

平成 19 年度

卒業論文

高感度 GPS 受信機の  
キャリアスムージングに関する研究

東京海洋大学

海事システム工学科 情報コース

学籍番号 0421045

氏名 仁禮和男

指導教官 久保信明 准教授

# 目次

## 1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	研究背景と目的	2

## 2章 GPS測位の基礎理論

2.1	GPS概要	3
2.2	観測モデル	5
2.3	位置推定	6
2.4	測位手法	9
2.4.1	単独測位	9
2.4.2	DGPS測位	11
2.4.3	相対測位	12

## 3章 高感度GPS受信機のけるキャリアスムージング

3.1	はじめに	13
3.2	キャリアスムージング	14
3.2.1	ハッチフィルタ	14
3.2.2	キャリアスムージングの効果	15
3.2.3	高感度GPS受信機におけるキャリアスムージング	16
3.3	スムージングした擬似距離2重差を利用した相対測位	20
3.3.1	擬似距離1重差	20
3.3.2	擬似距離2重差	22
3.3.3	擬似距離2重差を利用した相対測位実験	23
3.3.3.1	実験概要	23
3.3.3.2	実験結果	24
3.3.3.3	まとめと考察	25

## 4章 サイクルスリップ検知

4.1	はじめに	26
4.2	サイクルスリップ検知手法	27
4.2.1	擬似距離と搬送波の差を用いた検知手法	27
4.2.2	ドップラー周波数を利用した検知手法	27
4.2.3	搬送波位相の時刻間3重差を利用した検知手法	27

4 . 3	サイクルスリップ検知実験-----	28
4 . 3 . 2	実験概要-----	28
4 . 3 . 2	実験結果-----	29
4 . 3 . 3	まとめと考察-----	34
5 章	総括	
5 . 1	まとめ-----	35
5 . 2	今後の課題-----	35
謝辞-----		36
参考文献-----		37

# 第 1 章

## 1.1 はじめに

GPS(Gloval Positioning System;全世界的測位システム)は、人工衛星による 3 次元位置決定のためのシステムである。1970 年代初頭、米国国防総省 DOD ( Department of Defence ) により地球上で時間と場所を問わず実時間の連続測位が可能なシステムを目指し開発された。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 月には正式運用開始宣言がなされた。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変わり、本格的な完成がなされたのは 1995 年である。2000 年 5 月 2 日 13 時(JST)まで SA( Selective Availability ) と呼ばれる測位制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。現在では SA は解除され、GPS 測位の精度は受信機、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、日本においても準天頂衛星の運用が開始された。

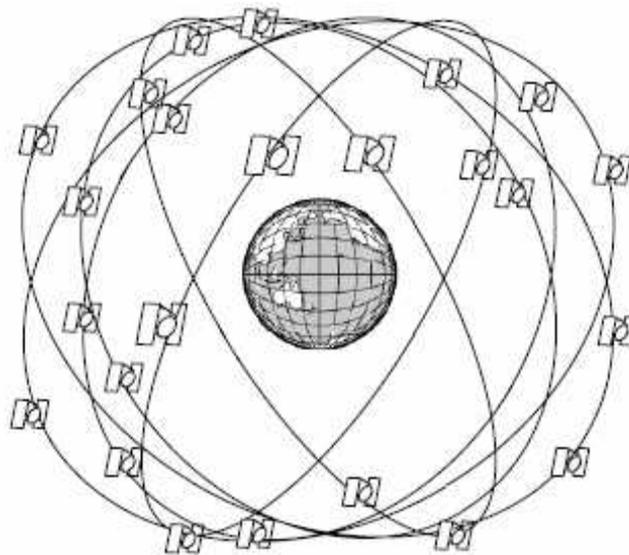


図 1-1 : GPS 衛星軌道概念図

## 1.2 研究背景と目的

GPS 測位の方法はさまざまな種類が存在する。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る。そのほかには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 程度の精度が利用される工事測量や、現在では航空機の離着陸時の位置計算等にも利用されている。今回、擬似距離測定値による GPS 相対測位に着目した。

擬似距離測定値による GPS 相対測位において、測位精度向上の為に、キャリアスムージングと呼ばれる搬送波位相測定値を利用した擬似距離測定値のスムージング手法が使用される事がある。しかし、1 周波観測値のみが得られる高感度 GPS 受信機を用いる際、最も一般的な擬似距離補正值(PRC)を使用した相対測位が効果的に利用できない場合がある。それは、擬似距離・搬送波それぞれの時刻が一致していない事から、うまくスムージングされない事に起因すると考えられる。その解決策として、2 重差と呼ばれる観測量を使用する相対測位が最も有効であると考えられる。しかし、2 重差を使用する場合でも、サイクルスリップと呼ばれる搬送波位相測定値の飛びが測位精度を劣化させる問題があり、サイクルスリップの検知・修復は必要不可欠であると言える。

そこで、本研究では、測位精度を劣化させるサイクルスリップの正確な検知を目的とし、1 周波観測値のみでのサイクルスリップの検出手法として知られるいくつかの手法について評価した。

## 2 章 GPS 測位の基礎理論

### 2.1 GPS 概要

GPS は地上の管理システム（制御部）と衛星（宇宙部）と利用者の受信機で構成される。利用者は衛星が送信する電波を受信することにより位置を測定する。位置の測定は実時間で行える上、利用者数にも制限はない。衛星は高度約 2 万キロメートル、傾斜角約 55 度、店間隔 60 度の 6 軌道を周る周回衛星である。各軌道に衛星を 4 機ずつ投入し、24 衛星で運用されているが、現在は 27 衛星が作動している。衛星の周回周期は約 11 時間 56 分 4 秒毎でその 2 倍の周期で同じ衛星の配置が上空に現れることとなり、1 年後の同じ場所、時刻において同じ配置に戻るようになる。実際には、軌道が随時変更されており決まっていなくても、衛星を捉えるのに必要とする程度の制度であれば、1 ヶ月程前の軌道情報で予測できる。衛星の軌道と位置は、2m以下の精度で管理されている。衛星自体かなり大きいので、電波を送信している衛星が描く軌道を管理する必要がある。今は 2 時間間隔で更新される高い精度を持った起動情報を各衛星が 12.5 分の周期で放送している。地上には数箇所の管制システムを設置し、衛星の軌道を高い精度で管理している。

各衛星は 10.23MHz の基準発信機を持っており、その 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地球全体に向けて発信している。全衛星が同一の周波数を持ち、C/A コードと P(Y)コードとともに衛星ごとに互いに異なるゴールドコードと呼ばれる擬似ランダム雑音（PRN：Pseudo Random Noise）で変調されている。民間利用者に許されているのは L1 にのみ載せられた C/A コードによる測位で、SPS（Standard Positioning Service）と呼ばれている。P(Y)コードによる測位は PPS（Precise Positioning Service）と呼ばれるが、これは米軍関係者のみが使用可能である。衛星からコードに載せて送信される航法データは衛星軌道情報（ephemeris）、衛星時計の情報、電離層補正データ、他の衛星の位置情報（almanac）等である。

衛星の軌道要素などには WGS84（World Geodetic System）の測地系が用いられている。WGS84 は米国の（DMA：Defense Mapping Agency）が、米国と世界各国が測定した色々な測量結果を用いて 1984 年に決定した世界規模の測地系である。表 2 - 1 に GPS 衛星の諸元を示す。GPS では GPS タイムと称する固有の時刻が管理され、この時刻の下に運用されている。各衛星には  $10^{-13}$  の安定性を持つセシウム原子時計と、幾分精度が劣る予備のルビジウム原子時計が各々 2 基搭載されている。この原子時計の時刻は地上の管制システムで管理し、補正情報を高精度軌道情報と同様に対応衛星から放送している。GPS タイムは 1 秒単位で、1 週間でゼロに戻り、週数は 10 ビットで計数されている。従って、1024 週でゼロに戻る。世界の標準時刻としては UTC（協定世界時：Coordinated Universal Time）が知られているが、これとの違いも管理されている。また衛星の時計が刻む時刻の進みが、衛星

位置の重力ポテンシャルの違いで生ずる相対論的効果で変化し、この変化も含めた時刻補正情報が管理されている。そして、これらの情報は航法データとして送信される。

表 2 - 1 : GPS 衛星の主要諸元

衛星個数	4個 × 6軌道面
衛星設計寿命	7.5年
軌道半径	26.561 k m
周回周期	12恒星時間
軌道傾斜角	55 °
送信電力	L1 : C/A code : 約26W、P code : 約13W
	L2 : P code : 約4W
搬送波周波数	L1 : 1 , 575.42MH z ( 10.23MHz × 154 )
	L2 : 1 , 227.6MH z ( 10.23MHz × 120 )
測距信号	C/A code : L1で送信
	P code : L1,L2で送信
地上受信電力(仰角 5 ° 以上)	L1 : C/A code > - 160dBW, P code > - 163dBW
	L2 : P code > - 166dBW
単独測位精度	C/A code : 約100m ( 2drms : SA on )
	(SPS) : 約15m ( 2drms : SA off )
時刻同期	C/A code : 約340ns ( SA on )
	(SPS) : 約20ns ( SA off )

## 2.2 観測モデル

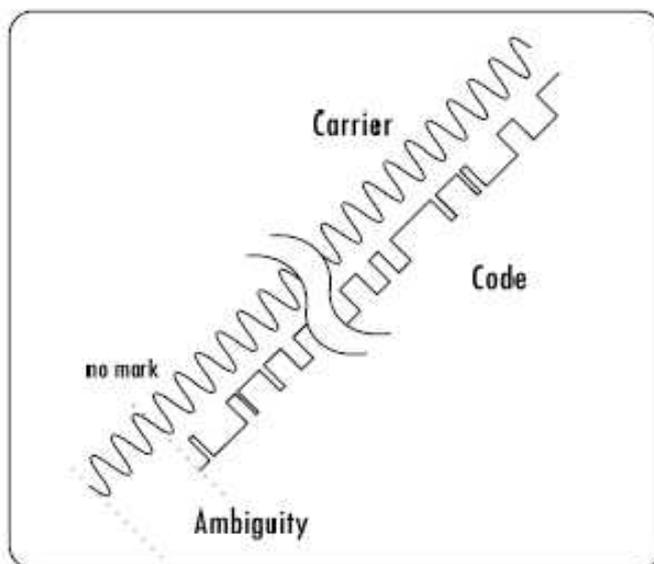


図 2-1 : GPS 信号におけるコード擬似距離と搬送波位相

GPS の測位信号によって得られる測定値は 2 つあり、擬似距離 (pseudo-range) と搬送波位相 (carrier phase) と呼ばれる。図 2-1 に測定値の概念図を示す。擬似距離は GPS 受信機から生成される最も基本的な測定値で、衛星から送信された PRN (pseudo-random noise) コードの受信時刻から伝播時間を求め、光速を乗算したものと定義される。擬似距離  $P$  の観測モデルは、以下のように表すことができる。

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + I_i + T + \varepsilon_{Pi} \quad (2-1)$$

ここで	:	衛星とアンテナ間の幾何学的距離 (m)
$C$	:	光速 (m/sec)
$d t$	:	受信機時計誤差 (sec)
$dT$	:	衛星時計誤差 (sec)
$I$	:	電離層遅延量 (m)
$T$	:	対流圏遅延量 (m)
$\varepsilon_p$	:	擬似距離の観測ノイズ (m)

である。なお、 $\varepsilon_p$  にはマルチパス誤差を含めることとし、添え字の  $i$  は GPS の周波数帯を表している。マルチパス波は天空の開けていない、つまり建物の多い都市部で多く、擬似

距離の大きな誤差要因となっている。現在（2007年1月）GPS衛星はL1、L2帯と呼ばれる2周波の搬送波を用いて信号を送信しており、今後は新たなコードや帯域で多周波数での運用が計画されている。一般のGPS受信機では、L1帯のC/Aコードのみを利用することが多いが、測量用受信機等の高価なものには2周波を受信できるものもある。搬送波位相は擬似距離と比べ、その測距能力の高さからしばしば測量などの精密測位（cmの精度）に利用されている。搬送波位相とは、受信機内で検出されたドップラー周波数の積算である。搬送波位相の観測モデルは以下のように表すことができる。

$$\lambda_i \cdot \Phi_i = \rho + c(dt - dT) - I_i + T + \lambda_i N_i + \varepsilon_{\Phi_i} \quad (2-2)$$

ここで、 $\lambda_i$ は周波数帯の波長（m）、 $\Phi_i$ は搬送波位相数（cycle）である。 $N_i$ は搬送波位相の持つバイアスであり、本稿では整数不定性（Ambiguity）として扱うが、これは厳密には実数である。搬送波位相の2重差をとることで、はじめて整数値になるので注意が必要である。搬送波位相には、電波が一時的に遮断される等の理由でAmbiguityが新しい値になり、搬送波位相値がジャンプすることがある。これをサイクルスリップと呼び、精密測位をするにはこのスリップの検出及び修正が必要である。一般に擬似距離の観測ノイズは数10cmであるのに対し、搬送波位相のそれは数mm程度である。また、測位コードや波長の違いはあるが、L1帯に比べて送信電力の低さよりL2の方は観測ノイズが若干大きいといった特徴がある。

### 2.3 位置推定

GPSの位置推定の手法として主に用いられるものに最小二乗法がある。最小二乗法とは、観測値と観測モデルから得られた理論値との差すなわち観測値に含まれる誤差の二乗和が最小になるようにモデルのパラメータを決定する手法のことである。最小二乗法は、観測誤差が正規分布に従っているとき最尤推定となる。

未知パラメータを $x$ 、観測量を $z$ とし、 $x$ と $z$ に以下の関係式が成り立つとする。

$$z = Hx + \varepsilon \quad (2-3)$$

ここで、 $H$ は観測モデルによる未知パラメータへの係数を表した計画行列、 $\varepsilon$ は観測誤差である。これを観測方程式と呼び、誤差の二乗和 $f$ は以下の式で表せる。

$$\begin{aligned}
f &= \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \cdots + \varepsilon_n^2 \\
&= \varepsilon^T \varepsilon \\
&= (z - Hx)^T (z - Hx) \\
&= z^T z - 2z^T Hx + x^T (H^T H)x
\end{aligned} \tag{2-4}$$

$f$  を最小値にするため、上式を  $x$  で偏微分して極値を求めると以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
\frac{\partial f}{\partial x} &= -2z^T H + 2x^T (H^T H) = 0 \\
z^T (H^T H) &= z^T H
\end{aligned} \tag{2-5}$$

上式の両辺に転置行列をとり、展開すると、

$$H^T Hx = H^T z \tag{2-6}$$

これを正規方程式と呼び、 $x$  について解くと、

$$x = (H^T H)^{-1} H^T z \tag{2-7}$$

と最小二乗解が得られる。一般の数値計算では、正規方程式を介して解くほうが実行時間が速いが、数値演算上の誤差が大きい。従って実用上は、QR 分解などを使用して最適化しているようである。GPS 測位では、観測モデルが非線形であるため、未知数である三次元座標の近似解が与えられることを仮定し、その周りで観測モデルを線形化して解く。観測モデルを  $h(x)$ 、 $x$  の近似解を  $x_0$  とすると、

$$\begin{aligned}
z &= h(x) + \varepsilon \\
&= h(x_0) + H(x - x_0) + \varepsilon
\end{aligned}
\tag{2-8}$$

と表せるので、未知パラメータ  $x$  の最小二乗推定値  $\hat{x}$  は以下のように求められる。

$$\hat{x} = x_0 + (H^T W H)^{-1} H^T W (z - h(x_0))
\tag{2-9}$$

ここで、計画行列  $H$ 、重み行列  $W$  は以下のように表せる。

$$\begin{aligned}
H &= \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \\
W &= \text{diag}(\sigma_1^{-2}, \sigma_2^{-2}, \dots, \sigma_n^{-2}, )
\end{aligned}
\tag{2-10}$$

$\sigma_i$  は観測  $i$  の観測誤差標準偏差であり、ここでは各観測間に相関がないことを仮定している。最小二乗推定値  $\hat{x}$  の共分散行列  $P$  は次のように求めることができる。

$$P = (H^T W H)^{-1}
\tag{2-11}$$

非線形を扱う最小二乗法では初期の近似解  $x_0$  の精度が悪い場合、推定値  $\hat{x}$  を再度近似解として逐次近似計算で解を収束させる必要がある。これを Gauss-Newton 法と呼ぶ。

## 2.4 測位手法

### 2.4.1 単独測位

GPS 衛星による単独測位は、GPS のもっとも基本的な利用方法であり、全世界で、宇宙、航空、海上、地上(地中と水中は無理であるが)のどこでも、随時、1 秒またはそれ以下の時間に現在地を知ることができる技術で、単純な原理である。GPS では、WGS - 84 座標系により、緯度、経度および高さが計算されるようになっている。

GPS による測位は、利用者と衛星間の距離を測定することによって行う。宇宙空間における人工衛星 3 個のそれぞれの位置が分かっているならば測位が可能となる。図 2-2 のように、衛星上の原子時計によって正確なタイミングで発信されている測位用の符号 C/A コードまたは P コードが受信機に到達するまでにどれだけ時間がかかったかを測定して求める。理想的な場合として、もしも受信機時計が衛星時計と完全に同期していれば、その所要時間(伝搬時間)がわかる。

しかしながら、受信機時計と衛星時計を完全に同期させることはほとんど不可能である。それは、衛星時計は原子時計と搭載し、正確に時刻を刻むのに対し、受信機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。この受信機内の時計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。実際の場合、図 2-3 で記したように、受信機時計によってコードの到達時間を計算して形式的に距離を求める。これによって得られた距離は時間誤差と真の距離との和で、この距離のことを擬似距離(Pseudo range)という。この擬似距離の問題から、実際の単独測位を行う際、3 機の衛星

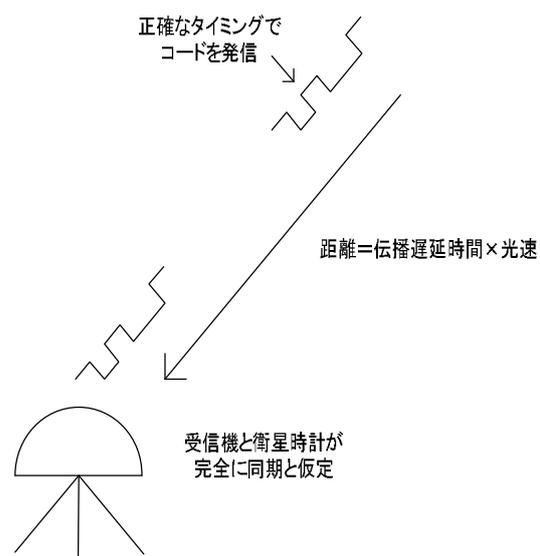


図 2-2：理想的なコードによる測定距離

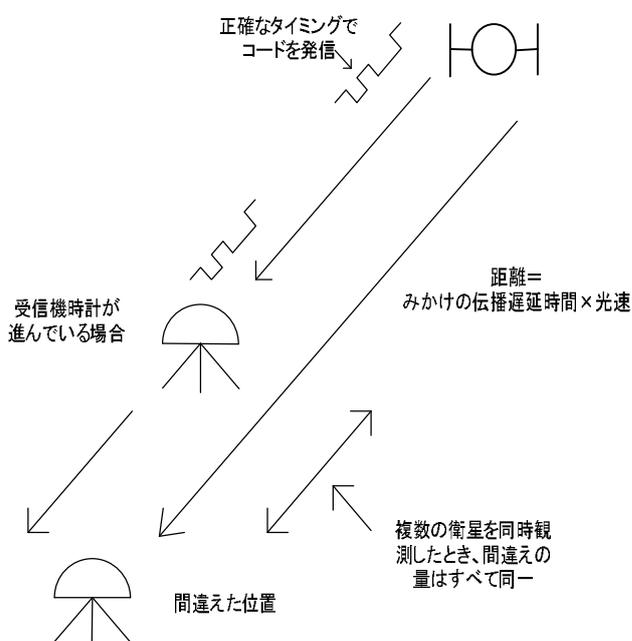


図 2-3：実際のコードによる測定距離

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、緯度、経度および高さの 3 次元座標の成分(x, y, z)の 3 つの未知数と、受信機内の時計誤差  $t$  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ことが必要となる。この 4 つの方程式を解くことにより測位解を得ることが出来る。

単独測位の測位精度は、SA が発動されていた時期は、時間帯によっては 65~100m であったが、SA が解除された後は 6~10m までに改善された。ただし、電波伝搬を遮断するような障害物によって受信できない衛星があると、見かけ上衛星の配置が悪くなり、市街地などではそれ以下の精度となることがあるので注意が必要である。

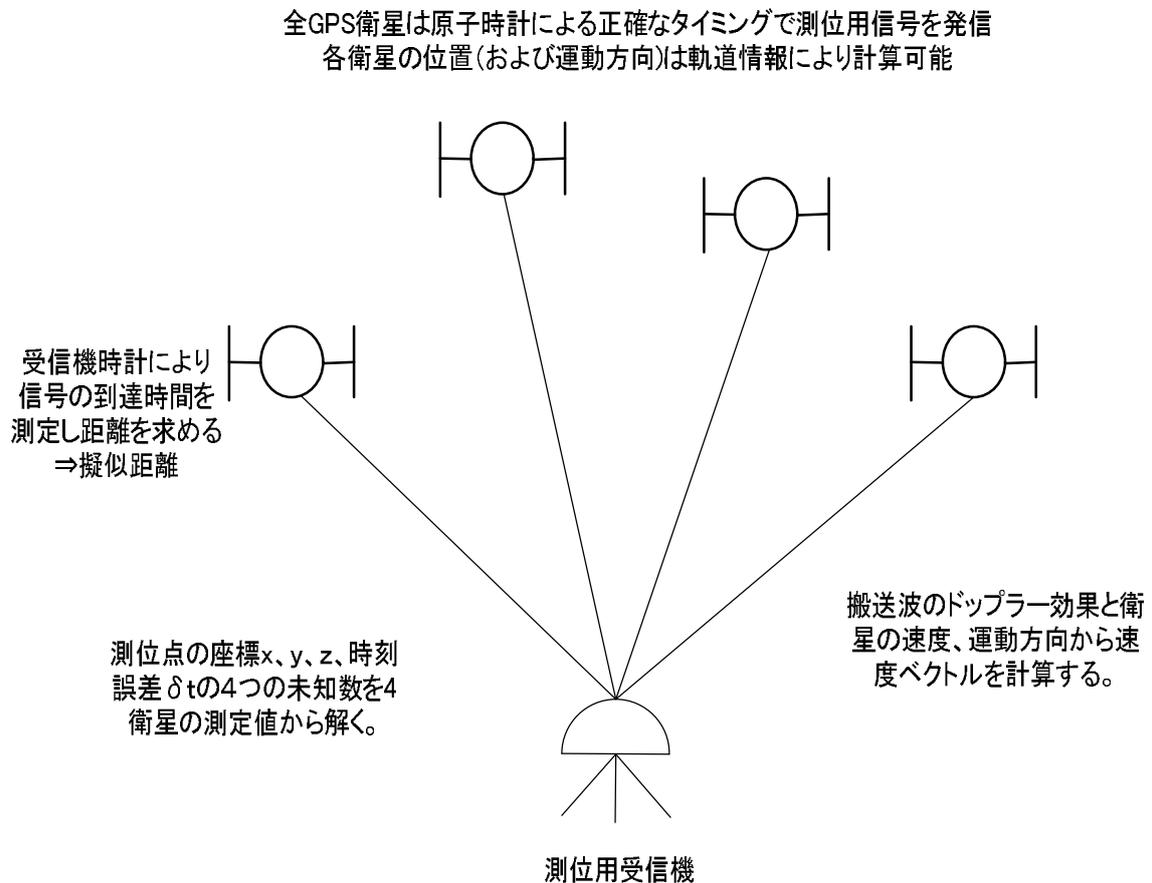


図 2-4 : 単独測位

## 2.4.2 D G P S 測位

DGPS は予め位置が正確に分かっている固定基準局(refernce staition)で測位誤差を求め、それによってユーザー局での測位結果を補正して精度を改善するものである。その精度は 2メートル程度で、条件がよければ 1メートル以内の測位精度となる。ただし、DGPS 測位では基準局とユーザー局において大気や電離層等の遅延量を同じと仮定しているので両地点間の最大距離は数 100 km から数 1000 k m までであり、それ以上になると精度が低下するので注意が必要となる。また、基準局からの補正データを伝送する必要があるためその伝送方法と距離が測位精度に影響することとなる。D G P S で用いられる 2 種類の補正方式について以下に述べる。

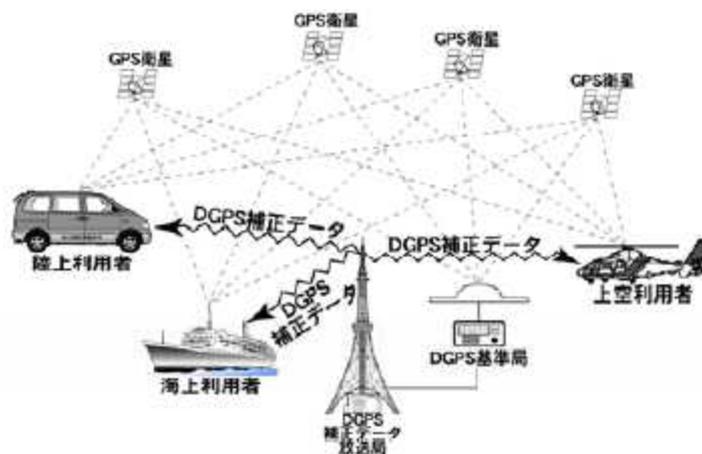


図 2-5： D G P 測位

### ・ 測位位置補正方式

この方式は、正確に分かっている基準局の位置と、同地点で単独測位により出力された位置を比較することによって、位置の補正值(緯度、経度、高さもしくは三次元直交座標系の xyz 座標)を算出し、ユーザー局の測位結果にこの補正值を適用するものである。

この方式は次に述べる擬似距離補正方式と比較して、基準局からユーザー局へ伝送するデータ量は格段に少なくてすむ。しかし、基準局とユーザー局とでまったく同じ衛星の組み合わせで測位を実行していなければ、補正結果が大幅に減少してしまうのが最大の欠点である。即ち、ユーザー側で使用した衛星の番号を含めた測位結果を何らかの方法(インターネット回線等)で基準局へ送り補正を行い、再びユーザー局へ伝送するといったようなことが必要となる。

- ・ 擬似距離補正方式

この方式は、基準局で受信している衛星までの真の距離と、ユーザーが実際に測定した擬似距離を比較することによって、衛星ごとの擬似距離補正值、及びその変化率を算出してユーザー局に伝送する。ユーザー局では受信機で測定された擬似距離に、この補正值を適用して測位するものである。

前述した測位位置補正方式と異なり、基準局で擬似距離補正データが得られた衛星であれば、ユーザー局ではどんな衛星の組み合わせを測位に使用しても良いという柔軟性がある。この方式は世界標準として幅広く利用されていて、この研究で述べる DGPS の方式は全てこの擬似距離補正方式を用いている。

### 2.4.3 相対測位

複数の受信機で 4 個以上の GPS 衛星を同時に観測して受信機間の相対的な位置関係を計測する方法である。実際に測位をするには、予め位置が正確に分かっている基準局が必要になる。ユーザ側では、基準局からタイムタグをつけた擬似距離を受信し、衛星ごとに自身の測定値と基準局における測定値との差をとり、基準局に対する相対的な自身の位置を推定する。

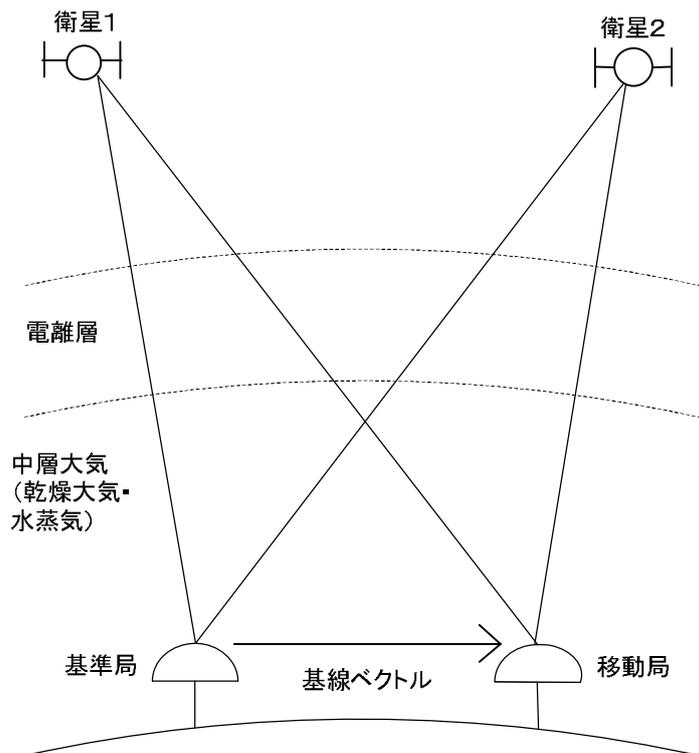


図 2-6：相対測位の概念図

## 3章 高感度 GPS 受信機におけるキャリアスムージング

### 3.1 はじめに

GPS 開発において、擬似距離の精度を高めるために搬送波位相を利用することが試みられてきた。最近では、一般的にキャリアスムージング(Carrier-smoothing)という名称で様々な受信機に使用されている。

受信機で観測された擬似距離の特徴として距離の分解能が低いためその精度が悪く、ノイズを多く含んでしまうことがあげられる。C/A コードや P コードなどの測位に用いられるコード擬似距離の分解能はそれぞれ 300m、30m となる。それに対し、L1,L2 帯の搬送波の波長はそれぞれ約 19cm、24cm であるから、コードによる距離測定に比べ分解能は非常に高く精度も格段によくなる。ただし、位相観測には整数値バイアス(ambiguity)を含んでいることに注意が必要である。搬送波の時間変化の差分は擬似距離のそれよりも精度が高く、衛星とアンテナの距離変化にほぼ等しい。この搬送波差分を擬似距離の変化に適用すれば、ノイズの少ない擬似距離を理論的に得ることはできる。

つまり、キャリアスムージングとは整数値バイアスを持たないがノイズを多く含むコード擬似距離に、整数値バイアスを持つもののノイズが少なく精度の高い搬送波位相の特性を利用して、精度の高い擬似距離を取得することである。これによって、コード測位における精度改善が期待できる。

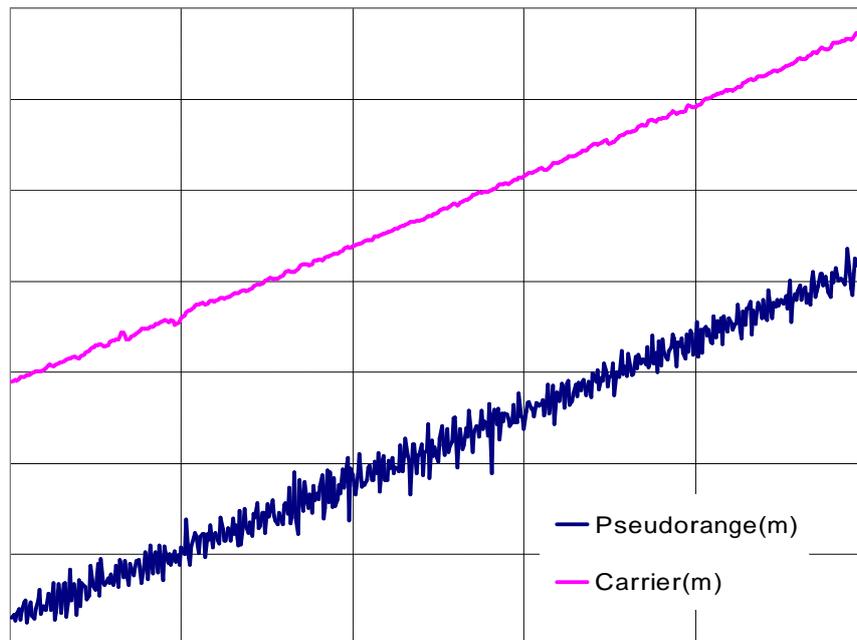


図 3 - 1 : 擬似距離 ( Pseudo range ) と搬送波(Carrier)の概念図

## 3.2 キャリアスムージング

### 3.2.1 ハッチフィルタ

ハッチフィルタを用いたキャリアスムージングは、擬似距離に搬送波の差分を適用するという最も容易な概念で成り立っている。以下にスムージングされた擬似距離取得の計算方法を示す。

$$S_i = \frac{\rho_i + (M - 1)\{S_{i-1} + (\phi_i - \phi_{i-1})\}}{M} \quad (3-1)$$

ここで、 $S$  : キャリアスムージング後の擬似距離 (m)  
          : キャリアスムージング前の擬似距離 (m)  
          : 搬送波位相 (m)  
 $M$  : 平均化定数 (sec)

を表し、添字でエポックと呼ばれる GPS 観測データの取得間隔を示している。今後、この章において 1 エポックは 1 秒として扱うこととする。

$i=1$  のとき、 $S_i = \rho_i$  となる。スムージングされていない擬似距離がそのまま適用され変化は起こらない。

$i=2$  のとき、 $S_2 = \frac{\rho_2}{2} + \frac{\{\rho_1 + (\phi_2 - \phi_1)\}}{2}$  となる。この意味するところは、1 エポック前の擬似距離に搬送波の差分を加えたものと今現在得られた擬似距離とを、それぞれ半分ずつ用い平滑化した擬似距離を得ているということである。

$i=3$  のとき、1 エポック前に搬送波差分を加えた擬似距離は  $\frac{2}{3}$ 、今期得られた擬似距離は  $\frac{1}{3}$  の平均化定数を持って、 $S_3$  に適用されている。

このように  $M$  で指定された時間まで重みを変化させ、 $M$  を過ぎたら重みを固定してスムージングを繰り返していく。

### 3.2.2 キャリアスムージングの効果

図3-2はハッチフィルタを利用してキャリアスムージングを行った際の擬似距離変化量である。ノイズの少ない搬送波を擬似距離に組み合わせることによりノイズが低減されていることがわかる。このスムージングされた擬似距離を使用して測位を行うことになる。100秒間スムージングされた擬似距離を用いて単独測位した例を図3-3に示す。この図から見て取れるように測位結果の改善ができていていることがわかる。

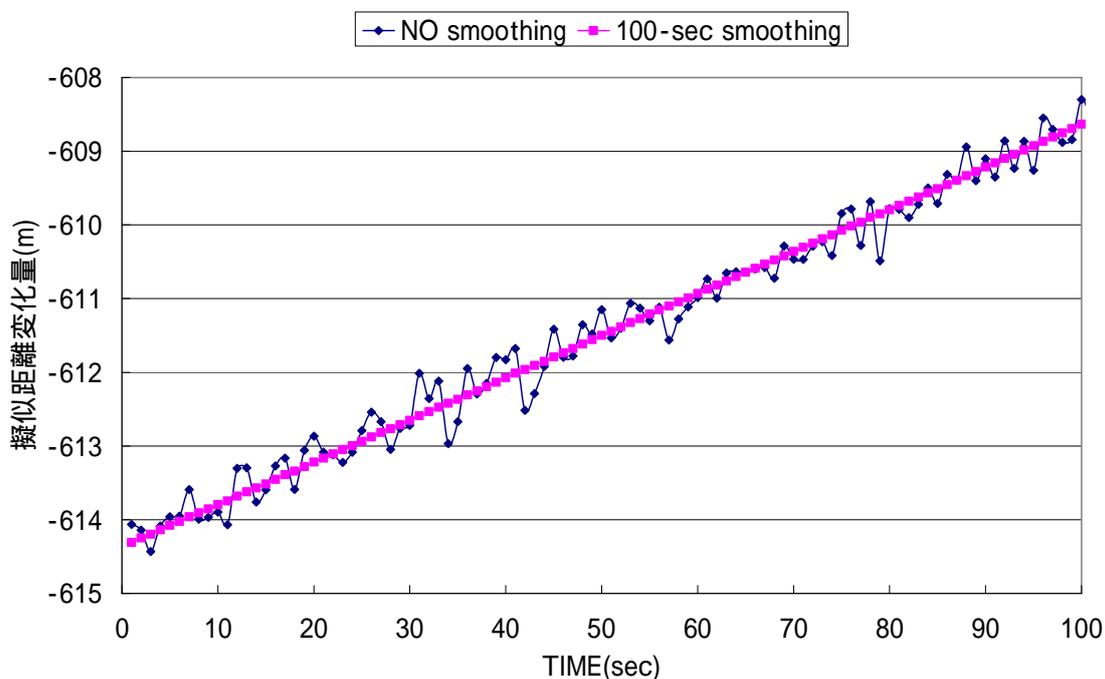


図3-2: スムージングした擬似距離変化量

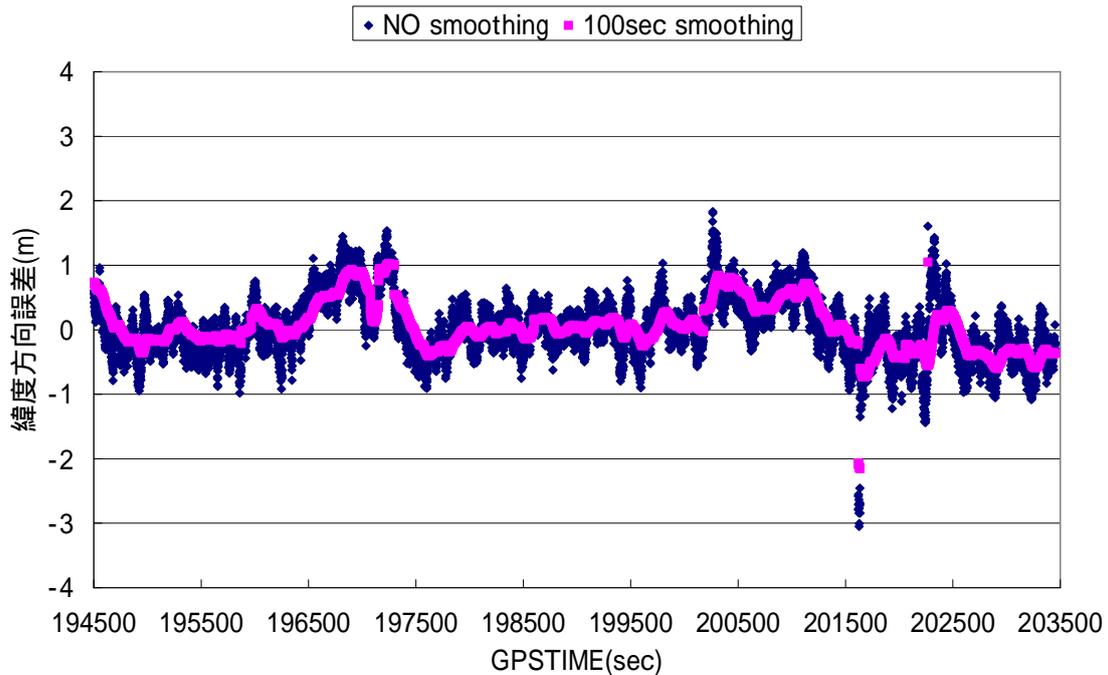


図 3 - 3 : キャリアスムージング

### 3.2.3 高感度GPS受信機におけるキャリアスムージング

高感度受信機を用いて観測した擬似距離をキャリアスムージングする際には注意しなければならない。高感度受信機の中には、観測した擬似距離と搬送波の時刻不一致が見られるものがある。これによりキャリアスムージングの効果的利用が困難となる場合がある。

#### ・ 擬似距離と搬送波の時刻不一致

通常、擬似距離と搬送波の観測値は図 3 - 4 のようになる。一般的にキャリアスムージングを行う際には擬似距離と搬送波の変化量が一致しているという前提がある。しかし、高感度受信機の中には図 3 - 5,6 で示すように擬似距離と搬送波の変化量が一致しないものがある。この現象によりキャリアスムージングの効果的利用は難しい。

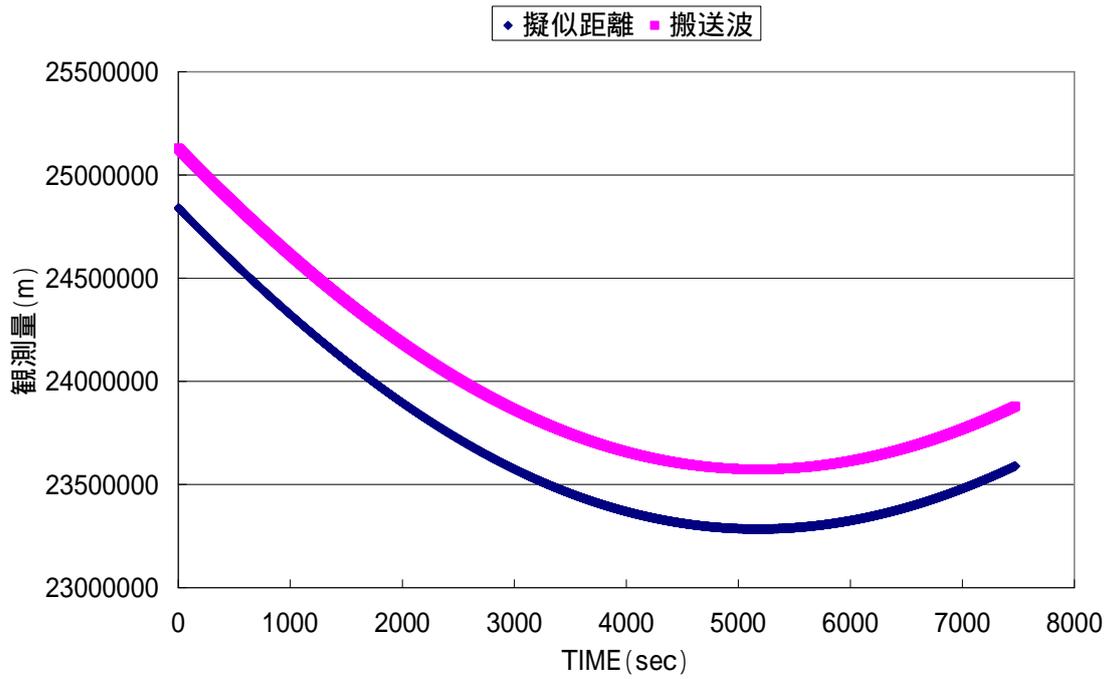


図 3-4 : 一般的な擬似距離と搬送波の観測値

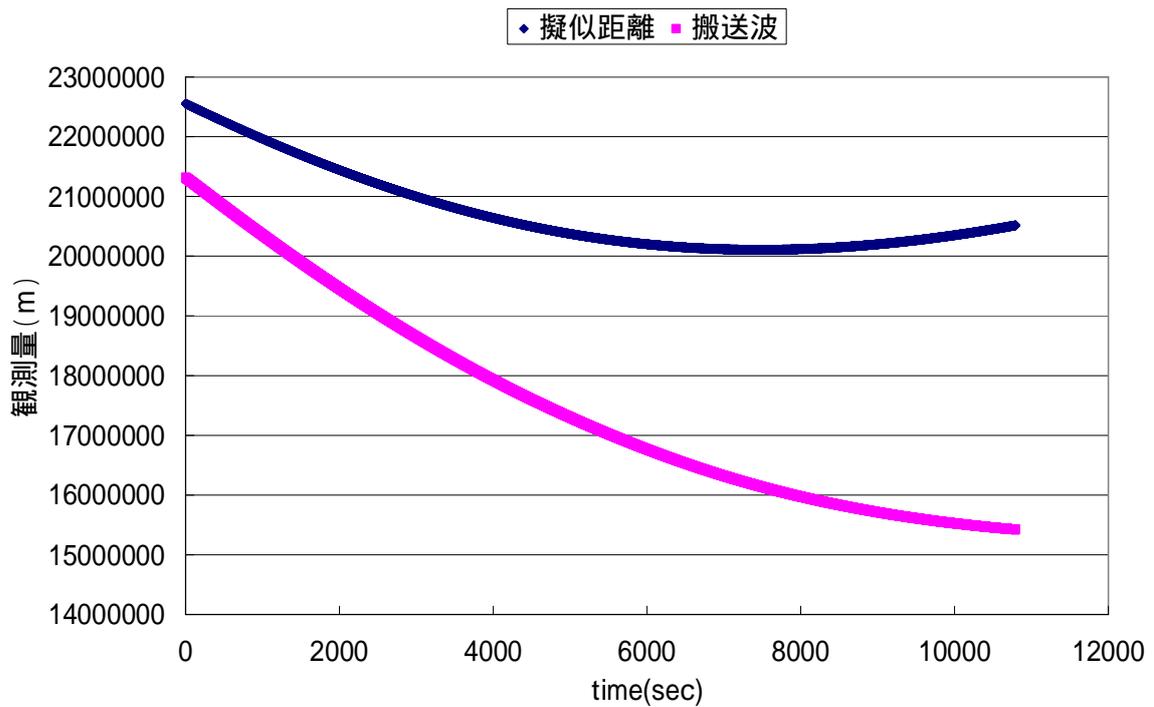


図 3-5 : 高感度 G P S 受信機での擬似距離と搬送波の観測値

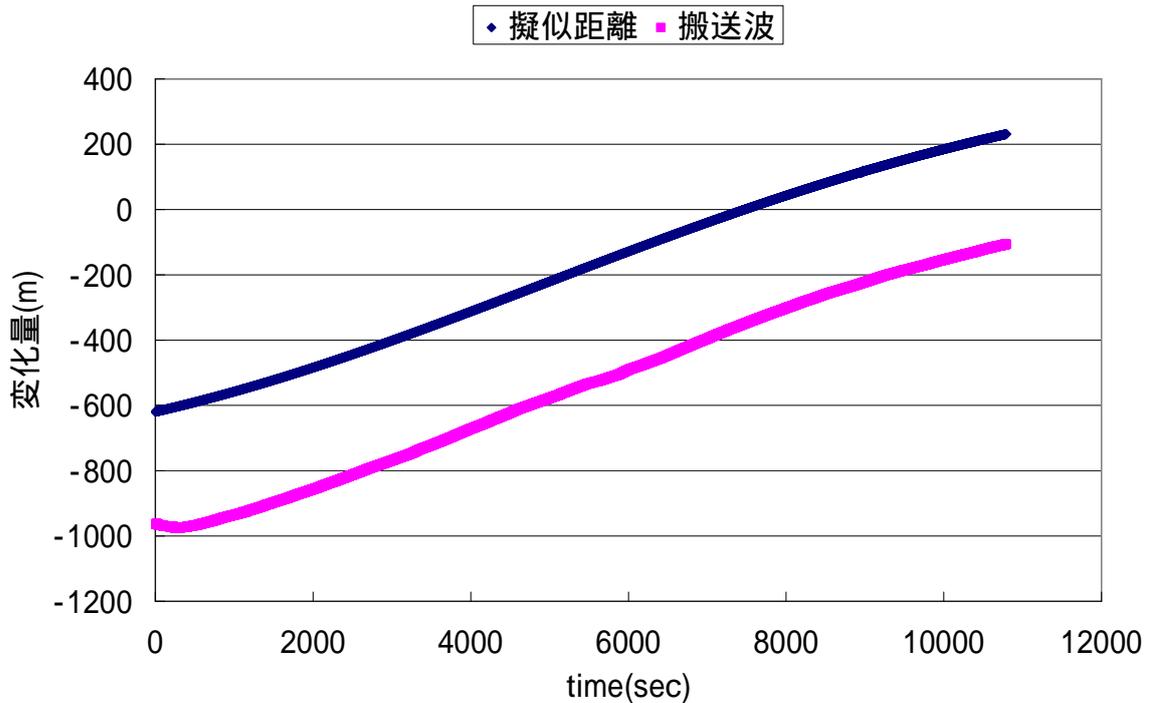


図 3-6 : 高感度 G P S 受信機の擬似距離と搬送波の変化量

・ 擬似距離補正值を利用した D G P S での解析例

前述したように高感度受信機では擬似距離と搬送波の変化量が違うためにキャリアスムージングを効果的に利用できない。具体的な例としてキャリアスムージングした擬似距離からえられる補正值を利用した D G P S での例をあげる。

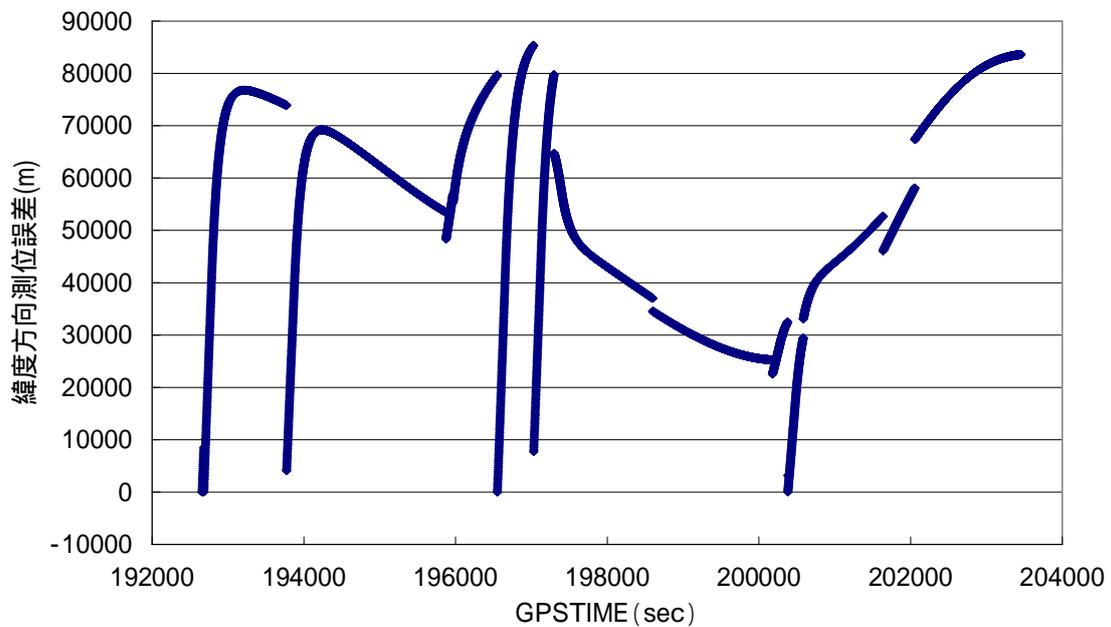


図 3-7 : 緯度方向測位誤差

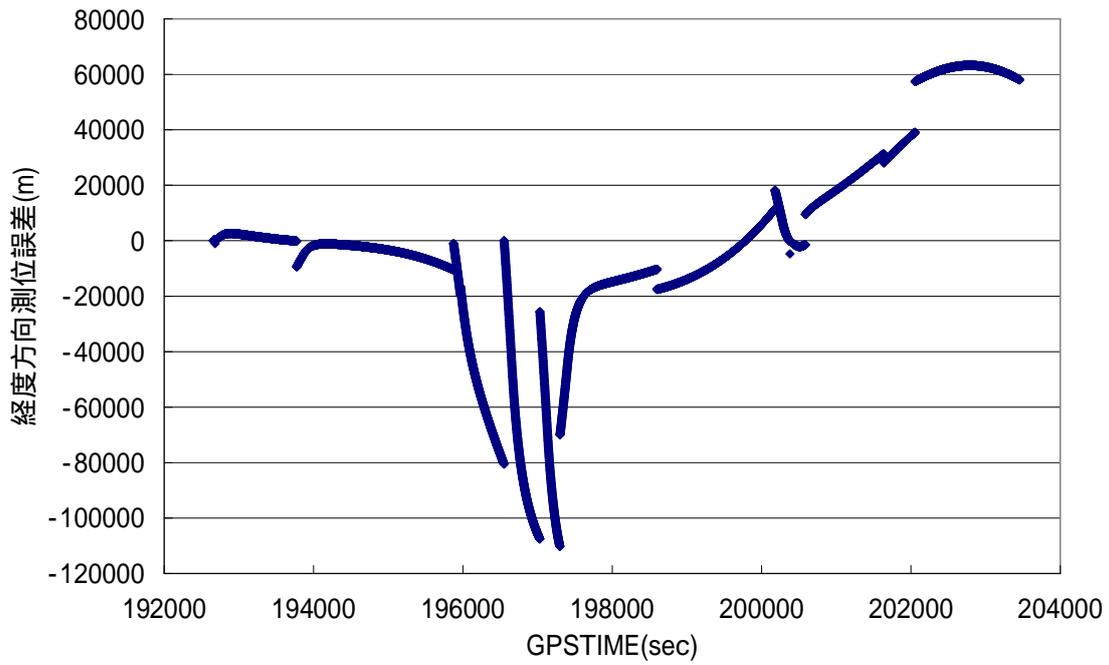


図 3-8 : 経度方向測位誤差

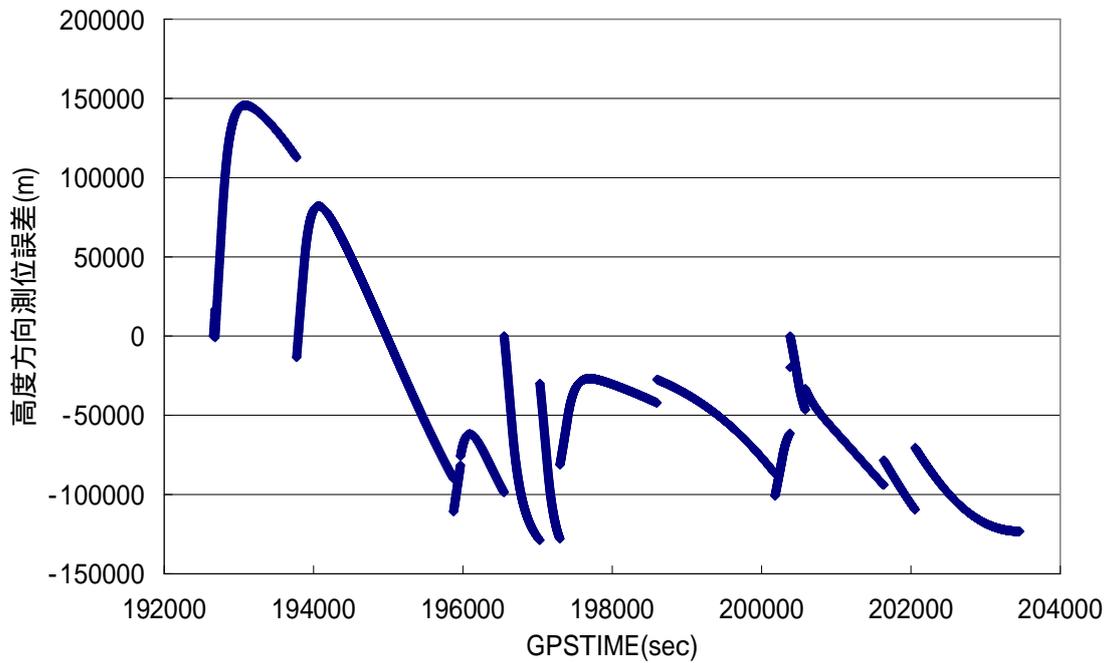


図 3-9 : 高度方向測位誤差

このようにキャリアスムージングの利用が困難である。この時刻不一致問題の解決策として擬似距離 2 重差を利用することが考えられる

### 3.3 スムージングした擬似距離 2 重差を利用した相対測位

高感度GPS受信機で相対測位を行う際、擬似距離と搬送波の時刻が不一致である場合、スムージングした擬似距離を使うことは難しい。この問題を解決するため、観測量として擬似距離 2 重差を利用することがある。擬似距離 2 重差は、GPS 測位において誤差要因である時計誤差等を取り除いた観測量である。これにより擬似距離と搬送波の時刻が不一致である問題が解決されキャリアスムージングの効果的が利用できる。

#### 3.3.1 擬似距離 1 重差

- ・受信機間 1 重差

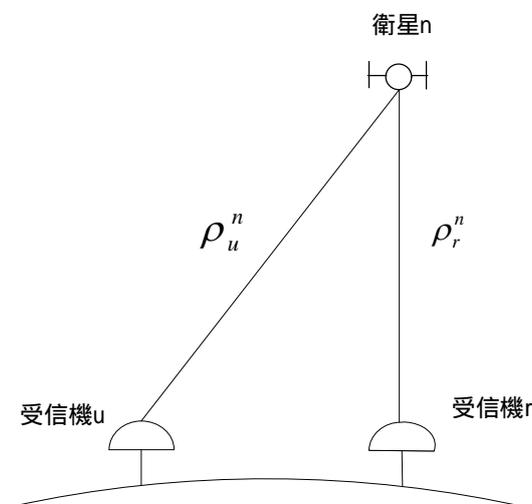


図 3 - 10 : 受信機間 1 重差

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コード擬似距離の差、つまり行路差を求める方法である受信機間 1 重差は

$$\begin{aligned}
 \rho_{u-r}^i &= \rho_u^i - \rho_r^i \\
 &= (r_u^i - r_r^i) - (I_u^i - I_r^i) + (T_u^i - T_r^i) \\
 &\quad + c\{(\delta t_u - \delta t_r) - (\delta t^i - \delta t^i)\} + (\varepsilon_u^i - \varepsilon_r^i) \\
 &= r_{u-r}^i - I_{u-r}^i + T_{u-r}^i + c\delta t_{u-r} + \varepsilon_{u-r}^i
 \end{aligned} \tag{3-2}$$

で表される。 $r$  は衛星-利用者間の正確な距離(m)、 $I$  は L1 帯の電離層遅延量(m)、 $T$  は L1 帯の対流圏遅延量(m)、 $\delta t_u$  は受信機の時計誤差(s)、 $\delta t^i$  は衛星の時計誤差(s)、 $\epsilon$  はマルチパス等の誤差(cycle)である。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。式(3-1) 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 1 重差では衛星時計誤差が消去できる。式(3-1)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。式(3-1)から短基線長の受信機間一重差は、

$$\rho_{u-r}^i = r_{u-r}^i + c\delta t_{u-r} + \epsilon_{u-r}^i \quad (3-3)$$

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 1 重差

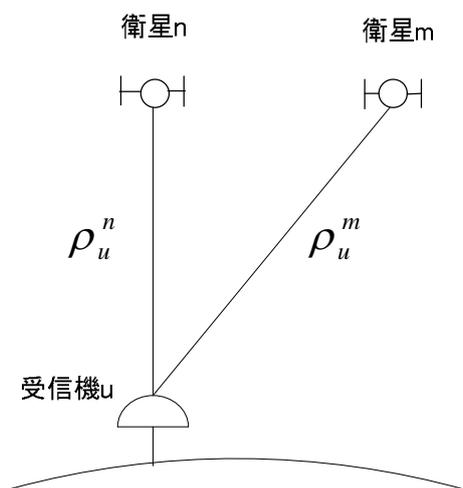


図 3-11 : 衛星間 1 重差

1 個の受信機で同時刻に測定した GPS 衛星 2 機の擬似距離の差を取った値を衛星間 1 重差と言う。例えば利用者側の受信機で  $n$  番衛星と  $m$  番衛星のコード擬似距離を測定したとすると、衛星間 1 重差は

$$\begin{aligned}
\rho_u^{n-m} &= \rho_u^{n-m} - \rho_u^{n-m} \\
&= (r_u^{n-m} - r_u^{n-m}) - (I_u^{n-m} - I_u^{n-m}) + (T_u^{n-m} - T_u^{n-m}) \\
&\quad + c\{(\delta t_u - \delta t_u) - (\delta t^{n-m} - \delta t^{n-m})\} + (\varepsilon_u^{n-m} - \varepsilon_u^{n-m}) \\
&= r_u^{n-m} - I_u^{n-m} + T_u^{n-m} + c\delta t^{n-m} + \varepsilon_u^{n-m}
\end{aligned} \tag{3-4}$$

で表される。式(3 - 3)から衛星間1重差では受信機の時計誤差の項が相殺できる。衛星間1重差は擬似距離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。

### 3.3.2 擬似距離2重差

どちらの1重差でも時計誤差を完全に消去することができない。2重差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。

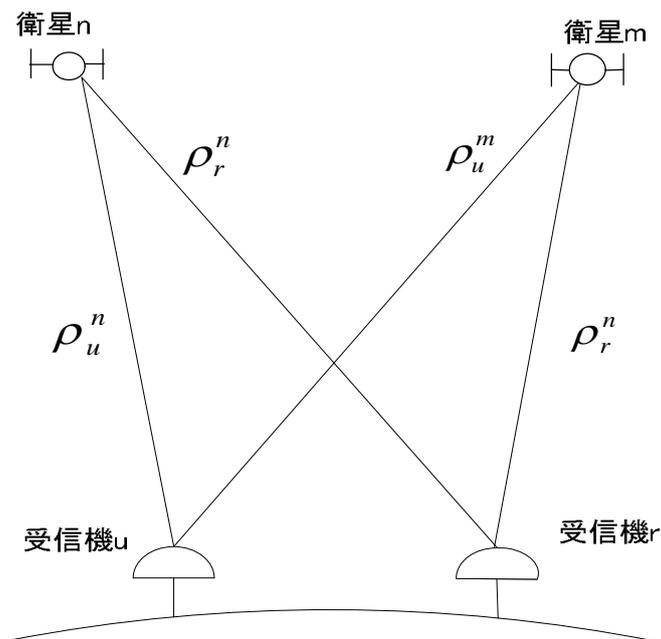


図3 - 12： 2重差

2重差は受信機間1重差からも衛星間1重差からも求めることができ、結果は変わらない。図3 - 12 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衛星からの擬似距離2重差は

$$\begin{aligned}\rho_{u-r}^{n-m} &= (\rho_u^n - \rho_r^n) - (\rho_u^m - \rho_r^m) \\ &= r_{u-r}^{n-m} - I_{u-r}^{n-m} + T_{u-r}^{n-m} + \varepsilon_u^{n-m}\end{aligned}\quad (3-5)$$

で表される。ここで式(3 - 4)は n 番衛星と m 番衛星の受信機間一重差を求め、それらの値を差し引いた値である。(3 - 4)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差の引き算になることがわかる。(3-4)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。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差が 3 個必要であるため、単独測位と同様に、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。

### 3.3.3 擬似距離 2 重差を利用した相対測位実験

#### 3.3.3.1 実験概要

時刻不一致の問題がある高感度受信機を用いてスムージングした擬似距離 2 重差を観測量とした相対測位を行う。ublox 社製の GPS 受信機 (AEK-4T 型) 2 台とパッチアンテナを用い、東京海洋大学工学部第四実験棟の屋上にて静止条件で測位を行った。基線長は 1 m で、それぞれの精密位置は後処理基線解析により算出した。計測時刻は 10 月 23 日の 14 時 30 分頃から 3 時間である。

### 3.3.3.2 実験結果

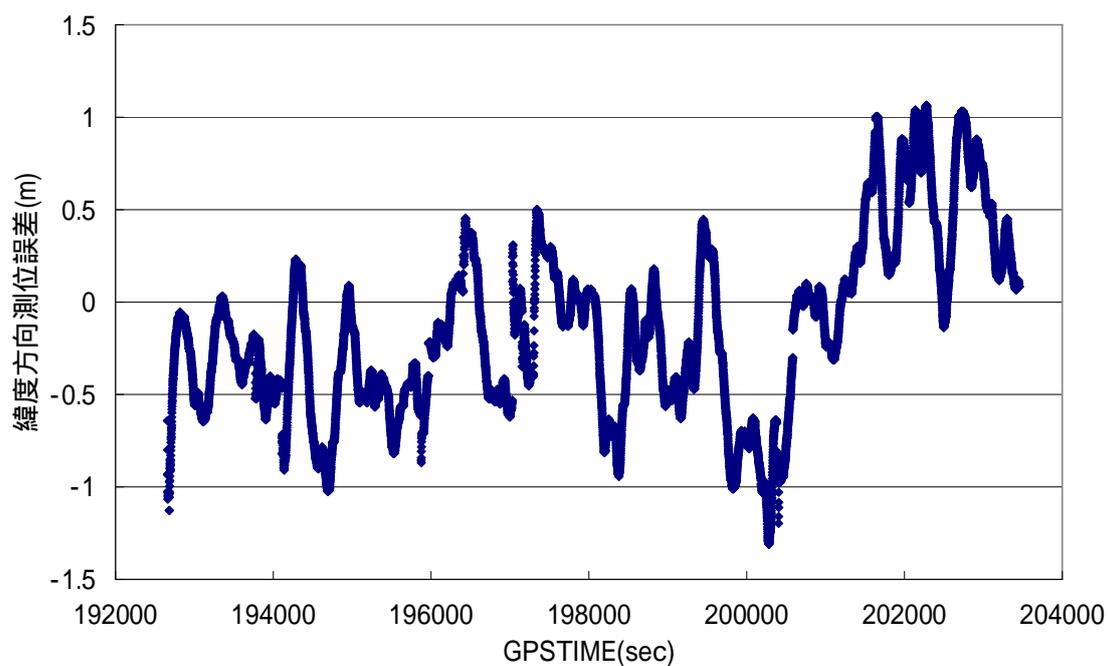


図 3-13 : 緯度方向測位誤差

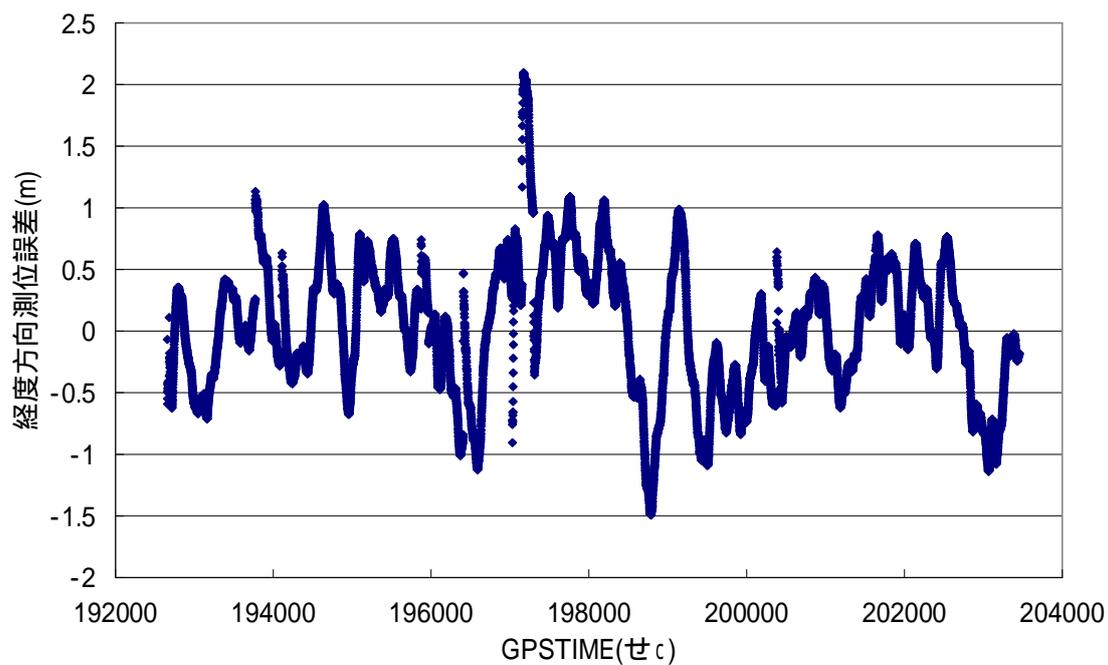


図 3-14 : 経度方向測位誤差

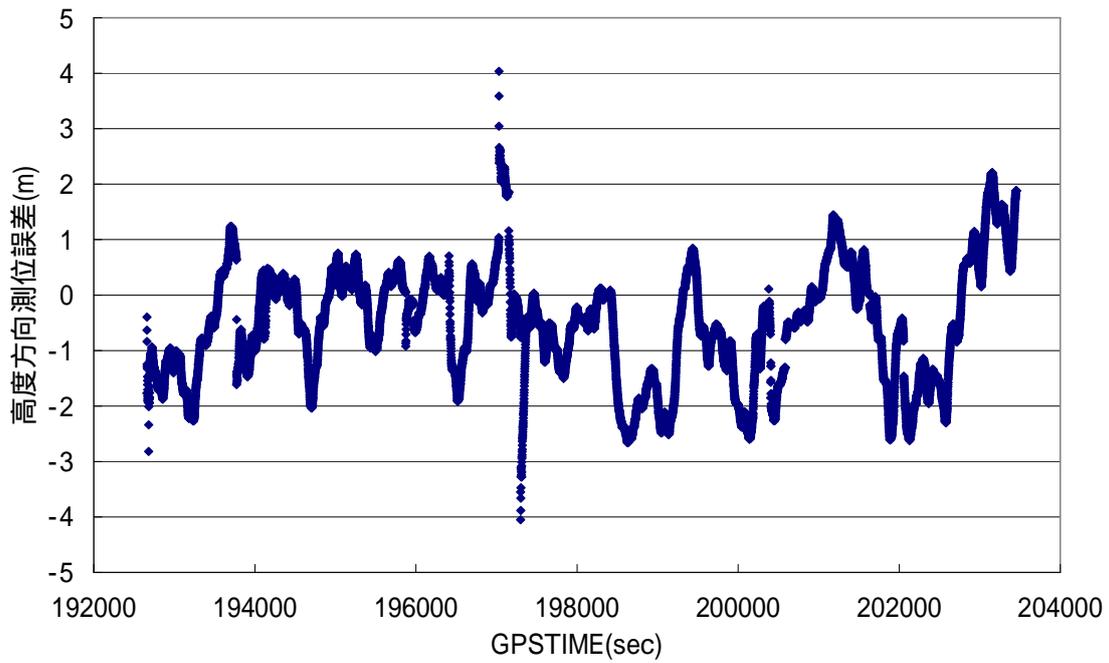


図 3-15 : 高度方向測位誤差

### 3.3.3.3 まとめと考察

擬似距離 2 重差を利用した相対測位においては高感度受信機の時刻不一致の問題が解決され、高い精度で測位できている。その一方で測位結果を見ると、サイクルスリップによる測位精度劣化という問題が新たに浮かび上がる。サイクルスリップの問題は第 4 章で扱う。

## 4章 サイクルスリップ検知

### 4.1 はじめに

3章で示したようにキャリアスムージングを行う際、測位精度向上のためにはサイクルスリップの問題を解決する必要がある。そもそもサイクルスリップとは、衛星信号の遮断による位相測定の中断により搬送波位相の整数値バイアスが別の値に設定される現象である。よって搬送波位相測定値の飛びとして現れる(図.4 - 1)。スムージング中にサイクルスリップが起きると、測位結果に大きく影響を及ぼす(図.4 - 2)。

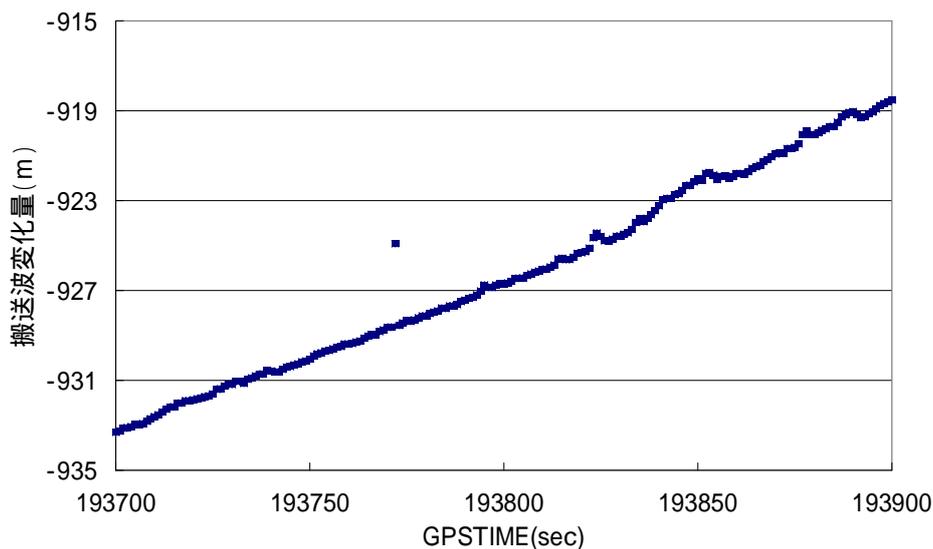


図.4 - 1 : サイクルスリップ発生例

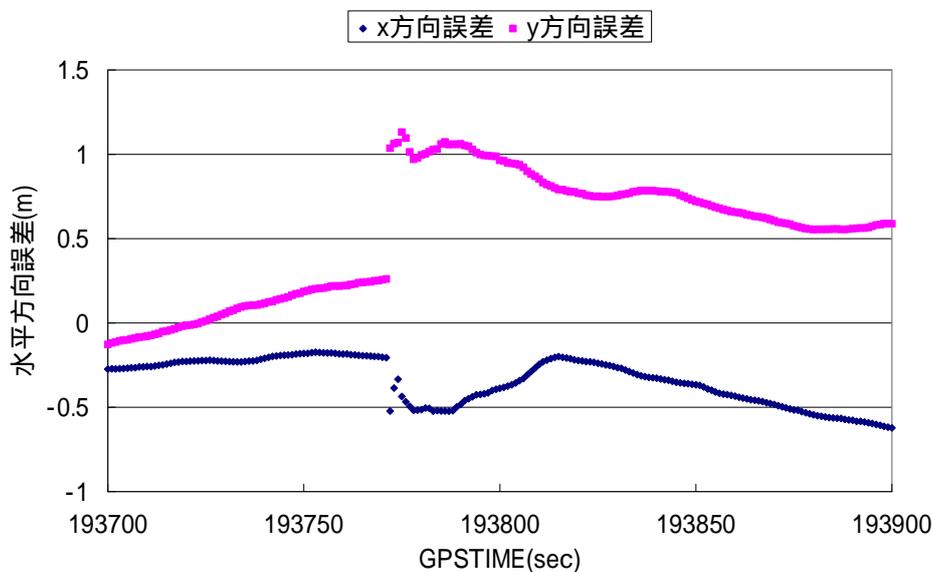


図.4 - 2 : スムージング中に発生したサイクルスリップの測位解への影響

このように測位精度の向上のためサイクルスリップの検知、修復は必要不可欠である。本研究では、1周波観測におけるサイクルスリップの正確な検知を目的とする検知手法の評価を目的とする。

## 4.2 サイクルスリップ検知手法

### 4.2.1 擬似距離と搬送波の差を用いた検知手法

擬似距離と搬送波の関係式は

$$\Delta_t R - \lambda \Delta_t \Phi = -\lambda \Delta_t N + \varepsilon \quad (4-1)$$

で表される。ここで  $\lambda$  は搬送波の波長(m)、 $\Delta_t R$  は擬似距離変化量(m)、 $\Delta_t \Phi$  は搬送波位相変化量 (cycle)、 $\Delta_t N$  整数値バイアスの変化量 (cycle)、 $\varepsilon$  はノイズ(cycle)である。実際に検知をする際には、整数値バイアスの特性を利用する。サイクルスリップが起これなければエポック間の整数値バイアスは変化せず、変化量 $\Delta_t N$ は0となるはずである。よって擬似距離変化量 $\Delta_t R$ と搬送波変化量 $\lambda \Delta_t \Phi$ の差が異常値を示したならばサイクルスリップと判定できる。

### 4.2.2 ドップラー周波数を利用した検知手法

ドップラー周波数と搬送波の関係式は

$$\Delta_t N = \Delta_t \Phi - \int_{t-1}^t D dt + \varepsilon \quad (4-2)$$

で表される。ここでDはドップラー周波数(Hz)である。ドップラー周波数をエポック間積分し、これを搬送波の変化量と予測する。実際の搬送波の変化量と予測した変化量を比較する。前述した整数値バイアスの特性を利用し、上の関係式から、これらの差分が異常値を示すならばサイクルスリップと判定できる。

### 4.2.3 搬送波位相の時刻間3重差を利用した検知手法

(図4-1)で示したようにサイクルスリップが発生すると搬送波変化量は大きく変動する。よって搬送波変化量の差分をとることでサイクルスリップを検知することが可能である。

- ・ 搬送波位相の時刻間 3 重差の利用

上記で搬送波変化量の差分をとる検知手法を紹介したがこれは言い換えると、搬送波位相測定値の 2 重差をとることである。ここでもう 1 つ差分をとる 3 重差 (figure4 - 3) を用いてサイクルスリップの検知を行う場合がある。3 重差をとることでサイクルスリップの検出量を増幅し検知を容易にする効果がある。

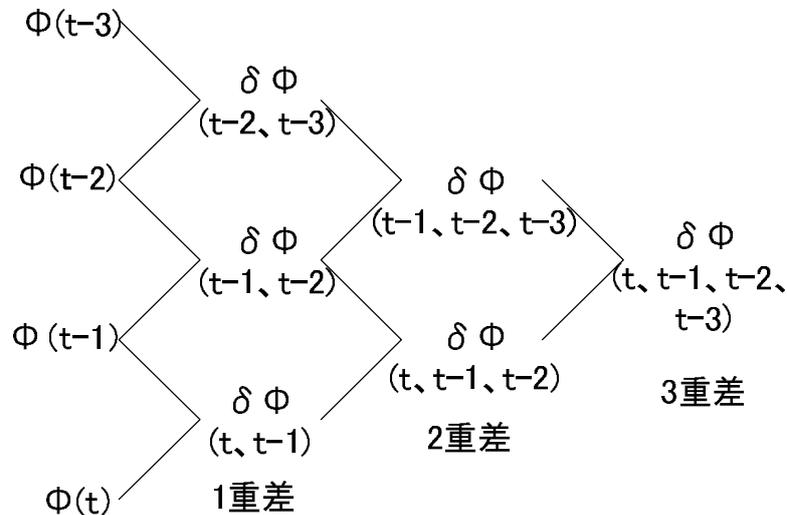


図 4 - 3 : 時刻間 3 重差の模式図

### 4.3 サイクルスリップ検知実験

#### 4.3.1 実験概要

- ・ 静止条件

ublox 社製の GPS 受信機 (AEK-4T 型) とパッチアンテナを用い、東京海洋大学工学部第四実験棟の屋上にて静止条件で測位を行った。計測時刻は 10 月 23 日の 14 時 30 分頃から 2 時間である。前述の 3 手法で 11 番衛星のサイクルスリップ検知を行った。

- ・ 移動条件

ublox 社製の GPS 受信機 (AEK-4T 型) とパッチアンテナを用い、東京海洋大学明治丸前を周回し測位を行った。計測時刻は 11 月 9 日の 15 時 50 分頃から 1 時間である。前述の 3 手法で 11 番衛星のサイクルスリップ検知を行った。

#### 4.3.2 実験結果

##### ・静止条件実験結果

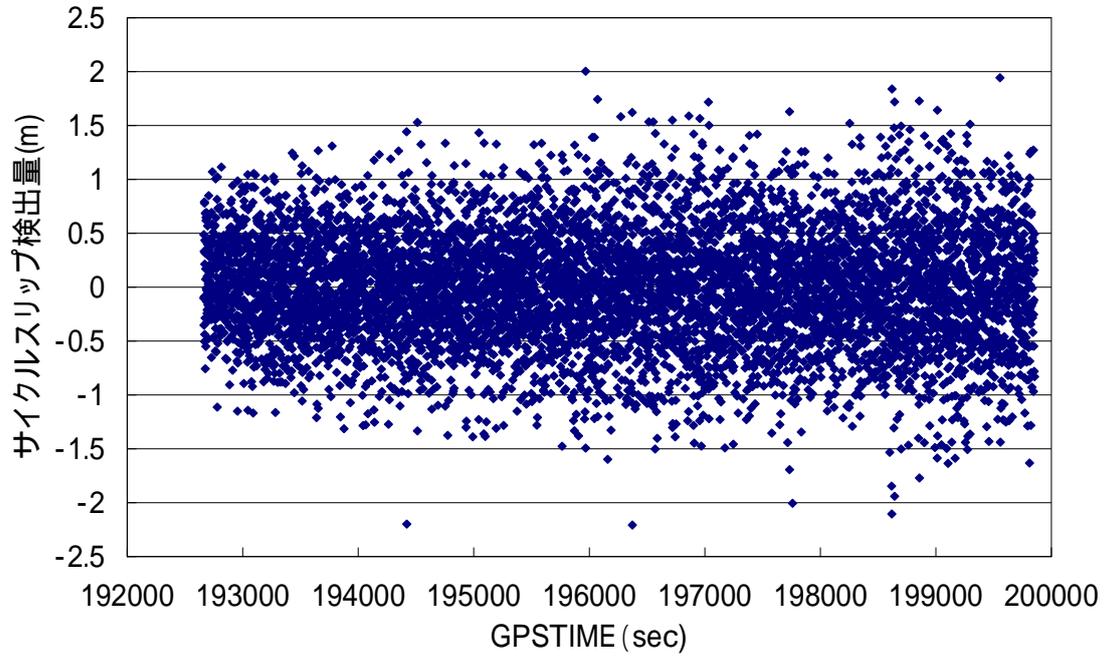


図.4 - 4 : 擬似距離と搬送波の差を利用した検知手法を用いた結果

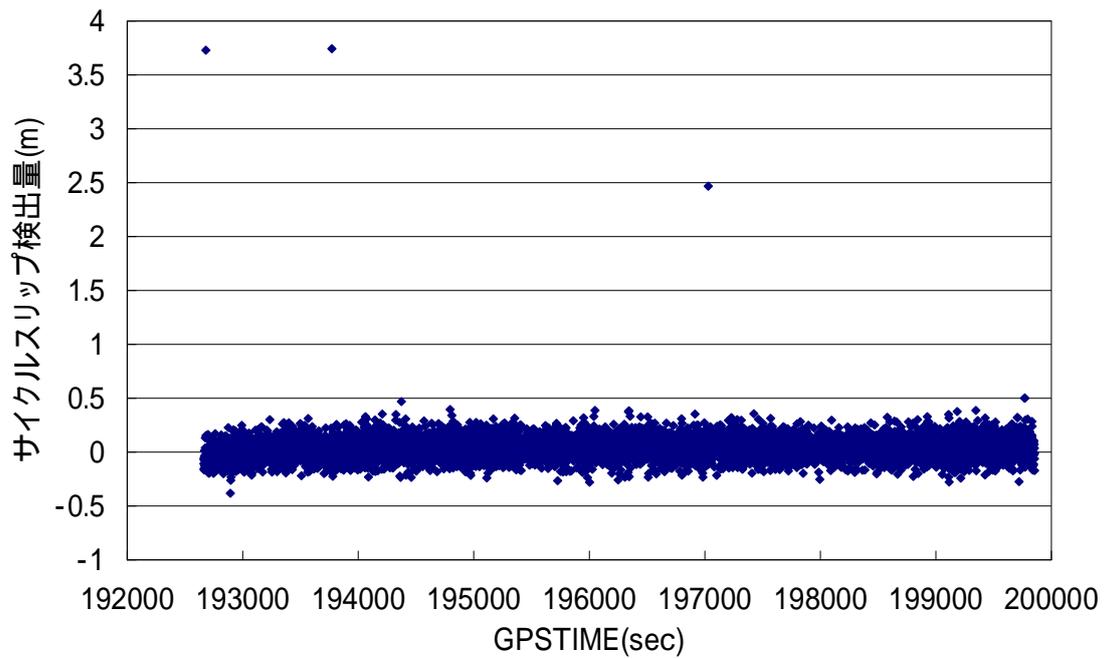


図.4 - 5 : ドップラー周波数を利用した検知手法を用いた結果

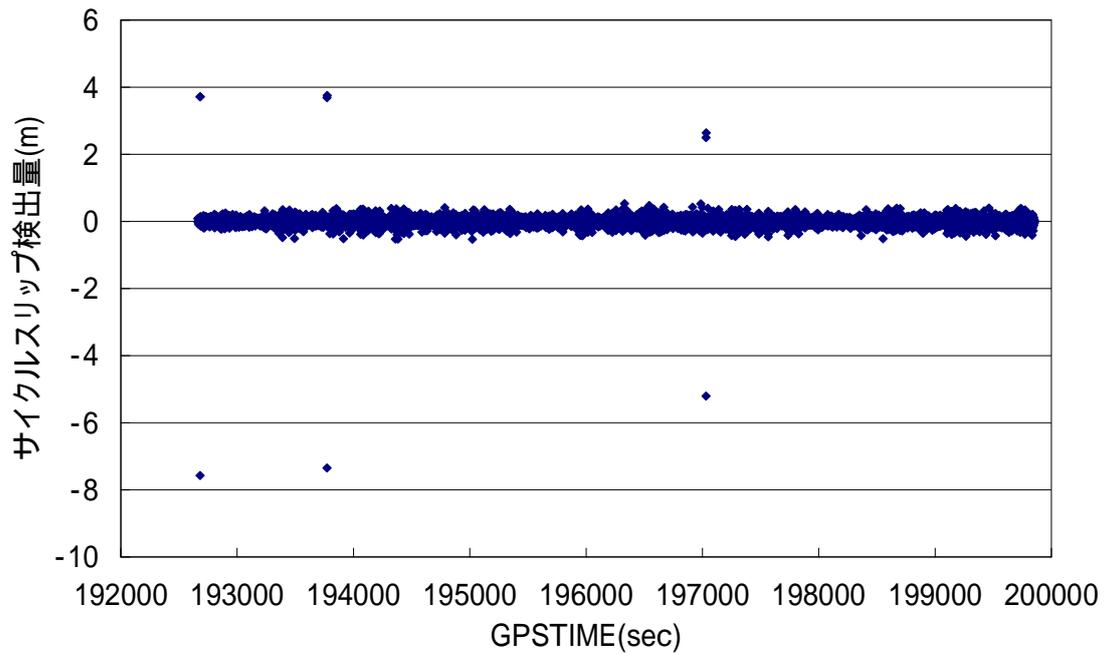


図.4 - 6 : 搬送波測定値の時刻間 3 重差を利用した検知手法を用いた結果

図.4 - 5 のようにプロットの飛びが異常値、すなわちサイクルスリップが起きていることを示しており、図.4 - 4 の擬似距離と搬送波の差を用いた検出法では擬似距離のノイズが大きく、うまく検知できなかった。しかし、図 4 - 5 のドップラー周波数による位相予測による検出法では 3 点のサイクルスリップが検出されていることがわかる。図 4 - 6 の時刻間 3 重差では 3 エポック前までの測定値を使用しているためにプロットの飛びは検出後引きずられている。検知についてはノイズが小さく、ドップラー周波数による位相予測による検出法と同様に検知できていると思われる。

・ 移動条件実験結果

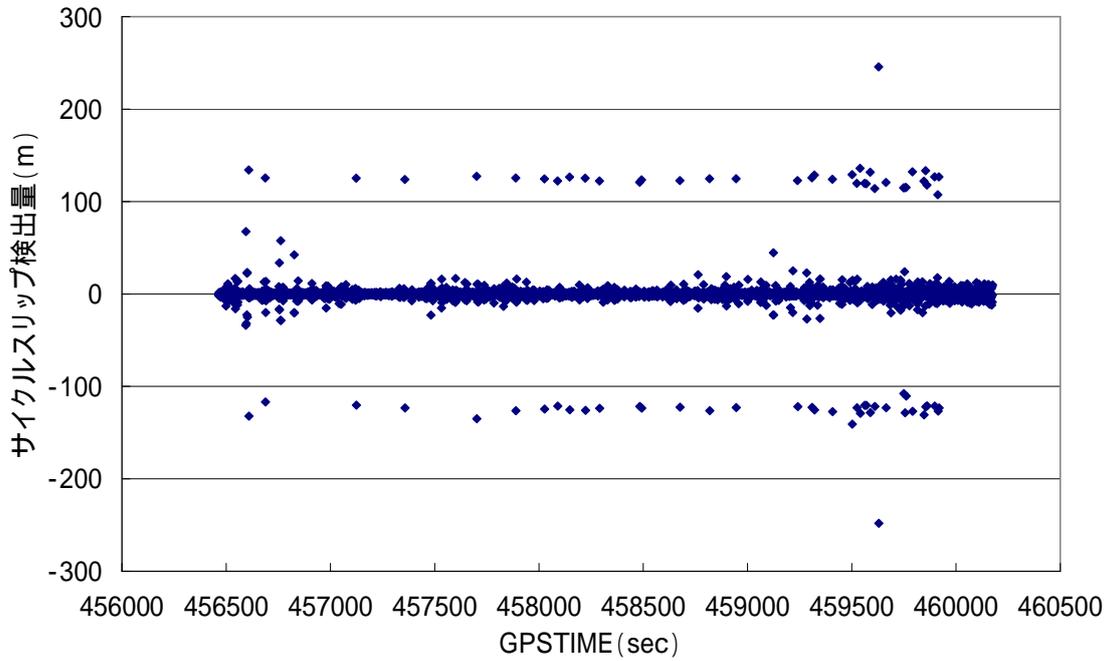


図.4 - 7 : 擬似距離と搬送波の差を利用した検知手法を用いた結果 1

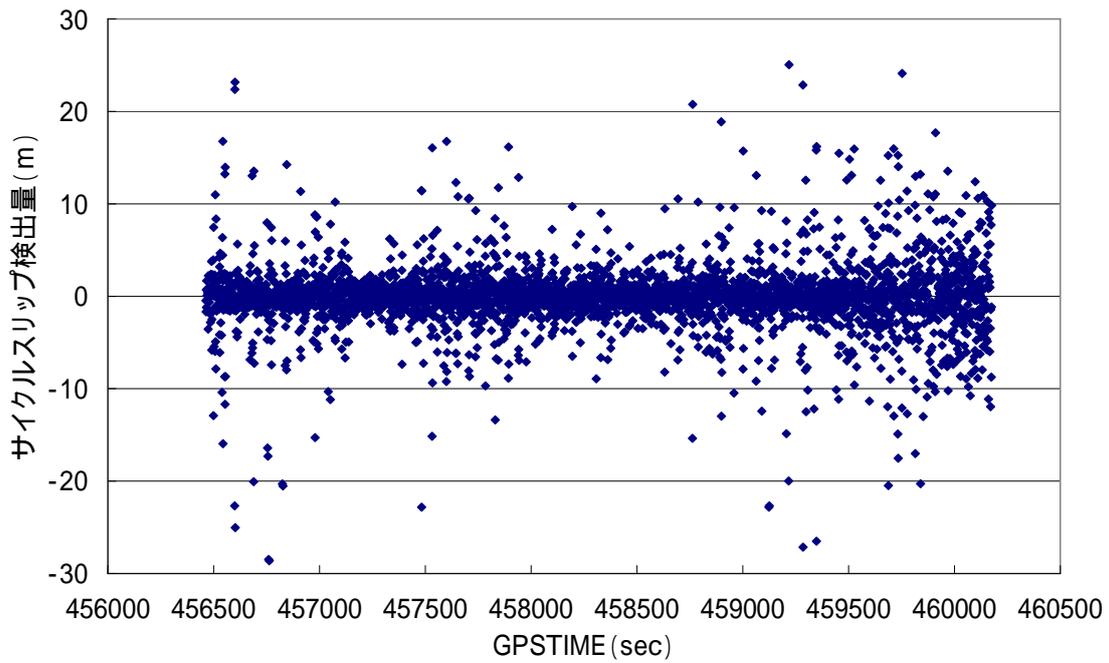


図.4 - 8 : 擬似距離と搬送波の差を利用した検知手法を用いた結果 2

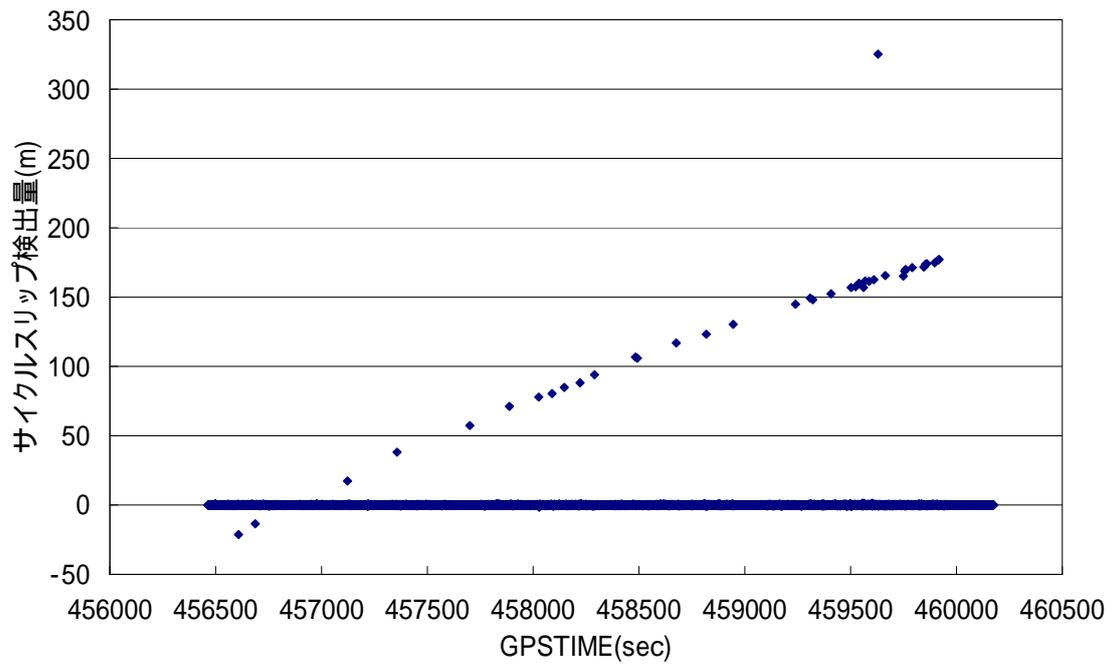


図.4 - 9 : ドップラー周波数を利用した検知手法を用いた結果 1

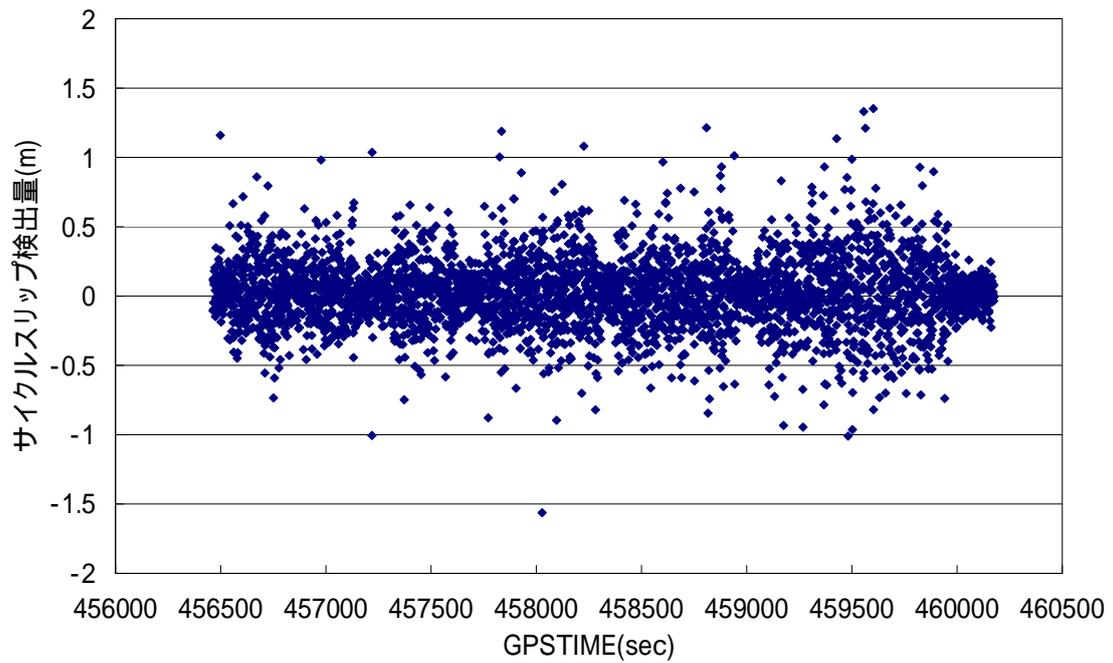


図.4 - 10 : ドップラー周波数を利用した検知手法を用いた結果 2

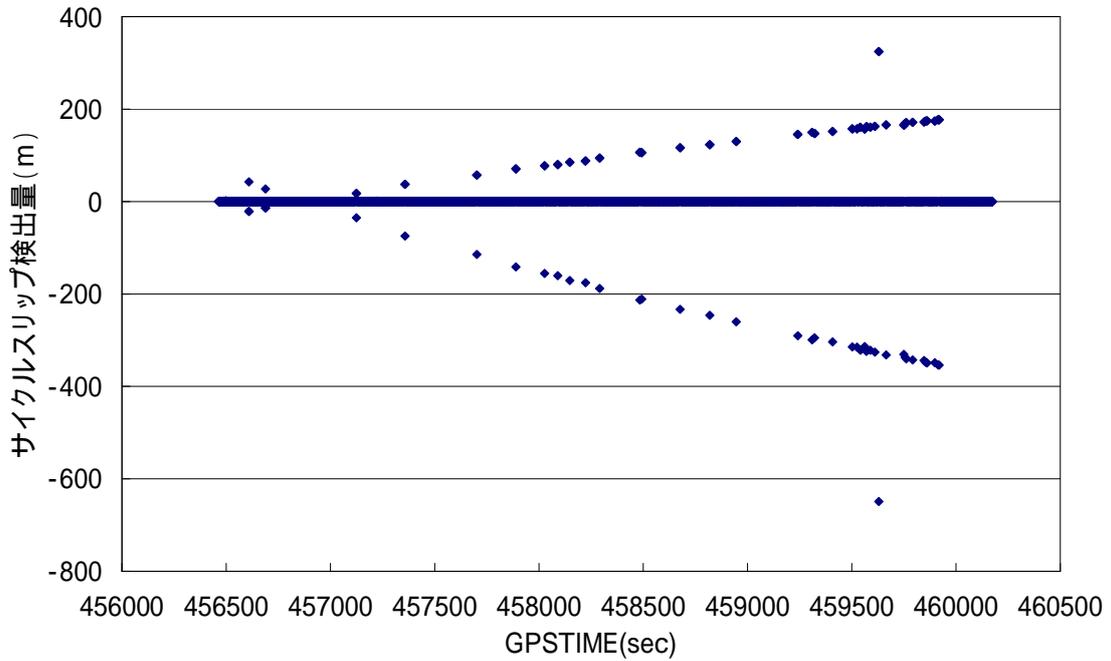


図.4 - 11 : 搬送波測定値の時刻間 3 重差を利用した検知手法を用いた結果 1

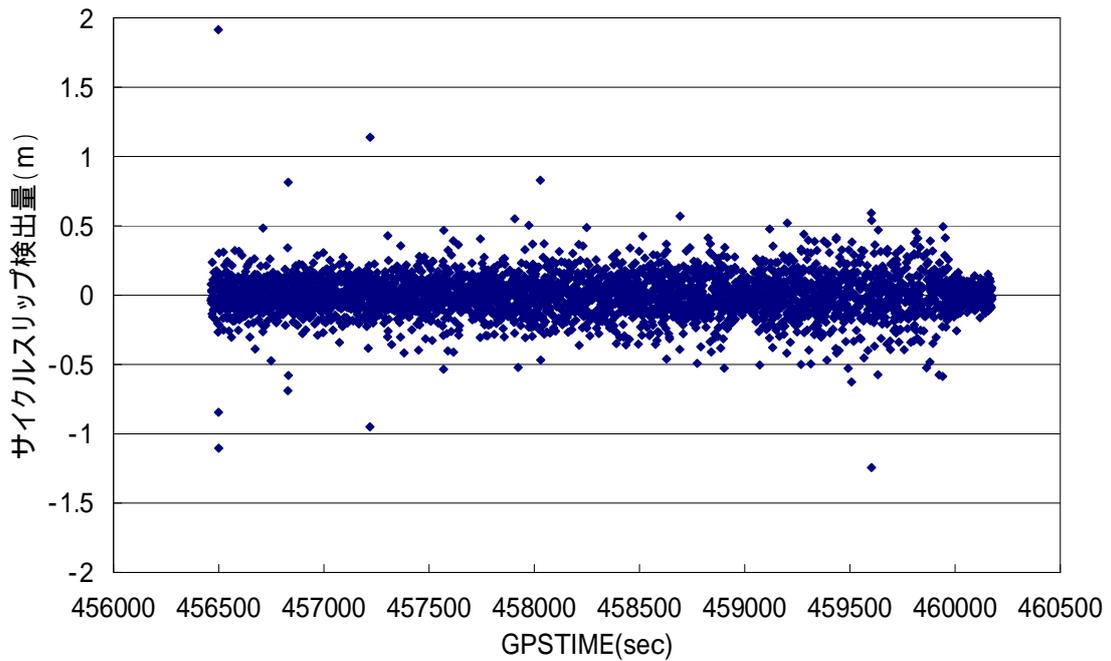


図.4 - 12 : 搬送波測定値の時刻間 3 重差を利用した検知手法を用いた結果 2

図.4 - 7,8 の擬似距離と搬送波の差を用いた検出法では大きなサイクルスリップは検知できているが、擬似距離のノイズが大いために小さいサイクルスリップがうまく検知できていないことがわかる。一方、図 4 - 9,10,11,12 のドップラー周波数による位相予測による検出法および搬送波位相の時刻間 3 重差ではノイズも小さく、うまく検知できているのではないかと考えられる。

#### 4.3.3 まとめと考察

擬似距離と搬送波の差を用いた検知手法ではノイズが大きいため小さなサイクルスリップは検知は困難であり、また閾値の設定が難しい。その点ドップラー周波数を使った検知手法と時刻間 3 重差を利用した検知手法は擬似距離と搬送波の差を用いた検知手法に比べ、ノイズが小さく閾値の設定も易く容易に検知が可能である。結論として 1 周波観測値のみでのサイクルスリップの検知手法に関してはドップラー周波数を使った検知と時刻間 3 重差を利用した手法が適していると思われる。

## 5章 総括

### 5.1 まとめ

第3章では、高感度GPS受信機におけるキャリアスムージングの問題について議論した。高感度GPS受信機の中には、擬似距離と搬送波の時刻が不一致であるために、キャリアスムージングを効果的に利用できないものがある。特に擬似距離補正值を利用したDGPSにおいてキャリアスムージングはまったく利用できないことがわかった。その解決策として観測量に擬似距離2重差を利用した相対測位があげられる。観測された擬似距離の2重差をとることで誤差要因である時計誤差や電離圏遅延などの多くを相殺することができ、キャリアスムージングを行うことができる。実際に実験を行い、キャリアスムージングの恩恵を受け高い精度を実現していることがわかった。一方、サイクルスリップという問題が発生し、測位解に影響を与えていることがわかった。サイクルスリップの検知・修復はキャリアスムージングを利用して測位精度を向上させるには必要不可欠であるといえる。

第4章では、第3章で問題となったサイクルスリップの検知手法の評価を行った。1周波観測における検知手法として3つの手法を評価した結果、擬似距離と搬送波の差を利用した手法では、擬似距離のノイズが大きいため移動体における大きなサイクルスリップ検出しか使用できなかった。一方、後2つのドップラー周波数を利用した検知手法と搬送波位相の時刻間3重差を利用した検知手法においてはノイズが小さく閾値の設定もしやすい。よって1周波観測におけるサイクルスリップ検知手法にはこの2手法が適していると思われる。

### 5.2 今後の課題

サイクルスリップを検知するにあたり、閾値の設定が問題となる。速度や振動といった測位条件の変化によってノイズが増加や小さなサイクルスリップが起きやすくなる可能性がある。サイクルスリップを正確に検知するには、このような測位条件の変化に応じて適切な閾値を設定しなければならない。よってさまざまな条件下で測位実験を行い、結果比較を行うことが今後の課題として挙げられる。

またサイクルスリップが起きた搬送波はそのまま観測値として使用できない。よって修復をしなければならない。よってサイクルスリップの修復手法を調べ、実験・評価することも今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本研究及び本稿作成において、日々ご指導・ご鞭撻頂きました、東京海洋大学情報通信工学研究室の安田明生教授、久保信明准教授に心から深く感謝申し上げます。安田教授、久保信明准教授のご指導があったおかげで、卒業論文を書き上げることができました。研究以外にもたくさんの知識を吸収させていただき、また、まだまだ未熟な私にも GPS/GNSS シンポジウム 2007 で研究発表を経験させていただくなど、充実した大学生を送ることが出来ました。本当に有難うございました。

技官の川村雅志先生にも色々のご指導いただきました。日々の生活、GPS/GNSS シンポジウムで様々なことを教えていただき、感謝申し上げます。

東京海洋大学情報通信工学研究室の OB である古野電気の富永貴樹さん、DENSO の五味泰人さん。GPS/GNSS シンポジウムや、卒業研究等で様々なアドバイスを頂き、有難うございました。

先輩の近藤俊一郎さん、富永麗司さん、湯浅純一さん、土本和彦さん、伊勢嶋潤さん、山田英輝さん、たくさんの方々いろいろなご指導頂きました。特に麗司さんには、シンポジウムの発表や卒業研究等で、朝方まで付き合っていたことが幾度もあり、ご迷惑をお掛けしました。近藤さん、湯浅さん、土本さんには GPS の基礎的なことを教えていただき、また日々の生活では大変お世話になりました。山田さん、素敵な笑顔をありがとうございました。先輩の方々、本当にありがとうございました。

最後に情報通信工学研究室の皆様へ心から感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] P.Misra, P.Enge 原著, A.Yasuda 他 訳 (2004) 「精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機-」, 社団法人 日本航海学会 GPS/GNSS 研究会
- [2] G.Xu (2003) 「GPS -Theory, Algorithms and Application-」
- [3] C.Rizos (1999) 「Detection and Repair of Cycle Slip」 SNAP, University of New South Wales, Austraria, <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/snap.htm>
- [4] T.Takasu 「測位衛星による高精度測位技術開発研究」, <http://gpspp.sakura.ne.jp/index.shtml>
- [5] Y.Gomi (2007) 「電離層影響下における GPS 相対測位の整数不定性決定の性能評価」, 東京海洋大学大学院修士論文
- [6] Y.Gomi (2005) 「DGPS 補正情報に関する研究」, 東京商船大学卒業論文
- [7] Y.Gomi, et al. (2005) 「キャリアスムージングによる 1 周波受信機の単独測位精度向上について」, 全国測量技術大会 2005
- [8] R.Tominaga (2006) 「LAMBDA 法による Ambiguity 決定に関する研究」, 東京商船大学卒業論文