのは、流れと磁場という2つのうちの、1つを測ったに過ぎないからだ。しかし検証はできる。図3のような自転構造が測られるようになると、それは日震学以前に想定されていた自転構造とはまったく違っていただ。それまでのダイナモ理論は見直しせざるを得なかったのである。太陽の磁気的活動もその11年周期も、ダイナモ機構がつくるとはいいつつ、その明瞭な全体像が見えてきていないのが現状である。

## 5. 局所の日震学

ここまで、太陽の固有振動数やそのずれの測定から、太陽の内部構造や、その自転のようすなどを測る研究について紹介してきた。一方、「局所の日震学」とよばれる新しい分野もある。局所の日震学では、固有振動については特に(あらわには)考えない。そのかわりに、音波の局所的な伝播を測るのである。

図4にあるように、太陽表面に届いた音波はそこで反射され、再び内部に向かう。太陽内部では、深い場所の方が高温で音速も大きいので、音波の経路は図のように屈折していき、やがてまた表面に戻ってくる。この伝播の仕方は、太陽内部の構造を反映しているだろう。しかし、不透明で見えない内部の

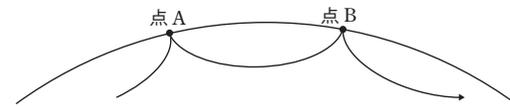


図4 太陽表面(大きな弧)上の2点AB間を伝わる音波の経路(矢印つきの弧)

波の伝播をどうやって測定するのか？

ここで登場するのが相互相関関数という数学的道具である。図4の点Aと点Bとで、振動のようすを測ってやる。点Aにやってきた音波が、そのまま点Bに行くわけではない。行かないことも多いだろう。しかし行くこともある。かかる時間は20分だとしよう。このとき、点Aのゆれ方と点Bのゆれ方とは、20分だけずらしてくらべると、少しだけ似ていることになる。この類似を定量的に測るための道具が相互相関関数で、これを使うことで点Aと点Bとの間の音波の伝播時間を測ることができる。これをもとに、局所的な構造や、局所的な流れを測定するのが、局所の日震学である。

局所の日震学はまだ発展中の分野だが、子午面循環流や黒点周囲の流れなどの測定に成功している。個人的に非常に重要だと考えている、最近の結果について紹介しよう。対流速度の測定である。

太陽のような天体の対流は乱流の対流とよばれ、流れのパターンは非常に複雑である。現代の計算機でシミュレーションをしたとしても、直接計算することは不可能といってよい。しかしそこは近似を使ったりしながら、うまく計算する人々がいる。対流速度は空間スケールにもよるので、具体的な数字を挙げるのは難しいが、表面近くならまずは100km/s程度である。このとき、十分な熱が運ばれて、太陽の明るさも無理なく説明できる。

一方、局所の日震学の手法で、対流速度を直接測ろうという試みがあったのだが、これはうまくいかなかった。うまくいかなかった、と諦めてしまえばそれまでだが、検出できなかったということを使えば、対流速度の上限を推定できる。もしこの上限値よりも対流が速ければ、検出できたはずだ、という論理だ。

こうして出てきた対流速度の上限は、シミュレーションによるものよりも2桁程小さかった。これは大問題である。直接計算は無理ながらも何とかうまく計算できていたと思っていた対流現象に関するシミュレーションも、これに基づくわれわれの理解も、

違っているのかもしれないからだ。例えば太陽の明るさを説明するには、普通のシミュレーションや、局所の日震学の測定では扱えないほどスケールの小さな対流が主に熱を運んでいると考えないと辻褃が合わない。詳しくは説明できないが、プリユームとよばれる現象が、これまで考えられていたよりも重要なものかもしれない。

## 6. 星震学へ

日震学の大きな成功は、星震学を動機づけることになった。恒星の波動現象から、恒星の内部を探る研究である。特に、NASA(米航空宇宙局)打ち上げの科学衛星 Kepler(ケプラー)は、系外惑星探査を主目的とする衛星であるが、恒星振動の測定にも大きな威力を発揮した。

恒星の場合、どんな大きな望遠鏡を使っても、空間的に分解して見えることはない(例外は干渉計による観測だが、まだまだ困難)。したがって、日震学の場合のようにデータが取れない。それでも、これまでにない精度で恒星振動が測れるようになったお蔭で、星震学も日進月歩の勢いである。ひとつだけ、KIC11145123という星について紹介する。

この星は100日程度の周期でゆっくり自転している。自転速度の緯度方向の変化まではわからない。しかし、半径方向の変化については推定ができる。まず、この変化は小さいことがデータからわかる。次に、この星では内部よりも外部の方が、わずかながら速く回っていることがわかったのである。回転流体では、角運動量は自転軸から離れるにしたがって増えないと不安定になるのだが、外側が全体として速く回っているという例は知らない。何がこの星にこんな自転をさせているのだろうか。謎はつきないものである。

### 参考文献

桜井隆, 小島正宜, 小杉健郎, 柴田一成編『シリーズ現代の天文学 10 太陽』日本評論社(2009)第3章(関井隆著)