

# 太陽型主系列星の星震学

Othman Benomar<sup>1</sup>

関井 隆<sup>2</sup>

〈国立天文台／総合研究大学院大学天文科学専攻

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: <sup>1</sup>othman.benomar@nao.ac.jp, <sup>2</sup>takashi.sekii@nao.ac.jp



Benomar



関井

太陽型星は対流外層を持ち、そこで起こる乱流的対流のために脈動する変光星である。太陽型星の星震学はKepler探査機のもたらしたデータによって長足の進歩を遂げた。本稿では太陽型主系列星の差動回転の星震学の最近の進展を解説する。また、関連するトピックとして、太陽系外で惑星を持つ恒星の星震学、特に恒星の自転軸の惑星軌道面に対する傾きの星震学的測定についても述べる。

## 1. はじめに

太陽型星は質量も小さく、星間雲の分裂で容易に生まれる。そのため、太陽型星の数は多い。ここでは、対流外層を持ち、それが脈動の起源となっている恒星を太陽型星と呼ぶことにする。太陽も、そんな太陽型星のひとつである。太陽表面速度場の5分振動の発見は1962年、Leightonら<sup>1)</sup> およびEvansとMichard<sup>2)</sup> によるが、5分振動が一体何であるのかは、70年代初頭にUlrich<sup>3)</sup> やLeibacherとStein<sup>4)</sup> が、グローバルな音波振動としての解釈を提唱して初めて理解された。一旦これが理解されると、これはわれわれが、太陽の内部を探ることが可能であることを意味した。日震学の誕生である。日震学のおかげで、太陽の構造や差動回転について、現在は非常に詳しいことがわかっている。従って太陽型星の星震学の出発点も、必然的に太陽それ自身となる。

日震学は重要な発見をいくつももたらし、中には恒星物理学の範囲を超えた発見もある。例えば、ニュートリノ振動の発見には日震学は重要な役割を果たした。地上における太陽ニュートリノ

のフラックスの測定値が標準太陽モデルから予測されるより小さい、といういわゆる太陽ニュートリノ問題において、これを修正するための非標準的なモデルがいくつか提案された。しかし日震学による太陽振動の振動数の測定結果は、この種の修正を施せば、ニュートリノのフラックスは説明出来ても、今度は太陽振動の振動数の予測値が観測値から大きくずれて行ってしまうことを示していた。天体物理学的な解決が難しいことがわかるにつれ、素粒子理論的な解決の道がより有望に見えてくる。さまざまな説が唱えられたが、そのひとつがニュートリノ振動説であった。これはニュートリノのフレーバー（電子型、ミュー型、タウ型）が、ニュートリノと物質との弱い相互作用によって変化するというものであった。ニュートリノ振動は1998年にスーパーカミオカンデが大気ニュートリノについて、2001年にはSudbury Neutrino Observatoryが太陽ニュートリノについて確認した。日震学的測定は正しかったのである。

過去数年、CoRoT (CNESおよびESA) やKepler (NASA) などの宇宙望遠鏡のおかげで、知

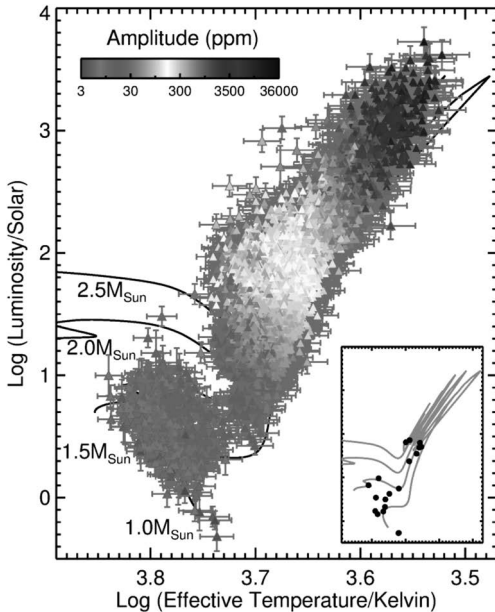


図1 太陽型星における振動の振幅 (ppm) を、明るさ (単位は太陽の明るさ) の対数と表面温度 (ppm) の対数に対してグレースケールで示している。表面温度が高いと振幅も大きくなる傾向が見て取れる。Huber (2016) より。

られる太陽型星の数は飛躍的に増えた。今では、太陽型星の進化や分布を、その進化初期 (初期主系列段階) から、進化の進んだ段階 (赤色巨星段階) まで調べることが出来る (図1, Huberら<sup>5)</sup> による)。しかし本稿では、太陽型星のうち質量も太陽にとっても近く、主系列段階にある星に特有な側面に焦点を絞る (進化の進んだ星については高田の赤色巨星の記事を参照)。ここでは、こうした星を太陽類似星と呼ぶ。恒星を調べることは、恒星で起こっている物理過程の理解を進めるだけでなく、恒星をめぐる惑星についても新しい知見をもたらす。本稿ではこの面についても触れる。

## 2. 太陽と太陽類似星

太陽類似星は、質量によって異なるが数十億年から数百億年の間、中心核で水素を燃やす。内部構造も、質量によって異なる。低質量の太陽類似星 (0.7から1.1太陽質量程度) はとても発達した

対流外層を持ち、そこでは元素の混合が起こっている。一方、放射層では重元素の沈殿が起きている。もう少し重い太陽類似星には対流核も出現し、エネルギー輸送の観点からは、これらの恒星には放射・対流の2つの輸送メカニズムが交互に卓越する3つの異なる領域が存在するわけである。伝導はエネルギー輸送のメカニズムとしては効かない。どんな恒星でもそうだが、化学組成、温度、圧力、密度などは表面から星の深部へ進むに連れて大きく変わる。しかし恒星内部では光に対する散乱断面積が大きいので、それらを直接測定することは出来ない。太陽類似星の奥深くで起こっている物理過程を調べ、検証するには、星震学などによる間接的手法によらざるを得ない。

太陽類似星では、脈動は乱流的対流により統計的に励起された、減衰振動と見ることが出来る (Andersonら<sup>6)</sup>。また、高田の総説記事を参照)。時間軸上でこうした波動の解析をしようとする時、位相がランダムに変化し続けるために難しい。そこで、太陽の場合と同じ様に、音波モードの振動数をパワースペクトルから測定するのが通常のやり方である。パワースペクトルは位相を含まないからだ (図2)。

パワースペクトルから測られた振動数は、恒星の内部を波が伝わるのに要する時間と直接関係しており、内部構造を探るための強力な手がかりになる。波の伝播時間、ひいては振動数は、音速や密度などの媒質の性質や自転などの流れ、磁場によって決まる。逆に、振動数の測定から、いわゆるインバージョンの方法により、これらの量を推定し、恒星の内部を探ることが出来る。インバージョンは物理的な仮定をほとんど必要とせず、特に恒星のモデルの作り方には依存しない。こうしてインバージョンの方法により、基本的にモデルに依存しない、内部構造の測定が出来る。例えば状態方程式など、別の仮定を導入して推定出来る量の範囲を広げることも出来るが、これは2次のインバージョンとして、通常のインバージョン

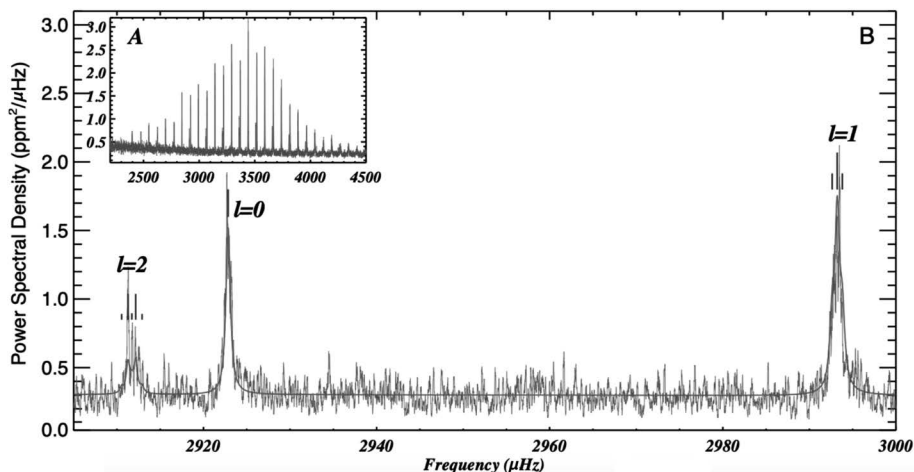


図2 Kepler探査機のデータによる恒星振動のパワースペクトルの例。星はHD 187160である。横軸は周波数（マイクロヘルツ）、縦軸はパワースペクトル密度（マイクロヘルツあたりの  $\text{ppm}^2$ ）。Benomar et al. (2018) より。

とは峻別される。

インバージョンを使った星震学的内部探査の一番の成功例のひとつは、太陽内部の差動回転の決定であろう<sup>7), 8)</sup>。日震学では角次数が数百程度までのたくさんの音波モードの測定に基づき、中心からの距離と緯度の関数として、自転角速度の分布を求めることに成功している（図3）。太陽は、当初の予想とは異なり、表面から半径の2割程度の深さまでは、動径方向にはほぼ一定の速度で回転している。緯度方向には、表面でも観測される緩やかな差動回転がある。これは太陽内部で強い角運動輸送が起こっていて、深い領域を減速し、浅い領域を加速していることを意味している。いくつかのメカニズムは提唱されているが、決定的なものはみつかっていない。

### 3. スペースからの星震学：恒星の自転

太陽内部の自転角速度分布の決定は日震学の最も重要な結果のひとつだが、われわれが太陽の自転をよく理解出来ているわけではない。太陽はなぜあいう自転をしているのか？ 太陽類似星の自転を調べることで、例えば太陽は太陽型星とし

て変わった恒星なのか、それとも普通の恒星なのか、わかるかも知れない。

日震学では深さ方向にも緯度方向にも、異なる領域を伝わる数万個のモードの振動数を測定する。これは太陽面を空間的に分解して、振動に伴う表面要素の速度を分光学的手法で赤方偏移・青方偏移から導くことが出来るからだ。恒星についてはどうか。

膨大な数の恒星について、分光学的な手法で視線速度を測定するのは技術的に困難なので、代わりに脈動に伴う明るさの変化を測定することが多い。これを可能にするのが高精度の測光技術で、これまでの星震学ミッションのすべて（MOST, CoRoT, Kepler, TESS）でこの方法が使われている。こういう間接的な手法は分光学的な手法に比べて、恒星表面の粒状斑に起因する雑音に対してより敏感なため、データの質は落ちる。しかし、数十万個の星の星震学のためには、これが最も効率的な方法であり、ハードウェアとしても軽量のCCDしか必要としない。

さらに、遠方にある恒星は点源にしか見えず、表面を空間分解して観測することは不可能で、恒星表面で積分した放射強度しか測定出来ない。こ

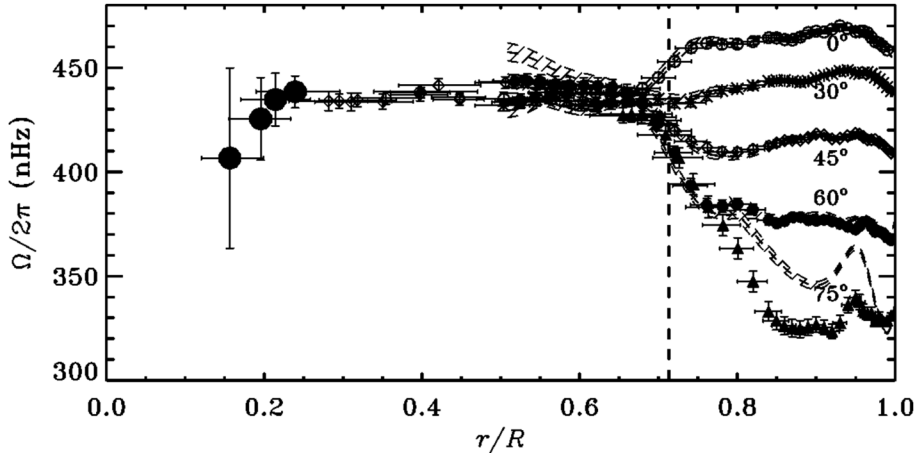


図3 日震学による、太陽内部の自転角速度の分布を緯度別に示したもの。横軸は中心からの距離の半径に対する割合、縦軸は自転周波数（ナノヘルツ）。Thompson et al. (2003) より。

のため、脈動に伴って明るくなっている場所から来る信号と、暗くなっている場所から来る信号は、キャンセルする傾向にある。角次数が高いほど、このキャンセルの効果は強いので、星震学では角次数が3程度以下のモードしか観測出来ない。

低次のモードしか観測出来ないことは、内部構造や内部自転のインバージョンを高精度で行おうとする時の制限になる。従って、*Kepler* はこれまでのところ最高の星震学観測装置であるにもかかわらず、*Kepler* が観測した恒星については、インバージョンによる解析を行える恒星は限られており、大多数の恒星については、平均的な自転角速度を高精度で測定することが出来るに過ぎない。これには自転の引き起こす振動数分裂による、振動数のずれを測るのだが、KIC 11145123（八田・関井の記事を参照）の様に振動数分裂がきれいに見られる恒星の数も少ない。そこで、例えばパワースペクトルから Markov Chain Monte Carlo サンプリングを利用したベイズ推定によって、この振動数のずれを含むモード毎のパラメータの先験的確率密度分布を求める方法が使われる。こうして得られた測定値はモードの伝わる領域における平均的な自転角速度でしかないのだが、独立に得られた恒星表面の回転速度の測定値と比べるこ

とで、（緯度方向には平均されているが）動径方向の差動回転の情報を得ることが出来る。例えば、恒星の内部で角運動量輸送が有効に起こらず、恒星の内部が外部に比べて何倍も速く回っていたとしたら、星震学で測る恒星の平均的な自転は、表面の自転より目に見えて速いはずである。分光学的な  $v \sin i$  を使って表面の回転速度を評価し、Benomar ら<sup>9)</sup> は太陽類似星における動径方向の差動回転では、自転角速度の内部と外部の差が、表面における角速度の50%は超えないことを示した。角運動量を有効に輸送するメカニズムが必要なのである（図4）。実は、*Kepler* の観測した恒星の中には、ほんの数個だが、放射層の平均的な自転と対流層における平均的な自転とを、別々に測れる恒星もある。Nielsen ら<sup>10)</sup> は、こうした恒星に関して、同様の結果を得ている。

面白いことに、この弱い差動回転の証拠は、太陽類似星の質量・年齢・自転の速さにはかかわらず見られる。進化の進んだ太陽型星やA型星に関する研究<sup>11)</sup> も、同様に顕著な角運動量輸送を示唆しており、その正体が何であるにせよ、角運動量輸送のメカニズムは普遍的であるのかも知れない。一方 KIC11145123 については、対流核が速く回っているという報告もある<sup>12)</sup>（また、八田・



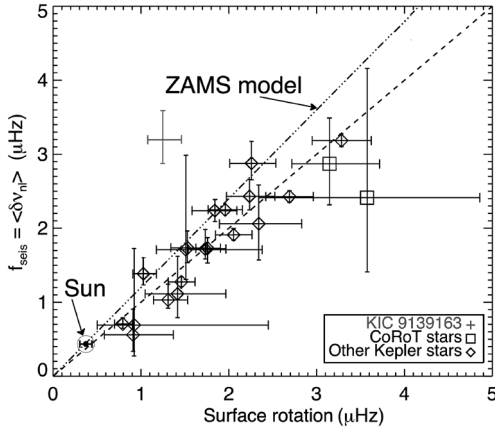


図4 太陽類似星の平均的な内部自転（縦軸，単位はマイクロヘルツ）と表面の自転（横軸，単位はマイクロヘルツ）との比較．ほとんどの星は黒い破線で示した関係式と合っており，角運動量輸送がない場合の関係（3点破線）からはずれている．Benomar et al. (2015) より．

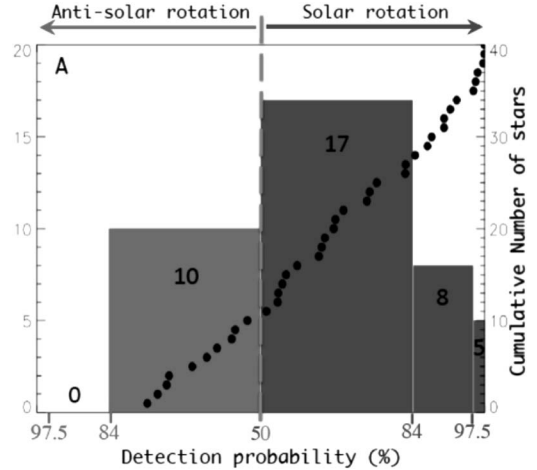


図5 太陽型（赤道が極より速い）自転，反太陽型（赤道が極より遅い）自転をしている先験的確率に対するヒストグラム（縦軸，左）．自転が太陽型である先験的確率（横軸，右半分），または反太陽型である先験的確率（横軸，左半分）に対して示してある．黒丸は，ひとつひとつの恒星データを反太陽型である先験的確率が高い方から順に，太陽型である先験的確率が高い方へ並べたもので，縦軸（右）はこれに順番をつけたもの．

関井の記事を参照)．

最近になって筆者ら<sup>13), 14)</sup>は，*Kepler*の観測した42個の太陽類似星の緯度方向の差動回転を調べた．*Kepler*で最長の4年間観測された星であれば，振動数空間での分解能は10 nHzである．これだけの分解能があれば，自転によって生ずる振動数の偏角次数による変化が測定出来る．この分解能は太陽と同程度以上の緯度方向の差動回転を検出するのに十分であることは，恒星の3次元流体モデルの計算結果も支持している．

この研究から，大部分の太陽類似星は太陽と似た自転をしていることがわかった．極が赤道に比べてゆっくり回転している（図5）のである．最近の恒星の3次元流体モデルは，自転周期が30日ほど，つまり太陽より少し遅い程度の自転周期を境目に，これより自転の速い恒星は太陽と似た自転をすると予測している．われわれのサンプルはもっと自転の速い恒星が多かったので，これはモデルの予測と整合していることになる．

興味深かったのは，われわれの調べたサンプルの30%ほどの恒星は緯度方向の差動回転を顕著

に示していたが，これらの恒星だけについて言えば，赤道は中緯度に比べて平均で2倍も速く回っていたことである．太陽では赤道は中緯度より15%程度速く自転しているに過ぎないので，2倍というのはコントラストが大きい．こんな強い差動回転を理解するには，流体モデルや理論のさらなる進展が必要である．

しかし70%ほどの恒星は，やはり太陽と同程度か，太陽より弱い差動回転しか示さなかったことは強調しておきたい．この意味するところは，平均から外れた恒星も存在はするものの，太陽は比較的標準的な，中質量星だということである．

恒星の差動回転を測れるということは，また別の視点ももたらす．例えば，Bazotら<sup>15)</sup>はKIC 8006161の星震学的に得られた自転角速度の（動径方向には平均された）緯度分布と*Kepler*の測光による光度変化のデータとを組み合わせると，活動

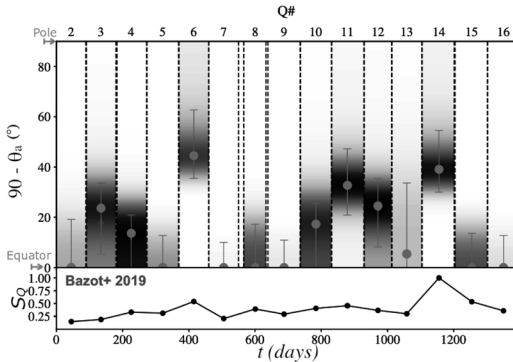


図6 KIC 8006161の活動領域の出現緯度の時間変化。観測開始からの日数(横軸)に対し、緯度ごとに活動領域の存在する先験的確率がグレースケールで、先験的確率の最大となる緯度(青丸)と、68.3%信用区間(青棒)とともに示されている(上)。規格化された光度の変動の振幅も、時間とともに変わっている(下)。

領域の存在する緯度の時間変化を推定した(図6)。太陽類似星の場合、脈動よりも長いタイムスケールでの光度変化は、温度の低い磁気的活動領域によると考えられている。活動領域はいろいろな緯度に現れ、恒星の表面と一緒に回って行き、その緯度の自転周期を反映した光度変化をもたらす。彼らの結果によると、KIC 8006161の活動領域は太陽と同様に緯度50度程度以下の領域に現れる様であるが、Keplerがこの恒星を観測した4年間の間には、出現緯度も大きく変動していた。太陽の場合には、約11年の周期的活動において、活動領域は高緯度から低緯度に移動する。KIC 8006161の光度変化を更に追いかければ、似た様な周期的活動の証拠がみつかるかも知れない。

#### 4. スペースからの星震学：系外惑星研究と星震学

系外惑星の研究は科学的にも重要であるし、この宇宙に他に生命を育む惑星があるのかどうかといった、この世界における人類の位置づけに関わる、ある意味哲学的な疑問の点からも重要である。ここ三十年ほどの間に、数千個の系外惑星が

発見された。これらのほとんどは、その軌道も大きさも、われわれの太陽系の惑星とは大きく異なっている。例えば、木星より大きな惑星が、主星のすぐ近くの周期数週間程度の軌道をめぐっていたりする。ホット・ジュピターと呼ばれる、この種の惑星が見つかるまでは、こういうことはあり得ないと考えられていた。巨大なガス惑星は星のすぐ近くでは形成されないからである。これは木星サイズの惑星が、水が固体としてしか存在出来ない雪線より外側で生まれ、その後で恒星の近くに移動して来たことを示している。

この惑星移動のメカニズムにはいくつかのモデルが存在しているが、統計的な議論の基となる様なデータが不足している。ホット・ジュピターの半径、質量、密度といった量や、3次元的な軌道パラメータを精度よく決められることが望ましい。

惑星を特徴付けるパラメータを決めるためには、主星の性質を知ることも必要である。もし表面温度や明るさなどしかわかっていなければ、これは困難である。太陽型星の星震学は、例えば主星の質量や半径の決定精度をファクター2から5、改善する。さらに星震学は恒星の年齢を精度20%かそれ以上で決めることが出来る。表面で測られる量だけに依存した標準的な方法では、どの進化段階にあるのか(主系列、準巨星、巨星)を決めることは出来ても、単独星の年齢を決めることは出来ない。ところがこうしたパラメータなしでは、ハビタブル・ゾーンを決めることも難しいのである。

また、星震学によって、惑星の軌道面と星の自転軸との間の角度を決めることが出来る。この角度は惑星系の誕生と進化に制限をつける重要なパラメータである。現在の惑星形成と進化のモデルに従えば、円盤と惑星と間の相互作用は、惑星の軌道面を星の自転軸に垂直にする一方で、惑星と惑星との間の相互作用(古在機構など)は傾いた軌道を予言する。従って、軌道傾斜角の分布は惑

星系の誕生と進化に強い制限をつけるのである<sup>16)</sup>。

これまでのところ、軌道傾斜角に星震学的制限のつけられた系の数はまだ少ない<sup>17)</sup>。これまでには *Kepler* しか、必要とされる長い観測時間を与えられなかったからだ。2024年に打ち上げ予定の *PLATO* によって、もっと多くの系について軌道傾斜角が測られると期待している。

## 5. おわりに

実り多かった *Kepler* ミッションは2018年10月に終了した。恒星の差動回転を調べるための更なる星震学的データは、ESAにより2026年打ち上げ予定の *PLATO* ミッションを待たなければならない。*PLATO* はトランジット法による大規模サーベイで、太陽類似星を巡る地球によく似た惑星を探すことを目的としている。恒星の質量・半径・年齢を必要な精度で決め、小さな岩石惑星の基本的な性質を定めるための唯一の手段が、星震学である。

### 参考文献

- 1) Leighton, R. B., et al., 1962, *ApJ*, 135, 474
- 2) Evans, J. W., & Michard, R., 1962, *ApJ*, 136, 493
- 3) Ulrich, R. K., 1970, *ApJ*, 162, 993
- 4) Leibacher, J. W., & Stein, R. F., 1971, *Astrophys. Lett.*, 7, 191
- 5) Huber, D., 2016, <https://arxiv.org/pdf/1604.07442.pdf>
- 6) Anderson, E. R., et al., 1990, *ApJ*, 364, 699
- 7) Brown, T. M., 1985, *Nature*, 317, 591
- 8) Thompson, M. J., et al., 2003, *ARA&A*, 41, 599
- 9) Benomar, O., et al., 2015, *MNRAS*, 452, 2654
- 10) Nielsen, M. B., et al., 2017, *A&A*, 603, A6
- 11) Kurtz, D. W., et al., 2014, *MNRAS*, 444, 102K
- 12) Hattar, Y., et al., 2019, *ApJ*, 871, 135H
- 13) Benomar, O., et al., 2018, *Science*, 361, 1231
- 14) Bazot, M., et al., 2019, *A&A*, 623, 125
- 15) Bazot, M., et al., 2018, *A&A*, 619, L9
- 16) Winn, J. N., et al., 2005, *ApJ*, 631, 1215
- 17) Benomar, O., et al., 2014, *PASJ*, 66, 94

### Asteroseismology of Solar-Like Stars

Othman BENOMAR and Takashi SEKII

*National Astronomical Observatory of Japan/  
Department of Astronomical Science, The  
Graduate University for Advanced studies, 2-21-1  
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: A solar-like star is a variable. It has a convective envelope, where turbulent convection excites the star's pulsation. Thanks to the data from the *Kepler* mission, there has been a substantial progress in asteroseismology of the solar-like stars. We discuss a few recent topics about asteroseismology of rotation, of solar-like stars in the main-sequence stage. As a related topic, asteroseismology of the host stars of exoplanets, in particular asteroseismic determination of the angle of the rotation axis of the star with respect to the orbital plane of the planet around it, is discussed too.