

身近な太陽たちの世界：太陽型恒星の高分散分光

竹田 洋一

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takedayi@cc.nao.ac.jp

岡山観測所の高分散分光器 HIDES はすでに所期の性能を十二分に発揮することが示されたが、望遠鏡の集光力の不十分さから比較的明るい恒星を主たるターゲットにせざるをえない。この現状で我々がこの分光器で天文学にいかなる貢献をなしうるかを考えたとき、近傍の太陽型恒星の研究が一つの重要な例として挙げられる。これらの星々を理解することは我々の母たる太陽のことを深く知ることにもつながるであろう。太陽スペクトルから始まった近代天体分光学の発達史を組成分析を中心に振り返るとともに、恒星としての太陽の位置づけという観点に重点を置いて、我々自身が HIDES で行っている研究の成果を交えつつ太陽型恒星の研究の現状を述べる。

1. 恒星の一つとしての太陽

我々の太陽は毎朝東の空から昇り、日中はまぶしいばかりに明るく輝いて地上に光をもたらし、そして夕刻になると西の空に沈んでいく。それに入れ替わるかのように夜の闇が支配すると夜空には無数の星々がきらめくようになる。我々の多くはこれら恒星が太陽のような巨大な燃えるガス球であることを現代天文学の知識として知っている。また歴史をひもとくと、すでに 300 年以上前に夜空の星々は極めて遠方にある太陽なのだという認識を持っていた人々がいたらしい。ただもちろんこれが科学的に確認されたのは 19 世紀に恒星までの距離が年周視差から測定され、星々のスペクトルが太陽のスペクトルと比較されるようになってからのことである。

しかし、我々の太陽は本当に無数の星々の中では全く普通の一つの恒星なのだろうか？ この問題は我々自身の存在ともかかわってくる根源的な意味合いを持つ。恒星進化論の知識が教えるところによれば、どんな恒星の物理量も (1) 初期質量、(2) 初期角運動量、(3) 初期化学組成、(4) 年

齢、の四つが与えられれば一意的に決まるものとされている。もしそうであれば現在の太陽とほぼ同じパラメーターを持つ恒星の諸特性は太陽で見られるものとほとんど同じであることが予想されよう。しかしながら太陽は少なくとも我々から見れば特別な存在である。太陽系という惑星系を従え、そのうちの一つである地球には我々人類をはじめとする種々の形態の生命の存在に適した環境が成立している。このことはこれらの初期条件さえかなえば必然的に起こることなのだろうか、それともまだ何か隠されたパラメーターがあるのだろうか。この疑問に答えるためには我々の太陽を同タイプの星々たちと注意深く比べて何か差異があるかどうかを調べる必要がある。

我々は岡山観測所の HIDES 分光器を用いて惑星を持つ恒星の研究を行ううちにどうしても太陽の同種の星々の中での位置づけということに明らかにする必要性を痛感した¹⁾。つまり普通太陽は絶対的な比較基準の対象として用いられているので、それが特殊なものなのかそれとも全く普通のありきたりの星なのかが微妙な問題を論ずる際には重要なポイントになってくるのである。このた

め我々は数年を費やして岡山 HIDES で数多くの太陽型恒星を観測し、これらの星々を化学組成や運動学的性質などさまざまな観点から太陽と比較研究する仕事に携わっている。本稿ではこの我々自身の進行中の研究から得られた成果をいくつか紹介するとともに「太陽とは星々の中でいかなる存在なのか？」という命題について現在わかっていることをまとめてみたい。ただこの問題は非常に微妙な性格のものであり、高精度の組成決定技術など最新の恒星分光学の話題が必然的にからんでくる。まずは話の展開に先立つ準備として天体分光学の発展の過程を簡単に述べることにしよう。バーコードの暗号解読にも似たこの学問は、ひたむきな情熱を持って立ち向かった数多の先駆者たちによって煉瓦を積み重ねるように構築されてきたものであり、いぶし銀のような百年の伝統と歴史を持つ。そしてそこでも太陽は主役を演じてきたのである。

2. 天体分光学と組成解析法の発達史

2.1 夜明けの時代

1859年の穏やかな春の一夜、ドイツ南西部の古都ハイデルベルクでの出来事である。ハイデルベルク大学化学部教授 R. W. ブンゼンと G. R. キルヒホッフはネッカー川沿いの研究所の一室で試料を燃やして発する光を分光器で調べて物質を分析する実験に没頭していた。しかしなにやら外が騒がしいので窓を開けて外を眺めると北西の空が赤く輝いている。約 10 キロ離れた隣の都市マンハイムが火事で燃えていたのだった。ふと思いついた彼らは実験に使っていた分光器を窓辺に持ってきて赤々と燃える夜空に向けて目を当てた。何本かの輝線がくっきりと見える。熟練した彼らにはそれがバリウムとストロンチウムに対応するものであることはすぐわかった。燃えた物質にこれらの元素が含まれていたことは明白であった。

数日後、彼らは対岸の小高い山の中腹を通る「哲学者の道」を一緒に散歩していた。ネッカー川

と古城を眼下に眺める絶景のパノラマで有名な小径である。考えにふけていたブンゼンがぼつりとつぶやいた。「火事の火を分析して遠く離れた町のことがわかるのならはるかに遠く太陽でも同じことができるのではなからうか？」この言葉にキルヒホッフはひらめいた。彼はそれから太陽光のスペクトル分析の研究に取りかかり、すでに半世紀近くも前からその存在が知られていたブラウンホーファー線と呼ばれるスペクトル中の暗線が太陽表面の低温のガスによって生じることを示したのである。すなわちこの暗線を同定することで太陽にどんな物質が存在するかを知りうる道を初めて開いたのであった。

ほぼ同じ頃に当時の代表的知識人であるフランスの哲学者オーギュスト・コントが「我々が絶対にうかがい知ることができないことは天体がどんな物質でできているかということだ」と述べていたことを考え合わせるとこの発見がいかに驚くべきものであったかがわかる。この過程で確立されたキルヒホッフの放射則（吸収と輻射の比は温度で決まる一定値をとる）は天体プラズマの輻射特性（低密のガスからは輝線スペクトル、高密のガスからは連続スペクトル）を本質的に言い表すものでもあり、翌 20 世紀に飛躍的に発展した量子論の萌芽となった意味でも科学史上に偉大な価値を持つ。これがきっかけで太陽にとどまらず恒星のスペクトルを調べることが始まり、いろいろな恒星が分光学的に分類されるようになったのである。

2.2 成長曲線の発見

しかし物質の元素組成量を推し量る定量解析の始まりは線スペクトルの形成過程が原子物理学的に理解される 1920 年代まで待たねばならなかった。線スペクトルの強さ（等価幅と呼ぶ）はその決まったエネルギーを吸収できる準位に存在する原子の数と吸収確率の積（これを吸収能率と呼ぶ）に依存する。ただ吸収線は連続スペクトルに生じる吸収のくぼみであるのでこの吸収能率が増

えるにつれて最初は比例的（1乗的）に増えていた等価幅は（光の強度レベル自体はゼロ近くに近づいて当然マイナスにはなりえないので）しだいに伸び悩んで頭打ちになって飽和するが、構わずさらに増やしていくと中心から離れた外部翼領域の吸収が始まって緩やかな1/2乗の増加を示す。したがって横軸に吸収能率の対数、縦軸に等価幅の対数、をとった場合、45度勾配の線形部、平坦な飽和部、22度勾配の漸増部、に分かれる特有な形状の曲線になる。「curve of growth（成長曲線）」と名づけられたこの曲線の形状は独特な美しさを持ち、人間の成長過程（順調な人生が蹉跎を迎え不遇の時期を経ても負けずに努力することで少しずつ伸びていく）を彷彿とさせる点でも印象的である。吸収能率は当該エネルギーレベルに存在する原子数に比例するので大気吸収層の励起電離状態に依存するが、これは20世紀初頭に確立したサハとボルツマンの式を用いて温度と密度の関数として計算することができた。したがって成長曲線は観測量（等価幅）を元素組成、大気密度、大気温度、と結びつける最初の簡単なモデルであった。これを用いて太陽の代表的な元素の組成分析が行われたが、初期の最も重要な仕事はラッセルやミンネルトたちによるものであり、彼らが明らかにした驚くべき事実は太陽の物質のほとんどが最も軽い元素の水素でできており、（無数の吸収線を生じる）より重いさまざまな元素はほんの微々たる含有量しか持たないことであった。この発見を契機にして宇宙の物質の元素組成に人々の興味は向かい、他の星々でもおおむね同じような結果が得られたのである。

2.3 大気モデルと細密解析の時代

次なる大きな飛躍は計算機の登場によってもたらされた。まず輻射輸送の方程式を運動量保存、エネルギー保存などの条件の下に数値的に解いて恒星表面層の物理量を深さの関数として表す恒星大気モデルを構築する。そしてそのモデルを基にすれば任意の組成に対する線スペクトルを理論的

に計算することができるので、逆に観測量としての線等価幅を与えればその線の元素の化学組成を求めることができる。この細密解析と呼ばれる手法によれば1本の線からでも組成を求めることが可能であるので古典的な粗い成長曲線解析に比して格段に可能性が広がる。この道を開くのに大なる貢献をなしたのはドイツのウンゼルトが率いるキール学派であった。1950年代から60年代にかけてドイツの天体物理学誌（*Zeitschrift für Astrophysik*）に掲載されたウンゼルトの弟子たちの論文は各人が一つの星を徹底的に解析して論ずる大部の力作になっている。内容的には今日の観点からすれば時代遅れでさして見るべきものはないのだが、強い印象が残るクラシックな業績である。このドイツの専門誌は編集部が全部の図を一から手書きで墨入れしてきちんと描き直すことで知られており、年月に耐える高級紙の使用と相まってドイツ人の物事に対するこだわりの強さがひしひしと感じられる。今日ではこのような力のこもった論文を目にすることはまれになった。近年では米国のクルーズらの努力によりリアリスティックな吸収係数が組み入れられたプログラムも公開されて、コンピューターを用いた細密解析はごく一般的な手法になっている。

2.4 差分解法：組成解析の伝家の宝刀

しかしながら実際問題として細密解析をもってしても組成決定の精度はめざましくは改善しなかった。ここでいう組成とはいわゆる絶対組成（ A/H ）であり、当該元素（仮に A で表わす）の単位体積当たりの原子数の水素（ H ）原子数に対する比の常用対数に12を加えたもので表す慣わしになっている。この値は遷移確率の不確定性など種々の要素に依存するので精度を出すのは非常に難しい。図1に最も重要な元素である鉄の太陽大気中の絶対組成の報告値の発表年ごとの変化を示す²⁾。この図からわかるように大きなうねりを示しており、1960年代の（遷移確率の実験値に含まれた大きな系統誤差という不幸な出来事に起因す

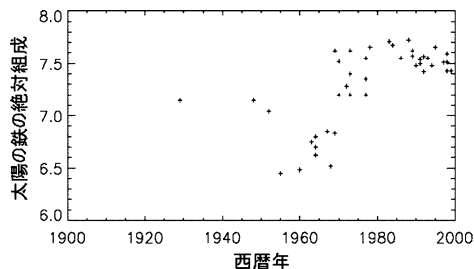


図1 これまでに発表された太陽の鉄の絶対組成の分光学的決定値を発表年に対してプロットした図（文献2の Fig. 1 を引用したもの）。

る）異常に低い値を経て、実は現在でさえもオックスフォードグループのハイスケール (7.67) とキール・リエージュのグループのロースケール (7.50) の間での論争がまだ完全には収束していない状態である。それにしても最も初期の1920年代にラッセルの出した値が、眼視(!)で大雑把に線スペクトル線強度を見積もったデータを用いたにもかかわらず、今日とそんなに大きく変わらない値を出していることは驚嘆に値する。格段に豊富なラインに恵まれている鉄でさえこのありさまであることから、高精度で絶対組成を分光学的に決めるのは極めて難度の高い問題であることが理解されよう。

ただ幸いなことに、化学組成の問題ではいわゆる相対組成 ($[A/H] = A/H_* - A/H_\odot$ で定義される、目的の星の絶対組成 A/H_* と太陽の絶対組成 A/H_\odot の差) が得られれば十分なケースがほとんどである。この場合、成長曲線を応用した差分解析法と呼ばれる強力な手法が適用可能となる。これは太陽と似通った星に対して有効で、J. L. グリーンスタイン, R. ケイレル, 寿岳 潤, B. E. J. パーゲル, などの先駆者により1950~60年代に確立されたものであるが、大気パラメーターである物理量(温度, 密度, 乱流速度)そのものは陽に現れることなく、それらの(両星間での)「差」のみが問題に出てくるように定式化され、それら差分パラメーターの値は多くのラインを用いて星の成長曲線が太陽の成長曲線と同様の形状を与え

るように組成差とともに同時に決定されるようになってきている。比較しあう両星が互いに十分似ていることが要求されるが、大気モデルの不完全さや遷移確率の誤差が打ち消しあうので非常に高精度で相対組成の決定が可能となる。後述するように、この手法は天体分光学の王道であってもう一度我々はその原点に立ち返るべきだと思われる。

3. 岡山 HIDES を用いた太陽型恒星の研究

3.1 恒星パラメータの決定とその特性

このように太陽は恒星分光学の発展史において、それも特に晩期型星の分光学的組成決定における比較基準として、絶えず重要な役割を果たしてきた。さて本題に立ち戻って岡山観測所の HIDES 分光器で行っている太陽型恒星の研究について述べたい。我々は惑星を持つ恒星の分光学的研究の過程において、比べるべき同種の恒星のサンプルを充実させることの重要性を感じ、これら標準星の観測に努めた結果、160個に及ぶF-G-K型矮星(+小数の準巨星)のスペクトルデータを得ることができた。これを依って立つデータベースとして化学組成解析を中心とした研究を進めている。手法としては先に述べたモデル大気を用いた細密解析のアプローチをとるのであるが、そのためにはまず大気のパラメーター(有効温度 T_{eff} , 重力加速度 $\log g$, 乱流速度 v_t , 鉄組成 $[Fe/H]$ で代表される金属量)を決定しなければならない。これはスペクトル中に最も豊富に存在する中性鉄 (Fe I) と1回電離鉄 (Fe II) のラインを用いて、(1)各ラインから出した鉄組成がラインの強さに依存しない(成長曲線マッチング)、(2)励起ポテンシャルにも依存しない(励起平衡)、(3)Fe Iからの平均鉄組成とFe IIからのものが一致する(電離平衡)、の三つの条件を要請して決定することができる。我々は $(T_{\text{eff}}, \log g, v_t)$ 空間における最適化問題に定式化してこれらのパラメーターのベストの解を数値的に決定した。それ

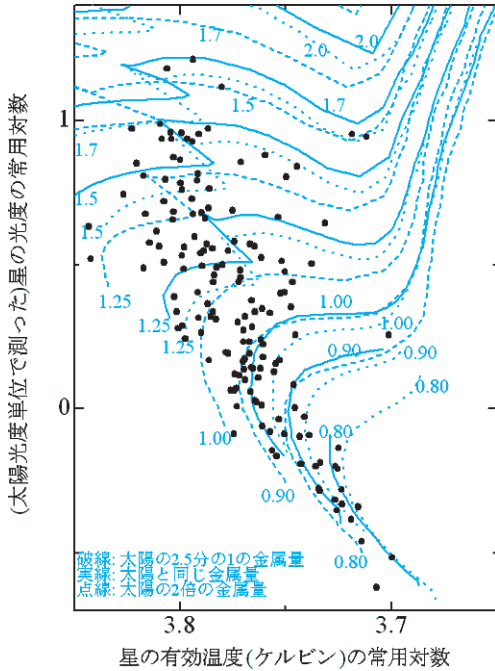


図 2 黒丸は我々が観測した 160 個の星を理論的 HR 図（横軸が有効温度，縦軸が絶対光度）の上にプロットしたもの。青線はいろいろな質量（それぞれのトラックに太陽質量を単位とした質量値を付記してある）の星の、3 種の異なる金属量（線種で区別）に対応する、理論的進化トラック（文献 3 より引用）である。

らの解とヒッパルコス衛星が計測した視差（距離）から各星の絶対光度が求まるので HR 図上で恒星進化の理論トラック³⁾と比較することができる（図 2）。この図からこれらの星々はほぼ主系列かやや進化したものであることがわかる。またこの比較から各星の年齢の大雑把な見積りもできるので、こうして得られた金属量 ([Fe/H]) と年齢 (t) の関係も図 3 に示す。散らばりは大きいですが、年齢のより古い星（より初期に生まれた星）ほど金属量は少ない⁴⁾傾向が見てとれよう。一方、恒星自体の物理量に加えて星々の種族や出自（いつどこで形成されたか）を論ずる際に重要なのはその運動学的特性である。ニュートンの運動方程式は時間について二階の微分方程式であるから、ある時間における 3 次元位置ベクトル（三つの成

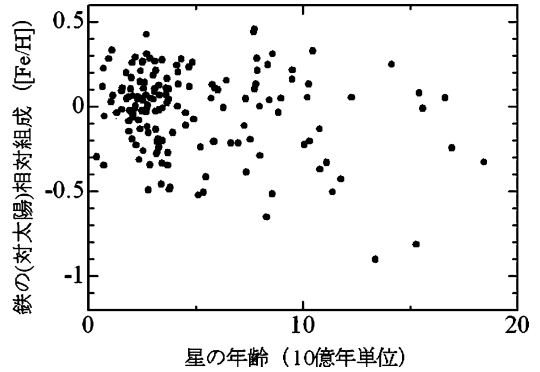


図 3 岡山 HIDES で観測した 160 個の太陽型恒星の金属量（太陽に相対的な鉄の組成）と年齢の関係。

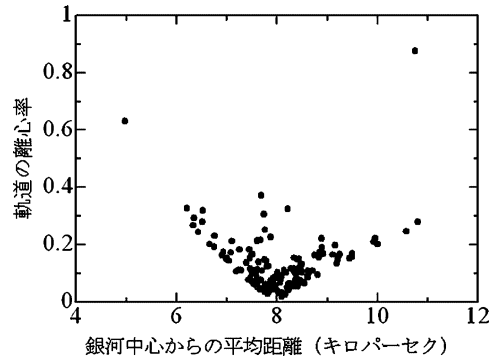


図 4 岡山 HIDES で観測した 160 個の太陽型恒星の（銀河中心からの）平均距離と（銀河中心を回る）軌道の離心率の関係。

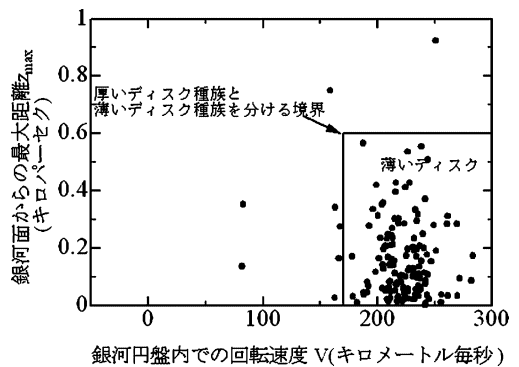


図 5 岡山 HIDES で観測した 160 個の太陽型恒星の（銀河中心周りを回る）回転速度と銀河面からの最も離れたときの距離の関係。

分)と速度ベクトル(三つの成分)の六つの量が与えられると運動が決定される。現在の位置ベクトルは(赤経, 赤緯, 距離)から, 速度ベクトルは(赤経方向の固有運動, 赤緯方向の固有運動, 視線速度)から決められるので, 宮本・永井ポテンシャルと呼ばれる(日本の宮本昌典氏と永井隆三郎氏によって提唱された)よく用いられる銀河系における重力ポテンシャルを仮定し, その中の軌道を過去にさかのぼって計算してみた。これにより銀河中心からの平均半径(a), 離心率(e), 銀河面から測った(垂直方向への)最大距離(z_{\max})などが求められる。図4に平均半径と離心率の相関を, 図5に垂直最大距離と(銀河面内での)回転速度(V)の相関を, それぞれ図示する。図5からわかるようにほとんどの星は太陽と同じ薄いディスク種族に属する私たちの兄弟であることがわかる。

3.2 究極の精度を求めて

これらの星々の組成解析を現在進めているところであるが, 我々は従来の標準的な方法を適用するだけでなく, 特に高精度の相対解析をも試みんとしている。それは非常に微妙な組成差の有無が鍵となる問題があるからである。そしてその道を模索する過程で我々が陥りかけている落とし穴の危険性を感じると同時に原点回帰の必要性も認識するに至った。つまり2.4節で述べた正統的な差分解析は(1)両星とも全く同じラインセットが1:1対応になり遷移確率の不確定性には全く無関係, (2)問題には大気パラメーターの微分(差分)量のみが陽に現れるのでモデルの不確定性も打ち消しあう, (3)両星の特性がかなり違っていれば解析の精度は保証されないが成長曲線を実際にプロットして描き確認することで適用範囲のチェックが必然的になされていた, という特徴を持っていた。

しかるに現代は大気モデルが楽に利用でき, 1本のラインからでも組成を求めることができる計算機(細密)解析の全盛時代であり, 大気のパラ

メーターもいろいろな方法で決定可能になってきた。確かに一面では大きな進歩を遂げたが便利なことは往々にして不注意や墮落につながるおそれがある。これがゆえに上の(1)はともかくとして(2)や(3)にはほとんど注意が払われず, 全く別の方法で求められた大気パラメーターを文献から探し出して適用したり500~1,000 K近くも太陽と温度の異なる星を平気で太陽と相対解析したりしている例を見ることもまれではない。そこで我々は伝統的差分解析の正統な精神を引き継ぎ, かつ計算機時代のメリットを活かす折衷的試みとして前節で述べた最適化問題の形で解くパラメーター決定プログラムを, 差分解析用に定式化し直したバージョンを開発した。これを用いると問題がすべて差分の物理量で定式化され, 両星の大気モデルパラメーターも決まり, かつ鉄の組成差も同時に決まる(絶対値は重要でなくその差はきちんと決まるという意味)。また決定誤差も際だって減少して~0.01 dexレベルの精度も十分視野に入ることがわかった。

3.3 双子連星系はくちょう座16番星の問題

ここではこの方法の一つの応用例として実視連星系はくちょう座16番星のケースを紹介したい。この系を構成するA(G1.5V, $V=5.96$)とB(G2.5V, $V=6.20$)は両星ともお互いにそっくりのG型矮星であるうえに, 太陽ともたいへん似ている「太陽との双子(solar twin)」として有名である。ところが近年両星の違いが話題になっている。つまりやや暗いBのほうに公転周期800日の惑星が発見されたが, Aのほうには惑星存在の兆候は未だ見られないのである。また両星のスペクトルはたいへんよく似ているのだが, リチウム(Li)線強度のみに関してはBはAに比べて明らかに弱い。この差異が惑星の存在と関係しているのかどうか議論的になっている。つまり本特集の大久保さんの記事でも触れられている「惑星を持つ恒星の金属量の過剰の原因は微惑星物質の降り積もりによる後天的な効果なのか, それとも

この異常は先天的にガスが持つものなのか（金属過剰のガスからは惑星が生まれやすい？）という問題とからんだ話である。それでこの連星系のケースで重要なことは、一見似たスペクトルを持つ双子のような **A** と **B** の金属量にわずかであっても差があるのかどうかということをはっきりとすることだ。つまり連星系は本質的に同じ組成のガスから生まれている以上、たとえわずかであっても金属量の違いがはっきりと確認されれば後天的な組成変化が起こりうるということになり微惑星降り積もりの可能性を示唆する材料となるであろう。

これまで両星の鉄組成の差の有無については半ダース以上の報告があるが、いずれもまちまちで（差の符号でさえ正も負もゼロもあり）混乱している。しかしつい最近ローズとゴンザレスたち⁵⁾が出した $\Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{A}-\text{B}) = +0.025 (\pm 0.009)$ という新しい結果は従来のもよりも際だって高精度であり、彼らはこれをもとに **A** は **B** より **0.03 dex** 多いセンスで組成差はわずかながらも確かに存在するとしている。一方、我々が岡山観測所の **HIDES** で得たスペクトルに基づいて上述の独自の差分解析手法を適用したところ、 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{A}-\text{B}) = -0.007$ （誤差は **0.005 dex** 程度）となり、（むしろ符号は極めてわずかに逆で）客観的に見て **A**, **B** 両星の間には有意な組成差は実質的に存在しないという結論を得た。太陽を挟んで解析した結果も $\Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{A}-\text{Sun}) = +0.088$, $\Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{B}-\text{Sun}) = +0.099$ であり、 $\Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{A}-\text{B}) = \Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{A}-\text{Sun}) - \Delta[\text{Fe}/\text{H}](\text{B}-\text{Sun}) = -0.011$ となってこれを支持することから、我々の見解は「彼らの結論（**A** の **B** に対するただ 1 回の解析のみでものを言っている）は尚早で正しくない」というものである。いずれにせよ極めて微妙な話ではあるが。

4. 恒星としてみた太陽の位置づけ

4.1 組成の観点から

冒頭に述べた問題を改めて考察しよう。実は太陽はやや金属過剰らしいと以前から言われている。これはもちろん太陽をほぼ同じような年齢の運動学的に同種の星々と比較して論じないといけないのであるが、例えば北欧・米国の共同グループが中期 **F**-早期 **G** 型のディスク星を大々的に解析した結果⁶⁾に基づけば、彼らのサンプルで銀河中心からの平均距離が **8 kpc** から **9 kpc** で年齢が **40 億年** から **60 億年** の星々の太陽に対する平均鉄組成は $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.09 (\sigma = 0.25)$ である。つまり逆に言えば太陽は同種の星々に比すると金属量がわずかながらも多めになっている⁷⁾。我々の観測した **160 個** の星々は中期 **F**~早期 **K** 型であり、彼らのよりずっと低温までカバーした独自のサンプルなのであるが、上の条件にかなうものは **6 個** しかなく統計的に有意な議論ができないので少し幅を広げて **7 kpc** から **9 kpc**, **30 億年** から **60 億年** にすると **41 個** にまで増え $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = -0.04 (\sigma = 0.21)$ となる。欧米グループの結果と比べると食い違いの程度は小さく目立たなくなったのであるが、定性的にはほぼ同様の結果が得られた。したがってこの金属量の観点から見れば太陽は兄弟たちとわずかに異なっていると言ってもよからう。

この原因は何であろうか？ 実は種々の解釈があってもまだよくわかっていない⁸⁾。一つの考え方として太陽は今のところで生まれたのではなくもっと内側の金属量のより高い場所（つまり銀河中心により近いほど密度が高く星の転生輪廻による化学進化が活発だから）で形成されてこれまでの間にだんだん外側に軌道が拡散してずれてきたのだとする説がある。他の説として太陽は惑星系を持っているがために先に述べた後天的な微惑星降り積もり効果で金属過剰気味になったとする意見もある。いずれにせよ太陽はやはり何らかの特殊

な条件におかれた星なのだろうか？ ただこの差異の大きさは微妙で際だったものではないし、また各元素の「パターン」($[X/Fe]$: 鉄にスケールした相対組成)は太陽は仲間の星々とほとんど変わらないという報告がなされている。確定的な結論に至るまでにはもっと大幅に数を増やしたサンプルを用いてのより高精度の解析が必要であろう。

4.2 恒星活動の観点から

黒点の数が一つの目安となる太陽活動が約11年の周期で盛衰を繰り返していることはよく知られている。活発な頃はフレアと呼ばれる表面爆発が頻発し、地球に飛来する磁気プラズマ雲や高エネルギー粒子が磁気嵐やオーロラ現象などを引き起こす。また活動は総放射エネルギーに影響するので、長いタイムスパンでの活動の盛衰は地球気象にも大きな影響を与える。中世の極大期と呼ばれる活発な時期においてはグリーンランドが本当に緑の大地であったほどの温暖期だったらしく、一方、17世紀には黒点が70年間もほとんど出現しない無黒点期が続き（マウンダー極小期）このときは全世界的な寒冷気候となり農作物の深刻な凶作やペストなどの伝染病の大流行に見舞われた暗い荒れた時代となった。

分光学的観点から見た場合、太陽活動が活発な際には表面に白斑などの活動領域が多く生じるので彩層など上部大気に注入されるエネルギーの上昇を反映してカルシウムのHK線に代表される非常に強いラインの中心部コアの輝線強度は増大する。このことを逆に利用すれば他の恒星においてもそのHK線の輝線強度から恒星活動の様子をうかがい知ることができるはずである。一方、測光学的にも明るさの変化をモニターすることによって放射エネルギー変動（すなわち活動の変遷）を追うことができる。

最も由緒ある天文台の一つである米国ウィルソン山天文台では伝統の2.5メートル反射鏡を用いて太陽型恒星のHK線をモニターしてその長期

的な変化を調べるという根気と忍耐のいるプロジェクトをここ数十年にわたって地道に続けている。それによれば確かに他の星々でも太陽活動のような十年前後のタイムスケールでの活動の盛衰が存在することが明らかになった。この意味においては太陽も他の星々も定性的に変わりはないが、測光学のデータと一緒に合わせると仲間たる類似の恒星たちの示す（活動変化に起因する）放射量変動は太陽に比べて約2~3倍大きいことが示された。つまり太陽は彼らに比べて「じゃじゃ馬ぶりが目立たない」のである。ただこれが太陽が一時的に変動のおとなしくなっている時期に当たっているせいなのか（太陽放射強度観測の歴史はそう長くないのでデータが十分でない）それとも本質的なものなのかは今のところ何とも言えない。

4.3 太陽＝普通の星？

前の二つの節では太陽が他の兄弟たちと違いを示す2点について特に紹介したが、実は大部分の観点（自転、元素パターン、表面速度場 etc.）から見て太陽は他の同類タイプの星々と本質的に同じ徴候を示しており、明らかに目立った相違点というものは見られない。ただ、ほとんど似ているから同じだと初めから決めつけてしまっただけは物事は進歩しないので、少しでも異なるように見える点をとことん追求していくことが問題の本質に迫るためには必要であろう。現時点では「太陽は同種の星々と比べて (1) やや表面の金属量が多く、(2) 活動に伴う放射エネルギー変動が比較的小さい、という微妙な見かけの違いがあるが、他の点においてはさしたる差は見られない」とまとめるにとどめておきたい。今後もっと多くの星々に対する追確認の観測とともに惑星系存在などの情報が待たれるところである。

それから付け加えておくと、太陽に「わりと似ている」星々は多く数を挙げるができるが、「何もかもほとんどうり二つ」というクローンコピーのような星には残念ながらほとんどお目にか

かれない。先に述べた白鳥座 16 番星も「太陽との双子」と呼ばれるほどであるが、精密な解析を行うと明らかな相違点がいくらか見えてくる。もしこのような星が見つければたいへん興味深い。ちなみにさそり座 18 番星という星がヒッパルコス観測から得られる基本パラメーターにおいては非常に太陽に似ているという報告⁷⁾を目にしたので、この星を観測して高精度解析でどこまでそっくりなのか調べてみたいと考えている。

5. おわりに

我々の太陽は天文学において最も基本となる存在である。銀河などの光度や質量も太陽を単位として測るし、天体の化学組成が問題になればほとんどの場合太陽組成を基準にとって比較する。したがって太陽研究は天文学において第一義的な重要性を持つ。もちろん太陽物理学は天文学の重要な部門であり、日本人のこの分野での業績は世界的に非常に高い評価を受けている。しかしながら、ある対象の本質について知りたい場合はそれ一つのみを血眼で詳しく調べ尽くすだけでは十分でなく、ある距離を置いた立場から数多くの他の同種のサンプルと比較研究することも重要であろう。そうすることによって新たに見えてくることもあるはずである。

4.2 節でウィルソン山天文台グループによる太陽型星のカルシウム **HK** 線の長期モニター観測について触れたが、彼らが遭遇した興味深い例がある。うお座 54 番星という太陽より少し温度が低い **K** 型の 6 等星があるが、この星は数十年来の観測から周期 14.6 年で活動の盛衰を繰り返すことがわかっていて、ところがそれは何の前触れもなく突然起こった。1985 年に極小を迎えたのを最後に活動は心停止状態になり今日に至るまで再び立ち上がりを見せるに至っていない。すなわち人類が四百年前の 17 世紀に経験した太陽の無黒点期（マウンダー極小期）と同様の大事件がこの 36 光年先の星にも起こったのであり、我々は今ま

さにそれを観察しているのである。もしこの星に地球のような惑星があって生命が存在していたとすれば環境変化で大きな打撃を受けているのだろうか……。このような例を多く集めることで、いつの日か太陽活動の長期的な予測ができるようになるかもしれない。ならばこの種の研究は人類の将来にとっても意義深いものになるであろう。

このウィルソン山天文台の伝統ある 2.5 メートル望遠鏡は、老朽化と市街地の灯りによる光害の下、天文学的に有意義な研究が果たして可能かという問題が以前から取り沙汰され、閉鎖の危機にさらされたこともあった。これは **HIDES** を有する岡山観測所の 1.9 メートル鏡にとっても決して人ごとではない問題である。この意味において、彼らが地道に継続している恒星活動モニターなどは我々にとっての非常に良いお手本である。つまり近傍の明るい恒星を長期的にじっくり腰を据えて分光観測することは、暗い夜空を失ったサイトの中口径の望遠鏡がその活路と存在意義を見いだすのに正にうってつけのテーマと言えるであろう。大望遠鏡時代の最近の恒星分光学では最先端の花形分野は非常に金属の欠乏した宇宙初期の古い恒星や系外銀河の恒星の研究などである。もちろんこのような重要なサイエンスは率先して大いに推進されるべきであるが、それとともに太陽や身近の普通の明るい恒星の研究も忘れてはなるまい。我々はこの種の地道な土台固めこそ岡山の望遠鏡で行うべきであると考えている。

謝 辞

本稿の執筆に当たっては、いろいろな所から情報や知識を拝借しました。天体分光学の歴史の所で述べた、ブンゼンとキルヒホッフのエピソードは小暮智一先生のエッセイ「ドイツ科学史の旅」（美星天文台 **WWW** ページ）を種にさせていただきましたし、それから分光学史一般についてはサッカレイ (**A. D. Thackeray, Astronomical Spectroscopy**) やハーンショー (**J. B. Hearnshaw, The**

Analysis of Starlight) などの書物を参考にしました。主題である「星としてみた太陽の位置づけ」についてはグスタフソン博士のレビュー⁷⁾が大いに役に立ちましたので、さらに詳しいことを知りたい方はこれを読まれることをお勧めします。それから、うお座 54 番星に関する話題はNHKの科学番組「今日は？曜日～：人と地球と宇宙の絆」の中で放映されたバリウナス博士（ウィルソン山天文台）のインタビューで知ることができました。我々が解析に用いた岡山天体物理観測所の HIDES 分光器で観測された 160 個の太陽型星のデータは 2000 年後期から 2003 年前期まで 3 年間継続されたプロジェクト「惑星を持つ恒星ならびに関連する恒星の分光学的研究」を実施する過程で得られたものです。本研究に加わって協力してくださったプロジェクトメンバーの方々、ならびに観測や機器保守の面でサポートして下さった岡山観測所のスタッフの皆様方にこの場を借りて心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 竹田洋一, 2003, 天文月報 96, 303
- 2) Grevesse N., Sauval A. J., 1999, A&A 347, 348
- 3) Lejeune T., Schaerer D., 2001, A&A 366, 538
- 4) 比田井昌英, 2003, 天文月報 96, 315
- 5) Laws C., Gonzalez G., 2001, ApJ 553, 405
- 6) Edvardsson B., et al., 1993, A&A 275, 101
- 7) Gustafsson B., 1998, Space Science Reviews 85, 419
- 8) Gonzalez G., 1999, MNRAS 308, 447

Our Neighbour Suns: High-Dispersion Spectroscopy of Solar-Type Stars

Yoichi TAKEDA

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

Abstract: In spite of its high efficiency, the targets of the new HIDES spectrograph at Okayama Astrophysical Observatory are restricted to comparatively bright stars due to the limited light collectivity of the 188 cm telescope. Given this situation, studying nearby solar-type stars is counted as an important task to be promoted with HIDES, by which we can also learn about “our Sun” from a different perspective. In this article, the history of the spectroscopic abundance study is briefly reviewed first, where our Sun always played a significant role. Then, with a particular attention to the question “is our Sun a normal star?,” the recent progress of the spectroscopic study of Sun-like stars is described along with the new HIDES results of our own.