

修士学位論文

長基線 DGPS 測位および干渉測位の  
測位精度に関する研究

平成 15 年度

(2003)

東京商船大学大学院 商船学研究科

流通情報工学専攻

2002203 岡本伸也

## 学位論文要旨

# 長基線 DGPS 測位および干渉測位における測位精度に関する研究

東京商船大学大学院 商船学研究科 流通情報工学専攻  
2002203 岡本 伸也

GPS 測位において相対測位は、位置が既知である基準局からの測定値を用いて未知点の測位精度を改善する。地球上の約 20,000km 上空にある GPS 衛星から送信される GPS 信号は、地上の GPS アンテナで受信される間に大気等の影響を受ける。この影響は衛星とアンテナ間の距離を測定する際の誤差要因となり、直接測位精度の劣化の原因となる。相対測位を用いることでこの誤差要因を相殺することができ、高精度な測位結果を得られるため、現在も広く利用されている。しかし基線長が長距離になると相対測位の効果は薄れるため、未知点の測位精度は改善されない。そこで本研究では、相対測位である DGPS 測位と干渉測位に対して、実際に基線長を変化させた場合の測位精度への影響を評価する。

DGPS 測位実験では、国土地理院が公表している電子基準点データを用いる。電子基準点は全国に 1,000 点以上設置され、正確な位置が知られている。千葉県市川市の電子基準点を基準局とし、基線長を主に緯度方向に伸ばし未知点とした。DGPS 測位方式は擬似距離補正方式を用い、測位計算は後処理であるため補正值の伝送遅延は考慮しない。まず計 6 日 24 時間の DGPS 測位計算を行い測位精度の評価を行い、基線長が長距離になる程、測位精度の劣化が生じることを確認した。次に電離層と対流圏遅延を、基準局と未知点のそれぞれで補正を行い、先ほどと同様の実験を行った。その結果測位精度は改善され、長基線長における相殺効果劣化の大きな要因が電離層、対流圏遅延量の違いであることを確認した。

干渉測位実験では、実際に基線長の異なる 5 つの未知点でデータを取得し解析を行った。搬送波位相の整数値バイアス決定の手段として OTF (On The Fly) アルゴリズムを用いた。OTF は従来の整数値バイアスの決定よりも高速に解くことができるため、移動体測位や RTK-GPS 測位等に利用されている。L1 帯と L2 帯の搬送波から線形結合により算出される波長の長いワイドレーン搬送波と L1 帯搬送波の 2 種類の搬送波位相を用いて干渉測位を行い基線長の変化による影響を調べた。干渉測位においても DGPS 測位同様基線長が長くなる程測位精度は劣化した。また L1 帯搬送波の干渉測位による中基線長 20.996km と 45.788km の未知点において、測位解を正確に求めることができなかった。これは二重位相差の残差が大きく変動し、正確な整数値バイアスの決定を困難にしたことが 1 つの要因であることがわかった。また残差の変動には、基準局と未知点の電離層伝播誤差が異なることと関係があることを確認した。

## Abstract

# The Positioning Accuracy of Long Baseline Code-DGPS and Carrier-Phase-DGPS

Shinya Okamoto

Tokyo University of Mercantile Marine

Relative positioning improves the positioning accuracy of a user station using the correction data of a reference station of which position coordinates are known. The atmosphere in the signal propagation path has effects on the measurements of the GPS signal. It causes the errors on the measurements and positioning error. In relative positioning, when the baseline length between the reference and user stations is short, the propagation paths of GPS signal are almost equal. And the errors in the atmospheric measurements are almost common to the GPS signals in both paths. Therefore, the errors are cancelled in the signals by the relative positioning and the highly accurate positioning is available. However, the errors cannot be canceled, as the difference of the errors becomes larger between the signals observed at the reference and user station with the increase of the baseline length.

There are two kinds of methods in relative positioning. One is that of using C/A-code, called *Code-DGPS*. The other is by Carrier-phase measurements, called *Carrier-phase-DGPS*. The objective in this paper is to investigate the atmospheric effects on the positioning accuracy due to the change of the baseline length.

In the case of Code-DGPS positioning, the experimental data is used on the electronic reference point, operated by Geographical Survey Institute. There are about 1,000 points in Japan. The data at *Chiba-Ichikawa* reference point are used for the reference. 12 points, extended mainly to northward, are chosen as user points. Code-DGPS method uses the pseudorange for correction. First, Code-DGPS positioning was performed for every user point. As baseline length becomes longer, the positioning accuracy deteriorates. Second, the atmospheric delays from the pseudorange measurements are corrected at both the reference and user station. The correction of the ionospheric delay is estimated from the dual frequency pseudorange and carrier phase measurements. The correction of the tropospheric delay is estimated from the *Saastamoinen Model*. It is found that Code-DGPS positioning accuracy can be improved by the correction of ionospheric and tropospheric delay.

In the case of Carrier-Phase-DGPS positioning, positioning is carried out by the data between the fixed reference station and 5 user stations. In order to resolve the integer ambiguity in Carrier-Phase measurements, *OTF (On the Fly) algorithm* is used. The characteristic of the algorithm is to resolve the integer ambiguity quickly. From L1 and L2 Carrier phase measurements, a new signal can be created, called *wide-lane*. It is very useful to resolve integer ambiguity. As baseline length becomes longer, the positioning accuracy deteriorates same as Code DGPS. And in the case of only L1 measurements, integer ambiguity was not correctly resolved at the user points of the 20.996km and 45.788km of baseline length. The residual of double-difference of measurements fluctuates severely as baseline length becomes longer. It is found that the fluctuation of the residual is generated mainly by difference of ionospheric delay in the double-difference between the reference and user station.

# 目 次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 はじめに	1
1.2 GPS の概要	2
1.3 GPS 測位の種類	3
1.4 GPS 測位の誤差要因	4
1.5 本研究の目的	4
<b>第2章 GPS 測位の基礎</b>	<b>5</b>
2.1 座標系	5
2.1.1 測地系	5
2.1.2 ジオイド	5
2.1.3 楕円体と測地系	5
2.1.4 高さ	8
2.2 単独測位	9
2.2.1 原理	9
2.2.2 計算方法	10
2.3 測位誤差と補正	12
2.3.1 衛星位置	12
2.3.2 衛星クロック	13
2.3.3 電離層遅延	13
2.3.4 対流圏遅延	18
2.3.5 マルチパス	20
2.3.6 受信機雑音	20
2.3.7 選択利用性 (SA: Selective Availability)	20
2.4 DOP (Dilution of Precision)	21
<b>第3章 DGPS 測位</b>	<b>24</b>
3.1 測位原理	24
3.2 相殺される誤差要因	24
3.3 DGPS 測位の主要な方式	25
3.4 補正データの伝送	27
3.5 RTCM 規格の概要	27
<b>第4章 長基線 DGPS 測位精度実験</b>	<b>29</b>
4.1 はじめに	29
4.2 標準データフォーマット	29

4.3	測位精度評価について	32
4.3.1	精度と確度	32
4.3.2	2drms	33
4.4	長基線 DGPS 測位実験	34
4.4.1	基線長に対する DGPS 測位精度の評価実験	34
4.4.2	基線長に対する DGPS 測位精度の実験結果	36
4.4.3	長基線長 DGPS 測位精度の改善に関する実験	45
4.4.4	長基線長 DGPS 測位精度の改善に関する実験結果	46
4.5	まとめと考察	55

## 第5章 干渉測位 57

5.1	測位原理	57
5.2	測位計算	57
5.2.1	搬送波位相と整数値バイアス	57
5.2.2	搬送波位相誤差項の削除	58
5.2.2.1	一重位相差	58
5.2.2.2	二重位相差	59
5.2.2.3	線形結合	60
5.2.3	FLOAT 解アルゴリズム	61
5.2.4	FIX 解アルゴリズム	65
5.3	整数値バイアスの決定	67

## 第6章 干渉測位実験 70

6.1	はじめに	70
6.2	基線長の異なる干渉測位実験	70
6.2.1	実験概要	70
6.2.2	測位結果	72
6.2.2.1	ワイドレーンによる測位結果	72
6.2.2.2	L1 帯搬送波による測位結果	75
6.3	干渉測位における電離層伝播誤差の影響	80
6.4	まとめと考察	84

## 第7章 結論 86

7.1	本論文のまとめ	86
-----	---------	----

謝辞

参考文献

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

GPS(Global Positioning System;全世界的測位システム)は人工衛星による位置決定システムである。1970年代の初頭に米国国防総省 DOD(Department of Defense)により地球上でいつでもどこでも実時間の連続測位が可能なシステムを目指し開発が開始された。1974年7月に最初の NAVSTAR(Navigation System with Time and Ranging)衛星が打ち上げられ、1993年12月には実質的に完全運用状態になった。しかし、この時点では試験段階のブロックと呼ばれる実験機を含めて24衛星以上で配置されていた。ブロックと呼ばれる実用機に全衛星が代わり、本格的な完成が達成されたのは1995年である。

2000年5月2日13時(JST)までSA(Selective Availability)と呼ばれる測位精度を劣化させる操作がなされていた。その精度は単独測位では水平方向で約100mであった。測位精度を上げるために種々の補正システムが世界中で運用されている。現在GPS測位の測位精度はSAが解除され、受信機、アンテナ等の周辺機器の進歩により大幅に改善されている。

GPSと類似している衛星航法システムには旧ソ連が開発し、現在ロシア連邦が運用しているGLONASS(Global Navigation Satellite System)がある。また欧州が開発を行っているGALILEOがあり、我が国においても準天頂衛星の運用が計画されている。

表 1-1 GPS 衛星の主要緒元

衛星数	4機 × 6軌道 = 24機
軌道半径	約26,561m
周回周期	約11時間58分2秒 約0.5恒星時
軌道傾斜角	55°
設計寿命	7.5年
搬送波周波数	L1 = 1,575.42MHz (154 × 10.23MHz) L2 = 1,227.6MHz (120 × 10.23MHz)
コードの種類	ゴールド符号
測地系	WGS-84

## 1.2 GPS の概要

表 1-1 に GPS 衛星の主要緒元を記す。GPS 衛星は高度約 20,000km の軌道を図 1-1 の GPS 衛星軌道概念図が示すように周回している。軌道面は赤道からの傾斜角  $55^\circ$  と各軌道間隔  $60^\circ$  の全てで 6 軌道ある。各軌道に 4 機の衛星が設置されており、計 24 衛星で運用するとされている。軌道上には予備衛星が 1 機配置できるようになっており、現在 (2004 年 3 月) では、28 機の GPS 衛星が使用可能である。各衛星は約 11 時間 58 分 2 秒 (約  $1/2$  恒星日) で軌道を 1 周し、一年で同じ配置に戻るように制御されているようである。実際には衛星軌道は随時変更されており完全には決定していない。衛星の軌道は 2m の範囲で地上のモニター局で管理されており、2 時間間隔で更新される高い精度の軌道情報 (Ephemeris) を 30 秒周期で対応した衛星が放送している。GPS 衛星 (ブロック I / A) の設計寿命は 7.5 年とされている。各衛星は 10.23MHz の基準発信機を搭載しており、154 倍の  $L1 = 1575.42\text{MHz}$  と 120 倍の  $L2 = 1227.6\text{MHz}$  の 2 周波の右旋円偏波を全地球に向けて送信している。信号は全衛星同一の周波数を用いて C/A コードと P コードとともに衛星ごとに異なるゴールド符号と呼ばれる擬似ランダム雑音 (PRN : Pseudo Random Noise) で BPSK (Bi-Phase Shift Key; 2 相位相変調) 変調されている。具体的に GPS 衛星からコードに載せられて送信されるデータは、衛星軌道情報 (Ephemeris)、衛星時計の補正值、電離層補正パラメータ、全衛星の位置情報 (almanac) 等である。

また、GPS では GPS タイムというものがあり、この時刻のもとに運用されている。各衛星には、セシウム原子時計と、ルビジウム時計が搭載されている。この原子時計は地上の官制システムで管理されており、この補正情報を軌道情報とともに衛星が放送している。GPS タイムは一週間で一回りするようになっている。また世界標準時である UTC が知られているが、UTC と GPS タイムの違いも管理されている。

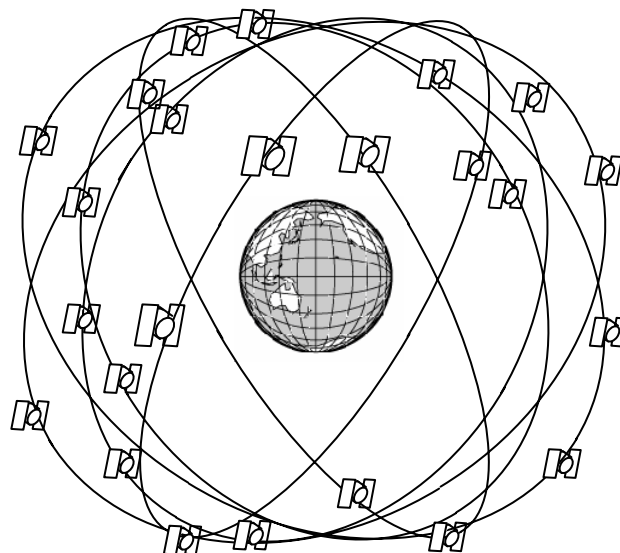


図 1-1 GPS 衛星軌道概念図

### 1.3 GPS 測位の種類

GPS 測位で最も標準的な測位法は、GPS 衛星から送信される C/A コードのみをもとに受信機 1 つで測位を行う単独測位であり、SPS (Standard Positioning Service) と呼ばれている。測位精度は 30m とされている。C/A コードは民間に開放された信号であり、何時でも利用することが可能である。GPS 衛星は C/A コードのほかに P コードを送信している。この信号は米軍関係者のみに使用が許されており、P コードを利用する測位法は PPS (Precise Positioning Service) と呼ばれている。測位精度は 10m と SPS よりも高い。

単独測位よりも高精度な測位を実現する測位法に相対測位がある。相対測位にはコードを利用する DGPS (Differential GPS) 測位と搬送波位相を測定し測位を行う干渉測位がある。DGPS 測位精度は 2 ~ 3m であり、カーナビゲーションシステム等に利用されている。干渉測位精度は数 cm であり、数 cm 程度の測位精度を要求している工事測量や現在では、航空機の離着陸時の位置計算等に利用されている。

相対測位は、利用者の受信機 1 つでは行うことができない。あらかじめ位置のわかっている定点に基準局を設ける必要があり、基準局の補正情報等を利用しなくてはならない。利用者が各自で基準局の設置を行うことはないため、基準局の補正情報等を放送するサービスが行われている。DGPS 補正情報は、図 1-2 の海上保安庁の電波灯台から放送されている中波ビーコンの補正情報が無償で利用できる。また FM 音声多重放送も利用できる。一方干渉測位では、無償の補正データ送信サービスは確立されてはいないが、携帯電話、インターネット等で補正データの送信を行っている。

単独測位、DGPS、干渉測位のいずれも測位計算には GPS 衛星位置と GPS 衛星とアンテナ(利用者)位置間の距離が必要となる。特に GPS 衛星とアンテナ位置間の距離は擬似距離 (Pseudo Range) と呼ばれる。

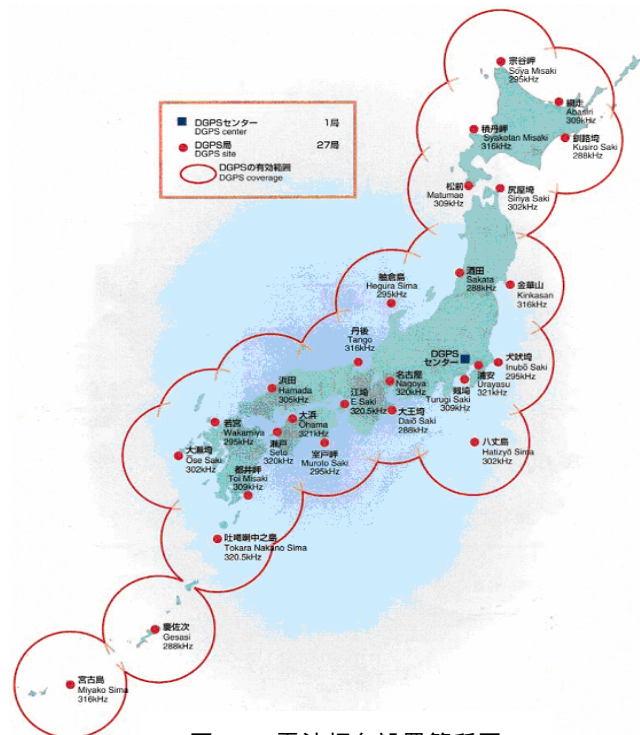


図 1-2 電波灯台設置箇所図



## 1.4 GPS 測位の誤差要因

GPS 測位における誤差を引き起こす要因はいくつか存在しており、GPS 衛星位置に関する誤差要因と擬似距離に関する誤差要因の大きく2種類に分別される。

GPS 衛星位置に関する誤差は、実際の GPS 衛星位置と衛星軌道情報(Ephemeris)を利用して計算した位置が異なることによって生じる。また太陽の輻射圧力による摂動等で衛星運動の乱れによる誤差もある。

擬似距離に関する誤差には、電離層、対流圏による遅延誤差や GPS 信号が建築物等の反射物に反射し、直接波に干渉を起こすマルチパスの電波伝搬経路誤差がある。また擬似距離はアンテナが GPS 信号を受信した時刻と信号送信時刻の差に光速を乗ずることで算出する。この算出法では送信側と受信側の時計が完全に一致していなければならないが、GPS 衛星時計と受信機時計が一致していないために時計誤差が生じ、正しい距離を求めることができない。

DGPS 測位、干渉測位は基準局側の補正データ等を利用し、利用者側の測位誤差要因を相殺することによって測位精度を向上させている。

## 1.5 本研究の目的

本研究では、参照地点の測定値を用いて測位精度の改善を行う相対測位に対して、参照点との距離、つまり基線長の変化が測位精度へ与える影響について調べた。相対測位は基準局と利用者側で等しく生じる測位誤差を相殺し、測位精度の改善を行う。測位誤差相殺効果は長距離であるとき劣化する。

そこで本研究では、相対測位である DGPS 測位と干渉測位において、実際に基線長を変化させ、測位精度劣化の程度を評価する。さらに測位精度劣化の主な要因を見出す。

## 第 2 章 GPS 測位の基礎

### 2.1 座標系

#### 2.1.1 測地系

GPS 測位において位置を表現する場合、普通は緯度、経度、高さ等の 3 次元座標で表す。3 次元座標系には、直行座標や球面座標等がある。数学的にはどの座標系も等価であるが、一般的には緯度、経度、高さで表すことが多い。緯度、経度、高さは直感的に理解しやすく、2 地点の緯度、経度を比較することで、相互の位置関係を容易に知ることができる。

測地系とは、地上の点を緯度、経度、高さで記述するための座標系のことである。

#### 2.1.2 ジオイド

ジオイド(geoid)とは、地球重力等のポテンシャル面のうち、平均海水面に一致するものであり、簡単に言うと地球全体に仮に水を張ったとしたときの水面の形である。図 2-1 のように、等重力ポテンシャル面は唯一のものではなく、ポテンシャル値に対応して存在する。この等重力ポテンシャル面のうち、海洋部で海水面と一致するものをジオイドと呼ぶ。

ジオイドは、陸上においては、必ずしも実際の地形と一致しない。実際の地形と一致しないにもかかわらずジオイドを地球の形として用いる理由には、ジオイドが地球の等重力ポテンシャル面という力学的に非常に定義しやすいものであること、及び重力測定その他の観測値から、ジオイドを正確に計算できることが挙げられる。

ジオイドには地球回転による遠心力が含まれていて、赤道面は少し膨らんでいるはずであるが、ジオイド図からはそれを明らかにすることは出来ない。これは基準面にすでにそれが含まれているからである。

海洋では、ジオイドと海面形状はほぼ一致しているから、海面の形状を決めることはジオイドを決定することと等しい。海面の地球表面全体に占める割合は大きいから、この方法で地球全体のジオイドの形を決めることができる。陸上に関しては重力などの測地的なデータを利用して求める。

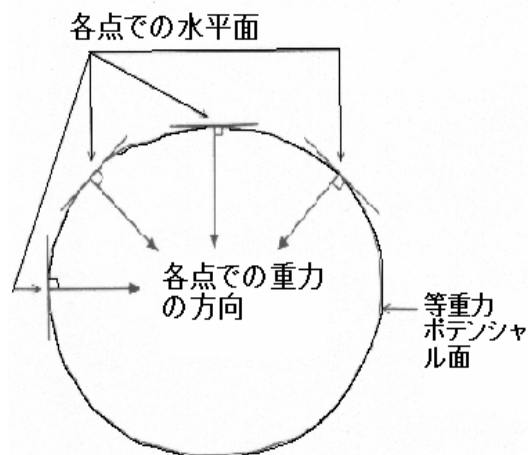


図 2-1 等重力ポテンシャル面の性質

#### 2.1.3 楕円体と測地系

ある場所の位置は緯度、経度、高さの 3 つの数値によって表される。しかし、緯度、経度、高さは測地系の定義に従って計算されるので、異なる原点に基づく緯度、経度、高さは同じ場所に対して違う数値を与えてしまうのである。

地球上で経度、緯度、高さを計算する方法としては、次のような手段が取られている。

- ・ 地球に何らかの方法で楕円体を固定する。
- ・ 緯度と経度は地球の自転軸を基準として計算する。
- ・ 地球の自転軸と垂直で、かつ地球の中心を通る面を赤道面と決める。
- ・ ある場所の緯度をその地点での鉛直線と赤道面のなす角として決める。
- ・ 経度は、地球の自転軸とその地点を含む面(子午面)が基準となる子午面となす角とする。  
この基準子午面は、英国のグリニッジを含む面とする。
- ・ 高さは、ジオイドとその地点との間の距離とする。

このように、緯度、経度は設定された回転楕円体を基準として計算される。基準とするために設定された回転楕円体を準拠楕円体(reference ellipsoid)という。GPSによって3次元的に位置が定まった場合、その地点の高さは通常、準拠楕円体から測られたものであることに注意する必要がある。

測地系が世界で一つに定まっていれば、いかなる場所においても緯度、経度、高さは一つに定まるにもかかわらず、世界中に様々な測地系が存在することには理由がある。世界各国や地域によって準拠する測地座標系が違う根本的な原因は、在来の測量技術の到達距離が短いため、局所的な測量成果だけに頼らざるを得なかったことである。さらに挙げるならば、大きく2つに分けられる。一つは地球楕円体の定数、つまり長半径や扁平率が研究の進展に伴い、逐次改定されたため、様々なものが存在することである。もう一つは、初めに述べたように各国、地域でこの楕円体をその地域の測地原点に合わせるときに、楕円体の中心と地球の中心が必ずしも一致していないことである。その原因には、ジオイドの湾曲による鉛直線の傾きが挙げられる。

地球は半径約6400kmの球である。しかし、厳密には赤道方向にわずかにふくらんだ回転楕円体の形をしている。平面図形の楕円の短軸がちょうど南北極を通る地軸で、それを回転させたような形をしている。赤道方向のふくらみは半径で約21kmである。

地球楕円体の定数は長半径(赤道半径)と扁平率で定義する。楕円体の定数が変わると、同じ地形であっても投影された形が変わり、経緯度も異なってくる。国土の基準とする座標の原点や地図を、地球楕円体の改定に従って変更すると手間がかかり不便なので、通常はある時期に採用した楕円体をそのまま用いる。

経緯度と高さは異なる体系により定まっている。まとめると、ある点の座標とは、

経緯度 楕円体に準拠

高さ 水準面に準拠

のように、三次元の成分中、2個と1個が異なる組み合わせにより構成されている。高さも楕円体表面から測れば統一した体系となったが、水準面の持つ実用的な側面と在来の測量技術では、水準面に準拠せざるを得なかったため、このような構成になった。

日本の地図(海図も含め)は、これまで日本測地系(Tokyo datum)に基づいて製作されてきた。経緯度の原点は東京麻布にある日本経緯度原点である。日本測地系はベッセル楕円体を使用しているので、現在知られている赤道半径や扁平率とはだいぶ違ってきている。例えば、ベッセル楕円体の赤道半径は実際よりも700m短く、扁平率がやや小さい。また、地球の裏側では、海面が楕円体から1km以上も離れてしまうので、全世界的な規模では使い物にならない。

近年、人工衛星の発達に伴い、新しい経緯度の基準が広く用いられるようになってきた。これが世界測地系である。世界測地系は、地心を原点とする現代的な測地系である。人工衛星や電波星を利用する宇宙測地技術によって維持され、ゆがみはとて小さい。GPSは世界測地系のWGS-84(World

Geodetic System 1984)を使用している。WGS-84はDOD(Defense:米国国防省)が維持している。日本測地系の場合、ベッセル楕円体の中心と地球重心は数百mずれている。そのため、WGS-84の座標を日本測地系の座標に変換するにはこのずれを考えなければならない。

楕円体座標から直交座標への変換は次のようになる。直交座標は、楕円体の回転軸方向をZ軸、グリニッジ子午面と楕円体の赤道面が交わる方向をX軸、これら2軸と右手系をなすようにY軸をとる。図2-2に測地系と直交座標の関係を記す。

ある観測点の楕円体座標が経度 $\lambda$ 、緯度 $\phi$ 、楕円体高 $h$ とすると、この点の三次元直交座標 $(X, Y, Z)$ は、

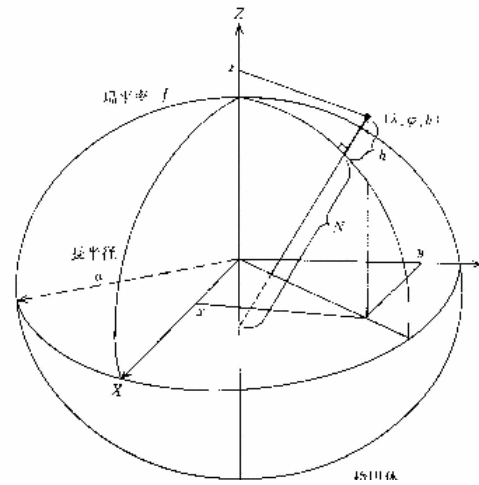


図 2-2 測地系と直交座標との関係

$$\begin{aligned} X &= (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ Y &= (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + h) \sin \phi \end{aligned}$$

(2-1)

となる。ただし、 $a$ を準拠楕円体の赤道半径、 $b$ を極半径、 $f$ を扁平率、 $e$ を離心率として、

$$N = a / (1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \tag{2-2}$$

$$e^2 = f(2 - f) \tag{2-2}$$

$$f = (a - b) / a \tag{2-4}$$

で与えられる。図2-2に概念図を記す。

ここで出る $h$ は楕円体高であり、標高ではない。

この逆、直交座標から楕円体座標への変換、つまり、 $(X, Y, Z)$ から $(\lambda, \phi, h)$ は次のようになる。経度は、

$$\tan \lambda = Y / X \tag{2-5}$$

となるので求めるのは容易だが、緯度は、

$$\tan \phi = (Z + N e^2 \sin \phi) / (X^2 + Y^2)^{1/2} \tag{2-6}$$

となり、直接解くことができない。そこで、

$$\tan \phi = Z / (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad (2-7)$$

とおき、近似値 を求め、これを(2-6)式に代入して新たな を求める。以後 が収束するまで計算を繰り返す。 が求められれば、

$$h = (X^2 + Y^2)^{1/2} / \cos \phi - N \quad (2-8)$$

から、 $h$ を求められる。

実用上の精度として用いるには、次の近似式がある。

$$\tan \phi = (Z + e'^2 b \sin^3 \theta) / \{(X^2 + Y^2)^{1/2} - e^2 a \cos^3 \theta\} \quad (2-9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \tan \theta &= Za / \{(X^2 + Y^2)^{1/2} b\} \\ e^2 &= (a^2 - b^2) / a^2 \\ e'^2 &= (a^2 - b^2) / b^2 \end{aligned} \quad (2-10)$$

である。

### 2.1.4 高さ

GPS で求めた高さを用いる際には注意が必要である。私達が日常の中で感覚的に“高さ”として使用しているのは地図等に記載されている標高、つまりジオイドからの高さである。これに対して GPS から得た高さは、準拠楕円体からの高さである。そのため、通常感覚で楕円体高を使用し標高と混同してしまうと、大きな混乱の元となる。

標高と楕円体高の関係を示すと次のようになる。(図 2-3 参照) 地表の観測点から準拠楕円体に下ろした垂線の高さが楕円体高、観測点から鉛直線に沿ってジオイドに至る長さが標高であり、ジオイドと楕円体との距離がジオイド高である。

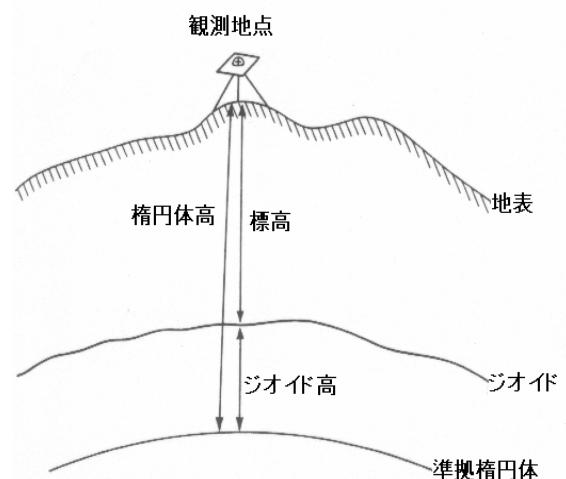


図 2-3 高さ概要

## 2.2 単独測位

### 2.2.1 原理

GPS 衛星による単独測位は、GPS でもっとも基本的な利用方法であり、単純な原理である。GPS では、WGS-84 座標系により経度、緯度および高さが計算されるようになっている。単独測位を行うために必要なパラメータは 2 種類しかない。一つ目は、ある時刻の衛星の位置、二つ目は、衛星と衛星信号を受信しているアンテナ(測位位置)間の距離である。特に二つ目のパラメータを擬似距離(pseudo range)と呼ぶ。ある時刻に 1 機の GPS 衛星の衛星位置と擬似距離が測定されたとする。このとき測位位置は衛星位置を中心とし擬似距離を半径とする球面上に存在することになる。しかしこのままでは球面上のどこに測位位置が存在しているか知ることができない。そこで複数の衛星のパラメータを同時に測定する。各衛星について球面を考えることができる。測位位置は各衛星とも同位置であるので各球面の交点として求めることができる。具体的には 2 機の衛星を用い、2 つの球面が交わるとその交線は円となる。3 機目の衛星の球面を用い、その 2 機の交線の円と交差する点が測位位置となる。当然この交点は 2 箇所できることになるが、通常測位位置の概略はわかっていて 2 箇所の交点のうちどちらが正しい測位位置か知ることが容易であり、このことが問題なることはほとんどない。

以上のことから、原理的には 3 機の GPS 衛星を用いることで測位位置を求めることができることになる。これは数学的に測位位置を表現する 3 次元座標の成分  $(x, y, z)$  の 3 つの未知数を求めるために、3 つの方程式が必要であることに対応している。

しかしながら、実際の単独測位を行うとき 3 機の衛星からできる 3 つの方程式では測位位置を求めることができない。それは擬似距離の測定に問題があるからである。擬似距離は、衛星から信号を送信した時刻と測位位置のアンテナがその信号を受信した時刻との時刻差(電波伝搬時間)に光速を乗ずることにより測定する。この測定方法では衛星が搭載している時計と測位位置の受信機内の時計が完全に一致、同期していなければ、正確な距離を求めることができない。衛星が搭載している時計はセシウム原子時計であり、正確に時刻を刻む。一方、受信機内の時計は衛星時計と比較して精度が悪く、2 つの時計は一致、同期していない。受信機内の時計の誤差は測定した全ての衛星に対して等しいので 1 つの未知数と考える。3 次元座標の成分  $(x, y, z)$  の 3 つの未知数と受信機内の時計の誤差を求めることになるので、実際単独測位を行うためには図 2-4 のように最低 4 機の衛星を同時に観測し、4 つの方程式を作成する必要がある。

単独測位の精度は、SA が発動されていた時期は民間の利用者は水平方向で約 100m であったが、SA が解除された後は 30m 程度が保障されている。

全GPS衛星は原子時計による正確なタイミングで測位用信号を発信  
各衛星の位置(と速度および運動方向)は軌道情報により計算可能

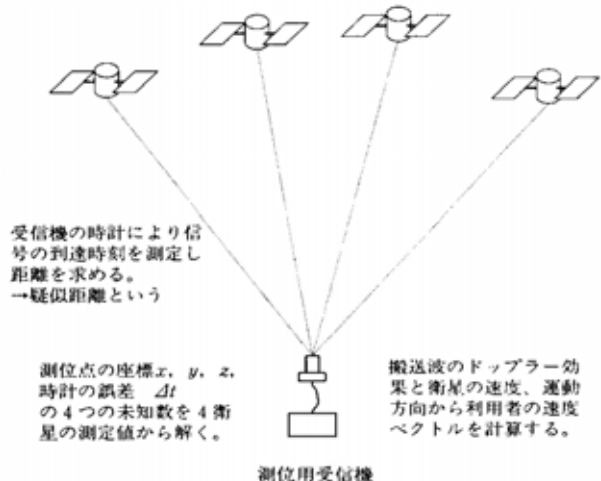


図 2-4 単独測位

## 2.2.2 計算方法

単独測位計算は受信機で測定された各衛星位置と擬似距離をもとに行う。4 個の GPS 衛星の位置は、軌道情報から計算される。位置表現に用いられている 3 次元直行座標系は、ECEF (Earth Centered Earth Fixed) と呼ばれ、地球の中心を原点、地球自転軸に沿って北方向を正方向とする Z 軸、グリニジ子午面と赤道面との交点方向に X 軸、これら 2 軸と右手系をなすように Y 軸を選ぶものである。

測位を行うために、利用者の位置座標を  $(x, y, z)$  とする。また信号を送信した時刻の  $i$  番衛星の位置座標を  $(x_{si}, y_{si}, z_{si})$  とする。衛星-利用者間の正確な距離  $\rho_{si}$  は、

$$\rho_{si} = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2} \quad (2-11)$$

と表される。単位は m である。しかし測定される擬似距離には受信機の時計誤差  $s$  が  $\rho_{si}$  に加わっているため、測定された擬似距離  $pr_{si}$  は、

$$pr_{si} = \sqrt{(x_{si} - x)^2 + (y_{si} - y)^2 + (z_{si} - z)^2} + s \quad (2-12)$$

と表される。 $i$  番衛星の位置  $(x_{si}, y_{si}, z_{si})$  と擬似距離  $pr_{si}$  は既知であるため、(2-12) 式の未知数は利用者位置座標と時計誤差の 4 つとなる。4 衛星の信号を同時刻に受信し、(2-12) 式を 4 つ以上得ることができれば未知数を解くことが可能である。

(2-12) 式は二乗や平方根があるため容易に解くことができない。そこで未知数を近似値と補正量の和であらわし、式をその補正量について展開する。さらに補正量を微小であると仮定し、2 次以上の項を無視して式の線形化を行う。以上により補正量についての連立 1 次方程式となる。未知数の初期値を適当に与え、逐次近似計算法により、補正量が十分小さくなるまで計算を繰り返すことで、未知数を容易に求めることができる。

$n$  回目の繰り返し計算後の利用者位置座標を  $(x_n, y_n, z_n)$  とする。ここで  $n(n=0,1,2,3,\dots)$  は計算回数を表し、 $n=0$  は未知数の初期値とする。このときの  $i$  番衛星の近似距離  $r_{n,si}$  は次式のように表される。

$$r_{n,si} = \sqrt{(x_{si} - x_n)^2 + (y_{si} - y_n)^2 + (z_{si} - z_n)^2} \quad (2-13)$$

近似距離  $r_{n,si}$  と実際に測定された擬似距離  $pr_{si}$  に対しての残差  $\Delta r_{n,si}$  は、

$$\Delta r_{n,si} = pr_{si} - r_{n,si} \quad (2-14)$$

として求められる。 $x_n, y_n, z_n$  をこの残差分に相当する分だけ修正すれば、正しい解に近づくことができる。このためには、近似距離  $r_{n,si}$  の  $x_n, y_n, z_n$  による偏微分

$$\frac{\partial r_{si}}{\partial x} = -\frac{x_{si} - x_n}{r_{n,si}}, \quad \frac{\partial r_{si}}{\partial y} = -\frac{y_{si} - y_n}{r_{n,si}}, \quad \frac{\partial r_{si}}{\partial z} = -\frac{z_{si} - z_n}{r_{n,si}} \quad (2-15)$$

を用いる。  $x_n, y_n, z_n$  の補正量を  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  とすると

$$\Delta r_{n,si} = \frac{\partial r_{si}}{\partial x} \times \Delta x_n + \frac{\partial r_{si}}{\partial y} \times \Delta y_n + \frac{\partial r_{si}}{\partial z} \times \Delta z_n + s \quad (2-16)$$

が得られる。これで連立 1 次方程式を得られたので、補正量を計算する。求められた補正量を使用して次式のように未知数を更新する。

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n + \Delta x \\ y_{n+1} &= y_n + \Delta y \\ z_{n+1} &= z_n + \Delta z \end{aligned} \quad (2-17)$$

以上の計算を補正量が十分小さくなるまで繰り返し行うことで、利用者位置座標  $x, y, z$  と受信機の時計誤差が求められる。

取り扱いを容易にするために、方程式を行列で表現する。

ここで  $\alpha_{si} = r_{si}/x$ 、  $\beta_{si} = r_{si}/y$ 、  $\gamma_{si} = r_{si}/z$  とすると(2-16)式は、

$$\begin{pmatrix} \Delta r_{n,1} \\ \Delta r_{n,2} \\ \Delta r_{n,3} \\ \vdots \\ \Delta r_{n,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_k & \beta_k & \gamma_k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix} \quad (2-18)$$

と表すことができる。ここで

$$\delta R = \begin{pmatrix} \Delta r_{n,1} \\ \Delta r_{n,2} \\ \Delta r_{n,3} \\ \vdots \\ \Delta r_{n,k} \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \alpha_3 & \beta_3 & \gamma_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_k & \beta_k & \gamma_k & 1 \end{pmatrix}, \quad \delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ s \end{pmatrix}$$

とする。(2-18)式は、



$$\delta R = G \cdot \delta X \tag{2-19}$$

となる。両辺に A の転置行列を掛けると、

$$G^T \cdot \delta R = G^T \cdot G \cdot \delta X \tag{2-20}$$

となる。次に両辺に A と A の転置行列をかけた行列の逆行列をかけると、

$$\delta X = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot \delta R \tag{2-21}$$

となり補正量 x、 y、 z、 s を求めることができる。

## 2.3 測位誤差と補正

### 2.3.1 衛星位置

GPS 測位時に衛星の位置に誤差があると、直接的に測位誤差になって現れることがある。GPS 衛星の軌道は、地上の制御部で監視されて正確に予測され、各衛星に送られる。衛星は航法メッセージとして軌道情報を地上に放送しているが、数 m ~ 10m 程度の誤差を避けることができない。GPS 衛星軌道情報をエフェメリス(Ephemeris)データと呼ばれている。エフェメリスデータは各衛星とも約 2 時間で更新され、更新されてから時間の経過とともに信頼度が低下する。図 2-5 に衛星軌道誤差の実例を示す。図 2-5 の誤差はエフェメリスデータから計算した位置と、IGS(International GPS Service)という国際的機関が作成した精密軌道暦の衛星位置との差である。経過時間が 2 時間を過ぎたあたりから誤差が大きくなる様子がわかる。

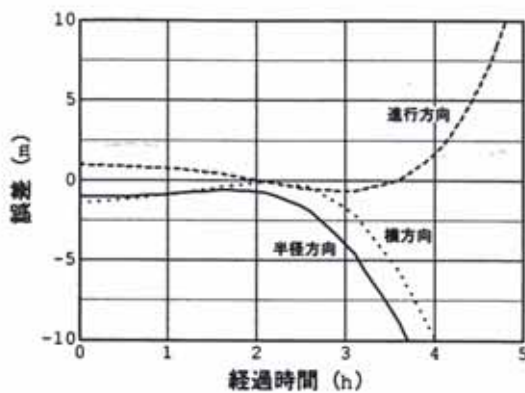


図 2-5 衛星軌道誤差

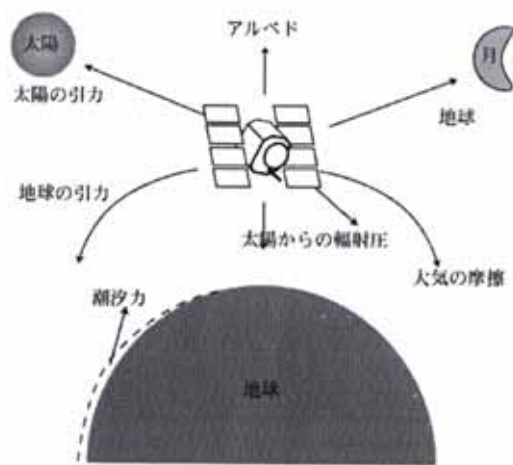


図 2-6 GPS 衛星に働く力

衛星位置誤差にはエフェメリスデータ誤差のほかに GPS 衛星自体の運動を乱し、衛星位置誤差を生じさせる要因がある。図 2-6 に GPS 衛星に働く力をまとめて示す。GPS 衛星の運動は基本的には、地球も質点とみなした時の楕円運動である。この質点の引力のほかに、当然のことながら小さいけれども無視できない力(摂動力)が働いて、衛星に加速度(摂動)を生じる。地球重力の高次項による摂動は、地球を質点と近似したことによる残りの重力場であり、一番大きい項は地球の形状が赤道方向に扁平であることに対応している。2 日間で約 20m、数時間では数 m と言われている。月と太陽の引力による摂動は、 $5 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$  程度の加速度であり、数時間で軌道が数 10m ~ 100m ほど移動するといわれている。地球以外の惑星の影響は無視できる。地球の潮汐現象によって生じる重力場の変化に伴う摂動もある。GPS 衛星への影響は地球潮汐、海洋潮汐ともほぼ同程度であり、衛星の位置のずれは 2 日間で 0.5 ~ 1m 程度である。したがって、両方合わせると 2 日間で 1 ~ 2m の影響を受ける計算になる。

太陽光の輻射圧力による摂動は、太陽光が直接衛星に当たることによる輻射圧と、地球からの照り返し(アルベド)をうけることによる輻射圧の摂動がある。GPS 衛星の形状は複雑であるので、これによる摂動力の見積もりは難しい。また、直接照射の影響は 2 日間で 100m ~ 800m、数時間で数 m とかなり大きいものになる。これらの摂動による衛星位置誤差はエフェメリスデータ中に摂動の補正項が存在し、補正されるため数 m に抑えられている。

衛星軌道誤差による測位精度に対する影響は視線方向(利用者位置と GPS 衛星を結ぶ方向)の位置誤差が問題となり、これと直行する方向の誤差は影響しない。GPS 衛星はそれほど細かい振動をすることはないため、衛星軌道の予測誤差は周期の長いバイアス性となる。

### 2.3.2 衛星クロック

GPS 衛星には、時刻同期用の正確な発信機としてセシウム原子時計が搭載されている。精度は  $10^{-13}$  程度といわれているが、1 日の間には  $10^{-8}$  秒程度の時刻誤差を生じる。距離に換算すると約 3m であるため補正を行わなければならない。地上のモニター局の受信機で、時計の同期誤差を連続的に監視し、1 日に 1 度は時計の補正データを各衛星に送信して、航法メッセージの 1 部として衛星が送信している。

送信される GPS 衛星クロック補正係数  $a_{f0}$ 、 $a_{f1}$ 、 $a_{f2}$ 、 $t_0$  は衛星が送信してくる時刻を補正するために用いられる。衛星クロック補正值  $t$  は、

$$\Delta t = a_{f0} + a_{f1}(t - t_0) + a_{f2}(t - t_0)^2 \quad (2-22)$$

で与えられる。ここで  $t$  は対象とする時刻、 $t_0$  は元期(基準時刻)、 $a_{f0}$  は時刻のオフセット、 $a_{f1}$  は原子周波数標準の周波数の変化率である。補正により時刻の誤差は 1ns(30cm)程度に抑えられる。セシウム発信機は短期間には安定した挙動を示すから、衛星クロック誤差は周期の長いバイアス性の成分となる。

### 2.3.3 電離層遅延

電離層は地上 100km 付近から数 100km のあたりに希薄な大気に、太陽の紫外線が作用してできる。図 2-7 の概念図が示すように下から上へ D 層、E 層、F1 層、F2 層という 4 種類の層がある。波長の長

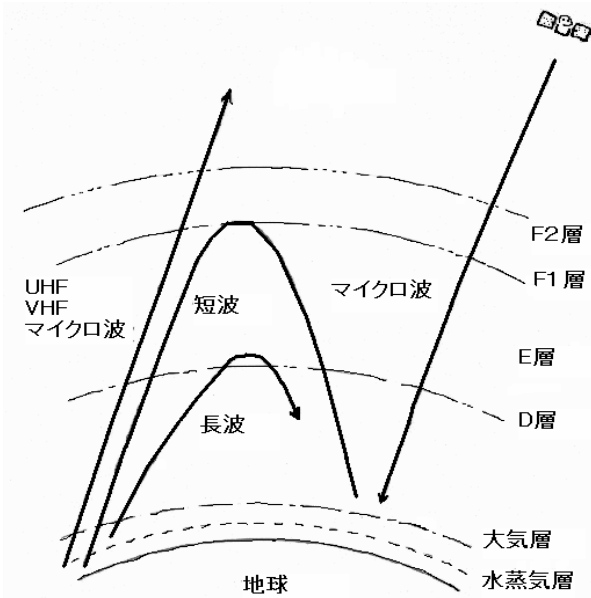


図 2-7 電離層概要図

い電波ほど下の層で反射される。GPS 衛星は超短波と呼ばれる波長がとても短い電波であるため、電離層の全ての層を通過することができる。しかしながら、電離層による屈折のために、電波の速度が変化する。その結果、地上で受信する時刻にずれが生じ、測定距離に誤差が生じる。電離層あたりの希薄な大気の電離(電子とイオンに分解)を行うのは、太陽の紫外線の力である。つまり、日光の当たり具合で電離層の状態が変化するので、昼夜では電離層による距離誤差は異なる。また太陽活動が活発であるとき、電離が激しく起こり誤差が大きくなる。太陽活動は太陽黒点数の増減に關係しており、約 11 年の周期(図 2-8)で増減を繰り返している。電離層中の

屈折率は電子密度に關係しているため、電離が激しく起こると屈折率が大きくなり誤差が大きくなる。

4 種類の層に分かれている電離層の中で GPS 信号に影響を及ぼしているものは電子密度の高い F2 層になる。

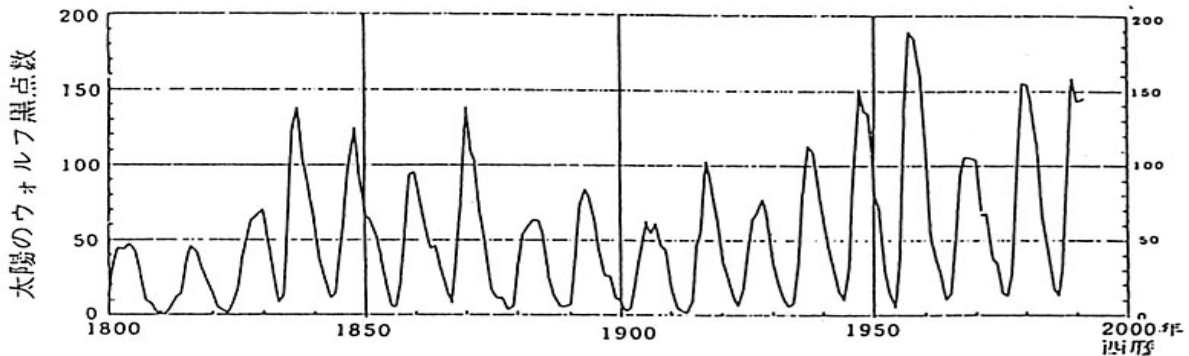


図 2-8 太陽黒点数の変動

### 電離層の中の電波の速度

電離層における電波の速度は群速度 (Group Velocity) と位相速度 (Phase Velocity) の 2 種類ある。電離層中の電波の位相速度  $v_p$  は

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{2\pi/\lambda} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}}} \quad (2-23)$$

で与えられる。一般に  $\omega \gg \omega_e$  である。ここで  $\omega$  は電磁波の角周波数、 $\lambda$  は電磁波の波長である。また

。はプラズマ角周波数と呼ばれるもので、電離層中の電子の固有振動数で、次式で表される。

$$\omega_e^2 = \frac{4\pi n_0 e^2}{m} \quad (2-24)$$

ここで  $m$  は電子の質量、 $e$  は電子の電気量である。また  $n_0$  は電子密度である。(2-24)式から、 $v_p$  は光速より速くなっていることがわかる。しかしこれは波長  $\lambda$  が長くなるだけで、実際光速は群速度であるので、光速よりは遅くなる。このとき群速度  $v_g$  は定義より(2-24)式の  $k$  を  $\omega$  で微分した次式で与えられる。

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{dk/d\omega} = c \sqrt{1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}} \quad (2-25)$$

ここで、周波数の異なる 2 周波の電波を考えると、 $n_0$  は電波の経路上の電子密度で両者に対して共通であるが  $\omega$  は異なる。よって  $v_p$ 、 $v_g$  もそれぞれ異なるので、到達時刻に差ができる。その差から電子密度が求まるので、2 周波の測位では電離層補正が可能となる。またコードを利用する擬似距離の電離層遅延は、電波受信時刻の遅れる群速度で測定するため正の値となる。逆に搬送波は見かけ上光速より速くなるため電離層の影響は負の値となる。

### 電離層遅延量の補正

ここでは電離層誤差補正の代表的なモデルと、2 週波測定による推定法を紹介する。

#### ● Broadcast Model

Broadcast Model はその名前の通り、GPS 衛星から送信される航法メッセージ中にある 8 つの電離層パラメータを利用して、電離層遅延量を推定するモデルである。またこのモデルはクロブッチャー (Klobuchar) モデルとも呼ばれている。電離層の日変化は複雑な形をしているが、これを 5ns の一定値と地方時 (現地時間) 14 時にピークをもつ余弦関数の正の部分との組み合わせた曲線で単純化する (図 2-9)。5ns の遅延は地球上どこでも等しいとして余弦関数の振幅 AMP と周期 T を与えることにより、電離層の日変化を近似するモデルである。AMP と T は観測地で異なる値をとるが、これはマイクロ波が通過する地磁気緯度  $\Phi_m$  だけの関数で表現でき、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} AMP &= \alpha_0 + \alpha_1 \Phi_m + \alpha_2 \Phi_m^2 + \alpha_3 \Phi_m^3 \\ T &= \beta_0 + \beta_1 \Phi_m + \beta_2 \Phi_m^2 + \beta_3 \Phi_m^3 \end{aligned} \quad (2-26)$$

ここで  $\alpha_n$ 、 $\beta_n$  ( $n=0,1,2,3$ ) は電離層パラメータである。

次に具体的な流れを示す。まず地磁気緯度を求める。利用者のおおよその位置 (緯度  $\phi$ 、経度  $\lambda$ ) と衛星仰角 E と方位角 A と観測時刻 (GPSTIME) が与えられているとする。このときの時間の

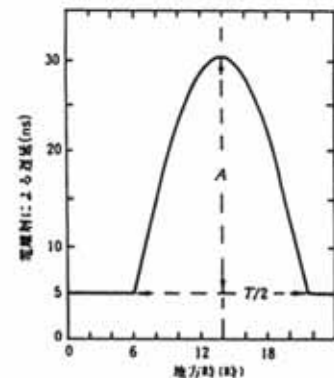


図 2-9 電離層モデル

単位は秒、角度の単位は度とする。

利用者位置と電波が電離層を交わる位置の地球中心を原点とする角度を求める。

$$\psi = \frac{443.88}{E + 19.8} - 3.96 \quad (2-27)$$

から電波と電離層の交わる点の緯度  $\Phi_I$  を求める。

$$\Phi_I = \Phi_u + \psi \cos A \quad (2-28)$$

ただし、 $\Phi_I > +75$  なら  $\Phi_I = +75$ 、 $\Phi_I < -75$  なら  $\Phi_I = -75$  とする。

と  $\Phi_I$  から電波と電離層が交わる点の経度  $\lambda_I$  を求める。

$$\lambda_I = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \Phi_I} \quad (2-29)$$

、 $\lambda_I$  から地磁気緯度  $\Phi_m$  を計算する。

$$\Phi_m = \Phi_I + 11.7 \cos(\lambda_I - 291) \quad (2-30)$$

これで AMP と T を求めることができる。次に観測時刻 (GPSTIME) から現地時刻 t を算出する。

$$t = 4.32 \times 10^4 \frac{\lambda_I}{180} + GPSTIME \quad (2-31)$$

ただし、 $t > 86400$  なら  $t = t - 86400$ 、 $t < 0$  なら  $t = t + 86400$  とする。

振幅と周期と現地時刻から電離層遅延量を推定することができるが、この推定された値はピアースポイント(電波が電離層に入射する位置)に垂直に入射したときの値である。実際には斜めの方向より入射してくるため推定値をそのまま遅延量とできない。そこで傾斜角係数を利用し、衛星仰角に依存した値に変更し遅延量を求める。傾斜角係数 F は、

$$F = 1.0 + 16.0 \times \left( 0.53 - \frac{E}{180} \right)^3 \quad (2-32)$$

で与えられる。図 2-10 に仰角と傾斜角係数の関係図を示す。振幅 AMP、周期 T、現地時間 t、傾斜角係数 F を用いて電離層遅延  $T_{iono}$  は、

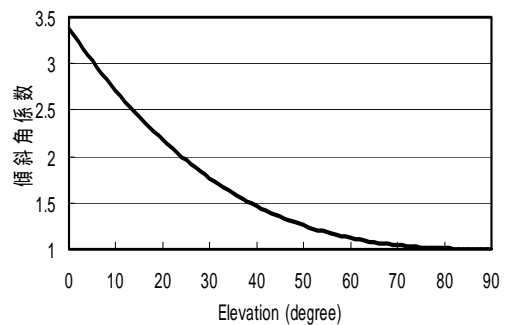


図 2-10 仰角と傾斜角係数の関係

$$T_{iono} = \begin{cases} F \left[ 5 \times 10^{-9} + AMP \left( 1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right], & |x| < 1.57 \\ 5 \times 10^{-9} F, & |x| \geq 1.57 \end{cases} \quad (2-33)$$

で与えられる。ここで

$$x = \frac{2\pi(t - 14 \times 3600)}{T} \quad (2-34)$$

である。 $T_{iono}$  は遅延時間 (秒) として推定されるので、光速を乗じて電離層遅延量 (m) を求める。

### ● 2周波の測定値からの電離層遅延量の推定

電波が電離層を通過するときの屈折率は周波数に依存する。GPS 信号は L1、L2 と 2 種類の異なる周波数の電波を送信している。2 つの電波は基本的に同じ伝搬経路を通過してくるはずであるので、電子密度は同じであり、受信時刻の差から電子密度を求めることができる。

実際には、電子密度を求めず L1、L2 の測定値 (擬似距離 (Code)、搬送波 (Carrier)) と、各周波数から求める。まず L1 の擬似距離の電離層遅延量  $I_{L1}$  (m) は、

$$I_{L1,\rho} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (\rho_{L2} - \rho_{L1}) \quad (2-35)$$

で与えられる。ここで  $f_{L1}$ 、 $f_{L2}$  は L1、L2 の周波数 (L1: 1575.42MHz、L2: 1227.6MHz)、 $\rho_{L1}$ 、 $\rho_{L2}$  は L1、L2 の擬似距離 (m) を示している。では次に搬送波測定値を用いて電離層遅延量を推定する。L1 の搬送波の電離層遅延量  $I_{L1}$  (m) は、

$$I_{L1,\phi} = -\frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (\lambda_2 \phi_{L2} - \lambda_1 \phi_{L1}) \quad (2-36)$$

で与えられる。ここで  $\lambda_{L1}$ 、 $\lambda_{L2}$  は L1、L2 の波長 (m)、 $\phi_{L1}$ 、 $\phi_{L2}$  は L1、L2 の搬送波測定値 (サイクル) である。搬送波測定値は 1 波長を 1 サイクルとした単位で出力されるため、各波長を乗じて単位を m に変換し、計算を行う。また位相速度となる搬送波の場合、電離層の効果は負の値になるため (2-36) 式にはマイナス符号が追加されている。

図 2-11 に (2-35) 式と (2-36) 式で求めた同じ衛星の電離層遅延量を示す。図 2-11 から (2-35) 式で求めた電離層遅延量はノイズが大きいことがわかる。逆に (2-36) 式で求めた電離層遅延量はノイズが小さい。これはコードと搬送波の測距精度の違いによるものである。しかしながら電離層遅延量としての値は (2-35) 式のコードから求めた値が絶対値に近く、(2-36) 式の搬送波から求めた値はバイアスがあ

り絶対値がわからない。

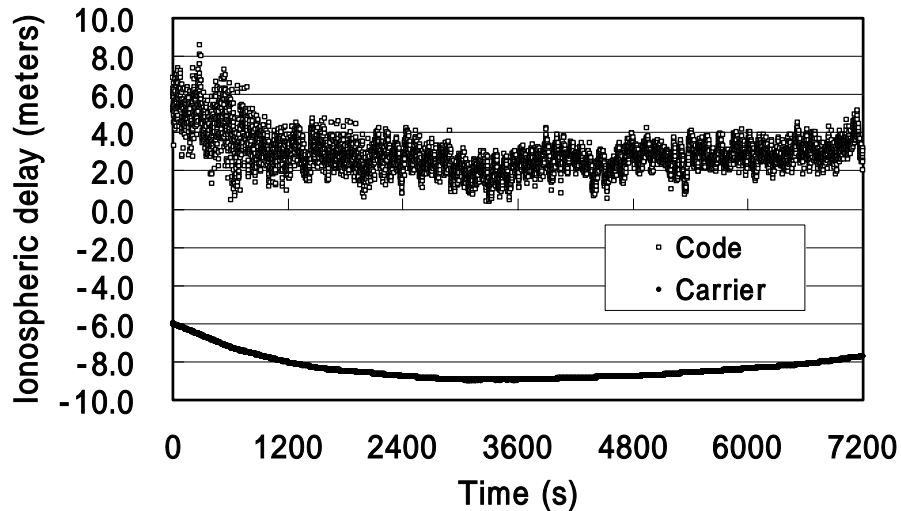


図 2-11 コードと搬送波から求めた電離層遅延量

そこで両者の推定値を用いて、絶対値が正しくノイズの小さな遅延量を求める。以下に手順を示す。

測定値がサイクルスリップ(衛星から電波が障害物で遮蔽される等の理由で位相測定が中断する現象)や衛星が見えなくなり電波が受信されなくなるまでのインターバルを求める。

連続観測できているインターバルの間の  $I_{L1}$  と  $I_{L1}$  の差をとり平均値  $\bar{I}_{L1}$  を求め、求めた平均値を  $I_{L1}$  のバイアスとする。

$I_{L1}$  の値から求めたバイアスを取り除き、求めた値を電離層遅延量とする。

このように求められた電離層遅延量  $I_{L1}$  は、

$$I_{L1} = I_{L1,\phi} + \bar{I}_{L1} \quad (2-37)$$

と表すことができる。

2 周波で求められる電離層遅延量は Broadcast Model で推定した値より正確であるため、2 周波受信機が利用できる場合こちらの方法を用いるのが一般的である。

### 2.3.4 対流圏遅延

中性気体は無線周波数に対して分散性を持たないので、L1、L2 いずれも搬送波の位相速度と群速度の変化量は同じである。電離層のように周波数依存の変化量差がないため、対流圏遅延は直接測定することができない。そこでモデル化を行う必要がある。次に 2 つのモデルを紹介する。

- Saastamoinen Model

このモデルは 1973 年に提案されたモデルで、対流圏における遅延を地上の気温、気圧、相対湿度を用いて推定を行う。仰角 20 度以上の衛星に対しての大気による伝搬遅延  $L_s(m)$ は、

$$\Delta L_s = \frac{0.002277}{\cos(90 - E)} \left[ P + \left( \frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) \cdot e - B \cdot \tan^2(90 - E) \right] + \delta_R \quad (2-38)$$

で与えられる。ここでEは対象としている衛星の仰角(度)、Pは地表での気圧、 $T_0$ は地表での気温(K)、 $e$ は地表での水蒸気圧、 $B$ は観測点の海拔高度に関する補正係数で、表に示す値、 $r$ (m)は天頂角(90-E)と海拔高度に関する補正項で表に示す値である。

表 2-1 モデルの高度に対する補正值

高度(km)	B(hPa)
0.0	1.156
0.5	1.079
1.0	1.006
1.5	0.938
2.0	0.874
2.5	0.813
3.0	0.757
4.0	0.654
5.0	0.563

表 2-2 モデルの受信機高と天頂角の対する補正值(m)

天頂角(°)	受信機の海面上の高さ(km)							
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
60.0	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001
66.0	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003	0.003
70.0	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008	0.006	0.005	0.004
73.0	0.020	0.018	0.017	0.015	0.013	0.011	0.009	0.007
75.0	0.031	0.028	0.025	0.023	0.021	0.017	0.014	0.011
76.0	0.039	0.035	0.032	0.029	0.026	0.021	0.017	0.014
77.0	0.050	0.045	0.041	0.037	0.033	0.027	0.022	0.018
78.0	0.065	0.059	0.054	0.049	0.044	0.036	0.030	0.024
79.0	0.087	0.079	0.072	0.065	0.059	0.049	0.040	0.033
79.5	0.102	0.093	0.085	0.077	0.070	0.058	0.047	0.039
80.0	0.121	0.110	0.100	0.091	0.083	0.068	0.056	0.047

● Hopfield Model

大気による伝搬遅延を表すモデルであり、天頂方向の遅延量  $L_h$ (m)を次式のように定義する。

$$\Delta L_h = H \frac{n_0 - 1}{5} \left( 1 - \frac{h}{H} \right)^5 \quad (2-39)$$

ここで  $n_0$  は地上における大気の屈折率、 $h$  は測定点の高度(m)、 $H$  はモデルで考慮する大気の厚さであり、43km 程度とされている。この式から高度が上がると対流圏遅延が小さくなることになるが、これは上空に上がると測定信号が通過する大気の長さが減少するためである。大気の屈折率はおおよそ1.0003 程度になる。



普通の GPS 受信機では気圧、気温を知ることができない。そこで一般的な気象条件を仮定するだけで十分といわれている。たとえば、(2-39)式をもとに次式を仮定する。

$$\Delta L_h = 2.47(1 - 2.3 \times 10^{-5} \cdot h)^5 \quad (2-40)$$

この推定値は、天頂方向からの遅延量であるので(2-39)式を衛星仰角  $E(^{\circ})$  依存にすると、

$$\Delta L_h = \frac{2.47(1 - 2.3 \times 10^{-5} \cdot h)^5}{\sin E + 0.0121} \quad (2-41)$$

で表される。

### 2.3.5 マルチパス

マルチパスの誤差は直接波と周囲の構造物や海面や地形の起伏などからの反射波がアンテナから入射し、信号を擾乱することによって発生し、真の相関のピーク検出を妨害する。これは大きな反射物が近くにある場合の固定局で顕著に現れ、時として 15m もの誤差を生じることがある。送信波は右旋波であるが、必ずしも理想的反射しないため、右旋波用のアンテナにも混入すると考えられる。DGPS 等基準局を必要とする測位では、特にマルチパスによる誤差がないようにアンテナの設置を決める必要がある。またアンテナをチョークリング上に載せることで地面からの反射波の影響を削減できる。最近ではマルチパス軽減のために「narrow-correlator」受信機が存在する。

### 2.3.6 受信機雑音

受信機内部の様々な要因によって測定誤差が生じる。こうした影響は温度による影響を受けやすいことから、受信機の熱雑音(thermal noise)と呼ばれることがある。また、受信アンテナと受信機本体を接続する高周波ケーブルについては、品質の良いものを使用して最小限の長さにしたほうが良い。受信機内部の測定誤差は、高度な処理回路を採用している受信機でも 0.5m 程度生じるといわれている。

### 2.3.7 選択利用性(SA: Selective Availability)

SPS に対する最大の誤差はかつては SA(Selective Availability)であった。SA は DOD によって利用者の測位結果を劣化させるために意図的に加えられたものである。SA は 1990 年 3 月 25 日から開始され、2000 年 5 月 2 日午後 1 時(JST)に解除された。

時計を揺らすことによる誤差は衛星時計の基本周波数に変動する誤差を導入することによって生じさせる。擬似距離測定値は衛星時計の時間と利用者の受信機時計で測定した電波の到着時間差から求めるので、直接誤差として現れる。基本周波数を揺れているので、コードも位相も同時に影響を受ける。SA による擬似距離の変動は 4~12 分周期で最大 70m にも達する不規則なものであった。SA は送信側で発生させているので、この誤差は空間的な相関を持っているといえる。すなわち、ある場所で生じた誤差はその近くでも同様な誤差として観測されるということを意味している。SA はこのような性

質があるため、後述する DGPS(Differential GPS)を採用することで取り除くことが可能であった。

## 2.4 DOP

GPS 測位精度は測位に使用する衛星の天空における配置、分布が良くないと劣化する。この大前提は、測定値(擬似距離、搬送波)の精度が有限であり、1つ1つの測定値の誤差が最終結果にどのように伝播するかという問題である。たとえば、測定値が絶対的に正確であれば、衛星配置による測位精度への影響はない。

衛星の配置による測位精度への影響は DOP(Dilution of Precision)という数値で示されている。この数値は、衛星の測定値に単位の誤差があったときに、測位結果に何倍になって現れるかを示すものである。したがって DOP を利用するときは観測した全ての衛星の測定値誤差は同一であると考えなければならない。仮に特定の衛星の測定値にだけ大きな誤差があるときには、測位計算式に戻って計算する必要がある。また、衛星軌道の誤差は DOP には含まれていないため、算出した衛星位置は正確であると仮定した上での議論である。

一言に DOP といっても測位の目的によって理想的な衛星配置は異なる。そこで目的にあった様々な DOP が定義されている。GDOP(Geometrical DOP:幾何学的精度劣化係数)、PDOP(Position DOP:位置精度低下率)、HDOP(Horizontal DOP:水平精度劣化係数)、VDOP(Vertical DOP:垂直精度劣化係数)、TDOP(Time DOP:時刻精度劣化係数)などがある。

以下に DOP の計算方法を示す。

DOP の計算には、単独測位計算のときに使用した方向余弦行列  $G$  を使用する。(2-19)式から  $G$  の逆行列を  $G^{-1}$  として、

$$\delta X = G^{-1} \cdot \delta R \quad (2-42)$$

が得られる。  $X$  の分散は、

$$Cov(\delta X) = G^{-1} \cdot Cov(\delta R) \cdot (G^{-1})^T \quad (2-43)$$

である。各衛星の測定値誤差が単位であり、それらが無相関であるとき、 $Cov(\delta R)$  次のように表される。

$$Cov(\delta R) = I \sigma_{URE} \quad (2-44)$$

ここで  $I$  は単位行列、 $\sigma_{URE}$  は擬似距離測定誤差である。よって  $G$  の転地行列を  $G^T$  とすると(2-43)式は、

$$Cov(\delta X) = (G^T \cdot G)^{-1} \sigma_{URE} \quad (2-45)$$

となる。ここで $(G^T \cdot G)^{-1}$ は擬似距離測定誤差  $\sigma_{URE}$  の拡大係数と考えることができる。  
また、 $(G^T \cdot G)^{-1}$ は、

$$(G^T \cdot G)^{-1} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{pmatrix} \quad (2-46)$$

となる。ここで  $H_{nm}$  は  $Cov(\hat{X})$  の各要素である。

GDOP は(2-46)式対角要素の和(トレース)の平方根として定義され、

$$GDOP = \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33} + H_{44}} \quad (2-47)$$

となる。また、PDOP、TDOP は、

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33}} \\ TDOP &= \sqrt{H_{44}} \end{aligned} \quad (2-48)$$

として定義される。

ここで方向余弦行列  $G$  の  $G_{11}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{31}$  は ECEF の座標系、つまり  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向における値である。しかしながら HDOP、VDOP は観測地(利用者位置)を基準にした局所座標系(ENU 座標系)における値でなければならない。つまり行列  $G$  の  $G_{11}$ 、 $G_{21}$ 、 $G_{31}$  の要素を ENU 座標系に計算しなおす必要がある。ENU 座標系での方向余弦を  $\alpha_E$ 、 $\beta_N$ 、 $\gamma_U$  とすると、

$$\begin{aligned} \alpha_E &= -\cos E \sin A \\ \beta_N &= -\cos E \cos A \\ \gamma_U &= -\sin E \end{aligned} \quad (2-49)$$

となる。ここで  $E$  は衛星の仰角(degree)、 $A$  は衛星の方位角(degree)である。この方向余弦ベクトルを  $\tilde{G}$  とし、要素を  $\tilde{H}_{nm}$  とすると HDOP、VDOP は、

$$\begin{aligned} HDOP &= \sqrt{\tilde{H}_{11} + \tilde{H}_{22}} \\ VDOP &= \sqrt{\tilde{H}_{33}} \end{aligned} \quad (2-50)$$

と定義できる。

干渉測位における DOP として RDOP(Relative DOP: 相対精度劣化係数)がある。行列 G の要素として、後述する二重位相差をとる衛星の方向余弦の差を並べたものとして定義される。

GPS によるおおよその測位精度は測距精度に DOP を乗じることで概算できる。たとえば、水平方向の測位精度は「測距精度 × HDOP」の関係があるので、擬似距離の測距精度  $\sigma_{PR}$  が 10m で、HDOP が 2 であったら、水平方向の測位精度は 20m 程度で測位できることになる。

## 第3章 DGPS 測位

### 3.1 測位原理

DGPS(Differential GPS)は、コード(擬似距離)を用いた相対測位の1つである。基本的には単独測位と同じ計算方法によって利用者位置を求めるが、図3-1のように位置の正確にわかっている基準局(Reference Station)からの補正データを、何らかの通信回線を用いて利用することで測位精度を改善させる技術である。DGPS 測位精度は数 m といわれている。基準局からの補正データにはいくつかの算出方法があり、この違いが DGPS の運用方法の違いとなって現れる。

DGPS の測位精度改善の原理は、基準局と利用者位置での測定誤差のうち共通の誤差成分が相殺されることによる。基準局と利用者位置との間の距離(基線長)が短距離であれば、上空約20,000kmにあるGPS衛星への視線は同一であるとみなすことができる。つまり、あるGPS衛星信号の伝搬経路が基準局と利用者位置で同じであると考えられる。伝搬経路が同じであれば通過するときに受ける誤差要因も同じである。基準局では正確な座標がわかるために測定値との差(測定誤差)を知ることができる。この測定誤差を補正值とすることで、利用者側の誤差要因を相殺することができ、精度が改善される。

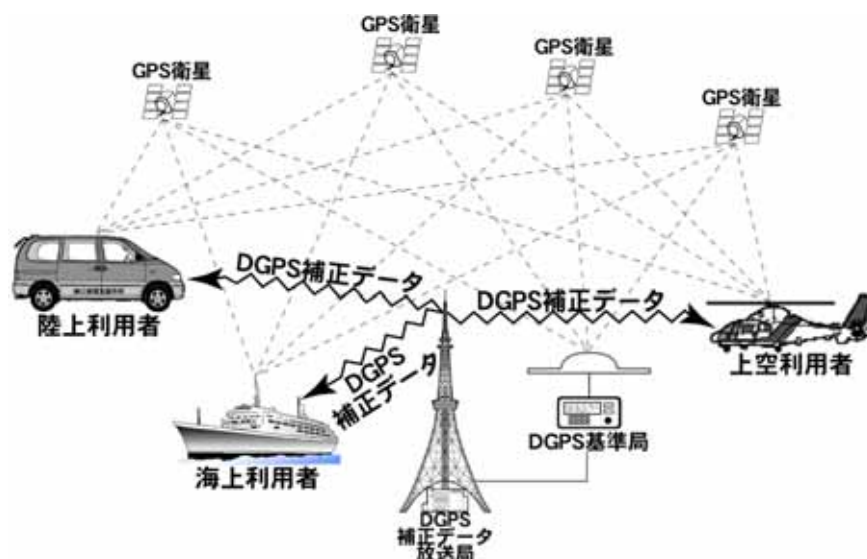


図 3-1 DGPS の概要図

### 3.2 相殺される誤差要因

DGPS 測位を行うことで基準局と利用者位置での共通誤差が相殺されることは述べた。では具体的にはどの誤差成分が相殺され、相殺できないのかをここでは述べる。

まず相殺される誤差成分であるが、GPS 衛星軌道情報の誤差、衛星時計誤差、電離層による遅延、対流圏による遅延である。かつては SA による擬似距離の揺らぎが相殺されることが DGPS 測位の 1

番のメリットであったが、SA が解除されてからは先ほど述べた 4 つの誤差成分である。GPS 衛星軌道情報の誤差は基準局と利用者位置で同一のエフェメリスを利用することにより、算出した衛星位置誤差も同一となり相殺できる。電離層、対流圏による遅延誤差はモデル等によって近似的に補正できるが、実際の値とは必ずしも一致しないために誤差が残ってしまう。しかし DGPS 測位では遅延量を推定しなくても基準局の補正值を用いることで相殺されることになる。

相殺効果は、基線長が短いほど有効に働く。基線長が長くなると、衛星位置誤差の影響の仕方や電波の伝搬経路(電離層、対流圏)の状態が大きく異なるため、相殺効果が薄れ結果として測位誤差が増大してしまう。

一方、相殺されない誤差成分には、観測地固有の誤差(マルチパス)、受信機による擬似距離測定の誤差、単独測位計算における逐次近似の残留誤差などがある。DGPS 測位精度(数 m)ではマルチパスはさほど問題にはならない。基本的に基準局はマルチパス環境の良い場所に設置されており、マルチパスの影響は少ない。受信機による擬似距離測定の誤差は、近年の受信機精度の向上に伴い減少している。

### 3.3 DGPS の主要な方式

DGPS 測位における補正值の作成方法には大きく 2 つの方法がある。以下に 2 つの方式について説明する。

#### ● 測位位置補正方式

この測位方式は、固定された基準局で単独測位を行う。基準局の測位結果と既知である基準局位置との差を各成分((緯度、経度、高さ)または(x,y,z))についての補正值とし、利用者側の単独測位結果に適用するものである。利用者側の測位位置補正方法を式で表すと、

$$rov = rov' - (ref' - ref) \quad (3-1)$$

となる。ここで rov は利用者側の DGPS 測位結果、rov' は利用者側の単独測位結果、ref は基準局の既知である位置、ref' は基準局の単独測位結果である。(3-1)式に各成分を代入することで DGPS 測位を行うことができる。

測位位置補正方式では、単独測位結果をそのまま利用できるように補正データが少なくてよいという長所がある。また (3-1)式の処理を行うだけでよいので処理ソフトも単純である。しかし基準局と利用者側で同じ組み合わせの GPS 衛星を用いて測位しなければならないという制限があり、最大の欠点である。

#### ● 擬似距離補正方式

この方式では、座標点の既知である基準局と衛星の座標から、2 点の【正しい】距離を求める(衛星位置に誤差が存在するため厳密には正しくない)【正しい】距離と受信した擬似距離との差を各衛星の補正值(擬似距離補正值)として、またその変化率を利用者側に送る。利用者側では測定された擬似距離に補正值を適用し、補正した擬似距離を用いて単独測位を行う方式である。

利用者側の擬似距離補正方式を式で表すと、

$$\rho'(t) = \rho(t) + PRC(t_0) + RRC(t_0) \times (t - t_0) \quad (3-2)$$

で表される。ここで  $t$ (s) は観測時刻、 $t_0$ (s) は補正データの算出時刻、 $\rho$ (m) は利用者側で補正された擬似距離、 $\rho_0$ (m) は利用者側で測定された擬似距離(m)である。PRC(m) は擬似距離補正值、RRC(m/s) は擬似距離補正值の変化率である。補正データの算出時刻と観測時刻との時刻差が大きいと相殺効果が減少する。

擬似距離補正方式では、補正データ量が測位位置補正方式よりも多くなる。また、擬似距離を補正するためソフトが複雑化する欠点がある。しかし、測位位置補正方式のように基準局と利用者側で、測位使用衛星を一致させることなく測位計算を行うことができるといった柔軟性があり、最大の長所でもある。現在、DGPS 測位は擬似距離補正方式が一般的になっている。

擬似距離  $\rho_n$  を

$$\rho_n = r_n + c(\delta t_{u,n} - \delta t_s) + I_n + T_n + \varepsilon_n \quad (3-3)$$

と表す。ここで  $r$  は衛星-利用者間の正確な距離(m)である。C は光速、 $t_u$  は受信機の時計誤差(s)、 $t_s$  は衛星時計誤差、 $I$  は電離層遅延、 $T$  は対流圏遅延、 $\varepsilon$  はマルチパス等のその他の誤差である。添え字の  $n$  は基準局、利用者側の違いを表す。仮に基準局の  $n$  を 1、利用者側の  $n$  を 2 とする。【正しい】距離 =  $r_1$  とすると基準局で作成される擬似距離補正值 PRC は、 $r_1 - \rho_1$  で表されて、

$$PRC = -[c(\delta t_{n,1} - \delta t_s) + I_1 + T_1 + \varepsilon_1] \quad (3-4)$$

となる。利用者側では PRC を同衛星から測定された擬似距離  $\rho_2$  に加える。補正された擬似距離は、

$$\begin{aligned} \rho'_2 &= \rho_2 + PRC \\ &= r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_s) + I_2 + T_2 + \varepsilon_2 - [c(\delta t_{n,1} - \delta t_s) + I_1 + T_1 + \varepsilon_1] \\ &= r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_{n,1}) + (I_2 - I_1) + (T_2 - T_1) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \end{aligned} \quad (3-5)$$

と表される。(3-5)式から衛星時計誤差  $t_s$  が消えていることがわかる。衛星時計誤差の項は基線長にかかわらず消去できる。また理想的な短基線長の場合、 $I_1 = I_2$ 、 $T_1 = T_2$  となり、電離層遅延の項、対流圏遅延の項が消去され、

$$\rho'_2 = r_2 + c(\delta t_{u,2} - \delta t_{n,1}) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (3-6)$$

として利用者側の擬似距離は補正される。(3-6)式中の誤差項は受信機時計の誤差、マルチパス等のノイズ誤差の項しかない。さらに受信機時計の誤差は単独測位計算の未知数の1つとして算出されるので、DGPS 測位結果にはマルチパス等のノイズ誤差の影響しか受けない。しかしこれは理想的な場合のときである。例えば基準局の  $r_1$  が衛星位置の誤差により誤って算出され、 $r_1$  から消去しきれない場合がある。

基線長が長くなることにより、(3-5)式の電離層、対流圏遅延の項が消去されずに残ることで測位精度の劣化が起こる。

### 3.4 補正データの伝送

DGPS 測位では基準局から利用者側への補正データの伝送が必要不可欠である。その伝送手段として様々なものが提案され実行されている。具体的には人力、携帯電話、特定小電力、船舶用方向探知ビーコン電波への相乗り、通信衛星、FM放送への重畳などがある。現在、世界的に利用されているのは、後の3つである。他は限定された狭い範囲での利用である。

米国、欧州、日本の海上保安庁等では周波数 300kHz 付近の船舶用中波ビーコン電波にへの重畳して DGPS 補正データ情報サービスが行われている。多くの場合このビーコン送信局は灯台に併設されているため、海上利用が原則である。この電波は海岸に近い陸上でも十分に受信できまた数 100km のサービスエリアがあり、利用性は高い。

DGPS 補正データを FM 放送電波に乗せて伝送することが実施されている。利用者は普通の FM 受信機に付加装置を取り付けるか、初めから付加装置のついている受信機等によって基準局の補正データを取得できる。

DGPS 補正データを伝送するとき、限られた小規模の実験ならばそのグループだけの適当なデータ形式を決定し使用すればよいが、多くの利用者を対象にサービスを考えると共通規格を作成する必要がある。このような規格には、米国海上無線技術協会(RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Service)の中の第 104 委員会(SC-104: Special Committee No.104)で勧告しているものがある。これをしばしば RTCM 規格と呼ぶ。

### 3.5 RTCM 規格の概要

現在、RTCM SC-104 規格には、ver2 までが規定されている。RTCM SC-104 規格は、多岐にわたる利用を想定して、60 種類以上のメッセージタイプを規定している。メッセージタイプとはデータの内容を示すもので、具体的に言えば擬似距離の補正量や基準局の座標値である。

表 3-1 にメッセージタイプとその内容の概略を示す。しかしほとんどの規格が暫定であり、これから変更されうるものであるが、実用上は問題ない。



図 3-1 RTCM SC-104 規格のメッセージタイプの概要

メッセージタイプ	現状	内容
1	確定	DGPS補正量(擬似距離とその時間変化の補正量)
2	確定	デルタDGPS補正量(新旧の軌道情報等の中の違いの補正)
3	確定	基準局のパラメータ(基準局のWGS-84による3次元座標)
4	暫定	測量(搬送波位相用であったが使用されなかった)
5	廃止	衛星のヘルス(ヘルスの情報と基準局での衛星電波のSN比等)
6	確定	空白
7	確定	ビーコン暦(DGPS併設の海上ビーコン局の位置、周波数等)
8	暫定	擬似衛星の暦(擬似GPS衛星の電波の発射時刻等)
9	確定	限定DGPS補正量(1と同じで、使用する衛星だけの情報に限定)
10	保留	PコードのDGPS補正量
11	保留	C/Aコード、L1、L2補正量
12	保留	擬似衛星パラメータ
13	暫定	地上送信局パラメータ
14	保留	測量用予備
15	保留	電離層、対流圏メッセージ
16	確定	特別メッセージ(アスキーコードで最大90字)
17	暫定	軌道情報、アルマナック
18	暫定	搬送波位相(生データ)
19	暫定	擬似距離(生データ)
20	暫定	RTK搬送波位相補正
21	暫定	RTK擬似距離補正
22 ~ 58	—	未定
59	暫定	専用メッセージ(運営責任者からの通報)
60 ~ 63	保留	未定

## 第 4 章 長基線 DGPS 測位精度実験

### 4.1 はじめに

DGPS 測位は第 3 章でも述べたように、基準局と利用者側で共通誤差を相殺して測位精度を改善する測位方法であった。単独測位と比較して SA の影響を取り除くことが最大の長所であったが、SA の解除によって、以前のような DGPS の優位性は大きく低下した。しかしほとんど単独測位と同じ測位アルゴリズムで単独測位よりも高精度な測位結果を得られていることは事実であり、様々な利用分野が存在している。

補正データの伝送時間の遅れがないと仮定すると、DGPS 測位による相殺効果は基線長が短いほど高いとされている。基線長が長くなると、共通誤差である衛星軌道誤差、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延が共通でなくなり測位精度の改善ができないためであるからである。

本章では国土地理院がインターネット上で提供している電子基準点のデータを使用し、異なる基線長での DGPS 測位を行い、基線長による測位結果への影響を調査した。また長基線になることで相殺効果が劣化する電離層伝搬遅延および対流圏伝搬遅延を基準局と利用者側それぞれでモデル等を用いて補正を行ったときの DGPS 測位結果を示す。

### 4.2 標準データフォーマット

GPS 観測データの世界共通の標準データフォーマットには RTCM 規格がある。これは受信機の機種に左右されることないため、異機種間のデータの交換が容易であることや、データ読み込みソフトの統一等の長所がある。提案当初は学術的な利用目的であったが、世界標準として普及し、現在ではいくつか種類がある。米国の NMEA(National Marine electronics association: 米国海洋電子機器工業会) が制定した位置情報データの NMEA-0183(GPGGA 等) や IGS(International GPS Service: 国際 GPS 事業) で作成されている精密軌道暦データの SP3 である。また擬似距離や搬送波の測定値とエフェメリスデータの標準フォーマットでは RINEX(Receiver Independent exchange format) 形式がある。現在 GPS 受信機や解析ソフトには測定データを RINEX ファイル形式で直接出力している機種も存在しているが、ほとんどが機種依存の測定データから RINEX ファイル形式への変換プログラムによって変換を行っている。ここでは、今回解析に使用した RINEX 形式のデータフォーマットを紹介する。

RINEX ファイルには、観測データ、航法メッセージ、気象観測の 3 種類がある。観測データは O ファイル(Observation Data File)、航法メッセージは N ファイル(Navigation Data File)、気象観測は M ファイル(Meteorological Data File) と呼ばれる。

RINEX ファイルの名前は、MS-DOS 形式で ssssdfff.yyt と一般的には書かれる。ファイル名の説明を表 4-1 に示す。ファイル名、拡張子の変更は可能であるが、多機種間のデータ交換においてはこのルールに則って行うほうが良い。

図 4-1 に実際の観測データの内容を示す。また図 4-2 に実際の航法データの内容を示す。

表 4-1 RINEX ファイル名

形式		内容	ファイルタイプ	
ssss		受信局番号	o	観測データ
ddd		1月1日からの通算日	n	航法データ
f		観測番号	m	気象データ
yy		観測年		
t		ファイルタイプ		

2 Convert		OBSERVATION DATA		G (GPS)		11-Dec-03 20:12		RINEX VERSION / TYPE		PGM / RUN BY / DATE		MARKER NAME		OBSERVER / AGENCY		REC # / TYPE / VERS		ANT # / TYPE		APPROX POSITION XYZ		ANTENNA: DELTA H/E/N	
		NovAtel		GPSCard																			
		0.0000		0.0000		0.0000																	
		0.0000		0.0000		0.0000																	
1	1	7	G 1	G 2	G 3	G 4	G 5	G 6	G 7	WAVELENGTH FACT L1/2													
1	1	7	G 8	G 9	G10	G11	G13	G14	G15	WAVELENGTH FACT L1/2													
1	1	7	G16	G17	G18	G20	G21	G23	G24	WAVELENGTH FACT L1/2													
1	1	7	G25	G26	G27	G28	G29	G30	G31	WAVELENGTH FACT L1/2													
6	C1	L1	D1	P2	L2	D2				# / TYPES OF OBSERV													
1										INTERVAL													
2003	12	10	02	00	0.000000		GPS			TIME OF FIRST OBS													
2003	12	11	02	00	0.000000		GPS			TIME OF LAST OBS													
										LEAP SECONDS													
										END OF HEADER													
03	12	10	02	00	0.0000000	0	9G16G	6G30G25G14G	2G21G	1G 3													
					21278478.508	8	111819207.305	8	-1201.477	8	21278475.922	3	87131877.027	3									
					-936.516	3																	
					22221847.766	6	116776616.875	6	2254.680	6	22221847.102	2	90994751.766	2									
					1756.586	2																	
					24118538.195	4	126743738.566	4	2917.398	4	24118536.234	9	98761372.094	9									
					2272.996	9																	
					20472352.453	9	107582938.813	9	-378.727	9	20472349.922	4	83830860.000	4									
					-295.391	4																	
					23187401.367	6	121850541.902	6	3565.711	6	23187401.891	1	94948434.066	1									
					2778.184	1																	
					23325288.273	5	122575268.563	5	-1746.258	5	23325289.430	1	95513229.230	1									
					-1361.039	1																	
					24353028.086	5	127976029.793	5	-2337.883	5	24353026.789	1	99721576.430	1									
					-1822.063	1																	
					23991626.016	5	126076844.516	5	-2821.445	5	23991627.883	1	98241694.660	1									
					-2198.828	1																	
					24084565.359	5	126565299.191	5	-3719.758	5	24084571.125	1	98622327.137	1									
					-2898.840	1																	
03	12	10	02	00	1.0000000	0	9G16G	6G30G25G14G	2G21G	1G 3													
					21278249.977	8	111818006.273	8	-1201.363	8	21278247.344	3	87130941.160	3									
					-936.438	3																	
					22222276.945	7	116778872.078	7	2254.949	7	22222276.227	1	90996509.070	1									
					1756.809	1																	
					24119093.445	4	126746656.254	4	2917.574	4	24119091.438	9	98763645.633	9									
					2273.098	9																	
					20472280.461	9	107582560.613	9	-378.395	9	20472277.789	4	83830565.301	4									
					-295.176	4																	
					23188080.000	6	121854107.992	6	3565.637	6	23188080.750	2	94951212.840	2									

図 4-1 Observation Data File

2				NAVIGATION DATA				RINEX VERSION / TYPE			
CCRINEXN V1.4.3 UX ANONYMOUS				03-APR- 3 18:49				PGM / RUN BY / DATE			
.2980D-07 .1490D-07 -.1788D-06 -.5960D-07								ION ALPHA			
.1331D+06 .1638D+05 -.2621D+06 .3277D+06								ION BETA			
-.124344978758D-13 -.465661287308D-08 319488				1212				DELTA-UTC: A0,A1,T,W			
END OF HEADER											
2	3	4	1	0	0	.0	-.900235027075D-04	-.648014975013D-11	.000000000000D+00		
							.730000000000D+02	.568750000000D+01	.479627138006D-08	-.152949363631D+01	
							.610947608948D-06	.226758009521D-01	.124573707581D-04	.515386214638D+04	
							.172800000000D+06	.430271029472D-06	-.507603812536D-01	.469386577606D-06	
							.932848821881D+00	.120093750000D+03	-.182995805038D+01	-.804783528707D-08	
							.107147320530D-10	.100000000000D+01	.121200000000D+04	.000000000000D+00	
							.100000000000D+01	.000000000000D+00	-.186264514923D-08	.730000000000D+02	
							.165618000000D+06	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.000000000000D+00	
3	3	4	1	0	0	.0	.117732211947D-03	.318323145621D-11	.000000000000D+00		
							.480000000000D+02	.732812500000D+02	.552237278129D-08	.146812311400D+01	
							.370852649212D-05	.433082890231D-02	.495463609695D-05	.515373583984D+04	
							.172800000000D+06	-.745058059692D-08	.102309634352D+01	.428408384323D-07	
							.930659989221D+00	.265500000000D+03	.534350879208D+00	-.874572148035D-08	
							.493949159353D-09	.100000000000D+01	.121200000000D+04	.000000000000D+00	
							.000000000000D+00	.000000000000D+00	-.419095158577D-08	.480000000000D+02	
							.165618000000D+06	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.000000000000D+00	

図 4-2 Navigation Data File

まず観測データの主要な内容を説明する。O ファイルは大きく分けて図 4-1 のヘッダ部とデータ部がある。

ヘッダ部の終わりには「END OF HEADER」のコメントが書かれており、読み込みではこのコメントでヘッダ部とデータ部の区別を行う。ヘッダ部の「TYPES OF OBSERV」のコメントの行にデータ部のデータの並び順と種類等が記載されている。データの種類には、【C1】(L1(C/A コード)の擬似距離(m))、【L1】(L1 の搬送波位相(cycle))、【D1】(L1 のドップラーシフト(Hz))、【P2】(L2(P コード)の擬似距離(m))、【L2】(L2 の搬送波位相(cycle))、【D2】(L2 のドップラーシフト(Hz))等があり、図 4-1 はこの順番でデータが並んでいることがわかる。

データ部は測定間隔(エポック)ごとに記載されている。各エポックの先頭にはエポック時刻と衛星数、衛星番号が 1 行目に記載される(衛星数が 12 機以上の場合次の行に記載される)。2 行目からは衛星数に相当する行数分測定値が記載されている(1 衛星の記載データが 6 以上の場合は次の行に記載される)。図 4-1 の衛星番号の前に【G】と記載されている。これは GPS 衛星であることを示している(【G】は空白の時もある)。他にロシアの衛星 GLONASS を【R】、静止衛星を【S】と表現している。

測定値は小数点以下 3 桁までが有効であり、4 桁目は受信回路の同期状態(LLI =Loss of Lock Indicator:0 または空白は正常、1 はロック外れ)、5 桁目は信号の強度(1 桁の数字で指標化されていて、5 以上であれば問題なく使用できる)を示している。ロック外れの場合は直前のエポックの測定値との連続性がない。

次に航法データについて説明する。N ファイルの O ファイル同様、ヘッダ部とデータ部で構成されている。

ヘッダ部の終わりを示すコメントも O ファイルと同様で「END OF HEADER」である。N ファイルのヘッダ部には電離層補正パラメータ等の補正項が記載されている場合もある。

データ部には各衛星の軌道情報であるエフェメリスデータが記載されていて、可視衛星の情報が記載されている。データの詳細は表 4-2 に示す。データは約 2 時間(7200 秒)ごとに更新され、軌道情報の変更タイミングは自分で決めることができる。

表 4-2 N ファイルデータ部の内容

行数	内容
1	衛星番号 エポック(年、月、日、時、分、秒) 衛星クロック補正係数
2	放送暦の年齢(IONODE) 軌道長半径補正のためのsin項(m) 平均運動の摂動(radians/sec) 元期における平均近点離角(radians)
3	赤経方向の変動補正のためのcos項(radians) 離心率 赤経方向の変動補正のためのsin項(radians) 軌道長半径の平方根(sqrt(m))
4	元期(sec of GPSTIME) 軌道傾斜角補正のためのcos項(radians) 昇交点赤経(radians) 軌道傾斜角補正のためのsin項(radians)
5	軌道傾斜角(radians) 軌道長半径補正のためのcos項(m) 近地点引数(radians) 昇交点赤径の変化率(radians/sec)
6	軌道傾斜角の変化率(radians/sec) L2チャンネルコード GPS週 L2のPコードデータフラグ
7	衛星精度(m) 衛星の健康状態 電離層遅延時間(sec) 時計情報の年齢
8	メッセージの発行時刻 3つの予備

### 4.3 測位精度評価について

ここでは測位精度を評価する際に使用する用語、または意味について定義を行う。

#### 4.3.1 精度と確度

今回測位精度を大きく2つ観点から評価する。1つ目は精度(Precision)、2つ目は確度(Accuracy)と呼ばれるものである。精度、確度の概要図を図4-3に示す。図4-3中の4つの図はすべて、ある測位結果の2次元方向分布プロットの例である。横軸と縦軸の交点が測位点の真値としている。黒い円を測位分布であるとしている。以上の条件で精度と確度を説明する。

まず図4-3(a)は測位分布の平均値が真値に近く、分布の大きさも4種類の中では小さい。図4-3(a)のような状態は高精度、高確度であるといえる。図4-3(b)は測位分布の大きさは小さいが分布の中心が真値からずれて測位されている。この状態は低精度、高確度であるといえる。図4-3(c)は測位分布の中心は真値に近いが測位分布の大きさが大きい。この状態は低精度、高確度であるといえる。最後に図4-3(d)は測位分布の平均値も真値からずれ、分布の大きさも大きい。この状態を低精度、低確度という。精度は測位分布の大きさを評価する指標であり、確度は測位分布が真値からのずれを示す指標である。具体的には精度は測位結果の平均値をもとにした標準偏差、後述する2drmsの値であり、確度は真値からの誤差の平均値の値である。また本論分で測位精度は精度と確度の両者を示すことと定義する。

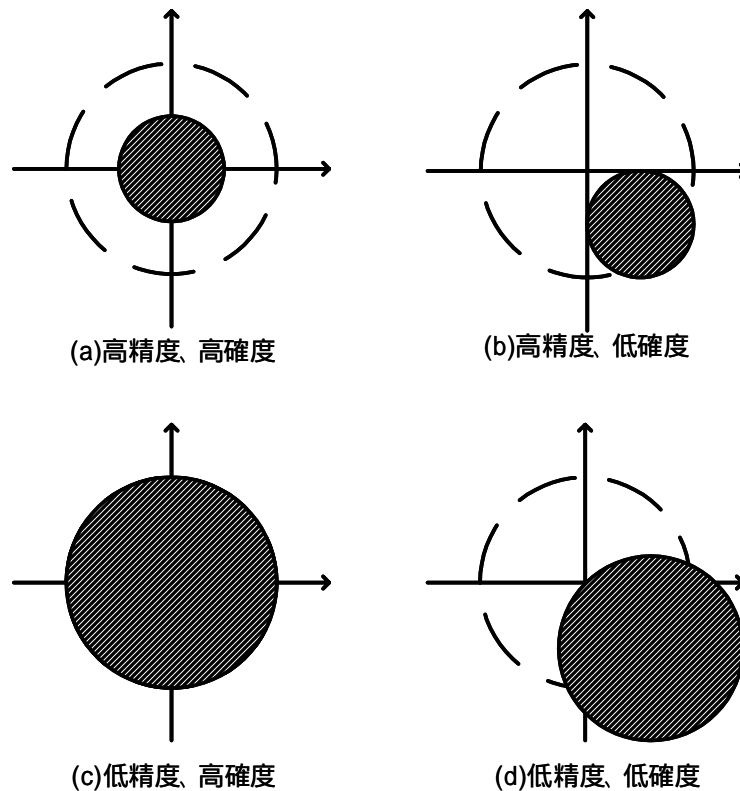


図 4-3 精度と確度の概要図

### 4.3.2 2drms

GPS 測位結果の評価をする際、よく使用される評価の値に 2drms がある。これは水平方向の分布の度合いを示す評価値として用いられている。高さ方向の分布には通常の標準偏差が良く用いられる。ここでは 2drms の数学的意味について述べる。

一般に 2 つの確率変数  $x$ 、 $y$  がそれぞれ正規分布に従う誤差を持ち、それぞれの標準偏差を  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、相関係数を  $r_{xy}$  とすると、確率分布が一定の曲線は楕円となり、 $x$ - $y$  平面において、

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2r_{xy} \frac{x}{\sigma_x} \frac{y}{\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = (1 - r_{xy}^2) C \quad (4-1)$$

となる。この楕円を共分散楕円という。ただし相関係数  $r_{xy}$  は、

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4-2)$$

である。ここで(4-1)式の  $C$  の平方根は楕円の大きさに比例する。この楕円の内側に測位点を観測する確率  $P$  は、 $C$  の関数となり、

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{C}{2}\right) \quad (4-3)$$

と表すことができる。P の確率を 95%にするには C の値を約 6 にすればよい。

ここで  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ 、相関係数を  $r_{xy}=0$  とすると(4-1)式で表される楕円は、次式のような円となる。

$$x^2 + y^2 = C \sigma^2 \quad (4-4)$$

この条件で P を 50%にすると、C は(1.1774)<sup>2</sup>となり、半径 1.1774 の円内に 50%の測位点が含まれていることになる。この円を 50%確率円と呼び、この円の半径を円形確率誤差あるいは CEP (Circular Error Probable)と呼ぶ。ここで半径方向測位誤差 (drms)は x 方向、y 方向の分散が等しいとしているので、

$$drms = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{2}\sigma \quad (4-5)$$

となり、CEP=1.1774 =0.833drms となる。(4-5)式の両辺を 2 乗し、(4-4)式の右辺 C<sup>2</sup>を(C/2)drms<sup>2</sup>と書き換え、C=6 を代入すると 1.73drms が 95%誤差円になる。C<sup>2</sup>に(2drms)<sup>2</sup>を代入すると C=8 となり、P=98.16%となる。もし x 方向の分散が y 方向と比較してきわめて大きいとき、2drms の円が 95.45%誤差円となる。したがって 2drms は楕円の離心率より 95.45%~98.16%の間で測位点を含む確率が変化する。実際の評価のときは、水平方向の誤差分布を示すため x、y 方向でなく緯度、経度方向の誤差の標準偏差を求め、緯度方向の標準偏差= $\sigma_x$ 、経度方向の標準偏差= $\sigma_y$ として(4-5)式に代入する。求めた drms を 2 倍して 2drms を算出している。

しばしば、2drms を 95%の水平方向誤差分布と扱うが、厳密には正しくない。

## 4.4 長基線 DGPS 測位実験

### 4.4.1 基線長に対する DGPS 測位精度の評価実験

DGPS 測位において、基準局からの距離(基線長)の違いが測位精度にどのような影響を与えるかを実際のデータを使用して評価する。

まず解析に使用したデータは国土地理院がインターネット上で提供している電子基準点のデータを使用した。電子基準点データは日本各地に 1000 点以上あり、基線長を容易に伸ばすことができる。また電子基準局の位置は正確に測定されているため、測位精度の評価が正確に行える。この 2 点から電子基準点のデータを使用している。データ形式は RINEX データ形式で、エポックは 30 秒ごとである。千葉県市川市の電子基準点を基準局に固定し、東日本の電子基準点で基準局から北方向にある点を利用者側(以下未知点)とした。基準局、未知点の位置概略図を図 4-4 に示し、評価する際に真値とした座標値を表 4-3、基線長の長さを表 4-4 に示す。DGPS 測位の補正方式は擬似距離補正方式を用いた。擬似距離補正值の伝送遅延は後処理測位であるので無視した。測位に使用した衛星最低仰角(マスク仰角)は 10 度とした。実験日時は 2003 年 1 月 1 日、2 月 1 日、3 月 6 日、4 月 1 日、5 月 1

日、6月1日の計6日行った。

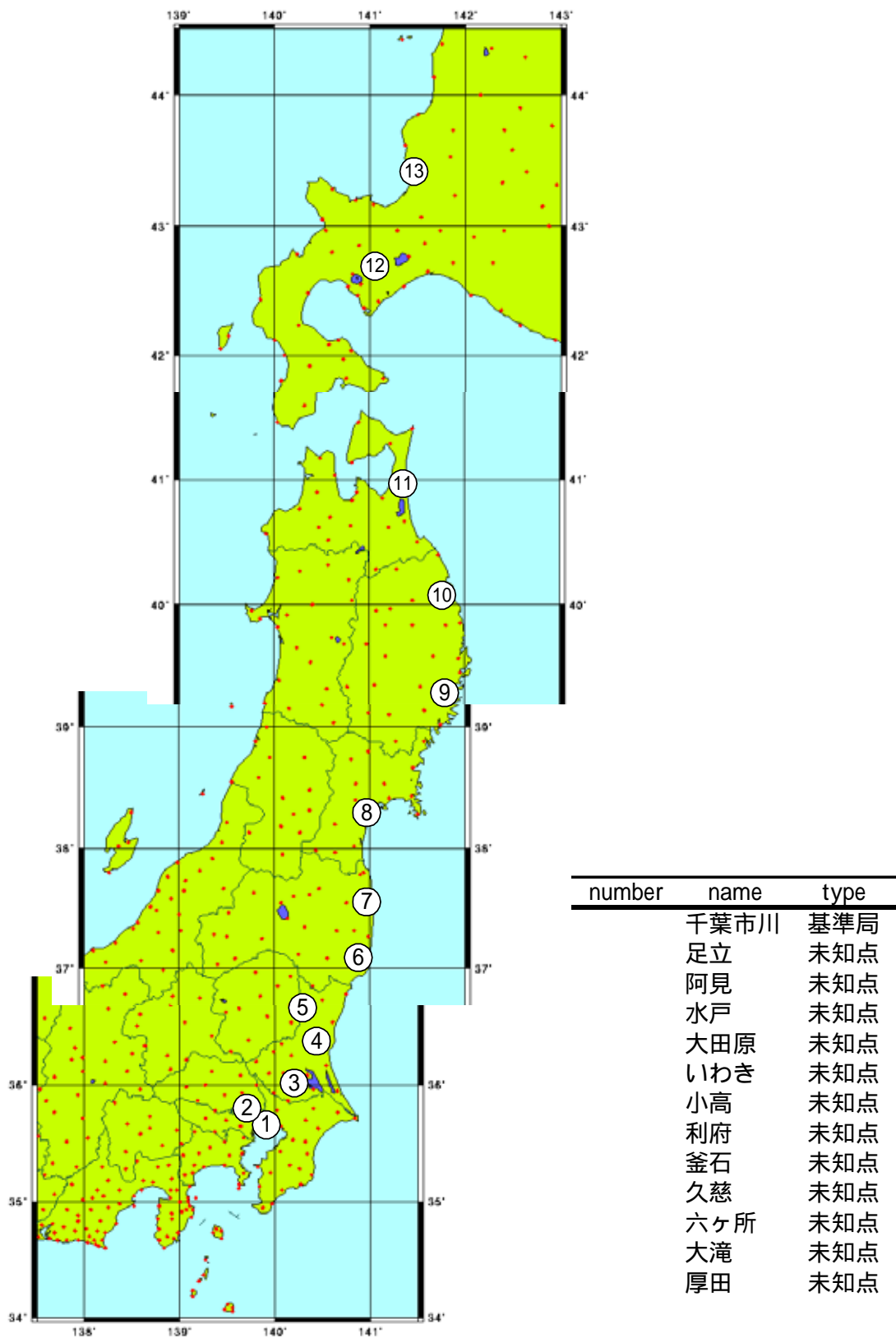


図 4-4 基準局と未知点の概略図



表 4-3 実験に使用した電子基準点の位置

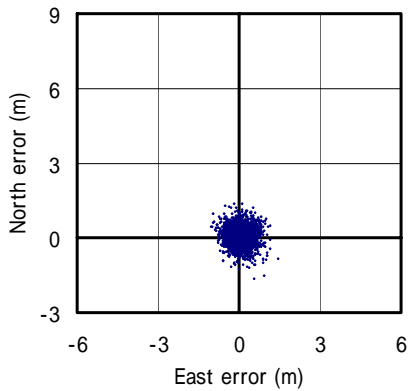
number	name	ECEF			ENU		
		X(m)	Y(m)	Z(m)	lat(degree)	lon(degree)	height(m)
	千葉市川	-3967874.238	3340981.697	3699025.218	35.6754640	139.9023540	43.52
	足立	-3957464.031	3342799.764	3708461.058	35.7802150	139.8128120	44.62
	阿見	-3967565.865	3305364.534	3731046.242	36.0313404	140.2024441	70.99
	水戸	-3967501.742	3273309.457	3759080.679	36.3443706	140.4763331	71.61
	大田原	-3916664.462	3281901.405	3804607.118	36.8542356	140.0392562	242.37
	いわき	-3953394.668	3212548.486	3825554.241	37.0907146	140.9025157	208.46
	小高	-3935966.91	3186531.257	3864562.879	37.5336934	141.0066112	53.63
	利府	-3891533.193	3156457.033	3933199.591	38.3174878	140.9541854	73.55
	釜石	-3886464.022	3058560.513	4014213.965	39.2535197	141.7980435	99.96
	久慈	-3836953.088	3020566.82	4089384.757	40.1334499	141.7890969	91.91
	六ヶ所	-3767550.308	3011046.579	4159800.216	40.9682449	141.3679628	59.72
	大滝	-3654389.853	2951359.488	4300732.703	42.6678782	141.0749528	423.75
	厚田	-3628791.729	2893595.381	4360326.298	43.4046823	141.4311721	76.16

表 4-4 基線長

number	name	baseline (km)
	千葉市川	-
	足立	14.167
	阿見	47.896
	水戸	90.478
	大田原	131.379
	いわき	180.871
	小高	228.639
	利府	307.758
	釜石	430.968
	久慈	521.715
	六ヶ所	601.083
	大滝	782.387
	厚田	867.439

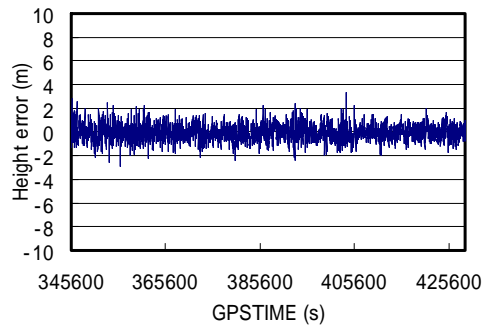
#### 4.4.2 基線長に対する DGPS 測位精度の実験結果

次に 5 月 1 日の未知点ごとの DGPS 測位結果を図 4-5 ~ 図 4-16 に示す。各図は真値からの誤差の値をプロットしており、水平方向の誤差を示した(a)図と高さ方向の誤差を示した(b)図の 2 種類から構成されている。(a)図の横軸は経度方向の誤差(m)、縦軸は緯度方向の誤差(m)である。また(a)図の真値は座標原点であり、図の中心ではない。これは全基線長の測位結果を同スケールで比較するためである。(b)図の横軸は GPSTIME(s)、縦軸は高さ方向の誤差(m)である。測位計算時間は午前 0 時より午後 11 時 59 分 30 秒までの 24 時間である。



(a) 水平方向測位結果

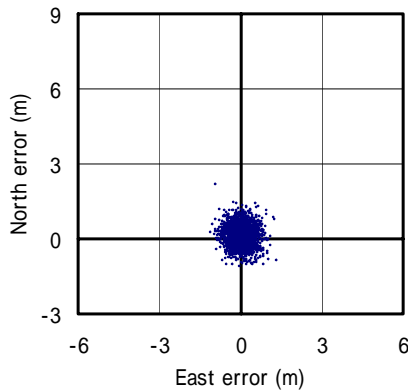
2drms = 0.974m  
 緯度方向測位誤差 = 0.080m  
 経度方向測位誤差 = 0.074m



(b) 高さ方向測位結果

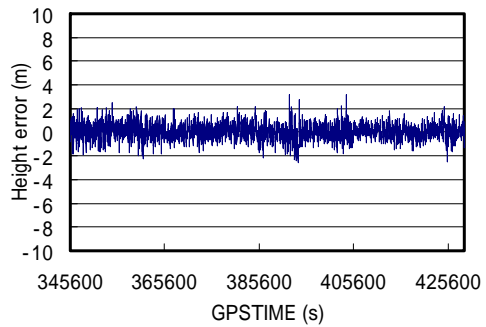
標準偏差 = 0.702m  
 高さ方向測位誤差 = -0.027m

図 4-5 基線長 14.167km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

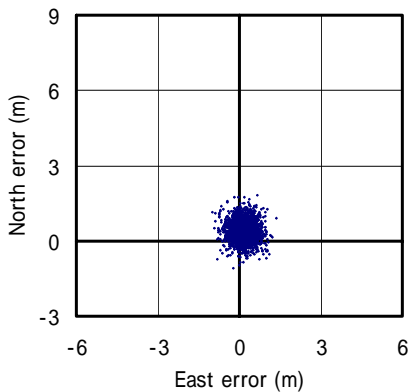
2drms = 1.065m  
 緯度方向測位誤差 = 0.156m  
 経度方向測位誤差 = 0.035m



(b) 高さ方向測位結果

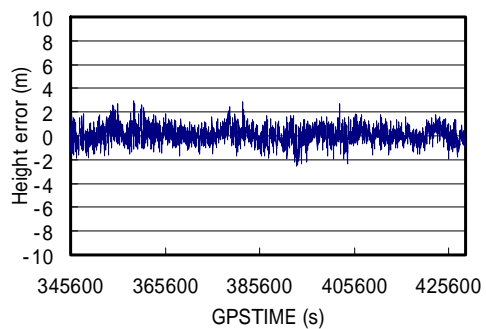
標準偏差 = 0.705m  
 高さ方向測位誤差 = 0.057m

図 4-6 基線長 47.896km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

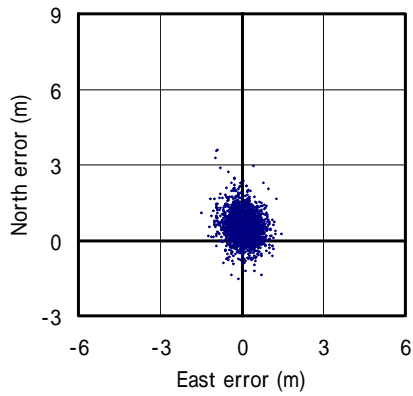
2drms = 0.979m  
 緯度方向測位誤差 = 0.399m  
 経度方向測位誤差 = 0.162m



(b) 高さ方向測位結果

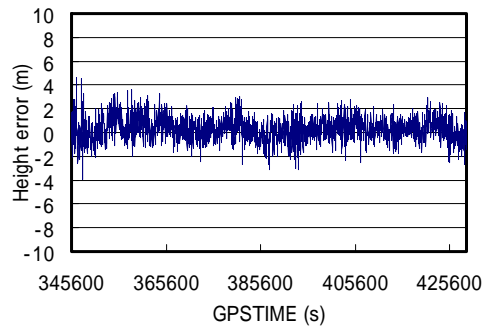
標準偏差 = 0.729m  
 高さ方向測位誤差 = 0.110m

図 4-7 基線長 90.478km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

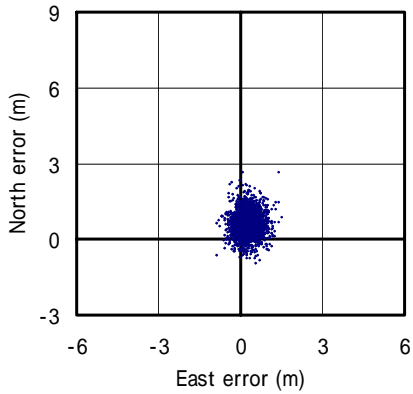
2drms = 1.261m  
 緯度方向測位誤差 = 0.540m  
 経度方向測位誤差 = 0.050m



(b) 高さ方向測位結果

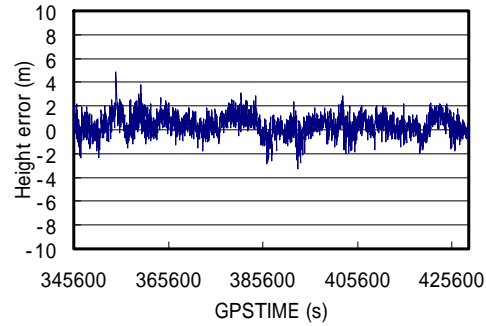
標準偏差 = 0.988m  
 高さ方向測位誤差 = 0.273m

図 4-8 基線長 131.379km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

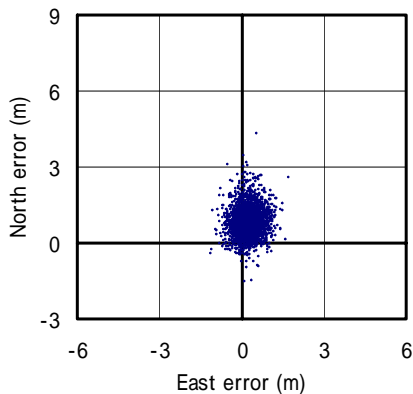
2drms = 1.084m  
 緯度方向測位誤差 = 0.600m  
 経度方向測位誤差 = 0.241m



(b) 高さ方向測位結果

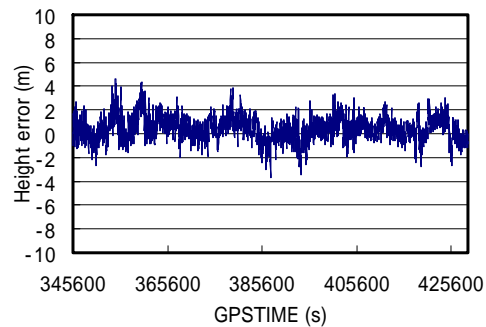
標準偏差 = 0.870m  
 高さ方向測位誤差 = 0.391m

図 4-9 基線長 180.871km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

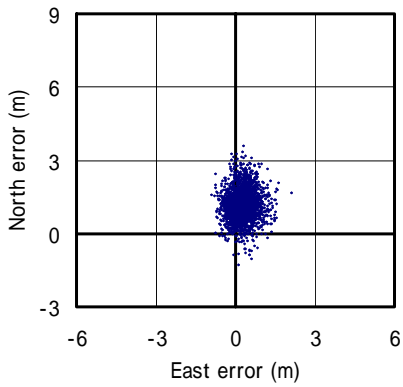
2drms = 1.311m  
 緯度方向測位誤差 = 0.866m  
 経度方向測位誤差 = 0.236m



(b) 高さ方向測位結果

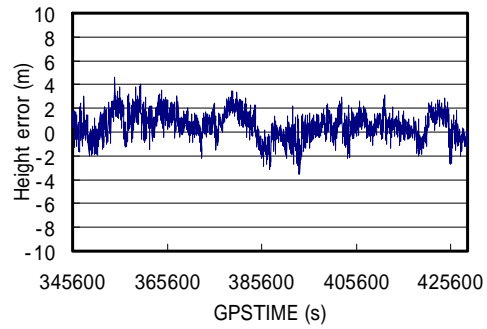
標準偏差 = 1.055m  
 高さ方向測位誤差 = 0.428m

図 4-10 基線長 228.639km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

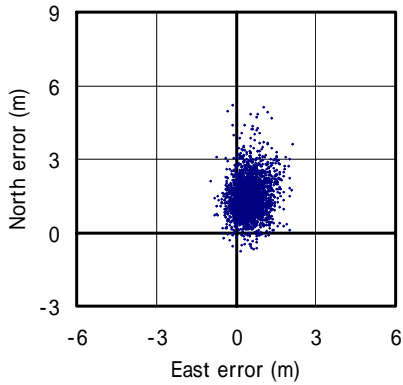
2drms = 1.398m  
 緯度方向測位誤差 = 1.154m  
 経度方向測位誤差 = 0.253m



(b) 高さ方向測位結果

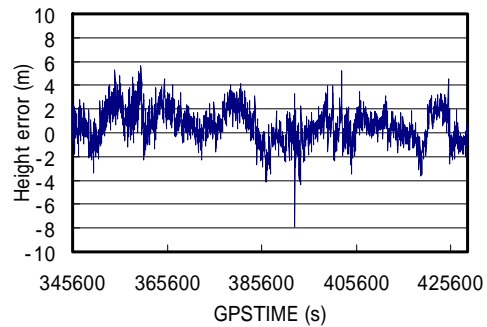
標準偏差 = 1.133m  
 高さ方向測位誤差 = 0.546m

図 4-11 基線長 307.758km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

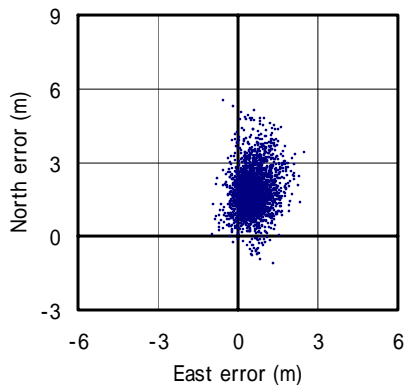
2drms = 1.707m  
 緯度方向測位誤差 = 1.451m  
 経度方向測位誤差 = 0.502m



(b) 高さ方向測位結果

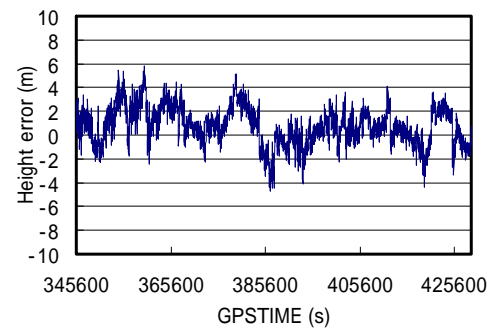
標準偏差 = 1.446m  
 高さ方向測位誤差 = 0.638m

図 4-12 基線長 430.968km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

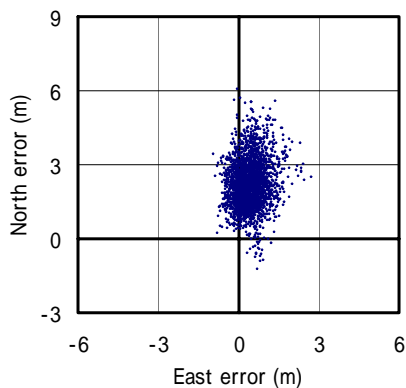
2drms = 1.943m  
 緯度方向測位誤差 = 1.839m  
 経度方向測位誤差 = 0.562m



(b) 高さ方向測位結果

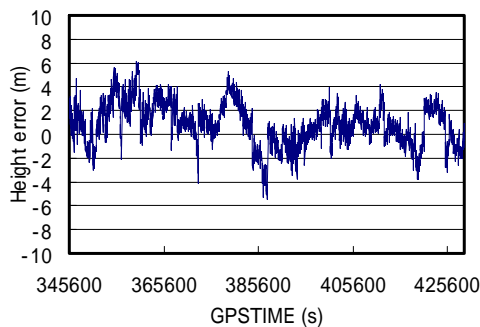
標準偏差 = 1.607m  
 高さ方向測位誤差 = 0.731m

図 4-13 基線長 521.715km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

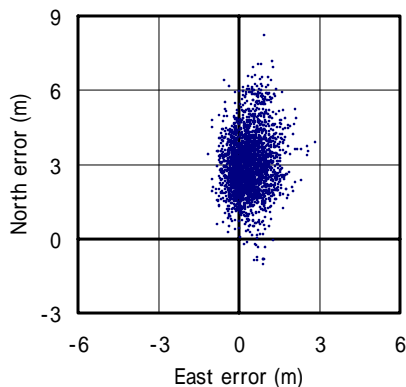
2drms = 2.101m  
 緯度方向測位誤差 = 2.232m  
 経度方向測位誤差 = 0.410m



(b) 高さ方向測位結果

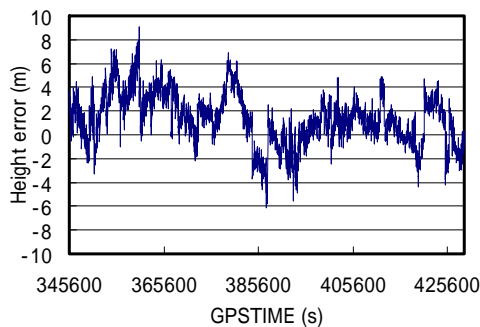
標準偏差 = 1.786m  
 高さ方向測位誤差 = 0.839m

図 4-14 基線長 601.083km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

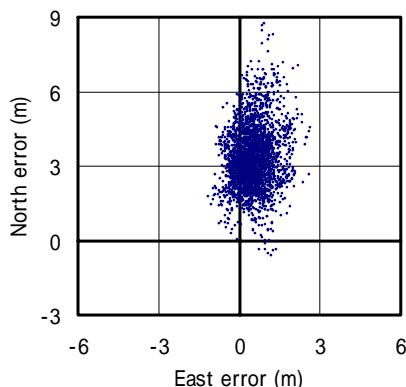
2drms = 2.546m  
 緯度方向測位誤差 = 2.999m  
 経度方向測位誤差 = 0.375m



(b) 高さ方向測位結果

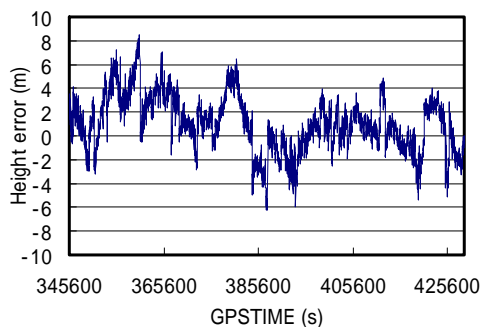
標準偏差 = 2.195m  
 高さ方向測位誤差 = 1.319m

図 4-15 基線長 782.387km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果



(a) 水平方向測位結果

2drms = 2.715m  
 緯度方向測位誤差 = 3.337m  
 経度方向測位誤差 = 0.506m



(b) 高さ方向測位結果

標準偏差 = 2.363m  
 高さ方向測位誤差 = 1.024m

図 4-16 基線長 867.439km の水平方向(a)と高さ方向(b)の測位結果

(a)図の水平方向から基線長が長くなるにつれて測位分布は真値から離れ、緯度方向の上(北)側への分布が大きくなる。また測位分布が広がり、精度も劣化している。緯度方向と経度方向を比較してみると緯度方向により大きく誤差が現れ、たてに長い測位分布となっている。

(b)図の高さ方向も短基線の場合は真値の周りに測位結果が分布し、精度、確度ともに良い結果が得られているが、長基線になるにつれて測位精度、特に精度が劣化している。また時間的に誤差の形状が似ていて、基線長が長くなるにつれて振れ幅が大きくなっている。

緯度、経度、高さ方向の標準偏差、水平方向の 2drms を図 4-17、表 4-5 に示し、各方向の測位誤差の平均値を図 4-18、表 4-6 に示す。

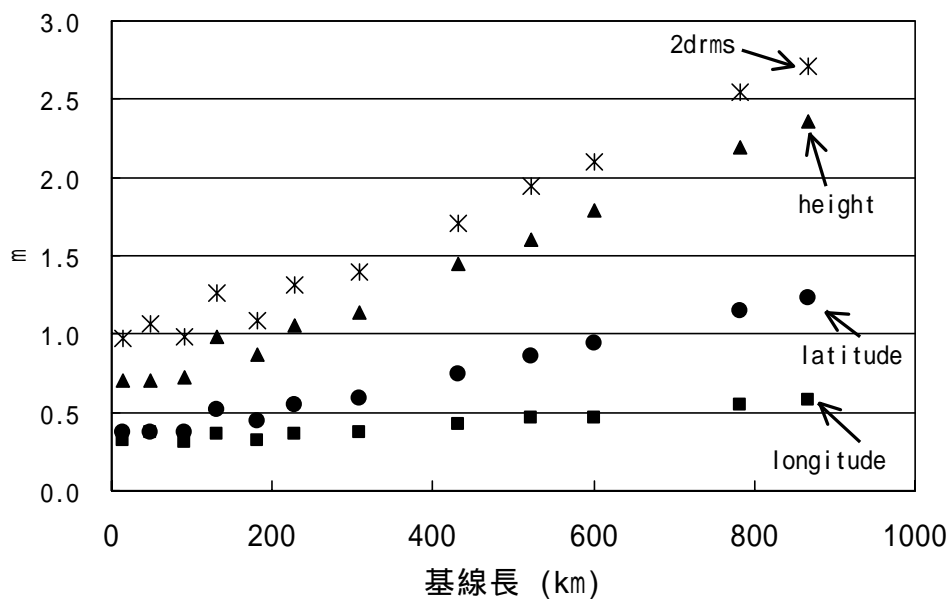


図 4-17 5 月 1 日の基線長と各方向標準偏差と水平方向 2drms の関係

表 4-5 5 月 1 日の各方向標準偏差と水平方向 2drms の値

number	baseline (km)	標準偏差(m)			2drms(m)
		latitude	longitude	height	
	14.167	0.370	0.316	0.702	0.974
	47.896	0.377	0.377	0.705	1.065
	90.478	0.375	0.314	0.729	0.979
	131.379	0.513	0.367	0.988	1.261
	180.871	0.441	0.316	0.870	1.084
	228.639	0.543	0.366	1.055	1.311
	307.758	0.594	0.368	1.133	1.398
	430.968	0.740	0.425	1.446	1.707
	521.715	0.855	0.462	1.607	1.943
	601.083	0.939	0.471	1.786	2.101
	782.387	1.151	0.544	2.195	2.546
	867.439	1.230	0.575	2.363	2.715

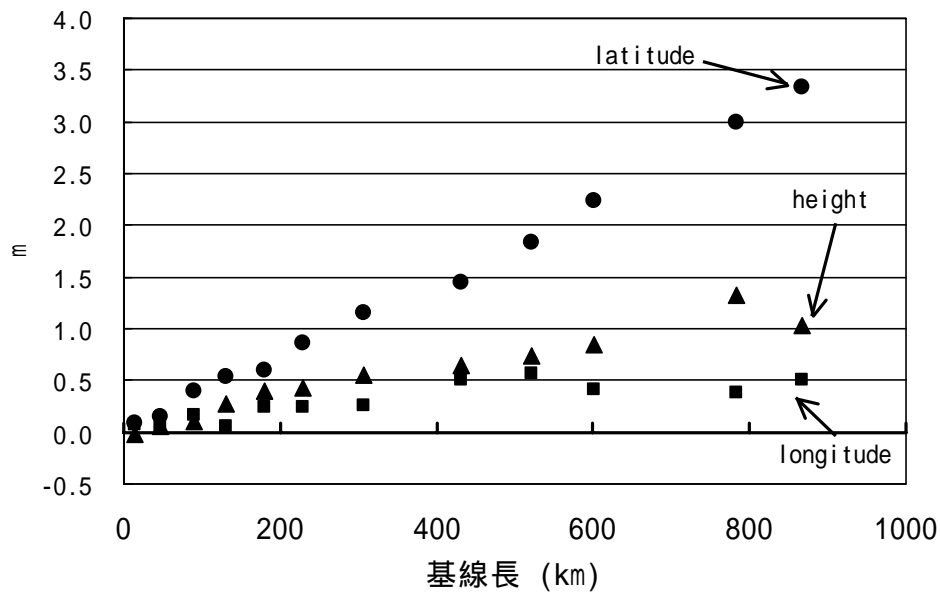


図 4-18 5月1日の基線長と各方向測位誤差の平均値との関係

表 4-6 5月1日の各方向測位誤差の平均値

number	baseline (km)	ERROR(m)		
		latitude	longitude	height
	14.167	0.080	0.074	-0.027
	47.896	0.156	0.035	0.057
	90.478	0.399	0.162	0.110
	131.379	0.540	0.050	0.273
	180.871	0.600	0.241	0.391
	228.639	0.866	0.236	0.428
	307.758	1.154	0.253	0.546
	430.968	1.451	0.502	0.638
	521.715	1.839	0.562	0.731
	601.083	2.232	0.410	0.839
	782.387	2.999	0.375	1.319
	867.439	3.337	0.506	1.024

実際に、まず表 4-5 から各基線長に対するそれぞれの方向の標準偏差について、精度の評価を行う。基線長の一番短い 1 番の未知点の緯度方向、経度方向、高さ方向の標準偏差は 0.37m、0.316m、0.702m と 1m 以下の精度を得られ、DGPS 測位の相殺効果がよく効いていることがわかる。基線長が長くなるにつれて各方向の標準偏差は大きくなり、基線長が 867.439km の 11 番の未知点の緯度方向、経度方向、高さ方向の標準偏差は 1.23m、0.575m、2.363m となっている。3 方向の中で高さの標準偏差の増加が一番激しく、1 番未知点と 11 番未知点とでは約 3.4 倍の精度の劣化がある。また 2 番目に増加の激しい緯度方向では約 3.3 倍であり、経度方向では 1.8 倍となっている。11 番未知点で同じ水平方向である緯度方向、経度方向の標準偏差に 2 倍以上の精度の差が生じたのは、今回基線長が経度方向の距離変化と比較して緯度方向の距離変化のほうが大きいことが関係あると考えられる。

水平方向の 2drms も緯度方向の標準偏差に影響を受け、11 番未知点では 0.974m、1 番未知点で

は 2.715m と約 2.8 倍の精度の劣化が見られる。

次に表 4-6 から確度の評価を行う。表 4-6 は実際の測位結果と真値との差(誤差)を平均化した値である。まず 番未知点の緯度方向、経度方向、高さ方向の誤差は 0.08m、0.074m、-0.027 と各方向とも 10cm 以下の確度を得られ、正確な測位ができていることがわかる。一方、 番未知点は 3.337m、0.506m、1.024m と標準偏差のときと同様に確度が劣化している。基線長が延びるにつれて誤差が増加することも標準偏差と同じである。しかし最大誤差は高さ方向、経度方向が基線長約 870km の 番未知点での約 1m と約 0.5m に対して、緯度方向は基線長 131km の 番未知点で 0.54m の誤差となり、経度方向の最大誤差を越える。さらに基線長約 300km の 番未知点で 1.154m となり、高さ方向の最大誤差も越え、他の 2 方向と比較して誤差増加の比率が高いことがわかる。

図 4-19、表 4-7 に実験を行った 6 日分の測位結果を平均した各方向の標準偏差を示し、図 4-20、表 4-8 に 6 日分の平均した各方向の測位誤差を示す。

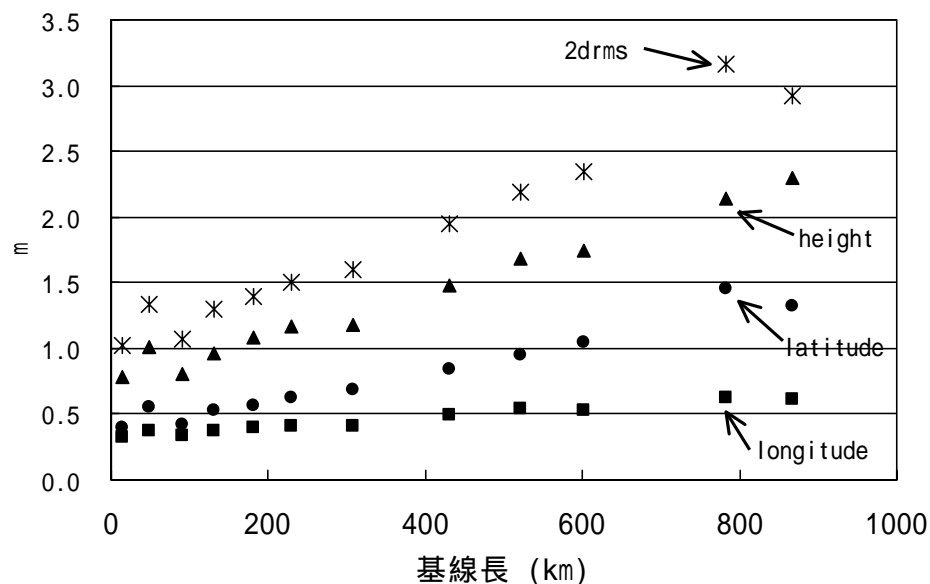


図 4-19 6 日分の基線長と各方向測位誤差の標準偏差との関係

表 4-7 6 日分の標準偏差の平均値

number	baseline (km)	標準偏差(m)			2drms(m)
		latitude	longitude	hight	
	14.167	0.394	0.328	0.784	1.025
	47.896	0.548	0.375	1.011	1.329
	90.478	0.419	0.332	0.811	1.070
	131.379	0.534	0.374	0.967	1.304
	180.871	0.570	0.398	1.085	1.390
	228.639	0.629	0.411	1.167	1.502
	307.758	0.683	0.414	1.174	1.597
	430.968	0.839	0.499	1.477	1.952
	521.715	0.955	0.537	1.684	2.191
	601.083	1.043	0.533	1.748	2.343
	782.387	1.453	0.621	2.146	3.160
	867.439	1.325	0.614	2.293	2.920



表 4-7 の 6 日分の各方向に対する標準偏差の結果も 5 月 1 日の結果と同じ傾向を示した。短基線の未知点では各方向とも標準偏差は小さく、DGPS 測位により測位結果の精度は改善されている。さらに基線長が延びると標準偏差が大きくなり、相殺効果が不完全で測位結果の精度の改善がされていないと考えられる。また高さ方向の標準偏差が一番大きく、緯度方向、経度方向と精度の劣化の順序も同じである。

次に表 4-8 の確度の評価であるが、この結果も 5 月 1 日の結果と同じ傾向となった。

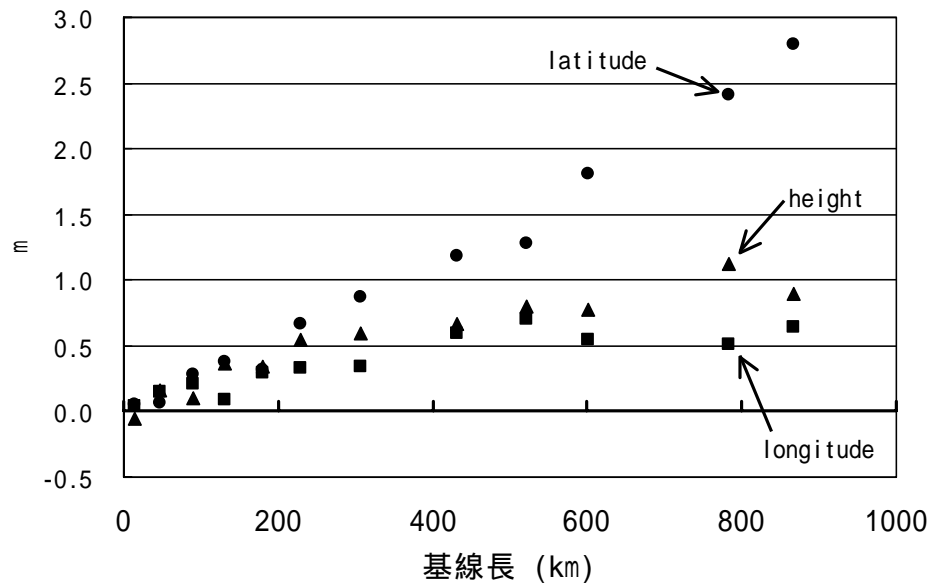


図 4-20 6 日分の基線長と各方向測位誤差との関係

表 4-8 6 日分の測位誤差の平均値

number	baseline (km)	ERROR(m)		
		latitude	longitude	hight
	14.167	0.048	0.044	-0.054
	47.896	0.065	0.153	0.161
	90.478	0.282	0.210	0.102
	131.379	0.375	0.093	0.370
	180.871	0.321	0.297	0.339
	228.639	0.671	0.329	0.552
	307.758	0.875	0.347	0.591
	430.968	1.184	0.600	0.671
	521.715	1.276	0.706	0.796
	601.083	1.809	0.541	0.776
	782.387	2.406	0.512	1.128
	867.439	2.790	0.644	0.897

以上の結果から、DGPS 測位精度が基線長に依存して劣化している傾向が得られた。そこで測位結果と基線長の関係を示すために両者の間の相関を求める。表 4-9 に 6 日分の標準偏差、測位誤差と基線長の相関係数を示す。基線長は 2 地点間の緯度、経度、高さの距離差の二乗和であるので基線長を各方向成分に分解し、それぞれの距離との相関係数も示す。例えば、表 4-9 の中では緯度方向の基線長と緯度方向の標準偏差の相関係数を示している。ここでは 3 方向の距離差の和で定義した基線長を 3 次元基線長(表 4-9 では「3-D」と定義)とし、3 方向それぞれの基線長と区別して扱う。

表 4-9 基線長と測位結果との相関

		latitude	longitude	height
標準偏差	3-D	0.98	0.98	0.99
	各方向	0.98	0.73	0.32
測位誤差	3-D	0.99	0.87	0.93
	各方向	0.99	0.95	0.42

表 4-9 より標準偏差、測位誤差ともに、3 次元基線長では 0.8 以上の高い相関があり、3 次元基線長の長さ DGPS 測位精度には強い関係があることがわかった。また各方向の相関係数を見ると、高さ方向の基線長、つまり楕円体高さと標準偏差、測位誤差との相関は 0.32、0.42 と相関が弱いことを示している。緯度方向基線長と標準偏差、測位誤差との相関は 0.98、0.99 と強い相関を示している。経度方向基線長との相関係数は 0.73、0.95 となり、相関があることがわかる。

#### 4.4.3 長基線長 DGPS 測位精度の改善に関する実験

DGPS 測位精度は基線長の長さに依存していることを確認することができた。DGPS 測位精度が劣化する理由は第 3 章で説明したように、本来基準局の補正值によって相殺されるべき誤差(衛星位置誤差、電離層遅延、対流圏遅延)を相殺しきれないからである。この相殺されない部分を改善することで長基線長 DGPS 測位精度も改善されると考えられる。

共通誤差の中で電離層、対流圏遅延量はモデルや二周波の測定値を使用して推定することが可能であることは第 2 章で説明している。仮に基準局、未知点ともに電離層、対流圏遅延量をモデル等で推定した補正值が実際の遅延量と等しいならば、(3-5)式を書き換えて、

$$\rho_n = r_n + c(\delta t_{u,n} - \delta t_s) + (I_n - \Delta I_n) + (T_n - \Delta T_n) + \varepsilon_n$$

$$\text{if } I_n = \Delta I_n, T_n = \Delta T_n \tag{4-6}$$

then

$$\rho_n = r_n + c(\delta t_{u,n} - \delta t_s) + \varepsilon_n$$

と擬似距離を表すことができる。ここで  $I$  は推定した電離層遅延量(m)、 $T$  は推定した対流圏遅延量を示す。(4-6)式の擬似距離を利用することで、長基線長 DGPS 測位精度劣化の要因である、電離層、対流圏遅延量の差が消去できるため、長基線長 DGPS 測位の相殺効果の劣化を抑えることがで

きると考えられる。

そこで 4.4.1 で行った実験に上記で説明した補正、つまり基準局と未知点でそれぞれ擬似距離に対して電離層遅延量と対流圏遅延量の補正を行う場合の長基線長 DGPS 測位精度への影響を調査する。実験に使用したデータ、マスク仰角等の条件は 4.4.1 の実験と全て同じである。4.4.1 実験との違いは基準局で擬似距離補正值を作成するとき使用する擬似距離、未知点で測位計算する擬似距離には(4-6)式の擬似距離を使用していることだけである。

電離層遅延量を推定する方法としては、電子基準点の観測データは L1 と L2 の二周波測定値が記載されているため、(2-37)式の二周波測定値による推定法を使用する。対流圏遅延量の推定には(2-38)式の Saastamoinen Model を使用する。対流圏遅延量の推定に必要なパラメータ(気圧、水蒸気圧)は、理科年表より取得した東京の気温、海面気圧、相対湿度から導出した。これらの値を表 4 10 に示す。

表 4 10 東京における気温、海面気圧、相対湿度の月別平均値

	気温( )	海面気圧(hPa)	相対湿度(%)
1月	5.8	1015.8	50
2月	6.1	1015.2	51
3月	8.9	1015.7	57
4月	14.4	1014.6	62
5月	18.7	1012.0	66
6月	21.8	1009.4	73

ここで水蒸気圧は気温と相対湿度から、

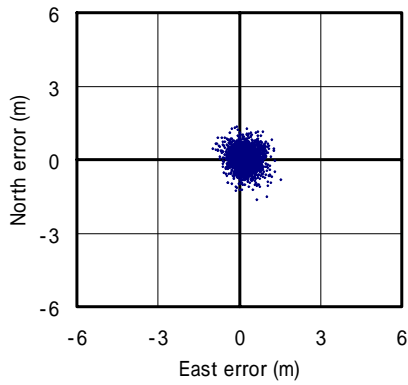
$$e = 6.108 \times \frac{p}{100} \times \exp\left(\frac{17.15 \cdot T - 4684}{T - 38.45}\right) \quad (4-7)$$

で表すことができる。ここで p(hPa)は相対湿度、T(K)は気温を示す。最後に衛星位置誤差は基準局と移動局での衛星位置は互いに同じ位置を用いて測位を行うため、無視する。

#### 4.4.4 長基線長 DGPS 測位精度の改善に関する実験結果

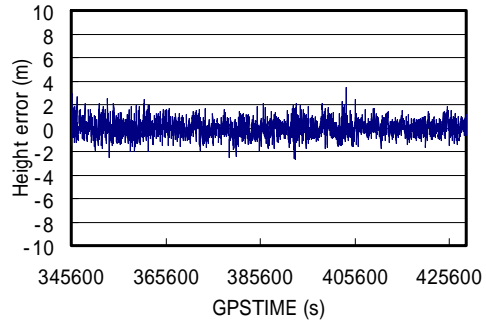
5月1日の未知点ごとの DGPS 測位結果を図 4-19～図 4-30 に示す。図の構成は図 4-5～図 4-16 と同じである。さらに緯度、経度、高さ方向の標準偏差、水平方向の 2drms を表 4-11、各方向の誤差の平均値を表 4-12 に示す。測位計算時間は午前 0 時より午後 11 時 59 分 30 秒までの 24 時間である。

図 4-19～図 4-30 の(a)図は真値が図の中心になり、図 4-5～図 4-16 の(a)図と異なる。



(a) 水平方向測位結果

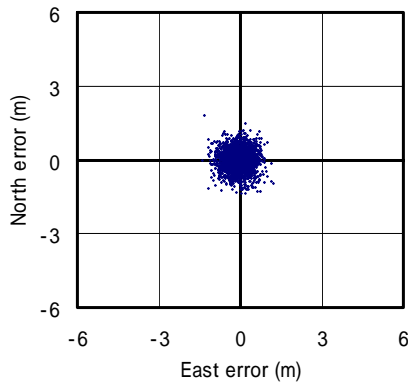
2drms = 0.992m  
 緯度方向測位誤差 = 0.062m  
 経度方向測位誤差 = 0.206m



(b) 高さ方向測位結果

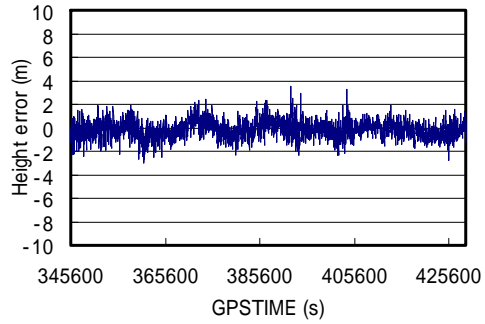
標準偏差 = 0.708m  
 高さ方向測位誤差 = 0.008m

図 4-19 基線長 14.167km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

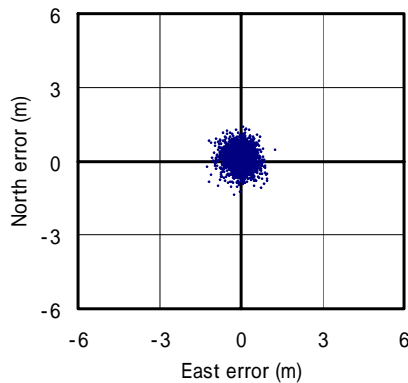
2drms = 1.082m  
 緯度方向測位誤差 = -0.016m  
 経度方向測位誤差 = -0.066m



(b) 高さ方向測位結果

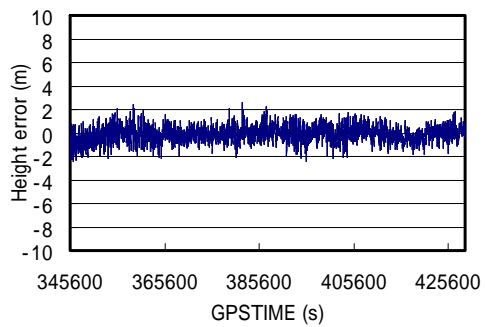
標準偏差 = 0.768m  
 高さ方向測位誤差 = -0.14m

図 4-20 基線長 47.896km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

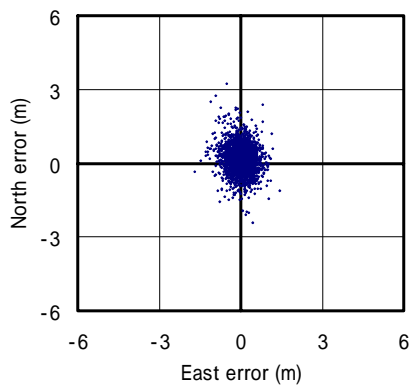
2drms = 0.993m  
 緯度方向測位誤差 = 0.121m  
 経度方向測位誤差 = -0.045m



(b) 高さ方向測位結果

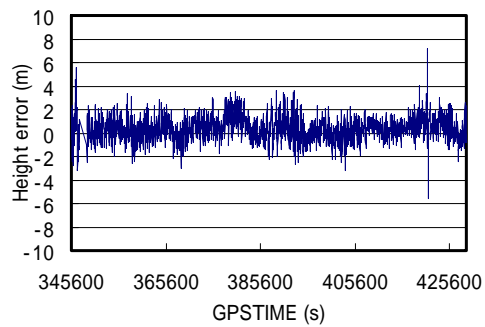
標準偏差 = 0.711m  
 高さ方向測位誤差 = -0.09m

図 4-21 基線長 90.478km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

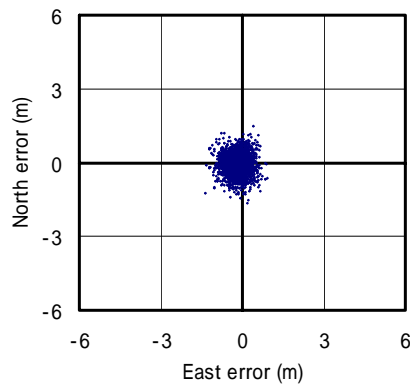
2drms = 1.270m  
 緯度方向測位誤差 = 0.165m  
 経度方向測位誤差 = 0.007m



(b) 高さ方向測位結果

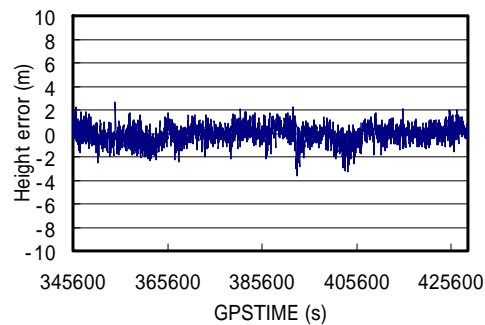
標準偏差 = 1.028m  
 高さ方向測位誤差 = 0.35m

図 4-22 基線長 131.379km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

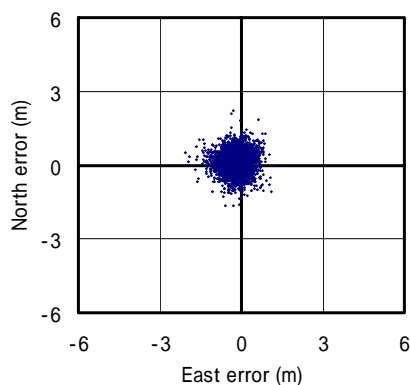
2drms = 1.007m  
 緯度方向測位誤差 = -0.058m  
 経度方向測位誤差 = -0.186m



(b) 高さ方向測位結果

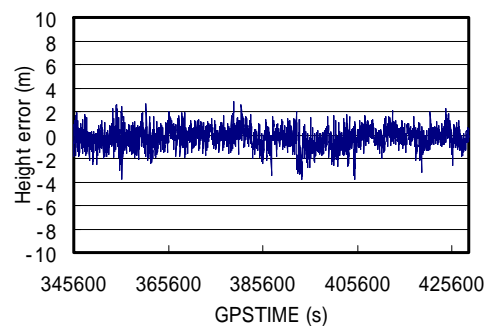
標準偏差 = 1.074m  
 高さ方向測位誤差 = -0.10m

図 4-23 基線長 180.871km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

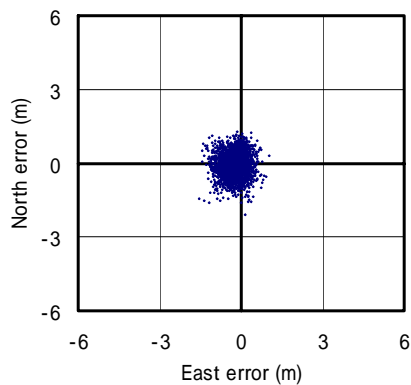
2drms = 1.196m  
 緯度方向測位誤差 = 0.120m  
 経度方向測位誤差 = -0.190m



(b) 高さ方向測位結果

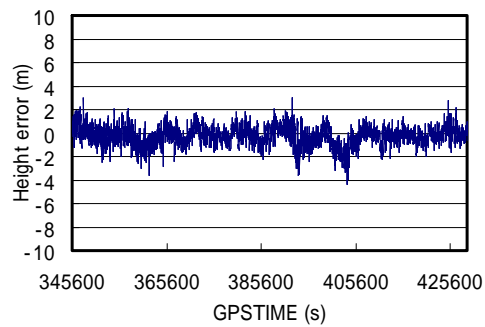
標準偏差 = 0.872m  
 高さ方向測位誤差 = -0.24m

図 4-24 基線長 228.639km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

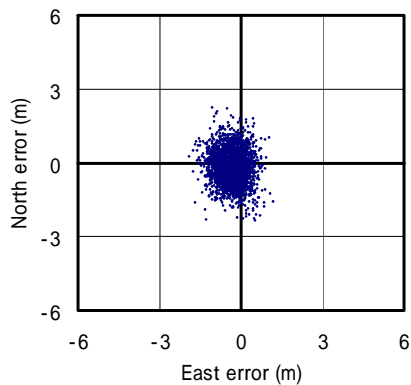
2drms = 1.157m  
 緯度方向測位誤差 = -0.049m  
 経度方向測位誤差 = -0.245m



(b) 高さ方向測位結果

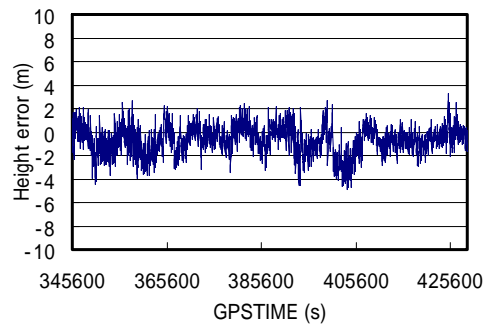
標準偏差 = 0.880m  
 高さ方向測位誤差 = -0.27m

図 4-25 基線長 307.758km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

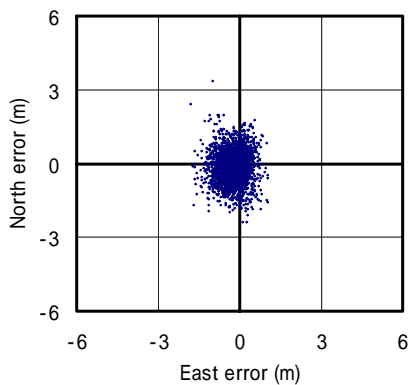
2drms = 1.550m  
 緯度方向測位誤差 = -0.134m  
 経度方向測位誤差 = -0.344m



(b) 高さ方向測位結果

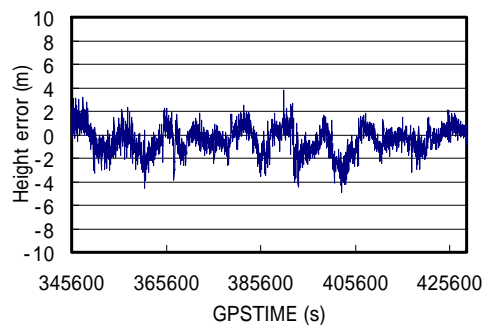
標準偏差 = 1.208m  
 高さ方向測位誤差 = -0.69m

図 4-26 基線長 430.968km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

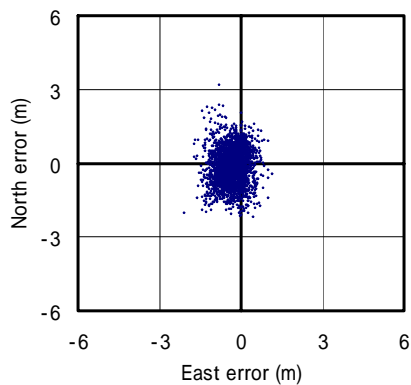
2drms = 1.516m  
 緯度方向測位誤差 = -0.146m  
 経度方向測位誤差 = -0.257m



(b) 高さ方向測位結果

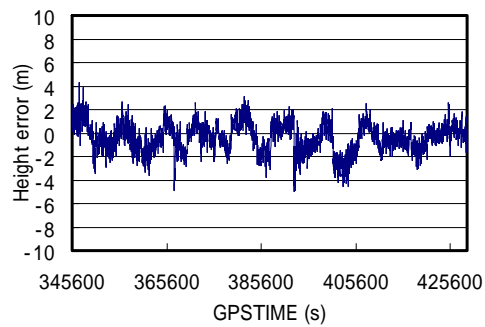
標準偏差 = 1.182m  
 高さ方向測位誤差 = -0.45m

図 4-27 基線長 521.715km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

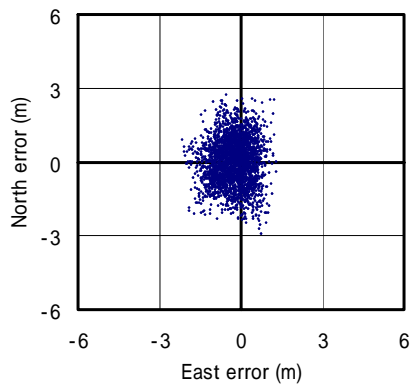
2drms = 1.655m  
 緯度方向測位誤差 = -0.132m  
 経度方向測位誤差 = -0.341m



(b) 高さ方向測位結果

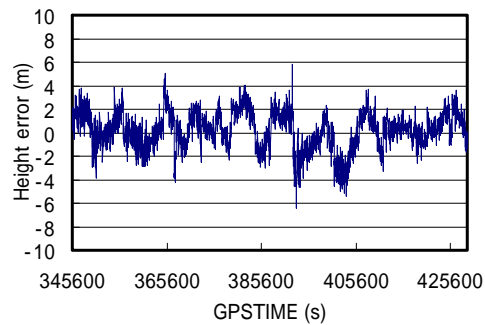
標準偏差 = 1.264m  
 高さ方向測位誤差 = -0.41m

図 4-28 基線長 601.083km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

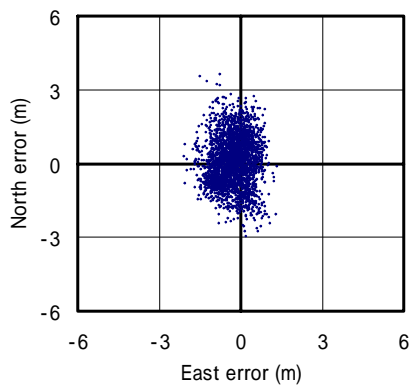
2drms = 2.182m  
 緯度方向測位誤差 = 0.016m  
 経度方向測位誤差 = -0.275m



(b) 高さ方向測位結果

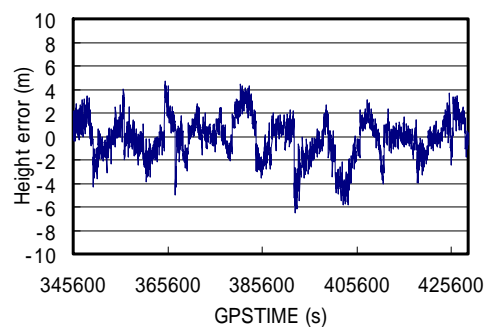
標準偏差 = 1.603m  
 高さ方向測位誤差 = 0.19m

図 4-29 基線長 782.387km の補正後の測位結果



(a) 水平方向測位結果

2drms = 2.242m  
 緯度方向測位誤差 = 0.089m  
 経度方向測位誤差 = -0.279m



(b) 高さ方向測位結果

標準偏差 = 1.752m  
 高さ方向測位誤差 = -0.16m

図 4-30 基線長 867.439km の補正後の測位結果

図 4-19～図 4-30 の水平方向の測位結果を示した(a)図から、基線長が延びても DGPS 測位結果が真値の周りに分布していることがわかる。(4-6)式の補正方法を用いたことにより、相殺効果の劣化を抑えられたことがわかる。

(b)図の高さ方向は、基線長は延びるごとに測位結果の揺れは大きくなる様子が見られる。

表 4-11 5月1日の補正後の測位誤差の標準偏差と 2drms

number	baseline (km)	標準偏差(m)			2drms
		latitude	longitude	height	
	14.167	0.378	0.321	0.708	0.992
	47.896	0.403	0.361	0.768	1.082
	90.478	0.371	0.330	0.711	0.993
	131.379	0.529	0.351	1.028	1.270
	180.871	0.395	0.313	0.784	1.007
	228.639	0.443	0.402	0.872	1.196
	307.758	0.463	0.347	0.880	1.157
	430.968	0.646	0.428	1.208	1.550
	521.715	0.632	0.418	1.182	1.516
	601.083	0.712	0.421	1.264	1.655
	782.387	0.922	0.582	1.603	2.182
	867.439	0.980	0.545	1.752	2.242

表 4-12 5月1日の補正後の測位誤差の平均値

number	baseline (km)	ERROR(m)		
		latitude	longitude	height
	14.167	0.062	0.206	0.008
	47.896	-0.016	-0.066	-0.14
	90.478	0.121	-0.045	-0.09
	131.379	0.165	0.007	0.35
	180.871	-0.058	-0.186	-0.10
	228.639	0.120	-0.190	-0.24
	307.758	-0.049	-0.245	-0.27
	430.968	-0.134	-0.344	-0.69
	521.715	-0.146	-0.257	-0.45
	601.083	-0.132	-0.341	-0.41
	782.387	0.016	-0.275	0.19
	867.439	0.089	-0.279	-0.16

実際の標準偏差と平均値の値から評価する。まず各方向の標準偏差では、各方向とも基線長に依存して値が悪くなる様子が見られるが、緯度方向では最大値を示している 番末知点でも 0.98m と 1m 以内の精度を得ている。高さ方向も 1.8m 以内と精度の改善できている。経度方向はそれほど顕著な改善は見られない。



次に表 4-12 の測位誤差の平均値は、表 4-11 の標準偏差の結果よりも顕著に結果の改善が見られる。長基線長の場合においても平均値が真値に近い値を示している。具体的に 4.4.1 実験の 番未知点の緯度方向の誤差は 3.337m に対して、今回は 0.089 と 3m 以上の改善があることがわかる。高さ方向も 1.024m に対して -0.16m と約 1m の確度改善が見られた。

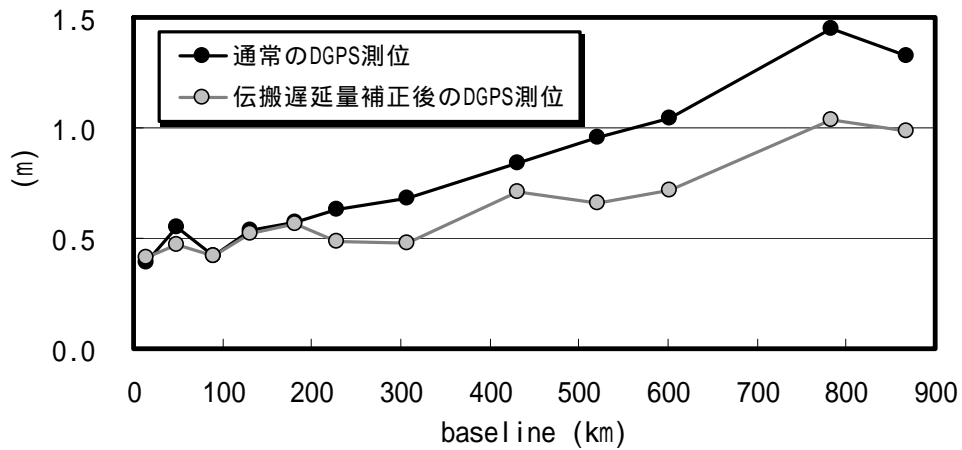
表 4-13 に実験を行った 6 日分の標準偏差の平均値、表 4-14 に 6 日分の測位誤差の平均値を示す。また 4.4.1 実験と今回の標準偏差の比較を図 4-31、測位誤差の比較を図 4-32 に示す。

表 4-13 6 日分の標準偏差と 2drms の平均値

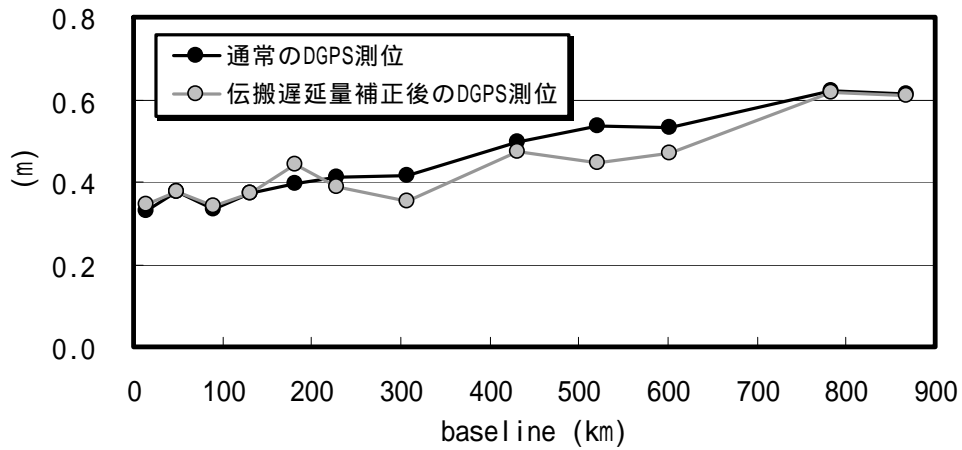
number	baseline (km)	標準偏差(m)			2drms
		latitude	longitude	height	
	14.167	0.415	0.345	0.895	1.079
	47.896	0.470	0.376	0.965	1.204
	90.478	0.418	0.341	0.879	1.079
	131.379	0.520	0.374	1.040	1.281
	180.871	0.568	0.442	1.153	1.439
	228.639	0.483	0.388	0.902	1.239
	307.758	0.478	0.354	0.953	1.191
	430.968	0.711	0.474	1.238	1.708
	521.715	0.659	0.447	1.252	1.592
	601.083	0.719	0.468	1.322	1.716
	782.387	1.034	0.619	1.673	2.410
	867.439	0.986	0.611	1.788	2.320

表 4-14 6 日分の測位誤差の平均値

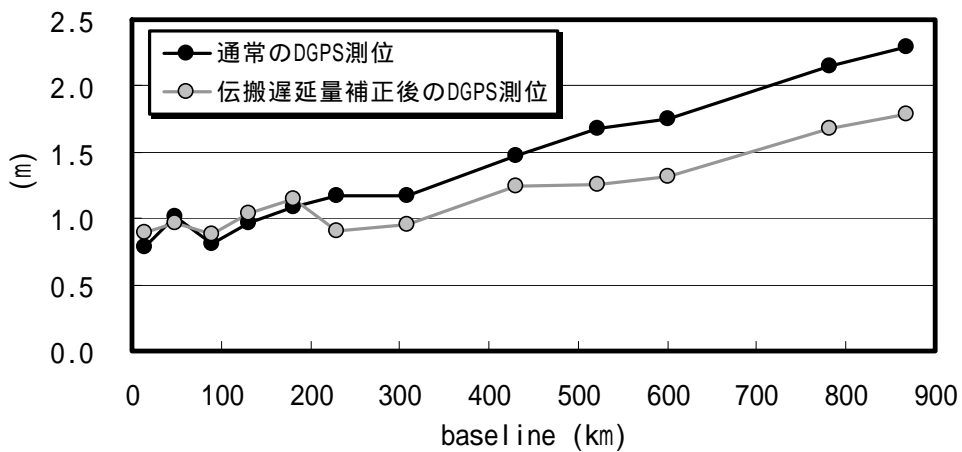
number	baseline (km)	ERROR(m)		
		latitude	longitude	height
	14.167	0.047	0.154	-0.025
	47.896	-0.069	0.000	-0.13
	90.478	0.032	0.014	-0.22
	131.379	0.069	0.016	0.29
	180.871	-0.176	-0.133	-0.32
	228.639	0.047	-0.172	-0.18
	307.758	-0.116	-0.232	-0.26
	430.968	-0.045	-0.237	-0.44
	521.715	-0.221	-0.270	-0.41
	601.083	-0.171	-0.323	-0.40
	782.387	-0.142	-0.269	0.18
	867.439	0.003	-0.269	-0.05



(a) 緯度方向標準偏差



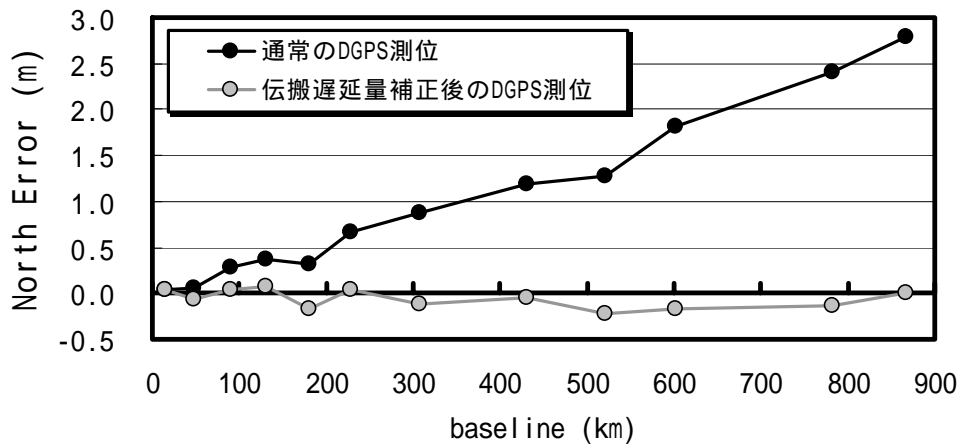
(b) 経度方向標準偏差



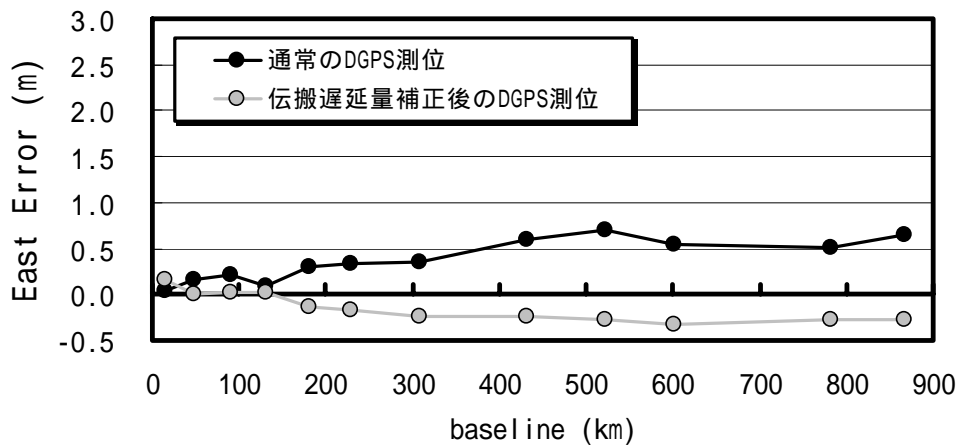
(c) 高さ方向標準偏差

図 4-29 通常の DGPS 測位と伝搬遅延量補正後の DGPS 測位における各方向の標準偏差の比較

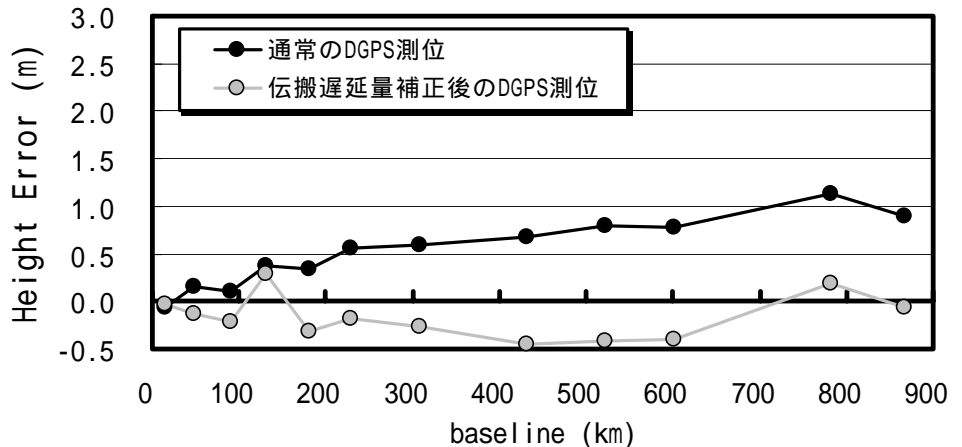
6 日分の標準偏差、測位誤差ともに 5 月 1 日の測位結果と同様な傾向を示した。標準偏差は各方向とも基線長に依存して劣化している。また測位誤差は長基線長の場合でも真値の付近に集中している。



(a) 緯度方向測位誤差



(b) 経度方向測位誤差



(c) 高さ方向測位誤差

図 4-30 通常の DGPS 測位と伝搬遅延量補正後の DGPS 測位における各方向測位誤差の比較

図 4-29 は横軸が基線長 (km) であり、縦軸が標準偏差 (m) の関係を示している。(a) は緯度方向、(b) は経度方向、(c) は高さ方向である。(4-6) 式の補正しない場合とした場合では、補正した場合のほうが緯度方向、経度方向、高さ方向の精度が改善される。しかし、基線長が 200km 未満の標準偏差では、補正を行わない場合のほうが良い結果を得られる場合もある。短基線長のため、通常の DGPS 測位の電離層、対流圏遅延量の相殺効果が(4-6)式の補正による効果よりも効果的に働いている結果で

あると考えられる。

次に図 4-30 の測位誤差の比較であるが、横軸は基線長(km)、縦軸は各方向の測位誤差(m)である。(a)は緯度方向、(b)は経度方向、(c)は高さ方向の測位誤差を示している。各方向とも基線長が伸びても測位結果は補正をしない場合よりも正確で、誤差は 0.5m(絶対値)以内である。長基線長になることにより生じる相殺効果の劣化が(4-6)式の補正で改善されていることがわかる。

伝搬遅延量補正後の DGPS 測位の基線長と測位結果の相関係数を表 4-15 に示す。

表 4-15 基線長と伝搬遅延量補正後の DGPS 測位結果との相関係数

		latitude	longitude	height
標準偏差	3-D	0.94	0.92	0.93
	各方向	0.95	0.56	0.45
測位誤差	3-D	-0.41	-0.84	-0.04
	各方向	-0.4	-0.9	0.58

3次元基線長(3-D)と各方向の標準偏差との相関係数は、いずれも 0.9 以上と強い値を示している。また各方向の基線長と標準偏差との相関係数は、緯度方向で 0.95、経度方向で 0.56、高さ方向で 0.45 となり、通常の DGPS 測位と伝搬遅延量補正後の DGPS 測位とは、類似した結果となった。しかし図 4-29 に見られるように、実際の標準偏差の値は補正後の DGPS 測位結果のほうが改善されている。

3次元基線長(3-D)と各方向の測位誤差との相関係数は、緯度方向は-0.41、経度方向は-0.84、高さ方向は-0.04 となり、通常の DGPS 測位結果の相関係数(表 4-9)と比較して異なる結果が得られた。具体的には、通常の DGPS 測位結果の相関係数は各方向とも正の相関であり、0.87 以上の強い値を示していたのに対して、今回は負の相関であり、緯度方向と高さ方向では強い値を示していない。

これらの結果から、伝搬遅延量補正を行うことで長基線長 DGPS 測位精度を改善できることがわかった。また特に基線長が長くなることによって生じる測位誤差を改善できることがわかった。

#### 4.5 まとめと考察

今回は基準局を固定して、未知点の位置を移動し基線長の変化による DGPS 測位精度への影響を調べた。4.4.1 の実験結果から、DGPS 測位精度は基線長に依存し劣化していくことがわかった。精度劣化の原因としては、基準局の擬似距離補正值を用いても未知点の電離層、対流圏遅延量が完全に相殺せずに擬似距離に残ることであることが 4.4.3 の実験結果からわかった。また電離層、対流圏遅延量の補正を行った場合では、補正しない場合よりも基線長による測位分布の劣化を抑えることができたが、完全に劣化を抑えることができなかった。これは両遅延量の推定が実際の遅延量と完全に一致していないことによるものであると考えられる。

両遅延量はほとんどの場合、衛星仰角が低いほど大きくなる。また同じ衛星であっても基線長が長くなると仰角差が大きくなり、遅延量差が増大すると考えられる。今回の実験はマスク仰角を 10° に固定したが、基準局と移動局の双方で一致する可視衛星数が多くある時間帯は高仰角衛星 4 機使用して DGPS 測位を行うことでも相殺効果の劣化を抑えることができると考えられる。このとき、DOP が大きくなりすぎない衛星配置を選択する必要がある。

海上保安庁の中波ビーコンを利用して実際に DGPS を行う場合を考えると、利用者は自分に一番近い基準局を選択することができるための基線長は最大でも約 100km であると考えられる。今回の結

果からわかるように基線長が 100km 以内であれば相殺効果の劣化が少ないため、精度、確度ともに改善された DGPS 測位結果を得ることができる。測位を実時間(リアルタイム)で行う場合には補正值の伝送遅れの誤差を考える必要がある。また今回のように電子基準点のデータ等を利用する後処理の場合を考えると、電子基準点は日本に 1200 点あり基準点間は約 10km 間隔に設置されているため、基準局を近い位置に決めることができ、DGPS 測位の効果を十分に発揮できる。利用者が基準局を設置する場合も、相殺効果の劣化が起こらないように未知点に近い位置に設置する必要がある。

## 第5章 干渉測位

### 5.1 測位原理

GPS 測位では測位を行うための 2 つのパラメータとして衛星位置と衛星-利用者間の距離を用いる。衛星-利用者間の距離として単独測位や DGPS 測位は擬似距離を使用する。干渉測位は、衛星-利用者間の距離として擬似距離の代わりに搬送波位相(Carrier Phase)を利用する。擬似距離と比較すると搬送波位相の測距精度が高いため、干渉測位は数 mm から数 cm の測位が可能となる。

干渉測位は、座標が既知である固定基準局に対する利用者の相対位置を求める方法が一般的である。原理は、座標が既知である固定基準局で搬送波位相を測定し、同時に利用者側でも搬送波位相を測定する。基準局と利用者側で同じ衛星から測定した搬送波位相の差(行路差)を求めることにより、基準局からの基線ベクトルを求める。基線ベクトルを求めることができれば、利用者の座標は基準局からの相対位置として求めることが可能である。図 5-1 に行路差と基線ベクトルの関係図を示す。基線ベクトルは 3 つの未知数で表され、解くためには 3 個の行路差が必要である。つまり 3 衛星の測定値が観測できれば良いことになるが、単独測位と同様に受信機の時計誤差を消去するためにもう 1 機の衛星が必要となる。

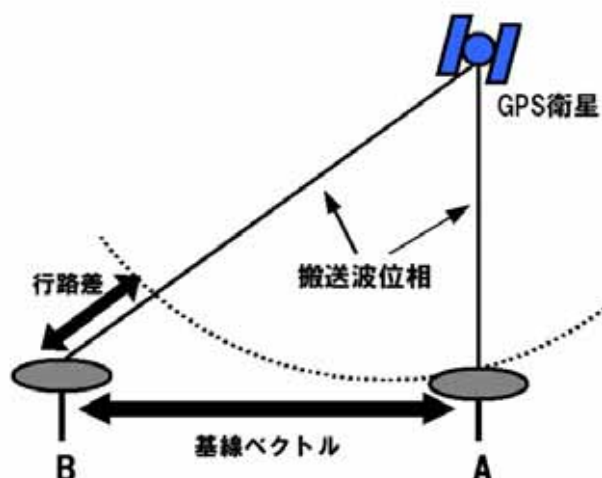


図 5-1 行路差と基線ベクトル

### 5.2 測位計算

#### 5.2.1 搬送波位相と整数値バイアス

搬送波位相は、衛星の C/A コードや航法メッセージ等の情報を GPS 衛星から地上に運ぶ媒体であり、電波である。搬送波自体はサイン波であり情報は無く、変調することによって情報を持たせることができる。GPS の搬送波には L1 帯と L2 帯の 2 種類があり、L1 帯は 1,575.42MHz、L2 帯は 1,227.6MHz の周波数である。それぞれを 1 波長で表すと L1 帯は約 0.19m、L2 帯は約 0.24m である。搬送波位相は 1 波長を 1 サイクル(波数)として表される。搬送波の測距精度は 1 波長の 100 分の 1 であるため、搬送波位相は L1 帯で約 2mm の精度で測定できる。このように波数を少数点以下まで測定した値を搬

送波位相と呼ぶ。GPS 受信機から出力される搬送波位相は、波数を 0.01 サイクルの精度で測定し積算した値である。ここで  $i$  番衛星の L1 帯の搬送波位相  $\phi_{L1}^{(i)}$  (cycle) を式で表現すると、

$$\phi_{L1}^{(i)} = \lambda_{L1}^{-1} (r^{(i)} - I_{L1}^{(i)} + T^{(i)}) + f_{L1} (\delta t_u - \delta t^{(i)}) + N_{L1}^{(i)} + \varepsilon_{L1}^{(i)} \quad (5-1)$$

となる。ここで  $\lambda_{L1}$  は L1 帯の波長(m)、 $r$  は衛星-利用者間の正確な距離(m)、 $I_{L1}$  は L1 帯の電離層遅延量(m)、 $T_{L1}$  は L1 帯の対流圏遅延量(m)、 $f_{L1}$  は L1 帯の周波数(MHz)、 $t_u$  は受信機の時計誤差(s)、

$t$  は衛星の時計誤差(s)、 $N_{L1}$  は L1 帯搬送波の整数値バイアス(cycle)、 $\varepsilon_{L1}$  はマルチパス等の誤差(cycle)である。上付き文字  $i$  の括弧は、次数と衛星番号の区別するためのものである。擬似距離と異なる点は、まず搬送波が電離層を通過するとき、位相速度は見かけ上速くなるため電離層遅延量の符号は負となることである。次にマルチパスの影響が擬似距離の m レベルと比較して、搬送波は cm レベルと小さい。最後に整数値バイアス(Integer Ambiguity)と呼ばれる項の存在である。搬送波位相は整数部(1波長の数)と小数部とで構成されている。小数部は0.01サイクルの精度で正確に測定できることは先ほど述べたが、整数部の絶対値は整数値バイアスのために正確に測定できない。整数値バイアスはその名の通り整数値となるが、衛星ごと、受信機ごとに異なる値を示すため、電離層、対流圏遅延を相殺するように他の測定値を利用して相殺することができない。しかし搬送波を連続的に観測できている期間においては、整数値バイアスは変化しないため、一度決定(Integer Ambiguity Resolution)できると連続的に正確な搬送波位相を得ることができる。サイクルスリップ等の原因で連続観測が中断した場合整数値バイアスは変化するため、もう一度決定しなおす必要がある。

干渉測位計算アルゴリズムは DGPS 測位と同様で単純であるが、整数値バイアスの決定が容易でない。干渉測位にはいろいろな種類があるが、基準局からの基線ベクトルを求めることには相違なく、整数値バイアスの決定方法の違いによる分別である。

## 5.2.2 搬送波位相誤差項の削除

(5-1)式には整数値バイアス以外の誤差項(電離層、衛星時計等)がある。これらの誤差項は DGPS 測位と同様に基準局の測定値等を利用して相殺できる。整数値バイアスの決定、測位精度の改善のために誤差項を相殺したほうがよい。ここでは搬送波位相の誤差項の削除法を記す。

### 5.2.2.1 一重位相差 (Single Difference)

#### ● 受信機間一重位相差

図 5-1 のように、基準局と利用者側の受信機で同時に同じ衛星から測定した搬送波位相の差、つまり行路差を求める方法である。受信機間一重位相差  $\phi_{u-r}^{(i)}$  は、

$$\begin{aligned} \phi_{u-r}^{(i)} &= \phi_u^{(i)} - \phi_r^{(i)} \\ &= \lambda^{-1} \left[ (r_u^{(i)} - r_r^{(i)}) - (I_u^{(i)} - I_r^{(i)}) + (T_u^{(i)} - T_r^{(i)}) \right] + f \left[ (\delta t_u - \delta t_r) - (\delta t^{(i)} - \delta t^{(i)}) \right] \\ &\quad + (N_u^{(i)} - N_r^{(i)}) + (\varepsilon_u^{(i)} - \varepsilon_r^{(i)}) \\ &= \lambda^{-1} (r_{u-r}^{(i)} - I_{u-r}^{(i)} + T_{u-r}^{(i)}) + f \cdot \delta t_{u-r} + N_{u-r}^{(i)} + \varepsilon_{u-r}^{(i)} \end{aligned} \quad (5-2)$$

で表される。ここで添え字の  $u$  は利用者側、 $r$  は基準局を示し、 $u-r$  は利用者側の測定値から基準局の測定値を引いた値を示す。(5-2)式では衛星時計誤差の項が相殺されていることがわかる。受信機間一重位相では衛星時計誤差が消去できる。整数値バイアスは基準局と利用者側の差となるが整数の値となる。

(5-2)式は基線長が短距離である場合、電離層と対流圏の項は同じ衛星であるため相殺できる。(5-2)式から短基線長の受信機間一重位相は、

$$\phi_{u-r}^{(i)} = \lambda^{-1} \cdot r_{u-r}^{(i)} + f \cdot \delta t_{u-r} + N_{u-r}^{(i)} + \varepsilon_{u-r}^{(i)} \quad (5-3)$$

となる。当然のことながら基線長が長距離の場合や電離層の活動が活発である場合は相殺されずに誤差項を消去することはできない。

### ● 衛星間一重位相

図 5-2 のように、1 個の受信機で同時刻に測定した GPS 衛星 2 機の搬送波位相を取った値を衛星間一重位相と言う。例えば利用者側の受信機で  $n$  番衛星と  $m$  番衛星の搬送波位相を測定したとすると、衛星間一重位相  $\phi_u^{(n-m)}$  は、(5-4)式で表される。(5-4)式から衛星間一重位相では受信機の時計誤差の項が相殺できる。

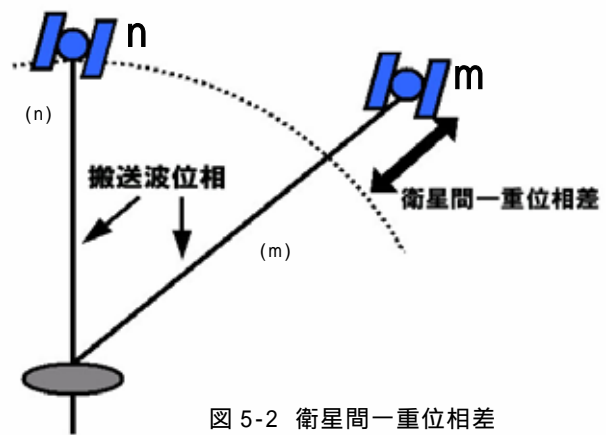


図 5-2 衛星間一重位相

$$\begin{aligned} \phi_u^{(n-m)} &= \phi_u^{(n)} - \phi_u^{(m)} \\ &= \lambda^{-1} \left[ \left( r_u^{(n)} - r_u^{(m)} \right) - \left( I_u^{(n)} - I_u^{(m)} \right) + \left( T_u^{(n)} - T_u^{(m)} \right) \right] + f \left[ \left( \delta t_u - \delta t_u \right) - \left( \delta t^{(n)} - \delta t^{(m)} \right) \right] \\ &\quad + \left( N_u^{(n)} - N_u^{(m)} \right) + \left( \varepsilon_u^{(n)} - \varepsilon_u^{(m)} \right) \\ &= \lambda^{-1} \left( r_u^{(n-m)} - I_u^{(n-m)} + T_u^{(n-m)} \right) + f \cdot \delta t^{(n-m)} + N_u^{(n-m)} + \varepsilon_u^{(n-m)} \end{aligned} \quad (5-4)$$

衛星間一重位相は搬送波位相を測定した衛星が異なるため、電離層、対流圏の項を相殺することはできない。衛星間一重位相も受信機間一重位相と同様に整数値バイアスの項は整数である。

### 5.2.2.2 二重位相 (Double Difference)

どちらの一重位相でも時計誤差を完全に消去することができない。二重位相は衛星時計誤差と受信機時計誤差の両方を理論的に完全に消去できる。二重位相は受信機間一重位相からも衛星間一重位相からも求めることができ、結果は同じである。図 5-3 が示すように 2 地点の観測場所と、それぞれの地点で 2 機の GPS 衛星からの搬送波位相から二重位相  $\phi_{u-r}^{(n-m)}$  は、



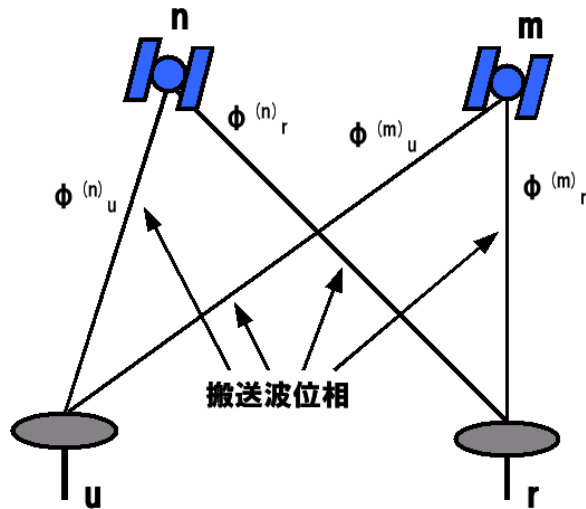


図 5-3 二重位相差

$$\begin{aligned}
 \phi_{u-r}^{(n-m)} &= (\phi_u^{(n)} - \phi_r^{(n)}) - (\phi_u^{(m)} - \phi_r^{(m)}) \\
 &= \lambda^{-1} (r_{u-r}^{(n-m)} - I_{u-r}^{(n-m)} + T_{u-r}^{(n-m)}) + N_{u-r}^{(n-m)} + \varepsilon_{u-r}^{(n-m)}
 \end{aligned}
 \tag{5-5}$$

で表される。ここで(5-5)式は n 番衛星と m 番衛星の受信機間一重位相差を求め、それらの値を差し引いた値である。(5-5)式を並べ替えることにより、利用者側と基準点の衛星間一重位相差の引き算になることがわかる。(5-5)式からは衛星時計誤差と受信機時計誤差が完全に消去され、基線長が短距離であれば電離層、対流圏の項も相殺される。

干渉測位は行路差から基線ベクトルを求めると説明したが、実際の干渉測位には、一重位相差では時計誤差が完全に消去されないために使用しない。二重位相差を行路差に相当する値として測位を行う。また、基線ベクトル、未知点の座標を求めるためには独立した二重位相差が 3 個必要であるため、コードを利用する測位と同様に、最低 4 衛星の測定値が必要である。

測位計算では独立した二重位相差を算出するためにある衛星を基準にする。一般的には衛星仰角の最も高い衛星を基準衛星とする場合が多い。

### 5.2.2.3 線形結合

GPS における線形結合とは、L1 帯と L2 帯の搬送波位相の測定値を二乗や平方根等の項を含まない形で結合し、見かけ上測定された新しい搬送波位相を求めることをいう。線形結合で求められる i 番衛星の新しい搬送波位相  $\phi^{(i)}$  は、

$$\phi^{(i)} = g_1 \cdot \phi_{L1}^{(i)} + g_2 \cdot \phi_{L2}^{(i)}
 \tag{5-6}$$

で表される。ここで  $g_1, g_2$  は任意の数を示している。 $g_1, g_2$  の与え方によって様々な搬送波を算出できる。

$g_1$ 、 $g_2$  にはどのような値を代入してもよいが、大きすぎる値では線形結合で求めた搬送波位相の雑音が増加し、搬送波位相の持つ正確性を失われる。

線形結合された搬送波位相の波長、周波数  $f$  は、

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{g_1 \cdot f_{L1} + g_2 \cdot f_{L2}} \quad (5-7)$$

$$f = g_1 \cdot f_{L1} + g_2 \cdot f_{L2}$$

で表される。次に代表的な線形結合である、ワイドレーン (Wide Lane) を説明する。

### ● ワイドレーン (Wide Lane)

ワイドレーン  $f_w$  は、(5-6)式の  $g_1 = 1$ 、 $g_2 = -1$  として、

$$\phi_w^{(i)} = \phi_{L1}^{(i)} - \phi_{L2}^{(i)} \quad (5-8)$$

と線形結合された搬送波である。波長  $\lambda_w$  と周波数  $f_w$  は(5-7)式から、

$$f_w = f_{L1} - f_{L2} = 1575.42\text{MHz} - 1227.6\text{MHz} = 347.82\text{MHz} \quad (5-9)$$

$$\lambda_w = \frac{c}{f_w} = 86.3\text{cm}$$

となる。ワイドレーンは(5-9)式が示すように  $L1$  帯、 $L2$  帯の搬送波と比較して1波長が長い。ワイドレーンの整数値バイアス  $N_w$  は、

$$N_w = N_{L1} - N_{L2} \quad (5-10)$$

と表される。 $g_1$ 、 $g_2$  ともに整数倍であるため、ワイドレーンの整数値バイアスは整数のみである。また電離層の影響は  $L1$  帯搬送波と比較して約 0.28 倍となる。

### 5.2.3 FLOAT 解アルゴリズム

干渉測位において一番の問題は整数値バイアスの存在である。FLOAT 解アルゴリズムは、この整数値バイアスを未知数の1つと考えて逐次近似計算によって求める方法である。測位計算を繰り返し行い求められる整数値バイアスが実数であることから、求められた座標をフロート解と呼ぶ。ここで時

刻  $t$  における  $i$  番、 $j$  番衛星の位置を  $(x^{(i)}(t), y^{(i)}(t), z^{(i)}(t))$ 、 $(x^{(j)}(t), y^{(j)}(t), z^{(j)}(t))$  とし、基準衛星を  $j = 1$  とする。また基準局、未知点の座標を  $(x_r, y_r, z_r)$ 、 $(x_u, y_u, z_u)$  とする。各衛星と各局における距離は、

$$R_m^{(k)}(t) = \sqrt{(x^{(k)}(t) - x_m)^2 + (y^{(k)}(t) - y_m)^2 + (z^{(k)}(t) - z_m)^2} \quad (5-11)$$

と表される。ここで  $k$  は、 $i, 1$  番衛星を示し、 $m$  は  $r$ (基準局)、 $u$ (未知点)を示している。 $R$  は衛星-アンテナ間の正確な距離である。(5-11)式から二重位相差  $\phi_{u-r}^{(i-1)}$  は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \phi_{u-r}^{(i-1)}(t) &= \{R_u^{(i-1)}(t) - R_r^{(i-1)}(t)\} + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \\ R_u^{(i-1)}(t) &= R_u^{(i)}(t) - R_u^{(1)}(t), \\ R_r^{(i-1)}(t) &= R_r^{(i)}(t) - R_r^{(1)}(t) \end{aligned} \quad (5-12)$$

ここで  $\lambda$  は用いている搬送波の波長(m)を示す。(5-12)式は観測可能な衛星数を  $svn$  とすると「 $svn-1$ 」個作成できる。衛星の位置は衛星軌道情報から計算でき、基準局の座標は既知であるため、未知数は「 $svn-1$ 」個の整数値バイアスと未知点の位置  $(x_u, y_u, z_u)$  の 3 個で計「 $svn+2$ 」となる。作成できる式より未知数の数が多いため、このままでは解くことができない。この問題は連続的に搬送波位相を測定できている間であれば整数値バイアスは変化しない特性を利用することで解決できる。2 つの観測時刻から  $2 \times$  「 $svn-1$ 」個の式を作成することができる。2 つの観測時刻中にサイクルスリップ等による連続測定中断が無ければ、未知数の数は変化しないため、解くことができる。

(5-12)式の既知の値は左辺、未知数を右辺へ移項すると、

$$\lambda \cdot \phi_{u-r}^{(i-1)}(t) + R_r^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \quad (5-13)$$

と書き換えることができる。つまり(左辺 - 右辺)が 0 になるときの各未知数が求めたい解となる。(5-13)式の左辺は既知の値であるので  $Y^{(i-1)}(t)$  としてまとめると、

$$Y^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{u-r}^{(i-1)} \quad (5-14)$$

と書き換えることができる。(5-14)式は二乗や平方根があり、このままでは容易に解くことができない。そこで第 2 章で述べた単独測位計算方法を使用する。未知数を近似値と補正量の和であらわし、式を補正量についての連立 1 次方程式に展開することで容易に未知数を解く方法である。ここで、未知数(未知点の位置座標、整数値バイアス)と補正量の関係は、

$$\begin{aligned}
x_{u,n+1} &= x_{u,n} + \Delta x \\
y_{u,n+1} &= y_{u,n} + \Delta y \\
z_{u,n+1} &= z_{u,n} + \Delta z \\
N_{u-r,n+1}^{(i-1)} &= N_{u-r,n}^{(i-1)} + \Delta N
\end{aligned} \tag{5-14}$$

と表される。ここで添え字  $n$  は逐次計算回数を示し、 $n=0$  の未知数は初期値を示す。 $n$  回目の計算で求められる(5-14)式の  $Y^{(i-1)}(t)$  の近似距離に相当する右辺  $Y^{(i-1)}_n(t)$  は、

$$\begin{aligned}
Y_n^{(i-1)}(t) &= R_{n,u}^{(i-1)}(t) + \lambda \cdot N_{n,u-r}^{(i-1)} \\
&= \left\{ \sqrt{\left(x^{(i)}(t) - x_{n,u}\right)^2 + \left(y^{(i)}(t) - y_{n,u}\right)^2 + \left(z^{(i)}(t) - z_{n,u}\right)^2} \right. \\
&\quad \left. - \sqrt{\left(x^{(1)}(t) - x_{n,u}\right)^2 + \left(y^{(1)}(t) - y_{n,u}\right)^2 + \left(z^{(1)}(t) - z_{n,u}\right)^2} \right\} + \lambda \cdot N_{n,u-r}^{(i-1)}
\end{aligned} \tag{5-15}$$

と表せる。近似距離  $Y^{(i-1)}_n(t)$  と既知の値  $Y^{(i-1)}(t)$  との残差  $Y^{(i-1)}_n(t)$  は、

$$\Delta Y_n^{(i-1)}(t) = Y^{(i-1)}(t) - Y_n^{(i-1)}(t) \tag{5-16}$$

として求められる。 $(x_{n,u}, y_{n,u}, z_{n,u})$  と  $N_{u-r}^{(i-1)}$  を残差  $Y^{(i-1)}_n(t)$  分に相当する分だけ修正すれば、正しい解に近づくことができる。このためには、近似距離  $Y^{(i-1)}_n(t)$  の  $(x_{n,u}, y_{n,u}, z_{n,u})$  と  $N_{u-r}^{(i-1)}$  による偏微分、

$$\begin{aligned}
\alpha_n^{(i-1)}(t) &= \frac{\partial Y_n^{(i-1)}(t)}{\partial x} = - \left( \frac{x^{(i)}(t) - x_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{x^{(1)}(t) - x_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\
\beta_n^{(i-1)}(t) &= \frac{\partial Y_n^{(i-1)}(t)}{\partial y} = - \left( \frac{y^{(i)}(t) - y_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{y^{(1)}(t) - y_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\
\gamma_n^{(i-1)}(t) &= \frac{\partial Y_n^{(i-1)}(t)}{\partial z} = - \left( \frac{z^{(i)}(t) - z_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(i)}(t)} - \frac{z^{(1)}(t) - z_{n,u}}{R_{n,u-r}^{(1)}(t)} \right) \\
1 &= \frac{\partial Y_n^{(i-1)}(t)}{\partial N_{u-r}^{(i-1)}}
\end{aligned} \tag{5-17}$$

を用いる。 $(x_{n,u}, y_{n,u}, z_{n,u})$  を各補正量に置き換えると

$$\Delta Y_n^{(i-1)}(t) = \alpha_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta x + \beta_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta y + \gamma_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta z + \lambda \cdot \Delta N_{u-r}^{(i-1)} \quad (5-18)$$

となり、一次方程式の表現に書き換えることができたので、後は単独測位計算と同様に補正量が収束するまで計算を行う。

FLOAT 解測位計算では、基準時刻 ( $t=0$ ) と観測時刻  $t(t-1)$  の 2 つの時刻で、最低 4 機以上の同じ衛星の組み合わせから算出した測定値を用いるため、可視衛星数を  $(s+1)$  とすると  $2s$  個の(5-18)式を立てることができる。扱いを容易にするため次のような行列を用いる。

$$G = \begin{pmatrix} \alpha_n^{(2-1)}(0) & \beta_n^{(2-1)}(0) & \gamma_n^{(2-1)}(0) & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_n^{(3-1)}(0) & \beta_n^{(3-1)}(0) & \gamma_n^{(3-1)}(0) & 0 & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(0) & \beta_n^{(s-1)}(0) & \gamma_n^{(s-1)}(0) & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \\ \alpha_n^{(2-1)}(t) & \beta_n^{(2-1)}(t) & \gamma_n^{(2-1)}(t) & \lambda & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_n^{(3-1)}(t) & \beta_n^{(3-1)}(t) & \gamma_n^{(3-1)}(t) & 0 & \lambda & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(t) & \beta_n^{(s-1)}(t) & \gamma_n^{(s-1)}(t) & 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda \end{pmatrix}$$

$$\delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_n^{(2-1)}(0) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(0) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(0) \\ \Delta Y_n^{(2-1)}(t) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta N_{u-r}^{(2-1)} \\ \Delta N_{u-r}^{(3-1)} \\ \vdots \\ \Delta N_{u-r}^{(s-1)} \end{pmatrix}$$

したがって、 $2s$  個の(5-18)式の連立一次方程式は、

$$\delta Y = G \cdot \delta X \quad (5-19)$$

で表すことができ、

$$\delta X = (G^T \cdot G)^{-1} \cdot G^T \cdot \delta Y \quad (5-20)$$

と(5-19)式を変形させ各未知数の補正量を算出し、補正量が収束するまで(5-20)式の計算を繰り返し行う。補正量が収束したときの推定値が未知点の座標であり、整数値バイアス(実数)となる。

図 5-4 に上記の FLOAT 解アルゴリズムを用いた測位結果を示す。

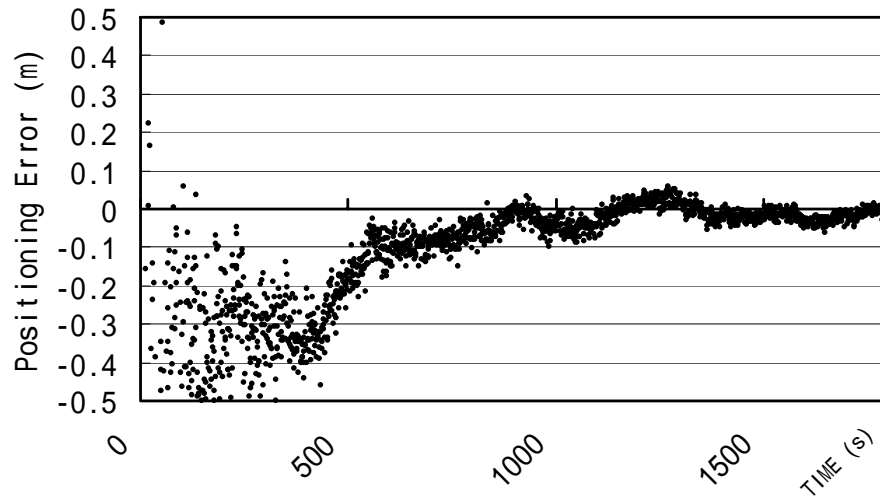


図 5-4 FLOAT 解アルゴリズム測位誤差(高さ方向)

図 5-4 は基線長が約 30m の場合の高さ方向の測位結果誤差である。測位時間の経過とともに測位精度が改善されていく様子が見られる。整数値バイアスがわからないため、干渉測位解は図 5-5 のように多重解となる。多重解の格子は時間変化、つまり衛星位置変化により変形するが、真の解の点(座標)は変化しない。FLOAT 解直後の測位結果が悪いのは、多重解の格子の変化が小さく真の解と誤った解との区別が付きにくいために生じていると考えられる。時間変化が大きくなり誤った解の格子点の差が大きくなると補正量を 1 つに収束させることができるために測位解精度は向上する。

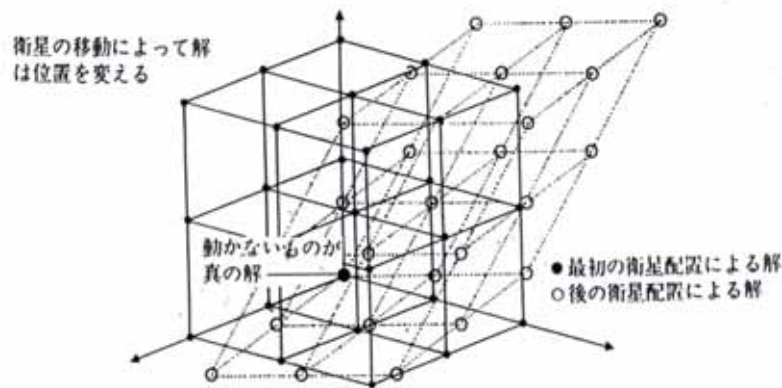


図 5-5 整数値バイアスによる多重解格子点の時間変化

## 5.2.4 FIX 解アルゴリズム

FLOAT 解は、整数値バイアスを実数として求めた。FIX 解とは、整数値バイアスの正しい値を実数ではなく整数(波数)にして求めた測位解のことである。正しい整数値バイアスを求める方法としては、FLOAT 解が収束した時の整数値バイアス(実数)を四捨五入して整数値とする方法がある。また DGPS 測位結果との比較や衛星の組み合わせの変化等による求め方もある。

実際に整数値バイアスを決定することができたならば、観測時刻  $t$  における測定値(最低 4 衛星)の

みで図 5-5 の格子点は真の値だけとなり、測位結果を高精度に求めることができる。(5-13)式において整数値バイアス  $N$  の項が既知の値となり左辺に移項できる。よって(5-14)式は、

$$Y^{(i-1)}(t) = R_u^{(i-1)}(t) \quad (5-21)$$

と書き直すことができる。(5-21)式の線形化を行うと、

$$\Delta Y_n^{(i-1)}(t) = \alpha_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta x + \beta_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta y + \gamma_n^{(i-1)}(t) \cdot \Delta z \quad (5-22)$$

で表される。FIX 解では、観測時刻  $t$  の測定値のみで測位できるため、可視衛星数を  $(s+1)$  機とすると(5-22)式は  $s$  個できる。行列を用いると各行列は、

$$G = \begin{pmatrix} \alpha_n^{(2-1)}(t) & \beta_n^{(2-1)}(t) & \gamma_n^{(2-1)}(t) \\ \alpha_n^{(3-1)}(t) & \beta_n^{(3-1)}(t) & \gamma_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n^{(s-1)}(t) & \beta_n^{(s-1)}(t) & \gamma_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad \Delta Y = \begin{pmatrix} \Delta Y_n^{(2-1)}(t) \\ \Delta Y_n^{(3-1)}(t) \\ \vdots \\ \Delta Y_n^{(s-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix}$$

で表すことができる。したがって FIX 解は上記の行列を(5-20)式に代入し、繰り返し計算を行うことにより求められる。図 5-7 に FIX 解アルゴリズム測位誤差を示す。FLOAT 解と比較して測位開始から測位精度の高い結果が得られている。

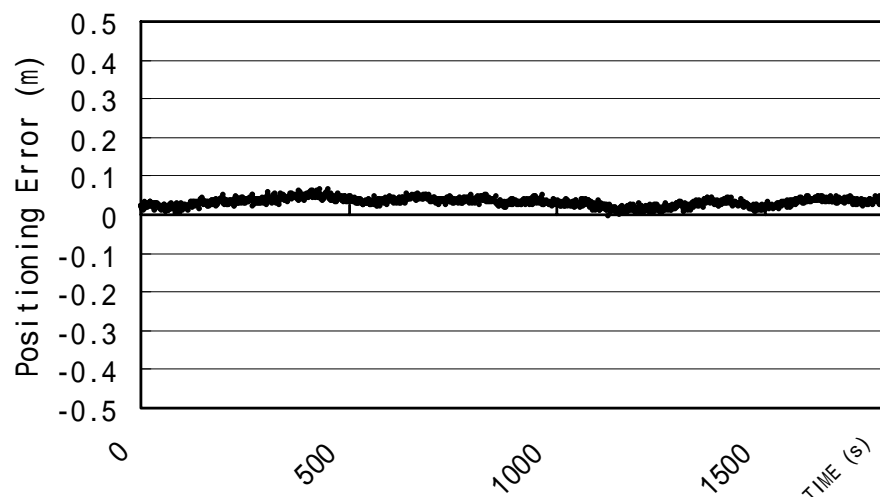


図 5-7 FIX 解アルゴリズム測位誤差(高さ方向)

### 5.3 整数値バイアスの決定

干渉測位において一番の問題点が整数値バイアス決定であることは以前から指摘してきた。FLOAT 解では、長時間連続観測を行うことで整数値バイアスを推定することができる。しかし衛星の組み合わせが長時間等しい状態であることは実際の状況からは考えにくいいため、整数値バイアスを絞り込む時間が取れない可能性がある。ここでは、短期間で整数値バイアスを決定し、測位結果をもとめるアルゴリズムを説明する。

高速に整数値バイアスを解くアルゴリズムは OTF (On The Fly) と呼ばれ、移動中に整数値バイアスを決定する方法として欧米を中止に研究されてきた。一般的な OTF アルゴリズムは、あらかじめ複数の整数値バイアスの候補を設定し、それぞれの候補に関する統計量を検定して、最後まで棄却されなかった候補を整数値バイアスの解とする方法である。本研究の干渉測位はこのアルゴリズムを用いている。

OTF では可視衛星を主衛星と従衛星に分ける。主衛星は可視衛星から DOP の最も小さな 4 衛星で構成される。また主衛星の中で最も仰角の高い衛星を基準衛星とする。従衛星は主衛星の整数値バイアス候補を検定するために必要となる衛星であり、1 衛星以上で構成される。したがって今回の OTF アルゴリズムを用いて整数値バイアスを解くためには最低 5 衛星必要である。

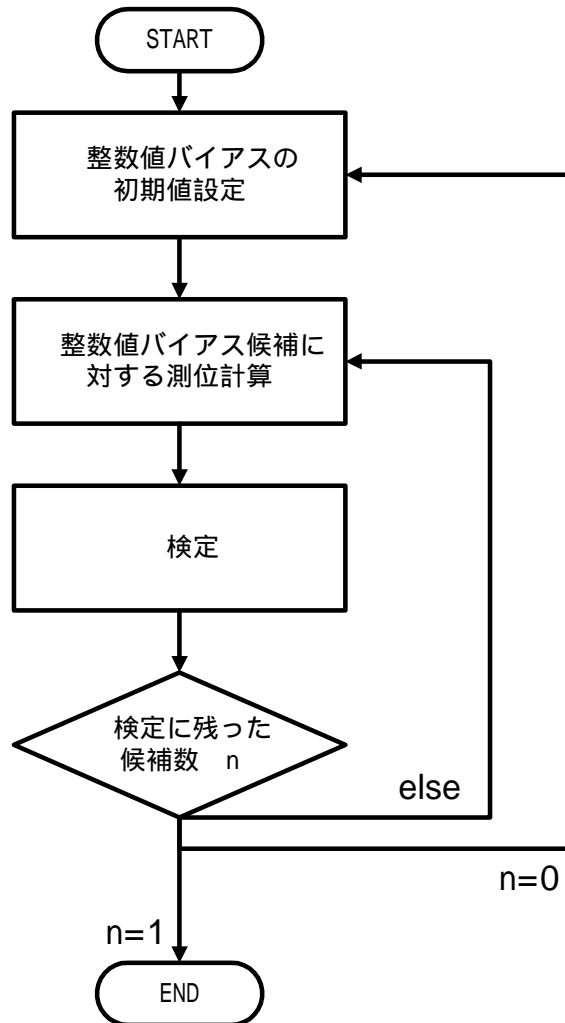


図 5-8 OTF アルゴリズムの流れ図



OTF アルゴリズムの手順を図 5-8 に記す。はじめの手順として 整数値バイアスの初期値設定を行う。整数値バイアスの初期値  $\bar{N}_{u-r}^{(i-1)}$  は、

$$\bar{N}_{u-r}^{(i-1)} = \left( \phi_{u-r}^{(i-1)} - \frac{\rho_{u-r}^{(i-1)}}{\lambda} \right)_{RoundOff} \quad (5-23)$$

で与えられる。ここで  $\phi_{u-r}^{(i-1)}$  は擬似距離の二重差、RoundOff は四捨五入整数化を示す。この  $\bar{N}_{u-r}^{(i-1)}$  は  $\phi_{u-r}^{(i-1)}$  と  $\rho_{u-r}^{(i-1)}$  の測定誤差があるために正確な整数値バイアスではない。正しい整数値バイアス  $N_{u-r}^{(i-1)}$  は  $\bar{N}_{u-r}^{(i-1)}$  を中心とする次の範囲にある。

$$\bar{N}_{u-r}^{(i-1)} - k\sigma \leq N_{u-r}^{(i-1)} \leq \bar{N}_{u-r}^{(i-1)} + k\sigma \quad (5-24)$$

ここで、 $\bar{N}_{u-r}^{(i-1)}$  の初期値推定誤差、 $k$  は 2 または 3 でそれぞれ優位水準 95%、99% に対応する。 $\phi_{u-r}^{(i-1)}$  と  $\rho_{u-r}^{(i-1)}$  の測定誤差  $\sigma$  から、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\phi}^2} \quad (5-25)$$

として与えられる。(5-24)式の範囲と波長を比較して整数値バイアスの候補を設定する。例えば、 $\lambda$  を 50cm とする。 $k=3$ (99%) のとき初期値  $\bar{N}_{u-r}^{(i-1)}$  から、 $\pm 150$ cm の範囲に正しい整数値バイアスが存在する。波長が約 86cm ワイドレーンでは、初期値から  $\pm 2$  サイクル(約 172cm)の範囲に解が存在する。1 衛星に初期値を合わせて計 5 個の候補を設定する。OTF アルゴリズムでは 3 個の二重位相差を用いるため、整数値バイアスの候補数は  $5^3 = 125$  となる。波長が約 19cm の L1 では、初期値から  $\pm 8$  サイクル(約 152cm)の範囲となり、整数値バイアスの候補数は  $17^3 = 4913$  個となる。L1 の整数値バイアスを求める場合、候補数が多いため 1 度ワイドレーンの解を求める。ワイドレーンの解から初期値を設定し候補数を減らす方法を用いる。

次に 整数値バイアス候補に対する測位計算を行う。候補を正しい整数値バイアスとし FIX 解アルゴリズムを用いる。測位計算の説明はここでは省略する。測位計算により求められた測位位置は、各候補により異なるため、図 5-5 の形状となる。

各候補の測位結果に対して 検定を行い、検定から漏れた候補を棄却する。今回用いた検定は観測領域検定と測位領域検定の 2 種類である。

観測領域検定は、従衛星の観測残差の自乗和を計算し、 $\chi^2$  判定を用いて候補の検定を行う。従衛星の観測残差  $v^{(j-1)}$  は、

$$v^{(j-1)} = \left( \phi_{u-r}^{(j-1)} - R_{u-r}^{(j-1)} \right)_{RoundOff} - \left( \phi_{u-r}^{(j-1)} - R_{u-r}^{(j-1)} \right) \quad (5-27)$$

で表される。ここで  $j$  は従衛星の衛星番号を示している。実際の観測領域検定は、次式を満たす候補

を棄却する。

$$v^T C^{-1} v > \chi_{df, 1-\alpha}^2 \quad (5-28)$$

ここで C は推定誤差共分散行列、df は自由度 (可視衛星数 - 主衛星数)、 $\alpha$  は優位水準である。

$\chi_{df, 1-\alpha}^2$  は、df と  $\alpha$  により決まる  $\chi^2$  分布の値である。表 5-1 に  $\chi^2$  分布の値を示す。また推定誤差共分散行列 C は、

$$C = 2\sigma_\phi \begin{pmatrix} 2 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 2 \end{pmatrix} \quad (5-29)$$

表 5-1  $\chi^2$  分布

df \	95%	99%
1	3.8415	6.6349
2	5.9915	9.2103
3	7.8147	11.345
4	9.4877	13.277
5	11.071	15.086

で与えられる。

測定領域検定は、各候補に対して から求められた位置と、DGPS 測位により求められた位置の比較による検定である。仮に検定する候補が正しい整数値バイアスであれば、DGPS 測位結果は、候補に対する測位結果を中心に  $DOP \times \sigma$  の範囲に分布していることになる。したがって測定領域検定は、

$$|X_\rho - X_\phi| > k \cdot DOP \cdot \sigma \quad (5-30)$$

で表され、(5-30)式を満たす候補は棄却される。ここで  $X$  は DGPS 測位結果行列、 $X$  は候補に対する干渉測位結果行列である。 $|\cdot|$  は括弧内の二乗和を示す。3 次元の位置差の検定を行う場合 DOP は GDOP の値をとり、水平方向の位置差で検定を行う場合 DOP は HDOP の値を用いる。

全候補について検定を行い棄却されることなく残った整数値バイアスの候補数が 1 個になれば、その候補を解とする。候補が複数あれば次の観測時刻に移る。検定を通過した候補は候補が 1 個になるまで、を繰り返す。全候補が棄却された場合は、整数値バイアスの初期値設定を再度行う。

OTF アルゴリズムにより整数値バイアスを決定できたなら、基準衛星の変更やサイクルスリップ等の連続測定中断が生じない間、同じ整数値バイアスを用いて干渉測位を行うことができる。また従衛星の(5-27)式の右辺第 1 項とすることができる。

## 第6章 干渉測位実験

### 6.1 はじめに

干渉測位は、測距精度の高い搬送波位相の利用により、数 cm の測位精度を得ることのできる測位法である。測位計算の方法は DGPS 測位における基線解析と同レベルであるが、第 5 章で述べた整数値バイアス決定の問題が追加されるためにアルゴリズムが複雑になる。干渉測位は当初、固定点の測量を行う際に利用されてきたが、高速に整数値バイアス決定ができるアルゴリズム (OTF 等) の考案により、移動体における利用が進んでいる。

干渉測位に用いられる基準局と未知点の測定値 (搬送波位相) で算出される二重位相差は、時計誤差を削除するために行われるが、基線長が短距離であれば、結果的に電離層、対流圏遅延量の項も削除される。しかし、基線長が長くなることで DGPS 測位実験の場合と同様に電離層、対流圏遅延量の相殺できず、二重位相差に残る。

本章では、実際に第 5 章で説明した OTF アルゴリズムを用いて整数値バイアスを決定し、FIX 解アルゴリズムを用いて、基線長が異なる未知点において干渉測位を行い、測位結果への影響がどの程度あるか調査した。

### 6.2 基線長の異なる干渉測位実験

#### 6.2.1 実験概要

基線長の異なる未知点と一箇所に固定した基準局で干渉測位を行い、測位結果を評価する。

まず、図 6-1 のように東京海洋大学航海科実習棟屋上の南側に基準局のアンテナを設置し、基線長の異なる未知点を 5 箇所選択した。各未知点と基準局で使用したアンテナ、受信機を表 6-1 に、基準局と未知点の位置概略図を図 6-2 に、今回測位評価を行う上で基準とした各局に座標と基線長を表 6-2 に示す。図 6-2 の番号は 0 が基準局、～ が未知点番号であり、表 6-1 の番号と対応している。

データ取得日時は 2003 年 12 月 10 日 (水) 午前 11 時 ~ 12 月 11 日 (木) 午前 11 時の 24 時間である。測定データ間隔は 1 秒である。取得したデータは、測距データ (各衛星の擬似距離、搬送波) と衛星軌道情報 (エフェメリス) の 2 点である。測距データは L1 帯と L2 帯の 2 種類の信号から毎秒、衛星軌道情報は更新される毎に取得した。受信マスク仰角は  $5^\circ$  とした。以上の実験条件は未知点、各基準点ともに同様である。取得したデータを RINEX データに変換し、自作プログラムによる後処理で干渉測位を行う。解析に使用した衛星マスク仰角は  $15^\circ$  とした。



図 6-1 基準局アンテナ

整数値バイアス決定のために使用したアルゴリズムは第5章で用いたものである。ワイドレーンとL1帯の搬送波における干渉測位結果の評価を行った。

表 6-1 基準局と未知点の使用道具

	name	受信アンテナ	GPS Receiver
基準局	東京海洋大学 越中島キャンパス 航海科実習棟屋上南側	JAVAD LegAnt2	NovAtel OEM4
未知点	東京海洋大学 越中島キャンパス 航海科実習棟屋上北側	JAVAD LegAnt	NovAtel OEM3
未知点	東京海洋大学 品川キャンパス	NovAtel gps600	NovAtel OEM3
未知点	新宿	NovAtel gps600	NovAtel OEM4
未知点	電子航法研究所	NovAtel gps600	NovAtel OEM4
未知点	防衛大学校	NovAtel gps600	NovAtel OEM4



図 6-2 基準局、未知点位置の概要図

表 6-2 基準局と未知点の基線長と座標

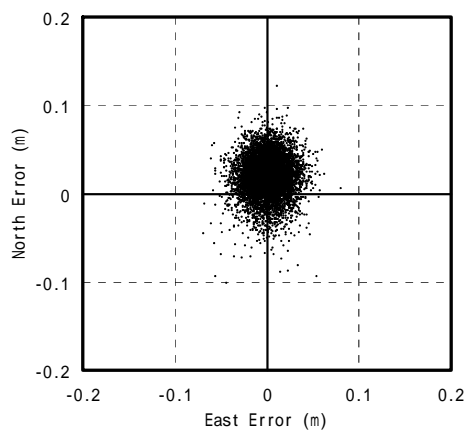
	baseline (km)	x (m)	y (m)	z (m)	latitude (degree)	longitude (degree)	height (m)
基準局	-	-3961915.611	3348989.197	3698205.341	35.66626007	139.79231569	60.241
未知点	0.029	-3961906.840	3348973.009	3698227.962	35.66651583	139.79238970	59.498
未知点	5.959	-3961240.991	3353725.883	3694652.346	35.62687447	139.74757476	57.087
未知点	8.260	-3955598.427	3353638.461	3700795.644	35.69477756	139.70802985	94.750
未知点	20.996	-3947716.153	3364403.122	3699479.354	35.68006254	139.56102360	111.569
未知点	45.788	-3977834.945	3370978.818	3661332.397	35.25774795	139.72070485	136.071

評価の基準となるアンテナ位置は JAVAD 社製の基線解析ソフト Pinnacle を用いた精密測位から求められた位置とした。しかし未知点 だけは精密測位を行うことができなかったため、24 時間の DGPS 測位結果の平均値を真値とした。

## 6.2.2 測位結果

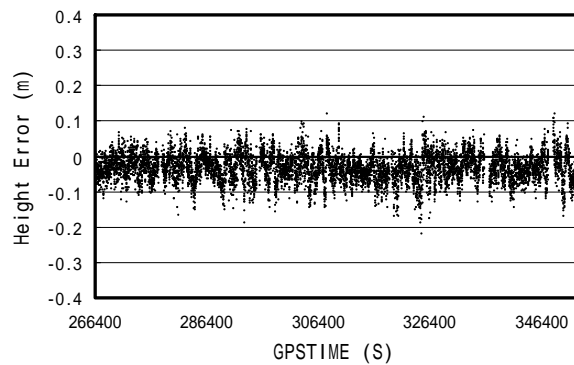
### 6.2.2.1 ワイドレーンによる測位結果

図 6-3 から図 6-7 に未知点 から のワイドレーンを用いた干渉測位結果を示す。図は水平方向誤差を示す A 図と高さ方向誤差を示す B 図から構成されている。A 図では横軸が経度方向の誤差(m)、縦軸が緯度方向の誤差(m)であり、B 図では横軸が GPSTIME(s)、縦軸が高さ方向の誤差(m)を表している。



**A 水平方向測位結果**

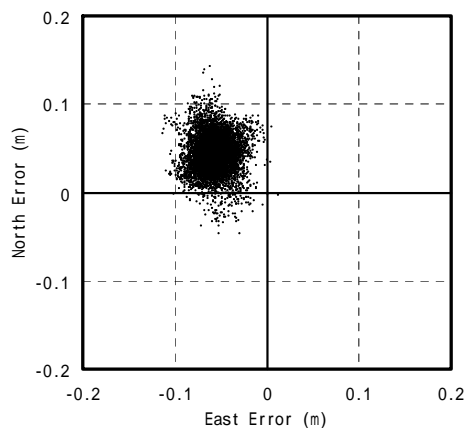
2drms = 5.4cm  
緯度方向測位誤差 = 1.9cm  
経度方向測位誤差 = 0.1cm



**B 高さ方向測位結果**

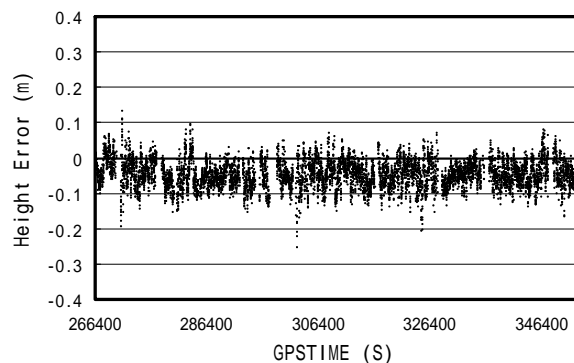
標準偏差 = 3.9cm  
高さ方向測位誤差 = -3.4cm

図 6-3 基線長 29m のワイドレーンによる干渉測位結果



**A 水平方向測位結果**

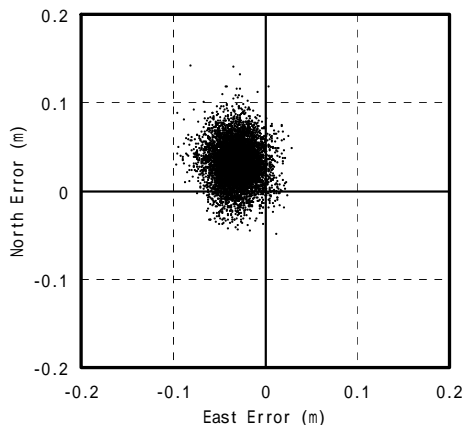
2drms = 5.0cm  
緯度方向測位誤差 = 4.3cm  
経度方向測位誤差 = -5.6cm



**B 高さ方向測位結果**

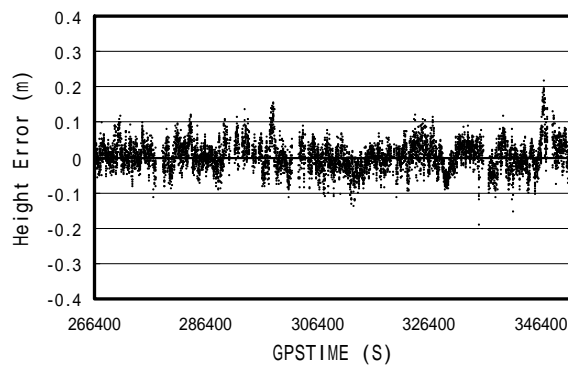
標準偏差 = 3.8cm  
高さ方向測位誤差 = -4.7cm

図 6-4 基線長 5.959km のワイドレーンによる干渉測位結果



**A 水平方向測位結果**

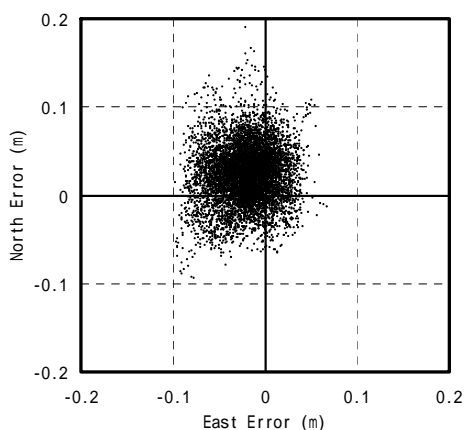
2drms = 5.5cm  
 緯度方向測位誤差 = 3.1cm  
 経度方向測位誤差 = -3.0cm



**B 高さ方向測位結果**

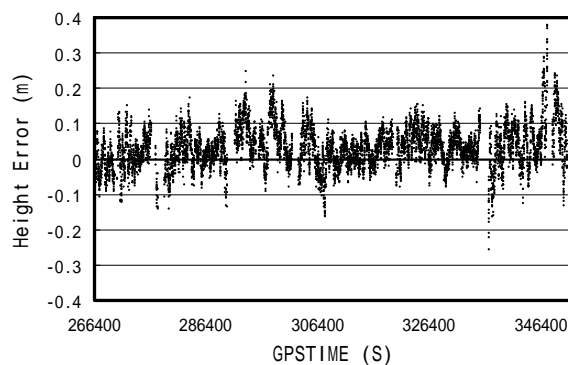
標準偏差 = 4.0cm  
 高さ方向測位誤差 = 0.2cm

図 6-5 基線長 8.26km のワイドレーンによる干涉測位結果



**A 水平方向測位結果**

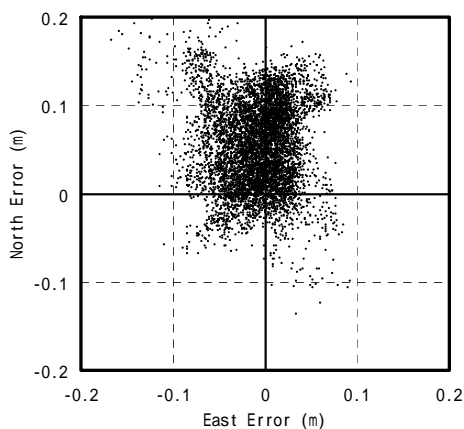
2drms = 8.3cm  
 緯度方向測位誤差 = 2.3cm  
 経度方向測位誤差 = -1.9cm



**B 高さ方向測位結果**

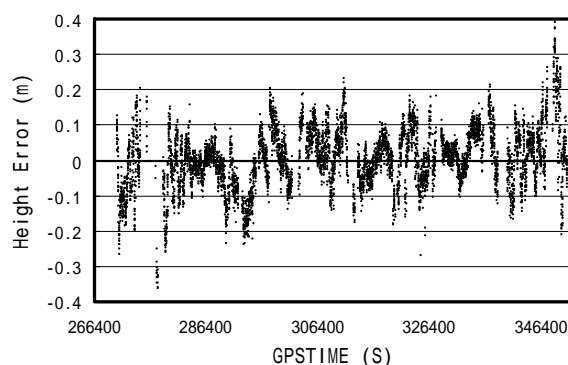
標準偏差 = 5.9cm  
 高さ方向測位誤差 = 3.1cm

図 6-6 基線長 20.996km のワイドレーンによる干涉測位結果



**A 水平方向測位結果**

2drms = 11.9cm  
 緯度方向測位誤差 = 5.5cm  
 経度方向測位誤差 = -0.8cm



**B 高さ方向測位結果**

標準偏差 = 8.5cm  
 高さ方向測位誤差 = 0.4cm

図 6-7 基線長 45.788km のワイドレーンによる干涉測位結果

基線長 29m の測位結果である図 6-3A、B とともに安定した測位分布が得られている。水平方向の 2drms は 5.4cm、高さ方向の標準偏差は 3.9cm である。緯度、経度、高さ方向の測位誤差はそれぞれ 1.9cm、0.1cm、-3.4cm となった。総観測時間と FIX 解が得られた総時間の割合を FIX 率という。基線長 29m 未知点では、総観測時間 86,400 秒中、86,108 秒解が得られ、FIX 率は 99.6%となった。

図 6-4A より、基線長 5.959km の水平方向の測位結果は円状に分布し、安定した精度が得られていることがわかる。水平方向の 2drms は 5cm、高さ方向の標準偏差は 3.8cm となり、基線長 29m の測位結果と同程度の結果が得られた。しかし各方向の測位誤差は、4.3cm、-5.6cm、-4.7cm となり、他 4 個の未知点の結果よりも劣化している。これは基準となる真値が、精密測位で無く DGPS 測位の結果が原因の一つであると考えられる。総観測時間 86,154 秒中、85,832 秒の解が得られた。FIX 率は 99.6% である。

図 6-5A より、基線長 8.26km の水平方向の測位結果は水平方向の 2drms が 5.5cm、図 6-5B から高さ方向の標準偏差は 4cm となった。各方向の測位誤差は、3.1cm、-3cm、0.2cm となった。総観測時間 85,110 秒中、84,366 秒の解が得られた。FIX 率は 99.1% である。

図 6-6A より、基線長 20.996km の水平方向の測位結果は、測位分布が未知点、と 比較して精度が劣化している。図 6-6B から高さ方向にも劣化が見られる。水平方向の 2drms は 8.3cm、高さ方向の標準偏差は 5.9cm となった。各方向の測位誤差は、2.3cm、-1.9cm、3.1cm となった。総観測時間 84,848 秒中、84,274 秒の解が得られた。FIX 率は 99.3% である。

図 6-7A より、基線長 45.788km の水平方向の測位結果は五つの未知点中最も測位分布の劣化が見られる。測位分布は基線長 29m のような高さ方向にも劣化が見られた。水平方向の 2drms は 11.9cm、高さ方向の標準偏差は 8.5cm となった。各方向の測位誤差は、5.5cm、-0.8cm、0.4cm となった。総観測時間 86,400 秒中、77,421 秒の解が得られた。FIX 率は 89.6% である。

各未知点の緯度、経度、高さ方向の標準偏差と 2drms を表 6-3 に示し、各方向の測位誤差を表 6-4 に示す。

表 6-3 ワイドレーン測位結果の標準偏差と 2drms

	baseline (km)	標準偏差 (cm)			2drms (cm)
		latitude	longitude	height	
未知点1	0.029	2.2	1.7	3.9	5.4
未知点2	5.959	2.0	1.5	3.8	5.0
未知点3	8.260	2.2	1.6	4.0	5.5
未知点4	20.996	3.2	2.6	5.9	8.3
未知点5	45.788	4.9	3.3	8.5	11.9

表 6-4 各方向のワイドレーン測位誤差

	baseline (km)	average (cm)		
		latitude	longitude	height
未知点1	0.029	1.9	0.1	-3.4
未知点2	5.959	4.3	-5.6	-4.7
未知点3	8.260	3.1	-3.0	0.2
未知点4	20.996	2.3	-1.9	3.1
未知点5	45.788	5.5	-0.8	0.4

以上の結果から、精度は基線長が長くなる程劣化することがわかる。しかし確度は基線長に依存している様子は見られなかった。

基準局、未知点ともに搬送波の測距精度に大きな変化は無いと考えられるため、測位精度劣化の原因としては基線長が異なるという項目が考えられる。基線長が長くなると測定値に生じる電離層、対流圏伝搬遅延量が相殺されず、測位結果に影響し劣化したと考えられる。

### 6.2.2.2 L1 帯搬送波による測位結果

L1 帯の整数値バイアスの初期値は、ワイドレーンで決定した整数値バイアスから求めることができる。ここでL1 帯、L2 帯の二重位相差  $\phi_{L1}$ 、 $\phi_{L2}$ を

$$\begin{aligned}\phi_{L1} &= \lambda_{L1}^{-1} \cdot r + N_{L1} \\ \phi_{L2} &= \lambda_{L2}^{-1} \cdot r + N_{L2}\end{aligned}\tag{6-1}$$

と表す。(6-1)式は二重位相差に整数値バイアスだけが存在し、電離層、対流圏伝搬遅延量等は無視する。(6-1)式から、

$$N_{L1} - \frac{\lambda_{L2}}{\lambda_{L1}} N_{L2} = \phi_{L1} - \frac{\lambda_{L2}}{\lambda_{L1}} \phi_{L2}\tag{6-2}$$

となる。ここでワイドレーンの整数値バイアス  $N_w$  は、

$$N_w = N_{L1} - N_{L2}\tag{6-3}$$

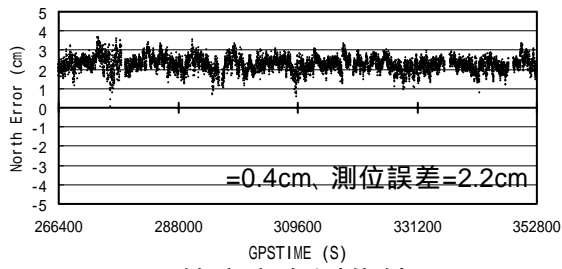
であるから、(6-2)式は、

$$N_{L1} = \left( \frac{\lambda_{L2}}{\lambda_{L1}} - 1 \right)^{-1} \left( \frac{\lambda_{L2}}{\lambda_{L1}} N_w - \phi_{L1} + \frac{\lambda_{L2}}{\lambda_{L1}} \phi_{L2} \right)\tag{6-4}$$

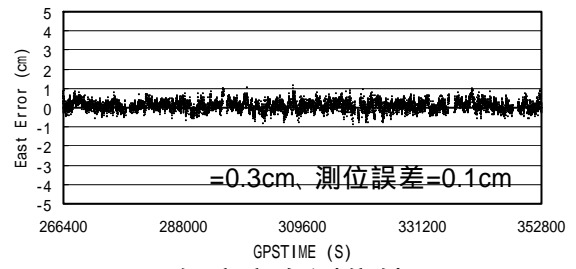
となり、L1 の整数値バイアスの初期値を設定できる。(6-4)式は実数となるため四捨五入を行い、値を整数にする必要がある。また(6-4)式は正確な整数値バイアスでないため、OTF アルゴリズムにより求める必要がある。

図6-8から図6-12に未知点 から のL1 帯を用いた干渉測位結果を示す。A 図は緯度方向誤差、B 図は経度方向誤差、C 図は高さ方向誤差を示し、縦軸が各方向の測位誤差(cm)、横軸が GPSTIME(s)である。

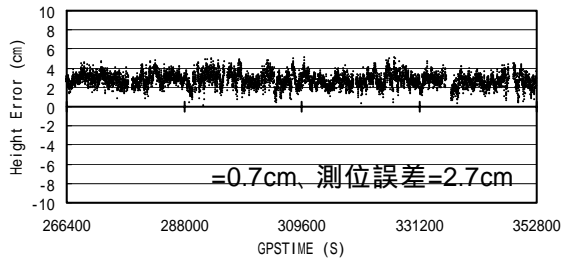




A 緯度方向測位結果



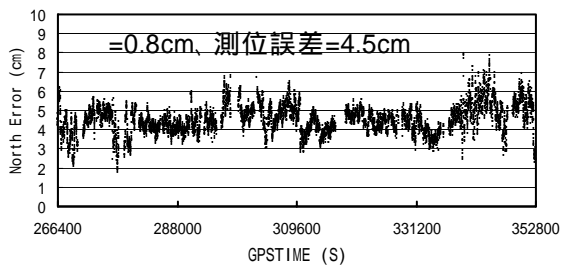
B 経度方向測位結果



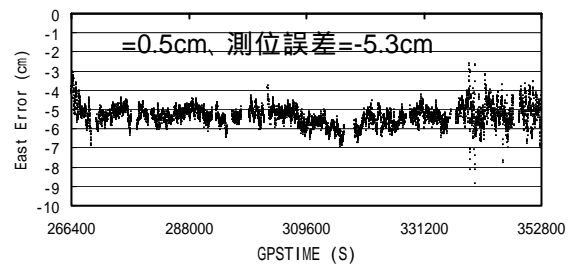
C 高さ方向測位結果

水平方向 2drms=0.9cm

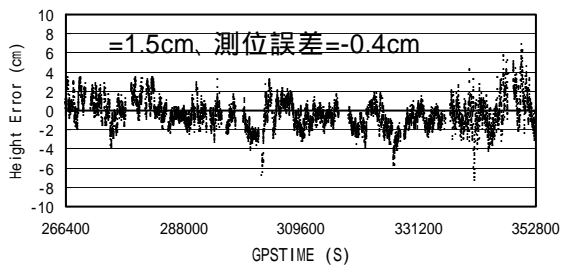
図 6-8 基線長 29m の L1 帯による干渉測位結果



A 緯度方向測位結果



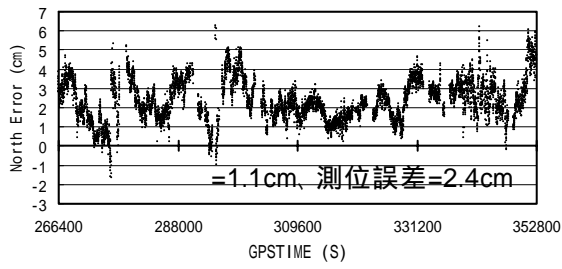
B 経度方向測位結果



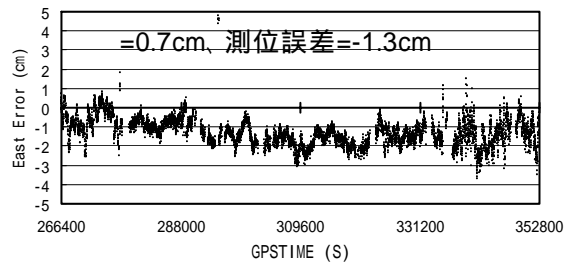
C 高さ方向測位結果

水平方向 2drms=1.8cm

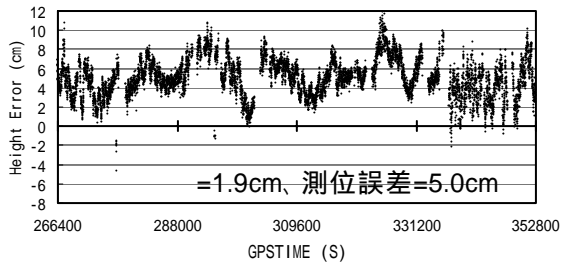
図 6-9 基線長 5.959km の L1 帯による干渉測位結果



A 緯度方向測位結果



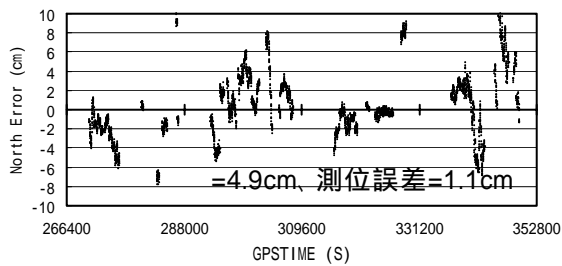
B 経度方向測位結果



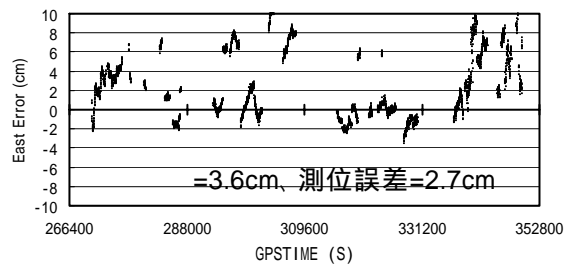
C 高さ方向測位結果

水平方向 2drms=2.6cm

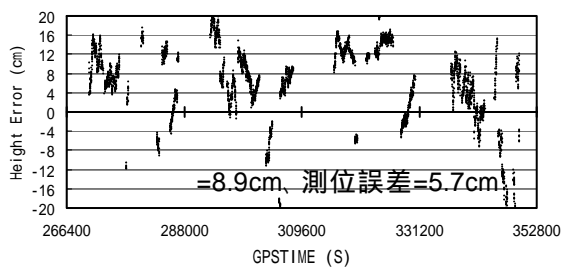
図 6-10 基線長 8.26km の L1 帯による干渉測位結果



A 緯度方向測位結果



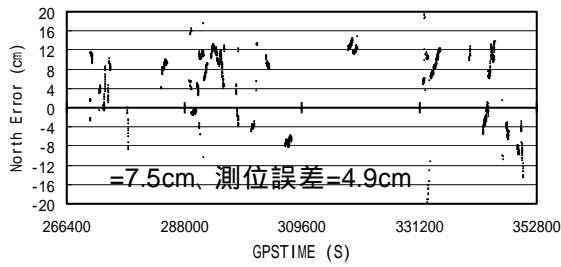
B 経度方向測位結果



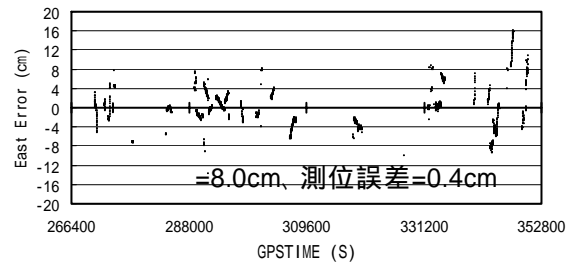
C 高さ方向測位結果

水平方向 2drms=12.1cm

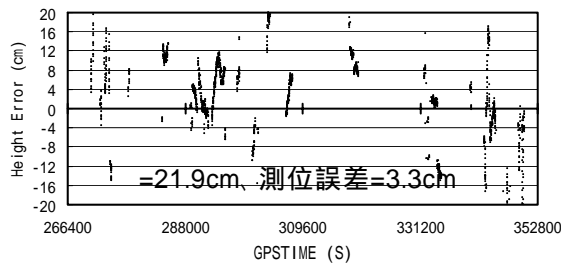
図 6-11 基線長 20.996km の L1 帯による干渉測位結果



A 緯度方向測位結果



B 経度方向測位結果



C 高さ方向測位結果

水平方向 2drms=21.9cm

図 6-12 基線長 45.788km の L1 帯による干渉測位結果

図 6-8 から基線長 29m の測位結果は、水平方向の 2drms が 0.9cm、高さ方向の標準偏差は、0.7cm となった。各方向の測位誤差は、2.2cm、0.1cm、2.7cm である。また FIX 率は、総観測時間 86,400 秒の内 85,999 秒の解を得ることができ、99.5%である。

図 6-9 から基線長 5.959km の測位結果は、水平方向の 2drms が 1.8cm、高さ方向の標準偏差は、1.5cm となった。各方向の測位誤差は、4.5cm、-5.3cm、-0.4cm である。また FIX 率は、総観測時間 86,154 秒の内 82,524 秒の解を得ることができ、95.8%である。

図 6-10 から基線長 8.26km の測位結果は、水平方向の 2drms が 2.6cm、高さ方向の標準偏差は、1.9cm となった。各方向の測位誤差は、2.4cm、-1.3cm、-5cm である。また FIX 率は、総観測時間 85,110 秒の内 80,456 秒の解を求めることができ、94.5%である。

以上の結果より、基線長の変化によって測位結果の劣化が生じることがわかった。未知点、の標準偏差と水平方向の 2drms を表 6-5、各方向の測位誤差を表 6-6 に示す。

表 6-5 各方向の標準偏差と水平方向の 2drms

	baseline (km)	標準偏差 (cm)			2drms (cm)
		latitude	longitude	height	
未知点1	0.029	0.4	0.3	0.7	0.9
未知点2	5.959	0.8	0.5	1.5	1.8
未知点3	8.260	1.1	0.7	1.9	2.6

図 6-6 各方向の測位誤差

	baseline (km)	average (cm)		
		latitude	longitude	height
未知点1	0.029	2.2	0.1	2.7
未知点2	5.959	4.5	-5.3	-0.4
未知点3	8.260	2.4	-1.3	5.0

基線長が 10km 以内の図 6-8、図 6-9、図 6-10 では、ワイドレーンの測位結果と比較して約 2 分の 1 以上精度の向上が見られる。しかし図 6-11 の基線長 20.996km と図 6-12 の基線長 45.788km の未知点における測位結果は、連続的に安定した解を求めることができていない。また図 6-12C において、GPSTIEM が 271250 秒 ~ 270880 秒までの 370 秒間に高さ方向の測位誤差が、25cm 以上変動している。このような急激な測位結果の変動が、図 6-11、図 6-12 の多く時間で見られる。今回の実験は全て固定点であるため、これらの測位結果が誤りであると考えられる。電離層、対流圏伝搬遅延量はゆっくりと変化する遅延量であるため、測位計算に使用する全整数値バイアスが正確に決定できたなら、測位結果は図 6-11、図 6-12 のようにはならない。未知点 1 では、総観測時間 84,848 秒の内 46,333 秒の座標が求まり、FIX 率は 54.6%となった。未知点 2 では、総観測時間 86,400 秒の内 21,962 秒の座標が求まり、FIX 率 25.4%となった。OTF アルゴリズムで整数値バイアスを決定する際、誤った候補が最後の一つとなり、図 6-11、図 6-12 の測位結果が算出されたと考えられる。

### 6.3 干渉測位における電離層伝搬遅延の影響

6.2 の実験結果から、干渉測位において基線長の変化により測位精度は劣化することがわかった。また、L1 帯の搬送波を用いた測位においては基線長 20.996km、45.788km の未知点では正しい整数値バイアスを決定できず、誤った測位解を求める結果となった。基線長が長くなると、二重位相差に電離層、対流圏伝搬遅延誤差の影響が生じる。ここでは特に電離層伝搬遅延の影響について述べる。電離層伝搬遅延が二周波を用いることで、精度の良い推定を行えることに対して、対流圏伝搬遅延は推定がモデルでしか行うことができないため、本研究では評価しない。

表 6-2 の各局の位置と計算から求めた衛星位置を用い、衛星と各局間の正確な距離をピタゴラスの定理より求める。求めた距離を二重位相差の(5-5)式の搬送波位相と入れ替えて、

$$\lambda^{-1} \cdot R_{u-r}^{(i-1)} = \lambda^{-1} \cdot (R_u^i - R_r^i) - \lambda^{-1} \cdot (R_u^1 - R_r^1) \quad (6-5)$$

と表現する。ここで右辺側の R は、アンテナ位置と衛星との正確な距離(m)、左辺側の R は正確な距離から求められた二重差(m)である。(6-5)式は(5-5)式の  $\lambda^{-1} \cdot r_{u-r}^{(i-1)}$  に相当する値である。(5-5)式から(6-5)式を引くと、

$$\Delta D^{(i-1)} = \lambda^{-1} \cdot (-I_{u-r}^{(i-1)} + T_{u-r}^{(i-1)}) + N_{u-r}^{(i-1)} + \varepsilon_{u-r}^{(i-1)} \quad (6-6)$$

と表される。ここで D は、本研究において残差と定義し、単位はサイクル(一波長)とする。(6-6)式の整数値バイアス N は基本的に一定値であるため、残差 D の時間変化による値は電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延、マルチパス等の項 だけとなる。

今回は(6-6)式の電離層伝搬遅延  $I_{u-r}^{(i-1)}$  を L1 帯と L2 帯の二周波から推定し、残差 D を比較する。(6-6)式の電離層伝搬遅延  $I_{u-r}^{(i-1)}$  を  $I_{ono}$  と定義し、 $I_{ono}(\text{cycle})$  は、

$$I_{ono}^{(i-1)} = \lambda^{-1} \cdot \left\{ (I_u^{(i)} - I_r^{(i)}) - (I_u^{(1)} - I_r^{(1)}) \right\} \quad (6-7)$$

として導出する。ここで  $I(\text{m})$  は L1 帯と L2 帯のコードと搬送波の測定値から推定された電離層伝搬遅延量、上付き文字は衛星番号、下付き文字は基準局と未知点の識別記号である。

6.2 の実験において、基準衛星が 1 時間変化しない時間(GPSTIME266,400 秒 ~ 269,999 秒までの 3,600 秒)を用いて評価を行う。評価に使用した衛星は基準局において、仰角が 50° 以上である 16 番衛星、仰角が 30° ~ 45° である 2 番衛星、仰角が 17° ~ 32° である 1 番衛星、仰角が 15° ~ 40° である 3 番衛星、40° ~ 17° である 6 番衛星の 5 機である。基準衛星は 25 番である。図 6-13 ~ 図 6-17 に 16 番衛星のワイドレーンにおける残差 D と  $I_{ono}$  の値を基線長ごとに示す。また 16 番衛星の L1 帯搬送波位相における評価を図 6-18 ~ 図 6-22 に示す。残差 D、 $I_{ono}$  の値ともに整数値バイアスを含んでいるため、各値の平均を 0 として評価する。横軸は平均値からの誤差を示し、単位はサイクルである。縦軸は GPSTIME を示し、単位は秒である。ワイドレーンと L1 帯搬送波位相の一波長が異なることに注意する必要がある。

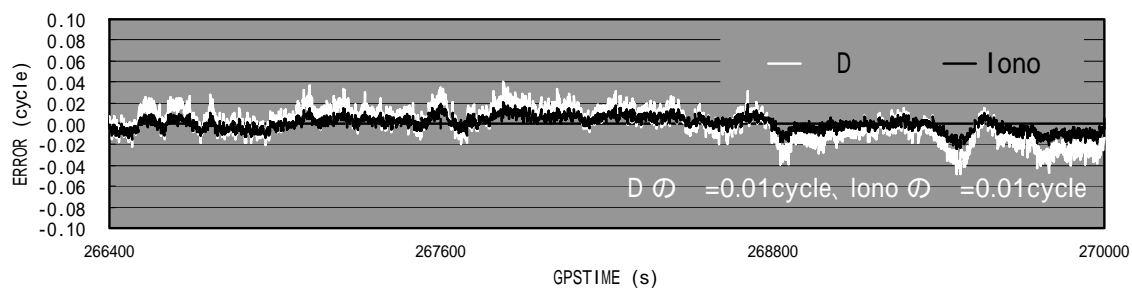


図 6-13 ワイドレーンによる基線長 29m の残差 D と Iono の時間変化

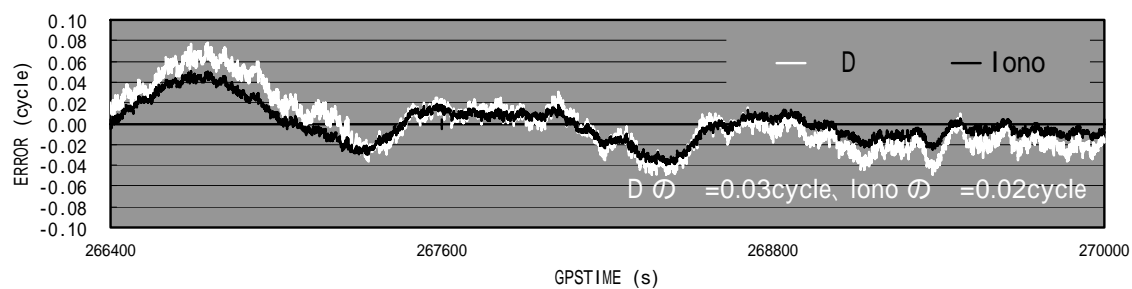


図 6-14 ワイドレーンによる基線長 5.959km の残差 D と Iono の時間変化

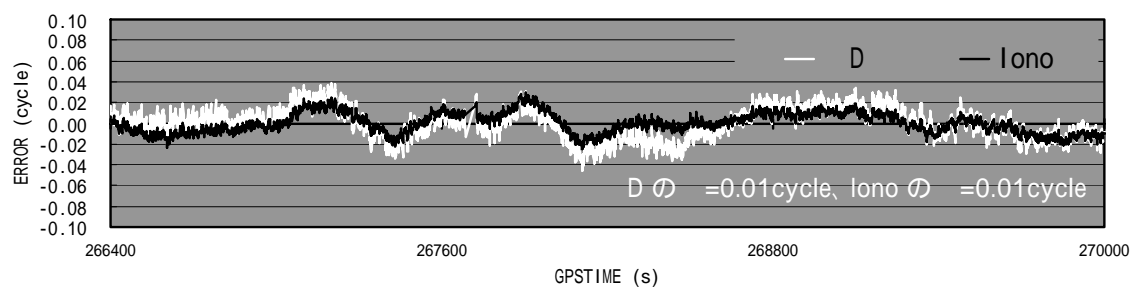


図 6-15 ワイドレーンによる基線長 8.26km の残差 D と Iono の時間変化

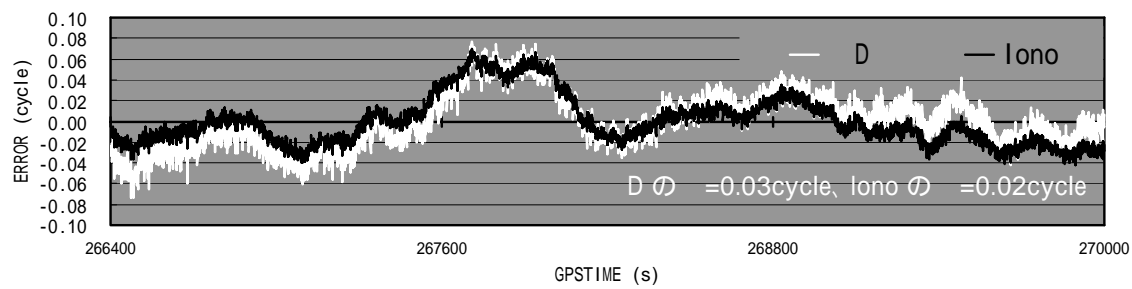


図 6-16 ワイドレーンによる基線長 20.996km の残差 D と Iono の時間変化

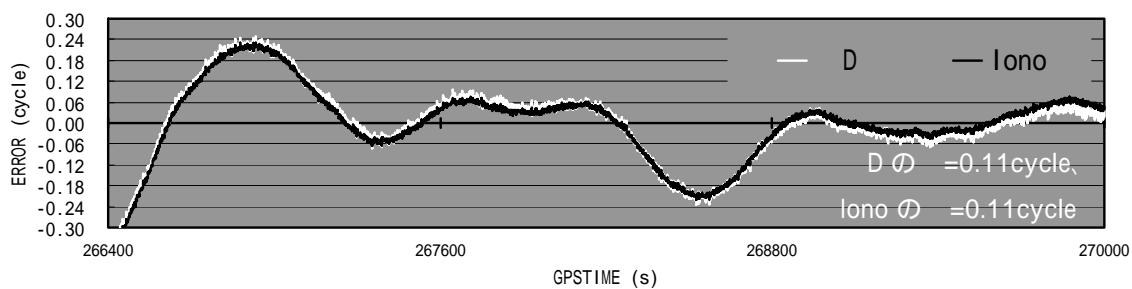


図 6-17 ワイドレーンによる基線長 45.788km の残差 D と Iono の時間変化

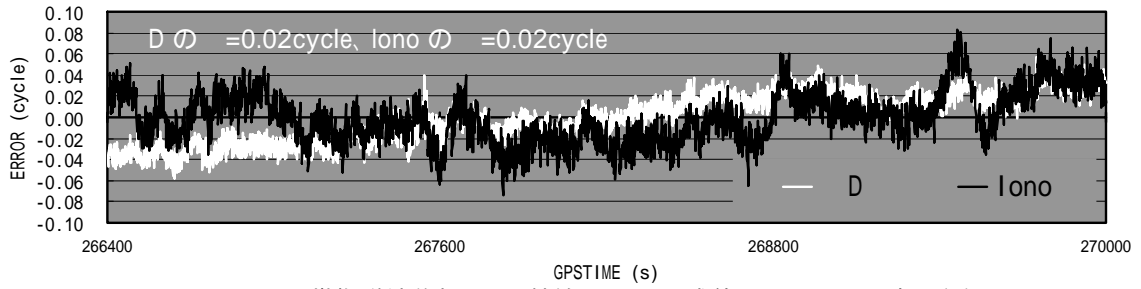


図 6-18 L1 帯搬送波位相による基線長 29m の残差 D と Iono の時間変化

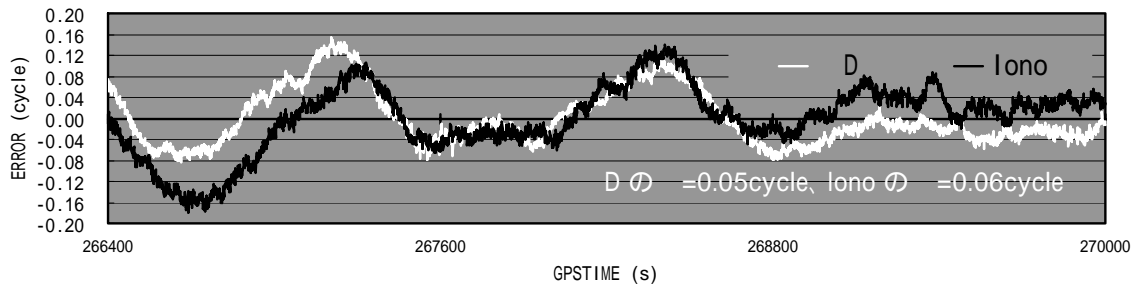


図 6-19 L1 帯搬送波位相による基線長 5.959km の残差 D と Iono の時間変化

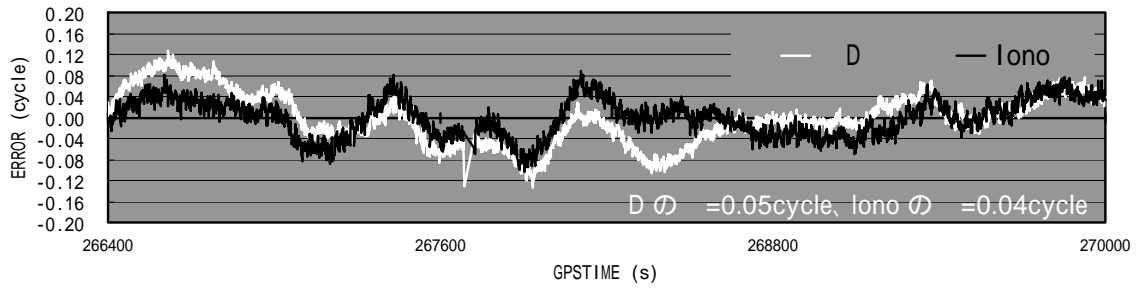


図 6-20 L1 帯搬送波位相による基線長 8.26km の残差 D と Iono の時間変化

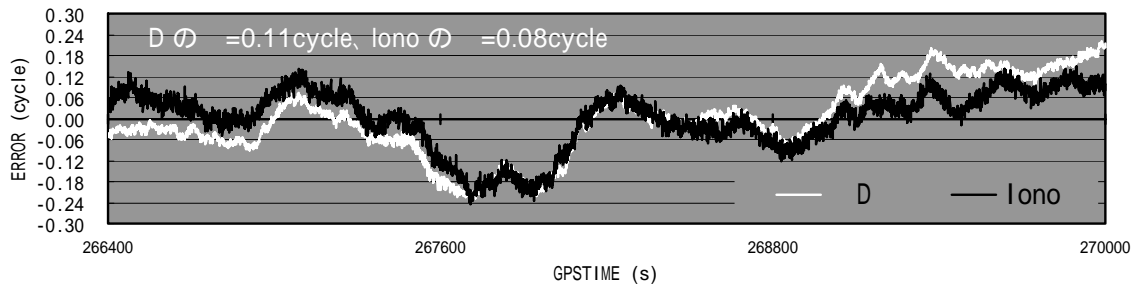


図 6-21 L1 帯搬送波位相による基線長 20.996km の残差 D と Iono の時間変化

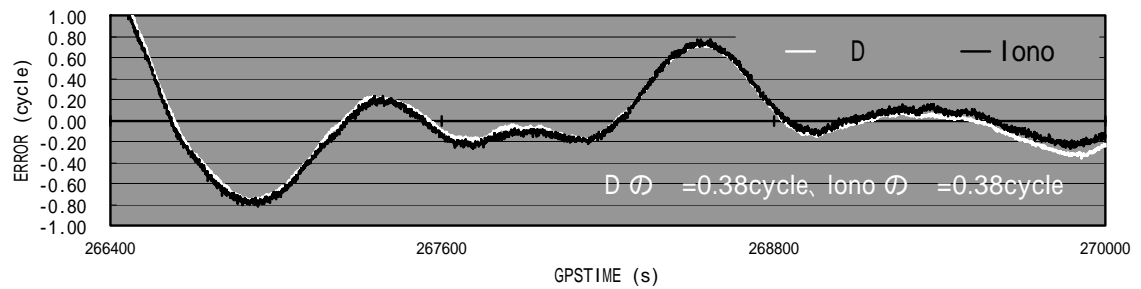


図 6-22 L1 帯搬送波位相による基線長 45.788km の残差 D と Iono の時間変化

図 6-13～図 6-17 までのワイドレーンの比較から、残差  $D$  と  $\text{lono}$  の時間変化傾向がよく類似していることがわかる。図 6-13 の基線長 29m は各値とも平均値からの誤差は小さく、 $\pm 0.05$  サイクル(約 4.3cm)を超えることが無かった。一方、図 6-17 の基線長 45.788km では各値とも平均値からの誤差が大きく、観測開始時刻では 0.3 サイクル(約 25.8cm)を超える誤差がある。

図 6-18～図 6-22 までの L1 帯搬送波位相の比較から、残差と  $\text{lono}$  との時間変化の傾向が類似しているが、ワイドレーンと比較すると各値の差は大きい。図 6-13 の基線長 29m は他の図と比較して平均値に近い値を示し、評価を行った時間帯で  $\pm 0.1$  サイクル(約 1.9cm)を超えることが無かった。図 6-22 の基線長 45.788km では 1 サイクル以上の誤差を示す時間があり、平均値からの誤差が大きい。

ワイドレーンと L1 帯搬送波位相において、残差の変動の主要な原因が電離層伝搬遅延量の変動であることがわかった。

ワイドレーンと L1 帯搬送波位相とを比較すると、cm 単位では L1 帯搬送波位相の誤差が小さいが、本研究で用いた OTF アルゴリズムでは、観測領域検定をサイクル単位で行う。残差の変動が小さいほど安定した検定を行うことができる。L1 帯搬送波位相のように残差の変動が激しいと、正しい整数値バイアスの候補が検定で棄却される確率が高くなり、6.2 の実験のように正しい解を求められないと考えられる。

表 6-7 に比較した 5 衛星のワイドレーンの残差  $D$ 、と表 6-8 にワイドレーンの  $\text{lono}$  の標準偏差を示す。表 6-9 に比較した 5 衛星の L1 帯搬送波位相の残差  $D$ 、と表 6-10 に L1 帯搬送波位相の  $\text{lono}$  の標準偏差を示す。

表 6-7 ワイドレーン二重位相差の残差の標準偏差

	baseline (km)	D(cycle)				
		prn = 16	prn = 6	prn = 3	prn = 2	prn = 1
未知点1	0.029	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03
未知点2	5.959	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
未知点3	8.260	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02
未知点4	20.996	0.03	0.04	0.06	0.04	0.05
未知点5	45.788	0.11	0.09	0.20	0.11	0.09

表 6-8 ワイドレーン二重位相差の  $\text{lono}$  の標準偏差

	baseline (km)	lono(cycle)				
		prn = 16	prn = 6	prn = 3	prn = 2	prn = 1
未知点1	0.029	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02
未知点2	5.959	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
未知点3	8.260	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
未知点4	20.996	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
未知点5	45.788	0.11	0.09	0.22	0.11	0.08



表 6-9 L1 帯搬送波位相二重位相差の残差の標準偏差

	baseline (km)	D (cycle)				
		prn = 16	prn = 6	prn = 3	prn = 2	prn = 1
未知点1	0.029	0.02	0.05	0.02	0.02	0.02
未知点2	5.959	0.05	0.04	0.08	0.05	0.07
未知点3	8.260	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05
未知点4	20.996	0.11	0.08	0.14	0.12	0.13
未知点5	45.788	0.38	0.29	0.67	0.37	0.38

表 6-10 L1 帯搬送波位相二重位相差の電離層伝搬遅延量の標準偏差

	baseline (km)	Iono (cycle)				
		prn = 16	prn = 6	prn = 3	prn = 2	prn = 1
未知点1	0.029	0.02	0.05	0.05	0.04	0.06
未知点2	5.959	0.06	0.06	0.09	0.05	0.06
未知点3	8.260	0.04	0.07	0.06	0.05	0.05
未知点4	20.996	0.08	0.10	0.12	0.11	0.11
未知点5	45.788	0.38	0.30	0.71	0.38	0.28

表全体から、残差と Iono の双方とも基線長が長くなるにつれて、標準偏差の劣化が大きくなる。ワイドレーンと L1 帯搬送波位相をサイクル単位で比較すると、評価に使用した全衛星で L1 帯搬送波位相の標準偏差劣化が大きくなる。ワイドレーンの電離層伝搬遅延量の影響は、L1 帯搬送波位相への影響を 1 とすると、約 0.28 倍になるといわれている。実際に今回の実験において、使用した 5 衛星の電離層伝搬遅延量の平均値をワイドレーンと L1 帯搬送波位相で比較すると、全ての未知点でワイドレーンは L1 帯搬送波位相の約 0.28 倍となった。

#### 6.4 まとめと考察

基準局を固定し、基線長を 29m ~ 45.788km まで変化させた 5 つの未知点で干渉測位を行い、基線長が長くなることによる測位結果への影響を調べた。

L1 帯と L2 帯の線形結合により算出したワイドレーンでは、FIX 率の低下が見られたが、基線長 45.788km の未知点においても整数値バイアスの決定を正しく行うことができ、正しい測位結果を得ることができた。L1 帯の一波長だけで干渉測位を行った場合は、基線長 20.988km 以上の未知点では正しい測位解を連続して求めることができなかった。また基線長が長くなるにつれて、測位精度はワイドレーン、L1 帯搬送波位相のいずれも劣化することがわかった。測位精度劣化の主となる原因が、基準局と未知点における電離層伝搬遅延量の違いが増加するためであることがわかった。この差の増加は、測位精度だけでなく、整数値バイアス決定に対しても影響を与えることがわかった。

今回の結果より、電離層伝搬遅延量を取り除くことで基線長が長くなっても干渉測位を行うことができると考えられる。搬送波位相から電離層伝搬遅延量の影響を削除する線形結合としてイオンフリー結合と呼ばれる結合がある。この結合は電離層の影響を受けない利点があるが、一般的に整数値バイアスが実数となり、バイアスの決定が困難という欠点がある。整数値バイアスが実数になるために

OTF アルゴリズムの観測領域検定を用いることができず、求められる測位解は信頼性が低いと考えられる。

今回の実験のように、基準局と未知点の1対1での干渉測位は短基線長の条件でのみ精度の高い測位解を得られるが、中基線長、長基線長の条件では測位精度の劣化を改善することは困難である。この問題を解決する方法として、仮想基準点方式と呼ばれる測位方式がある。この方式は未知点から遠く離れた複数の基準局の観測データをもとに、未知点の近くに基準局があるかのような観測データを作り出す技術である。このデータを用いて未知点の干渉測位を行うと、短基線の干渉測位を行うことと等しくなり、測位結果に電離層の影響が生じることは無い。DGPS 測位では基準局からの補正データを受け取るだけで測位結果の改善が行えたが、仮想基準点方式を利用する場合は未知点の概略位置を、仮想基準局データを作成する施設に伝えなければならず、基準局と未知点間に専用回線等のインターフェイスを必要とする。

## 第7章 結論

### 7.1 本論文のまとめ

本研究では、基線長変化による DGPS 測位と干渉測位の測位精度への影響を調査した。ここでは各章で得られた結果を要約する。

第4章では、DGPS 測位についての測位精度実験を6日分を行った。基準局を固定し、基線長が主に緯度方向に変化するように複数の未知点を選択した。まず擬似距離補正方式により測位計算を行った結果、基線長 14.167km の未知点では、水平方向の 2drms が 1.025m、緯度方向の測位誤差は 0.048m であった。この結果に対して基線長 867.439km の未知点では、水平方向の 2drms が 2.92m、緯度方向の測位誤差は 2.79m となり、精度では約 3 倍、確度では約 58 倍の劣化が生じた。測位精度劣化が基線長に依存して生じていることを確認した。次に基準局と未知点の双方で、擬似距離に対して電離層と対流圏伝搬遅延量の補正後、擬似距離補正方式により測位計算を行った。基線長 14.167km の未知点の測位結果は、補正を行う前と同程度の測位精度であった。この結果に対して基線長 867.439km の未知点では、水平方向の 2drms が 2.93m、緯度方向の測位誤差は -0.05m となり、精度、確度が共に改善された結果が得られた。この実験結果から、基線長が長距離になることで DGPS 測位精度が劣化する原因が電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延であることを確認し、さらにモデル等で遅延量の補正を基準局と未知点で行うことで、長基線長の DGPS 測位精度を改善できることを確認した。

第6章では、干渉測位についての測位精度実験を行った。DGPS 測位時と同様に、基準局は固定位置とし、未知点は基線長が異なる5箇所を選択した。L1帯とL2帯搬送波から線形結合を用いて算出したワイドレーンとL1帯搬送波のみの2種類の搬送波を用いて解析を行った。まずワイドレーンによる測位結果は、短基線長 29m の未知点における水平方向の 2drms は、5.4cm となった。中基線長 45.788km に未知点における水平方向の 2drms は 11.9cm となり、約 2 倍の測位精度の劣化が得られた。次に L1 帯搬送波による測位結果は、短基線長 29m の未知点における水平方向の 2drms は 0.9cm となったが、中基線長の 45.788km の未知点では整数値バイアスを正確に決定されず、正確な測位解を得ることができなかった。また今回の実験において、L1 帯搬送波による干渉測位解を得られた未知点は、基線長 8.26km の距離までであった。

次にワイドレーンと L1 帯搬送波において、二重位相の残差と二周波から推定した二重位相の電離層伝搬遅延量の値を比較した。両搬送波ともに残差と電離層伝搬遅延量の時刻変化の傾向は類似し、絶対値についても同程度であった。また基線長が長距離になる程、両値の標準偏差が劣化した。この結果より、搬送波の二重位相の揺らぎや測位精度の劣化は電離層伝搬遅延量が主な原因であることを確認した。ワイドレーンと L1 帯搬送波とを比較すると、波長を単位とすると L1 帯搬送波の標準偏差が大きかった。今回の干渉測位計算において整数値バイアスの決定法は OTF アルゴリズムである。OTF の観測領域検定では、二重位相の残差が最小になる整数値バイアスの候補を解とする。中基線長 20.996km と 45.788km の未知点で L1 帯搬送波の干渉測位が正確に行うことができない原因として、残差の変動が激しく、整数値バイアスを正確に決定できないことであることを確認した。

## 謝辞

本研究の製作にあたり、東京海洋大学情報通信工学室の安田明生教授に心から深く感謝申し上げます。安田教授の指導があったおかげで、修士論文を書き上げることができました。また研究以外にたくさんの知識を吸収させていただき、今日の私の成長があると思います。

測位計算プログラミング、研究方針についての様々な助言を頂きました東京海洋大学情報通信工学室の久保信明助手に感謝申し上げます。

東京海洋大学の川村雅志技官には、日々の生活、シンポジウムにおいて様々な助言をいただき、成長できました。感謝申し上げます。

干渉測位実験のデータ取得の際、急な申し出でもかかわらずデータ取得を快諾してくださった、東京海洋大学の樊春明助手、防衛大学校の浪江宏宗助手、茨城工業高等専門学校岡本修助手、電子航法研究所の齊藤眞二氏、測位衛星技術株式会社の齊藤浩治氏に心から感謝申し上げます。

最後に東京海洋大学情報通信工学研究室のOB 諸氏、学生諸君に心から感謝申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

1. 安田明生、「GPS シンポジウム 2001」、社団法人日本航海学会 GPS 研究会、pp.193-pp.239、2001
2. 酒井丈泰、「2003 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GPS/GNSS」、東京海洋大学開示交通共同研究センター、pp.57-pp.140、2003
3. 土屋淳・辻宏道、「新・GPS 測量の基礎」、社団法人日本測量協会、2002
4. 辻井利昭・村田正秋・張替正敏、「Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and Flight Test Evaluation」、科学技術庁航空宇宙技術研究所、1998
5. 浪江宏宗、「DGPSおよびRTK-GPSの実用化に関する研究」、東京商船大学大学院、pp.7-pp.28、2000
6. 久保信明、「二重位相差を利用した測位についての補足」、<http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/20030718.pdf>、2003
7. 富永貴樹、「RTK-GPS 測位計算アルゴリズム FLOORT 解-」、<http://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/takaki/RTK-001.pdf>、2003
8. 岡本伸也・久保信明・安田明生、「長基線 DGPS における測位精度について」、第 20 回センシングフォーラム資料、pp.123-pp.127、2003
9. 富永貴樹、「長基線 DGPS 測位における電離層遅延の影響」、東京商船大学卒業論文、pp.15-pp.17、2002
10. Pratap Misra and Per Enge、「GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals, Measurements, and Performance」、Ganga-Jamuna Press、Chapter 4-Chapter 6、2001
11. 長沢工、「天体の位置計算」、他人書館、pp.173-pp.181、1987