

GNSSの課題と 解決に向けた取り組み

第6回CNS/ATMシンポジウム

2006年1月31日

電子航法研究所 星野尾一明



GPS Block II-F



GIOVE-A launch, 28 December 2005

はじめに

1. 本講演では、GPSおよび位置測定の仕組みをとおして、航空航法として利用するための課題を解説。
 - (1) GPSの仕組み(GPSの構成、GPS衛星)
 - (2) 位置測定の仕組み
 - (3) GPS誤差の種類と大きさ、測位精度改善方法
2. GNSSの概要と現状
3. SBAS、GBAS、電離層に関する課題と解決するための電子航法研究所の取り組みについて説明。

各GPS構成要素

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 2

GPSコントロールセグメント

- MCS 1局+バックアップMCS: 全体制御、航法メッセージ生成
- Monitor Station (MS) 6局(うち1局はMCS内): L1/L2 測距、航法メッセージ受信
- Ground Antenna (GA) 4局: コマンド・データ送信用

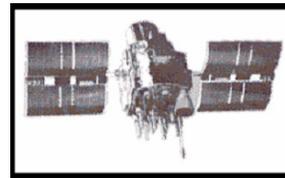


MCS

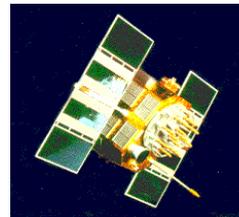


- 24衛星 (6軌道面、高度約2万km)
 - 実際は29衛星が稼動中
 - 軌道傾斜角55度、周期11:58
- 標準測位サービス (SPS): 軍民共用
 - L1 (1575.42MHz): C/Aコード (1.023Mcps)
- 精密測位サービス (PPS): 軍用
 - L2 (1227.6MHz): P/Yコード (10.23Mcps)
- スペクトラム拡散: CDMA、測距
 - 衛星のPRN番号 (1~37): 拡散コード
- 航法メッセージ (50bps): 軌道情報
- 1978~ Block I プロトタイプ
- 1989~ Block II/IIA 実用型 (SA機能あり)
- 1997~ Block IIR 衛星間リンク、Autonav
- 2005~ Block IIR-M 第二民間信号 (L2C)

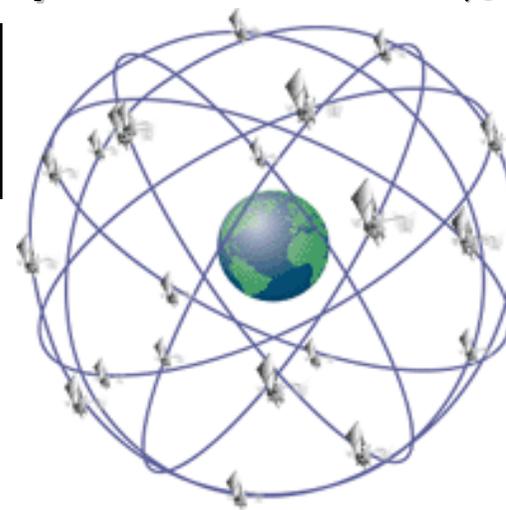
スペースセグメント



GPS Block I



GPS Block II/IIA



(FAA HP)



(Garrett, USAFより)

GPS Block IIR

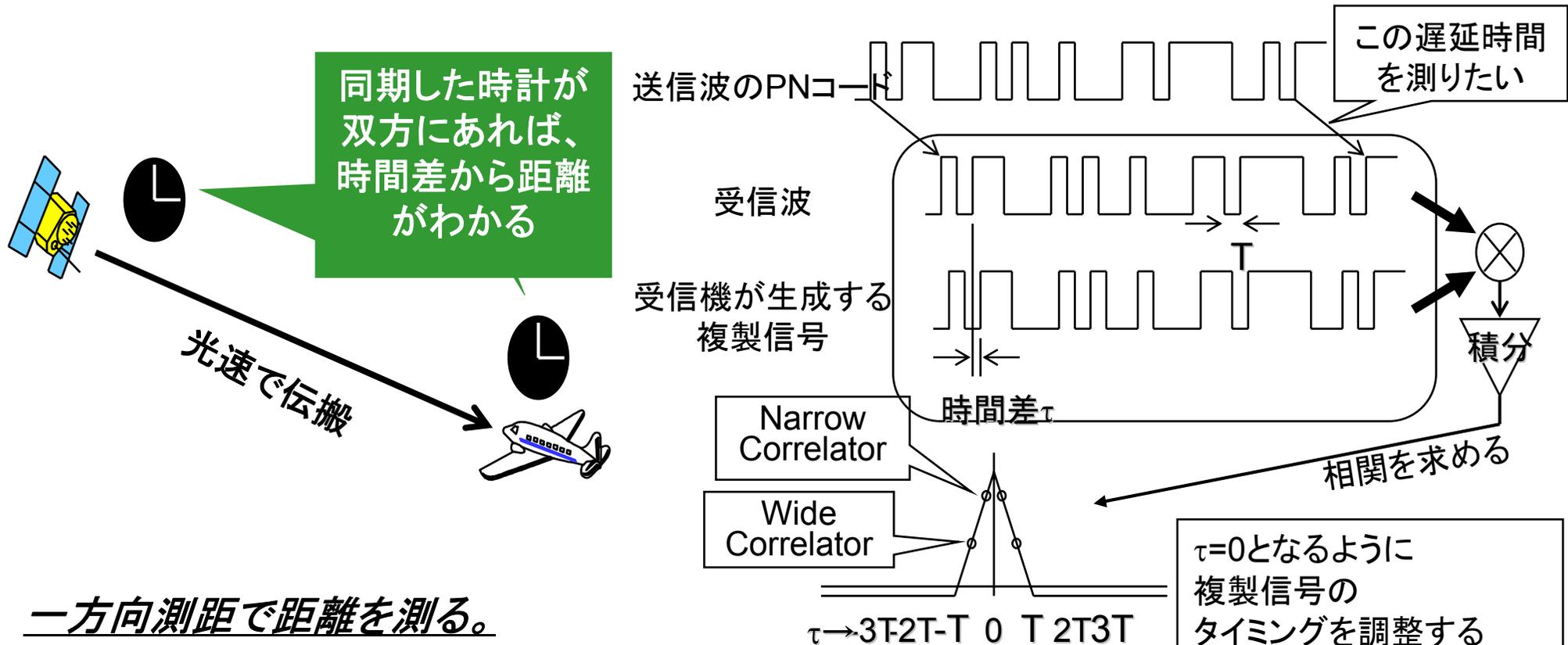


GPS Block IIF

位置測定の仕事み / 距離測定の原理

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 3



一方向測距で距離を測る。

- あらかじめ決められたタイミングで衛星が信号を放送し、受信側は受信した信号の時刻情報と自分の持っている時計を比べて時間差を算出する。

(課題1) 同期した時計が送・受信側双方に必要

(課題2) 受信タイミングを正確に測定しなければならない

- 10^{-9} 秒 ($1\text{ns}=0.3\text{m}$ に相当) 以上の精度で時間差を測定したい。

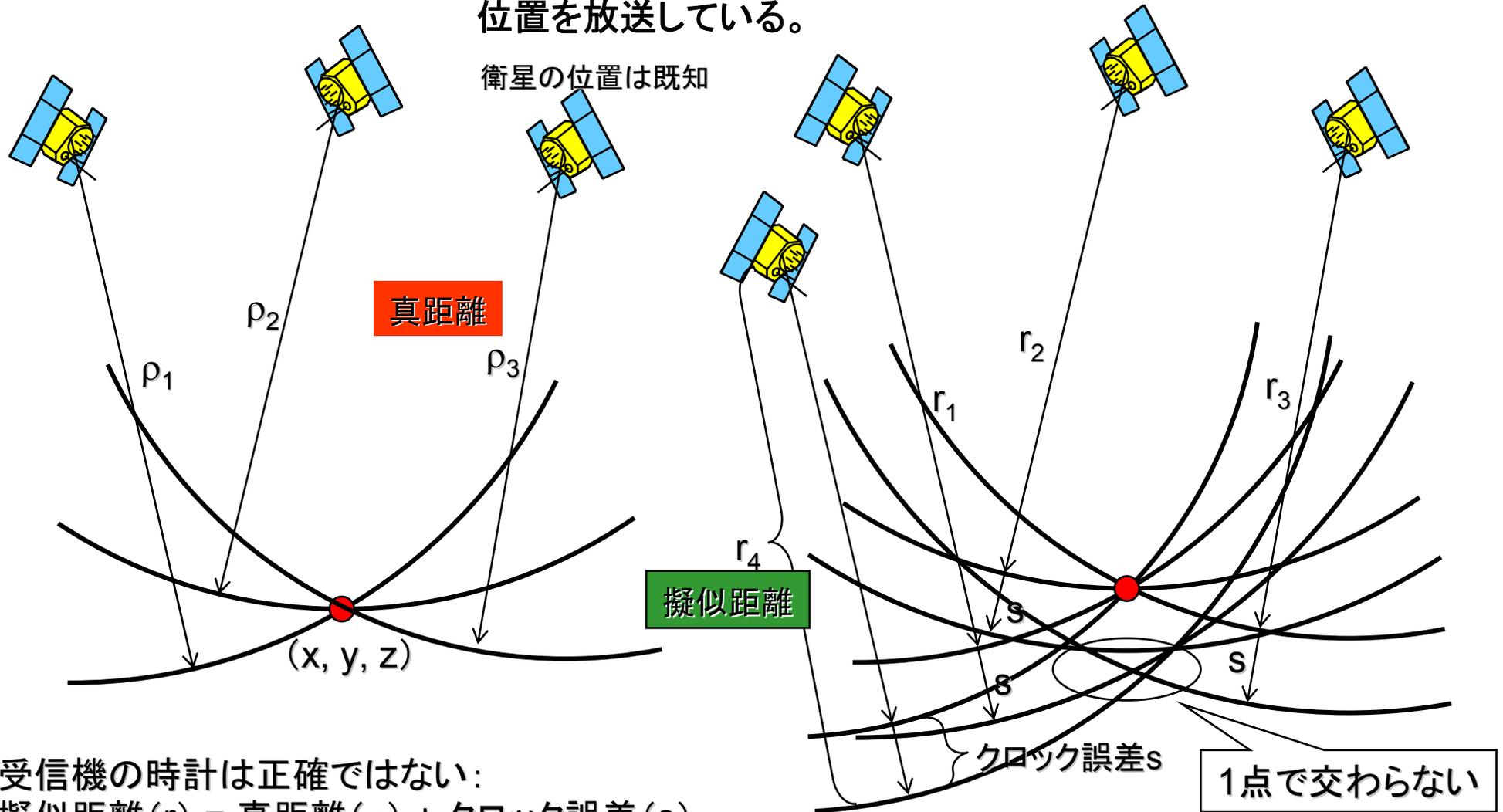
位置測定の仕事 / 測位の原理

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 4

衛星はエフェメリスとして自分の位置を放送している。

衛星の位置は既知



- 受信機の時計は正確ではない:
擬似距離 $(r) =$ 真距離 $(\rho) +$ クロック誤差 (s)
- 1点で交わるように s を調節する

測位誤差の要因

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

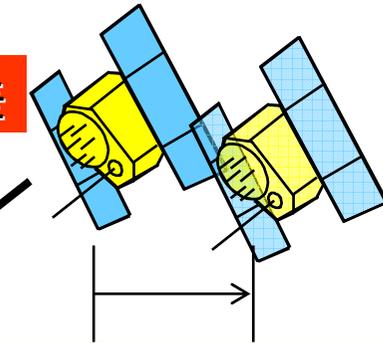
SLIDE 5

1. 電離層伝搬遅延
2. 衛星クロック、エフェメリス誤差
3. 対流圏伝搬遅延
4. マルチパス
5. 衛星配置

太陽光線



衛星クロック誤差



衛星軌道情報の誤差

電離層

電離層遅延 (~100m)
周波数に依存

高度250~400km程度

対流圏

対流圏遅延 (~20m)

高度7km程度まで

マルチパス

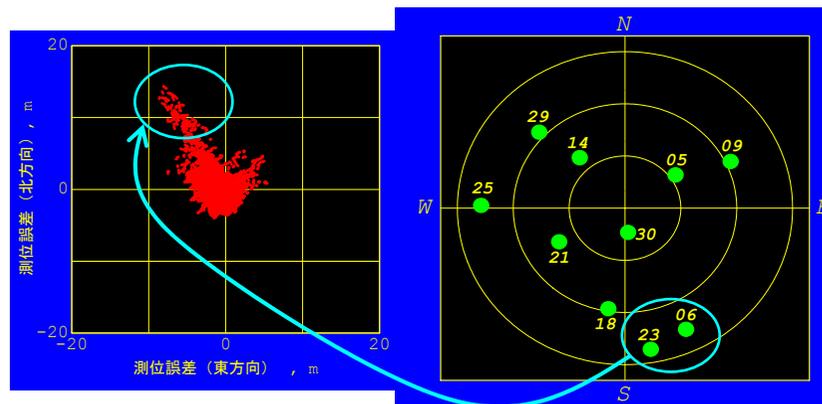
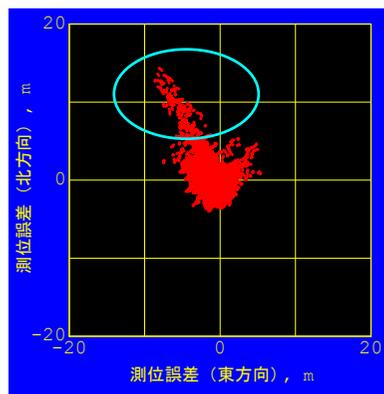


誤差要因の影響の例

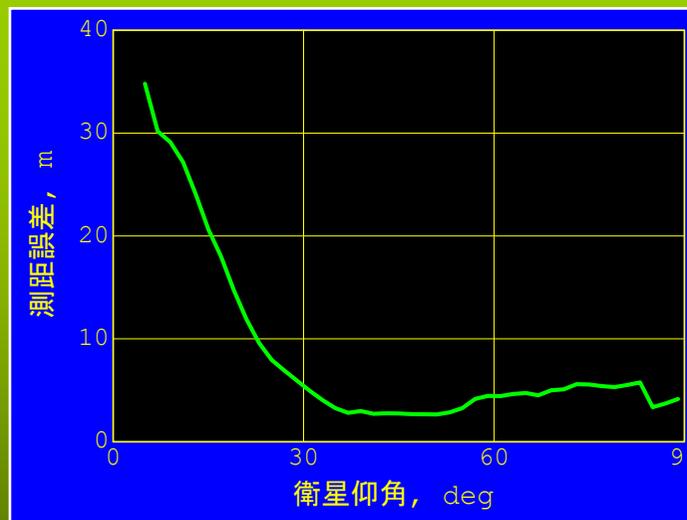
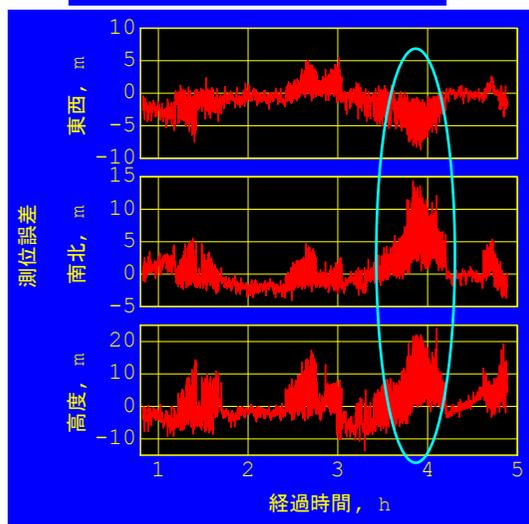
Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 6

測位誤差の例

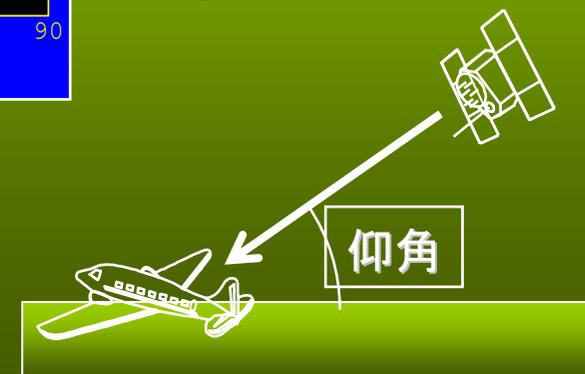


**衛星の配置
による影響**
(仰角の低い衛星が
悪影響を及ぼしている。)



- 測距精度は、衛星の仰角が低くなると悪化する。
対策(1): 低仰角の衛星は使わない(仰角マスク)。
対策(2): 仰角に依存して重みをつけて測位に使用する(衛星数>4の場合)。
- 仰角マスクは、測量等では15度以上、移動体航法では5~10度程度が普通。
- 仰角マスクを超える衛星について、重みをつけて計算するのが一般的。

測距精度の仰角依存性



東京都調布市 2001年10月19日

測位精度の見積り

測位誤差モデルの例(やや控えめ)

誤差要因	バイアス成分(m)	ランダム成分(m)	合計(m)
衛星軌道	2.1	0.0	2.1
衛星クロック	2.0	0.7	2.1
電離層遅延	4.0	0.5	4.0
対流圏遅延	0.5	0.5	0.7
マルチパス	1.0	1.0	1.4
受信機・その他	0.5	0.2	0.5
測距誤差	5.1	1.4	5.3
水平測位誤差(HDOP=2.0)			10.6
垂直測位誤差(VDOP=2.5)			13.3

米軍による規定(民間用標準測位サービス)

	全世界平均(95%)	最悪(95%)
水平方向	13 m	36 m
垂直方向	22 m	77 m

測位精度の向上

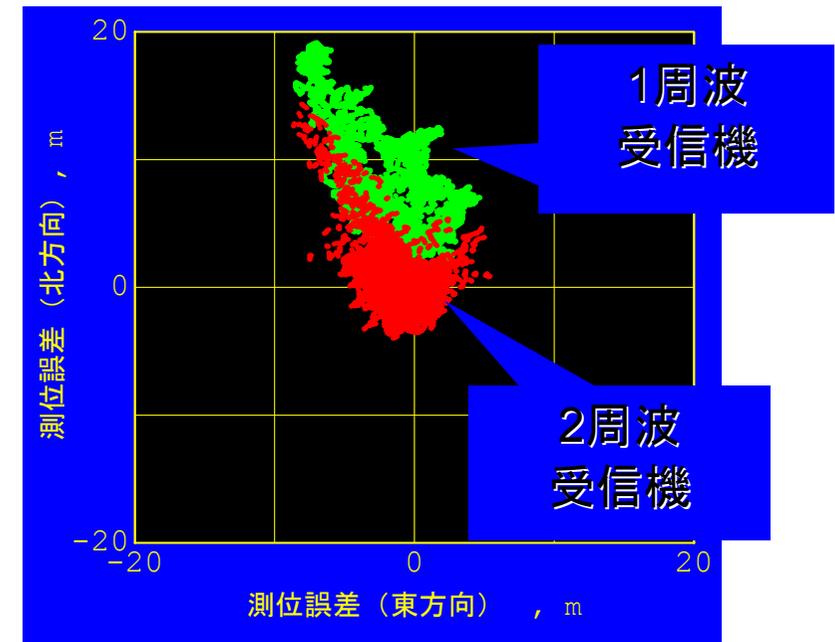
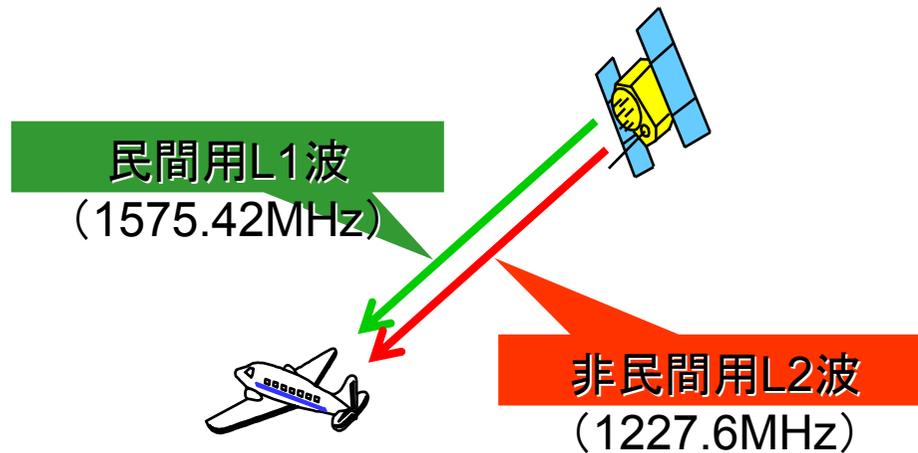
一般的には下記の方法で測位精度を良くする。

- 2周波の利用
- 狭域ディファレンシャルGPS
- 広域ディファレンシャルGPS

2周波の利用による効果

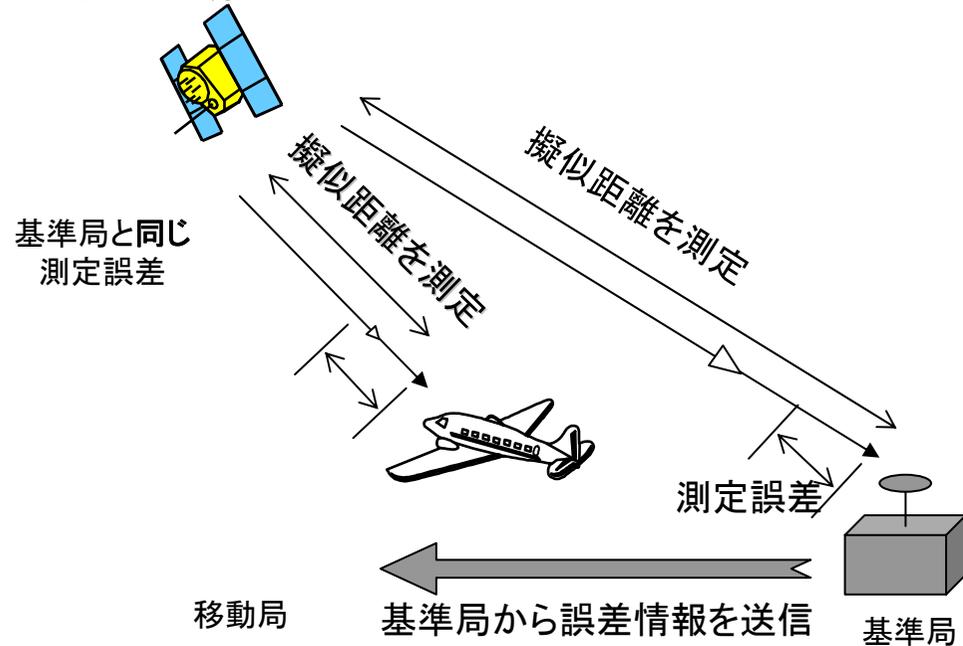
Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 9

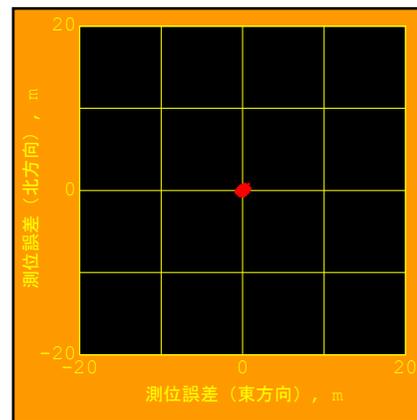
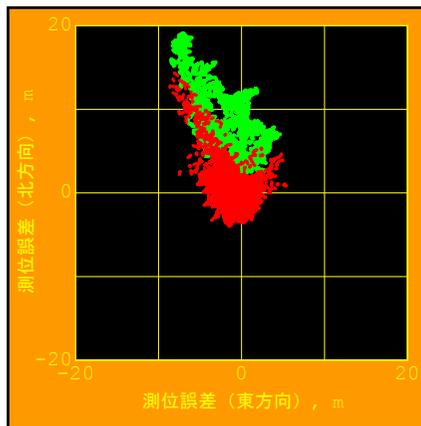


- GPS衛星は、民間用L1波に加え、民間用ではないがL2波も放送している。
- 将来民間用のL5が追加される。
- 2周波数を利用することで電離層遅延補正が良好にできるようになり、測位精度(特に垂直方向)が向上する。

狭域ディファレンシャルGPS



- GPSの誤差要因の多くは空間的な相関があるから、離れた地点間でも測距誤差は似ている。
- 位置がわかっている基準局で測距誤差を求め、この誤差情報を移動局に送信、移動局側で補正する。
- ディファレンシャル補正の精度は移動局—基準局間の距離(基線長)に依存。
- 基準局受信機に加え、無線リンクなどが必要。
- GBSA、海上保安庁DGPS等で利用されている。



ディファレンシャルGPSの効果

誤差要因	補正の可否	備考
衛星軌道	○	長基線では精度低下
衛星クロック	◎	よく補正できる
電離層遅延	○	活動が激しいと精度低下
対流圏遅延	△	高度差に注意
マルチパス	×	むしろ増加
受信機雑音	×	むしろ増加

広域ディファレンシャルGPS

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 11

- 狭域ディファレンシャル方式は、すべての測距誤差をまとめてひとつの補正值をつくる。
 - 基準局から遠く離れると補正值が役に立たなくなる。
 - ネットワーク化しても、線形補間ではうまくいかない場合がある。
- 地理的に広い範囲で有効な補正情報とするには、誤差要因別にすればよい。
 - 誤差要因: 衛星クロック誤差、衛星軌道誤差、電離層伝搬遅延、対流圏伝搬遅延。マルチパスは対象外。
 - 誤差要因別に補正值をつくり、それぞれ適切な関数で補間する。
 - 大陸規模の広い範囲で有効。
- 広域ディファレンシャルGPS (Wide-Area Differential GPS: WADGPS) 方式:
 - サービスエリア内では、単一の補正情報でどこでも補正が可能。
 - 所要データレートは、100~数100bps程度。
 - 地上基準局は、数100~1000km程度の間隔で配置する。
 - 静止衛星やインターネットで配信すると効果的。
 - 具体例: SBAS (静止衛星による補強システム: 米国WAASや日本MSAS)

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

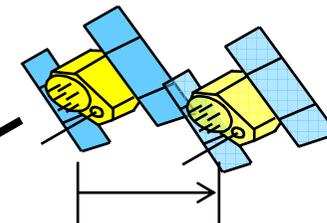
衛星軌道情報の誤差

- 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

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

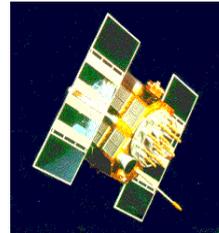
対流圏



ICAO GNSS

コアシステム (GPS/GLONASS) のみでは航空航法として必要とされる測位精度あるいは信頼性を得られない場合に、補強システム (augmentation system) を追加してこれを補う。

GPS



GLONASS



GBAS

地上基地局



WAAS

MSAS

EGNOS

SBAS

ABAS

機上装置によるインテグリティ確保
あるいはハイブリッド航法

補強システム

・SBAS: Satellite-Based Augmentation System

静止衛星による広域補強システム

・GBAS: Ground-Based Augmentation System

地上基地局による狭域補強システム

・ABAS: Airborne-Based Augmentation System

機上装置による補強システム

GNSS (Global Navigation Satellite System; 全世界的航法衛星システム)

- ICAO (国際民間航空機関) の定義: 民間航空航法に使用可能な性能を持つ衛星航法システム
 - 具体的には GPS/GLONASS+SBAS/GBAS
- 一般には、GPS/GLONASS/Galileo/各種補強システムの総称

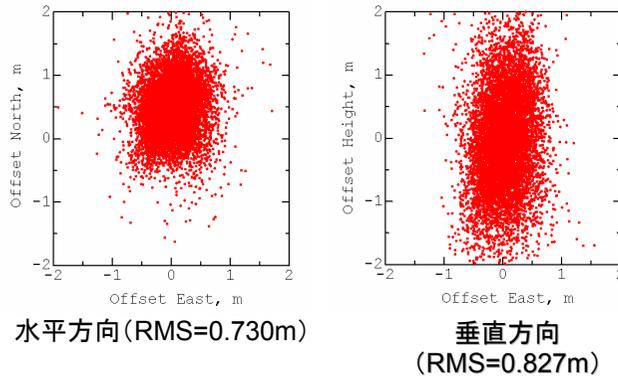
GNSS@Signal-in-Space 性能要件

Typical Operation	Accuracy (95%) / Alert Limit Lateral	Accuracy (95%) / Alert Limit Vertical	Integrity	Time to Alert	Continuity	Availability
En Route	3.7 km / 7.4 km	N/A	$1-10^{-7}/h$	5 min.	$1-10^{-4}/h$ to $1-10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
En Route, Terminal	0.74 km / 1.85 km	N/A	$1-10^{-7}/h$	15 s	$1-10^{-4}/h$ to $1-10^{-8}/h$	0.999 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach, Departure	220 m / 556 m	N/A	$1-10^{-7}/h$	10 s	$1-10^{-4}/h$ to $1-10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach and landing operations with vertical guidance (APV-I)	16.0 m / 40 m	20 m / 50 m	$1-2 \times 10^{-7}$ /approach	10 s	$1-10^{-4}/h$ to $1-10^{-8}/h$	0.99 to 0.99999
Approach and landing operations with vertical guidance (APV-II)	16.0 m / 40 m	8.0 m / 20m	$1-2 \times 10^{-7}$ /approach	6 s	$1-8 \times 10^{-6}$ in any 15s	0.99 to 0.99999
Category I Precision Approach	16.0 m / 40 m	6.0 ~ 4.0 m / 15 ~ 10 m	$1-2 \times 10^{-7}$ /approach	6 s	$1-8 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
Category II/IIIA Precision Approach	TBD	TBD	$1-1 \times 10^{-9}$ /approach	2 s	$1-4 \times 10^{-6}$ in any 15 s	0.99 to 0.99999
Category IIIB/IIIC Precision Approach	TBD	TBD	$1-1 \times 10^{-9}$ /approach	2 s	$1-2 \times 10^{-6}$ in any 30 s	0.99 to 0.99999

GNSS補強システム

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

開発／運用中のSBAS SLIDE 14

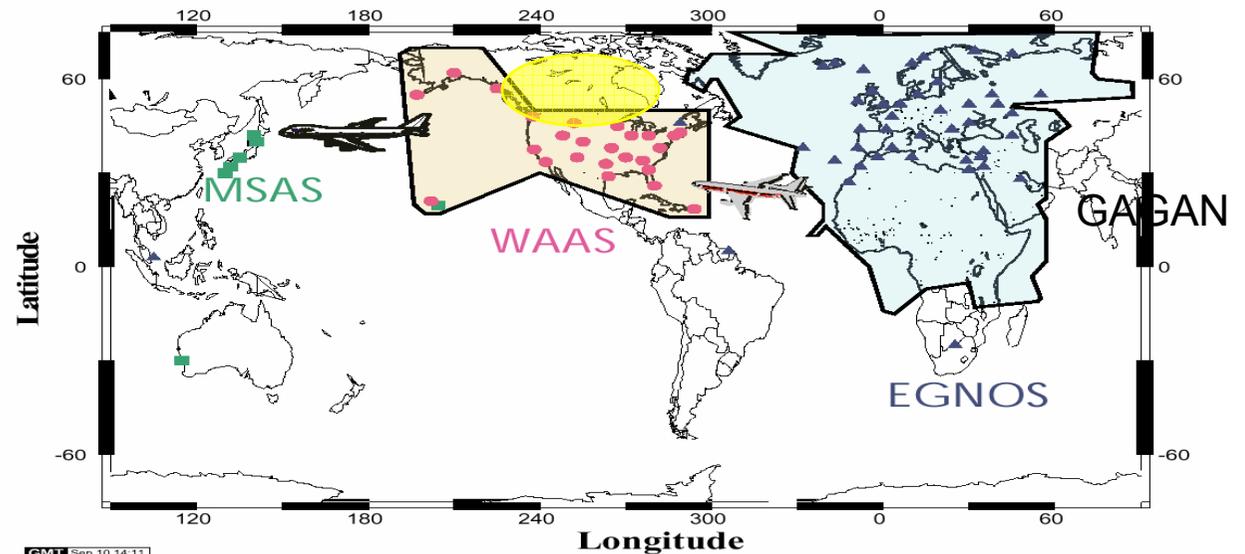


2004年5月7～9日 WAAS @Goldstone (IGS gold)

測位誤差の例 (WAAS)

補強システム: SBAS、GBASなどがある。

- コアシステム (GPS/GLONASS) のみではアプリケーションが必要とする測位精度あるいは信頼性を得られない場合に、補強システム (augmentation system) を追加してこれを補う。
- 補うのは、測位精度あるいは信頼性。
- 一般的な構成は:
 - (1) 地上基地局で測距精度や信頼性を監視
 - (2) 補強情報を作成してユーザに伝送
 - (3) ユーザ受信機で処理、測位精度や信頼性を向上させる
- ディファレンシャルGPSによる補強はすでに普及
 - ディファレンシャルGPS基準局+無線データリンク
 - 公共サービス: 中波ビーコン、FM多重放送など

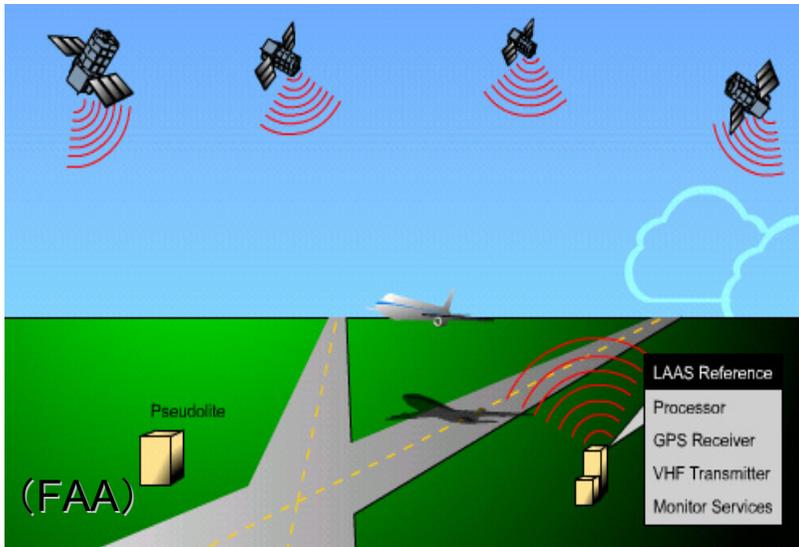


(R. Fuller, Stanford Univ.)

SBASの概要

- 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、メキシコ	WAASを拡張。カナダ、メキシコへの監視局追加。
- インドGAGAN	開発中。



GBASの概要

航空機の精密進入・着陸用の狭域補強システム。狭域ディファレンシャル方式を用いる。

- VHF帯のデジタルデータリンクにより31.5kbpsで送信。インテグリティ情報や進入経路情報等を含むため、データ量が多い。
- 地上局は複数の受信機・アンテナを装備。
 - 冗長性+マルチパス削減
- 米国はLAASと称して開発中。

GBASの状況

- ICAOではCAT-II/III SARPの策定作業が今も行われている
- 世界の開発・整備状況 (CAT-I)
 - 米国 FAAによる開発整備は中断 (研究は続行)
 - ヨーロッパ 2008年から ブレーメンの運用を目指す (Haneywell)
 - ToulouseにはAirbus用にCAT-I GBASは設置 (Thales)、
 - ロシア 2004年 機器開発・認証終了; 2006年に運用評価実施
 - オーストラリア 2005年12月 シドニーで運用評価開始 (Haneywell)
 - ブラジル プロトタイプを設置、評価を開始 (Haneywell)
- 航空機搭載装置
 - Collins GLU-925 MMR TSO approval
 - Boeing 737-NG 2004/8/31 Certification
 - Boeing 787 標準装備2008年より日本に導入 年間8機以上
 - Airbus 380 2006 からCertification作業を開始

GBASで何ができる

- 誘導精度がきわめて高い
 - 誘導コースは揺らぎがなく10m以内の精度をもつ
- 1式のGBASで、複数滑走路の複数の進入着陸・復行ルートの設定が可能
- 複雑な進入・復行ルートが設定できる:
 - Curved Approach
 - Offset Approaches
 - Multi-Segment Arrivals
 - Multi-Segment Missed Approaches
 - Multi-Segment Departure Procedures

GNSSの課題とENRIの取り組み(SBAS)

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 16

課題

- ・CAT-I精密進入は実現は困難、APV進入の利用率が十分でない。
- ・日本付近で電離層格子点が嵐とされ電離層情報が利用できない割合は30-40%と大きい。
- ・電離層誤差を示すGIVEがWAASに比して大きい。

理由:

- ・日本は磁気赤道に近く電離層活動が活発。電離層不規則構造
- ・プラズマバブルの影響を受けやすい。
- ・日本列島に沿ったモニター局配置しかできないため電離層データが少なめである。

取り組み

CAT-I 運用とAPV利用率向上を目指す研究。

- ・2周波(L1+L5)システム要件検討とSVMによる性能予測。
 - ー2周波SVM作成。衛星、信号の利用形態が重要
- ・2周波システム性能実証
 - ー2周波受信機による実証実験
- ・電離層プラズマバブル対策、到来予測
- ・1周波システム電離層性能向上

SVM: Service Volume Model

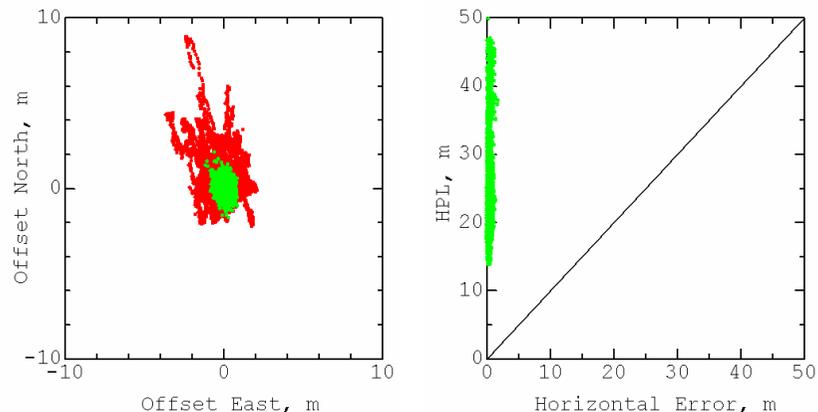
衛星配置、モニター局配置、測距性能等システムの主要機能性、性能を仮定して、利用率等を計算する数学モデル。

MSAS試験信号による性能の例と電離層の影響

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 17

MSAS 2005年12月26-30日のデータを使用



NPA 100.0%
 LNAV/VNAV 92.3%
 APV1 89.8%
 APV2 0.0%

 GEONET
 川越データ使用

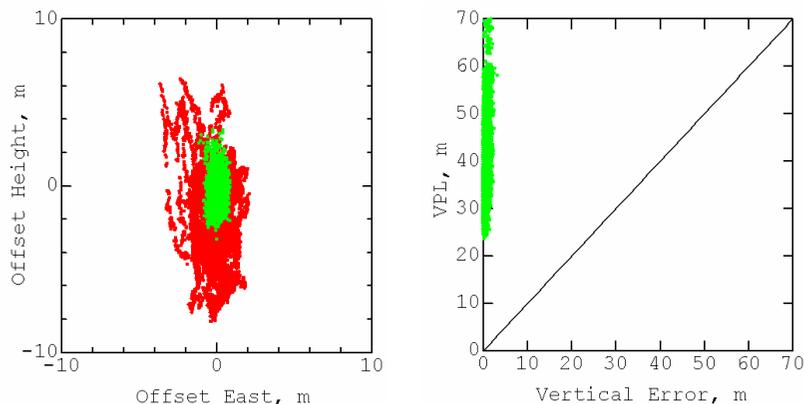
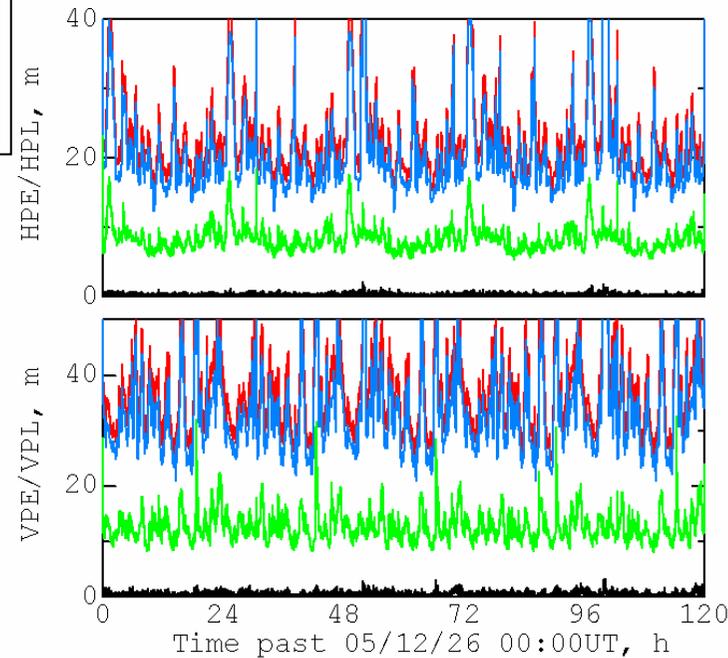
・GIVE:6m以上
 ・プロテクションレベルの大半は電離層の寄与

水平測位誤差とHPL (川越)

MSAS:RMS 0.412 m, MAX 2.211m

GPS:RMS 1.668 m, MAX 9.216 m

緑 MSAS、赤 GPS



垂直測位誤差とVPL (川越)

MSAS:RMS 0.710 m, MAX3.361 m

GPS:RMS 3.225 m, MAX 8.151 m

緑 MSAS、赤 GPS

測位誤差とプロテクションレベルを時系列

黒 誤差

赤 プロテクションレベル

青 電離層による寄与 (SARPsでいうsigma_fit)

緑 UDREによる寄与 (SARPsでいうsigma_UIRE)

MSASの概略性能の位置付けと

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

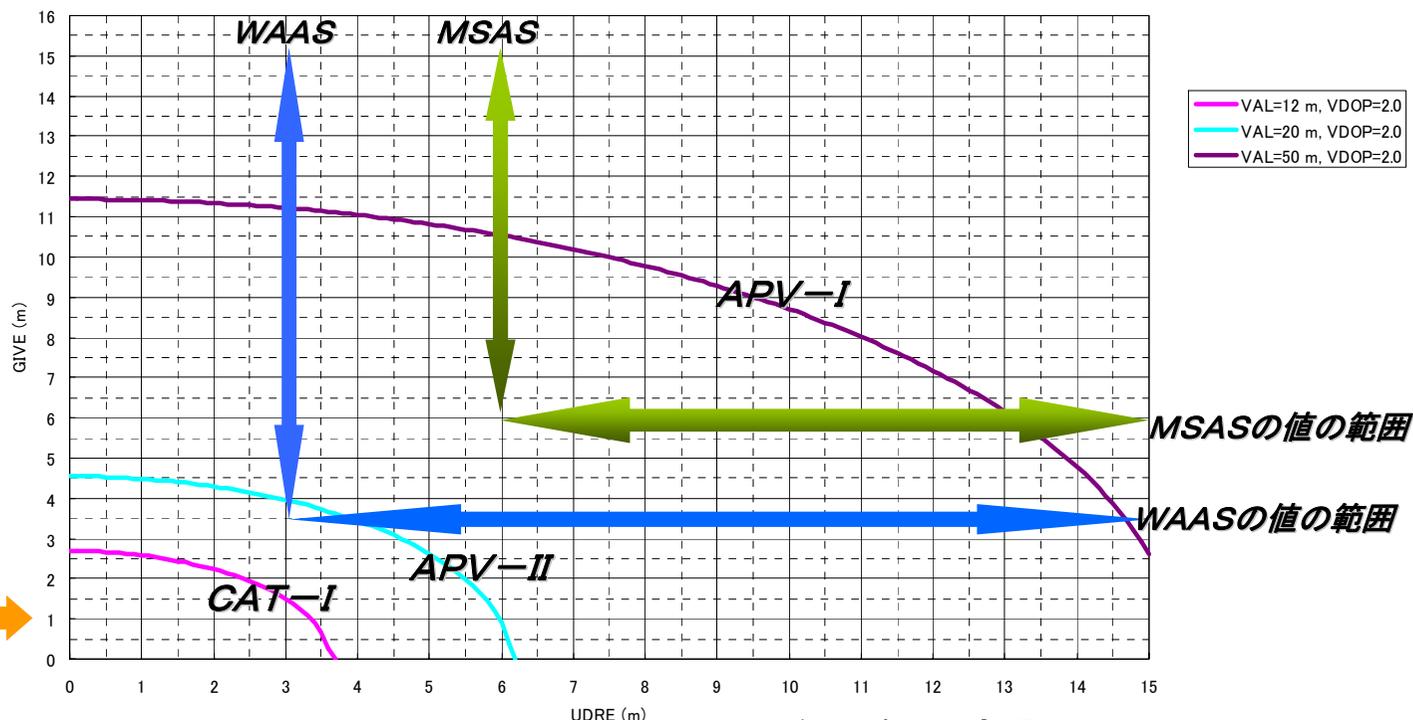
SLIDE 18

2周波システム性能の予測

MSAS:

- ・APV-Iは可能であるが、利用率が十分でない。
- ・CAT-I、APV-IIは電離層性能、クロックエフェメリス性能改善必要。

2周波システムにおけるGIVEの予想値



SBASにおいてAPV、CAT-Iを可能とする

クロックエフェメリス誤差 (UDRE) と電離層誤差 (GIVE) の関係

(VAL=12~50m、VDOP=2.0)

APV-Iを実現するためには、GIVE=11.5m、UDRE=15m以下、

APV-IIを実現するためには、GIVE=4.5m、UDRE=6.2m以下、

CAT-Iを実現するためには、GIVE=2.5m、UDRE=3.5m以下の必要がある。

現在のGNSSの課題とENRIの取り組み(GBAS) SLIDE 19

課題

精度、警報限界 (VAL) 要件が厳しいこと、および、現在の誤差モデルの限界ため、CAT-II, IIIの利用率が十分でない。

⇒プロテクションレベルの増大が原因。

増大を避けるあるいは軽減するため、誤差詳細の把握、誤差のモニタ、アルゴリズム改良が必要。

主要因

- 電離層不規則構造
- 受信機の個体差
- モニター局、利用者の誤差の相違 (マルチパス、対流圏遅延等)

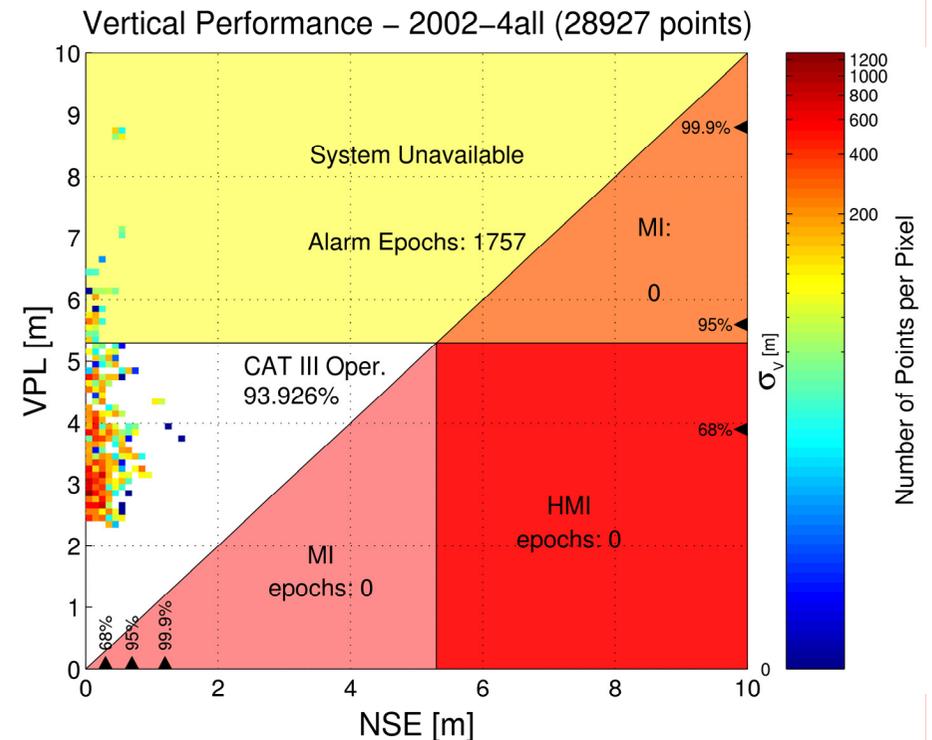
取り組み

- CAT-I GBASの実証
- MMRによる飛行試験 (collins GLU-925)
- SBAS測距信号を用いたGBASの開発
- 誤差要因解析
 - 完全性に対する日本における脅威モデル開発
 - 電離層、対流圏の影響
 - 積雪の影響
 - 受信機互換性 (信号歪み)、等
- L5 GBASの研究

GBAS飛行試験

- RTCA DO-245の要件を基準とした評価
- 精度（垂直方向 NSE 95% 2m）
 - 飛行実験 0.79m (最大値 1.49m)
 - 地上実験 0.59m (最大値 1.86m)
 - 航法精度は性能要件を満足する
- アベイラビリティ
 - 飛行実験 93.9 % (VAL 5.3 m)
 - CAT-IのVAL(10m) に対しては99.99%以上
 - 地上実験 99.3 % (VAL 5.3 m)
 - アベイラビリティの要件99%に対してはアベイラビリティを上げる努力が必要
- ICAOのTTAに相当するAGEを計測
 - 基準値の2秒を満足する1.6秒(最大値)
 - 平均 0.56秒

垂直精度・VPLの飛行実験結果



GNSSの課題とENRIの取り組み(電離層)

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 21

電離層に関する課題

- ・SBAS/GBASとも電離層活動の影響を受け、アベイラビリティ低下の原因となっている。
- ・電離層のGNSSへの影響の定量的評価が十分でなく、マージンが大きく見積もられている。
- ・電離層プラズマバブルによる、信号喪失、急激な電離層遅延の変化がある。
- ・GBASでは垂直電離層遅延誤差が測位誤差をもたらすために完全性を破る要因である。

理由

- ・日本は磁気赤道に近く電離層活動が活発。電離層に大小さまざまな不規則構造がある。(SBAS,GBAS)
- ・磁気赤道に近くプラズマバブルの影響を受けやすい。(SBAS,GBAS)
- ・日本列島に沿ったモニター局配置しかできないため電離層データが少なめである。(SBAS)

取り組み

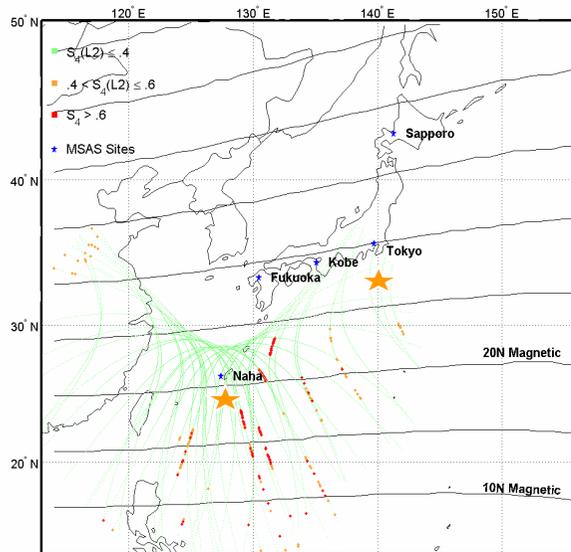
- ・2周波の利用の検討
- ・電離層不規則構造のGNSSへの影響データ収集、定量的評価
- ・電離層プラズマバブル対策、到来予測
 - －観測、予測システム試作(石垣島、与那国島)、受信機追尾ループ最適化
- ・1周波システム電離層性能向上
 - －嵐検出方法、近似モデル
 - －監視局配置
- ・GBAS完全性に対する日本における脅威モデル開発

電離層活動のGNSSへの影響と対策(1/2)

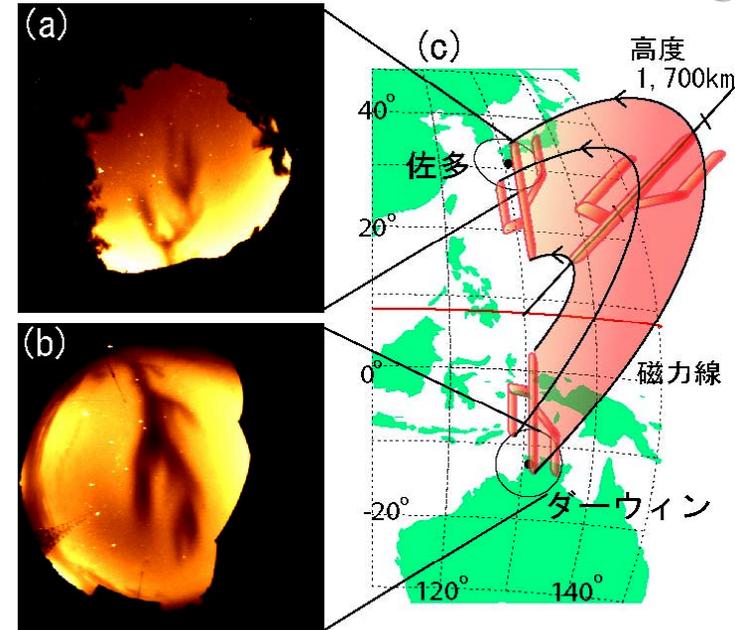
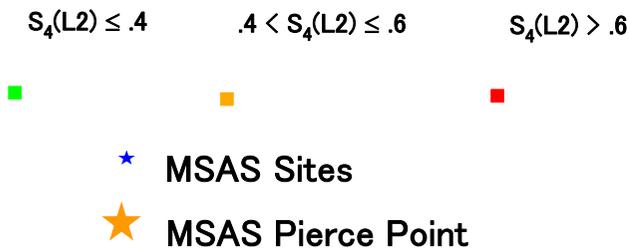
- **シンチレーションによる信号ロックはずれ。**
 - ①SBASでは静止衛星信号が失われると、補正情報、インテグリティ情報を得ることができない。
 - ②受信できる衛星数が4個以下となる可能性があり、測位不能となる場合がある。
- **対策**
 - 2周波システムとなっても影響が残る。
 - プラズマバブルの発生検知と到来予測、警報の発信。
 - モデルのシステムへの組み込み。
 - 受信機トラッキンググループの最適化
 - 冗長系を考える。
 - 衛星の増加。時間、空間ダイバーシティ等。

電離層プラズマバブルと シンチレーションの起こる場所

IPP 軌跡上でのシンチレーションが起こる位置
(那覇, 2001年2月17日)



$S_4(L2)$



大気光イメージャーによる
プラズマバブル観測の例

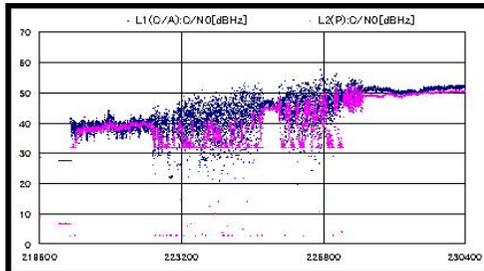
- 鹿児島県の佐多町とオーストラリアのダーウィンで同時に観測された、高度250km付近で発光する酸素原子の夜間大気光(波長630.0nm)の全天画像(それぞれ図 a,b)。画像の中心が天頂、上が北、左が東。
- 大気光の暗い領域がプラズマ・バブル。佐多とダーウィンでは上下逆さまに観測されており、プラズマ・バブルが図cのように地球の磁力線に沿った形をしていることが分かる。

GPS信号への電離層シンチレーションの影響

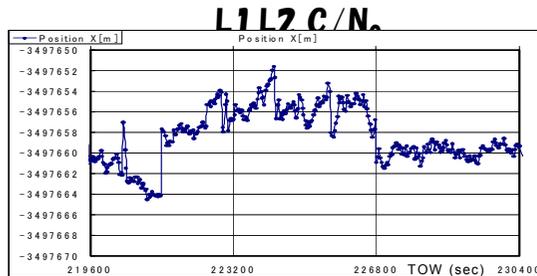
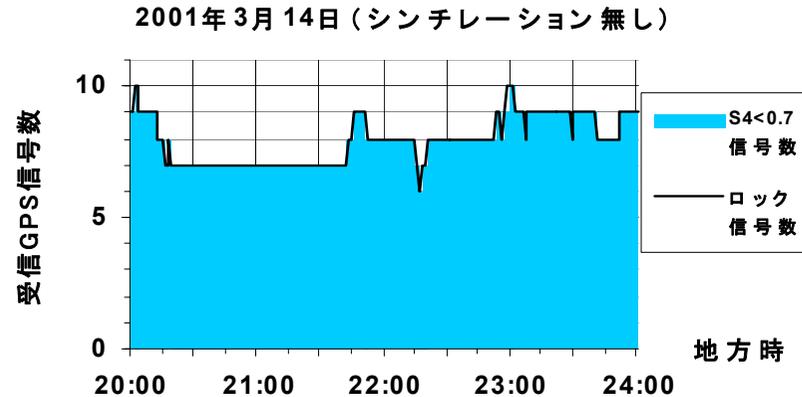
Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 24

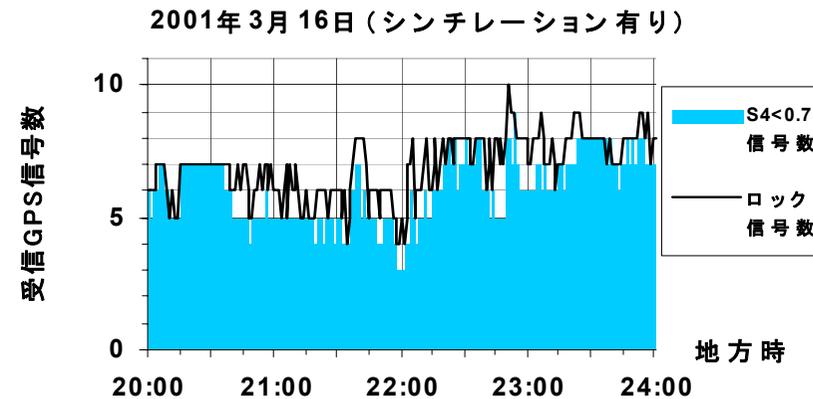
1. 急激な受信レベル変動
2. ロックはずれ
3. 測位値のずれ



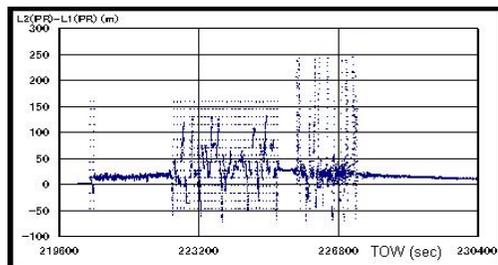
シンチレーションにより20dB以上のレベル変動。ロックはずれもある。



シンチレーションの影響により位置が4m程度ずれている。



X-axis Position Error)



シンチレーションにより250mに達する誤差がある。

Pseudo Range (L2-L1)

GPS信号への電離層シンチレーションの影響

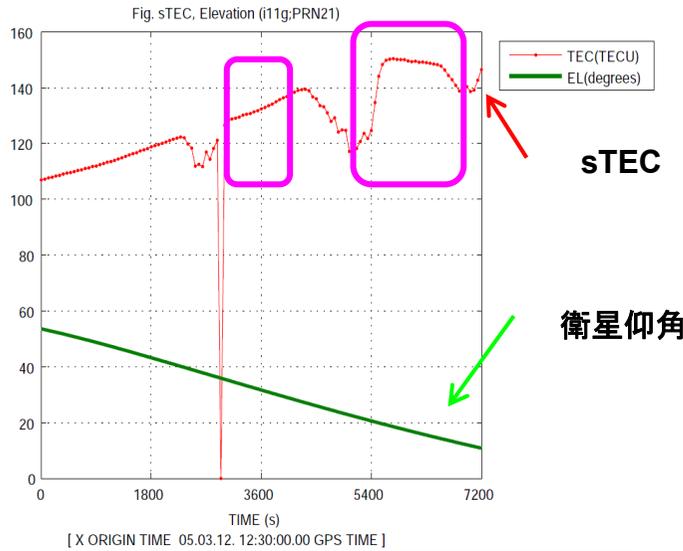
(PRN 5, 13:00-16:00 UTC, 2001年4月3日、那覇Z-12)

同時にシンチレーションの影響を受けるGPS信号数

激しいシンチレーションが観測された日は、通常より1から3個、GPS信号数が減少する。シンチレーションの影響を受けない衛星信号数が4個未満になることもある。

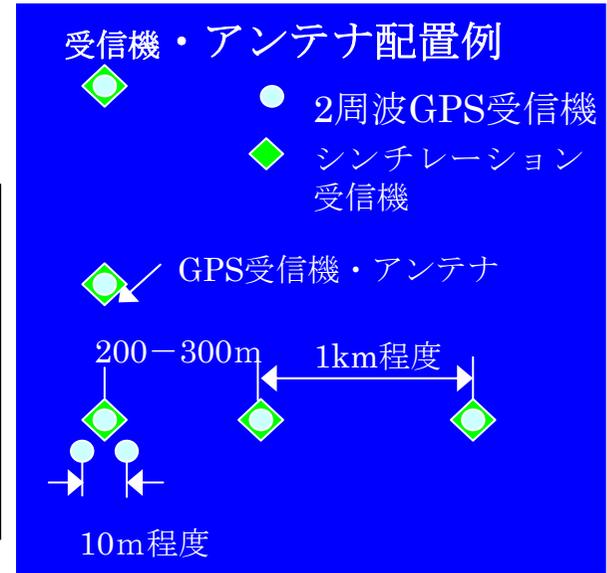
電離層プラズマバブルの発生と速度観測による

到来予測



プラズマバブル観測システム

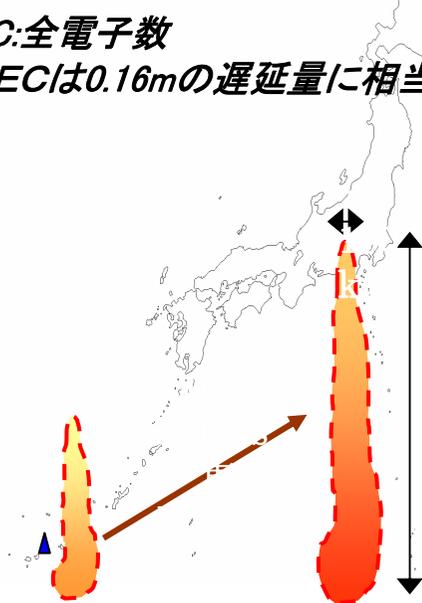
- ・急激なTEC変動によりプラズマバブルの発生を検知。
- ・数百メートル離れた3個以上のアンテナによりTEC変動を測定。
- ・各アンテナにおけるTEC変動の時間差よりプラズマバブルの移動方向速度を算出。



プラズマバブルによるTECの変化

TEC:全電子数

1TECは0.16mの遅延量に相当する。



プラズマバブルの形状と動きのイメージ

○ : 設置場所

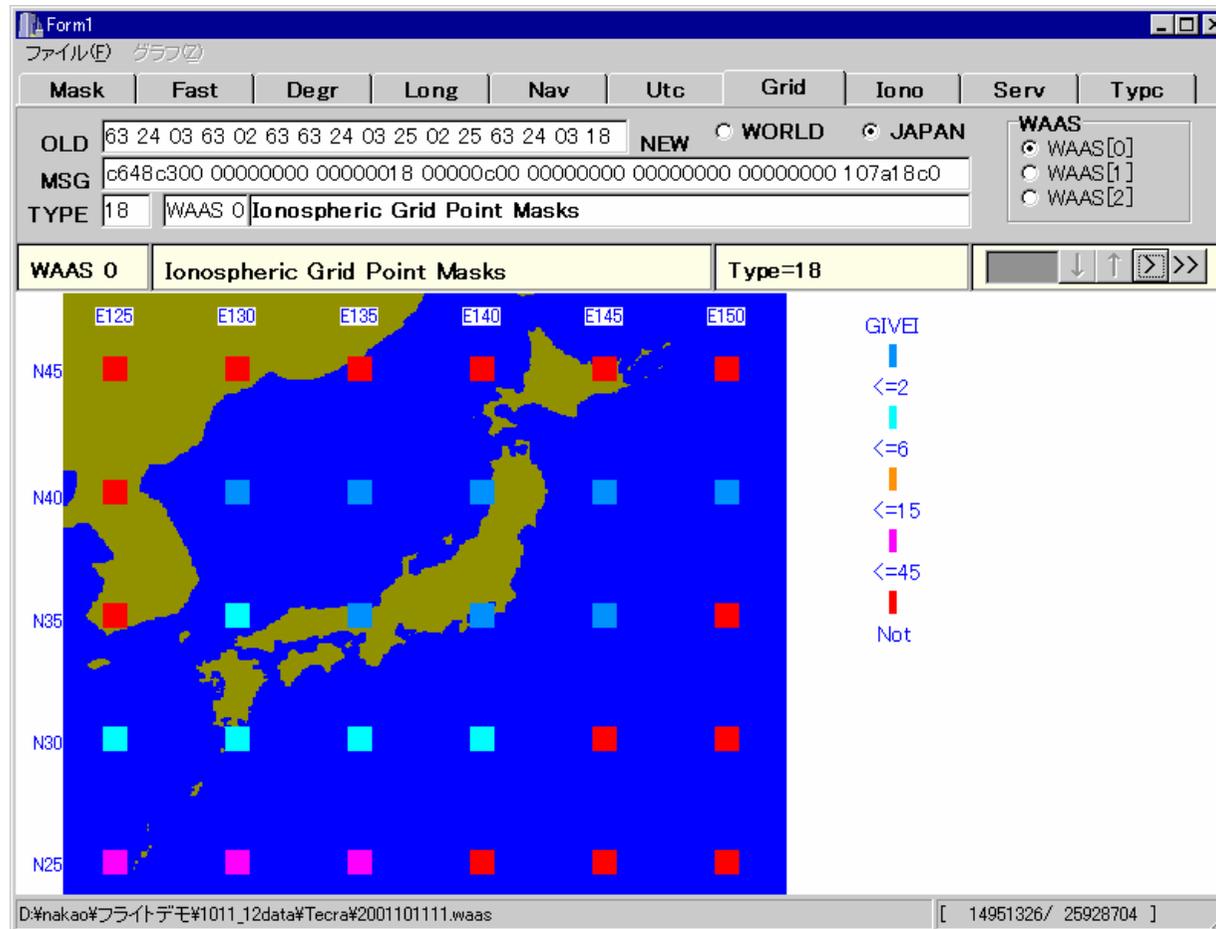


石垣島 GPS電離層シンチレーション稠密観測システム設置場所

電離層活動のGNSSへの影響と対策(2/2)

- 様々な空間スケールの電離層不規則さによる電波伝搬遅延量変動が影響する。
電離層遅延量の近似方式はベースとなる電離層遅延量の空間相関性に依存。
 - ①測位精度劣化、信頼性低下。
 - ②電離層遅延補正が利用できないと、精密進入は不可能。
 - ③電離層が平静な場合、平面近似はうまく働く。
 - ④嵐検出が適切でない。利用率低下。
- **対策**
 - 2周波システムでは電離層問題はほぼ解決可能。
 - 何らかの理由で1周波システムとなる可能性が残るので、1周波システムの性能改善は必要。
 - ・嵐検出方法の改善
 - ・遅延近似モデルの検討。
 - 0次、1次、2次近似あるいはそれらの組み合わせ。クリギング法等

MSASの電離層補正



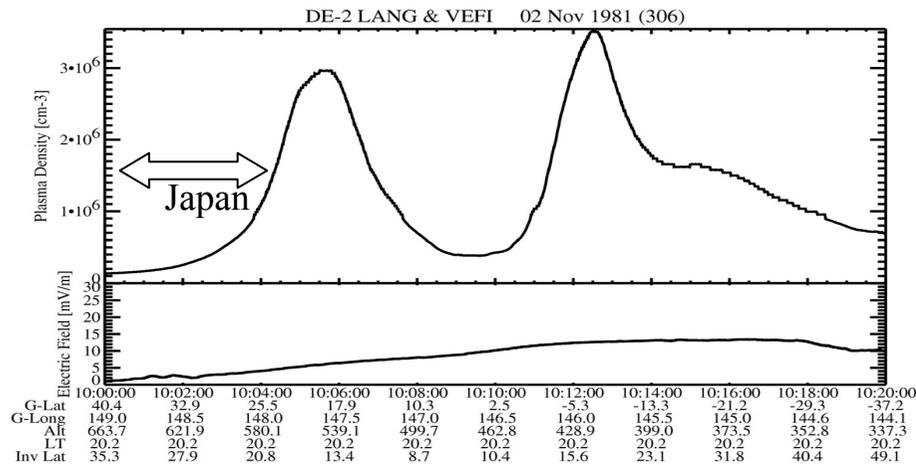
- 電離層関係の情報は2種類：
 - 遅延量情報(補正情報)
 - GIVE(誤差の推定値)
- これらの情報は、IGPにおける値が放送される。
- ユーザは、各衛星から到来する測距信号のIPPを求め、その位置の補正値を内挿により求める(外挿は不可)。

IGP: 電離層格子点、経緯度5度
毎の格子点

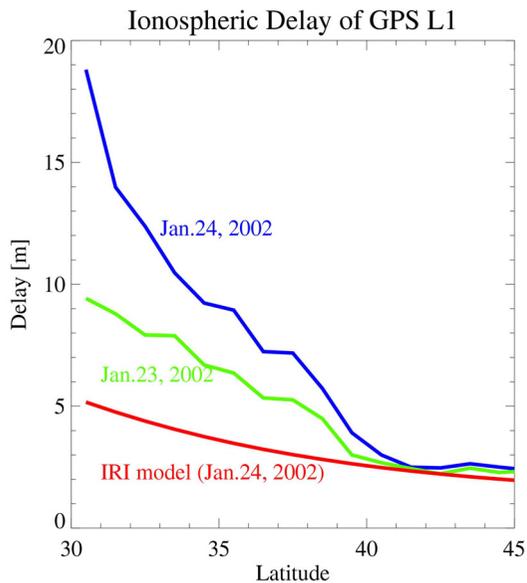
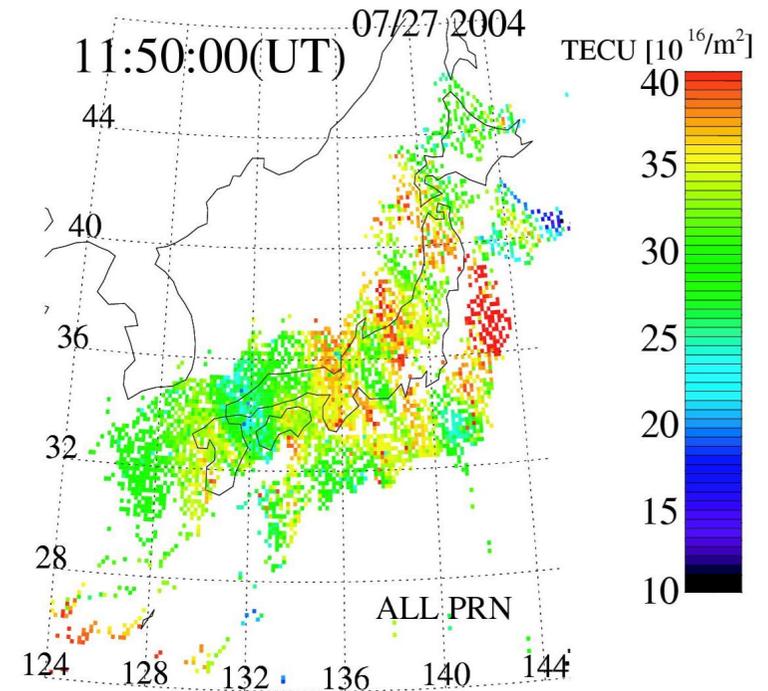
電離層遅延等で見えた電離層の大規模構造と擾乱

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 28



経度面内で見えたプラズマ密度
(30° S-40° N)



経度面内で見えた日々
の電離層遅延変化。

実測値とIRIモデルによる
計算値。
日々の変化が大きい。

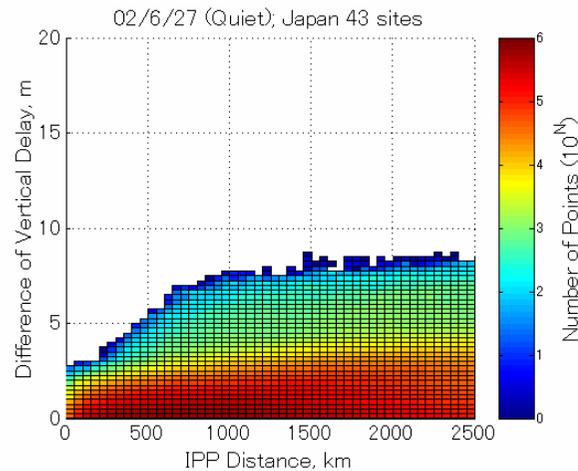
国土地理院GPS受信機網
GEONETで捉えられた
日本上空全電子数構造

百キロメートルあるいはそれ以下の
空間構造があり、モニター局の
密度、配置によっては見逃される。

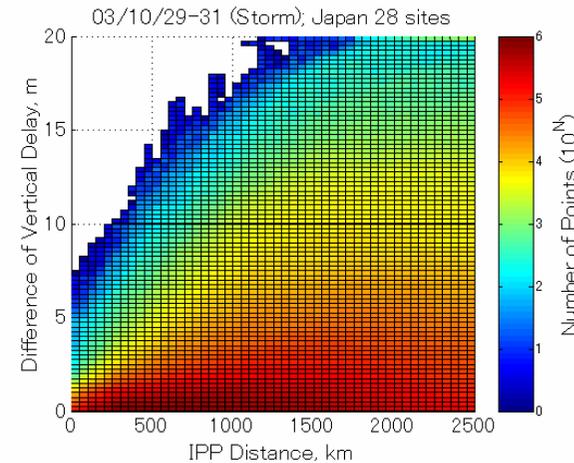
電離層遅延空間相関と平面近時残差の例

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 29

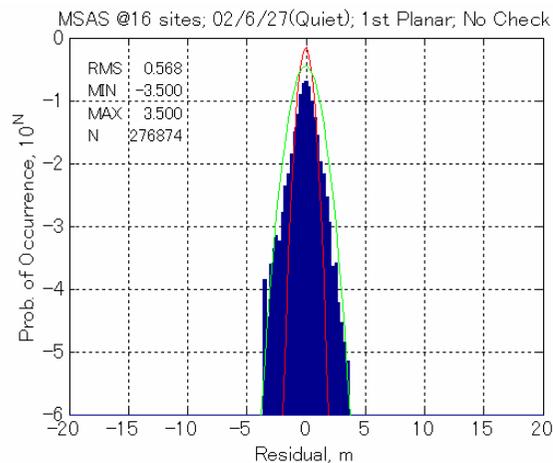


二つのIPPにおける垂直遅延量の差とIPP間距離の関係の色付きのヒストグラムで表示した。データセットは電離層静穏日のもの。

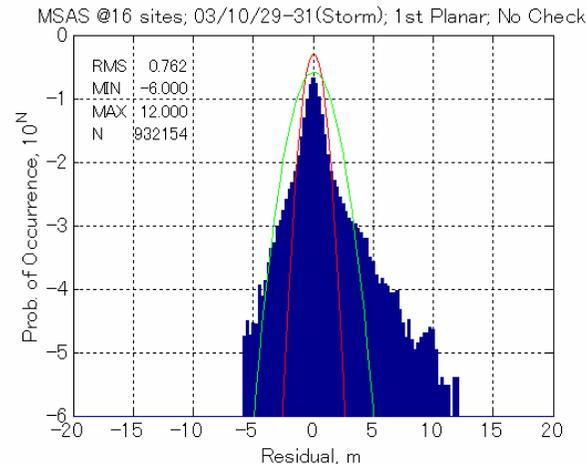


電離層擾乱日のデータセットを用いて左図と同様な処理を行った例。

2点間の電離層遅延量の違い(遅延量の空間相関)



プレーナフィット適用後の残差ヒストグラム。
電離層静穏日。



プレーナフィット適用後の残差ヒストグラム。
電離層擾乱日。

- ・電離層静穏時: プレーナフィットは比較的良く働く。
- ・電離層擾乱時: 嵐検出方法により利用率への影響が大きい。

平面近似残差の例

電離層がGBASに及ぼす影響

- 基準局と航空機側の垂直電離層遅延誤差が測位誤差をもたらすために完全性を破る要因である。
- 米国において2003年10月に電離層による変動が5mとの報告あり、問題となった。

$$\delta I \cong F \frac{dI_v}{dx} (x + 2 \tau v)$$

I : 電離層遅延量による誤差

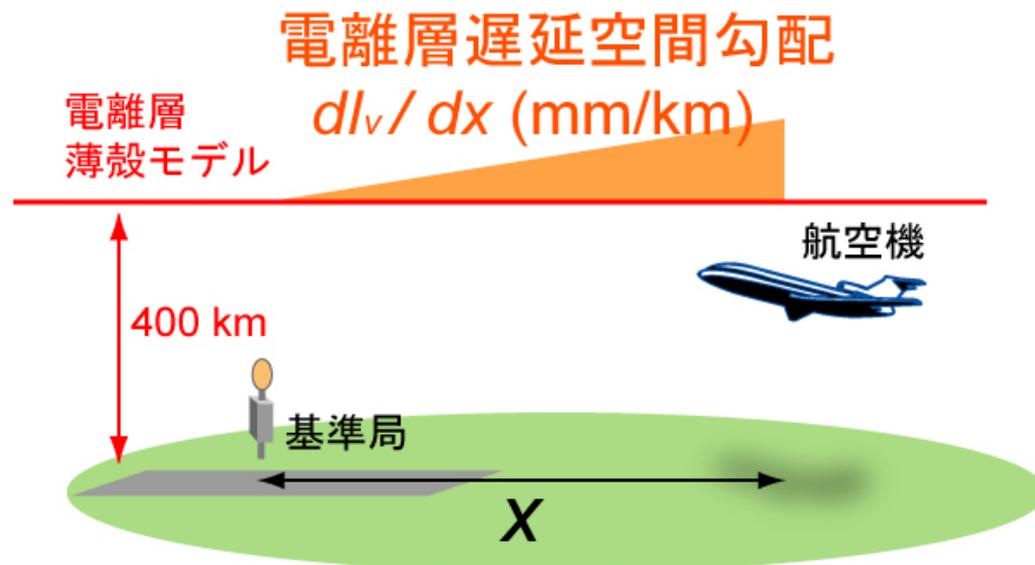
I_v : 垂直電離層遅延量

F : 投影関数

v : 航空機速度 (0.062 km/s)

x : 航空機と基準局の距離

τ : 100 s



例えば...

90mm/kmの勾配



垂直方向に144cm程度の測距誤差

(飛行実験での垂直測位精度: 2σ より大きい)

まとめ

Jan. 2006 Hoshino, ENRI

SLIDE 31

GPS測位原理と誤差要因、測位精度改善法、現SBAS、GBASの課題と解決に向けた電子航法研究所の活動を述べた。

SBAS

- ・SBASでは電離層の活動の影響により精密進入の利用率が低下している。
- ・電離層アルゴリズム、嵐検出の改善によりAPVの利用率改善の可能性がある。
- ・2周波システムによりSABSのCAT-I運用の可能性がある。

GBAS

- ・ENRIの開発したGBAS Bread Board Modelの垂直精度は0.8m
 - CAT-Iの要件および全てのCAT-II/IIIの要件案を満足する。
 - CAT-II/IIIの利用率は十分でない。
- ・さらなる脅威モデル提示により、完全性の評価の継続が必要
 - ICAOにおいても、CAT-II/IIIシステムのコンセプトの見直し
 - 現在、完全性に対する日本における脅威モデルを検討中

電離層

- ・電離層の活動データは十分でない。
 - GNSSへの影響の測定と定量的評価が必要。
- ・2周波システムにより電離層問題の主要部分の解決が可能。
- ・2周波システムとなってもシンチレーションによる信号ロックはずれの影響が残る。
 - プラズマバブルの発生検知と到来予測、警報の発信、モデルのシステムへの組み込み等が必要。
- ・何らかの理由で1周波システムとなる可能性が残るので、1周波システムの性能改善は必要。
 - 嵐検出方法の改善
 - 遅延近似モデルの検討。
 - 0次、1次、2次近似あるいはそれらの組み合わせ。クリギング法等