

星の位置を測る

安田 春 雄*

天文学では、自然法則に基いて構成された理論体系を、常に天体现象の観測事実と比較検討し、宇宙についての概念や理論体系を完成してゆく方法をとっている。例えば天体力学では、時代と共に精密さを増していった観測資料の集積を基礎とし、観測値と理論値を比較することによって、海王星や冥王星の発見をはじめ幾多の輝しい業績をあげ、ついにはアインシュタインの相対性理論の出現をうながし、時間空間に関する概念を根本的に改革した。したがって天体の位置を精密に測り記録しておくことは、いつでも極めて大切なことである。

ここでは、話を「恒星の位置を測り記録しておくこと」に限って、その意義を考えてみよう。これを大別するとつぎの2つに分けられるようである。1つは、天文学のあらゆる分野のいかなる要求にも十分に応じられるような高精度でその位置および運動がきめられている恒星の1団を持ち、いついかなる時でも天体の位置を測る基準と、宇宙の自然法則や理論体系を実証あるいは変革する資料をあたえることである。もう1つは、時々刻々測定される恒星の位置の変化からその運動を知り、それらの星が構成する重力の場での力学的状態を知ることがかりを得、宇宙の構造や進化を研究する1つの手段をあたえることである。

天体の位置を測り表示するには、測定の基準となる座標系を定義することが必要である。天文では恒星の距離は直接測定できず、ただ間接的な方法によってしか推定できないから、一般に天文で採用される座標系は方向のみを示せば十分である。望遠鏡に円板目盛を直接とり付けると、座標を直接読み取れるという実用的利益を考慮しても球面座標を採用すると便利である。星の位置を測る時、その足場として地球を離れることはできないし、星は地球の日周運動によって1日の間にその位置を変え、公転運動によって季節ごとにその位置を変えるから、高い精度で星の位置を決定するためには、地球の自転および公転運動に基く座標を採用するのが最も簡単である。地球の自転軸の方向を極とし、それに垂直な赤道面を基準面にとり、地球の公転面である黄道面との天球上の交点(春分点)を基準の座標軸として採用した座標系が赤道座標である。

星の位置を実際に測るにはどうしたらよいか考えてみ

る。まず必要なことは観測地点の子午線を決定し、望遠鏡をいつでも子午線面内に向けられるようにすることである。これには星の日周運動を利用するのが最も簡単であるから、極の近傍にある星(周極星)を利用する。観測地点が赤道の近くにないかぎり周極星は12時間の間隔を置いて子午線を1日に2回横切る。極より天頂側通過する場合を上方通過、天頂と反対側を通過する場合を下方通過と呼ぶが、前者の場合は周極星の高度が最も高く、後者の場合が最も低く、星の進行方向はお互に逆である。したがって同一星の上方通過と下方通過の組合せから観測地点の子午線面を決定できるから、地上に固定された目標物(子午線標)との相対関係を決定しておけば、以後は任意の時に子午線を設定できる。つぎには天球上の原点として極を決定しなくてはならない。同一周極星の上方通過と下方通過の時の高度の平均値は地球の自転軸の方向(極)の高度を示す。その極から 90° 離れた点を結ぶ大円が赤道であるから、星が子午線を通過する瞬間の高度を測り、極からの距離(極距離)を決定すれば赤緯はすぐ決定できる。最後に天体の赤経を決定しなくてはならない。赤経とは赤道上で測った春分点からの角距離であるから春分点の位置を決定する必要がある。それには太陽が子午線を通過した瞬間の高度を測り太陽の赤緯を決定する。黄道傾斜の値があらかじめ知られており、太陽の黄緯をゼロと考えると、春分点、黄道、太陽および赤道で作られる球面直角三角形の関係から太陽の赤経がわかる。ここに太陽の真の黄緯は摂動の力学理論から計算でき、黄道傾斜の量は夏至や冬至のような太陽の極距離が最大または最小になる瞬間の太陽の赤緯から原理的に決定できる。

つぎに天球上で太陽に近い明るい星の子午線通過の時刻と太陽が子午線を通過した瞬間との時間間隔を時計で測ればその星の赤経はすぐ上に決定できる。子午線通過の時刻を測る時計は、同じ星が次の日に再び子午線を通過するまでの時間が正確に24時間であるようにその歩度は調整されていなくてはならない。このようにして太陽の近くの明るい星の赤経が決定されると、その他の星の赤経は子午線通過時刻の相互関係から決定できる。このような原理に基づいて赤経赤緯を決定する観測を独立観測、またこのようにして位置が測られた1群の星を基本星と呼び、これらの基本星が赤道座標の座標軸の方向(極、赤道および春分点)を規定するもので、天体の位置を表示する基礎を与える。

* 東京天文台

H. Yasuda: Review of Fundamental Astrometry

上に述べた赤経赤緯決定の根本原理から容易に理解できると、星の位置表示の座標系を決定できる望遠鏡は子午環のみであって、アストロラープとかその他の観測器械は、星の相互位置の関係のみを明らかにできるだけであるという意味で、天体位置測定の基本望遠鏡たりえない。

赤道座標は、天体の位置の実測に都合がよいという点から採られた実用座標系であり、空間に固定された慣性系ではないから、時々刻々空間でその位置を変えている。したがって星の位置の時間変動は座標系の空間での動きと、星そのものの空間での動きが組合さったものである。

ニュートンの力学によると、外から力が加わらない限り重心は等速直進運動をなし、全角運動量は一定である。重心を通り全角運動量ベクトルの方向に垂直な面を不変面という。不変面はわれわれの太陽系の場合にも存在するから、この不変面で定義される座標系を慣性系にとればよい。その時黄道面は不変面と一致しないから、黄道の極は不変面の極のまわりを約 10 万年の周期で回転し、一方地球の自転軸は太陽や月の力を受けて黄道面の極のまわりを約 $23^{\circ}5'$ の距離をほぼ保ちながら約 28,000 年の周期で回転している。前者を惑星才差、後者を日月才差と呼ぶ。この両才差の組合さった動きが赤道座標での空間の動きを規定している。星の位置の時間変動のうち、座標系の動きを除いた残りが固有運動である。

星の位置を掲載している星表は、任意の時期の星の位置を計算できるように、特定の時期での星の位置、座標系の空間での動きを示す才差、および空間での星の実際の動きを示す固有運動の 3 つの値が示されている。

星表のうち、基本星表は任意の時期での座標系を具体的に表示する基準点を与え、位置決定の骨組を形成するものであるから、それに含まれる星すなわち基本星は独立観測でその位置および固有運動が非常に高精度できめられている明るい星のみから成り、全天で約 1,700 個 (5° 平方に 1 個の割合) がある。その他の星の位置はすべて基本星との相対関係から決められるから、天体の位置決定の精度は基本星表の精度にすべて支配される。

惑星、人工衛星も含めて惑星のまわりをまわっている衛星、小惑星、彗星、その他の特殊な星の位置を決める時、これらの天体は大部分光度が非常に暗いので写真観測にたよらなくてはならない。目的的天体の位置は乾板上に写っている星の位置を基準にして決定されるから、乾板 1 枚につきそのような比較係が 10 個程度必要である。したがって基本星の位置との相対関係が正確に決められている群の標準星が必要で、このような標準星は写真観測の比較星として使われる。写真観測のための標準星の数が全天でどのくらい必要であるかは使用される写

真乾板の大きさに左右され、 4° 平方の乾板を使用する時は約 10 万個の標準星が全天で必要である。

写真観測用の標準星は 10 等台までのかなり暗い星を含み、基本星は 7 等より明るい星であるから、その中間の光度を持つ星を両者の仲介として採用する。普通は 7 等から 8 等までの星を 1° 平方に 1 個の割合でえらび、その星を子午環で観測して基本星と密接に結びつけられた位置を決定し、このような星を比較星として 8 等から 10 等までの星の位置を写真観測で決めたものが、エールやケープの写真星表である。

天体の位置はそのまわりの星の位置に相対的に決定されるから、目的的天体の位置決定の精度は比較星の位置の精度に全面的に支配される。

太陽系の天体の運動は、天体力学によってその理論体系を完璧な形に完成しているが、その理論値と観測値の両者を結びつけるには、天体力学の用語でいう積分常数を観測で定義することによって、天文常数を決定すれば可能である。このようにして結びつけられた計算値と観測値の間に観測誤差以上の差があれば、理論体系、天文常数、パラメーターが修正され、より正確なものへ前進する。この時の精度は位置決定の比較星として使われる星の位置の精度に支配される。

あるいはまた、測地衛星を使って観測点の測地座標を決定する場合、測地座標の精度は人工衛星の観測位置の精度に比例する。もちろんこの精度はカメラの分解能にも左右されるが、まわりの比較星の位置の精度に左右されることは当然である。カメラの分解能等から判断して、5 m の精度で測地座標をきめたい場合、星の位置の精度は 0.3% 以上であることが必要で、現在利用できる星表の位置の精度を検討してみよう。

現在 10 等級より明るい星の位置を与えるものとして、天文学のいろいろの分野で使われている写真星表は、エールの星表、ケープの星表、あるいは AGK 2 である。これらはいずれも観測された平均時期が 1930 年から 1940 年の頃であるから、それから 30 年から 40 年経過した現在利用する場合は、掲載された固有運動を使って現在の位置に変換しなくてはならない。掲載されている位置と固有運動の誤差から、これらの星表を使った場合の星の 1970 年の計算位置の精度は、内部誤差で北半球では $\pm 0.3\%$ から $\pm 0.5\%$ 、南半球では $\pm 0.7\%$ から $\pm 1.0\%$ の範囲である。その他にこれらの星表の固有運動は 19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけての古い観測との比較から求められているから、その固有運動を使って 1970 年の位置に直した場合、古い時代の観測に含まれている観測の質の悪さや系統誤差が直接再現される。これらの星表の各赤緯帯間の系統誤差を評価してみると、それは 1970

年には $\pm 0\%35$ 以上に達すると考えてよい。さらに古い観測中に存在する星の光度差による誤差も内部誤差と同程度と推定されるので、これらの星表の現在での不確かさを総合すると、最小 $\pm 0\%5$ 程度から大きな所では $\pm 1\%6$ を越えると考えられる。AGK 2 のように固有運動が掲載されていない星表の場合、固有運動を考慮しないことにより生ずる不確かさは $\pm 2\%0$ 以上と判断してよい。

スミソニアン天体物理観測所で最近発行された SAO 星表は、10.9 等までの星表としては最も新しいものであるが、前に述べたエールやケープの星表や AGK 2 の星表に掲載されている値を単に FK 4 星表に基づく赤経赤緯系に変換しただけであるから、本質的にはエールやケープの星表と変らない。

GC 星表は 9 等台までをかなり含んで比較的全天に一樣に分布している 33,342 個の星から成っているので標準星としても使えるが、現在はすでに北半球で $\pm 0\%6$ 、南半球で $\pm 1\%3$ の不確かさを持ち、暗い星ではかなり大きな系統誤差を持つ。

現在利用できるいろいろの星表の精度から考えて、現在の位置天文学の諸々の要求を十分満足するためには、7.5 等から 10.9 等までの星について、その位置を十分な精度で決め直し、固有運動の欠点を訂正することが、緊急の必要事である。このため、1956 年から 1961 年までの AGK 3 観測計画が行なわれた。さらにこれを南天に延した観測計画が 1962 年に始められた。この広範な観測計画によって、ハンブルク-ベルゲドルフ天文台により北天の 18 万個の星が、ケープ天文台およびコロムビア-エール南方天文台により南天の 19 万 5 千個の星が高点観測でその位置を測られる。この観測には 5° 平方の乾板が使用され、対物格子をつけることによって、星の中心像と第 1 次廻折像の光度差が 3.5 等になるようにすることにより、比較星と目的星の明るさを同じ位にして観測誤差が小さくなるように努力している。これが完成すれば、観測位置で $\pm 0\%13$ 、固有運動で 100 年につき $\pm 0\%6$ から $\pm 0\%8$ の平均誤差を持つ約 38 万個の全天に一樣に分布している星の位置および固有運動が得られるであろう。

これらの写真観測の場合の乾板整約のための標準星は、基本星表 FK 4 で定義される座標系に基づいて組立てられた三角点網を構成するものでなくてはならない。そのために FK 4 系に厳密に一致するように定められた標準星系を組立てるという世界中の子午環の協同計画が AGK 3 R と SRS (南天標準星) の観測計画である。

6.5 等から 9.2 等までのあらゆる等級およびスペクトル型を含み、 1° 平方に 1 個の割合で分布している星からなり、前者の星の総数は 19,864 個で後者の星の総数

は 18,586 個である。観測に参加している子午環の数は両計画ともに 11 個である。

これらの計画が完成すれば、明るい星から 10 等台の星まで、全天の星について基本星表で定義される座標系に基づく位置および運動がえられ、その精度はあらゆる分野の要求を十分に満すであろう。

一方このような新しい観測結果の集積は、現在の基本星表 FK 4 の欠点を明らかにし、近い将来 FK 5 の編さんの必要が生ずる一方、ボスの GC に代るべき新しい GC の編さんも行われるであろう。かくて SRS や AGK 3 の計画が完成した後は、基本星表 FK 5、新しい GC およびさらに 38 万個におよぶ 10.9 等までの星の星表が出版され、一新された精度の高い位置および固有運動をあらゆる分野の研究に利用できるだろう。

星の位置を測ることは、その位置の時間変化をしらべることであり、これから固有運動を知ることができる。しかし位置を測る基準となる座標系の空間での動き、すなわち才差が完全に知られていることが必要である。才差の中でも日月才差は非常に厄介で、月の質量の他に地球の 2 つの主慣性能率 A , C に関係する量 $(C-A)/C$ が入ってきて、観測による以外は決定方法がない。ニューカムは才差常数を決定した時、才差を決めるための慣性系は恒星の平均位置で与えられるとした。その後固有運動の統計的研究から、恒星全体は静止しているのではなくて、銀河系を構成する星として銀河中心のまわりを回転していることがわかった。したがってニューカムが才差常数の決定に使った慣性系は真の慣性系ではないから、ニューカムの才差常数は小さいが明らかな誤差を含んでいる。したがって現在の固有運動は、才差常数の誤差と銀河回転に起因する系統運動を含み、それ以外の運動はランダムであるとして処理されている。

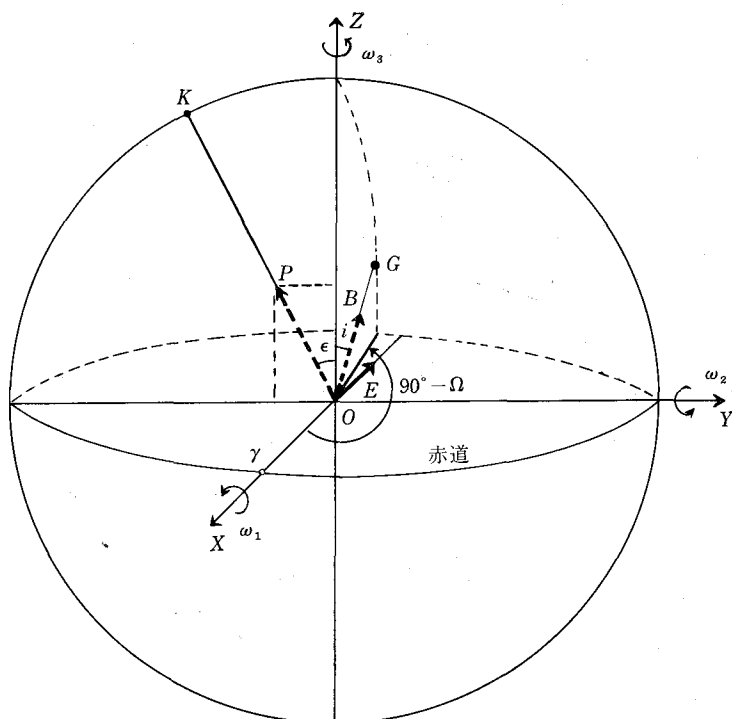
いま才差と銀河回転による系統運動を図で解說的に示す。惑星才差は理論からわかっているともし、日月才差は観測からきめられなくてはならないから、ここでは日月才差 (P) のみを考える。 P は黄道の極 (K) のまわりの回転であるから、図のように OK 軸に沿ったベクトルで示される。全体としての回転の成分を示す銀河回転常数 B は、銀河面の極 (G) の方向、すなわち OG に沿ったベクトルで示される。これらの回転を合成した回転を、赤道直角座標 (XYZ) の成分 ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) に分解すると

$$\omega_1 = B \sin \Omega \sin i$$

$$\omega_2 = -P \sin \varepsilon - B \cos \Omega \sin i = -(A n + B \cos \Omega \sin i)$$

$$\omega_3 = P \cos \varepsilon + B \sin i = A k + B \sin i$$

ここで OX 軸は春分点の方向と、 OZ 軸は赤道の極 (Z) の方向と一致する。 Ak は赤経方向の日月才差、 An は赤



日月才差 (P), 銀河回転 (B) と黄道傾斜長年項 (E) による座標軸の回転 ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$).

K : 黄道の極,

G : 銀河面の極,

γ : 春分点,

ϵ : 赤道面と黄道面の傾斜角,

i : 赤道面と銀河面の傾斜角,

Ω : 銀河面の赤道に対する昇交点の赤経

緯方向の日月才差を示す. i は銀河面の赤道に対する傾斜で, Ω は銀河面の赤道に対する昇交点の赤経を示す.

マックホルミックとケーブの固有運動を使ってフリッケは最近才差常数とオールド常数の値をきめた. 彼はこれらの固有運動を, FK 4, FK 3, N 30 の基本星系に一致するよう換算し, ニューカムの日月才差 P に対する補正量とオールドの常数を求めた. いずれの基本星系に基づく固有運動を使ってもその結果はよく一致する. フリッケの求めた主な結果は

$$\Delta p = +1.7 \pm 0.10 / \text{century} \text{ および}$$

$$B = (-7.6 \pm 1.4) \text{ km/sec} \cdot \text{kpc}^{-1} \text{ である.}$$

日月才差や銀河回転常数の決定は, 太陽近傍の星には太陽運動や銀河回転以外に系統運動はないという前提に立つと同時に, 座標系の慣性系に対する才差以外の動きはないことを前提としている. しかし才差以外の未知の運動が赤道にあれば事情は一変する.

黄道傾斜の長年変化の理論値は, 子午線観測から求めた値とくい違っていることはいろいろの人によって確認されており, ダンカムはその不一致を $-0.289 \pm 0.029 / \text{century}$ と結論した. この原因が黄道の長年振動の理論が不十分であることにあるとすれば, 座標系の動きに無関係であるが, 赤道が才差以外の未知の運動をしているのだとすれば, 赤道座標系の慣性系に対する動きとえられる. 東京天文台の青木信仰氏はこのことに注目し

た. 才差による赤緯の見かけの変化を別にすれば, 動く赤道にある星の赤緯方向の動きはゼロとなるが, 実際には慣性系に対してこの星は動く赤道とともに動いているから, その分だけ回転の見かけの成分が入ってくる, この回転の成分を E とすれば

$$\omega_1 = B \sin \Omega \sin i + E$$

回転は3つの成分しか持ち得ないから, $\Delta k, \Delta n, B$ および E の4つの項を分離できない. そこで黄道傾斜の上記のくい違いを仮定すると, B の値は大幅に変わる.

$$B = (-24 \pm 2) \text{ km/sec} \cdot \text{kpc}^{-1}.$$

これは前のフリッケの求めた値や現在採用されている値, $-10 \text{ km/sec} \cdot \text{kpc}^{-1}$ から大幅に変化している. この結果を使って我々の銀河系の全質量を推定すると

$$(6.5 \pm 1.0) \times 10^{11} M_{\odot} \quad (M_{\odot} \text{ は太陽の質量})$$

で, 現在採用されている値の3.5倍になり, 銀河系内の力学的様子も現在考えられているものとかかなり変わってくる. その結果は銀河系の構造や進化の研究に重大な影響をあたえると推定される.

星の固有運動を決定し, その統計的処理からわれわれの銀河系の力学的様子や構造をしらべる研究は, その信頼性を固有運動の決定の精度に全面的に負っている.