

修士学位論文

ネットワーク RTK-GPS 測位に関する研究

平成15年度

(2003)

東京商船大学 商船学研究科

流通情報工学専攻

2002210 田中慎治

学位論文要旨
ネットワーク RTK-GPS 測位に関する研究

東京商船大学 商船学研究科 2002210 田中 慎治
指導教官 安田 明生

GPS 衛星からの搬送波位相データを測距に使用した測位システムであるキネマティック測位、RTK-GPS 測位 (Real-Time Kinematic GPS) は、通常のコード DGPS よりも遥かに高精度 (2drms で数 cm) な測位が実時間で可能なため、精密かつ実時間性を要する測位測量分野において様々な形態で利用が進んでいる。

これまで、RTK-GPS 測位を行うためには、個々の利用者が独自に設置した基準局から搬送波位相データを何らかの方法で利用者局に伝送する必要があった。至近距離に基準局を設置できる場合には、無免許で使える特定小電力無線装置が広く使われているが、特定小電力装置の利用範囲は 100 ~ 300 m 程度とされており、それ以上では携帯電話とモデムを組み合わせるなどの工夫が必要になる。しかしこれらの伝送方法では広域で複数の利用者が同時に利用することは出来ない。また、RTK-GPS 測位において、電離層遅延、対流圏遅延、衛星軌道誤差などは基準局との基線長に依存して誤差が大きくなり、基線長が 10km 以上では整数値バイアスが正確に決定できないなどの制限があった。さらに、広域での測位に対応するには基準点網を密度高く構築する必要があり、その実現には基準局網および通信網の構築やその保守のための費用等の問題がある。現在、RTK-GPS 測位の補正データを配信している国土交通省国土地理院の管理運用する電子基準点ネットワーク (GEONET : ジオネット) 相互間の平均距離は 25 ~ 30 km であるので、仮に利用者が中間地点にいた場合、最寄の電子基準点からの距離は 10 km 以上にもなる。このために RTK GPS 測位では Fix 率の低下は避けられず、基線に依存して増す誤差成分により測位精度の劣化も生じる。

このような状況において、近年、日本において複数 (3 点以上) の電子基準点を基準局として利用し、精度よくキネマティック測位を行えるよう工夫されたシステム、いわゆるネットワーク RTK-GPS (仮想基準点方式) について研究が進められてきた。このネットワーク RTK では、複数の基準局の観測から、移動局で使用する補正データを作成することにより、RTK-GPS 測位で問題となる基線長が延びることによる測位劣化を低減させることが可能とされている。ネットワーク RTK の補正データは計算センタで作成される。通常、計算センタで作成されたネットワーク RTK の補正データを移動局側で取得する場合、移動局の単独測位結果を 1 度計算センタに送信しなければならず、移動局と計算センタ間で双方向通信回線が必要である。主な通信媒体としては携帯電話 (ダイヤルアップ) が利用されている。そのためネットワーク RTK-GPS 測位においても複数の利用者が同時に利用することは難しく、さらに通信範囲外 (例えば海上など) では補正データ取得は困難である。しかし、ネットワーク RTK 方式の 1 つである Referetznetz 方式の補正データ (FKP) であれば、移動局での単独測位結果を計算センタに送信する必要がないため、片道通信の放送型補正データ配信が可能とされている。本論文では、この FKP を移動局に送信する伝送媒体として静止衛星通信を使用し、広域性、同時性を兼ね備えた放送型システムを提案する。そして、提案した放送システムにより、FKP と基準局搬送波データ (RTK-GPS 測位用) を移動局に送信し、基準局からの基線長が 10 km、20 km の地点でネットワーク RTK と RTK-GPS 測位を行い、その測位結果を比較した。その結果、基線長が 10 km と 20 km 地

点ではネットワーク RTK の測位結果に大きな差異は見られなかったが、RTK-GPS 測位では Fix 率が低下した、また、測位精度の劣化が確認できた。そこで、この測位精度劣化原因を詳しく分析するために、基準局からの基線を延ばしていき、各移動局で 2 重位相差に影響を与える誤差成分の偏差を検証した。

目次

第1章 序論

1.1	はじめに	1
1.2	GPS 測位の種類	1
1.3	ネットワーク RTK	2
1.4	研究の目的	2

第2章 GPS/GNSS の概要

2.1	GPS 衛星	3
2.1.1	GPS 衛星の概要	3
2.1.2	GPS 衛星からの信号	4
2.1.3	各衛星の状態	5
2.1.4	軌道情報(エフェメリス)	6
2.1.5	軌道情報(アルマナック)	10
2.1.6	電離層補正係数	11
2.1.7	UTC	14
2.2	測位計算	14
2.2.1	ユーザ位置計算	14
2.2.2	共分散行列	19
2.2.3	DOP	19
2.2.4	測位分布	21
2.3	測地系	23
2.3.1	WGS-84 と日本測地系	23
2.3.2	標高とジオイド高	25

第3章 誤差要因

3.1	衛星軌道	27
3.2	衛星クロック	27
3.3	電離層遅延誤差	27
3.3.1	電離層遅延の概要	27
3.3.2	電離層中での電波の位相速度と群速度	28
3.3.3	電離層遅延量	29
3.4	対流圏遅延誤差	30
3.4.1	対流圏遅延の概要	31
3.4.2	Saastamoinen Model	32
3.5	マルチパス誤差	33
3.6	受信機の測定誤差	33

第4章 高精度測位

4.1	ディファレンシャル GPS 測位	34
4.1.1	ディファレンシャル GPS 測位とは	34

4.1.2	Local-Area 測位位置補正方式	34
4.1.3	Local-Area 擬似距離補正方式	34
4.1.4	補正データ放送方式	36
4.2	干渉測位	37
4.2.1	干渉測位とは	37
4.2.2	搬送波位相積算値	38
4.2.3	時計誤差補正方式	38
4.2.4	測位計算	40
4.3	ネットワーク RTK	41
4.3.1	ネットワーク RTK の原理	41
4.3.2	VRS 方式	43
4.3.3	Referenznetz 方式 (FKP 方式)	44
4.3.4	FKP 作成方法	44
第5章 長基線測位誤差		
5.1	2重位相差の残差	51
5.1.1	はじめに	51
5.1.2	2重位相差の残差の定義	51
5.1.3	測定概要	51
5.1.4	2重位相差の残差の測定結果	55
5.1.5	考察	57
5.2	電離層の影響	58
5.2.1	はじめに	58
5.2.2	2周波による電離層推定方法	58
5.2.3	電離層推定結果	59
5.2.4	考察	62
5.3	電離層2重位相差	63
5.3.1	はじめに	63
5.3.2	電離層2重位相差	63
5.3.2	電離層2重位相差測定結果	63
5.3.3	考察	66
5.4	対流圏2重位相差	66
5.4.1	はじめに	66
5.4.2	対流圏2重位相差測定結果	66
5.4.3	考察	69
5.5	残差への影響	69
5.5.1	距離依存誤差の残差への影響	69
5.5.2	考察	76
5.6	まとめ	76

第6章 静止衛星通信による補正データ伝送システムの構築	
6.1 目的	78
6.2 システム概要	78
6.2.1 静止衛星通信回線ネットワーク	78
6.2.2 通信プロトコル	79
6.2.3 補正データ放送の基本構成	79
6.3 RTK-GPS 補正データ伝送実験	80
6.3.1 実験概要	80
6.3.2 実験環境と取得データ	81
6.3.3 解析結果	82
6.3.4 考察	83
6.4 FKP 補正データ伝送実験	84
6.4.1 実験概要	84
6.4.2 PAS の概要	86
6.4.3 検証方法	86
6.4.4 測位結果	87
6.4.5 考察	88
6.5 中基線 RTK-GPS、FKP 方式ネットワーク RTK 測位実験	88
6.5.1 実験概要	88
6.5.2 検証方法	91
6.5.3 30km地点結果	91
6.5.4 20km地点結果	92
6.5.5 10km地点結果	94
6.5.6 考察	96
6.6 基準局位置による FKP 測位精度検証	97
6.6.1 実験目的	97
6.6.2 実験概要	98
6.6.3 検証方法	99
6.6.4 実験結果	99
6.6.5 考察	101
6.7 まとめ	102
第7章 まとめ	103
謝辞	104
参考文献	105
付録 A	
付録 B	
付録 C	
付録 D	

第1章 序論

1.1 はじめに

GPS 衛星からの搬送波位相データを測距に使用した測位システムであるキネマティック測位、特に高速バイアス初期化技術 O T F (On the Fly) を組み合わせた RTK-GPS 測位 (Real-Time Kinematic GPS) は、通常のコード DGPS よりも遥かに高精度な測位が実時間で可能なため、精密かつ実時間性を要する測位測量分野において様々な形態で利用が進んでいる。

これまで、RTK-GPS 測位を行うためには、個々の利用者が独自に設置した基準局から搬送波位相データを何らかの方法で利用者局に伝送する必要があった。至近距離に基準局を設置できる場合には、無免許で使える特定小電力無線装置が広く使われているが、特定小電力装置の利用範囲は 100 ~ 300 m 程度とされており、それ以上では携帯電話とモデムを組み合わせるなどの工夫が必要になる。しかしこれらの伝送方法では広域の複数の利用者が同時に利用することは出来ない。また、RTK-GPS 測位において、電離層遅延、対流圏遅延、衛星軌道誤差などは基線長に依存して誤差が大きくなり、基線長が 10km 以上では測定できないなどの制限があった。さらに広域での測位に対応するには、基準点網を密度高く構築する必要があり、その実現には基準局網および通信網の構築やその保守のための費用等の問題がある。現在日本国内で R T K を行う際に使用される国土交通省国土地理院の管理運用する電子基準点ネットワーク (GEONET : ジオネット) 相互間の平均距離は 25 ~ 30 km であるので、仮に利用者が中間地点にいた場合、最寄の電子基準点からの距離は 10 km 以上にもなる。このために測位精度の劣化は避けられず、O T F の動作も不安定になる。

このような状況において、近年、日本において、電子基準点ネットワークの内の幾つかの電子基準点を基準局として利用して精度よくキネマティック測位を行えるよう工夫されたシステム (例えば基線長 50 km 以上の広域の利用者に対して、基準局ネットワークにより新しく補正データを作成する) いわゆるネットワーク RTK-GPS (仮想基準点方式) について研究が進められてきた。現在、作成した基準局データを利用者局に伝送する手段として、主に携帯電話 (ダイヤルアップ) などが使われている。そのためネットワーク RTK-GPS 測位においても複数の利用者が同時に利用することは難しく、さらに通信範囲外 (例えば海上など) では補正データを送信すら出来ない状態である。

2008 年には日本上空に準天頂衛星が打ち上げ予定であり、この衛星は補正データの伝送媒体としても期待されている。

1.2 GPS 測位の種類

GPS の最も標準的な測位は、GPS 衛星からのコード信号のみを基に単独で測位する SPS (Standard Positioning Service) と呼ばれ、水平方向測位誤差は 2 d r m s で約 25 m 程度といわれている。米軍関係者のみに使用が許されている P コードによる PPS (Precise Positioning Service) も単独では 10 m 程度の精度であるといわれている。

GPS 測位精度を劣化させるシステム以外の主な原因としては、電離層電波伝搬誤差、対流圏電波伝搬誤差、マルチパス、受信機内部ノイズ等があげられる。そのため、これ以上の精度を必要とする場合は位置測位計算時に何らかの手段で補正をする必要があり、搬送波位相による測位では、これら外的要因による精度劣化を軽減して高精度の測位が可能となる。これは干渉測位と呼ばれる。移動体に対する適用の場合は KGPS (Kinematic GPS) さらに実時間で KGPS 測位を行う場合は RTK-GPS (Real Time

K-GPS) と呼ぶ。

搬送波による測位では、あらかじめ位置の分かっている定点に基準局を設けて搬送波を監視し、衛星までの擬似距離や搬送波位相の情報を計算し、実際に測位に用いる GPS 受信機に入力する必要がある。

1.3 ネットワークRTK

図 1-1 にネットワークRTKの基本構成概念図を示す。ネットワークRTKとは、複数の実基準局 (real reference station) と、それらの実基準局を監視する制御局 (計算センタ) より構成される。複数 (3つ以上) の実基準局で測定された、観測データはネットワークを介して制御局に集められる。このときのネットワークは主にインターネットが使用されている。制御局では集めた観測データから、ネットワーク内 (実基準局で囲まれた範囲) のすべてのユーザに共通に使用できる補正データ (VRS データまたはFKP 後述する) を計算し、利用者局に伝送する。利用者局での測位計算は通常のRTK-GPSと同じである。

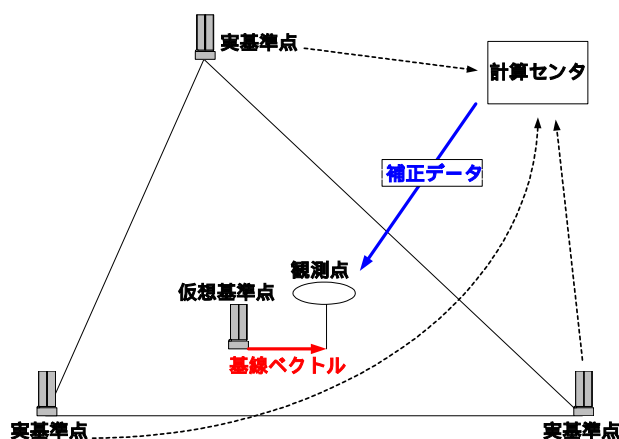


図 1-1: ネットワークRTK概略図

1.4 研究の目的

現在、国内においてネットワークRTKの補正データ伝送手段は携帯電話、特定小電力無線等の通信範囲が限定される方法が採用されている。しかし、ネットワークRTKの方式の1つFKP方式に関しては、その特性上、放送型の補正データ配信が可能とされているため、補正データの放送サービスが望まれている。現在、ドイツにおいてFKPの放送サービスが行われているが、その方法は専用の帯域の電波に乗せて放送するものである。日本においては、未だFKP専用の帯域は確保されておらず、放送手段は確立していない。このような状況のなか、本研究では、静止衛星通信回線を使用してFKPを放送するシステムを構築し、実験により実用化への可能性を検証した。

さらに、RTK-GPS 測位において、長基線による測位不安定性の問題に焦点をあてる。RTK-GPS 測位において、電離層遅延、対流圏遅延、衛星軌道誤差などは基準局との基線長に依存して誤差が大きくな

り、基線長が10 km以上では整数値バイアスが正確に決定できないなどの制限があった。そこで、これらの誤差が基線に依存して、どの程度影響してくるかを2重位相差に残ってくる誤差（残差）を評価することにより検証する。

ネットワーク RTK では、RTK-GPS で問題となる距離依存の誤差を複数の基準局を使用することによって補正し、長基線でも安定した高精度測位が行えるとされているため、実際に中基線で RTK GPS 測位とネットワーク RTK 測位を行い測位精度を比較し評価する。その際の、補正データは先に提案した静止衛星通信回線を利用して伝送する。

第2章 GPS/GNSS の概要

2.1 GPS 衛星

2.1.1 GPS 衛星の概要

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ることとなる。実際には、軌道が随時変更されており決まっていないが、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。図2-1にGPS衛星の軌道概念図を示す。

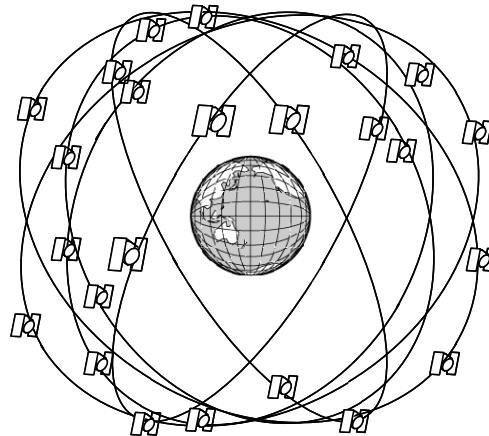


図2-1:GPS衛星軌道の概念図

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符号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。

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	26,561km
周回周期	12恒星時間(約11時間58秒)
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=1,575.42MHz(10.23MHz × 154) L2=1,227.6MHz(10.23MHz × 120)
測距信号	C/A code:L1波で送信、民間用に開放 P code:L1,L2で送信、非公開
地上受信電力 (仰角 5 ° 以上)	L1:C/A code>-160dBW、P code>-163 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)

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。

2.1.2 GPS 衛星からの信号

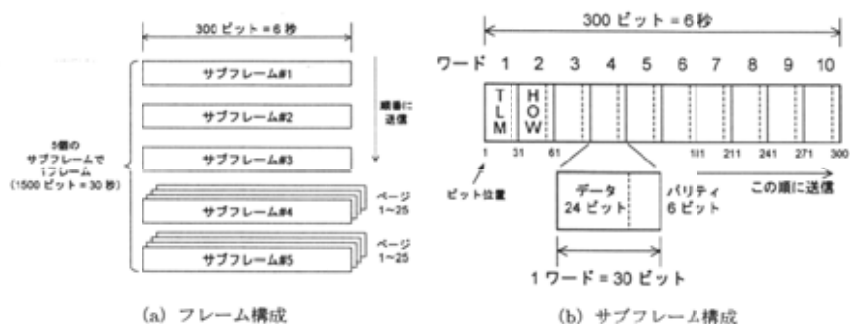


図 2-2 :航法メッセージのフォーマット

ユーザが測位計算を実行するためには、GPS衛星の位置を知っておかなければならない。このため、GPS衛星は測位信号に軌道情報を含んでいる航法メッセージというデータを載せている。航法メッセージのデータ速度は50bpsである。

航法メッセージの1サイクルはフレームという単位で呼ばれ、図2-2(a)のような構造になっている。1フレームは1500ビットなので、これを送信するには30秒の時間が掛かる。フレームは5組のサブフレーム(各300ビット)から構成されており、サブフレーム1~3は送信している衛星自身のクロック補正情報や軌道情報(エフェメリス)が含まれており、毎回同じ内容が繰り返し送信される。これに対してサブフレーム4および5は全衛星が同じ内容を送信しており、その内容は軌道上のすべてのGPS衛星(最大32衛星)の概略の軌道情報(アルマナック)や電離層補正情報となっているが、これらはデータ量が多いためさらにページ単位に分割されてサブフレームに収容される。つまり、サブフレーム4および5により送信されるデータはそれぞれページ1~25に分割されており、フレームごとに異なるページの内容が順番に送られる。すべてのページの内容を送信するには25フレームを必要とし、航法メッセージの全情報を得るには12分30秒の時間が掛かることになる。

サブフレームの内部は図2-2(b)のようにワードという単位に分割されている。1ワードは30ビットで1サブフレームは10ワードに対応し、各ワードは24ビットのデータ部とパリティチェック用の6ビットから構成される。サブフレームの先頭にはTLM(telemetry)ワード、続けてHOW(hand over)ワードが送信されることとされており、TLMワードには同期用のパターン、HOWワードにはGPS信号の時刻情報が含まれている。

2.1.3 各衛星の状態(サブフレーム1)

航法メッセージのサブフレーム1には、メッセージを送信している衛星自体の状態を表す数値やクロック補正係数が収められている(表(2-2))。「スケール」は航法メッセージとして格納されている数値(ビットの並び順は先に送信されているほうが上位ビットで、小数点の位置は最下位ビットの右)から本来の数値に変換するための係数を表し、スケールがnの時、メッセージ中の値に 2^n を乗じると本来の数値が得られる。符号付きの数値については、2の補数により表現できる。

$S_{V_{health}}$ は衛星の状態を表すコードで、0以外の場合は何らかの異常があることを示す。URAはその衛星により擬似距離を測定した場合の測距精度の目安で、15の場合はやはり何らかの異常があることを意味する。 T_{GD} は民間用L1信号の群遅延、ユーザが測定した擬似距離は T_{GD} だけ長くなっていることを意味する。

表2-2:サブフレーム1

ワード	ビット位置	ビット数	内容		スケール	符号	単位
1	1	22	TLM	テレメトリワード			
2	31	22	HOW	ハンドオーバーワード			
3	61	10	WN	週番号	0		
	73	4	URA	測距精度			
	77	6	SVhealth	衛星健康状態			
	83	2 MSB	IODC	クロック情報番号			
7	197	8	TGD	群遅延	-31		s
8	211	8 LSB	IODC	クロック情報番号			
	219	16	toc	エポック時刻(クロック)	4		s
9	241	8	af2	クロック補正係数	-55		s/s ²
	249	16	af1	クロック補正係数	-43		s/s
10	271	22	af0	クロック補正係数	-31		s

その他のパラメータは、衛星に搭載されているクロックの補正に使用される。GPS衛星には原始時計が搭載されており、正確なタイミングで測距信号を送信しているが、ごく小さな誤差は避けられない。このため、クロックの誤差を制御局で推定した上で、航法メッセージの一部として放送し、ユーザ側で補正することとなっている。

t_{oc} はこの補正の基準となる時刻で、週の始めからの経過時間で表される。クロックの補正は2次式で行われ、 a_{f0}, a_{f1}, a_{f2} の3つのパラメータが用意されている。先の群遅延パラメータ T_{GD} も考慮に入れると、測距信号が送信された時刻 t_t には次の補正を加えることとなる。

$$\Delta t_t = -\left\{a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r - T_{GD}\right\} \quad 2-1$$

t_r は相対論的効果の補正のために必要な項で、衛星軌道パラメータより、

$$\Delta t_r = -\frac{2e\sqrt{\mu_e A}}{c^2} \sin E \quad 2-2$$

として求める。 c は光速、 e は離心率、 A は軌道半径(エフェメリスデータより)、 E は離心近点角(後に説明する)地球重力定数としては、 $\mu_e = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ を用いる。

I O D Cは以上のクロック補正情報のバージョン番号を表しており、クロック補正情報が更新されるとI O D Cが変化するため、ユーザは補正情報の内容を比較しなくても更新の有無を知ることが出来る。

2.1.4 軌道情報 (エフェメリス)

表2-3:サブフレーム2

ワード	ビット位置	ビット数	内容		スケール	符号	単位
1	1	22	TLM	テレメトリワード			
2	31	22	HOW	ハンドオーバーワード			
3	61	8	IODE	軌道情報番号	8		
	69	16	C_{rs}	軌道補正係数	-5		m
4	91	16	n		-31		sc/s
	107	8 MSB	M_0	平均近点角	-31		sc
5	121	24 LSB					
6	151	16	C_{uc}	軌道補正係数	-29		rad
	159	8 MSB	e	離心率	-33		
7	181	24 LSB					
8	211	16	C_{us}	軌道補正係数	-29		rad
	227	8 MSB	A	軌道半径	-19		$m^{1/2}$
9	241	24 LSB					
10	271	16	t_{oe}	エポック時刻 (軌道)	4		s

表2-4:サブフレーム3

ワード	ビット位置	ビット数	内容		スケール	符号	単位
1	1	22	TLM	テレメトリワード			
2	31	22	HOW	ハンドオーバーワード			
3	61	16	C_{ic}	軌道補正係数	-29		rad
	77	8 MSB	ω	昇交点赤径	-31		sc
4	91	24 LSB					
5	121	16	C_{is}	軌道補正係数	-29		rad
	139	8 MSB	i_0	軌道傾斜角	-31		sc
6	151	24 LSB					
7	181	16	C_{rc}	軌道補正係数	-5		m
	197	8 MSB		近地点引数	-31		sc
8	211	24 LSB					
9	241	24	'	ω の変化率	-43		sc/s
10	279	14	l'	i_0 の変化率	-43		sc/s

サブフレーム2および3には、各衛星の軌道情報が格納されている。その内容は表2-3、2-4のとおりで、GPS衛星の軌道は基本的にいわゆる軌道の6要素により表現され、さらに精度を上げるための補正パラメータが追加されている。これらの情報はエフェメリス(ephemeris)と呼ばれ、任意の時刻におけるGPS衛星の位置を計算できるようになっている。

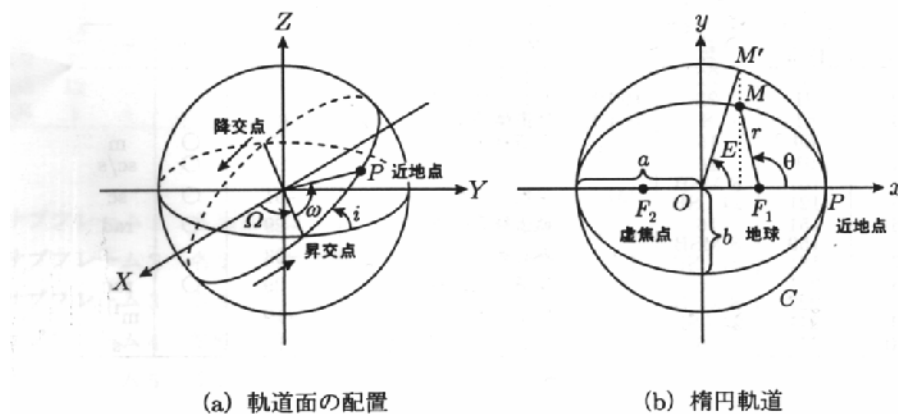


図2-3:人工衛星の軌道

- 昇交点赤経 (right ascension of the ascending node ; Ω) : 原点と昇交点を結ぶ直線と、基準となる X 軸との間の角度。反時計回りに測る。
- 軌道傾斜角 (inclination angle ; i) : 軌道面の、赤道面に対する傾斜の角度。昇交点から原点を見たときの反時計方向を正とする。静止衛星では 0 度、GPS の場合は 55 度。
- 近地点引数 (argument of perigee ; ω) : 原点から見た近地点の方向を示すパラメータで、昇交点を基準とした角度で表す。
- 軌道長半径 (semi major axis ; a) : 楕円の長径。短径 b とは、 $b = a\sqrt{1-e^2}$ の関係にある。
- 離心率 (eccentricity ; e) : 楕円の扁平さを表すパラメータで、 $0 \leq e < 1$ の範囲にあり、 e が小さいほど真円に近くなる。 $e = 0$ は円、 $e = 1$ は放物線を表す。
- 真近点角 (true anomaly ; θ) ある特定の時刻 (エポック) における人工衛星の位置を表すために用いる。近地点を基準として、焦点の周りに反時計回りに測った角度とする。

以上の 6 つのパラメータを軌道の 6 要素といい、人工衛星の軌道を記述する際に用いられる (図 2-3)。ただ、真近点角は時刻との関係が線形にならないことから扱いにくいので、GPS 衛星の位置を計算する際には平均近点角が用いられる。平均近点角 (mean anomaly) M はケプラー方程式

$$M = E - e \sin E \quad 2-3$$

から求められる。ここで E は楕円の中心周りに測った角度で、離心近点離角 (eccentric anomaly) といい、真近点角との間に、

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{1-e \cos E}, \\ \cos \theta &= \frac{\cos E - e}{1-e \cos E} \end{aligned} \quad 2-4$$

の関係がある。平均近点離角を用いると、エポック時刻 t_0 における平均近点角の初期値を M_0 としたとき、時刻 t における平均近点離角 $M(t)$ は、

$$M(t) = M_0 + n(t - t_0) \quad 2-5$$

と表せる。ここで、平均運動 (mean motion) n_0 は、

$$n_0 = \sqrt{\left(\frac{\mu_e}{A^3}\right)} \quad 2-6$$

であるので n は、

$$n = n_0 + \Delta n \quad 2-7$$

となり、平均運動の補正值となる。なお、 $M(t) = M_0 + 2\pi$ とすると、衛星が軌道を一周する時間、すなわち周回周期 T (period of revolution) が、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{A^3}{\mu_e}} \quad 2-8$$

と求められる。航法メッセージから GPS 衛星の位置を計算するには、まず衛星の位置を計算する時刻 t と、エポック時刻 t_{oe} との差から平均近点角 M_k を計算する。

$$\begin{aligned} t_k &= t - t_{oe} & 2-9 \\ M_k &= M_0 + nt_k & 2-10 \end{aligned}$$

式 2 - 3 のケプラー方程式を使用して、離心近点角 E_k を求める。

$$E_k = M_k + e \sin E_k \quad 2-11$$

この式 2 - 1 1 は「超越方程式」と呼ばれ、解析的に解けないので、 $E_0 = M_k$ として、逐次近似法を用いてもとめる。ほとんど 10 回程度計算すると十分な近似値が得られる。

$$\begin{aligned} E_1 &= E_0 + e \sin E_0 \\ E_2 &= E_0 + e \sin E_1 \\ &\vdots \\ E_{i+1} &= E_0 + e \sin E_i \end{aligned} \quad 2-12$$

$$|E_{i+1} - E_i| = \min$$

E_k が求まると、式 2-4 を使用して、真近点角 θ_k を求める。

後は、軌道面内における衛星の位置を計算して、E C E F 座標系 (earth centered earth fixed) に変換すればよい。真近点角は近地点が基準であるから、これを昇交点を基準とした回転角 ϕ_k に変換する。

$$\phi_k = \theta_k + \omega \quad 2-13$$

回転角と軌道補正係数 C を使用して、昇交点からの角度 u_k 、地心距離 r_k 、軌道傾斜角 i_k を計算する。

$$\begin{bmatrix} u_k \\ r_k \\ i_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_k \\ A(1 - e \cos E_k) \\ i_0 + i' t_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{uc} & C_{us} \\ C_{rc} & C_{rs} \\ C_{ic} & C_{is} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 2\phi_k \\ \sin 2\phi_k \end{bmatrix} \quad 2-14$$

最後に、昇交点赤径を求め、E C E F 直交座標系に変換する。

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\Omega' - \Omega'_e) t_k - \Omega'_e t_{oe} \quad 2-15$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega_k & -\sin \Omega_k \cos i_k \\ \sin \Omega_k & \cos \Omega_k \cos i_k \\ 0 & \sin i_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_k \cos u_k \\ r_k \sin u_k \end{bmatrix} \quad 2-16$$

地球時点角速度は、 $\Omega'_e = 7.2921151467 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ である。

以上により、任意の時刻における GPS 衛星の位置を計算できる。IODE は IODC と同様にエフェメリス情報のバージョン番号を意味する。また、エフェメリス情報の角度の単位としては半円 (sc=semi-circle ; 1sc= π rad) が用いられており、円周率は 3 . 1 4 1 5 9 2 6 5 3 5 8 9 8 を用いる。

2 . 1 . 5 軌道情報 (アルマナック)

サブフレーム 1 ~ 3 が航法メッセージを送信している衛星自身の情報しか含まないのに対して、サブフレーム 4 および 5 には全衛星に関係した情報が収められており、どの衛星も同じ情報を放送している。これらの情報はデータ量が多いためページ単位に分割されているのは前述のとおりで、どちらのサブフレームも 1 ~ 2 5 のいずれかのページが順番に送信される。

図2-5:航法メッセージ(アルマナック)

ワード	ビット位置	ビット数	内容		スケール	符号	単位
1	1	22	TLM	テレメトリワード			
2	31	22	HOW	ハンドオーバーワード			
3	63	6	SV ID	衛星番号			
	69	16	e	離心率	-21		
4	91	8	toa	エポック時刻(アルマナック)	12		s
	99	16	i	軌道傾斜角	-19		sc
5	121	16	'	0の変化率	-38		sc/s
	137	8	SVhealth	衛星健康状態			
6	151	24	A	軌道半径	-11		m1/2
	181	24	0	昇交点赤経	-23		sc
8	211	24		近地点引数	-23		sc
9	241	24	M0	平均近点角	-23		sc
10	271	8 MSB	af0	クロック補正係数			
	279	11	af1	クロック補正係数	-38		s/s
	290	3 LSB	af2	クロック補正係数	-20		s

全衛星分の概略の軌道情報はアルマナック情報と呼ばれ、サブフレーム4のページ2～5および7～10、サブフレーム5のページ1～24に収められている。合計32ページで、32機の衛星に対応する。アルマナック情報の内容は表2-5のとおりで、クロック補正情報およびエフェメリス情報の一部から構成される。同じパラメータでもエフェメリス情報に比べてビット数が減らされており、衛星の補正に最低限必要な情報に抑えられている。アルマナック情報のエポック時刻は t_{oa} で規定される。

2.1.6 電離層補正係数

図2-6:航法メッセージ

ワード	ビット位置	ビット数	内容		スケール	符号	単位
1	1	22	TLM	テレメトリワード			
2	31	22	HOW	ハンドオーバーワード			
3	63	6	SV ID	ページID = 56			
	69	8	0	電離層補正係数	-30		s
	77	8	1	電離層補正係数	-27		s/sc
4	91	8	2	電離層補正係数	-24		s/sc ²
	99	8	3	電離層補正係数	-24		s/sc ³
	107	8	0	電離層補正係数	11		s
5	121	8	1	電離層補正係数	14		s/sc
	129	8	2	電離層補正係数	16		s/sc
	137	8	3	電離層補正係数	16		s/sc ²
6	151	24	A ₁	UTCパラメータ	-50		s/sc ³
7	181	24 MSB	A ₀	UTCパラメータ	-30		s
8	211	8 LSB					
	219	8	T _{ot}	エポック時刻(UTC)	12		s
	227	8	WN _t		0		weeks
9	241	8	t _{LS}	現在の閏秒	0		s
	249	8	WN _{LSF}	閏秒の更新週	0		weeks
	257	8	DN	閏秒の更新日	0		days
	271	8	t _{LSF}	更新後の閏秒	0		s

高度100 km以上に分布する電離層にはGPSの使用するマイクロ波帯の電波の進行を遅くさせる働きがあり、これにより生じる電離層遅延についてはあらかじめ決められたモデル式により遅延量を推定して補正することになっている。補正するための情報はサブフレーム4のページ18に収められている(表2-6)。 $\alpha_0 \cdots \alpha_3, \beta_0 \cdots \beta_3$ の合計8個のパラメータによって、全世界の電離層遅延を補正するもので、この電離相補正係数はすべての衛星に共通である。

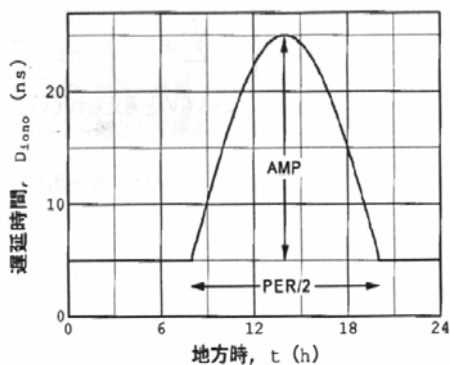


図2-4:電離層遅延モデル(コサインモデル)

電離層の1日の変化はかなり複雑な形をしているが、これを5 nsの一定遅延量と地方時の14時にピークを持つ余弦関数の上半分とを組み合わせた曲線で簡略化する(図2-4)。

以下にそのモデル式を示す。

$$T_{iono}(t_L) = \begin{cases} F \left[5 \times 10^{-9} + AMP \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right] & , |x| < 1.57 \\ 5 \times 10^{-9} F & , |x| \geq 1.57 \end{cases} \quad 2-17$$

このモデル式はコサインモデルと呼ばれている。式2-17の x はコサイン関数の位相を表しており、

$$x = \frac{2\pi(t_L - 14 \times 3600)}{PER} \quad 2-18$$

より計算する。 t_L は、衛星から送信された電波が電離層に入射する位置(pierce point)における地方時で、GPS時刻 t との関係は

$$t_L = 12 \times 3600 \lambda_i + t \quad 2-19$$

である(λ_i は電波と電離層が交わる点の経度)。AMPはコサイン波の振幅を表し、電離層遅

延パラメータ $\alpha_0 \cdots \alpha_3$ より

$$AMP = \sum_{i=3}^3 \alpha_i \Phi_m^i \quad 2-20$$

として計算される。電離層に関する現象は地磁気に関係していると考えられるため、磁気緯度 Φ_m [rad] が使用される。PER はコサイン波の周期であり、電離層遅延補正パラメータ $\beta_0 \cdots \beta_3$ より、

$$PER = \sum_{i=0}^3 \beta_i \Phi_m^i \quad 2-21$$

で計算される。磁気緯度 Φ_m は受信機の地理座標 (ϕ_u, λ_u) と、衛星仰角 EL と衛星の方位角 AZ より求めることが出来る。まず、受信機の位置と、電波が電離層と交わる位置の地球中心を原点とする角度をもとめる（角度はすべて半円 (semi-circle) とする）。

$$\psi = \frac{0.00137}{EL + 0.11} - 0.022 \quad [sc] \quad 2-22$$

この角度から、電波と電離層が交わる点の緯度を求める。

$$\phi_{i0} = \phi_u + \psi \cos AZ \quad [sc] \quad 2-23$$

$$\phi_i = \begin{cases} \phi_{i0} & |\phi_{i0}| \leq 0.416 \\ 0.416 & \phi_{i0} > 0.416 \\ -0.416 & \phi_{i0} < -0.416 \end{cases} \quad [sc] \quad 2-24$$

次に電波と電離層が交わる点の経度を求める。

$$\lambda_i = \lambda_u + \frac{\psi \sin AZ}{\cos \phi_i} \quad [sc] \quad 2-25$$

上記で求めた電波が電離層に入射する位置座標 (ϕ_i, λ_i) より、磁気緯度 Φ_m [sc] を求める。

$$\Phi_m = \phi_i + 0.064 \cos(\lambda_i - 1.617) \quad [sc] \quad 2-26$$

最後に F を求める。これは、電波が天頂方向からでなく斜め方向から電離層に入射するために電離層の通過距離が長くなる影響を考慮するためのもので、衛星仰角 EL から求められる。実際のGPS受信機では、近似式として以下の式を使用している。

$$F = 1.0 + 16.0(0.53 - EL)^3 \quad 2-27$$

図2-5にこの電離層遅延モデルを使用した場合の衛星仰角と遅延増加率の関係を示す。天頂方向の遅延が0となり、仰角が低くなるほど遅延増加率は増加することが分かる。これは、前述したように、仰角が低くなるにつれ、電波が電離層を通過する距離が長くなる影響である。

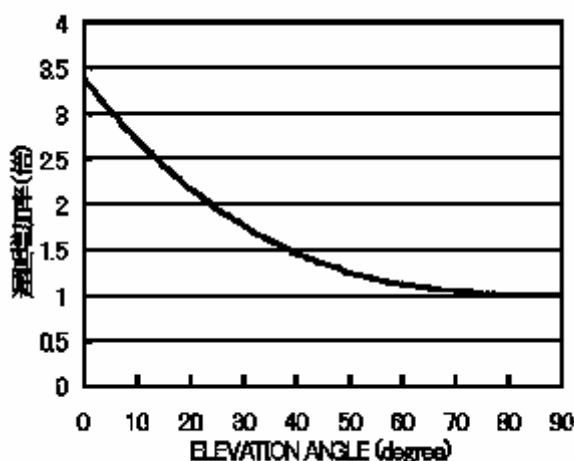


図2-5:衛星仰角と電離層遅延増加率の関係

2.1.7 UTC

GPSが基準とする時系はGPS時刻と呼ばれ、GPS衛星および地上のMCS（主統制局）はすべてこの時系にしたがって稼動している。GPS時刻はMCSに設置されているセシウム原子時計により管理されているが、そのベースとなっているのは米海軍天文台（USNO；US Naval observatory）の原子時計である。ユーザがGPS受信機により得る時計はGPS時刻が基準となるから、USNO時刻にも同期していることになる。

サブフレーム4のページ18には、GPS時刻とUTC（協定世界時）との関係を表す変換パラメータが格納されている。この情報を利用すれば、受信機側でUTCやJST（日本標準時）が得られる。GPS時刻 t からUTCによる時刻 t_{UTC} への変換は、次式により行う。

$$t_{UTC} = t - \Delta t_{UTC} \quad 2-28$$

$$\Delta t_{UTC} = \Delta t_{LS} + A_0 + A_1(t - t_{ot}) \quad 2-29$$

A_0, A_1 はUSNO原子時計のUTCに対するズレをあらわしており、エポック時刻 t_{ot} からの経

過時間の1次式により補正する。 Δt_{LS} は閏秒で、1999年～現時点まで $\Delta t_{LS} = 13s$ である。閏秒は不定期に実施されることから、GPS衛星が放送するUTC関係(表2-6)の情報には次の閏秒の更新予定日が含まれている。

2.2 測位計算

2.2.1 ユーザ位置計算

衛星*i*と受信機との距離の測定値を r_i [m]と書くことにする。これは正確な距離 ρ_i [m]に受信機の時計の進み δ [s]による誤差が加わって測定されたものであることから擬似距離(pseudorange)と呼ばれ、 $r_i = \rho_i + c\delta = \rho_i + s$ の関係にある。受信機の時計が進んでいると、測距信号が到着する時間に本来よりも進んだ時刻が観測されるため、見かけ上余分に時間が掛かったことになり、距離の測定結果が長めとなる。

衛星の位置は既知として、測定した擬似距離から受信機位置を求めることを考える。衛星と受信機との正確な距離 ρ_i は、受信機位置を (x, y, z) 、衛星*i*の位置を (x_i, y_i, z_i) とすると、

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad 2-30$$

と表される(単位はすべて[m])。可視衛星数が*N*のとき、擬似距離と本来の距離との関係より、受信機位置*X*を求めるためには、連立方程式

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} + s \\ r_2 &= \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} + s \\ &\vdots \\ r_N &= \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2 + (z_N - z)^2} + s \end{aligned} \quad 2-31$$

を、 x, y, z, s についてとけばよい。3次元の位置を決めるためには未知数は最低3つとなるが、式2-30では受信機の時計誤差 δ も未知数として扱われているため未知数は合計4つとなり、これを解くには最低4つの方程式が必要となる。したがって、4個以上の衛星を使用して擬似距離を測定する必要がある。

連立方程式2-31のそれぞれの式は、二乗すると球面を表す式になる。幾何学的には、受信機位置 x, y, z はこれらの球面の交点として求めることができる。正しく距離が測定されていれば4つの球面は1点で交わるはずだが、擬似距離は受信クロック誤差 $s = c\delta$ だけ長く測定されているから、1点では交わらない。このため、図2-6のように球面が1点で交わるように*s*を変化させて球の大きさを調節すると、その時の交点として受信機位置が求められる。5個以上の衛星を使用する場合はそれでも1点では交わらないので、受信機位置 x, y, z と各球面との距

離の二乗和が最も小さくなるように s を調整する (最小二乗法)。

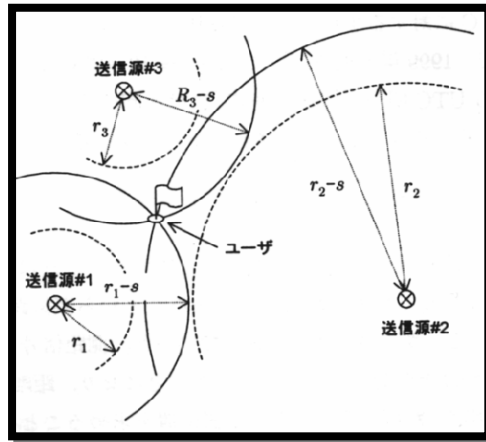


図2-6: 球面の交点として位置を求める

式 2 - 3 1 は非線形の連立方程式であるため、通常は適当な初期値のまわりで線形化をおこない、逐次近似法により解を得る。いかにその手順を示す。

- (1) x, y, z, s について適当な初期値 x^0, y^0, z^0, s^0 を用意する。
- (2) x^0, y^0, z^0, s^0 としたときに擬似距離として測定されるべき値を計算する。

$$\begin{aligned}
 r_1^0 &= \sqrt{(x_1 - x^0)^2 + (y_1 - y^0)^2 + (z_1 - z^0)^2} + s^0 \\
 r_2^0 &= \sqrt{(x_2 - x^0)^2 + (y_2 - y^0)^2 + (z_2 - z^0)^2} + s^0 \\
 &\vdots \\
 r_N^0 &= \sqrt{(x_N - x^0)^2 + (y_N - y^0)^2 + (z_N - z^0)^2} + s^0
 \end{aligned}
 \tag{2-32}$$

- (3) 実際に測定された擬似距離 r_i に対して、残差 $\Delta r_i = r_i - r_i^0$ を求める。
- (4) x^0, y^0, z^0, s^0 をこの残差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、 r_i の x, y, z, s による偏微分

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial r_i}{\partial x} &= -(x_i - x^0) / r_i^0, & \frac{\partial r_i}{\partial y} &= -(y_i - y^0) / r_i^0, \\
 \frac{\partial r_i}{\partial z} &= -(z_i - z^0) / r_i^0, & \frac{\partial r_i}{\partial s} &= 1
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

を用いる。 x^0, y^0, z^0, s^0 の変化量を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ と書くと、

$$\begin{aligned} \Delta r_1 &= \frac{\partial r_1}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_1}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_1}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_1}{\partial s} \Delta s \\ \Delta r_2 &= \frac{\partial r_2}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_2}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_2}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_2}{\partial s} \Delta s \\ &\vdots \\ \Delta r_N &= \frac{\partial r_N}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial r_N}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial r_N}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial r_N}{\partial s} \Delta s \end{aligned} \tag{2-34}$$

という連立方程式が得られる。 Δr_i は分かっているから、この連立方程式を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ について解けばよい。

(5) 得られた $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ を初期値として与えた x^0, y^0, z^0, s^0 に加えて、初期値を変更する。

$$\begin{aligned} x^1 &= x^0 + \Delta x, & y^1 &= y^0 + \Delta y, \\ z^1 &= z^0 + \Delta z, & s^1 &= s^0 + \Delta s, \end{aligned} \tag{2-35}$$

(6) 初期値を x^1, y^1, z^1, s^1 に更新して、(2) に戻る。以上の手順を $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta s$ が十分に小さくなるまで繰り返す。

このような手順で解を求めることが出来る。通常はそれほど厳密な初期値は必要なく、数回程度の繰り返しで正しい解に収束する。

手順(4)の方程式の解法を紹介する。取り扱いを簡単にするために方程式を行列により表現する。ベクトル $\Delta X = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta s]^T$ 、 $\Delta R = [\Delta r_1 \ \Delta r_2 \ \dots \ \Delta r_N]^T$ を利用すると、

(4)の方程式は、

$$G\Delta X = \Delta R \tag{2-36}$$

と簡単に書くことが出来る。行列 G は、

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial x} & \frac{\partial r_1}{\partial y} & \frac{\partial r_1}{\partial z} & \frac{\partial r_1}{\partial s} \\ \frac{\partial r_2}{\partial x} & \frac{\partial r_2}{\partial y} & \frac{\partial r_2}{\partial z} & \frac{\partial r_2}{\partial s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial r_N}{\partial x} & \frac{\partial r_N}{\partial y} & \frac{\partial r_N}{\partial z} & \frac{\partial r_N}{\partial s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(x_1-x)}{r_1} & \frac{-(y_1-y)}{r_1} & \frac{-(z_1-z)}{r_1} & 1 \\ \frac{-(x_2-x)}{r_2} & \frac{-(y_2-y)}{r_2} & \frac{-(z_2-z)}{r_2} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x_N-x)}{r_N} & \frac{-(y_N-y)}{r_N} & \frac{-(z_N-z)}{r_N} & 1 \end{bmatrix} \quad 2-37$$

で、GPS 衛星と受信機の相対的な位置関係により決まる。式 2-36 の連立方程式の解は、方程式が 4 つ (G が 4×4 の正方行列の場合) であれば、 G の逆行列を求めることで得られる。

$$\Delta X = G^{-1} \Delta R \quad 2-38$$

方程式が 5 つ以上 (測位に使用する衛星が 5 つ以上) ある場合は未知数よりも方程式のほうが数が多いことになる。これは、「過剰決定の状態」と呼ばれ、実際式 2-38 の左辺には誤差 ε_i が含まれており、

$$G \Delta X + \varepsilon = \Delta R \quad 2-39$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix} \quad 2-40$$

となる。そこで、この誤差 ε_i の二乗和を最小にするように解を決定する。これを「最小二乗法」と呼ぶ。

まず式 2-39 を

$$\varepsilon = \Delta R - G \Delta X \quad 2-41$$

と書き直す。このとき誤差 ε の二乗和 f は、

$$\begin{aligned} f &= \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i)^2 \\ &= \varepsilon^T \varepsilon \\ &= (\Delta R - G \Delta X)^T (\Delta R - G \Delta X) \\ &= \Delta R^T \Delta R - 2 \Delta R^T G \Delta X + \Delta X^T (G^T G) \Delta X \end{aligned} \quad 2-42$$

で表すことができる。ここで T は転置行列を示す。 f を最小にするために変数 ΔX で偏微分して極値を求めると、

$$\begin{aligned}\frac{\partial f}{\partial \Delta X} &= -2\Delta R^T G + 2\Delta X^T (G^T G) = 0 \\ \Delta X^T (G^T G) &= \Delta R^T G\end{aligned}\tag{2-43}$$

となり、両辺の転置をとり、 $(AB)^T = B^T A^T$ という性質と $(G^T G)$ が対称行列であることから、

$$(G^T G)\Delta X = G^T \Delta R\tag{2-44}$$

となる。これを「正規方程式」と呼び、 ΔX について解けば、

$$\Delta X = (G^T G)^{-1} G^T \Delta R\tag{2-45}$$

と最小 2 乗解が得られる。得られた ΔX を更新量とする。

2.2.2 共分散行列

定点において連続的に GPS 測位を行うと測位点は一点に集まることなく、必ず散ばってしまう。これはコードの立ち上がりの勾配が急峻でないことや伝搬経路上での問題で到着時間が揺らぐことが原因とされている。式 2-36 では概略位置の補正值 ΔX が最小となるよう擬似距離の値を逐次的に修正して測定点の位置をもとめることが出来た。 ΔX の収束値はゼロを中心とする真の位置からの偏位をしめしているの、これに転置行列 ΔX^T をかけることによって、 (x, y, z) 方向への分散が求めることが出来る。

$$\begin{aligned}\Delta X \Delta X^T &= (G^T G)^{-1} G^T \Delta R \Delta X^T \\ &= (G^T G)^{-1} \Delta R \Delta R^T \\ \Delta R \Delta R^T &= \sigma^2\end{aligned}\tag{2-46}$$

ここで $\Delta R \Delta R^T$ は擬似距離測定における誤差の分散 σ^2 (擬似距離の分散) であるから、

$(G^T G)^{-1}$ は擬似距離測定誤差の測位誤差への拡大係数と考えることができる。以下で分かりやすくするために

$$H = (G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xs}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{ys}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zs}^2 \\ \sigma_{sx}^2 & \sigma_{sy}^2 & \sigma_{sz}^2 & \sigma_{ss}^2 \end{bmatrix} \quad 2-47$$

とする。ここで行列 H は共分散行列と呼ばれ、各変数間 (x, y, z, s) の誤差の相互関係 (分散) を表している。この共分散行列より RMS (Root Mean Square) 位置誤差は

$$RMS \text{ position error} = \sigma^2 (H_{11} + H_{22} + H_{33}) \quad 2-48$$

として計算でき、誤差を表す指標として有効である。

2.2.3 DOP (Dilution of Precision)

測位精度を決める要因としては、(1) 擬似距離の測定精度 (測距精度)、(2) 利用者と衛星との幾何学的位置関係 (DOP) の2つがある。(1) については、前述の σ が表している。(2) のDOPに関して位置精度を表すPDOP (Position DOP) と時間精度を表すTDOP (Time DOP) は以下のように計算できる。

$$PDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} = \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33}} \quad 2-49$$

$$TDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_{ss}^2} = \sqrt{H_{44}} \quad 2-50$$

そして、幾何学精度を表すGDOP (Geometric DOP) は、

$$GDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + \sigma_{ss}^2} = \sqrt{H_{11} + H_{22} + H_{33} + H_{44}} \quad 2-51$$

として計算できる。GPSにおけ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、

$$RMS(3D \text{ position estimation error}) = \sigma \cdot PDOP \quad 2-52$$

$$RMS(\text{Clock bias estimation error}) = \sigma \cdot TDOP \quad 2-53$$

$$RMS(3D \text{ position and clock bias estimation error}) = \sigma \cdot GDOP \quad 2-54$$

の関係がある。ただしクロックエラーの測位精度は距離で表されるため、単位を時間で表すために光速 c で除する必要がある。

これらの計算はすべて E C E F 座標系での位置決定における測位精度である。そのため、アンテナ位置を中心とした水平方向と垂直方向の D O P を考える場合、行列 ΔX を E C E F 座標系から、E N U (East, North, Up) の局地座標系に変換して計算する必要がある。 ΔX の (x, y, z) 成分を $\Delta X_{(x,y,z)} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とし、座標変換後の行列を

$\Delta X_{L(x,y,z)} = (\Delta x_E, \Delta y_N, \Delta z_U)$ とすると、

$$\begin{bmatrix} \Delta X_{L(x,y,z)} \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_L & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_{(x,y,z)} \\ \Delta s \end{bmatrix} = \tilde{R}_L \begin{bmatrix} \Delta X_{(x,y,z)} \\ \Delta s \end{bmatrix} \quad 2-55$$

ここで、 R_L は座標変換のための回転行列とする。E N U 座標系の $\Delta X_L = (\Delta x_E, \Delta y_N, \Delta z_U, \Delta s)$ を使用し、式 2 - 4 7 と同じように、共分散行列 \tilde{H} を作成すると、

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} EDOP^2 & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & NDOP^2 & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & VDOP^2 & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & TDOP^2 \end{bmatrix} \quad 2-56$$

となり、E D O P (East D O P)、N D O P (North D O P)、V D O P (Vertical D O P)、T D O P が定義され、水平方向の位置精度 (H D O P) と高さ方向の位置精度 (V D O P) は、

$$HDOP = \sqrt{\tilde{H}_{11} + \tilde{H}_{22}} \quad 2-57$$

$$VDOP = \sqrt{\tilde{H}_{33}} \quad 2-58$$

となる。それぞれの測距精度は、

$$RMS \text{ horizontal error} = \sigma \cdot HDOP \quad 2-59$$

$$RMS \text{ vertical error} = \sigma \cdot VDOP \quad 2-60$$

$$RMS \text{ 3D error} = \sqrt{\sigma_{EE}^2 + \sigma_{NN}^2 + \sigma_{UU}^2} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} = \sigma \cdot PDOP \quad 2-61$$

となる。

2.2.3 測位分布

変数 $(j-k)$ 間の相関係数 ρ_{jk} は、 $\sigma_{jk} = \sigma_{kj} (j \neq k)$ の関係を用いて、

$$\rho_{jk} = \frac{\sigma_{jk}^2}{\sigma_{jj}\sigma_{kk}} \quad 2-62$$

のように決定される。

一方、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、それぞれ標準偏差を σ_x, σ_y 、相関係数 $\rho_{x,y}$ 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、

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho_{xy} \frac{x}{\sigma_x} \frac{y}{\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2)C \quad 2-63$$

となり、この楕円を共分散楕円という。ここで、 C の平方根は楕円の軸の長さに比例するが、この楕円の内側に確率変数 (x', y') を観測する確立 P は C の関数で、

$$P = 1 - \exp\left(\frac{-C}{2}\right) \quad 2-64$$

となる。ただし相関係数 ρ_{xy} は、

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(x', y')}{\sigma_x \sigma_y} \quad 2-65$$

で与えられる。式 2 - 6 4 において、 $C = 6$ とすると $P = 95.02\%$ となるので、このときの楕円が 95% 誤差楕円となりこの楕円の中に測位点の 95% が含まれることになる。

ここで $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ 、相関係数 $\rho_{xy} = 0$ とすると、式 2 - 6 3 は次式のように円となり、円形正規分布を表す。

$$x^2 + y^2 = C\sigma^2 \quad 2-66$$

式 2 - 6 4 において、 $P = 0.5$ を代入すると、 C は $(1.1774)^2$ となり、半径 1.1774σ 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立誤差 [5] あるいは CEP (Circular Error Probable) と呼ぶ。半径方向測位誤差 $drms$ は x, y 方向の分散が等しいとしているので、

$$drms = \sqrt{\sigma^2 + \sigma^2} = \sqrt{2}\sigma \quad 2-67$$

となり、 $CEP = 1.1774\sigma = 0.833drms$ となる。さらに式 2 - 6 7 の両辺を二乗して、式 2 - 6 6 の右辺 $C\sigma^2$ を $(C/2)drms^2$ と書き換えて、 $C = 6$ を代入すると、 $1.73drms$ が 95% 誤差円となる。一方、 $C\sigma^2$ に $2(2drms)^2$ をいれると $C = 8$ となり、式 2 - 6 4 の C に 8 を代入すると $P = 98.16\%$ となり、98.16% の測位点が $2drms$ 円の中に含まれることになる。一方、例えば x 方向の誤差が y 方向それに比べて極めて大きいときは $drms \cong \sigma_x \cong \sigma$ となって、1次元の確率過程に近くなり $2drms$ 円が 95.45% 誤差円となる。したがって $2drms$ 円は楕円の離心率により 95.45% ~ 98.16% の間で測位点を含む確率が変化する。

衛星の配置により得られる共分散行列から共分散楕円を書くには式 2 - 6 2 に

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_{xx} \sigma_0 \\ \sigma_y &= \sigma_{yy} \sigma_0 \end{aligned} \quad 2-68$$

および、式 2 - 6 5 から得られる相関係数 ρ_{xy} を代入すればよい。又同時に $x - y, y - x$ の組み合わせをとることにより、測位に先立ち予測される誤差の傾向が求められることになる。

2.3 測地系

2.3.1 WGS-84と日本測地系

経緯度により座標を表示する場合の原点は地球の中心（重心）である。したがって、本来は原点を正確に定めるために地球の形状に関する詳細な知識がなければならないが、大変困難である。そこで、各国においてそれぞれの測地系が定められており、これに基づいて測量が行われることになっている。日本において従来採用されていたものは日本測地系（Tokyo datum）と呼ばれ、日本で発行する地図には日本測地系の経緯度が表示されていた。日本測地系の経緯度原点は東京都港区麻布台にあり、この地点の経緯度が測量法により規定されている。

表2-7:日本測地系とWGS 84

	WGS 84系	日本測地系 (Tokyo datum)
座標系の種類	地心測地座標系	局所測地座標系
準拠楕円体	WGS 84楕円体	Bessel楕円体
長半径 (a)	6378137m	6377397.155m
扁平率 (f)	1/298.257223563	1/299.152813
楕円体の当てはめ	地球全体	経度緯度原点 (東京) 周辺
楕円体の原点	地球重心	地球重心からずれている
高さの基準面	WGS 84楕円体	東京湾の平均海面
高さの種類	楕円体高	標高
実現方法	GPS測位	水平：三角、三辺測量
		高さ：水準測量
基準となるもの	衛星と地上追跡局	国家基準点
設立年代	1984	明治時代

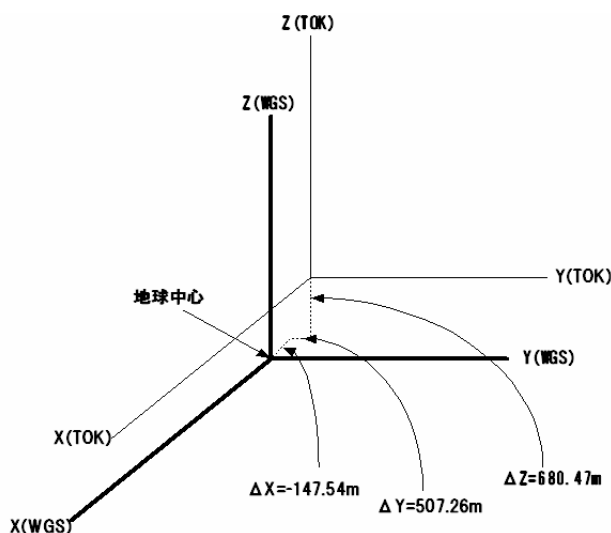


図2-7:日本測地系とWGS-84

こうした各国固有の測地系は国内の測量作業には都合がよく、経緯度原点を基準として多数の三角点の経緯度を定めておけば、これらを基準として測量を行い、対象地点の座標を決定す

ることが出来る。ただし、測地系の異なる国との国境では同一地点であっても座標地が違ってあらわされることがあり、共通の座標系が必要な場合は不都合を生じる。GPSのように全世界で使用可能なシステムでは、このような各国単位の座標系では都合が悪いため、世界中で共通に使える測地系として、米国により世界測地系（WGS：World Geodetic System）が開発された。WGSにもいくつかバージョンがあるが、現在GPSが採用しているのはWGS 84と呼ばれる測地系であり、座標原点は地球の重心、地球の形状を現すパラメータは最新の値とされている。

日本測地系からWGS-84への変換（図2-7）は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{Tokyo} + \begin{bmatrix} -147.54 \\ 507.26 \\ 680.47 \end{bmatrix} \quad 2-69$$

GPSの座標計算で利用されるECEF座標系は、WGS 84に準拠した直交座標系である。最近では精密測量分野でITRF（International terrestrial reference frame）という座標系が使用されるようになってきているが、現在のWGS 84は改正をへてITRFに近いものになっており、すくなくとも航法用途では両者はほぼ同一のものとして取り扱われる。

最近ではGPSによる測量が普及するなどして測地系の違いによる不便さが顕著になったことから、日本においても測量業務には全面的に世界測地系を使用することとなり、国土院が発行する地図にも世界測地系による経緯度が表示されるようになった。

2.3.2 標高とジオイド高

ある地点の位置を正確に表すためには、地面の高さを表す標高も必要なパラメータである。標高を測定する作業を水準測量といい、基準面からの鉛直距離を標高という。

GPSの場合の基準面は、WGS 84が採用している地球楕円体（準拠楕円体：reference ellipsoid）の表面からの高度が使われる。これを楕円体高(ellipsoidal height)といい、東京近辺では標高よりも40m程度大きな値となる。

楕円体高は理想的な形状の回転楕円体からの高さであるから平均海水面からの高さである標高との差は地域によって異なり、世界全体では最大100m程度になる。このため、標高が必要な場合には、衛星航法の分野ではジオイド

(geoid)という考え方が用いられる。ジオイドとは、地球全体に水を張ったと仮定してそのときの水面に相当する面（等ポテンシャル面）で、平均海水面と一致するものをいう。地球の大きさと比較すればジオイド面は滑らかな曲面であるが、局所的

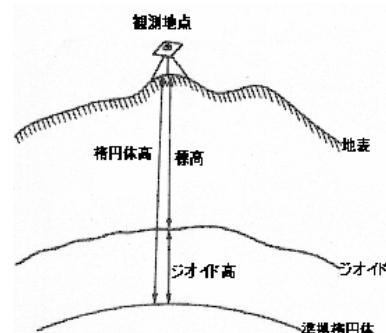


図2-8:標高とジオイド高

な重力の強弱に影響されて重力の強い山地ではジオイド面が凹、海溝周辺ではジオイド面が凸になっている。

橢円体高 h とジオイド面からの標高 H の関係を図 2 - 8 に示す。

$$H = h - N \qquad 2-70$$

であるから、ジオイド高 N が分かれば、橢円体高から標高を知ることが出来る。

第3章 測位誤差

3.1 衛星軌道

GPS受信機は、GPS衛星が送信する測距信号を用いて衛星と受信機間の距離を測定し、測位計算を行います。このとき衛星情報に誤差があると、そのまま測位誤差となって現れることになる。

GPS衛星の軌道は、地球の管制局で正確に予測されて、航法メッセージとして放送されているが、あくまでも予測値なのでどうしても数mから10m程度の誤差は避けられない。この予測誤差が、衛星軌道誤差として残る。図()は、衛星の航法メッセージとして放送されている放送軌道暦(broadcast ephemeris)から計算した衛星位置と、正確な軌道である精密軌道暦(precise ephemeris)による位置との差を表示している。この例では航法メッセージの放送直後はどの方向にも1.5m以下の誤差になっているが、2時間以上経過すると、誤差が拡大している様子がわかる。精密軌道暦とはIGS(International GPS Service)という国際的機関が作成しており、最確値の公称精度は5cmとされている。

衛星軌道誤差による影響は視線方向の位置誤差が問題で、これと直交する方向は測位結果に大きな影響を及ぼさない。人工衛星はそれほど細かい振動をすることはないので、衛星軌道の予測誤差は周期の長いバイアス性の成分となる特徴がある。

3.2 衛星クロック

GPS衛星には、時刻同期用の正確な発振器として、セシウム原始時計が搭載されている。宇宙用のセシウム発振器の精度は約 10^{-13} 程度である。しかし、1日の間には 10^{-8} 程度の時計誤差を生じるので、これを距離に直すと、約3mの誤差を示すことになる。補正をしないと、日々誤差を生じてしまうので、衛星クロックを補正するための情報が、航法メッセージに含まれている。

このクロック補正情報により補正しても残る誤差が、衛星クロック誤差になる。

3.3 電離層遅延誤差

3.3.1 電離層遅延の概要

地球の表面は大気で覆われている。その密度は地表付近で約 1 kg/m^3 で、上空へ行くほど希薄になる。500kmの高度では 10^{-12} 程度に減少する。地上からの高さが100km弱のところから数100kmの、非常に希薄な大気層が、太陽からの紫外線やX線により電離した状態になっている領域を電離層(ionosphere)という。電離層は下から上にD層、E層、F1層、F2層と呼ばれる4種類の層がある。低い周波数(波長の長い)の電波ほど下の層で反射される。一般に短波と呼ばれる波長が10m~100m位の電波は、F1層またはF2層で反射されるため、遠くまで送信することができる。これよりも高い周波数(波長の短い)電波は、電離層では反射されないで、そのまま突き抜け宇宙空間まで出ていく。このため、人工衛星との通信には超短波(VHF, very high frequency)や極超短波(UHF, ultra high frequency)を用いる必要がある。GPSに関係してくるのはF2層である。これらの層以外に、スプラディックE層(sporadic E)が時々現れる。

中性の大気を電子とイオンに分解するのは主に、太陽の紫外線によるものだが、これは日光の当たり具合によって電離層の状態、つまり電離層の電子とイオンの数が影響を受けるということである。この当たり具合は地球上の緯度と太陽の高度(仰角)に関係している。そのため、季節や時刻によって電離層のGPSへの影響の度合いは変化してゆく。

太陽の明るさは、目で見ていてもそれほど変化のあるようには見えないが、紫外線の強さは太陽活動によって変化する。この紫外線は太陽全面から輻射されるのではなく、黒点の周辺から強く発生する。黒点は太陽の表面にしみのように現れるが、きわめて激しい太陽ガスの攪乱場所となっている。ここでは、太陽面爆発(flare:フレア)などの異常現象が発生する。

このようなことから、太陽活動の変化による黒点の増減に関連して電離層の変化を考えることができる。太陽のウォルフ黒点数(太陽黒点を統一的に表す指標となる)の変化から、太陽活動が約11年の周期を持っていることを見て取れる。

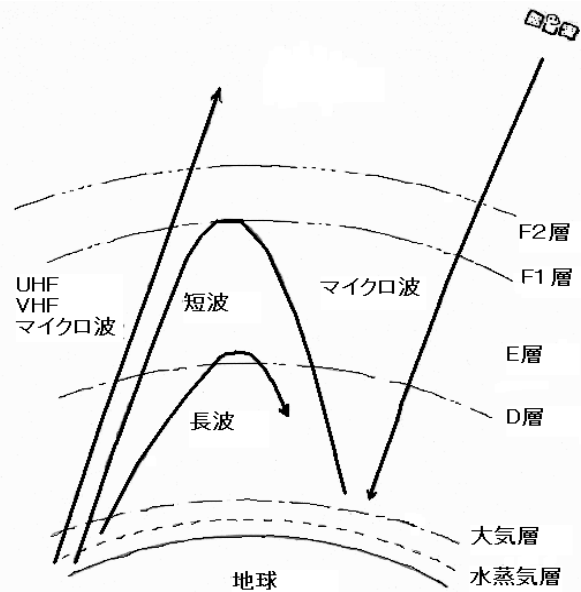


図3-1:電離層の概要

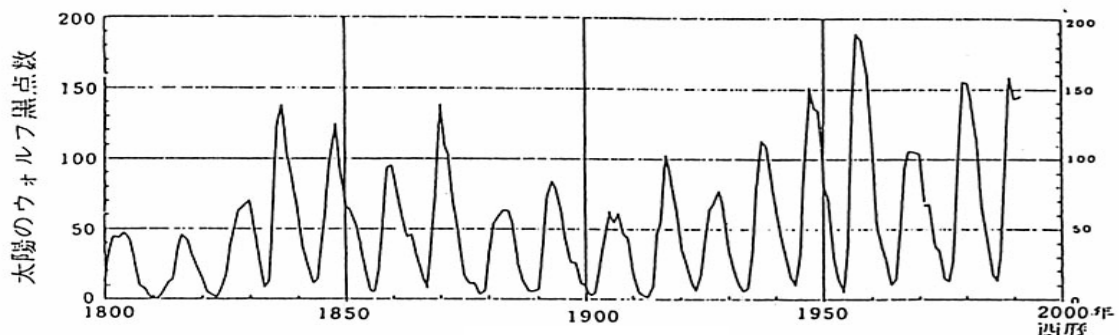


図3-2:太陽活動

3.3.2 電離層中での電波の位相速度と群速度

無線信号が大気圏を通過するとき、信号の速度を変化させる働きがある。この現象は屈折(refraction)と呼ばれ、屈折率(refractive index) n は、

$$n = \frac{c}{v} \quad 3-1$$

であらわされる。このとき、 v は大気圏中の信号の速度である。大気圏中の屈折率が周波数に依存する場合、その大気圏は分散(dispersive)的であると言い、分散的な大気中では、搬送波と変調波の速度は異なる。それぞれの速度は、位相速度(phase velocity)と群速度(group velocity)と呼ば

れ、異なる速度で大気圏を通過する。電離層もまた分散的であり、電離層中での電波の位相速度 v_p は

$$v_p = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{2\pi/\lambda} = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}}} \quad 3-2$$

で与えられる。 ω は電磁波の各周波数、 λ は電磁波の波長である。また ω_e はプラズマ各周波数 (GPS の場合は通常 $\omega \geq \omega_e$ である) と呼ばれるもので、電離気体中の電子の固有振動数で次式で与えられる。

$$\omega_e^2 = \frac{4\pi n_e e^2}{m} \quad 3-3$$

m は電子の質量、 e は電子の電気量である。また n_e は電子密度である。式 3-2 から v_p は光速より早くなっていることが分かる。しかしこれは波長 λ が長くなるだけで、実際の光速は群速度なので、光速より遅くなる。このとき群速度 v_g は定義により、式 3-2 の k を ω で微分して次式によって与えられる。

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{dk/d\omega} = c\sqrt{1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}} \quad 3-4$$

位相速度と群速度で屈折率は異なり、

$$n_p = \frac{c}{v_p}, \quad n_g = \frac{c}{v_g} \quad 3-5$$

となる。位相屈折率と群屈折率の関係は、

$$n_g = n_p + f \frac{dn_p}{df} \quad 3-6$$

のように表すことができる。

3.3.3 電離層遅延量

衛星 s から受信機 r までの伝搬経路長を l とすると、経路中の総電子密度 TEC (total electron content) は以下のように求められる。

$$TEC = \int_s^R n_e(l) dl \quad [m^{-2}] \quad 3-7$$

GPS のようなマイクロ波帯の電波は、電離層の屈折率が電子密度と電波の周波数によって変化する。

電離層中のマイクロ波帯の電波の屈折率は位相屈折率 n_p 、群屈折率 n_g それぞれ、

$$n_p \approx 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad 3-8$$

$$n_g \approx 1 + \frac{40.3n_e}{f^2} \quad 3-9$$

として近似できる。GPS の場合、搬送波は電離層内では位相速度で通過し、コードは群速度で通過するので、電離層遅延量を求める場合は、搬送波とコードで異なる。上記の式より搬送波が電離層を通過する時間をもとめる場合、位相屈折率を使用して、

$$\begin{aligned} \Delta t_p &= \frac{1}{c} \int_s^R (n_p(l) - 1) dl \\ &= -\frac{1}{c} \int \frac{40.3n_e(l)}{f^2} dl \\ &= -\frac{40.3 \cdot TEC}{cf^2} \end{aligned} \quad 3-10$$

となる。距離に換算することで、

$$I_\phi = c \cdot \Delta t_p = -\frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad 3-11$$

として電離層遅延量を求めることが出来る。この式より搬送波は電離層の中では縮むことがわかる。逆にコードは、

$$I_\rho = \frac{40.3 \cdot TEC}{f^2} \quad 3-12$$

となり、コードは電離層中ではのびることがわかる。

式 3-11 から分かるように、電離層遅延量は周波数の 2 乗に反比例する。この性質を利用すると、L1 信号と L2 信号が受信できる 2 周波受信機では、電離層遅延量を直接測定して精度よく補正することができる。

3.4 対流圏遅延誤差

3.4.1 対流圏遅延の概要

対流圏は空気層であるが、空気そのもの（乾燥空気）と水蒸気がやや違う振る舞いをする。乾燥空気のほうは物理的に安定な分布をするので、mmの精度で補正計算が可能である。しかし、水蒸気は分布が気象条件によって定まらないので、理論的な計算が難しい。対流圏では伝播速度は真空中より遅くなる。だけで、電離層での位相速度と群速度のような複雑な事情はない。

乾燥空気の事項的な厚み（scale height）は約 8 km であるが、水蒸気のそれは 3 km 以下である。水蒸気は光に対してよりもより大きく電波に影響する。電波領域での水蒸気を含めた 1 気圧の大気の屈折率 n は 1.0003 前後である。この値は水蒸気量、温度、気圧に依存する。

大気層のスケールハイトを τ とすると、

$$\tau(n-1) \tag{3-13}$$

が見かけの経路の伸びである。上の屈折率とスケールハイトの値を入れると約 2.4 m となり、天頂方向の衛星までの距離が実際の距離よりも伸びたように見える。この遅延は乾燥空気では気圧のみに依存し気温は無関係である。水蒸気では水蒸気密度（相対湿度と気温）が関係する。

対流圏における大気の屈折率 n を、

$$n-1 = n_d + n_w \tag{3-14}$$

のように書いて、 n_d は乾燥空気による屈折率、 n_w は水蒸気による屈折率であり、

$$\begin{aligned} n_d &= 3.73 \times 10^{-1} e / T^2 \\ n_w &= 0.776 \times 10^{-4} P / T \end{aligned} \tag{3-15}$$

である。ここで、 T は温度（K）、 e は水蒸気分圧（hPa）、 P は気圧（hPa）である。また相対湿度（%）と水蒸気分圧とは、

$$H = e / E_w \times 100 \quad (\%) \tag{3-16}$$

であらわされる。ここで、 E_w は飽和水蒸気圧（hPa）である。飽和水蒸気圧とは、ある温度のときに

空気中に気体として存在するこの出来る最大の水の量、すなわち、相対湿度 100% のときの水蒸気の圧力で表したものである。気温が上がるにつれ空気中に含まれる最大の水蒸気量は増加する。

単純に対流圏の経路遅延(天頂)を求めるには、乾燥空気 n_d にスケールハイト 8 km をかけ、水蒸気の n_w に 3 km をかけて合計すればよい。

3.4.2 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、

$$\Delta L_s = \frac{0.002277}{\cos(90 - E)} \left[P + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) \cdot e - B \cdot \tan^2(90 - E) \right] + \delta_R \quad 3-17$$

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 3-1 に示す値、 δ_R (m) は天頂角(90-E)と海拔高度に関する補正項で表 3-2 に示す値である。

表3-1:高度に関する補正項

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3-2:天頂角と高度に関する補正項

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

3.5 マルチパス誤差

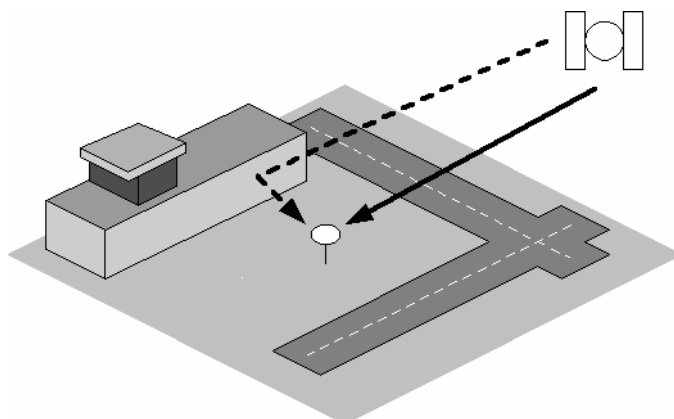


図3-3:マルチパス誤差

GPSの使用するマイクロ波は、直進性が強く、物体にぶつかると反射しやすい性質がある。一方GPSの受信機に使用するアンテナは、あらゆる方向からの電波を受信できるようになっているため、図3-3の様に、衛星から直接到来する電波のほかに周囲の建物などによる反射波が受信される。こうして受信される電波をマルチパス(multipath)波という。このように呼ばれるのは、反射波があることにより、衛星から受信機に到達する経路が増えるためである。

マルチパス波は直接波とは異なる経路をたどって到達するため、到着するまでに直接波より時間が掛かり、これが直接波と同時に受信されると、直接波の波形を崩し、受信機の動作に影響を及ぼすことになり、測距誤差となる。

マルチパス波を抑えるためには、低仰角の衛星を使用しないことと、低仰角から到来する電波をカットする対策が有効である。低仰角から到来する電波をカットするために、アンテナにチョークリングと呼ばれる部品を追加する必要がある。

3.6 受信機の測定誤差

受信機内部クロックの安定性や、高周波信号をデジタル化する部分でのクロックジッタなど、さまざまな要因により、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ることから、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とするのが、雑音の混入を減らすことにつながる。

受信機内部での測定誤差は、高度な処理回路を採用している受信機でも0.5m程度を生じるといわれている。安い受信機だとさらに大きな測定誤差が発生する。

第4章 高精度測位

4.1 ディファレンシャル GPS 測位

4.1.1 ディファレンシャル GPS 測位とは

GPS の誤差要因の中には、離れた複数の受信機に共通して表れる誤差がある。既知の地点に GPS 受信機を設置し誤差を測定すれば、離れた未知点の GPS 受信機に生じる誤差を予測し補正することが出来る。この方式はディファレンシャル GPS 測位（以下 DGPS）と呼ばれる。DGPS では一般に、既知地点に固定される受信機を基準局（reference station）、ユーザ受信機を移動局（rover）、そしてこれらを結ぶ直線を基線（baseline）と呼ぶ。

DGPS で相殺される誤差要因は、衛星軌道情報の誤差、衛星時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延である。ただし、衛星軌道情報と電離層遅延、対流圏遅延は基線が短い場合（Local-Area）のみ基準局と移動局で同一とみなされるので相殺効果が得られるが、基線が延びる（Wide-Area）と衛星軌道情報誤差や、電離層と対流圏の状態が基準局と移動局で大きく異なるので、相殺効果が薄れ測位誤差が増大する原因となる。

一方、マルチパスや、受信機測定誤差など、局に依存している誤差は DGPS でも相殺されない。このため、精度良く測定するためには、測位環境に十分配慮しなければならないだろう。

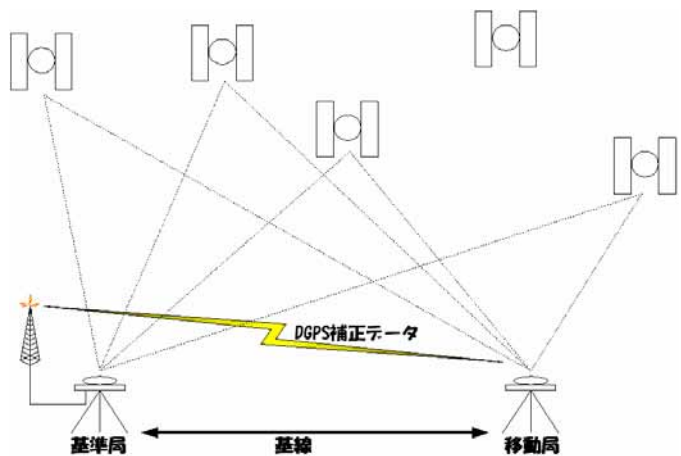


図4-1: DGPS 測位概要

4.1.2 Local-Area 測位位置補正方式

DGPS 測位には主に2つの補正方式がある。そのうち、単独測位結果によって補正情報を作成する方式を測位位置補正方式と呼ぶ。

この方式は、固定された基準局での単独測位結果（緯度、経度、高さ または x, y, z ）と、正確な基準局座標との差によって補正情報を作成し移動局の単独測位結果に適用する方式である。以下に数式によって測位位置補正方式を表す。

$$X_u = X'_u - (X'_r - X_r) \quad 4-1$$

X_r, X'_r はそれぞれ基準局の正確な位置座標と単独結果を表し、 X_u, X'_u は移動局での DGPS 測位結果と単独測位結果を表している。移動局側では通常の GPS 受信機が出力する単独測位結果を使用でき、計算処理も単純である。しかし、基準局側と移動局側で同じ組み合わせの GPS 衛星を使用して測位を行わなければならないという制限がある。

4.1.3 Local-Area 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（衛星位置誤差を含む幾何学的距離）と、

基準局の受信機が実際に測定した擬似距離を比較することによって、各衛星の擬似距離補正值、及びその変化率を算出して移動局に伝送する。移動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值が得られた衛星であれば、移動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広く利用されている。以下に数式によって擬似距離補正方式を示す。

$$\tilde{\rho}(t) = \rho(t) + e_r(t') + e'_r(t') \cdot (t - t') \quad 4-2$$

ここで、 $\tilde{\rho}$ は移動局で測定された擬似距離 ρ を補正した値であり、 t は観測時刻である。 t' は補正データを算出した時刻で、 e_r, e'_r はそれぞれ、擬似距離補正值と擬似距離補正值の変化率を表している。補正データの算出時刻と観測時刻の差が大きいと、各誤差の相殺効果が減少する。実際にどのように誤差が相殺されるかを以下に示す。下付の u, r はそれぞれ、移動局と基準局を示している。

$$\rho_u = r_u + c(\delta t_u - \delta t^s) + I_u + T_u + \varepsilon_{\rho u} \quad 4-3$$

$$\rho_r = r_r + c(\delta t_r - \delta t^s) + I_r + T_r + \varepsilon_{\rho r} \quad 4-4$$

r は幾何学的距離、 c は光速、 $\delta t_{u,r}, \delta t^s$ はそれぞれ受信機の時計誤差と衛星時計誤差を表し、 I は電離層遅延、 T は対流圏遅延、 ε は局依存誤差（マルチパス、受信機雑音等）を表している。基準局から衛星までの幾何学的距離は基準局の位置が既知なので、

$$r_r = \left\| \mathbf{X}^s - \mathbf{X}_r \right\| \quad 4-5$$

として求められる。 \mathbf{X}^s は衛星位置、 \mathbf{X}_r は基準局の正確な位置である。補正值 e_r はこの幾何学的距離から基準局で測定された擬似距離を引くことで求まるので、

$$\begin{aligned} e_r &= r_r - \rho_r \\ &= -c(\delta t_r - \delta t^s) - I_r - T_r - \varepsilon_{\rho r} \end{aligned} \quad 4-6$$

として算出される。この補正值を移動局に送信し、移動局側で測定した擬似距離に加えると、

$$\begin{aligned} \tilde{\rho} &= \rho_u + e_r \\ &\approx r_u + c(\delta t_u - \delta t_r) + (I_u - I_r) + (T_u - T_r) + \varepsilon_{\rho u} + \varepsilon_{\rho r} \end{aligned} \quad 4-7$$

となり、衛星時計誤差が相殺されていることがわかる。Local-Area では電離層遅延、対流圏遅延は $I_u \approx I_r, T_u \approx T_r$ として表すことができるので相殺される。局依存の誤差 ε は相殺されず、逆に大きくなる場合もある。よって、補正後の移動局の擬似距離は、

$$\tilde{\rho} \approx r_u + c(\delta t_u - \delta t_r) + \varepsilon_{\rho,ur} \quad 4-8$$

となる。残ってくる誤差は受信機の時計誤差と局依存誤差である。受信機の時計誤差は、単独測位計算中に未知数として求められるので、測位に影響を与えるのは局依存誤差のみになり、単独測位に比べて大幅な精度改善が見られる。しかし前にも述べたが、基線が伸びると (Wide-Area) 電離層と対流圏は相殺されず、測位精度の劣化につながるので注意しなければならない。

4.1.4 補正データ放送方式

実際に DGPS 測位を行う場合、当然ながら何らかの方法により基準局で作成した補正データを移動局に送信しなければならない。非常に狭いエリアでの測位であれば、携帯電話や特定省電力無線などの通信手段で補正データを送受信することは可能であるが、通信範囲が制限されてしまう。

現在、日本において DGPS の補正データ送信サービスは2つある。1つは海上保安庁の運営する海上の船舶向けに送信されている中波ビーコン電波に補正データを重畳し放送するサービスと、FM 音声多重放送に DGPS 補正データを載せてユーザに情報を提供するサービスである。

両者とも専用の補正データ受信機さえあれば、無償で選択した基準局からの補正データを受信することが可能である。このようなサービスを行う場合それぞれのデータフォーマットが異なると不便であるため共通のフォーマットが必要になる。そこで、アメリカの船舶電波技術委員会 (RTCM : Radio Technical Commission for Maritime Service) が作成している RTCM 規格と呼ばれるものが標準フォーマットとして使用されている。表4-1に RTCM 規格のメッセージタイプの概略を示す。この規格はほとんどが暫定であるため、今後変更が行われる可能性もある。

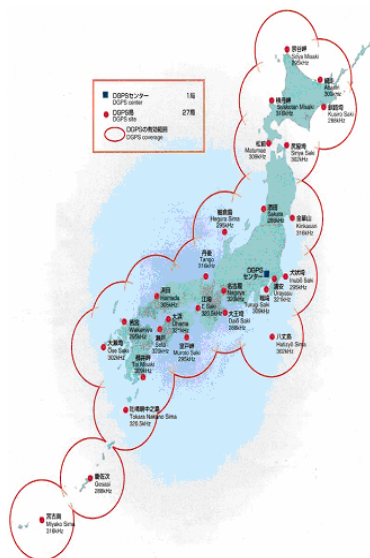


図4-2: 中波ビーコン基準局



図4-3: FM 音声多重放送基準局

表4-1:RTCM 規格

メッセージタイプ	現状	タイトル
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	DGPS補正量 (新旧の軌道情報等の中の違いの補正)
3	確定	参照局のパラメータ (参照地点のWGS 84による3次元座標)
4	廃止	測量 (搬送波移送用であったが使用されなかった)
5	暫定	衛星のヘルス (ヘルスの情報と参照局での衛星電波のSN比等)
6	確定	空白
7	確定	ビーコン層 (DGPS併設の海上ビーコンの局位置、周波数等)
8	暫定	擬似衛星の層 (擬似GPS衛星の電波の発射の時刻等)
9	確定	限定DGPS補正量
10	保留	PコードDGPS補正量
11	保留	C/Aコード、L1、L2補正量
12	保留	擬似衛星のパラメータ
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
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

4.2 干渉測位

4.2.1 干渉測位とは

干渉測位法とは、ディファレンシャル GPS と同じで、位置を測定したい地点に設置する、移動局と既知の地点に設置する基準局とを用意する。それぞれに設置された受信機は到着する測距信号の搬送波位相を数え、決まった時間ごと (エポック) に測定値として記録する。数時間分程度のデータを集めたところで終了し、両受信機の観測データをつき合わせて測位点の座標を計算する。搬送波の位相が観測値であるため 19.03 cm (L1) の不確実性がバイアス成分として含まれている (100分の1波長まで数えることができるが、幾つ搬送波がきているか不明)。このバイアスは時間によらず一定であるから、長時間のデータを処理すればこの不確実性 (整数値バイアスと呼ばれる) を正確に推定し、精密な測定値を得ることができる。

干渉測位は長時間の観測データが必要なため、主に測量分野で利用されてきた。ただし、一度整数値バイアスを決定してしまえばその後はサイクルスリップ (電波がなんらかの原因で途切れる現象) がない限り不確実性の問題はなく、移動局が移動しても問題はない。このことを利用する方式がキネマティック GPS (kinematic GPS) で、最初に整数値バイアスを決定するために数10分間の観測を行った後、移動しながら次々と多数の観測点の座標を求めることができる。キネマティック GPS に対して、固定点で行う干渉測位はスタティック GPS (static GPS) と呼ばれる。

現在は、キネマティック GPS を更に進めて、移動体でも販促は位相による測位が可能となってきている。リアルタイムキネマティック GPS (realtime kinematic GPS ; RTK-GPS) と呼ばれる方式で、移動局が移動中であってもリアルタイムに整数値バイアスを決定し、精密な測位を行うことができる。

RTK GPS では、移動中の利用者に基準局のデータを伝送するため無線データリンクと組み合わせて使用することになる。

4.2.2 搬送波位相積算値

受信機で観測される搬送波位相データは波数 (cycles) を単位とした積算データであるので、まず搬送波位相の積算値について述べる。

$$\phi_{L1} = \lambda_{L1}^{-1} [r - I_{L1} + T] + f_{L1} (\delta t_u - \delta t^s) + N_{L1} + \varepsilon_{\phi, L1} \quad 4-9$$

ここで、 λ_{L1} は搬送波 L1 の波長、 r は受信機と衛星間の幾何学的距離、 I_{L1} は電離層遅延、 T は対流圏遅延、 f_{L1} は搬送波 L1 の周波数、 $\delta t_u, \delta t^s$ はそれぞれ受信機と衛星の時計誤差、 N_{L1} は整数値バイアスである。ここでは、衛星軌道誤差とマルチパス等のランダム誤差は無視している。

この搬送波の積算値は衛星毎に存在し、時間とともに変化する。しかし、整数値バイアスは衛星、受信機の組み合わせ毎に一定であるため、時間によって変化しない。

干渉測位では、移動局、基準局におけるあるエポックの搬送波位相の積算値を一重位相差や、二重位相差を利用して受信機時計誤差、あるいは衛星時計誤差の影響を除去し、干渉測位計算を行うのが一般的である。このような差分演算は、整数値バイアスの個数を減少させ、方程式を解きやすくする効果がある。以降で一重位相差、二重位相差について説明する。

4.2.3 時計誤差補正方式

(a) 衛星間一重位相差

ある時刻に、受信機 a で同時に観測している GPS 衛星郡内の 2 機をそれぞれ、n 番 m 番とし、図 4-4 に示すように測定された搬送波位相の積算値をそれぞれ ϕ_a^n, ϕ_a^m とすると、受信機 a に対する衛星間搬送波の一重位相差は、

$$\begin{aligned} \Delta \phi_a^{n,m} &= \phi_a^m - \phi_a^n \\ &= \lambda^{-1} [(r_a^m - I_a^m + T_a^m) - (r_a^n - I_a^n + T_a^n)] + f [(\delta t_a - \delta t^m) - (\delta t_a - \delta t^n)] + N_a^m - N_a^n + \varepsilon_a^{n,m} \\ &= \lambda^{-1} [\Delta r_a^{n,m} - \Delta I_a^{n,m} + \Delta T_a^{n,m}] + f \cdot \Delta \delta t^{n,m} + \Delta N_a^{n,m} + \varepsilon_a^{n,m} \end{aligned} \quad 4-10$$

となり、2 つの搬送波の積算値に含まれていた受信機の時計誤差 δt_a が除去できる。しかし、衛星時計誤差はまだ積算値に含まれている。

(b) 受信機間一重位相差

図 4-5 に示すように、ある時刻に、受信機 a, b でそれぞれ観測された衛星 n からの搬送波位相の積算値を ϕ_a^n, ϕ_b^n とすると、衛星 n に対する受信機間一重位相差は、

$$\begin{aligned}
\Delta\phi_{a,b}^n &= \phi_b^n - \phi_a^n \\
&= \lambda^{-1} \left[(r_b^n - I_b^n + T_b^n) - (r_a^n - I_a^n + T_a^n) \right] + f \left[(\delta t_a - \delta t^n) - (\delta t_b - \delta t^n) \right] + N_b^n - N_a^n + \varepsilon_{a,b}^n \\
&= \lambda^{-1} \left[\Delta r_{a,b}^n - \Delta I_{a,b}^n + \Delta T_{a,b}^n \right] + f \cdot \Delta \delta t_{a,b} + \Delta N_{a,b}^n + \varepsilon_{a,b}^n
\end{aligned} \tag{4-11}$$

となり、衛星時計誤差 δt^n は完全に除去できる。しかし、先ほどの衛星間一重位相差のように、受信機時計誤差は除去されず、残っていることに注意する必要がある。そこで、衛星、受信機両方の時計誤差を除去するために、二重位相差をおこなう。

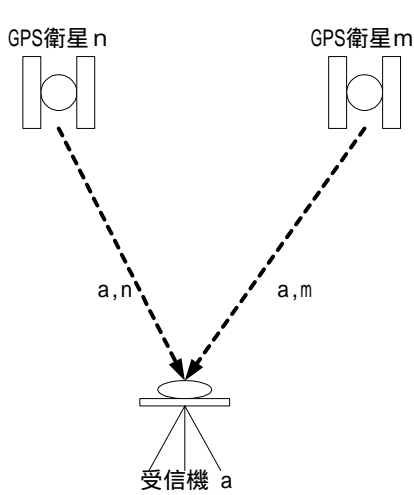


図4-4:受信機間一重位相差

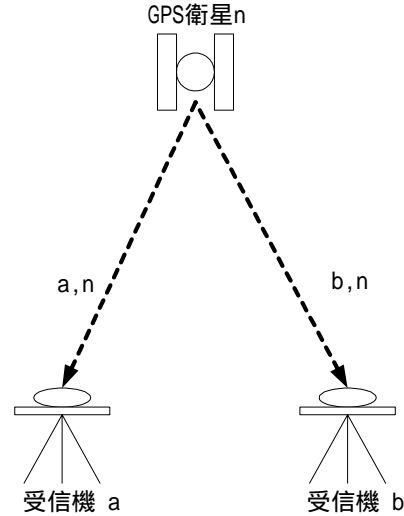


図4-5:衛星間一重位相差

(c) 二重位相差

図4-6に示すようにある時刻において、n番衛星とm番衛星からの搬送波位相データを2台の受信機a,bで取得する。受信機aでの各衛星の搬送波積算値は ϕ_a^n, ϕ_a^m 、受信機bでの各衛星の搬送波積算値は ϕ_b^n, ϕ_b^m とすると、二重位相差 $\Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m}$ は、

$$\begin{aligned}
\Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m} &= (\phi_b^m - \phi_b^n) - (\phi_a^m - \phi_a^n) \\
&= \lambda^{-1} \left[\Delta\nabla r_{a,b}^{n,m} - \Delta\nabla I_{a,b}^{n,m} + \Delta\nabla T_{a,b}^{n,m} \right] + \Delta\nabla N_{a,b}^{n,m} + \Delta\nabla \varepsilon_{a,b}^{n,m}
\end{aligned} \tag{4-12}$$

となり、受信機時計誤差、衛星時計誤差の両方が完全に除去される。また受信機aと、受信機bの基線が短い場合、電離層、対流圏の項は相殺されるため、短基線では二重位相差は、

$$\Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m} = \lambda^{-1} \Delta\nabla r_{a,b}^{n,m} + \Delta\nabla N_{a,b}^{n,m} + \Delta\nabla \varepsilon_{a,b}^{n,m} \tag{4-13}$$

として計算される。

干渉測位はこの二重位相差の値を使用して測位計算を行う。

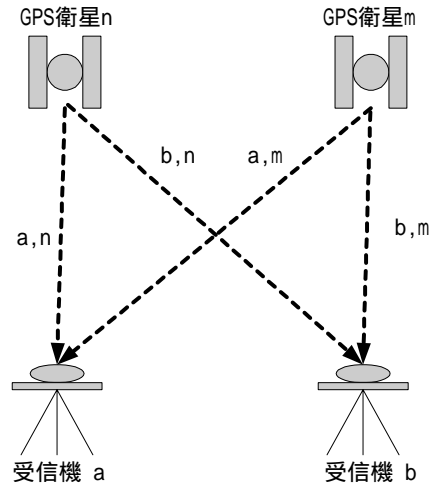


図4-5:二重位相差

4.2.4 測位計算

受信機 a を既知の基準局とし、受信機 b を未知の移動局とする。各衛星からの送信周波数が等しい（ドリフト無）と仮定すると、エポック（ t ）における二重位相差は、

$$\begin{aligned} \Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m}(t) &= \lambda^{-1}\{r_b^m(t) - r_a^m(t)\} - \lambda^{-1}\{r_b^n(t) - r_a^n(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{n,m}(t) \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m}(t) + \lambda^{-1}\{r_a^m(t) - r_a^n(t)\} &= \lambda^{-1}\{r_b^m(t) - r_b^n(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{n,m}(t) \end{aligned} \quad 4-14$$

ここで、 $\Delta\nabla\phi_{a,b}^{n,m}(t)$ は観測量のため既知数であり、 $r_a^m(t), r_a^n(t)$ は受信機 a の位置と衛星 m、n の位置が既知数のため、ピタゴラスの定理より求めることができる。未知数は、受信機 b の位置 $(x_b(t), y_b(t), z_b(t))$ と、整数値バイアス項 $\Delta\nabla N_{a,b}^{n,m}(t)$ である。これらの未知数を連立方程式から解く解法を Float 解と呼ぶ。

式 4-14 を用いて連立方程式を定義する。測位に使用する衛星数を i 個とし、基準衛星を 1 とすると、エポック (t) において、独立な連立方程式が以下のように $(i-1)$ 個存在する。

$$\begin{cases} \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,2}(t) + \lambda^{-1}\{r_a^2(t) - r_a^1(t)\} = \{r_b^2(t) - r_b^1(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,2}(t) \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,3}(t) + \lambda^{-1}\{r_a^3(t) - r_a^1(t)\} = \{r_b^3(t) - r_b^1(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,3}(t) \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,4}(t) + \lambda^{-1}\{r_a^4(t) - r_a^1(t)\} = \{r_b^4(t) - r_b^1(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,4}(t) \\ \vdots \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,i}(t) + \lambda^{-1}\{r_a^i(t) - r_a^1(t)\} = \{r_b^i(t) - r_b^1(t)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,i}(t) \end{cases} \quad 4-15$$

ここで、未知数が $(i-1)$ 個の $\Delta\nabla N(t)$ と、受信機 b の位置 $(x_b(t), y_b(t), z_b(t))$ の合計 $(i+2)$ 個になるため、式 4-15 だけでは解くことができない。そこで、サイクルスリップが起こらない限り、整数値バイアスは一定であるという性質を利用して、エポック $(t+1)$ においても同様の連立方程式を立てる。

$$\begin{cases} \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,2}(t+1) + \lambda^{-1}\{r_a^2(t+1) - r_a^1(t+1)\} = \{r_b^2(t+1) - r_b^1(t+1)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,2}(t) \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,3}(t+1) + \lambda^{-1}\{r_a^3(t+1) - r_a^1(t+1)\} = \{r_b^3(t+1) - r_b^1(t+1)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,3}(t) \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,4}(t+1) + \lambda^{-1}\{r_a^4(t+1) - r_a^1(t+1)\} = \{r_b^4(t+1) - r_b^1(t+1)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,4}(t) \\ \vdots \\ \Delta\nabla\phi_{a,b}^{1,i}(t+1) + \lambda^{-1}\{r_a^i(t+1) - r_a^1(t+1)\} = \{r_b^i(t+1) - r_b^1(t+1)\} + \Delta\nabla N_{a,b}^{1,i}(t) \end{cases} \quad 4-16$$

式 4-15 および式 4-16 の両方を用いると、未知数の数は $(i+2)$ と変わらないが、連立方程式は $(2i-2)$ 個できるので $i \geq 4$ のとき、すなわち測位に使用する衛星数が4つ以上の時にすべての未知数を求めることができる。

しかし、この方法 (Float 解) で求めた整数値バイアスは、整数とはならず実数となる。そこで、求めた実数のバイアスを整数化しなければならない。最も簡単な方法は四捨五入することであるが、バイアスの標準偏差が大きい場合は、この方法では正確にもとまらない。一般にはバイアスの平均値と標準偏差から判断して、可能性のある整数値の組み合わせを仮定し、最小二乗法の残差を計算し、その残差を最も小さくする組み合わせを真の整数値バイアスとする。得られた整数値バイアスを固定することで、式 4-16 の未知数は $(x_b(t), y_b(t), z_b(t))$ の3つであるので、解を求めることは容易である。

4.3 ネットワーク RTK

4.3.1 ネットワーク RTK の原理

ネットワーク RTK の原理を図 4-6 に示す。最も単純な例として、実基準点 3 点、A, B, C で囲まれた領域を考える。A, B, C 点の間隔は、実際のネットワーク RTK では 30 km ~ 70 km 以上とられる。また冗長性確保のため、実基準点を 4 点以上とすることもある。

この図で、水平軸は幾何学的座標を表すが、縦軸は上下方向ではなく、観測量 (observable) である。観測量とは、この場合は搬送波位相が中心であるが、擬似距離も整数値バイアス決定の際の補助データとして必要である。

実基準点 A, B, C や移動受信機は、簡単のため同一平面上にあるものとする。

A, B, C の受信機によって測定されたある衛星の搬送波位相 (擬似距離も同じ) は、ここでは仮に、整数値バイアス、衛星、受信時計誤差、電離層、対流圏遅延、アンテナ位相、マルチパス、衛星軌道誤差等の誤差を一切含まない、正確なものであると仮定する。

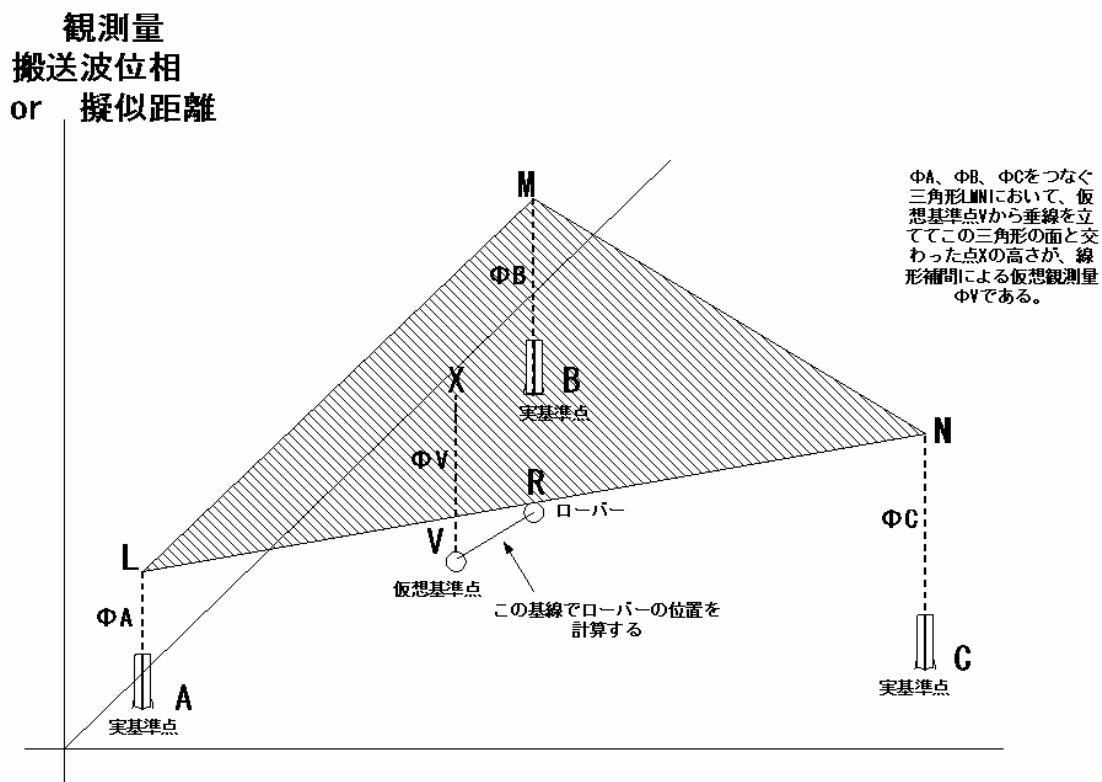
ある衛星にたいする受信機 A, B, C の観測量を Φ_A, Φ_B, Φ_C とする。この領域内に移動局受信機 R があつたとき、その付近に仮想基準点 V を考える。具体的に、この仮想基準点 V の位置は移動局受信機の単独測位によって測定された数値の位置とする。単独測位の精度は 10 m 程度であるため、仮想基準点 V と真の移動局受信機の位置 R とはその程度離れている可能性がある。

仮にこの仮想基準点に本当に参照受信機が置かれていたとすると、その受信機によって測定されるであろう観測量を、周辺の複数の実基準局点による観測量から推定して仮想的な観測量を作成することを考える。

このような仮想観測量をもとにして、実際には存在しない仮想点の受信機を、これまでのキネマティック測位における基準局受信機に見立てるのである。その仮想観測量と移動受信機で観測した観測量を合わせて処理し、基線の解析ができるはずである。こうして得られた基線ベクトルは、さきの移動局受信機による単独測位結果の数値に対する修正量とみなすこともできる。

このような測量、測位方式をネットワーク RTK 方式（日本では仮想基準点方式）と呼ぶ。

こうして作成された仮想観測量は、遠沿の実基準点データに基づいているが、電離層や対流圏の影響は補正されたものとなっている。実基準点の 2 周波データを用いて、電離層の影響を推定、補正するのである。対流圏についても、実基準点の座標は既知であることを利用して補正される。つまり、利用者は実際には遠沿の複数の実基準点を使って測量を行っているにもかかわらず、近くの基準点による電離層や対流圏を考える必要のないキネマティック測位と同等の状態になるのである。



仮想観測量は以下のようにして求める。

実基準点 A, B, C の座標は正確に分かっているから、移動局受信機の単独測位による座標値をもとに、補間計算によって仮想観測量を生成する。

図 4-6 の様に、実基準点の観測量 ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C をつなぐ三角形 LMN において、仮想基準点 V から垂線を立ててこの三角形の面と交わった点 X の高さが、線形補間による仮想観測量 ϕ_V である。実際にも

高次ではなく、線形的な補間が使われることが多い。

その理由は、曲面補間を行うには多くの実基準点を必要とし、計算負荷が増大することにある。また、実基準点間隔が100km程度までなら、線形補間でも良好な精度が得られるという実績にもよる。

このような仮想観測量は、観測できるすべての衛星について計算される。さらに、擬似距離、L1、L2についても同様に求められる。

上記の説明では、搬送波位相 Φ_A, Φ_B, Φ_C に含まれる一切の誤差を無視しているが、実際には整数値バイアス、衛星、受信時計誤差、電離層、対流圏遅延、アンテナ位相、マルチパス、衛星軌道誤差等が含まれている。したがって、ただ単純に補間するだけではだめで、補間計算の前に、これらの誤差を除去しなければならない。このことが、ネットワーク RTK の最も重要な問題である。現在、世界的に3つのネットワーク RTK の方式があり、これらの方式の主な違いは、この誤差除去の方法によるものである。表4-2にネットワーク RTK の2つの方式の違いをしめす(あとの1つは不明な点が多いので削除する)。

表4-2:ネットワーク RTK 測位方式の要

開発会社機関	Geo++	Terrasat
方式名	Referenznetz	Virtual Reference Station
国内提携企業	三菱電機	トリンプル
仮想基準点計算アルゴリズム		
使用計算機	PCで処理可能	PCで処理可能
搬送波位相	片道位相	2重位相差
バイアス決定	他のパラメータと同時推定	先にバイアス決定
擬似距離	片道擬似距離	片道擬似距離
搬送波線形結合	使用しない	Lcを使用
衛星位置誤差	推定	推定、精密軌道暦(IGS)で確認
衛星時計誤差	推定	2重位相差で除去
対流圏	推定	推定
電離層	推定	推定
受信機時計誤差	推定	2重位相差で除去
アンテナ位相	実測値で補正	IGSデータを使用
実基準点位置誤差	既知として扱う	既知として扱う
移動局に伝送する補正データ		
伝送するデータ	FKP 位相変化推定係数	仮想搬送波位相 仮想擬似距離
移動局での処理	FKPと単独測位結果をもとに仮想観測量作成	既存のRTK受信機に直結するだけで測位可能
移動局での付加装置	放送型受信機 仮想観測量作成計算機	携帯電話
移動局への通信	放送型が可能(双方向型データも作成可能)	双方向通信(単独測位結果をセンタに送る必要あり)

4.3.2 VRS方式

移動局の参照観測量とするか相関観測量を計算センタで作成することが最も大きな特徴である。この方式では、移動受信機の単独測位結果を計算センタに伝送し、計算センタで仮想観測量を計算・作成し、それを移動局側に送信する。計算センタで仮想観測量を計算するために、移動局の単独測位データを計算センタに伝送する必要があるため、携帯電話のような双方向の通信手段が必要となる。

移動局側では携帯電話と受信機を接続するモデムを用意する必要があるが、受信機とソフトウェアは在来のRTK-GPS用のものをそのまま使用できる。しかし、計算センタ側の電話回線数によって、移動局数が制限される。表4-3にVRS方式の補正データフォーマットを示す。

表4-3:VRSの補正データフォーマット

VRS方式 (RTCM2.1)		
Type	内容	周期 (s)
1	擬似距離補正データ	1
3	基準点位置座標	29
14	GPStime	61
16	基準局情報	499
17	エフェメリス	120
18	搬送波位相 (L1、L2)	1
19	擬似距離 (L1)	1
20	搬送波位相補正データ (L1、L2)	1
21	擬似距離補正データ (L1)	1

4.3.3 Referenznetz 方式 (FKP 方式)

計算センタから仮想観測量を作成するために必要なパラメータ (FKP) を放送し、移動局でそれを受信し、自身で仮想観測量を作成する方式である。

移動側での仮想観測量作成の計算負荷は小さいものであるが、既存の RTK-GPS 対応受信機には内蔵されていない。現在は外付けの計算機、またはアダプタ的な装置を必要とする。

図 () の観測量の補間を行う面 LMN の定数、すなわち、面の傾斜と位置を与えて、それをもとに仮想観測量を計算する。この面の傾斜と位置を表す定数を、FKP (flachenkorrekturparameter (ドイツ語)) と呼ぶ。利用者側では原則として、自身で測定した単独測位結果と FKP を基に、仮想観測量を計算する。そして、仮想観測量と自身の観測データとで測位計算を行う。

注意すべきことは、FKP は放送方式独自のものではなく、VRS も FKP に相当するものは存在している。計算センタで仮想観測量を作成するか、移動局側で仮想観測量を作成するかの違いである。

この FKP は、実基準局ネットワーク内のすべての利用者に共通である。

本論分内ではこの方式を FKP 方式と定義する。また後述の静止衛星通信回線による補正データ伝送実験ではこの FKP を放送することを目的として構築した。

表 () に FKP 方式の補正データフォーマットを示す。FKP 方式には、Geo++独自に開発された RTCM++フォーマットが使用される。

表4-4:FKPの補正データフォーマット

FKP方式 (RTCM++)		
Type	内容	周期 (s)
1	擬似距離補正データ	1
3	基準点位置座標	29
14	GPStime	61
16	基準局情報	499
17	エフェメリス	120
59	搬送波位相補正データ (高精度)	1
	擬似距離補正データ (高精度)	
	FKPパラメータ	

4.3.4 FKP 作成方法

以下に FKP (面補正パラメータ) の作成方法の概略をしめす。ネットワークを構成する実基準局が A,B,C あるとする。

$$\phi_{k,L}^i(t) = \left| r_k^i(t) \right| + A_k + M_{k,L}(t) + c(\delta t_k - \delta t^i) - \frac{I_k^i(t)}{f_L^2} + T_k^i(t) + \vec{b}^i(t) + \frac{c}{f_L} \cdot N_{k,L}^i + \varepsilon_{L,\phi}$$

4-17

ここで、

- k : 実基準局 A,B,C
- i : 衛星番号
- L : L1、L2
- t : エポック時間
- f : 周波数
- $\phi(t)$: 観測量
- $|r(t)|$: 衛星 - 受信機間距離
- A : アンテナ位相誤差
- $M(t)$: マルチパス誤差
- $I(t)$: 電離層の屈折率 ($I = 40.3 \cdot TEC$)
- $T(t)$: 対流圏遅延
- $\vec{b}(t)$: 衛星軌道誤差
- δt_a : 受信機時計誤差
- δt^b : 衛星時計誤差
- N : 整数値バイアス
- ε : ランダム誤差

である。整数値バイアスは決定されていると仮定し、モデルにより推定された衛星時計誤差 $\hat{\delta t}_{k,L}$ と受信機時計誤差 δt_L^i 、さらに衛星 受信機間の幾何学的距離 $|r_k^i(t)|$ 、ホワイトノイズ推定値 $\hat{\varepsilon}_{L,\phi}$ 、衛星仰角により重みづけされたマルチパス誤差モデル $\hat{M}_{k,L}(t)$ 、Geo++社独自のアンテナ位相誤差実測値 A_k より、

$$\hat{\phi}_{k,L}^i(t) = \left| r_k^i(t) \right| + \hat{A}_k + \hat{M}_{k,L}(t) + c(\hat{\delta t}_k - \delta t^i) + \frac{c}{f_L} \cdot N_{k,L}^i + \hat{\varepsilon}_{L,\phi}$$

4-18

というモデル観測量ができる。さらにこのモデル観測量から、実際の観測量を除算すると、

$$\begin{aligned}
\delta\phi_{k,L}^i &= \hat{\phi}_{k,L}^i - \phi_{k,L}^i \\
&= \tilde{\Delta A}_k + \delta\tilde{M}_{k,L}(t) + c(\delta\tilde{t}_k - \delta\tilde{t}^i) + \frac{I_k^i(t)}{f_L^2} - T_k^i(t) - \bar{b}_k^i(t) + \delta\tilde{\varepsilon}_{L,\phi}
\end{aligned} \tag{4-19}$$

ここで、アンテナ位相残差 $\tilde{\Delta A}_k$ 、マルチパス残差 $\delta\tilde{M}_{k,L}(t)$ 、衛星時計残差 $\delta\tilde{t}^i$ 、受信機時計残差 $\delta\tilde{t}_k$ 、ランダム誤差 $\delta\tilde{\varepsilon}_{L,\phi}$ の残差（モデル推定値 - 実測値）は微小数値であるため、観測量の主要成分は距離依存誤差（電離層、対流圏、衛星位置誤差）で構成されることになる。

補間面を作成する中心基準局を A とすると、他の基準局との一重位相差は、

$$\begin{aligned}
\delta\Delta\phi_{AB,L}^i &= \delta\phi_{B,L}^i - \delta\phi_{A,L}^i \\
&= \delta\tilde{\Delta A}_{AB} + \delta\Delta\tilde{M}_{AB,L}(t) + c \cdot \delta\Delta\tilde{t}_{AB} + \frac{\Delta I_{AB}^i(t)}{f_L^2} - \Delta T_{AB}^i(t) - \Delta\bar{b}_{AB}^i(t) + \delta\Delta\tilde{\varepsilon}_{L,\phi}
\end{aligned} \tag{4-20}$$

$$\begin{aligned}
\delta\Delta\phi_{AC,L}^i &= \delta\phi_{C,L}^i - \delta\phi_{A,L}^i \\
&= \delta\tilde{\Delta A}_{AC} + \delta\Delta\tilde{M}_{AC,L}(t) + c \cdot \delta\Delta\tilde{t}_{AC} + \frac{\Delta I_{AC}^i(t)}{f_L^2} - \Delta T_{AC}^i(t) - \Delta\bar{b}_{AC}^i(t) + \delta\Delta\tilde{\varepsilon}_{L,\phi}
\end{aligned} \tag{4-21}$$

とできる。ここで、電離層の誤差を dispersive（分散）誤差、その他の誤差を non-dispersive（非分散）誤差とし距離依存誤差を 2 周波（L1、L2）の線形結合を利用して分離する。

電離層誤差は geometry-free 線形結合によって L1 と L2 の電離層を以下のように推定する。

$$\begin{cases}
\delta\Delta\phi_{AB,L1}^{i,disp} = \frac{\delta\Delta I_{AB}^i}{f_{L1}^2} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L1}^i - \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L2}^i \\
\delta\Delta\phi_{AC,L1}^{i,disp} = \frac{\delta\Delta I_{AC}^i}{f_{L1}^2} = \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L1}^i - \frac{f_{L2}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L2}^i
\end{cases} \tag{4-22}$$

$$\begin{cases}
\delta\Delta\phi_{AB,L2}^{i,disp} = \frac{\delta\Delta I_{AB}^i}{f_{L2}^2} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L1}^i - \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L2}^i \\
\delta\Delta\phi_{AC,L2}^{i,disp} = \frac{\delta\Delta I_{AC}^i}{f_{L2}^2} = \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L1}^i - \frac{f_{L1}^2}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L2}^i
\end{cases} \tag{4-23}$$

推定した、L1 と L2 の電離層誤差をナローレ - ン(narrow lane)線形結合により、

$$\begin{aligned}\delta\Delta\phi_{AB,narrow}^{i,disp} &= \frac{\delta\Delta I_{AB}^i}{f_{L1} \cdot f_{L2}} = \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} (\delta\Delta\phi_{AB,L1}^i - \delta\Delta\phi_{AB,L2}^i) \\ \delta\Delta\phi_{AC,narrow}^{i,disp} &= \frac{\delta\Delta I_{AC}^i}{f_{L1} \cdot f_{L2}} = \frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{f_{L2}^2 - f_{L1}^2} (\delta\Delta\phi_{AC,L1}^i - \delta\Delta\phi_{AC,L2}^i)\end{aligned}\tag{4-24}$$

とし、電離層の誤差観測量とする。その他の誤差を ionosphere-free 線形結合により、

$$\begin{aligned}\delta\Delta\phi_{AB,L1}^{i,non-disp} &= \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L1}^i - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \delta\Delta\phi_{AB,L2}^i \\ \delta\Delta\phi_{AC,L1}^{i,non-disp} &= \frac{f_{L1}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L1}^i - \frac{f_{L2}^2}{f_{L1}^2 - f_{L2}^2} \delta\Delta\phi_{AC,L2}^i\end{aligned}\tag{4-25}$$

として、2種類の距離依存誤差観測量ができる。

$$\Phi^{disp} = \begin{bmatrix} \delta\Delta\phi_{AB,narrow}^{disp} \\ \delta\Delta\phi_{AC,narrow}^{disp} \end{bmatrix}\tag{4-26}$$

$$\Phi^{non-disp} = \begin{bmatrix} \delta\Delta\phi_{AB,L1}^{non-disp} \\ \delta\Delta\phi_{AC,L1}^{non-disp} \end{bmatrix}\tag{4-27}$$

実基準局座標 (φ, λ) より、

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_B - \varphi_A & \lambda_B - \lambda_A \\ \varphi_C - \varphi_A & \lambda_C - \lambda_A \end{bmatrix}\tag{4-28}$$

行列 A を作成し、この行列と先ほどの距離依存誤差観測量から FKP を作成する。

$$\begin{bmatrix} N_I \\ E_I \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot \Phi^{disp}\tag{4-29}$$

$$\begin{bmatrix} N_0 \\ E_0 \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot \Phi^{non-disp}\tag{4-30}$$

ここで

- N_I : 北 南方向の電離層誤差の FKP
- E_I : 東 西方向の電離層誤差の FKP
- N_0 : 北 南方向のその他の誤差の FKP

E_0 : 東 西方向のその他の誤差の FKP

である。この FKP はネットワーク内のすべての利用者に共通である。このパラメータは可視衛星分 RTCM type 5 9 に組み込まれ、図 4 - 7 のような構成で利用者に伝送される。

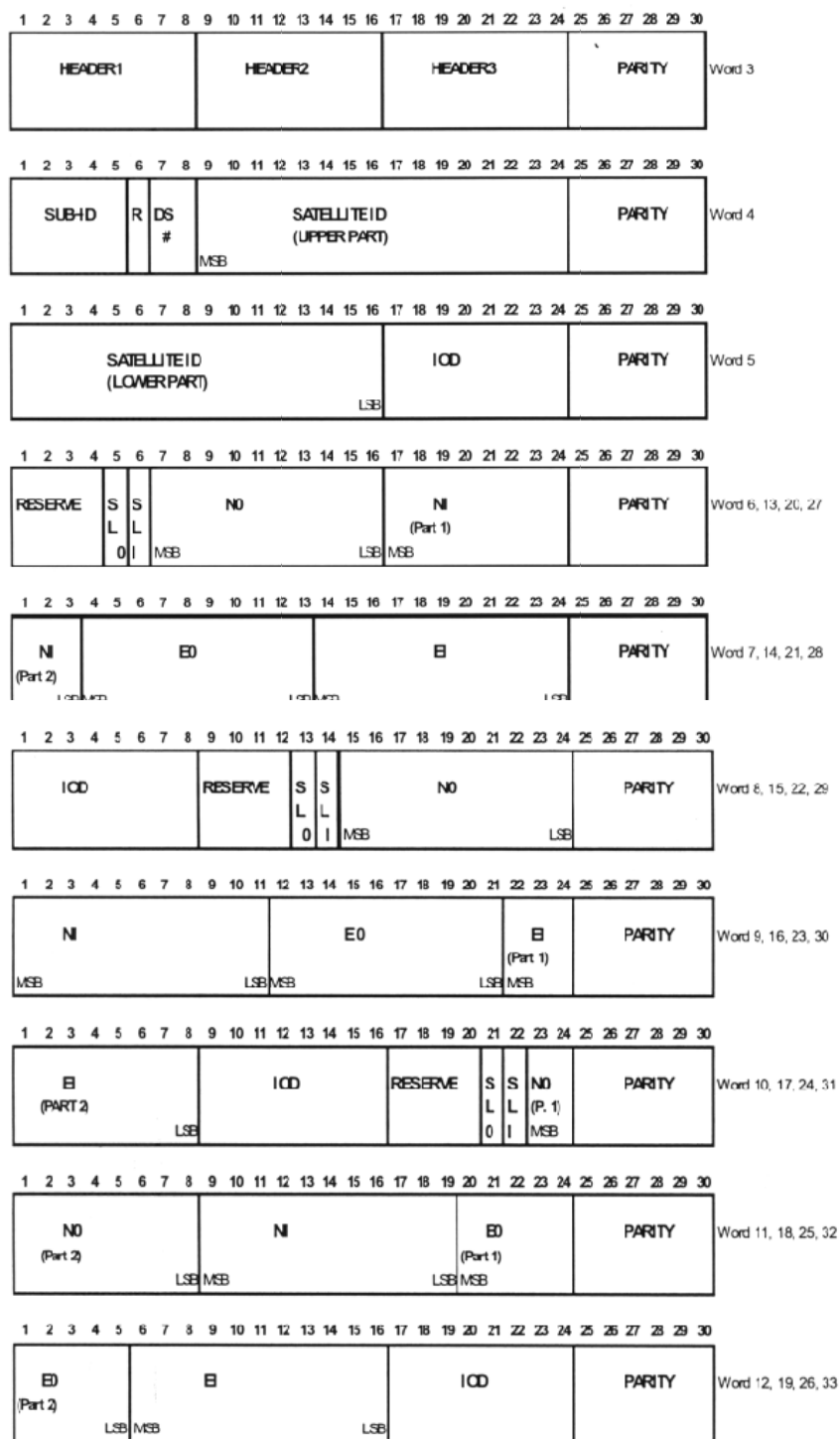


図4-7: RTCM59のデータ構成

移動局側では、伝送された FKP と基準局座標 (φ_A, λ_A) を使用して、自身の単独測位結果 (φ_R, λ_R) をもとに、

$$\begin{aligned}\delta e_0^i &= N_0^i(\varphi_R - \varphi_A) + E_0^i(\lambda_R - \lambda_A) \\ \delta e_l^i &= H^i(N_l^i(\varphi_R - \varphi_A) + E_l^i(\lambda_R - \lambda_A))\end{aligned}\quad 4-31$$

として、衛星毎の移動局位置での距離依存誤差（幾何学的誤差 δe_0^i [m]、電離層誤差 δe_l^i [m]）を計算する。ここで、 $H^i = 1 + 16(0.53 - EL^i / \pi)^3$ であり、電離層が衛星仰角により通過距離が変化する影響を考慮に入れる（ EL は移動局からの i 衛星の仰角 [rad]）。ここで、式 4-30 は水平面上で計算されているが、GPS の座標は WGS-84 に準拠して定義されるため、式 4-31 を以下のように書き換える。

$$\begin{aligned}\delta e_0^i &= 6.37(N_0^i(\varphi_R - \varphi_A) + E_0^i(\lambda_R - \lambda_A)\cos(\varphi_A)) \\ \delta e_l^i &= 6.37H^i(N_l^i(\varphi_R - \varphi_A) + E_l^i(\lambda_R - \lambda_A)\cos(\varphi_A))\end{aligned}\quad 4-32$$

そして、移動局での距離依存誤差の L1、L2 の観測量は、

$$\begin{aligned}\delta e_{L1}^i &= \delta e_0^i + \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \delta e_l^i \\ \delta e_{L2}^i &= \delta e_0^i + \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \delta e_l^i\end{aligned}\quad 4-33$$

として求めることができる。他の誤差要因（距離依存誤差も含む）はすべて基準局 A（補間の中心基準局）で作成された高精度搬送波位相補正データ $CR_{A,L1}^i$ （整数値バイアスは決定、除去済み）として、移動局に同報される。

$$\begin{aligned}CR_{A,L}^i &= \phi_{A,L1}^i(t) - |r_A^i| - c \cdot \hat{\delta t}_A \\ &= A_A + M_{A,L1}(t) + c(\delta \tilde{t}_A - \delta t^i) - \frac{I_A^i(t)}{f_A^2} + T_A^i(t) + \bar{b}^i(t) + \varepsilon_{L1,\phi}\end{aligned}\quad 4-34$$

移動局では自身の観測量をパラメータから求めた補正データと搬送波位相補正データによって補正し、高精度測位をおこなう。搬送波から求めた擬似距離 R_u^i から補正データを除算すると、

$$\begin{aligned}\delta R_{u,L1}^i &= R_{u,L1}^i - CR_{A,L1}^i - \delta e_{L1}^i \\ &= \left| r_u^i(t) \right| + \frac{c}{f_{L1}} N_{u,L1}^i + c \cdot \delta t_u + \varepsilon_u\end{aligned}\tag{4-35}$$

となり、移動局での整数値バイアスが決定しやすくなる。 ε_u は相殺されずに残った誤差である。しかし、最も大きな誤差要因である電離層、対流圏、衛星位置誤差等は FKP によって除去されているため、残っている誤差(局依存誤差)の残差は微小である。このように FKP 方式では二重位相差処理無しで、RTK GPS 同様 (FKP 方式では移動局での整数値バイアス決定アルゴリズムに OTF を採用している) に移動局の位置を高精度に求めることができる。

第5章 長基線測位誤差

5.1 二重位相差の残差

5.1.1 はじめに

第4章で説明したように、移動局と基準局の2点でコードの二重位相差の演算を行った場合、受信機と衛星の時計誤差が除去される。残っている誤差は、距離依存誤差の電離層遅延、対流圏遅延、衛星軌道誤差と、局依存誤差である、マルチパスと測定誤差である。

このうち基線長を延ばしていくときに最も大きな影響を与えるのが、電離層遅延と対流圏遅延である。通常RTK-GPS測位を行う場合、基線長10km以内の短基線では、経験上、電離層と対流圏による遅延量は $I_u \approx I_r, T_u \approx T_r$ とされ相殺される。しかし、中基線(10km)以上では二重位相差に含まれ測位精度に大きく影響してくる。そこで、電子基準点のRINEXデータを用い、二重位相差に含まれる誤差成分の検証を行う。

5.1.2 二重位相差の残差の定義

具体的に、干渉測位を行う場合での距離依存の誤差がどの程度であるかを調べるために、既知の2点で二重位相差をとる。L1の二重位相差を簡単に書くと、

$$\Delta\nabla\phi_{L1} = \lambda_{L1}^{-1}[\Delta\nabla r - \Delta\nabla I_{\phi,L1} + \Delta\nabla T_{\phi} + \Delta\nabla b] + \Delta\nabla N_{L1} + \varepsilon_{\phi,L1} \quad 5-1$$

ここで、基準局と移動局の正確な位置が分かっているので、幾何学距離(真の距離)の二重位相差の項 $\lambda^{-1}\Delta\nabla r$ を削除できる。真の距離の二重位相差を除去した残りの誤差を残差とする。マルチパス環境の良い場所での測位に限定すると二重位相差の残差 $\Delta\nabla D$ は、

$$\Delta\nabla D_{L1} = \Delta\nabla\phi_{L1} - \lambda_{L1}^{-1}\Delta\nabla r = \Delta\nabla N_{L1} + \lambda_{L1}^{-1}[-\Delta\nabla I_{\phi,L1} + \Delta\nabla T_{\phi} + \Delta\nabla b] + \varepsilon_{\phi,L1} \quad 5-2$$

と表わされる。整数値バイアス $\Delta\nabla N$ と電離層 $\Delta\nabla I$ 、対流圏遅延 $\Delta\nabla T$ と衛星軌道誤差 $\Delta\nabla b$ が主な残差となる。整数値バイアス項は、各衛星、受信機間で異なるため、整数値バイアスを決定しない限り、残差には一定のバイアスが乗っていることになる。しかし、二重位相差の対象となる基準衛星が変化せず、さらにサイクルスリップが起こらなければ、このバイアスは一定であるので残差の時系列変化は測定することが可能である。上記の観測方程式で求めた値はcycle(波の数)で表されるため、波長 λ_{L1} をかけて、メートルに換算する。

5.1.3 測定概要

基線による残差の変化を調べるために、異なる基線に位置する移動局と基準局との二重位相差

の残差を示す。移動局の概略位置は図5-1に示し、座標と基準局からの基線長は表5-1に示す。測定を行う衛星は1、2、9、26番衛星である。測定時間は1、2番衛星が7000~14000s (GPS time)、9、26番衛星は60000~70000s (GPS time)であり、各時間で仰角差が大きな衛星を選択した。測定時間での基準局、移動局の各衛星仰角は表5-2に示す。それぞれの時間帯での基準衛星は25、29番衛星である(表5-3)。基準局での基準衛星と観測する衛星の仰角は図5-2に示す。

測定値は前項でも述べたが、整数値バイアスのため、絶対値を測定することは困難であるため、ゼロ平均での分布を示し、標準偏差により残差を測定する。

表5-1:移動局の座標と基線長

	地名	distance(km)	X(km)	Y(km)	latitude(°)	longitude(°)	height(m)
基準局	世田谷	0	0	0	35.66369728	139.6306503	82.57
北東	練馬	10.66	1.12	10.60	35.75921044	139.6430323	85.52
	足立	20.95	16.47	12.94	35.78021472	139.8128122	44.62
	市川	24.63	24.60	1.34	35.67546419	139.9023545	43.52
	花見川(千葉)	37.81	37.80	-0.64	35.65720675	140.0480931	43.73
	水戸	107.32	75.92	75.85	36.34437156	140.4763331	71.61
	厚田(北海道)	870.49	145.83	858.18	43.40468233	141.4311721	76.06
南西	川崎	11.78	3.87	-11.13	35.56340294	139.6733532	47.44
	藤沢	40.26	-14.96	-37.38	35.326681	139.4660697	46.45
	横須賀	44.11	3.11	-44.00	35.26709311	139.6648381	60.37
	小田原	62.33	-44.42	-43.73	35.26859969	139.142415	64.22
	静岡	136.17	-114.33	-73.96	34.99052619	138.3782959	64.47
	沖縄	1,504.06	-1,168.40	-947.12	26.44692931	127.8327271	144.75

表5-2:観測衛星の仰角(°)

	SV1		SV2		SV9		SV26	
	7000s	14000s	7000s	14000s	62000s	70000s	62000s	70000s
世田谷	19.20	26.67	30.38	66.19	27.69	83.30	67.68	40.41
練馬	19.27	26.63	30.37	66.30	27.58	83.42	67.74	40.73
足立	19.19	26.47	30.22	66.27	27.51	83.40	67.64	40.89
市川	19.05	26.42	30.13	66.12	27.59	83.24	67.47	40.93
花見川	18.95	26.30	29.99	66.05	27.57	83.17	67.35	41.05
水戸	19.25	25.74	29.65	66.75	26.71	83.85	67.69	41.73
厚田	24.28	22.77	29.39	75.09	19.08	84.95	72.15	44.87
川崎	19.10	26.66	30.33	66.05	27.78	83.16	67.53	40.67
藤沢	19.03	26.90	30.79	66.06	28.10	82.91	67.44	40.38
横須賀	18.86	26.74	31.15	66.40	28.10	82.79	67.25	40.54
小田原	19.18	27.21	32.33	67.08	28.26	82.90	67.61	39.93
静岡	19.41	27.97	33.02	66.86	28.78	82.62	67.84	39.26
沖縄	18.90	40.60	41.07	55.76	40.59	68.43	62.33	25.52

表5-3:基準衛星の仰角(°)

	SV25		SV29	
	7000s	14000s	62000s	70000s
世田谷	80.38	28.23	64.93	27.32
練馬	80.47	28.13	65.05	27.34
足立	80.62	28.18	65.11	27.50
市川	80.59	28.32	64.99	27.56
花見川	80.68	28.40	64.99	27.69
水戸	81.64	27.86	65.93	28.20
厚田	83.92	20.92	75.06	29.79
川崎	80.32	28.34	64.81	27.34
藤沢	79.94	28.50	64.47	27.10
横須賀	80.03	28.64	64.43	27.27
小田原	79.64	28.43	64.34	26.80
静岡	78.81	28.39	63.83	26.05
沖縄	62.78	30.27	50.36	14.02

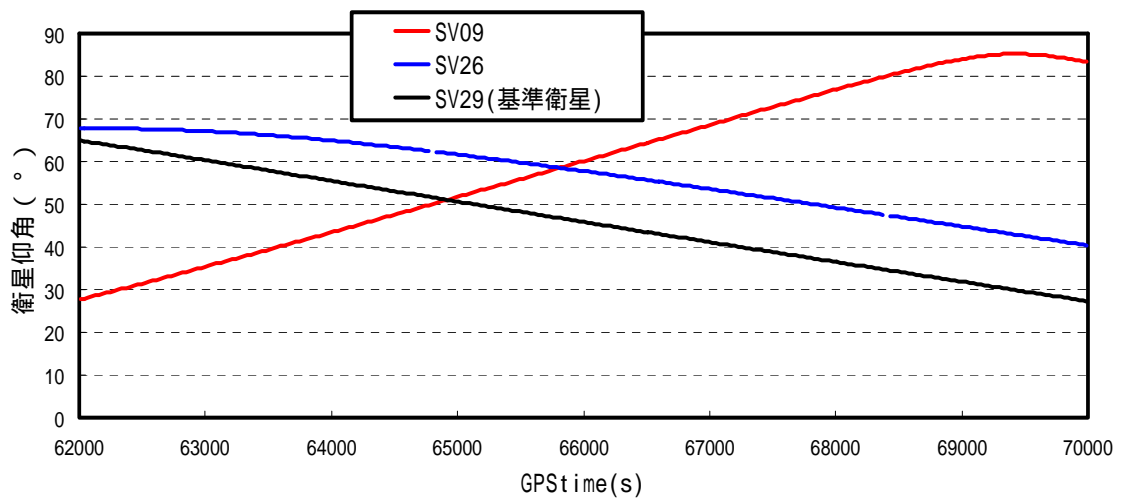
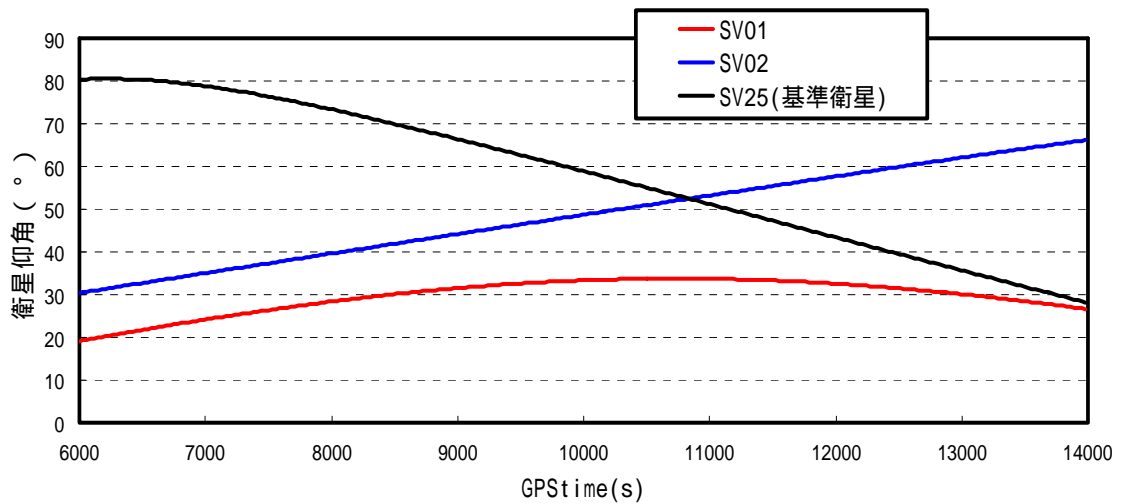
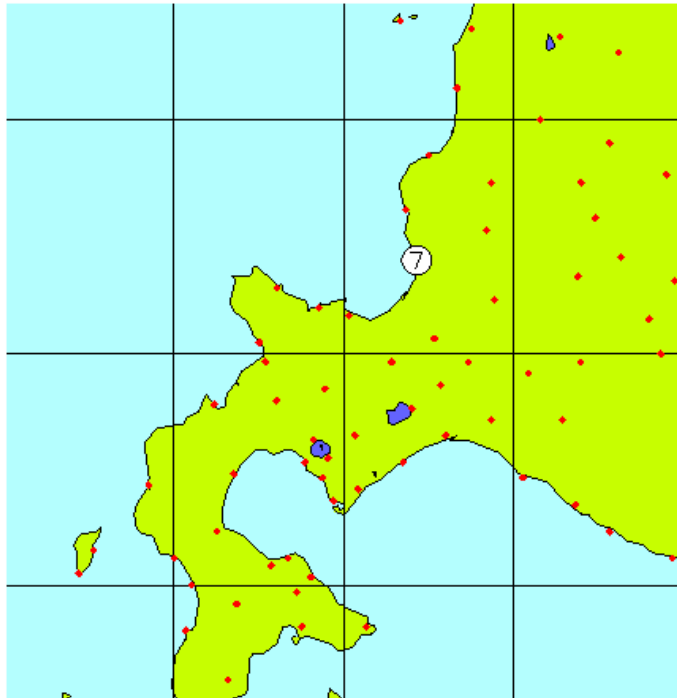


図5 2:基準局での観測衛星と基準衛星の仰角



	世田谷
	練馬
	足立
	市川
	花見川
	水戸
	厚田
	川崎
	藤沢
	横須賀
	小田原
	静岡
	沖縄

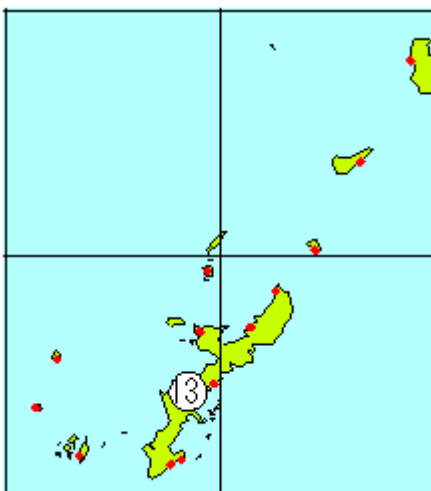
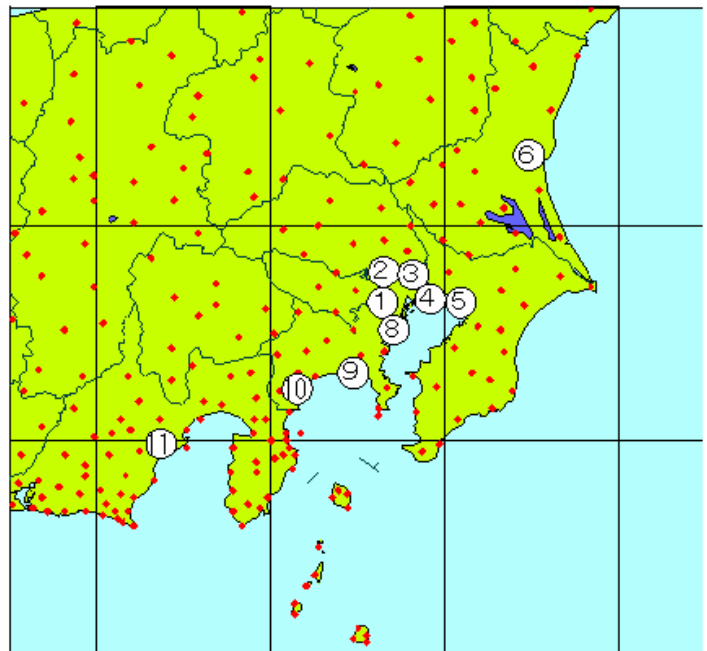


図5 1: 移動局 - 基準局位置

5.1.4 二重位相の残差の測定結果

12月16日の各基準局での二重位相の残差を測定する。基準局から見て、北東方向、南西方向へ基線を延ばすため、両方向で最も基線の短い(約10km)位置にある移動局(北東:練馬、南西:川崎)との二重位相の残差を示し、それぞれ基線の異なる移動局との二重位相の残差を各衛星で比較する。図5-3は1番衛星における基線長10km、20km、40km、100km地点(北東方向)の測定結果を示す。図5-4は2番衛星での測定結果である。全測定結果は付録として論文末に掲載する。

● 1番衛星

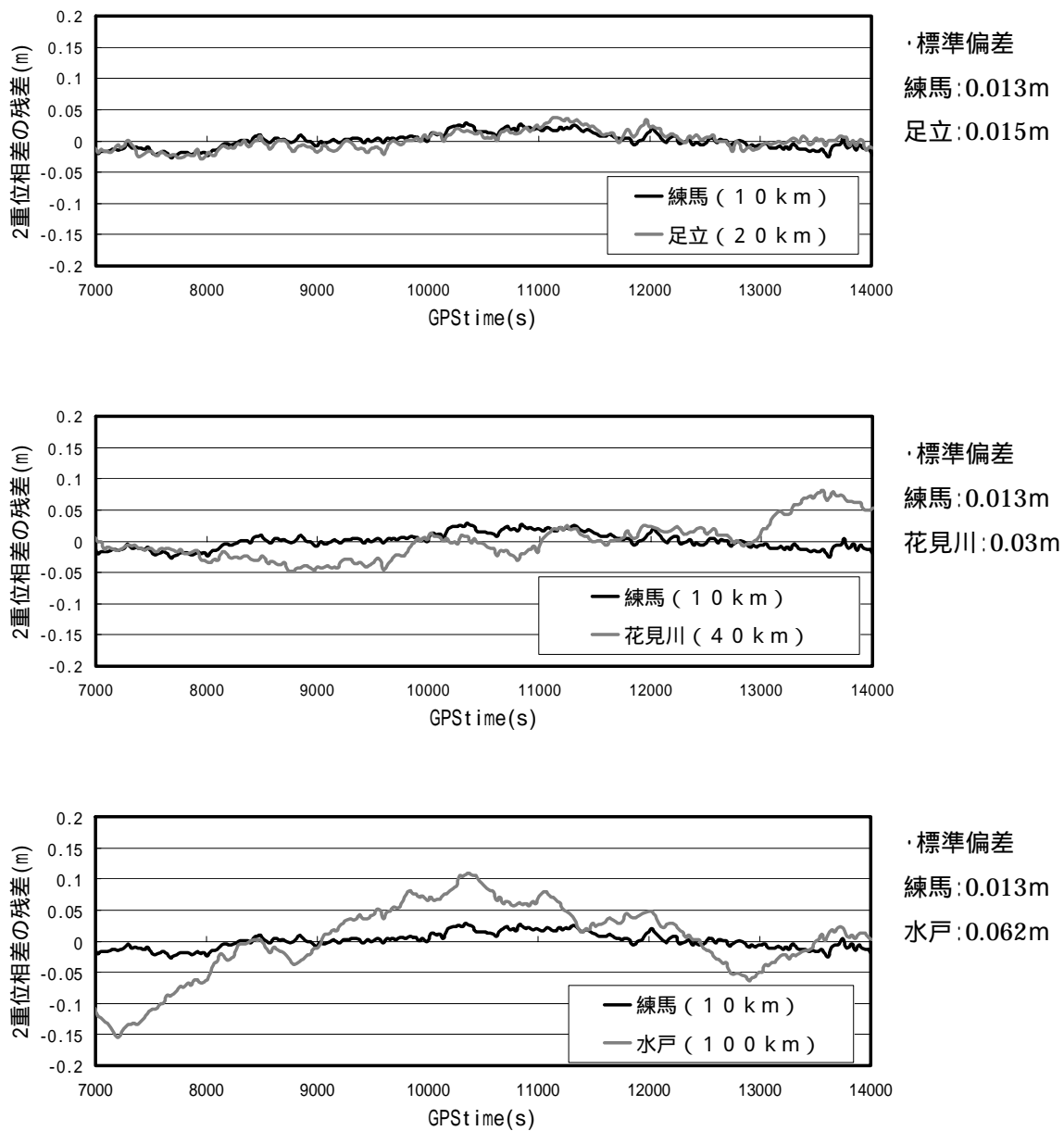


図5-3: 1番衛星における残差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

● 2 番衛星

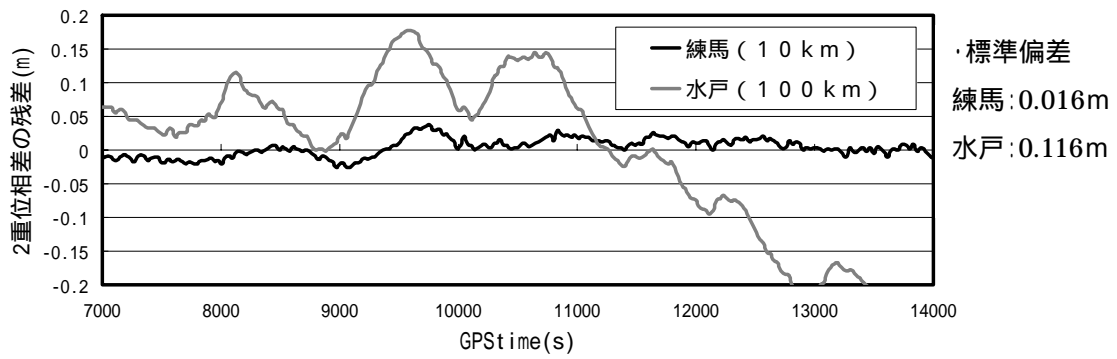
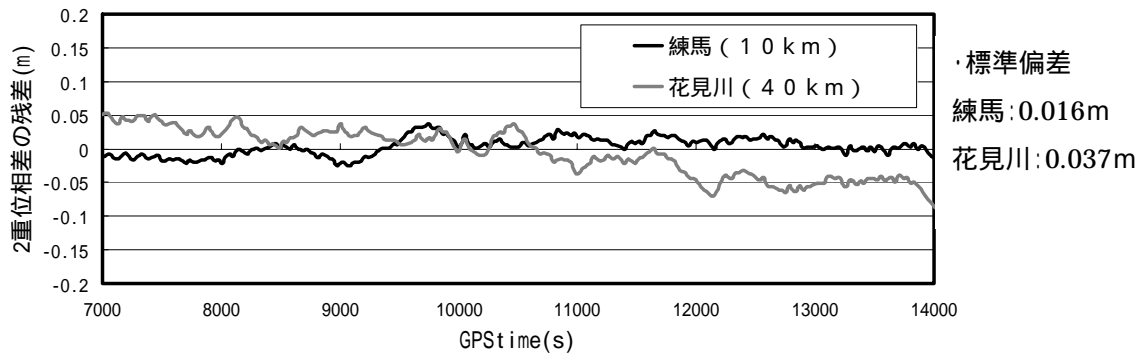
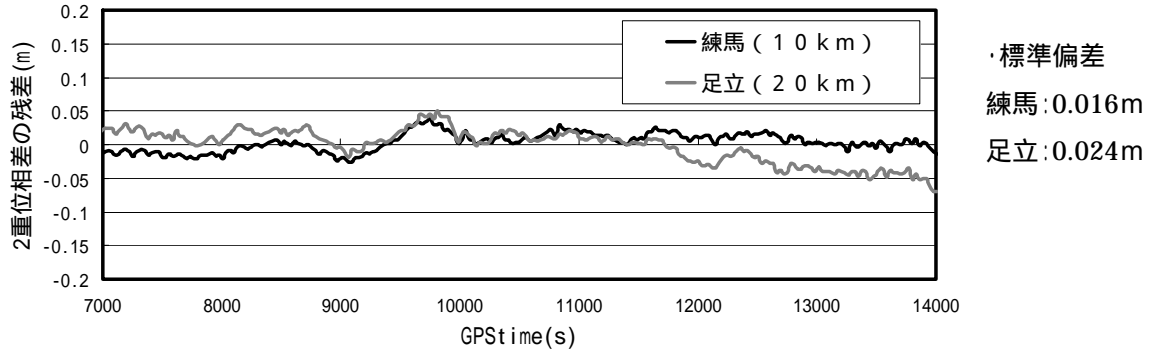


図5-4: 2番衛星における残差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

5.1.5 考察

表5 4:残差の標準偏差

		標準偏差(m)				
	位置	基線長(km)	SV1	SV2	SV9	SV26
北東	練馬	10.66	0.013	0.016	0.014	0.006
	足立	20.95	0.015	0.024	0.021	0.007
	市川	24.63	0.023	0.026	0.034	0.007
	花見川	37.81	0.030	0.037	0.051	0.011
	水戸	107.32	0.062	0.116	0.083	0.036
	厚田	870.49	0.677	0.602	0.437	0.090
南西	川崎	11.78	0.018	0.013	0.013	0.006
	藤沢	40.26	0.036	0.049	0.022	0.013
	横須賀	44.11	0.044	0.049	0.024	0.014
	小田原	62.33	0.039	0.085	0.032	0.019
	静岡	136.17	0.076	0.170	0.079	0.027
	沖縄	1504.06	3.084	1.033	2.245	1.497

表5 4に各衛星の移動局毎の各衛星の標準偏差を示す。基線が延びるに従い残差の標準偏差が増大していることが分かる。基線の長さとの標準偏差の相関をとると、ほぼ1に近い値が得られた。つまり、二重位相差に含まれる誤差は、基線の長さの影響を受け、基線が延びるほど増大することが分かる。各衛星で見ると、同じ時間でも、基準局から見て低仰角の衛星ほど誤差が増大している。また、基線が短い練馬(10 km)では、低仰角の1番衛星の標準偏差は0.013 mであり、高仰角の2番衛星は0.015 mとあまり差は見られないが、基線が長い水戸(100 km)では、1番衛星は0.062 mなのに対し、2番衛星は0.116 mと誤差が6分の1になっている。このことより、基線が長く基準局での仰角が低い衛星の残差が最も大きいといえる。こちらも相関は1に近く、この推定は正しいといえる。低仰角の衛星を使用した場合に誤差が増大するのは、低仰角の衛星ほど電波の伝搬経路が長くなるため、電離層や対流圏の影響を強く受けることが原因と考えられる。また低仰角の衛星は、基準局と移動局での伝搬経路の差が高仰角の衛星に比べて増すため、電離層等が均質であるとしても残差に与える影響が異なることになる。

最も残差の少ない26番衛星は、4つの衛星の中でも比較的高い仰角で推移し、基準衛星(29)との仰角差も小さいため、二重位相差を取る搬送波位相は $\phi_r^{26} \approx \phi_u^{26}, \phi_r^{29} \approx \phi_u^{29}, \phi_r^{26} \approx \phi_r^{29}, \phi_u^{26} \approx \phi_u^{29}$ であったものと考えられる。さすがに基線長が40 km以上になると標準偏差が1 cm以上となるが、20 km付近では標準偏差はmmである。このことから、測位に使用する衛星は高仰角なものを選び、さらに基準衛星に近い軌道の衛星を選択することが残差を減少させることにつながるといえる。

5.2 電離層の影響

5.2.1 はじめに

干渉測位において、移動局と基準局の上空の電離層の状態が均質であれば、測位に電離層は影響を与えないことは良く知られている。つまり、どんなに基線が長くとも、電離層の状態が同じであれば、相殺される。しかし、実際の電離層は均質ではなく細かい不均質がある。そこで、各移動局での電離層伝搬遅延（または、進み）を2周波によって推定し、基準局との電離層の状態を検証する。

5.2.2 2周波による電離層推定方法

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（L1：1,574.42MHz，L2：1,227.6MHz）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。

まず擬似距離での電離層推定式を示す。まず、擬似距離の式は、

$$\begin{aligned}\rho_{L1} &= r + c[\delta t_u - \delta t^s] + I_{L1} + T + \varepsilon_{\rho,L1} \\ \rho_{L2} &= r + c[\delta t_u - \delta t^s] + I_{L2} + T + \varepsilon_{\rho,L2}\end{aligned}\tag{5-3}$$

として示すことができる。ここで r は衛星受信機間の真の距離、 c は光速、 $\delta t_u, \delta t^s$ はそれぞれ受信機時計誤差と衛星時計誤差である。 I は電離層、 T は対流圏、 ε はその他の誤差要因である。

この擬似距離の式よりL1の電離層推定値は

$$I_{\rho,L1} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)}(\rho_{L2} - \rho_{L1})\tag{5-4}$$

として推定できる。 $f_{L1,L2}$ はそれぞれL1、L2の周波数である。

次に搬送波位相を使用した電離層推定式を示す。搬送波位相の式は、

$$\begin{aligned}\phi_{L1} &= \lambda_{L1}^{-1}[r - I_{L1} + T_\phi] + f_{L1}(\delta t_u - \delta t^s) + N_{L1} + \varepsilon_{\phi,L1} \\ \phi_{L2} &= \lambda_{L2}^{-1}[r - I_{L2} + T_\phi] + f_{L2}(\delta t_u - \delta t^s) + N_{L2} + \varepsilon_{\phi,L2}\end{aligned}\tag{5-5}$$

として示すことができる。ここで、 $\lambda_{L1,L2}$ は L1、L2 それぞれの波長である。 $N_{L1,L2}$ は整数値バイアスである。この式を使用し、L1 の電離層推定値は

$$I_{\phi,L1} = \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [\lambda_{L1}(\phi_{L1} - N_{L1}) - \lambda_{L2}(\phi_{L2} - N_{L2})] \quad 5-6$$

と推定できる。しかし、式からも分かるように、搬送波位相を使用して電離層を推定するためには L1 と L2 の整数値バイアスを決定しなければならず、整数値バイアスが定まっていない場合、バイアスとして電離層推定値に影響してくるため、絶対値を推定することは困難である。逆に擬似距離を使用して求めた電離層推定値の絶対値は真の電離層遅延量に近いが、擬似距離の測位精度が搬送波位相よりも劣化するので、その分ノイズがのっている。そこで、整数値バイアスを決定しないで、この擬似距離の電離層推定値を利用して、搬送波位相の電離層推定値の絶対値を真の電離層伝搬遅延量に近づける方法がよく使用される。以下にその手順を示す。

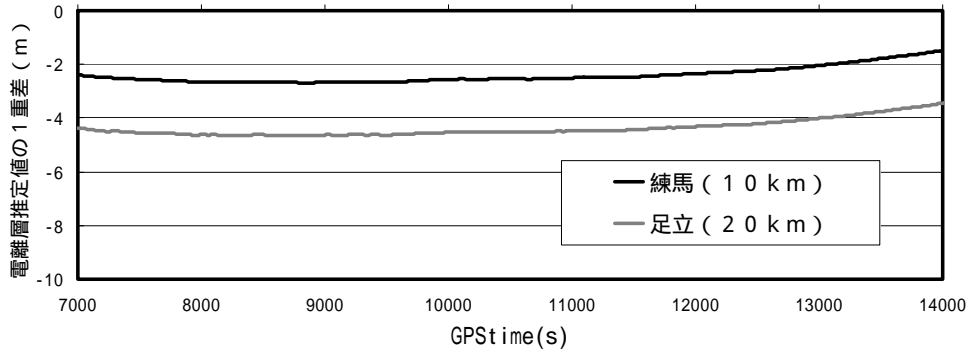
- 1) 測定値がサイクルスリップ（衛星から電波が障害物で遮蔽される等の理由で位相測定が中断する現象）や衛星が見えなくなり電波が受信されなくなるまでのインターバルを求める。
- 2) 連続観測できているインターバルの間の $L_{\rho,L1}$ と $L_{\phi,L1}$ の差をとり平均値を求め、求めた平均値を $L_{\phi,L1}$ のバイアス成分とする。
- 3) $L_{\phi,L1}$ の値から求めたバイアスを取り除き、求めた値を電離層伝搬遅延量とする。

上記の方法で求めた電離層推定値はノイズが少なく絶対値も正しい電離層推定値となる。

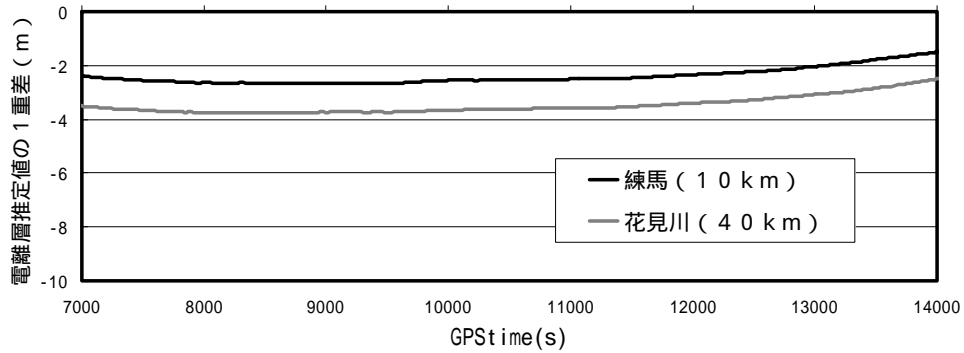
5.2.3 電離層推定結果

残差を求めた各基準点 I_u^s での電離層を、二周波を使用して推定し、基準局（世田谷） I_r^s での電離層推定値との差 $\Delta I_{u,r}^s = I_u^s - I_r^s$ を示す。その際、前回と同じように、基準局から最も近い移動局（練馬、川崎）との比較のため、各基準点のグラフには練馬と川崎の結果も同時に掲載する。以下の図 5 - 5 は 1 番衛星、図 5 - 6 は 2 番衛星についての各移動局での電離層推定結果を示す。

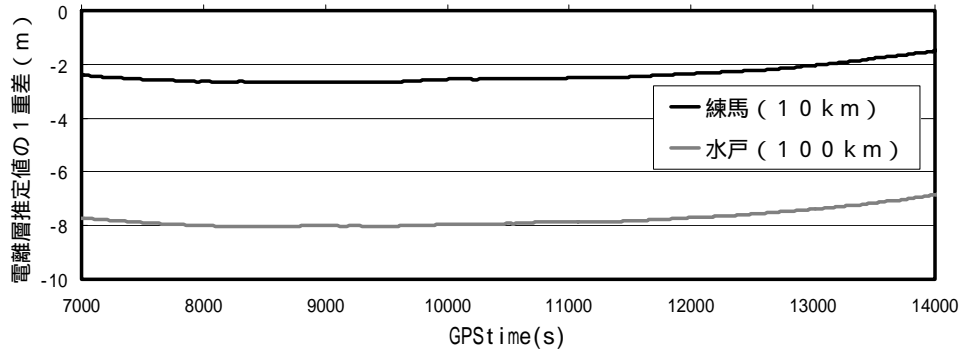
● 1 番衛星



・標準偏差
練馬:0.30m
足立:0.30m
・絶対値
練馬:2.40m
足立:4.37m



・標準偏差
練馬:0.30m
花見川:0.32m
・絶対値
練馬:2.40m
花見川:3.47m



・標準偏差
練馬:0.30m
水戸:0.30m
・絶対値
練馬:2.40m
水戸:7.76m

図5-5:1番衛星における電離層推定結果(基準局:世田谷)

● 2 番衛星

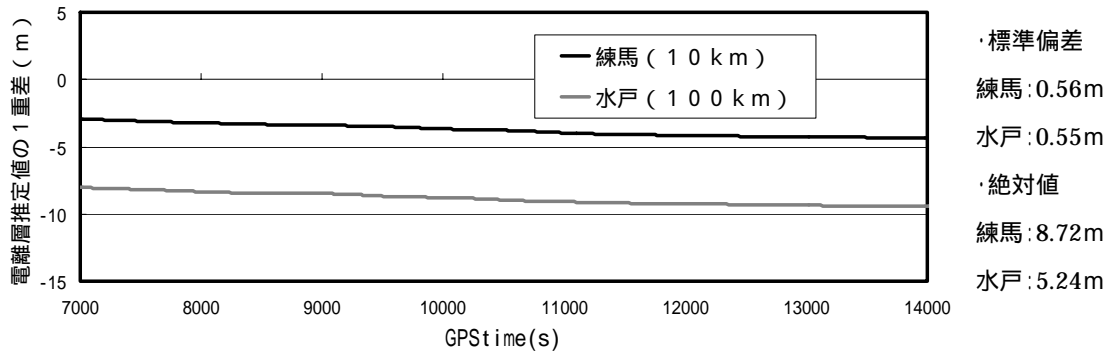
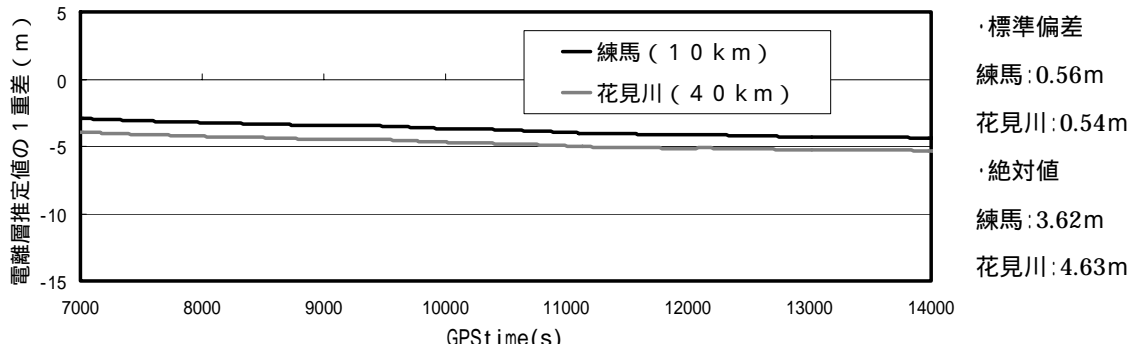
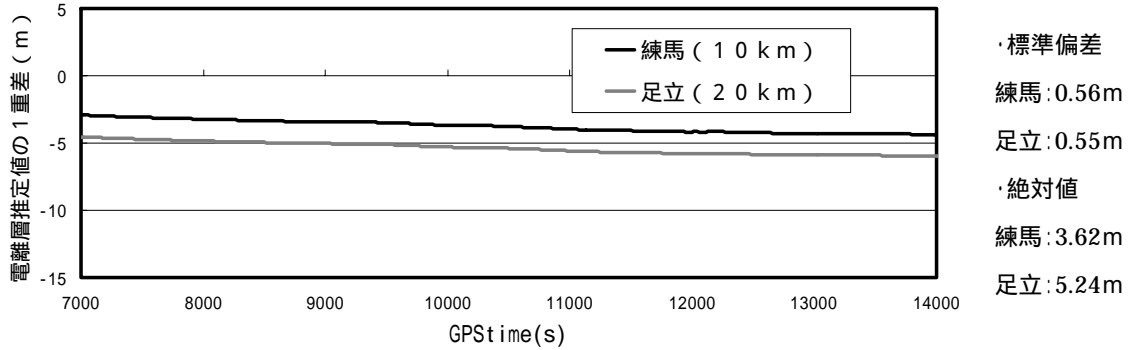


図5-6: 2番衛星における電離層推定結果(基準局:世田谷)

5.2.4 考察

表5 5は移動局で推定した電離層遅延量から、基準局で推定した電離層遅延量を除算した値の平均値の絶対値である。つまり、基準局と各移動局での電離層遅延量の差を示している。この表より、電離層遅延量自体は基線によって大きくなるわけではなく、局地的に異なることが分かる（24 km付近の市川で7 mなのに対して、800 km以上離れている厚田で3 m程度しか差がない）。しかし、この数値は整数値バイアスを決定して推定したわけではなく、擬似距離データを使用したものなので、整数値バイアスを決定した場合にくらべて、若干雑音がのっている。

電離層の時間変化を比較するために表5 6に標準偏差を示す。1、2番衛星よりも9、26番衛星の方が電離層の変化が小さいのは、9、26番衛星の測定時間が、比較的電離層の活動が少ない夜中であることが影響していると考えられる。また同じ時間帯でも1番衛星と2番衛星を比較すると、1番衛星の変化が少ないことが分かる。これは、1番衛星の仰角が10°～20°しか変化しないのに対して、2番衛星は30°～70°と測位中に変化しているため、時間によって伝搬経路が異なることが影響していると考えられる。9、26番衛星も同様のことが言える。基線がかなり長い、厚田や沖縄では他の移動局とは衛星の見え方（仰角）が大きく異なるため、標準偏差の傾向も異なる。

表5 5:2点の電離層推定値の差の絶対値

(移動局-世田谷)

衛星番号	平均値の絶対値(m)			
	SV1	SV2	SV9	SV26
北東				
練馬	2.40	3.62	5.90	5.92
足立	4.37	5.24	7.74	7.65
市川	7.03	8.10	10.41	10.29
花見川	3.47	4.63	6.95	6.81
茨城	7.76	8.72	11.09	11.17
厚田	3.44	4.47	6.09	6.12
南西				
川崎	4.76	5.85	8.39	8.36
藤沢	4.06	4.94	7.18	7.13
横須賀	3.97	3.68	7.39	7.35
小田原	2.50	7.98	6.14	6.06
静岡	6.87	5.13	10.14	10.08
沖縄	0.91	2.26	6.00	5.86

表5 6:2点の電離層推定値の差の標準偏差

(移動局-世田谷)

衛星番号	標準偏差(m)			
	SV1	SV2	SV9	SV26
北東				
練馬	0.30	0.56	0.13	0.05
足立	0.30	0.55	0.13	0.05
市川	0.29	0.56	0.13	0.05
花見川	0.32	0.54	0.17	0.03
茨城	0.30	0.55	0.13	0.05
厚田	0.56	0.59	0.19	0.05
南西				
川崎	0.30	0.55	0.13	0.05
藤沢	0.32	0.53	0.13	0.05
横須賀	0.31	0.55	0.13	0.05
小田原	0.31	0.55	0.13	0.05
静岡	0.34	0.53	0.12	0.06
沖縄	0.74	0.26	0.05	0.12

5.3 電離層二重位相差

5.3.1 はじめに

5.2で2周波によって電離層推定値を各基準局で求めた。その結果、電離層の状態は基線に無想間であり、不均一に広がっていることが確認できた。しかし、二重位相差を取った場合、電離層の遅延量は増加することは一般に知られている。そこで、実際に残差に含まれる電離層の二重位相差を各移動局で調べる。

5.3.2 電離層二重位相差

電離層の二重位相差は、5.2の式5-6を利用して求める。

$$\begin{aligned} I_{r,L1}^i &= \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [\lambda_{L1}(\phi_{r,L1}^i - N_{r,L1}^i) - \lambda_{L2}(\phi_{r,L2}^i - N_{r,L2}^i)] \\ I_{r,L1}^j &= \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [\lambda_{L1}(\phi_{r,L1}^j - N_{r,L1}^j) - \lambda_{L2}(\phi_{r,L2}^j - N_{r,L2}^j)] \\ I_{u,L1}^i &= \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [\lambda_{L1}(\phi_{u,L1}^i - N_{u,L1}^i) - \lambda_{L2}(\phi_{u,L2}^i - N_{u,L2}^i)] \\ I_{u,L1}^j &= \frac{f_{L2}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} [\lambda_{L1}(\phi_{u,L1}^j - N_{u,L1}^j) - \lambda_{L2}(\phi_{u,L2}^j - N_{u,L2}^j)] \end{aligned} \quad 5-7$$

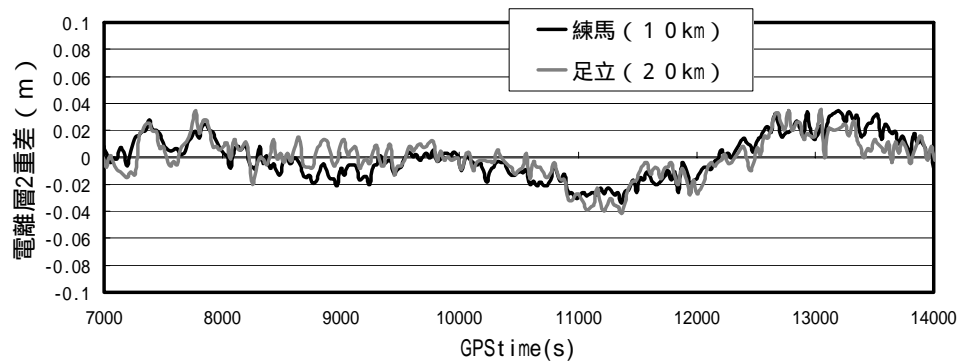
$$\Delta \nabla I_{ur}^{ij} = (I_u^j - I_u^i) - (I_r^j - I_r^i) \quad 5-8$$

ここで、整数値バイアスは決定していないため、一定のバイアスとして残るが、平均値からの偏差を検証する場合は問題とならない。

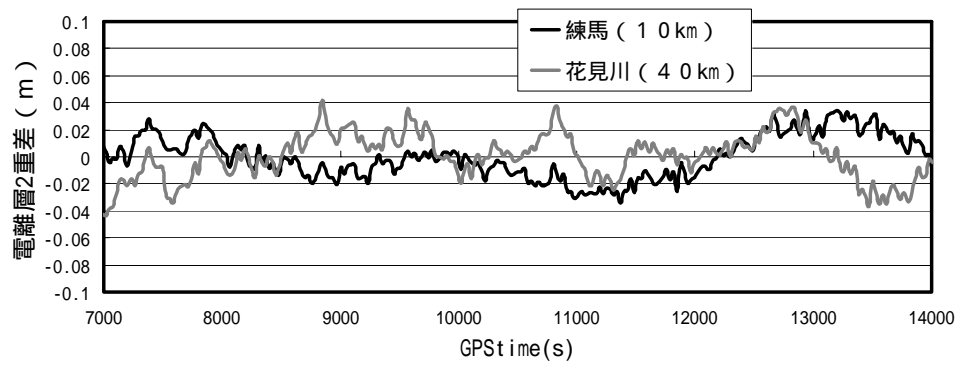
5.3.3 電離層二重位相差測定結果

基準局は二重位相差と同じで、世田谷を選択し、1、2番衛星の観測時における基準衛星は25番衛星を使用し、9、26番衛星の観測時の基準衛星は29番衛星である。各移動局は北東、南西に基線を伸ばし、最も近い基準局（練馬、川崎）との比較をグラフに示す。図5-7は1番衛星、図5-8は2番衛星を示す。他のグラフは全て論文末の付録に掲載する。

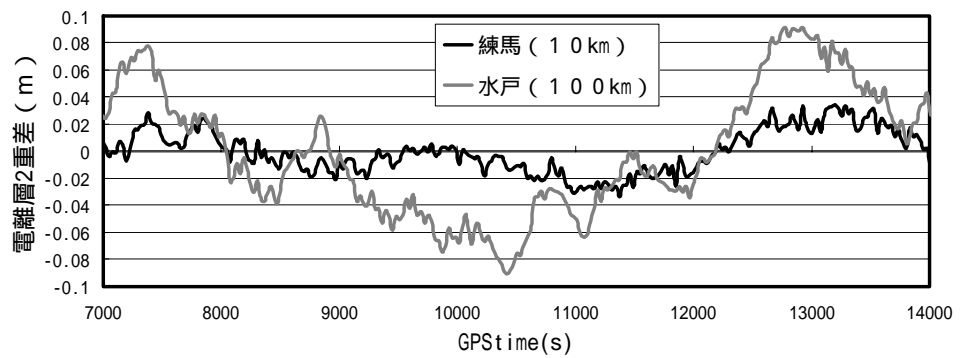
● 1 番衛星



・標準偏差
 練馬:0.16m
 足立:0.15m



・標準偏差
 練馬:0.16m
 花見川:0.18m



・標準偏差
 練馬:0.16m
 水戸:0.47m

図5-7: 1番衛星における電離層2重差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

● 2 番衛星

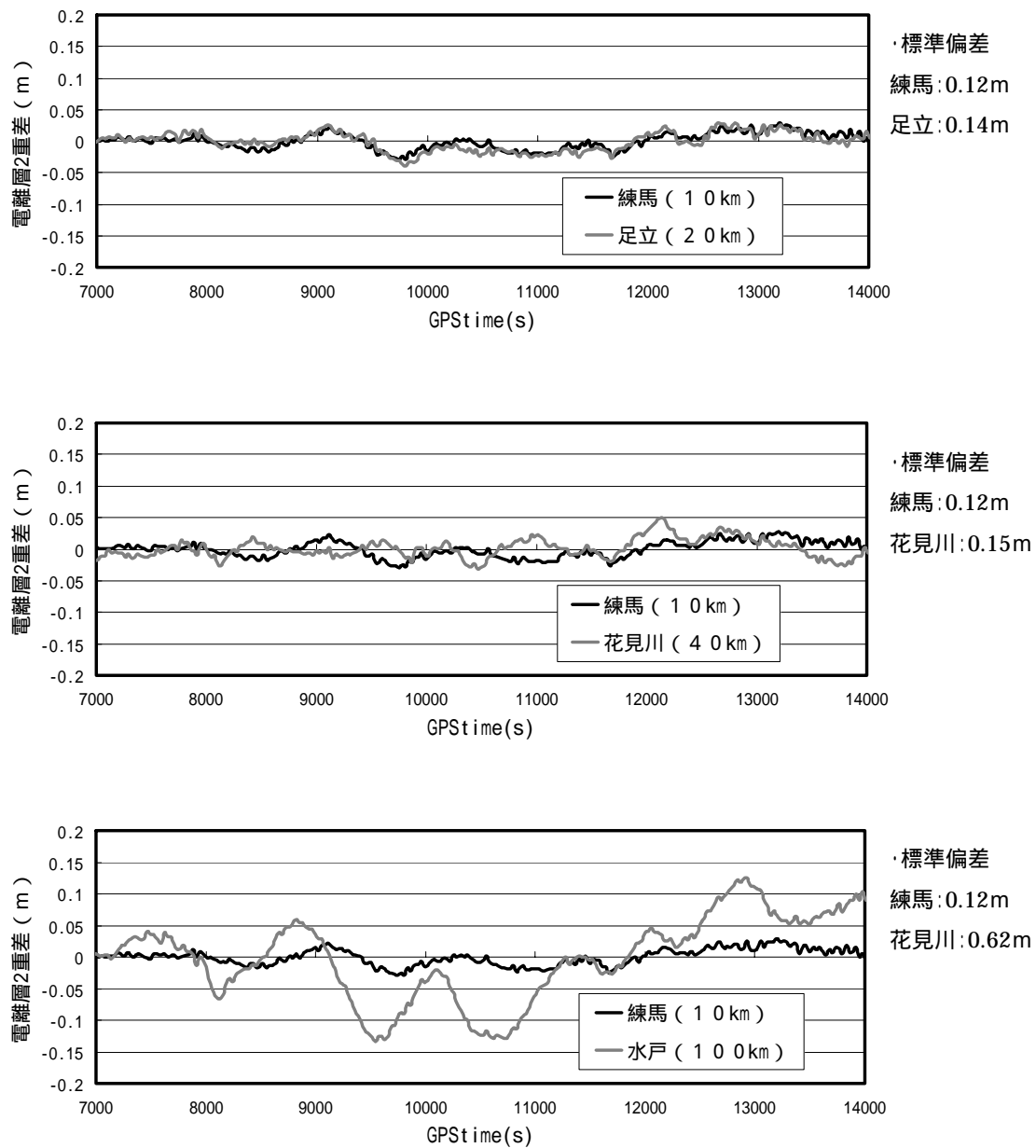


図5-8: 2番衛星における電離層2重差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

5.3.4 考察

表5 6:電離層二重位相差の標準偏差

		標準偏差 (m)				
	位置	基線長 (km)	SV1	SV2	SV9	SV26
北東	練馬	10.66	0.02	0.01	0.01	0.01
	足立	20.95	0.02	0.01	0.01	0.01
	市川	24.63	0.01	0.01	0.01	0.01
	花見川	37.81	0.02	0.01	0.01	0.01
	水戸	107.32	0.05	0.06	0.02	0.03
	厚田	870.49	0.34	0.20	0.09	0.05
南西	川崎	11.78	0.01	0.01	0.01	0.01
	藤沢	40.26	0.03	0.03	0.01	0.01
	横須賀	44.11	0.03	0.04	0.01	0.01
	小田原	62.33	0.04	0.04	0.01	0.01
	静岡	136.17	0.05	0.06	0.02	0.02
	沖縄	1504.06	1.44	1.55	0.06	0.07

各移動局での電離層の二重位相差の標準偏差を表5 6に示す。残差と同じく基線が延びるごとに、標準偏差の増大することが分かった。やはり電離層の活動が穏やかな時間帯の9、26番衛星は比較的電離層の2重差も小さく20km以下では標準偏差が1cm以下である。北東方向の移動局にくらべて、南西方向の移動局の電離層の二重位相差が増しているのは、北東方向に比べて、全体的に衛星仰角が低いことが原因と考えられる。(一般に電離層は天頂方向の遅延量を1とすると、仰角30°で1.8倍、仰角5°で3倍になると言われている。)今回は、絶対値が分からないので(整数値バイアスを決定していないため)平均値からの標準偏差を示しているが、残差と比較すると逆方向に変位していることが確認できる。これは、搬送波が電離層の中では「進む」ので、マイナス方向に残差の値をひっばっているためである。つまり、電離層の二重位相差の変動が残差の逆であるということは、残差に最も影響を与えている要因は電離層であると言える。

5.4 対流圏二重位相差

5.4.1 はじめに

電離層が基線に依存して誤差が増大することが5.3で確認できた。しかし、主に残差に残ってくる誤差には対流圏遅延も存在する。電離層と同じく基準局との基線が10km以下であれば、 $\Delta VT \approx 0$ として扱うことができるが、長基線では残差として残ってくる。対流圏遅延は第2章でも述べたように、GPS測位においてはモデル式で十分補正が可能である。対流圏遅延を測定することは困難であるため、各移動局で対流圏のモデルを使用し、対流圏の二重位相差を検証する。使用するモデルはSaastamoinen model(詳細は第2章)である。

5.4.2 対流圏二重位相差測定結果

図5-9にモデルによってもとめた1番衛星と25番衛星の対流圏遅延量の二重位相差を示す。基線

長は、10 km、20 km、40 km、100 kmと延ばし、それぞれ10 km地点の測定値と比較する。図5-10には2番衛星と25番衛星の対流圏二重位相差を示す。

- 1番衛星

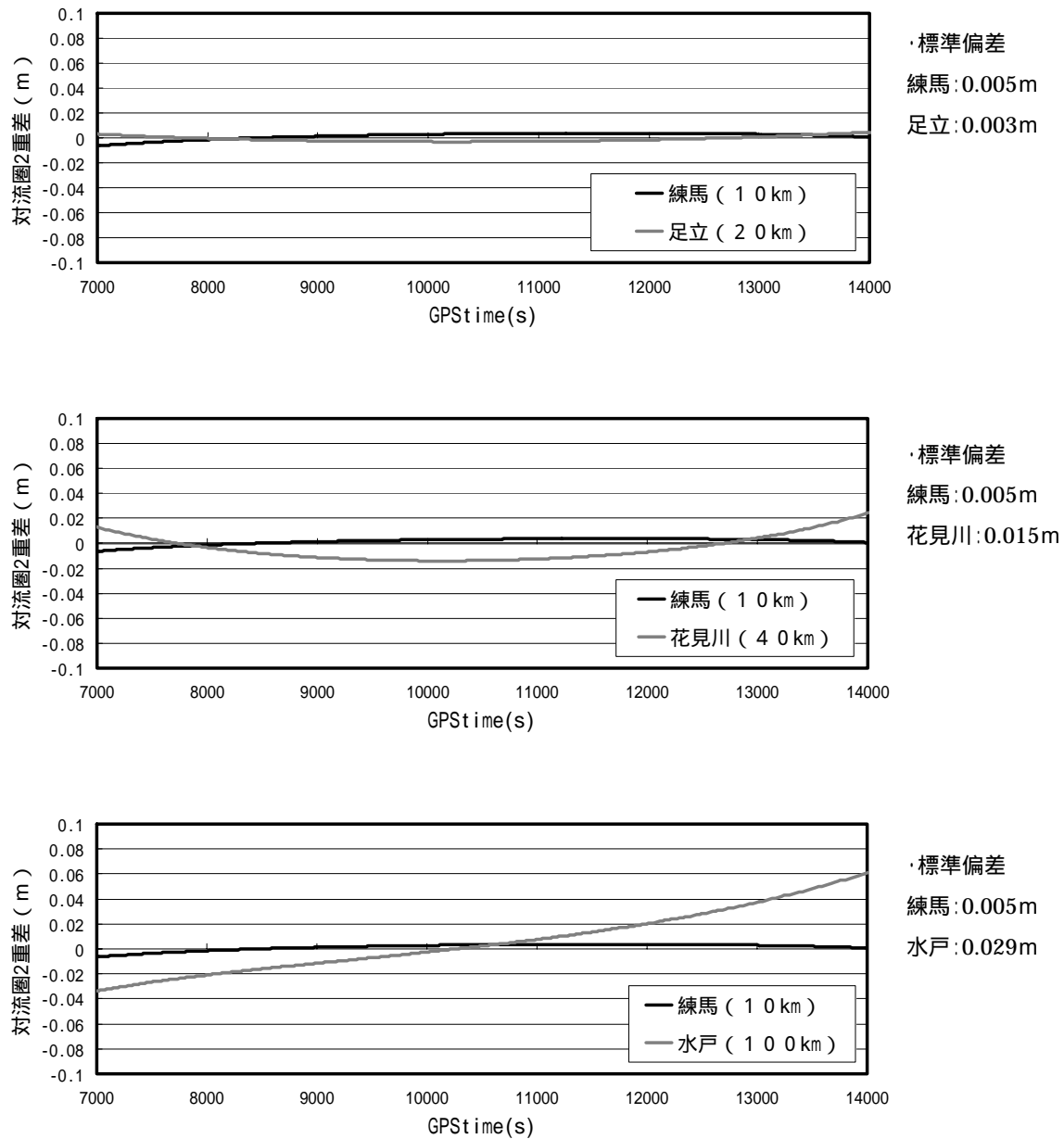


図5-9: 1番衛星におけるモデル対流圏2重差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

● 2 番衛星

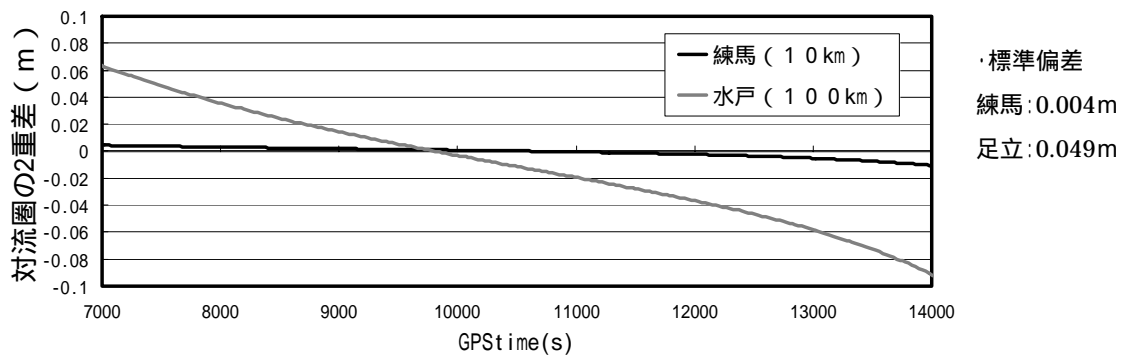
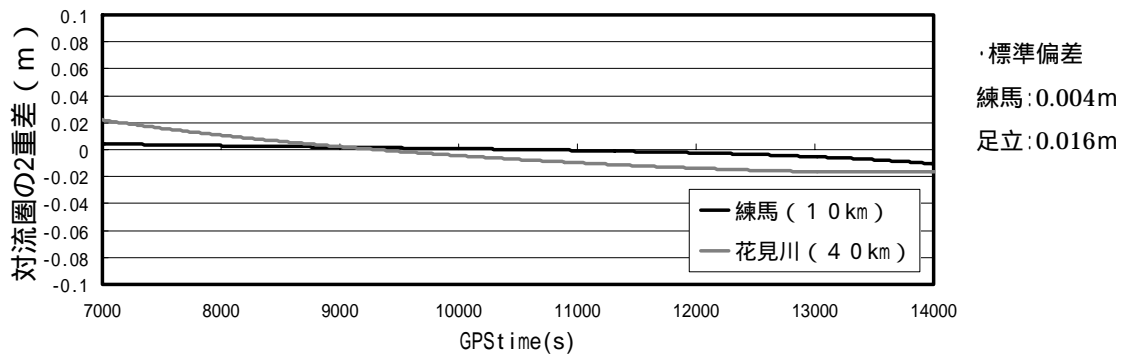
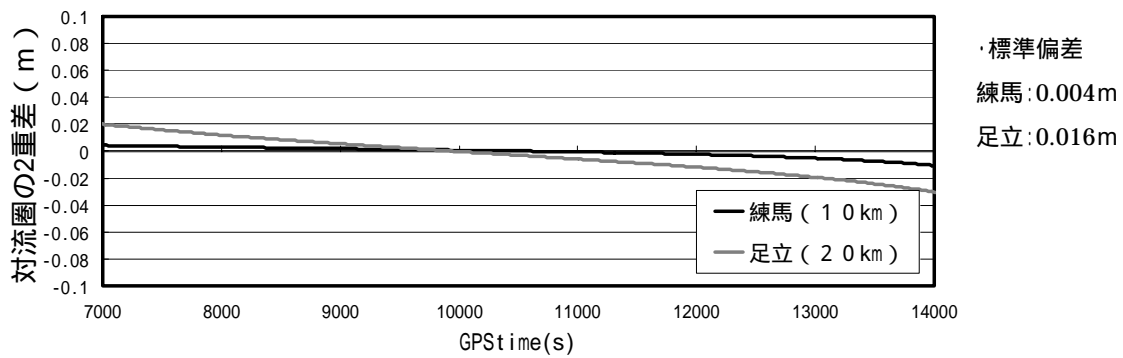


図5-10:2番衛星におけるモデル対流圏2重差測定結果(基準局:世田谷、基準衛星:25番衛星)

5.4.3 考察

表5-7:対流圏二重位相差の標準偏差

		標準偏差(m)				
	位置	基線長(km)	SV1	SV2	SV9	SV26
北東	練馬	10.66	0.005	0.004	0.003	0.000
	足立	20.95	0.003	0.016	0.008	0.001
	市川	24.63	0.010	0.013	0.004	0.003
	花見川	37.81	0.015	0.016	0.008	0.006
	水戸	107.32	0.029	0.049	0.020	0.014
	厚田	870.49	0.253	0.475	0.399	0.011
南西	川崎	11.78	0.011	0.003	0.002	0.001
	藤沢	40.26	0.021	0.011	0.005	0.005
	横須賀	44.11	0.023	0.014	0.012	0.000
	小田原	62.33	0.020	0.023	0.011	0.010
	静岡	136.17	0.035	0.049	0.030	0.026
	沖縄	1504.06	0.282	0.518	0.755	0.591

電離層と同じく対流圏も基線が延びるに従い、標準偏差が増していることがわかる(表5-7)。しかし、高仰角の衛星では偏差が小さく、最も高仰角の26番衛星は基線長40km付近であっても数mmの偏差である。最も低い1番衛星と比較すると、40km(藤沢)で、5倍の差がみられる。一般に対流圏遅延量は天頂方向を1とすると、仰角30°で2倍、仰角15°で4倍、仰角5°で10倍にもなることが知られている。これは電離層よりも仰角に依存して、遅延量が増すことを示している。測位において、低仰角衛星の使用は注意すべきであろう。しかし、対流圏遅延はモデルによってかなり正確な補正が可能であるので、長基線測位においても、モデルによって補正することで対流圏遅延を抑えることは可能であるといえる。

5.5 残差への影響

5.5.1 距離依存誤差の残差への影響

実際に電離層、対流圏がどの程度残差に影響を与えているかを検証するために、図5-11から図5-16に電離層を補正した残差、図5-17から図5-22に対流圏を補正した残差をしめす。それぞれ1番衛星について調べる。また、電離層、対流圏の両方を補正すると、残るのは衛星軌道誤差と測位誤差である(マルチパスは省く)。それらを調べるために、電離層と対流圏を補正した残差を図5-23から図5-28に示す。

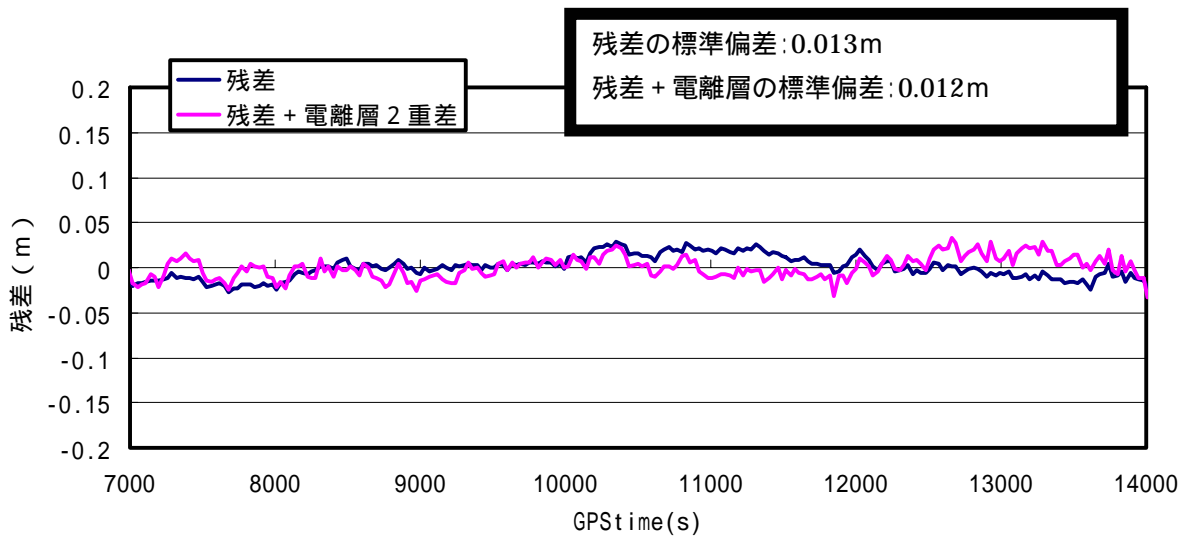


図5 11: 基線長10kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

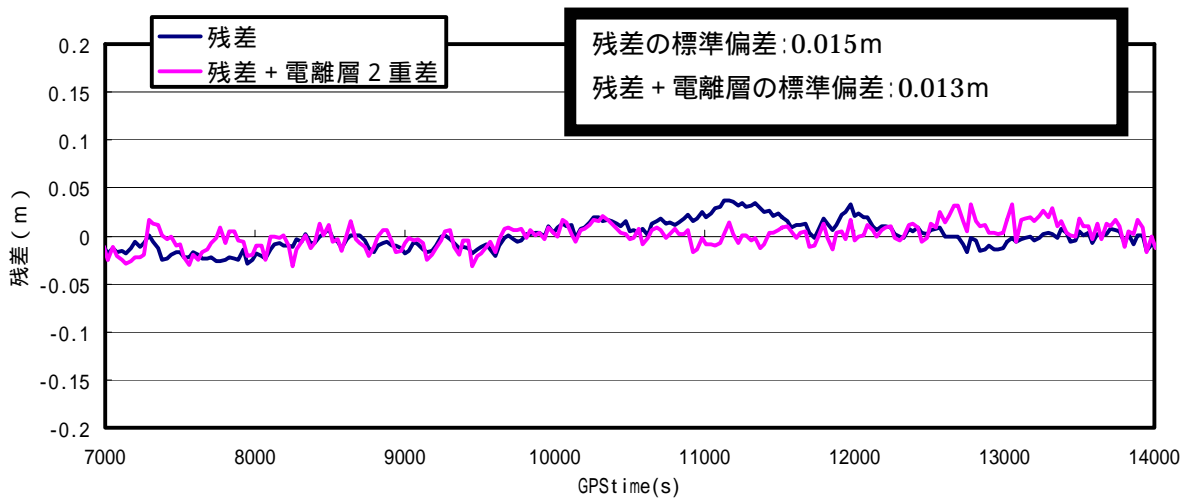


図5 12: 基線長20kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

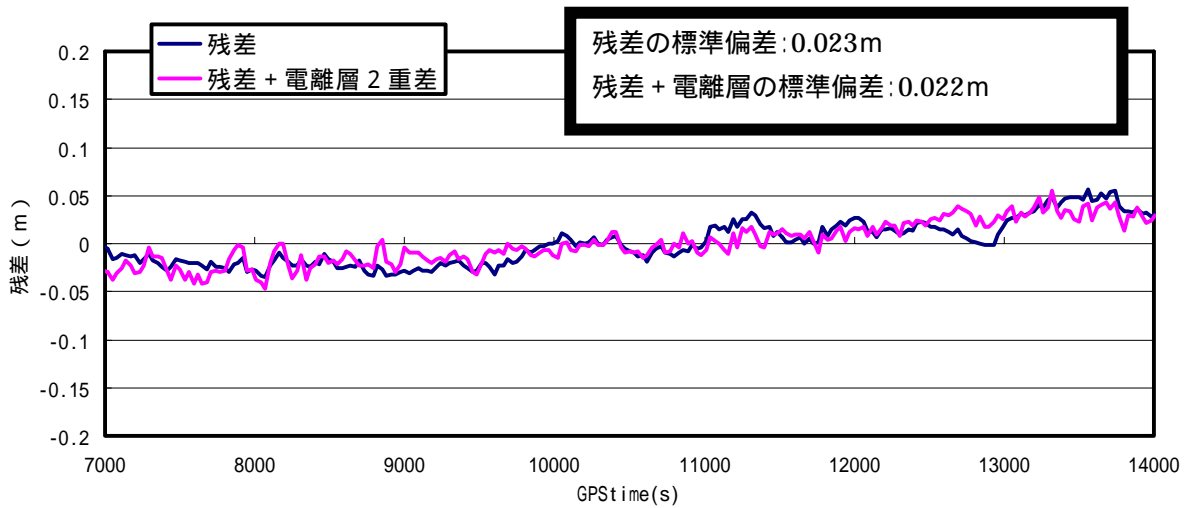


図5 13: 基線長24kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

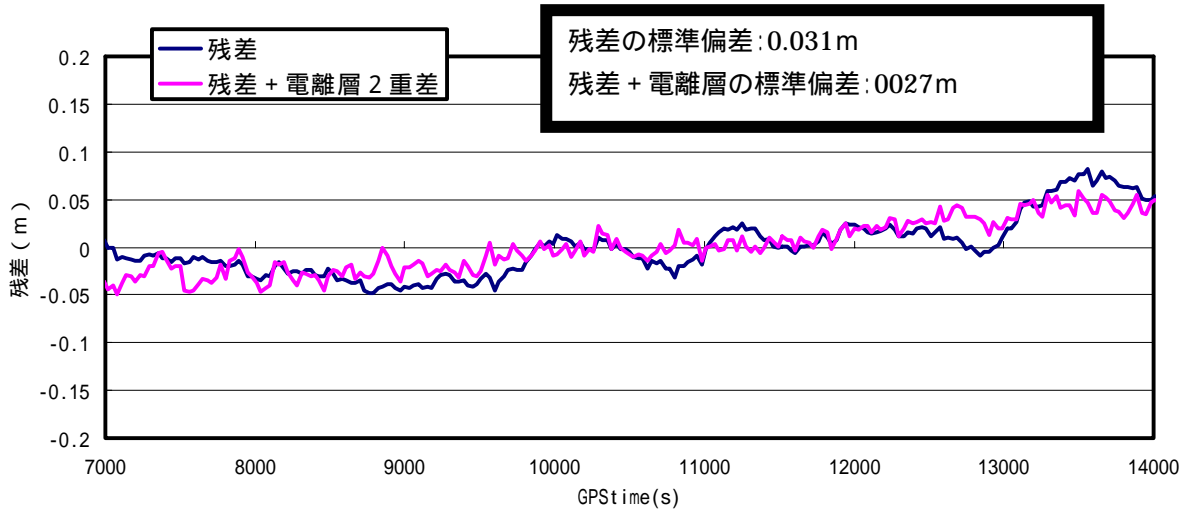


図5 14: 基線長37kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

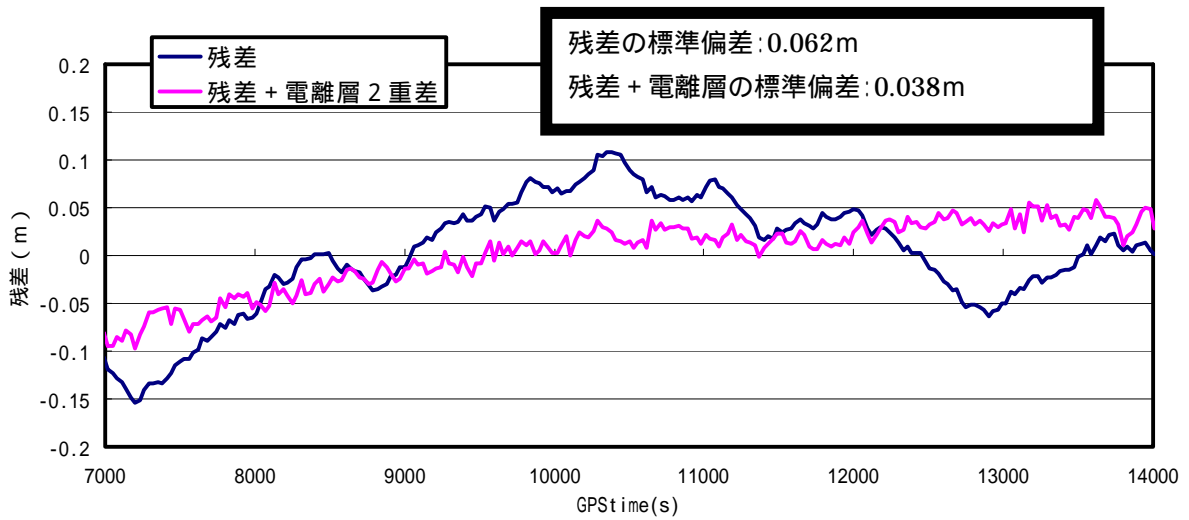


図5 15: 基線長107kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

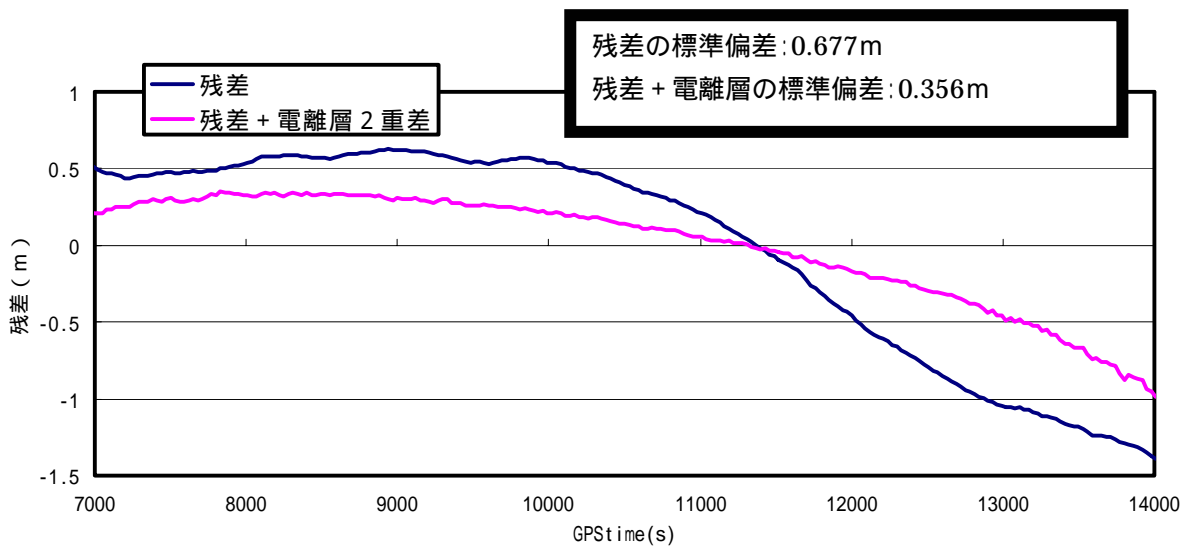


図5 16: 基線長870kmでの電離層補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

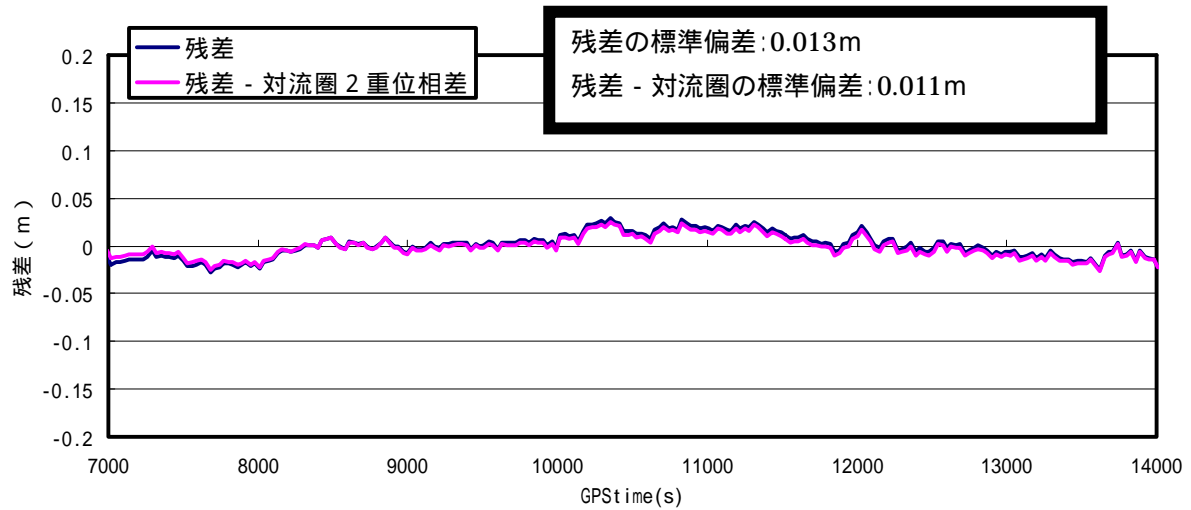


図5 17: 基線長10kmでの対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

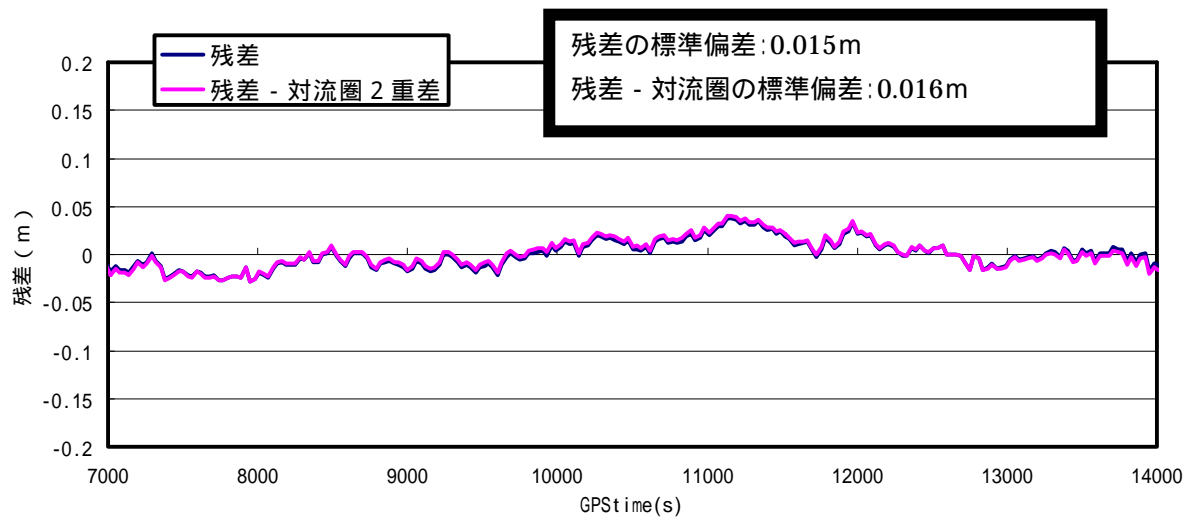


図5 18: 基線長20kmでの対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

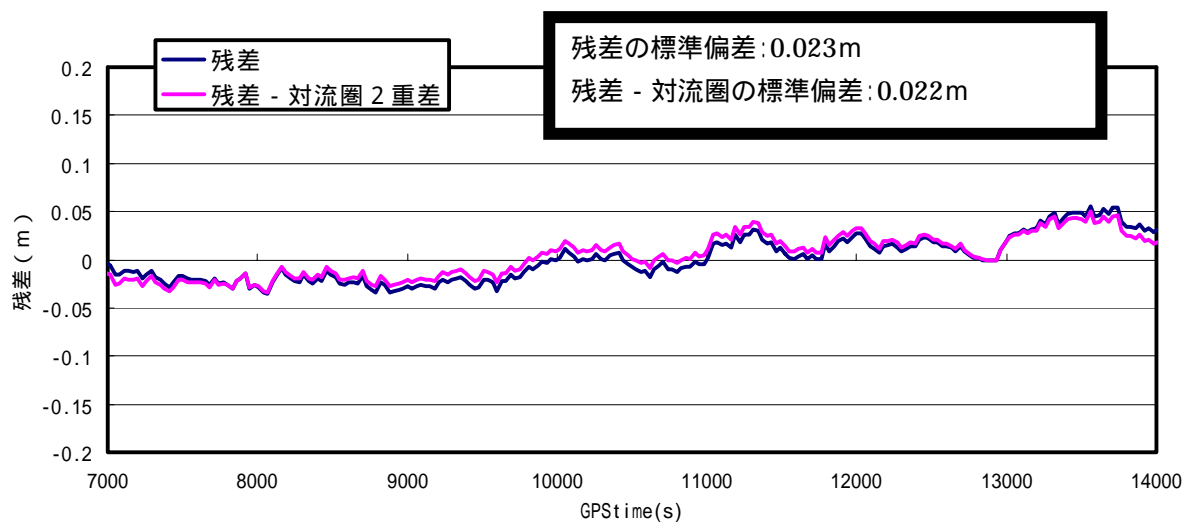


図5 19: 基線長24kmでの対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

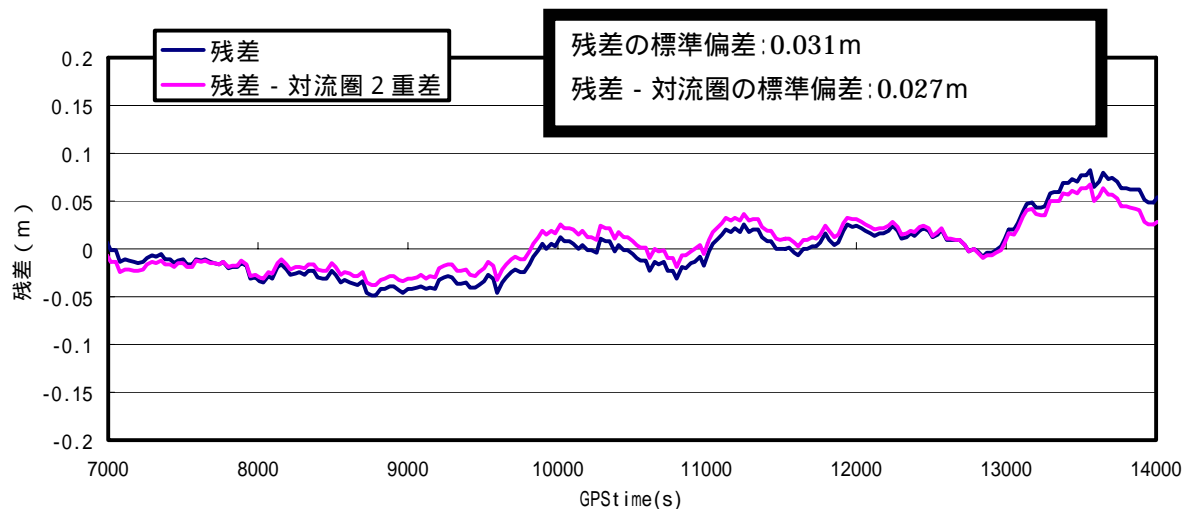


図5 20: 基線長37km での対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

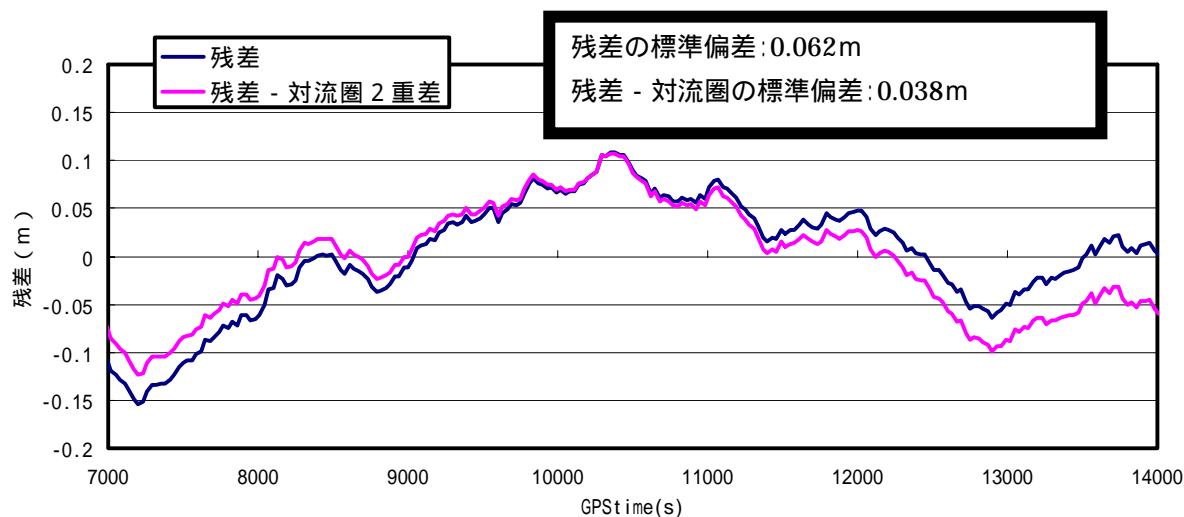


図5 21: 基線長107km での対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

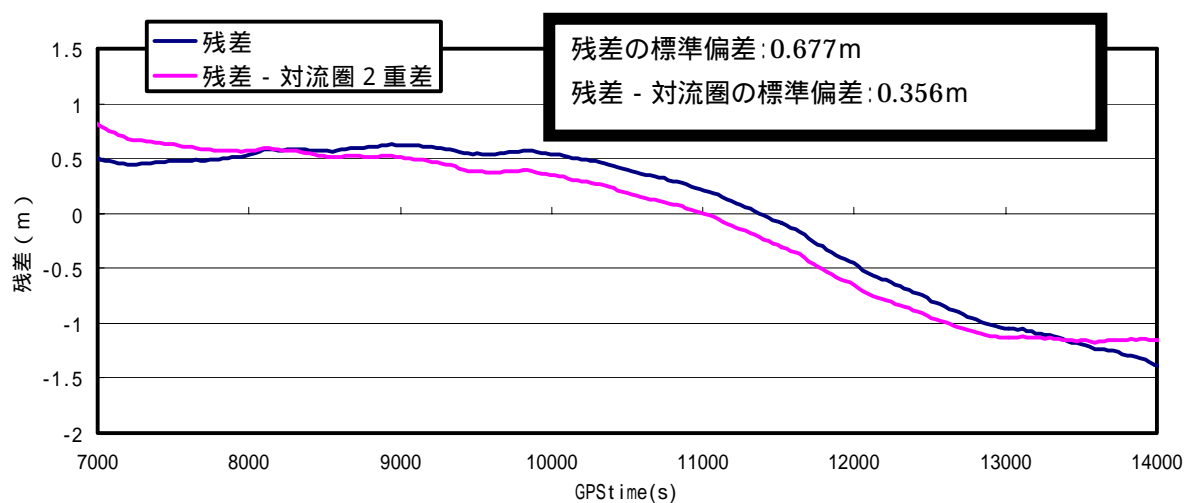


図5 22: 基線長870km での対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

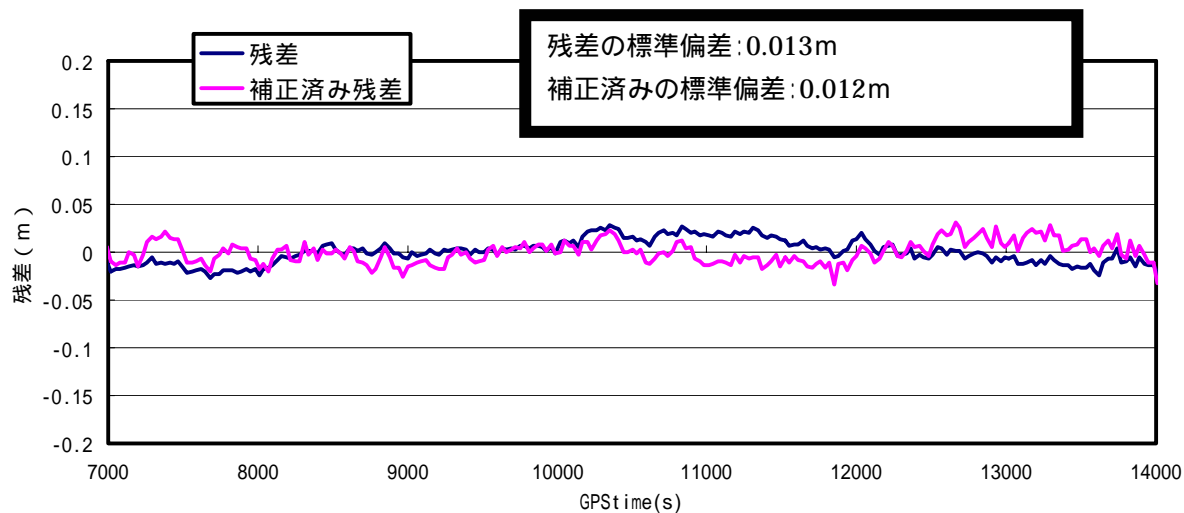


図5 23:基線長10kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

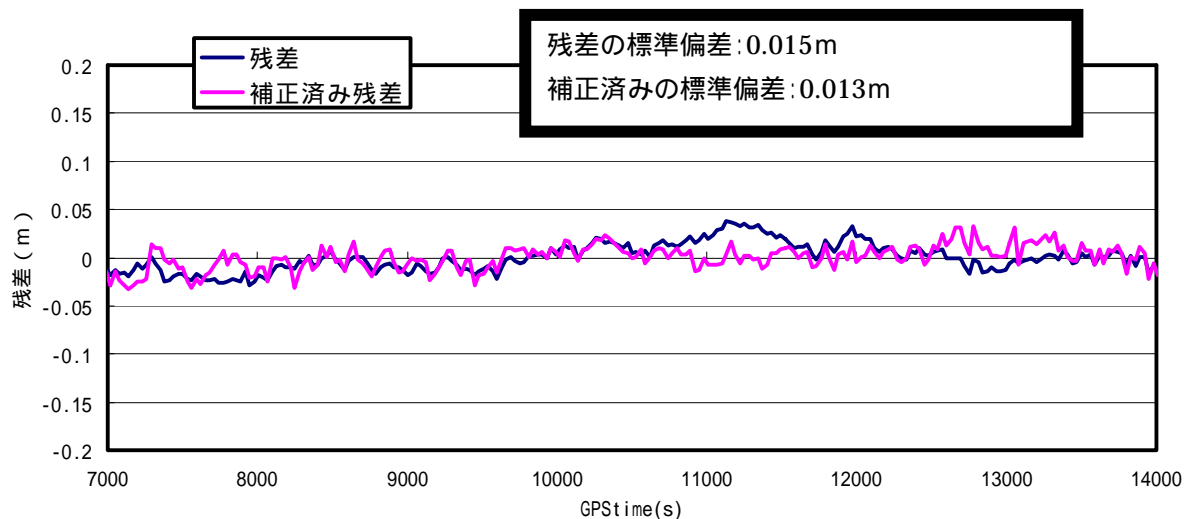


図5 24:基線長20kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

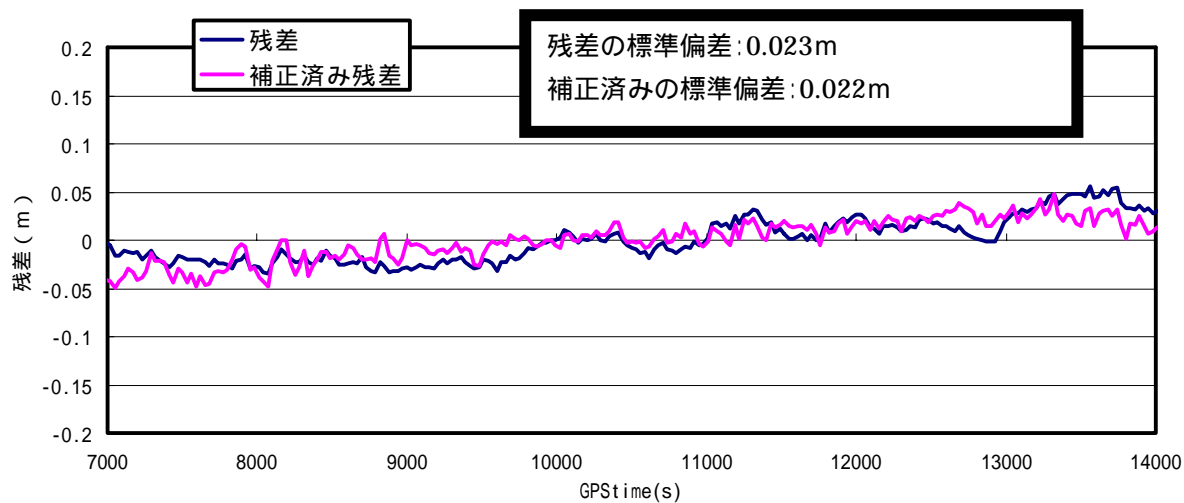


図5 25:基線長24kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 2)

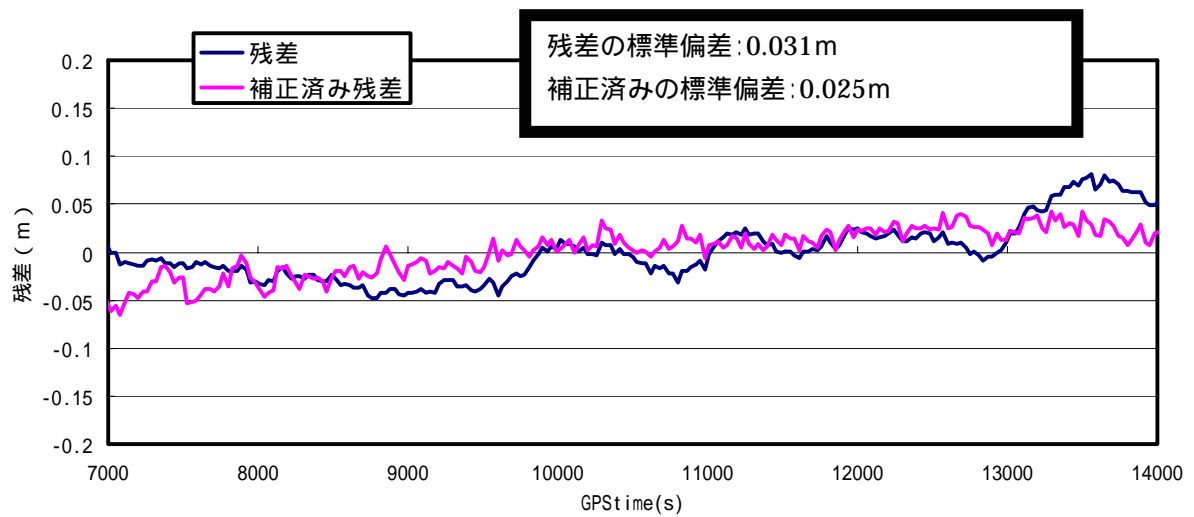


図5 26: 基線長37 kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 2)

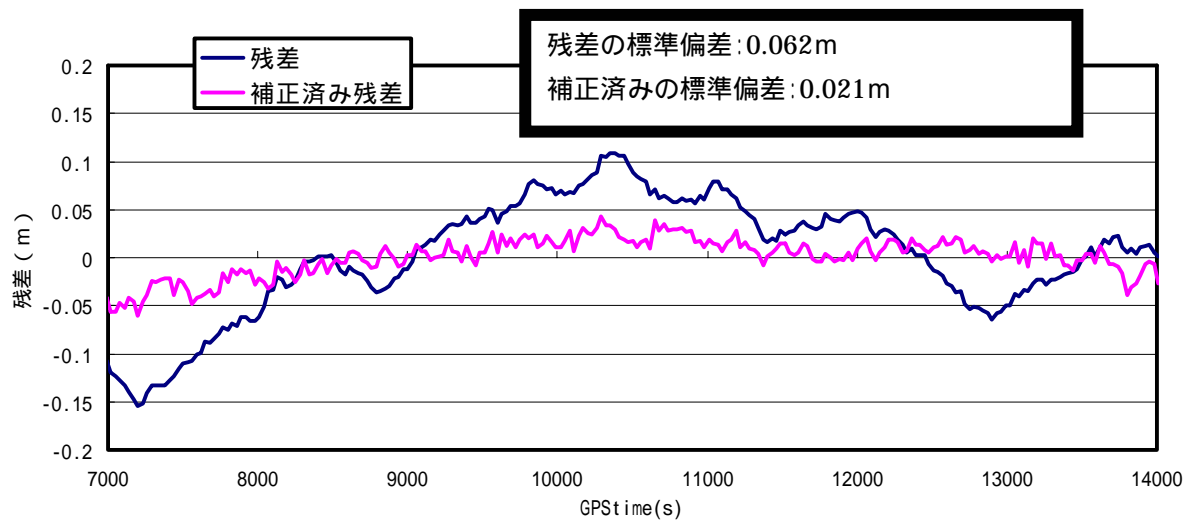


図5 27: 基線長107 kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

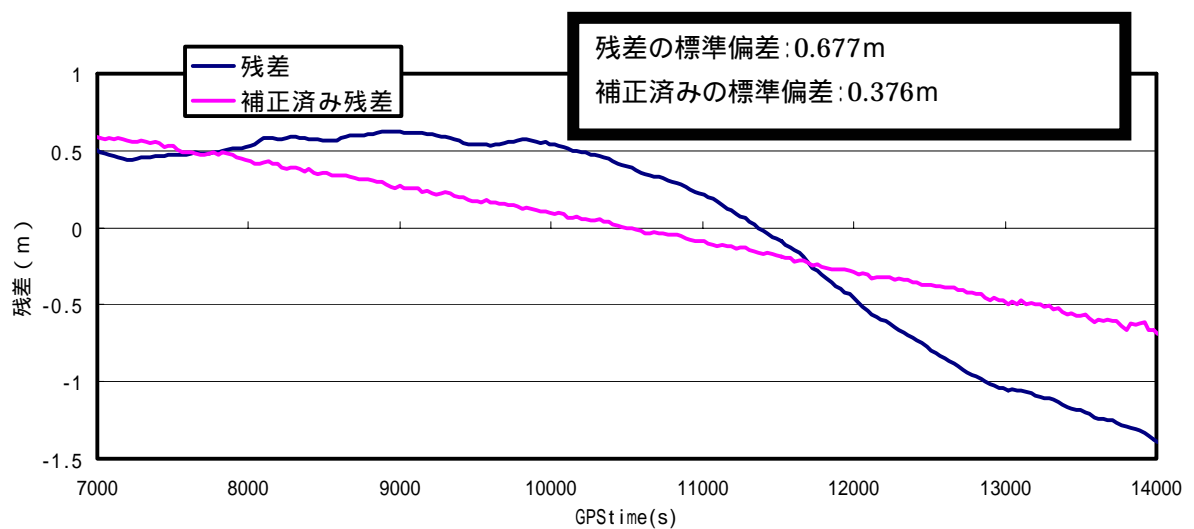


図5 28: 基線長870 kmでの電離層、対流圏補正後の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

5.5.2 考察

それぞれの結果の標準偏差を表5-8にまとめる。この表より、電離層の影響が最も強く表れていることが分かる。電離層を補正した標準偏差は、補正をしていない残差と比較して、標準偏差がかなり抑えられることが分かる。特に基線が延びると顕著で約100kmの静岡では3cmも標準偏差が減少していることが確認できた。対流圏を補正した場合は、こちらはモデルなので、逆に標準偏差が増している移動局も見られるが、全体的にみると偏差は減少している。しかし減少の幅は電離層を補正したときに比べ、少ないことが分かる。

電離層、対流圏の両方を補正したときの残差は、補正済み残差として示す。補正済み残差には、衛星軌道誤差や、測位誤差等が含まれている。基線によって誤差が若干増大している様子が見取れるが、電離層や対流圏などのように、はっきりとは分からない。また100km地点でも標準偏差は2cm前後であるため、補正を行った場合、かなり残差が減少することが分かる。しかし、衛星軌道誤差を無視することはできない。一般に衛星軌道誤差 b は、

$$b \leq \frac{d \cdot \delta r}{r} \quad 5-9$$

として表わされる。 r は受信機から衛星までの距離、 d は基線の長さ、 δr は衛星情報の精度であり、放送暦では約10m、精密暦(IGS)で約1mの精度といわれている。ここで、基線長が約100kmで、放送暦を使用した場合、衛星までの距離を約20000kmとすると衛星軌道誤差は約5cmとなるが、精密暦を使用した場合5mmと減少する。つまり、本来、衛星軌道誤差も長基線では考慮に入れる必要があり、正確な測量を行う場合、精密暦(IGS)を使うことが必要になる。

表5-8:結果

	標準偏差 (m)			
	残差	残差-対流圏	残差+電離層	補正済み残差
北東				
練馬	0.013	0.011	0.012	0.012
足立	0.015	0.016	0.013	0.013
市川	0.023	0.022	0.022	0.022
花見川	0.031	0.025	0.027	0.025
水戸	0.062	0.059	0.038	0.021
厚田	0.677	0.687	0.356	0.376
南西				
川崎	0.018	0.019	0.016	0.021
藤沢	0.036	0.036	0.012	0.019
横須賀	0.044	0.042	0.033	0.039
小田原	0.039	0.041	0.012	0.019
静岡	0.076	0.053	0.048	0.018
沖縄	3.084	3.325	1.882	2.107

5.6 まとめ

この章ではまず、基線ごとの残差を示し、次に電離層の二重位相差を示し、モデルの対流圏の二重

位相差を示した。電離層、対流圏ともに基線が長くなるに従い標準偏差が増すことが分かった。さらに、低仰角の衛星を使用した場合の二重位相差には高仰角衛星にくらべて、残差が増すことも分かった。また、電離層の影響は、対流圏よりも大きく、基線長10 kmですでに標準偏差が1 cmにもなっている。対流圏の影響は高仰角の衛星では基線長20 kmでも数mmの偏差であるが、低仰角の衛星では10 kmで1 cmの偏差がみられる。実際に電離層遅延、対流圏遅延の影響を基線長毎に検証した結果、電離層遅延が最も基線長に比例し、残差に影響を与えることが確認できた。対流圏遅延と衛星軌道誤差は電離層に比べると残差に与える影響は小さいが、無視はできない。結果的に、これらの距離依存誤差が残差に含まれるため、干渉測位における長基線測位は困難なものになっている。逆にいうと、距離依存誤差を除去する事ができれば、長基線測位も可能であるといえる。

2周波測位において、電離層を2周波推定値、対流圏をモデルによって補正し、精密軌道暦によって衛星軌道を決定すれば、二重位相差の残差をかなり減少させることが可能であり、整数値バイアス決定も容易になると考えられる。しかし、実際の2周波受信機では、リアルタイムに測位を行う場合、整数値バイアス決定(OTF)には2周波を使用するものの、電離層の推定には使用せず、影響は残ったままである。そのため、長基線になるとこの電離層の影響が強くて整数値バイアスの決定を困難にするため、Fix率も低下する。今回は電離層の活動が比較的穏やかな夜中に測定を行ったが、電離層の活動が活発な時間帯であれば、基線が20 km以上で標準偏差が数10 cmの残差も確認できた。その場合は、L1での測位が困難で、ワイドレーンの測位となるため、測位精度も劣化すると考えられる。長基線において最も問題となる電離層を、リアルタイムに推定し、除去する方法を開発することが、今後の課題ともいえる。そのためには、L1とL2の整数値バイアスをリアルタイムに同時決定する技術も必要となる。

第6章 静止衛星回線を使用した補正データ (FKP) 放送システムの構築

6.1 目的

ネットワーク RTK の方式には世界的に、トリプル VRS 方式(ドイツ) FKP 方式(ドイツ) Multiref 方式(カナダ)の3種類ある。この3種類の方式のなかで、片道方向通信で補正データの送信が可能な方式は FKP 方式のネットワーク RTK だけである。この FKP 方式なら、補正データを作成する実基準局で囲まれたエリア内のすべてのユーザで共通の補正データを使用することができるため、広域に渡り、この補正データ(以下 FKP)を放送できるシステムが設備されれば、より高精度な測位が手軽に実現できる。しかし、現在は FKP を放送しているサービスはなく、FKP を取得する手段として、主に携帯電話、インターネットが使用されている。しかし、これらの手段では、通信不安定や、通信エリア外では不可、同時通信不可などの制限があるため、利用しにくい面も持ちあわせている。本研究では、広域性、同時性を兼ね備えた静止衛星通信回線によって FKP を放送するシステムを提案する。さらに、実際に静止衛星通信回線を使い、FKP 方式ネットワーク RTK 測位を行った結果も示し、FKP の精度検証も行う。

6.2 システム概要

6.2.1 静止衛星通信回線ネットワーク

補正データの VSAT による伝送のために、静止衛星通信回線 (Superbird) を利用した。Superbird は、宇宙通信株式会社が運営している双方向受信可能な静止衛星であり、電波法関連書規則に基づく VSAT 地球局を利用するため、無線従事者の資格を持っていなくても、静止衛星通信が行える。つまり、直接、静止衛星を介して通信を行うのではなく、一度、管制局 (HUB 局) を経由するスター型ネットワーク通信回線である。静止衛星通信回線のコントロールは、この管制局で行われる。この通信回線 (VSAT 間) の伝送速度は約 56 kbps (最大 2.4 Mbps) であり、各ルータからネットワークに送信される伝送速度は最大 256 kbps である。Superbird は日本全国をカバーしているので、全国で通信が可能となる。この通信を行う際に必要な機材は送信側、受信側ともにパラボラアンテナ、ODU (out door unit)、IDU (in door unit) とルータである (図 6-1、図 6-2)。



図6-1: パラボラアンテナと ODU

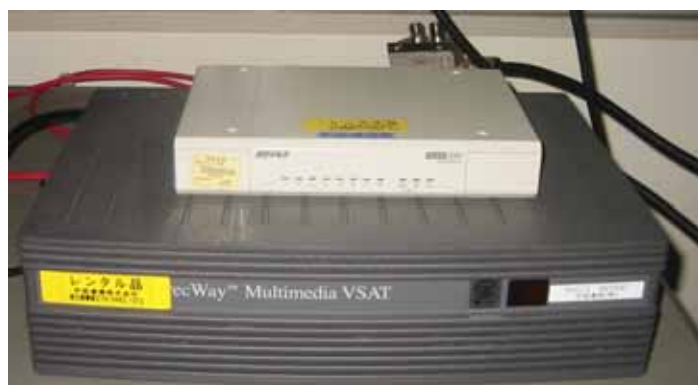


図6-2: IDU(ルータ内臓)と HUB

図 6 - 3 に Superbird の構成概念図を示す。VSAT1 から放送されたデータは静止衛星 (Superbird) を介して HUB 局に送られ、そこから静止衛星を介して VSAT2 に送信し、ネットワーク間でデータ通信を行う (VSAT 1 静止衛星 HUB 局 静止衛星 VSAT 2)。地球局 (VSAT) と静止衛星間の伝送時間は、地球局と衛星間で約 4 万 km の距離があるため、距離 / 光速 0.14 s となり、VSAT [1] から VSAT [2] に伝送するまでに掛かる時間は $0.14 \times 4 = 0.56 \text{ s}$ となる。さらに、ルータ等の処理遅延時間を加えると、合計 $0.6 \sim 0.7 \text{ s}$ の伝送遅延がある。

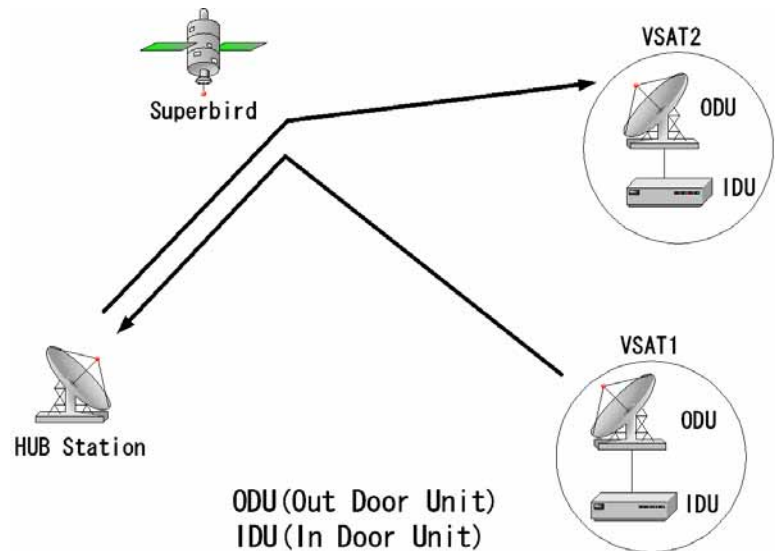


図 6-4: システム構成図

6.2.1 通信プロトコル

SI (Open System Interconnection) 参照モデルでトランスポート層の TCP (Transmission Control Protocol: 伝送制御プロトコル) と UDP (User Datagram Protocol: ユーザーデータグラムプロトコル) は、それぞれ通信に際して異なる手続きをとるため、速度や信頼性が異なる。

TCP は確実な通信を行うための、コネクション指向のプロトコルである。通信を行う際、サーバとクライアント間で仮想の伝送路を設置する。仮想伝送路は接続を解除するまで同じクライアントとの間に用意され続けるため、複数のクライアントと通信を行う時には、その相手の数だけ、仮想伝送路を用意する必要がある。この仮想伝送路はデータを相手に確実に届けるために、データが相手に正しく届いている事を相手に知らせたり、データが正しく届かなかった時に再送をしたり、データが分割されて送られた時にその順番を確認する機能などを備えている。しかし、そのためには双方向通信回線が必要となる。さらに伝送効率が悪くなるなどのデメリットも生まれてしまう。

それに対して、UDP はコネクションレスのプロトコルで、信頼性を確保する機能は持っていない。つまり、ネットワークの状況によっては、送られたデータが途中で消去したり、順序が入れ替わって届くこともありえる。しかし、UDP は接続処理や信頼性確保のための処理が不要となるので、TCP に比べて高速にデータを送付することができ、伝送効率も良い。さらに、UDP は、クライアントの要求があるかないかに関わらず、一方的にデータを送信することができるので、双方向通信は必要なく、片方通信でよい。そのため、放送型のデータ通信に適しており、通信コストも TCP に比べて安くなるメリットがある。

リアルタイムで測量を行う場合、補正データは当然リアルタイムに送信されることが望ましく、補正データがネットワーク内で壊れた場合、再送されるよりも、次の補正データが送信されることのほうが重要である。さらに、今回は静止衛星通信回線を使って放送型のシステムを提案しているので、確実性は高いが、双方向通信を必要とする TCP よりも、確実性は低い、高速に通信でき、放送型に適している UDP を選択した。

6.2.3 補正データ放送の基本構成

図 6 - 4 に提案したシステムの構成を示す。サーバ側で補正データを何らかの方法で取得し、取得したデータをネットワークプログラムを起動した PC に接続する。このプログラムは指定した IP (クライアント IP) に向かって、補正データを送信する機能を持つ。送信データは VSAT を介して、クライアントに送信される。クライアント側の VSAT で補正データを受信し、ルータによって IP に振り分けられ、PC で補正データを取得することができる。取得した補正データはネットワークプログラムによりシリアルに変換され出力することができるので、そのまま受信機等に接続することも容易である。複数のクライアントがいても、同様に各 IP に向けて補正データを放送できる。しかし、その場合はサーバ側にもクライアントの数分ネットワークプログラムを起動した PC が必要になる (図 6 - 5)

このシステムはサーバ側でクライアントの IP を知っていなければならないので完全な放送型ではないが、既存の携帯電話等の通信方法にくらべ、広域性、同報性など様々な利点を兼ね備えている

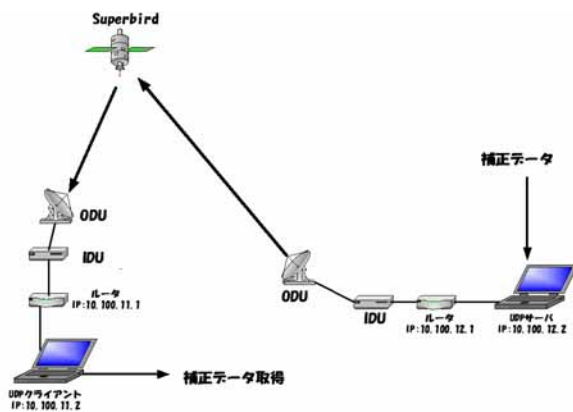


図 6-4 : 補正データ放送システム構成構

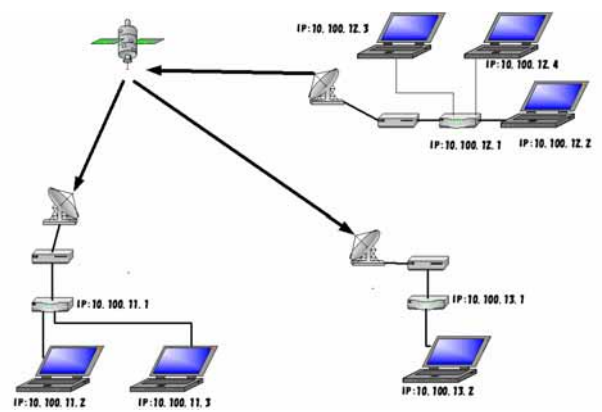


図 6-5 : 複数クライアントの場合の構成

6 . 3 RTK-GPS 補正データ伝送実験

6 . 3 . 1 実験概要

図 6 - 6、6 - 7 に実験の構成概念図を示す。使用する静止衛星 Superbird は双方向受信可能な静止衛星通信回線であるが、提案するシステムは放送型であり、複数の移動局での測位が可能である。今回は、初期実験として 1 定点で測位を行う。まず、東京海洋大学品川キャンパス、東京海洋大学越中島キャンパスの屋上にそれぞれ、VSAT を設置する。品川キャンパスの基準局 GPS 受信機から出力された RTCM Type 1 8、1 9 を、ネットワークプログラム (UDP) を介し VSAT に送り、静止衛星通信回線を利用して越中島キャンパスに伝送する。越中島キャンパス側の VSAT で補正データを受信した後、シリアル変換を行い、GPS 受信機 (NovAtel OEM 4) に入力し、1 Hz で RTK-GPS 測位を行った。品川キャンパスと越中島キャンパスとの基線長は約 5 . 7 km である。全測位時間は毎秒測位を約 1 時間行った。その際、同期モード、非同期モードと両方の測位を行った。

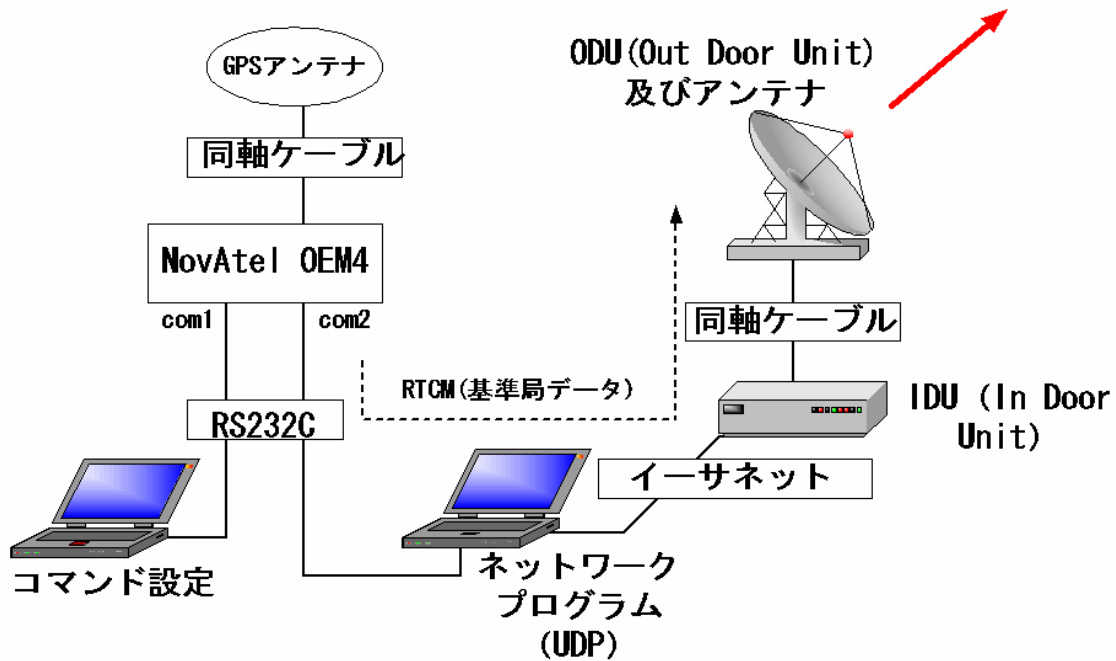


図6-6: RTK 補正データ送信実験構成図(送信側)

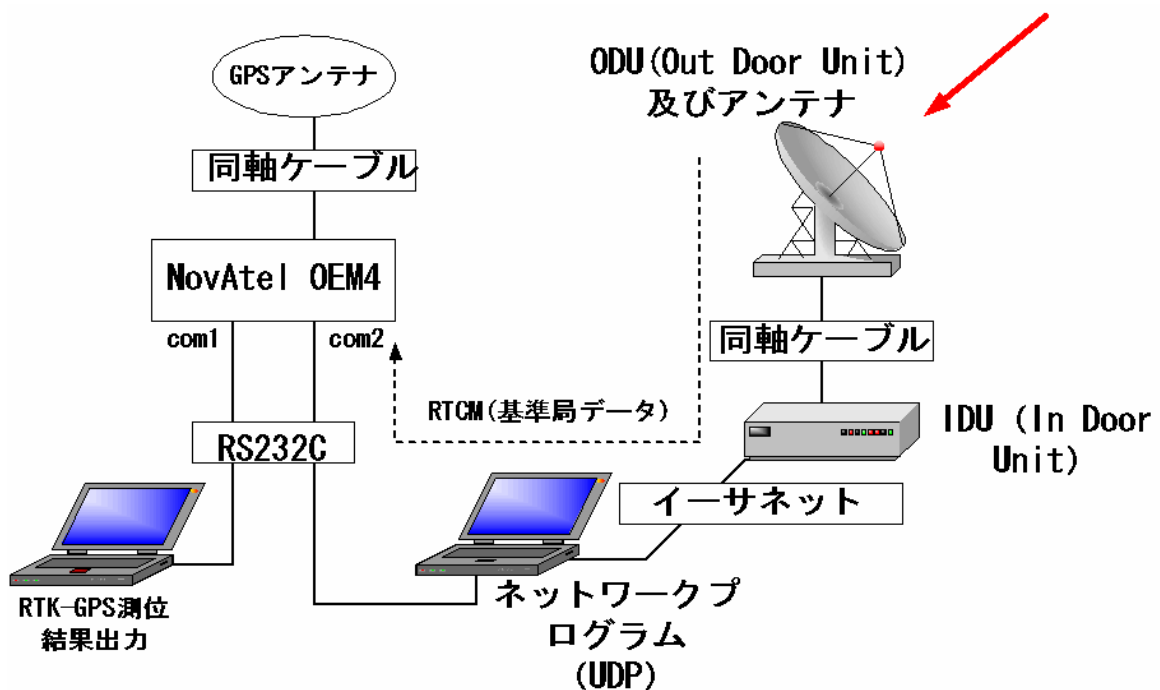


図6-7: RTK 補正データ送信実験構成図(受信側)

同期モードとは、移動局では受信機に蓄えておいた基準局データと同時刻の搬送位相を用い測位計算をするモードである。基準局データの時刻に合わせた測位をするため、測位精度そのものは非常に良いが、測位を行ったデータの時刻で測位結果が出力されるので、リアルタイム性には欠ける。

非同期モードとは基準局データが例えば3秒遅れて入ってきた場合、そのデータを基に3秒後、つまり現在の基準局データを予測し、移動局の最新の衛星データを用いて測位をする測位モードである。補正データを待たないので、ほぼ実時間で測位可能であるが、基準局データを予測して使用するため

に測位精度は劣化する。静止衛星通信回線を使用するにあたり、必ず補正データの伝送遅延が発生するので、その伝送遅延が測位精度に与える影響を見るために2つのモードの測位を行う。

6.3.2 実験環境と取得データ

実験日は2003年7月23日の5:21:07~6:27:50(UTC)の間で行った。アンテナは東京海洋大学航海科実習等屋上(lat:35.66651604, lon:139.7923897, height:59.498)に設置した。測位精度検証にあたり、HDOPは1以下、衛星数は5機以上の状態のみ抽出し検証を行った。このことより、仮に測位精度が極端に劣化したとしても、その原因が衛星配置によるものではないと言える。

取得するデータは、同期モードを示すMATCHDPOSA、非同期モードを示すRTKPOSAを取得する。またデータ伝送時間を検証するために、使用する補正データの古さを示すAgeを取得する。

6.3.3 解析結果

測位実験を1Hzで、約1時間行ったが、通信プログラムのテストのため、故意に補正データを止めたため、その時間の測位データは削除し、46分間の測位結果を示す。図6-8に非同期モードでの中心を平均値とした定点水平方向測位分布と高さ方向の時系列を示す。Fix率100%で2drmsは0.978cmであった。Fix率とは、RTK-GPS測位を行った際に、正確に整数値バイアスを決定できている時間帯が全測位中に何%あるかを示す数字である。高さ方向の標準偏差は0.798cmであった。緯度、経度、それぞれの時系列での標準偏差は、0.471cm、0.256cmであった。上記の値は、他の伝送手段を利用してRTK-GPS測位を行った場合と同程度の精度である。

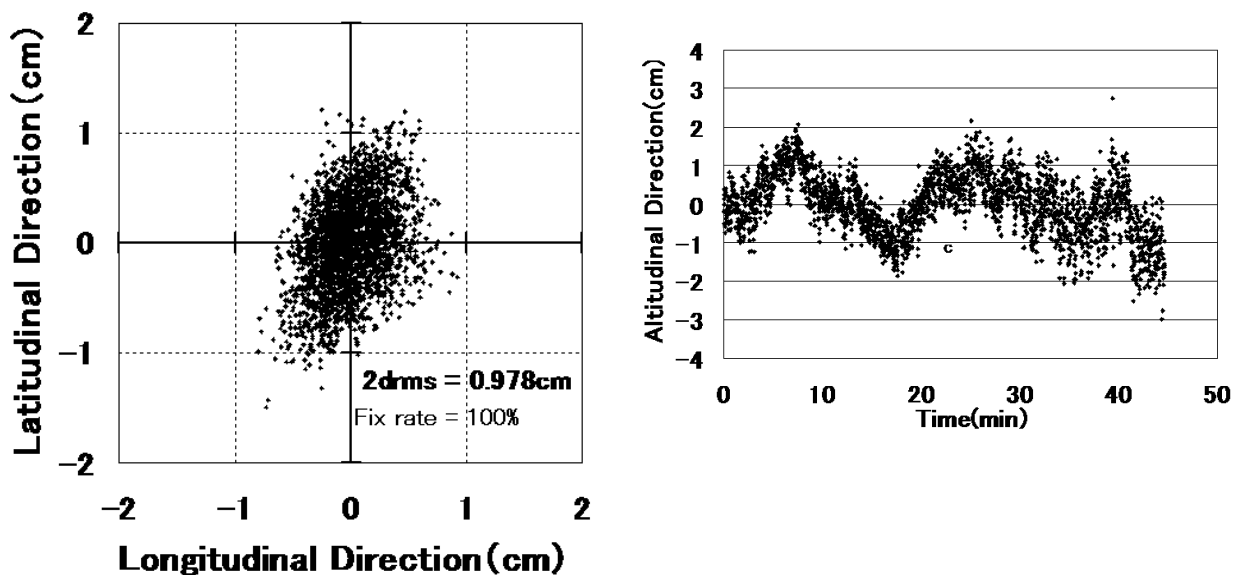


図6-8:非同期モードでの測位分布

図6-9に同期モードでの中心を平均値とした定点水平方向測位分布と高さ方向の時系列を示す。Fix率100%で2drmsは0.927cmであった。高さ方向の標準偏差は0.845cmであった。緯度、経度の標準偏差はそれぞれ、0.411cm、0.212cmである。非同期モードと同期モードでは若干同期モードでの測位結果の精度が良かったが、非同期モードでも極端な精度劣化は見られなかった。このことより、静止衛星通信回線を使用して補正データを送った場合に補正データの伝送に遅延が生じるが、非同期モードで測位を行った場合、この伝送遅延が測位精度に与える影響

は少ないと考えられる。

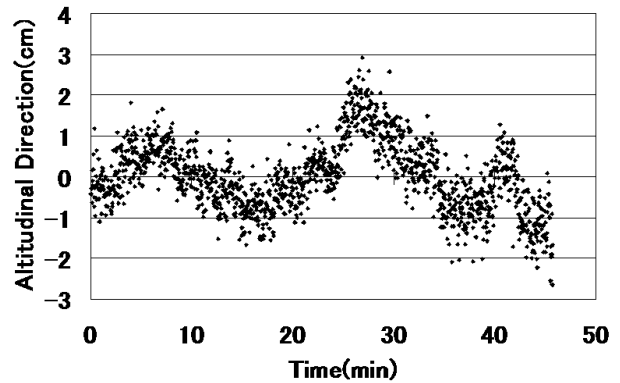
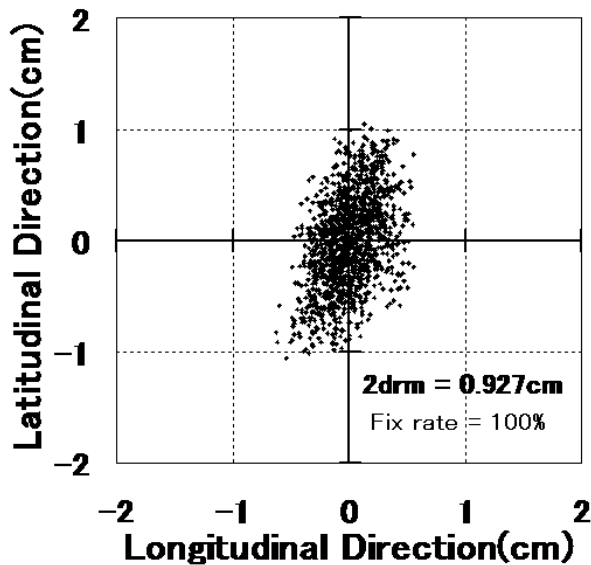


図6-9:同期モードでの測位分布

次に図6 10に Age (使用する補正データの古さを表す値) の測定値を時系列で示す。図から分かるように Age は、ほぼ 2 ~ 3 s かかっている。理論上の Superbird 回線使用時の伝送遅延は 0.6 ~ 0.7 s であるが、補正データを初めに受信してから、全て受信し終わるまでの所要時間が付加されたためと考えられる。また、例えば 1.5 秒で受信したとしても、測位エポックが 1 Hz のため、2 s と表示されるので、出力される値は端数になる。さらに詳しく調べるため図6 11に測位エポック 10 Hz の場合での Age の変化を示す。図より、伝送遅延は補正データを受け取った瞬間の時間を示すため、実際の伝送遅延は全て 2 s 以下であることが分かる。Age が増大してゆく理由として、補正データは 1 秒毎に受信機により出力されるため、補正データを移動局で受信し、次の補正データを受信するまでにかかる時間は、1 秒 + 伝送時間となる。そのため、次の補正データを受信するまでは、補正データが伝送されていない状態とみなされ、Age は増加する。

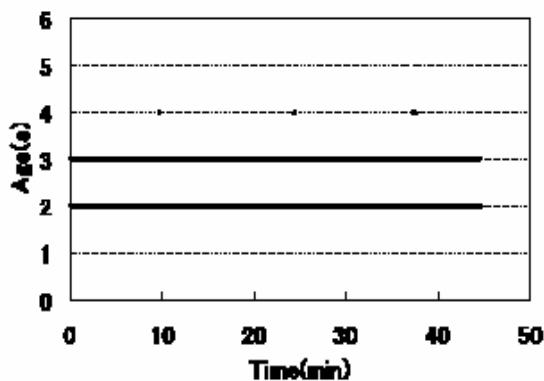


図6 10: Age の時間変化(10Hz)

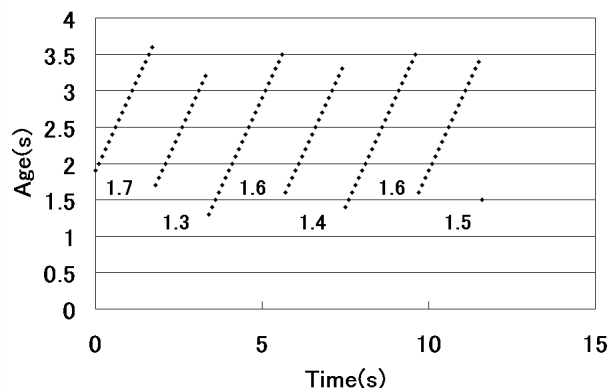


図6 11: Age の時間変化(1Hz)

6.3.4 考察

今回は静止衛星通信回線を基準局ネットワーク RTK-GPS 補正データ伝送に利用する放送型のシステ

ムを提案し、システム構築の初期実験として、定点での RTK-GPS 測位実験を行った。提案システムを利用した場合の測位結果は、Fix 率 100%で、水平方向の 2 d r m s は同期モードで 0 . 9 2 7 c m、非同期モードでも 0 . 9 7 8 c mであった。高さ方向の標準偏差はそれぞれ、同期モード、非同期モードで、0 . 8 4 5 c m、0 . 7 9 3 c mとなった。この結果は、他の補正データ伝送方法を使用して、測位を行った場合と同程度の精度であった。このことより、提案したシステムで補正データ伝送を行い RTK-GPS 測位が可能であることが確認できた。また静止衛星通信回線を利用することにより発生する遅延時間では極端な精度劣化はみられないことも確認できた。次に RTK-GPS の補正データをネットワーク RTK の補正データに変えて静止衛星通信回線によって補正データを伝送する実験を行う。

6 . 4 FKP 補正データ伝送実験

6 . 4 . 1 実験概要

測位地点は東京海洋大学の越中島キャンパスの航海科実習等屋上に設置し、補正データは三菱電機の PAS データセンタで作成される FKP (面補正パラメータ)を品川キャンパスでダイヤルアップによって取得し(図 6 - 1 3) 静止衛星通信回線によって越中島キャンパスに送られる。FKP は図 6 1 2 に示すように、世田谷、藤沢、上尾、千葉の三菱電機の独自基準点から作成し、世田谷から越中島キャンパスに向かって補間した補正データを送信する。基線長は約 1 0 . 3 k mである。越中島キャンパスでは同一アンテナを 2 又に分岐させ、2 台の異なる受信機 (Novatel OEM4 と JAVAD Legacy) に接続させ測位し、受信機による測位精度と確度の検証を行った (図 6 1 3、1 4)。

表 6 1:実基準点座標

	緯度(度)	経度(度)	高さ(m)
上尾	35.97926684	139.5807166	64.83
世田谷	35.6516789	139.6803658	70.46
千葉	35.63242807	140.1704542	79.47
藤沢	35.34975885	139.4780154	66.23

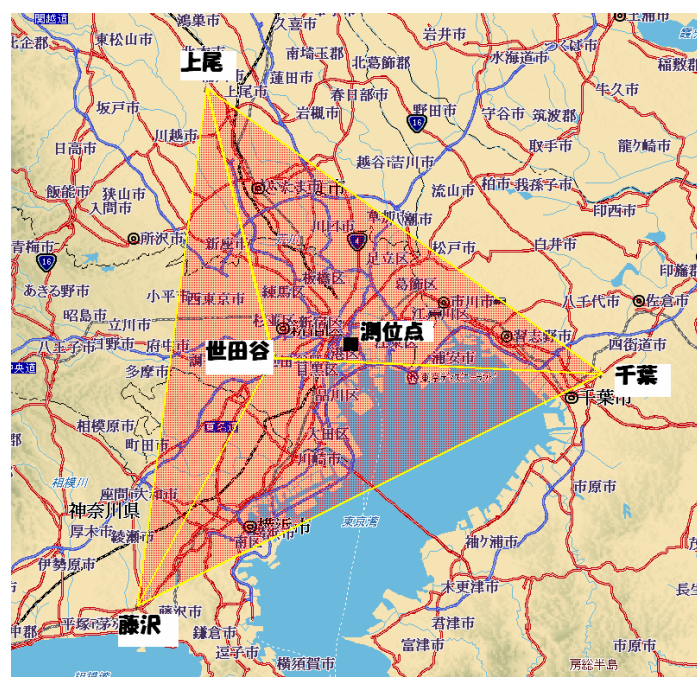


図 6 12:実基準点と測位点の配置図

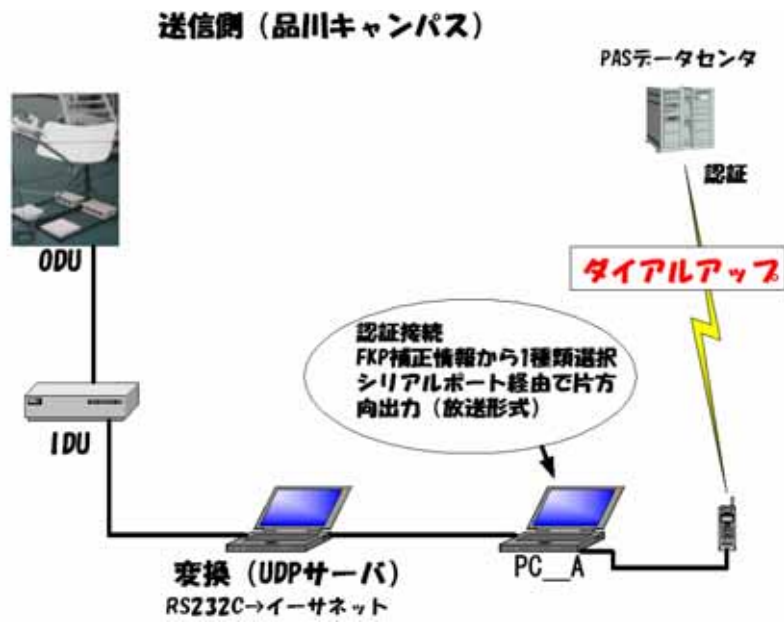


図6 13:FKP 放送実験構成図(送信)

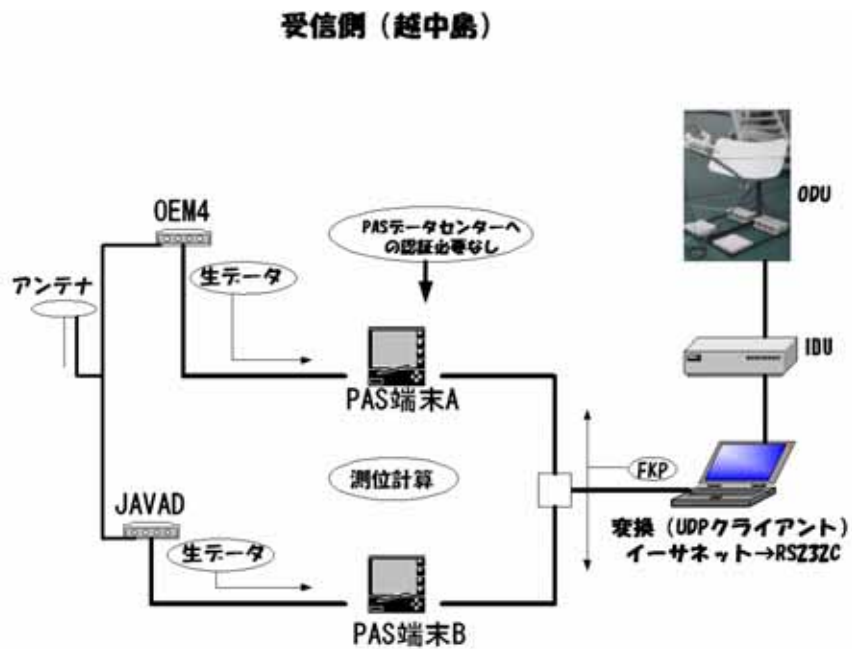


図6 14:FKP 放送実験構成図(受信)

この実験を行うにあたり最も問題となったのは、現在 PAS のデータセンタから補正データを取得する場合、1 度 PAS データセンタで認証をしなければならないので双方向通信が必要となることであった。そのため、直接 PAS データセンタから補正データを放送することは困難なので、1 度品川キャンパスで PAS データセンタにダイヤルアップを行い認証した後、送られてくる補正データを放送する形を採用した。以下にその手順をまとめる。

手順 : 品川キャンパスで P A S データセンタ機能の一部をノート P C で運用する。このノート P C を「 A 」とする。

手順 : A は P A S データセンタと携帯電話のダイヤルアップで認証接続し、補正情報を入手する。A は F K P 補正情報 (R T C M) から 1 種類選択 (世田谷データ) し出力する。シリアルポート経由での片方向出力 (放送形式) が可能である。

手順 : 品川側の V S A T 地上局は、シリアル経由で放送形式の補正情報を受け取り、RS- 2 3 2 C 形式からイーサネットへのメディア変換を行い静止衛星経由で移動局側に送信する。

手順 : 移動局側の V S A T 局は、これをメディア変換してシリアルポートで補正情報を出力する。

手順 : 移動局は、 P A S データセンタへの認証をすることなく、シリアルポート経由で放送形式の補正情報を受け取り、測位計算を行う。

6 . 4 . 2 PAS の概要

国土位置情報システム PAS (Positioning Augmentation Services) は、GPS 衛星と地上の電子基準点網をインフラとし、高精度位置情報をリアルタイムで提供する世界最先端の精密測位サービスである (図 6 1 5) 。 PAS で採用しているアルゴリズムは Geo++ 社の FKP 方式である。今実験では、電子基準点網を使用せず、独自網を使用した。

測位計算を行う端末は GNSMART というソフトウェアをインストールしてある専用の PAS 端末を使用する。この端末に、FKP とローバ側の受信機が出力する生データを入力することで、ネットワーク RTK 測位が可能となる。

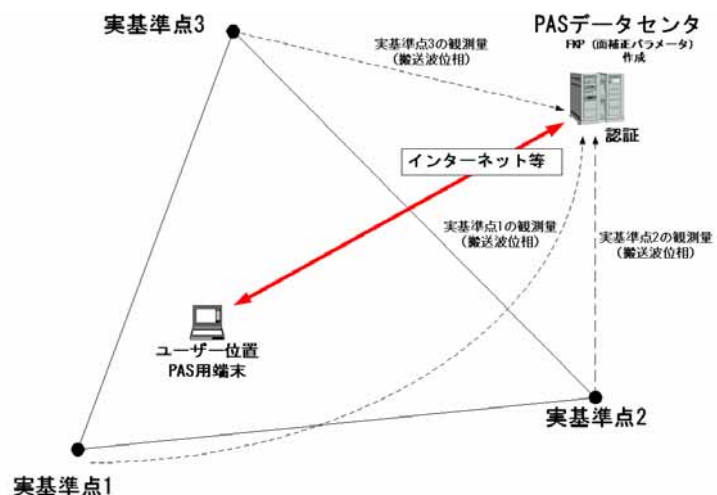


図6 15: PAS 概要図

6 . 4 . 3 検証方法

測位日時は 2 0 0 4 年 1 2 月 0 4 日の 0 3 : 4 4 : 0 0 ~ 8 : 5 3 : 0 0 (UTC) の約 5 時間測位を行った。測位はキネマティック測位に設定し、すべて同期モードで行う。精度評価の条件として、仰角 1 0 度以上、可視衛星は 5 機以上、PDOP は 2 . 7 5 以下と設定する。検証方法として、平均値を中

心とした分布により、精度を検証（水平方向、高さ方向）真値を中心とした分布により確度を検証する。使用する真値はネットワーク RTK 測位方法の 1 つである VRS による測位結果の平均値（lat:35.66651604 , lon:139.7923897 , height:59.498）から求めた。

6.4.4 測位結果

NovAtel 受信機が出力する生データ（搬送波位相を含む）を使用し、FKP 方式ネットワーク RTK 測位を行った結果を示す。図 6-17 は真値（VRS の結果）を中心値とした時の水平方向分布図と高さ方向の分布図である。緯度方向の標準偏差は 0.57 cm、経度方向の標準偏差は 0.27 cm、高さ方向の標準偏差は 0.99 cm であった。平均値を中心とした分布の水平方向の 2 drms は 1.84 cm であった。確度をみると、若干経度方向に測位分布が偏っていることが確認できる。高さ方向ではほぼ真値に近い値を出力していることが見て取れる。真値からの差の平均を取ってみると、緯度方向で -0.22 cm、経度方向で +0.55 cm、高さ方向で +0.2 cm の差がみられた。

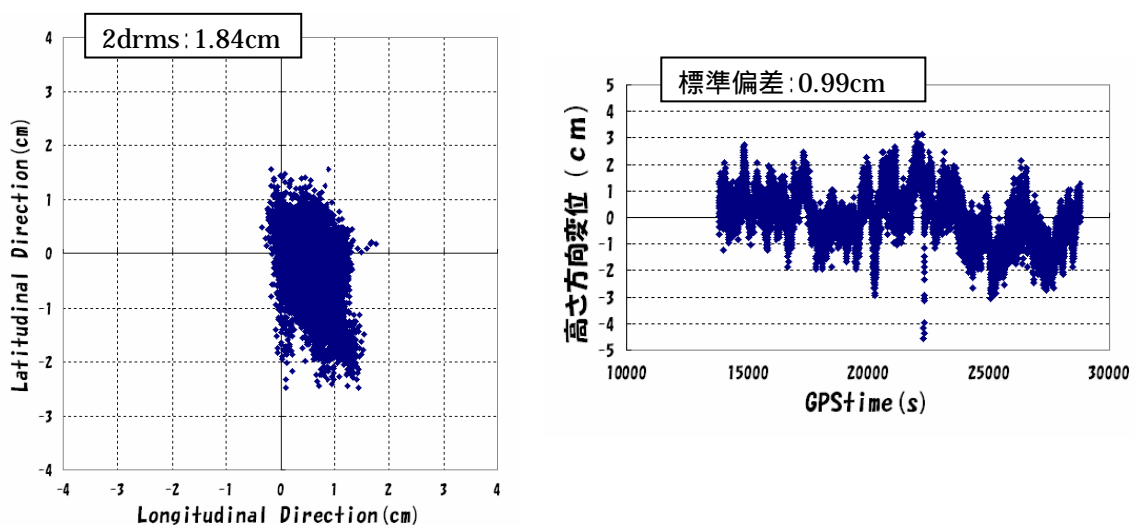


図6-16: VRS 測位結果からの分布 (NovAtel OEM4)

次に JAVAD 受信機の出力する生データを使用した測位結果を示す。平均値を中心とした水平方向分布図と高さ方向分布図の 2 drms は 1.94 cm、緯度、経度、高さ方向の標準偏差はそれぞれ 0.62 cm、0.32 cm、1.21 cm であった。先ほどの OEM4 の測位結果と比較して若干分布が広がっているが、各標準偏差の差をとっても、10 mm 前後の差であるので決定的に精度が劣化しているとは言いがたい。図 6-17 は真値を中心とした水平方向分布図と高さ方向分布図である。OEM4 と同じように経度方向に分布が伸びていることが確認できる。具体的な数値を見ると、緯度、経度方向にそれぞれ -0.255 cm、0.55 cm、高さ方向に 0.454 cm 中心がずれていることが確認できた。

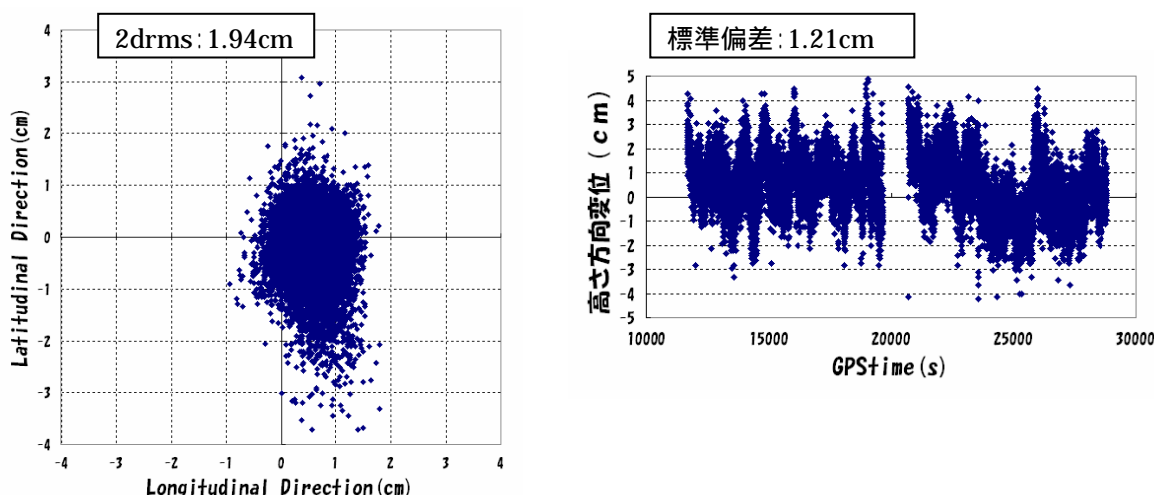


図6 17:VRS 測位結果からの分布(JAVAD)

6.4.5 考察

今回は、前回の静止衛星通信回線を RTK-GPS の補正データ伝送実験をさらに進めて、ネットワーク RTK の補正データ (FKP) を送信する実験を行った。また、現在の FKP 対応の端末に接続する受信機には主に JAVAD が使用されていることから、他の受信機 (OEM4) での精度評価も同時に行った。その結果表 6 2 に示されるように 2 台の受信機に差はほとんど見られず、基線長が 10 km にもかかわらず非常に良好な結果を得ることが出来た。

表6 2:測位結果

	2drms	標準偏差 (cm)			VRSの結果との比較 (cm)		
		緯度	経度	高さ	緯度	経度	高さ
NovAtel OEM4	1.84	0.57	0.27	0.99	-0.22	0.55	0.21
JAVAD Legacy	1.94	0.56	0.32	1.21	-0.26	0.55	0.46

すべて同期モードなので、伝送遅延による精度評価は行っていないが、Age は常に 2 ~ 3 s の値を示していた。静止衛星通信回線内の伝送レートは 5 6 0 0 0 b p s であり、伝送時間は約 0 . 6 s 前後であるので残りの遅延量は品川キャンパス側で携帯電話によるダイヤルアップ (9 6 0 0 b p s) の際に発生しているものと考えられる。

携帯電話で補正データを受信する場合、電波の状態などで受信が途切れることがあるが、静止衛星回線を使用する場合、電波が途中で中断することはなかった。安定して大量のデータを受信する必要があるときはやはり静止衛星回線が有効であると考えられる。

6.5 中基線長 RTK-GPS、FKP 方式ネットワーク RTK 測位実験

6.5.1 実験概要

前回の実験で、静止衛星回線によって FKP を放送するシステムを提案した。今回は前回のシステムに変更を加え、世田谷を基準局とした RTK GPS の補正データ (RTCM type 1 8、1 9) も同時に送信できるようにする。さらに、フィールドに出て基準局 (世田谷) からの基線長を 10 km、20 km、30 km に設定し、RTK と FKP 方式ネットワーク RTK の精度比較を行う。通常 RTK-GPS は基線長を延ば

していくと、10 km以上であると Fix が困難となることが知られている。しかし FKP 方式ネットワーク RTK ではネットワーク内であれば、基線に関係なく測位することが可能とされている。そこで、実際に RTK、FKP 方式ネットワーク RTK 両方ともに同一の基準局を固定し基線を延ばす実験を試みる。

測定を行う場所が野外であるため、正確な位置を測定するために、最短の電子基準点を3点選択し、トリプル VRS 測位も同時に行う。測定を行う場所は、マルチパスの影響をなるべく避けるために周りが開けている畑や河川敷を選択する。FKP 方式ネットワーク RTK の実基準局網は前回実験と同じである。以下に実験手順を示す。

手順 : 越中島キャンパスで PAS データセンタに PC 上でダイヤルアップし、直接補正データを取得する。(今回は通常の FKP に RTCM をつなげて取得するため、認証なしで取得できるよう変更されている)

手順 : 取得した補正データをネットワークプログラム(メディア変換)が起動してある PC に接続し、VSAT 地球局によって放送する。

手順 : 移動局側では VSAT 地球局を設置し、補正データを受信する。

手順 : 受信した補正データをネットワークプログラム(メディア変換)によってシリアルで出力したのち、2分配し、それぞれ FKP 方式ネットワーク RTK 用の PAS 端末と、RTK-GPS 用の NovAtel OEM 4 に接続する。PAS 端末には別の NovAtel OEM 4 を接続し、生データを入力する。2台の OEM 4 には同一のアンテナを分岐し同じデータを入力する。

手順 : 同時に RTK 測位と FKP 方式ネットワーク RTK 測位を行う。また同じアンテナで、トリプル VRS 測位も行う。

手順 : 基準局を世田谷に設定し、1日目に30 km(船橋)、2日目に20 km(江戸川河川敷)、3日目に10 km(東京海洋大学越中島キャンパス)地点の測定を行う(図6-20)。測位時間は30 km地点が12月16日2:44:00~8:00:00(UTC)の約5時間。20 km地点が12月17日6:00:00~9:00:00(UTC)の約3時間。10 km地点が12月18日7:00:00~2:47:00(UTC)の約19時間の測位をおこなった。

表6 3:各測位地点の座標と基線長

	緯度(度)	経度(度)	高さ(m)	基線長(km)
10km	35.66651583	139.7923897	59.4984	10.276
20km	35.70808789	139.9187271	43.9524	22.467
30km	35.72103222	140.0153769	62.5249	31.286

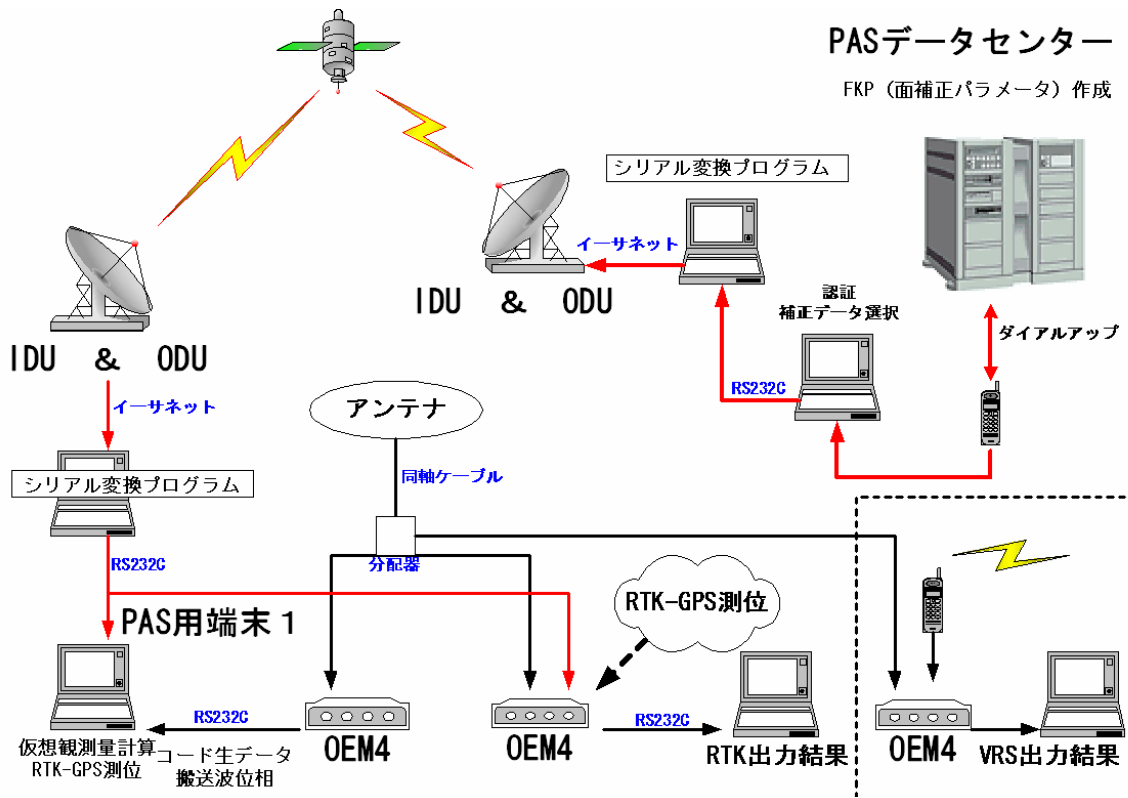


図6 18:実験全体構成図

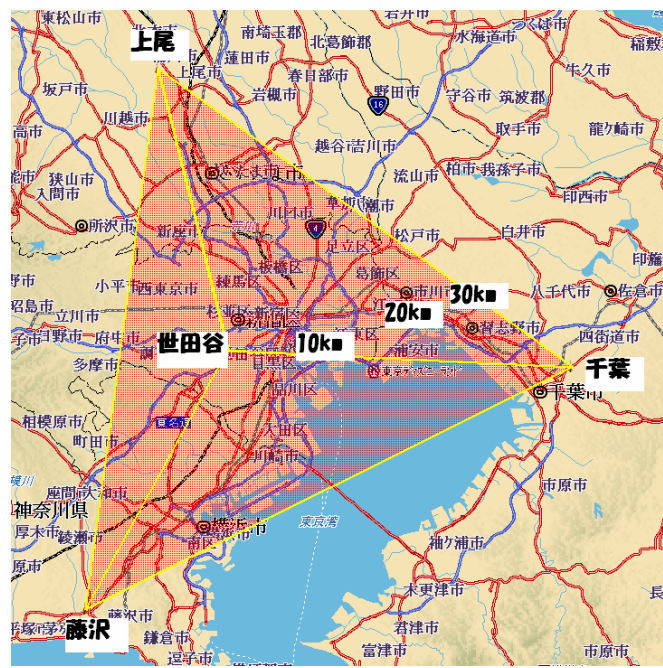


図6 19:フィールド実験概要図2

6.5.2 検証方法

RTK-GPS、FKP 方式ネットワーク RTK 両方とも測位はキネマティック測位に設定し、すべて同期モードで行う。GPS アンテナは GPS 600 を使用し、各受信機に分岐して測位データを入力する。精度評価の条件として、全実験と同様に、仰角 10 度以上、可視衛星は 5 機以上、PDOP は 2.75 以下と設定する。検証方法として、平均値を中心とした分布により、精度を検証（水平方向、高さ方向）、真値を中心とした分布により確度を検証する。使用する真値はトリンプル VRS の測位結果の平均値（基準局は測位地点を三角で囲める 3 点の電子基準点）から求めた。

6.5.3 30 km地点結果

30 km 地点は船橋市の船橋東高校脇の畑（図 6 20）で測位を行った。VSAT 地球局以外の機材はすべてトラックに設置（図 6 21）し、VSAT 地球局を地面が平らな地点に設置（図 6 22）した。RTK-GPS 測位と FKP 方式ネットワーク RTK 測位を行う予定であったが、PAS データセンタの関係で RTK-GPS の補正データ RTCM が送信されなかったため、ネットワーク RTK のみの測位となった。まず、図 6 23 に移動局の正確な位置として採用するトリンプル VRS の結果を示す。これらの結果はすべて Fix 時のデータである。2 drms で 2.41 cm、緯度、経度、高さの標準偏差はそれぞれ、0.95 cm、0.50 cm、1.12 cm であった。経度と高さ方向の標準偏差が若干大きいですが、数十 mm の偏差であるので基準値としての使用には問題がないと考えられる。求められた座標は（lat:35.72103, lon140.01537, height:62.5249）である。



図6 20:アンテナ設置



図6 21:VSAT 地球局設置状態



図6 22:実験風景

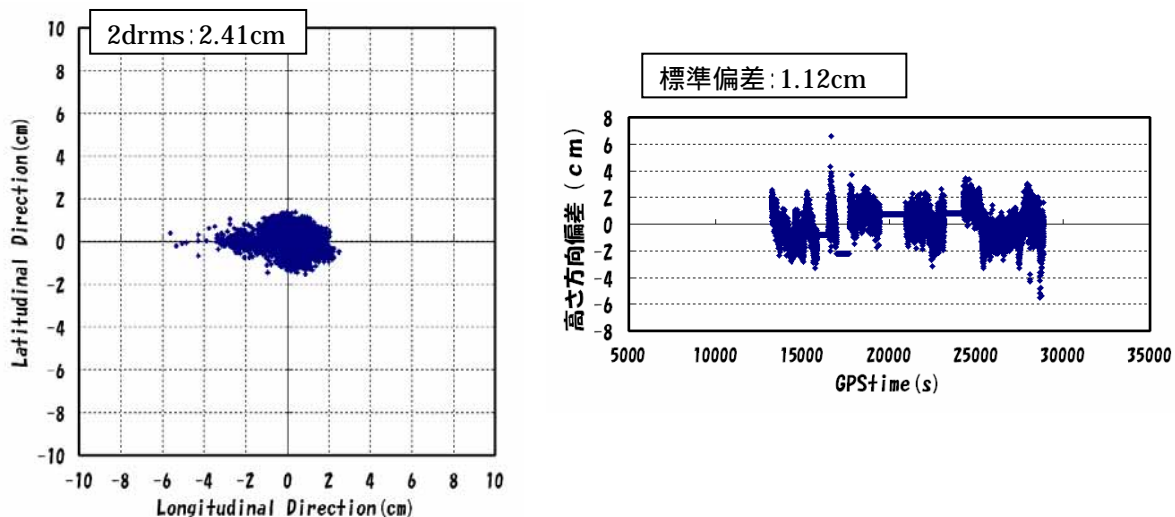


図6 23:トリプル VRS による測位結果

FKP 方式ネットワーク RTK 測位結果の 2 drms は 2.35 cm 、緯度、経度、高さ方向の標準偏差はそれぞれ、 0.70 cm 、 0.68 cm 、 1.53 cm と基線が 30 km にも関わらず、良好な値を示している。図6 24に真値からの水平方向分布と高さ方向分布を示す。真値としたトリプル VRS の平均値との差の平均は、緯度方向に -1.70 cm 、経度方向に $+0.22\text{ cm}$ 、高さ方向に $+6.12\text{ cm}$ の差が現れた。高さ方向に約 6 cm の差が現れたのは原因不明であるが、トリプル VRS は Novatel OEM4 内で、FKP 方式では、PAS 端末 (GNSMART) 内でそれぞれ座標変換を行っているため、そのアルゴリズムの違いからきている可能性が考えられる。

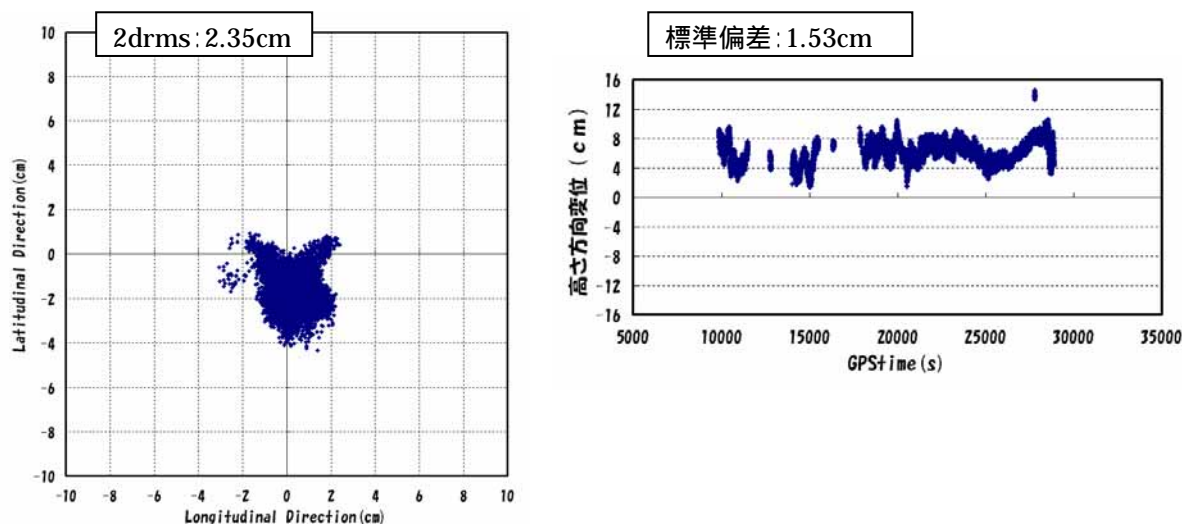


図6 24:VRS 測位結果を中心とした FKP 測位分布

6.5.3 20 km地点結果

20 km地点は開けている江戸川河川敷 (図6 25) で測位を行った。30 km地点と同じように、トラックに機材を設置し、VSAT 地球局は地面に設置した (図6 26)。図6 27にトリプル VRS の Fix 時の測位結果を示す。 2 drms は 2.16 cm 、緯度、経度、高さ方向の標準偏差は、それぞれ 0.86 cm 、 0.31 cm 、 1.76 cm であった。20 km地点でも高さ方向の標準偏差にばらつきが見られるが、 2 cm 以下の値を示しているため真値とする。求められた座標値は

(lat:35.708089, lon:139.918727,height:43.95237) である。



図6 25:アンテナ設置状況



図6 26:VSAT 地球局設置状況

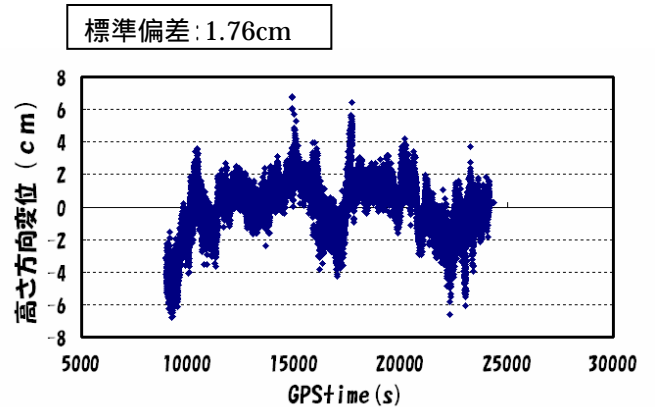
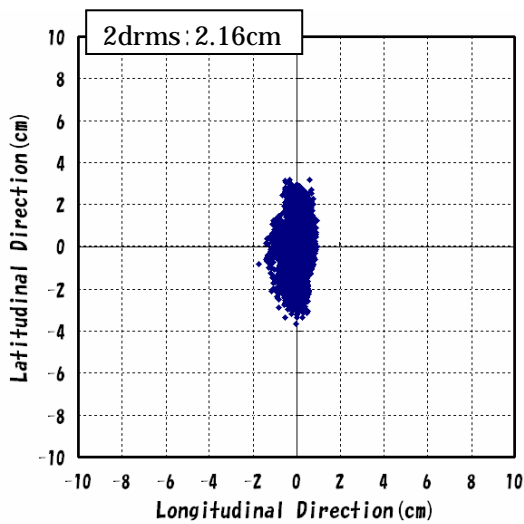


図6 27:トリプルVRSの測位結果(20km)

RTK-GPS 測位における Fix 時の水平方向分布と高さ方向分布を示す。Fix 率は 21.6% (すべてワイドレーン) と低く、全測位の 8 割が Float 解という結果になった。Fix 時の 2 d r m s は 4.74 cm、緯度、経度、高さ方向標準偏差はそれぞれ、1.69 cm、3.92 cm、5.81 cm であった。(Float 解を含めた 2 d r m s は 12.35 cm、緯度、経度、高さ方向標準偏差は、28.78 cm、9.38 cm、28.35 cm であった。) 図6-28 に真値からの差の図を示す。真値からの差の平均は、緯度方向で -8.11 cm、経度方向で +3.25 cm、高さ方向で -5.39 cm であった。基線長が 20 km となると正確に整数値バイアスを推定することが困難であることが実測より確認できた。これは第 5 章でも述べたが、基準局と移動局での電離層、対流圏の状態が異なっていることが原因とが考えられる。

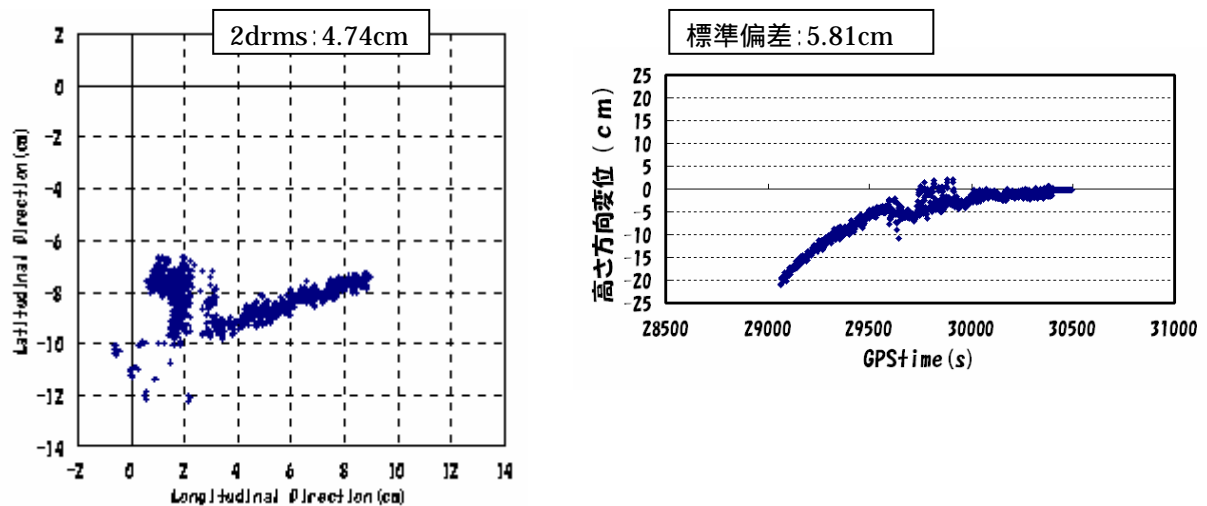


図6-28: VRS 測位結果を中心とした RTK 測位分布

図6-29にFKP方式ネットワークRTKの水平方向分布図と高さ方向分布図を示す。2drmsは2.12cm、緯度、経度、高さ方向標準偏差はそれぞれ、0.76cm、0.37cm、0.93cmとなった。図6-34に真値からの差を示す。水平方向の差はほとんどないが、高さ方向は30km地点と同じようにバイアスがかかっている状態である。数値で表すと、緯度、経度方向の差はそれぞれ、-0.46cm、-0.10cmと微小である。しかし高さ方向は+6.47cmと30km地点と同じく約6cmの差が見られる。やはりこれは、座標変換時におけるものか、もしくは基準局でなんらかのオフセットが掛かっている可能性が考えられる。

30kmではRTK-GPS測位を行うことはできなかったが、20km地点では、RTK-GPS測位とFKP方式ネットワークRTK測位の明らかな精度の違いを見て取ることができた。RTK-GPS測位とFKP方式では2drmsで約2cm、高さの標準偏差で約4cmもの差が現れた。それ以前に、FKP方式では測位を始めて数秒でFixしたにもかかわらず、RTK-GPSではほとんど(8割)Fixできなかったことから、リアルタイムに測位を行う場合、中基線以上ではやはりネットワークRTK測位が有効であるといえる。

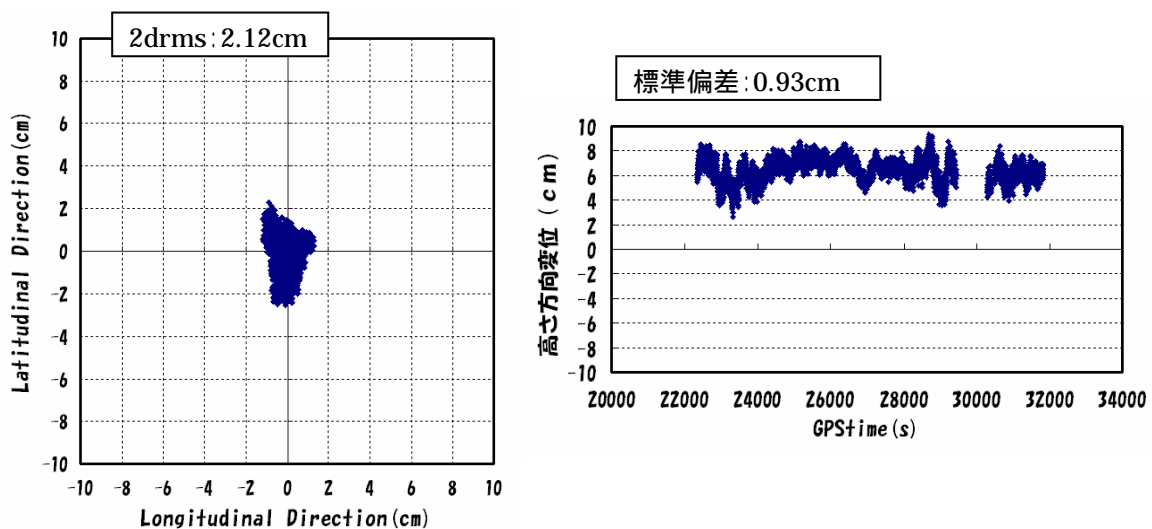


図6-29: VRS 測位結果を中心とした FKP 測位分布

6.5.4 10 km地点結果

10 km地点は東京海洋大学越中島キャンパスの航海科実習等の屋上に設置した。測位環境は30 km、20 km地点と比較して周りが開けていない分、マルチパス等の影響を受けやすい場所でもある。静止衛星通信回線を使用すると、同じ場所に VSAT 地球局を2台並べて設置し電波を衛星に打ち上げて戻すだけになるので、静止衛星通信回線は使用せず、直接 PAS データセンタにダイアルアップしデータを取得する方法を選択した。30 km、20 kmと同じ評価をするために、移動局の真値をトリプル VRS の Fix 時の測位結果を使用する。図6-31にトリプル VRS の水平方向分布と高さ方向分布を示す。2 drmsは2.43 cm、緯度、経度、高さ方向標準偏差はそれぞれ、0.95 cm、0.52 cm、2.14 cmであった。得られた真値の座標は (lat:35.666516039, lon139.79238965, height:59.49092) である。



図6 30:海洋大屋上のアンテナ

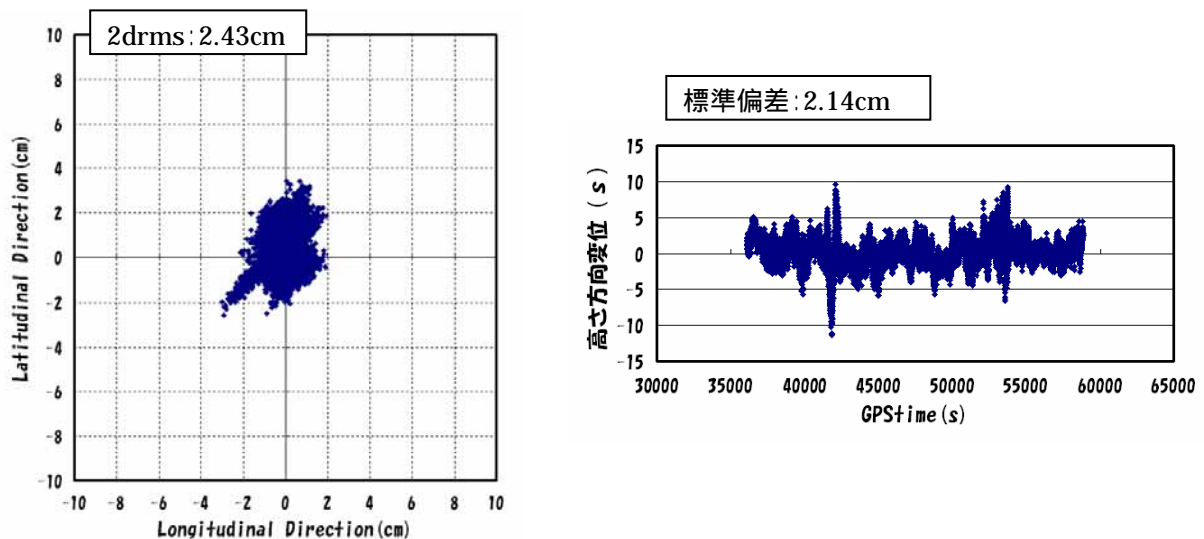


図6 31:トリプル VRS による測位結果

RTK-GPS 測位における水平方向分布と高さ方向分布を以下に示す。Fix 率は70% (すべてワイドレオン) である。2 drmsは3.20 cm、緯度、経度、高さ方向の標準偏差はそれぞれ、1.44 cm、1.12 cm、3.08 cmであった。20 km地点と比較して、数 cm、測位分布が抑えられていることが分かる。それ以上に Fix 率が飛躍的に向上したことに注目したい。基準局からの基線の長さが10 kmなので、RTK-GPS 測位が可能な範囲ギリギリではあるが、公証の RTK-GPS 精度 (1 cm + 1 ppm × 基線長) 以上の測位精度が得られた。真値からの差の平均は緯度、経度、高さ方向でそれぞれ、+3.27 cm、+0.268 cm、+3.71 cmであった (図6-32)。

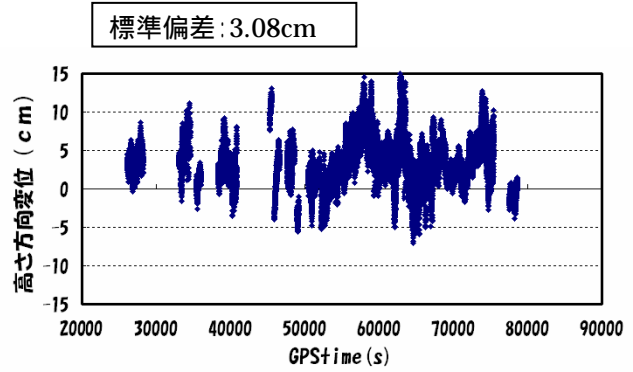
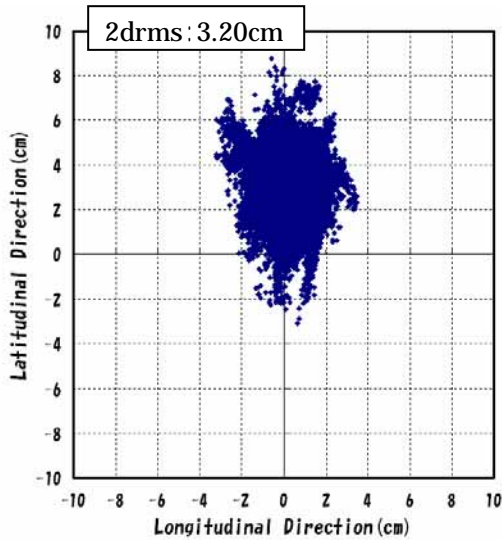


図6 32: VRS 測位結果を中心とした RTK 測位分布

FKP 方式ネットワーク RTK の水平方向分布と高さ方向の分布を以下に示す。2 d r m s は 1 . 9 6 c m、緯度、経度、高さ方向の標準偏差はそれぞれ 0 . 5 6 c m、0 . 4 0 c m、1 . 1 2 c mであった。やはり、10 km地点であっても、通常の RTK-GPS 測位にくらべて、良い精度を示している。真値からの差の平均を取ると、緯度、経度方向で、- 0 . 1 6 c m、+ 0 . 5 2 c mとmmオーダーで一致していることがわかる(図6-33)。しかし、高さ方向は+ 4 . 6 2 c mと差がみられた。そこで、トリプル VRS の測位結果ではなく、精密測位(ピナクル)ソフトで算出した結果との比較をおこなったが、高さ方向にやはり+ 3 . 8 6 c m差がみられた。水平方向はmmオーダーで一致した結果を示した。

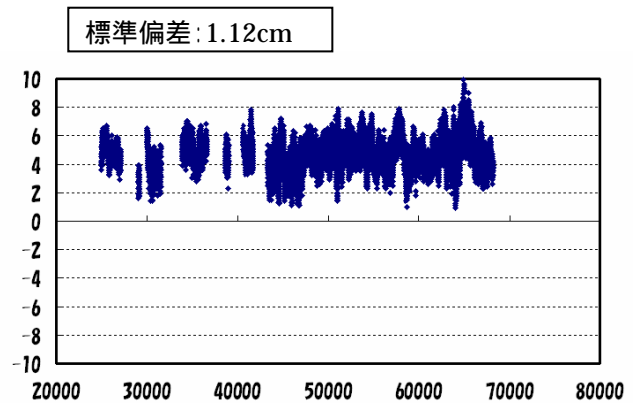
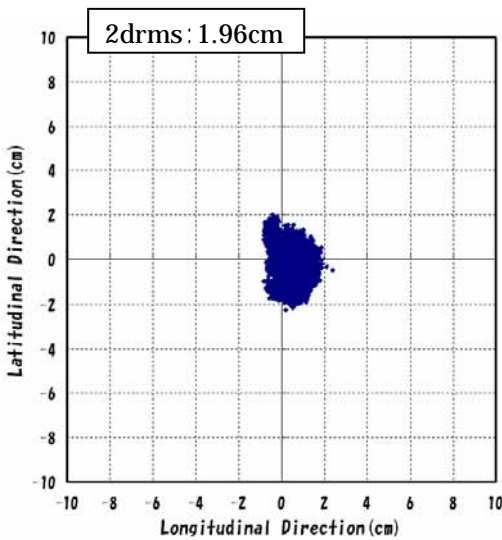


図6 33: VRS 測位結果を中心とした FKP 測位分布

6.5.4 考察

表6-4:異なる基線長での測位結果

	10km			20km			30km	
	RTK	FKP	VRS	RTK	FKP	VRS	FKP	VRS
2drms(cm)	3.20	1.96	2.43	4.74	2.12	2.16	2.35	2.41
lat_stdev(cm)	1.44	0.56	0.95	1.69	0.76	0.86	0.70	0.95
lon_stdev(cm)	1.12	0.40	0.52	3.92	0.37	0.31	0.68	0.50
h_stdev(cm)	3.08	1.12	2.14	5.80	0.93	1.76	1.53	1.12
lat(cm)	3.27	-0.16	0.00	-8.11	-0.46	0.00	-1.70	0.00
lon(cm)	0.27	0.52	0.00	3.25	-0.10	0.00	0.22	0.00
h(cm)	3.71	4.62	0.00	-5.39	6.47	0.00	6.12	0.00

表6-5:異なる基線長でのFix率

	10km	20km	30km
RTK(%)	70	22	*
FKP(%)	90	90	90

表6-4に実験結果をまとめて示す。トリプルVRSでは電子基準点は自動的に近くの電子基準点を選択して補正データを作成されるので、10km、20km、30km地点で大きな変化は見られない。RTK-GPS測位は明らかに10km地点より20km地点の測位精度が劣化していることが分かる。表6-5に示されるFix率は明らかで、20km地点では22%程度だったものが、10km地点では70%になっていることも特徴といえる。FKP方式では緯度、経度、高さ方向の標準偏差をみると基線長による差を見て取ることは難しいが、2drmsに限ると若干距離が伸びるに従って測位分布が広がっていることがわかる。しかし、それでも0.4cm程度の変化なので、基準局からの基線長による測位精度劣化は少ないといえる。この結果より、近くに基準局がない場合、ネットワークRTKは有効であると考えられる。しかし、高さ方向のバイアスの原因を検証する必要がある。

静止衛星を実際フィールドに持ち出して、通信を行ったが、1度通信が開始されると伝送時間の変動も少なく安定してデータの送受信が可能であることが今実験でも確認できた。しかし、機材等が大きく持ち運ぶには適さないため、運搬、設置に時間と労力がかかるため、手軽に使用できるシステムとは言いがたい。

現在、駅伝やマラソン中継用の移動しながら静止衛星をトラッキングし続ける小型のアンテナがあるが、費用が数百万程度必要となるため、実際の運用は困難である。今後、静止衛星による補正データ通信が可能となるためには、軽量で安価なアンテナの実現が望まれる。

6.5 基準局の位置によるFKP測位精度検証

6.5.1 実験目的

実際にPASサービスを受ける場合、利用者は自身の単独測位結果を一旦PASのデータセンタに送り認証を受ける。認証を行ったデータセンタは利用者位置から最も近い基準局を中心として複数の基準局データからFKP面を作成する。そして、そのFKPと中心とした基準局の座標を利用者側に何らかの方法で送信し、利用者側で仮想観測量を作成することが出来る。具体的にFKPによる提示方法を以下に示す。各実基準局の正確な観測量を V_i^s （詳細は第4章）とすると、 i は実基準局の数だけ存在する。

s は衛星数分存在する。実基準局が今4つだとすると、中心に補間する実基準局を V_0^s とし、他の実基

準局との差をとる。

$$V^s = \begin{bmatrix} \Delta V_{0,1}^s \\ \Delta V_{0,2}^s \\ \Delta V_{0,3}^s \end{bmatrix} \quad 6-1$$

の配列が各衛星数分存在する。中心となる基準局と他の実基準局との座標差ベクトルは、

$$A = \begin{bmatrix} \Delta X_{0,1} & \Delta Y_{0,1} & 1 \\ \Delta X_{0,2} & \Delta Y_{0,2} & 1 \\ \Delta X_{0,3} & \Delta Y_{0,3} & 1 \end{bmatrix} \quad 6-2$$

として表すと、各衛星の補間パラメータ $\alpha = [a \ b \ c]^T$ は以下のようにして求めることができる。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T V^s \quad 6-3$$

このパラメータと、中心実基準局の座標を利用者側に送り、利用者側では、自身の単独測位結果 $[X_u \ Y_u]$ をもとに、

$$\tilde{V}^s = \begin{bmatrix} \Delta X_{0,u} & \Delta Y_{0,u} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad 6-4$$

として、衛星ごとの仮想的な観測量が求まる。そのため、利用者は実基準点のネットワーク内にいる限り、どこにいようとこのパラメータを使用して、測位を行うことが可能となる。このようにして、FKP を提示するため、中心となる基準局が異なる場合、測位精度に影響が出るのではと考えられる。中基線長の実験によって、基線長が延びた場合でも 30 km までなら、測位精度劣化は少ないことが確認できた。よって今回は、FKP を作成する中心基準局を変化させ、その時の各測位精度を検証する。

現行の補正データ送信サービスでなら、認証の際にデータセンタ側で最適な基準局を選択できるが、放送型のシステムを構成するためには、FKP を作成する基準局によって測位精度が異なるのなら、どこかで、FKP を選択する必要が出てくるはずである。そのために、上記のことを確認することは非常に重要になってくる。

6.5.2 実験概要

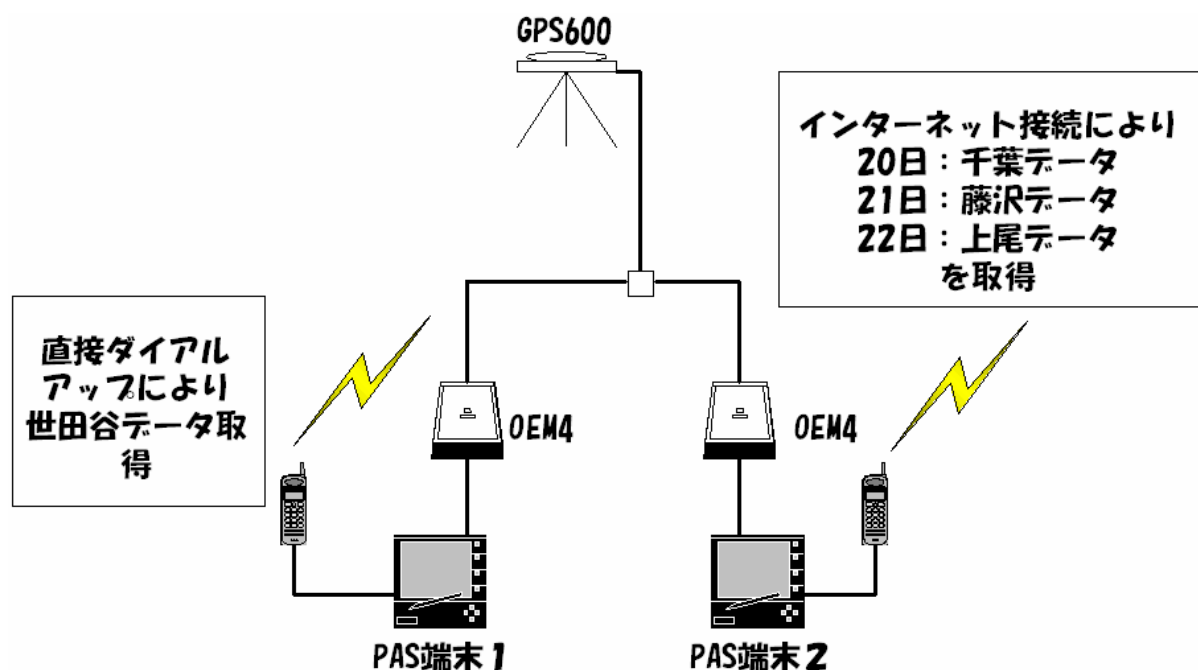


図6-34: 実験構成

図6-34に実験構成図を示す。PAS データセンタへの直接の回線は1本しか確保できなかったため、PAS 端末1に接続する世田谷データを取得する回線は、直接ダイヤルアップによって取得し、PAS 端末2に接続する千葉、藤沢、上尾データは、インターネットに接続し取得する方法で実験を行った（基準局はポート番号によって選択）。アンテナ（GPS600）を2分配し、それぞれNovatel OEM4に接続する。アンテナは東京海洋大学航海科実習等屋上に設置する。測位日時は2004年1月20、21、22日のそれぞれ午前02:00:00～翌日午前01:00:00（UTC）の23時間連続測位を行い、20日は世田谷と千葉、21日は世田谷と藤沢、22日は世田谷と上尾という組み合わせで測位を行った。各基準局と、測位地点の位置関係は図6-14と同じである。表6-5に各基準局から、移動局までの距離を示す。

表6-6: 移動局と各基準局との距離

	基準局との基線長 (km)
世田谷	10.277
千葉	34.447
上尾	39.624
藤沢	45.26

6.5.3 検証方法

今までの実験と同じで、検証時は仰角10度以上、可視衛星は5機以上、PDOPは2.75以下のデータを使用する。FKP方式の測位の設定は、すべてキネマティック測位で同期モードでの測位を行った。測位中に通信の中断などがあったため、全測位結果より3時間（午前07:00:00～09:00:00（UTC））を選択し掲載する。各図の中心は平均値を使用する。また各測定時の可視衛星数とPDOPを示し、測位精度への影響を検証する。

6.5.4 実験結果

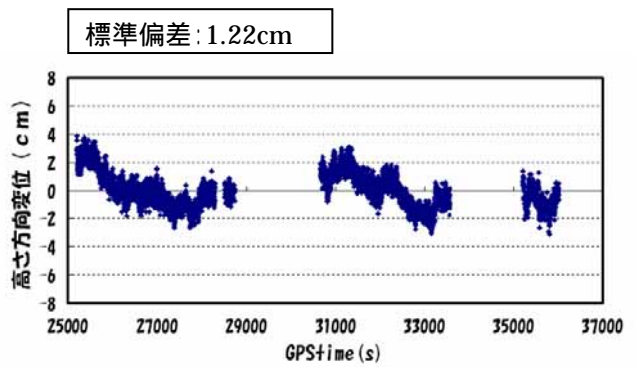
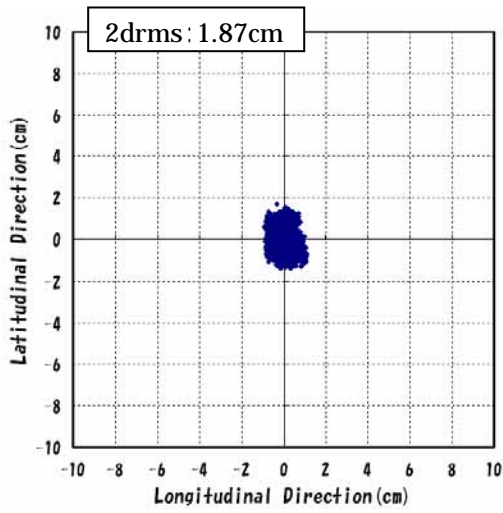


図6 35: 世田谷データを使用した場合の測位分布(1月20日)

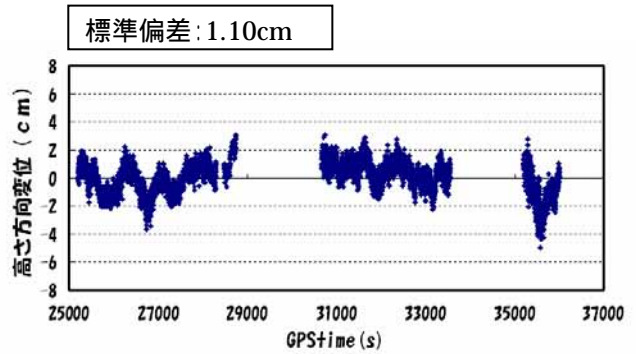
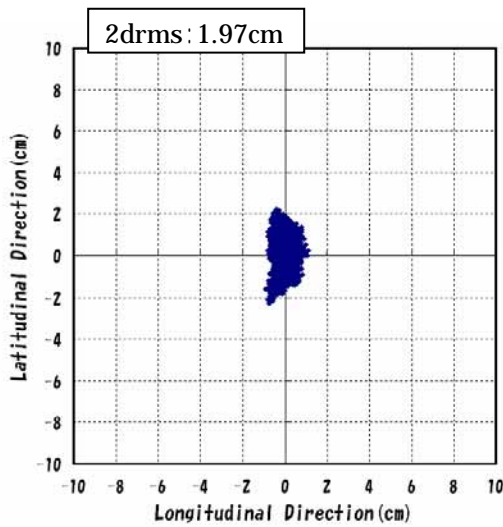


図6 36: 千葉データを使用した場合の測位分布(1月20日)

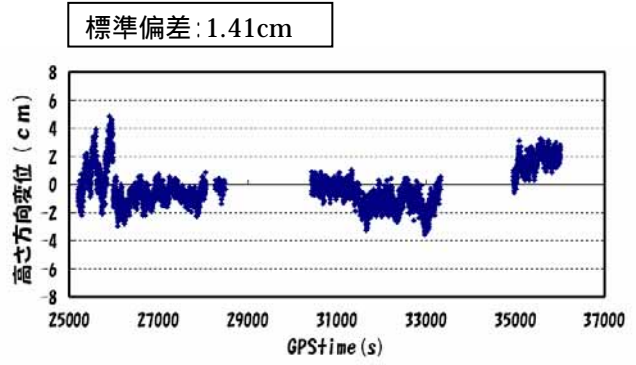
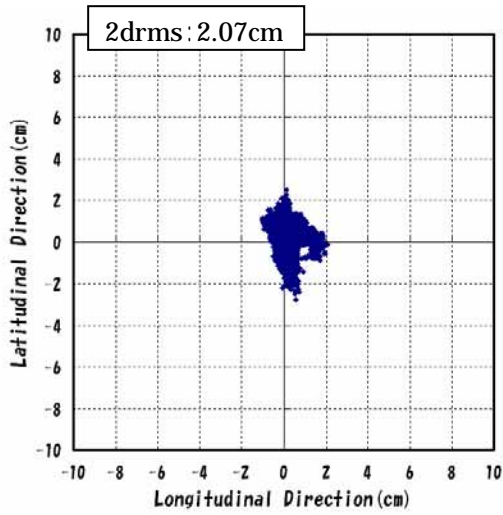


図6 37: 世田谷データを使用した場合の測位分布(1月21日)

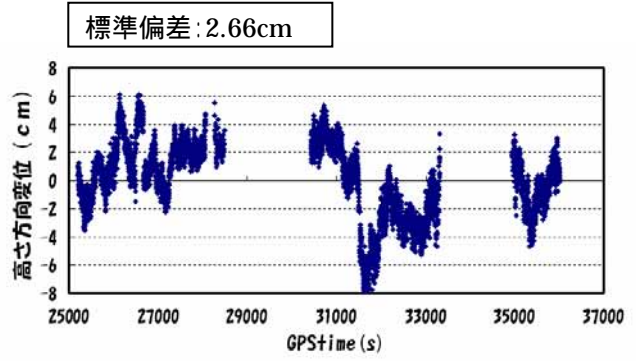
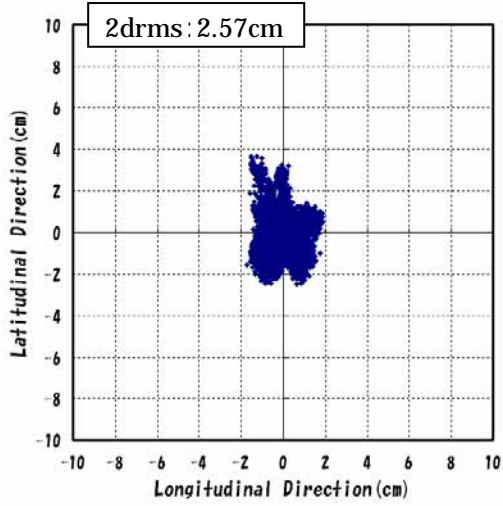


図6 38: 藤沢データを使用した場合の測位分布(1月21日)

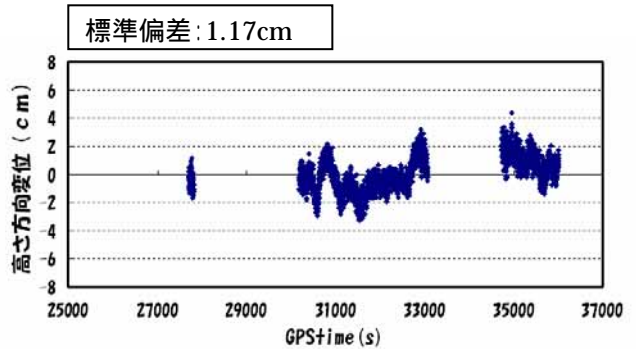
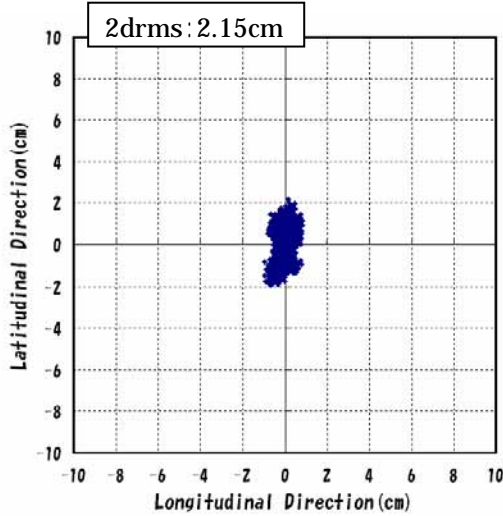


図6 39: 世田谷データを使用した場合の測位分布(1月22日)

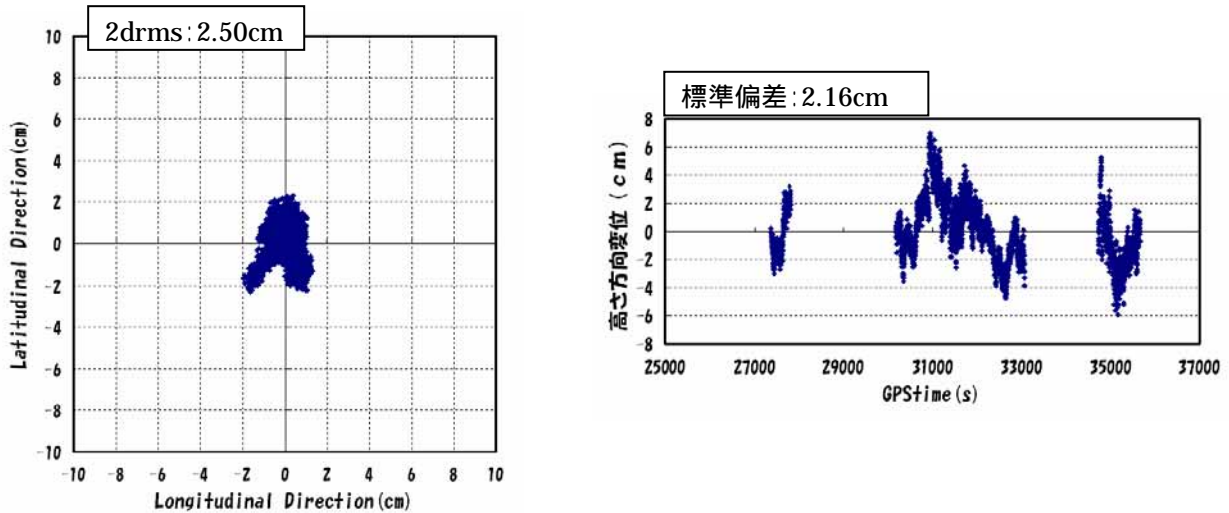


図6 40:上尾データを使用した場合の測位分布(1月22日)

6.5.5 考察

表6-7:実験結果

	38006.00		38007.00		38008.00	
	世田谷	千葉	世田谷	藤沢	世田谷	上尾
移動局との距離	10.276km	34.446km	10.276km	45.260km	10.276km	39.624km
2drms(cm)	1.87	1.97	2.07	2.57	2.15	2.50
lat stdev(cm)	0.56	0.67	0.67	1.03	0.86	0.98
lon stdev(cm)	0.32	0.30	0.40	0.63	0.29	0.58
h stdev(cm)	1.22	1.10	1.41	2.66	1.17	2.16
計算数	6096	6057	6056	6044	3720	3718
平均可視衛星数	6.62	6.62	6.63	6.63	7.09	7.06
平均PDOP	2.25	2.25	2.24	2.24	2.09	2.11

表6-6に実験結果をまとめる。表より、最も移動局との基線長が短い世田谷を中心としたFKPを使用した測位結果が全体的に良いことがわかる。基線長が約34kmの千葉との比較ではほとんど差はないが、基線長が40km付近にある上尾、それ以上の藤沢では、世田谷との差は顕著であり、特に高さ方向の標準偏差は1cm近く分散が広がっている。FKP方式ネットワークRTKに限らず、干渉測位では、基準局と移動局の両方で、同じ衛星を使用する。しかし、基線が延びると、同じ衛星が可視できる時間帯が少なく測位が行われないことになる。3時間(10800s)測位のなかで、指定した条件(仰角10度以上、可視衛星は5機以上、PDOPは2.75以下)を満たす結果を抽出したとき、その数値は、同じ日時であれば基線の長さによる差は見られなかった。そのことは、表の計算数からもみてとれる。しかし、20日、21日では10800エポック中、条件を満たすエポックが6000エポックしかないことは問題である。22日に限っては3700エポックと1時間強しか測位できていない。条件のPDOPを無くすと、エポック数は増大するが、やはり測位精度の劣化につながり、基準局からの基線の長さによる測位結果への影響が増大することが確認できた。しかし、条件を厳しくすると、基線長が長くても精度劣化の影響を減少させることが可能であるといえる。

結果として、DOPなどの条件を厳しく設定し、測位結果を出力させたとしても、FKP方式のネットワークRTKでは、基準局からの距離は40km上であると劣化する可能性が高いことが確認できた。よって、FKP面パラメータを作成する場合、中心とする実基準局はなるべく移動局に近いほうが望ましいといえる。

6.6 まとめ

この章で、静止衛星通信回線を利用した補正データ伝送システムを提案した。さらに提案したシステムを実際に使用し、RTK-GPS 測位、FKP 方式ネットワーク RTK 測位実験を行い、その精度検証を実施した。その結果、静止衛星通信回線は携帯電話のように受信中断等もなく、補正データの通信媒体として利用可能であることが確認できた。しかし、移動体や、野外での静止衛星通信回線の利用は、今のところ費用面で負担が大きく、安価で軽量のアンテナ等の設備が望まれる。

基準局からの基線長を延ばす実験では RTK-GPS 測位と FKP 方式ネットワーク RTK で測位精度比較も行ったが、RTK-GPS では基線長が 20 km になると Fix 率が 20% にまで落ち込み、測位精度も劣化が見られたが、FKP 方式ネットワーク RTK では基線長が延びることによる精度劣化は見られなかった。このため、基準局からの基線が長い場合（10 km 以上）RTK-GPS 測位よりも、FKP 方式ネットワーク RTK 測位が適していることが確認できた。

また FKP 方式のネットワーク RKT の補正データを放送する場合、より高精度の測位が必要であるならば、基準局の選択は必須である。補正データを取得する一連の流れの中で、どこで基準局を選択するかが問題となる。完全に放送型とする場合、周波数によって基準局を選択できれば、中波ビーコン（DGPS の補正データ）のように、専用の受信機によって基準局を選択できるが、そのためには、FKP 補正データ用の利用周波数帯を確保する必要がある。

今回提案した、静止衛星通信回線ネットワークでは、放送側で、相手（受信側）の IP を知っていなければならない、1対1の放送になっている。ユーザ数を増やす場合、放送側でも同じ数の IP が必要となるので、何人でも可能というわけには行かず、ユーザ数に限りが出てくる。今後はその問題を解決する必要もある。

第7章 まとめ

RTK-GPSでは基準局において生成された補正データを移動局に送信し、移動局では補正データを使用して測位を行う。GPS衛星から到達する電波は電離層および対流圏を通過する際に大気遅延が生じる。この伝搬遅延は受信機上空に広がる大気の状態変化によって増減しており、基準局と移動局間の距離が大きくなるとその相関関係は小さくなり、基線長が短ければその両端における大気遅延は同じと考えられ、測位計算時に相殺されることになるが、基線が長くなるとともに相殺効果が減少し測位結果に誤差が含まれることになる。このことは第5章の長基線誤差の項でも確認することができ、基線が長くなるにしたがい、最も電離層遅延の相殺効果が減少することが示された。具体的には、基線長10km地点では標準偏差で2cmの誤差が残るのに対し、100km地点では標準偏差で5cmの誤差が確認できた。この相殺されずに残る誤差が測位に影響を及ぼし、通常のRTK-GPS測位では基線長10kmになると、安定した測位を行うことが困難であることが分かった。

ネットワークRTKとは複数の基準局のデータをネットワーク的にそのエリア内における電離層伝搬遅延量、対流圏伝搬遅延量、衛星位置誤差をモデルし、移動局付近での補正データを作成することで、距離的な限界を解決し、今まで、原理的に不可能であった広域を対象とする長距離RTK-GPSが実現できる新しい測位手法である。実際に長基線（中基線）においてネットワークRTKと通常のRTK測位を比較検証したところ、10km地点でのRTK測位の2drmsは約3cmに対しネットワークRTKは約2cmであった。Fix率でみると前者は70%であったのに対し、後者は90%と、ネットワークRTKの方が安定度、測位精度ともにRTK測位を上回る結果を得ることができた。20km地点になるとさらに顕著に差が現れ、RTK測位ではFix率約20%、2drmsは約5cmと10km地点より遥かに測位結果に劣化が見られたのに対し、ネットワークRTKではFix率90%、2drmsは約2cmと10km地点と変わらない高精度な測位が可能であった。この実験により、中基線長以上においては、RTK測位よりも、ネットワークRTK測位は有効であることが確認できた。

また、ネットワークRTKの方式には3種類あり、その内の1つFKP方式については放送型の補正データ配信が可能であるという特徴を持っている。放送型の最大の利点は、利用者数が無制限であること、そして利用者数がどんなに多くても、計算センタの計算量に変化のないことである。しかし、現実には、日本国内において、FKPの放送サービスは行われていない。本研究では、FKPを静止衛星通信回線によって放送する手段を提案した。その結果、通常使用される携帯電話等の補正データ伝送方式とくらべて、安定した通信が可能であることが確認できた。通信による遅延時間は1.6秒程度（RTKの補正データ伝送実験より）であることも確認できた。しかし、今回提案した、静止衛星通信回線ネットワークでは、放送側で、相手（受信側）のIPを知っていなければならず、1対1での放送になっている。利用者数が増える場合、放送側でも同じ数のIPが必要となるので、何人でも可能というわけには行かず、利用者数に限りが出てくる。これでは、放送型の最大の利点である利用者数に依存しないデータ配信を行えたとはいえず、今後はそれらの問題を解決する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、様々な形でご指導いただ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に心よりお礼申し上げます。

本実験におきまして、並々ならぬご指導、ご協力を承りました、防衛庁防衛大学校の浪江宏宗助手、東京海洋大学校の樊春明助手、茨城高等工業専門学校岡本修助手には大変感謝いたしております。

また、本研究の機材等を提供していただいた三菱電機株式会社の大村祐二様には、親切なご指導もいただきまことにありがとうございます。

さらに、静止衛星通信の機材の設置等のご協力をしていただいた、大沼康孝様をはじめとする宇宙通信株式会社の皆様に謝意を表します。

いろいろとご指導助言をしていただいた、久保信明助手、川村雅志文部技官に謝意を表します。最後に、同期の岡本伸也君を初めとする情報通信工学研究室の皆様には、実験等を助けていただき、心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂井 文泰 : 「GPS 技術入門」: 東京電機大学出版局 : 2003 年 2 月 28 日
- 2) 日本測量協会 : 「仮想基準点方式について」: RTK-GPS 測位に関する研究発表会 :
pp. 1 ~ 11 : 2001 年 6 月 15 日
- 3) 土屋 淳・辻 宏道 : 「新・やさしいGPS 測量」: 社団法人 日本測量協会 : 2001 年 12 月 21 日
- 4) Pratap Misra and Per Enge : 「GLOBAL POSITIONING SYSTEM Signals , Measurements , and Performance」: Ganga-Jamuna Press : 2001 年
- 5) 日本航海学会 : 「VRS 方式 RTK-GPS の測位精度評価」: GPS シンポジウム 2002 :
pp. 157 ~ 162 : 2002 年
- 6) 日本航海学会 : 「GPS の基礎」: GPS シンポジウム 2002 : pp. 193 ~ 225 : 2002 年
- 7) Gerhard Wubben, Andreas Bagge, Martin Schmitz : 「RTK Networks based on Geo++ GNSMART-Concepts, Implementation, Results」: ION GPS-01 : September 11.-14, 2001
- 8) Liwen Dai, Shaowei Han, Jinling Wang and Chris Rizos : 「A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning」
- 9) Gerhard Wubben, Andreas Bagge : 「RTCM Message Type 59-FKP for transmission of FKP version 1.0」: Geo++ White Paper Nr. 2002.01
- 10) H.-j. Euler, C.R. Keenan, B.E. Zebhauser : 「Study of Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays」: ION GPS-2001 : September 11-14, 2001

付録 A 残差の全測定結果

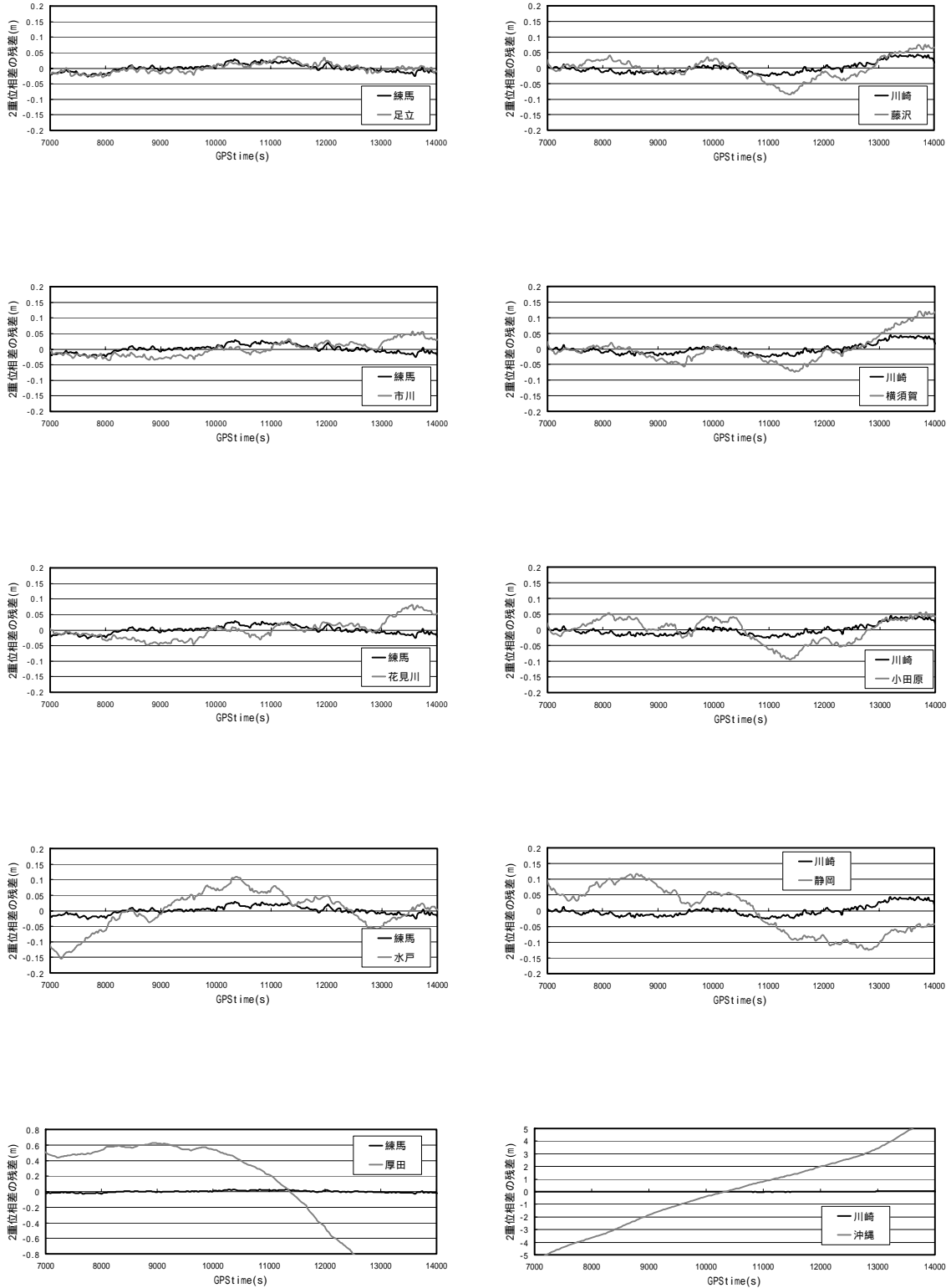


図 A-1: 1番衛星の2重位相差の残差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

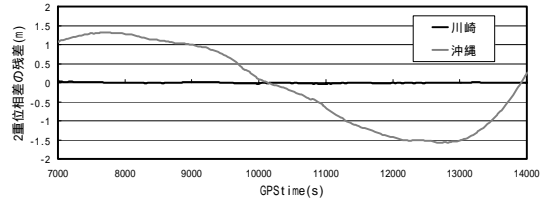
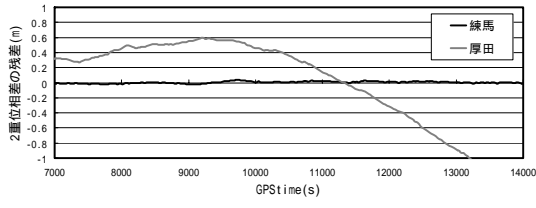
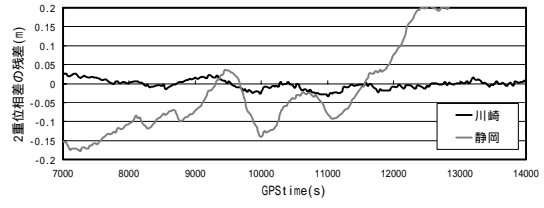
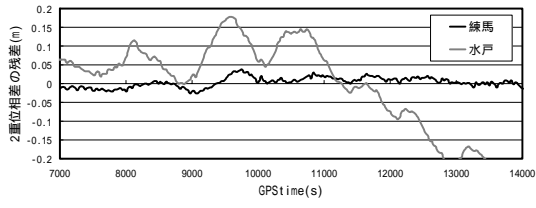
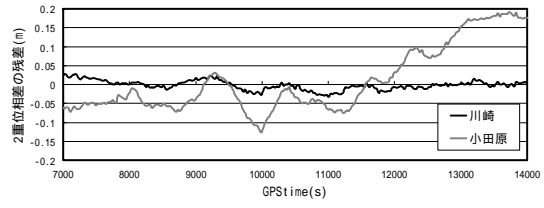
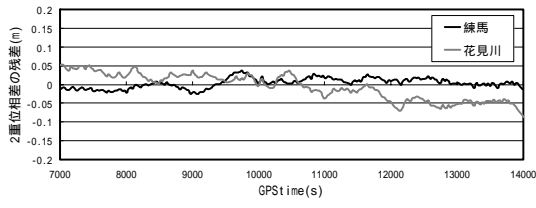
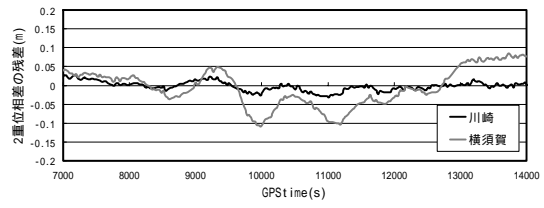
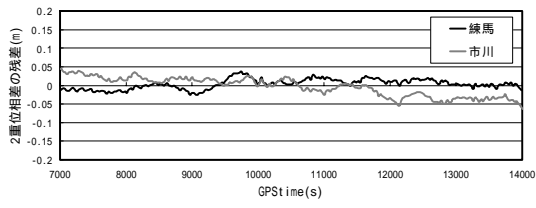
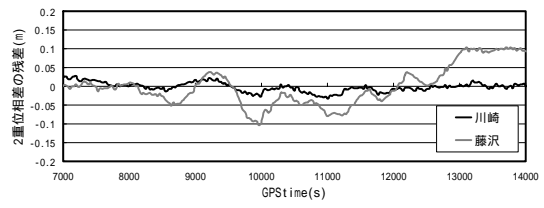
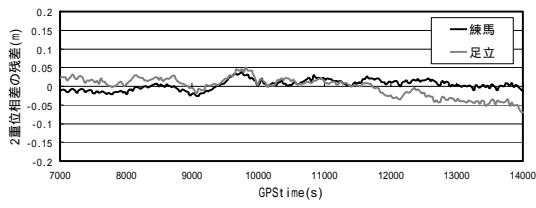


図 A-2 : 2番衛星の2重位相差の残差 (基準局 世田谷、基準衛星 25)

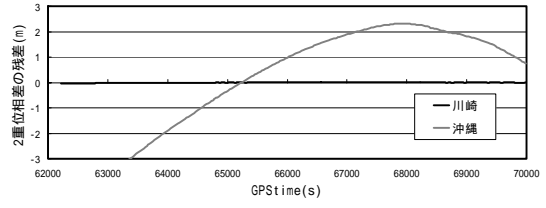
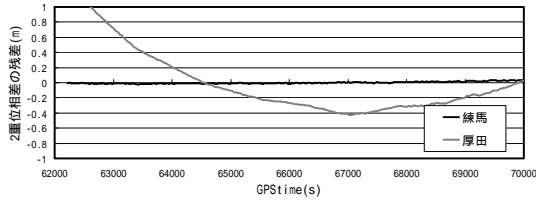
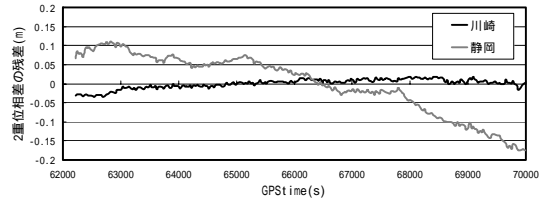
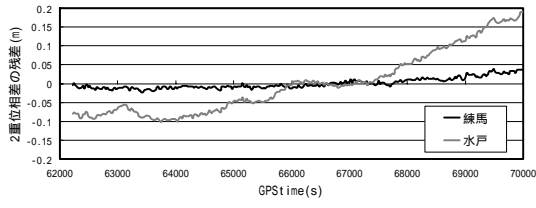
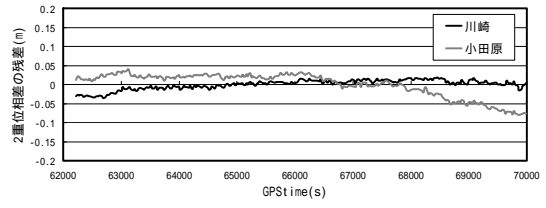
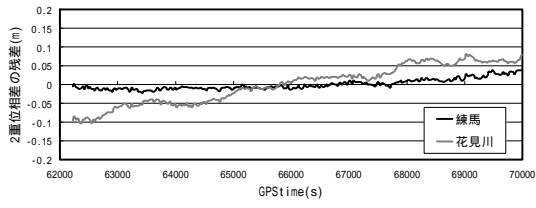
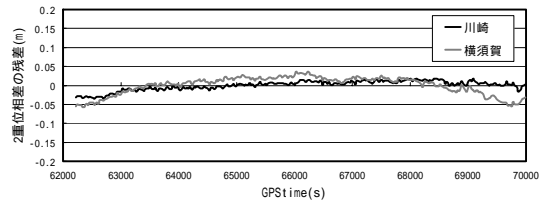
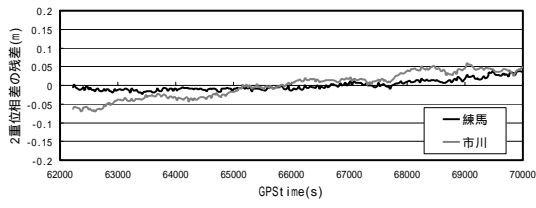
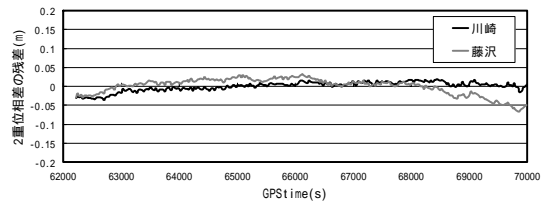
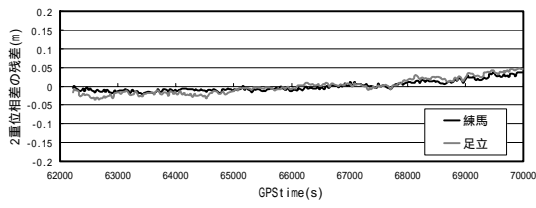


図 A-3 : 9 番衛星の2重位相差の残差(基準局 世田谷、基準衛星 29)

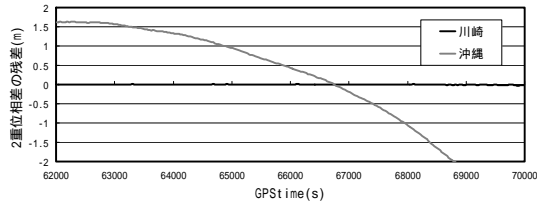
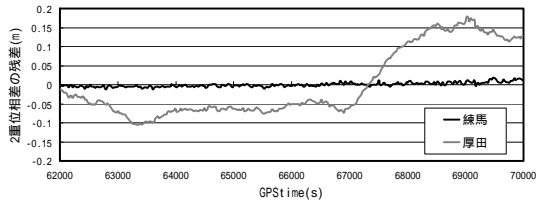
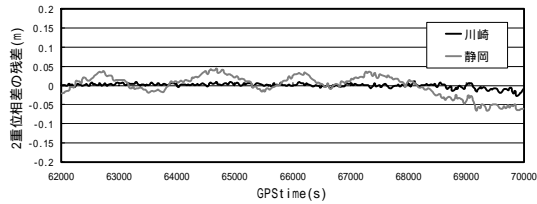
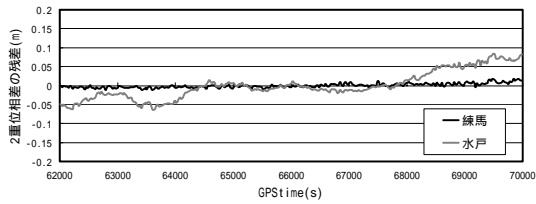
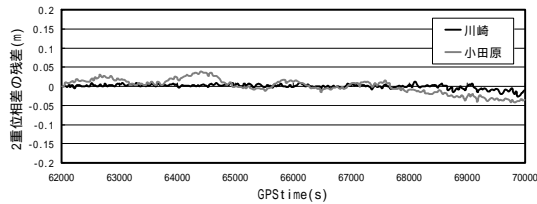
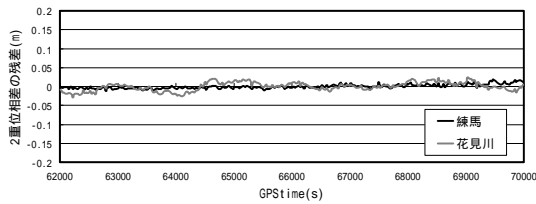
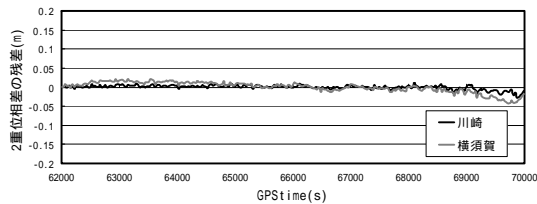
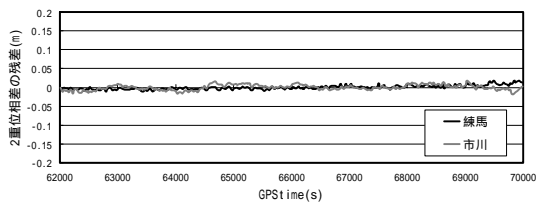
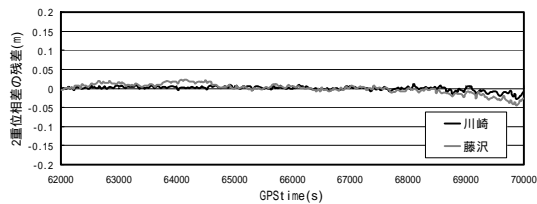
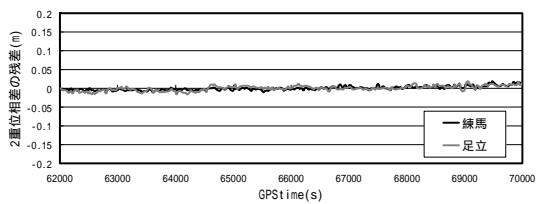


図 A-4: 26 番衛星の 2 重位相差の残差 (基準局 世田谷、基準衛星 29)

付録 B 電離層測定の結果

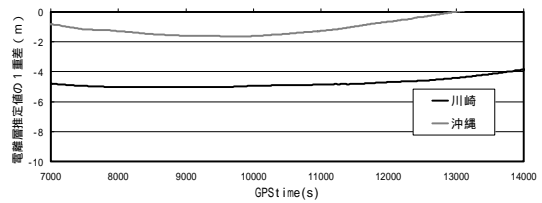
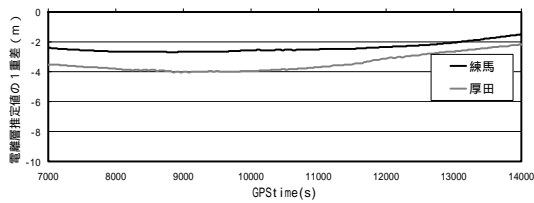
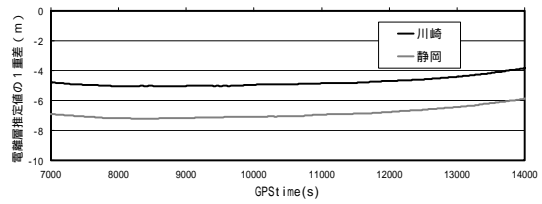
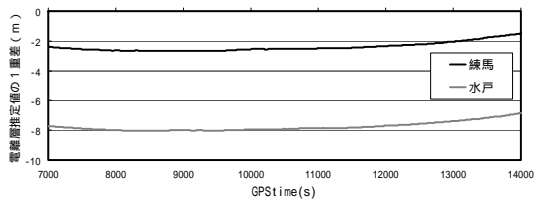
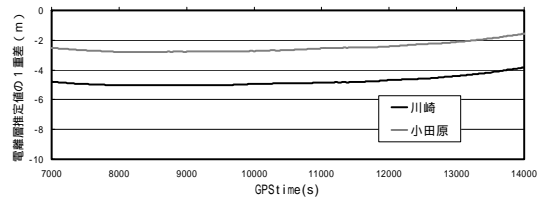
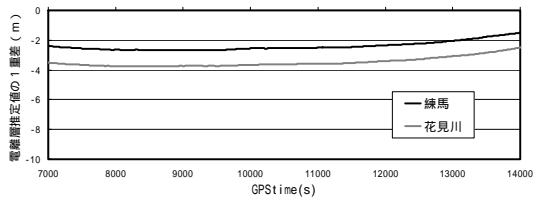
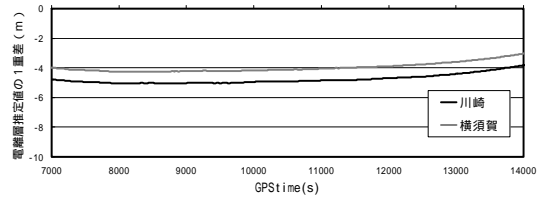
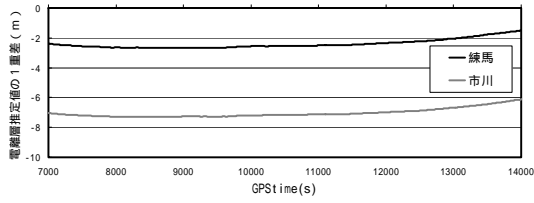
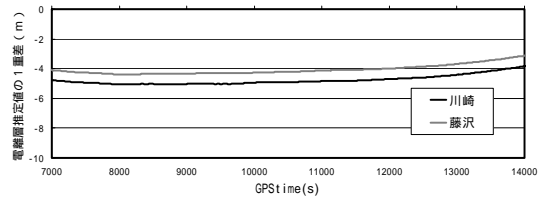
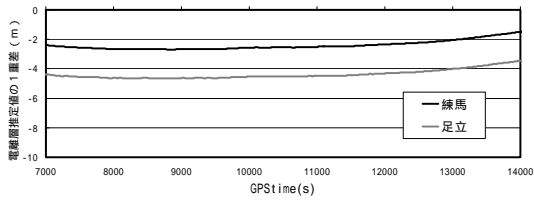


図 B-1: 1 番衛星の電離層推定値の基準局との差 (基準局 世田谷)

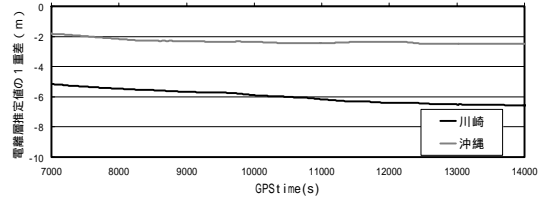
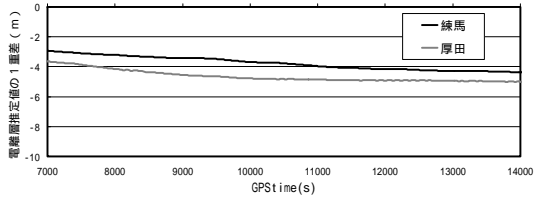
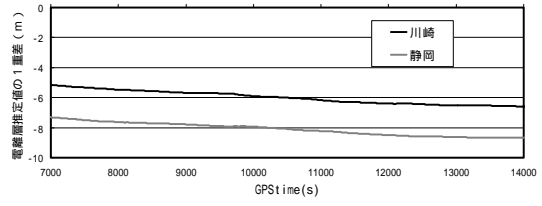
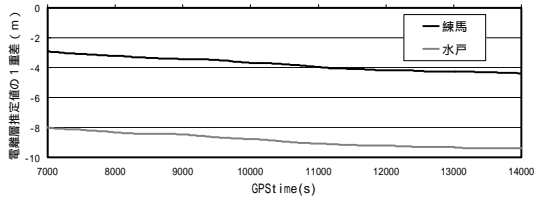
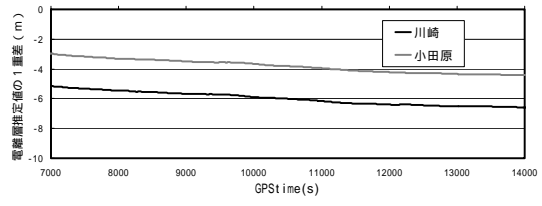
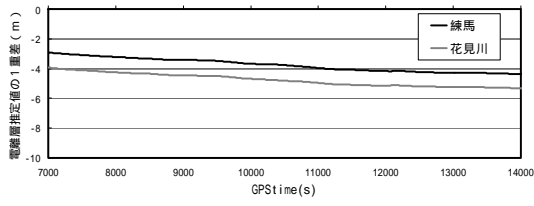
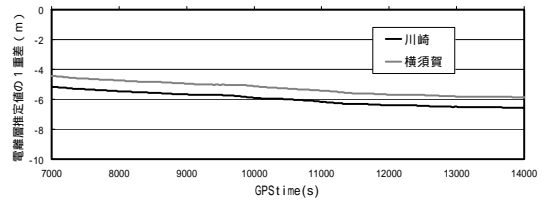
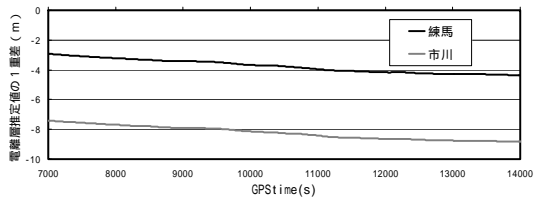
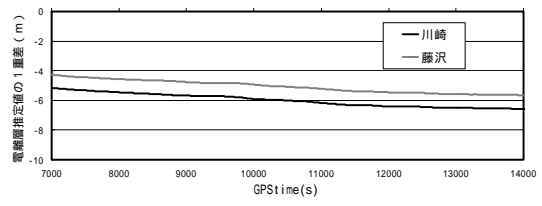
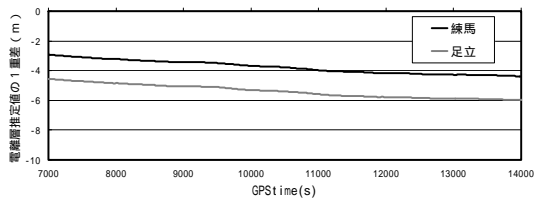


図 B-2 : 2 番衛星の電離層推定値の基準局との差 (基準局 世田谷)

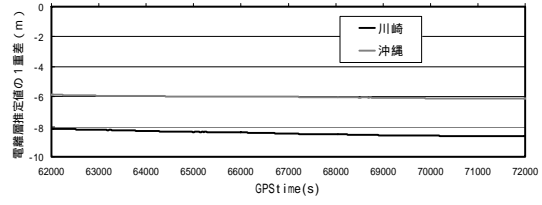
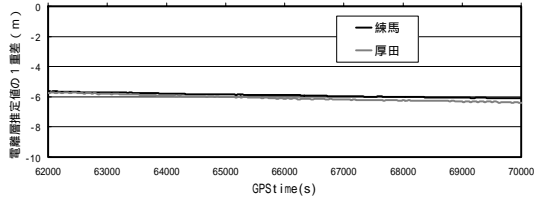
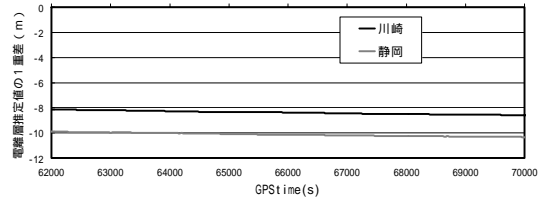
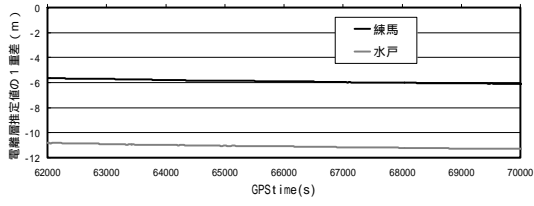
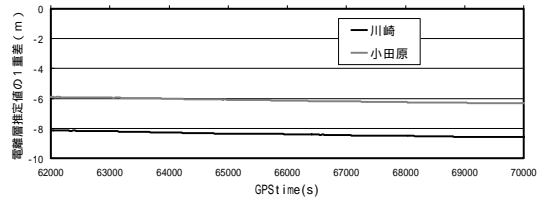
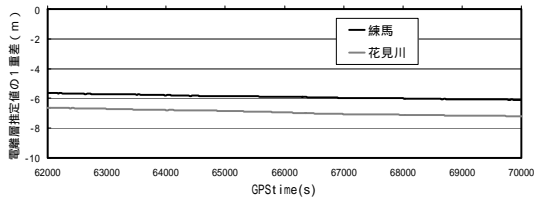
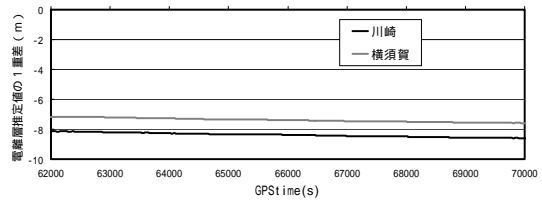
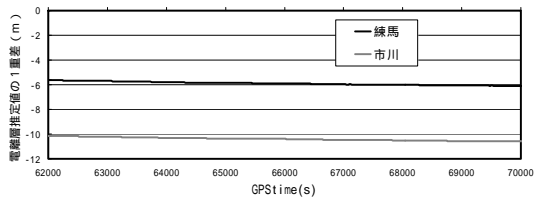
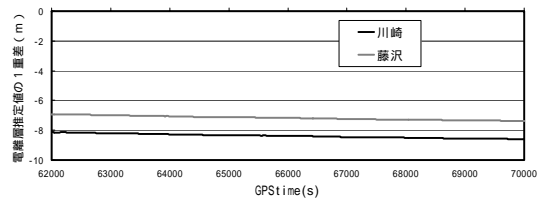
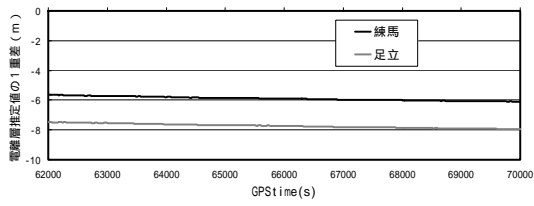


図 B-3 : 9 番衛星の電離層推定値の基準局との差 (基準局 世田谷)

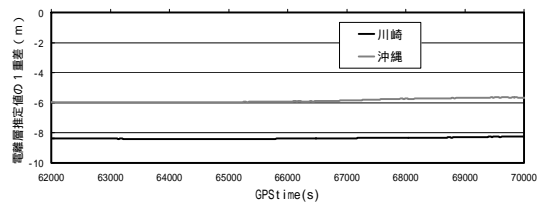
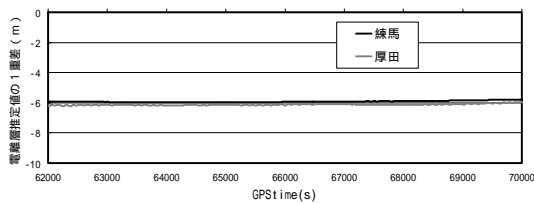
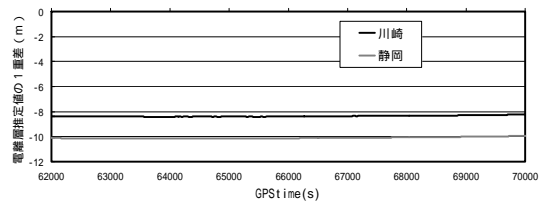
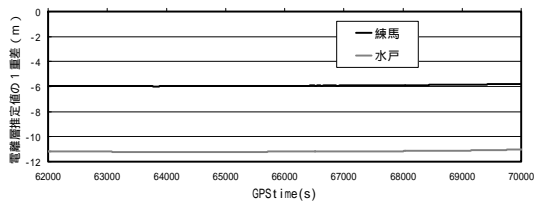
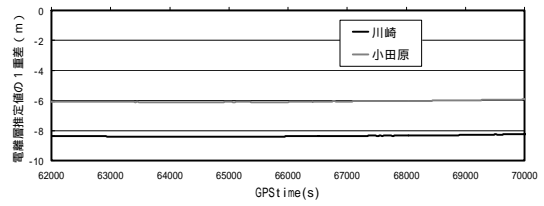
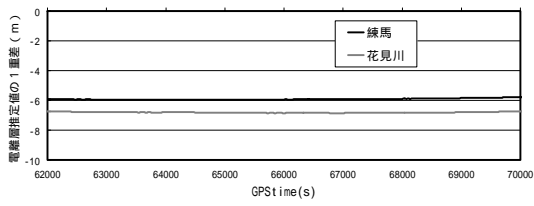
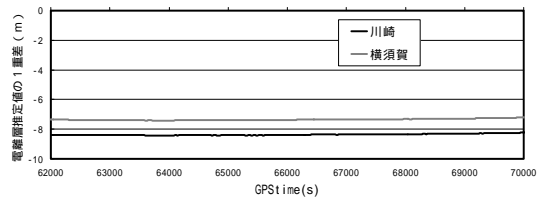
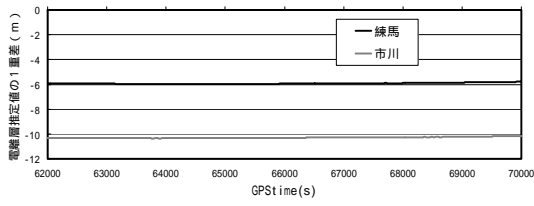
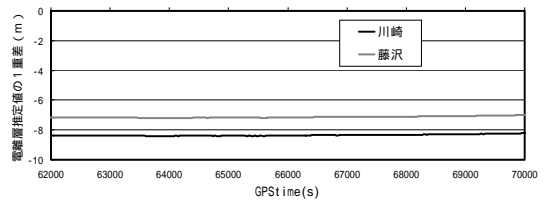
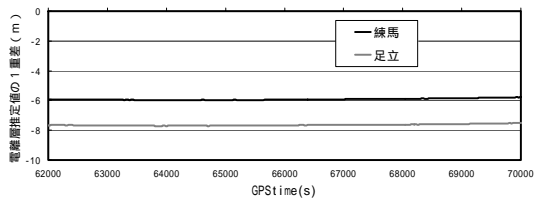


図 B-4 : 26 番衛星の電離層推定値の基準局との差 (基準局 世田谷)

付録 C 電離層2重位相差測定の結果

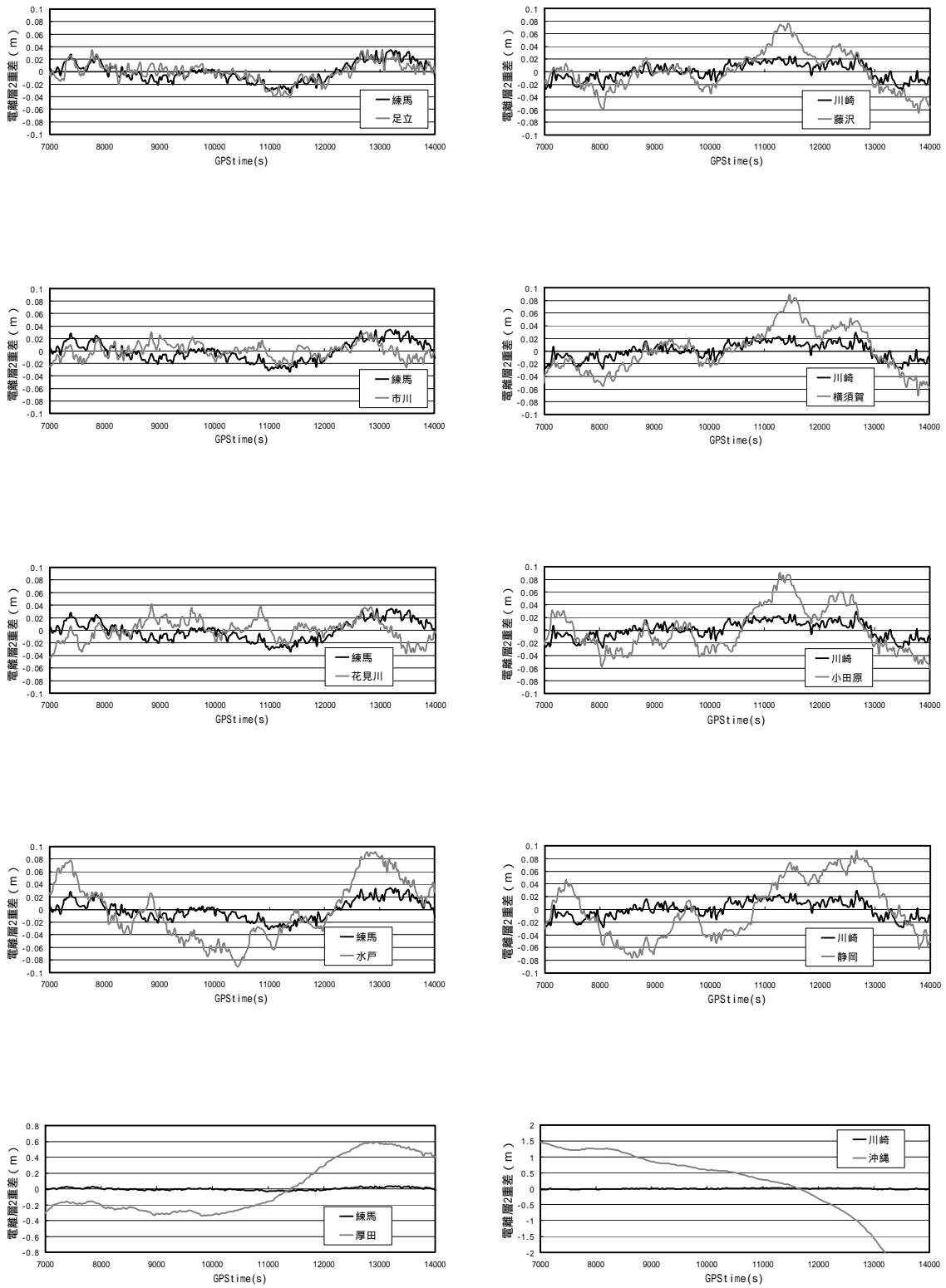


図 C-1:1 番衛星の電離層2重位相差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

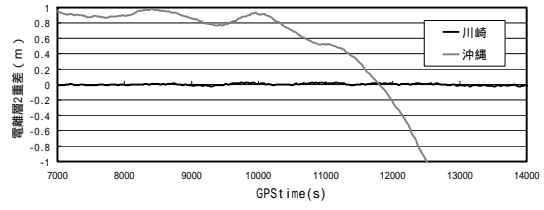
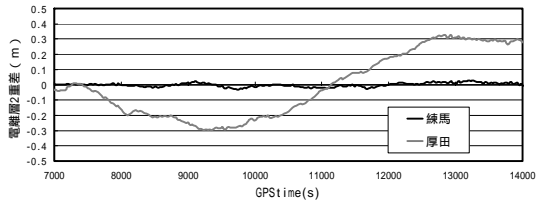
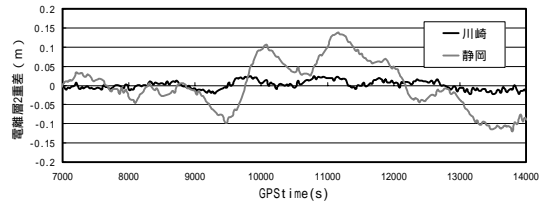
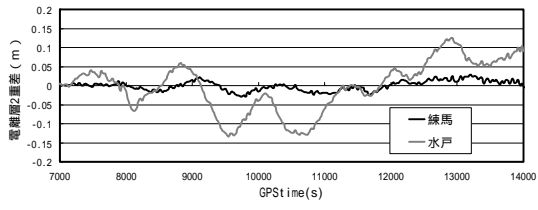
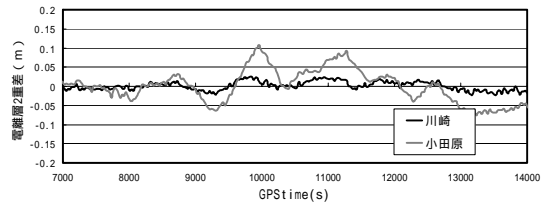
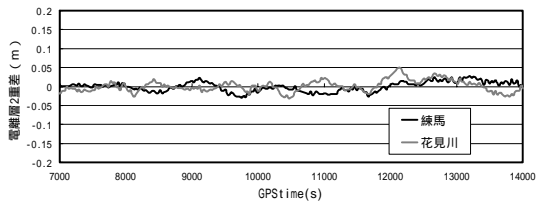
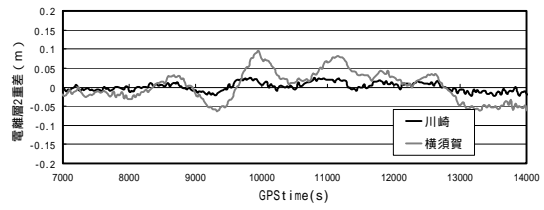
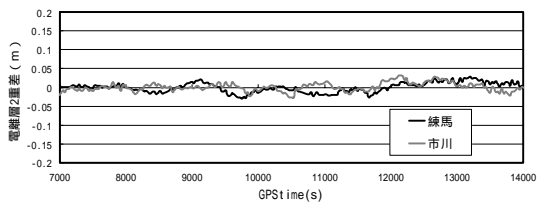
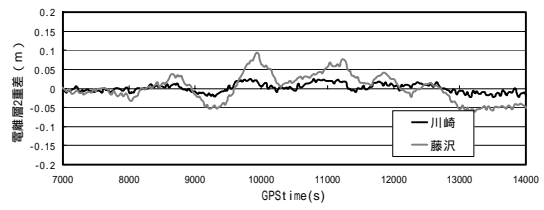
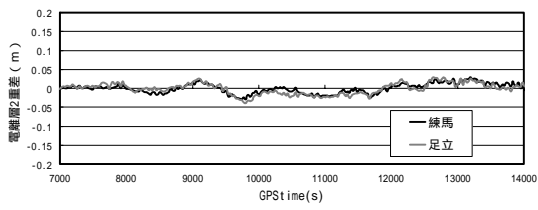


図 C-2 : 2 番衛星の電離層 2 重位相差 (基準局 世田谷、基準衛星 25)

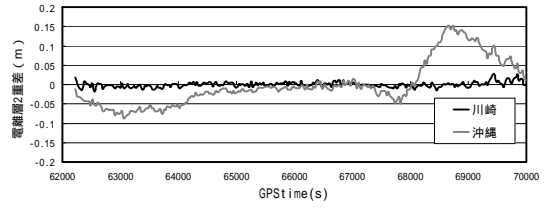
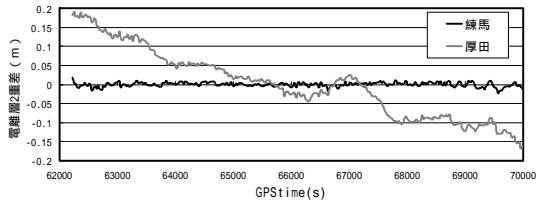
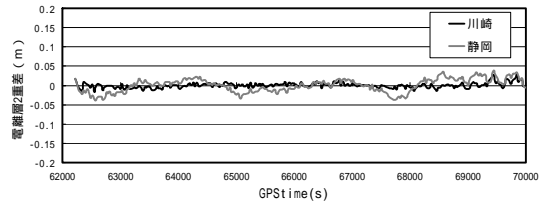
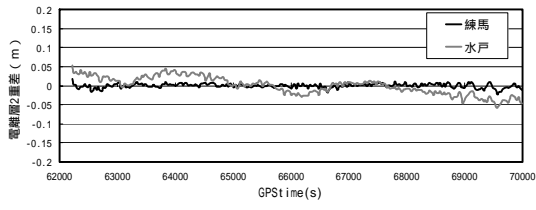
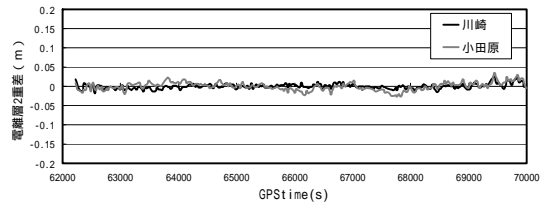
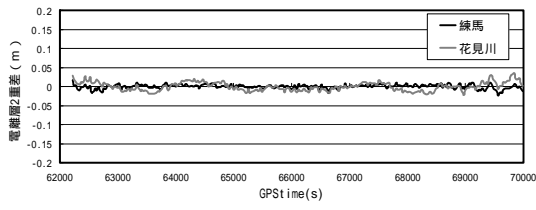
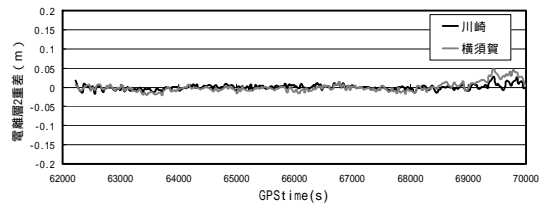
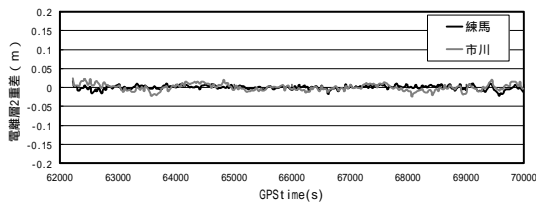
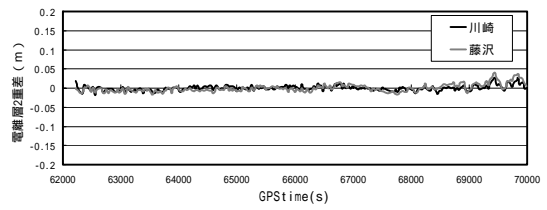
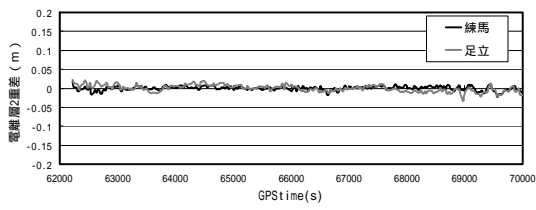


図 C-3 : 9 番衛星の電離層2重位相差(基準局 世田谷、基準衛星 29)

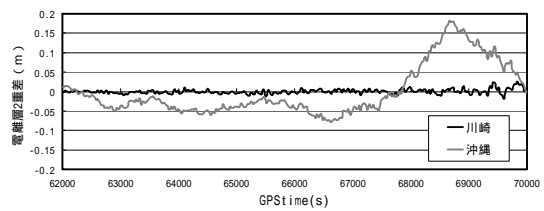
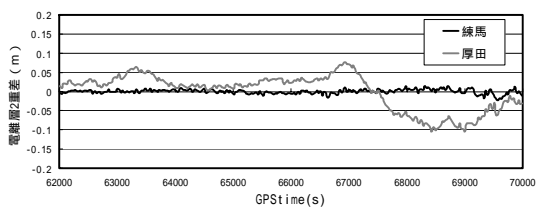
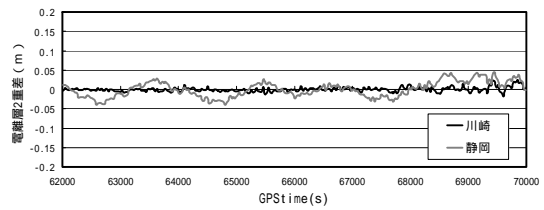
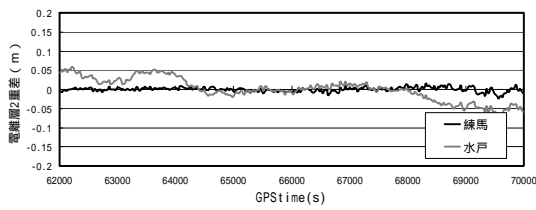
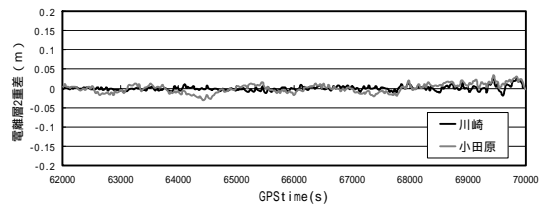
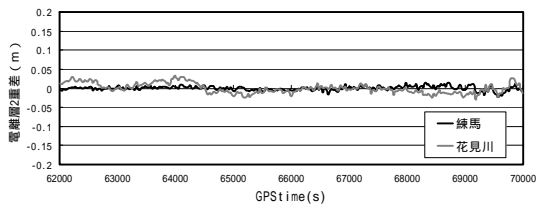
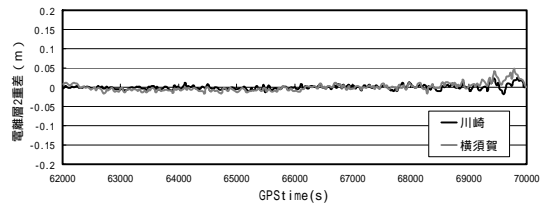
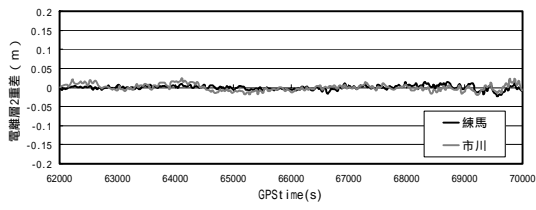
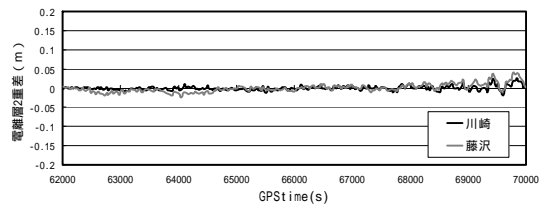
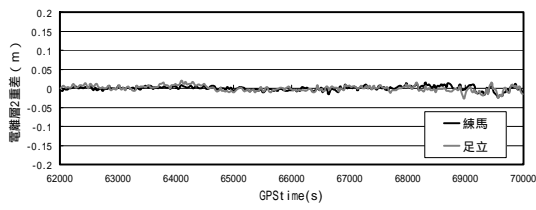


図 C-3 : 26 番衛星の電離層 2 重位相差 (基準局 世田谷、基準衛星 29)

付録D 対流圏2重位相差測定の結果

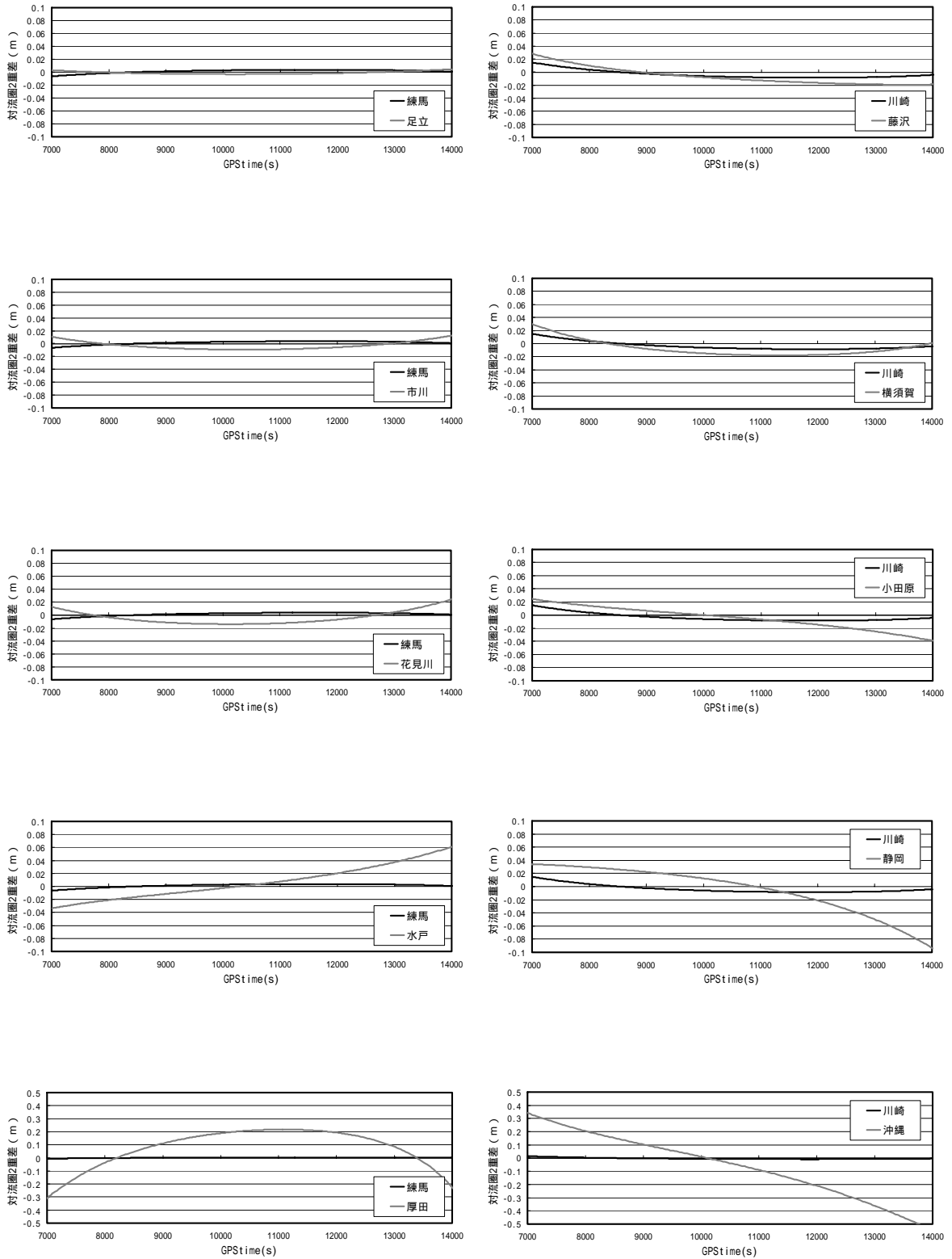


図 D-1: 1番衛星の対流圏2重位相差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

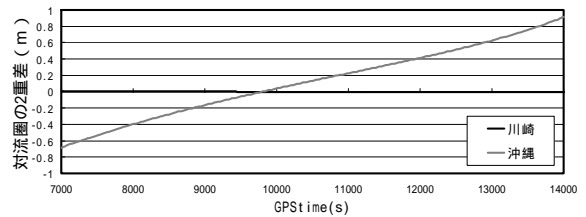
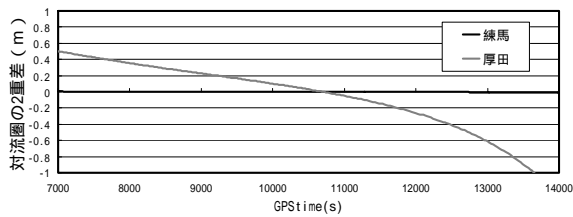
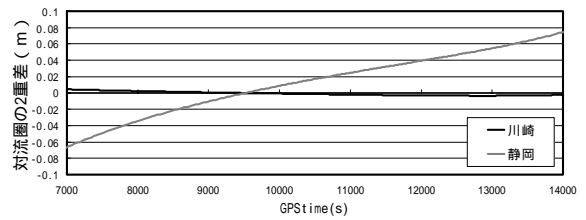
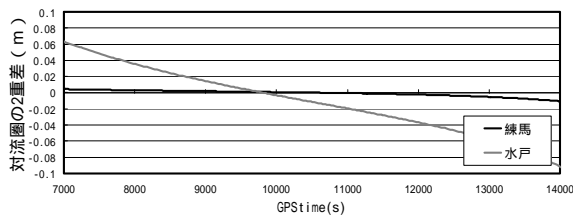
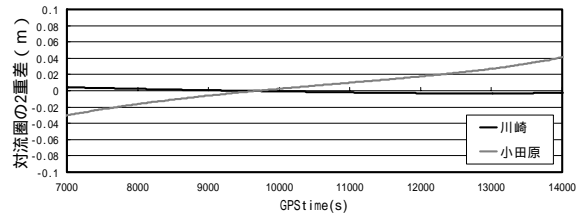
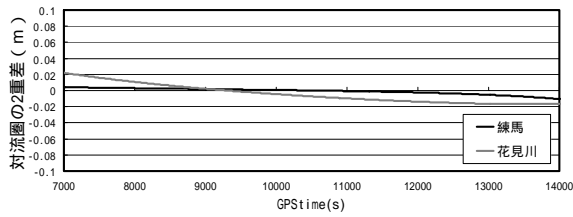
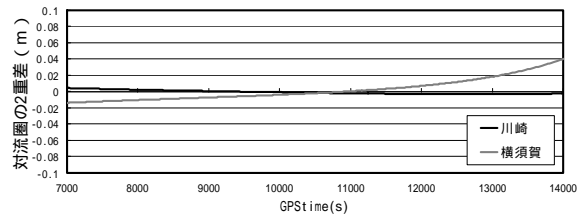
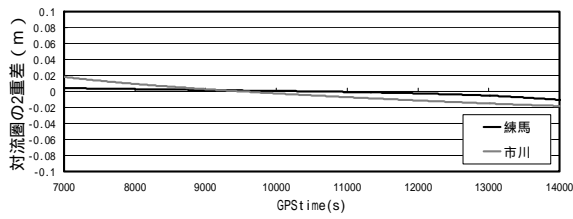
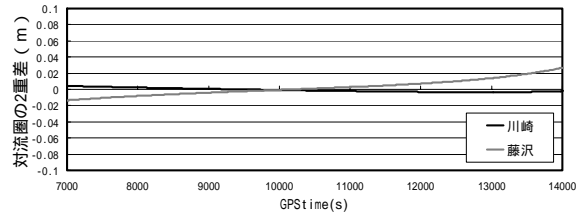
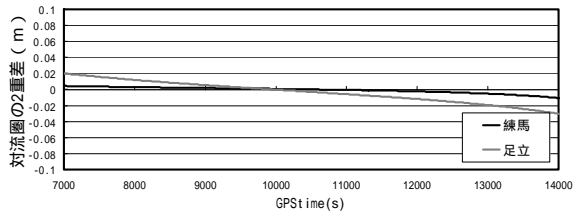


図 D-2 : 2 番衛星の対流圏2重位相差(基準局 世田谷、基準衛星 25)

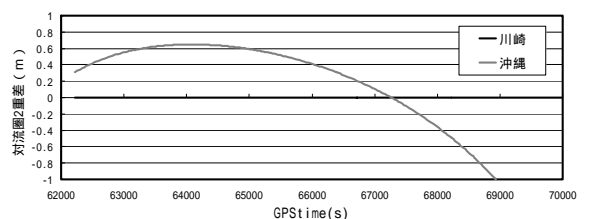
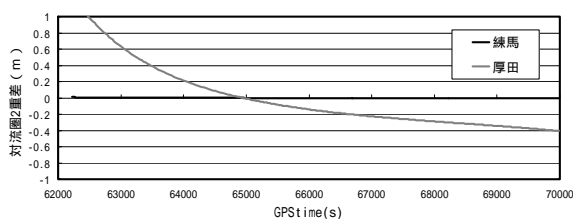
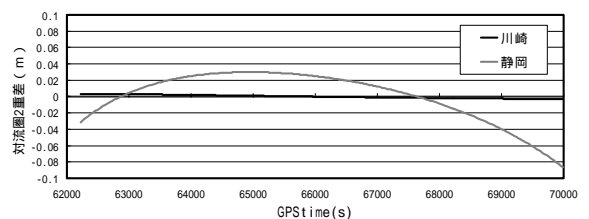
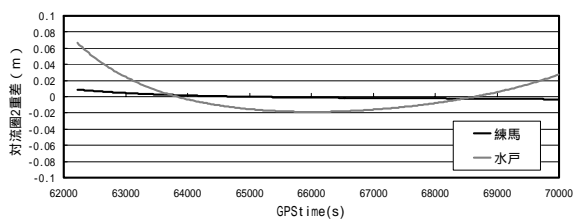
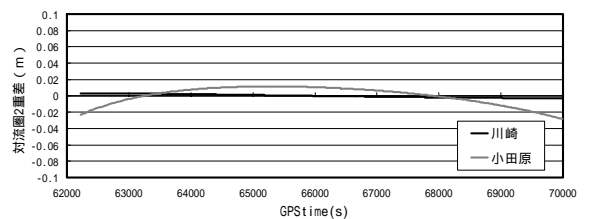
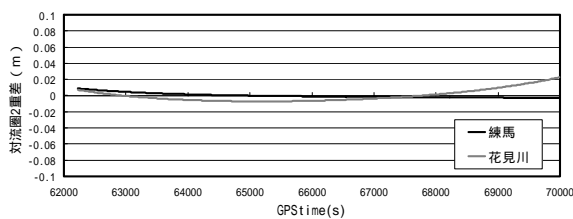
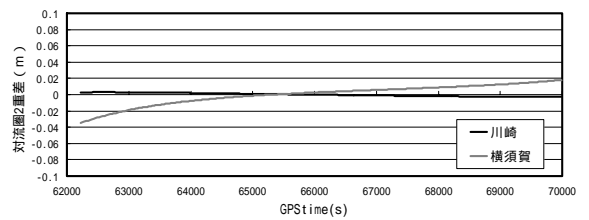
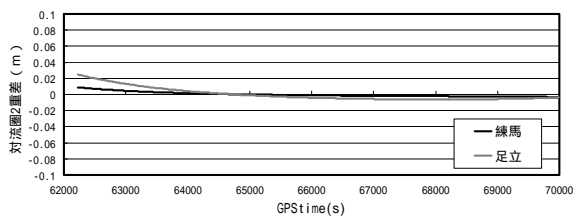
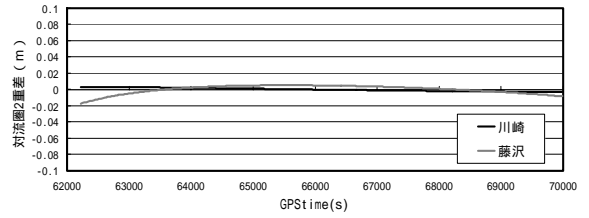
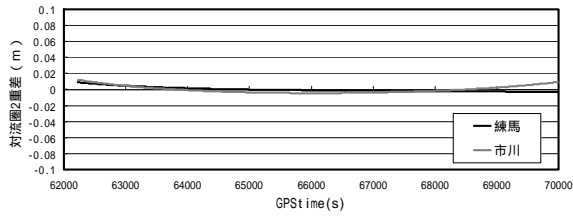


図 D-3 : 9 番衛星の対流圏2重位相差 (基準局 世田谷、基準衛星 29)

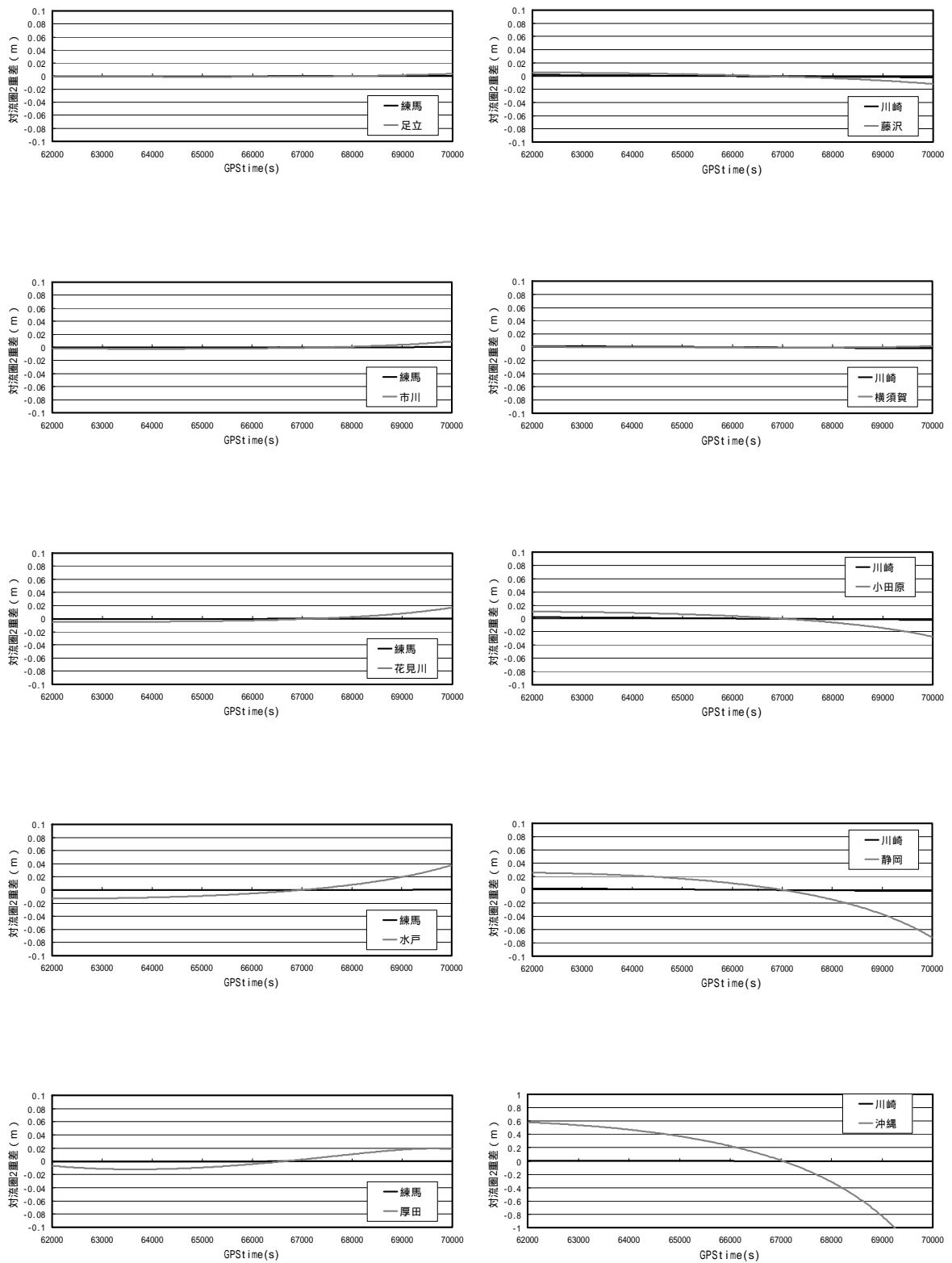


図 D-4 : 26 番衛星の対流圏2重位相差 (基準局 世田谷、基準衛星 29)