

# 地上型衛星補強システム (GBAS)の研究開発

電子航法研究所  
通信・航法・監視領域  
GNSS研究グループ(発表者:吉原貴之)

2008/11/28

第3回電波航法研究会

1

## 航空航法におけるGNSS利用の利点

- GNSS(Global Navigation Satellite System)
  - GPS
  - Galileo(開発中)
  - SBAS(Satellite-based Augmentation System)
- GNSS は4次元航法を可能にする
- GNSS は全ての飛行フェーズをサポートする
  - 洋上航空路、国内航空路、ターミナル、進入着陸、空港面、ミストアプローチ
- GNSS はRNAV(Area Navigation)と親和性がよく、効率的な運航が可能となることが期待される

2008/11/28

第3回電波航法研究会

2

## GPSの航空航法への利用

- 航空航法における要件
  - Accuracy
  - Integrity
  - Continuity
  - Availability
- GPS単独での利用では不十分
  - ユーザー側で衛星の故障が十分判らない
    - 故障が基地で判っても、制御するには時間がかかる
  - ある飛行フェーズでは不十分な精度(95% 確率)
- GPS利用には補強システムが必要

2008/11/28

第3回電波航法研究会

3

## Signal in Space 性能要件

- CAT-I精密進入の場合(ICAO SARP<sub>S</sub>)
  - Accuracy(95%)
    - Lateral: 16.0m / Vertical: 6.0 to 4.0m
  - Integrity
    - $1-2 \times 10^{-7}$ / approach
    - Time to Alert: 6s
    - Alert limit(Lateral: 20.0m / Vertical: 15.0 to 10.0m)
  - Continuity
    - $1-8 \times 10^{-6}$  in any 15s
  - Availability
    - 0.99 to 0.99999

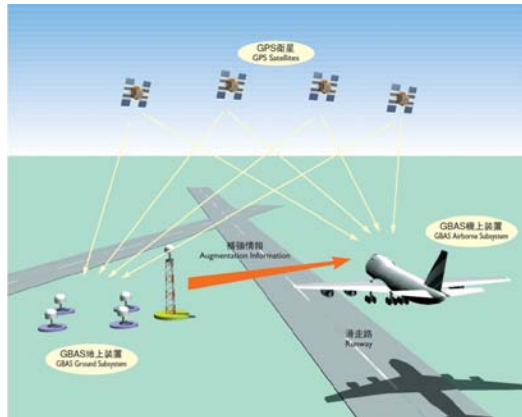
2008/11/28

第3回電波航法研究会

4

## GBASの概念図

- 地上型衛星補強システム
  - GBAS (Ground-based Augmentation System)
  - 精密進入着陸
- GBAS基準局
  - 3または4つのGPSアンテナ&受信機
- GBASデータ処理装置
  - 補正情報
  - インテグリティ情報
- VHF送信局
  - VDB; 108~118MHz



## GBASの概要

- 米国LAASと同じ、米軍のJPALSとほぼ同じ
  - Local Area Augmentation System
  - Joint Precision and Approach Landing System
- 航法バンド(108~118 MHz)で補強データ送信
- Positioning Service
  - GBAS PVT (Position, Velocity, Time)
  - 航空路、ターミナル、CAT-I/II/III 精密進入着陸、空港面の全てのフェーズを誘導

## GBASの原理

- GPSディファレンシャル測位を基礎
  - 1周波(L1、C/Aコード)
  - 地上GBAS基準局の位置は既知
  - 機上および地上基準局はGPSの疑似距離情報のみを使用して位置を決定(測位)
  - 地上GPS基準局でGPS衛星の疑似距離補正情報を生成
    - 共通誤差の除去
      - GPS衛星軌道誤差、衛星時計オフセット、電離層・対流圏誤差など、
    - 100m程度離れた複数の地上受信機から生成
      - 受信機ノイズ、マルチパスなどの影響排除
  - 測位精度は高カテゴリ進入までほぼ満足
- インテグリティ保証が課題

## GBASのインテグリティ機能

- インテグリティ:完全性
- 地上GBAS基準局は機上などの衛星を使って測位しているか分からない
  - 地上GBAS基準局では航空機の測位結果をモニタできない
  - 地上基準局は生成した補正情報と共に、そこに含まれる残留誤差情報を付加して送信
    - 受信機ノイズ、電離層・対流圏誤差など
- 機上局は自身でその位置精度をモニタする
  - 地上GBAS基準局から受け取った残留誤差情報から保護レベル(Protection Level; PL)を計算し、リアルタイムで測位解の信頼性を評価

## GBASの覆域とVDB

- 最小覆域: 20NM, 中心線から±35°, 高度10,000 ft
  - 通常, 全方位アンテナを利用する
- VDB: VHF帯 (108~117.975 MHz, 25 kHz間隔)
  - D8PSK変調, 31.5 kbps
  - TDMA(8スロット)
  - 水平偏波(楕円偏波)
- チャンネル割り当て:
  - 20000~39999 (5桁)
  - 1つの周波数で複数のパスを放送
  - チャンネルを選択し、パスを選択

## GBASの放送メッセージ

SARPs-amd81

DO245A

タイプ	内容
1	デファレンシャル補正值 (PRC, RRC, $\sigma_{pr\_gnd}$ , B1-4)
2	GBAS関連データ(基準局位置, 電離層, 放送層のインテグリティ情報等)
3	(予備)
4	最終進入パス(FAS), ターミナルエリアパス(TAP)
5	衛星アベイラビリティ情報(衛星の昇降)
6~8	(予備) 位相補正, 軍用, 試験
101	(予備) GRAS

FAS: Final Approach Segment, TAP: Terminal Area Path

## 電子航法研究所におけるGBAS開発

### 研究目的

1. GBASの基盤技術の確立
2. 国際標準化活動への寄与
3. 実用化のための実現性の実証
  - プロトタイプ製作
  - 課題の抽出と解決
  - 国内環境への適合性の検討

### 主な研究経過

- 96 ・放送型データリンクの研究  
(C-band, L-band, VHFの候補, デジタル通信の誤り訂正, 覆域)
- 98 ・飛行実験による測位誤差計測(仮設)
- 00 ・空港設置環境での誤差評価(成田)
- 02 ■ GBASテストベッド設置(仙台)
- ~04 飛行実験: 垂直誤差0.79 m(95%) 187回
- 05~ ■ GBASのインテグリティの研究
- ・GBASデータ解析(長期データ収集)
  - ・電離層空間勾配の調査
  - ・SQMモニタの開発

## GBASテストベッド

- 仙台空港内に設置
- 4組のGPSアンテナ/受信機からなるGPS受信ユニット
- Linux PCによる補正情報生成
- VDB 送信装置: 50 W
- 仮想ユーザ局兼モニタ局の設置



GPSアンテナ/受信機



データ解析用PC



VDB送信装置



VDBアンテナ

## GBASテストベッド(2)



## 実験用航空機



VDB receiver and GBAS A/C data processor

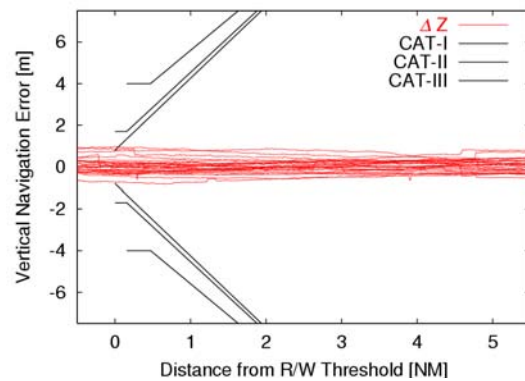


VDB and GPS antennas (sensor system) on roof of A/C



Experimental aircraft Beechcraft B-99

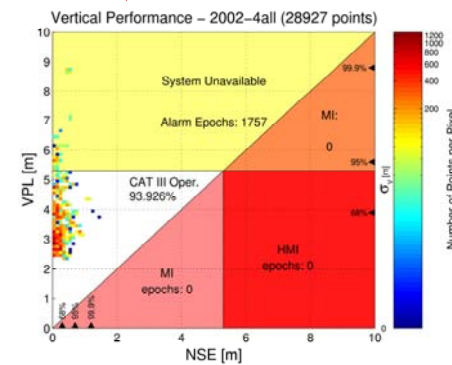
## 飛行実験結果の例



## 精度に関する飛行実験結果

### CAT-IIIのStanford Chart

2002~2004年に実施した飛行実験時のデータによる測位精度評価結果  
(後処理キネマティック値を基準) データ数:28927



	Along R/W	Across R/W	Vertical
平均	0.123[m]	0.217[m]	0.063[m]
標準偏差	0.150[m]	0.177[m]	0.362[m]
95%	0.422[m]	0.570[m]	0.786[m]

2002~2004年に実施した飛行実験時のデータによる高さ方向(VPL vs. V-NSE)のスタンフォードチャート

## 電子航法研究所におけるGBAS 開発(2)

- CAT-Iを満足するシステム開発／評価ならびに安全性を検証する手法の確立に重点
  - インテグリティ・リスク
  - リスクを軽減するモニタ手法の開発
    - GPS衛星信号の品質監視
      - GPS衛星の故障などによる異常信号の検出／排除
    - 電離層のGBASインテグリティに与える影響
      - 日本における定量的評価と発生頻度などの調査
      - 影響を受けたGPS衛星信号の検出／排除

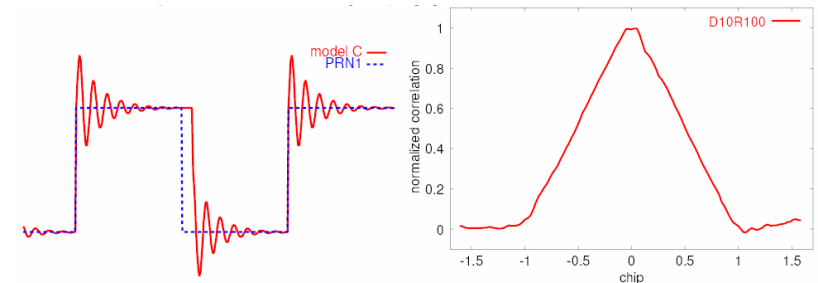
2008/11/28

第3回電波航法研究会

17

## 信号品質監視(SQM)の開発

- 衛星故障
  - コード相関カーブの歪み
  - DGPS誤差
- 劣化擬似信号
  - ICAOの提唱する3つの故障モード(A,B,C)について擬似信号を作成し相関波形の形状変化を取得



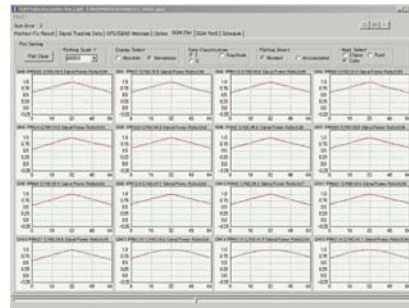
2008/11/28

第3回電波航法研究会

18

## SQMの開発(2)

- 信号品質監視(SQM)装置を開発
  - 16ch(うち3chはSBAS衛星用)の1周波GPS受信機がベース
  - 任意の16chの相関出力を80MHz (0.012788chip間隔)でサンプリング可
    - 65点(16ch)、129点(8ch)、257点(4ch)
  - 任意波形発生装置とベクトルジェネレータにより発生させた擬似GPS信号に対応
- 異常信号の検出手法の開発



2008/11/28

第3回電波航法研究会

19

## 電離層の影響調査

- 電離層遅延
  - GPS衛星電波が電離大気を通過する際に遅れを生じる
  - 太陽活動度に依存:11年周期(直近では2000年末に極大)
  - 磁気緯度に依存
    - 欧米は磁気緯度で高緯度側に位置
    - 日本では沖縄上空で電離層電子密度の極大
  - 昼間、春季・秋季ほど遅延量大きい
    - 数10cm~30m程度の範囲で変動
- GBASに与える影響
  - 補強データは1周波(L1、C/A)
    - 擬似距離に対するキャリアスムージング処理を介して測位解に与える影響が増幅
    - キャリアスムージングはマルチパス軽減のため
  - プラズマバブルなどの擾乱によるGPS信号強度変動

2008/11/28

第3回電波航法研究会

20

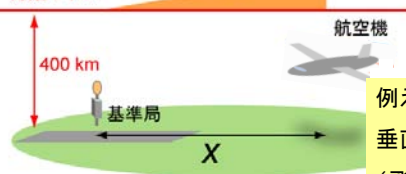


## 電離層遅延の影響

### ■ 基準局と航空機側の電離層遅延差

- 距離が離れるほど相関が小さくなる
- キャリアスムージング処理による影響
  - コード擬似距離と搬送波位相の電離層遅延の極性が逆
  - 100秒前までの状態が影響
  - 詳しくはJ. Christelほか、ION GPS 98

電離層遅延空間勾配  
薄殻モデル  $dl_v/dx$  (mm/km)



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

F: 投影関数

$\tau$ : 100 s

v: 航空機速度 (0.062 km/s)

例えば・・・、65mm/kmの勾配の場合  
垂直方向に80cm程度の測距誤差  
(飛行実験での垂直測位精度:  $2\sigma$ に相当)

## キャリアスムージングにおける電離層の影響

$$P_{CSCn} = \alpha P + (1 - \alpha) \left( P_{CSCn-1} + \frac{\lambda}{2\pi} (\phi_n - \phi_{n-1}) \right)$$

搬送波位相変化量

1エポック前にキャリアスムージングされた擬似距離

測定された擬似距離

### ■ キャリアスムージング処理

- $\alpha$ : フィルタの重み付け定数
  - 時定数: 100秒
  - 2 Hzサンプリングなので  $\alpha = 1/200$ となる

## 米国における電離層擾乱の事例

### ■ SED (Storm Enhanced Density)

- 地磁気嵐に伴う電離層擾乱
- 局所的な電離層勾配をもたらす

### ■ SEDIによるGBASへの影響

- Y. Parkほか, "Data-Replay Analysis of LAAS Safety during Ionosphere Storms", ION GNSS 2007 など

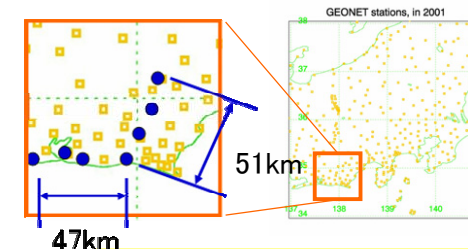
### ■ GBASの安全性への脅威とその軽減手法

- S. Ramakrishnanほか, "Targeted Ephemeris Decorrelation Parameter Inflation for Improved LAAS Availability during Severe Ionosphere Anomalies", ION NTM 2008

## 電離層空間勾配の調査

数10km程度内での空間勾配

- 東海地方: 観測点
- 東西方向・南北方向に4点



0 観測点間距離 50 (km)

- 2001年(電離層活動度極大期; 約11年周期)
- 30秒データ、仰角60度以上の衛星
- 各衛星個別に空間勾配を計算
- 天頂方向に投影した値
- 雑音と区別するため、1次近似

## 調査結果例(最大変化)

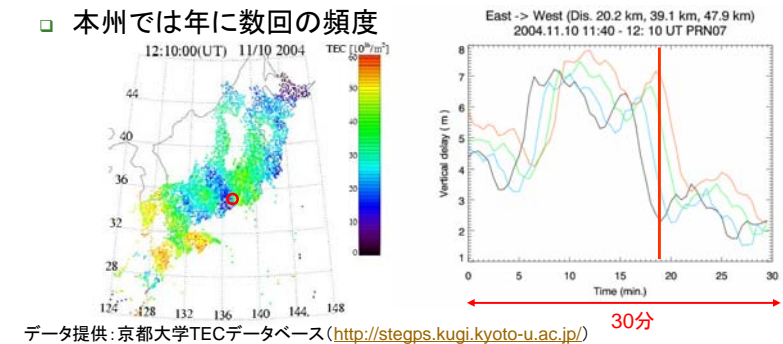
2001年	南北方向			東西方向		
	最大値	ガウスF. 分布幅	24mm/km 以上(%)	最大値	ガウスF. 分布幅	24mm/km 以上(%)
北海道	32.9	0.70	0.003	47.9	0.86	0.025
東海	29.9	1.43	0.036	43.9	1.15	0.023
四国	54.6	1.18	0.167	38.5	1.09	0.054

50~80 km程度内の観測点4点を選択

- この解析例での最大勾配値 54.6 mm/km (四国・南北) は67.7cm程度の垂直測距誤差に相当

## 電離層擾乱による急激な変化

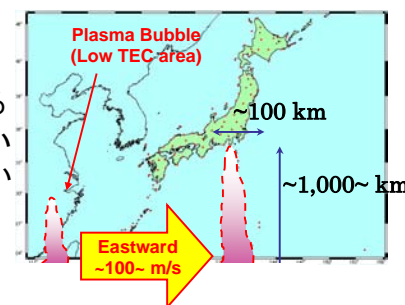
- 200~400 kmのスケールでの擾乱(2004年11月10日)
  - 電離層遅延量のステップ的な変化: 5m
    - 空間勾配: 約100 mm/km(2点間)
  - 2004年11月8日に起こった磁気嵐
  - 本州では年に数回の頻度



## 沖縄地方でのプラズマバブル

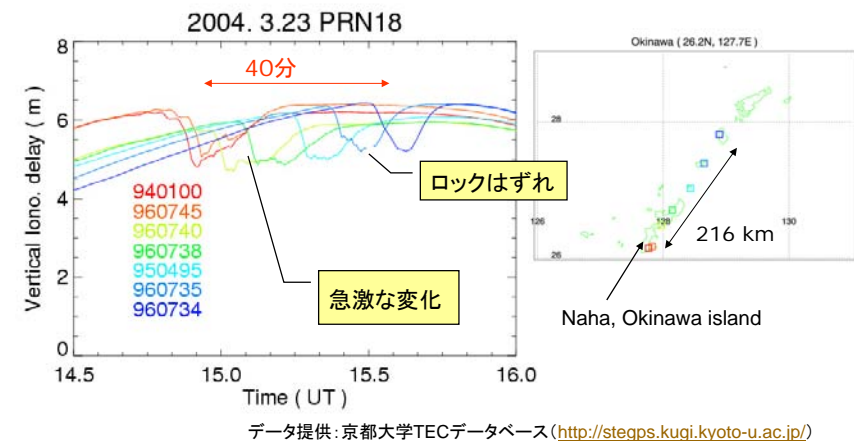
- 電離層内に低い電子密度の領域

- 領域のスケール
  - 東西方向に100km程度の幅
  - 南北方向には長くのびる
  - 主に東側に数100m/sで流される
- 春季と秋季の日没後に起こりやすい
  - SEDほど大きな勾配は観測されないが発生数が多い
- その領域を通過するGPS衛星電波が影響を受ける
  - 電離層遅延量の急激な減少
  - GPS信号の干渉による受信強度の低下

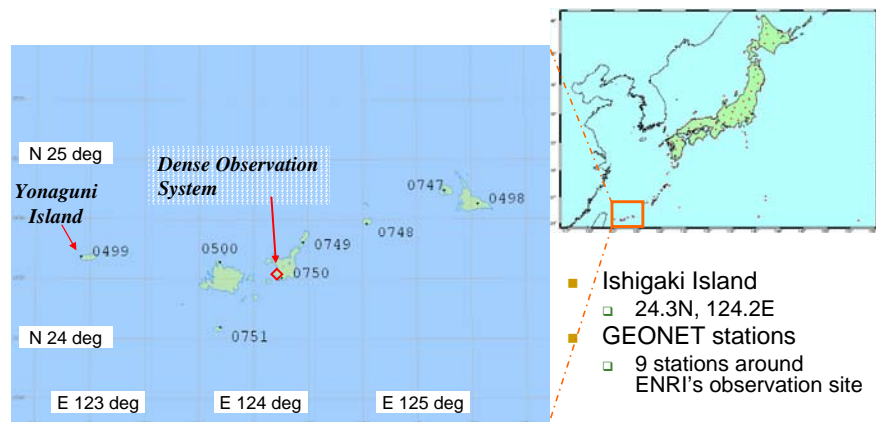


## プラズマバブルの事例

95 mm/km程度の勾配が観測された



## 石垣島におけるプラズマバブル観測

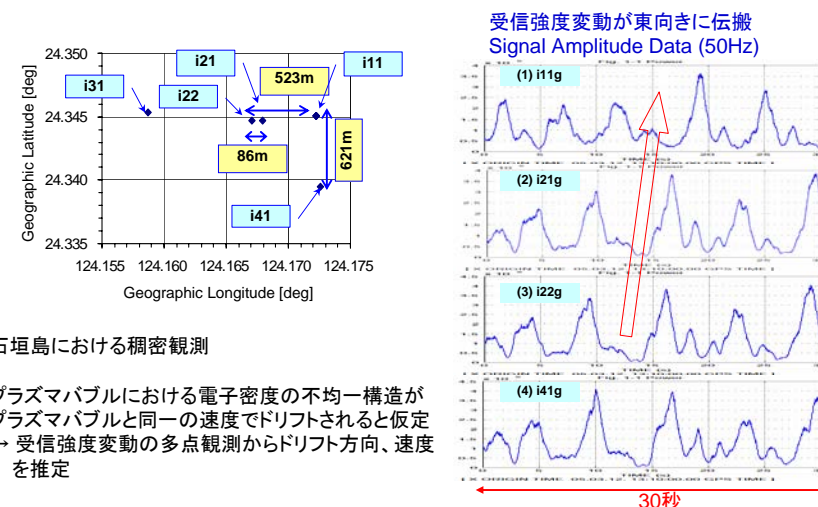


2008/11/28

第3回電波航法研究会

29

## 石垣島におけるプラズマバブル観測(2)



石垣島における稠密観測

プラズマバブルにおける電子密度の不均一構造がプラズマバブルと同一の速度でドリフトされると仮定  
→ 受信強度変動の多点観測からドリフト方向、速度を推定

2008/11/28

第3回電波航法研究会

30

## プラズマバブルのモデル化と影響評価

- GBASへの影響評価(スレットモデルの構築)
  - 急激なTEC (Total Electron Content) 変化
    - 空間勾配(ドロップの深さ、フロントの幅)
    - ドリフト速度
  - シンチレーション
    - 受信機のロックはずれ
    - 利用可能な衛星数の減少(アベイラビリティ低下)
  - 複数のプラズマバブル
- 電離層モニタ方式の開発
  - 異常検出および低減手法
  - アベイラビリティの評価
- 太陽活動極大期に向けた観測の継続
  - 石垣島における電離層稠密観測
  - 与那国島におけるAll Sky Airglow Imagerによる観測

2008/11/28

第3回電波航法研究会

31

## まとめ

- 航空航法におけるGNSS利用の利点
  - 将来の4次元航法
  - シームレスなサービス
- GBAS(地上型衛星補強システム)
  - GPSには補強情報が必要
  - 精密進入
  - 空港面および空港近辺でのガイダンス
- 電子航法研究所でのGBASの研究開発
  - 仙台空港にテストベッド
  - インテグリティ
    - 各種モニタ方式の開発
    - 電離層調査、モデル化、軽減手法
  - CAT-I実現のためのシステム開発/評価、ならびに安全性を検証する手法の確立

2008/11/28

第3回電波航法研究会

32