

1. 航海術とクロノメーター (特別講義 ; 科学技術史)

S. Yamauchi

2017 年 9 月 13 日

Question:

(1) 現代まで続くヨーロッパ優位の源泉は何か？

- (a) 古代ギリシャ・ローマ (BC ? ~ 3 c.) の遺産
- (b) ルネッサンス (15 ~ 16 c.)
- (c) 大航海時代 (16 ~ 17 c.)
- (d) 科学革命 (17 ~ 18 c.)
- (e) 産業革命 (18 ~ 19 c.)
- (f) 第一次・二次世界大戦 (20 c.)
- (g) その他

(2) 経度測定がなぜ困難であったのか？

(3) 振り子(テンプ)と脱進機の精度を支配する因子は？

1 航海術

1.1 天測航法の概要

1.2 大航海時代の航法

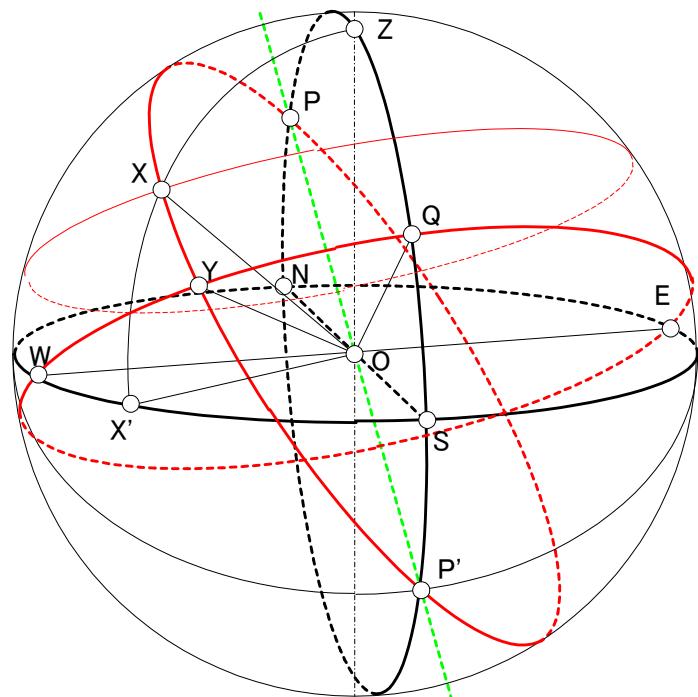
Why? 航海術 →

- (1) 時計 (最初の精密機械) : 機械の原点
- (2) 天文学 (惑星の運動、力学) : 近代科学の原点
- (3) ヨーロッパ諸国によるアジア・アフリカの植民地支配

→ 富の集中、産業、科学技術、文化の発展

現代もなお、世界を支配

天体の位置の表し方



(南側外部より天球を見る。)

- O: 地球上の観測位置
NESW: 水平線
N: 北
Z: 天頂
NZS: 子午線 (真北・天頂・真南を通る大円)
P: 天の北極 (地軸の北の延長線)
P': 天の南極 (P の反対側)
EQW: 天の赤道
X: 対象とする天体 (恒星, 太陽, 月等)
PXP': 天の北極、南極と天体を通る天の大円

地平座標系 :

方位角: $A = \angle NOX'$, 高度: $h = \angle X'OX$

赤道座標系 :

赤緯: $\delta = \angle YOX$, 時角: $T = \angle QOY$

地平座標系 (前の図参照)

天体の観測 \longleftrightarrow 方位角、高度に直結。

方位角: 真北を 0° とし、時計回りに $0 \sim 360^\circ$ で表す。

$$A = \angle NOX'$$

高度: 水平線上を 0° として天頂を 90° とす。

$$h = \angle X'OX$$

天球は POP' を軸として回転し、時間と共に方位角、高度は変化。

赤道座標系 (前の図参照)

地球の緯度・経度と同様に、天球に固定した赤緯・赤径 (or 赤緯・時角) で表す。

天の赤道: 地球の赤道を天球に投影した大円 EQW

天の北極: 地球の北極を天球に投影した点 P

天の南極: 地球の南極を天球に投影した点 P'

天の子午線: 天の北極、南極と天頂を通る天球上の大円

赤緯: 天の赤道面と天体とのなす角度。天の北極を 90° 、天の南極を -90° と表す。

$$\delta = \angle YOX$$

春分点: 太陽が天の赤道を南から北へ横切る天球上の位置

赤経: 北極・南極を通り、かつ春分点を通る大円と天体を通る大円とのなす角度。

東回り を正とし、 $0 \sim 24$ 時の時間 (1 時 = 15°) で表す。

時角: 子午線面と北極・南極・天体を通る大円面とのなす角度 (時間で表す)。

西回り を正とし、天体が正中してから現在までの時刻に等しい。

$$T = \angle QOY$$

天球上の太陽・月・惑星の動き

赤緯-赤径座標: 天球に固定されて地球の周りを回転。**恒星の座標は不变。**

天頂の赤経は経過時間だけ増加。

赤緯-時角座標: 地球に固定されており、地球と共に回転。

恒星の赤緯は変化しないが、時角は経過時間だけ増加。

太陽: 天球上の軌跡 (赤道の上下に蛇行する軌道 = **黄道 (こうどう)**) を、
西から東へ 1 年周期で移動。

黄道が赤道を南から北へ横切る点が春分点。

惑星: 黄道の近くを、**概ね西から東へ**移動し、ある周期 (会合周期) で**逆行**。

内惑星 (水星、金星) は太陽と相前後しながら移動。

外惑星は太陽より長周期で移動、途中 1 ~ 2 年周期で逆行。

月: 黄道に近い軌道を約 **27.3 日** (太陽に対しては約 **29.5 日**) で一周。
地球、太陽、他惑星の引力で、軌道は複雑 (8.85 年、18.60 年周期等)。

太陽時、恒星時と経度

太陽時: 太陽の運動をもとにした時刻。

恒星時: 恒星 (春分点) の運動をもとにした時刻

= 春分点の時角 (春分点が南中してから現在までの経過時間)

= 真南に見える星の赤経。

恒星時の 1 日 = 24 恒星時間 = 23 時間 56 分 4.091 秒 (毎日約 4 分進む)

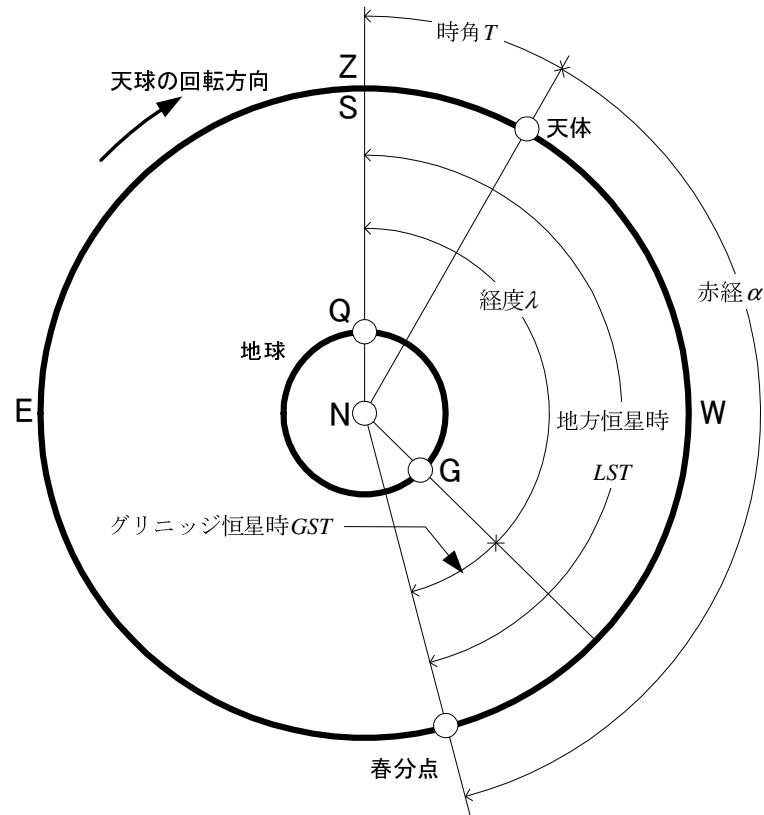
1 恒星時間 = $1/1.0027379094$ 時間

グリニッジ恒星時: グリニッジの子午線上で測った恒星時 (GST)

ある地方の恒星時は 地方恒星時 LST 。

$$LST(\text{地方恒星時}) = GST(\text{グリニッジ恒星時}) + \lambda(\text{経度})$$

時角，赤経，経度，恒星時の関係



(天の北極から見る)

Q : 現在地

G : グリニッジ

$$T(\text{時角}) + \alpha(\text{赤経})$$

$$= GST(\text{グリニッジ恒星時}) + \lambda(\text{経度})$$

$$= LST(\text{地方恒星時})$$

グリニッジ恒星時の計算法

- (1) 対象時刻の世界時(グリニッジ平均時) UT を求める。

$$UT = JST(\text{日本標準時}) - 9 \text{ 時} (\text{経度 } 135^\circ)$$

- (2) 修正ユリウス日(1858年11月17日0時からの通算日) MJD の算出。

$$MJD = \lfloor 365.25Y \rfloor + \lfloor Y/400 \rfloor - \lfloor Y/100 \rfloor + \lfloor 30.59(M-2) \rfloor + D \\ - 678912 + \frac{h}{24} + \frac{m}{1440} + \frac{s}{86400}$$

$\lfloor x \rfloor$ は, x を越えない最大の整数 (floor 関数)

UT の年を Y , 月を M , 日を D , 時間を h , 分を m , 秒を s とする。

1,2月は前年の13,14月とする(例:2013年2月5日は、 $Y=2012$, $M=14$, $D=5$)。

- (3) グリニッジ恒星時 GST を求める。

$$GSD = 0.671262 + 1.0027379094 \times MJD(\text{通算の恒星日})$$

$$GSD' = GSD - \lfloor GSD \rfloor \quad (\text{小数部分抽出})$$

$$GST = 24^h \times GSD' \quad (\text{時間へ換算})$$

地平座標系と赤道座標系の換算

地平座標 (高度 h , 方位 A) \leftarrow 赤道座標 (赤緯 δ , 時角 T)

$$\sin h = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos T \quad (1)$$

$$\sin A = -\frac{\cos \delta \sin T}{\cos h} \quad (2)$$

$$\cos A = \frac{\sin \delta \cos \phi - \cos \delta \sin \phi \cos T}{\cos h} \quad (3)$$

方位角 A は式 (2) の $\sin A$ の値と , 式 (3) の $\cos A$ の符号から

赤道座標 (赤緯 δ , 時角 T) \leftarrow 地平座標 (高度 h , 方位 A)

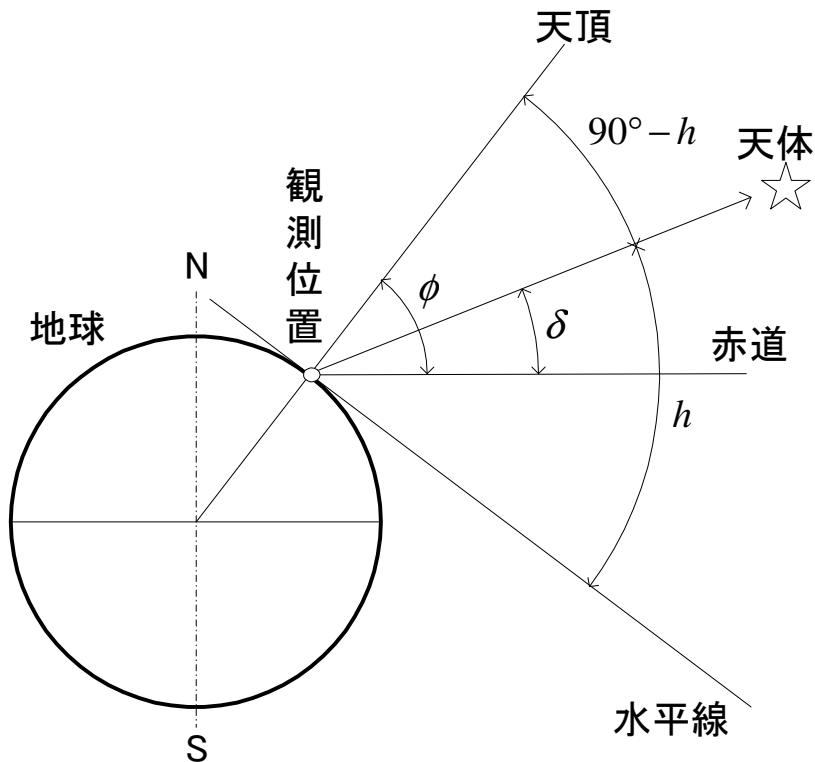
$$\sin \delta = \sin \phi \sin h + \cos \phi \cos h \cos A \quad (4)$$

$$\sin T = -\frac{\cos h \sin A}{\cos \delta} \quad (5)$$

$$\cos T = \frac{\sin h \cos \phi - \cos h \sin \phi \cos A}{\cos \delta} \quad (6)$$

時角 T は式 (5) の $\sin T$ の値と , 式 (6) の $\cos T$ の符号から

子午線高度緯度法による緯度と経度の決定



太陽，星等が正中したとき (左図)

緯度:

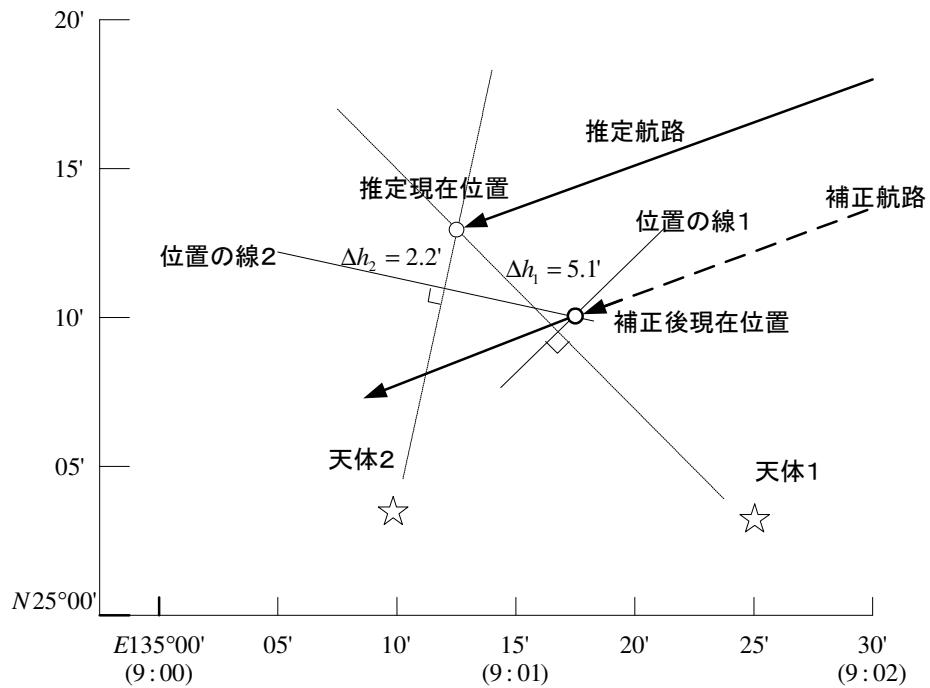
$$\phi = 90^\circ - h(\text{高度}) + \delta(\text{赤緯})$$

経度:(時角 $T = 0$ より)

$$\lambda = \alpha(\text{赤経}) - GST(G \text{ 恒星時})$$

晴天の正午、日出没前後または満月に近い夜間のみ可能。

高度差法による現在位置の補正 (位置の線)

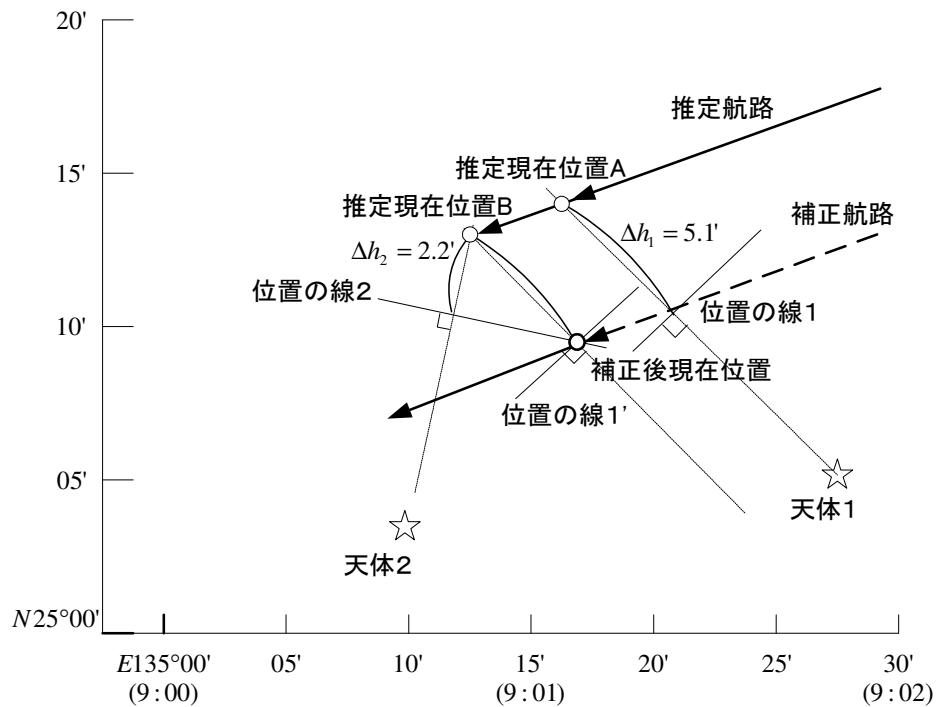


原理：位置の推定誤差：高度に反映される

手順：

- (1) 緯度 ϕ 、経度 λ を推定。
- (2) G 恒星時 GST 、赤緯 δ 、赤経 α 、時角 T を求める。
- (3) 方位角 A 、高度 h を推定。
- (4) 天体の方位角 A' 、高度 h' を観測。
- (5) 高度差 $\Delta h = h' - h$ より、
 $\Delta h > 0$ なら天体方向へ、
 $\Delta h < 0$ なら逆方向へシフト、
(角度 1 分 = 1.852 km)
—> 位置の線を引く。
- (6) 二つまたは三つの天体で観測
位置の線の交点または
三角形内が現在位置。

高度差法による現在位置の補正 (複数の天体を同時に観測できない場合)



2回に分けて観測する。
(恒星時も異なる)

初回観測位置 (推定位置): A

2回目観測位置 (〃): B
Aの位置の線を \overline{AB} だけ
平行移動。

大航海時代

大航海時代 (古くは「地理上の発見」時代):

15世紀半ば ~ 17世紀半ば

ヨーロッパ人がインド、アジア、アフリカ、アメリカ大陸へ進出、植民地化

背景：

ルネッサンスの3大発明 (火薬、羅針盤、活版印刷)

ギリシャ・ローマの遺産の復活

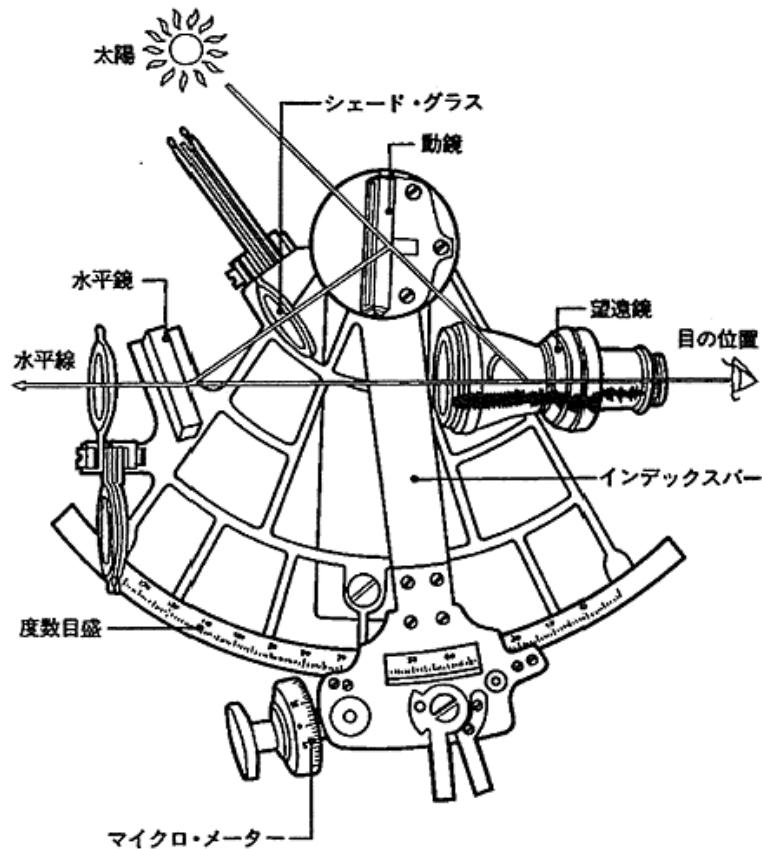
中世ヨーロッパの技術

羅針盤 磁気コンパス



1世紀頃、中国で発明。
魚の形をした木片 + 磁石、
水に浮かべた。
頭が南を向く → 「指南魚」
14世紀頃、イスラム商人により
ヨーロッパへ伝えられる。

八分儀 (のち六分儀)



天体の高度 (水平線との角度差) を精度よく測定。

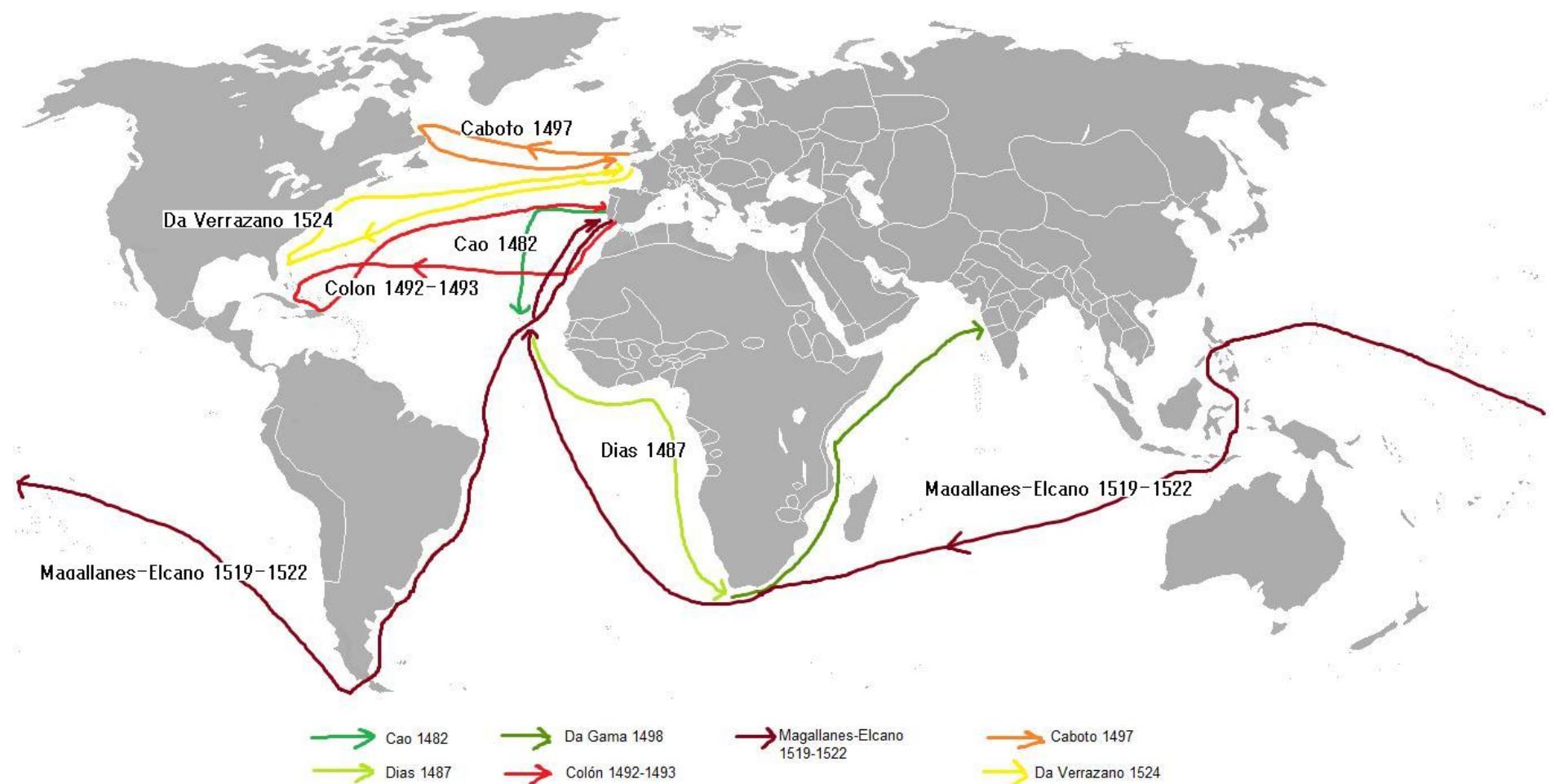
八分儀は動鏡が $360/8 = 45^\circ$ まで回り $0 \sim 90^\circ$ 測定可能。のち六分儀となる。

世界像 プトレマイオス図



緯度 -16 ~ 64°
経度 0 ~ 180°
インド洋：内海
ペルシャ湾：大
カスピ海：大
セイロン：大
インド：小

当時発見された主な航路



ポルトガル バルトロメウ・ディアスの航路

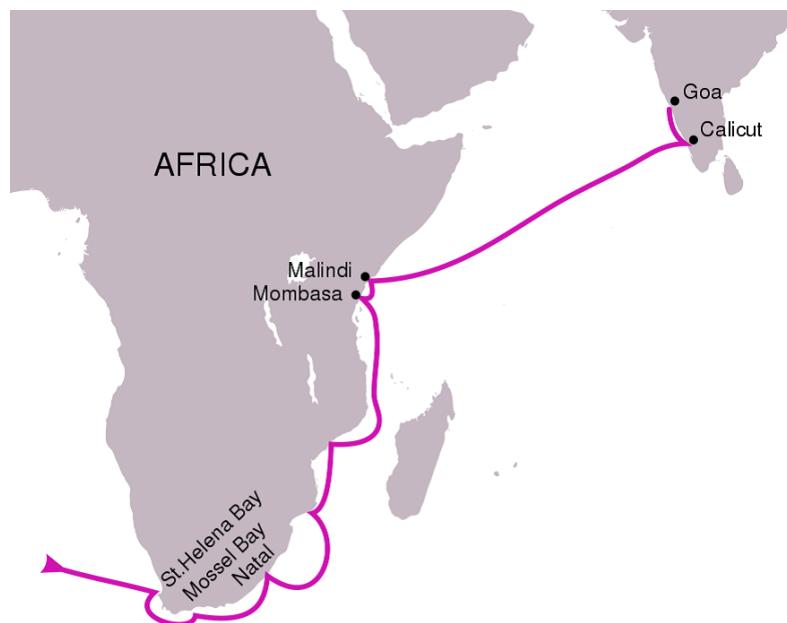


ポルトガルのエンリケ王子が航海学校。

ディオゴ・カン (Diogo Caō) は ,1482-84 年 , アフリカの赤道以南を探検。コンゴ川流域、現在のアンゴラに達す。1484-1486 年、ナミビアのケープ・クロス付近 (南緯 20 度付近) に達した。

バルトロメウ・ディアスは ,1487-88 年 , アジア航路のためアフリカ西岸を航海。漂流しつつアフリカ南端を発見。当初は「嵐の岬」、のち「喜望峰」

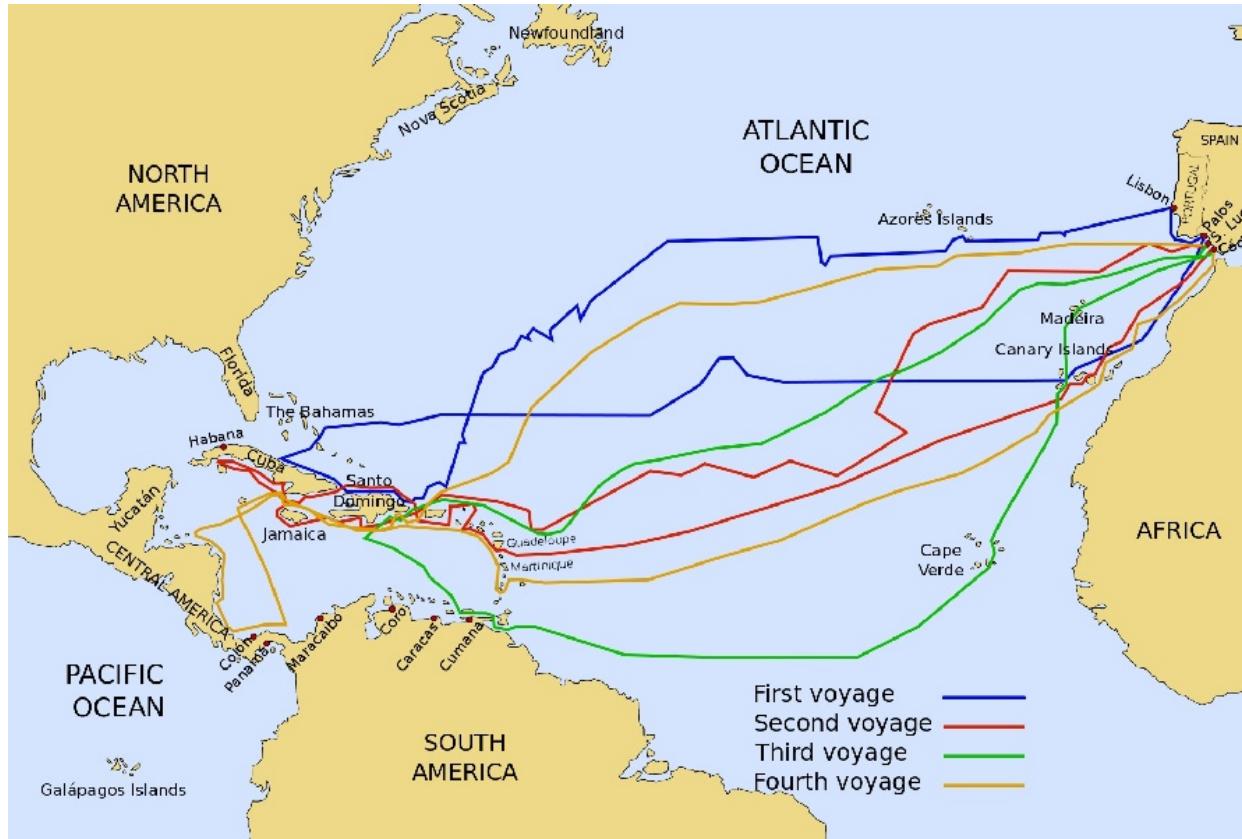
ヴァスコ・ダ・ガマの航路 インド航路の発見



1497/7/8 170名 4隻で里斯ボン出帆
11/22 喜望峰を通過
1498/3/2 マリンディからインド洋へ
5/28 カリクト王国へ到着上陸。
8/29 インド西岸を北上し帰路へ
1499/1/2 アフリカ東岸マリンディ着
3/20 喜望峰を通過
途中、ヴァスコ兄が病気・死去
7/10 1隻が里斯ボンへ帰着
9月頃 ヴァスコが里斯ボンへ帰着
帰還者は 55名 2隻のみ。

ヴァスコはこの後 2 度インドへ航海。3 度目の途中コ钦 (インド南部) で病死。

クリストファー・コロンブスの航路 アメリカ大陸発見



1492 年、スペインの支援で南西岸パロスから 3 隻 90 名で出航。
カナリア諸島から西進し、37 日後に バハマ諸島 に到着。
1502 年までに 4 回の航海。ジパングは見つからず、1506 年死去。

トルデシリヤス条約

15世紀後半、ポルトガル・スペインは海洋進出先で頻繁に抗争。

1481年の教皇回勅：カナリア諸島以南の新領土はすべてポルトガル領

コロンブスの「インド」発見後の1493年、スペイン出身教皇が教皇子午線定める。

1494年、両国王が直接交渉し、トルデシリヤス条約を結ぶ。教皇が承認。

境界線を西へ変更(西経46度37分)^{*1}。

この子午線の西側をスペイン領、東側をポルトガル領。

その後のアジア地域へは、どう適用する？

両国以外のフランス、イギリス、オランダなどの締め出し？

トルデシリヤス条約は1506年に廃止。

^{*1} カーボベルデ島(アフリカ西方)の西370レグア(約2193km)を通過する子午線。

ブラジルの発見

1500 年 3 月、ポルトガル王の命によりペドロ A. カブラルがインドへ出航。

13 隻の艦隊。

アフリカ南下中に西寄りのコースをとり、4 月にブラジルに漂着して発見。

その後東進し、喜望峰近くで嵐に遭遇して 4 隻が難破 (ディアス死去)。

9 月にカレクト国に到達するも交渉決裂で、街を砲撃して退去。

コ钦、カナノール経由でインドを去り、1501 年 7 月ポルトガルに帰帆。

西回り世界一周 フェルディナンド・マゼラン、ポルトガル人

当初はポルトガルの遠征に参加。のちスペインへ移る。

1519/8/10 艦隊を率いてセビリアを出発。5隻に270名の乗員、大砲71門ほか
カナリア諸島から南西に進行

12/13 現在のリオ・デ・ジャネイロ付近へ到着。

南アメリカ東岸を南下。難破する船、脱走船あり、

1520/10/21 マゼラン海峡を発見し、11/28 太平洋へ出る。
チリ沿岸をしばらく北上し、やがて北西に進路

1521/3/6 にマリアナ諸島にたどり着く。

途中、島なく食料を補給できず 3カ月余り航行。餓死寸前の状態で到着。

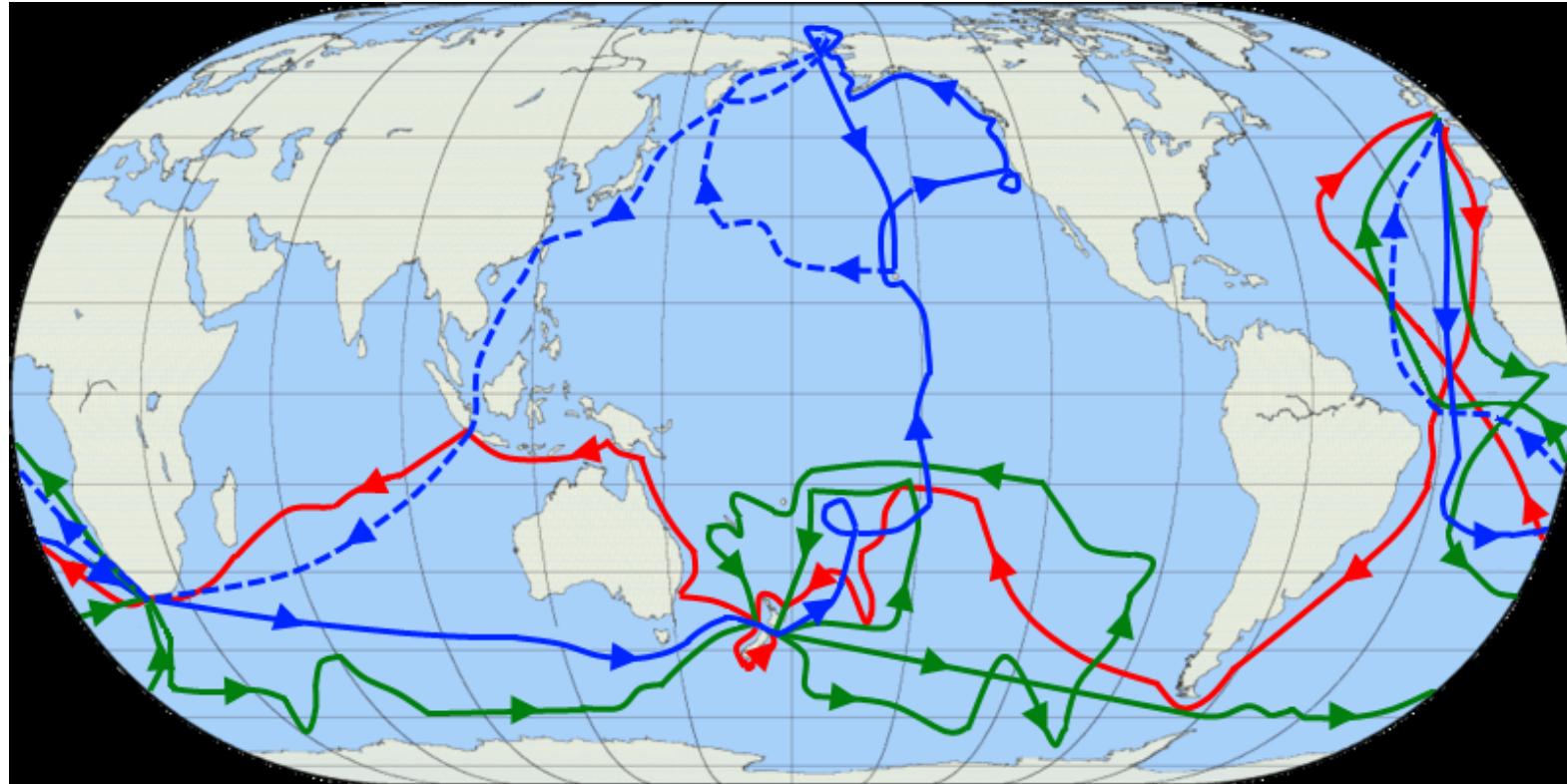
3/9 マリアナ諸島を出発。3/16 フィリピン諸島を発見。

フィリピンでの布教に絡んで、4/27 住民との戦で殺される。

11/8 残った艦隊 2隻で香料諸島（インドネシア・モルッカ諸島）にたどり着く。

1522/9/6 ビクトリア号 1隻がスペインに帰国。帰還者 18名のみ。

キャプテン・クック ジェームズ・クック 英国海軍の水兵，海軍士官



1768-71 年 (赤), 1772-75 年 (緑), 1776-80 年 (青) の三回にわたり、
太平洋、オセアニアを探索。伝説の南方大陸テラ・アウストラリスの探索。
ニュージーランド海岸線、オーストラリア東岸等のほぼ完全な地図を作製。
それまでの冒険航海に代わり、科学的な調査航海を行なう。H-4 の実証。

経度測定と航海

航海の成否 → 海上での船の位置緯度と経度を求めることが重要。

緯度 → 北極星や太陽の高度から可能

経度 (グリニッジ標準時と地方時の差) → 標準時が得られない。

航海中の経度は、船の進行方向、速度をもとに進んだ距離から推定。

速度 → 船首からロープをつけた木片を流し、ロープの伸びる時間から計測。

コロンブスは 1492 年、緯線に沿って西へ移動

ヴァスコ・ダ・ガマは、既知の喜望峰の緯度まで南下後東進。

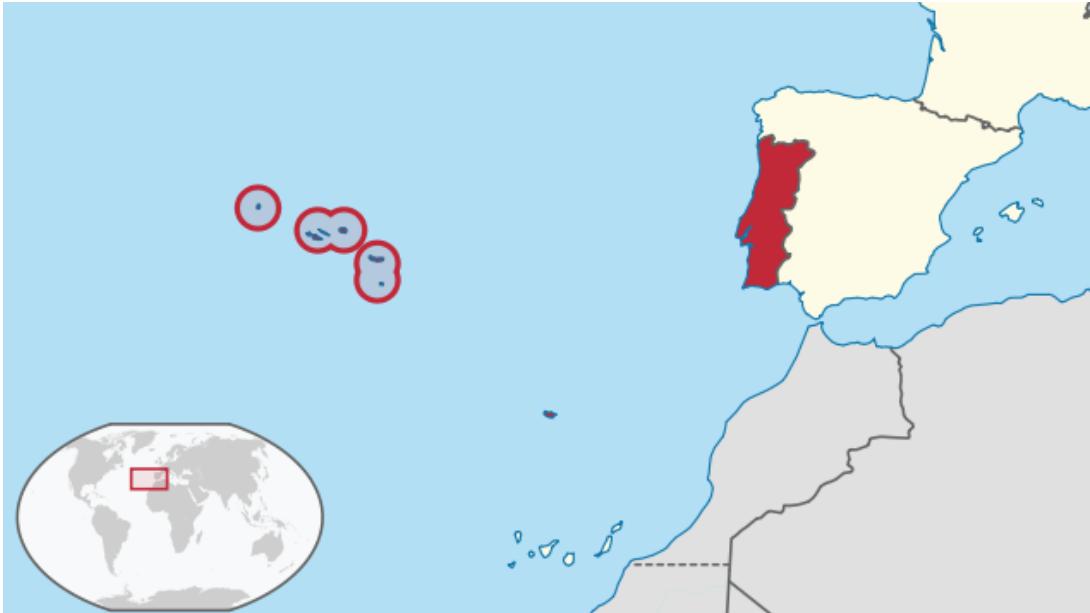
アメリカまたはインドを結ぶ大洋航路

緯度だけを手がかりにして安全確実に航行できる航路は限定。

捕鯨船、商船、戦艦、海賊船が入り乱れて、互いを食い物にし合っていた。

以下に、大きな海難事故や略奪の例。

マドレ・デ・デウス号の略奪 1592 年



アゾレス諸島
ポルトガル西約 1000km
現ポルトガル領

イギリスの小艦隊 6 隻がアゾレス諸島 (図の丸印) 沖で待ち伏せ

→ カリブ海から帰還のスペイン商船を狙う

そこへ、インドから帰ってきたポルトガルの巨大船マドレ・デ・デウス号が通過。

イギリス艦隊がマ号を襲撃。ポルトガルは積荷を失う。

金貨、銀貨、真珠、ダイヤモンド、琥珀、じゃこう、タペストリー、等々。

換算して 50 万ポンド。当時のイギリス国庫の約半分に相当。

ショベル艦隊の難破 (1707 年) 大英帝国史上最大の海難事故



シリー諸島

イギリス南西端の岬の
西方 30 km
海上に無数の岩礁散在

スペイン王位継承戦争でイギリス・フランス両国が交戦中
大英帝国海軍のクラウジリー・ショベル提督率いる 5 隻の艦隊
ジブラルタルでフランス艦隊を撃破しイギリスへ帰還、ビスケー海を北上
霧の夜、シリー諸島で次々座礁、4 隻沈没。乗組員 1550 名死亡
ショベル提督ほか 1 名が陸に打ち上げられたが、金品を物色中の女に殺害 (?)

センチュリオン号の迷走 (1741 年)



ファン・フェルナンデス
諸島

チリの沖合 670 km
ロビンソンクルーソー島
ほか

イギリスのジョージ・アンソン提督率いるセンチュリオン号ほか 5 隻
大西洋から南太平洋へ航行中、南米の南端 (ドレーク海峡) で強い嵐に遭遇
嵐は 58 日間続き、乗組員は壊血病を発症、毎日 6 ~ 8 人が死去
嵐がおさまって北進、休息地ファン・フェルナンデス諸島をめざす
目的の南緯 35 度で島が見つからず、東西の判断ができず、2 週間右往左往
さらに 80 名が死亡、出航時 1500 人の乗組員は半分以下となつた。

出発年	人物 (支援国)	人数	日数	主な内容
1482 夏	ディオゴ・ カン (ポルトガル)		20 か月	アフリカ西岸探検 コンゴ川河口と三角州発見 コンゴ王国との通商
1487	バルトロメウ・ ディアス (ポルトガル)	3 隻	16 か月 17 日	アフリカ西岸探検 喜望峰発見
1492 往	クリストファー・ コロンブス	3 隻 90 名	37 日	アメリカ大陸発見
1492 復	(スペイン)	3 隻 55 名		
1497 往	ヴァスコ・ ダ・ガマ №.1 (ポルトガル)	4 隻 147 名	約 11 か月	リスボン - カルカッタ
1498 復		2 隻 55 名	約 12 か月	カルカッタ - リスボン
1500 往	ペドロ・カブラル	13 隻	6 か月余	リスボン - カルカッタ
1501 復	(ポルトガル)	6,7 隻	約 10 か月	カルカッタ - リスボン
1502 往	ヴァスコ・ ダ・ガマ №.2	20 隻	8 か月余	リスボン - カルカッタ
1503 復		? 隻	8 か月	カルカッタ - リスボン
1524	ヴァスコ・ ダ・ガマ №.3	14 隻 3000 人	6 か月	リスボン - ゴア, コ钦, カルカッタ (コ钦で死去)
		? 隻		
1519	フェルディナンド・ マゼラン (スペイン)	5 隻 270 人	6 か月	セビリア - 南アメリカ東岸 - マゼラン海峡 - 太平洋
- 1522		1 隻 18 人		- マリアナ諸島 - フィリピン (死去) - 香料諸島 - スペイン
1768	ジェームズ・ クック №.1 (イギリス)	1 隻 エンデバー	約 3 年	英国 - タヒチ - ニュージーランド - オーストラリア - ジャカルタ - 英国
- 1771				
1772	ジェームズ・ クック №.2 (イギリス)	2 隻	約 3 年	英国 - アフリカ南端 - 南極圏 - ニュージーランド - 南太平洋 - 英国
- 1775				
1776	ジェームズ・ クック №.3 (イギリス)	2 隻	約 3 年	英国 - タヒチ - ハワイ諸島 - 北米西岸 - ベーリング海峡 - ハワイ (死去) - 英国
- 1780				

2 経度の歴史

経度測定法に対する賞金

1587 年 スペインのフェリペ 2 世、正確な経度測定者に賞金を出すと宣言。

1598 年、スペインのフェリペ 3 世、経度測定に終身年金を出すと発表

ガリレオ・ガリレイが木星の観測から経度を知る方法を送付 (却下)

1600 年頃 オランダ政府も同様の態度を示した。

1715 年、フランスの科学アカデミー (ルイ 14 世設立) が航海法改良に賞を設定

経度測定法に対する懸賞は、特にイギリスにおいて大々的に行われた。

イギリスの経度法 (1714 年)

海洋進出が増すにつれ、海難事故が深刻化 (特にショベル提督の事件)。

イギリス議会内委員会 (アイザック・ニュートン、エドモンド・ハレーほか) が種々の方法を比較検討。実用的方法はまだないと結論し、懸賞金を勧告。

1714 年 イギリス議会が経度法を成立さす。

(1) イギリス - 西インド諸島間の航海で経度誤差が、

角度 30 分 (距離換算 約 55km、時間換算 2 分) 以内なら 2 万ポンド^{*2}

角度 40 分 (74km) 以内なら 1 万 5 千ポンド、

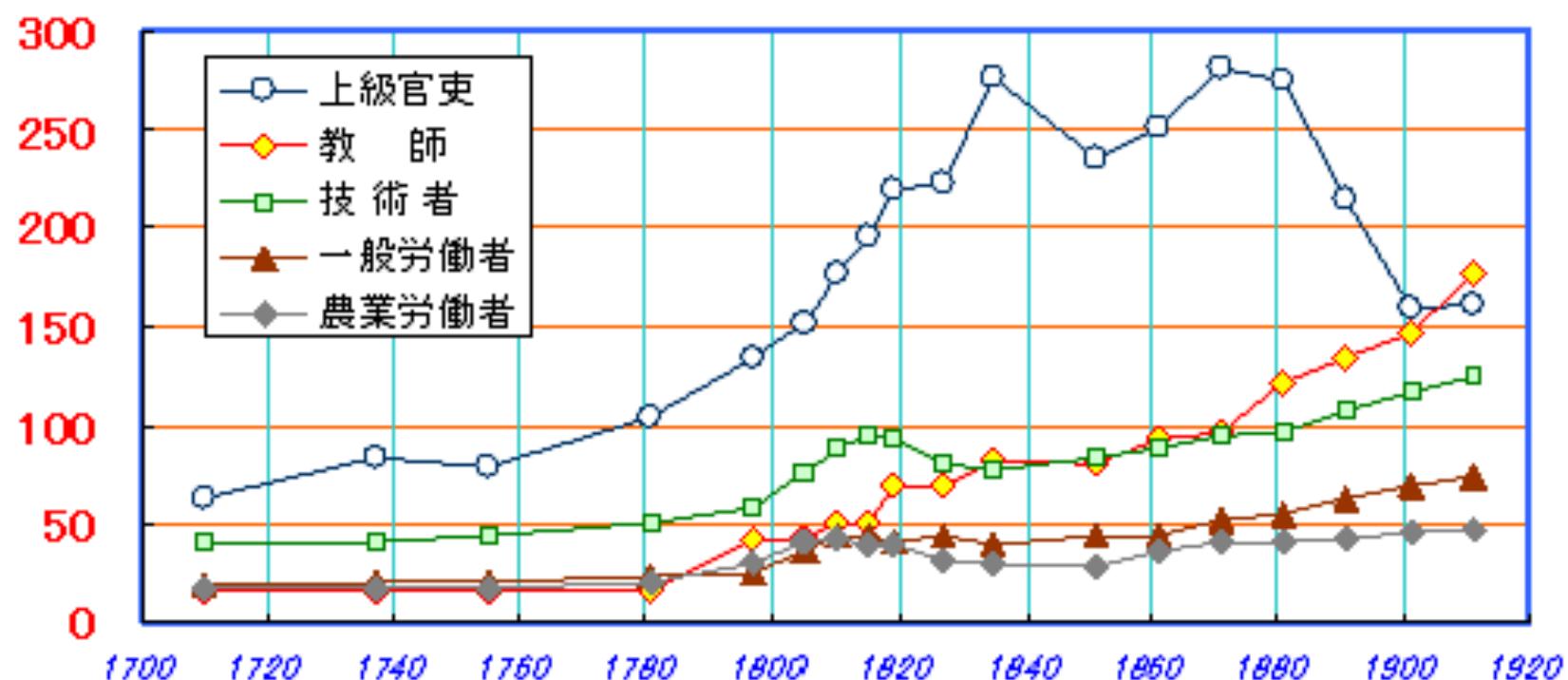
角度 1 度 (111km) 以内なら 1 万ポンド、の懸賞金。

(2) 有望者へ資金援助。

(3) 審査機関として経度評議員会を設置。

*2 この金額は国王の身代金相当の金額とされた。

イギリス人の年収(ポンド)



経度測定法の諸提案

(1) 時計を使用する方法

1530 年 フランドル (オランダ南部) のゲンマ・フリシウスが、

1559 年 英国のウィリアム・カニンガムが、この方法を提案。共に実用にならず。

1656 年、クリスティアーン・ホイヘンスは振り子時計を発明。航海では使えず。

1675 年 ホイヘンスはひげぜんまい式時計を考案したが、経度測定には使えず。

1714 年、ジェレミー・サッカーが、「クロノメーター」を製作、精度が少し足りず。

1730 以降、時計職人ジョン・ハリソンが正確かつ安定した時計を製作、

紆余曲折の後、結果的にこの方法で経度法の条件を満たした (後述)。

(2) 日食・月食を利用する方法

日食や月食の日時は事前に予測可能。

予測時刻 (標準時) と航海中の観測時刻 (地方時) の差から経度を求める。

日食、月食の頻度が少ない。月食開始の曖昧さ、日食の地域差あり。

(3) 木星の衛星の食を利用する方法

ガリレオ・ガリレイが、最初に提案。

1610 年 ガリレオが木星の衛星 (4 個のガリレオ衛星) を発見し、詳細に観測。

衛星イオは年間約 1,000 回の食発生等、食の頻度多し。

スペインの懸賞にガリレオが応募：観測に手間を要すとの理由で受賞せず。

この方法は 1650 年代ごろから、仏天文台等で地上での経度測定用に実用化。

17 世紀終り頃のルイ 14 世の言、「敵ではなく天文学者に多くの領土を奪われた」

1676 年、デンマークのローエ・レーメルが光の速度を求めた。

地球と木星間の距離により食の開始時刻がずれることから、

光の速度 214,300 km/s(真値は 299,792.458 km/s) と算出。

(4) 月距法

天球上の月自身の運動・位置を観測し経度を求める方法。

1514年 ドイツの天文学者ヨハネス・ヴェルナーが提唱。

月の移動速度(角速度) = $360^\circ / (27.32 \times 24h) = 0.5490^\circ/h$ となり、

→ 精度よく月の位置を測れば、時刻の特定ができる。

1500年代当時は、恒星の位置や月の動きについて詳細データ、測定技術が不備。

月の運行は極めて複雑。

1750年頃より、ある程度改良されることになる(後述)。

(5) 地球の偏角を利用する方法

偏角 (偏差、磁気偏角): 方位磁針が示す北と地軸の北極点の向きとの差。

地球上の場所により偏角が異なる → 経度測定に使用できないか?

1514 年 ジョアン・デ・リスボアの手記

アゾレス諸島のサンタマリア島で偏角ゼロ、東西に偏角は増加。

90 度離れた地点で最大偏角 45 度。 → 経度測定可能

1535 年 ルイ・ファレイロも同様に主張

1538-41 年 ポルトガルのジョン・デ・カストロが 3 回の航海で 127 回偏角測定

偏角と経度との関係を見出せず。偏角は経度差に比例しない。

1574 年 ウィリアム・ボーンは、**等偏角線は複雑な曲線**と主張。

1701 年 エドモンド・ハレーが、**大西洋の等偏角線図** (ハレー線) を示す。

北緯 52 ° ~ 南緯 52 ° の範囲。過去 2 年にわたる調査航海。

等偏角線は複雑な曲線。時間的にも磁気に強弱あり。経度測定は不可。

(6) その他の方法 (省略)

その後の月距法の進展

3 要件：(1) 位置を示す星表、(2) 観測機器、(3) 月の運動理論

(1) 星表

1725 年 「ブリタニカ星表」 グリニッジ初代天文台長フラムスティードほか

(2) 観測機器

1731 年にジョン・ハドリーが八分儀を発明。

(3) 月の運動理論

1752 年 ドイツのトビアス・マイヤーが月と太陽の運動に関する表(月行表)発表。

1755 年 月行表を経度評議員会へ提出。

1758 年 天文台長ブラッドリーが、 0.5° 以内の精度で経度測定可能と報告。

1763 年 ネヴィル・マスケリンがマイヤーの理論による『英國航海者ガイド』出版。

船員による経度測定は誤差は 1 度以内。計算に 4 時間を要す。

1765 年 マスケリンがグリニッジ天文台長に就任。『航海暦』を毎年出版。

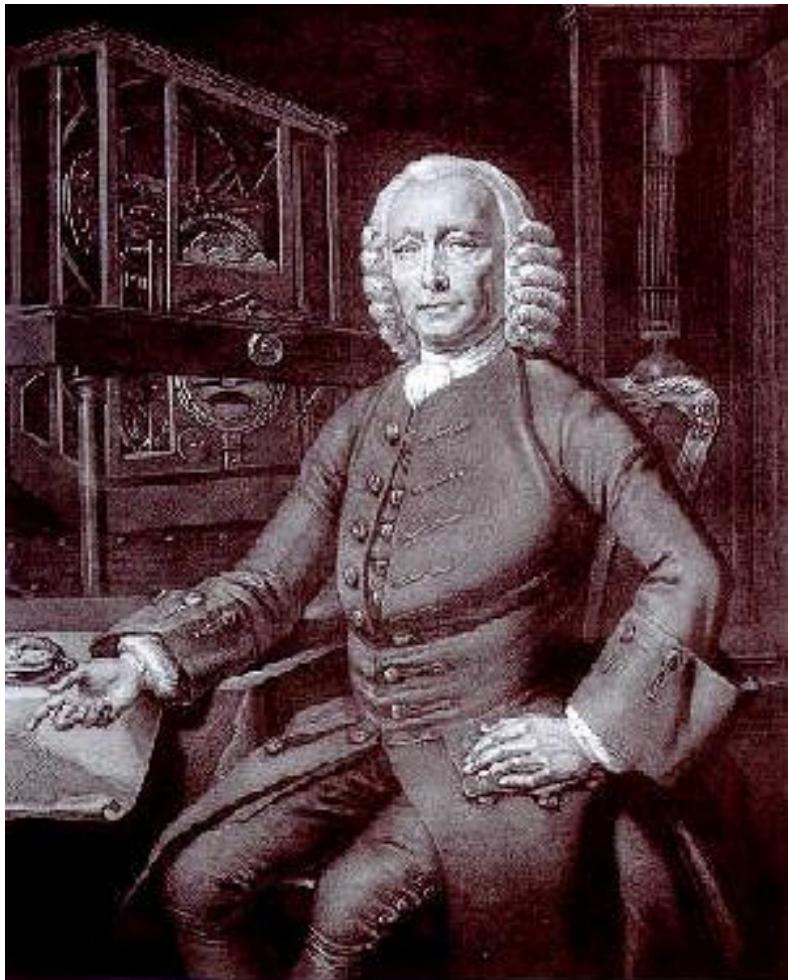
3 時間ごとの月と太陽の位置記載。算出時間 30 分に短縮。

月の動きの複雑さ

- (1) 月は天球上 (白道) を約 27.3 日 (太陽に対して 29.5 日) 周期で一周 (地球周りの公転)。
- (2) 白道は、太陽の軌道 (黄道) の近くを南北に約 5.1 度の幅で少しづつ周期的にずれる。ずれる周期は 18.60 年。
これは、地球の公転面と月の公転面が約 5.1 度の傾きをなしているのが原因であり、月が地球の交点面を南から北へ横切る位置 (昇交点；白道が黄道を下から上へ横切る点) が 18.60 年周期で公転方向へ移動している。
- (3) 月の橿円軌道の近地点 (および遠地点) の位置が、周期 8.85 年で公転方向へ移動する。
- (4) 上記の地球と月の位置関係のもとで、太陽の引力が影響する (詳細は略)。

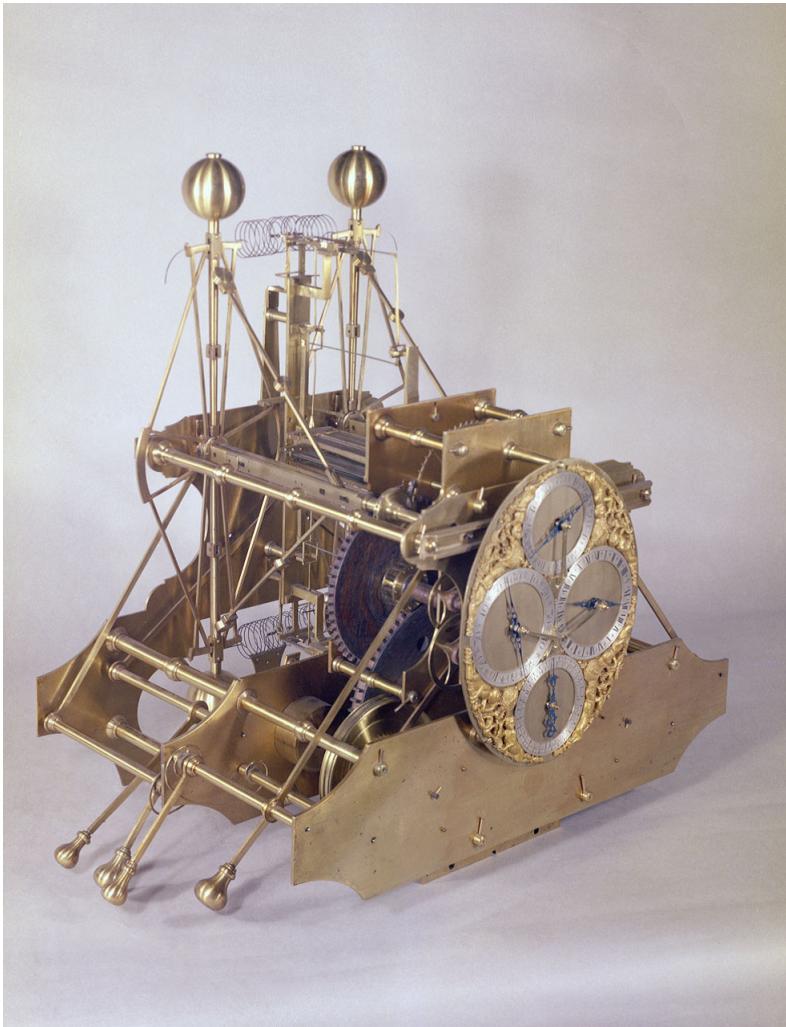
3 クロノメーター

ジョン・ハリソン (1693-1776)



イングランドヨークシャー州ウェーク
フィールド近郊のフォールビー生まれ。
少年期より時計に興味を持ち、成人する
と木工・大工の父の仕事を手伝いながら、
独学で物理や機械工学を学んだ。
1713年 大工仕事の合間に自力で時計の
製作を行ない、その時計の性能の良さが
近所の話題となり、時計の注文や修理の
依頼が相次ぐようになり、時計職人とし
て生計を立てるようになった。
1722年頃にはグラスホッパー脱進機を
発明。英国経度法を満たすクロノメー
ターを製作。

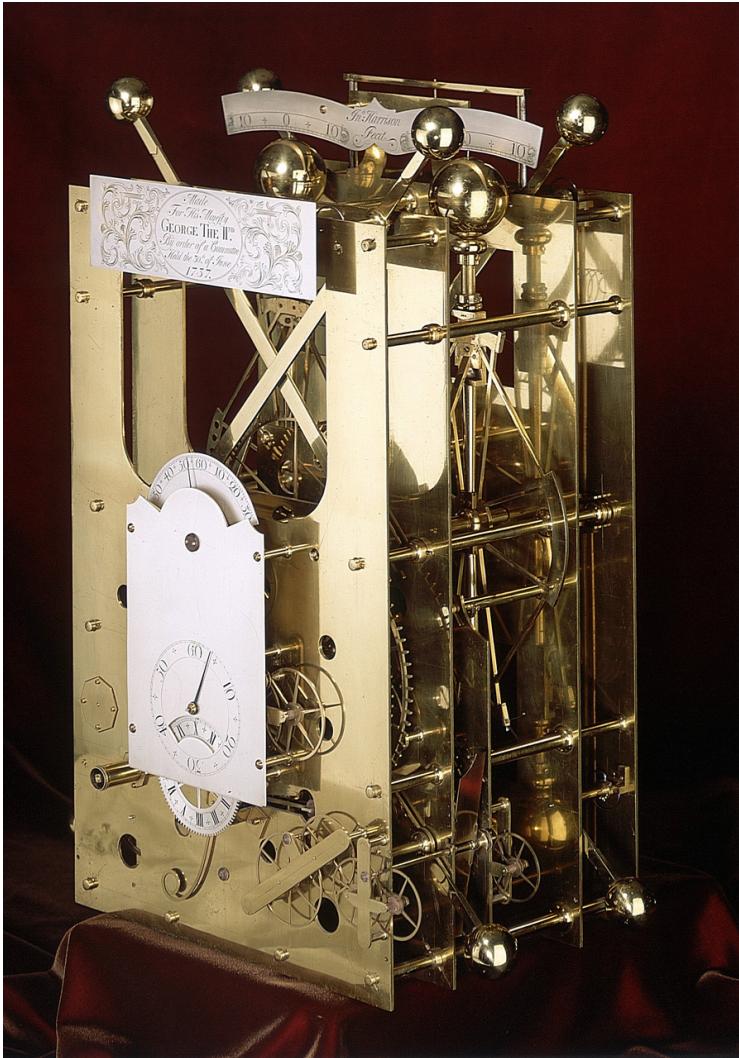
H-1 (1735 年)



1730 年 ロンドンでハレーに面会。
ジョージ・グラハムの資金援助を受ける。
1735 年 **H-1** を完成。重さ 34kg。
真ちゅう製で木製の歯車使用。
ダンベル型の 2 個のテンプ。
4 個のコイル状の大きなばね。
1736 年 **ポーツマス-里斯ボン (ポルトガル)** 往復航海で高精度を実証。

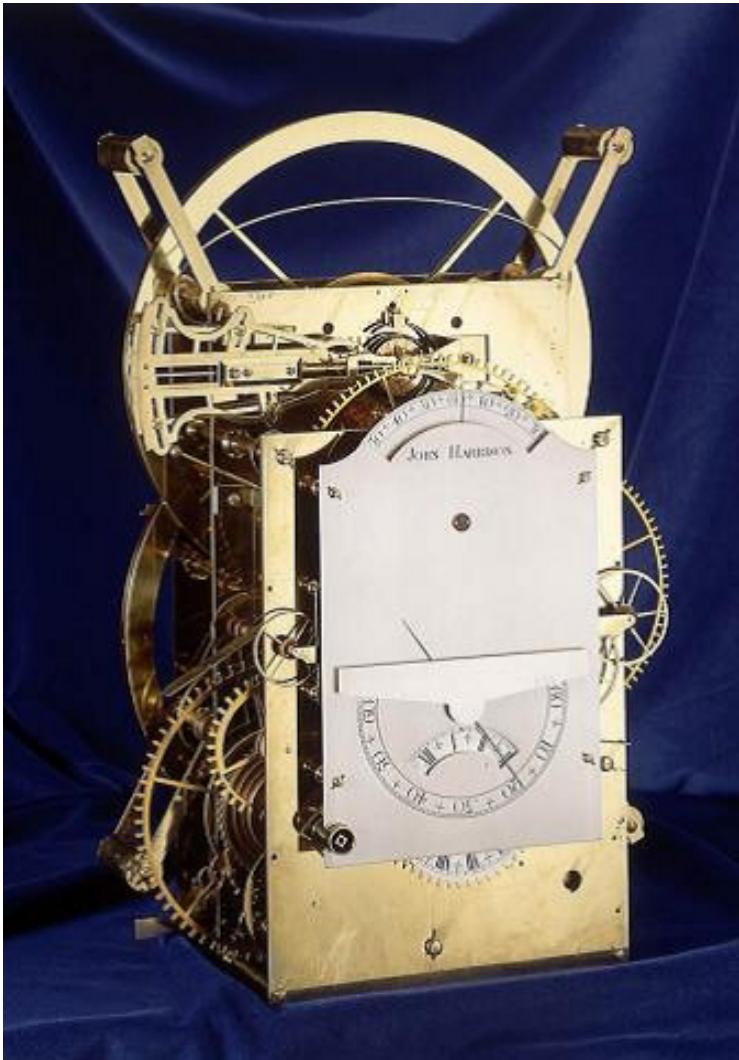
経度評議員会の評価良好なるも、
ハリソンが満足せず、改良を申し出る。
改良資金援助として 500 ポンドを受領。

H-2 (1741 年)



3 年の試作、2 年の陸上試験の後、
1741 年に H-2 が完成。
真ちゅう製。重さ 39 kg。
1741-42 年の王立協会でテストし好評。
加熱・冷却実験
何時間にもわたる強い揺動実験。
ハリソンは満足せず、改良を懇願。
オーストリア王位継承戦争 (1740-48) 中。
再び開発資金として 500 ポンド。

H-3 (1757 年)



1757 年に H-3 が完成。重さ 27 kg。
小型化：高さ 60cm 幅 30cm。
バイメタル構造のテンプと
ケージ付ローラー・ベアリングを採用。

この間、ロンドンの時計師らと交流し、
種々の改良を行なった模様。

並行して watch 型 H-4 を製作。

H-4 (1759 年)



1759 年には H-4 が完成。watch 形
直径 13 センチ弱。重さ 1.4 kg。
アンクルにダイヤモンド、潤滑を要す。
1761-62 年 試験航海
ポーツマス-ジャマイカ間
息子ウィリアムが乗船。
往路 81 日間で 5.1 秒 の誤差
復路 (荒天)59 日間で 1 分 49 秒
経度法の条件を達成。
経度評議員会は再度の試験航海を要求
ネヴィル・マスケリンらが
天文学者が月距法にこだわり。
議会で議論、庶民出身者を嫌う意見。

H-4 (つづき)

1764 年 2 度目の試験航海 月距法との比較を実施

ポートマス-バルバドス間

時間誤差 39 秒 (経度換算 8.5 海里 (15.7 km))。

(経度法の規定誤差の $1/3$ 以下)。

マスケリンの月距法では経度誤差 30 海里で、かなりの作業と計算を要した。

経度評議員会は H-4 の性能を認めたが、条件を付けた。

- (1) これまでのクロノメーターを全て提出
- (2) H-4 の機構を公開する
- (3) 複製を 2 個作る。

ハリソンはやむなく受け入れて、半額 の £10000 を受け取る。

1765 年にマスケリンが **グリニッジ天文台長** に就任

マスケリンは H-4 を室内テストに付し、経度を測定するのに不十分と結論。

ハリソンはそのテストを批判。

H-5 (1770 年)



1770 年に H-4 の複製品 H-5 を完成。

更にもう一つの複製の必要あり。

1772 年 老年 79 歳のハリソンの現況を
息子ウィリアムが国王に直訴。

ジョージ 3 世の下で H-5 の試験を実施。

1772 年 5 ~ 7 月の 10 週間の試験で、
1 日の誤差 0.3 秒以内を確認。

ハリソンが受け取った補助金等（「懸賞金」は誰にも支払われず）

H-1, H-2, H-3 製作補助 £4,315

1765 年に H4 の臨時支払い £10,000

1773 年に 議会より £8,750

計 £23,065

K-1 (H-4 の複製)



1770 年 ラーカム・ケンドールが、
H-4 の複製 K-1 を作る。

1772-75 年 ジェームズ・クックの
2 回目の航海に携行。海図作成。
高い精度を確認。K-1 を称賛。
「われわれのもっとも信頼できる友人」

その後のクロノメーター

H-4 や K-1 を使った航海 → クロノメーターが有効 (しかし、高価で数が少ない)。

ケンドール K-1 の後、より安価な K-2(1772 年) , K-3(1774 年) を製作。

性能は K-1 に劣っていた (「バウンティ号の反乱」事件にも遭遇)。

トマス・マッジ が 1774 年に 1 台、1777 年に 2 台のクロノメーターを製作。

マッジ父子と天文台長マスケリンの間で、性能評価をめぐる争いが生じる。

ジョン・アーノルド は 1779 年にクロノメーター「ナンバー 36」を作った。

特許を取得し、1785 年に工場を開設し大量生産への道を開いた。

トマス・アーンショウ も高性能のクロノメーターを多く製作した。

アーノルドと競合し、脱進機の特許をめぐって抗争した。

クロノメーター製作費 : 1770 年 (K-1) 頃 £500 → 1780 年代 £65 ~ 80。

19 世紀に入って急速に普及、1815 年 約 5000 台のクロノメーター使用。

一方、**月距法**は、手間と複雑さのため次第に使われなくなった。

脱進機

Escapement.htm