



利活用を支える衛星測位技術動向

研究開発WG

平成20年12月 5日

東京海洋大学大学院衛星航法工学研究室
(船井電機(株)寄附講座)

特任教授 安田明生

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

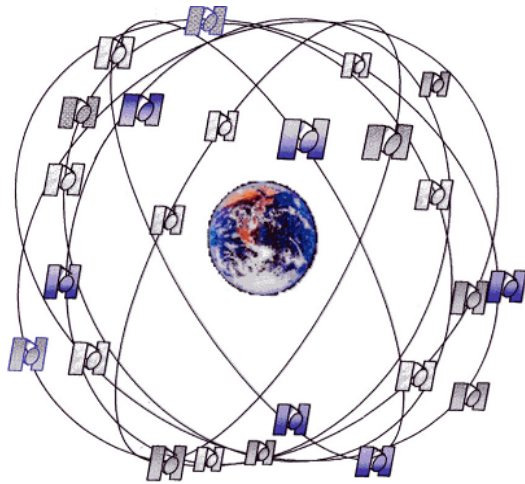
発表内容



- GNSSの概要
- コード測距測位について
- DGPS・SBASについて
- MSASの概要
- SBAS/MSAS信号について
- MSAS補完・補強における測位精度
- LEX利用搬送波位相測距測位について
- まとめ

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

GPSの概要



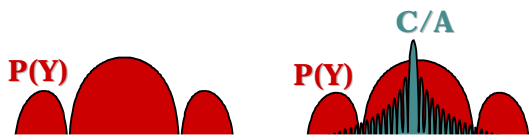
衛星個数	4個 × 6軌道面
設計寿命	7.5年
軌道半径	26,561km
周回周期	12恒星時間 (約11時間58分2秒)
軌道傾斜角	55 °
搬送波 周波数	L1=1,575.42MHz (10.23MHz × 154) L2=1,227.6MHz (10.23MHz × 120)
測距信号	C/A Code (1.023MHz : 1023 chips) : L1波で送信、民生用に解放 P(Y) code : L1、L2で送信、非公開

3

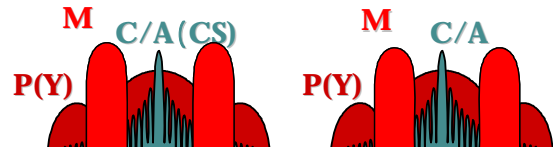
GPSの信号計画



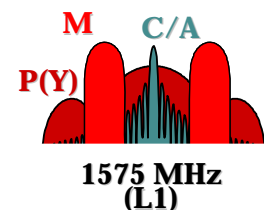
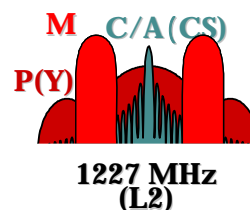
現在の信号
(Block II/IIA/IIR)



L2に民生コードを付加
軍用にMコードを新設
信号出力の増大
Block IIR-M
2005年から打ち上げ
残り2衛星



民生用L5を全Block IIFに付加
2009年から打ち上げ33衛星



GPS III 2013年から
L1C 付加

4

GPS衛星の現状



稼働衛星数 打上げ数(打上げ時期)

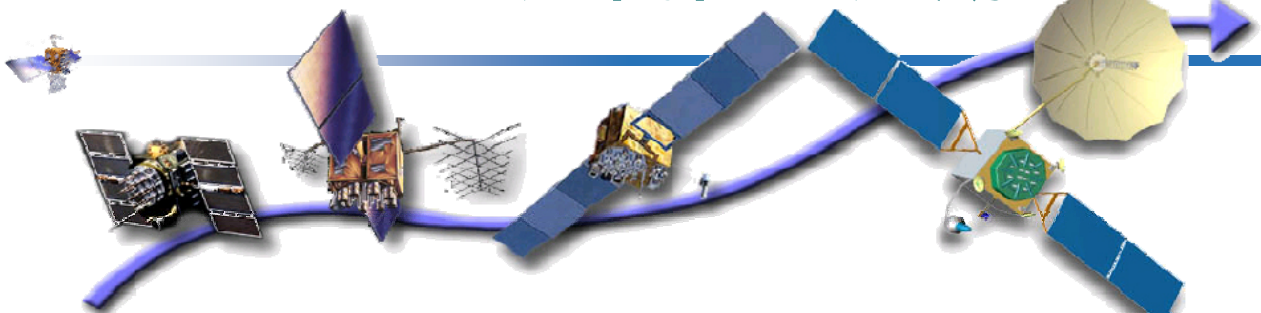
• Block		0	11 (1978 ~ 1985)
• Block		0	9 (1989, 1990)
• Block	A	13	19 (1990 ~ 1997)
• Block	R	12	13 (1997 ~ 2004)
• Block	R-M	6	6 (2005 ~ 2008)

31衛星稼働中

2008年11月27日現在

II R-Mはあと2機打ち上げ予定、
II Fは2009/2010年打ち上げ開始予定

GPS 近代化の道筋



システム性能の向上 ◆ 防衛 / 民生利用の便益増進

Block IIA/IIR Block IIR-M, IIF

基本 GPS

- 標準サービス (16-24m 精度)
 - 単一周波数 (L1)
 - 粗い接続 (C/A) コード測距
- 高精度サービス (16m 精度)
 - Y-Code (L1Y & L2Y)
 - Y-Code 測距

IIR-M: IIA/IIRの性能補強

- 第2民生信号 (L2C)
- M-Code (L1M & L2M)
 - Eliminates SA for denial
- 耐妨害 / 送信電力調整可能

IIF: IIR-Mの性能補強

- 第3の民生信号 (L5)
- 耐妨害 / 送信電力調整可能

Block III

Block IIIA:

- 耐妨害電力補強
- 安定性の増強
- 精度の向上
- 航法保障
- 後方互換性
- 利用保障
- 完全性の制御
- システム 維持性能
- 第4民生信号 (L1C)



GPS近代化のメリット



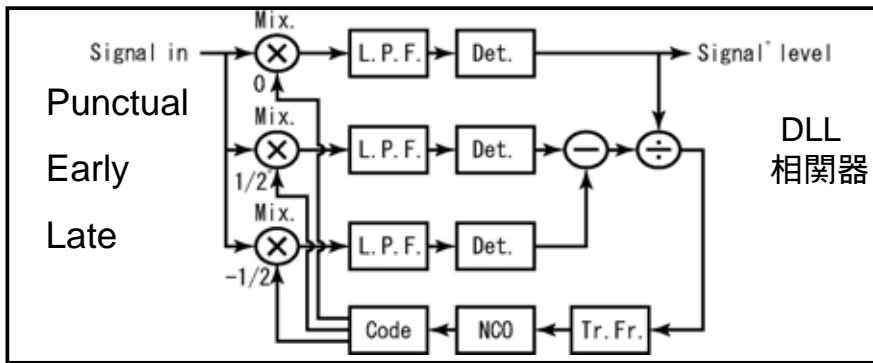
- 3周波数による電離層遅延量の測定精度改善
- 3周波数により耐干渉性の向上
- 送信出力アップによるCN比の向上
- 長コードによる分離性能向上
- L5(高チップレート)によるマルチパスの軽減
- Ambiguityの高速決定
(L2, L5のウルトラ・ワイドレーン)
- 軌道誤差、時計誤差の縮減(GPS)

世界のGNSS

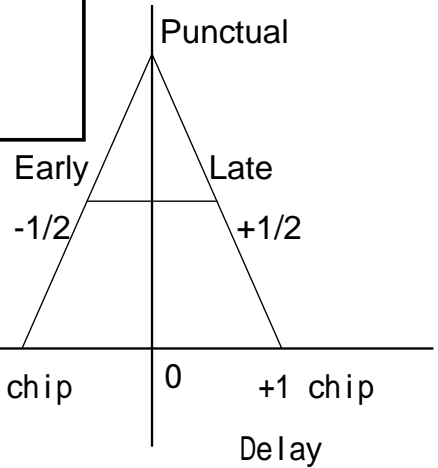


- GPSの近代化の信号L2Cが使えるようになるのは2010年ころか
- GLONASSの復活は2010年ころ
- GalileoのIOCは2013年ころ
- 準天頂衛星: QZSS(～2010年初号機打ち上げ予定)
- 中国のコンパス計画は? CNSS

DLL 相関器の出力特性



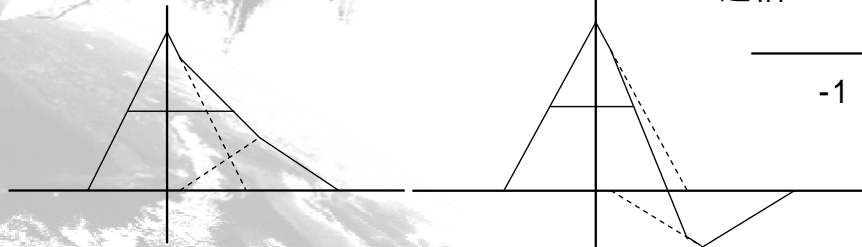
相関出力



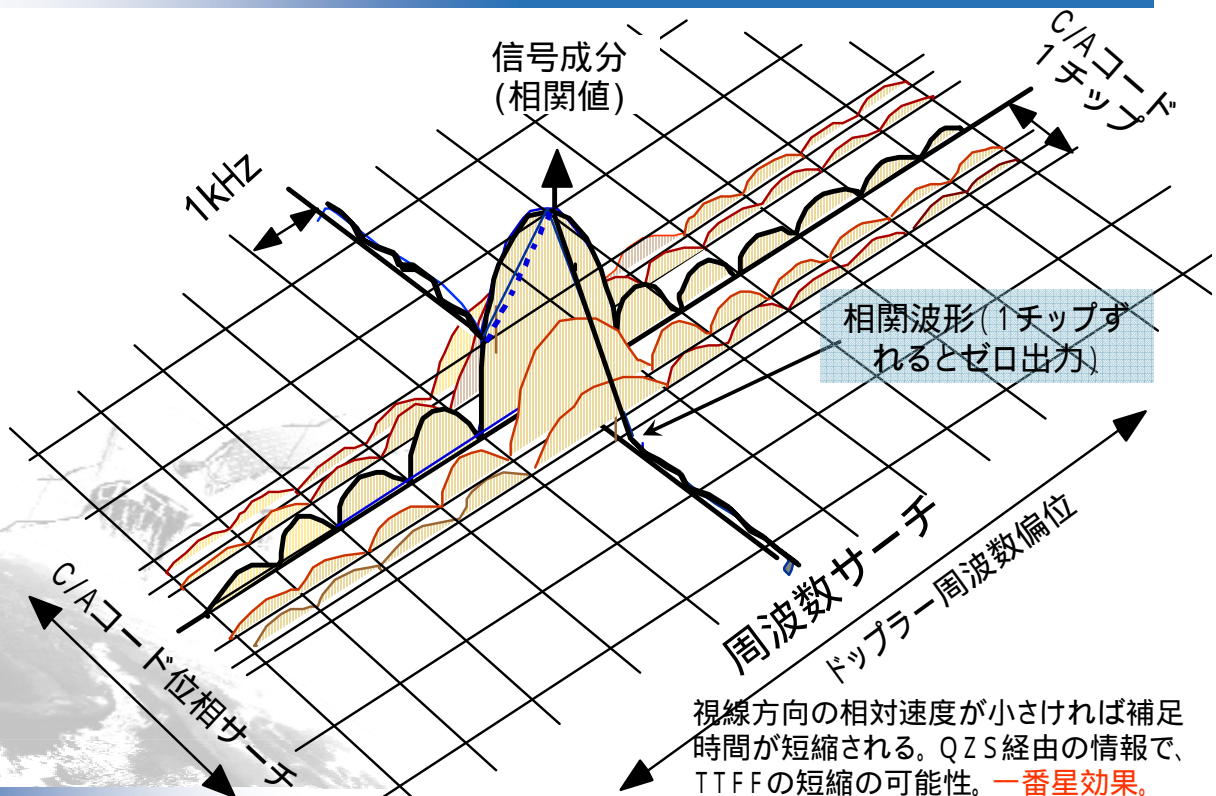
マルチパス誤差

擬似距離が長くなる場合
マルチパス波同相

擬似距離が短くなる場合
逆相

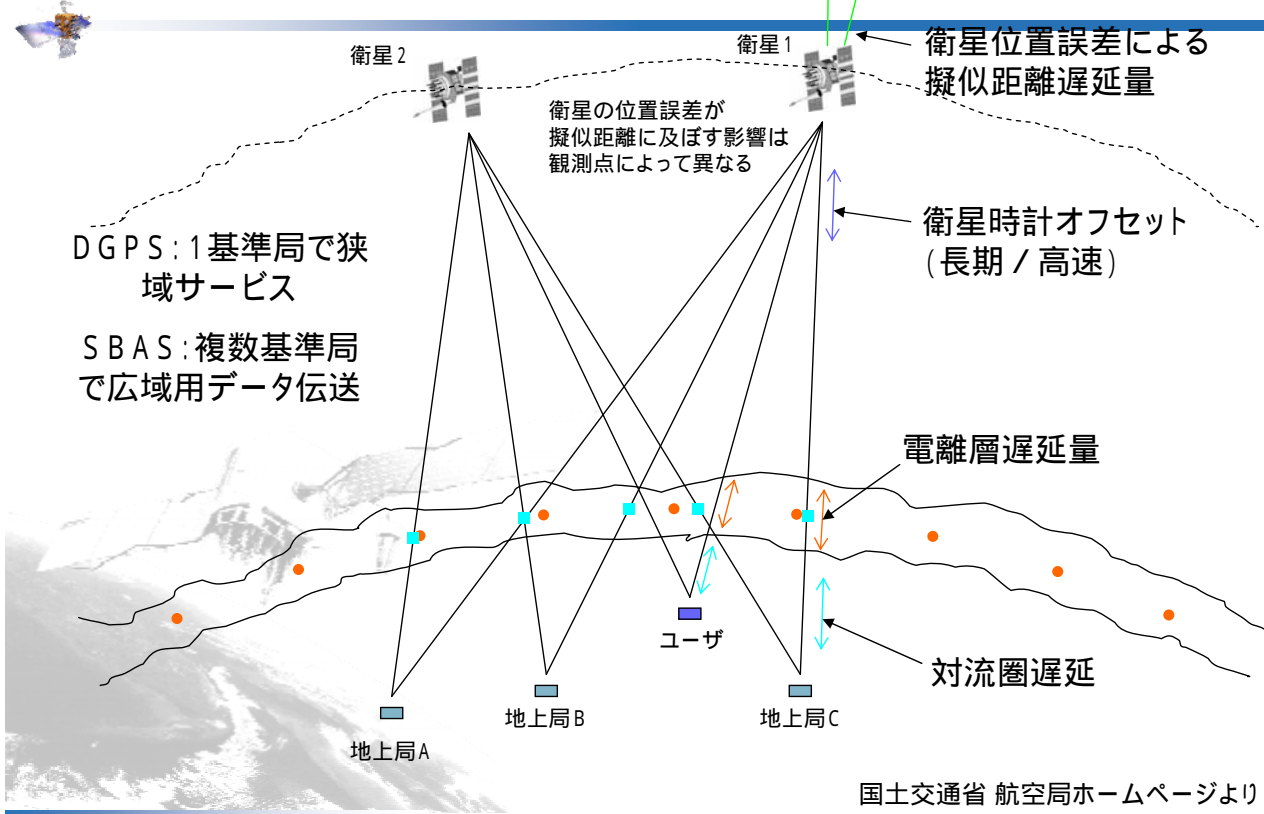


受信信号サーチ(補捉)

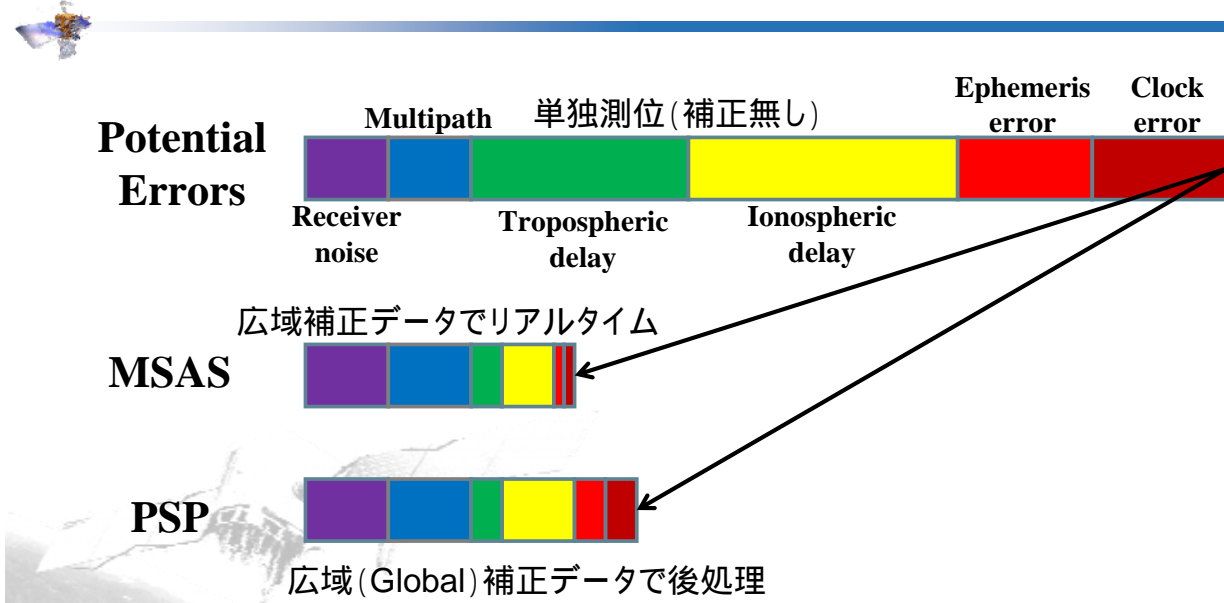


視線方向の相対速度が小さければ補足時間が短縮される。QZS経由の情報で、TTFFの短縮の可能性。一番星効果。

DGPS / SBAS補正(補強)の概念

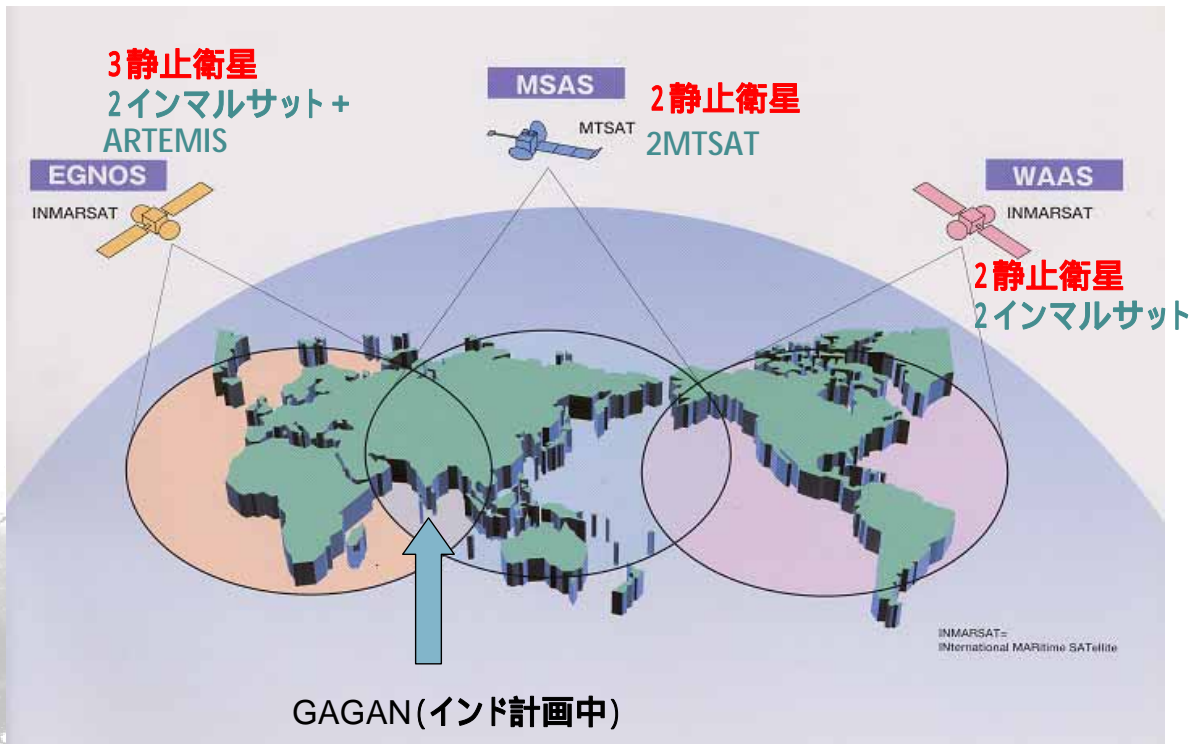


誤差軽減の評価



世界のSBASサービス

洋上飛行の航空機対象 (DGPS/インテグリティ/測距機能)



Laboratory of Satellite Navigation Engineering



MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System)

東経 140° / 145°

PRN 129 / PRN 137

■ MTSAT = Multi-functional Transport Satellite (運輸多目的衛星: 気象衛星を含む)

1999年11月H ロケットによる打ち上げ失敗

2005年2月26日打ち上げ成功

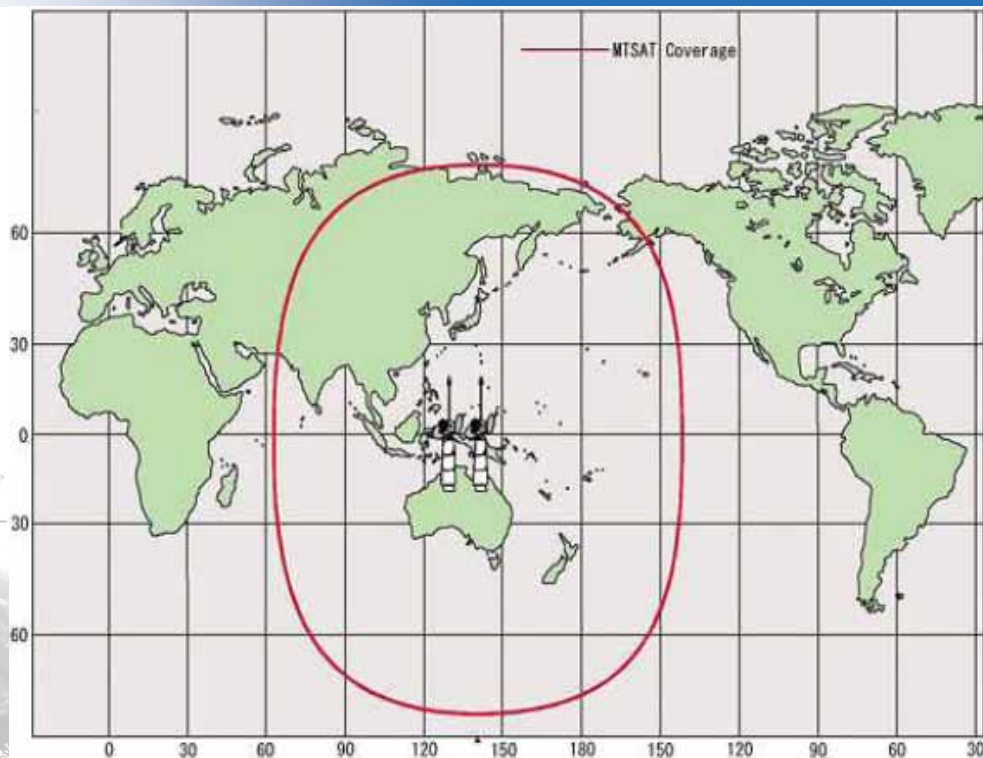
(H-Aロケット失敗で打ち上げ順延)

2006年2月2号機打ち上げ

2007年9月27日正式運用開始

Laboratory of S

MTSAT (MSAS) Cover Area



15

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

S B A S機能 (1/3)



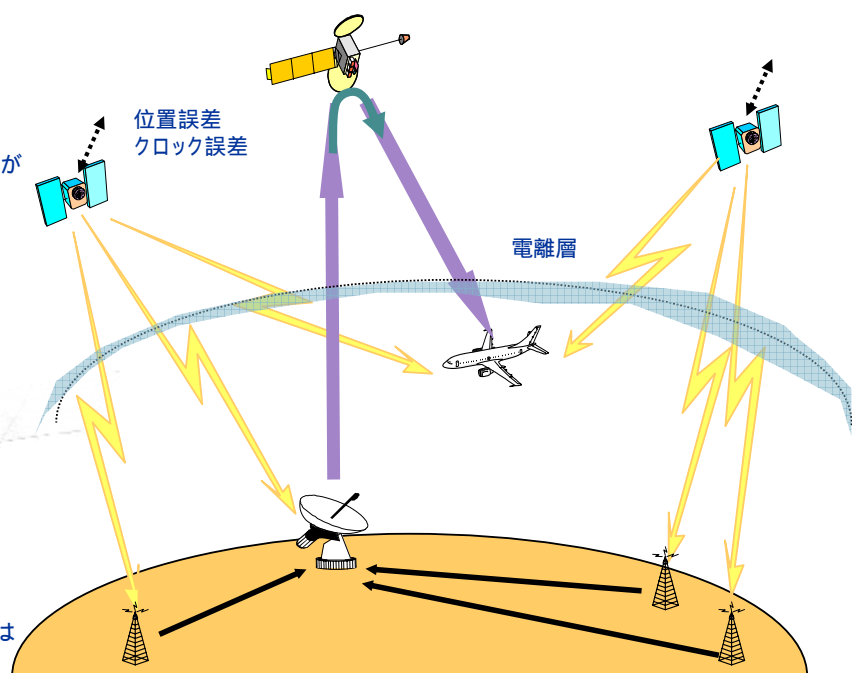
ディファレンシャル補正機能

GPSの位置精度を補強する機能。
GPSの位置精度は、故意の精度劣化(SA)がある場合、水平面で95%確率で75m
無い場合22.5mと言われている。

SBASは、GPS衛星毎に信号の有する誤差を航空機に提供するディファレンシャル機能を有し、基本的に水平数m程度まで位置精度を向上させることができる。

ディファレンシャル情報は、大別すると、電離層に起因する誤差と、それ以外の誤差に分離して伝送される。

GEO及びGPS信号をモニターする。
誤差補正データを作成する。
電離層誤差は、L1、L2の2周波数による測定値を用いる。
誤差補正データをGEOへ送出し、GEOは航空機へ誤差補正データを放送する。



国土交通省 航空局ホームページより

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

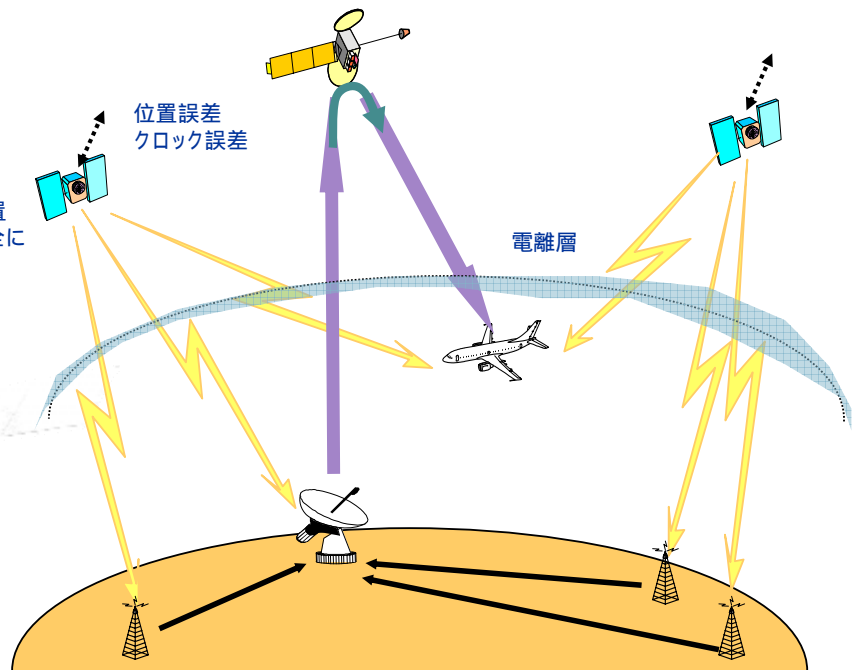
S B A S機能 (2/3)



インテグリティ機能

GPSの不具合情報(使用不可又は不具合の程度)を航空機に提供する機能。航空機は、この情報を用いて、飛行フェーズ(航空路、ターミナル、進入等)や自機の位置などに応じ、使用可能なGPSを判断し、安全に航行することができる。

GEO及びGPS信号をモニターする。GPS信号からGPSの使用の可否または、不具合の程度を判定する。不具合情報をGEOを経由で航空機へ放送する。



国土交通省 航空局ホームページより

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

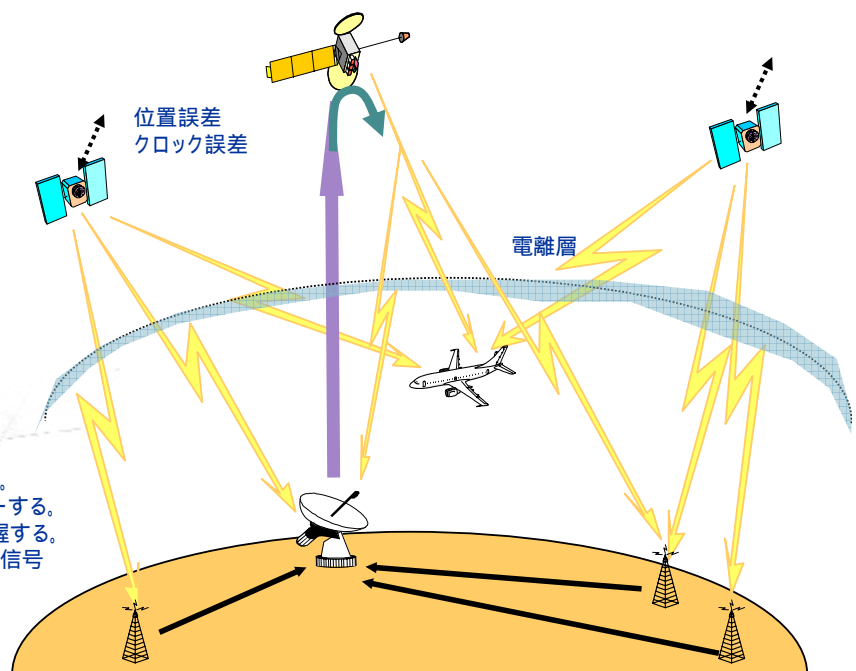
S B A S機能 (3/3)



レンジング機能

航空機が位置情報を得る為には4個以上のGPS信号を同時に受信する必要がある。(RAIMを使用する場合は5個以上)さらに、4個以上可視範囲であっても衛星の配置によって十分な精度が得られない地域、時間帯がある。GEOからGPSと同様の信号を提供し、あたかも1個のGPS衛星が追加されたと同等の効果を持たせる機能。

SBASがGPSと同様の信号を生成する。GEOを通じGPSと同様の信号を送出する。GEOから送出された信号をSBASでモニターする。モニターされた信号を元にGEOの軌道を把握する。正しいレンジ信号となるよう生成するレンジ信号を制御する。



RAIM: Receiver Autonomous Integrity Monitoring

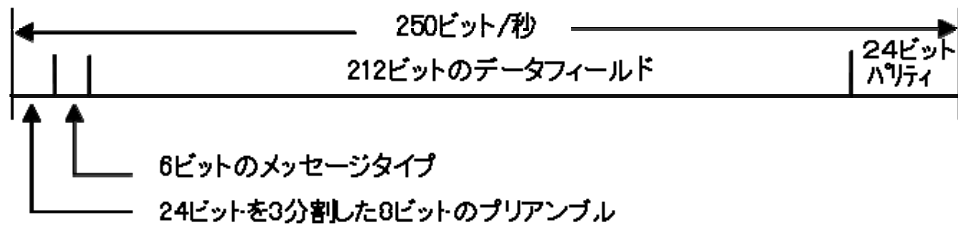
国土交通省 航空局ホームページより

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

SBASデータ・ブロック・フォーマット

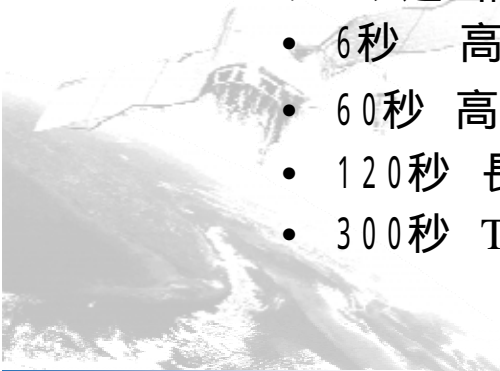


← 衛星からのデータの流れる方向は、最上位のビットが最初に送信される



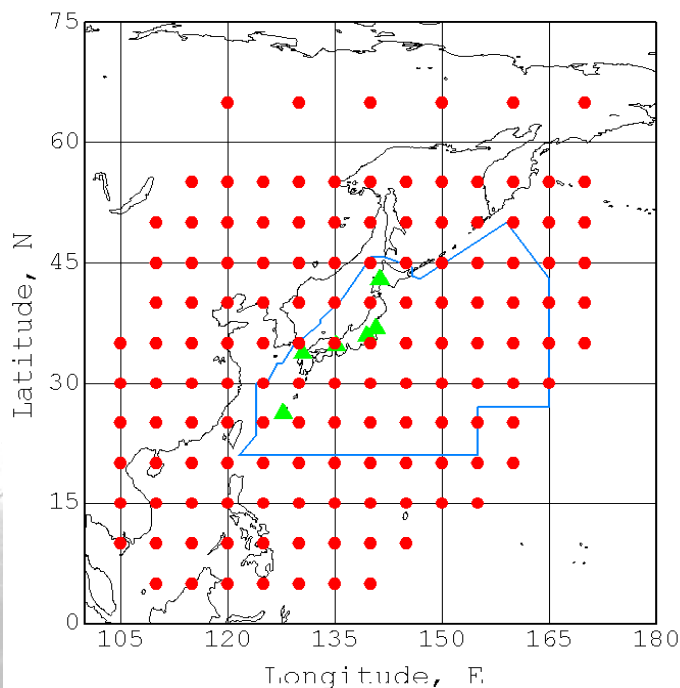
データ送出間隔(最大)

- 6秒 高速補正: Data Type 6 (インテグリティ)
- 60秒 高速補正: 衛星位置誤差、衛星時計誤差
- 120秒 長期補正: 衛星位置誤差、衛星時計誤差
- 300秒 Type 26 (IGP: Ionospheric Grid Point) 毎5°



Laboratory of Satellite Navigation Engineering

MSAS電離層遅延配信点(IGP 5° 間隔)



MSASモニタ局
国内6局
札幌
常陸太田
東京
神戸
福岡
那覇
国外2局
オーストラリア
ハワイ

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

静止点観測



2007/06/16 ~ 2007/07/28

単独測位, MSAS, ビーコンDGPS

(浦安・劔埼)の4方式

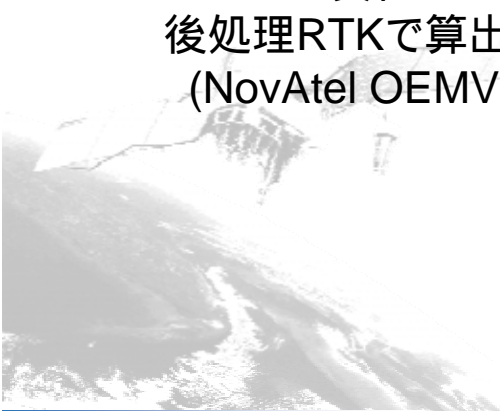
使用アンテナ: JLR-4331E改

(MSAS・ビーコンDGPS受信機)

アンテナ真位置は

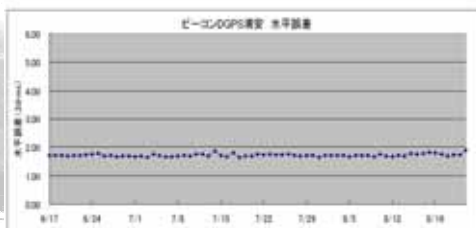
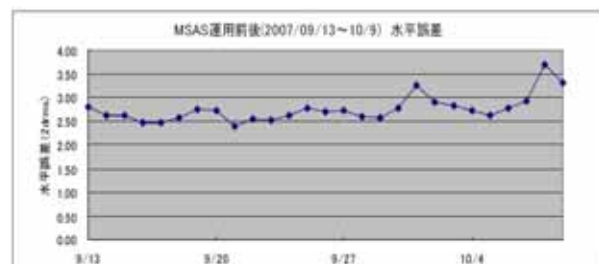
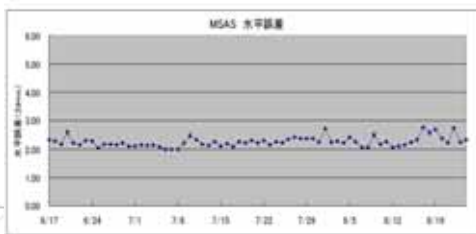
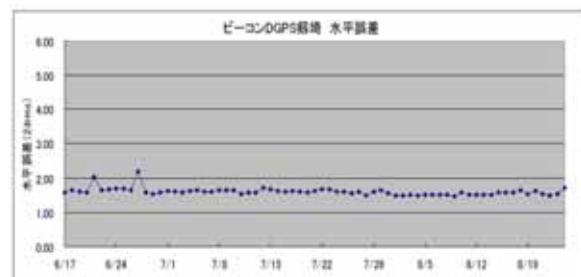
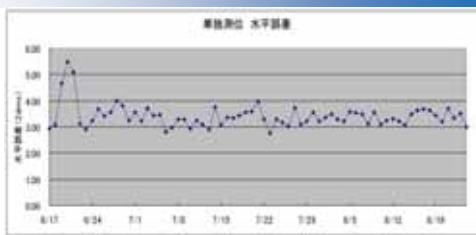
後処理RTKで算出

(NovAtel OEMV)



Laboratory of Satellite Navigation Engineering

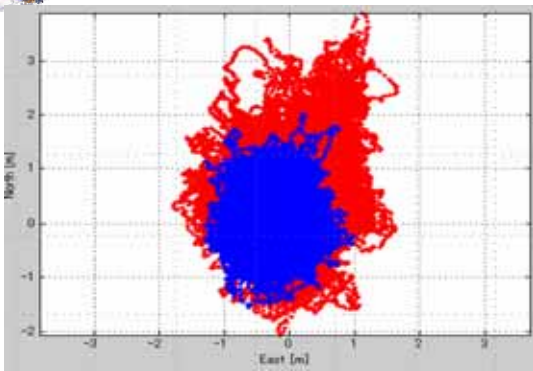
GPS受信機の測位誤差(単独 + 補正3ケース)



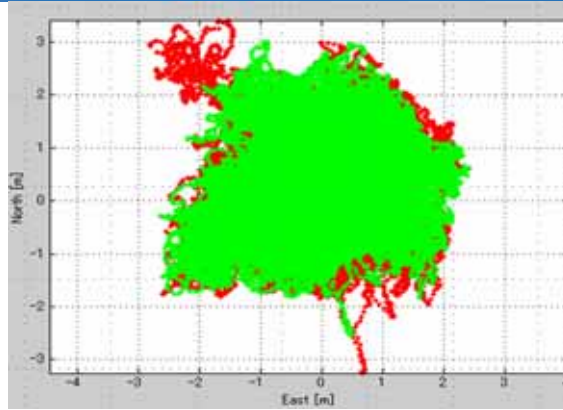
24時間1秒ごとのデータから計算
中波ビーコン補正データ(狭域)より劣る

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

定点24時間測位結果 (u-blox EVK-5H 2機で同時測位)

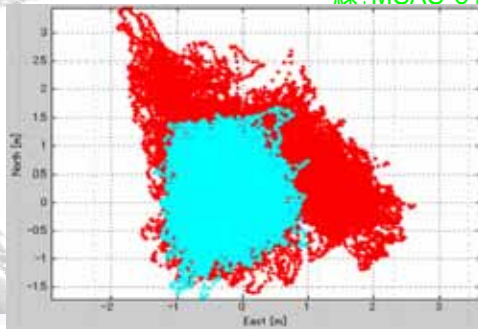


赤:MSAS OFF RANGE OFF 2drms:1.9 m
青:MSAS ON RANGE OFF 2drms:1.0 m



赤:MSAS OFF RANGE OFF 2drms:2.5 m
緑:MSAS OFF RANGE ON 2rms: 2.4 m

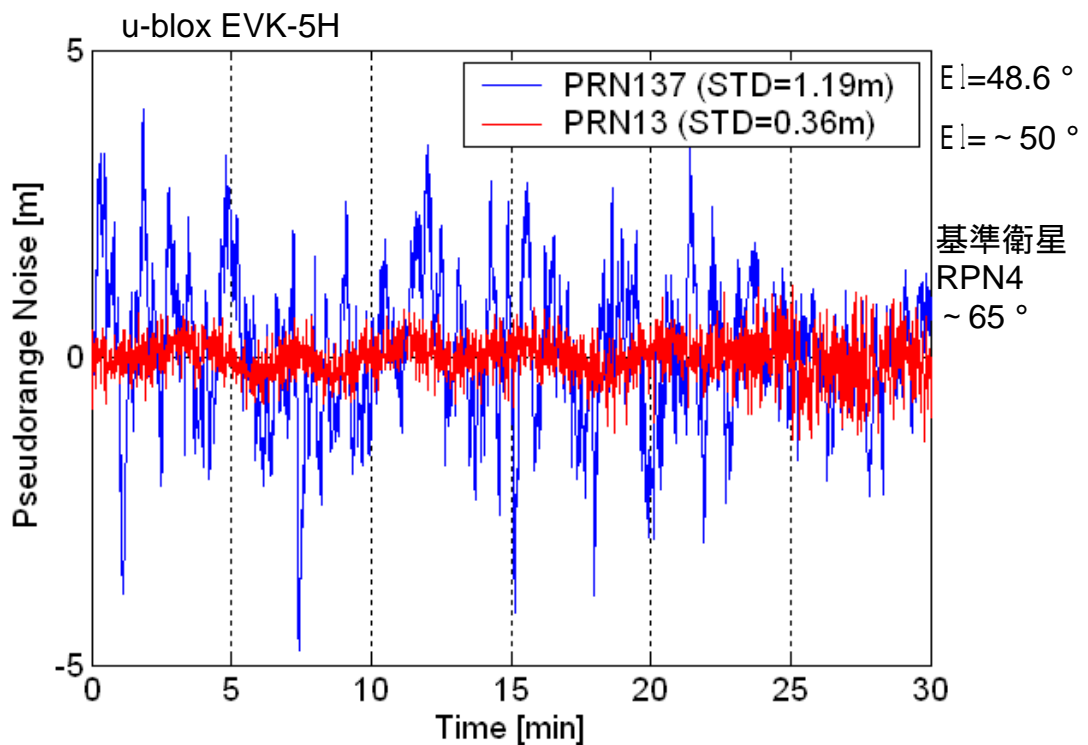
補正(補強)の効果
は大きい



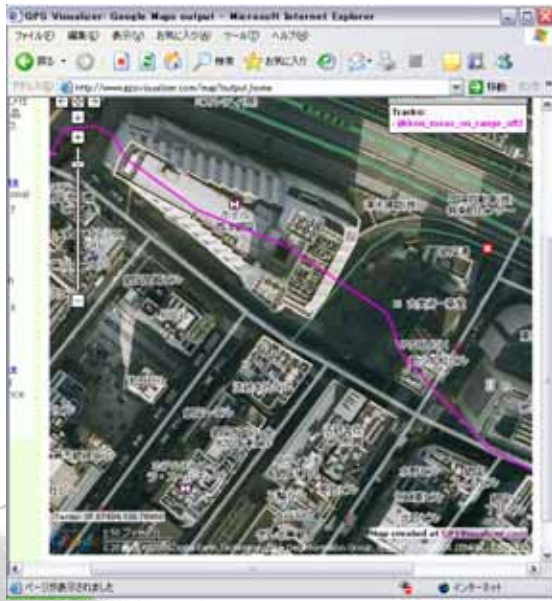
もう1機のGPSとして
の効果は得られない

赤:MSAS OFF RANGE OFF
水色:MSAS ON RANGE ON

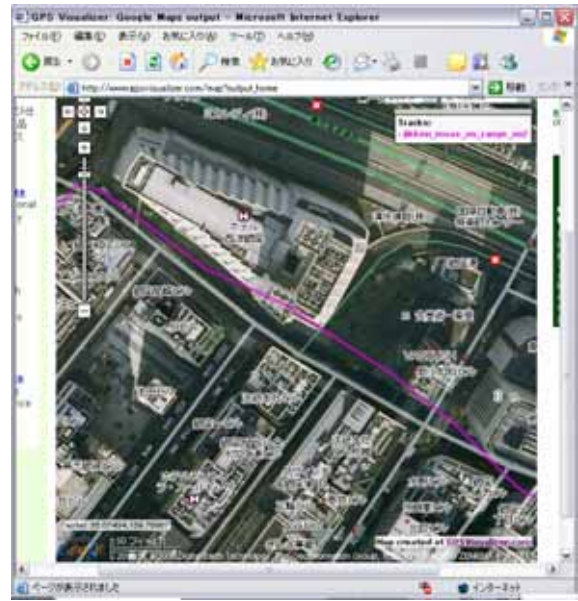
MSAS擬似距離雑音 (ゼロベース二重差)



銀座走行中 I

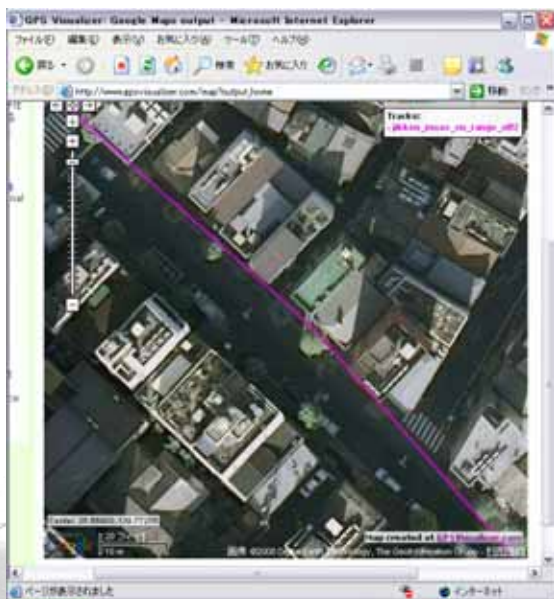


Range: off

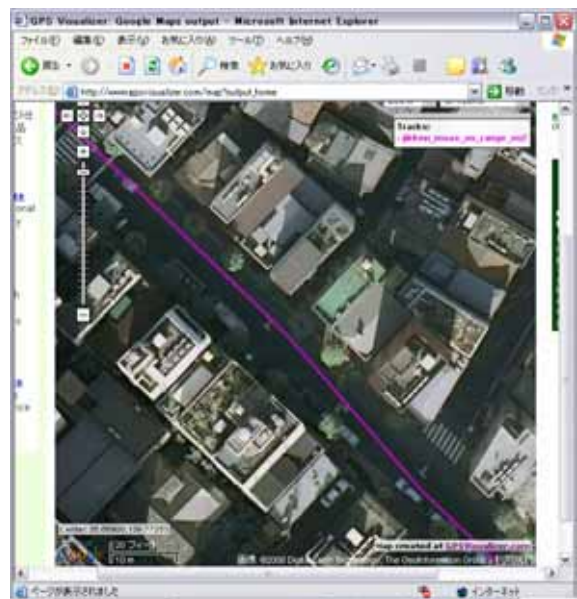


Range: on

銀座走行中 II

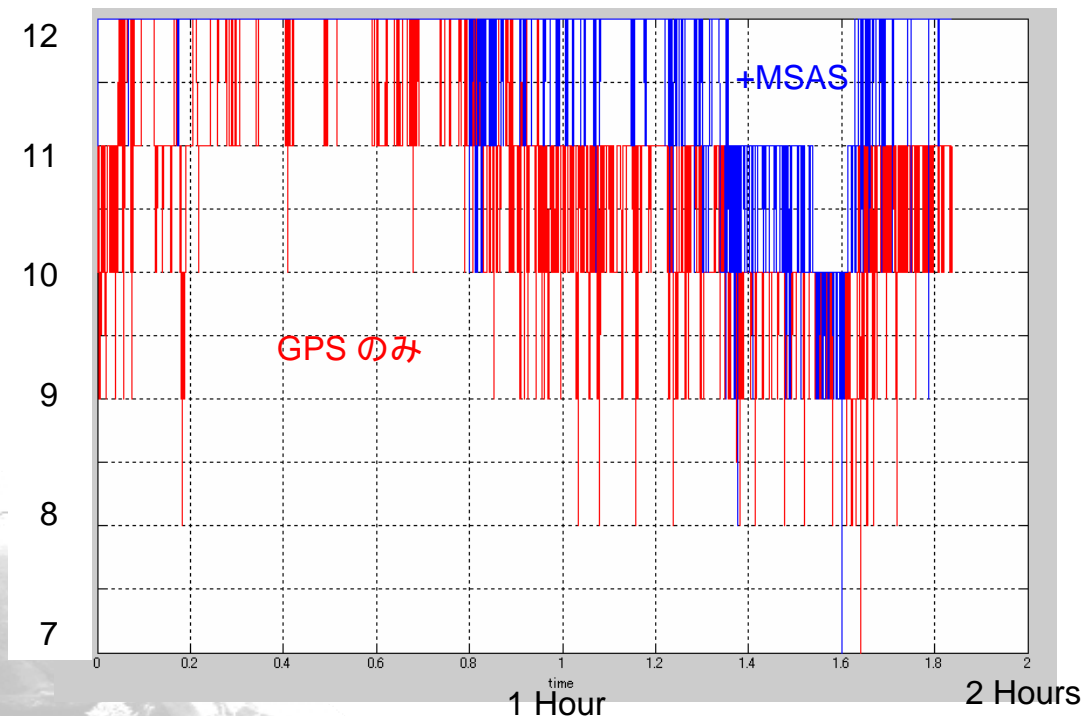


Range: off



Range: on

銀座走行中衛星数 (最大受信可能衛星数12機)



Laboratory of Satellite Navigation Engineering

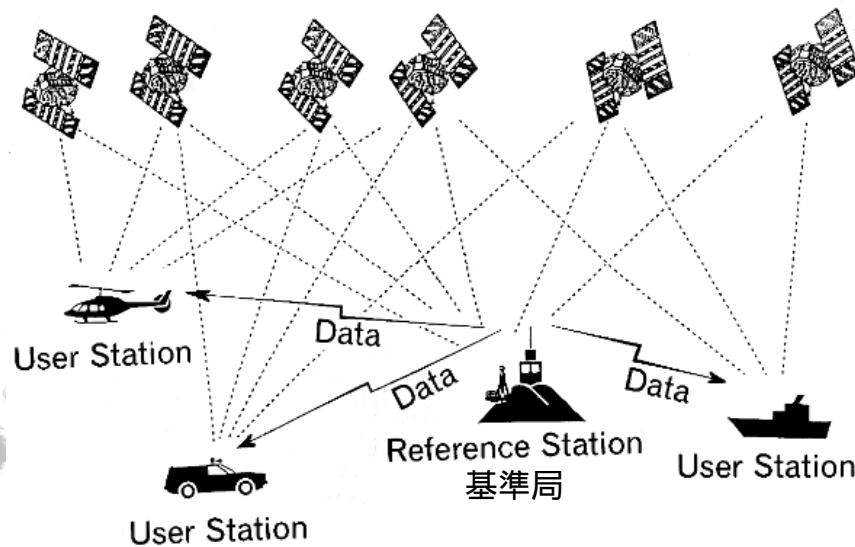
MSAS評価の結論



- MSASの補正データによる測位は海上保安庁の中波ビーコンデータによる補正に比べて若干劣るものの安定した精度改善が得られた。
- MSASの電離層補正データは沖縄地方では、本州以北に比べて効果が小さい。
- MSASが追加されるとDOPは向上するが、レンジング機能にやや難があり、測位精度の改善は余り期待できない。
- 都市部などでのアベイラビリティの向上は期待されるが、現時点でその効果については確認出来ない。

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

GPSの各種測位モード



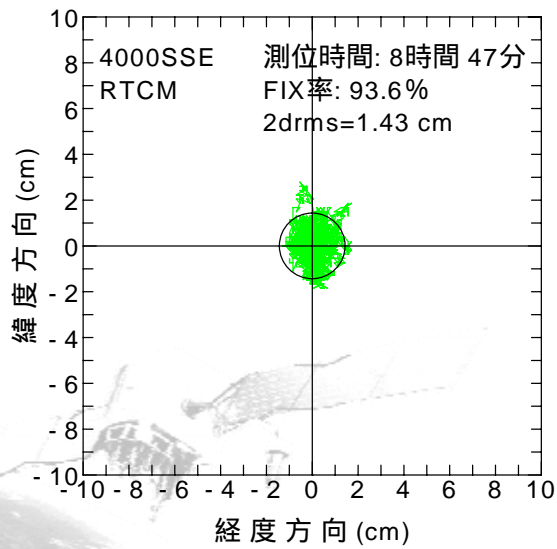
コード測距		搬送波測距	
GPS単独測位	>> DGPS	RTK-GPS Float解	>> Fix解
10 m	数m	10 cm	数cm

RTK-GPSの特徴と問題点

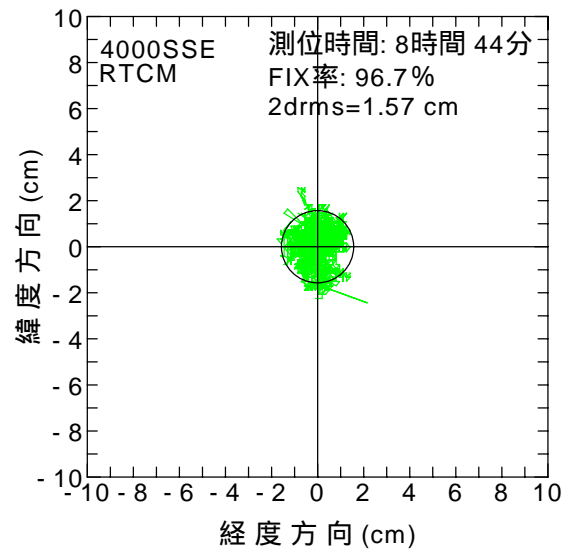


- DGPS(コード)とRTK-GPS(搬送波)の測距方式の相違。
- 基準局からのDGPS補正データ、L1,L2の搬送波位相積算値を伝送。
- DGPSによる測位(数m)からスタート。2重位相差による探索空間の設定。ワイドレーン(86cm)の格子状空間からL1搬送波(19cm)の格子状空間へ > 高精度測位。
- 要アンビギュイティの決定技術。要搬送波位相の連続的測定。サイクルスリップ発生の問題。

RTK-GPSの問題点 (基線長の差1)



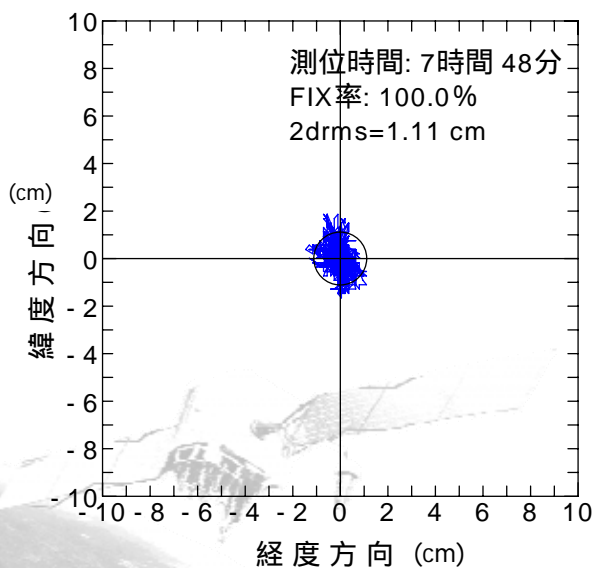
基線長 20 m



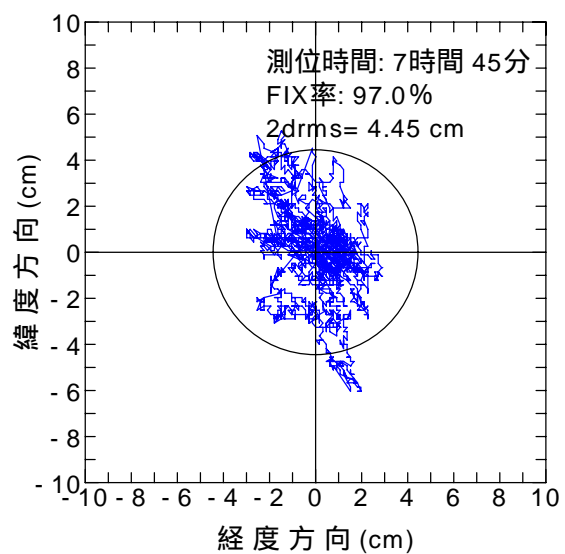
基線長 4 km

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

RTK-GPSの問題点 (基線長の差2)



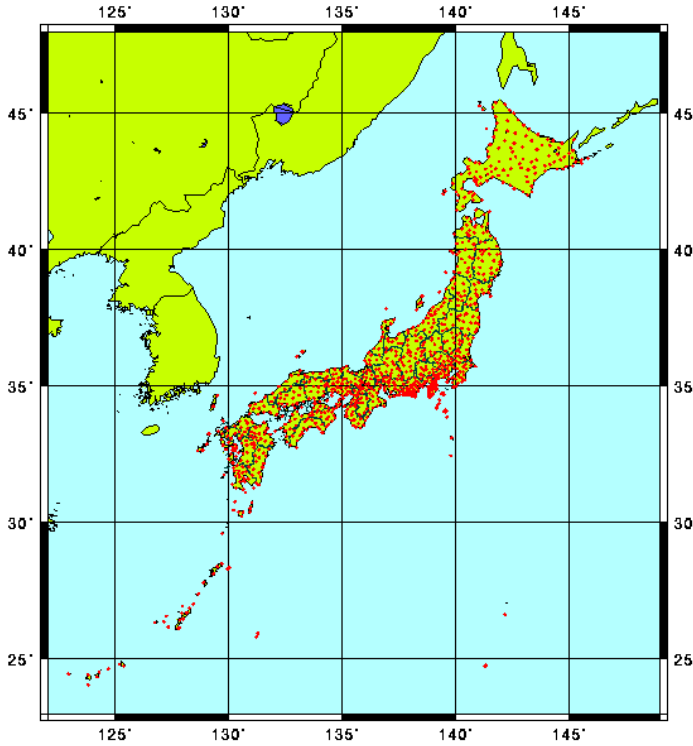
基線長 20 m



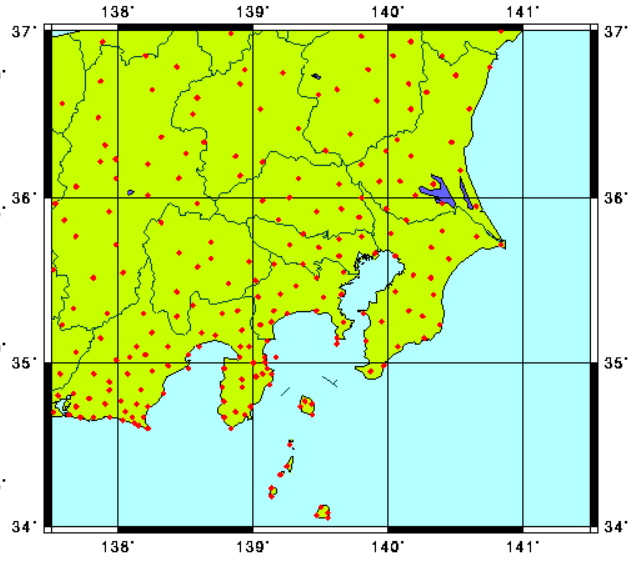
基線長 10km

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

電子基準点 (国土地理院)



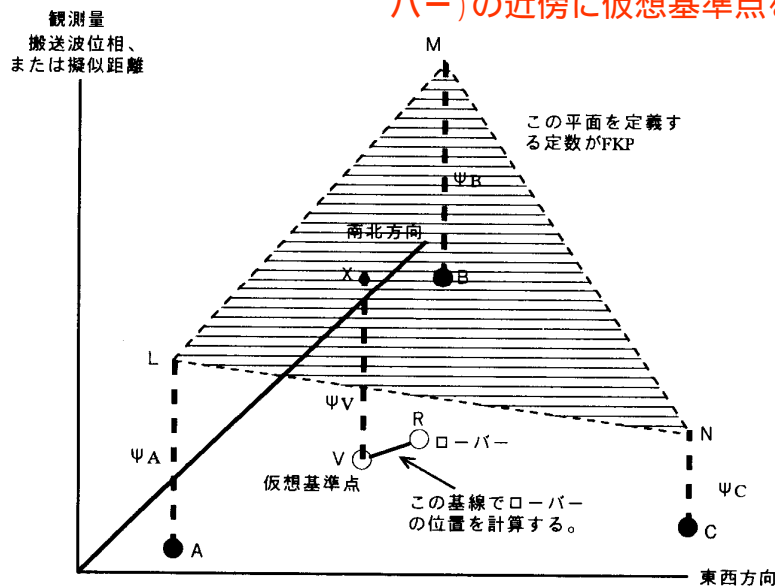
全国約1200点
約25km間隔
基準局として利用可能



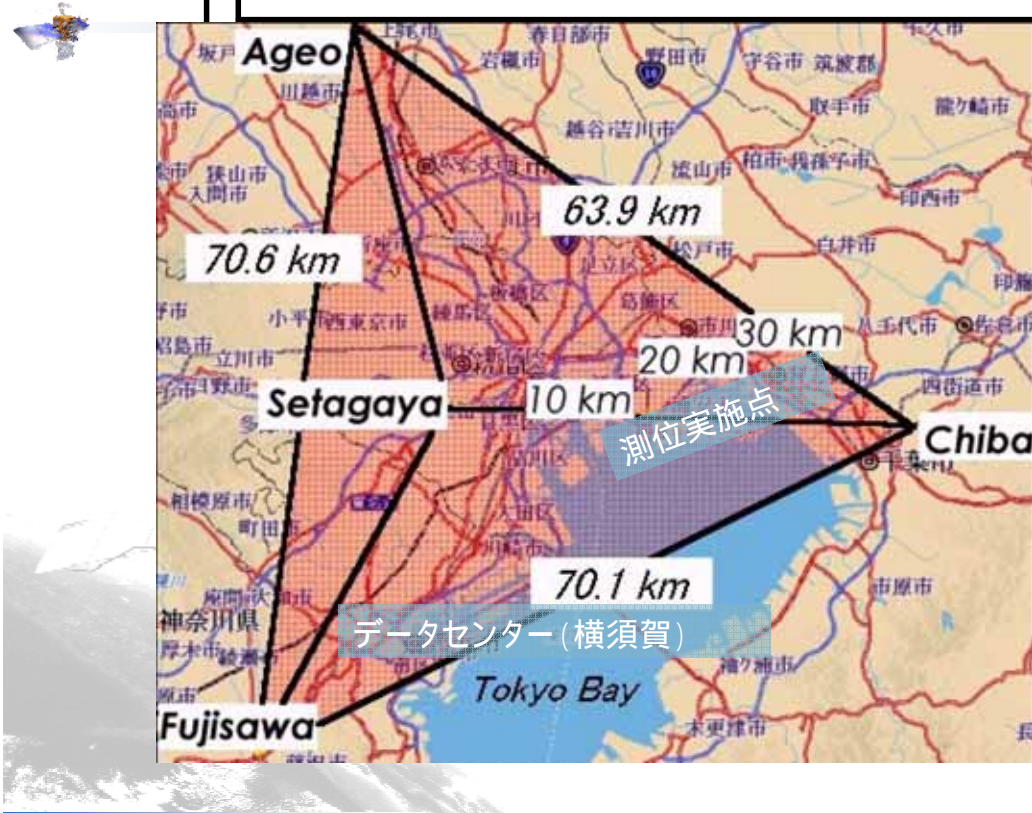
VRS (仮想基準点方式) の基本原理



複数基準局データを利用し、測位点(ローバー)の近傍に仮想基準点を設定

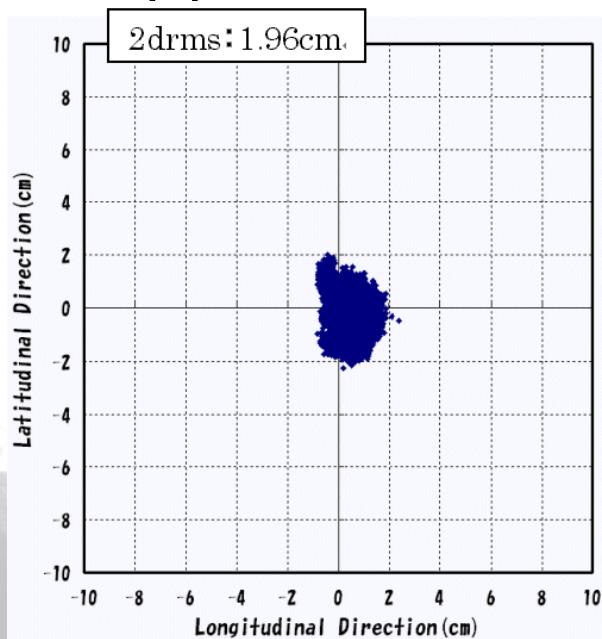


3 基準局と測位実施点

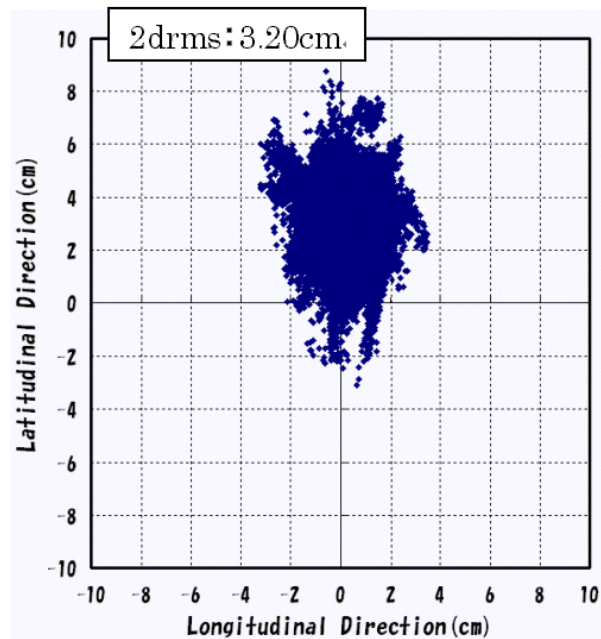


Laboratory of Satellite Navigation Engineering

10 km ポイント 水平測位誤差



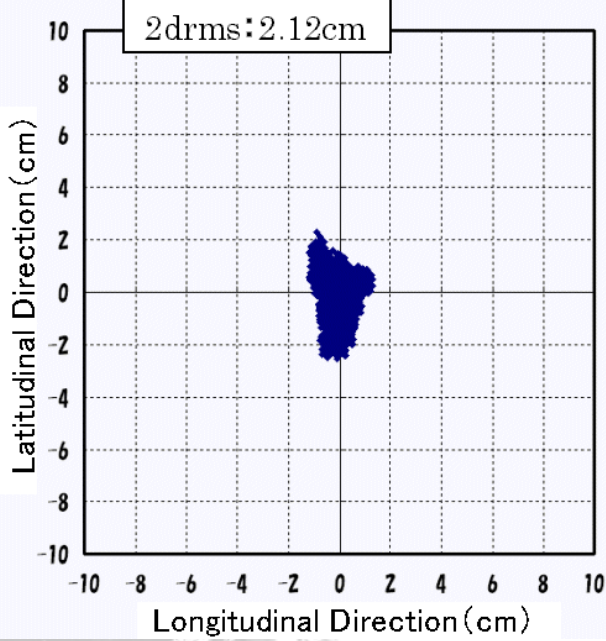
FKP モード (VRS の別バージョン) RTK-GPS



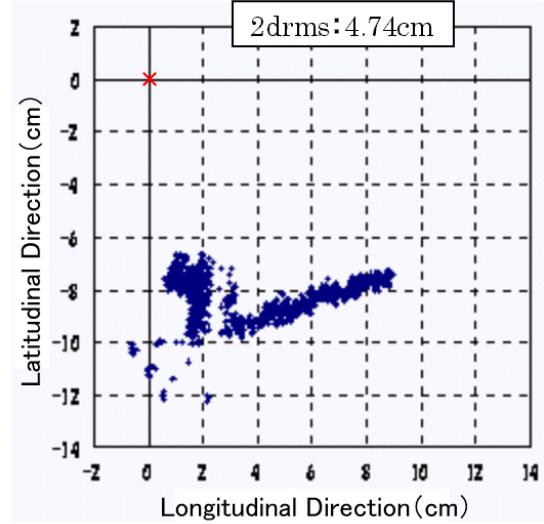
通常の RTK-GPS

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

20 km ポイント 水平測位誤差

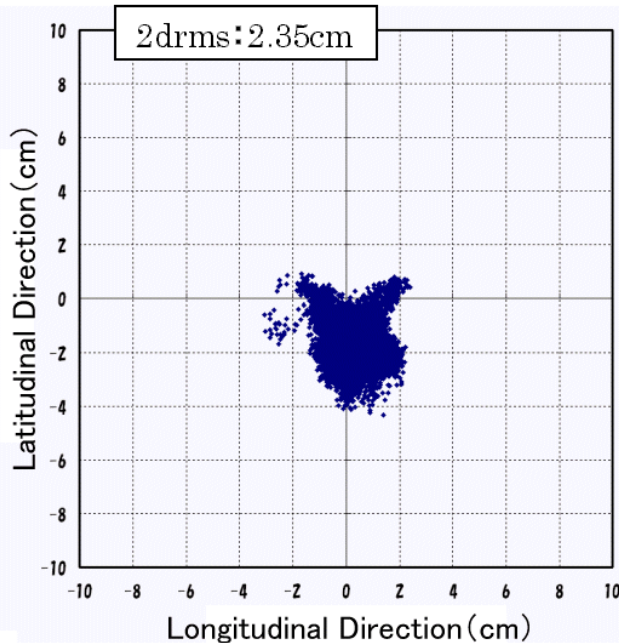


FKP mode RTK-GPS



通常 RTK-GPS

30 km ポイント 水平測位誤差



FKP mode RTK-GPS

通常RTK-GPS
では測位不能

LEX補正データ例 (2)



- 電離層遅延
 - 補正格子点 (55km) - 衛星スラント遅延 (L1)
 - L2, L5遅延: L1遅延からモデル計算
 - 更新周期: 30秒

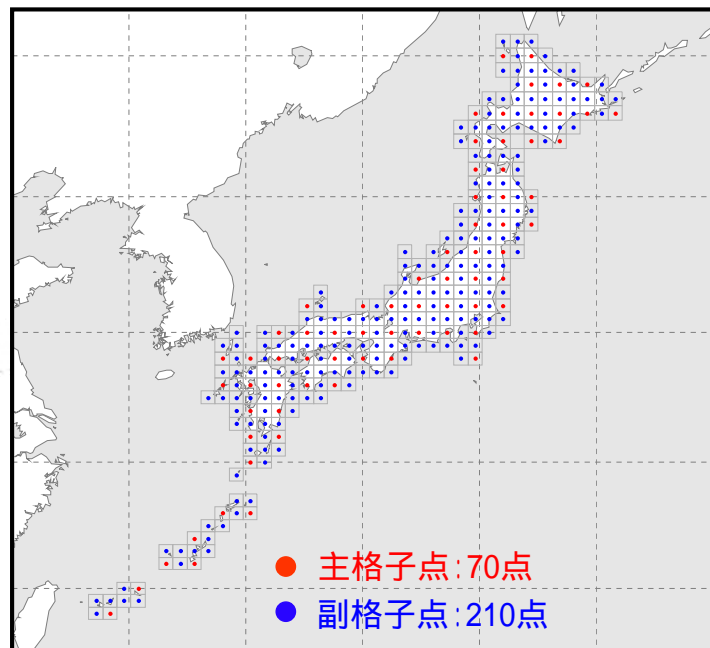
- 対流圏遅延
 - 補正格子点 (110km) 湿潤天頂遅延 (ZWD)
 - 乾燥大気遅延+マッピング関数: モデル計算
 - 更新周期: 30秒

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

地表補正格子点



- 日本全国陸域
(離島除く)
- 格子点間隔:
 $0.5 \times 0.6^\circ$
(55km)
- 格子点数
合計: 280点



Laboratory of Satellite Navigation Engineering

LEX補正データ例(3)



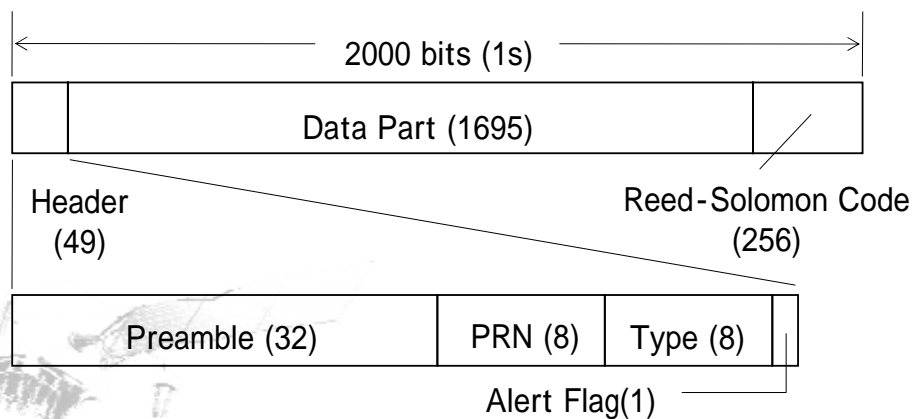
- 搬送波位相バイアス
 - 衛星UPD (Uncalibrated Phase Delay)
 - L1, L2, L5 (Phase Wind-up補正済)
 - OTF整数バイアス決定に必須, PPP-AR技術
- コードバイアス
 - 衛星DCB (Differential Code Bias)
 - L1C/A, L2C, L5
 - LC (L1P-L2P) コード位相基準

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

LEX補正情報伝送帯域



QZSS LEXメッセージ形式



(): Bit長

$$1695 \text{ bits} / 1 \text{ s} = 1695 \text{ bps}$$

Laboratory of Satellite Navigation Engineering

LEX補正情報データ量(試算)



衛星軌道	15 × 3	2mm	-33-33m	12	-	30s	18
	15 × 3	.02mm/s	-.3-.3m/s	12	-	30s	18
衛星時計	15	0.006ns	-98-98ns	12	-	3s	60
電離層遅延	15	2mm	0-66m	12	70 ●	30s	420
	13	2mm	-8-8m	12	210 ●	30s	1092
対流圏遅延	11	0.5mm	0-1m	-	70 ●	30s	26
位相Bias	11 × 3	0.01cyc	-10-10cyc	12	-	30s	13
コードBias	8 × 3	0.1m	-13-13m	12	-	30s	10
衛星ID+IOD	8+8	-	-	12	-	30s	6
その他	-	-	-	-	-	1-30s	32

LEXデータによる測位精度見積り

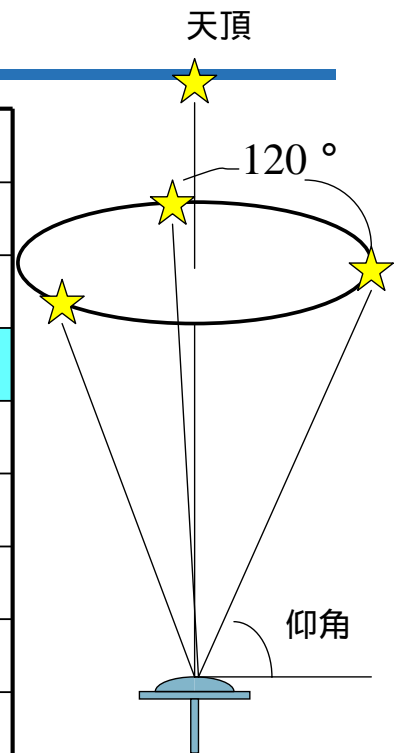


誤差項	一周波受信機	二周波受信機
衛星軌道・時計補正誤差	1.5 cm	1.5 cm
電離層遅延補正誤差	2.0 cm	-
対流圏遅延補正誤差	0.6 cm	0.6 cm
バイアス補正誤差	0.0 cm	0.0 cm
マルチパス + 雑音	0.3 cm	0.9 cm
衛星配置	HDOP	1.5
	VDOP	3.0
測位精度 (RMS)	水平	3.9 cm
	垂直	7.8 cm

衛星配置とDOP QZSの効果



仰角	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP	TDOP
5°	1.831	1.716	1.159	1.265	0.640
15	2.141	1.964	1.195	1.558	0.854
30	3.073	2.667	1.333	2.309	1.528
45	5.284	4.267	1.633	3.942	3.117
60	11.831	8.923	2.309	8.619	7.769
70	26.692	19.442	3.376	19.147	18.288
80	107.086	76.296	6.650	76.006	75.142
85	428.729	303.73	13.24	303.44	302.580



まとめ



- GPSとその近代化の概要について述べた。
- コード測距の考え方と、捕捉の高速化の可能性について述べた。
- QZS打ち上げ後の状況を考慮しながら、MSASの現状を調査した。
- QZSのLEX信号(2Kbps)で日本全域の広域RTK-GPS補強情報の伝送の可能性について述べた。