

201711-01 電子基準点

電子基準点

円柱のアンテナは電子基準点

皆さん写真のような金属の円柱を見たことはありませんか？携帯電話のアンテナよりは背丈は低いですが、よりガッチリした印象の姿で立っている。和歌山県内だけで34ヶ所、主に小学校の校庭の隅とかに立っている。紀美野町にはないようだが、海南市の海南第二中学校や海南検潮所にあるようだ。

(https://www.jisinyosoku.com/html/prefecture_30.html をみよ)

現在、全国では1300個所ぐらいに立っており、平均20キロメートル間隔の網目で日本列島を覆い尽くすまで、20年ほど前からじわじわと増設しているようである。

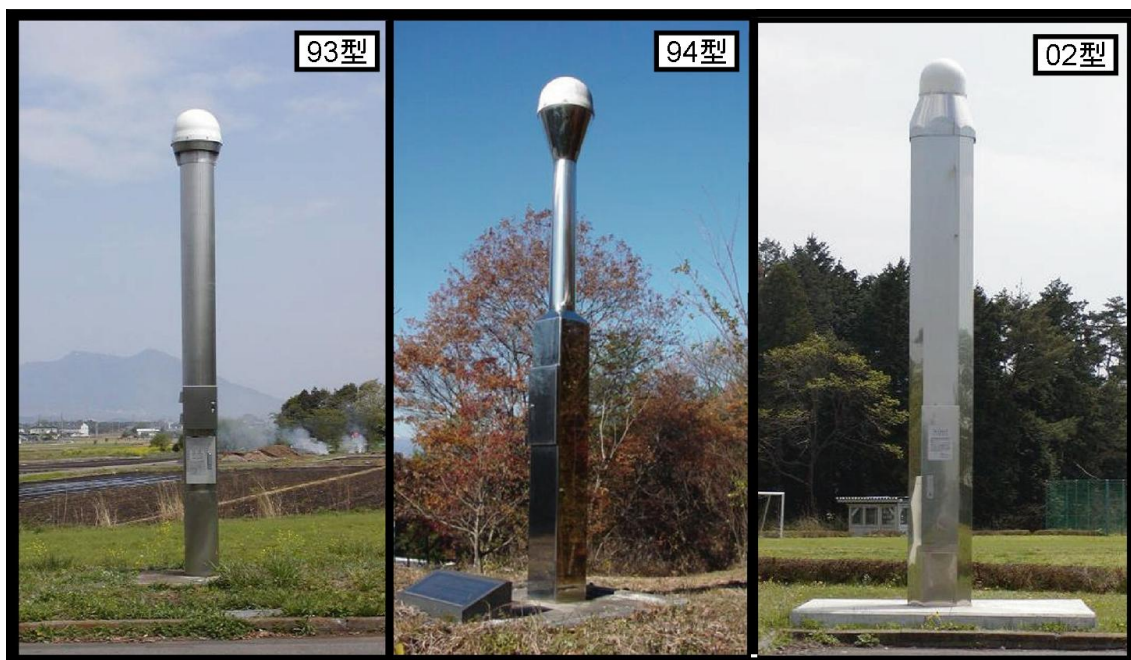


図 色々な形の電子基準点 (出所:<http://terras.gsi.go.jp/>)

現代の三角測量点

これは国土交通省管轄の国土地理院が各地に設置している電子基準点である。むかし5万分の1の地図を作成するための目印として三角測量点に埋められていったが、その現代版と思ってよい。

この電子基準点は頭の所にアンテナがあって GPS のような多くの人工衛星からの電波を受信している。それだけでなく、横の部分からは周囲に電波で情報を発信している。この受信と発信から分かるように、電子基準点はふたつの役目をしている。日本列島地殻変動の観測と測量・測地へのサービスである。

GPS は固有名詞

今では GPS は日常に溶け込んだ馴染み深い言葉になった。街中や山中での自分の位置を地図上に示し、自動車ドライブのガイドもしてくれる。GPS システムは人工衛星群から電波を受けて、受けたものの位置を地図上に示す。今や生活に密着した常識である。

ところでこの GPS はもともと冷戦中の巡行ミサイル誘導のためにアメリカ空軍がつくったものだ。いまはそれを制限付きで民生用に開放し、世界中で広く利用されている。だが、米空軍の好意で使っている状態は不安定である。軍事的に緊張したら民生使用が制限される可能性もある。

「全球測位衛星システム」

一方、この人工衛星群から位置を知るというシステムは今では必需品になっており、米空軍の GPS から独立したシステムも作られている。GLONASS（ロシア）、Galileo（EU）、準天頂衛星（日本）などであるが、いずれも、独立しては、GPS にはまだ及ばない。

2017 年 10 月 10 日に「みちびき」という人工衛星が打ち上げられたニュースが流れていたが、これは「日本版 GPS」作りの一環である。これが 4 機目で、7 機まで打ち上げる、2019 年以後に運用が始まるようだ。GPS は 30 機以上で運用している。

いずれにせよ先発であった GPS があまりにも有名なので固有名詞が普通名詞のように通用しているのは事実である。日本の電子基準点が利用するのは GPS だけでなく、全てのシステムを使っているのが全球測位衛星システム (GNSS、Global Navigation Satellite System) という名前になっている。

人工衛星軌道に対する三次元位置情報

衛星測位システムというのは、正確に分かっている衛星軌道を基準にして動いているもの位置を決めるのである。「位置を決める地点」は地表でなく、航

空機であったり、他の人工衛星でもいい。地表の二次元的位置ではなく高さも含む3次元的位置情報を計算する。計算が間違えると、自動車が地表を離れて空中や地下を走っていることになる。

だが、われわれのスマホでの「GPS 位置情報」とは、人工衛星から直接計算したものではなく、携帯の電波が届くような市街部の場合は様々な二次的なサービス情報を見ている場合が多い。そのために「GPS 直接」よりは正確なのである。太平洋のど真ん中や砂漠のど真ん中なら、「GPS 直接」以外に頼る手がない。しかし、携帯の電波が届く地域なら、地上基準点からの相対位置情報を割り出すことができる。

日本列島の動きをみる

さて電子基準点であるが、これらは地表に固定してある。三角測量石柱の様に地図上の位置を動かないものである。一度、地図に書けば済んでしまい、常時、宇宙からの電波で監視するという必要はないように思える。

しかし、大震災の際に話題になるように、断層ができるので分かるように、大地も移動する事があるのだ。しかし体感できないくらいユックリと時間をかけて大地が動く。この場合、動かない事ははっきりしている基準枠に対して大地がどう動いたか見なければならぬ。「動かないもの」の代表格ではある大地も基準枠としては利用できない。不動なのは人工衛星軌道枠なのである。日本列島に固定した電子基準点はこの不動の人工衛星軌道枠に対する動きを教えてくださいるのである。

日本列島の動きを見る

電子基準点の大事な役目の一つは、常時、日本列島の動きを見ていることである。自動車でも大地の上を動くものである。大地の動きを測るには動かないものを別に見つけなければならぬ。大地の動きはその「動かないもの」から見て動いたということである。

この「動かないもの」が GPS や「みちびき」を含む「全球測位衛星システム」なのである。すると「バカなことをいうな、人工衛星は地球をグルグル回って動いているじゃない！！」と反論されるかもしれない。そこで言い方を変えよう。人工衛星の各時刻の位置が地球重心を原点とする三次元の地心座標系の中で正確に分かっているということである。

「GPS で車の位置がわかる」のは、まず人工衛星に相対的に車の位置をきめて、次に人工衛星の地心座標を使って、車の位置を地心座標系の中に計算で落とし込むことである。大地の動きを測るとは、車の代わりに、まず人工衛星に相対的に大地に固定された電子基準点の位置を決め、次に人工衛星の地心座標を使って電子基準点（＝その場所の大地）の地心座標を計算することである。

ただ「何十メートル動いた」が分かればよい車のGPSと違って、「一年で1センチ」といった小さいゆっくりした動きを測るので、電子基準点のような高度な受信機のネットワーク群が必要になるのである。



図 2015年8月から2016年6月の間の日本列島の地殻変動。右下に「20cm」の変動（水平）の大きさを示した。2011年の東北大震災と2016年4月14日の熊本地震の影響が見られる。熊本地震では1～2mもの変動があった。また東北大震災のぶり返しがみられる。

東日本大震災後の日本列島の変形

このような観測によって地震の際の地殻変動などが分かるようになっている。例えば、図は 2015 年 8 月から 2016 年月の間の日本列島の地殻変動である。この間の 2016 年 4 月 14 日に熊本地震があったので、この地域では 1~2m もの変動があった。この地震の影響のほかに、東北地方の動きの異常が見られる。東北地方の北の北海道でも、その西南の関東・東海・近畿・四国・・・でも左にずれているが、東北の部分だけが西に 10cm ぐらいの大きさを動いている。これは東北大震災のぶり返しのような変動（余効変動）と見られる。地震があると列島の形が変わるような変形も起こるのである。地震の影響を差し引いても、どこも年間で数センチずつ西に移動している。これは日本列島がその上に乗っている地下にあるプレートのゆっくりとした移動に原因がある。

天文学的には地球も動いている

「不動の大地」とかいうが、天文学的には地球は自転しているし公転もしている。地球の重心の公転運動はそれこそ天文学的な長い時間でしか変化しないから考慮から外しておく。ここで話題にしている「大地の変動」に関係するのは、地球全体のかたちと自転である。かたちの変形がなくても自転軸の方向が変わることの影響がある。自転軸の方向の星の位置は空で動かないはずなのに動いて見えるのは、その星が動くのではなく、自転軸の方向が微動しているからである。この「地球の姿勢」は 19 世紀末の天文学の大きな課題でした。そして天体力学の粋を凝らした計算でこの変動（歳差や摂動）の大筋は理解されている。しかし、人工衛星を用いた地上の測位の技術が高度になってくると、より精度のよい情報も必要になっている。

VLBI

電子基準点を用いた 20km 間隔というキメの細かい大地の変動ではなく、地球全体としての変形を調べるには、間隔が数 1000km での変動を見る必要がある。これは VLBI という宇宙電波望遠鏡のネットワークを用いて行われている。人工衛星からの電波ではなく電波を出す天体を離れた場所で観測して互いの間隔を測ることである。

電波天体としては出来るだけ遠方でかつ強い電波を出すものが好都合なのでクエイサーが選ばれる。百分の 1 秒程度での強度の微妙な変動をみる。それが

達する時刻の差から二つの電波望遠鏡の間の距離が出せるのである。もちろんこの為には両方で非常によく同期された時計をもっていることが必要である。こうした目的のために国内に十個ぐらいの電波望遠鏡がある。また国立天文台水沢がおこなっている VERA はこの VLBI の精度をよくするため大気の影響を打ち消す工夫をおこなった観測である。

電子基準点は GPS の補正役

電子基準点が GPS の様な人工衛星群からの電波を受信することで、日本列島そのものの変形が分かることをみた。その観測結果は地震の予知などで一般の人にもとどくが、実際に使うのは専門家だけである。しかし電子基準点の利用はこうした自然科学的な観測に利用されるだけではない。じつは電子基準点は GPS でのいろいろな位置の測定、測位、の精度をよくする脇役として社会のインフラストラクチャーになっている。

測位の精度・誤差

最近ではスマホでもカーナビでも GPS の様な人工衛星からの電波を受信して、位置が知るのが当たり前になっている。だが、その仕組みにまでは理解は広まっていない。「最低 4 個の人工衛星からの電波信号を受け取って、信号の到着の時間差から位置が分かるのだ」という原理は知っていても、「どれほど正確に位置が決められるのか？」と、もう一步突っ込んで考える人は少ないだろう。「位置を知る」と言ってもいろいろある。山中の遭難者を探すときには 10 メートルほどズレていても構わないが、カーナビで 10 メートルずれたら大変である。また、道路、橋梁、線路、建築土台などの工事の測量では 1 センチずれていても困る。この様に、「位置を知る」にも目的に応じて許される誤差（不確かさ）はいろいろなのである。

電離層と大気での電波速度の変動

人工衛星からの電波を一か所で受信するだけでは、測位の誤差は最大 50 メートルぐらいにもなる。誤差の主な原因は、電波が電離層や大気を通過する際の速度が変動するからである。光速は真空中では一定だが、物質中ではわずかに変化する。しかも、そのズレかたは一定ではなく、太陽活動や天候により日々変動するのである。

速度がズレれば、信号の到着時間もズレるので、測位にも誤差が生ずる。じつは我々がスマホやカーナビで使っている位置情報はこのズレを常時補正したものである。この補正に電子基準点は大きな役割を果たしているのである。

DGPS

電波の速度のズレの原因となる電離層や大気の状態は場所が数キロメートルと近ければ同じである。このため、近い二つの地点の相対的な位置は、二つの地点での到着時間の引き算で決まるので、同じズレの効果は消し合う。だから近くの2点の間の測位は誤差なく決まる。二つの地点の一つが位置の確定した電子基準点であれば、そこからの相対的測位で、スマホやカーナビの絶対的な位置が決まる。こうやって、大気通過に伴う誤差の修正は原理的に可能になる。

しかし電子基準点は近くに何時もあるわけではないので、粗っぽい補正になる。携帯電話のアンテナも同じように使えが、こういう地上波で送ってくる補正情報を利用してスマホやカーナビの測位は行われているのだ。この方式をDGPS という。Dはディファレンシヤ differential 差分の意味である。

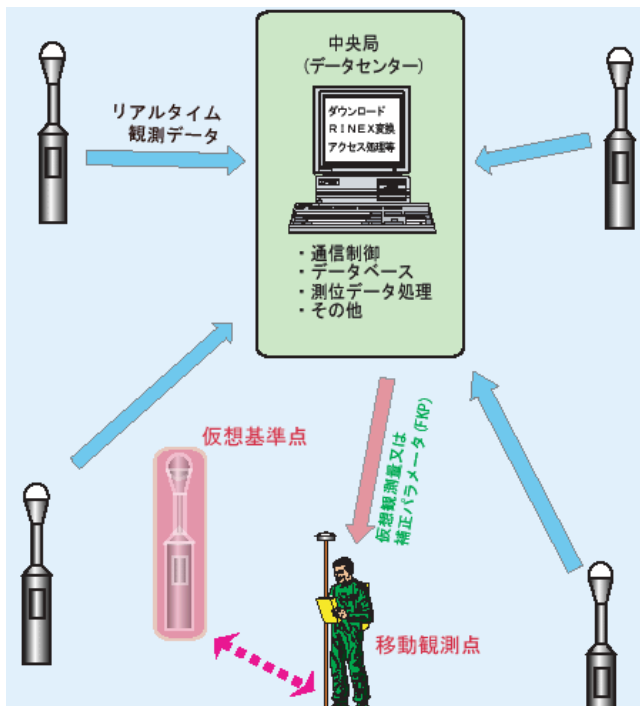


図 仮想基準点による測定のしくみ (図の出典：国土地理院 HP)

仮想基準点：土木や建築の精密測量法

スマホの地図上で位置を確かめる場合は1メートルズれていても、目立たないが、土木や建築の測量では誤差は1センチ以下にしなければならない。こういう、精密な測量にはもう少し複雑なかたちで電子基準点が使われている。

精度と簡便さを併せ持つ「仮想基準点」法である。この手順は次のようである。ここで「中央局」とはコンピュータを備えたサービス事業所であり、「移動局」とは測位をする現場の受信機である。

- 1) 電子基準点からの GPS 衛星からの連続観測データを中央局で収集する
- 2) 移動局から携帯電話で中央局に連絡、移動局の概略の位置情報を中央局は知る
- 3) 中央局は、移動局の測位に利用可能な3点以上の電子基準点を決める
- 4) 中央局で決定した電子基準点の観測情報や位置情報から、移動局の近くに仮想の基準点を想定して、そこで得られるであろう GPS 衛星からの観測データを生成する
- 5) 移動局に仮想基準点の位置情報と生成した観測データを携帯電話で伝送する
- 6) 移動局では、中央局から伝送された情報と GPS 衛星から直接受信した情報で、自分の位置を決定する

これは、移動局が電子基準点から遠いことを補う手法である。仮想的に電子基準点を近くに設定してそこでの信号を「生成する（予想する）」。そして、この仮想基準点と移動局の2地点での DGPS を行うのである。仮想基準点からの信号を「生成する（予想する）」できるは、周囲の複数の電子基準点の情報があるからである。