

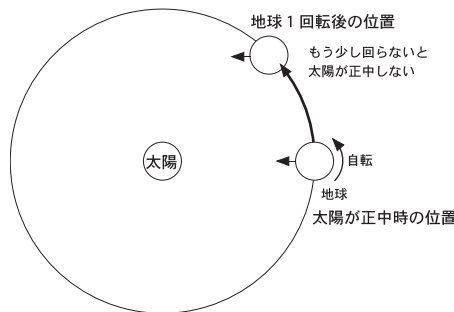
地球における位置の表現と計測

1 天体の運行と暦

地球上において位置を表現するのに緯度経度を利用しているが、本来緯度経度を測るには天体の日周運動や年周運動をもとに決定される。特に経度の決定においては、正確な時刻が判っていなければならない。したがって、暦に対する理解も必要である。ここでは天体の運行と暦について、天文観測を通じて緯度経度を計測するうえで必要となる事柄について解説しておく。

1.1 太陽時

太陽時は、我々にとって慣れ親しんでいる暦である。太陽の日周運動を基準に1日を定義しており、太陽が正中（北半球では南中）してから次の南中までの時間を1日としている。地域によって、およそ太陽が正中しているときを正午としたほうが生活の上では適しているので、グリニッジ子午線における世界時と世界各国での地方時とが使い分けられている。ところで、地球の自転1回転と1日の長さは、若干異なる。それは、地球が自転しているとともに公転しているためで、下図を参照すれば判ってもらえるであろう。



1.1.1 一年とは

地球の公転一回分の時間をさす。つまり太陽がある点（春分点）を通過し、再び通過するまでの時間と定義されている。現在は1年 = 365.2425日とされており、端数が生じているために閏年を利用して1年の長さを調整している。閏年とは、1年の長さを366日にする年のことである。通常は1年365日であるが、4年ごとに366日とすることで、 $365 + 1/4 = 365.25$ 日となる。しかし、これでは精度的に不十分なので100年目は閏年ではないようにすることで、 $365 + 1/4 - 1/100 = 365.24$ 日となる。さらに精度良くするため、400年目は閏年にすることで、 $365 + 1/4 - 1/100 + 1/400 = 365.2425$ 日となり、現在、1/10000の精度で1年間の日数が調整されている。古いカレンダーがあれば、2000年が400年に1度の特例で閏年となっていることを確認できる。

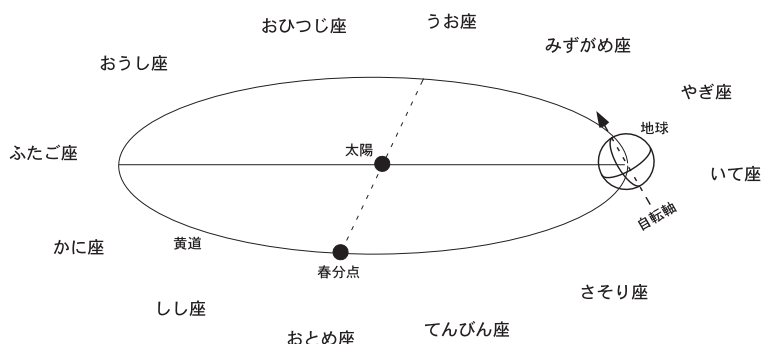
1.1.2 1秒とは

1秒は、1日の長さを基準とし、あくまでも $1\text{秒} = 1 / (24\text{時間} * 60\text{分} * 60\text{秒})$ 日である。この定義に一致する時計が必要とされる。古代より正確な時計が必要とされており、日時計、砂時計、振り子時計、ゼンマイ時計、水晶 (Quartz) 発振時計と進化して来た。水晶は、特別な加工を施した後に電圧をかけると歪む性質がある。そこで交流電圧を流すことで、水晶の共振する周波数を発振器として利用できるのである。この発振器により現在では、1ヶ月あたり数秒の精度を持つ時計が開発されている。

科学の分野においては、水晶発振時計では不十分であり、極めて高い精度が要求される。現在最も正確な時計として、原子時計が利用されている。原子時計は、 ^{133}Cs (セシウム) 原子が発振器となっている。この ^{133}Cs は、放射性物質であり、超高速で原子を回る電子の軌道が変化しており、それが発振器として利用されている。現在原子時計における1秒は、 ^{133}Cs の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射 $9,192,631,770$ 周期の継続時間と定義されている。つまり、91億分の1秒の精度を持つ時計ということになる。この原子時計を利用すれば、光の速さも測れるという高精度さである。このように原子時計は、正確に時を刻み、1秒が定義されているが、1年の長さと同様に1秒の長さにおける原子時計の発振器の周期には、端数が生じているために、やはり定期的に調整しなければならない。したがって数年に一度、閏秒を導入し、調整している。

1.2 恒星時

恒星時は、地球の自転を基準に1日を定義している。つまり太陽時の1日に比べて、恒星時は若干短く、1恒星日 = 23時間56分04.09秒とされている。この暦は、人工衛星や惑星の動き等を星座の上で表現するとき必要となる。

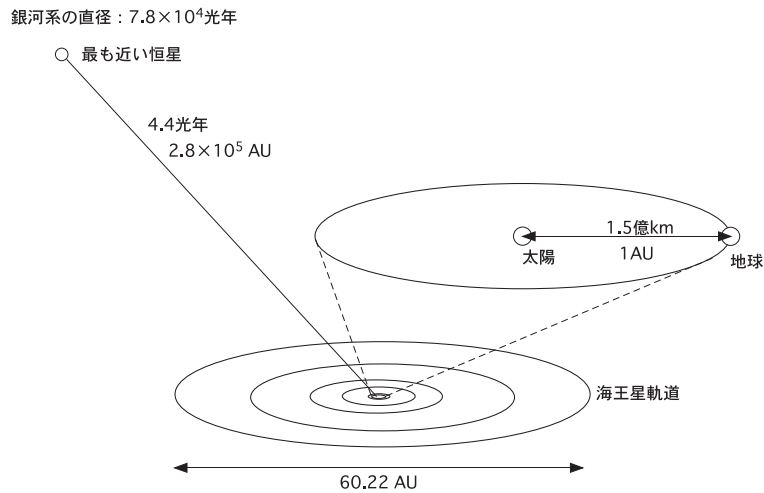


地球の自転軸と公転軸は一致していない。自転軸は、公転軸に対して約 23.4 度傾いている。その傾きは、ほぼ一定のまま公転しているため、夏の太陽は高い位置で正中し、冬の太陽は低い位置で正中する。上図は、地球の公転軌道と自転軸の傾きを模式化したものである。公転軌道の周りには黄道12星座を配置させた。黄道とは地球の公転面にあたり、地球から見ると太陽が星座上を通る道筋ともいえる。図中における地球の位置は、夏至の状態にあり、地球から見ると太陽はふたご座に位置している。なお、公転・自転ともに運動の方向は、左回りとなっている。図中における春分点については、

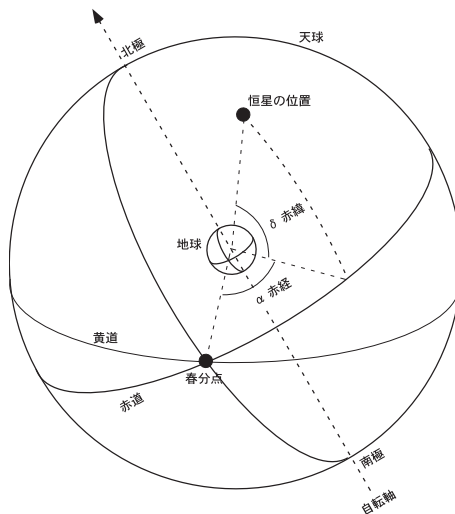
次節で解説する。

2 球面座標系で天体の位置を表す

恒星までの距離は、太陽系の大きさに比べて極めて大きい。下図は地球の公転軌道、太陽系の大きさ、最も近い恒星までの距離を模式化したものである。太陽と地球との距離を 1AU (天文単位) とすると、最も近い恒星までの距離は 28 万倍となる。つまり 280m 離れた所から 1mm の動きを見るようなものである。したがって、地球が太陽の周りを公転していても恒星の見かけの位置は、地球の自転による日周運動のみで回転運動しているように見える。



このように恒星が、地球から極めて遠いことを考えれば、天球という概念を取り入れて恒星の位置を表すことができる。下図のように恒星を天球上に配置させ、地球はその中心で自転しているという概念である。



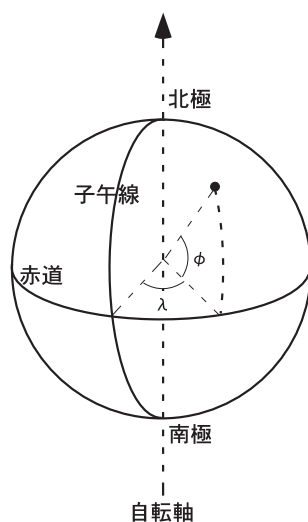
したがって天球は、地球の自転に合わせて回転していると見なせる。いわゆる天動説の概念であるが、恒星の日周運動を表現するには十分である。

天の北極・南極・赤道は、地球の北極・南極・赤道と相対的な位置関係は変わらない。つまり、地球上の同一観測地点において、恒星は常に同じ経路を辿りながら日周運動をしていることになる。例えば、北極星はほぼ天の北極に位置しているため、常にほぼ同じ位置に見える。ところが太陽は、冬は低く、夏は高い。このことは先にも述べた。この太陽の見かけの位置を天球上にプロットし、線で表したものが黄道である。この黄道と天の赤道とは、2箇所で交差する。このうち太陽が赤道の南から北へ昇っていく点を春分点と呼んでいる。暦の上での春分の日は、太陽が春分点を通過する日のことである。年によって春分の日が異なることがあるが、これは1年が365.2425日と半端なためである。閏年として4年ごとに調整するのではなく、太陽が春分点を通過する日はいつかという観点で春分の日が定められている。

恒星の位置を天球を使って表すことが出来る。地球上の位置を緯度経度を使って表すのと同じ概念である。天球において緯度にあたるのが赤緯 δ 、経度にあたるのが赤経 α である。赤緯 δ は、恒星と天球の中心との線分が赤道面となす角度で表し、北向きを+としている。赤経 α は、恒星が通る子午線と春分点を通る子午線のなす角度で表す。子午線とは、北極・南極を通る大円のことである。赤経 α は、東向きが+の角度で表すこともあるが、360度を24時間とする時刻で表すことが一般的である。

3 緯度・経度

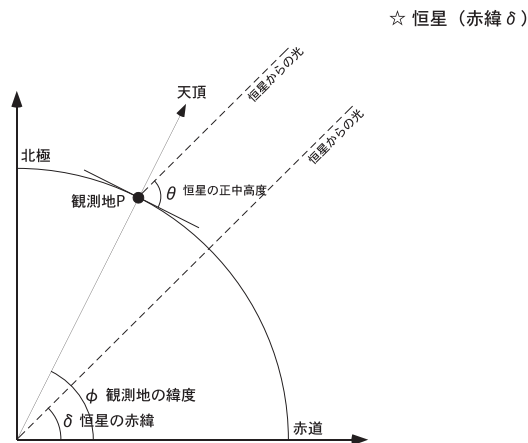
地球上での位置は、緯度 ϕ ・経度 λ で表すのが普通である。恒星の位置を表す赤緯同様、緯度は赤道・経度の基準であるグリニッジ子午線からの角度で表される。グリニッジ子午線は、イギリスにあるグリニッジ天文台を通る子午線のことである。この子午線より東向きに東経、西向きに西経を用いている。



4 緯度の計測法

4.1 天体の正中高度を測る

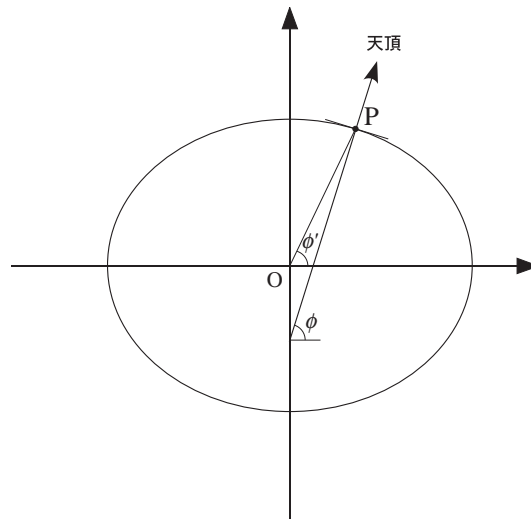
緯度の概略値を知るには北極星の高度を計測するのも良いが誤差が含まれている。つまり、北極星は真の北極に位置していないのである。したがって、位置（特に赤緯）の解っている天体の南中高度（子午線通過時の高度）を測れば、緯度を導くことができる。もちろん、北極星の赤緯も既知なので、その南中高度を測っても結果は得られる。



上図は、緯度を測るための概念図を示したものである。赤緯 δ の恒星は、地球の赤道面に対して角度 δ の傾きで光が地球に届けられる。図中の破線は、その光の傾きを表している。恒星は極めて遠い位置から光を放っているため、光の傾きは地球上においては平行と見なすことができる。観測点 P の緯度が ϕ で、P における恒星の正中高度が θ のとき、 ϕ, δ, θ の関係は、以下の式で表すことができる。

$$\phi = \delta + \frac{\pi^{rad}}{2} - \theta \quad (1)$$

なお、ここでは地球を真の球とみなして得られる緯度であるが、実際には地球の形は球でなく回転楕円体に近い。下図は、地球の形を楕円として模式化したものである。地球が球であれば、地球中心から観測点 P へのベクトルが、観測点 P における天頂方向と一致する。しかし楕円の場合、観測点 P における天頂の方向は、楕円体の接線に対する法線ベクトルの方向となるため、地球中心から観測点 P へのベクトルとは一致しない。したがって、この計測によって得られる緯度は、下図においては ϕ となる。この緯度を地理緯度と呼び、地球の中心と観測点を通る角度の ϕ' とは異なる。 ϕ' は特に地心緯度と呼ばれている。我々が一般に地図などで用いている測地緯度は、天体を測って得られる地理緯度を基本としている。



5 経度の計測法

経度は、恒星の位置を測るだけで求めるのは困難である。経度を知るには天体が正中する時刻を測ることによって求まる。太陽は見かけ上、24 時間かけて日周運動をしており、1 時間あたり 15° 動く。例えば、グリニッジにおいて太陽が 12 時に正中したとする。日本の明石は東経 135° なので、時差は 9 時間となるので、明石において太陽が正中するのは世界時 3 時である。このように太陽の正中時刻を測ることによって経度が求められるのである。

高知の経度は、東経 $133^\circ 33'33'' = 133.5592^\circ$ で、明石の東経 135° よりも 1.4408° 西側に位置している。したがって高知と明石の時差は、 $\frac{1.4408}{15} = 0.096055$ 時間 = 5 分 46 秒となる。つまり高知で太陽が正中するのは、12 時 5 分 46 秒と計算できる。

ところで、古来より各地に天文台が建設されてきた。これは、暦を作り、天文台自身の地球上の位置を計測する役割があったのである。