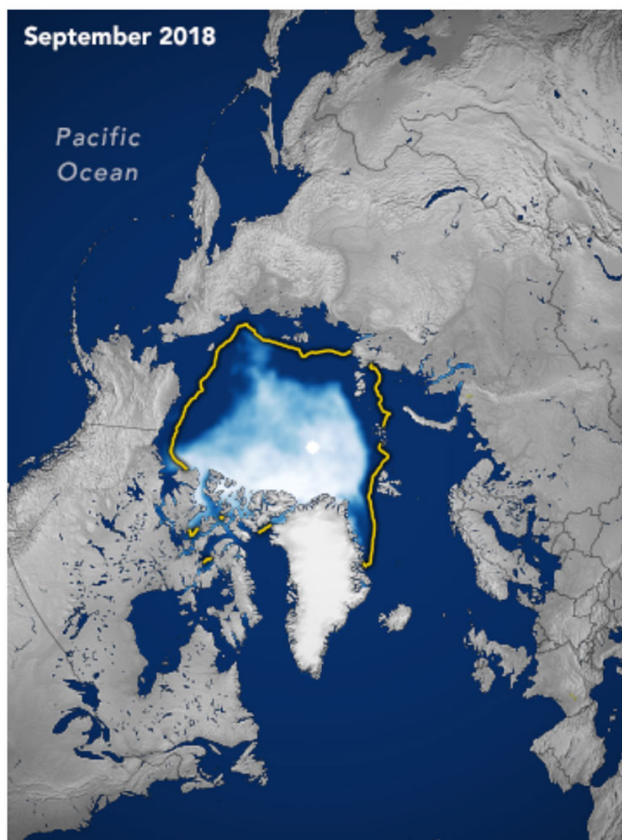


ノルウェー・オスロにおけるQZSSから 放送されたDFMC SBASの受信実験

高橋透¹, 齋藤享¹, 北村光教¹, 坂井丈泰¹

1. 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 航法システム領域

概要



Sea Ice Concentration (%)

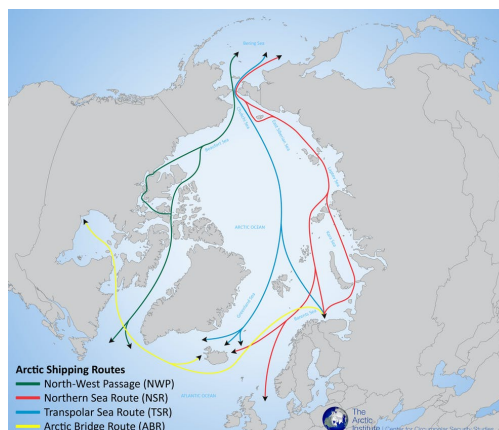
0 25 50 75 100

出典：https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/sea_ice.php

- 数値シミュレーションによって、2030年から2080年の夏季に”ice free”の時期がしばしば到来するのではないかと予測されている。
- これに伴って北極海航路の開拓や海洋資源調査が活発化すると考えられる。また、インフラの脆弱な北極域の空港の需要も増すことが予想される。

北極域における正確な衛星測位の需要が高まる。

北極海航路



出典：<https://theconversation.com/northwest-passage-crossed-but-its-not-a-boon-for-business-18853>

北極域の空港

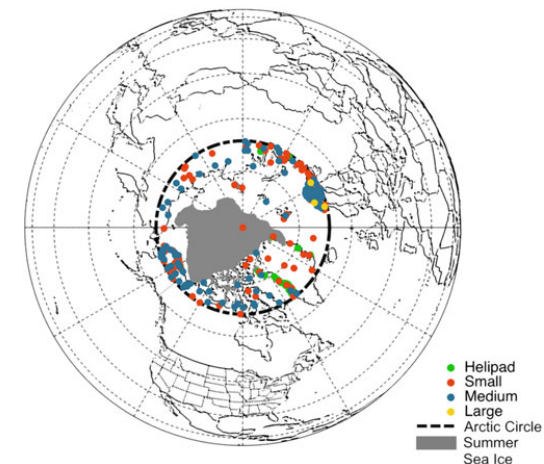
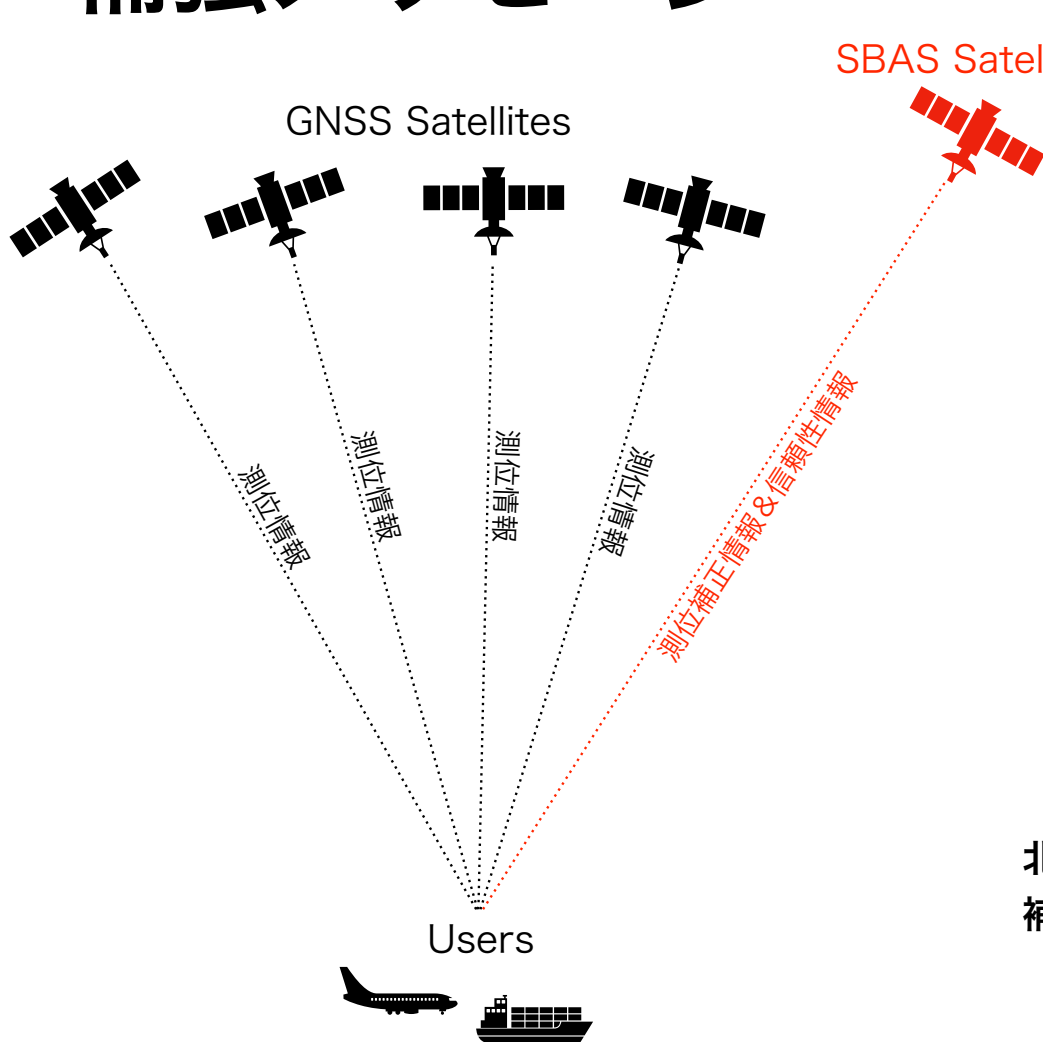


Fig. 1—Airports in the Arctic Circle (based on data from openflights.org and ourairports.com) [Color figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com and www.ion.org]

Reid et al., 2016

補強メッセージ



SBAS: Satellite Based Augmentation System

補強メッセージを主に静止軌道上に配置された衛星から放送する。

測位補正情報：各衛星の誤差情報。

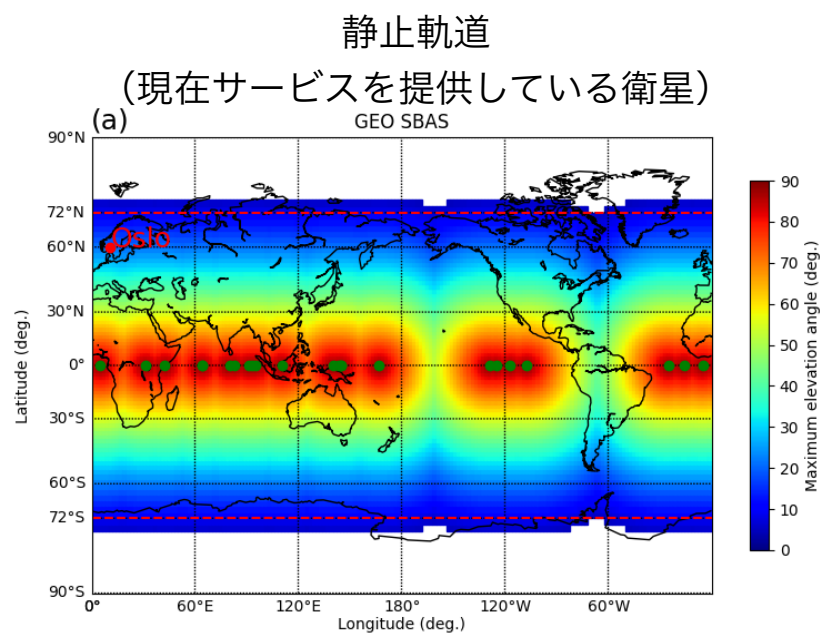
信頼性情報：測位結果がどの程度信頼できるか？

- GPSに代表される測位衛星（GNSS: Global Navigation Satellite System）を利用することで地球上の位置を知ることができる。
- GNSSの測位に加えて補正メッセージを用いることで測位を補正することに加え、その測位の信頼性も得ることができる。

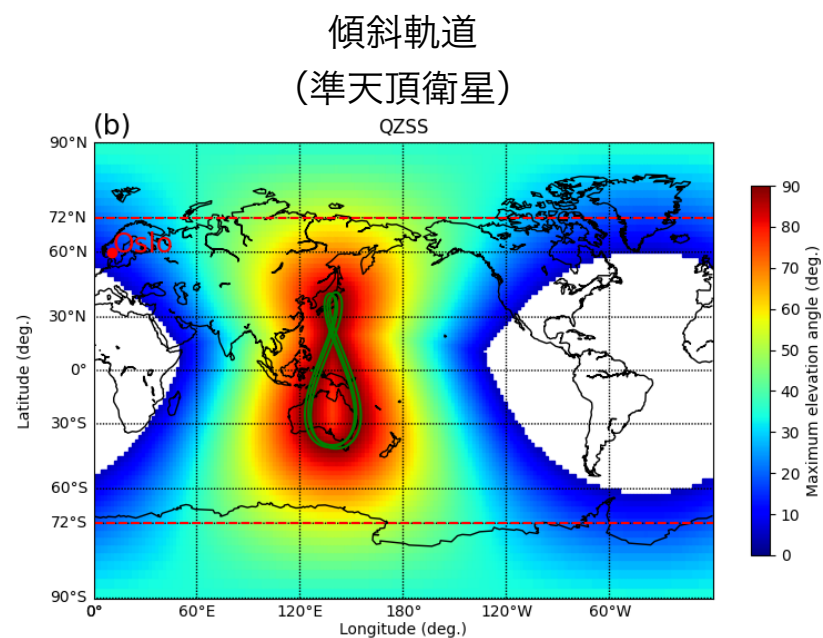
北極域での活動（資源調査、航路開拓、航空機の離着陸）には補強メッセージを用いた衛星測位が有効(Reid et al., 2016)。

衛星の配置

静止軌道に配置された補強メッセージを放送する衛星の見え方。
赤いほど見えやすく、青いほど見えにくい。白の部分は全く見えない。



需要が高まることが期待できる北極（及び南極）では静止軌道に配置された衛星からの信号は受信できない。



北極（及び南極）では準天頂衛星の信号を受信することができる。

QZSSから放送された補強メッセージを用いた測位 日本での評価

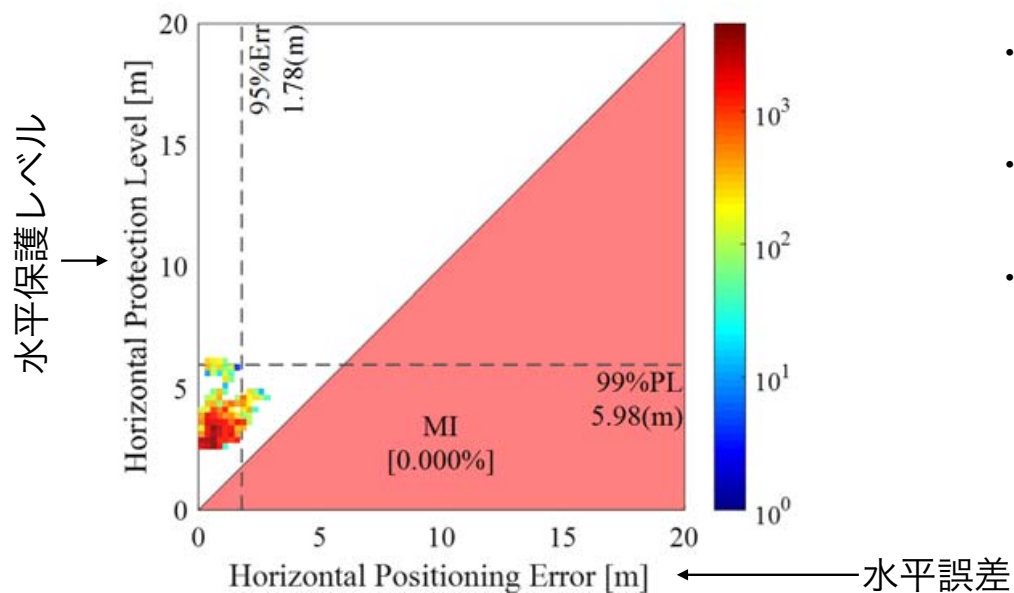


Fig. 12. Horizontal integrity chart using global GMS at Japan

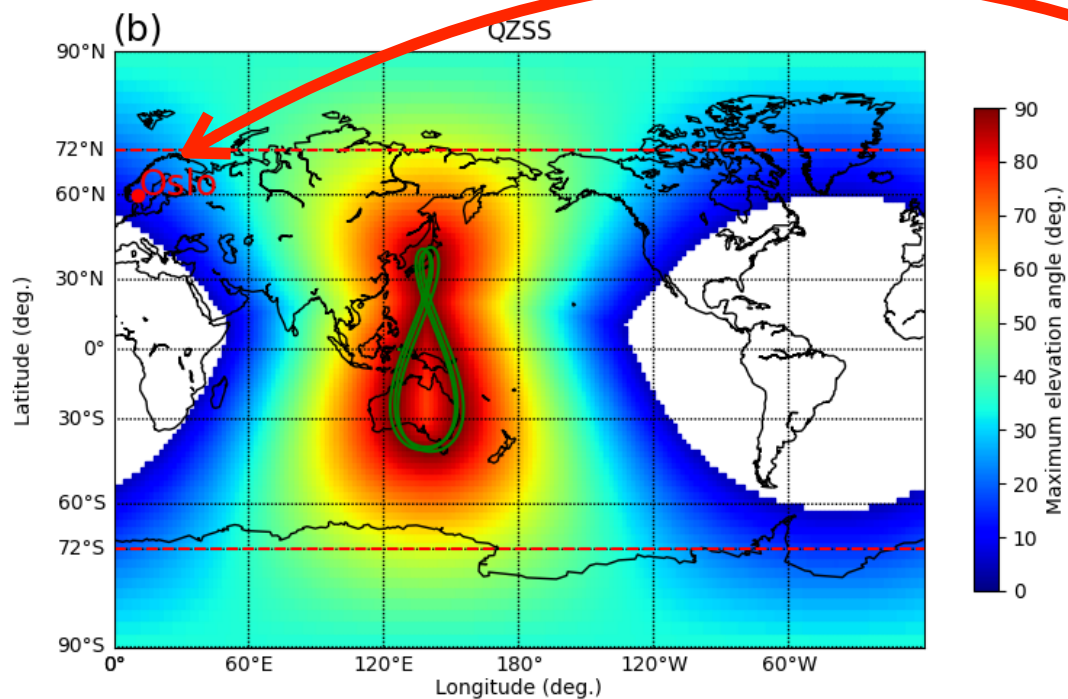
Kitamura et al., IAIN, 2018

- 誤差が保護レベルを超えない。
- 水平誤差は1.78 m (95%)、水平保護レベル5.98 m(99%)。
- LPVを想定すると警報限界は40 mとなり、この場合、測位誤差が保護レベルを超えない且つ保護レベルが警報限界を来ない割合(Availability)は100%となる。

※LPV: 補正メッセージを利用して、航空機が水平方向と垂直方向のガイダンスを受けながら滑走路への進入を行うことができるようにする運航方式。

研究目的

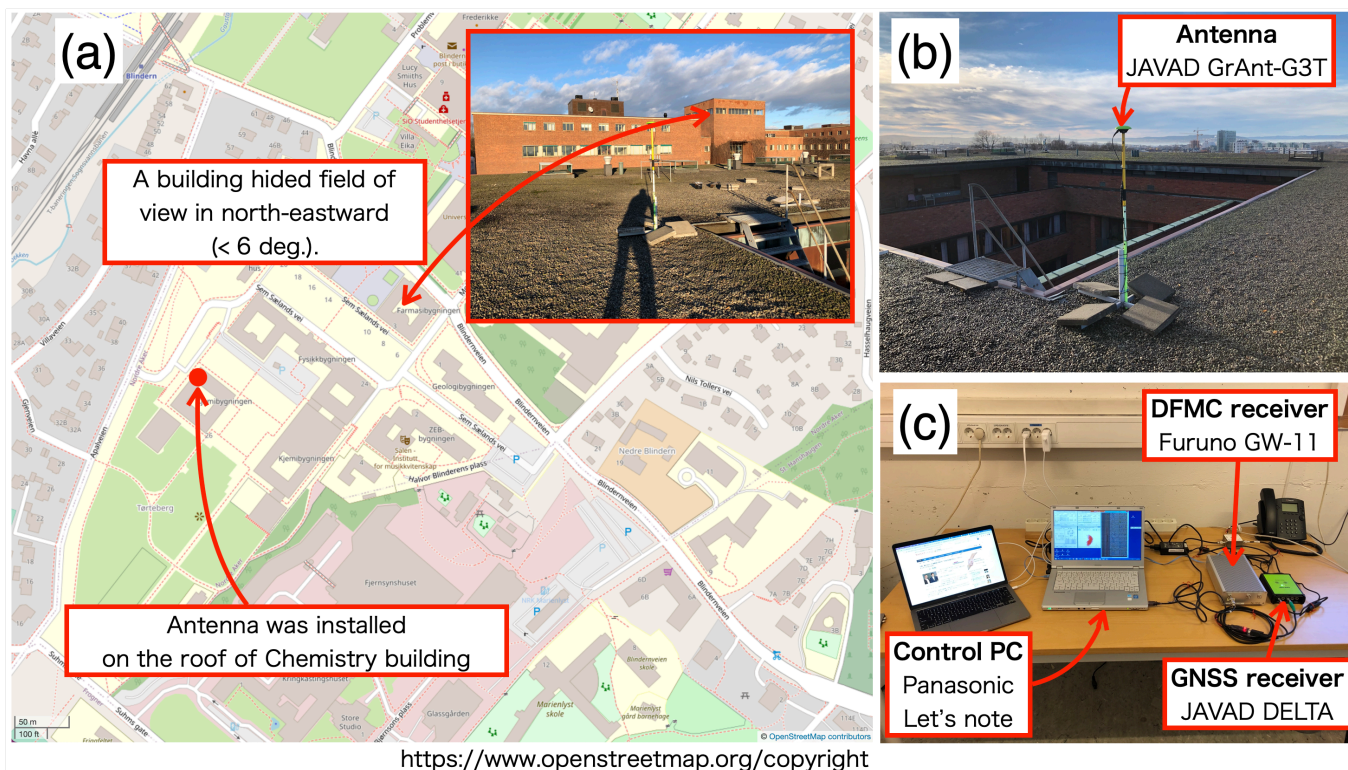
本研究では北極域でQZSSの受信実験を行い、その測位・補強精度の検証を行うことを目的とする。



ノルウェー・オスロで受信実験を行った。オスロはQZSSから放送される信号が受信可能なエリアの境界領域に位置し、静止衛星からの信号も受信できる。

北欧受信実験

ノルウェー・オスロに位置するオスロ大学のChemistry Buildingの屋上にアンテナを設置し、受信実験を行った。



実験期間

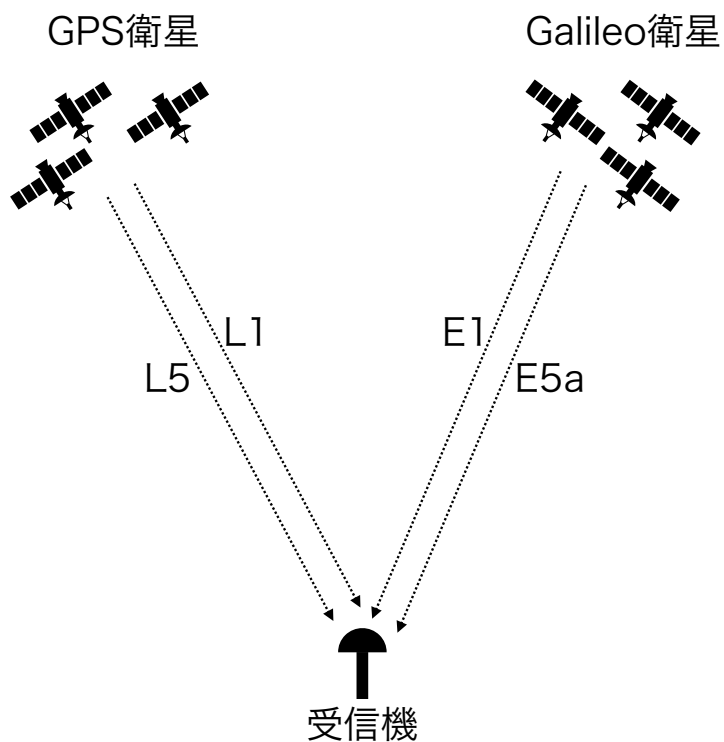
観測開始：2021年2月24日 9:10:17 UT
観測終了：2021年3月17日 18:44:31 UT

- GPS, Galileo, GLONASS, BeiDouからの信号を受信した。
- QZSSから放送された補強メッセージを受信した。
- 2021年3月2日、3月12日、3月17日はデータ取得用PCがハングアップしたため、データの取得ができていない。

測位方式

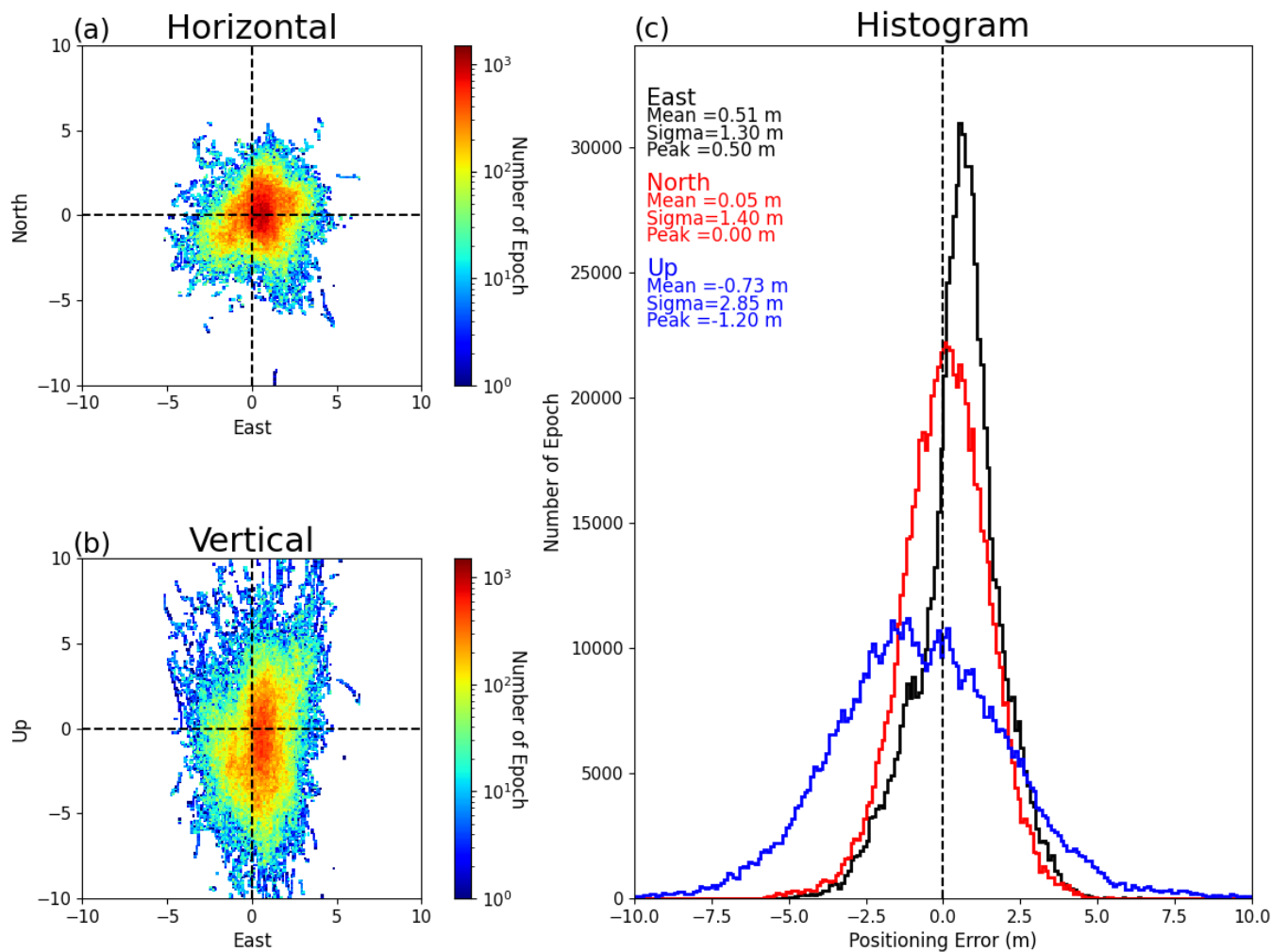
2周波複数衛星系単独測位

電離圏遅延を除去できる より多くの衛星を使える 1つの受信機で測位をする



- ・ 測位にはGPSとGalileo衛星を用いる。
- ・ L1/L5, E1/E5aの2つの衛星系を用いる。
- ・ すべてのGPS、Galileo衛星が2周波を放送しているわけではない。
- ・ 測位はx, y, zと時計誤差 Δt 、GPSとGalileoの時計誤差の5つの未知数を最小二乗法で求める。従って、6機以上の衛星が必要。
- ・ 100秒のキャリアスムージングを行った。
- ・ 補強メッセージを用いて、それぞれの衛星が持つ誤差を補正し、測位の保証精度を計算する。

実験結果 (補強メッセージなし)



高精度単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) によるアンテナの正確な位置

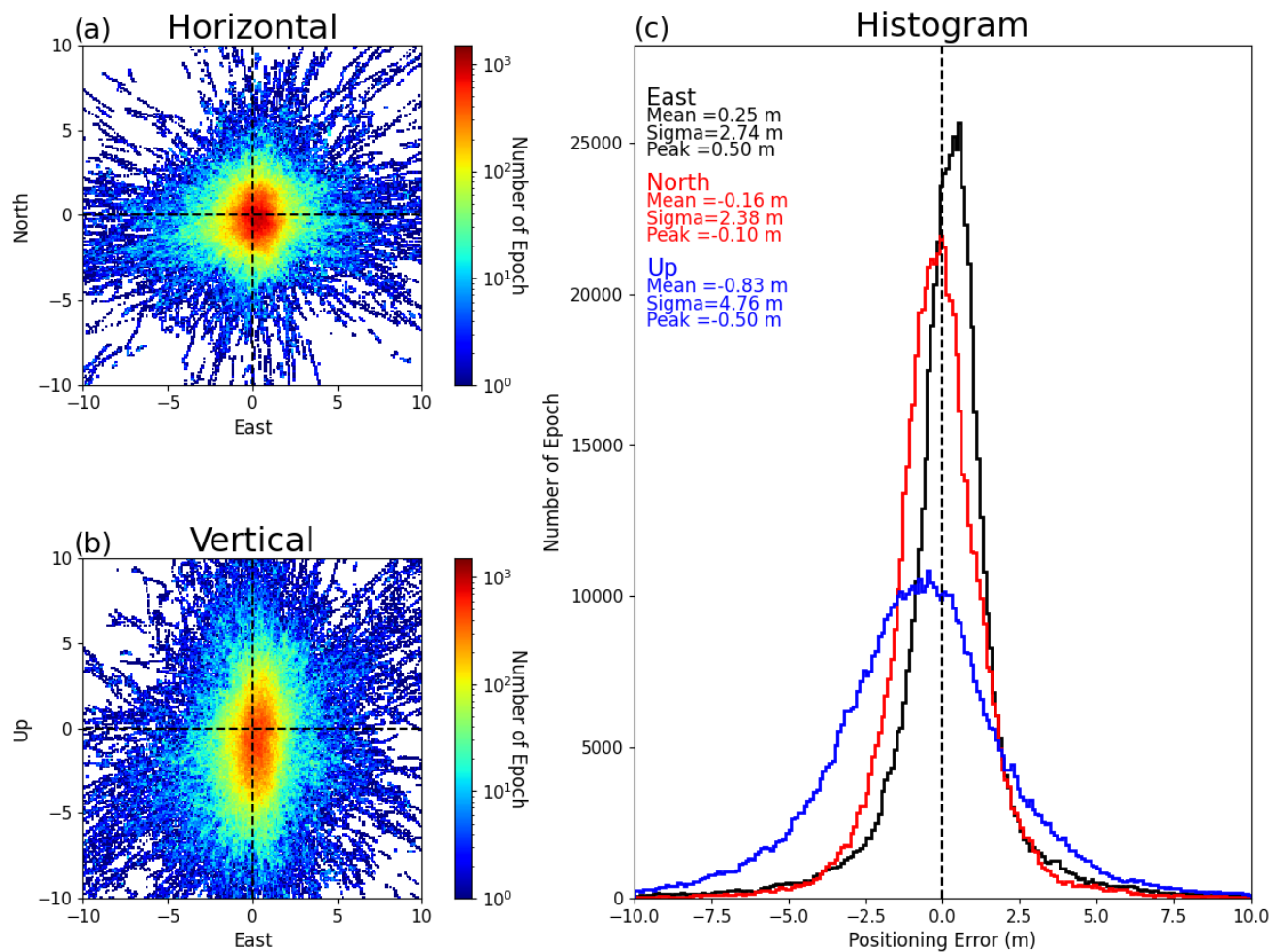
経度: 10.71701346° E

緯度: 59.937564229° N

高度: 133.8838 m

- 最頻値とPPPの差が東方向に0.50 m、北方向に0.00 m, 上方向に-1.20 mであった。
- 測位のばらつき (標準偏差) は東方向1.30 m、北方向1.40 m、上方向2.85 mであった。

実験結果 (補強メッセージあり)

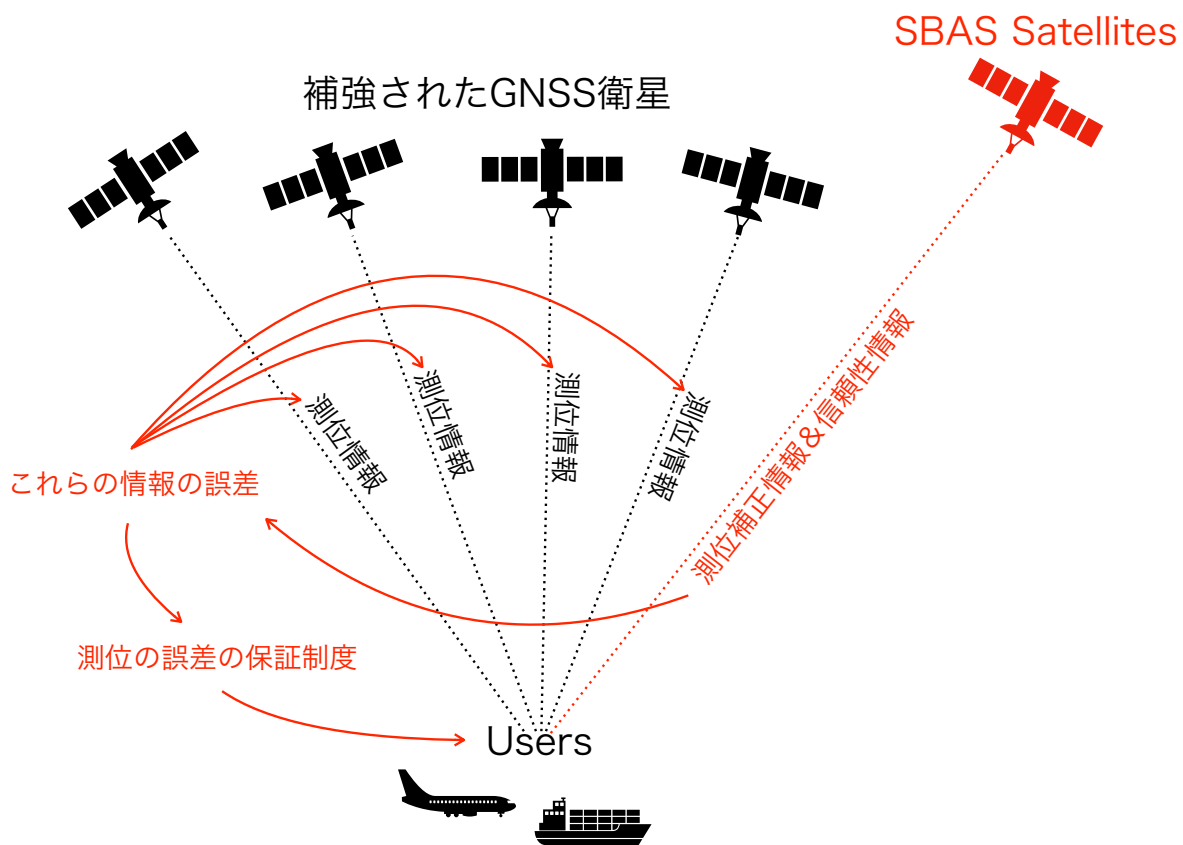


- 最頻値とPPPの差が東方向に0.50 m、北方向に0.10 m、上方向に-0.50 mであった。
- 測位のばらつき（標準偏差）は東方向2.74 m、北方向2.38 m、上方向4.76 mであった。
- 上方向は誤差が減少したが、測位のばらつきは増す結果となった。

保護レベルの計算

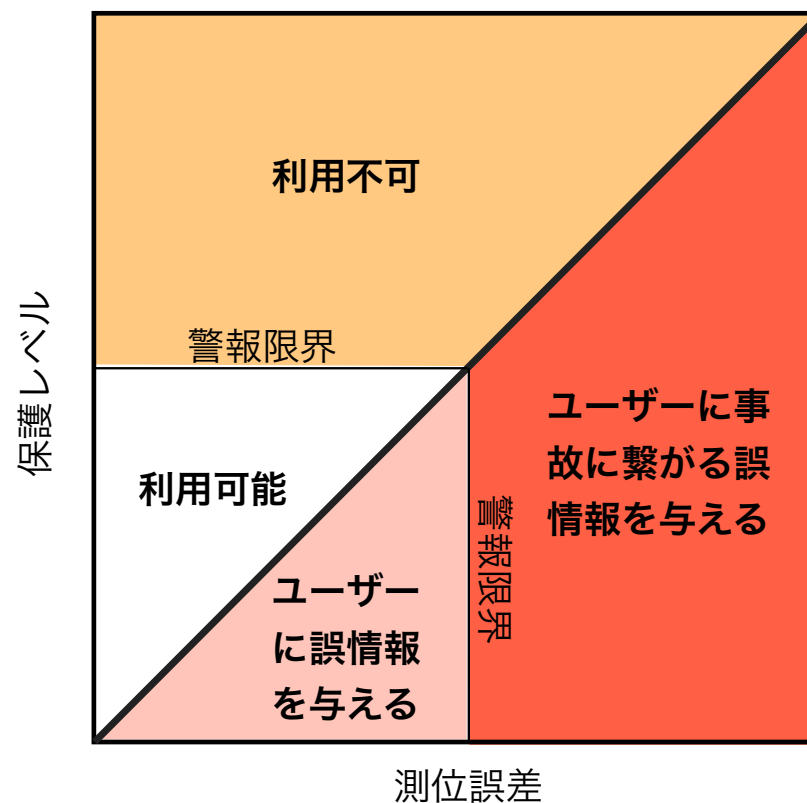
保護レベル

測位によって得られる位置誤差の保証精度。



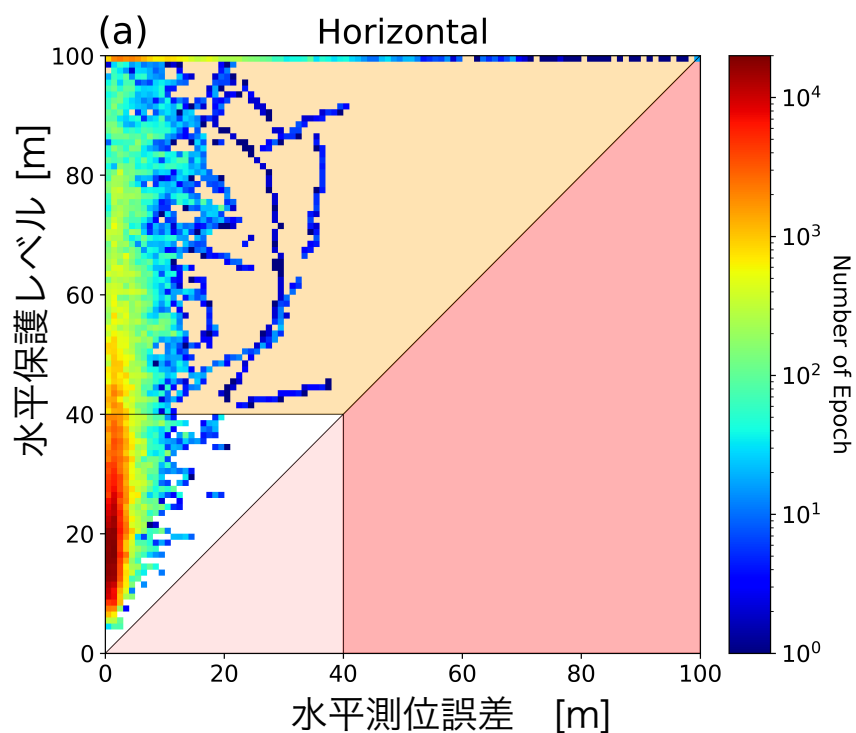
Triangle Chart

保護レベルと測位誤差の評価チャート



Triangle Chart

本研究では海洋と航空の利用を想定し、双方に共通する水平方向の保護レベルと測位誤差について議論する。警報限界についてはLPV (Localiser Performance with Vertical Guidance)を想定し、40 mと設定した。

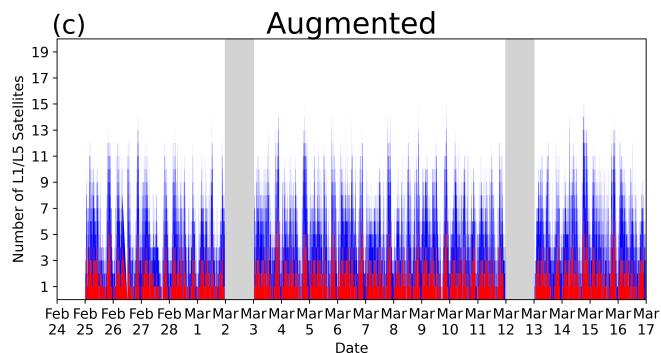
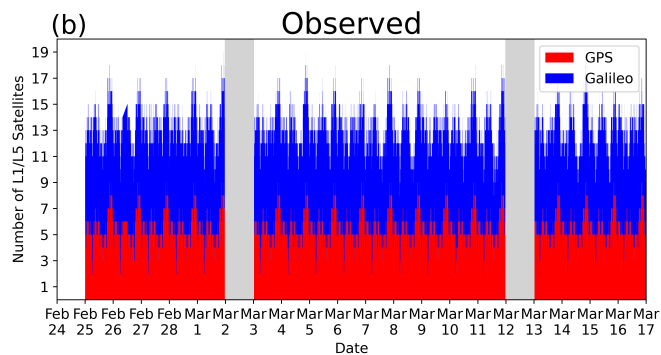
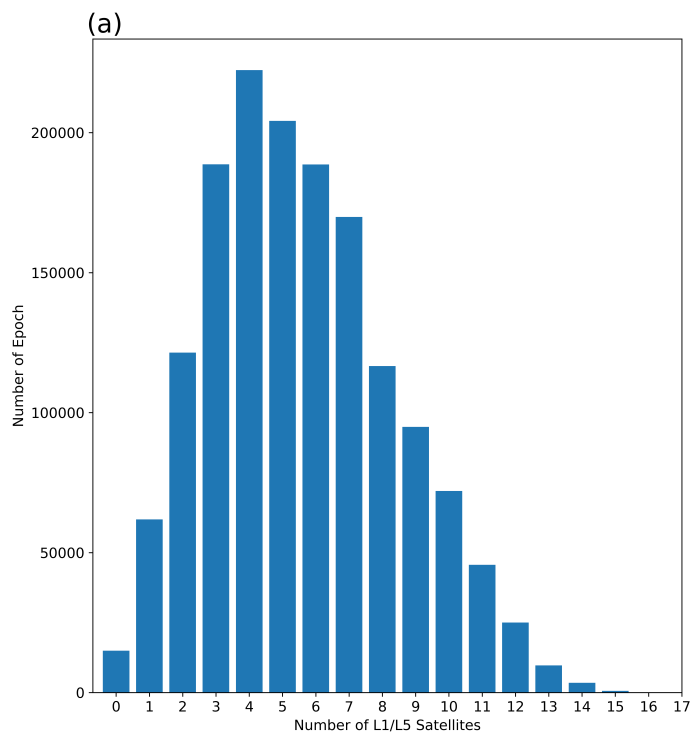


※LPV: 補正メッセージを利用して、航空機が水平方向と垂直方向のガイダンスを受けながら滑走路への進入を行うことができるようにする運航方式。

- ・ 保護レベルを超えた測位誤差は観測されなかった。
- ・ 白の三角に入ったデータ数の割合であるAvailabilityは77.16%であった。

議論

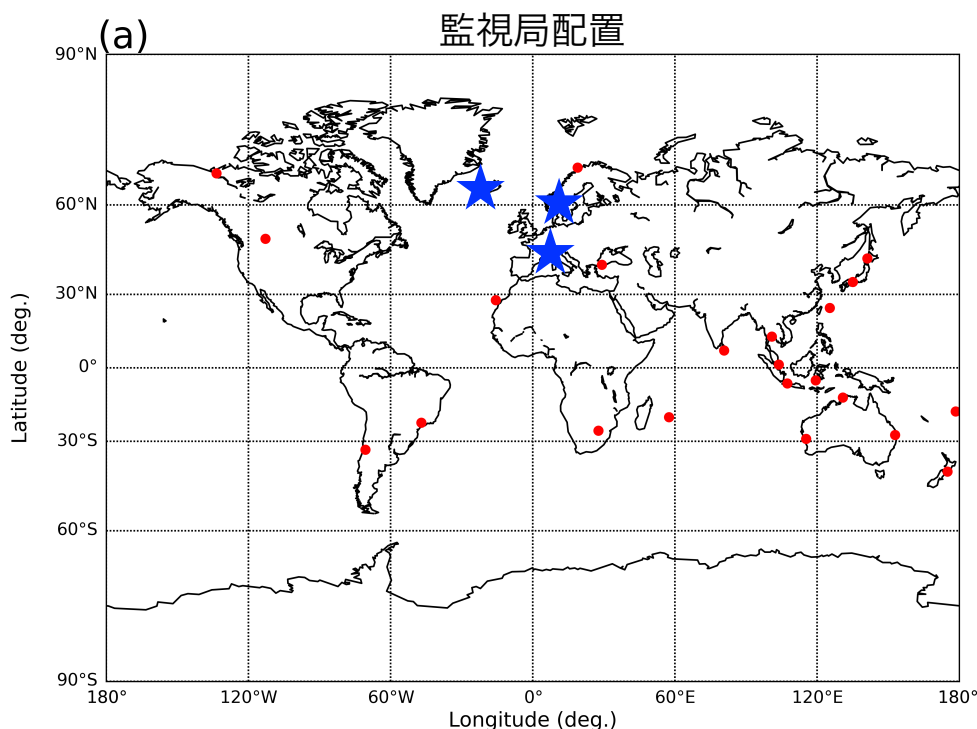
QZSSから放送される補強メッセージを利用した測位について



- 補強メッセージを利用した測位では測位精度には若干の改善は見られたものの測位のばらつきは大きくなった。
- これは補強された衛星数が少ないためであると考えられる。
- 補強された衛星数は観測された衛星数の30~50%程度であった。
- 測位には6機以上の衛星が必要であるが、6機以上の補強された衛星が観測されたのは全体の半分以下の時間であった。

議論

将来的に補強された衛星数は増えるのか？



- ・ 現在、1周波のみを放送する衛星が2周波を放送する衛星に置き換えられている。
- ・ 衛星を監視している基準局は左図の赤点に位置しており、アジア地域に集中している。

以下の条件で将来的にAvailabilityが改善するのか見積もった。

Case 1

- ・ 2021年3月1日時点ですべてのGPSとGalileo衛星がL1/L5, E1/E5a信号を放送していたとする。
- ・ 衛星位置は2021年3月1日のAlmanacを使って計算する。
- ・ 監視局は図8aに示される赤点2021年3月1日現在のものを利用する。
- ・ 衛星が7つの基準局から監視されていた場合その衛星は補正されたとする。

Case 2

- ・ Case 1に加え、基準局がノルウェー・オスロ、イタリア・ミラノ、アイスランド・レイキャビク（青星）に仮に新設されたとする。

議論

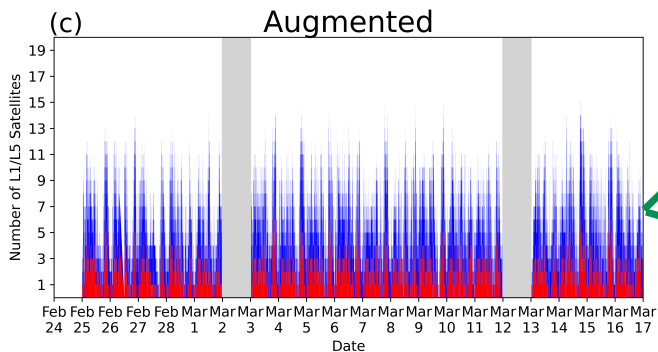
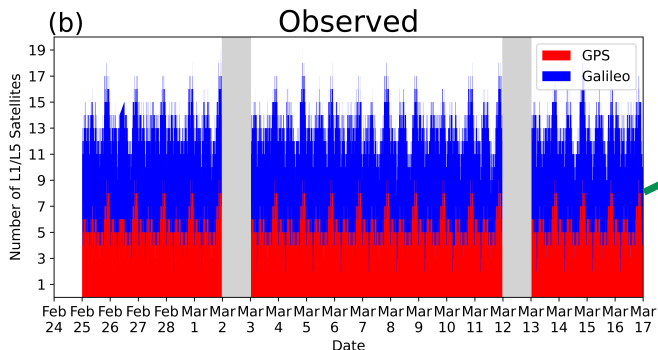
将来的に補強された衛星数は増えるのか？

観測結果

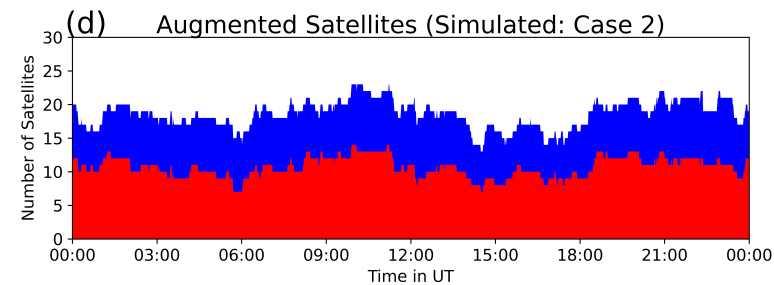
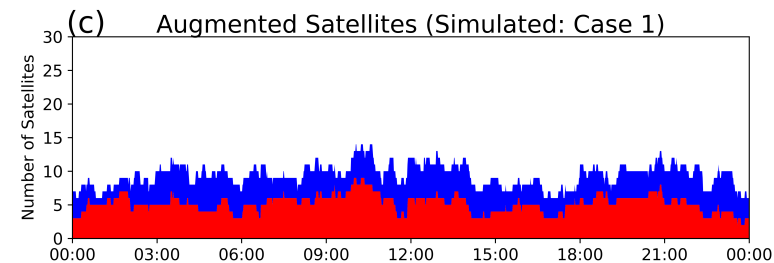
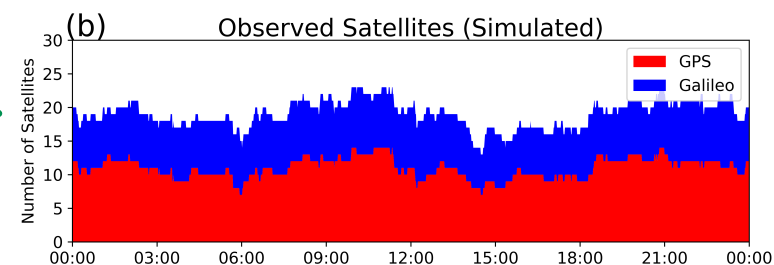
観測された衛星数は9~15機程度であったが、将来的に15~20機が平均的に観測されることが見込まれる。

補強された衛星数は3~7機程度であったが、将来的に8~12機が補強されることが見込まれる。

監視局が増えれば、ほとんどの衛星が補強され、その数は15~20機であることが見込まれる。



見積もり結果



議論

Number of Satellites	Augmented Interval [%]	Availability [%]
6	42.56	77.16
7	32.79	85.84
8	23.22	92.51
9	16.18	95.56
10	10.15	97.41
11	5.48	98.85
12	2.52	99.09
13	0.90	100.00

- 2周波複数衛星系で補強メッセージを利用した測位のためには6機以上の補強された衛星が必要。
- 北欧受信実験が行われた時点では、補強された衛星が6機以上観測された時間帯は半分以下であった。
- GPS、Galileo衛星がL1, L5信号を放送していたと仮定すると、すべての時間で6機以上の衛星が補強されていた。
- もし、3つの監視局が欧州地方に設置されていたと仮定すると、すべての時間で13機以上の衛星が補強されることが見込まれる。これは同時にAvailabilityが100%に到達する可能性も意味する。

まとめ

- ・北極での補強メッセージを用いた衛星測位（2周波複数衛星系）の需要が高まっているが、現況の静止衛星から放送される補強メッセージは北極域では受信できない。従って、本研究では北極域でQZSSの受信実験を行い、その測位・補強精度の検証を行うことを目的とした。
- ・ノルウェー・オスロにあるオスロ大学の屋上にアンテナと受信機を設置し観測を開始した。GPS, Galileo, GLONASS, BeiDouからの信号と、QZSSから放送された補強メッセージを受信した。
- ・補強メッセージを用いることで測位結果には若干の改善は見られるものの、測位のばらつきが大きくなった。また、およそ、半分の時間で測位に必要な衛星数（6機）に満たなかった。Availabilityは77.16%であった。
- ・補強された衛星数が少ないことが測位できる時間が少ないことと、低いAvailabilityの要因である。将来的に補強された衛星がどの程度増えるのか見積もった。
- ・もし、すべての衛星が2周波数を放送していた場合、すべての時間で補強メッセージを持ちた測位が可能になる。加えて、監視局が欧州に3つ増えた場合はQZSSが観測できるすべての時間で測位が可能で、Availabilityは100%に達することが見積もられた。