

NNSS 人工衛星の測地的利用

小 牧 和 雄*

1. はじめに

NNSS とは米国海軍航行衛星システム (Navy Navigation Satellite System) の略で、元来船舶の位置決定のための航行用として開発されたものであるが、測位精度の向上に伴って測地測量あるいは測地学的分野にも利用されるようになった人工衛星による測位システムである。

我国でも測地的には緯度観測所の極運動観測、海上保安庁水路部の海図作成のための離島の経緯度決定 (金沢輝雄、航行衛星を用いた経緯度測定、天文月報第 72 巻第 12 号, pp. 320-323, (1979) 参照) に利用されている。また最近では南極観測においても位置の測定に用いられている。

建設省国土地理院においては国内測地網の規正を目的とした本土内の数点での定期的な位置観測を行っている。また 2 万 5 千分の 1 地形図作成のための離島の位置決定測量も数島について実施してきた。

以下では先ず NNSS の原理について簡単な説明をし、続いて国土地理院における NNSS による測位観測の実際を紹介したい。

2. NNSS の測位原理

NNSS の測位原理の記述的説明は金沢輝雄氏が既に天文月報誌上 (前出) で簡明にしておられるのでここでは若干の数式により補足を試みるだけにしておく。

現在使用できる衛星は 5 個で、いずれも高度約 1100 km のほぼ円形の極軌道上を周期約 107 分で飛行している。即ち人工衛星は観測点から見て東側または西側を北向きまたは南向きに通過していく。地上ではこの衛星の出す電波のドップラー効果を測定し、同時に位相変調されて送られてくる軌道情報及び時刻信号を解読することによって観測点の三次元的な位置決定を行う。

人工衛星から送られてくる電波の周波数を f_T (実際には 399.968 MHz と 149.988 MHz の 2 周波数で 8:3 の比になっている) とする。地上では f_T は人工衛星の運動及び地球の自転によってドップラー効果を受け f_R として受信される。ここで地上の受信機も固有の周波数 f_L をもっているため測定されるのはビート周波数 $f_L - f_R$ である。一定間隔の時刻信号が衛星上で t_1 と t_2 に出さ

れるとすると t_1 から t_2 の間に送り出される波の数は

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} f_T dt \quad (1)$$

である。地上の受信装置に時刻信号が到達する時刻は電波伝播時間だけ遅れた時刻 $t_1 + \Delta t_1$, $t_2 + \Delta t_2$ となる。この時刻信号間に受信される波の数は

$$N_R = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_R dt \quad (2)$$

である。 N_T と N_R が等しいことは容易に理解できよう。また実際に測定されるビート波数 ΔN (ドップラー・カウント) は

$$\Delta N = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} (f_L - f_R) dt = \int_{t_1 + \Delta t_1}^{t_2 + \Delta t_2} f_L dt - \int_{t_1}^{t_2} f_T dt \quad (3)$$

となる。 f_T , f_L が一定であるとして

$$\Delta N = (f_L - f_T)(t_2 - t_1) + f_L(\Delta t_2 - \Delta t_1) \quad (4)$$

Δt_1 , Δt_2 は電波伝播速度 c 及び電波が人工衛星から送られて観測点に達するまでの行路差 s によって

$$\Delta t_1 = \frac{s_1}{c}, \quad \Delta t_2 = \frac{s_2}{c} \quad (5)$$

と書くことができるので (4) 式は

$$\Delta N = \frac{f_L}{c}(s_2 - s_1) + (f_L - f_T)(t_2 - t_1) \quad (6)$$

となる。(6) 式の第 2 項を定数項とすれば、ドップラー・カウント ΔN を測定することは距離差 $s_2 - s_1$ を観測することになる。一定の距離差を満足する点の軌跡は三次元的には回転双曲面であるので、この場合衛星の位置が各時刻について既知であれば t_1 と t_2 における衛星の位置を焦点とする回転双曲面の片側上に人工衛星観測点は存在することになる。従って同一衛星の三組以上の距離差の観測によって原理的には回転双曲面の交点として観測点の位置を求めることができる。但し推定座標値によって人工衛星が観測点の東側を通過するか西側を通過するか予め分っているものとする。

衛星の軌道情報及び時刻信号は 2 分間毎の 157 語の位相変調信号の一部として送られてくる。その他の信号内容については明らかにされていない。時刻信号はワシントンの海軍天文台の原子時計と同期するように監視されており、協定世界時にほぼ一致している。またこの時刻信号間の 2 分間の精度は約 $10 \mu s$ である。

このようにドップラー・カウントを測定し、衛星の位置を既知、観測点の位置修正量を未知数として (6) 式を線形化した観測方程式を最小二乗法で解くことにより観

* 国土地理院 Kazuo Komaki: Geodetic Use of the NNSS Satellites

測点の座標推定値を得ることができる。実際にはオフセット周波数 $f_L - f_T$ も未知数として解く。また時刻信号として2分間隔のタイム・マークだけではなく、データの語の切れ目を利用して2分間を細分する方式もあり(ショートドップラー方式)、観測方程式の数が多く得られる利点がある。

さらに、測地用の計算としては電離層の補正及び対流圏の気象補正を考慮する。これは電離層及び対流圏での屈折率補正に相当する。電離層の補正は層内の屈折率が周波数の関数であることを利用して、400 MHz と 150 MHz の2波により屈折率の周波数による第1次展開項(周波数の2乗に反比例)について補正することができる。この補正を受信機内部で行い、測定値が補正されたドップラー・カウントとなるようにすることもある。また対流圏の補正は地表の気象要素(温度、気圧、湿度)によりモデル化して計算することができる。この対流圏補正は一般に光路長の変化分として観測方程式の定数項に加えて補正する。これらの両補正は測位値に対して電離層補正で数 km 以下、対流圏補正で数 10 m 以下の影響をもつ。またこの補正の誤差は低高度で観測する場合大きくなるので、観測や計算の際に最大高度の低い例えば 15 度以下の衛星は除いた方がよい。

このようにして、1週間程度同一点で観測すると良好な観測パス(衛星通過)が約 40~50 程得られ、数 m の測位精度で三次元的に位置を決定することができる。これは従来の野外での天文測量の精度を上回るものであり、しかも局所的な重力場による鉛直線偏差の影響も受けない。また受信機も自動化されており、昼夜・天候の順不順の区別なく効率的に観測を続けることができる。NNSS 測位システムが広く利用される所以である。

測位誤差の要因としては衛星の軌道誤差、屈折率補正誤差、受信機の誤差に大別できる。この中で軌道誤差が最も大きい(20~40 m)。また長期的変動もあるので、短期間の観測では多くの有効パス数によっても内部精度が向上するだけである。この軌道誤差は軌道予報の誤差である。このために大気摩擦や光圧による軌道擾乱の影響を小さくして軌道予報をより正確なものにするような改良型の衛星の打上げが近く計画されている。屈折率補正誤差としては電離層補正の高次項を無視したことによる誤差が大きい低高度の観測を避ければ 1~2 m 以内であろう。受信機に原因する誤差は他の誤差に比べると小さい。

この軌道誤差による影響を小さくする方法には二つあると考えられる。一つは人工衛星から送信される軌道情報(Broadcast Ephemeris)を使用する代わりに精密暦(Precise Ephemeris)を使用する方法であり、もう一つは人工衛星を数点で同時に観測する方法である。

精密暦は米国地図庁内の DMAHTC(Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center) が世界の TRANET と呼ばれる NNSS 衛星の観測網のデータから人工衛星の軌道を再決定するものである。日本においても水沢の緯度観測所がこの観測点の一つとなっている。この精密暦によるならば 1 m 程度の測位精度は得られる。ここで精密暦による測位値と米国海軍内の NAG(Navy Astronautics Group) による人工衛星の軌道情報を使った測位値とは系統的な差が存在することが知られている。

また衛星を数点で同時に観測するもう一つの方法は、衛星の軌道要素も決定するショート・アーク法と衛星の運動のモデル化は含まないトランスロケーション法とに分れる。いずれも数 100 km 以内の観測点間の相対位置関係も精度良く決定する。ショート・アーク法は D. C. ブラウン等が提唱しており、人工衛星から送信される軌道情報を使っても数 10 cm の相対精度が得られるとしている。またトランスロケーション法は2観測点における測位値の差から相対関係を求める方法で、これは観測点の相対位置が衛星の位置の不確定さに大きく影響を及ぼされないことを利用したものである。またこの2観測点が遠く離れていなければ屈折率の補正誤差の影響も小さくすることができる。

3. 測位観測の実際

先に、国土地理院は国内測地網の規正を目的として本土内の数点において定期的な測位観測を行っているが、現在国土地理院の所在地である筑波以外に四つの主要な観測点がある。北から北海道新十津川(国土地理院新十津川人工衛星観測室)、岩手県水沢(国土地理院水沢測地観測所)、埼玉県堂平(東京天文台堂平観測所敷地内)、鹿児島県鹿屋(国土地理院鹿屋人工衛星観測室)である。

これらの観測点で得られる測位値と実用成果と呼んでいる日本の測地系による座標値を比べてみる。堂平の場合人工衛星観測による測位値は実用成果よりも緯度で約 11 秒、経度で約 -12 秒、高さで約 50 m 大きい。こうした差が生じるのは NNSS の準拠している楕円体が

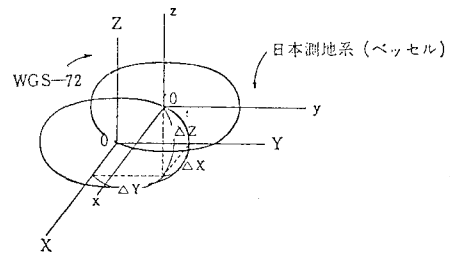


図1 WGS-71 楕円体とベッセル楕円体の位置関係

WGS-72 楕円体 (長半径 $a=6378135$ m, 扁平率 $f=1/298.26$) であるのに対し, 日本の測地系が準拠している楕円体はベッセル楕円体 ($a=6377397.155$ m, $f=1/299.152813$) で, しかもこの両楕円体間に中心の偏位が存在するからである (図1参照).

図は WGS-72 楕円体による系とベッセル楕円体による系の各座標軸が平行とした場合の相互関係を示している. 楕円体中心と座標軸原点は各々一致しているものとする. また Z 軸は地球回転軸方向であり, X 軸はグリニッジ子午面に平行で, Y 軸は X 及び Z 軸に直交する.

このように各座標軸の原点に偏位量 (図中の $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) があるのは何故であろうか. このことを楕円体面上で考えると東京の国土地理院関東地方測量部構内 (旧東京天文台構内) にある経緯度原点は世界的な座標系の中で南東方向へ約 500 m ずれているとよく言われるが, 原点偏位量はこの経緯度差に対応している. 日本の経緯度原点の座標値は天文測量により決定されたが, 観測の誤差は別として天文測量で得られる天文経緯度と WGS-72 のような世界的な座標系による経緯度とは必ずしも一致しない. これは天文観測が鉛直線を基準としており付近のジオイド面の傾斜に影響されるからである. 日本の測地系は離島を除いて, 東京原点から出発した三角測量により結合されているから北海道から沖縄に至るまでこうした原点の偏位の影響を受けていることになる. ベッセル楕円体と WGS-72 楕円体の原点偏位量について未だ確立した値は決定されていない. 原理的には東京の経緯度原点上で NNSS の観測を行えばこの偏位量を直接観測できることになる. しかし電波状態等実際的でないので東京原点から直接一等三角測量で結合されている三角点のある堂平及び筑波での定期的な観測により, この偏位量を求めようとしている.

ここで, とりあえずこの原点偏位量として Thomas O. Seppelin (The Department of Defense World Geodetic System 1972. The Canadian Surveyor, vol. 28 (5), pp. 496-506, (1974)) による値 $\Delta X=-140$ m, $\Delta Y=+516$ m, $\Delta Z=-673$ m を用いて WGS-72 楕円体上の座標値をベッセル楕円体上の座標値に変換してみる. 新十津川と鹿屋における一観測を例にとると, 楕円体変換後も実用成果との座標差があり, 標高について実用成果を基準として新十津川で約 -38 m, また鹿屋では約 -6 m ある. 経緯度についても約 10 m 前後の差が両観測点に見られる.

標高の差が大きいが, これは WGS-72 楕円体上の座標値をベッセル楕円体上の座標値に変換して得られる標高は楕円体面からの法線に沿った幾何学的な高さであるのに対し, 実用成果の標高は東京の国会図書館構内にある水準原点下 24.414 m を通るジオイド面からの高さに

なっているからである. 海上保安庁水路部の我如古氏によるベッセル楕円体を基準としたジオイド高図では新十津川近辺で約 -40 m, 鹿屋近辺では約 -12 m となり比較的良く合っている.

また緯度差, 経度差が生じることについては人工衛星観測の誤差, 原点偏位量の誤差の他に実用成果の誤差及び WGS-72 測地系と日本の測地系の間の回転量やスケール・ファクターによる系統的差異が考えられる. それでは水平位置の実用成果はどのようにして決められたのであろうか.

日本の各地には水平位置の基準点として三角点があるが, それぞれベッセル楕円体に準拠した経緯度値が与えられている. またこの三角点には一等から四等までの等級がつけられており, このうち一等三角点はさらに本点と補点とに区分されている. この一等三角本点による三角網が日本の測地網の中で最も主要な網となっている. 即ち一等三角本点より下位の等級の三角点は一等本点を既知の点として逐次的に位置が決定されている. 一等三角本点網は三角測量によって東京原点から出発して北は北海道から南は沖縄まで結合されているが, 三角測量は網の形しか与えないので全国各地で基線の測量も行い, 網のスケールを決定している. さらに以上の観測だけでは日本の測地網に回転の自由度が残るので, 原点において原点上の子午線と近傍の三角点とがなす角 (これを原方位角と言う) を観測する. 東京原点から千葉県鹿野山にある一等三角点を見た方位角を原方位角としている. このように基準となる楕円体が決められ, 原点経緯度, 原方位角, 水平夾角, 基線長が与えられて平均計算を行い, 一等三角本点の位置が決められ, さらに逐次的に三角測量によって一等補点以下の位置も決められた. ところで, 明治・大正時代になされたこの計算は今日のように電子計算機を使う訳にいかないので手計算でなされた. このために最も主要な網である一等三角本点網の平均計算についても網を分割して逐次的に行われている.

このことから分るように現在の実用成果は原点から離れた点について観測誤差の累積, そして逐次平均による歪み等も含んでいると考えられる. さらに明治時代の測量後の修正されていない地殻変動分もあろう.

また以上のような NNSS 人工衛星観測位置と実用成果の比較から NNSS の準拠する測地系を基準とした日本の測地系の系統的な回転量やスケール・ファクターを原点の偏位量と共に求めることができる. 既にいくつかこうした計算が行われているが, 実用成果の検討及び人工衛星観測の高精度化によって両測地系間の相互関係がより明らかになっていくであろう.

さて人工衛星の位置観測が精度 1 m 以内で可能であれば, 東京から約 1000 km 近く離れた北海道, 九州の

相対位置を精度 1×10^{-6} で決めることができる。国土地理院は現在電磁波測距儀を用いた三辺測量方式による全国一、二、三等三角点の改測（日本列島精密測地網測量）を実施しているが、この精度は約 2×10^{-6} 程度であるので人工衛星観測による超長距離基線を精密測地網の平均計算に繰入れると、北海道、九州における累積誤差を小さくすることができる。これが測地網の規正である。1 m 以内の測位精度は精密暦による定期的観測によれば可能であろう。米国における精密暦による NNSS 観測と VLBI 観測、人工衛星レーザー観測を比較した例では約 4000 km の基線で、それぞれが 1 m 以内の差で一致している。

次に離島の位置決定観測についても述べたい。国土地理院は昭和 52 年度から昭和 54 年度にかけて、2 万 5 千分の 1 地形図の作成を目的として南鳥島（マークス島）、北硫黄島、鳥島、西之島において NNSS 観測により位置を決定してきた。これらの島は南鳥島を除き無人島である。

NNSS 観測により三次元的に位置が決定された基準点の座標値は既に述べられた原点偏位量のみを考慮した楕円体変換が施されベッセル楕円体上の座標値にされる。こうして離島の位置は東京原点と結合される。但し、地図上に表示される標高は簡易検潮によって決められる付近の平均海面からの高さが使われる。

南鳥島以外は既に旧陸軍の陸地測量部による 5 万分の 1 地形図（以下旧地図とする）があり、人工衛星観測点の旧地図上から設定される旧座標値と NNSS 観測によって得られる新座標値とを比較することができる。この結果旧座標値は新座標値に対して北硫黄島で北に約 830 m、鳥島で東に約 1240 m、西之島では西に約 230 m 程ずれていることが分った。

ここで各離島の旧位置は次のように決められた。北硫黄島には三角点があり、硫黄島からの三角測量によって位置が求められた。但し、硫黄島には天文測量による局所的経緯度原点がある。また孤立した鳥島、西之島は直接天文測量によって位置が決定された。

こうした離島における大きい新旧座標値の差は天文測量の誤差、鉛直線偏差の影響等によるものであろう。北海道から沖縄までの本土近辺の島々は三角測量によって東京原点と結合されているが、それ以外の離島についてはこのように局所的な原点からの三角測量、或いは直接天文測量によって位置が決定されているので NNSS 観測による位置と比較すると、一般にこうした大きな位置の差異が出てくる。

4. おわりに

測地測量関係者にとって人工衛星は空を飛ぶ基準点で

ある。従来国土地理院は写真赤道儀を用いて、気球型衛星パジオス、エコーの光学観測法によって人工衛星測地測量を行ってきた。しかし、この観測法は 3 点同時観測を前提としたため天候による制限を大きく受けた。ここで、この NNSS による測位観測はこの天候依存性の問題を解決し、しかもより高精度の測位を可能としている。さらに NNSS の次世代用として米国が開発を進めている GPS (Global Positioning System) では例えば VLBI 方式の観測により数 100 km を数 cm の精度で相対位置観測が可能とされる。こうしたシステムが自由に利用できるようになれば、従来の視通、天候に左右されてきた地上測量の形態も大きく変わるようになるかもしれない。さらに人工衛星レーザー測距、VLBI も含めた宇宙関連技術を応用した測地技術を駆逐する時代が来れば、測地測量の役割は大きく広がり、地殻変動のモニター、プレートテクトニクスの検証等我々が存するこの地球の鼓動を的確に捕える役割を担うのではないかと期待している。

学会だより

日本証券奨学財団研究助成募集

上記について、学会宛に募集要項がとどいています。趣旨は、学術文化の研究調査に従事している者に対し、その研究調査を奨励し、学術の振興をはかり、もって社会の発展と福祉に寄与することを目的としていて、対象者は、大学において学術文化の研究調査に従事している個人又はグループとし、その研究者の年齢は 55 歳以下とする。ただし大学間にまたがるグループでもよく、代表者は 55 歳以下とかぎらない。なお研究調査分野の範囲で、当学会に関係ある理学及び工学については、エネルギー問題及び環境問題に関するものを重視する。ということで、助成金の総額は 3000 万円、申請期間は 56 年 3 月 1 日から 4 月末日までとなっています。関心のある方は、本学会庶務理事宛に御照会下さい。

会費納入のお願い

4 月より会計年度が改まりますので新年度会費の納入をお願いします。会費は通常会員 3,500 円、特別会員 10,000 円です。納入には今月号に同封の振込用紙を利用して三菱銀行三鷹支店日本天文学会普通預金口座 (222-4434400)、または郵便振替口座社団法人日本天文学会 (東京 6-13595) 宛振りこみか、あるいは現金書留を御利用下さい。会の円滑な運営のため、できるだけ早く御納入下さるようお願いいたします。