3. 時刻系・座標系の違いによる影響

3.1. 評価内容

前章までは測位信号の特性の違いによる影響について評価を行ってきた。本章からは各衛星系の時刻系・座標系の違いによる影響を考察し、それらの相互変換方法について整理する。本調査ではセンチメートル級の精度による基線解析および精密単独測位での利用を前提としているため、時刻系・座標系の取扱いについてもそれらの測位解析を行う観点からの評価となる。

具体的には本章では以下の①～④の項目について調査を実施した。

① 各衛星系の準拠座標系と ITRF との関係
② 各衛星系の準拠座標系間の変換（Helmert 変換）パラメータの入手・取扱い方法
③ 各衛星系の準拠時刻系と UTC との関係
④ 各衛星系の準拠時刻系間の変換パラメータの入手・取扱い方法

3.2. 各衛星系の準拠座標系と ITRF との関係

GPS と Galileo は、それぞれの基準座標系を ITRS（International Terrestrial Reference System）に近づけることで合意されている。QZSS も GPS や Galileo と同様に、その基準座標系を ITRS としている[9]。一方、GLONASS の基準座標系は ITRS に関係なく、PZ90（現在 PZ90.02）と呼ばれる独自の自律的座標系を定義した[8]。
各衛星系の準拠座標系の一覧を表 3-1 に示す。

ITRS の実現である ITRF(ITRF2008)は、GPS、SLR、VLBI、DORIS より位置を決定された地上観測局の座標値に基づいて定められている[18]。GPS、Galileo、QZSS の基準座標系は、それぞれの地上監視局の座標を定めることにより実現されている。現在、GPS、Galileo の基準座標系 WGS84、GTRF と ITRF の系統誤差は 2cm 以下である[9][17]。また、QZSS の基準座標系 JGS は、元々ITRF に準拠したモニタ局の座標より実現されている座標系であり、GPS、Galileo の座標系の間に 2cm 以下のオフセットで運用されている[6]。よって、GPS、Galiieo、QZSS の基準座標系は ITRF と同一座標系と見なせる。ITRF と GPS、Galiieo、QZSS の基準座標系との関係を図 3-1 に示す。

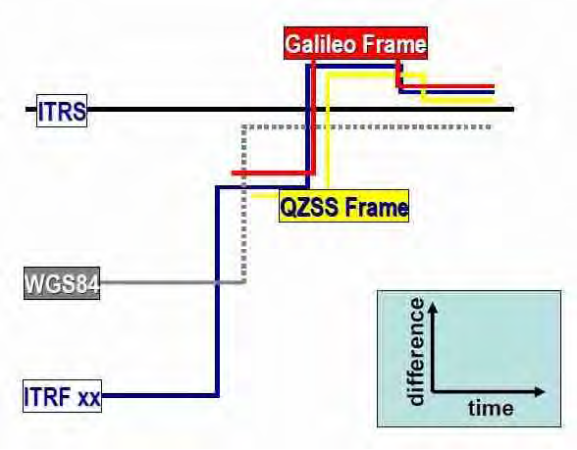


図 3-1 座標系の関係図(IS-QZSS ver.1.3 [6]より引用)

GLONASS の基準座標系 PZ-90、PZ-90.02 は WGS84 との間に、数十センチ～数メートルの差がある。ITRF と WGS84 は同一座標系と見なされているので、GLONASS の基準座標系 PZ-90、PZ-90.02 と ITRF との間にも同じ系統誤差と見なせる。

各衛星系の準拠座標系と ITRF との関係を表 3-1 に示す。

表 3-1 各衛星系の準拠時刻系及び座標系の一覧表

	GPS	GLONASS	QZSS	Galileo
座標系				
準拠座標系	WGS84 (World Geodetic System 1984)	1) PZ-90 2) PZ90.02 (2007/09/20～) (Parametry Zemli 1990, PE-90; Parameters of the Earth 1990)	JGS (日本衛星測位測地系：Japan satellite navigation Geodetic System)	GTRF (Galileo Terrestrial Reference Frame)
実現方法	GPS モニタ局の座標値によって実現されている。		モニタ局（9 局）の位置を最新の ITRF との基線長解析により求めて、それを QZS の軌道推定に使用することによって実現されている[8]。	IGS 局（131 局）と Galileo モニタ局（13 局）の座標系によって実現されている[16]。
ITRF との系統誤差	1cm 程度の精度で一致している[8]。	1) WGS84 との変換パラメータより、地表で最大 10 メートルの差がある。 2) WGS84 との変換パラメータより、40 センチの差がある。	GPS 及び Galileo との座標系オフセットは 2cm 以下である[6]。	2cm（1σ）の精度で一致している[16]。
時刻系				
準拠時刻系	GPST	GLONASST	QZSST	GST
UTC に対するバイアス	閏秒 + 10ns	3 時間 + 300ns	閏秒 + 20ns 以下	閏秒 + 50ns（目標値）
UTC-UUTC(k) (2011/5/27)	UTC-UTC(USNO) 4.3ns	UTC-UTC(US) -4.2ns	UTC-UTC(NICT) -9.6ns	
GPST への変換		BIPM Circular T による	航法メッセージに含まれるパラメータを使用	航法メッセージに含まれるパラメータを使用

3.3. 各衛星系の準拠座標系間の変換（Helmert 変換）パラメータの入手・取扱い方法

基準座標系 WGS84、GTRF、JGS 座標系間の系統誤差は 2cm 以下である。これは、例えば精密暦の軌道精度（リアルタイム部分を除き、2.5～5cm）と比べても小さい値であり、無視できる誤差である。

一方、GLONASS の基準座標系 PZ90、PZ-90.02 と WGS84 間の系統誤差についてはそれぞれ最大約 10 メートル、40 センチの差があり、座標変換が必要である。

PZ90 については次の(11)式で座標変換を行う[15]。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} 1 & -1.6\times10^{-6} & 0 \\ 1.6\times10^{-6} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{PZ-90} \quad (11)$$

現行の GLONASS の基準座標系 PZ-90.02（2007 年 9 月 20 日から運用）では、次の(12)式で座標変換を行う[16]。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{WGS-84} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_{PZ-90.02} + \begin{bmatrix} -0.36 \\ 0.08 \\ 0.18 \end{bmatrix} (m) \quad (12)$$

3.4. 各衛星系の準拠時刻系と UTC との関係

協定世界時 UTC（Coordinated Universal Time）は、国際度量衡局（BIPM：Bureau International des Poids et Mesures）が世界各地の原子時計データを重み付け平均して決められている。原子時計データを提供する各機関 k が生成する標準時はそれぞれの機関名をかっこ内に記し、UTC(k)と表記する。

3.4.1. GPS 時刻系

GPS 時刻(GPST)は、1980 年 1 月 6 日 00:00:00 UTC(USNO)を起点とし、米軍天文台（USNO：U.S. Naval Observatory）で生成される標準時 UTC(USNO)と同期する時刻である。現在、両時刻系の差は閏秒を除くと 10ns 以下である[9]。

GPS 時刻から UTC への変換は、衛星の航法メッセージに含まれる衛星クロック補正用のパラメータを使って、衛星の時計から GPS 時刻へ、GPS 時刻から UTC への補正を行う。

1）衛星時計から GPS 時刻への補正

衛星時計から GPS 時刻への補正方法は、文献[1]IS-GPS-200E の「20.3.3.3.3.1 User

Algorithm for SV Clock Correction」(pp.85-87) に記載されている。衛星時計の時刻 $t_s(t)$ と GPS 時刻 t の間に、次の関係がある。

$$t = t_s(t) - \Delta t_c(t) - \Delta t_r(t) \tag{13}$$

ここで、

$\Delta t_c(t)$：衛星時計 $t_s(t)$ の GPS 時刻に対するオフセット(衛星クロックのみに起因する部分)

$\Delta t_r(t)$：衛星時計 $t_s(t)$ の GPS 時刻に対するオフセット(相対論効果のみに起因する部分)

① 衛星クロック補正

衛星クロックに起因する衛星時計 $t_s(t)$ の GPS 時刻に対するオフセットは、次のように表される。

$$\Delta t_c(t) = a_{f0} + a_{f1}(t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 \tag{14}$$

ここで、

t_{oc}：衛星クロックパラメータの元期、航法メッセージに含まれる。

a_{f0}，a_{f1}，a_{f2}：衛星クロックパラメータ、航法メッセージに含まれる。

Δt_cの推定値の rms 誤差は、現在のところ 5ns と推定されている[8]。

② 相対論効果補正

相対論効果に起因する衛星時計 $t_s(t)$ の GPS 時刻に対するオフセットは、次のように表される。

$$\Delta t_r(t) = Fe\sqrt{A}\,sinE_k \ , \quad F = -\frac{2\mu}{c^2} \tag{15)(16}$$

ここで、

μ：地球重力定数

c：光の速度

e, $\sqrt{A}$, E_k：衛星軌道パラメータ、航法メッセージに含まれている。

2）GPS 時刻から UTC への補正

GPS 時刻 t において、GPS 時刻と UTC 間のバイアス Δt_{UTC} は、次の式から計算される。

$$\Delta t_{UTC} = t - UTC$$
$$= A_0 + A_1(t - t_{0t}) + \Delta t_{LS} \quad (17)$$

ここで、

A_0, A_1 : UTC への変換パラメータ、航法メッセージに含まれている。これらのパラメータより、バイアスの 1 秒以下の部分を算出できる。

t_{0t} : 基準 UTC の時刻、航法メッセージに含まれている。

Δt_{LS} : 閏秒、航法メッセージに含まれている。

Δt_{UTC}の推定値の rms 誤差は、現在のところ 10ns と推定されている[8]。

3.4.2. GLONASS 時刻系

GLONASS の時刻系（GLONASST）は UTC(SU)を基に生成されており、GLONASS－UTC(SU)間の時刻差は 3 時間+300ns 程度である[11]。

GLONASS 時刻 t と UTC(SU)時刻との差は GLONASS の航法メッセージに含まれている。

$$T_{UTC(SU)} + 03\ hour\ 00\ minutes = t + \tau_c + \tau_n(t_b) - \gamma_n(t_b)(t - t_b) \quad (18)$$

3.4.3. QZSS 時刻系

QZSS の時刻系（QZSST）は、日本（小金井）の UTC（NICT）に同期した QZSS 時刻を用いる。QZS および GPS 衛星の SV クロックは、共に GPS 時刻系に対するオフセットが管理されており、そのオフセットの大きさは航法メッセージに含まれる衛星クロックパラメータで補正される。また、航法メッセージ中の UTC パラメータにより QZSS 時刻と UTC 間のバイアスΔt_{UTC}を求めることができる。Δt_{UTC}の求め方は、前述した GPS 時刻から UTC に変換する方法と同じである[6]。

各衛星系の準拠時刻系と UTC との関係を図 3-2 に示す。

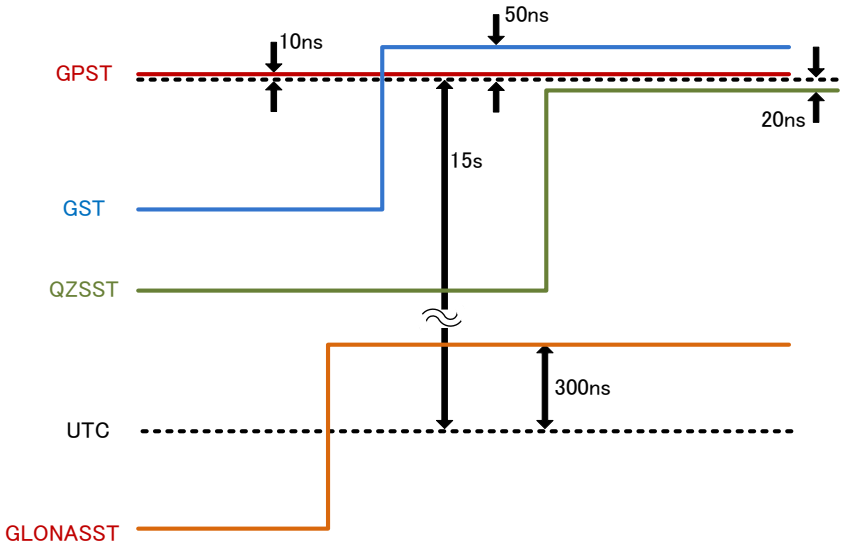


図 3-2 時刻系の関係図

3.4.4. Galileo 時刻系

Galileo の時刻系(GST)は、PTF（precise timing facilities）を基準とすることが計画され、UTC と 50ns 以内で同期目標とされている[12]。

Galileo の衛星クロックは、Galileo 時刻系に対するオフセットが管理されており、そのオフセットの大きさは航法メッセージに含まれる衛星クロックパラメータで補正される。また、航法メッセージ中の UTC パラメータにより Galileo 時刻から UTC に変換することができる。変換方法は、GPS 時刻から UTC に変換する際、GPS 時刻 t を Galileo 時刻系 t に置き換え、同じ計算式で行う[6][19]。

3.5. 各衛星系の準拠時刻系間の変換パラメータの入手・取扱い方法

1）GLONASS 時刻系と GPS 時刻系とのインタフェース

GLONASS の航法メッセージに、GLONASS 時刻から GPS 時刻への変換パラメータがないので、BIPM の Circuler T レポートに公表されている UTC と GPS/GLONASS 時刻間の変換パラメータを利用して変換を行う。ただし、現在、Circular T レポートは 1 ヶ月の遅れで、5 日毎の値として毎月公表されているので、リアルタイム測位に利用できない。

Circular T レポートは、次の URL から入手できる。

ftp://ftp2.bipm.org/pub/tai/publication/cirt.???

(注：「???」は、公表されている Circular T レポートの番号であり、2011 年 7 月には 282 である)。

GLONASS 時刻と GPS 時刻間の変換は次の通りである。

$$GPST = GLONASST + 閏秒 + C0 + C1 \tag{19}$$

ここで、

閏秒：2011/07/07 現在 15 秒。

C0：UTC と GPST との間の補正値であり、現在 10ns 以内である。

C１：UTC と GLONASS 時刻系との間の補正であり、現在数百 ns 以内である。

2）QZSS 時刻系と GPS 時刻系とのインタフェース

QZS 及び GPS 衛星の SV クロックは、共に GPS 時刻系(GPST)に対するオフセットが管理されており、そのオフセットの大きさは送信する航法メッセージに含まれる SV クロックパラメータ（a_{f0}，a_{f1}，a_{f2}）で補正される[6]。具体的な補正方法は、「3.4.1GPS 時刻系」の衛星時計から GPS 時刻への補正と同じである。

3）Galileo 時刻系と GPS 時刻系とのインタフェース[6]

Galileo 時刻から GPS 時刻への変換は、航法メッセージ中の Galileo 時刻と GPS 時刻間の変換パラメータを利用して、次のように変換を行う。

$$GPST = GST - \Delta T \tag{20}$$

$$\Delta T = A_{0G} + A_{1G}(t - t_{0G}) \tag{21}$$

ここで、

A_{0G}，A_{1G}：Galileo 時刻と GPS 時刻間の変換パラメータ、航法メッセージに含まれている。

t_{0G}：GGTO データの基準時刻、航法メッセージに含まれている。

4. 軌道暦の精度による影響

4.1. 評価内容

複数衛星系の組合せによる影響評価として最後に本章では軌道暦の精度についてまとめる。ここでは、各衛星系の IGS 最終暦を基準とした場合の差異を軌道暦誤差として、実際の軌道暦データに含まれる誤差を整理した。対象とした軌道暦と評価期間を表 4-1 に示す。QZSS および Galileo に関してはまだ精密暦自身が存在しないため評価の対象外とした。

なお、評価にあたっては RTKLIB2.4.1（http://www.rtklib.com）に含まれる軌道・クロック比較ユーティリティ diffeph を用いた。

また、以下の概算式を用いて軌道暦精度が二重差観測値に与える影響を評価した[27]。

$$\Delta r = \Delta e \times BL/R \tag{22}$$

ここで、Δrが測位観測値への影響、Δeが軌道暦誤差、BLが基線長、Rが軌道高度である。

表 4-1 評価対象の軌道暦と評価期間

	軌道暦	発行機関	評価期間
1	GPS 放送暦	IGS	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME
2	GLONASS 放送暦	IGS	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME
3	GPS 超速報暦	IGS	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME
4	GPS 速報暦	IGS	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME
5	GLONASS 超速報暦	CODE	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME
6	GLONASS 速報暦	CODE	2011 年 8 月 21 日～2011 年 8 月 27 日 GPSTIME

4.2. 放送暦

GPS、GLONASS それぞれの放送暦について、それぞれの公称精度と実際の 3DRMS、および二重差観測値に対する影響の概算値を表 4-2 に示す。また、各衛星毎の 3DRMS を図 4-1 に示す。この結果から、実際に解析を行う場合の暦に起因する誤差を見積もることができる。GPS に比べて GLONASS の誤差は 3 倍程度大きくなっており、特に長基線解析や精密単独測位を行う場合は GLONASS を加えることで得られるメリット（DOP の向上など）に対して軌道暦誤差などのデメリットを考慮する必要がある。

表 4-2 放送暦評価結果

			二重差観測値に対する影響の概算値		
軌道暦	公称精度[21][4]	3D Error RMS (注)	基線 10km	基線 100km	基線 500km
■ GPS 放送暦	1 m	1.46 m	0.72 mm	7.2 mm	36 mm
■ GLONASS 放送暦	10 m	4.54 m	2.4 mm	24 mm	120 mm

(注) 3DRMS は精密暦を真とした場合の誤差を元に計算

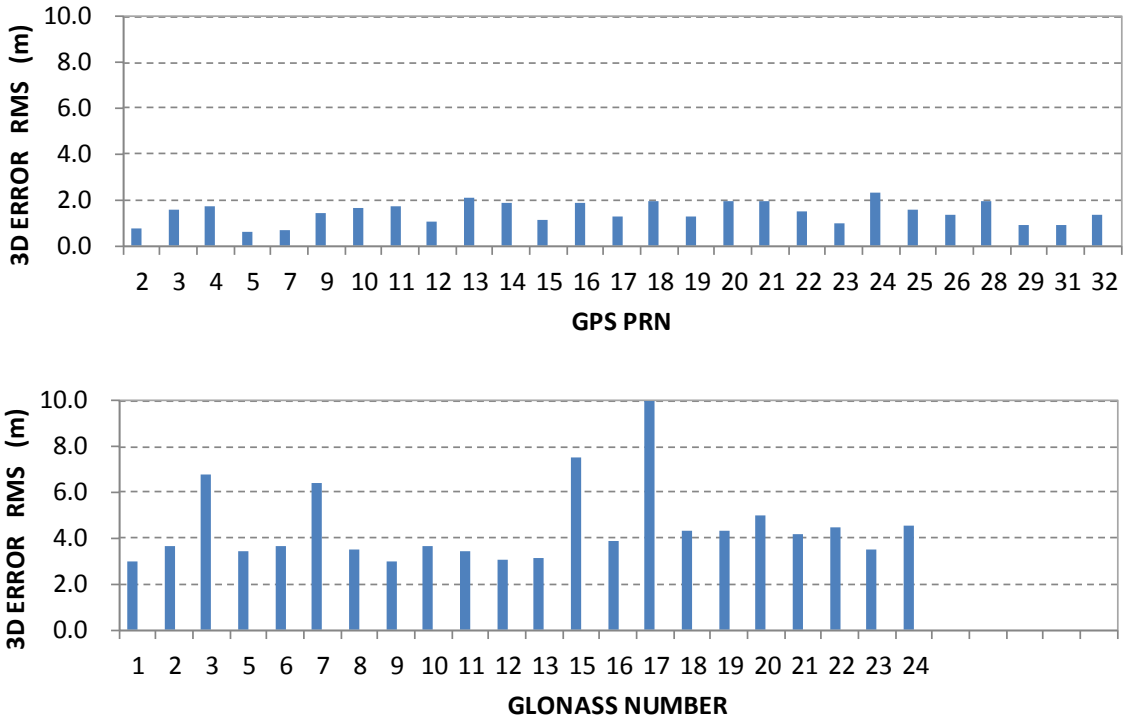


図 4-1 放送暦誤差(上:GPS 下:GLONASS)

4.3. 超速報暦、速報暦

GPS、GLONASS の超速報暦・速報暦について前項と同様に表 4-3 および図 4-2 に示す。放送暦に比べて格段に精度が向上するが、やはり GPS に比べて GLONASS の精度が下回る。

この後、「9. 計算手法のプロトタイプ実装と評価」で実際の測位を行い、長基線における GPS+GLONASS 測位についても評価を行う。

表 4-3 超速報暦・速報暦評価結果

軌道暦	公称精度[21]	3D Error RMS (注)	二重差観測値に対する影響の概算値		
			基線 10km	基線 100km	基線 500km
GPS 超速報暦	0.05 m	0.05 m	0.025 mm	0.25 mm	1.25 mm
GPS 速報暦	0.025 m	0.01 m	0.005 mm	0.05 mm	0.25 mm
GLONASS 超速報暦	-	0.21 m	0.11 mm	1.1 mm	5.5 mm
GLONASS 速報暦	-	0.06 m	0.031 mm	0.31 mm	1.55 mm

(注) 3DRMS は精密暦を真とした場合の誤差を元に計算

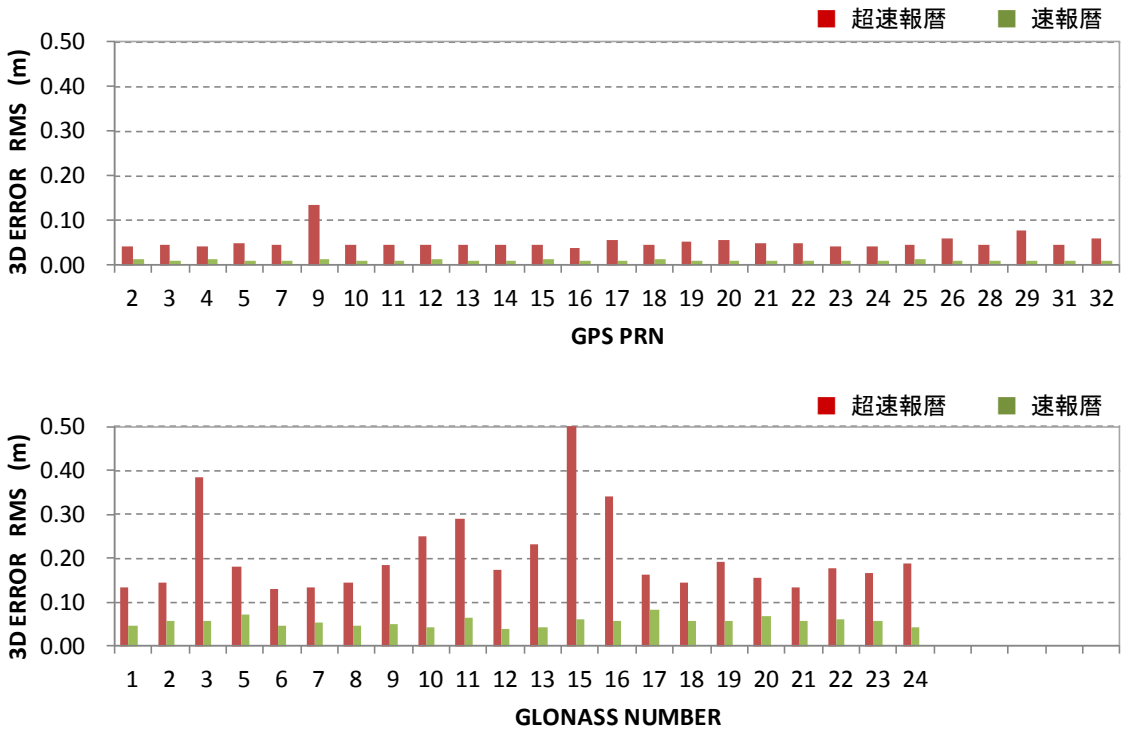


図 4-2 超速報暦・速報暦誤差(上:GPS 下:GLONASS)

5. 測位手法の既存研究調査

5.1. 本章の目的

本章では、複数衛星系の組合せに関する既存研究について本調査で特に参考としたものについてその内容整理を行う。前章までで行なった実データの整理と本章の内容を中心として、本調査では最終的に複数衛星系組合せアルゴリズムを構築してプロトタイプソフトウェアへの実装を行うこととしている。

5.2. GPS と GLONASS との組合せ

参考文献[23] （Kozlov, D 、et al.(2000), Statistical Characterization of Hardware Biases in GPS + GLONASS receivers, ION GPS 2000）では GPS と GLONASS を組合せて解析する手法として"Partial Fixing"による方法が提案され、その評価が行われている。Partial Fixing とは、得られたフロート解のアンビギュイティのうち一部のアンビギュイティに対してのみアンビギュイティ決定（Ambiguity Resolution：AR）を試みる手法であり、参考文献[23]では異機種間の GLONASS の搬送波アンビギュイティ決定の困難さを避けるために GPS の搬送波アンビギュイティだけを決定している。これにより、GLONASS がフロート解のままであっても GPS の Fix 率向上やフロート解精度向上が確認されている。

また、参考文献[22] （山田英輝、et al.(2010), チャンネル間ハードウェアバイアス較正による RTK-GPS/GLONASS 測位の性能評価、 ION GNSS 2010）においては Partial Fixing に加えて GLONASS チャンネル間ハードウェアバイアス較正も行い、異機種間における一周波および二周波の瞬時 AR にて表 5-1、表 5-2 の結果が得られている。なお、ここでの基線長は 300m である。

表 5-1 文献[23]における GPS+GLONASS 測位解析の Fix 率と精度（一周波）

（上段： Fix 率　　下段： 測位精度 E/N/U (m) ）

	GPS のみ	GPS+GLONASS (Partial Fixing)	GPS+GLONASS (Partial Fixing + バイアス較正)
NovAtel-Trimble	49.5% 0.07/0.09/0.25	31.9% 0.11/0.17/0.31	52.1% 0.05/0.07/0.11
NovAtel-Topcon	45.5% 0.09/0.17/0.39	41.5% 0.10/0.16/0.27	47.0% 0.07/0.09/0.15
NovAtel-JAVAD	29.9% 0.13/0.21/0.54	31.9% 0.12/0.17/0.40	33.8% 0.11/0.18/0.35
JAVAD-Trimble	35.8% 0.12/0.14/0.32	21.9% 0.17/0.23/0.53	36.5% 0.10/0.11/0.30
JAVAD-Topcon	41.0% 0.09/0.11/0.32	68.7% 0.04/0.06/0.14	68.8% 0.04/0.06/0.14

表 5-2 文献[23]における GPS+GLONASS 測位解析の Fix 率と精度(二周波)

（上段： Fix 率　　下段： 測位精度 E/N/U (m)）

	GPS のみ	GPS+GLONASS (Partial Fixing)	GPS+GLONASS (Partial Fixing + バイアス較正)
NovAtel-Trimble	98.9% 0.01/0.01/0.02	96.7% 0.01/0.01/0.02	99.0% 0.01/0.01/0.02
NovAtel-Topcon	98.9% 0.01/0.01/0.02	96.4% 0.01/0.01/0.02	98.9% 0.01/0.01/0.02
NovAtel-JAVAD	98.2% 0.01/0.01/0.02	98.0% 0.01/0.01/0.02	98.5% 0.01/0.01/0.02
JAVAD-Trimble	98.1% 0.01/0.01/0	95.3% 0.01/0.01/0.02	97.0% 0.01/0.01/0.02
JAVAD-Topcon	98.2% 0.01/0.01/0.02	98.0% 0.01/0.01/0.02	98.0% 0.01/0.01/0.02

本調査においても、GLONASS チャンネル間バイアスの補正によって Fix 率と精度がどの程度向上するかを評価する。本調査での結果については「9. 計算手法のプロトタイプ実装と評価」にまとめる。

5.3. 座標系および時刻系

GLONASS と GPS との間の座標系・時刻系の取扱いについては、参考文献[11] （安田 明生, 山田 英輝, マルチ GNSS 時代における準天頂衛星システムの役割について, IEICE2011, 2011）においても、GPS と GLONASS 間の時刻系バイアスをパラメータとして推定する方法が述べられている。本調査のプロトタイプソフトウェアも同様の方法で時刻系バイアスの推定を行なっている。

GPS 及び GLONASS 時刻に対する受信機時刻誤差dtr_{sys}は次の式で表す。

$$dtr_{sys} = t_r - t_{sys} \tag{23}$$

ここで、t_rは受信機時計での測定時刻を表し、t_{sys}は各測位衛星のシステム時刻である。

また、GPS と GLONASS の各々のシステム時刻に対する受信機時計誤差の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} dtr_{GLONASS} &= t_r - t_{GLONASS} \\ &= t_r - t_{GPS} + t_{GPS} - t_{GLONASS} \\ &= dtr_{GPS} - \Delta T_{GPS-GLONASS} \end{aligned} \tag{24}$$

$\Delta T_{GPS-GLONASS}$は GPS 時刻と GLONASS 時刻との差である。

GPS と GLONASS の複合測位では、GLONASS のコードの観測方程式は次のように表せる。

$$P = r + c\left(dtr_{GPS} - \Delta T^{s} + \Delta B_{r,p}\right) + I + T + \varepsilon_{P} \quad (25)$$

$$\Delta B_{r,p} = \Delta B_{r} - \Delta T_{GPS-SYS} \quad (26)$$

P は GLONASS のコード観測値、r は受信機－衛星間の幾何学距離、c は光速、dtr_{GPS} は GPS 時刻に対する受信機時計誤差、ΔT^{s} は GLONASS の衛星時計バイアス、I は電離層遅延、T は対流圏遅延、ε_{P} はコードのマルチパス誤差及び受信機雑音、ΔB_{r} は衛星系間の受信機ハードウェアバイアスを表す。

未知数のベクトル $x = (r_{r}^{T}, c\Delta t_{r}, c\Delta B_{r,p})^{T}$ は最小二乗法を用いて推定する。推定されたコードバイアス $\Delta B_{r,p}$ から、GPS 時刻と GLONASS 時刻との差を差し引くと、衛星系間の受信機のハードウェアバイアス ΔB_{r} が得られる。GLONASS 時刻と GPS 時刻の差は BIPM Circular T により 1 ヶ月の遅れで得られる。

$$\Delta B_{r} = \Delta B_{r,p} + \Delta T_{GPS-SYS} \quad (27)$$

本調査では、後の「7.4 座標系・時刻系の統合」において座標系および時刻系の取扱いを定めてプロトタイプソフトウェアに実装して評価を行なっている。

6. 複数衛星系組合せが及ぼす影響の理論評価

前章までの調査結果に基づき、複数の衛星系を利用する場合に考慮すべき誤差源が測位演算における観測モデル式にどのような影響を与えるかをまとめる。また、そのモデル式を用いて、測位精度やアンビギュイティの決定に生じる影響の評価方法について述べる。

6.1. 観測モデルの一般化

複数の衛星系を組み合わせて測位を行う場合、その組合せ方法に依存して観測モデルに変化が生じる。そのため、まず衛星系を組み合わせる際の観測モデルを一般的に記述する。

前節までの調査結果より、考慮すべき誤差源は大きく分けてバイアス的な誤差とランダムな誤差（雑音）に分類できる。そこで、基準局 k とユーザ局 u において、衛星システム X と衛星システム Y からの信号を観測した際の観測モデルを以下のように一般化する。

（擬似距離［m］）

$$\rho_k^X = r_k^X + \delta t_k - \delta t^X + d_k^X + e_k^X \tag{28}$$

$$\rho_u^X = r_u^X + \delta t_u - \delta t^X + d_u^X + e_u^X \tag{29}$$

$$\rho_k^Y = r_k^Y + \delta t_k - \delta t^Y + d_k^Y + e_k^Y \tag{30}$$

$$\rho_u^Y = r_u^Y + \delta t_u - \delta t^Y + d_u^Y + e_u^Y \tag{31}$$

（搬送波位相［m］）

$$\Phi_k^X = r_k^X + \delta t_k - \delta t^X + \lambda_X N_k^X + b_k^X + \varepsilon_k^X \tag{32}$$

$$\Phi_u^X = r_u^X + \delta t_u - \delta t^X + \lambda_X N_u^X + b_u^X + \varepsilon_u^X \tag{33}$$

$$\Phi_k^Y = r_k^Y + \delta t_k - \delta t^Y + \lambda_Y N_k^Y + b_k^Y + \varepsilon_k^Y \tag{34}$$

$$\Phi_u^Y = r_u^Y + \delta t_u - \delta t^Y + \lambda_Y N_u^Y + b_u^Y + \varepsilon_u^Y \tag{35}$$

ただしr_k^X ([m])は受信機 k 、衛星 X 間の幾何学的距離、δt_k ([m])は受信機 k の時計誤差、δt^X ([m])は衛星 X の時計誤差、λ_X ([m])は当該衛星搬送波の波長、N_k^X ([cycle])はアンビギュイティ、d_k^X、b_k^X ([m])はそれぞれ受信機 k で衛星 X を観測する際に擬似距離および搬送波位相観測量に生じるバイアス誤差、e_k^X、ε_k^X ([m])はそれぞれ擬似距離および搬送波位相の観測雑音を表しており、電離層、対流圏の影響は簡単化のため無視している。また、観測雑音は互いに無相関な平均 0 の正規性白色雑音であり、

$$e_k^X \sim N(0、\xi_{kX}^2)、e_k^X \sim N(0、\xi_{uX}^2)、e_k^X \sim N(0、\xi_{kY}^2)、e_k^X \sim N(0、\xi_{uY}^2) \tag{36}$$

$$\varepsilon_k^X \sim N(0、\sigma_{kX}^2)、\varepsilon_k^X \sim N(0、\sigma_{uX}^2)、\varepsilon_k^X \sim N(0、\sigma_{kY}^2)、\varepsilon_k^X \sim N(0、\sigma_{uY}^2) \qquad (37)$$

とする。

ユーザ局における単独測位では、基本的に(29)、(31)、(33)、(35)式でモデル化される擬似距離および搬送波位相観測量を複数衛星について得て、測位演算が行われる。

一方、基線解析においては観測量の二重差を用いる方法が一般的であり、以下では簡単化のため、搬送波位相観測量の二重差についてのみ記述することとするが、擬似距離観測量や多周波の観測量を用いる際には、適宜同様な観測モデルを加えることで簡単に拡張が可能である。

(32)式～(35)式の観測量の二重差をとると、

$$\begin{aligned}\Phi_{ku}^{XY} &= (\Phi_k^X - \Phi_u^X) - (\Phi_k^Y - \Phi_u^Y) \\ &= r_{ku}^{XY} + N_{ku}^{XY} + b_{ku}^{XY} + \varepsilon_{ku}^{XY}\end{aligned} \qquad (38)$$

となり、受信機時計誤差、衛星時計誤差が相殺される。ただし、

$$\begin{aligned}r_{ku}^{XY} &\equiv (r_k^X - r_u^X) - (r_k^Y - r_u^Y), \\ N_{ku}^{XY} &\equiv \lambda_X(N_k^X - N_u^X) - \lambda_Y(N_k^Y - N_u^Y), \\ b_{ku}^{XY} &\equiv (b_k^X - b_u^X) - (b_k^Y - b_u^Y), \\ \varepsilon_{ku}^{XY} &\equiv (\varepsilon_k^X - \varepsilon_u^X) - (\varepsilon_k^Y - \varepsilon_u^Y)\end{aligned} \qquad (39)$$

と定義している。FDMA 方式を採用している GLONASS を利用する場合は、$\lambda_X \neq \lambda_Y$となるため、測位演算中にアンビギュイティを整数として取り扱う場合は、受信機間 1 重差のアンビギュイティを未知数と考える必要がある。

6.2. 観測雑音の統計的性質

測位精度の解析を行う際には、観測雑音の統計的性質が重要となる。(38)式の観測雑音は$\varepsilon_{ku}^X \equiv (\varepsilon_k^X - \varepsilon_u^X) - (\varepsilon_k^Y - \varepsilon_u^Y)$であり、$\varepsilon_k^X, \varepsilon_u^X, \varepsilon_k^Y, \varepsilon_u^Y$はそれぞれ無相関で、(37)式に示すような分布にしたがうから、

$$\varepsilon_{ku}^{XY} \sim N(0、\sigma_{kX}^2 + \sigma_{uX}^2 + \sigma_{kY}^2 + \sigma_{uY}^2) \qquad (40)$$

となっていることが分かる。一方、複数の衛星を観測した場合の二重差観測雑音ベクトルの各要素は無相関とはならないため、その共分散行列を一般的に計算しておく。いま、衛星システム X の衛星を p 機（X_1～X_p）、衛星システム Y の衛星を q 機（Y_1～Y_q）観測し

たとすると、例えばX_1を基準衛星とする二重差観測量は

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ku}^{X_1X_2} \\ \vdots \\ \Phi_{ku}^{X_1X_p} \\ \Phi_{ku}^{X_1Y_1} \\ \vdots \\ \Phi_{ku}^{X_1Y_p} \end{bmatrix} = [D \quad -D] \begin{bmatrix} \Phi_{k}^{X_1} \\ \vdots \\ \Phi_{k}^{Y_q} \\ \Phi_{u}^{X_1} \\ \vdots \\ \Phi_{u}^{Y_q} \end{bmatrix} \tag{41}$$

と表現できる。ただし D はサイズが$(p+q-1)\times(p+q)$ の以下のような行列である。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & -1 \end{bmatrix} \tag{42}$$

したがって、この場合の観測雑音ベクトルの共分散行列 R は

$$R = [D \quad -D] \begin{bmatrix} \sigma_{kX_1}^2 & & & & & & \\ & \ddots & & & & 0 & \\ & & \sigma_{kY_q}^2 & & & & \\ & & & \sigma_{uX_1}^2 & & & \\ & 0 & & & \ddots & & \\ & & & & & \sigma_{kY_q}^2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D^T \\ -D^T \end{bmatrix} \tag{43}$$

で得られる。各々の観測雑音の分散が等しくσ^2であると仮定した場合、すなわち $\sigma^2 = \sigma_{kX_1}^2 = \cdots = \sigma_{kY_q}^2 = \sigma_{uX_1}^2 = \cdots = \sigma_{uY_q}^2$ のときは、上式は

$$R = \sigma^2 \begin{bmatrix} 4 & 2 & \cdots & 2 \\ 2 & 4 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 2 \\ 2 & 2 & \cdots & 4 \end{bmatrix} \tag{44}$$

となり、通常この表現（仮定）がよく用いられるが、衛星系によって雑音の分散が異なる場合の解析を行うには(43)式から共分散行列を正確に求める必要がある。

6.3. 各種の誤差源と観測モデル

ここでは、観測雑音の特性、マルチパス、受信機ハードウェアバイアス、GLONASS チャンネル間バイアス、軌道暦誤差の影響が観測式においてどのようにモデル化できるかを整理する。

6.3.1. 観測雑音の影響について

観測雑音の大きさ（分散）は 2.3.3 節で説明されているように、受信機、アンテナ、衛星の仰角・方位角、周波数帯、コードの種類、衛星系の違いに依存して異なる。観測雑音の分散値は、(36)、(37)式のパラメータξ^2、σ^2 で設定可能であり、上記の状況に応じた分散値を設定することで、観測雑音の影響を調べることができる。二重差を用いる測位においては、(43)式から観測雑音の共分散行列を求める必要があることに注意が必要である。

6.3.2. マルチパスの影響について

マルチパスの特性は 2.3.5 節および 2.3.6 節で説明されているように、アンテナ特性、衛星仰角に大きく依存している。各観測エポックにおけるマルチパス誤差はバイアス誤差として捉えることができ、(28)～(35)式の観測モデル中のバイアス項 d , b に各衛星に応じて想定するマルチパス量を設定することで、その影響を調べることができる。

6.3.3. 受信機ハードウェアバイアスの影響について

受信機ハードウェアバイアスは 2.3.7 節で説明されているように、受信機内の各衛星系回路間の遅延差に起因して生じるバイアスであり、二重差を観測量とする基線解析の場合は相殺される。単独測位における受信機ハードウェアバイアスの影響を調べるためには、(28)～(35)式の観測モデル中のバイアス項 d , b に各衛星に応じて想定する受信機ハードウェアバイアス量を設定すればよい。このバイアスは衛星系間で相対的に発生するバイアスである。したがって、例えばユーザ局における擬似距離観測量について、衛星システム X に対する衛星システム Y のバイアスを考える場合は、$d_u^X = 0$として、d_u^Y にバイアス量を設定すればよい。

6.3.4. GLONASS 受信機チャンネル間バイアスの影響について

GLONASS 受信機チャンネル間バイアスは 2.3.8 節で説明されているように、受信機・アンテナの群遅延特性の周波数依存性に起因して生じるバイアスである。基線解析において、同機種の受信機を利用する際はハードウェアの設計が同一であるため、このバイアスは二重差によってほぼ相殺することができる。しかしながら、異機種間では相殺されない。チャンネル間バイアスの影響を調べるためには、(28)～(35)式の観測モデル中のバイアス項 d , b に各衛星に応じて想定する受信機チャンネル間バイアス量を設定すればよい。このバイアスは GLONASS の搬送波周波数の異なる衛星間で相対的に発生するバイアスであり、バイアス量は、図 2-16 に示されているように、搬送波周波数に対してほぼ線形な関係がある。したがって、チャンネル間バイアスの影響を陽に記述した観測モデルを以下のように書くこともできる[32]。

$$\Phi_u^Y = r_u^Y + \delta t_u + m\,IFB - \delta t^Y + \lambda_Y N_u^Y + \varepsilon_u^Y \tag{45}$$

ただし、m はチャンネル番号を表し、IFB はチャンネル番号の増加に対するチャンネル間バイアスの増分であり、図 2-16 の直線の傾きに相当するパラメータである。

6.3.5. 軌道暦誤差の影響について

軌道暦誤差は 4 章で説明されているように、放送暦、精密暦ともに誤差が含まれ、軌道暦誤差が二重差観測量におよぼす影響は、表 4-2、表 4-3 に見積もられている。この誤差はバイアス誤差であり、測位におよぼす影響は(28)～(35)式の観測モデル中のバイアス項 d , b に各衛星に応じて想定する軌道暦の誤差量を設定すればよい。

6.4. 最小二乗法と推定誤差の統計的性質

6.1 項で述べた内容に基づいて、1 エポック分の観測モデルが一般的に

$$y_t = H_t\theta + \varepsilon_t、 \quad \varepsilon_t \sim N(0、R) \tag{46}$$

と表わされた場合について考える。ただし、t はエポック番号、y_t は$(n \times 1)$の観測ベクトル、H_t は$(n \times m)$の既知行列、θ は$(m \times 1)$の未知ベクトル、b_t は$(n \times 1)$のバイアスベクトル、ε_t は$(n \times 1)$の観測雑音ベクトルとする。観測にバイアス誤差が無い場合、すなわち $b_t = 0$ の場合、エポック t までの観測に基づく θ の最小二乗推定量は、

$$\hat{\theta}_t = (\textstyle\sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} H_t)^{-1} \sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} y_t \tag{47}$$

となる（例えば文献[28]）。よく知られているように $\hat{\theta}_t$ は不偏推定量であり、推定誤差の期待値について

$$E[\hat{\theta} - \theta] = 0 \tag{48}$$

となる。また、その共分散行列は

$$P_t = (\textstyle\sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} H_t)^{-1} \tag{49}$$

で与えられる。

一方、$b_t \neq 0$ の場合の θ の最小二乗推定量は、

$$\hat{\theta}_t = (\sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} H_t)^{-1} \sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1}(y_t + b_t) \quad (50)$$

となり、バイアス b_t が測位演算に与える影響（推定誤差の期待値）は

$$E[\hat{\theta}_t - \theta] = (\sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} H_t)^{-1} \sum_{i=1}^{t} H_t^T R^{-1} b_t \quad (51)$$

のように評価できる。

6.5. 測位精度等に生じる影響の評価方法

前節の議論より、観測モデルにおけるバイアス誤差が測位解に及ぼす影響は、(51)式で評価することができる。

一方、観測雑音ε_t（ランダムな観測誤差）が測位解におよぼす影響は(49)式の共分散行列で評価することができ、例えば測位精度（フロート解）を評価する指標として

$$J_t = \sqrt{P_t(1,1) + P_t(2,2) + P_t(3,3)} \quad (52)$$

を導入して、測位精度の目安を得ることができる。ただし、$P_t(1,1)$ は(49)式で得られる P_t の $(1,1)$ 要素を意味する。同様な解析方法として、RDOP（Relative Dilution Of Precision）[29]などが提案されている。

また、アンビギュイティの推定精度を評価する指標として、ADOP（Ambiguity DOP）[30][31]などがある。ADOP は、

$$ADOP = \left(\sqrt{P_{a,t}}\right)^{1/n_a} \quad (53)$$

で定義される。ただし、na はアンビギュイティの次数、P_a 、t はアンビギュイティ推定値（フロート）の共分散行列で、次元は $na \times na$ であり、P_t の部分行列として得られる。ADOP はアンビギュイティの推定精度（正しい解が得られる確率）を評価する指標であるとともに、アンビギュイティの探索空間の大きさを評価する指標として解釈することもできる。

6.6. 衛星系の有無による測位精度の変化について

前節までで、各種の誤差源による影響の評価方法を示したが、ここでは(52)式の評価指標を用いて GLONASS 衛星の有無の影響を評価した一例（数値例）を示しておく。この数値例は、GPS 衛星 6 機を用いた測位において、GLONASS 衛星 3 機を複合することで、測位精度にどのような変化が生じるかを評価したものである。なお、評価においては、

2011 年 1 月 1 日、13 時 40 分～14 時 20 分（JST）の衛星配置を用いて、東京海洋大学－大森間（約 10[km]）、立命館大学－大阪間（約 60[km]）、東京海洋大学－立命館大学間（約 360[km]）の搬送波位相のみによる基線解析において、30 秒毎に観測データを得た場合を想定している。また、搬送波位相の観測雑音について、その分散は等しく 0.032[m2]、すなわち観測雑音の共分散行列は(44)式で表され、$\sigma^2 = 0.03^2$ とした。

上記の想定の下で、各基線に対して横軸を時刻とし、(52)式で得られる fix 解および float 解の測位精度指標 J_t [m]が GLONASS の有無によってどのように変化するかを図 6-1 に示している。

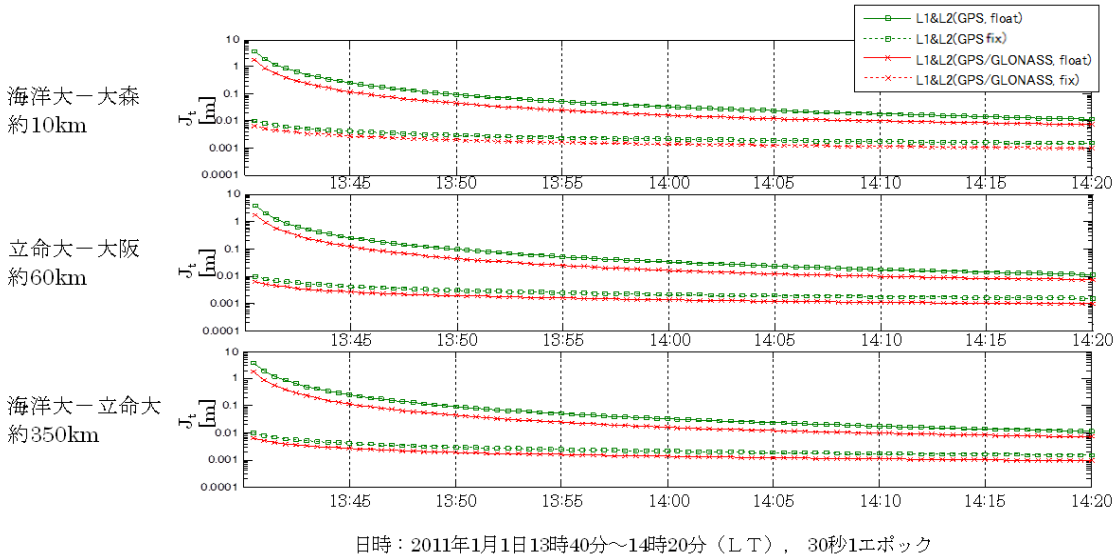


図 6-1 GLONASS の有無による測位精度指標

図 6-1 より、float 解と fix 解では明らかに fix 解の方が測位精度は改善されており、また GLONASS を併用した方が測位精度が改善されることが確認できる。

7. 計算手法の検討

7.1. 検討の方針

2 章～6 章で行なった複数衛星系の観測データや評価結果を元に、本章では複数衛星系を組合せたアルゴリズムについて検討する。前章までに整理したとおり、各衛星系の特性や運用状況の違いから、それぞれのデータを組合せる場合は重み付けや補正、変換が必要になってくる。本章では複数衛星系の組合せを以下の方針で詳細にまとめる。

①各衛星系の最適重み付け

各衛星系のマルチパス誤差を元にした観測誤差モデルからそれぞれの重み付けを行う。

②受信機バイアスの補正

受信機毎に異なるハードウェアバイアス、GLONASS チャンネル間バイアスについては、その補正値をあらかじめソフトウェアに持たせ、解析時に適用する。

③座標系・時刻系の統合

センチメートル級の精度による基線解析および精密単独測位を行うことを前提に、座標系・時刻系の変換要否を決定する。

④アルゴリズムまとめ

①～③の検討結果を含め、これまでの調査結果を総合してアルゴリズムとして整理する。

7.2. 各衛星系の最適重み付け

各衛星系や周波数帯によって異なるマルチパス誤差について、衛星仰角 φ に依存する観測誤差 $\sigma(\varphi)$ が(54)式のモデルに従うとし、「2.3.5 擬似距離マルチパス」「2.3.6 搬送波位相マルチパス」で実測した値からそれぞれのバイアス係数 a 、ノイズ係数 b を求めた。

$$\sigma(\varphi)^2 = a^2 + \frac{b^2}{sin^2(\varphi)} \qquad (54)$$

例えば、JAVAD DELTA の GPS L1 搬送波について求めた a 、 b による観測誤差モデルは図 7-1 のとおりである。

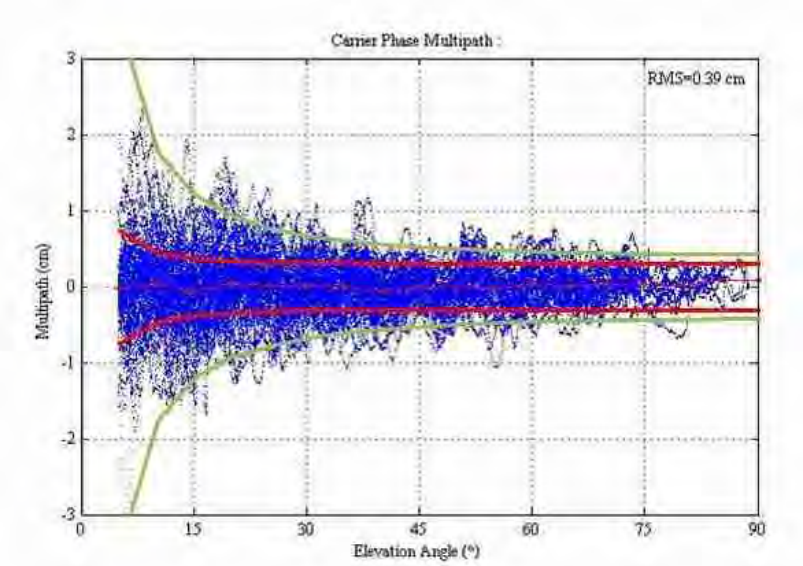


図 7-1 マルチパス誤差と観測誤差モデル（JAVAD DELTA, GPS L1）

青色のマルチパスに対して、求めた観測誤差モデルを赤色の曲線で表す。
緑色の曲線はプロトタイプソフトウェア RTKLIB のデフォルト値（a: 0.003m　b: 0.003m）である。

このように全ての受信機で衛星系毎に求めた a 、 b の値は表 7-1 のとおりである。これらの値をテーブルとしてプロトタイプソフトウェアに持たせ、解析時に補正を行うこととした。

表 7-1 観測誤差モデルの係数(a,b)補正値

GPS						
受信機	アンテナ	周波数帯	搬送波位相		コード	
			a	b	a	b
JAVAD DELTA	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.001	0.176	0.024
		L2	0.004	0.001	0.206	0.041
		L5	0.002	0.000	0.142	0.006
NovAtel OEM628	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.146	0.032
		L2	0.003	0.000	0.151	0.035
Trimble NetR9	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.001	0.120	0.023
		L2	0.003	0.000	0.142	0.028
		L5	NaN	NaN	0.158	0.019
TOPCON NET-G3	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.004	0.001	0.179	0.037
		L2	0.003	0.001	0.192	0.075
		L5	NaN	NaN	0.139	0.023
GLONASS						
受信機	アンテナ	周波数帯	搬送波位相		コード	
			a	b	a	b
JAVAD DELTA	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.169	0.027
		L2	0.005	0.001	0.224	0.037
NovAtel OEM628	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.132	0.036
		L2	0.004	0.000	0.163	0.027
Trimble NetR9	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.141	0.031
		L2	0.004	0.001	0.141	0.025
TOPCON NET-G3	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.205	0.040
		L2	0.004	0.001	0.193	0.043
QZSS						
JAVAD DELTA	JAVAD GrAnt-G3T	L1	0.003	0.000	0.171	0.027
		L2	0.002	0.000	0.140	0.027
		L5	0.001	0.000	0.113	0.000

（単位：m）

7.3. 受信機バイアスの補正

表 2-12 のハードウェアバイアス値、および図 2-16 の GLONASS チャンネル間バイアス値をテーブルとしてプロトタイプソフトウェアに持たせ、解析時に補正を行うこととした。

なお、これらの補正値について、本調査のプロトタイプソフトウェアでは測位解析実行前にあらかじめ得られているものとして実装する。補正値の推定手法については、「2.3.7 受信機ハードウェアバイアス」を参照。

7.4. 座標系・時刻系の統合

基線解析においては、精密暦を使う場合は GPS-GLONASS の組合せにおいて座標変換が必要である。放送暦の解析では、暦精度に対して座標系の違いが無視できるので、変換の必要はない。また、時刻系のバイアスについては二重差分でキャンセルされること

から補正の必要はない。

一方、精密単独測位（PPP）では、全ての組合せで座標変換が必要である。座標変換は「3.3 各衛星系の準拠座標系間の変換（Helmert 変換）パラメータの入手・取扱い方法」における式(11)(12)により座標変換を行う。時刻系の補正についてもすべての組合せで変換が必要であり、変換方法は「3.5 各衛星系の準拠時刻系間の変換パラメータの入手・取扱い方法」に記載したとおりである。

以上の手法をまとめた表 7-2 の手法で本調査はプロトタイプソフトウェアを構築して評価を行う。

表 7-2 座標系･時刻系の統合手法

GPS-GLONASS		
基線解析	座標系	○変換する　：　式(11)または(12)で変換する（3.3 項）。 または、統一された座標系に基づいた暦を使用する。 ただし、放送暦使用時は座標系誤差は無視できる。
	時刻系	－変換しない
精密単独測位	座標系	○変換する　：　式(11)または(12)で変換する（3.3 項）。 または、統一された座標系に基づいた暦を使用する。
	時刻系	○変換する　：　BIPM Circular T により補正する（3.5 項）。 または、統一された時刻系に基づいた暦を使用する。
GPS-QZSS		
基線解析	座標系	－変換しない
	時刻系	－変換しない
精密単独測位	座標系	○変換する　：　3.3 項の変換手法で変換する。 または、統一された座標系に基づいた暦を使用する。
	時刻系	○変換する　：　放送暦中の GGTO により補正する（3.5 項）。 または、統一された時刻系に基づいた暦を使用する。
GPS-Galileo		
基線解析	座標系	－変換しない
	時刻系	－変換しない
精密単独測位	座標系	○変換する　：　3.3 項の変換手法で変換する。 または、統一された座標系に基づいた暦を使用する。
	時刻系	○変換する　：　放送暦中の GGTO により補正する（3.5 項）。 または、統一された時刻系に基づいた暦を使用する。

7.5. 各衛星系の組み合わせアルゴリズム

電離層や対流圏の推定を用いたGNSS観測データの長基線解析における拡張カルマンフィルタの方程式について詳細を述べる。拡張カルマンフィルタ[35]により未知パラメータ $\boldsymbol{x}$ とその分散共分散行列 $\boldsymbol{P}$ を、時刻 t_k における観測値 $\boldsymbol{y}_k$ によって次式で推定する。

$$\begin{aligned}
&\hat{\boldsymbol{x}}_k(+) = \hat{\boldsymbol{x}}_k(-) + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{y}_k - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)))\\
&\boldsymbol{P}_k(+) = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)))\boldsymbol{P}_k(-)\\
&\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-))\left(\boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-))\boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-))^T + \boldsymbol{R}\right)^{-1}
\end{aligned} \tag{55}$$

ここで、$\boldsymbol{h}(x)$、$\boldsymbol{H}(x)$、$\boldsymbol{R}$ はそれぞれ観測モデル、計画行列、観測誤差の共分散行列である。

観測モデルが線形であると仮定し、状態ベクトルとその共分散行列の時間更新則は拡張カルマンフィルタにより次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
&\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1}(-) = \boldsymbol{F}_k^{k+1}\hat{\boldsymbol{x}}_k(+)\\
&\boldsymbol{P}_{k+1}(-) = \boldsymbol{F}_k^{k+1}\boldsymbol{P}_k(+){\boldsymbol{F}_k^{k+1}}^T + \boldsymbol{Q}_k^{k+1}
\end{aligned} \tag{56}$$

ここで、$\boldsymbol{F}_k^{k+1}$ は時刻 t_k から時刻 t_{k+1} への状態遷移行列、$\boldsymbol{Q}_k^{k+1}$ はプロセスノイズ行列である。

基準局 b と移動局 r 間の長基線解析では、観測方程式は次式で与えられる。この方程式では衛星時計誤差、受信機時計誤差、搬送波位相における衛星および受信機の初期位相オフセットは二重位相差によりほぼ完全に消去される。

$$\begin{aligned}
&\Phi_{rb,k}^{ij} \equiv \lambda_k\varphi_{rb,k}^{ij} = \rho_{rb}^{ij} - I_{rb,k}^{ij} + T_{rb}^{ij} + \lambda_k\left(N_{rb,k}^{i} - N_{rb,k}^{j}\right) + \left(n^i - n^j\right)b_{rb,k} + \varepsilon_\Phi\\
&P_{rb,k}^{ij} = \rho_{rb}^{ij} + I_{rb,k}^{ij} + T_{rb}^{ij} + \varepsilon_P
\end{aligned} \tag{57}$$

ここで、

$()^{ij}$ ：衛星 i と衛星 j の衛星間一重差
$()_{rb}$ ：受信機 r と b の受信機間一重差
$\varphi_{r,k}^{i}$ ：搬送波位相観測値（cycle）
$P_{r,k}^{i}$ ：疑似距離測定値（m）
ρ_r^i ：衛星のアンテナ位相中心と受信機のアンテナ位相中心との幾何学距離（m）
$I_{r,k}^{i}$ ：電離層遅延（m）
T_r^i ：対流圏遅延（m）
λ_k ：搬送波波長（m）
$N_{r,k}^{i}$ ：搬送波位相アンビギュイティ（cycle）
n^i ：GLONASS衛星の周波数番号（GPSは0）
$b_{rb,k}$ ：GLONASS衛星の受信機 r と受信機 b 間のチャンネル間バイアス

（GPS は 0）

$\varepsilon_\Phi, \varepsilon_P$：搬送波位相および疑似距離の観測誤差（m）

二周波 GNSS 観測における長基線解析の未知パラメータ $\boldsymbol{x}$ は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{r}^T, Z_{W,r}, G_{N,r}, G_{E,r}, Z_{W,b}, G_{N,b}, G_{E,b}, \boldsymbol{I}^T, \boldsymbol{N}_1^T, \boldsymbol{N}_2^T)^T \tag{58}$$

基準衛星の切り替わりの問題を避けるために二重差の搬送波位相アンビギュイティの代わりに一重差を使用することに注意する。観測値 $\boldsymbol{y}$ は搬送波位相観測値および疑似距離観測値の二重差により次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{y} = (\boldsymbol{\Phi}_1^T, \boldsymbol{\Phi}_2^T, \boldsymbol{P}_1^T, \boldsymbol{P}_2^T)^T \\
&\boldsymbol{\Phi}_k = (\Phi_{rb,k}^{12}, \Phi_{rb,k}^{13}, \Phi_{rb,k}^{14}, \dots, \Phi_{rb,k}^{1m})^T \\
&\boldsymbol{P}_k = (P_{rb,k}^{12}, P_{rb,k}^{13}, P_{rb,k}^{14}, \dots, P_{rb,k}^{1m})^T
\end{aligned} \tag{59}$$

式（57）により、観測モデル $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ と計画行列 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})$ は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}) = (\boldsymbol{h}_{\Phi,1}{}^T, \boldsymbol{h}_{\Phi,2}{}^T, \boldsymbol{h}_{P,1}{}^T \boldsymbol{h}_{P,1}{}^T)^T \tag{60}$$

$$\boldsymbol{h}_{\Phi,k} = \begin{bmatrix}
\rho_{rb}^{12} + T_{rb}^{12} - r_k\left(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^2 I_{rb,1}^2\right) + \lambda_k\left(\widehat{N}_{rb,k}^1 - \widehat{N}_{rb,k}^2\right) + (n^1 - n^2) b_{rb,k} \\
\rho_{rb}^{13} + T_{rb}^{13} - r_k\left(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^3 I_{rb,1}^3\right) + \lambda_k\left(\widehat{N}_{rb,k}^1 - \widehat{N}_{rb,k}^3\right) + (n^1 - n^3) b_{rb,k} \\
\vdots \\
\rho_{rb}^{1m} + T_{rb}^{1m} - r_k\left(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^m I_{rb,1}^m\right) + \lambda_k\left(\widehat{N}_{rb,k}^1 - \widehat{N}_{rb,k}^m\right) + (n^1 - n^m) b_{rb,k}
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{h}_{P,k} = \begin{bmatrix}
\rho_{rb}^{12} + T_{rb}^{12} + r_k(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^2 I_{rb,1}^2) \\
\rho_{rb}^{13} + T_{rb}^{13} + r_k(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^3 I_{rb,1}^3) \\
\vdots \\
\rho_{rb}^{1m} + T_{rb}^{1m} + r_k(m_I^1 I_{rb,1}^1 - m_I^m I_{rb,1}^m)
\end{bmatrix}$$

$$\rho_r^i = \left\| \boldsymbol{r}_r + \delta \boldsymbol{a}_r + \delta \boldsymbol{r}_{r,tide} - \boldsymbol{r}^i - \delta \boldsymbol{a}^i \right\| + \delta p^i + \delta p_r$$

$$T_r^i = m_{H,r}^i Z_{H,r} + m_{WG,r}^i (Z_{T,r} - Z_{H,r})$$

$$m_{WG,r}^i = m_{W,r}^i \left\{ 1 + cot\, El_r^i \left(G_{N,r}\, cos\, Az_r^i + G_{E,r}\, sin\, Az_r^i \right) \right\}$$

$$r_k = \lambda_k^2 / \lambda_1^2$$

$$\boldsymbol{H}(\hat{\boldsymbol{x}}) = \frac{\partial \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{x=\hat{x}} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{DE} & \boldsymbol{DM}_{T,r} & \boldsymbol{DM}_{T,b} & -\gamma_1 \boldsymbol{DM}_I & \lambda_1 \boldsymbol{D} & \\ -\boldsymbol{DE} & \boldsymbol{DM}_{T,r} & \boldsymbol{DM}_{T,b} & -\gamma_2 \boldsymbol{DM}_I & & \lambda_2 \boldsymbol{D} \\ -\boldsymbol{DE} & \boldsymbol{DM}_{T,r} & \boldsymbol{DM}_{T,b} & \gamma_1 \boldsymbol{DM}_I & & \\ -\boldsymbol{DE} & \boldsymbol{DM}_{T,r} & \boldsymbol{DM}_{T,b} & \gamma_2 \boldsymbol{DM}_I & & \end{bmatrix} \tag{61}$$

$$\boldsymbol{E} = (\boldsymbol{e}_r^1, \boldsymbol{e}_r^2, \dots, \boldsymbol{e}_r^m)^T$$

$$\boldsymbol{M}_{T,r} = \begin{bmatrix} m_{WG,r}^1 & m_{W,r}^1 \cot El_r^1 \cos Az_r^1 & m_{W,r}^1 \cot El_r^1 \sin Az_r^1 \\ m_{WG,r}^2 & m_{W,r}^2 co & El_r^2 \cos Az_r^2 & m_{W,r}^2 \cot El_r^2 \sin Az_r^2 \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_{WG,r}^m & m_{W,r}^1 \cot El_r^m \cos Az_r^m & m_{W,r}^m \cot El_r^m \sin Az_r^m \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_I = (m_I^1, m_I^2, \dots, m_I^m)^T$$

ここで、
$\boldsymbol{r}^i$　：衛星の重心位置（m）
$\delta \boldsymbol{a}^i$　：衛星アンテナ位相中心オフセット（m）
δp^i　：衛星アンテナ位相変動（m）
$\boldsymbol{r}_r$　：受信機アンテナ位置（m）
$\delta \boldsymbol{a}_r$　：受信機アンテナ位相中心オフセット（m）
$\delta \boldsymbol{r}_{r,tide}$：地球潮汐による受信機変動（m）
δp_r　：衛星アンテナ位相変動（m）
$\boldsymbol{e}_r^i$　：衛星の視線方向単位ベクトル
Az_r^i, El_r^i：衛星の方位角および仰角（rad）
$Z_{T,r}$　：対流圏天頂遅延量（m）
$Z_{H,r}$　：対流圏静水圧天頂遅延量（m）
$G_{E,r}$　：東方向対流圏遅延勾配
$G_{N,r}$　：北方向対流圏遅延勾配
$m_{H,r}^i, m_{W,r}^i$：対流圏静水圧、湿潤遅延マッピング関数
m_I^i　：電離層遅延マッピング関数
$\boldsymbol{I} = (I_{rb,1}^1, I_{rb,1}^2, \dots, I_{rb,1}^m)^T$：垂直方向電離層遅延一重差（m）
$\boldsymbol{N}_{Ij} = (N_{rb,Lj}^1, N_{rb,Lj}^2, \dots, N_{rb,Lj}^m)^T$：搬送波位相アンビギュイティ一重差（cycle）

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}$$：一重差行列

二重差の観測誤差の行分散行列は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{DR}_{\Phi,1}\boldsymbol{D}^T & & & \\ & \boldsymbol{DR}_{\Phi,2}\boldsymbol{D}^T & & \\ & & \boldsymbol{DR}_{P,1}\boldsymbol{D}^T & \\ & & & \boldsymbol{DR}_{P,2}\boldsymbol{D}^T \end{bmatrix} \tag{62}$$

$$\boldsymbol{R}_{\Phi,k} = diag(2{\sigma_{\Phi,k}^{1}}^{2}, 2{\sigma_{\Phi,k}^{2}}^{2}, \ldots, 2{\sigma_{\Phi,k}^{m}}^{2})$$
$$\boldsymbol{R}_{P,k} = diag(2{\sigma_{P,k}^{1}}^{2}, 2{\sigma_{P,k}^{2}}^{2}, \ldots, 2{\sigma_{P,k}^{m}}^{2})$$
$${\sigma_{\phi,k}^{i}}^{2} = {a_{\phi,k}}^{2} + {b_{\phi,k}}^{2}/sin(El_r^i)$$
$${\sigma_{P,k}^{i}}^{2} = {a_{P,k}}^{2} + {b_{P,k}}^{2}/sin(El_r^i)$$

ここで、

$\sigma_{\Phi,k}^{i}$, $\sigma_{P,k}^{i}$ ：搬送波位相誤差および疑似距離誤差の標準偏差（m）
$a_{\phi,k}$, $b_{\phi,k}$ ：受信機依存の衛星系搬送波位相誤差（m）
$a_{P,k}$, $b_{P,k}$ ：受信機依存の衛星系疑似距離誤差（m）

長基線解析のキネマティック解析モードでは拡張カルマンフィルタの時間更新則は式（56）を用いて次式で与えられる。

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I} \ , \ \boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \infty_{3\times3} & & & \\ & \boldsymbol{Q}_T & & \\ & & \boldsymbol{Q}_I & \\ & & & \boldsymbol{0}_{nsat\times nsat} \end{bmatrix} \tag{63}$$

ここで、

$\tau_r = t_{k+1} - t_k$：受信機サンプリング間隔（秒）
$\sigma_{ve}, \sigma_{vn}, \sigma_{vu}$ ：東方向、北方向、上方向の受信機速度誤差の標準偏差（m/$\sqrt{\text{s}}$）
$\boldsymbol{Q}_I, \boldsymbol{Q}_T$ ：電離層項および対流圏項のプロセスノイズ共分散行列
$nsat$ ：衛星数

式（58）から（63）の式を用いた拡張カルマンフィルタの式（55）、（56）の解により移動局アンテナ位置、速度およびフロート搬送波位相アンビギュイティを推定する。スタティック解析モードでは式（63）のシステムノイズの共分散行列 $\boldsymbol{Q}$ は次式で置き換えられる。

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0}_{3\times3} & & & \\ & \boldsymbol{Q}_T & & \\ & & \boldsymbol{Q}_I & \\ & & & 0_{nsat\times nsat} \end{bmatrix}$$

拡張カルマンフィルタによる解析戦略により、移動局受信機の ECEF 座標位置、各衛星の一重差電離層視線方向遅延量、基準局および移動局における天頂方向湿潤対流圏遅延量、対流圏遅延勾配パラメータ、搬送波位相の二重差フロートアンビギュイティを推定する。軌道暦誤差を減らすために IGS から提供されるリアルタイム精密衛星軌道を使用する。また電離層遅延にはシングルレイヤーマッピング関数[36]、対流圏遅延には一般

的な NMF[3]を使用する。電離層遅延や対流圏遅延の時間的変動はランダムウォークモデルを使用する。

拡張カルマンフィルタで推定された一重差フロートアンビギュイティは次式によって二重差アンビギュイティに変換する。

$$\begin{aligned}
&\hat{\boldsymbol{x}}'_k = \boldsymbol{G}\hat{\boldsymbol{x}}_k(+) = (\boldsymbol{R}^T, \hat{\boldsymbol{N}}^T)^T \\
&\boldsymbol{P}'_k = \boldsymbol{G}\boldsymbol{P}_k(+)\boldsymbol{G}^T = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_R & \boldsymbol{Q}_{NR} \\ \boldsymbol{Q}_{RN} & \boldsymbol{Q}_N \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{64}$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & & \\ & \boldsymbol{D} & \\ & & \boldsymbol{D} \end{bmatrix}$$

この式において、最適な二重差アンビギュイティの整数値バイアス $\check{\boldsymbol{N}}$ は ILS（最小二乗解）を満足するよう検索する。

$$\check{\boldsymbol{N}} = argmin_{N\in Z}\left(\left(\boldsymbol{N}-\hat{\boldsymbol{N}}\right)^T \boldsymbol{Q}_N{}^{-1}\left(\boldsymbol{N}-\hat{\boldsymbol{N}}\right)\right) \tag{65}$$

解を解くために LAMBDA[37]が効果的であることがよく知られており、それを拡張した MLAMBDA[39]を本アルゴリズムで採用している。簡単なレシオテストのような方法により解の検定を行った後、次式の解により移動局位置を含んだ正しいパラメータ $\boldsymbol{R}$ のフィックス解が得られる。

$$\check{\boldsymbol{R}} = \hat{\boldsymbol{R}} - \boldsymbol{Q}_{RN}\boldsymbol{Q}_N{}^{-1}(\hat{\boldsymbol{N}} - \check{\boldsymbol{N}}) \tag{66}$$

アンビギュイティ決定モードで「fix and hold」オプションを使用すると、次式により決定されたアンビギュイティが拡張カルマンフィルタの観測更新において強く拘束される。

$$\begin{aligned}
&\boldsymbol{H} = (0,0,\ldots,0,1,1,\ldots,-1,-1,\ldots) \\
&\hat{\boldsymbol{x}}_k(+) = \hat{\boldsymbol{x}}_k(-) + \boldsymbol{K}_k(\check{\boldsymbol{N}} - \hat{\boldsymbol{N}}) \\
&\boldsymbol{P}_k(+) = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k\boldsymbol{H})\boldsymbol{P}_k(-) \\
&\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}(\boldsymbol{H}\boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}^T + \boldsymbol{R})^{-1} \\
&\boldsymbol{R} = diag(c,c,\ldots,c)
\end{aligned} \tag{67}$$

$\boldsymbol{H}$ において、移動局の固定されたアンビギュイティを示す列は 1 に設定し、基準局の固定されたアンビギュイティを示す列は-1 に設定する。他の成分は 0 に設定する。そし

て c は固定されたアンビギュイティのための拘束パラメータである。c のデフォルト設定値は 0.01m である。

AR オプションにおいて仰角マスクによるアンビギュイティの部分解決では、(64) 式の行列 D に仰角マスク以下の衛星のフロートアンビギュイティに 0 を設定する。

8. 統計学的手法に基づく検討

7 章に示したように、複数衛星系を組み合わせた測位アルゴリズムでは、各衛星系の特性や運用状況の違いからそれぞれのデータに対する重み付け、補正、変換が行われる。しかしながら、これらの補正量等は実測データから見積もられた値に基づいたものであり、種々のバイアス誤差等が完全に除去できるものではない。したがって、補正によって除去できない、残留するバイアス誤差成分が測位解におよぼす影響を評価する必要が生じる場合もある。このような残留するバイアス成分の影響は、6 章に示した評価方法とまったく同じ手法によって評価可能である。

一方、バイアスの補正値の精度を考慮した観測モデルを構築して、測位に活用することも可能である。例えば、基準局 k で衛星 1 の位相観測量

$$\Phi_k^1 = r_k^1 + \delta t_k - \delta t^1 + \lambda N_k^1 + b_k^1 + \varepsilon_k^1 \tag{68}$$

を得て、バイアス誤差 b_k^1 をその補正値 $\overline{b_k^1}$ で補正するとする。このとき、補正値 $\overline{b_k^1}$ は誤差をもち、

$$\overline{b_k^1} = b_k^1 - \eta_k^1 \tag{69}$$

と表されると考える。ここで η_k^1 はバイアス補正値の誤差であり、ε_k^1 とは独立な平均 0、分散 ζ_{k1}^2 の正規性白色雑音と仮定する。負号は便宜的なものである。このとき、(68)式の観測は

$$\widetilde{\Phi_k^1} = r_k^1 + \delta t_k - \delta t^1 + \lambda N_k^1 + \eta_k^1 + \varepsilon_k^1 \tag{70}$$

のように補正され、補正された観測量の観測雑音は $(\eta_k^1 + \varepsilon_k^1) \sim N\left(0、\ \zeta_{k1}^2 + \sigma_{k1}^2\right)$ となる。すなわち、補正値の不確かさを観測雑音に包含した形で観測モデルを構築できる。以上のような、補正値の誤差のモデル化およびその取り扱いについては、文献[33][34]などで考察されている。

9. 計算手法のプロトタイプ実装と評価

9.1. 評価内容

本章では、「7.5 各衛星系の組み合わせアルゴリズム」でまとめたアルゴリズムをプロトタイプソフトウェアへ実装して実際の測位解析を行なった結果をまとめる。プロトタイプ実装は RTKLIB2.4.1 の後処理基線解析ソフトウェア RTKPOST の一部を改修して行なった。

本調査で対象とする解析方法は基線解析と精密単独測位であり、衛星系の組合せやバイアス補正の条件を変えながら以下①～③の各条件で初期化時間と FIX 率、および測位精度の評価を行った。

①各衛星系の組合せによる基線解析（長基線、短基線）
②各衛星系の組合せによる精密単独測位
③異機種間 GPS+GLONASS 基線解析での補正効果（1m 基線）

①および③の基線解析観測場所は表 9-1 のとおり。②の精密単独測位は東京海洋大学越中島キャンパス第 4 実験棟の屋上で実施した。いずれもオープンスカイ環境である。

表 9-1 各データの観測場所

基線長	観測場所	
	Reference	Rover
長基線 （356 km）	東京海洋大学　越中島キャンパス 第 4 実験棟	立命館大学　びわこ・くさつキャンパス
短基線 （260 m）	東京海洋大学　越中島キャンパス 第 4 実験棟	東京海洋大学　越中島キャンパス 先端科学技術研究センター
PPP	ー	東京海洋大学　越中島キャンパス 第 4 実験棟
1m 基線	東京海洋大学　越中島キャンパス 第 4 実験棟	東京海洋大学　越中島キャンパス 第 4 実験棟

（いずれも建屋屋上のオープンスカイ環境）

また、それぞれの基線の Rover 側における衛星数と DOP については Appendix 2 に整理した。

9.2. 各衛星系の組合せによる基線解析

本項では、次の①～④の４通りの衛星系組合せによって基線解析結果（スタティック・キネマティック）がどのように異なるかを評価した。

① GPS のみ
② GPS＋GLONASS
③ GPS＋QZSS
④ GPS＋GLONASS＋QZSS

それぞれの組合せにおいて、表 9-2 の解析条件で基線解析を行い、初期化時間と Fix 率、および精度（RMS）について表 9-3 のとおり整理した。また、それぞれの時系列結果については Appendix 3 に整理した。ここで、RMS 計算や時系列プロットで基準とした真の座標は GPS のみのデータと精密暦から Bernese5.0 の静止測位によって得られた値である。

衛星暦については GPS 解析と GPS＋GLONASS 解析では長基線で精密暦、短基線で放送暦を用いた。QZSS を組合せた解析では QZSS の精密暦が存在しないため長基線・短基線ともに放送暦のみとなっている。

表 9-3 において、複数衛星系の結果が GPS のみの場合に比べて性能向上した部分を赤字で示している。なお、RMS の計算は Fix 解のみを対象としている。この結果によると、短基線スタティック解析では複数衛星系の組合せ解析での結果は GPS のみの解析に比べてほとんど変化が得られていない。オープンスカイにおける短基線スタティックでは、既に GPS だけで解析に十分な情報が得られており、GLONASS や QZSS を組合せても性能の向上が極僅かであると見られる。

長基線スタティック解析においても複数衛星系による性能向上はほとんど得られず、GPS+GLONASS+QZSS ではむしろ精度が劣化してしまう。精密暦を使った GPS＋GLONASS 解析や放送暦での GPS＋QZSS 解析では大きな精度劣化は見られていないことから、GPS＋GLONASS＋QZSS の精度劣化は GLONASS 放送暦の誤差が影響しているものと考えられる。4.2 項で調査したとおり、GLONASS 放送暦は GPS 放送暦に比べて 3 倍程度の誤差があるため、現段階では数 100km の長基線解析においては放送暦での GLONASS データを使用しないほうが良い。QZSS については精密暦が得られないことから暦精度の評価は行なっていないが、GPS＋QZSS の長期線解析で精度が保たれていることを考えると QZSS 放送暦については少なくとも GPS と同等の精度が得られていると考えられる。

一方、短基線キネマティック解析では、複数衛星系の組合せによって僅かであるが精度の向上傾向が得られた。しかし、Fix 率で見ると GLONASS の利用による向上は得られていない。長基線になると更に Fix 率の低下が顕著であり、やはり GLONASS の暦精

度が影響しているものと考えられる。QZSS での Fix 率低下については放送暦を使用しているためであり、長基線解析に使用するためには精密暦の利用が必要である。

表 9-2 各衛星系の組合せによる基線解析 解析条件

受信機／アンテナ	（Reference）JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T （Rover） JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T
観測日	2011 年 9 月 13 日
測位方式	基線解析スタティック、基線解析キネマティック
観測データ期間とエポック間隔	24 時間 30 秒エポック間隔
基線長	長基線（356 km）、短基線（260 m）
衛星系の組合せ	GPS、GPS+GLONASS、GPS+QZSS、GPS+GLONASS+QZSS
衛星暦	放送暦 （長基線 GPS、GLONASS 解析のみ精密暦）
仰角マスク	10° ただし Fix 時は長基線 25° 短基線 0°
アンビギュイティ決定最小 Ratio	3.0
ハードウェアバイアス補正	補正なし
観測誤差モデル	補正なし （固定値 Phase:3mm、Code:300mm）
GLONASS チャンネル間バイアス	補正なし

表 9-3 各衛星系の組合せによる基線解析 解析結果

各組合せの番号(#)は Appendix 3 に示す時系列グラフの番号に対応する。本表での RMS 値は Fix 解のみを対象としており、Appendix 3 の時系列グラフ内に書かれている RMS 値（Float 解も含む）とは異なる。(表 9-5、表 9-7 も同様)

複数衛星系の組合せによって GPS のみと比べて改善した値を 赤字下線 で表す。

#d4 の GPS+GLONASS+QZSS 解析では FIX 解が得られていない。

#	衛星系の組合わせ	初期化時間（エポック）	Fix 率 (%)	RMS E-W (m)	RMS N-S (m)	RMS U-D (m)
短基線　基線解析スタティック						
a1	GPS のみ	1	—	0.0044	0.0059	0.0102
a2	GPS + GLONASS	1	—	0.0040	0.0060	0.0104
a3	GPS + QZSS	1	—	0.0044	0.0058	0.0104
a4	GPS + GLONASS + QZSS	1	—	0.0040	0.0060	0.0106
長基線　基線解析スタティック						
b1	GPS のみ（精密暦）	88	—	0.0000	0.0049	0.0216
b2	GPS + GLONASS（精密暦）	78	—	0.0064	0.0044	0.0188
b3	GPS + QZSS	81	—	0.0038	0.0031	0.0123
b4	GPS + GLONASS + QZSS	163	—	0.0247	0.0055	0.0326
短基線　基線解析キネマティック						
c1	GPS のみ	1	94.1	0.0060	0.0076	0.0104
c2	GPS + GLONASS	1	80.4	0.0057	0.0072	0.0097
c3	GPS + QZSS	1	94.1	0.0059	0.0078	0.0099
c4	GPS + GLONASS + QZSS	1	76.1	0.0057	0.0075	0.0092
長基線　基線解析キネマティック						
d1	GPS のみ（精密暦）	116	78.9	0.0114	0.0150	0.0416
d2	GPS + GLONASS（精密暦）	74	36.9	0.0104	0.0112	0.0457
d3	GPS + QZSS	308	35.1	0.0141	0.0185	0.0571
d4	GPS + GLONASS + QZSS	*	0.0	*	*	*

9.3. 各衛星系の組合せによる精密単独測位

本項では、複数衛星系組合せによる精密単独測位を評価する。精密単独測位には精密暦の使用が必須となるので、ここでは精密暦が入手可能な GPS と GLONASS について評価を行った。解析条件と結果を表 9-4、表 9-5 に示す。なお、各結果の時系列については Appendix 3 にまとめている。

表 9-5 において GPS＋GLONASS の結果が GPS のみの場合に比べて性能向上した部分を赤字で示しているが、本調査の精密単独測位では GPS＋GLONASS で改善が得られていない。精密単独測位では暦の軌道精度の他にクロックの精度も必要になるが、GLONASS におけるそれらの精度が GPS に比べて悪いため、現時点では GLONASS を利用した精密単独測位で利点は無いと考えられる。

表 9-4 各衛星系の組合せによる精密単独測位 解析条件

受信機／アンテナ	JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T
観測日	2011 年 8 月 30 日
測位方式	精密単独測位スタティック、精密単独測位キネマティック
観測データ期間とエポック間隔	24 時間　30 秒エポック間隔
衛星系の組合せ	GPS、GPS+GLONASS
衛星暦	精密暦
仰角マスク	10°
ハードウェアバイアス補正	補正なし
観測誤差モデル	補正なし　（固定値　Phase:3mm、Code:300mm）
GLONASS チャンネル間バイアス	補正なし

表 9-5 各衛星系の組合せによる精密単独測位 解析結果

各組合せの番号(#)は Appendix 3 に示す時系列グラフの番号に対応する。

複数衛星系の組合せによって GPS のみと比べて改善した値を 赤字下線 で表す。

#	衛星系の組合わせ	RMS E-W (m)	RMS N-S (m)	RMS U-D (m)
精密単独測位　スタティック				
e1	GPS のみ	0.0711	0.0094	0.0667
e2	GPS + GLONASS	0.0723	0.0091	0.0991
精密単独測位　キネマティック				
f1	GPS のみ	0.1817	0.1024	0.4309
f2	GPS + GLONASS	0.3504	1.0408	2.0486

9.4. 異機種間 GPS＋GLONASS 基線解析での補正効果

本項では、異機種間の GPS＋GLONASS 解析における補正の効果について評価する。

本調査の 7.2 項および 2.3.8 節において観測誤差モデルと GLONASS チャンネル間バイアスを推定しており、これらをプロトタイプソフトウェアに取り込んで補正した場合に補正なしと比べてどのように結果が変わるかを整理した。

なお、解析するデータはそれぞれの補正値推定に使用したデータと同じものを用いた。つまり、表 2-9 の 1m 基線データである。その他解析条件と解析結果についてはの表 9-6 および表 9-7 のとおりである。各結果の時系列は Appendix 3 にまとめている。

解析を行った受信機の組合せは

① JAVAD DELTA － NovAtel OEM628

② JAVAD DELTA － Trimble NetR9

③ JAVAD DELTA － TOPCON NET-G3

の三通りである。

また、補正の方法については

A) 観測誤差モデル : －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス : －補正なし

B) 観測誤差モデル : ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス : －補正なし

C) 観測誤差モデル : －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス : ○補正あり

D) 観測誤差モデル : ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス : ○補正あり

の４つの場合について調査しており、A の補正なしの場合に比べて B～D の補正がどのように影響するかを整理した。表 9-7 では、A の補正なしに比べて B～D の補正によって性能向上した部分を赤字で示している。

これらの補正において、特に Fix 率の向上が得られていることが分かる。特に① JAVAD-NovAtel と②JAVAD-Trimble の組合せにおいて顕著である。一方、③JAVAD－TOPCON では A の補正なしでもある程度の Fix 率が得られているが、これは図 2-16 で求めた GLONASS チャンネル間バイアスを見てみると、比較的 JAVAD と TOPCON のチャンネル間バイアスの傾向が近いためであると考えられる。

いずれにしても、異機種間で GLONASS を利用した解析を行う場合は、これらの補正が効果的であることが確認できた。

表 9-6 GPS+GLONASS 基線解析での補正効果 解析条件

受信機／アンテナ	① (Reference) JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T (Rover) NovAtel OEM628 ／ Trimble GNSS ChokeRing ② (Reference) JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T (Rover) Trimble NetR9 ／ Trimble GNSS ChokeRing ③ (Reference) JAVAD DELTA ／ JAVAD GrAnt-G3T (Rover) TOPCON NET-G3 ／ TOPCON G3-A1
観測日	① 2011 年 9 月 1 日 ② 2011 年 9 月 2 日 ③ 2011 年 9 月 3 日
測位方式	基線解析（スタティック)、基線解析（キネマティック）
観測データ期間とエポック間隔	24 時間　30 秒エポック間隔
基線長	1 m
衛星系の組合せ	GPS + GLONASS
衛星暦	放送暦
仰角マスク	10°
ハードウェアバイアス補正	補正なし
観測誤差モデル	補正あり、補正なし
GLONASS チャンネル間バイアス	補正あり、補正なし

表 9-7　GPS+GLONASS 基線解析での補正効果 解析結果

左は各組合せの番号(#)は Appendix 3 に示す時系列グラフの番号に対応する。

「補正」について、各記号の意味は次の通り。

A ） 観測誤差モデル：－補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス：－補正なし

B ） 観測誤差モデル：○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス：－補正なし

C ） 観測誤差モデル：－補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス：○補正あり

D ） 観測誤差モデル：○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス：○補正あり

B～D の補正が A の場合と比べて改善した値を 赤字下線 で表す。

#	受信機組合せ	補正	初期化時間（エポック）	Fix 率 (%)	RMS E-W (m)	RMS N-S (m)	RMS U-D (m)
基線解析　スタティック							
g1	① JAVAD-NovAtel	A	1082	—	0.0018	0.0042	0.0026
g2		B	8	—	0.0003	0.0068	0.0021
g3		C	1	—	0.0008	0.0052	0.0010
g4		D	1	—	0.0002	0.0053	0.0010
g5	② JAVAD-Trimble	A	1	—	0.0005	0.0047	0.0005
g6		B	3	—	0.0002	0.0045	0.0002
g7		C	1	—	0.0010	0.0050	0.0004
g8		D	2	—	0.0006	0.0048	0.0003
g9	③ JAVAD-TOPCON	A	1	—	0.0007	0.0039	0.0027
g10		B	1	—	0.0008	0.0035	0.0016
g11		C	1	—	0.0003	0.0039	0.0026
g12		D	1	—	0.0006	0.0036	0.0017
基線解析　キネマティック							
h1	① JAVAD-NovAtel	A	1078	0.9	0.0009	0.0060	0.0065
h2		B	7	14.0	0.0022	0.0054	0.0058
h3		C	1	80.2	0.0021	0.0054	0.0055
h4		D	1	96.1	0.0021	0.0052	0.0059
h5	② JAVAD-Trimble	A	1	54.6	0.0020	0.0053	0.0059
h6		B	2	93.8	0.0020	0.0053	0.0060
h7		C	1	82.9	0.0021	0.0051	0.0055
h8		D	2	93.8	0.0021	0.0051	0.0054
h9	③ JAVAD-TOPCON	A	1	82.6	0.0021	0.0046	0.0061
h10		B	1	94.2	0.0023	0.0045	0.0061
h11		C	1	79.1	0.0023	0.0047	0.0061
h12		D	1	91.6	0.0024	0.0047	0.0063

10. まとめ

GPS、GLONASS、QZSS の各衛星系において、

① 測位信号の特性の違いによる影響

② 時刻系・座標系の違いによる影響

③ 軌道暦の精度による影響

のそれぞれの影響について主に実測データから評価を行い、それらの情報からアルゴリズムを構築してプロトタイプソフトウェアによる評価を行なった。

① 測位信号の特性の違いによる影響については、実測データを元に各衛星系の特性を整理した。ここで得られたマルチパスによる観測誤差モデルと GLONASS 受信機チャンネル間バイアスについては、衛星系組合せ解析において補正することによって Fix 率の向上が得られることが確認できた。GLONASS 受信機チャンネル間バイアスは GNSS 受信機の機種に依存するものであり、受信機の組合せによっては 1m という短基線でも補正なしでは Fix 率 1%未満という場合もあったが、補正によって 80%超の Fix 率が得られ、その有効性が確認できた。

② 時刻系・座標系の違いによる影響については、GPS、GLONASS、QZSS それぞれの時刻系・座標系を整理してプロトタイプソフトウェアに補正を組み込んだ。基線解析においては GLONASS 以外は二重差分でキャンセルされるものの、GLONASS においては現在の PZ-90.02 でも WGS84 から 40cm の差があり補正が必要である。また、精密単独測位を行う場合はこれらはすべて補正する必要がある。

③ 軌道暦の精度による影響については、GPS と GLONASS について IGS 精密暦を基準とした誤差を整理することでそれぞれの精度を評価した。GLONASS は数年前に比べて精度が向上しているものの、現時点でも放送暦で GPS の 3 倍程度の誤差があるため、300km 超の長基線解析や精密単独測位においてはそれらの影響のため利用する利点が得られていない。

衛星系ごとに整理すると、GLONASS の場合はセンチメートル級の解析では暦精度の影響から精度や Fix 率が低下する場合があり、現状では高精度解析において利用する利点は少ない。今後、GLONASS 暦の精度向上が進んでくればメリットが大きくなってくる可能性がある。一方で、Appendix 2 に整理したとおり GPS＋GLONASS で利用可能な衛星数は増加するため、アベイラビリティの向上としては現時点でも利用するメリットはある。

QZSS については、現在は精密暦が入手できないため長基線や精密単独測位の評価が行えていないが、GLONASS に比べて GPS との互換性が高いのでデータの取扱いが容易である。GPS のみで既にセンチメートル級の精度が得られる短基線では QZSS 利用の利点は小さいものの、長基線解析や精密単独測位では複数衛星系利用による性能向上余地が

十分にある。①測位信号の特性の違いによる影響で評価したとおり、高仰角ではノイズやマルチパスの影響が小さいため、今後 QZSS の衛星数増加によってアベイラビリティ向上はもちろん、長基線解析や精密単独測位での Fix 率向上・精度向上が期待できる。

本調査では Galileo については実データが得られないことから調査は行なっていないが、運用が開始されれば同様の評価を行なっていく必要がある。

また、複数衛星系のみならず、GPS でも L2C や L5 帯などの新しい信号や周波数が利用可能になっており、複数周波数の利用とあわせた総合的な解析についても評価を行なっていく必要がある。

11.参考文献

[1] IS-GPS-200E, Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, June 8, 2010

[2] IS-GPS-705A, Navstar GPS Space Segment/User Segment L5 Interfacecs, June 8, 2010

[3] IS-GPS-800A, Navstar GPS Space Segment/User Segment L1C Interface, June 8, 2010

[4] GLONASS-ICD edition 5.1, Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document Navigation, radiosignal in bands L1, L2, 2008

[5] OS SIS ICD Issure 1.1, European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document, September, 2010

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

[7] Yuri Urlichich et al, GLONASS Developing Strategies for the Future, GPS World April 2011 pp42-49, 2011

[8] Pratap Misra and Per Enge 原著、測位航法学会訳、精説 GPS、改訂第 2 版

[9] 杉本 末雄 et al., GPS ハンドブック 2010 年 9 月 25 日初版第 1 刷, 2010

[10] B.ホフマン-ウェレンホフ等著、西修二郎訳, GPS 理論と応用, 2005

[11] 安田 明生, 山田 英輝, マルチ GNSS 時代における準天頂衛星システムの役割について, IEICE2011, 2011

[12] 浜 真一, 世界時とその高精度比較について, 測位航法学会ニューズレター第 I 巻第 3 号, 2010

[13] BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES：CIRCULAR T 282、July.2011

[14] GLONASS-ICD, Global Navigation Satellite System GLONASS Interface Control Document Navigation, Version 5.0, 2002

[15] Tianxing Chu and Dennis Akos, Assisted GNSS - Traditional andVectorized: Implementation and Performance Results、ION GNSS 2010

[16] GLONASS－AIC, AERONAUTICAL INFORMATION CIRCULAR OF THE RUSSIAN FEDERATION, 2009

[17] G. Gendt et al., GGSP: Realisation and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame, Advances in Space Research 47, 2011

[18] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/

[19] Yuri Urlichich et al, GLONASS Developing Strategies for the Future, GPS World April 2011 pp42-49, 2011

[20] 山田英輝(2008)、複合測位における GLONASS 測位性能に関する研究、東京海洋大学大学院

[21] http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html

[22] 山田英輝、et al.(2010), チャネル間ハードウェアバイアス較正による RTK-GPS/GLONASS 測位の性能評価、 ION GNSS 2010

[23] Kozlov, D 、et al.(2000), Statistical Characterization of Hardware Biases in GPS + GLONASS receivers, ION GPS 2000

[24] Changsheng Cai et al.(2007)、Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations、Journal of Global Positioning Systems(2007) Vol.6,No.1:13-22

[25] Pratap Misra and Per Enge, 精鋭 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機, pp.235-289, 2004

[26] Tom Stansell et al., BOC or MBOC? The Common GPS/Galileo Civil SIgnal Design: A Manufacturers Dialog, Part 1, Inside GNSS July/August 2006, 2006

[27] 高須 知二, 長基線 RTK-GPS/GNSS の現状、課題と展望, 電気学会産業システム情報化研究会, 2010

[28] G. Strang and K. Borre: Linear Algebra, Geodesy, and GPS, Wellesley-Cambridge Press, 1997.

[29] R. O. Nielsen: Relationship Between Dilution of Precision for Point Positioning and for Relative Positioning with GPS, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 33, No. 1, pp. 333-338, 1997.

[30] P. J. G. Teunissen, A Canonical Theory for Short GPS Baselines. Part IV: Precision Versus Reliability, Journal of Geodesy, Vol. 71, No. 9, pp. 513-525, 1997.

[31] D. Odijk and P. J. G. Teunissen, ADOP in Closed Form for a Hierarchy of Multi-frequency Single-baseline GNSS Models, Journal of Geodesy, Vol. 82, No. 8, pp. 473-492, 2008.

[32] N. Reussner and L. Wanninger: GLONASS Inter-frequency Boases and Their Effects on RTK and PPP Carrier-phase Ambiguity Resolution, Proc. of ION GNSS 2011, pp. 712-716, Portland, OR, Sep. 2011.

[33] S. Sugimoto and Y. Kubo: GNSS Regressive Models and Precise Point Positioning, Proc. of the 36th ISCIE Int. Symp. on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 159-164, Suwa, Japan, 2004.

[34] S. Fujita, Y. Kubo and S. Sugimoto: Precise Point Positioning based on GR Models - Further Results in Single Frequency Applications, Proc. IGNSS Symposium 2006, paper no. 92, 2006.

[35] Gelb ed., Applied Optimal Estimation, The M.I.T. Press, London, 1974

[36] S. Schaer, How to use CODE's global ionosphere maps, 1997

[37] A. E.Niell, Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelength, Journal of Geophysical Research, 101, b2, 3227-3246, 1996

[38] P. J. G. Teunissen, The least-square ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS ambiguity estimation, J. Geodesy, vol.70, 1995

[39] X.-W. Chang, X. Yang and T. Zhou, MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation, J. Geodesy, vol.79, 2005

Appendix 1　GLONASS 受信機チャンネル間バイアスの解析手法

EKF（extended Kalman filter）を用いることで、状態ベクトル $\boldsymbol{x}$ とその共分散行列 $\boldsymbol{P}$ は以下の通りとなる。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_k(+) = \hat{\boldsymbol{x}}_k(-) + \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{v}(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-))$$

$$\boldsymbol{P}_k(+) = \left(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)\right)\right) \boldsymbol{P}_k(-)$$

$$\boldsymbol{K}_k = \boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)\right)\left(\boldsymbol{H}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)\right)\boldsymbol{P}_k(-)\boldsymbol{H}\left(\hat{\boldsymbol{x}}_k(-)\right)^T\right) + \boldsymbol{R})^{-1}$$

ここで、$\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x})$、$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})$、$\boldsymbol{R}$はそれぞれ残差ベクトル、偏微分行列、計測誤差の共分散行列である。システムモデルが静的でありシステム雑音を無視すると EKF における t_k から t_{k+1} への時刻変化は以下のように表現できる。

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+1}(-) = \hat{\boldsymbol{x}}_k(+)\ ,\ \ \boldsymbol{P}_{k+1}(-) = \boldsymbol{P}_k(+)$$

推定された GLONASS 受信機チャンネル間バイアスの状態ベクトルを以下のように定義する。

搬送波位相の一重差(SD)残差より、二重差残差と観測誤差の偏微分と共分散を以下のように表現できる。

$$\boldsymbol{v}_k(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{D}\boldsymbol{v}_{ur,k}(\boldsymbol{x})\ ,\ \ \boldsymbol{H}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{D}\boldsymbol{H}_{ur}(\boldsymbol{x})\ ,\ \ \boldsymbol{R} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{R}_{ur}\boldsymbol{D}^T$$

$$\boldsymbol{v}_{ur}(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} \lambda^1\varphi_{ur}^1 - (\rho_{ur,k}^1 + \lambda^1 B_{ur}^1) \\ \lambda^2\varphi_{ur}^2 - (\rho_{ur,k}^2 + \lambda^2 B_{ur}^2) \\ \vdots \\ \lambda^m\varphi_{ur}^m - (\rho_{ur,k}^m + \lambda^m B_{ur}^m) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{H}_{ur}(\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} \lambda^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda^m \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{ur} = diag(2{\sigma_\phi}^2, 2{\sigma_\phi}^2, \ldots, 2{\sigma_\phi}^2)$$

$$\rho_{ur}^i = \rho_u^i - \rho_r^i\ ,\ \ \boldsymbol{e}_u^i = (\boldsymbol{r}^i - \boldsymbol{r}_r)/\|\boldsymbol{r}^i - \boldsymbol{r}_r\|$$

ここで、

$()_{ur}$ ： ターゲット受信機と基準受信機との一重差(SD)
$\boldsymbol{r}_r$ ： アンテナ位相中心（m）
$\boldsymbol{r}^i$ ： 信号送信時の衛星位置（m）
λ^i ： 衛星 i の波長（m）
ϕ_u^i ： 衛星 i の搬送波観測値（cycle）
ρ_u^i ： 幾何学距離（m）
B_{ur}^i ： 一重差（SD）搬送波バイアス（cycle）
σ_ϕ ： 搬送波誤差の標準偏差（m）

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}$$ ：一重差行列

搬送波バイアスは整数アンビギュイティと衛星ハードウェアバイアス、周波数依存の受信機ハードウェアバイアスによって以下のように表現できる。

$$B_u^i = N_u^i + b_u^i - b^i$$

ここで、

N_u^i ： 整数アンビギュイティ（cycle）
b^i ： 衛星 i のハードウェアバイアス（cycle）
b_u^i ： 衛星 i における受信機ハードウェアバイアス（cycle）

以上観測方程式を使い、EKF により推定された二重差ハードウェアバイアスは以下の通りとなる。

$$\hat{b}_{ur}^{ij} = \hat{B}_{ur}^i - \hat{B}_{ur}^j - \breve{N}_{ur}^{ij}$$

ここで、

$\hat{B}_{ur}^i$ ：衛星 i における一重差(SD)搬送波バイアスの推定値（cycle）
$\breve{N}_{ur}^{ij}$ ： 二重差(DD)整数アンビギュイティ

整数アンビギュイティを解く際、本調査では以下のアンビギュイティ決定手順で行なった。この手順の中では、周波数番号間の受信機ハードウェアバイアスが 1 サイクルより十分小さい値であるとしている。

(1) 周波数番号 0 の衛星 j を基準とする

(2) 周波数番号が+1 の衛星 i をターゲットとする

(3) 衛星 i と j の二重差整数アンビギュイティを以下のように解く

$$\breve{N}_{ur}^{ij} = round(\hat{B}_{ur}^{i} - \hat{B}_{ur}^{j})$$

(4) 衛星 i と j の二重差受信機ハードウェアバイアスを以下のように得る

$$\hat{b}_{ur}^{ij} = \hat{B}_{ur}^{i} - \hat{B}_{ur}^{j} - \breve{N}_{ur}^{ij}$$

(5) 衛星 i と j の二重差受信機ハードウェアバイアスについて、推定期間中の対応周波数番号衛星組の推定値すべての平均をとる

$$\bar{b}_{ur}^{ij} = average(\hat{b}_{ur}^{ij})$$

(6) 周波数番号が+2 の衛星 i をターゲットとする

(7) 衛星 i と j の二重差整数アンビギュイティを以下のように解く

$$\breve{N}_{ur}^{ij} = round(\hat{B}_{ur}^{i} - \hat{B}_{ur}^{j} - \bar{b}_{ur}^{i-1,j})$$

(8) 手順(4)～(5)を行う

(9) 衛星 i と j の両方を 1 つずつ増やしながら周波数番号+6 まで手順(3)～(8)を繰り返す。

(10) 周波数番号−1, −2, . . . , −7 においても(2)～(9)を繰り返す

Appendix 2　プロトタイプ評価データの衛星状況

本調査のプロトタイプ評価で用いた観測データ Rover 側の衛星状況について整理した。
各観測データにおいて、Rover 側観測場所と観測日は以下の通りである。

(i) 長基線データ

観測場所：　立命館大学びわこ・くさつキャンパス

観測日　：　2011 年 9 月 13 日

(ii) 短基線データ

観測場所：　東京海洋大学越中島キャンパス　先端科学技術研究センター

観測日　：　2011 年 8 月 30 日

(iii) PPP データ／1m 基線データ

観測場所：　東京海洋大学越中島キャンパス　第 4 実験棟

観測日　：　① NovAtel　2011 年 9 月 1 日

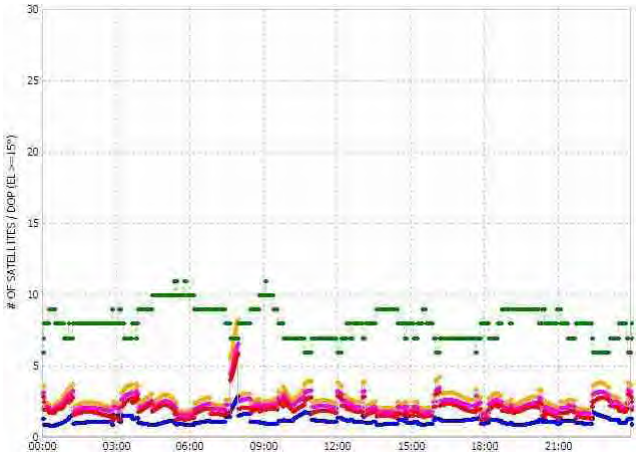
② Trimble　2011 年 9 月 2 日

③ TOPCON　2011 年 9 月 3 日

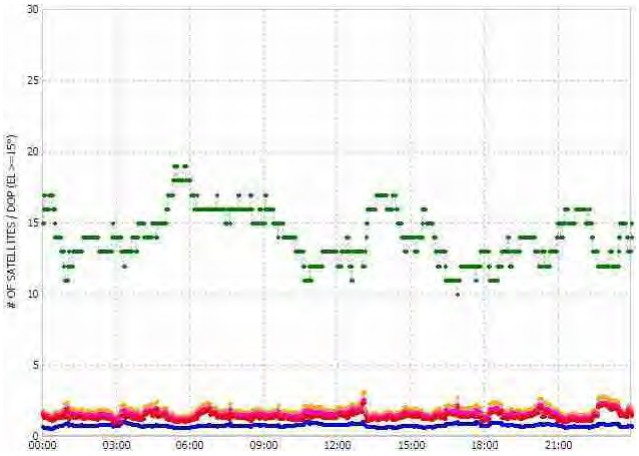
(i) 立命館大学びわこ・くさつキャンパス　　(2011 年 9 月 13 日)

● 衛星数　● GDOP　● PDOP　● HDOP　● VDOP

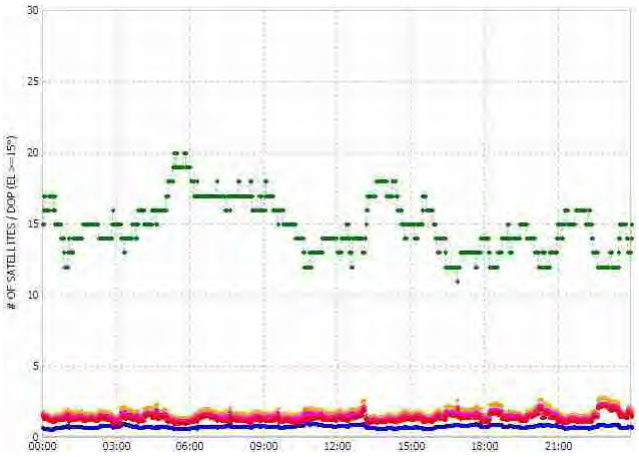
■GPS のみ



■GPS＋GLONASS



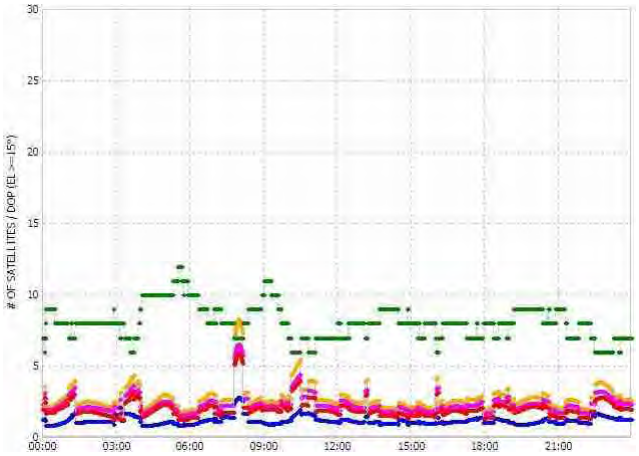
■GPS＋GLONASS＋QZSS



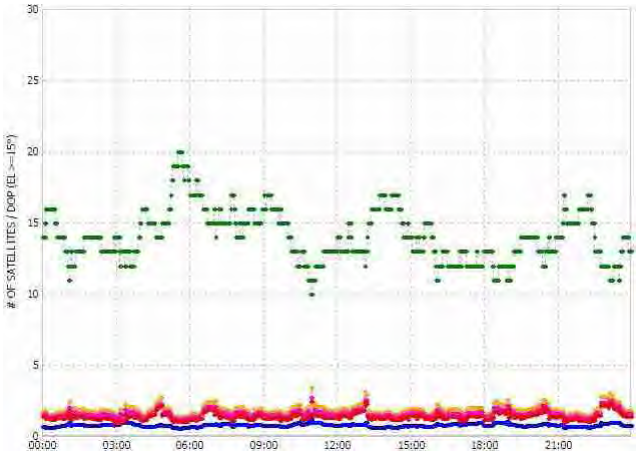
（ii）東京海洋大学越中島キャンパス　先端科学技術研究センター　（2011 年 8 月 30 日）

● 衛星数　● GDOP　● PDOP　● HDOP　● VDOP

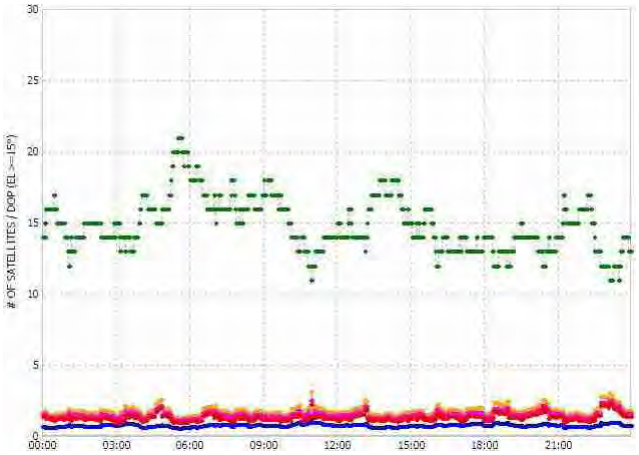
■GPS のみ



■GPS＋GLONASS



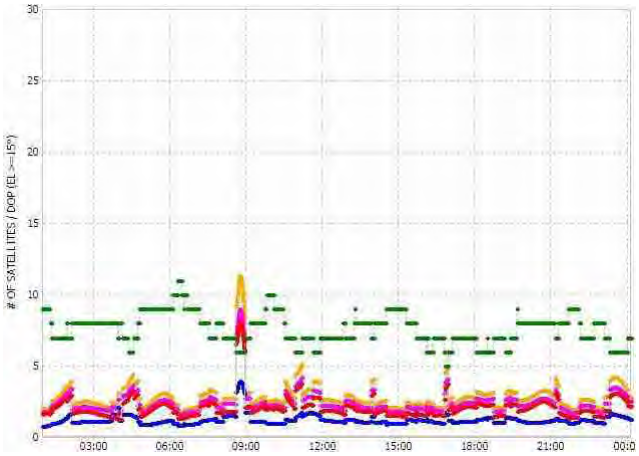
■GPS＋GLONASS＋QZSS



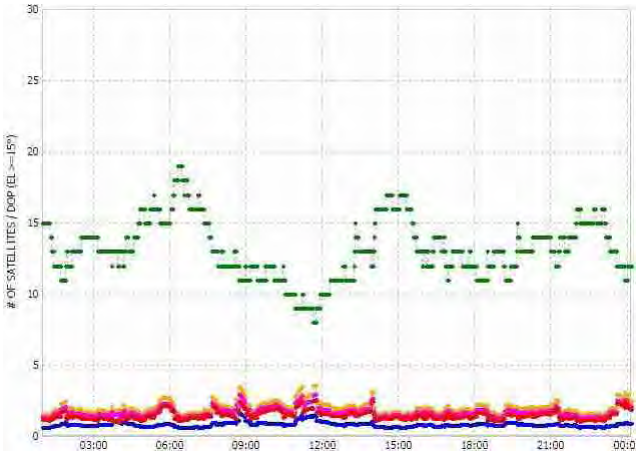
(iii)① 東京海洋大学越中島キャンパス　第 4 実験棟　(NovAtel　2011 年 9 月 1 日)

● 衛星数　● GDOP　● PDOP　● HDOP　● VDOP

■GPS のみ



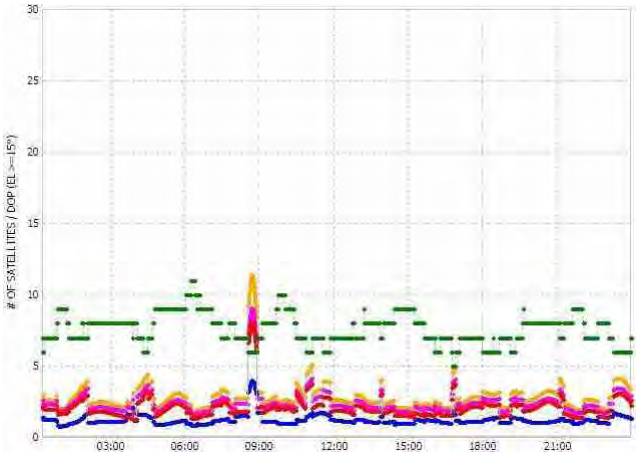
■GPS＋GLONASS



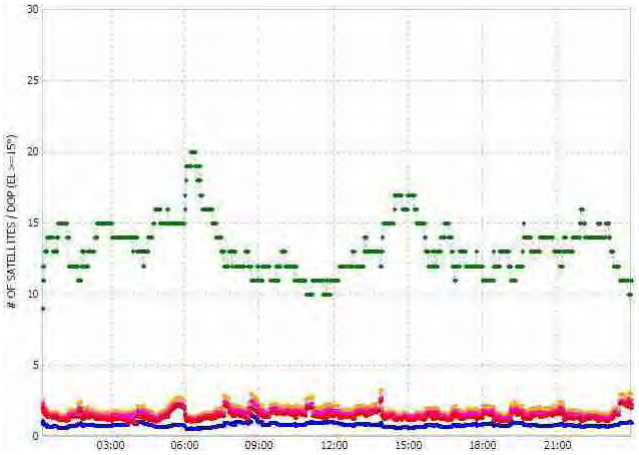
(iii)② 東京海洋大学越中島キャンパス　第 4 実験棟　(Trimble　2011 年 9 月 2 日)

● 衛星数　● GDOP　● PDOP　● HDOP　● VDOP

■GPS のみ



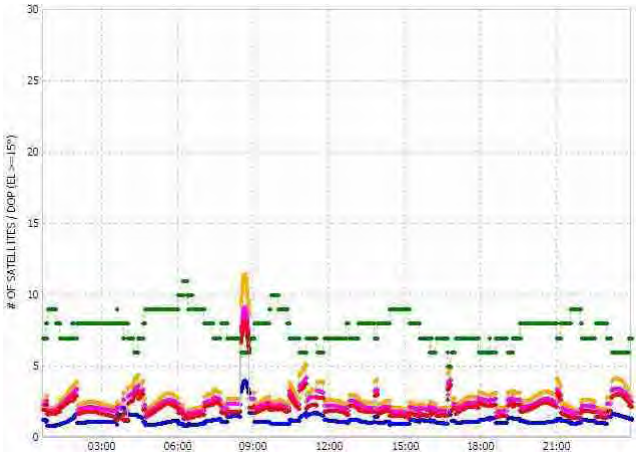
■GPS＋GLONASS



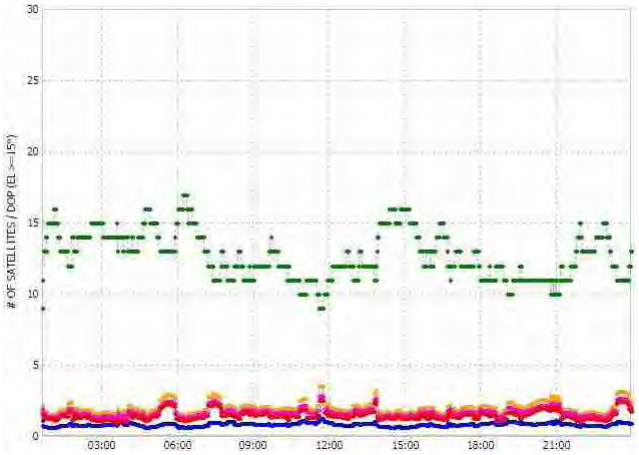
(iii)③ 東京海洋大学越中島キャンパス　第 4 実験棟　（TOPCON　2011 年 9 月 3 日）

● 衛星数　● GDOP　● PDOP　● HDOP　● VDOP

■GPS のみ



■GPS＋GLONASS

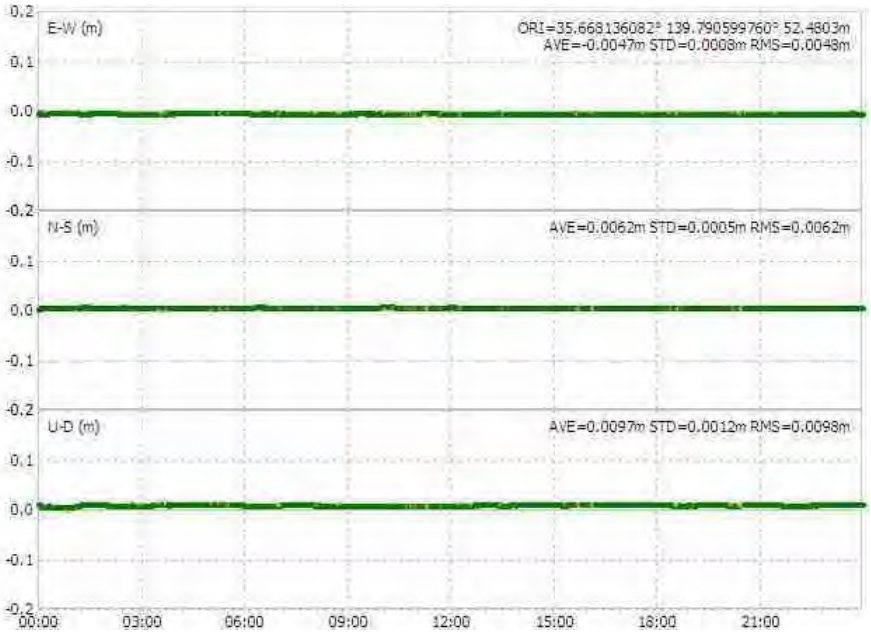


Appendix 3　測位解析結果の時系列グラフ

図中の平均値(AVE)、標準偏差(STD)、RMS の各値は Float 解を含んだものであり、報告書本文で記載した値（Fix 解のみが対象）とは異なることに注意。

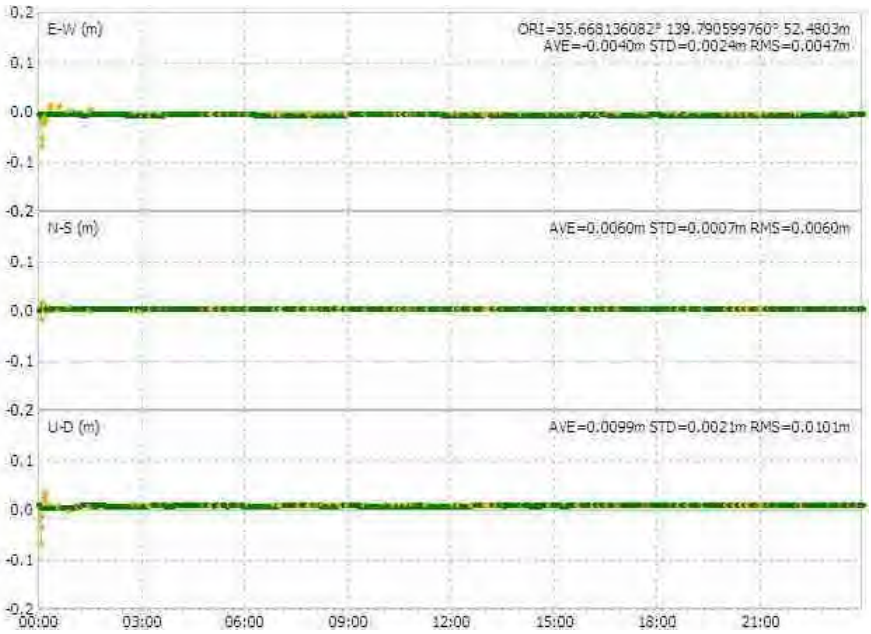
a1）短基線スタティック　GPS のみ

■ 放送暦　　● FIX　● Float



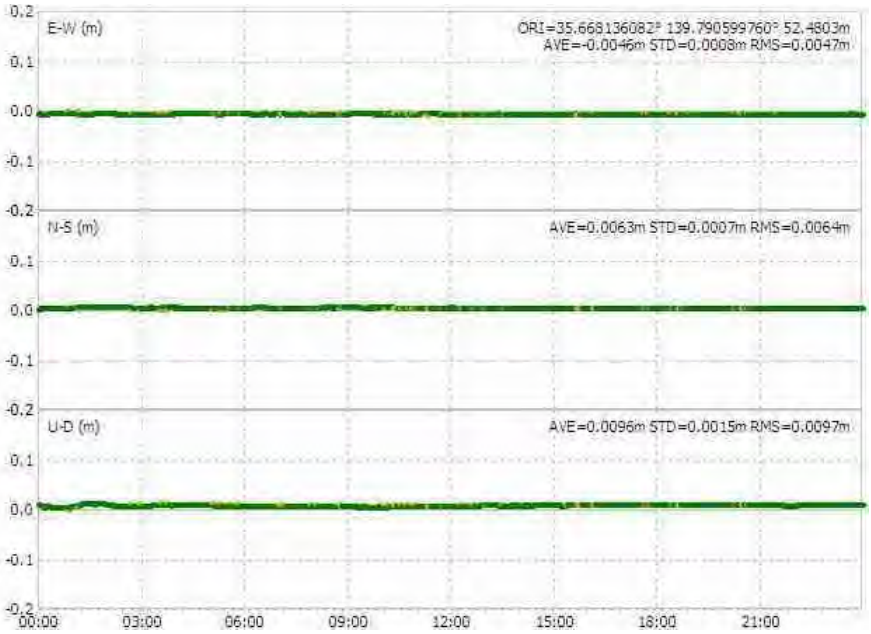
a2）短基線スタティック　GPS＋GLONASS

■放送暦　　● FIX　● Float



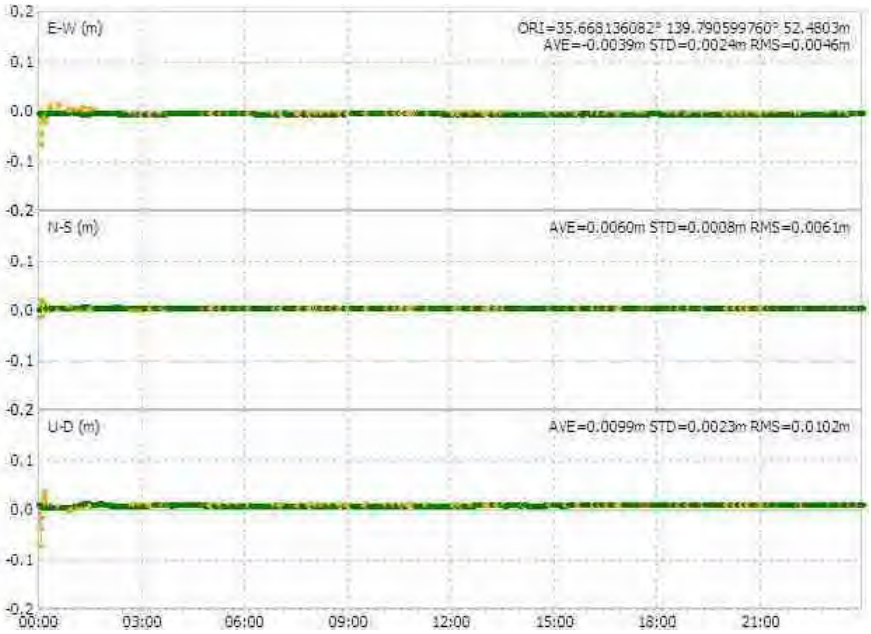
a3）短基線スタティック　GPS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



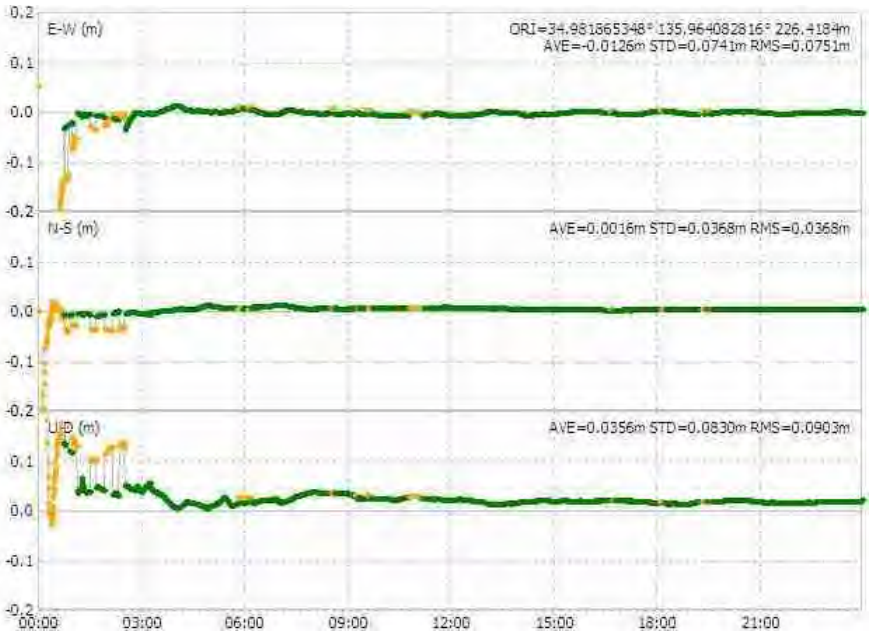
a4）短基線スタティック　GPS＋GLONASS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



b1）長基線スタティック　GPS のみ

■ 精密暦　　● FIX　● Float

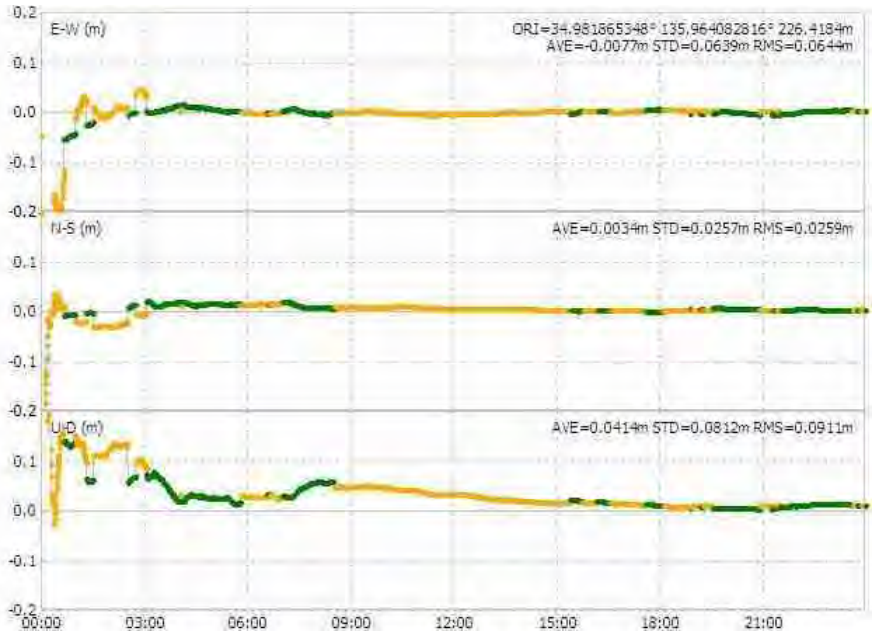


b2）長基線スタティック　GPS＋GLONASS

■ 精密暦　　● FIX　● Float

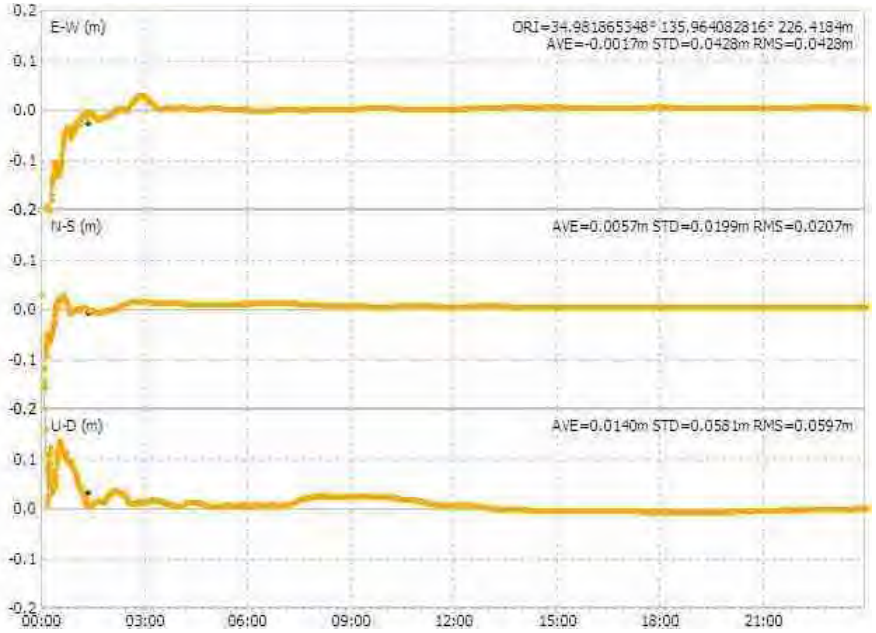
b3）長基線スタティック　GPS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



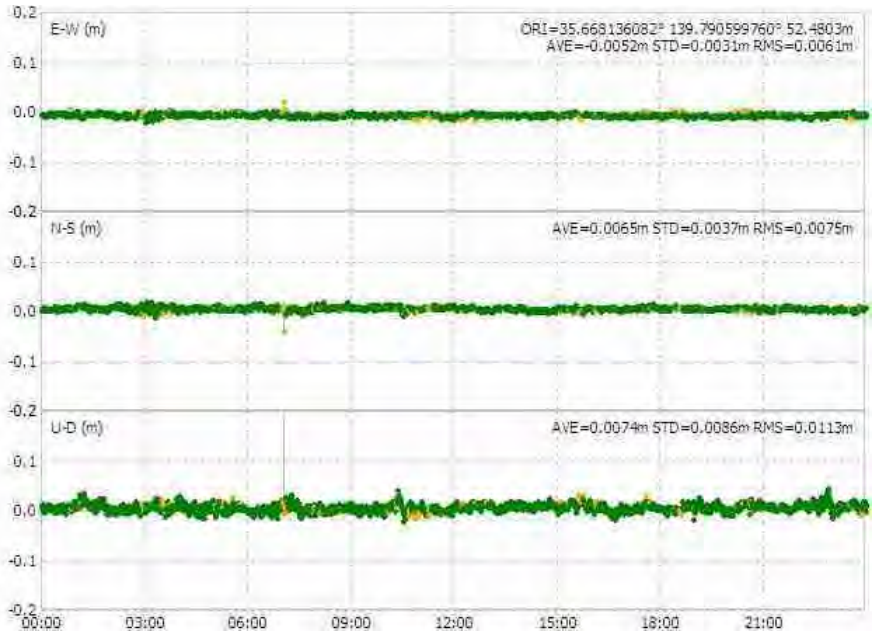
b4）長基線スタティック　GPS＋GLONASS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



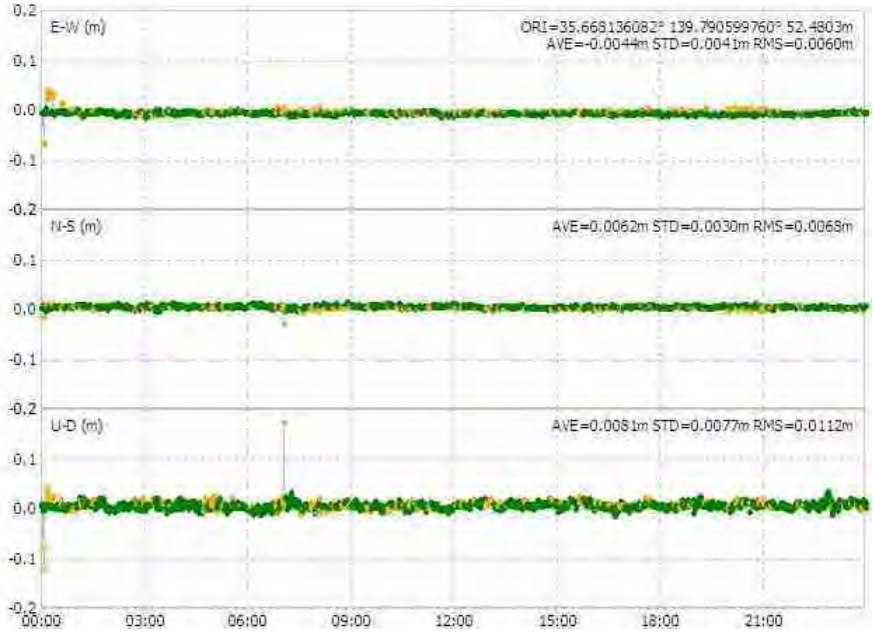
c1）短基線キネマティック　GPS のみ

■ 放送暦　　● FIX　● Float



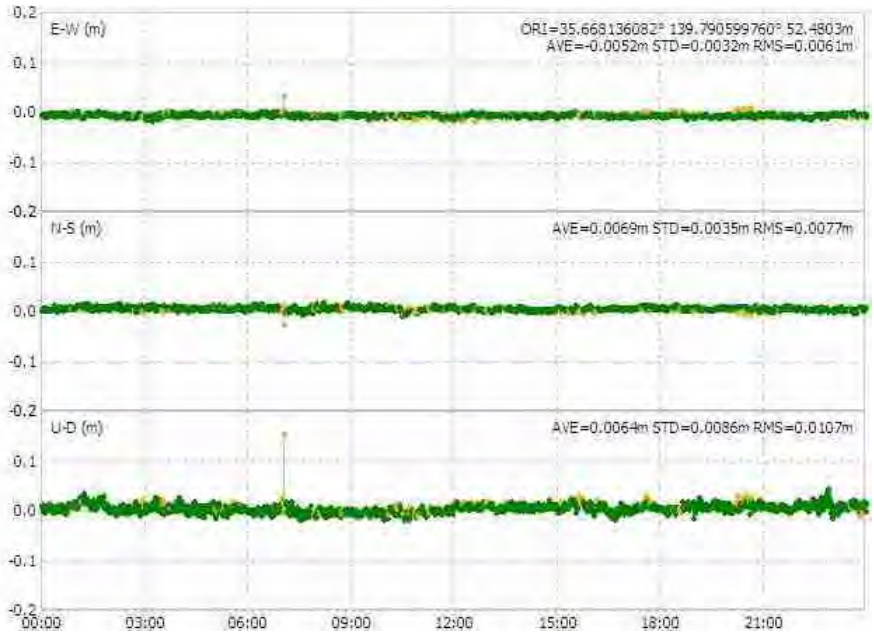
c2）短基線キネマティック　GPS＋GLONASS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



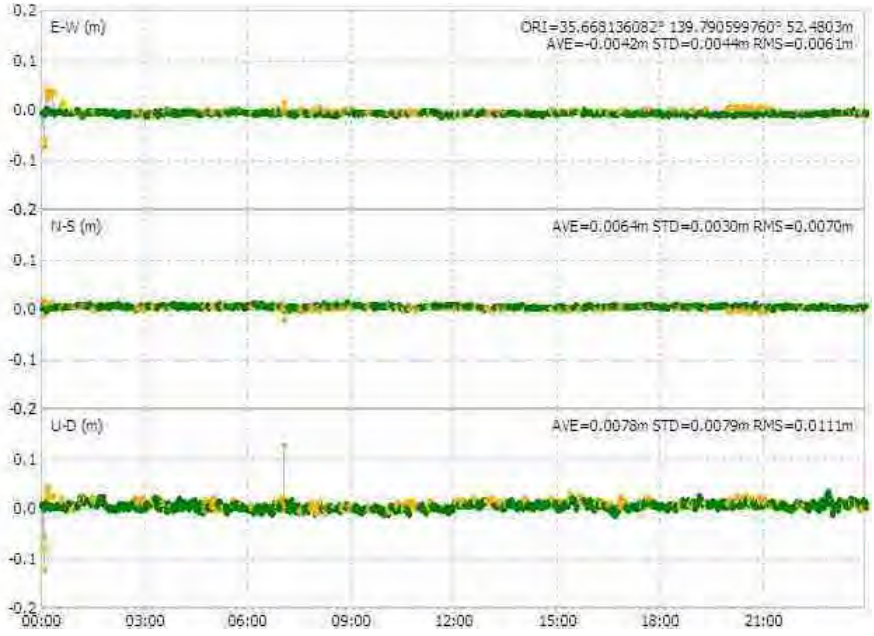
c3）短基線キネマティック　GPS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



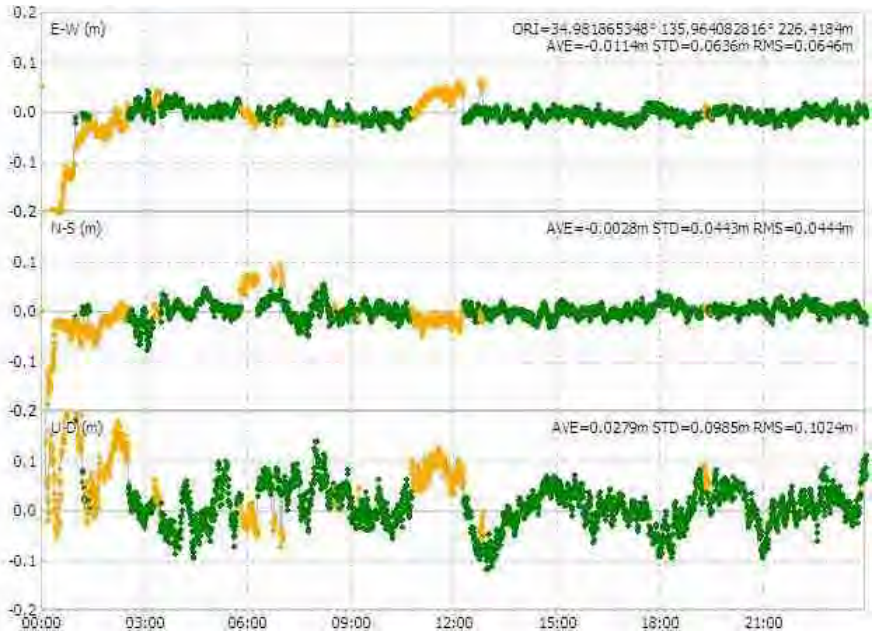
c4）短基線キネマティック　GPS＋GLONASS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float



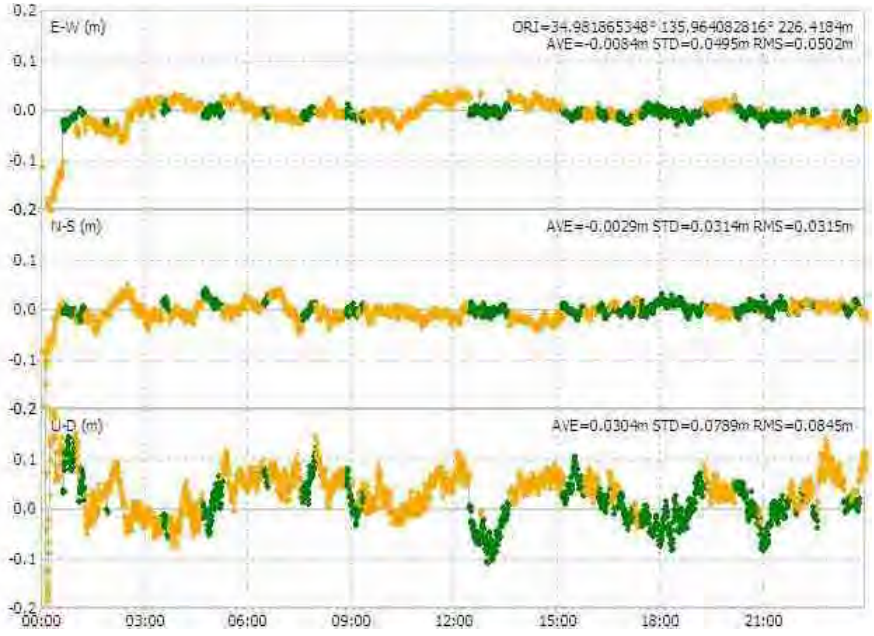
d1）長基線キネマティック　GPS のみ

■ 精密暦　　● FIX　● Float



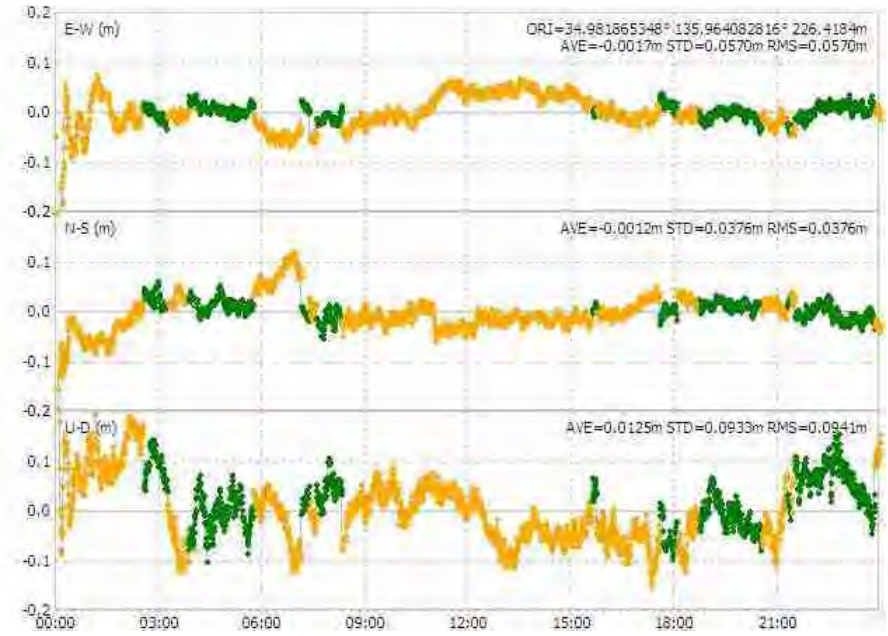
d2）長基線キネマティック　GPS＋GLONASS

■ 精密暦　　● FIX　● Float



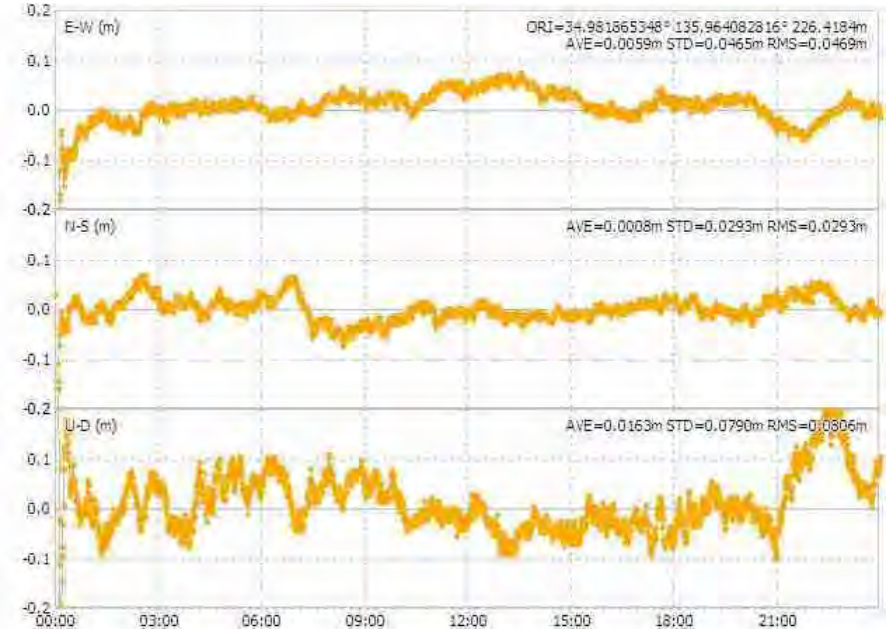
d3）長基線キネマティック　GPS＋QZSS

■ 放送暦　　● FIX　● Float

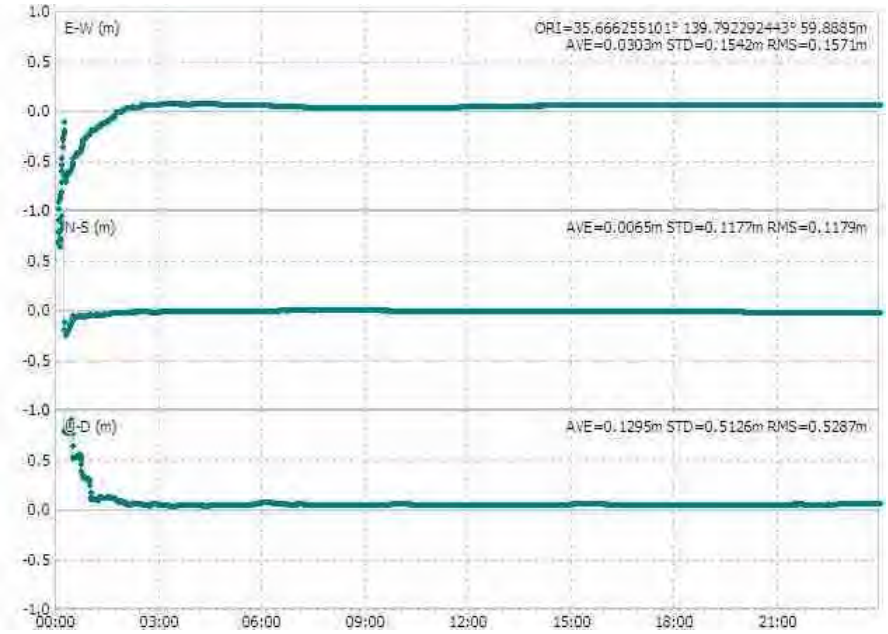


d4）長基線キネマティック　GPS＋GLONASS＋QZSS

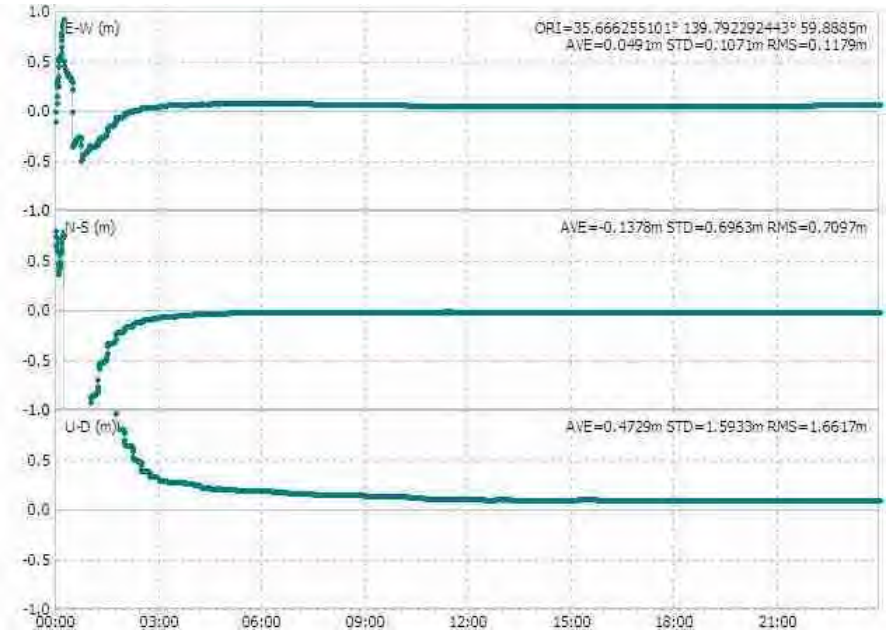
■ 放送暦　　● FIX　● Float



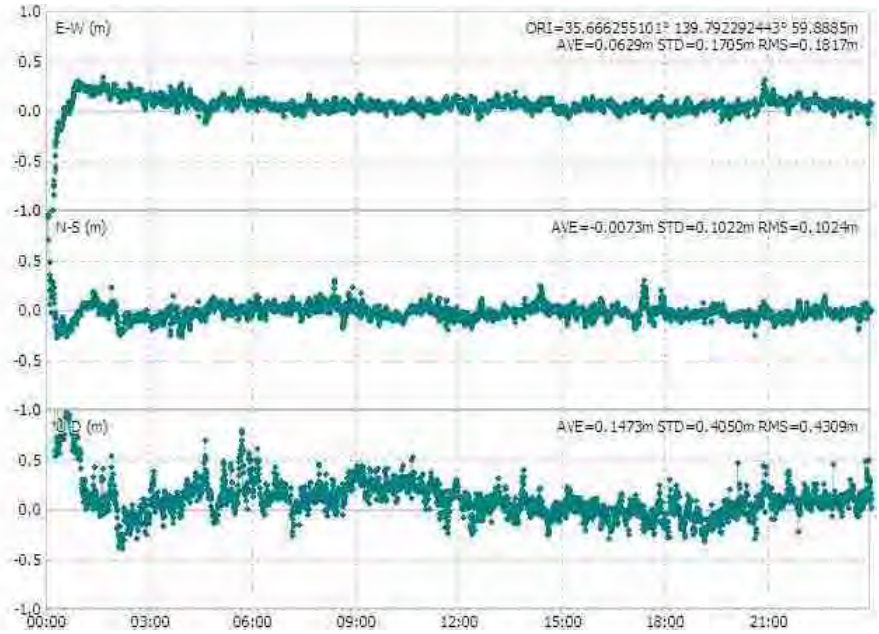
e1）精密単独測位スタティック　GPS



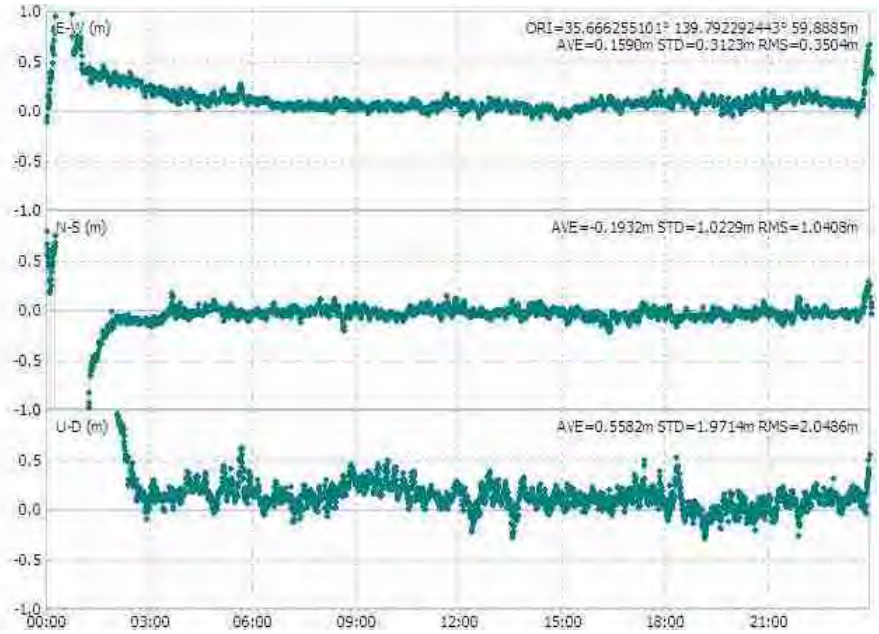
e2）精密単独測位スタティック　GPS＋GLONASS



f1）精密単独測位キネマティック　GPS



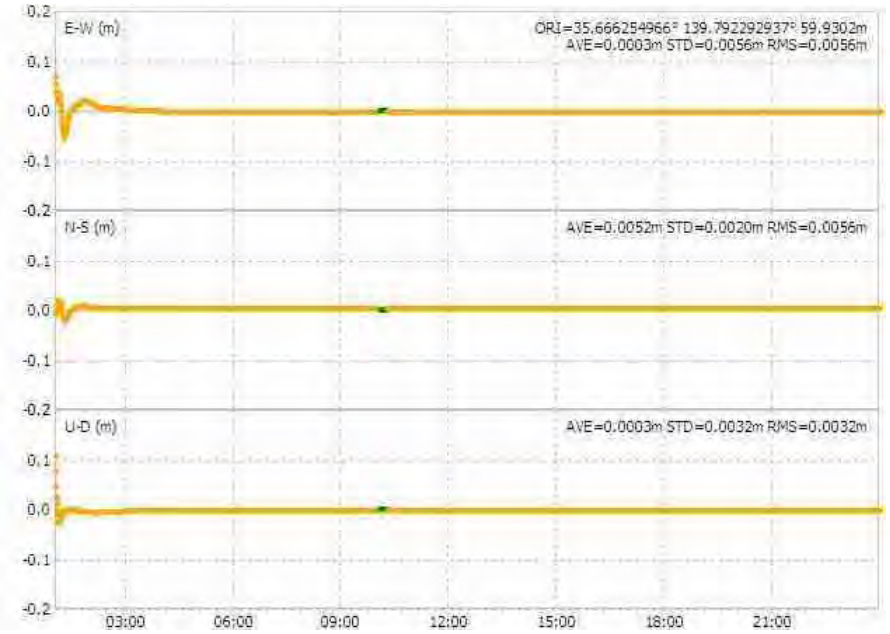
f2）精密単独測位キネマティック　GPS＋GLONASS



g1）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

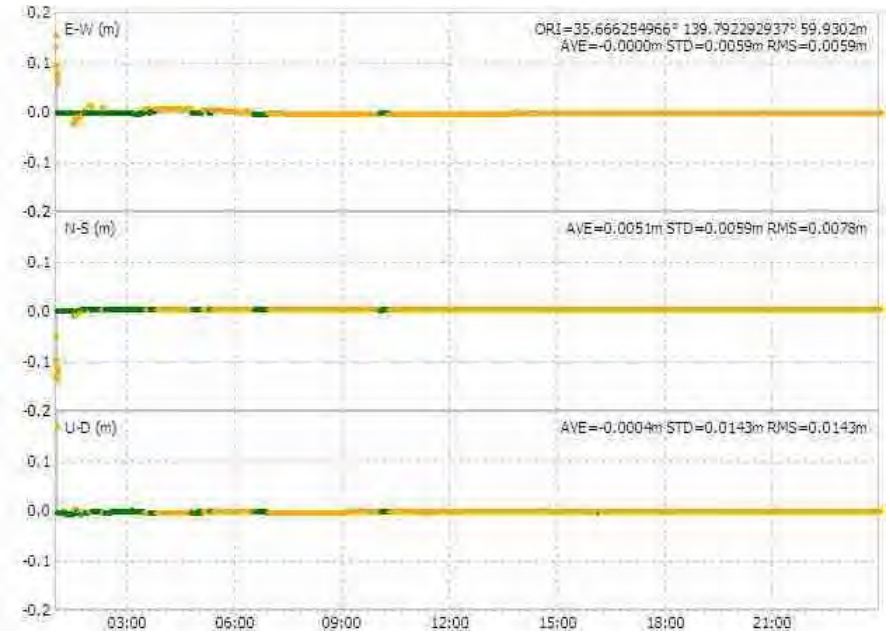
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g2）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

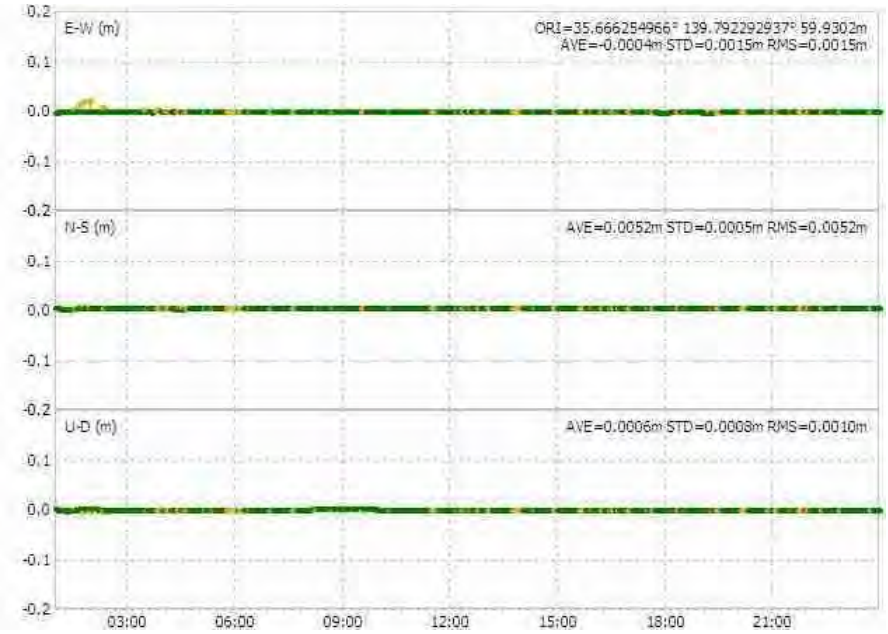
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g3）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

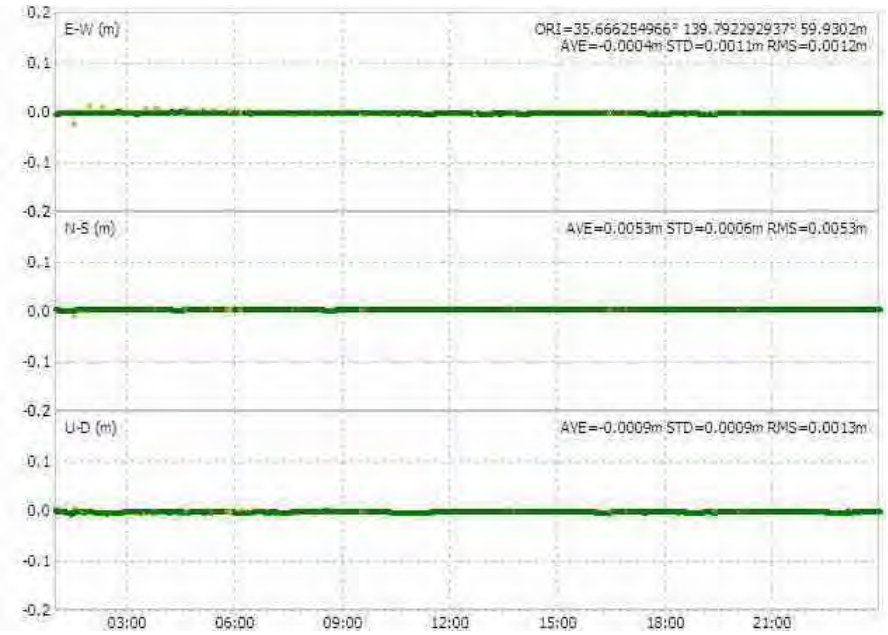
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



g4）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

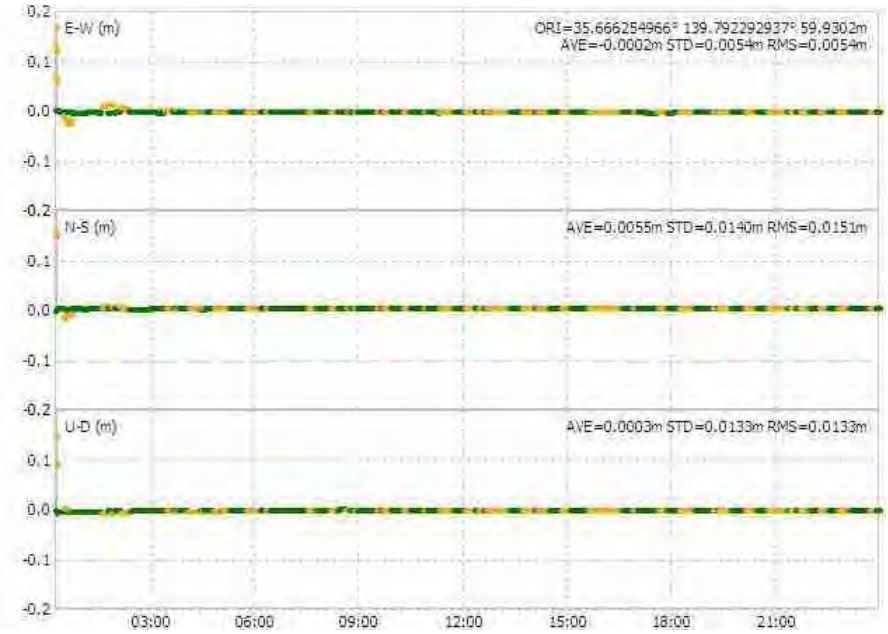
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



g5）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

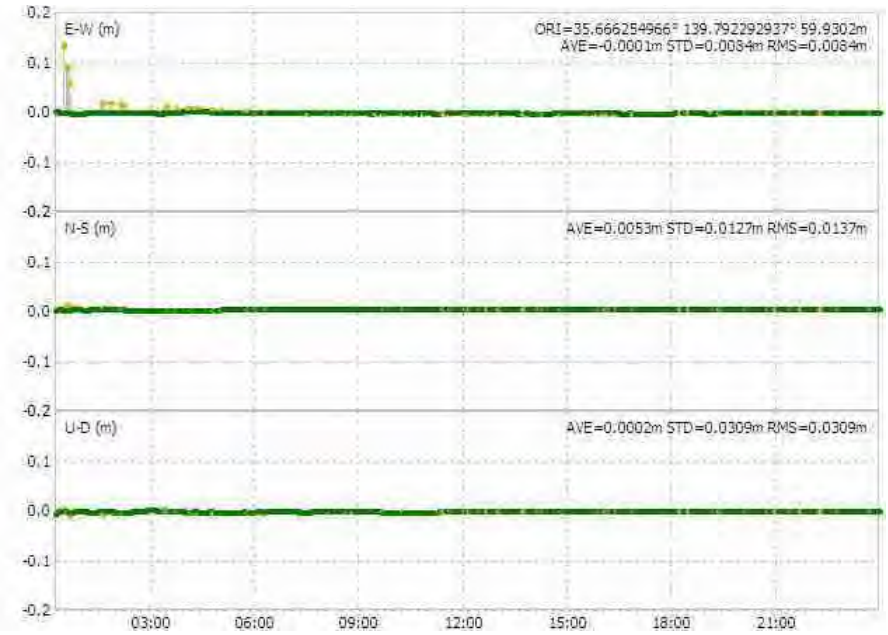
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g6）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

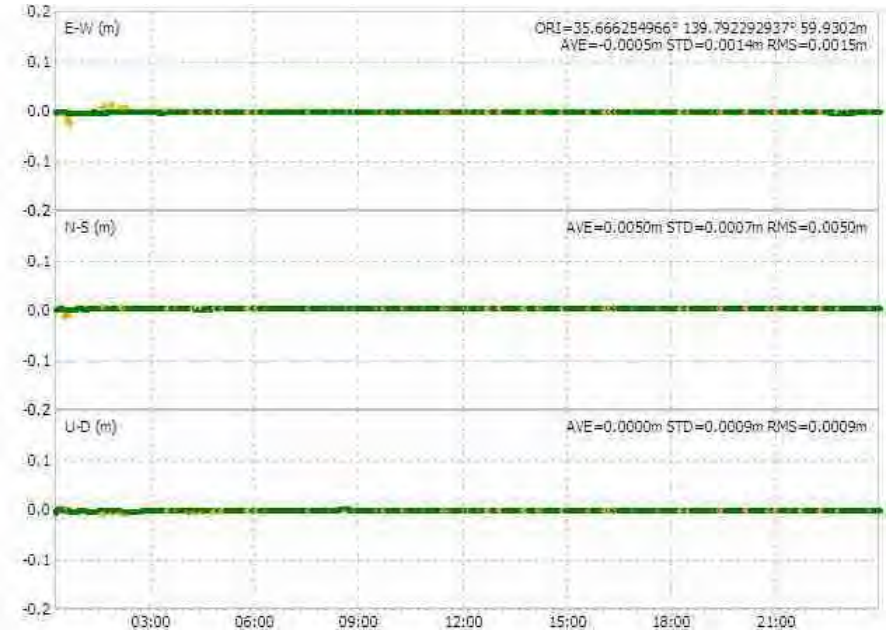
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g7）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

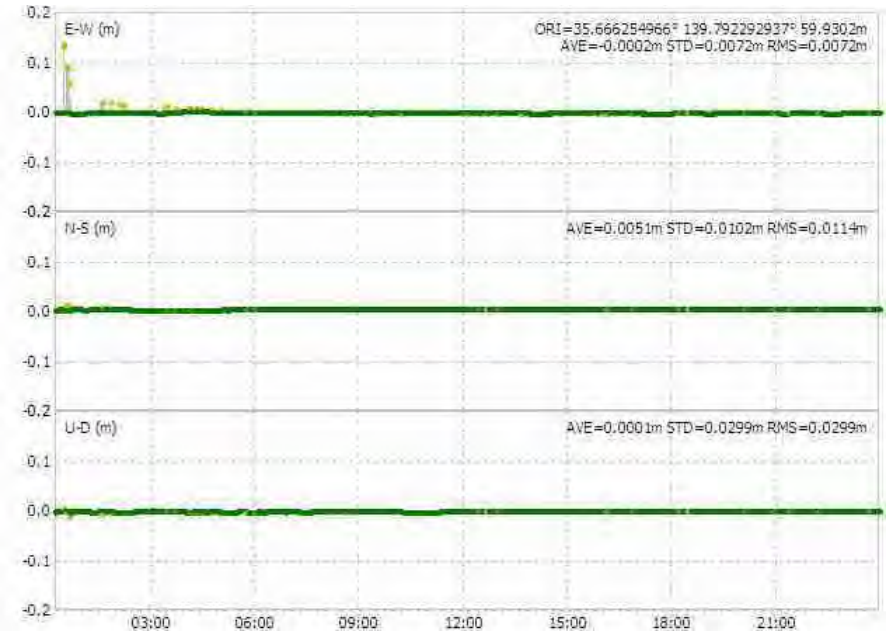
【観測誤差モデル: ー補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



g8）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

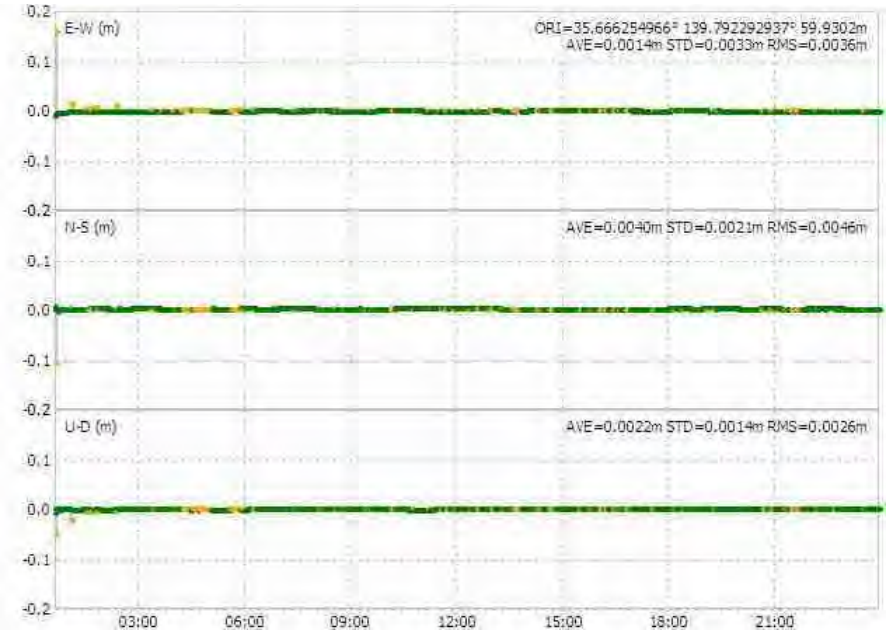
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



g9）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

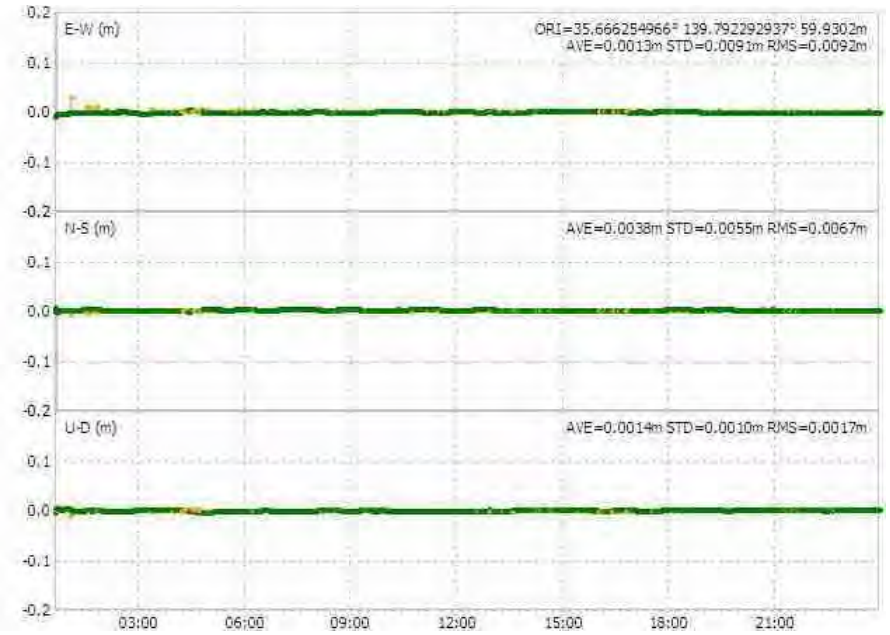
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g10）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

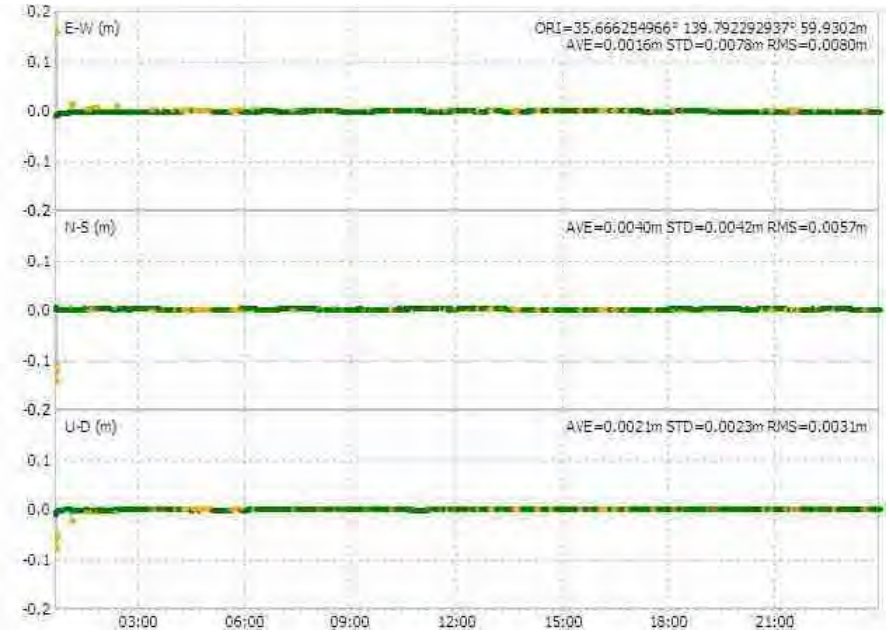
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



g11）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

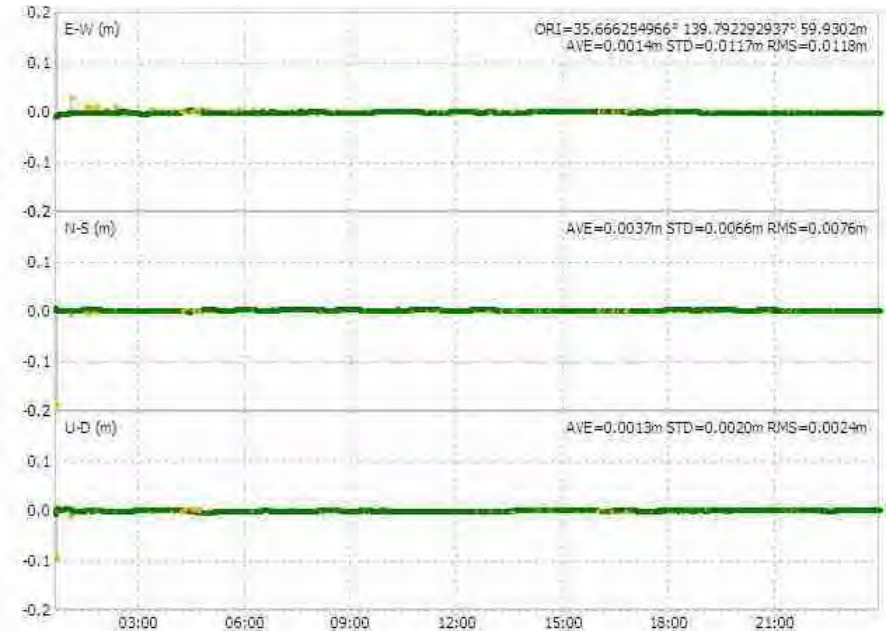
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



g12）基線解析スタティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

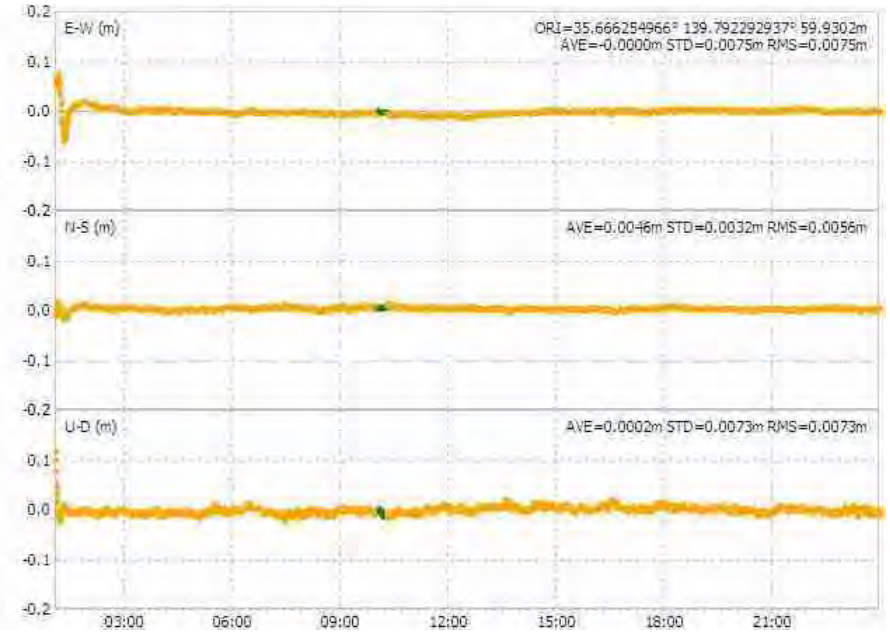
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h1）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

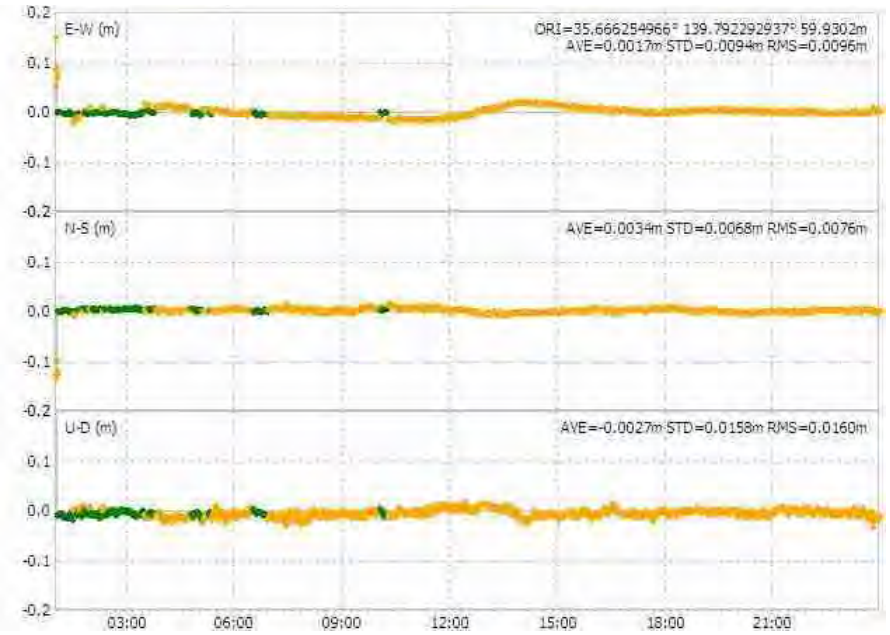
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



h2）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

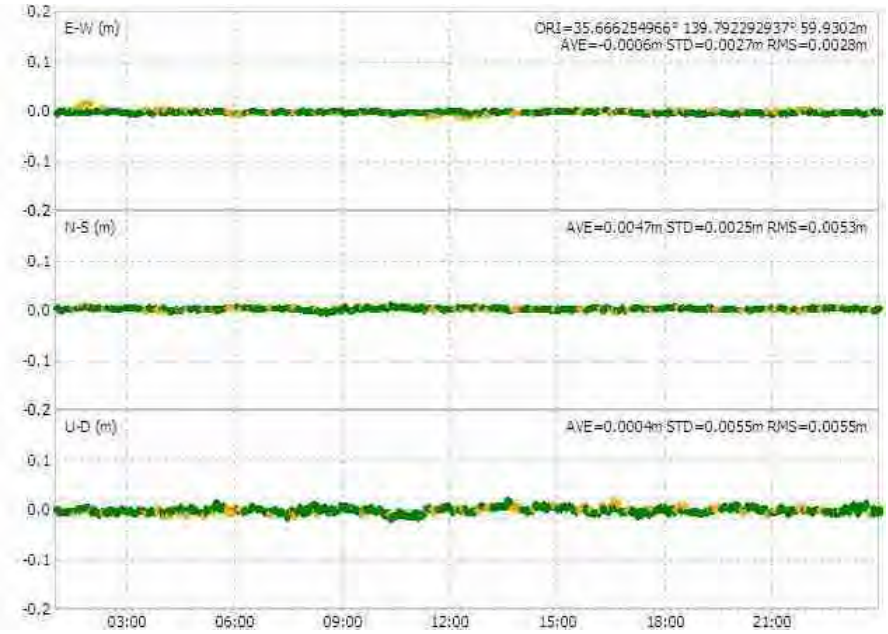
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



h3）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

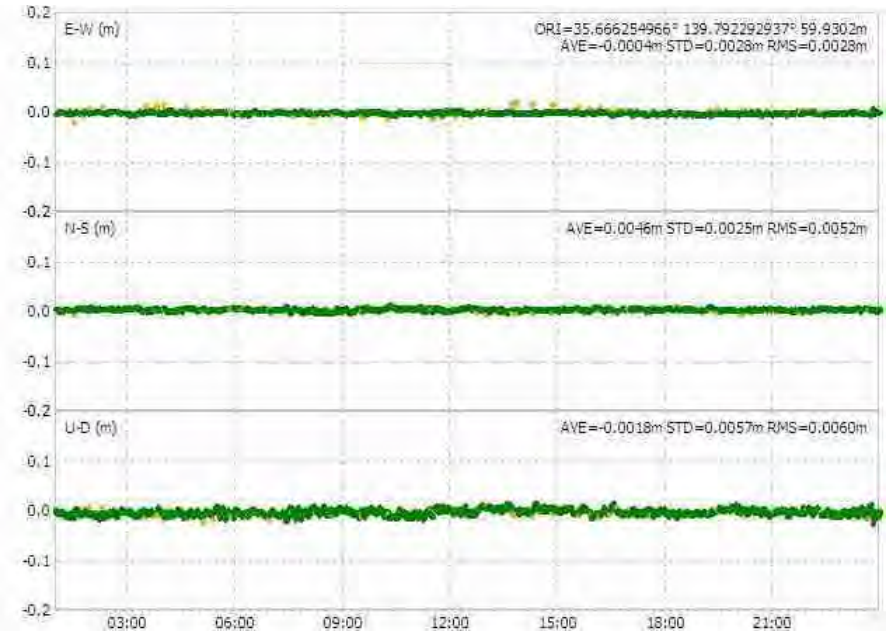
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h4）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - NovAtel OEM628

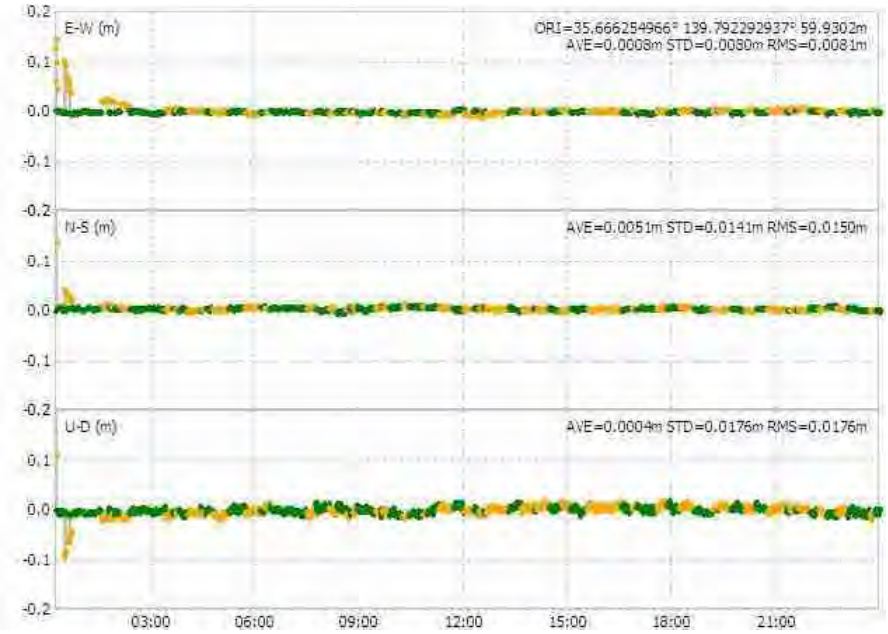
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h5）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

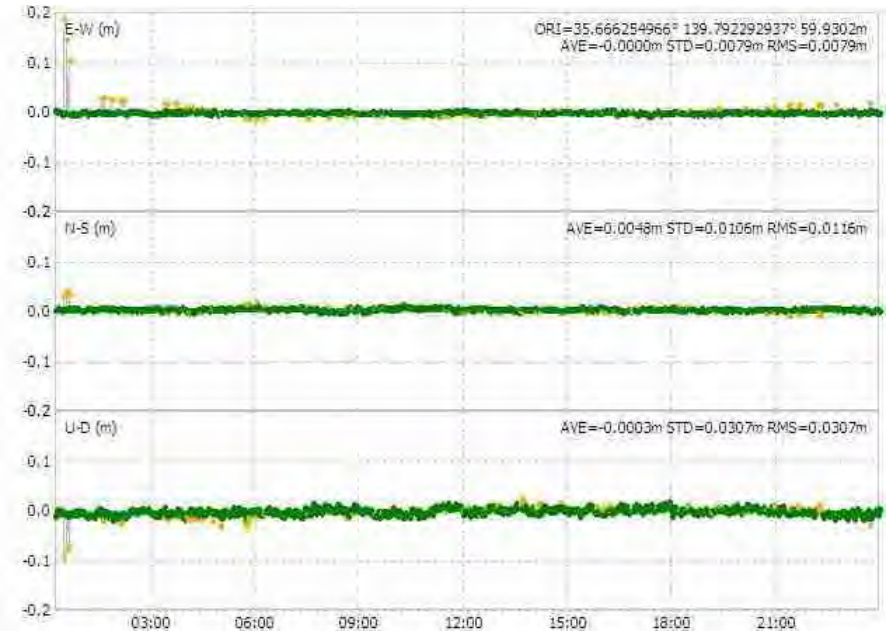
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



h6）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

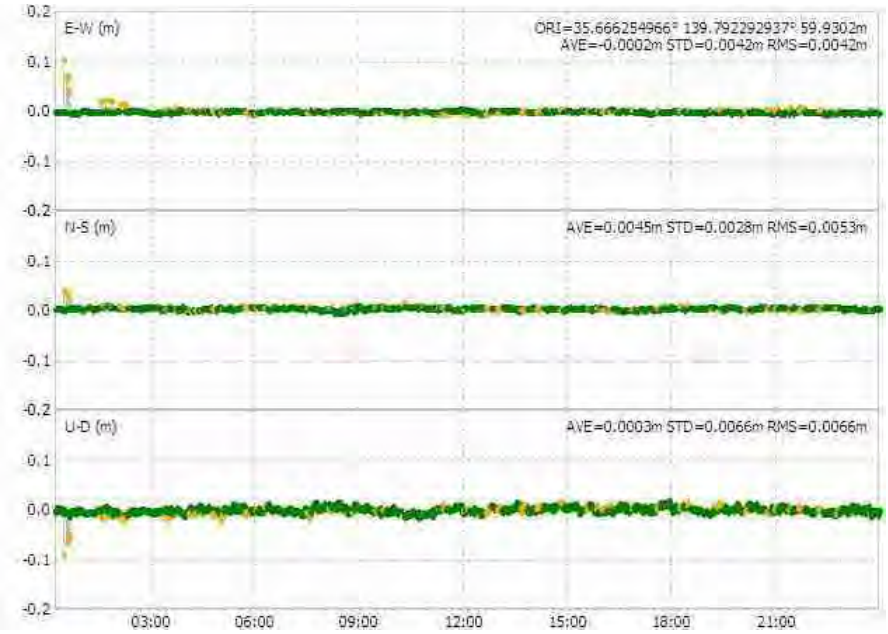
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



h7）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

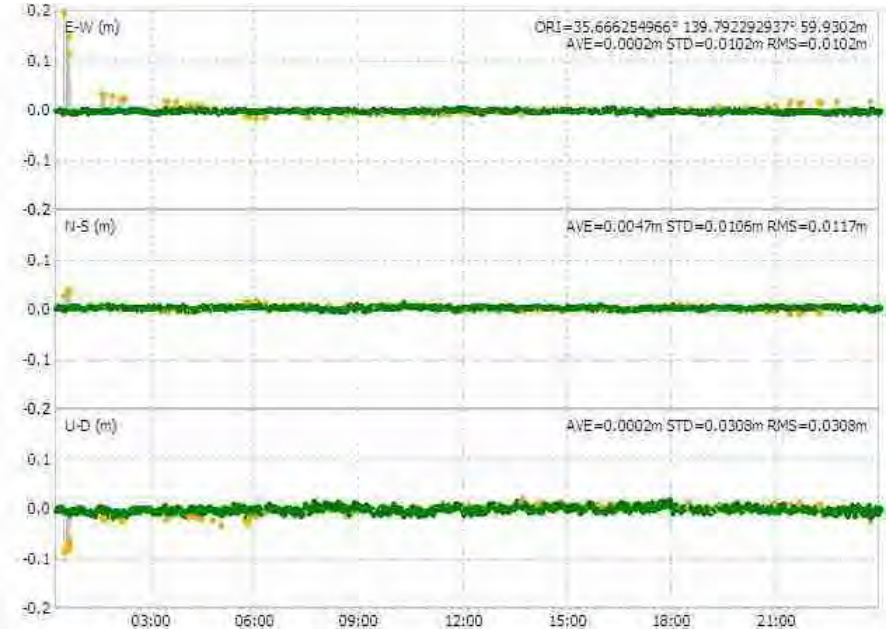
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h8）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - Trimble GNSS ChokeRing

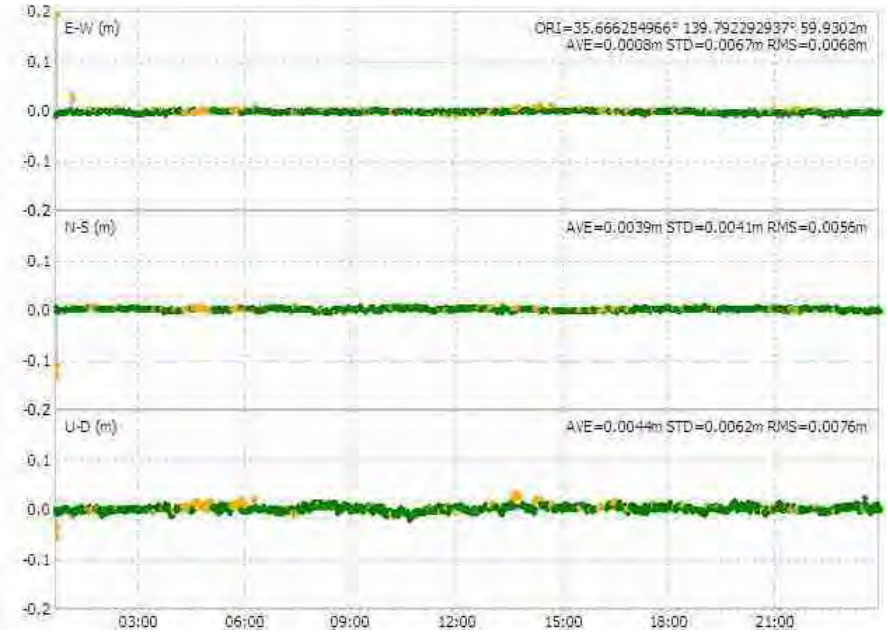
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h9）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

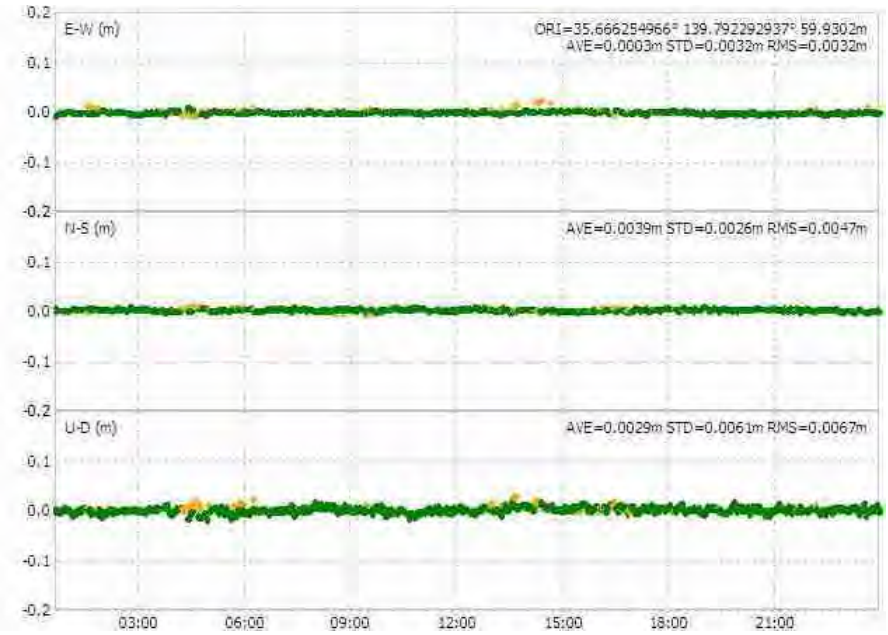
【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



h10）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

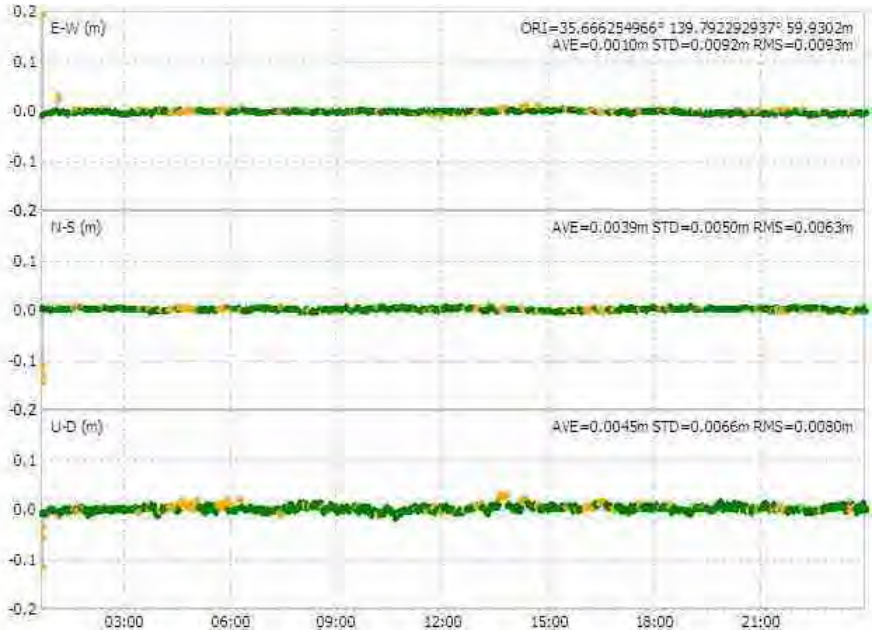
【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： －補正なし】



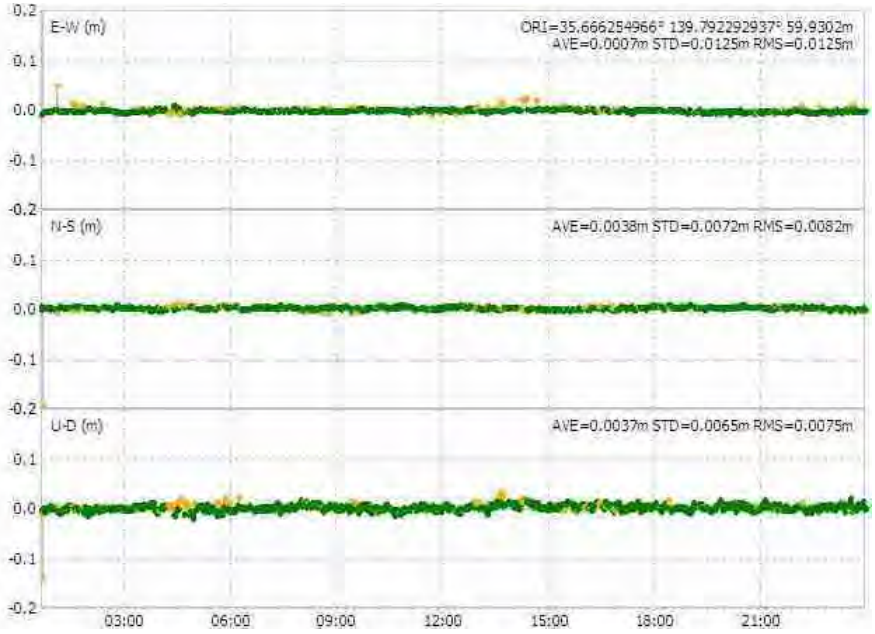
h11）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

【観測誤差モデル: －補正なし　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】



h12）基線解析キネマティック　GPS＋GLONASS

■JAVAD DELTA - TOPCON NET-G3

【観測誤差モデル: ○補正あり　　GLONASS チャンネル間バイアス： ○補正あり】