連載

恒星天文学の源流【19】

星と銀河　その２

～天空の測深と銀河系～

小暮智一（京都大学 OB）

今回は 1938-9 年の同時期に恒星視差の測定に成功したベッセル、シュトルーフェとヘンダーソンの 3 人の足跡を辿って見よう。ベッセルとシュトルーフェの 2 人は望遠鏡製作を通してフラウンホーフェルと深いつながりがあり、また、2 人は視差測定の良きライバルであった。ヘンダーソンは南アフリカの観測から独立に視差の測定に挑んだ。シュトルーフェはハーシェルの銀河モデルを再考察している。

1. ベッセルの生涯（Friedrich Wilhelm Bessel, 1784 - 1846）

はじめにベッセルとシュトルーフェの生涯を辿って見よう。ベッセルの方が 9 歳ほど年長なのでベッセルから始めたい（[1], [22]）。

ベッセルはドイツ北部のミンデンで生まれた。父は下級公務員であったから、家族の生活もつつましいものであった。14 歳でミンデンの北、ブレーメンで貿易会社に徒弟として住み込み、会計係を担当する。ブレーメンはヨーロッパの交易路として商業で栄えた、中世からの古い歴史をもつ町である。ベッセルの会社は輸出入が主体であったから、船乗りたちとも知り合いが多かった。ベッセルは航海技術に興味を持ち、独学で数学と天文学を学び始める。彼は特に計算技術に優れ、20 歳のときには、1607 年に出現したハレー彗星の観測データから精密な軌道計算法を考案し、それを論文にまとめた。彼はその結果をオルバースに見てもらいたいと思った。

オルバース（Heinrich Wilhelm Olbers、1758 - 1840）はゲッチンゲン大学で医学を学び、ブレーメンで開業医として生活しながら、天体観測を進めていた。小惑星のパラス、ベスタの発見や、彗星探査とその軌道計算でも知られ、ドイツでは優れた天文学者としての評価を得ていた。オルバースはまた、夜空の暗さに関するパラドックスにもその名を留めている。ベッセルはブレーメンの裏通りで散歩中のオルバースを捕まえ、手短に論文の要旨を伝えた。オルバースが興味を示したので早速、論文をオルバースの家に届けた。

オルバースはそれを読んで彼の正確な計算、十分な説明、簡潔な理論付け、これらはすべて学位論文にも値するものであると認めた。20 歳の若いアマチュアの業績に彼は感銘し、彼の友人であるカール・フリードリッヒ・ガウスにもそれを知らせた。その年の 12 月、オルバースの計らいによって論文は公表された。

ブレーメンの近郊にヨハン・シュレーター（Johann Schröter）によって設立された私設のリリエンタール天文台（Lilienthal Observatory）がある。1806 年、ベッセルはシュレーターの招きでこの天文台の助手となる。サラリーは低かったが、ベッセルは満足していた。彼は後にこの時代を「幸福で静謐な日々であった」と回想している。しかし、シュレーターの反射望遠鏡は取り扱いに不便で分解能も十分でなかった。シュレーターは月面地形のマッピングに取り組んでいたがベッセルは相変わらず彗星探査に集中していた。彗星の軌道を精確に計算するには背景にある

恒星の位置の高い精度を必要とする。ベッセルは子午儀を設置してもらい、星の位置の測定を始めた。これが彼の恒星視差への取り組みのそもそもの始まりである。ベッセルの名前もドイツで次第に知られるようになった。

Friedrich Wilhelm Bessel.
Source: *Sternwarte, Universität Bonn.*

図 12　ベッセル肖像 [1]

そうしたなか、1809 年秋に、ベッセルに転機が訪れた。プロシャの皇帝フリードリッヒ・ウイルヘルム 3 世はそのころドイツ国内の各地に国立大学の設置を進めていたが、その中にケーニッヒスベルク大学が含まれていた。皇帝はこの大学に精密な望遠鏡を持つケーニッヒスベルク天文台の建設を計画した。当時、皇帝科学補佐官であったアレキサンダー・フンボルト（Alexander Humbolt）はこの天文台の台長として 26 歳の若きベッセルを推薦し、ベッセルのもとにフンボルトからの招待状が届いたのである。こうしてベッセルの未来が開けてきた。

翌年、ベッセルは妹のアマリー（Amalie）を伴ってケーニッヒスベルク(現ロシア領カリーニングラード)に赴任する。

天文台ではベッセルは子午儀を用いて恒星の精密な位置観測に従事し、1818 年に『基礎天文学』を出版している [23]。この書では 1755 年にグリニジ天文台長ブラッドレー（James Bradley, 1693 – 1762）によって観測された星のリストを挙げ、リスト星の位置にたいし、あらためて機械的誤差、大気差、歳差などの効果の補正を行っている。同時にその補正法についても詳しく述べているので、この書は当時の天文観測者に対し星の位置や、その長期的変動を測定するための基本的なテキストになった。また、この書の中でベッセルは、恒星の視差は恐らく 1 秒角以下であろう、と述べて視差探索者のチャレンジを促している。

その後の彼は二重星の観測と恒星視差の測定に専念し、1838 年に恒星視差の測定に成功する（次節）。すでに 54 歳であった。その功績によって 1842 年に英国王立天文協会からゴールドメダルを贈られている。

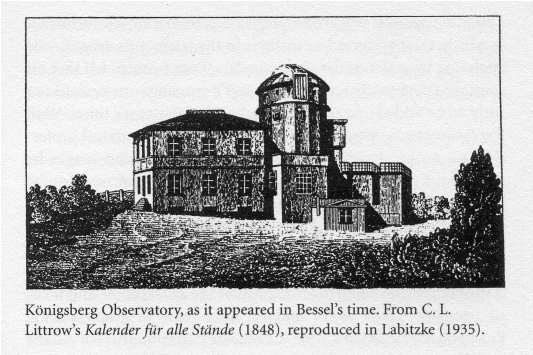
Königsberg Observatory, as it appeared in Bessel's time. From C. L. Littrow's *Kalender für alle Stände* (1848), reproduced in Labitzke (1935).

図 13　ベッセル時代のケーニッヒスベルグ天文台（1848 年頃）[22]

1842 年にベッセルは英国を訪れ、2 人の人物に会っている。1 人はケント州のコリングウッドに住むジョン・ハーシェルである。王立天文協会の会長であるハーシェルにはゴー

ルドメダルへのお礼の挨拶を兼ねてのことであったが、その折に彼は天王星の精密な運動を紹介し、軌道運動の乱れから未知の惑星の存在を示唆したという。新惑星については、パリ天文台のルベリエによって軌道運動の精密な計算が行われ、ベルリン天文台のヨハン・ガレによって 1846 年に発見され海王星と名づけられたことは良く知られているが、ベッセルはそれを知ることなく 1846 年に死去する。もう 1 人の人物はトマス・ヘンダーソンで、1838年の視差測定の1人であるが(第4節)、ベッセルが訪ねたときにはすでに退職して、当時、発明されたばかりのダゲレオ式写真に凝っていた。風景や肖像画も撮っており、ベッセルの写真も撮ったという話であるが、それは残っていない。

ベッセルは 1846 年に他界するまで観測を続けていた。最後の年にはシリウスの固有運動に奇妙なダンスを見出している。これは後にシリウス伴星の運動を表わし、白色矮星の発見となるが、ベッセル本人はこれも知る由もなかった。

2．シュトルーフェの生涯（1793-1864）

ウイルヘルム・シュトルーフェ（Friedrich Georg Wilhelm Struve ）はドイツ、ハンブルグ近郊のアルトナ（Altona）で 1793 年 4 月に誕生した。アルトナは当時デンマーク領になっていた。父ヤコブ（Jacob Struve）はクリスチャン・アカデミーの学長で古典言語学が専門であったが数学（統計学、確率論、数論など）にも優れていた。数学の著書もあり、キール大学から数学について名誉学位を得ている。

当時のヨーロッパはナポレオン戦争の時代で、ドイツ国内ではナポレオン軍による若者たちの徴兵が危機的に広まっていた。アルトナはデンマーク領ではあったがナポレオン軍が入り込み、13 歳のウイルヘルムはフランス軍によって一時拘束され、窓から飛び降りて脱走したという事件もあった。こうした社会不安から、父はそれを避けるため、長男のカール（Karl Struve）が勤めているドルパト（Dorpat、当時ロシア領、現在はエストニアのタルトゥ）の大学にウイルヘルムを入学させることにした。カールは父の志をついで古典言語学の担当教授になっていた。

1808 年、大学に入学した 15 歳のウイルヘルムは言語学でなく、数学を学びたいと父に申し出たが許されなかったので、やむをえず言語学を専攻し、18 歳で言語学科を卒業する。在学中に地元の貴族、カウント・フォン・ベルグ（Count von Berg）の家に家庭教師として住み込み、働きながら大学に通った。仕事は週に 36 時間、4 人の子供の教育に当たるというもので自由な時間が多かった。大学まで 50km もあったので、彼は自由な時間をほとんどフォン・ベルグ家で過ごした。この家でウイリャムは家族の一員のように扱われ、夕食会や狩、舞踏会などにも参加して、将来のために多くの知己を得ている。

1810 年、言語学科を卒業すると、父との約束は果たしたものと考え、大学院に進んで物理学、数学、天文学分野を専攻する。この進学にはフォン･ベルグの大きな援助があった。彼は大学付属ドルパト天文台長のプファッフ（Johann W. A. Pfaff）の指導で天文学の基礎を学んだ。プファッフは光学機器の理論家であり、測地学にも優れていた。1807 年に天文台にドーランド社製子午儀を設置し、シュトルーフェに測地学を研究課題として与えた。しかし、プファッフは子午儀の設定を待たずに 1809 年にドイツのニュールンベルグ科学研究所に転任していった。プファッフを引き継いだのはクラコフ大学から赴任してきたフス（Johann S. G. Huth）である。彼はドルパト大学で数学と共に測地学、数理地理学を担当した。特に地球の大きさと形状の測定に

取り組み、1812 年にドルパト天文台においてシュトルーフェを助手として子午儀による測定を開始している [24]。

シュトルーフェは標準星の子午線通過時刻の測定において、地球大気差や光行差などの補正を行い、その方法と測定結果をまとめて 1813 年に学位論文として提出した。この年、ナポレオン戦争の影響でドルパトの近郊は一時戦場となり、学位審査が延期されたが無事に学位を得て、そのままドルパト天文台の研究員となる。天文台では子午儀による二重星の探査と測定観測を継続し、二重星のカタログを作成している。また、ドルパト大学においても天文学と数学の講義を担当した。

フスは健康上の理由から 1814 年に退職し、シュトルーフェが後任として専任研究員となる。こうして生活が安定したのでその年(22 歳)、長期休暇をとってアルトナに帰郷し、未来の妻、若きエミリー（Emilie Wall）と出会う。また、ドルパトへの帰路、ケーニッヒスベルグ天文台を訪ねて初対面のベッセルと会い、先輩のベッセルから天体位置観測の補正法について助言を受ける。この訪問が契機になって、その後、2 人は親交を結び、視差測定の良きライバルとなる。

ナポレオンが 1815 年にウオータールーの最後の戦いに敗れると、ヨーロッパに平和が訪れる。エミリーはドルパトにやって来て 2 人は結婚する。エミリーは 17 年間に 12 人の子供を生むという子沢山であった。そのうち、長男のオットー・シュトルーフェ（Otto W. Struve）はプルコボ天文台長となり、その子のヘルマン（Hermann Struve）はベッセルを継いでケーニッヒスベルグ天文台長となる。それ以後、シュトルーフェ家は代々天文学者を生み、アメリカに亡命してカリフォルニア大学教授から国立電波天文台の台長となったオットー・シュトルーフェ（Otto Struve）まで 5 代続く天文家系となる。

ドルパトにおいてシュトルーフェは 1820 年（27 歳）にドルパト大学教授兼、付属天文台長になる。天文台では二重星の観測、視差の測定とともに測地事業にも取り組む。ロシア皇帝アレクサンダー1 世にとって測地は経緯度の測定と共に領土の画定など国家的な事業であったから、シュトルーフェも等閑にはできなかった。1817 年から始まった三角測量は最初、エストニアとラトビア付近が対象であった。それが一段落すると、彼は皇帝にフィンランドの北端から黒海沿岸に到る大規模測量計画を提出する。この計画はロシアとスエーデン両国の協力による国際事業となった。東経 26 度の南北線を中心に 265 個の三角点網がめぐらされ、北緯 70 度 40 分から北緯 45 度 40 分まで 2800km の測地作業が 1855 年まで続く。その成果は 1857 年に報告書が出版されたが、その中には地球の形状に関する測定もあり、高い精度で地球の楕円体形状を示すものであった。なお、三角点網の一部は現在、10 ヵ国に及ぶ国際的な世界遺産に登録されている [25]。

図 14　シュトルーフェ肖像 [1]

図 15　シュトルーフェの時代のドルパト天文台　[22]　右手手前の家はシュトルーフェの住居

1830 年代、ロシア皇帝はサンクトペテルブルグ近郊のプルコワに新しい天文台の建設に乗り出し、皇帝からの委嘱によってシュトルーフェは予備調査などで多忙な時を過ごすことになった。1839 年（46 歳）には天文台建設委員会の委員長になり、天文台完成後は台長となる。新しい天文台においても二重星や恒星位置観測を継続していたが、1847 年に銀河系モデルに関する著書 [26]（第 5 節参照）を出版したあとは、健康が優れず、次第に観測から離れて書斎の仕事に比重を移す。1861 年（68 歳）で天文台を退職し、1864、サンクトペテルベルクの自宅で肺炎のため死去した。享年 71 歳であった。

3. ベッセルとシュトルーフェの視差測定

(1)フラウンホーフェルの望遠鏡（[22], [27]）

恒星視差の測定には星の精密な位置観測を可能にする望遠鏡が必要である。ウイリャム・ハーシェルは大型反射望遠鏡を製作したが、金属反射鏡は研磨が難しく、星像は必ずしも鮮明とはいえなかった。星の位置観測については、口径は及ばなくても屈折望遠鏡が高い精度をもっていた。19 世紀初頭における屈折望遠鏡製作の主流はドイツにあり、なかでもフラウンホーフェル（Joseph Fraunhofer）はトップランナーであった。ベッセルもシュトルーフェも共にフラウンホーフェルの製作した屈折望遠鏡を用いている。

フラウンホーフェルがドルパト天文台の注文によって製作した 9 インチ（23cm）屈折鏡は次のような新しい技術を採用している。

1）色消しレンズを対物レンズに使用した
2）赤道儀方式を採用した（フラウンホーフェル以前はほとんど経緯台式であった。）
3）錘を用いた自動追尾方式を取り入れた
4）温度変化に対し対物レンズが常に色消しになるようなレンズ支持方式を採用した。

こうした技術によってこの望遠鏡は他に例のない高精度の、しかも当時、最大口径の屈折鏡になった。

一方、ベッセルがケーニッヒスベルグ天文台からフラウンホーフェルに注文したのはベッセル自身が設計したヘリオメータである。ヘリオメータはもともと、ロンドンのドロンド（John Dollond）が太陽の直径を計るために考案した望遠鏡で、対物レンズを 2 等分し、一方の半レンズを移動させて精密な角距離を測定する装置である。ベッセルが注文したのは 1824 年でフラウンホーフェルはすでに体調を崩していた。フラウンホーフェルは製作に意欲を示したが完成を待たずに 1826 年に永眠する。ヘリオメータは後継者によって 1829 年に完成し、10 月にケーニッヒスベルグに設置された。ベッセルはその性能に満足

し、本格的な視差測定を開始する。

この頃、アイルランドのバー・キャッスルからフラウンホーフェル工房を訪ねた第３代ロス卿ウイリャム・パーソンズ（William Parsons）は製作技術の精巧さに感嘆して

「フラウンホーフェルの発明以来(色消しレンズなど)、屈折鏡はすべての点で反射鏡の精度を上回っている。反射鏡を（精度に関して）改良しようとする試みはむなしいものになった。」

図 16　フラウンホーフェル肖像　[22]

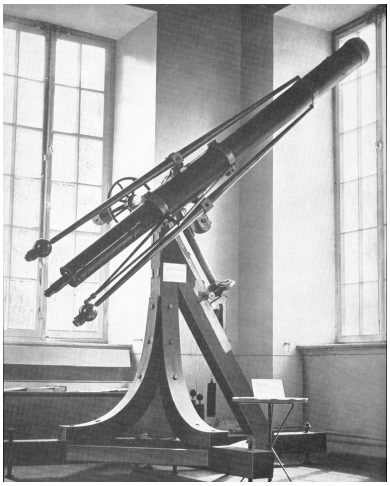

図 17　ドルパト天文台の「大屈折鏡」現在、古タルトゥ天文台に展示されている。[27]

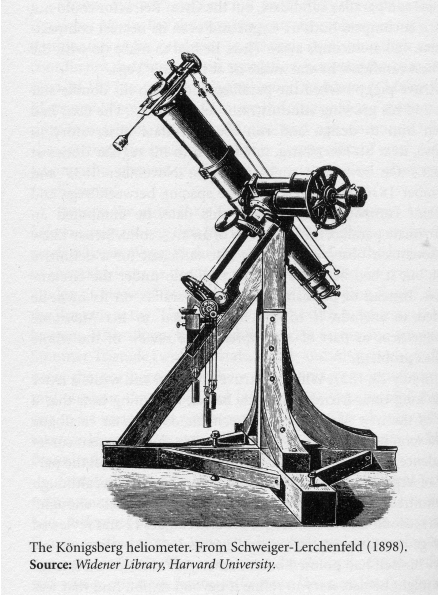

図 18　ケーニッヒスベルグ天文台のヘリオメータ[22]

なお、観測データの解析については当時ベッセルが卓越していた。彼は 1818 年に「基礎天文学」を公刊している[23]。この書が精密位置観測の教科書となったことはすでに述べた。

こうした新しい観測装置、解析技術によって視差の測定が可能になるが、シュトルーフェとベッセルは共に二重星の観測から始めて視差の測定へと移っている。ここでは視差の測定に成功したシュトルーフェとベッセルの測定過程を辿って見よう。

(2) シュトルーフェの視差測定

シュトルーフェは 1814 年にドルパト天文台に採用されて以来、子午儀による二重星の測定に取り組んでいたが、標準星に対する経度差、緯度差を測定するには経度、緯度を別々に測る必要があって不便であったし、また、口径が小さいので暗い星の観測は困難であった。1818 年から視差測定の観測を始めている

が、そのためには子午儀は不十分で、高精度の屈折望遠鏡が必須であった。大学を通して設置計画を提出したが、幸い、ロシア皇帝アレクサンダー1 世はその計画を承認したばかりか、1819 年には自らフラウンホーフェル工房を訪ねて、当時、世界最高の精度を持つ最大口径の望遠鏡を発注したというエピソードもある。

1824 年に望遠鏡がドルパトに到着し、大屈折鏡（Great Refractor）と名づけられた（図 17）。11 月 16 日にファーストライトを迎え、シュトルーフェは星像の鋭さに感嘆した。早速、取り組んだのは二重星の探査である。その後の 2 年間で 122,000 個の星を観測し、3000 個の二重星、多重星を検出している。1827 年にはその成果を「二重星、多重星の新カタログ」として公刊しているが、成分星の分離角，位置角の精度は他の追従を許さないものがあった。この業績によってロンドンの王立天文協会からゴールドメダルが授与されている。

大屈折鏡では平行して恒星視差の測定にも取り組んだ。彼が選んだ星はベガ（α Lyr）である。この星は二重星であるが、主星（A）は伴星（B）に対して異なった固有運動を示すので、両星は力学的に結ばれた連星ではなく、5 等級暗い伴星は遠方の星と見なされる。両星の分離角は 43 秒角と大屈折鏡の視野に十分に入る近さである。彼はこの星に狙いを定めた。そのほか、 61 Cyg が大きな固有運動を持ち、視差測定の有力候補星の 1 つであることは知っていたが、61 Cyg では比較星が 460 秒角と離れ、大屈折鏡の視野から外れてしまうので目的星としては不適当と考えた。

シュトルーフェがベガに対し、視差測定に取り組んだのは 1835 年からの 2 年間である。その間、多忙な日々が続いたので実際に観測できたのは 17 夜に過ぎなかった。それでも彼は観測結果を解析し、ベガの視差を

0.125 ± 0.055 秒角

と見積もった。1837 年 7 月 25 日、シュトルーフェはベッセルに長い手紙を送り、その中に「まだ完全ではないが」と断ってベガのこの測定値を示している[22]。この値は現在の視差 0.123 秒角に極めて近い。彼はまだ観測は不十分と考え、観測を続けるつもりであったから、それは公表しなかった。しかし、シュトルーフェの値を見てベッセルは大きな衝撃を受けた。その年の 10 月にベッセルはオルバースに手紙を送り、その中で「シュトルーフェは私より一歩先に進んでいる。彼はまだ完全ではないといっているが、その試みは有望な見通しを与えてくれる。」と述べている。シュトルーフェが最初に公表したのは 1840 年になってからであるが[28]、その値は

0.2613± 0.0254 秒角 （現在値 0.123 秒角）

と 2 倍の値になっている。これは彼が歳差と光行差の補正を大きくとりすぎたためと言われている。こうして、シュトルーフェは第 1 測定者とはならなかったのは彼のために惜しまれるが、彼の測定したベガの視差はベッセル、ヘンダーソンに比較して遥かに小さく、ドルパト天文台の大屈折鏡の高い精度を示すものであった。

シュトルーフェのためにひとこと弁明すると、1838 年は彼にとって多忙さと身内の不幸が重なった不運な年であった。幼い息子が病没し、妻の父であり、ドルパト大学の数学科の同僚でもあったパウル（Paul Bartels）も死亡した。ベガの観測と解析を行うのに十分な時間がなかったのである。

(3) ベッセルの視差測定

ベッセルは 1834 年頃からフラウンホーフェル製作のヘリオメータを用いた視差測定観測に乗り出している。彼は視差観測に適した目的星として 3 つの理由から 61 Cyg を選ん

だ[22, Chap.16]。

第 1 は 1806 年にピアジ（Giuseppe Piazzi, 1746 – 1826, イタリア カソリック神父）によってこの星が非常に大きな固有運動（年間 5.123 秒角）を持つことが発見された。固有運動の大きい星は近傍の星と考えられること。

第 2 はブラッドレーによって連星系として公転周期も求められていた。ケプラーの第 3 法則から両星の距離の概略値を推定し、見かけの分離角との比較からこの星の視差は 0.5 秒角より少し小さい程度と見積もった。これは測定不可能な値ではない。

第 3 にこの星は周極星に近く、年間を通して観測の機会が多い。

である。

こうして 61 Cyg の視差の測定に挑んだが、位置の補正法や比較星の選定などに多くの問題があり、また、1836 年は彗星の観測や、測地観測などに追われていた。ようやく 1837 年に視差観測を再開したが、適当な比較星の選定に手間取り、まだ、満足する結果に到達していなかった。そのさなかの 7 月に、上述したようにシュトルーフェからの手紙を受け取り、ショックを受けた。そこで彼は意を決して 8 月から本格的な視差測定に乗り出した。

最終的に比較星 2 個を選定し a, b 星として 61 Cyg との位置関係の測定を始めた。a 星は 460 秒角、b 星は 706 秒角離れていたが、ともにヘリオメータの視野にあった。1837 年 8 月 18 日から 38 年 10 月 2 日まで連続的に観測を続け、晴れた日には 15 回以上観測し、98 日分のデータが得られた。データ解析を半月ほどで終了させ、視差として

0.3136±0.0202 秒角　（現在値　0.287 秒角）

を導いた。その結果は直ちに王立天文協会のジョン・ハーシェルへの書簡という形でマンスリー・ノーチィスに投稿され、10 月 23 日に受理されている[29]。これが第 1 報である。続いて 12 月にはアストロノミッシェ・ナハリヒテン誌に詳細を掲載している[30]。この視差の値は公式に認められ、ベッセルが第 1 測定者となったのである。

4. トマス・ヘンダーソンと視差測定

ここでは視差測定の第 2 測定者であるヘンダーソン（Thomas Henderson, 1798 - 1844）について触れておこう [22, Chapter 11]。ヘンダーソンはスコットランドのダンディーの町で生まれた。北海に望む港町である。地元の高校を卒業後、弁護士養成校で資格を取り、弁護士として働いていた。裁判所の書記を兼ねたこともあった。しかし、高校時代からもち始めた天文学への興味が深まり、仕事の合間にエディンバラ市内の私立カルトン・ヒル天文台で位置天文学の実地を学んだ。そのなかで月食を用いて経度を測定する方法を考案し、その論文原稿を海軍編暦局長のトマス・ヤング（Thomas Young）に送った。

図 19　トマス・ヘンダーソンの肖像 [31]

天文学に対するヘンダーソンの才能はヤングによって高く評価され、エディンバラ大学や海軍編暦局からの招聘もあったが、依然と

してカルトン・ヒル天文台にアマチュアとして留まり、観測とともに「月食予報の新方法」(1827 年)など多くの論文を公表している。

そうした業績によって 1831 年（ヘンダーソン 33 歳）に王立協会から喜望峰の王立ケープ天文台台長として招聘される。今度は気持ちよく招聘を受け入れ、1832 年 4 月にケープ天文台に着任する。しかし、彼は最初から天文台の生活に馴染まなかった。天文台からのシンチレーションは良かったが、近くには彼が「陰鬱な沼地」と呼んだ湿地帯が広がり、蛇が多く群がり、野生動物も出没するという土地柄で環境は最悪であった。前任者で初代台長のフォロース（Fearon Fallows）もこの地で猩紅熱のために死去している。風土はヘンダーソンの健康も徐々に蝕んでいった。

それでも翌年まで天文台で観測を続け、6 万個に及ぶ恒星の位置の精密測定を行っているが、やはり、風土と健康には勝てず、1833 年に再びスコットランドに帰国している。帰国後はエディンバラ大学教授に就任し、王立天文官となったが、同時に元のカルトン・ヒル天文台においても観測を続け、北天の星の位置観測を行っている。

大学では喜望峰で行った観測資料の整約を進めていた。そのとき、彼のところに友人から α Cen が年間に 3.6 秒角という大きな固有運動を示すという情報が送られてきた。彼はこの星が近傍の星に違いないと確信し、ケープ天文台で行った位置観測のデータを解析してみた。データ数は 19 個に過ぎなかったが、それでも視差が 1.12 秒角と導かれた。しかし、資料数が少なかったので追加の観測が必要と考えて、ケープ天文台に勤務する友人に追加観測を依頼した。その結果が到着して解析を進めていたが、1838 年の 10 月に彼を興奮させるニュースが入ってきた。ケーニッヒスベルグ天文台のベッセルが 61 Cyg の視差測定に成功したという知らせである。彼は早速解析を急いだ。

α Cen も二重星である。主星と伴星 α^1, α^2 は 19 秒角の距離で共通の固有運動を示す。ケープ天文台ではこの星は周極星なので年間を通して観測可能である。ヘンダーソンの観測日数は少なかったが、視差測定には十分に長い観測期間があった。近傍の 3 個の比較星と共に位置測定をすすめ、光行差と章動の補正を施して、主伴両星についてそれぞれ独立に視差を計算した。それによると視差は

α^1 ： 1.38 ± 0.16 秒角

α^2 ： 0.94 ± 0.16 秒角

これらの値の統計的平均から α Cen までの視差を

1.16 ± 0.11 秒角 （現在値 0.742 秒角）

と見積もった。この結果はマンスリー・ノーティス誌に 1839 年 1 月 11 日受理として掲載され、ヘンダーソンは第 2 測定者となった[32]。測定誤差はベッセルたちより一桁大きかったが、α Cen が太陽に最も近い星の 1 つであることが幸いした。最も近いのは Proxima Centauri (視差 0.772 秒角)で α Cen はこれに次ぐ 2 番目の最近星である。

なお、視差測定の現況についてひとこと触れておこう。恒星視差の測定には高性能の位置観測を必要とするので観測された測定星と距離範囲は 20 世紀になっても限られたものであった。1970 においても写真観測で得られた星の数は距離 100 光年以内の数千個に限られていた。大きな前進を見たのは観測衛星の打ち上げである[22]。1989 年に Hipparcos (ESA)が打ち上げられ、250 万星の視差が測定された。それ以来、多くの衛星観測が計画されている。Hipparcos および計画中のおもな衛星を表 1 に示しておこう（測定精度はそれぞれの衛星プロジェクトのホームページ)。

表 1　衛星観測による視差測定の進展

年度	プロジェクト名	限界距離（光年）	測定星数	測定精度
1989	Hipparcos (ESA)	300	250 万個	2 – 4 ミリ秒角
計画中	DIVA (ドイツ)	3000	3000 万星	0.8 ミリ秒角
計画中	FAME (NASA)	8000	4000 万星	50 マイクロ秒角
計画中（2015）	SIM (NASA)	100,000	20,000 星	1 – 4 マイクロ秒角
計画中（2013）	GAIA (ESA)	30,000	10 億星	20 マイクロ秒角

注　括弧（）内の年号は打ち上げ予定年を示す。

5. シュトルーフェの銀河系モデル

シュトルーフェは 1847 年に「恒星天文学エチュード」というモノグラフを、フランス文化を愛するロシア皇帝のためにフランス語で著している[26]。この書は副題が「銀河系について、および恒星の距離について」となっているように、1847 年までの視差測定の現状と、それに基づく銀河系モデルの考察が主題になっている。この書の中で彼は次のように書いている。

「このレポートは私に天の川研究に立ち戻らせる機会となった。この課題は一見しただけでも、あまりに多くの謎を秘めており、多くの人はその研究をあきらめている。しかし、科学者である限り、なぞめいた現象や、設問の困難さにもかかわらず、研究から撤退するべきではない。研究者は古い文献を良く調べ、新しい技術をとおして静かに推測の歩を進めるべきである。」

この一文は当時の銀河系研究の困難さと、それに立ち向かうシュトルーフェの強い意思を示している。

「エチュード」は歴史的考察から始まっている。銀河の構造に関する哲学的、天文学的考察をガリレイ、ケプラーから始めているが、ウイリャム・ハーシェルの先行者として、トマス・ライト（Thomas Wright,1750）、イマヌエル・カント（Immanuel Kant,1755）、およびヨハン・ハインリッヒ・ランベルト（Johann Heinrich Lambert,1761）を挙げている。このうち前 2 者は思索的考察であったが、ランベルトは観測に基づいているという。ただ、ランベルトの研究はハーシェルのところまで届いていなかった。

この書「エチュード」はある意味ではシュトルーフェのウイリャム・ハーシェルに対する深い敬愛の書となっている。執筆の前には英国に渡ってジョン・ハーシェルに会い、ウイリャム・ハーシェルの銀河系に関する詳しい情報を手に入れている。この書は本文が 109 頁、注が 57 ページという小さいモノグラフであるが、そのうち、本文の半分くらいをハーシェルの銀河構造論の検討に当てている。

ハーシェルはすでに述べたように（源流[18]）、新旧 2 つの銀河系モデル（1785, 1818 年）を提唱し、1818 年のモデルでは古いモデルを否定している。

1785 年モデルは「星計測法」、1818 年モデルでは「等光度法」で銀河モデルにアプローチし、彼の望遠鏡では宇宙の果ての星まで見通せないという理由で前者を廃棄し、「深遠な銀河」というモデルに転換している。しかし、当時の天文書物は 1840 年代になっても依然

として古いモデルを銀河系として紹介していた。シュトルーフェは憤慨して書いている。

「なぜ、天文学者たちは、ハーシェル本人が否定している古い描像に固執しているのであろうか。最近の著作がいまだに古い段階に留まっているのは驚きである。」

シュトルーフェは当然、1818 年の新しいモデルを採用する。銀河宇宙の限界については、シュトルーフェの 23cm「大屈折鏡」は微光星探査ではハーシェルの 48ｃｍや 122ｃｍ反射鏡には及ばなかったので、ハーシェルの「深遠な宇宙」説を受け入れ、「太陽を取り巻く巨大な恒星界は銀河と呼ばれるが、その広がりについてわれわれは全く無知である。」と述べている。

しかし、宇宙の限界とは別に、シュトルーフェは太陽からみた銀河系内の恒星の分布について解析を進めている。基本的な手法はハーシェルの「星計測法」に基づき、新たに、恒星視差の成果と統計的手法を取り入れたものである。

星の計測についてはプルコワ天文台において作成された恒星カタログを、これをベッセルによって作成されたレギオモンタヌス星表[33]と比較する。ベッセルの星表は赤緯 -15 度から+15 度までのゾーンに限られていたので、ベッセルゾーンと呼ばれていた。一方、プルコワ星表は北天の広い天域をカバーしている。そこでシュトルーフェはまず、ベッセルゾーンを赤経によって 12 分し、それぞれの領域の恒星密度を測定した。次にその測定値に基づいて、プルコワ星表上で銀河面に平行な天域の星密度を統計的に推測する。

恒星までの距離について、「エチュード」の時代には 35 個の恒星視差が測定されていた。当時は、恒星はどれも太陽に似た天体と考えられていたので、彼も星の明るさはほぼ同一であると仮定して 1 等星までの平均の距離（仮に a とおく）を約 100 万天文単位（15.8 光年）と推定した。ハーシェルはシリウスまでの距離を単位にして宇宙のサイズを推測したが、シュトルーフェはそれを光年で表わした。視差の分からない遠方の星の距離測定法については「エチュード」では明示されていないが、恐らく、ハーシェルの「等光度法」か、それに近い方法で行われたのであろう。彼は等級ごとの星の距離として次の値を与えている。

最遠の 6 等星までの距離　$a_6 = 88.726\ a = 1402$ 光年

同じく 9 等星　$a_9 = 4.25\ a_6 = 377.08\ a = 5958$ 光年

銀河系全体としては銀河面方向では 9 等星の距離を超えて広がっているが、それと垂直方向の距離は星計測法から広がりは銀河面方向より小さいと推定した。こうして導かれた観測可能な範囲での銀河の構造は次のようになっている。

(1) 銀河系は扁平な構造を示し、中心の銀河面から両側にほぼ対称的に層状構造を示す。
(2) 星の空間密度は銀河面からの距離と共に減少する。
(3) 銀河系における太陽の位置は銀河面から少し外れた点にある。
(4) 星団や星雲は銀河面に近いところほど多く存在し、分布は不規則である。
(5) 恒星間空間には光を吸収する物質が存在する。

最後の点は銀河面の星の分布が不均質である点や星団、星雲の分布などから推測されたものである。こうした太陽近傍の銀河構造について「エチュード」では図は示されていないが, ベルコラ [1] は図 20 のような構造図を与えている。

ハーシェルからシュトルーフェへの銀河像の変遷を見ると、恒星の距離測定が最大の課

題だったことがわかる。年周視差を超えた何か新しい方法が必要だったのである [34]。

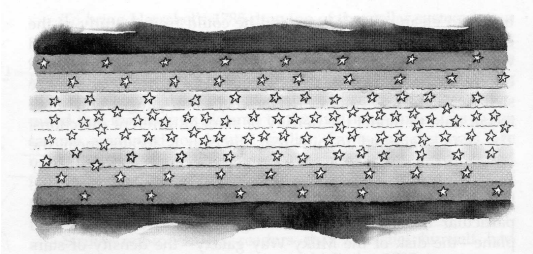

Figure 5.8 Struve's model of the Milky Way, as described verbally in his *Etudes d'Astronomie Stellaire* (1847). The Milky Way system of stars, in his conception, is thin in one direction but extends to unknown reaches in the other direction. Struve described the distribution of stars mathematically, envisioning them as very densely packed in a thin central layer, surrounded by layers of decreasing density. (Credit: Layne Lundström.)

図 20　シュトルーフェの銀河系モデル [1]

文　献

[22] Hirshfeld, A. W. 2001, Parallax　The Race to Measure the Cosmos, A.W. H. Freeman / Owl Book　（恒星視差測定の成功までの歴史物語。注や文献も多い）

[23] Bessel, F.W., 1818, Fundamenta Astronomiae (基礎天文学)

[24] Tartu Observatory Home page, Heads of the Tartu Observatory (歴代台長、Pfaff, Huth, Struve の紹介) http://www.ajaloomuuseum.ut.ee/vvebook/

[25] 小暮智一、2009、天文月報、102、614、歴史的天文台バーチャル探訪、その 3 古タルトゥ天文台

[26] Struve, W. 1847, Etude d'astronomie stellaire, sur la voie lactée et sur la distance des étoiles fixes, St. Petersburg, Imprimerie de l'Academie des Sciences. （恒星系天文学研究、銀河系と恒星までの距離について）（Kessinger Publishing 社復刻版）

[27] King, H. C. 1955. The History of the Telescope, Dover Publ. Inc. Chapter IX（フラウンホーフェルの望遠鏡）

[28] Struve, W. F. 1840, Astronomische Nachrichten, 17, No. 396, 12 – 13, Ueber die Parallaxe des Sterns α Lyrae nach Micrometermessungen am grössen Refraktor der Dorpater Sternwarte.

[29] Bessel, F. W., 1838, MNRAS, 152 – 161, (1838 Oct. 23 received)　A letter from Professor Bessel to Sir J. Herschel (parallax of 61 Cyg, 第 1 報)

[30] Bessel, F. W., 1838, A. N., 17, No. 365, 65 – 96, Bestimmung der Entferbung des 61sten Sterne des Schwans. (61 Cyg についての視差測定の詳細)

[31] Thomas Henderson, Google picture http://www.google.co.jp/search?q=Thomas+Henderson,astronomer&hl=ja&sa

[32] Henderson, T. 1839, MNRAS, 4, (Jan. 11), 168 – 170, On the parallax of α Centauri.

[33] Bessel, F.W., 1830, Tabulae regiomontanae reductionum observationum astronomicarum ab anno 1750 usque ad annum 1850 computlatae （ベッセルの作成したレギオモンタヌス恒星カタログ）

[34] Struve, O. W. 1895, Wilhelm Struve, Zur Erinnerung an der Vator, Karlsruhe : G. Braun'schen Hofbuchdruckerie （息子のオットーによる父 Wilhelm に対する回想録）

小暮智一（京都大学 OB）