

## 第 XXII 部

# インターネットと GNSS を 利用した高精度測位



## 第 22 部

### インターネットと GNSS を利用した高精度測位

#### 第 1 章 はじめに

近年の技術進歩により、パーソナルコンピュータや Personal Digital Assistance (PDA)、携帯電話などの小型化・高性能化が進展している。また、携帯電話や Personal Handyphone System (PHS)、無線 Local Area Network (無線 LAN) を利用したインターネットへの接続も一般的になっている。これらの動向を背景としてモバイル・コンピューティングが普及しつつあるが、モバイル・コンピューティングの最大の特徴は、端末の位置が固定でないという点にある。

端末の正確な位置を提供することによって、端末を携帯している人に対するナビゲーションや、特定の場所にいる人に対する情報提供などが可能になる。また、モバイル・コンピューティングの分野のみならず、高度交通システム (ITS) や地理情報システム (GIS) といった分野からも、端末の高精度な位置情報の取得に対する要求が高まっている。

端末の測位を行う場合、手段は携帯電話や PHS の基地局を利用する方法、赤外線や電波の発信機を利用する方法など様々なものが考えられる。数ある測位手段の中でも、人工衛星を利用した Global Navigation Satellite Systems (GNSS) には以下のような特徴がある。

- 全地球上で利用が可能
- 絶対座標が取得できる
- 利用のために事前の手続きが不要

したがって、モバイル・コンピューティングにおける端末の屋外での測位には、GNSS が有効であると考えられる。しかし、電離層や対流圏における衛星からの電波の遅延などといった誤差要因により、GNSS 単独での測位精度には限界がある。そこでこの問題に対し、誤差に対する補正情報を端末に配信することにより、端末の測位精度を向上させる技術が開発されている。

現在、補正情報を配信するサービスは、主として FM や中波ビーコンによる電波放送を利用して提供されている。しかし既存のサービスには、サービス範囲や利用者に対する柔軟性・利用手段といった点で問題がある。これらの問題に対し、インターネットを利用して補正情報を配信することには、以下のような利点がある。

- サービス範囲が限定されない
- 利用者ごとの位置や要求に応じた補正情報の提供ができる
- サービスの利用手段を限定しない

これまでも、WIDE プロジェクトでは ICAR WG 内でインターネットを利用した高精度 GNSS 測位に関する研究を行ってきたが、恒常的に端末に対して補正情報を配信するシステムを確立・運用するには至っていない。そこで GNSS WG は、GNSS とインターネットを利用した高精度測位に関する議論を集中的に行い、インターネットを利用して補正情報を配信するシステムをインフラとして確立させることを目的として、2003 年 6 月より活動を開始した。現在、議論のためのメーリングリストにはおよそ 20 名が参加している。本報告書が、GNSS WG として最初の報告書となる。

本報告では、まずはじめに第 2 章で GNSS の概要とその問題について総括したあと、第 3 章で GNSS の高精度測位にインターネットを利用する利点を整理し、既存技術とこれまでの WIDE での取り組みについて触れる。第 4 章では、今回新たに GNSS WG で取り組む実験について述べ、第 5 章ではその途中経過について報告する。最後に第 6 章で今後の活動予定についてまとめる。

#### 第 2 章 GNSS の現状とその問題点

##### 2.1 GNSS を取り巻く現状

GPS による衛星測位は、カーナビゲーションに加えて、携帯電話にも組み込まれはじめてきた。特に

米国の E911 (緊急位置情報通知義務)に見られるように、セキュリティーを確保する上で、位置情報利用は重要であるとともに、今後さらにその利用が進むものと思われる。日本においても、携帯電話からの 110 番や 119 番通報に位置情報の付加義務が検討されており、これによって、ほとんどの個人が、測位機能をもつことになり、位置情報の取り扱いや利用は急速に進むことになる。

GPS に代表される衛星航法システムは、GPS の近代化と称して、今までコンシューマ利用で唯一使用することができた L1 帯の C/A コードに加えて、L2 帯でも C/A コードが利用できたり、第 3 の周波数帯として L5 帯が準備されるなど、機能向上が具体的にスケジュールされてきた。利用者側からすれば、このことは、一層の高精度測位がナビゲーションユーザにもたらされることが期待できる。この高精度測位の実現には、受信機単独の測位では限界があり、電波伝搬経路上の遅延誤差推定などの補正量を生成する基準局が不可欠となる。その基準局も、最近の技術では、基準局をネットワーク化し、エリア内の電離層遅延量の分布量を推定したり、相互補完して運用の冗長性を高めたりしている。これらの、基準局のインテグリティや冗長性の確保といった技術を日本の基準局ネットワークにも反映させることで、車などのダイナミックレンジで移動するユーザへの利用などもさらに大きく広がると考えられる。

ただし、衛星測位システムの弱点である、衛星の視通が確保されていないなければならないという衛星ビジビリティの問題に対しては、残念ながらこの近代化も効果がない。この問題は、都市部や山岳部など、高い障害物の存在する場所での精度劣化や測位不能などの事態を引き起こす。この問題に対しては、少ない上空視界内の使用衛星数をいかに確保するか、という対処になってくることから、これからは、GPS 以外にも GLONASS や、将来的には GALILEO、準天頂衛星などを利用したハイブリッド衛星測位技術が台頭してくるものと思われる。

歩行者などでの利用ニーズの高い室内や地下街などでは、さまざまな INDOOR 測位技術が検討されているが、インフラとしての整備がどのように進むかが重要で、上記の携帯電話への測位機能付加のタイミングと密接に関係する。

## 2.2 GNSS の測位原理と誤差要因

GNSS は、衛星から送信される電波を受信することにより、利用者の位置を決定するシステム全体の総称である。ここでは、GNSS の 1 つである GPS について、その測位原理と誤差要因について述べる。

位置決定精度は測位方式により異なり、最も精度の高いスタティック (静止) 測位において数 mm、最も簡単に利用できる単独測位において 100m 程度である。表 2.1 に GPS の主な測位方式を示す。

GPS の測位方式は大別すると単独測位と相対測位の 2 つに分類される。単独測位とはその名の通り単独 (1 台) の受信機を用いて衛星の電波を受信し、利用者の位置を決定する方式で、GPS を利用する上でもっとも基本となる測位方式である。一方、相対測位とは単独測位の拡張版とも言うべき測位方式で、複数の受信機を同時に利用することによって、正確な座標のわかっている点 (基準点) からの相対的な位置を決定する方式である。

GPS 衛星は、測位に必要な信号とともに、衛星の軌道情報 (ephemeris) を含む航法メッセージと呼ばれる情報を搬送波 (carrier) に乗せて連続的に送信している。この搬送波にはそれぞれ L1 帯 (1575.42 MHz) および L2 帯 (1227.6 MHz) と呼ばれる 2 種類の電波が用いられており、L1 帯に C/A コードおよび P (Y) コードと呼ばれる測位用の符号、および航法メッセージが、また L2 帯には P (Y) コードのみが乗せられている。各衛星ごとにそれぞれ異なるコードパターン (図 2.1) が割り当てられており、これにより衛星の識別が可能となっている。GPS は民間用の SPS (Standard Positioning Service) および軍用の PPS (Precise Positioning Service) という 2 つ

表 2.1. GPS の主な測位方式



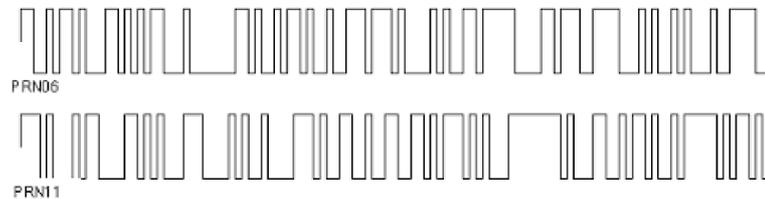


図 2.1. C/A コードパターンの例

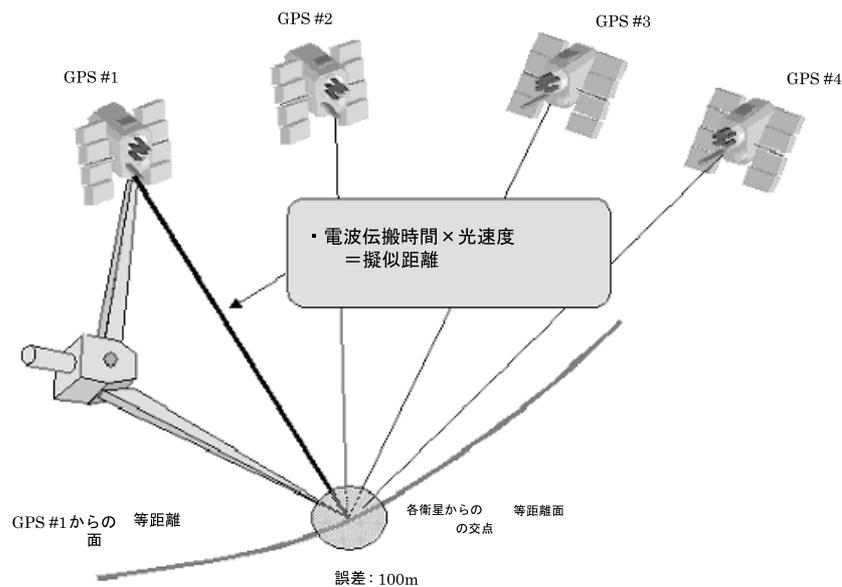


図 2.2. 単独測位の概念

の枠組みに基き運用されているが、民間用の1周波受信機(L1帯のみ受信)ではP(Y)コードは利用できないことになっている。つまり、通常の単独測位およびDGPSでは、上記測位用符号のうち、L1帯のC/Aコードのみを利用するわけである。

GPS受信機内部には各衛星のコードパターンが組み込まれており、この受信機内で生成されるコードパターン(レプリカと呼ぶ)と受信したC/Aコードとが同期するようタイミングを調整し、その遅れをもとにGPS電波の伝播時間、すなわちGPS衛星から受信機までの電波の到達時間を求めている。この求められた伝播時間に光速をかけることでGPS衛星と受信機間の距離が求められることになる。

ここで、GPS衛星が正確な原始時計を搭載しているのに対して、受信機側に内蔵されているのははるかに精度の低い時計である。すなわち、上記方法で測定した伝播時間には受信機の時計誤差が含まれており、計算された衛星-受信機間距離も正確な値からはほど遠い。そのため、この距離のことを「擬似距離(スードレンジ)」と呼ぶ。

今、ある瞬間に、利用者の位置を単独測位により決定しようとした場合、利用者の3次元位置( $x, y, z$ )に加えて、その瞬間の受信機時計誤差 $\delta$ という計4つの未知数をかかえることになる。この際、各衛星の3次元位置は衛星から送信されている航法メッセージ内の軌道情報から計算可能であるため、既知とみなして構わない。すなわちこの4つの未知数を解くためには最低4衛星の電波を受信し、4つの擬似距離を求めてやれば良い(図2.2)。

しかしながら、こうして単独測位により決定された利用者(=GPS受信機)の位置は、いくつかの誤差要因により水平成分で30m(2 drms)程度の精度を実現するに過ぎない。その主な誤差要因を表2.2に示す。

ただし、最近の受信機側の技術向上(搬送波のスムージング、フィルター技術、マルチパス軽減技術など)によって、10m前後の精度は期待できる。

表 2.2. 単独測位における主な誤差要因

①	衛星の軌道誤差	実際の衛星位置と軌道情報から計算される位置との差
②	衛星の時計誤差	主に SA による意図的な C/A コードのタイミングのゆらぎ
③	電離層遅延補正誤差	航法メッセージ内の補正パラメータの誤差
④	対流圏遅延補正誤差	計算に用いる対流圏モデルの誤差
⑤	マルチパス	観測点環境に依存
⑥	受信機ノイズ	受信機内回路の性能による

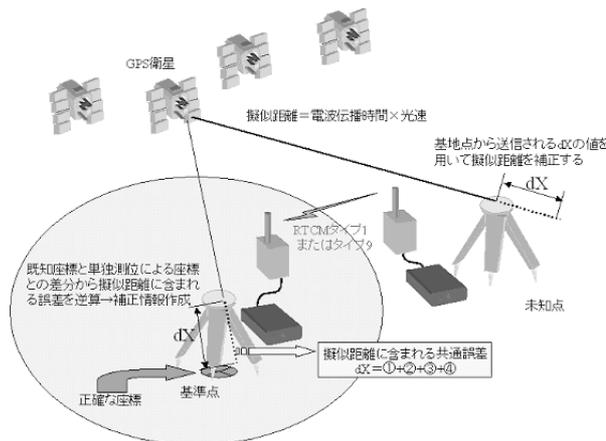


図 2.3. DGPS の概念

## 2.3 誤差の補正技術

### 2.3.1 DGPS (ディファレンシャル測位)

単独測位における上記誤差要因を、複数の受信機を利用することによって相殺し、測位精度を向上させる測位方式を総称して相対測位と呼ぶ。相対測位は表 2.1 に示したように干渉測位と DGPS (ディファレンシャル測位) に分類されるが、ここでは DGPS について説明する。

DGPS は、既に正確な座標の求められている点(基準点)と、実際に測定したい点(未知点)とで同時に単独測位を行い、両者で共通する誤差を相殺することにより測位精度を 10~100 倍程度向上させる測位方式である。

表 2.2 の誤差要因を改めて見直すと、①、②に関しては衛星に起因する誤差、③、④に関しては衛星の電波伝播経路に起因する誤差であることがわかる。この中で①、③、④に関しては、基準点-未知点間距離(基線長)がそれほど大きくない場合( ~ 数 100 km 程度)は、ほぼ同じ大きさと同方向を持っていると考えられるため、共通誤差として相殺することが可能である。また②に関しても、同じ衛星を用いて測定した擬似距離内には同じ大きさの誤差として存在していることになり、共通誤差として相殺可能である。

ちなみに⑤は観測地点固有の誤差、また⑥はノイズによるデータのふらつきで、これらは共通誤差として相殺できずに残る誤差である。ここで前節の話に戻るが、単独測位において基本観測量となる擬似距離の中には、これらの誤差が見えないながらも含まれており、それが単独測位の精度の上限を決定している。もしこれら共通誤差を、基準点において測定した各衛星との擬似距離に含まれる誤差量として求めることができれば、その誤差量をそのまま未知点の擬似距離補正に利用することで、結果として単独測位精度を大きく向上させることが可能となる。

ここで、基準点の正確な座標値はわかっているため、基準点において計算された単独測位による座標値と正確な座標値との差分から逆算して、各衛星との擬似距離にそれぞれどの程度の誤差が含まれているかを計算することが可能である。この各衛星ごとに計算された擬似距離誤差=補正量を総称して一般的に「補正情報」と呼び、この補正情報を基準点から未知点へリアルタイムに送信することによって、未知点側ではその補正情報を用いて擬似距離を補正し、補正した擬似距離を用いて単独測位計算を行い、結果的に数 m または、サブ m の精度で位置を決定することができる。

2.3.2 搬送波干渉測位

GPS による測位方法は、大きく分けて未知点のみの単独測位と、既知点と未知点を用いた相対測位の2通りの方法があることは既に述べたが、相対測位においても大きく分けて2通りの測位方法があり、一方がDGPS(ディファレンシャル測位)であり、もう一方が干渉測位である。この両者の違いは、DGPSがC/Aコードを用い衛星-受信機間の疑似距離を計算し、さらにその疑似距離計算値に基準局補正データを用いて補正・測位する方法である。これに対し、干渉測位では搬送波(キャリア)位相を用い、2地点間における電波の行路差を求めることにより測位す

る方式であり、それを表したのが図2.4である。そのため、干渉測位においても精密に座標が計算された既知点が必要であり、その既知点からの距離の計算により座標値を決定する。この方法は元来、GPS測位が行われる前より電波天体を利用したVLBI(Very Long Baseline Interferometry)観測により用いられた方法であり、GPS干渉測位においては、電波発信源が天体から人工衛星に変化し、受信装置が大きかりな電波望遠鏡から持ち運び可能なコンパクトなものになっている。

干渉測位では、それぞれの受信機において観測される搬送波位相を測定するため、受信機間の位相差は

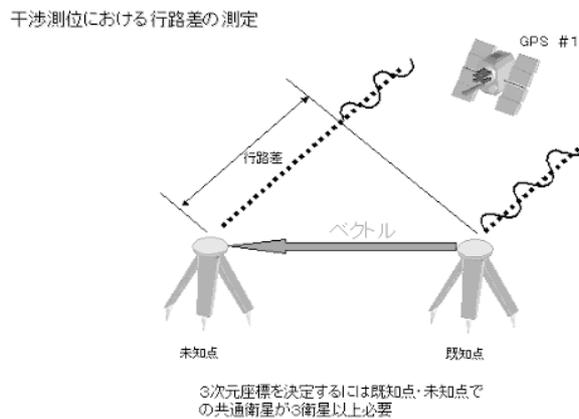


図 2.4. 干渉測位の概念図

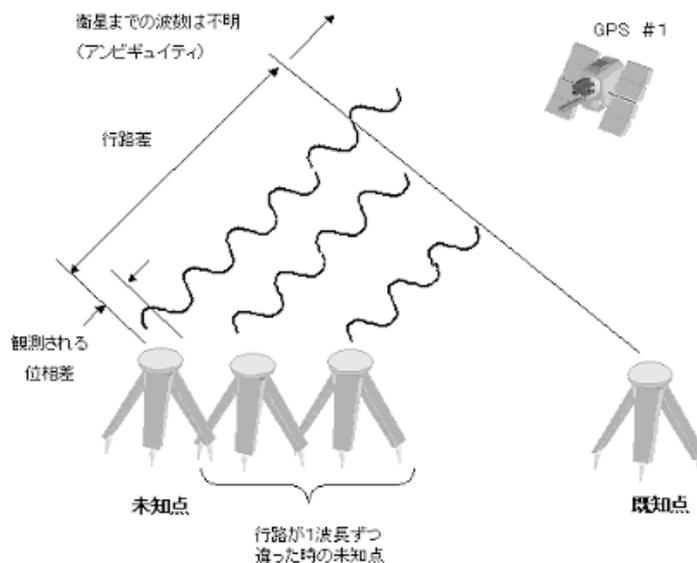


図 2.5. 干渉測位で測定される位相差と搬送波波数の関係

実際には位相のみ測定され、データ収録時点では衛星-受信機間の波数は不明。

明らかになるが、受信機間の波数については不明である(図 2.5)。これをアンビギュイティ (Ambiguity: 波数不確定、または整数値バイアス) と言う。

このため干渉測位では、3次元座標における測位解の決定では、RTK (リアルタイム キネマティック) においては測位のプロセスとしてフロート解から FIX 解への収束過程が存在し、スタティック測位においてはアンビギュイティを解くため長時間観測が必要である。

このアンビギュイティがあるため、基線解が多数あり、これを図 2.6 に示す。この格子軸の方向は、衛星の組み合わせによって異なる。この格子状に表れる基線解のうち、衛星組み合わせのパターンによらず変化しない点が必ずあり、これが真の測位解である。

### 2.3.3 RTK の原理

干渉測位は主に 3 種類の測位方式があり、後処理方式としてスタティック測位とキネマティック測位、リアルタイムに測位可能なものとして RTK (リアルタイムキネマティック) がある。この RTK の原理について示したものが図 2.7 である。RTK では基地局より補正データとして、基地局における座標、搬送波位相情報、疑似距離情報を移動局側に送信する。これらの補正情報は、RTCM SC104 の Ver.2.2 ではそれぞれタイプ 3、18、19 に当てはまる。補正データ送信には無線免許の必要がなく、取り扱いが容易な特定小電力無線が用いられることが多い。移動局では補正情報を受け、測位解の計算を行う。

RTK の特徴として、移動局側受信機において基地

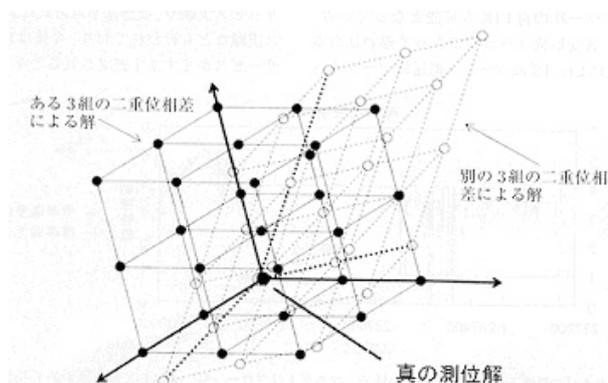


図 2.6. ある衛星組での整数値バイアスと、別の組み合わせによる整数値バイアス  
整数値バイアスは格子状に表れ、組み合わせによらない共通の解が真の測位解。

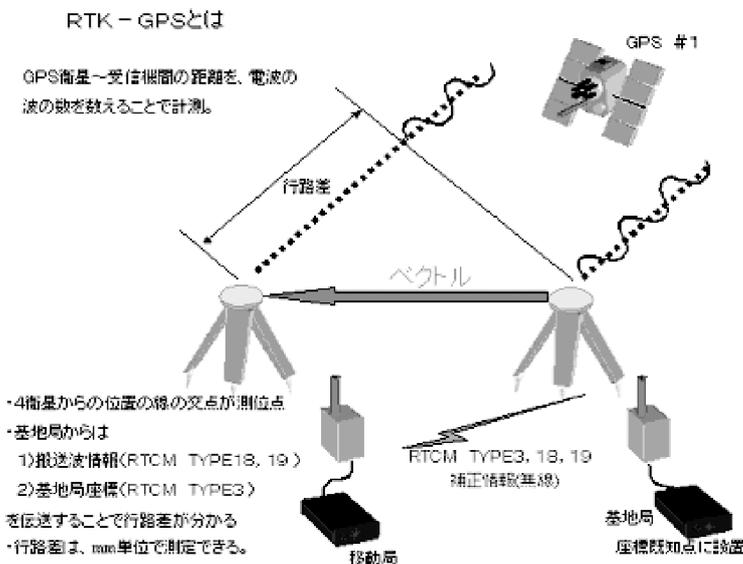


図 2.7. RTK 概念図

W I D E P R O J E C T 2 0 0 3 a a n n u a l r e p o r t

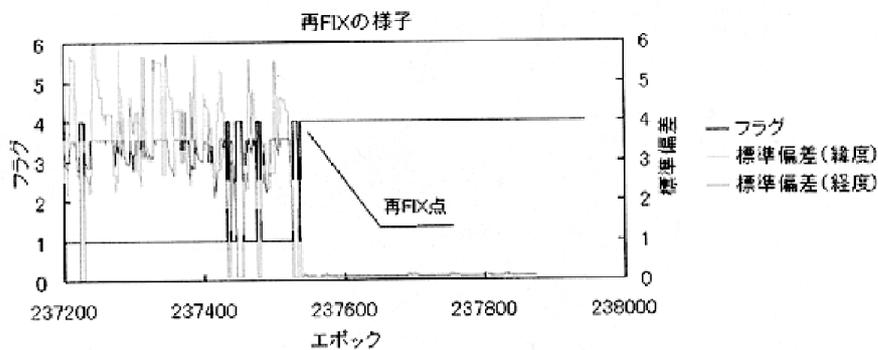


図 2.8. マルチパス環境下における再 FIX の様子  
フラグ 1 はフロート解、4 は FIX 解を示す。1 エポックは 1 秒。

局・移動局の C/A コード及び搬送波データを使用し、測位解の決定を行う。測位解の決定のプロセスにおけるアンビギュイティの収束計算中での測位解をフロート解と呼び、さらに、アンビギュイティ決定後の測位解を FIX 解と呼ぶ。図 2.6 中の多数ある基線解のうち、真の解が FIX 解にあたる。

アンビギュイティの収束では OTF (On The Fly) 技術があり、移動中におけるサイクルスリップなどによる測位エラー時における再 FIX も可能となっている。RTK では衛星数が多いほど、アンビギュイティ収束時間が短い。今日では、GPS+GLONASS 受信機の登場により共通衛星数を多くすることが可能となっている。そのため、GPS+GLONASS 受信機により、アンビギュイティ決定の短時間化、およびダム湖、露天掘り、谷間などの上空視野が確保しにくい場所での RTK を可能としている。将来的には GPS+GLONASS+GALILEO による RTK 受信機の登場が期待される。

また、2 周波 RTK 受信機での OTF において、L1、L2 の搬送波合成されたワイドレーンを使用できるタイプでは、高速で安定したアンビギュイティ収束が可能である。

### 2.3.4 仮想基準局方式の原理

仮想基準局 (Virtual Reference Station: VRS) 方式は、RTK-GPS における距離的な限界を、その名の通り、移動局の近傍に“仮想的な”基準局を作成することにより解決する新しい手法である。仮想基準局を作成するにあたっては、複数の基準局における観測値をもとにエリア内における相対誤差を補正することから、ネットワーク RTK とも呼ばれている。以下にこの手法の概念を述べる。

#### (1) 相対誤差の補正

あるエリア内における大気の状態は空間的に不均質であるため、電離層・対流圏遅延誤差も電波を受信する場所に応じて相対的に変化する。この場合、遅延誤差の絶対量は問題ではなく、任意の 2 点間における誤差の差分 (相対誤差) が問題となってくる。これは軌道誤差についても同様であり、従来の RTK-GPS においては基準局が 1 局であったため、基準局から離れるとともに移動局における相対誤差が大きくなり、FIX 解を得ることが困難であった。

一方、複数の基準局において観測されたデータをリアルタイムで処理することにより、エリア内の相対誤差をモデル化し、補正することが可能である。まず各基準局間の二重位相のアンビギュイティを決定する。次に実際の搬送波位相観測値と、衛星軌道および観測点座標から計算された各衛星までの距離との残差を求める。この残差をもとに最小二乗ロケーション法を用いて、エリア内における擬似距離および搬送波位相の相対誤差を推定する (Lachapelle et al., 2000)。

この手法を用いることにより約 30 ~ 100 km 程度の間隔で基準局を配置することが可能となるが、これは従来の RTK-GPS と比較しておよそ 1.5 ~ 3 倍程度のカバレッジを実現したことになる。図 2.9 にその概念図を示す。

#### (2) 仮想基準局の作成

一般的な RTK-GPS 受信機は、基準局からの距離に応じて測位計算アルゴリズムを変化させている。そのため、たとえ相対誤差を補正しその影響を取り除いたとしても、実際の測位計算に使用する基準局との距離が大きく離れていれば、受信機はその計算アルゴリズムに従い、FIX 解を求めない方向で計算

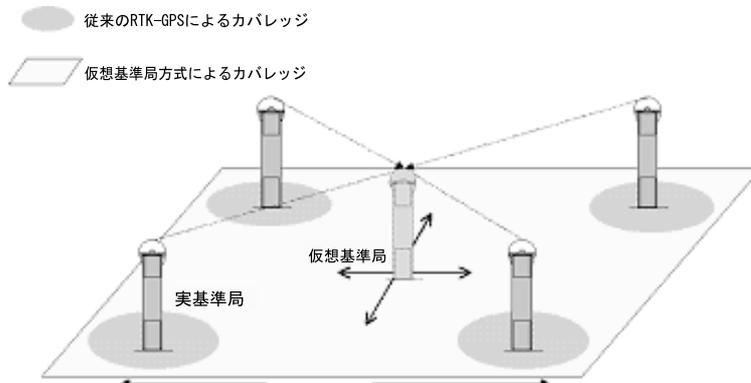


図 2.9. 仮想基準局方式によるカバレッジ

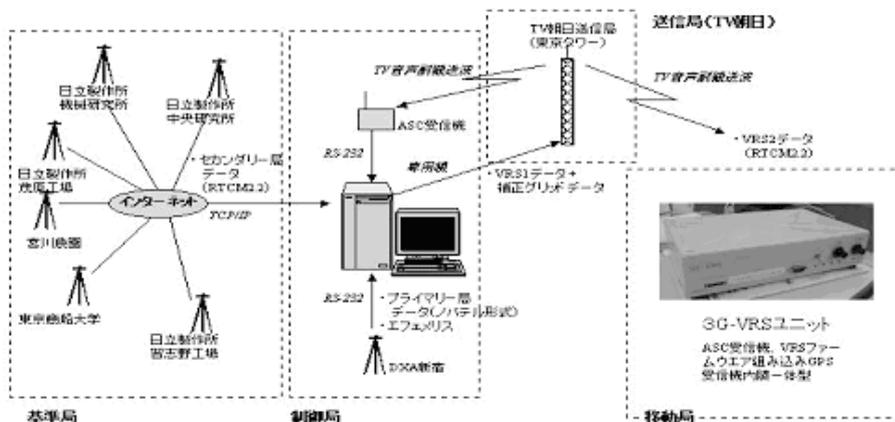


図 2.10. 実験システムの構成

を行う。つまり複数の基準局における観測値をもとに相対誤差を取り除いたにもかかわらず、受信機は相対誤差があるものとして計算を行おうとするため、最適な計算アルゴリズムが適用されないという結果となる。

これを回避するため、仮想基準局という概念を利用する。移動局の近傍に仮想的な基準局を作成し、実際の測位計算は、“短距離の RTK-GPS” としてあくまで仮想基準局と移動局間で行う。

以上で述べたように、従来の基地局 1 局を利用する RTK-GPS に対して、複数の基準局をネットワーク化して利用することにより、少ない基準局数でより広いサービスエリアを実現するとともに、システムとしての信頼性の向上、そしてより高精度な測位が可能となる。

#### 2.4 仮想 RTK 基準局方式を用いた東京湾ネットワーク実験

本節では、第 4 章で提案する新たな基準局ネット

ワークの前身として、2000 年に構築したテストサイトにおける実験について述べる。

##### 2.4.1 実験概要

2000 年 5 月より、WIDE プロジェクト、GNSS (DX アンテナ) テレビ朝日、日立製作所、及びカルガリー大学共同で、仮想 RTK 基準局方式の検証を目的とした実験システムを構築し、システム検証を行った。この実験システムは基準局、制御局、送信局、そして移動局の 4 つのシステムから構成されている。実験システムの構成を図 2.10 に示す。またシステム全体のデータの流れを図 2.11 に示す。

##### 基準局

本実験では、基準局間距離が最大で 100 km 程度に達する合計 6 局 (図 2.12) の基準局を利用した。各基準局には、2 周波 GPS 受信機である Novatel 社 RT2 受信機およびマルチパス除去機能を強化した GPS600 アンテナが設置され、1 秒間隔で RTCM

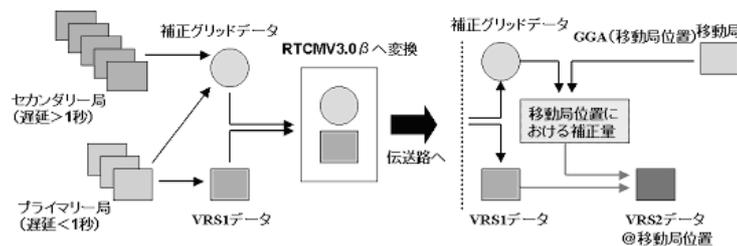


図 2.11. 実験システムにおけるデータの流れ



図 2.12. 基準局の配置

V2.2フォーマットにおけるタイプ3(基準局座標値)、タイプ18(搬送波位相測定値)およびタイプ19(擬似距離測定値)の3種類のメッセージを出力した。これらのメッセージは通常のRTK-GPSにおいて基準局から送信するいわゆる“補正情報”と全く同じデータである。出力されたデータはRS-232C経由で基準局サーバ(グローバルIPアドレスを割り当てられたFreeBSDマシン)に入力され、実験にあたって開発されたプロトコルに基づきインターネット用のデータ形式に変換された上で、次に述べる制御局サーバに対して送信された。なお、制御局サーバや通信回線にアクシデント等があり通信が一旦切断さ

れた場合、基準局サーバは5分間ごとに制御局サーバへの接続をリトライするように設定された。

特にコスト面と拡張性(汎用性)という観点から考えた場合、インターネットは基準局-制御局間の通信手段として非常に有効である。仮想RTK基準局方式においては、基準局と制御局間が常時接続されている必要があるが、通常の公衆回線を利用した場合、そのコストは非常に大きなものになる。また、専用線を利用する場合はその通信距離に応じてコストが左右されるため、より広域を対象としたシステムを実現しようとするればそれだけコストがかさむ結果となる。この実験システムにおいてはフレッツISDN

を經由しインターネットに常時接続した。

また、拡張性という観点から言えば、インターネットを利用することで、例えば複数の基準局サーバに対して同時に基準局データを送信することも可能になる。これは将来的に制御局を追加した場合に、基準局データの送信先を複数指定することで容易に実現が可能である。一方で、将来的に基準局を追加した場合、データの受け側である制御局においては、インターネットへの接続さえ確立していれば特に物理的に機器を追加する必要がないことを意味する。

さらに基準局サーバが IP アドレスを持っていることで、基準局の制御を世界中どこからでも容易に行うことが可能になる。実際に今回のシステムにおいては基準局の設定変更を複数の異なる場所から行った。

#### 制御局

制御局には、基準局と同様にグローバル IP アドレスを割り当てられたサーバが設置されており、ソケットインターフェイスにより各基準局データをインターネット経由でリアルタイムに受信した。受信した各基準局のデータは、本システムの中核をなす MultiRef ソフトウェアに受け渡され、エリア内の相対的な電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差がモデル化された。

基準局はその役割から 2 種類に分類される。ひとつはプライマリー局と呼ばれる基準局で、データの伝送遅延が確実に 1 秒以下であることを前提とした。この実験では、制御局にも基準局受信機を設置しており、このデータに関しては RS-232C 経由で直接制御局サーバに取り込むことで伝送遅延を最小限に抑えた。このプライマリー局データは最終的に移動局側において作成される仮想基準局データ “VRS2” の原型となるデータであり、“VRS1” と呼ばれている。一方で、残りの基準局はセカンダリー局と呼ばれ、電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差モデル（補正グリッドデータ）を作成するために利用した。これらの誤差要因は、時間的変動がそれほど急激ではないため、現実的には伝送遅延が 30 秒程度あったとしても最終的な測位精度にはほとんど影響を及ぼさないことが確認されている (Townsend et al., 1999)。この実験でセカンダリー局との通信にインターネットを利用することで、時間帯等により多少伝送時間を要する場合でも、結果的には何ら問題は生じておらず、インターネットの有効性が証

明された。なお、制御局において作成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは、専用線により次に述べる送信局部に伝送された。

#### 送信局

この実験においては、移動局への補正情報伝送手段として、前述のテレビ朝日により開発された特許技術である ASC を利用した。制御局において生成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは、専用線によりテレビ朝日の放送施設に伝送され、東京タワーから音声信号の副搬送波に乗せて放送されることとなり、本実験が対象とするエリア全体をカバーした。この実験において、グリッドデータを含む合計のデータ量は、毎秒 3000 ~ 4000 ビット程度であった。

#### 移動局

移動局には、上記 ASC に対応した受信機と、最終的な仮想基準局作成計算のためのソフトウェアをインストールし、RTK-GPS (RT-2) 受信機をひとつのユニットに内蔵した。GPS 受信機は、まず受信地点における単独測位位置をソフトウェアに対して出力し、ソフトウェア側では受信した補正グリッドデータから、この座標値における補正量を改めて補間計算した。

一方、VRS1 データをもとにこの座標値における仮想的な基準局データが計算され、求められた補正量を加味することにより、最終的な仮想基準局データである VRS2 データが作成された。このデータは通常の RTK-GPS において利用されている RTCM V2.2 フォーマットのタイプ 3、18、および 19 メッセージとして移動局受信機に入力され、受信機内において通常の RTK-GPS 計算が行われた。なお、最終的に RTCM V2.2 フォーマットを用いたため、市販されているほとんどの受信機はそのまま利用可能であった。

この実験において(株)日立製作所で試作した



図 2.13. VRS 対応 GPS 受信機ユニット 3G-VRS

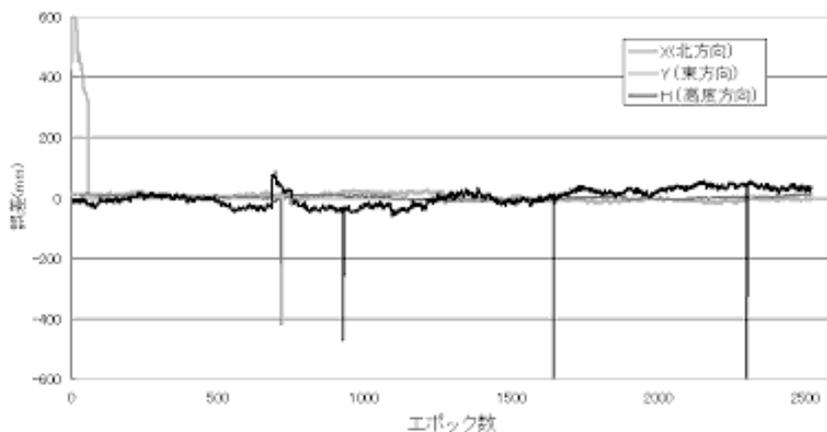


図 2.14. 各座標成分の時系列変化

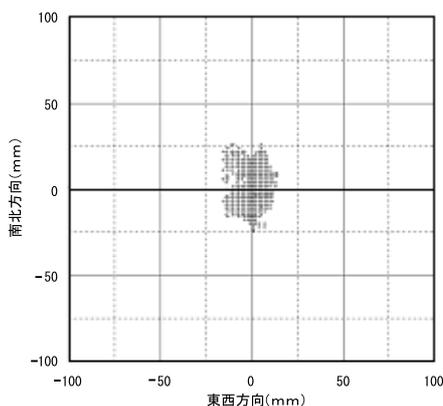


図 2.15. 水平成分のばらつき

3G-VRS ユニットは、移動側の VRS 計算ソフトを GPS 受信機のファームウェアとして搭載した。そのため現在、RTCM 委員会に対して、次の V3.0 フォーマットで正式にネットワーク RTK メッセージをサポートするよう標準化の提案を行っている (Townsend et al., 2000)。このような日本からの標準化の働きかけは、世界の GPS ユーザ大国としても重要と考える。

#### 2.4.2 実験結果

この実験によって得られた結果の一例を図 2.14 および図 2.15 に示す。千葉県習志野市内に移動局を設置し、静止状態で約 40 分間のデータを取得したものである。最も近い基準局までの距離は約 30 km である。図 2.14 は水平成分および高さ成分の時系列を示している。ほぼ安定して  $\pm 2$  cm 以内の精度におさまっていることがわかる。

また図 2.15 は水平成分をプロットしたものであるが、2.4 cm (2 drms) という結果を示している。従来の RTK-GPS においては FIX 解を得ることが不可能な距離において、RTK-GPS と同等の精度を実現している。しかし、昼間と夜間では、電離層の状態が異なり、日、季節によっても異なってくる。さらに、この実験においては、基準局固有のマルチパス誤差などは分離されておらず、観測量に含まれたままである。良好な結果が得られる割合は、この時点で 80% 以下であり、安心して利用できる基準局ネットワークとは、言い難い。

#### 2.5 GNSS 基準局の問題点

コード測位においても搬送波測位においても、高精度測位のキーポイントは、基準局との干渉測位と言える。ここでもう一度誤差要因について考えてみる。

衛星の軌道誤差および時計誤差については、同時刻に受信している基準局と移動局の観測値内に同じ誤差が入っているので相殺することができる。電離層遅延補正誤差、対流圏遅延補正誤差といった、伝播経路上での遅延誤差は、先述した通り、基準局と移動局が近傍の場合は、同じ影響を受けていると近似的に言えるが、距離が離れた場合には、電離圏や対流圏の影響量は、場所によって違う為、遅延量は異なってくる。しかし、このことに関しては、2.3.4 項で説明した、ネットワーク型基準局でエリア内の電離層遅延量をグリッド化してその分布を推測する手法の出現によって、基地局からの距離とは関係なく移動局上空の遅延量を推定できるようになった。

しかし問題は、ディファレンシャル補正やネット

ワーク型基準局方式による電離層遅延量の推定ともに、基準局自身のもつ、マルチパス・受信機ノイズといった誤差が補正量に含まれていることである。特にマルチパスの影響は、基準局の設置環境によってまちまちであり、その影響量は、衛星位置と反射面との相対関係で刻々と変化する。

そこで第 4 章では、この基準局毎のマルチパス、受信機ノイズによる影響量を推定する手法を確立し、基準局の観測値（衛星-受信アンテナ間の距離）に含まれるそれぞれの誤差量を要因毎に分離させ、余分な誤差を含まない観測量を配信することによって、今後の高精度測位を担う新たな基準局ネットワークのあり方を提案する。

### 第 3 章 インターネットを利用した高精度 GNSS 測位

#### 3.1 インターネットを利用することの利点

インターネットの普及に伴い、その社会基盤としての地位も急速に認められつつある。このインターネットを補正情報の配信に利用することには、以下のような利点がある。

- 広域性  
インターネットには世界中のネットワークが接続されており、その利用は国境、電波到達範囲などにとらわれない。したがって、インターネットを利用してサービスを提供すれば、世界中どこからでも利用することができる。
- 双方向性  
インターネットは双方向の通信が可能であり、放送などと違い 1 対 1 でのデータの送受信ができる。したがって、利用者と配信サーバとの間でメッセージを交換できるシステムを構築すれば、利用者ごとの位置や要求に応じた補正情報を提供することができる。
- 利用手段の多様性  
インターネットを利用する際に、その接続手段は利用者が選択できる。現在モバイル・コンピューティングにおいて最も広く利用されているのは携帯電話や PHS、無線 LAN などであるが、今後専用狭域通信 (DSRC) や赤外線など新たな接続手段が広く利用されることも予想される。

インターネットを利用してサービスを提供すれば、これら複数の接続手段を同時にサポートでき、利用者はそれぞれの環境に応じた接続手段でサービスを利用することができる。

#### 3.2 既存のインターネットを利用した技術

すでに、インターネットを利用して補正情報を配信するシステムはいくつか存在している。しかし、これまでのところインターネットを利用したシステムは広域的かつ安定したサービスとしては提供されていない。

- アルプス社による補正情報の配信実験

アルプス社により、1999 年 3 月から 2000 年 4 月までの間インターネットを利用してディファレンシャル補正情報の提供実験が行われた [332]。この実験では、利用者は Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) の GET メソッドを利用し、Common Gateway Interface (CGI) プログラムにより補正情報を入手することができた。

- DGPS-IP

DGPS-IP[56] は、基準局に生成された補正情報を Transmission Control Protocol (TCP) あるいは User Datagram Protocol (UDP) で利用者に配信するシステムである。現在利用できる基準局はアメリカ国内に 3 ヶ所あり、それぞれの基準局で生成されたディファレンシャル補正情報が 1 つの配信サーバの異なるポートを利用して提供されている。利用者と配信サーバとの間で送受信されるプロトコルは特に定義されておらず、利用者から配信サーバの特定ポートへのコネクションが確立すると、自動的に補正情報が配信される。

#### 3.3 これまでの WIDE プロジェクトによる研究

WIDE プロジェクトの ICAR WG においても、補正情報をインターネットを利用して配信する技術が研究されてきた。まず、クライアントと配信サーバとの間で双方向通信を可能にする、GNSS 補正情報配信プロトコルが提案されている [95, 345]。さらに、複数の基準局をネットワークに接続し、基準局での観測データをインターネットを利用して収集することにより、複数の基準局を統括的に利用するモデルも提案されている [151]。また、このモデルでの、複数の補正情報と配信サーバが利用可能な状況下で、クライアント

がそれぞれにとって最適の補正結果が得られるものを選択する方法に関する研究も行われている [297]。

前節で説明したアルプス社による実験、および DGPS-IP は一般利用者に対して実際に提供されたという点で非常に重要なものである。しかしどちらも、インターネットを単純に通信路として利用したに過ぎず、インターネットが持つ双方向性という特徴を生かしているとは言えない。

アルプス社の実験や DGPS-IP に対し、WIDE プロジェクトにおける研究では、クライアントと配信サーバとの間で送受信されるプロトコルを提案することにより、利用者の位置と要求に応じた補正情報の提供を可能にするとともに、システム全体のモデルを示し、複数の基準局と多数の利用者に対応する方法を提案している。

#### 第 4 章 新たな基準局ネットワークの提案

現在、GNSS における測位環境において、さまざまな補正情報が有料、無料で配信されているが、補正システムが広域をカバーし、インテグリティを備えて安定した補正情報を配信するには至っていない。本実験では、東京湾を囲む形で基準局を設置し、GNSS 補正情報のクオリティの確保やネットワーク配信における問題を追究し、解決する。

##### 4.1 背景

カーナビゲーションの分野ではすでに一般化した GNSS 測位であるが、ヨーロッパのガリレオ計画や日本の準天頂衛星計画の背景にあるように、より高精度かつ、信頼性の向上がユーザーズとして鮮明になってきている。

衛星測位の精度を向上させる為の地上系補強システムにおいて、衛星信号を受信し測距するのは基準局であり、さらに衛星の軌道をトラッキングするのもモニター局といわれる基準局である。どちらの場合も、広域に点在する基準局はネットワークと繋がっており、各局で観測された観測データをセンター局に収集する。

時代のニーズは、リアルタイムでの高精度測位を求めているが、その際、重要となってくるのは、各局

からの衛星観測データが誤差要因(衛星クロック、対流圏遅延、電離層遅延、マルチパス、受信機エラー、その他)ごとに監視され、インテグリティが確保されていることである。また、各局からのデータ伝送経路においてもデータ遅延や不測のデータ混入、欠落などネットワークの中にもインテグリティ機能を有していなければならない。しかし、わが国で既にスタートしている国土地理院電子基準点を利用した VRS(仮想基準点方式)などのサービスでは、それらのインテグリティ確保はなされておらず、特に近年は、ディファレンシャルや RTK の補正データは、広域の基準点観測網で観測されたデータを元に電離層遅延量をグリッド化するネットワーク型の補正データ生成方式が主流になりつつある。

この場合、ユーザ側において精度が不安定に陥った場合の大きな問題として、補正情報の生成元である基準局データが、はたして正確であったのかを判定する術を持っていないことがある。リアルタイムに高精度な補正データを必要とする ITS などでは、この問題は深刻であり、もし、ある基準局からのデータに不測の誤差が混入したような場合には、即座にそのデータ利用を止め、予備機もしくは、近隣の基準局への切り替えなどを行えるよう誤差要因毎の監視システムと冗長性を持たせたシステム設計が必要である。日本も準天頂衛星計画がスタートしているが、本インテグリティ手法の確立は、非常に重要であり、緊急を要する。また、同じようにデータ伝送経路でのインテグリティの確保も重要なものはいうまでもない。

そこで GNSS WG では、インターネットを利用して独自の基準局網を構築し、利用者における高精度・高信頼性に直接関与する基準局データについて、

1. 誤差の分離、および各成分量を把握するアルゴリズム
2. インテグリティを確保するメカニズム
3. 伝送遅延への対策手法

などといった課題について検討する。さらに、この基準局データから生成された補正情報を、インターネットを利用して配信することにより、端末が安定して高精度な位置情報を取得可能とすることを目的とする。

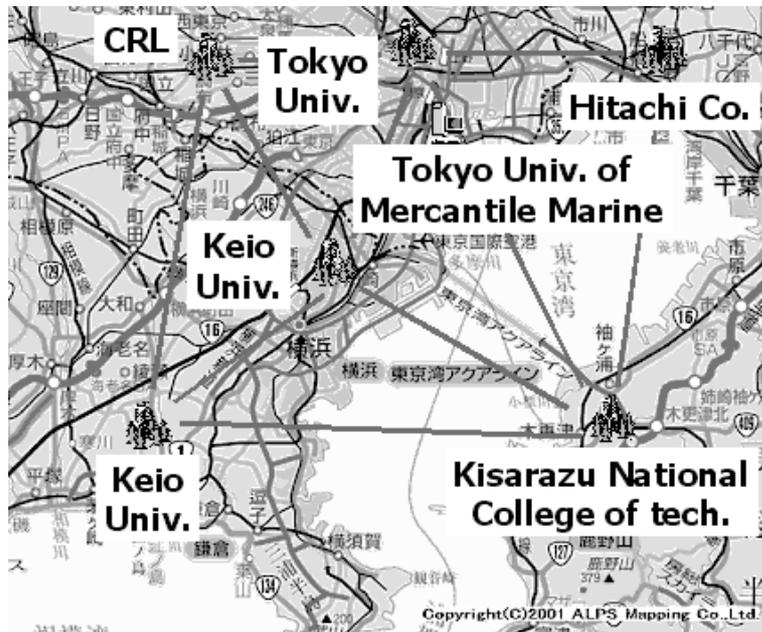


図 4.1. 各基準局およびデータセンターの設置点



図 4.2. 基準局の機器構成

#### 4.2 実験計画

##### 4.2.1 実験サイトの構築

各関係機関の協力により、基準局間の基線長が最大 40 km 以上の基準局ネットワークを構築する(図 4.1)。木更津工業高等専門学校、日立製作所、東京大学本郷キャンパス、CRL、慶応大学湘南藤沢キャンパス、同矢上キャンパスの計 6 ヶ所(設置交渉中のものも含む)に設置された基準局で観測されたデータは、インターネットを通じて、データセンターが設置される東京海洋大学に集約される。

● 基準局の機器構成

基準局の機器構成を図 4.2、図 4.3、図 4.4 に示す。基準局の受信機は、2 周波の GPS/GLONASS 受信機を主体として配置する。その理由としては、今後想定される GNSS による測位環境は、GPS・GLONASS・GALILEO、そして日本の準天頂衛星など、複数の衛星システムが同時運用され、当然高精度、高信頼性を高める上では、ハイブリッド受信機による基準局が主流になるものと思われるためである。



図 4.3. 受信機：ASHTECH Z-18  
(GPS/GLONASS 2 周波受信機)



図 4.4. アンテナ：クロスダイポールエレメント  
チョークリングアンテナ

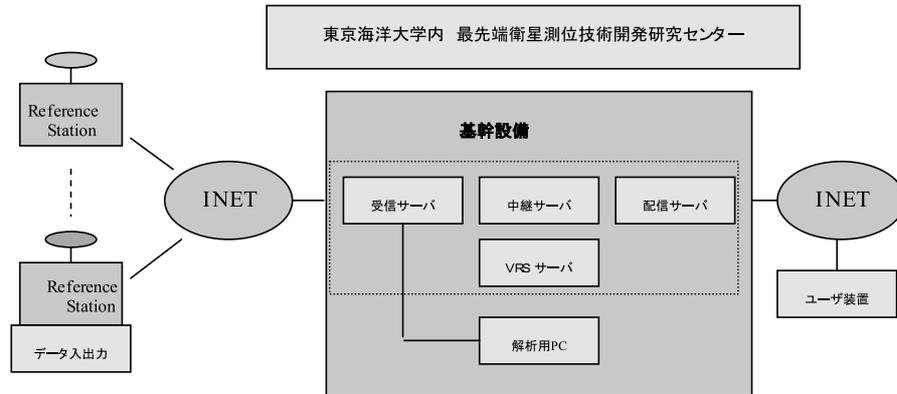


図 4.5. データセンターの機器構成

表 4.1. 基準局ネットワーク構築実験のスケジュール

実施スケジュール	2003年	2004年								
	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
(サイト構築)										
事前調査	完了									
測量	完了									
治具製作と設計										
設置調整										
回線開通 (木更津高専-R&D 間に該当)										
(実験)										
基礎データ収集										
基準局所アルゴリズムソフトウェア搭載										
改修										
インターネットインテグリティ機能搭載										
第1次総合テスト										
第2次総合テスト										
報告書まとめ										

受信機と logging 用 PC は RS-232C で直結され、logging 用 PC は、学内 / 社内 LAN からルータを通じ、東京海洋大学に設置されている受信サーバに対して定常的に観測データを送信する。

● データセンターの機器構成

東京海洋大学に設置されるデータセンターの機器構成を図 4.5 に示す。

各基準局において観測されたデータは、インターネットを通じて受信サーバに集約され、解析用 PC にて各誤差要因が解析・除去される。そして、誤差要因が除去されたデータから、VRS サーバで移動局向けの補正情報が生成され、補正情報が配信サーバから移動局にインターネットを通じて提供される。

4.3 研究開発項目

本実験で開発しなければならない項目は、衛星測位技術分野、インターネット分野の大きく 2 つに分けられる。

4.3.1 衛星測位技術分野

1. 基準局データ各誤差成分の切り分けアルゴリズムの開発
  - 統計的観測手法
  - 誤差モデルの構築
2. 各サイト別のマルチパス量の把握手法の確立
  - 生成データ RTCM type 1、3、9、31
3. 誤差を含まないディファレンシャル補正情報の生成
  - 生成データ RTCM type 18、19
5. センター (東京海洋大学) における VRS データの生成

4.3.2 インターネット分野

1. データの遅延やジッタ、欠落への対策
 

インターネットを利用した通信では、データの遅延およびジッタの発生は避けられない。また、移動局のインターネットへの接続形態は多岐にわたると考えられ、接続も不安定になりかねない。したがって、データの遅延やジッタ、欠落が測位精度に与える影響について詳しい評価を

行い、常に安定した測位を可能にするデータ伝送技術について検討しなければならない。

2. セキュリティの考慮

データの通信路としてのインターネットは、常にデータの盗聴・改竄といった脅威にさらされている。これらの脅威は、基準局における観測データや生成された補正情報に対する信頼性の低下をもたらす。したがって、インターネット上に設置するサーバのなりすましや、送受信されるデータの改ざんを防ぐ必要がある。

3. 基準局の監視体制の確立

4.2.1 項で述べた、各基準局データの誤差成分の分析の結果、許容範囲を超える誤差が観測された場合、あるいは、基準局もしくはデータ伝送経路のトラブルにより、観測データが取得できなくなったなどの場合、即座にその基準局の利用を止め、使用する受信機もしくは基準局を代替のものに切り替え、移動局が継続して高精度な測位を行えるような機構を開発する必要がある。

4.4 スケジュール

表 4.1 に、本実験のスケジュールを示す。

第 5 章 実験の途中経過

本章では、前章で述べた実験の途中経過について

述べる。現在、図 4.1 で示した各地に基準局を設置する準備を進めている段階である。2004 年 1 月 28 日現在の、各地の準備進捗状況を表 5.1 に示す。

今後、機器の設置が終わった地点より順次観測データの収集を開始し、まずはさまざまな誤差要因が分離されていないままの観測データから生成された補正情報を、配信サーバから提供するところから実験を開始したいと考えている。

第 6 章 今後の活動予定

GNSS WG を立ち上げた 2003 年は、衛星測位技術に関する情報共有と、新たな基準局ネットワークに関するディスカッション、そして基準局設置の準備に終始した年であった。

2004 年は、第 4 章で述べた実験について以下のような具体的目標を設定している。

- 2004 年春合宿までに、各基準局における補正情報のインターネットからの配信を順次開始する。
- 2004 年 5 月までに、誤差要因を切り分ける新アルゴリズムを実装し、測位のさらなる高精度化を目指す。

当面は、実験に全力を傾ける予定であるが、中長期的計画としては、

- 2004 年度中にインフラとしてのシステムを確立させ、各種サンプルアプリを製作・配布するこ

表 5.1. 各地の準備進捗状況

	PC 設置	ネットワーク周辺	アンテナ架台設置工事	受信機設置	アンテナ設置
東京海洋大	設置完了	既にある環境によりインターネットへ接続可能	不要	不要	不要
木更津高専	未設置	・ネットワーク管理者と交渉中 ・NG の場合、INS64 の準備が別途必要	完了	未設置	未設置
慶応矢上	未設置	既にある環境によりインターネットへ接続可能	完了	未設置	未設置
東大	未設置	既にある環境によりインターネットへ接続可能	・工事許可申請の受理待ち ・ポールは既に現地にある。アンカー取り付けおよびケーブル引回し工事が必要	未設置	未設置
慶応 SFC	設置完了 (既設)	既にある環境によりインターネットへ接続可能	既設	設置完了 (既設)	設置完了 (既設)
日立	未設置	INS64 が 2 月 10 日より使用可能	完了 (既設)	未設置	未設置
CRL	未設置	交渉中	既設	設置完了 (既設)	設置完了 (既設)

 ... 完了

とにより、あらゆるユーザに高精度測位環境を提供する。

- 補正情報をインターネットを利用して配信する際のプロトコルの標準化作業を進める。

といったことを目標に活動していきたい。