

天文学と航海学のつながり

レーダーやGPSの無い時代
船乗り達は自船の位置を
どの様にして知る事が出来たのか

平成27年10月31日

非営利活動法人日本海洋塾 理事 澤間譲治

自船の位置を知る方法は大きな括りでは三つあります

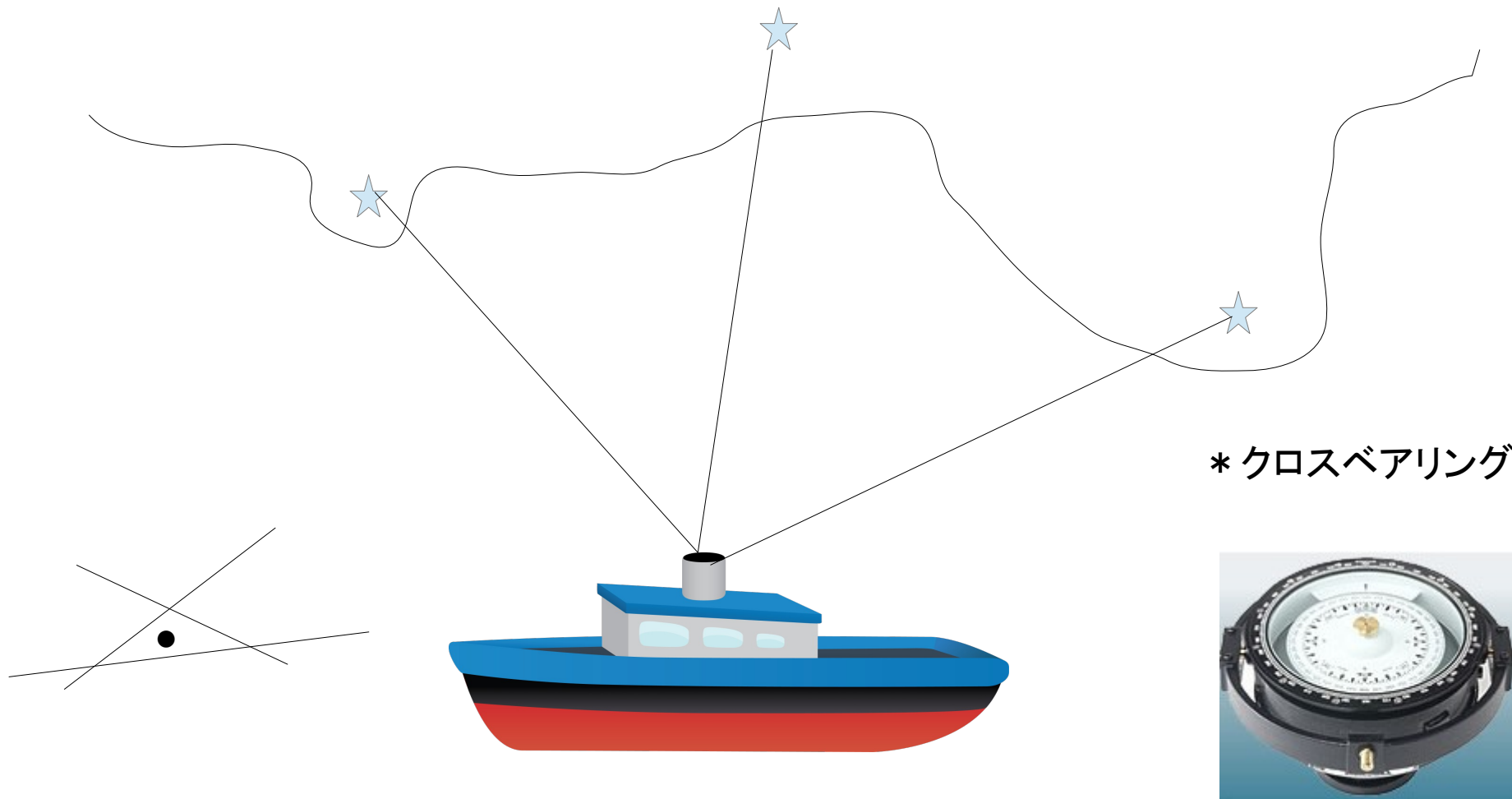
1. 地文航法

2. 電波航法

3. 天文航法

1. 地文航法

地上の目標物からの逆算的方法で自船の位置を知る方法。例えば灯台や山の頂上等



2. 電波航法

地上局の電波から距離を割り出し、自船の位置を割り出す

ロラン、デッカ

自船から電波を出してその反射波を捉えて自船の位置を割り出す

レーダー

複数の人工衛星からの電波を捉えて自船の位置を割り出す

GPS

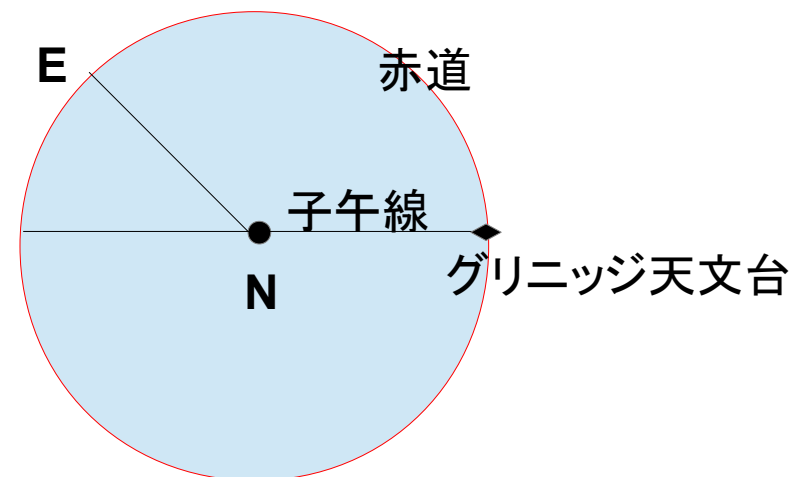
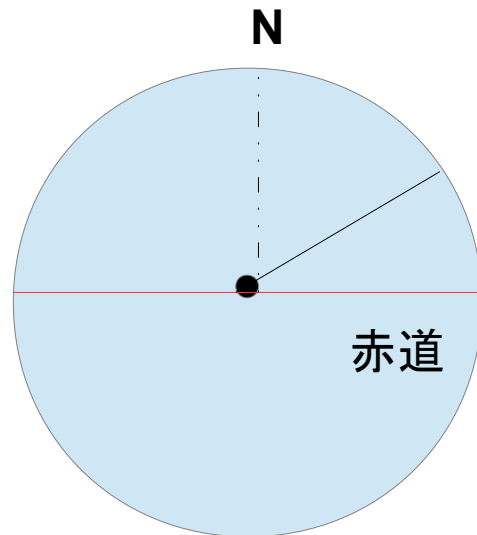
3. 天文航法

位置情報の基本

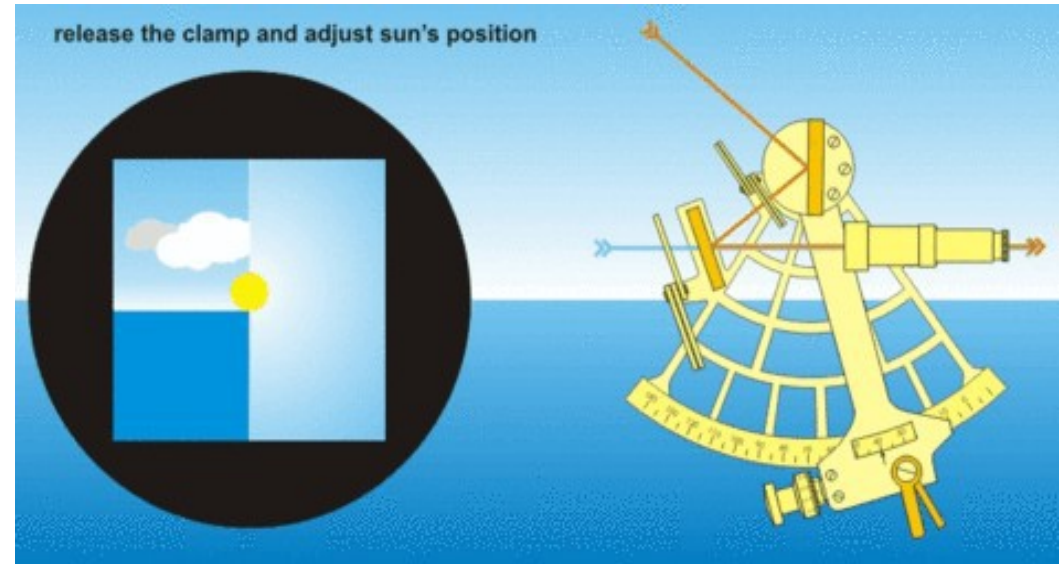
緯度 (Latitude) と経度 (Longitude)

- ・緯度とは赤道からの距離を角度で表したもの
- ・経度とはグリニッジ子午線から東西方向に測った距離を角度で表したもの

天文航法 = 星の高度と方向を計測する事で緯度と経度を知る技術



六分儀(太陽や星の高度を測る機器)

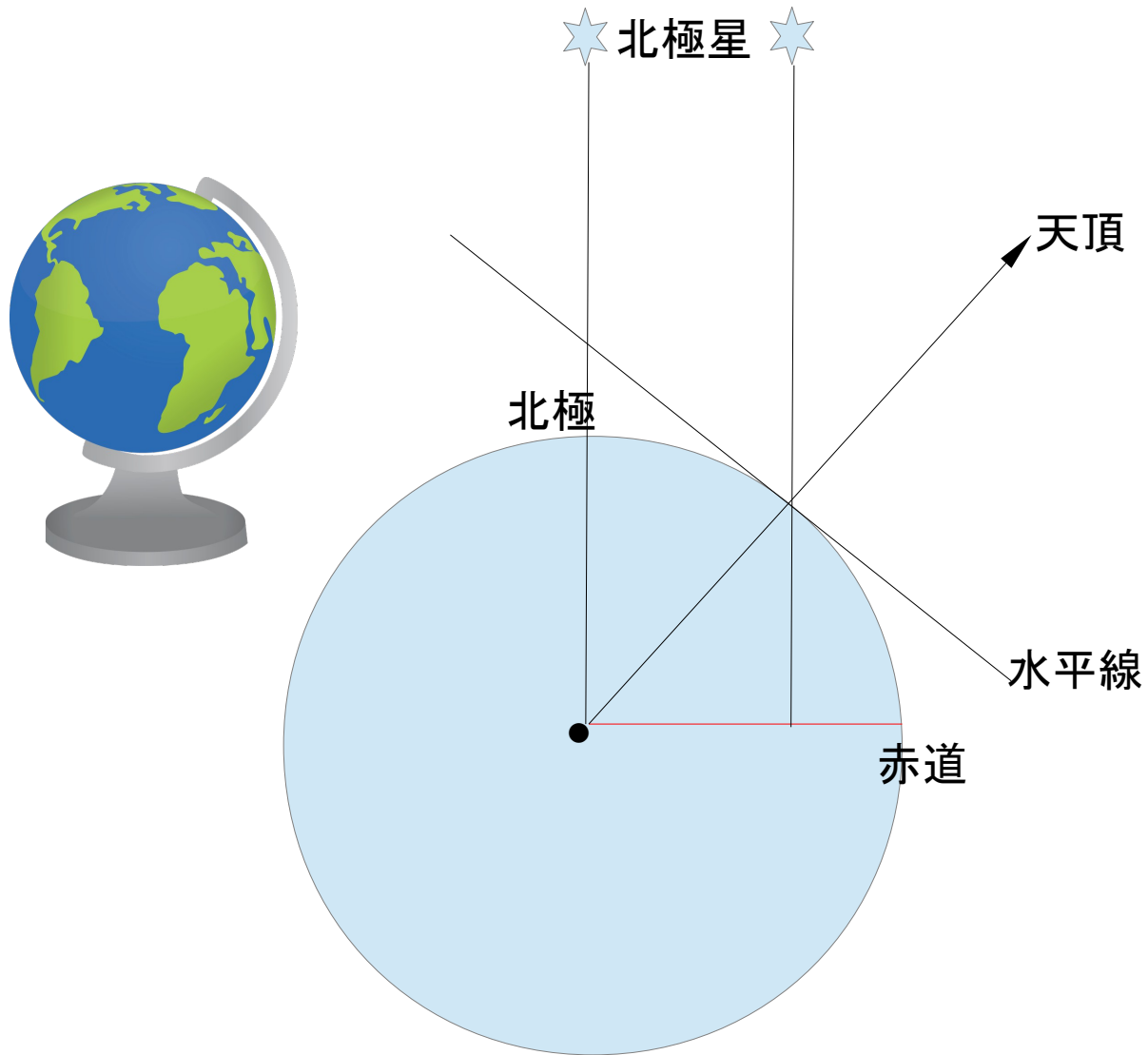


クロノメーター(世界時を知る為の精密時計)



北極星緯度法

北半球では何故、北極星の高さを測る事で緯度を知る事が出来るのか？



子午線高度緯度法

天体が子午線を通過するときの高度を測ります。

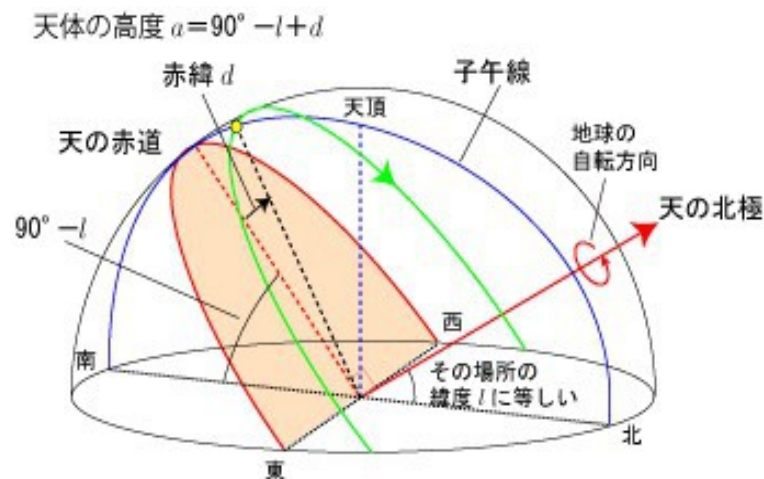
天体が子午線を通過＝南中、正中、子午線通過
天体の高度 $a=90^\circ-l+d \rightarrow l=90^\circ-a+d$ (符号等は状況によります)

この方法で測るのはおもに太陽です。

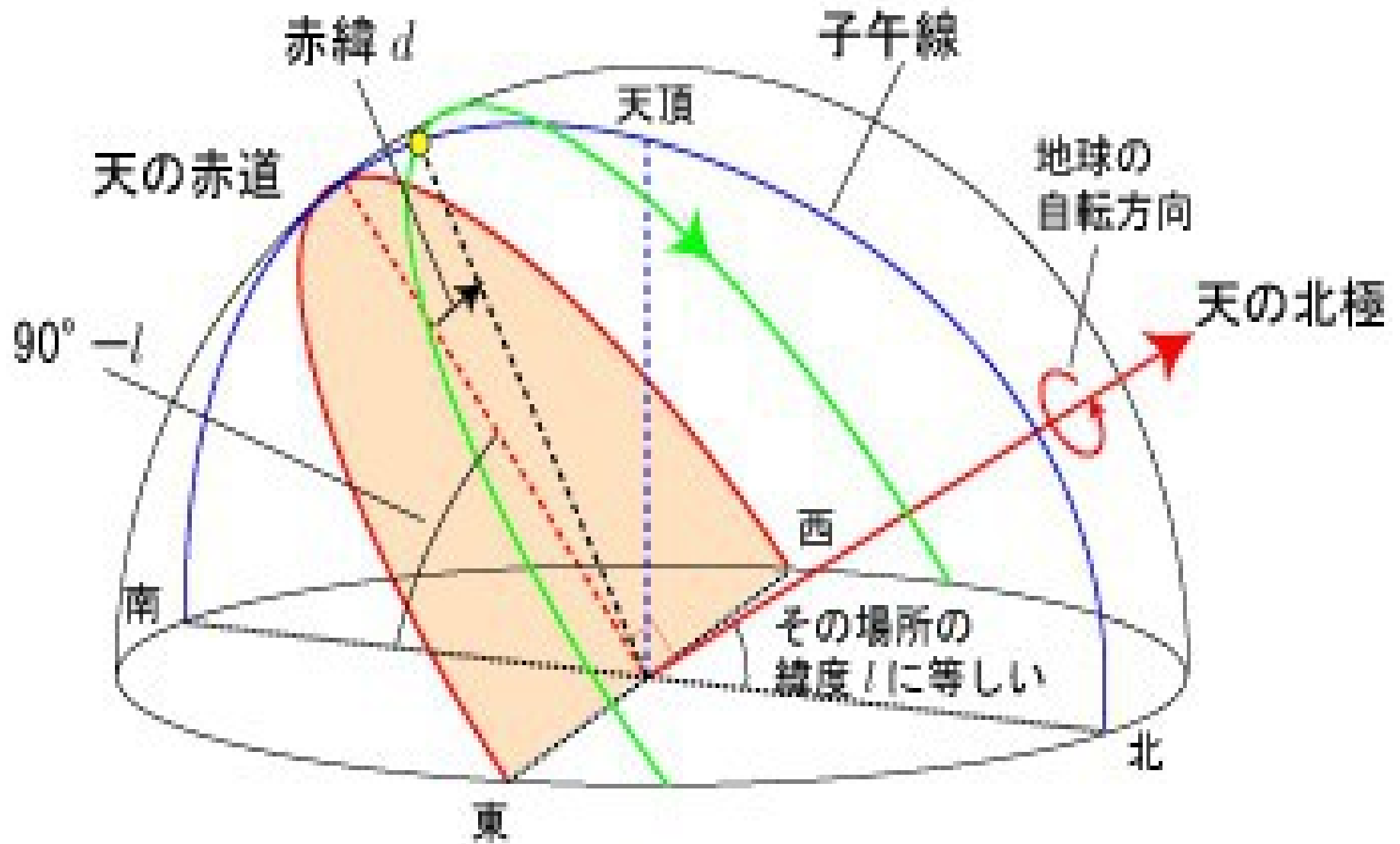
恒星や惑星は日が沈まない見えませんし、暗すぎると水平線が見えなくなります。
限られた時間内に都合よく南中する天体が必要です。

天体はいつ南中するのか？

経度がわかれば南中時刻は求まりますが・・・。
実際には南中前後の高度を測って、極大高度を調べます。
船の移動、赤緯の変化を補正する必要があります



天体の高度 $a = 90^\circ - l + d$



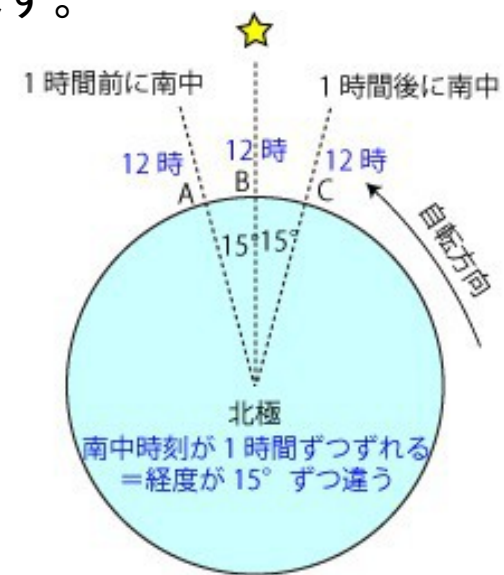
地球は1日24時間で太陽に対して1回転＝360°回転しますから、1時間には15°回転します。

ある地点Aで南中した1時間後、経度で西に15°離れた地点Bで南中します。逆に1時間前には、経度で東に15°離れた地点Cで南中していました。
緯度が同じなら南中高度も変わりませんから、それぞれの地点で1時間ずつ異なる時計を持っているとしたら、違いに気づくことはまずないでしょう。
一般に、経度の差に応じて適切に時刻を設定してやれば、緯度の同じ地点では同じ時刻に同じほしぞらを眺めることができるわけです。

この経度の差に応じて補正した時刻を地方時といいます。

視太陽時に対するものを地方視時、平均太陽時に対応するものを地方平均時あるいは地方平時といいます。
経度の差を決める基準となる子午線を本初子午線といいます。

南中時刻が1時間違えば、経度が15°違うことになります。



●東経150度にいる人が南中を捉えた時のGMTは？

●南中した時のGMTが4時の時の経度は？

位置の線航法

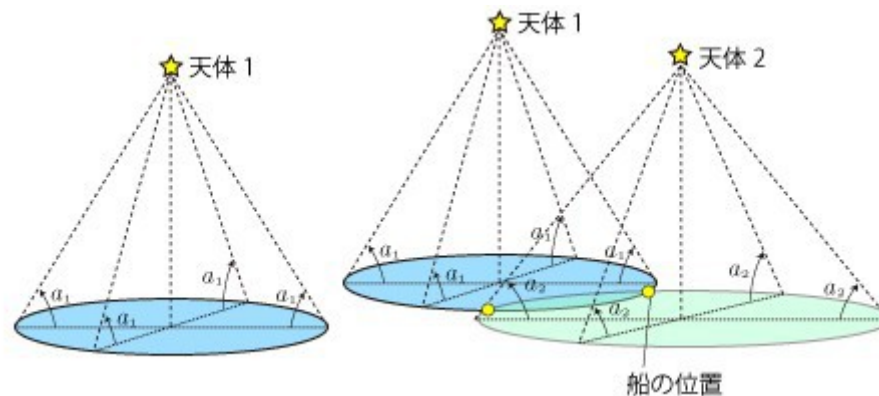
ある天体が高度 a に見えるような場所は円周の上にあります。

天体1が高度 a_1 、天体2が高度 a_2 とすると、それぞれがそのような高度に見える円周を描くことができ、その交点に船がいるはずですが、交点は2つありますが、もう一方は現実的でないくらい離れているので区別できます。

地図上に円周を描くのは困難です。

地球儀上では円周でも、地図上では円周になりません。一方、地図の狭い範囲では、円周は直線とみなせます。この直線を位置の線と呼び、位置の線の交点が船の位置になります。

位置の線を使った航海法を位置の線航法と呼びます。南中などの条件は不要で、複数回測定により精度を上げることができます。子午線高度緯度法など、他の方法との組み合わせも可能です。



位置の線の求め方

何らかの手段により船の推定位置を割り出します。

たとえば、前日の位置および船の針路と速度から求めます。

推定位置における天体の高度と方位を求めます。

推定した方位の方向に円周の中心があります。

天体の高度を測り、真高度を求めます。

真高度が推定した高度より高ければ、もっと円周の中心に近いはずです。
真高度が推定した高度より低ければ、もっと円周の中心から遠いはずです。
推定した方位の方向に真高度と推定高度の差分だけずらします。
円周は推定した方位に対して垂直ですから、ずらした点から推定方位に垂直な線を引けば位置の線が求まります。

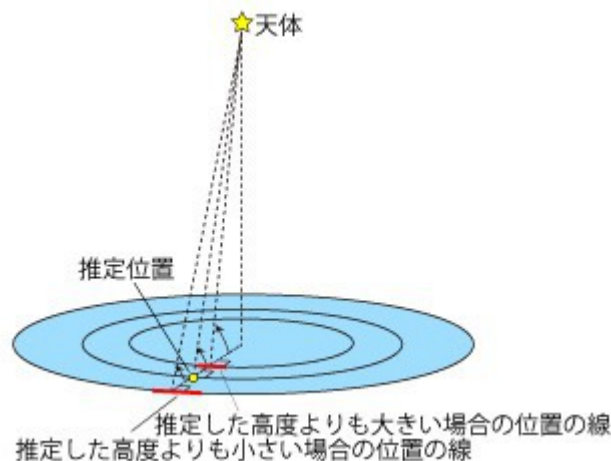


Table with columns: 太陽 (Sun), U, E2, d, d@P.P., P 惑星 (Planets), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus and Mars.

視半径 S.D. 16.92

水 恒 星 U-E2-d

Table listing stars with columns: No., U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, Dubhe, etc.

Table with columns: ♀ 金星 (Venus), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus.

HP. 38.4, S.D. 16.66

♂ 火星 (Mars)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♀ 金星 (Venus), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus.

HP. 38.4, S.D. 16.66

♂ 火星 (Mars)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

R2 2.28.55

Table with columns: 太陽 (Sun), U, E2, d, d@P.P., P 惑星 (Planets), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus and Mars.

視半径 S.D. 16.06

水 恒 星 U-E2-d

Table listing stars with columns: No., U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, Dubhe, etc.

Table with columns: ♀ 金星 (Venus), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus.

HP. 37.8, S.D. 15.85

♂ 火星 (Mars)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♀ 金星 (Venus), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Venus.

HP. 37.8, S.D. 15.85

♂ 火星 (Mars)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

Table with columns: ♃ 木星 (Jupiter), U, E2, d, P.P., E2 d. Includes data for Jupiter.

HP. 57.4, S.D. 15.47

♄ 土星 (Saturn)

Table listing stars with columns: U, E2, d. Includes stars like Polaris, Kochab, etc.

R2 4.18.55

GPS【 Global Positioning System 】

全地球測位システム / グローバルポジショニングシステム

GPSとは、人工衛星を利用して自分が地球上のどこにいるのかを正確に割り出すシステム
米軍の軍事技術 の一つで、地球周回軌道に30基程度配置された人工衛星が発信する
電波を利用し、受信機の緯度・経度・高度などを数cmから数十mの誤差で割り出すこと
ができる。

米国防総省の管理するGPS衛星(正式には「NAVSTAR衛星」と呼ばれる)は高度約2万km
の6つの軌道面に それぞれ4つ以上、計24個以上が配置され、約12時間周期で地球を周回
している。約7年半で寿命を迎えるた め、毎年のように新しい衛星を打ち上げて軌道に投入
しており、概ね30個前後の衛星が常時運用されている。GPS衛星は高性能の原子時計を
内蔵しており、1.2/1.5GHz帯の電波で時刻を含むデータを地上に送信している。

GPS受信機は複数のGPS衛星からの電波を受信してそれぞれとの距離を割り出すことにより、
現在位置を測定することができる。3つの衛星が見えるところでは緯度と経度を、4つの衛星
が見えるところではこれに加えて高度を割り出すことができる。

衛星の発信する電波に含まれる時刻データは暗号化されたものと暗号化されていないものの2種類があり、暗号化されたデータは米軍しか利用することができない。誤差は数cmから数十cmと言われており、精密誘導兵器などに利用されている。民生用に利用できるものは暗号化されていないデータで、故意に精度が落とされているため誤差は10m程度となる。誤差をより小さくするため、正確な位置の分かっている地上の基準局から電波を発信し、これを利用して位置情報の補正を行う「DGPS」(Differential GPS)という技術が実用化されており、誤差を数mに縮めることができる。

過去には米国防総省が安全保障上の理由から民生用GPS信号の精度を100m程度まで落としたことがあり、各国政府は位置情報をアメリカ政府に依存する状態に危機感を覚えていると言われている。EU(欧州連合)各国は共同でGPS同様の人工衛星を利用した位置測位システム「Galileo」(ガリレオ)を推進しており、中国などにも参加を呼びかけている。ロシアも旧ソ連時代から「GLONASS」と呼ばれる位置測位システムを推進している。

GPSの民生利用は航空機や船舶などの航行システムで行われてきたが、近年の半導体技術の急激な発達に伴い機器の小型化・低価格化が進み、情報技術の進展から地図を表示するコンピュータシステムなども安価に提供されるようになったため、**カーナビゲーションシステムや携帯電話**に広く組み込まれるようになり、位置情報を利用した様々なサービスが提供されるようになっている。

GPS 測位の原理は、局所慣性系で光速 c が一定であることによる。+

$$c=2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}+$$

GPS 衛星と受信機がともに正確とみなせる時計をもっていれば、送信時刻(測定値) T と受信時刻 t の差に c を掛けると距離がわかる。+

GPS 衛星 i の位置を座標 (X_i, Y_i, Z_i) 、受信機の位置を (x, y, z) とすると、+

$$c^2 (T_i - t)^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2+$$

GPS 衛星の位置を得るには、受信データに重畳された航法メッセージ信号を復調し、送信時刻と組み合わせる。+

受信時刻 t は GPS 受信機の時計の値であり、もしそれが正確ならば、受信機の位置である三つの変数(未知数) x, y, z を得るために最低三つの連立方程式があれば良い。しかし GPS 受信機の時計はそれほど正確ではなく、受信時刻 t も未知数とする必要がある。したがって、4つの衛星から受信することで、これら4つの未知数を求められる。+

利用者受信機は、複数の航法衛星から電波で送信された航法信号を受信し、その送信時刻を測定する。送信時刻の測定は、擬似ランダム雑音 (Pseudo Random Noise; PRN) 変調信号の特性を用いて行う。+

送信時刻の測定値はおよそ 10 ns もしくはそれ以上の誤差を持つ。+

また航法衛星の天体歴(軌道)の情報を受信し、これにより送信時刻における航法衛星の座標が求められる(この誤差は視線方向成分が(ほぼ 1.5m 以下)。+

最終的に、利用者受信機の座標及び受信時刻(合わせて 4 つの未知変数:

x, y, z, t)の解は、慣性系を仮定し、各航法衛星の時空点座標を頂点とする(4 つ以上が必要)の交点となる。+

言い換えれば次の連立方程式の解となる。ここでは用いる航法衛星数を 4 機とし、航

法衛星 i ($= 1, 2, 3, 4$)の信号送信時刻 t_i 、その座標 x_i, y_i, z_i c としている。+

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} - c(t - t_1) = 0 \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} - c(t - t_2) = 0 \\ \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} - c(t - t_3) = 0 \\ \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2} - c(t - t_4) = 0, \end{cases}$$