

準天頂衛星を用いる 高精度測位実験



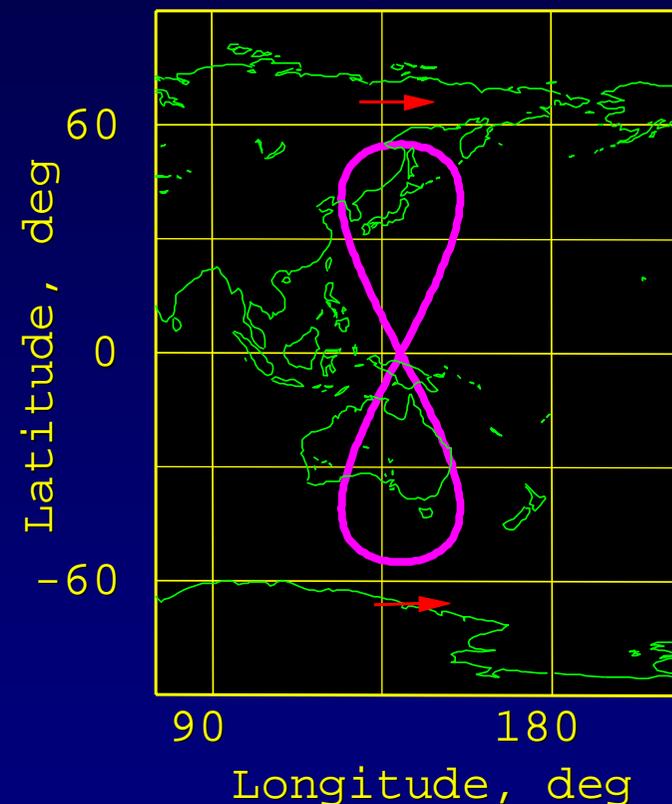
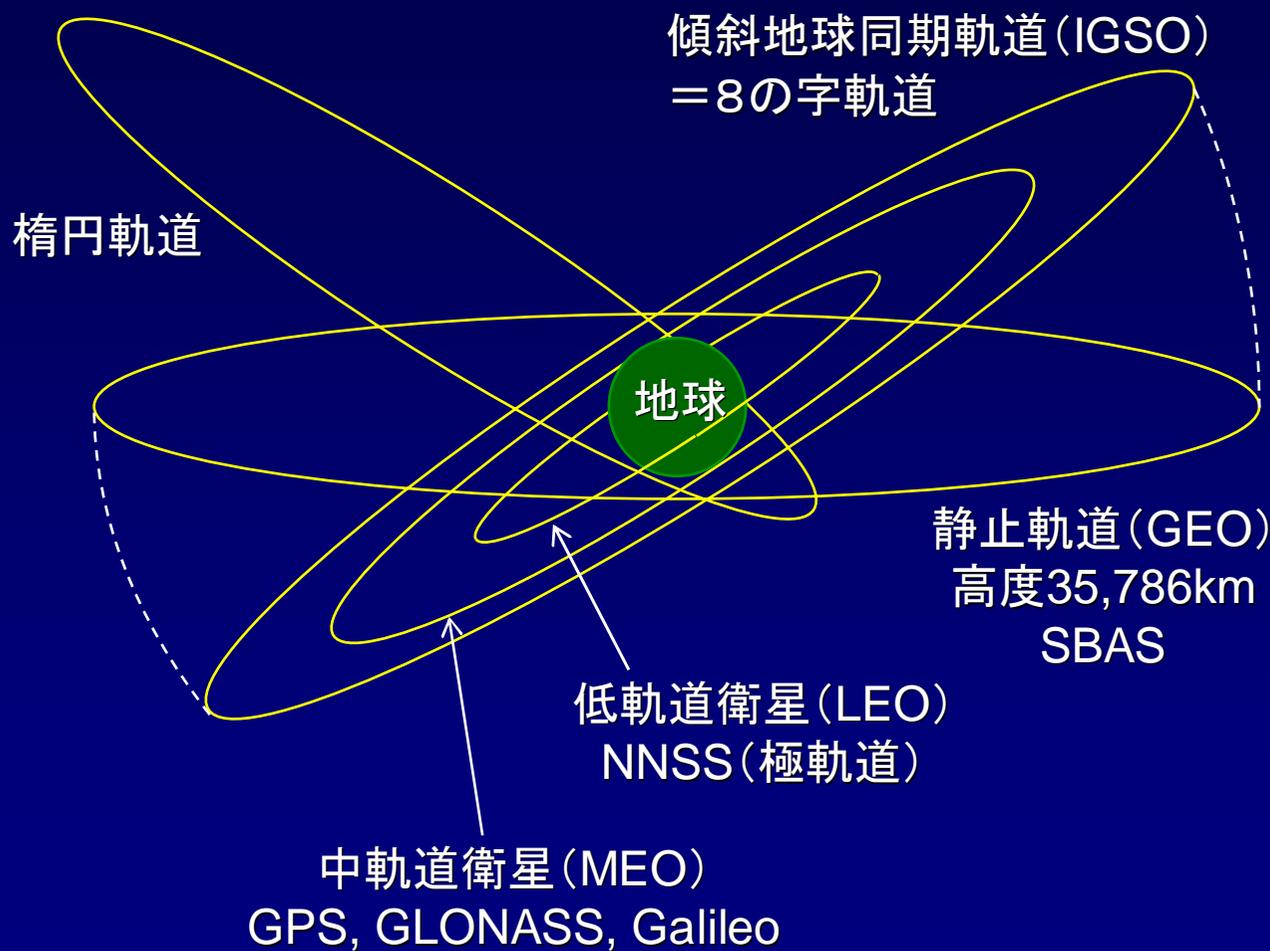
坂井 丈泰、福島 莊之介、武市 昇、伊藤 憲
電子航法研究所

Introduction

- 準天頂衛星システム(QZSS):
 - 8の字形の軌道により、3機の衛星で24時間運用。
 - 静止衛星と比べて仰角を高くできるため、山間部や都市部での測位・放送ミッションに有利。
 - L1/L2/L5の補完信号(GPS互換信号)と補強信号を計画。
 - 2009年度に1号機を打上げ予定。
- L1-SAIF補強信号:
 - SBAS(静止衛星による補強システム:MSAS)互換の信号形式により、サブメートル級の測位精度とインテグリティ機能を提供する。
 - 電子航法研究所が開発を担当。
 - オフラインの試験システムをすでに整備、試験中。現在はリアルタイム化に向けて作業中。

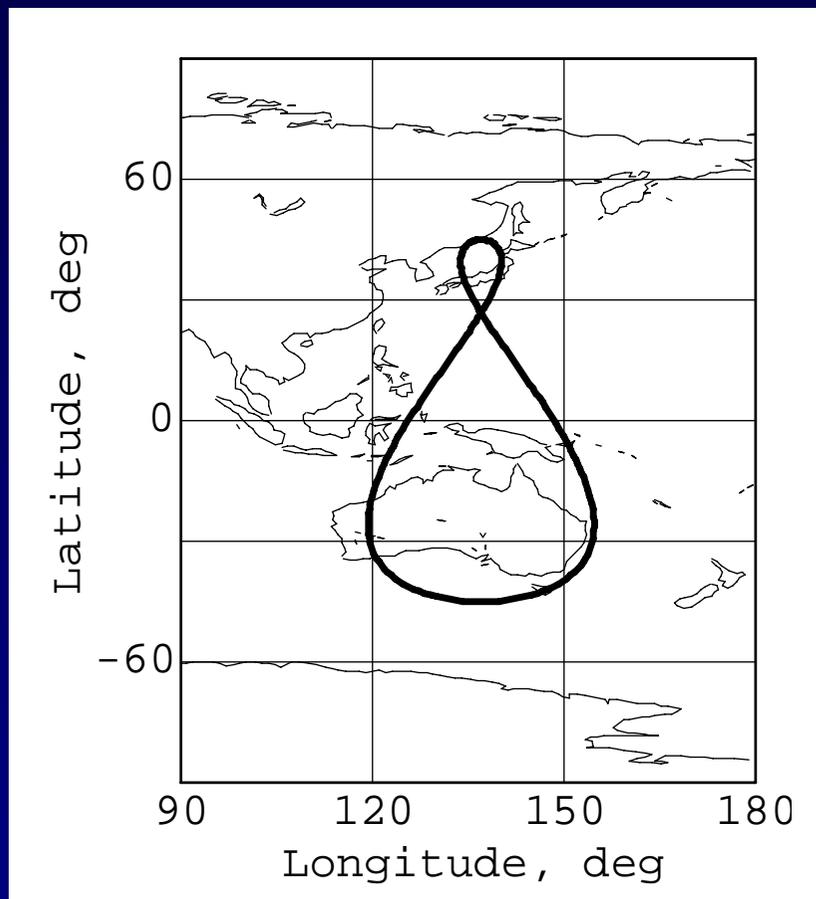
(1) 準天頂衛星システム計画と
L1-SAIF補強信号の開発

準天頂衛星の軌道



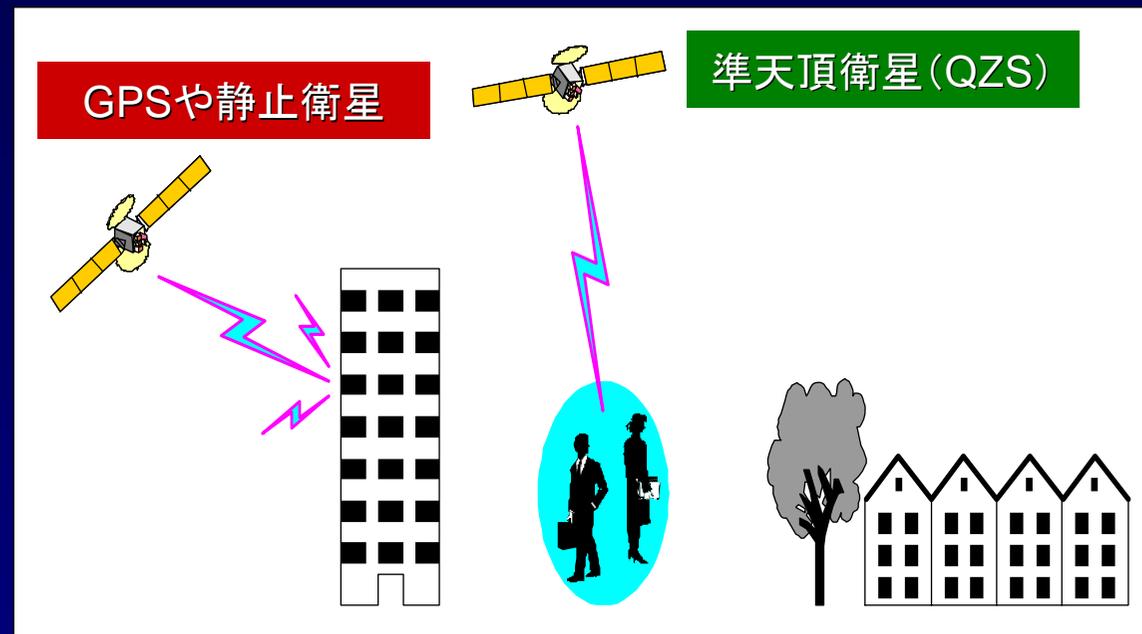
- 東経140度を中心に配置した場合の地上軌跡の例
- 離心率0、軌道傾斜角55度

準天頂衛星のメリット



東経135度を中心に配置

離心率0.1 軌道傾斜角45度



- 高仰角からサービスを提供可能。
- 山間部や都市部における測位・放送ミッションに有利。

準天頂衛星計画

1. 各国の状況

(a) GPS近代化計画（米国）： L2C、L5、GPSブロックIII（L1C）

(b) ガリレオ計画（欧州）： 試験機打上げ（2005.12.28）

(c) 北斗（中国）： 軍用、1号機（2003.5） コンパス計画

2. 準天頂衛星計画（日本）： 8の字軌道による地域的測位システム

内閣府：総合科学技術会議 宇宙開発委員会

「我が国における測位衛星システムのあり方」（2003.12）

※要素技術の開発を推進

測位地理システム等推進会議 計画見直し（2006.3）

◆第1段階：国主体のプロジェクト

・ 1号機打上げ（2009）→技術実証（4省）、利用実証（民間）

◆第2段階：官民合同プロジェクト

・ 2、3号機打上げ→システム実証（官民）、事業化判断

準天頂衛星の測位技術開発

◆ GPS補完信号(L1C, L2, L5) : 宇宙航空開発研究機構



◆ 広域補強信号(L1-SAIF) : 電子航法研究所



■ 国産の広域DGPS技術開発

■ 目標精度:サブメートル級(1m程度)

◆ 衛星搭載原子時計技術 : 情報通信研究機構, 産業技術総合研究所



◆ ネットワークRTK技術 : 国土地理院

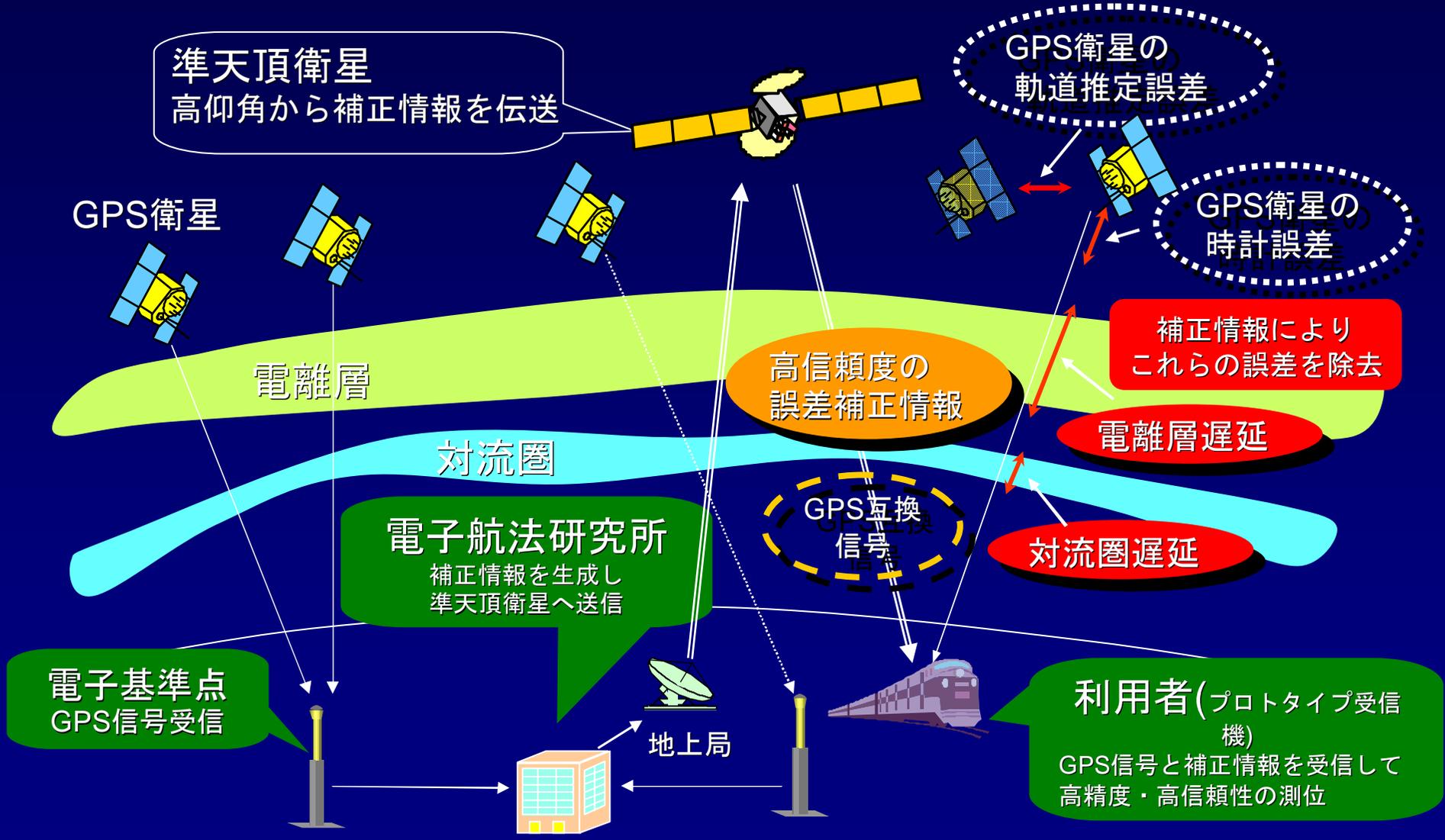
◆ ユーザ側技術 : 国土技術政策総合研究所, 交通安全公害研究所



年次計画

H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22
		補正情報リアルタイム生成システム開発			実証試験		
補正情報生成方式開発							
方式調査・検討	方式評価	リアルタイム処理システム開発			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		

実験システム概念図



高精度測位実験の概要(1)

準天頂衛星を用いる高精度測位補正技術

(高精度・高信頼性の測位補正方式の開発)

- 目的

鉄道などの高速移動体の安全性向上に寄与する
高精度測位システムの実現

- 特徴

- ① 高精度: 目標測位精度は1メートル程度
- ② 高信頼性: 利用者が安心して使えるシステム
- ③ SBAS(静止衛星によるGPS補強システム)方式に基づいて開発

高精度測位実験の概要(2)

- 研究項目
 - ① 完全性監視方式開発(信頼性の確保)
 - ② 大気遅延推定方式開発(精度向上)
 - ③ 補正情報生成・配信方式の開発
 - ④ プロトタイプ受信機の開発
 - ⑤ 機能・性能確認のための実証試験を実施

(2)L1-SAIF補強信号の概要

サブメータ級補強信号(L1-SAIF)

- GPS L1周波数で放送する補強信号：
 - GPSと同一のアンテナ・フロントエンドで受信可能。
 - L1-SAIF信号 (Submeter-class Augmentation with Integrity Function)。
 - 「補完」ではなく「補強」: 衛星が増えるだけでなく、補強情報も放送。
- 我が国全域を対象としたディファレンシャル補正情報：
 - 広域ディファレンシャルGPS (WADGPS)。
 - ベクトル補正方式: 衛星軌道、クロック、電離層遅延をそれぞれ別々に補正。
 - 補強対象: GPS、準天頂衛星、(ガリレオ)。目標精度=1m。
 - すでに実用化されているSBASをベースとして開発: 受信機側ソフトウェアの負担を抑える。
- インテグリティ情報あり：
 - 信頼性の高い位置情報を提供。
 - 移動体用途における安全確保。

L1帯補完・補強信号の比較

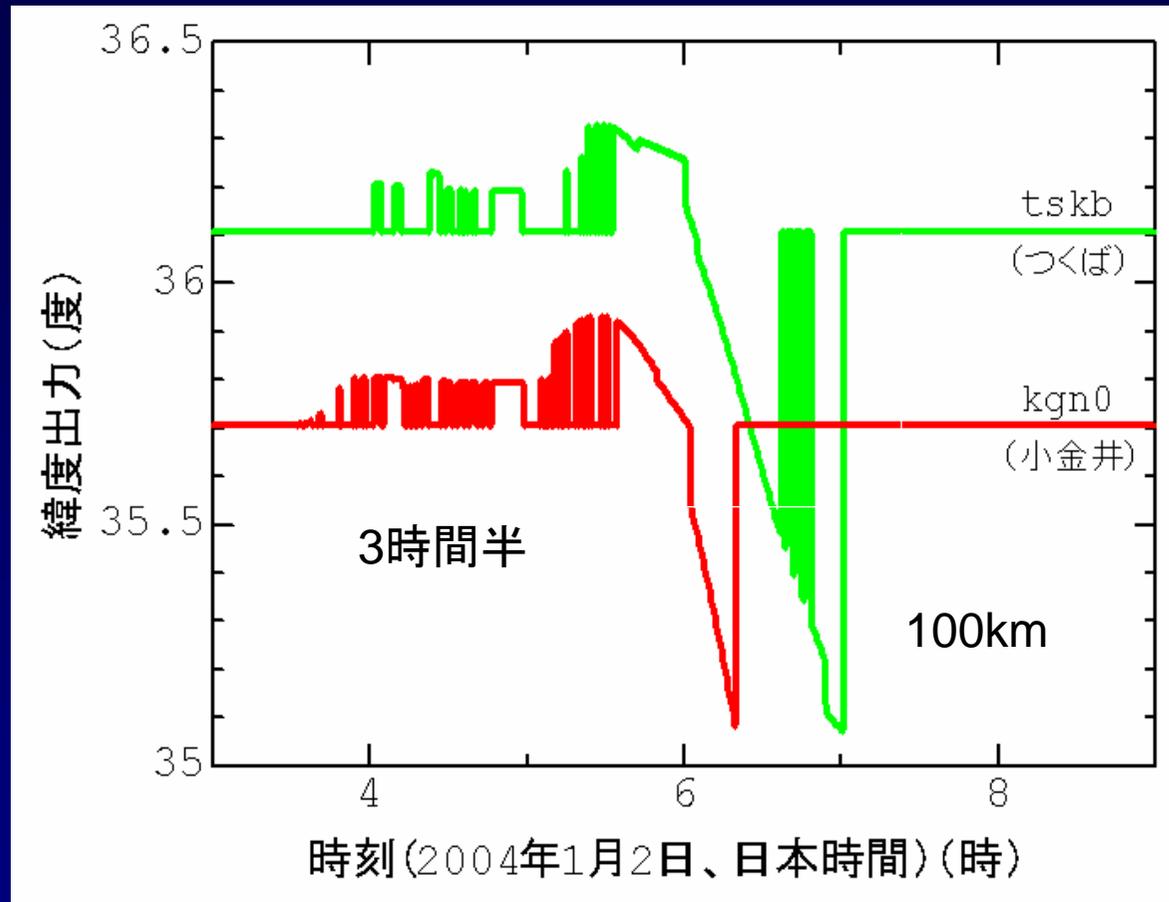
信号の種類	測距信号		測位機能			安全・緊急応用	
	既存受信機で受信可	測距機能	軌道・クロック情報	ディファレンシャル補正	TTF改善	インテグリティ情報	災害情報等放送
L1C信号 (補完信号)	×	◎	○	×	× (他衛星は不可)	×	×
L1-SAIF信号 (補強信号)	△ (要改修)	○ (L1-C/Aと同じ)	○	◎ (1mより良い)	○ (全衛星が対象)	◎	○
L1-C/A信号 (補完信号)	△ (要改修)	○	○	×	×	×	×
(参考)MSAS (補強信号)	○ (SBAS対応受信機)	○ (L1-C/Aと同じ)	○	○	×	◎	×

- L1-SAIFは、L1-C/Aの機能をすべて含む。
- L1-C/Aであっても、既存受信機では受信できない(PRNコードや航法メッセージがGPSとは異なる)。
- TTF(time to first fix) : 最初に位置情報が出力されるまでの時間。

インテグリティ

- 完全性 (integrity) : 航法システムが出力する位置情報の正しさ。「GPSが出力している経緯度は果たして正しいか？」
 - 実際に異常な位置を出力する例がある。
- 万が一、位置情報に誤りがあると危険な応用 (safety-of-life application) がある：
 - 交通機関 (特に航空機) の航法・測位、衝突防止。
 - 精密農業等、工作機械の自動運転。
 - 犯罪捜査や事故記録関係。
- **GPSはインテグリティを保証していない。**
 - 精度や信頼性の規定はあるが、インテグリティについては規定なし。
 - GPSだけでは安全性を確保できない。
 - 航空分野では、国の責任でインテグリティ確保の仕組みを整備 (MSAS)。

異常測位の実例



- 2004年1月2日 (JST) 明け方にPRN23衛星が故障。位置出力で100kmの誤差。
- 3時間半後によろやくPRN23衛星が使用不可とされ、復旧した。
- 受信機によって反応が異なる: ディファレンシャル処理では補正できない
→ 正しい対処にはインテグリティ情報が必要

(3) SBAS方式による広域ディフ
アレンシヤル補正

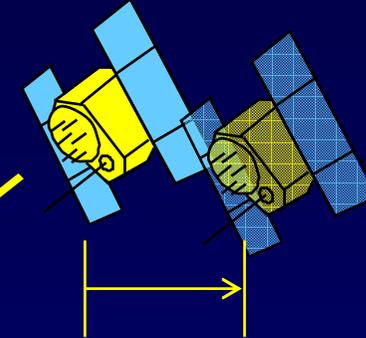
SBASとは

- ICAO(国際民間航空機関)が規格化した広域ディファレンシャルGPS方式による補強システム
 - 補正(補強)情報は静止衛星から放送。
 - 大陸規模の広い地域で有効な補正情報。
 - GPSと同一のアンテナ・受信回路でディファレンシャル補正情報が得られる。
- 開発／運用中のSBAS:
 - 米国WAAS 2003年7月より運用中。
 - 欧州EGNOS 2005年7月より試験運用中。
 - 日本MSAS MTSAT-1Rを使用して試験中。
 - カナダCWAAS WAASをカナダにも拡張中。
 - インドGAGAN 開発中。

広域ディファレンシャル補正方式

衛星クロック誤差

- ユーザ位置の関数ではない
- すべてのユーザに対して同じ寄与
- SA ONなら速い変動



電離層遅延 (~100m)

- ユーザ位置の関数
- 垂直構造は薄膜で近似など

電離層

衛星軌道情報の誤差

- ユーザ位置の関数ではない
- 寄与の程度はユーザ位置による (視線方向成分が問題)
- 変動の周期は数10分以上

対流圏遅延 (~20m)

- ユーザ位置 (特に高度) の関数
- モデルによる補正が有効

対流圏

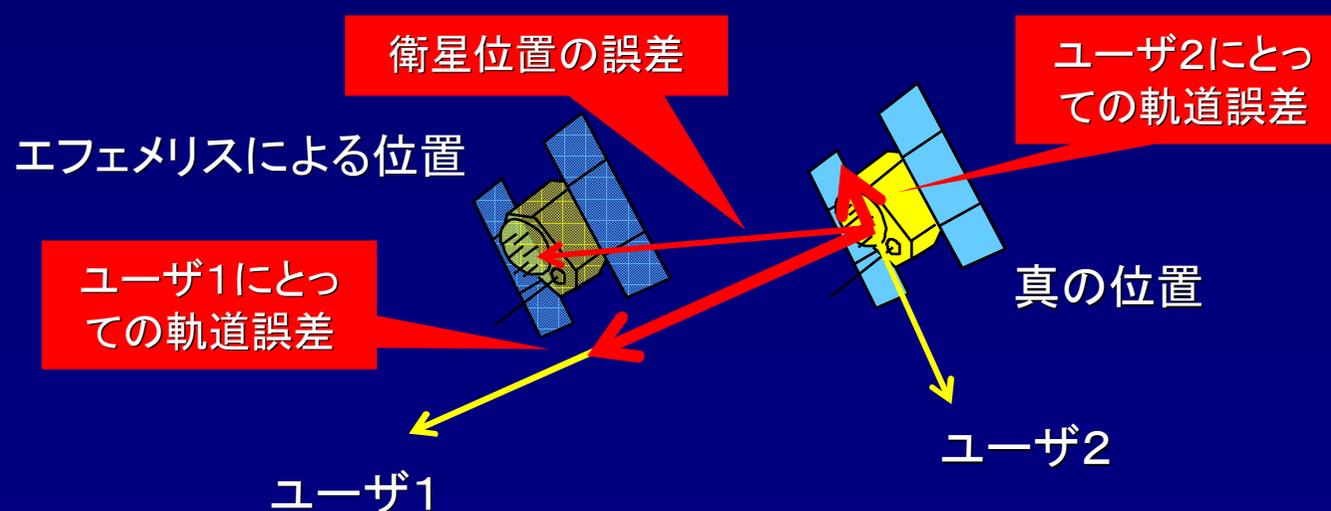


補正情報の内容

- **衛星クロック補正**: エフェメリスから得た衛星クロックに対する補正量。
- **衛星軌道補正**: エフェメリスから得た衛星のECEF直交座標値に対する補正量。 Δx 、 Δy 、 Δz の3成分。
- **電離層遅延補正**: 経緯度で5度毎に設定された格子点(IGP)における垂直遅延量として放送。
 - ユーザ側ではあらかじめ決められた内挿法(双一次線形補間)により必要な位置(IPP)における遅延量を得る。
 - 垂直構造は薄膜で近似。衛星の仰角により垂直→傾斜変換。
- **対流圏遅延補正**: モデルにより遅延量を計算する。
 - 衛星の仰角により垂直→傾斜変換する。
 - 拡張メッセージについては今回は考慮しない。

クロック／軌道誤差分離(1)

- 対流圏遅延・電離層遅延を除いた測距誤差は、衛星クロック誤差と軌道情報の誤差の線形結合。
- クロックと軌道誤差の性質の違いを利用して、これらを分離：
 - 衛星クロック誤差：すべてのユーザに一律な誤差となる。
 - 軌道誤差：ユーザ位置によって影響が異なる。それぞれのユーザにとっての視線方向成分が誤差として現れる。

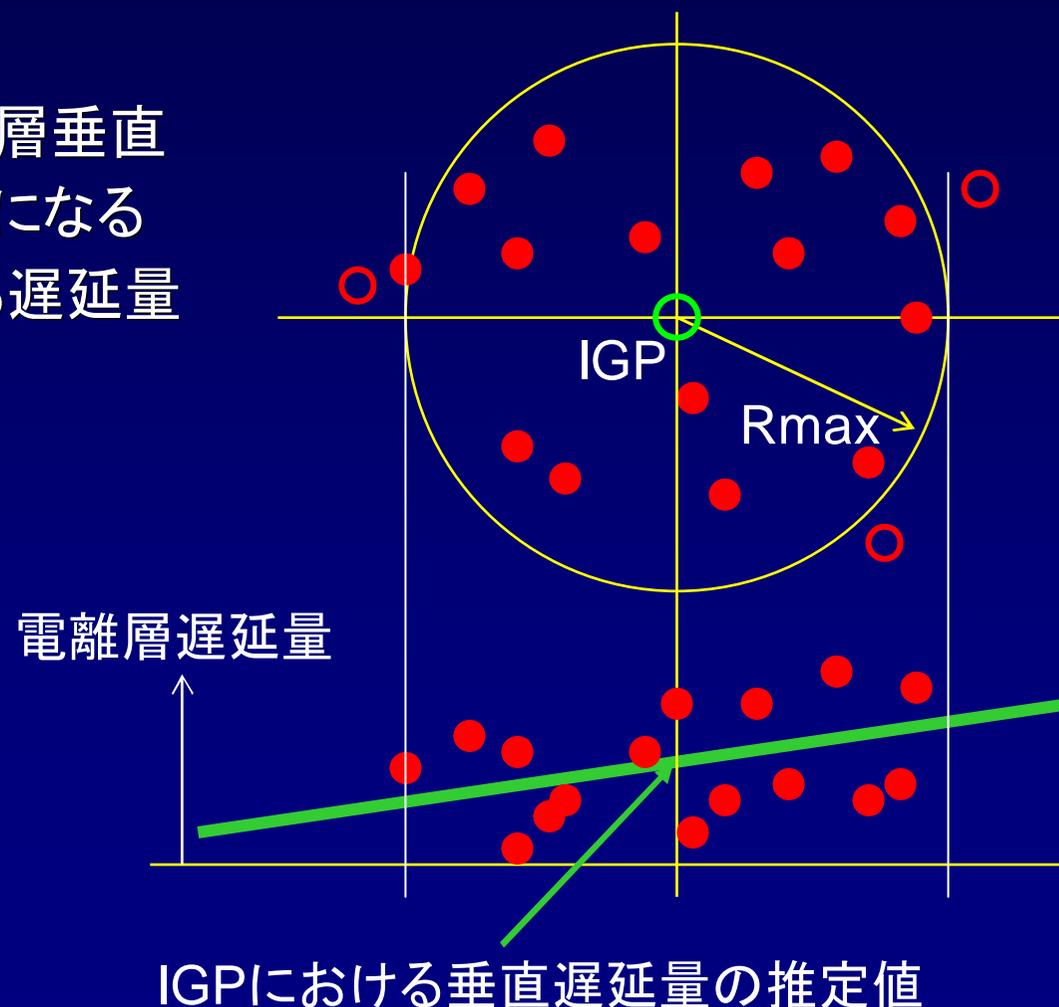


クロック／軌道誤差分離(2)

- マルチパス誤差などを避けるため、比較的長い時定数を持たせてカルマンフィルタで処理する。
- 多数のモニタ局が幾何学的にまんべんなく分布しているほうが分離しやすい：
 - ただし、ディファレンシャル補正を行うことが目的なので、**必ずしも完全に分離する必要はない**。
 - モニタ局はサービスエリア内となるべく広い面積をカバーするように配置するとよい。
- 精密軌道情報がリアルタイムに取得できる場合は、それを利用してよい。
 - サービスエリア端においても有効な補正情報を期待できる。

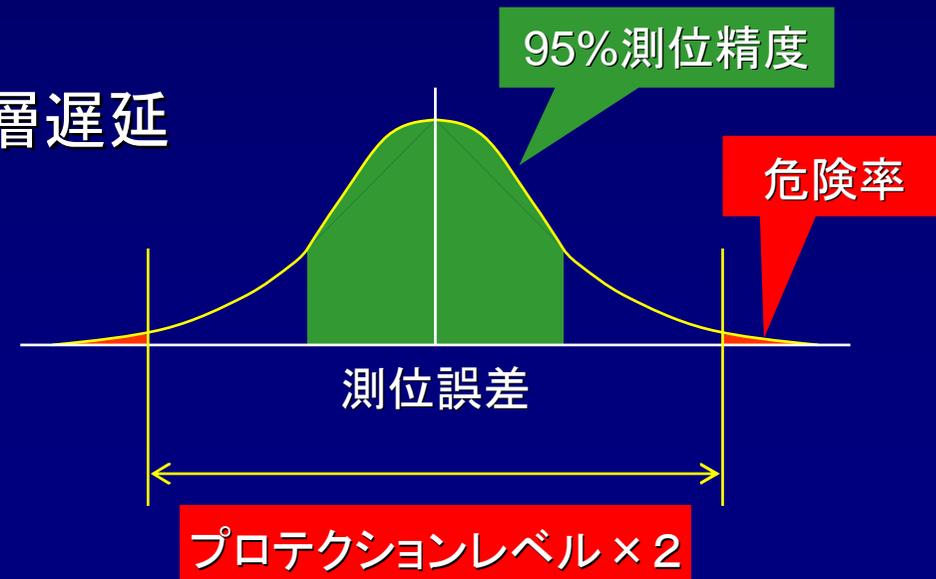
電離層伝搬遅延補正

- MSAS/WAASが採用しているプレーナフィット (planar fit) 方式:
 - **平面モデル**: IGP周辺の電離層垂直遅延量が経緯度の一次関数になるものとして、IGP位置における遅延量を求める。
 - **周波数間バイアス**: 電離層遅延量の測定で問題となる周波数間バイアス (IFB) は、リアルタイムに推定・除去。
- 推定処理は1分毎に実行 (IFB推定は10分毎)



インテグリティ情報

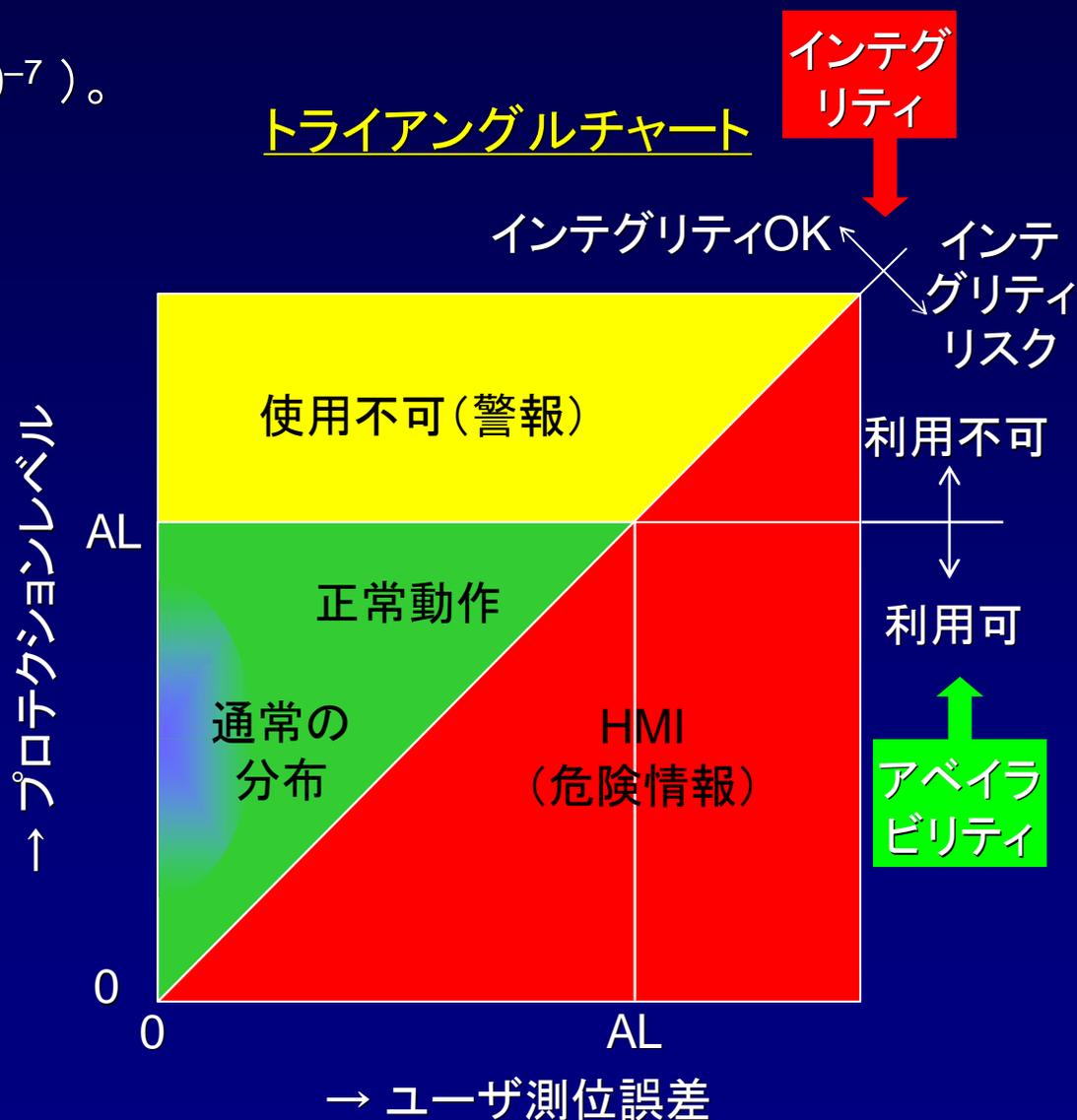
- プロテクションレベル方式: ユーザ測位誤差の上限をプロテクションレベルと呼び、これを計算するためのパラメータをユーザに放送する。
- ユーザ受信機側では、与えられたパラメータから自己の位置におけるプロテクションレベルを求めることで、測位誤差の上限がわかる。
- パラメータ: 測距誤差・電離層遅延補正残差の不確実性など
- 上限を超える確率
= インテグリティリスク



プロテクションレベルの使い方

- ユーザ測位誤差の上限値(危険率 10^{-7})。
- 水平方向:HPL、垂直方向:VPL
- PLと警報限界(Alert Limit)を比較し、
AL<PLなら利用不可とする:
ユーザ測位誤差はALを超えない。
- プロテクションレベルの計算に
必要なパラメータがインテグリティ
情報として放送される。

航法モード	垂直AL (VAL)
垂直誘導付進入 APV-I	50 m
垂直誘導付進入 APV-II	20 m
精密進入 CAT-I	10~15 m



(4) L1-SAIF補強メッセージの 設計

補強メッセージの検討

- 目的: 日本全域に対して有効な広域補強情報をリアルタイムにユーザに伝送し得るメッセージ構成であること。
- 制約: データレートは **250bps 以内**。
- すでに実用化されているSBAS(静止衛星による補強システム)メッセージをベースとする。
 - 静止衛星依存部分は準天頂衛星向けに変更する。
 - 電離層・対流圏伝搬遅延については、高精度化が可能な拡張メッセージを検討する。
 - 実現可能な測位精度について予備検討が必要(量子化単位は12.5 cmのままでよいか?)。
- 実際にSBASベースの補強メッセージで所要の性能が達成できるか? → **プロトタイプにより評価した。**

補強メッセージ設計方針

- 前提条件：
 - サブメータ級の測位精度が実現可能。
 - SBASに対して可能な限りの互換性。
- 既存SBAS受信機は、L1-SAIF信号は受信しない。
 - PRNコードが異なるので、受信できない:誤動作の恐れはない。
- 現行SBASメッセージに対して**完全上位互換**とする。
 - クロック・軌道補正等の基本的な補強情報は、SBASと同一のメッセージとする。
 - 追加メッセージは電離層遅延補正および追加機能(TTFF改善や災害情報等放送など)で定義・利用。数個程度を想定。
 - L1-SAIF対応受信機は、同一の処理ルーチンでSBASメッセージも処理できる:L1-SAIFに対応すれば、MSASにも自動的に対応する。
 - L1-SAIF ICDは、SBAS SARP_sを若干簡略化する方針。

SBASメッセージ(1)

プリアンブル 8ビット	メッセージタイプ 6ビット	データ領域 212ビット	CRCコード 24ビット
----------------	------------------	-----------------	-----------------

250ビット

メッセージ タイプ	内 容	更新間隔 (秒)	メッセージ タイプ	内 容	更新間隔 (秒)
0	テストモード(使用不可)	6	17	GEOアルマナック	300
1	PRNマスク情報	120	18	IGPマスク情報	300
2~5	高速補正(FC+UDRE)	60	24	高速補正・長期補正	6
6	インテグリティ情報(UDRE)	6	25	長期補正	120
7	高速補正の劣化係数	120	26	電離層遅延補正(+GIVE)	300
9	GEO航法メッセージ	120	27	WAASサービスメッセージ	300
10	劣化係数	120	28	クロック・軌道情報共分散	120
12	SBAS時刻情報	300	63	NULLメッセージ	—

SBASメッセージ(2)

補正の種類	記号	ビット数	分解能	補正範囲
高速補正	FC	12	0.125 m	±256 m
長期補正(衛星位置)	$\delta x, \delta y, \delta z$	11	0.125 m	±128 m
長期補正(衛星速度)	$\delta \dot{x}, \delta \dot{y}, \delta \dot{z}$	8	2^{-11} m/s	±0.0625 m/s
電離層遅延補正	Vertical Delay Estimate	9	0.125 m	63.875 m

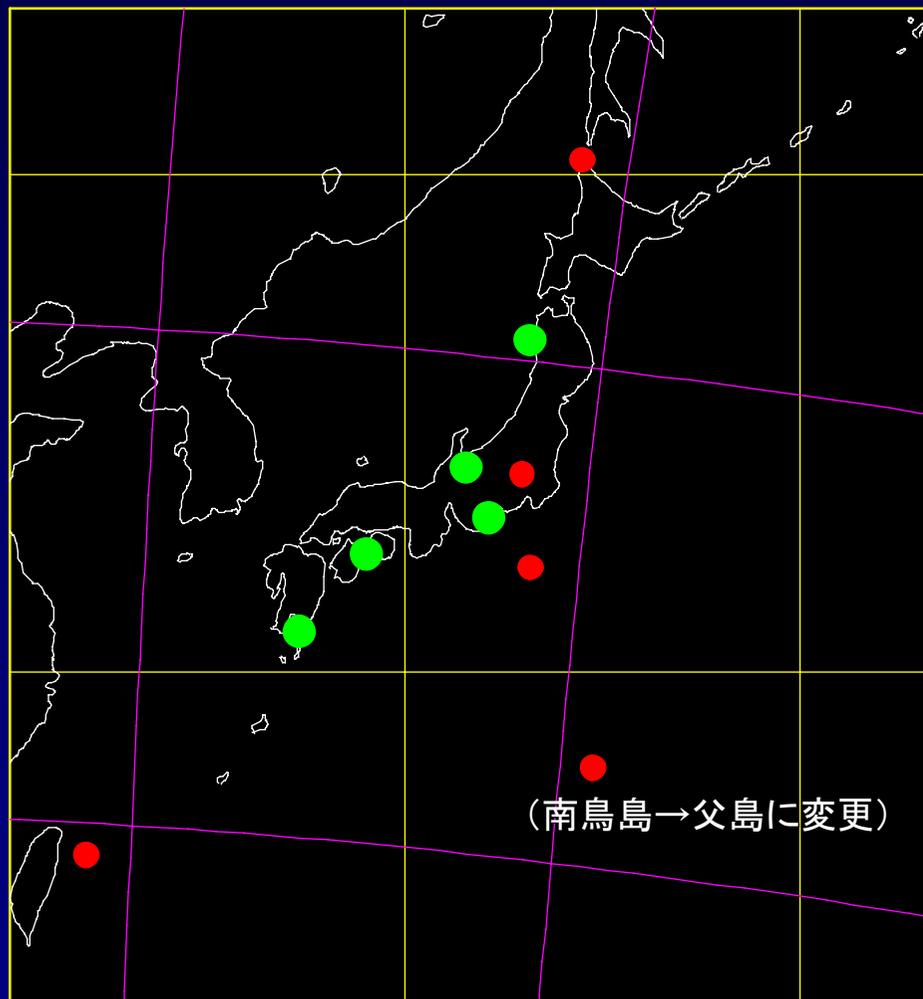
ビット内容	FC劣化係数	UDRE	GIVE	URA(静止衛星)
0	0 mm/s ²	0.0520 m ²	0.0084 m ²	2 m
1	0.05 mm/s ²	0.0924 m ²	0.0333 m ²	2.8 m
2	0.09 mm/s ²	0.1444 m ²	0.0749 m ²	4 m
3	0.12 mm/s ²	0.2830 m ²	0.1331 m ²	5.7 m
:	:	:	:	:
13	3.30 mm/s ²	2078.695 m ²	20.787 m ²	2048 m
14	4.60 mm/s ²	Not Monitored	187.0826 m ²	4096 m
15	5.80 mm/s ²	Don't Use	Not Monitored	Don't Use

(5) プロトタイプシステム

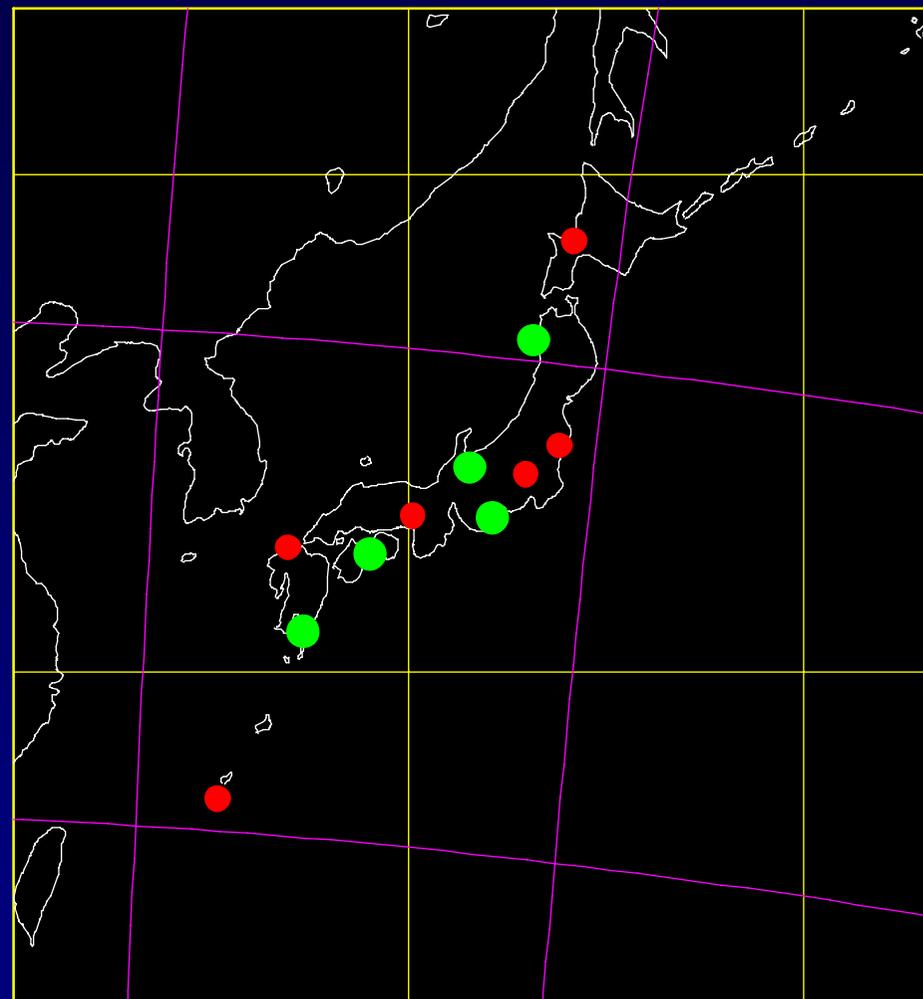
プロトタイプシステムの開発

- PCまたはUNIX上で動作する**プロトタイプシステム**を実装した。
 - RINEX形式の観測データを利用して、実際にSBAS形式の補強メッセージを生成する。
 - **研究開発用テストベッド**: 補強情報生成アルゴリズムやパラメータをさまざまに変えて、補強性能を調べることができる。
- 利用するのは**二周波の擬似距離のみ**。
 - 国土地理院GEONETのデータを使用(30秒サンプル)。
 - 搬送波位相は使わない: キャリアスムージングもしない。
 - 当面は補強対象はGPSのみ: 準天頂衛星の観測データが無いから。
- SBASメッセージを出力:
 - 完全なSBASメッセージ(250ビット長)を毎秒生成、ファイルに記録。
 - **毎秒250ビット**のデータレート。
 - NovAtelフォーマット(\$FRMAレコード)を流用。

モニタ局配置(1)

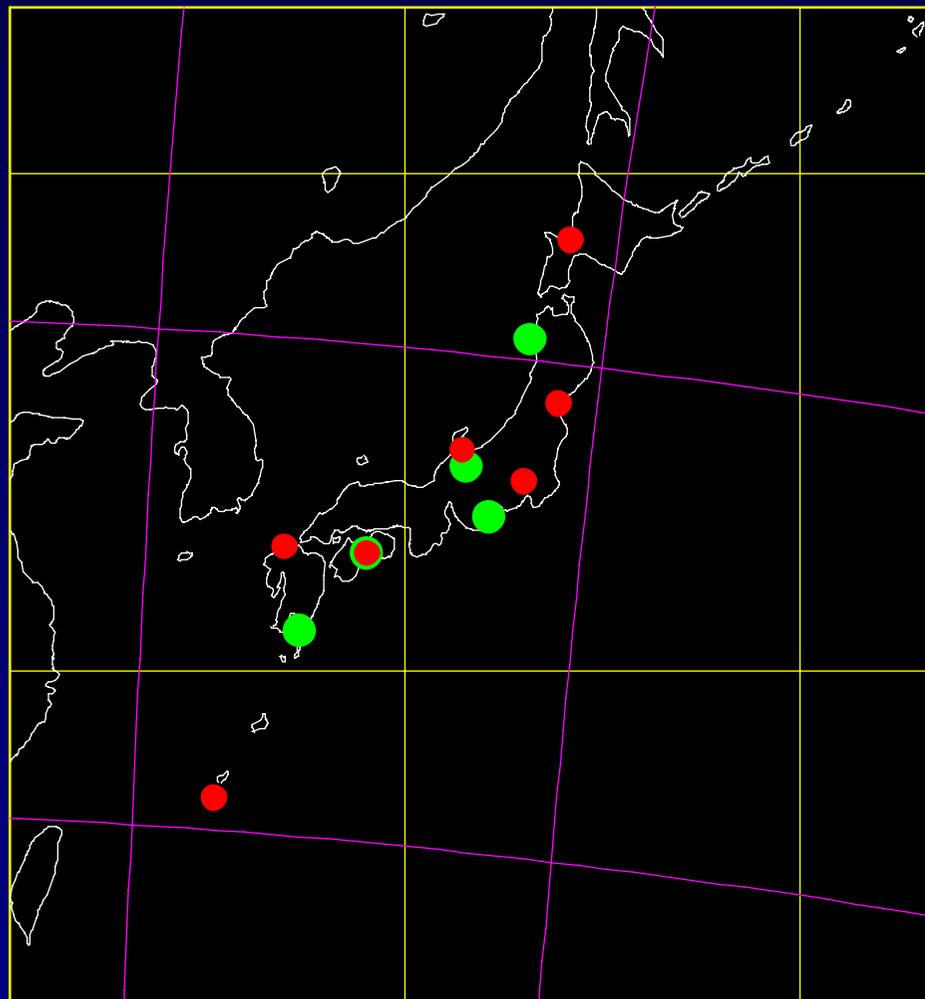


PT/5
JAXAが設置するQZSSモニタ局候補地



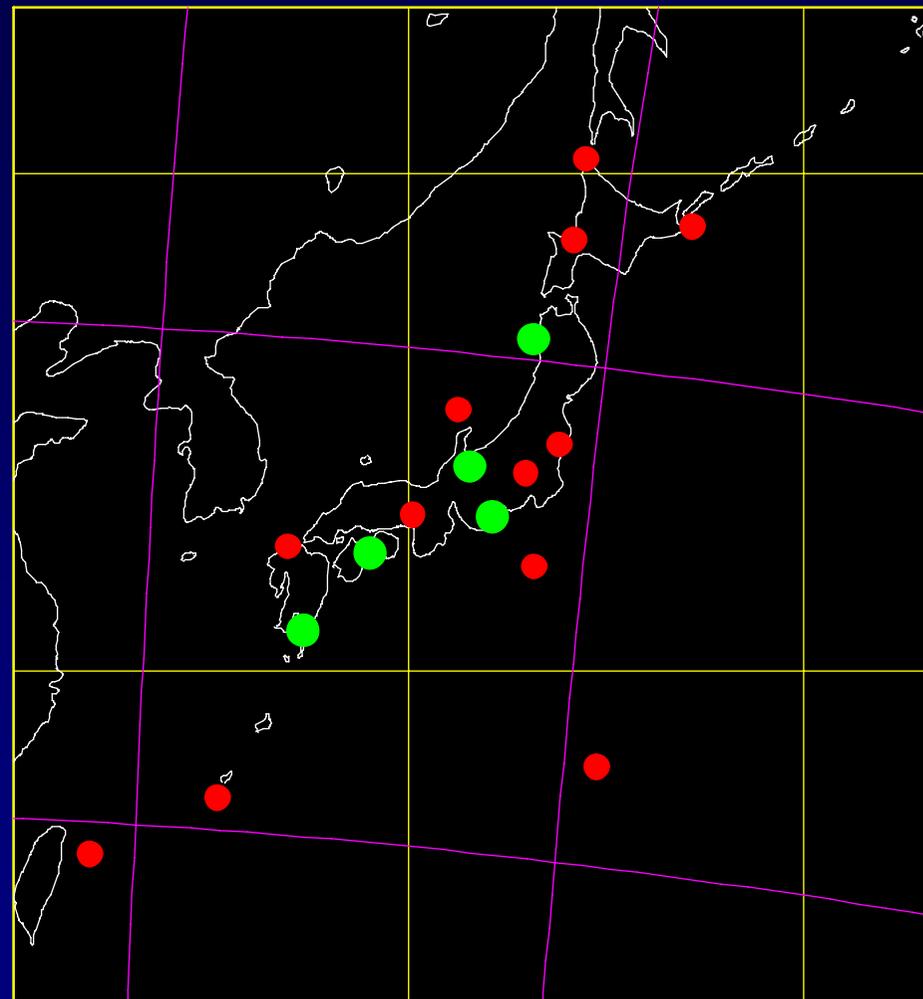
MSAS および PT/6
MSASの国内モニタ局

モニタ局配置(2)



PT/7

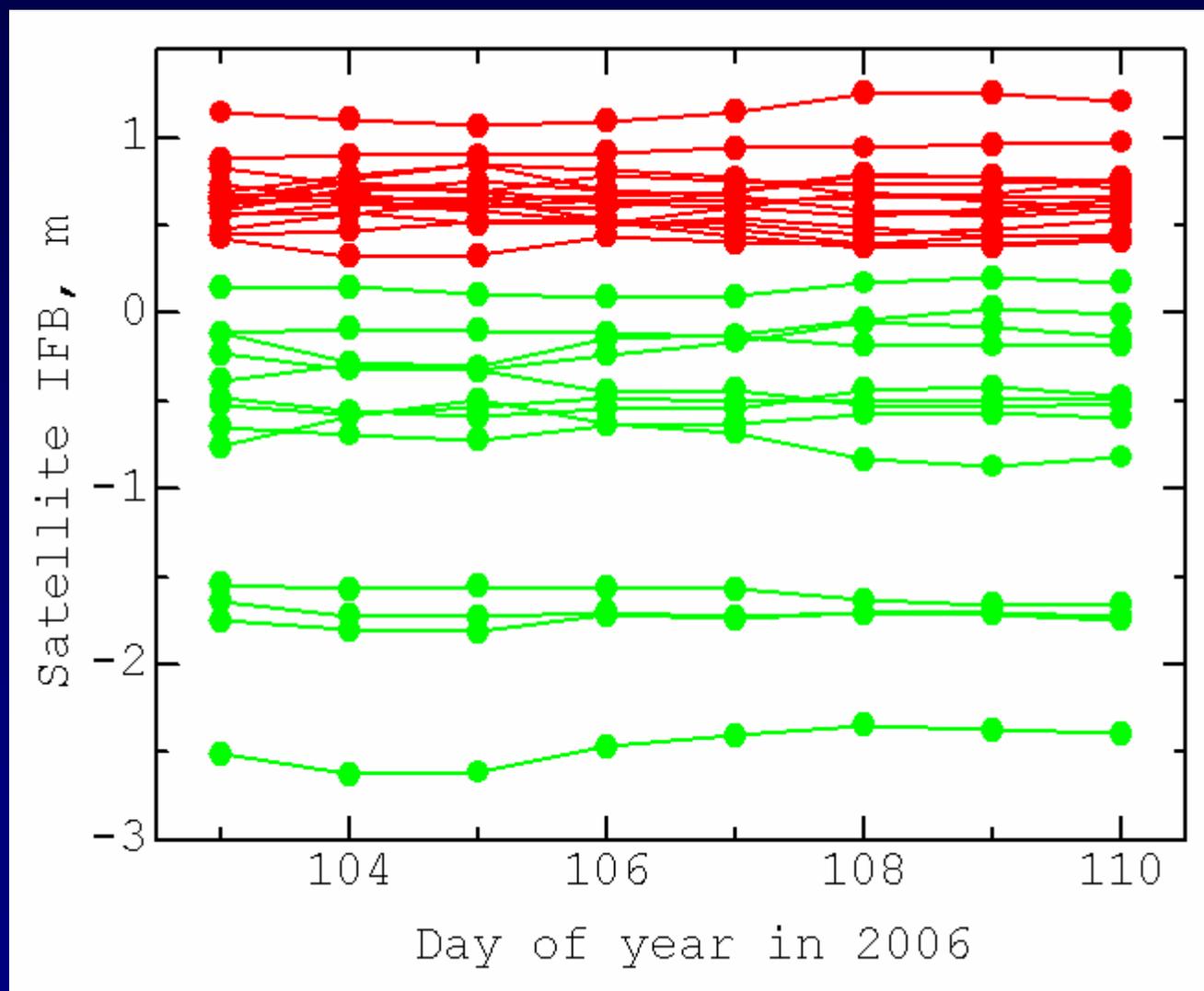
当所のリアルタイムモニタ局



PT/12

PT/5 + PT/6 + さらに2局

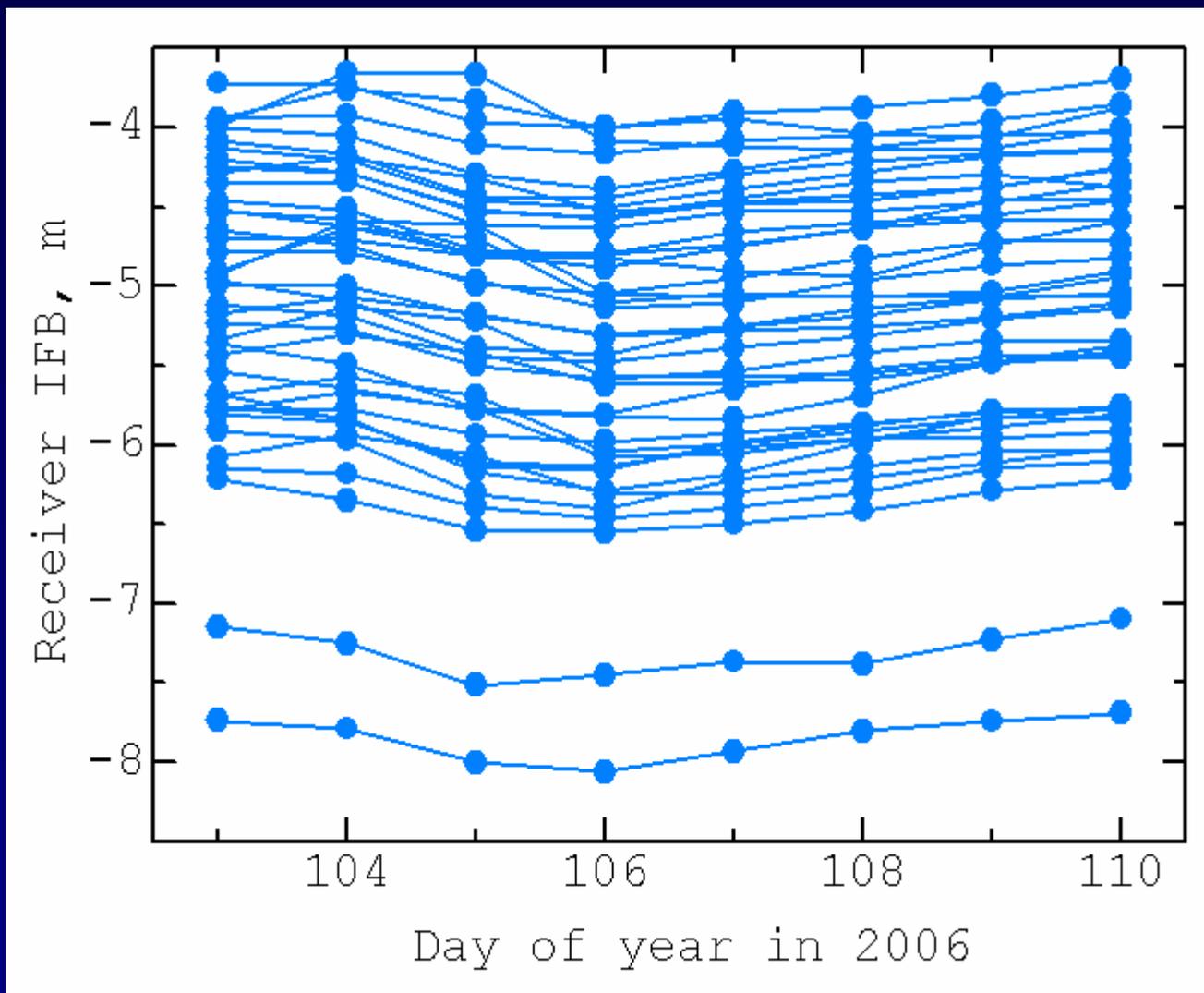
バイアス推定例(衛星側)



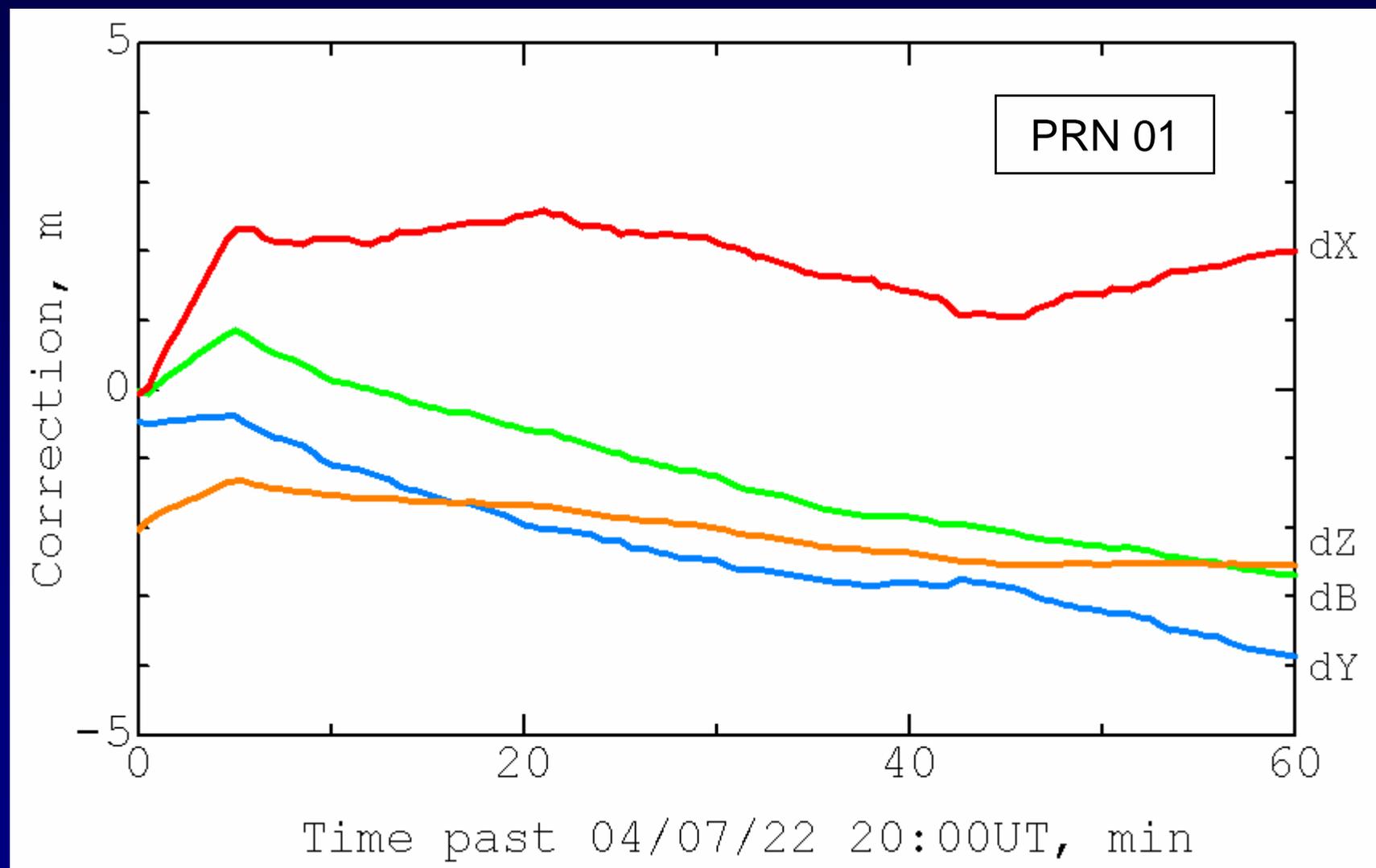
ブロックII/IIA

ブロックIIR

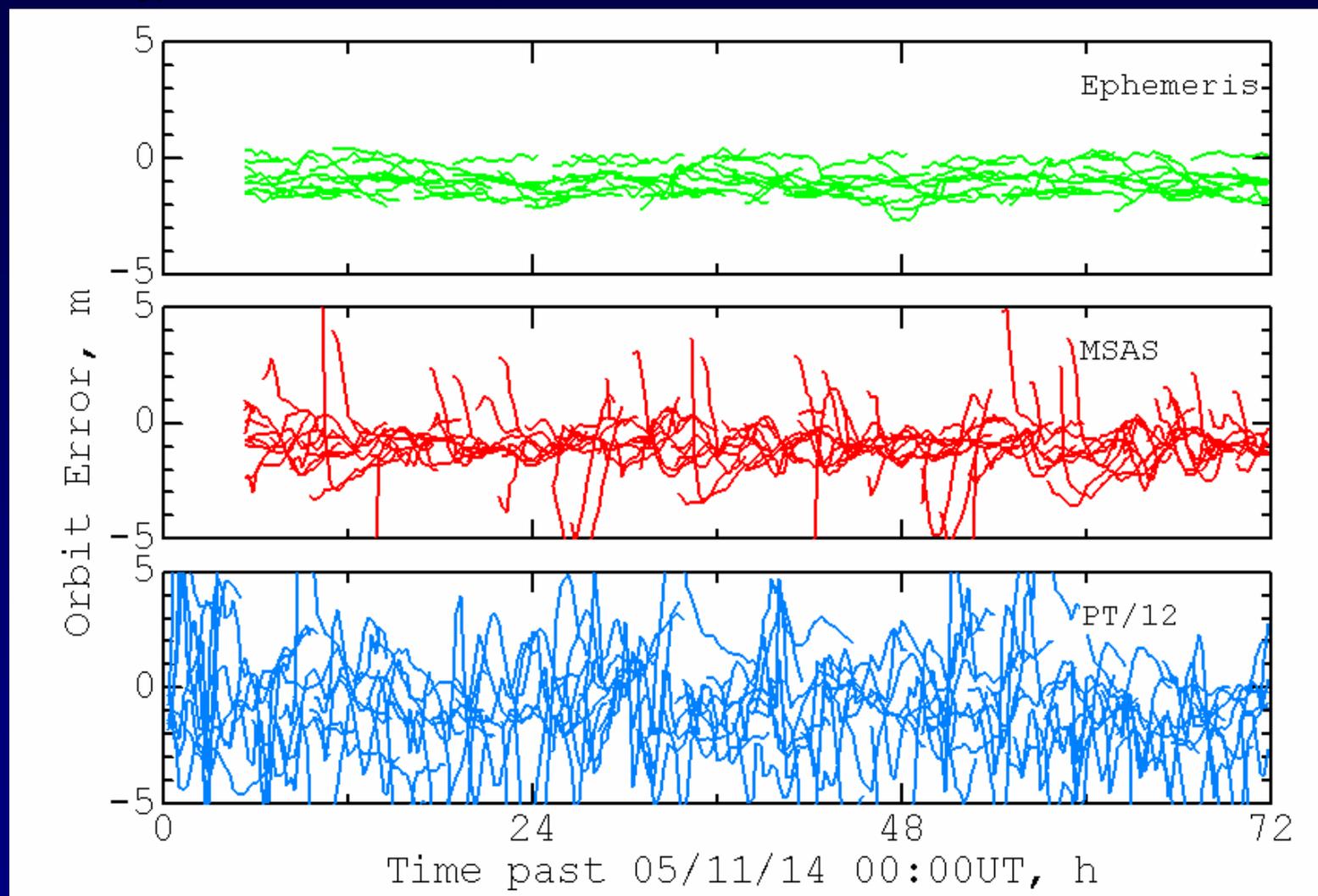
バイアス推定例(受信機側)



補正量のサンプル

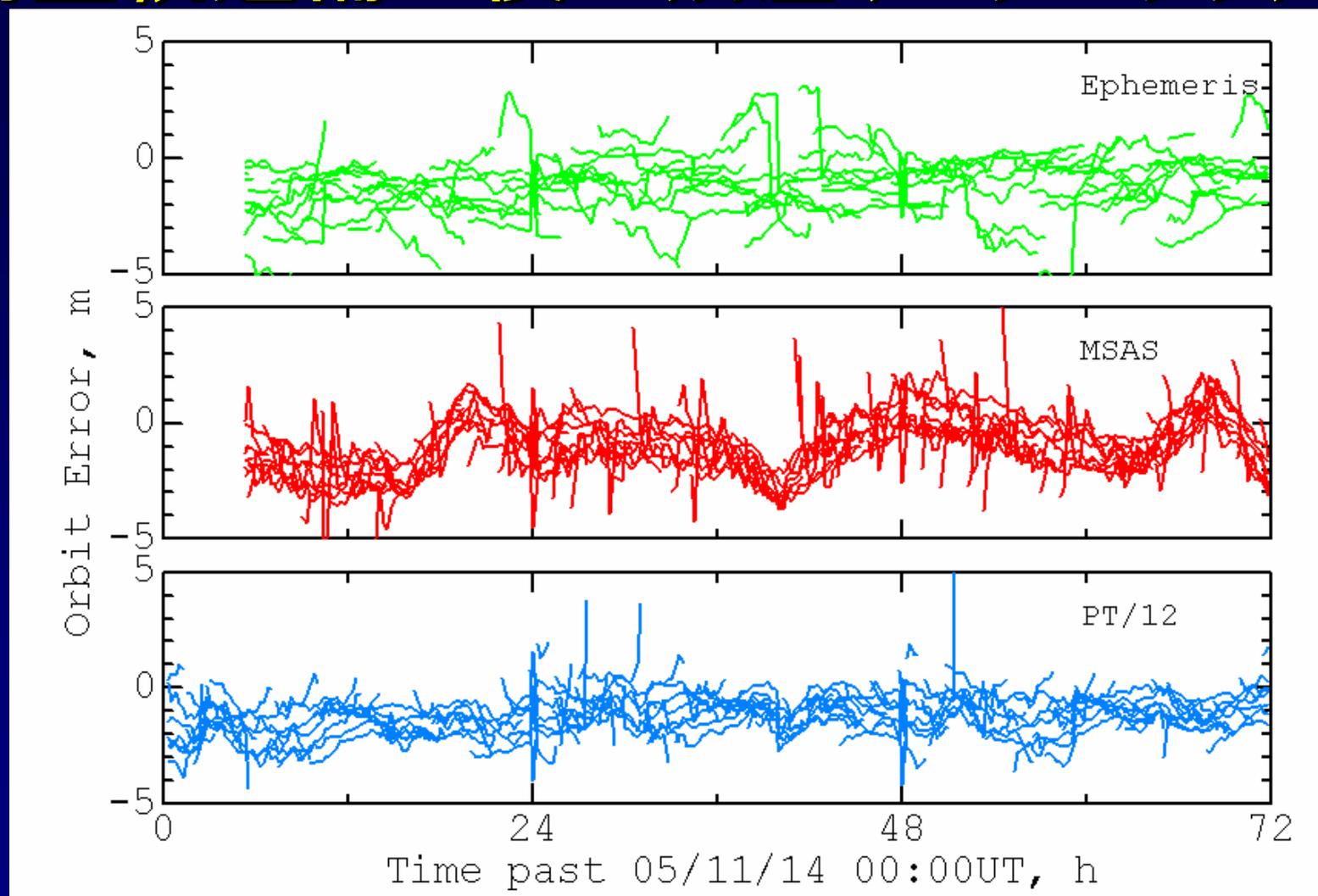


衛星軌道補正後の残差(対IGS)



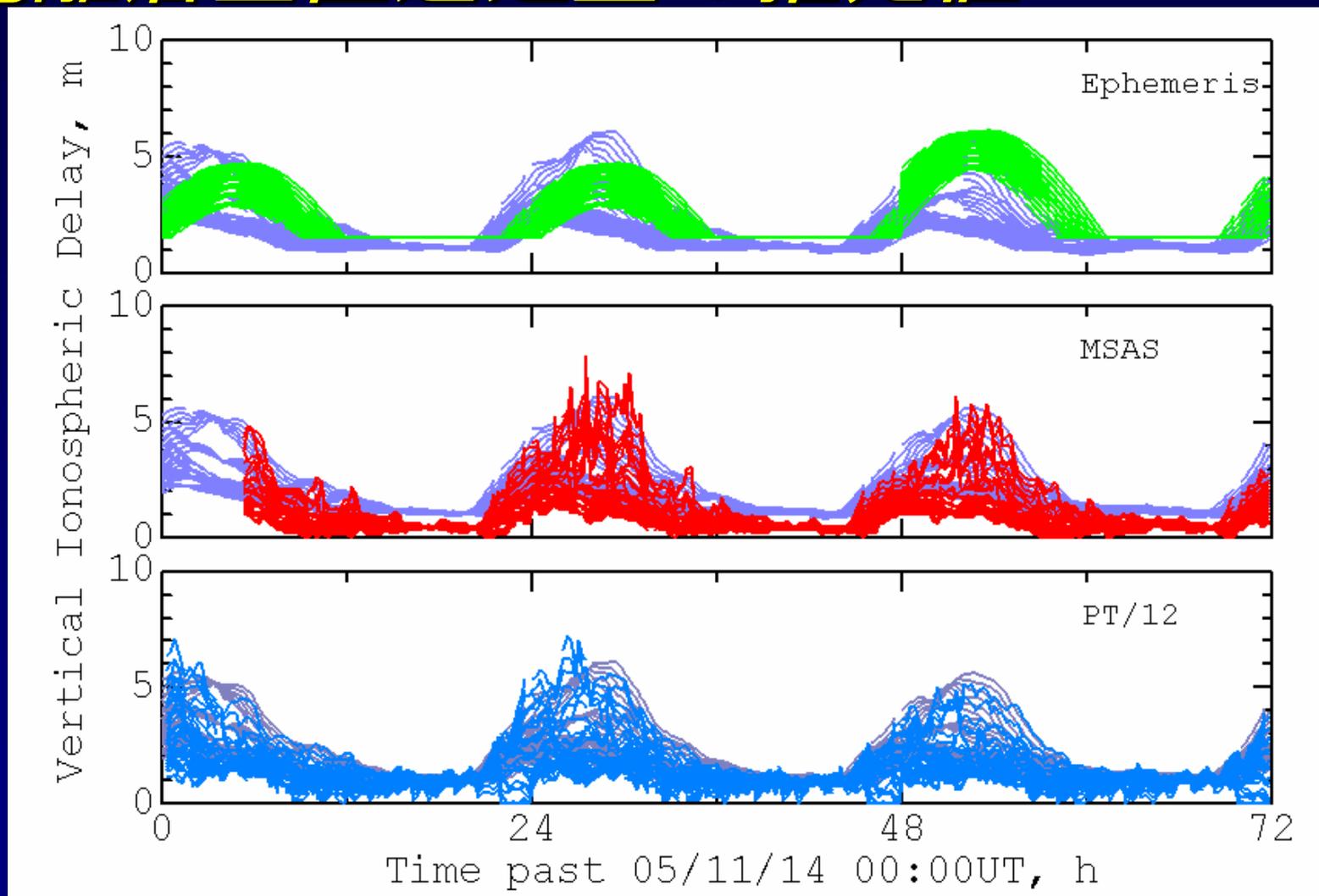
- 衛星軌道補正後のIGS精密軌道暦との差の、東京から見た視線方向成分。
- プロタイプシステムでは軌道補正があまり良くない;モニタ局が国内のみで不利。

衛星軌道補正後の残差(＋クロック)



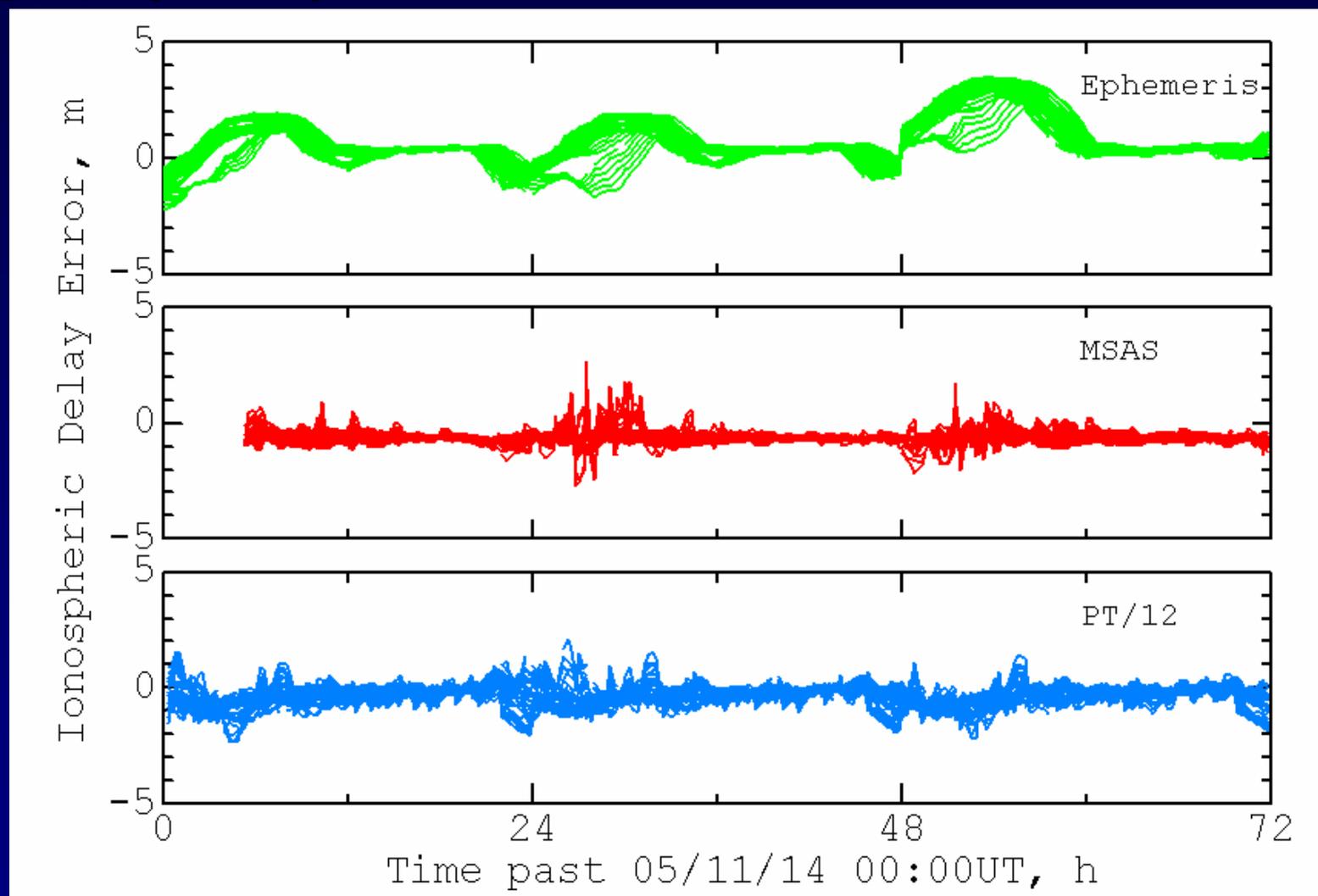
- 衛星クロックも含めた正味の視線方向成分。
- プロトタイプシステムの残差が小さい;国内では良い補正值といえる。

電離層垂直遅延量の推定値



- 各IGPにおける電離層垂直遅延量を重ねて表示。
- 背景はIGSによる電離層TECデータベース(IONEXファイル)による推定値。

電離層垂直遅延量(対IGS/IONEX)^{SLIDE 40}

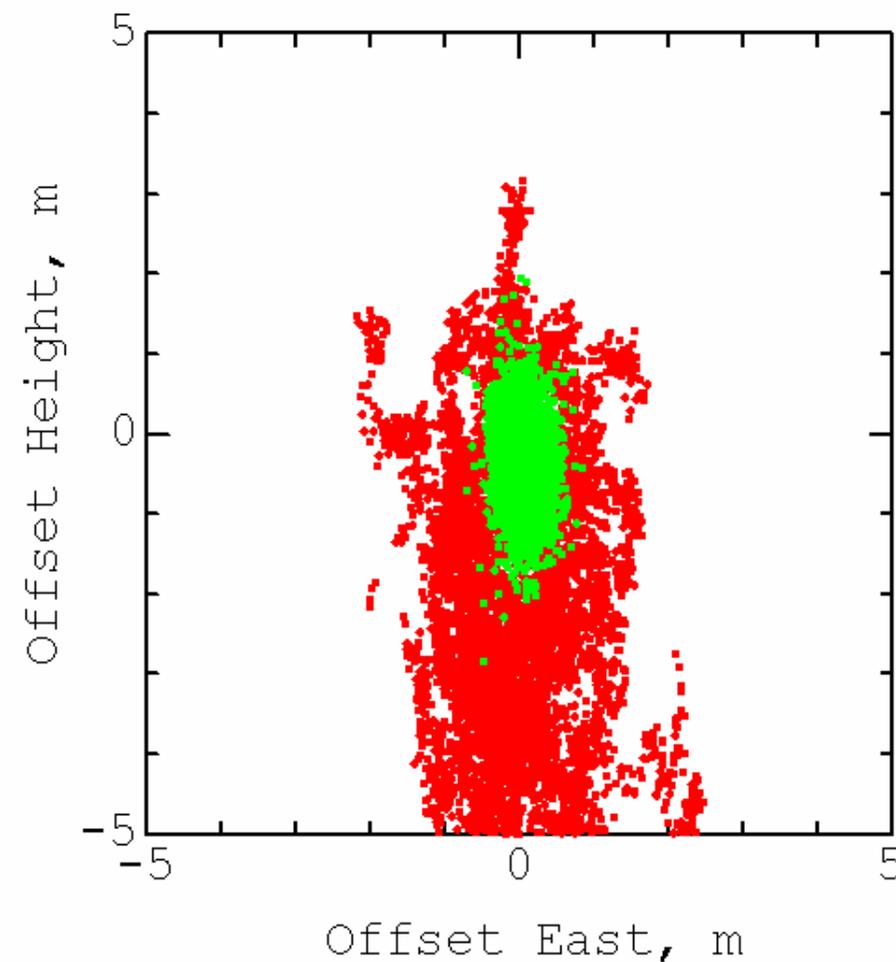
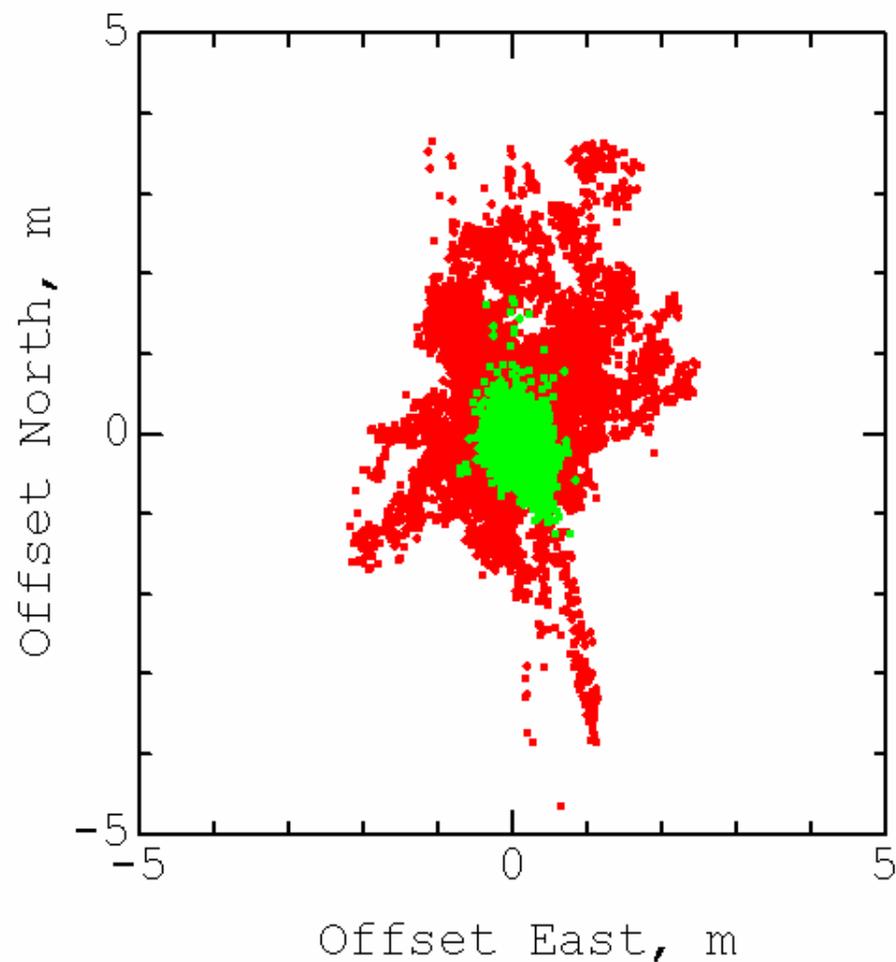


- 各IGPにおける電離層垂直遅延量の、IGS/IONEXとの差。
- いずれの補強システムも、若干の負のバイアスがある：RMSでは半減。

ユーザ測位誤差の評価

- SBASユーザ受信機シミュレータ:
 - PC/UNIX上で動作する計算機プログラム。
 - ユーザ局における観測データ(RINEXファイル)を入力として、測位計算を実行する。
 - SBAS補強メッセージも入力された場合、これを適用する。
 - 測位結果のほか、プロテクションレベルも計算。
 - SBAS補強メッセージは、NovAtelフォーマット(\$FRMAレコード)で入力する。
- 一周波の擬似距離のみを利用:
 - 搬送波位相は使わないが、キャリアスムージングは適用。
 - 国土地理院GEONETの観測データRINEXファイル(30秒サンプル)を処理対象とした。
 - 航法ユーザを想定し、出力フィルタはなし。

ユーザ測位誤差(高山:PT/7)



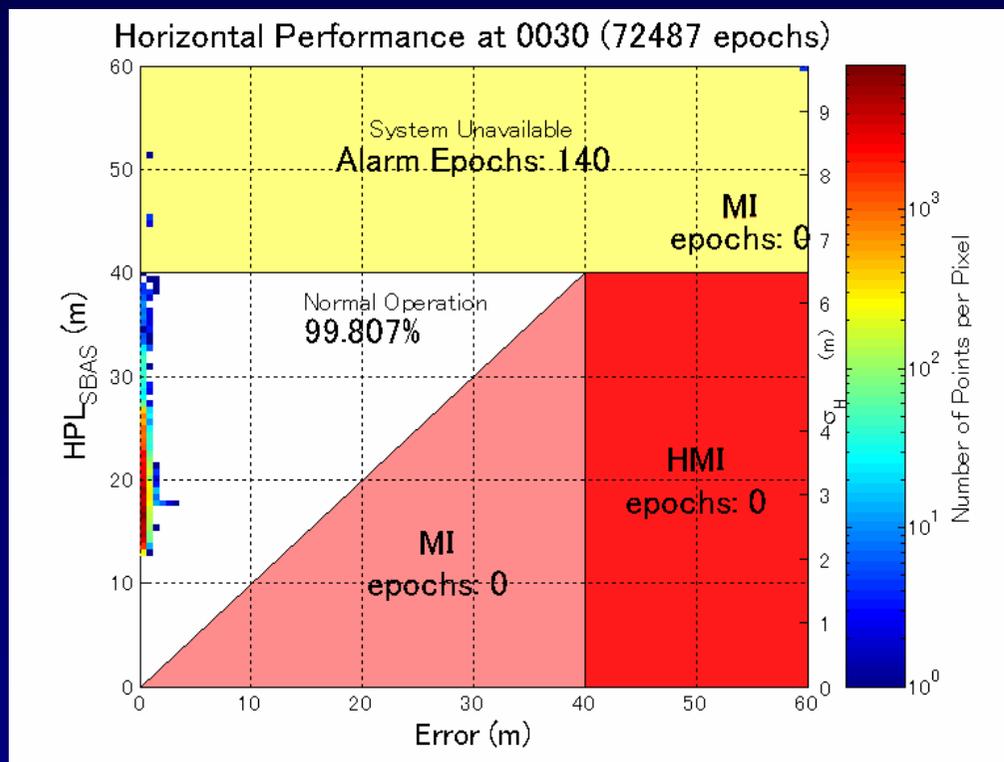
ユーザ測位精度

単位 [m]

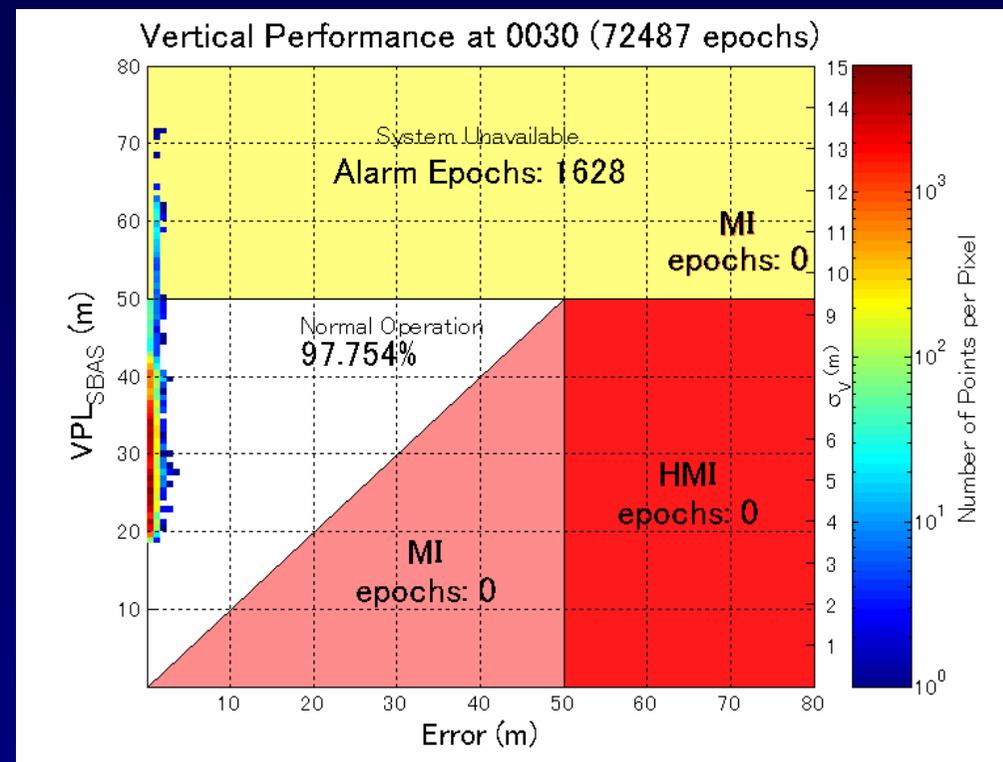
補強システム		男鹿		御前崎		高山		高知		佐多	
		水平	垂直								
GPS 単独測位	RMS	1.30	3.58	1.37	3.63	1.39	3.63	1.50	3.72	1.77	3.40
	最大	3.71	8.45	5.13	8.76	4.70	10.9	5.63	11.8	8.60	9.53
MSAS	RMS	0.38	0.63	0.43	0.67	0.50	0.73	0.64	0.88	0.64	0.73
	最大	1.66	2.41	2.04	3.60	4.87	3.70	8.52	9.40	3.01	2.68
PT/5	RMS	0.44	0.67	0.47	0.89	0.45	0.72	0.57	1.07	0.69	0.99
	最大	2.78	2.95	2.27	3.21	2.30	3.33	2.21	5.19	4.64	4.50
PT/6	RMS	0.33	0.51	0.32	0.70	0.30	0.56	0.38	0.76	0.53	0.71
	最大	2.01	2.91	1.46	3.14	1.85	3.06	1.81	6.01	5.02	4.05
PT/7	RMS	0.32	0.50	0.38	0.67	0.29	0.54	0.40	0.68	0.55	0.68
	最大	1.96	3.08	1.41	3.05	1.68	2.86	1.81	6.02	4.35	3.52
PT/12	RMS	0.29	0.49	0.32	0.71	0.31	0.57	0.40	0.83	0.56	0.88
	最大	1.87	2.95	1.95	3.29	1.68	3.12	1.64	5.41	4.81	4.02

(一周波、30秒サンプル、キャリアスムージングあり)

測位誤差とプロテクションレベル(1)



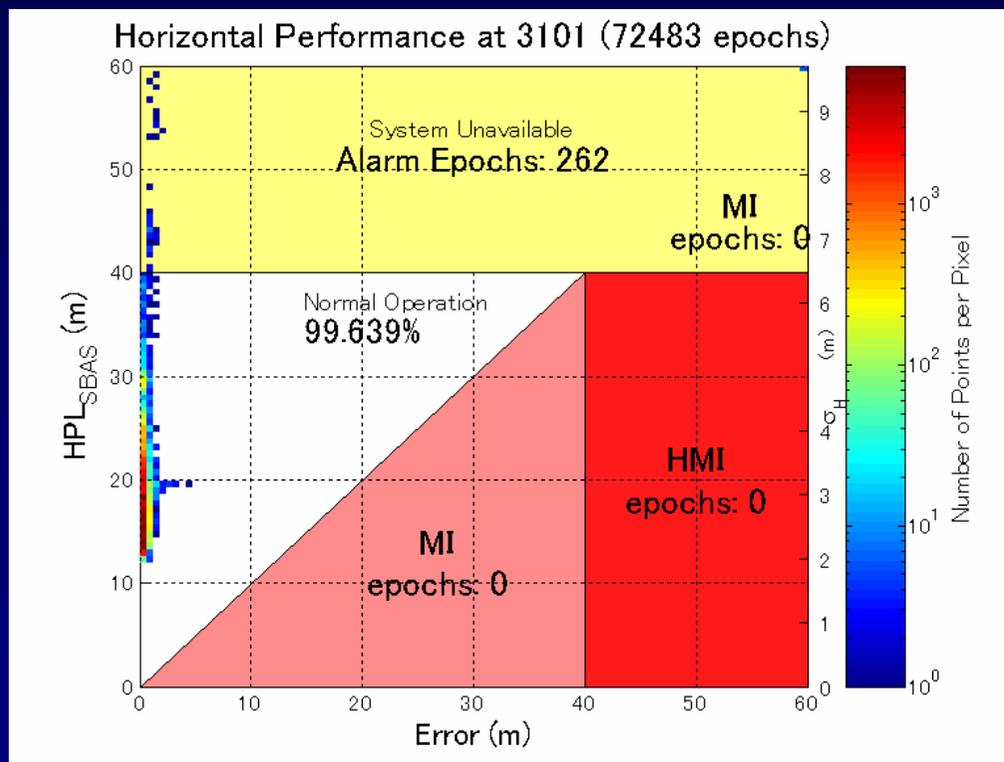
水平方向



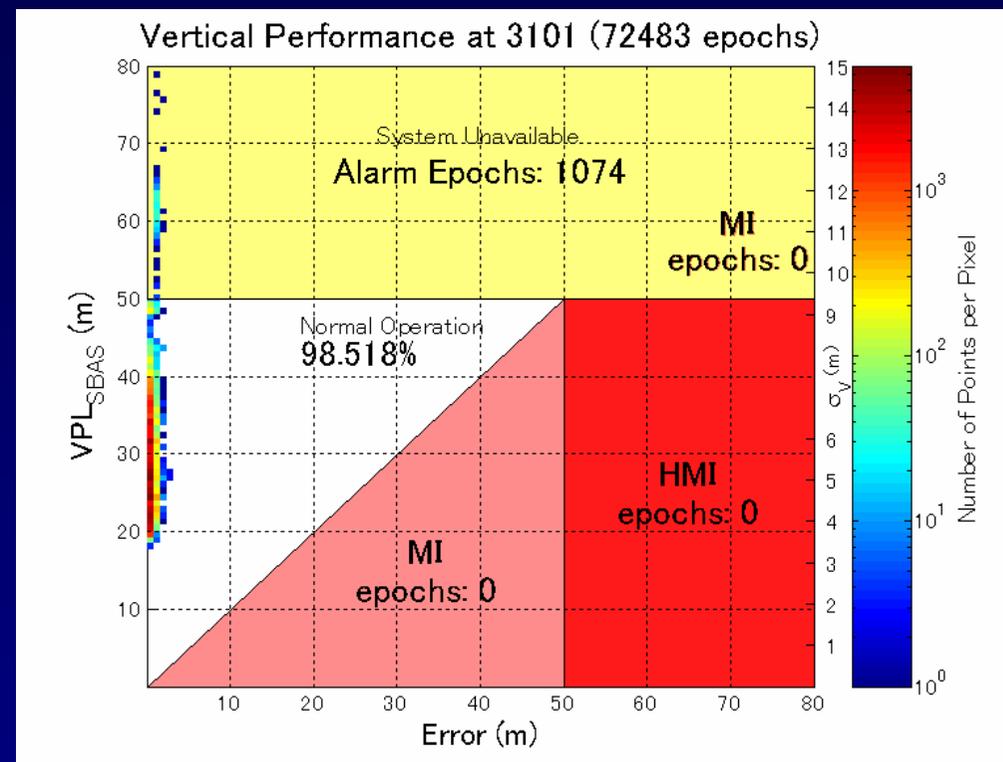
垂直方向

GEONET 0030(男鹿)
06/4/20 – 06/5/19 (30 days)
PPWAD PT/6+S

測位誤差とプロテクションレベル(2)



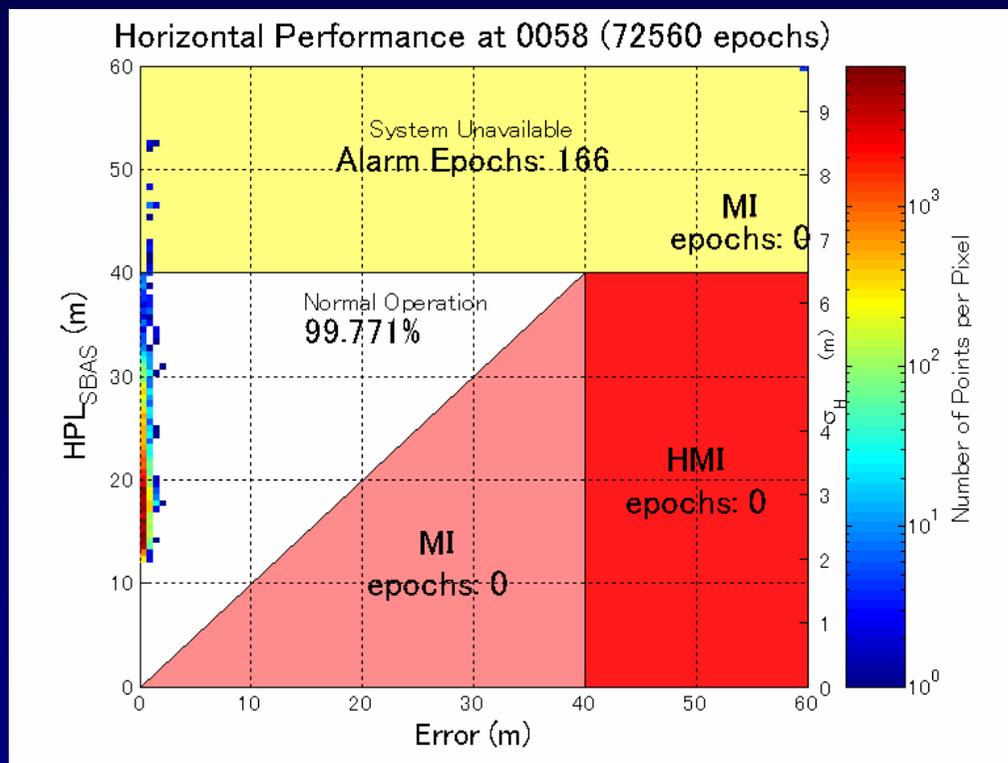
水平方向



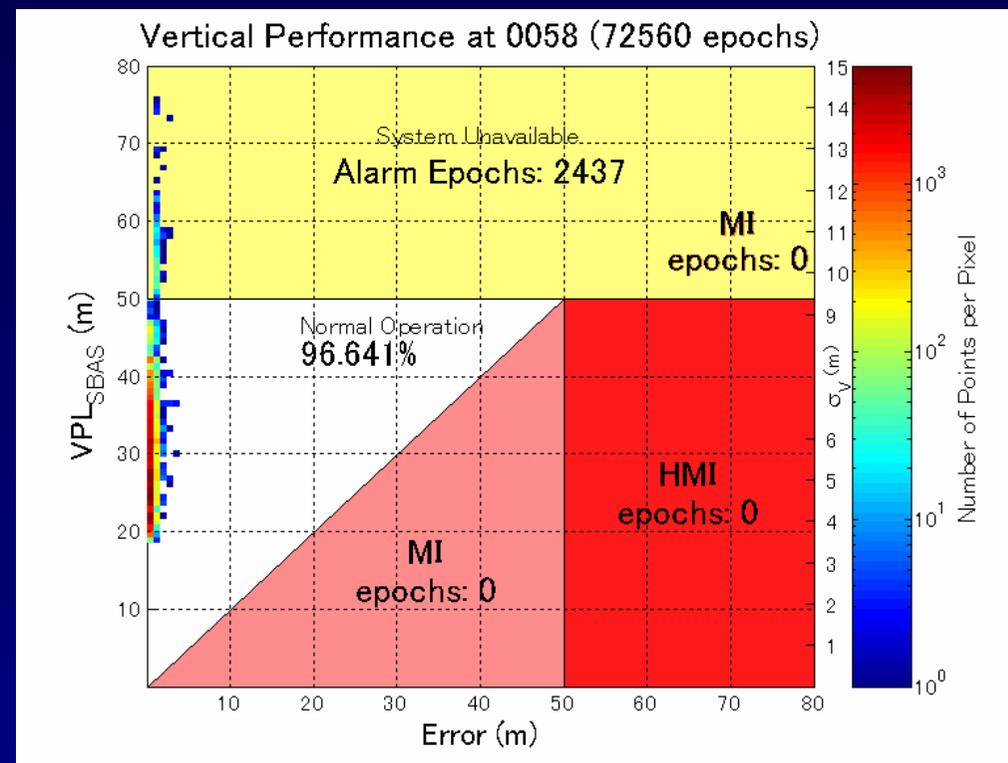
垂直方向

GEONET 3101 (御前崎)
 06/4/20 – 06/5/19 (30 days)
 PPWAD PT/6+S

測位誤差とプロテクションレベル(3)



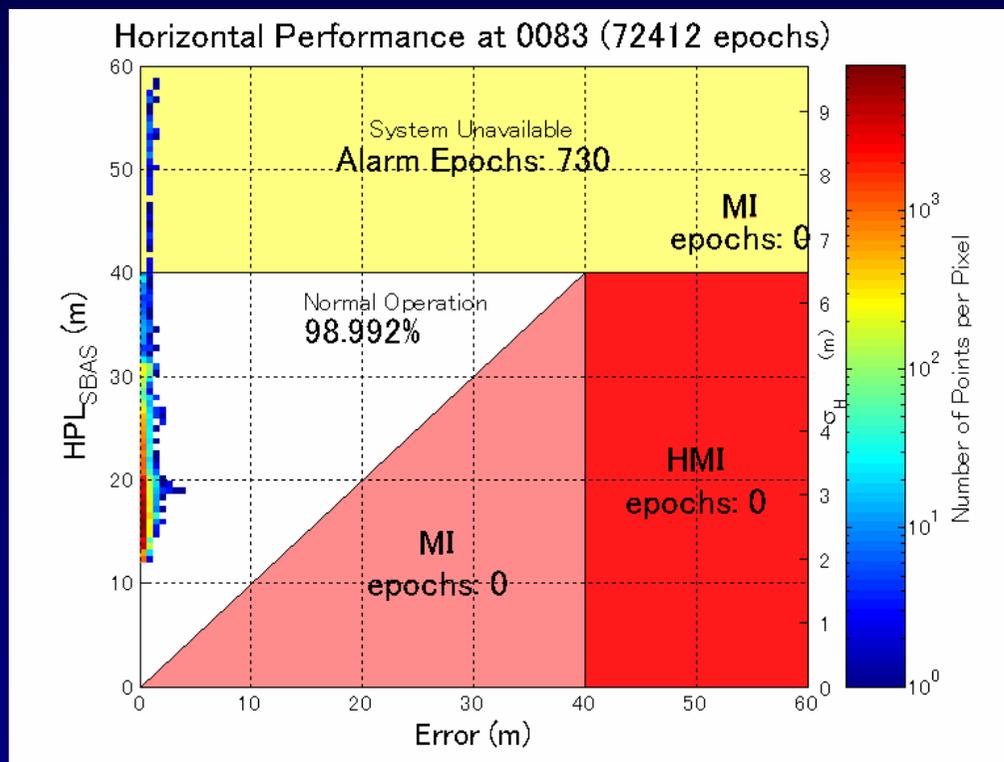
水平方向



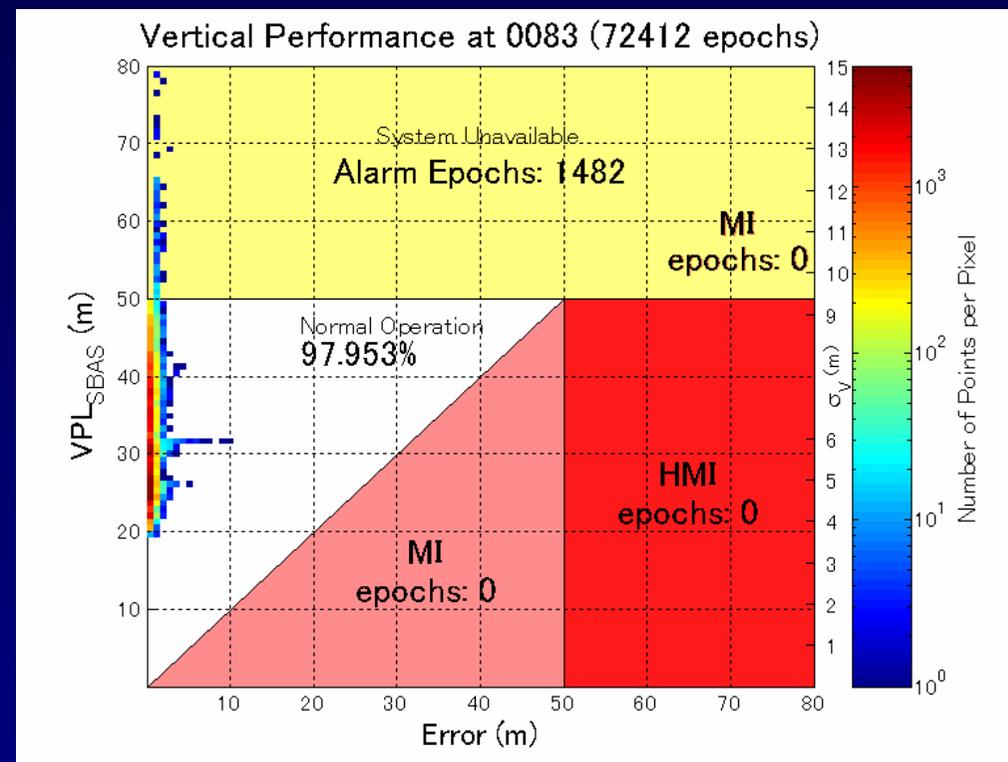
垂直方向

GEONET 0058(高山)
06/4/20 – 06/5/19 (30 days)
PPWAD PT/6+S

測位誤差とプロテクションレベル(4)



水平方向



垂直方向

GEONET 0083(高知)
06/4/20 – 06/5/19 (30 days)
PPWAD PT/6+S

今後の計画

・ 平成18～19年度

- (1) 補正情報リアルタイム生成・配信システム開発
- (2) プロトタイプ受信機開発
- (3) L1-SAIF ICD作成・公表
 - L1-SAIF信号の仕様・データ内容を規定。
 - L1/L2/L5補完信号と同一の文書とする。
 - H18秋にドラフト版を公表、意見収集・改定を経て、H19夏までに第1版を決定。

・ 平成20～22年度

- (1) 地上での総合試験
- (2) JAXA-ENRI接続システム開発
- (3) 実衛星による技術実証試験

Conclusion

- 準天頂衛星システム (QZSS) の開発が進められている:
 - L1/L2/L5の補完信号 (GPS互換信号) と補強信号を計画。
 - 2009年度に1号機を打上げ予定。
- 電子航法研究所ではL1-SAIF補強信号を担当:
 - SBAS (静止衛星による補強システム: MSAS) 互換の信号形式により、サブメートル級の測位精度とインテグリティ機能を提供する。
 - オフラインの試験システムをすでに整備、試験中。現在はリアルタイム化に向けて作業中。
- 今後の検討課題:
 - リアルタイムシステムの整備。
 - プロトタイプ受信機の開発、接続試験。
 - 電離層伝搬遅延補正方式の改良。