

ヒヤデス星団の距離

宮本昌典

〈国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

ヒヤデス星団の距離について解説しようと思います。天文学史上、位置天文学と天体物理学双方から、ヒヤデス星団ほど強い関心を同時期に寄せられた天体はなかったと思われますし、また、ヒヤデス星団の距離問題が原因となって、普段はほとんど没交渉の位置天文学と天体物理学の間にこれほど大きな緊張関係が生まれたことはなかったように思われますので、筆者にとっては天文学の一つのドラマを垣間見るようで面白く感じられたからです。

1. 背景

空間運動が共通の星々の集団を運動星団 (Moving Clusters) と称する。星団の成因を考えれば全ての星団は運動星団といえるが、普通はごく狭い意味で使われていて、星団メンバー星の固有運動

ベクトルが天球上の一点 (Convergent Point, 以下C.P.または収束点) に収束するように見える星団をいう (図1参照)。

ここで恒星の固有運動とは、恒星の空間運動(恒星の銀河軌道はかなり複雑ではあるが、現実の観測精度では、等速直線運動と看做している)の横断速度成分を天球面上に投影したとき現われる恒星運動の角速度(″/年または″/世紀で表現)のことである。従って、赤経成分 $\mu_a \cos \delta$ と赤緯成分 μ_δ をもつ固有運動ベクトルは天球上の大円に沿う。だから、上述の“一点に収束するように見える”は、正確には180°離れた“二点に収束するように見える”はずである (図2参照)。

運動星団の重要性は、メンバー星の位置・固有運動・視線速度情報を幾何学的に組み合わせるだけで、一挙に多数のいろいろなスペクトル型・光度の星々の距離推定が可能ということによる。

Hyades Cluster(星数~200, 距離~45 pc), Ursa Major Group(星数~60, 距離~25 pc), Scorpio-Centaurs Group(星数~100, 距離~170 pc)などが運動星団として有名で、特にヒヤデス星団の距離は、宇宙距離梯子(Cosmological Distance Ladder)の第一段といわれ、天文学上の直接距離——三角視差(年周視差)——に次ぐ基本距離とされている。その理由は、ヒヤデス星団の距離を出発点として、次のような順序で銀河系内の距離尺度

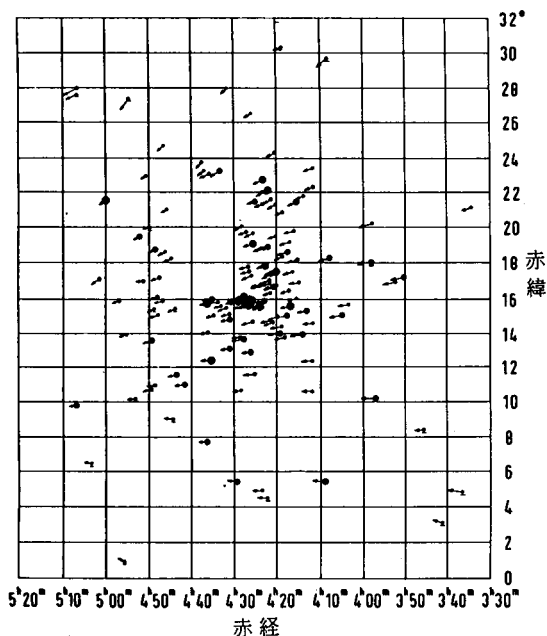


図1 ヒヤデス星団メンバー星の固有運動ベクトル (van Bueren 1952 による)。

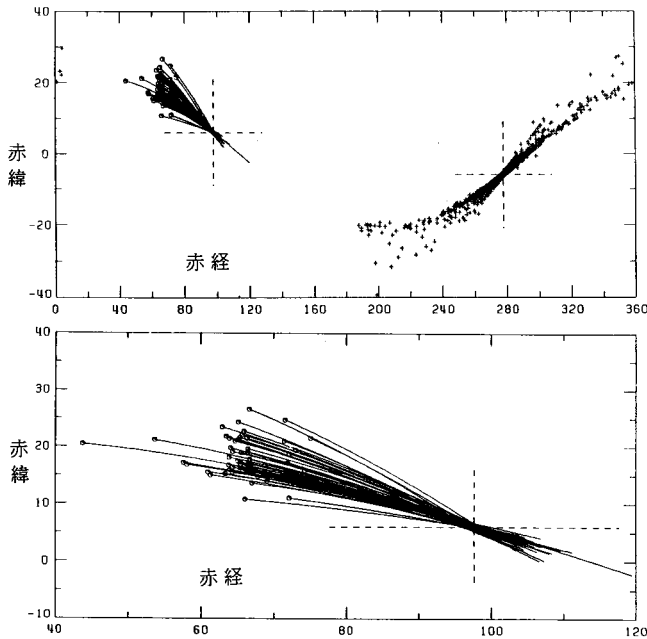
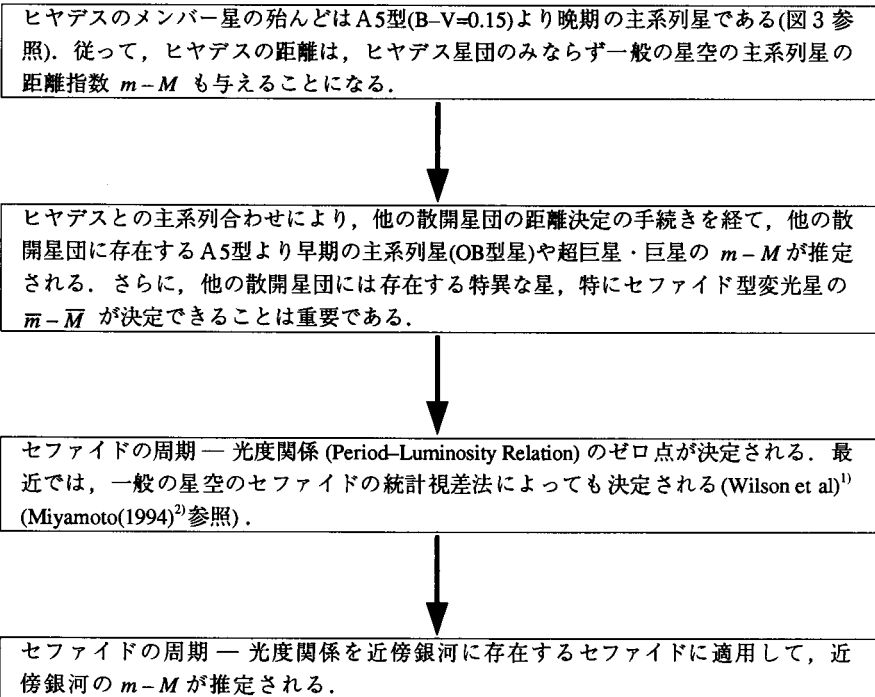


図2 ヒヤダス星団メンバー星 (62星) の固有運動ベクトルに沿う天球上の大円。これらの大円は天球上の一点 (収束点, C. P.) で交り (左側), 再び約180°離れた点で交叉するように見える (右側)。+印は大円の平均交点。下図は, ヒヤダス星団近傍の拡大図 (Schwan 1991 による)。

(Galactic Distance Scale) のみならず銀河系外の距離尺度 (Extragalactic Distance Scale) まで与えるからである。

2. 収束点法の原理

最も基本的で古典的な運動星団距離推定法の解



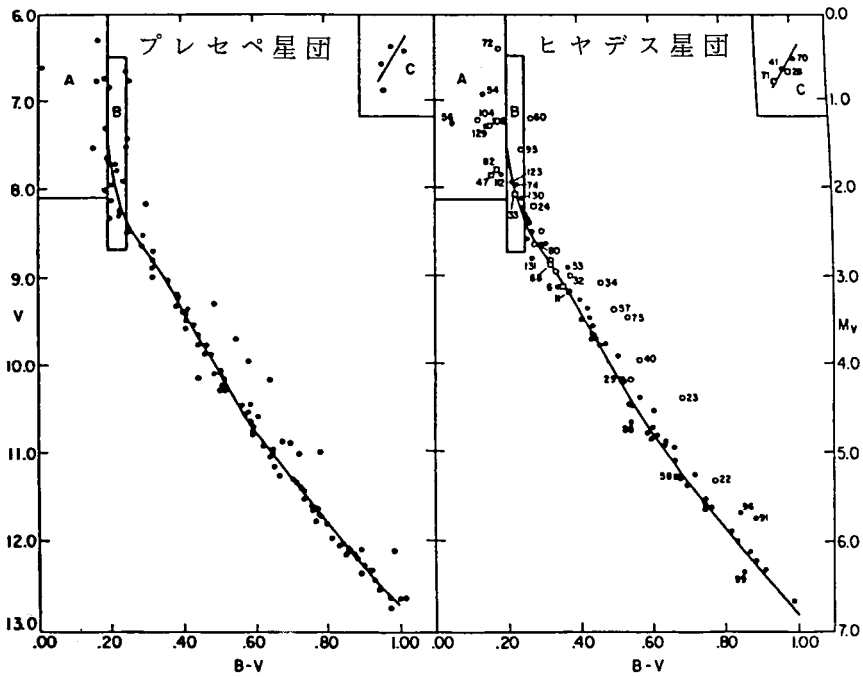


図3 ヒヤデス星団とプレセペ星団の色一等級図 (Upton 1970 による)。

説を試みる。§1で述べたように、運動星団の幾何学的考察だけから星団までの距離(太陽中心距離, Heliocentric Distance) の決定を行なう。この方法(モデル)が理想的に適用できるためには次の仮定が必要である(但し、b)とc)はa)の内容にすぎない)。

仮定

- a) 星団メンバー星はことごとく等しい空間速度ベクトルを持つ。
- b) 星団は膨張も収縮も回転もしていない。
- c) 星団速度重心のまわりの星々の速度のばらつき(Random Motion~0.2 km/s) は星団全体としての空間運動(~45 km/s) に比べて充分小さい。

さて、いうまでもなく、単位半径の天球面上では、天体の見える方向とか天体の運動の方向とか、とにかく“方向”のみを問題とする。図4に、われわれ(太陽☉)を中心とした天球と星団メンバー星Sの方向(α, δ)と星団メンバー星共通の空間速度ベクトルVの方向(A, D)即ち天球面上に

おける収束点の方向との関係を図解した。メンバー星と収束点(C.P.)を結ぶ大円弧の長さが角度 λ となる(図5参照)。メンバー星の固有運動ベクトル μ ($|\mu| = (\mu_\alpha^2 \cos^2 \delta + \mu_\delta^2)^{1/2}$)はこの大円弧に沿う。メンバー星までの距離(Heliocentric Distance)を $|r|$ で示してある。

図4を参照すると、 λ が既知ならメンバー星の視線速度情報 V_R を使って星団共通の空間速度の大きさ V がわかる。あとは、次元解析そのものである：長さ=速さ/角速度=空間速度/固有運動、即ち次の関係が成り立つ。

$$r = \frac{1}{\kappa} \frac{V \sin \lambda}{\mu} = \frac{1}{\kappa} \frac{V_R \tan \lambda}{\mu} \quad (1)$$

この関係はしばしば星団方程式(Cluster Equation)と呼ばれる。但し、 κ は距離・速度・固有運動の単位を結びつける定数で、距離をpc、速度をkm/s、固有運動を"/年で測るとき $\kappa=4.74$ である。この原理によれば、(1)式の λ 即ち収束点の位置(A, D)を精度良く決めることが本質的であることがわかる。実際問題として、次のような手順

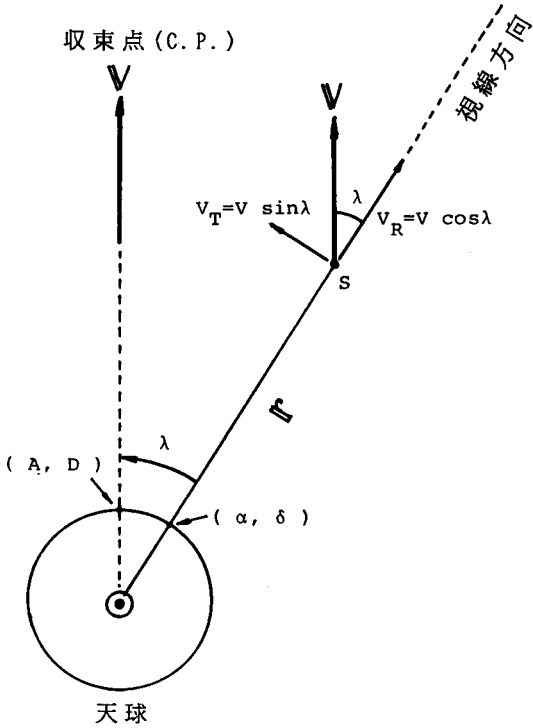


図4

で星団の平均距離が決められる。

まず、図5を参照して、メンバー星の位置 (α, δ) と取束点の位置 (A, D) と λ との関係は球面三角法の cosine 公式により次のように与えられる。

$$\cos \lambda = \sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos (A - \alpha) \quad (2)$$

一方、メンバー星共通の空間速度 V の赤道直角座標成分を (X, Y, Z) とすると

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} \cos D \cos A \\ \cos D \sin A \\ \sin D \end{pmatrix} \quad (3)$$

これから、天球面上 S 点 (α, δ) における赤経方向、赤緯方向、視線方向の速度成分 $(V_\alpha, V_\delta, V_\gamma)$ は次のように与えられる。

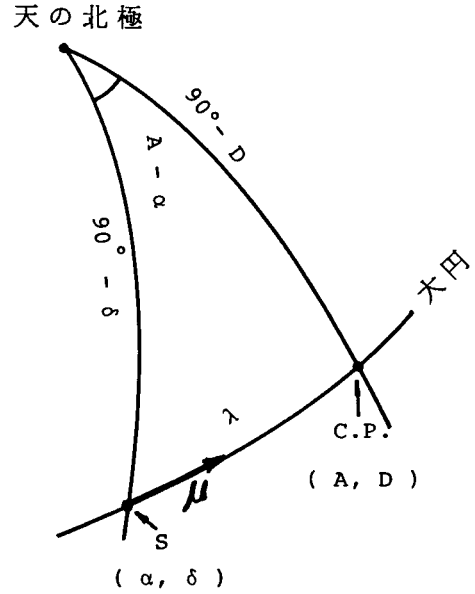


図5

$$\left. \begin{aligned} V_\alpha &= -X \sin \alpha + Y \cos \alpha \\ V_\delta &= -X \cos \alpha \sin \delta - Y \sin \alpha \sin \delta + Z \cos \delta \\ V_\gamma &= X \cos \alpha \cos \delta + Y \sin \alpha \cos \delta + Z \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4)式左辺は固有運動と視線速度 $(\mu_\alpha, \mu_\delta, V_R)$ を使って表現できる。即ち、

$$\left. \begin{aligned} V_\alpha &= kr \mu_\alpha \cos \delta \\ V_\delta &= kr \mu_\delta \\ V_\gamma &= V_R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

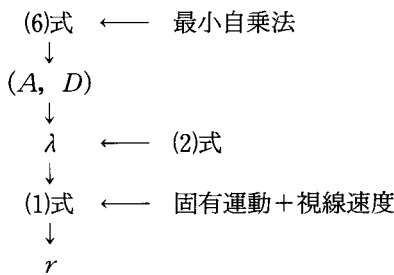
但し、もちろん r が求めるべき未知量である。(5)式を(4)式に代入してから、(4)式最初の2本の関係から未知量 r を消去すると、メンバー星共通の取束点の位置 (A, D) を決定するための次の条件方程式(メンバー星の数だけある)が得られる。

$$a \cos A \cot D + b \sin A \cot D = c \quad (6)$$

但し、 a, b, c は既知量で

$$\left. \begin{aligned} a &= \mu_\alpha \cos \alpha \cos \delta \sin \delta - \mu_\delta \sin \alpha \\ b &= \mu_\alpha \sin \alpha \cos \delta \sin \delta + \mu_\delta \cos \alpha \\ c &= \mu_\alpha \cos^2 \delta \end{aligned} \right\}$$

(A, D) は最小自乗法により求められる。この (A, D) とメンバー星の位置 (α, δ) から(2)式を使って λ が求まる。個々のメンバー星から (A, D) までの角距離 λ , 視線速度, 固有運動は少しずつ異なるから, (1)式の λ, V_R, μ には適当な平均値を代入するものとする。以上の距離決定手続きをまとめると次のようになる。



3. 恒星内部構造論から投げかけられた疑問——収束点法の問題点

前節の原理に従い, GC 星表の固有運動データを用いてオランダの H.G. van Bueren (1952)³⁾は, ヒヤデス星団までの距離 $r=40.4 \pm 1.1\text{pc}$ を与えた (距離指数と三角視差に換算すると $m-M=3.03 \pm 0.06$ および $\pi=0''.0248 \pm 0''.007$ となる)。van Bueren によるこの距離がしばらく天文学界に定着することになった。ひとたび権威が形成されると, その後の追試はことごとく権威値を追認しその結果ますます権威を強め, 思考の融通性が失われることとなった。天文学者の同様な姿勢は Hubble 定数にも見られる。

前節の収束点の方法を適用するにあたって, いくつかの注意すべき問題が潜んでいることに気付く:

a) メンバーシップ

背景の一般の星空から星団のメンバー星をいかに客観的・合理的に分類するかという問題。星団とは無関係な背景の星が混入すると, こ

の方法の前提となっているサンプル星の空間速度ベクトルの平行性が崩れてしまう。

b) 固有運動記述座標系の欠陥

収束点 (A, D) 決定に直接かかわっているメンバー星の固有運動 (μ_α, μ_δ) が信頼できるかという問題である。固有運動は, 春分点と赤道の動き (天の北極の動き) が正確にわかっているとき, 背景の無回転 (慣性) 座標系における恒星の位置変化率として与えられる。もし日月歳差定数値に誤差 $\Delta\psi$ があれば (現用の歳差定数値も $0''.1/\text{世紀}$ の桁からあやしい, Miyamoto and Sôma 1993⁴⁾), 地球という足場 (観測プラットフォーム) の運動誤差を全て真の固有運動と思い込んで (A, D) を決定することになる。さらに, 天球上の場所々に依存して, 固有運動には常に系統的な誤差が含まれるから, そのような誤差も (A, D) 決定を左右する。

c) 固有運動成分 μ_δ の精度

この問題はヒヤデス星団固有の (偶然的な) 問題である。メンバー星 (α, δ) と収束点 (A, D) を結ぶ大円が, 大ざっぱに言って, 赤道に平行であるため (図2参照), 主としてメンバー星の μ_δ が (A, D) 決定に寄与する。 μ_δ のわずかな誤差が (A, D) 決定を大きく左右することになる。

このような問題を抱えていたにもかかわらず, とにかく van Bueren の値は定着してしまった。一方, この頃, 恒星内部構造論は最盛期を迎えつつあった。そして, 主系列星に対する理論的な質量・光度関係と太陽近傍の主系列の実視連星の観測に基づく質量・光度関係とのつき合わせは既に完了していた。理論的にも観測的にも質量・光度関係は確立されていたという背景がある。

まず, Hodge and Wallerstein (1966)⁵⁾は, van Bueren による距離を採用すると, ヒヤデス星団に属する主系列の実視連星の質量が undermassive になってしまうことを指摘した。連星系の見

掛けの大きさ α'' , 周期 P 年, 質量 $(M_A + M_B)/M_\odot$ が与えられると, 連星の三角視差 π_d'' はケプラーの第三法則から次のように与えられる (π_d'' は力学視差 (Dynamical Parallax) と呼ばれている).

$$\pi_d'' = \alpha'' P^{-2/3} [(M_A + M_B)/M_\odot]^{-1/3} \quad (7)$$

(7)式の π_d'' に van Bueren の値を入れて ($M_A + M_B$) を求めると, 太陽近傍の主系列星の質量・光度関係から推定される質量 (光度は van Bueren の $m-M$ から求める) より著しく小さくなってしまふ. ヒヤデス星団中の実視連星の質量として, 三角視差や軌道がよく決まっている太陽近傍の実視連星の質量 (従って, 質量・光度関係を満たす質量) を(7)式に使うと, ヒヤデスの π_d'' (従ってヒヤデスの三角視差) はもっと小さくなる (距離が大きくなる). さらに, Wilson-Bappu 効果を使ってヒヤデス星団中の超巨星の絶対等級を推定すると, やはり van Bueren の距離が小さすぎることがわかってきた. Hodge and Wallerstein は, 以上のような天体物理学的考察から, ヒヤデスの距離をもっと大きくして $r=48.3\text{pc}$, $\pi=0''.0207$, $m-M=3.42$ という値を提案した.

一方では, Iben (1963, 1967)⁶⁾⁷⁾ は, van Bueren の値を使うかぎり恒星内部構造論は, ヒヤデスの質量・光度関係と色・光度関係の双方を矛盾なく説明できないことを示し, 内部構造論はヒヤデス星団の距離として $m-M=3.40$ を与えることを示した. 以上の経緯については, van Altena (1974)⁸⁾ の論評も参照されたい. ただ彼はもう少し控えめの改定 $m-M=3.21 \pm 0.03$ を提案している.

今にして思えば, これらヒヤデスにまつわる天体物理学の活躍を通して, 天文学界に印象付けたことは, 天体物理学の勝利と同時に位置天文学の信頼性の失墜であったように思われる. 特に, 星々の固有運動決定に際して, 子午環観測は積極的な意味をもたないという強い印象を Hodge and Wallerstein の論文が与えてしまったことは, 非常に残念に思う (§5 参照).

4. 批判後の反応

i) Upton (1970)⁹⁾による反論—固有運動の勾配法

前節での問題点 b) が最も深刻で, 現在でも位置天文学の弱点の一つである. 銀河系内における星々の位置 (α, δ) の網目として天文座標系を構築するかぎり, 天球上の三角点としての星々の運動は正確にわかっている必要があるから, 観測プラットフォームとしての地球の歳差を正確に決めることと, 銀河系内部運動 (特に銀河回転) を正確に決めることは同等である (Miyamoto and Sôma 1993¹⁰⁾). 歳差定数だけを分離して正確に決める訳には行かない. だから, b) のような問題に位置天文屋は常にストレスを感じている.

そこで, Upton は, b) の欠陥を容認したうえで, 真の (従って絶対的な) 固有運動値に頼らずに, 固有運動の勾配に着目することにした. もはや固有運動ベクトルの収束点の概念は表には出て来ない. ヒヤデス星団は太陽から遠ざかるに従って, 星団の見掛けの大きさ (angular size) θ が時と共に減少することに着目すると, 図6から次の関係が成り立つことがわかる (但し, θ が小なる場合).

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = -\frac{V_R}{r}$$

一方, $\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} \approx \frac{d\mu_\alpha}{d\alpha}$ or $\frac{d\mu_\delta}{d\delta}$.

これらを組み合わせると, 星団領域の固有運動の勾配 $d\mu_\alpha/d\alpha$ or $d\mu_\delta/d\delta$ とメンバー星の視線速度

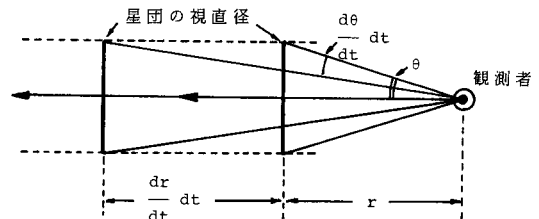


図6 星団が太陽から遠ざかるにつれて, 星団視直径は減少する.

を知って、距離 r を導くことができる。もはや、固有運動 (μ_α, μ_δ) のゼロ点 (春分点と赤道の移動) がいかなるものであるかは問われない。Upton はこの方法によってヒヤデスの距離を求め、収束点には頼らずに van Bueren の値の正しさを“証明”した。つまり、van Bueren の用いた位置天文データの有効性を主張した。しかしながら、後になって、前記近似関係 (\approx) を修正するプロセスを含むかぎりこの方法と収束点の方法は数学的には同等であることがわかり、van Bueren の値を独立な方法で支持したことはなくなってしまう。

ii) Lick 天文台による NPM (Northern Proper Motions) 計画——絶対的固有運動の決定

観測プラットフォームの動き (歳差、従って固有運動の原点たる春分点と赤道の動き) の不確定性だけによって天文学全体の思考を停滞させたくないという発想は当然起こる——宇宙は広いのだから。元を辿れば、前節 b) のような問題は、われわれが天球上に確実な不動点を探し出せないことによる。不動点が存在すれば、観測プラットフォームの動きも星々の固有運動もそれに準拠して決めればよい。そうすれば、それぞれ絶対的な意味を持つ。

天球面上の不動点として遠方銀河の中心核を使えばよい。銀河がたとえ宇宙膨張 (50 km/s/Mpc) と同程度の横断速度を持っていても 10^{-3} "/世紀 程度だから、現在のところ実質的には不動点と看做してよからう (いま問題としている固有運動は $1'' \sim 0.1$ /世紀)。まさに、恒星 (fixed stars) の時代から“fixed galaxies”の時代への転換である。

このような転換を最初に提案したのは以前の Lick 天文台長の W.H. Wright (1934) である (準星を天球上の固定点とした現在の VLBI 観測の考え方は Wright まで遡る)。早速、カーネギー財団から援助を得て、18 等級までの前景の星々のみならず背景の galaxies の写真位置測定用の 2 色の (twin) 天体写真儀の建造が開始された。しか

し、第二次世界大戦による資金難は米国においても深刻で、終戦を迎えるまでこの計画は中断されてしまった。終戦後まもなくこの計画は Vasilevskis や Klemola により再び立ち上げられ、固有運動決定のための第一期の北天全域写真撮影 (写野 $6^\circ \times 6^\circ$) が始まった。第一期撮影の副産物として、C.D. Shane and C.A. Wirtanen (1967)¹¹⁾ による銀河計数に基づく銀河分布構造 (いわゆる宇宙の大規模構造) の解明が緒についたことは注目に値する。第二期の撮影はつい最近完了し、現在約 30 万星の絶対固有運動決定が行なわれている最中である (Klemola et al. 1987¹²⁾)。南天全域写真撮影 (SPM) は、van Altena をリーダーとして Yale 大学とアルゼンチン San-Juan 天文台によって進められており、現在第二期の撮影が行なわれている最中である。但し、zone-of-avoidance ($|b| < 20^\circ$) では背景の銀河が見えないから、南北全天にわたって整合性のある天文座標系が構築できるかどうか問題として残る。

長期プロジェクト推進に当たって常に必要なことだが、この間先導研究の 1 つとして、Hanson (1975)¹³⁾ によって絶対固有運動データに基づくヒヤデス星団の距離決定が試みられた。固有運動データに自信があるのだから、正攻法つまり収束点の方法を用いる。既にわれわれは、ヒヤデスの距離と空間運動に関して全く無知ではないし、(A, D) 決定が本質的な役割を演じていることも知っている。(1)と(2)式によれば、 $K = V/r$ とするとき、メンバー星の固有運動は $\mu = F(A, D, K; \alpha, \delta)$ と書けるから、初期推定値を $[A_0, D_0, K_0]$ として逐次近似的に $[A, D, K]$ を決定することができる。即ち、メンバー星の数だけの条件式

$$\begin{aligned} \Delta F &= \mu_{obs} - F(A_0, D_0, K_0; \alpha, \delta) \\ &= \left(\frac{\partial F}{\partial A}\right)_0 \Delta A + \left(\frac{\partial F}{\partial D}\right)_0 \Delta D + \left(\frac{\partial F}{\partial K}\right)_0 \Delta K \end{aligned}$$

に最小自乗法を適用して ($\Delta A, \Delta D, \Delta K$) を求めると、これらのパラメータの第一近似値 $K_1 = K_0 + \Delta K, A_1 = A_0 + \Delta A, D_1 = D_0 + \Delta D$ が得られる。

以下、収束するまで逐次近似を繰り返す。(A, D) とメンバー星の視線速度情報 V_R があれば $V = V_R / \cos \lambda$ の関係を使って K から r を求めることができる。このようにして得られたヒヤデスの距離を最後の表に掲載してある。恒星内部構造論から演繹される距離に近づいた値が絶対的固有運動データから導かれたことになる。

iii) 視線速度勾配による収束点決定

子午環観測による固有運動データに基づいて構築された天文座標系(基本座標系)がそれほど信頼できないものならば、観測精度が高いといわれている視線速度情報だけからヒヤデスの収束点(A, D)を決定できないものだろうか? Gunn et al.(1988)¹⁴⁾は次のような方法を考えた。

まず図4の幾何学から、 $V_R = V \cos \lambda$ の関係の導関数を求めると、 $dV_R/d\lambda = -V_R \tan \lambda$ であるから、(1)式は次のようになる。

$$r = -\frac{1}{\kappa} \frac{dV_R/d\lambda}{\mu}$$

ここでは、 $dV_R/d\lambda$ を通して間接的に(A, D)を決定していることになる。つまり、 $dV_R/d\lambda$ と μ を知って r を導く(但し、ここでは、固有運動ベクトルの方向は信頼しないにしても大きさは信頼している)。この方法が積極的な意味を持つためには、メンバー星の視線速度の観測精度 ± 1 km/s 以上が要求される。視線速度といえども系統誤差があることが知られているから、この精度を保つためには、天体暦の正確な小惑星のスペクトル線を使って常に分光器の検定が必要であった。この方法を使ってえられた結果も最後の表に掲げてある。ここでも、恒星内部構造論から推定される値への歩み寄りが見られる。

5. 子午環観測データ(基本座標系)の名誉回復

さて、van Bueren の基本データは古典的な GC 星表の固有運動データであり、GC 星表が採用している歳差定数(春分点と赤道の移動量)は、1980

年初めまで利用されてきた FK 4 基本座標系の定数と同一で、19 世紀末に米国海軍天文台(USNO)の S. Newcomb が定めた値である。長らく採用されてきた Newcomb の値に $\Delta\psi \sim 1''$ /世紀の修正を施したのは、子午環観測データに基づく基本星表編集の総本山、Astronomisches Rechen-Institut (Heidelberg) の W. Fricke で、つい最近のことである。この修正された歳差定数に従って現用の FK 5 基本座標系の春分点・赤道は移動されている(この他、観測誤差による春分点移動や惑星歳差による春分点移動があるが、説明を簡略化するため日月歳差に的をしぼる)。

歳差定数値の修正に伴う固有運動値の修正は次の程度である。

$$\left. \begin{aligned} \Delta\mu_\alpha &\sim -0''.4 \sin \alpha \tan \delta / \text{世紀} \\ \Delta\mu_\delta &\sim -0''.4 \cos \alpha / \text{世紀} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

一方、ヒヤデス星団メンバー星の固有運動の代表的な値は次の程度である。

$$\left. \begin{aligned} \mu_\alpha &\sim 10'' / \text{世紀} \\ \mu_\delta &\sim 3'' / \text{世紀} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ヒヤデスの位置(α, δ)を考慮すれば(8)式による固有運動の修正量は $0.1''$ /世紀程度だから、この修正が距離推定を 20% も(40 pc \rightarrow 48 pc)変更させるはずがない。Hodge and Wallerstein が無責任にも子午環観測の信頼性を失墜させることになった b) の問題ではなさそうだ (§3 参照)。過去において、固有運動データをあまりに気軽に処理しすぎていたのではあるまいか……。ひとたび問題のモデルを設定したら、観測データは常に誤差で汚されていることを念頭において、データの質を徹底的に検討する必要がある。

Astronomisches Rechen-Institut の H. Schwan (1990)¹⁵⁾は、最高精度の固有運動データソースである FK 5 星表 Parts I and II と N 30 星表の現代版から 44 個の Hyades メンバー星を選び出し、収束点法に基づく非常に神経質な解析を行なった結

果、天体物理学が示唆してきた値とほとんど一致する次のような値を得た(Schwan 1991も参照¹⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} (A, D) &= (6^h 28^m.4 \pm 3^m.2, +6^\circ 15' \pm 20') \\ r &= 47.2 \text{pc} \pm 1.5 \text{pc} \\ m - M &= 3.37 \pm 0.07 \end{aligned} \right\}$$

Schwan の辿った手続きを以下説明する：

- 1) ヒヤデス星団のメンバー星の選択

星団の近似的な中心 $(\alpha_0, \delta_0) = (4^h.4, +15^\circ 8')$

星団の近似的な収束点 $(A_0, D_0) = (6^h.38, +7^\circ.15)$

を仮定して、 (α_0, δ_0) のまわり 30° 以内の全ての星を拾い上げる。

次に、それぞれの星 (α_i, δ_i) と (A_0, D_0) を結ぶ大円の方位角 ϕ_{CP_i} とその星の固有運動ベクトルの方位角 ϕ_{μ_i} から、差 $\Delta\phi_i = |\phi_{CP_i} - \phi_{\mu_i}|$ を計算し、 $\Delta\phi_i \geq 10^\circ$ の星を除外する。さらに、星団の近似的な空間速度 $V = 44.5$ km/s を仮定し、メンバー星の V_R を推定し、Wilson の視線速度カタログの値との差が 10 km/s 以上となる場合は、そのような星も除外する。Wilson のカタログの質が完璧でないからである。結局 44 星のみ選ばれた。

- 2) (A_0, D_0) の修正

最初の近似値 (A_0, D_0) のまわりに多数の格子点を設け、それらを $(A_0^{(j)}, D_0^{(j)})$ とする。全ての星に対して $\Delta\phi_i^{(j)}$ を計算し、適当な重み w_i のもとに

$$S^{(j)} = \sum_{i=1}^N w_i [\Delta\phi_i^{(j)}]^2$$
 が最小になるような格子点 $(A_0^{(j)}, D_0^{(j)})$ を探し出す。この格子点のまわりにさらに細かな格子点を設け以上の手続きを収束するまで繰り返す。このようにして得られた (A, D) の推定値を (A^*, D^*) と記す。

3) 疑わしい固有運動 μ_δ をもつ星々の除外

§3 の c) の問題を避けるために、 μ_δ 成分に大

きな誤差 ϵ_{μ_δ} が含まれていると思われる星を除外したい。

われわれは、既に、星団の収束点の近似的な値 (A^*, D^*) と近似的な空間速度 V を知っている。もちろん選択された星々の (α_i, δ_i) と $(\mu_{\alpha_i}, \mu_{\delta_i})$ は与えられている。(4)と(5)式の最初の2本の関係式を用いると、それぞれの星の μ_α と μ_δ に基づいた別々の距離 r_α と r_δ が推定できる。一方、 (A^*, D^*) と V の近似値を用いると、(1)式からも平均的な r が推定できる。矛盾のない距離は $r \approx r_\alpha \approx r_\delta$ となるはずである。実際には、全ての星に対して $|r - r_\alpha| \leq 5 \text{pc}$ であり、 $|r - r_\delta| \geq 10 \text{pc}$ が10星含まれていたのもそれらは除外された(残34星)。

4) 収束点 (A, D) と距離 r の決定

このように精選された34星に対して、§2の収束点法を適用して前述の (A, D) を得た。Wilson のカタログが与える V_R の精度は満足できるものではない。 V_R のカタログ値を直接(1)式に用いると信用を落とす。星団中心の平均視線速度の最新値 $V_R = +39.1$ km/s を用いて $V_R = V \cos \lambda$ の関係から空間速度 $V = 46.3$ km/s をまず求めこれを使って(1)式から r を導くと前述のような値となった。星団の空間速度の銀河直角座標成分は $(U, V, W) = (-42.0, -19.5, -1.3)$ km/s となった。また、星団内の星々の速度分散は 0.3 km/s 以下であることもわかった。

このようにして、現在では、位置天文学データと天体物理学データいずれに基づいても、ヒヤデス星団の互いに整合性のある距離決定ができるようになった。van Bueren も Schwan と同様に慎重にデータ解析を行なっていれば、GC 星表を使ってもあれほど小さな距離を与えなかったであろうと悔やまれる。Newcomb の歳差定数値はそれほど悪くなかったのだから。

最近では、ヒヤデス星団メンバー星の三角視差観測がかなり蓄積されていて、三角視差法による

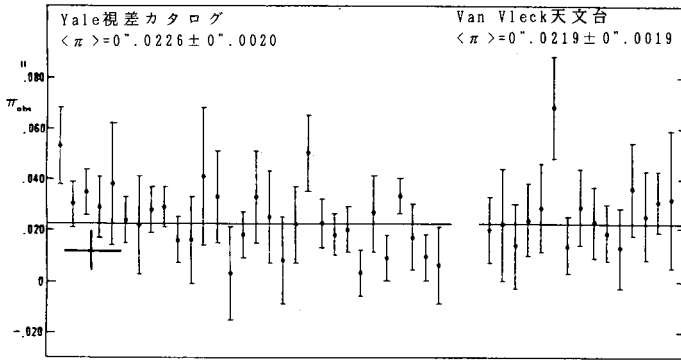


図7 ヒヤデス星団星の絶対三角視差と標準誤差 (van Altena 1974 による)。

表1 ヒヤデス星団の距離の最近の決定値

収束点の赤経・赤緯	距離(pc)	距離指数($m-M$)	空間速度(km/s)	方法
van Altena (1974)	43.9 ± 0.6	3.21 ± 0.03		三角視差
Hanson (1975)	48.5 ± 5.0	3.42 ± 0.20		収束点法
Hanson (1977)	44.7 ± 1.6	3.25 ± 0.08		三角視差
Hanson (1980)	45.6 ± 1.0	3.30 ± 0.04		三角視差の加重平均
Eggen (1982)	46.7	3.30		主系列合わせ
Heintz (1988)	46.8	3.35		連星の力学視差
Gunn et al. (1988)	$A = 98.2 \pm 1.1$ $D = +6.1 \pm 1.0$	45.4 ± 2.1	48.0 ± 0.3	収束点法 (視線速度勾配)
Schwan (1990)	$A = 97.0 \pm 0.8$ $D = +6.3 \pm 0.3$	47.2 ± 1.5	46.3	収束点法
Schwan (1991)	$A = 97.7 \pm 0.4$ $D = +6.0 \pm 0.2$	47.9 ± 0.8	46.6	収束点法
Simple Mean	46.1 ± 1.6	3.32 ± 0.05		以上単純平均

ヒヤデスの直接距離決定が可能になりつつある。図7に van Altena (1974)¹⁷⁾から引用したメンバー星の三角視差測定を示す。個々の誤差は大きいのが平均値はよく決まっているように思われる。Hanson(1980)¹⁸⁾によれば、ヒヤデスの55メンバー星から求められた三角視差の平均値は次のようになる。

$$\pi = 0''.0224 \pm 0''.0009 \quad (r = 44.6\text{pc})$$

$$m - M = 3.25 \pm 0.08$$

最後に、ヒヤデスの最近の距離決定を表の形でまとめた。約4年のミッションを1993年8月に終えたESAの位置天文衛星 HIPPARCOS は、ヒヤ

デスを含む数箇の運動星団の三角視差測定 ($\pm 0''.002$ の測角精度) も行なった。解析結果が待ち遠しい。

参考文献

- 1) Wilson, T.D., Barnes III, T.G., Hawley, S.L., and Jefferys, W.H. 1991, ApJ., 378, 717
- 2) Miyamoto, M. 1994, 天文教養講座 Cosmological Distance Ladder 講義録, 宮本昌典編, p58.
- 3) van Bueren, H.G. 1952, Bull. Astron. Inst. Neth., 11, 385.
- 4) Miyamoto, M. and Sōma, M.: 1993, AJ., 105, 691.
- 5) Hodge, P.W. and Wallerstein, G.: 1966, P.A.S.P., 78, 411.

6) Iben, I., Jr. : 1963, ApJ., 138, 452.
 7) Iben, I., Jr. : 1967, Ann. Rev. Astron. and Astrophys., 5, 571.
 8) van Altena, W.F. 1974, PASP., 88, 217.
 9) Upton, E.K.L. 1970, AJ., 75, 1097.
 10) 前掲書 4)
 11) Shane, C.D. and Wirtanen, C.A. 1967, Publ. Lick Obs., 22, Part 1.
 12) Klemola, A.R., Jones, B.F., and Hanson, R.B. : 1987, AJ., 94, 501.
 13) Hanson, R.B. : 1975, AJ., 80, 379.
 14) Gunn, J.E., Griffin, R.F., Griffin, R.E.M., and Zimmerman, B.A. : 1988, AJ., 96, 198.
 15) Schwan, H. 1990, A & A., 228, 69.
 16) Schwan, H. 1991, A & A., 243, 386.
 17) 前掲書 8)
 18) Hanson, R.B. : 1980, IAU Symp. No. 85, in Star Clusters, 71.
 19) Eggen, O.J. : 1982, ApJ. Suppl., 50, 221.

20) Heinz, W.D. : 1988, PASP., 100, 839.

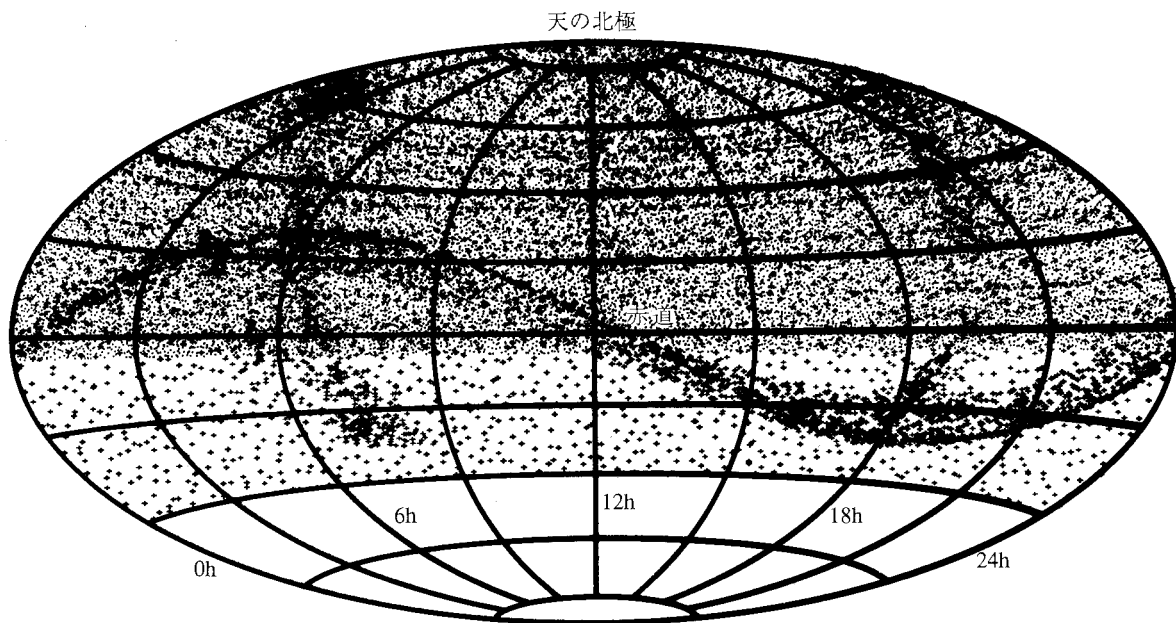
Parallax of the Hyades Cluster

Masanori Miyamoto

National Astronomical Observatory

Mitaka, Tokyo 181, Japan

Abstract : Concerning the astronomical importance of the Hyades distance, the methods hitherto proposed of determining the distance of moving clusters are reviewed. The Hyades distance determined by Schwan (1990, 1991), on the basis of the classical Convergent Point Method, has proved that the current Reference System of Proper Motions is sufficiently inertial to determine the accurate convergent point. Nowadays, the Hyades distances derived from the astrometric and astrophysical data are reconciled with each other.



星々の固有運動決定のため国立天文台三鷹キャンパスにある子午環によって、過去 10 年間に観測された 12 等級まで約 35000 星 (ヒヤデス星団も含む) の天球分布。青色は天の川 (銀河面) に沿う OB 型星やセフェイド型変光星。赤道に沿ってうねった分布は黄道帯星。