

光電子午環と光学天体の運動学

宮 本 昌 典*

1. はじめに

位置天文学の分野に技術革新の波が押し寄せ、その実用化が汎世界的に展開されつつあった1970年前後、わが国では、位置天文学連絡会の将来計画小委員会によって、「位置天文学の現状と将来」と題する報告書(天文月報第64巻第6号および66巻12号)がまとめられた。

そこには、わが国の位置天文学の分野におけるそれまでの実績をふまえて、わが国の位置天文学の発展の方向づけと、それに必要ないくつかの観測設備の強化、人材の確保、研究体制が描き出されていた。観測設備の強化に関連しては、慣性空間での天体の位置を記述するための天文座標系と、ある現象の時刻を定義する時系の確立が位置天文学の根本課題をなしていることから、位置天文学の一翼を担い得る現代的な子午環の設置が緊急課題の一つであることも強調されていた。太陽系天体の運動理論と矛盾のない慣性座標系を見つけ出すには、子午環観測が不可欠であるとの認識があったからである(そのような慣性座標系を最もよく近似する天文座標系が、いわゆる基本座標系であって、それは基本星表の与える星々の位置によって具体化されている)。

この報告書にまとめられた位置天文学の将来計画の一環として、1982年東京天文台に自動光電子午環が建設され、3年間にわたる基本的な観測実験を経て、現在本格的な観測活動が開始されようとしている。以下、この新子午環により、どのような天文学上の貢献が期待され日論まれているか紹介してみようと思う。自動光電子午環の特性およびそれによる観測方法については、安田春雄氏による「自動光電子午環」(天文月報74巻第10号)を参照されたい。

2. 諸外国の光電子午環

1960年代初頭、ヘッグ(E. Høg)が、ハムブルク天文台で光電子午環(以下、PMC, Photoelectric Meridian Circle)を実用化してから、既に四半世紀が経過しようとしている。観測者の肉眼に代って、子午環観測に光電技術を導入した結果、観測の自動化による観測能率の向上と観測の個人誤差(ある現象への反応が観測者ごと異なるために生ずる誤差)の除去が可能となった。光電化さ

れたこの子午環は、南天標準星(SRS)の国際協同観測に参加のため、オーストラリアのパース天文台に移設され、10等級より暗い星をも含む大量の星の相対位置観測(基本星表の与える星の位置に相対的に行われる位置決定観測)が行われた。その結果は観測星表Perth 70とPerth 75として出版され、PMCが次の世代の地上光学位置天文観測を背負うべき有能な装置であることが実証された。この間、ボルドー天文台でも、1971年に回転セクター方式(rotating knife-edge)のPMCが完成し、

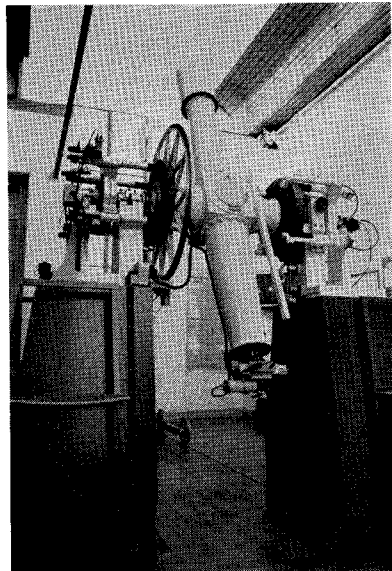


写真1 ボルドー天文台の光電子午環

安田氏の提案したNPZTキャンペーン(観測歴の長いPZT星の子午環による協同観測、観測元期1974年)において、その装置のずばぬけた優秀性が証明された。さらに、コペンハーゲン大学天文台のプロールフェルデ(Brorfelde)観測所では、1982年既存の子午環の自動光電化が終了し、イギリス・デンマーク・スペインの国際協力事業として、そのPMCはカナリー諸島ラ・パルマ(La Palma)に移設され、既に大量の星の観測活動が始まっている。

一方、米国海軍天文台(USNO)では、アダムス(A. N. Adams)とクロック(B. L. Klock)を中心として、早くから反射鏡形式の画期的なPMCの開発を急いでいたが、残念ながらその実用化は失敗に終わってしまった。USNO 6インチ子午環によって今世紀初めから提供さ

* 東京天文台 Masanori Miyamoto: Photoelectric Meridian Circles for Planetary Theory and Stellar Dynamics

れてきた観測星表は、過去の基本星表に最も重要な貢献をしてきた。USNO としては、基本座標系確立への過去からの寄与の大きさを考えると、眼視観測による最高級のデータを提供しつづけているとはいえ、従来の観測手段にあまんずる訳には行かない。次期世代の基本座標系の確立に対しても大きな責任を引き続き持つ。ちなみに、前述のパス、ボルドー、ラ・パルマでの PMC 観測は、いずれも相対位置観測であって、基本座標系の枠組を決めるための絶対位置観測（既に決められたいかなる星の位置とも全く独立に、独自の観測だけで星の位置を決定する観測。当然のことながら、春分点も赤道も独自に決定する）ではない。そこで USNO は、古典的な 7 インチ子午環を PMC に改良し、絶対位置観測を目的として、昨年それをニュージーランドのブラックバース (Black Birth) に搬出した。

この PMC は、位置測定部 (マイクロメータ) にヨーロッパ宇宙開発機構 (ESA) の位置天文衛星 HIPPARCOS に採用されるようなイメージダイセクター (Image Dissector) が装着され、子午環望遠鏡視野内 (約 30') の多数の星を一挙に観測することができる。この方式によれば、例えば天体写真儀 (Astrograph) による準星などの微光電波天体の光学位置決定を考える場合、その微光天体を含む小視野内に、基本座標系に直接結びつけられた多数の比較星 (Reference Stars) の位置をいっきに提供できるという利点をもつし、また惑星などの非点源の位置決定にも便利である。

後で述べるように、南天の基本座標系の精度を北天の精度なみに持ち上げることが緊急であるから、USNO は

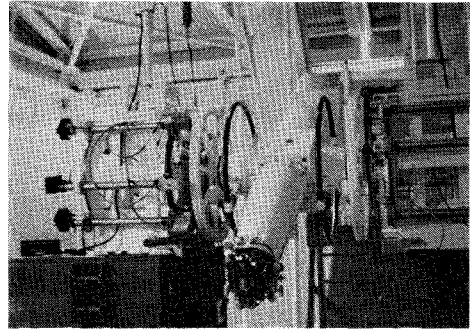


写真 3 米国海軍天文台の 6 インチ子午環

ワシントンにある従来の 6 インチ子午環 (眼視観測) とニュージーランドに設置された PMC により、南北両天球の星の位置の同時絶対位置観測を計画している。近い将来 USNO は、ニュージーランドに天体写真儀も設置する予定である。光学天体の運動を論ずるための光学基準座標系 (optical reference system) を、固有運動が (実用上) 無視できるような銀河系外天体で張りめぐらされた電波基準座標系 (radio reference system) あるいは銀河系外基準座標系 (extragalactic reference system) に結合するための具体的な手段は現在のところ写真位置測定 (photographic astrometry) しか考えられないからである。USNO は、両座標系の結合の全てを HIPPARCOS と米国の軌道望遠鏡 ST のみに託すことはできないと考えているようだ。

東京天文台では、このような次期世代の地上光学天体位置観測の動向を早くから予期し、約 15 年前に絶対位



写真 2 ラ・パルマ移設作業中のプロールフェルデ観測所の光電子子午環

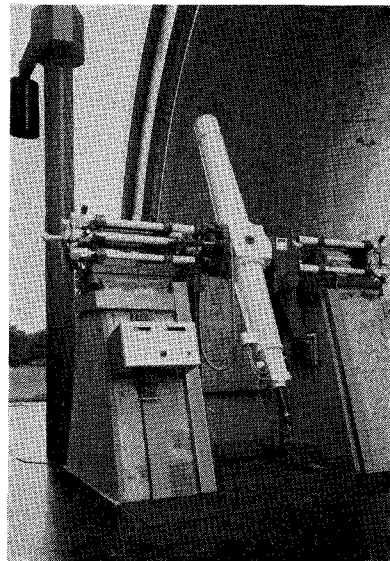


写真 4 東京天文台の自動光電子子午環

置観測を目的とした自動光電子午環の建設計画を立案した。既に実現している PMC の長所を積極的にとり入れた Tokyo PMC は 1982 年になって完成した。その後の 3 年間にわたる試験観測によれば、この PMC は当初の目標精度——9 等級までの星の一回の位置決定精度 ± 0.1 、太陽の対応する精度 ± 0.3 ——を実際に保証していることがわかった。

3. 光電子午環の特徴

いうまでもなく、PMC は光学天体の位置と運動を決定し、惑星運動論と恒星系力学を論ずるための基礎データを提供する。この観点からすれば、将来、超長基線電波干渉計 (VLBI) によって地球回転パラメータの高精度決定がなされ、さらに銀河系外天体に準拠した電波基準座標系 (理想的な慣性座標系を定義できると想像されている) が確立されても、それが光学基準座標系に結びつけられ、従来の光学基準座標系の欠点を検定できない限り、VLBI の上記天文学分野への寄与は限られたものになってしまう。いずれにせよ、これらの研究目的にはより正確な光学基準座標系の確立が要求される。

古典的な子午環 (眼視観測) と比較するとき、一般に PMC は次の三つの著しい特徴をもつ。

- i) 無個人差観測 (impersonal observation)
PMC 観測には従来の意味の厄介な個人差 (personal error) は残存しない。地球大気の流れによる星像の踊りに起因する限界精度ぎりぎりの観測が可能。一回の観測で得られる位置決定精度は ± 0.1 。眼視観測では、対応する精度は $\pm 0.3 \sim \pm 0.5$ 。
- ii) 微光天体の観測
計算機によるデータ処理法の開発によって、 $m_v \leq 13.0$ までの大量の暗い天体の位置決定が可能。従来の限界は、 $m_v \leq 9.0$ 。

iii) 観測の高能率化

自動化によって、一星あたり 1 分～3 分の頻度で長時間にわたって観測が可能。

これらの特徴によって、まず太陽や小惑星を含む太陽系天体や恒星の位置を従来の $1/3 \sim 1/5$ の誤差の範囲内で決定でき、さらに大量の微光天体の高精度位置決定ができる。高精度位置決定が可能になれば、従来 30 年～50 年を要した固有運動の決定が、15 年程度で可能になってくる。現在最もよく慣性座標系を近似している基本星表 FK4 は、約半世紀にわたる観測歴をもった $m_v \approx 7.5$ より明るい星 (最頻等級 5 等) 1535 個から構成されるが、天の一等三角点ともいふべき最高級の基準点は 5° 四方にわずか一個の割合でしか分布していない。三角点の密度を最低もう一桁は大きくする必要がある。まず、星の等級を大幅に上げ、基本星表中の星数を増やす使命が PMC にはある。

4. 光学基準座標系の現状

いろいろな基準座標系は、それぞれの星表が与える恒星の位置と固有運動によって定義されている。図 1 は、現用のいろいろな星表が与える星の位置の平均的な精度が、それぞれの星表の元期に残存していた固有運動の決定誤差のために、放置しておけば時間と共に低下してゆく様子を示す。現在一等三角点を与えている基本星表 FK4 の星々の基本座標系内における位置ですら、1985 年には北天で、 ± 0.15 、南天で ± 0.3 の精度でしか与えられない。写真乾板上での位置測定のために比較星としてひろく利用されている AGK3 星表の位置精度は ± 0.6 しかない。FK4 星表の拡大星表として近年直接子午環観測された、AGK3R+SRS=IRS (International Reference Stars, $7.0 \leq m_v \leq 9.0$, 約 40,000 星, 平均観測元期 1960) の星の位置精度は現在 ± 0.4 程度である。

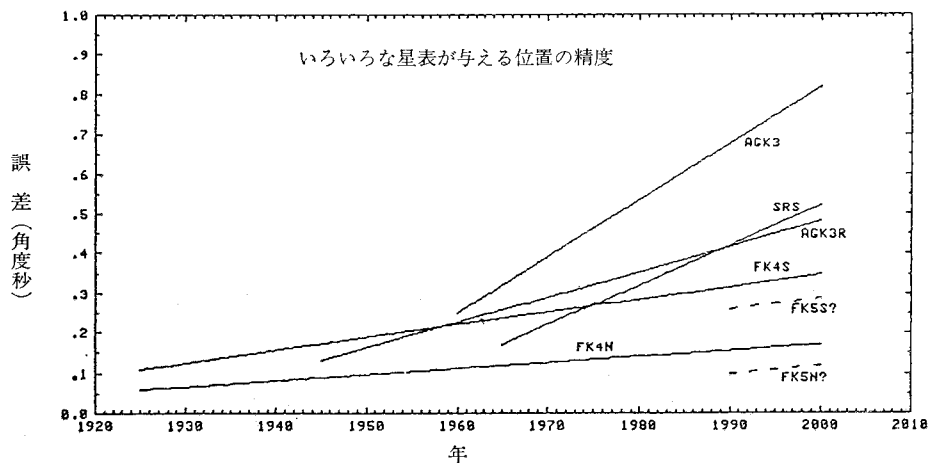


図 1

それぞれの星表に含まれている個々の星の位置は、上述の平均誤差の 2 倍以上の誤差をもち得ることを承知してはならない。それぞれの星表が定義する基準座標系に歪みがなく且つそれが理想的な慣性座標系を与えていると仮定しても、それぞれの基準座標系内で与えられる星々の位置には上述のような不確実性があることを示している。

もう少し詳しく基本座標系を定義している基本星表 FK4、あるいは近く公表される FK4 の改定版 FK5 の内容を吟味してみる。基本星表は、過去約一世紀にわたる 200~300 個の絶対および相対観測星表をそれぞれ適当な重みをつけて編集したものである。基本星表の枠組は絶対観測星表のみで決められる。その枠組や長年変化(固有運動)は、北天では主に USNO の観測星表で決められており、南天ではケープ (Cape) 天文台の観測星表のみで決められている。従って、USNO の 6 インチ子午環による絶対観測星表 W10~W5/50 の基本星表における重みは必然的に非常に大きい (W4/50 と W5/50 は、FK5 の編集にあたり初めて基本星表に寄与し始める)。従って、USNO の観測星表の質は、大ざっぱに言って、

基本星表の北天の星の質を代表していると考えてよい。表 1 に USNO 観測星表の内容を示す。

表 1 によれば、最高級の眼観視測といえども、一回の星の位置決定精度は $\pm 0^{\circ}3 \sim \pm 0^{\circ}5$ である (PMC の場合 $\pm 0^{\circ}1$ は保証されている)。USNO の観測星表は絶対観測に基づいているから、それ自体 FK4 とは独立な基準座標系をそれぞれ定義している。USNO 観測星表は“真”なりとすれば、その観測星表と FK4 星表との差 [観測星表-FK4] は、FK4 星表が定義する基本座標系の欠陥の目安を与える。

[観測星表-FK4] はランダム成分とシステムティック成分とに分離される。プロッシュェ、シュバン、ビーン (P. Brosche, H. Schwan, R. Bien) らによれば、システムティック成分は、 $m \approx 4, n \approx 7$ までの統計的に有意な調和函数 (α, δ を独立変数とする) で表現される。ランダム成分は、統計的なノイズに相当する。直観的に表現すれば、システムティック成分は、FK4 が定義する基本座標系のデコボコ性 (歪み) の目安を、ランダム成分はザラザラ性の目安をそれぞれ与えていることになる。

表 2 は、USNO の絶対観測星表 W5/50 との比較によ

表 1

観測星表	平均観測元期	観測星数	FK4 星数	観測南限	一回の観測の平均誤差		[観測星表-FK4] のランダム成分	
					$\sigma_1(\alpha)$	$\sigma_1(\delta)$	$\sigma_{\Delta\alpha \cos \delta}$	$\sigma_{\Delta\delta}$
W10	1914.0	2499	1044	-36°12	$\pm 0^{\circ}025$	$\pm 0^{\circ}45$	$\pm 0^{\circ}009$	$\pm 0^{\circ}16$
W25	1932.7	2383	1125	-38.10	0.025	0.51	0.008	0.17
W1/50	1938.6	1536	1176	-36.12	0.019	0.47	0.007	0.16
W2/50	1945.4	5216	1138	-29.89	0.019	0.45	0.007	0.18
W3/50	1952.5	5965	1146	-30.96	0.018	0.42	0.009	0.18
W4/50	1959.8	2685	1276	-30.96	0.017	0.36	0.008	0.20
W5/50	1967.4	15048	1146	-30.96	0.017	0.34	0.008	0.15

表 2

W5/50-FK4 (赤緯成分) $\Delta\delta = \Delta\delta_\alpha + \Delta\delta_\delta$ (単位 $0^{\circ}01$)

90	9	12	8	3	1	3	8	10	8	6	8	14	22	24	20	13	8	8	10	8	3	-2	-2	3	9	90
85	7	9	6	1	-1	1	5	7	5	3	6	12	19	21	17	10	6	6	7	5	1	-4	-4	1	7	85
80	-1	1	-2	-6	-8	-6	-2	0	-1	-3	0	5	11	13	10	4	0	-1	-1	-2	-7	-10	-11	-6	-1	80
75	-9	-8	-10	-13	-14	-13	-10	-9	-9	-9	-7	-2	3	4	1	-4	-8	-9	-9	-11	-14	-17	-17	-13	-9	75
70	-11	-10	-12	-14	-15	-14	-12	-11	-11	-10	-8	-4	-1	0	-3	-6	-9	-11	-12	-14	-16	-17	-16	-14	-11	70
65	-7	-6	-7	-8	-9	-9	-8	-6	-5	-3	-1	1	1	1	-1	-3	-5	-8	-9	-10	-10	-10	-9	-8	-7	65
60	-4	-3	-3	-4	-5	-6	-7	-6	-4	-2	-1	0	0	0	-1	-2	-4	-6	-8	-7	-6	-4	-4	-4	-4	60
55	-8	-8	-8	-7	-9	-10	-12	-11	-9	-7	-6	-7	-8	-8	-8	-9	-10	-13	-14	-14	-11	-9	-7	-8	-8	55
50	-14	-14	-13	-13	-14	-16	-17	-17	-14	-12	-12	-13	-15	-16	-16	-17	-20	-21	-19	-16	-14	-12	-13	-14	-14	50
45	-12	-11	-10	-10	-12	-14	-14	-11	-10	-9	-9	-11	-13	-13	-14	-16	-18	-18	-17	-14	-11	-11	-11	-11	-12	45
40	-6	-4	-4	-4	-6	-7	-6	-3	-1	0	-2	-3	-4	-5	-7	-9	-11	-11	-9	-6	-5	-6	-6	-6	-6	40
35	-4	-2	-1	-2	-4	-4	-1	3	5	4	2	1	1	2	0	-3	-7	-8	-7	-5	-3	-4	-5	-6	-4	35
30	-5	-2	-2	-4	-6	-5	0	5	6	4	2	1	3	4	2	-3	-8	-9	-7	-8	-8	-6	-9	-9	-5	30
25	-3	1	1	-2	-4	-2	4	9	9	6	3	3	6	8	5	-1	-7	-7	-8	-1	-1	-5	-9	-8	-3	25
20	1	6	6	2	-1	1	8	13	12	7	3	3	8	10	7	1	-5	-5	0	3	2	-3	-6	-4	1	20
15	1	6	6	1	-3	-1	5	9	8	2	-3	-3	2	5	3	-4	-9	-8	-3	1	0	-5	-8	-6	1	15
10	-2	3	3	-2	-6	-5	0	4	1	-6	-11	-11	-7	-3	-5	-10	-15	-13	-8	-3	-4	-8	-11	-9	-2	10
5	0	5	6	2	-2	-2	1	3	1	-6	-11	-12	-8	-5	-5	-9	-13	-11	-6	-2	-2	-5	-8	-6	0	5
0	1	7	8	6	3	2	4	5	3	-3	-7	-9	-6	-3	-3	-5	-8	-7	-3	0	1	-2	-4	-2	3	0
-5	-1	3	5	5	3	2	3	3	2	-2	-5	-7	-6	-4	-2	-3	-5	-5	-3	-1	-1	-2	-4	-3	-1	-5
-10	1	8	7	9	8	7	7	7	7	5	3	1	0	2	4	4	4	2	2	3	3	3	1	0	1	-10
-15	8	10	13	16	17	16	15	15	16	15	14	11	10	10	12	14	14	13	11	11	12	12	10	9	8	-15
-20	3	8	8	9	10	10	9	9	8	8	6	4	2	2	4	6	8	7	7	7	7	7	6	4	3	-20
-25	9	8	8	8	9	10	10	10	8	5	3	1	0	0	1	2	5	7	10	11	11	10	9	8	8	-25
-30	10	9	6	2	2	5	9	10	5	-1	-5	-5	-3	-2	-4	-6	-3	3	11	14	12	8	6	8	10	-30

って得られた FK4 における赤経のデコボコ性を示す。FK4 の赤経におけるデコボコ性も同程度である。FK4 星表が与える基本座標系は一様ではなく、振幅 $\pm 0^{\circ}15$ 、週期 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 程度の凹凸をもつことを示す。USNO の他の観測星表と比較しても凹凸の振幅は同程度ではあるが、その分布のパターンは観測星表ごと異なる。つまり、現用の基本座標系は一様ではなく至るところで $\pm 0^{\circ}15$ 程度歪んでいることになる。このような比較を北天と南天別々に行くと南天でのデコボコ性は北天の倍以上にもなる。USNO のニュージーランド遠征の意義はここにある。

表1の【観測星表-FK4】のランダム成分の欄は、FK4 の滑らかな凹凸の上に重畳されているザラザラ性の目安を与えている。この値も $\pm 0^{\circ}15$ 程度である。FK4 が与える基本座標に歪みがたとえなかったとしても、現用の基本座標系に準拠して与えられる星の位置には、この節の冒頭で述べた固有運動誤差による基本座標系の劣化の他に、このランダム成分程度の不確実性が残されているといえよう。

固有運動の天球における誤差分布についても、同様な比較が可能である。表3は、USNO 観測星表全体と FK4 が与える赤経方向の固有運動の差(システムティック成分)の分布を示す。全天にわたって、 $\pm 0^{\circ}1\sim \pm 0^{\circ}2$ /世紀の振幅をもったうねりが認められる。天体の位置と運動を正確に記述するに当って、準拠すべき基本座標系自体が時と共に非等方的に変形しつつあることを示す。

以上が、現用の光学基準座標系の精度の限界である。基本座標系の精度限界の主な原因は、特に眼視子午環観測における一回の観測の精度が $\pm 0^{\circ}3\sim \pm 0^{\circ}5$ しかなかったことと、南天の観測が極めて稀薄であったことに

よる(南天は殆んどケーブ天文台の観測星表に頼っている)。近く公表される基本星表 FK5 も眼視観測星表に基づいているので、それにより定義される基本座標系の質の大幅な向上は期待できないし、いずれ FK4 と同程度の速度で質は劣化してしまう。FK5 による基本座標系が確立されたとしても、現代的な惑星運動論や恒星力学への直接的な寄与は、FK4 が確立された時代(1963年出版)以上に矮小になってしまうのではなからうかと懸念される(GC 星表や FK3 星表の確立が、銀河回転の発見など天文学に与えたイムパクトは非常に大きかった)。高精度の PMC 観測星表によって、FK シリーズの精度を飛躍的に高めなければ、新しい惑星運動論や恒星力学の展開は望めないだろう。

5. 基本座標系の残存回転

星の固有運動の解析に当って忘れてはならないことがある。基本星表 FK4 の与える星々の固有運動の決定精度は、ランダム成分・システムティック成分共に $\pm 0^{\circ}1\sim 0^{\circ}2$ /世紀程度である。写真乾板上の位置決定に際し、比較星として使われるはずの AGK3R 星(約 20,000 星)の固有運動の決定精度は、コービン(T. E. Corbin)によれば、 $\pm 0^{\circ}45$ /世紀しかない。さらに、FK5 星表で定義される基本座標系に導入される歳差定数の補正値も不確実性を含む。フリッケ(W. Fricke)によれば、FK4 星表の与える固有運動から銀河回転 ω_0 と歳差定数補正値(日月歳差補正値) Δp_1 を同時に解くと

$$\Delta p_1 = +(1.10 \pm 0.15)''/\text{世紀}$$

が得られる。但し、この値の銀河回転軸への写影は、約半分になる。いづれにせよ、上述の固有運動や基本座標系の回転の不確実性は $\pm 0^{\circ}1$ /世紀程度残されているということである。この値は、5 km/sec/kpc 程度の角速度

表 3

USNO-FK4 (赤緯成分) $\Delta\mu = \Delta\mu_\alpha + \Delta\mu_\delta$ (単位 $0^{\circ}01$ /世紀)

90	2	14	27	36	40	41	43	45	44	41	36	33	36	43	49	50	45	37	30	23	16	7	0	-3	2	90	
85	-2	9	21	29	33	35	36	37	37	33	29	26	29	36	42	43	38	31	23	17	10	2	-5	-7	-2	85	
80	-16	-7	4	12	14	14	14	15	15	12	9	7	9	15	21	22	18	11	5	-1	-6	-12	-18	-20	-16	80	
75	-26	-20	-11	-5	-4	-6	-8	-8	-9	-9	-11	-13	-12	-7	-1	1	-2	-7	-13	-18	-20	-23	-27	-29	-26	75	
70	-19	-15	-10	-5	-5	-9	-13	-15	-14	-13	-14	-16	-16	-12	-7	-4	-5	-10	-14	-17	-17	-17	-18	-20	-19	70	
65	-7	-6	-3	0	-1	-6	-12	-14	-14	-12	-11	-13	-14	-12	-8	-3	-3	-6	-10	-11	-9	-6	-5	-6	-7	65	
60	-10	-11	-9	-7	-9	-15	-21	-24	-23	-20	-19	-21	-24	-23	-19	-14	-13	-14	-17	-17	-12	-7	-5	-7	-10	60	
55	-15	-17	-17	-15	-17	-23	-29	-32	-30	-27	-26	-29	-33	-33	-30	-25	-22	-23	-25	-23	-18	-12	-9	-11	-15	55	
50	-11	-13	-13	-11	-12	-17	-22	-23	-22	-19	-20	-24	-28	-29	-26	-22	-19	-19	-19	-17	-11	-5	-4	-6	-11	50	
45	-5	-7	-5	-3	-4	-7	-9	-9	-7	-6	-9	-14	-19	-20	-17	-13	-11	-11	-10	-6	-1	3	3	1	-5	45	
40	-6	-5	-3	-1	0	-1	-1	1	3	2	-2	-9	-13	-14	-11	-9	-8	-7	-5	-1	3	4	2	-3	-6	40	
35	-9	-7	-1	0	0	1	4	8	10	7	0	-7	-10	-9	-7	-6	-7	-7	-4	1	4	3	-3	-8	-9	35	
30	-12	-7	-2	0	2	8	14	16	11	2	-6	-8	-5	-3	-4	-7	-7	-3	3	5	0	-8	-13	-12	30		
25	-9	-1	4	5	4	6	14	22	24	17	6	-1	-1	3	6	3	-1	-2	3	9	10	3	-6	-12	-9	25	
20	-5	4	10	10	7	9	17	26	28	20	8	1	4	10	13	9	3	1	7	14	14	6	-5	-10	-6	20	
15	-16	-6	0	-2	-6	-6	2	11	13	4	-7	-13	-9	0	3	-2	-10	-12	-6	1	1	-7	-18	-23	-16	15	
10	-32	-21	-15	-18	-24	-24	-18	-9	-9	-16	-27	-32	-26	-17	-13	-18	-26	-29	-24	-17	-17	-25	-36	-39	-32	10	
5	-33	-22	-15	-18	-24	-26	-20	-13	-13	-20	-30	-34	-28	-18	-14	-19	-27	-30	-26	-20	-20	-28	-37	-40	-31	5	
0	-26	-16	-9	-10	-15	-16	-13	-7	-7	-14	-23	-26	-21	-12	-8	-11	-18	-21	-19	-15	-15	-22	-31	-33	-26	0	
-5	-18	-8	0	2	-1	-1	2	6	5	-1	-10	-14	-10	-3	2	0	-5	-9	-8	-6	-7	-14	-21	-24	-18	-5	
-10	-3	7	16	21	22	23	26	29	28	22	13	7	8	14	19	19	15	12	12	13	10	8	-4	-7	-3	-10	
-15	17	26	36	43	47	49	53	56	54	47	36	29	28	32	37	39	36	34	34	34	32	25	17	13	17	-15	
-20	16	25	34	41	44	47	51	55	53	44	31	22	19	22	27	28	27	27	30	33	27	18	13	16	-20		
-25	-1	7	12	13	11	12	17	22	19	8	-7	-18	-20	-16	-13	-13	-14	-10	0	10	14	10	1	-4	-1	-25	
-30	18	23	20	7	-8	-14	-9	-3	-5	-19	-37	-48	-46	-40	-37	-40	-42	-33	-12	11	24	24	17	13	18	-30	
δ	α	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	α

の不確定性に対応する。

太陽近傍の恒星集団 (Orion Arm, Gould-Belt, Shingle Structures, など) の運動, 銀河円盤の歪み (Warping) さらには球状星団やマゼラン雲の運動 (250 km/sec/50 kpc) 等々に関する問題は, 全てこの不確定性 $\pm 0.1/\text{世紀} \approx 5 \text{ km/sec/kpc}$ を克服しなければ, 何も解決されないことを強調しておきたい。例えば太陽近傍の銀河回転は, $\omega_0 = A - B = 0.5/\text{世紀}$ と見積られているから, $\pm 0.1/\text{世紀}$ の不確定性を許すなら, 銀河回転速度として 300 km/sec も真であり, 200 km/sec (最近の傾向) も真である。また, 銀河系の標準模型によれば, 太陽近傍の回転速度勾配は 5 km/sec/kpc で銀河系の外に向って減少していることになっている。ここでも $\pm 0.1/\text{世紀}$ が顔をのぞかせる。銀河系が大質量ハローに包まれていることの証拠の一つとして銀河回転速度が外に向って平坦ないしは増大の事実が挙げられるが, 全ては $\pm 0.1/\text{世紀}$ の中に埋もれた議論であって, 銀河系質量 $10^{11} M_\odot$ が真なら $10^{12} M_\odot$ も真である。

空間に縛って不動の慣性座標系を近似すべき基本座標系に残存する回転には, さらに未解決の問題がある。基本座標系の基準面は, 根本的には太陽系の不変面に合致するように選ばれている。地球上で天体の位置を記述する都合上, 表面的には, 基本座標系の基準面は赤道面になっている。従って, 不変面に対する赤道面の回転を, 不変面に対して回転している黄道面に準拠して常時知っていないてはならないという事情がある。直接的には黄道傾斜角の永年変化 $\dot{\epsilon}$ は既知でなくてはならない。 $\dot{\epsilon}$ は, 不変面に対する黄道面の永年変化量として, 20 世紀初頭ニューカム (S. Newcomb) によって定式化されたが, 18 世紀以来の太陽系天体の位置観測に基づいて, スペンサージョーンズ (H. Spencer-Jones, 1932), クレメンズ (G. M. Clemence, 1943), ダンカム (R. L. Duncombe, 1958) 等が $\dot{\epsilon}$ を求め直してみると, ニューカムの値との間に $-0.3/\text{世紀}$ のくいちがいが出て来てしまった。銀河回転を決定するにあたって, このくいちがいがいかに重大な意味をもつか, 青木信仰氏 (1967) が注意を喚起したが, 未だに $-0.3/\text{世紀}$ のくいちがいの真偽について明解に決着がつけられたとは思えない。

これらのことは, 足もとの定数の高精度決定が天文学にとっていかに重要な意味をもつかを示す一例にすぎない。 $\pm 0.1/\text{世紀}$ の不確定性の除去は, 地球力学や惑星運動論にとっては, もっと重大な意味をもつことはいうまでもない。歳差定数の不確定性は, 近い将来 VLBI 観測によって除去されるだろう。星々の固有運動や黄道傾斜角の永年変化の不確定性の除去は, PMC による恒星・太陽系天体の高精度観測を待たねばならない, PMC の観測の成果が蓄積された暁に, 埋もれていた新事実が

現われてくる。

6. 光学基準座標系の“固定”

天体の運動 (固有運動) を正確に決定するためには, 無限遠点を不動の三角点とする無回転座標系 (慣性座標系) を見つけ出せばよい。実際には無限遠点は見えないから, 可視の銀河系外天体で三角点網を張りめぐらせばよい (宇宙膨脹程度の銀河系外天体の固有運動があったとしても, それは $0.01/\text{世紀}$ 程度である)。このような夢を最初に提案したのは, ハーシェル (W. Herschel, 1785) であった。恒星の固有運動の発見後既に半世紀経過していた。実際にハーシェルの夢が実現したのは, さらに 2 世紀後の 1970 年になってからである。1950 年ライト (W. H. Wright) の提案で, リック天文台とブルコボ天文台は, 天体写真儀 (Astrograph) を用いて, 星の位置とセイファート銀河等の銀河中心核の位置との結合を試みた。約 20 年の歳月を経て, 両天文台は, それぞれの“慣性”座標系に準拠した星々の固有運動を測定した。ところが, 期待に反して, それぞれの“慣性”座標系に準拠した固有運動に約 $1''/\text{世紀}$ もの系統差が残されてしまった。双方またはどちらか一方の座標系が理想的な慣性座標系でなかったことを意味する。くいちがいの明確な原因はわかっていない。

最近では VLBI が実用化され, 銀河系外電波源 (準星) の大角度の相対位置が ± 0.01 以下の誤差で測定できるようになった。準星を三角点網とする電波基準座標系が確立されれば, それが, ハーシェル以来夢見られていた最高精度の慣性座標系を与えることになる。しかしながら, 3 節にも述べたように, 光学天体の運動を記述するための光学基準座標系が電波基準座標系に結びつけられ, 前述の光学基準座標系の欠陥が除去できなければ, 二種の基準座標系は, 学術的には, 無関係の存在である (“optical” kinematics と “radio” kinematics との学術的整合性は得られない)。

VLBI による赤緯観測は光学観測と同様に地球の自転軸の方向に準拠して独自に行なわれる。VLBI の赤経原点は, 春分点という抽象的な点ではなく, 相手が充分遠方にありさえすればどの準星に定めてもよい (銀河系外天体の固有運動を問題にしなれば)。しかし, 二種の座標系の結合という観点から, 電波基準座標系と基本座標系 FK4 の赤経原点を出来るだけよく合致させておく必要がある。現在, 電波星 Algol = β Persei (FK4/111) や β Lyrae (FK4/705), さらには準星 3C273B ($m_0=13$) や NRAO 140 ($m_0=19$) の VLBI による電波位置を基準座標系 FK4 における光学位置に ± 0.01 の精度で合致させてあることになっている。

しかしながら, この数点においてすら, ± 0.01 の結

合精度を額面通りに受けとる訳にはいかない。青木氏等(1984)によれば、電波基準座標系で表示されている準星の観測元期と視位置との関係がまず曖昧であるし、第4節で述べたように、基本座標系内での個々の星の位置の決定精度は ± 0.15 しかない。釘づけしても ± 0.1 程度のガタが残っているはずである。さらに前述のように、現用の基準座標系の非一様性(凹凸)は、 $m \approx 4, n \approx 7$ までの調和関数で表現されているから、基本座標系のこのような系統差を修正するには、全天で少くとも50~60の光学的にも電波的にも見える理想的な点源(検定点)が要求される。現在、両座標系のこのような結合はようやく緒についたばかりである。

電波基準座標系に準拠して基本座標系の残存回転を検定し、基本座標系を銀河系外天体に釘づけることはもっと困難を伴う。釘づけにすることは、基本座標系 FK4 が無回転として、準星の光学部の見かけ上の固有運動(約 0.1/世紀)を検出することと同等である。この場合にも、ある瞬間における両座標系の結合の場合と全く同様に、全天に最低 50~60 の検定点が要求される。

以上のような二つの座標系の結合・検定に伴う困難の大きな原因は、銀河系外天体が光学的に非常に暗いことである(多くの準星は $m_v > 15$)。このように暗い光学天体を PMC や位置天文衛星 HIPPARCOS によって直接観測することは不可能である。いずれも限界等級は $m_v = 12 \sim 13$ である。 $m_v \leq 13$ の星と $m_v \geq 15$ の銀河系外天体の位置を結びつける最も実際的な方法は、現在のところ、天体写真儀やシュミット望遠鏡による写真位置測定(Photographic Astrometry)であろう。

7. 光学基準座標系の改良

望遠鏡が大口径になれば宇宙の奥深くの何かが見えてくるはずだという天文学上の素朴な期待がもし許されるなら、ここでいう改良には、光学天体の運動学において、それと同じような夢も含まれている。PMC の光学基準座標系への寄与を具体化すると次のようになる。

i) 基本座標系の改良

近い将来出版される基本座標系 FK5 は FK4 と同程度の誤差を含み得るから、PMC 観測により、その誤差を 1/3~1/5 に狭めることによって、基本星表の質を飛躍的に改良する。PMC による絶対観測を具体的に計画しているところは、北半球における東京天文台と南半球(ニュージーランド)における USNO だけである。さらに、東京天文台の PMC は、絶対観測によって、USNO 6 インチ子午環観測に偏りすぎていた基本座標系を矯正する役割も果たす。両天文台の責任は大きい。

ii) 太陽系天体の無個人差観測

光学天体の絶対位置観測においては、太陽を含む太陽

系天体の観測は不可欠である。既存のいかなる基本座標系(例えば FK5)に頼ることなく、太陽系天体の運動理論と矛盾しないように座標原点としての春分点と基準面としての赤道を決定しなくてはならないからである。昨年 11 月より、東京天文台の PMC により、世界ではじめて光電方式の太陽位置観測が開始された。惑星といくつかの衛星も PMC により直接観測される。これらの無個人差高精度観測による成果は、惑星運動論の発展を直接促す。

iii) 銀河系外天体のまわりの微光比較星

6 節に述べたように、i) と ii) で改良された基本座標系を銀河系外天体による三角点網に結びつけることは、依然として大きな夢である。例えば VLBI 観測対象の準星を中心とした微小領域内($1^\circ \times 1^\circ$)の多数の微光星($10 \leq m_v \leq 13$)の高精度位置を、基本座標系(FK5 $m_v \leq 9$)に準拠して決定する。これら位置決定済の微光星は、 $m_v \geq 15$ の準星の光学位置を写真乾板上で決定する際に、比較星として用いられる。 $m_v \geq 10$ の星の固有運動は殆んど未知と考えられるから、その不確定性を避けるために、PMC による基本星と微光星との結合と、天体写真儀による微光星と準星との結合の観測は同時に行わねばならない。このような同時観測を異なった元期で 2 回実施すれば、基本座標系に準拠した準星の見掛け上の固有運動が、原理的には求まることになる。以上の結合作業では、準星の電波位置と光学位置が合致していることを前提としている。準星・電波星は、活動天体だから、電波・光学位置が時間的にずれる可能性は充分考えられる。不一致が検出されれば、それ自体天体物理学の面白い研究対象となろう。図 2 に各種基準座標系 ○ とそれを実現する観測手段 □ との関係を示しておく。

iv) 基本星表の拡張

基本星表は、観測歴の長い明るい星で構成されている(例えば FK5 は $m_v \leq 9$, 約 5000 星)。写真乾板による位置・固有運動の測定においては、もっと高密度で分布したより暗い星々が比較星として要求される。その目的の星表が AGK3, AGK3R (AGK3 星の位置を FK4 星に結びつけるための星表), SRS (南天標準星)であった。これらの星の位置精度は図 1 に示した程度しかない。われわれの感覚からすれば、これらの星表の与える固有運動はあてにならない。PMC により、少くとも IRS (AGK3R + SRS) 約 40000 星は再観測されることになる。

v) (HIPPARCOS+TYCO) 座標系の補強

1988 年には位置天文衛星 HIPPARCOS が打上げられ、2.5 年のミッション後 1990 年代の中頃には、地上の PMC 観測とは全く独立な光学基準座標系が確立される。この座標系は、星相互の相対位置を従来に比べて一桁以上高い精度で与えることになっている。しかし、

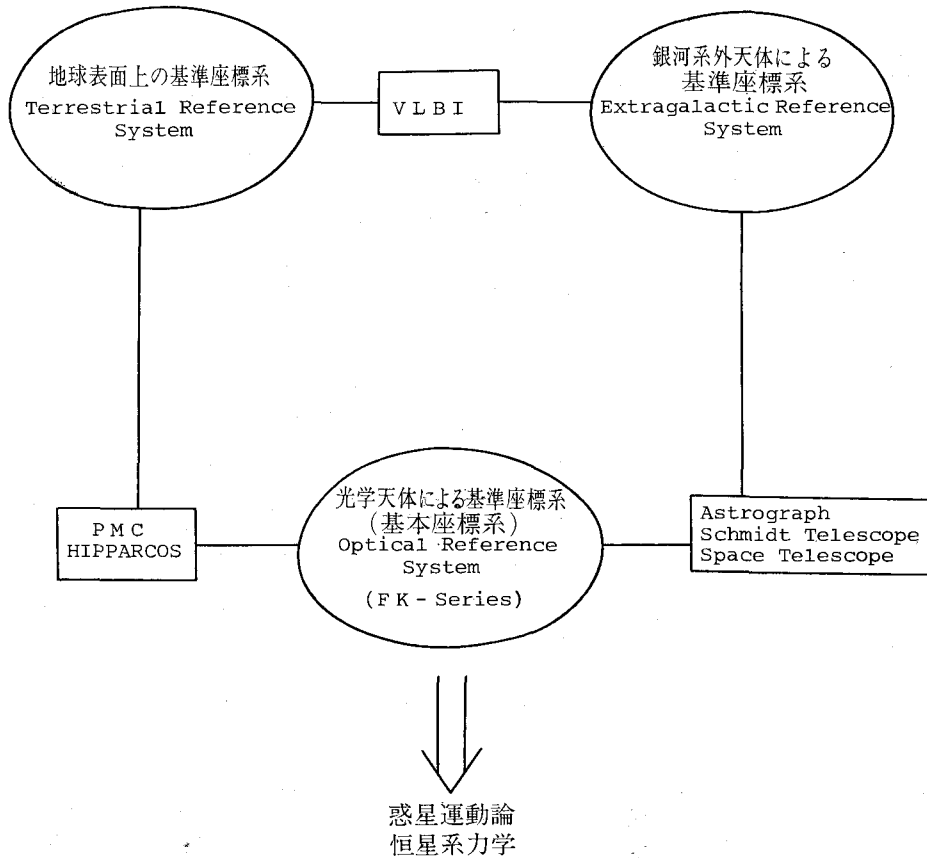


図 2

HIPPARCOS が与える座標系には、座標系の回転三成分が不確定という泣き所がある。慣性空間における 1.5 (?) 星の固有運動を独自に決定できれば、回転を止めることができるのだが、限界等級 $m_v \leq 13$ では準星まで手が届かないし、また小惑星の軌道もよく決められないために、太陽系天体の運動から決めるべき慣性座標系（いわゆる力学座標系）とも結びつけられない。差し当り、HIPPARCOS 座標系を PMC による高精度光学基準座標系に結びつけて回転を止めてやらねばならない。さらに、リックとブルコボ天文台の大プロジェクトの例にも見られるように、独立な座標系には、必ず系統差がつきもので、その系統差の原因を明確にしなければ、新しいシステムに気軽に乗り換えるわけには行かない。この系統差の原因チェックの役割も PMC は担っている。系統差の原因の中に天文学的な新事実が埋もれていることが多い。

8. おわりに

以上のような背景と観測目標のもとに、今年度から自

動光電子午環による年間平均約 2 万星の観測活動が開始される。一星当り平均 4 回の観測を実施するとすれば、4 年毎に約 2 万星を含む全く独立な絶対観測星表が、東京天文台で編集されることになる。南半球で光電子午環により絶対観測を行う USNO でも、同様なテンポで観測星表が編集される。

ひるがえって、オールドが活躍した時代と現代とを比較してみると、銀河系の骨格に関するわれわれの認識は、オールド以来、著しく深まったとは思えない。このところ 20~30 年間にわたって、銀河系の骨格に関する基本データ（恒星の視差や固有運動など）の量・質ともに著しい飛躍がなかったからであろう。むしろ、それらの基本データは、既に 1960 年代には枯渇してしまっていることに気づく。東京天文台や USNO、さらには HIPPARCOS による根気のいる観測活動が蓄積・総合されてはじめて、光学天体の運動学に新たな活気をもたらすことが可能となろう。天文学の発展に伴って、天文学の間口が拡大され多様化したのが、天文学は依然として息の長い観測活動がなければ成立しないという特質もっている。