

一つの衛星を使ったドプラ型測位の精度向上について

誌名	水産工学
ISSN	09167617
巻/号	333
掲載ページ	p. 185-191
発行年月	1997年3月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



【研究論文】

一つの衛星を使ったドプラ型測位の精度向上について

奥田 邦 晴*¹・本村 紘治郎*²・濱田 悦之*³

An Improvement of Accuracy by Doppler Type Positioning Used a Single Satellite

Kuniharu OKUDA*¹, Kojiro MOTOMURA*²
and Etsuyuki HAMADA*³

Abstract

The method to obtain the position of the measurement point by a single satellite applies to the distress rescue and the oceanic observation.

The present study analyzed the improvement of the positioning accuracy by the improvement of this positioning method. The analysis was carried out by means of the numerical simulation. The positioning calculation was carried out using the data of intervals of one minute when a satellite approached the measurement point.

As a result, when the angle of elevation of the satellite was 80 degrees or less, the positioning error became about 0.2nm (nautical mile) in the latitudinal direction and about 0.5nm in the longitudinal direction. This is a remarkable improvement on the accuracy of the usual positioning method.

1. ま え が き

一つの衛星を使って移動体の位置を求める方法は2通りある。一つは衛星が発した電波を移動体が受信して測位計算を行う方法で、米国の海軍航行衛星システム(Navy Navigation Satellite System, 以後 NNSS という)の方式である。もう一つは移動体が発した電波を衛星が受信し、このデータを使って地上局で測位計算を行う方法で、これには遭難船の位置を知らせる非常用位置指示無線標識(Emergency Position Indicating Radio Beacon, 以後 EPIRB という)や、気象衛星 NOAA によるデータ

収集・測位システムの ARGOS がある。

航行中の船舶のように移動体自身が位置を知りたい場合には前者の NNSS 方式がよいが、遭難船のように位置を自動的に他者に直接知らせたい場合には後者が適切である。いずれも電波のドプラー効果を利用して測位計算を行うが、測位精度は NNSS の方がはるかによい。

また、後者の方法による移動体の位置を求めるには、発信器さえ正常に作動すれば、移動体の側で人手を必要としないので、ARGOS は水産や海洋の分野の調査研究に利用されている。小型発信器をウミガメ、イルカ、クジラ等の海洋回遊生物や海流調査ブイに取付け、送信される電波を衛星で受信し、陸上局で測位計算を行うことにより、海洋生物の回遊経路の調査や海潮流の流向・流速を現場に赴くことなく陸上で知ることができる。

移動体から電波が送信される場合の測位精度向上のため、著者らは前に一つの手法を提案した¹⁾。しかし、この提案の中での解析では、連続して電波が送信されるものとして検討したので、実際の EPIRB や ARGOS のように、電波がある時間間隔の周期で、断続的に送信される場合については検討していない。本研究では、さらに現実的な面からの検討を加えるため、移動体から電波が断続的に送信される場合を想定してシミュレーションを行った。その結果、絶え間なく電波を送信する場合とほぼ同程度の測位精度が得られることがわかった。

1996年6月12日受付, 1996年11月26日受理

キーワード: 一つの衛星, ドプラデータ, シミュレーション, 測位精度向上,

Key words: Single satellite, Doppler data, Simulation, Improvement of positioning accuracy

*¹ 弓削商船高等専門学校 〒794-25 愛媛県越智郡弓削町下弓削1000 (Yuge National College of Maritime Technology, Shimoyuge 1000, Yuge, Ochi, Ehime 794-25, Japan)

*² 水産大学校 〒759-65 下関市永田本町2-7-1 (National Fisheries University, Nagata-Honmachi 2-7-1, Shimonoseki 759-65, Japan)

*³ 東京水産大学 〒108 東京都港区港南4-5-7 (Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Minato, Tokyo 108, Japan)

2. 測位計算とシミュレーションの方法

1) NNSS の測位原理と本研究への応用

電波のドプラ効果を使って測位を行う計算方法は、NNSS 航法として海事関係者の中で広く知られている。本研究の測位計算にも NNSS のアルゴリズムを用いたので NNSS の測位原理について概略的に述べる。

図一は NNSS 測位の概念図である。NNSS 衛星から送信される電波には、2分ごとの時間信号と時間信号が出されたときの衛星の位置を計算できるようなデータが含まれている。図一に示された衛星の位置(t_0, t_1, t_2, t_3)の時間間隔は2分間で、それぞれの位置で衛星から送信された電波の受信周波数を測定すれば、ドプラ効果による周波数の変化(Δf)を2分間隔で知ることができる。そこで、送信電波の周波数(f_1)を使って、各衛星の位置と電波受信点との距離の差(ΔD)を次式で求めることができる。

$$\Delta D = C / f_1 \cdot \Delta f \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

C : 電波の速度 (3×10^8 m/sec)

いま、 t_0, t_1 における衛星の位置と受信点とのそれぞれ

の距離の差を ΔD_0 とすると、 ΔD_0 は一定であるから、 t_0 と t_1 を焦点とする回転双曲面が2面得られる。そして、その内のどちらか1面が受信点の位置の面となる。同様に、 t_1 と t_2 を焦点とする回転双曲面を次に得る。これらの回転双曲面は地球表面で2本の双曲線となるから、その交点は受信点の位置となる。以上が NNSS の測位原理である。

EPIRB や ARGOS では、NNSS とは逆にパイから送信された電波を衛星が受信し、そのドプラ効果によりパイの位置を求めるから、測位原理そのものは NNSS と変わらない。

NNSS の場合、測位計算の初期値に受信点の推測位置が必要である。この初期位置を受信機に予め入力しておく、この位置を更新する計算手法によって最も確からしい位置を求める。しかし、EPIRB や ARGOS のように移動体が電波を送信する場合には、初期位置の入力は困難なので、初期位置を使わずに衛星が移動体に最接近した時刻、すなわち送信周波数と受信周波数が等しくなったときの衛星の位置とドプラ曲線とから移動体の位置を求める。この場合の測位精度は送信電波の周波数の安定度に依存するので、NNSS 測位よりも位置の精度は劣る。

電波を送信する移動体の位置の精度を高めるため、著者らが前に提案した¹⁾のは、EPIRB や ARGOS の測位計算と NNSS の測位計算を合わせて行う方法である。すなわち、衛星の最接近時刻から求めた移動体の位置を初期位置として、NNSS のアルゴリズムで再度測位計算を行えば、移動体の位置の精度が高められることを確かめた。

そこで本研究では、この手法を使って前の研究¹⁾とは異なった条件下でドプラデータが受信された場合の測位精度の検討を行った。

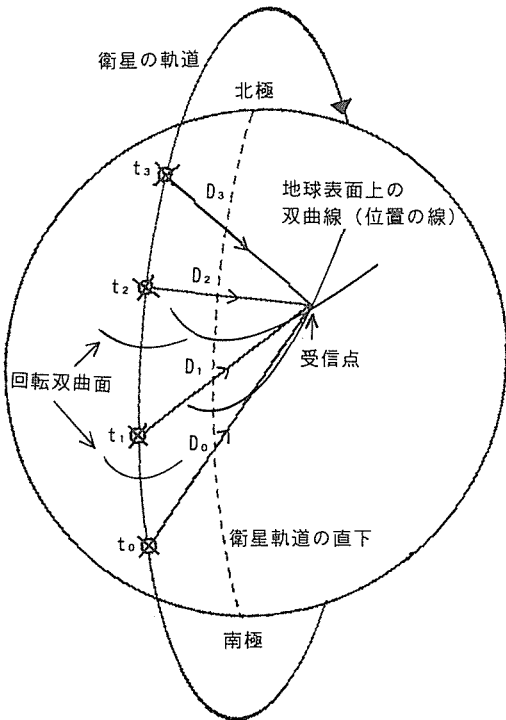
2) ドプラデータ

NNSS の測位計算によって求める解は、真位置と推測位置との差、すなわち緯度差および経度差と、送信周波数と受信機内部の基準周波数との差である。これら3つの未知数を求めるには、三元連立一次方程式を作成して解けばよいから、ドプラデータは少なくとも3個必要である。

電波が送信側から絶えず送信されていれば、多くのドプラデータが得られるが、周期的に断続して送信される場合には、ドプラデータの数は限られる。例えば、衛星が高度約1000kmで極軌道を周回する場合、中緯度では衛星が水平線から出て水平線下に没するまで15~16分かかるから、1分の周期で0.5秒間送信するシステムでは、最大15~16個のデータしか受信できない。

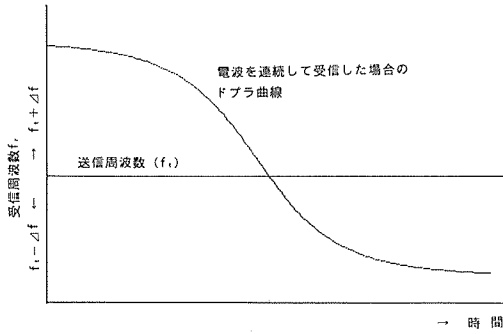
受信した電波のドプラ曲線を図一2に示す。図一2(a)は連続して電波を受信できた場合、また、図一2(b)は断続的に電波を受信した場合である。

次にドプラデータの誤差について述べる。測位精度に

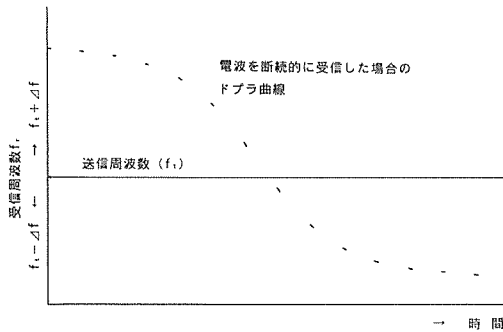


⊗ : NNSS衛星
 t_0, t_1, t_2, t_3 : 衛星の通過点
 D_0, D_1, D_2, D_3 : 衛星と受信点の距離

図一1 NNSS 測位の概念図



(a) 電波を連続して受信した場合のドブラ曲線



(b) 電波を断続的に受信した場合のドブラ曲線

図一 2 ドブラ周波数の変化

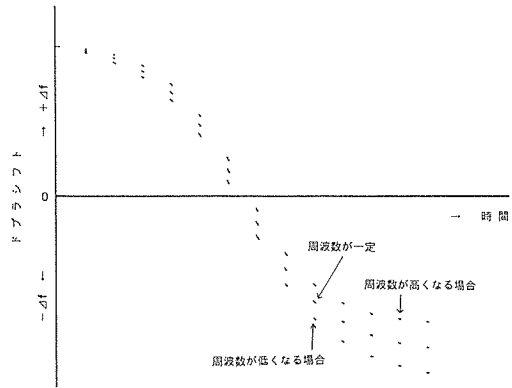
- (a) 電波を連続して受信した場合のドブラ曲線
- (b) 電波を断続的に受信した場合のドブラ曲線

影響する要因のうち、ドブラデータに影響を与えるものは主として電波屈折と送信周波数の変化である²⁾。

電波屈折は、電波が電子密度の高い南方を經由してきたときに大きくなる。この現象は電波の伝搬経路長の増加となってドブラデータに影響を与え¹⁾、測位誤差が生ずる原因となる。この影響が小さいのは、衛星が測位側に最も近づく付近で、測位側から衛星を見る仰角が最大になる付近である。

また、発信器の性能による送信周波数の変化もドブラデータに影響を与える。衛星から電波が送信される NNSS の場合、経年変化のため周波数が変化していても、15~16分間に受信する電波の送信周波数は安定して変動はない。しかし、EPIRB や ARGOS の場合、電波の送信時間が約0.5秒であっても、送信周波数はドリフト的に若干変化する。この送信周波数の変化は受信周波数にも影響を与えるから、ドブラデータの精度は劣化し、プイの位置誤差の原因となる。

送信周波数が変化して影響を受けたドブラ曲線を図-3に示す。送信周波数が高い方あるいは低い方に変化すると、受信開始後の時間経過にともない、ドブラ曲線は周波数が変化しないときの曲線から離れていく¹⁾。すなわち、ドブラデータの受信時間が長いほど測位誤差は大き



図一 3 送信周波数が変化した場合のドブラ曲線

くなる。

以上のことから、電波屈折と送信周波数の変化に起因する誤差を小さくするには、衛星が最も測位点側に近づく時機（最大仰角付近）のドブラデータを測位計算に使用すればよいことになる。

3) シミュレーションの方法

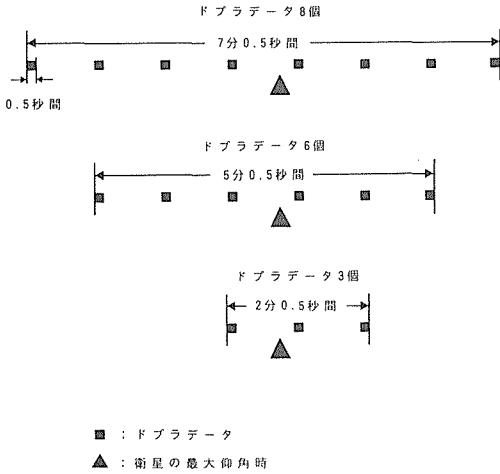
前項で述べたように、電波屈折による誤差をできるだけ小さくするには、衛星の仰角が最大となる付近のドブラデータを使用する必要がある。そのためには、シミュレーションを行うにあたり、衛星の軌道を決めておかなければならないが、現在、一つの衛星を使って測位するシステムの衛星軌道データは NNSS とほぼ同じであるので、NNSS の軌道データを使用した。そして、衛星の最大仰角を10°から10°おきに80°までと85°の合わせて9例設定し、最大仰角付近で得られるドブラデータを計算³⁾で求めた。

また、前の研究¹⁾では、受信したドブラデータが連続したものとして検討を行ったが、ここでは、EPIRB のシステムとはほぼ同様に、電波の送信周期を1分、送信時間を0.5秒、送信周波数を400MHz と想定してシミュレーションを行った。

送信周波数が変化する割合については、EPIRB の送信周波数の中期安定度の規格が 1×10^{-9} /分以内⁴⁾とされているので、この値を用いた。すなわち、受信開始から 1×10^{-9} /分の割合でドリフト的に周波数が高くなったり低くなったりすることを想定してドブラデータを求め、測位計算を行った。なお、送信周波数が変化すると電波の波長も変化するがその値は小さいので、ここでは一定とした。

次に、シミュレーションに使用するドブラ積算カウント値 (N_k)、つまり受信電波の周波数の山の数を調べる方法を述べる。

送信周波数が一定の場合、ドブラ積算カウント値は次式²⁾で求められる。



図一四 測位計算に用いたドプラデータ

$$N_k = (D_{ck} + t \cdot f_0 \cdot L_0) / L_0 \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

D_{ck} : t 時間ごとの測位点と衛星の距離の変化

t : ドプラカウントをする時間

f_0 : 受信機内の基準周波数と経年変化した送信周波数との差

L_0 : 送信電波の波長

送信周波数が短時間に变化すると f_0 も当然变化するから、(2)式の f_0 に送信周波数の变化した分を加減すればよい。したがって、送信周波数が变化したときのドプラ積算カウント値 (N_k) は次に示す(3)式で求められる。(3)式の±の符号は、+の場合には送信周波数が低くなることを、-の場合には高くなることを意味する。

$$N_k = \{D_{ck} + t \cdot (f_0 \pm 1 \times 10^{-9} / 60 \cdot f_0) \cdot L_0\} / L_0 \quad \dots\dots(3)$$

そこで、1分周期で0.5秒間受信されるドプラデータを1個として、8個、6個、および3個のドプラデータについて、衛星の各仰角ごとに(3)式を用いてドプラ積算カウント値を求め、測位誤差を計算した。それぞれの受信時間は7分0.5秒、5分0.5秒、および2分0.5秒である。その場合の受信状況を図一四に示す。

ドプラデータの受信時間は、受信開始から終了までのほぼ中間点で衛星の仰角が最大となるようにとった。これとともに、移動体の位置の緯度による測位誤差傾向を調べるため、低緯度と中緯度に分けて検討した。

計算に用いた衛星の軌道データと周波数の諸元値を表一に表す。

3. 結果と考察

1) 低緯度における測位誤差

移動体の位置が低緯度のときの緯度を0°として、測位

表一 計算に用いた各要素の諸元値

衛星の軌道	長半径	7459.61km
	離心率	0.001941
	近地点通過時間	395.7843min
	昇交点経度	220.4686°
	近地点引数	166.0464°
電波の周波数	傾斜角	89.6685°
	受信機の基準周波数	399.968MHz
	経年変化した送信周波数と受信機内部の基準周波数との差 (f_0)	32.0KHz

誤差をシミュレーションにより求めた。その結果を図一五、および図一六に示す。

図一五は衛星が南から北に移動する北上軌道の場合、図一六はその逆の南下軌道の場合である。縦軸を緯度および経度方向の誤差 (N, S, E, Wはそれぞれ北, 南, 東, 西を意味する)、横軸を測位側から見た衛星の最大仰角とした。それぞれの図で、受信中に送信周波数が高くなる時と低くなる時、そしてドプラデータの受信個数が8個、6個、および3個の場合を示した。

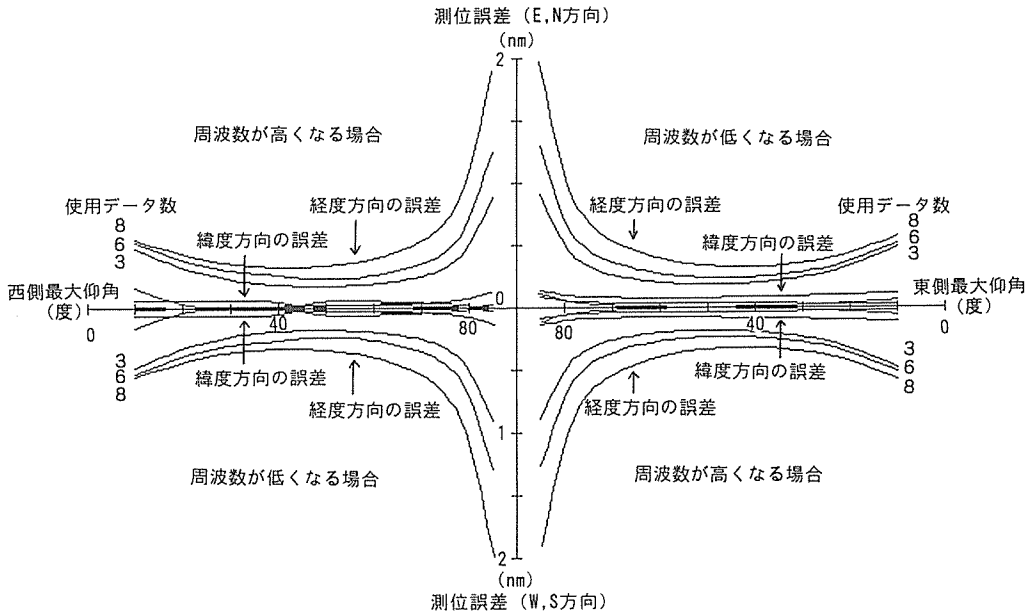
これらの図で明らかのように、送信周波数が高くなる場合と低くなる場合とでは、測位誤差の大きさはほぼ同様で、誤差の方向が変わるだけである。また、ドプラデータ数が多くなると、すなわち測位時間が長くなると測位誤差も増加した。この傾向は経度方向の誤差によく現れている。

ドプラデータ数が3個の場合の緯度方向の誤差は、北上および南下軌道とも、どの最大仰角においても約0.2海里 (0.4km, 1海里は1852m, 以後、記号 nm を用いる) 以内におさまっている。経度方向については、仰角が10°あたりで約0.5nm (0.9km), その後、仰角が高くなるにつれて測位誤差は若干減少し、60°位から徐々に増加して、80°位で約0.5nmの誤差となった。この傾向は、北上軌道、南下軌道とも同様である。また、衛星の方向が東側と西側ではほぼ対称な測位誤差傾向となった。

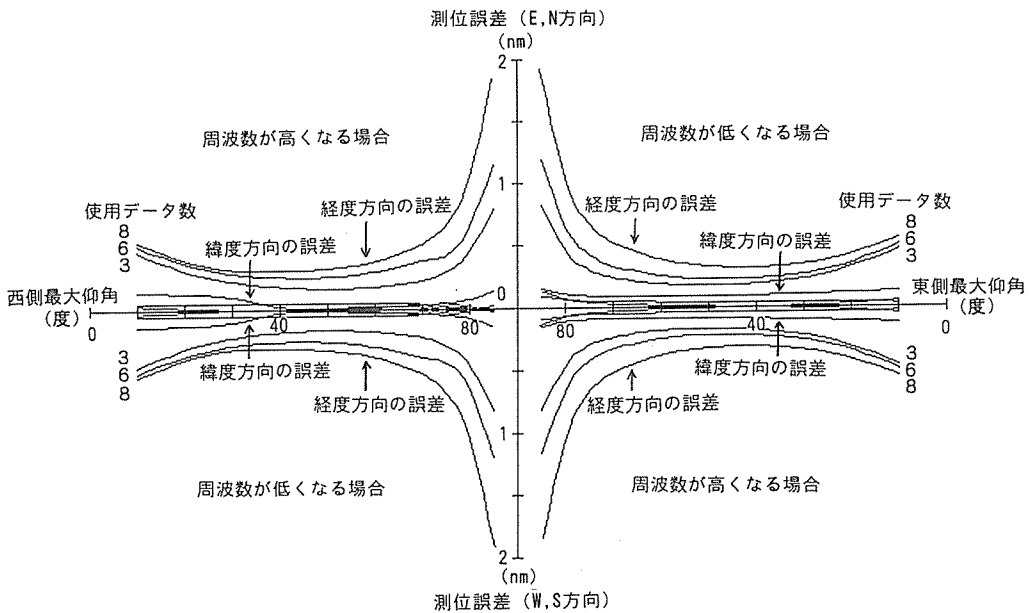
2) 中緯度における測位誤差

移動体の位置の中緯度として、弓削商船高等専門学校に近い北緯34° (以後、34°Nという) を選んだ。前項と同様に、34°Nにおいて求めた測位誤差を図一七、および図一八に示す。

測位誤差の大きさは低緯度の場合とほぼ同じである。しかし、中緯度では、衛星を東に見るか西に見るかで若干誤差の傾向が異なっている。すなわち、仰角が80°を



図一五 移動体の緯度が0°で、衛星が北上軌道における測位誤差



図一六 移動体の緯度が0°で、衛星が南下軌道における測位誤差

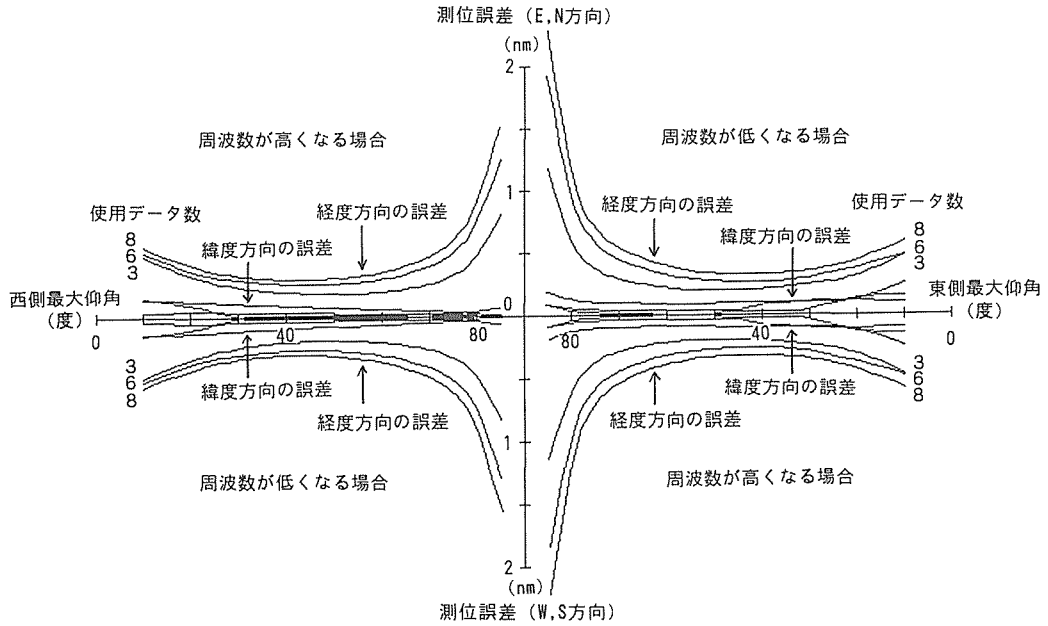
越えると、北上軌道では西側仰角よりも東側仰角の方が測位誤差の増加の割合が大きくなり、南下軌道ではこの逆である。そして、この傾向は緯度が高くなるほど大きい。

3) 考察

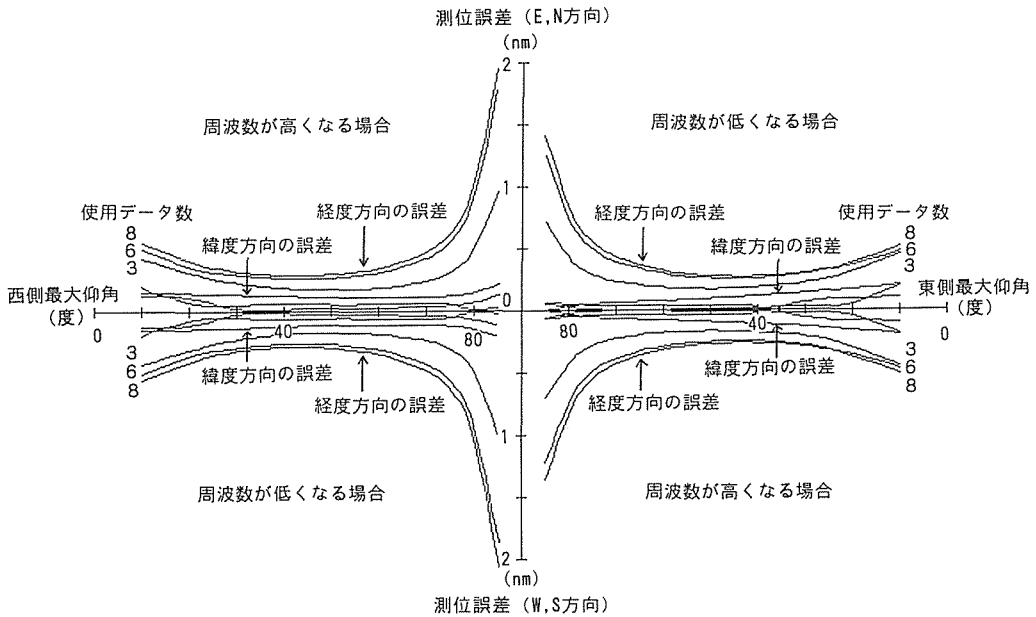
シミュレーションでは、ドブラデータが3個の場合が、最もよい結果が得られた。しかし、衛星の最大仰角が低仰角のときにドブラデータ数が少ないと、電波屈折の影

響が大きく、測位誤差が大きくなる¹⁾ので、低仰角のときのデータ数は6個位が適当と考えられる。また、ドブラデータ数が少なく不良データがある場合には、測位計算における不良データの寄与率が高くなり測位誤差が増加するおそれがあること、さらに、電波屈折や送信周波数の変化以外の原因による測位誤差²⁾が加わることに、当然、注意を払う必要がある。

本研究で得られた測位精度をまとめると、最大仰角付



図一七 移動体の緯度が34° Nで、衛星が北上軌道における測位誤差



図一八 移動体の緯度が34° Nで、衛星が南下軌道における測位誤差

近の3個のドプラデータを使用した場合、緯度方向の誤差は、前の研究¹⁾と同様、衛星の仰角に関わらず約0.2 nm以下であった。しかし、経度方向の誤差は仰角80°付近を境に傾向が異なった。すなわち、経度方向誤差は衛星の最大仰角が80°以下のとき0.5nm以下におさまっているが、80°を越えると急激に増大した。このことから、測位誤差の範囲を緯度方向では0.2nm程度、経度方向では衛星の仰角80°以上と以下の場合に応じて設定

すればよいことになる。

前の研究¹⁾では、ドプラデータを連続して受信できる場合、送信周波数に変化しても測定時間が短ければ、緯度方向誤差は衛星の仰角の大きさに関わらず0.2nm以下、経度方向誤差は衛星の仰角80°以下で0.5nm以下、仰角が85°位ときは2nm(3.7km)程度であった。

以上述べたとおり、前の結果¹⁾と今回の結果とを比較してみると、衛星の仰角80°以上のときの経度誤差を除

けば、測位誤差の傾向は大差ない。したがって、実際のEPIRBのように、断続的に電波を送信する場合に送信周波数が変化しても、著者らが提案した計算手法¹⁾は、移動体の測位精度向上に有効であることが確かめられた。

このように、移動体が電波を送信する場合の移動体の位置の精度向上については、小塩⁵⁾や柿原⁶⁾の研究がある。小塩はEPIRBの高安定発信器を開発し、EPIRBの測位精度を90%確率誤差で2.7nm(5.0km)から0.6nm(1.1km)に向上させた⁵⁾。また、柿原はディファレンシャルの手法を提案し、ARGOSの測位精度を95%確率誤差で6.5nm(12.0km)から1.6nm(3.0km)に改善した⁶⁾。著者らの方法¹⁾ではソフトのみで十分対応できるので、送信電波の周波数を安定させる装置やディファレンシャル補正のための基地局も必要なく、しかも上記2方法よりも測位精度が高い。

4. あとがき

衛星の最接近時(最大仰角の時)を利用して求めた移動体の位置を初期値とし、その時刻付近で得られたドブラデータを用いて、NNSSのアルゴリズムで測位計算を行った。この方法によって、電波を送信する移動体の測位精度について検討した。

本研究の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 断続的なドブラデータの場合、3~6個のデータを用いると測位精度向上に有効である。
- (2) 本手法による測位計算では、ドブラデータが連続していても断続的であっても、測位精度向上にほぼ同程度の効果がみられた。
- (3) 緯度方向誤差は、衛星の仰角に関わらず、約0.2

nm(0.4km)以下であった。

- (4) 経度方向誤差は衛星の仰角が 80° 以下のとき、約0.5nm(0.9km)以下であったが、仰角が 80° を超えると急激に大きくなった。

冒頭にも述べたように、本手法による測位は、今後、遭難救助用ブイの位置だけでなく、海洋観測用ブイのような漂流移動体、さらにウミガメ、イルカ、クジラ、鳥類のような回遊生物などの位置や回遊経路を精度よく求める場合に有効であると考ええる。

なお、今回はシミュレーションによる検証にとどまったが、次の機会に実データを使って検討したいと考えている。

最後に、データ整理を行うにあたり協力して頂いた弓削商船高等専門学校卒業生の吉梅護君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 奥田邦晴, 濱田悦之: 極軌道衛星系EPIRBの測位精度の向上について, 日航論, **92**, pp. 1-8, 1995.
- 2) 木村小一: NNSS測位誤差の解析, 衛星航法, 海文堂, pp. 97~109, 1977.
- 3) 奥田邦晴, 庄司和民: NNSSの位置誤差について, 日航論, **61**, pp. 1~10, 1979.
- 4) 庄司和民, 飯島幸人: 衛星EPIRBシステム, GMDSSの解説, 成山堂, pp. 69~101, 1990.
- 5) 小塩立吉: 短予熱時間高安定OCXOを用いた406MHz衛星系イーパブとその測位精度について, 日航論, **88**, pp. 269-277, 1992.
- 6) 柿原利治: 逆NNSS型ディファレンシャル航法, 日本航海学会誌, **122**, pp. 72-77, 1994.