

第4講：森林 GIS データの構築（2）

本講では、現地調査によって GIS データを収集する上で最低限必要な基本情報である位置情報の収集法について扱う。ここでは座標に関する測量学について復習し、コンパスおよび GPS を用いた座標取得法について演習する。

1. 座標の基礎

GIS データにとって最重要である位置情報とは、“空間上の位置を一意に決める情報”である。位置情報は座標として伝達されるが、座標は座標系の設定の仕方によって無数の表現が可能であり、実際に用途ごとに異なった座標系が用いられている。GIS 上で複数のレイヤを正しく重ね合わせるためには、GIS の座標系を正しく設定し、また時には収集した GIS データの座標系を変換する必要がある。

ここではまず、平面位置と高さの位置の定義を確認しておこう。通常、“高さ”を表す指標として“標高”が用いられる。標高は“ジオイド面からの鉛直距離”であるが、このジオイド面の起伏が座標変換の手順を複雑にしている。ジオイド (Geoid) とは“地球重力の等ポテンシャル面のうち平均海水面に一致するもの”で、簡単に言えば世界中が海であった場合の水面の形である。地球上の等重力面は、地中の物質密度の不均一性により、凹凸をもっている。例えば日本周辺のジオイド面は図 4.1 のように激しい凹凸がある。水準測量（レベル測量）において水準器を利用して求めた水平面は、その地点におけるジオイド面に平行な面に相当することになる。結果として水準測量では“ジオイド面からの鉛直線の高さの差”を計測していることになる。

ジオイドを利用した高さの表現方法である標高は、“海面に対する比高”として直感的に理解しやすく、また精密な測量も容易である。しかし一方で、空間上の位置を一意に決める情報としては不完全である。すなわち、空間上での位置を定めるためにはジオイドの形状に関する情報を必要とするのである。しかしジオイド面は複雑な形状をしており、正確な計測が困難である。

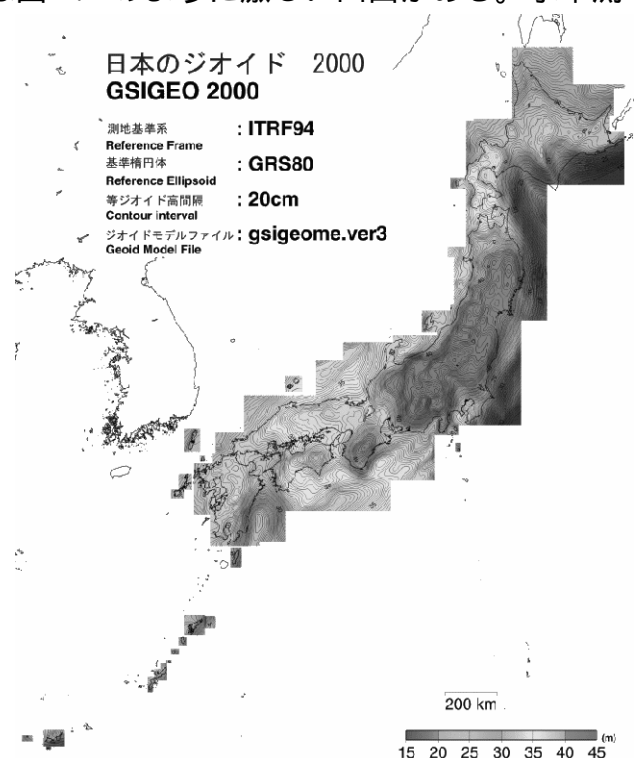


図 4.1 日本周辺のジオイド (国土地理院 HP より)

一方，平面上の位置は通常，緯度と経度で表される。これは地球を楕円体と見なした場合の位置であるから，単純な幾何学的計算から算出することが可能である。ただし，地球をどのような楕円体と見なすかによって数値が変化する。この楕円体のことを準拠楕円体という。平成 14 年 4 月から，日本で使用される緯度，経度の座標値が変更されたが，これは日本で明治以来使用されてきた「ベッセル楕円体準拠の日本測地系」が「GRS80 楕円体準拠の世界座標系（JGD2000）」に変更されたのである。このため，旧表記の緯度経度を現在の地図上で表すと，北西方向に 400～450m 程度ずれて表記される。注意したいのは，日本測位系が間違っていたというわけではないことである。あくまで日本測位系はベッセル楕円体のある原点をもって配置させたときに算出される座標値を示すものであって，正しい座標表現の一つである。単に，地球全体により適合した楕円体に準拠する測地系に置き換えられたというだけである。

地球上のある地点の座標値を確定するためには，その地点の正確なジオイド高が分かっているなければならない。図 4.2 のように空間上の任意の点は，緯度，経度とともに楕円体高（エリプソイド高）で表されるため，ある測地系の緯度，経度，標高を別の測地系の緯度，経度，標高に変換するためには，ジオイド面の形状に関する精密なモデルが必要となる。図 4.3 に，この変換に必要なプロセスを示す。

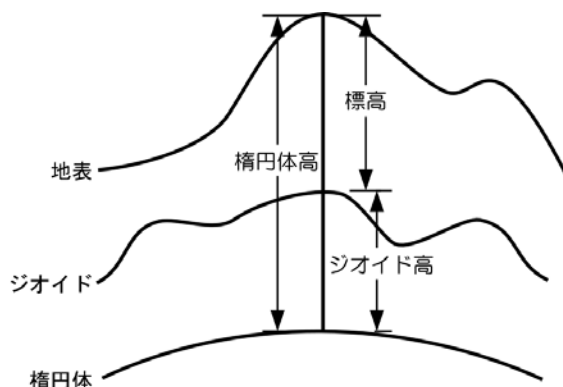


図 4.2 楕円体高・ジオイド高・標高の関係

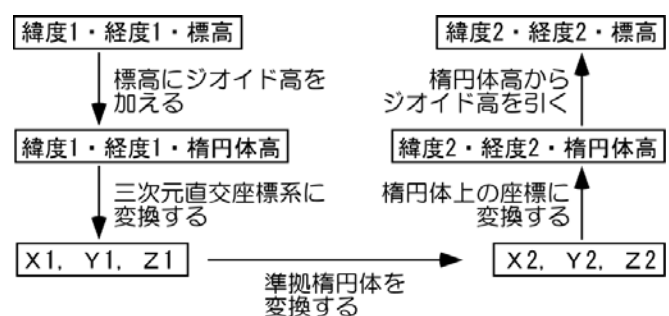


図 4.3 測地系の変換手順

さて，緯度と経度は直接計測することが困難である。例えば二点間の距離や方角を求めるのでさえも，複雑な計算が必要になってしまう。そこで楕円体表面の曲面を平面に投影し，その (x, y) 座標で位置を表す平面座標が用いられる。曲面を平面に投影するため厳密には正確でないが，図面全体の歪みをある範囲以下で押さえるように設計されており，日本では，(1)平面直角座標系（日本独自）と，(2)UTM 座標系（世界共通），の二種類が用いられる。平面直角座標系は，日本の領域に 19 の座標系が設定されており，測量法によって都府県界（北海道では支庁界）ごとに使用すべき座標系原点が指定されている（兵庫県を除く近畿各府県では東尋坊近辺の北緯 36 度，東経 136 度を原点とする第 VI 系）。一方，UTM 座標系は作成法が国際的に統一されており，南緯 80 度から北緯 84 度までの範囲が経度 6 度ごとに 60 の範囲に区切られている。日本では先島諸島の Zone51 から南鳥島の Zone56

までの6つの座標系が該当する（近畿は Zone53）。

平面直角座標系は、公共測量や国土地理院発行の 1/2,500 , 1/5,000 , 1/10,000 国土基本図・地形図など、比較的狭い地域の大縮尺図面に適用され、UTM 座標系は、国土地理院発行の 1/25,000 , 1/50,000 , 1/200,000 地形図・地勢図や人工衛星画像など、より広い範囲の図化に用いられる。どちらも原点が緯度経度で定められているので、任意の地点の緯度経度と平面座標の相互変換は、単純な幾何学モデルで可能である。すなわち、通常は図化に便利な平面座標を用いて現地測量を行い、必要に応じて緯度経度に変換すればよい。

これらの平面座標系を利用する上で注意する必要があるのが、座標原点の異なる図面は単純に繋ぐことができない（割れ目ができる）ことである。GIS 上に複数の図面を取り込むときには、各図面と GIS 上の表示について、正しく座標系と投影法を設定しなければならない。またいずれの平面座標系においても、原点を通る子午線を除いて経度線は曲線となる。そのため平面座標での x 軸（図面の世界では南北方向の軸を x 軸、東西方向の軸を y 軸と呼ぶ）方向は真北（真南）に一致せず、方眼北と呼ばれる。例えば原点の子午線上にない点(0,100)から点(100,100)へのベクトルは厳密には真北方向ではない。

2. コンパス測量の原理

森林での現地調査でもっともよく用いられる測量手法はコンパス測量である。コンパス測量では、方位磁針が常に磁北を指すことを利用して既知点から未知点の方向を観測し、同時にその斜距離および高低角を計測することによって、未知点の座標を決定していく方法である。トランシットなど内角を精密に計測する測量機器よりも精度は劣るが、構造が簡単で、急傾斜地でも持ち運びや設置が容易であることが大きな利点である。地点間の距離の計測には巻き尺や検縄、レーザー距離計などが用いられる。

ただし日本付近の磁北は、真北に対して 2～10 度、西偏しており（南鳥島では東偏）、コンパス測量の際には方位角から西偏値を減じる補正が必要となる。厳密には方眼北も考慮しなければならないが、コンパス測量で通常用いる平面直角座標系での真北と方眼北とのずれは、コンパス測量の精度に比べて小さく無視できる。西偏値は地域によって異なるだけでなく年々変化しており、例えば関東近辺では 350 年前には 8 度東偏していたことが分かっている。正確な西偏値は方位角が既知である地点間を測量、視準して得ることができるほか、国土地理院の Web サイトで 2000 年時点での近似値が得られる。

コンパス測量における計算では、連続する 2 点間の x 軸方向の移動距離（緯距 δx ）と y 軸方向の移動距離（経距 δy ）とに分けて集計を行う。それぞれ以下の式で表される（図 4.4）。

$$\delta x = S \cos(\varphi) \cos(\theta - D) \quad ; \quad \delta y = S \cos(\varphi) \sin(\theta - D)$$

ただし、 S ：斜距離， φ ：高低角， θ ：観測方位角， D ：西偏値

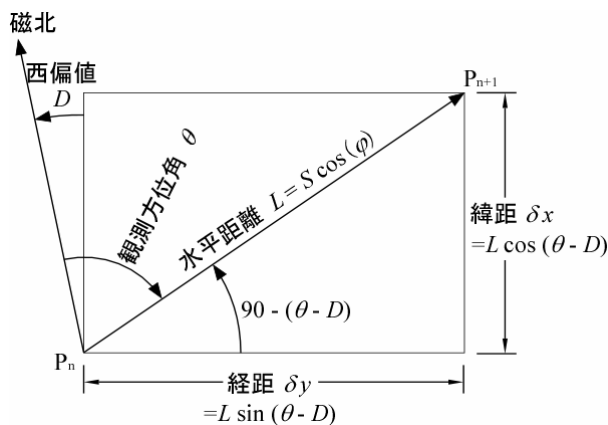


図 4.4 緯距および経距の算出

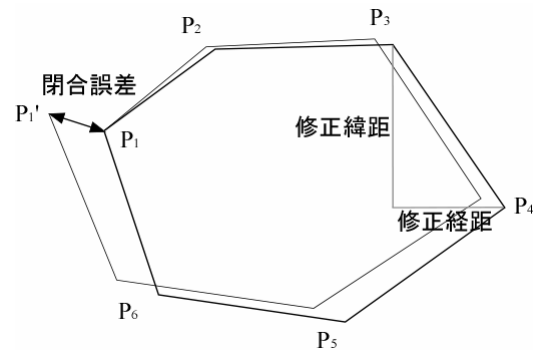


図 4.5 誤差の評価と修正

誤差を正しく評価，配分するために，測量開始点および測量終了点の座標は既知であることが望ましい。仮に完全に正確な測量が実行できたとすると，緯距および経距の合計は 2 点の既知座標の緯距および経距に等しくなるが，実際には誤差が生じる。これを閉合誤差といい，各測点で区間距離に比例して生じたと見なして比例配分を行う（図 4.5）。再計算の際の緯距および経距を，それぞれ修正緯距（ $\delta x'$ ），修正経距（ $\delta y'$ ）といい，以下の式で表される。

$$\delta x' = \delta x - \omega L / \Sigma L \quad ; \quad \delta y' = \delta y - \omega L / \Sigma L$$

ただし， ω ：閉合誤差， L ：区間距離， ΣL ：測線長の総和

この誤差配分による補正により， $\delta x'$ と $\delta y'$ の合計はそれぞれ 0 となる。また測量精度は，閉合誤差と測線長の総和の比で評価することができる。これを閉合比（ R ）といい，普通は分子を 1 とした分数で表す。

$$R = \omega / \Sigma L = 1 / (\Sigma L / \omega)$$

コンパス測量の場合，1/300 で可，1/500 で良といわれる。すなわち，300m の測線長に対して 1m 以内の誤差に抑えることが求められ，これよりも測量精度が悪い場合には，再測量が必要となる。

3. GPS 測位の原理

近年では，森林でも GPS（Global Positioning System：汎地球測位システム）を用いることが多くなっている。GPS では小さな箱に自動的に座標値を表示してくれるため，上記のコンパス測量のような計算が必要なく，人手もかからないことから，急速に普及しつつある。しかし GPS は一種のブラックボックスであり，その仕組みと特徴についてある程度の知識が必要である。特に，研究や業務として森林で GPS を扱ったり，GPS で取得した座標値を測量データとして使用したりする場合には，誤差についての正しい知識が必要になる。

GPS は簡単に言うと，衛星を使った壮大な三角測量システムである。つまり，高度 2 万 km の 6 つの円軌道に配置された 24～30 個の衛星から，測位地点までの距離をそれぞれ計

測し、その距離を用いて測位地点の位置を算出する(図 4.6)。原理上は 3 衛星からの距離によって一つの交点が決まるが、GPS 受信機の時計誤差も未知数であるため、通常は 4 個以上の衛星から信号を受信する必要がある。

GPS はアメリカ合衆国の軍事目的に構築されたシステムであり、一般の利用に対しては制限が掛けられている。しかし、もっとも大きな利用制限であった S/A (Selective Availability: 意図的に精度を落とす操作) が解除された 2000

年 5 月以降、数万円の安価な GPS 受信機でも、開放地で数 m の精度で座標値を取得できるようになり、急速に普及が進んでいる。

GPS の測位方法には 1) 単独測位、2) コードディファレンシャル測位 (DGPS)、3) 干渉測位、の 3 種類がある。測位方法が 3 種類あるのは、衛星と測位点との距離の計測方法および誤差の解消方法に関連するので、GPS の仕組みについて、もう少し詳しく解説しておく。

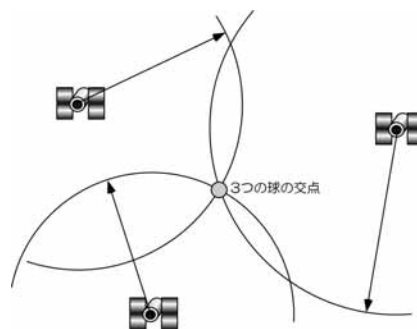


図 4.6 GPS 測位の原理

3.1 受信機、衛星間の距離計測

GPS では受信機と各衛星との距離を計測するが、一般に 2 種類の距離計測法がある。なお、ここでいう“距離”には、受信機と各衛星の時計の誤差が含まれているので、正確な距離ではなく、“疑似距離”とよばれるものである。

GPS 衛星からは、L1 帯と L2 帯、二種類の波長の電波が発信されており、それぞれの波長帯に測位のための情報がいくつか載せられている。通常の安価な GPS 受信機では、L1 帯の航法メッセージ（全ての衛星の軌道および健康状態に関する情報）と C/A コードを利用して測位を行っている。一方、測量用など高価な受信機には、L1 帯の情報に加えて L2 帯の情報を利用するものが多い。

C/A コードは 1ms ごとに 1023 個の信号が繰り返し送信されている。すなわち、1 サイクルの信号は約 300km（光が 1ms の間に進む距離）、一つのデータは約 293m（光が 1μs に進む距離）の長さがあり、これを物差しに見立てて、距離を計測するのである。衛星から測地点までのサイクル数は分からないが、300km 以下の端数分は比較的正確に計測することができる。サイクル数が一つでも異なると、測地点が宇宙空間か地中になってしまうので、サイクル数は簡単に推定できるのである。C/A コードを用いた距離計測を行うのが、“単独測位 (Autonomous GPS)”と“DGPS 測位 (コードディファレンシャル: Code Differential GPS)”である。

一方、C/A コードの“目盛り”は約 293m で、距離測定としてはあまり精度が高くない。そこでより精度の高い“目盛り”として、電波の波長を用いる方法が“干渉測位 (Carrier Phase GPS)”である。L1 帯の波長は約 19cm、L2 帯の波長は約 24cm であり、その波の中での位置（搬送波位相: Carrier Phase）を知ることによって、より高精度な距離計測が可能となる。ただ

しこの方法には2つの制約がある。第一点は、搬送波位相を途切れることなく積算する必要があるため、電波受信が途切れやすい環境での利用に向かないことである。すなわち樹冠下で安定した干渉測位を行うことは困難である。第二点は解の多重性である。あまりにも解像度が高すぎるので、もっともらしい位置が数多く現れる。この解決法を AR (Ambiguity Resolution) といい、AR の種類によって様々な干渉測位法が存在する。干渉測位は L1 帯のみで可能であるが、L2 帯を併用することで効率の良い AR が可能となる。

3.2 ディファレンシャル補正

受信機・衛星間の距離測定には様々な誤差が含まれる。各衛星の正確な位置を知るために航法メッセージ中の衛星の軌道情報を用いるが、これは事前に予測された計算値であり、誤差が含まれている。また電波の伝搬経路のうち、電離層および対流圏では遅延が生じ、これも誤差要因となる。これらの誤差を軽減して測位精度を向上させるために用いられるのが、ディファレンシャル補正である。

ディファレンシャル補正の基本的原理は、座標を決定したい地点(移動局)での GPS 測位と同時に、座標がすでに分かっている地点(基地局)においても GPS 測位を行うことによって、各衛星までの疑似距離の測定誤差を評価し、移動局で観測された疑似距離を補正する、というものである。ただし、基地局と移動局の距離(基線長)が長くなると GPS 信号が通過してくる大気の状態が異なるため、補正効果が小さくなる(DGPS で約 200km、干渉測位で 10~30km)。また、移動局で観測した衛星を基地局でも観測していなければ補正できない。

日本では海上保安庁が DGPS 用の基地局情報を放送しており、ビーコン受信機を用いてリアルタイムにディファレンシャル補正を行うことができる。ただし、海から離れた山の中では受信できないことも多い。また国土地理院では、全国各地の電子基準点で観測された補正情報を公開しており、こちらは干渉測位にも利用できる。米国では WAAS と呼ばれる衛星からの補正情報放送が行われており、日本でもひまわり 6 号を用いて同様の放送(MSAS)が開始され、安価な GPS 受信機でもリアルタイムにディファレンシャル補正が可能になる。その他、携帯電話を用いた補正情報の送信など、有料の民間サービスもある。

3.3 その他の誤差

ディファレンシャル補正により改善されない誤差として、衛星配置による誤差と、疑似距離測定に関する誤差とがある。通常、前者は PDOP マスク、後者は SNR マスクおよび仰角マスクにより制御される。PDOP (位置精度劣化度: Position Dilution Of Precision) とは測量用語で言う“図形の強さ”を示すものであり、例えば上空の一点に集まった4つの衛星から得られた測位座標値は、上空に散らばった4衛星から導かれた測位座標値よりも精度が劣る。この違いを数値で表したものが PDOP で、数値が小さいほど良い衛星配置とな

る。PDOP マスクは、設定値以上の PDOP 値となる衛星配置から算出された測位座標値を結果として使用しないとする、一種のフィルタリング処理である。なお、GPS 衛星は約 11 時間 58 分で地球を一周しており、衛星配置は刻一刻と変化する。つまり次の日にはほぼ同じ衛星配置が 4 分早く再現されることになる。飛来衛星数予測ソフトを用いれば、数週間先までの大まかな衛星配置が予測できる。

疑似距離の測定誤差は、受信機本体のハードウェア的な精度による部分も大きい。GPS 信号の質にも左右される。樹木等を透過した信号は多くのノイズを含むため、“物差しの目盛り”である信号の立ち上がり箇所が不鮮明になる。これにより疑似距離の観測精度が劣化するのである。信号本体とノイズとの比を SNR (Signal to Noise Ratio) と呼び、設定値以下の SNR の衛星を測位に用いないとするフィルタリング処理を SNR マスクという。

疑似距離の測定誤差のもう一つの要因はマルチパスである。これは GPS 信号が地物に反射して観測されたもので、場合によっては数百 m もの誤差を生じさせる。低仰角の衛星からの電波は地物に反射されやすく、また電離層や大気圏の通過距離が長いことから、例えば仰角 15 度以下の衛星は測位に用いない、などのフィルタリングが行われる。これを仰角マスクという。ただし仰角マスクを大きくすると衛星配置の偏りを招くことがある。

3.4 森林での GPS 利用

森林は特殊な GPS 測位環境である。地形によって GPS 信号が遮断される状況は、都市部でのビルによる信号遮断の状況に似るが、樹幹により GPS 信号の受信が断続的になる、あるいは枝や葉により信号の SNR が低下するという状況は他ではあまり例がなく、受信予測や精度管理において、特殊な配慮が必要となる。

地形や樹木による GPS 信号の遮断により、開放地に比べて捕捉衛星数が減少する。上空がある程度開けていたとしても、衛星配置の偏った状況になることが多く、また葉や枝による SNR の低下によって疑似距離測定精度が低下し、干渉測位における安定した AR が困難になる。さらに林道の法面下や岩石地では、マルチパスが生じやすい。これらの影響のため、森林内では開放地と比べて精度が著しく劣り、また移動しながらの干渉測位（キネマティック測位）は困難である。樹冠下での単独測位の誤差は 50m 程度と考えた方がよい。森林での測位精度は胸高断面積合計と深い関係があるといわれている。

このような劣悪ともいえる測位環境では、飛来衛星数の多い時間帯に測位を行う、測位地点で数分間静止して測位座標を平均化する、低価格受信機でも外部アンテナを利用する、などの対策が有効である。また数分間静止して L1 と L2 の 2 周波を観測する二周波干渉測位（静止測位）では、樹冠下でも数 mm の精度で測位が可能となる場合がある。

受信機によってはマスク設定が固定されているものがあるが、これは原則として開放地で用いる際に最適化された設定であり、森林内でも同様の設定が適しているとは限らず、逆に精度を低下させる可能性がある。森林において GPS を利用して GIS データを取得する

際には、現地ではマスク設定を行わずにできるだけ多くのデータを取得しておき、事務所等に帰ってから後処理としてマスク処理を行った方がよい。

以上のように、森林で GPS を用いる際には、現場において障害物となる樹木や地形、その時の衛星配置、受信機の性能（それぞれの測位方式の限界）などを念頭においた上で、常に得られた座標値の精度と信頼性について注意を払っておくことが必要である。

3.5 衛星測位システムの今後

現在、GPS の近代化計画が進められており、L2 帯への民生用コードの追加、L5 帯の追加などが予定されている。また GPS と同様の衛星測位システムとしてロシアの GLONASS（GLObal NAvigation SyStem）が稼働しており、これも近代化計画が進行中である。さらに EU では GPS、GLONASS に続く新しい衛星測位システムである Galileo の構築計画がある。日本では GPS を補完する準天頂衛星の打ち上げが計画されている。準天頂衛星は日本からオーストラリア上空にかけて 8 の字型に飛行する数個の GPS 互換の通信衛星を打ち上げ、高度の高い場所に常に衛星が存在するよう意図したシステムである。

これらの衛星測位システムを相互利用することにより、数年のうちには森林でも高精度の位置情報の取得が容易になる可能性がある。実際に GPS 衛星と GLONASS 衛星を併用できる受信機が市販されており、森林での利用に関する調査が進められている。

4. コンパス測量の計算

それではいよいよ現地測量データを扱ってみよう。もちろん、実際に測量を行う時間はないので、ここではあらかじめ測量データを用意した。まずエクセルを用いて、コンパス測量の計算を行う。デスクトップ上に“コンピュータ利用と森林科学 3,4”というフォルダがあるので、その中の“第 4 回”フォルダの中にある、“survey.xls”を開こう。

(1) データの確認

このファイルの sheet1(compass)には、森林で実際にコンパス測量を行って記録した野帳データが入っている。B2 から E5 の範囲には、測量に使用した 2 つの基準点の既知座標が記載されている。C7 には、測量を行った地域の西偏値が記されている。この値を用いて、方位角の修正を行う。C8 は、測量計算の結果から導き出される閉合比であり、まだ空欄になっている。B10 から G45 が野帳のデータが記された部分で、コンパス位置、測点、方位角、斜距離、高低角が記述されている。H10 から N45、H46 から L47 が測量計算を行う部分で、今回のメインである。なお、今回、式を入力しなければならないセルの背景を緑色にしてある。

(2) 基準点の緯距・経距の計算（D5, E5）

はじめに、測量の始点と終点の緯距・経距を算出する。緯距・経距とは、測量線のベクトルを緯度方向と経度方向に分解した成分のことである。D5 と E5 の欄に始点から終点までのベクトルを計算する式を記入する。単純な引き算でよい。この値を測量結果と比較し、誤差を修正する。

(3) 水平距離の計算 (H12 ~ H46)

次に、水平距離を計算する。水平距離は斜距離と高低角から算出できる。H12 に式を入力し、その下の範囲にコピーする。水平距離の合計も計算しておこう。

(ヒント) COS 関数, SUM 関数, RADIANS 関数または定数 PI()

(4) 緯距・経距の計算 (I12 ~ J45)

コンパスを設置した場所から測点までのそれぞれの緯距・経距を計算しよう。方位角, 水平距離, 西偏値を用いる。方位角を数学上の角度に変換しなければならないことに注意。これも I12 と J12 に式を入力してから下の範囲にコピーする。絶対番地を使いこなそう。番地を入力して F4 を何度か押すと、様々な形の絶対番地に変換される。

(ヒント) SIN 関数, COS 関数, RADIANS 関数または定数 PI()

(5) 誤差の計算 (I46 ~ J47, C8)

緯距・経距の合計は(2)で計算した測量の始点と終点の緯距・経距に一致するはずである。このずれが測量誤差(閉合誤差)である。I46 から J47 でその合計と誤差を計算し、C8 には閉合比の計算式(分子を 1 とした分母)を入力しよう。

(ヒント) SUM 関数, SQRT 関数

(6) 修正緯距・修正経距の計算 (K12 ~ L47)

誤差を各測点に対して配分したものを修正緯距・修正経距である。区間距離に比例して、修正量を重み付けする。修正緯距・修正経距それぞれの合計が 0 になれば OK。

(ヒント) SUM 関数

(7) 座標の計算 (M12 ~ N45)

修正緯距・修正経距はそれぞれの区間の値なので、加算していくことによって、それぞれの座標が算出できる。それぞれの地点の x 座標, y 座標を算出しよう。

(8) グラフの表示

これで全ての測点の座標を算出することができたので、測量で得られた平面図をグラフで表示してみよう。ただし、平面直角座標系では、x(緯度方向)が縦軸, y(経度方向)が横軸なので注意。

演習問題(1)

西偏値を 1 度変えたときの閉合比の変化を確認せよ

5. GPS 測位データのとりまとめ

“ survey.xls ” の sheet2(NMEA)は、GPS で採取した NMEA-0183 フォーマットのログである。NMEA-0183 とは米国海洋電子機器協会 (National Marine Electronics Association) が定めた GPS 受信機とナビゲーション機器とでデータのやりとりを行うための規格で、ほとんどの GPS 受信機が対応している。GPS 受信機とパソコンを接続すれば、単なる座標値だけでなく、個々の衛星の位置や SNR 値などを取り出すことができる。

sheet3(GPS)は、森林内のある地点で約 3 時間半の GPS 受信を行い、得られた NMEA ログから、測位時刻、総衛星数 (上空にある全ての GPS 衛星数)、捕捉衛星数 (GPS 受信機で信号が受信できた衛星数)、平面直角座標 (x, y, H), PDOP の各情報を抽出したものである。このデータを用いて、森林での GPS の誤差を計算してみよう。

(1) 平均座標の算出 (D1 ~ F1)

まず、GPS で得られた座標値の平均値を算出しておこう。D1 ~ F1 に、 x, y, H ごとの平均座標値を算出する式を入力する。

(ヒント) AVERAGE 関数

(2) 各エポックの誤差の算出 (H3 ~ K5784)

それぞれで位置が算出される観測単位のことをエポックという。(1)で算出した平均座標値を真値として、各エポックの測位誤差を算出しよう。H3 に x 座標の誤差の計算式を入力する。絶対番地をうまく使えば、入力した H3 を H3 ~ J5784 にコピーするだけで、 H 座標 (標高) の誤差までが一気に入力できる。次に K3 に xy 平面上での誤差の計算式を絶対番地を用いて入力し、これも K4 ~ K5784 にコピーしよう。

(ヒント) SQRT 関数

(3) 誤差の計算 (N2 ~ P2,N3)

測位誤差が正規分布に従うと考えた場合、その標準偏差はデータの約 66%が入る区間を示すことになる。N2 ~ P2 に、座標軸ごとの標準偏差を計算する式を入力しよう。

また、 x 方向の標準偏差と y 方向の標準偏差の幾何平均の 2 倍を特に 2DRMS (distance root mean square) という。データの約 95%が含まれる確率円の半径に相当し、GPS での測量の精度指標となる。N3 に 2DRMS を計算する式を入力しよう。

(ヒント) STDEV 関数、SQRT 関数

演習問題(2)

測位座標の平均値を真値として、 x, y 平面上での測位誤差を散布図グラフで示せ