

10. SBAS比較用GPS衛星精密軌道情報の作成

衛星技術部

※新井 直樹 星野尾 一明 伊藤 実 松永 圭左

1. まえがき

次世代の航空航法システムとして、日、米、加および欧州で、静止衛星型衛星航法補強システム(SBAS)の整備が進められている。日本のシステムは、運輸多目的衛星(MTSAT)用衛星航法補強システム(MSAS)と呼ばれている。このシステムは、他の SBAS と同様に GPS 衛星の軌道を高精度に標定し、GPS の測距情報を補正する機能を有している。

標定した軌道の精度を評価するには比較となる軌道情報が必要であるが、この比較用の軌道情報はさらに精度が高く、かつ各々の衛星における軌道情報の時間間隔(エポック間隔)が短い、すなわち時間的に密な情報であることが重要になる。さらに、MSAS の軌道評定精度の検証のためには、MSAS と異なるアルゴリズムで作成されていることが望ましい。現在、いくつかの軌道情報が公開されているが、上記の条件を満たす軌道情報は一般に提供されていない。

本研究では、SBAS の衛星標定精度の検証に利用するために、エポック間隔が短い軌道情報を、MSAS とは異なるアルゴリズムを用いて作成した。本稿では、作成した軌道情報の概要とその精度について報告する。

2. GPS 衛星の軌道情報の現状

現在一般に利用できる軌道情報として、次の2つが挙げられる⁽¹⁾。

- ・放送暦
- ・IGS の軌道情報

放送暦は、各 GPS 衛星から常時放送されている航法メッセージに含まれる軌道情報である。リアルタイムで利用することができるので、単独測位等、航法を目的とした用途に広く用いられている。しかしその精度は低く、後述する IGS の最終暦と比較して数 m 程度、場合によっては数十 m の誤差が見られる。

IGS の軌道情報は、GPS 等の観測、データ解析を行う世界的な組織である IGS (International GPS Service)が作成している軌道情報である。現在、IGS の軌道情報は、次の3つが公開されている⁽²⁾。

- ・予測暦 (観測時刻以前に公開され、精度は衛星によってばらつきがある)
- ・速報暦 (1日分の観測後 23時間以内に公開され、精度は 15~20cm 以内)
- ・最終暦 (1週間分の観測後 11日以内に公開され、精度は 10cm 程度)

これらの IGS の軌道情報はインターネット

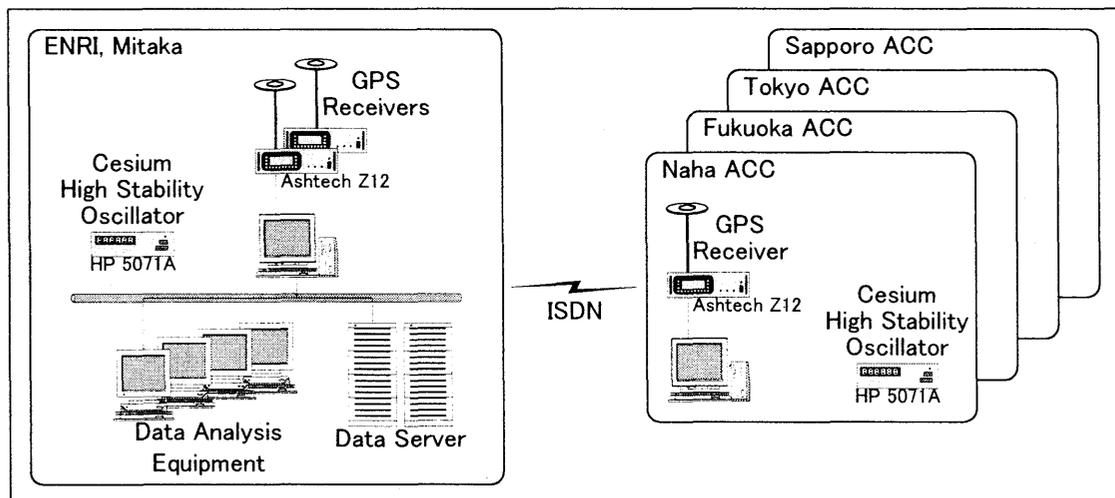


図1 電子航法研究所 GPS 観測点の構成

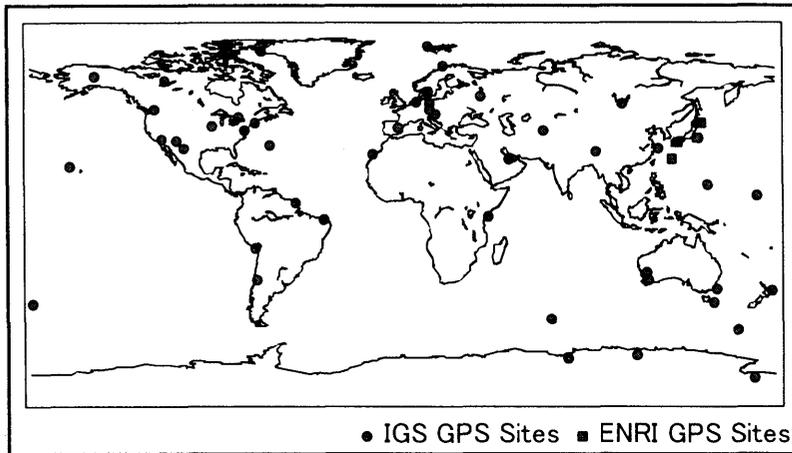


図2 衛星の軌道推定に用いた GPS 観測点

を用いて一般に公開されているので、任意のユーザが自由に入手することができる。さらにその精度は非常に高い。しかし、IGSの軌道情報は元来測地ユーザを主な対象としているので、15分間という比較的長いエポック間隔で作成されている。そのため、MSASで標定した軌道と短い時間間隔で比較を行う場合には不都合が生じる。

そこで、本研究ではSBASの衛星標定精度の検証に適した、エポック間隔が短く、精度の高い(IGSの最終暦に対して数十cm程度の誤差)軌道情報を得ることを目的としている。

3. ENRI 速報暦の作成

GPS衛星の軌道を高い精度で推定するためには、観測点が全地球に広く分布している必要がある。ここではIGSの世界的なGPS観測点と、電子航法研究所が日本国内で独自に運用しているGPS観測点のデータを用いて、GPS衛星の軌道を推定する。

電子航法研究所の観測点は、札幌、東京(所沢市)、福岡、及び那覇の各航空交通管制部

(ACC: Area Control Center)と、電子航法研究所(調布市)内の計5ヶ所に設置されている(図1)。これらの受信機で観測したデータをISDN回線を用いて電子航法研究所に転送し、ファイルサーバに保存している。

IGSの観測点については、2002年4月現在登録されている294の観測点のうち、ITRF97座標系のコアサイトとして知られている約50の観測点を用いた。軌道の推定に使用した観測点を図2に示す。

衛星の軌道の推定には、Massachusetts工科大学及びScripps海洋研究所が開発しているGAMIT (GPS at MIT)⁽³⁾を使用した。GAMITはGPS解析用プログラムの集合体であり、主に研究目的のために開発され、そのソースコードが公開されている。利用者自身がソースコードをコンパイルし、実行モジュールを作成して利用する。GAMITでは解析の手法として最小二乗法を用いて各パラメータの

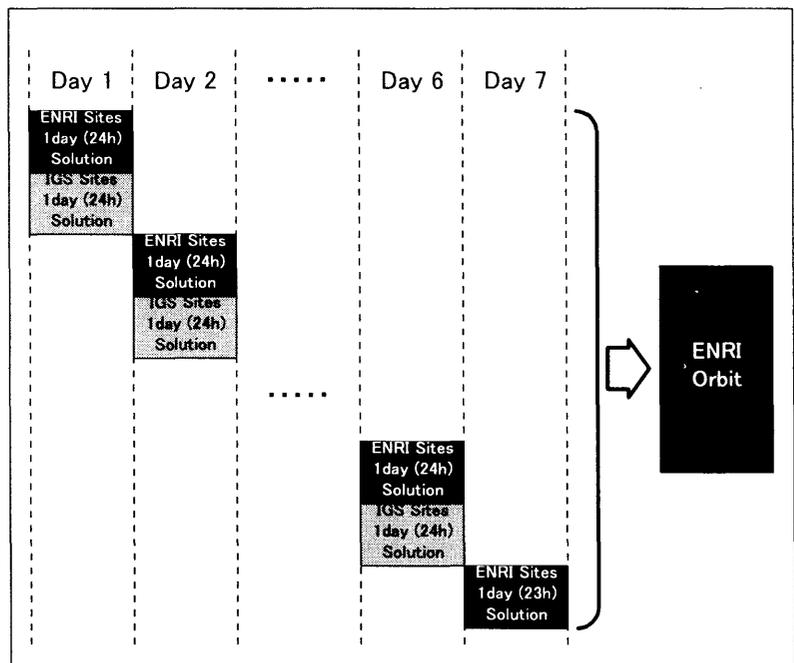


図3 衛星の軌道推定の手順

表 1 衛星の軌道推定に用いた主なパラメータ

慣性座標系	J2000
重力定数	IGS 1992 Standards
輻射モデル	BERNE
大気遅延モデル	Saastamoinen
天頂大気遅延量の推定個数	13 / 日
マッピング関数	NMF
大気遅延勾配の推定個数	3 / 日
アンテナモデル	仰角モデル
マスク角	10°
地球回転パラメータ	IERS
海洋潮汐モデル	なし

推定を行う⁽⁴⁾。解析の際には、GAMIT を用いて IGS の観測点及び電子航法研究所の観測点を1つのクラスタとして計算し、衛星の軌道パラメータを含んだ最小二乗解を得る。この軌道パラメータから、一定の時間間隔で目的とする衛星の位置を求め、軌道情報とする。

GPS 衛星の軌道を数時間以上の期間について推定する場合には、1 日を越える長期間の観測データを用いて各衛星の軌道の弧(arc)を求め、衛星の軌道パラメータを計算することによって、得られる軌道の精度が向上することが経験的に確かめられている。ここでは解析に要する計算時間の制限等も考慮して、計7日間分の観測データから各衛星の軌道パラメータを求めることとした(図3)。軌道推定作業では、各々の日に対して GAMIT を用いて 24 時間毎の解析を行い、1 日ごとの最小二乗解を得る。これを繰り返して7日間分の最小二乗解を結合し、衛星の軌道について1つの弧を表す軌道パラメータを計算する。最小二乗解の結合の作業には、GAMIT と同じく Massachusetts 工科大学と Scripps 海洋研究所が開発している GLOBK (Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program)を用いた。GLOBK はカルマンフィルタを用いたプログラムで、複数の最小二乗解を結合し単一の解を得ることができる。複数の最小二乗解を結合して得られた軌道パラメータから、目的とする日における衛星の位置を表す速報暦を作成する。解析に用いた主なパラメータを表1に示す。このようにして得られ

た速報暦を、本論文では ENRI 速報暦と呼ぶ。ENRI 速報暦のフォーマットには SP3 (Standard Product #3)⁽⁵⁾ を用いている。なお、現状では ENRI 速報暦のエポック間隔を 30 秒間としている。これは一般に流通している RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 観測ファイルのエポック間隔と一致させるためである。

4. ENRI 速報暦の精度評価

前項までの手順で得られた ENRI 速報暦の軌道推定精度を評価する。その際の基準として、IGS の最終的な解析結果である最終暦を用いた。

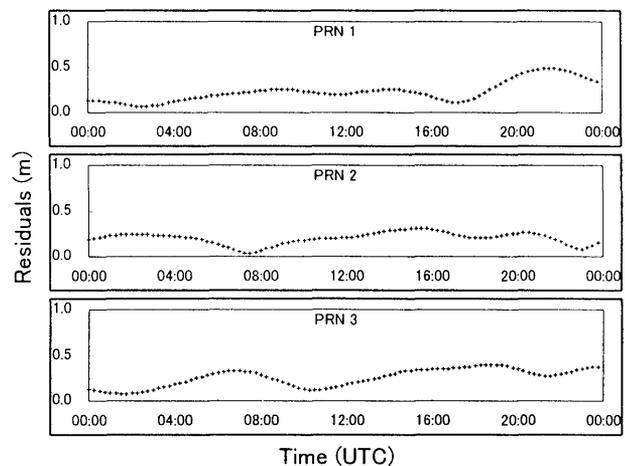


図 4 ENRI 速報暦の誤差
(2001 年 5 月 13 日 PRN1~3)

例として、2001年5月13日におけるENRI速報暦の誤差を図4に示す。前述したように、IGSの軌道情報はその間隔が15分間であるため、ENRI速報暦については該当する時刻の情報のみを抽出して比較している。同じ日について、すべての衛星における軌道推定誤差の平均値と標準偏差を図5に示す。図4、5が示すように、IGSの最終暦と比較して、ENRI速報暦の誤差は数十cm程度であった。

2001年5月中旬より6月初めにおけるENRI速報暦の誤差の平均値を図6に示す。この図は、それぞれの日においてすべての衛星の軌道推定誤差を求め、1日ごとの平均値を示したものである。なお、この図においてデータが示されていない日があるが、これは解析時のエラーによって、該当する日における速報暦の作成に不具合が生じたことによるものである。軌道推定の誤差は日によって変動が見られるが、おおむね数十cm~1m程度の誤差で軌道の推定が行われていることが確認された。

5. あとがき

本研究ではSBASの衛星標定精度の検証に利用することを目的とし、MSASとは異なるアルゴリズムを用いて、エポック間隔が短い軌道情報を作成した。その結果、作成した軌道情報は日によってその誤差に変動が見られるが、数十cm~1m程度の精度が得られていることを確認した。さらに精度を向上させる必要があるが、本研究で用いた手段によって、SBASの衛星標定精度の検証用の軌道情報が作成できると考えられる。また本研究で作成した軌道情報は、航法などの分野で、短いエポック間隔の軌道情報を必要とする用途においても利用することが可能である。

今後は、さらに軌道推定精度を向上させること、そしてより安定した軌道情報の提供を行うことが課題である。

参考文献

- (1) 新井直樹, "GPS衛星軌道情報の作成と利用", 日本航海学会GPS研究会GPSシンポジウム'2001テキスト, pp.225-234
- (2) 島田誠一, 日置幸介, 畑中雄樹, "GPS解析の概要", 気象研究ノート, 第192号, pp.61-72, Sep.1998.
- (3) "Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software Release9.9", Massachusetts Institute of Technology, Scripps Institute of Oceanography, Dec.1999.
- (4) 日置幸介, 島田誠一, 大谷竜, "GPS解析ソフトウェア", 気象研究ノート, 第192号, pp.73-92, Sep.1998.
- (5) "SP3 Format," U.S. DoC / NOAA / NOS / National Geodetic Survey Web Page, http://www.ngs.noaa.gov/GPS/SP3_format.html

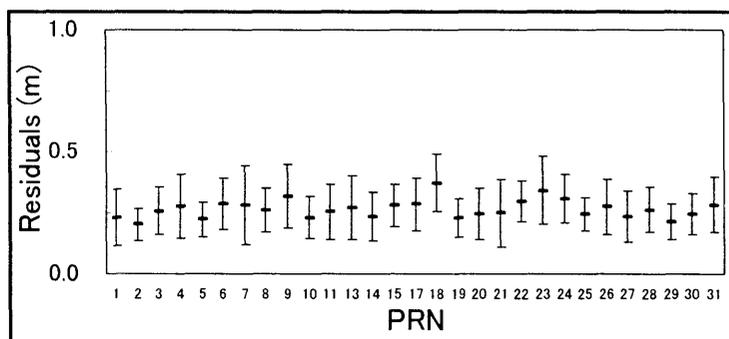


図5 ENRI速報暦の誤差 - 平均値と標準偏差 - (2001年5月13日)

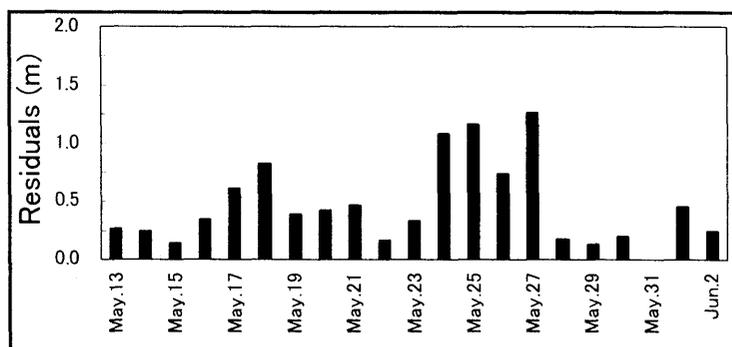


図6 ENRI速報暦の誤差 - 平均値 - (2001年5月13日~6月2日)