

5. 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

航法システム領域 ※高橋 透, 齋藤 享, 北村 光教, 坂井 丈泰

1 まえがき

北極域の海氷面積の減少により、航空及び海洋活動が活発になっている。最近のシミュレーションでは2030年から2080年には夏季において海氷が無くなる“ice free”となる期間が訪れることが予想されている[1, 2, 3, 4]。従って、今後も北極の航空・海洋活動は活発化し続けると考えられる。

新航路の開拓、地下資源調査やインフラの乏しい北極域に位置する空港への安全な離着陸を実現するためには Global Positioning System (GPS)に代表される Global Navigation Satellite System (GNSS)による2周波測位とそれを補正する Dual Frequency Multi Constellation (DFMC) Satellite Based Augmentation System (SBAS) [5]を利用することが有効であると考えられている[7]。しかし、現況のSBASは静止衛星から放送されている。図1aに示すように静止衛星の電波は緯度72度以上では受信することができないため、極域では現在SBASを利用することはできない。

北極域で2周波数測位の補正メッセージが受信できるように静止軌道ではない Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO)からDFMC SBASを放送することが検討されている。日本の準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) の軌道はIGSOの一種でQZSSから放送される電波は極域で受信することができる(図1b)。電子航法研究所はDFMC SBASのプロトタイプを開発し、QZSSから試験的に放送している[8]。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する。

本研究ではノルウェー・オスロに受信機を設置し、観測を行なった。オスロはQZSSから放送される電波が観測可能なことに加え、SBASで、静止衛星である European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS)からの電波も受信でき、そのデータを検証に用いることができる。

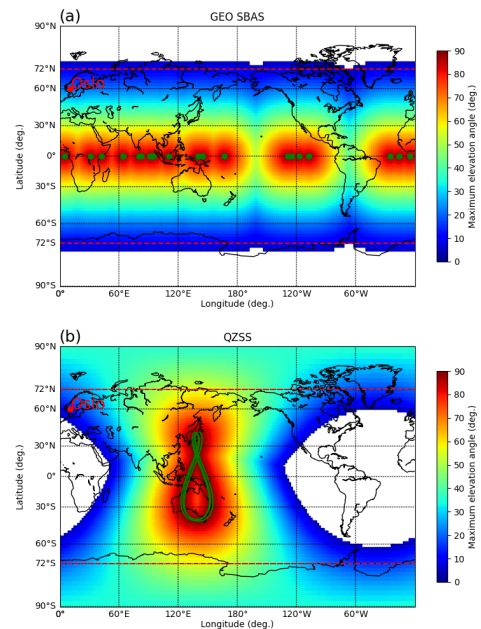


図1. (a)静止衛星と(b)QZSSの仰角。赤の点線は北緯及び南緯72度を示す。緑点と緑線は静止衛星の位置とQZSSの軌道を示す。

2 オスロにおける衛星配置

図2にオスロにおける衛星配置を示す。GPS及びGNSS衛星の1つであるGalileo衛星は仰角およそ80度程度まで上がり、常に15から20機は見えている。QZSSは北東方向に現れ、最大仰角はおよそ13度で1日およそ15時間程度その電波が受信することが見込まれる。EGNOSは南から南東方向に見られ、仰角は8から20度である。

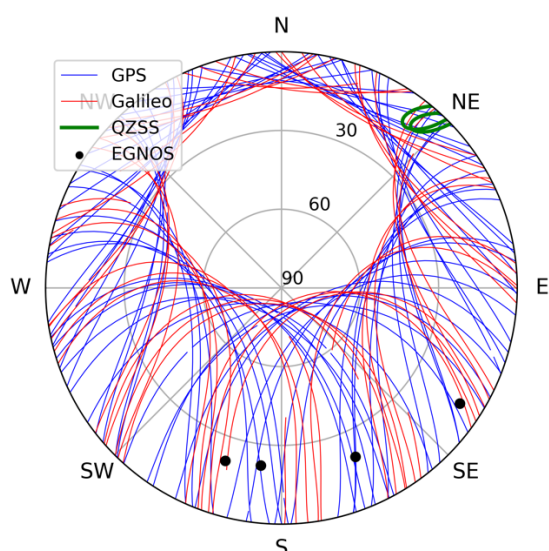


図 2. オスロにおける GPS（青線），Galileo（赤線），QZSS（緑線），EGNOS（黒点）の衛星軌道の全天プロット。

3 観測

GNSS 受信機とアンテナをノルウェー・オスロに位置するオスロ大学の屋上に設置した（図 3）。アンテナの位置は Precise Point Positioning (PPP) により計測し， 10.71701346° E, 59.937564229° N, 133.8838 m であった。アンテナは L1/L5, E1/E5a が受信可能な JAVAD GrAnt-G3T を使用した。受信機は 2 機使用し，JAVAD DELTA と Furuno prototype DFMC SBAS（以下，Furuno）受信機によって，それぞれ GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou からの信号と DFMC SBAS メッセージの受信を行なった。JAVAD DELTA のデータ保存は 1 Hz で行われた。これらの受信機はパソコン（Panasonic Let's note）によって受信機の制御及びデータ保存が行われた。

この観測は 2021 年 2 月 24 日 9:10:17 UT から 2021 年 3 月 17 日 18:44:31 UT まで連続して行われ，GPS, Galileo, GLONASS, Beidou と QZSS から放送された DFMC SBAS メッセージの受信に成功した。観測期間中，3 月 2 日，3 月 12 日，3 月 17 日にパソコンがハングアップした。このため，これら 3 日間のデータは本研究の解析には使用していない。



図 3. (a) オスロ大学の俯瞰図とアンテナ設置位置。(b) アンテナ外観。(c) 受信機とパソコン。

4 観測結果

本研究では GPS 及び Galileo から放送された L1/E1 と L5/E5a の 2 周波を使って最小二乗法と 100 秒のキャリアスムージングを用いて測位を行なった。Horizontal Protection Level (HPL), Vertical Protection Level (VPL) は DFMC SBAS のメッセージを ICAO2018[9]に基づいて計算した。また，測位と補正に用いた衛星の軌道情報であるエフェメリスと補正メッセージは放送されたデータを使った。

本研究では海洋や航空での受信機周りの障害物が少なく，マルチパスの影響を比較的受けにくい状況での利用を想定しているが，図 3a に示すようにアンテナ設置場所の北東側に建物が

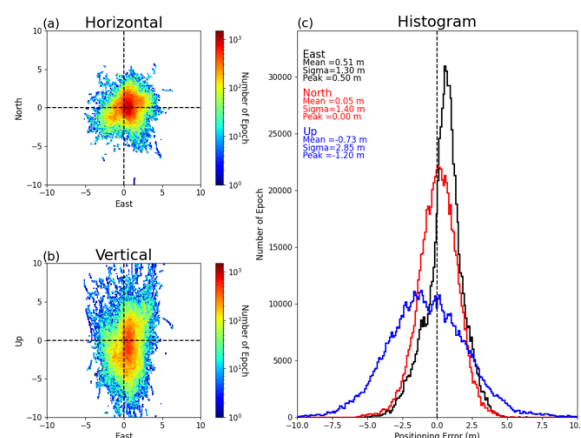


図 4. (a) 東方向-北方向，(b) 東方向-鉛直方向の測位結果，(c) 測位結果のヒストグラム。東方向を黒線，北方向を赤線，鉛直方向を青線で示す。測位には補正メッセージは使用していない。

あり、マルチパスによる影響を受ける可能性がある。従って、

$$|\rho_{i,code} - \rho_{i,carrier}| > 6.18 \sigma_{i,airDF} \quad (1)$$

となる衛星の観測データは排除した。ここで、 $\rho_{i,code}$ 、 $\rho_{i,carrier}$ は衛星*i*に対して観測された2周波線形結合及びキャリアスムージングされたコード擬似距離と位相擬似距離であり、 $\sigma_{i,airDF}$ は衛星の仰角と受信機ノイズから求められるマルチパス・ノイズ誤差である[9]。

図4に補正メッセージを利用せずに測位した結果を示す。東方向、北方向、鉛直方向の測位のPPPからの差の平均はそれぞれ、0.51, 0.05, -0.73 m、測位の標準偏差(σ)は1.30, 1.40, 2.85 mとなった。

図5に補正メッセージを利用して測位した結果を示す。東方向、北方向、鉛直方向の測位のPPPからの差の平均はそれぞれ、0.25, -0.16, -0.83 m、測位の σ は2.74, 2.38, 4.76 mとなった。

北方向以外の測位は補正メッセージを利用することで改善がみられたが、 σ が大きくなった。これはオスロにおいて、補正される衛星数が観測された衛星数に対して少ないため、それに伴って測位計算で使用した衛星数が減ったためである。

次に、HPLの計算を行なった。本研究では海洋と航空で共通して重要になる水平方向のProtection Level (PL)であるHPLを用いて議論するが、参考のためにVPLの計算を行なった。

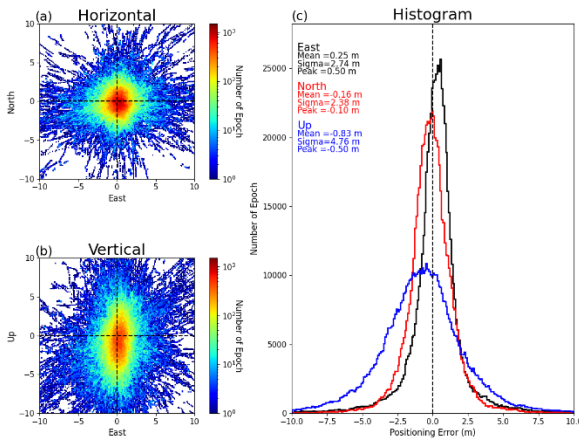


図5. 補正メッセージを用いた測位結果。図4と同じフォーマットで示す。

図6にHPLとPPPからの測位の差であるHorizontal Positioning Error (HPE)を比較したスタンプードチャートを示す。本研究ではLocalizer Performance with Vertical Guidance (LPV)での利用を想定して、水平警報限界(HAL: Horizontal Alert Limit)を40 mに、垂直警報限界(VAL: Vertical Alert Limit)を50 mに設定した。多くの場合、HPLがHALを下回る結果となったが、時折、HALを超えるHPLが観測された。HPLを超えるHPEは観測されなかった。

PLがAlert limitを下回る割合であるAvailabilityを求めると、水平方向と鉛直方向でそれぞれ83.17, 81.54%となった。

5 議論とまとめ

ここでは、原因と将来的にAvailabilityが極域において改善するか否かについて議論する。前

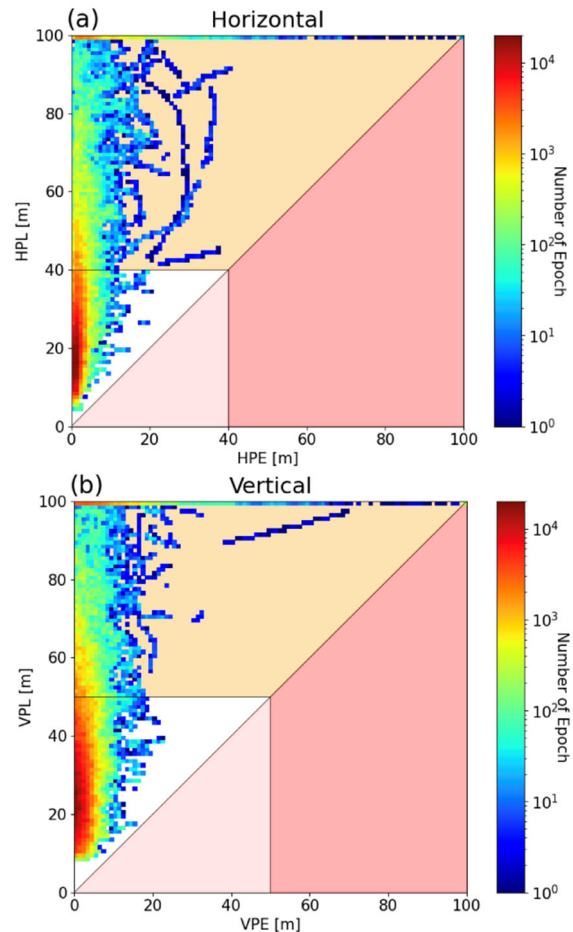


図6. (a) 水平、(b) 鉛直のスタンプードチャート。

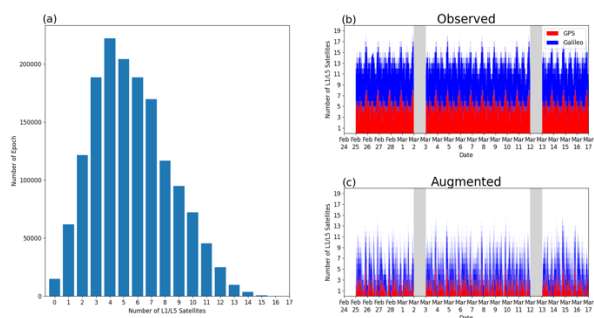


図7. (a)補正された衛星数のヒストグラム。(b)観測された衛星数の時間変化。(c)補正された衛星数の時間変化。赤で GPS，青で Galileo を示す。

述の通り，観測された衛星数に対して補正された衛星数は少ない。図7に補正された衛星数のヒストグラムと観測された衛星数と補正された衛星数の時間変化を示す。L1/L5, E1/E5a を放送している衛星はおよそ，11機から17機で観測されているが，補正された衛星は数機から11機で，2周波測位では6機以上の衛星を用いることが望ましいが，6機以上の衛星が補正される時間は全体のおよそ半分程度しかない。

補正された衛星が少ないことから，HPEだけでなくHPLも大きく算出されている。表1に補正された衛星数ごとに算出されたAvailabilityを示す。補正された衛星数の増加に伴ってAvailabilityが増加する。補正された衛星数が11機ある場合，水平方向のAvailabilityが100%に達し，LPVによる離着陸に利用可能となる。しかし，11機の補正された衛星が観測できるのは全体の5.48%の時間であり，極めて稀である。

表1. 補正された衛星数ごとのAvailability

| 補正された衛星数 | 全時間に 対する割合 [%] | 水平方向 Availability [%] | 鉛直方向 Availability [%] |
|----------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 6 | 47.18 | 83.17 | 85.50 |
| 7 | 34.93 | 91.34 | 90.12 |
| 8 | 23.89 | 97.09 | 93.75 |
| 9 | 16.32 | 98.74 | 95.86 |
| 10 | 10.16 | 99.53 | 97.46 |
| 11 | 5.48 | 100.0 | 98.85 |

補正された衛星数が少ない最も大きい原因は基準局の配置である。QZSSは日本において主に利用されることが想定されているため，基準局が日本の緯度帯に集中して配置されている。図8aに示すように北欧地方には基準局が希薄である。これによってオスロでは補正された衛星数が少なくなっている。

将来的にすべてのGPS, Galileo衛星はL1/L5, E1/E5a信号を放送する予定である。従って，本研究では以下の2つCase1とCase2の条件で将来的にAvailabilityがどの程度改善されるか見積もりを行なった。

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。
- 基準局は図8aに示される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

- Case1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・レイキャビクに仮に新設されたとする。

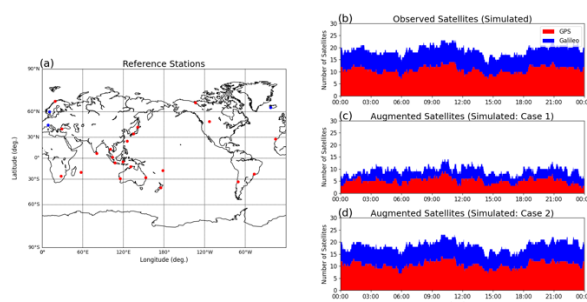


図8. (a)基準局の配置。2021年3月1日現在の基準局を赤点，Case2で仮定した基準局を青点で示す。(b)見積もられた観測される衛星。(c)Case1で見積もられた補正された衛星数。(d)Case2で見積もられた補正された衛星数。

計算した見積りの結果を図8に示す。観測される衛星数は多くの時間帯で20機程度である。Case1の条件で、11機以上の補正された衛星が観測される時間は全体の25.56%であり、十分とは言えない。一方でCase2では11機以上の補正された衛星がすべての時間で観測される。従って、現況ではすべての衛星からL1/L5, E1/E5aが放送されたとしても北極域でQZSSを用いた離着陸か海洋での精密な測位を行うことは限られた時間しか実現できず、実用は難しいが、もし、今後基準局をその配置が希薄な欧州地方に3地点以上配置されたならば、QZSSが観測されている時間では補正メッセージを使った測位が航空・海洋分野で利用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Miller, A. W. and Ruiz, G. M. (2014). Arctic shipping and marine invaders. *Nature Climate Change*, 4(6):413–416.
- [2] Cavalieri, D. J. and Parkinson, C. L. (2012). Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, 6(4):881–889.
- [3] Kacimi, S. and Kwok, R. (2022). Arctic snow depth, ice thickness, and volume from icesat-2 and cryosat-2: 2018–2021. *Geophysical Research Letters*, 49(5):e2021GL097448. e2021GL097448 2021GL097448.
- [4] Overland, J. E. and Wang, M. (2013). When will the summer arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters*, 40(10):2097–2101.
- [5] Walter, T., Blanch, J., and Enge, P. (2012). L1/L5 sbas mops to support multiple constellations. In *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, pages 1287–1297, Nashville, TN. Institute of Navigation.
- [6] Blanch, J., Walter, T., Enge, P., Pervan, B., Joerger, M., Khanafseh, S., Burns, J., Alexander, K., Boyero, J. P., Lee, Y., Kropp, V., Milner, C., Macabiau, C., Suard, N., Berz, G., and Rippl, M. (2014). Architectures for advanced RAIM: Offline and online. In *Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014)*, pages 787–804, Tampa, Florida, USA. Institute of Navigation.
- [7] Reid, T., Walter, T., Blanch, J., and Enge, P. (2016). GNSS integrity in the arctic. *NAVIGATION*, 63(4):469–492.
- [8] Kitamura, M. and Sakai, T. (2019). DFMC SBAS prototype system performance using global monitoring stations of QZSS. In *Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting*, pages 382–387, Honolulu, Hawaii, USA. Institute of Navigation.
- [9] ICAO (2018). DFMC SBAS SARPS - Baseline draft for validation, NSP_5 Report on Agenda Item 2. APPENDIX A2. International Civil Aviation Organization.