



ベガの話

竹田 洋一

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takeda.yoichi@nao.ac.jp

昔から人々に親しまれており最もよく研究されている星の一つであるベガについて、伝承などの歴史的背景とともに、観測技術の向上や理論モデルの進歩がめざましい現代天文学が明らかにしたその最新の描像を筆者自身のグループによる研究成果も交えて紹介する。中国と日本の七夕伝説におけるその役割、測光の絶対標準星としての重要性、見かけの金属欠乏の原因、絶対自転速度の決定にまつわる最近の論争の経緯、赤外線観測で見いだされた星周ダスト円盤の発見と惑星系形成との関係、などに特に焦点を置いて解説する。

1. 織女の星

夏の宵に空を見上げてみよう。頭の真上に青白くひとときわ明るく輝く星を認めることができるだろう。それこそが本文の主役たる、こと座のアルファ星、通称ベガである。夜空で親しまれている明るい星はいくつもあるが、見え方や季節が違うことでそれぞれ独特の個性を醸し出している。凍てつく冬に低い位置でキラキラと白く光るシリウスはその野趣あふれる印象から中国では天の狼(天狼星)と呼ばれたほどであるが、このベガは清々しい夏の夜に中天高く堂々と位置しつつ放つその優しい輝きは女王の気品を感じさせる。ほとんど同じ温度で同じ色に見えるはずなのに、白っぽいシリウスに比べてベガは確かに青白く目に映るのは季節の違いによる目の錯覚だろうか。

この星を一躍有名にしたのは、古代中国に生まれたいわゆる七夕伝説であろう。天の帝の美しい娘は機織りの名手として名高い働き者だった。日夜動きづめで粧う暇もないのを天帝は憐れみ、女としての幸せな日々を送れよと、河の対岸の牛牽きの若者と妻合わせた。しかし幸せに浮かれた若き二人は仕事も忘れて日夜戯れ合うばかりになった。怒った天帝は兩人を河の両岸に引き離して逢

えなくしてしまう。嘆き悲しむ二人を憐れんだのは鵲(かささぎ)であり、この鳥は一年に一度7月7日に自分たちの羽を広げて橋を造って天の河に渡してやり、二人のこの一日の甘い逢瀬のために一肌脱ぐというものである。この時期に鵲の羽が抜けるのはそのせいだと伝えられる。この河で隔てられた織女と牽牛こそ天の川の両岸に位置する二つの一等星、ベガ(おりひめぼし)とアルタイル(ひこぼし)にほかならない。

この伝承は奈良期以前にはわが国にも伝わっていたが、こちらでは独自の性格に色づけられてくる。元々の中国版では着飾った織女が立派な牛車に乗って鵲の橋を渡って対岸の牽牛に会いにくる構図であった(烏鵲河を填め橋を成して織女を渡す: 淮南子)。しかし当時の通い婚(妻問い婚)の風習ではこれはとても考えられなかったに相違ない。数々の歌にも詠まれているように、われわれの祖先が思い描いたのは、ただひたすら待ち続ける織女をめざして小舟を操りながら天の河を渡って行く牽牛の姿であった(天のかは霧立ち渡りひこぼしの楫の音聞こゆ夜の更けゆけば: 万葉集)。当時の女性にとっては頭の中を占めていたのは慕う男性が訪ねてきてくれるかどうかという祈りにも似た念いであったろうが、織女はそれをかなえ

てくれる信仰的存在にまでも昇華されていき、七夕の夜には願いをかけた。そしてそれは機織りの「糸」の縁で、蜘蛛にまで運命を託し、巣張りで物事を占う蜘蛛占いにまで及んだ（わが背子が来べき宵なりささが根の蜘蛛の行い今宵しるしも：衣通姫・日本書記）。かくして織女星は地域・時代の違いによってさまざまな形で語り継がれてきたのである。

2. 標準たる存在

それでは近代天文学ではこのベガはいかに位置づけられてきたのか。それは頭上の天心に堂々と輝く見え方にふさわしく、「絶対基準としての星」である。天文学の基本は色々な物理量を測定することであるが、極めて大きな範囲の数と広がりを持つ性格上、まず足がかりとなる基準（原点）を決めてそれに対して相対的な測定を行ってもっと広い範囲に手を伸ばし、そこでさらに二次的な基準を設定してそれを基にもっと先へ…というやりかたがとられる。よく知られた例が天体までの距離の測定であり、三角視差で直接距離を測定した星を基準に、セファイド変光星、銀河中で最も明るい星、銀河そのものの明るさ、…のように遠くに行くに従って用いる基準が変わる「宇宙距離梯子」の方法がとられるが、常に一段下位のものがすぐ上の基準の基礎になっているので、最下段の基準は（これが変わると全部に波及するという意味で）最も大切である。もちろん三角視差についてもベガは（白鳥座 61 番星、ケンタウルス座 α 星と並んで）19 世紀前半に測定が試みられていち早く成功した歴史ある星の一つであるが、この星の真の重要性は天体物理観測の基礎である測光という分野において果たしている原点的役割にあるといえよう。

一つの星のみに対してその星の明るさを測ること（絶対測定）は非常に難しいが、その星と似通った比較星とともに観測してその相対的な差を測定することはたやすいので、その比較星の明る

ささえわかっていれば目的の星の明るさも求まる。実はベガはこのための最も基本的な絶対エネルギー分布の原点的基準星になっている。つまりこのベガを基にして二次基準星が定義され、さらにそれを基に…というように全天の至る所に測光の比較に用いるための星が準備されているのである。もちろん肝心のベガの絶対的なエネルギー分布は黒体（空洞輻射体）から放射されるエネルギースペクトルと慎重に照らし合わせて行う極めて微妙で難しい実験によって別途測定されねばならないのだが、複数のグループの結果は現在ではほぼ 1% 程度（等級でいうと 0.01 等）以内の精度では一致している²⁾。

また、ベガはカラー（色）のシステムの実用上の基準になっていることも忘れてはならない。たとえば最もよく使用されているジョンソンの **UBVRI**…システムではベガに対応する星（厳密に言うところ赤化を受けていない種族 **I** の **A0V** 型星の平均）のカラーがゼロになるように決められているので實際上 **U-B**, **B-V**, **V-R**, **R-I**, …などの値はほとんど 0 になる。さらにベガの **V** 等級自体も +0.03 等と同じくゼロに近いので覚えやすい。

スペクトル分類においては、ベガのスペクトルは規則正しく並ぶ水素のバルマー線で特徴づけられ、**A0** 型と分類されているが、これは水素の線が最強になるスペクトル型である。恒星のスペクトル分類は 19 世紀末以降に分類の整理がなされ、温度系列順に **O-B-A-F-G-K-M** と並べ替えられて、今日でも残っているハーバード分類が確立したという経緯があるが、それ以前の萌芽期ではとりあえず見かけの特徴で **A**, **B**, **C**, …とアルファベット順に記号づけられていたのである。もちろんベガは現在の **MK** スペクトル分類では **A0V** 型（**A0** 型の主系列星）の標準星となっているが、見だ目の分類でも「いの一歩」にきたというのはいかにもこの星の基本的性格を表しているようであらざるを得ない。

このようにベガは恒星研究の標準たる存在と見

なされているが、このためには①時間的な変動を示さず安定であること、②それ自身異常ではなく普通の標準的な星であること、を暗黙の前提にしていることを忘れてはならない。実は①の時間的不変性については「～1時間程度のオーダーのタイムスケールで百分の数等程度の微小な変光があるのでは？」との報告が過去になされたこともあった^{3),4)}。しかしその後追試がなされたとは聞いていない。これははっきり言って難しいからであり、ベガはあまりに明るすぎて普通用いられる天文観測機器では精密な測光観測は困難で、また適当な直接比較星も見つからない（あまり大きく明るさの違わない比較星を用いるのが測光の原則である）という皮肉な事情を反映している。これを確かめるにはいくつか明るさの段階の異なる数多くの標準星とともに注意深い観測を続ける必要がある（最近主流の CCD ではなくむしろ光電測光の手法のほうが適当か）、こういう地道な研究はむしろアマチュア天文家の方々にふさわしいテーマかもしれない。もしベガの明るさの時間変動がはっきりと確認されたら恒星物理学への有意義な寄与となるであろう。もっともそれは原点の揺らぎを意味するので観測天文学者にとってはあまり心持ち良くないかもしれないが…

3. 金属欠乏の謎

それでは上に述べた②の条件についてはどうだろう。ベガは普通の星なのか？ここでいう普通というのは同種の星と比べて特異な性質をもたないこと、つまり標準的な A0 型の星かどうか、ということである。実は A 型近辺の上部主系列の星には明らかな種族 I の若い星であるにもかかわらず表面の化学組成に異常を示す化学特異星が少なからず存在するのだが、この仲間ではないと言い切れるだろうか。（この特異性の原因はまだはっきりとはわかっていないが、磁場が存在したり自転の遅い星の安定した外層大気では上向きの輻射力と下向きの重力のバランスの崩れに応じて

元素が浮かび上がったり沈んだりすることによって大気中で異常組成が生じるといういわゆる「元素拡散分離機構」が働いているのではないかとの説が有力視されている。）

さて、ベガは眼視のスペクトル分類では特異星と分類されたことは一度もない。それどころか上述したように A0V 型の標準のテンプレートになっているくらいである。しかし精密な化学組成の議論をするには高分散スペクトル（つまり波長分解能の高い分光器を用いて光を何万色にも分解したスペクトル）を解析しなければならない。太陽が種族 I の星の典型的な化学組成をもつと考えられるので、それと比較して大体一致するかどうかを調べれば良い。もっともベガ-太陽の組成差を求めるのは必ずしも容易ではないことは断っておきたい。つまり両星はタイプがかなり違うので（それぞれ表面温度は 1 万度と 6 千度）使えるスペクトル線が大きく異なり、直接の相対差解析（高い精度が約束される）ができないために、スペクトル線遷移確率や大気パラメーターの誤差に結果が大きく影響されるからである。

元素（金属量）の代表格である鉄についてのベガ対太陽の組成差（ $[Fe/H]$ ）を求めた文献はこれ

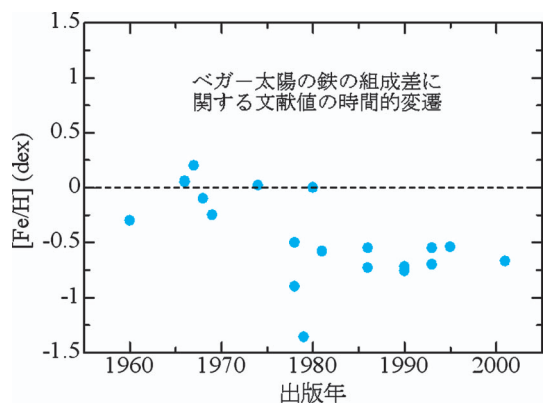


図1 これまでの色んな文献で発表されたベガの鉄組成（ $[Fe/H]$ ：太陽の鉄組成との差で表したもので単位は dex）を出版年に対してプロットしたもので、データは主に参考文献 5 から取ったが最近の値も付け加えてある。

まで数多くあるが⁵⁾、それぞれについてその値を出版年に対してプロットしたのが図1である。これを一見してわかるように、1960年から70年代にかけてはベガの鉄組成はほぼ太陽値の回りに散らばっていたが、1980年頃を境にして傾向は一転し、それ以降は $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.6 \text{ dex}$ あたりに値は収斂してきている。つまり「初期の頃の『ベガ \approx 太陽組成』は間違っていて正しくは太陽の約四分の1程度の金属欠乏である」と結論せざるをえないのだが、これはおそらく1970年代頃から①鉄スペクトル線遷移確率の大きな系統誤差（実験における励起温度見積り誤りによる）の存在が明らかになりその大幅な改訂がなされたこと、②恒星大気構造計算と組成解析のための汎用プログラムコードが公開されて世界に広まりモデル大気を用いた細密解析（伝統的な成長曲線解析よりずっと信頼のおける結果が得られる）を行うための敷居が低くなった、という歴史的事情（つまり1980年代以降は解析の信頼性が格段に向上した）を反映しているものと思われる。ただ昔の粗い解析では散らばりの大きいデータ点に見た目で成長曲線を合わせるというかなり主観的な要素も強かったので「標準星のベガはノーマルに違いない」という先入観も少しは働いたのではなかろうか。

星の転生輪廻（星間ガスの金属量は最初はほぼゼロに近かったがガスから星が誕生してその生涯あるいは死の際に生成した重元素を周りに放出してガス中の金属がより富裕になりそのガスからまた星が生まれる...）の繰り返しで銀河系ガスの金属量は時間が経つにつれて徐々に増加していくので、ずっと昔の $\sim 50\text{-}100$ 億年前頃に生まれたかなり老いた星ならその当時のガスの性質を反映して金属欠乏になっていてもおかしくない。しかしベガは太陽の約2倍くらいの質量で年齢がせいぜい数億年程度の若い星（年齢45億年の太陽よりはずっと若い）である。それがどうして太陽と比べてたった四分の1の金属量しかもたないのか？

実はA型星にはうしかい座ラムダ星に代表さ

れる λBoo 型と呼ばれる特異星グループがあり、鉄など多くの重元素に顕著な金属欠乏を示す一方、軽元素（炭素、酸素、窒素など）はその欠乏にあずからないという性質をもつものである。この原因についても諸説あるのだが、星自体に起因する組成異常ではなく、星間ガスの降着によって生じた外因的なものではないかとの説⁶⁾が最近有力視されている。つまり星間物質では鉄などの重元素は凝縮しやすいので固体微粒子（ダスト）の中に潜り込んでしまい、凝縮しにくい水素など軽元素はガスの状態のまま残る傾向にある。（したがって星間ガスは水素に対して重元素が少ないので金属欠乏になっている。）星が星間物質の中を通り過ぎるとき、輻射圧を受けやすいダストは遠くに吹き飛ばされる一方、星間ガスはそのまま星に降着するので星の表面は星間ガスの組成を反映して金属欠乏の特徴を示すというわけである。

この仮説がベガにも適用されるかどうかを見るためにはベガの組成を星間ガスの組成と比較して同様の特長が見られるかどうかを調べればよい。筆者は、次節で述べるベガの超高 S/N 比スペクトルを用いて、このチェックの鍵となる三つのアルカリ元素 [Li (リチウム), Na (ナトリウム), K (カリウム)] の化学組成（これまでほとんど調べられたことがなかった）を決定した⁷⁾。図2は結果として得られたベガの $[\text{X}/\text{H}]$ 値（他の元素は文献値）と代表的な星間ガス（へびつかい座ゼータ星方向）の $[\text{X}/\text{H}]$ 値を凝縮温度 T_c （固体への凝縮のしやすさを表す指標）に対してプロットしたものである。両者は値を直接比べることはできないので（星間ガスの重元素欠乏度にも星間物質の位置方向によっていろいろなものがあるし、降着によって生じた組成異常は降着物質と星元々の組成の混合になるだろうから）、各元素の $[\text{X}/\text{H}]$ 値相互関係の定性的傾向（組成パターン）に着目するわけであるが、星間ガスに見られる $T_c \sim 1,000 \text{ K}$ 付近を境にする傾向の変化がベガでも見て取れるであろう ($[\text{Na}/\text{H}] \approx [\text{K}/\text{H}] >$

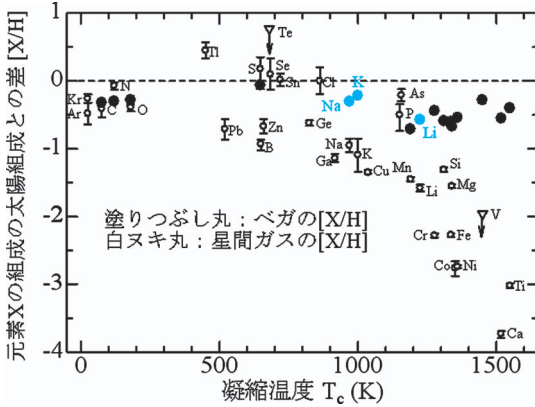


図2 ベガと星間ガス（へびつかい座ゼータ星方向）の $[X/H]$ 値（元素 X の組成値を太陽値との差で表したもので単位は dex）を凝縮温度 (T_c : 単位は K) に対してプロットしたものの、塗りつぶした大きめの丸はベガで白抜きの小さめの丸は星間ガスを表す。青色で示したものはベガの $[Na/H]$, $[K/H]$, $[Li/H]$ で筆者自身で決定した結果であり、他は文献値である。詳細は参考文献7を参照。

$[Li/H]$ ）。したがってベガの金属欠乏は星間ガスの降り積もりによる後天的な見かけ（外層のみ）の特性ではないかと考えるのは一つの説明として理にかなっている。

もう一つ注意すべきは、銀河ガスの金属量の時間につれての振舞いは（通常の化学進化理論が予測するような）必ずしも単調増加ではなかったと疑われることである。これは G 型巨星（ベガと同様の質量の星が進化して巨星になったもの）多数に対して組成解析を行った結果判明したことであるが⁸⁾、今から約 10 億年くらい前を境にして金属量が ~ 0.2 dex 程度低下したらしく傾向がうかがえるので（ひょっとしたらハローの金属欠乏原初ガスが大量に銀河円盤に落ち込んだのかもしれないなどと想像している）太陽より若い星の金属量はむしろ太陽より若干低いと考えたほうがよからう。実際、高速に自転している A 型星（自転の遅い星では顕著な特異性が発生していて初期組成を推定するには不向きなので）に対する組成解析でもこの傾向はおおむね確認された⁹⁾。したがって

見かけの欠乏のうち ~ 0.2 dex 程度分はこの効果が含まれていると考えるのが妥当だろう。

いずれにせよベガの大気金属量は太陽に比して約四分の一しかないことはほぼ確定的であるが、この事実一つをもってしてベガが特異な星だと結論するのは早計すぎる。実を言うと A 型星では何が普通の星か（そもそもそういう星が存在するのかということすら）わかっていないのが現状である¹⁰⁾。つまりスペクトル分類で（特異星でなく）通常の A 型と分類された星々でも、その化学組成を詳しく調べれば調べるほど程度の差こそあれそれぞれの星に固有の差異が検出されるのが常なのだ。ならばむしろ逆に考えよう。「この多種多様な個性こそが『普通の』A 型星の本質ではないか？」1万度という表面温度の A 型星では水素原子の連続吸収係数が最も卓越しており、大気の吸収係数 κ は最大の値をとるので、 $z(\tau=0)$ と $z(\tau=1)$ の差 (z は大気中の幾何学的高さで τ は光学的深さ) で定義される大気の幾何学的厚さはあらゆるスペクトル型の星の中で最小の値となる。この非常に薄い大気のため物質自体の量が本質的に少なく、ほんの少しの外界からの物質降着や内部の拡散分離のような組成変化の要因に対して鋭敏に反応し表面組成は多かれ少なかれ必然的にある程度の後天的変化を被るのが常なのではなかろうか。そういう過程にあずからずに星形成時の組成を厳密に保っている A 型の星があったとしてもそれはむしろ特殊なケースと見なしたほうがよいのではないか。この観点からすれば、化学組成についてもわれわれのベガは立派な標準的な星である。ただしそれは絶対の規範的存在という趣旨ではなく、他の諸々の A 型星と同類の仲間としてのグローバルスタンダード的存在という意味で。

4. 自転速度論争

ベガ（織女星）に相対して天の川の対岸に輝くアルタイル（牽牛星）は少し温度が低いが同じ A 型の主系列星 (A7V) であり、明るさがベガの約

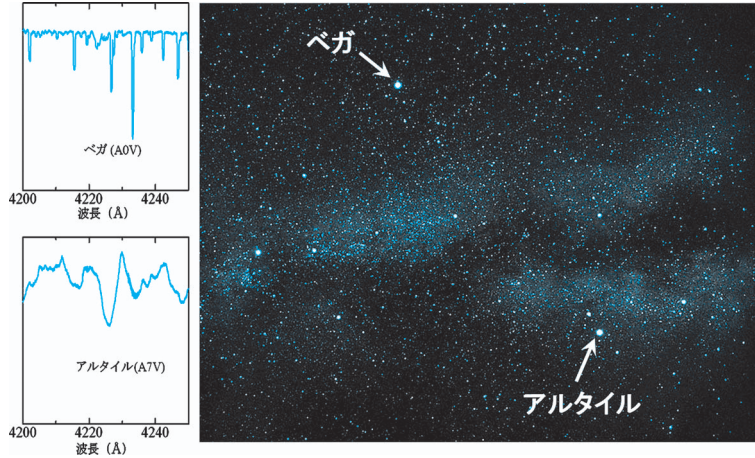


図3 天の川を挟むペガとアルタイル. 左に示したのは4,200–4,250 Å領域での両星のスペクトルの比較.

半分しかないので ($V=0.8$ 等) 若干見栄えが劣るのはやむをえないとはいえ、両者はほぼ同じタイプである。しかしスペクトルを見ると両者の間には歴然とした違いが見受けられる (図3を参照)。つまりペガはシャープなスペクトルを示すのに対してアルタイルはスペクトル線の幅が著しく広い。これは射影自転速度 ($v_e \sin i$: v_e は赤道自転速度, i は視線方向に対する自転軸の傾斜角) の違いを表している。つまり自転している星の表面の各点はわれわれから見て遠ざかっているものも近づいているものもあり、そこから出てくる光の波長はドップラー効果によりそれぞれ長波長側と短波長側にずれて観測されるから、各点の寄与を積分した全体光においてはスペクトル線の幅が広がるのである。逆に言うところの幅を測定することで $v_e \sin i$ の値を知ることができるのであるが、ペガでは約 20 km s^{-1} 程度なのに対してアルタイルは約 240 km s^{-1} と格段に大きい。つまりアルタイルが高速自転しているのは確実であり、実際に最近の干渉計の観測では、この星はあまりの自転の速さによる遠心力でいびつな平べったい楕円球になっていることが確認され、 i は約 60° で v_e は約 280 km s^{-1} であると報告されている¹¹⁾。これは実に限界速度 (それ以上速いと分裂してしまう) の約90%という猛烈な高速自転である。

それではペガはゆっくり自転しているのだろうか。実はひと昔前までは一般向けの天文の講義で「ひこ星は荒々しい男性のように猛烈に速く回っているのですが、おりひめ星はしとやかな女性らしくゆっくりとした自転なのです」といった解説がされることがよくあった。しかし、ここ十数年来でこの描像は覆されて、ペガも実際には高速で自転していることが判明したのである。つまり v_e はかなり大きいのだがわれわれの視線がほとんど自転軸の方向と一致していて (自転の極を真正面から円盤のほぼ真中に見る位置での観測となって) i が小さくなり射影因子 $\sin i$ の効果で $v_e \sin i$ も小さい値になったに過ぎない。ドップラー効果に効くのは速度の視線方向の成分であるから視線に垂直方向の成分がいくら大きくてもスペクトル線の幅には反映されないわけである。

この事実の判明はカナダのドミニオン天文台で得られた $\sim 2,000\text{--}3,000$ という非常に高い S/N 比のスペクトルにおいてペガの弱いスペクトル線の輪郭が奇妙な「なべ底型」をしていることの発見¹²⁾ がきっかけになった。なぜ高速自転星を極方向から眺めるとこのような輪郭になるかというと、フォン・ツァイベルの定理と呼ばれる局所有効温度 (T_{eff}) と実効重力加速度 (g_{eff}) の間に成立する $g_{\text{eff}} \propto T_{\text{eff}}^4$ という関係 (エネルギーが輻射で運

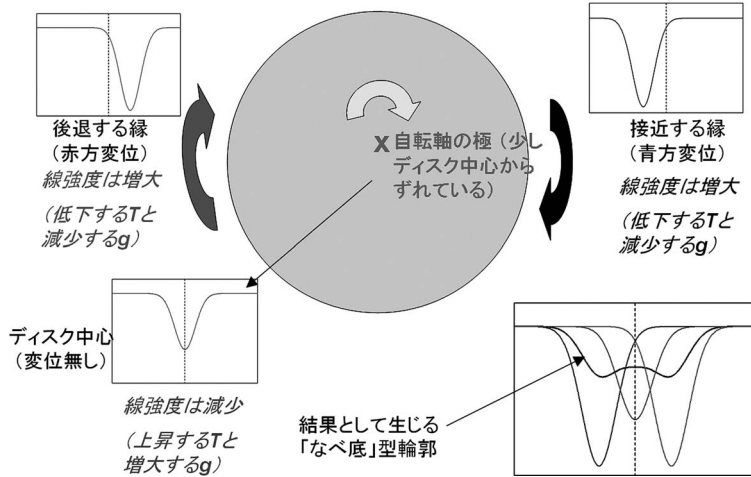


図4 自転軸に近い視線で極方向から見た高速自転星のスペクトル線輪郭が「なべ底型」の特殊な形状になる理由を説明するための模式図。

ばれている外層の場合)に起因する。これにより赤道では(遠心力で) g_{eff} は低下し逆に極では(偏平による極半径減少の効果で) g_{eff} は増加するから、赤道と極ではそれぞれ温度の低下と上昇という相反した効果が生じるのである。(特に赤道付近の輝度低下をもたらすので自転による重力減光とも呼ばれている。)ここで、数が多く代表的な中性鉄のようなスペクトル線は温度が低くなると強度が増大する傾向があることに注意されたい。これにより、ドップラー変位の比較的大きい低温の線近くからは深く強いスペクトル線の光、ドップラー変位のない高温のディスク中心からは浅く弱いスペクトル線の光、をそれぞれ寄与するので結局全体として積分された光ではエラの張ったような平べったい底の特徴的な輪郭が生じる(図4)。

この重力減光による輪郭変形の程度は当然 v_e の大きさに依存するので、理論モデルから計算したスペクトル線輪郭を観測と比較して v_e と i を分離して決定することが可能になる。これを最初に行ったのは上述の超高 S/N 比スペクトルの観測者であるドミニオン天文台グループ自身によってなされ、 $v_e = 245 \text{ km s}^{-1}$, $i = 5.1^\circ$ との結果が得られた¹³⁾。ところが、それから10年後になって、彼らは「先の結果は解析の手続きに誤りがあったので

新たな再解析を行った」と、 $v_e = 160 \text{ km s}^{-1}$, $i = 7.7^\circ$ の大きく異なる改訂値を発表したのである¹⁴⁾。

ただ問題はこれで収まらない。さらに事態を複雑にしたのはこれに引き続き干渉計グループの参入であった。複数基線の干渉計による観測からは恒星円盤の輝度分布の情報を得ることができるので、重力減光を定量的に見積もることで原理的には v_e の決定が可能である。それぞれ異なる干渉計(可視域の **NPOI** と近赤外域の **CHARA**)を用いて米国の二つのチームはこのベガの自転速度問題に取り組んだ^{15), 16)}。ここではそれぞれを便宜上 **NPOI** グループと **CHARA** グループと呼ぶことにするが、独立な両チームはそれぞれ ($v_e = 274 \text{ km s}^{-1}$, $i = 4.5^\circ$), ($v_e = 270 \text{ km s}^{-1}$, $i = 4.7^\circ$) というほとんど同一の解を与えたとはいえ、これはドミニオンのグループが最初に出した(間違った)解とは比較的一致しているものの再解析後に発表した(正しい)解とは大きく異なっていたのである。ロースケールの v_e ($\sim 160 \text{ km s}^{-1}$) とハイスケールの v_e ($\sim 250\text{--}270 \text{ km s}^{-1}$) の一体どちらが真の値なのか? 前者ならA型星としてはほぼ平均的な自転速度であるが、後者であればアルタイルと同様限界速度に近いかなりエキセントリックな猛烈自転になる。

この混乱した状況に鑑み、われわれ自身も線輪郭解析の手法でこの問題に取り組みたいと考えた。しかしドミニオングループが用いたベガの超高 S/N 比スペクトルはあいにく公開データとはなっていないので、自分たちで観測して調達しなければならなかった。そこで2006年の5月に川野元聡と大石奈緒子（国立天文台）の両氏に協力してもらって岡山天体物理観測所の HIDES 分光器を用いてベガの観測を行い、 S/N 比が $\sim 1,000$ – $3,000$ 、波長分解能が約10万、の広い波長域をカバーするデータを得ることができたのである。

HIDES の優れた性能のおかげで、星とフラットフィールドの両方において十分多数のフレームを足し合わせた以外には特に工夫を凝らすこともなく目的とする品質を首尾よく達成できたのは幸運だと思っている。このデータはデジタルスペクトルアトラスとしていち早く公開した¹⁷⁾。

高速自転星のモデルスペクトル計算に際しては (1) 重力ポテンシャルは中心に全質量が集中した場合を仮定し、星の表面の形状は実効重力の等ポテンシャル面（ロッシュモデル）、(2) 一様自転（微分回転はなし）、(3) 恒星表面で T_{eff} と g_{eff} の間にはフォン・ツェイベルの関係 ($g_{\text{eff}} \propto T_{\text{eff}}^4$) が成立、という三つの前提を置いた。われわれのモデルは M （質量）、 $[X/H]$ （金属量）、 v_e （赤道自転速度）、 i （自転軸傾斜角）、 R_p （極半径）、 $T_{\text{eff}, p}$ （極における有効温度）、という六つのパラメーターを含んでいる。しかし、問題に余りかかわらない M と $[X/H]$ を過去の文献を参考にそれぞれ2.3倍太陽質量と -0.5 dex に仮定し、さらに（よく決まっている）射影自転速度が $v_e \sin i = 22 \text{ km s}^{-1}$ という拘束条件と紫外域から近赤外域までのエネルギー分布の拘束条件を用いて自由度を減らすことで i , R_p , $T_{\text{eff}, p}$ を v_e のみの関数で表すことができる。つまり問題が v_e というただ一つのパラメーターの決定に絞込まれた。

そして観測される線輪郭を v_e の色んな値に対して計算した理論的線輪郭と比較して最もよく

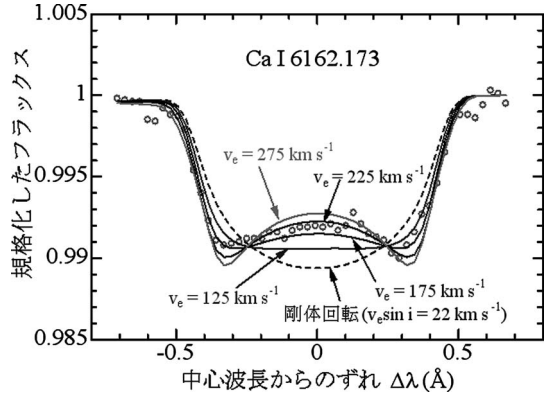


図5 赤道自転速度 v_e を決定するための輪郭フィッティングの一例で $6,162.173 \text{ \AA}$ の中性カルシウム線の場合。白抜き丸は観測された線輪郭、一群の線は種々の v_e の値に対して計算された理論的線輪郭である。

フィットするものを探して最適な v_e の解が定まる。この様子の一例を図5に示した。実際はこの手続きを数多くのラインに対して繰り返して統計的な議論を行うわけであるが、その結果赤道自転速度の解としては $v_e = 175 \text{ km s}^{-1}$ がベストである（これは $i = 7.2^\circ$ に対応）と決定された¹⁸⁾。つまりわれわれの解析の結論は「ベガの赤道自転速度 v_e は約 175 km s^{-1} でA型星として平均的な値でありドミニオングループが最近行った線輪郭再解析による 160 km s^{-1} という新しい解とよく一致するが、二つの干渉計グループの報告した 270 km s^{-1} とは大きな食い違いを示す」ということである。

この干渉計チーム達の結果との矛盾はいかに説明すべきだろうか。まず CHARA グループの論文¹⁶⁾を点検したところ、彼らの解析には重大な問題点があった。多数のパラメーターがからむこの問題で、彼らは（われわれが行ったような）きちんとした解の搜索戦略を立てて取り組まなかったために、ほんの限られたパラメーター空間しか調べなかった。つまり猛烈に速く自転しているということを当然のものとして、最初から限界自転速度の80%以上、つまり $v_e \geq 200 \text{ km s}^{-1}$ の領域でしか解を探していなかったのである。これではわれわれの結果と一致しないのは当然である。

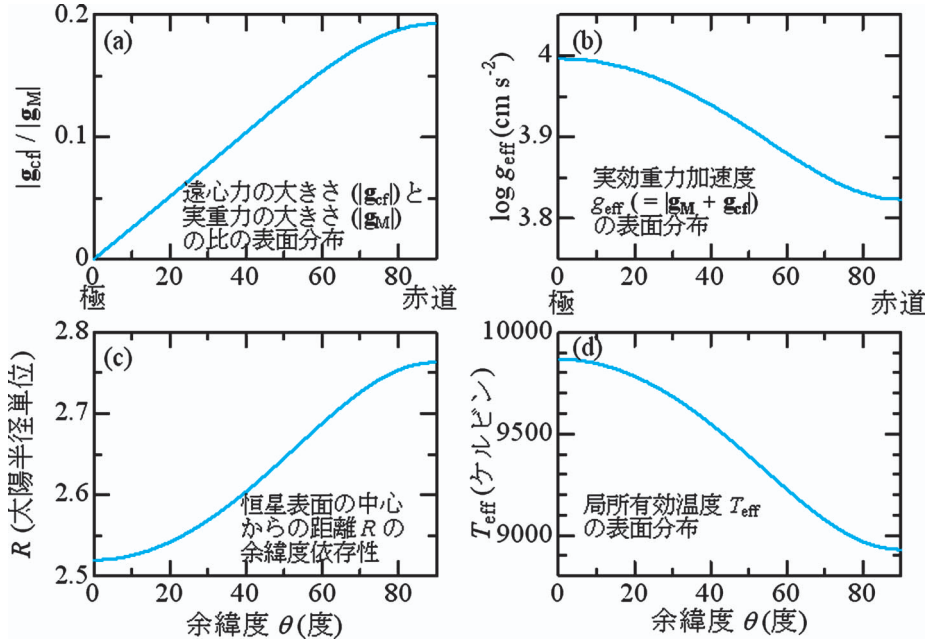


図6 われわれの求めた $v_e \sin i = 175 \text{ km s}^{-1}$ という最適解のモデル (文献 18) に基づくベガの表面における各物理量の余緯度 θ ($\theta = 0^\circ$ が極で $\theta = 90^\circ$ が赤道) への依存性. (a) 遠心力加速度の大きさ $|g_{cf}| \equiv v(\theta)^2/R(\theta)$ と実重力加速度の大きさ $|g_M| \equiv GM/R(\theta)^2$ [G は重力定数, M は質量] の比. (b) 実効重力加速度 $g_{eff} \equiv |g_M + g_{cf}|$ の表面分布. (c) 半径 R (恒星表面の中心からの距離). (d) 局所有効温度 T_{eff} .

一方 NPOI グループの仕事に関してはわれわれはほとんどコメントできない. 残念なことに彼らの論文¹⁵⁾は結果のみを提示していかに解を探したとか誤差をどう見積もったかなどの解析の詳細については一切述べていないのである. 速報誌での掲載であるのでページ数の制限のためにやむをえなかったのかもしれないが, それなら別途本格的な論文を発表するなりして自分たちの解析の手順を詳かにすべきではないか. ちなみにこのグループはつい最近われわれと同様に線輪郭解析の手法でもベガの v_e 決定に取り組んだ¹⁹⁾. そして彼らは自分たちが NPOI 干渉計観測で結論した $v_e = 274 \text{ km s}^{-1}$ では重力減光の効果が大きく働きすぎてベガのなべ底型輪郭がうまく説明できないこと (なべ底の「U型」を通り越してむしろ「W型」になる), したがってわれわれの得た結果と本質的に一致すること, を認めた. しかし意外にも彼らはまだ自分たちの解は正しいものと固執してい

る. つまり, ベガは猛烈自転なので表面にはハリケーンのような毎秒 10 km s^{-1} 程度の速度の暴風が吹き荒れていて (巨視的乱流) この速度分布関数が線輪郭にたまり込みとして働くために本来の W 字型輪郭が「なまらされて」観測されるような U 字型になっているのだろう, と解釈しているのである. 率直に言ってこれはアドホックな言い訳としか見えないのでどうもいただけない. 自分たちの解に自信があるならもちろんそれは結構なことであるが, それなら少なくともいかにそれが導かれたかの詳細を明らかにして世に問うべきであろう. それを行わずして無理な仮説を持ち出して自分たちの出した数字を正当化しようとするのはいかなものだろうか.

このようなわけでこのベガの自転速度問題についてはまだ完全に決着がつくには至っていない. しかし筆者は自分たちの出した解 ($v_e = 175 \text{ km s}^{-1}$) がおそらく真実に近いであろうと考えてい

る。干渉計グループの出した著しく大きな値を完全に否定することはできないが、複数あるパラメーターの解の追い込みかたがまずくて偽の見かけの解を真の解と混同したのではないかの疑念は禁じえない。いずれにせよ今後さらなる追試がなされるであろう。ともあれ、現時点においてはわれわれの結果に基づき、牽牛星のアルタイルは確かに男性的な猛烈な高速自転（遠心力によるつぶれ方は半端でない）かもしれないが、織女星のベガはさほどでもなく A 型星として平均的な速さのまっとうな自転速度（つぶれの程度もマイルド）であると言っておこう。つまり、図 6（われわれの得た最適自転速度解に対応するモデルに基づいて半径や有効温度や重力加速度などの諸物理量がベガ表面の緯度に応じてどのように変化しているかを示したもの）からわかるように、赤道半径は極半径より自転の遠心力で約 10% 大きく、実効重力加速度 g_{eff} は赤道では極より約 0.2 dex（約 30-40%）低いので有効温度 T_{eff} は赤道では極より約 900 度（約 10%）低下している程度である。いずれも自転の影響ははっきりと顕れてはいるものの、アルタイル 11) のような（赤道では極より温度が ~20% も低く、赤道半径が極半径より ~30-40% も大きくなっている）極端な変形と温度コントラストではない。

5. 夢膨らむ星へ

ベガはその見栄えの立派さで目立つだけに特に人々に親しまれているが、特別変わっていることもなく至って普通の標準的な星といっても良いだろう。しかし最もよく調べられている星の一つでもあるがゆえに、新分野を切り開くような重要発見の立役者となったこともある。

1983 年に打ち上げられた世界初の赤外線天文衛星 IRAS はベガから放射される遠赤外線強度が表面温度 1 万度の A0 型星としてはとても説明できないような過剰を示すこと、そしてこの遠赤外線は星から約 100 天文単位程度離れた領域から

放射されていることを発見した²⁰⁾。これは低温の固体微粒子（ダスト）による円盤が星周を取り巻いていることを意味する。これらの微粒子は星に落ち込んだり輻射圧で吹き飛ばされたりして失われていくので円盤として存続するためには絶えず供給されねばならず、それは微惑星が衝突しあってくっついて惑星形成に至る過程で生成するもの、つまりこの円盤は原初惑星系円盤ではないかと考えられた²¹⁾。これらのニュースは「あのベガに惑星が存在するのか?!」と人々の夢をかき立てたであろう。惑星科学の権威で数々の一般解説書も執筆した天文学者であるカール・セイガン博士が 1985 年に発表した SF 小説「コンタクト」はこの背景があったからこそ生まれたものと思われる。「20 世紀末のある日ニューメキシコの電波天文台が奇妙な電波信号をキャッチした…発信源は 26 光年離れたベガからのものと判明…その信号を特殊処理すると映像らしきものが現れた…そこに映っていたのは何と意外にも、あの…」というつかみで始まるストーリーは読者を強い力で魅き込む格調高い傑作である。（ジョディ・フォスター主演の映画も製作されたが、こちらもそれなりの見応えはあるものの、残念ながら小説の原作には及ばないと思う。）

このベガのような遠赤外での過剰を示し、ダスト円盤の存在を示唆する星は今日では何百個も発見されており、「ベガ型星」と呼ばれて、星惑星形成の研究における鍵となる天体として特に着目されている。ベガの円盤に関していうと最近ではスピッツァー宇宙望遠鏡などの観測でさらに詳しいことがわかってきて、ダスト円盤は従来思われていたよりもずっと遠方まで伸びていることが判明し、これは惑星が現に形成しつつある場ではなく、惑星物質の残骸が集まったいわゆる「デブリ円盤」（太陽系でいうとカイパーベルトに対応）であろうとの見方が強まってきた²²⁾。とはいえ、ベガ惑星の存在の可能性は大いにあると見ても良い。実際にサブミリ波での観測でベガのすぐそばの北東の方

角に明るく光る領域が確認され²³⁾これが惑星の存在によって引き起こされた現象ではないかと議論を引き起こしたこともある。まだ直接惑星が確認されるには至っていないが、近い将来の発見を期待したい。[ちなみにベガと同じく IRAS で赤外超過が検出された明るいベガ型星である HR 8799²⁴⁾ガカ座ベータ星²⁵⁾についてはつい最近「惑星の存在を確認」とのニュースが流れた²⁴⁾。]

夏の夜に頭上高く光るベガは7月7日の七夕祭りとのからみもあって典型的な夏の風物詩になっているが、遠い未来にはかなり様子が変わってくる。地球は自転の遠心力のせいでわずかに平べったいミカン型の形状をしているので、太陽の引力が相殺せずに生じるトルクが地球の自転軸の首振り運動を引き起こす。これにより天の北極（地球の自転軸方向）は黄道の北極（地球の公転軸方向）の周りを約 26,000 年かかって一周するので、時の流れとともに星座の見え方も変わるのである。今から約 12,000 年後にはベガはその頃の天の北極からわずか 5° しか離れていないので北の空にさして位置を変えずに 1 年を通して夜空に輝き、（現在のこぐま座アルファ星のように）方位を示す重要な星とされるはずである。厳寒の冬に天の川の中の北極星ベガを見上げて七夕伝説を語る未来人の姿を思い浮かべるのもエキゾチックで面白い。いずれにせよ時を超えて変わることのないのはこの星に対する人々の親しみと基準の恒星としての信頼感であろう。

参考文献

- 1) Burnham Jr. R., 1978, in "Burnham's Celestial Handbook," Vol. II (Dover, New York), p. 1137
- 2) Gray D. F., 2005, in "The Observation and Analysis of Stellar Photospheres," 3rd ed. (Cambridge University Press, Cambridge), chapter 10
- 3) Fernie J. D., 1981, PASP 93,333
- 4) Kozyreva V. S., Moshkalev V. G., Khaliullin Kh. F., 1981, SvA 25, 705
- 5) Cayrel de Strobel G., et al., 1992, A&AS 95, 273
- 6) Kamp I., Paunzen E., 2002, MNRAS 335, L45
- 7) Takeda Y., 2008, MNRAS 388, 913
- 8) Takeda Y., Sato B., Murata D., 2008, PASJ 60, 781
- 9) Takeda Y., et al., 2008, JKAS 41, 83
- 10) Griffin R. E. M., 2008, in Proc. CP#AP Workshop 2007 [Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso Vol. 38] (Astronomical Institute of Slovak Academy of Sciences, Slovakia), p. 93
- 11) Monnier J. D., et al., 2007, Science 317, 342
- 12) Gulliver A. F., et al., 1991, ApJ 380, 223
- 13) Gulliver A. F., Hill G., Adelman S. J., 1994, ApJ 429, L81
- 14) Hill G., Gulliver A. F., Adelman S. J. 2004, in IAU Symp. 224, The A-Star Puzzle, ed. by J. Zverko, et al. (Cambridge University Press, Cambridge), p. 35
- 15) Peterson D. M., et al., 2006, Nature 440, 896
- 16) Aufdenberg J. P., et al., 2006, ApJ 645, 664 (erratum 651, 617)
- 17) Takeda Y., Kawanomoto S., Ohishi N., 2007, PASJ 59, 245
- 18) Takeda Y., Kawanomoto S., Ohishi N., 2008, ApJ 678, 446
- 19) Yoon J., et al., 2008, ApJ 681, 570
- 20) Aumann H. H., et al., 1984, ApJ 278, L23
- 21) Harper D. A., Loewenstein R. F., Davidson J. A., 1984, ApJ 285, 808
- 22) Su K. Y. L., et al., 2005, ApJ 628, 487
- 23) Holland W. S., et al., 1998, Nat 392, 788
- 24) Marois C., et al., 2008, Science 322, 1348
- 25) Lagrange A.-M., et al., 2009, A&A 493, L21

The Story of Vega

Yoichi TAKEDA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Vega is one of the most familiar and best studied stars. We here present its historical background and the new remarkable features, which have recently been revealed by the progress of modern astrophysical research thanks to new observational techniques as well as developments in theoretical modelings. Main emphasis is placed upon describing its mythological love stories in China as well as in Japan, its importance as the basic photometric standard, the puzzling deficiency in the photospheric elemental abundances, the recent controversy concerning its absolute rotational velocity, and the existence of the circumstellar dust disk along with its connection to planetary system formation.