

地球の大きさをはかる

古 在 由 秀

エラトステネスの測定

地球が球であることは、西暦前 400 年ごろにすでにピタゴラス学派の人達によって知られていたという。地球が球であると仮定し、はじめて地球の大きさを測定したのは西暦前 220 年のエラトステネスである。

エジプトのナイル河の東岸にあるシエネの町は、ほぼ北回帰線の上であり、したがって夏至の日には太陽は頭上にやってきて、真直にほった井戸の底に日の光があたる。その時に、ここからほぼ 800 km 北にあるアレキサンドリアの町で、太陽が天頂からどれ位まで近づくかを測定し、これが 7.2° であることを知った。

太陽の南中時の天頂距離の差は、シエネとアレキサンドリアの緯度の差に相当する。一方、シエネとアレキサンドリアの地表上での距離を三角測量で求める。この長さが、 7.2° にあたるのだから、これから子午線の円周が計算でき、また地球の直径も計算できる。

エラトステネスの測定によると、北極から赤道までの子午線の長さは 11,600 km となっており、今日の 1 万 km という値とあまり違ってはいない。そして、今日でも、原理的には我々は地球の大きさを知るのには、エラトステネスと同じ方法を使っている。

地球楕円体

地球が球であるならばこれでよいのだが、地球は球ではなく、回転楕円体であることが、アイザック・ニュー

トンによって理論的に予言された。地球は自転をしているので、地表、とくに赤道上では大きな遠心力が加わり、このために赤道部はふくらみ、子午線の形は円ではなく、赤道方向に長軸のある楕円であるべきだと、ニュートンは考えた。この楕円の、赤道方向の半径 a と極方向の半径 b とから計算される扁率、

$$f = (a - b) / a \quad (1)$$

については、さまざまな仮定のもとに推定が行なわれた。ニュートンは地球が均質であるとして $f = 1/230$ と、ホイヘンスは全質量が重心に集まっているとして $1/578$ という値を求めている。

フランスでは 1669 年、科学アカデミーがこの扁率と地球の大きさを測定する仕事をとりあげ、まずパリーの南（北緯 45° ）で、緯度 1° の差の子午線の長さを測り、これが 57060 トワズ（1 トワズ = 1.949 m）であることを知った。そして、フランス国内各地での測定から、地球が扁平な回転楕円体であることを知ったという。

1735 年になると、赤道に近いペルー（北緯 $1^\circ 5'$ ）にブーゲーを中心とした遠征隊を、1736 年には北緯 $66^\circ 5'$ のラブラントにクレーロー、モーベルチュエらを送り、緯度 1° の差の子午線の長さが、それぞれ、56750 トワズ、57440 トワズであることを知った。これから、モーベルチュエは地球の扁率を $1/178$ と求めたのである。

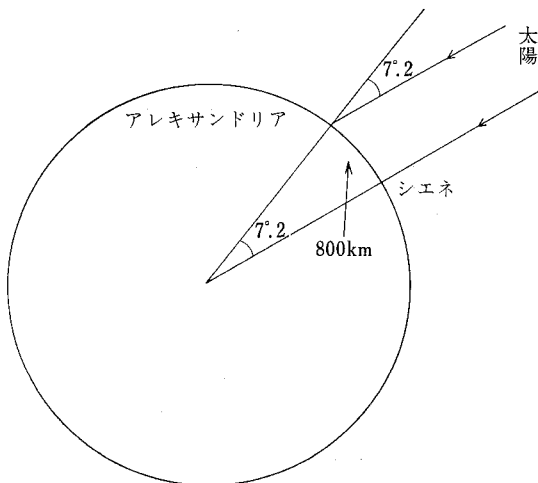
メートル

1799 年 12 月、フランス政府に正式に採用されたメートルという単位は、地球の子午線の円周の 4,000 万分の 1 として決められたものである。その後この長さは、正確には円周の 4,000 万分の 1 ではないことが分ったが、1875 年のパリ条約によって国際的な長さの単位となり、メートル原器も作られた。

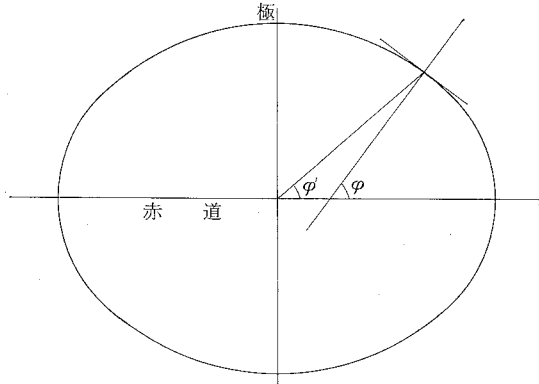
しかし、1960 年にはクリプトン 86 という元素の出すだいたい色の線の波長の 1,650,763.73 倍として 1 m が再定義されて今日にいたっている。

鉛直線偏差

地球の大きさと形を求める仕事は、地球の形が回転楕円体であるかぎり、フランスの科学アカデミーと同じ方法でやればよいし、測定の精度が向上するにつれて、赤道半径や扁平率はそれにつれてより正確に求まるようになる。



第 1 図



第2図 地心緯度と地理緯度

ところが、ここでも面倒な事がある。回転楕円体の場合には、ある点での緯度は、この点での法線（鉛直線）と赤道面とのなす角で、これを地理緯度φとよんで、地心緯度φ'と区別してあり、φを我々はふつう緯度とよんでいる。経度λは、この点を通る子午面と、グリニジの基準子午面とのなす角である。

しかし、地表の各点での鉛直線は必ずしも回転楕円体の法線とは一致していない。この鉛直線は、地球の等ポテンシャル面であるジオイドの法線で、ジオイドは回転楕円体ではなく、最大100mほど回転楕円体からはずれているのである。

各地での回転楕円体とジオイドの傾きは、それぞれの面の法線の向きの差で、場所によっては角度の数分になることがある。これを鉛直線偏差とよぶ。

フランスの科学アカデミーの測定では、同じ子午線上の2点で緯度を測り、この2点間の距離をその緯度の差でわって、1°の子午線の長さをだしたのであるが、緯度を測るには、この点での鉛直線にたよっており、しかも、この鉛直線が回転楕円体の法線であると仮定しなければならなかったのである。

緯度を測った2点で鉛直線偏差があるから、いくら測定を精密にやっても地球の大きさを求める計算にも誤差がでてきてしまう。また、測った2点間の距離も、回転楕円体の表面にそって測ったものではない。そこで、ここからも誤差がでてくる。

天文経緯度と測地経緯度

我々が日常使っている経緯度というのは、どのようにして求められているのであろうか。日本では、東京麻布の旧東京天文台で、鉛直線をもとにして天体の観測から経緯度を決定した。この点が、日本の測地原点である。

あとは、3角測量の方法で3角網をのばしていくのであるが、こうして測量をして各地点の経緯度を決めるには、地球の大きさと形とが分らなければならない。日本では、地球は $a=6377.397\text{ km}$, $f=1/299.15$ のベッセ

ル楕円体であり、しかも麻布の鉛直線はこの楕円体の法線であると仮定をして計算をする。これが測地経緯度で、日本の地図はこの値をもとにして作られている。

一方、主な3角点では、これと独立に経緯度を天体の観測から求めている。これが天文経緯度である。

当然のことながら、各地の天文経緯度と測地経緯度との間には差 $d\lambda$ と $d\phi$ がある。

この原因は、まず麻布の原点での経度方向と緯度方向の鉛直線偏差 ξ , η であり、また、回転楕円体の大きさと扁率に da , df という誤差があれば、遠くに行けばいくほど、測地経緯度に大きな誤差を生ずる。この関係を近似的に、

$$\begin{cases} d\lambda = Ada + Bdf + C\xi + D\eta \\ d\phi = Eda + Fdf + G\xi + H\eta \end{cases} \quad (2)$$

と書くことができる。

日本中の多くの点で $d\lambda$ と $d\phi$ とを求めて、この式を最小自乗法で解くと、原点での鉛直線偏差 ξ , η や、基準となる回転楕円体の赤道半径や扁率の補正值 da , df を求めることができる。そして、これらの補正をほどこしても、なお各点での天文経緯度と測地経緯度に差があれば、それはその点での鉛直線偏差と考えるのである。

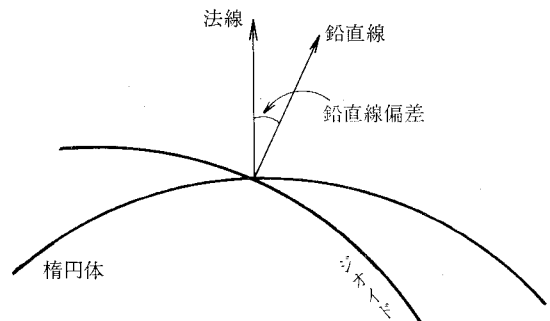
3角点を結ぶ

現在我々は、このようにして、ジオイドに最も近い回転楕円体のパラメーターを求めている。といっても、日本では、原点での鉛直線偏差は $20'' \sim 30''$ もあり、各地での値も小さくない。

(2)の式を最小自乗法で解くには、鉛直線偏差がガウス分布をしているという仮定をしているので、少なくとも日本のなかではこの仮定は正しくない。

そこで、なるべく沢山のデータをもとにして、すなわち世界中のデータを使って(2)の式を解かなければならないのである。ところが、天文経緯度は各地で独立に求められるのであるが、測地経緯度の方は、原点から3角測量で測っていかなければならない。

しかしながら、地上の3角測量だけを使っては、3角網をのばせる地域はかぎられてしまう。日本では、日本だけにかぎられている。



第3図

そこで登場したのが、人工衛星の利用で、人工衛星を空とぶ3角点と考え、その同時観測から3角網をのぼそうというのである。こうして、独立に決められた測地原点をむすびつける仕事が続けられている。そして、日本をふくめて、各測地原点での鉛直線偏差は、各測地網でのデータをもとにして(2)を解いて決めるのではなく、お互いの比較によって決められている。

国際楕円体

1964年 IAU (国際天文連合) が採用し、1967年には IAG (国際測地学協会) がそれにならった楕円体では、

$$a=6378.160 \text{ km} \quad f=1/298.25$$

となっている。この値をもとにすると、極半径は6356.775 km で、子午線の円周の4分の1は10002.001 km となっている。

この a の値は、ヨーロッパを中心として、アフリカ、アジアまでをむすんだ測量網をもとにして求めたものであり、 f の値は、人工衛星の動きから、地球が平衡形状をしていると仮定して計算したものである。これらの値も、将来はもっとくわしく決められるであろうが、

(東京天文台)

新刊紹介

日本人の天文観

広瀬秀雄 著

(NHKブックス No. 167, B6判, 218頁, 420円)

日本古来の暦道の話に最近の話題を適宜に取り入れた一般教養向けの新著である。

まず第1頁に、「高松塚古墳に眠る人の宇宙」という章がある。「東壁には金で描かれた太陽が、西壁には銀で描かれた月があった。その上、天井には全天の星座を代表する二十八宿の星が金で描かれていた。……幅約1m, 奥行き約2.7m, 高さ約1.1mの石櫛(かく)に大宇宙を縮め、死後その中心から宇宙を眺めるという構想は、よほど天文と密接した生活を生前に送った人のものでなくてはなるまい。そこで私は、考古学者の議論を横目にやらんで、ここに葬られた人はきっと当時、天の言葉を聞く事ができる超人的能力をもつ人と畏敬されたに違いない天文博士といわれた人の一人であると信じたい」とある。書評子もよくは判らないが、かなりフリーな気分で書かれているようだ。また魏志倭人伝に述べてあるように、三世紀ごろの日本人は年始も月日もない自然暦の生活をしていたらしいが、これと高松塚(7世紀頃と推定されている)の壁画に見るような高度の天文知識とそれに伴う暦とが行なわれている日本との間には明らかな断層がある。これらの知識技術が半島からの移入であることは記録から明らかだから、「この300年の間に、(日本はかれらに)征服され、統一され、別の国家組織がもちこまれたと考える事もできよう」といわれると、改めてギョッとしてしまう。もっとも、昔々の日本人はアメリカ人に於けると同じく、移民の混和であったとも説いているのだから仕方がないのだが。

「古代の天文遺跡」の章はさらに興味をそそる。奈良の明日香に石舞台といわれる上辺平坦な巨岩があり、現在

では蘇我馬子の墓と認定されている。著者は昔この石造物を、日本書紀に記されている天武天皇作るところの占星台(一種の天文台)ではないかと考えていた。その後発掘調査が進められて、天武天皇の占星台というのは旗色が悪くなったが、最近別に占星台の候補者になりうる大石造物が話題になった。「益田の岩船」という大きな花崗岩石で、このもの自体は古くは1791年刊の「大和名所図絵」にも紹介されている。上面は6m×10m, 高さ6m, 表面はつるつるで上面に1.6m四方の四角の孔が2個あいている。恐らく当時の観天文生がこれに入って天象を観察していたのではないかとするのである。以上は考古学者藪田嘉一郎氏の所説の紹介であるが、著者自身の説としては、明日香に酒船石といわれるものがある。これは天智天皇の水時計の標準に使われたであろう「日時計」の遺跡ではないかとの提言である。とにかくいろいろと面白い。

その他、著者は豊富な話題を随所に展開させているが、本書の本命はあくまで日本暦法の変遷についてであって、さればこそこの部分が大半を占めている。ある所では、過去の日本天文家が中国暦法の踏襲と西洋天文学の移入など専ら外国知識の吸収にあけくれた事大主義を歎き、ある所では暦道がひたすら国家権力につかえる因襲に墮した古代から第2次大戦までのわが国の官制の前近代性をいきどおっている。

「私などもその昔、技手の辞命をもらった頃は、研究などとはおこがましい。命ぜられた観測をしておればよいのだと「天文博士」に叱りつけられ、益田の岩船の上の天文生のように、毎夜星の写真を撮っていたものである。……70円の月給をもらって、独身寮の食費と分担金合計20円ほどを払うと、食と住とは保証され、晴天の時に美しい星空の下で空の写真を撮るとる事は楽しい事であった。夜はわれわれ観天文生の天下であった。「天文博士」も「権天文博士」も夜は顔を見せない……。これはまことに鋭い皮肉である。本書によって、我が国の天文学(の主流)が戦後になってやっと、西洋流の「学問」になりえた事を改めて知らされた。(斉藤國治)