

### 3. 準天頂衛星システムによる SBASサービス



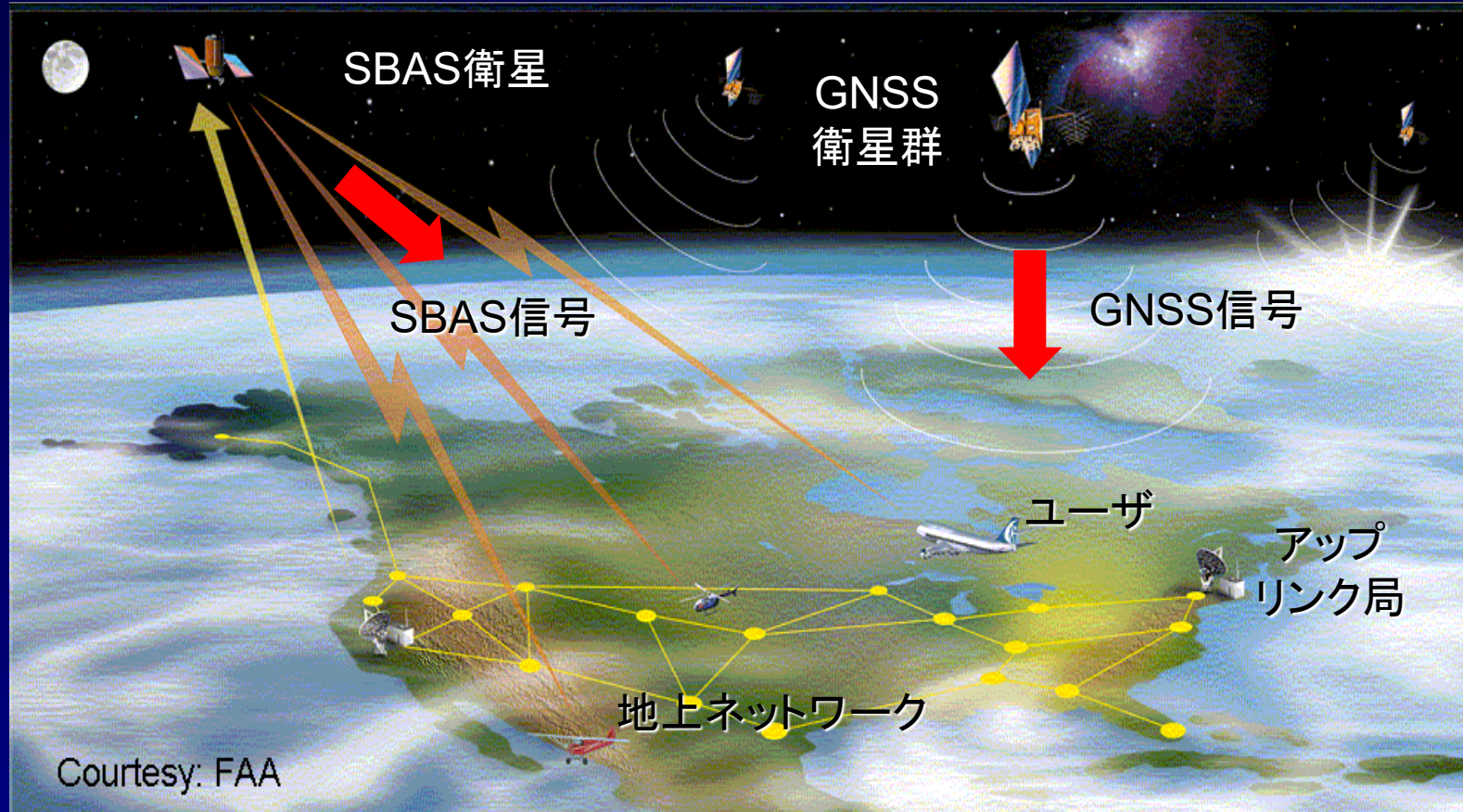
坂井 丈泰・北村 光教・麻生 貴広・星野尾 一明  
航法システム領域



# Introduction

- SBAS (Satellite-Based Augmentation System)
  - 補強システム: GPS/GLONASSを補強し、これらと併用されることで民間航空用途に利用できるGNSSを構成する。
    - 現行規格(L1 SBAS)は単一周波数・単一システムのみ対応。
  - 我が国はMSASを運用中。
- 現在、次世代規格(L5 SBAS)の制定に向けた作業が行われている
  - DFMC SBAS: Dual-Frequency Multi-Constellation SBAS
    - 二周波数の利用により電離圏遅延の問題を解消
    - 複数コアシステムへの対応によるアベイラビリティの向上
    - 非静止衛星からの送信を許容: 準天頂衛星軌道(IGSO)も含まれる
  - ICAOで2018年末にベースライン規格を制定。2020年末までに確定する予定。
- 電子航法研究所は準天頂衛星のL5S信号により実証実験を実施中
  - プロトタイプシステムにより随時送信。最近は欧州でも受信実験を実施。

# SBASの仕組み



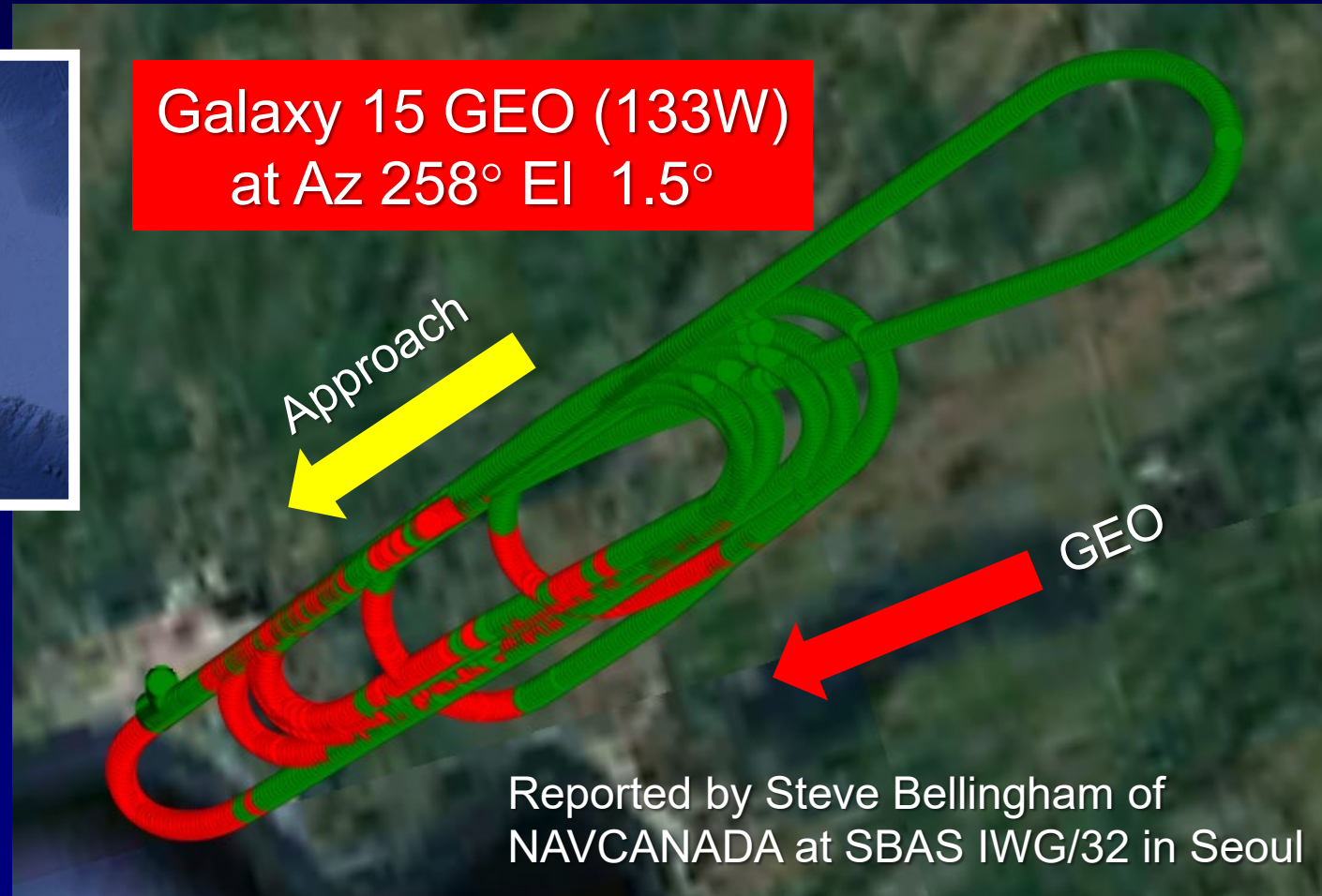
- 地上ネットワークによりGNSS信号を監視(異常の有無・測距誤差)
- ディファレンシャル補正情報及び完全性情報をSBAS衛星経由で送信

現行規格(L1 SBAS)は静止衛星からしか送信できない

# 静止衛星の遮蔽例



Galaxy 15 GEO (133W)  
at Az 258° El 1.5°



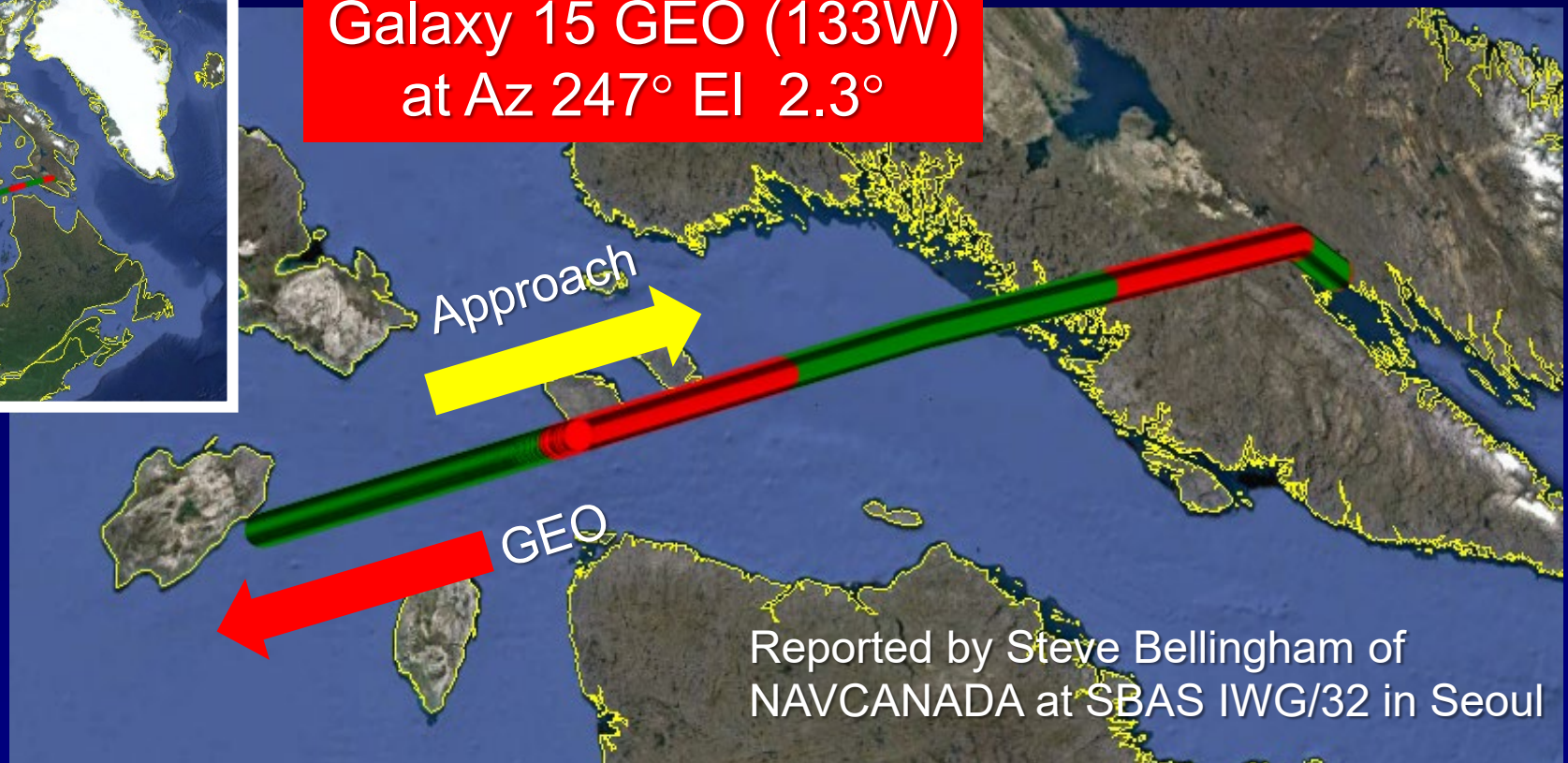
Reported by Steve Bellingham of  
NAVCANADA at SBAS IWG/32 in Seoul

- CRJ機によるStephenville, NL (48.6N 58.6W)へのアプローチ
- 機体の姿勢により、WAAS信号が頻繁に遮蔽(赤プロット)されている

# 静止衛星の遮蔽例



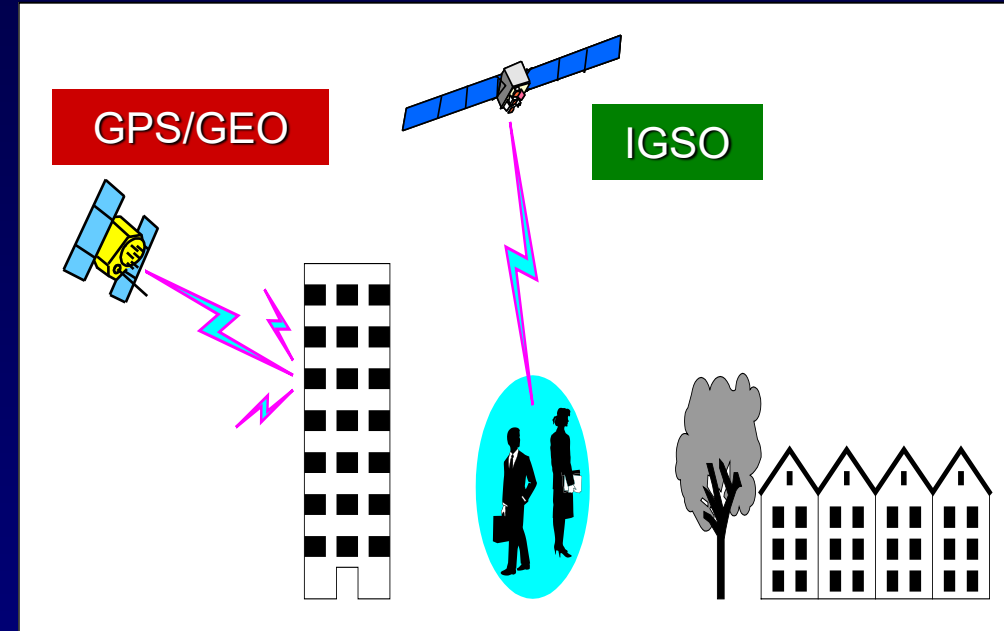
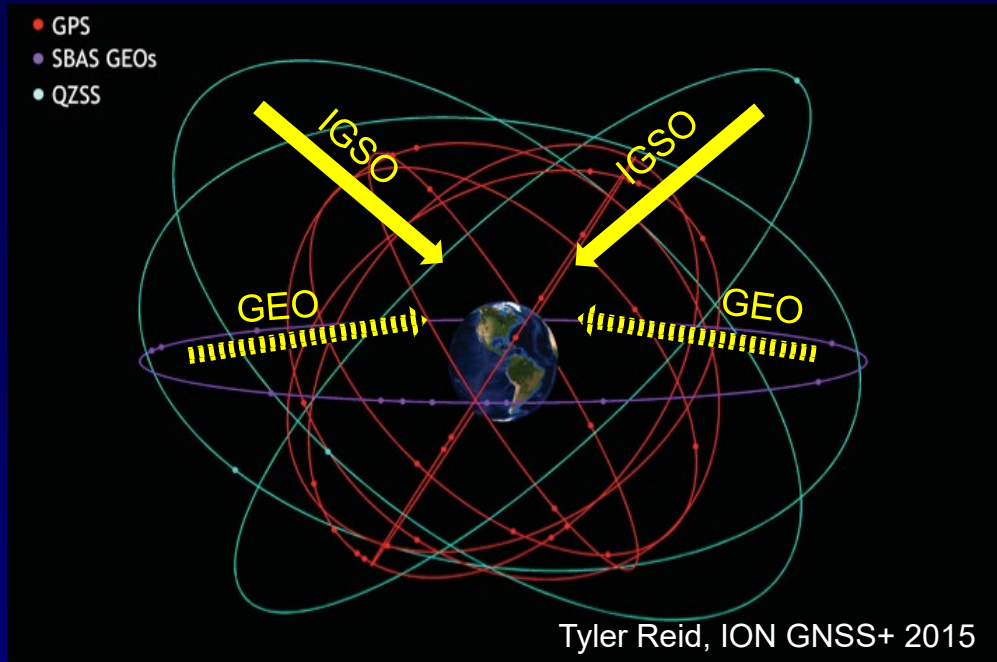
Galaxy 15 GEO (133W)  
at Az 247° El 2.3°



Reported by Steve Bellingham of NAVCANADA at SBAS IWG/32 in Seoul

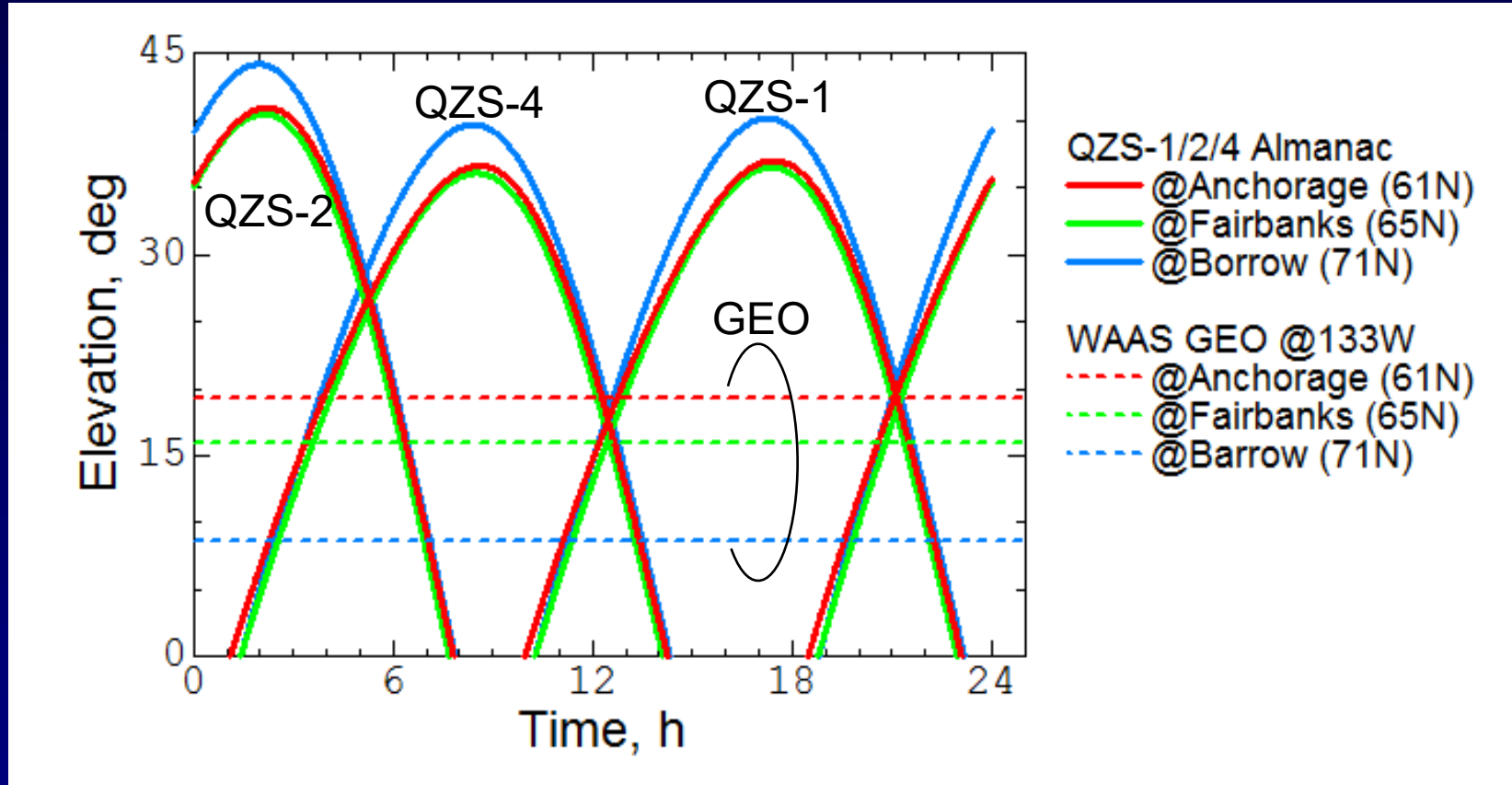
- Dash-8機がIqaluit, NU (63.7N 68.5W)に到着
- 出発時にも似たような状況であったと報告されている

# 準天頂衛星によるSBAS



- 準天頂衛星からSBAS信号を送信することで、静止衛星では信号が届きにくい地域・場所に対して補強信号の Availability を改善できる
  - たとえば、極域・山岳地域・都市部など
  - 測位衛星はGalileoの利用などで補えるが、補強信号については静止衛星以外を使用するより他にない：準天頂衛星軌道(IGSO)の活用
  - 二周波SBASは電離圏活動の影響を受けない：赤道域から極域までカバーできる

# 例：アラスカでの見え方



- 準天頂衛星QZS-1/2/4のアルマナックから計算した仰角の変化
- アラスカ地方では準天頂衛星が可視であり、WAAS衛星よりも仰角が高い

# L5 SBAS:RF仕様

項目	L5 SBAS	L1 SBAS	備考
周波数	1176.45 MHz	1575.42 MHz	GPSと同じ
帯域幅	20~24 MHz	$\geq 2.2$ MHz	
変調方式	BPSK		QPSK化の可能性あり
変調速度	10.23 Mcps	1.023 Mcps	
拡散符号	PRN 120~158		当初は120~138
符号速度	1 Ksps	500 sps	
符号化	$\frac{1}{2}$ FEC マンチェスター符号	$\frac{1}{2}$ FEC	K=7
データ速度	NH符号 なし	250 bps	
メッセージ長	なし	250 ビット	
プリアンブル	4ビット 6パターン	8ビット 3パターン	GPSサブフレームに 同期
CRC長	24ビット		$P_E < 10^{-7}$



# L5 SBAS: 補強機能

項目	L5 SBAS	L1 SBAS	備考
補強対象	GPS・GLONASS・Galileo・BeiDou・SBAS	GPS・GLONASS・SBAS	若干の予備ビットあり
対応衛星数	214	210	
同時補強衛星数	92	51	
補強対象の擬似距離	L1 C/A + L5 電離圏フリー線形結合 (2周波数モードのみ)	L1 C/A (1周波数モードのみ)	L5のみの1周波数モードはない
補正情報	クロック補正 軌道補正	高速補正・クロック補正 軌道補正 電離圏遅延補正	SAは想定しない
SBAS衛星	<b>制約なし</b>	静止衛星のみ	レンジング機能はオプション

準天頂衛星も含まれる

# L5 SBASの特徴

## • 二周波数の利用

- ユーザ受信機は、L1/L5の電離圏フリー線形結合擬似距離を使用する。
  - 電離圏伝搬遅延に影響されないロバストな測位。
- 電離圏遅延補正は送信しない。

## • 複数コアシステムに対応

- 補強対象: GPS・GLONASS・Galileo・BeiDou・SBAS
  - システム間バイアスは受信機クロックバイアスに含めて処理する。

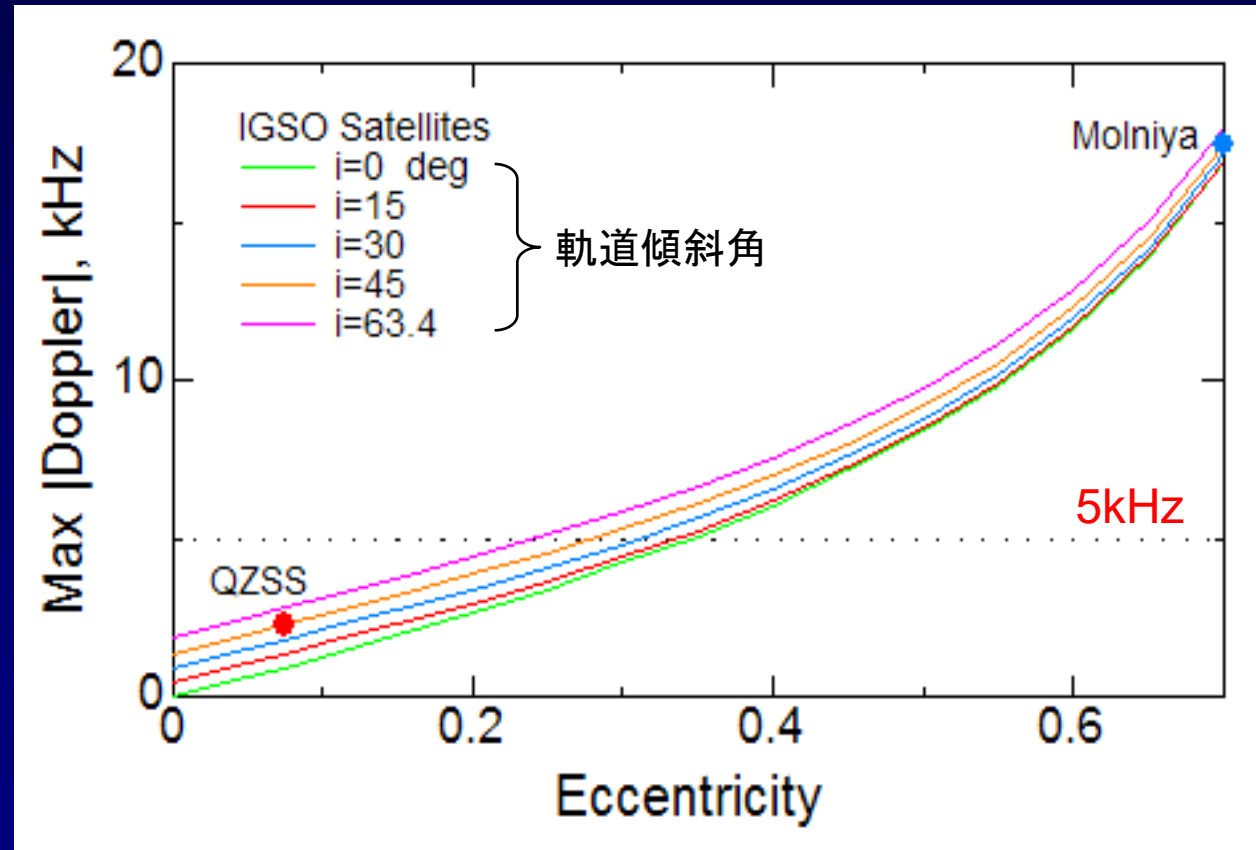
## • 非静止衛星によるSBASを考慮

- 準天頂衛星を含む非静止衛星からSBAS信号を送信できる。
- SBAS衛星のエフェメリス情報も非静止衛星に対応: ケプラー要素による表現。
  - 実際には、原案段階ではいくつかの課題があった。
  - それぞれについて修正提案を行い、いずれも採用された。

# (課題1) ドップラ周波数

- 準天頂衛星のドップラ周波数: 最大 $\pm 2.2$ kHz程度
- SBAS信号のドップラ周波数
  - 静止衛星:  $\pm 337$ Hz (L1 SBASの規定値をL5周波数に換算した値)
  - 非静止衛星: 当初案は $\pm 40$ kHz (第一宇宙速度 $7.9$ km/sに対応する値)
    - GPSについてMOPSで定められている $\pm 5$ kHzに対して大き過ぎる
    - EUROCAEでの指摘: ドップラ周波数の範囲が広いと、受信機側の初期捕捉に時間がかかり、信号捕捉時間の規定を満たすことが難しくなる
- 非静止衛星のドップラ周波数について、変更を提案
  - 実際問題として、理論的最大値 ( $7.9$ km/s) まで考慮する必要はない
    - 実際に使われる可能性のある軌道に絞る
    - 最大・最小受信電力差の観点からも離心率の大きな軌道は許容できない
  - GPSにあわせて、 $\pm 5$ kHzとすることを提案した
  - 議論の結果、 $\pm 7$ kHzとすることで落ち着いた

# さまざまな軌道の最大ドップラ



- 準天頂衛星では最大±2.2kHz程度
- モルニヤ軌道(軌道傾斜角63.4度、離心率0.7)では最大で±18kHzになる
  - 低仰角での接近・離脱時。仰角が上がるにつれてドップラ周波数が下がる

## (課題2) 受信電力

### • SBAS信号の受信電力

- ベースラインSARPSの規定：最大  $-150.5$  dBW / 最小  $-158.0$  dBW
- 覆域内の(仰角5度以上となる)どの地点でも満足することが必要
  - 最大となる地点と最小となる地点で、差が7.5dB以内であること

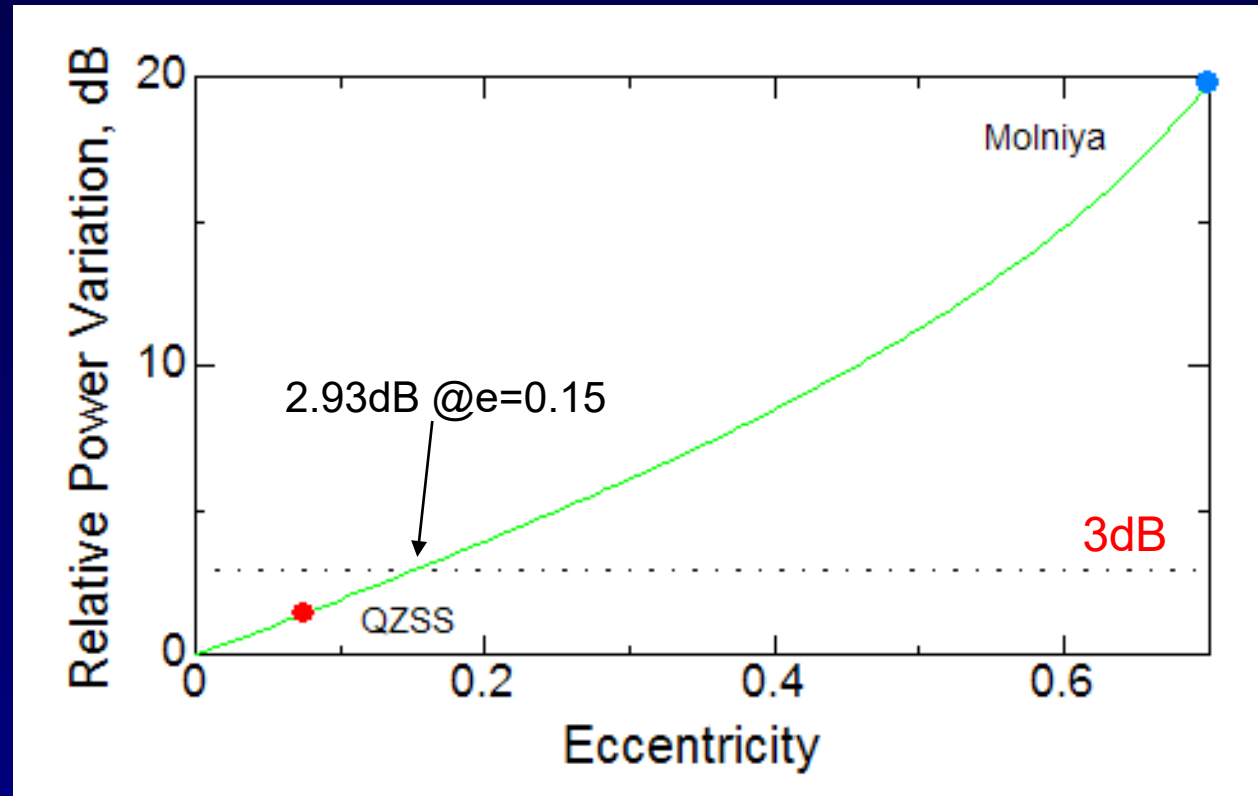
### • 静止衛星や円軌道の場合は問題にならない

- 地球との距離関係が変わらない
- 衛星側送信アンテナのアンテナパターンで補正

### • 楕円軌道の場合

- 近地点で最大電力、遠地点で最小電力となる
- 距離の変化に由来する変動分はアンテナパターンで補正できない
  - 電力差7.5dB以内のうち、3dB程度をこの変動分に充てることと想定する
  - 3dBまでの変動を許容したとき、衛星の軌道はどのように制約されるか

# 受信電力の制約を考慮

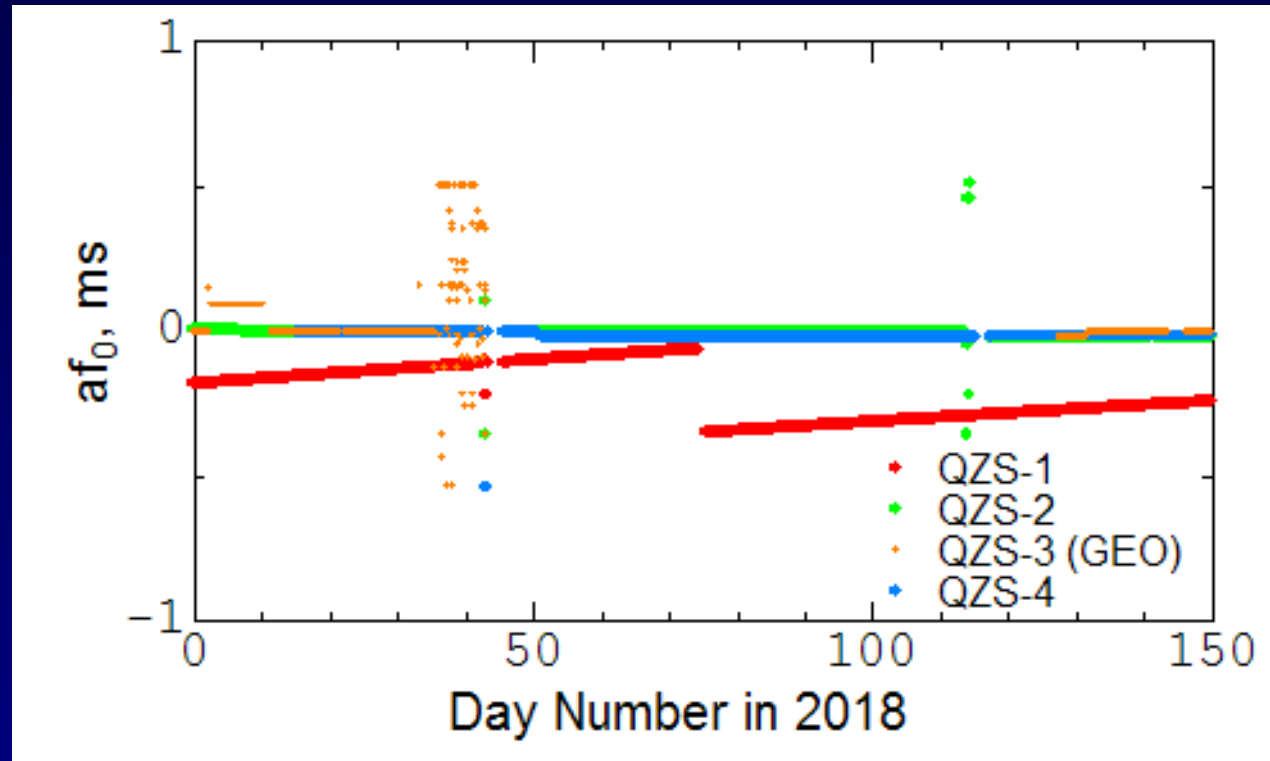


- 離心率を変えた場合の最大・最小電力差
  - 円軌道での最大・最小電力差(1.324dB)からの差分を表示
- 許容変動幅3dBのとき、離心率 $e=0.15$ まで許容できる
  - ドップラ周波数の許容範囲を $\pm 5\text{kHz}$ 以内とする提案とも整合する

# (課題3) コード位相オフセット

- SBAS信号のコード位相オフセット
  - PRNコードの位相のずれ(クロック補正值 $a_{Gf_0}$ が対応する)
    - 信号生成に使用している周波数標準のオフセットによる
    - 時間の経過とともに拡大する。GPSでは、 $\pm 1\text{ms}$ 以内と規定(クロック補正值 $a_{f_0}$ )
  - L1 SBASでは、 $\pm 1\mu\text{s}$ 以内と規定されている
    - 衛星の軌道制御のタイミングで調整できる
    - 静止衛星では軌道制御が頻繁なので問題にならない( $\pm 1\mu\text{s}$ 以内に維持できる)
- 準天頂衛星の場合
  - QZS-1/2/4(準天頂軌道)は、おおよそ半年に一度の軌道制御
  - コード位相オフセットについて $\pm 1\mu\text{s}$ 以内を維持するのは難しい
- コード位相オフセットの許容範囲について、変更を提案
  - 非静止衛星＝周回衛星を許容している以上、静止衛星を前提にはできない
  - GPSを参考に $\pm 1\text{ms}$ 以内とすることを提案

# 準天頂衛星での実績

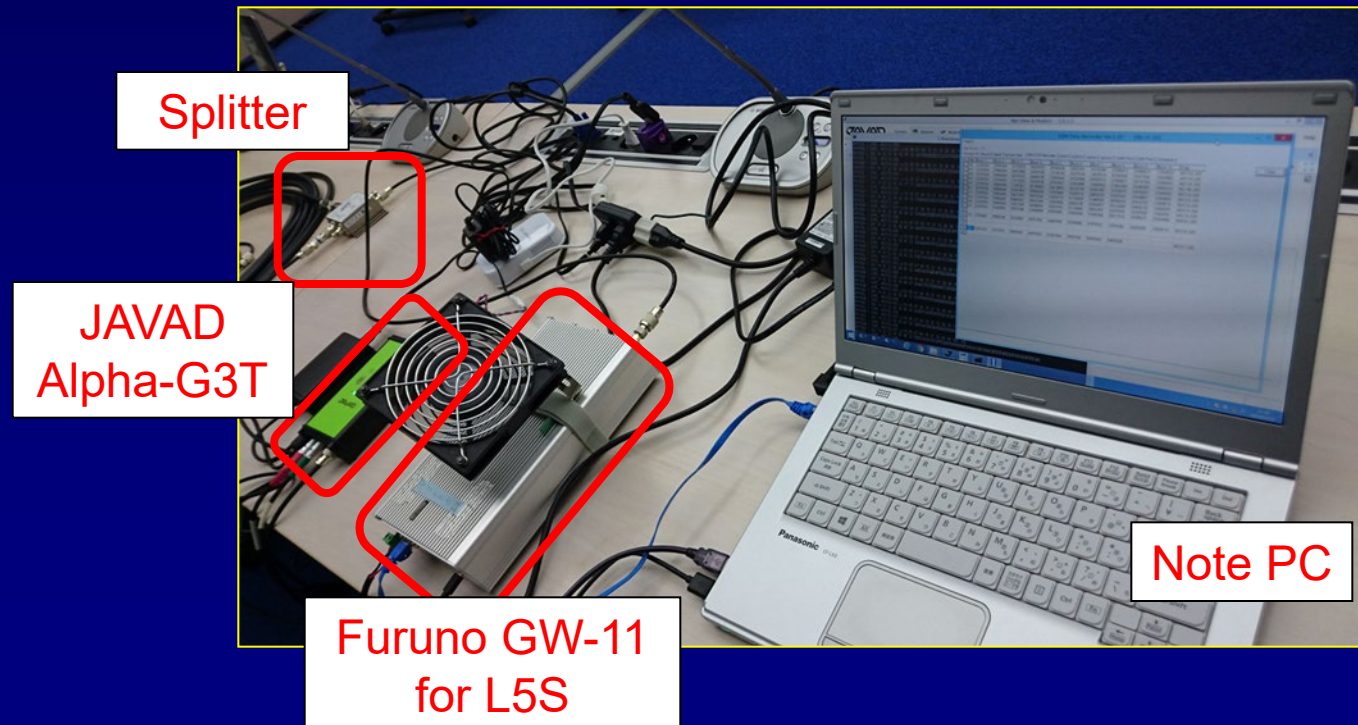


- 1～4号機の航法メッセージのクロック補正值 $a_{f_0}$
- $\pm 1$ msは維持できるが、 $\pm 1\mu$ sは難しい
  - 静止衛星・非静止衛星とも $\pm 1$ ms以内とすることを提案した
  - SBAS衛星エフェメリスについても、 $a_{Gf_0}$ のビット数を拡大

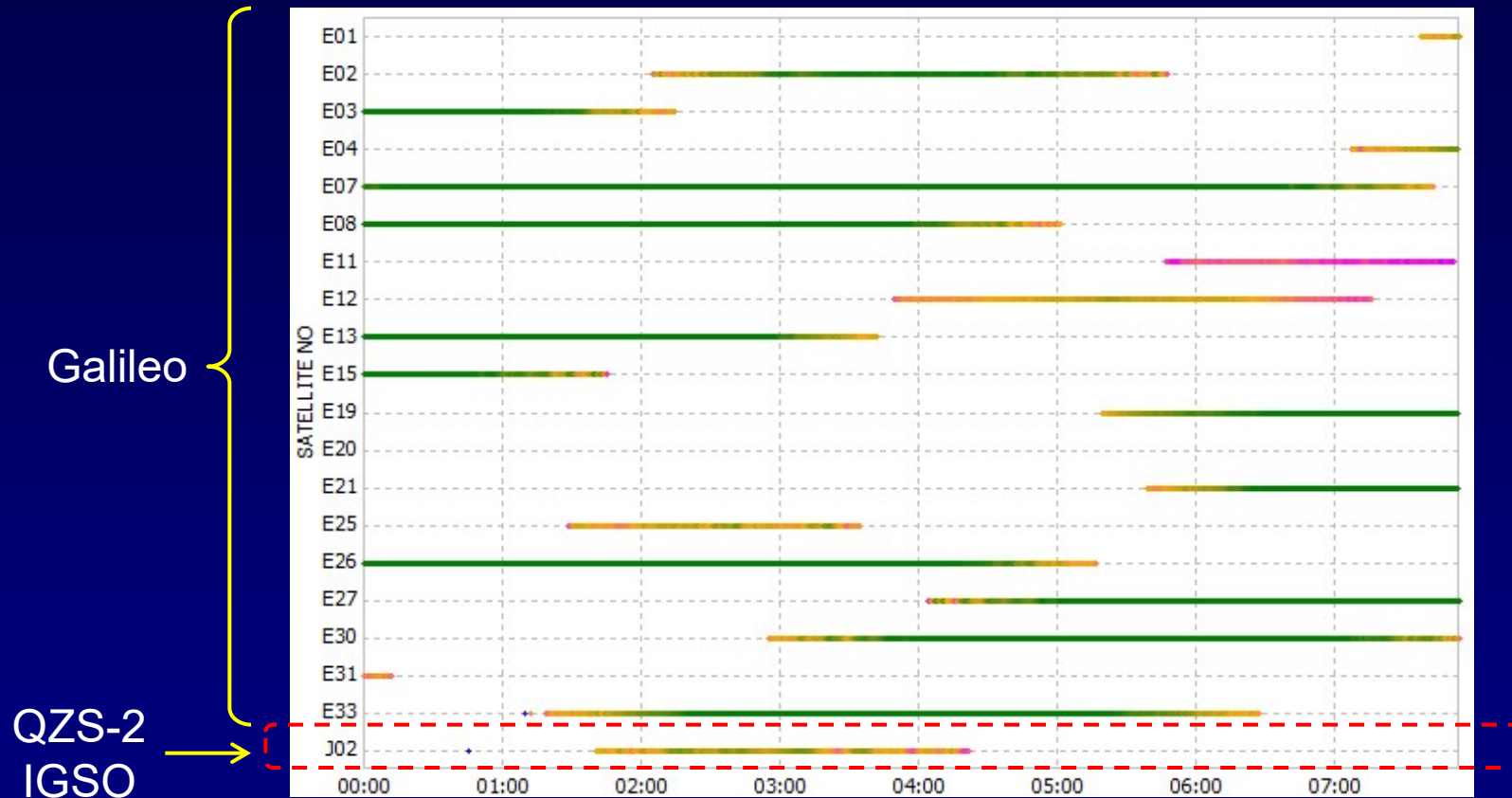


# L5S信号の受信実験

- 初期段階として、プラハにて受信実験を実施した
  - 欧州にてL5S信号を受信する初の試み
  - プラハのGSA(欧州GNSS機関)本部にて、2019年3月21~22日に実施
  - 次回は北欧地方での受信実験を計画中

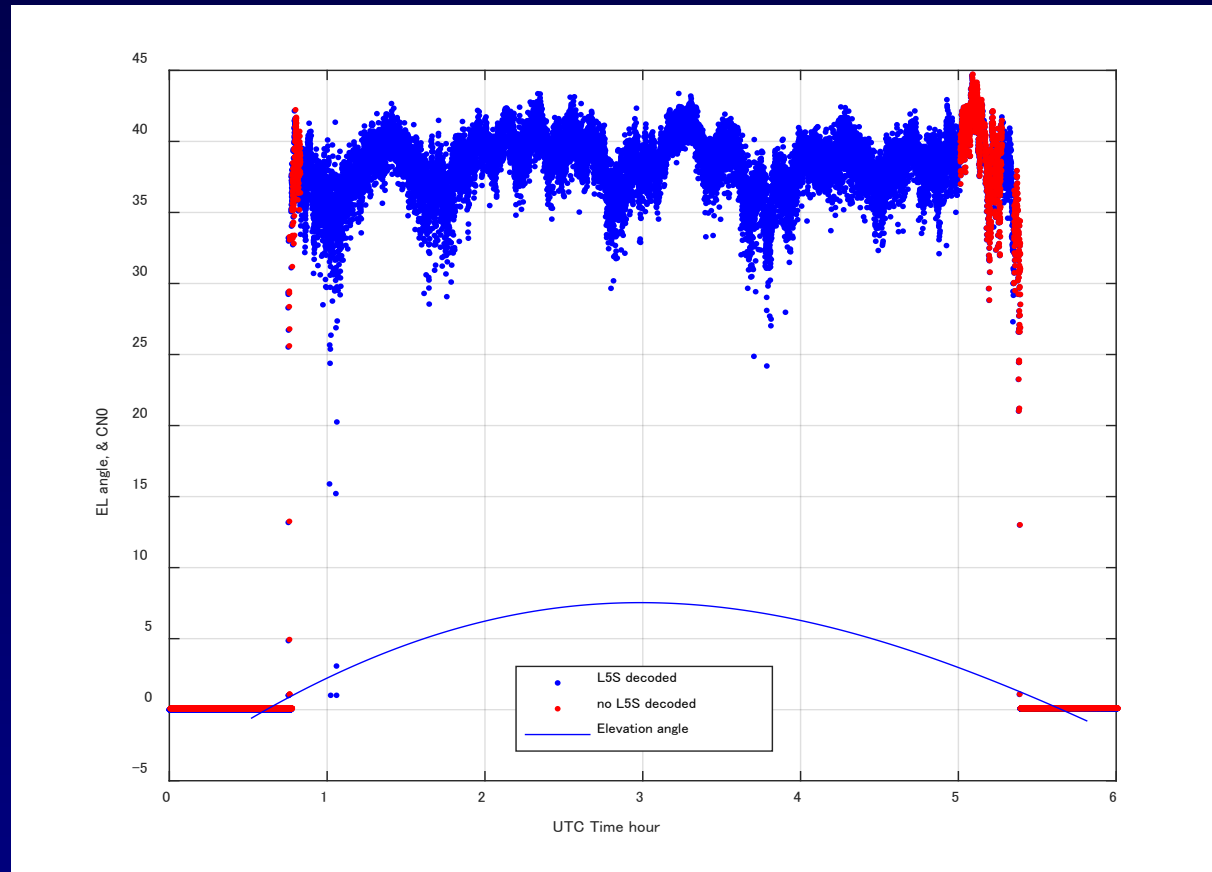


# 準天頂衛星のL5信号



- JAVAD受信機: 多数のGalileo衛星 (E5信号) を捕捉
- 古野電気GW-11: 夜間にQZS-2 IGSOを捕捉 (仰角5度以上は3時間程度)

# L5S信号の受信



- 古野電気GW-11で受信したQZS-2のL5S信号
- 仰角0~7度、C/N<sub>0</sub> 30~45 dB-Hz程度
- L5Sメッセージは正常にデコードされた

# Conclusion

- ICAOにおいて、次世代SBAS規格の制定に向けた作業中
  - 2018年末にベースライン規格を制定済み、2020年末に確定を予定
- 主な特徴：
  - 二周波数の利用：電離圏伝搬遅延の影響を受けない測位
    - 低緯度地域を含む全世界でロバストな測位機能を提供できる
  - 複数コアシステムへの対応
    - GPS・GLONASS・Galileo・BeiDou・SBAS
- 非静止衛星によるSBASが許容されている
  - 準天頂衛星を含む非静止衛星からSBAS信号を送信できる
    - 静止衛星の信号を受信しにくい環境で、補強信号のアベイラビリティ改善に有効
  - 非静止衛星対応のために必要な変更を提案し、いずれも採用された
    - ドップラ周波数・最大最小電力差・コード位相オフセット
  - 準天頂衛星L5S信号を使用して実証実験を実施
    - 昨年度中にプラハにて受信実験を実施した。北欧での実験を計画中