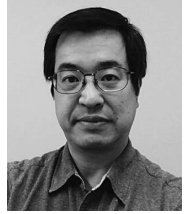


# 赤色巨星の星震学

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



赤色巨星の表面には深い対流層があり、太陽5分振動と同様の振動が起きる。この現象は、最近の宇宙探査機の観測によって、多数の星で見つかるようになり、これを用いた星震学が大きく花開いた。他の脈動変光星と比較したとき、赤色巨星で特徴的なのは、混合モードとよばれる中心部では内部重力波、外層では音波で構成される特殊な固有振動モードが観測されることである。ここでは、混合モードとはどのようなものか、またそれからどんなことがわかってきたかを簡単に紹介する。

## 1. 太陽の未来の姿

もっとも身近な星である太陽は、中心で水素をヘリウムに変換する核融合反応をエネルギー源として輝いている。水素は宇宙でもっとも多い元素（重さでいって全元素の7割以上）で、太陽の主成分でもあるが、長い年月が経てば、いずれは中心で枯渇する。これは約50億年後に起きると予想されている。中心部には「燃えかす」のヘリウムがたまっているが、その周囲には水素が残存しており、ヘリウムを取り囲む薄い層でなお核反応を続ける。このとき、ヘリウムからなる中心部は徐々に収縮するのに対し、星の外層部分は反対にふくらんでいく。こうして星の半径はどんどん大きくなり、また表面の温度は下がる（赤くなる）ので、赤色巨星とよばれる段階に至る。

このような中心で水素核融合の起きる段階（主系列段階）から、その後の赤色巨星への進化は、ほぼすべての恒星に共通のものである。ヘルツシュプルング・ラッセル図（HR図）上の動きでいえば、左上から右下に至る系列が主系列であり、上にいくほど重い星が存在する。すべての恒星は一生の大半を主系列で過ごすか、中心の水素

がつかると、重い星も軽い星も総じて右（ないし右上）の方へ移動するが、これが赤色巨星の段階である（図1参照）。このように、質量によらずほとんどの星がいずれは赤色巨星になる。

赤色巨星の構造には、そこに至るまでの進化で

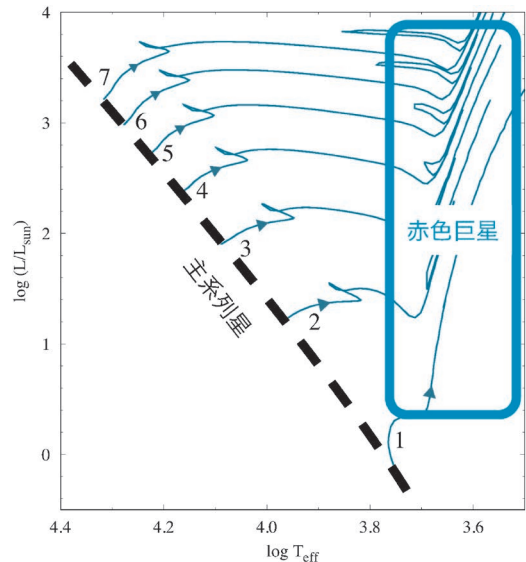


図1 主系列星と赤色巨星のHR図上の位置の概略図。実線は恒星進化理論計算<sup>1)</sup>によって得られた太陽質量の1倍から7倍の星の進化経路。

起きる種々の物理過程（核融合や混合，拡散，自転，磁場など）の結果が反映される。したがって，その内部を調べることができれば，これまでにどんなことが起きたか探ることができる。

## 2. 赤色巨星の太陽型振動

赤色巨星の広がった外層では，非常に深い対流層（ものの動きでエネルギーを外に運ぶ過程）が発達している。対流運動は激しい乱流状態であり，音波を発生する。この音波を構成要素として，固有振動モードが立つ。この仕組みは太陽の5分振動と同じなので，太陽型振動とよばれる。詳しくは，本特集の高田による星震学に関する総説記事（以下「総説記事」とよぶ）を参照のこと。

このような現象が検出されはじめたのは，20世紀終わりから21世紀初頭のことであるが，コロ（CoRoT），ケプラー（Kepler）といった宇宙探査機による観測の時代になって，検出数は著しく（10のオーダーから1万個以上に）増加した。

赤色巨星の太陽型振動を，太陽のような主系列星の場合とくらべると，（サイズが大きい分）周期は長く，振幅は大きい\*1。また，単純なスケールの違いに加えて，振動モードに質的な違いがある。非動径モード（とりわけ赤道面に関して反対称に振動する双極子モード）の場合に，中心部で（浮力を復元力とする）内部重力波が立ち，外層の音波と相互作用することで，pモードとgモードの2重の性格を持つ混合モードができるのである（恒星振動の基礎事項については総説記事参照）。この原因は，中心部で密度が高く（したがって浮力が強く），主系列星よりも，音波を基準として相対的にはるかに高い周波数の内部重力波が伝播できることにある。pモードは星の外層

しか伝わらないのに対して，混合モードは中心部でも振動するため，これをうまく用いると，中心から外層までの全体の構造を探ることができる。

恒星の固有振動モードとして，今日混合モードとよばれるものがあるというのは，実は1970年代には知られていた<sup>2)</sup>。ただし，これは進化した星の固有振動を理論的に調べているうちに見つかったのであって，現実の星で検出され<sup>3), 4)</sup>，そのうえ星震学で非常に重要な役割を果たすようになるまでは，当時は予想できなかったに違いない。

なお，巨星の固有振動（脈動）ということでは，ミラ型やセファイド型変光星が古くから知られているが，太陽型振動と比較すると以下のような違いがある。これらはいずれもはるかに明るく，質量または進化段階の異なる星で，また振動の振幅，周期ともに桁違いに大きい。とくに，周期光度関係を示すので，距離指標としての役割を果たせる。一方観測される振動モードの数（せいぜい数個の動径モード）は多くないので，星震学には向かない。

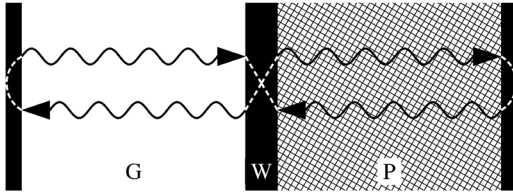
## 3. 混合モードの1次元モデル

ここでは，混合モードがどんなものか，単純化した1次元モデルで説明する（図2参照）。

赤色巨星の構造は，大雑把にヘリウムからなるコンパクトな中心核と広がった（スカスカの）外層からなる。前者に内部重力波，後者に音波の伝播する領域がある。またこれらの間には，どちらの波も伝わらないような領域がある。この状況を，以下のように例えることができる。壁Wで仕切られた2つの部屋GとPがあって，それぞれの部屋では性質の異なる波\*2が伝わる（各部屋では単純な正弦波として伝わりと考えるとよい）。

\*1 太陽型振動の観測されている赤色巨星は，実は低質量のもの（太陽質量の約3倍以下）だけで，半径も太陽の数倍から10倍以下程度である。一方太陽型振動の周期は，主系列星の場合数分から数十分程度，赤色巨星の場合は，1時間から1日程度である。また，明るさの振幅は，主系列星では，100万分の1等級のオーダーであるのに対し，赤色巨星の場合は，その数十倍ないし数百倍である。

\*2 Gでは内部重力波，Pでは音波が伝播する。両者では，振動数と波長の関係（分散関係）が異なる。

図2 混合モードの1次元モデル<sup>5)</sup>。

ただしWの厚さに応じて、隣の部屋の波が少し漏れ伝わってくる。(いわば隣室からの音漏れ。量子力学の1次元ポテンシャル問題で出てくるトンネル効果に相当する。)

(外層に対応する)部屋Pの端(表面近くの対流)から発生した音波は、Pを伝わり、Wに達する。このとき、波の一部は反射し、来た方向に戻っていくが、別の一部はWをくぐり抜けて反対側の部屋Gに伝わる。このような現象を部分反射という。波のどれだけの成分が反射されるか、その割合を反射率という。

(中心部に相当する)部屋Gに漏れた波は、音波から内部重力波に変わり、伝播を続ける。Gのもう一方の端(星の中心)に達すると(もう隣室はないので)全部が反射して、もと来た方向に戻って行く。これを全反射という。やがてWに達すると、再び部分反射を起こし、一部は反射してGに戻り、一部は漏れてPに伝わり再度音波となる。以下同様に、仕切り壁Wでの部分反射とW以外の端(星の中心と表面)での全反射を繰り返しながら、波は伝播を続ける。

星の表面(直下)から内側に向かって出発した波は、部分反射、全反射を経て、出発点に内向きに伝わる波として戻ってくる。波の周波数が特定の値のときにかぎり、出発したときと戻ってきたときの波の位相がそろい、両者は強め合う。この周波数が固有振動数である。混合モードの固有振動数は以下の量で決まる。すなわち、(1) G, P各部屋の大きさ<sup>\*3</sup>、また(2) 各部屋で何波長分

の波が入るか、(3) (Wでの)部分反射における反射率、(4) (Wでの)部分反射および(W以外の端での)全反射でどれだけ波の位相が変化するか、である。(2)以外、1つの星ではどのモードでもほぼ共通な量である。したがって、混合モードの周波数を観測することでわかるのも、これら4種類の情報である。とりわけ、(1)はさまざまな問題で非常に重要な役割を担う。

混合モードは、非動径振動の場合にしかありえない。これは内部重力波の復元力である浮力が、球対称な振動では生じないからである。したがって動径モードは、部屋Pだけがある場合に相当する。一方、非動径モードでも仕切り壁Wが非常に厚い場合、波は漏れなくなり、Wでも全反射が起きる。このとき、P, G各部屋で発生した波があれば、単にそれぞれの内部を往復するだけである。Pに閉じ込められる波は、純粋な音波(p)モードを、一方Gに立つ波は、純粋な内部重力波(g)モードを構成する。赤色巨星の非動径モードのうち、 $l=2$ (4重極子)および $l=3$ (8重極子)のモードでは、これに近い状況が起きている。つまり、壁Wが厚いため、表面で検出されるのは、pモード的な性格の強いもののみである。一方 $l=1$ (双極子)のモードでは、Wの厚さはもっと薄くなり、固有モードを構成する波は、P, Gどちらの部屋でもある程度の振幅を持つ。どちらの部屋により閉じ込められるか(より振動のエネルギーが大きい)は、モードごとにその割合が変化する。その結果、周波数によってgモードの性質が強いモードと、pモードの性質が強いモードがある。周波数を調べることで、この性格の違いも観測的に決めることができ、内部構造を探るうえで重要になる。

#### 4. 代表的な成果

赤色巨星の星震学で得られた成果は多岐にわた

<sup>\*3</sup> ここでは、同じ周波数の波を考えたとき、より多くの波が入る(大きさを波長で割った値が大きい)ほど広い部屋としている。

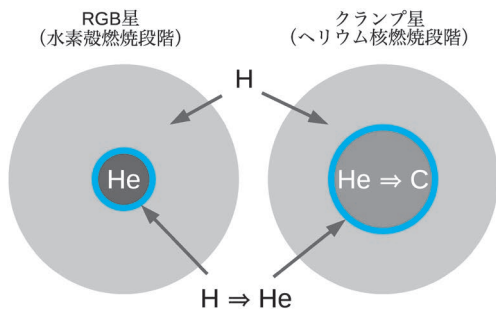


図3 RGB星とクランプ星の構造の模式図。

るが、ここでは代表的なものを紹介する（質量と半径の測定については、総説記事を参照）。

#### 4.1 進化段階の区別

赤色巨星は、進化段階によりいくつかに分類できるが、ここでは最初の2段階について考える（図3参照）。第1の段階は、中心の水素が枯渇した後のもので、中心温度がさほど高くないため、ヘリウムは核融合反応を起こさず、それを取り巻く薄い層で水素の反応が起きる。これを水素殻燃焼段階とよぶ。HR図上の位置でいうと、赤色巨星分枝（RGB）に沿い下から上へと移動していく（温度がほぼ一定のまま、明るさが増加していく）部分に相当する。このため、これらをRGB星とよぶ。

RGB星の間、中心の温度は徐々に上がっていくが、これが $10^8$ 度ぐらいになると、ヘリウムの核反応がはじまる。このとき、少しずつ収縮を続けていたヘリウム中心核は、一転して膨張に転じる。これに応じて、膨張を続けていた外層は収縮する。同時に星の光度は減小する（暗くなる）。やがて、中心でのヘリウム核反応が安定すると、構造の変化も落ち着く。この段階（ヘリウム核燃焼段階）の星は、HR図上でひとかたまりになって分布するので、クランプ星とよばれる<sup>\*4</sup>。

RGB星とクランプ星のHR図上の分布は重なっ

ている。また表面の元素組成や重力加速度を調べても、はっきりした差は簡単にはわからない。したがって、特定の赤色巨星がどちらの進化段階にあるのか、観測的に区別するのはとても難しい問題であった。星震学はこの問題に決定打を与えた<sup>6)</sup>。

RGB星とクランプ星の差は、表面の量には表れないが、中心部では事情が違う。RGB星のヘリウム中心核は核反応を起こさず、星の重みでつぶれる一方なので、密度が高い。一方クランプ星の中心部は、ヘリウム核反応のおかげで膨らみ、密度が下がっている。この中心密度の差を見てやればよい。3節の1次元モデルの言葉でいえば、密度の違いは部屋Gの大きさに反映される。すなわち、RGB星にくらべてクランプ星の方が狭い。

混合モードの周波数を調べることで、部屋Gの大きさ（の指標）がわかる。観測的には、隣り合う双極子モードの平均周期間隔（ $\Delta P$ ）の逆数がGの広さの指標である。一方部屋Pの大きさも同様に調べられる。こちらは、（混合モードより測りやすい）動径モードの周波数間隔（ $\Delta \nu$ ）の逆数を用いる。 $\Delta \nu$ は、星全体の平均密度（の平方根）の目安でもある。

横軸に部屋Pの大きさの指標 $\Delta \nu$ 、縦軸に部屋Gの大きさの指標 $\Delta P$ をとった図をつくり、カラーで観測されたさまざまな赤色巨星について点を打つと、図4が得られる（同様の結果は、まずケプラーで観測された赤色巨星について得られた<sup>6)</sup>）。これからわかるように、分布は縦軸の値の大小で、はっきりと2つに分かれる。上の説明でわかるように、大きい（部屋の狭い）方がクランプ星（ヘリウム核燃焼段階）、小さい（部屋の広い）方がRGB星（水素殻燃焼段階）ということになる。このようにして、進化段階を区別する問題は鮮やかに解決された。

<sup>\*4</sup> 球状星団の色等級図には、赤色巨星分枝の左側に、ほぼ水平に伸びる分枝が見られる。これらの星（水平分枝星）もヘリウム核燃焼段階にある星と考えられているが、赤色巨星分枝からは離れているので、RGB星とは簡単に区別できる。これらは重元素量の少ない種族IIの星である。一方クランプ星となるのは、重元素量の多い（種族Iの）星である。

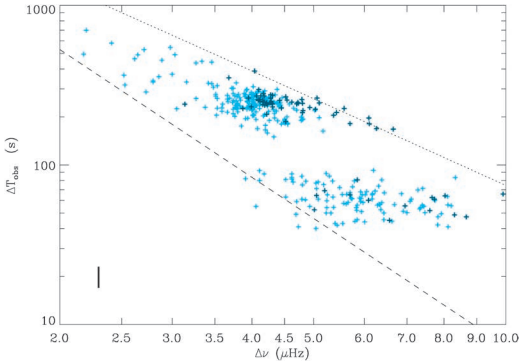


図4 赤色巨星の2つの進化段階（水素殻燃焼段階とヘリウム核燃焼段階）を区別する図。横軸は動径モードの周波数間隔 $\Delta\nu$ （平均密度の目安）、縦軸は混合モードの平均周期間隔 $\Delta T_{\text{obs}}$ （中心部の密度の指標で本文の $\Delta P$ に相当）である。モサー（Mosser）ら（2011）<sup>7)</sup>より許可を得て転載。

## 4.2 内部の自転

星震学的手法によって、さまざまな星で内部の自転構造を測れるようになり、恒星の自転という長年の大問題は、あらたな局面を迎えている。とくに赤色巨星の場合は、主系列段階にくらべて進化のスピードが速く、自転構造が変化しやすいので、関連する物理機構の影響をより敏感に調べられるという利点がある。

内部自転の測定原理は、以下のようなものである（より詳しくは、総説記事を参照）。各（非動径振動）モードの周波数を詳しく調べると、近接する複数の周波数成分が見つかる。これは、もともと1つだった周波数が、自転の効果で分裂したものと解釈できる。分裂の大きさは、内部の自転角速度の重み付き平均に等しい。

3節のモデルによれば、混合モードを構成する波は、2つの部屋G（中心部）とP（外層）を伝わる。したがって混合モードからわかるのは、GとPの自転角速度のなんらかの平均値である。1つの混合モードからは、これ以上のことはわからないが、幸いにして通常混合モードはいくつも検出され、モードごとに各部屋に閉じ込められる割

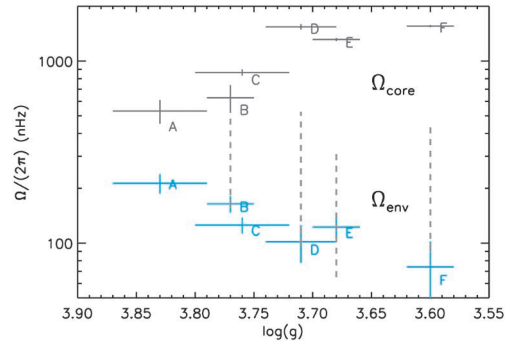


図5 6つの準巨星，早期の赤色巨星の内部自転周波数（自転周期の逆数）．単位はナノヘルツ． $\Omega_{\text{core}}$ 、 $\Omega_{\text{env}}$ は、それぞれ中心部、外層の角速度を意味する．横軸は表面重力加速度をcgs単位系で表した値の常用対数値．ドゥーフーベルスら（2014）<sup>8)</sup>より許可を得て転載。

合が変化する．この性質をうまく利用できれば、中心部と外層の（平均）自転角速度を独立に求めることができる。

実際ドゥーフーベルス（Deheuvels）ら（2014）<sup>8)</sup>は、ケプラーで観測された、RGB星になる直前からなりたての段階にある6つの星に対してこのような解析を行い、図5に示す結果を得た．これからわかるのは、まず（1）どの星でも中心部の方が外層より速く自転しているということである．また、6つの星の質量は大体同じ（太陽の約1.1倍から1.4倍の範囲）で、横軸の値、表面重力加速度は、進化している星ほど（半径が大きくなるので）小さいと考えられる．したがって、この図の示唆することは、（2）進化の進んだ星ほど、中心はより速く、外層はより遅く自転するようになる、あるいは（より詳しくは）、中心と外層の自転角速度の比は、進化につれて数倍から数十倍にほぼ単調に増加するということである．これらの星では、進化につれて中心部は収縮し、外層は膨張すると考えられている．（1）と（2）の結果は、この描像と定性的にはよく合致するもので、これが観測的に確認できたことは、それだけで大きな意義がある．一方中心部の自転周波数に注目

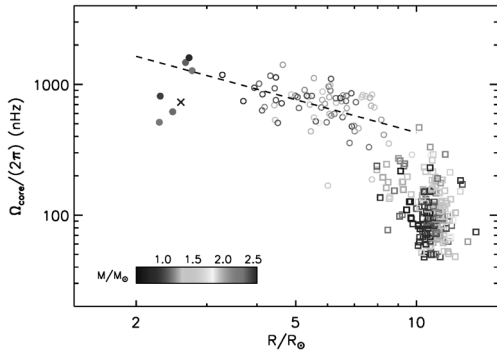


図6 ケプラーで観測された赤色巨星の中心部の自転周波数を半径の関数として表した図. ×, •は, それぞれドゥーフベルスら (2012)<sup>9)</sup>, ドゥーフベルスら (2014)<sup>8)</sup> の結果 (準巨星, 早期RGB星). 一方○ (RGB星) と□ (クランプ星) はモサーら (2012a)<sup>10)</sup> の結果. ドゥーフベルスら (2014)<sup>8)</sup> より許可を得て転載.

すると, 従来の理論で予想されるより数桁も小さいものであり, 相違の原因が何なのか, 現在も大きな問題となっている.

RGB星でもより進化した段階では, 残念ながら外層の自転を決めるのが難しくなるが, この場合も, 中心部の自転角速度だけは決められる. 図6は, 準巨星からRGB星, クランプ星にいたる星について, 中心部の自転周波数を半径の関数として示したものである (進化の方向は左から右). 左端にある• (図5と同じ星) と×で示された星では, 進化につれて自転が速くなっている. その一方, 図の中央付近の○で示された点はRGB段階の星で, 驚くべきことに, 進化につれて中心部の自転が次第に遅くなっている<sup>\*5</sup>. 従来の描像では, この段階でも中心部は徐々に収縮し, 自転は速くなると予想されていたにもかかわらず, である.

図5, 6は, 実はどちらも同じことを示唆している. (総説記事と重複するが, 大事なことなのでもう一度書く.) 星の外側が, 速く回ろうとする内側を引き留める現象をさして, 角運動量が外部に輸送されるというのが, 赤色巨星の内部では, な

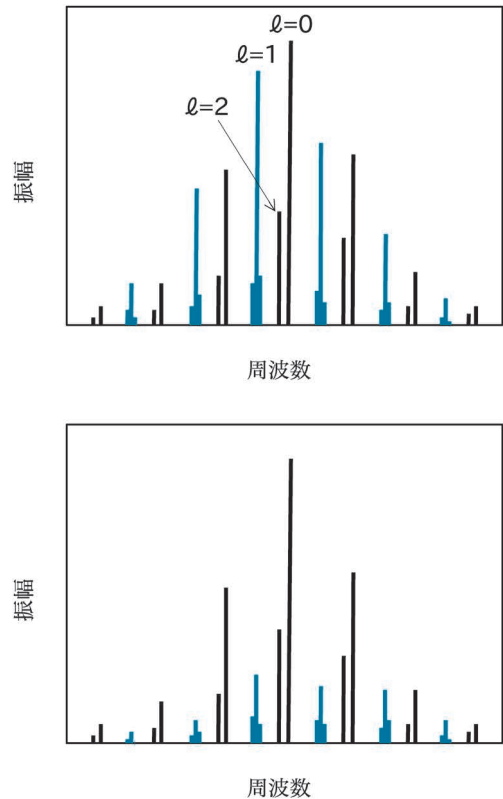


図7 通常の星 (上) と双極子モードの振幅の小さい星 (下) の周波数スペクトルの比較 (模式図). 青の縦線が双極子モードに対応する.

んらかの原因で, 中心部の収縮の効果を上回る勢いで, 角運動量が非常に効率的に, 外部に輸送されている. これは, 赤色巨星の星震学でわかった非常に重要な結果である.

### 4.3 抑圧された双極子モード

最後に, 何かがわかった (解決した) という話ではなく, あらたに判明した問題を紹介する. それは, ケプラー探査機で観測された多くの赤色巨星について双極子モードを調べると, かなりの星で振幅が他より極端に小さいことがわかったというものである. これを「抑圧された双極子モードの問題」という. 図7にその例を示す. 2つの星は, 質量, 半径がほぼ同じなのに, 双極子モード

\*5 ちらばりが大きいので, 本当に遅くなっていることを確認するには, さらにサンプルを増やす必要があるが, 少なくとも速くなる傾向は見えない.

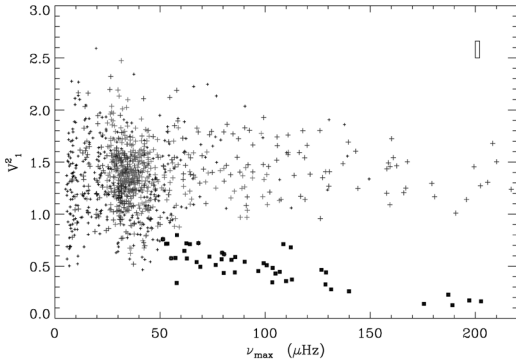


図8 双極子モードと動径モードの振幅比の2乗。横軸の値 $\nu_{\max}$ は、振幅が最大となる周波数。■で示された星では、+で示された大多数より双極子モードの振幅が小さい。モサーら(2012b)<sup>11)</sup>より許可を得て転載。

の振幅に大きな差がある。この現象を最初に指摘、議論したのは、モサーら(2012b)<sup>11)</sup>とガルシア(García)ら(2014)<sup>12)</sup>である。このうち、前者は、ケプラーで観測された多数の赤色巨星で、双極子モードと動径モードの振幅の比(の2乗)を調べ、図8を得た。これからわかるように、ほとんどの星は縦軸の値が約1.5の周囲に分布しているが、一部の星はそれからは離れて、0.5程度以下のところに分布している。図の横軸 $\nu_{\max}$ は、振幅が最大となる周波数(総説記事参照)で、RGB段階では一様に減少する。つまり、右から左が進化の向きである。このことから、進化が進むにつれて、双極子モードの抑圧は徐々に緩和され、 $\nu_{\max}$ が50  $\mu\text{Hz}$ 程度になると、他と区別がつかなくなることがわかる。

問題をより深く理解するために、モードの振幅がどのような物理で決まるか考えてみる。固有モードの振幅は、簡単にいうと次の2つの要素の釣り合いで決まる。すなわち、モードがどれくらい強く叩かれる(単位時間あたりにどれくらいエネルギーを注入される)か、そしてどれくらい減衰する(単位時間あたりどれくらいエネルギーを失う)かである。

太陽型振動を叩く源は、おもに表面直下に薄く

分布する乱対流であるが、このような乱雑な運動からは、少なくとも水平方向(重力と垂直な方向)に関しては、どの方向にも同じように音波が発生する。したがって、周波数が同じなら、動径モードも非動径モードも(つまり $l$ に依らず)同じように叩かれるはずである。一方モードを減衰させる要因(振動のエネルギーが輻射や対流のエネルギーに変わる効果や、他のモードにエネルギーが逃げる効果など)も、標準的な描像では、おもに表面近くにあり、やはりモードの角度依存性(つまり $l$ の値)とは無関係と考えられる。もし上記の説明が正しいなら、動径モード( $l=0$ )と双極子モード( $l=1$ )の振幅の比は、どの星でも同じはずである。実際、この描像から予想される比の値は、大部分の星の観測値1.5とよく一致する。

では、比の小さい星では何が起きているのだろうか。振幅を決める2つの要素のうち、叩き方については、ほとんど疑う余地がない。対流から発生する音波が、(水平方向の)どこか特定の方向に偏っているということは考えにくい。となると、問題の原因は、減衰の方に求める必要がある。ここでも、3節の1次元モデルで考えよう。動径モードは部屋Pだけに振幅を持つ純粋なpモードであり、双極子モードは部屋P, Gの両方に振幅を持つ混合モードである。標準的な描像では、減衰は部屋Pで起こり、どちらか一方のモードだけに選択的に強くはたらくとは考えにくい。ところが仮に、部屋Gでもなんらかの減衰が起こるとすると、双極子モードだけが影響を受け、(振幅を持たない)動径モードは変化しないと考えられる。このように、抑圧された双極子モードの原因は、星の中心部にある(標準的な描像にはない)なんらかの減衰機構ではないかと考えられる。

しかしながら、今のところ、ここで行き詰まっている。具体的にどんな減衰機構がはたらいっているのか、わからないのである。これまでに、中心部の磁場<sup>13), 14)</sup>や非線形の(波長が振幅程度にまで

短くなり、波形が崩れる) 効果<sup>15)</sup>による説明が提案されているが、残念ながらこれらの仮説は、予想が観測によって否定される<sup>16)</sup>、あるいは既知の観測結果と矛盾するといった問題を抱えるため、完全な解決案とはいえない。これらになんらかの改良を加えるか、あるいは何かまったく新しい考えが必要かもしれない。さらにいえば、最終的な説明では、なぜ、図8の示すように、抑圧は一部の星だけで起こり、そうでない(標準的な枠組みで予想される通りの)星とは分布がはっきり分かれるのか、その理由も明らかにしなければならない。

このように、双極子モードの抑圧という問題は未解決であるが、こうした既存の考え方では説明できない現象を解明することで、何か新しい描像が出てくることを、個人的には期待している。

## 5. まとめと展望

近年赤色巨星で見つかるようになった太陽型振動には、混合モードという特殊な固有振動モードがある。これは、性質の異なる2つのモード(pモードとgモード)が複合したもので、その分複雑な構造をしている。周波数を観測的に決めるのも簡単ではない。しかしこれは、裏を返せばより多くの情報を含むということで、内部構造を調べるうえではむしろ好都合である。実際赤色巨星の星震学は、他の星と比較しても大きく成功したといえるが、その最大の要因は、混合モードを検出できたことにある。現象の興味深さと引き出せる情報の多様さが相まって、これからも多くの研究者の関心と呼び続けるであろう。

一方この記事では説明しなかったが、赤色巨星の星震学の重要な応用として、銀河考古学との接点がある(総説記事参照)。赤色巨星は明るいので見つけやすく、また広範囲に分布しているので、銀河系の性質を調べるうえで、格好のターゲットである。とくに星震学的手段で、質量と半径が決まると、恒星進化計算を介して(他の手段では難しい)星の年齢を決められるというのが最

も大事な点である。この方面の研究は、今後大きく発展していくと思われる。

と、一応の展望を予想してみたが、赤色巨星が年老いた星であるのと対照的に、赤色巨星の星震学は、まだ若い研究分野である。どう成長するかは、だれにもわからない。そもそも、分野の誕生自体が思いがけないものだったので、今後予想外の展開をみせても不思議はない。そして、その方が関わっている人間にとってもきっと面白いだろう。

## 参考文献

- 1) Girardi, L., et al., 2000, A&A, 141, 371
- 2) Osaki, Y., 1975, PASJ, 27, 237
- 3) Bedding, T. R., et al., 2010, ApJ, 713, L176
- 4) Beck, P. G., et al., 2011, Science, 332, 205
- 5) Takata, M., 2016, PASJ, 68, 91
- 6) Bedding, T. R., et al., 2011, Nature, 471, 608
- 7) Mosser, B., et al., 2011, A&A, 532, A86
- 8) Deheuvels, S., et al., 2014, A&A, 564, A27
- 9) Deheuvels, S., et al., 2012, ApJ, 756, 19
- 10) Mosser, B., et al., 2012a, A&A, 548, A10
- 11) Mosser, B., et al., 2012b, A&A, 537, A30
- 12) García, R. A., et al., 2014, A&A, 563, A84
- 13) Fuller, J., et al., 2015, Science, 350, 423
- 14) Loi, S. T., & Papaloizou, J. C. B., 2017, MNRAS, 467, 3212
- 15) Weinberg, N. N., & Arras, P., 2019, ApJ, 873, 67
- 16) Mosser, B., et al., 2017, A&A, 598, A62

## Asteroseismology of Red Giant Stars

Masao TAKATA

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

Abstract: Red giant stars have a deep convective envelope, where similar oscillations to the five-minute oscillations of the Sun are excited. Recent space missions have detected this phenomenon in a lot of stars, based on which asteroseismology has prospered. Compared to other oscillating variable stars, the most remarkable feature of red giants is that we can observe mixed modes, a unique type of eigenmodes that are composed of internal gravity waves in the core and acoustic waves in the envelope. In this article, we briefly describe what mixed modes are and what we have learnt from them.