

後処理用 広域DGPS情報の配信状況



坂井 丈泰

電子航法研究所

Introduction

- GPS広域補強システムの実用化が進められている：
 - 日本全国で利用可能なディファレンシャル補正情報。
 - MSAS: MTSAT-1R(ひまわり6号)とMTSAT-2(ひまわり7号)を打ち上げ、実用試験中。2007年に運用開始を予定。
 - QZSS(準天頂衛星システム): 2009年度打上げ予定。L1-SAIF信号によるGPS補強を計画。
- 当所ではプロトタイプを試作：
 - MSASあるいはQZSSの研究開発用テストベッド。
 - 国土地理院GEONETのデータを利用して、オフラインモードで試験：良好な測位精度(0.3~1m程度)。
 - 現在、標準的なパラメータにて定常運用中。生成された補強情報は、**後処理用広域ディファレンシャル補正情報**として一般に提供。

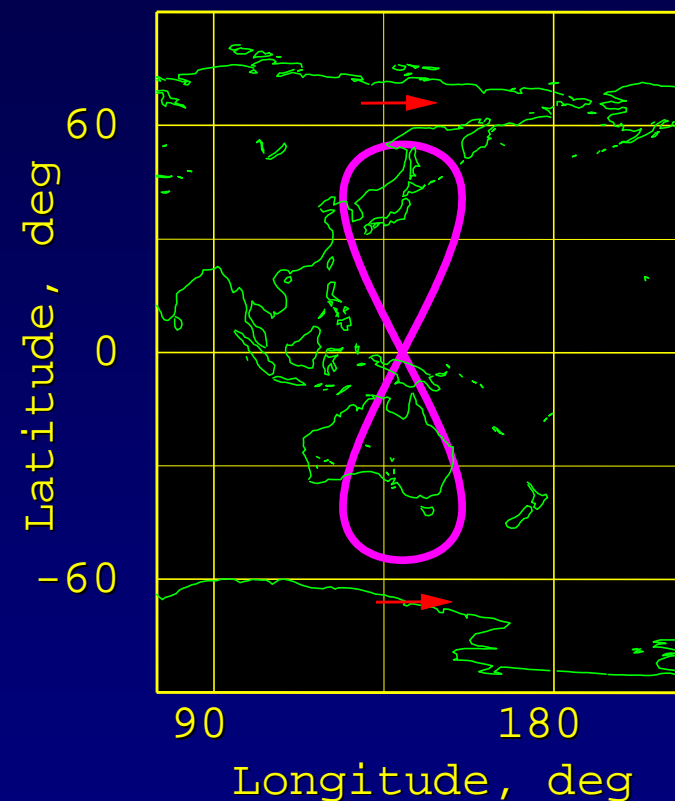
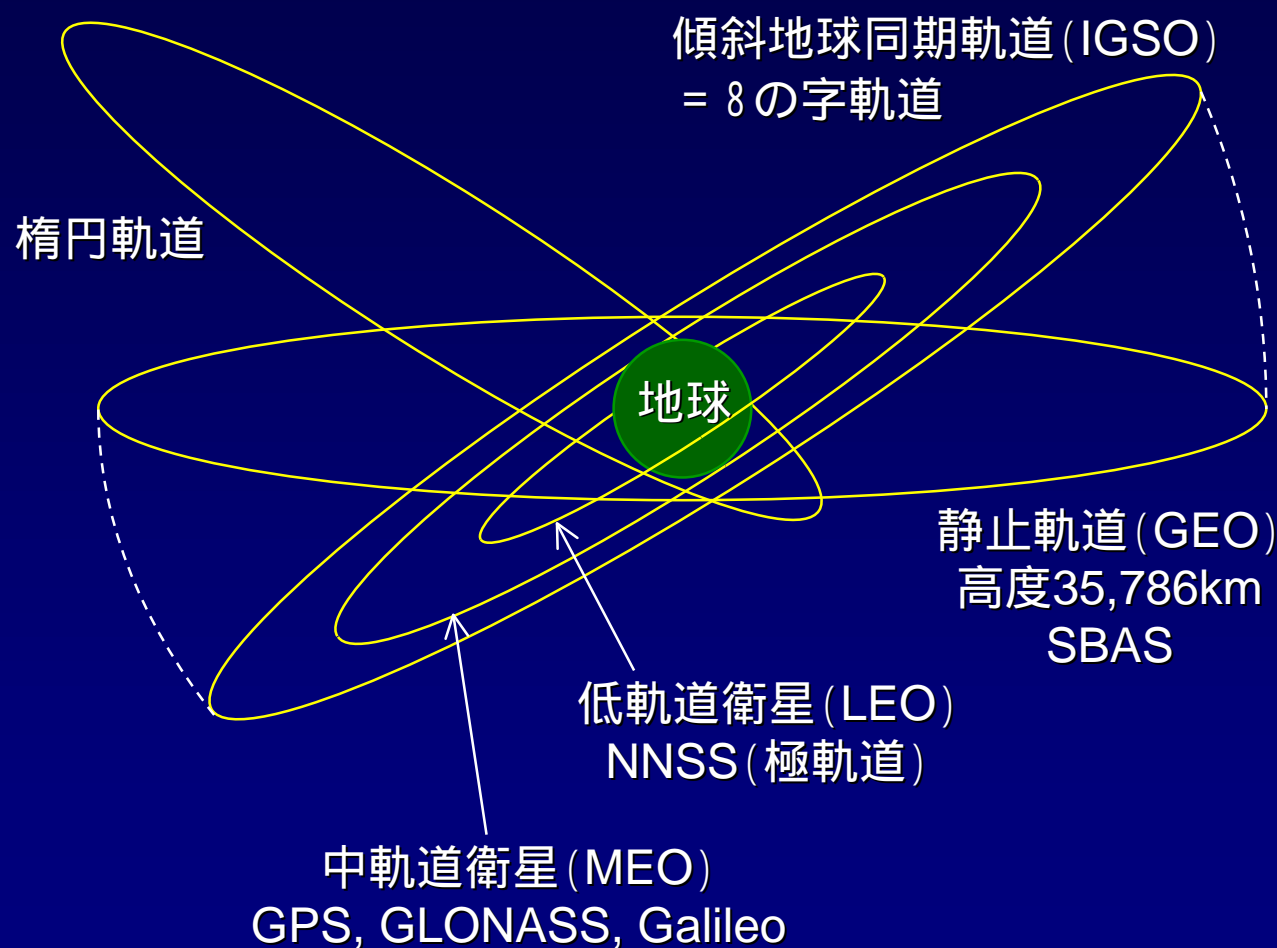
(1) 我が国におけるGPS広域補強システムの開発状況

MSASの状況

- 航空局が整備中の、静止衛星による広域補強システム（ICAO SBAS）：
 - 日本全国で使える広域ディファレンシャル情報 + インテグリティ情報。
 - GPS L1周波数で放送。
- 昨年2月に運輸多目的衛星新1号（MTSAT-1R=ひまわり6号）、また本年2月に2号（MTSAT-2=ひまわり7号）を打上げ。
- 現在、静止軌道上で運用 / 試験中：
 - 気象ミッションはすでに運用中。
 - MSASは試験中。2007年に運用開始予定。
- MSAS試験信号を随時放送：
 - SBAS補強メッセージを受信可能。
 - 放送予定は神戸航空衛星センタHPに掲載。

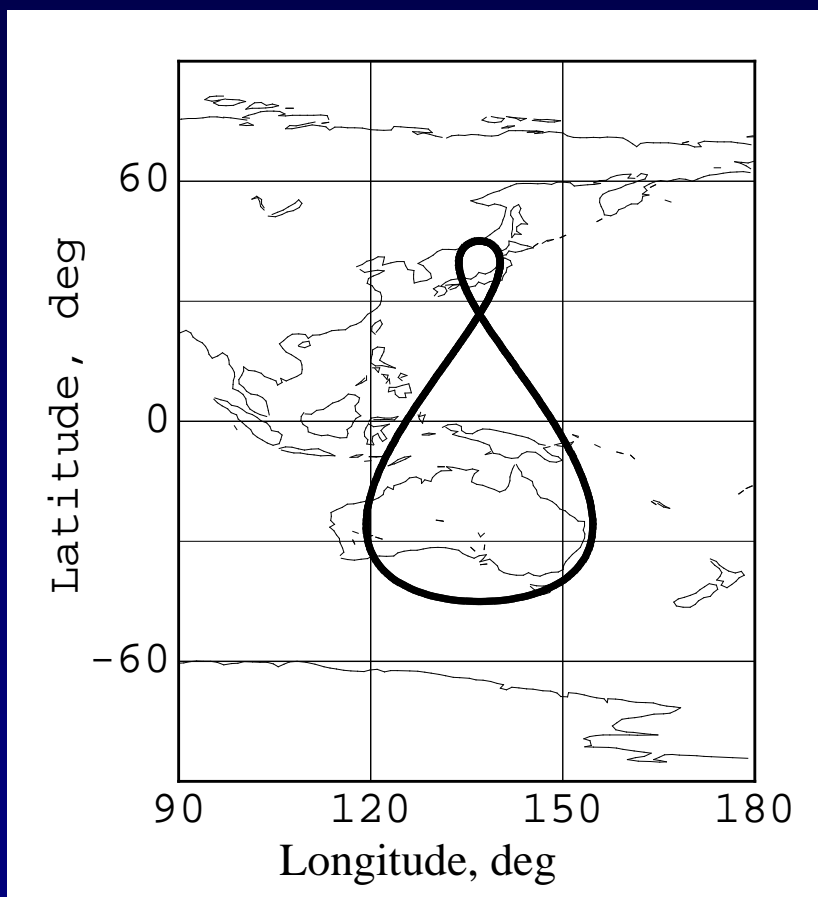


準天頂衛星の軌道

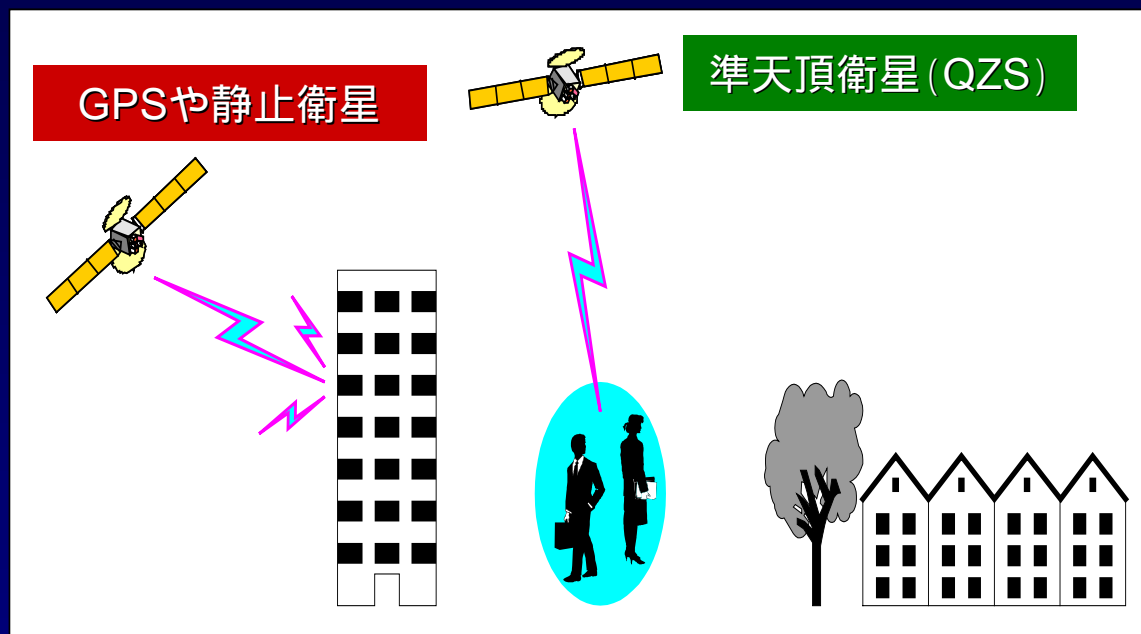


- 東経140度を中心に配置した場合の地上軌跡の例
- 離心率0、軌道傾斜角55度

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。

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。

(2) 広域ディファレンシャル
補正方式

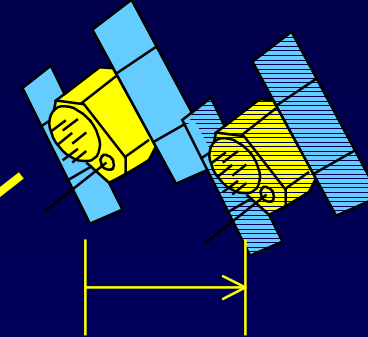
SBASとは

- 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



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

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

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

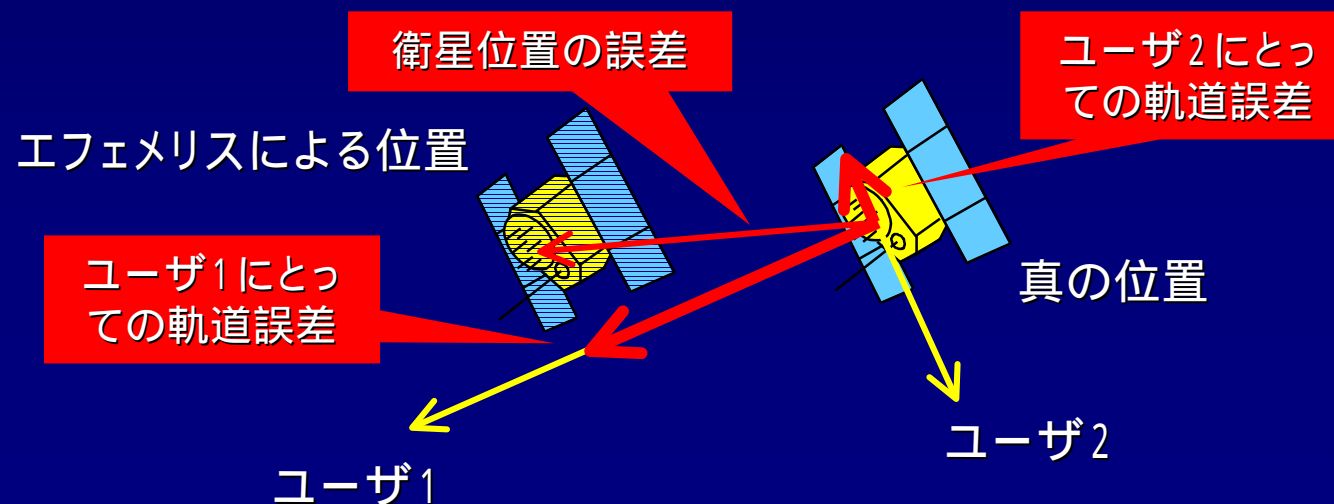


補正情報の内容

- **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。 x 、 y 、 z 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。
 - 準天頂衛星L1-SAIFでは拡張メッセージを検討中。

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。

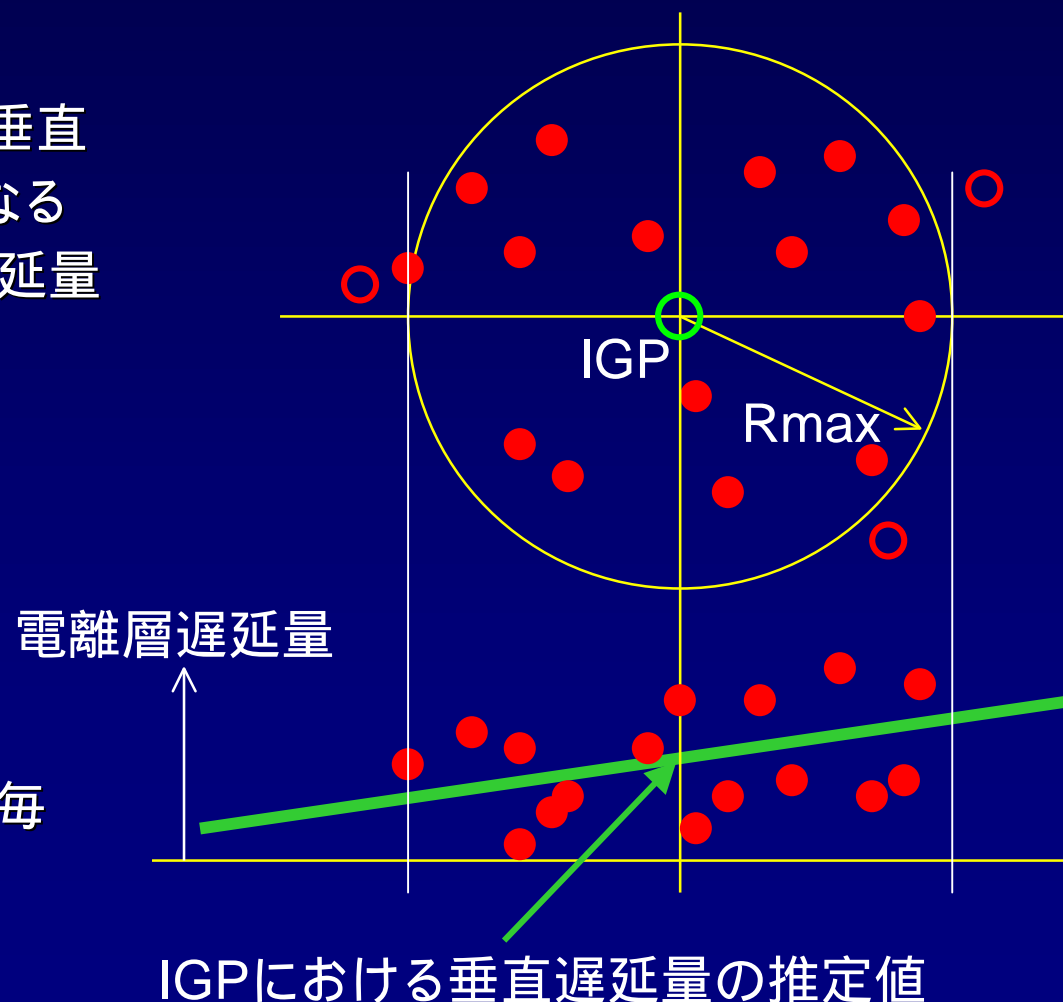


クロック / 軌道誤差分離 (2)

- 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、それを利用してもよい。
 - 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

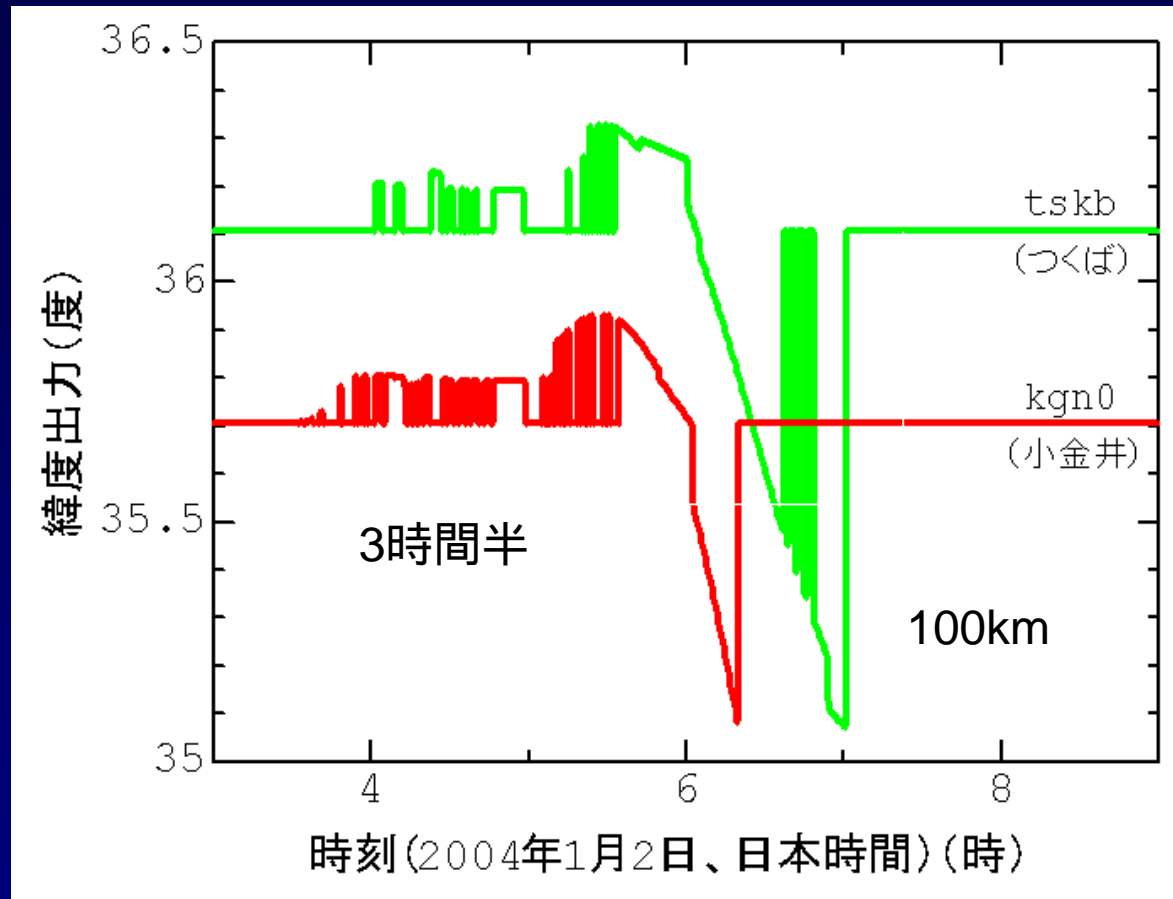
- MSAS/WAASが採用しているプレーナフィット (planar fit) 方式:
 - **平面モデル**: IGP周辺の電離層垂直遅延量が経緯度の一次関数になるものとして、IGP位置における遅延量を求める。
 - **周波数間バイアス**: 電離層遅延量の測定で問題となる周波数間バイアス (IFB) は、リアルタイムに推定・除去。
- 推定処理は1分毎に実行:
 - 周波数間バイアス (IFB) は10分毎のデータで処理。



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)。

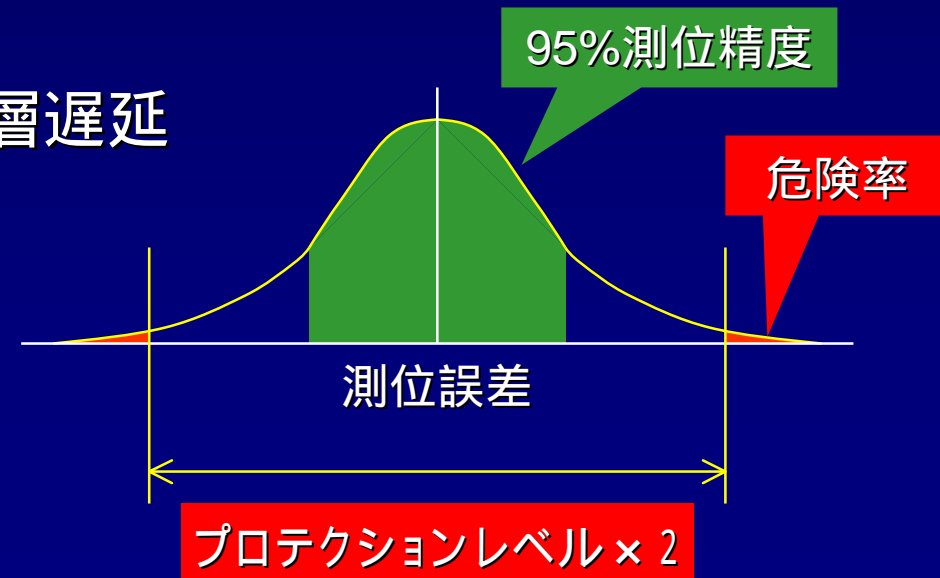
異常測位の実例



- 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

インテグリティ情報

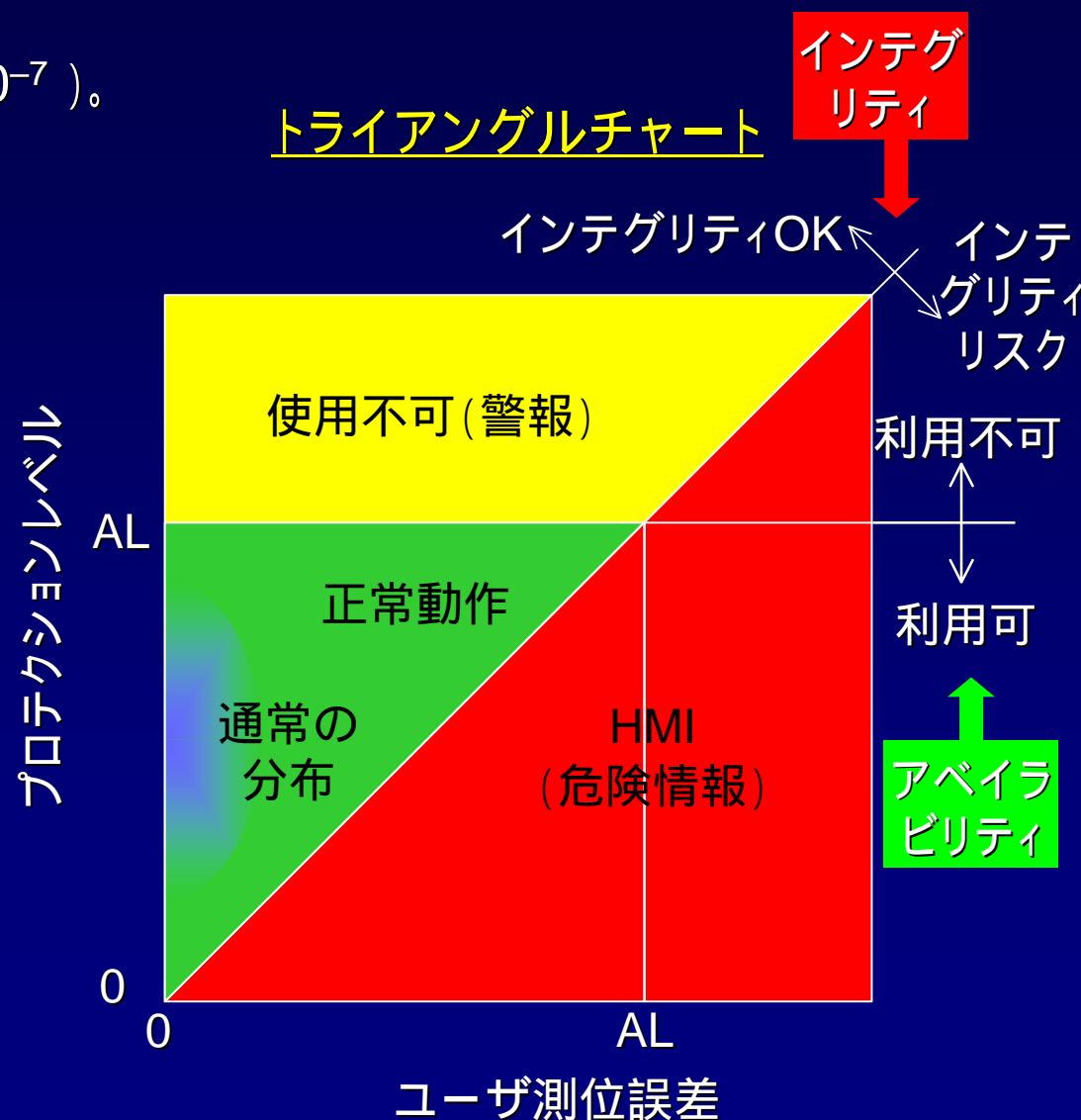
- プロテクションレベル方式: ユーザ測位誤差の上限をプロテクションレベルと呼び、これを計算するためのパラメータをユーザに放送する。
- ユーザ受信機側では、与えられたパラメータから自己の位置におけるプロテクションレベルを求めることで、測位誤差の上限がわかる。
- パラメータ: 測距誤差・電離層遅延補正残差の不確実性など
- 上限を超える確率
= インテグリティリスク



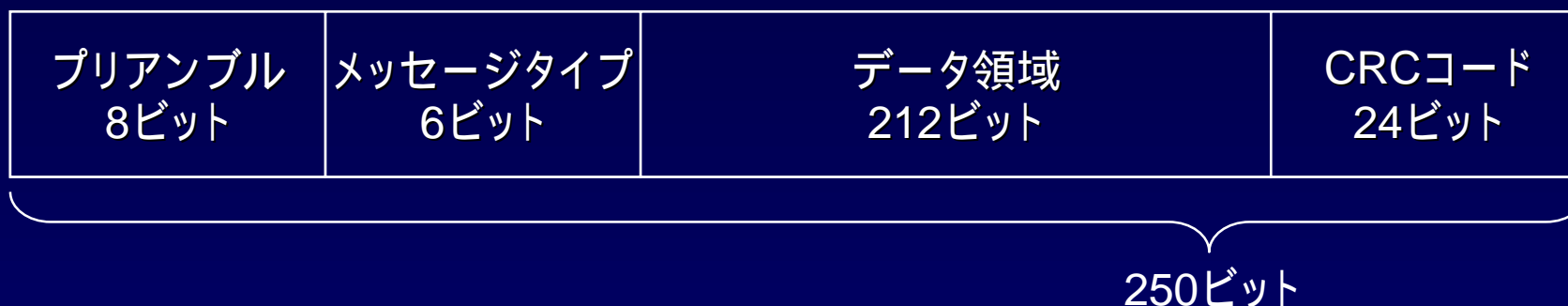
プロテクションレベルの使い方

- 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



SBASメッセージ(1)



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)	x, y, z	11	0.125 m	± 128 m
長期補正 (衛星速度)	\dot{x} , \dot{y} , \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

(3) プロトタイプシステムの開発

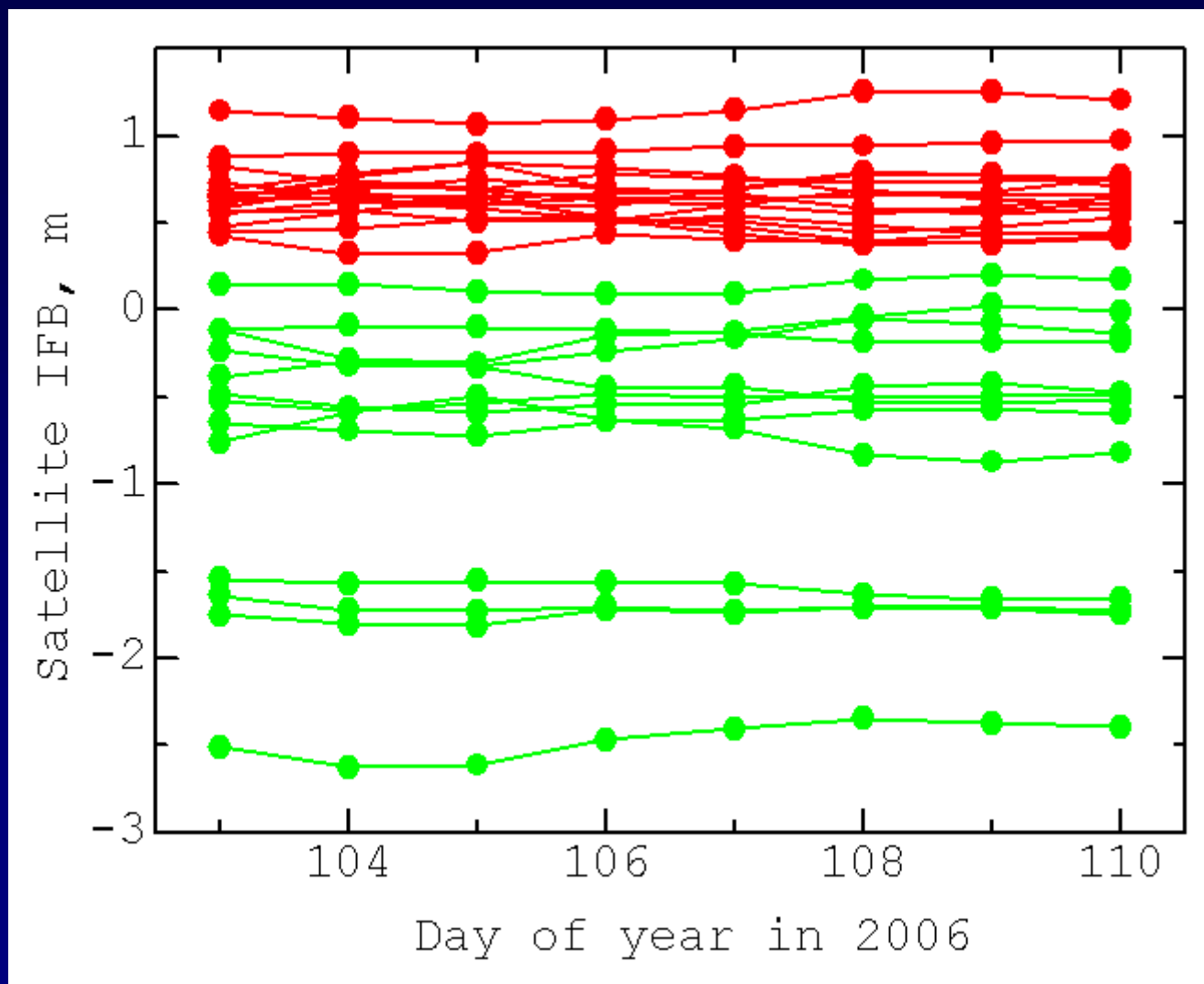
プロトタイプシステムの開発

- 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。

バイアス推定処理

- 周波数間バイアス (IFB) :
 - 送信機 (衛星側) および受信回路 (受信機側) のハードウェアに起因するバイアス誤差で、周波数によって異なる。
 - L1/L2バイアス、ハードウェアバイアスなどとも呼ばれる。
 - 電離層伝搬遅延量を求める際にバイアス誤差となるので、あらかじめ推定・除去する必要がある。
 - IFBの推定精度は、広域補正の測位精度に一定のインパクトあり。
- プロトタイプにおける推定処理 :
 - 二周波の擬似距離を10分毎に取り出して、最小二乗法により解く。
 - 2日分の観測データを使用し、40局をまとめて解く。マスク15度。
 - 推定結果を蓄積。補強情報生成処理では最新の推定結果を利用。
- 推定の際の電離層モデル :
 - 単層薄膜モデルにより近似。電離層高度は350kmに固定。
 - 水平方向は低次の球面調和関数によりモデル化。

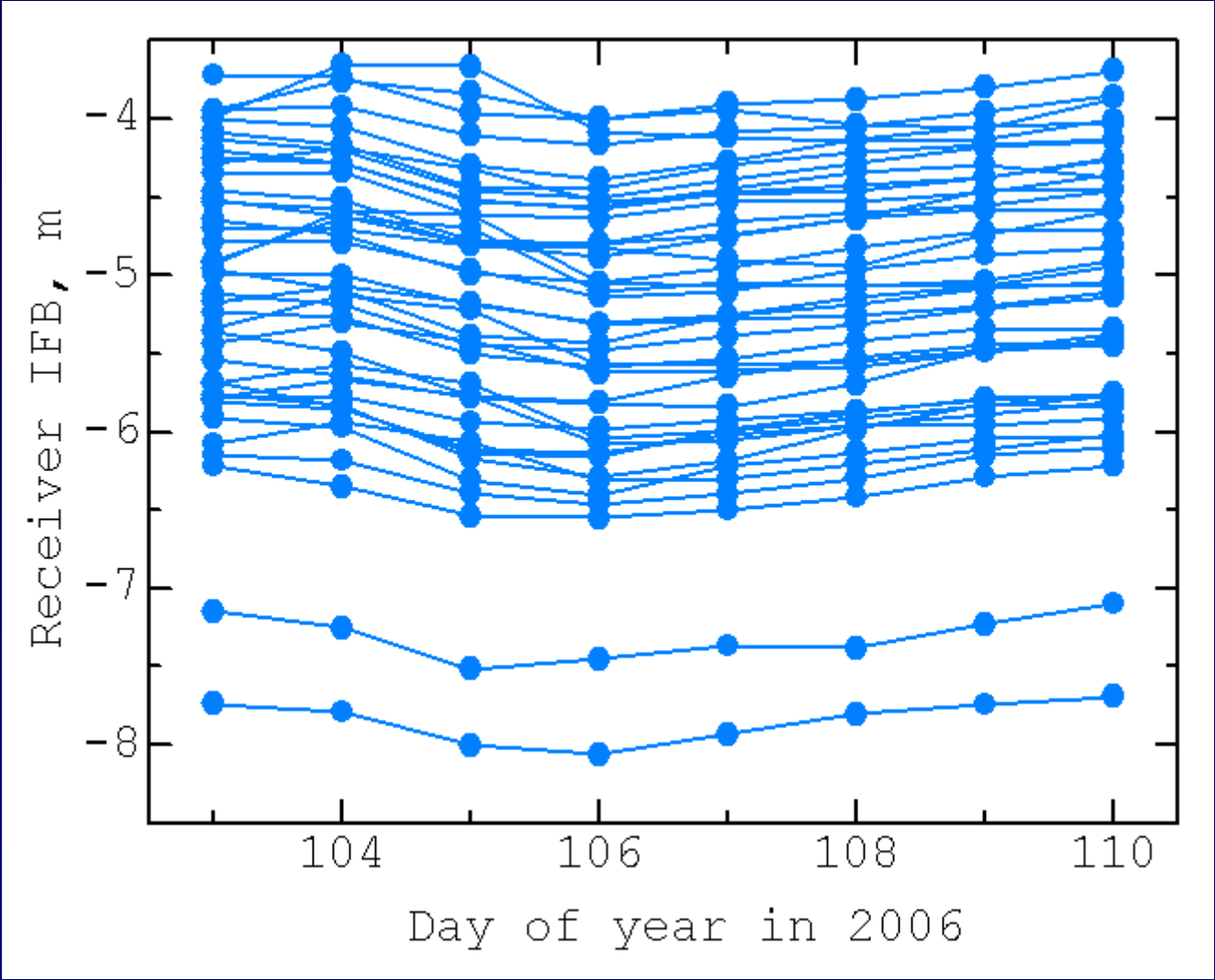
バイアス推定例(衛星側)



ブロックII/IIA

ブロックIIR

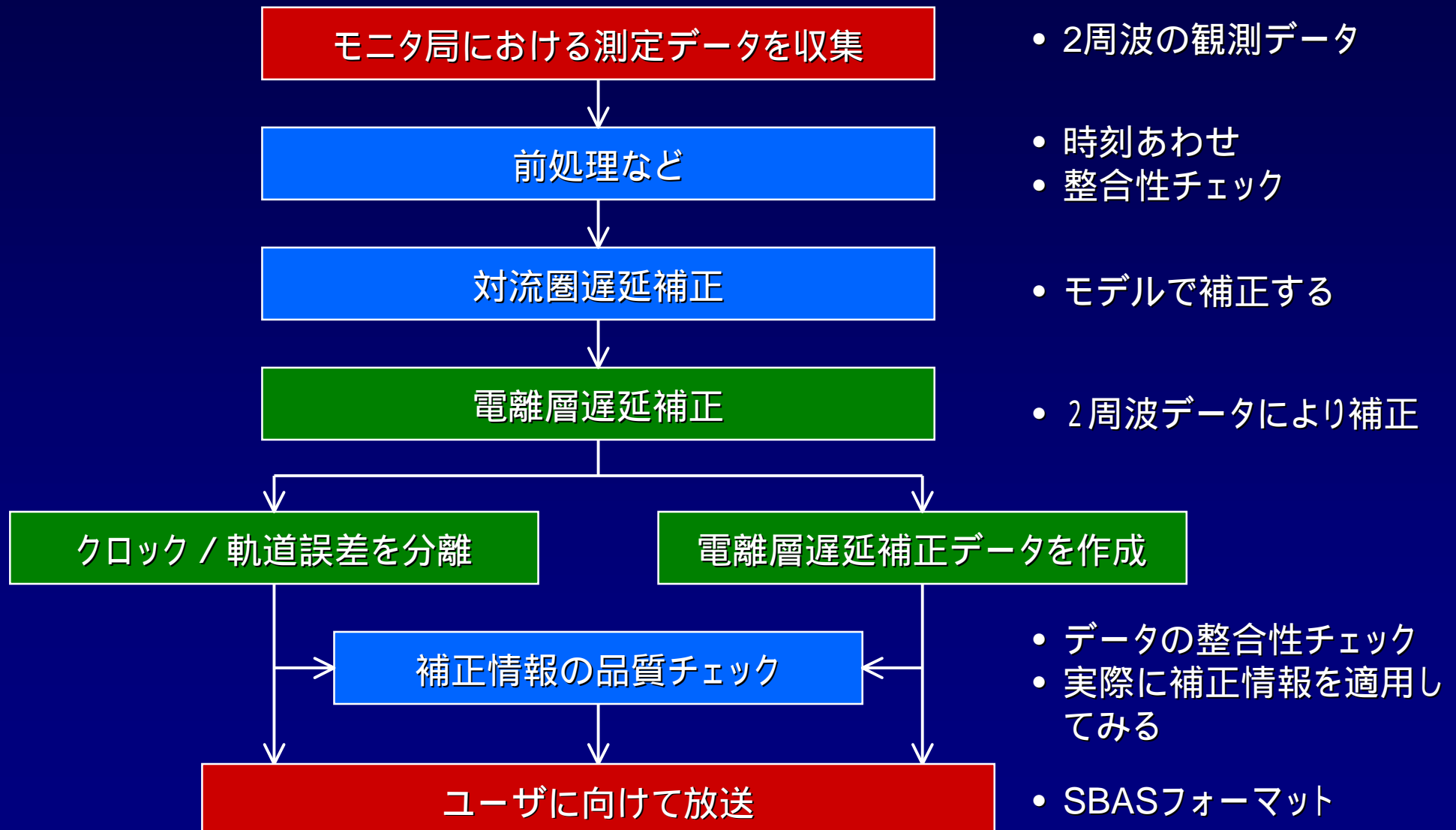
バイアス推定例(受信機側)



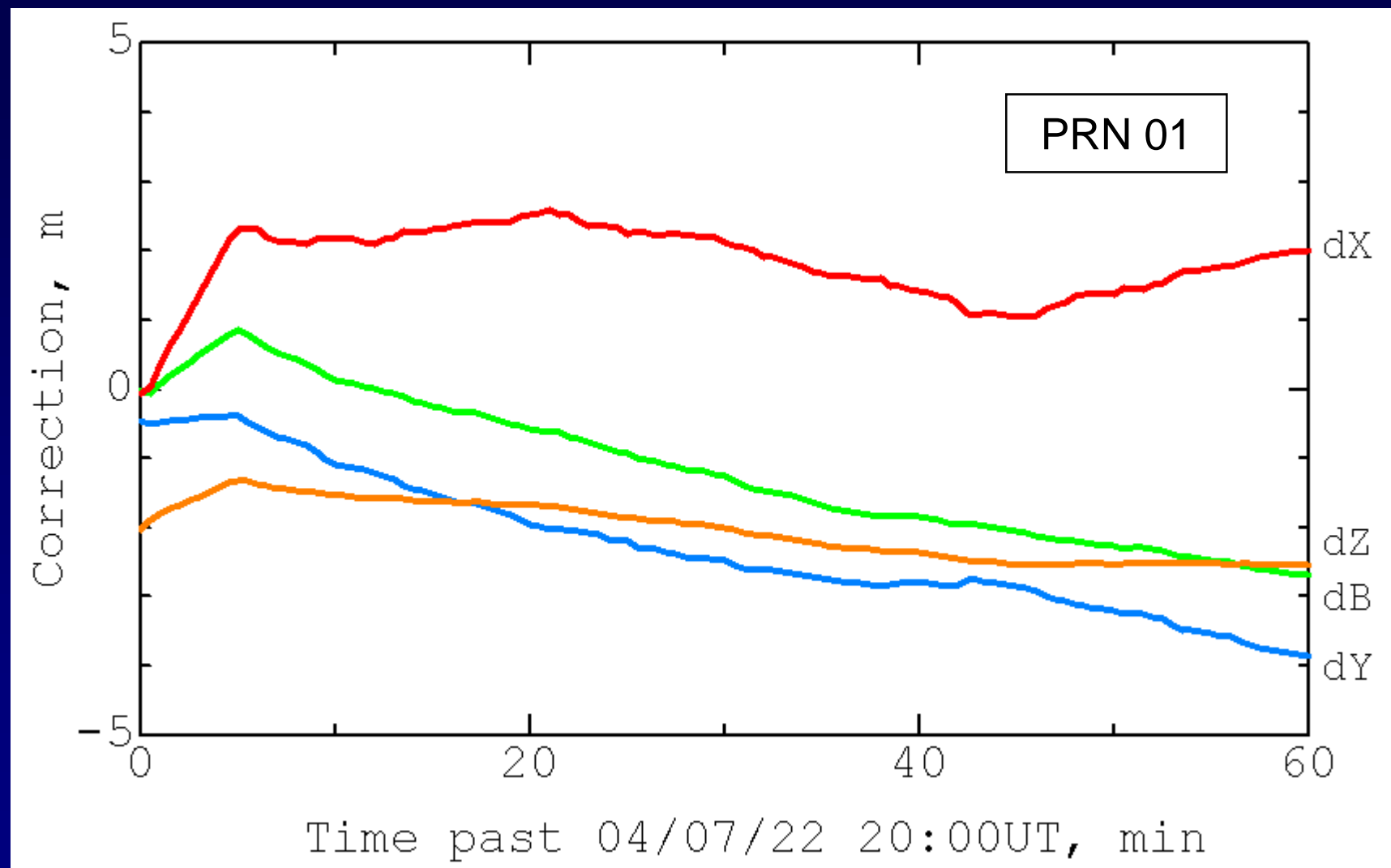
補強情報の生成

- PC/UNIX上で動作する計算機プログラム：
 - モニタ局データを入力として、実際に補強メッセージを生成する。
 - リアルタイム化を想定して実装。基本的にカルマンフィルタによる処理とし、過去のデータは使わない。IFBは前日の推定結果を利用。
- モニタ局の配置は任意：
 - 国土地理院GEONETのデータを使用(30秒サンプル)。
 - モニタ局数に上限は特にはないが、速度的な制約から12局までしか試していない。
 - 補強対象はGPSのみ：静止衛星や準天頂衛星は対象外。
- 補強情報生成アルゴリズムも変更可能：
 - いまのところ、電離層遅延補正はMSASと同じプレーナフィットを採用。
 - 改良アルゴリズムについて検討中。
 - 2周波SBASの検討も可能。

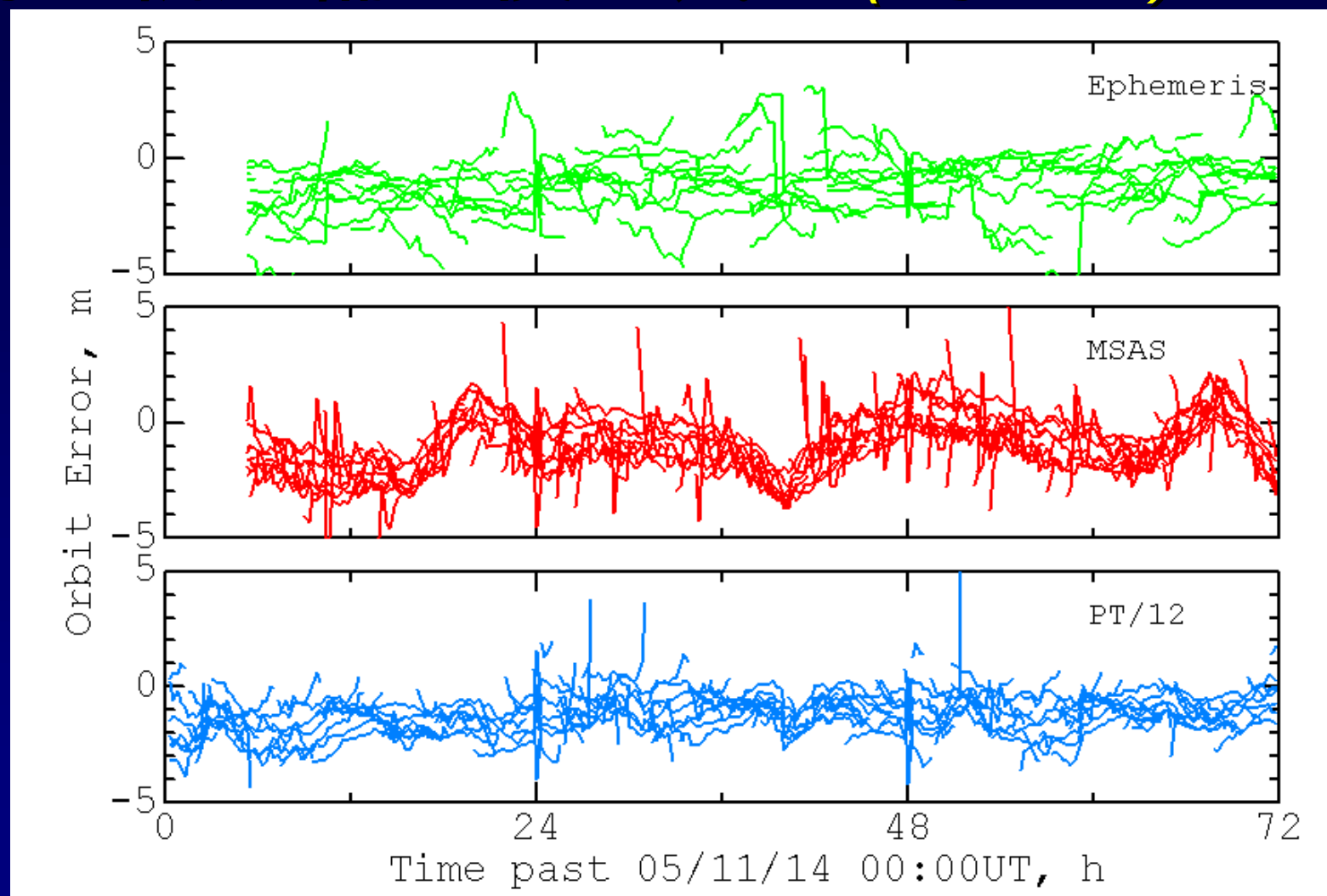
補強情報生成処理フロー



補正量のサンプル

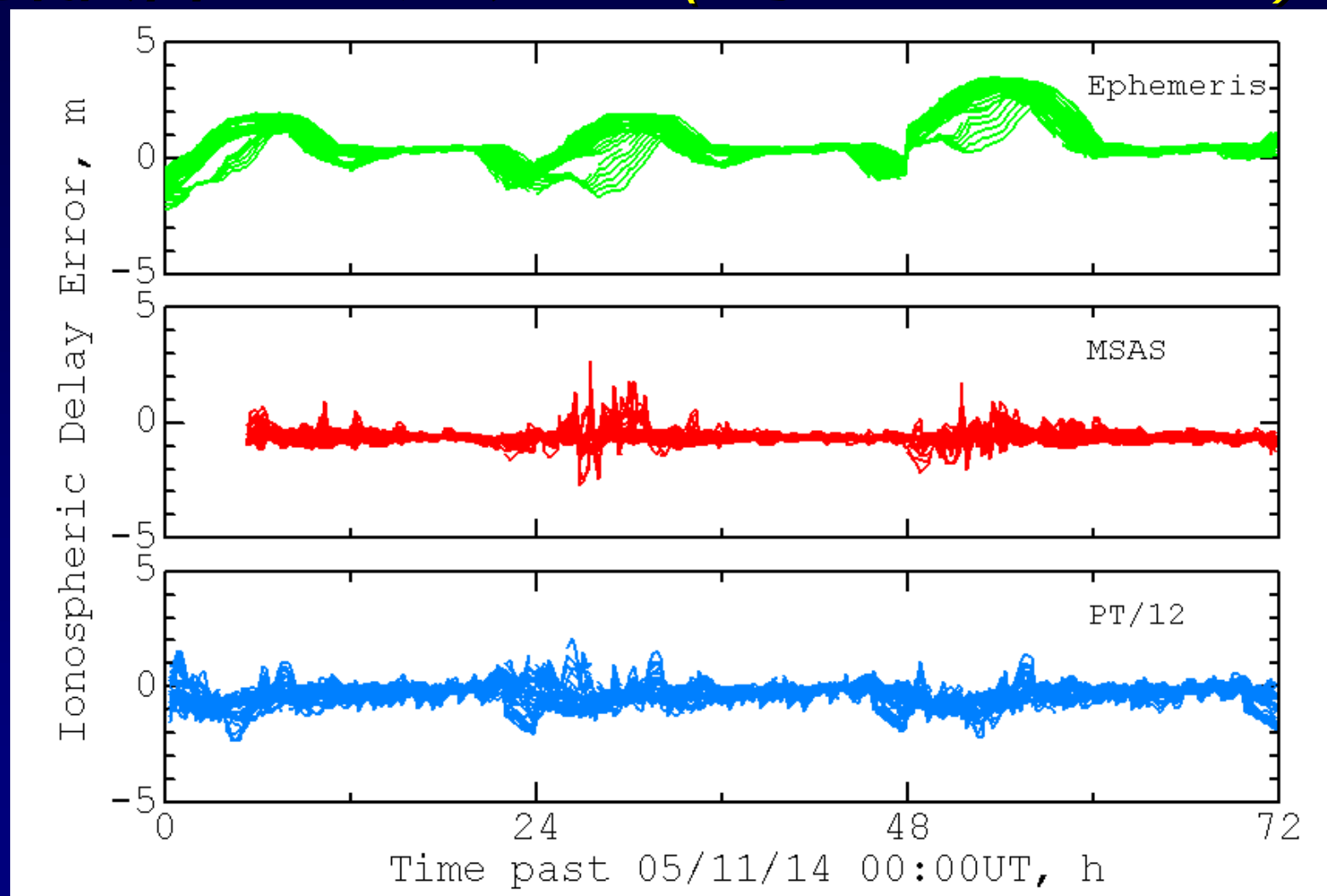


衛星軌道補正後の残差(対IGS)



- 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 (対IGS/IONEX) ^{SLIDE 30}

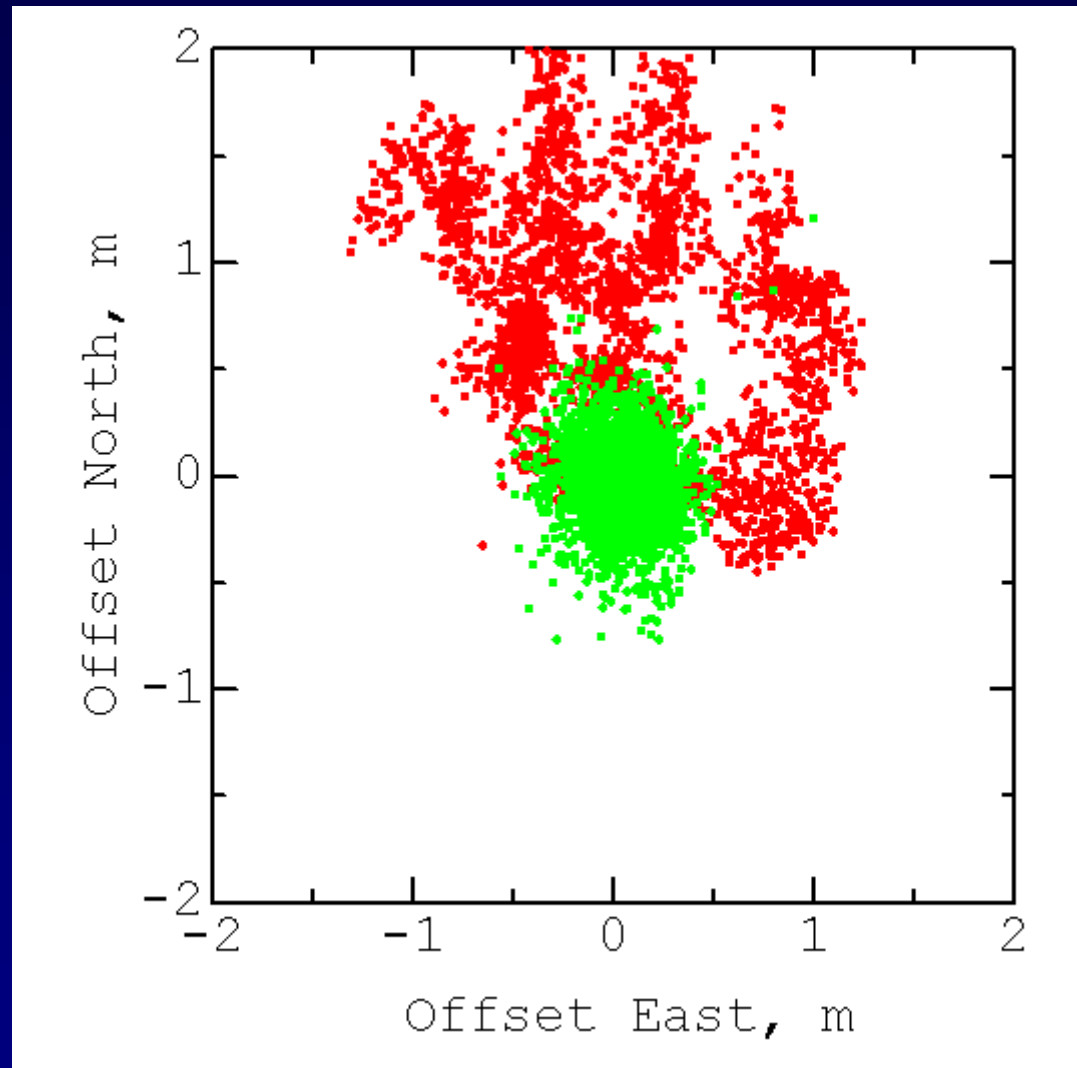


- 各IGPにおける電離層垂直遅延量の、IGS/IONEXとの差。
- いずれの補強システムも、若干の負のバイアスがある：RMSでは半減。

ユーザ測位誤差の評価

- 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。

ユーザ測位誤差の例



GEONET 3101 (御前崎)
06/4/20 00:00-24:00

PPWAD PT/6+S

GPS単独

RMS 1.47m HOR
2.46m VER

プロトタイプ

RMS 0.25m HOR
0.39m VER

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	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
GPS 単独測位	RMS	1.37	2.48	1.47	2.46	1.44	2.48	1.44	2.40
	最大	3.57	6.25	4.55	6.21	3.35	6.76	3.95	7.60
プロトタイプ	RMS	0.28	0.38	0.25	0.39	0.28	0.41	0.27	0.44
	最大	1.94	2.47	1.57	1.36	1.28	1.47	1.55	3.85

(一周波、30秒サンプル、キャリアスムージングあり)

06/4/20 00:00-24:00

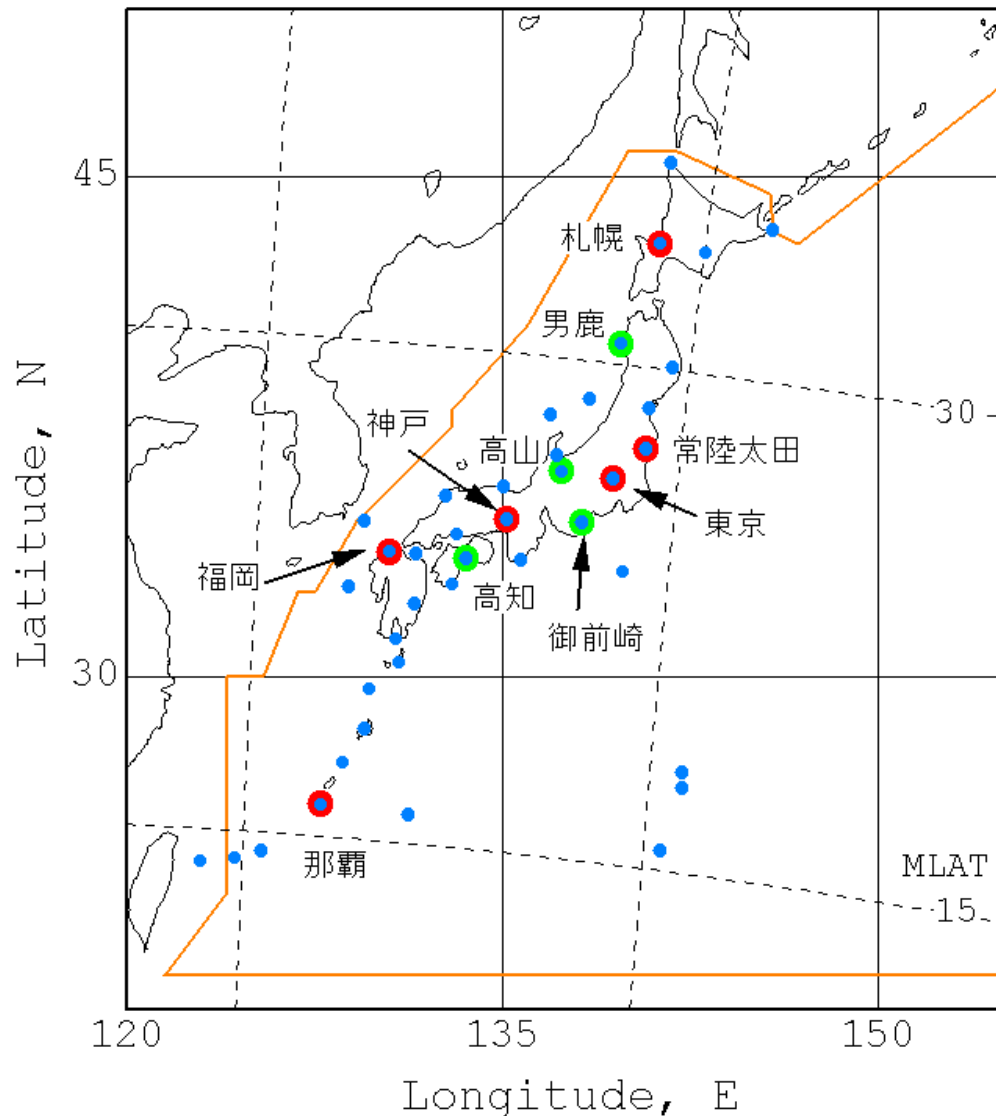
PPWAD PT/6+S

(5) 定常運用

定常運用

- 定常運用を開始：
 - 2006年4月より**定常運用を開始**した。補強メッセージを毎日生成、蓄積。
 - モニタ局配置はMSAS国内局に近い6局。
 - オーソドックスなアルゴリズムおよびパラメータで運用。電離層遅延補正はMSAS/WAASに近いプレーナフィット方式。
- 後処理用広域補強情報としての利用：
 - 定常運用により生成された補強情報は、日本全国で後処理ディファレンシャルGPS用に利用可能。
 - インターネットを利用して一般に提供中。処理プログラム(ユーザ受信機シミュレータ)も提供。
- データ提供状況：
 - 2006年4月23日～2006年9月30日の161日間のうち、146日については補強データを生成済み。欠けている日は、停電による停止など。
 - 7月3日以降分をHPに掲載。9月30日まで全日あり。

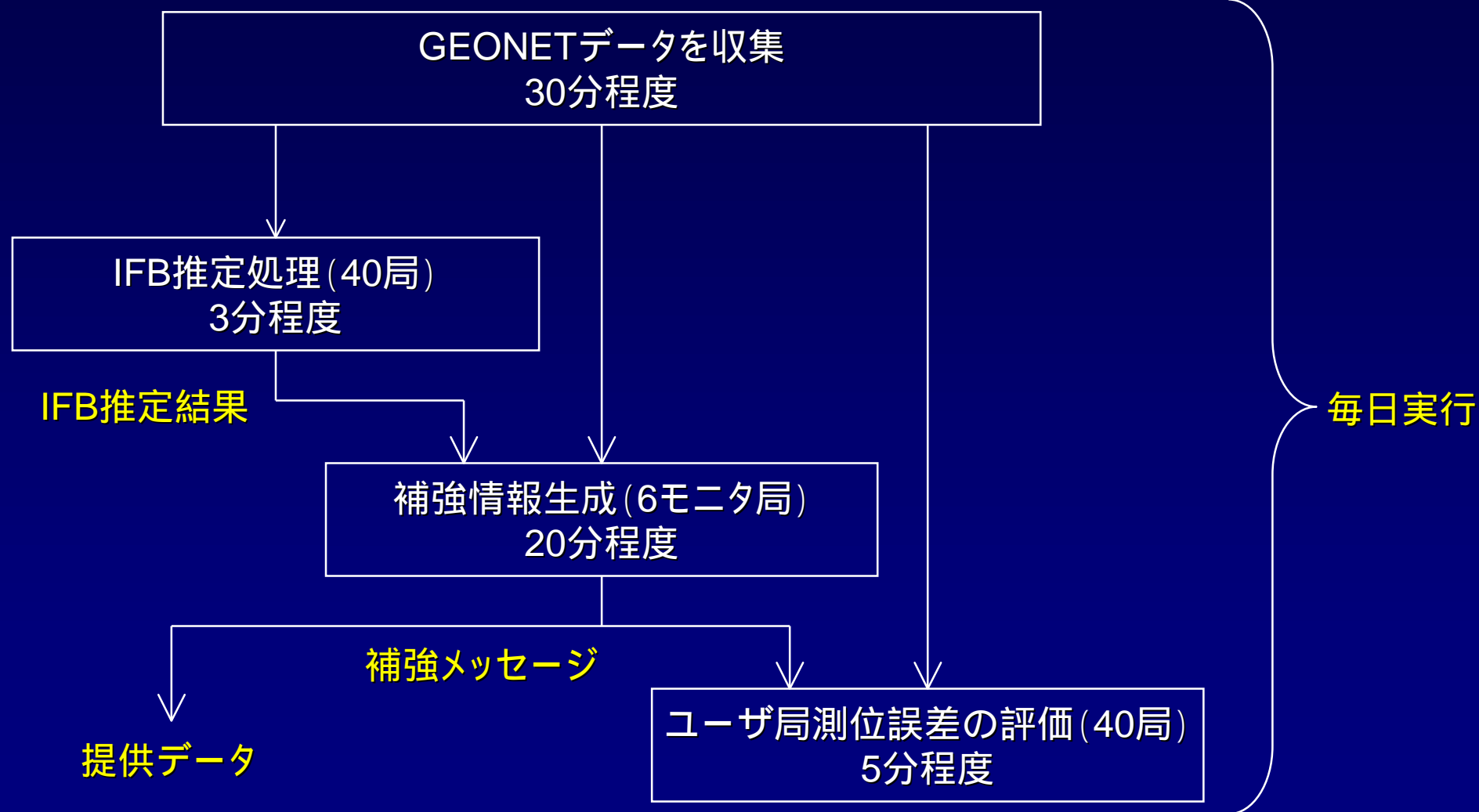
モニタ局の配置



- MSASモニタ局
- 評価用ユーザ局 (A)
- 評価用ユーザ局 (B)

- MSASの国内モニタ局に近い6サイトを利用。
- MSASの場合、さらにハワイとオーストラリアに標定局がある。
- ユーザ局 (A) については、インテグリティ性能確認結果を図で紹介。
- ユーザ局 (B) について、インテグリティ性能を毎日確認。

定常運用フロー



補強メッセージの提供

Index of /sat/pro/data/ppwad

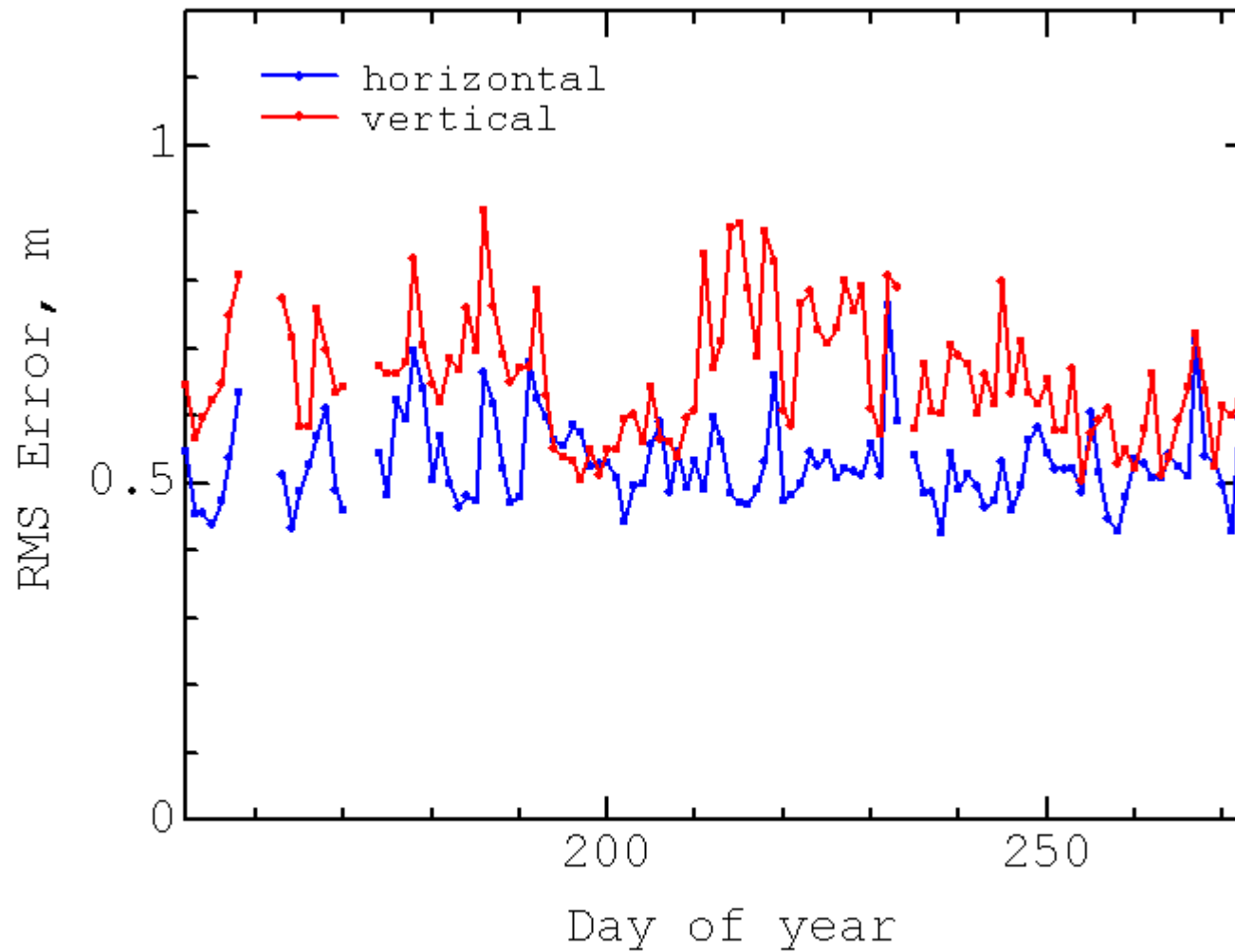
Name	Last modified	Size	Description
Parent Directory	-	-	
ppwad.log.gz	09-Aug-2006 05:39	935K	
ppwad_06184.log.gz	07-Jul-2006 18:18	939K	
ppwad_06185.log.gz	08-Jul-2006 05:39	938K	
ppwad_06186.log.gz	08-Jul-2006 05:39	941K	
ppwad_06187.log.gz	10-Jul-2006 05:39	939K	
ppwad_06188.log.gz	09-Aug-2006 18:06	934K	
ppwad_06189.log.gz	12-Jul-2006 05:39	938K	
ppwad_06190.log.gz	13-Jul-2006 05:39	936K	
ppwad_06191.log.gz	14-Jul-2006 05:40	941K	
ppwad_06192.log.gz	15-Jul-2006 05:40	936K	
ppwad_06193.log.gz	16-Jul-2006 05:39	944K	
ppwad_06194.log.gz	17-Jul-2006 05:39	938K	
ppwad_06195.log.gz	18-Jul-2006 05:39	934K	
ppwad_06196.log.gz	19-Jul-2006 05:39	941K	
ppwad_06197.log.gz	20-Jul-2006 05:39	938K	
ppwad_06198.log.gz	21-Jul-2006 05:40	927K	
ppwad_06199.log.gz	22-Jul-2006 05:40	927K	
ppwad_06200.log.gz	23-Jul-2006 05:40	927K	
ppwad_06201.log.gz	24-Jul-2006 05:40	927K	
ppwad_06202.log.gz	25-Jul-2006 05:41	925K	
ppwad_06203.log.gz	26-Jul-2006 05:41	926K	
ppwad_06204.log.gz	27-Jul-2006 05:41	926K	
ppwad_06205.log.gz	28-Jul-2006 05:41	930K	

2006/7/3 (day #184) ~
毎日のデータを掲載
1ファイル/1日

ファイルネーム:
ppwad_06ddd.log.gz

URL <http://www.enri.go.jp/sat/pro/data/ppwad> にてデータを提供

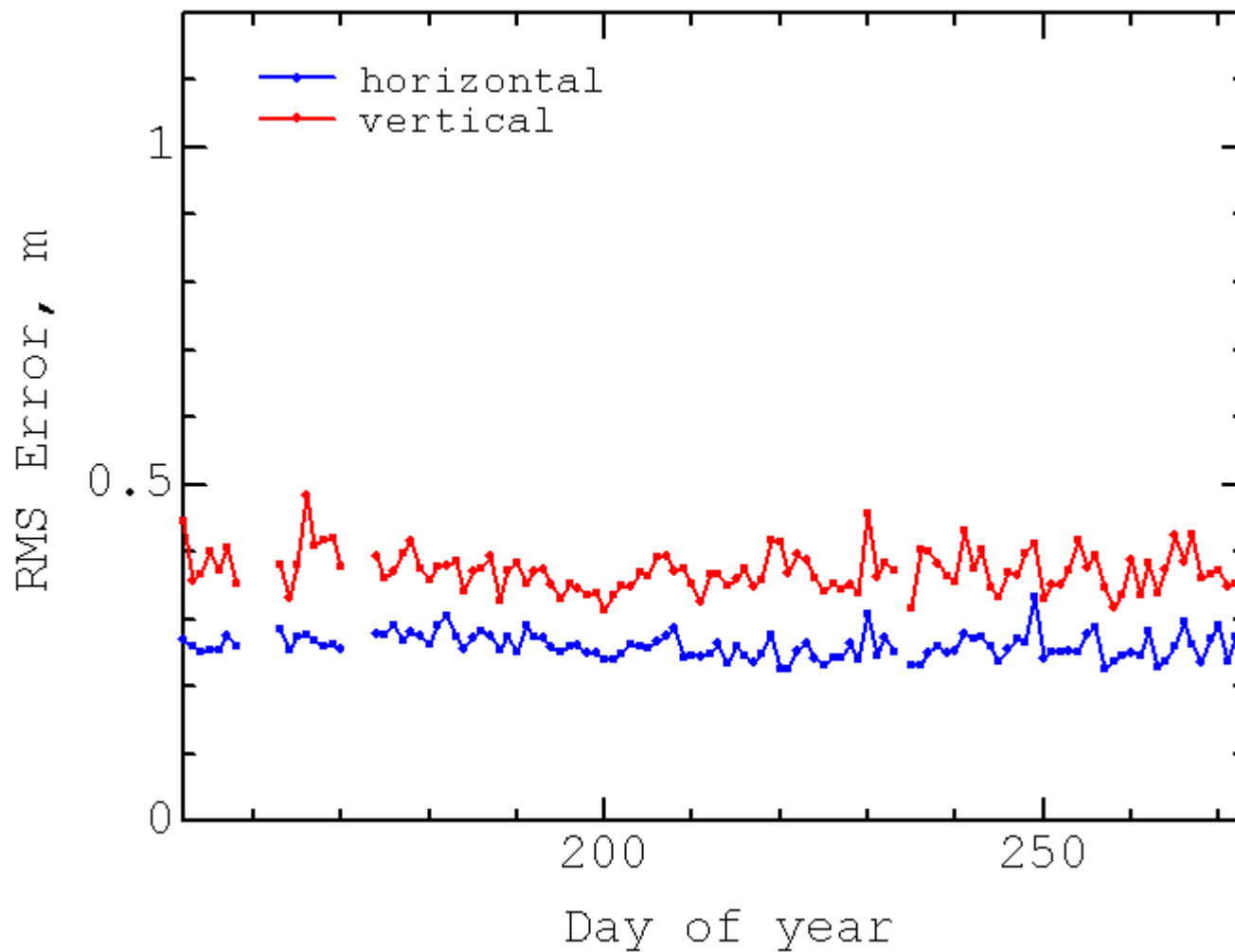
ユーザ測位誤差(稚内)



GEONET 0001 (稚内)
06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

ユーザ測位誤差(川越)

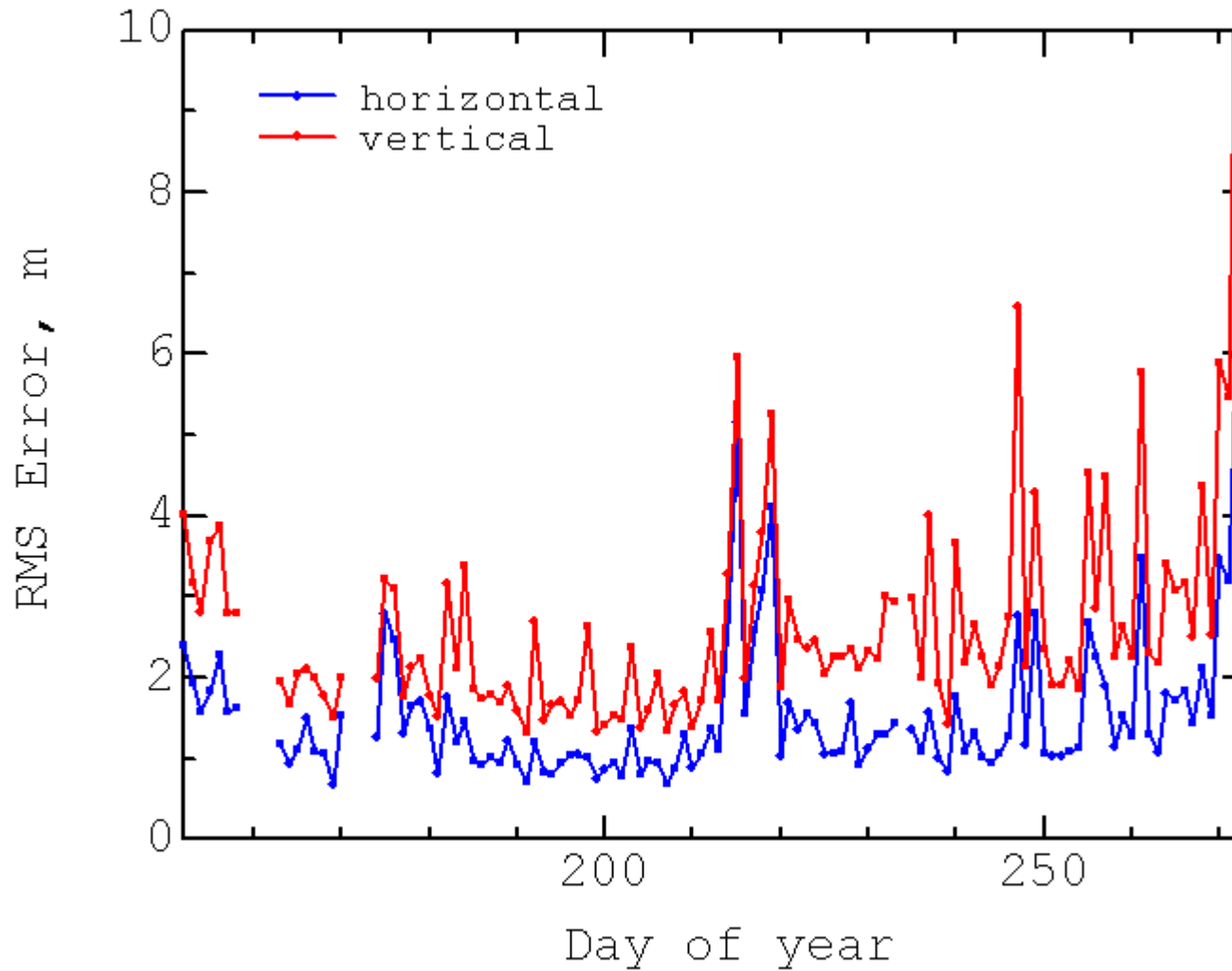


GEONET 3011 (川越)

06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

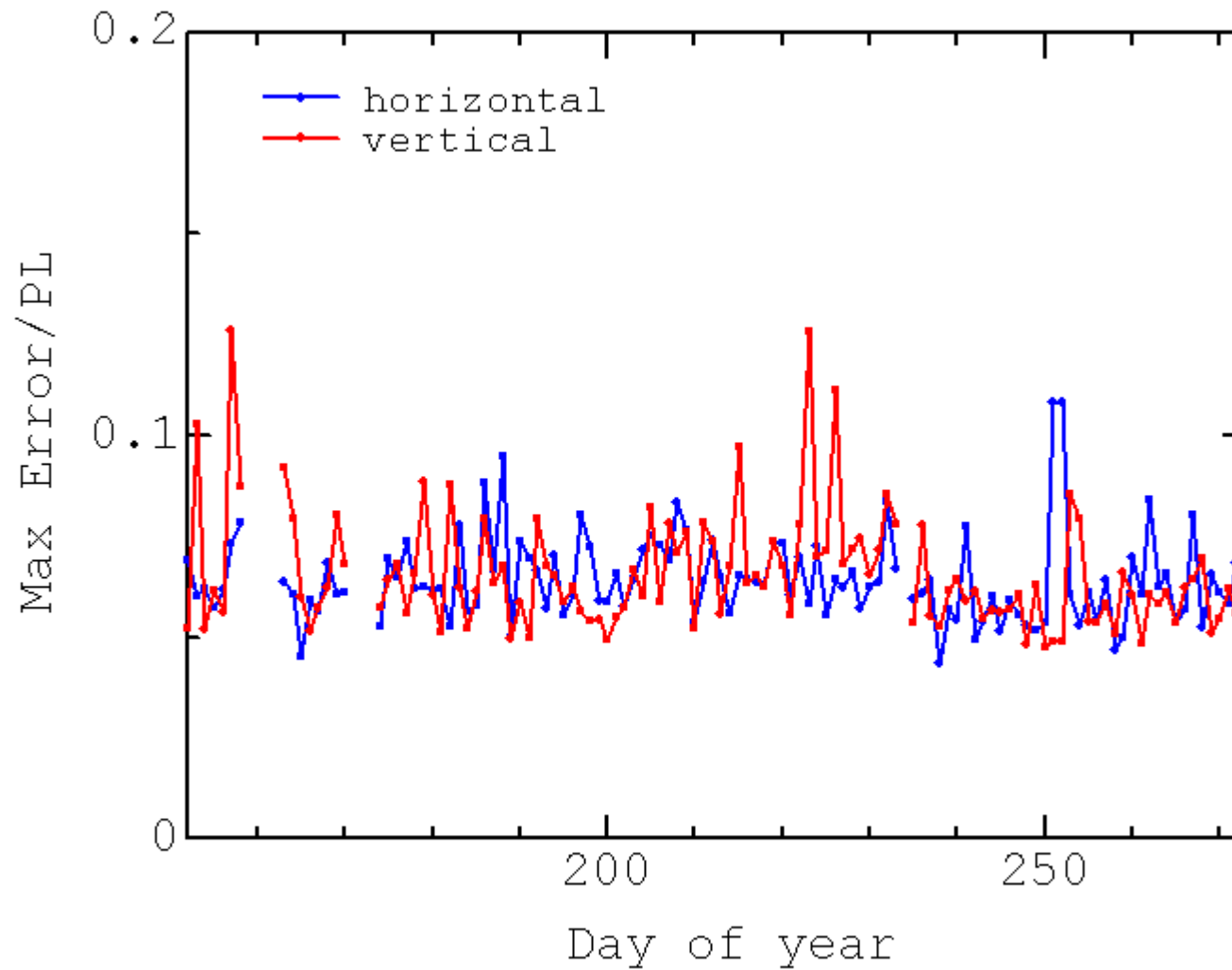
ユーザ測位誤差(那覇)



GEONET 0100 (那覇)
06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

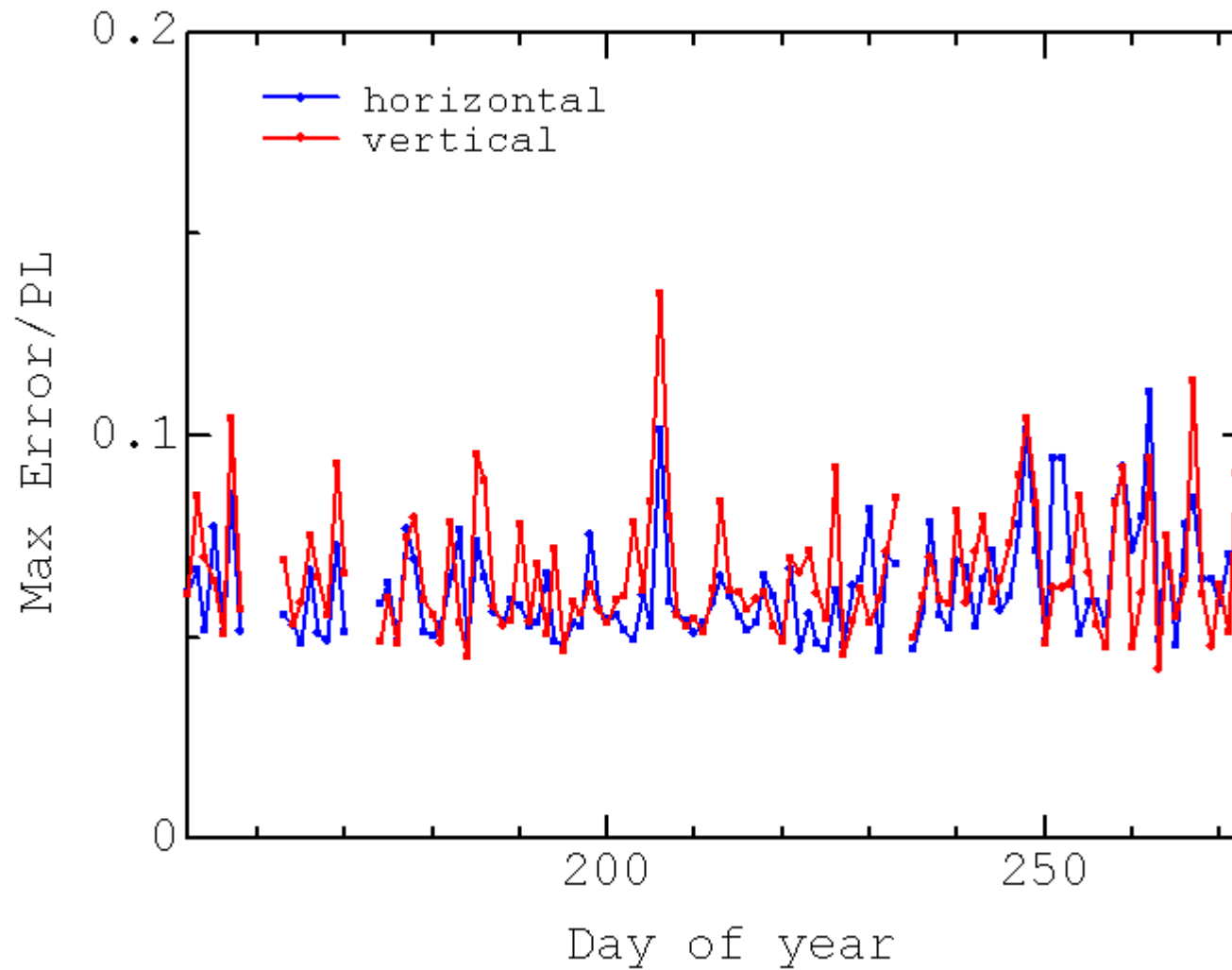
測位誤差 / PL 最大值 (稚内)



GEONET 0001 (稚内)
06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

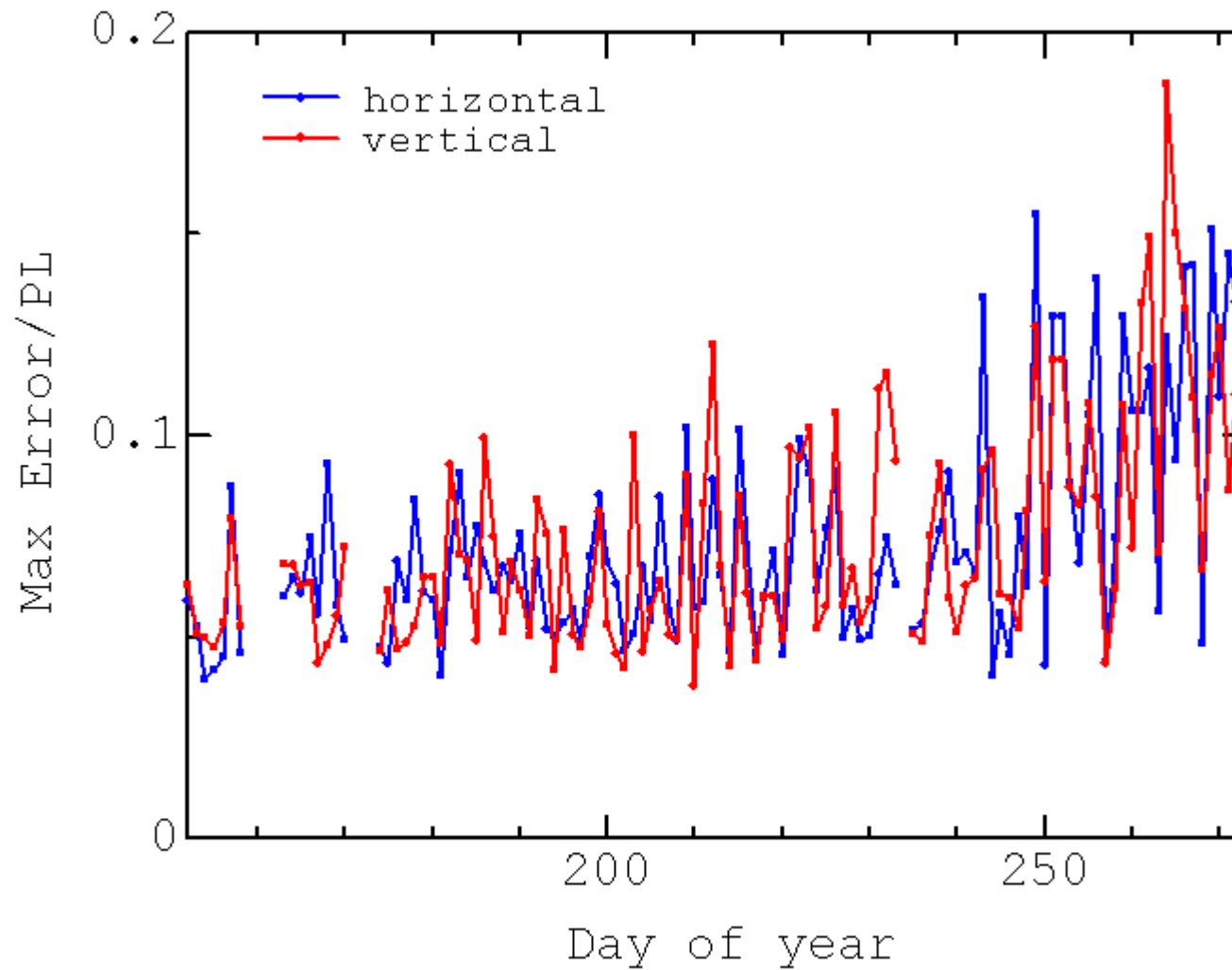
測位誤差 / PL 最大值 (川越)



GEONET 3011 (川越)
06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

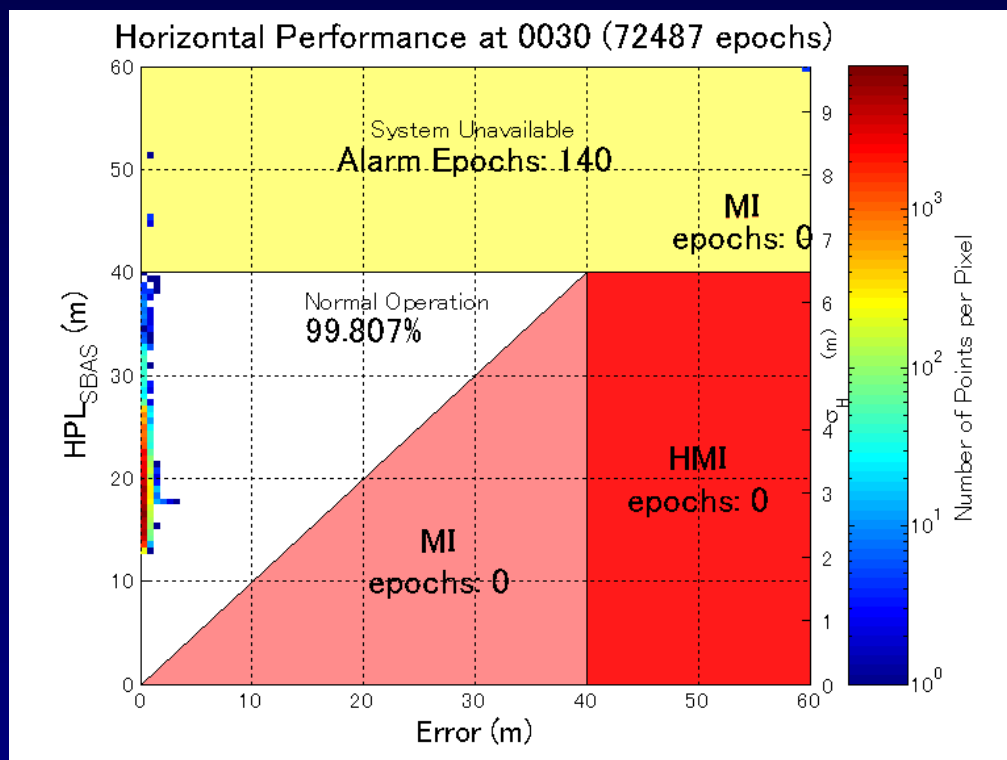
測位誤差 / PL 最大值 (那霸)



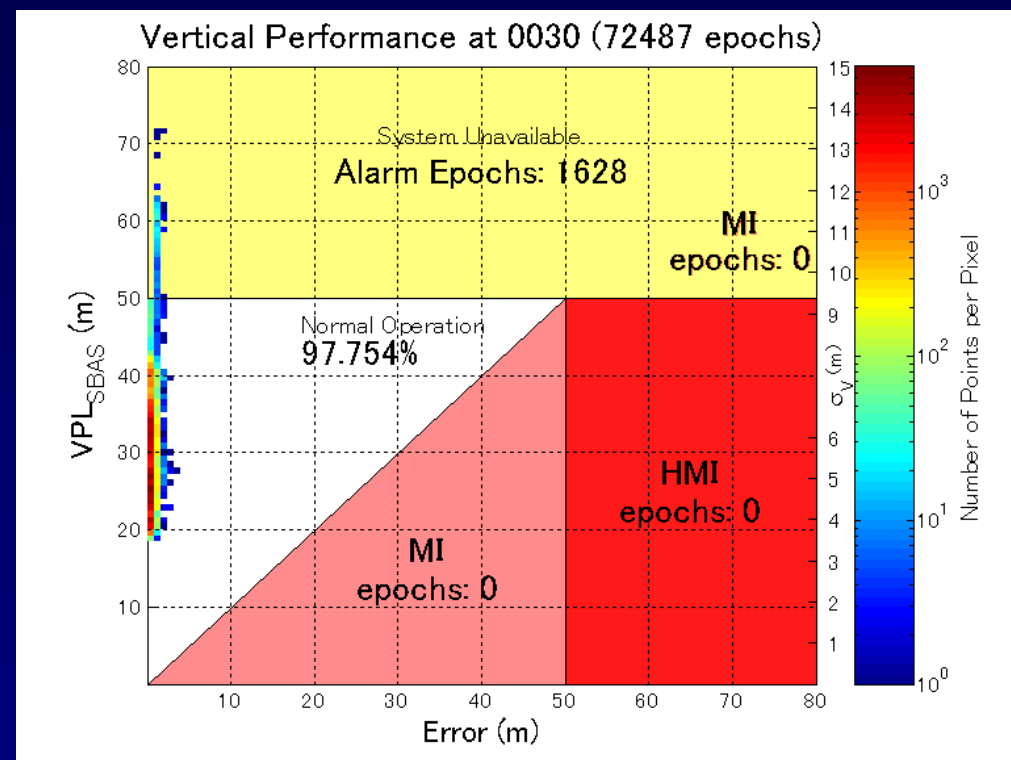
GEONET 0100 (那霸)
06/6/1 – 06/9/30

PPWAD PT/6+S

測位誤差とプロテクションレベル(1)



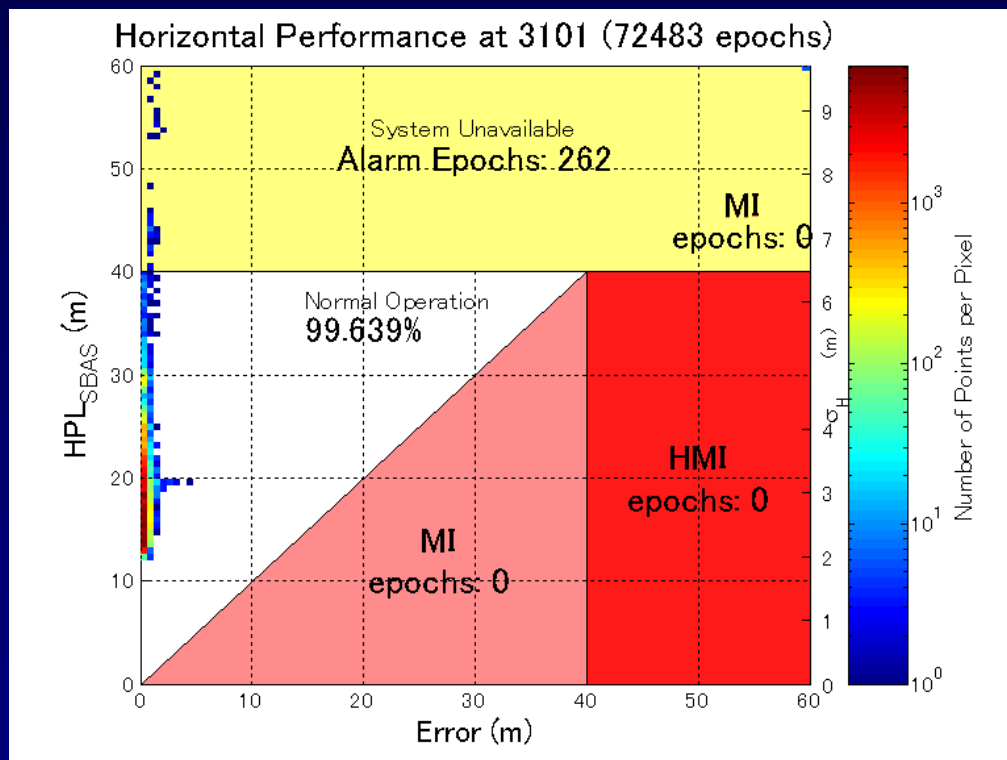
水平方向



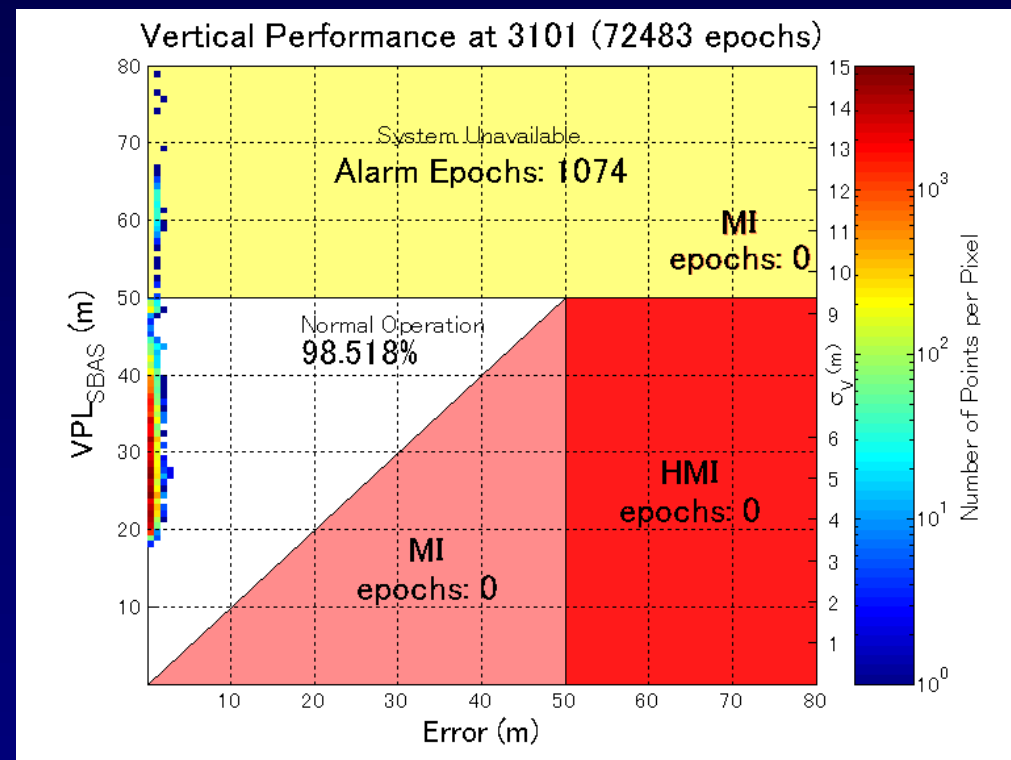
垂直方向

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)



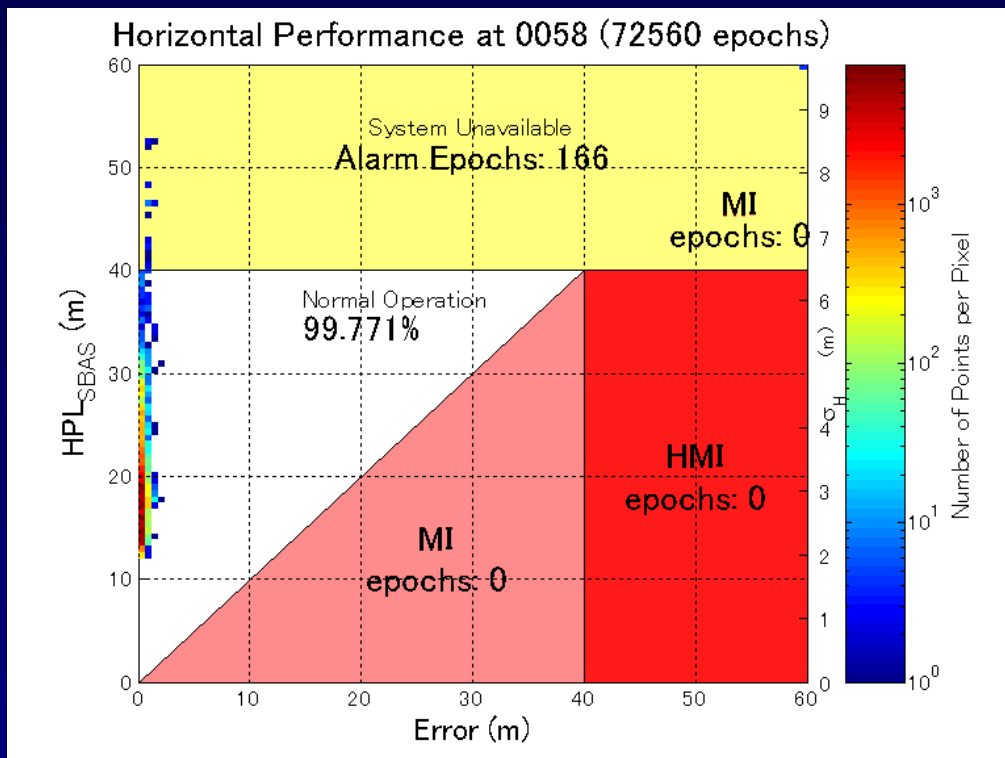
水平方向



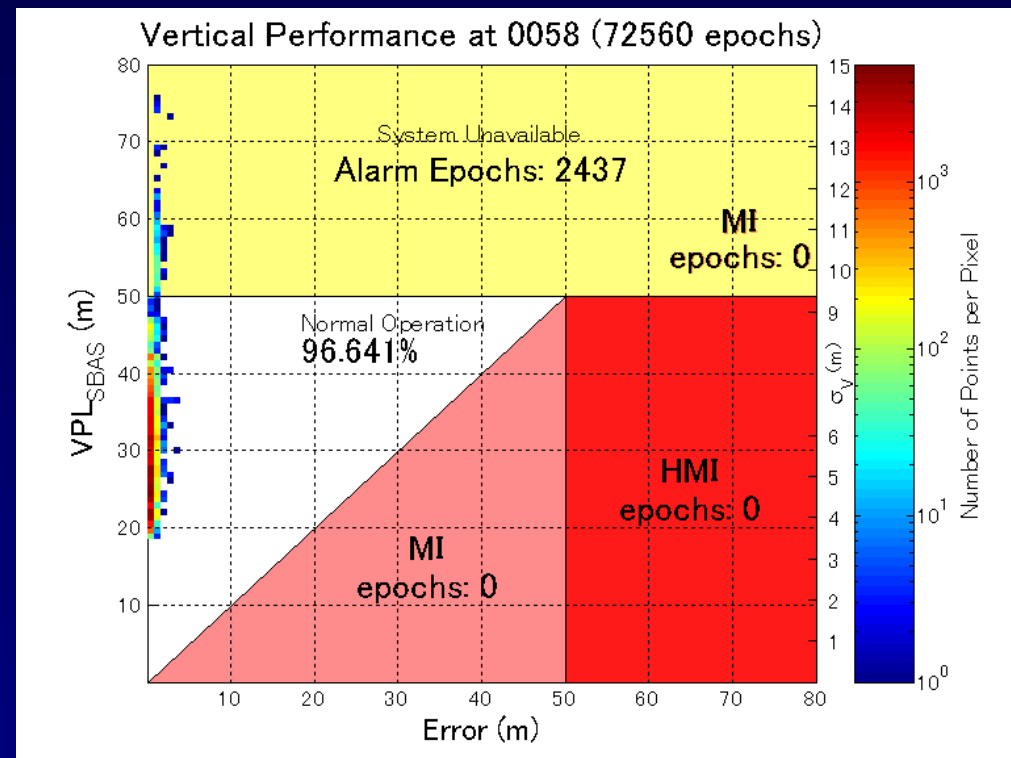
垂直方向

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) SLIDE 47



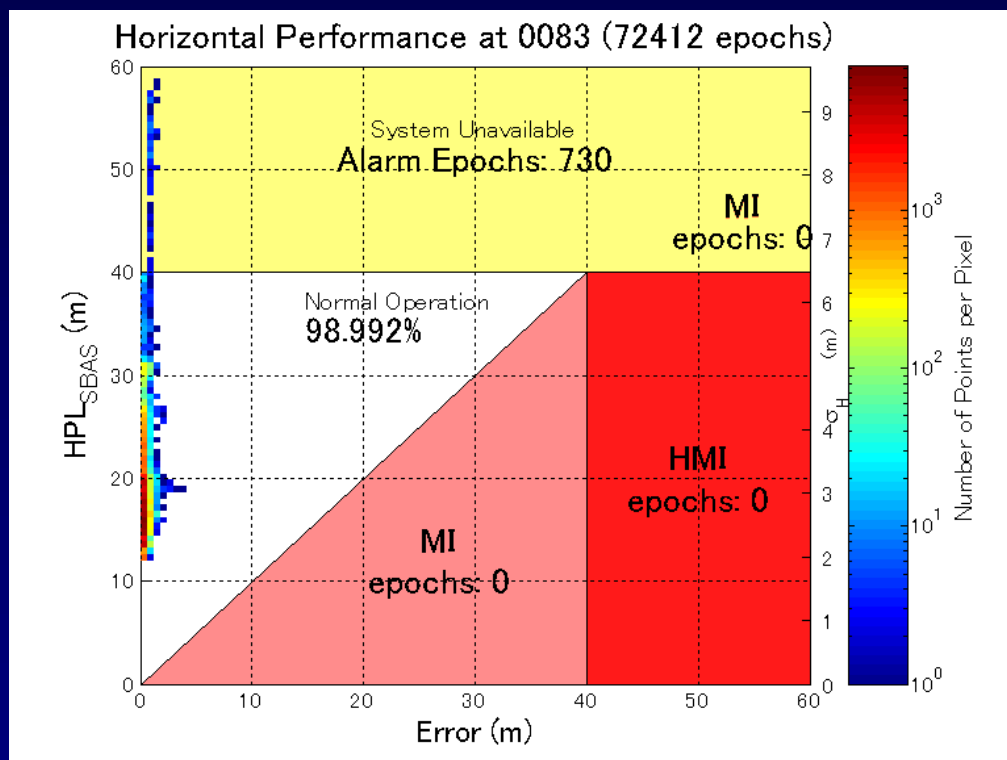
水平方向



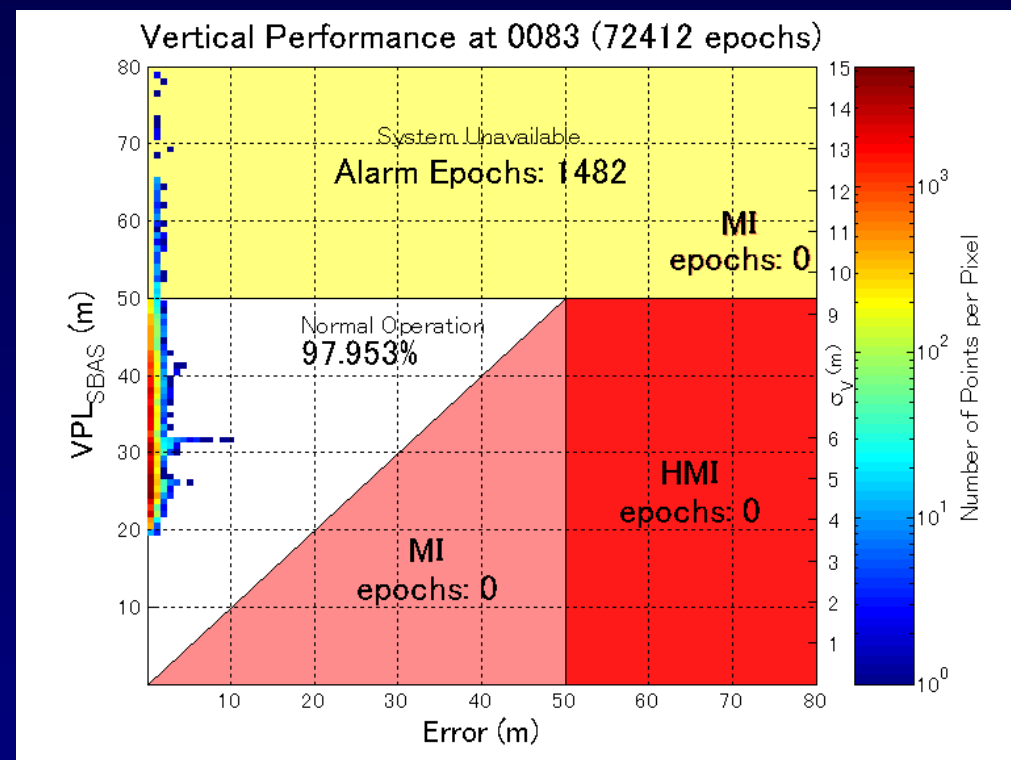
垂直方向

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

Conclusion

- GPS広域補強プロトタイプシステムを実装した：
 - MSASあるいはQZSSの研究開発用テストベッド。
 - 国土地理院GEONETのデータを利用して、オフラインモードで定常運用中。
 - 良好な測位精度(0.3～1m程度)、プロテクションレベルも正常に機能。
- 定常運用を実施中：
 - 2006年4月より定常運用を開始し、補強メッセージを毎日生成・蓄積。
 - 生成した補強メッセージは、後処理用広域ディファレンシャル補正情報として一般に提供： URL <http://www.enri.go.jp/sat/pro/data/ppwad>
 - 現在、リアルタイム化の作業中：リアルタイムモニタ局を、札幌・仙台・東京・富山・高知・福岡・那覇の7地点に設置済み。信楽にも設置作業中。
- 今後の検討課題：
 - 補正精度・インテグリティ性能の向上：電離層伝搬遅延補正方式の改良。
 - リアルタイム配信：RTCMフォーマットも検討。