



# はじめて学ぶ海洋学:第2回

## 地球の大きさと位置 (浅海編\_2)

教科書：「第一章 人類の海洋進出」  
p. 1 ~ p. 14

[yokose@kumamoto-u.ac.jp](mailto:yokose@kumamoto-u.ac.jp)



# 今日のお話

## —地球上の位置を記述する—

- 目標物が見える限界 (水平線までの距離)
- 地球における座標のおさらい (緯度経度表記)
- 地球の形と大きさ (地球一周4万km)
- 自転と時差と子午線
- 円盤状の地球と大航海時代  
(磁石だけでは、位置がわからない)
- 大航海時代を飛躍的に発展させた時計  
(クロノメータの発明)



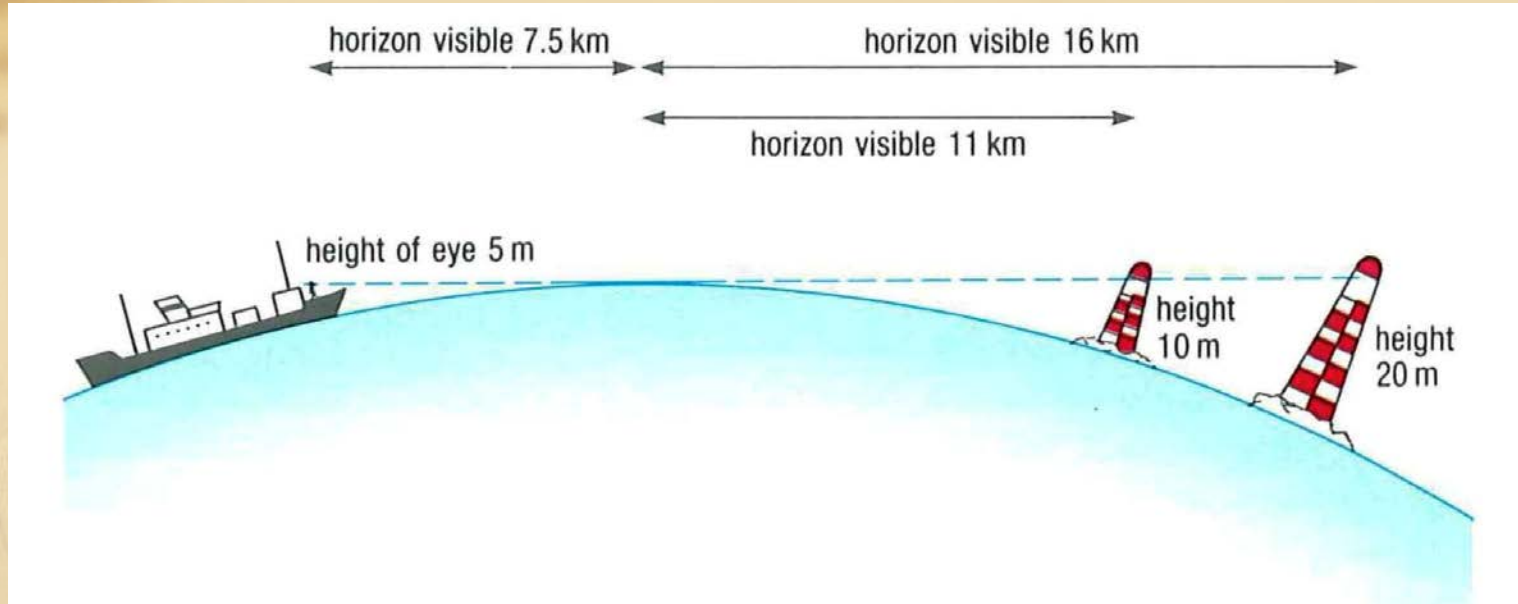
# 地球の丸さを実感できる水平線



ところで？ 水平線までの距離は？.....



# ☆陸上の目標物が見えなくなるのはどのくらい先？



対象物の海面からの高さ = H メートル

眼高 = h メートル

$$\text{距離 (km)} = (\sqrt{H} + \sqrt{h}) \times 2.083 \times 1.852$$

Q.1 ヨットの上（眼高=4m）から見た水平線は、  
どのくらいの距離？



# 地球はいつから球体と考えられてか？

- 初期アイデア：地球は平板状で、その上に天球が広がっている。
- 初期ギリシャ時代
  - 円盤説：ホメロス(B. C. 8世紀)
  - 球体説：ピタゴラス (B. C. 582-496)理由：数学者のピタゴラスは、完全体は球であり、神が作りたもうた地上は、完全体でなければならないから。
  - 約100年後、アリストテレスも球体説を支持
  - 長方形：アナクシメネス(B. C. 585-525)
- 地球は球体：根拠1 月食に見られる影の形が、円形であるから。  
根拠2 赤道に向かって南下すると、北極星の見える角度がだんだん低くなるから。



# エラトステネスによる地球の大きさ測定

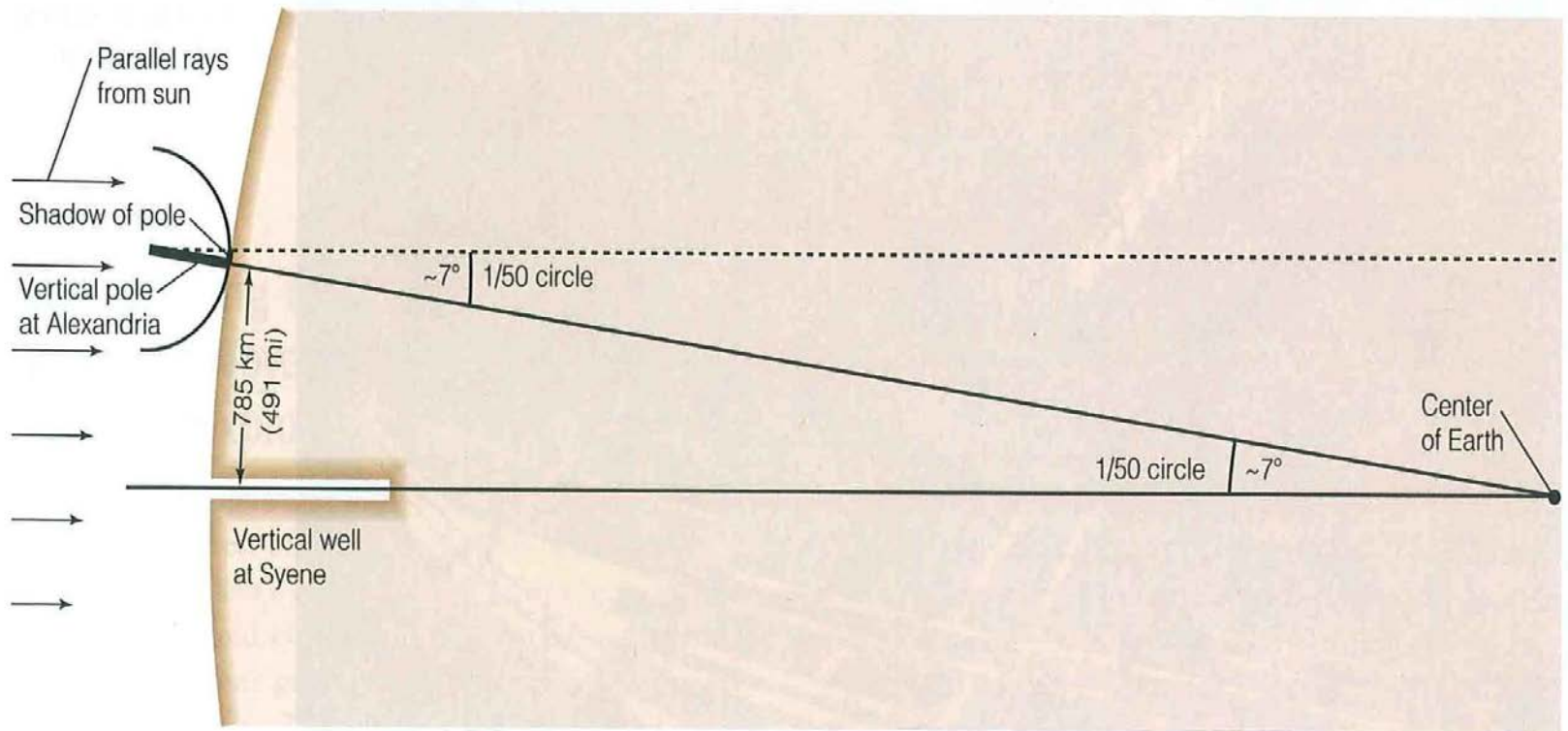
- 夏至の時、アレキサンドリアでの太陽の南中高度は $82.8^\circ$ であった。一方、シエネでは、深い井戸の底まで太陽光が差し込んでいた。アレキサンドリアからシエネ(アスワン)までの距離は、5000スタジア(スタジアは、当時の距離の単位:二分間に人が歩く距離)あった。
- 1スタジアが180mなので、地球一周 $=0.18\text{km} * 5000 * 360 / (90 - 82.8)$ になる。

答え 45000km

特にしつらえた競技場をスタジアムとよぶのは、ギリシア時代、そこに1スタジオンの競争路が設けられたことによるといいます。オリンピアのスタジアムは紀元前450年頃に造られたもので、長さが211m、その走路は192.3mで、当時の1スタジオンです。



# 地球の大きさを測ろう



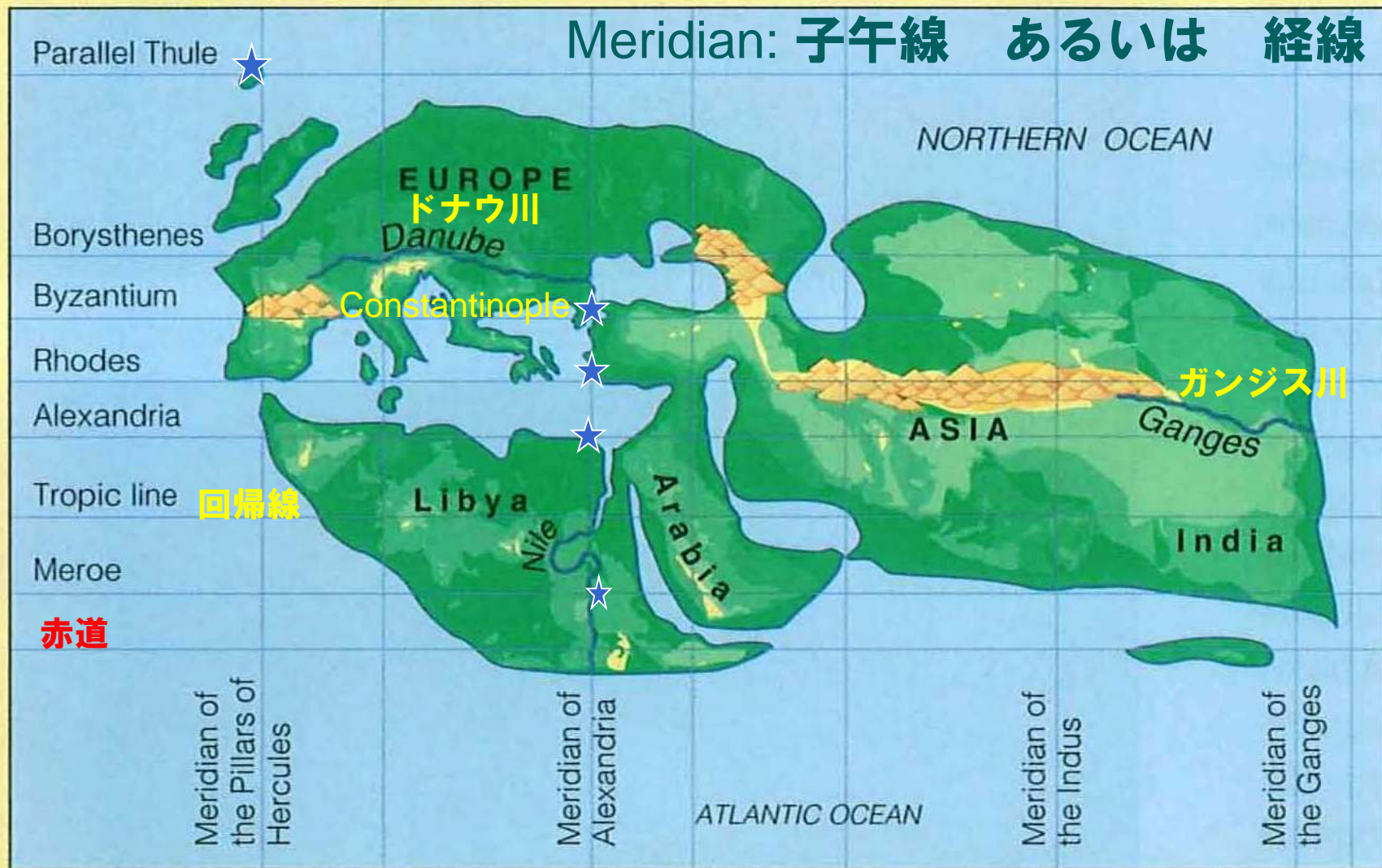
**Figure 1.7** A diagram showing Eratosthenes' method for calculating the circumference of Earth. As described in the text, he used simple geometric reasoning based on the assumptions that Earth is spherical and that the sun is very far away. Using this method,

he was able to discover the circumference of Earth to within about 8% of its true value. This knowledge was available more than 1,700 years before Columbus began his voyages. (The diagram is not drawn to scale.)

紀元前3世紀に測定された地球の大きさ。現在の測定値との差は、僅か8%



地図は、昔から平面が主流(グリッドは東西南北)

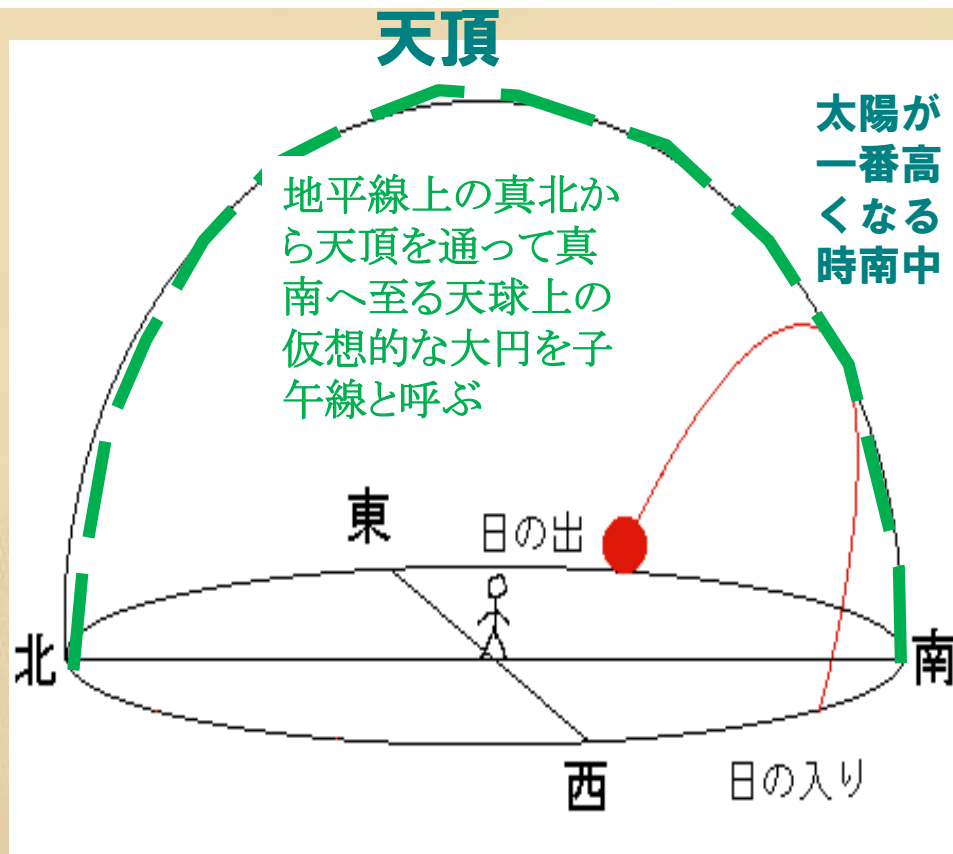


アレキサンドラの地図(最初の世界地図:紀元前3世紀)





# 時間と東西南北は、太陽と地球の位置で決まる

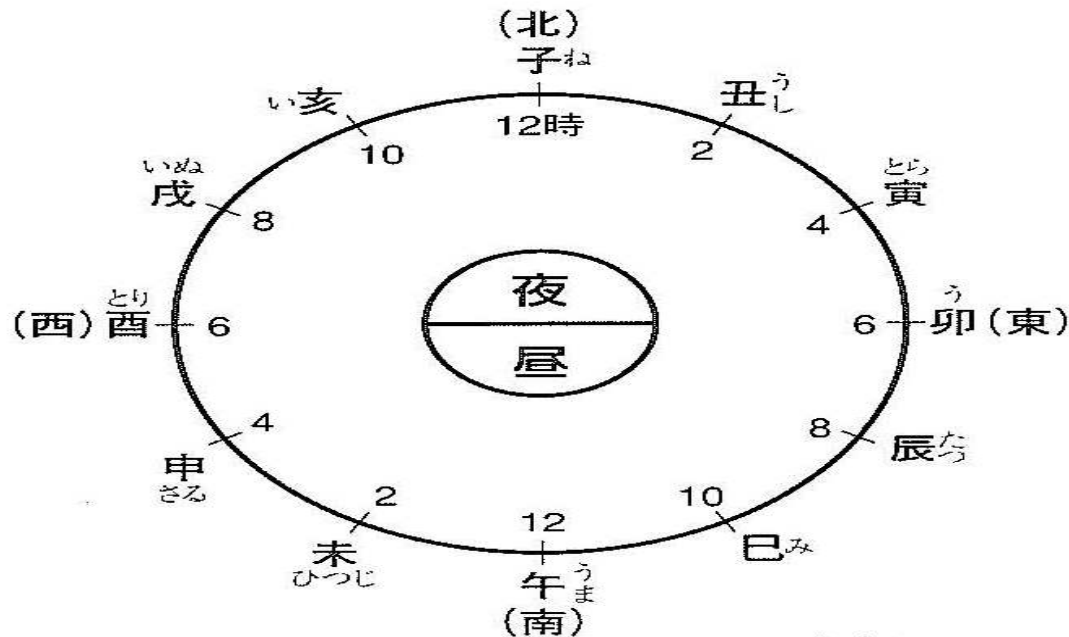


南中高度 =  $90^\circ$   $\Rightarrow$  太陽が真上に上る（天頂）  
（秋分・春分時の赤道線上，夏至の時の北回帰線上，冬至の時の南回帰線上）



日本では古来から南北方向を  
子午方角と呼んでいる。

〈図表1〉子午線はここから



十二支は方位や時刻に使われてきた。「<sup>うしとら</sup>丑寅」の方向が北東である。幽霊が出るのは草木も眠る「<sup>うし</sup>丑三つ時」。子と午を結べば南北に走る線になるので、経線のことを子午線というのである。なお、同様に東西方向の線<sup>しほ</sup>を卯酉線ということもある。



# ☆60進法(60分法)の有用性

時間や角度を表す時、60進法(60分法)が用いられ

時間： 1時間=60分； 1分=60秒

角度：  $1^\circ = 60$ 分； 1分=60秒

古代バビロニアから現在に受け継がれる表記法

60は、1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12,

15, 20, 30, 60などの約数が多く、

結構割りきれる。

1年=355日, 1ヶ月=30日, 1日=24時間

太陰暦(年=355日、1ヶ月=29.5日)



アナレマ

# Analemma: 均時差によって生まれる

## Imaging Details

Body:

Sun

Mass:

332,900 x Earth

Mean Eq Diameter:

109.1 x Earth

Distance:

147 million km

RA / Dec:

02h 13m 05s /

+13° 23'

Diameter:

32.03'

Magnitude:

-26.8



Date:

Jan 06, 2004 - Dec 20, 2004  
13:00:00 UT+2

Location:

Athens, Greece

Equipment:

Canon A-1

Canon FD 24 mm @ f/11

Fuji Super HQ 100

Baadar Solar Filter ND5

Exposures:

1/30 sec

46 multiple exposures +  
1 foreground exposure

Software:

Photoshop V6

Processing:

Layers

Resampling (25%)

JPG Compression

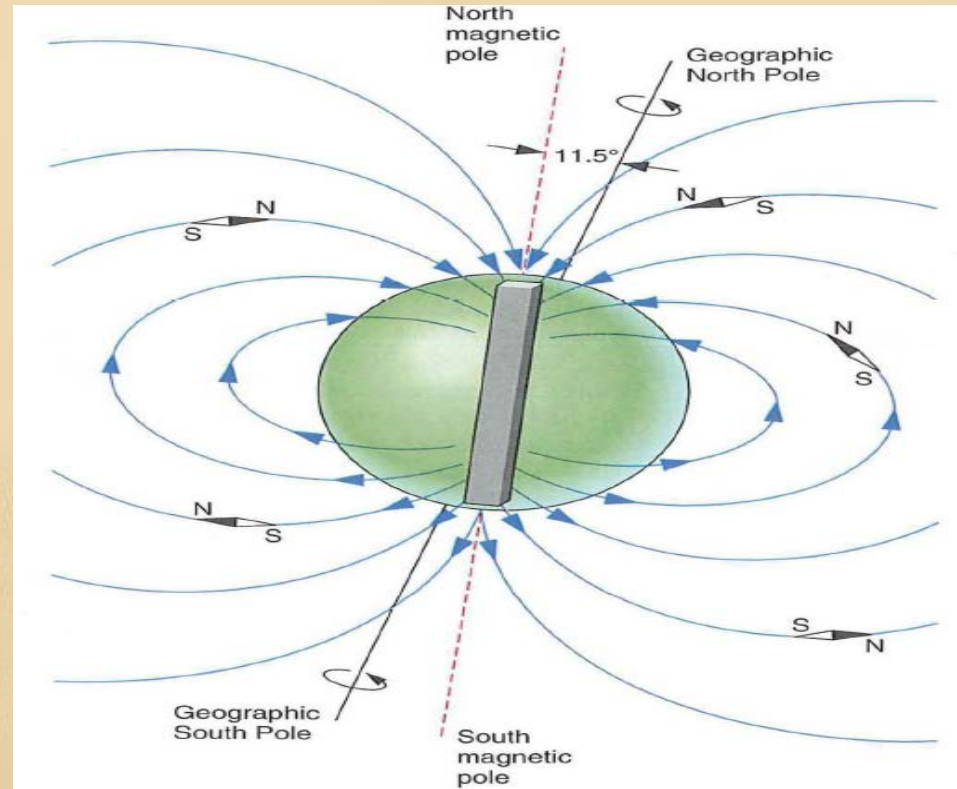
- <http://www.perseus.gr/Astro-Solar-Analemma-110000-animated.htm> より



大海原の果てには何が？  
方位はわかるが，位置を割り出せない磁石．



5世紀～15世紀の間に中国で開発されたコンパスは、アラブに渡り、ヨーロッパに広がっていった。



磁石は，真北を示さない。  
真北からのズレは，場所によって異なる．

海上では，どのくらい進んだかがわからない．



# 北極星(天体)を使って緯度を求める

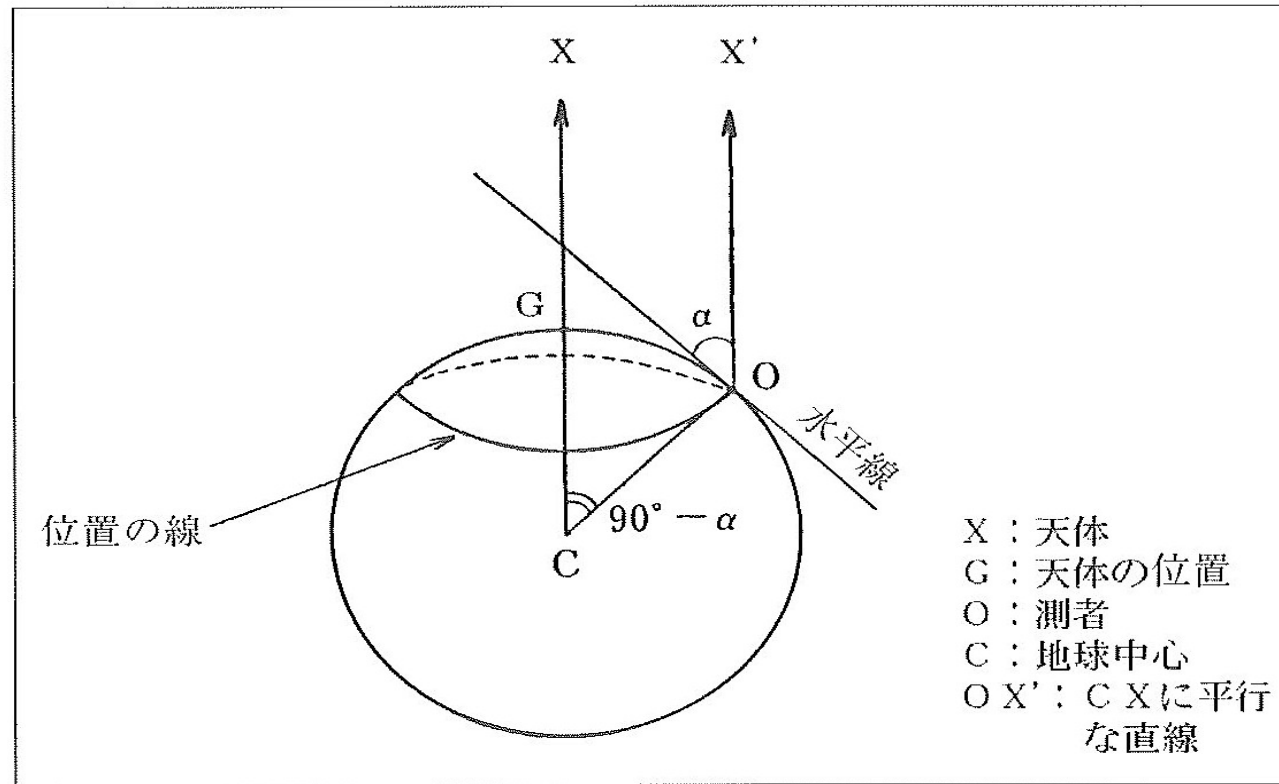


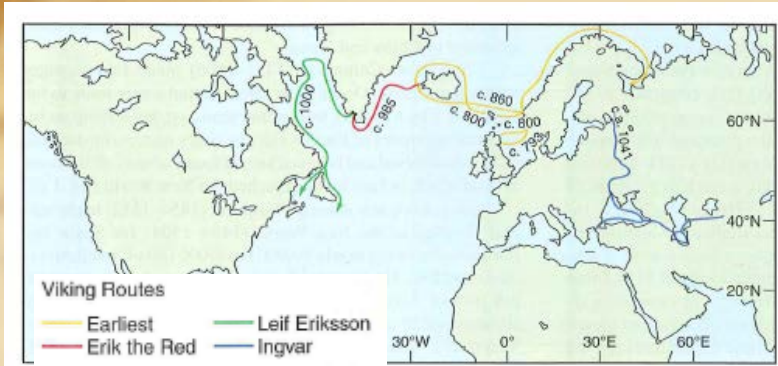
図10.11 天測による位置の線の原理

天体 X の真高度  $\alpha$  を求めれば G から半径  $90^\circ - \alpha$  の円周が位置の線となる。船位は 2 ~ 4 個の天体の観測によって得られる位置の線を組み合わせ、その交点として決定する。

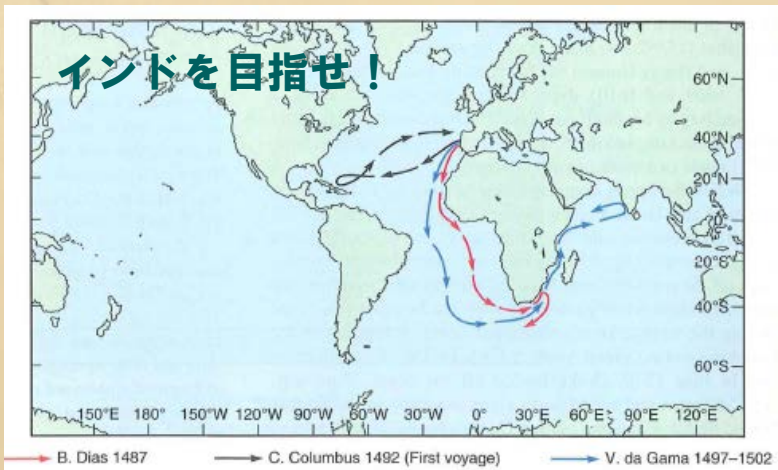
**遠い彼方の天体を固定点として、角度を求める事が出来。地球上の緯度は、昔から把握できていた。**



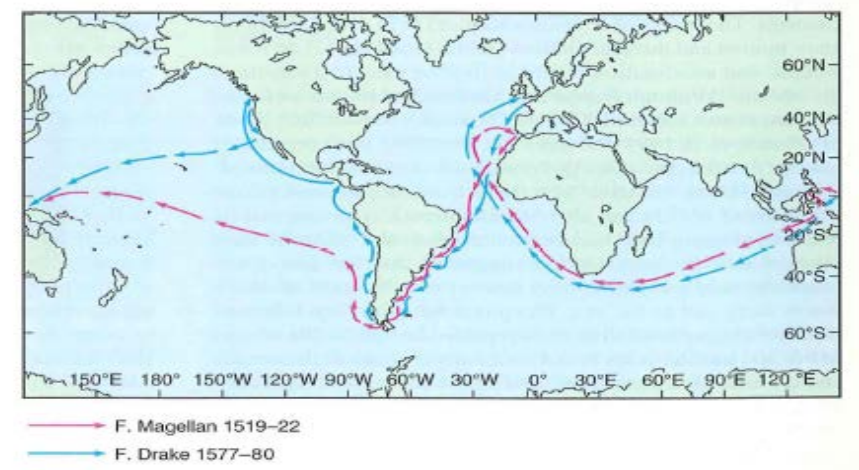
# 大航海時代(手さぐりの航海時代)



中世には，バイキングが大西洋を横断していた。



ポルトガル：喜望峰経由  
スペイン：大西洋を横断（コロンバス）。



16世紀：世界一周航海。  
マゼラン



# 大航海時代、外洋の航海はコンパスが命綱でも。。



東インド会社



航海の必需品：コンパス、  
ハンドログ、六分儀、航海日誌



オランダ海洋博物館にて

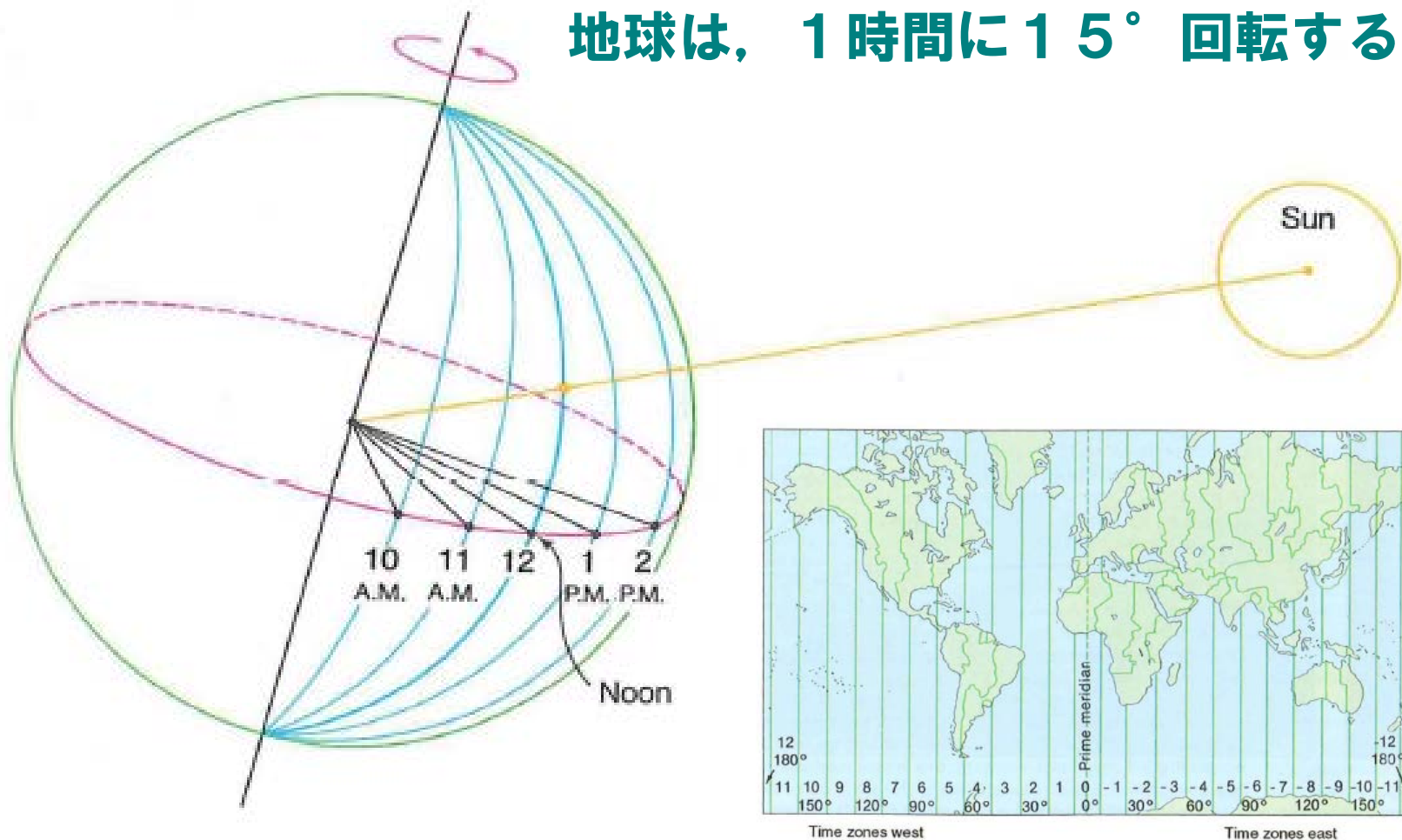


# 時計は大事な道標



# 地球上の場所は、時間に対応する！

地球は、1時間に $15^\circ$ 回転する



各国の標準時刻が存在するため、経度線とタイムゾーンは一致しない。



# 正確な時計を作りしものには、報奨金

- 1530年 フリースランド(現在のオランダ)の数学、地図作成、天文学者 Gemma Frisius (ゲンマ・フリシウス)は、

## 正確な時間を使ってと経度が求まる事を提案

- 1598年 スペイン王は、船上で使える正確な時計を作った者に、100000クラウンの報奨金を提示
- 1714年 イギリスのアン王女が、船上で使える正確な時計を作った者に、20000ポンドの報奨金を提示



洋上で使える精密時計の開発は困難を極めた。

振り子時計は波に弱い  
金属は熱膨張する  
湿度が異常に高い



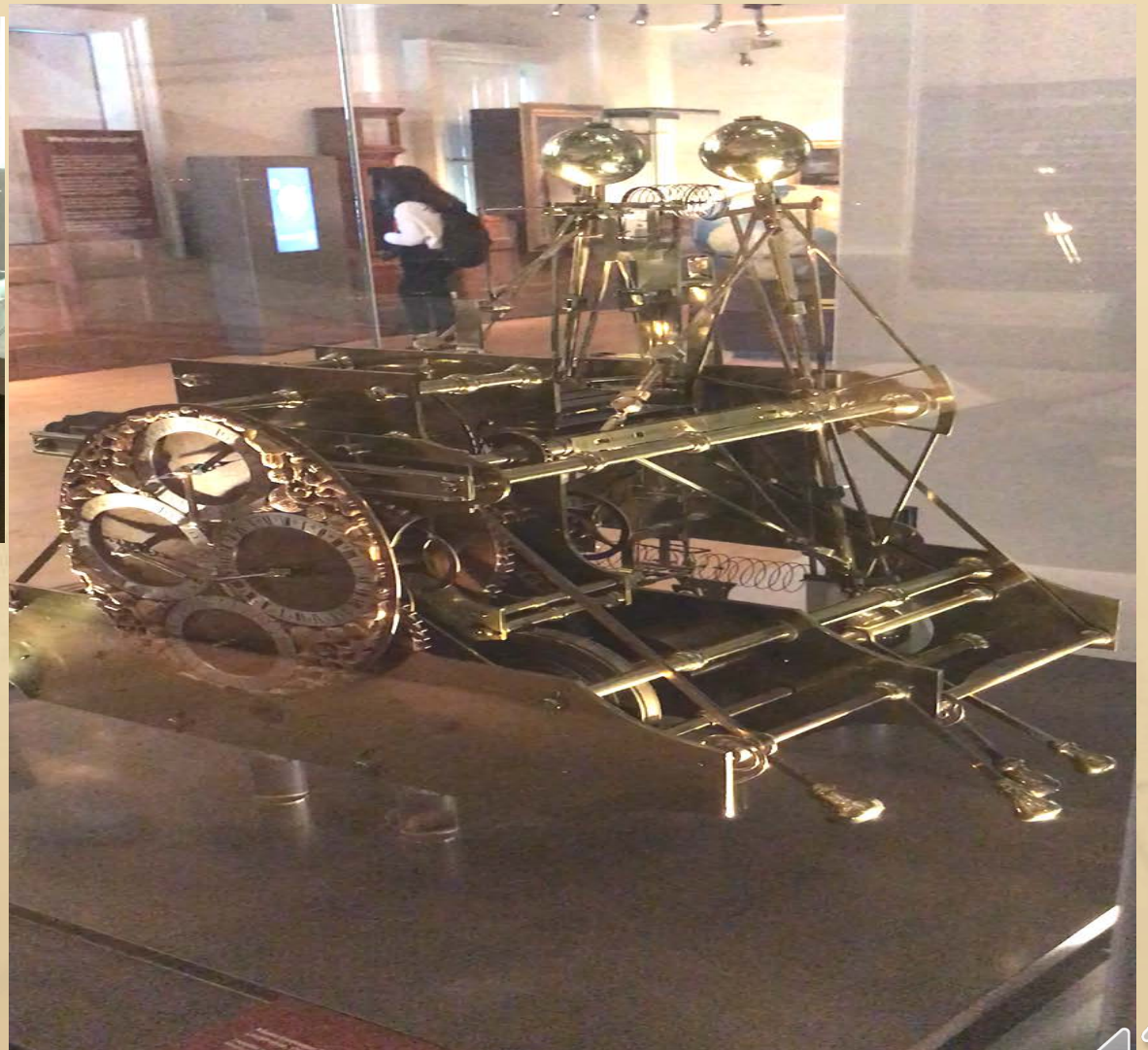
旧王立グリニッジ天文台にて

# 大英帝国をGame Changer にした時計



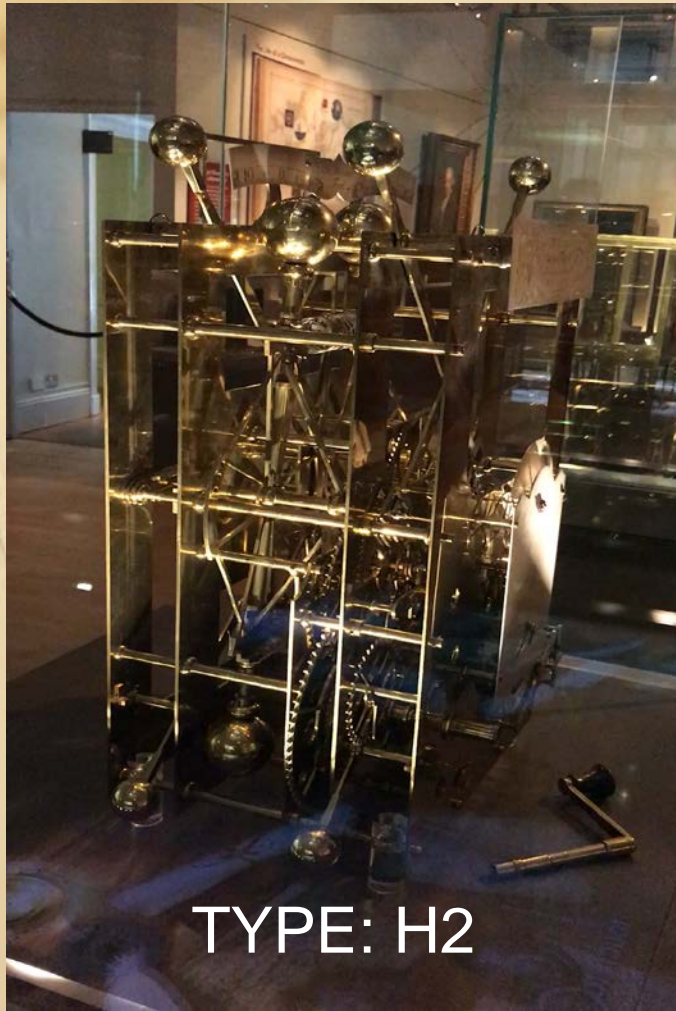
TYPE: H1

ジョンハリソン  
ン一号機



旧王立グリニッジ天文台にて

# 大英帝国をGame Changer にした時計



TYPE: H2

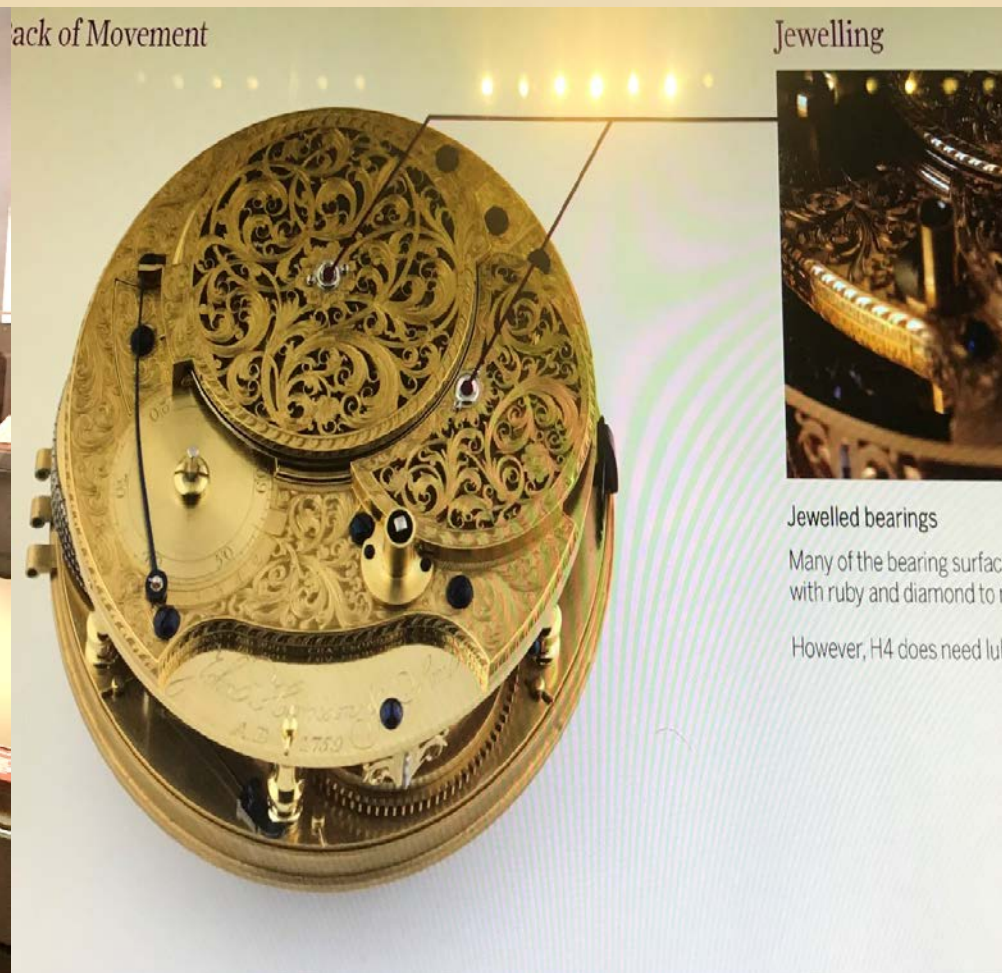


TYPE: H3

2号機振り子式で3号機からバランスホイール式



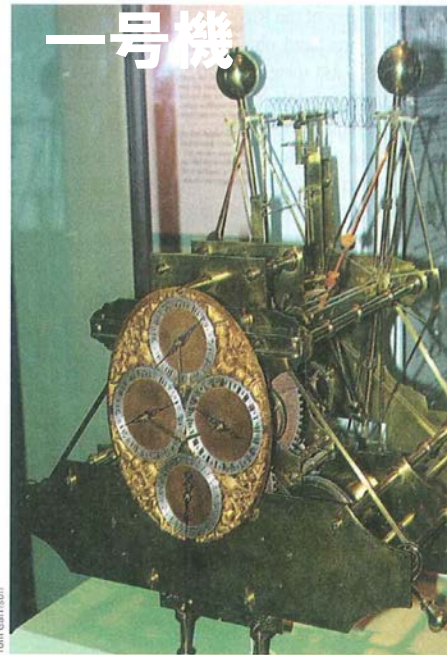
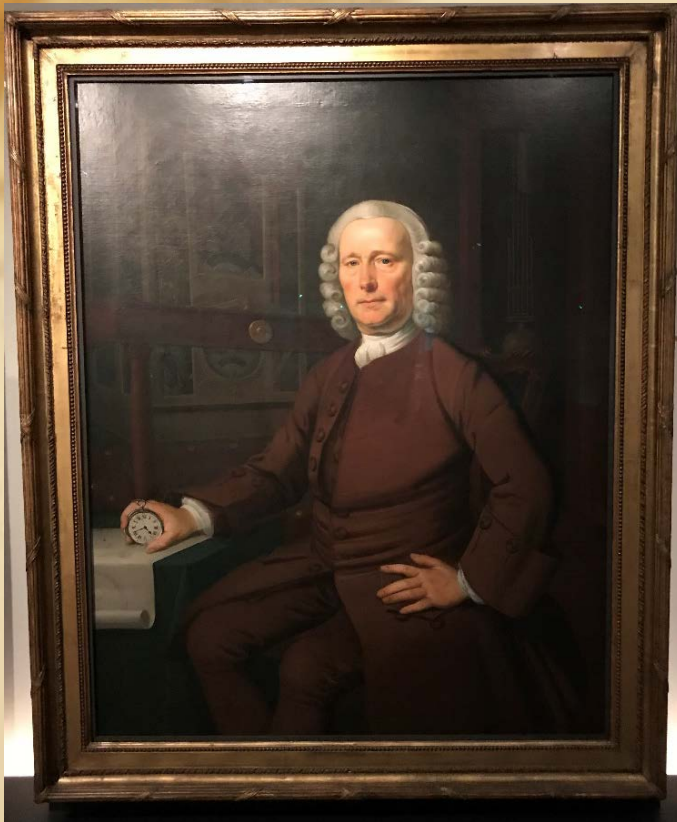
# 大英帝国をGame Changer にした時計



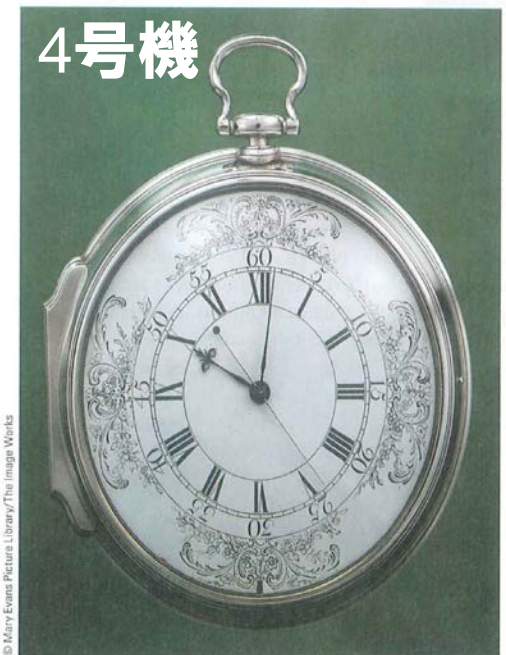
4号機は懐中時計サイズ！！



# クロノメーターの完成



一号機



4号機

**Figure 1.20** The first chronometers. (a) Harrison's Number One timekeeper, a clock built to prove principles but unfit for use at sea. (b) The Number Four timekeeper, which won the £20,000 award offered by the British Board of Longitude. Both are functioning and are on display at the National Maritime Museum in Greenwich, England.

**イギリスの時計職人John Harrisonが、1735年に高精度の時計を開発。**

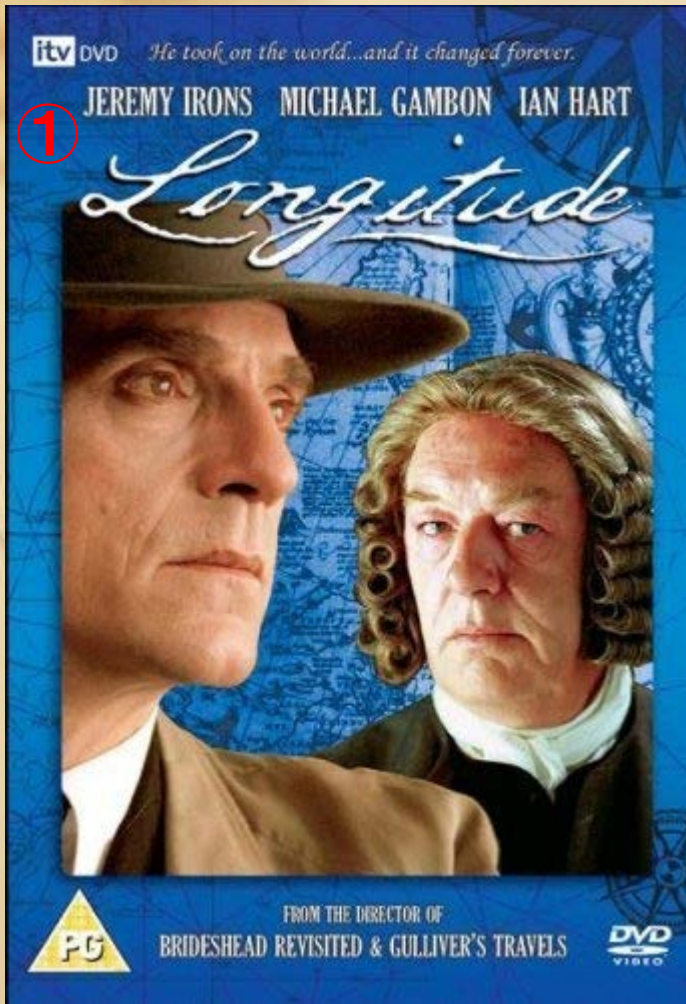
**1761年 モデル4を作成（81日間の航海で、誤差51秒）**

**1775年 83歳の時、イギリス政府から報奨金をもらう。**



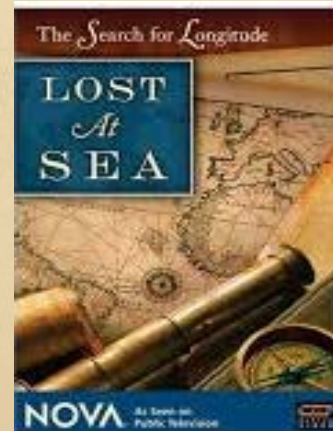


# John and William Harrison 親子の挑戦



Adam Hart-Davis tells the story of the amazing 280-year-old wooden clock, made in Lincolnshire, that changed timekeeping for ever and helped solve the problem of how to navigate round the world.

The Clock That Changed the World  
(BBC History of the World)

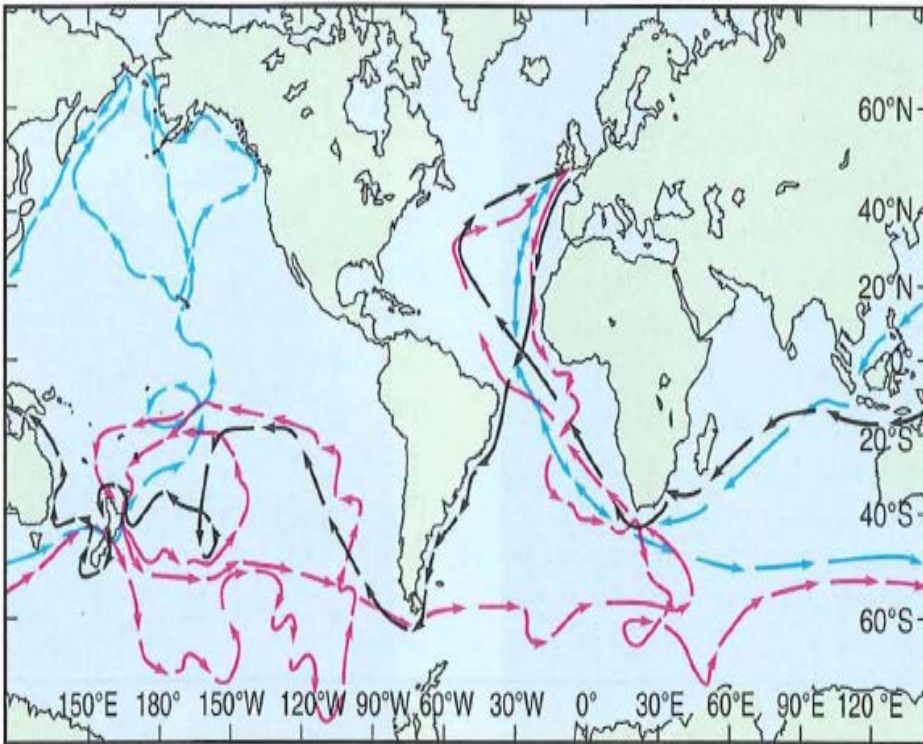


Lost at SEA, The search for longitude. NOVA

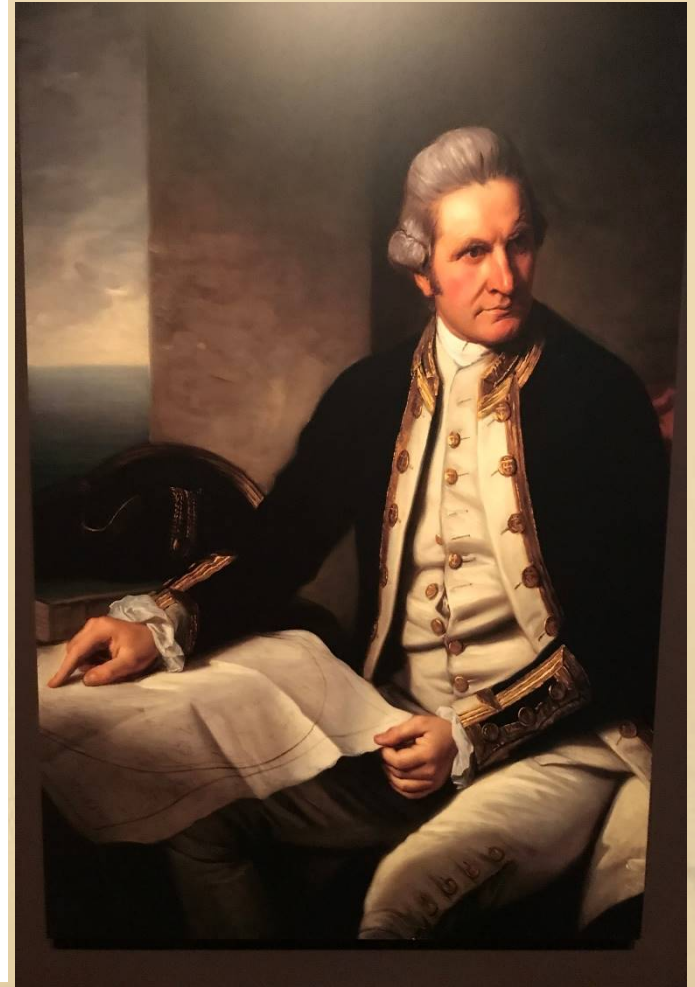
ジョン・ハリソンのように世界をひっくり返す人々(ライト兄弟やスティーブ・ジョブスなど)の物語は、面白くて共通点がある。Game Changerを目指す人にお勧め動画です。



# クック船長の陰にクロノメーターあり



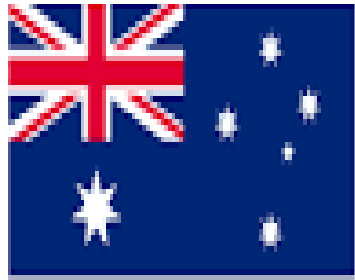
- Cook's first voyage 1768-71
- Cook's second voyage 1772-75
- Cook's third voyage 1776-79



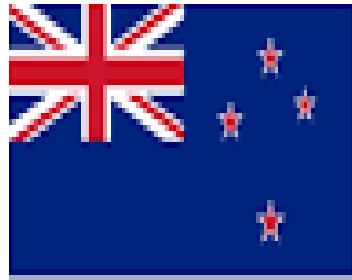
1772年：クック船長は、クロノメータ4号機のコピーをもって航海に出る。クックは、発見したニュージーランド、オーストラリア東部、南極の島々を正確に海図上に記入する事が出来るようになった。



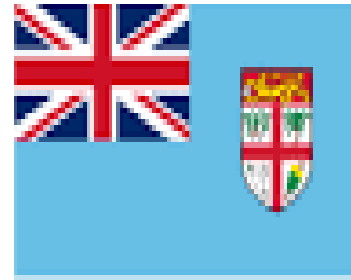
だからこれらの国旗にはユニオンジャックが含まれる



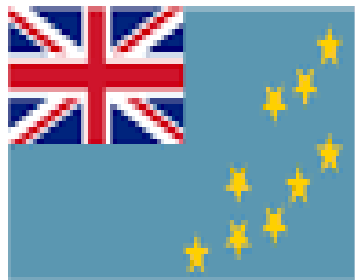
オーストラリア



ニュージーランド



フィジー



ツバル



返還前の香港旗



イングランド  
(聖ジョージ旗)



スコットランド  
(聖アンドリュース旗)

+



初代ユニオンフラッグ  
(1800年制定)



アイルランド  
(聖パトリック旗)

+



現行ユニオンフラッグ  
(1801年制定)

イギリスの世界制覇を陰で支えたのがクロノメーターという当時のハイテクであった。



# 本初子午線 (経度線の基準)

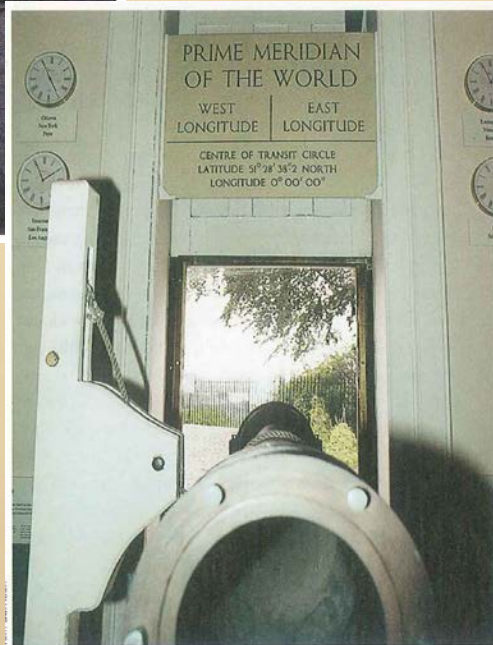
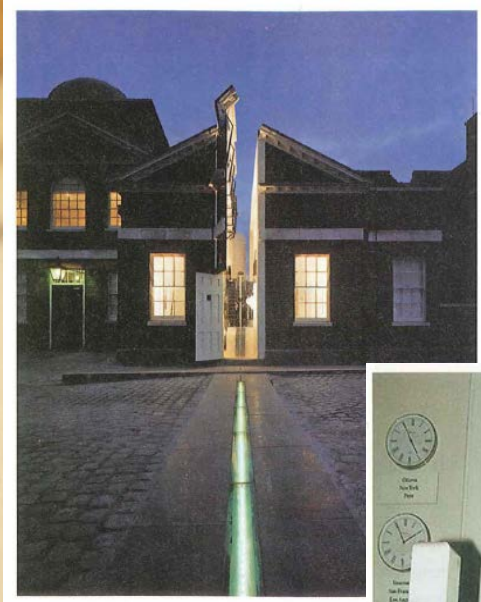
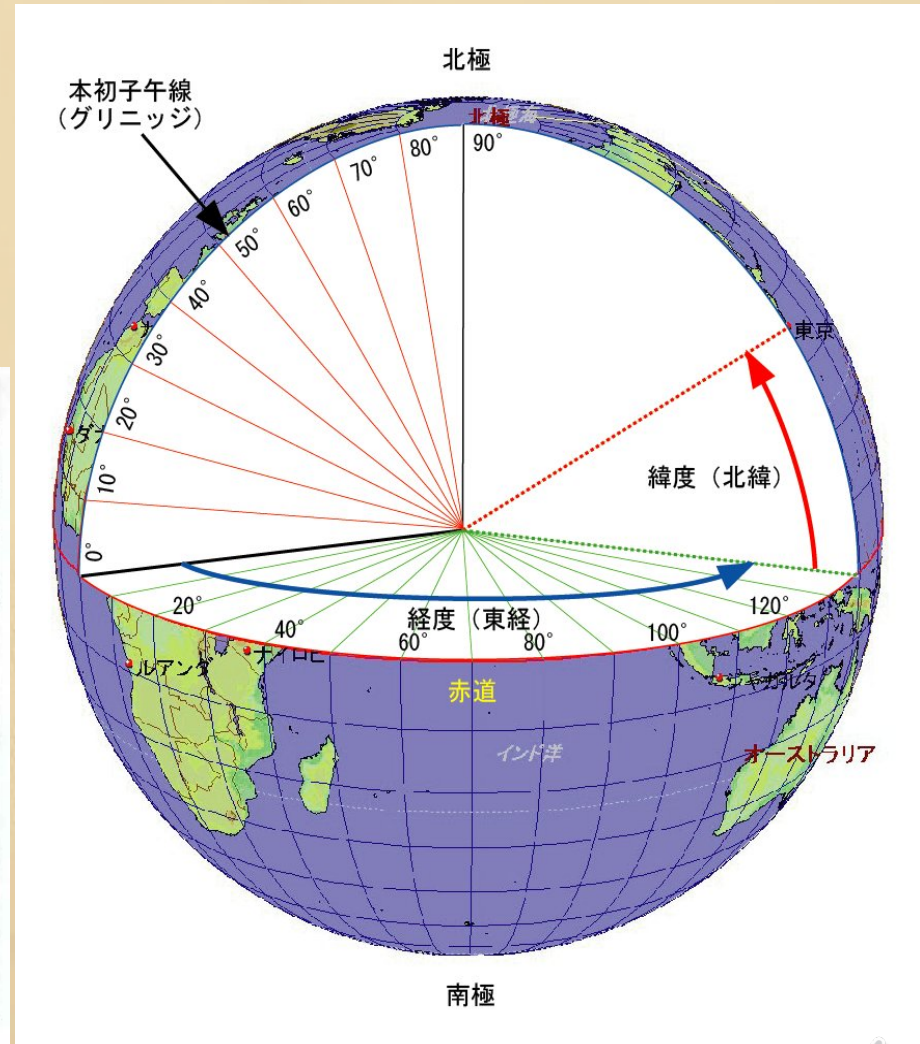


Figure 1.21 Looking north along the telescope in the prime meridian transit circle at the Royal Observatory, Greenwich, England. Zero longitude is defined as the line passing north and south through the center of the instrument.



# 本初子午線の歴史(英仏の戦い)

グリニッジ天文台は、子午線を決定するために設置され、初代台長ジョン・フラムステードは、グリニッジ天文台で観測した厳密な恒星図を作り、世界各地でグリニッジとの観測時間の差を測定すれば、グリニッジ天文台との経度差が分かると考え、フラムステード天球図譜という星図を製作した。

1750年代:**イギリスが世界的海運国**になる。フラムステード天球図譜が全ヨーロッパ的に使われることが多くなる。

国際列車の運行: 標準的な時刻と子午線の必要性が出る。

1850年:**アメリカ合衆国は、グリニッジ子午線を採用**

1875年:国際地理学会は、カナリア諸島フェルロ(フランス領)を基礎子午線とすることを決議

1881年:国際地理学会では、カナリア諸島は基点として不適、**重要な観測拠点となりうる天文台**を基点とするべき。

1884年:国際子午線会議がワシントンD.C.で開催。投票の結果、グリニッジ子午線は**国際的な本初子午線**として採択。

1886年:日本は、グリニッジ子午線を採用

1911年:**フランスがグリニッジ子午線を採用**



# 旧王立グリニッジ天文台（時間と位置の基準）

## The time ball

テムズ川の船に  
13時を知らせる。



【注】 GMT（Greenwich Mean Time）でも今は  
UTC（Coordinated Universal Time）協定世界時が基準



# そもそも地球の一周は、なぜ約4万km

- **18世紀、大航海時代を迎え、貿易が盛んになる。**
- **地域間において、大きさや重さの尺度が不統一で、商取引上問題が生じた。**  
(場所によって、足のサイズや頭の大きさが異なるため身体尺が使えない)
- **単位の統一を図る目的で、フランスは、メートル法の制定をおしすすめる。**
- **メートル法：長さの単位およびそれを基準として派生した**  
各種の単位系の総称。国際単位系(SI)の別名とされることが多い。
- **例えば**
  - **質量： 1立方デシメートルの水の質量を1キログラム**
  - **面積： 面積の単位アール (are, 100平方メートル)**
  - **体積： 体積の単位ステール (stere, 1立方メートル) ・**  
**リットル (litre, 1立方デシメートル)**



**1ステールの木材 (まきなど)**



# メートル法と地球の大きさとの関係

メートル法の制定：

フランス革命後の1790年3月、タレーラン・ペリゴール（国民議会議員）が提案

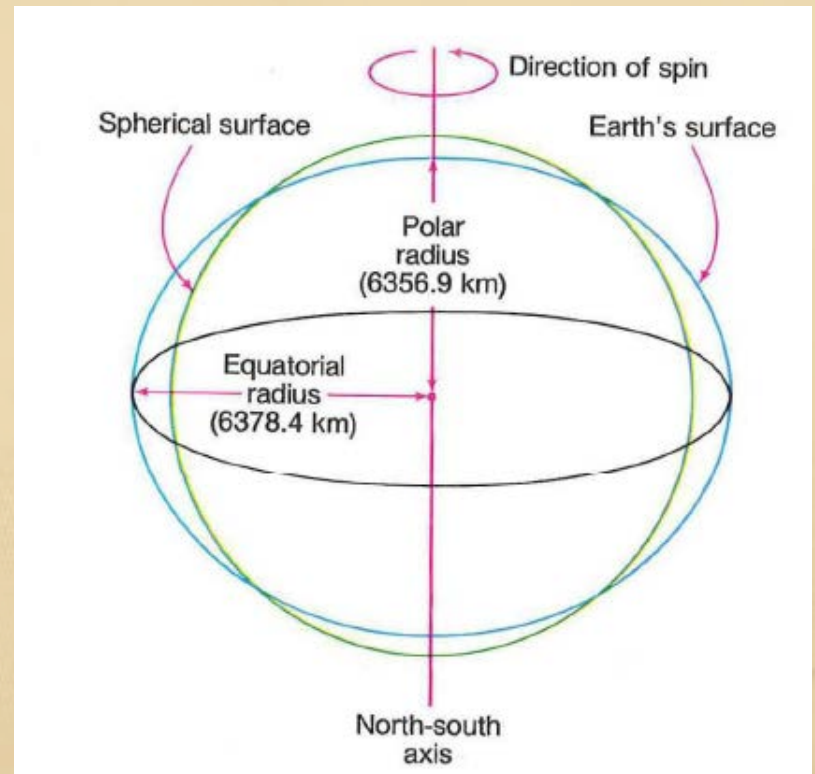
世界に統一した単位系としてのメートル法の創設をフランス議会在議決

メートルとは：地球の北極点から赤道までの経線の1000万分の1の長さとして、1791年に定義。

なぜ地球の一周は約4万kmか？

答え：

地球の4分の1周を1万kmと定義したから。



$$\text{円周} = 2\pi r$$

$$\text{半径} = 4\text{万} / 2\pi = 6366.39\text{km}$$





# 耳慣れない，“**ノット**”でも，とても簡単なスピードの単位

**海里：** 船や飛行機が距離の単位として使っているもの

$$1\text{海里} = 1.852 \text{ km}$$

なぜ，このような中途半端な数字になるか？

(換算) 1海里を言いかえると，緯度1' (分)の長さ.  $1\text{海里} = 1'$

$$\text{緯度}1^\circ = \text{緯度}60'$$

緯度 $90^\circ = \text{緯度}5400'$  ( $60 \times 90$ ) = 北極(南極)から赤道までの距離

$$\text{緯度}5400' = 10000\text{km}$$

$$1\text{海里} (\text{緯度}1\text{分の距離}) = 10000\text{km} / 5400' = 1.852\text{km}$$

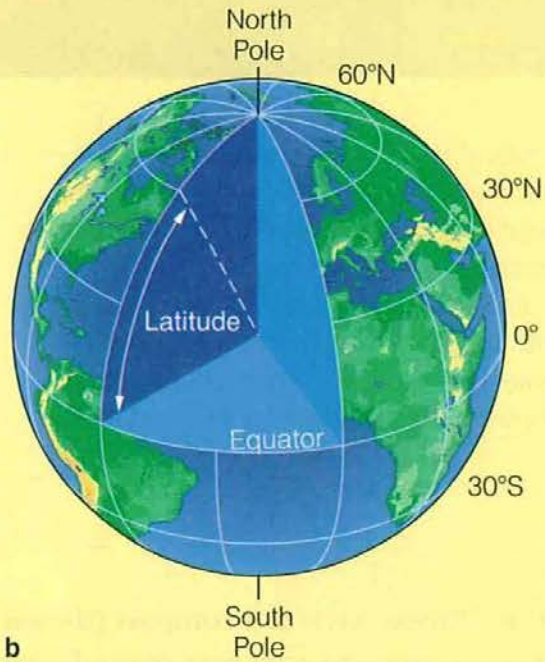
(速度) **1ノット：** 1時間に1海里進む速度.

つまり，1時間に緯度1'の距離を進むスピード

例えば，15ノットで4時間航行すると緯度 $1^\circ$ の距離を進める。

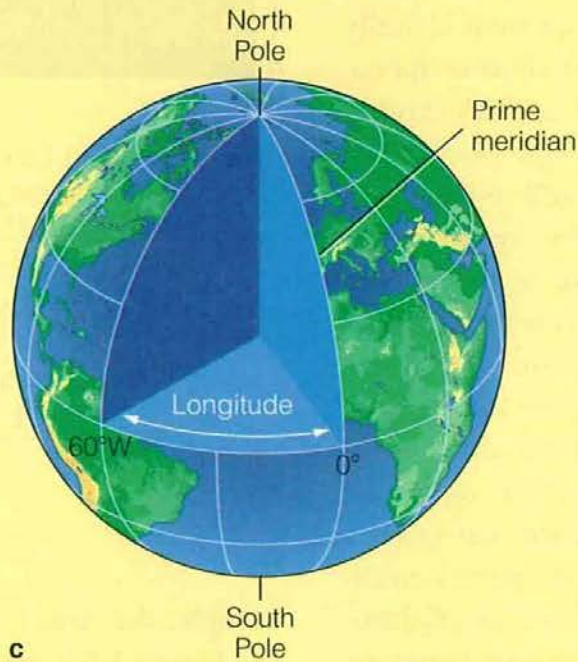


# 緯度・経度の表し方

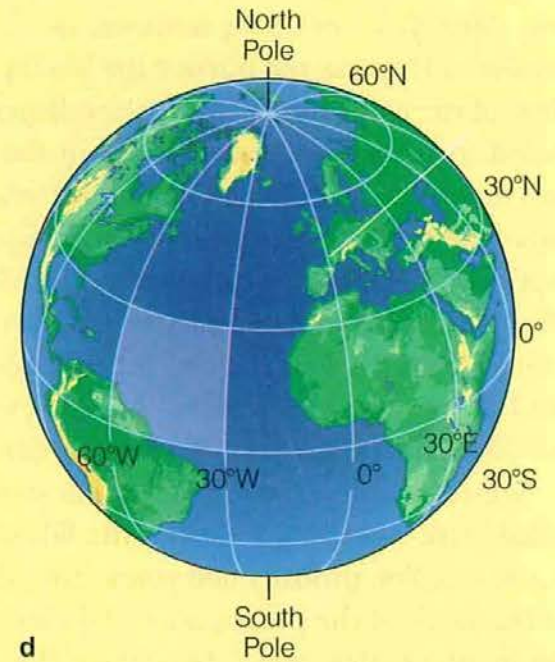


**b**

(b) Latitude is measured as the angle between a line from Earth's center to the equator and a line from Earth's center to the measurement point. (c) Longitude is measured as the angle between a line from Earth's center to the measurement point and a line from Earth's center to the prime (or Greenwich) meridian, which is a



**c**



**d**

line drawn from the North Pole to the South Pole passing through Greenwich, England. (d) Lines of latitude are always the same distance apart, but the distance between two lines of longitude varies with latitude.



# 緯度・経度の表記法

- 緯度は赤道を0度として南北それぞれを90度に分け、北を北緯、南を南緯として数える。

表記例 北緯35度41分30秒

北緯 $35^{\circ} 41' 30''$

- 経度は、旧王立グリニッジ天文台をとおりる子午線を0度とし(本初子午線)、東西にそれぞれ180度に分け、東側を東経、西側を西経として数える。

表記例 東経139度46分30秒

東経 $139^{\circ} 46' 30''$



# 練習問題 1

1. 10月15日午後3時に $30^{\circ} 38'N$ ,  $149^{\circ} 46'E$ を出港する豪華客船が真南に60時間航行しました。その時の平均船速は13ノットでした。到着した時の緯度・経度を計算しなさい。

13ノットとは、1時間に13分の距離を進むスピードなので、13分\*60時間は、780分（13度）の距離を進んだことになる。北半球で南なら赤道に向かうこととなり、北緯30度から移動分の13度を引き算すればよい。また、真南に進むので、東西方向の変化はない。

だから、北緯17度38分、東経149度46分となる。

**ポイント**      **北半球では、南はマイナス、北はプラス**  
**東経では、東ならプラス、西ならマイナス**



## 練習問題 2

赤道上を航行中の船が、12時(現地時間:ローカルタイム)に $0^{\circ}$  N,  $140^{\circ}$  Eから東に向け、平均18.75ノットで48時間航行しました。その時の位置とローカルタイムを計算しなさい。

赤道上=大円なので、距離=角度として処理できる。船速18.75ノットで48時間航行したのだから、 $18.75' * 48 = 900' = 15^{\circ}$  (距離)。時差補正をしなければ、2日後の12時なのだが、地球上を15度東に移動しているため、現地時間は、

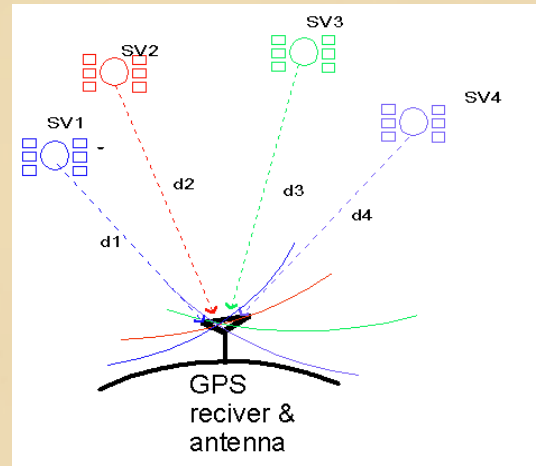
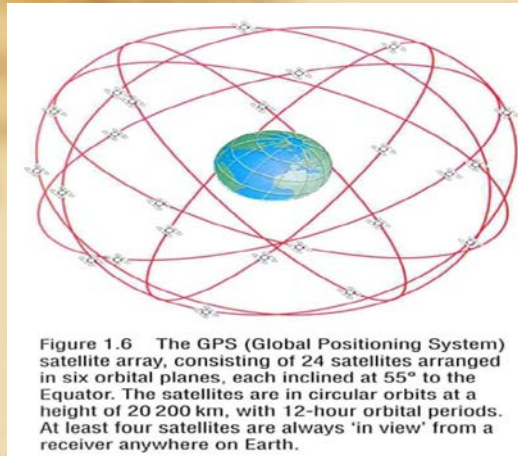
**世界標準時間と現地時間を意識しよう。**

**赤道は、経線と同様に大円である。**

**地球は、24時間で一周するから、経度で15度 / 1時間**



# 人工衛星はタイムマシーン



- 衛星の位置(SV1,SV2,SV3,SV4)が既知のとき、各衛星とGPSレシーバとの距離( $d_1, d_2, d_3, d_4$ )が求まれば、球の方程式の解として、GPSレシーバの位置(X,Y,Z)が求まる。
- GPS衛星との距離は、電波の伝搬遅延時間より求める。この測位技術による測定精度は1m以下(時刻差にして10のマイナス8乗程度)である。
- 衛星の原子時計は、標準時刻系(UTC)に正確に同期している。
- 高速で宇宙空間を飛び回る人工衛星は、地球時間より少しづつ遅れを生じるため、補正が必要となる(つまり、タイムマシンなのだ！)
- 最近、アメリカの衛星のみならず多くの国が人工衛星を打ち上げており全地球航法衛星システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)と呼ばれる。



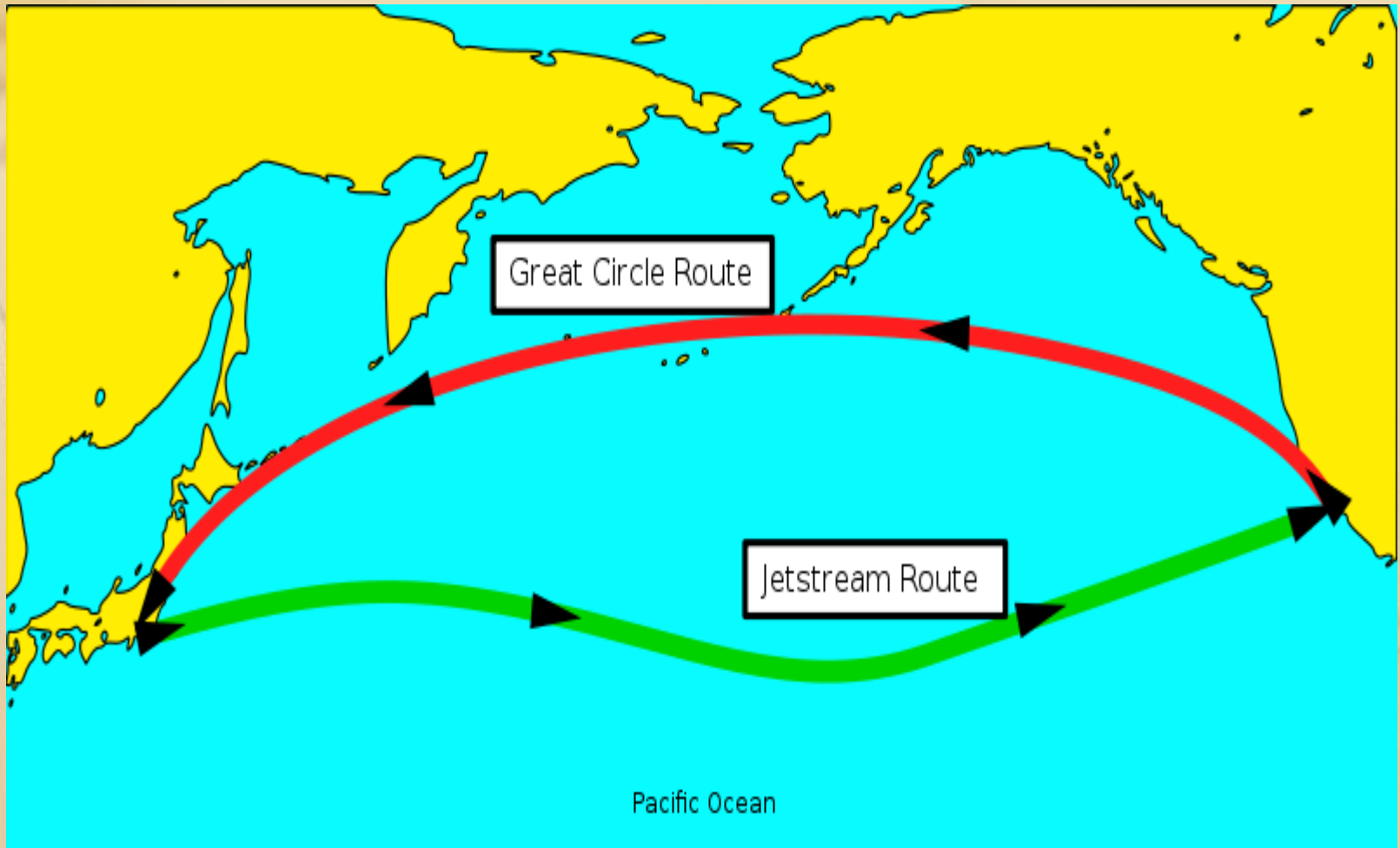
# 今日のまとめ

## —地球上の位置を記述する—

- 目標物が見える限界 (水平線までの距離)
- 地球における座標のおさらい (緯度経度表記)
- 地球の形と大きさ (地球一周4万km)
- 円盤状の地球と大航海時代  
(磁石だけでは、位置がわからない)
- 大航海時代を飛躍的に発展させた時計  
(クロノメータの発明)



成田からロサンゼルスまで飛んじゃいます。





実際測ってみました。  
と言っても、地球儀ですけど。



A > B のように  
見えないでもないが。。

# 経線は大円：緯線は赤道のみ大円

- **大円 (great circle / orthodrome)**: 球と平面の交差の仕方をあらわすことばです。平面が球の中心を通るときに、球と平面が交差してできる円が大円です。地球でいえば**赤道**や**経線**(子午線)、さらに**大圏コース**が大円になります。
- **小円 (small circle)**: 球と平面の交差の仕方をあらわすことばです。平面が球の中心を通らないときに、球と平面が交差してできる円が**小円**です。地球でいえば赤道以外の**緯線**は小円です。

# 陸地が見える場合：沿岸域

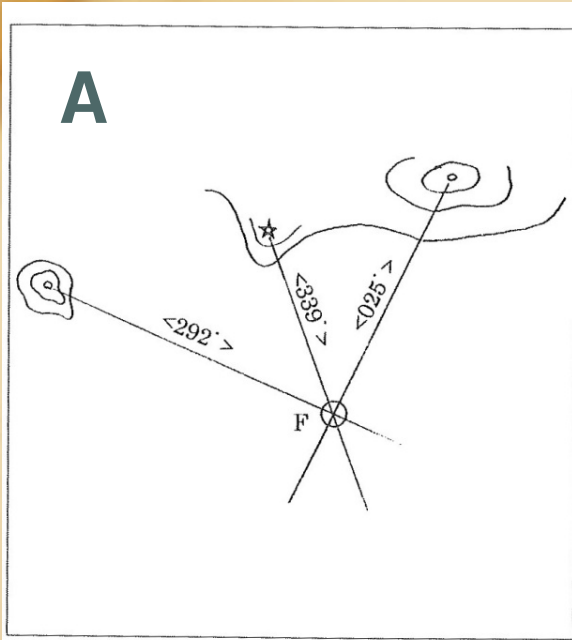


図10.3 クロス方位法  
船のコンパスで2本以上の物標の方位を観測し、海図上に記入した方位線の交点により船位Fを決定する。

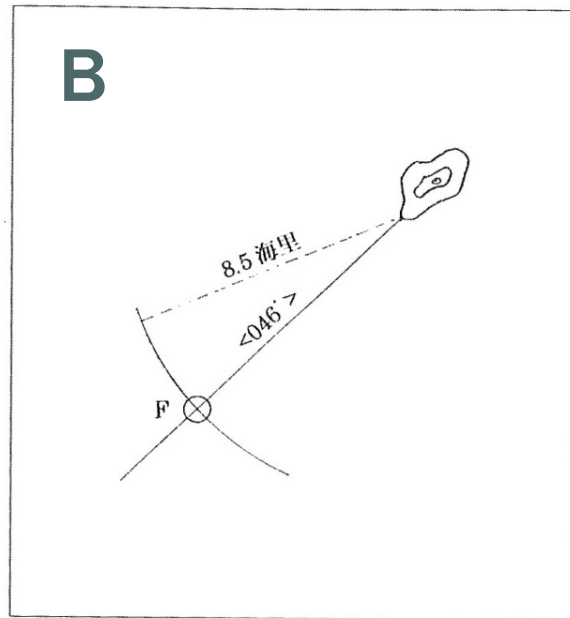


図10.4 レーダによる測位(その1)  
レーダにより単一目標の方位と距離を測定し、海図に記入して船位Fを決定する。

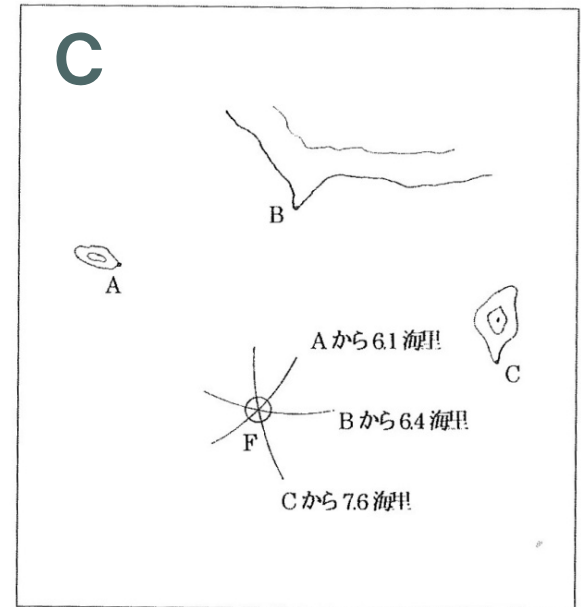


図10.5 レーダによる測位(その2)  
レーダにより複数目標を同時に測定し、海図上に記入して船位Fを決定する。

- A : 固定点3点の方向がわかれば, 位置が割り出せる。
- B : 固定点の方向と距離がわかれば, 位置が割り出せる。
- C : 固定点3点からの距離がわかれば, 位置が割り出せる。