

GPSの基礎知識（測地系、精度に関して）

1 測地系とは何？

測量の分野では、地球上での位置を経度・緯度で表わすための基準となる座標系、及び地球の形状を表わす楕円体のことを測地基準系といいます。各国の測地基準系が測量技術の制約等から歴史的に主に自国のみを対象として構築されてきたことから、数多くの測地系があります。

2 世界測地系採用の理由等

日本測地系（日本の測地基準系を指す固有名詞で、GPS 器機では『トウキョウ』と表示される測地系）から、わが国も、世界各国で共通に利用できることを目的に構築された世界測地系を採用することとした測量法の改正がありました。

測量法の改正により、地図や測量の分野では大きな影響を受けますが、その改正の一番大きな理由は、測量技術が進歩した結果だと言うことができます。

従来の測量は、トランシットを使った地上での測量でしたが、最近の測量では GPS や VLBI（超長基線干渉計）など衛星や電波星を使った測量に移行しています。その結果、従来の測量では得られなかった精度での測量が可能になり、VLBI では数千 km で数 mm という高い精度で、GPS では測定方法により、20m ~ 1cm という精度が得られることとなります。

このように、近年、GPS をはじめとする人工衛星を用いた測位技術が発展し、世界測地系を用いた精度の良い位置決定や測量が普及してきました。このような高い精度で測量を行うと、従来の測量での誤差や地殻の歪や、さらに、地球上での日本列島の位置が違っていることなどが分かってきました。日本列島の位置が違っていると、GPS を使った場合に問題となります。

世界測地系で決定された経緯度を日本測地系に整合させるためには、煩雑な変換計算が必要であるため、技術的な障害となってきたことと、日本測地系で表すためには、世界測地系で得られた経緯度を GPS 受信機内部で日本測地系へ変換しなければならないため、どうしても、無用な精度劣化が生じることから、世界測地系に変更されました。

3 緯度・経度はどのくらい違うこととなるのか？

日本測地系が採用しているベッセル楕円体と世界測地系が採用している GRS80 楕円体は、大きさ・形状及び中心位置が異なります。その影響で、日本測地系と世界測地系の測地基準点成果での経度・緯度の変化は場所によって異なることとなります。

（例）　〔世界測地系 - 日本測地系〕

	緯度の差（距離換算）		経度の差（距離換算）	
稚内	約+ 8 秒	（約 240m）	約-14 秒	（約 350m）
東京	約+12 秒	（約 360m）	約-12 秒	（約 300m）
福岡	約+12 秒	（約 360m）	約- 8 秒	（約 200m）
那覇	約+14 秒	（約 420m）	約- 7 秒	（約 180m）

したがって、原点の地上での位置は、東京付近（9系）で緯度は南へ約 12 秒、経度

は東へ約 12 秒移動します。これにより原点周辺の各基準点の座標値は、X は約 + 360m、Y は約 - 300m 変化します。日本測地系における日本列島の位置は、世界測地系で表した位置に対して、全体的に北西方向に 4 6 5 m 程ずれていることが明らかになりました。

4 日本測地系の歪みについて

平成 14 年 3 月末まで我が国が使用していた日本測地系には観測誤差が含まれており、日本測地系と世界測地系との差は、上記のずれの値に、さらにこの誤差が加わったものになります。この誤差は日本経緯度原点から遠くなるほど大きくなり、北海道などでは 10m 以上になるそうです。これは日本測地系の歪みを意味し、通常日本測地系で表した経緯度はこの歪みの影響を受けています。

また、島嶼の位置もこれまで三角測量や天文観測によって求められていた経緯度とは大きな差があることが分かりました。

5 世界測地系というものは単一のものではない！

世界測地系は、概念としてはただ一つのものですが、国ごとに採用する時期や構築に当たっての詳細な手法及び実現精度が異なります。構築にあたって詳細な手法のうち代表的なものに、ITRF 系、WGS 系、PZ 系の 3 種類あります。

改正された測量法では、位置の表示に地心直交座標を用いることができることが新たに規定されましたが、この地心直交座標系として、具体的には 1994 年における地球の状態に基づいて規定された ITRF 系の座標系である ITRF94 座標系（1994 年制定）を使用して位置を表示することとしています。

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、測地成果 2000 という呼称が使用されています。

6 GPS における世界測地系の WGS 系の位置付け

GPS は定まった軌道上を電波を発射しながら周回している GPS 衛星により、地球上どの地点においても測位情報を得ることができるシステムです。

WGS 系で、1984 年に制定されたものを WGS 84 といい、米国が構築・維持している世界測地系です。GPS は、もともと軍事用で開発されたため、WGS 系で運用されています。

GPS で採用している WGS84 系は過去 2 回の大きな改訂を経て測地成果 2000 の算出基準となっている ITRF 系に接近し、現在両者の変換パラメータは 1 cm 以下と言われており、両者は実用上同一と見なして差し支えないとされています。

なお、GPS 器機では、WGS 系の数値で認識、計算され、使用者が指定する測地系の緯度、経度データ等に変換して表示しています。変換することによって、精度劣化も生じます。

7 カーナビゲーション装置と携帯 GPS の精度の違い

我々が使用する携帯 GPS は、単独測位法によるものであり、カーナビゲーションによる GPS 測位ほど精度は高くありません。

カーナビ等では、衛星受信データに、FM 多重放送（全国中の多くの基地局から発信）の DGPS などを使って補正し、これを利用して高い位置精度を確保しています。携帯 GPS に FM 多重 D-GPS システムの受信ユニットとを取り付ければ、多くの地域でカーナビ等と同様な受信精度を保つことは可能です。

8 携帯 GPS の精度について

携帯 GPS の基本的精度は数 m（GPS 信号に影響してくる電離層や大気圏通過時の遅延等による誤差源によるものでは 4.5 ~ 9.0m）とされています。

しかし、精度が数 m であっても、受信状態（衛星の配置状況、受信衛星数）や受信感度性能によって測定誤差は大きくなることがあります。同一の器機を使用し、同一の地点で測定した場合でも、測定誤差が生じます。

GPS の測定誤差を発生させる原因として、電磁波の伝搬速度、電離層の影響、大気圏の影響等がありますが、これらの誤差は衛星の配置状況によって拡大されます。これを幾何学的測定精度といいます。我々が森林内で行う測位は、空が開けていないことが多く、受信できる衛星が必然的に少なくなるとともに、谷方向（傾斜方向）の衛星が選択的に受信されるため、幾何学的測定精度の影響を受けやすくなります。

したがって、実際の衛星情報の受信の際では、良い状況下での PDOP（位置精度低下率）の値はだいたい 2 ~ 6 位ですから、予想する精度としては、良い受信機の場合 9 ~ 30m となります。

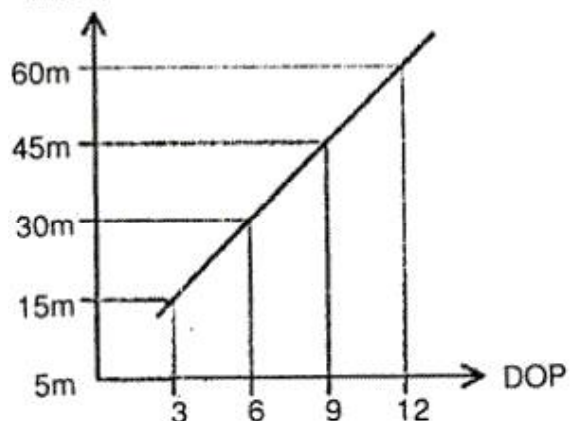
衛星の配置状況によって誤差が拡大してしまうことがあり、測定する箇所の傾斜や樹冠の有無などによって、配置状況の悪い衛星しか受信できないことや、衛星情報を受信できないことすらあります。衛星情報の受信感度性能は、GPS の機種によって大きく異なります。悪い受信状態では、精度としては 60m 程以上にもなることを念頭に置いておく必要があります。

9 携帯 GPS で良い精度の測位をする方法

精度の高い測定をするためには、4 衛星から測定値が取れ、それらの衛星同士の相対角度が大きい時間帯に行うことが重要になります。GPS の測位精度は受信点から見た衛星の幾何学的配置に影響され、受信点から見てそれぞれの衛星の方向がまんべんなく散らばっていれば精度が良くなり（但し、受信が可能な衛星でなければならない。）1 方向に集まっていれば精度は悪くなります。

衛星の配置状態によって決まる測位精度の劣化を DOP（測位精度劣化係数、Dilution of Precision）といい、右図のように DOP 値が小さいほど測位精度は良くなります。

誤差 (RMS)



10 測地成果 2000 作成における測量の有無

国土地理院は、測地成果 2000 の公表に際して、国家基準点の等級や地殻変動量の大小に応じて手法を使い分けて、日本中の測量をやり直したといえます。具体的には、宇宙測地技術を駆使した VLBI や GPS を利用した電子基準点の観測値に基づいて、全国の三角点について新たに計算し、測地成果 2000 の水平位置を求めたそうです。

原点位置の移動に伴う座標値の変化に加え、従来の測地基準点成果が持っていた歪み（北海道で約 9m、九州で約 4m の全国一律でない変化）についても、世界測地系への移行に際して解消したとのこと。（但し、平成 14 年の移行時に日本測地系から世界測地系への変換パラメータに誤りがあった地域もあります（沖縄八重山地域外）。）

11 国土地理院の刊行物における対応

(1) 基準点

地理院から刊行されているデータのうち、基準点（電子基準点、三角点、水準点）は新測地系の緯度経度で表されています。

(2) 紙地図

25,000 分の 1 地形図などの地図は、新刊から順次、新測地系対応となっています。新測地系への対応には、次の 2 種類あります。

- ・従来の地図のままで、図の 4 隅の緯度経度が新測地系の緯度経度になっている暫定的な対応。
- ・地図の範囲が新測地系の範囲となった完全な対応。

当面は暫定版の地図が刊行されますが、2003 年秋ごろから完全な対応がなされた地図が刊行される予定。

(3) 数値地図

数値地図に関しては、刊行分は変換ソフトで対応し、新刊から新測地系の座標となります。

12 数値地図での歪みの補正又は G P S での日本測地系への変換

(1) 数値地図における日本測地系から世界測地系への変換

今回の測量法の改正には日本測地系における歪の補正は明示的には表現されていませんが、国土地理院の数値地図では、従来の測地基準点成果が持っていた歪みを解消しつつ世界測地系に変換するプログラム（国土地理院公開プログラム TKY2JGD）を使用して、自動的にこの歪の補正が行われているようです。

この国土地理院公開プログラムにそって行わないと、変換パラメータのみによる幾何学的変換だけでは、もとの測地系の歪みについてはその歪みを維持したまま変換します。したがって、日本測地系（TOKYO）には北海道や九州・中国・四国などにおいて、最大 9 m（離島では数十 m になることもあり）の測地網の歪みによる誤差がありますので、世界測地系への変換を行った場合もこの歪みを解消できないこととなります。

* G P S は世界測地系で受信、運用されており、世界測地系（WGS84 系）で表示

された緯度、経度の測定値は、世界測地系である測地成果 2000 上の緯度、経度の値とほぼ一致します。

(2) GPSでの座標の変換について

GPSは元々世界測地系で運用、受信されているものであり、測地系を Tokyo に変更した場合には、器機内で受信データのパラメータ変換を行い、緯度、経度を表示することになります。この日本測地系への変換では、JGD2000 という測地系から旧測地系への変換というプロセスを経ないと正しく日本測地系への変換ができません。もし、JGD2000 という測地系でなく GRS80 ないしは WGS84 から旧測地系への変換を行った場合は、その変換の工程が問題となります。

GPS 受信機などでサポートされている WGS84 から旧測地系 (Tokyo) への変換は数式で行っているのみで、従来の測地基準点成果が持っていた歪みを補正する機能が無いものもあるそうです。そのため、GPSを使った日本測地系の表示については、誤った緯度、経度情報を表示するものもありそうです。

(3) 測地系の違いによる緯度、経度の差異について (EMPEX の例)

EMPEX 商品開発部 (山内氏) より、日本測地系使用時における誤差に関して次のとおり回答がありました。

GPS の測地系は WGS84 を使用し、それをそれぞれの測地系に変換しています。日本測地系変換するとき使用するパラメータが 2 通りあり、当社の GPS では 3 パラメータを使用しております。そのため、誤差が発生しております。

パラメータについては下記を参照。

「地域毎のパラメータ」と「3 パラメータ」(ちいきごとのばらめーた とさんばらめーた)

「地域毎のパラメータ」は、楕円体の大きさ、形状、位置 (つまり座標系) の他、「測地網の歪み」も考慮された座標変換パラメータです。測地網の歪みは地域毎に異なるため、変換パラメータの値も地域毎に異なります。ちなみに、「測地網の歪み」の主な原因は「測地原点から離れるに従って大きくなる 累積誤差」です。

一方、楕円体の大きさ、形状、位置 (つまり座標系) による座標値の違い、すなわち、座標変換パラメータは、楕円体パラメータ (a , f) と、原点 (楕円体中心) の相対位置 (dX , dY , dZ) だけで表すことができます。この (dX , dY , dZ) を「地域毎のパラメータ」に対し「3 パラメータ」と呼びます。3 パラメータは、「東京大正」三角点で測定・定義されました。

一般に、地域毎のパラメータの方が 3 パラメータより、精度良く座標を変換することができます。しかし、地域毎のパラメータは、一部離島では未整備のため利用できない場合があります。「地域毎のパラメータの方が精度が高いので地域毎のパラメータがあるところはいつでも地域毎のパラメータを使う」という考え方は正しくありません。「地域毎のパラメータ」と「3 パラメータ」のどちらを使うかは、変換する座標値の性質や変換の目的に応じて正しく判断しなければなりません。

13 具体的な変換方法（株式会社アルプス社のHPより抜粋し、一部編集）

旧測地系から新測地系へデータを変換する基本的な変換方法は次のようになります。実際にデータ変換する時は既製のソフトを使って行うことが一般的です。

(1) 変換方法の種類 変換方法には次の4種類あります。

3次メッシュ毎の地理院提供の変換パラメータにより変換する。

測地成果2000を基準にして、以前の測量結果を計算しなおす。（改算）

測地成果2000を基準にして測量しなおす。（改測）

改算、改測の結果を利用して、その地域により合った変換パラメータを求め、そのパラメータにより変換する。

これらのうち、2～4は公共測量で基準点データの変換に用いられる方法であり、一般には1の方法で変換します。

(2) 3次メッシュ毎の変換パラメータによる変換方法

3次メッシュというのは、日本全国を約1km四方のメッシュに分割したメッシュです。この1km四方のメッシュ毎に緯度と経度の変換パラメータがテキスト形式のファイルとして、地理院より提供されています。ファイルはTKY2JGD.parという名称で、地理院のホームページからダウンロードできます。このソフトは、変換したい緯度経度をテキストファイルで用意しておき、プログラムを実行すると、変換後の緯度経度がテキストファイルで出力されるものです。公共測量ではこのソフトを利用することが標準となっています。

この変換パラメータを使った変換では、次のように緯度経度の変換を行います。

新緯度 = 旧緯度 + dB

新経度 = 旧経度 + dL

この式で、dB、dLは緯度経度の補正量で、その値はおおよそ

dB：+ 2.7 ~ + 19.8 秒

dL：+ 1.6 ~ - 14.8 秒

の範囲で変動します。このように、変換は旧の緯度経度に補正量を足すだけの単純な方法となっています。

この補正量の内訳は次の2つの変更分から成り立っています。

楕円体がBessel楕円体からGRS80楕円体になることによるもの。

測量誤差や地殻のひずみ等によるもの。

この変更分のうち、1の楕円体によるものが殆どで、2の測量誤差などによるものは0.3秒程度、距離にして10m程度の変化量となっています。

求めたい点での緯度経度の補正量は、その緯度経度が属する3次メッシュの変換パラメータから求めます。

14 GPSと衛星との関係（参考）

株式会社ニコン・トリンプルのホームページより（抜粋）

・正確な時刻は衛星との距離を計る鍵です。

- ・衛星には原子時計が積まれているので正確な時を伝えます。
- ・数学的に受信機の時計の誤差を修正できるので、精密な時計を受信機に内蔵する必要はありません。
- ・4衛星から測定値をとることに秘訣があります。
- ・4測定値の必要性は受信機の設計に影響します。

光は秒速約 299,800 キロメートルで進みます。(と、言うことは) もし、衛星と受信機の同期が 100 分の 1 でもずれていれば、2,998 キロメートルも離れた場所を指してしまうこともあります！ ならばどのようにして衛星と手元の受信機が同期しているかどうか確かめることができるのでしょうか。

衛星側には非常に正確で信じられないほど高価な原子時計が積んであるので時間が狂う心配はありません。原子時計の価格は一つ約 100,000 ドル程で、どのような場合でもかならず一つは動いているようにするために各衛星に 4 つずつ付いています。原子時計は特に原子力で動いている訳ではなく、ある特殊な原子の振動をメトロノームとして使う所からその名前が付きました。

原子時計は何よりも安定している時の標準器です。ですから原子時計が正午であれば本当に正午なのです。ということで、衛星の方はさておき、地上の側はどうでしょう。もし全ての GPS 受信機に 10 万ドルもするような原子時計を付けなければならなかったら、最高級の大型ヨットくらいにしか、受信機を積むことはできないでしょう。

GPS へ数学的な補助

幸い受信機にはそれほど精密な時計は必要ありません。その秘密は、4 つ目の衛星の計測にあります。4 番目の衛星の観測により、不完全な同期をおこしている受信機の誤差をとくことができます。(これで何故、理論的には 3 つの計測だけで位置がわかるかがわかっていただけだと思います。)

3 つの正確な計測値があれば位置を確定する事ができます。しかし不正確な時間情報に対してでも時間の狂いが一定であれば、4 つ目の衛星からの測定値で修正できます。

単に言ってしまうえば、衛星同士の相対角度が大きければ大きいほど、良い測定値がとれるということになります。

ですから、良い受信機には、頭上の受信可能な衛星の中から 4 つの、相対角度が一番良いものを選び出すコンピュータがついています。こうすることにより出来る四角の大きさを小さくすることが出来ます。

更に難しいことが出来るコンピュータのついている受信機ならば、受信可能な全ての衛星の相対関係から現在地を割り出すことが出来ます。この方法を使えば、GDOP 誤差値を最小限に押さえることが出来ます。

GPS の精度

GPS の精度は幾つかの誤差の和で表されます。そして各々の誤差の値は、大気の状態や使用している受信機とその周辺機器の状態によっても変わります。更に、GPS

の精度は国防総省により「セレクトティブ・アベイラビリティ(S/A、エスエーと呼ばれる)」とよばれる運用モードで、わざと精度が落とされています。

S/A は敵対する戦力に対し、戦略上有利な情報を与えてしまわないようにするために生み出されました。S/A モードの誤差は、数ある誤差の中で、一番大きい誤差といえるかもしれません。(*なお、2000年5月より SA (Selective Availability = 人為的な精度劣化) を停止する決定が大統領声明という形で発表されています。現在では、通常の状態では S/A は無いと思われます。)

誤差値表

(ブロック I 衛星の中で、実際に見られる値)

誤差源 (典型的なもの)

衛星内の原子時計誤差 0.6m

放送暦誤差 0.6m

受信機誤差 1.2m

大気圏・電離層遅延 3.6m

S/A で起こりうる最悪の誤差 (実行された場合) 7.5m

合計 (自乗の和の平方根) 4.5 ~ 9.0m (S/A の値により変化する)

上記の値に「位置精度低下率:PDOP」の値を掛け合わせるにより精度を予測することができます。良い状況下での PDOP の値はだいたい 4 ~ 6 位ですから、予想しうる精度の値は以下ようになります。

良い受信機の場合 18 ~ 30m

ひどい場合 60m

S/A が実行された場合 105m

まとめ

- ・ GPS 信号に影響してくる電離層や大気圏通過時の遅延は、測位精度に影響してきます。
- ・ 誤差の幾つかは、数学的処理や模試化することにより打ち消す事ができます。
- ・ 他の種の誤差源として、衛星の時計や受信機の狂いやマルチパスの影響があります。
- ・ 衛星の配置状況によっても、誤差を拡張してしまうことがあります。

15 GPSで得た緯度、経度情報のXY座標への変換

緯度、経度情報では、直間的な距離の違いが解りませんが、これをXY座標へ変換することにより、距離感が数値として把握でき、分布図の作成等大変便利です。

(1) 変換ソフトの概要

変換ソフトは、菰口恵さんという方が作成したエクセルアドインソフト (ConvBLXY2000 - 座標変換アドイン Ver.2.00) のフリーソフトを西表森林環境保全ふれあいセンターでは使用しています。

このアドインは、測位座標系（BL）と平面座標系（XY）間の投影計算を行う関数を組み込むものです。

このアドインを組み込むと、次の4つのユーザー定義関数が組み込まれ、通常の間数と同様に利用することができます。

- ・ bltoxy - 緯度経度から X Y 座標に変換（日本測地系用）
- ・ bltoxy2000 - 緯度経度から X Y 座標に変換（世界測地系用）
- ・ xytoobl - X Y 座標から緯度経度に変換（日本測地系用）
- ・ xytoobl2000 - X Y 座標から緯度経度に変換（世界測地系用）

(2) アドインの方法

ア エクセルを起動する。

イ メニュー【ツール】から【アドイン】を選択する。

ウ アドイン・ダイアログボックスが表示される。

エ 参照ボタンを押し、「ConvBLXY2000.xla」を探して選択します。

オ アドイン一覧に「緯度経度変換」が追加されます。

カ 「緯度経度変換」をチェックしOKボタンを押しします。

(3) 利用方法

（緯度経度から X Y 座標に変換する場合）

形 式： = bltoxy（緯度、経度、系、出力値）

又は

= bltoxy2000（緯度、経度、系、出力値）

緯 度：「DDMMSS」形式で入力するか、その形式で入力しているセルを指定する。

DD は度の数値、MM は分の数値、SS は秒の数値を表す。

経 度：緯度と同じ形式で指定。

系 : 原点となる座標系を入力するか、その値が入力されているセルを指定する。

（値の範囲：1～19）

原点座標系については「国土交通省告示第9号」を参照。

なお、1) 沖縄県のうち東経126度から東であり、かつ東経130度から西である区域は15系、2) 沖縄県のうち東経126度から西である区域は16系、3) 沖縄県のうち東経130度から東である区域は17系となっており、この場合にはそれぞれ、『15』、『16』が座標系の値となります。

出力値：XとYのどちらを出力するかを0か1で指定します。

（0 = X座標，1 = Y座標）

（X Y 座標から緯度経度に変換する場合）

形 式： = xytoobl（X座標、Y座標、系、出力値）

又は

= xytoobl2000（X座標、Y座標、系、出力値）

緯 度：X座標（m）で入力するか、その形式で入力しているセルを指定する。

経 度：緯度と同じ形式で指定。

系 : 原点となる座標系を入力するか、その値が入力されているセルを指定する。

（値の範囲：1～19）

出力値：緯度と経度のどちらかを出力するかを0か1で指定します。

（0 = 緯度，1 = 経度）