

準天頂衛星を用いる高精度測位補正技術の開発

電子航法研究所 通信・航法・監視領域
 上席研究員
 伊藤 憲

1 はじめに

現在、我が国においては全地球的測位システム(GPS)による測位技術の利用が拡大しており、カーナビゲーションを始めとした交通分野や測量、防災、国土管理など幅広い分野で利用されているが、GPSには山岳や都市部のビル等により遮られ、十分な数の衛星からの信号を受信できない地域が存在するという問題がある。さらに、現在のGPSを単独で用いて得られる位置の精度は、列車などの高速移動体にとっては十分ではなく、さらに、位置精度の信頼性が保証されていないことから、安全性を重視する用途では何らかの手段を用いて、求められた位置の信頼性を確保する必要がある。そのため、国土交通省では、常に天頂付近に見える準天頂衛星(平成22年9月打上げ)を利用することにより、測位不可能な地域を縮小し、高速移動体にも適用できる高精度測位補正技術とともに移動体への利用技術を確認するための研究開発に取り組んでいる。

電子航法研究所は、国土交通省から委託を受け、平成15年度から、高速移動体に適用可能で、かつ、信頼性を確保できる高精度測位補正実験システムの開発を開始した。ここでは、電子航法研究所における研究開発の概要について紹介する。

2 準天頂衛星システム(QZSS:Quasi Zenith Satellite System) [1]

図1は準天頂衛星軌道の地上軌跡の例である。この図では、離心率が約0.1で、軌道傾斜角が45度である。このような軌道の衛星は、日本付近で、約8時間、仰角が70度から80度と高くなり、その間はだいたい天頂方向に見えることになる。そのため、この衛星は準天頂衛星(QZS)と呼ばれている。この準天頂衛星を3個組み合わせると、各準天頂衛星が8時間ずつ次々に日本上空に見えるようにすることができる。言い換えると、24時間のうち、いつでも、いずれかの準天頂衛星が天頂方向に見えることになる。

このような準天頂衛星は、常に、高い仰角で見えるので、都市部や山間部でも、準天頂衛星から送られてくる信号が建物や山岳により遮られることが少なくなる。これが、準天頂衛星の大きな特徴である。(図2参照)

準天頂衛星を用いたシステムについては、民間の通信放送事業(高仰角からの移動体通信・放送サービス提供)に国の衛

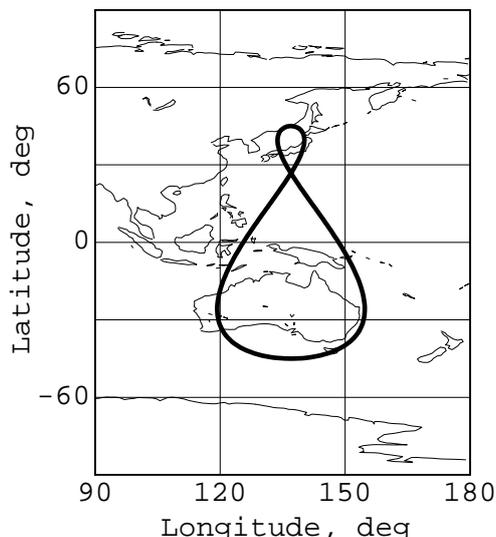


図1 準天頂衛星軌道の地上軌跡

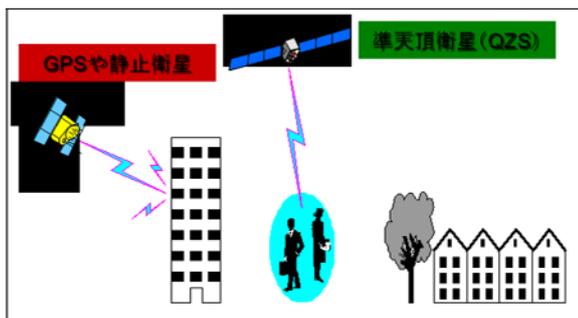


図2 準天頂衛星の特徴

星測位研究開発(GPS補完・補強)を組み合わせた形で、平成15年より研究が開始された。平成18年3月にこの方針が見直され、次のように、段階的にシステムを整備することになった。

- (1)第1段階: 初号機(測位単独衛星)による技術・利用実証(平成22年9月打上げ)
- (2)第2段階: 2号機、3号機を打上げ、システム実証(打上げ年度は未定)

民間は第2段階以降に事業化を行うかどうかを判断す

る予定である。初号機の開発・実証はJAXA(宇宙航空研究開発機構)が担当する。計画レベルでは文部科学省がとりまとめを行う。準天頂衛星を用いる測位関連技術開発は4省(文部科学省、総務省、経済産業省、国土交通省)関連の研究機関が中心になって実施しており、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、GPSと互換性を持った、L1C、L2、L5信号の開発を行う。電子航法研究所は、GPSより更に精度の高い測位精度を実現できる補正情報を送信する信号(L1-SAIF信号: Submeter-class Augmentation with Integrity Function)の技術開発を担当している。測位衛星に欠かせない原子時計は、日本の時刻標準を管理している情報通信研究機構、さらに産業技術総合研究所が担当している。

なお、準天頂衛星初号機は質量約4,100kg、設計寿命10年(目標12年)、軌道上での大きさは2.9m(奥行き)×25.3m(幅)×6.0m(高さ)である。

3 実験システム ([2]-[5])

電子航法研究所は国土交通省の委託を受けて、準天頂衛星を用いる高精度・高信頼性の測位補正技術を開発した。この開発の目的は、鉄道などの高速移動体の安全性向上に寄与する高精度測位補正システムの実現ということである。目標としている測位精度はサブメータ級(1m程度)、そして、信頼性の確保のために完全性監視機能を持つ方式を開発した。高精度・高信頼性の実現のために、国土地理院の電子基準点で得られる観測データを利用する。なお、この開発は、SBAS(静止衛星型衛星航法補強システム)で用いられている方式に基づいて行っている。

図3は、高精度かつ高信頼性を持つ高精度測位補正技術の実験システムである高精度測位補正実験システム概念図である。電子基準点で得られた観測データを電子航法研究所で収集し、その観測データを用いて、高精度かつ高信頼性の測位を可能にする補正情報を、電子航法研究所におけるテストシステムで生成する。ここで、テストシステムとは、高精度・高信頼性の測位補正技術を実現するために用いられるハードウェア・ソフトウェアのことであり、補正情報リアルタイム生成・配信システムと呼んでいる。

測位誤差要因には、衛星の軌道推定誤差・時計誤差、電離層や対流圏における伝搬遅延の推定誤差がある。補正情報リアルタイム生成・配信システムは、これらの誤差に対する補正情報を生成する。

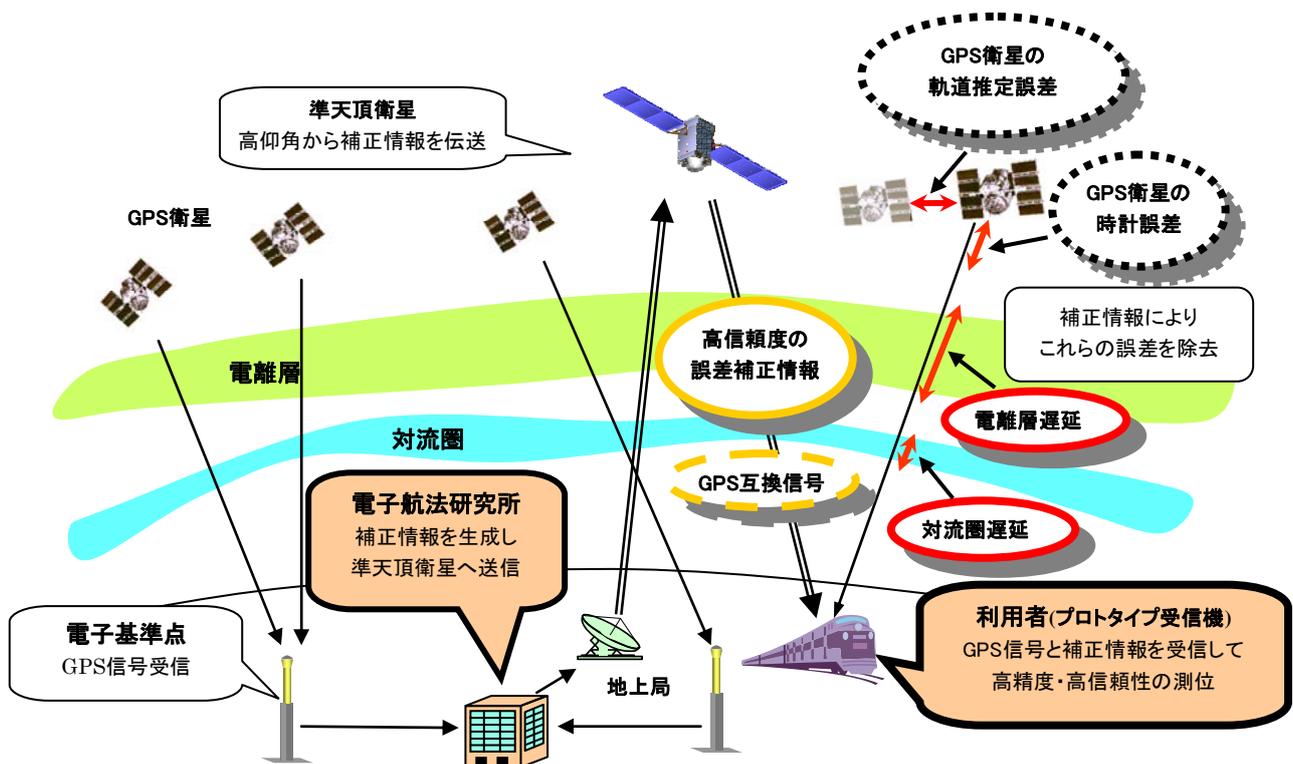


図3 高精度測位補正実験システム概念図

生成した補正情報は、地上局および準天頂衛星を経由して利用者へ送信される。送信周波数はGPS L1(1575.42MHz)であり、補正情報のデータ伝送速度は250bpsである。利用者はその補正情報を利用することにより、高精度・高信頼性の測位が可能になる。なお、補正情報を利用者に向けて送信するとき、GPS互換信号も送信する。

L1-SAIF信号はSBASと同様、測位誤差改善および信頼性確保のための情報を含み、かつ追加のレンジング信号(C/Aコード)として利用できる、という特徴を持っており、信号とメッセージ構造はSBASと同じとなっている。L1-SAIF補正情報データ構造を図4に示す。この図のとおり、L1-SAIF信号に含まれる補正情報のデータ形式は、8ビットのプリアンブル、6ビットのメッセージID、そして24ビットのCRCから構成される。残りの212ビットがデータフィールドとなるが、これはSBASと全く同じ構造である。



図4 L1-SAIF信号補正情報データ構造

4 年次計画

図5に示す年次計画は大きく3つに分けられる。すなわち、補正情報生成方式の検討期間、補正情報リアルタイム生成システムの開発期間、そして、開発したシステムの評価期間である。

平成15、16年度において、補正情報を生成する方式を検討し、その方式により生成された補正情報を用いることで高精度かつ高信頼性の測位が可能であることを、電子基準点観測データをオフラインで用いて検証した。平成17年度から19年度にかけては、平成16年度までに開発したシステムを改修し、電子基準点観測データをリアルタイムで利用して、高精度かつ高信頼性の測位が可能となる補正情報を生成するシステムを開発した。また、この期間には、平行して、利用者用受信機であるプロトタイプ受信機の開発も行った。平成20年度には、補正情報をリアルタイムで生成するシステムとプロトタイプ受信機を組み合わせ、高精度かつ高信頼性の測位が可能であることを実証するための総合試験を実施した。総合試験は、衛星シミュレータ(準天頂衛星信号模擬システム)を用いて地上で実施した。そして、平成22年9月に打ち上げられた準天頂衛星を用いて、平成22年12月から、実衛星を用いる評価試験(技術実証実験)を行っている。

平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
(補正情報生成方式開発)		(高精度測位補正実験システム開発)			(実証試験)		
方式調査・検討	方式評価	補正情報リアルタイム生成・配信システム開発			総合試験	技術実証試験	
評価用ソフトウェア作成		プロトタイプ受信機開発					 準天頂衛星 打上げ

図5 年次計画

5 研究開発項目

ここでは、高精度測位補正実験システムの開発において、電子航法研究所が実施している研究開発項目について述べる。

(1) 補正情報リアルタイム生成・配信システムの開発

(1-1) 完全性監視方式の開発

完全性監視とは、利用している衛星測位システムが期待される性能で利用できるかどうか判断することである。利用している衛星測位システムが利用できないと判断されたら、利用者に警報が出される。この警報により、利用者は、安心して衛星測位システムを利用できることになる。このようにして、完全性監視により信頼性が確保できることになる。

(1-2) 伝搬遅延推定方式の開発

本システムでは、誤差要因毎に誤差を評価して、その誤差に対する補正情報を利用者へ送る。誤差要因という場合、具体的には、衛星の位置誤差、電離層や対流圏を通過するときには生ずる遅延誤差、マルチパス誤差、受信機ノイズなどがある。電子航法研究所における研究開発ではこれらの誤差要因のうち、電離層遅延および対流圏遅延を高精度に推定し補正する方式について検討した。

(1-3) 補正情報作成・配信方式の開発

この開発では、どんな内容の補正情報を、どんな形式で作成し、作成した補正情報を、どんな順番で送信するか、などについて検討した。

(2) プロトタイプ受信機の開発

プロトタイプ受信機というのは利用者用受信機のこと、今回開発しているシステムにより生成された補正情報を用いたときに、どのような測位精度が得られるかなど、補正情報の評価に利用する。

(3) 評価試験

開発したシステムが、実際に、要求される機能・性能を持っているかを評価するための評価試験を実施する。

(3-1) 単体評価試験

補正情報リアルタイム生成・配信システムおよびプロトタイプ受信機それぞれの単体評価試験である。補正情報リアルタイム生成・配信システムの単体評価試験での確認項目は次のとおりである。

- (a) 電子基準点観測データからリアルタイムで補正情報を生成・配信できる。
- (b) 生成・配信された補正情報により、測位精度の改善・信頼性の確保が可能である。

プロトタイプ受信機の単体評価試験での確認項目は次のとおりである。

- ① プロトタイプ受信機が準天頂衛星から送信されるL1-SAIF信号を受信できる。
- ② プロトタイプ受信機がL1-SAIF信号に含まれる補正情報を解読できる。
- ③ プロトタイプ受信機が、補正情報を利用した測位計算を実施できる。

ここで、プロトタイプ受信機単体評価試験で利用されるL1-SAIF信号は、衛星シミュレータにより発生される模擬的な信号である。また、上記③項での試験では、補正情報をプロトタイプ受信機に直接入力する。

(3-2) 総合試験

補正情報リアルタイム生成・配信システムとプロトタイプ受信機（および衛星シミュレータ）を地上で組合せて実施する評価試験である。この評価試験では、電子基準点観測データにより補正情報リアルタイム生成・配信システムでリアルタイム生成された補正情報を衛星シミュレータに入力する。その衛星シミュレータが発生する模擬的準天頂衛星信号、およびGPS信号（実際の衛星から送信されてくる信号）をプロトタイプ受信機に入力する。こうして、補正情報の生成から利用まで、システム全体として機能確認を行う。

(3-3) 技術実証実験

平成22年9月に打ち上げられた準天頂衛星を用いて実施する評価試験である。この評価試験では、電子基準点観測データにより補正情報リアルタイム生成・配信システムでリアルタイム生成された補正情報をJAXA地上局経由で準天頂衛星に送信する。準天頂衛星から送信されるL1-SAIF信号、およびGPS信号(実際の衛星から送信されてくる信号)をプロトタイプ受信機で受信して、プロトタイプ受信機により、補正情報の評価を行う。こうして、補正情報の生成から利用まで、実際の準天頂衛星を用いて、システム全体として機能確認を行う。

6 補正情報リアルタイム生成・配信システム

6.1 補正情報生成・配信方式

SBASではすべての補正量が一度に送信されるわけではない。補正量の種類、すなわち、電離層遅延量や、衛星軌道・クロックの補正量、完全性監視に関する補正量など、それぞれの補正量に対応した「補正情報」が生成される。各補正量に対応した「補正情報」は「メッセージタイプ」と呼ばれる番号で区別される。0から63までのメッセージタイプがあり、SBASでは、そのうちの半分程度が使われている。SBASでは、この補正情報を、適当な順番で送信することで、利用者が必要な補正量を送信している。各補正量に対応した「補正情報」の長さは250ビットで、1秒に1個送信される。すなわち伝送速度は250bpsである。

準天頂衛星システムQZSSでは、高精度測位を実現するためにSBASの場合よりも多くの補正情報が必要になると予想され、SBASで利用されていないメッセージタイプに、QZSSで必要となる高精度測位用補正量を割り当てることとしている。このメッセージタイプには、QZSの軌道情報や対流圏遅延量に関する情報などが含まれることになる。QZSSで用いられる補正情報のビット構造や伝送速度はSBASと同じとしている。

6.2 補正情報リアルタイム生成・配信システムの構成

図6は補正情報リアルタイム生成・配信システムの構成図である。モニタ局データである電子基準点観測データは日本測量協会から収集する。そのデータを用いて補正情報を生成する。その補正情報は、JAXA地上局を経由して準天頂衛星に送信される。本システムには、生成した補正情報を保存するデー

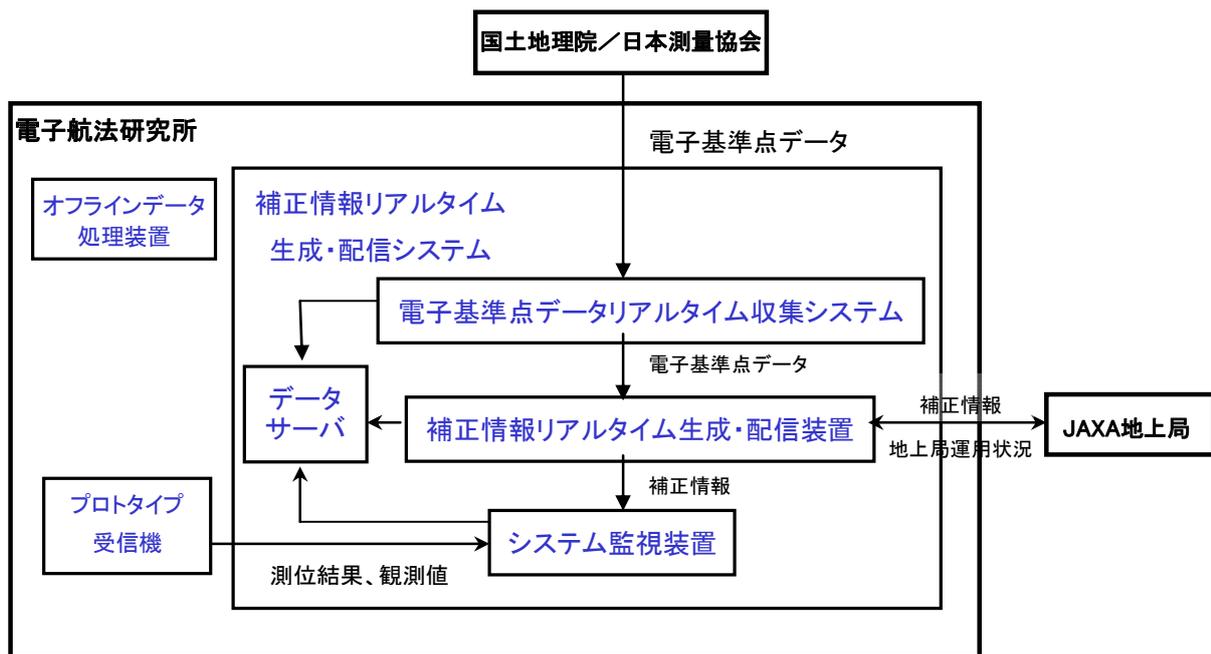


図6 補正情報リアルタイム生成・配信システム構成図

タサーバやシステムを監視する装置も含まれる。また、電子航法研究所にプロトタイプ受信機を設置して、準天頂衛星から放送される補正情報をモニタする。

図7は補正情報リアルタイム生成・配信システムの外観図である。一番左側のラックが電子基準点観測データをリアルタイムで収集する装置、その隣が補正情報を生成・配信する装置、右側のラック2本はデータサーバである。



図7 補正情報リアルタイム生成・配信システム外観図

7 プロトタイプ受信機

平成17年度からは利用者用受信機に相当するプロトタイプ受信機の開発を開始した。図8はプロトタイプ受信機の構成図であり、図9は外観図である。受信機本体は、信号捕捉・追尾、データ取得を行う信号処理部と、測位計算を行う部分から構成される。受信機で取得されたデータや、測位計算結果は、外部のモニタ用パソコンで表示・処理される。このプロトタイプ受信機の概略仕様は下記のとおりである。

大きさ: 45cm(W) × 45cm(D) × 20cm(H)
 重量: 約11kg
 受信可能周波数: GPS L1
 受信可能衛星数: 16
 測位演算機能: GPS単独測位、補正情報利用測位

また、マルチパス誤差軽減機能として、信号処理回路およびソフトウェアによるものを備えている。

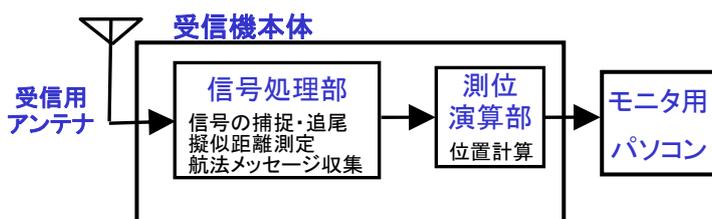


図8 プロトタイプ受信機構成図



図9 プロトタイプ受信機外観図

8 リアルタイム動作試験

補正情報リアルタイム生成・配信システムの性能を実証するために、リアルタイム動作試験を行った。この試験では、電子基準点においてリアルタイムで取得されたデータを用いて補正情報を生成した。生成された補正情報を用いて、利用者となした他の電子基準点における測位誤差を後処理により評価した。

8.1 モニタ局配置

この試験では、適当な配置の電子基準点で得られたデータを用いて補正情報を生成した。なお、複数の電子基準点の組合せに対して補正情報を生成した。

- (1) 4局配置(図10の赤の四角記号)
JAXAモニタ局が設置されている
稚内、小金井、父島、那覇に相当
する場所の電子基準点
- (2) 6局配置(図10の緑色の三角記
号)
MSAS用国内モニタ局が設置され
ている札幌、常陸太田、東京、神
戸、福岡、那覇に相当する場所
にある電子基準点
- (3) 9局配置(図10の青の三角記号)
ENRIリアルタイムモニタ局である
札幌、仙台、東京、富山、信楽、高
知、福岡、那覇、与那国に相当す
る場所にある電子基準点
- (4) 11局配置
JAXAモニタ局およびENRIモニタ
局

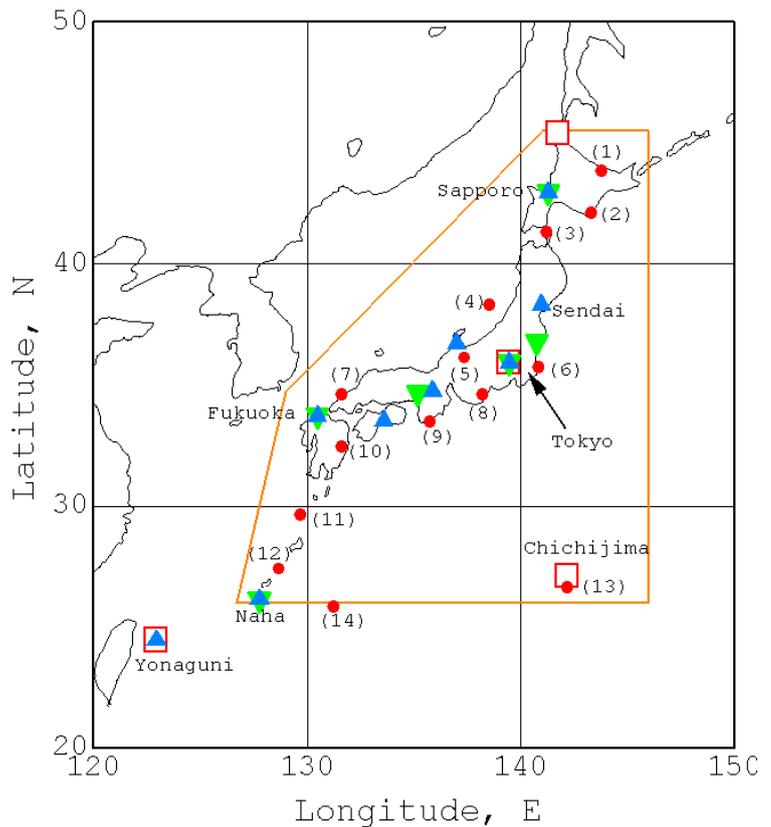


図10 モニタ局配置

L1-SAIF実験領域:オレンジ色の線で囲まれた領域

- :JAXA局
- ▼:MSAS地上局、
- ▲:ENRIリアルタイム局
- :リアルタイム試験用利用者局、カッコ付きの数

8.2 結果

図10の緑色の円(カッコ付き)で示される場所にある電子基準点を、測位誤差評価時の利用者受信機と見なした。利用者位置精度はこれらの場所で評価した。これらの、どの場所の電子基準点の

データも補正情報生成には用いられていない。

図11は、高山(図10の(5)で示される位置)における水平方向の位置誤差の例である。データ収集期間は2008年1月19日から1月23日の5日間である。補正情報は6局配置を用いて生成された。この図で補正情報を適用した場合の結果については、得られた位置誤差のほとんどは1mより小さく、rms値は0.292mである。

図12は4種類のモニタ局配置に対して、すべての評価場所での利用者位置誤差(補正情報適用済み)である。データ集収集期間は2008年1月19日から1月23日の5日間である。実線および破線は、それぞれ、水平、垂直精度である。この図では、図10に示されるように北から南に番号(カッコ付き)を付けた評価場所に対する精度がrms値で示されている。

図12から、1m rmsという目標精度値は達成可能であり、補正情報を生成するのに必要なモニタ局の数は少なくとも6局であることがわかる。ただしモニタ局数が増えたからといって、自動的に精度が改善されるわけではない。ここ

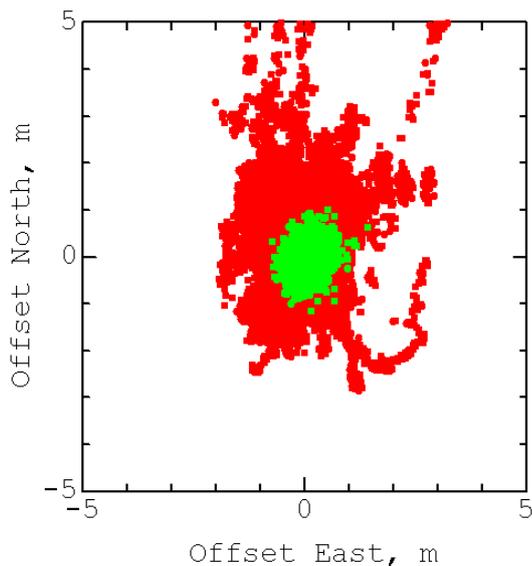


図11 高山における利用者位置誤差
データ収集期間:2008年1月19日から1月23日
赤のプロット:単独GPSの場合
緑のプロット:補正情報を適用した場合
(6局配置)

で評価されたすべての場所について、精度の観点から見ると、9局以上配置がもっとも良いと思われる。なお、この試験期間では電離層活動は比較的穏やかであった。電離層擾乱により引き起こされる大きな誤差を防ぐためにはもっと多くの局が必要になるであろう。なお、衛星シミュレータを用いた総合試験でも、本節で述べたものと同等の結果が得られた。

9 おわりに

ここでは、国土交通省の委託を受けて電子航法研究所が実施している、準天頂衛星を用いる高精度測位補正技術の開発の概要について述べた。準天頂衛星信を用いる高精度測位補正システムはSBASに基づいて開発しているが、この高精度測位補正システムがSBASと異なる点をまとめると次のようになる。

- (1) 利用する衛星が静止衛星(MTSAT)ではなく、高仰角を持つ準天頂衛星である。
- (2) 利用するモニタ局が国土地理院電子基準点である。
- (3) 想定している利用者が、地上の高速移動体(鉄道)である。
- (4) 利用可能地域が日本近辺である。
- (5) ICAO で定められた国際標準に、完全に準拠しているわけではない。

電子航法研究所は、平成21年度までに補正情報リアルタイム生成・配信システムおよびプロトタイプ受信機の開発、総合試験の実施を終了した。現在、平成22年9月に打ち上げられた準天頂衛星を用いて技術実証実験を実施し、これらのシステムの機能・性能を確認している。■

参考文献

- [1] 小暮ほか：“QZSSの開発状況”、日本航海学会GPS/GNSSシンポジウム、pp.27-34、2007年11月
- [2] 伊藤ほか：“準天頂衛星L1-SAIF利用者装置”、第8回電子航法研究所研究発表会、2008年6月
- [3] 坂井ほか：“準天頂衛星L1-SAIF実験局の構成”、第8回電子航法研究所研究発表会、2008年6月
- [4] 武市ほか：“L1-SAIFメッセージによる対流圏遅延補正方式”、第51回宇宙科学技術連合講演会、2007年10月
- [5] 坂井ほか：“準天頂衛星L1-SAIF補強信号のインテグリティ機能”、第51回宇宙科学技術連合講演会、2007年10月

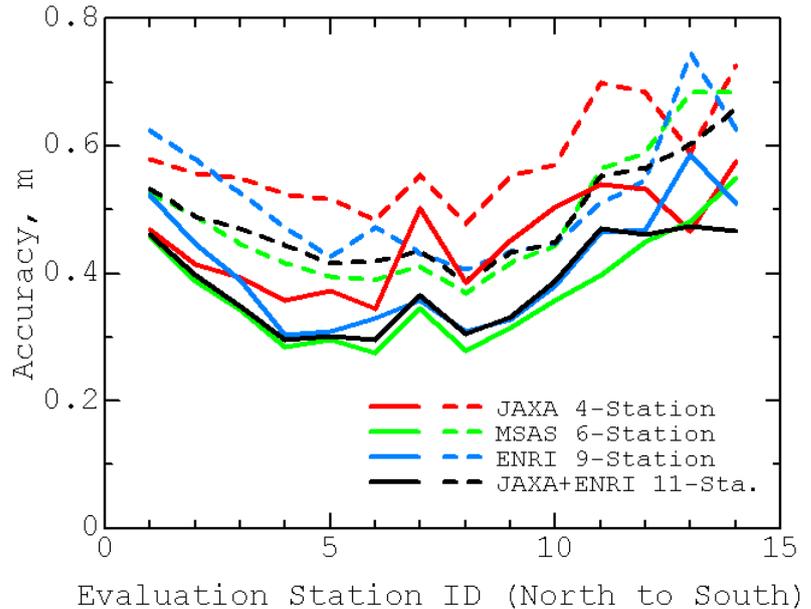


図12 4種類のモニタ局配置に対する利用者位置精度 (4日間のデータ)
 実線: 水平誤差
 破線: 垂直誤差