

惑星を持つ恒星の分光学的研究

竹田洋一
(国立天文台)



1. はじめに

「惑星を持つ恒星の分光学的研究」は2000年の新高分散エシエル分光器 HIDES の共同利用公開とともに採択され、2000年後期から2003年前期まで足かけ3年にわたり延べ121夜が割り当てられた（実際に観測できたのはその約半分）、岡山観測所における最初の大型プロジェクト課題である。研究組織は各機関に所属する15名の混成チームから構成され、竹田が観測・解析・発表の全般にわたり主導を務めた。指導原理として(1)分光学的惑星系検出の研究分野に資する基礎固めをすること、(2)惑星系を持つ恒星自体の特徴をより明らかにすること、の二本の柱を掲げ、それに沿って、視線速度解析、化学組成解析、線輪郭解析、の三つの分野それぞれに当初具体的な研究目標テーマを設定した。つまり、①視線速度決定の精度向上（ヨードセル法）、②惑星形成と恒星表面組成の関係究明、③表面非均一性による線輪郭変動の視線速度への影響チェックなど、である。

この研究の企てには1995年の視線速度法に基づいたペガス座51番星周りの惑星の検出（系外惑星最初の発見）とそれに続く系外惑星天文学のブームに刺激されたことが大きな動機になったことは確かである。当時の背景とプロジェクトに至るいきさつについては一度天文月報に執筆したことがあるので（[1]）詳しくはそれを参照されたい。1998年から2000年にかけては新分光器 HIDES が稼働に向

けて製作と調整が進んでいたし、一方クーデ室の焦点周りは安定化に向けた遠隔操作と温度コントロールの改善努力がなされつつあったので、観測所自体が高分散分光を推進する機運に満ちていたように思われる。第一回プロジェクト観測公募が2000年に行われた際には他にも優れた観測課題の応募があったと聞いているが、HIDESは立ち上がったばかりのホヤホヤで評価も定まっていなかったこの時期に海のものとも山のものともわからない本課題が採択されたのは、HIDESお披露目のご祝儀の意味合いもあったのではないかと推測している。

とはいえ、メンバー自体も「実際 HIDES でということがどこまでできるのか」ということを十分把握していなかった関係上、かなり手探りに近い状態でスタートしたプロジェクトであり、決して考えていた通りには物事は運ばず、状況を見つつ絶えず軌道修正をしながら何とか進めて行ったというのが実情である。当初目論んでいた目標と実際の達成度との比較という観点から振り返ってみよう。

2. 視線速度解析：思わぬ展開

岡山観測所でもドップラー法で恒星の周りに惑星を検出できるだけの視線速度決定精度（毎秒数メートル程度）を達成したいということは我々プロジェクトメンバーの一致した思いであり、ヨードセルフィルターを導入したりクーデ室の安定化に気を配ったりして1990年代末はこれに向けて努力を続けていたが、当時の旧クーデ C10 分光器を用いたテストではせいぜい毎秒数十メートル程度の精度であり、更なる向上の見通しが中々つかなかつた。従って、HIDES で腰を据えてこの問題に取り組みたいとプロジェクトの重点テーマの一つに組み入れたのは当然である。しかし（おそらく誰もがそう見ていたであろうが）「この問題は決して容易ではなく目的達成までの道のりは長くなるだろう」と私は考えていたのでむしろ努力目標に近かった。

しかし、HIDES の性能は意外な喜ばしき結果をもたらした。2000 年後半期からのプロジェクト開始に先立つその年の春、数日望遠鏡時間をいただいたので、稼働を始めたばかりの HIDES にヨードセルを装着して、惑星を持つとわかっている恒星のテスト観測を行った。わずかの分量のデータであったがそれを持ち帰ってエシエルデータ整約の練習や視線速度解析プログラムの開発を行った。それで喜ばしいことに、数ヶ月後の夏になって、短時間のタイムスパンとはいえ毎秒 5メートル程度の精度が実際に出ていることが確認できたのである。つまり、手持ちのデータは高々約 1 時間の間にわたって撮られた数フレームのものだったが、地球の公転運動に起因するわずかな視線速度変化が確かに検出できたのだ。視線速度決定精度はラインの数（波長域の広さ）の平方根とラインのシャープさに比例するので、広い波長域カバーと高波長分解能というエシエル分光器の特長を兼ね備えた HIDES のメリットが如実に発揮されたのである。

つまり、プロジェクトが実際に開始する前にすでに明るい見通しがついたのであった。この初期の成果は論文としても発表した ([2])、更に頼もしいことにはメンバーの佐藤文衛氏と神戸栄治氏はこれ以後ソフト（解析プログラム）とハード（最適化された新ヨードセル）の両面での開発を積極的に押し進め、視線速度精度の更なる向上に貢献するとともに、G 型巨星周りの惑星探し並びにプロキオンなどの星震学という最先端のサイエンスに別途新たに取り組むことになった。従って、この視線速度解析のテーマの追求は両氏に委ねることにして、本プロジェクトの主眼は次節で述べる惑星を持つ恒星の化学組成の研究に置くことにしたのである。

3. 化学組成解析：集中的な取り組み

最初の系外惑星発見からまもなく「惑星の検出された星にはいわゆる超金属過剰星 (Super Metal Rich stars) として知られるものが多いこと」や「太陽そっくりの二つの星 (A と B) から成る連星系 16 Cyg は惑星を有する B のリチウム量は惑星を持たない A に比べて有意に少ないこと」などが判明し、「惑星を周りに持つ恒星はそうで無い普通の恒星と比較して表面の化学組成に違いがあるのではないか？もしそうならその原因は何だろうか？」とい

う話題が恒星分光学者の間で熱っぽく議論されるようになった。そこで我々のプロジェクトもこの問題の解明をメインテーマに据えることにしたのである。特に、惑星を持つ星が金属量過剰になる機構については「先天説（金属量が多いガスから生まれた星には惑星がしやすいのだ）」と「降着説（水素などの軽元素が蒸発欠乏して重元素が比較的多くなっている固体中心の原初惑星物質が中心星に降り積もったせいだ）」の両説が拮抗しており、いずれに分があるのかの決着が必要とされていた。これは揮発性元素 (C, N, O, S, Zn など) と他の鉄属などの非揮発性元素の二つのグループの間で組成に違いが見られるかどうかで判断することができる。従って、当時惑星を持つとわかっていた星で比較的明るいもの 14 個を集中的に観測し、早速解析を進めて確かにこれらの星の金属過剰傾向を確認するとともに前者の先天説の方に軍配が上がることを結論し、その成果はいち早く発表した ([3])。プロジェクトが始まってたった半年後のことである。

しかし、ここで「更なる今後は如何に進むべきか？」の判断に悩む事態に陥るに至った。つまり惑星を持つ恒星はどんどん新たに報告されており、実際これらは同様の組成解析を行うためには垂涎のサンプルなのだが、多くは岡山の望遠鏡で効率よく観測するには苦しい暗い星が主体を占めていたのである。「無理をして長時間の露出をかけてでも地道にこれら新発見の惑星を持つ星を観測していくべきか？いや目先の情報に振り回されたり余りに暗いターゲットに手を伸ばしたりしては、数が稼げずに結局中途半端な仕事に終わるのではないか？」と残り二年半をどのような観測に費やすべきかについて考えあぐねた結果、あえて軌道を修正して地道な基礎固め（むしろ惑星を持たない比較星の方に重点を置く）の方針を取ることに決断した。つまり「惑星を持つ星」がどのように特殊なのかを理解するためには「惑星を持たない星」と比べる必要があるのだが、後者は従来の研究ではあまり重視されていなかったからである。

この方針に基づき、残りの観測時間はサンプルとして選んだ多数の F-G-K 型の比較星を三つの波長域（緑～黄域、橙～赤域、写真赤外域）で観測してスペクトルを根気よく蓄積することに費やした。そして「これでなんらかの目先の成果を出すことより

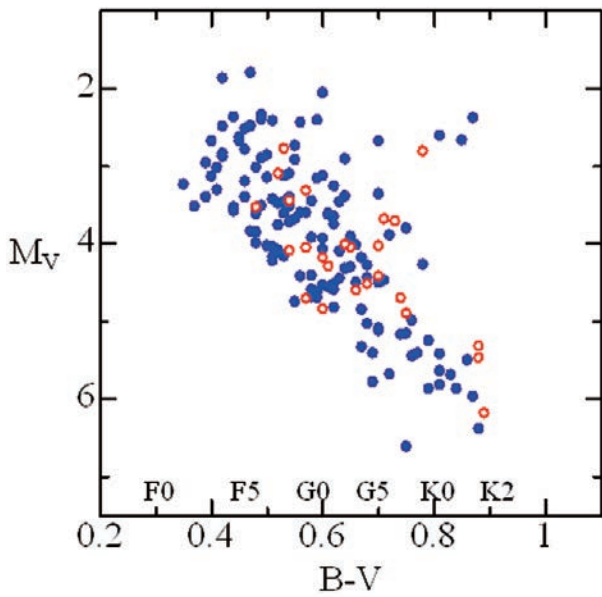


図1. サンプルとして選んだ160個のFGK型星の色-等級図上での分布。塗りつぶした青丸は惑星を持たない星で白抜き赤丸は惑星を持つ星。

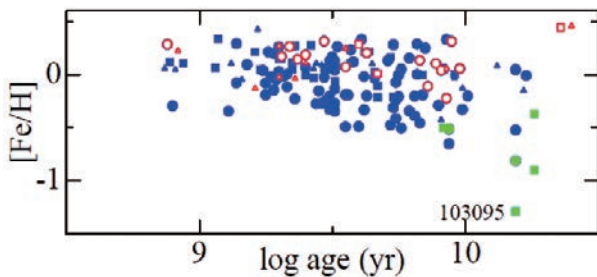


図2 我々の解析した160個のFGK型星の金属量と年齢の関係。白抜き赤いシンボルは惑星を持つ星、塗りつぶしたシンボルは惑星を持たない星（青色は薄いディスクの星、緑色は厚いディスクの星）。シンボルの形の違いは年齢の信頼性の違いを表す。惑星を持つ星は持たない星よりも系統的に高い金属量を示す傾向がある。（文献9より引用。）

も、むしろ他の（あるいは後世の）この分野の研究者のために少しでも役立つようなものを後に残さないだろうか」と考えた末に、①全部の星の整約したスペクトルをデータベースとして広く公表する、②そのスペクトルを我々自身もできるだけ解析して恒星基本物理量、大気パラメータ、運動学的パラメータ、色んな元素の化学組成、をコンシステントな方法で決定して（等価幅などの基礎データも全て併せて）出版する、という二つの仕事を並行して進めた。かくして160個のFGK型星（うち惑星を持つ星27個、惑星を持たない星133個）のスペクトルデータベースは完成し（[4]）電子データとしてインターネットで公開したのである。これらのサンプル星の色—等級図を図1に示す。大気のパラメータ（有効温度、重力加速度、鉄組成、微小乱流）は組成解析には必須の情報であるが、測定した鉄の線強度のみ

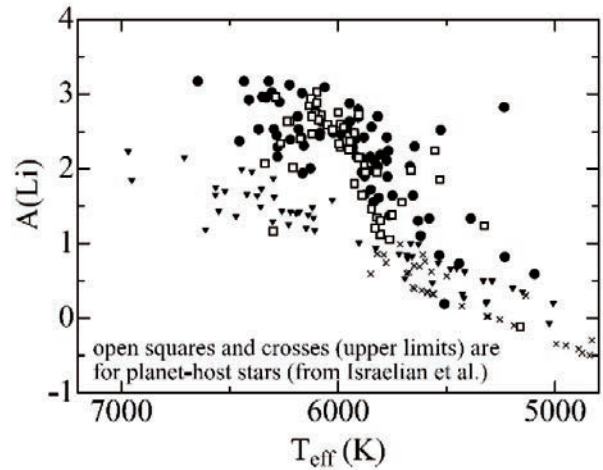


図3 FGK型星のリチウム量と有効温度の関係。白抜き四角□（×印は上限）は惑星を持つ星でIsraelian et al. (2004, A&A, 414, 601) の出した値。（彼らの解析した惑星を持つ星の数は我々よりずっと多いのでこちらを採用した：共通する星では我々の結果と非常に良く一致する）。一方塗りつぶした丸●（下三角▼は上限）は惑星を持たない星で我々の解析で得られた値。5800-5900Kあたりの狭い温度範囲では惑星を持つ星のリチウム量は惑星を持たない星よりも低く出ている。（文献7より引用。）

から高精度決定するためのプログラムを開発したので（[5]）、160個もの多数の星が対象でもこれが効率よく達成できた（[6]）。そしてリチウム組成の解析（[7]）、CNO組成の解析（[8]）、他の元素組成や年齢や運動学的パラメータの解析（[9]）、と一連の論文において化学組成解析結果を発表するに至った。また16 Cygについては似通った星の間の組成差を特に高精度に決定する方法を開発し、両星（A,B）の間には金属量の有意な差異は存在しないと結論した（[10]）。本節の最初に述べた惑星を持つ星の化学組成に関する問題に関して、これらの総合的解析の結果に基づいて一言でまとめれば、「惑星を持つ星の金属過剰の傾向の確認（図2）、その原因としては先天説が有力、太陽類似の星については惑星を持つ星はリチウム欠乏の傾向あり（図3）」となる。しかし先天説を取った場合、惑星を持ち金属過剰であるが年齢百億年くらいの老いた星の存在は謎である。銀河初期にも金属過剰のガスが存在したのだろうか。

4. 線輪郭解析：積み残された課題

このように三年間のプロジェクト観測における大部分の望遠鏡時間は化学組成の研究に向けた観測に費やしたので、最初に設定した三つの研究目標テーマのうちの最後の「線輪郭解析に関する課題（星自体の線輪郭変動がいかに視線速度解析へ影響する

か)」にはとても手が回らず、観測時間のごく一部を費やした試験的な企てのみに終わったので、語るべき多くを持たない。試験的に τ Boo と 51 Peg の短周期の惑星をもつ星について特に高い十万の波長分解能で時系列のデータを取得して線輪郭のバイセクターを調べる試みをしたが、(i) 線輪郭における極めてわずかなブレンドに大きく影響される、(ii) ノイズを減らすために多くのラインについてのバイセクターを足し合わせる際の波長合わせが問題、などのクリアすべき問題点も判明した。

最近ではトランジット惑星によるロシター効果の検出など輪郭変動の検出にもヨードセル法を用いた視線速度解析は成果を上げているが、恒星表面の非均一性に起因する線輪郭の変動がどれだけ惑星公転運動による視線速度解析に影響するかを区別して調べたいという場合には単なる視線速度解析では間に合わない。つまり輪郭のわずかな変化(∞^1 の自由度)を視線速度という一次元の自由度に押し込んでしまうともはや両者は区別できなくなるからである。きわめて正確な波長校正の担保(ヨウ素の線を焼き込んでしまうと線輪郭は測定できないのでヨードセル以外の方法で)と同時にスペクトルの線輪郭そのものの形状を解析する別の手法を考える必要があるだろう。この種の課題は未だ定まった手法が確立していないようであるので、今後有望な高分散分光学の未踏分野と言えるかもしれない。

5. おわりに

今になって振り返ってみると、当初立てた三つもの研究目標はあまりに欲張りすぎて、高々三年間百二十夜の割り当て(実質半分の六十夜で観測可能)でこれら全部を達成するのはとても無理なことであった。プロポーザルで科学的重要性をアピールしたいがために「これもやるあれもやる」と総花的

に色んなことを書いてしまったようであるので大いに反省せねばならない。線輪郭変動解析を断念して実質的に化学組成解析一本に専念したことは正解であったと信じている。視線速度のテーマが最初にトントン拍子に進んで他に譲ることができたことは幸運で、さもなければもっと消化不良の結果に終わっていたかもしれない。

この岡山観測所の第一回プロジェクト観測が客観的にどのように評価されるかはわからないが、PIとしての立場から主観的に見た場合、私自身がこの三年間の観測で得たもの(特に経験)は限りなく大きかった。ある程度の長期間にわたって望遠鏡時間が約束されることは、途中で投げ出すことができないのは当然であるが、きちんとそれなりの成果を上げなければならないという責任が伴う。この、否が応でも真剣に取り組まざるを得ない状況でのプレッシャーはある意味良い方向に働いて根気と集中力を持続できたと思っている。

研究と観測の遂行計画をほとんど私の自由に任せてくれて暖かく見守ってくれた研究組織メンバーの皆さん(神戸栄治、佐藤文衛、泉浦秀行、渡辺悦二、柳澤顕史、増田盛治、青木和光、本田敏志、川野元聡、定金晃三、大久保美智子、比田井昌英、観山正見、安藤裕康、の各氏[敬称略])、特に観測のサポートで多大なお世話になった佐藤氏と神戸氏と泉浦氏、にはこの場を借りてお礼を申し上げたい。

参考文献

1. 竹田洋一 2003, 天文月報, 96 巻, 303 頁
2. Takeda, Y., et al. 2002, *PASJ*, 54, 113
3. Takeda, Y., et al. 2001, *PASJ*, 53, 1211
4. Takeda, Y., et al. 2005, *PASJ*, 57, 13
5. Takeda, Y., et al. 2002, *PASJ*, 54, 451
6. Takeda, Y., et al. 2005, *PASJ*, 57, 27
7. Takeda, Y., Kawanomoto, S. 2005, *PASJ*, 57, 45
8. Takeda, Y., Honda, S. 2005, *PASJ*, 57, 65
9. Takeda, Y. 2007, *PASJ*, 59, 335
10. Takeda, Y. 2005, *PASJ*, 57, 83