

航行衛星を用いた経緯度測定

金 沢 輝 雄*

1. GDP 海洋測地観測

水路部は国際学術会議 (ICSU) の主宰する地球内部ダイナミクス計画 (Geo-Dynamics Project) のうちの海洋測地部門に参加し、「我が国周辺の海洋ジオイドの調査」を目的として1973年から1977年の5ヶ年にわたる特別観測を実施した。その方法は、測地衛星バジオスの同時写真観測によって準拠座標系の方向を確立するとともに、米海軍航行衛星を利用し、本土及び島嶼において観測点の位置を3次元的に決定する。それによって観測点の経緯度が与えられると共に、海面からの高さの実測値と比較することによってジオイド高が得られるわけである。従来、陸上における三角測量の及ばない離島に関しては、天体観測によって位置が決められたため、地図上の位置が実際と1 km 以上も違っている場合もある。今回の観測によって小笠原諸島および沖繩諸島周辺の島嶼の大部分が測定され、日本測地系に結合された。また、このような観測を行なうことにより、日本測地系と世界的な座標系との位置関係を明らかにすることができる。ここでは航行衛星を用いた3次元測位の原理とその利用について述べる。

2. 天文航法・電波航法

天文学の中でも天体暦の作成にかかわる位置天文学の分野が、航海中の船の位置を決定する必要性から発達したことはよく知られている。陸岸に沿って進む船は別として、遠く大洋に航海をする船は、人類の歴史が始まって以来つい数十年前までは太陽や月、星を頼りに自分の位置やこれから進むべき方角を見い出してきた。離島においてもその位置を決定することは天体観測に頼る他はなく、我が国においても明治から大正にかけて作成された陸図および海図における離島の位置は、水路部の天体観測によって決められた。しかし、当時の測定技術、なかでも時計の誤差による観測の誤差に加えて、ジオイドの法線と準拠楕円体の法線のくい違い(鉛直線偏差)のために、採用された経緯度は、測地系を定義する準拠楕円体に基づいて測った測地経緯度とはかなり異なるものも含まれることになった。

一方、電波を用いて海上での位置を測定しようとする方法は、今世紀の始めから開発されてきたが、第二次大

戦後に電波の利用技術の急速な発達に伴って実用化の段階にはいり、陸上から発射した電波を海上で受信し、船の位置を決定する電波航法によって昼夜、天候にかかわらず船位の測定が可能となった。たとえば、ロランCとよばれるシステムでは100 kHzの搬送波を用い、いくつかの送信局から一定の間隔でパルスを発射する。船上では2局のパルスの到着時間差を2組測定することにより、2つの双曲線の交点として自分の位置を見い出すことができる。日本近海では硫黄島、北海道、沖繩、南鳥島、ヤップ島に送信局をもつ北西太平洋チェーンが利用できる。しかし、その有効範囲は2000海里(1海里は約1.8 km)の程度であり、北太平洋、北米沿岸、およびヨーロッパ方面をいくつかのチェーンでおおっているにすぎない。

全世界をおおうという目的で数年前から始められたオメガシステムは約10 kHzの超長波3種を用いる位相測定の方法により、8つの局で地球の全表面において測位を可能とした。ただし、ロランCの測位精度0.1~0.2海里に対し、オメガの精度は1~2海里と悪い。それでも精密な位置測定を必要とする科学的な観測を目的とした船舶等は別として、通常の航海では全世界で利用可能というメリットは大きい。

3. 衛星航法

1957年10月に最初の人工衛星スプートニク1号が打ち上げられた時、その電波を受信していたアメリカの研究者たちは、衛星からの電波がドップラー効果を受けるために、受信周波数が著しく変化することに注目した。この受信周波数の変化を詳しく調べれば、人工衛星の軌道を決めることができる。それならば、逆に軌道のわかっている人工衛星の電波を受信して周波数の変化を測定すれば、受信点の位置が決められるはずである。そこで、アメリカの海軍はこのような方式で任意の受信点の位置決定が行なえるような衛星の開発を民間に委託することになった。これは衛星追跡局のような大がかりな装置を必要とせず、船上で使用し、船舶の位置を決定できるようなシステムの開発を目標とするものであった。このシステムは1964年7月に運用を開始し、米海軍航行衛星システム(Navy Navigation Satellite System)と名付けられ、NNSSの略称で呼ばれている。当初は軍の艦船のみが使用し、その内容は秘密にされていたが、1967年に内容の詳細が公開され、民間利用が許可されるようになった。

* 水路部 T. Kanazawa: Geodetic Positioning by Using Navigation Satellite Systems

た。

NNSSの衛星は現在5個が稼動しており、その軌道は高さが約1100 km、衛星は1時間50分で軌道を一周する。離心率はほとんど0で軌道傾斜角90°の極軌道を飛び、5つの衛星は昇交点経度の違いによって地球を鳥籠状にとり囲む。地表で観測をしていると衛星は受信点上空を10~20分かかって北方または南方に通過し、1日の間には衛星が次々と現われて全部で20回程度の通過が見られる。衛星の1回の通過により1つの位置決定値が得られる。

衛星の軌道は米国内の4つの追跡局で常時観測され、カリフォルニアにある計算局へ集められて解析され、次の半日分の予測軌道が送信局に送られる。各衛星が送信局上空を通過する時その新しい情報が衛星に送られ、各衛星はこれを順次とり出して放送しながら飛んでいる。また、衛星は2分毎のタイムマークも放送しており、このタイムマークは米海軍天文台(USNO)の原子時計により校正される。

各衛星は安定な周波数発振器を持ち、399.968 MHzと149.988 MHzの2つの周波数の電波を送信する。2分毎のタイムマークと衛星の軌道要素に関する情報は、これらの周波数を位相変調することによって放送されている。受信者は基準発振器を持つ受信装置により、受信した周波数の変化を測定すると同時に、偶数分のタイムマークを出発点として定められたコーディングによって衛星の送信する軌道情報を解読する。これらのデータは受信装置に接続されたミニコンに送られ、計算処理されてその計算結果が付属の入出力装置に経緯度の数値として打ち出されるようになっている。

衛星からの受信電波は受信装置の基準発振器の作る信号と混合してビートをとる。衛星からのタイムマークに応じてこのビートのカウントを開始、終了させれば、測定されたビートの数はドップラー周波数の積算値であり、すなわちカウント開始時刻における衛星と受信器の間の距離と、カウント終了時刻におけるそれとの差に対応する。衛星の軌道は与えられているから、それらの時刻における衛星の位置は空間内に求められる。いま、測定されたものは距離差であるから、理論的には空間内の2つの点を焦点とした双曲面が与えられることになる。衛星が受信点の上空を通過する間に n 個の周波数積分値を得れば n 個の異なる双曲面が得られ、それらの交点として受信点の位置が決まる。ただし、実際の計算手続きとしては、まず受信点の経緯度の概略値を仮定値として入力し、その仮定点と衛星との距離を計算する。この場合、受信アンテナの海面からの高さはわかっているからあらかじめ与えておく。計算した距離差と受信データから求められる距離差の違いは経緯度の仮定値の悪さによ

るものであるから、真の経緯度と仮定経緯度の差および受信器の基準周波数と衛星の送信周波数の差を未知数として観測方程式を作り、最小二乗法によって経緯度の修正量を求める。もし仮定経緯度が真の経緯度と大きく離れていると観測方程式の係数にゆがみが出るため、正規方程式を解いて得た修正量も完全には正しくない。そこで、最初の仮定値にこの修正量を加えたものを第2の仮定値とし、再び距離の計算に入る。こうして、修正すべき量が一定の限界内に収束するまで繰り返し計算を行ない、その時の数値が計算結果として採用される。

衛星が400 MHz、150 MHzという2つの周波数の電波を放送しているのは、電離層による屈折の影響を補正するためである。電離層による屈折量は周波数の関数として表わすことができるので、異なる2つの周波数を用いることによってその屈折量を推定することができる。

NNSSを用いて船舶の位置を決定した時の誤差の主な原因は、船の速度と針路の不正確さによるものである。船上のアンテナと衛星との距離差をもとに船の位置を決定するのであるから、船の動きが正確に与えられていなければならない。ところが、海上において測ることのできる船の速度は通常対水速度であって、海流などの影響により対地速度とは一致しない。船の速度の誤差と位置決定の誤差の間の関係は、船の針路あるいは衛星の高度などと複雑に絡み合っているが、大体1ノット(毎時1海里)の速度誤差は0.1~0.2海里の位置誤差を生じる。衛星の受信が数時間に1回で不連続、不定期であることが欠点といえるが、全世界、全天候の測位システムとしてはNNSSが現在最高のものといえる。

4. NNSSの測地学的分野での利用

NNSSで船位を求める時は、船上のアンテナの海面からの高さを既知として入力し、ジオイドの高さも与えて地心準拠楕円体からの高さに直し、水平方向の経度、緯度だけを求めるのでこれを2次元解(2D)とよぶ。一方、陸上に受信器を設置してその受信点の位置を決め、測地学的な目的に用いることも行なわれている。この場合には高さも未知数にすることが多く、これを3次元解(3D)とよんでいる。

先に述べたように、NNSSで船位の決定を行なう場合の誤差の主な原因は、船の速度誤差によるものである。それではこの受信装置を陸上に固定して測定すれば、測位の誤差はどの位になるだろうか。この場合の誤差の原因には次のようなものがある。(1)受信器の器差、(2)衛星軌道の誤差、(3)電離層の屈折の影響などである。受信器の器差は数十センチ以下で今のところ問題となる程ではない。それに対して衛星軌道の誤差は10~20 m、また電離層の屈折影響は太陽活動の状況にもよるが、2

波による補正を行なってもなお数メートルの誤差となる。従って、位置決定の誤差は 20~30 m である。データの数を増せばみかけ上の精度を上げることはできるが、衛星の軌道予報には系統的誤差も含まれているため、必ずしも正しい結果は得られない。

そこで考え出されたのが、衛星の軌道要素の誤差を消去するトランスロケーションとよばれる方法である。この方法は 2 台以上の受信装置を使用し、測定点を適当に配置して同じ衛星を同時に受信することにより、衛星の軌道要素の補正量も未知数として解いてしまう。これによって数キロから数百キロ離れた測点間の相対的な位置関係を精度よく決めることができる。測点間の距離が増えるにつれて電離層の影響が異なってくるためにやや精度が落ちるが、近距離でトランスロケーションの方法を用いれば 1 回の測定で 10 m の精度が出せる。従って、数日間データをとれば 1 m に達することも不可能ではない。ただし、この方法は衛星の軌道を改正するのであるから地上の 1 点は固定して解かねばならず、任意の測点間の相対的位置関係を決めることはできるが、経緯度の絶対値を与えるものではない。また、VLBI のように座標系の向きを決定することはトランスロケーションの場合には容易ではないので、測点間の距離が最も精度よく決まる。

我が国が採用している経緯度は、日本測地系とよばれる 1 つの座標系であるが、これは実際の地球に全体として最もよく一致するような世界的な座標系とはかなり異なっている。たとえば、日本測地系を定義する楕円体はベッセル楕円体 (赤道半径 $a=6377397.115$ m, 偏平率 $f=1/299.1528$) であるが、IAU で採用されている地球原子は IAU 76 ($a=6378140$ m, $d=1/298.257$) で、ちなみに NNSS のシステムは WGS 72 ($a=6378135$ m, $f=1/298.26$) を用いている。また、日本測地系の経緯度の原点は麻布にあり、その経緯度の値の決定のいきさつは本誌 1969 年 11 月号にもあるように天体観測によっている。ところが、東京付近では鉛直線が南東の方角に傾いているため、原点の経緯度は世界的な座標系から見ると東および南へそれぞれ 10 秒余りずれていることが今ではわかっている。これらの原因により、WGS 72 の座標系と日本測地系の座標系とは日本周辺で数百メートルのくい違いを生じる。NNSS を用いて測った位置は WGS 72 の座標系での位置に近い (NNSS の予報は米本土とハワイの 4 ケ所での追跡から求めたものであるから WGS 72 と完全に一致しているわけではない) から、これを日本測地系での位置に直そうとすれば 2 つの準拠楕円体間の位置関係が必要となる。2 つの楕円体の 3 軸がそれぞれ平行である場合には、この位置関係は楕円体の中心間のずれの量で表わすことができる。(より厳密に

軸の平行性からのずれも考慮に入れる時には、各軸のまわりの回転角を含めなければならないが、WGS 72 自体その議論ができる精度はもっていない。) この中心間のずれの量は現在 ± 10 m の精度で求められている。従って、NNSS の測定値を日本測地系での数値に直そうとすると、この変換の誤差も避けることはできない。

5. 次の世代の測位システム

NNSS では数時間に 1 回しかデータがとれないし、1 回の測定に 10 分以上かかる。これに対し、次の世代の測位システムとして GPS (Global Positioning System) とよばれるシステムが開発中で、24 時間連続でさらに高精度の測位の実現を目ざしている。衛星の軌道は高度が地表から約 2 万 km、軌道傾斜角は 63° 、12 時間で地球を一周する。昇交点経度が 120° 離れた 3 つの軌道面上にそれぞれ 8 個の衛星を配置し、全部で 24 個の衛星が地球を囲む予定である。衛星は互いに同期した精度の高い時計を持ち、1575 MHz と 1227 MHz の 2 周波で信号を送る。もし、受信者の側にも衛星と同期した時計があれば、電波の伝播時間を測定することにより衛星と受信点との間の距離を測ることができる。海上における船舶の場合には受信アンテナの準拠楕円体からの高さを既知として与える 2D の方法で、2 つの衛星からの電波を受信すれば受信点の位置が決まる。受信装置の時計の同期精度が悪い時は、時計のずれの量も未知数として 3 つの衛星を測定すればよい。さらに、高さも未知数として 3 次元の測位を行なう場合には、4 つの衛星の測定を必要とする。

各衛星からの電波は PRN (Pseudo Random Noise) とよばれる方式で位相変調されている。衛星は軌道高度が高く、数も多いので常に 3~4 個が受信可能な範囲に存在する。各衛星の信号を区別するためにそれぞれの衛星に対して信号の送り方の様式が決められており、受信装置は同時に受信された信号の中からそのパターンに合うものだけを選び出し、目標とする衛星の信号を測定することができる。測定は短時間でよいので船速の誤差の影響も少なく、海上でも 100 m の精度が得られると期待される。陸上の測定では精度は 10 m と予想されている。

このシステムは現在すでに実験用の衛星が打ち上げられ、1980 年代後半の実用化を目標として開発が進められている。NNSS も少なくとも 1990 年代中頃までは維持される予定になっているが、GPS の開発が順調に進み、その技術が民間に公開されればやがて NNSS にとってかわる時が来るだろう。

6. 航行衛星と測地学・天文学

最初に述べたように、水路部では航行衛星を利用して小笠原諸島および沖縄の先島諸島など従来日本測地系と

結ばれていなかった島嶼の大部分を結合し、その成果により海図の修正を行なった。今、世界は200海里的時代を迎え、これら離島の位置は200海里水域の画定の起点として重要な役割を担っている。

2~3年前、各国の200海里宣言が相次ぐ中で、遠洋漁業の漁船は1千万円もするような NNSS の受信装置を先を争って買い求めたため一時在庫がなくなり、順番待ちをするというような時期があった。これは NNSS の有用さが認められたこともさることながら、政治的背景から必要に迫られたという点も否めない。海洋においても、正確な海図と精密な測位が必要な時代となったのである。

こと陸上での利用に関しては、近年電子回路の発展に応じてポータブルな受信装置が次々と開発され、処理プ

ログラムの改良と相まって測位精度が向上し、ますます利用者の増大を招いている。天文学の分野に関しては、水沢緯度観測所を含む DPMS の組織が NNSS を利用して極運動の観測を行なっていることは御存知のとおりである。

水路部では NNSS を始め、測地衛星のレーザー測距、写真観測などの衛星測地学的手法を動員し、測定の精度をさらに上げて本土と離島を結ぶ海洋測地網を構築する計画を持っている。NNSS はポータブルかつ自動化という面において VLBI やレーザー測距などの機器より扱いやすいため、無人島などにおいては偉力を発揮するだろう。NNSS の精度向上とそれに続く GPS への期待は、海事関係者のみならず、測地学、位置天文学の分野にとっても大きい。

学会だより II

日本天文学会昭和54年度秋季年会記事

昭和54年度秋季年会は岡山県浅口市鴨方町の鴨方町民会館の大ホールに於て10月16日(火)~19日(金)の4日間にわたって開催された。講演数145、出席者約280名、各セッションの座長は次の方々をお願いした。

- 16日午前 堀源一郎、古在由秀(講演数16)
午後 坪川家恒、高倉達雄(" 25)
17日午前 柿沼清隆、赤羽賢二(" 18)
午後 甲斐敬造、山下泰正(" 26)
18日午前 小平桂一、海野和三郎(" 17)
午後 高瀬文志郎、会津晃(" 27)
19日午前 奥田治之、高窪啓弥(" 16)

会期中の16日の昼に内地留学奨学金選考委員会、17日夜に懇親会、18日の昼に理事会が開かれた。また19日の午後、台風20号通過直後の晴天下にエクスカージョンとして岡山天体物理観測所の見学会が開かれ参加者約30名であった。

内地留学奨学金

年会中に開かれた内地留学奨学金選考委員会において申請のあった3名の候補者について選考を行った結果、次のように決定した。

- ◎浦田 武(富士観光、日本平富士観光センター勤務)
研究題目:「小惑星の同定検索と軌道の研究」
留 学 先: 東京天文台天体掃索部
奨 学 金: 18万円

日本天文学会評議員候補者選挙に関する公示

選挙管理委員会は、1980年の総会に推薦される改選組(任期1980年~1984年)評議員候補者の選挙について、定款第19条及び評議員選挙施行細則(1970年5月制定、以下細則という。)の規定に基づき、下記の通り公示する。

記

1. 選挙権及び被選挙権を有する者は、この公示の時点における特別会員である。ただし、被選挙権については現に非改選組評議員であるものを除く。(細則第3条による。)
2. 上記有権者には、有権者名簿及び投票用紙を別に発送する。(細則第4条による。)
3. 投票は、10名以内の無記名連記とする。(細則第5条による。)
4. 投票期間は、1980年1月20日から同年2月18日必着までとする。
5. 選出された候補者の名簿は、1980年4月20日発行の天文月報(1980年5月号)にこれを発表する。(細則第7条による。)
6. 投票の詳細に関しては、上記2.の投票用紙の発送に際して、これを通知する。

以 上

1979年11月20日

選挙管理委員会

注意: 公示の時点における特別会員の名簿を有権者に近日中に発送します。この名簿に異議・誤記があれば1979年12月15日(必着)までにお知らせ下さい。なお、投票用紙等の発送は1979年11月20日現在の会員原簿の住所欄によりますから、その後、変更等のある方は必ず同日までにお知らせ下さい。