基本座標系の現状

相馬 充*

1. 基本座標系とは

恒星の位置や固有運動は，基本星表に基づいて測定され，その結果から，地球の自転運動や恒星の運動，さらに銀河系の回転などが研究される．基本星表は現在まで FK4 が使用されてきたが，間もなく新しい基本星表 FK5 が出版される予定である．

基本星表は，実際に地球上で観測される天体の座標と力学的な慣性系とを関係づけるものであり，その基本星表によって与えられる座標系が基本座標系である．

恒星の位置は，地球の自転運動を利用して，その赤経と赤緯が観測される．これは，地球の赤道面を基準面に，また，赤道上の春分点を基準点とする座標である．恒星の赤経・赤緯の変化には，恒星自身の固有運動の他に，地球の自転軸の動きである歳差が含まれる．基本座標系を確立するためには，恒星位置の変化から，この2つを分離しなければならない．次に，その方法と結果について解説しよう．

2. 歳差定数の決定

地球の歳差の量を決定する1つの方法として，恒星の固有運動が平均して0であると仮定して求める方法がある．この方法によって求めたおもなものを表1に示す．ベッセルの2つの値は，恒星の固有運動が完全にランダムだとして求めたものである．2つの値の違いは，1815年の解析に用いた星表が章動定数として大きすぎる値を採用していたことにより系統的な誤差を持っていたためである．ストルーベの値は，太陽運動を考慮して求めた最初のものである．ピーターズの値はストルーベと同じ方法で計算したもので，ニューカムの値が発表されるまで一般に用いられた．ニューカムの値は，1896 年のパリの国際会議で採用され，1983年まで使用された．

1927 年，オールトはリンドブラッドの銀河回転の仮設を，恒星の視線速度と固有運動のデータから確認し，銀河回転に関するオールトの定数 A と B を導入した．銀河回転をも考慮してモーガンとオールトによって求められた歳差定数は，ピーターズによる値に非常に近いものであった．これは，銀河面が黄道に対して成す角度が大きいため，銀河回転が歳差決定にあまり大きな影響を及ぼさないためである．それに対し，ニューカムの値が小さすぎるのは，主に，ニューカムの採用した春分点に系統的な誤差があったためと考えられる．

表 1 固有運動の解析から求めた歳差定数
(100太陽年あたりの黄経における一般歳差，1900.0 年)

ベッセル，1815	5021″.05
ベッセル，1830	5024.57
ストルーベ，1840	5025.89
ピーターズ，1842	5026.33
ニューカム，1896	5025.64
モーガン，オールト，1951	5026.39
フリッケ，1972	5026.74

表 2 惑星の軌道から求めた歳差定数

ブラウワー，1950	ニューカム	+0″.74
クレメンス，1966	〃	+1.86±1″.06
ラウプシャー，1976	〃	+1.21±0.44
ブラナム，1979	〃	+1.32±0.24

歳差定数を決定するもう1つの方法に，惑星の運動を利用する方法がある．惑星の軌道の近日点や昇交点は，他の惑星の摂動により徐々に動いている．その動きは摂動を与える天体の質量の関数である．そこで，軌道の変化の観測値と理論値とを比較することにより，歳差定数と惑星の質量を同時に解くことができる．この方法によって求めた歳差定数を表2に示す．ブラウワーの値は水星の軌道の変化から，クレメンスは水星・金星・地球の軌道変化を同時に解いたもの．ラウプシャーは火星の軌道変化から求めたもの，また，ブラナムは5個の小惑星の軌道変化から求めたものである．いずれもフリッケが恒星の固有運動の解析から求めた値（ニューカム +1″.10）に近いが，力学的に求めた値の精度は恒星の運動から求めた精度 ±0″.15 に比べて劣っている．恒星の運動から求めた値には，まだ恒星の系統的な未知の動きが残っている可能性があるため，この値を力学的に正確に求めることが望まれる．

3. 春分点補正とその変化

赤経の原点である春分点は，赤道と黄道の交点の1つである．したがって，春分点を星空の中に定めるには，太陽の位置を恒星に相対的に求めればよいことになる．しかし，太陽は視直径が大きく，しかも，昼間しか観測できないため，太陽の位置を精度良く求めるのは困難である．そのため，惑星・小惑星・月の位置観測を利用することが考えられるが，その場合にも，それらの天体の

* 東京天文台 Mitsuru Sōma: Present Status of the Fundamental Reference Frame

軌道要素と春分点補正との分離があまり良くないため，春分点補正を精密には決定しにくい．この春分点補正に時間的変化があると，その座標系には赤道面に沿った見かけの回転を含むことになる．

新しい基本星表 FK5 に採用される FK4 の春分点補正の一世紀あたりの変化量は，次の 3 個の値の平均として求められた．1 つは固有運動の解析からフリッケ（1967 年）が歳差定数と同時に求めた $+0^{s}.082$，1 つはヴァン・フランダン（1980 年）が 1820〜1977 年の星食の結果から求めた $+0^{s}.087$，もう 1 つは，図 1 に示した春分点補正の値を時間の 1 次式で表わして求めた $+0^{s}.085$ である．これら 3 つは，良く一致しているが，これほどの一致は偶然である．実際，この採用値の決定後にモリソン（1982 年）が 1800〜1976 年の星食の結果を使って求めた値は $+0^{s}.072$ である．

FK5 に採用される春分点の位置は，1950 年において FK4 $+0^{s}.035$ である．この値は，上記の春分点補正の変化量を採用して，図 1 の個々の値の重みをつけなおして求めたものである．この値は，図 1 のばらつきからわかるように，$\pm 0^{s}.01$ 程度の誤差が含まれていると思われる．

4.　黄道傾斜角の変化

銀河回転の決定に最も大きな影響を及ぼす黄道傾斜角の変化の観測値を，理論値に対する補正量として表 3 に示す．この値はオールトの定数 B と密接に関係しており，もし，黄道傾斜角の変化量の補正値 $-0''.3$（1 世紀あたり）が地球の自転軸の変化によるものだとすると，

表 3　黄道傾斜角の変化量
（理論値に対する補正量，100 年あたり）

スペンサー・ジョーンズ，1932	$-0''.30 \pm 0''.24$
モーガン，1933，1950	-0.19
クレメンス，1943	-0.26 ± 0.07
ダンカム，1956，1958	-0.30 ± 0.04
リースキー，1968	-0.27 ± 0.04
ラウプシャー，1971	-0.14 ± 0.11

B の値は現在の -10 km/sec/kpc から -24 km/sec/kpc に変化し，銀河系の総質量は太陽質量の 2×10^{11} 倍を 6.5×10^{11} 倍に変えなければならない（青木，1967 年）．黄道傾斜角の変化に対するこのような補正値は，19 世紀の観測の系統的誤差による可能性が大きいが，どうしてこのような誤差が生じたのかは不明である．

恒星の固有運動は，上に述べた歳差定数，春分点補正の変化量，黄道傾斜角の変化量の採用値に大きく依存する．したがって，恒星の固有運動から，その恒星の距離や空間運動などを求める際には，それがどのような定数から求められ，どのくらいの精度を持っているのかを考慮することが重要である．

5.　今後の観測

上に説明したように，天文学上重要な基本座標系は，現在のところ，充分な精度で確立されたとは言い難い．この座標系を力学的に定める際の困難さの主たる原因は，座標系に関する未知数と惑星の軌道要素の分離の悪さにある．そこで，軌道要素が何らかの方法で決定できれば，座標系に関する量は精度良く決定できることが期

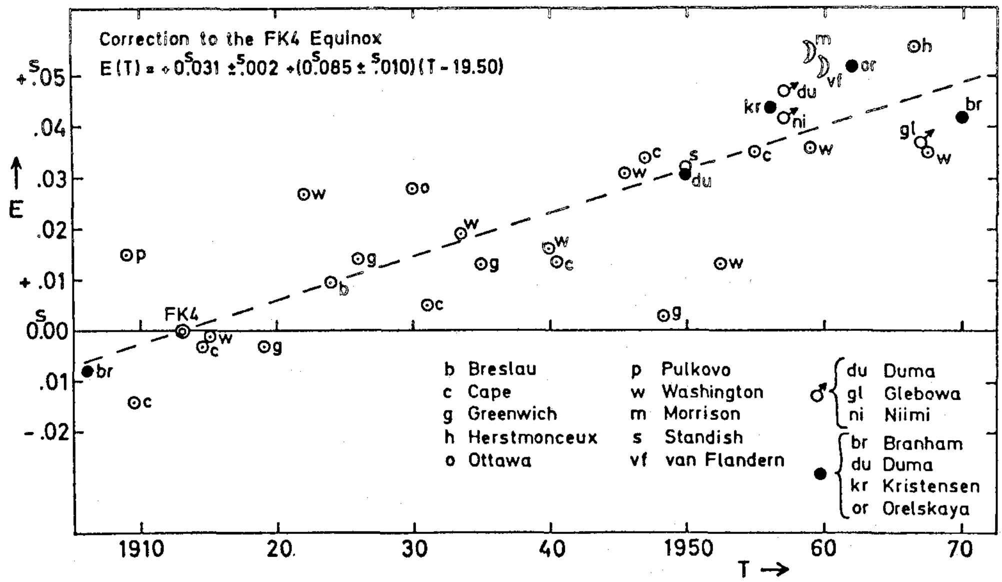

図 1　春分点補正の決定値（フリッケ，1980 年より）

待される.

我々（木下，土屋，ほか）は，臼田の 64 m アンテナを用いて，小惑星の距離観測を行なうことを提案している．この観測が行なえるためには，信号対雑音比 SNR がある程度大きくなければならない．SNR は小惑星の直径の 2 乗に比例し，距離の 4 乗に反比例する．そこで，直径の大きなものと地球に近づく可能性のあるものについて，観測可能日数を今後 5 年間について計算してみた（表 4）．ここでは，臼田のアンテナで期待される SNR が 3 以上のとき観測可能とした．軌道決定のためには，軌道全体にわたって観測されることが望ましい．したがって，距離観測による軌道決定に適する小惑星は，1. セレス，2. パラス，4. ヴェスタの 3 個である．

距離観測によって期待される軌道の決定誤差を表 5 に示す．ここでは，30 日毎に観測することとし，1 回の観測精度は SNR≧3.0 のとき 15 km，SNR＜3.0 のときは観測できないとした．この表から，数年で座標系決定に使用できる精度に達することがわかる．

表 6 には，東京天文台の光電子午環によって小惑星を 5 年間観測した場合に期待される春分点補正の精度を示した．ここで，晴天率は三鷹の月毎の統計を使用し，1 回あたりの観測精度は 9.0 等より明るいとき 0″15，それ以下のとき 0″20 とした．σ_1 は軌道要素と同時に解いた場合，σ_2 は軌道要素は精密に求まっているとした場合である．座標系の未知数としては，春分点補正の他，黄経の補正，黄道傾斜角の補正，赤道補正を同時に解いている．これらの決定精度は，春分点補正の精度のほぼ 1.0 倍，0.4 倍，0.1 倍である．表 6 から，軌道要素が定まっている場合には，座標系の決定精度が 3 倍以上に向上することがわかる．

表 7 には，小惑星の軌道が求まっているとして，子午環による，より長期間の観測から期待される座標系決定精度である．小惑星は 3 個を同時に用いている．これから，約 20 年の観測で，恒星の運動の統計から求められている精度に達し，30 年では，その 2 倍の精度に達することがわかる．

表 4　主な小惑星の距離観測可能日数

番号	名まえ	軌道長半径 AU	直径 km	観測可能日数 %
1	セレス	2.77	1003	67
2	パラス	2.77	608	34
3	ジュノー	2.67	247	8
4	ヴェスタ	2.36	538	41
6	ヘーベ	2.43	201	15
7	イーリス	2.39	209	18
10	ヒジエア	3.13	450	13
15	ユーノミア	2.65	272	10
31	ユーフロシネ	3.15	370	8
65	シベレ	3.43	309	0
433	エロス	1.46	23	3
511	ダヴィダ	3.18	323	0
704	インテラムニア	3.06	350	5
1566	イカルス	1.08	20	3

表 5　距離観測による軌道決定精度

観測期間 年	小惑星 番号	$\sigma(l_0)$ ″	$\sigma(n)$ ″/年	$\sigma(e)$ ″	$\sigma(i)$ ″
3	1	0.031	0.0050	0.0033	0.047
	2	0.012	0.0119	0.0119	0.032
	4	0.133	0.0158	0.0076	0.153
5	1	0.018	0.0018	0.0017	0.034
	2	0.012	0.0037	0.0030	0.018
	4	0.042	0.0041	0.0022	0.071

l_0：平均観測元期における平均近点角
n：平均運動
e：離心率
i：軌道傾斜角

表 6　春分点補正の決定精度

小惑星 番号	観測数	$\sigma_1(E)$ ″	$\sigma_2(E)$ ″
1	260	0.127	0.037
2	245	0.187	0.030
4	250	0.083	0.042
1，2，4	755	0.065	0.020

σ_1：軌道要素を同時に解いた場合
σ_2：軌道要素を既知とした場合

表 7　子午環観測による座標系決定精度
（小惑星 1，2，4 を使用，軌道要素を既知とする）

観測期間 年	$\sigma(E)$ ″	$\sigma(\dot{E})$ ″/世紀	$\sigma(\varepsilon)$ ″	$\sigma(\dot{\varepsilon})$ ″/世紀	$\sigma(\dot{p})$ ″/世紀
10	0.045	0.543	0.015	0.174	0.542
20	0.011	0.172	0.004	0.065	0.169
30	0.008	0.086	0.003	0.036	0.085

E：春分点補正
ε：黄道傾斜角
p：一般歳差
ドットは時間微分

☆　☆

☆　☆　☆