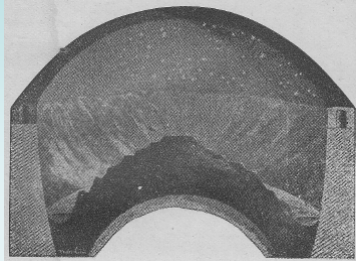


第2回 地球の形と大きさ

地球物理学教室
福田洋一

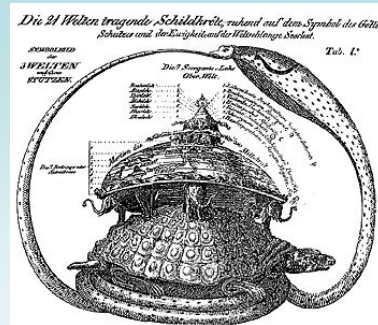
古代の宇宙観



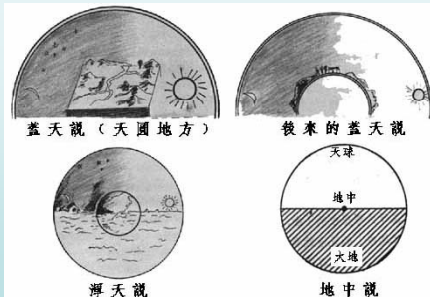
カルディアの宇宙観



エジプトの宇宙観



インドの宇宙観



蓋天説（天圓地方）

後來的蓋天説

渾天説

地中説

中国の宇宙観

球形の地球

- ・古代ギリシャのピタゴラス(BC582-493?)とその学派
 - 数学こそが自然を支配するものであり、数学的に最も完全な形である球が地球の形にふさわしい
 - 海上から陸を見ると、ある程度の高さより上だけが見え、海岸線付近は見えない
- ・アリストテレス(BC384-322)
 - 月食の影が丸い
 - 南北に移動すると見える星が変化する
- ・アリストタルコス(BC310-230?)
 - 太陽中心説(地動説)
 - 月食から月の直径を地球の1/3と見積もる

エラステネスによる地球の大きさの測定

エラステネス(BC275-195)

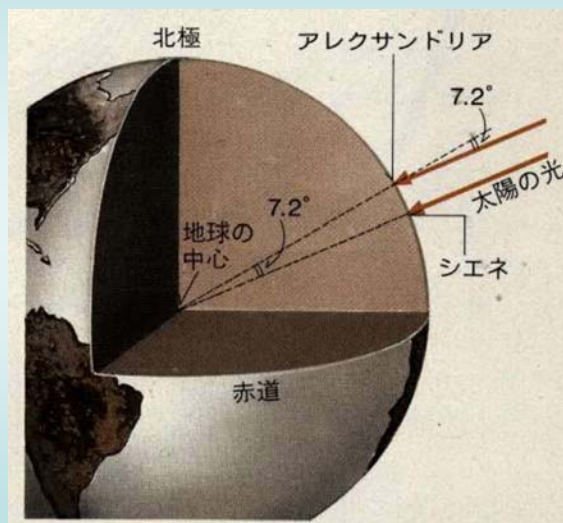
- ・アレクサンドリアの図書館長
- ・アレクサンドリアの南のシエネ(現在のアスワン)に、夏至の正午にだけ水面まで太陽の光が届く深井戸があることを知る
- ・夏至の正午のアレクサンドリアでの太陽の高度を 7.2° と求める
- ・アレクサンドリアとシエネの距離を隊商が移動するのに要する日数から5000スタジア(約920km)と求めた

地球一周の長さを

$$920\text{km} \div \frac{7.2}{360} = 46000\text{km}$$

と見積もった(誤差15%)

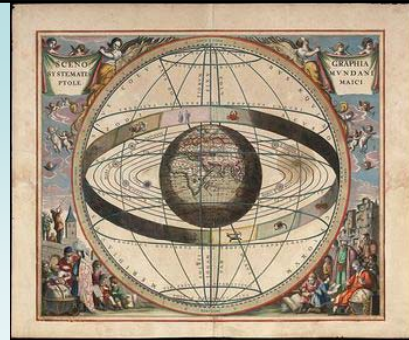
⇒測地学の父



(東京図書高校教科書「地学IB」より).

エラトステネスから ニュートンまで

- ・ プトレマイオス(83-168)
アルマゲスト→
天動説を体系化



大航海時代:

- ・ コロンブス-新大陸(1492)
- ・ ヴァスコ・ダ・ガマ-インド航路(1498)
- ・ マゼラン- 世界一周(1519-1522)
- ・ コペルニクス(1473-1543): 天球の回転について(1543)
- ・ ガリレオ(1564-1642): 地動説裁判(1616)
- ・ ケプラー(1571-1630): ケプラーの法則(1619)

楕円体の地球

・ニュートン(1642-1727)

- パリ天文台のリシェーがパリで調整した時計を赤道付近のカイエヌに携行したところ1日に2分28秒遅れる
- 自転による遠心力では説明できず赤道の重力が小さい(赤道半径が極半径に比べ長い)と結論した

•Oblate(横長)かProlate(縦長)か?

- ニュートン:密度一定の地球が自転すると、扁平率 $f = (a - b) / a = 1/230$
- ホイヘンス:質量が中心に集中と仮定すると、扁平率 $f = 1/578$
- カッシーニ父子:測量結果を基に子午線弧長を求めたところ、低緯度の方が高緯度より長くなった

フランス王立科学学士院:スカンジナビア半島北部のラップランドと赤道直下のペルーで子午線弧長を測定。地球の形はoblateであることを示した

楕円

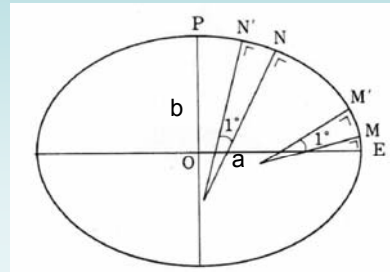
楕円: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$

子午線弧長

長軸半径 a

短軸半径 b

扁平率: $f = (a-b)/a$



惑星の扁平率

	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
f	0.0006	0.0002	0.0033528	0.00589	0.06487	0.09796	0.0229	0.0171
$1/f$	1666.67	5000.00	298.257	169.78	15.42	10.21	43.67	58.48

静水圧平衡地球の扁平率=1/299.627

大航海時代の位置測定

緯度: 六分儀による天文観測

経度法(イギリス:1714)

船舶の正確な経度を測定する方法を
発明した者に懸賞金を与える

ジョン・ハリソン(1759):

クロノメーターH4

直径5インチの懐中時計



六分儀



クロノメーター © Rémi Kaupp,

現在の 計測基礎技術

時間(周波数)の精密計測



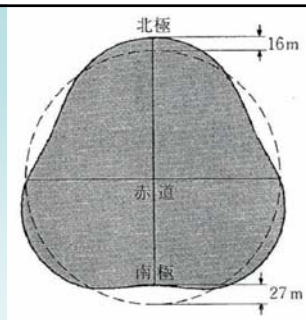
新日本標準時システム (<http://www2.nict.go.jp/>)

- 1m:「真空中を光が299,792,458分の1秒に進む長さ」
- 1秒:「セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間」(理科年表より)
- 原子時計の精度: 1秒について 10^{-13} 安定度: 光の伝搬距離として30 μ m

西洋梨型の地球

人工衛星の軌道6要素

昇交点黄経 Ω
軌道傾斜角 i
軌道長半径 a
軌道離心率 e
近地点引数 ω
元期の平均経度 ϵ



人工衛星は、地球が球対称であると仮定すると、ケプラーの法則にしたがって地球の重心を1つの焦点とする楕円軌道を描く。この軌道は軌道の6要素で記述できる。

1958年3月に打ち上げられたバンガード1号という人工衛星をNASAがミニトラックという干渉計で追跡していたところ、近地点が周期的に変動していることが発見された。このような変動は地球が赤道面に対して対称であれば起こらないことである。

当時スミニアン天文台に滞在していた古在由秀は、この軌道の変化をもとに地球の形、つまりジオイドの形は、北極が南極よりも40m強飛び出ていることを見いだした。

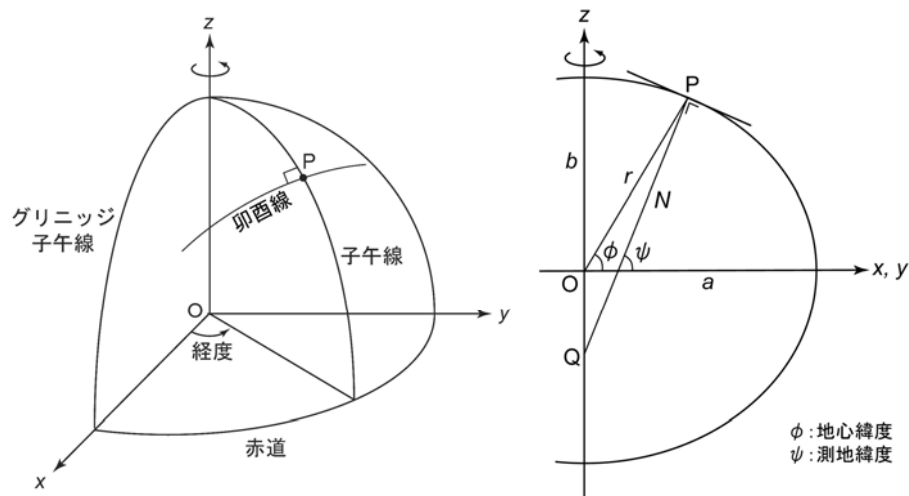
これが西洋梨型と言われる地球の形である。

何が地球の形か

- 球？
- 回転楕円体？
- ジオイド？
- 地表面？

なぜこのような形になるか
幾何学的な形と力学的な形

楕円体の緯度・経度

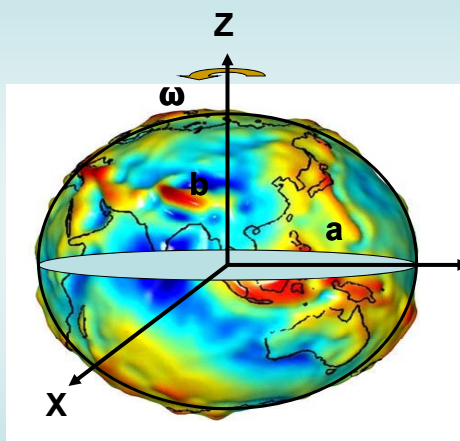


地球の形、位置(座標)を どのように表すか？

- 球対称の地球
- 回転楕円体(地球楕円体)
- 座標系
- 高さ

地球上での位置・変形を記載する
座標系(reference frame)

地球楕円体



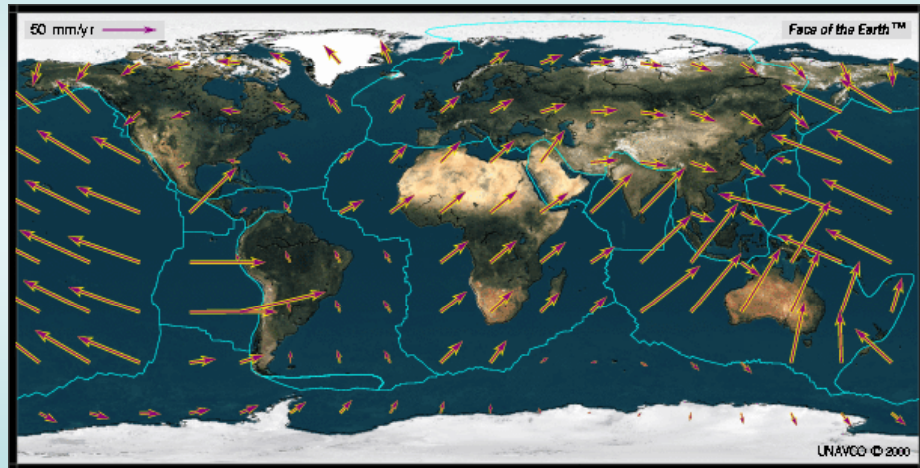
GRS80 ellipsoid

$a=6378137 \text{ m}$
 $b=6356752.314 \text{ m}$
 $f=(a-b)/a=1/298.257222101$
 $\omega=7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$

座標をどのように決めるか？

座標原点 → 重心
Z-軸 → 自転軸
X,Y軸

プレート運動



http://sps.unavco.org/crustal_motion/dxdt/images/nuvel1a_nnr.gif

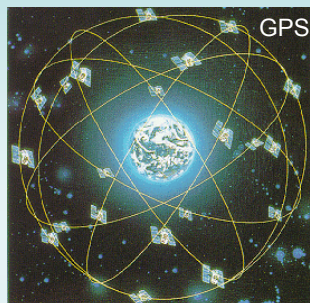
ITRF (from <http://itrf.ensg.ign.fr/>)

Definitions

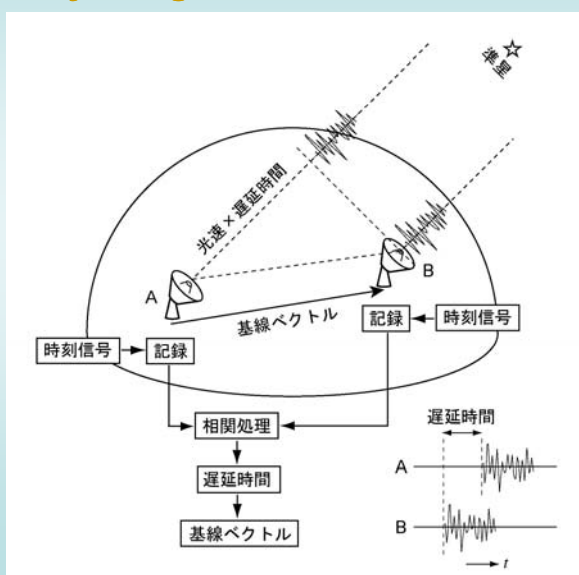
A Terrestrial Reference System (TRS) is a spatial reference system co-rotating with the Earth in its diurnal motion in space. In such a system, positions of points anchored on the Earth solid surface have coordinates which undergo only small variations with time, due to geophysical effects (tectonic or tidal deformations).

A Terrestrial Reference Frame (TRF) is a set of physical points with precisely determined coordinates in a specific coordinate system (cartesian, geographic, mapping...) attached to a Terrestrial Reference System. Such a TRF is said to be a realization of the TRS.

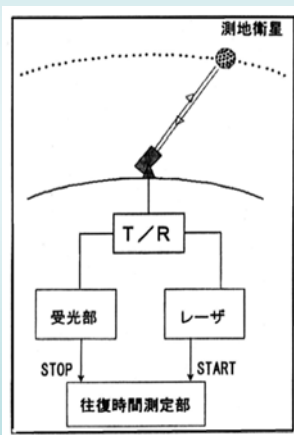
宇宙測地技術



VLBI (Very Long Baseline Interferometry)



衛星レーザー測距 (SLR) (Satellite Laser Ranging)



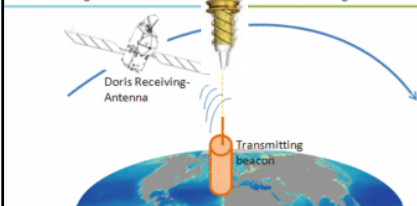
DORIS: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

- ・衛星で受信した地上のDORISビーコンから電波のdopplerシフトを利用して衛星 (TOPEX/Poseidon, ERSなど、主にaltimeter衛星) の軌道追跡を行う。
- ・これらのデータを集積することによりDORISビーコンの位置が正確に求まる。

The satellite is **upright** the beacon, it's the TCA point (Time of Closest Approach). The frequency of the received signal is **equal** to the frequency of the transmitted signal.

The satellite is **approaching** the beacon:
The frequency of the received signal is **greater** than the frequency of the transmitted signal.

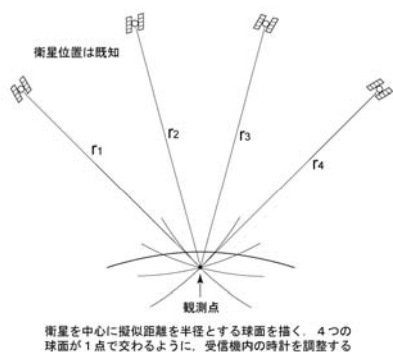
The satellite is **moving away** the beacon:
The frequency of the received signal is **lower** than the frequency of the transmitted signal.



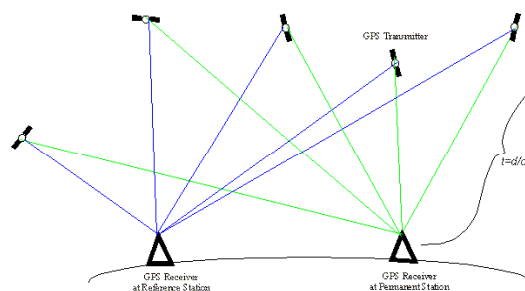
<http://www.aviso.oceanobs.com/en/doris/principle.html>

GPS: (Global Positioning System)

GNSS: (Global Navigation Satellite System)



単独測位



相対測位

Primary ITRF2000 Map

ITRF2000 STATION POSITIONS AT EPOCH 1997.0 AND VELOCITIES
GPS STATIONS

DONES NB.	SITE NAME	TECH.	ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz	Sigmat	SOLN
				m/m/y				
10002M006	GRASSE	GPS	GRAS	4581691.012	556114.680	4389360.696	.002 .001 .002	
10002M006				-.0131	.0189	.0101	.0003 .0001 .0004	
10003M004	TOULOUSE	GPS	TOUL	4627846.128	119629.178	4372999.723	.002 .001 .002	
10003M004				-.0134	.0187	.0088	.0009 .0003 .0008	
10004M002	BREST	GPS	7604	4228877.078	-333104.179	4747181.000	.005 .001 .006	
10004M002				-.0133	.0184	.0085	.0021 .0004 .0022	
10004M004	BREST	GPS	BRST	4231162.677	-332746.825	4745130.837	.006 .001 .006	
10004M004				-.0133	.0184	.0085	.0021 .0004 .0022	
10011M001	SAINT-MICHEL DE	GPS	MICH	4578886.977	458434.255	4402461.434	.008 .002 .007	
10011M001				-.0074	.0197	.0158	.0031 .0007 .0029	
10073M008	MARSEILLE	GPS	MARS	4630532.881	433946.163	4350142.640	.008 .002 .007	
10073M008				-.0158	.0182	.0083	.0031 .0007 .0029	
10077M005	AJACCIO	GPS	AJAC	4696989.550	723994.369	4239678.490	.833 .189 .740	
10077M005				-.0146	.0037	-.0053	.2686 .0609 .2387	
10090M001	SAINT JEAN DES V	GPS	SJDV	4433469.953	362672.672	4556211.610	.004 .001 .004	
10090M001				-.0090	.0186	.0145	.0017 .0004 .0017	
10091M001	LE MANS	GPS	MANS	4274276.048	11584.191	4718385.958	.008 .002 .008	
10091M001				-.0129	.0159	.0075	.0031 .0006 .0033	
10092M001	MARNE LA VALLEE	GPS	MLVL	4201577.090	189859.958	4779064.724	.007 .001 .008	
10092M001				-.0166	.0159	.0061	.0029 .0006 .0032	
10095M001	CADARACHE-GINASS	GPS	GINA	4597159.085	465906.853	4382366.700	.005 .001 .004	
10095M001				-.0070	.0193	.0166	.0020 .0004 .0019	
10096M001	MODANE-AVRIEUX	GPS	MODA	4470757.663	525990.993	4504955.382	.011 .002 .011	
10096M001				.0112	.0203	.0105	.0041 .0009 .0040	
10097M001	MONTPELLIER	GPS	MTPL	4612940.626	311634.817	4379108.465	.024 .005 .022	
10097M001				-.0141	.0188	.0090	.0083 .0019 .0077	
10098M001	LA FECLAZ	GPS	FCLZ	4443368.669	465894.217	4538566.036	.011 .003 .010	
10098M001				-.0139	.0187	.0083	.0043 .0011 .0043	

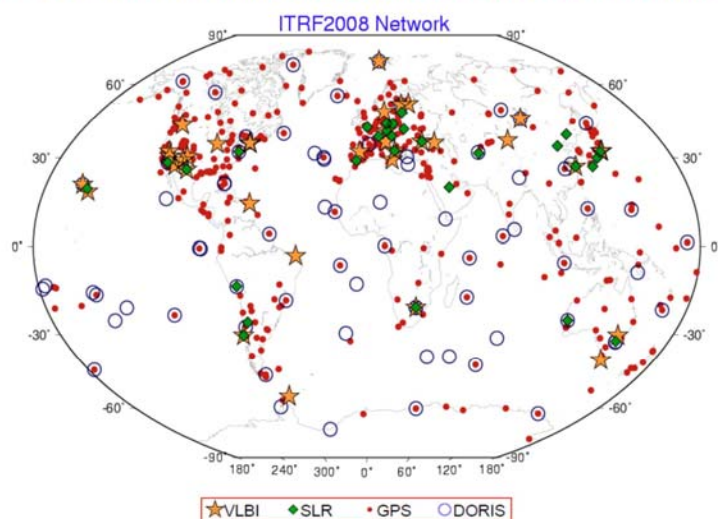
ITRF2005 Map

ITRF2005_GPS.SSC.txt

ITRF2005 STATION POSITIONS AT EPOCH 2000.0 AND VELOCITIES
GPS STATIONS

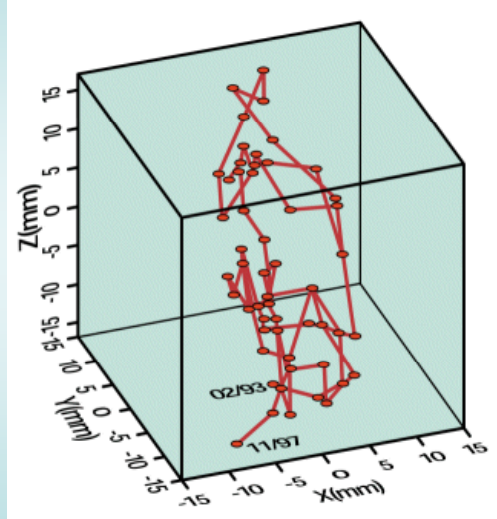
DOMES NB.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Vx	Y/Vy	Z/Vz	Sigmas	SOLN	DATA_START
					m/m/y			
10001S006	PARIS	GPS OPMT	4202777.434	171367.913	4778660.147	0.005 0.002 0.006		
10001S006			-.0118	0.0170	0.0111 .0011 .0004 .0012			
10002M006	GRASSE	GPS GRAS	4581690.969	556114.738	4389360.731	0.001 0.000 0.001	1	00:000:00000
10002M006			-.0139	0.0186	0.0116 .0001 .0001 .0001			
10002M006	GRASSE	GPS GRAS	4581690.975	556114.741	4389360.734	0.001 0.000 0.001	2	03:113:00000
10002M006			-.0139	0.0186	0.0116 .0001 .0001 .0001			
10002M006	GRASSE	GPS GRAS	4581690.974	556114.744	4389360.739	0.001 0.001 0.001	3	04:296:43200
10002M006			-.0139	0.0186	0.0116 .0001 .0001 .0001			
10003M004	TOULOUSE	GPS TOUL	4627846.086	119629.236	4372999.754	0.001 0.000 0.001		
10003M004			-.0111	0.0191	0.0117 .0003 .0001 .0003			
10003M009	TOULOUSE	GPS TLSE	4627851.889	119639.921	4372993.492	0.001 0.001 0.001		
10003M009			-.0111	0.0191	0.0117 .0003 .0001 .0003			
10004M004	BREST	GPS BRST	4231162.638	-332746.764	4745130.859	0.004 0.001 0.004		
10004M004			-.0111	0.0162	0.0134 .0009 .0003 .0009			
10023M001	La Rochelle	GPS LROC	4424632.623	-94175.321	4577544.022	0.003 0.001 0.003		
10023M001			-.0106	0.0183	0.0123 .0006 .0002 .0006			
10090M001	SAINT JEAN DES	GPS SJDV	4433469.919	362672.729	4556211.652	0.002 0.001 0.002	1	00:000:00000
10090M001			-.0118	0.0186	0.0121 .0008 .0002 .0008			
10090M001	SAINT JEAN DES	GPS SJDV	4433469.921	362672.729	4556211.656	0.001 0.000 0.001	2	99:071:57600
10090M001			-.0118	0.0186	0.0121 .0008 .0002 .0008			
10202M001	REYKJAVIK	GPS REYK	2587384.422	-1043033.508	5716563.995	0.001 0.000 0.001	1	00:000:00000
10202M001			-.0216	-.0028	0.0059 .0001 .0001 .0002			
10202M001	REYKJAVIK	GPS REYK	2587384.410	-1043033.501	5716563.980	0.006 0.003 0.012	2	00:169:56460
10202M001			-.0216	-.0028	0.0059 .0001 .0001 .0002			
10202M001	REYKJAVIK	GPS REYK	2587384.415	-1043033.509	5716564.003	0.001 0.000 0.001	3	00:173:03120
10202M001			-.0216	-.0028	0.0059 .0001 .0001 .0002			
10202M003	REYKJAVIK	GPS REYZ	2587383.736	-1043032.722	5716564.472	0.001 0.001 0.001		
10202M003			-.0216	-.0028	0.0059 .0001 .0001 .0002			
10240M002	HOFN	GPS HOFN	2679689.983	-727951.292	5722789.189	0.001 0.000 0.001	1	00:000:00000

ITRF2008 Network: GPS + DORIS + VLBI + SLR



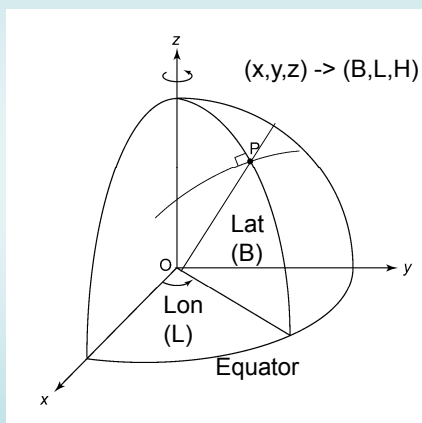
地球の重心

地球の重心位置は、海洋、土壌水分、降雪、陸水など地球上での水循環による質量の再配分の結果として、3cm程度の範囲で常に変化している。

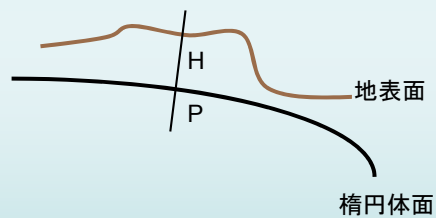


http://www.jason.oceanobs.com/html/applications/geophysique/centre_gravite_uk.html

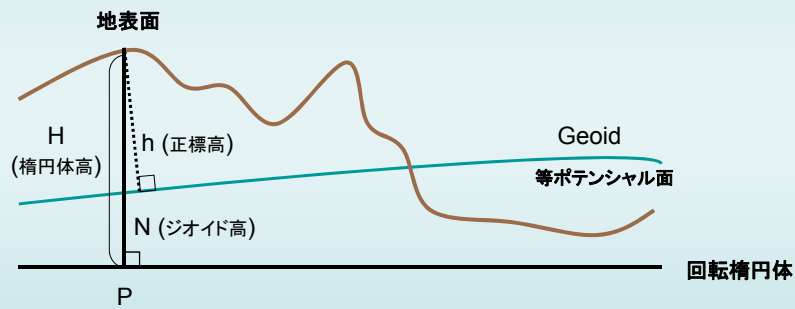
直交座標(X,Y,Z)から B,L,H座標へ



「高さ」とはなにか？



高さとジオイド(Geoid)・重力



次 回

地球の内部構造