

岡山プラネットサーチプロジェクト —巨星の惑星探し—

佐藤文衛

〈神戸大学大学院自然科学研究科 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1〉

e-mail: satobn@kobe-u.ac.jp

2003年10月、国立天文台岡山天体物理観測所（以下、岡山観測所、または岡山）は、巨星を回る巨大惑星の発見を発表した。日本初の太陽系外惑星（以下、系外惑星）の発見である。世界に遅れること約8年、高分散エシエル分光器 HIDES^{*1}の登場により、いよいよ日本もこの分野への参入を果たすこととなった。本稿では、現在我々が岡山観測所で進めている巨星の惑星探しプロジェクトについて、すばる時代を岡山で過ごした一大学院生の体験をもとに紹介する。

1. 系外惑星発見！

2002年5月31日からの3日間、週明けから始まる整備期間（約7週間）を控えた前期最後の観測時間は、一応晴れてはいるけれどもまいちすっきりしないという、ある意味普通の天気だった。「天気、大丈夫かな？」比較的明るい天体しか観測対象に選んでいない私にとっては、普段この程度の天気ならほとんど問題にならないのだが、このときばかりは少々ナーバスになっていた。なぜなら、今回は何としても観測しなければならない星があったからである。この1週間前、私は約50個の星について1年間取りためたデータを大急ぎで解析していた。そして、ある一つの星に心を奪われた。ありがちな話だが、その星はそれまで全くノーマークで、解析も後回しだった。ところが、いざふたを開けてみると、他の星には見られない大きな視線速度変化^{*2}を示していたのである。

「軌道運動だ。間違いない。」しかしこの時点では、まだ周期が分からなかった。同じ大きさの視線速度変化でも、周期が長ければ長いほど伴星の質量は大きくなる。この星の場合、はじめ視線速度が少し増加した後減少に転じてからは、長周期で緩やかに減少し続けているように見えた^{*3}。この後すぐに折り返して増加に転じれば惑星質量に収まるが、もしこのままの減少傾向が続けば惑星の質量を超えて連星になってしまう。その分岐点が今回の観測、逃がすわけにはいかなかった。日が沈むのを待ち、観測開始と同時に真っ先にその星に望遠鏡を向ける。慣れた手つきでスリット上に導入し、30分露出で1枚のスペクトルを取得、無事使えるデータであることを確認した。これで今回の目的は達成。観測初日の30分、残念ながら特にこれといったドラマはなかった。

さて、3日間の観測を終え、私は早速データの解析に着手した。コンピューターを駆使し相変わ

^{*1} HIDES については、特集記事その1の泉浦秀行氏の記事を参照されたい（天文月報第96巻第6号291-302頁「岡山高分散エシエル分光器 HIDES」）。

^{*2} 視線速度測定による系外惑星検出法については、天文月報第96巻第4号190-194頁「ドップラー法による系外惑星検出」（佐藤文衛）を参照されたい。

^{*3} 後出の図5で、（左から）1点目から8点目までの変化の様子のこと。

らずの長い計算時間の末ようやく導き出されたあの星の視線速度は……何と増加に転じていた！^{*4}この時点で、周期 400 日以内、振幅 200 m/s 以下であることが明らかとなり、念のため大雑把に伴星の質量を見積もると、木星質量の約 10 倍以下、それは惑星と呼べるものであった。「見つけちゃったよ。早速明日みんなに教えよう。これで D 論も何とかかなりそうだな。あー、よかった。」安堵と興奮に包まれながら、その夜は一人静かに余韻に浸った。これまでのこと、そしてこれからのことを考えながら……。

2. 岡山でもできる惑星探し

—HIDES 登場

私が系外惑星なるものの存在を知ったのは、1998 年、修士課程 1 年の頃である。当時は、1995 年の Mayor らによる初の系外惑星発見¹⁾と、その後の Marcy らによる相次ぐ発見によって世界は興奮に包まれていた（らしい）。すでに約 20 個の系外惑星が発見され、灼熱巨大惑星（ホット・ジュピター）、楕円軌道惑星（エキセントリック・プラネット）など、多様性に富む系外惑星の姿が明らかになりつつあった²⁾。アメリカ、ヨーロッパの 2 大グループはそれぞれ 1,000 個規模でサーベイを展開し始め、発見数は右肩上がりに増加（図 1）、天文学の新時代がまさに到来しようとしていたそのとき、お気楽大学生および大学院生を謳歌していた私は、恥ずかしながら系外惑星の「け」の字も知らなかった。

そんな調子で何となく修士 1 年も半年が過ぎたある秋の日、当時の指導教官、国立天文台の安藤裕康教授が、「今度の 11 月に竹田洋一さん（当時駒澤大学、現在国立天文台）の観測が岡山であるから、勉強のために手伝いにいって見たら？」と勧めてくださった。竹田さんは、当時岡山 188 cm 鏡のクーデ分光器に視線速度精密測定用ヨードセ

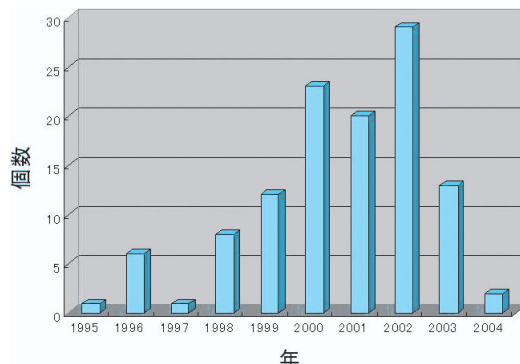


図 1 年別系外惑星発見数. <http://www.obspm.fr/encycle/encycle.html> をもとに作成（2004 年 3 月現在）。

ル（ヨウ素ガスを封入したフィルター）の試作機を取り付け、地道にテスト観測を続けていた³⁾。また、このとき一緒に観測にいった防衛大の神戸栄治さんは、ちょうどすばる望遠鏡の高分散分光器 HDS（以下、すばる HDS）用にヨードセルを作ろうとしているときであった。私にとっては偶然の出会いだったが、今思えばこれがすべての始まりだった。「日本でもやろうとしている人がいる。」この頃にはさすがの私も系外惑星のことを少しは知っており、ヨードセルを用いた視線速度精密測定そのものにはたいへん興味を覚えた。しかし、系外惑星を探そうなどという大それたことは、どこか別世界の人たちがする研究なのだろうという気がして、自分には全く現実感がなかった。「そんなすごいことしてみたいけど、自分には無理だろう。」と。それに、当時岡山ではまだ古い分光器を使っており、系外惑星検出に必要な数 m/s の超高精度など望むべくもなかったのである。「岡山じゃ無理だよな。」どこからともなく聞こえてくるそんな声を、私も真に受けていた。

しかし 2000 年になって、状況は大きく変わり始めた。すばる HDS が立ち上がり、岡山でも最新鋭の高分散分光器 HIDES が本格稼働、日本の

*4 同じく後出の図 5 で、9～11 点目で視線速度が増加している様子のこと。

高分散分光に新時代が到来したのである。この年、何とか博士課程に進学していた私は、うららかな春の日をいつものように竹田さんと岡山で過ごしていた。このときの観測は、HIDESで初めての視線速度精密測定、すでに惑星をもつことが知られているうしかい座タウ星のモニター観測であった。観測後、竹田さんが早速簡易的な解析を施したところ、何といきなり10~20 m/sの精度を達成、惑星による数百 m/sの視線速度変化を見事とらえることに成功したのだ⁴⁾。「岡山でも系外惑星を見つけられる！」HIDESのポテンシャルの高さを実感した瞬間だった。しかし、HIDESの能力はこの程度のものではなく、理論的に数 m/sの精度は出るはずだった。そしてその本来の威力を発揮させるためには、本格的な解析ソフトウェアの開発が不可欠であった。私は、この時点でもまだ系外惑星探しを行うつもりはなかったが、視線速度精密測定を利用した研究がしたいとは強く思うようになっていた。そこで、その取っ掛かりとして、解析ソフトの開発を始めてみることにした。

3. いまさら惑星探し？

そうこうするうちに平和な博士課程1年の夏が終わり、秋も深まる頃になると、周囲からはおそらく多くの博士課程の学生にとって最もキツイ質問の一つ、「D論どうするの？」という声が増しに強まる。私は、視線速度精密測定を使ったテーマをいろいろと探っていたが、面白くてかつD論になりそうなネタがなかなか思いつかず途方に暮れていた。D論のテーマは絶対自分で見つけるんだ！と息巻いてはみたものの、実際そんなに簡単に見つかるものではない。「こうなったら惑星探ししかないか？」系外惑星探しは、面白いとは感じながらも無理だと思ってずっと敬遠してきたテーマだが、この期に及んでそんなことも言っていられない。「とにかく何とかしなければ……」さまざまな感情が交錯するなか、藁にもす

がる思いで文献を読み漁った。なお、このような動機が良いか悪いかはここでは問わないでいただきたい。さて、2000年当時は、すでに50個以上の系外惑星が発見され、100個を超えるのは時間の問題、世界は単なる発見から統計へと進みつつある頃だった⁵⁾。およそ3,000個もの太陽型星が世界中のグループによって常時モニターされている状況で、彼らの後を単に追いかけるのはあまりに無意味だし、何より勝負にならないことは火を見るよりも明らかである。となると、彼らとは違うタイプの星をターゲットとするか、それとも彼らより精度を上げてより軽い惑星を見つけるか、しかし、後者が容易でないことは容易に想像がついたので、今さらな感は否めなかったが、とりあえず前者の線で検討することにした。

3.1 ニッチを狙う

ドップラー偏移を利用して惑星を見つけるには、まず測定精度が出ること、そして、星自身の視線速度が安定していることが重要である。視線速度の変化は吸収線の位置のずれを測定して検出するので、シャープな吸収線がたくさんある星ほど測定精度が出る。しかし、いくら精度が出ても、例えば脈動星のように自分自身の視線速度が大きく変化している星では、惑星による微小な視線速度変化はそこに埋もれてしまうので検出が困難になる。そのため、惑星探しには活動性の低いおとなしい星が適している。このような条件を満たすのは、自転速度が小さく、スペクトル型が晩期F型からM型の矮星（太陽はG型）、まさに世界中でサーベイされまくっている星である。これは、太陽質量の約1.5倍より軽い星に相当する。それ以外の、例えばより重いB型やA型の早期型星は、高温のため吸収線の数が少なく、高速自転によってその幅も大きく広がっているため、数 m/s もの精度は実際上困難である。また、若い星も活動性が高いのでターゲットには適さない。では年老いた巨星はどうか？ 巨星は低温のため吸収線の数が多く、自転速度も小さいので確かに精

度は出る。しかし、巨星はその名のとおりに進化によって大きく膨張しており、仮に惑星があったとしても多くは飲み込まれているだろう。また、対流層の発達によって恒星表面の運動が激しくなっており、星自身の視線速度が安定していないので、不可能ではないが、やはり惑星探しには不向きと言わざるをえない。「巨星も無理か……超巨星なんてもっと無理だろうし……」と早くも諦めムードが漂ったそのとき、ふと、「巨星と超巨星ってどのくらい大きさが違うんだろう？」と些細なことが気になった。教科書を調べると、光度階級 III の巨星は、G、K 型で大体太陽半径の 10 倍から 30 倍くらいとある。これは、軌道半径にするとせいぜい 0.05~0.15 天文単位程度である。一方、光度階級 I の超巨星は太陽半径の 100 倍以上、地球軌道に迫る勢いだ。つまり、私はいい加減な知識で巨星と超巨星をごっちゃにして勘違いしていた。巨星の周りには惑星がたくさん残っていてよ

いのだ。では、星自身の視線速度の安定性はどうか？ 人は巨星を不安定と言うが、それはどの程度本当なのか文献をあたってみた。K、M 型巨星については、伝統的に脈動の研究を行っているグループがあり、いくつかの明るい天体で視線速度の精密モニター観測がなされていた。それによると、確かに K、M 型巨星の多くは数百 m/s にも及ぶ視線速度の変化を示すが、晩期 G 型や早期 K 型の巨星では 20 m/s 程度の変動に収まっているケースも見受けられた⁶⁾。一方、測光観測でも同じような結果が得られており、晩期 G 型から早期 K 型、色指数で言うと $0.6 < B - V < 1.0$ にある巨星が、巨星の中では最も明るさの変化が小さく星自身が安定していることが分かった⁷⁾。HR 図を眺めると、これらは赤色巨星枝のちょうど根元辺りに位置する言わば「黄色巨星」とも言うべきもので、より進化の進んだ赤色巨星に比べて星自身が安定しているのはある意味当然であっ

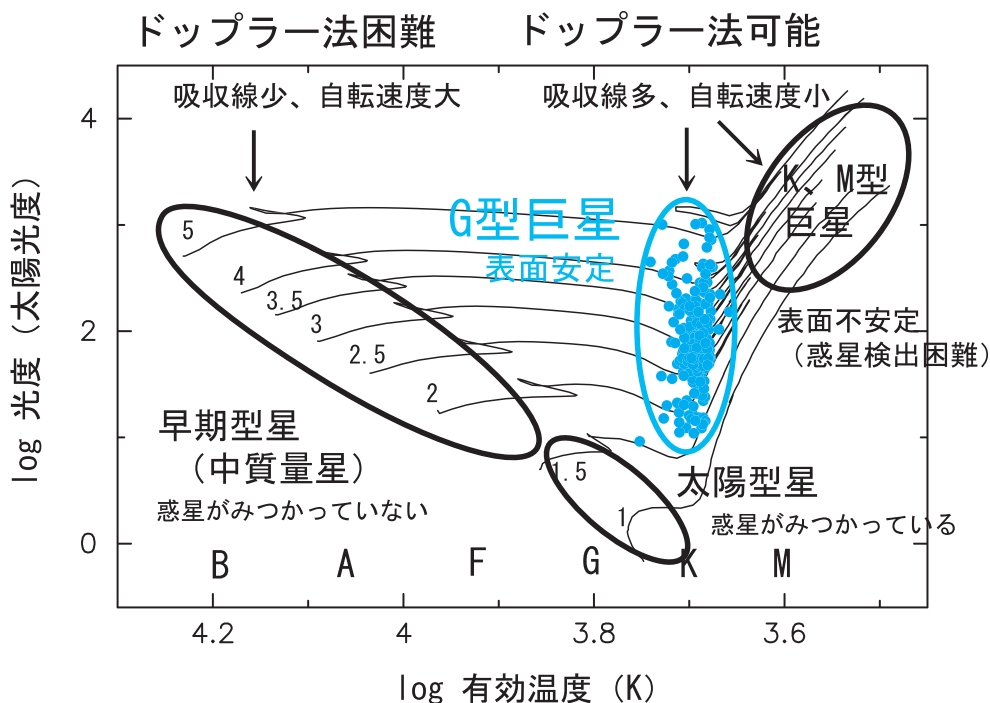


図 2 HR 図上における G 型巨星の位置。実線は 1~5 太陽質量の星の進化経路、丸は現在岡山観測所でサーベイしている約 300 個のターゲットの分布を表す。1.5~5 太陽質量の星を含むようにターゲットを選んでいる。

た（図2）。これらの星に対しては $\sigma \sim 20 \text{ m/s}$ 程度の視線速度安定性は期待してよさそうだ。数 m/s 以下で視線速度が安定している矮星に比べればこの変化は大きい。主星近傍なら木星質量の惑星を十分見つけられる。また、幸い過去にこれらの巨星では大規模な視線速度サーベイはほとんど行われたことがなく、唯一あったサーベイも、精度数百 m/s というかなり粗いものだった。しかも G 型巨星に関しては、数 m/s という精度での視線速度測定がなされた天体はほとんどないと言ってよかった（K 型巨星については、この頃からいくつかのグループがサーベイを行っている）。G 型巨星は、矮星で惑星を探している人にとっては不安定な星で、脈動の研究をしている人にとってはおとなしすぎるという、その中途半端さゆえに、精密視線速度測定の空白地帯となっていたのだ。しかし、巨星の周りで惑星を探す人にとっては最も適した星である。G 型巨星は、今はやりの言葉で言えば「ニッチ」だった。なお、最近新規参入してくるグループは、特に小口径望遠鏡では、視線速度が測れる星なら何でもやる（やらざるをえない）という雰囲気になりつつある。

3.2 G 型巨星の視線速度精密測定—中質量星の惑星探し

さて、サーベイできそうなターゲットは見つかった。ではそれがもつ意味は何だろうか？ 巨星の周りの惑星と聞いてすぐに思い浮かぶのは、やはり惑星系の運命だろう。進化して大きく膨らんでいく星に飲み込まれていく惑星たち……確かに話としては面白いが、もっと惑星形成に関して重要な知見を与えるものでなければ、大掛かりにサーベイを展開する動機としては弱い。うーん、とひとしきり悩んだところで、ひとまずこまごまの流れを竹田、神戸の両氏に伝え、ご意見を伺うことにした。すると、竹田さん曰く、「G 型巨星の中には、主系列では A 型星や B 型星だった星が

進化してきたものも含まれているはず。」なるほど確かにそうだ。それはつまり、主系列星では不可能だった重い星（ > 1.5 太陽質量）の周りの惑星探しができるということを意味する。このような星では、Herbig Ae/Be 星やヴェガ型星など星周円盤をもつ星は見ついているものの、まだ惑星自体は検出されていない。さまざまな質量の星における惑星系を調べることは、今後統一的な惑星系形成論を目指すうえで欠かせない要素の一つだろう。また、赤外線による若い星団のイメージングサーベイからは、G 型より早期型の星では、その周りの原始惑星系円盤の寿命は数百万年と言われている^{8),9)}。これは、木星型惑星形成のいわゆる標準モデル¹⁰⁾が必要とする 1 億年程度に比べてずいぶん短い。木星型惑星形成のタイムスケールは未だ解明されていない大きな問題であるが、重い星での惑星の有無と原始惑星系円盤の寿命を合わせて明らかにすることによって、これに観測的に制限を与えることができると考えられる。一方、神戸さんは、「巨星の惑星系はトランジット^{*5}を起こす確率が高いね。」トランジットを起こすには、その惑星の軌道傾斜角がちょうど 90 度くらいでなければならないが、巨星は星が大きいのでこの角度が矮星に比べて小さくてもよい。ただし、星の明るさの変化は小さくなるので地上からの観測では難しいが、将来スペースからの観測が可能になれば有望なターゲットになるだろう。頼りにするお二人から特に反対意見は（積極的な賛成意見も??）出なかったということで、この時点で私の気持ちは決まった。まさか本当に惑星探しをすることになるとは……多少分不相応な気もしたが、これに勝るテーマが思いつかない以上、腹をくくってやるしかない。「G 型巨星の視線速度精密測定による中質量星の惑星探し」、曲がりなりにも D 論のテーマが決まった頃には、もう冬の足音が聞こえていた。系外惑星探しで D 論を

*5 我々から見て、恒星の前面を、その周りを回る惑星が通り過ぎる現象。

書くにしてはやや遅いスタートだったが、目的も手段も明快ただけに、後になって迷いが生じることはなかった。時間をかければきっと成果は出る、私のような単純な人間には適したテーマだったのかもしれない。なお、「ターゲットと目的を決める順番が逆じゃないの？」というツッコミはやめてください。

3.3 いざ岡山へ

観測の機会は早速やってきた。この年の12月、岡山で竹田さんPIのプロジェクト観測があり、神戸さんらの努力により導入された新ヨードセル¹¹⁾のテスト観測として、G型巨星を一つ加えることになった。私は、ヒッパルコスカタログをもとに明るい星(V<6)中心のリストを作り、その中の一つのデータを取り始めた。「もしこの星に惑星があったらラッキーだよな。」なんて虫のいいことを考えていたが、幸か不幸か、この星はリストの中で今なお最も視線速度が変化していない星の一つである。

かくして細々と始まったこのサーベイだが、最大の問題は観測時間の確保であった。とりあえず半年から1年くらいの周期を押さえようと思うと、少なくとも1,2カ月に1回はデータを取りたい。このような長期モニター観測ができる可能性があるのはやはり岡山だ。それまで岡山の共同利用観測では、1課題当たりの割当夜数は半期1週間くらいが最大で、これは晴天率を考えると約3日であった。とすると、サーベイできる天体数は一晩で観測できる天体数と同じ20~30個程度となる。当時太陽型星のサーベイでは、惑星が見つかる確率は3~5%くらいと言われていたので、これをそのまま当てはめると、惑星は一つ見つかるかどうかというところであった。ターゲットが多いにこしたことはないのだが、いきなりたくさんは無理だろうし、きっとそんなに観測できないだろうと思って、「とりあえずターゲットは20個くらいを考えています。」と岡山観測所の泉浦秀行さんに相談した。すると、「少ない。20個だと

21個目とか22個目に惑星があるかもしれない。」20個と言いつくすのもおっかなびっくりだったのに、少ないと言われるとは思っていなかった。でも確かにこういうところで変に遠慮してはいけないのであって、本当に必要な分だけやらなければ意味がない。そう考え直した私は、ターゲットを50個に増やすことにした。これなら最低1個、あわよくば数個は見つかるはずだし、もし1個もなかったとしても統計的な議論が可能である。こういうところでは控え目な性格というのは仇になる。「もっと大胆にならなければ」と、そのとき思った（その後はやや大胆になりすぎたが）。

しかし50個となると、必要な夜数は倍になり半期で2週間、仮にその要求が通ったとしても、1回の観測期間は平均3日、まだ天候によっては全滅の危険性が高い。この種の観測は、コンスタントに継続することこそが命である。「どうしたらたくさん観測できるでしょうか？」そんな虫のいい相談を再び泉浦さんにもちかけたところ、「観測所時間を使うという手はある。」でもその時間は、本来機器の整備や観測所員のための観測時間であり、そうでない私が自由に使えるわけではない。どうしたものかと数カ月悩んだ末の結論は、「観測所員になる」であった。もちろん所員になったからといって観測時間が保証されるわけではなく、どのくらい使える時間があるのか分からなかったが、岡山にいかないよりはいったほうが確実に使える可能性は増えるはずである。この研究は時間が命なのだ。そう決意し、岡山に引っ越したい旨を泉浦さんに伝えたところ、「ウェルカム」。こうして、2001年、博士課程2年の5月に、リサーチアシスタントとして晴れて岡山観測所の一員となり岡山ライフがスタートした。

こんなにトントン拍子に話が進んだのにはわけがあった。この頃ちょうどすばる望遠鏡が共同利用を始め、岡山の時間には比較的余裕が生まれることが予想されていた。そして岡山観測所では、すばるでは難しい時間軸方向の観測に重点を移そ

うとしていた。そんなときタイミングよく私が惑星探しで岡山にいきたいと申し出たわけだ。私は単に自分の都合で動いていただけだが、たまたまお互いの思惑が一致していたのである。千載一遇のこの機会をとらえられたことは、私にとってたいへん幸せであった。蒸着や観望会など観測所の業務をお手伝いしながら、「隙あらば観測」。岡山での2年間はこの一言に尽きる。幸いこの作戦は、いろいろな幸運が重なって当初の予想以上の成功を収めた。

4. 解析ソフトウェアの開発

岡山へ引っ越して数カ月、サーベイも序々に軌道に乗り始めていたが、実はまだ大きな問題を抱えていた。肝心の解析ソフトがまだ完成していなかったのだ。D論のテーマ決めと並行して続けていたソフト開発は、2000年11月の時点で、短期間なら5 m/s程度の精度が出せるところまで漕ぎ

つけてはいた。しかし系外惑星探しでは、この精度が年のタイムスケールで維持されなければならない。そのために大きな障害となっていたのが、解析に用いる星のスペクトルテンプレート（分光器の器械輪郭の影響を受けていない星本来のスペクトル）をいかにして得るかということであった（ヨードセルを用いた観測データの解析方法は図3を参照）。これは、単純には非常に高い分解能（比波長分解能で数十万以上）でスペクトルを取得すれば済む話だが、岡山を含め、系外惑星探しを行っている多くのサイトで残念ながらそれは不可能である。そのため他のグループは、通常の分解能で星のみのスペクトルを取得した前後に高速自転星やフラットランプを利用してヨウ素だけのスペクトルを取得し、そこから分光器の器械輪郭を見積もり、星のスペクトルからデコンボリューションするという方法を用いていた。この方法をHIDESのデータで試してみると、数日から1週

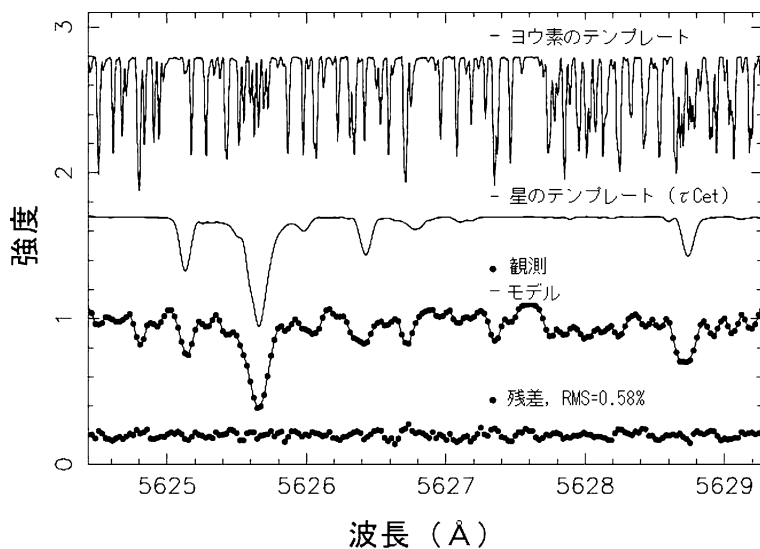


図3 ヨードセルを用いた観測データの解析例。星は太陽型星であるくじら座タウ星。ヨウ素のテンプレート（一番上）と星のテンプレート（上から二番目）を掛け合わせ、これに分光器の器械輪郭（図中には表していない）をコンボリューションすることによって、ヨードセルを通して得られた星の観測スペクトルをモデル化する（上から三番目。点が観測スペクトル、実線がモデルスペクトル）。観測とモデルの差（一番下）が最小になるように、ヨウ素のテンプレートに対する星のテンプレートのずれ（視線速度）をパラメーターとして決定する。

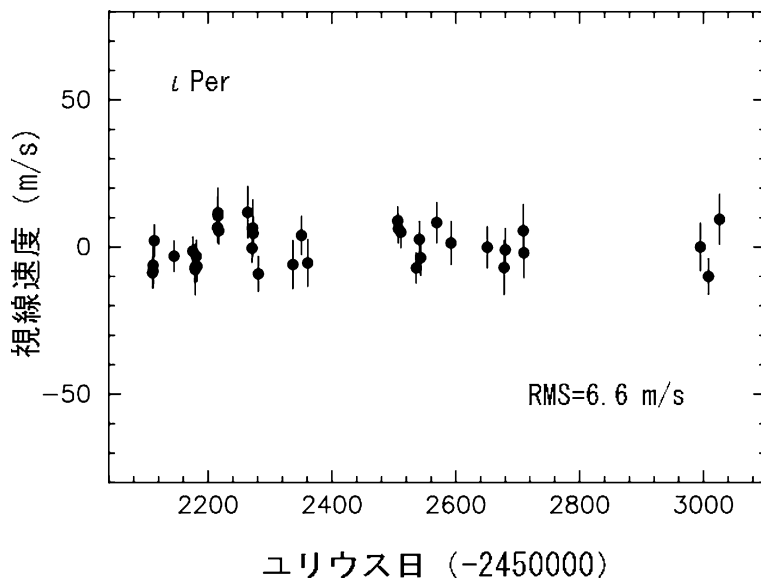


図 4 視線速度不変星として知られるペルセウス座イオタ星 (G0V) を HIDES で観測した結果. RMS は平均値の周りのばらつき. 約 2 年半にわたって視線速度が RMS=6.6 m/s で安定している. これがほぼ HIDES での測定精度に相当する.

間という短期間のデータに対しては比較的うまくいったが、例えば 1 カ月後の他の観測期間のデータに対して同じテンプレートを適用すると途端に精度が落ちる結果となった。これは、デコンボリューションや波長決定の不完全さに伴う系統誤差がテンプレートに残っており、同じ観測期間のデータに対する影響は小さいものの、全く別の期間のデータに対しては大きく効いてくるということを意味している。岡山 188 cm 鏡の場合、望遠鏡の向きや観測条件によって器械輪郭が時々刻々変化していることが分かり、先に述べた方法では、星のスペクトルとヨウ素のスペクトルを撮ったときの器械輪郭や波長スケールの違いが無視できないほど大きいことが原因と考えられた。

私は、この問題をソフト的に解消するために、ヨウ素のスペクトルが混ざった星の（星+ヨウ素）スペクトルから星のスペクトル成分だけを抽出するという方法の開発を続けていた。この方法は、ある星のテンプレートを仮定して星+ヨウ素のスペクトルのモデルを作り（ヨウ素のテンプレ

レートは既知）、観測スペクトルとの差を星のテンプレートに補正していくというものであるが、こうして得られたテンプレートはヨウ素の吸収線によって波長が精度良く決められ、かつ器械輪郭がデコンボリューションされている。また、複数のフレームから作られたテンプレートを足し合わせて S/N 比を上げることができるという点でも有用である。つまり、視線速度測定用にヨードセルを使ったデータだけとっていればよいので、限られた時間内に少しでも視線速度のデータ点を増やしたい私にとっては、是非とも実現させたい方法であった。

観測と並行してソフト開発に取り組み、試行錯誤を繰り返しながら何とか 1 年間にわたって 5~6 m/s の精度を達成する目処がたったのは 2002 年の 2 月のこと¹²⁾、D 論提出まですでに 1 年を切っていた。ちなみに、この精度は 3 年経った今も保たれている（図 4）。もちろんこの精度で満足したわけではないが、当面のサーベイには十分な精度であったので、ソフトの開発はひとまずお休

みし、たまっていたデータの解析に大急ぎで取りかかった。その後、私がソフト開発を中断している間、神戸さんや安藤さんが精力的に精度向上に取り組まれ、現在短期間では4 m/sを切るころまで到達している。

5. 岡山惑星1号：HD104985b

サーベイ開始から約1年が経過した2002年5月、待ち焦がれた「当たり」が見つかった。その星の名はHD104985、北極星のほど近く、きりん座の方向にあるG9III型の5.8等星（V等級）で、直径は太陽の約10倍、進化トラックとの比較から、質量は太陽の約1.6倍と推定された。その後の継続的なモニター観測により、この星は周期198日、振幅160 m/sの正弦波的な視線速度変化を示すことが明らかになった¹³⁾ (図5)。

5.1 G型巨星の視線速度安定性

ここで、G型巨星の視線速度安定性について先に述べておきたい。解析を進めていまず気がついたのは、やはり当初の目論見どおりG型巨星の視線速度は安定しているということだった。図6は、53個のG型巨星について、2~3年間にわ

たる視線速度測定を行い、各星の視線速度の平均値からのばらつきをヒストグラムに表したものである。図から分かるように、 $\sigma \sim 10$ m/sの星が最も多く、約70%の星が20 m/s以下、約90%の星が30 m/s以下の変動で収まっている。なかでも特に安定しているものは $\sigma = 6 \sim 8$ m/sのレベルに達している（測定精度は5~10 m/s）。G型巨星のこのような視線速度安定性は、測光観測やK型巨星の結果から推察されていたが（3.1参照）、これほど多くのG型巨星のサンプルについてこれを示したのは本研究が初めてである。このくらいのレベルで視線速度が安定している星の周りでは、主星近傍であれば木星質量程度以上の惑星を楽々検出することができる。解析し始めの頃は、視線速度が変化していないとがっかりしたものだが、その「はずれ」の積み重ねがあるからこそ、「当たり」を特別なものとして見なせるのである。

5.2 視線速度変化の原因

上で述べたように、HD104985の視線速度変化はほかの50数個の星に比べて明らかに大きいので、これがG型巨星というタイプの星に特有の現象だとは考えにくく、外的な要因、つまり軌道

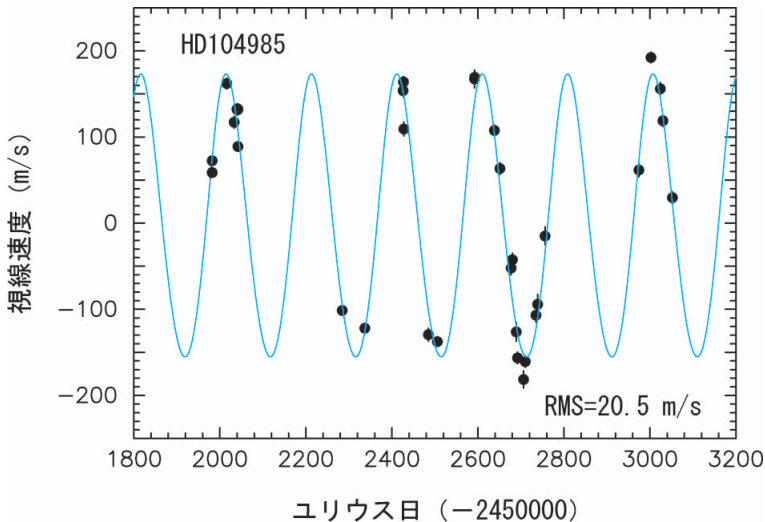


図5 HD104985 (G9III) で検出された視線速度変化。丸が観測点、実線が軌道運動を仮定したときの理論曲線を表す。RMSは理論曲線からの観測点のばらつき。最も新しい観測点は2004年2月に取得されたもの。

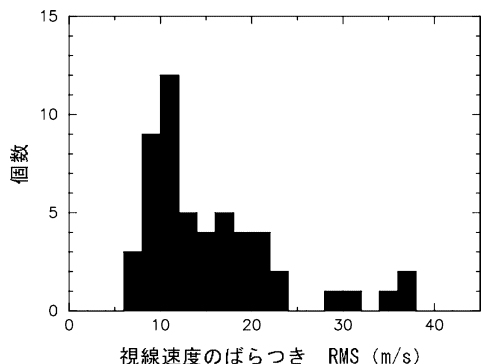


図 6 G 型巨星の視線速度安定性. 53 個の G 型巨星について、2~3 年間にわたる視線速度測定を行い、各星の視線速度の平均値からのばらつき (RMS) をヒストグラムに表したもの. この図には HD104985 は含まれていない.

運動によるものである可能性が高い。軌道運動のほかに周期的な視線速度の変化を生み出す原因としては、星自身の脈動やモジュレーションが考えられるが、脈動の場合、理論的に予想される変動周期は G 型巨星では約 1 日程度であるのに対し、観測された周期は 198 日、両者は 2 桁も違う。一方、モジュレーションは黒点などの表面模様が恒星の自転とともに移動することによって吸収線の輪郭が変化し、視線速度が変化して見える現象である。仮にこの星で観測された振幅が一つの黒点によるモジュレーションだとすると、自転速度約 3 km/s をもつこの星では、その黒点は概算で星表面の約 5% を覆っていることになる。このような黒点は視線速度だけでなく明るさの変化も引き起こすはずであり、その大きさは約 0.05 等と見積もられるが、これは、ヒッパルコスの測光からこの星の明るさが $\sigma \sim 0.006$ 等のレベルで安定しているとされていることと矛盾する。また、この星の視線速度変化は現在約 6 周期、つまり約 1,200 日にわたって同じ振幅、同じ周期で続いている。このように変化が長期的に安定しているという事実は、軌道運動にとって有利な証拠の一つでもあ

る。以上の理由から、やはり観測された視線速度変化は、軌道運動によるものと解釈するのが最も妥当だと考えられる。軌道運動を仮定すると、半径約 0.8 天文単位のほぼ円軌道（離心率 0.06）を、木星の約 6.3 倍の質量（下限値）をもつ巨大惑星が回っていることになる（表紙図参照）。G 型巨星での惑星発見は世界初、K 型巨星も含めると巨星では 3 例目の発見であった*6。

ところで、まだこの分野で世界に対する実績のなかった私としては、最低 1 周期は位相を連続的にカバーすることによって万人を納得させたいと考えていた。そのため、この星の変化に気づいてからその後 1 年間は、毎月 1 回ずつ観測して予想どおりの変化が続いていることを確かめるといふ、単純だが精神的に非常に消耗する観測が続いた。そして 2003 年、ようやく世に送り出すこととなったのである。しかし、実は最も心臓に悪かったのは、公表後初めての観測だった。記者発表までしてしまったのに予想曲線に乗らなかったら……この 1 年で、私の寿命はきっと縮んだに違いない。

5.3 また一つ多様な系外惑星が

今回見つかった系外惑星の軌道半径は約 0.8 天文単位、質量（下限値）は約 6.3 木星質量であった。これまでに知られている系外惑星の中ではやや重めの部類に入るが、軌道半径、質量ともに特に珍しいというほどのものではない（図 7 左）。一方、離心率については、これまでに太陽型星で見つかった惑星では、ごく主星近傍を除いて楕円軌道をもつものが一般的であるのに対し、今回見つかった惑星はほぼ円軌道を回っているのが特徴的である（図 7 右）。実は、このような一見普通に見える惑星の軌道を説明できる理論はまだ確立されていない。例えば中心星の潮汐力は、軌道半径 0.8 天文単位までは及ばず、これによって軌道を円軌道化させることはできない。また、遠くで

*6 2004 年 3 月現在、巨星（光度階級 III）の周りの惑星は 5 例の発見が報告されている。

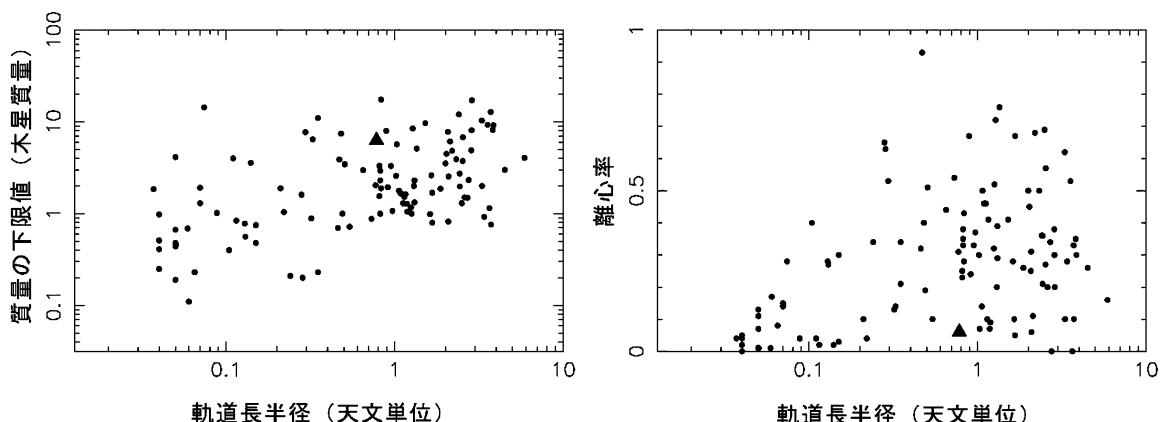


図7 これまでに見つかっている系外惑星の質量下限値（左）、軌道離心率（右）と軌道長半径の関係。http://exoplanets.org のデータをもとに作成。三角は HD104985b を表す。

できた惑星が内側に移動してきた (**migration**) としても、このような中途半端な場所でその移動を止めるメカニズムは解明されていないのが現状である。他方、この星が巨星であることを考えると、“red clump giant” の惑星を見ている可能性もある。red clump giant は、一度赤色巨星として大きく膨張した星が、中心でヘリウムに点火し収縮したものだと考えられているが、もしこの星がそうだとすると、過去に大きく膨張した段階で惑星の軌道を潮汐力によって円軌道化することができる。しかし、そのような段階を惑星が中心星に飲み込まれずに生き残れるのかという疑問は残る。今後さらに多くの惑星を見つけることによって、今回のケースが特別なのか否かが分かるだろう。いずれにしても、今回の発見によって、系外惑星の多様性がまた一つ明らかになったことは間違いない。

一方、主星に目を転じると、HD104985 の質量は太陽の約 1.6 倍、主系列星では F-A 型星に相当する質量である。今回の発見は、このような早期型星の周りにも惑星が普遍的に存在する可能性を示唆するものと言える。今後、すばるや ASTRO-F などによって、これら太陽より重い星における原始惑星系円盤の性質（寿命や質量など）が統計的に明らかにされ、我々のサーベイの結果と合わ

せて、惑星形成のタイムスケール等の議論が可能になることを期待したい。また、我々が見積もった主星の金属量は $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.35$ 、若干金属欠乏気味である。太陽型星では、金属量の多い星ほど惑星をもつ確率が高いことが知られており、その確率は $[\text{Fe}/\text{H}] > 0.0$ の星で十数 % であるのに対し、 $[\text{Fe}/\text{H}] < 0.0$ の星では 3~4% 以下である¹⁴⁾。このような金属量に対する依存性は、惑星形成のメカニズムを探る重要な手がかりとなる。現在標準とされている「コア集積モデル」では、金属量が多い環境ほど惑星が形成されやすいのに対し、もう一つの理論である「ディスク不安定モデル¹⁵⁾」ではあまり金属量には依存しないと言われている。我々は、視線速度測定と並行して全サンプルに対する化学組成解析も進めており、この観点からも中質量星における惑星形成を明らかにしたいと考えている。

6. 今後の展開

最初は 50 個のターゲットから細々とスタートし、空き時間をかき集めてゲリラ的に何とか進めてきたこのサーベイだが、その後徐々に共同利用観測での割り当て夜数が増えるとともにターゲットを増やし、2004 年からはターゲット 300 個を擁する 3 年間のプロジェクト観測へと成長を遂げ

た。300 という数は、岡山から観測できる 6 等より明るい G 型巨星のうち、系外惑星探しに適したもののほぼすべてに相当する。巨星の惑星サーベイとしては今のところ世界一の規模だろう。このような研究を遂行するうえで、ある程度長期間にわたって観測時間が保証されるというのはとてもありがたい。「今日の観測は 3 年後のため」、いつ打ち切られるともしれぬ状況では、そんな息の長い研究はなかなか難しい。このサーベイで、木星近傍にある木星質量程度以上の惑星が 10 個くらい検出され、中質量星の周りの惑星系の特徴が明らかになると期待している。実は、最初の 50 個のサンプルの中にもすでに次の惑星候補があるが、これが本当に当たりかどうかは今後の発表をお待ちいただきたい。

我々は、最終的にサンプル数を 1,000 個の規模にまで増やしたいと考えている。そうすれば、数十個程度の惑星検出が見込まれ、統計的な議論が可能になる。そのためには、現在の 188 cm 鏡と HIDES にファイバーフィードやイメージスライサーなどを導入し、高効率化を図ることが不可欠だろう。一方、海外のグループとの協力も重要になる。幸い東アジアでは、現在 2 m クラスの望遠鏡で高分散分光器が立ち上がってきており、韓国、中国では視線速度の精密測定ができる環境が整いつつある。これらと協力して、東アジアにおける一大プラネットサーチネットワークを構築できれば素晴らしいと思う。また、近い将来、やっぱりすばる HDS でもサーベイを展開したいと考えている。

7. おわりに

実は、岡山観測所 40 年の歴史の中で、大学院生が常駐したのは私が初めてだったらしい。何事も初めてというのはいいものだが、むしろそれ以降途切れていないことのほうが嬉しい。すばる時代にわざわざ岡山にいくなんて、と変わり者呼ばわりされたりもしたが、すばる時代の岡山だからこ

そで研究もある。HIDES の建設、プロジェクト観測の導入、時間軸重点の研究へのシフトは、諸先輩方が 10 年以上前からこの時代を見据えて作ってきた流れだ。そして今、私は幸運にもそこに居合わせ、そのお膳立ての上でここで述べた成果を上げることができた。では、私は 10 年後の若者のために何ができるか。今の自分の身もままならないのにそんなことを言うのは時期尚早の感もあるが、そのくらい長期的な視点に立って研究を進めていければと思っている。

最後に、「若きプラネット・ハンター募集中」。

謝 辞

ここで紹介した成果は、私の博士論文¹⁶⁾の内容を基にしたものです。当時の指導教官であった安藤裕康教授には、このような研究を行う機会を与えてくださったことに感謝いたします。防衛大学の神戸栄治さん、国立天文台の竹田洋一さん、岡山天体物理観測所の泉浦秀行さんには、大学院入学以来、研究を行ううえで有意義なアドバイスを数多くいただきました。特に泉浦さんには、観測に関するあらゆるサポートをしていただきました。岡山観測所の増田盛治さんには、私の代わりに何度も観測をしていただきました。岡山に滞在した 2 年間は、吉田道利所長をはじめとする観測所のスタッフの方々に恵まれた研究環境を用意していただき、また、日常生活の面でもたいへんお世話になりました。おかげ様で何一つ不自由なく生活し、研究に集中することができました。この場をお借りして皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Mayor M., Queloz D., 1995, Nature 378, 355
- 2) Marcy G. W., Butler R. P., 1998, ARA&A 36, 57
- 3) 竹田洋一, 2003, 天文月報 96, 303
- 4) Takeda Y., et al., 2002, PASJ 54, 113
- 5) Marcy G. W., Cochran W. D., Mayor M., 2000, in Protostars and Planets IV, 1285
- 6) Horner S., 1996, ApJ, 460, 449

- 7) Henry G. W., Fekel F. C., Henry S. M., Hall D. S., 2000, ApJS 130, 201
- 8) Haisch K. E. Jr., Lada E. A., Lada C. J., 2001, AJ 121, 2065
- 9) Haisch K. E. Jr., Lada E. A., Lada C. J., 2001, ApJ 553, L153
- 10) Pollack J. B., et al., 1996, Icarus 124, 62
- 11) Kambe E., et al., 2002, PASJ 54, 865
- 12) Sato B., Kambe E., Takeda Y., Izumiura H., Ando H., 2002, PASJ 54, 873
- 13) Sato B., et al., 2003, ApJ 597, L157
- 14) Fischer D., Valenti J. A., Marcy G. W., 2004, in IAU S 219 Stars as Suns: Activity, Evolution and Planets. ed. A. K. Dupree and A. O. Benz, ASP Conf. Ser.
- 15) Boss A. P., 2002, ApJ 567, L149
- 16) 佐藤文衛, 2003, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士論文

**Okayama Planet Search Program:
Searching for Planets around Giant Stars**
Bun'ei SATO

*Department of Earth and Planetary System
Science, Graduate School of Science and
Technology, Kobe University, 1-1 Rokkodai-cho,
Nada, Kobe 657-8501*

Abstract: In 2003 October, Okayama Astrophysical Observatory (OAO) announced the discovery of a giant planet orbiting a giant star. This is the first “Japanese extrasolar planet”. The HIDES, a new high dispersion echelle spectrograph at OAO, has enabled us to carry out such kinds of studies using high-precision Doppler technique in Japan. In this article, we introduce our on-going project at OAO which is searching for planets around giant stars, and also present the recent results we have obtained during these few years.