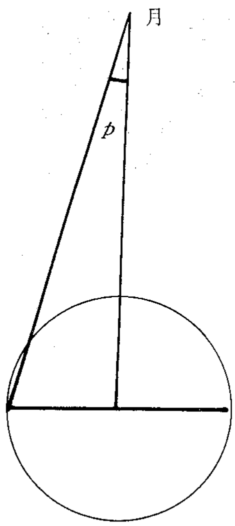
物をはかる話 ②

月までの距離

古在由秀

1. 3角視差



地球の大きさや形が分ってくると，地球上に基線ををおいて近い天体までの距離は3角測量の方法で測ることができる．流星が地球の大気中での現象であることが分ったのも，地球上の2点から3角測量の方法で流星の高さを測ることができたからである．

月まで距離も，19世紀になると，この方法で測られるようになった．といっても，基線の両端で月の同時観測をする必要はない．各地での月の観測された位置から，地球の中心でみた月の動きを求め，それからの観測値のはずれを，地心でみた時と地表でみた時の月の方向の差と考え，これから月までの距離を計算するのである．

月までの距離を表わすのに，地心でみる時と，赤道上で月を地平線上にみる時との方向の差 p を使い，これを水平赤道視差とよんでいる．これをたんに月の視差ともいう．また，p の代わりに $\sin p$（これに1ラディアンを秒で表わしたものをかけて秒で表わして）を赤道視差の定数とすることもある．

1863年に，グリニジ，エジンバラ，ケンブリジ，喜望峰の天文台での1830-1837年の月の観測をもとにして，ブリーンは $\sin p$ の平均の値として 3422″.70 を求めている．このすぐあとに，ストーンは，1856-1861年のグリニジと喜望峰との観測をくみあわせて，ブリーンと全く同じ値を導いている．

これらの観測は，もともとは月の視差を求めるために行なわれたものではなく，ふだんの月の位置の観測，すなわち，月のへりの位置の観測を使ったのである．

2. メスティング A の観測

月のへりというのはかなり凹凸がはげしく，へりを観測しているかぎり，各天文台で計算した月の中心の位置もくい違い，月の視差の計算にも誤差の入りこむおそれがある．

そこでえらばれたのが，メスティングAという，月面のほぼ中央にある小さなクレーターで，このクレーターの天頂距離を1905年から1910年まで，グリニジ天文台のクリスティと，喜望峰天文台のギルが子午環で測定した．この測定を整理してクロムリンは月の視差を求めている．

グリニジと喜望峰は，ほぼ同じ子午線上にあるので，基線の長さを計算するのには，2つの点の緯度と，地球の大きさ，形が関係してくる．前号で述べたように，天文台の緯度は天文観測から求めたもので鉛直線偏差をふくんでいる．そこで，この緯度の値を使って天文台間の距離を計算しても，誤差がでてくる．また，赤道半径と扁率にどんな値をとるかによって，2つの天文台間の計算された距離は変わってくるし，月の視差の値も違って求まってくる．

クロムリンは扁率 f について 1/293.5 と 1/300 という2つの値を仮定し，

$$p=57'02''.73 \quad と \quad 57'02''.35$$

いう値を求めた．クロムリンは，赤道半径 a_e としては，6,378.739 km と 6,378.033 km という2つの値を使い，月までの平均距離を

384,418.9 km　と　384,419.0 km

と計算している．f と a_e の違った値を使って，月までの平均距離としては，ほとんど同じ値が求まったことは注目にあたいする．

1910年以降，この種の測定は行なわていないが，1950年代の後半に，グリニジ天文台と喜望峰天文台は，東経30°にそった3角網によって結ばれ，両点での鉛直線偏差も決められ，月の測量の基線となった2つの天文台間の距離も方向も正確に決められた．この新しいデーターをもとにした月の視差は

$$p=57'02''.49$$

であり，月までの平均距離は

384,413 km

と計算し直された．

3. 力学的視差

月までの距離や視差はこのような3角測量の原理で求

められるだけでなく，月の運動をもとにして，ケプラーの第3法則を使っても計算できる．3角測量から求めた視差を幾何学的視差，ケプラーの第3法則によるものを力学的視差と区別する．

地球のまわりをまわる人工衛星でも，その公転の周期から，軌道の平均の高さを計算することができるように，月までの平均距離も，周期から計算できるのである．

地球の赤道半径 a_e を $\sin p$ でわかったものが，月の軌道の平均半径であるから，月の場合のケプラーの第3法則は，

$$F_2^3 \sin^3 p = \frac{a_e^3 n^2}{GM+GE} \qquad (1)$$

と書ける．ここで n は月の平均運動（平均の公転角速度），G は重力定数，M, E はそれぞれ月と地球の質量である．また，F_2 は 2 体問題の仮定では1であるが，太陽の摂動によってつけ加えられたもので

$$F_2 = 0.999\,093\,142 \qquad (2)$$

である．

月の平均運動は長年の観測から正確に決められ，

$$n = 2.661\,699\,489 \times 10^{-6} \quad \mathrm{rad/sec}, \qquad (3)$$

である．

GE の値は，地球上の重力測定から決められた表面重力に，その点までの地心距離の自乗をかけたものとして計算できる．しかし，最近では GE の値がもっと直接的に求められるようになった．それは，地球から月や他の惑星に向かったロケットの速度を，レーダーのドップラー観測から時々刻々求め，これから加速度を計算して，この加速度のもとになっている GE の値を

$$GE = 398\,603 \times 10^9 \quad \mathrm{m^3/s^2} \qquad (4)$$

と決めることができた．

M/E の値も，昔から種々の方法で求められてきたが，GM の値が月に近づくロケットの加速度から決められ，

$$M/E = 1/81.302 \qquad (5)$$

と5桁の精度で求まった．

これらの値と，地球の赤道半径 $a_e = 6{,}378.16$ km から $\sin p$ の値が計算できる．この結果は

$$\sin p = 3422''.451, \quad p = 3422''.608$$

で，月までの平均距離は，

384,400 km

となる．

このようにして求めた，力学的視差や距離の方が，前に述べた幾何学的視差よりも精度のよいことが分っているので，この力学的視差が IAU でも月の視差として採用されている．

4. レーダによる測定

ところが，月までの距離を測定する他の方法がある．その一つは，1948年頃からはじまった月のレーダ観測で，レーダの発射と，反射波の受信の時刻の差をくわしく測定し，これに光速度をかけて月までの距離を知る．レーダを反射するのは月面で，これから月の中心までの距離を求めるには，月の大きさを知らなければならない．

また，レーダーの反射波は，月面の中心のまわりのほぼ半径の 10 分の1以内のところから返ってくるということも分っている．

そこで，測距自体の精度は向上しても，月の方の条件で，月の中心までの距離は ±1 km ほどの誤差をふくむことになり，1958 年には月までの平均距離として

384,402 km

と，力学的視差とほとんど一致した値が求まっている．

5. レーザによる測定

測距の精度としてはレーダよりもレーザの方がよく，±20 cm ほどの精度で距離が求められる．そして月面に測距点を固定するために，1969年7月にアメリカのアポロ 11 号によってレーザ反射鏡がおかれ，その後もソ連のロケットによって2つの反射鏡と，アポロによってもう2つの反射鏡が月面におかれている．

これらの鏡までの距離は，アメリカのマクドナルド天文台の 270 cm の望遠鏡を使って，レーザを発射し，反射光を受信して 20 cm ほどの誤差で求められている．

しかしこれによって直ちに，月の中心までの距離が ±20 cm の精度で求まるとはいえない．

6. 他の天体の視差

月の視差は地心視差で同じ天文台で観測していても，地球の自転によって月の天頂距離が変わり，これによって地心からみている位置から一日周期で見かけの位置がずれるので，これを日周視差とよぶ．

月の視差は 57′ あまりであるから，日周視差を考慮しないと，暦から月の位置を計算して望遠鏡を向けても，月が視野に入ってこないこともある．

ところが，月よりも 400 倍遠い太陽になると，視差は $8''.80$ と小さくなり，A 天文単位の距離にある惑星の視差は $8''.80/A$ となり，ほとんどの惑星の視差は太陽のよりもさらに小さい．もちろん，太陽系からでて恒星になると，地心視差などはほとんどなくなり，地球上どこからでも同じ方向に見えることになる．（東京天文台）