

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

SBAS測位誤差要因補正情報の詳細評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-09-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 手塚, 賢太郎 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/977

修士学位論文

SBAS 測位誤差要因補正情報の詳細評価

平成24年度

(2013年3月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋システム工学専攻

手塚 賢太郎

[修士]

修士学位論文内容要旨 Abstract

専攻 Major	海洋システム工学専攻	氏名 Name	手塚 賢太郎
論文題目 Title	SBAS 測位誤差要因補正情報の詳細評価		

GPS (Global Positioning System)は米国が運用する衛星測位システムである。地球上空を周回する GPS 衛星が放送する信号を受信する事ができる場所であればどこでも、ユーザは自身の現在位置の計算(測位)をすることができる。GPS はカーナビゲーションシステムや、最近ではスマートフォンでも利用されており、我々にとって身近なシステムであると言える。

航空機でも GPS を利用した測位が行われている。しかし多くの人命を預かる航空機で GPS を用いる場合は、計算した航空機の現在位置が十分に正確でなければならない、という課題を克服する必要がある。こうした航空機特有の問題を解決するために策定されたのが、航空機用 GNSS 補強システム (SBAS : Satellite Based Augmentation System)である。SBAS は測位結果の信頼性に関する情報や、測位における誤差要因に対する補正情報などをユーザに提供する。SBAS は航空機用に設計されたシステムではあるが、一般の(航空関係以外の)ユーザもこうしたサービスを受ける事ができる。

SBAS は米国や日本、ヨーロッパ圏で運用実績があり、アジアやアフリカでも運用が検討される世界で広く注目されているシステムである。日本が運営する SBAS とは国土交通省航空局により 2007 年に運用を開始された、運輸多目的衛星用衛星航法補強システム(MSAS : MTSAT Satellite-based Augmentation System)である。また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が 2010 年に初号機を打ち上げ、2012 年現在も研究開発が進められている準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)も SBAS 互換のメッセージを放送する。本稿では SBAS について特に、日本において既に正式なサービスの提供が開始されている MSAS を研究対象とした。

MSAS はユーザにディファレンシャル補正メッセージを提供する。MSAS が提供する衛星軌道誤差および衛星時計誤差に対する補正メッセージが、MSAS のサービスエリア外でも測位精度向上効果を有するのであれば、MSAS にサービスエリア外でも一周波受信機ユーザの測位精度を改善する効果を期待できる。そこで、MSAS のディファレンシャル補正メッセージが、サービスエリア外において測位精度改善効果を持つのかを明らかにするため研究を行った。

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.2 MSAS に関する先行研究	3
1.3 本研究の目的	5
第 2 章 MSAS の実際	6
2.1 MSAS の概要と運用組織	6
2.2 規格文書	8
2.3 衛星	9
2.4 地上局	10
2.5 MSAS メッセージ	11
2.5.1 メッセージ概要	11
2.5.2 メッセージの構造	13
2.5.3 Message Type 1 の Data Field	14
2.5.4 Message Type 2, 3, 4, 5 の Data Field	16
2.5.5 Message Type 25 の Data Field	18
2.5.6 Message Type 24 の Data Field	20
2.5.7 メッセージの更新頻度	21
2.5.8 MSAS メッセージによる衛星軌道の補正	23
2.5.9 MSAS メッセージによる衛星時計の補正	24
2.6 MSAS メッセージのサービスエリア外での利用	25
第 3 章 衛星軌道/時計補正メッセージの評価	27
3.1 評価概要	27
3.2 衛星軌道の評価	28
3.3 衛星時計の評価	33
3.4 視線方向距離誤差の評価	38
3.5 測位結果の比較	43

第4章 考察	46
4.1 MSAS の現状と問題点の指摘	46
4.2 サービスエリア外における MSAS 補正メッセージの利用	47
4.3 後発の SBAS が意識すべき課題	48
第5章 結論	49
謝辞	50
参考文献	51
付録1 衛星軌道の真値からの距離	53
付録2 衛星時計の真値に対する誤差	58
付録3 サービスエリア内における視線方向距離誤差の差	63
付録4 サービスエリア外における視線方向距離誤差の差	68

第1章 緒論

1.1 緒言

GPS (Global Positioning System)^[1]は米国が運用する衛星測位システムである。地球上空を周回する GPS 衛星が放送する信号を受信することによって、ユーザは自身の現在位置の計算(測位)をすることができる。GPS は軍事用のシステムであるが、一部の機能は民間にも開放されている。そのため GPS の利用は一般に広く普及することとなった。多くの自動車に搭載されたカーナビゲーションシステムなどはそのよい例であろう。また最近では多くのスマートフォンやタブレット端末にも GPS 機器が搭載され、GPS の利用はますます身近なものになっていると言える。

航空機でも GPS を利用した測位が行われている。しかし航空機の場合、GPS を利用するにあたり特有の問題を解決する必要がある。それはつまり、GPS を用いて計算した航空機の現在位置が十分に正確でなければならない、という問題である。多くの人命を預かる航空機では、特に着陸に近づくにつれ、誤った位置を算出しないことが重要になる。

こうした航空機特有の問題を解決するために策定されたのが、航空機用 GNSS 補強システム (SBAS : Satellite Based Augmentation System)である。SBAS は米国や日本、ヨーロッパ圏で運用実績があり、アジアやアフリカでも運用が検討される世界で広く注目されているシステムである。SBAS が放送する信号は、GPS 信号と共に利用することで、GPS による測位結果の正確さを向上させると同時に、測位結果の信頼性に関する情報をユーザに提供する。アジアにおける SBAS として、日本の国土交通省航空局が 2007 年に運用を開始した運輸多目的衛星用衛星航法補強システム(MSAS:MTSAT Satellite-based Augmentation System)が存在する。また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が 2010 年に初号機を打ち上げ、2012 年現在も研究開発が進められている準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)^[2]も SBAS 互換のメッセージを放送する。

さて衛星測位システムは、信号を受信できる場所であれば世界中どこでも(それこそ、四方を海に囲まれた太平洋の真ん中であっても)ユーザが位置を算出できる事を大きな利点としており、こうした利点から船舶にも広く普及したシステムである。

そのため衛星測位システムの研究は、船舶のより安全な運航に結びつくものである。現在運用されている SBAS ははたして、世界の広い地域や海域で有効に機能し、こうした衛星測位システムの利点を助長するものであろうか。それとも、一部の狭いエリアでしか有効に機能しない、改善すべき点を残したシステムでろうか。この疑問への明確な回答となる先行研究は確認されなかった。

本研究の目的は SBAS の、特に日本の国土交通省が運用する MSAS について、未だ明らかにされていない性質を明らかにする事である。さらに、研究結果から考えられる MSAS の問題点についても考察も行った。研究内容と結果について、本稿にて報告したい。

1.2 MSAS に関する先行研究

MSAS に関しては多くの研究者が先行研究を行っており、そのテーマは多岐にわたる。本研究ではこれらの中でも特に、MSAS の有する GPS による測位精度を向上させる機能に関するものに着目した。

MSAS はユーザに対し、GPS による測位精度を向上させるための補強メッセージを放送する。衛星測位における、いくつかの誤差要因それぞれに対する補正値をユーザに放送することで、測位精度を向上させるという仕組みである。日本国内において、こうした補強メッセージを利用することで測位精度がたしかに改善させる事が、多くの先行研究により報告されてきた^[3]。

ここで疑問を抱くのは日本国外における MSAS 補正メッセージの効果である。MSAS は日本周辺で利用されることを前提に運用されているが、MSAS 信号自体はアジアの広範囲で受信可能である。そして、MSAS の放送する衛星軌道/時計誤差に対する補正メッセージは、日本国外での利用も十分に考えられる(詳細については後述する)。SBAS 対応受信機は広く普及しているため、仮に MSAS 補正メッセージが衛星軌道/時計誤差に対する補正を正確に行っていたとすれば、それは、アジア域では MSAS 補正メッセージを用いて衛星軌道/時計を計算することで、一周波コード測位の測位精度を手軽に向上できる可能性があることを意味する。

ここで補足として記しておきたいのは、衛星測位において、ある地点での測位精度の向上は個々の補正値の質の良さを必ずしも意味しないという事である。各々の誤差要因に対する補正値が正確でない場合でも、それらを同時に利用することで各々の持つ誤差が相殺され、結果としてある地域に限り測位精度が向上するということが起こりうる。MSAS 補正メッセージは日本において測位精度を改善することが報告されてきたが、これは MSAS が衛星軌道/時計誤差を正確に補正していることを必ずしも意味しない。日本国外のある地域において MSAS 補正メッセージが測位精度を劣化させる可能性も十分考えられるのである。

日本国外において MSAS 補正メッセージが測位精度向上に寄与するかどうかを明らかにするためには、MSAS 補正メッセージが衛星軌道/時計誤差をどれだけ正確に補正しているか調査する方法が有効と言える。しらみつぶしにアジア中で測位を行うのは現実的でないし、先述の通り測位結果からは補正メッセージの質は明らか

にできない。しかし、放送される補正メッセージが各誤差要因をどれだけ正確に補正しているのか、先行研究では明らかにされてこなかった。そのため、日本国外において MSAS 補正メッセージが測位精度の向上に寄与するのか明らかにするためには、MSAS 補正メッセージが衛星軌道/時計誤差をどれだけ正確に補正しているか、自身の研究で明らかにしてゆかねばならない。

1.3 本研究の目的

本研究では前述の通り、MSAS が放送する衛星軌道/時計誤差に対する補正メッセージを評価し、日本国外において MSAS 補正メッセージが測位精度の向上に寄与するのか(つまり、日本国外でも有効に利用できるのか)明らかにする事を目的とした。MSAS 補正メッセージの評価は、後処理解析により、MSAS が放送した補正值が衛星軌道/時計誤差をどれだけ正確に補正できていたのか調査することで行う。

この研究の意義は、MSAS 補正メッセージが日本国外でも有効に機能するか判断することだけにとどまらない。MSAS の現状を把握することで(場合によっては問題点を明らかにすることで)、メッセージの質の改善に貢献し得る点にも大きな意味がある。ここで注目したいのは、2012 年現在実験や開発が行われている日本固有の衛星測位システム QZSS の存在である。MSAS は運営こそ日本が行っているが、補正メッセージの生成は海外製のシステムを流用している。対して QZSS の補正メッセージ生成は国産のシステムによって行われており、そのシステムも日々開発が進められている状態にある。当研究は先行システムとも言える MSAS の現状把握を行うものである。当研究が MSAS の現状を明らかにするだけでなく、SBAS あるいは QZSS 開発の助力になれば幸いである。

第2章 MSAS の実際

2.1 MSAS の概要と運用組織

本章では研究対象とする MSAS の運用形態、補正情報の生成や放送等について記述していく。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)^[4]をサービスエリアとし(Fig.1)、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 に携わる団体として、日本の電子航法研究所(ENRI)が存在する。ENRI は MSAS の性能改善を目的として MSAS に関する研究開発を行っている(MSAS の運営には携わっていない)。これは、ENRI が国土交通省より業務委託を受けてのことであり、研究成果は国土交通省航空局に報告される。

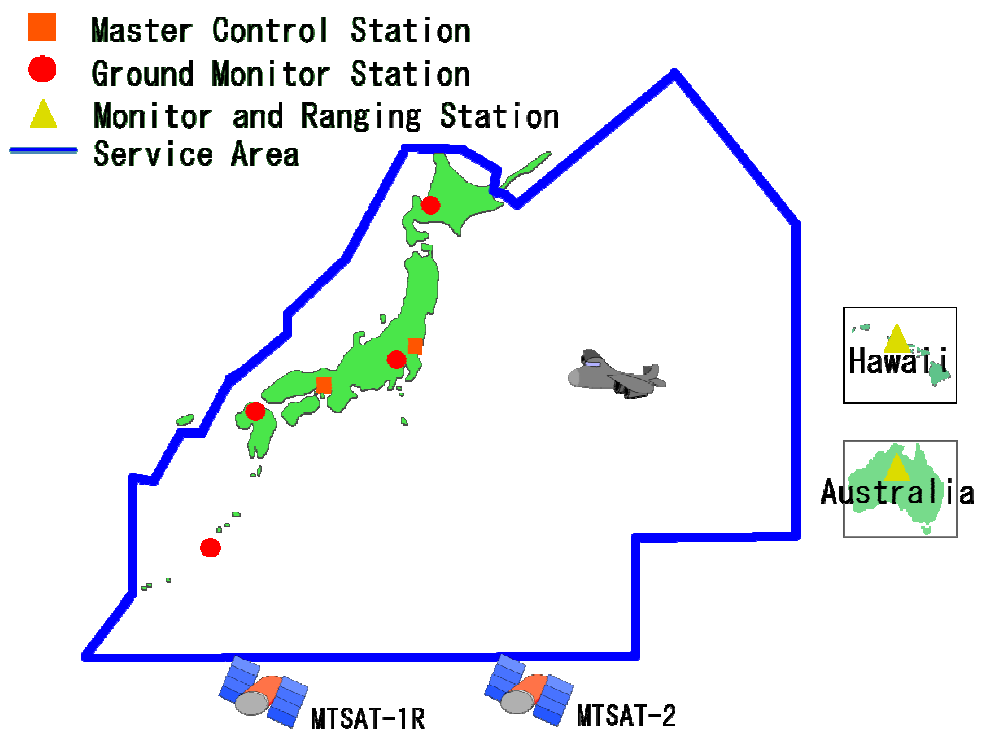


Fig.1 MSAS サービスエリアと地上局の配置

2.2 規格文書

SBAS(および MSAS)に関する規格文書として、先に挙げた「ICAO GNSS SARPs」の他に「RTCA MOPS (DO-229)」⁵⁾が存在する。まず「ICAO GNSS SARPs」については ICAO が策定した文書である。国際民間航空条約の付随書であり、NSP パネルでの議論に基づいて ICAO が作成し、加盟国の承認を受けて発行されたものである。

対して「RTCA MOPS (DO-229)」は米国 RTCA 社が、米国の航空機搭載用受信機向けに作成した文書である。連邦航空局(FAA)や関係者の議論で決定されたものである。SBAS 対応受信機の満たすべき性能の指定や補正モデルの指定などが記述されている。

2.3 衛星

MSAS 衛星は 2 機存在する。2005 年 02 月 26 日に打ち上げられた MTSAT-1R および、2006 年 02 月 18 日に打ち上げられた MTSAT-2 である。MSAS の正式サービスが開始されたのは 2007 年 09 月 27 日である。これら 2 機は MSAS としての機能の他に、気象観測用の機能も搭載された多目的衛星であるが、本稿では MSAS としての機能にのみ言及する。

MTSAT-1R の信号には 129 番、MTSAT-2 の信号には 137 番の PRN 番号が割り当てられている。システム上この 2 機に大きな違いはなく、基本的には同じメッセージを放送する。ユーザは 2 機の MSAS 衛星のうち 1 機を任意に選択し、選択した 1 機が放送する MSAS メッセージを利用する。

2.4 地上局

MSAS の地上モニタ局は全 8 局である(Fig.1.)。日本の神戸と茨城に航法統制局、東京、札幌、福岡、那覇に監視局を擁する。日本国外にも、オーストラリアとハワイに標定局が存在する。これら 8 局の地上局で観測された GNSS 信号を元に、MSAS のメッセージが生成される。

このうち、神戸と茨城に配置された航法統制局は MSAS 衛星にメッセージのアップリンクを行っている。神戸航法統制局は MTSAT-1R に、茨城航法統制局は MTSAT-2 にメッセージのアップリンクを行っている。どちらの航法統制局においても MSAS メッセージは米国 Raytheon 社開発のソフトウェアによって生成される(なお MSAS 自体のメーカーは NEC である)。統制系は異なるものの、基本的には両航法統制局で同一のメッセージが生成され、各 MSAS 衛星を通してユーザに放送される。

MSAS の信号は、MSAS 衛星に搭載された中継器(トランスポーター)を利用して地上に放送される。MSAS 信号は地上で生成され、MSAS 衛星はそれを折り返す形で信号をユーザに提供している。ここで、MSAS は独自の時刻系を持ち、GPS との時刻同期を行っていない。ただし、MSAS の時刻系と GPST のズレは $1\mu\text{s}$ 以内になるようにコントロール局で調整されている。

こうした調整を行うにあたり、基地局でも MSAS 衛星より MSAS 信号を受信している。受信した MSAS 信号から対流圏伝搬遅延量、電離層伝搬遅延量、衛星内部のハードウェアに関する遅延などから成る遅延量の合計を推定し、次回アップリンク時に反映することで、適切な時刻にユーザに信号が届くよう調整がなされている。なお、MSAS のダウンリンクの帯域幅は 2.2MHz であり、アップリンクも同等あるいはそれ以上の帯域幅で行われている。

2.5 MSAS メッセージ

2.5.1 メッセージ概要

MSAS の 1 メッセージあたりの長さは 250bit であり、データ速度は 250bps なので 1s に 1 つのメッセージが放送される。MSAS メッセージには 18 種のメッセージタイプが規定されており、それらによってインテグリティ情報や広域ディファレンシャル機能(および、MSAS 軌道情報によるレンジング機能)が提供される。1 つのメッセージには 1 つのメッセージタイプが割り当てられる。それぞれのメッセージタイプの概要については Table1 を参照のこと。なお、メッセージは前方誤り修正(FEC)により符号化されてユーザに放送される。

MSAS は全ての GPS 衛星と MSAS 衛星に対する補正情報をユーザに提供している。補強対象とする全ての衛星について、同一の頻度で補正情報を提供し、特定の衛星に対する補正情報を優先して送ることはない。ただし、観測局が観測を行えない衛星(例えば、地球の裏側にいる衛星など)や、健康状態に異常が確認されている衛星などについては”Not Monitored”や”Do Not Use”という形でメッセージが送信される。

SBAS の広域ディファレンシャル補正情報は、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。

Table 1 MSAS の Message Type 一覧

Message Type	内容	主な関連機能*1		
		R	D	I
0	テストモード(使用不可)	-	-	-
1	PRN マスク	-	○	○
2, 3, 4, 5	高速補正 (UDRE + FC) FC: 短期的な衛星時計変動の補正	-	○	○
6	インテグリティ情報 (UDRE)	-	-	○
7	高速補正の劣化係数	-	-	○
9	SBAS 航法メッセージ	○	-	-
10	劣化係数	-	-	○
12	SBAS 時刻情報	○	-	-
17	SBAS アルマナック	○	-	-
18	IGP マスク (電離層格子点の設定)	-	○	-
24	長期/高速補正 複合メッセージ	-	○	○
25	長期補正 (長期的な衛星軌道/時計誤差の補正)	-	○	-
26	電離層伝搬遅延補正值	-	○	-
27	SBAS サービスメッセージ	-	-	-
28	衛星クロック・軌道共分散	-	-	○
63	NULL メッセージ(使用不可)	-	-	-

*1: R,D,I は以下を表し、○は特に関連が深い事を表す。

R=レンジング機能 (MSAS 衛星による測距機能)

D=ディファレンシャル補正機能 (衛星測位における誤差要因の補正機能)

I=インテグリティ情報 (測位結果に対する保証、安全に関する機能)

*2: なお当研究に関係が深いのは”D”(ディファレンシャル補正機能関連)のメッセージ (特に補強対象の衛星を示す Message Type1 および、衛星軌道/時計誤差に対する補正を行う Message Type2~5, 24, 25)である。

2.5.2 メッセージの構造

SBAS メッセージは1メッセージあたり 250bit から成り、その内容は規格文書^[5]により定められている。その構造は Fig.2 の通りである。1メッセージは 8bit の Preamble から始まり、6bit の Message Type、212bit の Data Field が続き、24bit の Parity で完結する。

8bit の Preamble は同期およびメッセージの開始を表す目的で付加され、"01010011", "10011010", "11000110" の 3 通りが規定されている。続く 6bit の Message Type は 0~63 までの Message Type 番号が 2 進数で格納され、以降の Data Field の構造を示す役割を果たしている。212bit の Data Field は Message Type により内容が異なる。本研究に特に関わりの深い Message Type(Message Type 1, 2~5, 24, 25)の Data Field については以降の節で取り上げることとする。1メッセージの最期には 24bit の CRC パリティが用意され、バースト誤りおよびランダム誤りどちらに対しても、誤り見逃し率 $\leq 2^{-24}$ (ビット誤り率 ≤ 0.5 としたとき)でメッセージを保護するように設計されている。

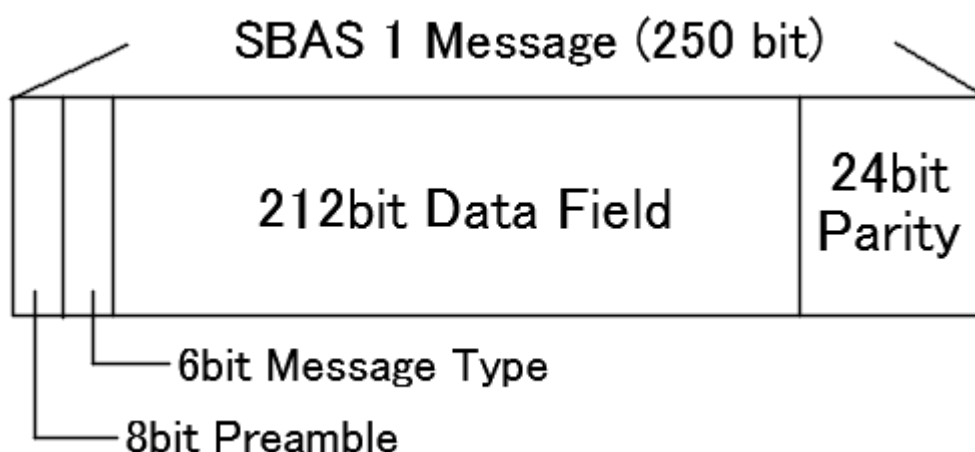


Fig.2 SBAS メッセージの構造

2.5.3 Message Type 1 の Data Field

本節では Message Type1 の Data Field について記す。Message Type1 のメッセージは PRN マスクを送信する。PRN マスクとは、補強対象の衛星を示すフラグ情報である。つまり Message Type1 は、これ以降に放送される補強メッセージはどの衛星を補強対象としているのか、という事をユーザに知らせるためのメッセージである。PRN マスクは最大で 51 衛星にセットされる(つまり、SBAS は最大で 51 衛星を補強対象にとる)。Message Type1 の Data Field の構造は Fig.3 の通りである。

Message Type1 のメッセージの Data Field は、1bit の PRN マスクが 210 回繰り返され、2bit の IODP(PRN マスク更新番号)で完結する。1bit の PRN マスクは、規格文書^[5]によって定められた PRN スロット(Table2)の順に従い、0 であれば補強対象で無い事を、1 であれば補強対象である事を表す。IODP は PRN マスク更新番号であり、0, 1, 2, 3 のいずれかで表される。ここで例として Fig.4 を示す。

なお PRN マスクの更新は、新たな測位衛星が打ち上げられた場合や、衛星の退役があった場合にのみ行われる事が SBAS の規格文書^[5]により規定されている。それに対し、SBAS 互換システムである QZSS L1-SAIF はメッセージ帯域幅の効率的な利用を目的とし、衛星の打ち上げなどに依らず PRN マスクを随時更新することが QZSS の規格文書^[2]に明記されている。

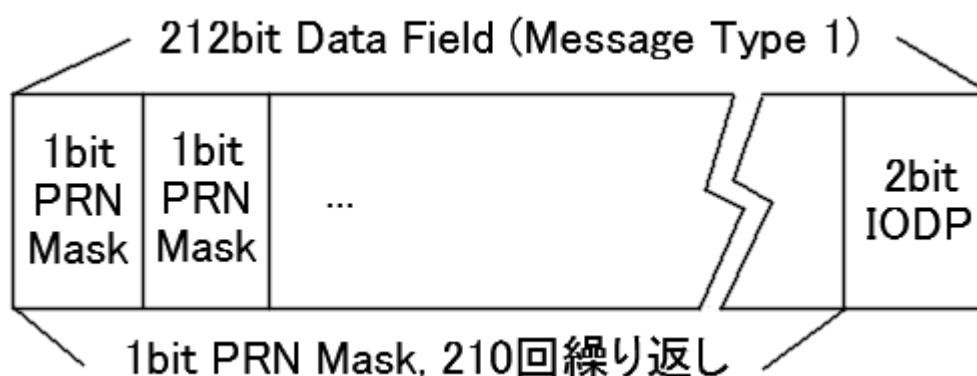
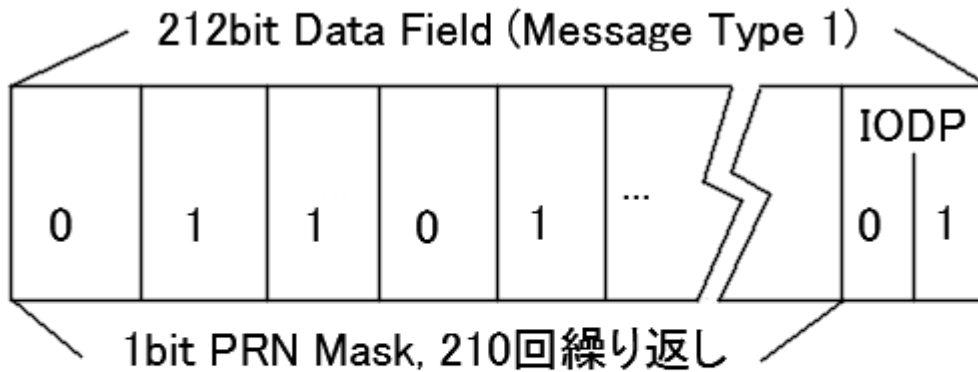


Fig.3 Message Type 1 の Data Field

Table 2 Message Type1, PRN スロット表

PRNスロット	衛星システム
1~37	GPS (PRNスロットは順に、GPSに割り当てられたPRN番号1, 2, 3...に対応)
38~61	GLONASS (PRNスロットは順に、GLONASS Slot Numberに37を足したものに対応)
62~119	(将来のGNSSのために確保)
120~138	GEO, SBAS (PRNスロットは、各システムに割り当てられたPRN番号に対応)
139~210	(将来のGNSSのために確保)



メッセージが上記のような場合、
 GPSのPRN2衛星がPRNマスク1番に、
 GPSのPRN3衛星がPRNマスク2番に、
 GPSのPRN5衛星がPRNマスク3番にセットされ、
 以降放送されるメッセージで補強対象となる事を表す。

Fig.4 Message Type 1 の例

2.5.4 Message Type 2, 3, 4, 5 の Data Field

本節では Message Type2~5 の Data Field について記す。Message Type2~5 のメッセージはいずれも高速補正を送信する。高速補正は、事前に受信した Message Type1(PRN マスク)によって示された衛星に対する補強情報である。Message Type2 は PRN マスク 1~13 の衛星に対する高速補正情報を、Message Type3 は PRN マスク 14~26 の衛星に対する高速補正情報を、Message Type4 は PRN マスク 27~39 の衛星に対する高速補正情報を、Message Type5 は PRN マスク 40~51 の衛星に対する高速補正情報をユーザに提供する。

Message Type2~5 の Data Field の構造はいずれも同様であり、Fig.5 の通りである。高速補正は、2bit の IODF(高速補正更新番号)、2bit の IODP(対応する PRN マスク更新番号を表す)、12bit で表される衛星時計の短周期の誤差を補正する高速補正值 FC(13 衛星分)と、4bit で表される保護レベル計算のためのパラメータ UDREI(13 衛星分)から成る。

高速補正は、事前に Message Type1(PRN マスク)を受信しており、かつ PRN マスクの IODP と高速補正メッセージ内の IODP の値が一致する場合のみ適用する事が出来る。衛星時計の短周期誤差の補正值である(ただし、直接的には疑似距離の補正を行うため補正值の単位は m である) FC は 2 の補数表現により、分解能 0.125m、有効範囲-256~255.750m の補正值として表される。FC の具体的な適用方法は 2.5.9 節に記す。なお、保護レベルの適用方法については本研究では取り扱わないため、詳細な説明は規格文書⁵⁾などに譲るものとする。

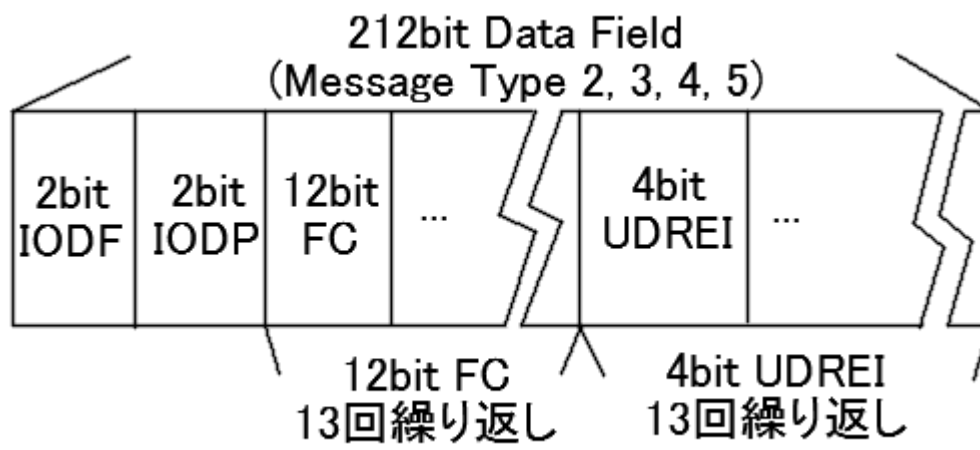


Fig.5 Message Type 2~5 の Data Field

2.5.5 Message Type 25 の Data Field

本節では Message Type25 の Data Field について記す。Message Type25 のメッセージは長期補正を送信する。長期補正は、衛星軌道および時計の長周期の誤差に対する補正情報である。なお、この補正値は GPS 衛星に対するものである場合は L1 C/A 信号に重畳されている航法メッセージより計算される衛星軌道/時計に対する補正値である。

長期補正は、Fig.6 の通り同一のフォーマットである 2 つの部分メッセージから成る。1 つの部分メッセージは 106bit で構成される。部分メッセージの構造は Table 3, Table 4 を参照のこと。各補正パラメータの具体的な適用方法は 2.5.8 および 2.5.9 節に記す。

長期補正は、事前に Message Type1(PRN マスク)を受信しており、かつ PRN マスクの IODP と長期補正メッセージ内の IODP の値が一致する場合のみ適用する事が出来る。また、部分メッセージに含まれる IOD は 8bit の GPS エフェメリス送出番号に対応し、どのエフェメリスに対応する補強メッセージであるかを表している。

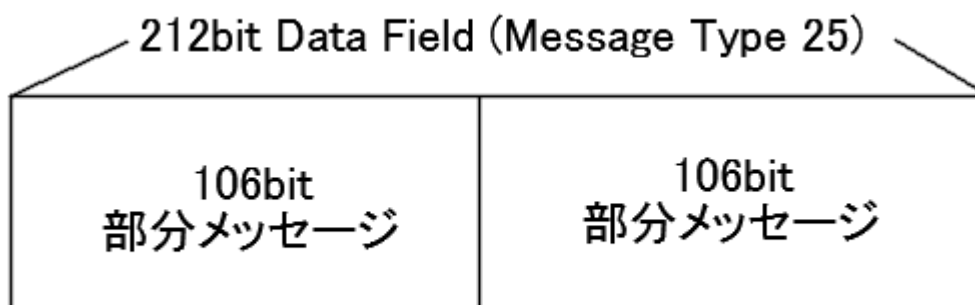


Fig.6 Message Type 25 の Data Field

Table 3 部分メッセージ(速度コード=0で放送された場合)

速度コード=0として放送された場合					
繰り返し	内容	bit数	分解能	有効範囲	単位
1	速度コード(=0)	1	1	0	-
2	PRNマスク番号	6	1	1~51	-
	IODi	8	1	0~255	-
	δx_i (ECEF, 2の補数表現)	9	0.125	± 32	m
	δy_i (ECEF, 2の補数表現)	9	0.125	± 32	m
	δz_i (ECEF, 2の補数表現)	9	0.125	± 32	m
	$\delta a_{i,f0}$ (2の補数表現)	10	2^{-31}	$\pm 2^{-22}$	s
1	IODP	2	1	0~3	-
1	予備	1	-	-	-

注) δx_i , δy_i , δz_i は衛星軌道誤差、 $\delta a_{i,f0}$ はクロックオフセットの補正量を表す

Table 4 部分メッセージ(速度コード=1で放送された場合)

速度コード=1として放送された場合					
繰り返し	内容	bit数	分解能	有効範囲	単位
1	速度コード(=1)	1	1	1	-
	PRNマスク番号	6	1	1~51	-
	IODi	8	1	0~255	-
	δx_i (ECEF, 2の補数表現)	11	0.125	± 128	m
	δy_i (ECEF, 2の補数表現)	11	0.125	± 128	m
	δz_i (ECEF, 2の補数表現)	11	0.125	± 128	m
	$\delta a_{i,f0}$ (2の補数表現)	11	2^{-31}	$\pm 2^{-21}$	s
	$\delta \dot{x}_i$ (ECEF, 2の補数表現)	8	2^{-11}	± 0.0625	m/s
	$\delta \dot{y}_i$ (ECEF, 2の補数表現)	8	2^{-11}	± 0.0625	m/s
	$\delta \dot{z}_i$ (ECEF, 2の補数表現)	8	2^{-11}	± 0.0625	m/s
	$\delta a_{i,f1}$ (2の補数表現)	8	2^{-39}	$\pm 2^{-32}$	s/s
	$t_{i,LT}$ (基準となる日内時刻)	13	16	0~86384	s
	IODP	2	1	0~3	-

注) $\delta \dot{x}_i$, $\delta \dot{y}_i$, $\delta \dot{z}_i$ は衛星軌道誤差の時間変化、 $\delta a_{i,f1}$ はクロックドリフトの補正量を表す

2.5.6 Message Type 24 の Data Field

本節では Message Type24 の Data Field について記す。Message Type24 のメッセージは複合高速/長期補正を送信する。複合高速/長期補正は、前述の高速補正および長期補正の補正パラメータを一つのメッセージ内に収めたものである。

Message Type2~5 のいずれかが 6 機以下の衛星しか補強対象としない場合に、代わりに Message Type24 が放送される。効率よく補強情報をユーザに提供するための工夫である。最大 6 機分の高速補正值 FC、保護レベル計算パラメータ UDRE と、1 機分の長期補正パラメータが放送される。

複合高速/長期補正の Data Field の構造は Fig.7 の通りである。ここで、各補正パラメータ等の表すものは前述の高速補正または長期補正のものと同様である。高速補正ブロック ID は、0~3 の値をとり、このメッセージが Message Type 2~5 のどの代わりに放送されたか(つまり、メッセージ内の FC および UDRE がどの PRN マスクに対応するものであるか)を表す。

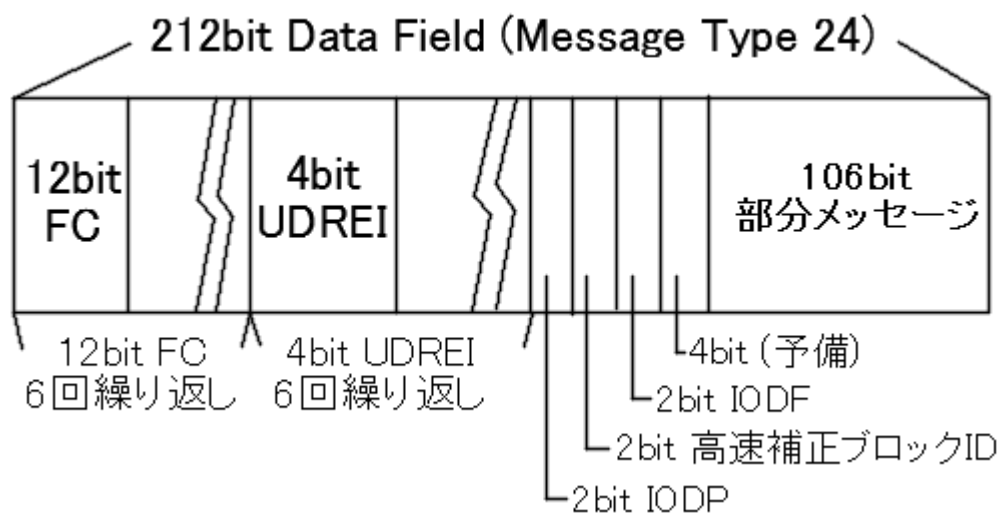


Fig.7 Message Type 24 の Data Field

2.5.7 メッセージの更新頻度

MSAS が放送するメッセージについて、放送されるメッセージタイプの順番は特に規定されていない。ただし、MSAS メッセージに含まれるパラメータには、規格文書により最長の更新間隔が定められている。特にインテグリティ情報に関するパラメータは頻繁に更新されるように定められている。例えば、保護レベルを計算するためのパラメータ UDRE は 6s に一度は必ず更新されるよう、メッセージが放送される。またそれと同時に、パラメータごとに有効時間も定められており、適応可能時刻から有効時間を過ぎたメッセージは無効となる。

実際にはメッセージタイプ(以下 MT とする)2~5 の高速補正メッセージが最も頻繁に放送される。これは高速補正メッセージに含まれる UDRE パラメータを最長でも 6s に一度更新するよう SBAS 仕様書で定められていることに依るが、高速補正は衛星時計誤差(その中でも特に変動の激しい短周期の誤差)に対する補正值(FC)も含むため、変動の激しい衛星時計誤差に対する補正值を計算するためのパラメータも、6s に一度の頻度で更新されることとなる。注意として、高速補正メッセージ自体は最長で 60s に一度放送されるものと規定されている。そのため SBAS の仕様上、衛星時計誤差に対する補正パラメータが 60s に一度のみ更新されることもあり得なくはない。ただし、UDRE パラメータのみを頻繁に放送するのは明らかに効率的ではなく、過去の放送データから判断しても、MSAS の高速補正(つまり衛星時計の短周期の誤差に対する補正パラメータ)の放送は 6s に一度行われるものと捉えて問題ないであろう。

衛星軌道誤差と、衛星時計の長周期の誤差に対する補正パラメータは MT25 の長期補正(または MT24 長期/高速補正複合メッセージの一部)で放送される。長期補正メッセージは最長でも 120s に一度更新されることが規定されているため、衛星軌道誤差に対する補正パラメータは最長でも 120s に一度の更新となる。ただし、MT24 が放送される場合はさらに頻繁に更新されることとなる。MT24 の放送は以下のような場合に行われる。高速補正メッセージ(MT2~5)は 1 メッセージで 7 から 13 機の測位衛星に対する補正パラメータを放送する事が定義されており、6 機以下の衛星に対する補正パラメータを放送する場合は、MT24 の長期/高速補正複合メッセージが利用される。MT24 は例えば、MSAS が 32 衛星分の補正パラメータを放

送する場合に利用され、MT2 で 13 機、MT3 で 13 機、MT24 で 6 機に対する衛星時計誤差の補正パラメータをユーザに提供する。補強対象の測位衛星数によっては(例えば MSAS が補強する測位衛星数が 33 機、38 機など 7 から 13 の組み合わせから成る数である場合)MT24 は利用されない。

2.5.8 MSAS メッセージによる衛星軌道の補正

衛星軌道に対する補正パラメータは、MT25 の長期補正メッセージ(または MT24 長期/高速補正複合メッセージの一部)で放送される。長期補正メッセージには、対応するエフェメリスにより計算された衛星軌道の ECEF 座標値 $x_{ephemeris}$, $y_{ephemeris}$, $z_{ephemeris}$ (m) に対する補正值 δx , δy , δz (単位は m) が格納されている。なお、場合によっては衛星軌道誤差の時間変化を表すパラメータ $\delta \dot{x}$, $\delta \dot{y}$, $\delta \dot{z}$ (単位は m/s) も格納されている(格納されていない場合、それぞれ値は 0m/s として扱う)。さらにエポック時刻 $t_{i,LT}$ がメッセージに格納されており、あるエポック t_k における MSAS により補正された ECEF 座標値での衛星軌道 $x_{corrected}$, $y_{corrected}$, $z_{corrected}$ (m) は、以下の式で計算される。

$$x_{corrected} = x_{ephemeris} + \delta x + \delta \dot{x}(t_k - t_{i,LT}) \quad (2.5.1)$$

$$y_{corrected} = y_{ephemeris} + \delta y + \delta \dot{y}(t_k - t_{i,LT}) \quad (2.5.2)$$

$$z_{corrected} = z_{ephemeris} + \delta z + \delta \dot{z}(t_k - t_{i,LT}) \quad (2.5.3)$$

なお、より詳細なメッセージの適応方法については SBAS の規格文書^[5]を参照されたい。

2.5.9 MSAS メッセージによる衛星時計の補正

衛星時計に対する補正パラメータは、MT2~5 の高速補正メッセージと MT25 の長期補正メッセージ(加えて MT24 長期/高速補正複合メッセージの一部)で放送される。高速補正メッセージにはパラメータ FC (単位は m) が格納され、観測された疑似距離を補正することで、衛星時計の短周期の誤差を補正する。長期補正メッセージには、対応するエフェメリスにより計算された衛星時計 $\Delta t_{SV,i}$ の長周期の誤差に対する補正パラメータ(クロックオフセット) $\delta a_{i,f0}$ (単位は s) が格納される。場合によっては、長期補正メッセージにはクロックドリフト $\delta a_{i,f1}$ (単位は s/s) も格納される(格納されていない場合、値は 0s/s として扱う)。長期補正メッセージにはさらにエポック時刻 $t_{i,LT}$ がメッセージに格納されており、あるエポック t_k における MSAS により補正された衛星時計 $\Delta t_{SV,i}^{corrected}$ (s) は以下の式で表される。

$$\Delta t_{SV,i}^{corrected} = \Delta t_{SV,i} + \delta a_{i,f0} + \delta a_{i,f1}(t_k - t_{i,LT}) \quad (2.5.4)$$

さらに、高速補正によるパラメータ FC を含めて衛星時計の計算を行う場合、長期補正および高速補正により補正された衛星時計 $\Delta t_{SV,i}^{corrected,FC}$ (s) は以下のように表す事ができる(C は光速とする)。

$$\Delta t_{SV,i}^{corrected,FC} = \Delta t_{SV,i}^{corrected} + FC / C \quad (2.5.5)$$

なお、より詳細なメッセージの適応方法については SBAS の規格文書⁵⁾を参照されたい。

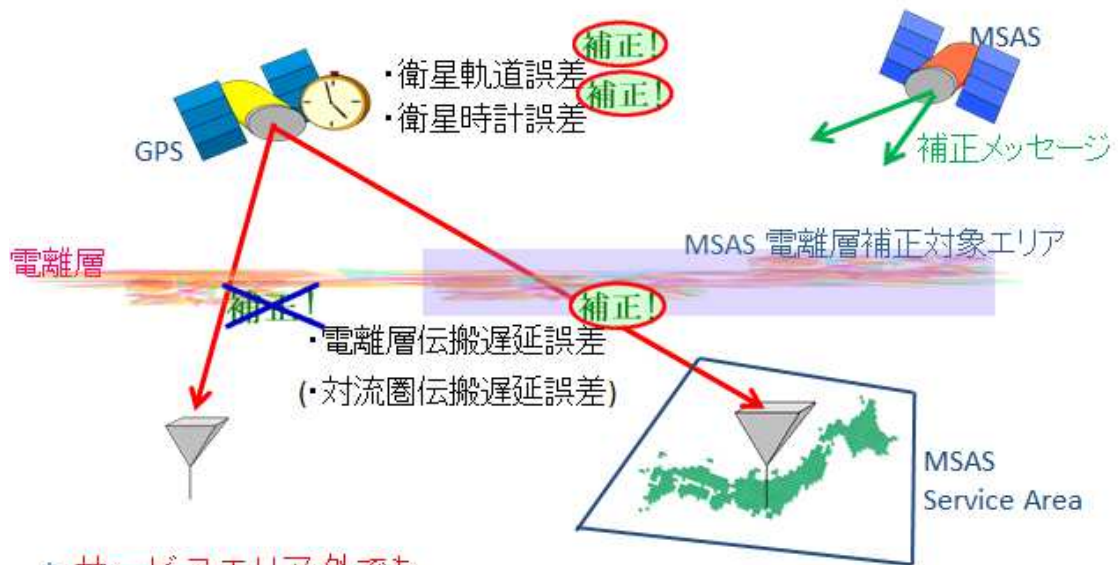
2.6 MSAS メッセージのサービスエリア外での利用

先述の通り MSAS はディファレンシャル補正機能として、衛星軌道誤差、衛星時計誤差、電離層伝搬遅延誤差に対する補正メッセージを放送している。本節ではこれら補正メッセージが MSAS サービスエリア外で利用可能であるか検討する。

まず衛星軌道/時計誤差に対する補正であるが、これらは測位衛星が放送するメッセージ(エフェメリス)が含む誤差に対する補正メッセージであり、サービスエリアの内外を問わず適応出来るものと考えられる。MSAS サービスエリアから大きく離れた場所では観測出来る衛星が異なるため補正メッセージそのものが送られなくなってしまうが、アジア域(特に東南アジアなど)であれば観測される衛星におおきな違いはないため目立った問題はないと思われる。

次に電離層伝搬遅延誤差に対する補正であるが、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。そのためサービスエリア外では電離層伝搬遅延誤差に対する補正メッセージを利用することはできない (Fig.8)。

以上より、当研究では MSAS が放送するディファレンシャル補正メッセージの内、衛星軌道誤差および衛星時計誤差に対する補正は MSAS サービスエリア外でも利用可能と判断した。以降、MSAS がユーザに提供する衛星軌道/時計誤差に対する補正が、MSAS サービスエリア外でも測位精度の向上に寄与するか判断するため、補正メッセージが衛星軌道/時計誤差をどれだけ正確に補正していたのかを解析してゆく。



* サービスエリア外でも、

衛星軌道/時計誤差に対する補正メッセージは適応可能

Fig.8 サービスエリア外で利用可能な補正メッセージ

第3章 衛星軌道/時計補正メッセージの評価

3.1 評価概要

MSAS の放送する衛星軌道/時計補正メッセージ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衛星軌道および衛星時計の正確さを評価した。また、MSAS の補正メッセージを適応して推定された衛星軌道/時計が受信機-衛星方向の距離誤差に与える影響についても評価した。詳細については各節のはじめに記すものとする。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 Table5 の通りである。

Table5 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 [6] より Satellite Antenna Parameter : IGS Multi GNSS Experiment [7] より Ephemeris Data : IGS Broadcast Ephemeris [6] より MSAS Message : ENRI Sat Nav Group [8] より GPS Observation Data : IGS Station data [9] 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 Table5 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。なお真値とした IGS 精密暦は公証精度が 2.5cm 以下の衛星軌道データ⁶⁾であり、当研究を行う上で十分な精度を持つものと判断した。

72 時間分のグラフプロットは Fig.9, Fig.10 の通りであり、1 年分の解析結果は Fig.11, Fig.12 の通りである。72 時間のグラフプロットは例として PRN05, 15 のもののみ記載するが、どの衛星についても同様の傾向の結果が得られた。1 年分の解析では、真値からの距離の RMS 値と、真値からの距離の平均値(Average(Distance)と表記)を計算し、図に表した。なお、定義は以下の通りである。

$$RMS_{(MSAS)} = \sqrt{\frac{1}{EY} \sum_{i=1}^{EY} Dist_{i(MSAS)}^2} \quad (3.2.1)$$

$$Average(Distance)_{(MSAS)} = \frac{1}{EY} \sum_{i=1}^{EY} Dist_{(MSAS)} \quad (3.2.2)$$

$$Dist_{(MSAS)} = \sqrt{(x_{(MSAS)} - x_{precise})^2 + (y_{(MSAS)} - y_{precise})^2 + (z_{(MSAS)} - z_{precise})^2} \quad (3.2.3)$$

ここで、EY は評価期間とした一年間のうちの全エポック数であり、x, y, z はあるエポックにおける衛星軌道である。 $x_{(MSAS)}$, $y_{(MSAS)}$, $z_{(MSAS)}$ は MSAS 補正メッセージを適応して計算された衛星軌道、 $x_{precise}$, $y_{precise}$, $z_{precise}$ は真値とした衛星軌道である。なお、Ephemeris から計算された衛星軌道の解析結果については、上記 3 式の(MSAS)の部分 を Ephemeris のものと読み替えた結果である。

結果より、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く。

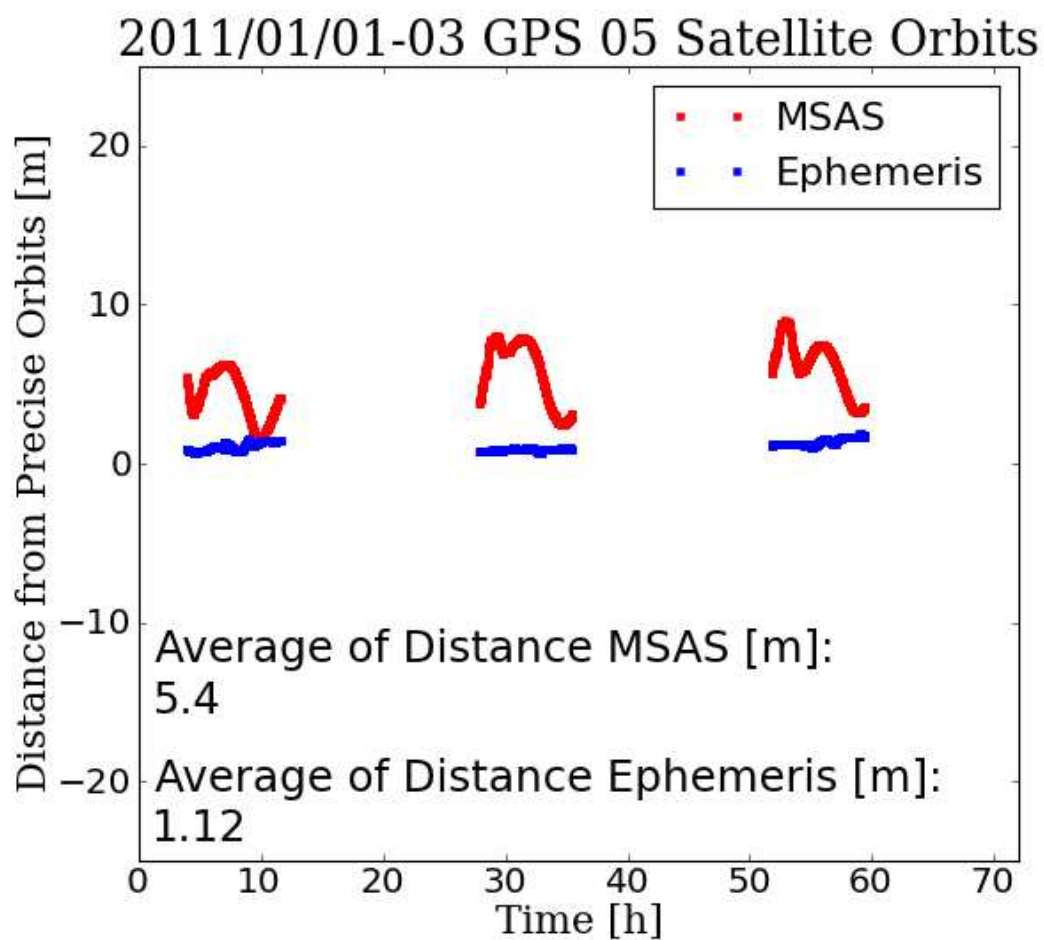


Fig.9 衛星軌道の真値からの距離(PRN05)

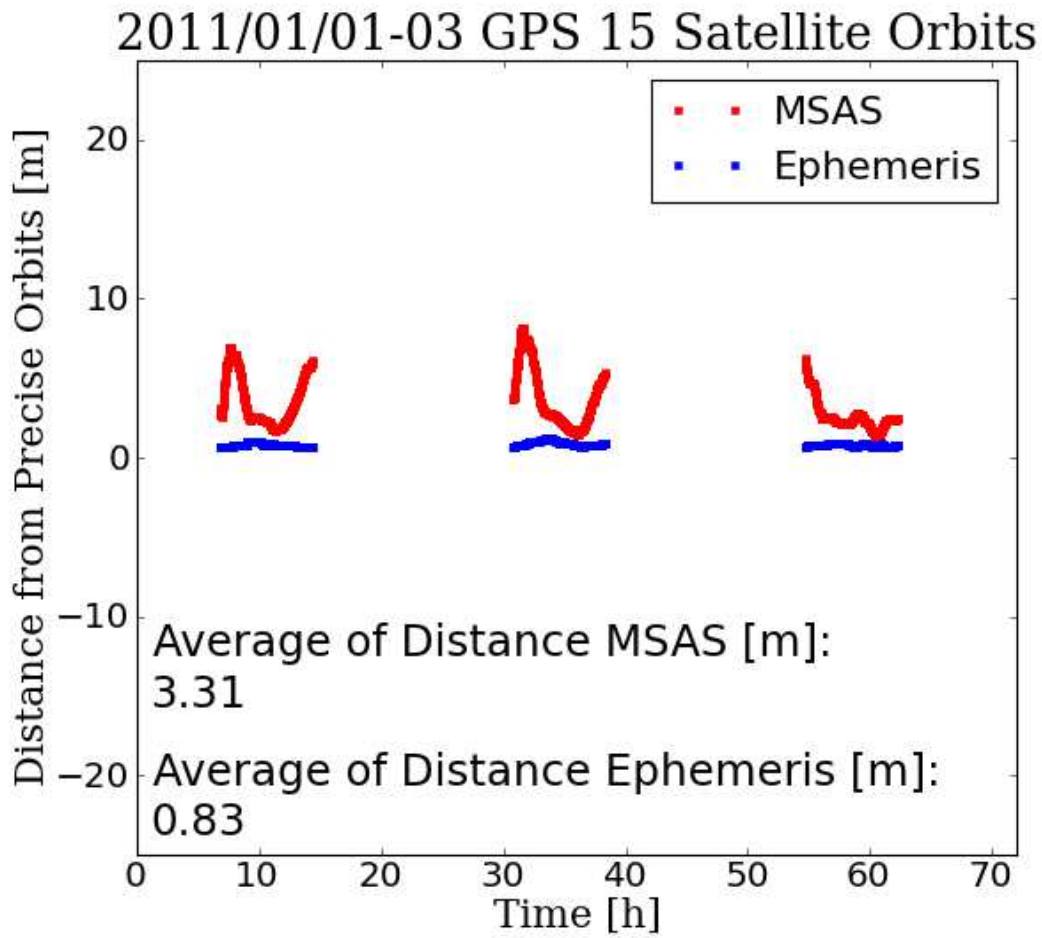


Fig.10 衛星軌道の真値からの距離(PRN15)

Satellite Orbits Error (2011 Average)

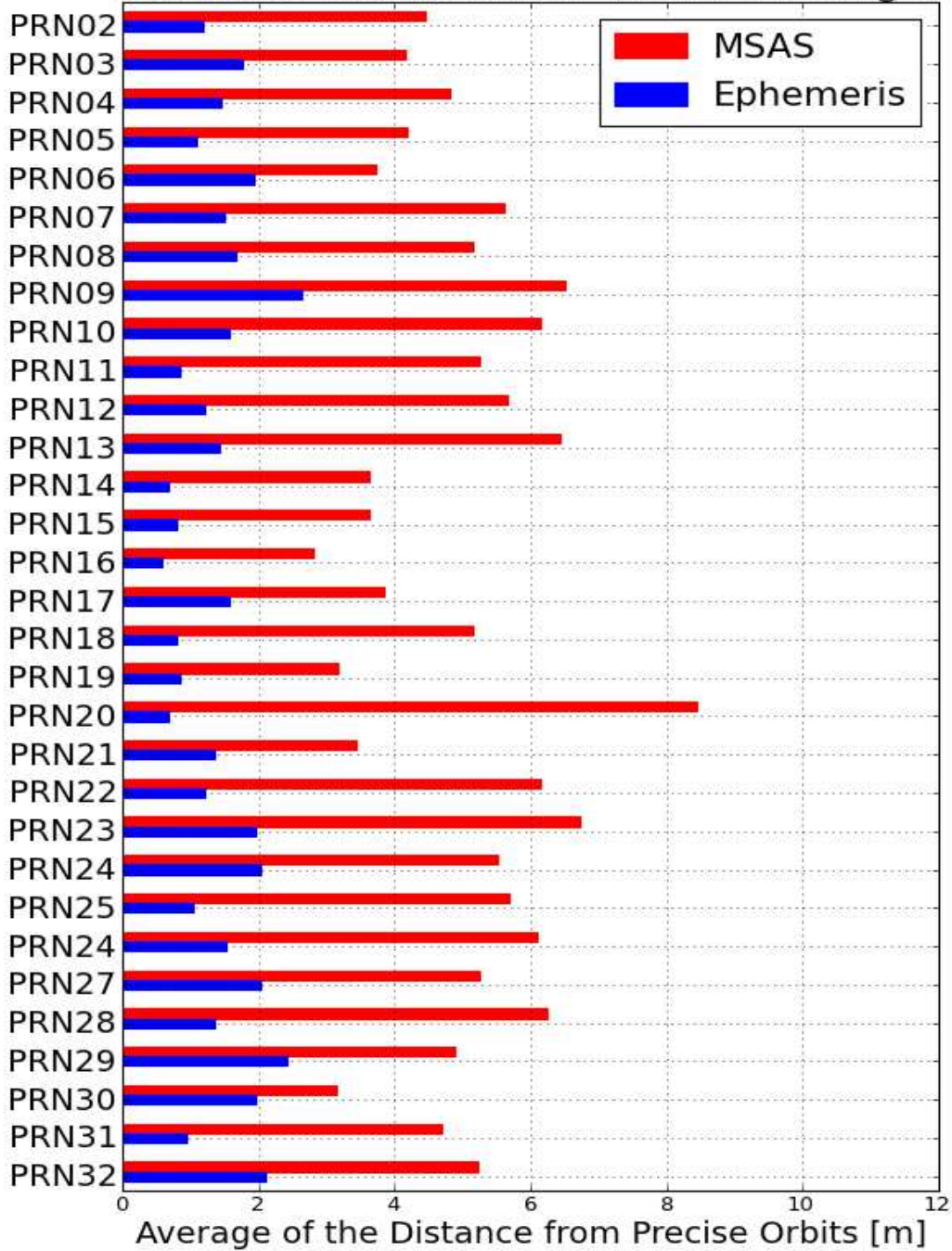


Fig.11 2011 年における衛星軌道の真値からの距離(平均値)

Satellite Orbits Error (2011 RMS)

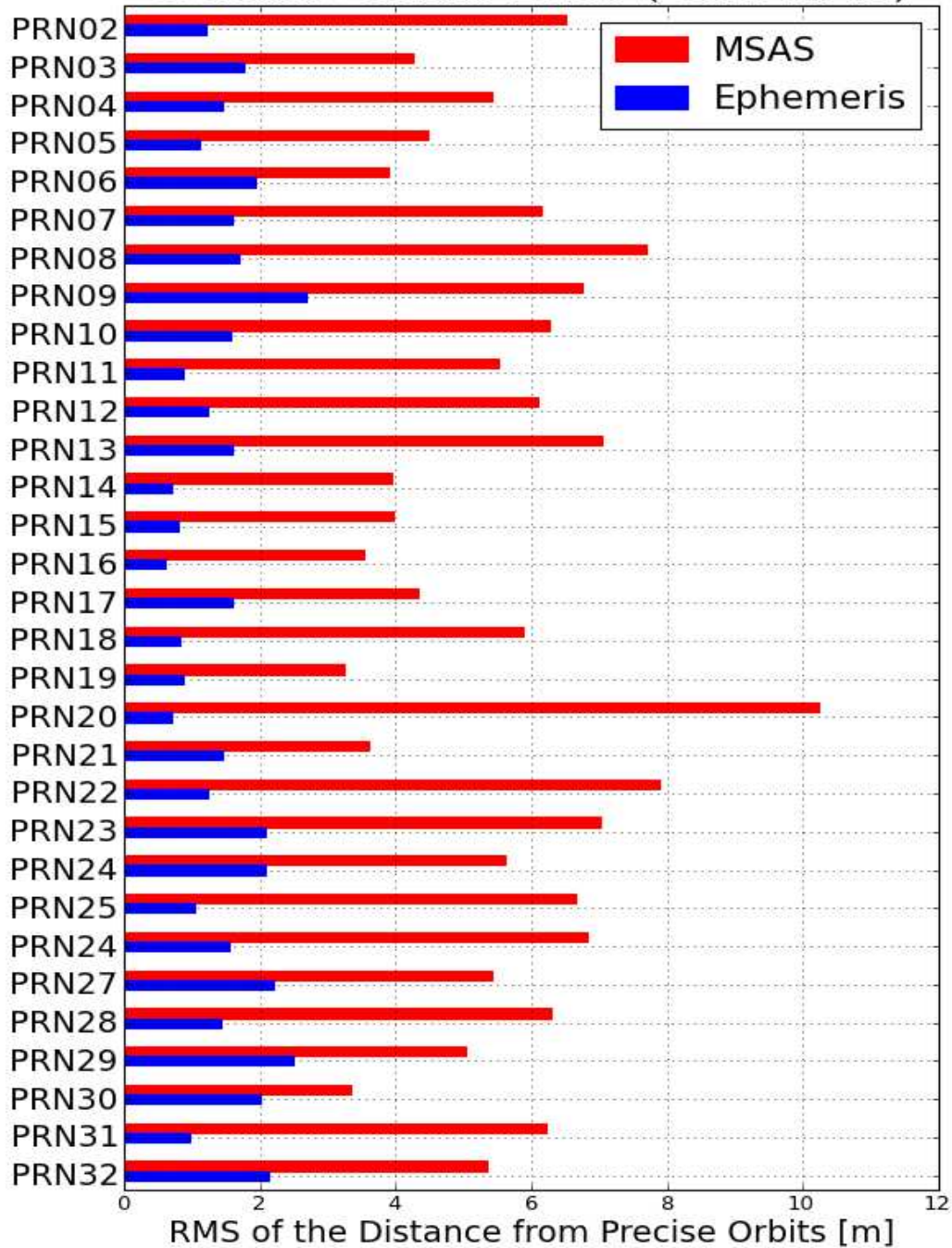


Fig.12 2011年における衛星軌道の真値からの距離(RMS値)

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 Table5 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(高速補正を含む)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。真値とした IGS 精密暦は公証精度が 75ps (RMS)以下の衛星時計データ⁶⁾であり、当研究を行う上で十分な精度を持つものと判断した。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。

72 時間分のグラフプロットは Fig.13, Fig.14 の通り、1 年分の解析結果は Fig.15, Fig.16 の通りである。72 時間のグラフプロットは例として PRN05, 15 のもののみ記載するが、どの衛星についても同様の傾向の結果が得られた。1 年分の解析では、真値に対する誤差の RMS 値と、真値に対する誤差の平均値(Average(Difference)と表記)を計算し、図に表した。なお、定義は以下の通りである。

$$RMS_{(MSAS)} = \sqrt{\frac{1}{EY} \sum_{i=1}^{EY} Diff_{i(MSAS)}^2} \quad (3.3.1)$$

$$Average(Difference)_{(MSAS)} = \frac{1}{EY} \sum_{i=1}^{EY} Diff_{(MSAS)} \quad (3.3.2)$$

$$Diff_{(MSAS)} = |Clock_{(MSAS)} - Clock_{precise}| \quad (3.3.3)$$

ここで、EY は評価期間とした一年間のうちの全エポック数であり、Clock はあるエポックにおける衛星時計である。Clock_(MSAS) は MSAS 補正メッセージを適応して計算された衛星時計、Clock_{precise} は真値とした衛星時計である。なお、Ephemeris から計算された衛星時計の解析結果については、上記 3 式の(MSAS)の部分 Ephemeris のものと読み替えた結果である。

結果より、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る。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く。

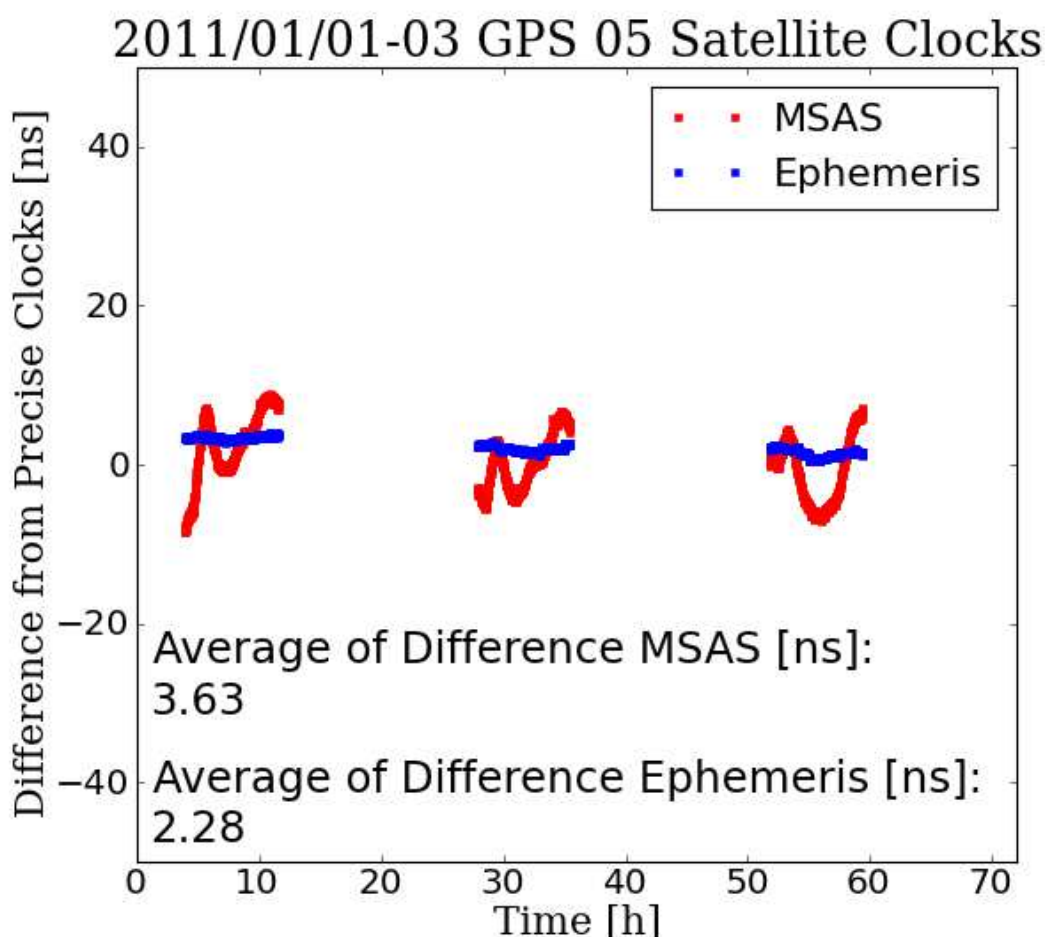


Fig.13 衛星時計の真値に対する誤差(PRN05)

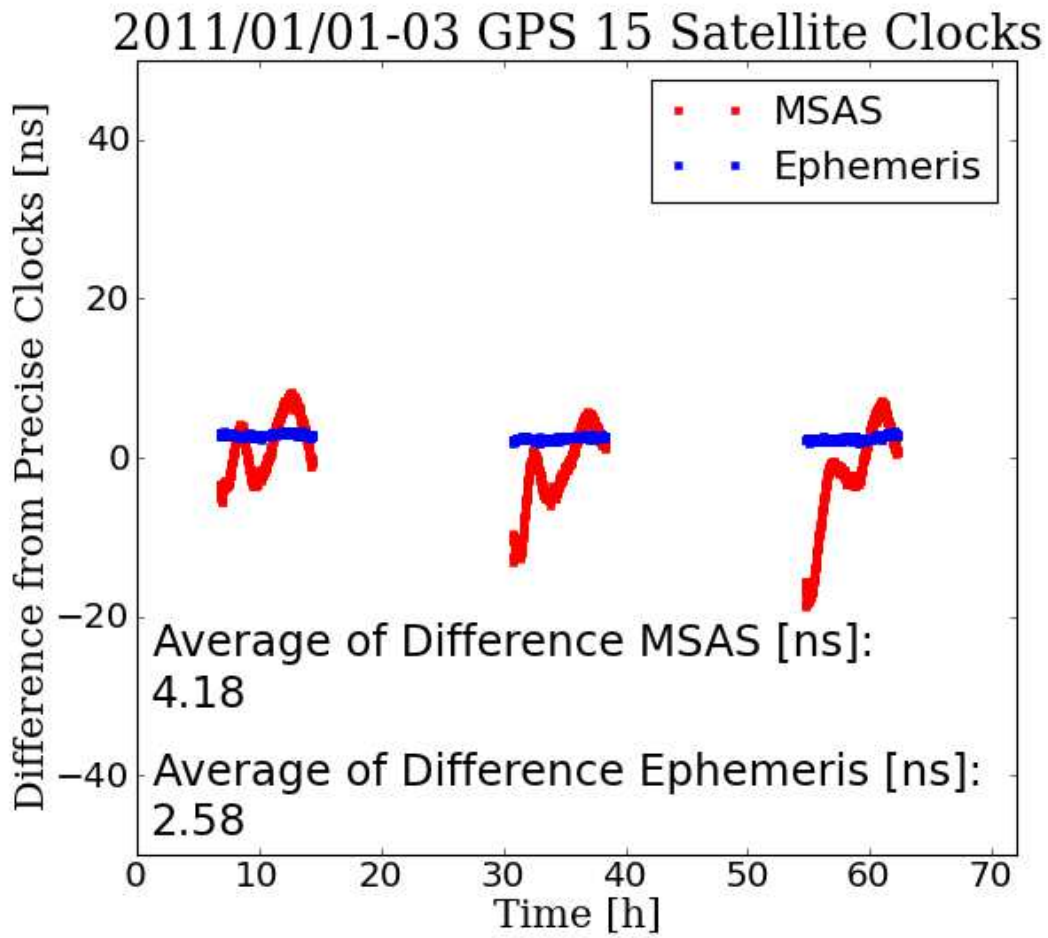


Fig.14 衛星時計の真値に対する誤差(PRN15)

Satellite Clocks Error (2011 Average)

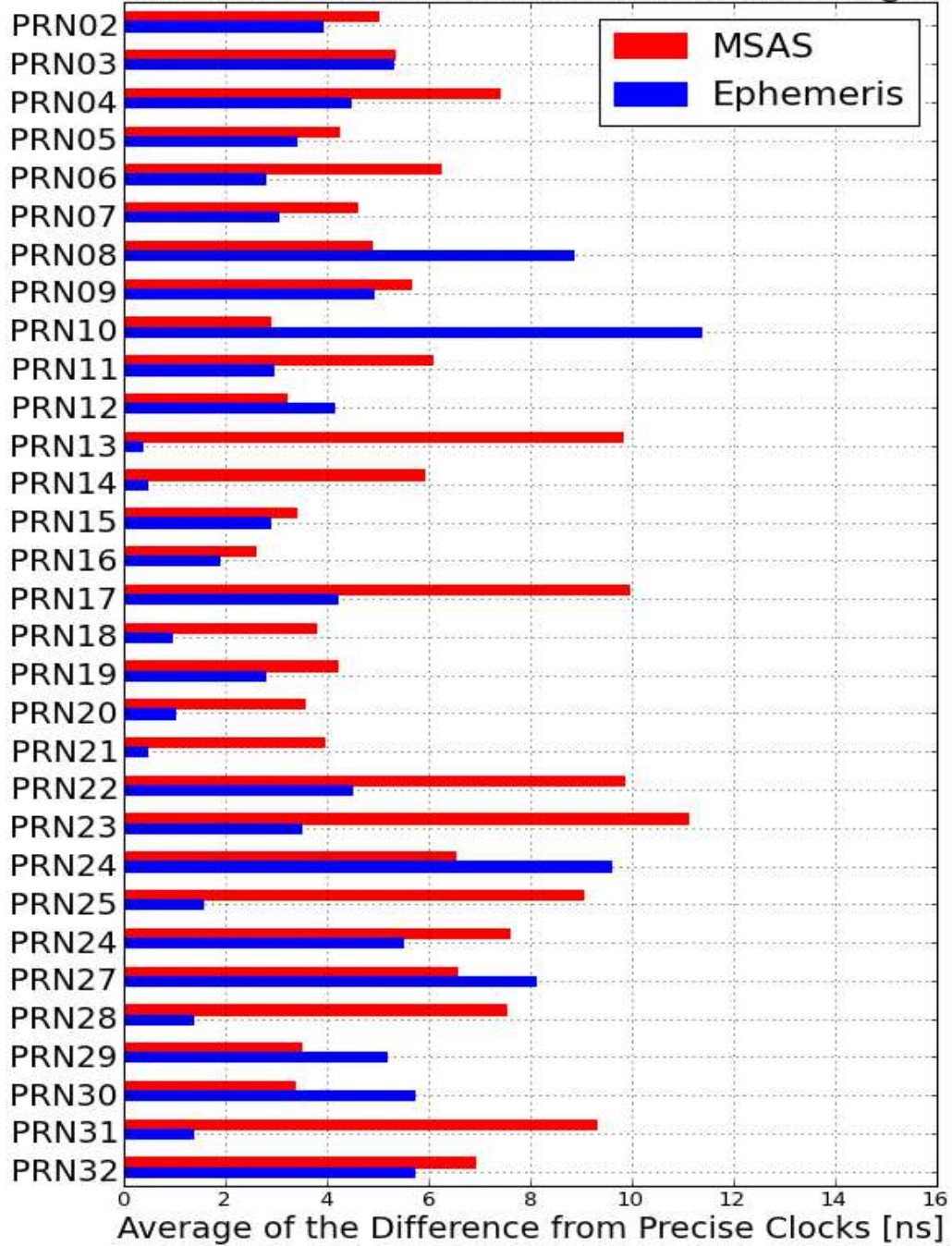


Fig.15 2011 年における衛星時計の真値に対する誤差(平均値)

Satellite Clocks Error (2011 RMS)

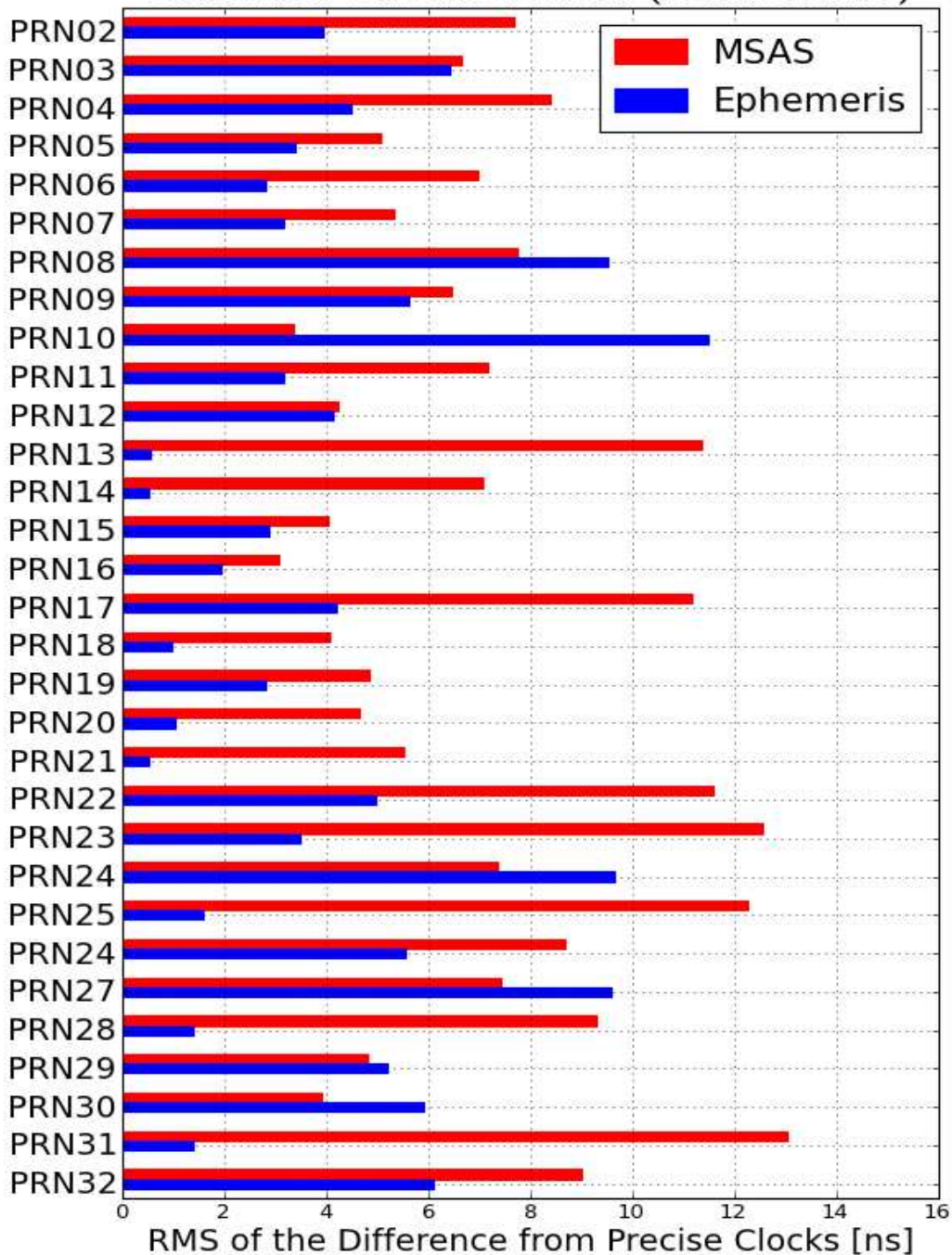


Fig.16 2011 年における衛星時計の真値に対する誤差(RMS 値)

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.17, Fig.18, Fig.19, Fig.20)。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(=MSAS を利用した方が精度が良い)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。

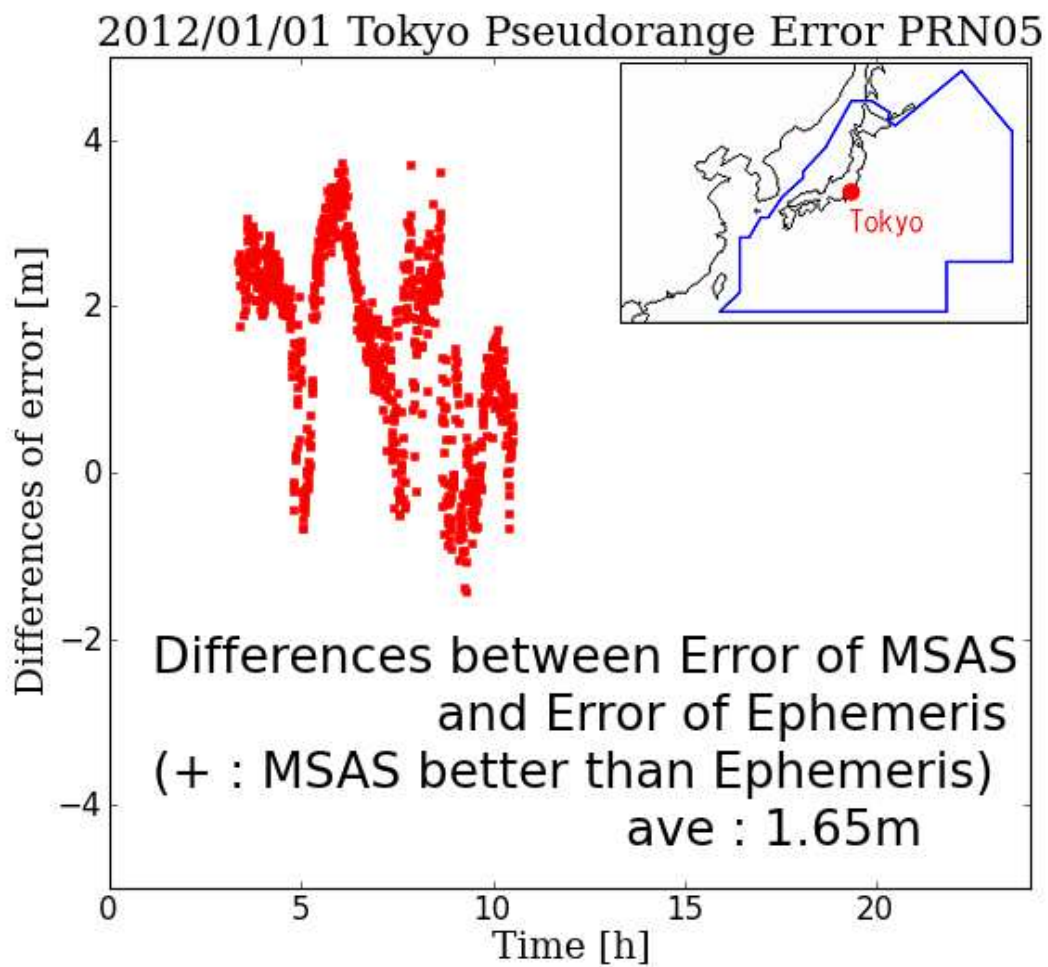


Fig.17 サービスエリア内(日本、東京)における視線方向距離誤差の差(PRN05)

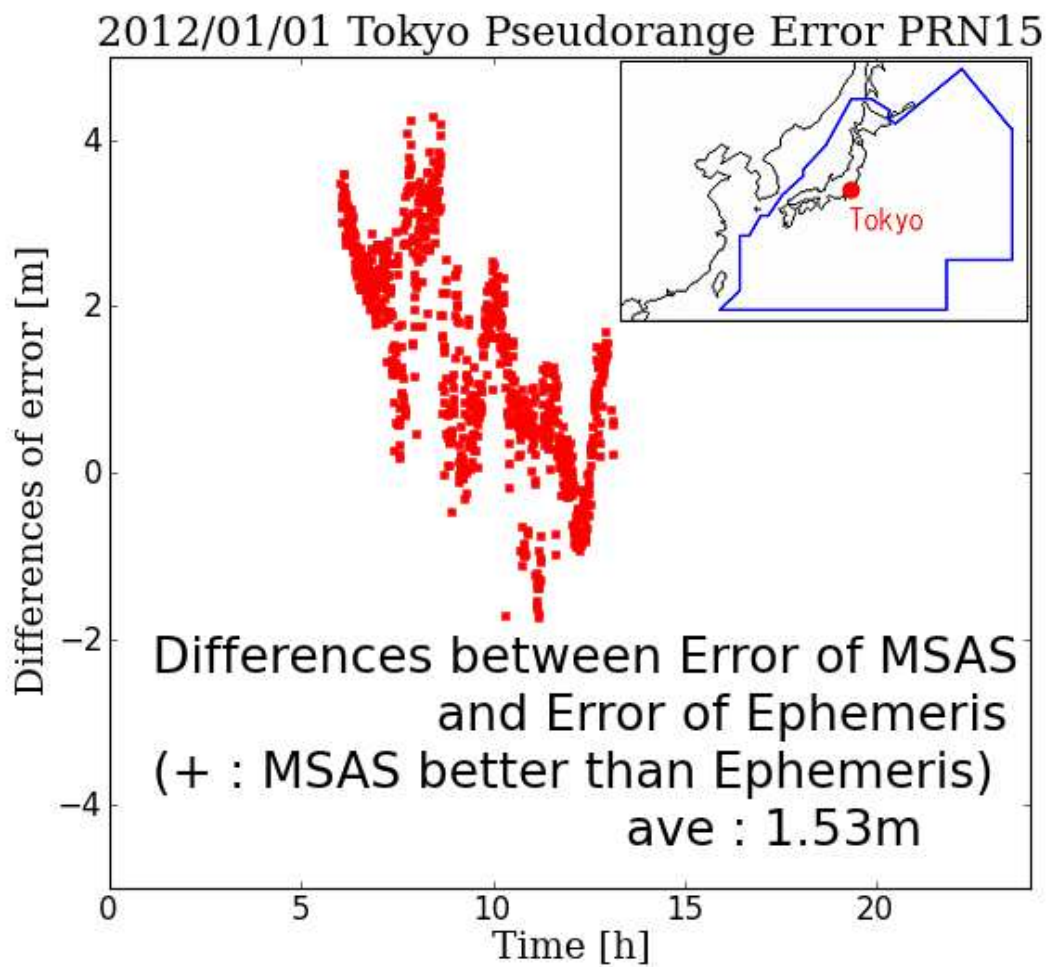


Fig.18 サービスエリア内(日本、東京)における視線方向距離誤差の差(PRN15)

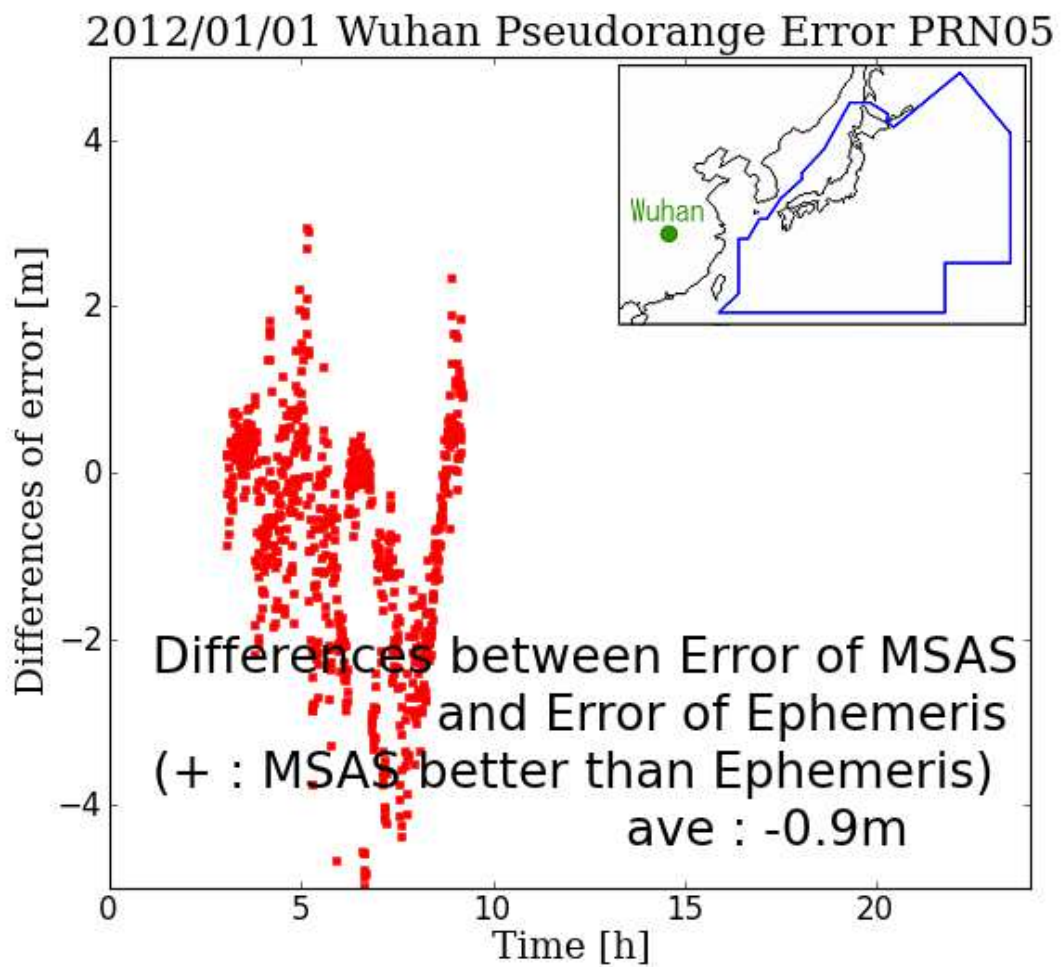


Fig.19 サービスエリア外(中国、武漢)における視線方向距離誤差の差(PRN05)

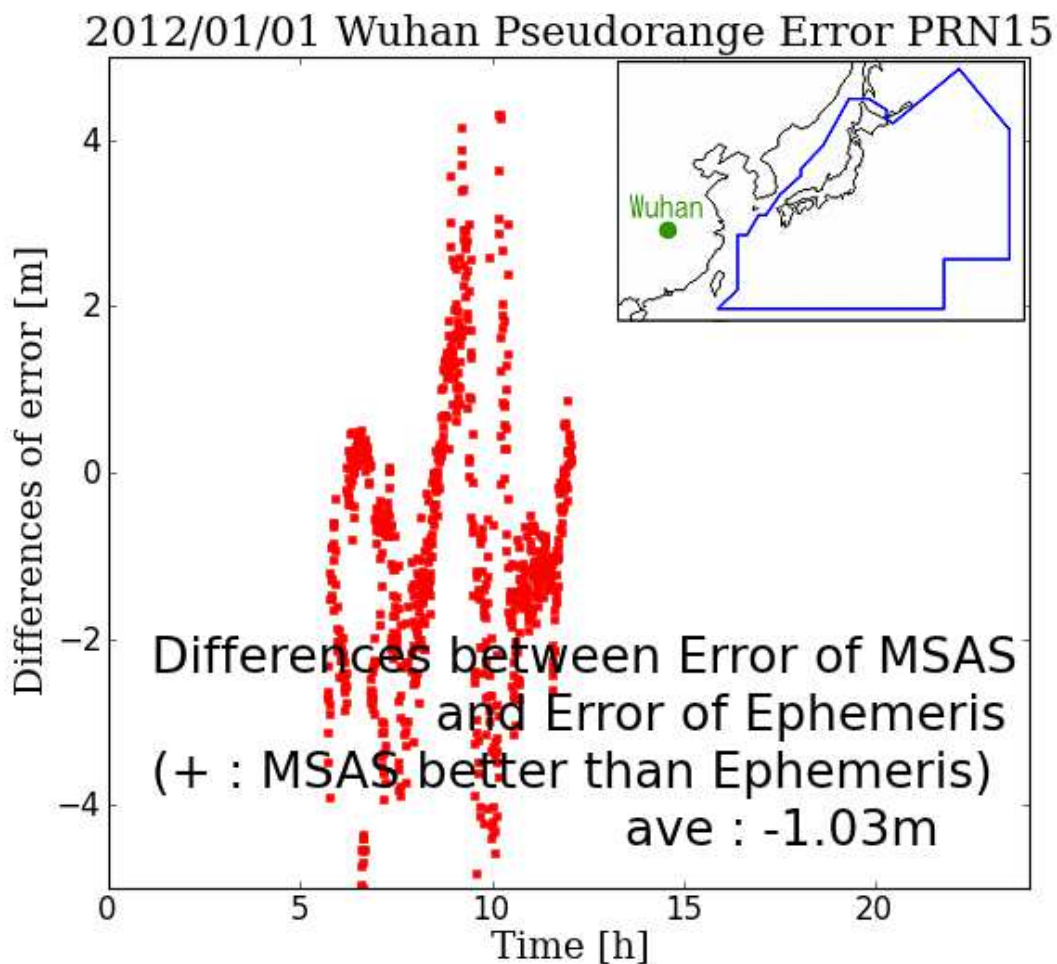


Fig.20 サービスエリア外(中国、武漢)における視線方向距離誤差の差(PRN15)

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、ほとんどの衛星について視線方向距離誤差を増大させる(あるいは、ほとんど改善されない)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 6 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.21, Fig.22 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、測位を行う方がたしかに測位精度が良くなることが確認された。反対に、サービスエリア外(武漢)においては MSAS を用いるとたしかに測位精度が劣化することが確認された。

Table 6 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 Ccorrection	GPS Broadcast	GPS Broadcast
Elevation Mask	5°	5°
Excluded Satellites	なし (MSASの仕様上、利用可能であっ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った衛星を、測位演算から除外)

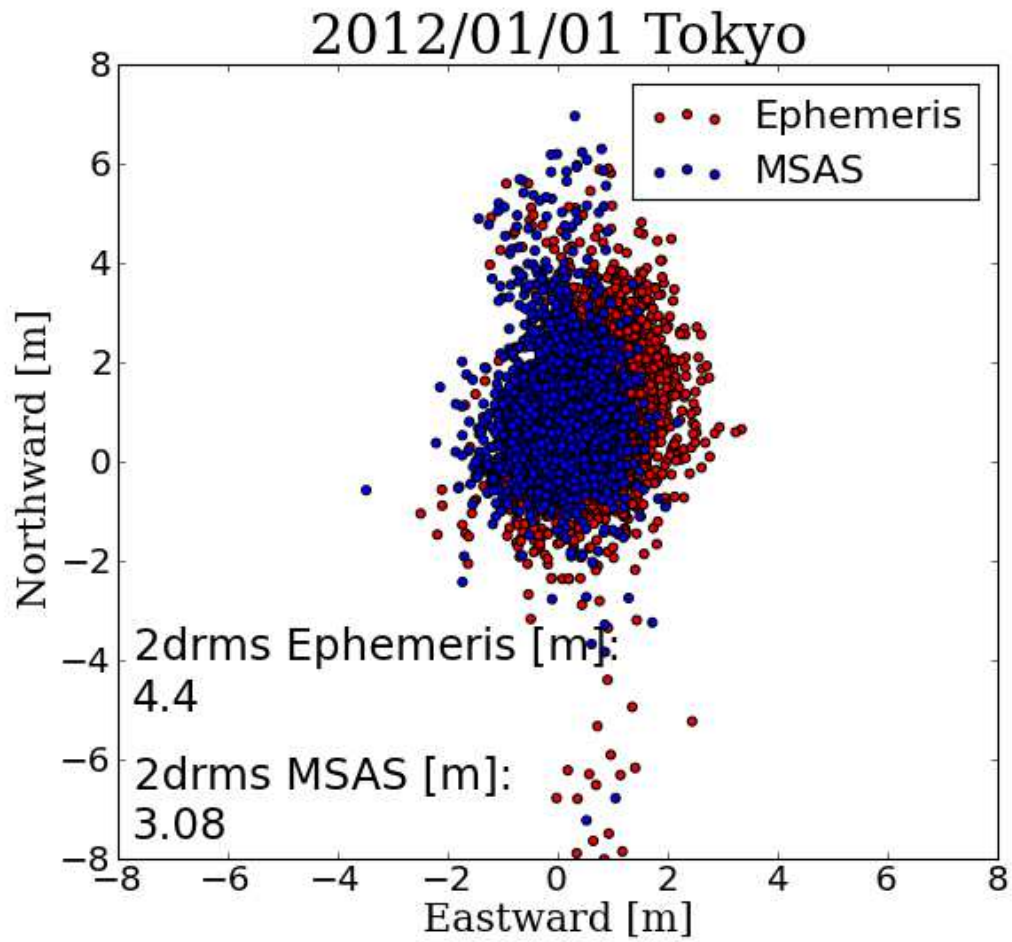


Fig.21 MSAS サービスエリア内における測位結果

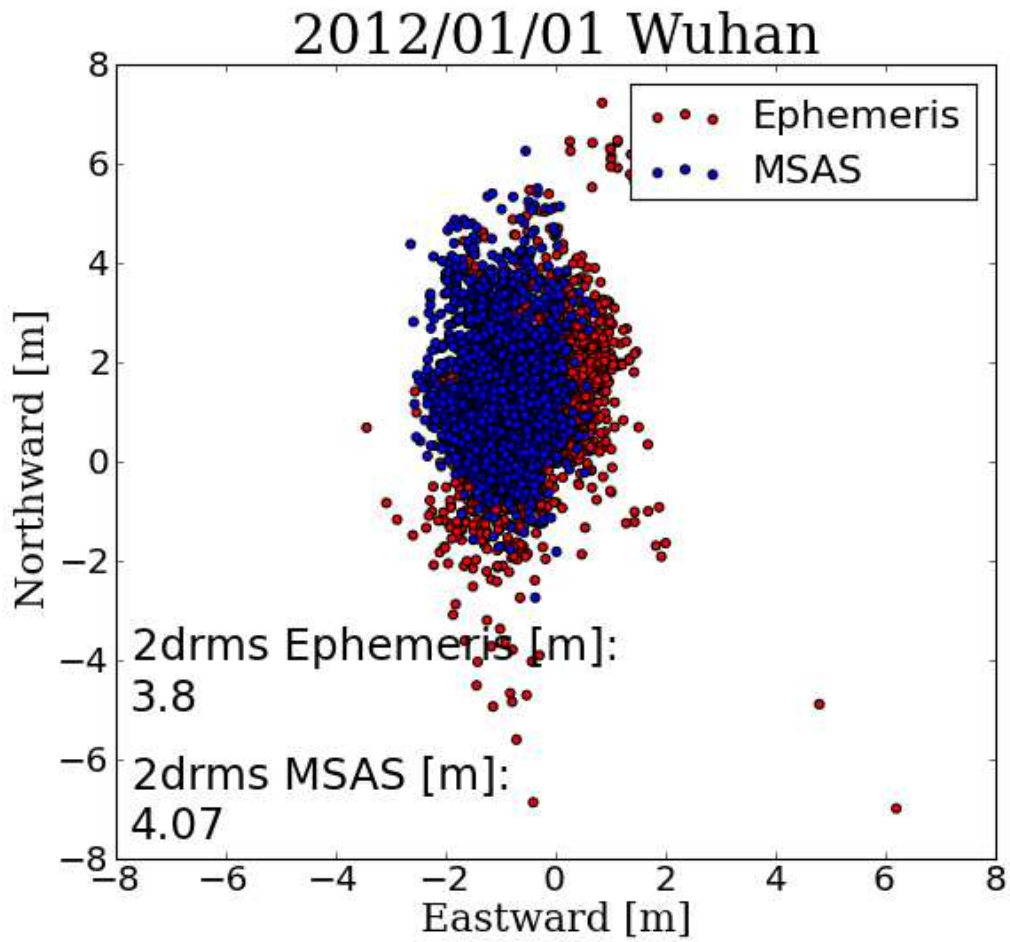


Fig.22 MSAS サービスエリア外における測位結果

第4章 考察

4.1 MSAS の現状と問題点の指摘

3.2 節および 3.3 節より、MSAS 補正メッセージを用いて計算された衛星軌道および衛星時計は真値に対して大きく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衛星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 節および 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。

こうした結果は、MSAS 補正メッセージの生成システムに改善の余地があることを示している。MSAS は地上局で観測された GNSS 観測値から補正メッセージを生成しているが、観測された距離誤差から衛星軌道誤差と衛星時計誤差を推定する際、その分離が十分な精度で行われていないと言える。なおこれら問題点の改善方法としては、補正メッセージ生成アルゴリズムの見直し(特に衛星軌道誤差と衛星時計誤差の推定に関するもの)や、地上観測局の増加(特に広範囲への配置)^[10]が予想される。

4.2 サービスエリア外における MSAS 補正メッセージの利用

本研究より、MSAS 補正メッセージを用いて計算された衛星軌道および衛星時計は真値に対して大きく劣化している事が確認された。これ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を意味し、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 3.5 節より確認された。

MSAS による衛星軌道/時計誤差の補正メッセージは、サービスエリア外で利用すると測位精度が劣化する場合があります、サービスエリア外で利用すべきではないと結論付けたい。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のかについては今後の研究課題とする。

4.3 後発の SBAS が意識すべき課題

本研究により、MSAS の放送する衛星軌道/時計の補正メッセージは、衛星軌道および時計を正確にするものではない事が確認された。これは前述の通り、MSAS 信号がアジアの広範囲で受信できるにも関わらず、サービスエリア(日本近辺)以外のほとんどのエリアで機能しない事を意味する。この問題が”広域”ディファレンシャル補正を謳う SBAS にとって、改善すべき課題であることは明らかであろう。

MSAS 以外の SBAS や SBAS 互換サービスもこの問題を強く意識する必要があると考えられる。特に QZSS L1-SAIF は、この問題を無視すべきではないだろう。QZSS L1-SAIF は MSAS に対して後発のサービスであり、信号の放送地域は MSAS と同様にアジア域、提供サービスも MSAS と競合するからである。L1-SAIF が MSAS との差別化を目指し、アジアおよびオーストラリアという広い地域でユーザを獲得しようとするのであれば、現状のシステムを流用するのではなく、より正確な衛星軌道/時計補正メッセージを生成できるシステムを開発してゆく必要があるだろう。

QZSS L1-SAIF は 2012 年現在、研究開発段階にある。L1-SAIF の現状の調査についても行いたいと思うが、それについては今後の課題としたい。

第5章 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。真値に対する距離の RMS 値は、評価対象とした全 GPS 衛星について、MSAS による衛星軌道が 3.24m から 10.23m であったのに対し、Ephemeris による衛星軌道は 0.61m から 2.69m であった。

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。真値に対する RMS 値は、評価対象とした全 GPS 衛星について、MSAS による衛星時計が 3.07ns から 13.05ns であったのに対し、Ephemeris による衛星時計は 0.50ns から 9.66ns であった。

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場合があると結論づけられる。

以上の理由から、MSAS による衛星軌道/時計誤差の補正メッセージは、測位精度を劣化させる場合があるため、サービスエリア外では利用すべきでないと結論づけられる。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。また、QZSS L1-SAIF についても今後同様に評価を行いたいと考えている。

謝辞

本研究を行うにあたり熱心なご指導をしていただき、また著者を叱咤激励してくださいました、東京海洋大学の樊春明先生に厚くお礼申し上げます。また、特に数学的な知見から多くのご指導をいただきました東京海洋大学上野公彦先生に心よりお礼申し上げます。本稿を執筆するにあたり、工学的な知見からの的確なご指摘やアドバイスをいただきました東京海洋大学の柿原利治先生に深くお礼を申し上げます。至らぬ点の多い学生でしたが、なんとか研究を形にすることができました。ありがとうございます。

GNSSに関する多くのアドバイスや、本研究についてのご指摘を賜りました東京海洋大学の高須知二先生に厚くお礼申し上げます。お忙しい中ありがとうございました。また、多くの先生方にお会いする場や研究を進める機会を提供してくださいました東京海洋大学の安田明生先生に心よりお礼申し上げます。

SBAS や QZSS L1-SAIF について、何度も丁寧な解説をしていただきました電子航法研究所の坂井丈泰様に厚くお礼申し上げます。突然のメールにも関わらず、親切な対応をしていただきありがとうございました。

また日頃よりお世話になっております研究室の先輩方、後輩の皆様にもお礼を申し上げます。おかげさまで、毎日楽しく研究が出来ました。

参考文献

[1] Global Positioning System Wing (GPSW) Systems Engineering & Integration Interface Specification IS-GPS-200 Revision E, 8 June 2010, Global Positioning Systems Wing

<http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200E.pdf>

[2] 準天頂衛星システム ユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS) 1.3 版 J, 2011 年 6 月 22 日, 宇宙航空研究開発機構

<http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/>

[3] MSAS の性能向上について(その 2), 2008 年 6 月, 電子航法研究所 坂井丈泰・松永圭左・吉原貴之・伊藤実・星野尾一明

<http://www.enri.go.jp/~sakai/pub/h21-14p.pdf>

[4] 国土交通省 情報区(FIR)及び管制部管轄空域

http://www.mlit.go.jp/koku/15_bf_000339.html

[5] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment (DO-229C), November 28, 2001, RTCA, Inc

[6] IGS Products

<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

[7] IGS Multi GNSS Experiment

<http://igs.org/mgex/>

[8] ENRI SatNav Group

<http://www.enri.go.jp/~sakai/index.htm>

[9] The IGS Tracking Network

<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/complete.html>

[10] 静止衛星を利用する測位システムに関する研究, 1997 年, 樊春明, 東京水産大学大学院平成九年度博士論文

[11] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning
(RTKLIB ver. 2.4.1)

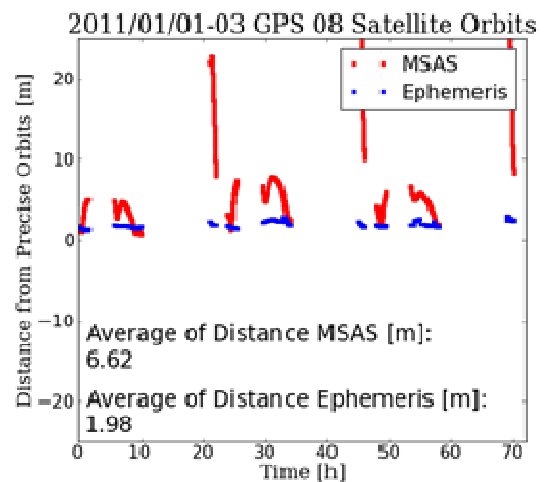
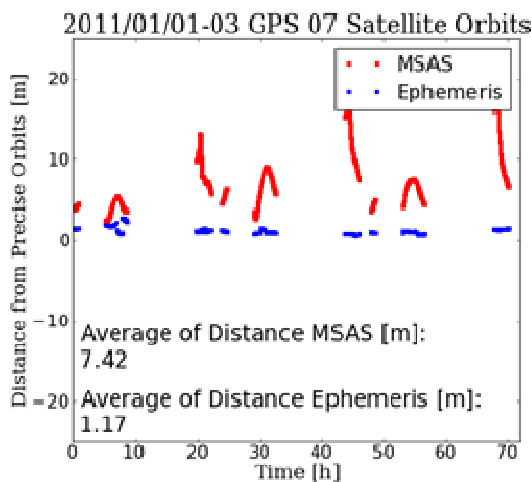
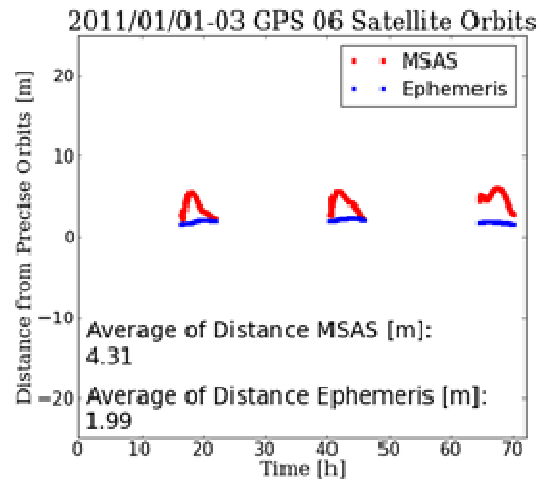
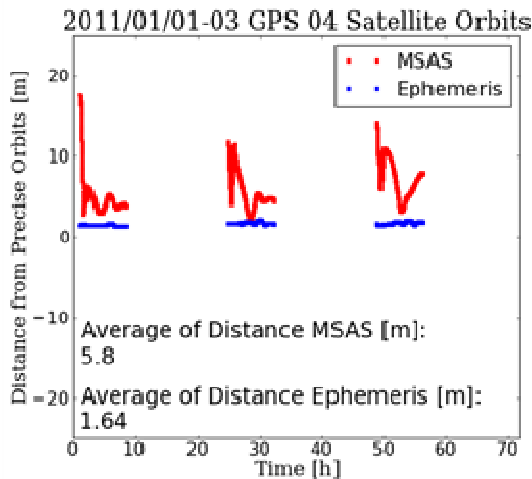
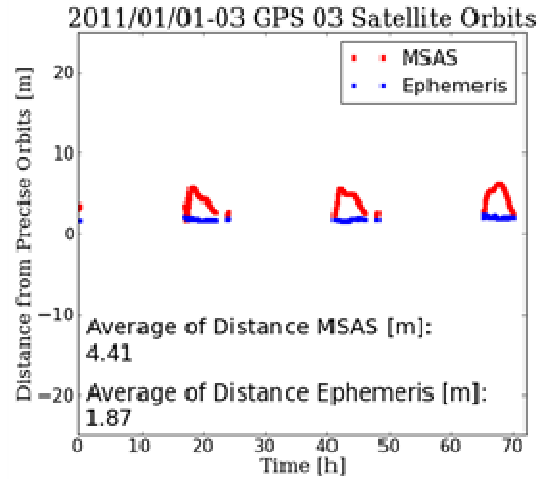
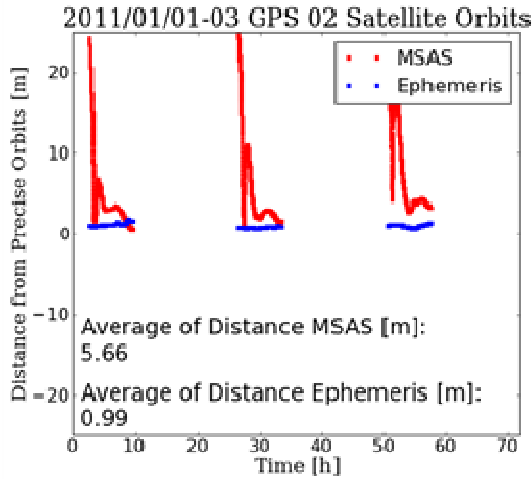
<http://www.rtklib.com/>

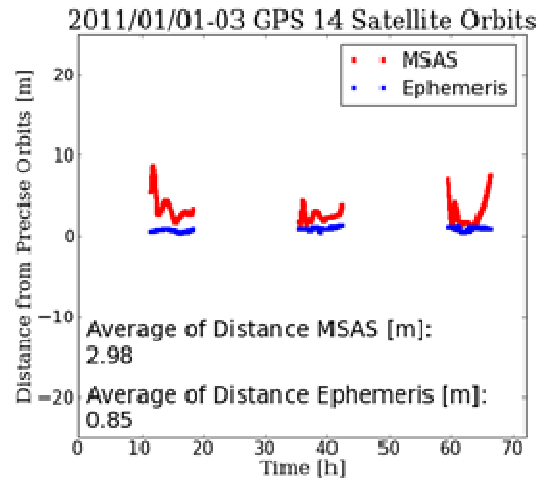
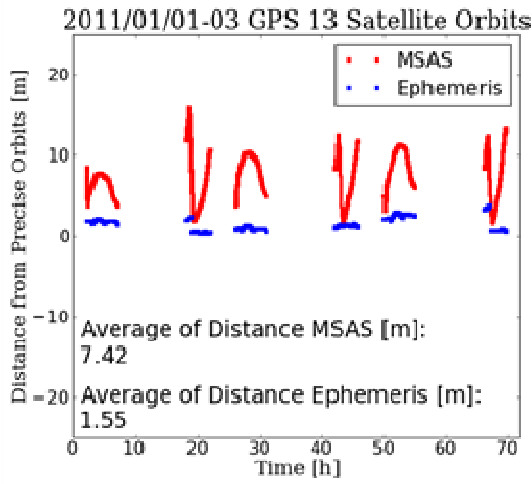
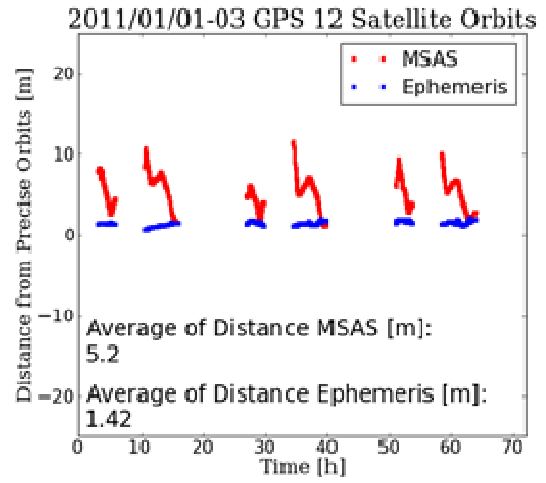
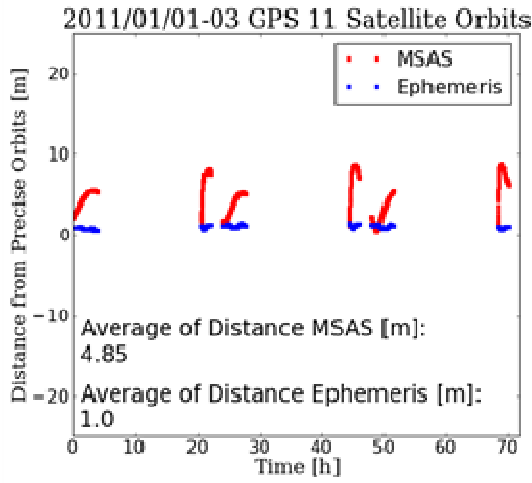
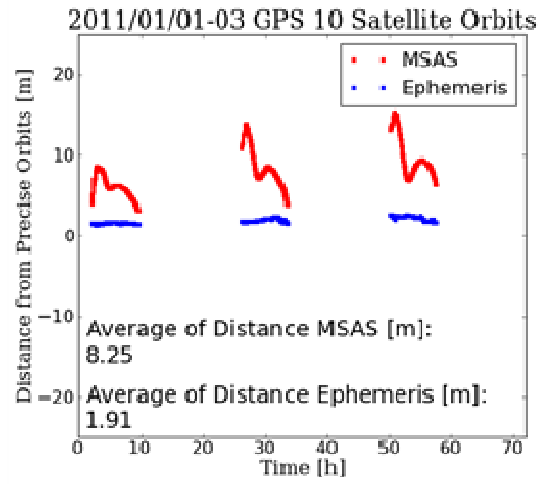
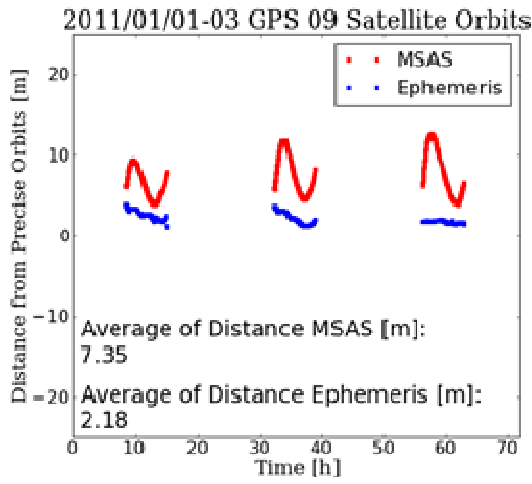
[12] 精説 GPS 改定第 2 版, 2010 年 4 月 1 日, Pratap Misra and Per Enge 原著, 測位航法学会 訳, 松香堂書店

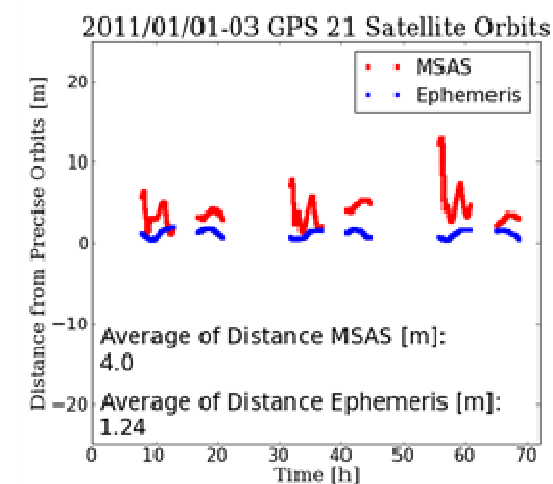
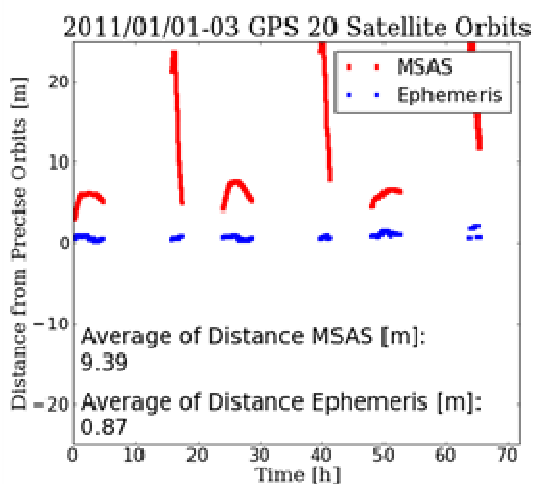
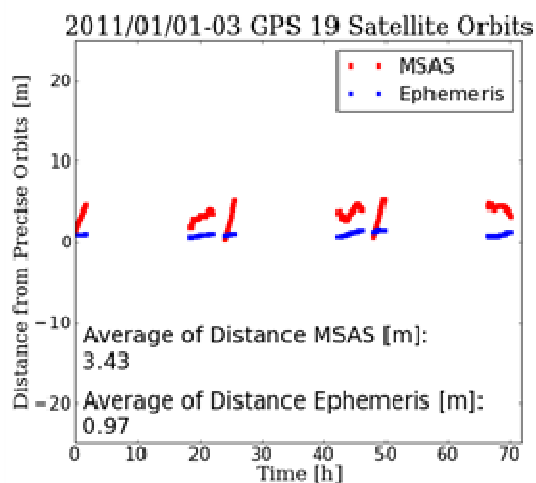
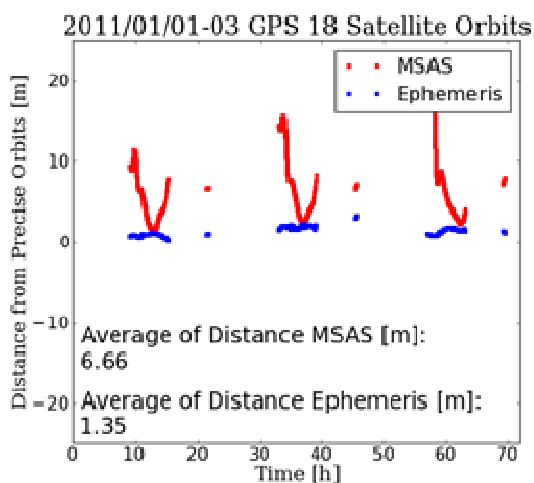
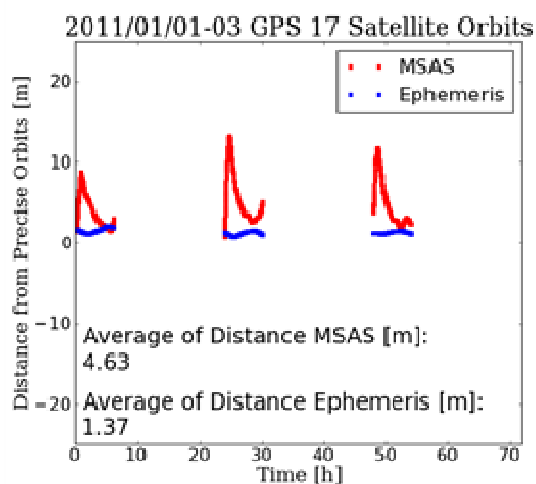
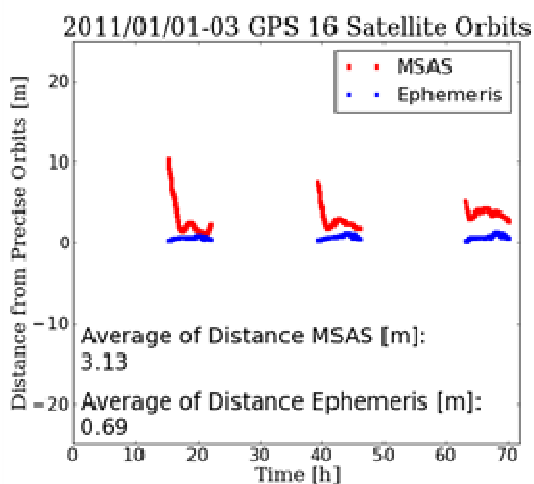
[13] GPS 技術入門, 2003 年 2 月 28 日, 坂井丈泰, 東京電機大学出版局

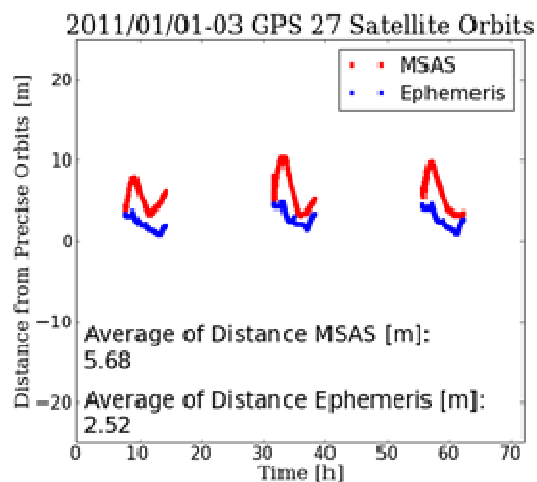
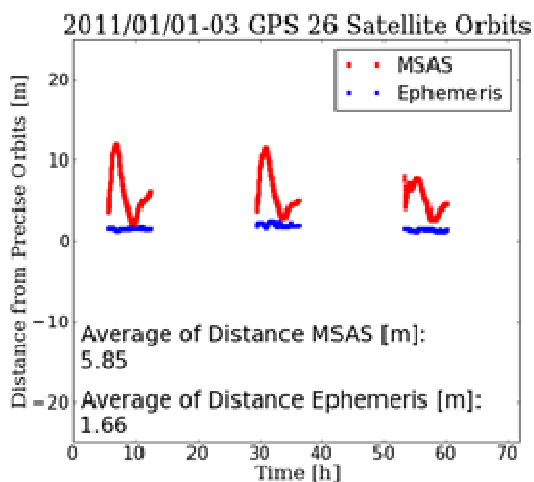
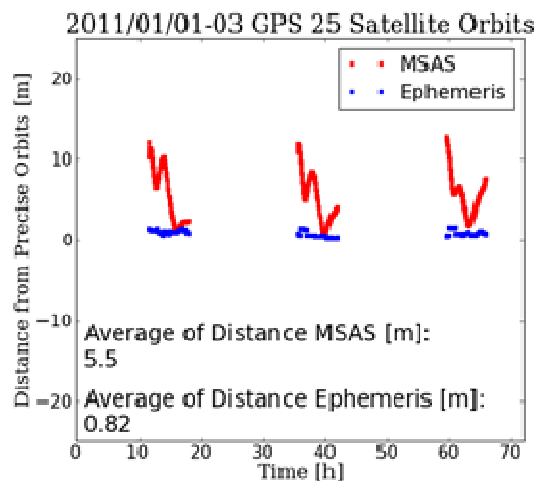
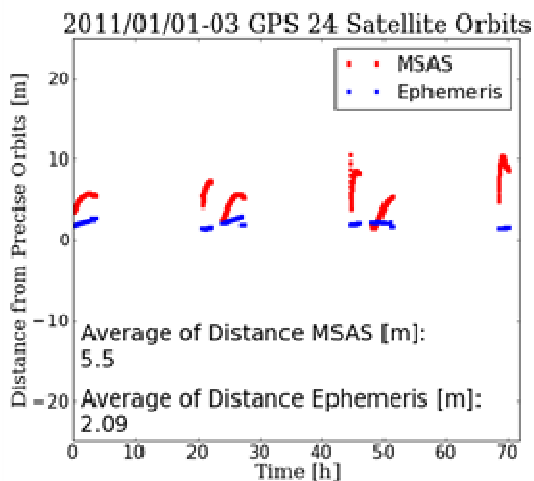
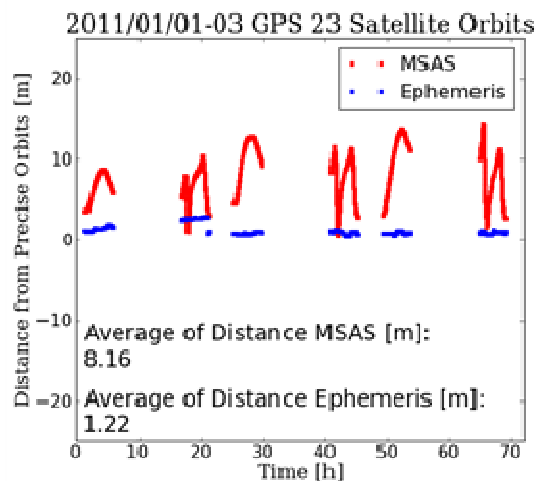
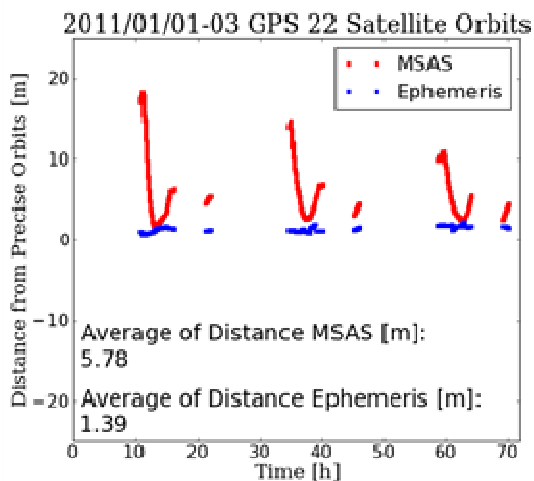
付録 1 衛星軌道の真値からの距離

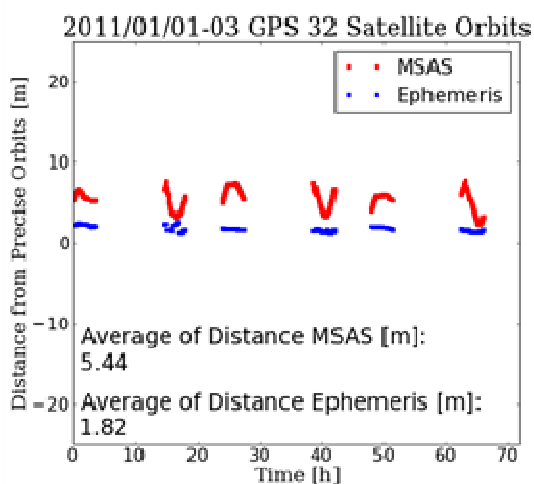
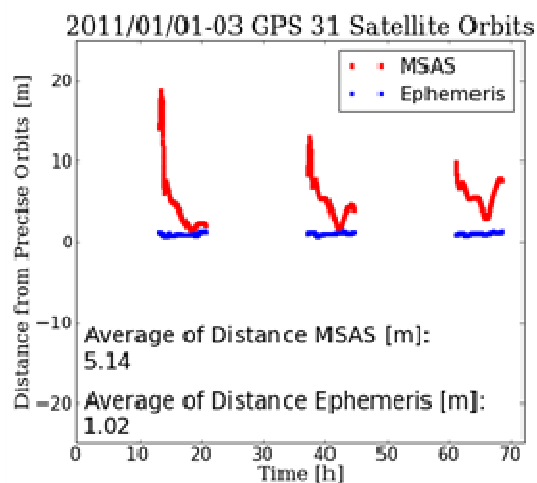
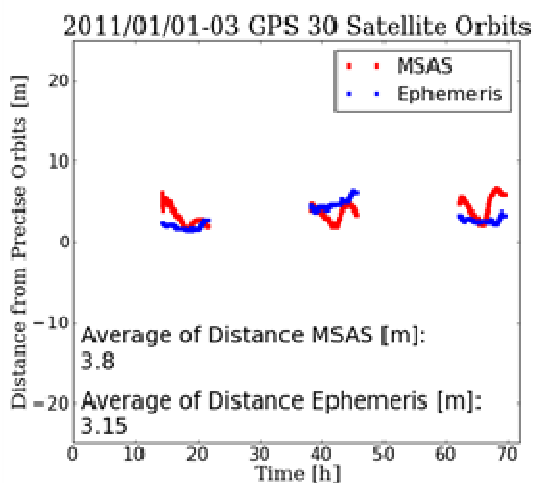
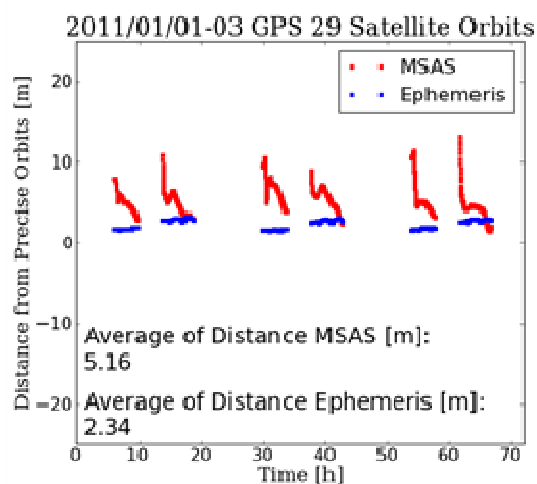
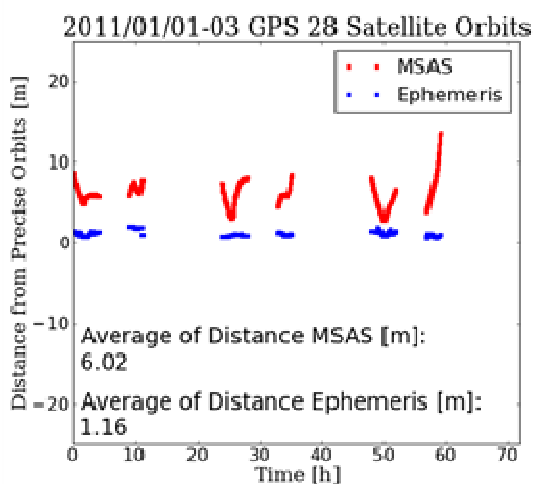
※本文掲載の PRN5, 15 と 2011/01/01-03 に MSAS の補強対象外であった PRN1 を除く





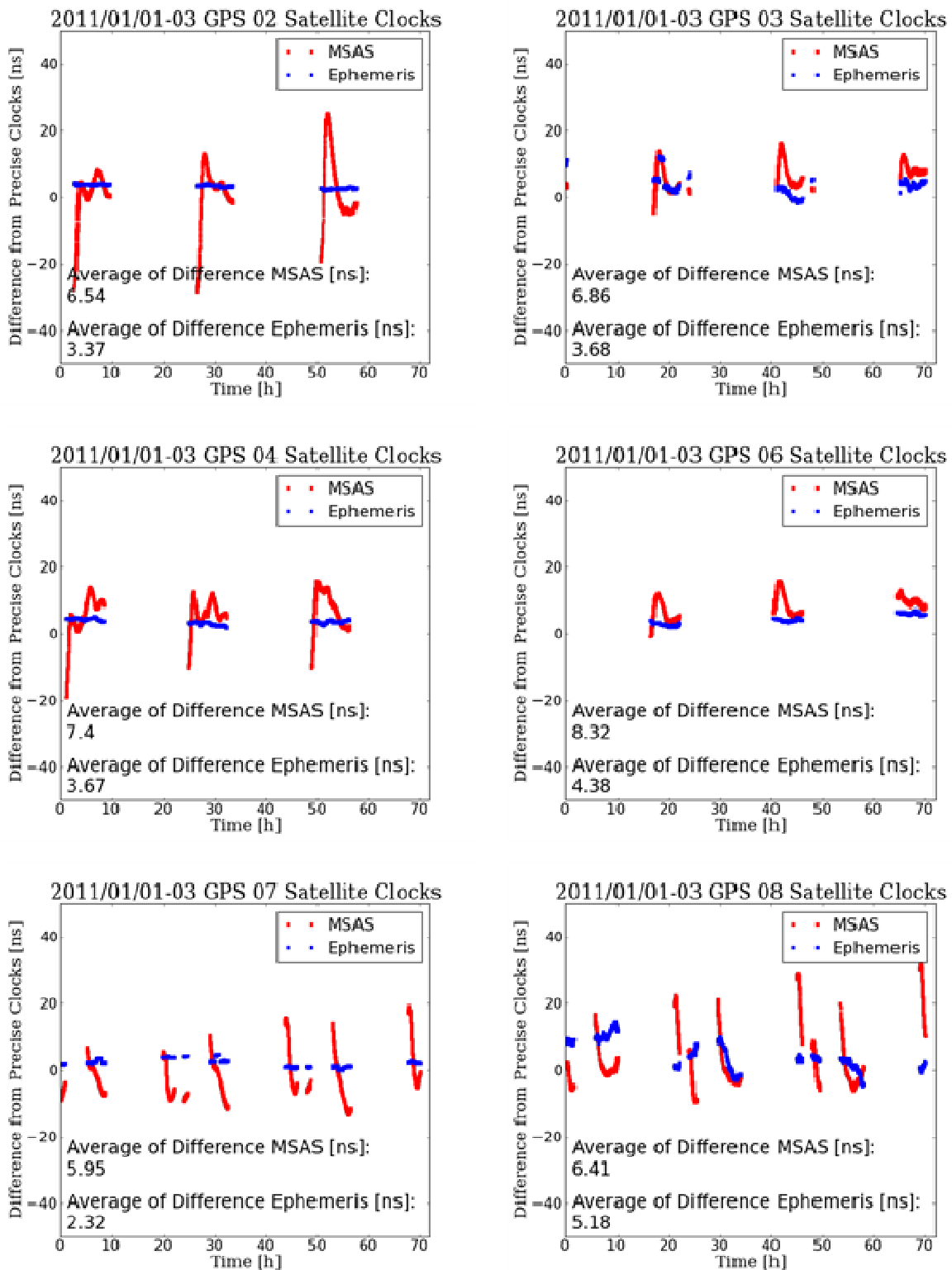


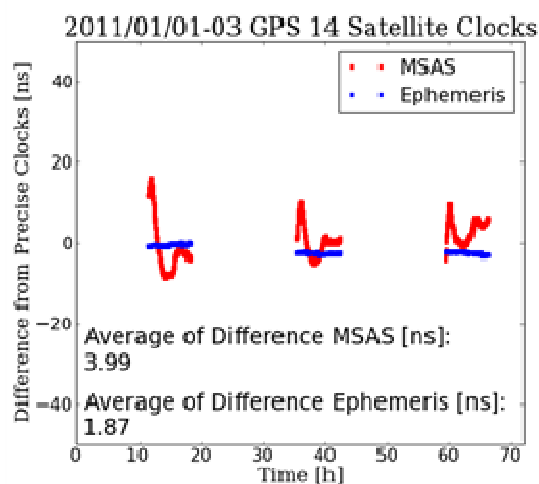
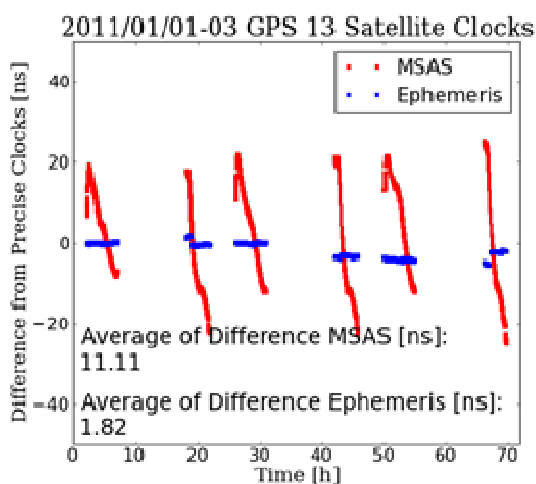
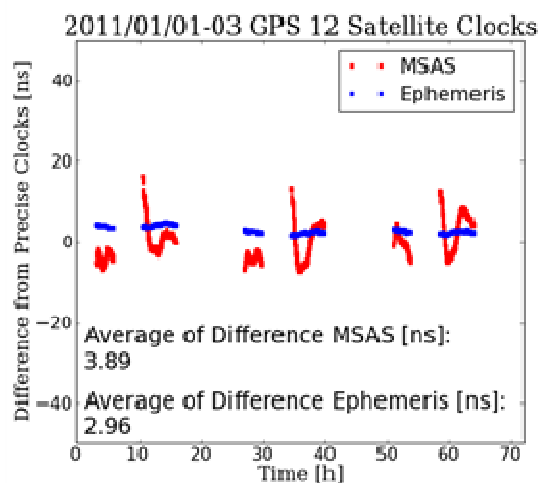
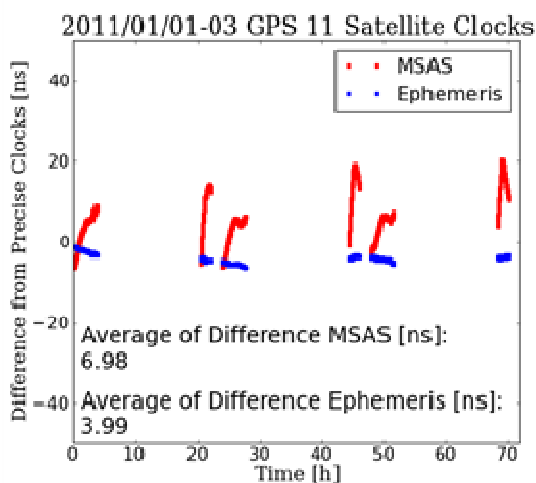
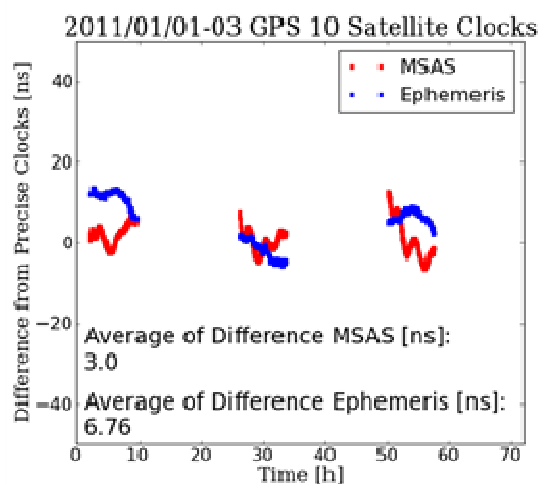
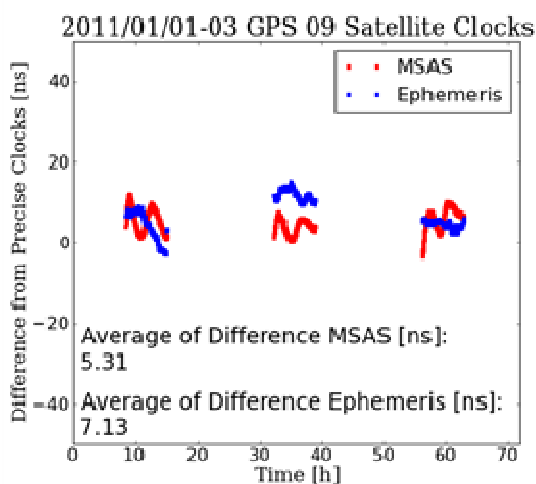


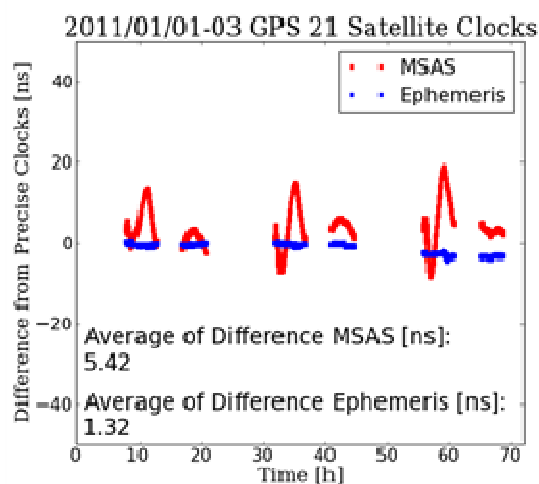
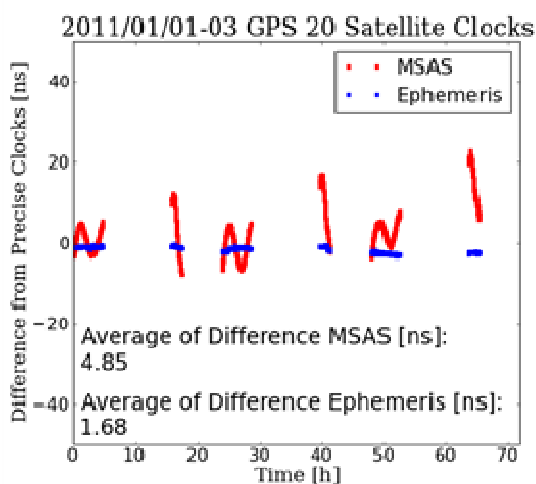
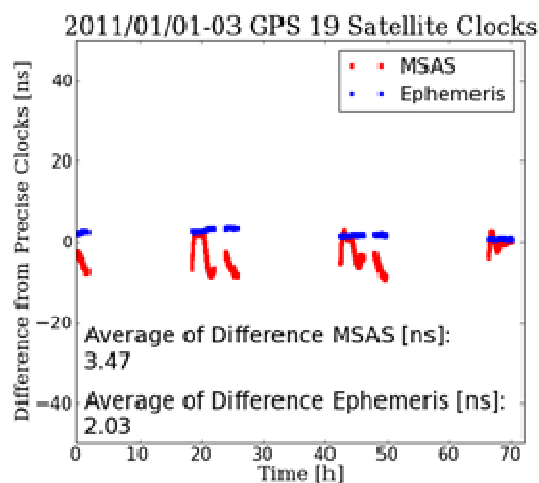
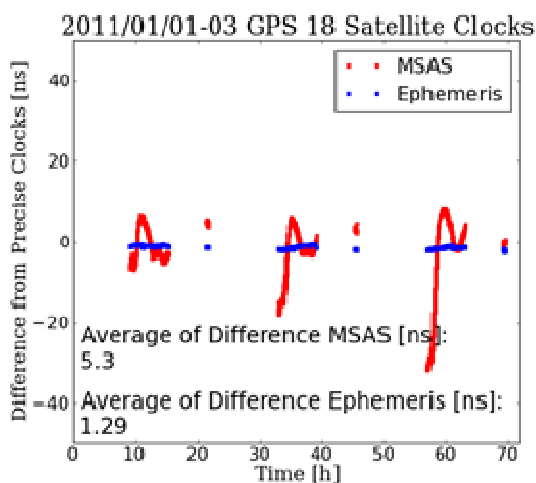
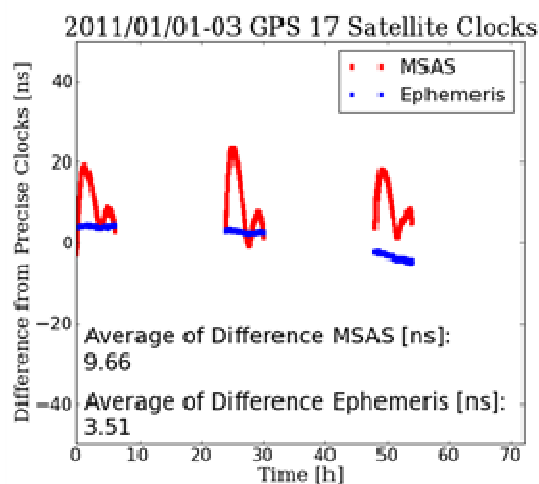
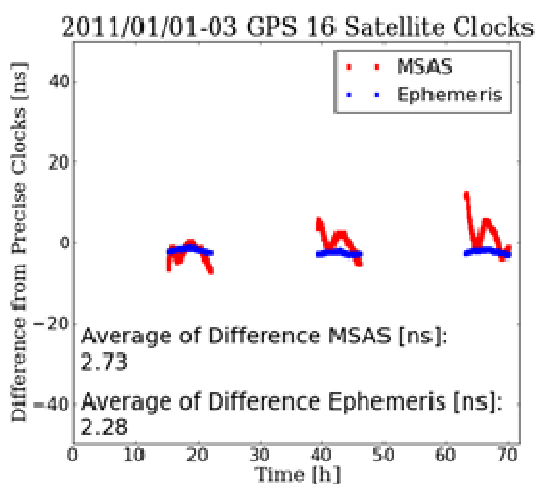


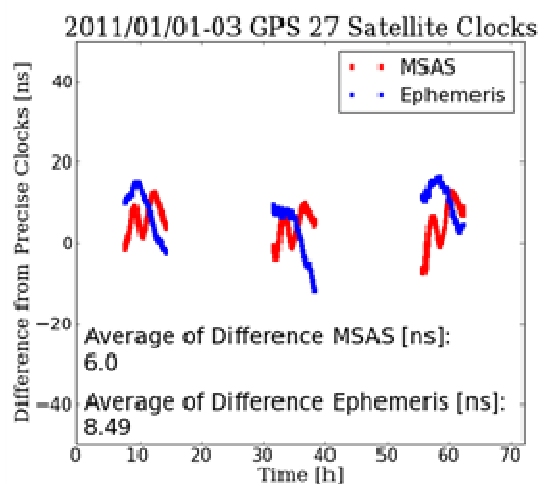
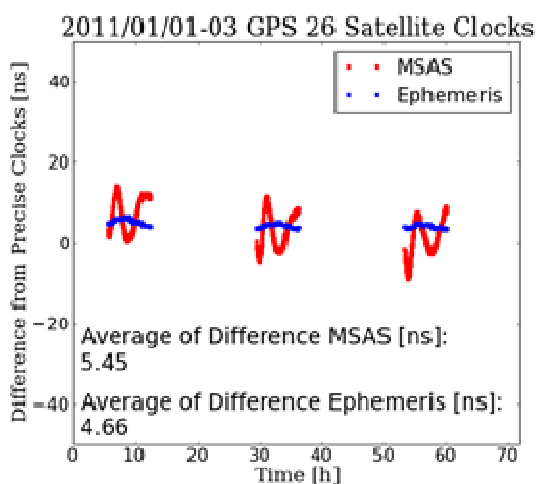
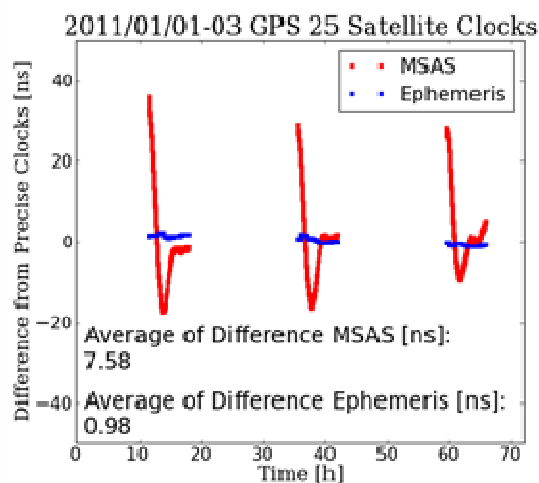
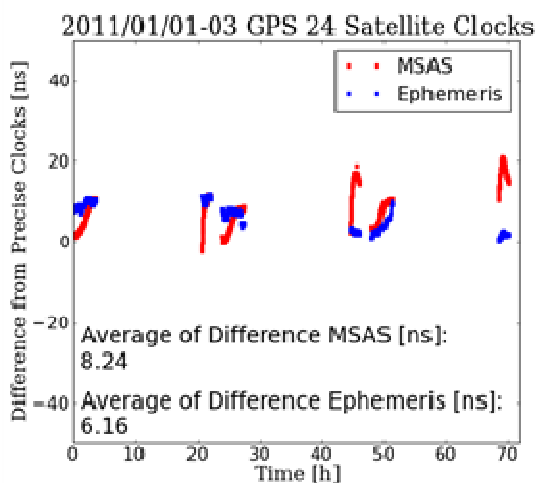
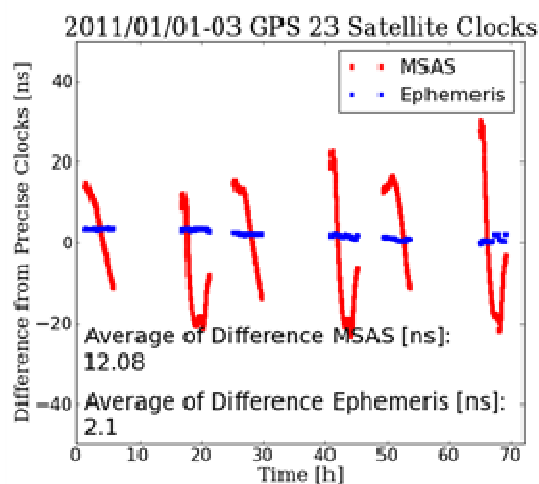
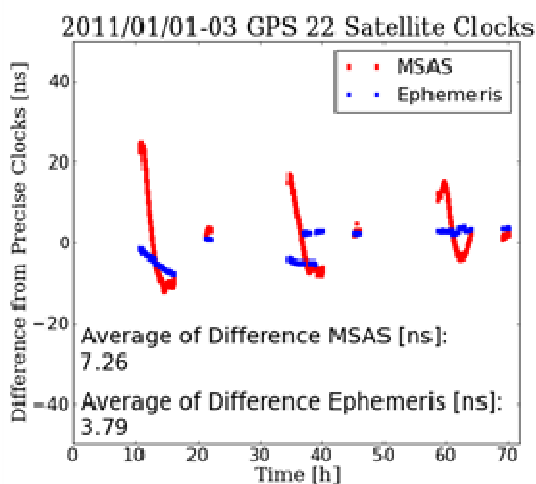
付録 2 衛星時計の真値に対する誤差

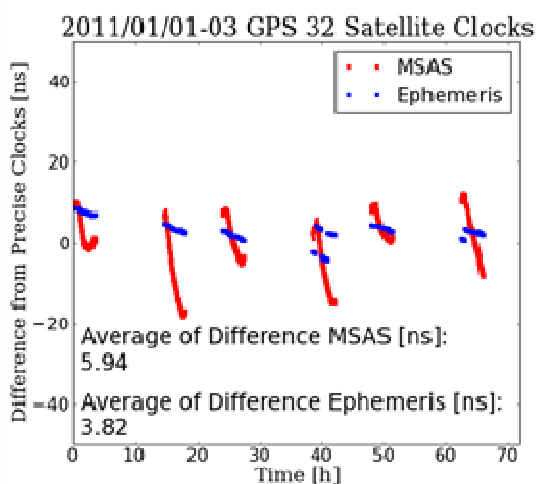
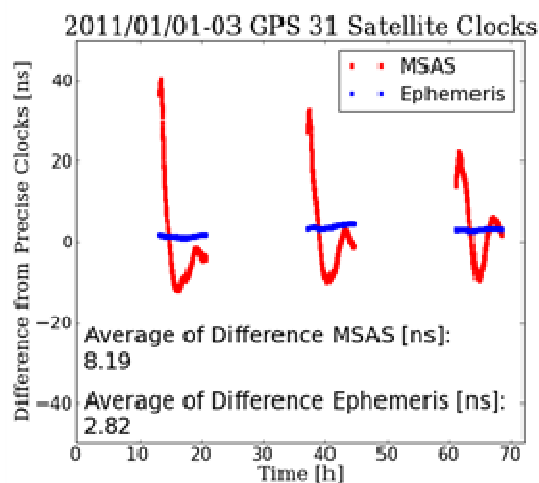
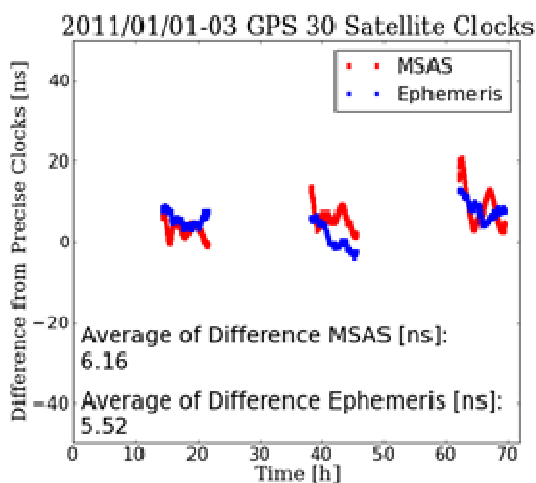
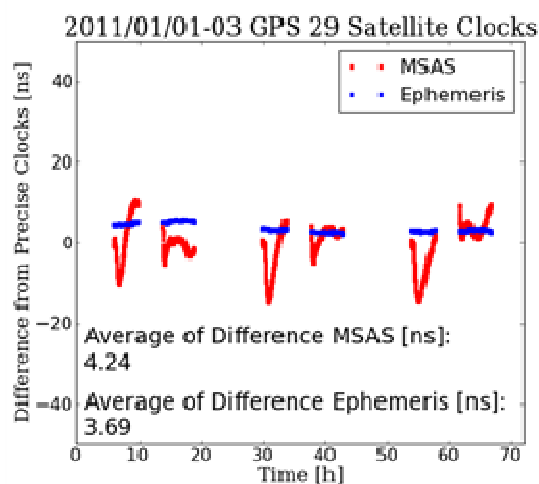
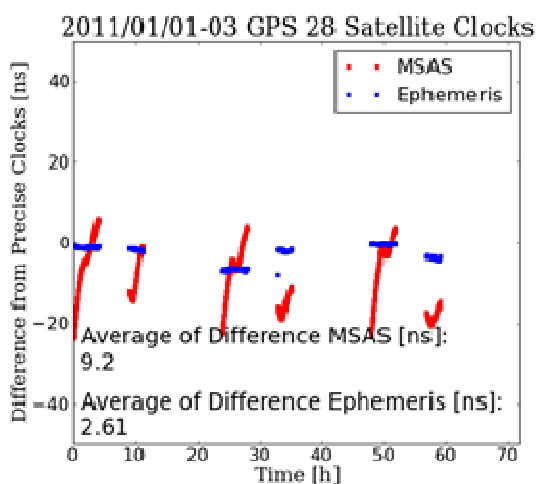
※本文掲載の PRN5, 15 と 2011/01/01-03 に MSAS の補強対象外であった PRN1 を除く





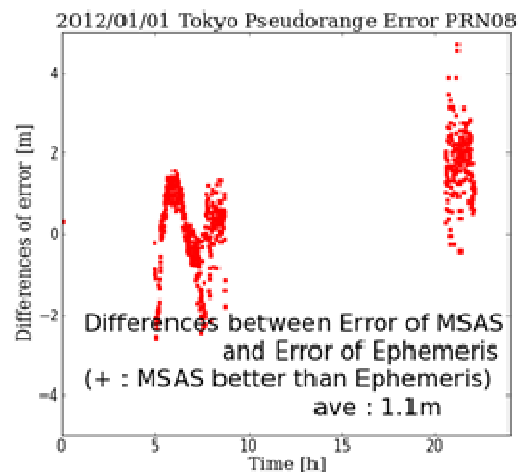
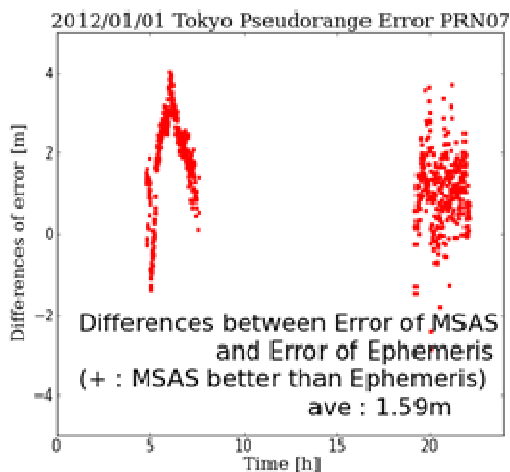
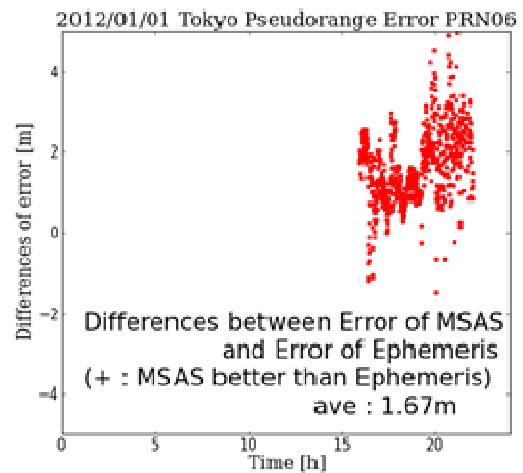
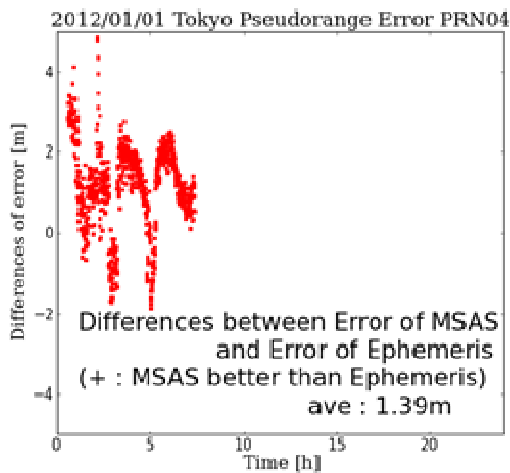
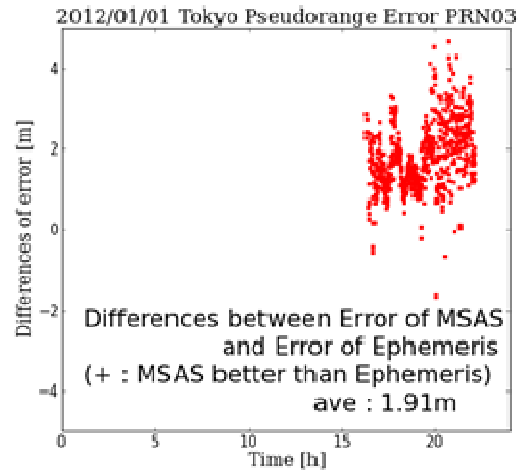
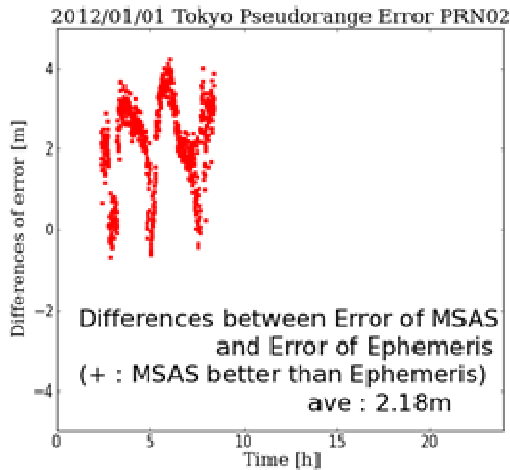


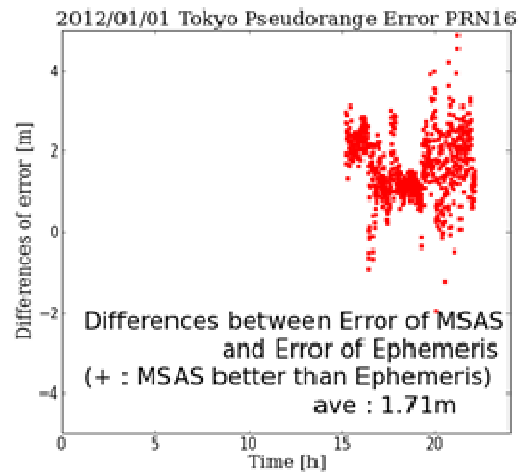
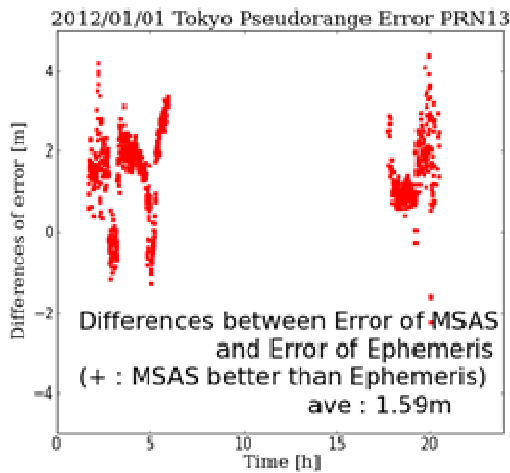
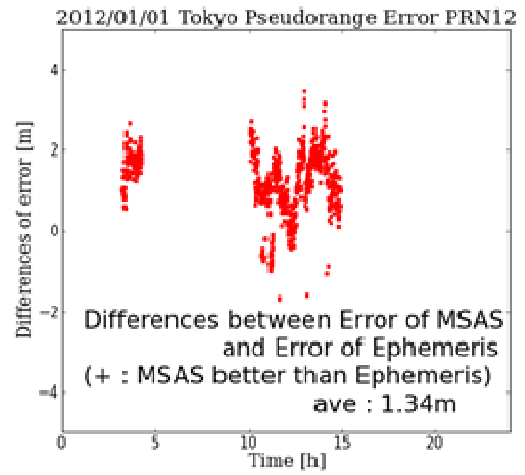
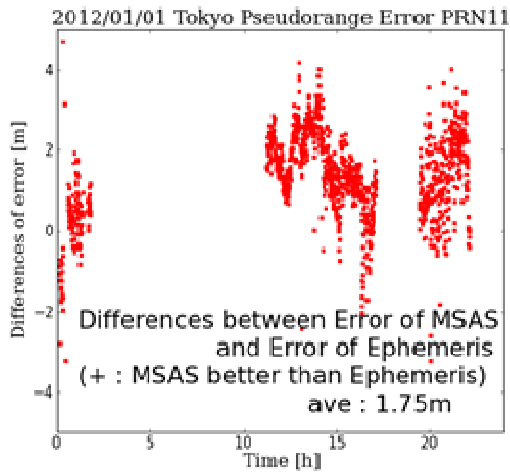
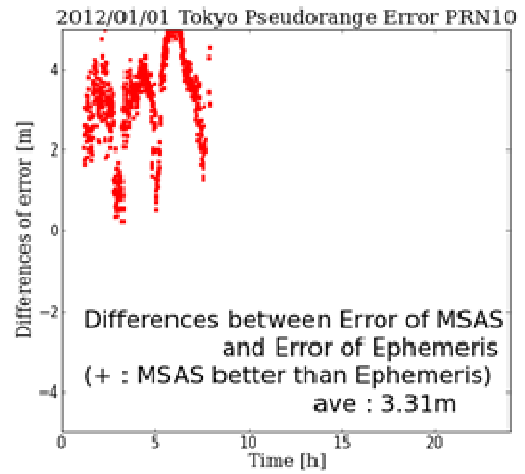
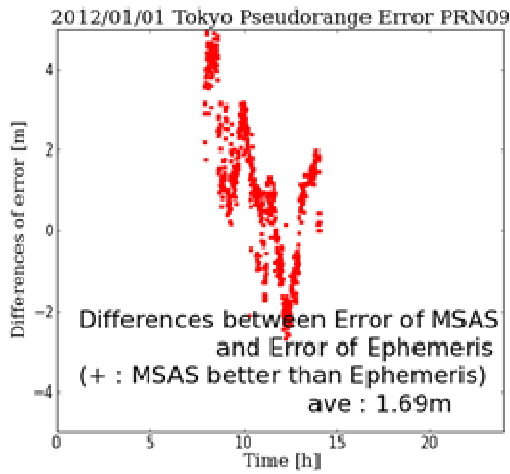


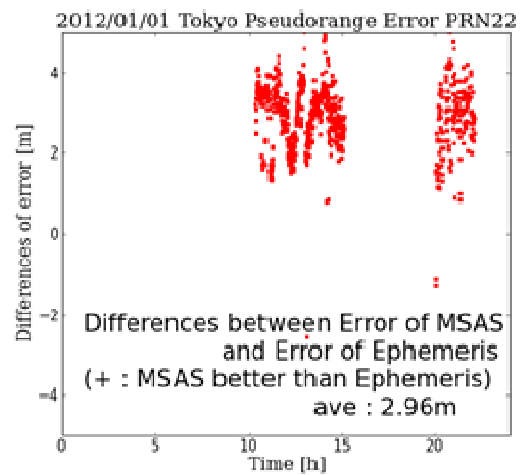
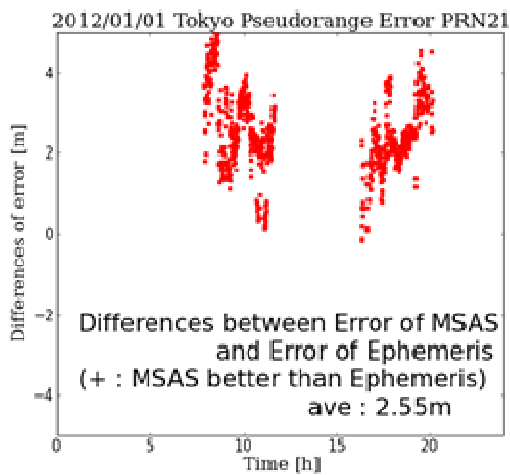
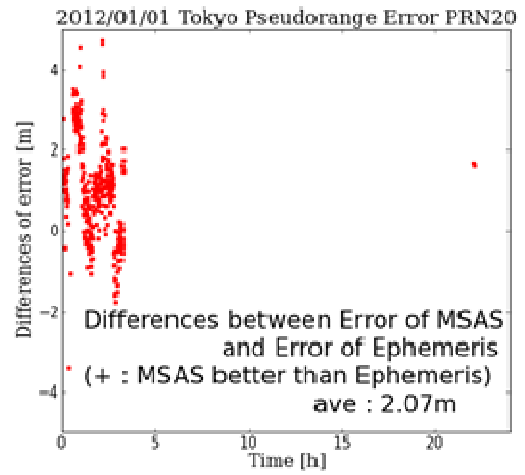
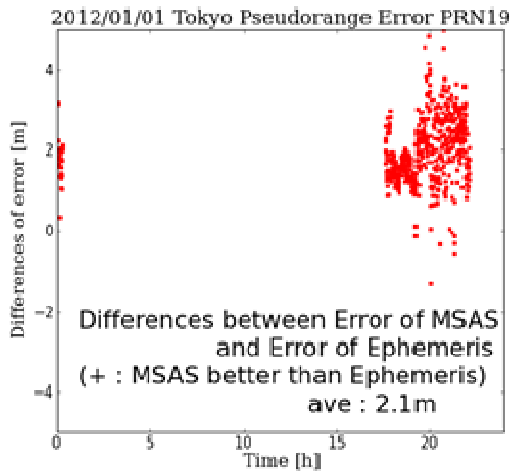
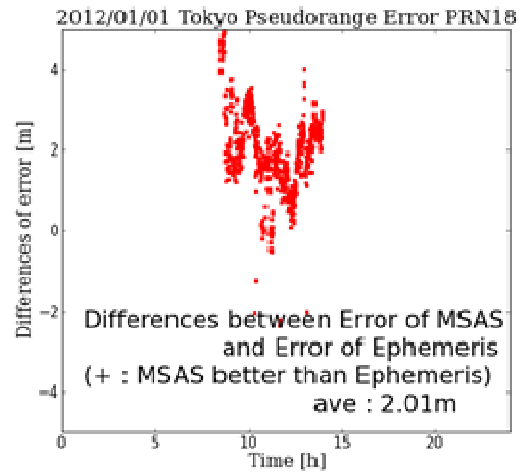
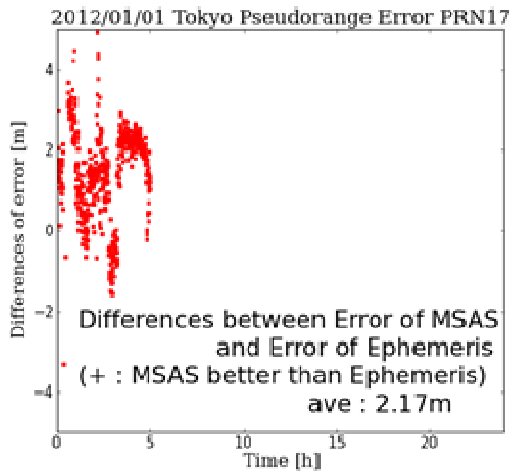


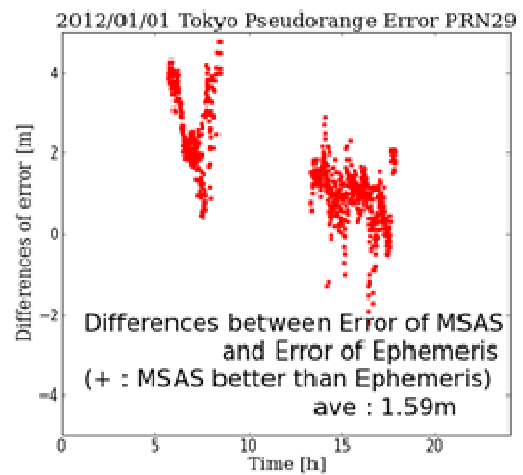
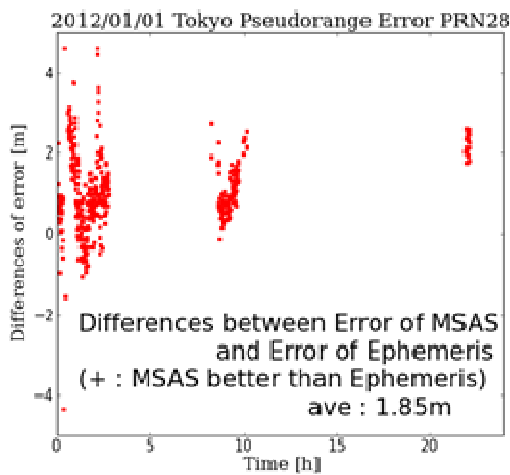
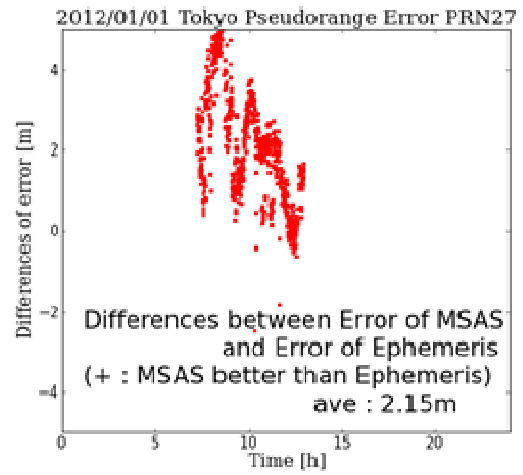
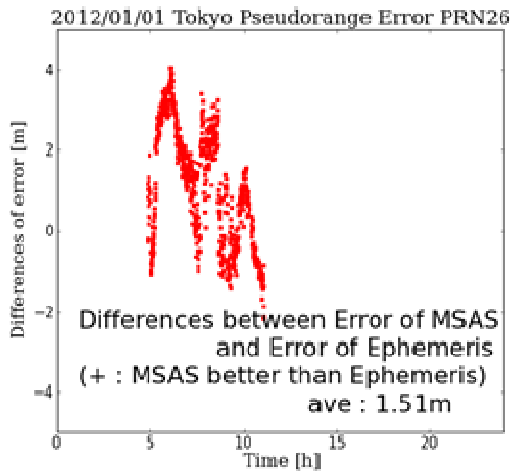
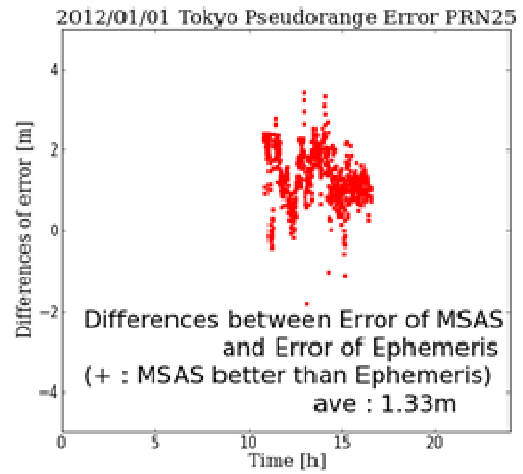
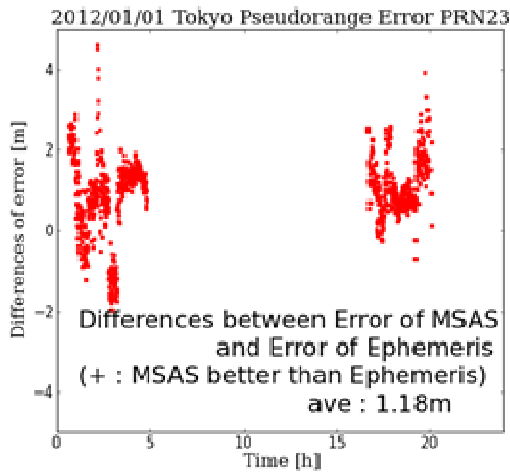
付録3 サービスエリア内における視線方向距離誤差の差

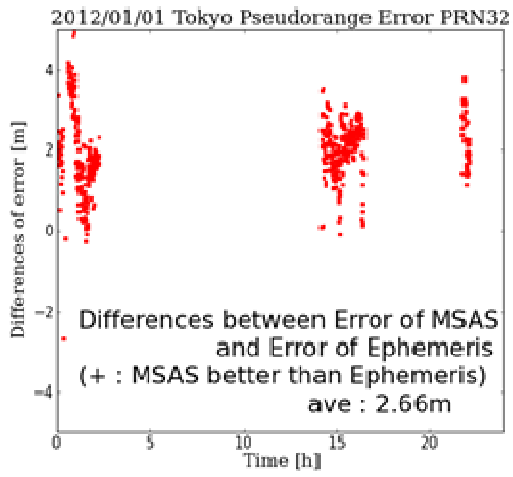
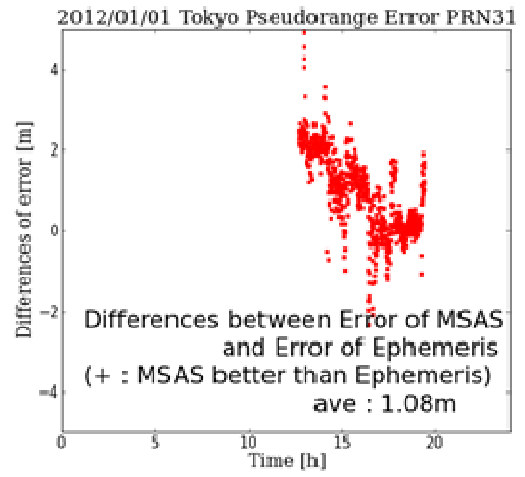
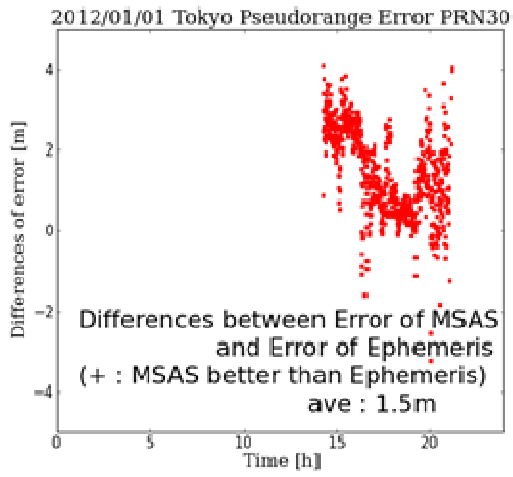
※本文掲載の PRN5, 15 と 2012/01/01 に MSAS の補強対象外であった PRN1, 14, 24 を除く











付録 4 サービスエリア外における視線方向距離誤差の差

※本文掲載の PRN5, 15 と 2012/01/01 に MSAS の補強対象外であった PRN1, 14, 24 を除く

