

## 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

### 1 まえがき

北極域の海氷面積が減少している。数値計算によるシミュレーションによると 2030 年から 2080 年の間の夏季に”ice-free”となる期間が到来することが予想されている[1, 2]。これに伴って、北極海航路の探索、資源調査といった北極域の経済活動が活発になり、船舶や航空機の需要が高まることが予想されている[3]。インフラが脆弱な北極域での船舶・航空機の航行には、次世代の測位方式である DFMC SBAS (Dual-Frequency Multi Constellation Satellite Based Augmentation System) を用いることが有効であることが指摘されている[3]。

現行の SBAS は静止軌道に配置された SBAS 衛星から放送されている。静止軌道から放送されている SBAS メッセージは緯度 72 度以上では受信することができない（図 1a）。このため、現行のシステムでは北極域において DFMC SBAS を利用することができない。

傾斜対地同期軌道 (IGSO: Inclined Geosynchronous Orbit) から SBAS メッセージを放送することが極域で DFMC SBAS メッセージを受信することができない問題の解決策として挙げられている。日本の準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) 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）。さらに、QZSS は現在、DFMC SBAS メッセージを放送しており、このメッセージは電子航法研究所が生成している。

DFMC SBAS メッセージは図 2 に示す、世界 22 点に展開された監視局の監視データに基づいて生成されている。監視局では GPS、Galileo、QZSS の L1/L5 及び E1/E5a の疑似距離を監視し、メッセージに反映している。また、上記の 2 周波数線型結合された疑似距離だけではなく、衛星の位置と衛星クロックの誤、保守的なエラーバーとして使われる保護レベル (PL: Protection Level) を計算できるパラメータもメッセージに含まれている[4]。

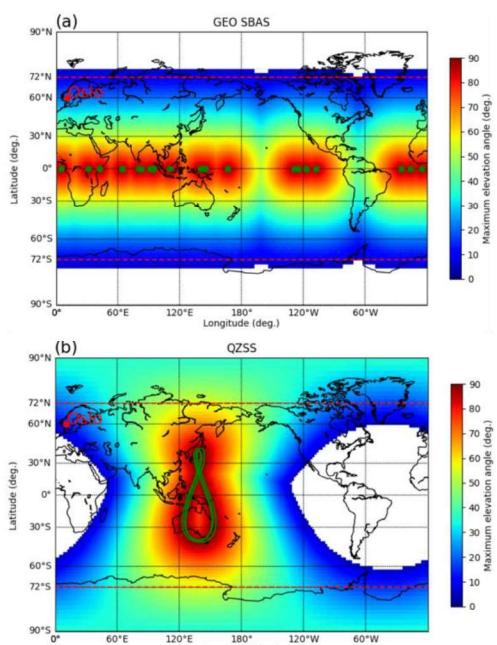


図 1. (a) 静止軌道衛星の仰角。(b) QZSS の仰角。

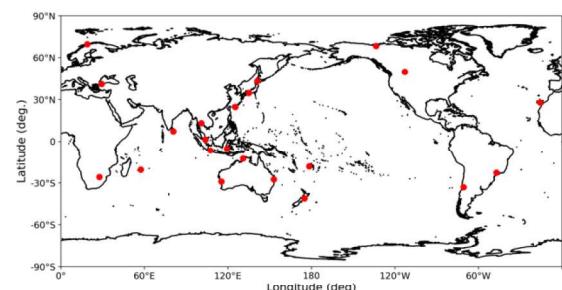


図 2. 監視局の配置。

QZSS から放送される DFMC SBAS メッセージは日本周辺での利用が想定され、生成されており、日本における性能評価は進められているものの、北極域における利用には検証が必要である。従って、本研究では QZSS から放送される DFMC SBAS メッセージを北極域において受信することで性能評価を行い、その可用性を明らかにすることを目的とする。

## 2 オスロでの事前実験

2021年2月24日から2021年3月17日にノルウェー・オスロ ( $10.72^{\circ}$  E,  $59.94^{\circ}$  N) に受信機を設置して、QZSS から放送される DFMC SBAS の性能評価を行った。この性能評価では短期間ではあったものの、GPS、Galileo、GLONASS、BeiDou、及び QZSS の測位信号が受信され、QZSS から放送された DFMC SBAS メッセージの受信も行われた。性能評価においては、DFMC SBAS メッセージを用いて PL の計算も行われ、測位誤差との比較が行われた。その結果、DFMC SBAS のシステムとしては利用可能であるものの、航空機の利用を想定されたアベイラビリティ（利用できる時間の割合）は日本と比較して低いものとなった。この結果を考察し、監視局の配置が欧州に希薄であることに着目した。簡単な予測を行い、欧州地方に3局の監視局を配置することで日本と同等の性能で利用可能であることを示した[5]。

## 3 海洋地球研究船みらいでの観測

次のステップとして海洋研究開発機構所属の海洋地球観測船みらいに GNSS 受信機及びアンテナを設置して、北極海における DFMC SBAS の性能評価を行った。みらいは 2024 年 8 月 25 日に清水港を出港し、9 月 2 日に米国・ダッチャーバーに入港した。その後、9 月 4 日にダッチャーバーを出港し、北極海においておよそ 1 ヶ月間研究航海を行った。

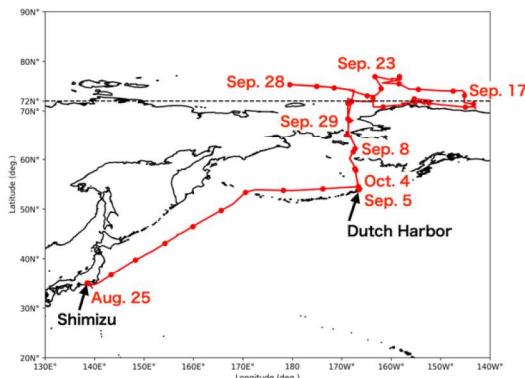


図 3. みらいの航海日程。

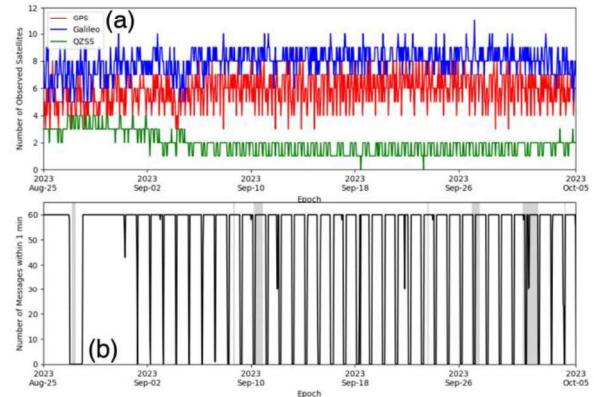


図 4. (a)受信された GPS, Galileo, QZSS 衛星数、(b)1 分以内に受信された DFMC SBAS のメッセージ数。灰色の時間帯は DFMC SBAS がメンテナンスを行なっていた時間帯。

みらいには GNSS 受信機として JAVAD DELTA、Septentrio Pola5S、DFMC SBAS メッセージの受信機として CORE Cohac  $\infty$ 、Furuno L5S Prototype 受信機が搭載された。図 4a に GNSS 受信機によって観測された GPS, Galileo QZSS 衛星数を示している。GPS と Galileo 衛星は全時間帯にわたって、4~10 機観測されていた。QZSS 衛星は 9 月 2 日までは 2~4 機が観測されていた。9 月 2 日以降は 1~2 機の QZSS が観測された。これは QZSS が同期している日本から離れたためである。図 4b に 1 分間に取得された DFMC SBAS メッセージ数を示す。DFMC SBAS メッセージは 1 Hz で送信されているため、通常は 1 分間に 60 個のメッセージが受信される。DFMC SBAS メッセージは受信された QZSS 衛星の個数が減る 9 月 2 日まではほぼ 60 個観測されていたが、9 月 2 日以降は DFMC SBAS メッセージが受信されていない時間帯もあった。これは本研究では QZSS2 号機と QZSS4 号機から送信されたメッセージを使ったため、これらのメッセージがない時間帯が生じることとなった。以上のことから、観測された GNSS 衛星の個数及び、DFMC SBAS メッセージの個数共に当初予想されていた通りの観測が行われたため、本観測は大きなシステムトラブルなしに観測を実行することができた。

#### 4 観測結果

本研究では JAVAD DELTA によって 1 Hz 取得された測位信号と Furuno L5S Prototype Receiver で取得された DFMC SBAS メッセージを使って、補強された測位解を求めた。測位結果を示す前に初めに JAVAD DELTA で観測された衛星数の時間変化と DFMC SBAS メッセージによって補強された衛星数、そのヒストグラムを図 5 に示す。観測された GPS, Galileo, QZSS の合計の衛星数は 14-19 機である一方、補強された衛星数は平均的に 5-12 機であった。本研究では GPS, Galileo, QZSS の 3 つの衛星系を使って補強された測位解を得た。このため、6 機以上の衛星が受信された時間帯のみを抽出し、補強された保測位解を導出した。

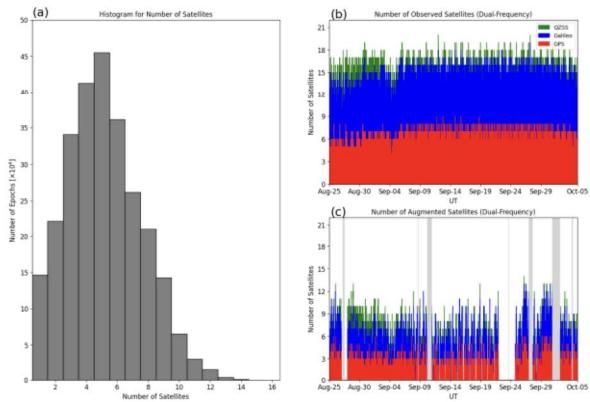


図 5. (a)補強された衛星数のヒストグラム、(b)観測された GPS, Galileo, QZSS 衛星数の時間変化、(c)補強された GPS, Galileo, QZSS 衛星数の時間変化。

補強された測位解のアンテナ位置からの距離を図 6 に示す。測位解は 100 秒の時定数のキャリアスマージングで求めた。アンテナの位置は高精度単独測位 (PPP: Precise Point Positioning) を用いて事後解析により求めた。また、 $\rho_{i,code}$  と  $\rho_{i,carrier}$  をコード疑似距離と位相疑似距離とすると、

$$|\rho_{i,code} - \rho_{i,carrier}| > 20$$

の条件を満たす信号をマルチパスの影響がある信号として計算から除外した。

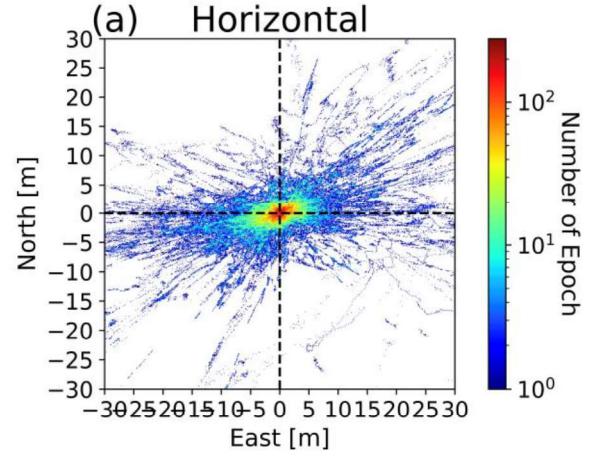


図 6. 測位結果。

測位誤差は、DFMC SBAS メッセージを使わずに測位する方法である単独測位と比較して、ばらつきが大きく、最頻値は東向き、北向きそれぞれ 0.5 m, -0.2 m で、標準偏差は東向き、北向きそれぞれ 28.51 m, 12.05 m となった。ばらつきが大きいものの補強された測位解の誤差が PL 以下であればシステムとしては利用可能である。次に、PL の計算を行った。

PL は水平方向の PL である HPL (Horizontal Protection Level)、鉛直方向の PL である VPL (Vertical Protection Level)があるが、本研究は船で観測を行ったため、HPLを扱う。HPLは以下の式により求めた、

$$HPL = K_H d_{major}$$

$K_H$ はそれぞれ対象とするシステムのインテグリティリスクによって変わり、外洋を航行中の船舶のインテグリティリスクは  $10^{-5}$  であるので本研究の場合は 4.42 とした。 $d_{major}$ は水平に投影された誤差の標準偏差に相当する値で、以下の誤差の二乗和に基づいて計算される。

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

右辺、第 1 項、第 2 項、第 4 項はそれぞれ、SBAS 補強、対流圏、電離圏の誤差モデルである。第 3 項は航空機を想定した誤差モデルである。

る。本研究では船舶を用いた観測ではあるが、船舶の誤差モデルは現在、調査中のため、第3項は現時点では航空機での利用を想定した誤差モデルを使った。

図7にHPLと観測誤差を直接比較したインテグリティチャートを示す。インテグリティリスクを超えて誤差がHPLを超えない必要があるが、今回の計算ではDFMC SBASメッセージにより補強した測位解とHPLが計算できた時間が332120epochであったことに対して、2041epochで誤差がHPLを超えた。

事前実験としてオスロで行った実験では補強された衛星数が少ないことが、測位誤差を大きくする要因の一つではないかということを示している。ここで、簡単に今回の観測において、誤差がHPLを超えた時間帯を調べると、補強された衛星数は十分にある場合が多く、補強された衛星数が測位誤差を大きくした主な要因ではないと今のとこと考えている。従って、前述のように航空機の誤差モデルを利用していることが原因として挙げられ、今後、船舶の誤差モデルを見積り、性能評価を行う必要がある。

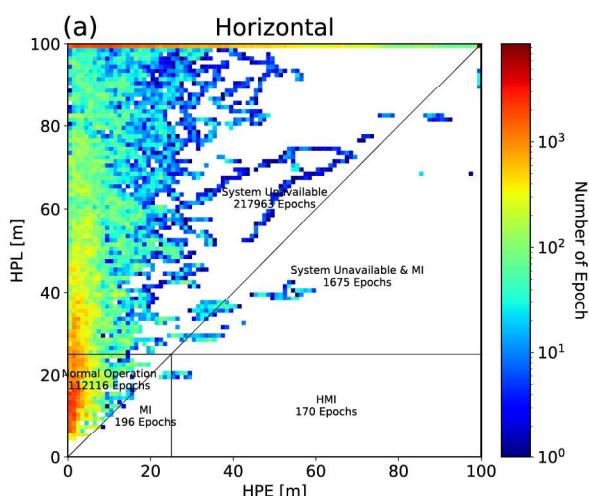


図7. インテグリティチャート。縦軸がHPLで横軸は水平測位誤差である。

## 5 まとめ

本研究では海洋研究開発機構所有の海洋地球研究船みらいにGNSS受信機及びDFMC SB

メッセージ受信機を設置した。みらいは2023年8月25日に清水港を出港し、ダッヂハーバーに一時寄港した後に北極海に入った。その後、10月4日にダッヂハーバーに入港した。この間、約1ヶ月間、北極海で研究航海を行った。

すべての観測期間で観測機器は正常に観測を行った。DFMC SBASメッセージを使って補強された測位解とHPLを比較すると、332120epoch中、2041epochで誤差がHPLを超えた。簡単な調査ではあるが、補強された衛星数を調べると、誤差がHPLを超えた時間帯であっても補強された衛星数は十分であった。原因として、HPLの計算に航空機の誤差モデルを利用していたことが挙げられる。このため、次のステップとして船舶の誤差モデルを推定し、性能評価を行う必要がある。

## 5 参考文献

- [1] Miller, A. W., & Ruiz, G. M. (2014). Arctic shipping and marine invaders. *Nature Climate Change*, 4(6), 413–416. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nclimate2193>
- [2] Overland, J. E., & Wang, M. (2013). When will the summer arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2097–2101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/grl.50316>
- [3] Reid, T., Walter, T., Blanch, J., & Enge, P. (2016). Gnss integrity in the arctic. *NAVIGATION*, 63(4), 469–492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/navi.169>
- [4] Kitamura, M., & Sakai, T. (2019). DFMC SBAS prototype system performance using global monitoring stations of qzss. *Proceedings of the ION 2019 Pacific PNT Meeting*, 382–387. <https://doi.org/https://doi.org/10.33012/2019.16789>
- [5] Takahashi, T., Saito, S., Kitamura, M. & Sakai, T., (2022) Performance of DFMC SBAS broadcasted from Japanese QZSS in Oslo, Norway, *Proceedings of the 2022 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Long Beach, California*, pp. 401-406. <https://doi.org/10.33012/2022.18239>