

アストロラープの観測では1夜に約90星を平均3分間隔で観測しているので、整約計算で(35)と(36)或いは(35)と(38)と(39)を1星毎に計算するのは電子計算機を利用するにしてもあまり能率がよいと思えない。 $\Delta R_a$ と $D$ は恒星と全く関係がなく時刻さえ指定されれば決まる量なので、これらを適当な時間間隔であらかじめ計算しておけばベッセルの日々常数と同じような取扱いが出来ることになる。水沢のアストロラープでは毎日の0<sup>h</sup> UT に対して $\Delta R_a$ と $D$ と共に固有運動の計算のための $T$ と、視差の計算のための $r_{\oplus}$ 等を計算しておいて直交座標の日々常数と名付けている。これを磁気テープに記憶させておいて観測のあった時刻に対して補間計算によってとり出し、直交座標の恒星常数と名付けた時刻に無関係で星表の値だけから決まる $R_0$ や $v_0$ と組合わせて(35)と(38)の計算だけで簡単に視位置を求めている。

この方式は計算式が単純で電子計算機に適しており、

その上計算精度が高いので水沢ではアストロラープだけでなく、今年から眼視天頂儀による国際共同緯度観測の整約や浮遊天頂儀による緯度観測整約にも採用された。なお日々常数は磁気テープだけでなく、1日分を3枚のIBMカードにしてあるので要求があればいつでも提供できる。

#### 参考文献

- 1) H-M Dufour et A. Fontaine: Formules pratiques pour le calcul électronique des coordonnées des Étoiles, Bull. Astr., **23**, 117, 1959.
- 2) F. P. Scott and J. A. Hughes: Computation of Apparent Places for the Southern Reference Star Program. A. J., **69**, 368, 1964.
- 3) 古川麒一郎: 直交座標を用いた恒星の視位置計算(I), (II), (III), 緯度観測所集報, No. 3, 1963, No. 4, 1964, No. 5, 1965.
- 4) 長谷川一郎: Cracovian 入門(1), (2), (3), (4), (5), (6) 天界, No. 467-472, 1964.

## 太陽系のスケールについて

須 川 力\*

### 1. まえがき

太陽系のスケールを表わす基本的な単位として、天文単位が用いられている。この単位は、もともと地球と太陽との間の平均距離を表わすものとして定義されたが、現在では厳密に言えば、それとは独立して定義されている。ケプラーの第3法則は次の式によって表わされる:

$$n^2 a^3 = \kappa^2 (1 + M),$$

ここに $n$ は1暦表日についての惑星の平均運動(ラジアンで表わす)、 $a$ は摂動を受けないとしての惑星と太陽の間の平均距離、 $M$ は太陽の質量を単位にとった惑星の質量、 $\kappa$ はガウスの重力定数である。ガウスの重力定数を絶対不変な定数として、0.017, 202, 098, 950 という値を採用し、質量の単位に太陽の質量をとり、時間の単位に暦表日をとって、長さの単位としての天文単位が定義されている。従って地球と太陽との間の平均距離は1,000,000,2天文単位(a. u.)となる。

この天文単位を出来るだけ正確に決定することは、太陽系における惑星、小惑星、彗星等の天体の位置およびそれらの運動を取扱う位置天文学・天体力学にとって最も基本的な問題の1つである。現在この単位を決定する主な3つの方法は

- i) レーダーによる惑星間の距離測定より導くこと
- ii) 太陽視差の幾何学的決定
- iii) 小惑星におよぼす地球および月の引力作用から推定する力学的推定

である。最近1964年8月末西ドイツのハンブルグで開催されたIAU総会において、新しい基本的な天文常数として

$$1 \text{ a. u.} = 149,600,000 \text{ km}$$

という値が採用された。しかし、この新採用値は決定的なものではなくて、まだ論議すべき問題点を多く含んでいるように思われる。ここではクレメンツ<sup>1)</sup>の最近の批判を紹介して、太陽系のスケールの基本単位の決定についての問題点を考えてみたい。

### 2. レーダー法

1959年以来レーダーパルスの系列が地球上の数ヶ所から発射され、金星で反射されたエコーが地球上で再び受け取られた。パルスの全伝播時間が、測定された。これよりシンプルな太陽系のスケールを決める原理はほかに考えられないほどであるが、この方法による決定にも次のような仮定がおかれている。

- a) 地球の中心から金星の中心までの、天文単位で表わした距離が測定の際に知られていること
- b) 地球と金星の有効直径が知られていること

\* 緯度観測所

C. Sugawa: On the Scale of the Solar System.

- c) 信号は光速で伝播してゆくこと  
 d) 光速の値が精確に知られていること

等である。これらの仮定のどれも疑う理由は一応ないが、IAU のワーキング・グループは真の値は下限  $149597000 \text{ km}$  と上限  $149601000 \text{ km}$  との間に在ると信じられると発表した。前にのべた新採用値は下限との間に  $23000 \text{ km}$ 、上限との間に  $1000 \text{ km}$  のへだたりがあり、むしろ上限に非常に近くて、決して上限と下限との中間に当たる値ではない。しかし probable error (*p.e.*) は  $2000 \text{ km}$  より小さいにちがいがなく、おそらく  $1000 \text{ km}$  程度すなわち  $1.5 \times 10^{-5}$  のオーダーであろう。レーダー測定値は上限から下限まで見て4つの有効数字まで一致しているが、それぞれの *p.e.* はかなり違っている。ヴェーメとフリッケ<sup>2)</sup> は次のこととなった場所で得られた5つの測定結果を太陽視差で表わしている。

|       |   |        |
|-------|---|--------|
| No. 1 | $8^{\circ}797,4 \pm 0^{\circ}000,8$     | (1960) |
| No. 2 | $8^{\circ}794,3 \pm 0^{\circ}000,3$     | (1961) |
| No. 3 | $8^{\circ}794,39 \pm 0^{\circ}000,05$   | (1961) |
| No. 4 | $8^{\circ}794,491 \pm 0^{\circ}000,024$ | (1961) |
| No. 5 | $8^{\circ}794,098 \pm 0^{\circ}000,015$ | (1961) |

これらの値のうちで、No. 1 の値は *p.e.* が他の値に比べて非常に大きい。しかもその値自身が他の値と比べて、その差が *p.e.* の約4倍ほど大きい。また No. 3 の値は、No. 5 の値と比べて、その差が *p.e.* の約6倍ほど違っている。

No. 4 と No. 5 の値は最も精度の良い結果とされているが、それらの値は *p.e.* の14倍ほども違っている。こうして見ると、No. 4 か No. 5 の値のいずれかが、他の値と同様に、ある系統的な誤差の影響を受けていることは確からしい。従って *p.e.* が必しも実際の精度を表わしているものではないと思われる。4桁の有効数字まで一致したことは、少なくとも相互の値の不一致を説明出来なければ、妥当性を確認出来ない。

扱ってレーダー測定が依存している金星と地球の軌道は、ニューカムの理論に従って数値積分によって得られたものである。この理論を現代の観測と比較して導かれた軌道常数への補正をほどこしてある。ニューカムの理論は、その当時においては適合していたが、現在にいたってはある程度はずれてきている。そのなかに含まれた2次の摂動項のみが、平均黄経における長周期の主要項である。永年項についてはかなりあらっぽい近似度である。

ニューカムによって省略された項の重要性は、それらを実際に計算してみないことには正しい推定が出来ない。ともあれ軌道常数を出来るだけ現代の観測に合わせるように補正することによって、理論のなかで consistency が保たれるように修正がなされつつある。もっと

はっきり言えば、ニューカムの理論の不適合性は、正しい軌道常数を求める過程において、むしろ迷路に導く危険性があるといっても過言ではない。

次にレーダー測定が依存している、惑星間空間における光速は常識的に考えられているほどには良く知られていない。ドーセイ<sup>3)</sup>はこの問題についての研究に新しい統計量、dubiety (疑わしさ)を導入した。これは *p.e.* のような多数の測定結果の internal consistency に関係したものではなくて、ことなった種類の個々の測定の最大 possible の系統差を見積もることによって得られる。そして符号を考えないでそれぞれの系統差の和をとる。従って dubiety は最大 possible な誤差を示すものとみてよい。ドーセイは1944年に光速の値として  $299773 \text{ km/sec}$  に“おそらく  $10 \text{ km/sec}$  より小さいであろう”という dubiety をつけて発表した。その後まもなくマイクロ・ウェイブの技術が実験室に導入された。

そして何回も測定が積み重ねられて、結果は  $299792.5 \text{ km/sec}$  であった。この値が新天文常数として採用された。ワーキング・グループによって真の値は  $299792$  と  $299793$  の間に在るであろうと推定された。今ではこの結果はドーセイの値と両立させることは、おそらく困難に思われる。少なくとも、実際の惑星間空間における光の有効速度が実験室のなかでの測定値よりは小さいかもしれないという可能性は残る。それは地球と金星の附近における光の屈折率が充分に良く知られていないからである。クレメンヌ自身は、このことにもとづく誤差がこの不一致を説明するのに充分であることを認めるまでにははいたっていないという。しかしこのような問題に直面した時、不一致を解決するまではいろいろな原因をもっと追求すべきであろう。

### 3. 太陽視差

太陽視差は1天文単位の距離において地球の赤道半径によって張られた角度と定義されている。地球の赤道半径は  $km$  で良く測定されているから、これを  $R$ 、太陽視差を  $\pi$  で表わせば、 $km$  で表わした天文単位の数値は  $R/\pi$  で与えられる。この際  $\pi$  はラジアンで表わされる。もし  $\pi$  を角度の秒で表わす時には  $206,264^{\circ}8 R/\pi$  となる。

太陽視差の1回の測定精度は最も良くても  $0.01$  で、通常は  $0.1$  より大きい程度であるから、 $10^{-4}$  の精度まで決めるためには非常に多数の観測の集積を必要とする。しかし1950年までは太陽視差の決定は天文単位を決めるためには最も有利な方法であった。この観測の近代的な歴史は1761年に始まった。その時1天文単位より地球に近づく惑星の視差の観測が、太陽の観測より高い精度を与えるであろうということが認識され、実際その年にリヒターとケイエンヌ (Cayenne) はパリにおけるビ

カールとレーマーと共に火星の同時観測を行なった。

この2組の観測から太陽視差について9%という値が得られた。1888-1889年にかけて小惑星ヴィクトリア、サッフォー、アイリスの観測計画が実施され、25の天文台がこれらの観測に参加した。この時の結果は $8^{\circ}802 \pm 0^{\circ}005$ であった。1899年に発見された小惑星エロスの観測が1900-1901年にかけて各天文台で実施され、この時にはじめて写真観測法が用いられた。結果として、 $8^{\circ}806 \pm 0^{\circ}004$ が得られた。1931年に多くの天文台が参加して、2847のエロスの写真観測データが得られた。この時の結果はスペンサー・ジョンズ<sup>4)</sup>によって十分に吟味され、 $8^{\circ}790 \pm 0^{\circ}001$ という結果が得られた。この値はその後しばらくの間最も信頼出来る値として受け入れられた。太陽視差の決定についてアトキンソンが重要な指摘を行なった。観測結果が、ある程度まで、北半球においてなされた観測と南半球においてなされた観測とによって左右されていることに着目した。これらの観測は長焦点の屈折望遠鏡でなされているので、天頂からかなりはなれたところを観測する際に、光学系がたわみの影響を受けることは長い間認められてきた。この事実は星の視差の観測者にはよく知られていて、結果におよぼす系統的な誤差の影響を避けるように、適当な配慮がなされている。北半球の望遠鏡は天頂の南の方に向けられ、南半球の方は北の方に向けられる、このようにして望遠鏡のたわみの影響が太陽視差の結果をかたよらせることが考えられる。しかし今となっては、このたわみの測定をして結果に補正することは間に合わない。たわみは時期とともに変化することがあり得るからである。しかしアトキンソンは観測に実際に用いられた望遠鏡について、ある実験をこころみた。適当な天頂距離に望遠鏡を向けて星野写真を撮った。そしてエロスの観測がなされた時と同じような整列をほどこした。小惑星を用いるかわりに、まわりの星の良く知られた位置から中心星の位置を導いて、かなり大きい量だけ、その中心星のすでに知られている位置との不一致が見出された。そのころみから、ジョンズの決めた $8^{\circ}790$ という値が正の補正を要することが示された。

この系統誤差が1931年の時にだけ見逃されたことは不思議である。特に若干の観測者は星の視差決定の専門家であった。従って折角のジョンズの値もすてなければならない。

#### 4. 力学的方法

この方法は $(S+E+M)/(E+M)$ の比を求めることである。ここに $S$ は太陽の質量、 $E$ は地球の質量、 $M$ は月の質量である。この比と $\pi^2$ の積は非常に精確に知られている。従ってもしどちらかが測定されれば、他は直ちにそれから推定出来る。質量比は地球に充分近づく

惑星の運動を観測することによって決めることが出来る。先づ、惑星の座標を、観測された全期間に亘って、出来るだけ精密に計算する。まだよく知られていないdisturbing massについては暫定値を用いる。今 $(E+M)$ は補正を要する量であるとする。もし $(E+M)$ によって計算された惑星の摂動を時間軸に対してプロットしたならば、それは不規則な連続曲線としてあらされるであろう。例えばdisturbing massが仮定された値より5%大きいと仮定する。惑星の観測された座標と計算された座標との不一致( $O-C$ )を同じグラフにプロットすると、正確に計算値の曲線の形状を再現するが、振幅は計算値の5%になるであろう。実際にはこのようなグラフ法をとらないで、解析的方法が用いられる。惑星の6つの軌道常数および地球の軌道常数のうちの2つの値が同時に決められなければならない。この方法は大変な量の計算を要し、また2,3の惑星はこの目的のためには適していない。それらは地球からはなれすぎているか、または必要な観測数が蓄積されるにはあまりにも最近になって発見されたため等の理由による。最近での決定はラーベ<sup>5)</sup>(1950年)による。彼は1926-1945年にかけてのエロスの観測を処理した。16個の量を同時に決めることをこころみた。すなわち水星、金星、 $(E+M)$ 、火星の質量、エロスの6つの軌道要素、地球の3つの要素、黄道傾斜、春分点、赤道等である。 $S/(E+M)$ について $328452 \pm 64$ を導いた。太陽視差にして $8^{\circ}7984 \pm 0^{\circ}0004$ に相当する。マースデン<sup>6)</sup>はラーベの決定値について再吟味を行なった。彼は太陽と火星との質量比をラーベの採った値3110000を3020000に減小させれば、太陽視差は $8^{\circ}7984$ から、天文単位の新採用値に相当する $8^{\circ}7941$ に向ってゆくことを示した。しかし観測における( $O-C$ )の自乗和がほぼ2倍になり、こうした点から見ても両者の値の間の不一致はまだ十分に説明されつくしていないと思われる。1893年から現在にいたるまでのすべての観測データを用いて、再び統一的にエロスの運動を研究することがのぞましい。ラーベがこれを実行しなかったのは、当時まだ十分に高い性能をもつ計算機が作られていなかったからであろう。このような全データを用いる研究はすでにエール大学天文台のリースクによって始められた。

扱てニューカム<sup>7)</sup>は1895年に次の原理を打ち出した。

すなわち地球の質量は、ある惑星の運動に生ずる周期摂動によって十分に決められることは出来ないということであった。ジェフリーズ<sup>8)</sup>は1965年にこのことにふれて再考を要することを論じた。ニューカムは水星、金星、火星を考えていた。それらの惑星のvisible discは1会合周期の間にその大きさや形状を変える。従って地球によって生じた摂動と関係のある観測の系統的な誤差

を生ずる。小惑星を観測して地球の質量をきめる方法は当時まだ考えられていなかった。適当な小惑星が当時まだ発見されていなかったからである。次にもっとも重要なことは、地球の運動の理論における誤差が、質量決定に大きく影響するかもしれないということである。

### 5. むすび

以上にのべた天文単位を決定する主な3つの方法のほかに月の運動における parallax inequality の観測値および光行差常数の観測値から太陽視差を決める方法があるが、結果は今では興味をもつほどに精確ではない。

主な3つの方法による決定値をここにまとめてみると

1) レーダー法  $8.7941 \pm 0.0002$

2) 太陽視差の幾何学的決定  $8.790 \pm 0.001$

3) 力学的方法  $8.7984 \pm 0.0004$

である。誤差論からみて、以上の3つの結果をすべて認めることは出来ない。*p. e.* はある系列の観測の internal consistency (内部的な一貫性) を表わすものにすぎない。全観測を系統的にある方向にかたよらせる傾向をもつ系統的な誤差については何も語ってはいない。しかも相互の間の不一致は *p. e.* を比較してみても、あまりにも大きいので、少なくともそのうちの2つが系統的な誤差の影響を受けていることを確かめることが出来ない。このような場合に、ただ平均値をとることは許されない。3つのそれぞれについて他との不一致の原因を見出すために分析をこころみなければならない。レーダー法から導かれた値は他の2つの値の中間に在るという状況は、決してそれを採用する理由とはならない。それぞれの間の不一致について、考えられる問題点を論じてきた。要約す

ると

- 1) レーダー法による決定値は多少小さく導かれているかもしれない。
- 2) 光の有効速度は採用値より小さいかもしれない。
- 3) ニューカム金星と地球の運動の理論は重要な誤差を含んでいる。エロスの観測は地球によって起された摂動と関係のある系統的な誤差によって影響を受けている。

これらの影響のうちのあるもの、またはすべての組合わせが実際に効いていることもあり得るし、あるいはまだ考えられていない別の説明が将来見出されるかもしれない。

かくして太陽系のスケールは天文常数の間にあつて最も魅力に富んだ謎につつまれていると言っても過言ではない。

### 参考文献

- 1) G. M. Clemence: Journ. Roy. Astr. Soc. Canada, **60**, No. 4, 167, 1966.
- 2) S. Böhm and W. Fricke: Bull. Astr. **25**, 269, 1965.
- 3) N. Dorsey: Trans. Amer. Phil. Soc., New Series, **34**, part 1, 1944.
- 4) H. Spencer Jones: M. N., **101**, No. 8, 356, 1942.
- 5) E. Rabe: A. J. **55**, 112, 1950.
- 6) B. G. Marsden: Bull. Astr. **25**, 225, 1965.
- 7) S. Newcomb: The elements of the four planets and the fundamental constants of Astronomy, Washington, 12, 1895.
- 8) H. Jeffreys: Bull. Astr. **25**, 67, 1965.

昭和42年3月20日

印刷発行

定価100円

編集兼発行人

印刷所

発行所

東京都三鷹市東京天文台内

東京都港区西新橋1丁目21番8号

東京都三鷹市東京天文台内

電話武蔵野45局(0422-45)1959

広瀬秀雄

笠井出版印刷社

社団法人日本天文学会

振替口座東京13595