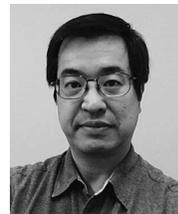


# 総説—星震学とは何か

高田 将 郎

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: takata@astron.s.u-tokyo.ac.jp



星の内部はどのような構造になっているのか？ 表面で検出される振動を調べて、これに答えようというのが、星震学という研究分野である。この分野は、セファイドの周期光度関係の発見を契機として発展してきた脈動変光星の研究と、太陽5分振動の発見に端を発する日震学を前段階としているが、21世紀に入って宇宙探査機からの観測が実現され、めざましい発展を遂げている。本稿では、星震学とは何かについて、基本的な考え方や歴史、そして主要な成果まで含めて解説する。また、続く4つの記事では、それぞれ特定の種類の星について、最近の成果を紹介する。

## 1. はじめに

恒星の研究は長い歴史を持つが、従来の方法は、物理法則に基づいて内部構造を理論的に構築し、その予想を、温度や明るさ、化学組成といった表面で観測される量に基づいて検証するというものであった。これに対して、星震学の手法は、表面の振動から内部の情報を得るというもので、表面だけでなく内部構造についても理論と観測を直接比較するという点で、一歩踏み込んだものである。ここ約10年の間に星震学の研究は急速に活発になり、恒星研究の最前線に躍り出たといっても過言ではない。こうした状況を踏まえ、本特集では、星震学の歴史や手法から説き起こし、最新の成果までを紹介する。

本特集は、本稿を含めて5つの記事からなる。冒頭の本稿では、後続記事への準備をかねて、星震学の概要を説明する。続く4つの記事では、日本のグループの携わった研究を中心に、以下のタイプの星に関する最近の成果について解説する。

すなわち、(1) ベノマー (Benomar), 関井の記事: 太陽型振動を示す(F-G型)主系列星, (2) 八田, 関井の記事: KIC11145123というA型主系列星, (3) 斉尾の記事: かじき座 $\gamma$  ( $\gamma$  Dor)型に代表される自転の影響を強く受けた星, (4) 高田の記事: 太陽型振動を示す赤色巨星である。

## 2. 星震学の概要

### 2.1 原理

星震学という語は、「地震学」で地球を意味する「地」を「星」に置き換えたものである。辞書的に定義を書けば、「表面で検出される振動の性質から、恒星の内部構造<sup>\*1</sup>に関する情報を引き出す研究分野」、大雑把に言えば「地震学の恒星バージョン」ということになる。ちなみにこれは、英語の *asteroseismology* の訳語であるが、前半の *astero* が「(恒)星の」を意味する。*seismology* は通常「地震学」を意味するが、ここではより一般に「振動に関する学問」の意である。

検出するのはあくまでも表面での振動であるが、

<sup>\*1</sup> 最近では、内部構造だけでなく、星全体の質量や半径、自転軸の傾きといったグローバルパラメータ(全体の構造)、さらには振動や対流といった物理過程自体も星震学の研究として扱われる。したがって「振動に基づいて恒星の構造や物理過程を研究する分野」と定義を少し広げるのがより適切かもしれない。

これは実は内部を伝わる波が表面に達したときに現れる現象である。このために、表面で測る信号に内部の情報が反映されるのである。現象の理解としては、「星の内部構造（入力）がまずあって、それに応じて（物理法則から）振動の性質（出力）が決まる」と考えるのが自然であろう。すると「振動の性質から、内部の構造を探る」というのは、出力から入力を決める逆問題ということになる。

## 2.2 対象：脈動変光星

星震学のターゲットは、表面で振動の検出される星ということになるが、実際には脈動変光星と呼ばれるものが対応する。形を変えながら、継続的に明暗を繰り返す星である。このような星は、1世紀前なら一部の例外といってよかった。当時知られていた脈動変光星は、セファイド（ケフェウス座 $\delta$ 型）、琴座RR型といった（古典的脈動変光星と呼ばれる）もので、ほとんどがヘルツシュプルング・ラッセル図（HR図）上の带状領域（セファイド不安定性帯）で見つかった。ところが、20世紀後半以降、観測技術の進歩により、太陽、白色矮星など、より微弱に変光する脈動変光星が、セファイド不安定性帯の外側でも、次々に発見されるようになった。図1に示すように、現在ではHR図上のさまざまな領域で、脈動変光星が見つかっている。

一口に脈動変光星といっても、主系列星、巨星、白色矮星などさまざまで、その性質は多様である。変光周期でいえば、数分ものから数年のものまで、振幅でいえば、100万分の1等級程度から数等級のものまで、いずれも6桁もの範囲に及ぶ。古典的脈動変光星のほとんどは、球対称な形を保ったまま（動径振動）、単一ないしせいぜい数個の周期で振動している。また一般に振幅も大きい。これに対し、セファイド不安定性帯の外側で見つかっているものは、一般に非球対称に振動（非動径振動）し、その振幅は小さく、また数多くの周期を持つ。さらに振動を励起する機構の

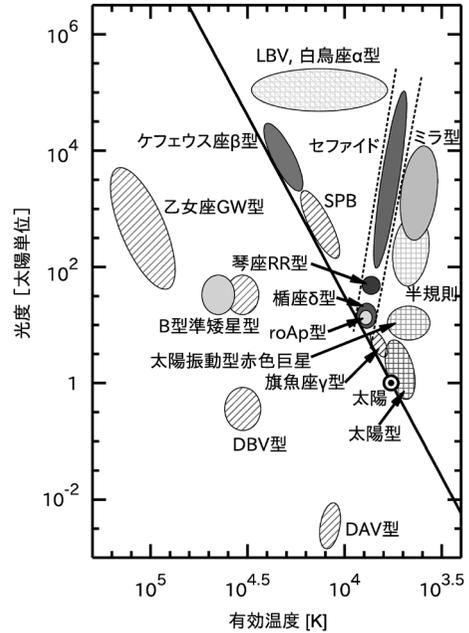


図1 主な脈動変光星のHR図上の分布（概略図）。破線で挟まれた带状の領域はセファイド不安定性帯と呼ばれる。

違いにより、変光曲線やそれをフーリエ変換して得られるパワースペクトルの様相は大きく異なる（詳しくは3.2節を参照）。これらの多様性のために、星震学ではすべての星で同じ方法が使えるわけではなく、星それぞれの性質に応じて異なる観測、解析方法を考案、適用する必要がある。

## 2.3 歴史的背景

星震学という分野が明確に成立してきたのは、ここ20~30年のことである。それ以前からあった、星震学の源流といえるものは、脈動変光星（恒星振動）の研究と日震学である。

### 2.3.1 脈動変光星の研究

明るさの変わる星には、脈動変光星のほか、新星、超新星、食連星などがあるが、いずれも現象として珍しいということもあり、古く（近代科学の成立以前）から記録がある。しかしながら、脈動変光星の代表格であるセファイドが、とくに注目されるようになったのは、1908年リービット（Leavitt）により、周期光度関係が発見されてか

らである<sup>1), \*2</sup>。彼女は、小マゼラン星雲にあるセファイドを観測し、明るいものほど変光周期が長いことに気がついた。これらの星はどれも大体同じ距離にあると考えてよいから、(見かけの)明るさの違いは星固有の明るさ(絶対光度)の違いを反映する。変光周期と星固有の明るさの間に普遍的な関係があるとすれば、(距離によらない)変光周期を測定することで、星固有の明るさがわかり、それを見かけの明るさと比較して、星までの距離がわかる。こうしてセファイドは、星自身はもちろん、その属する集団(星団、銀河)までの距離の指標となる。こうした周期光度関係を示す脈動変光星は、宇宙の大きさを測る際の標準光源として、現代に至るまで天文学全体において重要な役割を果たしている。

一方で、恒星非動径振動の研究が本格的に始まったのは、1951年にルドゥー(Ledoux)がおおいぬ座 $\beta$ 星の変光原因として提唱してからである<sup>2)</sup>。しかしながら、一般に非動径振動を示す脈動変光星は、(少なくとも簡単に使えるような)周期光度関係を示さないので、距離指標としては役に立たない。また振幅が小さく、かつ多周期の変光の構造を解明するには、大変なコストが掛かるので、質のよい観測データを得るのは容易ではない。その結果非動径振動の研究は、現象(すなわち特定のタイプの脈動変光星)をどう理解するかに重点をおく時代が長く続いた。

### 2.3.2 日震学

太陽で「5分振動」と呼ばれる現象(視線速度の微弱な変動)が検出されたのは、1960年である(レイトン(Leighton)ら<sup>3)</sup>による)。当初は、原因を巡って諸説あったが、最終的に(一般の脈動変光星と同じく)固有振動(3.1節参照)であるという解釈が確立した<sup>4)-7)</sup>。すなわち、5分振動の正体は、おびただしい数の固有振動モード(3.1

節参照)の重ね合わせである。

固有振動は星の深部までの性質で決まるものであるから、多数のモードが観測されるということは、それだけ内部構造の情報が得られるということである。この点、同じ脈動変光星とはいえ、セファイドのように、1つないし数個のモードしか観測されないものとは一線を画す。この性質に着目することで、地震学と同様に「振動を使って逆問題を解いて太陽の中を調べる」という発想が生まれ<sup>8)</sup>、1970年代中頃から1980年代にかけて、太陽の場合の星震学、「日震学」が誕生した。

日震学で得られた結果には、音速分布、表面对流層の深さ、(対流層の)ヘリウム組成、自転角速度分布といったものがある。これらは、いずれも他の方法では得られないものばかりで、対流の物理、宇宙の化学組成、ダイナモ機構といった重要な問題に貴重な手がかりを与える。

20世紀終わり頃からは、局所の日震学と呼ばれる新しい分野が誕生した。これは、太陽振動の固有振動としての性質(モードの周波数や減衰率などのいわば大局的な量)を用いるのではなく、太陽内部を伝わる(必ずしも固有モードの条件を満たさない)波動の性質を利用するものである。この手法を用いて、黒点直下の音速構造や対流層の流れの構造が明らかにされている。

なお、日震学についての詳細は、過去の天文月報の記事<sup>9)-11)</sup>を参照のこと。

### 2.3.3 星震学の成立

日震学の成功を受けて、太陽以外の星でも5分振動に相当するものを検出しようという試みは、すでに1980年代にはあった。しかしながら、太陽型振動の振幅は非常に小さいため、明確に検出するためには、観測技術の向上を待たねばならなかった。努力がようやく実ったのは、20世紀終盤のことである。以降今世紀初頭まで、太陽型振

\*2 もっとも、セファイドの変光する原因が脈動であるという解釈が確立したのは、周期光度関係の発見より後のことである。

動の検出は、ほぼ地上からの観測によるものであり、数はせいぜい数十個にとどまっていた。ところが、その後フランスのコロー (CoRoT: 2006年から2013年まで)、米国のケプラー (Kepler: 2009年から2013年まで<sup>\*3</sup>、その後2014年から2018年まではK2として継続) といった系外惑星探査を目的とした宇宙探査計画に、星震学も「相乗り」することになり、その圧倒的な性能のおかげで、検出数および観測データの質は飛躍的に向上した (2.4.1節も参照)。一方これらのスペースから (とくにケプラー) の観測は、太陽型のみならず、他の数多くの脈動変光星のデータをも一新した。こうして観測データが量的にも質的にも飛躍的に向上したおかげで、星震学の研究は最近約10年の間に一気に活発になった。この劇的な変化を表すのに「ケプラー革命」という言葉が使われるほどである。

## 2.4 他分野とのつながり

### 2.4.1 系外惑星の研究

星震学は系外惑星の研究と、観測方法と科学的成果の両面で深い関わりがある。

コローやケプラー、さらにはテス (TESS: 米国 NASA, 2018年から)、プラト (PLATO: 欧州 ESA, 2026年打ち上げ予定) といった宇宙探査計画で用いられるのは、トランジット法と呼ばれる手法である。地球から見て、もし惑星が主星の手前に来ること (恒星面通過) があるとすると、主星の一部が惑星に隠されるために、星が少しだけ暗くなる。光度曲線を描くと、周期的にくぼみができることになるので、このくぼみを見つけて、惑星の目印とするわけである。地球から見て、たまたま恒星面通過を起こすような配置を持つ惑星系は限られており、またいつ恒星面通過が起こるかは事前にはわからない。したがって、トランジット法で惑星を見つけるには、なるべく多くの

恒星の明るさを長期間連続的に観測し続ける必要がある。また地球型のような小さな惑星は、光度曲線に小さなくぼみしか作らないから、それだけ高い測光精度が必要である。この「多数の星を高精度で長期間連続に観測」というのは、星震学的重要と非常にうまく合致する。まず「多数」という点であるが、たくさんの星を調べれば、それだけ多くの脈動変光星を見つけられる。また「高精度」は小さな振幅の変光を捉えるのに、さらに「長期間」は振動の周波数を精度よく決めるのに有利である。(周波数精度は観測期間に反比例する。) 最後に「連続」観測の重要性は、地上 (の一地点) からの観測と比較するとわかりやすい。この場合、昼間は観測を中断せざるを得ないため、光度曲線を周波数解析をすると、パワースペクトルに、振動周波数に対応する (本物の) ピークのほかに、エイリアスという偽のピークが現れる。星が多数の周波数を持ち、本物とエイリアスが混在する場合、両者を区別するのは一般に難しい。この点、スペースから昼夜の区別なく連続的に観測すると、エイリアスは完全に消えるのである。

一方で星震学と系外惑星研究は、科学的な成果という点でも、接点がある。太陽のような星の周りに惑星を探す場合、中心星は太陽型振動を示す星 (F, G, K型主系列星) であることが多い。このような場合、振動の解析から、中心星の質量や半径がわかる (4.1節参照)。また、振動の性質からは、中心星の自転軸と視線方向の傾きを決めることができる (惑星系の配置についての情報)。以上はいずれも惑星系の形成過程を考える上で、貴重な情報となる。(詳しくは、本特集のペノマー、関井の記事を参照のこと。)

### 2.4.2 銀河考古学

赤色巨星は太陽と同様に外層に深い対流層を持

<sup>\*3</sup> 2009年から2013年にわたるケプラー計画では、白鳥座、琴座、竜座にまたがる約100平方度の領域にある15万個以上の星の明るさを、30分間隔 (一部の星は1分間隔) で、また  $10^{-5}$  等級程度の精度で、ほぼ切れ目なく測定し続けた。

つため、太陽型振動を示す。実際カラー、ケプラーにより、こうした星が多数見つかった。太陽型振動を示す星については、振動の性質から、半経験的な方法により、質量と半径が推定できる(4.1節参照)。赤色巨星の質量がわかると、理論的に計算された恒星進化モデルと組み合わせることで、星の年齢をこれまでより正確に決められる。

一般に(フィールドにある)恒星の年齢を正確に求めるのは難しい。従来(1つ)の方法は、HR図上の位置を観測的に決めて、その位置にくる理論進化モデルの年齢を推定値とするものである。ところが赤色巨星の場合、異なる質量の星の進化径路が近接し、しかも年齢は質量が大きくなると急激に短くなるので、HR図上の位置に不定性があると、質量ひいては年齢の誤差は大きくなるを得ない。これに対して、星震学的手法で質量がよく決まると、HR図上の位置はさほど問題にならない。赤色巨星の年齢は、その星が主系列段階で過ごした期間の長さでほぼ決まるが、これは主に質量の関数だからである。

一方赤色巨星は明るいいため、遠くにあっても見つけやすいという大きな利点がある。そこで、もし銀河系のさまざまな位置にある多数の赤色巨星について、質量や年齢、化学組成がわかれば、銀河系の現在および過去の構造を探るプローブとして有用であると考えられる。こうして、赤色巨星の星震学は、銀河考古学の研究に大変役立つことが期待されており、現在その可能性について活発に議論されている。2026年の打ち上げを目指しているESAのプラトー計画でも、赤色巨星の星震学に基づく銀河考古学が1つの目標となっている。

### 3. 恒星振動の基礎

星震学の基礎となるのは、恒星振動の理論なので、この節ではその基本事項を説明する。簡単のため、球対称な星(自転も磁場もない星)の場合

に話を限る。

#### 3.1 星の固有振動モード

お寺の鐘をつけば、ゴーンという音がしばらく鳴り響く。これは鐘が振動して、その振動数に対応する音が発生するからである。鐘の音色は、おおよそ形や材質によってさまざまだが、これは鐘ごとに振動周波数(振動数)が異なるからである。鐘がそれぞれ特有の音色を持つように、どの物体もガンと叩いて放っておくと、それぞれに(一般に複数ある)固有の振動数で振動する。この振動を固有振動、対応する振動数を固有振動数という。

固有振動を構成する単位は、固有振動数と、物体の各部位の動きを記述する固有関数(つまり、どういう振動数でどういう変形をするか)の組である。これを固有振動モードという。脈動変光星に見られる変光の原因は、星の固有振動である。

##### 3.1.1 固有モードの分類

星の固有振動には、無数のモードがあるが、それらをどう分類するかについて説明する。はじめに、もっと簡単な1次元の弦の振動を考えよう(図2参照)。弦の密度は一樣で、両端は固定されているとする。これをピンと張っておいてから、指ではじくと振動が起こる。振動の様子ははじき方によって変わるが、どの場合も固有モードの重ね合わせとなる。それぞれのモードについて、弦の各部分の動き(振動の固有関数)は、三角関数(サイン、コサイン)で記述され、その周期(振動の波長)は、節(振動に際して動かない点)の数で特徴付けられる。とくに、節の数が多いほど固有振動数が高いという性質がある。

実はこの「各モードの固有関数が節の数によって指定(分類)できる」という性質は、星の振動についてもあてはまる。ただし、弦と違って星は3次元なので、節は点ではなく面(節面)をなす。星の固有振動の節面には、次の3種類ある。(1)半径(中心からの距離)一定の球面、(2)緯度一定の円錐面(あるいは赤道面)、(3)子午面(極軸

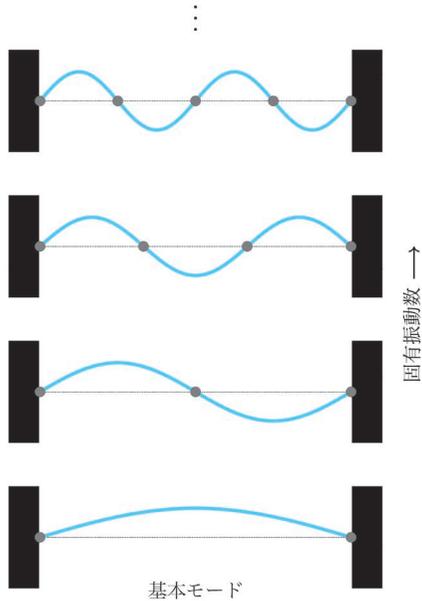


図2 両端を固定された1次元の弦の固有振動。下から上に固有振動数の小さい順に固有モードが並べてある。それぞれのモードで、●は振動の節を表す。

(南北極を通る直線)を含む平面)である。慣習として、(1)のタイプの節面の数(の指標)を $n$ (動径オーダー)、(2)と(3)のタイプの合計数を $l$ (角次数)、(3)のタイプの数(の指標)を $m$ (偏角次数)という\*4。こうして星の固有振動モードは $n, l, m$ の3つの整数で指定される。

### 3.1.2 表面の節の数 $l$ と $m$

星の表面に現れる振動を考えると、 $l, m$ (の絶対値)はそれぞれ表面に現れる節線の総数、およびそのうち子午線に一致するものの数ということになる。 $l=0$ は(表面に節線のない)球対称な振動(動径振動)を、一方 $l>0$ は非球対称な振動(非動径振動)を記述する。 $l=1, 2, 3$ に対応するものを、それぞれ双極子、四重極子、八重極子の振

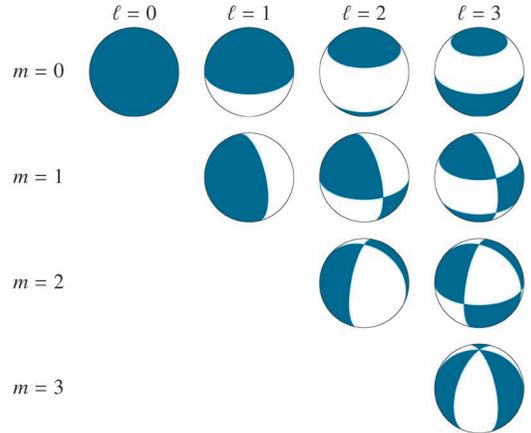


図3 星が球対称な場合に、各固有振動モードの角度依存性を記述する球面調和関数の例。色のついた部分とそうでない部分では、振動に伴う物理量(温度や圧力など)の変化が逆符号であることを意味する。両者の境目が振動の節に対応する。 $l$ は表面の節線の総数、また $m$ は子午線と一致する節線の数である。

動モードという。それぞれの振動パターンを図3に示す。これらのパターンは、星の構造に一切よらず、球面調和関数という数学関数で記述される。(弦の振動の固有関数が、線密度や張力によらず、どんな場合も三角関数で表されるのと事情は同じである。)

ところで $l$ や $m$ に対応する節面は、極軸を基準にしているが、これは中心を通る軸ならどれを選んでもよい。今球対称な星を考えているので、どの軸も平等だからである。球対称であることによる重要な性質として、次のことがある。 $n$ と $l$ が同じ場合、 $m=-l$ から $m=l$ までの $2l+1$ 個の固有モードは、すべて同じ固有振動数を持つ。これを固有モードの縮退という。

図3からわかるように、 $l$ の値が大きくなるに

\*4 固有振動の各モードは(弦の場合のように)通常定常波で記述されるが、星の場合、経度方向については、進行波を用いる。したがって(3)のタイプの節面は、位置が固定されているわけではなく、厳密には「節面」とは呼べない。 $m$ の正確な定義は以下ようになる。振動の各瞬間に、その上で、変位の平衡状態からのずれが0となるような子午面が $|m|$ 枚現れる。進行波の伝播する向きには東西2つあるので、それを $m$ の符号で区別する。各 $l$ につき、 $m$ は $-l$ から $l$ までの $2l+1$ 個の値をとる。

つれ、表面の節線が増え、振動パターンがより細かくなる。太陽以外の星は、ほぼ点光源としてしか観測できないため、表面に明暗の細かいパターンがあっても、実際に観測される明るさは（星の観測者側にある半面）全体の平均である。細かいパターンほど、平均でならされる効果が大きく、全体としての明るさの変化は小さくなる。このため、太陽以外の恒星で明るさの変化を測定しても、検出される固有振動モードは、せいぜい $l \leq 3$ のものに限られる。

### 3.1.3 pモードとgモード

動径オーダー  $n$ （半径一定の節面の数の指標）は、固有振動を構成する波が、星の深さ方向にどう伝播するかを特徴付ける指標である。この伝播の様子は物理によって決まるので、まずはそれを説明する。星は自分の重み（重力）でつぶれようとするのを、圧力で外に押し返すことで形を保っている系である。この状態から少しでもずれると、重力もしくは圧力のどちらかが優勢になって、元に戻ろうとする。（そうでないと、星が壊れてしまう。）振動が起こる（あるいはその伝播として波が立つ）場合には、必ずこのような力（復元力）がはたらく。2つの力に対応して、それぞれを復元力とする2種類の波が存在する。圧力を復元力とするものが音波であるのに対して、浮力（重力）を復元力とするものを重力波<sup>\*5</sup>という。固有振動はこれら2種類の波からなり、音波で構成されるものをpモード、重力波で構成されるものをgモードと呼ぶ。浮力は密度が水平（重力と垂直な）方向に不均一なときに限って生ずるので、gモードは非動径振動である。一方pモードは動径振動にも、非動径振動にもある。また、対流層では浮力ははたらかないので、gモードは輻射層のみを伝播する。

pモードとgモードの性質で、とくに重要な点

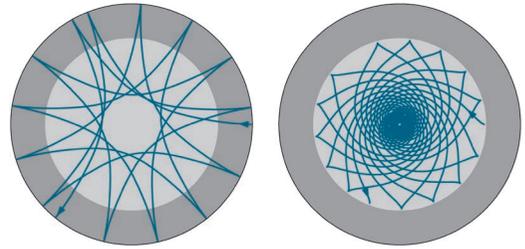


図4 pモード（左）とgモード（右）を構成する波動が太陽内部を伝播の様子。中心の薄い灰色の部分は輻射層、外層の濃い灰色の部分は対流層を表す。

を以下にまとめる。まず周波数（固有振動数）であるが、pモードは高く、gモードは低い。（両者の境は、音波が星の直径を横切る時間の逆数ぐらいである。）脈動変光星を観測すると、振動の周波数がわかるが、その高低を見て、pモードかgモードかを判定するのが星震学の第一歩である。また、pモードは主として星の外側の領域を、gモードは中心の方まで伝播するという性質がある（図4参照）。各モードは、伝播領域の情報しか持ち得ないので、pモードが見つかれば星の外側のこと、一方gモードが見つかれば中心までのことがわかる、ということになる。さらに、pモードでは周波数が高いほど、gモードでは周波数が低いほど（半径一定の）節面の数（動径オーダー  $n$  の絶対値）は多くなる。（3.1.1節で説明した弦の場合とくらべると、pモードでは同じ、gモードでは反対の関係が成り立つ。）両者を区別するため、便宜上pモードに対しては $n > 0$ 、gモードに対しては $n < 0$ とする。

なお、進化が進んだ段階（主系列段階の中期以降）の星では、pモードともgモードとも判定できないものが現れる。このモードは、中心部では重力波で、外層では音波で構成され、混合モードとよばれる。混合モードは、赤色巨星の星震学に

<sup>\*5</sup> 重力波といっても、一般相対論とは無関係で、純粋に流体力学の話である。英語では、一般相対論の方（時空のゆがみの変動に伴うもの）にgravitational waveを、流体力学の方にgravity waveを用いて区別する。

おいてとくに重要な役割を果たす（本特集の高田による赤色巨星の記事を参照）。

### 3.2 なぜ振動するのか？：励起機構

脈動変光星が現実に観測されるのはよいが、それらはどうして脈動するのだろうか？ この節ではこの疑問に対して、代表的な答え（星が「勝手に」振動する物理機構）を2つ挙げる。

#### 3.2.1 熱エンジン機構

第一の励起機構の考え方は以下のようなものである。恒星の中心ないしその周辺では、核融合反応が起こり、発生したエネルギーは表面まで運ばれる。したがって、星が脈動するためには、この中心から流れてくる（熱）エネルギーの一部を捕まえ（せきとめ）て、振動の（力学的）エネルギーに変換してやればよい。このような仕組み<sup>\*6</sup>の代表例は（ガソリン）自動車のエンジンなので、この機構を熱エンジン機構と呼ぶ。

実際にこの仕組みは、原子が部分電離している層ではたらく<sup>12)</sup>。以下この様子を少し詳しく説明する。星の内部は高温高圧で、原子はほぼ完全に電離している。電離状態の遷移（中性から1回電離、1回電離から2回電離など）は表面近くのごく薄い層で起こるが、これが部分電離層である。星の各層は振動にもなって収縮膨張を繰り返すが、部分電離層が収縮すると、電離が少し活発になり、星の内側から流れてくる放射のエネルギーを、その分余計に吸収する。そのため層の温度、圧力は（電離状態が変わらないときとくらべて<sup>\*7</sup>）少し余分に上昇する。圧力が増えるため、運動が膨張に転じたときに、この層は隣接する層を少し強く押す。このため振動を何度も繰り返すにつれ、その振幅は徐々に大きくなる。このようにして振動は成長する<sup>\*8</sup>。どの原子の電離が大事になるかは、脈動変光星の型によって異なる。セファイド不安定性帯にある脈動変光星では、ヘリ

ウムの1回電離と2回電離の間の遷移が重要である。一方ケフェウス座 $\beta$ 型や長周期振動B型星（SPB）では鉄族元素の電離が本質的な役割を果たしている。

熱エンジン機構で励起される振動の各モードは、基本的に同じ運動を延々と繰り返す。このような現象を観測する場合、単純に期間が長いほど、（固有）振動数を正確に決められる。

#### 3.2.2 対流による統計的励起

太陽のように質量の小さい星や、進化が進んで赤色巨星となった星は、表面に深い対流層を持つ。対流層で起きる運動は乱流状態にあるが、一般に乱流からは音波が発生する。この理論はもとはジェットエンジンから発生する轟音を説明するために考案されたものだが<sup>13)</sup>、太陽5分振動の説明に用いたのはゴールドライクとキーリー（Goldreich & Keeley）（1977）である<sup>14)</sup>。

対流層内の乱流運動は表面のごく近くで最も激しくなるから、そこが音波の発生源である。発生する音波は、広範囲の周波数とさまざまな方向を持ち、星の深部へと伝播していく。とはいえ、ほとんどの成分は、星の内部を周回して戻ってきたときに、もとの波とは異なる位相を持つので、振動は弱め合うことになる。特定の周波数と方向を持つ成分だけが、周回前後で自分自身と正の干渉を起こし（いわば星の構造と共鳴し）、固有モードを構成することになる。しかし、これらの波も発生後は放射や対流との相互作用によって、次第に減衰していく。その一方、乱流からは次から次へと絶えず音波が発生するので、1回の励起で発生した音波が減衰しても、直後に同じ周波数と方向の波が発生することで、絶えず同じ固有モードが励起されている状態が保たれる。

このように、太陽型振動は、（乱流によってランダムに叩かれ、放っておくと減衰してしまう）

<sup>\*6</sup> 熱力学で学ぶように、熱エネルギーを（力学的）仕事に変換する装置を熱機関という。

<sup>\*7</sup> 熱力学の言葉でいえば、断熱圧縮の場合とくらべて、ということである。

<sup>\*8</sup> 電離の活性化は吸収係数（通常 $\kappa$ で表す）の増加と捉えることができるので、この機構を $\kappa$ （カッパ）メカニズムという。

強制・減衰振動と理解できる。振動数の高い音波で構成されるので、太陽型振動は高調波の（動径オーダー  $n$  の大きな） $p$ モードである。（ただし赤色巨星の非動径振動では、混合モードとなる。）また一定周波数領域にあるモードがすべて励起されることになる。

太陽型振動の光度曲線には、固有振動とは別に、表面近くの乱流運動に由来する大きな「雑音」がのっており、熱エンジン機構で励起される脈動変光星とはまったく異なる様相を示す。太陽型振動の解析では、この雑音をかき分けて固有振動の情報を取り出さなければならないため、（熱エンジン機構の場合と異なり）高度な解析方法が用いられる。

#### 4. 最近の成果から

この節では、星震学の最近の成果から、2つのトピックを選んで簡単に紹介する。

##### 4.1 太陽型振動星の質量、半径

質量と半径は、星の構造を考える上で最も基本的な量であるが、食連星などの一部の例外をのぞき、観測的に正確に決めるのは簡単ではない。ところが、太陽型振動（3.2.2節参照）を示す星については、星震学の手法を用いることで、単独星であっても質量  $M$  と半径  $R$  を推定することができる。

この方法の土台は、観測量の満たす2つの比例関係である。太陽型振動は、多数の高調波  $p$ モードの集まりであるが、これらのモードから  $l$  が同じものを取り出し、周波数（または  $n$ ）の順に並べると、隣り合うモードの周波数間隔が一定になるという著しい特徴がある。これを周波数大間隔といい  $\Delta\nu$  で表す（図5参照）。第一の関係は、 $\Delta\nu$  が、おおよそ星の平均密度の平方根に比例するというものである（この関係には、近似的ではあるが理論的な裏付けがある）。

一方各固有モードの（表面での）振幅に着目し、周波数の関数として分布を見ると、ある周波

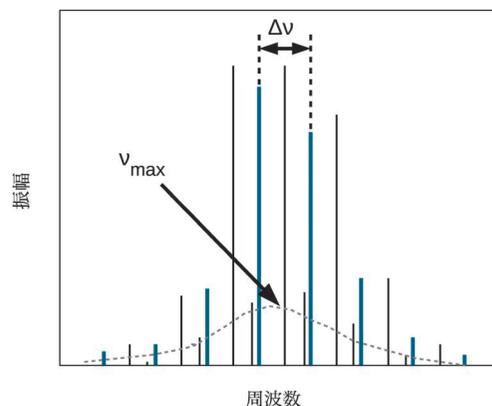


図5 太陽型振動の周波数スペクトルの模式図。高いピークがほぼ等間隔にあるが、実は  $l=0$  の動径モード（青い縦線）と、 $l=1$  の双極子モードが交互に並んでいる。 $\Delta\nu$  は、隣り合う同じ  $l$  のモードの間隔なので、2つ隣のピークとの周波数差となる。

数で最大となり、両側ではほぼ対称に次第に減小する。この振幅が最大となる周波数を  $\nu_{\max}$  と表す（図5参照）。経験的ではあるが、 $\nu_{\max}$  は表面の重力加速度に比例し、有効温度の平方根に反比例することが知られている。これが第2の関係である。

結局振動から  $\Delta\nu$  と  $\nu_{\max}$  を決め、分光観測など別の手段で有効温度が求まると、星の平均密度と表面での重力加速度が決まる。（比例定数は、太陽の場合の値から決める。）前者は  $M/R^3$ 、後者は  $M/R^2$  に比例するので、これらを解いて質量  $M$  と半径  $R$  を求めることができる。実際この方法で、多数の主系列星、赤色巨星の半径、質量が測定されている<sup>15),16)</sup>。

この結果について、3点コメントする。1つ目は、方法の原理は単純であるが、振動のパラメータ（とくに  $\Delta\nu$ ）は、ケプラー計画のように、高精度かつ長期間連続する観測が実現されてはじめて、多数の星で正確に決められるようになったという点である（太陽型振動を示す星であれば、どの星にも適用可能な方法だが、相応のコストは掛かるということ）。2つ目は、 $\nu_{\max}$  の関係にはきち

んとした理論的な裏付けがなく、無制限に受け入れてよいか懸念があるということである。最後は、質量、半径の決定精度についてである。(文献によって値は異なるが、比較的保守的な場合でもそれぞれ15%程度、5%程度といった小さな値が見られる。)これらは、答えのわかっているケース(太陽型振動を示す星からなる食連星系や干渉計で観測できる近傍の星)で検証すべきだが、現状まだ数が限られている。2つ目、3つ目については、いずれも今後の進展が待たれる。

#### 4.2 内部自転構造の測定

星の内部がどのように自転しているかは、単に興味のある問題というだけでなく、元素合成や星の寿命に影響するため、星の内部構造と進化をよく理解する上で重要である。また磁場の生成維持(ダイナモ)機構とも深く関わっている。

表面の自転は、たとえば黒点による明るさの変動を検出できれば測れるが、自転構造の全容を調べるには、内部の情報も必要で、それには星震学以外に手段はない(実際日震学の場合には、すでに大きな実績がある)。

##### 4.2.1 遅い自転の影響

固有振動のどのような性質を調べると、星の中の自転がわかるのか? 答えは、「各モードの固有振動数が、内部の自転の仕方に応じて(自転していない場合にくらべて)変化するので、その変化量を測ってやる」ということになる。

3.1.2節で説明したように、自転していない場合には、(極軸の選び方は任意で)固有振動数は $m$ によらず縮退している。ところが自転が加わると(極軸としては自転軸を選ぶ必要があり)、各 $m$ ごとに異なる振動数を持つようになる(縮退が解ける)。これを振動のパワースペクトルで見ると、自転がないときに1本だったピークが、隣接する $2l+1$ 本に分裂する(図6参照)。これは、

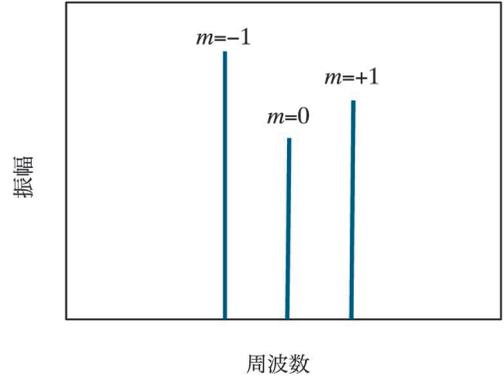


図6 光度変化の周波数スペクトルで、自転によって双極子( $l=1$ )のモードの周波数が分裂する様子(模式図)。青の縦線は、左から順に $m=-1, 0, +1$ の固有振動モードに対応する。

量子力学で習う、原子のスペクトルが、磁場をかけると分裂する現象(ゼーマン効果)と同様である。ゼーマン効果の場合に、分裂の大きさが磁場の強度で決まると同様に、自転による周波数分裂の大きさは、自転周波数の星内部での(重み付き)平均の値に比例する<sup>\*9</sup>。平均の重みはモードの伝播領域で決まり、 $p$ モードは外層、 $g$ モードは中心付近(混合モードはその両方)に比重がある。したがって内部の自転を測ろうと思えば、振動のパワースペクトルの中に、近接するピークを探し、見つければ自転によるものかどうかをくわしく検討するという手順を踏むことになる。分裂した周波数の組(そしてモードの種類)が多く見つかるほど、それだけ詳しく自転構造を調べられる。

##### 4.2.2 ささまざまな星の内部自転構造からの示唆

これまで内部自転が測られた星には、太陽型(F,G型)主系列星、A型主系列星、赤色巨星(準巨星)、白色矮星などがある。本特集のペノマー、関井の記事には、太陽型主系列星について、また八田、関井の記事にはA型主系列星についての結

\*9 自転が速くなると、コリオリ力や遠心力の効果が重要になり、事情はもっと複雑になる。詳細は、本特集の斉尾による記事を参照のこと。

果が紹介されている。

このうち、ここではとくに「星の内側と外側では、自転にどれくらい差があるか？」という問題を考えてみる。星は生まれたときには、全体が対流層になっていてよく混ぜられるので、中心から表面までだいたい同じ角速度で自転しているとしてよいだろう。しかしながら、星が進化するにつれて、おおよそ中心部は徐々に小さくなり（密度が上昇し）、反対に外側の領域は希薄になっていく。このとき、もし何も起こらなければ（各質量要素の角運動量が保存するなら）内側ほど速く回るようになるはずである。実際には、外側がブレーキを掛ける効果（角運動量輸送）がはたるとき、角速度の差はある程度ならされるだろう。角運動量輸送の物理機構としては、流体力学的不安定性、子午面環流、磁場、内部重力波など多様なものが提案されているが、それぞれの過程がどれだけ効くかを定量的に予想するのはとても難しい問題である。一応「この程度ではないか」ということで提案された評価方法はあるが、果たしてこれに基づく予想は正しいだろうか？

太陽型（F, G型）主系列星とA型主系列星についての結果は、どちらも「星の内側と外側で自転角速度に差はほとんどない」というものであった。一方赤色巨星、準巨星では、確かに内側の方が速く回っているが、その差は予想より何桁も小さいというものであった。これらの意外な結果はいずれも同じことを示唆する。すなわち、主系列星でもその後の進化段階でも、何らかの機構により、角運動量が予想をはるかに上回る効率で内側から外側に輸送されている、平たくいうと、星の外側が何かものすごく強いブレーキを掛けていて、中心部が速く回ろうとするのを引き止めているということである。今のところ、これが自転に関して星震学で得られた最も大事な結果である。どのような物理機構が原因なのかは、大変興味のある問題で、現在も活発な議論が続いているが、まだ最終的な結論は出ていない。

### 4.3 その他の成果

この特集記事では割愛したが、他にも白色矮星やB型準矮星といった高温高密度の星や、たて座 $\delta$ 星、長周期振動B型星やケフェウス座 $\beta$ 型星といった早期型主系列星、さらに磁場のとくに強いことで知られるA型特異星などについてもそれぞれ星震学の研究が進んでいる。またこれとは別に、脈動変光星の振動数の変動を用いて連星系を探索するというユニークな研究もある<sup>17)</sup>。

## 5. ま と め

星震学は、振動というチャンネルを通じて星の中を「みる」という研究である。21世紀に入り、ケプラー計画に代表されるスペース観測のもたらした「革命」により、星震学で扱う観測データは、質・量ともに飛躍的に向上した。分野は一気に活性化し、研究成果も研究者の数も大幅に増えた。こうした成果のうち、4節で解説した質量、半径の測定や内部自転構造などは、これまでできなかった（あるいは難しかった）ことが可能になったというものである。一方で、赤色巨星の混合モードや $\gamma$  Dor型星のrモードのように、純粋に理論的な興味から、何十年前に議論されていた恒星振動の現象が、思いも掛けず現実の星で見つかったという成果もあり、こうした理論に携わる研究者にとって、大きな刺激となっている。しかしながら、興味深そうに見えるが、どう解釈、解析してよいかわからないような手つかずのデータも実はまだまだたくさんある。こういうものを正しく理解するには、まだまだ何か新しいアイデアが必要であろう。（多くの分野に共通することだろうが）知恵を絞って試行錯誤を繰り返し、データをどう理解すべきかを明らかにしていくのも、星震学研究の醍醐味である。というわけで、（半分期待が混じっているが）今後も当分この分野の発展は続くであろう。

## 参考文献

- 1) Leavitt, H. S., & Pickering, E. C., 1912, Harvard College Observatory Circular, 173, 1
- 2) Ledoux, P., 1951, ApJ, 114, 373
- 3) Leighton, R. B., et al., 1962, ApJ, 135, 474
- 4) Frazier, E. N., 1968, Zeitung für Astrophysik, 68, 345
- 5) Ulrich, R. K., 1970, ApJ, 162, 993
- 6) Leibacher, J. W., & Stein, R. F., 1971, Astrophys. Lett., 7, 191
- 7) Ando, H., & Osaki, Y., 1975, PASJ, 27, 581
- 8) Christensen-Dalsgaard, J., & Gough, D. O., 1976, Nature, 259, 89
- 9) 柴橋博資, 関井隆, 1993, 天文月報, 86, 416 および 461
- 10) 関井隆, 1998, 天文月報, 91, 92
- 11) 長島薫, 2010, 天文月報, 103, 756
- 12) Zhevakin, S. A., 1953, Astron. Zh., 30, 161
- 13) Lighthill, M. J., 1952, Proc. R. Soc. Lond. A, 211, 564
- 14) Goldreich, P., & Keeley, D. A., 1977, ApJ, 212, 243
- 15) Chaplin, W. J., et al., 2014, ApJS, 210, 1
- 16) Yu, J., et al., 2018, ApJS, 236, 42
- 17) 柴橋博資, 2013, 天文月報, 106, 528

## What Is Asteroseismology?

Masao TAKATA

*Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: What kind of structure does a star have? Asteroseismology is the research subject that tries to answer this question by examining oscillations detected at the surface. This has evolved from study of pulsating variable stars, which has developed since the discovery of the period-luminosity relation of Cepheids, and helioseismology, which has been initiated by the detection of the five-minute oscillation of the Sun. The subject has been advanced remarkably thanks to observations from space, which have been realised in the 21st century. This article explains what asteroseismology is, including its fundamental concepts, history and major topics, while the following four articles focus on particular types of stars to introduce their recent results.