

### 3. SBAS電離層補正情報のアベイラビリティ向上

衛星技術部 坂井 丈泰 松永 圭左 星野尾 一明

#### 1 はじめに

GPS (global positioning system) をはじめとする衛星航法システムの誤差要因のひとつは電離層により生じる伝搬遅延であって、たとえばGPSの場合は最大で300ns (距離に換算して100m) 程度の影響がある。現在ICAO (international civil aviation organization : 国際民間航空機関) により開発が進められているSBAS (satellite-based augmentation system : 静止衛星型衛星航法補強システム) では、広いサービス範囲にわたって均一な測位性能を提供するため、電離層遅延量についてはユーザ位置の関数として補正することとされている。すなわち、経緯度で5度毎の格子点における遅延量がSBAS衛星から放送され、ユーザ受信機は自分の位置における遅延量を内挿により求めて補正に利用する。

SBAS方式は主に北米大陸における電離層観測データに基づいて設計されており、中程度の磁気緯度における通常の電離層活動によく適合する。したがって、太陽活動の状態や磁気緯度の違いなどにより電離層活動が活発な時期あるいは地域においては、十分な補正能力が発揮されないか、または補正情報そのものが作成されない場合がある。これは電離層補正情報のアベイラビリティが低下することを意味し、その程度は補正情報の生成アルゴリズムに依存する。

SBASの場合、非精密進入までの飛行段階では電離層補正情報は利用されないが、垂直誘導を伴う航法においては電離層遅延補正を行う必要がある。したがって、SBASにおける電離層補正情報のアベイラビリティの改善は、垂直誘導付きの航法のアベイラビリティ向上に寄与する。このための方法を検討し、日本付近の電離層について評価を試みたので、その概要を報告する。

#### 2 SBASの電離層遅延補正方式

現行のSBASにおける電離層遅延補正方式は、経緯度で5度毎に設定されたIGP (ionospheric grid point) における電離層垂直遅延量をユーザに向けて放送することとされている [1]。測距信号が電離層を通過する位置はIPP (ionospheric pierce point) と呼

ばれ、ユーザ受信機は各IPPにおける垂直遅延量をIGP垂直遅延量から内挿により求めて利用する。この際の内挿処理やIPP位置計算の手順も規格により定められており [1]、SBAS準拠の受信機であれば同一の処理を実行することとなる。

ユーザ受信機側の処理手順が定められているのに対して、SBASサービスプロバイダがIGP垂直遅延量を推定する方法には特に制約はない。すなわち、SBASが規定された航法性能を提供する限り、サービスプロバイダの裁量で任意の推定アルゴリズムを採用してよい。各サービスプロバイダにとっては、サービスエリア内なるべく推定精度の良いアルゴリズムを採用することが、測位精度の向上につながることになる。

電離層遅延推定アルゴリズムとして米国WAASおよび日本のMSASが採用しているプレーナフィット (planar fit) 方式では、IGP周辺における電離層遅延観測データをもとにして、平面モデルによりIGP位置における電離層遅延量を推定する。このためにモニタ局には二周波型受信機が設置されており、周辺の電離層による遅延量を観測している。平面モデルでは電離層垂直遅延量を経緯度に関する一次式として表現し、モニタ局における観測データを利用してその係数を推定することでIGP位置における垂直遅延量を得る (図1)。

プレーナフィット方式では、サービスエリア上空の電離層の様相が平面モデルに適合している場合に限り正常な推定が行われる。磁気嵐等の影響により電離層活動が活発な場合はこうした条件が満たされないから、平面モデルにより推定されたパラメータを信頼して補正情報を生成してはならない。このような状況を検出するのが電離層嵐モニタ (storm monitor) であって、平面モデルにより推定された電離層遅延量と実際のモニタ局における観測結果との残差二乗和がカイ二乗統計量になることを利用してモデル適合性を検定するものである。電離層嵐モニタにより平面モデルが実際の電離層に適合しないと判断された場合、そのIGPについては補正情報が生成されないか、あるいは補正値の分散が最大値に設定される。

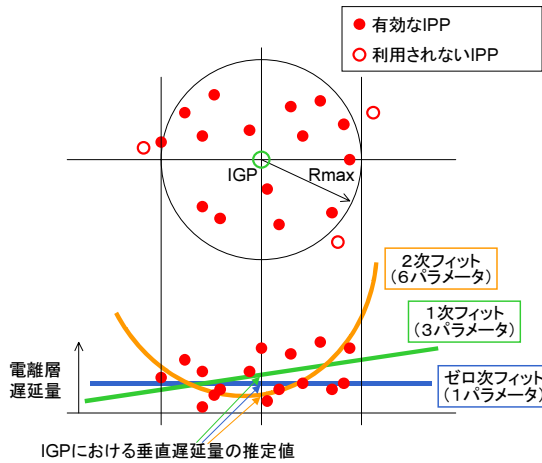


図 1. プレーナフィットによる電離層遅延量の推定方法.

### 3 日本付近における補正例

プレーナフィットにより電離層垂直遅延量を推定し、これの観測データに対する残差の統計的性質を調べた結果が図 2 である。この計算にあたっては電離層活動が静穏な時期を選び、MSAS のモニタ局配置を想定した。電離層遅延量の観測データについては、当所で作成した電離層遅延量データセットを利用した（付録参照）。

図では、IPP 間距離を横軸として、三つの信頼水準により色分けしてプレーナフィット残差の RMS に対応する統計量をプロットしてある。すなわち、二つの IPP におけるプレーナフィット残差の差を集計し、その 68.3% 値、95.5% 値、および 99.7% 値から RMS 値を推定した（このようなプロットはバリオグラム variogram と呼ばれる）。上段はプレーナフィットをする前の観測データそのもので、電離層遅延量は正規分布に近く、距離に対して分散が直線的に増加している。一方、下段はプレーナフィットを実行した後の残差に対応する。プレーナフィットにより推定された遅延量の残差は正規分布よりも裾が広い分布となっており、距離が大きくなっても残差の RMS 値はそれほど大きくなりませんが、次第に裾が広がっていくことがわかる。ユーザに放送する電離層遅延量の分散についてはこの裾の広さを反映するものでなければならぬことから、プレーナフィットを適用してもこれを小さくすることができない。すなわち、(残差の RMS 値は改善されているから) プレーナフィットにより推定された電離層遅延量を用いてユーザが補正処理を行うとおおむね測位精度は改善されるが、(裾が広い分布であることから) 電離層遅延量の分散を

02/6/27 (Quiet Day)  
MSAS 6 sites; User 31 sites; No Check

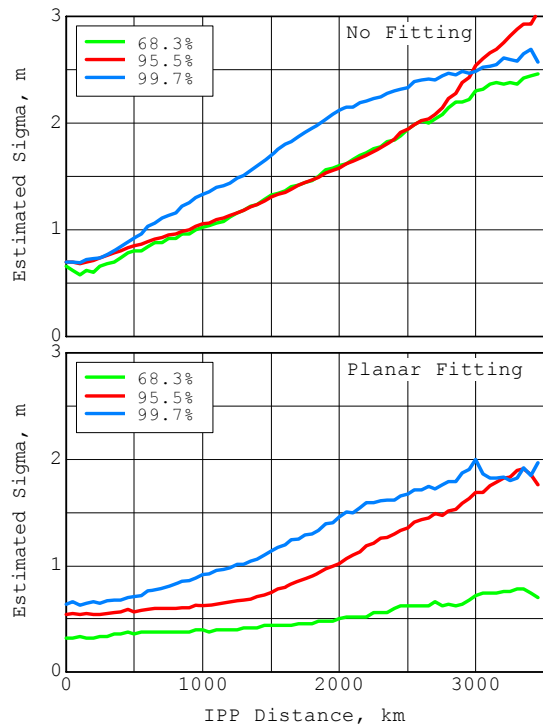


図 2. 電離層活動静穏時におけるプレーナフィット残差の分布を示すバリオグラム。横軸は IPP 間距離、縦軸は残差の RMS に対応する統計量で、信頼水準別に色分けしてある。

小さくできないためプロテクションレベルはそれほど変わらないこととなる。

プレーナフィットにより補正値を生成した場合の補正結果は、表 1 のとおりであった。図 2 と同様であるが、モニタ局データより生成した補正情報を擬似ユーザ局データにより評価してある。 $R_{max}$  はプレーナフィットのパラメータのひとつで、IGP における垂直遅延量を推定する際に収集する観測データの最大半径を意味する。「裾の広がり」は、99.7% および 68.3% の各信頼水準に対応する残差 RMS 値の比であって、正規分布であれば 1 となる量である。観測データが不足する (10 未満) かあるいは磁気嵐モニタが磁気嵐状態と判定すると電離層補正情報を作成できないが、これらが発生せず補正情報を作成できた割合が「アベイラビリティ」に示されている。カッコ内は磁気嵐モニタを適用しない場合のアベイラビリティである。

観測データを収集する最大半径  $R_{max}$  を大きくするとアベイラビリティが向上するが、これは収集半径の増加によりデータ不足が起きにくくなることに対応する。推定残差の RMS 値は 0.5~0.8 m 程度で磁気

表 1. プレーナフィットによる補正結果.

電離層の状態	$R_{max}$ [km]	残差 RMS [m]	最大残差 [m]	裾の広がり	アベイラビリティ
静穏	1200	0.514	7.26	1.28	0.9262 (0.9262)
	1500	0.528	3.95	1.28	0.9831 (0.9833)
	2100	0.541	5.25	1.39	0.9992 (0.9994)
磁気嵐	1200	0.670	14.5	2.23	0.8334 (0.8546)
	1500	0.736	12.0	2.65	0.9072 (0.9411)
	2100	0.806	15.8	2.86	0.9447 (0.9909)

嵐の有無による差は顕著ではないが、磁気嵐の際には最大値が大きくなり、また正規分布から大きく外れた分布となることがわかる。

補正情報のアベイラビリティについては、静穏時は 99.9%以上となるが、磁気嵐の際は 94%あまりに低下した。しかしながら磁気嵐モニタを適用しない場合のアベイラビリティは 99.1%であることから、補正情報を作成できなかったケースの大部分で磁気嵐モニタが作動している。すなわち、磁気嵐が発生しているため平面モデルが適合しないと判断されているわけであるが、それにしても最大で 15 m 以上の残差を見逃していることになる。

## 4 アベイラビリティの改善

電離層補正情報のアベイラビリティを改善するためには、観測データ不足あるいは磁気嵐モニタの作動によりプレーナフィットが実行できなかった場合にも何らかの方法で補正情報を作成することが考えられる。あるいは、補正情報そのものについても、精度の改善ができれば最終的なアベイラビリティ向上に寄与する。これらのための方法として、ゼロ次フィットと二次フィットによるアルゴリズムを検討した。

### 4.1 ゼロ次フィット

図 2 によれば、数 100 km 程度までの範囲であれば電離層垂直遅延量の空間的変動は必ずしもそれほど大きくない。プレーナフィットを実行するうえで観測データが不足する場合に、この性質を利用することを考える。すなわち、IGP 近傍にある IPP における垂直遅延量を、そのまま IGP における遅延量とみなすこととする。

具体的には、IGP 近傍に複数の IPP がある場合を考慮し、次の手順とした：

1. IGP から一定の距離以下の IPP における観測デ

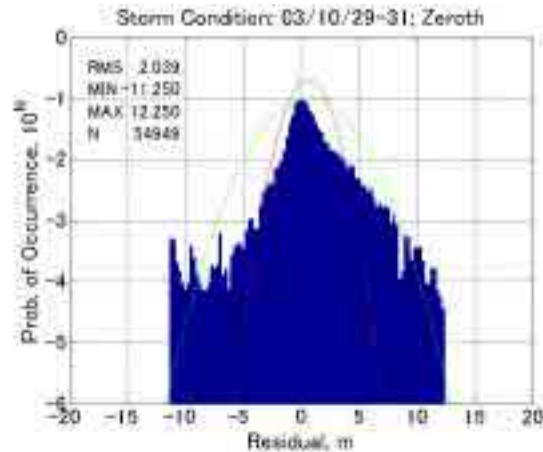


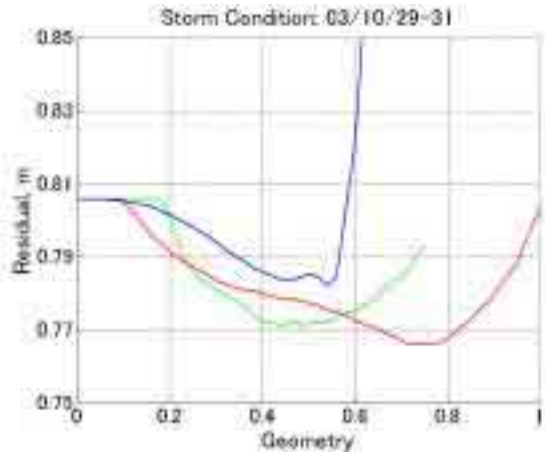
図 3. ゼロ次フィットを適用した場合の残差ヒストグラム。プレーナフィットが実行できなかった場合のみを対象とした。

ータを集め、1 以上のデータがあればその平均値を採用する。

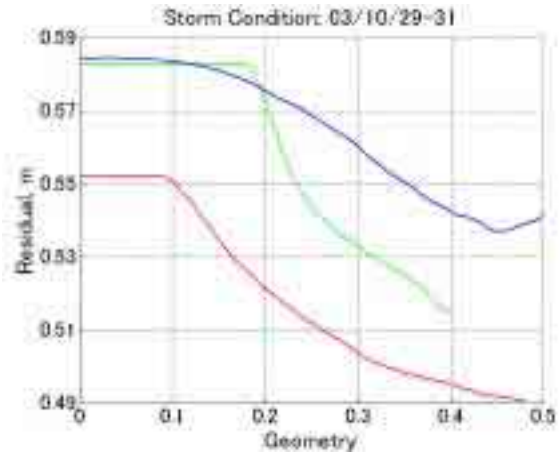
2. IGP からもっとも近い（ただし、最大半径以下の）IPP における観測データを採用する。
3. 最大半径以内にひとつも IPP がいない場合、その IGP については補正值の作成をあきらめる。

表 1 によれば、磁気嵐の際にプレーナフィットが実行できた割合は約 94.5%であった。残りの 5.5%について、ゼロ次フィットを実行した場合の残差を図 3 にヒストグラムで示す。

残差の RMS 値は約 2 m であり、プレーナフィットを実行できない状況であったことを考えれば良好な結果といえる。また最大値は 12 m 程度であったが、これは表 1 のプレーナフィットの場合と変わらない。したがって、プレーナフィットと同程度の性能が要求される場合においては、プレーナフィットでは遅延量を推定できなかった 5.5%の IGP についてはゼロ次フィットにより補正情報を作成可能であり、ユーザにとっては電離層遅延情報のアベイラビリティが向上す



(a) 全 IGP を対象とした場合



(b) 洋上のデータを除いた場合

図 4. 二次フィットを適用した場合の残差 RMS 値. (a) 全 IGP を対象とした場合, (b) 洋上のデータを除いた場合. 横軸は, (緑) HDOP 指数, (赤) 条件数指数, (青) RCM 指数で, それぞれ適当にスケールしてある.

ることとなる. 実用にあたってはさらにインテグリティ上の検討が必要であるが, 現行方式の磁気嵐モニタによらずに残差をバウンドするアルゴリズムを検討している [5].

## 4.2 二次フィット

プレーナフィットが実行できない状況においては, 未知数を減らしてゼロ次フィットを行うことが有効であり, これによりアベイラビリティが改善される. 逆に, 十分な観測データがある状況ならば, 推定処理の次数を上げて推定精度を向上させることが考えられる. すなわち, 二次フィットを実行してもよい.

問題は, どのような状況であれば二次のフィッティングが可能であるか, すなわち観測データが十分であるかどうかを判定することである. 二次フィットでは未知数が増えるため, 観測データが十分でないで推定結果の信頼性を確保することができない. 事前の調査の結果からは, 二次フィットを実行可能かどうかは観測データの数だけでは判定できず, たとえば IGP を中心とした 4 象限に IPP が分布するとよいことがわかっている [4]. IGP を中心とした観測データの空間的分布を表す指標として, ここでは次の三案を検討対象とした.

- HDOP 指数: IPP を GPS 衛星, IGP をユーザ受信機にみだてて HDOP を計算し, これを観測データ分布の良否の指標とする.
- 条件数指数: IGP における垂直遅延量の推定に用いる行列について, その性質を表す条件数 (

condition number) を計算してこれを指標とする. 条件数とは, 具体的には対象とする行列の特異値の最大値および最小値の比である.

- RCM (relative centroid metric) 指数 [6]: フィッティングに用いる IPP 群の重心から IGP までの距離と, もっとも遠い IPP から IGP までの距離の比. 0 なら重心が IGP に一致しており, 値が大きいほど重心が偏っていることを示す.

それぞれの指数を用いて二次フィットの適合性を判定し, 適用可能な場合は二次フィット, そうでなければプレーナフィットを実行することとして, 残差の RMS 値を比べた結果を図 4 に示す.

横軸は二次フィット適用の判定に用いるスレッシュールドで, 各指数がこのスレッシュールド以下ならば二次フィットを実行する. スレッシュールドをゼロとした場合はすべてプレーナフィットとなるから, 全 IGP を対象とした (a) では残差の RMS 値は表 1 と同じ 0.806 m となっている. スレッシュールドを上げていくと二次フィットが実行される割合が増えて残差が抑えられるが, ある程度よりも大きなスレッシュールドでは二次フィットが適合しない状況でも二次フィットを実行してしまい, 残差はかえって増加することとなる. なお, 各指数による結果を単一のグラフにまとめるため, 図 4 については横軸を適当にスケールしたうえで「Geometry」と表示した.

今回の調査結果では, もっとも残差を小さくできるのは条件数指数であった. RCM 指数の場合は, もっとも残差を小さくする最適スレッシュールドを過ぎると残差が急激に大きくなっており, 他の磁気嵐も考え合



わせた場合はスレッシュホールドを決定できないものと思われる。

図4 (a) は全 IGP を対象としており観測データの配置が極端に悪い洋上も含んでいるが、現実にもどの程度の改善が期待できるかを知るために、そのような場合を除いた7割程度について二次フィットによる効果を評価した結果が (b) である。RCM 指数では残差を7%程度削減しているが、HDOP 指数および条件数指数では12%程度の改善がみられた。

条件数指数を用いる場合に、プレーナフィットと二次フィットの残差を比較した結果が図6である。条件数が25程度以下であれば、二次フィットのほうがプレーナフィットよりも残差を小さく抑えられることがわかる。ただし、信頼水準別の3本のプロットの比較によれば補正後の残差は依然として正規分布とはなっておらず、裾の広い分布となっていることを示唆している。

図4によれば、条件数指数を用いる場合の最適スレッシュホールドは38.4付近であった。すなわち、条件数が38.4以下の場合には二次フィット、そうでなければ通常のプレーナフィットを適用することとすれば、残差のRMS値を最小とすることができる。このスレッシュホールドによる判定処理を行った結果、補正残差の分布は図7のように得られた。最大誤差については、そのような誤差を生じる場合は条件数が大きいのが普通であるからプレーナフィットが実行されており、二次フィットによる改善はなされていない。ヒストグラムの中心付近では、観測データの配置によっては二次フィットが実行されており、残差を抑制する効果がみられた。

## 5 むすび

SBAS 方式は主に北米大陸における電離層観測データに基づいて設計されていることから、電離層活動が活発な時期あるいは地域においては、十分な補正能力が発揮されないか、または補正情報そのものが作成されない場合がある。すなわち、電離層補正情報について十分なアベイラビリティを確保できない場合があることがわかってきた。

このため、日本付近において電離層補正情報のアベイラビリティの向上を図ることのできる補正情報生成アルゴリズムを検討した。プレーナフィットに代えてゼロ次フィットを用いると、補正精度はそれほどではないもののアベイラビリティを直接的に改善で

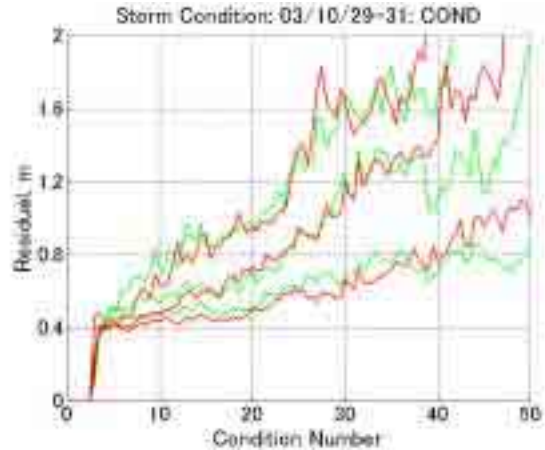


図6. 条件数指数に対する、プレーナフィットと二次フィットの残差の比較。(緑) プレーナフィット、(赤) 二次フィット. 信頼水準別に3本のプロットを対応させてある。

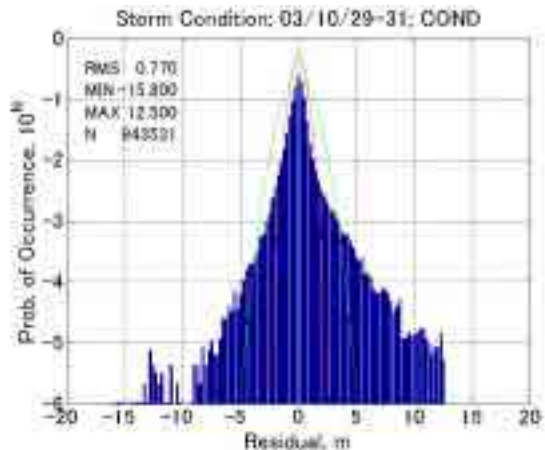


図7. 二次フィットを適用した場合の残差ヒストグラム。条件数が38.4以下の場合には二次フィット、そうでなければ通常のプレーナフィットを適用することとした。

きる場合があり、その効果は5%前後であった。また、二次フィットによれば、補正精度を向上することで間接的にアベイラビリティの改善を図ることができ、条件によっては12%程度の補正精度向上が得られる。

SBAS においては、電離層補正情報のアベイラビリティは垂直誘導付きの航法のアベイラビリティを左右する要素となるから、その向上は重要な課題である。今後は、さらに性能の良いアルゴリズムの開発に加え、他の磁気嵐の際も含めた検証作業が必要である。

## 参考文献

- [1] *International Standards and Recommended*

*Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, vol. I, ICAO, Nov. 2002.*

- [2] T. Walter, A. Hansen, J. Blanch, P. Enge, T. Mannucci, X. Pi, L. Sparks, B. Iijima, B. El-Arini, R. Lejeune, M. Hagen, E. Altshuler, R. Fries, and A. Chu, "Robust Detection of Ionospheric Irregularities," *Proc. 13th Int'l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS)*, pp. 209–218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- [3] 坂井 丈泰, Todd Walter, "GPS による電離層総電子数の観測", *信学技報*, vol. 103, no. 531, pp. 13–18, SANE2003-87, Dec. 2003.
- [4] T. Sakai, K. Matsunaga, K. Hoshinoo, and T. Walter, "Evaluating Ionospheric Effects on SBAS in the Low Magnetic Latitude Region," *Proc. 17th Int'l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS)*, pp. 1318–1328, Long Beach, CA, Sept. 2004.
- [5] T. Sakai, K. Matsunaga, K. Hoshinoo, and T. Walter, "Improving Availability of Ionospheric Corrections in the Low Magnetic Latitude Region," *Proc. ION National Technical Meeting*, pp. 569–579, San Diego, CA, Jan. 2005.
- [6] E. Altshuler, D. Cormier, and H. Go, "Improvements to the WAAS Ionospheric Algorithms," *Proc. 15th Int'l Tech. Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS)*, pp. 2256–2261, Portland, OR, Sept. 2002.

## 付録. 電離層遅延量データセットの作成

電離層遅延の影響を調査するにあたり、電離層活動の活発さに応じた適当なデータセットが必要である。データセットは少なくとも MSAS モニタ局と同じ位置で取得されている必要があるが、それ以外の位置におけるデータを利用することで、サンプリング密度に関する問題などを検討することもできる。

電離層遅延量を観測する方法はいくつかあるが、ここでは二周波受信機による搬送波位相の測定値を用いて、電離層遅延量の周波数依存性により遅延量を算出することとした。整数不定性およびサイクルスリップについては、適当な方法で除去してある。二周波観測では衛星毎および受信機毎に固有の周波数間バイアスが問題となるが、適当な電離層モデルを仮定して最小二乗法を適用することによりこれを直接解き、観測データから除去することとした。電離層モデルとしては、250,350,450km の各高度に薄膜状の電離層を仮定し、水平方向については 3 次の球面調和関

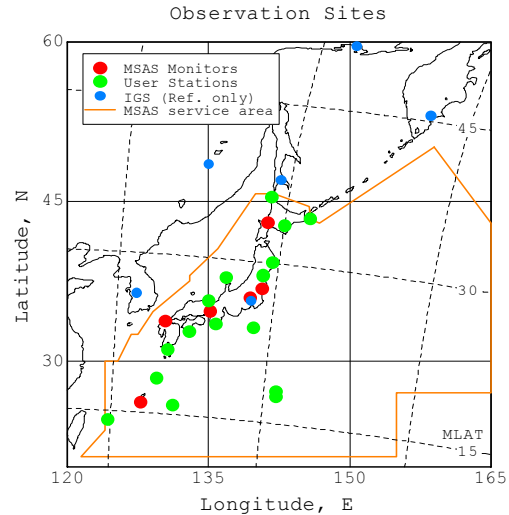


図 8. 電離層遅延量データセットの作成に利用した観測局の配置。(赤) MSAS モニタ局に対応させた GEONET 局, (緑) ユーザ局にみたてた GEONET 局, (青) IGS 局。

数を用いた (電離層モデルの未知数は 48 個となる)。最小二乗法の処理にはカルマンフィルタを適用した。周波数間バイアスの推定処理にあたっては、仰角マスクを最適値である 15 度とした [3]。周波数間バイアスの推定結果は異なる時期についても整合しており、推定処理は正しく行われている。最終的なデータセットとしては、周波数間バイアスの推定結果をもとの観測データから除去し、仰角マスク 5 度の電離層遅延量データとする。

GPS 受信機による観測データは、国土地理院の GEONET から得た。利用した観測局の配置を図 8 に示す。30 秒毎の観測値が RINEX ファイルに収められており、これに対して周波数間バイアスの推定処理を実行し、以降の解析で用いるデータセットを得た。国内のモニタ局だけではバイアス推定処理が安定しないため、周辺国に設置されている IGS モニタ局のデータも利用した。

データセットは、静穏日および擾乱日に対応したサンプルを作成することとした。具体的には、それぞれ次の時期のデータを用いた。

**静穏日** 2002 年 6 月 27 日

**磁気嵐** 2003 年 10 月 29～31 日

前者は 1 日を通して KP 指数が 1 以下となっており、電離層活動がたいへん穏やかな日であった。一方、後者は大規模な磁気嵐の代表例であり、その発生が新聞でも報道されたほどであった。