

MSAS 測位誤差要因補正情報の詳細評価

手塚賢太郎*・樊春明*・上野公彦*

*東京海洋大学大学院

Studies on the Accuracy of Individual MSAS Corrections

Kentaro Tezuka*, Chun Ming Fan* & Kimihiko Ueno*

*Graduate School of Tokyo University of Marine Science and Technology

MSAS (Multifunctional transport satellite based Satellite Augmentation System) provides differential correction messages to GNSS users. Assuming that correction messages for satellite orbits/clocks errors improve positioning precision outside the MSAS service area, we should also expect improvements in positioning precision for users of single-channel receivers outside the service area. Based on this assumption, we examine the efficacy of MSAS correction messages in improving general positioning precision outside the MSAS service area.

1 緒言

国際民間航空機関ICAOが策定した航空機用GNSS補強システム(SBAS)は、ユーザにインテグリティ情報(安全運航のための測位誤差上限の推定値)、レンジング機能(測距信号)、広域ディファレンシャル補正情報(測位誤差要因の補正情報)を提供する。アジアにおけるSBASとしては日本の国土交通省航空局の運営するMSASが存在する。また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が運営するQZSS(L1-SAIF信号)はSBAS互換のメッセージを放送する。

MSASは日本を中心としたサービスエリアを定めており、MSAS広域ディファレンシャル補正情報がサービスエリア内において測位精度の向上効果をもたらす事は、これまで多くの研究者により報告されてきた。ここで、MSASの信号はアジアの広範囲で受信可能であり、衛星軌道誤差および衛星時計誤差に対する補正情報を放送するため、MSASはサービスエリア外でも測位精度の向上効果をもたらすのではないかという疑問が生ずる。MSAS衛星軌道/時計補正情報がサービスエリア外においても有効に機能するのであれば、MSAS信号の受信可能エリアにおいて、1周波受信機ユーザはMSAS衛星軌道/時計補正情報を用いての測位精度を向上効果させることが期待できる。

MSASが放送する衛星軌道誤差および衛星時計誤差に対する補正情報が、サービスエリア外において測位精度向上効果を持つのかを明らかにするため、研究を行った。

2 MSAS について

MSASは国際民間航空機関ICAOが策定した規格文書「ICAO GNSS SARPS」に基づいて運用される、航空機用GNSS補強システム(SBAS)である。運用は日本の国土交通省航空局により行われる。MSASはICAOにより定められたFukuoka FIR (Flight Information Region)をサービスエリアとし、ユーザにインテグリティ情報(安全の運行のための測位誤差上限の推定値)、レンジング機能(測距信号)、広域ディファレンシャル補正情報(測位誤差要因の補正情報)を提供する。MSASは航空機を対象に設計されたシステムであるが、対応受信機を利用すれば航空機に関係のない一般のユーザでも利用することが可能である。

MSASの広域ディファレンシャル補正情報(以下、補正メッセージとする)は、ユーザに衛星軌道、衛星時計、電離層伝搬遅延量の補正情報を提供する。補強対象はGPS衛星とMSAS衛星である。また、対流圏伝搬遅延量の補正についても固定係数にて規定される。

MSASはサービスエリア付近の電離層による測距信号の遅延のみを対象に補正を行っているため、サービスエリア外では電離層伝搬遅延量に対する補正メッセージは利用することができない(Fig.1.)。しかし、衛星軌道および時計に対する補正メッセージは、各測位衛星が放送するメッセージ(エフェメリス)に対する補正を行うため、サービスエリアの内外を問わず適応出来ると考えられる。

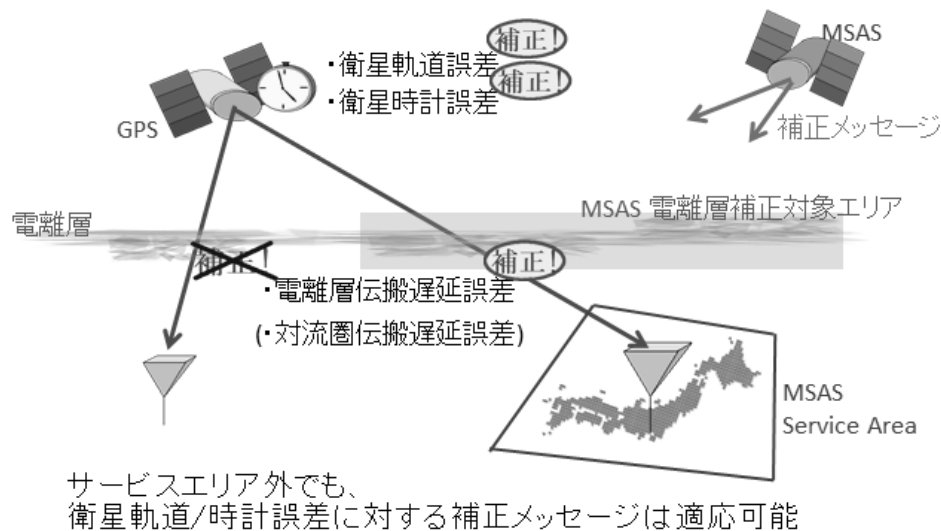


Fig.1. MSAS サービスエリア外における補正メッセージの利用

3 衛星軌道と時計の評価

3.1 評価方法

MSASの放送する衛星軌道/時計補正情報がサービスエリア外で測位精度に与える影響を考察するため、MSASの補正メッセージを適応して推定されたGPS衛星の衛星軌道および衛星時計の正確さを評価した。以下に続く評価は全て後処理によるもので、評価期間や評価対象はTable1.の通りである。

Table1. 評価方法一覧

評価期間	1年間 (2011年)
評価対象	全GPS衛星(*1)について以下3点を評価 (a) MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星軌道の正確さ (b) MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星時計の正確さ (c) MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星軌道/時計が、受信機 - 衛星方向の距離誤差に与える影響
評価方法	評価は全て後処理解析である。 (a) (b)について 計算された衛星軌道/時計をIGS精密暦(*2)と比較する。 参考値として、Ephemeris(のみ)から計算される衛星軌道/時計を同様にIGS精密暦と比較した結果も掲載する。 (c)について 観測された疑似距離を元に、衛星軌道誤差および衛星時計誤差に由来する視線方向距離誤差を推定する。 評価は、Ephemeris(のみ)から計算される衛星軌道/時計による視線方向距離誤差と、MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星時計/軌道による視線方向距離誤差とを比較することで行う。
使用データ	Precise Satellite Orbits/Clocks : IGS Final Products [1] より Satellite Antenna Parameter : IGS Multi GNSS Experiment [2] より Ephemeris Data : IGS Broadcast Ephemeris [1] より MSAS Message : ENRI Sat Nav Group [3] より GPS Observation Data : IGS Station data [4] より
*1 PRN1番衛星に対する補正情報の放送は2011年には確認されなかったため、評価対象外とした。	
*2 IGS精密暦の衛星軌道は、IGS公開の衛星アンテナパラメータを用いてアンテナ位相中心の座標を推定した上で、真値として扱った。	
*3 MSAS129, 137はほぼ同様のメッセージを放送するため、MSAS129が放送するメッセージをもって上記評価を行った。	

3.2 衛星軌道の評価

MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星軌道について評価を行った。真値はTable1.の通りとし、MSAS補正メッセージを適応して計算された衛星軌道の、真値からの距離を算出した。参考値として、Ephemeris(のみ)から計算された衛星軌道の真値からの距離も記載する。

結果はFig.2.の通りである。例としてPRN05, 15の結果を72時間分のみ記載するが、どの衛星についても同様の傾向の結果が得られた。また、1年分の解析でも、同様の傾向の結果が得られた。

MSAS補正メッセージを適応したEphemerisから計算される衛星軌道は、MSAS補正メッセージを適応しない場合(Ephemerisのみから計算した場合)に比べても、真値から大きく遠のいており、また分散もより大きくなっている事がわかる。MSAS補正メッセージを用いて計算された衛星軌道は、Ephemerisのみから計算されるものよりも精度が悪いことが確認された。

ここで、測位精度に影響を与えるのは衛星軌道に時計の要素を加味し測定される、ユーザから衛星の視線方向の距離誤差である。本節の結果がそのまま測位精度に反映される訳では無いことを断っておきたい。

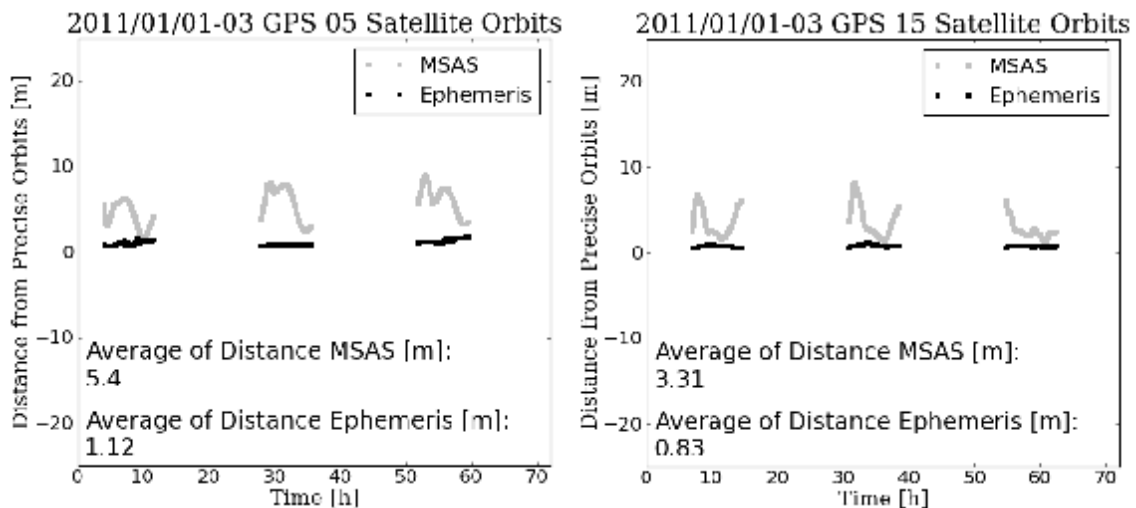


Fig.2. 衛星軌道の真値からの距離(PRN05, PRN15)

3.3 衛星時計の評価

MSAS 補正メッセージを適応して計算される衛星時計について評価を行った。真値については Table1.の通りとし、MSAS 補正メッセージを適応して計算された衛星時計の真値に対する誤差を算出した。参考値として、Ephemeris(のみ)から計算された衛星時計の真値に対する誤差も記載する。なお DCB について、多くの衛星について P1-C1 バイアスは 1ns 前後であるため、比較において DCB に対する補正は行わないものとした。

結果はFig.3.の通りである。例としてPRN05, 15の結果を72時間分のみ記載するが、どの衛星についても同様の傾向の結果が得られた。また、1年分の解析でも、一部衛星を除き同様の傾向の結果が得られた。

MSAS 補正メッセージを適応した Ephemeris から計算される衛星時計は、MSAS 補正メッセージを適応しない場合(Ephemeris のみから計算した場合)に比べ、一部衛星を除き真値から遠のく傾向にあり、また分散も増大傾向にある事がわかった。MSAS 補正メッセージを用いて計算された衛星時計についても、Ephemeris のみから計算されるものよりも精度が悪くなる傾向にあることが確認された。

ここで、測位精度に影響を与えるのは衛星軌道に時計の要素を加味し測定される、ユーザから衛星の視線方向の距離誤差である。本節の結果がそのまま測位精度に反映される訳では無いことを断っておきたい。

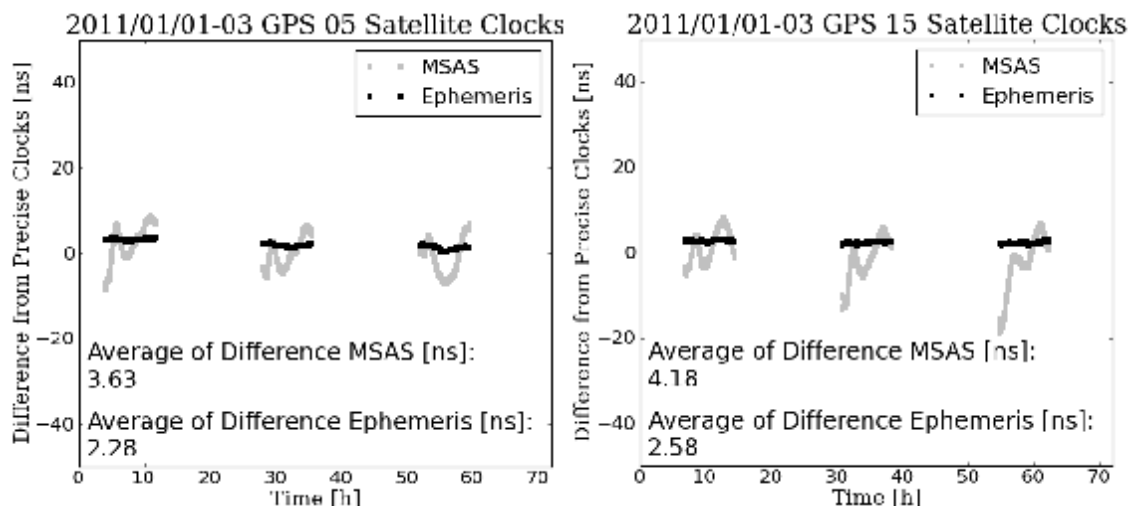


Fig.3. 衛星時計の真値に対する誤差(PRN05,PRN15)

3.4 視線方向距離誤差の評価

MSAS による衛星軌道および時計は、Ephemeris のみから計算する場合よりも精度が悪い傾向にある。しかし、測位精度に影響するのは衛星軌道と時計を合わせた際のユーザから衛星の視線方向の距離誤差である。そこで、エポックごとに次式の β_{MSAS} および β_{Ephe} を算出し、比較を行った。詳細については以下に述べる。

$$\beta_{MSAS} = r_{MSAS} - P - c \cdot \delta t_{MSAS} - c \cdot \delta t_{user} - \varepsilon \quad (3.3.1)$$

$$r_{MSAS} = \sqrt{(x_{Sat(MSAS)} - x_{user})^2 + (y_{Sat(MSAS)} - y_{user})^2 + (z_{Sat(MSAS)} - z_{user})^2} + Sagnac \quad (3.3.2)$$

$$\beta_{Ephe} = r_{Ephe} - P - c \cdot \delta t_{Ephe} - c \cdot \delta t_{user} - \varepsilon \quad (3.3.3)$$

$$r_{Ephe} = \sqrt{(x_{Sat(Ephe)} - x_{user})^2 + (y_{Sat(Ephe)} - y_{user})^2 + (z_{Sat(Ephe)} - z_{user})^2} + sagnac \quad (3.3.4)$$

β_{MSAS} および β_{Ephe} は衛星軌道および時計による視線方向の距離誤差である。 β の絶対値が小さい方が視線方向距離誤差が小さく、精度がよい事を表す。 r は MSAS または Ephemeris による衛星位置とユーザ位置の幾何学的距離であり、Sagnac 効果に対する補正を含む。 P は観測された疑似距離であり、2 式の間で共通である。 C は光速であり、 $\delta t_{MSAS(Ephe)}$ は MSAS(または Ephemeris)による衛星時計である。衛星時計については、相対論補正および Ephemeris 由来の TGD 補正を適応した。ユーザ時計誤差 δt_{user} は計算により算出される値であり両者に共通である。 ε はその他電離層伝搬遅延誤差やマルチパスなどによる誤差であり、両者に共通である。

日本(東京、MSAS サービスエリア内)と中国(武漢、MSAS サービスエリア外)それぞれについて $|\beta_{Ephe}| - |\beta_{MSAS}|$ を算出し図に表したところ以下の結果を得た(Fig.4. , Fig. 5.)。この値(図中のプロット)が正の値のとき、視線方向距離誤差は MSAS の方が小さいことを表す。例として PRN05, 15 について記載するが、他の衛星についても同様の傾向が見られた。

MSAS 測位誤差要因補正情報の詳細評価

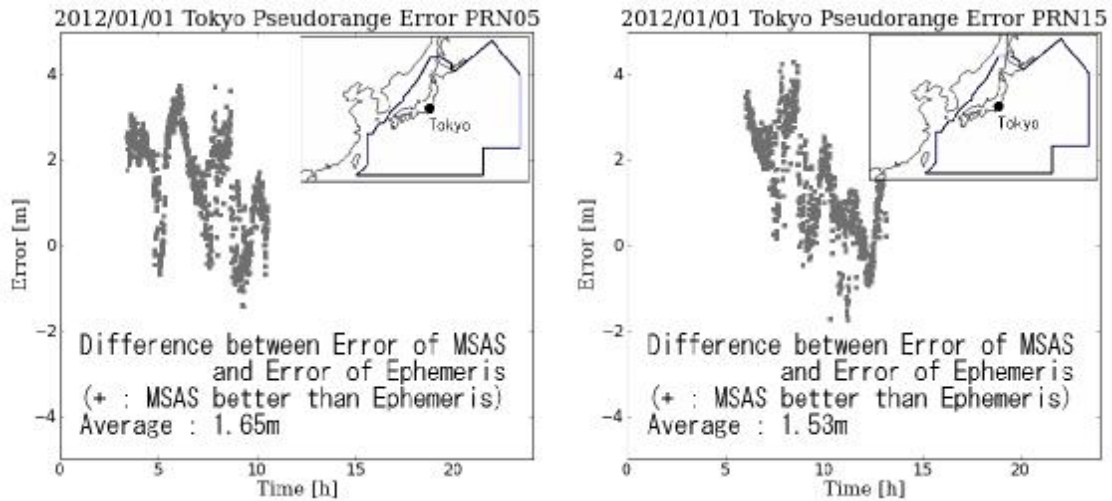


Fig.4. 日本(東京)における視線方向距離誤差の差(PRN05, 15)

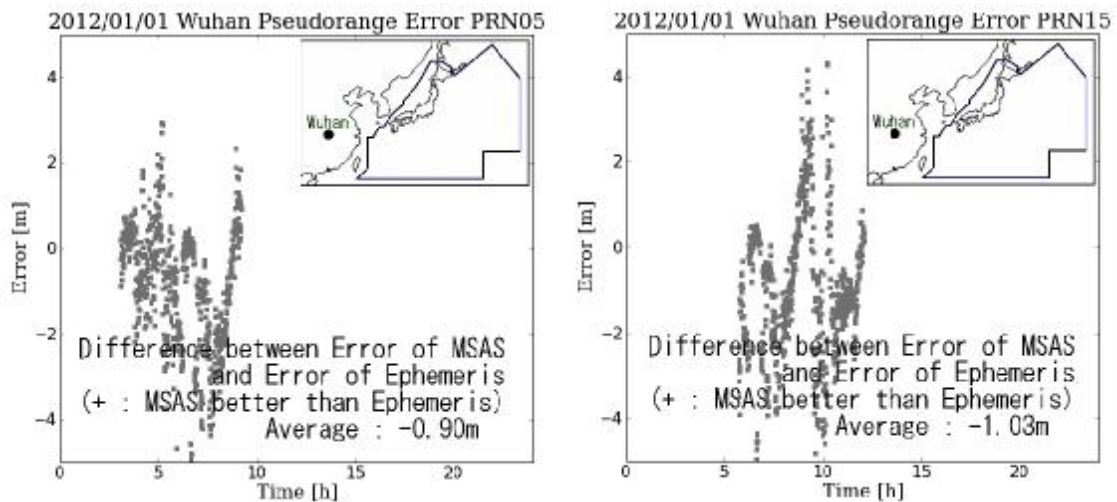


Fig.5. 中国(武漢)における視線方向距離誤差の差(PRN05, 15)

サービスエリア内の東京では、MSAS による衛星軌道および時計の方が、MSAS を利用しない場合に比べ視線方向距離誤差が小さかった。対して、サービスエリア外の武漢では MSAS による衛星軌道および時計は視線方向距離誤差を増大させる結果となることが確認された。

3.5 測位結果の比較

以上を踏まえ、東京と武漢における後処理測位を行った。測位条件は Table.2 の通りであり、MSAS を利用するケースと利用しないケースで、衛星軌道および時計の計算手段以外は測位条件を可能な限り統一した。結果は Fig.6.の通りである。ここで、図の中心は事前に解析されたアンテナ位置を表す。

結果よりサービスエリア内(東京)では衛星軌道および時計を MSAS 補正メッセージを用いて計算し、測位を行う方が測位精度が良いことが確認された。反対に、サービスエリア外(武漢)においては MSAS を用いると測位精度が劣化することが確認された。

Table2. 測位条件一覧

	Case:MSAS	Case:Ephemeris
Positioning Mode	Single Positioning (Post Processing)	Single Positioning (Post Processing)
Satellite Orbits/Clocks	Broadcast Ephemeris + MSAS Message	Broadcast Ephemeris
Ionosphere Correction	GPS Broadcast	GPS Broadcast
Troposphere Correction	GPS Broadcast	GPS Broadcast
Elevation Mask	5°	5°
Excluded Satellites	なし (MSASの仕様上、利用可能であつた衛星は全て測位演算に使用)	あり (エポックごとに、Case:MSASで測位演算に使用されなかつた衛星を、測位演算から除外)

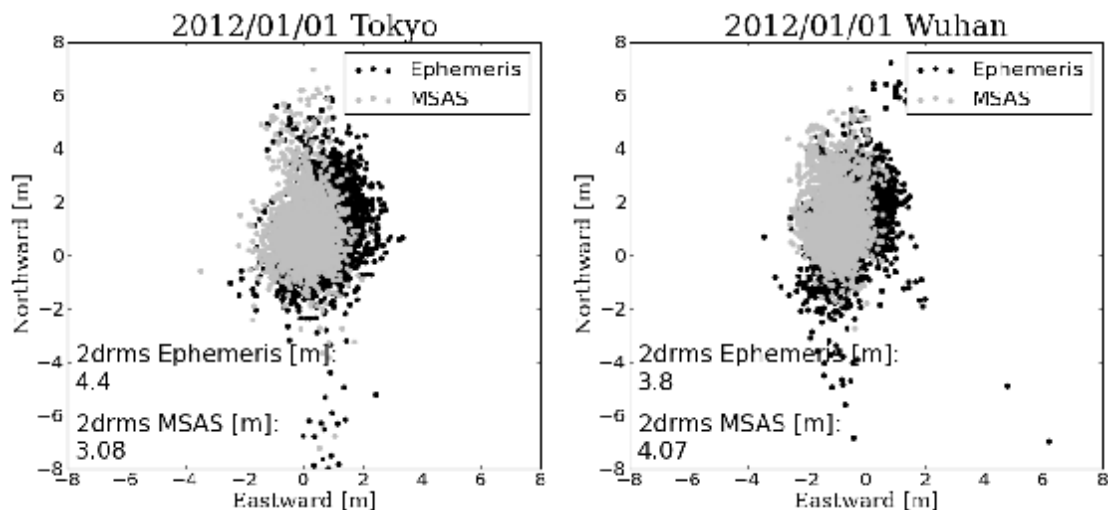


Fig.6. MSAS サービスエリア内外による測位結果

3.6 考察

3.2、3.3 節より、MSAS ディファレンシャル補正メッセージを用いて計算された衛星軌道および時計は真値に対して劣化している事が確認された。これは、Ephemeris のみから求めた衛星軌道および時計よりも精度が悪い傾向にある。しかし MSAS のサービスエリア内では、MSAS を利用することによりユーザから衛星方向の視線方向距離誤差が抑えられ、測位精度を改善することが 3.4、3.5 節より確認された。これは、衛星軌道誤差と衛星時計誤差が相殺することによる結果と考えられる。

以上より、MSAS が放送する衛星軌道/時計に対する補正情報は、サービスエリア外において必ずしも測位精度を改善させるわけではないことが明らかとなった。ユーザ位置によっては測位精度を劣化させる場合がある事も確認された。MSAS の衛星軌道/時計補正情報が測位精度に改善効果をもたらすエリアが、サービスエリア外でも存在するのかについては今後の研究課題としたい。

4 結論

本稿では、MSASが放送する衛星軌道/時計の補正情報が、MSASサービスエリア外において測位精度を改善させる効果があるか考察を行った。

MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星軌道は、Ephemerisのみから計算される衛星軌道に対して精度が悪い傾向にあることが明らかとなった。同様に、MSAS補正メッセージを適応して計算される衛星時計は、Ephemerisのみから計算される衛星時計に対し、改善効果はほとんど見られず、精度が劣化する場合も多いことが明らかとなった。

MSAS補正メッセージが衛星軌道/時計の精度を劣化させるのに、サービスエリア内において測位精度の向上効果をもたらすのは、衛星軌道誤差と時計誤差が相殺し、結果的にユーザ-衛星の視線方向距離誤差を抑えるからである。そのため、サービスエリア外ではMSASの衛星軌道/時計補正情報は測位精度を劣化させると結論づけられる。MSASの衛星軌道/時計補正情報が測位精度に改善効果をもたらすエリアが、サービスエリア外でも存在するのかについては今後の研究課題としたい。

参考文献・資料

- [1] IGS Products: <http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>
- [2] IGS Multi GNSS Experiment: <http://igs.org/mgex/>
- [3] ENRI SatNav Group: <http://www.enri.go.jp/~sakai/index.htm>
- [4] The IGS Tracking Network: <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/complete.html>

受付日 2012年12月5日

著者略歴

手塚 賢太郎

2011年3月 東京海洋大学 海洋科学部 海洋環境学科 卒業

2011年4月より東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科博士前期課程在学中

研究対象:衛星測位に関する研究

所属学会:数理水産科学会, 測位航法学会

樊 春明

中国南京航空航天大学卒業,

東京水産大学大学院博士後期課程修了, 博士(水産学:東京水産大学)

現在, 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科助教

所属学会:数理水産科学会, 測位航法学会, 電子情報通信学会

上野 公彦

{北海道大学水産学部卒, 北海道大学大学院水産学研究科博士後期課程中途退学,

博士(水産学:北海道大学)

現在, 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科准教授

所属学会:数理水産科学会, 日本応用数理学会, 電子情報通信学会