系外惑星「遠い世界の物語」その4 〜巨星を巡る複数惑星系: νOphとHD4732〜

佐藤 文衛[1]

（**要旨**）太陽系のように複数の惑星からなる複数惑星系は太陽系外でも多数見つかっており，惑星系の形成と軌道進化を理解する上で重要なサンプルとなっている．本稿では，我々が行っている中質量巨星を対象とした惑星探索から見つかった複数惑星系について，発見にまつわるエピソードを交えて紹介する．中質量巨星における複数惑星系は未だ数えるほどしか発見されていないが，ここで紹介するものを含めて興味深い惑星系が見つかり始めているので，今後の探索の進展に期待してほしい．

1. 視線速度法による系外惑星探索

惑星の引力による主星のふらつきを捉える視線速度法は代表的な系外惑星の間接的検出法であり，これまでに多くの系外惑星が発見されている手法の一つである．視線速度法は幅広い軌道長半径と質量の惑星に検出感度があり，軌道傾斜角が極端に小さい場合を除いて惑星を検出することができるため，惑星の検出率が高い．最近は，ケプラー宇宙望遠鏡の大活躍によって惑星のシルエットを捉えるトランジット法で膨大な数の系外惑星が発見されているが，太陽近傍の明るい恒星に対しては主として視線速度法で惑星探索が行われている．

視線速度法を用いた本格的な惑星探索は日本では2001年に岡山天体物理観測所（以下，岡山観測所または単に岡山）で始まり，中質量巨星を対象とした惑星探索で成果を挙げ続けている．すばる望遠鏡では，2004年に始まった太陽型星周りのホットジュピター探索（N2Kプロジェクト）や，地上トランジットネットワーク（HATNet，HATSouth）と連携したトランジット惑星探索などが成果を挙げており[1]，岡山とすばるを合わせてこれまでに合計34個の系外惑星が視線速度法によって発見されている．これらの一部の成果は以前この誌面で紹介したが[2]，今回はその後新たに見つかった惑星系，特に岡山で見つかった巨星の周りの複数惑星系について紹介したい．

太陽系は言うまでもなく複数惑星系であるが，このような複数惑星系は惑星系の形成とその後の軌道進化の過程を理解する上で大変重要である．例えば，惑星同士の重力散乱による惑星移動の痕跡はホットジュピターを含む複数惑星系の軌道配置に残されており[3]，また，惑星同士が平均運動共鳴の関係にある場合は円盤内での惑星移動が強く示唆される[4, 5]．単独惑星系と複数惑星系では惑星の軌道分布の統計的な特徴が異なるという示唆もあり，両者の軌道進化の違いが現れている可能性がある[6]．複数惑星系の長期的な軌道安定性を調べることも重要である．惑星系の軌道は視線速度変化の観測データを最も良く再現するものとして求められるのが普通だが，必ずしもそうやって求められた軌道が長期間（例えば主星の寿命程度）に渡って安定であるとは限らないので，逆に軌道の安定性から軌道要素に対して制限を加えることができる．

太陽型星の周りでは約30 %から50 %の巨大惑星が複数惑星系に属すると言われており[6]，また，海王星質量の惑星やスーパーアースなど比較的低質量の惑星からなる系では複数系の頻度はさらに高いと言われている[7, 8]．一方，中質量巨星や準巨星では，過去10年間の精力的な探索で数多くの惑星が発見されてきてはいるが，複数惑星系はまだ数えるほどである．しかしその少ない例においても平均運動共鳴にあると

1. 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
satobn@geo.titech.ac.jp

考えられる惑星系が複数発見されており[9, 10]，太陽型星同様，中質量星の周りでも軌道移動が起こっていることが強く示唆されている．次節では，我々が岡山で発見した二つの複数惑星系について，発見までの過程を交えて紹介する．

2. 岡山で見つかった巨星の周りの複数惑星系

2.1 へびつかい座ν星

岡山で最初に見つかった複数系は，へびつかい座ν星（ν Oph，HD163917）を周回する褐色矮星系である（図1, 2）[11]．岡山での惑星探索のサンプルはV等級で6等より明るいGK型巨星が中心なので，V等級で3.3等のK0型巨星であるこの星は当初からサンプルに入っており，2002年に観測を始めてすぐにこの星が周期500日程度の大きな視線速度変化を示すことに気がついた．振幅の大きさから判断して伴天体は褐色矮星である．そう思って喜んでいた矢先，アメリカのリック天文台でK型巨星の惑星探索を行っていたAndreas Quirrenbach氏のグループが，アメリカ天文学会でこの褐色矮星の発見を発表したことを知った．学会のアブストラクトのみで詳しいパラメータは書かれていなかったが，先を越されてとても落胆したのを覚えている．しかし，彼らの方が我々より先に観測を始めており，我々のデータではなぜかうまく軌道が決まらなかったのですぐには出版できそうになかったという事情もあって（実はこのことが，この系が複数系であることを示唆していたのである），諦めはついた．すぐに論文も出版されるだろうと思い，この星については少し熱が冷めてしまったのだが，非常に明るい星であったため曇りがちのときなどに観測していたので，結果的に年に数回は観測し続けることになった．

その後数年が経ち岡山のデータがたまり始めると，どうやらこの星は二つの褐色矮星をもっているようだということが分かってきた．しかも，二つの公転周期はちょうど6対1で平均運動共鳴に入っていることが示唆された．この時点でQuirrenbach氏らのグループはまだ論文を発表していない．こうなると俄然やる気が出てきて，岡山でデータを密に取り始めた．そんな折，2010年の7月にQuirrenbach氏から突然メールが届き，今度東京に行くので東工大を訪問したいとのこと．同氏の訪問を受け，東工大のオフィスで色々研究の話をしながら最近面白い発見はありましたかと尋ねたところ，「複数褐色矮星系を見つけた」というので，私は彼らが以前アメリカ天文学会で発表したあの星かというつもりでさりげなく「ν Ophですか？」と言ったら，その場の空気が凍ってしまった．私はまずいと

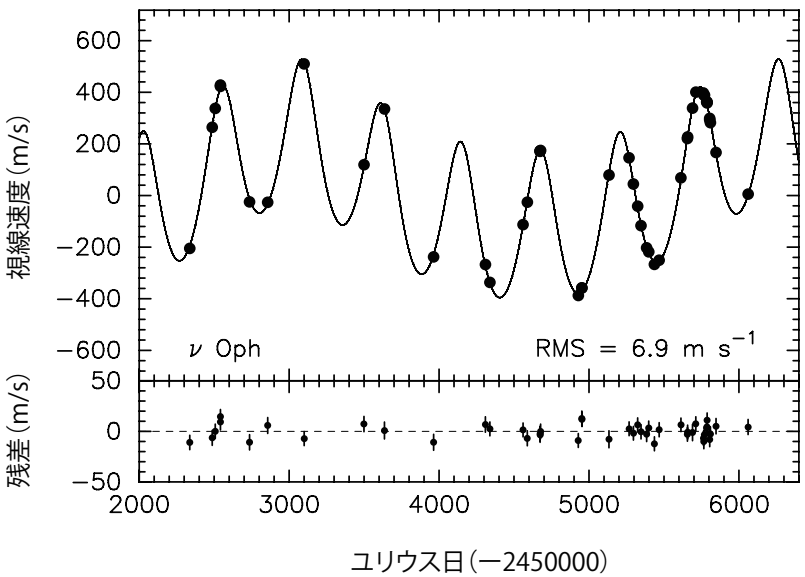

図1：へびつかい座ν星の視線速度変化．

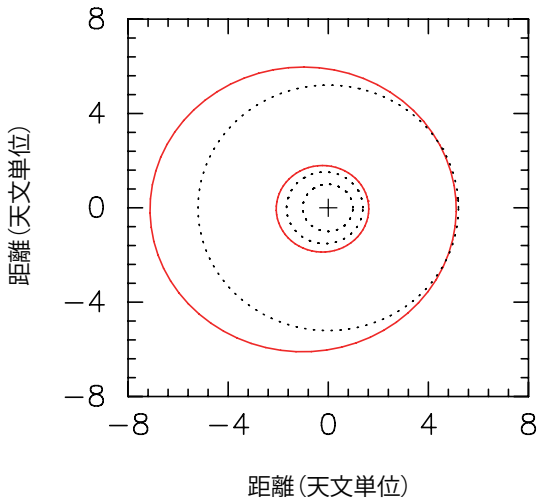

図2: へびつかい座ν星を周回する二つの褐色矮星の軌道（実線）．点線は内側から太陽系の地球，火星，木星の軌道を表す．＋は中心星の位置．

思って適当にごまかして話題を変えたのだが，果たして，その半年後には某研究会の集録に彼らの発見―ν Ophにおける褐色矮星系の発見―が載ったのであった[12]．お互い口が滑った形になり，結局私は先を越されたわけだが，その後我々は十分なデータをためて“査読付き論文”では先に独立発見として発表した．

さて，ν Ophの質量は約3太陽質量で，約24木星質量と27木星質量の褐色惑星がそれぞれ公転周期約530日と約3190日で公転している．そもそも視線速度法で伴星として発見される褐色矮星は少ないが，複数の褐色矮星からなる系はさらに珍しく数えるほどしか例がない．褐色矮星の形成シナリオはいくつか提案されており，ガス雲の収縮・分裂や星周円盤内での重力不安定などが有力とされているが[13, 14]，最近の理論研究によると巨大惑星と同様のコア集積によっても形成されると言われている[15]．ν Oph系の存在は褐色矮星質量の天体が円盤内で形成されうることを意味し，かつそれらが惑星のように軌道移動しうることを示唆している．

2.2　HD4732

岡山で発見されたもう一つの複数惑星系はK0型準巨星HD4732を周回する惑星系である（図3, 4）[16]．この星の場合も，2004年に観測を始めてすぐに惑星相当の振幅の視線速度変化を示すことに気がついた．しかし運の悪いことに，この星の赤緯はマイナス25度，岡山からは頑張っても半年間しか観測できない．さらに輪をかけて運の悪いことに，観測を数年続けるとどうやらこの惑星は公転周期がほぼ一年であるらしいことが分かった．周期が一年で一年に半年間しか観測できないということは，毎年同じ位相しか観測できないことを意味し，HD4732の場合は視線速度が増加する位相しか観測できなかった．しかし，視線速度の平均値は年々増加しているように見える．これが一つの惑星によるものなのか，それとも二つの惑星が存在するのか，観測開始から6年が経過しても分からなかった．

そんな折，2009年の秋にオーストラリア・ニューサウスウェールズ大のRobert Wittenmyer氏から突然メールがあり，翌年の春に東京に行く機会があるのでそのとき東工大を訪問して議論したいとのこと．面識はなかったが論文で名前は知っており，彼らは口径3.9 mのアングロ・オーストラリアン望遠鏡（AAT）を使って中質量準巨星周りの惑星探索を新たに始めていたので，ちょうど私も話を聞いてみたいと思っていたところだった．余談だが，彼は大変旅行が好きで毎年オーストラリアが冬の季節に北半球を研究旅行しているらしい．中でもアジア，特に日本が大好きなようで，その後もほぼ毎年日本に来ている．東工大に来るのはどちらかというと旅行のついでなのかもしれない．

彼との議論の中で，岡山で観測しているターゲットに赤緯の低いものがあり，軌道が決められずに困っているという話をしたところ，彼がAATでもっている観測時間の中で観測してくれるという．南半球のオーストラリアでは日本より数ヶ月間長く観測できるので，これまで欠けていた位相のデータが取れて軌道が決定できる．早速彼に天体名を教えて観測してもらうことにした．その後はこちらが期待した以上にデータを取ってくれて，結局AATのデータが決め手となり，この系は約2.4木星質量の二つの巨大惑星がそれぞれ公転周期約360日と約2700日で公転している複数惑星系であることが2012年の夏に判明した．

この結果を踏まえて，天体力学の専門家である東工大の長沢真樹子氏にこの惑星系の安定性を調べてもらった．長沢氏の素早くかつ詳細な計算の結果，この系は両惑星が同一平面上にあり同じ方向に公転している場合，軌道傾斜角5度以上，つまり惑星質量が28木星質量以下なら視線速度データから求められた軌道で安

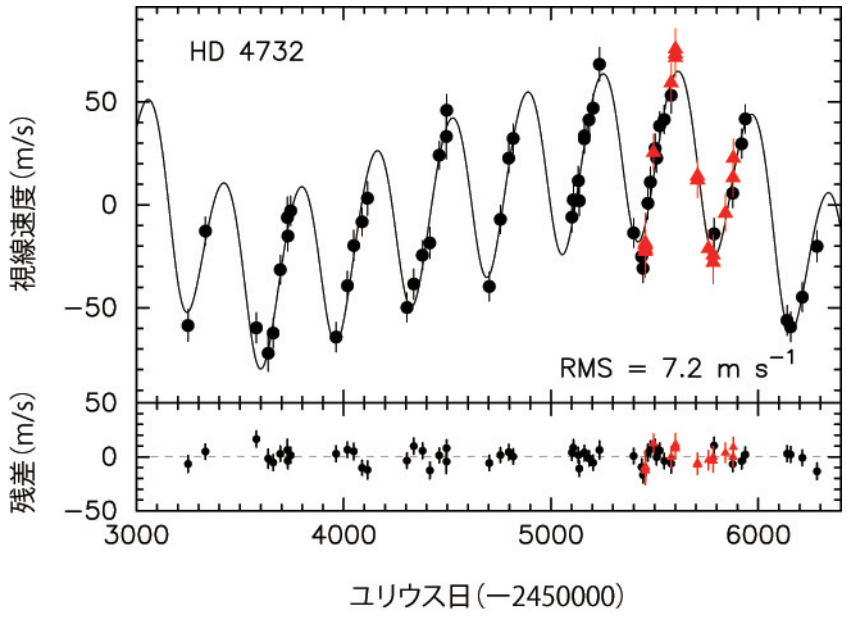

図3：HD4732の視線速度変化．●は岡山，▲はAATで取得されたデータ．

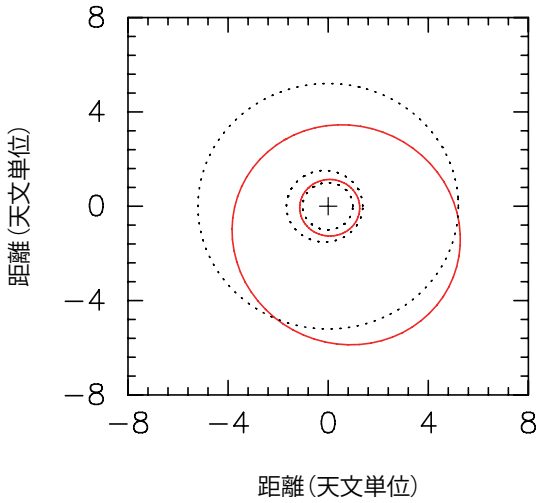

図4：HD4732を周回する二つの惑星の軌道（実線）．点線は内側から太陽系の地球，火星，木星の軌道を表す．＋は中心星の位置．

定であることが分かった．視線速度法では軌道傾斜角が分からないため惑星質量に不定性があり，もし軌道傾斜角が小さければ，つまり惑星質量が大きければお互いの重力が強くなって軌道が不安定になる可能性がある．このことを利用して，今回の場合は二つの伴天体は重くてもせいぜい軽めの褐色矮星程度であり，中心で水素の核融合反応を起こす恒星ではないことが示されたのである．

3. 今 後

中質量巨星の周りでは他にも興味深い惑星系や褐色矮星系が見つかっている．例えば，K2型巨星BD+20 2457では ν Ophと同様に褐色矮星が二つ見つかっており，当初3:2の軌道共鳴にある可能性が示唆されていた[17]．しかし，その後の詳細な軌道安定性解析によって視線速度データに対してベストフィットな軌道は不安定であり，安定軌道はベストフィットのものとは大きく異なることが判明した[18]．このような場合は，観測期間が短かったりデータが少なかったりで観測データから軌道がきちんと決まっていないことが多いのだが，別の可能性として面白いのは，二つの褐色矮星がお互い逆向きに公転していればベストフィットの軌道で安定だということである．視線速度観測では基本的に伴天体の公転の向きが分からないため，二つがお互いに同じに向きに回っている場合と逆向きに回っている場合とで主星の視線速度変化にほとんど違いが見られない．これらを区別するのは容易ではないが，長期間に渡る高精度の観測によってヒントが得られる

かもしれない.

岡山での惑星探索は今も続いており，前節に示した系以外にも興味深い複数惑星系が見つかりつつある．今後このような事例を蓄積していくことによって，中質量星周りの惑星系の形成と進化についてより理解が深まっていくものと期待される．これらについては，また別の機会に紹介できればと思う.

謝 辞

ここで紹介した成果は岡山惑星探索プロジェクトによって得られたものです．この場をお借りして共同研究者の皆様にお礼申し上げます.

参考文献

[1] Zhou, G. et al., 2014, AJ 147, 144.
[2] 佐藤文衛, 2009, 日本惑星科学会誌 18, 138.
[3] Ford, E. B., 2005, Nature 434, 873.
[4] Lee, M. H. & Peale, S. J., 2002, ApJ 567, 596.
[5] Kley, W. et al., 2004, A&A 414, 735.
[6] Wright, J .T. et al., 2009, ApJ 693, 1084.
[7] Mayor, M. et al., 2011, arXiv:1109.2497v1.
[8] Howard, A. W. et al., 2012, ApJS 201, 15.
[9] Johnson, J.A. et al., 2011, AJ 141, 16.
[10] Trifonov, T. et al., 2014, A&A in press (arXiv:1407.0712).
[11] Sato, B. et al., 2012, PASJ 64, 135.
[12] Quirrenbach, A. et al., 2011, in AIP Conf. Proc. 1331, 102.
[13] Bate, M.R., 2000, MNRAS 314, 33.
[14] Boss, A.P., 2000, ApJ 536, L101.
[15] Alibert, Y. et al., 2005, A&A 434, 343.
[16] Sato, B. et al., 2013, ApJ 762, 9.
[17] Niedzielski, A. et al., 2009, ApJ 707, 768.
[18] Horner, J. et al., 2014, MNRAS 439, 1176.