

次世代SBASの北極域における 性能評価実験

航法システム領域

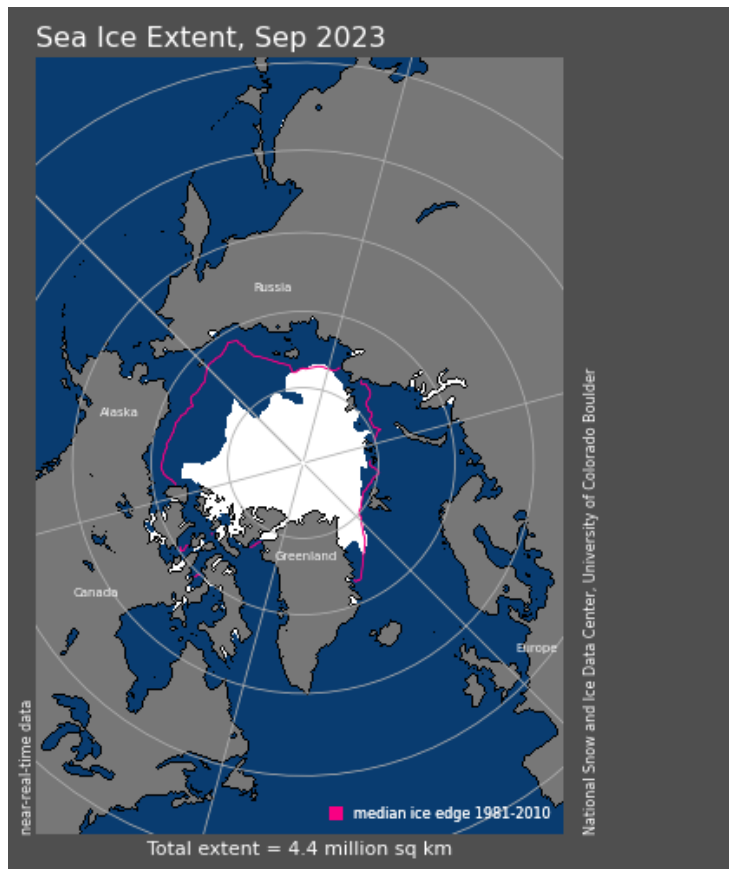
高橋透、北村光教、斎藤享、坂井丈泰

海洋研究開発機構

藤原周

Introduction

北極域の海氷面積の減少

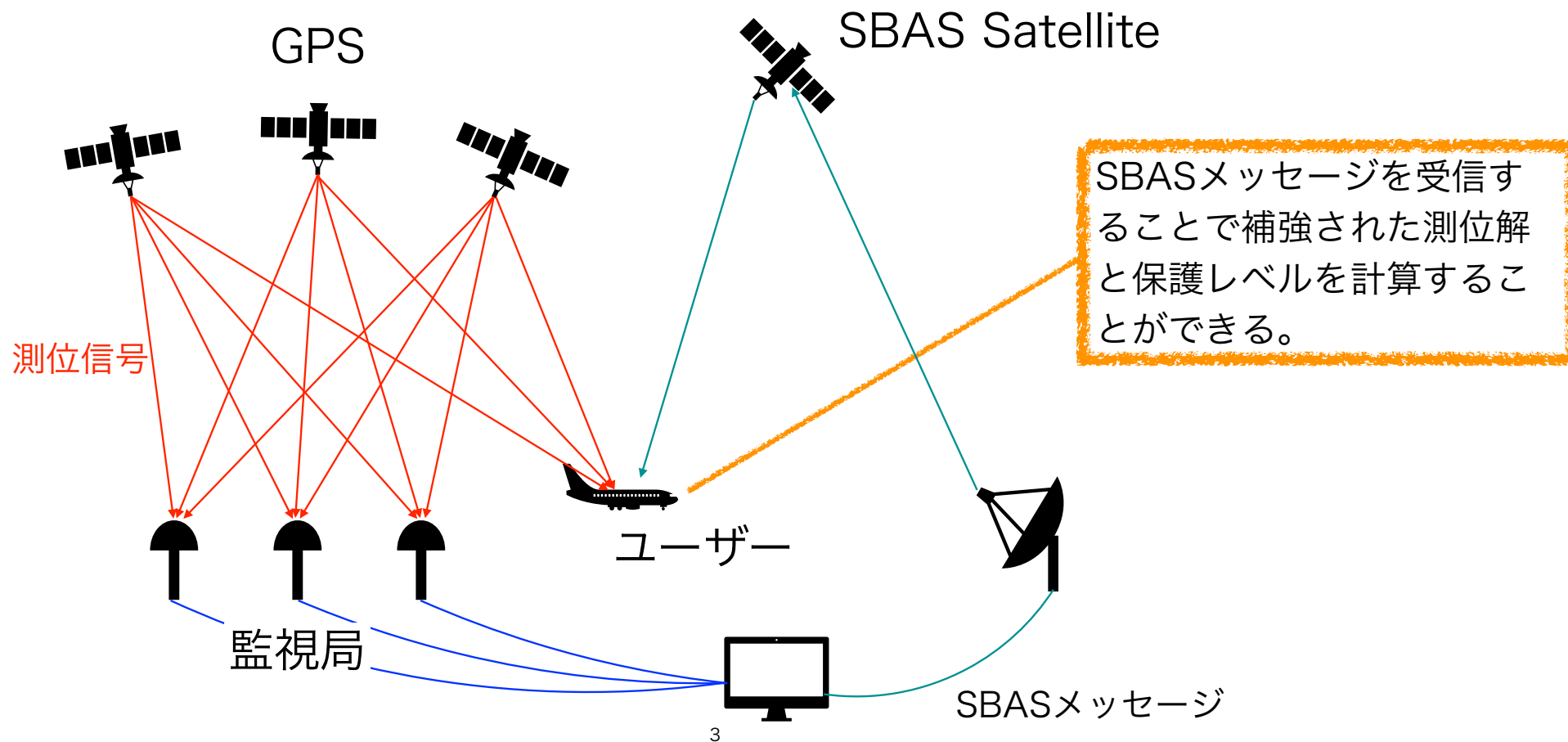


Cite: http://nsidc.org/data/seaice_index/

- 北極海の海氷面積が減少している (Miller and Ruiz, 2014)。
- 2030年から2080年の夏季に海氷がなくなる "ice-free" となることが予想されている (Overland and Wang, 2013)。
- 海氷面積の減少に伴って、北極域において、資源探査、航路開拓と言った船舶・航空を用いた経済活動が活発化することが予想されている。
- インフラの乏しい北極域において、航空機の運用には衛星航法補強システム (SBAS: Satellite Based Augmentation System) を利用することが効果的である (Reid et al., 2016)。

Introduction

SBAS: Satellite Based Augmentation System



信頼性

保護レベル (PL: Protection Level)

ユーザーの位置における測位誤差の信頼限界。本研究では船舶で性能評価を行ったため、水平保護レベル (HPL) を議論に用いた。

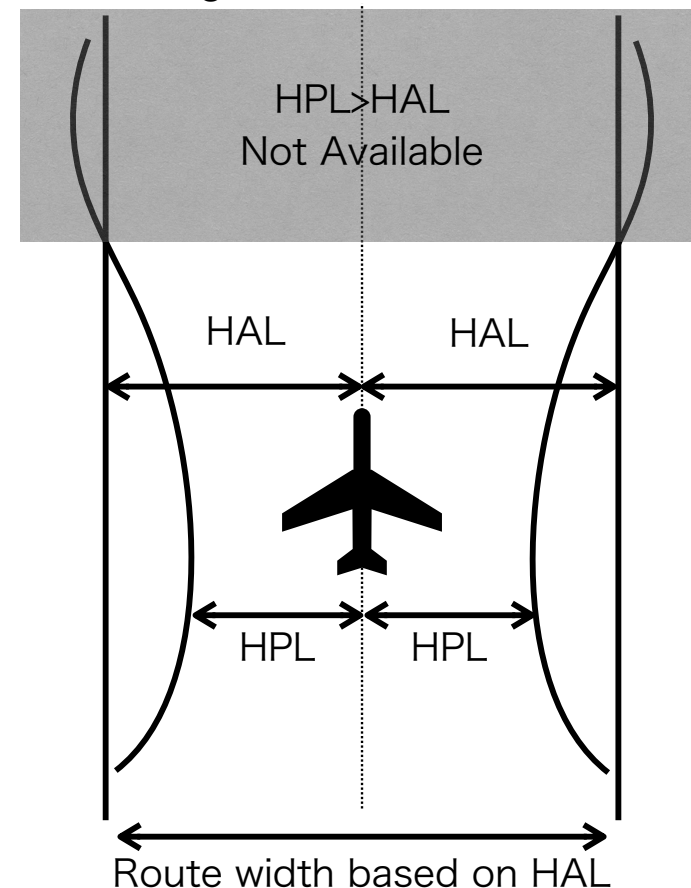
警報限界 (AL: Alert Limit)

航空機の航法モードにより予め決められている上限値。本研究では船舶の外洋での航海 (Ocean/Coastal) を想定して水平警報限界 (HAL) を 25 m とした。 (Reid et al., 2016).

利用可能 & 安全: $PE < PL < AL$

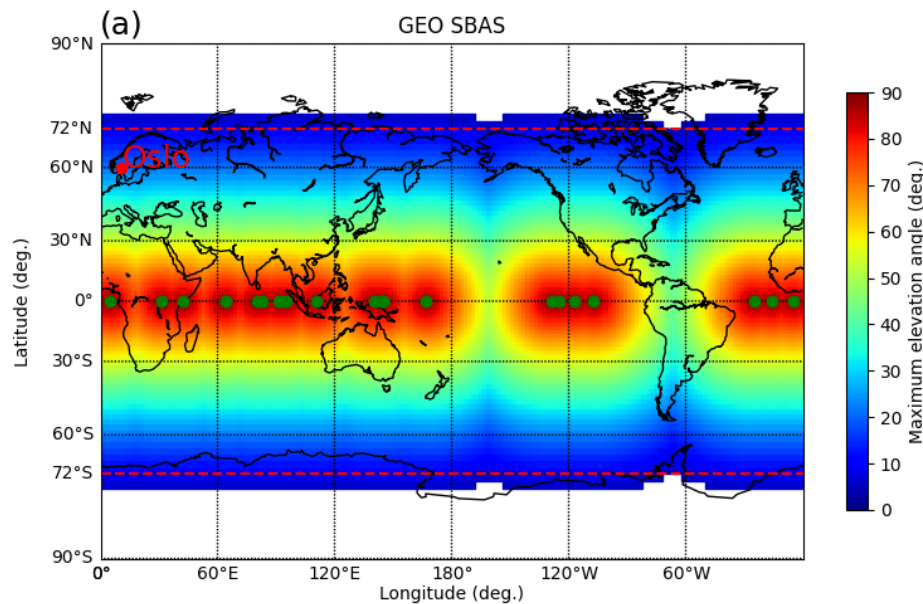
利用不可 : $PE < PL, PL > AL$

Misleading Information: $PE > PL$

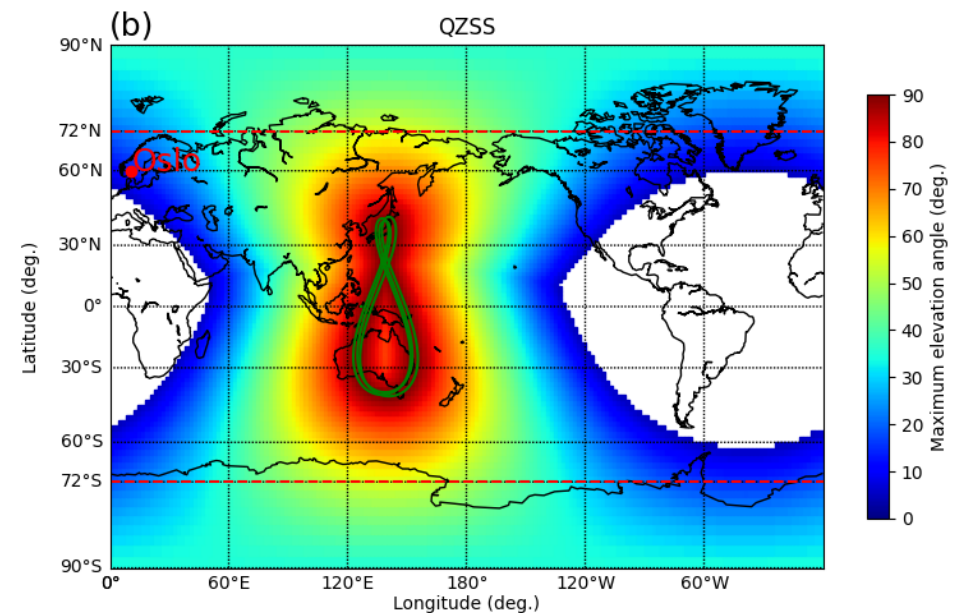


Introduction

SBAS衛星と準天頂衛星 (QZSS)



- 現行のSBASメッセージは静止衛星から放送されている。
- 静止軌道から放送される信号は極域（72度以上）では受信できない。

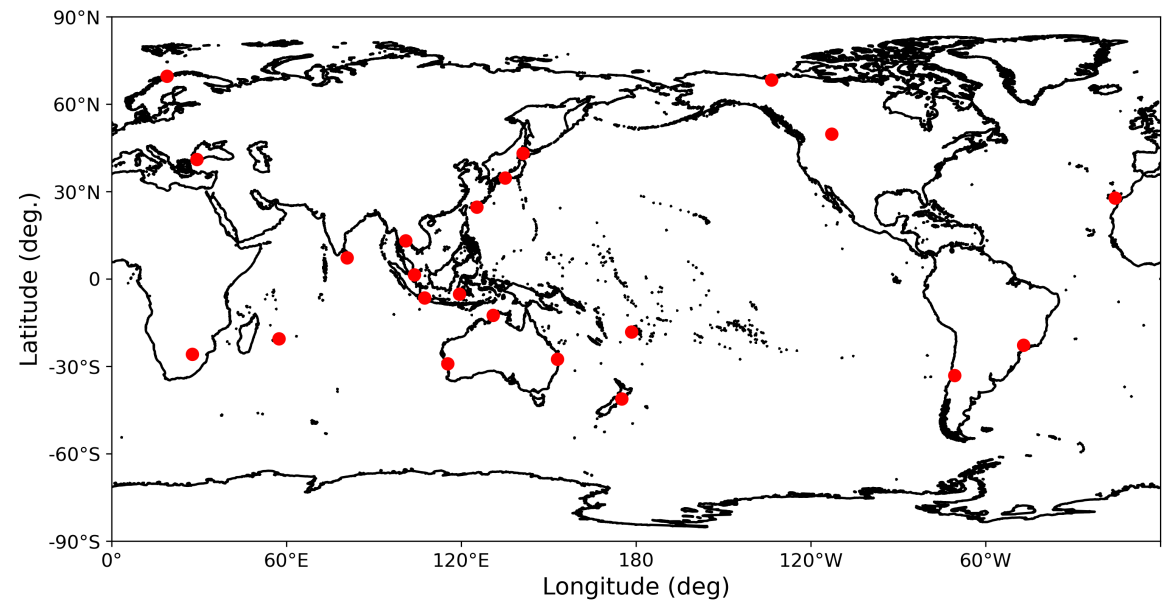


- QZSSからDFMC SBASメッセージが試験的に放送されている。
- この信号は極域で受信することができる。

Introduction

SBAS衛星と準天頂衛星（QZSS）

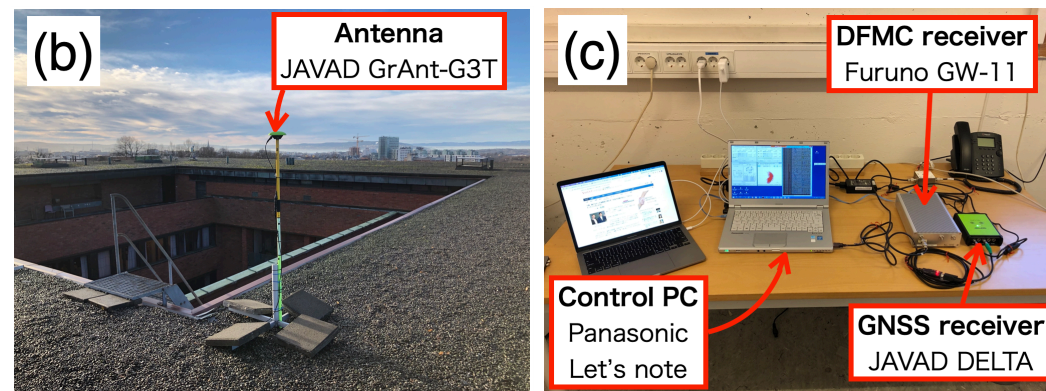
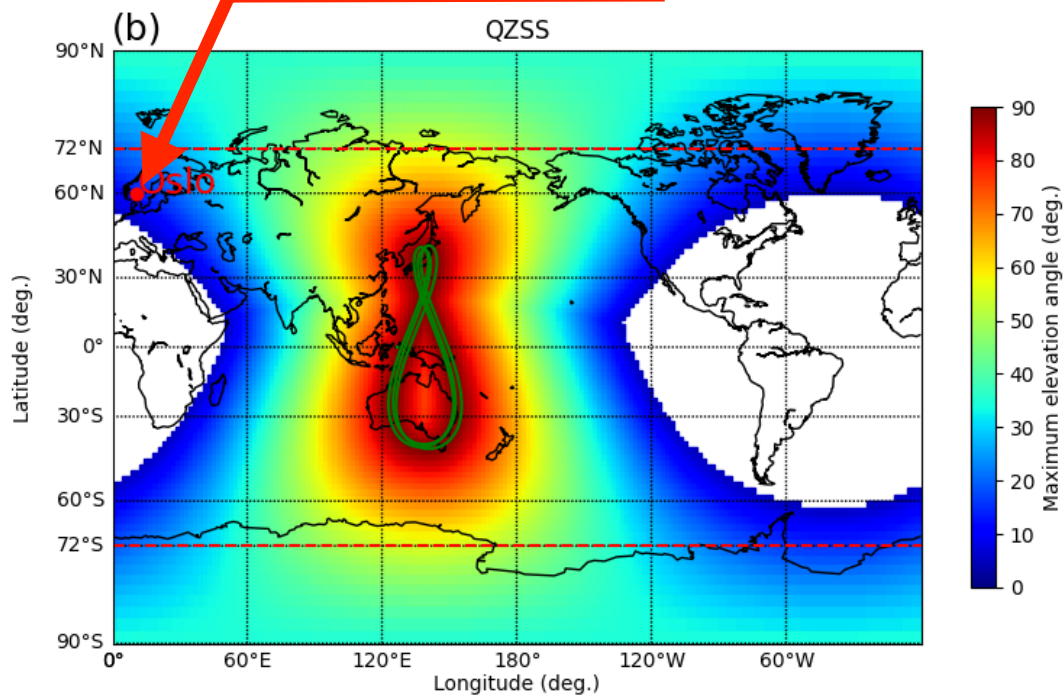
- 監視局でGPS, Galileo, QZSSの信号、衛星位置を監視する。
- DFMC SBASは2周波線形結合された疑似距離(L1/E1 & L5/E5a)を補強する。
- 補強メッセージにはこの他に以下も補正する。
 - 衛星位置
 - 衛星クロック



Introduction

ノルウェー・オスロでの性能評価実験

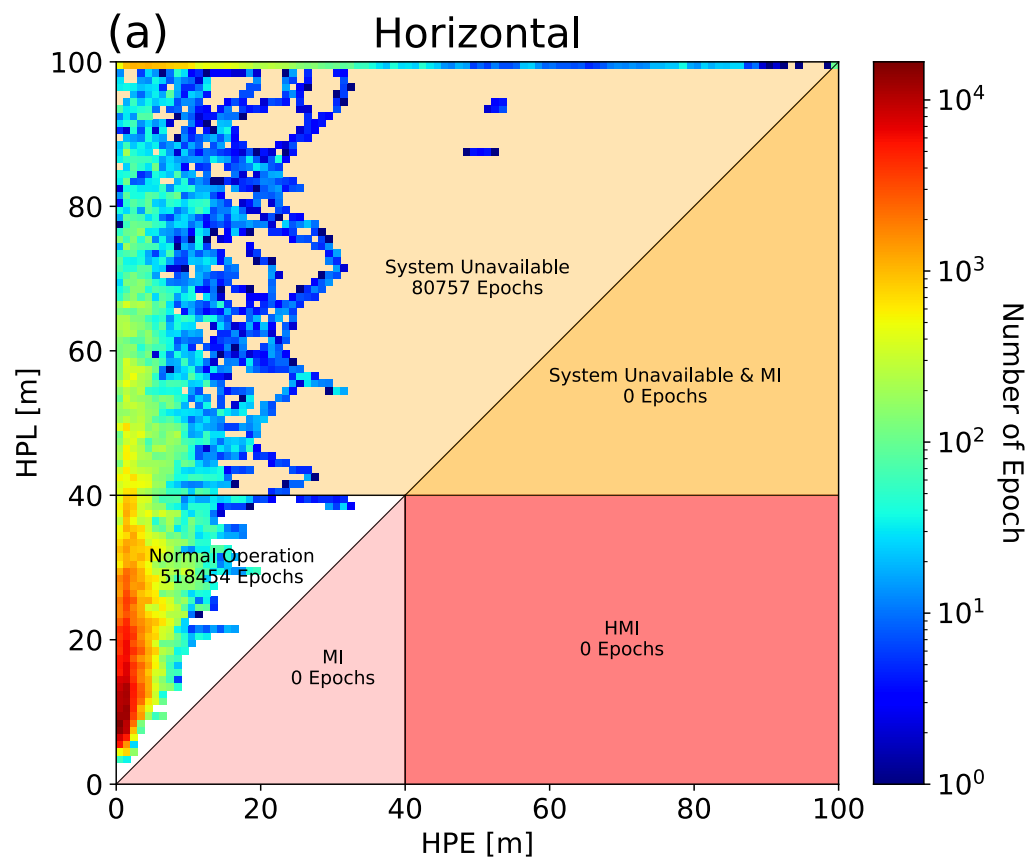
Oslo, Norway
10.72° E, 59.94° N



- QZSSから放送されるDFMC SBASの性能評価実験を2021年2月24日から3月17日までノルウェーオスロで行った。
Takahashi et al., 2024, submitted to *Navigation*

Introduction

ノルウェー・オスロでの性能評価実験



-6機以上の衛星が補強された時間帯は全体の67%であった。

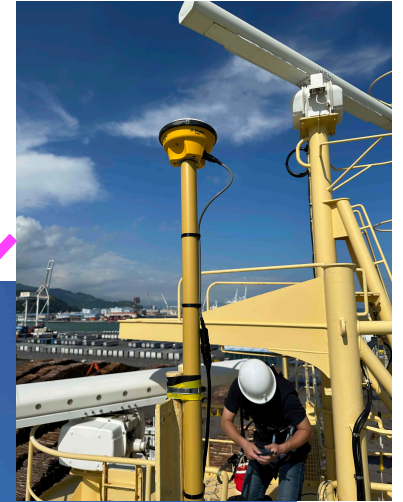
-6機以上補強された時間帯でのアベラビリティは84.68%であった。これは日本での性能と比較して低い値であった。

-シンプルな見積もりを行うと、欧州に3局以上の監視局を設置することで、北欧においても日本と同等な性能で利用可能であることを示唆する結果を得た。

目的

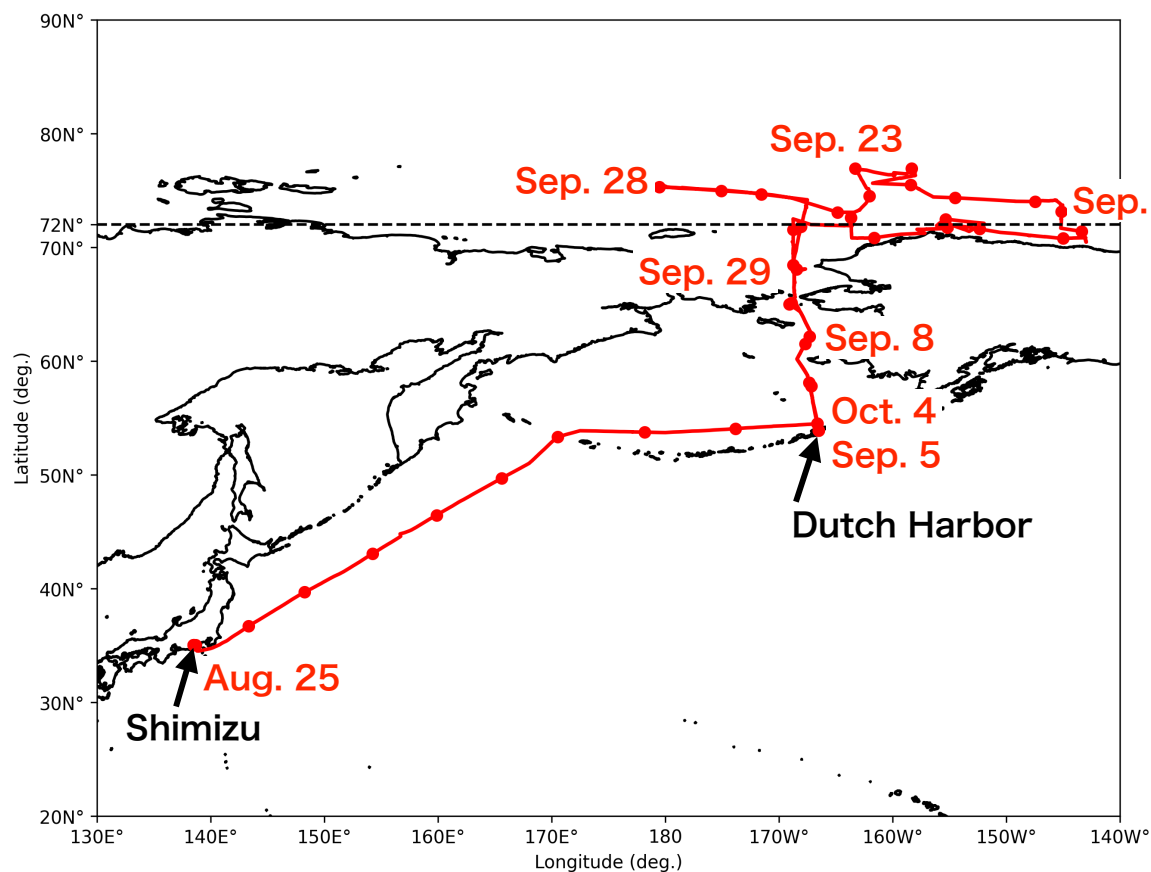
海洋地球研究船みらいを用いた性能評価実験

- 次のステップとして、GNSS受信機、DFMC SBAS受信機をJAMSTECが運用する海洋地球研究船みらいに設置した。
- みらいは2023年8月25日から2023年10月4日にかけて、航海を行った。この期間において北極域においても航海をおこなった。
- この観測では船上環境において性能評価実験を行い、船上における受信環境を明らかにするとともに、北極域における性能を明らかにすることを目的とする。



観測

Cruise: MR2306C



Cruise

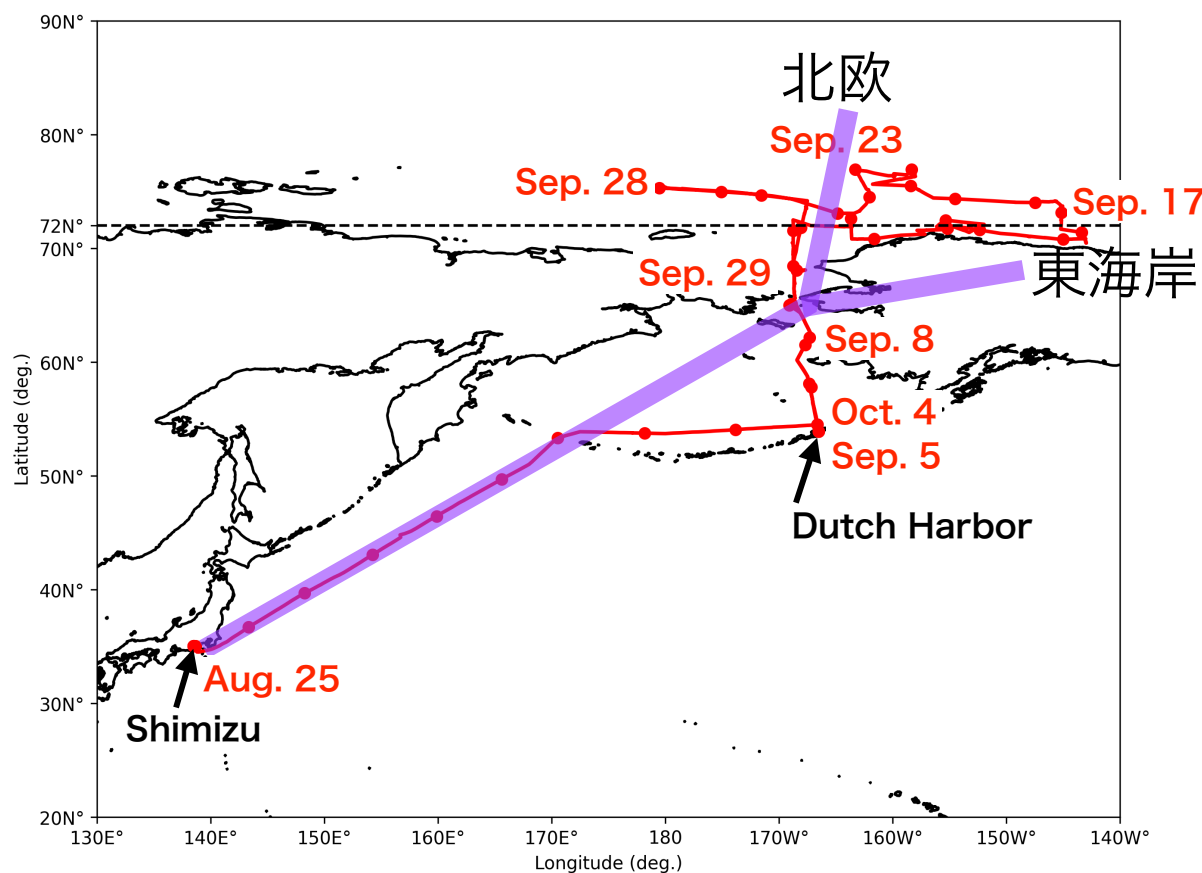
Dept. Shimizu:	Aug. 25, 2023
Arrive Dutch Harbor:	Sep. 2, 2023
Dept. Dutch Harbor:	Sep. 5, 2023
Arrive Dutch Harbor:	Oct. 4, 2023

Onboard Instruments

JAVAD DELTA:	GNSS ranging signal
Furuno L5S Prototype Receiver:	L5S Message
Core Chronosphere-L5S:	L5S Message & GNSS ranging signal
Septentrio Pola5S:	Scintillation index & GNSS ranging signal

観測

Cruise: MR2306C



Cruise

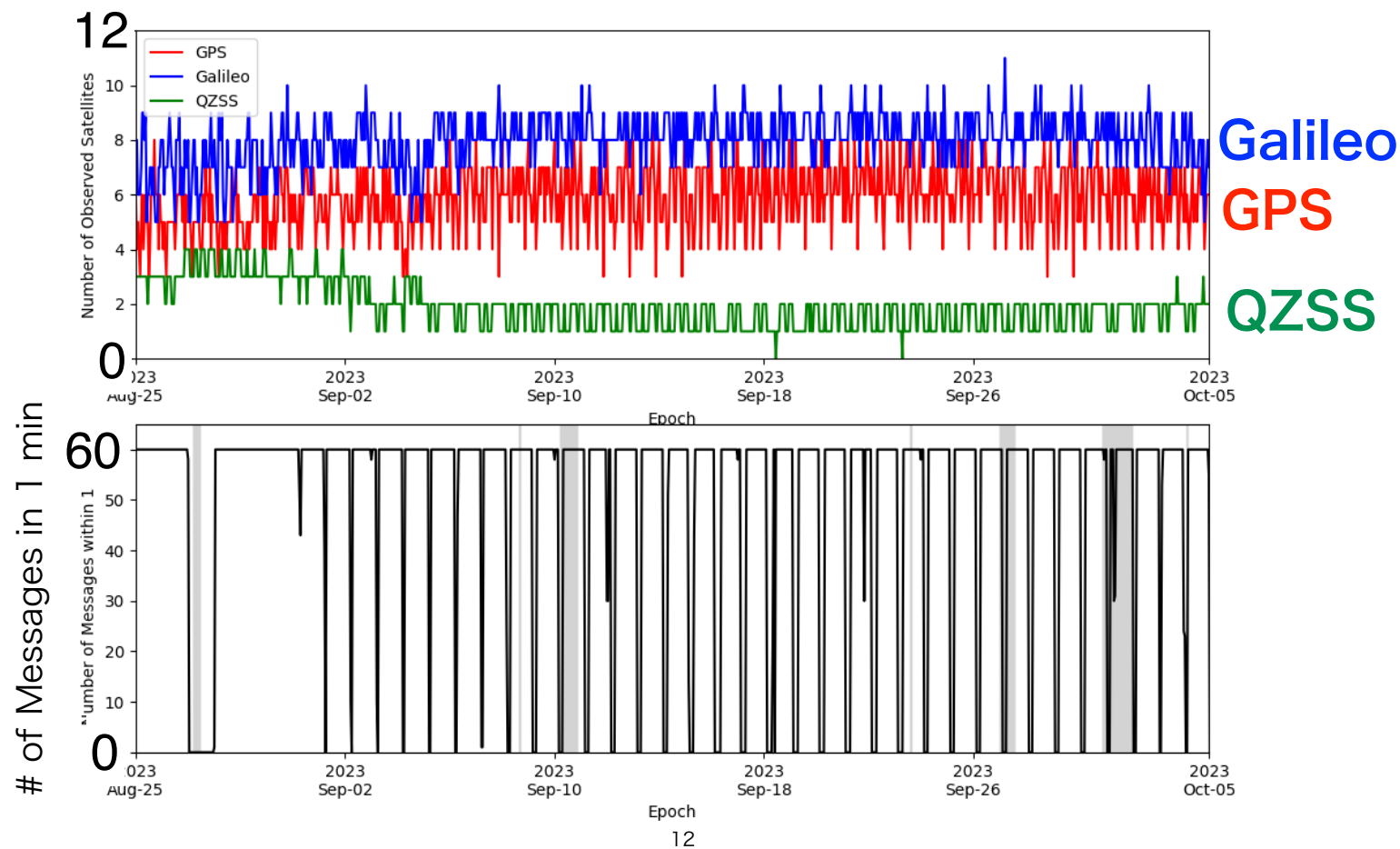
Dept. Shimizu:	Aug. 25, 2023
Arrive Dutch Harbor:	Sep. 2, 2023
Dept. Dutch Harbor:	Sep. 5, 2023
Arrive Dutch Harbor:	Oct. 4, 2023

Onboard Instruments

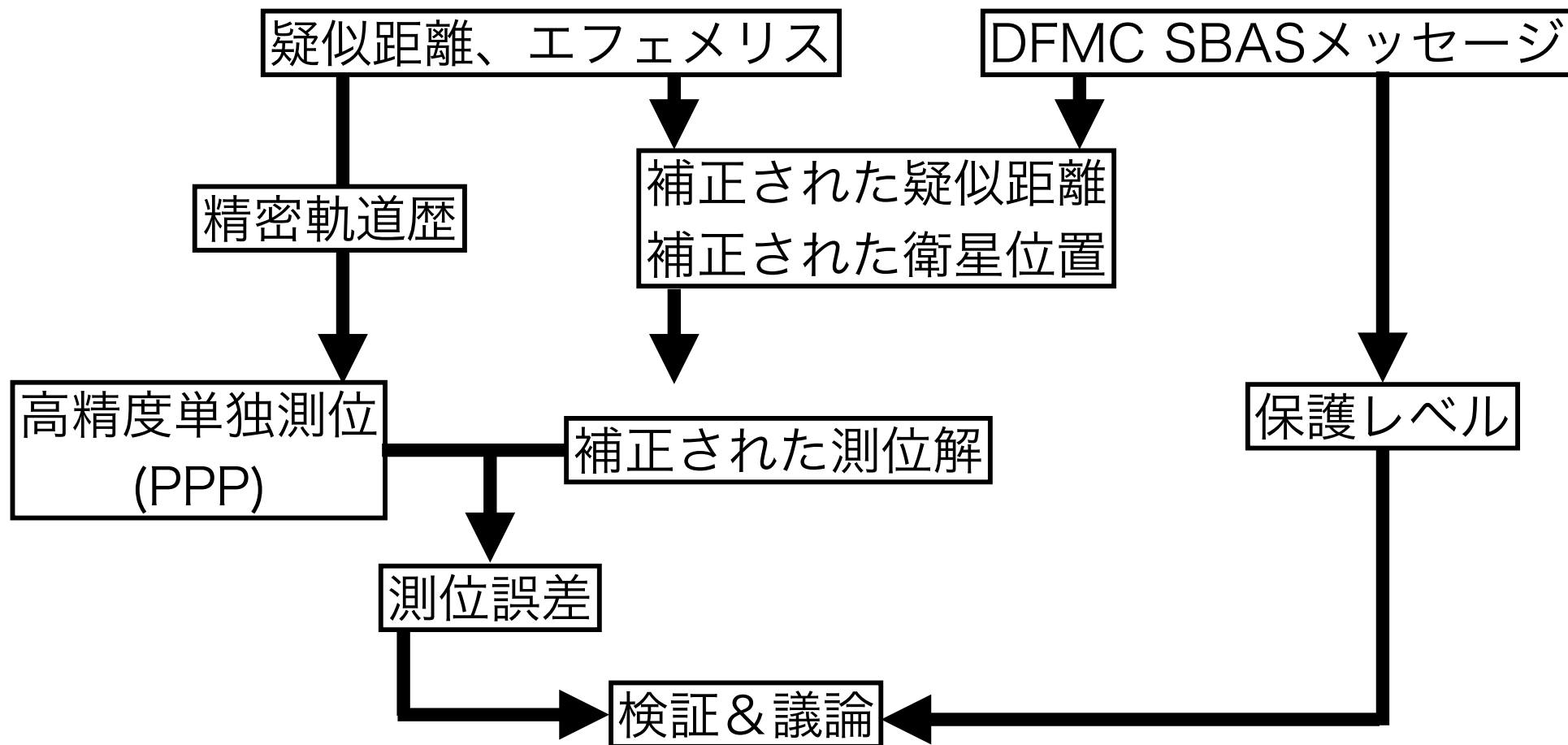
JAVAD DELTA:	GNSS ranging signal
Furuno L5S Prototype Receiver:	L5S Message
Core Chronosphere-L5S:	L5S Message & GNSS ranging signal
Septentrio Pola5S:	Scintillation index & GNSS ranging signal

観測結果

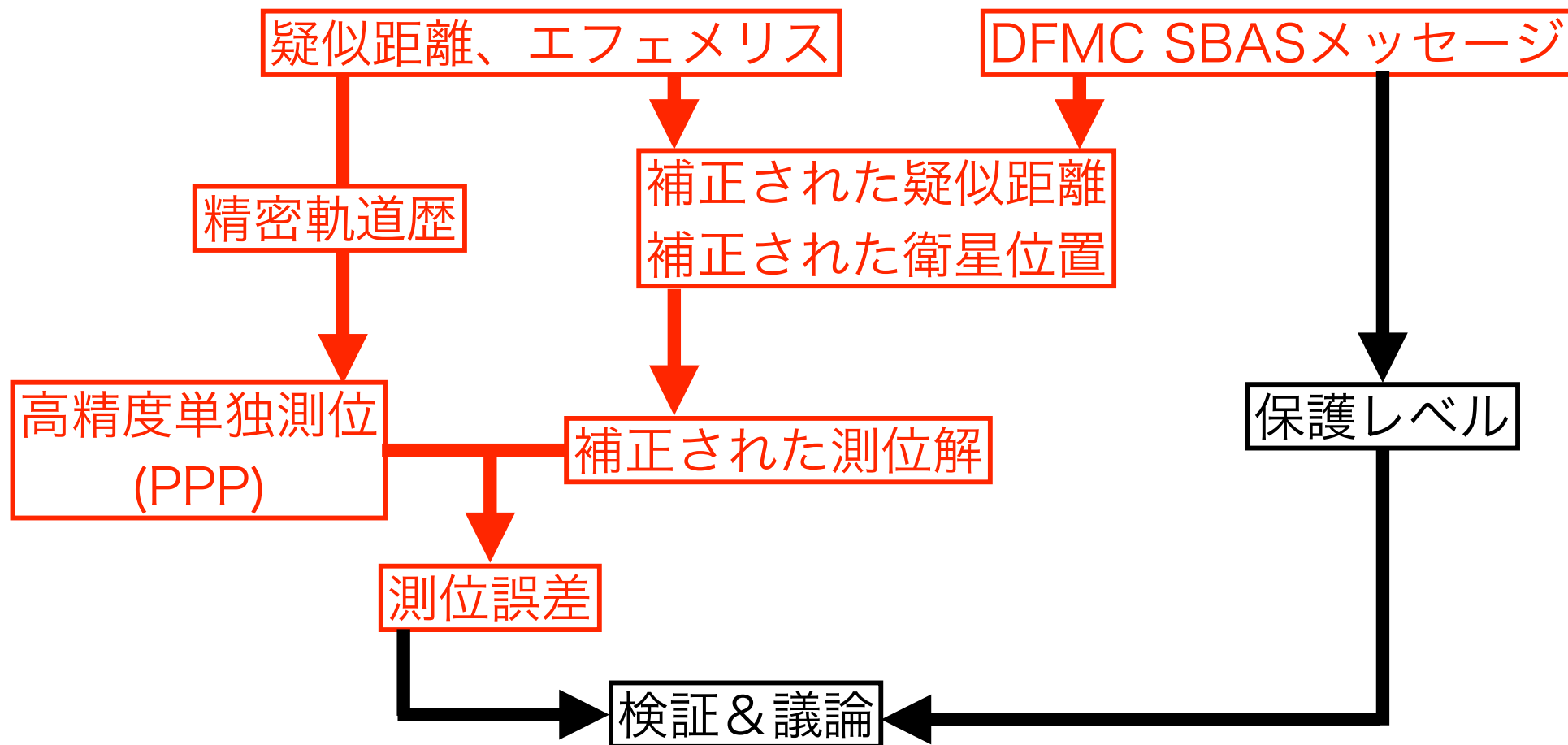
受信された衛星数とDFMC SBASのメッセージ数



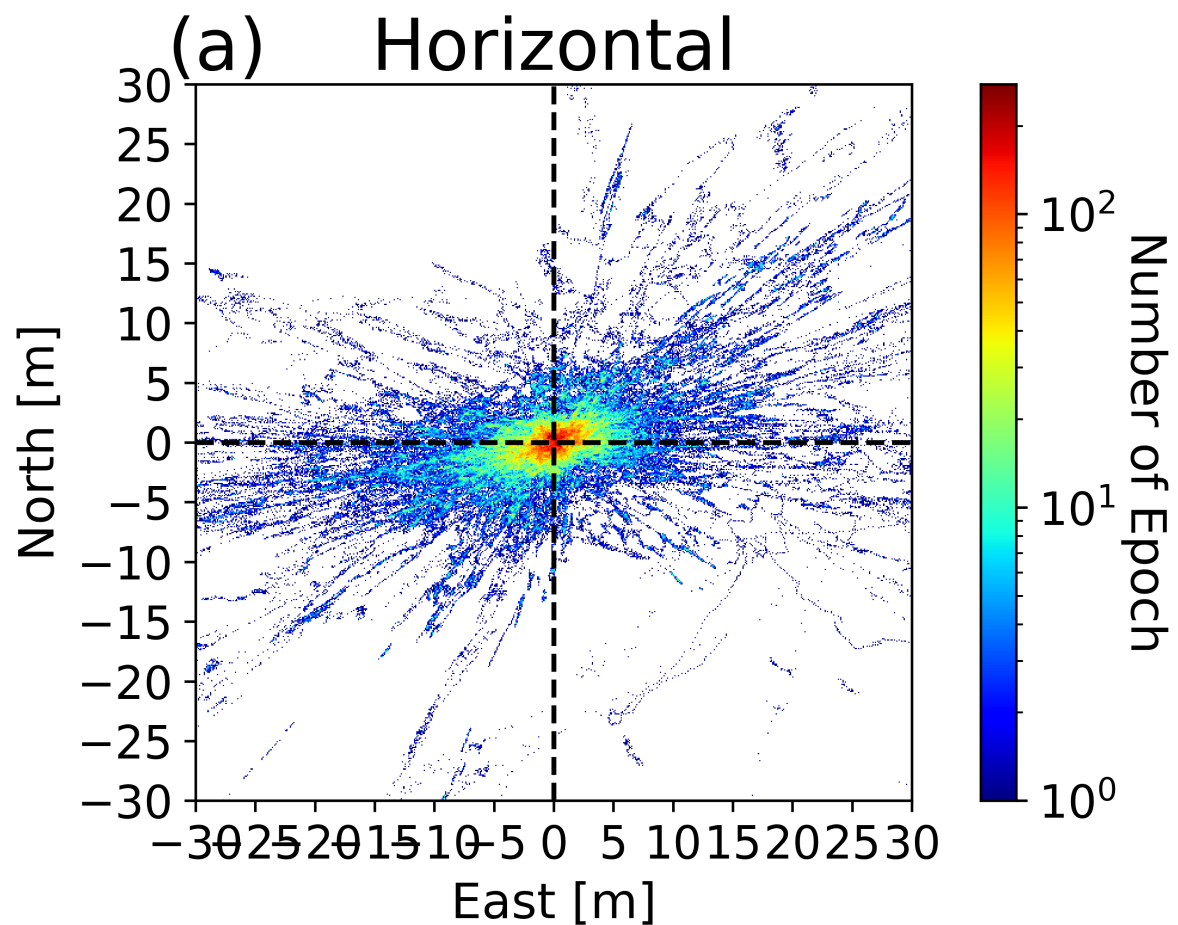
解析方法



解析方法

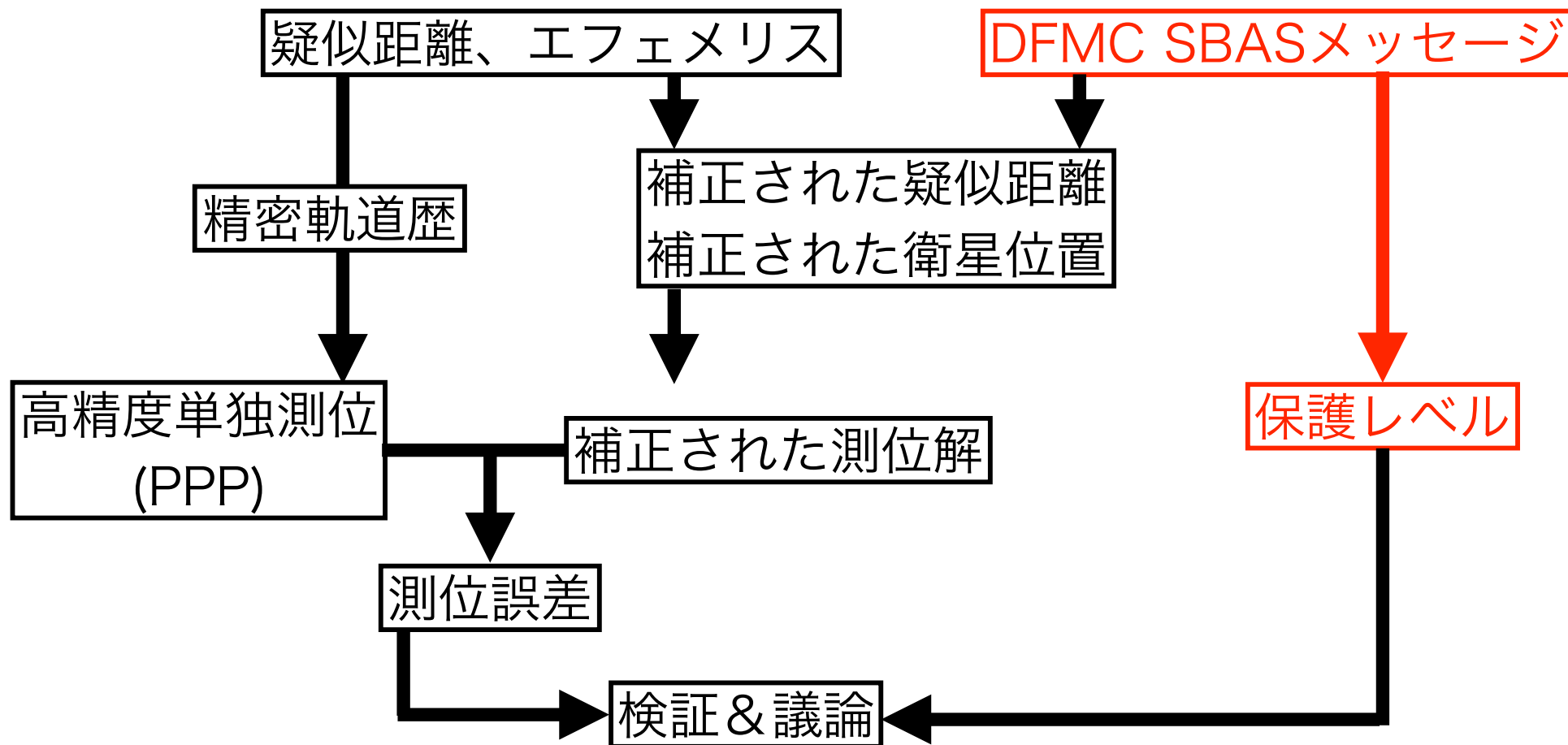


測位誤差



- 高精度精密測位 (PPP) と補強された測位解との距離を測位誤差としてプロットした。
- 補強された測位解はGPS, Galileo, QZSSがそれぞれ2機以上補強された場合の時間帯において計算した。
- 100秒の時定数のキャリアスMOOTHINGされた擬似距離を使って最小二乗法により測位解を求めた。

解析方法



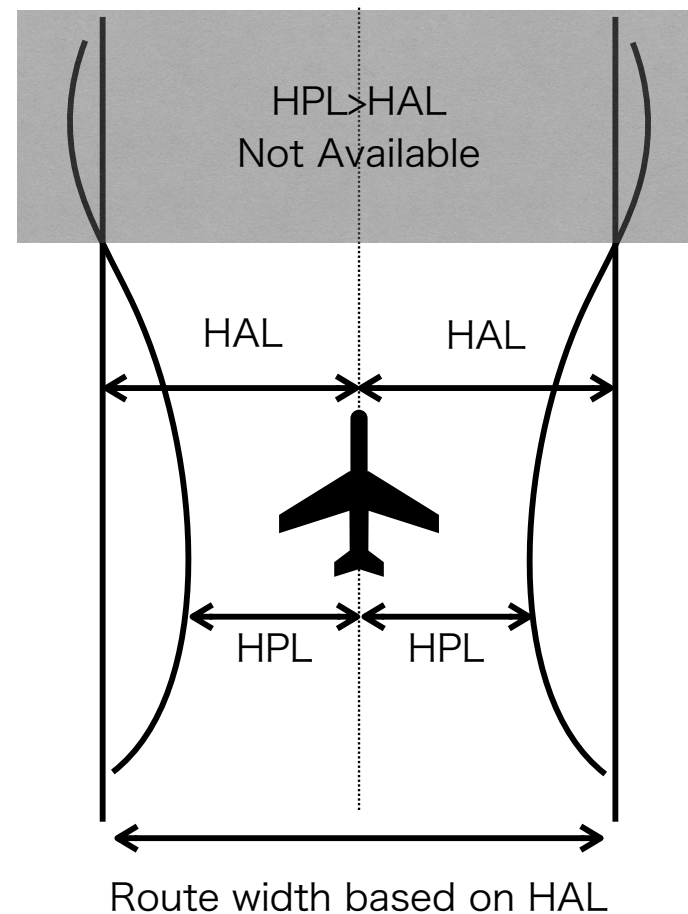
信頼性

保護レベル (PL: Protection Level)

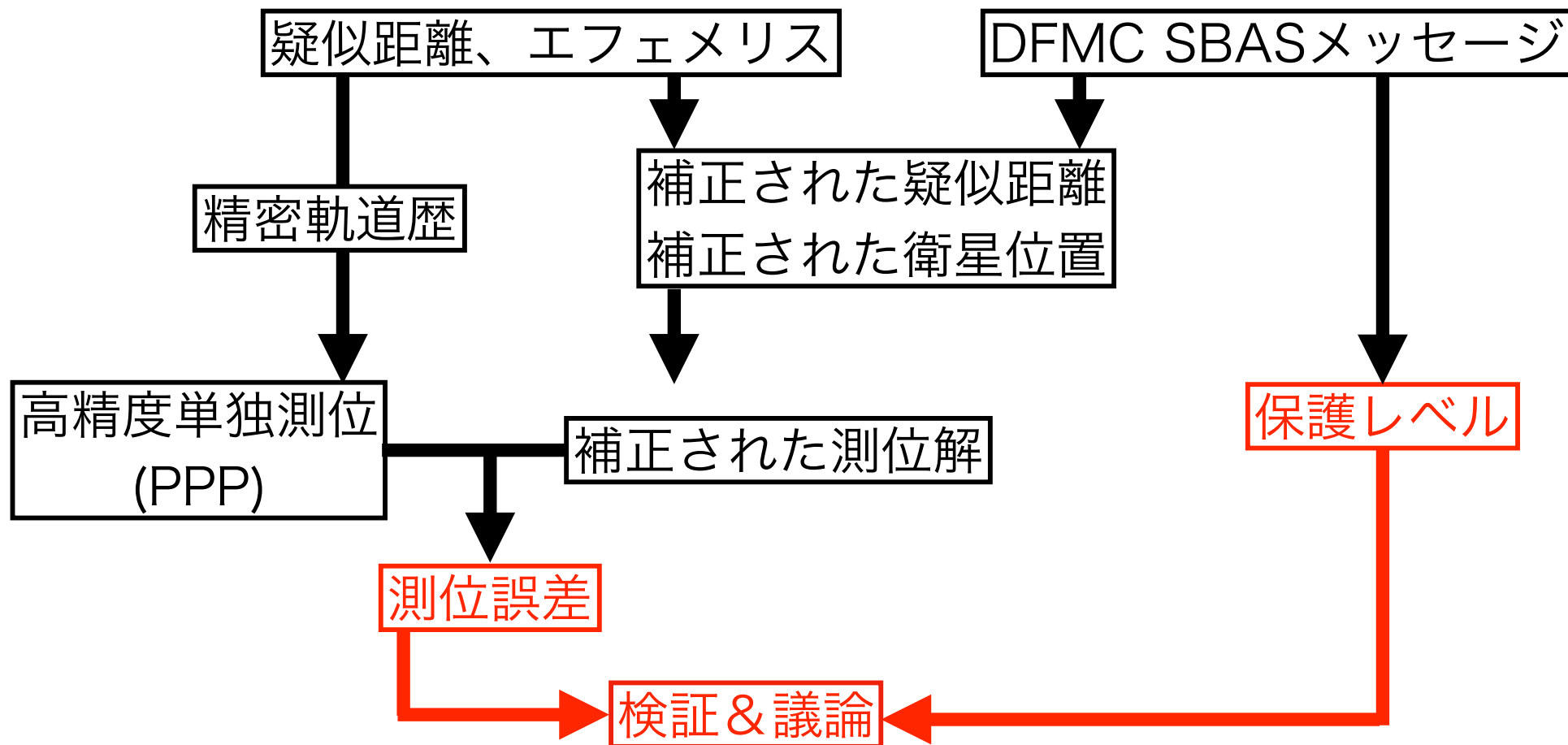
$$\sigma_i^2 = \sigma_{i,DFC}^2 + \sigma_{i,tropo}^2 + \sigma_{i,air_{DF}}^2 + \sigma_{i,iono}^2$$

誤差モデルに航空での利用を
想定されたモデルが含まれて
いる。

$$HPL = 4.42d_{major}$$

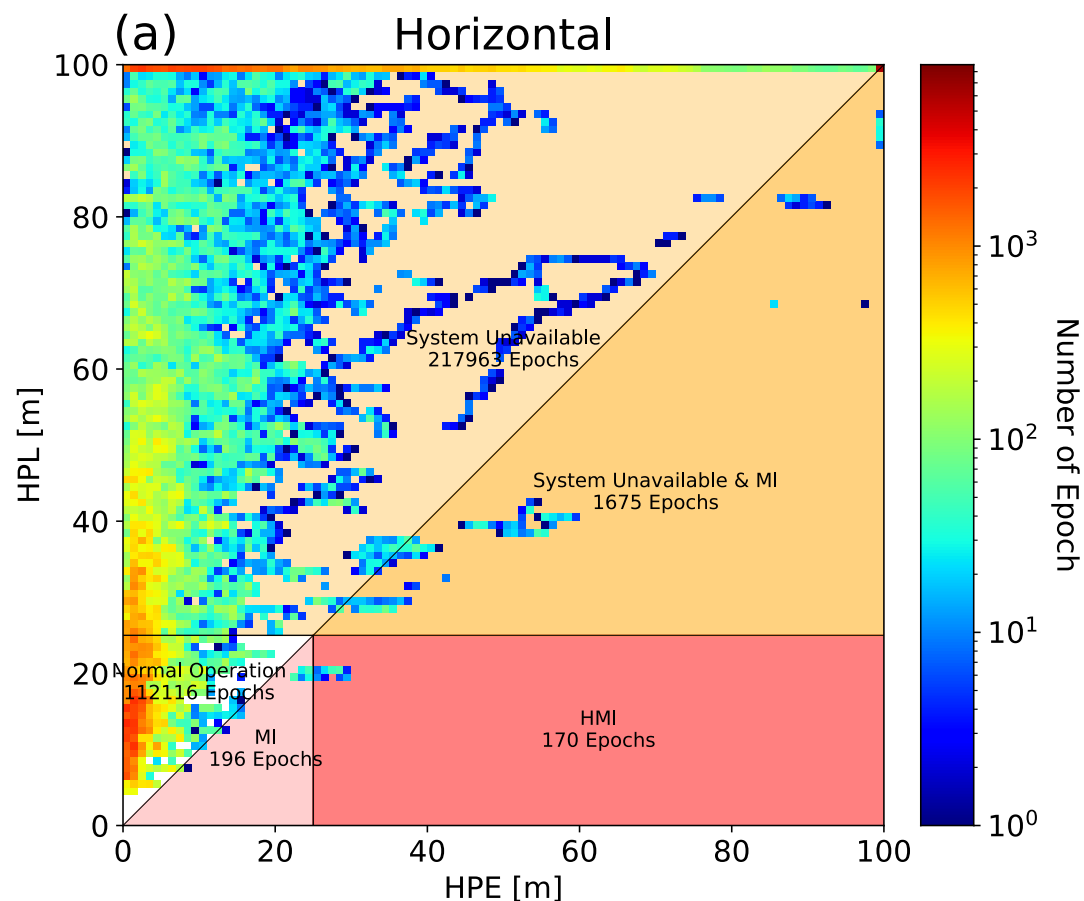


解析方法



評価結果

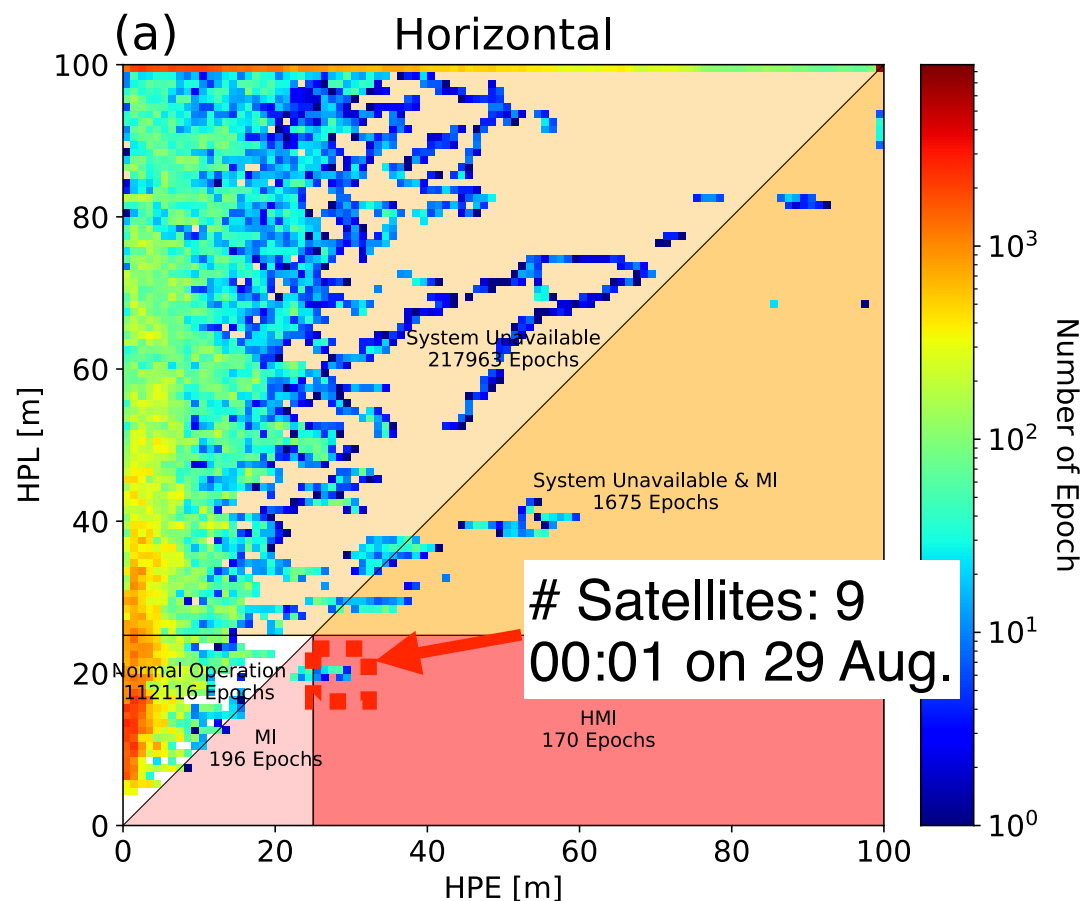
Triangle Chart



- 332120 Epoch中、2041 Epochで測位誤差が保護レベルを超えた。
- 前述の通り、 $\sigma_{\text{air_DF}}$ を保護レベルの計算したことが上記の原因である可能性がある。
- Takahashi et al., 2022では補強された衛星数が少ない場合に測位誤差が増大した原因の一つであることを指摘している。

評価結果

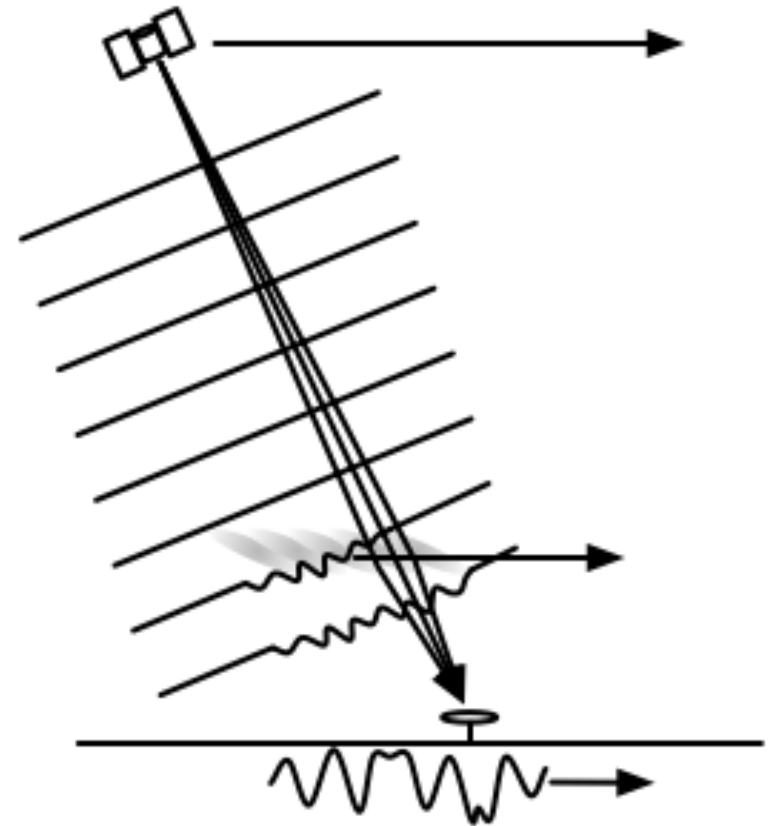
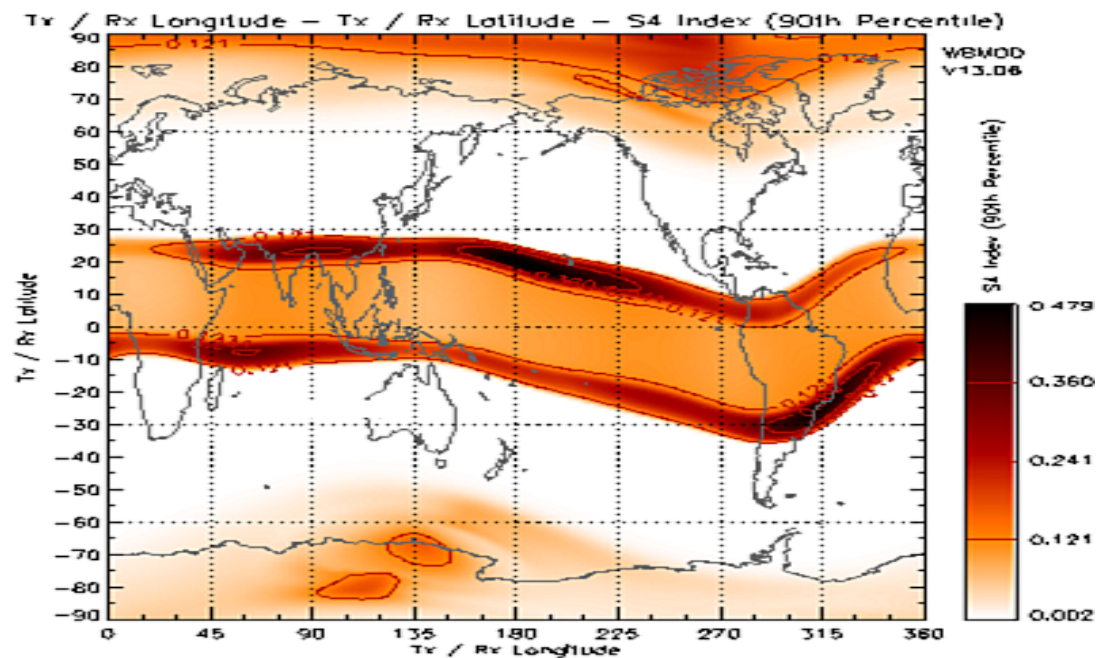
Triangle Chart



-例えば、8月29日にPE>PLとなった時間帯はカムチャッカ半島の南側を航海しており、補強された衛星数は9機であり、十分な衛星数であった。

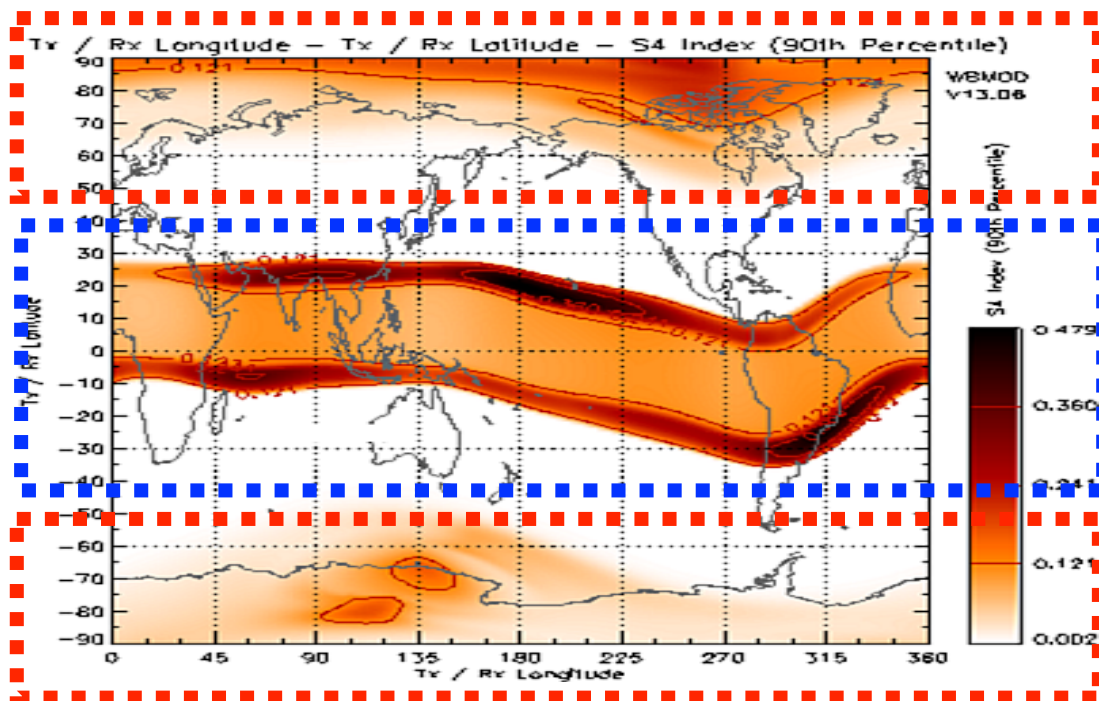
- 今後、以下の点を調査する必要がある。
- ✓ 誤差モデル
 - ✓ 船体からのマルチパス
 - ✓ 他の船上観測機による電波干渉

電離圏の影響の調査 シンチレーション



電離圏の影響の調査

シンチレーション



位相シンチレーション

振幅シンチレーション

位相シンチレーション

電離圏の電子密度の不規則構造や不規則構造が電場によって運動することで、GNSSの信号に揺らぎが与えられることがある（シンチレーション）。みらいにはシンチレーション受信機も搭載されており、このシンチレーションが信頼性に与える影響も調査する必要がある。

まとめ

- 現行のSBAS衛星は静止軌道に配備されており、その信号は極域では受信できない。QZSSからDFMC SBASが試験的に放送されておりその信号は極域で受信することができる。
- ノルウェー・オスロで行った性能評価実験の結果、日本と同等の精度で利用するためには欧州に基準局を3局以上配備する必要があることを示した。
- 海洋地球研究船みらいにGNSS受信機、DFMC SBAS受信機を設置した。みらいは約1ヶ月半の航海を行い、北極域においても航海を行った。
- この航海での観測中、 $PE > PL$ となる時間帯があった。
- 今後、以下の点を調査する必要がある。
 - ✓ 誤差モデル
 - ✓ 船体からのマルチパス
 - ✓ 他の船上観測機による電波干渉
 - ✓ 電離圏の電子密度の不規則構造によるシンチレーション