

# HIDESとヨードセル装置による星震学の試み—太陽型星 $\alpha$ CMi の場合—

神戸 栄治(防衛大・地球海洋学科) & 岡山ヨードセル観測チーム

## はじめに

我々は、星震学的な手法によって恒星の内部やその進化状態を探るために、HIDESとヨードセル装置を用いているいろいろなタイプの恒星の非動径振動を検出することを目指している。特に太陽型星でみられるような微小振動(振幅 $\sim 1\text{m/s}$ )を検出するためには視線速度測定精度を向上させていくことが不可欠であり、現在我々はハードウェア、ソフトウェアの両面から方法の改良を試みている。

ここでは、まず、2000年12月のテスト観測で得られた  $\alpha$  CMi のスペクトルをSato et al. (2002) が開発した手法などで解析した結果を示し、視線速度決定精度およびその改良の可能性について議論する。現在ヨードセル法による視線速度測定精度の世界最高値は $3\text{m/s}$ /露出と言われており、また岡山でも視線速度標準星や惑星を持つ太陽型星の解析から約 $5\text{m/s}$ /露出の精度が出ているが、理論的には $2\text{m/s}$ 以下の精度が出るはずであり、まだまだハードウェア、ソフトウェアともに改善の余地がある。

また、後半では、星震学の例として、今年12月に予定している太陽型星  $\alpha$  CMi の国際キャンペーン観測について、その目的などを中心に紹介する

## $\alpha$ CMi のテスト観測データによる視線速度測定精度の評価

### 観測について

テスト観測データはHIDESとヨードセルを用いて2000年12月に取得された。比較的好天に恵まれ、5夜で558枚の star+I<sub>2</sub> スペクトルが得られた。右表は観測ログである。なお、観測の方法と視線速度瀬光測定法については参考資料を参照されたい

### 視線速度測定について

解析では、IPのモデルのsatellite Gaussiansの数を4-10個の範囲で変え、また、星のテンプレートとして、1) HIDESでスリット幅を狭めて取得したもの、2) 対象星のスペクトルとほぼ同時に

高速自転早期型星のstar+I<sub>2</sub> スペクトルを取得し、後者から求めたIPで前者をdeconvolutionしたもの、3) McDonald天文台で取得された  $R\sim 200,000$  のスペクトル、4) 複数(ここでは5枚)のstar+I<sub>2</sub> から各スペクトルのIPと星のテンプレートを同時に決めたもの、などを試した。また、各セグメントの領域については、星の吸収線や沃素分子の吸収帯が中途半端にかかって解析に影響を及ぼさないように、注意深く(try-and-errorで)選んだ。

結果として、図1に現在最良と考えられる(後述)視線速度を、図2にその周期解析結果(ペリオドグラム)を示した。

こうして求めたペリオドグラムは、

- 約 $0.5\text{mHz}$ 以下の振動数域での複数のピーク
- 約 $70\text{cm/s}$ を最も高いピークとする約 $0.5\text{mHz}\sim 1.5\text{mHz}$ の振動数域でのパワー超過
- 約 $1.5\text{mHz}$ 以上の振動数域での弱いパワー

から構成されると考えられる。これらの結果は過去のBrown (2000)やMartic et al. (1999,2001)の結果とほぼ一致している

### Observing Log

Date (2000)	HJD (2451900+)	Number of Spectra
Dec 25	4.054 - 4.312	112
Dec 26	5.027 - 5.176	63
Dec 27	6.036 - 6.248	95
Dec 28	7.021 - 7.351	164
Dec 29	8.015 - 8.279	124
Total		558

• S/N is typically 200-300

• exposure time is set to 30 seconds

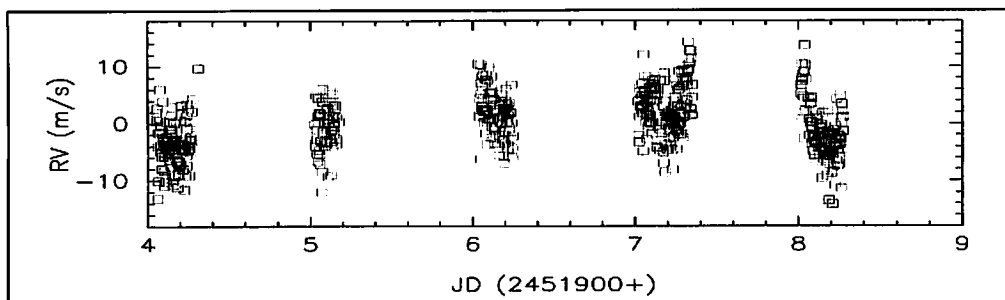


図1 Radial velocity variation of Procyon

## 視線速度測定精度の考察

[考察1] 1.5mHz以上の振動数域でのパワーをノイズによるものと考えた場合には、約3m/s/露出の測定精度が出てくることになる。これは、ほぼ世界最高精度だが、理論的な予想(今回の場合、その光子数より約2m/s/露出)より劣る(光子数にするとまだ倍くらい無駄にしていることになる)。

また、ノイズのレベルは、satellite Gaussians の数によって異なる。各セグメントの解析ではGaussiansの数が少ない方がばらつきが小さくみえる場合もあるが、最終的な周期解析の結果ではGaussiansの数が大きい方が、高振動数域でのノイズが小さい。これは、HIDESのIPが多くの場合ボックス型なので、Gaussiansの数が少ないとIPがうまく補正できていないことを意味すると考えられる

[考察2] 0.5mHz~1.5mHzの振動数域のピークの最大値(約 $0.7\text{m}^2/\text{s}^2$ )は1.5mHz以上の振動数域のパワーから判断すると $3\sigma$ レベルの高さに相当する。また、この波長域は、 $\alpha\text{CMI}$ で励起されると考えられる振動モードの周期と一致する(Houdek et al.1999)。逆に0.5mHz以上の振動数域でのパワーを全てノイズだと考えると、視線速度測定精度は約4m/sである。

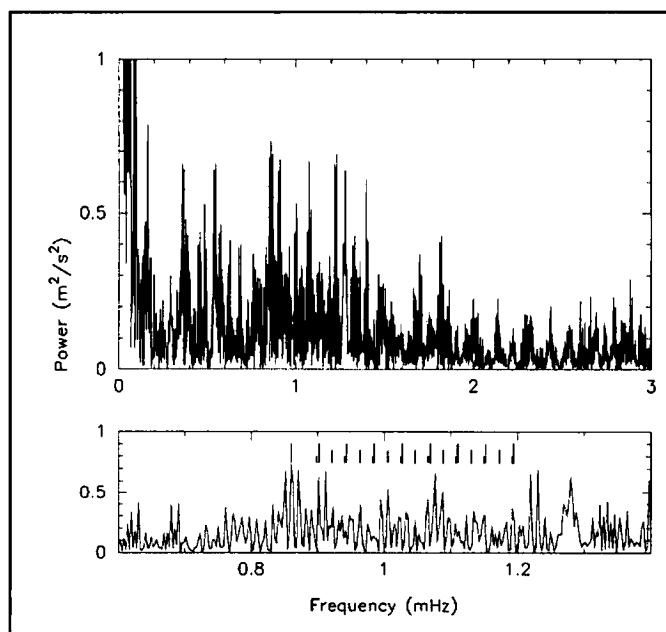
[考察3] 0.5mHz以下の振動数域のピークは測定の系統誤差によると一般的に考えられているが、低い振動数のピークがより高い振動数域のパワーに強く影響を及ぼすことがあるので、低振動数の系統誤差については、その取り扱いに注意を要する。今回の解析では、少なくとも、数日オーダー以上のタイム・スケールで変化する成分と数時間~約1日で変化する成分とがみられる。

・数日オーダーの変化は、各セグメントの解析でも現れ、振幅0-100m/s/5days程度。このトレンドはセグメントによって方向が異なるので、明らかに解析の誤差によるものである。またこのトレンドは1,2,4のテンプレートを使用した時に顕著に現れたが、McDonaldのテンプレートを使用した場合には、かなり消えた。従って、視線速度解析に星のテンプレート選びは極めて重要である。

・数時間~約1日で変化する成分は、常にみられた。この原因としては器械的なもの(望遠鏡と分光器の光軸がずれていてコリメータに光が当たる位置が刻々変化する場合などに影響があることが知られている)などが考えられるが、次回の観測で原因の究明をする予定である。

なお、今回はMcDonaldのテンプレートに限られた波長域しかなかったため、1のテンプレートを使用して得られた視線速度とその解析結果を示す。また、この場合、Satellite Gaussians を10個にした場合が、周期解析時に最も高振動数成分(> 1.5mHz)のノイズが小さかった。

図2 Periodogram of radial velocity variation of Procyon. An example of comb pattern expected from nrp theory is indicated as color marks (red for  $l=0$ , green for  $l=1$ , blue for  $l=2$ ).



## 今後の方針

- ハードウェア的には、温度などの環境の安定をさらに図る(テスト観測時は停電の直後だった)、コリメータ・マスクを導入し光束を安定させる、などを計画している
- ソフトウェア的には、良い星のテンプレートを取得することがまず重要だと考えられる。また、現在は $\alpha_2$ のテンプレートとしてMarcyのセルのものを流用しているが、これも自前のものにする予定である
- また、HIDESのIPはボックス型なので、それに見合ったIPのモデル化もなど試みたい

## $\alpha$ CMiの国際キャンペーン観測について

星震学から天文学的に有用な情報を得るためには、振動周期などの振動の特徴を正確に決定する必要がある。しかし、地上の1地点からの観測ではペリオドグラムにdaily aliasesなどが現れ、それはしばしば困難となる。特に太陽型星の場合、似たような振幅のモードが多数励起されていると考えられるので、この問題は深刻である。

これまで、東アジア(日本)は視線速度精密測定装置のない、空白地帯であった。しかし、今回岡山でヨードセル装置を開発したことにより、そのギャップがほぼ解消し、国際キャンペーン観測でほぼ1日24時間の連続観測が可能になった。

そこで、我々は太陽型星  $\alpha$  CMiの国際キャンペーン観測を計画している

### 科学的な目的

太陽型星は、我々が最もよくその内部構造や振動の性質を理解している太陽をお手本としてモデルを作成できるので、星震学に最も近い星の一つだといえる。また、太陽における振動周期などの理論値と観測値の有意なずれの原因がどこにあるのか(overshoot, diffusion, or, ...)を、太陽型星の星震学を通して、探ることができる。さらに、太陽型星は系外惑星の母星であり、惑星系形成などの観点からも、その理解の重要性が高まっている。

$\alpha$  CMiは、その光度や有効温度がよくわかっており、HR図の位置から、もしovershootやdiffusionの効果が大きければこの星はcore hydrogen-burning phaseにあり、そうでなければshell hydrogen-burning phase(に近い)状態にあると考えられる。

また、asterometryから $\alpha$  CMiの質量( $M=1.497 \pm 0.037 M_{\text{sun}}$ ; asterometryより, Girard et al. 2000)も良く決まっており、これらのデータをもとに振動周期などの詳細な予測が理論的になされている(Di Mauro and Christensen-Dalsgaard 2001, Chaboyer et al. 1999など)。それによると、もしあまり進化していなければ、ペリオドグラムに特徴的に現れるlarge separation( $\Delta \sim \nu(n, l) - \nu(n-1, l)$ )の値は54-55  $\mu\text{Hz}$ となり、進化していれば52  $\mu\text{Hz}$ くらいになるので、2週間程度の観測でこの星の進化状態を決めることができる。また、この進化状態は、large separationやsmall separationの振動数分布からもチェックできる(図3参照)。さらに観測がうまくいけば、overshootが効いているのかももしくはdiffusionが効いているのか、までも見分けることができる可能性もある。

従って、今回のキャンペーンは、 $\alpha$  CMiの進化状態やこの星でのovershootやdiffusionの効果を調べることができると期待できる。また、今回の観測は、来るべき星震学衛星時代\*のよい道しるべになるであろう。

\*現在、カナダのMOST(2002.12打ち上げ予定)、フランスが主体のCOROT(2005打ち上げ予定)、ESAのEddinton(2007/8打ち上げ予定)の打ち上げが決まっている

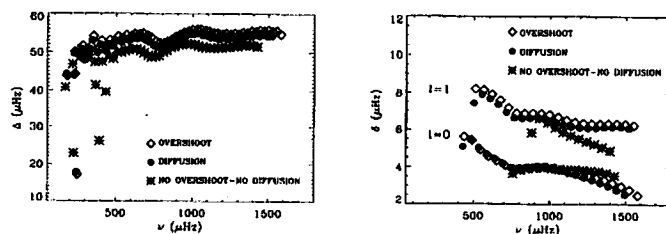


図3 overshoot/diffusion効果の違いによるlarge separationとsmall separationの振動数分布の差 (Di Mauro and Christensen-Dalsgaard 2001より)

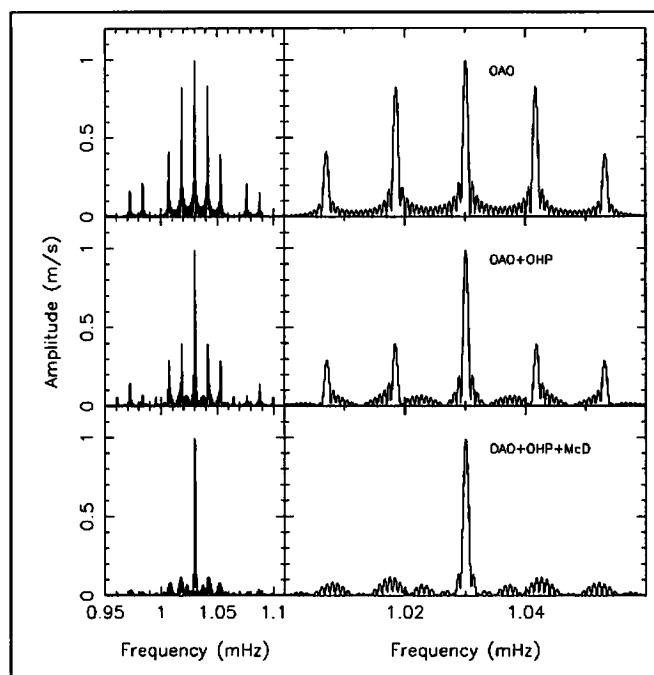
## 観測参加予定地とwindow function

現在のところ、観測参加予定地は以下の通り

観測地(P.I.)	経度	緯度	観測割当期間
岡山1.88m (Kambe)	+133 36	+34 34	12 Dec. – 26 Dec.
Peak Terskol 2m (Mkrtsician)			-16 Dec.
Haute-Provence 1.93m (Martic)	+ 5 43	+43 56	10 Dec. – 24 Dec.
McDonal 2.7m (Hatzes)	-104 01	+30 40	10 nights (応募中)

また、主要3地点の観測から予想されるwindow functionを図4に示した。3カ所でまんべんなく観測ができれば、aliasingはかなり押さえることができる。

図4 主要3地点の観測から予想されるwindow function。上から、岡山のみ、岡山とOHP、岡山-OHP-McDonaldで観測できた場合



## References

- Brown, T.M. 2000, in *Unsolved Problems in Stellar Evolution*, ed. M.Livio (Cambridge University Press), 141
- Chaboyer, B., Demarque, P., Guenther, D.B. 1999, *ApJ*, 525, 41L
- Di Mauro, M.P., Christensen-Dalsgaard, J. 2001, in *Proc. of IAU Symp. No. 203*, 94
- Girard, T.M., Wu, H., Lee, J.T. et al. 2000, *AJ*, 119, 2428
- Houdek, G., Balmforth, N.J., Christensen-Dalsgaard, J. et al. 1999, *AA*, 351, 582
- Kambe, E., Sato, B., Takeda, Y. et al. 2002a, *PASJ* in press
- Martic., M., Schmitt, J., Lebrun, J.C. et al. 1999, *AA*, 351, 993
- Martic., M., Lebrun, J.C., Schmitt, J., et al. 2001, in *Proc. of IAU Symp. No. 203*, 121
- Sato, B., Ando, H., Kambe, E. et al. 2002, *PASJ* in press
- Valenti, J.A., Butler, R.P., Marcy, G.W. 1995, *PASP*, 107, 966

## ヨードセル装置による観測と視線速度解析(参考資料)

岡山におけるヨードセル観測では、約55度に温めたヨードセル( $I_2$  cell; 図1)をHIDESのスリットの直前に置き(図2)、星のスペクトルに多数の鋭い沃素の吸収線(5000 Å ~ 6200 Å)を重ね合わせる(star+ $I_2$ スペクトル)。そして、この沃素の吸収線を利用して波長基準を決め、また同時にCCD検出器上の各場所の器械プロファイル(instrumental profile ; IP)を補正して、星の視線速度を求める。

この時、観測から得られたstar+ $I_2$ スペクトルをモデル近似するが、ここでは、現在最も高い視線速度精度が達成できているValenti et al. (1995)やButler et al. (1996)らの方法を基本とする、Sato et al. 2002のプログラムを使用する。

この方法では、約5 Å毎に(星+ $I_2$ )-スペクトルを、

$$I_{\text{obs}}(\lambda(x,t)) = k(t) [ I_{\text{star}}(\lambda(x) + \delta\lambda_s(t)) T_{I_2}(\lambda(x) + \delta\lambda_{I_2}(t)) ] * IP(t)$$

$I_{\text{star}}(\lambda)$  : 星のテンプレート (intrinsic spectrum)

$T_{I_2}(\lambda)$  :  $I_2$  のテンプレート (FTS spectrum; Marcy, s cell)

$\delta\lambda_s(t)$  : 星の視線速度

$\delta\lambda_{I_2}$  : 沃素の吸収線の見かけ上のずれ

$IP(t)$  : 器械プロファイル (中心とその周りに配置したいくつかのガウスプロファイルで近似)

のように近似する。最終的な視線速度は、適当に重みをかけてセグメント平均を取ることによって得られる。

視線速度測定精度を上げるためには、星のスペクトル、沃素のスペクトル及びIPが独立に決定できるのが理想である。従って、解析では、

- 各セグメントの領域
- IPのモデル (satellite Gaussiansの数)
- 星のテンプレート

を如何にうまく選ぶかが特に重要となる。

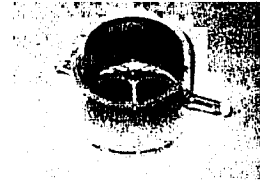


Fig. 1  $I_2$  cell



Fig. 2  $I_2$  cell at the outer coude room of HIDES

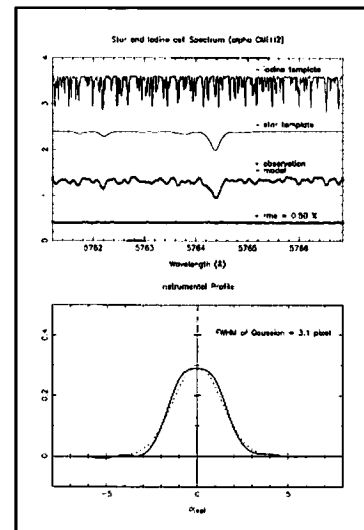


Fig. 3 Example of modeling star+ $I_2$  spectrum (upper); box-shaped IP of HIDES (lower)