

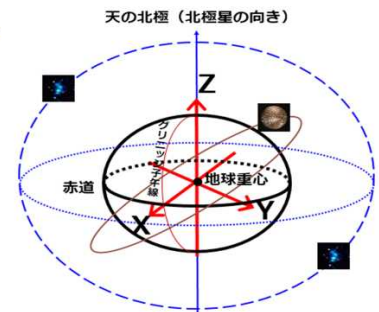
宇宙技術を利用した測量

平成になってから宇宙技術を利用した測量が使われ始めました

地球上の位置は、天体や人工衛星からの電波を受信することなどで正確に決まります。国土地理院のVLBIや電子基準点は、正確な位置や地球の形の決定に貢献しています。

国際地球基準座標系とは (ITRF)

地球重心を原点とし「自転軸をZ軸」、赤道面の「グリニッジ子午線方向をX軸」「東経90°をY軸」とした3次元直交座標系で、地球上の位置を世界共通の基準で表します。この座標系は、宇宙技術の観測結果から国際的な学術機関 (IERS) が決定し、地球の形状 (楕円体) を正確に求めることに役立っています。

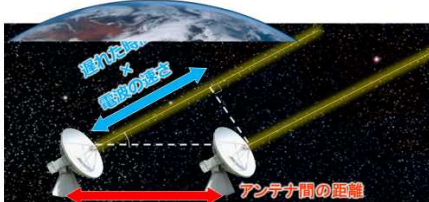


国際地球基準座標系 (ITRF)

ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 国際地球基準座標系

IERS (International Earth rotation and Reference Systems Service) 国際地球回転・基準系事業

天体からの電波で自転軸の方向 (Z) を決定 (VLBI)



2点間の距離を求めるイメージ
※ 実際には複数の天体を観測して距離を決定



世界のVLBI局

VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 超長基線電波干渉法

VLBIは、世界中の観測点で同一の天体からの電波を受信し、時間差から2点間の距離を正確に計測する技術で自転軸の方向や地球上の位置を決定します。

衛星測位で日本国内の位置を正確に決定 (GNSS)



電子基準点の配点図



電子基準点「東京千代田」
(国会議事堂前公園)

GNSS (Global navigation Satellite System) 全球測位衛星システム

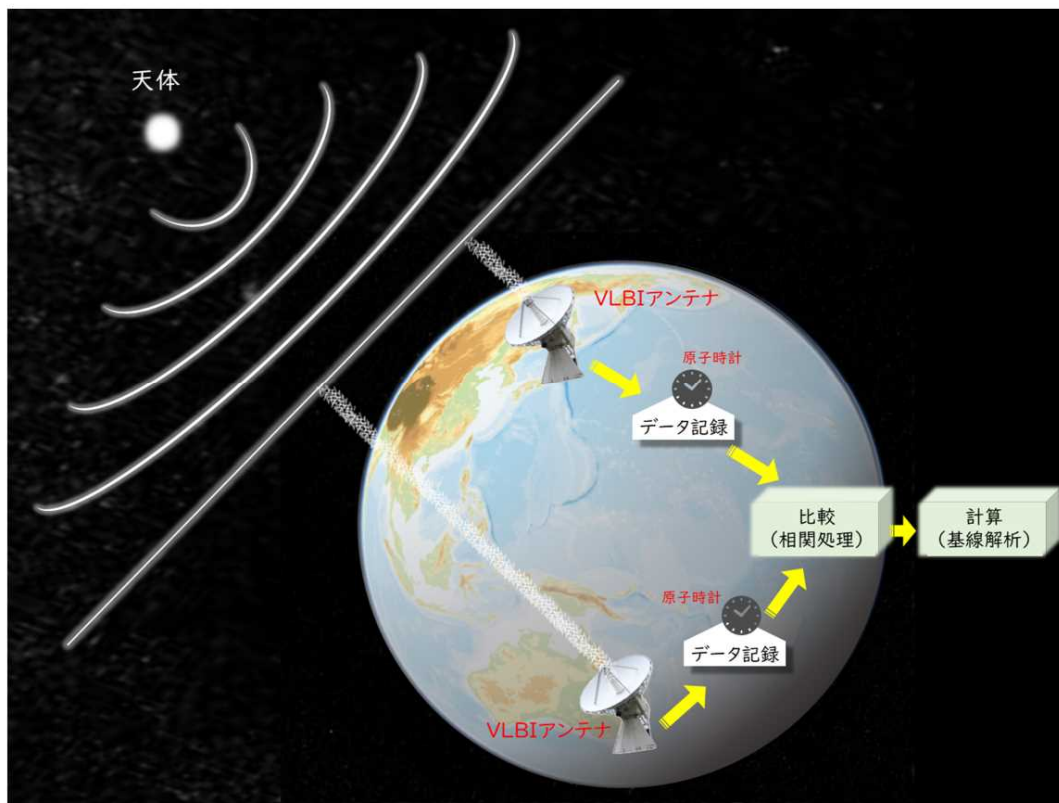
GNSSは、衛星からの電波を受信して位置を求める技術で、世界各地の位置を正確に決定します。

日本各地でGNSSを観測する固定観測施設が電子基準点です。国内に約1,300点設置されています。

VLBI測量

VLBIでは、数十億光年離れた天体が放つ非常に弱い電波を、いくつかのパラボラアンテナで同時に受信します。特定の電波を受信した時刻は、2つのアンテナ間でわずかに(0-0.02秒)異なります。この時刻の差(遅延時間)を、非常に正確な時計で1000億分の1秒まで測ります。

この時刻の差に電波の速さ(秒速30万km)をかけると、2つのアンテナが電波のやってくる方向から見て、どれだけ離れているかがわかります。



非常に正確な時計は「水素メーザ原子時計」といい、1億年に1秒しか狂いません。この狂わない時計の精度がVLBIの命です。

| 時間(秒) | 電波が進む距離(m) | 距離 |
|-------------------|-------------|-------|
| 1 | 300,000,000 | 30万km |
| 1/100 | 3,000,000 | 300km |
| 1/100,000,000 | 3 | 3m |
| 1/100,000,000,000 | 0.003 | 3mm |

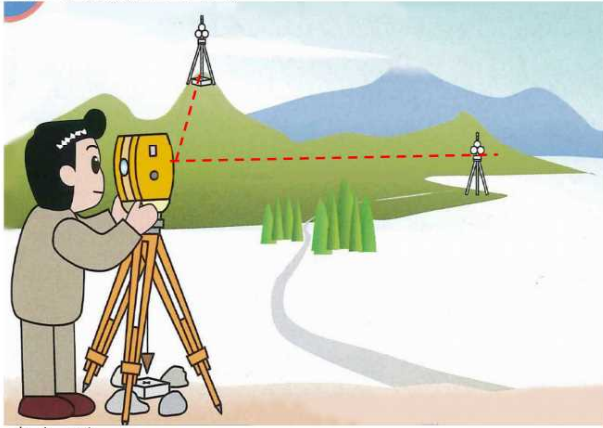
1000億分の1秒まで測ると、mm単位の正確さでアンテナ間の距離がわかります。

※VLBI : Very Long Baseline Interferometry (超長基線電波干渉法)

位置を測る測量は三角測量から衛星測位へと変わっていきました

三角測量

明治時代から行われてきた三角測量は、距離と角度を計測し、三角形の原理を利用して位置を求める測量です。



既知点と新点の間に測量機器を置いて距離・角度を測定

- 移動や設置に時間がかかります
- 観測点同士の視通が必要です
(視通を妨げる場合、伐採等が必要となります)



衛星測位 (GNSS測量)

平成に入りGPSの運用が本格的に開始され、測量でもGPSを利用した衛星測位が始まりました。測量では、同時に2台以上のGPS受信機を用いて観測を行い位置計測をしています (相対測位)。

→ 観測点同士の視通は不要ですが上空の視界が必要です (同時に4つ以上の衛星からの受信が必要)

天候に左右されません

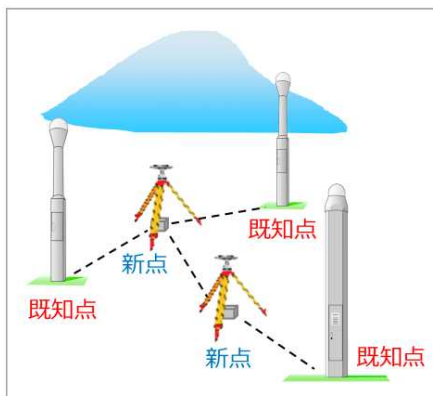
電子基準点を既知点 (受信機) として使用できます

現在は、GPSの他にも、GLONASS、準天頂衛星 (みちびき) などの衛星も利用しており、GNSS (全球測位衛星システム) 観測と呼称しています。

スタティック測量

最も精度の高い測位方法です。

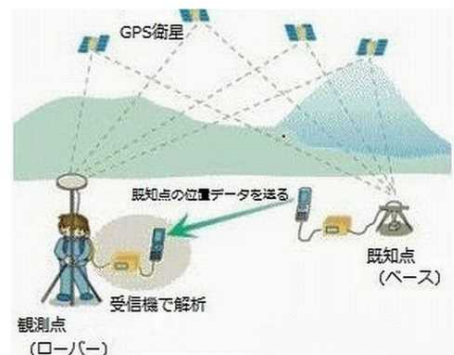
受信機を静止したまま観測を行いますが、距離が長くなると必要な観測時間も長くなります。観測後、観測データを解析して位置を出します。



既知点に電子基準点のみを使用したスタティック測量

RTK (リアルタイム・キネマティック) 測量

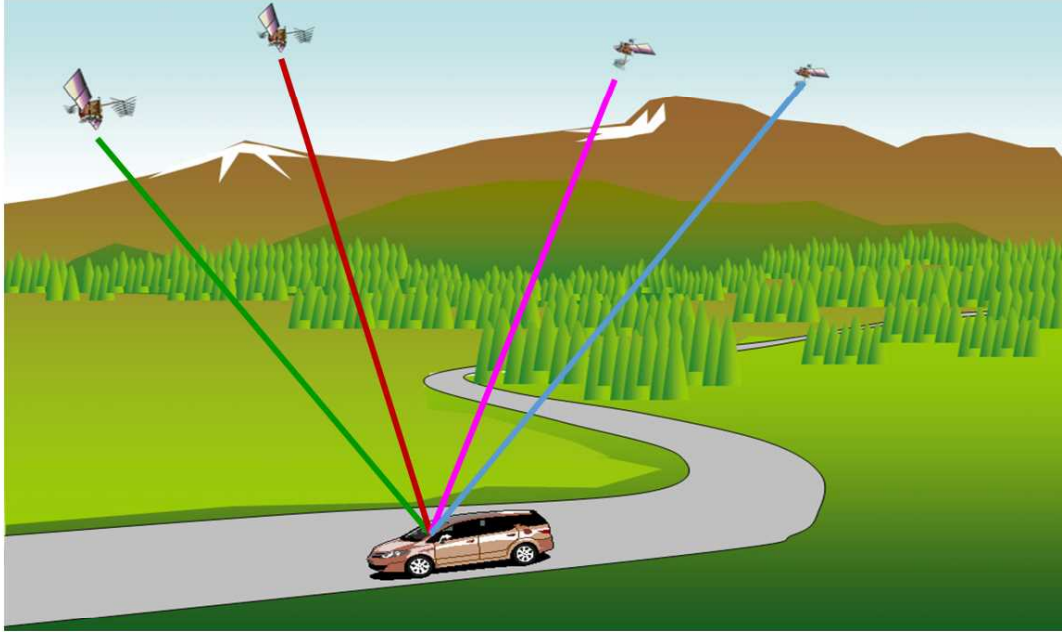
位置の分かっている基準局と位置を求めようとする観測点で同時に観測を行い、基準局で観測したデータを無線等を用いて観測点へリアルタイムに送信し、基準局の位置成果に基づき観測点の位置をリアルタイムに求めます。車の自動運転は、この測位方法を用いて行われます。



RTK-GPS測量

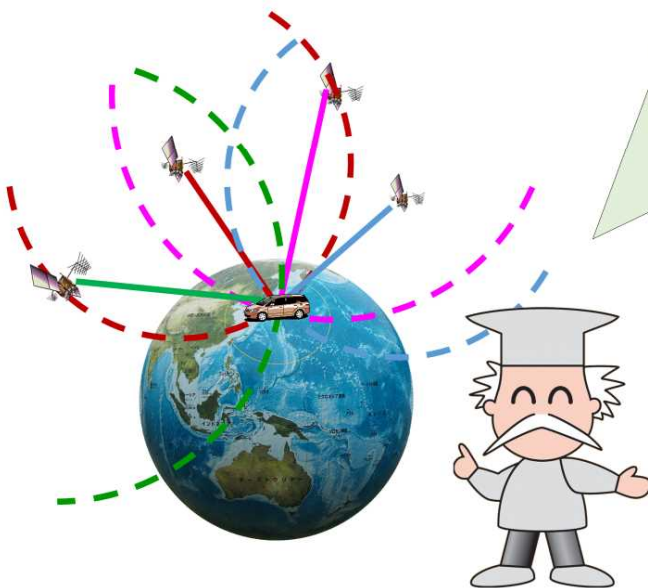
カーナビはどうして位置がわかるの？

自動車に付けられたカーナビは、今の位置がわかるし、目的地まで案内してくれる便利な道具です。でも、どうして位置がわかるのかな？



カーナビは、GNSS衛星から送られてくる電波を受信し、色々な情報をもとに自動車の位置や方向を求めています。

目的地を入力すると車の向かう場所を地図上で求めて、通る道を選び地図に表示して案内してくれます。



衛星からは、“衛星の位置”と“信号を送信した時刻”が送られてくる。自動車に届いた時刻との差から、それぞれの衛星との距離がわかるんじゃ。

4個の衛星からの距離が分かれば、自分の位置(緯度、経度、高度、時刻)がわかるんじゃよ。

衛星測位が普及してきたのに伴い電子基準点の設置が開始されました

電子基準点のピラー形状種類



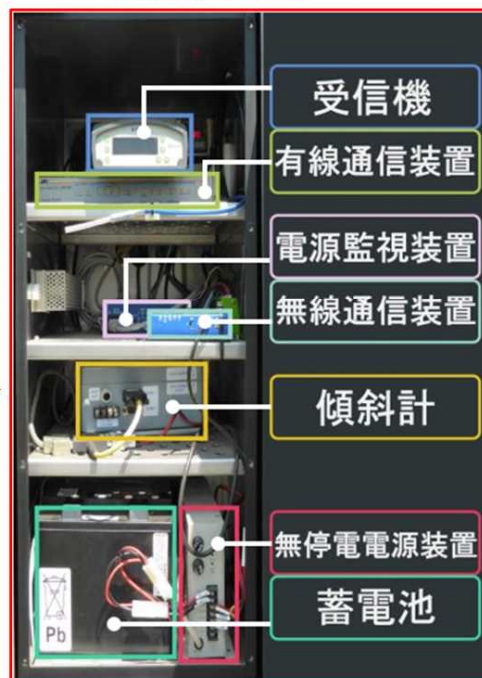
93年型 (1992-1993) 94年型 (1994) 95年型 (1995-2001) 02年型 (2002-現在)

一重管タイプ

二重管タイプ ※

※ 日射による熱変形を軽減

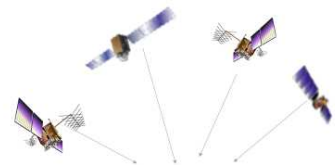
- 高さ5m (ステンレス製)
- 対風性能 60m/s



電子基準点の基本知識を紹介します

1. そもそも何？

- GPSや準天頂衛星等の測位衛星（人工衛星）の電波を受信する連続観測施設です。
- このデータを上手に使うと、**地上の位置がcmの精度でわかります。**
- 地殻変動の監視、測量の基準点として国土地理院が1993年から整備をはじめました。
- 現在**全国に約1,300点**あります。
- 基本的には右写真のような形をしています。高さ約5mのステンレス製です。



電子基準点「つくば1」

2. 何をしているの？

- 頭部のアンテナに届いた衛星の電波を、内部の受信機で記録しています。
- 観測データは1秒毎に国土地理院へ送ります。
- 1日分のデータをまとめて解析し、地球上の位置を1cmの精度で求め、**地殻変動を監視します。**
- リアルタイムでも解析し、巨大地震の規模を直ちに求め、**津波の予測を支援します。**
- 測量に必要な観測データは国土地理院のウェブサイトで公開しています。
- 1秒毎のデータはリアルタイムで配信され、**建設機械の制御・農業機械の自動運転等に利用されます。**
- 大気中の水蒸気量がわかるので、**天気予報にも使われています。**

3. なぜ電子基準点というの？

- 電子レンジ同様、電気仕掛けで動く「基準点」なので、電子基準点と呼びます。基準点とは、測量に使う標識のことで、三角点や水準点などがあります。

4. どこにあるの？

- **概ね20km程度の間隔で全国各地に設置**されています。
- この間隔は、政府の地震調査研究推進本部が定めた計画に基づくものです。
- 2018年3月に、国会前の憲政記念館敷地に都心では初となる電子基準点「東京千代田」が設置されました。

5. なぜ必要なの？

- YouTubeで動画「動く日本列島」をご覧ください。こんなに動く国だから、電子基準点での監視が必要です。

<https://youtu.be/W2TKZw4pNMM> 「動く日本」で検索！



- 電子基準点は、
 - 1) 正確な測量・地図作製のための基準として使われています。
 - 2) 国土の地殻変動を監視し、地震・火山活動による災害対応やメカニズム解明に活用されています。
 - 3) 高精度な位置を即時に把握できる位置情報サービスに活用されています。

6. いくらかかるの？

- 頑丈に作るので、**1点の設置に約1,500万円かかります。**
- 1,300点の運用（通信、維持等）に年6億円程度必要です。
- 電子基準点を利用した公的な測量の市場規模は毎年100億円程度です（国土地理院時報2016）。

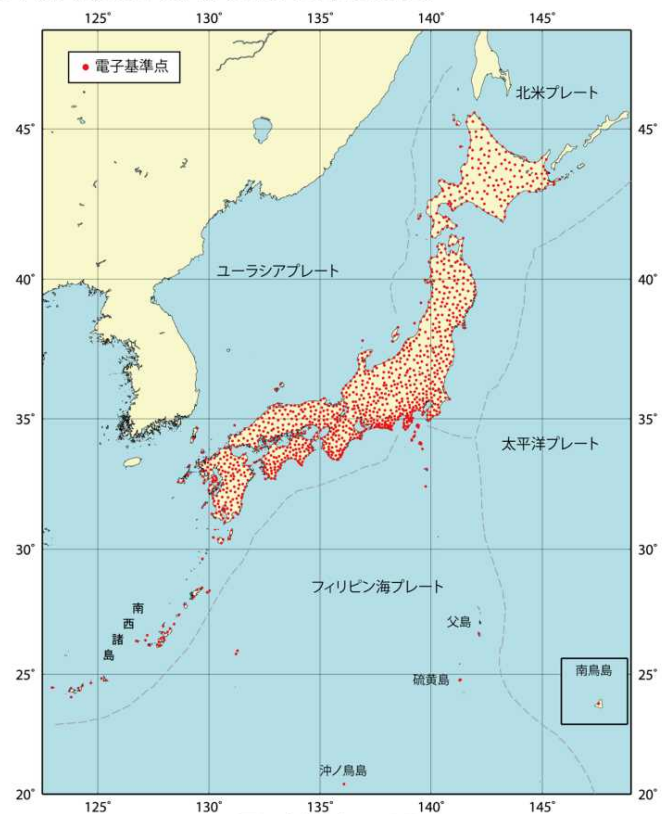
7. 外国にもあるの？

- 日本では電子基準点の設置を先行して開始しましたが、今では先進国は勿論、途上国でも設置が進んでいます。
- 国土地理院は、東南アジア諸国を中心に、電子基準点に関する技術協力を行い、その海外展開を支援しています。
- GNSS連続観測点（電子基準点）を整備している国・地域は米国、欧州、中国、豪州、韓国、東南アジア等があります。

• **日本の設置密度は世界一です**

8. これからどうなるの？

- 2018年11月、我が国の**準天頂衛星システム（QZSS）**が4機体制となり、センチメートル級測位補強サービス（CLAS）が始まりました。CLASを用いると、誰でも簡単に自分の位置をセンチメートルレベルで把握できます。ここにも電子基準点データが活用されています。
- 今後も、測量・測位のインフラとして、電子基準点をしっかり運用して、国土を測り、豊かな未来を築きます。



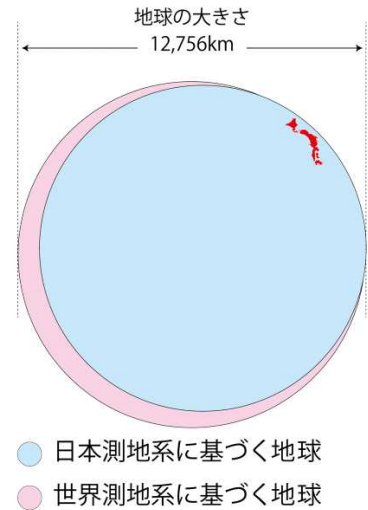
電子基準点 配置図

世界測地系の導入

科学技術の進歩により地球の大きさが正確にわかってきました

科学技術の進歩により、GNSS衛星やVLBIなどの宇宙技術を利用することで、国を超えての測量が可能となりました。これにより地球の正確な形や、大きさが明らかとなりました。

日本測地系と比較して、世界測地系では地球の直径が1,480mほど、大きいことがわかりました。日本の位置も正確に測れるようになりました。



今は正確な地球の大きさがわかるんだな

地球の大きさは19世紀に割り出した数値より実際にはちょっと大きかったんじゃ

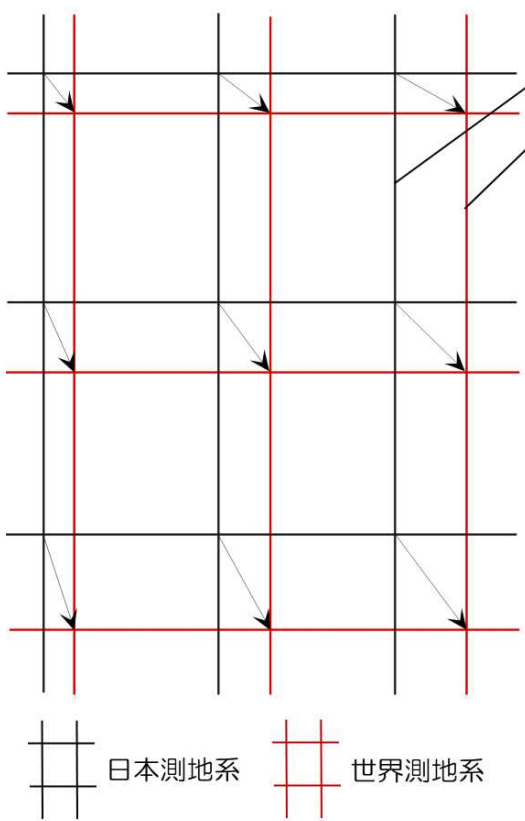
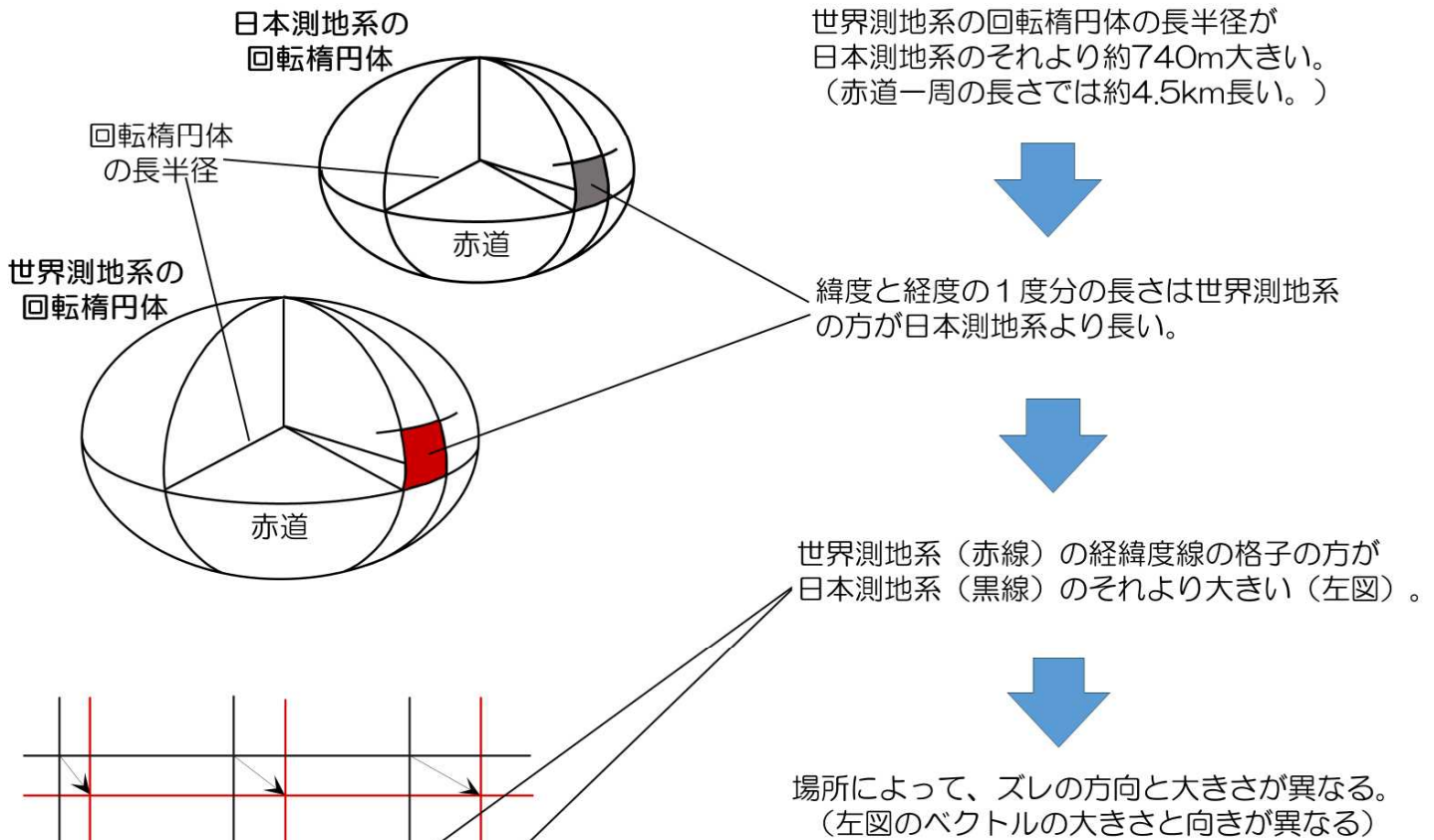
GNSS衛星を利用した測量

GNSS衛星はいろいろなところに使われているのね。測量や車のナビゲーションなどにも利用されているんだって

電波星を利用した測量 (VLBI)
非常に遠くにある星の電波を観測して行われる測量

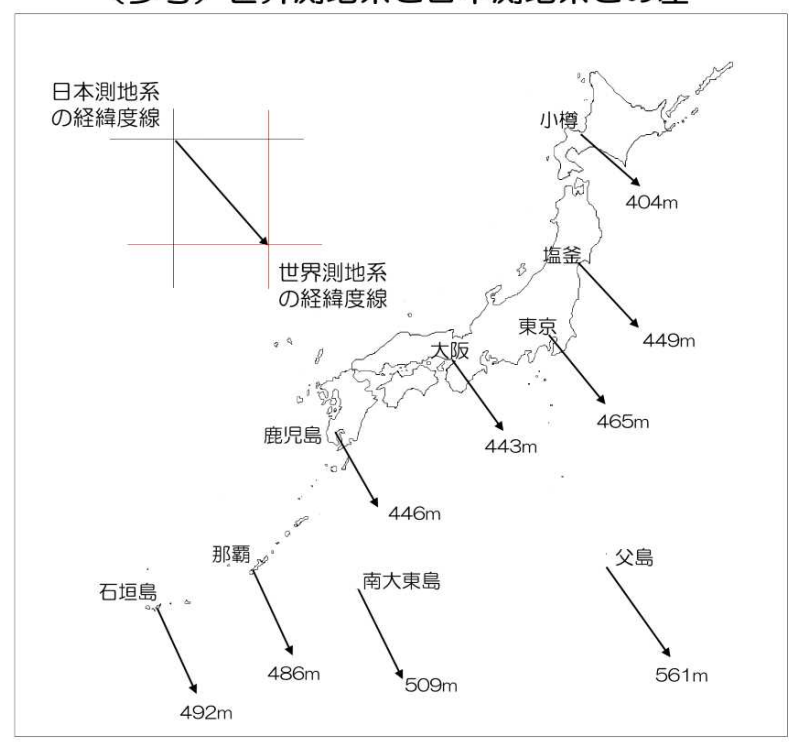
地球の正確な形・大きさに近い世界測地系 基準の回転楕円体を採用

地球の正確な形・大きさがわかり、日本は世界測地系の回転楕円体を採用しました。回転楕円体の大きさが異なっていることにより、世界測地系と日本測地系の差は、場所によって異なります。



場所によって、ズレの方向と大きさが異なる。(左図のベクトルの大きさと向きが異なる)

(参考) 世界測地系と日本測地系との差



日本測地系から世界測地系へ(1)

ベッセル楕円体（日本測地系）からGRS80楕円体（世界測地系）へ

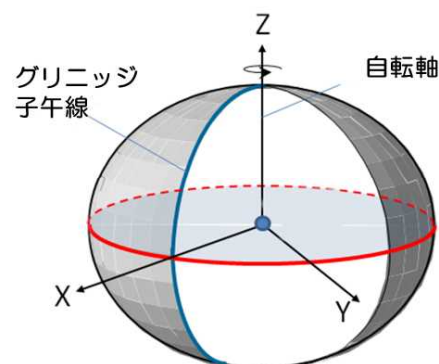
測地系は、位置の基準となるものであり、地球の形に近い準拠楕円体と、楕円体上に位置（緯度・経度）を表示するためのルールである座標系で定義されます。

日本では20世紀まで日本が独自に定めた測地系である日本測地系を採用していました。日本測地系ではベッセル楕円体と、天文観測によって定めた日本経緯度原点の数値をもとに構築した座標系を採用していました。日本測地系は、地球の重心を原点としていないため、地球の重心を中心に周回するGPSなどの測位衛星によって得られる位置は、計算で変換しないと使用することができませんでした。

近年、VLBIや人工衛星などの宇宙観測技術が進展し、より正確な地球の形状と大きさが明らかになりました。こうした背景から、国土地理院は2002年に日本測地系から世界測地系へ移行しました。

日本の世界測地系では、地球の形に最も近いGRS80楕円体と、国連や国際的な学術機関が推奨するITRF（国際地球基準座標系）を採用しています。

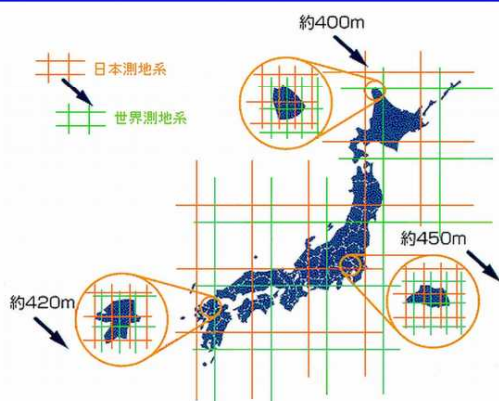
世界の多くの国でも、各国が独自に定めていた測地系から世界測地系へと移行しています。



ITRFでは
中心：地球の重心
X軸：グリニッジ子午線と赤道との交点の方向
Y軸：東経90度の方向
Z軸：北極の方向

| | 長半径 (m) | へんへいりつ 扁平率 |
|----------|---------------|-----------------|
| ベッセル楕円体 | 6,377,397.155 | 1/299.152813 |
| GRS80楕円体 | 6,378,137.000 | 1/298.257222101 |

日本測地系の「ひずみ」



左図は日本測地系と世界測地系との間の座標値の差を示しています。

日本経緯度原点付近では、南東方向へ約450mずれており、原点から離れた北海道や九州では、ずれる距離が違ってきます。これは、日本測地系にひずみがあったからです。

ひずみの要因としては、日本測地系の構築当時の観測技術と計算処理能力の制約があったことや、明治以来の地殻変動の蓄積が加わっていたことが挙げられます。これらのひずみは、世界測地系への移行時に解消しています。

世界測地系導入で測量法を改正

【位置の改正】 測量法の改正により、日本の位置の基準となる日本経緯度原点の数値（経度：東経139度44分40秒5020、緯度：北緯35度39分17秒5148）は、世界測地系での数値に変更されました。（測量法施行令第2条第1項第2号）

また、地球の形は絶えず変化しており、今後さらに詳細な値が定められることがあると考えられるため、改正前はベツセルの回転楕円体を測量法（法律）に規定していましたが、改正後は、具体的な長半径及び扁平率の値については測量法施行令（政令）で定めると規定されました。（測量法施行令第2条の2）

【地点の改正】 日本経緯度原点の地点「旧東京天文台子午環の中心点」は「日本経緯度原点金属標の十字の交点」に、原点方位角「鹿野山一等三角点の方位角」は「つくば超長基線電波干渉計観測点金属標の十字の交点の方位角」に改正されました。

測量法改正前

（測量の基準）

第十一条 基本測量及び公共測量は、左の各号に掲げる測量の基準に従って行わなければならない。

一 地球の形状及び大きさについては、ベツセルの算出した次の値による。

長半径 6,377,397.155メートル

扁平度 299.152813分の1

改正後の施行令

（日本経緯度原点及び日本水準原点）

第二条 法第十一条第一項第四号に規定する日本経緯度原点の地点及び原点値は、次のとおりとする。

一 地点 東京都港区麻布台二丁目十八番一地内日本経緯度原点金属標の十字の交点

二 原点数値 次に掲げる値

イ 経度 東経139度44分28秒8759

ロ 緯度 北緯35度39分29秒1572

ハ 原点方位角 32度20分44秒756

（長半径及び扁平率）

第二条の二

一 長半径 6,378,137メートル

二 扁平率 298.257222101分の1

日本測地系から世界測地系へ(2)

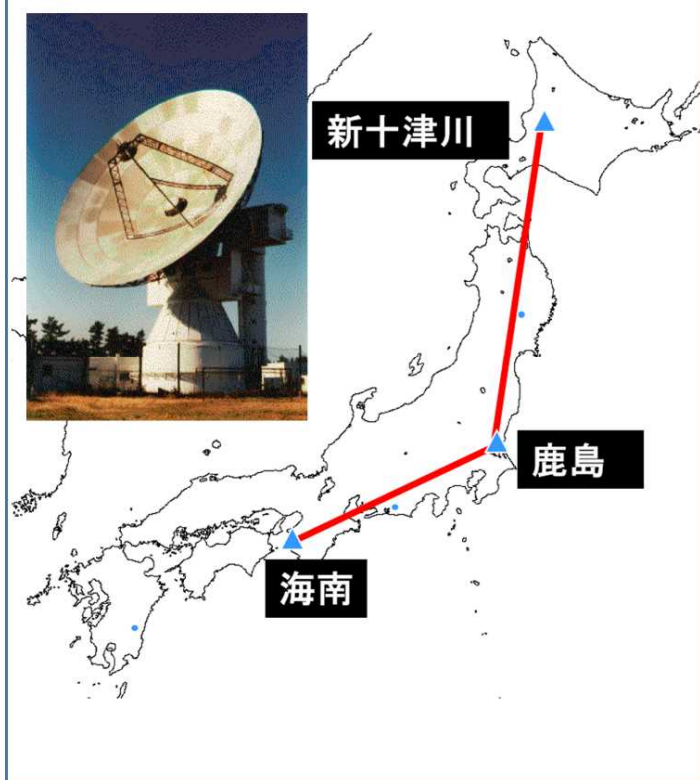
世界測地系への移行がもたらした効果

- より科学的に合理性のある位置の表示が可能
- GPSなどのGNSSで直接求められる緯度・経度が、そのまま利用可能
- 航海・航空の安全性が向上
- 各国における世界測地系の普及を促進することにより、こくさいひょうじゆんか国際標準化に貢献

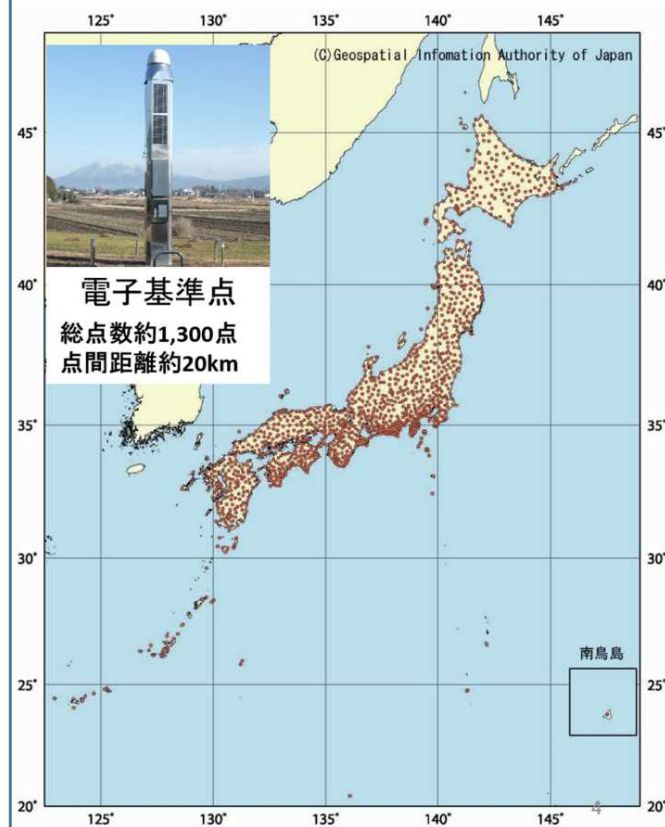
測地成果2000

測地成果2000は、世界測地系に基づく我が国の測地基準点（電子基準点・三角点等）成果で、従来の日本測地系に基づく測地基準点成果と区別するための呼称です。測地成果2000は、世界測地系に基づき、宇宙測地技術を駆使したVLBIや電子基準点の観測網を骨格として作られました。

VLBI



電子基準点



日本測地系から世界測地系へ(3)

測地成果2000から測地成果2011へ

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴い、大きな地殻変動が観測されました。そのため、国土地理院では、三角点1,846点及び水準点1,897点の現地測量結果を基に、1都19県における43,312点の三角点位置及び1,897点の水準点標高の改定値を公表しました。新しい測量成果の名称は、三角点及び水準点とも全国で「測地成果2011」に改めました。

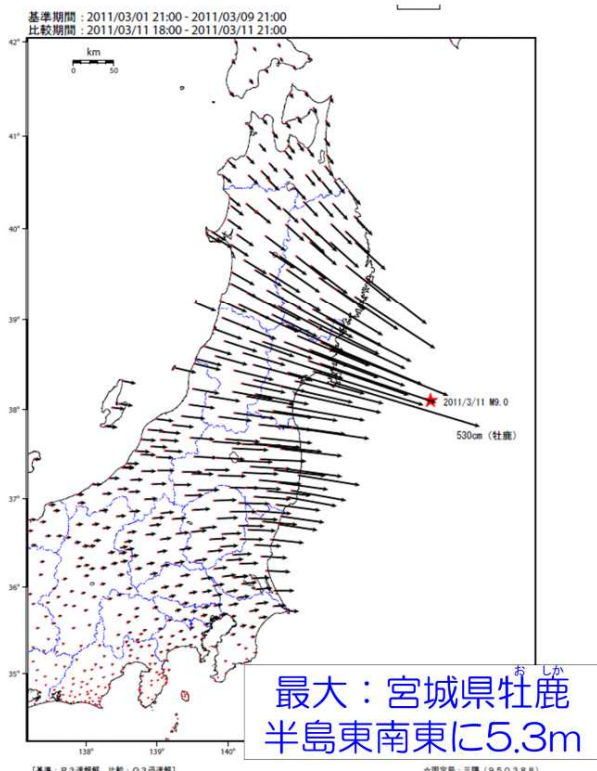
測地成果2011への移行に伴う原点座標の変更

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震の影響は原点にも及びました。日本経緯度原点は東に約27cm移動し、日本水準原点は2.4cm沈下したことが確認されました。このため、日本経緯度原点の経度と原点方位角及び日本水準原点の高さを改正しました。

日本経緯度原点の数値は、平成13年(2001年)の測量法改正時に世界測地系の導入に伴って改正され、日本水準原点の数値は、大正12年(1923年)の関東大震災の後の昭和3年(1928年)に改正されましたが、2つの原点数値が同時に改正されたのは、この時が初めてでした。

東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動

(水平方向)



(上下方向)

