

## 1. 技術開発の方針と計画

### 1.1. 本プロジェクトの目的

本プロジェクトは、測量分野で普及している低コストな一周波 GPS 受信機を用いる利用者を対象に、国内全域において 10 分程度の観測から準リアルタイムに水平測位精度数 cm の測量を実現する、準天頂衛星の放送機能を利用した放送方式によるネットワーク型 RTK-GPS 測位方式を開発することを目的とする。

### 1.2. 全体スキーム

#### 1.2.1. 実施方針

本プロジェクトでは、一周波 GPS 受信機利用者を対象に準天頂衛星の放送機能を用いた高精度な測量方式の開発を目的としているため、全国の電子基準点データを用いたネットワーク型 RTK-GPS 測量方式により、様々な誤差要因を補正して十分な精度を確保する技術を開発する必要がある。既存のネットワーク型 RTK-GPS 測量方式には、双方向通信を必要とする VRS 方式や、二周波 GPS 受信機が必要な FKP 方式がある。しかし、本プロジェクトで考えている一周波 GPS 受信機を利用した放送方式によるネットワーク型 RTK-GPS 測位方式には、そのままでは適用できない。そのため、これら既存のネットワーク型 RTK-GPS 測量方式を参照しつつ基礎技術から開発を行い、実際の測量による検証を通じて実用可能なシステムとして技術を完成させる必要がある。そこで、開発工程を次の 3 つのフェーズに分けて実施する。

フェーズ 1 電子基準点データを用いた高精度測位補正情報の生成・配信に関する基礎技術の設計

フェーズ 2 補正情報生成・配信装置および受信・測位装置のプロトタイプ製作

フェーズ 3 補正情報生成・配信装置および受信・測位装置の完成と実証実験による確認・検証

第 1 フェーズでは、高精度測位を実現するために必要な補正情報とその生成・配信アルゴリズムを開発し、電子基準点データをオフラインで使用して精度検証を行う。第 2 フェーズでは、補正情報をリアルタイムに配信・適用するためのアルゴリズムの改良および補正情報配信フォーマットの詳細設計を行う。また、設計をもとにプロトタイプシステムを作成し、測位実験によりアルゴリズムの妥当性を検証する。第 3 フェーズでは、第 2 フェーズまでの検討結果をもとにシステムの改良と調整を最終化し、要件を満たし、実使用に耐えうるシステムを完成させる。さらに、リアルタイム測位実証実験を行い、完成したシステムが要求される性能を満たしていることを確認・検証する。

以上の工程は、手法の構築からシステムの完成まで開発すべき要素が多く、高度な技術を必要とするため、各フェーズに 1 年をかけ、合計 3 年間の実施により目標を達成することとする。また、システムの開発を効率的に進めるため、GPS データ解析の基本部

分に関しては既存の GPS 解析ソフトウェアを基盤として用い、それだけでは不十分な部分について、改良や新たな開発を行い、全体のシステムを構築することとする。

なお、準天頂衛星を利用した補正情報の配信には、基本的に準天頂衛星の L 帯実験用信号 (LEX, 伝送速度 2kbps) を用いることを前提とする。この方式を「L 帯補正方式」と記述する。また、本プロジェクトでは、準天頂衛星計画において当初搭載が検討されていた S 帯信号の放送機能に相当する伝送速度(1Mbps)を用いた配信方法についても、高精度測位補正方式の基礎技術として併せて検討する。これは、補正情報の配信がその他の通信手段へも応用可能であり、将来の測量の効率化方式として発展の可能性を有するためである。この方式を「S 帯補正方式」と記述する。

## 1.2.2. 概念設計

日本全国を対象に一周波 GPS 受信機を用いて高精度な測量を実現するためには、GPS 観測における誤差を精度よく補正する GPS 補強技術が必要である。既存の GPS 補強技術には、電子基準点などを利用した GPS 固定観測網のデータを用いて誤差を推定・補正するネットワーク型 RTK-GPS 測量手法がある。GPS による高精度な測位方式には、大きく分けて、二重位相差データを用いて参照基準点と測位点の間で相対測位を行う干渉測位法と、参照基準点を用いない精密単独測位法 (Precise Point Positioning: PPP) がある。後者は参照基準点が不要であるという利点を持つが、一周波 GPS 受信機の観測で搬送波位相データの波数不確定 (以下、アンビギュイティ) を解くのは困難であるため、本プロジェクトには用いず、干渉測位法に基づいて開発を行う。

配信する情報には、基線解析における主要な誤差要因である GPS 衛星の軌道と時計、GPS 測位信号の伝播経路上の電離層と対流圏による伝播遅延に対する補正に適用可能な情報や、干渉測位法による基線解析に必要な基準点の観測情報 (参照基準点観測情報) を含むものとする。その場合、限られた伝送容量の中で全ての電子基準点データを参照基準点観測情報として配信することはできないため、配信情報の容量制限と測量精度の確保の観点から全国を適切な個数の部分領域に分割し、参照基準点は領域ごとにその中央付近に一点ずつに限定する。このとき、領域の端にある測位点については参照基準点からの距離が長くなるため、各補正情報には長基線でも安定した精度で基線解析ができる精度を確保する必要がある。そのため、補正情報の生成にあたっては精度の高い解析およびモデル化を行う。

日本では全国を約 20km 間隔でカバーする電子基準点網のデータがリアルタイムで収集されており、これらの情報は、とくに日本上空における対流圏遅延量および電離層遅延量の時空間的な変化をリアルタイムに捉えるのに適している。そのため、電子基準点のリアルタイムデータを用いてこれらの補正情報を生成するものとする。

本プロジェクトにおいて準天頂衛星による補正情報の配信に用いることができるのは、LEX 信号であり、その伝送速度は 2kbps (そのうち補正情報に用いることができるのは

1,695bps) と非常に小さく、また、双方向通信ができないという制約がある。そのため、本プロジェクトにおいては、補正情報の量をこの伝送速度内に収めるために、更新頻度の調整を行うとともに、一方向通信による放送型の配信手法を実現する設計が前提となる。

LEX 信号は、2kbits のパケット単位で 1 秒ごとにデータを送信するという仕様となっている。したがって、L 帯補正方式においては、生成した各種補正情報をこのパケット構造に適合するように調整して送り出す仕組みを構築する。その際、日本全国を対象とした補正情報を適切な領域に分割して送信する。ここで分割した補正情報は、通信において生じるパケットロスによって、測位している領域と異なる領域の補正情報が欠けても、測位には支障が生じないようなデータ構造とする。

以下に、各補正情報および、その放送方式への適合について、やや詳細な概念設計を記述する。

#### 1.2.2.1. 参照基準点観測情報

干渉測位方式の基線解析における参照基準点での観測情報として、電子基準点データを配信する。その際問題となるのは、全国での測量を実現するために必要となる参照基準点の数と、その観測データの更新頻度である。全ての電子基準点のデータを送信することはできないので、全国を数カ所から十数カ所程度の領域に分割し、領域ごとの参照基準点としてその中央付近の電子基準点 1 点に絞り込む。このとき、領域を大きくとると、領域の個数が少なくなることによって参照基準点の数も少なくなる。その結果、補正情報全体としてのデータ量が小さくなる。その代わりに、領域の端付近にある観測点と参照基準点との間の距離が長くなるため、測位精度の確保にとっては不利な条件となる。更新頻度についても、データ量を減らすために低くすれば、干渉測位に用いられるデータ数が減ってしまい、測位精度が低下したり、観測に要する時間が長くなったりする。したがって、測位精度と伝送速度の許す範囲で、領域のサイズとデータの更新頻度をなるべく小さく取る。

#### 1.2.2.2. 衛星軌道・時計補正情報

リアルタイム測位に利用可能性のある、公開されている衛星軌道・時計情報には、放送暦と IGS が提供する超速報暦の 2 種類がある。ここで IGS とは International GNSS Service (国際 GNSS 事業) の略称で、GPS など測位衛星の固定観測網の運用や解析を通じて、測位衛星の軌道情報や地球回転パラメータなどを計算し、インターネットで公開している国際ボランティア組織である。放送暦は GPS 衛星から放送されるものでありどこでも取得可能であるが、軌道精度が 160cm と低い。一方、IGS 精密暦のうち超速報暦 (以下、IGU 暦) は、15 分間隔で衛星の座標値を提供しており、速報部分と予報部分で構成されている。予報部分の軌道精度は約 10cm と報告されており、地表での 100km

基線の測定における伝播誤差は 0.5mm と見積もられる。衛星時計の精度は、放送暦が 7 nsec であるのに対し、IGU 暦は 5 nsec である。干渉測位方式では二重位相差により衛星時計の誤差は相殺されるが、補正情報の生成において用いる必要があり、また、他の補正方式での利用の余地を考慮して、補正情報としての配信を検討する。

衛星軌道・時計補正情報については、上記の品質を考慮し、IGU 暦をベースにした補正情報の生成を基本として、適切な衛星数、配信フォーマットおよび更新頻度を検討し開発を行う。

#### 1.2.2.3. 対流圏遅延補正情報

GPS 衛星と測位点との間の測位信号の伝播経路に起因する誤差要因の一つとして、対流圏による伝播遅延が考えられる。対流圏遅延は、一般に、静水圧遅延と湿潤遅延に分けて考えられている。このうち、静水圧遅延量は先験的モデルから十分な品質で算出できるが、湿潤遅延量は、高精度補正技術において、別途、推定しなければならない。そこで、対流圏遅延補正情報としては、時間的に変化する湿潤遅延量のみを送信することを検討し、その空間間隔や配信フォーマットおよび更新頻度を考慮して設計する。また、測位点と参照基準点の場所と時刻において対流圏遅延補正を適用するためには、電子基準点において推定された対流圏遅延量をもとに何らかの手法で時間・空間内挿する必要がある。そのための手法として、最適な内挿モデル（または手法）を検討し開発を行う。

#### 1.2.2.4. 電離層遅延補正情報

伝播経路に起因する誤差要因としては、対流圏に加え、電離層による伝播遅延がある。電離層遅延量は二周波 GPS 受信機では搬送波の線形結合によって推定することができるが、一周波 GPS 観測においては観測データの組み合わせによる補正が不可能であるため、別途補正情報として推定し、配信する必要がある。二重位相差に対する電離層遅延誤差は、電子基準点の二周波データを用いて推定することができるが、これを測位点と参照基準点の場所と時刻において電離層遅延補正值として適用するためには、電子基準点において推定された電離層遅延量をもとに何らかの手法で時間・空間内挿する必要がある。そのため、内挿に適したモデルを検討し開発するとともに、必要な精度を確保するために必要な空間密度と更新頻度を見積もる。

#### 1.2.2.5. 放送方式に適合した補正情報

準天頂衛星による配信に用いる LEX 信号では、伝送速度の低さと双方向通信ができないという制約がある。そのため、本プロジェクトにおいては、L 帯補正方式での補正情報の量をこの容量内に収めるとともに、放送型の配信手法を実現する設計が前提となる。必要な精度を確保しつつ、補正情報の量がこの制限内に収まるように、補正情報の表現方法や更新頻度を調整する。この場合、同じ表現方法を S 帯補正方式にも用いられるよ

うに、補正情報の構造には柔軟性をもたせる。ただし、S 帯補正方式の伝送速度は 1Mbps 以下を想定する。

LEX 信号は 1 秒ごとに 1,695bits の補正情報を含むパケットとして送信されるため、L 帯補正方式においては、この伝送方法に補正情報を適応させたパケット化を行うとともに、無線通信と同様に、通信エラーに強いフォーマットを検討し、開発を行う。

### 1.2.3. 開発要件

本プロジェクトにあたっては、前項に示した補正情報をリアルタイムに生成・配信し、測位することを考えなければならない。そこで、以下の開発要件を設定した。

- ①電子基準点のリアルタイムデータを利用すること。
- ②準リアルタイムでの基線解析に適用できる補正情報を生成・配信すること。
- ③補正情報として必要なものを精査し、S 帯補正方式、L 帯補正方式共通のフォーマットとし、伝送速度を考慮した更新頻度を決定すること。L 帯補正方式の場合は補正情報の伝送速度を 1,695bps 以内に収めること。
- ④電離層遅延と対流圏遅延については、それぞれの時・空間変化の特性を考慮した補正情報モデルを生成し、適用すること。
- ⑤補正情報を適用した結果、水平精度数 cm 以内の測位精度を達成すること。
- ⑥10 分程度の観測時間で測位精度を満たすシステムとすること。
- ⑦通信エラーに強い配信フォーマットとすること。

#### 1.2.4. 達成目標および評価方法・想定成果

各年度において、達成目標と想定される成果、その評価方法について以下のように設定する。

表 1-1 フェーズ1における達成目標、想定成果と評価方法

フェーズ1	達成目標	想定成果	評価方法
補正情報の生成	電子基準点データをもとにして、日本全国を対象としたネットワーク型 RTK-GPS 測位方式に適用可能な高精度測位補正情報を生成するための技術の調査・設計、アルゴリズムの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・衛星時計推定アルゴリズム</li> <li>・対流圏遅延推定アルゴリズム</li> <li>・電離層遅延推定アルゴリズム</li> </ul>	電子基準点のオフラインデータを使用し、それぞれのアルゴリズムを適用して補正情報を生成する。それらを用いて測位解析を行い、目標水平精度2cm が達成できることを確認する。ただし、測位解析に使用する測位側データには、補正情報を生成する際に使用した電子基準点データ以外のものを利用し、一周波データのみ使用する。
	電子基準点データをもとにして全国の電離層総電子数(TEC)分布をリアルタイムに推定し、モデル化するアルゴリズムの開発	・電離層総電子数リアルタイム推定ソフトウェア	電子基準点のオフラインデータを使用して求めた電離層モデルを適用して一周波解析を行い、二周波解析と比較して誤差の範囲で一致することを確認する。ただし、測位解析に使用するデータには、補正情報を生成する際に使用した電子基準点データ以外のものを利用する。
	準天頂衛星の放送機能を利用した補正情報の配信を想定し、補正情報の選択法(構造や書式)や容量を算出し、設計	・補正情報の構造と書式、容量の制限を満たした補正情報の選択手法	衛星の放送機能として想定される方式におけるデータ転送速度を下回ることを確認する。すべての情報を合わせて1Mbps以下とする。
配信および受信	準天頂衛星の放送機能についての調査	・想定される放送方式の整理	なし

表 1-2 フェーズ2における達成目標、想定成果と評価方法

フェーズ2	達成目標	想定成果	評価方法
補正情報の生成	フェーズ1で調査・設計、開発したアルゴリズムをもとに、リアルタイムデータを使用してリアルタイム処理が可能なプロトタイプ(ハードウェア含む)の構築	・高精度測位補正情報生成プロトタイプソフトウェアおよび装置	電子基準点のリアルタイムデータを使用して補正情報の生成をリアルタイムで実施する。地上回線を使用し測位側に配信し、一周波 RTK-GPS 測位を行い、測位誤差が標準偏差 2 cm 以下(水平成分)が達成できることを確認する。
	LEX 信号の仕様に基づく L 帯補正方式でのデータ配信に対応したアルゴリズムの開発	同上	同上
配信および受信	準天頂衛星の放送機能について調査を行い、配信および受信の構成を再検討。併せて、既存地上回線を使用して準天頂衛星の伝送遅延を模擬できる配信および受信ソフトウェアの構築	・フェーズ3で製作する静止通信衛星に適用可能な配信および受信システムと同じ外部インターフェースを具備した、配信ソフトウェアと受信ソフトウェア	準天頂衛星を経由して補正情報を伝送する際に生じる遅延を模擬できることを確認する。
	LEX 信号の仕様に基づく L 帯補正方式での伝送速度を満たすフォーマットの開発	同上	2Kbps の伝送速度を超えないように調整し、すべての補正情報が配信・受信できることを確認する。
測位	一周波 GPS 受信機を使用した補正情報を利用して一周波 RTK-GPS 測位のできるプロトタイプ補正情報受信・測位装置の構築(S 帯・L 帯補正方式共通)	・補正情報受信・測位装置のプロトタイプ	測位位置に対応した補正情報を選別使用し、様々な観測条件を考慮して代表的な領域を選定して実証実験を行い、測位精度の要件を満たすことを確認する。

表 1-3 フェーズ3達成目標および想定成果・評価方法

フェーズ3	達成目標	想定成果	評価方法
補正情報の生成	フェーズ2で開発したプロトタイプをもとに実使用に耐えうる補正情報生成・配信装置の構築 (S 帯・L 帯補正方式共通)	・高精度測位補正情報生成ソフトウェアとその装置	電子基準点のリアルタイムデータを使用して補正情報の生成をリアルタイムで実施する。静止通信衛星を經由して補正情報受信・測位装置で、一周波 RTK-GPS 測位を行い、目標水平精度 2cm が達成できることを確認する。
配信および受信	準天頂衛星の放送方式を用いた補正情報生成・配信および受信・測位装置の構築 (S 帯・L 帯補正方式共通)	・静止通信衛星に適用できる補正情報配信および受信装置	準天頂衛星の LEX 信号の packets 仕様に適合させ、また伝送遅延を模擬して補正情報の配信および受信が可能であることを確認する。
測位	測量用一周波 GPS 受信機を使用した新しい補正情報を利用して実使用に耐えうる補正情報受信・測位装置 (S 帯・L 帯補正方式共通) バイアス誤決定による解を確実に除外できる精度管理手法の確立	・実使用に耐えうる測位ソフトウェアとその装置	測位点位置に対応した補正情報を選別使用し、様々な観測条件を考慮して代表的な領域を選定し、実証実験を行い、測位精度の要件を満たすことを確認する。 バイアスの誤決定検出・除去手法および精度管理手法を開発し、それらが正しく機能していることを確認する。



## 2. 高精度測位補正情報の生成・配信に関する基礎技術の調査・設計

本章は、フェーズ1で行われた工程について概括したものである。そこでは、高精度測位補正情報の生成および配信に関する基礎技術の調査、その結果にもとづいたアルゴリズムの設計、電子基準点のオフラインデータを使用した後処理解析による L1 一周波測位の設計の妥当性の検証が行われた。

### 2.1. 調査・設計の方針

「1.2.2. 概念設計」に記載したとおり、本技術開発においては、一周波 GPS 受信機を用いた 10 分間程度の観測における基線解析で数 cm の測位精度を実現するために、電子基準点データをもとに補正情報を生成し、これを適用して電子基準点を参照点とした干渉測位を用いる。これを前提とした技術を実現するにあたり、干渉測位法による測位技術にとって必要なアンビギュイティ解決の効果を確認し、各種補正情報に必要となる品質等を調査し、その結果に基づいて、補正情報を生成するためのアルゴリズムを設計する。

#### 2.1.1. 補正情報の必要性和精度に関する事前調査の方針

一般に、干渉測位法によるリアルタイム測位では、搬送波位相のアンビギュイティの解決が必要とされる。しかし、本技術開発において想定している 10 分程度のセッション長でセンチメートル級の精度を実現する場合に対しても、アンビギュイティ解決が必須であるかどうかは必ずしも自明ではない。そこで、10 分程度のセッションにおけるアンビギュイティ解決の効果を評価し、その必要性を確認する。

また、目標とする測位精度を達成するために、用いられるべき補正情報に求められる精度を評価する。

#### 2.1.2. 参照基準点観測情報の調査・設計の方針

本技術開発では、電子基準点を参照基準点として用いた干渉測位を実現するため、電子基準点の観測データを参照基準点観測情報として配信する必要がある。現在利用されている GPS リアルタイムデータの標準フォーマットを参考にしながら、配信する参照基準点データの内容と形式について、本技術開発に適した方式を設計する。また、電子基準点のオフラインデータから抽出した L1 搬送波位相データと擬似距離データを L1 一周波測位に適用して測位精度を評価・判定することにより、参照基準点として配信する電子基準点の数や更新頻度についても検討を行い、最適な条件を設計する。

#### 2.1.3. 衛星軌道・時計補正情報の調査・設計の方針

衛星軌道の誤差の影響は、基線長に比例して大きくなる。本技術開発で想定する補正

方式では基線長が最大数 100km になるため、衛星軌道誤差を考慮する必要がある。そこで、リアルタイム解析に利用可能な比較的精度の高い軌道情報として、IGU 暦（予報部分）に焦点をあて、本技術開発の目標精度の達成に十分な精度を持つかどうかの検証を行ったうえで、その採否を判断する。また、衛星時計の誤差は、二重位相差をとることによってほぼ相殺されるため、干渉測位法では補正の必要はないが、対流圏遅延補正量の推定を精密単独測位法（PPP）で行う場合には、衛星軌道情報とともに必要な情報であるため、必要となる精度で算出する必要がある。また、これを配信することにより、測位側における解の評価や他の測位方式での利用の余地も生まれる。PPP に使用する衛星時計情報は衛星軌道と整合している必要があるため、既存の衛星時計情報や独自に推定した場合の結果を比較し、用いるべき衛星時計情報を選定する。

#### 2.1.4. 対流圏遅延補正情報の調査・設計の方針

対流圏遅延量の推定手法として、計算負荷の小さな PPP を候補とし、電子基準点データを用いた対流圏遅延推定結果の精度を評価することにより、PPP の利用の妥当性を検証する。また、補正情報の配信方式において、静水圧遅延と湿潤遅延のそれぞれの扱い、および、測位点での補正情報の適用方法についても検討の上決定する。

#### 2.1.5. 電離層遅延補正情報の調査・設計の方針

電離層遅延は、地上約 50~1000km の電離層中を電波が通過する際に、電子密度に比例し、周波数の二乗に反比例する量だけ電波の速度が遅れる現象である。また、電離層遅延は、太陽活動の長期的な変化に合わせて 11 年周期で変動するとともに、短期的にも時間的・空間的に大きく変化する。電波の伝播経路上における電離層遅延量は、電波の周波数により差が生じるため、二周波の電波を使うことにより推定することができる。ここでは、まず、配信方式として適した補正情報の表現方法や空間密度・更新頻度を検討し、設計を行う。次に、電子基準点の二周波観測データを用い電離層遅延推定を行い、これを適用した場合としない場合について測位結果を比較することにより、その補正効果を検証する。

#### 2.1.6. 絶対電離層モデルの調査・設計の方針

干渉測位では、電離層遅延のバイアスは二重位相差を取ることによって相殺されるので、相対値の精度のみが重要である。しかし、電離層モデルの設計において、まず、その状態を正しく把握するためには、推定される電離層遅延量のバイアスの変動は小さいことが望ましい。そこで、一部の電子基準点のデータを用いて電離層モデルを作成し、モデル推定に用いていない電子基準点のデータから推定された電離層遅延量と比較することにより、モデル推定された電離層遅延量の絶対値の整合性を評価する。

## 2.2. 調査・設計の内容および成果

### 2.2.1. 補正情報の必要性と精度に関する事前調査の結果

アンビギュイティ決定の効果を評価するため、電子基準点のデータから一周波 GPS 観測データのみを使用し、アンビギュイティ決定を行った場合と行わない場合の2つのケースについて、10分のセッション長で干渉測位を行い、結果を比較した。評価には、電子基準点 970841-92107 (3.8km) 基線を用いた。ここで比較的短い基線を選んだのは、電離層遅延や対流圏遅延量によるノイズの影響を避け、アンビギュイティ決定の効果のみを評価するためである。

図 2-1 に、1日分の一周波観測データを10分ずつのセッションで基線解析した結果の座標時系列を示す。縦軸は、二周波 GPS 受信機を使った静止測量で得られた座標値からの差 (m) を示し、赤が南北成分、緑が東西成分、青が上下成分である。左図は L1 搬送波位相アンビギュイティを整数として解決しない場合の測位結果 (フロート解)、右図は解決した場合の測位結果 (フィックス解) である。フロート解の場合は、水平成分のばらつきが 10cm を超えており、数 cm レベルの基線解析が不可能であることがわかる。一方、フィックス解の水平成分のばらつきは、一部の例外を除き概ね 2cm 以内の範囲に収まっている。これらの結果から、測位精度への要求を満たすためには、搬送波位相アンビギュイティの整数化が不可欠であり、それを可能とする精度を有する補正情報が必要であることが確認された。

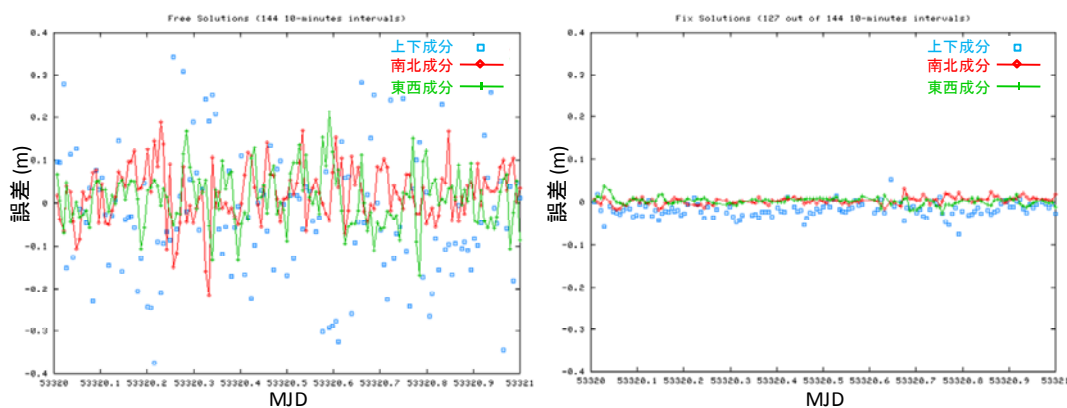


図 2-1 約 4km の基線における搬送波位相アンビギュイティ決定する・しないによる測位誤差

図 2-2 は、同一の観測点を2つの基線端点と見なして解析を行うゼロベースラインにおいて、一方の端点の対流圏湿潤遅延量の設定をデフォルト値とし、もう一方を意図的に 5mm ずつ増やした設定で解析を行うことにより、基線解に与える対流圏遅延の誤差の影響をシミュレートした結果を示したものである。横軸は与えた対流圏湿潤遅延量の増分(すなわち対流圏遅延量の誤差(mm))、縦軸が真位置からの測位解の水平距離について、95セッションの平均値 (2D 誤差平均;単位 mm)および平均値のまわりの差の標準偏差で

ある。図より、対流圏遅延量の誤差が 5cm を超えると、これだけで基線解の水平成分の誤差が目標精度の 2cm を超えてしまうことがわかる。測位における誤差要因は対流圏遅延のみではないので、対流圏遅延補正情報に要求される精度としては、5cm よりも十分に小さな値としなければならない。ここでは、5cm の半分である 2.5cm を目標精度として設定することとする。

電離層遅延については、推定される遅延量そのものの精度評価が難しいため、L1 一周波測位に推定した電離層遅延量を適用した場合に、アンビギュイティが解決できることを評価基準とする。

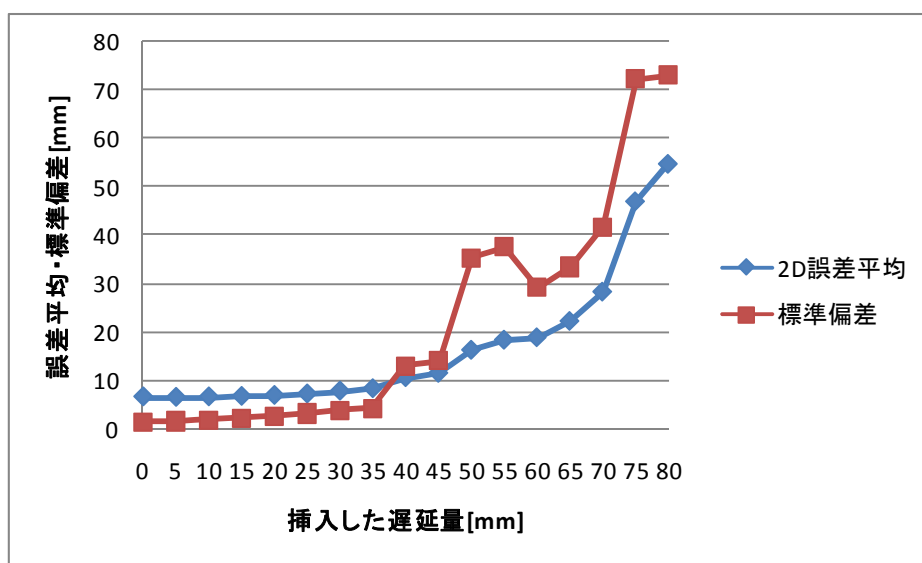


図 2-2 遅延量を変化させたシミュレーションによる誤差の水平成分の平均と標準偏差

### 2.2.2. 参照基準点観測情報の調査・設計の結果

測位では一周波受信機を用いた観測を想定しているため、参照基準点観測情報として、電子基準点で観測された二周波観測情報から、L1 一周波の搬送波位相データと擬似距離データを抽出して配信することとした。参照基準点観測情報を配信する電子基準点の点数を必要最小限とするため、後述する、電離層遅延補正情報の生成に用いられる領域ごとに 1 つの電子基準点の情報を配信することとした。また、配信形式に関しては、多くの測量用 GPS 受信機が出力可能なフォーマットとして、RTK-GPS 測位で一般的に使用されている RTCM 3.0 を参考に、これに準拠した形式で観測量を表現することとする。

### 2.2.3. 衛星軌道・時計補正情報の調査・設計の結果

本技術開発で採用する衛星軌道・時計補正情報の候補として IGU 暦を想定し、対流圏遅延補正情報、電離層遅延補正情報の生成および L1 一周波測位に適用した結果から補正情報として配信することが適切であるかを検証した。

表 2-1 に、IGS のホームページ(<http://igsb.jpl.nasa.gov/>)に記載されている、最終暦と超速報暦および随時提供される放送暦の品質を転載する。これによると、IGU 暦の予報値の誤差は 10cm のオーダーであり、IGS 最終暦の 2 倍程度であるものの、放送暦よりも 1 桁以上高い。大まかな経験則では、衛星軌道誤差による測位誤差は基線長に比例し、その比は衛星軌道のスケール（軌道半径 26000km）に対する上空位置誤差の比と同程度であるといわれている。したがって、上空位置で 10cm の誤差は、そのスケールに対して数 ppb のオーダーなので、本技術開発で想定される数 100km の基線に対しては、数 mm から 1cm 程度の誤差が見込まれる。

表 2-1 最終暦と IGS 超速報暦および放送暦の品質

種類		最終暦(IGS)	超速報暦(IGU)		放送暦
決定／予報		決定値	決定値	予報値	予報値
時間遅れ		13 日	3 時間	即時	随時
提供頻度		1 週間ごと	6 時間ごと		随時
時間 間隔	軌道	15 分	15 分		随時
	時計	5 分	15 分		随時
精度 (公称)	軌道	<5cm	<5cm	~10cm	160cm
	時計	~0.1ns(3cm)	0.2ns	~5ns (150cm)	7ns (2m 以上)

一方、予測の難しい IGU 暦の衛星時計精度の予報値の公称精度は、最終暦のそれよりも 50 倍程度悪い。IGS 最終暦と IGU 暦（予報値）で示される衛星時計の動きを図 2-3 に、両者の差を図 2-4 に例示する。横軸が時間（全体で 2 日）、縦軸がそれぞれの衛星時計のオフセット量（マイクロ秒）またはその差（ナノ秒）を示している。図 2-3 において、赤線で示される IGS 最終暦では衛星時計オフセット値がその揺らぎを連続的に捕らえているのに対し、緑線で示される IGU 暦（予報値）では衛星時計オフセット値に 6 時間ごとの暦の更新にともなう不連続がみられる。これは、過去の予報値と最新の予報値との間の差であり、その大きさが衛星によっては 10nsec(距離にすると 3m)程度にも上ることを示している。したがって、IGU 暦の時計を、PPP による対流圏遅延量の推定に用いることはできない。

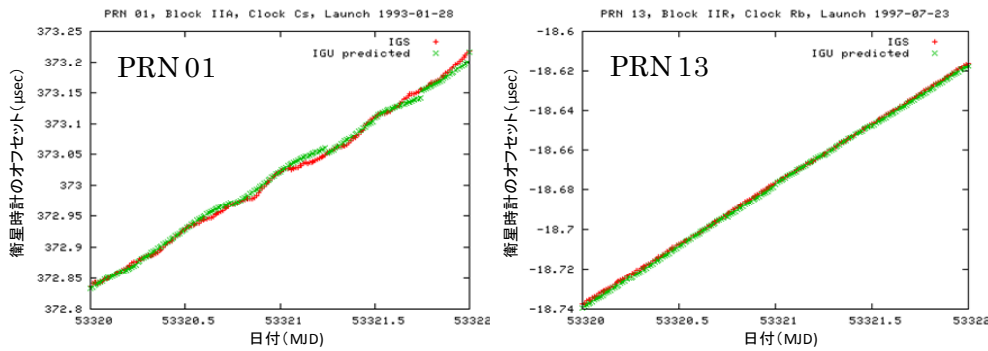


図 2-3 IGS の最終暦および IGU 暦 (予報値) における衛星時計のオフセット量 (PRN#01 と #13)

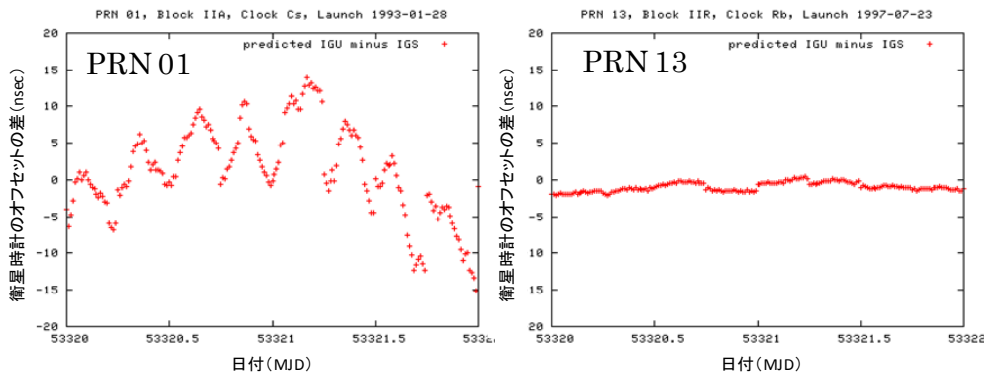


図 2-4 衛星時計のオフセット値の差:IGU 暦 (予報値)-IGS 最終暦 (PRN#01 と #13)

以上の検討結果から、精度の高い衛星時計を独自に推定することが必要なことが明らかである。そのために、電子基準点データを使用して衛星時計誤差をリアルタイムに推定する、以下のような方法を考案した。日本全国で受信できる全ての衛星を対象とするため、全国をカバーする 25 点前後の電子基準点を選び、衛星軌道と電子基準点の座標を既知として固定し、衛星時計誤差と受信機時計誤差を推定する。このとき、対流圏遅延も同時推定する。また、受信機時計は、単独測位法によって得られた値を初期値とし、その残差の平均が 0 となるように拘束する。

このようにして推定された衛星時計を用いて PPP で推定された対流圏天頂遅延量 (ZTD) の時系列と、その他の時計情報を用いた推定結果との比較例を図 2-5 に示す。図の横軸は修正ユリウス通算日 (MJD)、縦軸は天頂遅延量 (単位は m) である。赤は IGS 最終暦の軌道と時計、緑は IGU 暦 (予報値) の軌道と上記の方法で推定された時計、青は IGU 暦の軌道と時計、紫は IGU 暦 (予報値) の軌道と時計から衛星時計の結果が安定していない衛星 PRN17 を除いて推定した結果を表している。評価期間は 2004 年 11 月 11 日~13 日 (MJD 53320~53322) である。最も精度が高いと考えられる IGS 最終暦

による結果(赤)を基準とすると、IGU 暦の軌道と時計を使用した結果(青)は MJD 53320.5～53321 の時間帯で 10cm 程度の大きな乖離がみられる。紫で示す 17 番衛星を除いた結果は最終暦による結果に近づくが、このような不安定性をリアルタイムに予測するのは難しい。一方、独自に推定した衛星時計を用いた結果は、IGS 暦による結果からの乖離が 2～3cm 程度に収まっている。したがって、リアルタイムでの衛星時計補正情報の生成には、上記の方法による独自の推定が妥当であることが確認された。

なお、衛星軌道および衛星時計の補正情報は、測位の際に 12 次のラグランジュ補間を用いて時間内挿するため、いずれについても現在の時刻を中心とする計 13 点の情報とする必要がある。

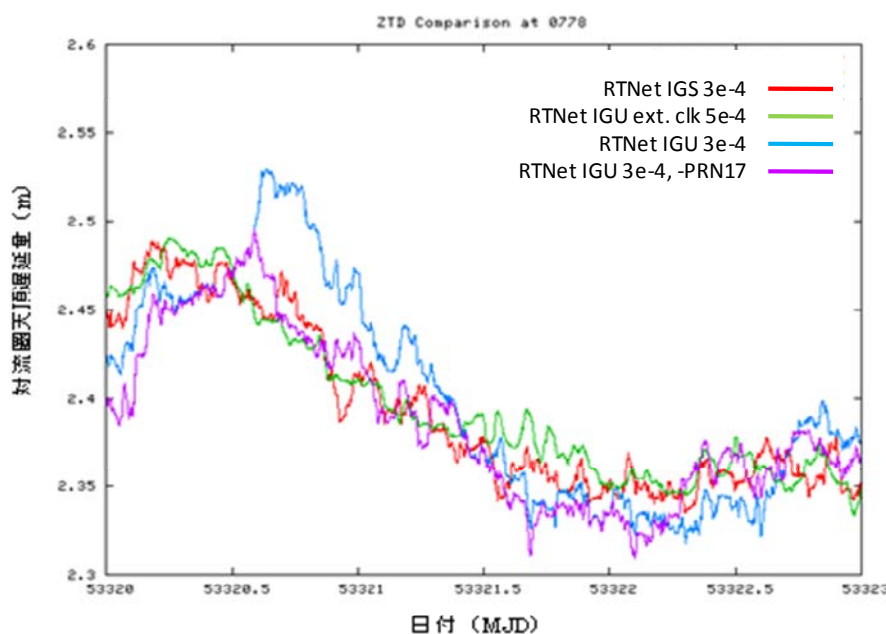


図 2-5 衛星時計の違いによる対流圏遅延量推定への影響

## 2.2.4. 対流圏遅延補正情報の調査・設計の結果

対流圏遅延は、乾燥大気による遅延である静水圧遅延と大気中の水蒸気による遅延である湿潤遅延に分けられる。このうち、大きな部分を占める静水圧遅延については単純なモデルで与えることができる。そのため、静水圧遅延の成分については、生成時に使用するモデルを明らかにし、測位時にも同じモデルを適用できるようにすることで十分であり、配信情報に含める必要はない。また、伝送容量の節約の観点からも含めないのが適当である。

他方、湿潤遅延は、時間的・空間的変化が大きいので、全電子基準点について、リアルタイムの観測データを用いて推定し、補正情報として送信することが必要である。二



重位相差を用いた干渉測位法では、観測点数の増大とともに計算時間が飛躍的に大きくなるため、このような処理には適していない。そこで、計算負荷の小さい PPP の適用を検討する。精密単独測位に必要な衛星時計情報には、前節の手法で生成したものを使用する。

全国の気象庁と防衛庁のラジオゾンデ観測点の近傍にある電子基準点のうち、ラジオゾンデ観測点との標高差が 50m 以内でかつ最寄りの 13 点について、PPP で推定された対流圏天頂遅延量推定値とラジオゾンデによる観測値を 2005 年 8 月 24、25 日の 2 日間について比較した。その中から地域の異なる 4 例を図 2-6 に示す。図において、横軸は 2005 年の通算日、縦軸は対流圏天頂遅延量 (ZTD: 単位 m) を示している。緑線が RTNet による天頂遅延量推定値の推移であり、12 時間ごとのラジオゾンデの値は四角で示している。比較のために、GIPSY ソフトウェアを用いた PPP による天頂遅延量推定値の推移結果を赤線で示している。なお、ここで RTNet とはリアルタイム処理が可能な GPS 解析ソフトウェアである。本プロジェクトにおいては、リアルタイムでの GPS データ収集処理および誤差推定について、既存技術を利用することとして、RT Epoch Server (以下 RTES) と併せて本ソフトウェアを使用した。

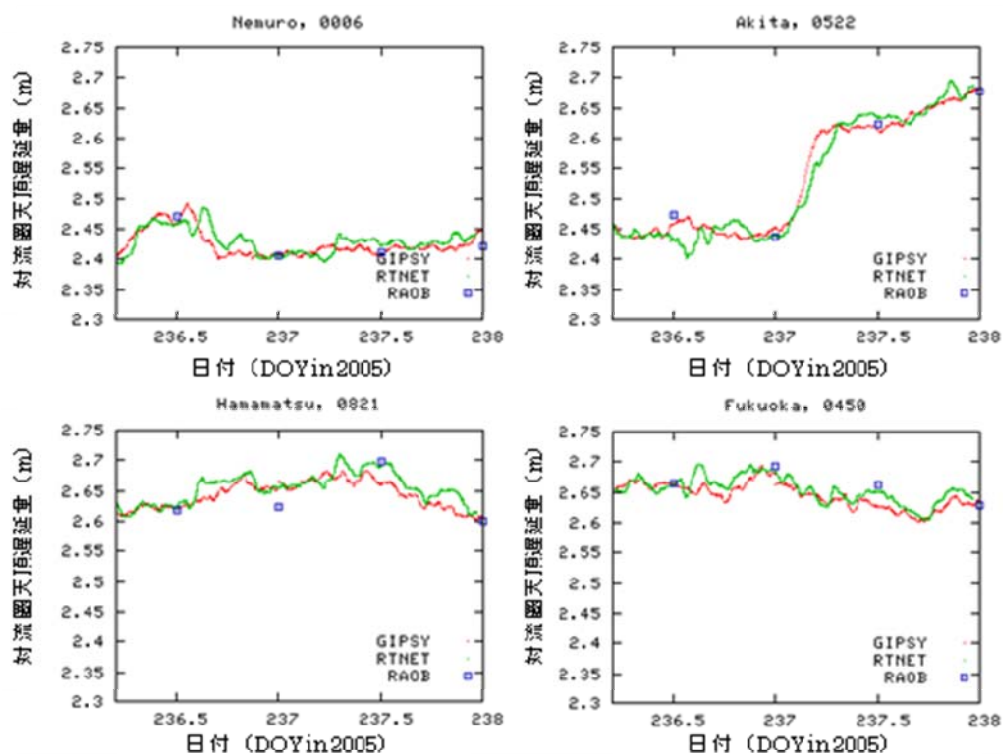


図 2-6 2005 年 8 月 24 日、25 日における対流圏天頂遅延推定値の比較(一例)

表 2-2 は、ラジオゾンデの観測値を基準として、GIPSY と RTNet のそれぞれについて推定値のバイアスおよび RMS (Root Mean Square) を示したものである。



表 2-2 対流圏天頂遅延量についてラジオゾンデ観測に対する PPP 推定の差の統計量

	GIPSY	RTNet
バイアス(mm)	-3.0	0.8
RMS(mm)	21.3	16.6

図 2-6 および表 2-2 より、RTNet を用いて推定された天頂方向の対流圏遅延量は、17 mm 以内の RMS でラジオゾンデの観測データと一致しており、GIPSY による推定結果に比べても遜色のない結果となっている。したがって、2.5cm 以内とした対流圏遅延補正情報の目標精度を満たしており、独自の衛星時計情報を用いた PPP により生成された対流圏遅延情報は、数 cm の精度で水平位置を決定するためには、十分な精度を持っており、推定手法として PPP を用いることは妥当である。

各電子基準点において推定された対流圏遅延補正情報を測位の際に適応するには、各電子基準点における値をもとに、測位点における値を内挿によって求める必要がある。

L1 一周波測位における対流圏遅延量の適用については、有効半径を 75km とした範囲内にある電子基準点で求められた対流圏遅延量を、測位点と電子基準点間の距離の逆数で重み付けを行い内挿することとした。有効半径を 75km と選択したのは、電子基準点の平均間隔が約 20km であり、内陸部であれば 20～30 点の観測点を確保でき、観測点に固有なメソスケール対流の影響を平滑化できると考えたからである。ここで、メソスケール対流とは 100km スケールで起こる大気循環のことである。

## 2.2.5. 電離層遅延補正情報の調査・設計の結果

電離層遅延補正情報の生成方法の候補として、ある領域内の電子基準点を対象に、2 周波のデータから衛星ごとに相対的な電離層遅延量を求め、この電離層遅延量を上空の電離層薄層モデル面上でグリッド化し、相対的な電離層遅延補正情報として生成する手法を開発し、その効果を評価する。

衛星毎の電離層遅延推定においては、精度を高めるために、前処理として、ネットワークモードの基線解析によって二重位相差の L1 および L2 信号の位相アンビギュイティを解き、これを適用した二周波データの解析により、観測点と衛星を結ぶ各視線における電離層遅延量を未知数として解く。さらに、高度 506.7 km におかれた電離層薄層モデル面を定義し、衛星と電子基準点を結ぶ伝播経路がこのモデル面を貫通する点（貫通点）を求め、全ての貫通点を包含するグリッドを緯度 0.2 度、経度 0.3 度間隔で生成する。推定された電離層遅延量を双一次補間の式を用いてグリッド点上に展開し、かつ、グリッド点での遅延量で作られる曲面に平均曲率一定の拘束を与えた重み付き最小二乗法を適用して、最終的に各グリッドにおける天頂遅延量（VTEC 値）を求める。この方法を、平均曲面曲率拘束法（略して、曲率法）と呼ぶこととする。電離層遅延補正情報のグリ

ッド表現形式は、IONEX 形式をもとに本システムに必要なないヘッダ情報等を除外して配信することとした。

北海道の領域内の 21 点の電子基準点について、オフラインデータを使用して、電離層擾乱期・通常期・平穏期のそれぞれにおいて電離層遅延補正情報を生成し、これを適用した測位計算を行った。その結果を表 2-3 に示す。擾乱期・通常期・平穏期のいずれの場合にも、電離層遅延補正情報を適用すると、網掛けで示したアンビギュイティ解決数が 4 以上（フィックスされた解）の割合が増大し、測位精度（RMS）についても、水平成分の誤差（水平誤差）および三次元誤差の値が小さくなっていることがわかる。

表 2-3 電離層補正フィックス解の統計結果

	アンビギュイティ 解決数	電離層補正の適用無し			電離層補正の適用あり		
		割合 (%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	割合 (%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)
擾乱期 DOY236+237	0~3	72	0.6649	0.9638	22	0.2036	0.5330
	4	4	0.0749	0.2360	7	0.0477	0.1560
	5	11	0.5741	0.8201	31	0.0279	0.0753
	6	10	0.1227	0.2645	28	0.0196	0.0772
	7~	2	0.2155	0.3596	12	0.0106	0.0409
	全データ	100	0.6003	0.8725	100	0.0980	0.2601
	4~(フィックス)	28	0.3817	0.5663	78	0.0261	0.0834
通常期 DOY276	0~3	81	0.1416	0.2994	10	0.1181	0.2322
	4	3	0.0653	0.1531	10	0.0567	0.0704
	5	9	0.1607	0.2789	41	0.0251	0.1049
	6	6	0.1504	0.4514	28	0.0101	0.0420
	7~	1	0.2984	0.3253	10	0.0094	0.0400
	全データ	100	0.1437	0.3045	100	0.0456	0.1065
	4~(フィックス)	19	0.1524	0.3257	90	0.0262	0.0797
平穏期 DOY313	0~3	76	0.1779	0.3354	6	0.1046	0.1998
	4	6	0.1418	0.2534	14	0.0118	0.0394
	5	9	0.1698	0.5064	36	0.0167	0.0463
	6	8	0.2028	0.3866	31	0.0143	0.0391
	7~	1	0.0410	0.0487	13	0.0156	0.0404
	全データ	100	0.1768	0.3532	100	0.0300	0.0647
	4~(フィックス)	24	0.1733	0.4038	94	0.0151	0.0422

## 2.2.6. 絶対電離層モデルの調査・設計の結果

位相観測値には整数波数のアンビギュイティがあるため、これのみから電離層遅延量の絶対値を確定することはできない。そこで、絶対電離層モデルの推定のために、または、アンビギュイティの確定のために、二周波の擬似距離データを用いることとする。なお、二周波の擬似距離の間には衛星毎に異なるバイアスが存在するため、その使用に際してはコード間バイアスの補正を行うものとする。

Fusion Numerics 社によって開発された絶対三次元電離層モデルを使用し、これに、日本全国から選択した 100~200 点程度の電子基準点のデータを同化させることによって、日本周辺地域に特化した絶対電離層モデルを生成した。次に、絶対電離層モデルへの同化に使用していない電子基準点について、そのデータから幾何学的フリー線形結合を使用して求めた TEC 値を算出し、期間毎に全国から選んだ 9 点ないし 10 点の観測点を対象として、絶対電離層モデルから求められる TEC 値と比較した。両者の差の RMS 平均（エポック毎に求めた全衛星についての差の RMS を、1 日分平均したもの）と平均バイアスを表 2-4 に示す。電離層活動が活発なほど RMS 平均、平均バイアスともに増加する傾向が見られるが、その大きさは 3TECU 以内である。したがって、この推定手法から求められる電離層モデルは、電離層擾乱の状態を 3TECU 程度の絶対精度で知るための基礎資料として用いることが可能である。

表 2-4 電離層の状態別の TEC 推定値の較差の RMS とバイアスの平均値(単位:TECU)

DOY	日付	電離層の状態	RMS 平均	平均バイアス	備考
236	2005/8/24	擾乱	2.485	-1.240	磁気嵐発生
237	2005/8/25	擾乱	1.938	-0.530	磁気嵐発生
276	2005/10/3	通常	1.565	-0.342	
313	2005/11/9	平穏	1.506	-0.397	

## 2.3. L1 一周波測位による評価試験

前節の設計に基づき、電子基準点のオフラインデータを使用し、生成した補正情報を適用して測位を行い、補正効果を検証した。評価試験の方法、結果を以下に示す。

### 2.3.1. 評価試験の方法

配信すべき補正情報（衛星軌道・時計、対流圏遅延、電離層遅延）と参照基準点観測情報をそれぞれ 10 秒の更新頻度で生成し、電子基準点の L1 搬送波位相データを使用した 10 分間の後処理解析により L1 一周波測位を行った。電離層擾乱期・通常期・平穏期

の各期間において、複数の基線長・地域（北海道地域・九州地域）、対流圏遅延補正情報を使用しない場合について解析を行った（表 2-5～表 2-7）。解析結果を、GEONET で公開している F2 解(最終座標推定値)と比較して、アンビギュイティの解決数と誤差量を評価した。

表 2-5 北海道地域の試験に使用した電子基準点からなる基線

基線	始点	終点	距離 [km]
基線 1	950109	950123	175.7
基線 2	950119	020863	219.3
基線 3	020878	020861	139.2
基線 4	970788	960505	103.5

表 2-6 九州地域の試験に使用した電子基準点からなる基線

基線	始点	終点	距離 [km]
基線 1	970834	021083	105.9
基線 2	950468	940095	95.9
基線 3	960776	021071	117.7
基線 4	960715	950466	101.5
基線 5	960714	970837	35.7

表 2-7 測位解析対象日における大気と電離層の状態

DOY	日付	気象条件	電離層の状態	領域	備考
236	2005/8/24	平均湿度(網走:75%,根室:90%,釧路:83%) 北海道地方は概ね晴れ	擾乱	北海道	磁気嵐 発生
237	2005/8/25	平均湿度(網走:77%,根室:83%,釧路:72%) 関東地方に台風上陸。北海道地方は曇り	擾乱	北海道	磁気嵐 発生
276	2005/10/3	平均湿度(網走:63%,根室:62%,釧路:60%, 宮崎:85%,熊本:69%,鹿児島:77%) 全国的に概ね晴れや曇り。北海道上空 5500m に-20℃以下の寒気流入	通常	北海道・ 九州	
313	2005/11/9	平均湿度(網走:58%,根室:60%,釧路:49%, 宮崎:62%,熊本:67%,鹿児島:52%) 北海道・九州地方では曇りや晴れ。札幌上 空 5300m 付近に-33℃の寒気流入。北日本 で冬型の気圧配置。	平穏	北海道・ 九州	

### 2.3.2. 評価試験の結果

表 2-8～表 2-12 に、地域・電離層状態ごとの基線解析の結果を示す。対流圏の影響を見るために、対流圏遅延補正情報のあり・なしについて測位解析を行った。各表では、基線ごとに、すべての補正情報を使用した場合と、対流圏補正だけを使用しなかった場合に分けた。また、アンビギュイティ解決数によって分類し、水平誤差と三次元誤差の RMS を示した。

アンビギュイティ解決数については、0～3 の場合は精密測位に必要なフィックス解が得られず、4 以上の場合にはフィックス解が得られたことを意味する。アンビギュイティ解決数が 4 以上のフィックス解では、アンビギュイティが解決していない衛星は測位に使用していない。アンビギュイティ解決数が 5 でも、10cm 以上の誤差がみられる場合もあった。このような結果は、アンビギュイティのミスフィックスであると考えられる。そのため、参考として三次元誤差が 10cm 以上の結果をミスフィックスとみなし、その個数をミスフィックス数として記載した。なお、フェーズ 2 以降では、水平誤差が 10cm 以上の時にミスフィックスとみなすように変更した。

表 2-8 北海道（電離層擾乱期）

	アンビギ ユイティ 解決数	対流圏補正無し				すべての補正			
		割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数	割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数
基線 1 始点 0109 終点 0123 175.7km	0~3	35.3%	0.2747	0.5586	-	38.9%	0.1635	0.2900	-
	4	9.5%	0.0702	0.1308	5	7.4%	0.0478	0.0835	2
	5	24.4%	0.0365	0.1049	11	24.7%	0.0340	0.0801	6
	6	20.5%	0.0364	0.0932	7	20.5%	0.0210	0.0528	3
	7~	10.2%	0.0455	0.1371	6	8.5%	0.0084	0.0231	0
	全データ	100.0%	0.1672	0.3439	-	100.0%	0.1046	0.1882	-
基線 2 始点 0119 終点 0863 219.3km	0~3	46.6%	0.1602	0.4816	-	41.7%	0.1306	0.2514	-
	4	9.2%	0.0522	0.1156	4	11.7%	0.0666	0.4192	4
	5	29.7%	0.0327	0.2810	33	29.3%	0.0170	0.0442	4
	6	14.1%	0.0173	0.0911	12	16.3%	0.0240	0.0519	2
	7~	0.4%	0.0185	0.0807	0	1.1%	0.0154	0.0456	0
	全データ	100.0%	0.1122	0.3661	-	100.0%	0.0884	0.2188	-
基線 3 始点 0878 終点 0861 139.2km	0~3	21.9%	0.2036	0.5330	-	24.4%	0.2962	0.6996	-
	4	7.4%	0.0477	0.1560	3	6.7%	0.0397	0.0821	2
	5	31.4%	0.0279	0.0753	9	30.0%	0.0363	0.0975	9
	6	27.6%	0.0196	0.0772	4	25.8%	0.0146	0.0687	4
	7~	11.7%	0.0106	0.0409	0	13.1%	0.0174	0.1032	3
	全データ	100.0%	0.0980	0.2601	-	100.0%	0.1483	0.3539	-
基線 4 始点 0788 終点 0505 103.5km	0~3	47.3%	0.1640	0.3775	-	45.9%	0.1774	0.4456	-
	4	7.4%	0.1249	0.2165	9	6.4%	0.0995	0.2107	7
	5	13.4%	0.0975	0.1812	8	15.5%	0.0851	0.1731	8
	6	18.4%	0.0507	0.1438	11	19.1%	0.0650	0.1055	4
	7~	13.4%	0.0291	0.1351	6	13.1%	0.0297	0.1548	8
	全データ	100.0%	0.1255	0.2857	-	100.0%	0.1309	0.3224	-

表 2-9 北海道（電離層通常期）

	アンビギ ユイティ 解決数	対流圏補正無し				すべての補正			
		割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数	割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数
基線 1 始点 0109 終点 0123 175.7km	0~3	22.4%	0.1402	0.2716	-	25.9%	0.1399	0.2401	-
	4	14.7%	0.0506	0.0851	2	11.2%	0.0162	0.0370	0
	5	34.3%	0.0172	0.0886	2	35.0%	0.0165	0.0872	4
	6	23.8%	0.0388	0.1143	2	22.4%	0.0397	0.1140	2
	7~	4.9%	0.0168	0.1843	1	5.6%	0.0166	0.1590	1
	全データ	100.0%	0.0725	0.1582	-	100.0%	0.0746	0.1485	-
基線 2 始点 0119 終点 0863 219.3km	0~3	26.6%	0.1087	0.2348	-	27.3%	0.1093	0.2416	-
	4	4.9%	0.1177	0.1454	1	4.9%	0.0118	0.0257	0
	5	35.7%	0.0277	0.1062	4	35.7%	0.0902	0.1883	2
	6	22.4%	0.0365	0.0708	1	22.4%	0.0360	0.0704	1
	7~	10.5%	0.0144	0.0518	0	9.8%	0.0132	0.0297	0
	全データ	100.0%	0.0664	0.1453	-	100.0%	0.0804	0.1726	-
基線 3 始点 0878 終点 0861 139.2km	0~3	10.5%	0.1181	0.2322	-	16.8%	0.1078	0.2228	-
	4	9.8%	0.0567	0.0704	1	7.7%	0.0103	0.0191	0
	5	41.3%	0.0251	0.1049	2	38.5%	0.0094	0.0199	0
	6	28.0%	0.0101	0.0420	2	27.3%	0.0098	0.0207	0
	7~	10.5%	0.0094	0.0400	0	9.8%	0.0098	0.0183	0
	全データ	100.0%	0.0456	0.1065	-	100.0%	0.0450	0.0931	-
基線 4 始点 0788 終点 0505 103.5km	0~3	22.4%	0.0979	0.2599	-	18.2%	0.1009	0.2325	-
	4	7.0%	0.0099	0.0384	1	7.7%	0.0087	0.0192	0
	5	35.7%	0.0089	0.0429	2	37.1%	0.0081	0.0246	0
	6	22.4%	0.0101	0.0417	0	24.5%	0.0356	0.0637	2
	7~	12.6%	0.0090	0.0368	0	12.6%	0.0096	0.0247	0
	全データ	100.0%	0.0471	0.1282	-	100.0%	0.0470	0.1056	-

表 2-10 北海道（電離層平穏期）

	アンビギ ユイティ 解決数	対流圏補正無し				すべての補正			
		割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数	割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数
基線 1 始点 0109 終点 0123 175.7km	0~3	16.8%	0.1420	0.1996	-	21.7%	0.1372	0.1906	-
	4	14.7%	0.0454	0.0668	1	11.9%	0.0111	0.0168	0
	5	30.8%	0.0427	0.0703	2	28.7%	0.0124	0.0296	1
	6	27.3%	0.0149	0.0396	0	28.7%	0.0110	0.0195	0
	7~	10.5%	0.0563	0.0732	1	9.1%	0.0167	0.0269	0
	全データ	100.0%	0.0681	0.0992	-	100.0%	0.0648	0.0913	-
基線 2 始点 0119 終点 0863 219.3km	0~3	25.2%	0.1325	0.2317	-	19.6%	0.1335	0.2246	-
	4	11.2%	0.0206	0.0951	4	14.0%	0.0154	0.0411	1
	5	26.6%	0.0302	0.0831	10	27.3%	0.0087	0.0234	0
	6	28.7%	0.0161	0.0869	9	28.0%	0.0094	0.0252	0
	7~	8.4%	0.0171	0.0930	1	11.2%	0.0087	0.0190	0
	全データ	100.0%	0.0694	0.1388	-	100.0%	0.0598	0.1024	-
基線 3 始点 0878 終点 0861 139.2km	0~3	6.3%	0.1046	0.1998	-	11.9%	0.1106	0.1700	-
	4	14.0%	0.0118	0.0394	0	9.8%	0.0099	0.0141	0
	5	35.7%	0.0167	0.0463	0	34.3%	0.0121	0.0242	0
	6	30.8%	0.0143	0.0391	0	30.8%	0.0094	0.0149	0
	7~	13.3%	0.0156	0.0404	0	13.3%	0.0098	0.0209	0
	全データ	100.0%	0.0300	0.0647	-	100.0%	0.0394	0.0615	-
基線 4 始点 0788 終点 0505 103.5km	0~3	44.1%	0.1597	0.2441	-	47.6%	0.1548	0.2493	-
	4	12.6%	0.0141	0.0337	0	8.4%	0.0132	0.0307	0
	5	23.1%	0.0088	0.0272	0	22.4%	0.0099	0.0254	0
	6	16.8%	0.0079	0.0247	0	18.9%	0.0081	0.0245	0
	7~	3.5%	0.0103	0.0158	0	2.8%	0.0088	0.0266	0
	全データ	100.0%	0.1063	0.1634	-	100.0%	0.1070	0.1729	-



表 2-11 九州（電離層通常期）

	アンビギ ユイティ 解決数	対流圏補正無し				すべての補正			
		割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数	割合(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィックス 数
基線 1 始点 0834 終点 1083 105.9km	0~3	44.1%	0.1240	0.3291	-	44.8%	0.1306	0.3307	-
	4	6.3%	0.0374	0.1188	2	7.7%	0.0551	0.1508	3
	5	23.1%	0.0354	0.0827	2	20.3%	0.0297	0.0646	2
	6	23.8%	0.0573	0.1466	3	22.4%	0.0197	0.0410	2
	7~	2.8%	0.0136	0.0446	0	4.9%	0.0153	0.0342	0
	全データ	100.0%	0.0891	0.2353	-	100.0%	0.0902	0.2280	-
基線 2 始点 0468 終点 0095 95.9km	0~3	58.7%	0.1232	0.2292	-	62.9%	0.1179	0.2616	-
	4	4.9%	0.0944	0.1514	2	3.5%	0.0522	0.2475	2
	5	18.9%	0.0398	0.1737	7	16.1%	0.0461	0.0759	2
	6	13.3%	0.0775	0.4161	5	14.0%	0.0273	0.1960	4
	7~	4.2%	0.1812	0.3519	2	3.5%	0.1953	0.4298	2
	全データ	100.0%	0.1087	0.2567	-	100.0%	0.1031	0.2408	-
基線 3 始点 0776 終点 1071 117.7km	0~3	55.9%	0.1684	0.3788	-	54.5%	0.1744	0.4512	-
	4	9.8%	0.1541	0.3746	8	8.4%	0.1316	0.1953	5
	5	18.9%	0.0883	0.1205	3	18.9%	0.0550	0.1117	2
	6	14.0%	0.0768	0.3041	5	16.1%	0.0575	0.0940	3
	7~	1.4%	0.0272	0.0652	0	2.1%	0.2475	0.3288	1
	全データ	100.0%	0.1432	0.3313	-	100.0%	0.1429	0.3468	-
基線 4 始点 0715 終点 0466 101.5km	0~3	57.3%	0.1266	0.3369	-	55.9%	0.1177	0.3570	-
	4	7.7%	0.0574	0.1488	4	4.2%	0.1079	0.1479	2
	5	20.3%	0.0443	0.1456	17	20.3%	0.0926	0.2027	6
	6	13.3%	0.0864	0.1592	13	17.5%	0.0730	0.1103	3
	7~	1.4%	0.0225	0.1059	1	2.1%	0.0166	0.0321	0
	全データ	100.0%	0.1042	0.2731	-	100.0%	0.1044	0.2876	-
基線 5 始点 0714 終点 0837 35.7km	0~3	38.5%	0.1819	0.3395	-	39.9%	0.1791	0.3393	-
	4	8.4%	0.0906	0.1074	2	9.8%	0.0834	0.1007	2
	5	20.3%	0.0683	0.0827	1	18.2%	0.0136	0.0363	0
	6	27.3%	0.0511	0.0951	3	25.9%	0.0467	0.0809	1
	7~	5.6%	0.0269	0.0436	0	6.3%	0.0263	0.0364	0
	全データ	100.0%	0.1230	0.2220	-	100.0%	0.1188	0.2211	-

表 2-12 九州（電離層平穏期）

	アンビギ ユイティ 解決数	対流圏補正無し				すべての補正			
		割合 (%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィクス 数	割合 (%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィクス 数
基線 1 始点 0834 終点 1083 105.9km	0~3	14.7%	0.1447	0.3453	-	14.7%	0.1414	0.3192	-
	4	10.5%	0.0112	0.0583	0	10.5%	0.0113	0.0260	0
	5	30.8%	0.0106	0.0583	1	30.8%	0.0108	0.0288	0
	6	33.6%	0.0367	0.1215	5	33.6%	0.0250	0.0826	2
	7~	10.5%	0.0129	0.0799	2	10.5%	0.0119	0.0218	0
	全データ	100.0%	0.0600	0.1566	-	100.0%	0.0566	0.1328	-
基線 2 始点 0468 終点 0095 95.9km	0~3	28.7%	0.1254	0.2944	-	25.2%	0.1248	0.2528	-
	4	5.6%	0.0236	0.0856	3	7.7%	0.0884	0.2160	3
	5	19.6%	0.0328	0.1378	6	22.4%	0.0132	0.0251	0
	6	35.7%	0.0486	0.1359	17	35.0%	0.0102	0.0206	0
	7~	10.5%	0.0360	0.1285	8	9.8%	0.0073	0.0191	0
	全データ	100.0%	0.0757	0.1931	-	100.0%	0.0678	0.1415	-
基線 3 始点 0776 終点 1071 117.7km	0~3	53.1%	0.1769	0.4680	-	51.7%	0.1760	0.4053	-
	4	16.8%	0.0731	0.1703	9	13.3%	0.1390	0.1926	3
	5	22.4%	0.0609	0.1629	16	25.2%	0.0492	0.0943	3
	6	4.9%	0.0206	0.1201	3	7.0%	0.0115	0.0179	0
	7~	2.8%	0.0239	0.1751	3	2.8%	0.0163	0.0245	0
	全データ	100.0%	0.1356	0.3589	-	100.0%	0.1386	0.3036	-
基線 4 始点 0715 終点 0466 101.5km	0~3	29.4%	0.1152	0.3453	-	18.2%	0.1153	0.2804	-
	4	9.8%	0.0273	0.1034	5	10.5%	0.0223	0.0323	0
	5	22.4%	0.0163	0.1099	13	26.6%	0.0119	0.0328	0
	6	28.7%	0.0333	0.2025	21	32.9%	0.0119	0.0726	1
	7~	9.8%	0.0148	0.1412	12	11.9%	0.0153	0.0513	1
	全データ	100.0%	0.0661	0.2291	-	100.0%	0.0508	0.1294	-
基線 5 始点 0714 終点 0837 35.7km	0~3	14.7%	0.0979	0.2270	-	21.0%	0.0940	0.1982	-
	4	10.5%	0.0743	0.1032	1	7.7%	0.0875	0.1222	1
	5	32.2%	0.0088	0.0248	0	30.8%	0.0088	0.0178	0
	6	32.9%	0.0080	0.0217	0	32.2%	0.0075	0.0173	0
	7~	9.8%	0.0086	0.0217	0	8.4%	0.0071	0.0178	0
	全データ	100.0%	0.0452	0.0953	-	100.0%	0.0499	0.0980	-

表 2-8～表 2-12 において、「全データ」の行に、全ての測位解を用いた水平測位精度の統計を取った結果を示している。どのケースにおいても、水平誤差は目標精度である 2cm を有意に上回った。アンビギュイティ解決数に分けて見た場合、アンビギュイティ解決数が 0～3 でフィックスしなかった場合は、すべての基線で電離層の状態にかかわらず、9cm 以上の誤差がある。アンビギュイティ解決数が 4 以上でフィックス解が得られた場合では、アンビギュイティ解決数が多いほど測位精度が良くなる傾向があった。しかし、北海道地域では、アンビギュイティ解決数が多くても精度が悪くなっている例があった。その原因は特定できなかったが、アンビギュイティのミスフィックスが候補として考えられる。そこで、以下では、三次元誤差が 10cm 以上の解をミスフィックスによるものと仮定して議論するものとする。ミスフィックスと目されるものの数が特に電離層擾乱期の結果で高いことから、その原因として電離層補正が不十分である可能性があるものと考えられる。

全解析結果から正しくフィックスしたと目されるものを抜き出して一覧表にした（表 2-13）。フィックス率はフィックス数（ミスフィックスを含む）÷全観測数（10 分観測を 24 時間実施）とした。表 2-13 から、北海道の平穏期のように、ミスフィックスが少ない場合は目標精度を達成している。しかし、九州の通常期のように、ミスフィックスが多い場合、目標精度を達成していない。したがって、目標精度を達成するためには、フィックス率を上げることもさることながら、ミスフィックスを減少させることが必須である。

そこで、さらにミスフィックスでないフィックス解が目標精度を達成しているかどうかを確認するために、フィックスしたもののうちミスフィックスを除いたもののみを対象に統計を取ると（表 2-14）、すべての補正を適用した場合に目標精度を達成している。このことから、対流圏遅延補正情報は、精度向上に寄与しているものと考えられる。

以上の結果から、電離層の状態や地域によっては電離層遅延補正情報の精度が十分でなく、電離層遅延補正情報生成アルゴリズムの改良が課題として残された。

表 2-13 フィックス解の集計結果

	基線 (基線長)	対流圏補正無し				すべての補正			
		フィックス 率(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィッ ク入数	フィックス 率(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	ミスフィッ ク入数
北海道 擾乱期 DOY236+237	基線1 (175.7km)	64.7%	0.0444	0.1114	29	61.1%	0.0301	0.0667	11
	基線2 (219.3km)	53.4%	0.0338	0.2201	49	58.3%	0.0346	0.1921	10
	基線3 (139.2km)	78.1%	0.0261	0.0834	16	75.6%	0.0281	0.0885	18
	基線4 (103.5km)	52.7%	0.0757	0.1639	34	54.1%	0.0704	0.1535	27
北海道 通常期 DOY276	基線1 (175.7km)	77.6%	0.0331	0.1048	7	74.1%	0.0258	0.0981	7
	基線2 (219.3km)	73.4%	0.0416	0.0938	6	72.7%	0.0665	0.1381	3
	基線3 (139.2km)	89.5%	0.0262	0.0797	5	83.2%	0.0097	0.0199	0
	基線4 (103.5km)	77.6%	0.0094	0.0412	3	81.8%	0.0207	0.0402	2
北海道 平穏期 DOY313	基線1 (175.7km)	83.2%	0.0389	0.0616	4	78.3%	0.0123	0.0242	1
	基線2 (219.3km)	74.8%	0.0228	0.0876	24	80.4%	0.0104	0.0274	1
	基線3 (139.2km)	93.7%	0.0151	0.0422	0	88.1%	0.0106	0.0198	0
	基線4 (103.5km)	55.9%	0.0101	0.0276	0	52.4%	0.0099	0.0261	0
九州 通常期 DOY276	基線1 (105.9km)	55.9%	0.0456	0.1168	7	55.2%	0.0304	0.0740	7
	基線2 (95.9km)	41.3%	0.0840	0.2913	16	37.1%	0.0711	0.2005	10
	基線3 (117.7km)	44.1%	0.1025	0.2586	16	45.5%	0.0919	0.1426	11
	基線4 (101.5km)	42.7%	0.0622	0.1494	35	44.1%	0.0847	0.1609	11
	基線5 (35.7km)	61.5%	0.0623	0.0895	6	60.1%	0.0469	0.0707	3
九州 平穏期 DOY313	基線1 (105.9km)	85.3%	0.0246	0.0907	8	85.3%	0.0179	0.0559	2
	基線2 (95.9km)	71.3%	0.0414	0.1321	34	74.8%	0.0302	0.0723	3
	基線3 (117.7km)	46.9%	0.0614	0.1625	31	48.3%	0.0814	0.1222	6
	基線4 (101.5km)	70.6%	0.0259	0.1572	51	81.8%	0.0142	0.0546	2
	基線5 (35.7km)	85.3%	0.0272	0.0421	1	79.0%	0.0283	0.0416	1

表 2-14 フィックス解からミスフィックスを除去した集計結果

	基線 (基線長)	対流圏補正無し			すべての補正		
		フィックス 率(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)	フィックス 率(%)	水平誤差 RMS(m)	三次元誤差 RMS(m)
北海道 擾乱期 DOY236+237	基線1 (175.7km)	54.4%	0.0162	0.0529	57.2%	0.0123	0.0294
	基線2 (219.3km)	36.0%	0.0161	0.0590	54.8%	0.0154	0.0379
	基線3 (139.2km)	72.4%	0.0136	0.0416	69.3%	0.0148	0.0346
	基線4 (103.5km)	40.6%	0.0161	0.0529	44.5%	0.0152	0.0361
北海道 通常期 DOY276	基線1 (175.7km)	72.7%	0.0143	0.0347	69.2%	0.0135	0.0297
	基線2 (219.3km)	69.2%	0.0131	0.0407	70.6%	0.0140	0.0290
	基線3 (139.2km)	86.0%	0.0095	0.0367	83.2%	0.0097	0.0199
	基線4 (103.5km)	75.5%	0.0093	0.0374	80.4%	0.0085	0.0234
北海道 平穏期 DOY313	基線1 (175.7km)	80.4%	0.0153	0.0425	77.6%	0.0121	0.0220
	基線2 (219.3km)	58.0%	0.0158	0.0753	79.7%	0.0098	0.0244
	基線3 (139.2km)	93.7%	0.0151	0.0422	88.1%	0.0106	0.0198
	基線4 (103.5km)	55.9%	0.0101	0.0276	52.4%	0.0099	0.0261
九州 通常期 DOY276	基線1 (105.9km)	51.0%	0.0198	0.0465	50.3%	0.0145	0.0282
	基線2 (95.9km)	30.1%	0.0276	0.0684	30.1%	0.0178	0.0399
	基線3 (117.7km)	32.9%	0.0263	0.0554	37.8%	0.0224	0.0449
	基線4 (101.5km)	18.2%	0.0300	0.0787	36.4%	0.0229	0.0470
	基線5 (35.7km)	57.3%	0.0197	0.0368	58.0%	0.0200	0.0379
九州 平穏期 DOY313	基線1 (105.9km)	79.7%	0.0119	0.0610	83.9%	0.0125	0.0275
	基線2 (95.9km)	47.6%	0.0120	0.0455	72.7%	0.0115	0.0219
	基線3 (117.7km)	25.2%	0.0145	0.0486	44.1%	0.0149	0.0294
	基線4 (101.5km)	35.0%	0.0091	0.0554	80.4%	0.0127	0.0311
	基線5 (35.7km)	84.6%	0.0085	0.0231	78.3%	0.0087	0.0186

## 2.4. 補正情報の形式とデータサイズ

補正情報のフォーマットと格納するデータを定義した。また、データ量について、補正情報のデータサイズを補正情報のフォーマットから集計することにより見積もった。

### 2.4.1. 補正情報の構造

補正情報のレコード構造を表 2-15 に示す。補正情報は Stx 文字で始まり Etx 文字で終わるレコード構造であり、ヘッダ部はレコード ID、レコード長と CRC で構成される。レコード ID は補正情報の内容を示す識別子であり、表 2-16 に示す。

表 2-15 補正情報のレコード構造

レコード構造			
#	項目	サイズ	内容
1	Stx	1 バイト	レコード開始(0x02)
2	レコード ID	1 バイト	レコード識別子 (0x01~0xD2)
3	レコード長	2 バイト	パラメータ部の長さ
4	crc1	2 バイト	パラメータ部の最初の 128 バイトの CRC
5	パラメータ部	N バイト	データの本体
6	crc2	4 バイト	パラメータ部の全体の CRC
7	Etx	1 バイト	レコード終了 (0x03)
	合計	11+N バイト	

※crc1 は、データのヘッダ部分の間違いを早めに検出するために使用される。

表 2-16 補正情報のレコード識別子ごとのデータ内容

ID	種類	内容
0x00	基本情報	補正情報の配信内容を示す基本的な情報 <ul style="list-style-type: none"> <li>補正情報のバージョン、領域分割数、参照基準点数等</li> </ul>
0x01	領域情報	補正情報領域(適用範囲)情報 <ul style="list-style-type: none"> <li>領域 ID、経度・緯度(最大/最小値)</li> </ul>
0x02	参照基準点情報	参照基準点情報 <ul style="list-style-type: none"> <li>電子基準点 ID、電子基準点座標(X,Y,Z)、アンテナ高</li> </ul>
0x03	参照基準点観測情報	参照基準点とした電子基準点の L1 観測データ <ul style="list-style-type: none"> <li>電子基準点 ID、GPS 時刻、擬似距離、搬送波位相(観測データフォーマットは RTCM3.0 に準拠)</li> </ul>

0xD2	衛星軌道・時計補正情報	各衛星についての位置および時計の補正情報 (位置は IGS 超速報暦に記載されているもの) ・GPS 時刻、衛星番号、衛星位置 (X,Y,Z)、衛星時計
0x10	対流圏遅延補正情報	電子基準点の位置における対流圏遅延の湿潤項 電子基準点 1200 点すべてについての座標と補正情報を送信する。 ・電子基準点座標 (X,Y,Z)、天頂湿潤遅延量
0x20	電離層遅延補正情報	日本にて観測される衛星ごとの電離層遅延量を補正する情報。各衛星についてグリッドデータとして送信する。 ・緯度、緯度方向の間隔/グリッド点数、経度、経度方向の間隔/グリッド点数、天頂 TEC 値

#### 2.4.2. 補正情報データ量の見積もり

補正情報のレコード数、レコード長と更新頻度から、想定されるデータ量を見積もった。表 2-17 に補正情報に必要なデータ量 (圧縮しない場合) をまとめた。対流圏遅延の補正情報は可変長であるが、見積もりの値より大きくなることはない。なお、データ量は、レコード数×レコード長である。また、データ量の見積もり条件は、表 2-18 に示したとおりである。

表 2-17 補正情報に必要なデータ量

種類	頻度	レコード数	レコード長(bits)
基本情報	30 秒	1	27+31*8=275
領域情報	30 秒	領域数	61
参照基準点情報	30 秒	領域数	135
参照基準点観測情報	10 秒	領域数	34+衛星数*58
衛星軌道・時計補正情報	10 秒	1	30+衛星数*1979
対流圏遅延補正情報	10 秒	1	146+12+1200*(38*3+12)=158+1200*126 (可変長)
電離層遅延補正情報	10 秒	領域数	256+(2+グリッド数*2)*8bits*衛星数

ここで、基本情報とは バージョンや領域数等補正情報の配信内容を示す情報で、領域情報は電離層の領域・座標情報、参照基準点情報は参照基準点の座標である。

表 2-18 補正情報量見積条件

条件	値
領域数	6
電離層遅延補正情報のグリッド数	a*b=60*60=3600 (緯度 0.1°、経度 0.15° 約 12km 間隔)
衛星数	12

補正情報の配信に必要なデータ量の総計を表 2-19 に示す。この仮定のもとで必要な帯域は 433,159bps となり、領域数を増やした場合でも S 帯補正方式では十分に送信できることがわかった。

表 2-19 補正情報の配信に必要なデータ量の見積もり

種類	頻度 (秒) [A]	レコー ド数 [B]	Body サイ ズ(bits) [C]	Body サイ ズ(bytes) [D]=[C/8]	レコー ドサイ ズ(bytes) [E]=[D]+11	全体サイ ズ(bytes) [F]=[B*E]	全体サイ ズ(bits) [G]=[F]*8	必要帯域 (bps) [H]=[G/A]
基本情報	30	1	275	35	46	46	368	13
領域情報	30	6	61	8	19	114	912	31
参照基準点情報	30	6	135	17	28	168	1,344	45
参照基準点観測 情報	10	6	730	92	103	618	4,944	495
衛星軌道・時計補 正情報	10	1	23,778	2,973	2,984	2,984	23,872	2,388
対流圏遅延補正 情報	10	1	151,358	18,920	18,931	18,931	151,448	15,145
電離層遅延補正 情報	10	6	691,648	86,456	86,467	518,802	4,150,416	415,042
合計							4,333,304	433,159



## 2.5. 準天頂衛星の放送機能に関する調査

フェーズ1の期間においては、準天頂衛星の放送方式として、DVB-S.2方式(ETSI EN302 307 v1.1.1 2005-03)が候補の一つに挙げられていたが、最終的な方式については検討段階にあった。この候補以外のものも含めた各種の放送方式について調査するとともに、補正情報の配信における問題の一つとして伝送遅延の問題を取り上げ、検討を行った。

### 2.5.1. 放送方式の調査

準天頂衛星で検討されていたDVB-S.2方式(ETSI EN302 307 v1.1.1 2005-03)はETSI(European Telecommunications Standards Institute)で策定された衛星伝送方式であり、従来の方式に比べ効率的な伝送が可能となっている。表2-20に各種の放送方式の特徴を整理する。

表 2-20 各種の放送方式の特徴

項目	準天頂衛星(仮)	PCM 音声放送	BS デジタル放送	CS デジタル放送	2.6GHz 帯衛星デジタル音声放送
使用周波数	2605MHz ~ 2630MHz	12.5GHz ~ 12.75GHz	11.7GHz ~ 12.2GHz	12.2GHz ~ 12.75GHz	2630MHz ~ 2655MHz
偏波	円偏波	直線偏波	円偏波	直線偏波	円偏波
サービスエリア	日本全国	日本全国	日本全国	日本全国	日本全国
符号多重化方式	TDM	TDM	TDM	TDM	DS-SS-SS-SS
変調方式	QPSK	MSK	BPSK,QPSK,8PSK	QPSK	QPSK
誤り訂正方式	BCH,LDPC	BCH,畳み込み符号	RS,トレリス符号,畳み込み符号	RS,畳み込み符号	RS,畳み込み符号
スクランブル方式	詳細未定	COATEC	MULTI2	MULTI2	MULTI2

### 2.5.2. 伝送遅延

準天頂衛星を用いた通信において発生する伝送遅延の問題については、測位側でのGPS観測データを蓄積するバッファに十分な大きさを確保し、通信で得られる補正情報を蓄積して解析する方式を採用することにより、10秒程度の遅延時間であれば容易に対応することができ、問題とはならないものと考えられる。

## 2.6. まとめ

フェーズ 1 における達成目標と評価結果を表 2-21 に記載する。

本技術開発において生成する各種補正情報について、必要とされる要件・生成方法等の調査を行い、補正情報生成のためのアルゴリズムを設計し、電子基準点のオフラインデータを用いて、その評価を行った。

10 分程度の L1 一周波の観測を用いた測位処理においてアンビギュイティ決定の影響を評価した結果、要求される測位精度の実現のためには、アンビギュイティ決定が不可欠であることが明らかとなった。参照基準点観測情報の仕様は、領域毎に 1 点の電子基準点を参照基準点とし、その L1 搬送波位相データおよび擬似距離データを RTCM に準じたフォーマットに変換して配信することとした。衛星軌道情報は、対流圏遅延推定のために十分な精度を持つことから、IGU 暦の予測部分を用いることとした。衛星時計情報は、IGU 暦の値では精度が不十分であるため、日本全国をカバーする 20 点程度の電子基準点のデータを用いて推定する。対流圏遅延補正情報は、静水圧遅延量を既存のモデルで与え、湿潤遅延量のみを、計算負荷の小さな PPP で前述の衛星軌道・時計情報を用いて電子基準点毎に推定を行う。電離層遅延補正情報は、まず、二周波の位相および擬似距離観測値を用い、ネットワークモードで二重位相差のアンビギュイティを解いて、観測点と衛星を結ぶ各視線の遅延量を推定する。これを天頂方向の遅延量に換算して、視線が高度約 500km の電離層モデル面を貫通する点に投影し、双一次補間によりグリッド化されたモデルとする。なお、推定された電離層モデルの絶対値の精度は 3TECU 以内と評価され、この精度の範囲内で電離層の状況把握に用いることが可能であることが示された。

以上のようにして設計されたアルゴリズムを用いて補正情報を生成し、これを適用して電子基準点のオフラインデータを用いた測位解析を行い、測位精度を評価した。その結果、測位誤差の極端に大きなはずれ値となる事例が数多くあり、これを除いた上で評価を行った結果、アンビギュイティが解けた二重位相差の組み合わせが 4 つ以上の場合については、測位誤差が標準偏差 2 cm 以下（水平成分）を達成できることを確認した。はずれ値となる事例については、アンビギュイティのミスフィックスが発生しているものと目され、その頻度と電離層の活動度との間に相関がみられることから、電離層補正が不十分である可能性が示唆され、電離層補正情報の向上が課題として残された。

準天頂衛星の放送機能を考慮した補正情報の設計については、衛星の放送機能として想定されていた S 帯補正方式におけるデータ伝送量 (1Mbps) を下回るように補正情報が生成できることを確認した (443kbps)。また、準天頂衛星の放送機能については、補正情報の配信に支障がないことを確認した。

表 2-21 達成目標とフェーズ1評価結果

達成目標	評価結果
<p>電子基準点データをもとにして日本全国を対象としたネットワーク型 RTK-GPS 測位方式に適用可能な高精度測位補正情報を生成するための調査・設計、アルゴリズムの構築</p>	<p>参照基準点観測情報、衛星軌道・時計補正情報、対流圏遅延補正情報、電離層遅延補正情報を算出するアルゴリズムを設計した。電子基準点のオフラインデータを用いて補正情報を生成し、これを適用して測位解析を行った。正しいアンビギュイティ決定が行われた場合には、目標とする測位精度の達成が可能であることを確認した。</p> <p>ただし、電離層擾乱期の解析結果において正しいアンビギュイティ決定ができていないと目される場合ものが多く、電離層遅延補正情報の精度向上が今後の課題として残された。</p>
<p>電子基準点データをもとにして全国の電離層総電子数(TEC)分布をリアルタイムに推定しモデル化するアルゴリズムを開発</p>	<p>2周波の擬似距離データを、コード間バイアスを補正して処理することにより、電離層総電子数を算出する手法を採用した。この手法により電子基準点のオフラインデータを用いて電離層モデルを推定し、その評価を行った結果、その精度が 3TECU 以内であることを確認した。</p>
<p>準天頂衛星の放送機能を利用した補正情報の配信を想定し、補正情報の選択法(構造や書式)や容量を算出し設計</p>	<p>補正情報フォーマットの設計を行い、全ての情報を合わせて1 Mbps 以下で、伝送可能であることを確認した。</p>
<p>準天頂衛星の放送機能について調査</p>	<p>準天頂衛星の放送機能と、その他の放送システムについて調査を行い、とりまとめた。</p>

### 3. 補正情報生成・配信および受信・測位装置のプロトタイプの開発

フェーズ1で行った基礎技術の設計に引き続き、リアルタイム測位が可能な補正情報生成・配信および受信・測位装置のプロトタイプの開発、および、準天頂衛星システム計画の方針に合わせ、LEX 信号を用いる配信を想定した方式への対応を行った。

#### 3.1. 開発項目

フェーズ1で残された課題を解決するとともに、補正情報のサイズを伝送容量内に収めるため、配信される補正情報の内容・フォーマットの調整を行い、補正技術の改良を行う。特に、課題とされた電離層遅延補正の精度向上を実現するため、リアルタイムで利用できる電子基準点をほぼ全て使用した高密度な電離層遅延推定処理を行い、さらに、測位処理において補正情報を適用する際に、より精度の高い時間内挿を行うよう手法の改良を行う。

以上により構築した補正技術に基づき、補正情報の生成・配信から受信・測位までをリアルタイムで処理するシステムをプロトタイプとして構築する。構築したプロトタイプシステムを用いたリアルタイム測位実験を行い、その動作・性能を評価し、要求される性能を満たしうるものであることを確認する。具体的な開発項目を表 3-1、表 3-2 に示す。

表 3-1 S 帯・L 帯補正方式に共通な開発項目と評価実験

分類	開発項目	内容
補正情報の生成	電離層補正情報生成時の電子基準点使用数の変更	補正情報生成にはほぼ全ての電子基準点を使用する。領域とサブネットワーク、グリッド領域を調整する。
測位	電離層補正情報の適用方法の調整	補正情報の更新頻度を低くした場合に対応できる電離層遅延補正情報の内挿方法の開発を行う。
補正情報の配信	フォーマットの見直し	補正情報の読み書きを簡易化するため、補正情報フォーマットの見直しを行う。
システム構築	プロトタイプシステムの構築	構築した方法に基づいて補正情報の生成・配信および受信測位をリアルタイムで行うシステムのプロトタイプを構築する。また、リアルタイム予備実験を行い、設定の確認、および構築したプロトタイプシステムが要求される動作・性能を満たしうるものであることの確認を行う。
評価実験	リアルタイム測位実験	関東・沖縄の2地域において、プロトタイプシステムを用いて測位実験を行い、プロトタイプシステムが実地の観測において要求される動作・性能を満たしうるものであることを確認する。

表 3-2 L帯補正方式のための開発項目

分類	開発項目	内容
補正情報の生成	電離層領域形状の変更	配信データ量削減のため、電離層補正情報領域の形状を矩形から領域の形状に合わせた多角形面に変更する。
補正情報の配信	フォーマットの見直し	配信データ量削減のため、補正情報フォーマットの一部の見直しを行う。
	データ圧縮	配信データ量削減の選択肢として、補正情報の配信にデータ圧縮処理を導入する。

### 3.2. 測位補正技術の改良

フェーズ1で課題として残された電離層遅延補正の精度向上に取り組むと共に、伝送容量制約の遵守と要求精度の実現における有効性の観点から、補正情報の内容・フォーマットの見直しを行うことにより、フェーズ1で構築した測位補正技術の改良を行った。

### 3.2.1. 電離層遅延補正の精度向上

電離層遅延補正の精度を向上させるために、補正情報生成時に使用する電子基準点の空間密度向上、および、測位処理において電離層遅延補正を適用する際の時間内挿手法の導入という、2種類の改良を行った。

#### 3.2.1.1. 電離層補正情報生成における観測点密度の向上

フェーズ1において電離層補正の精度が不十分だった原因の一つは、電離層補正情報の生成のためにごく一部の電子基準点を用いており、用いられる電子基準点の配点密度が小さかったことが考えられる。そこで、リアルタイムに配信されている電子基準点をほぼ全点使用することにより、生成する電離層補正情報の精度向上を図る。

ほぼ全点の電子基準点を対象に電離層遅延の即時的推定を行うためには、膨大な計算を複数のタスクに分散し処理する仕組みが必要である。そのため、まず、領域分割の単位を見直し、フェーズ1で設定した5領域から12領域に細分化した。さらに、各領域をネットワークモードでのリアルタイムで処理が可能な単位（以後この単位を「サブネットワーク」と呼ぶ）に分割し、サブネットワークごとに推定処理を行い、グリッド化処理の際に、領域ごとにバイアスの調整を行いながら再統合する仕組みに改良した。電離層遅延量推定処理および電離層グリッド生成処理の実装のイメージを図3-1に示す。多数からなる電離層遅延量推定装置のそれぞれ1台では、4つのサブネットワークの電離層遅延量の推定を行う。推定された結果は、当該領域の電離層グリッド生成装置に送られ、領域ごとの電離層グリッドを生成する。DD2INXは、各サブネットワークの電離層推定結果から1つの領域の電離層グリッドを生成するソフトウェアである。

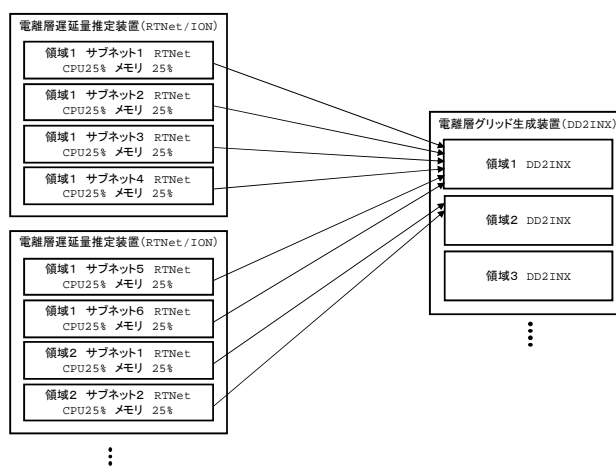


図 3-1 電離層遅延量推定および電離層グリッド生成のイメージ

### 3.2.1.2. 電離層遅延補正情報の適用における内挿方法の改良

フェーズ1では、電離層遅延補正情報の適用において、時間変化について線形内挿などの処理は行わず、単純に、新たな電離層遅延補正情報を取得するまでは、既を取得されている電離層遅延補正情報をそのまま使用する処理を用いていた。電離層遅延量は、電離層の電子密度の分布自体の時間変化や観測点と衛星を結ぶ視線の移動に伴い時間・空間的に変化するが、フェーズ1の手法ではこの変化が十分に考慮されていなかった可能性がある。

そこで、観測時刻を挟む2時点で作られた電離層遅延補正情報を、観測時刻において時間的に線形内挿する方式に改良した。この場合、観測時点以後に新たな電離層遅延補正情報を受信するまで、内挿処理を行うことができない点に注意が必要である。図3-2に、観測時間間隔を10秒、電離層遅延補正情報の間隔を30秒、最大内挿時間を30秒とした場合の時間内挿処理の経時的流れのイメージを示す。フェーズ1の処理では、測位解析時に取得済みの電離層遅延補正量をそのまま使用していたため、補正情報が更新されるまでの間は同じ遅延量を適用して即座に解析を行っていた（図3-2の上段）。改良後は、測位解析時刻の前後2時点における補正情報を基に時間内挿処理を行うため、新たな補正情報が得られた時点で、時間を遡って電離層時間内挿値を算出・適用して測位解析処理を行う（図3-2の下段）。

改良されたアルゴリズムをもとに作成した時間内挿処理コードを、補正情報受信・測位装置における電離層遅延補正情報適用処理に追加し、リアルタイムでの測位処理を行った。その結果、S帯補正方式においては参照基準点観測情報の更新頻度10秒に対して電離層遅延補正情報の更新頻度を30秒に、L帯補正方式においては同30秒に対して120秒に設定した場合においても、L1一周波測位が実行可能なことを確認した。

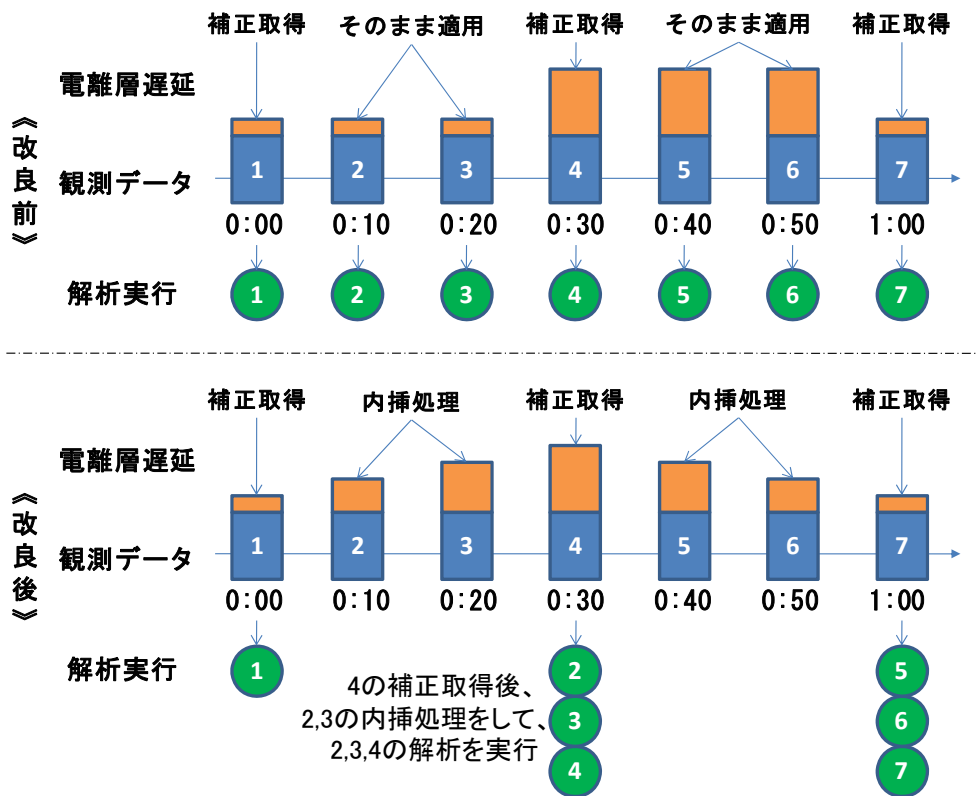


図 3-2 電離層遅延補正情報の時間内挿処理イメージ(S 帯補正方式の例)

### 3.2.2. LEX 仕様への適合を考慮した補正情報の仕様変更

L 帯補正方式において LEX 仕様の伝送速度 (1,695bps) に収まるように補正情報の仕様を検討する必要がある。そのため、測位精度を確保しつつ補正情報の配信容量を削減する改良を行った。S 帯補正方式については配信容量に削減の必要はないが、処理方式やフォーマットはなるべく L 帯補正方式と共通になるように設計し、測位精度を確保できる範囲で削減可能なものについては削除を行う。特に、電離層遅延補正情報については領域の数や形状・グリッドサイズを変更することにより、データ量を削減する。

#### 3.2.2.1. 電離層領域形状の変更

電離層遅延量の推定において全ての電子基準点を使用するために、電離層遅延推定領域を細分化した。さらに、測位の対象域をカバーするために必要かつ最小限の範囲のみを配信するため、領域の形状を矩形から多角形に変更することで、余分な領域を削除した。多角形領域の例を図 3-3 に示す。赤点が参照基準点 (電子基準点つくば 3 ; 960627)、赤線は電離層領域の境界、青数字は領域番号、4 桁の数字はその位置に置かれている電子基準点の ID である。なお、実際の配信領域は、上空に設定された電離層面上に配置され



るので、この図の表示は、衛星が天頂方向にあるとした場合の電離層面上のグリッド領域のイメージである。実際には、補正情報の領域は、衛星の位置に応じて移動するものである点を注意する。

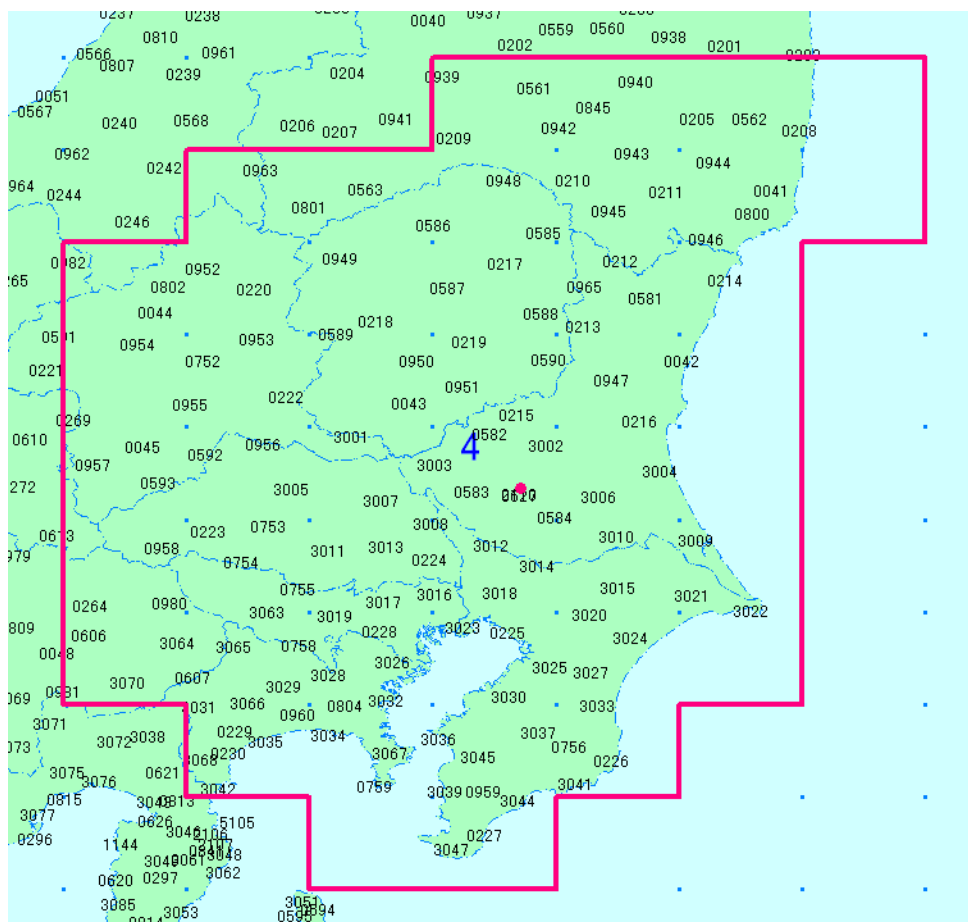


図 3-3 新しい領域形状の区分(関東領域)

### 3.2.2.2. データの圧縮

配信する補正情報のデータ量を削減するための選択肢として、データ圧縮を行う機能を追加した。圧縮方法には、標準的な圧縮方式である zip を用いる。

### 3.2.2.3. 補正情報フォーマットの見直し

補正情報の配信については、L帯補正方式の伝送速度を考慮してデータ数を削減するため、各種補正情報の内容とフォーマットの見直しを行った。S帯補正方式については、補正情報のフォーマットはL帯補正方式と同一とし、内容についても、補正情報の分解能等を除き、基本仕様はほぼ同じものとした。表 3-3 に、フェーズ 1 で設定したフォーマット (表 2-19) と、ここで見直したフォーマット (表 3-4) との変更点とデータの増減

量を示す。データの増減量については、各補正情報レコード（圧縮前）の増減量で記載した（表 2-19[全体サイズ]欄の値と、表 3-4[全体サイズ]欄の値の差分）。

表 3-3 補正情報フォーマットの変更点とデータ量削減効果

種類	内容	変更点およびデータサイズの増減（バイト）
1) レコード構造ヘッダ	補正情報レコードのヘッダ部分	ヘッダの拡張(+4) ※1レコードあたりの増加数
2) 基本情報、領域情報	補正情報全般、領域の情報	全削除(-46-114=-160)
3) 参照基準点情報	参照基準点に関する情報	全削除(-168)
4) 参照基準点観測情報	観測データ	RTCM3.0 フォーマット準拠に変更(+381) ※フェーズ1は6領域12衛星で算出、フェーズ2は12領域、8衛星で算出した場合の増加数
5) 衛星軌道・時計補正情報	衛星軌道と時計の補正值	時刻表現の変更・ 衛星状態表現の変更(-977)
6) 対流圏遅延補正情報	推定された対流圏遅延量	参照基準点座標はあらかじめファイルとしてもつことに変更。遅延量は絶対値に変更。 (-11,706)
7) 電離層遅延補正情報	推定された電離層遅延量をグリッド化したもの	不要な情報を削除(-499,062) ※フェーズ1は6領域12衛星グリッド間隔 0.1°×0.15°で算出、フェーズ2は12領域8衛星グリッド間隔 0.3°×0.4°で算出した場合の減少数

#### 1) レコード構造ヘッダの変更内容

圧縮タイプと（フェーズ1の設計では基本情報に記載していた）補正情報のバージョンを追加した。後者は、基本情報に含まれるデータの一部を削除することに伴う追加である。

## 2) 基本情報・領域情報の変更内容

基本情報として、バージョン情報、参照基準点数、領域分割数が含まれていた。また、領域情報として、1つの電離層領域の最大、最小の緯度経度が含まれていた。領域形状を矩形から多角形に変更し、電離層遅延補正情報から領域を得るようにすることで、領域に関する情報を削除することとした。さらに、参照基準点を1領域に1点としたこと、バージョン情報をレコード構造ヘッダに移動したことにより、これらの情報を全て削除することとした。

## 3) 参照基準点情報の変更内容

参照基準点情報には、各領域の参照基準点となる電子基準点の正確な座標が含まれる。フェーズ1の設計では、この項目の内容として各電子基準点のID、座標とアンテナを含めていた。今回の改良では、変更される機会の少ない内容について受信・測位装置側では別途ファイルとしてあらかじめ取得する方法に変更し、配信情報からは削除することとした。各電子基準点が属する領域のID、補正情報のサンプリングレート、アンテナ名を追加した。

## 4) 参照基準点観測情報の内容変更

参照基準点観測情報には、参照基準点となる電子基準点における観測データを与える。フェーズ1の設計では、RTCM3.0に含まれるものから必要最小限の内容のみを抜粋し、配信することとしていた。しかし、各種受信機への汎用性を考慮し、RTCM3.0フォーマット (MessageType 1002)に準拠したデータ形式のほぼ全てを含めることとした。

## 5) 衛星軌道・時計補正情報の内容変更

衛星軌道・時計補正情報には、IGS 超速報暦による軌道情報と本システムで推定した衛星時計情報が含まれる。フェーズ1の設計では時刻をTOW (Time of Week) で表現していたが、それをDOY (Day of Year) と TOD (Time of Day) に分けて与えることにし、また、衛星状態を1ビット (正常 or 異常) で表現していたが、IGSで規定されている衛星軌道暦フォーマット (sp3) に整合させることに変更 (衛星状態として衛星の位置精度を0から99までの値を用いて表現) した。

## 6) 対流圏遅延補正情報の内容変更

フェーズ1の設計では、この情報に領域ID、全ての電子基準点の正確な座標と遅延量が含まれていた。このうち、対流圏遅延補正情報では領域分割しないので、領域IDは不要である。また、電子基準点の座標は、上記1)で述べたとおり、参照基準点情報として別途提供することとした。したがって、この情報として対流圏遅延量だ

けを含めることに変更した。その場合、フェーズ 1 の設定で用いた相対表現では一部のデータがパケットロスなどで失われると全情報が取得できなくなる危険性があるため、絶対値で表現することに変更した。

#### 7) 電離層遅延補正情報の内容変更

電離層遅延補正情報は、データ量として最も大きくなる情報である。フェーズ 1 の設計では、IONEX ファイルのフォーマットに含まれる情報をほぼそのままバイナリ化したものを用いた。それは、マッピング関数やバージョン等の補助的な情報を含む、汎用性のある仕様であるが、本補正方式ではそのような汎用性は必ずしも必要ではないので、これらの情報を削除した。

以上のように、補正情報フォーマットの見直しを行った後、L 帯補正方式の伝送速度 (1,695bps) に収まるように条件を検討した。まず、電離層補正情報の配信間隔を S 帯補正方式の 4 倍、グリッドサイズを各辺 2 倍とした。次に、観測時間を 10 分と仮定し、衛星軌道については情報取得の待ち時間を、観測時間の半分以下を限度として、240 秒に設定した。同様に、対流圏についても時間的な変化が少ないと考え、S 帯補正方式の倍 (240 秒) とした。最後に、参照基準点観測情報を 30 秒とすることで計算上の合計が 1,350bps (zip 圧縮を適用) となり、L 帯補正方式の伝送速度内に収めることができるので、ひとまずこれらの値を L 帯の基本設定値と仮決めした (表 3-4 参照)。

表 3-4 フォーマット変更後の L 帯補正方式のデータ量の見積

種類	全体サイズ (bytes)	圧縮率 (%)	圧縮後サイズ (bytes)	頻度 (秒)	必要帯域 (bps)
参照基準点観測情報	999	10	900	30	240
衛星軌道、時計補正情報	2,007	0	2,007	240	67
対流圏遅延補正情報 (電子基準点ごとの遅延量)	7,225	50	3,613	240	121
電離層遅延補正情報 (12 領域)	19,740	30	13,818	120	922
合計					1,350

### 3.3. プロトタイプシステムの構築

フェーズ 1 で構築した測位手法に、3.2.で行った改良を取り入れた上で処理のリアルタイム化を図り、補正情報の生成・配信および受信・測位を行うシステムのプロトタイプを構築し、リアルタイム予備実験を行って、その動作・性能を確認した。

### 3.3.1. プロトタイプシステムの構築

補正情報の生成・配信を行う装置と受信・測位を行う装置の2つのプロトタイプシステム（ソフトウェアを含む）を構築した。前者の構成を図 3-4 および表 3-5 に、後者の構成を図 3-5 および表 3-6 にそれぞれ示す。なお、図 3-5 および表 3-6 は、複数の観測と処理を同時並列で行ったリアルタイム予備実験において測位点側で用いた機器の全体構成を示したものであり、2台のGPS受信機と4台のPCが用いられているが、受信・測位装置単体としては、GPS受信機1台および、測位用PC1台によって構成されるものである。

補正情報生成・配信装置は、リアルタイムデータ配信システムより取得した1秒エポックの全電子基準点データおよびIGU暦等の外部データを用いて、測位に使用する補正情報を生成する。生成・配信される補正情報は、「参照基準点観測情報」、「衛星軌道・時計補正情報」、「対流圏遅延補正情報」、「電離層遅延補正情報」である。補正情報生成・配信装置は、これらの補正情報をインターネット経由で配信する。

測位実験では、補正情報受信・測位装置は、NGS社蒲田事業所屋上に設置したGPSアンテナで受けた測位信号をL1測位実験用GPS受信機2台に分配し、測位点側の観測データを取得する。また、精度比較用に二周波GPS受信機を設置する。補正情報生成・配信装置で生成された補正情報はインターネット経由で取得する。これらのデータを用いて、解析PCにおいてL1一周波測位を行う。

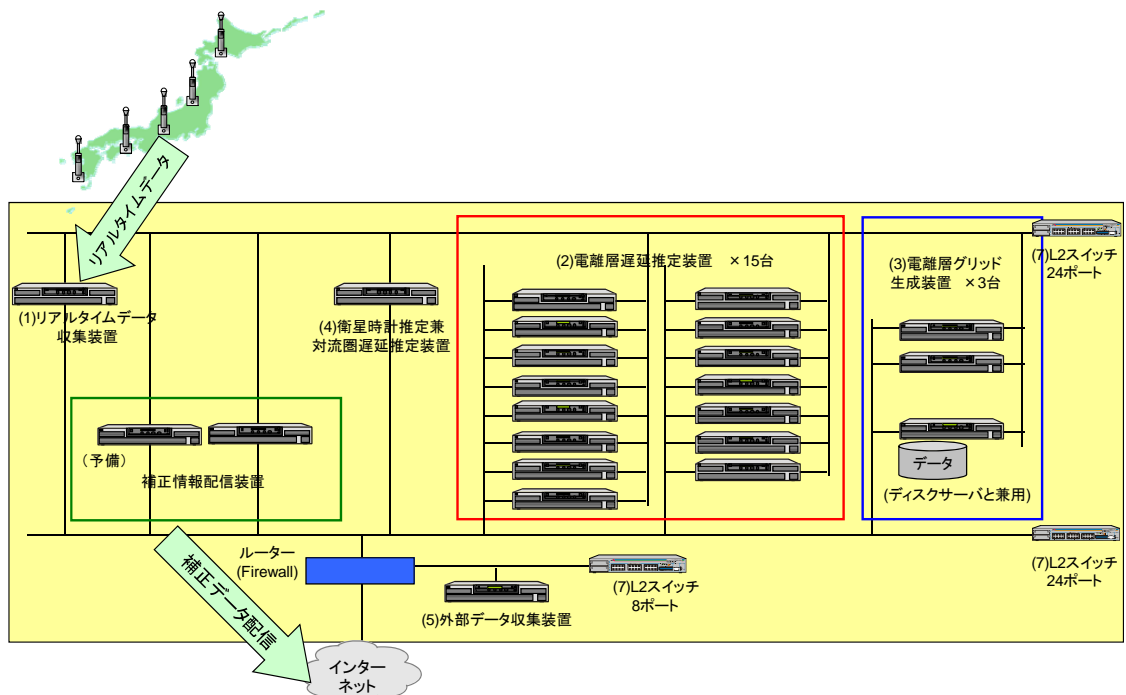


図 3-4 補正情報生成・配信装置の構成

表 3-5 補正情報生成・配信装置のシステム構成

	種類	構成	備考
(1)	リアルタイムデータ 収集装置 (1台)	プロセッサ:Xeon 3.60GHz 2MB キャッシュ×2 メモリ: 4GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	リアルタイムデータ約 1200 点の収集
(2)	電離層遅延推定装置 (15台)	プロセッサ:Xeon 3.60GHz 2MB キャッシュ×2 メモリ: 4GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	全部で 61 あるサブネットワ ークごとの解析プロセスを、 4~5サブネットワークずつ 15 台の装置に分けて、並 列に実行
(3)	電離層グリッド生成 装置 (3台)	プロセッサ:Xeon 3.60GHz 2MB キャッシュ×2 メモリ: 4GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	全部で12ある領域毎の解 析プロセスを4プロセスず つ3台に分けて、並列に実 行
(4)	衛星時計推定装置 および対流圏遅延推 定装置 (1台)	プロセッサ:Xeon 3.80GHz 2MB キャッシュ×2 メモリ: 4GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	衛星時計推定1プロセスの 実行、及び、対流圏遅延推 定を約 20 点分ずつの 58 プロセス(電子基準点約 1200 点)に分けて並列に 実行
(5)	外部データ収集装置 (1台)	プロセッサ:Xeon 3.00GHz 2MB キャッシュ×1 メモリ: 1GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	
(6)	補正情報配信装置 (1台)	プロセッサ:Xeon 3.00GHz 2MB キャッシュ×1 メモリ: 1GB、ハードディスク: 70GB(10krpm) ネットワーク 1000Base-T×2 ポート	
(7)	L2スイッチ (3台)	1000BASE-T×24 ポート	

※第 1 列の数字は図 3-4 中に示された番号に対応している。

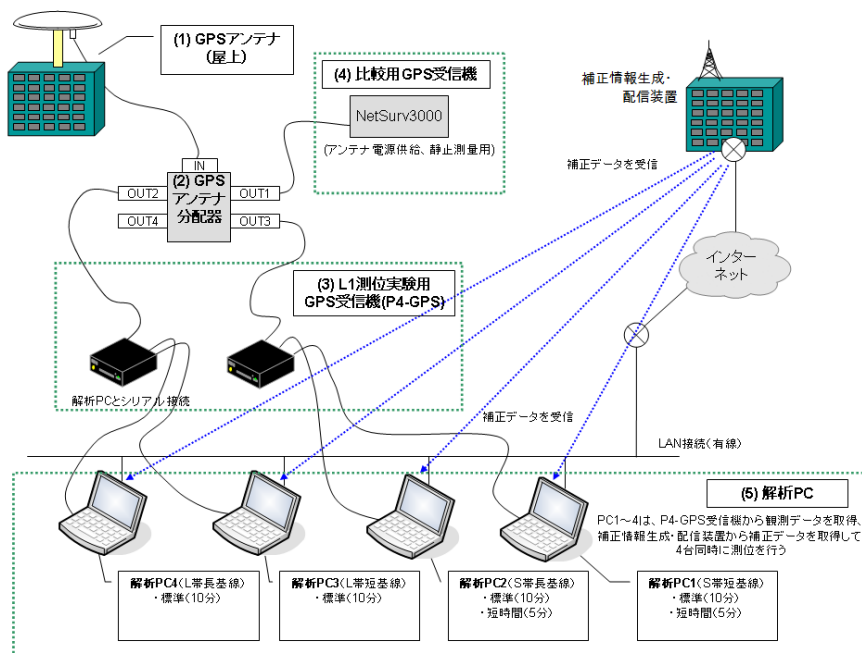


図 3-5 補正情報受信・測位装置の構成(予備実験における構成)

表 3-6 実験に用いられた受信・測位装置の機器構成

	種類	機種	メーカー	備考
(3)	L1 一周波 測位実験 用 GPS 受 信機	P4-GPS	日本 GPS ソリューション ズ株式会社	L1 一周波受信に使用。観測デー タを 2 つのシリアルポートに分配 し、2 台の解析 PC に出力。
(4)	比較用二 周波 GPS 受信機	NetSurv3000	日本 GPS ソリューション ズ株式会社	GPS アンテナへの電源供給用に 使用。また、精度評価のための 静止測量に使用。
(5)	解析用 PC	TOUGH BOOK CF-18	松下電器産業株式会社 (Panasonic)	L1 一周波測位解析。(解析 PC1, 2)
		nc2400	日本ヒューレット・パッ カード株式会社	L1 一周波測位解析。(解析 PC3, 4)

※第 1 列の数字は図 3-5 中に示された番号に対応している。

### 3.3.2. リアルタイム予備実験

#### 3.3.2.1. リアルタイム予備実験の目的

構築したプロトタイプシステムが必要とされる動作および性能を実現するものであることを確認するため、リアルタイム予備実験を実施した。本実験においては、電子基準

点のリアルタイムデータを用いた補正情報生成・配信、および、受信した補正情報と一周波 GPS 受信機の観測データを用いた測位がいずれもリアルタイムで処理可能であることを確認する。また、設定された補正情報の更新頻度が要求される測位精度を達成するものかどうかを確認するとともに、S 帯補正方式および L 帯補正方式のそれぞれにおいて、妥当な観測時間の目安を得る。

### 3.3.2.2. リアルタイム予備実験の実施方針・実施内容

リアルタイム予備実験で使用する短基線および長基線についての設定を表 3-7 に、基線図を図 3-6 に示す。東京都大田区の日本 GPS ソリューションズ株式会社 (NGS) 蒲田事業所の屋上に GPS アンテナを設置して測位点とし、宇都宮(960219)を長基線における参照基準点とし、つくば3(960627)を短基線における参照基準点とした。補正情報の配信にはインターネットを用いた。補正情報として表 3-8 に記載する基本設定値を用いて、S 帯補正方式、L 帯補正方式ともに測位精度の検証を行った。

表 3-7 リアルタイム予備実験の基線設定

基線種別	観測点配置	参照基準点	基線長
短基線	東京都大田区 (NGS 蒲田事業所)	960627 つくば3	約 73km
長基線	東京都大田区 (NGS 蒲田事業所)	950219 宇都宮	約 118km

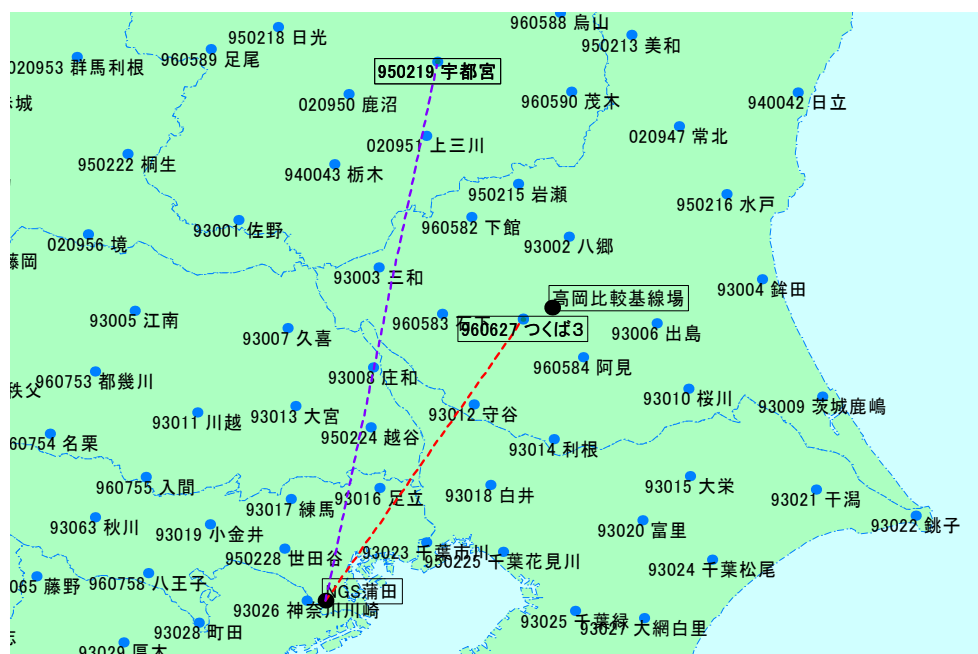


図 3-6 リアルタイム予備実験の基線



表 3-8 S 帯、L 帯補正方式の基本設定値

補正情報種別	項目	S 帯補正方式	L 帯補正方式
参照基準点観測情報	更新頻度 (秒)	10	30
衛星軌道・時計補正情報	更新頻度 (秒)	120	240
対流圏遅延補正情報	更新頻度 (秒)	120	240
	使用する電子基準点数	全点	全点
電離層遅延補正情報	更新頻度 (秒)	30	120
	グリッドサイズ (° ) (緯度方向×経度方向)	0.15×0.2	0.3×0.4
	領域数	12	12
	最低仰角 (° )	15	15

### 3.3.2.3. 補正情報の生成時間

電離層遅延補正情報と対流圏遅延補正情報の生成にかかる処理時間の確認を行った。表 3-9 に示されたとおり、それぞれの更新頻度（電離層遅延補正情報：30 秒、対流圏遅延補正情報：120 秒）以内で、全国についての補正情報を生成できることが確認された。

表 3-9 補正情報の生成処理に要した時間

補正情報種別	最小時間	最大時間	平均時間
電離層遅延補正情報	16.40 秒	21.00 秒	17.79 秒
対流圏遅延補正情報	22.90 秒	26.60 秒	24.10 秒

### 3.3.2.4. 基本設定値における S 帯補正方式の観測時間の評価

表 3-8 で示した基本設定値における観測時間の評価を行った。S 帯補正方式については、標準観測時間を 10 分、短時間観測を 5 分として比較を行った。L 帯補正方式については、観測時間を 10 分として観測を行い、精度の確認を行った。

S 帯補正方式および L 帯補正方式についての測位結果を、それぞれ表 3-10、表 3-11 に示す。表中、「FIX」は、アンビギュイティが 4 つ以上解けたフィックス解のうち、静止測量で得られた真値からの水平誤差が 10cm 未満の観測数、「MissFIX」は、フィックス解のうち真値からの水平誤差が 10cm 以上の観測数、「NotFIX」はフィックスできな

った観測数、「有効測位率」は全観測数に対する FIX 数の割合、「水平誤差 (RMS)」は FIX 解についての水平誤差の RMS である。

S 帯補正方式、L 帯補正方式とも、観測時間 10 分での観測の有効測位率が 95%となっている。一方、S 帯補正方式について行われた観測時間 5 分での有効測位率は、75~85%となっており、やや低い結果となった。これらから、両測位方式とも観測時間として 10 分程度を目安とすることが妥当と思われる。

表 3-10 S 帯補正方式基本設定値での測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計	有効測位率[%]	水平誤差 (RMS) [m]
短基線・標準観測時間 (10 分)	19	1	0	20	95%	0.0089
短基線・短時間観測 (5 分)	15	5	0	20	75%	0.0081
長基線・標準観測時間 (10 分)	19	1	0	20	95%	0.0102
長基線・短時間観測 (5 分)	17	3	0	20	85%	0.0097

表 3-11 L 帯補正方式基本設定値での測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計	有効測位率[%]	水平誤差 (RMS) [m]
短基線・標準観測時間 (10 分)	19	1	0	20	95%	0.0075
長基線・標準観測時間 (10 分)	19	1	0	20	95%	0.0139

### 3.4. リアルタイム測位実験

前節で構築したプロトタイプシステムが、地域によらず、必要とされる性能を達成できるものであることを実地の観測で確認するため、沖縄および関東の2地域でリアルタイム測位実験を実施した。

#### 3.4.1. リアルタイム測位実験の目的

リアルタイム測位実験は、プロトタイプシステムを用いて、S帯補正方式およびL帯補正方式それぞれについて観測を実施し、補正情報の生成・配信から受信・測位までの処理がリアルタイムに行われ、実験地域、測位方式、基線長等の条件によらず、水平成分がRMSで2cm以内の誤差で測位が可能であることの確認を目的とする。ここで、測位誤差はあらかじめ静止測量で求められた測位点の正確な座標からの差として評価するほか、フィックス解取得までの時間、有効測位率についても評価を行う。

また、L帯補正方式においては、補正情報のサイズが伝送速度の制限内であるかどうかについても確認を行い、制限を超えた場合には、測位処理に用いる衛星数を減らした場合の測位精度についても評価を行う。さらに、準天頂衛星による補正情報の伝搬遅延を想定し、データ遅延を付加した場合の測位への影響の有無についても評価を行う。

#### 3.4.2. リアルタイム測位実験のシステム構成

リアルタイム測位実験で用いたシステムの受信・測位装置側の機器構成を図3-7に示す。補正情報生成・配信装置は、プロトタイプシステムの構成と同一である(図3-4参照)。受信・測位装置の構成は、基本的にはリアルタイム予備実験で使用したのと同じであるが、屋外での観測用のインターネット接続装置(ルータおよび通信カード)と準天頂衛星を想定したデータ遅延を模擬するデータ遅延装置を追加した。

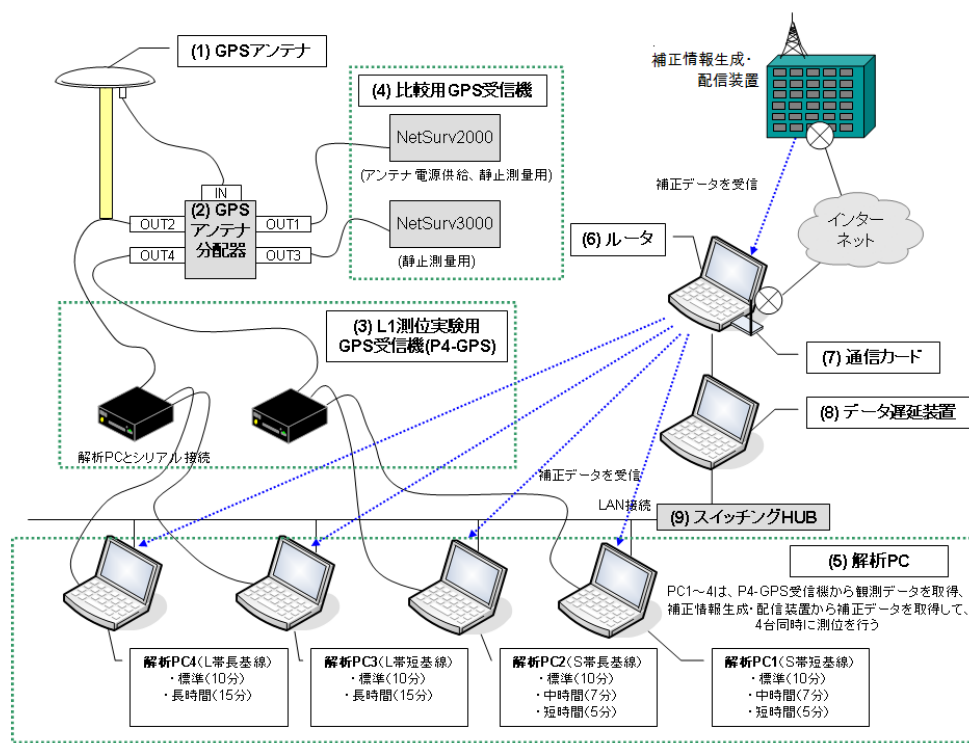


図 3-7 リアルタイム測位実験の機器構成(受信・測位側)

本実験では、なるべく多くの観測結果を取得し、また、同じ時間帯で測定方法の異なる観測結果を比較するために、単一の GPS アンテナの受信データを分配器で 2 台の L1 一周波測位実験用 GPS 受信機に分配して観測を行い、それぞれの受信機の 2 つのポートから出力される合計 4 つの受信信号を 4 台の解析用 PC に入力して、4 台同時に測位解析を行った。また、比較データ取得用に、GPS アンテナからの信号は、分配器において更に 2 台の二周波 GPS 受信機 (NetSurv2000 と NetSurv3000) に分配して静止測量方式の観測を行った。各解析用 PC は、通信カードをもったルータを介して補正情報生成・配信装置にインターネット経由で接続した。補正情報生成・配信装置では、常に、S 帯補正方式と L 帯補正方式の両方の補正情報を生成し、それぞれの補正情報を、サーバの IP アドレスとポート番号を分けて配信させた。4 台の解析用 PC のそれぞれは、このどちらかのポートにアクセスし、対象とする補正方式の補正情報を取得した。また、1 台の解析用 PC で複数の解析プロセスを同時に実行させ、同じ補正情報を使用して観測時間長の異なる測位処理を並列で行った。

また、解析用 PC とルータの間にデータ遅延装置を組みこみ、転送遅延を伴う実験を行った。データ遅延を与えない実験の場合は、データ遅延装置で発生させる遅延時間をゼロに設定して使用した。

表 3-12 に、各解析用 PC で行った実験の種類を示す。

表 3-12 各解析用 PC で行った実験の設定項目

評価項目	解析 PC1	解析 PC2	解析 PC3	解析 PC4
観測時間 長の違い	S 帯・短基線 ・標準時間 (10 分) ・中時間 (7 分) ・短時間 (5 分)	S 帯・長基線 ・標準時間 (10 分) ・中時間 (7 分) ・短時間 (5 分)	L 帯・短基線 ・長時間 (15 分) ・標準時間 (10 分)	L 帯・長基線 ・長時間 (15 分) ・標準時間 (10 分)
転送遅延 の影響	S 帯・長基線 ・標準時間 (10 分) ・遅延あり	S 帯・長基線 ・標準時間 (10 分) ・遅延なし	L 帯・長基線 ・長時間 (15 分) ・遅延あり	L 帯・長基線 ・長時間 (15 分) ・遅延なし

### 3.4.3. 沖縄地域の実験状況

#### 3.4.3.1. 実験設定

沖縄地域の観測点位置と使用した参照基準点を図 3-8、表 3-13 に示す。黒色の点が観測点位置である。赤で示した点 (940100 玉城、021095 北谷、960741 沖縄石川) は短基線での参照基準点であり、紫で示した点 (960737 国頭) は長基線での参照基準点である。実験開始当初は「北谷」を短基線の参照基準点としていた。しかし、「北谷」を使用した基線解析では、実験中アンビギュイティが突然減少する現象が多数見られ解析が不安定であったため、「玉城」に変更したが、ここでも同様の現象が見られた。最終的には、「沖縄石川」を参照基準点として使用することとした。(解析が不安定となった原因はクロックジャンプの処理の不具合にあることが、事後の原因調査でわかった。これについては後述する。)

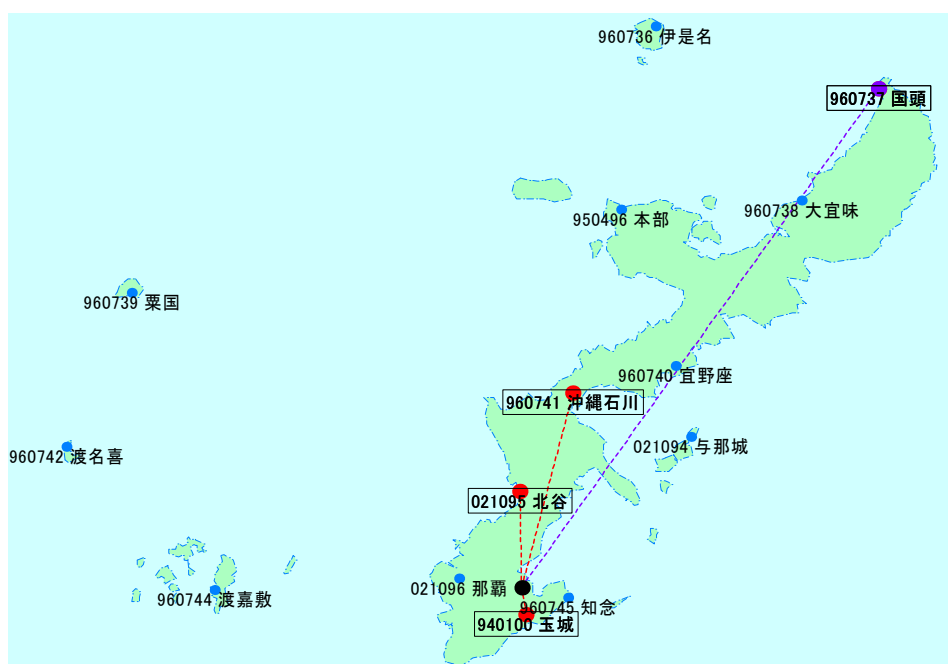


図 3-8 沖縄地域での観測点位置

表 3-13 沖縄地域実験に使用した基線

基線種別	観測点位置	参照基準点	基線長	観測日(2007年)
短基線	沖縄(大里内原公園)	021095 北谷	約 14km	3/12~13
短基線	沖縄(大里内原公園)	940100 玉城	約 4km	3/14 午前
短基線	沖縄(大里内原公園)	960741 沖縄石川	約 30km	3/14 午後
長基線	沖縄(大里内原公園)	960737 国頭	約 90km	3/12~3/14

### 3.4.3.2. 測位解析の結果

S 帯補正方式における実験の測位解析結果を表 3-14 に、L 帯補正方式における結果を表 3-15 にそれぞれ示す。表において、各項目の定義は 3.3.2.4.と同じである。短基線の統計には、参照基準点として用いた「北谷」「玉城」「沖縄石川」の全ての場合を含んでいる。なお、実験計画には転送遅延付与テストが含まれていたが、転送遅延を付与したところ、補正情報配信および受信ソフトウェアが異常終了する現象が発生したため、データ遅延を評価するためのデータを得ることができなかった(詳細は 3.4.5.3.に記載)。従って、以降の集計には遅延ありのデータは含まれていない。

沖縄地域での S 帯補正方式による有効測位率が 17.0~37.8%であり、水平誤差が RMS で 2cm 以下とならなかった(表 3-14)。他方、L 帯補正方式では、有効測位率が 18.5~43.5%であり、長基線 15 分の結果においては水平誤差が RMS で 2cm 以下にならなかった(表 3-15)。

表 3-14 沖縄地域の実験のS帯補正方式における実験の測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計	有効測位率[%]	水平誤差(RMS) [m]
短基線 (10分)	20	7	61	88	22.7%	0.0256
短基線 (7分)	21	18	49	88	23.9%	0.0279
短基線 (5分)	15	33	40	88	17.0%	0.0261
長基線 (10分)	34	22	34	90	37.8%	0.0232
長基線 (7分)	28	44	20	92	30.4%	0.0362
長基線 (5分)	25	52	14	91	27.5%	0.0386

表 3-15 沖縄地域の実験のL帯補正方式における実験の測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計	有効測位率[%]	水平誤差(RMS) [m]
短基線(15分)	10	1	43	54	18.5%	0.0125
短基線(10分)	20	6	66	92	21.7%	0.0149
長基線(15分)	27	9	26	62	43.5%	0.0281
長基線(10分)	23	28	48	99	23.2%	0.0180

### 3.4.4. 関東地域の実験状況

#### 3.4.4.1. 実験設定

関東地域の実験点位置と使用した参照基準点を図 3-9、表 3-16 に示す。黒色の点が観測点位置である。赤で示した点 (950219 宇都宮) は短基線での参照基準点、紫で示した点 (020946 いわき 4, 020945 棚倉, 020952 水上 2) は長基線での参照基準点である。実験開始時は「棚倉」を長基線の参照基準点としたが、これを用いた場合の基線解析では、沖縄での実験時と同様に、アンビギュイティが突然減少する現象が多数見られ、解析が不安定であった。そこで参照基準点を「いわき 4」に変更して実験を行った。すると、その場合にも同様の現象が見られた。そのため、最終的には、参照基準点には「水上 2」を使用することとした。(解析が不安定となった原因はクロックジャンプの処理の不具合にあることが、事後の原因調査でわかった。これについては後述する。)

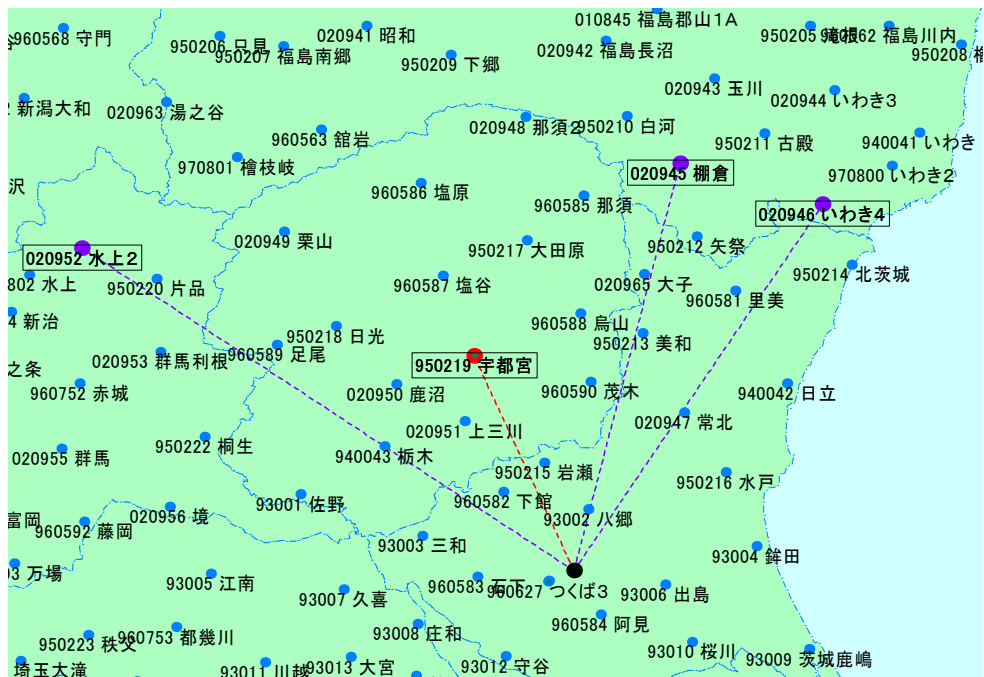


図 3-9 関東地域での基線配置

表 3-16 関東地域実験の設定

基線種別	観測点位置	参照基準点	基線長	観測日(2007年)
短基線	つくば(高岡基線場)	950219 宇都宮	約 56km	3/16~17
長基線	つくば(高岡基線場)	020945 棚倉	約 103km	3/16 午前
長基線	つくば(高岡基線場)	020946 いわき 4	約 108km	3/16 午前
長基線	つくば(高岡基線場)	950952 水上 2	約 144km	3/16 午後~3/17

#### 3.4.4.2. 測位解析の結果

S 帯補正方式における実験の測位解析の結果を表 3-17 に、L 帯補正方式における結果を表 3-18 にそれぞれ示す。集計は、参照基準点ごとではなく、基線長の設定種別で取りまとめた。つまり、長基線の統計は、参照基準点として用いた「棚倉」「いわき 4」「水上 2」の全ての場合を含んでいる。なお、沖縄実験と同様に、実験の計画時に予定していた転送遅延付与テストについては、実施できなかった(詳細は 3.4.5.3.に記載)。従って、以降の集計には遅延ありのデータは含まれていない。

関東地域での実験の測位精度は、沖縄地域の結果に比べ良好であった。水平誤差は S 帯・L 帯両補正方式において RMS で 2cm を越えることがなく、要求精度を満足するものであった。しかし、有効測位率が S 帯補正方式で 50.9~74.6%、L 帯補正方式で 58.6~88.1% となり、安定した測位とは言えない。



表 3-17 関東地域の実験のS帯補正方式における測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計観測数	有効測位率[%]	水平誤差(RMS) [m]
短基線 (10分)	44	2	13	59	74.6%	0.0082
短基線 (7分)	42	7	10	59	71.2%	0.0078
短基線 (5分)	36	16	8	60	60.0%	0.0084
長基線 (10分)	29	5	23	57	50.9%	0.0126
長基線 (7分)	31	6	19	56	55.4%	0.0196
長基線 (5分)	29	15	12	56	51.8%	0.0186

表 3-18 関東地域の実験のL帯補正方式における実測位結果

基線・観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計観測数	有効測位率[%]	水平誤差(RMS) [m]
短基線 (15分)	37	1	4	42	88.1%	0.0159
短基線 (10分)	53	1	13	67	79.1%	0.0149
長基線 (15分)	19	2	14	35	54.3%	0.0128
長基線 (10分)	34	9	15	58	58.6%	0.0153

### 3.4.5. リアルタイム測位実験の評価

#### 3.4.5.1. 実験における測位の不安定性の原因

リアルタイム測位実験の結果は、いずれの地域、いずれの補正方式においても有効測位率が低く、極めて不安定というべきものであった。原因を調査し、次のようないくつかの要因が判明した。

- ・ 参照基準点観測情報に含まれるクロックジャンプの処理に不具合があり、これをサイクルスリップと誤認識してアンビギュイティ解決が初期化され、与えられた観測時間内で測位解取得に至らないもの。
- ・ 必要な補正情報の取得が完了する前に L1 一周波測位動作を開始する不具合があり、測位が完結しないもの。
- ・ 携帯電話の通信不良によるパケットロスが発生する障害があり、補正情報の取得を失敗するもの。
- ・ 対流圏遅延補正情報生成装置においてディスク使用量超過が発生し、それ以降の補正情報の生成処理が行われず、補正情報が配信されないもの。

このうち、最後の2点は実験時の通信環境や運用上の問題であり、プロトタイプシステムの問題ではない。最初の2点については、プロトタイプシステムの不具合に起因するものであるため、これらを解決するためのソフトウェアの改修はフェーズ3において

行うこととした。また、これらの問題のため、プロトタイプシステム本来の性能をリアルタイム動作実験において評価することができなかったため、実験終了後に、リアルタイム測位実験で取得された観測データを用いた後処理解析を行い、その測位結果を用いて性能評価を行った(3.4.6.を参照)。

#### 3.4.5.2. 電離層遅延情報量の削減

リアルタイム測位実験における L 帯補正情報のデータ量を評価したところ、3.2.2.に記載した補正情報の内容とフォーマットの調整を経ても平均で 1,802bps となった。したがって、準天頂衛星の LEX 帯の制限である 1,695bps を超過したため、更なるデータ量の削減が必要であることが明らかとなった。

##### (1) 衛星数制限

データ量削減の方策の一つとして、配信する参照基準点観測情報と電離層遅延補正情報に含まれる衛星数（つまり、測位処理に用いる衛星の数）に制限を加えることが考えられる。試算の結果、9 衛星の場合には L 帯補正方式の伝送速度 2 kbps を超えてしまうため、配信する補正情報に含まれる衛星数の上限を 8 衛星とすることを案とし、その場合の測位精度への影響を評価した。

沖縄地域および関東地域で取得した観測データを用いて、測位に利用された衛星数が 8 を越える場合について、仰角の低い衛星を手作業で削除して衛星数を 8 衛星に制限したうえで測位計算を行う。この結果を、衛星数を制限しない場合の解析結果と比較評価した。表 3-19 に関東地域の実験データのうち、参照基準点において衛星捕捉数が 9 個以上のものを抽出して示す。衛星数制限なしの場合と 8 衛星に制限した場合でアンビギュイティが解決された衛星対数 (Amb.解決数) と測位精度 (水平成分) の低下は顕著なものではなく、したがって、8 衛星での補正情報の制限は測位に致命的な影響を及ぼしていないことを確認した。

表 3-19 衛星数制限あり・なしでの測位結果例(関東・長基線)

観測日	解析終了時刻	衛星数制限なし				衛星数制限あり			
		PDOP 端末側	PDOP 参照基準 点側	Amb. 解決数	測位精度 (水平成分) [m]	PDOP 端末側	PDOP 参照基準 点側	Amb. 解 決数	測位精度 (水平成分) [m]
16 日	5:31:53	1.71	1.71	7	0.0187	1.71	1.94	7	0.0187
	6:21:20	1.98	1.79	7	0.0124	1.98	2.94	6	0.0126
	6:32:02	1.88	1.68	7	0.0135	1.88	2.88	6	0.0165
17 日	5:22:03	1.68	1.68	6	0.0094	1.68	1.94	6	0.0094
	6:12:20	2.04	1.83	7	0.0170	2.04	2.96	6	0.0198
	6:22:02	1.94	1.74	7	0.0112	1.94	2.92	6	0.0094
	6:32:09	1.83	1.64	6	0.0149	1.83	2.85	5	0.0223

(2) 領域による切り取り

電離層遅延補正情報の領域の設定は、高度 506.7km の電離層薄層モデル上に投影された貫通点群から形成される凸包形状に対して、グリッド間隔（緯度・経度）の長辺の 2 倍（L 帯補正方式の場合  $0.4^{\circ} \times 2 \text{倍} = 0.8^{\circ}$ ）だけ外側に広げた領域とした。この場合、仰角や電子基準点群の配置によっては、想定よりも大きな領域でグリッドが生成されることが分かった。そこで、電離層遅延情報量の削減のためには、あらかじめ地上で配信領域を設定し、上空 506.7km の電離層薄層上に投影することによって、この凸多角形を内包する最小の格子点群をなすよう、補正情報の配信領域を切り取る機能が必要である。

さらにデータ量の削減を行うため、補正情報フォーマットの数値表現（データ型）がオーバーフローしない範囲で最小限となるように変更した。

これらの衛星数制限、領域による切り取りとフォーマットの数値表現の変更を加えてデータ量の見積もりを行うと、圧縮しなくても必要帯域のサイズが 1,606bps となり、LEX の伝送速度以内に収まることが確認できた（表 3-20）。

表 3-20 衛星数制限、領域切り取り、数値表現変更後の L 帯補正方式のデータ量の見積

種類	全体サイズ (bytes)	頻度 (秒)	必要帯域 (bps)
参照基準点観測情報	990	30	264
衛星軌道、時計補正情報	3,987	240	133
対流圏遅延補正情報 (電子基準点ごとの遅延量)	4,213	240	141
電離層遅延補正情報 (12 領域)	16,006	120	1,068
合計			1,606

### 3.4.5.3. データ遅延の影響

沖縄および関東地域で実施した転送遅延付与テストにおいては、遅延発生装置により 5 秒程度の遅延を入れた場合、いずれの地域でも補正情報配信および受信ソフトウェアが異常終了するという現象が発生したために、測位解析が正常動作せず、データ遅延の影響を評価するためのデータを得ることができなかった。沖縄実験時に、遅延発生と同時にサーバへの通信確認を行ったところ、頻繁にパケットロスとなる現象を確認した。また、関東実験時にも同様の現象を確認した。このことから、原因としては、通信キャリアネットワークから遅延発生装置までの間でデータ欠落が発生したことが推定される。そのため、リアルタイム測位実験の実施後、NGS 蒲田事業所において、通信が安定している有線 LAN 環境で再実験を行った。再実験においては、L 帯遅延時間の想定を 10 秒とし、回線部分他ですでに 3 秒程度の遅延があるものとして、残り 7 秒の遅延を与えた。なお、観測時間は、S 帯補正方式 10 分 (600 秒)、L 帯補正方式 15 分 (900 秒) である。

S 帯補正方式での結果を表 3-21 に、L 帯補正方式での結果を表 3-22 にそれぞれ示す。FIX 欄の「○」はアンビギュイティが 4 つ以上解けて、かつ、静止測量で得られた真値からの水平誤差が 10cm 以下の測位結果であったことを示す。また、転送遅延の影響欄の「○」は「遅延なし」「遅延あり」の組み合わせで FIX 時間、水平誤差ともに同一の結果が得られたことを示す。この表から、補正方式によらず、遅延を入れた場合と入れない場合とで、FIX 時間と水平誤差の全てが同一となっている。したがって、10 秒程度の転送遅延がプロトタイプシステムを用いた測位解析に与える影響は、ほとんどないものと考えられる。

表 3-21 S 帯補正方式における転送遅延の有無と測位への影響

実験	遅延なし			遅延あり			転送遅延 の影響
	FIX	FIX 時間 [秒]	水平誤差 [m]	FIX	FIX 時間 [秒]	水平誤差 [m]	
1 回目	○	550	0.0072	○	550	0.0072	○
2 回目	○	550	0.0140	○	550	0.0140	○
3 回目	○	550	0.0124	○	550	0.0124	○
4 回目	○	550	0.0126	○	550	0.0126	○
5 回目	○	550	0.0088	○	550	0.0088	○
6 回目	○	550	0.0078	○	550	0.0078	○

表 3-22 L 帯補正方式における転送遅延の有無とその測位への影響

実験	遅延なし			遅延あり			比較結果
	FIX	FIX 時間 [秒]	水平誤差 [m]	FIX	FIX 時間 [秒]	水平誤差 [m]	
1 回目	○	870	0.0150	○	870	0.0150	○
2 回目	○	870	0.0128	○	870	0.0128	○
3 回目	○	870	0.0119	○	870	0.0119	○
4 回目	○	870	0.0168	○	870	0.0168	○

### 3.4.6. リアルタイム測位実験のデータを用いた後処理による性能検証

リアルタイム測位実験においては、3.4.5.1.に記載したような原因により問題が発生したため、プロトタイプシステムの本来の性能を評価することができなかった。そのため、実験時に受信・測位装置で取得・保存した参照基準点データを用いて、後処理解析で測位計算を行い、性能を検証した。このとき、参照基準点データ以外の補正情報については、電子基準点の RINEX データを用いて、後処理解析において改めて算出した。補正情報受信・測位装置の入力データには、実験時に保存した二周波 GPS 受信機の観測データのうち一周波観測のみを使用した。後処理による S 帯補正方式の測位結果を表 3-23 に、L 帯補正方式の結果を表 3-24 に示す。有効測位率については、沖縄地域の S 帯補正方式および L 帯補正方式において、それぞれ、61.4～84.9%および 62.1～96.0%、関東地域での S 帯補正方式および L 帯補正方式において、それぞれ 71.4～93.1%および 61.8～95.1% となり、リアルタイム測位実験時の結果（表 3-14、表 3-15）に比べて大きく改善され

た。測位の水平精度についても、沖縄地域における長基線設定において 2.2~2.8cm となったことを除き、RMS で 2cm 以下を達成している。

観測時間による比較については、一部の例外を除き、両補正方式ともに、長時間であるほどミスフィックスが少なく、良好な結果が得られた。また、S 帯補正方式と L 帯補正方式の補正方式の違いによる測位精度の間には顕著な差はみられない。解析結果に明確な違いが見られたのは基線長の違いによるものであり、長基線においてミスフィックスがより多く見られた。

フィックスしなかった解析結果では、ほとんどの誤差が 10cm 以上となり、フィックスしなかった解析結果の信頼性は著しく低く、測位処理において採用すべきではないものと考えられる。また、得られた測位解の精度を向上させ安定な測位を実現するためには、ミスフィックスの検出をより正確に行い、除去する必要がある。

表 3-23 後処理によるS帯補正方式の測位結果

地域	基線長と観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計観測数	有効測位率 [%]	水平誤差 (RMS) [m]
沖縄	短基線 (5分)	68	12	6	86	79.1%	0.0115
	短基線 (7分)	73	6	7	86	84.9%	0.0115
	短基線 (10分)	69	4	13	86	80.2%	0.0113
	長基線 (5分)	54	23	11	88	61.4%	0.0264
	長基線 (7分)	56	20	12	88	63.6%	0.0257
	長基線 (10分)	58	15	15	88	65.9%	0.0188
関東	短基線 (5分)	48	7	3	58	82.8%	0.0077
	短基線 (7分)	51	4	3	58	87.9%	0.0078
	短基線 (10分)	54	0	4	58	93.1%	0.0083
	長基線 (5分)	40	11	5	56	71.4%	0.0148
	長基線 (7分)	42	7	7	56	75.0%	0.0126
	長基線 (10分)	41	4	11	56	73.2%	0.0130

表 3-24 後処理によるL帯測位方式の測位結果

地域	基線長と観測時間	FIX	MissFIX	NotFIX	合計観測数	有効測位率 [%]	水平誤差 (RMS) [m]
沖縄	短基線(10分)	44	2	4	50	88.0%	0.0138
	短基線(15分)	48	0	2	50	96.0%	0.0134
	長基線(10分)	36	12	10	58	62.1%	0.0278
	長基線(15分)	41	12	5	58	70.7%	0.0220
関東	短基線(10分)	37	0	4	41	90.2%	0.0155
	短基線(15分)	39	0	2	41	95.1%	0.0150
	長基線(10分)	21	6	7	34	61.8%	0.0138
	長基線(15分)	24	7	3	34	70.6%	0.0136

### 3.5. まとめ

フェーズ1で調査・設計した結果に基づき、一周波GPS受信機を用いてリアルタイムに高精度測位を行うための補正情報生成・配信装置および受信・測位装置の開発を行った。あわせて、フェーズ1で課題となっていた、電離層遅延推定アルゴリズムの改良と、新たに決定された準天頂衛星LEX信号の伝送容量に対応するための補正情報仕様の見直しを行った。補正情報の生成においては、電離層遅延補正情報の精度を向上させるために、全ての電子基準点を利用し空間密度を上げることとした。そのため、リアルタイムに補正情報を生成・配信するために、電離層領域の分割を12領域に増加するとともに、各領域を更にサブネットに分割することにより計算負荷を分散させ、リアルタイム処理が可能な処理方式とした。また、測位処理における電離層遅延補正情報の適用に際しては、線形の時間内挿処理を行うこととした。LEX信号の伝送量制限への対応のため、領域形状を矩形から多角形に変更するとともに、各補正情報フォーマットの見直しを行い、補正情報の削減を行った。S帯補正方式で用いる補正情報フォーマットについては、基本的にL帯補正方式と同一とした。さらに、L帯補正方式対応として、衛星数の制約設定を評価し、その有効性を確認した。衛星数を制限する機能および領域切り取り機能の実装は、フェーズ3における課題である。

以上により開発された測位補正技術に基づいて、補正情報の生成・配信および受信・測位をリアルタイムに行うプロトタイプシステムを構築した。

プロトタイプシステムを用いてリアルタイム予備実験を行い、補正情報の生成が想定時間内に完了し、設定したパラメータにより、要求される測位精度が達成される見込みを得た。さらに、S帯補正方式およびL帯補正方式における観測時間について有効測位率から評価を行い、リアルタイム測位実験の設定値の目安とした。

沖縄地域と関東地域の2地域において、プロトタイプシステムを用いた実地のリアルタイム測位実験を実施した。その結果、いずれの地域・補正方式においても有効測位率が低く、安定測位はできなかった。要因分析に取り組み、原因の一部は実験時の運用や環境等の問題であったが、参照基準点観測情報に含まれるクロックジャンプの処理に関する不具合、および、必要な補正情報の取得が完了する前に測位処理が開始される問題の2点については、プロトタイプシステム固有の問題であり、フェーズ3においてシステム改修等により解決すべき課題となった。

これらの問題によりシステム本来の性能をリアルタイム測位実験において確認できなかったため、実験時に取得されたデータを用いて後処理解析を実施し、本システムの本来の性能に対応すると思われる処理の測位精度等の評価を行った。その結果、有効測位率が向上し、いずれのケースにおいても、水平成分のRMSが概ね2cm以内となり、前述の問題点を解決することによって目標性能の達成が可能であることが示された。観測時間については、S帯補正方式とL帯補正方式ともに、より長時間の観測の方がフィックス数が多く、良好な結果が得られた。しかしながら、測位解には、ミスフィックスと思われる大きな誤差を持つ解が含まれるので、誤ったバイアスを検出・除去する手法や精度管理手法などを新たに開発し、実装する必要があると考えられる。また、準天頂衛星の放送方式に対応した実用システムとするために、LEX信号の仕様に適合させた補正情報の送受信システムの開発が必要である。

表 3-25 にフェーズ2における達成目標と評価結果を記載する。



表 3-25 達成目標とフェーズ 2 評価結果

達成目標	評価結果
フェーズ1での調査・設計、開発したアルゴリズムをもとにリアルタイムデータを使用してリアルタイム処理が可能なプロトタイプ(ハードウェア含む)の構築	電子基準点のリアルタイムデータを使用してリアルタイムで補正情報を生成・配信するシステムのプロトタイプを構築した。 リアルタイム測位実験において、本システムを用いて補正情報を生成し、地上回線を使用して配信した。実験において発生したシステム運用上の問題と通信上のトラブルを除き、補正情報の生成・配信が行われ、測位側においてこれを受信し、測位処理に適用できることが確認された。
LEX の仕様に基づく L 帯補正方式でのデータ配信に対応したアルゴリズムの開発	補正情報の内容の見直しを行った。領域情報や参照基準点情報等は内容更新の機会が少ないので、補正情報に含めずに、別途提供するものとし、配信する補正情報から削除した。
準天頂衛星の放送機能について調査を行い、配信および受信の構成を再検討。併せて既存地上回線を使用し準天頂衛星の伝送遅延をシミュレートできる擬似配信および受信ソフトウェアの構築	準天頂衛星の LEX 通信において発生することが想定される 10 秒程度の遅延を模擬する装置を構築した。この装置を用いて伝送遅延を擬似的に発生させて測位試験を行い、測位処理が正常に行われ、解析結果にも、遅延を発生させなかった場合と差が生じなかった。したがって、プロトタイプシステムによる測位処理が、10 秒程度の遅延には影響されないことが確認された。
LEX の仕様に基づく L 帯補正方式での伝送速度を満たすフォーマットの開発	L 帯補正方式の伝送速度である 1,695bps 以下で補正情報の配信が可能とするよう、補正情報フォーマットの見直しおよびデータ圧縮の機能の追加を行った。しかし、リアルタイム測位実験において、生成した補正情報のデータ量は、伝送速度の制限を超過したため、L 帯測位方式については、補正情報のさらなる削減が必要である。補正情報に含まれる衛星数を 8 衛星に制限し余分な領域を切り取ることにより、測位精度に致命的な影響を与えずに、伝送速度の制限内で十分に配信可能なデータ量にすることができることを確認した。
PC と一周波 GPS 受信機を使用した補正情報を利用して一周波 RTK-GPS 測位のできるプロトタイプ補正情報受信・測位装置の構築(S 帯・L 帯補正方式共通)	PC と一周波 GPS 受信機を使用して、補正情報を受信し、これを適用して測位処理を行うシステムのプロトタイプを構築した。 リアルタイム測位実験を行い、地上回線を経由して配信された補正情報を受信し、これを適用して一周波 RTK-GPS 測位が行われることを確認した。リアルタイム測位においては、クロックジャンプの処理や測位処理開始のタイミングに関する不具合のため、改良が必要であることが明らかとなった。これらの不具合の影響を受けない後処理解析で評価を行った結果、測位誤差は標準偏差 2 cm 以下(水平成分)という目標をほぼ達成できていることが確認され、不具合の解決・修正によって目標性能を満たすことが可能であることが示された。

## 4. 補正情報生成・配信装置および受信・測位装置のシステムの改良

フェーズ3では、フェーズ2で開発したプロトタイプシステムをもとに、本プロジェクトの開発要件を満たし、実使用に耐えうる、補正情報生成・配信装置および受信・測位装置を構築し、バイアス誤決定による解を確実に除外し安定した測位を実現する精度管理手法を確立し、システムを完成させるべく、改良を行う。

### 4.1. システム完成のための対策・改良すべき課題

高精度測位補正情報を使用して安定した測位を実現するためには、フェーズ2における評価の結果、プロトタイプシステムに対し、システムの安定化、有効測位率・測位精度の向上とミスフィックスの低減が大きな課題であることが明らかになった。また、LEX信号の仕様に適合させた補正情報の配信・受信方式の最適化を図り、LEX対応方式を完成させる必要がある。さらに、安定した測位解を取得するために、バイアス誤決定の検出・除去手法と精度管理手法を開発し、システムを完成させなければならない。

フェーズ2で明らかになった課題は以下のとおりである。

- ・ 参照基準点観測データに生じるクロックジャンプへの処理対応
- ・ 補正情報配信装置におけるディスク使用量管理不良による補正情報の欠落
- ・ 測位装置における補正情報取得不備状態での解析実行
- ・ 対応可能な一周波GPS受信機の拡大（汎用化）
- ・ L帯補正方式における配信情報設計の最適化とそれに対応するシステムへの改良
- ・ 補正情報の品質改良によるミスフィックス発生の低減
- ・ バイアス誤決定の検出・除去手法と精度管理手法の構築

これらの課題について、フェーズ2で取得された測位実験データ等を分析し、解決策を検討するとともに改良を行い、それらのデータ等を用いて評価することにより、システムを完成する。

### 4.2. システム完成のための対策・改良・開発内容と結果

システムの完成に向けて実施した不具合対策、アルゴリズム・システムの改良、新規開発の項目について、表4-1にとりまとめる。また、それぞれの確認作業について、補正情報の生成・配信・受信・測位の順で以下に記述する。

表 4-1 システム完成のための対策・改良・開発項目一覧

生成	参照基準点観測情報処理の不具合対策と改良	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クロックジャンプによる搬送波位相データの飛び処理</li> <li>・参照基準点切り替え機能の追加</li> </ul>
	対流圏遅延補正情報生成の不具合対策と改良	<ul style="list-style-type: none"> <li>・衛星時計誤差の推定処理の安定化（アルゴリズムの不具合対策）</li> <li>・対流圏遅延補正情報の安定化（開始時間の設定）</li> </ul>
	電離層遅延補正情報の生成手法検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・グリッド補正モデル生成アルゴリズムの検討</li> <li>・グリッド領域切り取り処理の追加</li> <li>・電離層遅延補正情報異常の通知機能追加</li> </ul>
	補正情報生成装置の不具合対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ディスク使用量超過対策</li> </ul>
配信	S帯・L帯補正方式の仕様最終化と LEX 配信模擬システムの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補正情報フォーマットの調整</li> <li>・補正情報更新頻度の調整</li> <li>・L帯補正方式における補正情報の衛星数制限処理開発</li> <li>・LEX パッケージ化と MCS へのデータ送信処理の開発</li> <li>・LEX 配信模擬システムの構築</li> </ul>
	別途提供する情報ファイルの採用	<ul style="list-style-type: none"> <li>・領域定義ファイル</li> <li>・観測点情報ファイル</li> <li>・2つのファイルのバージョン情報の通知</li> </ul>
受信	S帯・L帯補正方式の仕様最終化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・LEX 受信機に対応させた補正情報受信処理の開発</li> <li>・電離層遅延補正情報の領域判定処理の変更</li> <li>・参照基準点の切り替わり対応</li> <li>・情報ファイルの同一性照合処理の開発</li> </ul>
測位	測位解析の不具合対策と対応受信機の汎用化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・補正情報取得不備での解析開始の対策</li> <li>・一周波 GPS 受信機対応の汎用化</li> </ul>
	精度管理手法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・誤ったバイアス決定の検出・除去手法の開発</li> <li>・測位解の精度管理手法のアルゴリズム開発</li> </ul>

## 4.2.1. 補正情報の生成

### 4.2.1.1. 参照基準点観測情報処理の不具合対策と改良

#### (1) クロックジャンプによる搬送波位相データの飛びの処理

参照基準点観測情報に含まれる搬送波位相データにみられた飛びの現象は、電子基準点リアルタイムデータのクロックジャンプのタイミングで発生しており、プロトタイプシステムにおいて電子基準点リアルタイムデータを RTCM3.0 フォーマットに変換する処理に不具合があることを確認した。

RTCM3.0 フォーマットでは搬送波位相データは搬送波位相距離として擬似距離との差分で表現されるが、プロトタイプ処理ではクロックジャンプ発生への対応を考慮していなかった。このため、クロックジャンプのタイミングで搬送波位相データに飛びが発生し、受信側ではサイクルスリップとして処理され、測位ができない事例を多く生じていた。

この不具合の対策として、エポックごとの受信機時計の誤差量（クロックオフセット量）を擬似距離および搬送波位相データに積算し、クロックジャンプが発生しても搬送波位相データに飛びを発生させないように、フォーマット変換処理を改良した。該当するソフトウェアは、補正情報配信ソフトウェア **packRT** および補正情報受信ソフトウェア **unpackRT** である。

改良を行ったソフトウェアを用いて、クロックジャンプが頻繁に発生している **GEONET** 局を参照基準点とする実験を行い、クロックジャンプ時に測位解析のリセットが発生せず、本対策の有効性、妥当性が確認された（付録 1.1.1.参照）。

## （2）参照基準点切り替え機能の追加

プロトタイプシステムでは、1 領域につき 1 点の電子基準点しか参照基準点を登録しておらず、その電子基準点におけるリアルタイムデータの提供が停止した場合、手動で参照基準点を切り替えない限り、参照基準点観測情報が配信されず、測位不能となってしまう。この問題を回避するため、領域ごとに優先度をつけた 2 点の電子基準点を参照基準点として登録し、優先度に従って参照基準点を選択し、設定されたエポック数のリアルタイムデータをその点で取得できなかった場合、次の登録点を参照基準点として観測情報を配信する機能を追加した。該当するソフトウェアは電離層グリッド生成ソフトウェア **DD2INX** と **packRT** である。

本機能について動作実験を行い、リアルタイムデータの取得が停止した場合に、参照基準点が自動で切り替わることが確認された（付録 1.1.1 参照）。

### 4.2.1.2. 対流圏遅延補正情報生成の不具合対策と改良

#### （1）衛星時計誤差の推定処理の安定化

フェーズ 2 のデータを用いた後処理解析においてみられた、連続的にフィックスしない（または、ミスフィックスとなった）時間帯について調査を行った。その結果、対流圏遅延の推定値が参照点側と測位点側で大きな乖離がみられ、対流圏遅延推定に用いられる衛星時計が時間と共にずれが大きくなっていることが分かった。そこで、衛星時計の誤差推定においてアンビギュイティに拘束条件を付加し、衛星時計の推定ずれを抑えるようにソフトウェアを改良した。

また、新たに観測領域に飛来した **GPS** 衛星では衛星時計誤差の推定再開からしばらくの期間において衛星時計の推定が不安定となる。そこで、対流圏遅延情報の配信に先立

って衛星時計誤差の推定を低仰角（5度）から開始させ、対流圏遅延の推定（仰角15度以上を配信する設定）で使用するまでに安定するように改良した。

## （2）対流圏遅延補正情報の安定化

対流圏遅延の推定は、処理の起動後アンビギュイティ推定が収束するまでは推定値が安定せず、測位解が不安定になる。そこで、フェーズ2の実験データを用いて対流圏遅延量の推定が安定するまでの所要時間を調査した。

図4-1は、関東周辺の電子基準点を用い、1日前に推定を始めたものと当日から始めたものとの大気遅延推定値の差の時系列を示したものである。横軸は当日の推定開始からの経過時間、縦軸は前日との推定値の差分(m)を表している。大気遅延推定値の較差は、推定開始から2時間経過で1cm以内に、3時間経過で5mm以下となってほぼ収束している。従って、対流圏遅延推定処理の起動後3時間経過するまで対流圏遅延補正情報を配信させない処理を導入することとする。この処理を該当するソフトウェアであるpackRTに追加した。

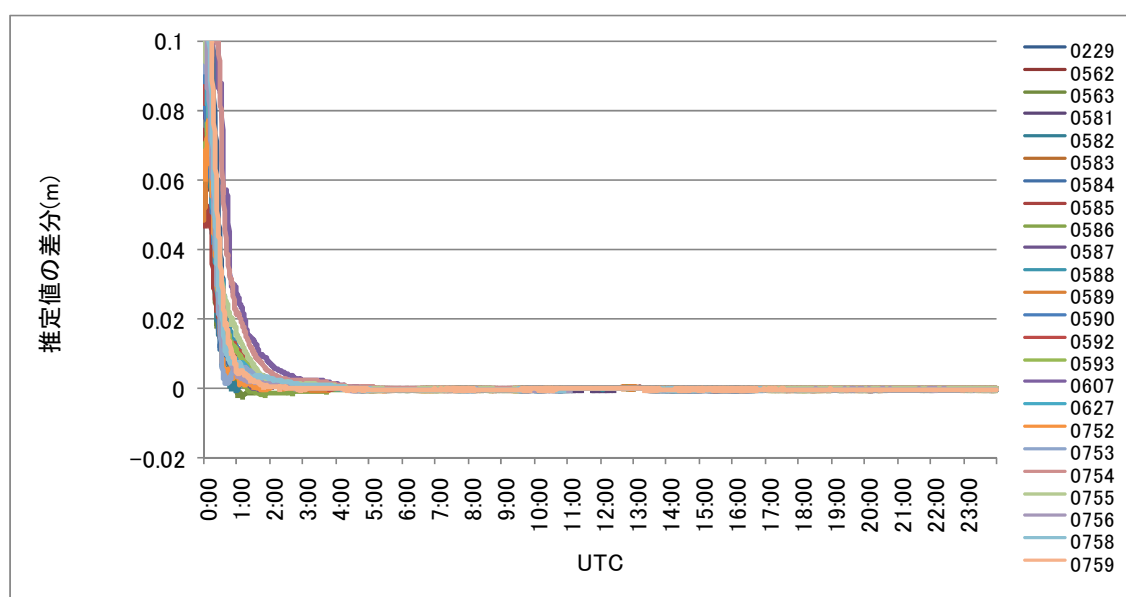


図 4-1 対流圏遅延推定値の較差の時系列

### 4.2.1.3. 電離層遅延補正情報の生成手法検討

#### （1）グリッド補正モデル生成アルゴリズムの検討

電離層遅延のグリッド補正モデルの生成手法について、異なるグリッド化手法を比較検討する。開発した平均曲面曲率拘束法（曲率法）に加えて、距離の逆数による重み付き平均法（距離法）による格子化手法を追加開発した。従って、本システムでは、表4-2

に示す 2 通りの格子化手法が選択可能である。なお、格子化には、薄層近似した電離層上での測位信号経路の貫通点における電離層遅延推定値が用いられる。

表 4-2 電離層グリッド生成アルゴリズム

電離層グリッド生成手法	アルゴリズムの概要
平均曲面曲率拘束法（曲率法）	貫通点における電離層遅延推定値から双一次補間式により格子点での遅延量を作成し、格子点遅延量分布について平均曲率一定という拘束条件を与えた重みつき最小二乗法により推定する方法
距離の逆数による重み付き平均法（距離法）	貫通点における電離層遅延推定値から、求める格子点と貫通点との幾何学的距離の逆数を重みとし、格子化する方法

次に、観測された全ての貫通点での電離層遅延推定値を格子化に使用しているが、アンビギュイティ推定が整数値に固定できない貫通点推定値が作成された補正モデルの品質に劣化を生じる可能性がある。そこで、そのような整数値固定できない貫通点での電離層遅延推定値を格子化に用いない処理を選択できるようにアルゴリズムを追加した。

これらの異なる処理方法について、実証実験における観測データを用いた比較検討を行い、最良な手法を選択することとする。

## (2) グリッド領域の切り取り処理の追加

フェーズ 2 において、電離層遅延補正情報の作成領域を矩形から凸多角形に変更し、海域にあたる領域を削除することで補正情報の総量を削減した。その場合、電離層遅延補正情報の領域は、高度 506.7km の電離層薄層モデル面上に投影された貫通点群から形成される凸包形状に対して、グリッド間隔（緯度・経度）の長辺の 2 倍（L 帯の場合  $0.4^{\circ} \times 2 \text{ 倍} = 0.8^{\circ}$ ）だけ外側に広げた領域に設定した。また、L 帯補正方式については、電離層補正情報の配信対象となる凸多角形を内包する最小の格子点群をなすよう、補正情報の配信領域を切り取ることで、全ての補正情報の配信を L 帯補正方式の伝送速度である毎秒 1,695bits に収めることが可能であることを示した。

フェーズ 3 では、L 帯補正方式でのこの電離層遅延補正グリッドの凸多角形切り取り処理を行うソフトウェアを完成させた。ここで、日本全国の陸域（小笠原諸島、北方領土を除く）に対してモデル領域の大きさが最小となるように、領域切り取り機能の最適化を併せて図った。この処理が該当するソフトウェアは DD2INX である。以下に、領域切り取り処理の詳細を説明する。

まず、日本全国を12領域に分割し、それぞれの陸域を囲むように凸多角形を設定する。次に、この多角形を、観測されるGPS測位信号の経路方向の上空506.7kmにおかれた電離層薄層上に投影する。薄層モデルとして設定された正規格子点群から、投影された凸多角形を包含する最小個数の凸型領域となるよう格子点を電離層遅延の補正用グリッドとして切り取る。こうして切り取られた格子点群における電離層遅延推定値が電離層遅延補正情報として配信される。

電離層グリッドの切り取りのイメージを図4-2に示す。横軸は上空薄層上での経度、縦軸は緯度を表す。図中に実線で示される多角形が地上の座標から上空薄層に投影された領域である。本システムでは、測位補正の有効領域を多角形として定義しており、その領域を上空の薄層に投影した領域を内包する格子点群が電離層遅延補正情報として必要となる(図中の黄色部分)。L帯補正方式の配信情報の設計では、経度方向において連続した1組の格子点群を表現方法としているため、南北方向における凹部分(緑色部分)を含むグリッド点群を電離層遅延補正グリッドとする。なお、S帯補正方式においては配信速度の制約が厳しくないため、ここに示す切り取り処理は適用せず、フェーズ2で行った拡張された領域を電離層遅延の補正グリッドとして配信を行う。

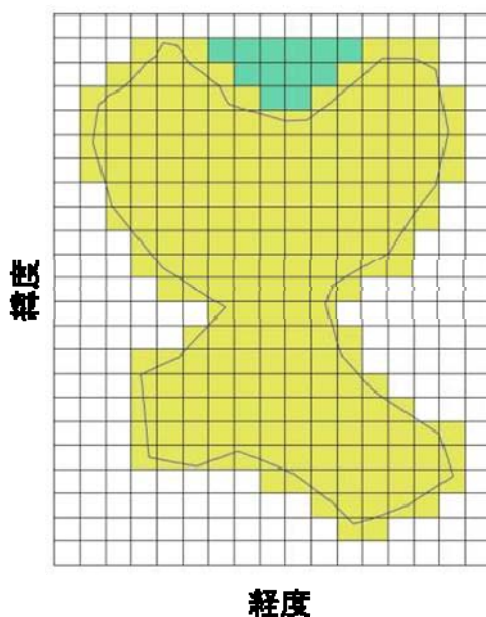


図 4-2 電離層グリッドの切り取り例

開発した切り取り処理を実行確認するため、補正グリッドの作成結果を調べた。図4-3に、関東地区を対象領域とする場合について、結果の例を示す。横軸は上空薄層上での経度(°)、縦軸は緯度(°)を表す。青色の実線は補正対象領域を示す凸多角形、青点は電離層薄層上の格子点、△が薄層上の貫通点を示している。対象領域の内包する最小

の格子点群が電離層補正グリッドとして正しく切り取られていることが分かる。

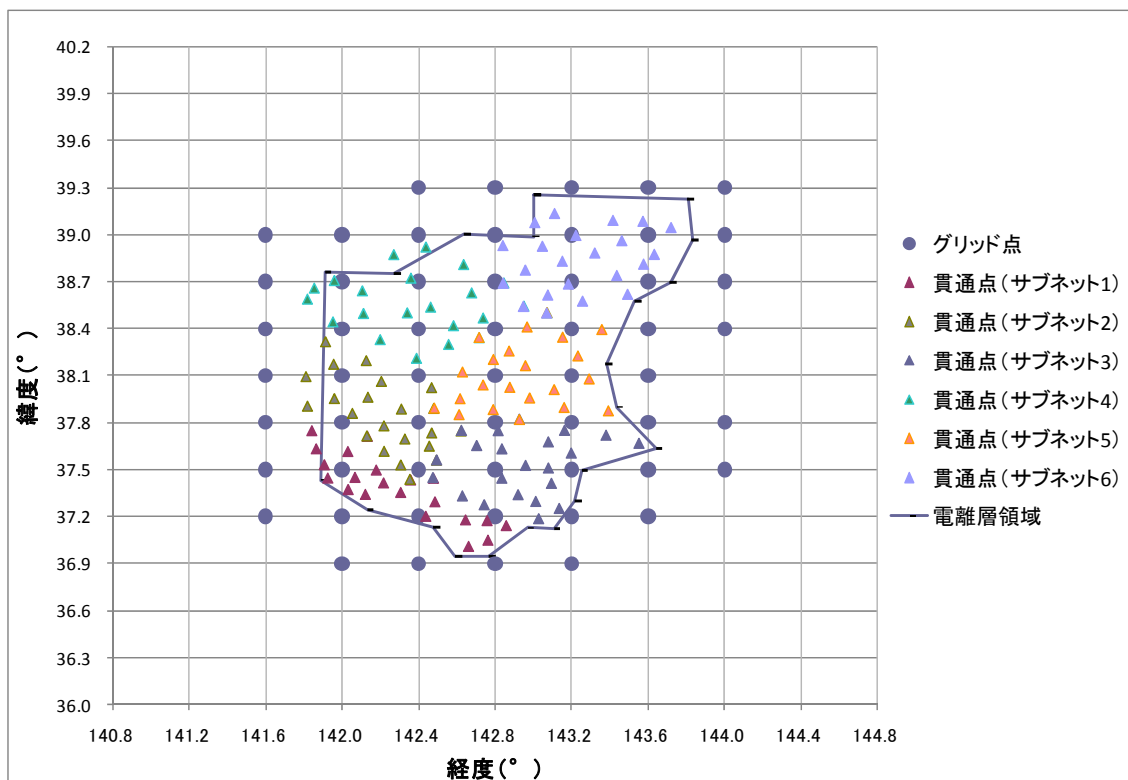


図 4-3 関東におけるグリッドの切り取り例

### (3) 電離層遅延補正情報異常の通知機能の追加

距離法では、各格子点において設定された距離内に含まれる貫通点での電離層遅延推定値から格子点での電離層遅延推定値を求める。従って、設定距離内に貫通点が無い格子点では推定値を決定することができない。そこで、そのような格子点について、無効格子点として測位計算時に除外する機能を追加した。推定値が与えられない格子点には、異常点であることを示す値「-999」を与え、測位装置側で測位計算から除外する機能を追加した。

#### 4.2.1.4. 補正情報生成装置の不具合対策

##### (1) ディスク使用量超過対策

フェーズ2の測位実験において対流圏遅延の補正情報が生成できない現象が発生した。その原因として、補正情報生成装置のディスク使用量超過によりリアルタイムデータ収集サーバのソケット接続・通信処理が異常停止した可能性が考えられた。実行時のシステムログに明らかなエラーメッセージは見つからず、原因を特定できなかったが、対流圏遅延の補正情報生成処理の設定では動作状況を確認するログメッセージ出力が大量になっており、ディスク領域の過剰使用はシステム動作に支障をきたす可能性が高い。



そこで、出力するログメッセージを最小限に減らし、ログローテーション機能を搭載することとした。ログローテーション機能とは、設定した時間ごとにログファイルを分割して過去のログを圧縮し、待避させる仕組みである。この対策を施したシステムを単体試験として長期作動させ、当該機能が正常に動作し、通信処理に異常停止がみられないことが確認された（付録 1.1.5.参照）。

## 4.2.2. 補正情報の配信

### 4.2.2.1. S 帯・L 帯補正方式の仕様最終化と LEX 配信模擬システムの構築

#### (1) 補正情報フォーマットの調整

補正情報の表現書式は、L 帯補正方式において配信速度制限に適合するよう最終調整し、同一の書式を S 帯補正方式でも適用することとする。また、LEX 信号の配信仕様にあわせたパケット化では、ALERT フラグを用い、一組の補正情報ブロック（レコードと呼ぶ）の先頭であるかどうかの識別子とすることとする。この ALERT フラグは、LEX パケットの QZS 独自メッセージのデータヘッダに含まれる情報の一つであり、ヘッダの最終ビットに位置している。L 帯補正方式での補正情報配信に用いる場合、ALERT フラグとして、レコードの先頭をなすパケットで 1、後続のパケットは 0 と設定する。

#### (2) 補正情報更新頻度の調整

S 帯補正方式と L 帯補正方式のそれぞれの場合の各種補正情報の更新頻度の設定とデータ伝送容量の見積もりを表 4-3、表 4-4 に示す。特に、L 帯補正方式では、LEX 仕様による伝送速度の制約を満たすように、各種補正情報の更新頻度を調整した。

表 4-3 S 帯補正方式の補正情報更新頻度とデータ量の見積もり

種類	全体サイズ (bytes)	頻度 (秒)	必要帯域 (bps)
参照基準点観測情報(最大 12 衛星)	1,434	10	1,148
衛星軌道・時計補正情報(16 衛星)	3,987	120	166
対流圏遅延補正情報	4,213	30	1,123
電離層遅延補正情報(0.2°×0.15°)	73,536	30	19,610
		合計	22,047

表 4-4 L 帯補正方式の補正情報更新頻度とデータ量の見積もり

種類	全体サイズ (bytes)	配信間隔 (秒)	必要帯域 (bps)
参照基準点観測情報(8 衛星)	962	30	257
衛星軌道、時計補正情報(16 衛星分)	3,718	240	124
対流圏遅延補正情報	3,310	240	111
電離層遅延補正情報(最大 8 衛星、 0.4° × 0.3° )	16,112	120	1,075
合計			1,567

S 帯補正方式では、伝送容量に余裕があることから、電離層遅延および対流圏遅延補正情報のリアルタイム生成に必要な所要時間による最短の更新頻度である 30 秒を用いた。L 帯補正方式では、伝送速度の制約と時間変化の程度を考慮し、電離層遅延補正情報を 120 秒、対流圏遅延補正情報を 240 秒という更新頻度とした（付録 1.2.1.参照）。

参照基準点観測情報と衛星軌道・時計補正情報については、フェーズ 2 の設定と同一である。

### (3) L 帯補正方式における補正情報の衛星数制限処理の開発

L 帯補正方式では、補正情報のデータ量を抑えるため、配信する補正情報の衛星数を最大 8 衛星に制限する必要があるため、参照基準点の観測情報と電離層遅延補正情報について、衛星数の制約処理を開発した。配信対象とする衛星は、電離層補正情報の配信領域内における電子基準点での衛星の捕捉状況、捕捉時間、仰角に基づいて選定する。該当するソフトウェアは DD2INX である。本機能について、リアルタイム動作による事前実験において、正しく動作し、配信される情報が最大 8 衛星に制限されていることが確認された（付録 1.2.4 参照）。

### (4) LEX パケット化と MCS（マスターコントロール局）へのデータ送信処理の開発

L 帯補正方式では、LEX 信号の仕様に合わせ 1 秒ごとに 1,695 bits 以内のデータに補正情報を分割することと、通信エラーに伴うパケットロスによる補正情報の欠落に対し、測位できなくなる影響を小さくする信号構造の設計が必要である。後者では、1 つの LEX パケットが壊れたり欠落したりした場合に、以降のパケットに影響を与えないこと、測位している領域以外の補正情報についてパケットロスが生じても、測位領域の処理に影響が及ばないことが求められる。そのため、以下の方針で LEX パケット化の構造設計を行った。

① LEX 信号の伝送速度を考慮しつつ、できるだけ領域単位でまとまったパケットを配信させる。

② 1 つの LEX パケットには、1 種類の補正情報のみを含める。

③ 1 種類の補正情報は、連続した LEX パケットで配信する。

これらの方針に基づき、図 4-4 に示すパケット構造を用いた。また、パケットロスが発生した場合のリスク分散として、対流圏遅延補正情報についても、日本列島を 3 領域に分割し、それぞれ異なるパケットに補正情報を割り振ることとした(付録 1.2.3.参照)。さらに、配信するデータ量削減のため、補正情報のレコードごとに zip 圧縮を加える機能も追加した。補正情報レコードの詳細は付録 1.5.1 に記載する。これらの LEX 用のパケット化と各パケットを 1 秒ごとに配信する処理を行うソフトウェアとして、stcond\_qzss/SHS を開発した。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30												
参照基準点					衛星軌道、時計補正情報+電離層グリッド間隔情報																		電離層1																		
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60												
参照基準点								電離層2									電離層10						電離層3																		
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90												
参照基準点								電離層5									電離層8						電離層9																		
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120												
電離層11								参照基準点									電離層4						電離層6						電離層7							電離層12					
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150												
参照基準点								対流圏遅延補正情報																		電離層1															
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180												
参照基準点								電離層2									電離層10						電離層3																		
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210												
参照基準点								電離層5									電離層8						電離層9																		
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240												
電離層11								参照基準点									電離層4						電離層6						電離層7							電離層12					

図 4-4 補正情報パケット配信タイミングのイメージ

#### (5) LEX 配信模擬システムの構築

リアルタイム実証実験では、静止衛星を用いて準天頂衛星の LEX 信号放送方式を模擬する実験を行うので、準天頂衛星の LEX 配信を模擬するシステムを開発した。その場合、衛星処理系の内部で信号配信の遅延（最大 10 秒程度）を生じるため、データ配信に遅延を加える機能を持たせた。この準天頂衛星の LEX 配信を模擬するソフトウェアとして、stcond\_qzss/MCS を開発した。

補正情報の LEX 用パケット化とその準天頂衛星を模擬する配信処理について、動作試験を行い、正しい動作の実行が確認された（付録 1.2.2.参照）。

#### 4.2.2.2. 別途提供する情報ファイルの採用

高精度測位補正情報を LEX 信号により配信する方式では、補正情報配信速度に大きな制約があるため、本プロジェクトにおけるシステム開発では、測位補正に必要となる情報のうち、リアルタイムに常時配信する必要がないものについて、放送とは別に提供する方式を採用した。ここでは、それら別途提供する情報について説明を行う。

##### (1) 領域定義ファイル

領域定義ファイルとは、電離層遅延の補正情報について全国を 1 2 分割する領域を定義する情報である。この情報は、補正情報生成・配信装置における配信領域の切り取り処理、補正情報受信・測位装置における測位位置の該当領域の選別処理に用いられる。このファイルは、それぞれの装置において同一のファイルが使用されなければならない。領域分割の定義は修正される可能性があるため、バージョンアップ通知等の管理・運用を行う必要があり、ファイルにバージョン番号を含むフォーマットを用いた。なお、ファイルのバージョン情報の通知の内容に関しては、(3) に記載する。

##### (2) 観測点情報ファイル

全国の電子基準点の座標やアンテナ仕様等の情報を観測点情報ファイルとして提供する。このファイルも、補正情報生成・配信装置と補正情報受信・測位装置の両方で使用される。これについても内容が変更される場合がありうるため、両装置において同一性を確保する必要がある。そのため、ファイルにバージョン番号を含むフォーマットを用いた。ファイルのバージョン情報の通知の内容に関しては、次項 (3) に記載する。

##### (3) 2つのファイルのバージョン情報の通知

領域定義ファイルと観測点情報ファイルについてリアルタイムに同一性を確認するため、補正情報生成・配信装置で用いられたファイルのバージョン番号を補正情報受信・測位装置に通知する仕組みを追加した。このためには配信される補正情報にバージョン情報を追加する必要がある。補正情報の配信容量の増大を最小とするため、最も更新頻度の低い衛星軌道・時計補正情報にバージョン番号を追加した。バージョン番号については、領域定義ファイルと観測点情報ファイルで共通とした。従って、一方のファイルのバージョン番号を変更した場合、(内容変更を伴わなくとも) 他方のファイルについてもバージョン番号を変更する必要がある。なお、これら別途提供するファイルの更新については、ホームページ等を用いることで容易に運用可能である。

#### 4.2.3. 補正情報の受信

##### 4.2.3.1. S 帯・L 帯補正方式の仕様最終化

##### (1) LEX 受信機に対応させた補正情報受信処理の開発

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が開発している、準天頂衛星の LEX 受信機を用いた

補正情報の取得に対応させるため、LEX 受信機の仕様に適合して同受信機からのリアルタイム出力信号を受信し、補正情報受信・測位装置において補正情報に復号する処理を開発した。該当するソフトウェアは `stcond_qzss/RECV` であり、その出力をソフトウェア `unpackRT` に引き渡す。

準天頂衛星による放送を模擬するため、静止衛星による補正情報配信を用いたリアルタイムでの事前実験を行い、本処理が正しく動作することが確認された (付録 1.2.2.参照)。

#### (2) 電離層遅延補正情報の領域判定処理の変更

補正情報受信・測位装置では、一周波 GPS 受信機で取得される概略座標値を用いて、測位しようとする地点が、分割された電離層遅延補正情報のどの領域に属するかの判定を行う。領域分け情報の提供には別途提供される領域定義ファイルを採用することとしたため、これに対応する処理に変更した。該当するソフトウェアは `unpackRT` である (付録 1.3.1 参照)。

#### (3) 参照基準点の切り替わり対応

4.2.1.1.の (2) に述べたとおり、補正情報・生成配信装置に参照基準点の切り替え機能を追加した。そのため、参照基準点の切り替わりが発生した場合、受信・測位装置において、送られてくる参照基準点の ID 情報から参照基準点の切り替わりを判定し、測位解析を停止させる処理を開発した。該当するソフトウェアは `unpackRT` である。

補正情報生成・配信装置において参照基準点の切り替えを発生させる動作実験を行い、本処理が正しく動作することが確認された (付録 1.3.2.参照)。

#### (4) 情報ファイルの同一性照合処理の開発

領域定義ファイルと観測点情報ファイルは、補正情報生成・配信装置と補正情報受信・測位装置で同一である必要があり、受信・測位装置において、ファイルに与えられたバージョン情報を照合し、同一でない場合には通知するとともに測位解析を中止する処理を開発した。該当するソフトウェアは `unpackRT` である。

補正情報生成・配信装置を用い、バージョン情報を変更した情報ファイルを提供させた実験を行い、受信・測位装置において本処理が正しく動作することが確認された (付録 1.3.2.参照)。

### 4.2.4. 測位解析の不具合対策と対応受信機の汎用化

#### (1) 補正情報取得不備での解析開始の対策

プロトタイプにおいて、必要な補正情報が揃う前に解析を開始するという不具合が発生した。本補正方式の測位解析では、観測より低い頻度で配信される補正情報 (電離層遅延補正情報、対流圏遅延補正情報) を取得してから解析を開始する必要がある。特に

電離層補正情報については、時間内挿して用いるために、観測時刻よりも後の時刻に対して作成された補正情報を用いる必要がある。しかし、プロトタイプでは、一部の処理事例において正しい時刻の補正情報を取得する前に、解析を開始する場合が発生していた。そこで、測位解析において、必要となる補正情報の取得完備を待って測位解析を開始する処理に改良した。該当するソフトウェアは **RTNet** である。

本処理について、試験を行い正しく動作することが確認された（付録 1.4.1.参照）。

なお、受信・測位装置で行う対流圏遅延補正情報の内挿処理に用いている計算式においてパラメータ定数の一つに誤りがあったため、定数値を改正した。該当するソフトウェアは **unpackRT** である（付録 1.1.3、1.1.4.参照）。

## (2) 一周波 GPS 受信機対応の汎用化

フェーズ 2 では、特定の一周波 GPS 受信機を用い、その機器独自の観測データフォーマットに対応する処理が可能なプロトタイプを構築した。フェーズ 3 では、一般的な一周波 GPS 受信機に対応する汎用性をもたせるために、汎用的な観測データ書式である **RTCM 2.3** または **RTCM 3.0** により観測データの出力機能を持つ一周波 GPS 受信機を利用可能な受信・測位装置に改良した。GPS 受信機と受信・測位装置（解析用 PC）の間の通信形式は、シリアル接続または **TCP/IP** を用いた **LAN** 接続とした。なお、上記書式による観測データ出力機能を持つ一周波 GPS 受信機であっても、データ通信において特別なコマンドによる操作等が必要なものは対応外である。該当するソフトウェアは **RTES** である。

受信・測位装置では、参照基準点観測情報と同じ頻度で GPS 受信機から観測データを取得する必要がある。観測データの出力間隔を任意に設定変更できない受信機では、参照基準点情報の観測頻度に適合させるため、出力データを間引いて必要な時刻の観測データを取り出すソフトウェアを作成し、組み込んだ。

## 4.2.5. 精度管理手法

### 4.2.5.1. 誤ったバイアス決定の検出・除去手法の開発

補正情報を用いた基線解析では、補正情報の取得時にパケットロスの発生や衛星捕捉数の減少などにより、フィックスしない、あるいは、誤ったバイアスにフィックスされる（ミスフィックス、と呼ぶ）場合がある。

本システムの利用により安定した測位解を取得するために、このようなミスフィックスを極力生じないように、誤ったバイアス決定の検出・除去手法を開発・適用し、さらに得られた測位解の品質評価により、ミスフィックス解を判定除去する精度管理手法の開発を行う。

本プロジェクトでは、補正情報の生成とそれを用いた測位解析手法の開発において、できるだけ高品質な補正を実行するように手法の改良や解析において使用する各種パラ

メータの調整を行った。さらなる安定化のため、誤ったバイアス決定を除去する手法として、低品質の測位解を取得する可能性を低減させる、リアルタイムでの判定手法を開発した。以下に、その判定手法を説明する。

今回開発した補正方式では、10分程度のセッションによるGPS観測から基線解析を行って一つの測位解を求める。観測セッション内において十分にアンビギュイティが収束しないまま整数値アンビギュイティを決定するとミスフィックスとなる可能性が高い。また、アンビギュイティ決定後に行われる基線解析において、1エポックだけのデータでは測位解が得られない場合がある。そこで、本システムでは、観測セッション長から1分短い時間に相当するエポック数の観測値を取得した段階でアンビギュイティの決定処理を行って、測位解を求める設定を採用した。

アンビギュイティ決定では、参照基準点と測位点で共通に捕捉できている衛星対数が4つ以上である条件が必要であり、さらに、各観測セッション内においてアンビギュイティを決定するまでの待機エポック数の設定により、10分をセッション長（60エポック）とするS帯補正方式では54エポック以上、15分をセッション長（30エポック）とするL帯補正方式では28エポック以上の観測データ数の取得が必要である。これらの条件を満たさない場合、その観測セッションではアンビギュイティの決定ができない、または、決定されたとしてもミスフィックスとなる可能性が高い。

このような事象のうち、測位解析において判断可能であるものは、表4-5のとおりである。従って、観測セッション中にこれらの事象の発生を監視し、“Warning”メッセージを出力する処理を開発した（付録1.6.1.参照）。

表 4-5 整数値アンビギュイティの決定が十分できない事象

観測状況	原因	アンビギュイティが決定できない事象
捕捉衛星対数が4以下	取得、使用可能な衛星数の不足 衛星の切り替わり	L帯補正方式で3エポック目以降、S帯補正方式で7エポック目以降に捕捉衛星対数が4以下
データの欠落	GPS受信機でのサイクルスリップ発生 補正情報のパケットロス 物理的な接続不良	L帯補正方式で3エポック以上、S帯補正方式で7エポック以上のデータまたは補正情報の欠落
アンビギュイティのリセット	サイクルスリップ	L帯補正方式で3エポック目以降、S帯補正方式で7エポック目以降にリセットが発生

#### 4.2.5.2. 測位解の精度管理手法のアルゴリズム開発

##### (1) 精度管理手法の基本的な考え方

上記の誤バイアス除去手法を適用して得られた測位解において、まだ、ミスフィックスに該当するものを取得する可能性がある。そのため、そのようなミスフィックスを判定し、除外する精度管理手法を開発する。公共測量作業規程における精度管理では、通常、重複する基線ベクトルの較差か、異なるセッションの組み合わせからなる基線ベクトルの環閉合差を用いた点検が行われている。そこで、本補正方式においては、異なる時間帯で観測した2セッションの重複する基線ベクトルの較差を用いた点検手法について検討する。GPS 干渉測位方式に基づく本方式においては、較差の点検は、衛星配置が十分変化したセッションの間で行うことが重要である。従って、作業地区における一連の観測が終了した後、GPS 衛星の配置が十分に変化してから点検のための比較観測を実施することとする。

精度管理手法には、以下の要件が求められる。

- ① 測位結果からその場で判定が可能であること
- ② ミスフィックスを確実に排除できること
- ③ フィックスをミスフィックスとして誤判定しないこと

これらの要件を満たす手法として、まず、アンビギュイティ決定衛星対個数が4個未満である観測セッションの測位解はノットフィックスとして除外し、その他の測位解について、フェーズ2の測位実験において得られたデータを用いた分析を行い、重複基線ベクトルのセッション間較差についてミスフィックスを正しく判定する閾値を求めることとする。

##### (2) 精度管理手法のアルゴリズム概要

上記(1)に示す考え方に従い、フェーズ2の測位実験で得られたデータから、重複する基線ベクトルのセッション間較差と測位解におけるフィックス、ミスフィックスの関係を調べた。

フェーズ2の測位実験では、二周波GPS観測を用いたスタティック法による測位解を求め、それを真の解として用いることで、本補正方式による測位解の誤差を評価することができる。セッションごとの測位解について、真の解との較差水平成分が10cmを超えるものをミスフィックスと判断することとし、各々の測位解をフィックスした解とミスフィックスした解に判別した。次に、同一の基線について、①連続するセッション、②セッションの開始時刻がおよそ1時間隔たったセッション、③セッションの開始時刻が2時間以上隔たったセッション、の組み合わせに分け、さらに、全てのセッション間、フィックスしたセッション間、ミスフィックスしたセッション間に分類し、較差の水平成分の頻度分布を1cmごとに階級分けして調べた。その結果、重複する基線ベクトルのセッション間較差の閾値として、9cmを採用することでミスフィックスを間違いなく除外



できた。評価結果の詳細については付録 1.6.2 に記載した。

なお、後述するリアルタイム実証実験において取得されたデータにこの手法を適用すると、全部で 877 セッション（ミスフィックス該当は 48 セッション）のうち、ミスフィックスにあたるセッションをミスフィックスと判定できなかったものが 2 セッション、フィックスにあたるセッションをミスフィックスであると誤判定したものが 5 セッションであった。

### 4.3. まとめ

本システムの完成にむけて、プロトタイプにみられた課題を解決し、また、フェーズ 3 において計画された開発事項に取り組んだ。その結果、電子基準点のリアルタイムデータを用いたネットワーク型 RTK-GPS 方式による補正方式を開発し、また、準天頂衛星の LEX 信号による配信に対応させた L 帯補正方式を構築するとともに、静止衛星を準天頂衛星に模擬したリアルタイム測位実験を行うために必要となる模擬システムを作成した。さらに、補正情報受信・測位装置と組み合わせて用いる GPS 受信機について、汎用的な一周波 GPS 受信機を利用可能とするシステムに改良し、安定した測位解を得るための精度管理手法をとりまとめた。フェーズ 3 として設定した開発要件に対する開発システムの評価結果を表 4-6 に示す。

表 4-6 開発要件に対する開発システムの評価

内容	評価
電子基準点のリアルタイムデータを利用すること	○
準リアルタイムでの基線解析に適用できる補正情報を生成・配信すること	○
補正情報として必要なものを精査し、S 帯補正方式、L 帯補正方式共通のフォーマットとし、伝送速度を考慮した更新頻度を決定すること。L 帯補正方式の場合は補正情報の伝送速度を 1,695bps 以内に収めること	○
電離層遅延と対流圏遅延については、それぞれの時間・空間変化を考慮した補正情報モデルを生成し、適用すること	○
補正情報を適用した結果、水平精度数 cm 以内の測位精度を達成すること	○
10 分程度の観測時間で測位精度を満たすシステムとすること	○
通信エラーに強い配信フォーマットとすること	○

## 5. リアルタイム実証実験

4章において開発したシステムが要求される性能を満たしていることを実証するために、リアルタイム実証実験を行う。その場合、準天頂衛星による放送方式に近い実験と  
するため、通信用の静止衛星により補正情報を配信し、準天頂衛星の LEX 信号配信を模  
擬するシステムを使用する。なお、実験結果の評価により必要性が認められた場合には、  
開発されたシステムの最終調整を行い、システムを完成させることとする。

### 5.1. 実験の目的

本実験の目的は、開発されたシステムによる S 帯および L 帯の各補正方式について、  
測位の精度と安定性や安定した測位に必要な観測時間等を評価し、要求された性能を満  
たしていることを実証することである。この実験では、静止通信衛星 (Ku バンド) を用  
いて準天頂衛星を模擬し、全国を対象とした補正情報を放送する。実験は、沖縄と関東  
地域において、一周波 GPS 受信機を用いたリアルタイム測位を行う。全ての処理が電子  
基準点リアルタイムデータを用いてリアルタイムで行なわれ、10 分程度の観測時間によ  
り、測位精度が標準偏差 2 cm (水平成分) を満たしていることを実証する (表 5-1)。さ  
らに、沖縄地方で得られたデータを用いた後処理解析により、S 帯補正方式での補正情報  
の更新頻度、観測時間の最適値を決定する。

表 5-1 リアルタイム実証実験の目的・内容

リアルタイム実証実験	
目的	S 帯および L 帯の各補正方式について、測位精度と有効測位率および測位に 必要な観測時間等を評価し、システムが要求された性能を満たしていることを 実証する ※ここで有効測位率とは、ミスフィックスを除いたフィックス解の数 / 全解析数
観測方法	全国を対象とする補正情報を放送し、L1 一周波受信機を用いて実験地域 に適合する補正情報を選別するネットワーク型 RTK-GPS 測位を行う
評価内容	リアルタイム解析により、フィックス解取得までの時間、有効測位率、 測位精度 (水平成分) やそのばらつきを評価する
観測点	スタティック測量により、正確な位置が既知である点
判定基準	測位精度 (水平成分) が、観測の場所や時間によらず標準偏差 2 cm (水平成 分) を満たしていること

## 5.2. リアルタイム実証実験の評価・実証項目と評価手順

始めに、沖縄地域での実験で L 帯補正方式と S 帯補正方式における最適観測時間と、S 帯補正方式における補正情報の最適頻度を決定する。得られた最適設定を適用し、測位結果から要求された性能を満たしていることを実証する。以下に評価・実証項目と評価手順を示す。

### 5.2.1. 評価項目と評価基準

本実験の評価は 5.1. で示した評価内容に即し、表 5-2、表 5-3、表 5-4 について実施する。なお、測位解の精度評価は、GPS 観測によるスタティック解析による解を真値として行う。

表 5-2 最適観測時間と S 帯補正方式における補正情報最適頻度の評価

分類	評価項目	評価内容	比較検討項目	評価基準	評価結果の適用
性能 評価	最適観測 時間	観測時間を変えた測位の精度評価。観測時間変更は、同一のデータの後に処理解析による。	・S 帯補正方式 (10 分、7 分) ・L 帯補正方式 (15 分、10 分)	測位精度、ミスフィックスの発生頻度、有効測位率により優劣を判断	明確な差異がなければ、短い観測時間を採用
	S 帯補正方式における補正情報の最適頻度	補正情報の更新頻度を変えた測位の精度評価。高頻度化の観測時間短縮効果を評価	・対流圏遅延情報 (120 秒と上限の 30 秒) ・参照基準点の観測 (30 秒と 10 秒)	測位精度、ミスフィックスの発生頻度、有効測位率により優劣を判断	明確な差異がなければ、最多頻度を採用

表 5-3 システム動作に関する実証項目

分類	実証項目	実証内容	比較検討項目	評価基準	備考
シ ス テ ム 動 作	リアルタイム動作	システム全体のリアルタイム動作	なし	補正情報のリアルタイム生成・配信、リアルタイム測位解析	
	補正情報の遅延	L 帯補正方式における伝送遅延下のリアルタイム動作	・10 秒の遅延付与 ・遅延なし	遅延付与で遅延非付与結果と同品質の測位	
	補正情報の欠落	通信遮断による補正情報の欠落で測位装置が異常判断	欠落あり 欠落なし	受信した補正情報の欠落を認識	

表 5-4 測位精度に関する実証項目

分類	実証項目	実証内容	評価対象	評価基準	備考
測位精度	補正方式	いずれの補正方式でも測位精度要求を達成	S帯補正方式 L帯補正方式	測位精度(水平成分2cm)の達成	
	観測地域	地域、観測時間帯によらず測位精度要求を達成	沖縄地域 関東地域	測位精度(水平成分2cm)の安定した達成	
	基線長	基線長によらず、測位精度要求を達成	短基線 長基線	測位精度(水平成分2cm)の達成	
	精度管理手法の有効性	精度管理手法の適用による安定した測位解の取得	バイアス誤決定の検出除去手法と精度管理手法	ミスフィックスした解の有効な除去	

※1：測位解析の初期位置は静止測量結果から北、東方向にそれぞれ1mずらして設定。

※2：測位誤差の標準偏差（水平成分）は、次式により求める：

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \{(\Delta N_i)^2 + (\Delta E_i)^2\}} / n$$

ただし、 $n$ は観測数、 $\Delta N_i$ 、 $\Delta E_i$ はそれぞれスタティック法による座標を真値とするときの測位解誤差の南北、東西成分である。

## 5.2.2. 評価手順

リアルタイム実証実験における評価項目に対する評価手順を表 5-5 に示す。

表 5-5 評価手順の内容

試験分類	評価項目	評価手順
性能評価 (沖縄地域)	最適観測時間	①後処理解析により、S 帯補正方式は 10 分と 7 分、L 帯補正方式は 15 分と 10 分で解析 ②フィックス・ミスフィックス・有効測位解に分けて集計し、それぞれの取得比率を評価 ③測位精度を算出・評価
	S 帯補正方式における補正情報の最適頻度	①参照基準点観測 10 秒、対流圏遅延 30 秒、電離層遅延 30 秒の頻度で補正情報生成 ②補正情報を保存 ③後処理解析により、測位解を算出・評価
システム動作	リアルタイム動作	①電子基準点リアルタイムデータを用いた全国の補正情報の生成・配信と受信・測位がリアルタイムに動作すること ②補正情報生成・配信装置と既存衛星通信のアップリンク局間、衛星通信受信機と補正情報受信・測位装置の間にパケット・キャプチャを設置し、補正情報の転送状況を把握 ③補正情報生成・配信装置と MCS 間において 1 秒ごとのデータ受信を実証、また、L 帯補正方式において 1 組の補正情報の生成・配信と受信・測位が 4 分間で実行を実証
	補正情報の遅延	①遅延ソフトウェアで補正情報の配信を 10 秒遅延 ②配信された補正情報によるリアルタイムの測位処理 ③測位精度を評価
	補正情報の欠落	①衛星アンテナの受信面を(1 秒間程度)遮蔽して補正情報の受信妨害 ②補正情報受信・測位装置からのログ出力による補正情報の欠落状況の確認と測位解の算出・評価
測位精度	補正方式	①L 帯、S 帯補正方式について測位解析し、フィックス・ミスフィックス・有効測位率を集計 ②測位精度を評価
	実施地域	①各地域について測位解析し、フィックス・ミスフィックス・有効測位率を集計 ②測位精度を評価
	基線長	①基線長ごとに測位解析し、フィックス・ミスフィックス・有効測位率を集計 ②測位精度を評価
	精度管理手法の有効性	精度管理手法の適用の有無による測位解を比較、ミスフィックスの適切な除去を実証

## 5.3. 実験の概要

### 5.3.1. 実証実験の全体概要

この実験は、開発されたシステムが汎用的な一周波 GPS 受信機と組み合わせた測量により全国どこでも安定した測位が可能であることを実証するものである。日本列島は南北に細長い列島であるため、電子基準点の空間配置や電離層や対流圏といった電波信号の伝搬媒質による測位への影響といった条件に大きな違いがある。そこで、測位条件において、最も厳しい条件を代表する沖縄地域と、標準的な条件を代表する関東地域の2地域を対象として実験を行う。

S 帯補正方式と L 帯補正方式のいずれについても評価を行うが、準天頂衛星を用いた放送方式をできるだけ模擬する実験を行うこととする。そのため、衛星高度がほぼ等しい静止軌道を周回する通信衛星を用い、準天頂衛星の放送方式を再現するため、開発された LEX 配信の模擬システムを用いる。信号の放送には国内の民間事業者である JSAT 社の通信衛星を用い、Ku 帯による通信を実行するため、表 5-6 に示すアンテナ、受信機と信号の通信状況を監視するパケット・キャプチャを用いる。

表 5-6 本実験に用いる機器構成

番号	種類	機種	メーカー	備考
1	Ku バンド受信機	JSAT skyaccess S75CA	JSAT 株式会社	
2	Ku バンドアンテナ	CS-S504	日本アンテナ株式会社	
3	パケット・キャプチャ	Ethereal		フリーソフト

また、汎用的な一周波 GPS 受信機の利用可能性を確認するため、2 種類の GPS アンテナ・受信機の組み合わせを用い、衛星からの補正情報は 1 台の PC により収集したものを 2 台の受信・測位装置に分配し、それぞれの GPS 受信機と接続して測位を行う (図 5-1)。表 5-8 に、用いた受信・測位側の機器を示す。これらの GPS 受信機は、RTCM と NMEA-GGA 形式のデータ出力が可能である。今回、受信機として Trimble 5700L1 と Leica SR530 を使用する。前者は一周波型であるが、受信データの出力が 1 秒周期に限定されているため、測位用 PC による抽出処理を用いて頻度の調整を行う。後者は二周波型であるので、L1 だけを測位解析に用いる。

さらに、測位精度の評価における真値を求めるため、実験の冒頭に二周波 GPS 受信機を用いて 6 時間の観測によるスタティック測量を行い、近傍の電子基準点を固定した測位解析により精密座標を決定する。用いる機器等は表 5-6 のとおりである。

表 5-7 受信・測位側の使用機器

番号	種類	機種	メーカー	備考
1	Trimble GPS 受信機	Trimble 5700 L1	ニコン・トリンプル株式会社	一周波 GPS 受信機
	同アンテナ	Trimble Zephyr L1	ニコン・トリンプル株式会社	一周波 GPS アンテナ
2	Leica GPS 受信機	Leica SR530	ライカジオシステムズ株式会社	二周波 GPS 受信機
	同アンテナ	Leica AT502	ライカジオシステムズ株式会社	二周波 GPS アンテナ
3	測位用 PC	ToughBook CF-18	松下電器産業株式会社	補正情報の収集分配
	同	ToughBook CF-18	松下電器産業株式会社	補正情報の取得複合 と測位処理
	同	NC2400	日本ヒューレット・パッカード株式会社	補正情報の取得複合 と測位処理

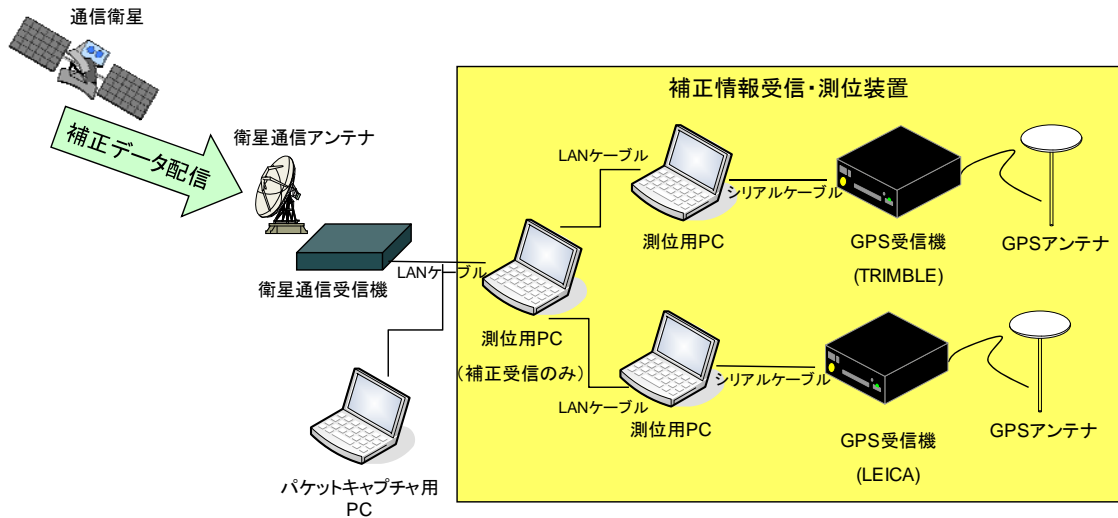


図 5-1 補正情報受信・測位装置の構成(黄色部分が本システム構成)

表 5-8 スタティック測量の概要

項目	内容
GPS 受信機	Trimble 5700 × 2 台
GPS アンテナ	Trimble Zephyr Geodetic × 2 台
基線解析ソフトウェア	Trimble Total Control
衛星軌道暦	放送暦

### 5.3.2. 沖縄地域の実験状況

沖縄地域では、フェーズ2における実験と同様に、図5-2に示す沖縄県南城市大里内原公園内にある比較基線場の2点（G 端点・補助点1号）を観測点とする。図5-3に観測機器の設置風景を示す。



図 5-2 沖縄地域の観測点位置(大里内原公園内比較基線場)



図 5-3 沖縄地域の観測点における機器設置風景

基線長の異なる観測を行うため、参照基準点として電子基準点の沖縄石川（960741）と国頭（960737）を用い、それぞれ短基線、長基線の評価とする。図5-4に基線配置、表5-9に基線長を示す。これらの設定はフェーズ2における最終設定と同じである。



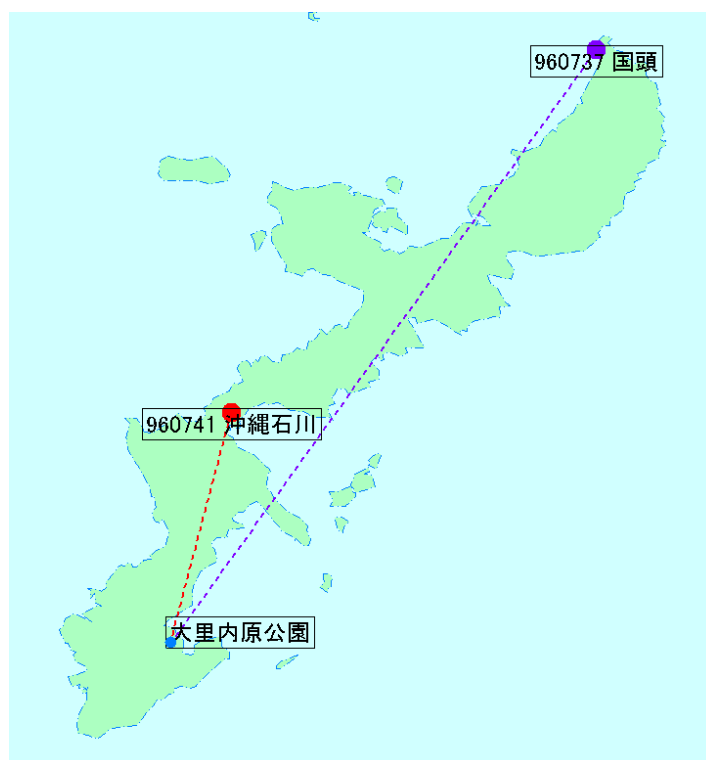


図 5-4 沖縄地域の基線配置

表 5-9 沖縄地域の基線長

基線種別	観測点位置	参照基準点	基線長
短基線	南城市大里内原公園	960741 沖縄石川	約 30km
長基線	南城市大里内原公園	960737 国頭	約 90km

実証実験は 2008 年 3 月 10 日、14 日、15 日の 3 日間行い、その日程は表 5-10 のとおりである。S 帯補正方式の実験設定を表 5-11 に、L 帯補正方式のそれを表 5-12 に示す。なお、設定条件の違いを明確にするため、それぞれに異なる記号を付与する。

表 5-10 沖縄地域の実証実験日程

日	時刻(JST)	作業項目
3/10 (月)	11:00	静止測量開始
	14:00	衛星通信準備開始
	15:00	衛星通信確認テスト開始
	18:46	静止測量終了
3/14 (金)	10:35~12:10	・L帯長基線(RO-L01)6セッション
	12:11	・参照基準点の切替作業
	12:30~14:05	・L帯短基線(RO-L02)6セッション
	14:05~15:35	・L帯短基線(RO-L03)6セッション
	15:35	・参照基準点の切替作業
	16:53~18:25	・L帯長基線(RO-L04)6セッション
	18:30	・S帯の通信遮断試験
3/15 (土)	14:48~16:28	・S帯長基線(RO-S01)10セッション
	16:30	・参照基準点の切替作業
	17:48~19:18	・S帯短基線(RO-S02)9セッション
	19:18~21:27	・S帯短基線(RO-S03)9セッション
	21:27	・参照基準点の切替作業
	22:09~23:39	・S帯長基線(RO-S04)9セッション

表 5-11 S帯補正方式の実験設定

記号	方式	地域	基線長	観測時間	遅延
RO-S01	S帯	沖縄	長基線	10分	なし
RO-S02	S帯	沖縄	短基線	10分	なし
RO-S03	S帯	沖縄	短基線	10分	なし
RO-S04	S帯	沖縄	長基線	10分	なし

表 5-12 L帯補正方式の実験設定

記号	方式	地域	基線長	観測時間	遅延
RO-L01	L帯	沖縄	長基線	15分	あり
RO-L02	L帯	沖縄	短基線	15分	あり
RO-L03	L帯	沖縄	短基線	15分	あり
RO-L04	L帯	沖縄	長基線	15分	あり

スタティック測量では、3点の電子基準点玉城（940100）、知念（960745）、那覇（021096）を固定点とする解析を行い、表 5-13 に示す測位解を得た。

表 5-13 沖縄地域のスタティック測量の測位解

	G 端点	補助点 1 号
緯度(北緯)	26:11:22.46649	26:11:22.35807
経度(東経)	127:45:33.19048	127:45:33.11221
楕円体高(m)	124.6588	124.1519
X (m)	-3507017.0719	-3507015.9781
Y (m)	4527870.0057	4527872.1426
Z (m)	2797978.8896	2797975.6724

### 5.3.3. 関東地域の実験状況

関東地域では、図 5-5 に示す茨城県土浦市にある高岡比較基線場の2点(No.7 と No.8)を観測点とする。図 5-6 に観測機器の設置風景を示す。

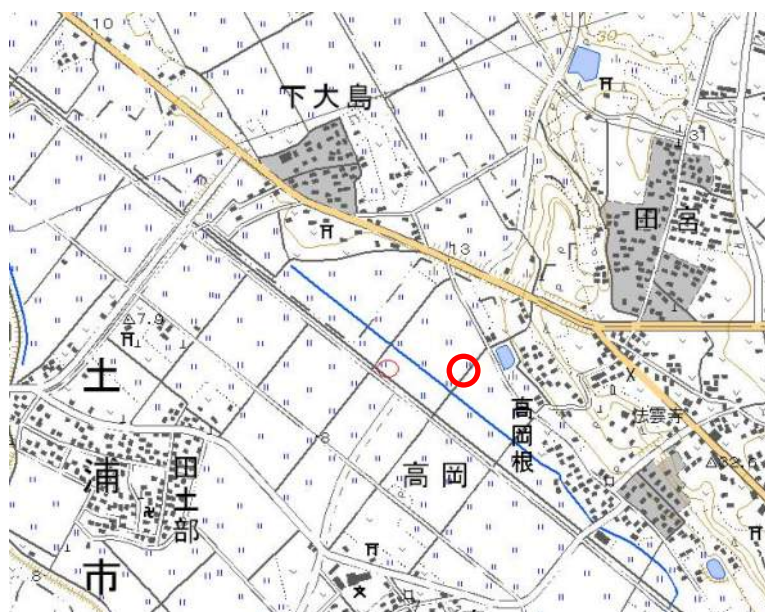


図 5-5 関東地域の観測点位置(高岡比較基線場)



図 5-6 関東地域の観測点における機器設置風景

参照基準点として電子基準点の宇都宮（95021）と水上2（020952）を用い、それぞれ短基線、長基線の評価とする。図 5-7 に基線配置、表 5-14 に基線長を示す。



図 5-7 関東地域の基線配置

表 5-14 関東地域の基線長

基線種別	観測点位置	参照基準点	基線長
短基線	茨城県土浦市高岡基線場	950219 宇都宮	約 56 km
長基線	茨城県土浦市高岡基線場	020952 水上 2	約 125 km

実証実験は 2008 年 3 月 17 日から 19 日の 3 日間行い、その日程は表 5-15 のとおりである。S 帯補正方式の実験設定を表 5-16 に、L 帯補正方式のそれを表 5-17 に示す。なお、設定条件の違いを明確にするため、それぞれに異なる記号を付与する。

実験期間中の 3 月 18 日に、測位解析ソフトウェアによる電離層補正グリッド情報の処理において、長基線設定での参照基準点水上 2 に関する内挿処理に不具合があることが判明した。そこで、ソフトウェアに修正を加え、3 月 19 日に L 帯長基線、S 帯長基線の設定に対するリアルタイム処理の再実験を行った。また、S 帯短基線についてもソフトウェアの修正による影響がないことを確認するため、再実験に加えた。

表 5-15 関東地域の実証実験日程

日	時	作業項目
3/17 (月)	10:43	試験観測開始
	12:32~15:29	・L 帯長基線 (RT-L01) 10 セッション ・参照基準点の切替作業
	16:03~18:03	・L 帯短基線 (RT-L02) 8 セッション
	18:03~19:48	・L 帯短基線 (RT-L03) 7 セッション
	3/18 (火)	09:46~11:16
	11:16~12:46	・S 帯短基線 (RT-S02) 9 セッション
	12:48	・参照基準点の切替作業
	13:37~15:07	・S 帯長基線 (RT-S03) 9 セッション
	15:07~16:37	・S 帯長基線 (RT-S04) 9 セッション
	16:59~19:11	機器調整
3/19 (水) 再実験	09:29~11:14	・L 帯長基線 (RT-L01) 7 セッション
	11:14~12:44	・L 帯長基線 (RT-L04) 6 セッション
	13:07~15:19	・S 帯長基線 (RT-S01) 9 セッション
	15:19~16:49	・S 帯長基線 (RT-S04) 9 セッション ・参照基準点の切替作業
	17:06~18:36	・S 帯短基線 (RT-S02) 9 セッション
	18:36~20:06	・S 帯短基線 (RT-S03) 10 セッション

表 5-16 S 帯補正方式の実験

番号	方式	地域	基線長	観測時間	遅延
RT-S01	S 帯	関東	長基線	10 分	なし
RT-S02	S 帯	関東	短基線	10 分	なし
RT-S03	S 帯	関東	短基線	10 分	なし
RT-S04	S 帯	関東	長基線	10 分	なし

表 5-17 L 帯補正方式の実験

番号	方式	地域	基線長	観測時間	遅延
RT-L01	L 帯	関東	長基線	15 分	あり
RT-L02	L 帯	関東	短基線	15 分	あり
RT-L03	L 帯	関東	短基線	15 分	あり
RT-L04	L 帯	関東	長基線	15 分	あり

スタティック測量を実証実験に先立つ 3 月 1 日に実施し、3 点の電子基準点つくば 3 (960627)、八郷 (93002)、出島 (93006) を固定点とする解析を行い、表 5-18 に示す測位解を得た。

表 5-18 関東地域におけるスタティック測量の測位解

点番号	No.7	No.8
緯度(北緯)	36:07:49.16565	36:07:49.26400
経度(東経)	140:08:18.18274	140:08:18.03060
楕円体高(m)	48.4895	48.4965
X (m)	-3958888.7476	-3958884.9418
Y (m)	3305640.9671	3305642.7451
Z (m)	3739909.5862	3739912.0389

## 5.4. 評価

### 5.4.1. 性能評価

#### 5.4.1.1. 最適観測時間

沖縄地域において Trimble 受信機を用いて実施した実験結果により、本システムによる補正方式を用いて安定した測位解を得るために必要となる最適な観測時間を求める。

5.2.1.における設定に従い、S 帯補正方式について 7 分と 10 分、L 帯補正方式について 10 分と 15 分、という観測時間のデータを用いた解析結果を表 5-19 に示す。ここで、有効測位率については、フェーズ 2 と同様の定義(3.3.2.1.を参照)とし、右欄にはその誤差

の水平成分の RMS 値を示している。なお、詳細については付録 2.4.を参照されたい。

表 5-19 沖縄地域の実験による観測時間の長さとの測位誤差

	観測時間	長基線		短基線	
		有効測位率 (%)	水平誤差の RMS (cm)	有効測位率 (%)	水平誤差の RMS (cm)
S 帯補正方式	10 分	89.5	0.7	100.0	0.6
	7 分	92.6	0.8	96.2	0.7
L 帯補正方式	15 分	83.3	0.9	75.0	3.0
	10 分	83.3	1.0	66.7	1.2

この実験では、補正方式と基線長のいずれの組み合わせについても、約 3 時間という限られた時間で得られた観測を行っており、観測時間の短い設定の方が長い設定の場合に比べセッション数が多いということに注意が必要である。水平誤差の RMS 値は、L 帯補正方式の短基線の観測時間 15 分において 3.0 cm と少し大きい。有効測位率についてみると、S 帯補正方式の長基線を除き、より長い観測時間の設定の方が高い結果を示している。有効測位率の高さを優先し、全体として、いずれの組み合わせにおいてもより長い観測時間、つまり、S 帯補正方式では 10 分、L 帯補正方式では 15 分を最適観測時間として選定することとする。

#### 5.4.1.2. S 帯補正方式における補正情報の最適頻度

沖縄地域において Trimble 受信機を用いて実施した約 3 時間の実験結果により、S 帯補正方式において、参照基準点の観測データと対流圏遅延補正情報の更新頻度と測位解の安定性について評価を行う。電離層遅延補正情報については最高頻度である 30 秒とし、参照基準点観測データの頻度を 10 秒と 30 秒、対流圏遅延情報の頻度を 30 秒と 120 秒とする 4 通りの組み合わせについて、10 分を観測時間とするセッションで評価する。前節と同様に、有効測位率と水平誤差の RMS 値をとりまとめ、表 5-20 に示す。ここで、fix 数比の欄は、ミスフィックスを除くフィックスしたセッション数と全セッション数の個数比であり、有効測位率を与える。なお、詳細については付録 2.3.を参照されたい。

表 5-20 S 帯補正方式の情報頻度と測位誤差

ケース	更新頻度[秒]			短基線			長基線		
	参照点	電離層	対流圏	fix 数比	有効測位率(%)	水平誤差 (c m)	fix 数比	有効測位率(%)	水平誤差 (c m)
1	10	30	30	18/18	100	0.6	17/19	89.5	0.7
2	10	30	120	18/18	100	0.6	17/19	89.5	0.7
3	30	30	30	19/19	100	0.6	18/19	94.7	0.9
4	30	30	120	19/19	100	0.6	18/19	94.7	0.9

補正情報の更新頻度の違いに対し、短基線では差違がみられない。一方、長基線では、参照基準点の更新頻度が低い場合に、ミスフィックスが1セッションだけ多いものの、正しくフィックスした解の水平精度は有意に高い。また、対流圏遅延補正情報の頻度の違いに対しては測位結果の品質に違いはみられない。観測時の気象条件は快晴で安定しており、対流圏遅延が干渉測位方式に与える影響が小さい状態であったと考えられ、不安定な気象条件下では異なる結果となる可能性がある。従って、S 帯補正方式における補正情報の最適頻度としては、もっとも更新頻度が高いケース1の設定を採用することとする。

## 5.4.2. システム動作

### 5.4.2.1. リアルタイム動作

沖縄地域と関東地域において、本システムを用いたS 帯補正方式とL 帯補正方式のリアルタイム処理実験が行なわれた。パケット・キャプチャを用いた補正情報の配信状態の監視により、1秒ごとにパケット化された補正情報が、補正情報生成・配信装置から±20msの範囲内で正しく配信されていることが確認された(付録2.2.3.参照)。また、補正情報受信・測位装置において、1組の補正情報が4分ごとに正しく受信されることが確認された(付録2.2.2.参照)。さらに、本システムを用いて、補正情報の生成・配信から受信・測位まで、リアルタイムでの正常な動作をすることが確認された(付録2.1.参照)。

### 5.4.2.2. 補正情報の遅延

L 帯補正方式では、システム内での処理遅延を想定し、LEX 配信を模擬するシステムに10秒間の配信遅延を設定して実験を行った。その結果、リアルタイム処理において、遅延に伴うような障害はなく、測位品質にも有意な影響はみられなかった(付録2.1.参照)。

### 5.4.2.3. 補正情報の欠落

通信衛星からの通信を遮断し、補正情報の受信に欠落を生じる実験では、補正情報受



信・測位装置において欠落が正しく認識されることが確認された(付録 2.1.参照)。また、実験に用いた Ku 帯用受信機に問題があり、実験中において定期的にパケットロスが発生したが、観測点を含む領域の情報に欠落があった場合には補正情報の欠落として処理が行われ、該当しない領域に関する欠落の場合には測位解析が正しく行われた(付録 2.1.参照)。具体的な処理状況については、精度管理手法の有効性として 5.4.3.3.4.において報告する。

### 5.4.3. 測位精度

リアルタイム実証実験について、精度管理手法の有効性を評価するため、まず、この手法を適用する前の測位解について精度を評価し、つぎに、精度管理手法の適用効果を調べる。測位解の精度評価にあたっては、地域条件が異なる沖縄地域と関東地域に分けて分析を行った後に全体をとりまとめることとする。実験期間中の電離層・対流圏の状況について調査すると、太陽活動、プロトン現象、地磁気活動など電離層は全日において静穏であり、大きな電離層擾乱等が発生しておらず、また、沖縄地域の実験初日に降雨がみられたものの、気象条件においても平穏であり、大気の大きな乱れは生じなかった。そのため、電離層や大気の状態の違いについては、今回の実験から評価することはできない。

#### 5.4.3.1. 沖縄地域の実験

沖縄地域で行った実験の測位解について、表 5-21 に、補正方式、基線設定、用いた GPS アンテナ・受信機の種別ごとにとりまとめる。参考のため、同じ条件で行われたフェーズ 2 で得られたプロトタイプシステムによる結果を併せて示す。今回の実験では、静止衛星用の受信機の問題によりパケットロスがほぼ定期的に発生したため、それによって補正情報の受信に致命的な欠落が確認された観測セッションは、集計から除外する。

表 5-21 沖縄地域における測位解の精度

補正方式	基線	フェーズ 2		フェーズ 3			
		有効測位率(%)	水平精度(cm)	有効測位率(%)		水平精度(cm)	
				Leica	Trimble	Leica	Trimble
L	長基線	70.7	2.2	90.0	90.0	1.2	1.0
	短基線	96.0	1.3	55.6	77.8	3.7	3.9
S	長基線	65.9	1.9	94.1	94.1	1.7	0.8
	短基線	80.2	1.1	100.0	100.0	1.3	0.6

※プロトタイプシステムによる結果として、表 3-23、表 3-24 において S 帯補正方式は 10 分、L 帯補正方式は 15 分の観測時間の場合を「フェーズ 2」欄に転載している。

※水平精度はスタティック測量による解を真値としたときの測位誤差の水平成分の RMS を示

し、正しくフィックスした解だけを用いて算出している。

つぎに、セッションごとの測位解の水平成分のばらつきを、補正方式と基線長の組み合わせごとに図 5-8～図 5-11 に示す。各図は、真値として採用したスタティック測量による解を原点としている。得られたフィックス解のうち、水平誤差が 10 cm 以上のセッションをミスフィックスと判断し、図においてマゼンタ色で表し、それを除くフィックス解を紺色で表している。各図において、左図は全ての測位解を含む範囲を示し、右図は真値を中心として東西、南北成分に±4cm の範囲を拡大して示している。いずれの組み合わせにおいても、測位解の水平成分には特に大きな誤差は見られず、フィックス解の多くは真値からほぼ 2cm 以内に分布している。

開発されたシステムは、プロトタイプシステムによる結果と比べ、有効測位率と水平精度において、ほとんどの場合に有意な改善がみられるが、L 帯補正方式の短基線の場合、いずれにおいても有意に品質が劣っている。プロトタイプシステムによる結果はフェーズ 2 における実験で得られたものであり、今回の実験とは必ずしも同一条件ではないが、開発されたシステムに最終調整が必要である可能性を示している。これについては、関東地域における評価などと併せ、総合的に検討することとする。

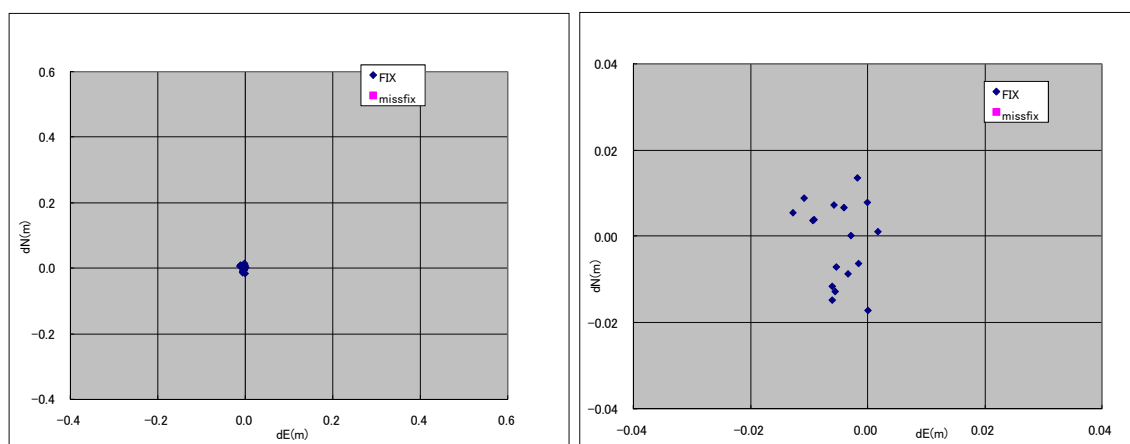


図 5-8 沖縄地域の測位解水平成分のばらつき—L 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

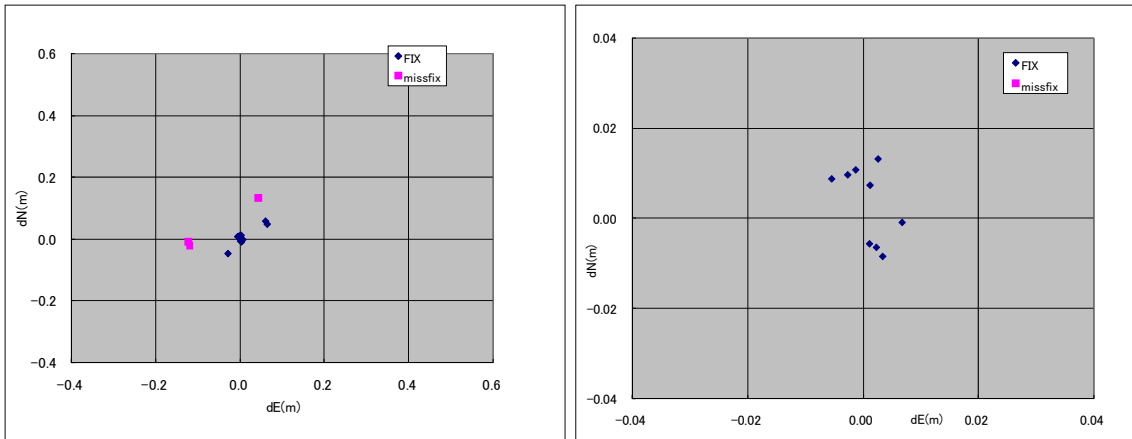


図 5-9 沖縄地域の測位解水平成分のばらつき-L 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

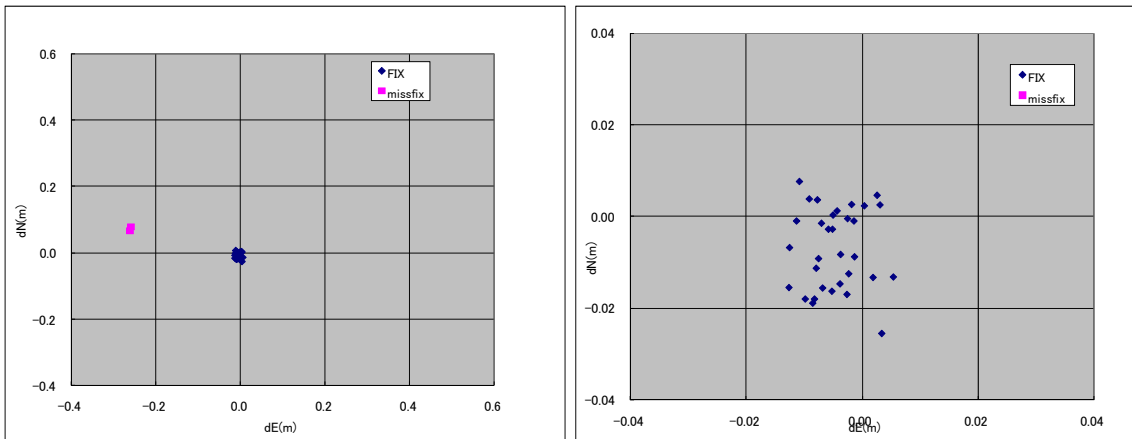


図 5-10 沖縄地域の測位解水平成分のばらつき-S 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

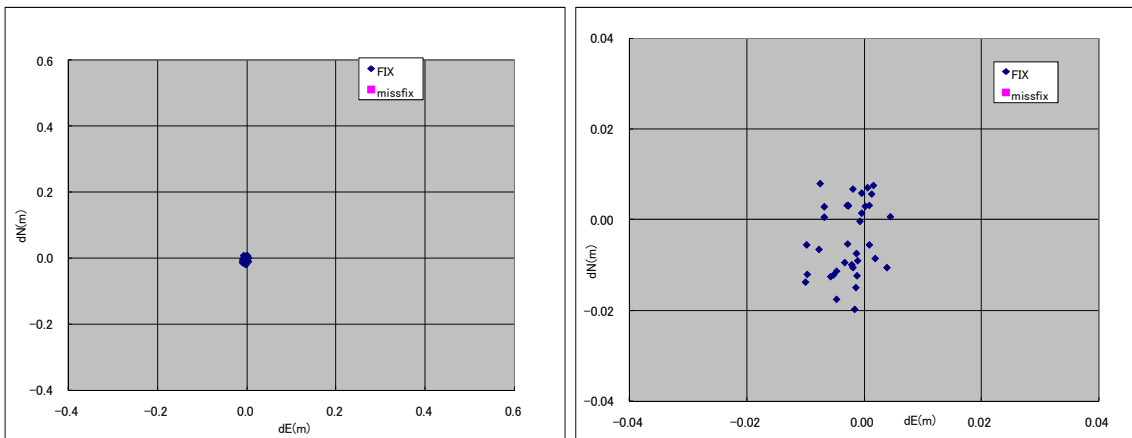


図 5-11 沖縄地域の測位解水平成分のばらつき-S 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

#### 5.4.3.2. 関東地域の実験

関東地域で行った実験の測位解について、表 5-22 に、補正方式、基線設定、用いた GPS アンテナ・受信機の種別ごとにとりまとめる。参考のため、同じ条件で行われたフェーズ2で得られたプロトタイプシステムによる結果を併せて示す。実験の期間中に電離層補正情報の内挿処理の修正が行われたため、修正前の実験と修正後の再実験について区別して集計を行う。また、静止衛星用の受信機の問題により生じたパケットロスにより補正情報の受信に致命的な欠落が確認されたセッションは、集計から除外する。

電離層補正情報の内挿処理に加えられた修正は以下のとおりである。長基線における参照基準点として用いた水上2 (020952) は電離層補正領域の端部に位置し、測位解析においてこの点での電離層遅延の補正情報を内挿処理する場合、近接する4格子点の補正情報が領域内として完備されない位置にあたる。そのため、近接する4格子点の一部が補正情報から欠ける場合の内挿処理を追加した。

表 5-22 関東地域における測位解の精度

補正方式	基線	フェーズ2		フェーズ3			
		有効測位率(%)	水平精度(cm)	有効測位率(%)		水平精度(cm)	
				Leica	Trimble	Leica	Trimble
L	長基線	70.6	1.4	50.0	50.0	0.7	0.5
	(再実験)			66.7	91.7	1.3	1.2
	短基線	95.1	1.5	100.0	100.0	0.8	0.7
S	長基線	73.2	1.3	50.0	78.6	1.9	2.8
	(再実験)			66.7	86.7	1.1	1.4
	短基線	93.1	0.8	71.4	92.9	1.0	0.8
(再実験)	81.3			75.0	1.9	1.4	

※プロトタイプシステムによる結果として、表 3-23、表 3-24 において S 帯補正方式は 10 分、L 帯補正方式は 15 分の観測時間の場合を「フェーズ2」欄に転載している。

※水平精度はスタティック測量による解を真値としたときの測位誤差の水平成分の RMS を示し、正しくフィックスした解だけを用いて算出している。

つぎに、沖縄地域の場合と同様に、セッションごとの測位解の水平成分のばらつきを、図 5-12～図 5-15 に示す。ただし、L 帯短基線の場合を除き、再実験による測位解を用いている。沖縄地域の結果と比べると、ミスフィックス解が多くみられるが、フィックス解の多くは真値からほぼ 2cm 以内に分布している。

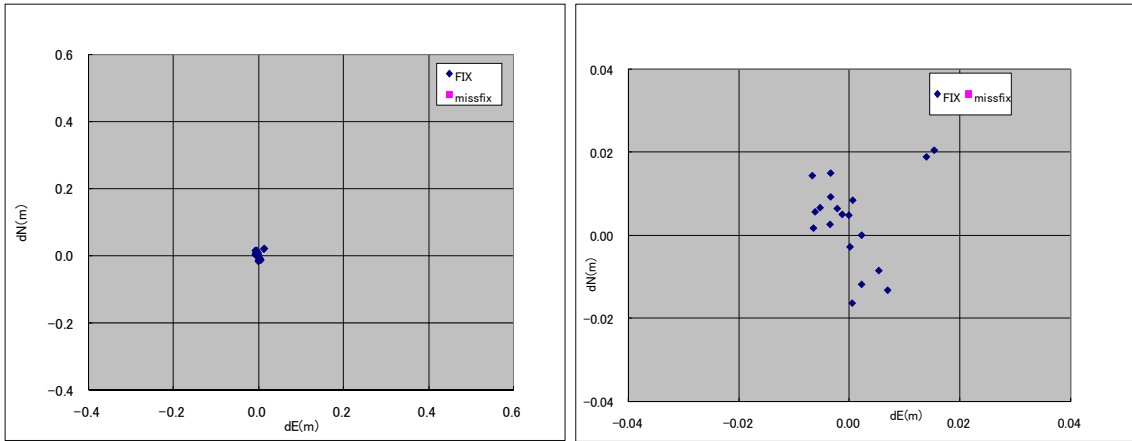


図 5-12 関東地域の測位解水平成分のばらつき-L 帯長基線:再実験 (左:全体、右:拡大)

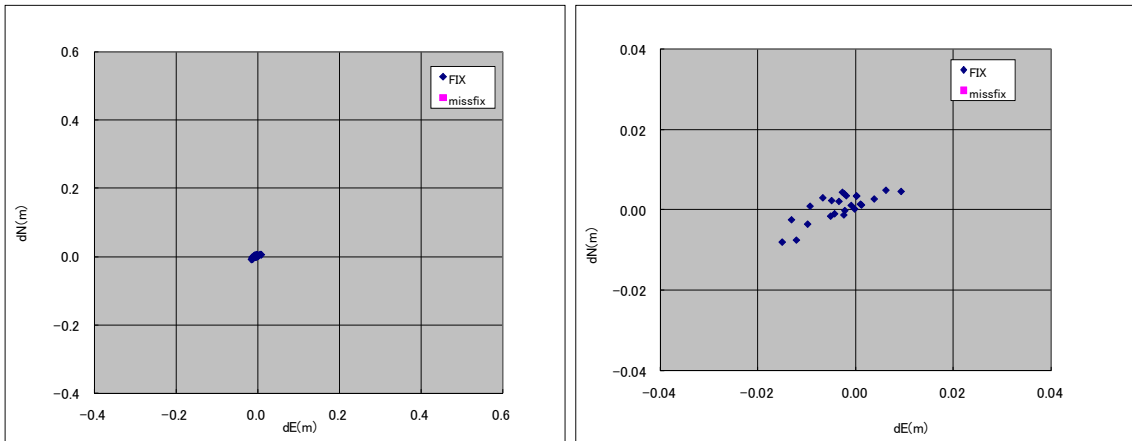


図 5-13 関東地域の測位解水平成分のばらつき-L 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

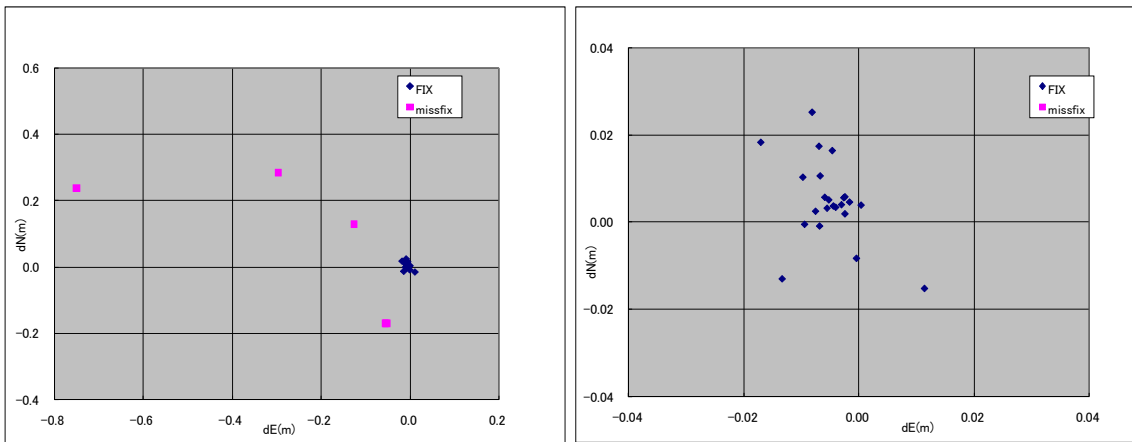


図 5-14 関東地域の測位解水平成分のばらつき-S 帯長基線:再実験 (左:全体、右:拡大)

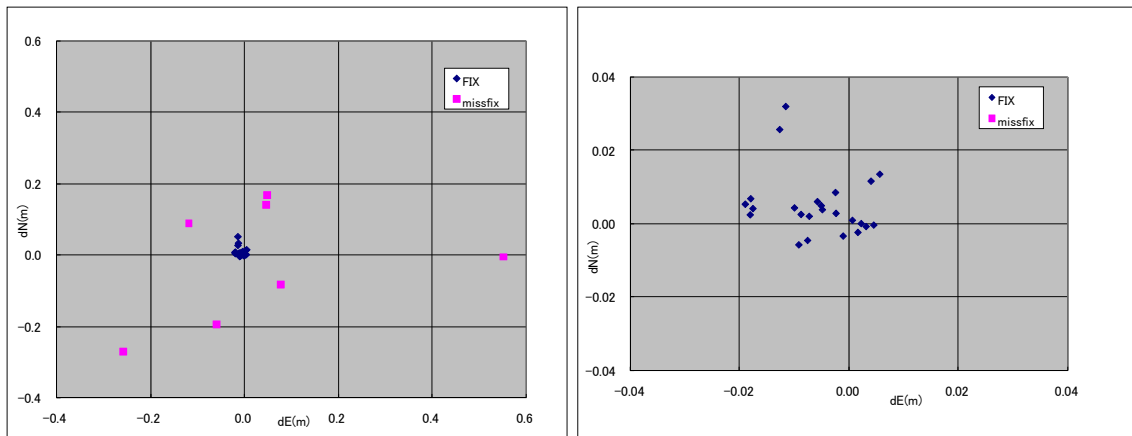


図 5-15 関東地域の測位解水平成分のばらつき—S 帯短基線:再実験 (左:全体、右:拡大)

有効測位率をみると、開発されたシステムは、L 帯補正方式の短基線で 100%であるものの総じて低く、Trimble アンテナ・受信機を用いた S 帯補正方式の長基線の場合を除くと、フェーズ 2 の結果に比べ劣っている。沖縄地域で得られた結果と併せ、開発されたシステムに最終調整が必要である可能性が高いと考えられ、後節において総合的に検討することとする。

#### 5.4.3.3. 誤ったバイアス決定の検出・除去手法の適用効果

開発された誤ったバイアス決定の検出・除去手法では、表 4-5 に示す 3 通りの事象を検出する。以下に、それぞれの検出事例を紹介し、実証実験全体における検出状況を示す。なお、この節においては時刻を UTC で表す。

##### 5.4.3.3.1. 捕捉衛星対数が 4 個以下である事象

沖縄地域で 3 月 14 日に行った L 帯補正方式の短基線設定での実験において、4 時 14 分を挟む観測セッションにおいて捕捉衛星対数が 4 個以下になり、整数値アンビギュイティが十分決定されない条件にあたる事象が発生した。図 5-16 は、測位解析による出力ログを抜粋したものである。行の一番右にある#obs の後に現れる数値は、セッション内における観測衛星対の観測エポックの積算個数である。4 時 9 分 30 秒のエポックでは、G02 衛星との組み合わせにおいて 4 衛星の積算観測数が 19 であるが、つぎの 4 時 10 分 0 秒のエポックでは G13 番衛星が捕捉されず、積算観測数が 20 となったのは 3 衛星対だけである。これに対し、本システムでは、図 5-16 の最終行にあるように、“Warning: Number of Used Sv is less than 4” というメッセージが出力され、事象を検出している。

```

EPOTIME 2008-03-14 04:09:00.007 request_type 0 t_req 2008-03-14 04:09:00.007 t_wait
30.00 response_delay 0.000
L1 REFR ROVR G04 G02 -16777211.000 -16777213.508 +- 0.082 #obs 18
L1 REFR ROVR G08 G02 14.000 8.642 +- 0.147 #obs 7
L1 REFR ROVR G10 G02 -15.000 -17.470 +- 0.092 #obs 18
L1 REFR ROVR G13 G02 -8388632.000 -8388632.986 +- 0.124 #obs 18
L1 REFR ROVR G26 G02 3.000 -9.311 +- 0.147 #obs 18
L1 REFR ROVR G27 G02 -98.000 -69.229 +- 0.144 #obs 2
EPOTIME 2008-03-14 04:09:30.007 request_type 0 t_req 2008-03-14 04:09:30.007 t_wait
30.00 response_delay 0.000
L1 REFR ROVR G04 G02 -16777211.000 -16777213.211 +- 0.078 #obs 19
L1 REFR ROVR G08 G02 14.000 9.654 +- 0.138 #obs 8
L1 REFR ROVR G10 G02 -15.000 -17.470 +- 0.088 #obs 19
L1 REFR ROVR G13 G02 -8388632.000 -8388632.043 +- 0.117 #obs 19
L1 REFR ROVR G26 G02 3.000 -8.740 +- 0.138 #obs 19
L1 REFR ROVR G27 G02 -98.000 -68.186 +- 0.135 #obs 3
EPOTIME 2008-03-14 04:10:00.007 request_type 0 t_req 2008-03-14 04:10:00.007 t_wait
30.00 response_delay 0.000
L1 REFR ROVR G04 G02 -16777211.000 -16777212.338 +- 0.074 #obs 20
L1 REFR ROVR G08 G02 14.000 11.712 +- 0.130 #obs 9
L1 REFR ROVR G10 G02 -15.000 -17.822 +- 0.085 #obs 20
L1 REFR ROVR G26 G02 3.000 -7.769 +- 0.131 #obs 20
L1 REFR ROVR G27 G02 -98.000 -66.225 +- 0.128 #obs 4

```

**Warning: Number of Used Sv is less than 4**

図 5-16 捕捉衛星数が4個以下となった事象の検出例

5.4.3.3.2. 補正情報欠落の事象

沖縄地域で3月15日に行ったS帯補正方式の長基線設定での実験において、補正情報の欠落事例が発生した。図5-17はこのときの測位解析による出力ログを抜粋したものである。6時38分00秒から6時38分20秒にかけて3つのエポックにおいて補正情報が欠落し、これに対し“Warning: All Observation were Missing”というメッセージが出力され（図中の太字）、事象を検出している。このセッションでは、補正情報の欠落により10分間（60エポック）の観測で57エポックしか解析されなかったことが示されている（図中の57F）。この場合、LAMBDA法によるアンビギュイティ決定に十分な個数が得られず、フィックスしないかミスフィックスになる可能性がある。

```

L1 REFR ROVR G24 G26 16777204.000 16777202.435 +- 0.170 #obs 1
L1 REFR ROVR G29 G26 8388602.000 8388592.678 +- 0.718 #obs 1
EPOTIME 2008-03-15 06:38:00.009 request_type 0 t_req 2008-03-15 06:38:00.009 t_wait 10.00

```

```

response_delay 0.000
Warning: All Observation were Missing
EPOTIME 2008-03-15 06:38:10.009 request_type 0 t_req 2008-03-15 06:38:10.009 t_wait 10.00
response_delay 0.000
Warning: All Observation were Missing
EPOTIME 2008-03-15 06:38:20.009 request_type 0 t_req 2008-03-15 06:38:20.009 t_wait 10.00
response_delay 0.000
Warning: All Observation were Missing
EPOTIME 2008-03-15 06:38:30.009 request_type 0 t_req 2008-03-15 06:38:30.009 t_wait 10.00
response_delay 0.000
L1 REFR ROVR G02 G26 -8388631.000 -8388632.478 +- 0.515 #obs 2
L1 REFR ROVR G08 G26 8388558.000 8388564.789 +- 0.704 #obs 2
L1 REFR ROVR G09 G26 25165826.000 25165817.767 +- 0.600 #obs 2
L1 REFR ROVR G10 G26 -7.000 -2.134 +- 0.353 #obs 2
L1 REFR ROVR G15 G26 8388585.000 8388582.715 +- 0.088 #obs 2
L1 REFR ROVR G21 G26 16777193.000 16777190.220 +- 0.690 #obs 2
L1 REFR ROVR G24 G26 16777204.000 16777202.651 +- 0.115 #obs 2
L1 REFR ROVR G29 G26 8388602.000 8388593.591 +- 0.494 #obs 2
(中略)
EPOTIME 2008-03-15 06:47:40.009 request_type 0 t_req 2008-03-15 06:47:40.009 t_wait 10.00
response_delay 0.000
L1 REFR ROVR G02 G15 -16777216.000 -16777214.000 +- 0.000 #obs 57 F
L1 REFR ROVR G09 G15 16777243.000 16777238.474 +- 0.019 #obs 1
L1 REFR ROVR G10 G15 -8388592.000 -8388585.000 +- 0.000 #obs 57 F
L1 REFR ROVR G21 G15 8388609.000 8388609.755 +- 0.005 #obs 29
L1 REFR ROVR G24 G15 8388619.000 8388620.000 +- 0.000 #obs 57 F
L1 REFR ROVR G26 G15 -8388585.000 -8388583.000 +- 0.000 #obs 57 F
L1 REFR ROVR G29 G15 17.000 13.000 +- 0.000 #obs 57 F
RTKtest 54540.283102 ROVR X -3507016.9540 0.3603 Y 4527871.1480 1.3524 Z 2797976.2340
-0.6196 dN -0.9305 dE -1.1130 dH 0.4881 L5 0 / 0 L1 7 / 5 L2 0 / 0

```

図 5-17 補正情報欠落の検出例

#### 5.4.3.3. アンビギュイティのリセットの事象

沖縄地域で3月15日に行ったS帯補正方式の短基線設定での実験において、アンビギュイティのリセットが生じたセッションがみられた。図 5-18はこのときの測位解析による出力ログを抜粋したものである。11時49分0秒のエポックにおいて積算観測数がいずれの衛星対についても7個であったが、11時49分10秒のエポックになると、全ての衛星対において積算観測数が1になっており、全てのアンビギュイティの組み合わせがリセットしていることを示している。これに対し、“Warning: All Ambiguities were Reset”というメッセージが出力され、事象を検出している。



EPOTIME 2008-03-15 11:49:00.011 request_type 0 t_req 2008-03-15 11:49:00.011 t_wait								
10.00 response_delay 0.000								
L1	REFR	ROVR	G01	G30	135.000	135.199 +-	0.260 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G05	G30	12.000	15.224 +-	0.076 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G09	G30	8388590.000	8388598.850 +-	0.357 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G12	G30	-15.000	-9.292 +-	0.158 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G14	G30	125.000	126.792 +-	0.178 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G18	G30	109.000	106.533 +-	0.173 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G22	G30	120.000	117.436 +-	0.108 #obs	7
L1	REFR	ROVR	G31	G30	104.000	98.900 +-	0.236 #obs	7
EPOTIME 2008-03-15 11:49:10.010 request_type 0 t_req 2008-03-15 11:49:10.011 t_wait								
10.00 response_delay 0.000								
L1	REFR	ROVR	G01	G30	136.000	135.039 +-	0.245 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G05	G30	14.000	15.221 +-	0.073 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G09	G30	8388595.000	8388598.831 +-	0.335 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G12	G30	-12.000	-9.289 +-	0.150 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G14	G30	126.000	126.701 +-	0.167 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G18	G30	108.000	106.499 +-	0.163 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G22	G30	119.000	117.359 +-	0.103 #obs	1
L1	REFR	ROVR	G31	G30	102.000	98.732 +-	0.223 #obs	1
<b>Warning: All Ambiguities were Reset</b>								

図 5-18 アンビギュイティリセットの検出例

#### 5.4.3.3.4. 実証実験における事象検出状況

表 5-23～表 5-25 に、リアルタイム実証実験におけるバイアス誤決定検出・除去によるこれら事象の検出状況を示す。表中の欄には、‘地域’に実験地域、‘補正’に補正方式、‘基線’に基線長設定、‘受信機’に GPS アンテナ・受信機の組、についての区別を示し、‘Amb’にアンビギュイティが解決された衛星対数、‘SV s’に解析に使用された衛星対数、‘判定’に測位解の品質情報を与えている。‘備考’において、「\*1」は衛星通信網の不具合による致命的なパケットロス、「\*2」は通信遮断実験による補正情報欠落、が生じたことを示す。また、‘REFR’、‘IONO’と‘TROP’に文字が記入されているものは、それぞれ、観測点の属する領域について、参照基準点観測情報、電離層遅延補正情報、対流圏遅延補正情報が欠落していることを示している。また、‘Missing’、‘reset’と‘≤4’は、それぞれ、補正情報の欠落、アンビギュイティのリセット、捕捉衛星対数が4以下、という事象が生じたエポックの個数を示している。なお、集計には再実験前も含めた全ての測位結果を使用した。

実証実験の全体において45セッションでミスフィックスとなったが、表 5-24 に示すとおり、そのうちの15件で致命的なパケットロスが検出されている。

また、全体で、フィックスしないセッションは表 5-25 に示す54件においてみられた。

そのうちの 40 件では、致命的なパケットロス、アンビグイティのリセット、もしくは、捕捉衛星対数の不足が検出されており、黄色に塗りつぶした 30 件は当該セッションについてフィックス不可能な条件を満たしている。

表 5-23 ミスフィックスとなったセッションにおける異常の検出状況

地域	補正	基線	受信機	Amb	SVs	判定	備考	REFR	IONO	TROP	Missing	reset	≤4
沖縄	S	long	TRIM	7	8	missfix	*1	REFR			3		
関東	S	long	LEICA	6	8	missfix	*1	REFR			1		
関東	S	long	LEICA	7	7	missfix	*1	REFR			2		
関東	S	long	LEICA	4	6	missfix	*1	REFR	IONO	TROP	4		
関東	S	long	LEICA	6	6	missfix	*1	REFR		TROP	1		
関東	S	short	LEICA	5	5	missfix	*1	REFR	IONO		5		
関東	S	Short	LEICA	4	5	missfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	Short	LEICA	7	7	missfix	*1	REFR	IONO		4		
関東	S	Short	LEICA	7	7	missfix	*1	REFR	IONO		4		
関東	S	Short	LEICA	7	8	missfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	Long	TRIM	5	6	missfix	*1	REFR			1		
関東	S	Short	TRIM	5	5	missfix	*1	REFR	IONO		5		
関東	S	Short	TRIM	7	7	missfix	*1	REFR	IONO		4		
関東	S	Short	TRIM	7	7	missfix	*1	REFR	IONO		4		
関東	S	Short	TRIM	7	8	missfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		

表 5-24 フィックスされないセッションにおける異常の検出状況

地域	補正	基線	受信機	Amb	SVs	判定	備考	REFR	IONO	TROP	Missing	reset	≤4
沖縄	L	long	LEICA	0	5	notfix	*1		IONO		7		
沖縄	L	long	LEICA	0	6	notfix	*2	REFR			8		
沖縄	L	short	LEICA	3	5	notfix							6
沖縄	L	short	LEICA	3	5	notfix	*1	REFR			1		30
沖縄	L	short	LEICA	0	7	notfix	*2	REFR	IONO		7		
沖縄	L	short	LEICA	0	6	notfix						29	
沖縄	S	long	LEICA	0	6	notfix	*1		IONO			49	
沖縄	S	long	LEICA	0	7	notfix	*1	REFR			3		
沖縄	L	long	TRIM	0	5	notfix	*1		IONO		7		
沖縄	L	long	TRIM	0	6	notfix	*2	REFR			8		
沖縄	L	short	TRIM	0	5	notfix							6
沖縄	L	short	TRIM	3	6	notfix	*1	REFR			1		30
沖縄	L	short	TRIM	0	7	notfix	*2	REFR	IONO		7		
関東	L	long	LEICA	0	5	notfix	*1		IONO		3		14
関東	L	long	LEICA	0	5	notfix							13
関東	L	long	LEICA	0	7	notfix	*1			TROP			23
関東	L	long	LEICA	0	7	notfix	*1	REFR			1		26
関東	L	long	LEICA	0	5	notfix							4
関東	L	long	LEICA	0	5	notfix	*1		IONO		7		
関東	L	short	LEICA	0	6	notfix	*1		IONO		3		
関東	L	short	LEICA	0	7	notfix	*1		IONO		3	4	
関東	L	short	LEICA	0	6	notfix	*1		IONO		7		
関東	S	long	LEICA	0	6	notfix	*1	REFR			1		
関東	S	long	LEICA	0	6	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	long	LEICA	0	6	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	short	LEICA	0	4	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	L	long	TRIM	0	5	notfix	*1		IONO		3		13
関東	L	long	TRIM	0	5	notfix	*1		IONO		3	4	
関東	L	long	TRIM	0	5	notfix							14
関東	L	long	TRIM	0	7	notfix	*1			TROP			23
関東	L	long	TRIM	0	7	notfix	*1	REFR			7		26
関東	L	long	TRIM	0	5	notfix							4
関東	L	long	TRIM	0	5	notfix	*1		IONO		7		
関東	L	short	TRIM	0	6	notfix	*1		IONO		3		
関東	L	short	TRIM	0	7	notfix	*1		IONO		3		4
関東	L	short	TRIM	0	6	notfix	*1		IONO		7		
関東	S	long	TRIM	0	6	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	4		
関東	S	long	TRIM	0	6	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	short	TRIM	0	5	notfix	*1	REFR	IONO		5		
関東	S	short	TRIM	0	4	notfix	*1	REFR	IONO	TROP	5		

実証実験において、ミスフィックスを除く FIX したセッションの総数は 245 件になる (表 5-25)。78 件では、パケットロス、または、捕捉衛星対数の不足に該当するエポックを含むことが検出されている。このうち、29 エポック目で捕捉衛星対数の不足が検出された 2 件では、30 エポック目において捕捉衛星対が十分な個数に回復し、測位解がフィックスとなっている。開発されたバイアス誤決定の検出・除去手法のソフトウェアで

は、このような事象を検出した時点で Warning メッセージが出力されるが、当該事象が解消された時点で Warning 出力が停止され、状況の推移が把握される。

表 5-25 正しくフィックスされたセッションにおける異常の検出状況

地域	補正	基線	受信機	Amb	SVs	判定	備考	REFR	IONO	TROP	Missing	reset	≤4
沖縄	L	long	LEICA	4	4	FIX		REFR			2		
沖縄	L	short	LEICA	4	4	FIX		REFR			1		
沖縄	L	short	LEICA	6	6	FIX	*2	REFR			2		
沖縄	S	long	LEICA	6	6	FIX		REFR			3		
沖縄	S	long	LEICA	7	7	FIX		REFR			3		
沖縄	S	long	LEICA	5	7	FIX		REFR			1		
沖縄	S	long	LEICA	8	8	FIX		REFR		TROP	1		
沖縄	S	long	LEICA	7	7	FIX		REFR	IONO		4		
沖縄	S	long	LEICA	6	6	FIX		REFR	IONO		5		
沖縄	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR			1		
沖縄	S	short	LEICA	8	8	FIX		REFR			2		
沖縄	S	short	LEICA	8	9	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	LEICA	7	8	FIX		REFR	IONO		4		
沖縄	S	short	LEICA	8	8	FIX		REFR		TROP	1		
沖縄	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	LEICA	8	8	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	LEICA	7	8	FIX		REFR			1		
沖縄	S	short	LEICA	8	8	FIX		REFR	IONO		4		
沖縄	L	long	TRIM	4	4	FIX		REFR			2		
沖縄	L	short	TRIM	6	6	FIX	*2	REFR			2		
沖縄	S	long	TRIM	6	6	FIX		REFR			4		
沖縄	S	long	TRIM	7	7	FIX		REFR			3		
沖縄	S	long	TRIM	6	7	FIX		REFR			1		
沖縄	S	long	TRIM	8	8	FIX		REFR		TROP	1		
沖縄	S	long	TRIM	7	7	FIX		REFR	IONO		4		
沖縄	S	long	TRIM	6	6	FIX		REFR	IONO		5		
沖縄	S	short	TRIM	6	8	FIX		REFR			1		
沖縄	S	short	TRIM	8	8	FIX		REFR			2		
沖縄	S	short	TRIM	8	9	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	TRIM	8	8	FIX		REFR	IONO		4		
沖縄	S	short	TRIM	8	8	FIX		REFR		TROP	1		
沖縄	S	short	TRIM	7	7	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	TRIM	8	8	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
沖縄	S	short	TRIM	7	8	FIX		REFR			1		
沖縄	S	short	TRIM	8	8	FIX		REFR	IONO		4		
関東	L	long	LEICA	4	4	FIX		REFR			1		
関東	L	long	LEICA	4	5	FIX							29
関東	S	long	LEICA	6	6	FIX		REFR		TROP	1		
関東	S	long	LEICA	4	6	FIX		REFR	IONO		4		
関東	S	long	LEICA	6	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	long	LEICA	8	8	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	long	LEICA	7	8	FIX		REFR		TROP	1		
関東	S	long	LEICA	7	7	FIX			IONO		5		
関東	S	long	LEICA	6	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	short	LEICA	6	6	FIX					5		
関東	S	short	LEICA	6	6	FIX		REFR		TROP	1		

関東	S	short	LEICA	5	5	FIX		REFR	IONO		5		
関東	S	short	LEICA	5	5	FIX		REFR			1		
関東	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	short	LEICA	6	7	FIX		REFR			1		
関東	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR	IONO		5		
関東	S	short	LEICA	7	8	FIX		REFR	IONO	TROP	4		
関東	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR	IONO		4		
関東	S	short	LEICA	7	7	FIX		REFR			1		
関東	L	long	TRIM	4	5	FIX							29
関東	S	long	TRIM	8	8	FIX	*1	REFR			1		
関東	S	long	TRIM	7	7	FIX	*1	REFR			2		
関東	S	long	TRIM	6	6	FIX		REFR		TROP	1		
関東	S	long	TRIM	6	7	FIX		REFR	IONO		4		
関東	S	long	TRIM	6	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	long	TRIM	8	8	FIX		REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	long	TRIM	8	8	FIX		REFR			1		
関東	S	long	TRIM	7	8	FIX		REFR		TROP	5		
関東	S	long	TRIM	7	7	FIX			IONO		5		
関東	S	long	TRIM	6	6	FIX	*1	REFR		TROP	1		
関東	S	long	TRIM	5	6	FIX	*1	REFR	IONO	TROP	7		
関東	S	long	TRIM	6	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	short	TRIM	6	6	FIX					5		
関東	S	short	TRIM	6	6	FIX		REFR		TROP	1		
関東	S	short	TRIM	5	5	FIX	*1	REFR	IONO	TROP	5		
関東	S	short	TRIM	4	5	FIX		REFR	IONO		5		
関東	S	short	TRIM	5	5	FIX		REFR			1		
関東	S	short	TRIM	7	7	FIX		REFR		TROP	2		
関東	S	short	TRIM	6	7	FIX		REFR			1		
関東	S	short	TRIM	7	7	FIX		REFR	IONO		5		
関東	S	short	TRIM	7	8	FIX		REFR	IONO	TROP	4		
関東	S	short	TRIM	7	7	FIX		REFR	IONO		4		
関東	S	short	TRIM	7	7	FIX		REFR			1		

以上の結果から、開発されたバイアス誤決定の検出・除去ソフトウェアが正しく動作し、ノットフィックスとなる可能性のあるセッションがリアルタイム解析において検出されることが確認された。

#### 5.4.3.4. 精度管理手法の有効性

開発された精度管理手法を関東地域と沖縄地域のリアルタイム実証実験に適用し、その有効性を評価する。この場合、関東地域での長基線設定の実験では、期間の途中でソフトウェアに修正を施したため、最終日に行った再実験だけを対象とする。また、衛星通信機器の問題で致命的なパケットロスが発生し、測位解が得られなかった合計 42 セッションについても評価から除外する。そのため、対象となる観測セッションの総数は、沖縄地域について 108、関東地域について 138、合計 246 となる。

はじめに、精度管理手法を適用しない場合の測位解について、フィックスしない解 (notifx)、測位誤差の水平成分の大きさ (10cm 以上) からミスフィックスと思われる解

(missfix)、正しくフィックスしたと思われる解 (fix) に分類した取得状況を、実験地域、補正方式、基線長設定、GPS アンテナ・受信機の組み合わせに分けた取得状況を表 5-26 に示す。ここで、‘有効測位率’ は全観測数に対する正しいフィックス解の割合、‘有効解取得率’ はフィックスしない解を除く全観測数に対する正しいフィックス解の割合を与えている。前者は全ての観測における有効解の取得率、後者は現地におけるリアルタイム測位時に認定されるフィックスしない解を除外した場合の有効解の取得率を示す。精度管理手法では、安定した測位解を取得するため、フィックス解の誤った除外をできるだけ少なくし、有効解取得率が 100%に近い判定を行うことが求められる。

表 5-26 リアルタイム実証実験における測位解の品質と正しいフィックス解取得率

地域・補正・基線・受信機	fix	miss fix	not fix	合計	有効測位率 (%)	有効解取得 率(%)
沖縄 L 長基線 (Leica)	9	0	1	10	90.0	100.0
沖縄 L 長基線 (Trimble)	9	0	1	10	90.0	100.0
沖縄 L 短基線 (Leica)	5	2	2	9	55.6	71.4
沖縄 L 短基線 (Trimble)	7	1	1	9	77.8	87.5
沖縄 S 長基線 (Leica)	16	1	0	17	94.1	94.1
沖縄 S 長基線 (Trimble)	16	1	0	17	94.1	94.1
沖縄 S 短基線 (Leica)	18	0	0	18	100.0	100.0
沖縄 S 短基線 (Trimble)	18	0	0	18	100.0	100.0
小計	98	5	5	108		
関東 L 長基線 (再実験) (Leica)	8	0	4	12	66.7	100.0
関東 L 長基線 (再実験) (Trimble)	11	0	1	12	91.7	100.0
関東 L 短基線 (Leica)	12	0	0	12	100.0	100.0
関東 L 短基線 (Trimble)	12	0	0	12	100.0	100.0
関東 S 長基線 (再実験) (Leica)	10	4	1	15	66.7	71.4
関東 S 長基線 (再実験) (Trimble)	13	1	1	15	86.7	92.9
関東 S 短基線 (Leica)	10	1	3	14	71.4	90.9
関東 S 短基線 (Trimble)	13	0	1	14	92.9	100.0
関東 S 短基線 (再実験) (Leica)	13	3	0	16	81.3	81.3
関東 S 短基線 (再実験) (Trimble)	12	4	0	16	75.0	75.0
小計	114	13	11	138		
合計	212	18	16	246		

有効測位率 = [fix 解数] ÷ [全観測数]、有効解取得率 = [fix 解数] ÷ [(全観測数 - notfix 解数)]

つぎに、精度管理手法を適用した場合の正しいフィックス解判定の有効性について評価する。この場合、リアルタイム測位結果の取得時に判定されるフィックスしない解 (全体で 16 セッション) は対象とならないので、検討から除外する。従って、対象とするセッション総数は 230 であり、212 個の正しいフィックス解と 18 個のミスフィックス解で構成されていることになる。

まず、連続する 2 セッションの間でとった測位解水平成分の較差に対し、ミスフィッ

クス判定の閾値を変えた場合の判定状況について調べる。表 5-27 がその結果の一覧である。‘fix 判定’と‘missfix 判定’は当該閾値を用いたフィックス判定個数とミスフィックス判定個数、‘fix 誤判定’と‘missfix 誤判定’は当該閾値による判定で fix と誤判定された missfix 個数と missfix と誤判定された fix 個数である。また、当該閾値を適用して判定されたフィックス解について、その妥当性は問わないで求めた有効測位率と有効解取得率を併せて示している。

正しいフィックス解をミスフィックスと誤る missfix 誤判定は、当然、閾値が小さいほど起こりやすい。閾値を 8 cm とすると誤判定が 2 個と小さいが、20 cm とした場合でも 1 個の誤判定がみられる。他方、ミスフィックス解を正しいフィックスと誤る fix 誤判定は、閾値を大きくするほど起こりやすいが、3 cm の設定でも 2 個誤判定がみられ、それについては後述する。採用した精度管理手法の閾値 9 cm の場合、fix 誤判定と missfix 誤判定はそれぞれ 2 個ずつの合わせて 4 個となり、調べた閾値の範囲の中では、誤判定総数がもっとも小さいものになっている。実際のミスフィックス解は 18 個であるので、これを見分ける手法の誤りとしては十分小さな個数である。

表 5-27 閾値の違いによるミスフィックス判定能力と測位精度

閾値 (cm)	水平精度 (cm)	fix 判定	missfix 判定	合計	fix 誤判定	missfix 誤判定	有効測位率(%)	有効解取得率(%)
1	0.98	181	49	230	0	31	73.6	78.7
2	1.06	200	30	230	0	12	81.3	87.0
3	1.98	206	24	230	2	8	83.7	89.6
4	1.98	208	22	230	2	6	84.6	90.4
5	1.98	208	22	230	2	6	84.6	90.4
6	2.01	210	20	230	2	4	85.4	91.3
7	2.01	210	20	230	2	4	85.4	91.3
8	2.15	212	18	230	2	2	86.2	92.2
9	2.15	212	18	230	2	2	86.2	92.2
10	2.15	212	18	230	2	2	86.2	92.2
11	2.31	213	17	230	3	2	86.6	92.6
12	2.31	213	17	230	3	2	86.6	92.6
13	2.31	213	17	230	3	2	86.6	92.6
14	2.31	213	17	230	3	2	86.6	92.6
15	2.68	216	14	230	5	1	87.8	93.9
16	2.68	216	14	230	5	1	87.8	93.9
17	2.93	217	13	230	6	1	88.2	94.3
18	3.32	219	11	230	8	1	89.0	95.2
19	3.46	220	10	230	9	1	89.4	95.7
20	3.54	221	9	230	10	1	89.8	96.1

つぎに、測位解水平成分のセッション間較差が、ミスフィックス解について 3 cm という小さなものになった要因について検討する。これは、関東地域の Trimble アンテナ・受信機を用いた S 帯補正方式短基線設定（再実験）において発生したものである。この

条件で取得された 16 個のセッションについて、異なるセッション間でとった較差の違いを表 5-28 に示す。

ミスフィックスは 4 個の連続するセッションで発生しており、これらミスフィックスを含むセッション間の較差水平成分はほとんどの場合に 10 cm を超えている。ただし、連続する 2 つのセッション（代表時刻が 9 時 6 分 50 秒と 9 時 27 分 0 秒のセッション）の間においてだけ 10 cm を下回る較差となっており、その値は 2.9 cm である。これは、短時間の間に観測されるセッション間では、GPS 衛星の幾何学的配置などの観測環境が類似しており、測位解析において同一のバイアス誤決定が発生していると考えられる。

ミスフィックス判定に用いる閾値を小さくするとこのようなミスフィックス解を正しく判定しうるが、逆に、多くの正しいフィックス解をミスフィックスと誤判定してしまうことは表 5-27 の結果から明らかである。表 5-28 から分かるように、測位解の較差をとるセッション間の観測時間の隔たりを大きくすると、ミスフィックス解を含むセッション間較差は十分大きくなっており、判定に用いる閾値を過小に設定する必要がない。したがって、ミスフィックス解を判定する精度管理手法としては閾値には 9 cm を採用し、同一の基線間で較差を調べる観測セッションの時間間隔を十分大きくとる点検を導入することが有効であると考えられる。

表 5-28 関東 S 帯短基線 Trimble(再実験)における測位解のセッション間較差の水平成分

時刻 [UTC]	dN[cm]	dE[cm]	水平誤 差[cm]	Amb	SVs	判定	1つ前と の較差	2つ前と の較差	3つ前と の較差	4つ前と の較差	5つ前と の較差
8:16:30	1.3	0.6	1.5	7	7	FIX					
8:26:30	-0.1	0.3	0.3	6	6	FIX	1.5				
8:36:50	0.1	0.1	0.1	6	6	FIX	0.3	1.4			
8:46:50	0.8	-0.3	0.9	5	6	FIX	0.8	1.1	1.0		
8:56:50	3.2	-01.2	3.4	6	7	FIX	2.5	3.3	3.6	2.5	
9:06:50	14.0	4.7	14.8	7	8	missfix	12.3	14.1	14.7	14.8	13.4
9:27:00	16.9	5.0	17.6	7	7	missfix	2.9	15.0	15.0	16.9	17.5
9:47:10	8.8	-11.7	14.7	7	8	missfix	18.5	17.2	17.2	12.0	14.0
10:07:20	-0.5	55.3	55.3	8	8	missfix	67.7	53.3	53.3	52.7	56.6
10:17:30	0.0	0.4	0.5	7	7	FIX	54.9	15.1	15.1	17.5	14.7
10:27:30	-0.5	-0.8	0.9	7	7	FIX	1.3	56.1	56.1	14.4	18.3
10:38:00	0.4	-1.8	1.8	7	8	FIX	1.3	2.3	57.1	57.1	13.0
10:48:00	0.7	-1.8	1.9	8	8	FIX	0.3	1.5	2.4	57.2	57.2
10:58:10	0.6	-0.6	0.8	7	7	FIX	1.2	1.2	1.1	1.2	55.9
11:08:10	0.3	-0.2	0.4	7	7	FIX	0.5	1.6	1.5	0.9	0.8
11:18:10	0.4	-0.5	0.6	7	7	FIX	0.3	0.2	1.3	1.3	0.9

※ 「1つ前との較差」は、1 つ前のセッションとのセッション間較差。以下同様。

※ dN,およびdE は、それぞれスタティック解からの北方向および東方向の差である。

※ 赤字で示した較差はミスフィックス解のセッションを含むものであることを示している。



## 5.5. システムの最終調整

開発されたシステムを用いた沖縄地域と関東地域におけるリアルタイム実証実験では、プロトタイプシステムを用いた実験に比べ、測位解析結果に必ずしも十分な改良が認められず、システムの最終調整が必要であると考えられる。ここでは、実証実験で得られた解析結果について細かな分析を行い、システムに対する最終的な調整を加える。そうして調整されたシステムにより実証実験で取得されたデータを再解析して評価を行い、要求される性能を満たすことを実証する。

なお、準天頂衛星による放送を模擬するために用いた静止衛星の通信にみられた不具合については、衛星通信用に使用したルータに障害があり、約 20 分ごとに 1 パケットのデータが Ku 帯衛星通信受信機内で消失することが原因であることが判明した。そのため、このパケットロスが測位解析に致命的な補正情報の欠落をもたらしている場合については、測位解析の品質評価に用いないこととする。

### 5.5.1. 測位解の分析とシステムの調整事項

#### (1) 測位解析における電離層補正情報の内挿処理

関東地域の長基線設定において、測位解析における電離層遅延補正情報（格子化モデル）の内挿処理について、以下の改良を施した。長基線設定で参照基準点として用いた電子基準点水上 2（020952）は、電離層遅延補正情報の領域の端部に位置している。測位解析においては、観測点と参照基準点を結ぶ基線を組み、それぞれの基線端点と GPS 衛星とを結ぶ伝播経路上の電離層遅延量を、電離層遅延補正情報に含まれる近傍 4 格子点の電離層遅延量から内挿処理により求めている。電離層遅延補正情報の領域境界近傍にある水上 2 を端点とする経路では、近傍 4 点のうちの一部の格子点が領域に含まれていない事例が生じていた。開発されたシステムでは、このような場合に内挿を行わず、測位解析を実行しない処理となっていた。そこで、当該する 4 近傍格子点のうち、電離層遅延補正情報に含まれるものが 4 点未満の場合、つまり、1 点から 3 点の場合についても、それらを用いた内挿が行われるように処理ソフトウェアを改良した。該当するソフトウェアは補正情報受信・測位装置における RTNet である。

この改良により、既に表 5-22 に示したとおり、関東地域の長基線設定での再実験結果において有効測位率の有意な改善がもたらされた。

#### (2) 対流圏遅延情報の推定処理

対流圏遅延量の推定には、本システムにおいて推定される衛星時計の推定結果が用いられる。関東地域の実証実験結果では、この推定に衛星時計の推定結果が適用されない事例が発生していた。このような場合、対流圏遅延補正情報には大きな誤差が含まれる可能性があり、大気の状態が不安定であれば測位が安定して行われないことになる。そこで、対流圏遅延量の推定において、衛星時計の推定結果が入力されない場合に対流圏

遅延情報が配信されないように改良を行った。該当するソフトウェアは packRT である。

### (3) 電離層遅延量推定におけるサイクルスリップの検知機能

有効測位率が低い結果となった関東地域の L 帯補正方式長基線設定について、解析状況を細かく調べた。すると、参照基準点（水上 2）での PRN 番号 10 番の衛星観測においてサイクルスリップが発生しているが、電離層遅延量の推定処理ではその発生が検知されず、発生前に決定されたアンビギュイティがサイクルスリップ発生後のデータにもそのまま適用されていることが確認された。このような場合、電離層遅延量の推定において十分な品質が確保されない。

リアルタイムデータ収集・分配部は、1 秒間隔で提供される電子基準点のリアルタイム観測データを 30 秒間隔に抽出し、電離層遅延推定処理部に分配している。サイクルスリップ発生時には、電子基準点の受信機において当該エポックにサイクルスリップ発生符号が付けられた観測データが提供されるが、それが抽出エポックに該当しない場合、サイクルスリップの発生が電離層推定処理部には伝達されない。そこで、このような場合にもサイクルスリップを認識できるようにするため、サイクルスリップ符号とは別に、GPS 受信機データのサイクルスリップカウンタをチェックするように機能を追加し、電離層遅延推定処理部においてサイクルスリップの発生が正しく検知されるよう改良した。

### (4) 電離層遅延情報の格子化処理のパラメータ調整

有効測位率が低い結果となった沖縄地域の L 帯補正方式短基線設定について、解析結果を詳しく調べた。すると、電離層遅延量の推定において、観測局と GPS 衛星とで形成される多数の組み合わせに対してアンビギュイティの決定が正しく行われず、生成された補正情報を用いた測位解析では正しくフィックスした解の取得率が著しく低くなっていることが分かった。沖縄地域の実験でリアルタイム処理された電離層遅延推定処理において、アンビギュイティ解決率の時系列を図 5-19 に示す。図の横軸は各実験日における時刻を UTC で表しており、3 月 13 日、14 日、15 日の時系列を、それぞれ青色、赤色、黄色の実線で示している。なお、電離層遅延の推定処理は補正情報生成・配信装置において実験期間中常時稼働されており、その結果が保管されているのでこのような調査が可能である。

アンビギュイティ解決率は、この 3 日も 3 時過ぎから 10 時過ぎまで低くなっている。沖縄地域の実験結果では、正しくフィックスした解の取得率が 4 時から 5 時にかけて著しく低くなっており、(表付録 2.3、付録 2.4.参照)、特に有効測位率が低くなった、L 帯補正方式短基線設定の実験が行われた 3 月 14 日においては、アンビギュイティ解決率は 60%以下と最も低くなっている。

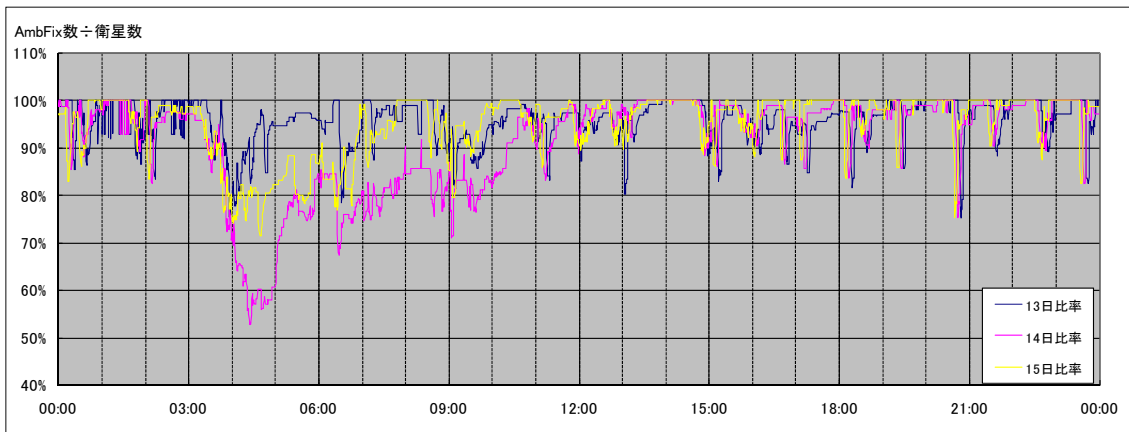


図 5-19 沖縄地域実験での電離層遅延推定処理におけるアンビギュイティ解決状況

そこで、この時間帯に行われた実験結果を対象として、電離層遅延補正情報の作成処理について調整を検討することとする。まず、電離層遅延補正情報の作成を除く処理について、それらが測位解析の品質に劣化をもたらしていないことを確認するため、個別に分析を行う。その結果、以下の事項について、品質劣化に影響をもたらさないことが確認された。

<観測データの品質>

- ・ 電子基準点観測データ（欠落・分断がなく、サイクルスリップの発生も少ない）
- ・ 参照基準点観測データ（欠落・分断がなく、サイクルスリップの発生も少ない）
- ・ 観測点での観測データ（欠落がなく、サイクルスリップの発生も少ない）

<GPS 衛星の暦・ヘルス状況>

- ・ GPS 衛星のヘルス状況（捕捉された衛星のヘルス状態は IGS 情報より問題なし）
- ・ GPS 衛星の暦情報（IGU 予報暦の精度は誤差 10 cm の前提条件を満足）

<衛星時計の推定情報の品質>

- ・ 本システムによる推定結果（IGS 最終暦の結果と比べ、十分な品質）

<対流圏遅延の推定情報の品質>

- ・ 測位解析における内挿処理（観測点位置について、2 周波観測データによる推定値と補正情報の内挿値との較差は最大 2 cm、標準偏差 0.4 cm と十分な品質）

<データ取得>

- ・ LEX 配信模擬システムの通信（Ku 帯通信受信機によるものを除き、欠落なし）
- ・ GPS 受信機からの観測データ取得（受信・測位装置でデータの取得漏れなし）

つぎに、電離層遅延推定値とその格子化処理について、品質を検討する。電離層遅延推定値の格子化では、測位信号の伝搬経路と薄層近似した電離層の貫通点における遅延推定値から、局所的な平均曲率拘束を与えた最小二乗法による手法を適用している。この場合、拘束条件に対

する重みと拘束条件が付与される範囲を規定する計算領域の設定、および格子化間隔がパラメータとして導入される。貫通点における電離層遅延推定値と格子化された電離層遅延モデルを比較すると、拘束条件の付与により計算領域の縁辺部において電離層遅延モデルの形状を歪める可能性があり、それに対する重みの違いによりモデルの形状全体の滑らかさが変化することが確認された。そこで、これらのパラメータの組み合わせをいくとおりか変更させて格子化処理を行って品質を比較した結果、最適なパラメータとして下記の設定を採用することとする。詳細については付録 2.5. を参照されたい。

#### <S 帯補正方式>

グリッドの間隔 :  $0.15^\circ \times 0.2^\circ$

グリッドの拡張 : 2 倍

曲率の重み :  $1/500^2$

#### <L 帯補正方式>

グリッドの間隔 :  $0.3^\circ \times 0.4^\circ$

グリッドの拡張 : 4 倍

曲率の重み :  $1/500^2$

### 5.5.2. 最終調整を適用したシステムの品質評価

本技術開発において、前節で行った最終調整を加えたものを完成システムとする。このシステムが要求された性能を満たすことを最終的に実証するため、リアルタイム実証実験で取得されたデータに対して最終調整後のシステムを適用した測位解析を行い、品質を評価する。

#### 5.5.2.1. 沖縄地域の実験データの解析結果

沖縄地域の実証実験において補正情報受信・測位装置に保管されたデータを用いて、完成システムにより、精度管理手法を適用しない段階での測位解析の結果を表 5-29 に示す。各欄において、上段に有効測位率、下段に正しいフィックス解だけを用いた場合の測位誤差水平成分の RMS 値を与えている。参考のため、プロトタイプシステムによるフェーズ 2 で行った測位実験での結果と、完成システムにおいて電離層遅延情報の格子化処理の選択肢として追加した距離の逆数による重み付き平均法（距離法）による結果を併せて示す。格子化処理として曲率法を用いた場合の完成システムによる有効測位率は、最終調整前のシステムによるリアルタイム処理時の結果に比べるとやや劣るものになっている。また、距離法を用いた場合では、有効測位率がいずれにおいても非常に低く、測位誤差も大きい。

表 5-29 沖縄地域実験データに対する完成システムの測位解の精度

補正方式	基線	フェーズ 2	フェーズ 3					
			リアルタイム (曲率法)		完成システム (曲率法)		完成システム (距離法)	
			Leica	Trimble	Leica	Trimble	Leica	Trimble
L	長基線	70.7	90.0	90.0	70.0	60.0	10.0	20.0
		2.2	1.2	1.0	1.4	0.9	9.9	7.1
	短基線	96.0	55.6	77.8	55.6	77.8	11.1	11.1
		1.3	3.7	3.9	3.8	3.8	6.1	4.9
S	長基線	65.9	94.1	94.1	94.1	94.1	35.3	64.7
		1.9	1.7	0.8	1.4	0.8	5.7	5.4
	短基線	80.2	100.0	100.0	94.4	94.4	66.7	44.4
		1.1	1.3	0.6	1.2	0.7	5.1	4.2

※表中の上段の数値は有効測位率(%)、下段の数値は測位誤差水平成分の RMS(cm)を示す。

なお、測位誤差は正しくフィックスした解だけを用いて算出している。

※プロトタイプシステムによる結果として、表 3-23、表 3-24 において S 帯補正方式は 10 分、L 帯補正方式は 15 分の観測時間の場合を「フェーズ2」欄に転載している。

つぎに、曲率法を用いた場合について、セッションごとの測位解水平成分のばらつきを補正方式と基線長の組み合わせごとに図 5-20 から図 5-23 に示す。また、距離法を用いた場合についても同様に図 5-24 から図 5-27 に示す。図の表示方法は図 5-8 の場合と同じである。曲率法の場合では、正しくフィックスした解のほとんどが真値から 2cm 以内に収まっているが、距離法の場合は、正しくフィックスした解においても真値から大きくずれていることが明らかである。

曲率法を用いて完成システムを適用した測位解の品質は、L 帯補正方式の長基線設定を除き、リアルタイム実証実験の結果とほぼ同じである。前節で行った最終調整は、主に関東地域で得られた実験結果の改善に有効なものとして行われているため、その妥当性については、関東地域で得られた実験データの解析結果と併せて検討することとする。なお、距離法の適用結果が非常に劣っていることについては、沖縄地域では電子基準点の配置が南北方向に偏っているため、重み付き平均をとるのに十分な推定値が利用されない条件となっている可能性がある。

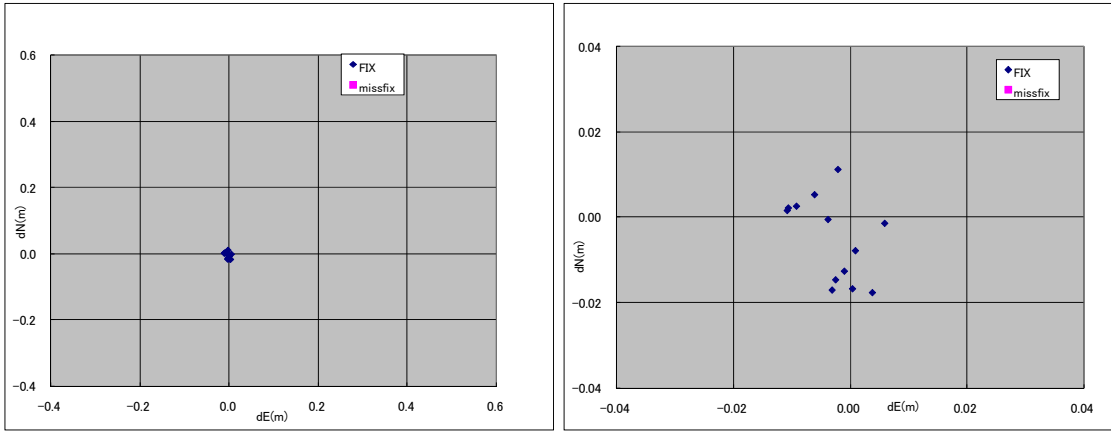


図 5-20 完成システム(曲率法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
—L 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

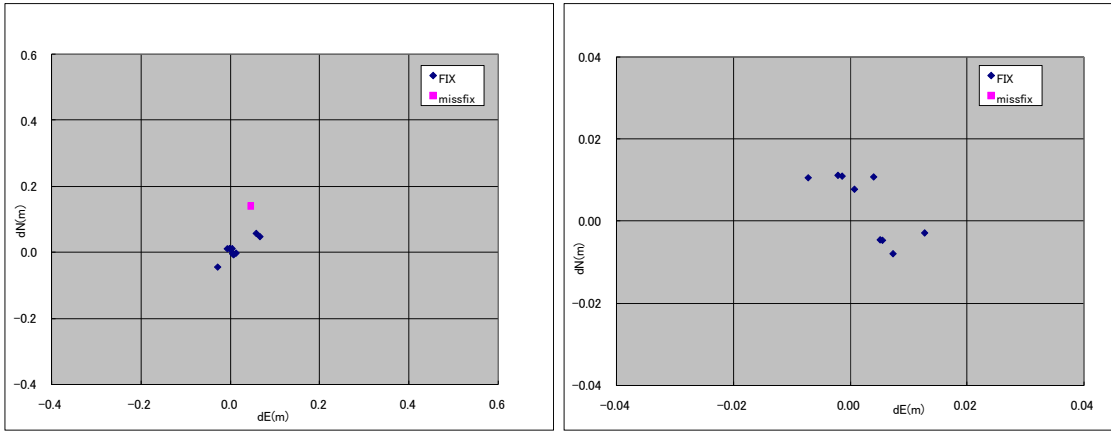


図 5-21 完成システム(曲率法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
—L 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

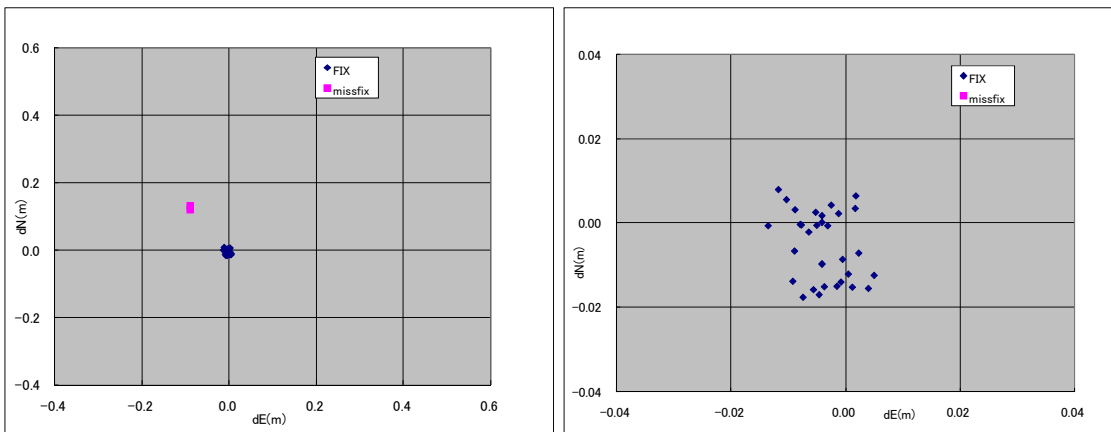


図 5-22 完成システム(曲率法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
—S 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

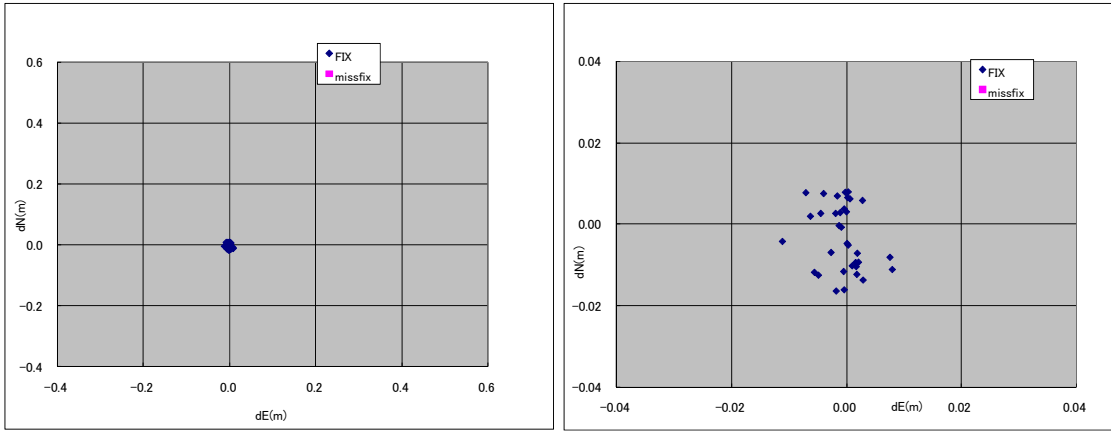


図 5-23 完成システム(曲率法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -S 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

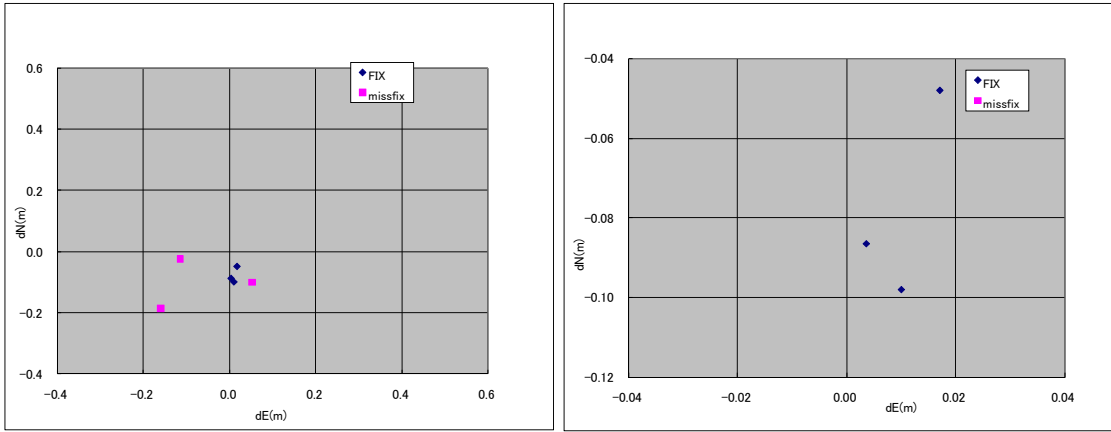


図 5-24 完成システム(距離法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

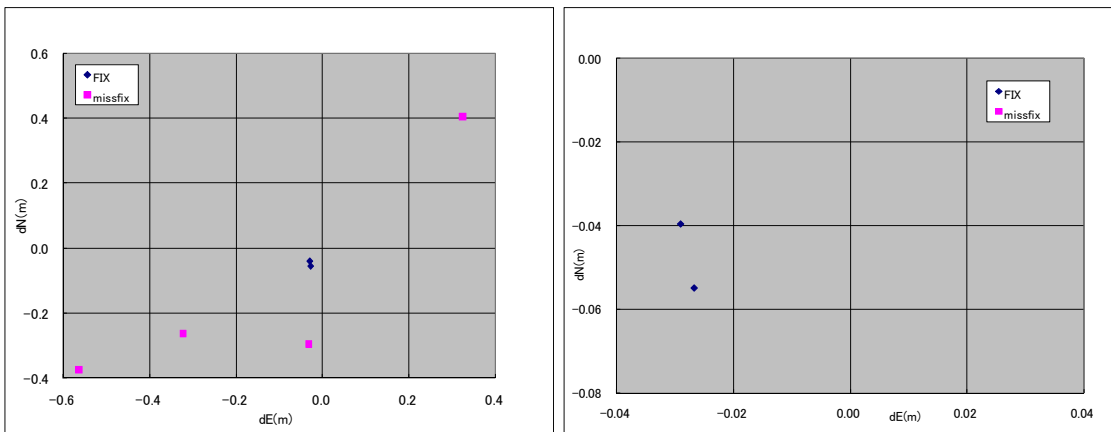


図 5-25 完成システム(距離法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

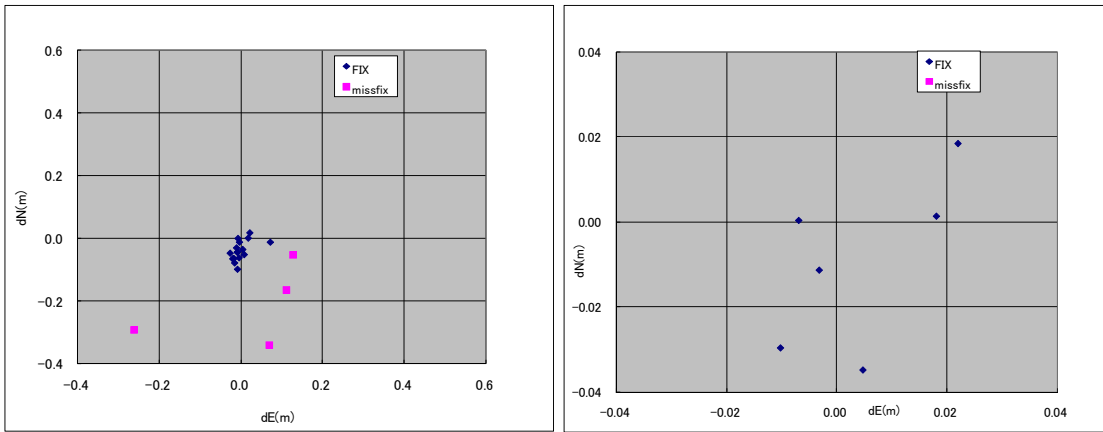


図 5-26 完成システム(距離法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
—S 帯長基線 (左:全体、右:拡大)

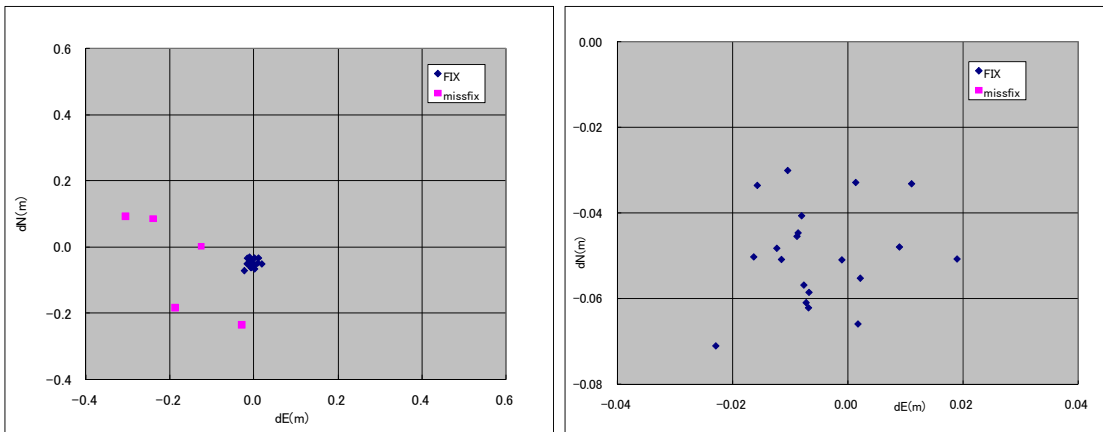


図 5-27 完成システム(距離法)による沖縄地域の測位解水平誤差のばらつき  
—S 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

### 5.5.2.2. 関東地域の実験データの解析結果

関東地域の実証実験で保管されたデータを用いて、完成システムにより、精度管理手法を適用しない段階での測位解析の結果を表 5-30 に示す。格子化手法として曲率法を用いた場合の完成システムによる有効測位率は、最終調整前のシステムによるリアルタイム処理時の結果に比べ、L 帯補正方式の長基線（再実験）において GPS アンテナ・受信機との組み合わせにより優劣に違いがみられ、S 帯補正方式の短基線（始めの実験）で劣っているが、その他の全てにおいて有意に改善している。また、距離法を用いた場合の完成システムによる有効測位率は、多くの場合においてリアルタイム処理時の結果と同等かやや上回るものが得られている。



表 5-30 関東地域実験データに対する完成システムの測位解の精度

補正方式	基線	フェーズ 2	フェーズ 3					
			リアルタイム (曲率法)		完成システム (曲率法)		完成システム (距離法)	
			Leica	Trimble	Leica	Trimble	Leica	Trimble
L	長基線	70.6	50.0	50.0	100.0	100.0	83.3	100.0
			0.7	0.5	0.9	0.8	2.7	2.8
	(再実験)	1.4	66.7	91.7	75.0	83.3	83.3	83.3
			1.3	1.2	0.9	1.0	1.1	1.1
	短基線	95.1	100.0	100.0	100.0	100.0	91.7	91.7
			1.5	0.8	0.7	0.4	0.5	1.0
S	長基線	73.2	50.0	78.6	100.0	100.0	57.1	100.0
			1.9	2.8	0.6	0.6	1.5	0.6
	(再実験)	1.3	66.7	86.7	100.0	100.0	60.0	93.3
			1.1	1.4	0.9	1.0	1.2	1.4
	短基線	93.1	71.4	92.9	50.0	57.1	7.1	7.1
			1.0	0.8	0.6	0.8	0.1	0.9
(再実験)	0.8	81.3	75.0	93.8	100.0	81.3	100.0	
		1.9	1.4	0.7	0.9	0.9	0.9	

※表 5-31 と同様の処理による。

つぎに、前節と同様に、セッションごとの測位解水平成分のばらつきを補正方式と基線長の組み合わせごとに調べる。曲率法を用いた場合の結果を図 5-28 から図 5-31 に、距離法を用いた場合の結果を図 5-32 から図 5-35 に示す。曲率法を用いた場合、正しくフィックスされた解が真値からほぼ 1cm 以内に、距離法を用いた場合でもほぼ 2cm 以内に収まっていることが分かる。

曲率法を用いて完成システムを適用した結果は、プロトタイプシステムを用いてフェーズ 2 の実験で得られた結果と最終調整前のシステムによるリアルタイム処理時の結果に比べ、ほぼすべてにおいて改良している。従って、前節の結果と併せ、最終調整を加え、曲率法を用いて処理を行うシステムを完成システムとして考えることとし、精度管理手法を適用した結果について評価を行うこととする。

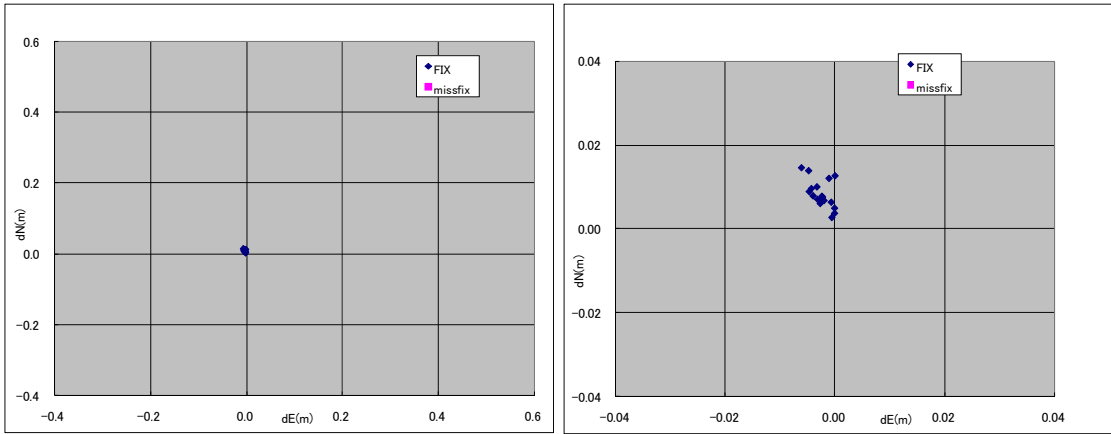


図 5-28 完成システム(曲率法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯長基線<再実験> (左:全体、右:拡大)

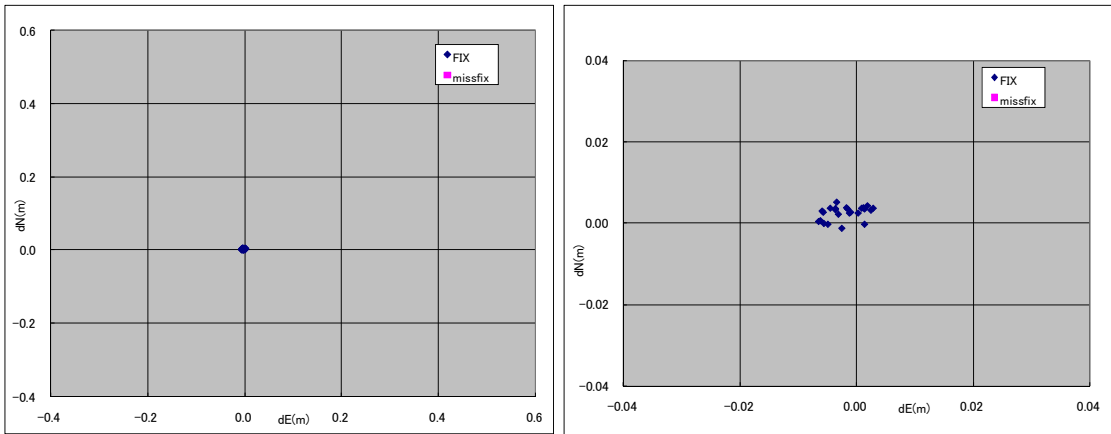


図 5-29 完成システム(曲率法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯短基線 (左:全体、右:拡大)

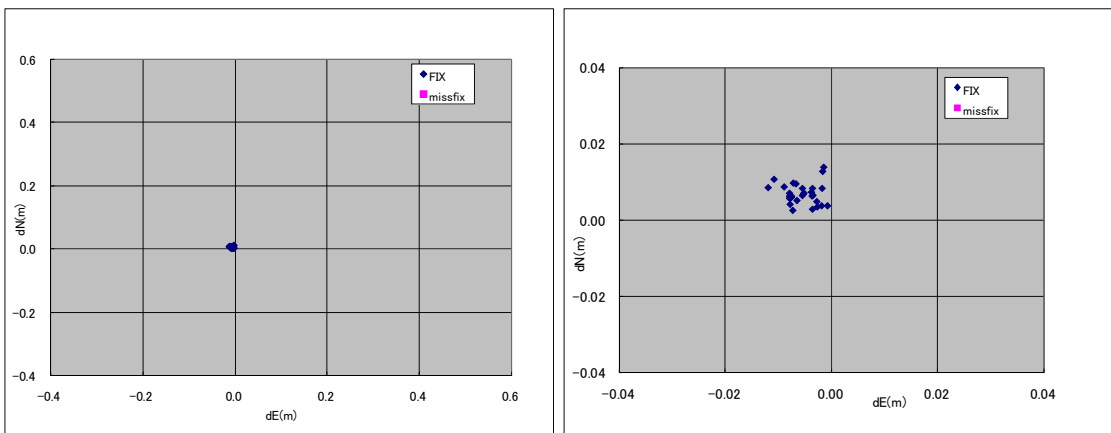


図 5-30 完成システム(曲率法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -S 帯長基線<再実験> (左:全体、右:拡大)

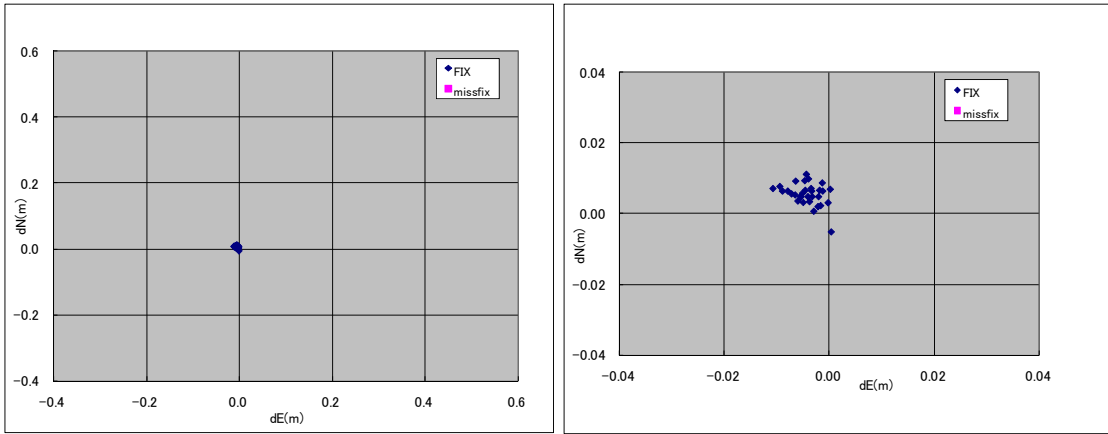


図 5-31 完成システム(曲率法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -S 帯短基線<再実験> (左:全体、右:拡大)

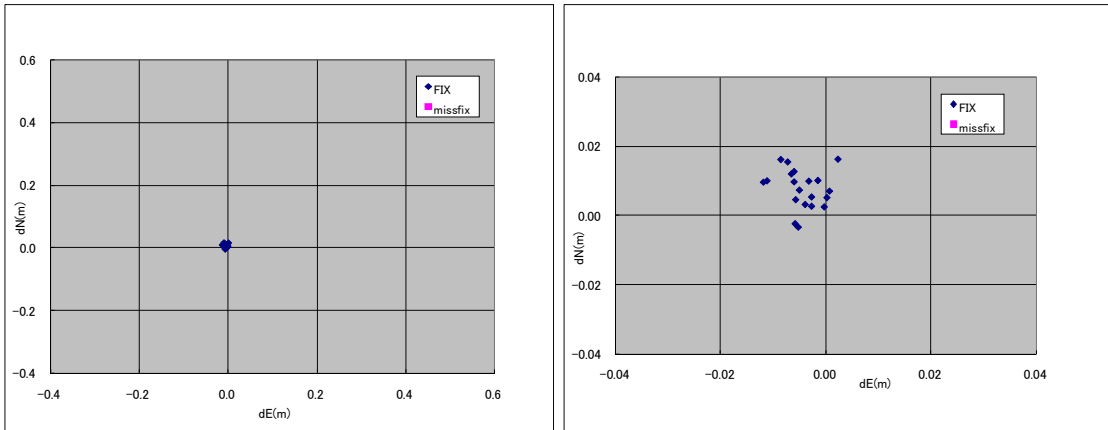


図 5-32 完成システム(距離法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯長基線<再実験> (左:全体、右:拡大)

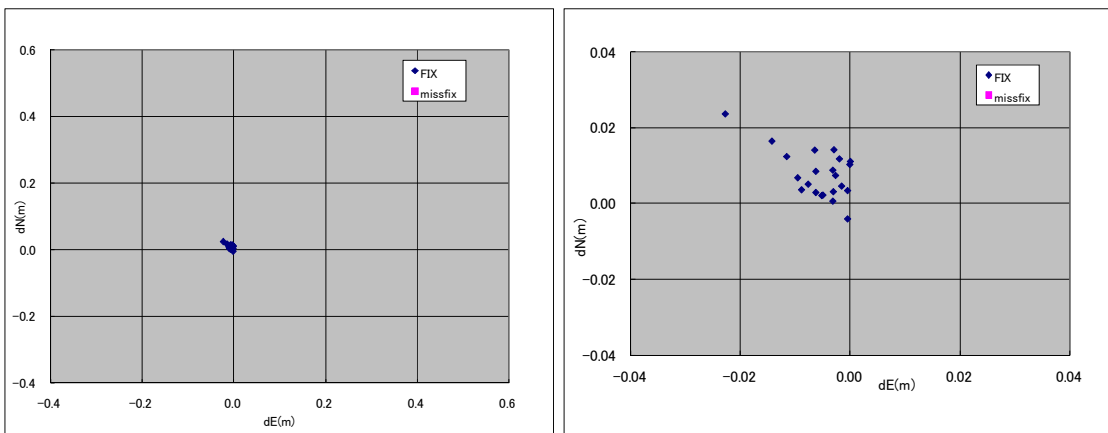


図 5-33 完成システム(距離法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -L 帯短基線 (左:全体、右:大)

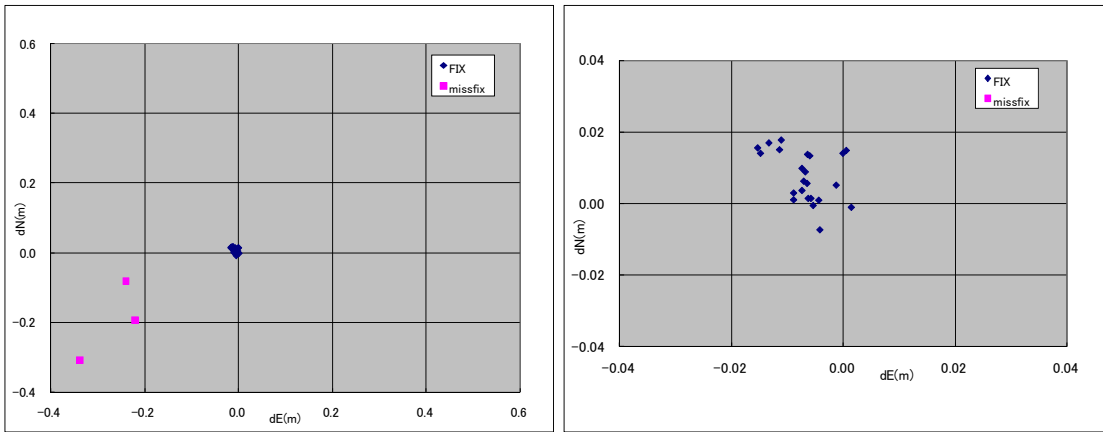


図 5-34 完成システム(距離法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -S 帯長基線<再実験> (左図:体, 右図:大)

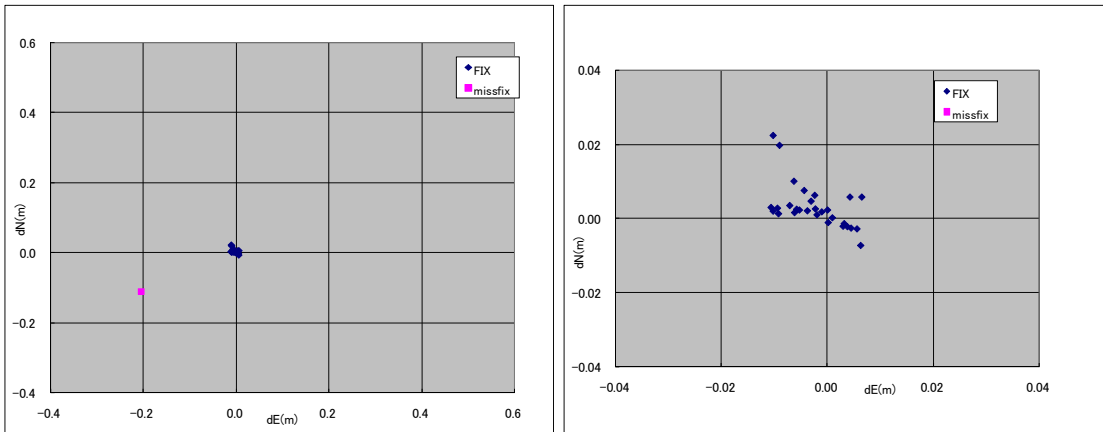


図 5-35 完成システム(距離法)による関東地域の測位解水平誤差のばらつき  
 -S 帯短基線<再実験> (左:全体, 図:拡大)

### 5.5.2.3. 精度管理手法を適用した完成システムの評価

実証実験で取得されたデータについて、曲率法を格子化手法として用いた完成システムによる測位解に精度管理手法を適用した品質を評価する。その場合、関東地域における全ての観測を含むが、通信の障害により致命的なパケットロスが発生した 58セッションを除く、全部で 286セッションを対象とする。なお、精度管理手法を適用する前の段階でフィックスしない 33セッションは、除外される。

はじめに、精度管理手法を適用する前の測位解の品質を表 5-31 に示す。ここでは、真値からの水平誤差が 10 cm を超えるものをミスフィックスと判断し、これを除くものを正しいフィックス解として集計をとっている。ミスフィックス解は、沖縄地域の場合について 3セッションだけにみられた。完成されたシステムでは、フィックスしない測位解が全観測セッションのおよそ 10% でみられるものの、測位解がフィックスした場合に

はミスフィックスの発生が非常に少なくなっている。

測位解析により直ちに判定されるフィックスしない解を除いた場合のフィックス解の取得割合である有効解取得率は、沖縄地域の実験について 96.8 %、関東地域の実験について 100 %、全体で 98.8 %である。フィックスしない解を除く全ての測位解について求めた測位誤差水平成分の RMS は、沖縄で 3.2 cm、関東で 0.8 cm、全体で 2.0 cm であった。これらの数値は、目標精度の 2 cm を満たさないが、ミスフィックス解を除いた場合には、沖縄で 1.7 cm、全体で 1.2 cm となる。

つぎに、連続する 2 セッションの間でとった測位解水平成分の較差に対し、ミスフィックス判定の閾値を変えた場合の判定状況について調べる。その結果を表 5-32 に示す。集計の方法は表 5-27 と同じである。最終調整されたシステムによる測位解には、調整前のシステムを用いたリアルタイム処理結果の場合にみられたような、連続するセッション間においても、水平成分の較差が小さくなるようなミスフィックス解はみられない。閾値 9 cm を用いたミスフィックス判定の適用では、ミスフィックスである解を正しいフィックスと誤る事例は皆無であり、正しいフィックス解をミスフィックスと誤る事例が 1 つだけみられた。従って、精度管理手法としては十分な品質を有していると評価される。

この手法を適用した場合の有効解取得率は全体で 98.4 %であり、その測位誤差水平成分の RMS は 1.2 cm である。従って、精度管理手法を適用した完成システムについては、安定した測位解の取得と測位精度の水平成分の RMS が 2 cm という要求された性能を満たしていると評価される。実証実験で取得されたデータを用いた精度管理手法の適用では、連続するセッションについて較差をとった点検で有効な管理が行われている。しかし、実証実験が行われた際の電離層や大気の状態はいずれも安定しており、また、データの総数も限られているので、点検のための重複セッションの観測は、衛星の配置状況の変化も考慮し、できるだけ観測時刻を隔てることが望ましいと考えられる。

なお、最終調整を加えた完成システムを用いて、全国の補正情報生成・配信と受信・測位に関する動作の試験を行い、全ての動作がリアルタイムに実行されることが確認されている。

表 5-31 実証実験データに曲率法を用いた完成システムを適用した測位解の品質と正しいフィックス  
解取得率(精度管理手法適用前)

地域・補正・基線・受信機	fix	miss fix	not fix	合計	有効測位 率(%)	有効解取 得率(%)	水平精 度 (cm)	水平精 度(cm) missfix を除く
沖縄L長基線(Leica)	7	0	3	10	70.0	100.0	1.40	
沖縄L長基線(Trimble)	6	0	4	10	60.0	100.0	0.94	
沖縄L短基線(Leica)	5	1	3	9	55.6	83.3	6.93	3.77
沖縄L短基線(Trimble)	7	0	2	9	77.8	100.0	3.82	
沖縄S長基線(Leica)	16	1	0	17	94.1	94.1	3.86	1.41
沖縄S長基線(Trimble)	16	1	0	17	94.1	94.1	3.89	0.77
沖縄S短基線(Leica)	17	0	1	18	94.4	100.0	1.15	
沖縄S短基線(Trimble)	17	0	1	18	94.4	100.0	0.66	
沖縄地域小計	91	3	14	108	84.3	96.8	3.18	1.70
関東L長基線(Leica)	6	0	0	6	100.0	100.0	0.89	
関東L長基線(Trimble)	6	0	0	6	100.0	100.0	0.82	
関東L長基線(再実験)(Leica)	9	0	3	12	75.0	100.0	0.87	
関東L長基線(再実験)(Trimble)	10	0	2	12	83.3	100.0	0.99	
関東L短基線(Leica)	12	0	0	12	100.0	100.0	0.43	
関東L短基線(Trimble)	12	0	0	12	100.0	100.0	0.50	
関東S長基線(Leica)	14	0	0	14	100.0	100.0	0.58	
関東S長基線(Trimble)	14	0	0	14	100.0	100.0	0.58	
関東S長基線(再実験)(Leica)	15	0	0	15	100.0	100.0	0.91	
関東S長基線(再実験)(Trimble)	15	0	0	15	100.0	100.0	1.01	
関東S短基線(Leica)	7	0	7	14	50.0	100.0	0.59	
関東S短基線(Trimble)	8	0	6	14	57.1	100.0	0.76	
関東S短基線(再実験)(Leica)	15	0	1	16	93.8	100.0	0.71	
関東S短基線(再実験)(Trimble)	16	0	0	16	100.0	100.0	0.88	
関東地域小計	159	0	19	178	89.3	100.0	0.78	
合計	250	3	33	286	87.4	98.8	2.03	1.20

有効測位率=[fix 解数]÷[全観測数]、有効解取得率=[fix 解数]÷[(全観測数-notfix 解数)]

表 5-32 閾値の違いによるミスフィックス判定能力と測位精度

閾値 (cm)	水平精度 (cm)	fix 判定	missfix 判定	合計	fix 誤判定	missfix 誤判定	有効測位 率(%)	有効解取 得率(%)
1	0.88	250	3	253	0	13	82.9	93.7
2	0.89	250	3	253	0	5	85.7	96.8
3	0.89	250	3	253	0	5	85.7	96.8
4	0.89	250	3	253	0	5	85.7	96.8
5	0.89	250	3	253	0	5	85.7	96.8
6	0.89	250	3	253	0	5	85.7	96.8
7	0.95	250	3	253	0	3	86.4	97.6
8	1.2	250	3	253	0	1	87.1	98.4
9	1.2	250	3	253	0	1	87.1	98.4
10	1.51	250	3	253	1	1	87.4	98.8
11	1.51	250	3	253	1	1	87.4	98.8
12	1.51	250	3	253	1	1	87.4	98.8
13	1.51	250	3	253	1	1	87.4	98.8
14	1.51	250	3	253	1	1	87.4	98.8
15	2.03	250	3	253	3	1	88.1	99.6
16	2.03	250	3	253	3	0	88.5	100.0
17	2.03	250	3	253	3	0	88.5	100.0
18	2.03	250	3	253	3	0	88.5	100.0
19	2.03	250	3	253	3	0	88.5	100.0
20	2.03	250	3	253	3	0	88.5	100.0

## 5.6. まとめ

前章により開発されたシステムを用い、沖縄地域と関東地域で L 帯補正方式・S 帯補正方式、長基線設定・短基線設定によるリアルタイム実証実験を行った。精度管理手法を適用する前の測位解についての品質評価から、開発されたシステムでは、プロトタイプシステムを用いてフェーズ 2 の測位実験で得られた結果に比べ、一部において有効解取得率が低くなるものがみられた。そこで、実証実験期間中に行ったものを含め、システムに以下の最終調整を行った。

- ・ 測位解析における電離層遅延補正情報の内挿処理の改良
- ・ 衛星時計推定結果の未適用時における対流圏遅延補正情報の配信停止機能追加
- ・ 電離層遅延量推定におけるサイクルスリップ検知機能追加
- ・ 電離層遅延補正量の格子化処理のパラメータ調整

この調整を加えて完成システムを構築し、リアルタイム実証実験で得られたデータを用いた測位解析を行い、得られた測位解の品質は表 5-33 のとおりであった。完成システムを用いた測位解では、ほとんどにおいて 100 % の有効解取得率となり、最も低い Leica の GPS アンテナ・受信機と組み合わせた沖縄地域の L 帯補正方式・短基線設定においても 83 % を超え、測位解析の安定性が向上している。

開発された精度管理手法を適用すると、全ての実験を含めた場合、有効測位率は 87 %、有効解取得率は 98.4 % であり、採用された測位解の水平誤差の RMS は 1.2 cm となり、要求された測位精度を満たしている。従って、本技術開発の結果、測位解におけるミスフィックスの誤判定の極めて少ない、安定性の高い高精度測位方式に関する基盤的な技術のシステム開発が実現されている。

実証実験に対して設定された評価項目に関する評価結果は、以下のとおりであった。

### <性能評価>

- ・ 最適な観測時間の選択 (S 帯補正方式で 10 分、L 帯補正方式で 15 分)
- ・ S 帯補正方式の補正情報の最適頻度 (参照基準点観測 10 秒、対流圏遅延補正 30 秒)

### <システム動作>

- ・ 補正情報の生成・配信と受信・測位処理の動作 (リアルタイムで動作)
- ・ 補正情報の遅延に対する動作 (10 秒の遅延を付与しても、障害や品質劣化なし)
- ・ 補正情報欠落時の動作 (受信データの欠落認識と処理を正しく実行)

### <測位精度>

- ・ S 帯補正方式、L 帯補正方式 (水平精度の標準偏差 2 cm を達成)
- ・ 観測の地域、時間帯によらない安定性 (沖縄地域と関東地域でいずれの時間帯でも水平精度目標を安定して達成)
- ・ 基線長によらない安定性 (沖縄地域で約 30/90 km、関東地域で約 56/125 km の基線設定でいずれも水平精度目標を達成)
- ・ 精度管理手法の有効性 (ミスフィックスを有効に除去する安定した測位解を取得)



表 5-33 実験による測位解の有効解取得率とその水平成分精度精度(精度管理手法適用前)

地域	補正方式	基線	プロトタイプ フェーズ2	リアルタイム		完成システム	
				Leica	Trimble	Leica	Trimble
沖縄	L	長基線	70.7	100.0	100.0	100.0	87.5
			2.2	1.2	1.0	1.4	0.9
		短基線	96.0	71.4	87.5	83.3	100.0
			1.3	3.7	3.9	3.8	3.8
	S	長基線	65.9	94.1	94.1	94.1	94.1
			1.9	1.7	0.8	1.4	0.8
		短基線	80.2	100.0	100.0	100.0	100.0
			1.1	1.3	0.6	1.2	0.7
関東	L	長基線	70.6	—	—	100.0	100.0
			0.9	0.8			
		(再実験)	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0
			1.3	1.2	0.9	1.0	
		短基線	95.1	100.0	100.0	100.0	100.0
			1.5	0.8	0.7	0.4	0.5
	S	長基線	73.2	—	—	100.0	100.0
			0.6	0.6			
		(再実験)	1.3	71.4	92.9	100.0	100.0
			1.1	1.4	0.9	1.0	
		短基線	93.1	90.9	100.0	100.0	100.0
			1.0	0.8	0.6	0.8	
(再実験)	0.8	81.3	75.0	100.0	100.0		
	1.9	1.4	0.7	0.9			

※表中の上段の数値は有効解取得(%),下段の数値は測位誤差水平成分の RMS(cm)を示す。  
 なお、測位誤差は正しくフィックスした解だけを用いて算出している。  
 ※プロトタイプシステムによる結果として、表 3-23、表 3-24 において S 帯補正方式は 10 分、L 帯補正方式は 15 分の観測時間の場合を「フェーズ2」欄に転載している。

以上の評価から、本技術開発の最終年度について設定された達成目標に対する評価結果をまとめると表 5-34 のとおりであり、全ての目標を達成している。

表 5-34 フェーズ3における達成目標と評価結果

達成目標	評価結果
<p>フェーズ2で開発したプロトタイプをもとに実使用に耐えうる補正情報生成・配信装置の構築 (S 帯・L 帯補正方式共通)</p>	<p>電子基準点のリアルタイムデータを使用した実験により、補正情報の生成が両補正方式においてリアルタイムに実行されることが確認された。静止通信衛星を経由して補正情報受信・測位装置で一周波 RTK-GPS 測位の実験を行い、目標水平精度 2cm を達成することが確認された。</p>
<p>準天頂衛星の放送方式を用いた補正情報生成・配信および受信・測位装置の構築 (S 帯・L 帯補正方式共通)</p>	<p>静止通信衛星を使用し、構築された LEX 配信模擬システムを用いた実験を行い、L 帯補正方式において、準天頂衛星の LEX 信号の packets 仕様に適合し、10 秒の伝送遅延を模擬した補正情報の配信および受信・測位を正しく実行することが確認された。また、S 帯補正方式においても静止通信衛星を使用した実験を行い、補正情報の配信および受信・測位を正しく実行することが確認された。</p>
<p>測量用一周波 GPS 受信機を使用した新しい補正情報を利用して実使用に耐えうる補正情報受信・測位装置(S 帯・L 帯補正方式共通) バイアス誤決定による解を確実に除外できる精度管理手法の確立</p>	<p>異なる2種類の汎用型の測量用一周波 GPS 受信機を用いて代表的な2地域で実験を行い、両補正方式において、測位点位置に対応した補正情報を選別使用し、得られた測位解が測位精度の要件(水平精度 2cm)を達成していることが確認された。また、バイアス誤決定の検出・除去手法および精度管理手法を適用することにより、ミスフィックス解を誤判定の少ない、安定性の高い測位を実現していることが確認された。</p>