

B 型脈動星の分光観測と太陽型星の星震学の試み

増 田 盛 治

〈国立天文台 岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口郡鴨方町本庄 3037-5〉

e-mail: masuda@oao.nao.ac.jp

神 戸 栄 治

〈防衛大学校地球海洋学科 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20〉

e-mail: kambe@nda.ac.jp

HIDES の登場により、より微小な変光を示す星、その中でも特に非動径振動をしている星、の系統的な観測が可能になった。本稿では、そのような脈動型変光星について簡単にまとめ、新しい SPB (Slowly Pulsating B stars) と呼ばれる B 型脈動星についての HIDES による観測例を紹介する。また、ヨードセル装置によって可能になりつつある太陽型星の振動や星震学の試みについても紹介する。

1. HIDES と脈動型変光星の研究

HIDES の完成やすばる望遠鏡の定常運用は岡山で行なう天文学のスタイルにもかなりの変化をもたらしてきている。このことは、本特集他稿で紹介されたプロジェクト的研究はもちろんのこと、脈動型変光星の分野においてもあてはまる。HIDES は、これまでより暗い星について、恒星大気の様々な高さで形成されるスペクトル線をより高分解能で、しかも同時に観測することを可能にした。さらに、すばる望遠鏡などが岡山にもたらした観測時間的余裕も加わって、これまで欧米で行なわれてきたような恒星についての“まとまった”高分散分光学的研究が、速やかに実行できるようになってきている。一般に脈動型変光星の研究は観測時間のかかるまた「地味と思われがち」テーマが多いが、これらのテーマの多くは、対流、自転、質量放出など未解明の恒星の基礎的物理に関係するものが多い。これらの研究が岡山でもできるようになったことは喜ばしいことである。

さて、脈動型変光星と言って一番先に想像されるのは、セファイドやミラ型のような、星が球対称のまま半径（動径）方向に膨らんだり縮んだりす

る星であろう。こういった揺れ方を動径振動と呼んでいるのだが、これとは別に（より一般的に）、星が球対称からずれる揺れ方があり、これらを非動径振動と呼ぶ。（動径振動は脈動と呼ぶのにふさわしい感じがして、非動径振動は脈動のイメージとはずれるかもしれないが、ここではどちらの場合でも脈動あるいは振動と呼ぶことにする。）非動径振動という言葉にはあまりなじみがないかもしれないが、最近多くの星がこのような揺れ方をしていることがわかってきている（図1）。実は、我々の太陽もまたそのような星の仲間なのである。太陽の場合、振動の典型的な周期が5分であることから「5分振動」と呼ばれている。

ところで、ちょうど地震波を調べて地球の内部構造が分かるように、5分振動を調べれば太陽の内部が分かる。このような研究は、地球に対しての地震学のように、太陽に対しては日震学、星に対しては星震学と呼ばれている。非動径振動の場合には異なる周期を持った多くの波（振動モードと呼ばれる）が同時に観測され、それぞれのモードが星の内部の異なる場所の情報を持っているので、非動径振動を利用して星の内部の状態を詳しく調べることができる。実際、日震学が大成功を収め

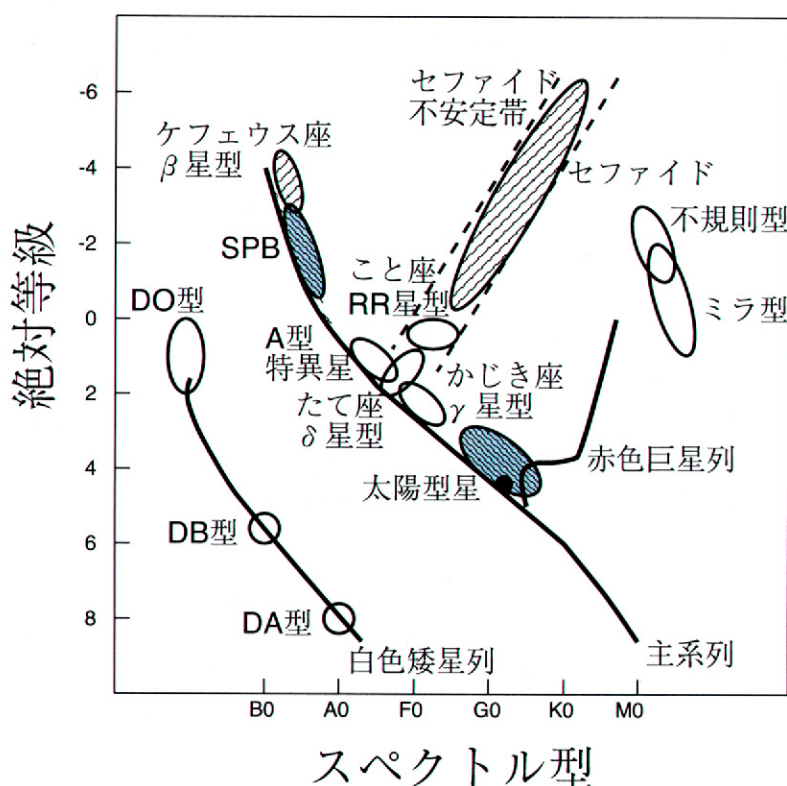


図1 HR 図上での様々な脈動型変光星のおおよその位置。

ムは SPB の発見や同定にも深く関係してきた。そこで、まず、どのようにして星が脈動するのかをセファイドを例に簡単に説明する（より詳しくは他の解説^{4), 5)}を、さらに詳しくは教科書⁶⁾を参照のこと）。

星は自分自身のガスの圧力勾配と重力がつり合った力学的平衡状態にあるが、振動するためには平衡状態からずれた時にある復元力が働いて元の平衡状態に戻ろうとしなければならない。その復元力としては、ガスの圧力と浮力が考えられる（回転や磁場がある場合にはもっと複雑になるが、ここでは無視することに

する）。ガスの圧力が復元力の場合、その振動は粗密波つまり音波であるから、このような振動を音波モードと呼ぶ。これに対して、浮力が復元力の場合は重力波モードと呼ぶ。重力波と言っても一般相対論で出てくる gravitational wave ではなく gravity wave のことである。セファイドは音波モードで振動している。

さて、実際に星が振動するためにはある条件を満たす必要がある。星が平衡状態からずれて振動したとしても、そのままではエネルギーの散逸があるので振動は減衰して消えてしまうから、振動を維持するようなエンジンの役割を果たすものが必要になる。セファイドの場合、そのエンジンは星の内部の水素やヘリウムが部分電離状態にある層である。星の中心部で核融合反応によって生成されたエネルギーは放射によって外側へと運ばれて

する）。ガスの圧力が復元力の場合、その振動は粗密波つまり音波であるから、このような振動を音波モードと呼ぶ。これに対して、浮力が復元力の場合は重力波モードと呼ぶ。重力波と言っても一般相対論で出てくる gravitational wave ではなく gravity wave のことである。セファイドは音波モードで振動している。

さて、実際に星が振動するためにはある条件を満たす必要がある。星が平衡状態からずれて振動したとしても、そのままではエネルギーの散逸があるので振動は減衰して消えてしまうから、振動を維持するようなエンジンの役割を果たすものが必要になる。セファイドの場合、そのエンジンは星の内部の水素やヘリウムが部分電離状態にある層である。星の中心部で核融合反応によって生成されたエネルギーは放射によって外側へと運ばれて

2. 星はなぜ脈動するのか

星の脈動を利用して、恒星の半径や質量を見積もったり、大気や内部の状態を調べたりするためには、星がどういうメカニズムで脈動しているかを理解していくことが重要である。実は、これから紹介する SPB はセファイドと同様の振動励起メカニズムが働いていると考えられており、このメカニ

行くが、上記のような部分電離層では、圧縮されて密度と温度が上がる時には不透明度が上がり放射を吸収しエネルギーをため込み、逆に膨張して密度と温度が下がる時には不透明度が下がり放射を出してエネルギーを吐き出す。圧縮された時にため込んだエネルギーは次の膨張を強め、膨張した時にはエネルギーを失うので次の圧縮が強まる。このようにして振動を強める機構が働くのだ。このような機構のことを、ガスの不透明度または吸収係数を表すのにギリシャ文字の κ (カッパ) という文字を使うことから κ メカニズムと呼んでいる。

水素とヘリウムの κ メカニズムがうまく働いて振動が安定して励起される領域が、ちょうど HR 図上の右上から左下へと続く領域に限られるので、HR 図上に脈動型変光星が固まる領域が出来上がる。これがいわゆるセファイド不安定帯である (図 1 参照)。

3. ケフェウス座 β 星型、そして SPB

ケフェウス座 β 星型は、早期 B 型の主系列星から巨星で HR 図上では左上の方に位置する。周期が 0.3 日より短く、変光幅が 0.01 から 0.1 等級という変光を示す。様々な観測から非動径振動による変光だと昔から解釈されており、HR 図上である領域に固まっていることからセファイドと同じような不安定帯の存在が疑われていた。つまり、ケフェウス座 β 星型の振動の励起メカニズムは何らかの元素による κ メカニズムだろうと予測されていた。

1970 年代に Stellingwerf は、1 個の電子をすでに失っているヘリウムイオンがさらにもう 1 個の電子を電離する過程での κ メカニズムで説明を試みたが⁷⁾、Lee & Osaki などによってヘリウムイオンの κ メカニズムでは振動を励起するのに十分なエネルギーが得られないことが示された⁸⁾。その後 Simon は、Stellingwerf が提唱したヘリウムイオンが電離するような温度領域 (約 15 万度) で、重元素の吸収係数が 2 ~ 3 倍に増加すれば振動が励起で

きるという仮説を立てたが⁹⁾、当時それは幾つかある説のひとつに過ぎなかった。このように、ケフェウス座 β 星型では振動を励起するメカニズムが長い間謎であった。

しかし、このような研究が契機となって元素の吸収係数が再計算され、そしてついに 1990 年代初めに、それまでと違い 20 万度付近で鉄イオンなどにより吸収係数が大きくなることが判明した¹⁰⁾。この新しい吸収係数を使い振動モデルを解析したところ、ケフェウス座 β 星型の振動は鉄イオンの κ メカニズムによって励起される音波モードの非動径振動であることが分かった^{11), 12)}。

この時、同じ吸収係数を使いもう少し軽い (HR 図上では下に位置する) 星の振動についても調べたところ、ケフェウス座 β 星型の音波モードとは違い重力波モードの非動径振動があらわれることが分かった^{13), 14)}。実は、観測的には、この領域に SPB と呼ばれる、周期が 1 日程度、変光幅が 0.01 から 0.05 等級の変光星があることが知られていた¹⁵⁾。重力波モードでは音波モードよりも周期が長くなり、SPB の名前の由来でもあるケフェウス座 β 星型よりも“ゆっくり”脈動している事実がうまく説明できる。結局、SPB もケフェウス座 β 星型と同じ κ メカニズムによって励起されているが、モードが異なる重力波モードの非動径振動であることが明らかになった。

4. ヒッパルコス SPB

位置天文衛星ヒッパルコスは、約 12 万個の星の位置、三角視差、固有運動を高精度で決定したが、その測定のために一個の星に対して時間をおいて高精度の測光観測を何回も繰り返した結果、多くの変光星も発見した。その中に SPB も含まれており、それまで 10 個ほどだった SPB の数が一挙に約 10 倍にもなった¹⁶⁾。それまであまり SPB が発見されていなかった理由は、変光幅が 0.01 等級程度と小さく周期が 1 日程度と地上から観測するには難しかったことが挙げられる。ヒッパルコスによる宇

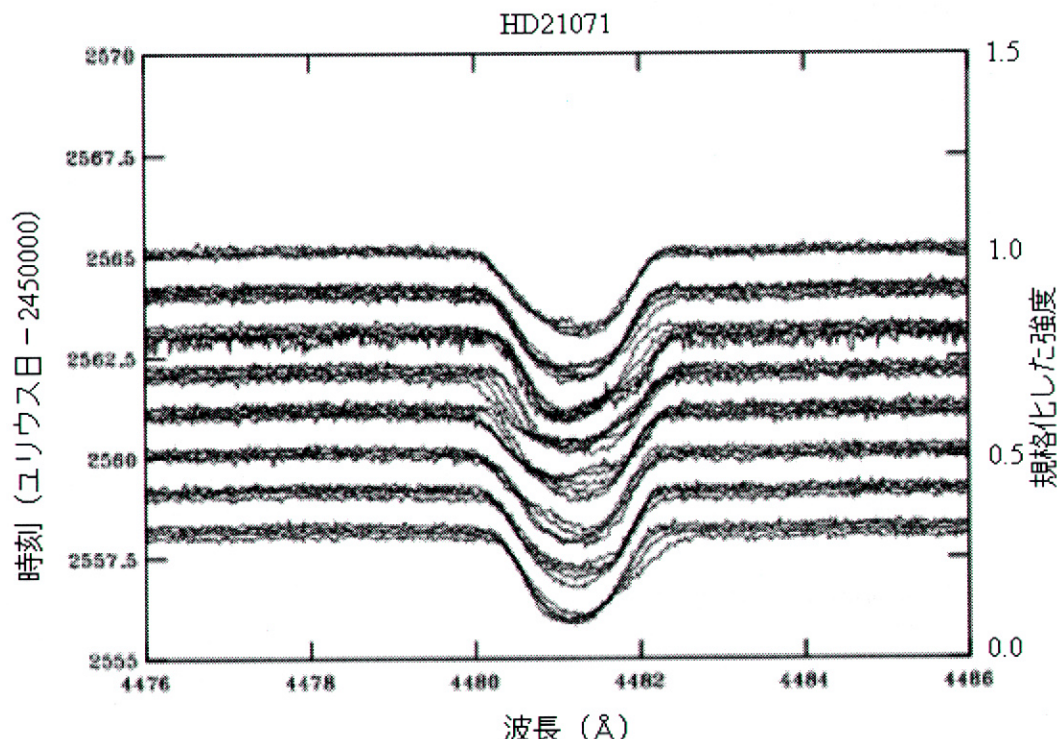


図2 HD21071 のマグネシウム吸収線の線輪郭変動. コンティニュームで規格化したスペクトルを, データ取得時刻に合わせて下から上へと時間変化するよう縦軸をずらして示した. 横軸は波長.

宙からの高精度の観測によって, ようやくその姿を現したのだ.

ヒッパルコスにより新しく発見された SPB のことをこれ以降ヒッパルコス SPB と呼ぶことにするが, ヒッパルコス SPB は測光周期と HR 図上での位置などから SPB と分類されたもので, 本当に脈動星としての性質をもっているかどうかは確認されていない. 例えば連星の可能性も否定できない訳だ. そこで我々は, ヒッパルコス SPB の高分散分光観測を行ない, 本当に非動径振動しているか確認することにした. B 型星では数 km/s ~ 数十 km/s の速さで脈動していると思われ, 高分散分光観測を行なうと, 吸収線の形が左右非対称になったり, 特殊な場合では吸収線の中に凸凹が現れ, 時間とともに変化していく様子が見られる. このような吸収線の形の変化を線輪郭変動と言う.

まず最初に, 一番明るかったヘルクレス座 ϵ 星

を岡山観測所の 188 cm 望遠鏡とクーデ分光器を使って観測した (まだ HIDES は立ち上がっていないかった). その結果, 線輪郭変動がはっきりと検出され非動径振動が確認された. また, 線輪郭変動が測光周期とは別の周期である可能性を示唆した¹⁷⁾. ヘルクレス座 ϵ 星は, スペクトル分類で B5 IV 型の標準星として挙げられているように不変の星と思われていたが, このように脈動星であることが明らかになった.

その後, HIDES が立ち上がりやや暗い星でも観測できるようになり, またすばる望遠鏡が完成して岡山での観測時間にゆとりができたこともあって, 観測可能なヒッパルコス SPB すべての高分散分光観測に着手した. 観測対象としては, ヘルクレス座 ϵ 星も含めて赤緯-25 度以北で 7 等よりも明るい 22 星を選んだ.

これまで約 3 年に渡り観測を続けて来て, まだ

全データの解析が終了していない予備的な段階ではあるが、全 22 天体中 12 天体で線輪郭変動を検出し脈動星であることが確認できた。図 2 にその一例である HD21071 という星の線輪郭変動を示す。時間によって吸収線の形・幅・深さが変わっていく様子が分かるだろう。他にも 5 天体で線輪郭変動の可能性があることが分かった。

また、5 天体が分光連星であることも判明し、4 天体も連星の可能性があると

いう結果が得られている。興味深いのは、連星でありながらなおかつ線輪郭変動を示す星も発見されたことである。図 3 にその一例の HD37055 という星のスペクトルを示す。この星は周期が 4 ~ 5 日くらいの分光連星だと思われ、射影自転速度の遅い星（吸収線が狭く深い方）と速い星（広く浅い方）がお互いが共通重心の周りを廻っており、その動きに合わせてドップラーシフトにより吸収線の位置がずれて見えている。狭く深い方の吸収線の形をよく見てもらうと、吸収線の底の部分に小さなコブが現れたり消えたりしている。これは吸収線が狭い方の星が振動している証拠である。連星系の非動径振動を解析するためには、まず連星の軌道運動によるドップラーシフトを補正する必要があるなど、単独星の場合よりも難しくなる。しかし、連星系であれば星の質量などのパラメータにある程度制限が課せられ、理論モデルとの比較が

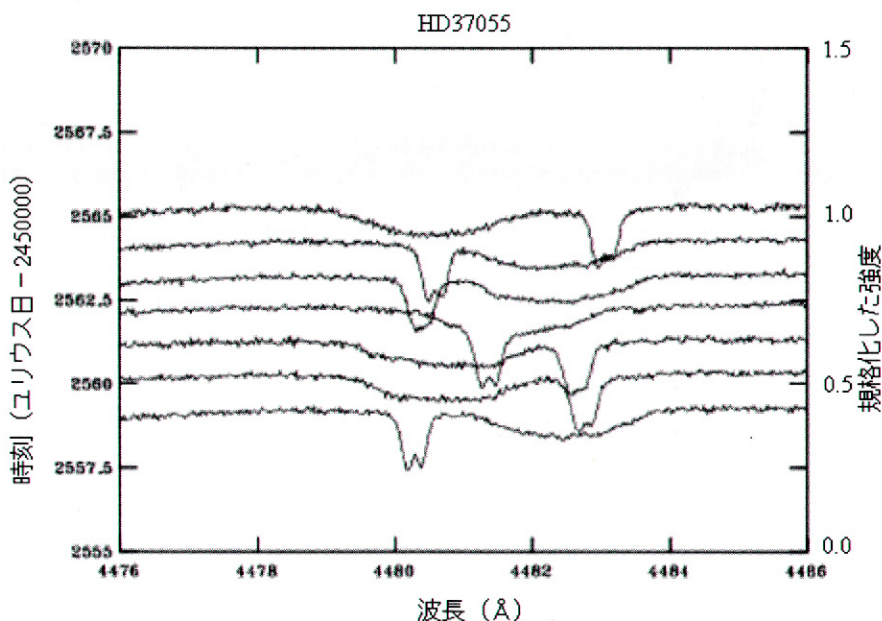


図 3 HD37055 の軌道運動によるドップラーシフト及び線輪郭変動。縦軸、横軸は図 2 と同じ。同じマグネシウムの吸収線だが 1 本ではなく 2 本見えている。

しやすくなるので、星の脈動を解き明かすのに貴重なサンプルとなるであろう。

5. 太陽型星振動と星震学

ここでは少し話題を変えて、HIDES の導入で可能になりつつある別のタイプの非動径振動、太陽型星の振動について紹介する。太陽型星は、非常に多くの振動モードが励起されていると期待され、また太陽との類似性から、精密な星震学が可能な星だと目されている。日震学の成功に後押しされ、今後数年の間に 3 台以上の宇宙測光望遠鏡の打ち上げが予定されるなど、現在、ホットな分野となりつつある。

太陽型星の振動の振幅はとても小さく、測光では 100 万分の 1 等級程度、視線速度変化にして高々 1m/s（つまり人が歩く程度の速度）の振幅しかない。従って、このような振動を検出するために

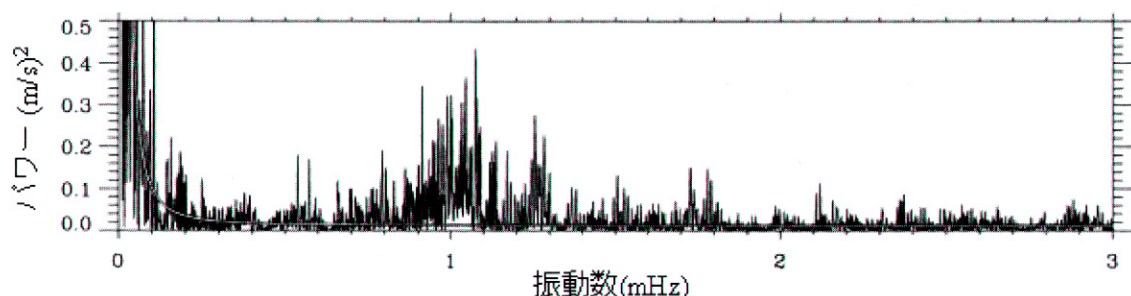


図4 Bedding らによるみずへび座 β 星のペリオドグラム。横軸に振動数を縦軸にパワー（振幅の2乗に相当）をとっている（アメリカ天文学会の許可を得て転載）。

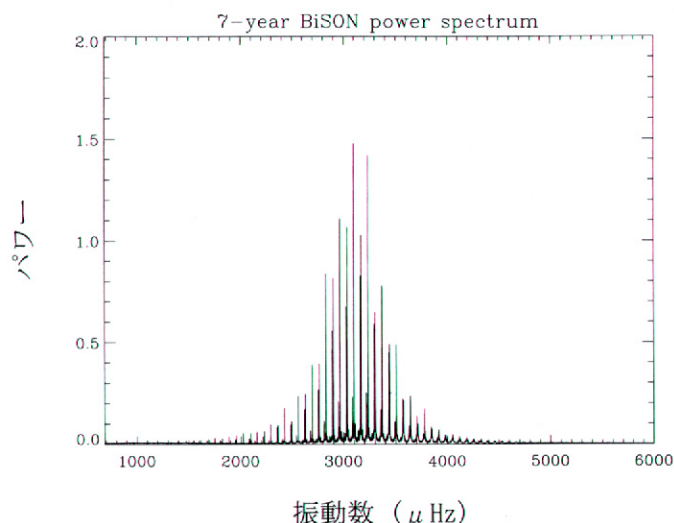


図5 太陽振動を全面で、複数の地点から観測した時のペリオドグラム。
（バーミンガム大グループ <http://bison.ph.bham.ac.uk/> の William Chaplin 氏より提供）

は、HIDESのような高分散分光器をもってしても、千分の一ピクセル程度のスペクトル線の波長のずれを精確に測定する必要がある。これを現実のものとしたのが、ヨードセル装置などの視線速度精密測定装置である。岡山でもヨードセル装置がHIDESの立ち上げと期を同じくして導入され、その後の分光器の温度安定化などの努力もあって、現在測定点あたり約5m/s（短期間ならもう少しよい）の精度が達成されている（ヨードセル装置については竹田氏の記事¹⁸⁾を参照）。

さて、現在太陽型振動が受かっているといわれている星の1つであるみずへび座 β 星のペリオドグラムを図4に示す。図は、2001年にオーストラリアのBeddingら¹⁹⁾がAAT（アングロ＝オーストラリアン望遠鏡）とヨードセル装置を使用して観測した結果であるが、振動数1mHz（周期約12分）付近に非動径振動モードによると思われるピーク群が受かっている。これまでの太陽型振動検出の報告はどれも決定的なものではなかったが、この図を見て多くの研究者は太陽型振動の検出を確信した。

しかし、この図を、太陽をいくつかの観測地点をつないで連続的に観

測した場合のペリオドグラム（図5）と比べると、この2つにはかなり違いがあるのに気がつくと思う。太陽の場合には、明らかに等間隔に並んだピーク群がある。実は、太陽型振動では、ペリオドグラムに数種類の間隔を持ったピーク群のパターンが観測されることが予測されており、この間隔は星の密度や年齢に深く関係している。逆に言えば、振動観測から星についての情報を十分に引き出すためには、観測からこれらの間隔を精度良く見積もることが重要な鍵になる（より詳しくはBrown²⁰⁾

などを参照されたい)。では、みずへび座 β 星の場合にこのようなパターンが顕著でないのは何故だろうか？ これは、実は、エイリアジングと呼ばれる問題が関係している。上記のように1地点だけで星を観測した場合には、例えば、1日に10サイクルする波と11サイクルする波の区別は（夜の間は似たような変化をするために）つきにくいのである。星の観測の場合このことが原因となって、ペリオドグラムに多くの偽のピークが現れ、本来の等間隔パターンを見えにくくしてしまうのである。

このような問題を解決する方法の一つとして、太陽の場合と同様に異なる経度の天文台をつなぐ共同観測を実施し、連続的な時系列データを取得することが考えられる。これまで東アジアは視線速度精密測定装置の空白地帯であったのだが、岡山でのヨードセルの導入により、2 mクラスの望遠鏡をつないでこのような連続観測をすることが可能になった。実は、2002年12月に我々はこれまで振動があるかどうか論争が続いていたプロシオン（こいぬ座アルファ星）に対して初めてそのような共同観測を実施し、現在解析を進めている最中である。本特集号には間に合わなかったが、近いうちに結果報告ができればと思う。

6. おわりに

HIDESを使った脈動型変光星の研究について、SPBと太陽型星を例に紹介した。これらの研究はまだ始まったばかりである。また、HIDES（+岡山188 cm鏡）自身も装置としてまだまだ進化中であり、今後高スループット化、ピンングモードの導入、CCDモザイク化によるさらなる広波長域観測、などによって観測効率が上がるであろうし、温度安定性の向上の努力などによって観測精度の向上が期待できる。時間変化を追いかける上で経度的に望遠鏡が少ない貴重な位置にあるという岡山の地の利を活かしながら、今後も観測を続け星震学を実行していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 柴橋博資, 関井 隆, 1993, 天文月報 86, 416
- 2) 柴橋博資, 関井 隆, 1993, 天文月報 86, 461
- 3) 関井 隆, 1998, 天文月報 91, 92
- 4) 尾崎洋二, 1987, パリティ 2, 14
- 5) 斉尾英行, 1992, 星の進化 (培風館)
- 6) Unno W., Osaki Y., Ando H., Saio H., Shibahashi H., 1989, Nonradial Oscillations of Stars Second Edition (University of Tokyo Press, Tokyo)
- 7) Stellingwerf A.F., 1978, AJ 83, 1184
- 8) Lee U., Osaki Y., 1982, PASJ 34, 39
- 9) Simon N.R., 1982, ApJ 260, L87
- 10) Rogers F.J., Iglesias C.A., 1992, ApJS 79, 507
- 11) Moskalik P., Dziembowski W.A., 1992, A&A 256, L5
- 12) Kiriakidis M., El Eid M.F., Glatzel W., 1992, MNRAS 255, 1
- 13) Gautschi A., Saio H., 1993, MNRAS 262, 213
- 14) Dziembowski W.A., Moskalik P., Pamyatnykh A.A., 1993, MNRAS 265, 588
- 15) Waelkens C., 1991, A&A 246, 453
- 16) Waelkens C., et al., 1998, A&A 330, 215
- 17) Masuda S., Hirata R., 2000, A&A 365, 209
- 18) 竹田洋一, 2003, 天文月報 96, 303
- 19) Bedding T.R., et al., 2001, ApJ 549, L105
- 20) Brown T.M., 2000, in Unsolved Problems in Stellar Evolution, ed. Livio M. (Cambridge University Press), p.141

Spectroscopic Observations of SPB and Challenges to Asteroseismology in Solar-type Stars

Seiji MASUDA

Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory, Kamogata, Okayama 719-0232

Eiji KAMBE

Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy, Yokosuka, Kanagawa 239-8686

Abstract: The HIDES has enabled us to make systematic observations of variable stars with smaller amplitudes, including nonradially pulsating variable stars in particular. In this article, we briefly summarize such pulsating stars, and then introduce our observations with HIDES on the new class of pulsating stars, SPB (Slowly Pulsating B stars). We also mention our challenges to detect tiny oscillations in solar-type stars with the iodine cell toward their asteroseismological study.