

仮想基準点方式によるリアルタイム測位 Real Time Positioning by Virtual Reference Station

測地観測センター 都筑三千夫・西 修二郎・松村正一

Geodetic Observation Center

Michio TSUZUKU, Shujiro NISHI, Shouichi MATSUMURA

要 旨

GPSは、1993年に米国により正式運用が開始され以来、航法や測量に急速に浸透し、現在では受信機の小型軽量化、低価格化も急速に進み幅広い分野で利用されている。また、2000年5月にはSA (Selective Availability) の解除により単独測位の精度向上がなされた。測量分野においては、スタティック測位から簡便かつ即時に数cmの精度で位置が得られるRTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) 測位が利用できるようになり、21世紀の位置情報として測量、GIS (Geographic Information System)、建設・土木工事、防災、レジャー等多種多様な分野において利活用が期待される。しかし、測量分野において数cmの精度を得られるのは、さまざまな誤差要因により基準点からの距離が10km位までの測位に限られる。最近、この距離に依存しない手法として、複数の基準点からのデータを統合処理し、誤差要因となる電離層遅延等の補正を行ったデータを提供する手法がドイツなどで開発され試験的に運用されている。測地観測センターでは、このような手法の可能性について平成12年度に、電子基準点を利用した「仮想基準点方式によるリアルタイム測位の実験」を行ったのでここに報告する。

1. はじめに

測地観測センターではGEONET (GPS Earth Observation NETwork) と名付けられたGPS観測システムを構築し、全国974点の電子基準点でGPS連続観測を行っている。電子基準点で取得したGPS観測データは、電話回線を通じて宇宙測地館の中央監視局に集められる。集められたGPS観測データは解析処理され日々の地殻変動監視に利用されている。この電子基準点のGPS観測データを、地殻変動監視のためだけでなく、一般の測量、測位のための基準点としても有効に活用できるよう改造等を行っている。電子基準点を利用したRTK-GPS測位サービスとして、既に全国4地域22点の電子基準点において1秒エポックの補正情報をDMCA (Digital Multi Channel Access) 無線を通じて提供するサービスを行っている。DMCA無線を利用した方式においても、基準となる電子基準点からの距離が10kmを越えるような長距離となると電離層遅延等が無視できなくなり、測位誤差の増大および長時間の初期化、さらには間違った値を推定

してしまう問題が生じてしまうことは、通常のRTK-GPSと同様である。

全国の電子基準点947点の配点間隔は約25kmで設置されているため、これらの電子基準点全点をRTK-GPSの基準点とした場合でも、観測点と基準点の距離が大きくなってしまいうことが避けられない。現在の電子基準点を利用してリアルタイム高精度測位を実現するためには、なんらかの補助的な手段が必要となる。

最近、長距離に設置されている複数の基準点からの観測データを統合処理することにより、誤差要因となる電離層遅延等の補正を行い、移動局の近傍に仮想の基準点を作成して補正データを配信する仮想基準点方式と呼ばれるリアルタイム測位手法がドイツなどで開発、試験運用がされている。測地観測センターでは、この手法に注目し平成12年度に、日本における電子基準点データ提供システムの構築を目的とした、電子基準点を利用した「仮想基準点方式によるリアルタイム測位の実験」を行ったので、仮想基準点方式の概略と実験の概要および結果について紹介する。

2. 仮想基準点

2. 1 RTK-GPS測位の原理

RTK-GPS測位は、基準点と移動局の間で相対測位を搬送波の位相を用いてリアルタイムに行う手法である。測位計算を行うために、基準点で受信したデータを無線等で移動局へ送信し、移動局側でリアルタイムに位置を計算する。搬送波の位相を位置決定の計算に用いるため、衛星と受信機との距離を推定する際に、電波の波長 (L_1 波で19cm) の整数倍分の「アンビグイティ (不確かさ)」が生じる。これを短時間のデータで推定するために、GPS衛星の送信している L_1 と L_2 の2波長の両方についての位相観測値と疑似距離を用いて計算する。このOTF (on the fly) と呼ばれる手法による初期化 (アンビグイティ推定まで) の時間は、基準点と移動局の間の距離が数kmならば、2分程度以内である。アンビグイティを整数値に決定できた測位解をFIX解と呼び、これを測位結果として採用する。初期化がおわれれば、障害物等で電波の遮断がない限りFIX解で2~3cmの位置精度の決定ができる。(図-1) 基線長が長いと誤差要因が大きくなり、整数値決定が困難となり初期化までの時間

がかかる。また、整数値に決定できなかったり、間違った整数値に初期化される結果ともなる。

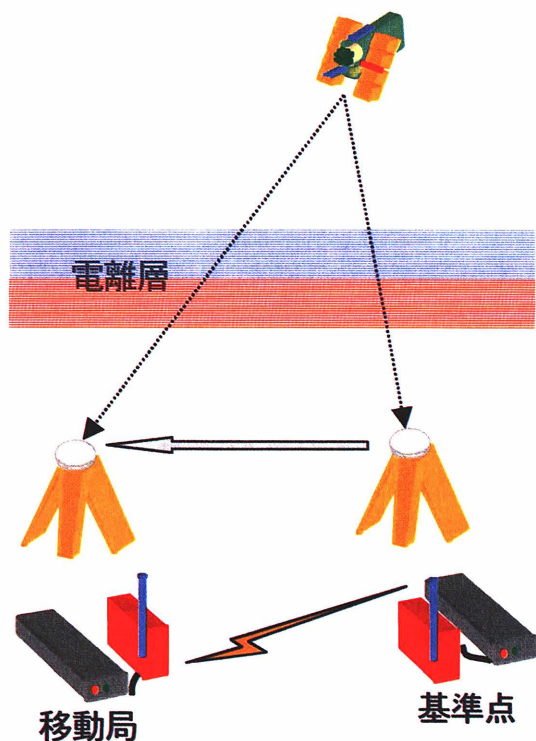


図-1 従来のRTK

2.2 仮想基準点の概念

仮想基準点方式のRTK-GPSは、一基準点からの距離に依存せず、従来のRTK-GPSでは不可能であった長距離RTKが行えるうえ、少数の基準点で広域をカバーすることができる。(図-2)

2.3 仮想基準点方式RTK-GPSの原理

仮想基準点方式のRTK-GPSは、数10km間隔の複数基準点のGPSリアルタイムデータを連続的に取得して、それらの基準点で得られたデータを統合処理(中央局)して、移動局でRTK観測をしているユーザーに、あたかも

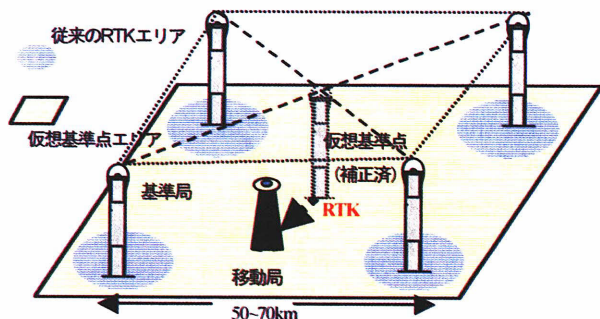


図-2 仮想基準点の概念

移動局観測点の近くに基準点があるかのようなデータを作成し送信する方法である。ドイツ等では50km～70kmの基準点間隔で良好な結果が得られている。①から⑥でこの方法の手順を示す。(図-3)

- ①電子基準点からの連続観測データを中央局において、リアルタイムに収集する。
- ②移動局から携帯電話で、中央局にアクセスし、移動局の概略の位置情報を伝送する。
- ③中央局は、移動局の測位に利用可能な3点以上の電子基準点を決定する。
- ④中央局で決定した電子基準点の観測値や位置情報などから、移動局の近くに仮想の基準点を想定し、その位置情報とそこで得られるであろう観測データを生成する。
- ⑤移動局に仮想基準点の位置情報、生成した観測データを携帯電話を介して伝送する。
- ⑥移動局は、中央局から伝送された情報とGPS衛星から受信した情報で、自らの位置を決定する。

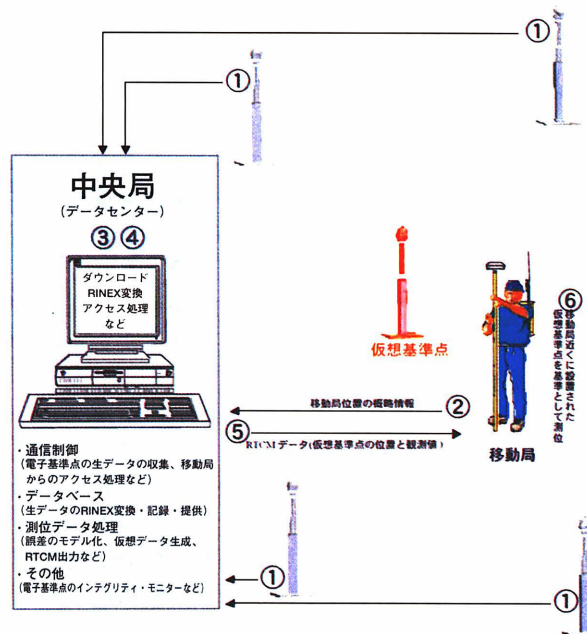


図-3 仮想基準点測位の原理

仮想基準点方式には2つの方式がある。一つは中央局から移動局側へ仮想搬送波位相と仮想疑似距離を計算して伝送し、移動局側では既存のRTK受信機だけで測位するものであり、この通信方法は双方向通信型と呼ばれている。(図-4)

また、もう一つの方式は、中央局で簡単な電離層、対流圏遅延パラメーター等を送信し、移動局側では仮想観測量作成(現在はパソコンを使用)する方式であり、この通信方法は片道通信型と呼ばれている。(図-5)

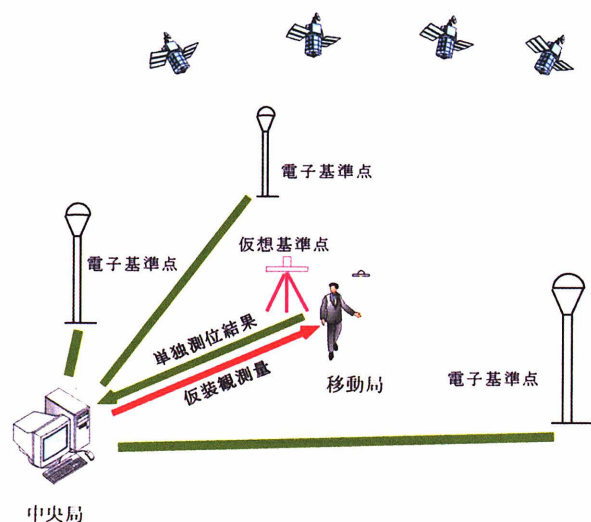


図-4 双方向通信による仮想基準点方式

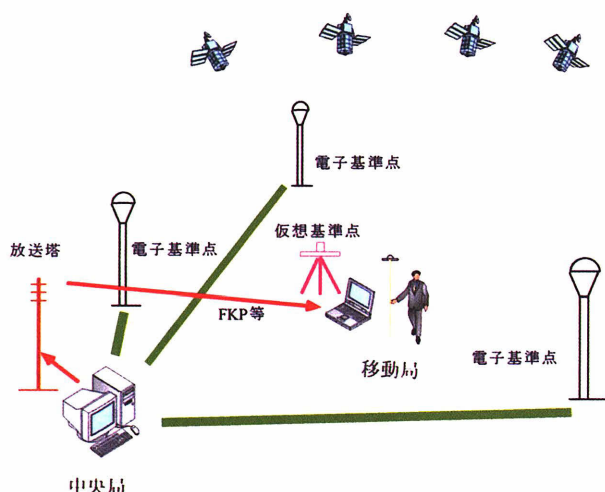


図-5 片側通信による仮想基準点方式

この2つの方式は、次のような特徴を持つ。双方向通信方式の場合、移動局では通常のRTKの設備で測位ができるが、移動局の数が多くなると中央局（計算機）の負荷が急増してしまう。片道通信方式の場合は、移動局数と中央局の負荷とは無関係なこととなるが、その代わり、移動局側で仮想搬送波位相、仮想疑似距離等を計算するための外付け計算機が必要となる。

これら2方式の仮想基準点方式は、世界的に3つの企業・大学（ドイツ2社、カナダ1大学）が独自のソフトウェアを開発し、実験的ではあるがデータサービスが行われている。各企業・大学方式はそれぞれ、Multi-Ref（多基準点）、Referenznetz（基準点網）、Virtual Reference Station（仮想基準点）方式と呼ばれている。厳密にはそれぞれの方式に対応した名称で呼ぶべきであるが、記述がきわめて複雑となるので、ここでは一括し

て仮想基準点方式と呼ぶこととした。

2. 4 電子基準点を利用した仮想基準点実験

測地観測センターでは、仮想基準点方式によるリアルタイム測位を行う上で、技術的課題及び対応方法等について調査・研究するとともに、精度評価を行い各種測量への応用について評価することを目的として、平成12年9月に仮想基準点ソフトウェアを購入し、同年11月から参加者を公募して、平成13年1月から公開実験を行った。実験に使用した電子基準点は、つくば周辺の5点と鹿野山周辺の5点、合計10点であった。（図-6）

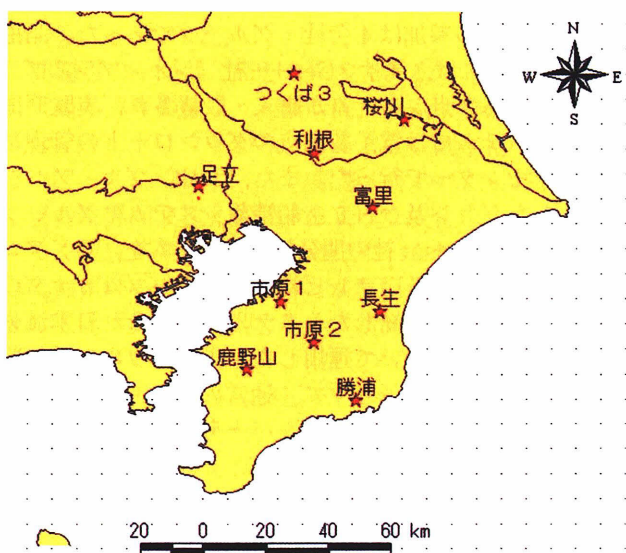


図-6 実験に利用した電子基準点の配置

それぞれの電子基準点から1秒エポックデータを連続的にダウンロード（測地観測センターへ収集）し双方向通信方式・片道通信方式データを作成するサーバーに伝送した。（写真-1）



写真-1 観測センターの仮想基準点システム

今回の実験では、測地観測センター内において制御サーバーで双方向通信方式・片道通信方式データを作成し配信する他に、(社)日本測量協会(情報提供窓口)には他社の仮想基準点システム方式を用意して、電子基準点の生データを転送し、複数の仮想基準点システム(世界的な3つの方式)による並行実験を行った。

この実験では、データ配信を行う参加者(仮想基準点システム所持会社)を「Aメンバー」、移動局でデータを受信するだけの参加者(Aメンバーからの補正情報を受け取るだけ)を「Bメンバー」と分類して実験の管理を行った。両メンバーの企業、大学等は23社・機関であった。

Aメンバーの参加は4会社・グループであった。測地観測センターには、ドイツGeo++社(ジオ、プラスプラス)の仮想基準点システムが購入・設置され、実験期間中このシステムでは電子基準点のダウンロードの管理を測地観測センターで行った。また、トリンプル・スペクトラプレジジョン及び日立造船情報システムのグループはドイツのTerrasat社の開発したシステムを、DXアンテナ・日立製作所及びテレビ朝日のグループはカナダのカルガリー大学が開発したシステムをそれぞれ日本測量協会にサーバーを置いて運用した。また、ソキアは仮想基準点のシステムを通さず、通常のRTK-GPSを行うためにデータ配信のためのサーバーを日本測量協会に置いて運用した。

実験は、平成13年1月中旬から開始し2月末まで実施した。また、2月末までの実験結果からAメンバーのソフトウェア修正等により追試実験の申し入れがあり、3月に追試実験を一部行うこととなった。実験のためのデータは、平日の午前10時から午後4時までの6時間ずつ、電子基準点5点ずつからダウンロードされた。ただし、電離層の影響が少ないと思われる時間帯との比較のために、夜間22時から早朝までのデータ取得と配信を1日だけ行った。

図-7に、実験のシステム構成を示す。各電子基準点は、GPS衛星からの信号を連続的に受信し、1秒毎に観測データを出力する。測地観測センター内に設置されたシステムは、通信・データ管理の機能と、補正データ計算の機能が備えられている。通信回線はISDNを用いたデータダウンロード用に5回線と、移動局からの携帯電話受信用にアナログ回線を5回線用意した。また、測地観測センターから日本測量協会へのデータ転送は、測地観測センターシステムに入力されるデータを測地観測センター内で分岐し、日本測量協会に置かれた各社システムはこのデータを受け取り、LANを通じて各社のサーバーに中継・転送する。各社では、受け取った5局分のリアルタイムデータをそれぞれのシステムで処理して移動局側で利用できるRTCMフォーマットなどの標準的形式の補正情報を作成した。今実験では、仮想基準点における補正信号を作成した方法、補正パラメータを送信した

方法、また、RTK用補正データのみを送信した方法と、それぞれの手法が使用された。また、電子基準点の他に独自の基準点を追加したところもあった。

移動局側(Bメンバー)の利用者は、モデムの接続された携帯電話でAグループのサーバーにアクセスし、補正データを受信した。移動局のGPS受信機はそれぞれがアクセスするAグループの配信する形式のデータを受信・利用できる必要があり、これについてはそれぞれのAグループからソフトウェア・ハードウェア等の提供を受けて、受信機及びノートパソコン等で使用した。

リアルタイム測位実験観測の構成

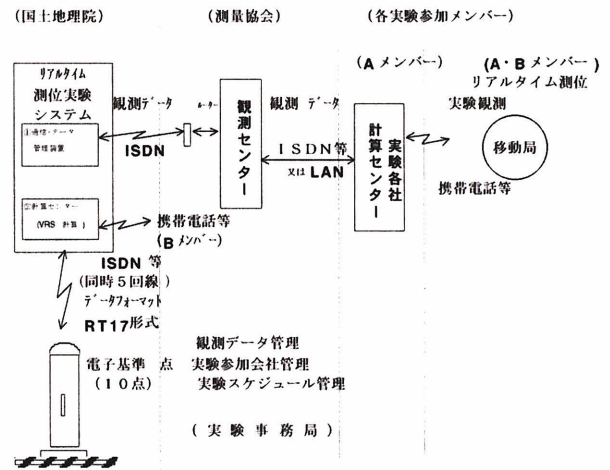


図-7 実験のシステム構成

実験においては、初期化時間、測位精度などの検証の他に、運用に当たっての問題点なども検討した。また、データの処理や転送による遅延が測位精度に影響するかについても検討した。

実験は1月15日から1月26日をつくば周辺の電子基準点5点(つくば3、桜川、富里、市原1、足立)からなる「つくば網」で行い、1月29日から2月9日は、鹿野山周辺の5点(富里、市原1、鹿野山、勝浦、長生)からなる「鹿野山網」で行った。また、2月13日から2月28日までは、広域で観測できるエリアとして(つくば3、富里、市原1、鹿野山、足立)の5点で構成される「広域網」を基準点として使用した。つくば網と鹿野山網では基準点間の距離が30km前後、広域網では基準点間の距離が50～60kmとなっている。また、つくば網では基準点が平坦な条件で行い、鹿野山網では標高差(200m程度)がある条件で観測が行われ、それぞれの条件での結果が評価された。

実験に先だって、つくば網、広域網の両方で利用できる千葉県佐倉市の印旛沼周辺(写真-2)と、鹿野山網で利用できる千葉県市原市南部に移動観測用のフィールドを設置した。これらのフィールドにおいては、実験用

の比較基準点を設置し、あらかじめGPSのスタティック測位によりそれぞれの観測点の座標を決定した。仮想基準点方式によるRTK-GPS測位の結果を評価する際は、これらの座標値を基準とすることで、それぞれの観測精度を評価することができる。

2. 5実験結果

Aメンバー個々のシステム評価については、観測日や観測地域等で必ずしも実験観測の条件が同じでなかったこともあり検討が必要などあるが、1つの仮想基準点システムは概ね確実な動作が可能であって、実用段階であることが確認された。

評価すべき第1のポイントは、スタティック測位の結果との差である。(表-1)は、スタティック測位と仮想基準点方式によるRTK-GPS測位の結果の差をまとめたものである。つくば網、鹿野山網及び広域網のそれぞれについて、各1日の観測データをそれぞれ用いて集計したものである。テストフィールドに1つの参照基準点を設置して移動せずに測定している。観測数とは、測定の際に一旦電波を遮断して再初期化を行っているが、その再初期化を行った回数である。

表-1 仮想基準点測位とスタティック測位の差

観測日時 基準点網 観測フィールド 観測数		VRS-RTK - スタティック (単位:m)		
		Δx (南北/北+)	Δy (東西/東+)	ΔH (標高/体高)
01/01/25 つくば網 印旛沼 9観測	平均値	0.0178 m	0.0120 m	-0.0537 m
	最大値	0.0237 m	0.0171 m	-0.0462 m
	最小値	0.0106 m	0.0080 m	-0.0653 m
	最大最小差	0.0131 m	0.0091 m	0.0191 m
01/01/31 鹿野山網 市原 4観測	平均値	0.0156 m	-0.0044 m	-0.0495 m
	最大値	0.0231 m	-0.0009 m	-0.0369 m
	最小値	0.0036 m	-0.0091 m	-0.0091 m
	最大最小差	0.0195 m	0.0082 m	0.0255 m
01/02/21 広域網 印旛沼 4観測	平均値	-0.0008 m	-0.0021 m	-0.0779 m
	最大値	0.0037 m	0.0038 m	-0.0704 m
	最小値	-0.0034 m	-0.0005 m	-0.0882 m
	最大最小差	0.0071 m	0.0043 m	0.0178 m

この結果からみると、水平成分については内部的精度の最大最小で2 cm以下、スタティック測位の結果との差でも1~2 cmで求められていることがわかる。ただし、高さのデータについては内部精度で3 cm以内であるが、スタティック測位結果との差は6 cm前後あった。これは基準局のアンテナ高の定義に誤り(電子基準点ピラー上面とアンテナ位相中心のアンテナ高)があった可能性が推測されるが、これについては原因を調査中である。

また、初期化時間については、アンテナの上部に障害物を置き、衛星からの電波を遮ることで、再初期化に必要な時間を繰り返し測定した。3つの基準点網での初期化時間の計測結果は(表-2)に示すとおりであった。

このように、実用には問題のない短時間で初期化ができていないことと、特に広域網において基準点から20km以上離れていても問題なく測位が可能であることが示された。

本実験では、仮想基準点方式を用いたRTK-GPS測位

表-2 初期化時間計測値

測定日時	01/01/25	01/01/31	01/02/21
観測フィールド	つくば網	鹿野山網	広域網
観測数	印旛沼	市原	印旛沼
測定数	13	11	12
平均(秒)	29.8	31.5	20.3
最大(秒)	79	63	32
最小(秒)	16	21	13

が実際に使用できるレベルにあることが確認できたが、今後解決しなければならない所もいくつかあることを確認することができた。

問題点の一つは、高さの精度である。先に述べたアンテナ高の誤りの他に、観測時間が経過するに従って高さ成分だけにドリフトがみられるような例が見つかった(図-8)。これは、その観測が行われた日における電離層の臨界周波数と相関するような変化をしていることから、仮想基準点方式のために用いられている電離層遅延の補正が不十分であることが原因かと思われる。2001年は太陽活動の極大期にあり、電離層の時間的・空間的擾乱が大きいことにより、現在の仮想基準点方式に用いられている電離層遅延補正モデルが追従できないケースが起きているとも思われる。この補正モデルは高さ方向の観測精度に直接影響するもので、今後のモデルの改良を期待したい。

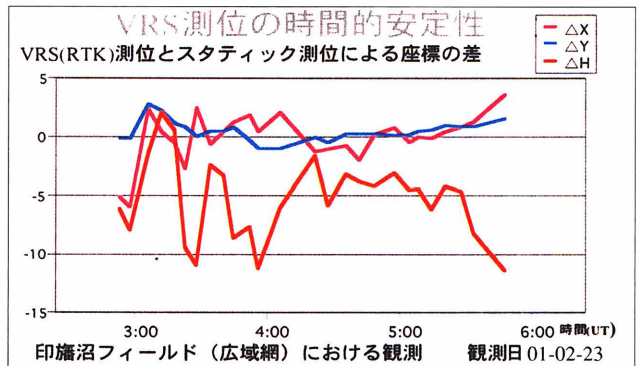


図-8 VRSの時間的安定性

電離層の影響とみられるその他の問題としては、時間帯により初期化時間が大きく異なることがみられた。今回の実験では、午前中は比較的順調に初期化が可能であったが、午後には初期化時間が長くなるといった例が(何回か)みられた。また、夜間観測では、初期化時間が非常に短いという結果も得られており、これは電離層の状態が初期化時間に大きく影響していることを思わせる。これも、電離層遅延推定のモデルの改善で対応する必要がある。

これらの課題が残されているものの、広域網での基準

点間隔が50～60kmにおいても仮想基準点方式によるRTK-GPSが実証されたことは重要で、従来のRTK-GPSでは、現在の電子基準点947点以上の基準局が必要であったものが、仮想基準点方式によるリアルタイム測位では数百点程度で全国をカバーできることとなり、従来のRTK-GPSに比べ基準点を大幅に節約できる。なお、基準点間隔を50～60kmにした場合、電子基準点の故障によりリアルタイムに補正情報を受信できない空白地域ができる場合を想定し、一基準点が故障した場合にも対応できる配点密度（基準点間隔）で基準点を選点すべきである。



写真－2 仮想基準点方式（双方向・片道通信）による観測風景

3. 電子基準点データサービスの将来

測地観測センターでは、これまでもインターネットを通じて電子基準点データ提供サービスや、DMCA無線方式によるリアルタイムデータ提供を行ってきた。これらのサービスを発展させて、将来には広い範囲でのデータ提供システムが必要であると考えている。インフラ整備を進めていくことはもちろん、リアルタイムデータ伝送に最適な通信方法（FR（フレームリレー）、VPN（Virtual Private Network）及びインターネット等）を確立することで、電子基準点補正情報を広く利用者に発信できるような環境の整備が進み、民間による多様な位置情報サービスが期待される。

電子基準点側の設備では、今回の実験に用いられた10点と同様に、リアルタイム測位用のデータを出力できる電子基準点の改造を、2000年度末までに100点完了している。更に2001年度中に400点の電子基準点を改造する予定である。測地観測センターでは、これらの改造・整備を進め、早い時期にリアルタイムデータを公開出来るようにして、電子基準点データを利用した位置情報サービスの基盤を整備していきたいと考えている。

電子基準点のリアルタイムデータを測地観測センター

まで伝送する方式については、ランニングコストやセキュリティの確保、通信遅延時間の保証等の観点から技術的な検討を進めている。最近では、高速で信頼性の高い通信サービスが安価で利用されるようになってきており、これらのサービスを利用したデータ伝送により、多数の基準点データをリアルタイムにダウンロードすることが容易になることが期待できる。

また、移動局ユーザーへのデータ伝送については、今回の実験で主に使用された携帯電話が活用されることになると考えられる。なお、配信方法としては、移動局から位置情報センターにリクエストし、それを受けて位置情報センターからデータを配信するオンデマンド方式の配信は、今回の実験でも主流を占めており、実用化に当たっても先行することが予想される。一方、この方式は移動局の数だけ位置情報センター側にデータ提供用回線を用意することが必要となるため、ユーザー数が極端に増えた場合の対応が難しい。この問題を避けることができる方式として、TV音声の副搬送波を用いたデータ放送方式などもある。この方式は、片方向のデータ伝送となるため、移動局の数が多数になった場合には有効な方式となる。今回の実験でもこの方式による試験観測が行われたが、システムが開発途上であったため、有効性が確認されるまでには至らなかった。しかし、アプリケーションやユーザーの動向次第では今後有効な方式となる可能性を持っている。

4. おわりに

全国947点の電子基準点を有効に活用したリアルタイムかつ高精度な位置情報サービスを実現するために、測地観測センターでは仮想基準点方式によるデータ提供システムの有効性を確認する実験を公開で行った。この実験の結果、現存する電子基準点の配点でも、十分に全国リアルタイム測位サービスを行うことが可能であることが確認できた。今回の実験参加企業などを中心に、電子基準点データを利用したリアルタイム測位を実用化しようという機運が高まっている。世界測地系の採用によりGPSデータはさらに利用しやすくなることが見込まれる。測地観測センターでは、リアルタイム位置情報サービスが実現できるよう、電子基準点リアルタイムデータの早期提供を進めていく予定である。また、平成13年度は、早期実用化を目指した新たな通信方法での実用実験を行う予定である。