

平成 28 年度戦略的イノベーション創造プログラム
(自動走行システムの実現に向けた衛星測位情報活用に係る調査)
調査報告書

平成 29 年 3 月

代表機関：アイサンテクノロジー株式会社
共同機関：海上・港湾・航空技術研究所、東京海洋大学
協力機関：衛星測位利用推進センター、早稲田大学、中部大学

目次

1. 概要／サマリー	6
1.1. 調査概要	6
1.1.1. 背景	6
1.1.2. 目的	6
1.1.3. 実施内容	6
1.1.4. 体制と分担	7
1.2. 調査結果	8
1.2.1. 都市間高速道路における測位精度の評価	8
1.2.2. 時刻・進行方向の評価	10
1.2.3. ダイナミックマップ上での測位誤差要因の検討	11
1.2.4. 静的な位置特定の検討	11
1.2.5. 衛星測位の測位信頼度の検討	12
1.2.6. 測位信号のセキュリティ調査	12
2. 都市間高速道路における測位精度の評価	14
2.1. 実施概要	14
2.1.1. 目的	14
2.1.2. 測位実験方法	14
2.1.3. 実験コース	15
2.1.4. スケジュールと衛星配置	16
2.1.5. 取得データ	21
2.2. 機器構成	23
2.2.1. 受信機	25
2.2.2. アンテナ	26
2.2.3. 計測車両	27
2.2.4. その他の機器	28
2.3. 評価方法	29
2.3.1. 参照座標	29
2.3.2. 精度評価の方法	29
2.4. 測位精度評価その1：測位方式毎の評価	31
2.4.1. 衛星測位方式の概要	31
2.4.2. コード測位（1周波）	31
2.4.3. コード測位（多周波）	52
2.4.4. QZSS L1S（DGPS）補強	72
2.4.5. RTK	82
2.4.6. QZSS L6（CLAS）補強	92
2.4.7. MADOCA-PPP AR	102

2.4.8.	L1-SAIF	112
2.5.	測位精度評価その2：マルチGNSSの評価	114
2.5.1.	マルチGNSS概要	114
2.5.2.	1周波コード測位	115
2.5.3.	RTK.....	117
2.5.4.	マルチGNSSによる可視衛星数.....	132
3.	時刻・進行方向の評価	135
3.1.	実施概要.....	135
3.1.1.	目的.....	135
3.1.2.	時刻の取得.....	136
3.1.3.	GPSを用いた時刻の取得.....	137
3.2.	移動体通過時刻測定	137
3.2.1.	概要.....	137
3.2.2.	機器構成	140
3.2.3.	評価方法	143
3.2.4.	時刻精度評価	147
3.3.	GNSS受信機時刻性能評価	149
3.3.1.	概要.....	149
3.3.2.	機器構成	152
3.3.3.	評価方法	153
3.3.4.	時刻性能評価	153
4.	ダイナミックマップ上での測位誤差要因の検討.....	159
4.1.	検討概要.....	159
4.1.1.	目的.....	159
4.1.2.	検討方法	159
4.2.	ダイナミックマップの位置精度	159
4.2.1.	ダイナミックマップ基盤企画会社へのヒアリング	159
4.2.2.	ダイナミックマップ作成時の位置情報.....	160
4.2.3.	衛星測位の誤差要因	161
4.3.	ダイナミックマップ上での衛星測位の誤差要因の検討.....	184
5.	静的な位置特定の検討	186
5.1.	検討概要.....	186
5.1.1.	目的.....	186
5.1.2.	検討方法	186
5.2.	日本の位置情報.....	186
5.2.1.	測地系の概要	186
5.2.2.	日本の測地系	192
5.2.3.	衛星測位の測地系.....	195

5.3.	日本の位置情報の歪み.....	197
5.3.1.	日本測地系の歪みの要因.....	197
5.3.2.	時間軸で見る日本の歪み.....	197
5.3.3.	歪みの補正方法.....	200
5.4.	高精度地図と衛星測位の整合手法の検討.....	201
5.4.1.	日本測地系と衛星測位のズレ.....	201
5.4.2.	電子基準点網 (GEONET) を利用した位置情報補正.....	201
5.5.	位置整合手法の評価.....	203
5.5.1.	評価手法.....	203
5.5.2.	東北地域での位置情報補正の評価.....	203
6.	衛星測位の測位信頼度の検討.....	205
6.1.	摘要.....	205
6.2.	研究背景.....	205
6.2.1.	背景.....	205
6.2.2.	マルチパス.....	207
6.3.	研究目的・方法.....	209
6.4.	衛星測位の信頼性の定義.....	209
6.4.1.	誤差楕円.....	209
6.4.2.	衛星測位の信頼性の低下.....	211
6.5.	静止試験.....	212
6.5.1.	実験概要.....	212
6.5.2.	実験方法.....	213
6.5.3.	実験・解析手順.....	215
6.5.4.	実験 1.....	216
6.5.5.	実験 2.....	225
6.6.	正しい信頼度の算出手法の検討.....	234
6.6.1.	マルチパスの低減.....	235
6.6.2.	ミス FIX 解の低減と検出.....	236
6.7.	結言.....	236
7.	衛星信号のセキュリティ調査.....	238
7.1.	はじめに.....	238
7.2.	GNSS 信号への攻撃.....	239
7.2.1.	Jamming.....	239
7.2.2.	Spoofing.....	244
7.3.	GNSS 信号に対する攻撃の検知と抑制.....	248
7.3.1.	GNSS 受信機の構成.....	249
7.3.2.	Jamming の検知.....	249
7.3.3.	Jamming の抑制.....	252

7.3.4.	Spoofing の検知.....	257
7.3.5.	Spoofing の抑制.....	260
7.4.	まとめ	262
8.	市販 GPS 受信機の spoofing 耐性実験	264
8.1.	はじめに.....	264
8.2.	ソフトウェア無線	264
8.3.	GPS 受信機の spoofing 実験	265
8.3.1.	シミュレータの構成	265
8.3.2.	非同期の <i>simplistic</i> な spoofing 攻撃	266
8.3.3.	同期した <i>simplistic</i> な spoofing 攻撃	268
8.3.4.	Intermediate な spoofing 攻撃	268
8.4.	まとめ	269
9.	まとめと課題.....	270
9.1.	総合的な衛星測位誤差の調査.....	270
9.1.1.	衛星測位精度・可用性調査	270
9.1.2.	ダイナミックマップで利用するための検討.....	270
9.2.	データ信頼度の測定方法の検討	271
9.2.1.	衛星測位の信頼度の検討.....	271
9.2.2.	衛星信号のセキュリティ調査.....	271
9.3.	今後の自動走行における衛星測位の調査に関して	271
10.	参考資料	272
10.1.	各国の衛星測位システムとその動向	272
10.1.1.	GPS.....	272
10.1.2.	QZSS.....	272
10.1.3.	GLONASS	273
10.1.4.	BeiDou.....	273
10.1.5.	Galileo	273
10.1.6.	NavIC	274
10.1.7.	SBAS	274
10.2.	測位方式.....	275
10.2.1.	衛星測位システムによる測位の基本原理.....	275
10.2.2.	コード測位 (1 周波)	278
10.2.3.	コード測位 (2 周波)	280
10.2.4.	QZSS L1S (DGPS) 補強.....	280
10.2.5.	RTK	282
10.2.6.	QZSS L6 (CLAS) 補強.....	283
10.2.7.	MADOCA-PPP AR.....	284
10.3.	略語表.....	285

10.4. 参考文献..... 290

1. 概要／サマリー

1.1. 調査概要

1.1.1. 背景

自動車の普及に伴うエネルギー問題、交通事故、交通渋滞は、世界的な課題となっている。わが国では高齢化と都市過密化により、一層問題が深刻化するものと考えられる。自動走行システムは交通事故低減、交通渋滞緩和、より効率的な物流、人の移動への効果が期待されている。

自動走行システムの実現に向けては、ダイナミックマップ上での高度な自律センサと地物による位置標定を前提としたうえで、これを補完するために、天候等の地上環境の変化に影響されずに、地球上の位置を得ることのできる衛星測位技術を活用することが議論されている。

また、欧州では衛星測位のセキュリティに関して標準化の議論が始まっており、車車間通信時における交換情報の標準化等、自動走行に関する国際的な議論が今後活発になる事が想定される。

一方、測位衛星プロバイダ各国では本年度、複数の衛星を打ち上げ、衛星測位システムのアップデート、整備を積極的に推進している。準天頂衛星システムも平成 30 年度からのサービス開始を目指し、実用サービスへの移行が始まっている。

自動走行システムの実現化に向け、国際的な標準化の議論に貢献するためにも、自動走行における衛星測位の可用性を見極めることが必要となっている。

1.1.2. 目的

平成 26 年度、27 年度の調査報告書を踏まえ、本調査は以下を目的として実施する。

- ▶ 測位実験により衛星測位精度に関する情報を収集し、データを評価
 - 準天頂衛星初号機「みちびき」から実用サービスと同等の信号配信が可能になったことから、昨年度まで実施できなかったリアルタイムでの計測評価を実施する。また、欧州の測位衛星システム Galileo が初期サービスを開始しているため、これら最新の衛星測位システムの評価を実施する。
- ▶ 衛星測位情報の信頼度の検討
 - ダイナミックマップ上で衛星測位による位置情報を利用する際に生じる誤差要因を検討し、衛星測位の信頼度の評価方法、対策を検討する。
- ▶ 衛星測位情報のセキュリティ対策のための試験方法や検知方法についての調査検討
 - Jamming、spoofing 等の信号自体のセキュリティに関するもの、及び衛星測位で得られた位置自体の信頼度を検知、評価する手法の調査検討を実施する。

1.1.3. 実施内容

本調査では以下の項目を実施した。

- ▶ 衛星測位の測位精度・可用性の評価
 - ・ 移動体（自動車）に搭載した受信機を利用し、都市間高速で 8 回計測走行を実施
 - ・ 各受信機のリアルタイム計測結果の評価分析を実施
 - ・ 計測結果を解析し、測位方式毎、測位衛星システム毎に評価分析を実施
- ▶ 受信機遅延を含めた移動体測位誤差の評価
 - ・ 外部計測機を用いて車両の通過時刻を計測し、受信機から計測結果が出力された時刻と比較評

価を実施

- ・ 複数の速度帯で評価し、速度による進行方向の位置誤差の評価を実施
- 誤差要因の検討
 - ・ 計測した測位結果から、天空率、衛星配置、速度の影響を調査
 - ・ ダイナミックマップ上での測位情報の誤差要因を統合的に検討
- 静的な位置特定の検討
 - ・ 地殻変動の歪みの検出方法を検討
 - ・ 高精度地図の更新等への活用可能性を検討
- 衛星測位の信頼度の検討
 - ・ 環境影響度等の信頼度の評価方法を検討
 - ・ 他のセンサ類を利用する事により衛星測位の信頼度の評価方法を検討
- 衛星信号のセキュリティ調査
 - ・ セキュリティアタックの方式を調査
 - ・ 各セキュリティアタックの判断方法を調査検討

1.1.4. 体制と分担

本調査の体制図を示す。

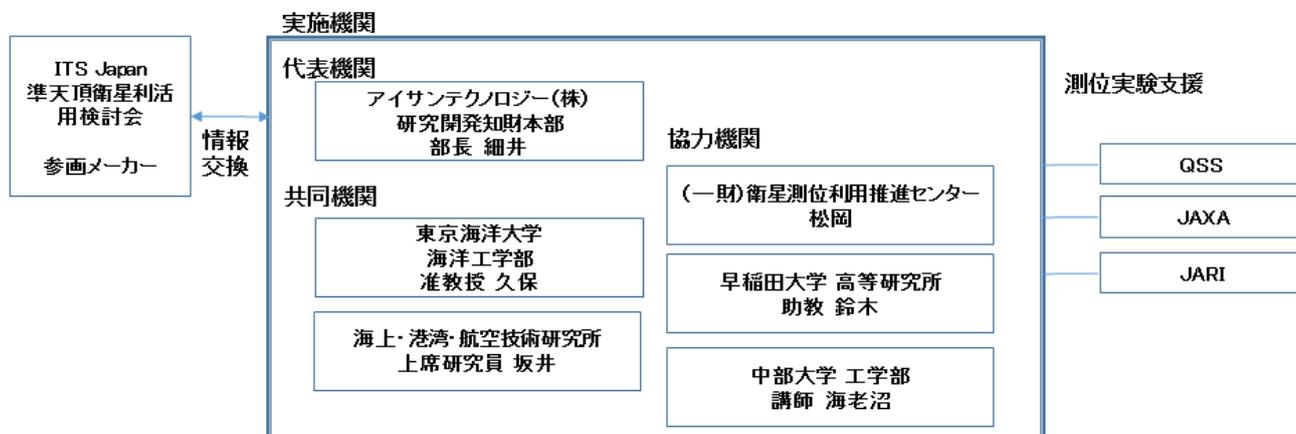


図 1.1.4-1 体制図

各実施機関の分担は以下のようになる。

- アイサンテクノロジー株式会社
 - ・ 測位実験の計画・実施、精度評価分析、静的な位置特定の検討、報告書とりまとめ
- 一般財団法人 衛星測位利用推進センター（SPAC）
 - ・ 測位実験の支援
- 国立大学法人 東京海洋大学
 - ・ 測位実験の支援

- ・ データ解析 (RINEX、RTK)
- 学校法人 早稲田大学
 - ・ 衛星測位の信頼度の検討
- 学校法人 中部大学
 - ・ 衛星信号のセキュリティ調査
- 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 電子航法研究所 (ENRI)
 - ・ データ解析 (1周波コード測位、多周波コード測位、L1S (DGPS)、L1-SAIF)

本調査を実施するにあたり、特定非営利活動法人 ITS Japan「準天頂衛星・マルチ GNSS 利活用委員会」にて、自動走行システムに寄与する調査となるよう、自動車関連企業と意見交換を実施した。また、測位実験の支援として、準天頂衛星システムサービス株式会社 (QSS)、日本電気株式会社 (NEC) 及び三菱電機株式会社 (MELCO) に準天頂衛星の民間利用実証の枠組みで、受信機の貸与及び配信調整をいただいている。国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) には MADOCA-PPPAR による測位実験の支援と都市間高速での測位実験時の施設利用、一般財団法人 日本自動車研究所 (JARI) には時刻・進行方向評価のためのテストコース利用で協力をいただいている。

1.2. 調査結果

1.2.1. 都市間高速道路における測位精度の評価

2014 年度、2015 年度と同じコース (桜土浦 IC～つくば中央 IC～谷田部 IC) で評価実験を実施した。コースは JCT の高架、法面、橋梁等による遮蔽、部分遮蔽区間が何カ所かあるが、全体的には比較的上空視界の開けた環境となる。本年度は自動走行／走行支援時での利用に、より近い状態として、各受信機でのリアルタイム処理による計測結果を評価している。

表 1.2.1-1 都市間高速道路における測位精度

		測位率	Fix 率	左右方向誤差[m]		進行方向誤差[m]		標高誤差[m]	
				RMS	95.45%	RMS	95.45%	RMS	95.45%
1 周波コード 測位	GJ	100.00%	—	1.184	2.391	1.374	2.698	1.991	3.989
	GJR	100.00%	—	1.672	3.039	1.738	3.295	2.340	4.714
多周波コード 測位	GJR	99.98%	88.80%	0.904	1.004	0.710	1.055	2.006	2.617
RTK	G	99.99%	85.83%	0.023	0.036	0.023	0.037	0.188	0.232
L6 (CLAS) 補強	GJ	94.16%	63.59%	0.084	0.120	0.071	0.072	0.119	0.152
MADOCA- PPPAR	GJR	92.44%	70.71%	0.074	0.156	0.069	0.139	0.269	0.402

コード測位受信機は内蔵されたカルマンフィルタが高機能であるため、昨年度まで実施していた後処理によるコード測位計算の結果に比べかなり測位精度が向上しており、推定測位による補完も含め測位率

100%、RMS は左右方向、進行方向ともに 1.5m を切る結果となった。また、今回初めて使用した多周波コード測位でも測位率 99.98%、RMS は左右方向、進行方向ともに 1m を切る結果となっている。

搬送波位相測位受信機に関する測位率は 90%以上となっている。Fix 解のみの RMS は左右方向、進行方向ともに 10cm 以下であり、高さ方向も数 10cm の値となっている。

準天頂衛星の L6 信号による補強を利用した場合、Fix 率は他のものと比べて低くなっているが、これは利用できる測位衛星システムが GPS と QZSS に限られているため部分遮蔽等で十分な衛星数が可視とならなかった事が大きな要因となっている。今後 GLONASS、Galileo 等への対応が計画されており、アップデートによる改善が期待できる。また比較的精度が出にくい垂直方向に関しては最も良い値となっていることも特徴の一つと言える。

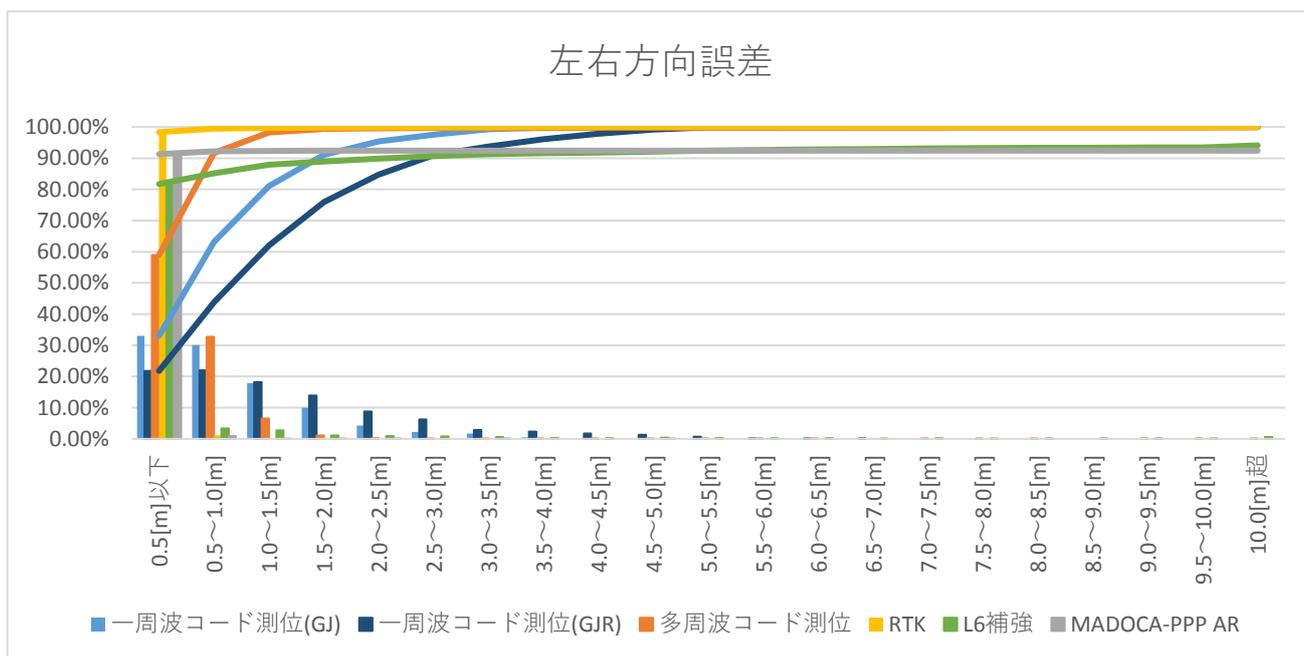


図 1.2.1-1 リアルタイム計測 左右方向誤差

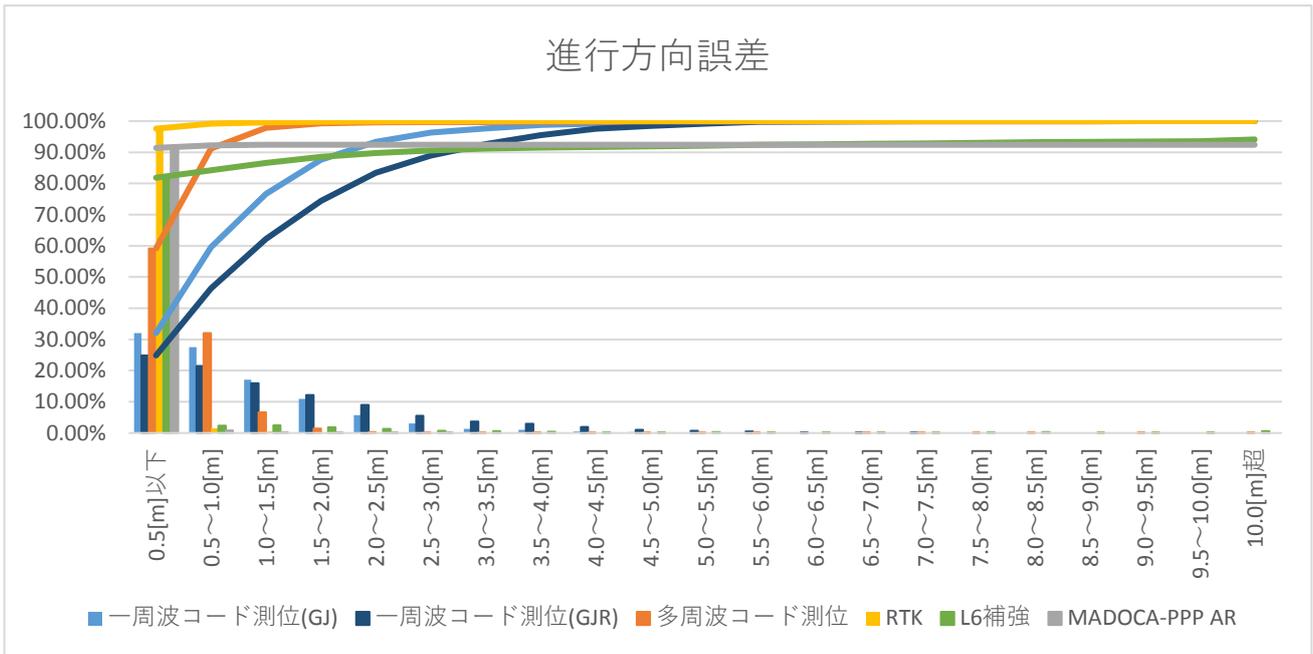


図 1.2.1-2 リアルタイム計測 進行方向誤差

コード測位受信機でも、フィルタや推定測位により、都市間高速のような比較的上空視界の開けた箇所であれば、測位率も含め十分に車線認識レベルであれば利用可能であると考えられる。また、GPS と QZSS だけで十分な衛星数が可視となった区間が多かったためか、GLONASS を利用する事で若干測位精度が低下する傾向があることが再確認できている。

L1S による計測は、実用システムへの移行が完了していなかったため、後処理にて評価を行っている。

表 1.2.1-2 後処理によるコード測位及びコード測位補強の評価 (GJ)

	測位率	RMS[m]	左右方向誤差		
			0.5[m]以下	0.5~1.0[m]	1.0~1.5[m]
コード測位	91.01%	1.148217	35.28%	65.61%	81.13%
L1S	90.80%	0.554096	75.42%	88.77%	90.16%
L1-SAIF	90.21%	0.499575	75.86%	88.14%	89.60%

同条件の後処理で行った、コード測位と比較して測位率は若干低かったものの、L1S を利用する事で、測位精度は大幅に向上し、左右方向誤差で 1.0m 以内が 88.77%、1.5m 以内で 90.16%となった。これは L1-SAIF の測位精度より若干良い結果である。

1.2.2. 時刻・進行方向の評価

従来の衛星測位精度評価では、測位データに付与された時刻情報を基準に評価を行っているが、時刻・進行方向の評価では、車車間通信等での活用を前提に、受信機から出力されたデータが記録された時刻と、実際に車両が通過した時刻を基に、評価を実施した。

RTK、MADOCA-PPP AR 等の搬送波受信機での計測結果は、速度によらず 0.2 秒程度の遅延誤差であ

った。実際の通過時刻より早いタイミングで位置が送信されているのは、推定方式によるものと考えられる。一方、コード測位受信時では低速度ほど時刻誤差が大きくなる傾向がみられた。使用したコード測位受信機は車両用のフィルタが利用されており、ある程度の速度で最適化されているのが要因と考えられる。

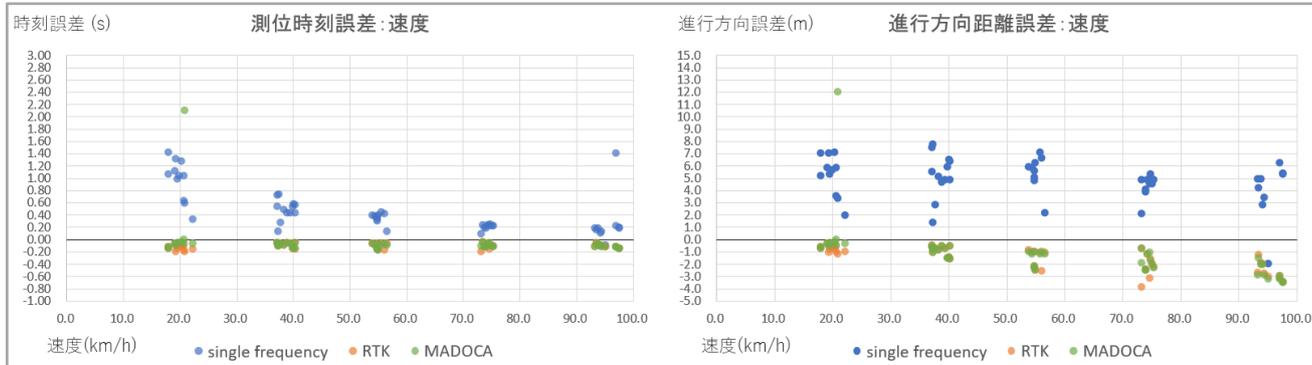


図 1.2.2-1 速度毎の時刻誤差・進行方向誤差

受信機からの出力に関しては別途静止にて出力周期に関する評価を実施した。コード測位受信機、CLAS の受信機で出力周期に、ある程度の幅で揺らぎが生じていることが確認できた。

1.2.3. ダイナミックマップ上での測位誤差要因の検討

調査時点で評価として利用可能なダイナミックマップが無い場合、ダイナミックマップの位置精度に関する調査と衛星測位の誤差要因の調査を行い、実際に利用するうえでの課題を検討している。

ダイナミックマップの位置精度は MMS の計測結果に大きく依存しているが、地図情報としての品質基準等が定められたものではなく、ダイナミックマップ自体の位置精度は保証されていないことを確認した。一方、衛星測位においては、準天頂衛星の補強信号等で低減できる誤差以外として、可視衛星数と地上環境による遮蔽の影響が大きいことが確認できた。

これらにより数 m の位置誤差が生じる可能性もあるが、ダイナミックマップの相対的精度が高いことと、線形データの構造を持つこと、また衛星測位の移動体の連続観測による位置推定等により、線形、あるいは面として位置を捉えることで、ある程度の誤差を含んだものとして利用していく事が適切かと思われる。またダイナミックマップの計測で利用される MMS では、常に GNSS 測位と IMU 等の複数のセンサ類と比較評価を行っており、測位精度の目安としている。このようなデータから、衛星測位の信頼度マップ情報等への適用も検討すべきと思われる。

1.2.4. 静的な位置特定の検討

地理空間情報と衛星測位の位置情報の違いを整理し、整合性を図る手法の検討を実施した。

まず地図等で用いられている測地座標系と衛星測位で利用されている座標系の違いを明らかにし、変換方法を示した。

国土地理院のセミ・ダイナミック補正パラメータを基に JGD2011 からの日本の地殻変動の様子を可視化した。東北地方や離島では 1m 前後の水平移動が生じている。また複雑な歪み（方向のズレ）が生じてい

ることが明らかになった。

セミ・ダイナミック補正パラメータは歪みを修正するものであり、座標値を変換することはできない。またセミ・ダイナミック補正パラメータは毎年1月のパラメータが4月に公開されるため、最大15カ月の時間差が生じる。地殻変動量が1m前後となる東北地方の座標値を対象に、周辺の電子基準点のF3解(最終解)とJGD2011での位置のズレ量を利用して、クリギング法により作成したグリッド・パラメータを用いた変換を行ったところ、数cmの誤差まで低減することが可能であることが示された。

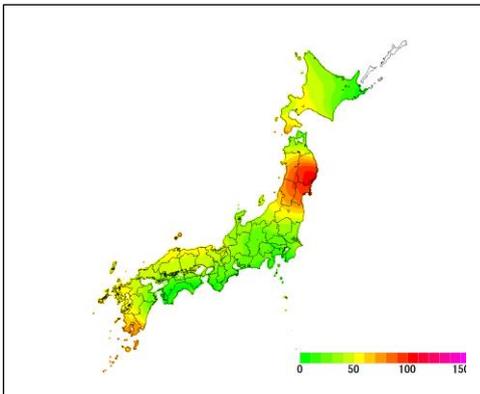


図 1.2.4-1 2016年1月時点でのJGD2011からの水平方向の移動量

表 1.2.4-1 電子基準点情報を利用した補正による水平方向誤差の低減

	補正前[m]	補正後[m]
利府	0.934	0.023
気仙沼	1.049	0.024
村山	0.912	0.032
亘理	0.854	0.027
福島	0.711	0.039

1.2.5. 衛星測位の測位信頼度の検討

信頼度調査は移動体では難しいため、静止データを利用して実施している。マルチパスが発生する環境で静止実験を実施し、GNSS測位の信頼性の調査を行った。GNSS測位計算によって求められる測位解の誤差の分散をGNSS測位の信頼性と定義し、誤差楕円を用いた評価を行っている。

NLOS (Non-Line-of-Sight) マルチパスは正規分布にならないため、誤差楕円の外に測位解が発生する割合が高くなる。これにより測位信頼度を評価することが可能である。マルチGNSSの利用とSNRマスクによりNLOSを棄却することで、測位精度、信頼度が向上することを示した。さらにミスFix解を検出、削除することで測位信頼度はさらに向上することを示した。

移動体におけるミスFixの検知手法としては、INS (Inertial Navigation System) 等で推定した事前誤差共分散と観測値の誤差共分散を比較する方法を提案している。

1.2.6. 測位信号のセキュリティ調査

GNSSに対する攻撃手法として、jammingとspoofingに分けて攻撃手法を明らかにし、実際に起きた攻撃に対して、どのような影響があるかを調査した。

現在のGNSS信号への攻撃を検知する手法と抑制する手段を調査し、それぞれの手法を評価した。攻撃方向がわかる場合は、アレーアンテナによる空間領域での抑制手法が最も適していることを示した。

また、実際に受信機に正しい信号とspoofing信号を同時に流し込むことでspoofing状態にしたうえで、特定の受信機の攻撃に対する耐性の評価を行っている。また移動体においては、INS等の組み合わせにより、攻撃が検知可能であることを示した。

攻撃を受けた際の測位結果の影響は受信機の抑制技術やフィルタリングの設定等の影響を受けるため、

特定の受信機の挙動を評価するためには、シミュレータを利用した評価システムが必須といえる。

2. 都市間高速道路における測位精度の評価

2.1. 実施概要

自動走行／走行支援での衛星測位の測位精度・可用性調査を目的に、平成 26 年度、27 年度同様に継続的な車載による衛星測位の精度評価を実施した。

自動走行の実用化が早いとされる都市間高速道路を対象コースとして 2 日間で計 8 回、様々な受信機を搭載した計測車両で走行しながら測位を行い、測位結果と走行軌跡の比較を行うことで、測位精度の評価を実施した。

2.1.1. 目的

測位実験の目的は以下の 4 項目となる。

- ▶ 継続的な衛星測位精度に関する情報の収集と評価
- ▶ 実用準天頂衛星の補強信号を利用した測位精度の評価
- ▶ リアルタイム計測による測位精度の評価
- ▶ 新しい衛星システム Galileo を利用した測位精度の評価

衛星測位システムの各プロバイダ国はシステムのアップデート及び整備を進めており、衛星測位の高精度化、可用性の向上が図られている。今年度、GPS では民生用信号 L5 周波数帯に対応した Block-II F 衛星が打ち上げられ、今後は新しい民生信号 L1C に対応した Block-III の打ち上げが行われる。また BeiDou、Galileo も 3 機、4 機とまとめて打ち上げられ、衛星数が増えている。このような衛星測位システムのアップデートに伴う定点的な情報の収集と評価を行う。

日本の実用準天頂衛星システムは、平成 30 年度の運用開始に向け整備が進められており、平成 28 年度中に準天頂衛星初号機「みちびき」の運用機関が JAXA より QSS に移管される。今まで利用実証用に配信されていた、サブメータ級測位補強信号及び、センチメータ級測位補強信号は、それぞれ実用サービスで配信される L1S 及び L6 に変更される。実用サービスの補強信号は未だ調整段階ではあるが、今回の実証実験においては自動走行／走行支援で実際に利用可能な補強信号として、実用サービスと同等の補強信号の配信を依頼して評価している。

また、平成 27 年度までの測位実験の評価では、同じ受信機で取得したデータを測位方式毎に後処理することで、同一条件下として評価を行ってきたが、本年度の実証実験においては、より実用に近い状況での評価を行うため、受信機でのリアルタイムに計測された測位結果を主な評価対象としている。

2016 年 12 月 15 日より Galileo の初期運用が開始されたため、Galileo を利用した測位結果に関しても評価を行った。

2.1.2. 測位実験方法

走行軌跡との比較評価を行うため、計測車両には測量等で利用される MMS (Mobile Mapping System) を利用している。MMS に各測位受信機及びアンテナを搭載して、測位を行っている。

リアルタイム計測での評価を行うため、コード測位受信機 6 台 (3 種類) と、搬送波位相測位受信機 4 台 (3 種類) を使用した。さらに、受信機の他に誤差要因検討のため、一部の実験走行で天空カメラ、デジタル信号記録機器を利用している。

走行するにあたり、あらかじめ TLE (Two-Line Elements : 二行軌道要素形式) を利用した衛星飛来予想を行い、計測時間帯を決定している。



図 2.1.2-1 計測走行写真

(左 : アンテナ設置 / 右上 : 機材設置 / 右下 : アンテナ・カメラ等拡大)

2.1.3. 実験コース

走行コースは、定点的な衛星測位の評価が可能ないように、平成 26 年度、27 年度と同じ、常磐自動車道及び首都圏中央連絡自動車道 (桜土浦 IC ~ つくば JCT ~ つくば中央 IC ~ つくば JCT ~ 谷田部 IC ~ 桜土浦 IC) を選定した。実験コースは以下の 4 つの区間に分けて評価を行っている。

表 2.1.3-1 計測経路

	起点	終点	距離	備考
全区間	桜土浦 IC	桜土浦 IC	28 km	高速道全体。一部一般道含む
区間 A	桜土浦 IC	つくば中央 IC	8.4 km	つくば JCT 含む
区間 B	つくば中央 IC	谷田部 IC	8.6 km	つくば JCT 含む
区間 C	谷田部 IC	桜土浦 IC	8.4 km	

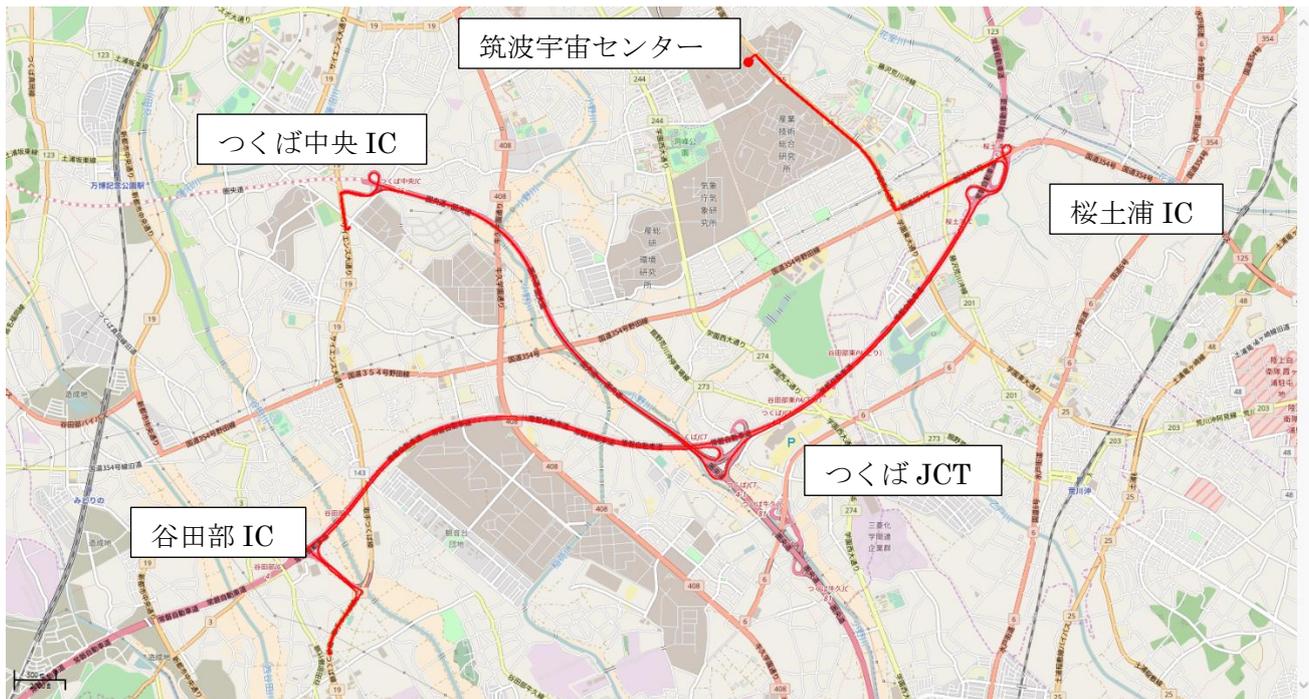


図 2.1.3-1 計測経路

桜土浦 IC～つくば JCT 及び、つくば JCT～つくば中央 IC 間は比較的上空視界が開けているのに対し、つくば JCT～谷田部 IC 間では、法面、跨線橋等による遮蔽箇所が存在する。

走行実験の実施にあたり、宇宙航空研究開発機構の協力を得て筑波宇宙センターをベースとして行っている。

選定に際し、トンネル等の多い箇所での走行実験も検討したが、RTK 及び MADOCA-PPPAR で利用する基準局からの距離の制約、準天頂衛星補強信号の配信スケジュールの関係から見送った。

2.1.4. スケジュールと衛星配置

走行実験は車両への機材搭載、事前試験も合わせ、平成 28 年 12 月 20 日～22 日で実施した。

準天頂衛星の補強信号使用に際し、準天頂衛星システム利用実証推進事務局 (QSS、SPAC 共同運営) に申請し、民間利用実証として関東地区で利用可能な日程を調整した。

また、L1S 及び L6 (CLAS) の配信の為、日本電気株式会社 (NEC) 及び三菱電機株式会社 (MELCO) と調整を行った。

12 月 20 日	機材搭載作業・機器動作確認	東京海洋大学越中島キャンパス
12 月 21 日	走行実験 (4 回走行)	宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センター
12 月 22 日	走行実験 (4 回走行)	宇宙航空研究開発機構筑波宇宙センター

22 日は時折降雨となったため、機材の関係上、雨を避けて走行時間を調整しながら実施している。実際に計測走行した時間 (UTC) は以下ようになる。

(評価対象となる都市間高速の部分の時間。桜土浦 IC の通過時刻となる。)

表 2.1.4-1 計測時刻 (UTC)

日付	回数	開始時刻	終了時刻	計測時間
12月21日	T1	01:08:50	01:50:13	0:41:23
	T2	03:09:45	03:46:03	0:36:18
	T3	04:50:17	05:23:17	0:33:00
	T4	06:00:38	06:35:45	0:35:07
12月22日	T5	00:24:43	00:58:23	0:33:40
	T6	01:42:47	02:16:26	0:33:39
	T7	04:18:11	04:57:17	0:39:06
	T8	05:23:15	05:58:39	0:35:24

走行実験当日の衛星飛来予測による GPS のみの測位衛星の状態は以下のようにになっている。

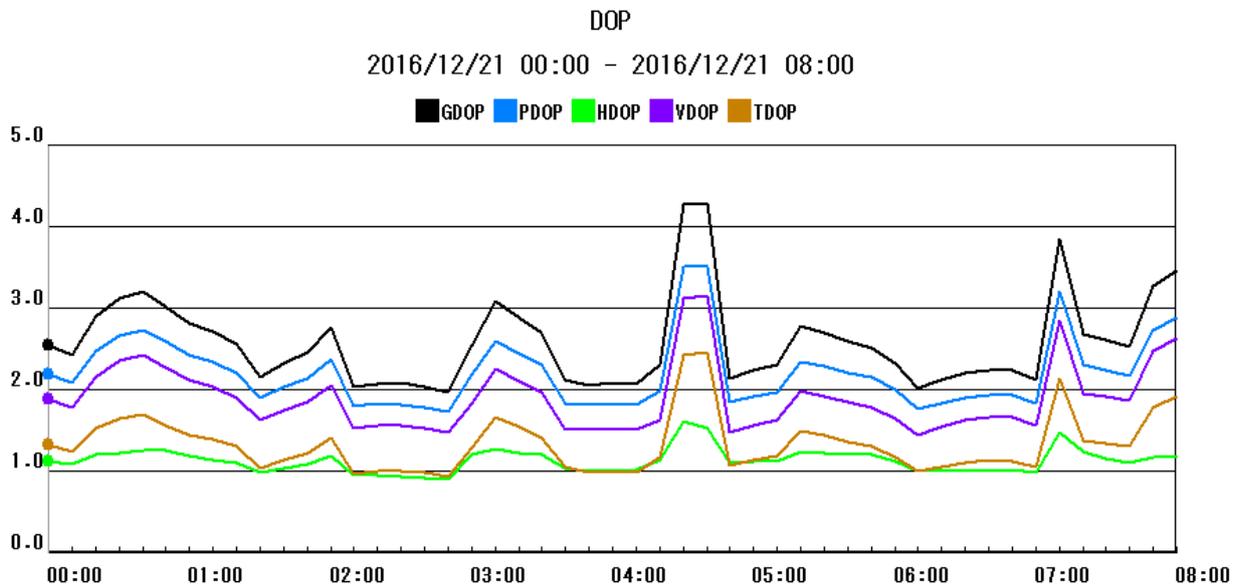


図 2.1.4-1 DOP (12月21日、GPSのみ)

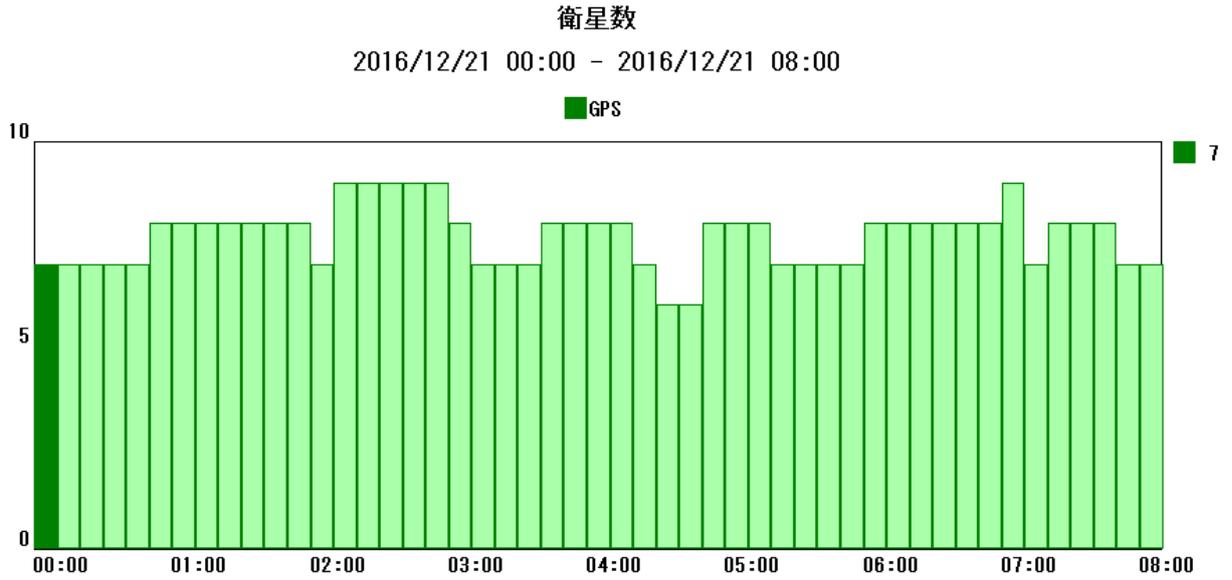


図 2.1.4-2 衛星数 (12月21日、GPSのみ)

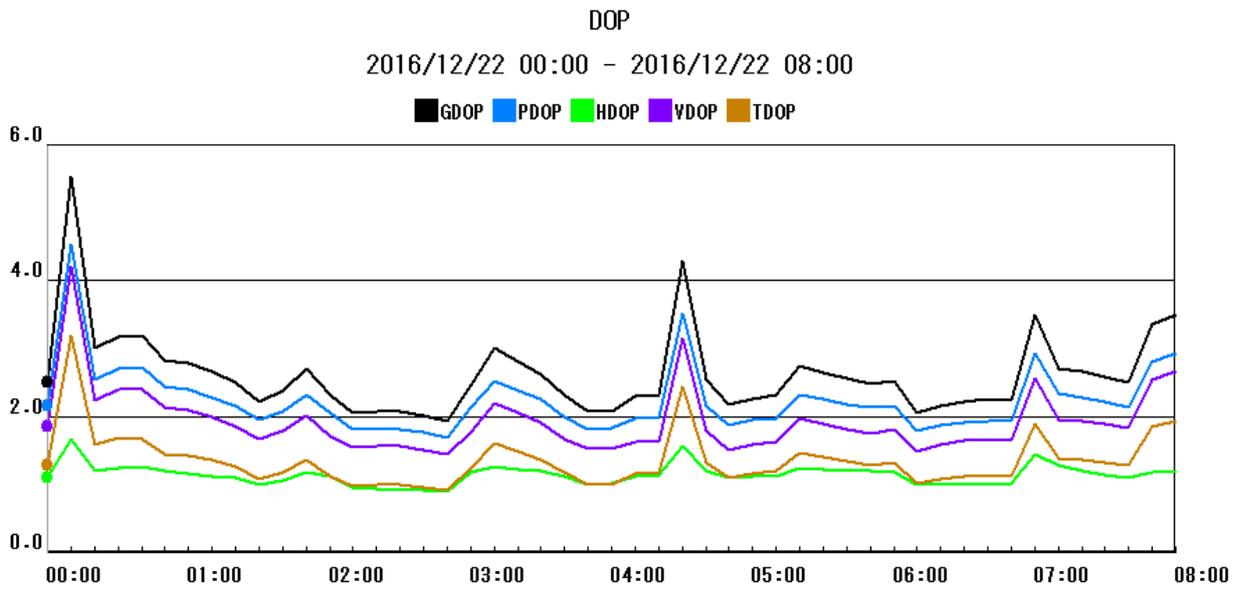


図 2.1.4-3 DOP (12月22日、GPSのみ)

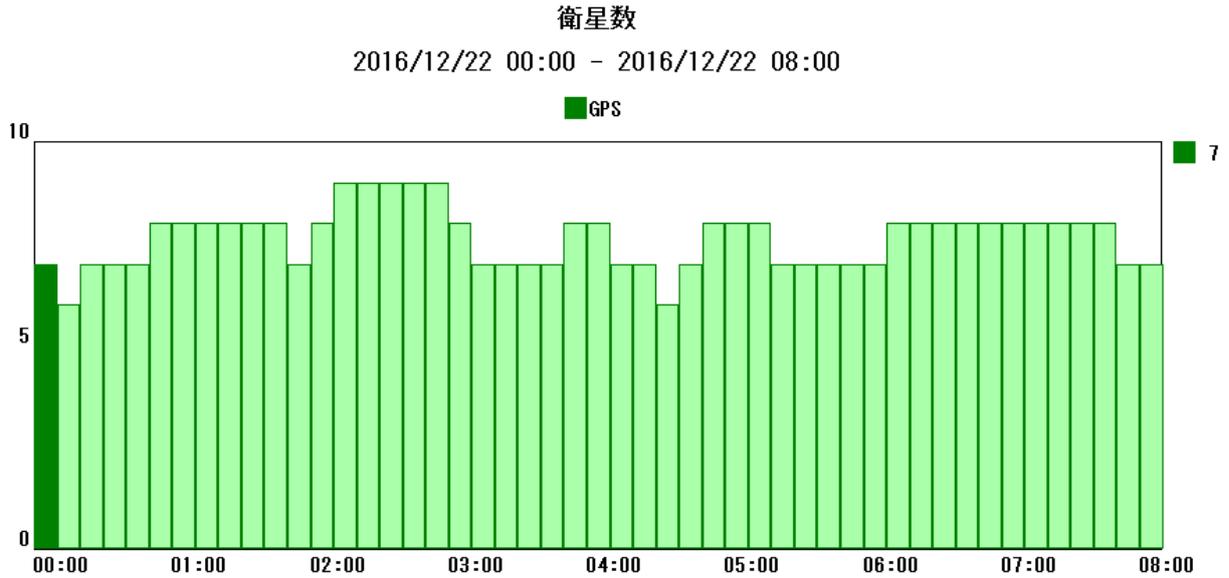


図 2.1.4-4 衛星数 (12月22日、GPSのみ)

GPS のみの場合、21 日、22 日ともに 04:00~05:00 (UTC) の間が GPS 測位に適さない衛星配置となっている。22 日計測の T7 がこの時間帯となる。

また、03:00 (UTC) 周辺も通常に比べて若干衛星配置が悪い状態となる。こちらは 21 日計測の T2 の測位時間となっている。

その他の時間帯は比較的、GPS のみでも衛星測位に適した時間帯となっている。

GPS に QZSS、GLONASS、BeiDou、Galileo を加えたマルチ GNSS での衛星の状況は以下のようになっている。

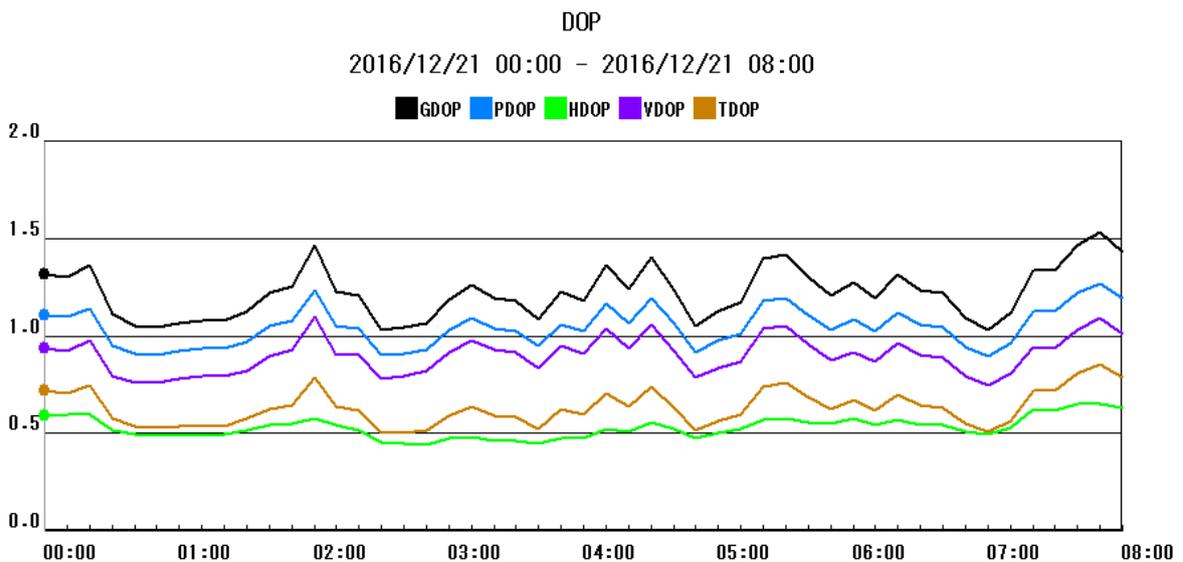


図 2.1.4-5 DOP (12月21日、マルチ GNSS)

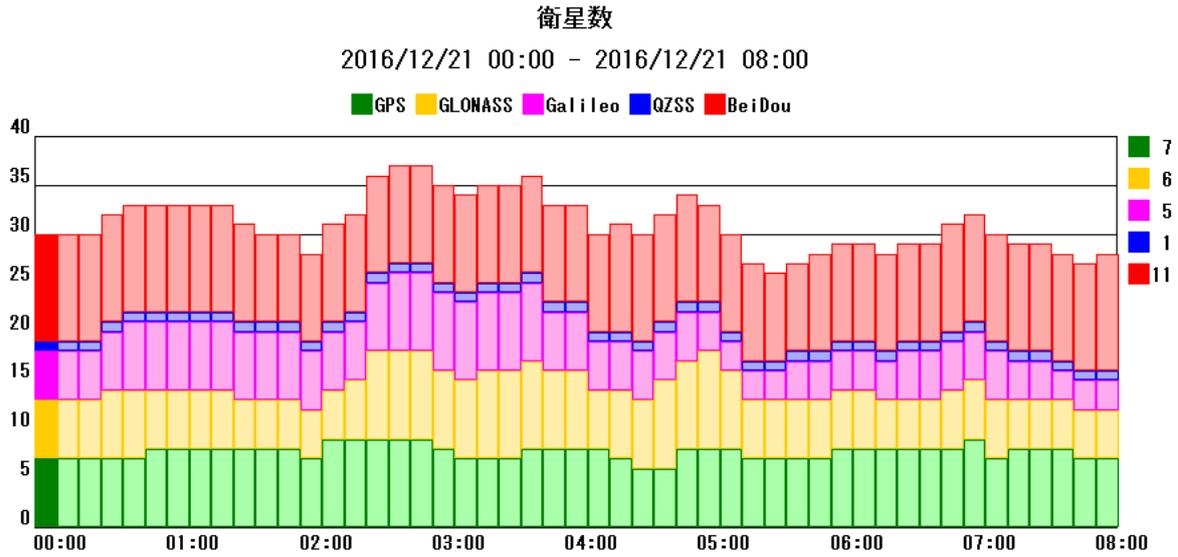


図 2.1.4-6 衛星数 (12月21日、マルチGNSS)

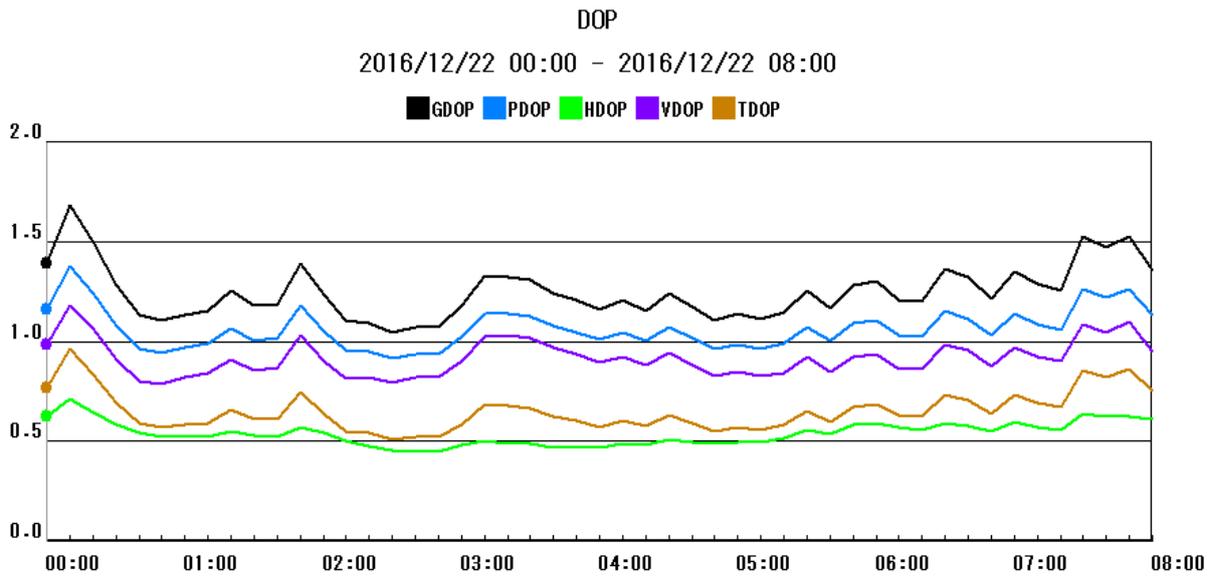


図 2.1.4-7 DOP (12月22日、マルチGNSS)

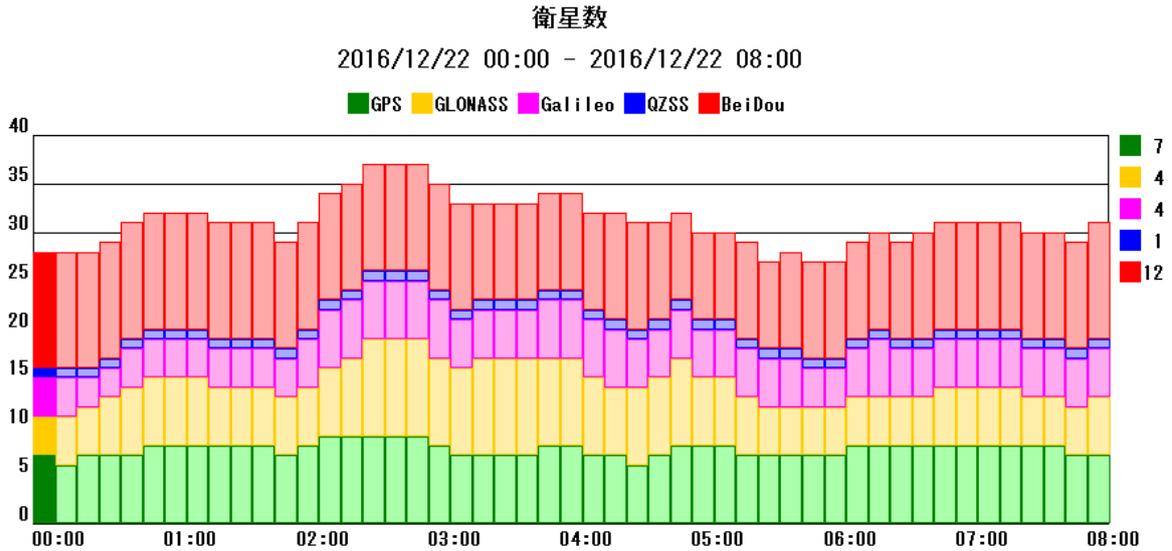


図 2.1.4-8 衛星数 (12月22日、マルチGNSS)

当日の準天頂衛星の走行実験時間においては、ほぼ高仰角に位置した時間帯となっている。準天頂衛星の軌道周期はほぼ1日であるため、2月21日と22日の仰角による違いはほとんどないので、21日の準天頂衛星の仰角のみを以下に示す。

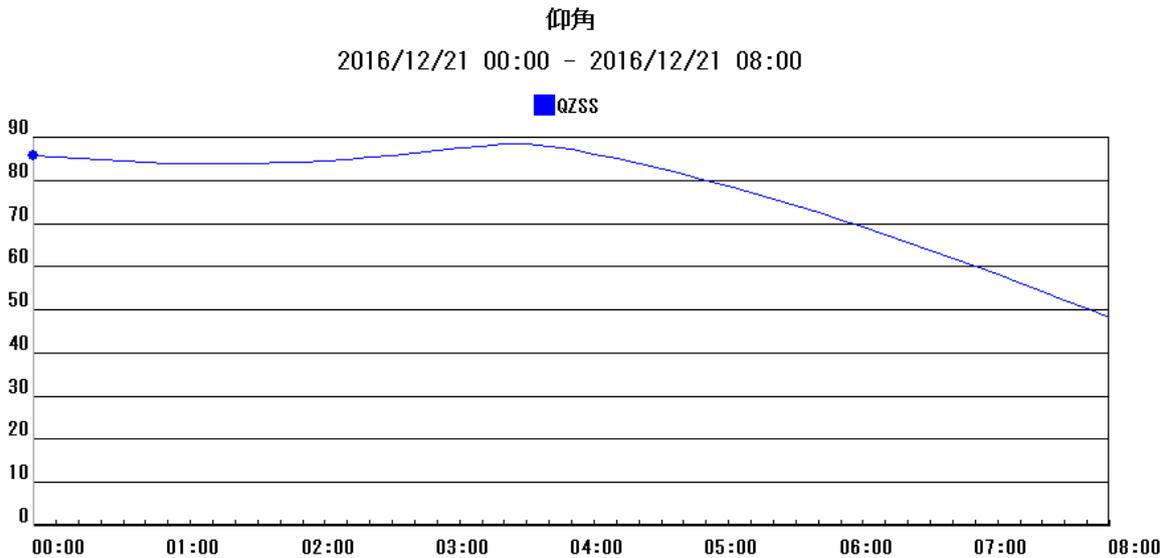


図 2.1.4-9 QZSS 仰角 (12月21日)

2.1.5. 取得データ

リアルタイムでの測位データ取得のため、使用する受信機毎に測位方式及び利用する衛星システムを設定して走行実験を行っている。このため各受信機の測位アルゴリズム、フィルタリング等による差が多少なりともある。

また、後処理に関しては、搬送波位相測位受信機を利用して、多周波でのマルチGNSSからの情報をRAWデータとして取得し、解析後に各測位方式及び利用する衛星システム毎に測位計算を行なっている。この

ため受信機による差異は生じないが、衛星選択、フィルタ補正等の測位の高度化は行われていない。

表 2.1.5-1 取得データ (リアルタイム)

測位・補強方式	衛星システム	受信機	アンテナ
1周波コード測位	GJ	u-blox EVK-M8T	受信機付属アンテナ
	GJR	u-blox EVK-M8T	受信機付属アンテナ
多周波コード測位	GJR	NovAtel FlexPak6	MMS のアンテナ
RTK	GJR	Trimble NetR9	MMS のアンテナ
QZSS L6 補強	GJ	MELCO AQLOC	JAVA アンテナ
MADOCA-PPP AR	GJR	Trimble SPS855	MMS のアンテナ

衛星システムの各アルファベットは以下の衛星システムを指します

G : GPS / J : QZSS / R : GLONASS / C : BeiDou / E : Galileo

RTK、MADOCA-PPP AR の基準局は東京海洋大学越中島キャンパスに設置されているものを利用している。基準局の詳細な座標は下表の通りである。

表 2.1.5-2 東京海洋大学基準局の座標

緯度[度]	経度[度]	楕円体高[m]	ジオイド高[m]
35.6663423	139.7921789	60.549	42.654

リアルタイム計測に関しては、通信系のトラブルにより MADOCA-PPP AR の 21 日 T1~T4 の 4 回のデータ取得と、電源系のトラブルにより L6 の 22 日 T5、T6 の 2 回のデータの取得ができていない。

表 2.1.5-3 取得データ (後処理)

測位・補強方式	衛星システム	受信機	アンテナ
1周波コード測位	G	Trimble NetR9	MMS のアンテナ
	GJ		
	GJR		
QZSS L1S 補強	G		
	GJ		
多周波コード測位	G		
	GJ		
RTK	G		
	GJ		
	GJR		
	GJRCE		

	GJC	
	GR	
	GC	
	GE	

2.2. 機器構成

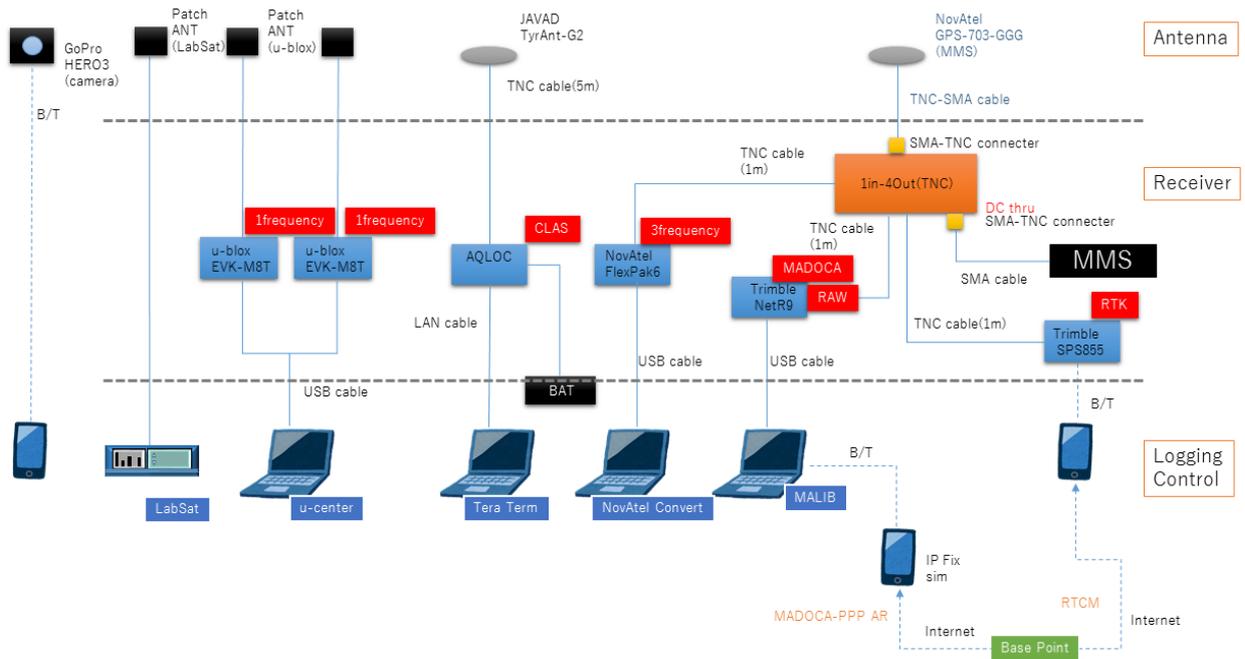


図 2.1.5-1 機器構成

リアルタイムでの評価のため、測位方式毎に受信機を用意して計測を実施した。各受信機と測位方式、測位に使用した衛星システムは以下ようになる。

表 2.1.5-1 受信機設定

	受信機名	メーカー	測位方式	衛星システム	アンテナ
1	EVK-M8T	u-blox	1周波コード測位	GJ	受信機付属
2	EVK-M8T	u-blox	1周波コード測位	GJR	受信機付属
3	FlexPak6	NovAtel	多周波コード測位	GR	MMS
4	SPS855	Trimble	RTK	GJR	MMS
5	NetR9	Trimble	MADOCA-PPP AR	GJR	MMS
6	AQLOC	MELCO	L6 (CLAS)	GJ	JAVAD TyrAnt-G2

衛星システムの各アルファベットは以下の衛星システムを指します

G : GPS / J : QZSS / R : GLONASS

MADDOCA-PPP AR 用の受信機 NetR9 では、同時に後処理用に利用する Raw データの取得も行っている。

アンテナに関しては、1 周波コード測位受信機 (EVK-M8T) はダッシュボード上に設置し、その他の受信機はルーフに設置されている MMS の計測用アンテナ (NovAtel GPS-703-GGG) から分配している。ただし、準天頂衛星からの L6 (CLAS) を受信するため、AQLOC に関しては別途 AQLOC 一式に付属していたアンテナ (JAVAD TyrAnt-G2) を使用した。

また、測位情報として一部の走行において、天空カメラ及び信号の記録を行っている。

2.2.1. 受信機

利用した各受信機の仕様を以下に示す。

表 2.2.1-1 受信機

メーカー		u-blox	NovAtel	Trimble	Trimble	MELCO
機種名		EVK-M8T	FlexPak6	SPS855	NetR9	AQLOC
外観						
対応する測位信号						
GPS	L1 C/A	●	●	●	●	●
	L1C			●	●	
	L2P			●	●	●
	L2C		●	●	●	
	L5		●	●	●	
QZSS	L1 C/A	●	●	●	●	●
	L1C			●	●	●
	L1S					
	L2C		●	●	●	
	L5		●	●	●	
	L6				●	●
GLONASS	L1	●※1	●	●	●	
	L2		●	●	●	
BeiDou	B1	●※1	●		●	
	B2		●		●	
Galileo	E1	●※1	●	●	●	
	E5		●	●	●	
SBAS	L1 C/A	●	●			
	SBAS	●	●	●	●	
最大出力周期		5Hz	100Hz	20Hz	50Hz	5Hz
NMEA		●	●	●	●	●
RAW		●	●	●	●	

※1 GLONASS、BeiDou、Galileo の同時利用はできません。

2.2.2. アンテナ

利用したアンテナの仕様を以下に示す。

表 2.2.2-1 アンテナ

メーカー		u-blox	NovAtel	JAVAD
機種名		EVK-M8T 付属アンテナ	GPS-703-GGG	TyrAnt-G2
アンテナ種類		パッチアンテナ	チョークリング	チョークリング
外観				
GPS	L1 C/A	●	●	●
	L1C	●	●	●
	L2P		●	●
	L2C		●	●
	L5		●	●
QZSS	L1 C/A	●	●	●
	L1C	●	●	●
	L1S	●	●	●
	L2C		●	●
	L5		●	●
	L6			●
GLONASS	L1	●	●	●
	L2		●	●
BeiDou	B1	●	●	●
	B2		●	●
Galileo	E1	●	●	●
	E5		●	●
SBAS	L1 C/A		●	●
	SBAS		●	●
接続受信機		EVK-M8T	FlexPak6	AQLOC
			MMS	
			NetR9	
			SPS855	

また、各アンテナの配置は以下ようになる。

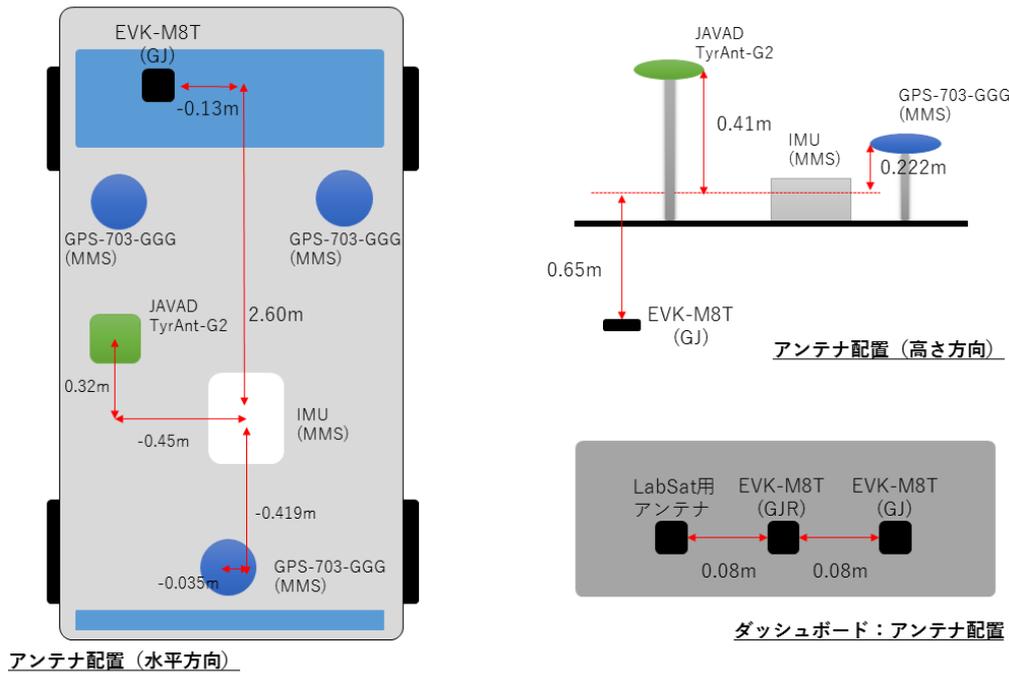


図 2.2.2-1 MMS アンテナ配置

MMS の自己位置となる IMU 中心を正しい位置として、各アンテナのオフセット量を考慮したうえで、測位性能の評価を行う。

2.2.3. 計測車両

計測車両は機器の搭載能力を考慮し、MMS Type-S220R を使用した。

表 2.2.3-1 MMS

外観	項目	仕様	備考
	計測車両	MMS Type-S220R	アルファード (ハイブリッド)
	位置精度	自己位置精度：6cm 点群精度：平面 10cm ：高さ 15cm	GPS 良好時 相対精度：1cm
	デジタルカメラ	2 台 画素数：200 万画素 撮影速度：10/秒	10m 離れた位置で 1cm 以下の解像度
	レーザースキャナ	2 台 取得密度 13,500 点/秒	時速 65km/h で 10m 離れた位置で 24cm 程の間隔

MMS Type-S220R は GPS アンテナと IMU、カメラ、レーザースキャナを一体化したシステムであり、3 台の GPS アンテナと IMU で車体の姿勢と位置を正確に把握し、カメラとレーザーで車体周囲の道路状況を高精度の 3 次元点群と画像で記録する。取得データの調整処理も可能である。測位方式にはネットワーク型 RTK の一つである FKP 方式が採用されており、IMU、高精度オドメーターによる位置補正、相互チェックにより信頼性の高い高精度な位置情報の取得が可能である。

2.2.4. その他の機器

表 2.2.4-1 GNSS レコーダー

外観	項目	仕様
	品名	LabSat 3 RLLS03-1RP
	対応信号	<ul style="list-style-type: none"> ・ GPS L1/SBAS/Galileo E1/QZSS L1C ・ GLONASS L1 ・ BeiDou B1 のいずれか
	信号レベル	-83dBm to -115dBm
	RF 中央周波数	1561.098/ 1575.40/ 1602.00 MHz
	データフォーマット	I&Q

測位衛星信号（L1 帯）の信号の記録・再生機。マルチパス、電離層等の影響を受けている状態の実際の衛星からの信号を記録。衛星数の制限はなく全ての衛星からの信号が記録可能である。

RF レコーダーとは異なり信号そのものを記録する機器ではないが、シミュレーションの他、取得信号の編集等が可能。実証実験では 2 回の走行で記録した。

表 2.2.4-2 天空カメラ

外観	項目	仕様
	品名	GoPro HERO3 Black Edition
	レンズ	ウルトラシャープ f2.8・非球面ガラスレンズ
	画角	対角 175 度
	動画	1920×1440-48P/30P/24P 1920×1080-60P/48P/30P/24P 1280×960-60P/48P/30P 1280×720-120P/60P
	写真撮影	1200 万画素 (ワイド) 700 万画素 (ワイド+ミディアム) 500 万画素 (ミディアム)

走行時の天空状況を記録するために、吸盤でルーフに固定し動画撮影を実施した。走行コースにおける天空率による測位への影響を判断するために、撮影しながらの走行を 1 回実施した。

2.3. 評価方法

2.3.1. 参照座標

MMS の自己位置を参照座標系として使用している。MMS は測量法に基づく計測器であるため、座標系は測地成果 2011 (JGD2011) に基づいた座標となる。必要に応じて衛星測位で用いられる座標系 (WGS84) を補正した後、評価を行っている。

2.3.1.1. MMS の測位精度

MMS における精度指標は

車両自己位置の精度： 水平 $XY = \pm 6\text{cm}$ 以内

高さ $Z = \pm 15\text{cm}$ 以内

ランドマークアップデート処理 (調整処理) を行うことで、測位精度を向上させることが可能であるが、今回の計測箇所が高速道路上であり、GCP (Ground Control Point) の設置が困難であったこのため、今回の走行実験においては、MMS 搭載の衛星測位、IMU、高密度オドメーターの相互評価による信頼性により精度検証を実施し、8 回の走行全てにおいて、MMS の精度指標内に入っていることを確認している。

2.3.2. 精度評価の方法

位置精度の評価は昨年同様以下の手順によって実施している。

1. リファレンスとなる MMS の位置情報を軌道曲線から推定する

2. 評価対象となる測位データを世界測地系に変換する
3. 評価対象となる測位データの時刻に一致する MMS の位置情報を軌道曲線から取得し、その時刻の MMS の向き、速度を考慮してアンテナオフセットから真のアンテナ位置を決定する
4. 評価対象となる測位データと真のアンテナ位置を比較評価する

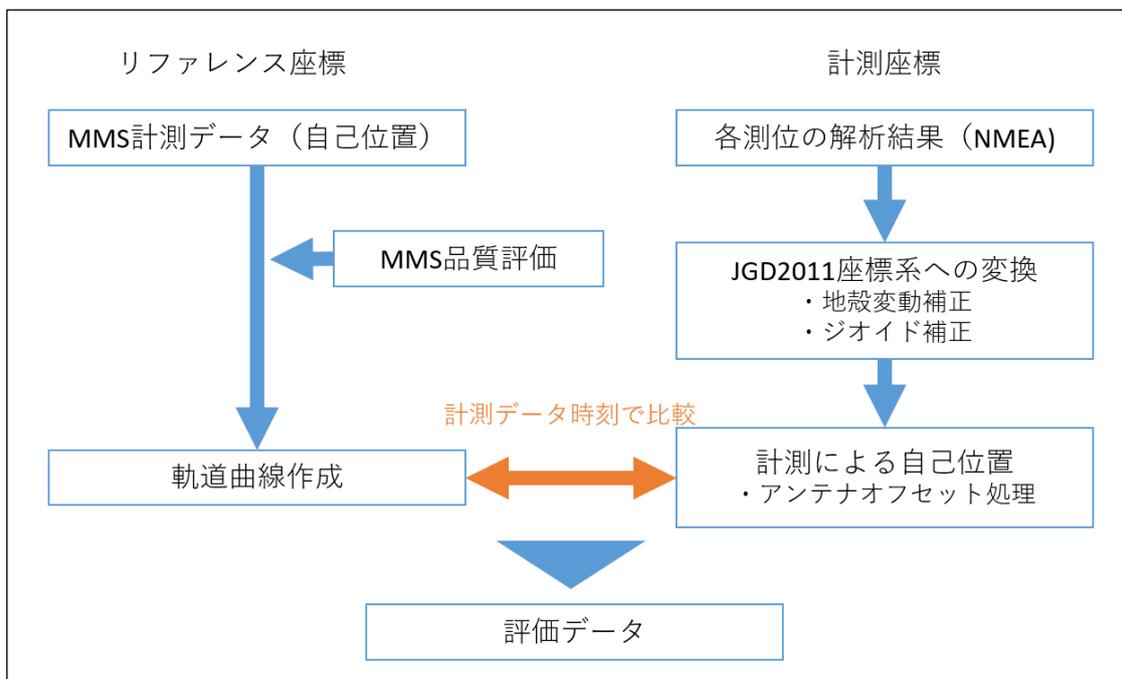


図 2.3.2-1 位置精度の評価手順

評価対象としたデータ要素は以下のようなになる。

表 2.3.2-1 評価対象データ要素

評価要素	単位
データ開始時刻からの経過秒数	秒
UTC 時刻系	年月日 [yyyyMMdd]
測位時刻 (UTC 時刻系)	時分秒 [HHmmss.SSS]
データ開始時刻からの累積距離	メートル
参照データの X 座標	メートル
参照データの Y 座標	メートル
参照データの標高	メートル
対象データの X 座標	メートル
対象データの Y 座標	メートル
対象データの標高	メートル
参照データを基準とする対象データとの X 座標の差分	メートル
参照データを基準とする対象データとの Y 座標の差分	メートル

参照データを基準とする対象データとの標高の差分	メートル
参照データを基準とする対象データとの進行方向の差分（進行方向：正）	メートル
参照データを基準とする対象データとの左右方向の差分（左方向：正）	メートル
参照データと対象データとの水平距離	メートル
参照データから推定した速度	m / s
GPS Quality Indicator	—
Number of satellites in use	機
HDOP	—

また、可用性の評価は測位率、Fix 率について実施している。測位データの計測時間を基準に、各受信機のデータ出力サイクルを用いて、すべて計測できた場合の測位回数を分母に行っている。コード受信機をはじめとしたリアルタイム計測では 1Hz、搬送波位相受信機を利用した計測においては 10Hz で評価した。測位率、Fix 率の計算式は下記の通りである。

- ・ (測位率) = 測位解を得られた測位数 / ((計測終了時間 - 計測開始時間) × 取得周期 + 1)
- ・ (Fix 率) = Fix した測位数 / ((計測終了時間 - 計測開始時間) × 取得周期 + 1)

計測時間は、MMS が評価対象エリアに入った時刻を開始時刻とし、MMS が走行コースを走り対象エリアから出た時刻を終了時刻とした。

2.4. 測位精度評価その 1：測位方式毎の評価

2.4.1. 衛星測位方式の概要

本調査では、測位方式毎の評価として、1 周波コード測位、多周波コード測位、RTK の基本的な測位方式に加えて、QZSS から送信される L6 信号を用いたセンチメートル級補強サービス (CLAS) 及びインターネット配信により取得した高精度な衛星軌道と時刻等の補強情報により PPP-AR を行う MADOCA-PPPAR をリアルタイムで行い、QZSS の L1S 相当の DGPS 測位は後処理で行った。

さらに、準天頂衛星の利用実証向けに配信されていた L1-SAIF と L1S の比較評価も行った。

各測位方式の詳細は 10.2 節を参照されたい。

2.4.2. コード測位 (1 周波)

2.4.2.1. u-blox EVK-M8T

u-blox 社の M8 シリーズは、JEDEC/ISO 16750 認定の産業用向けの GNSS 受信チップであり、その中でも M8T は GPS、QZSS 以外に GLONASS、BeiDou、Galileo の同時並行受信 (※GLONASS、BeiDou、Galileo のうち同時並行受信できるのは 1 種類のみ) 可能なものとなる。本来はタイミング用モジュールであるが、衛星タイミングにより最適化された精度の高さと、マルチ GNSS の Raw データに対応していることから、研究開発でもよく用いられる受信機の一つである。EVK-M8T はその評価キットであり、USB インターフェイスを持つコンパクトタイプのパッケージとなる。

本調査では 2 台の EVK-M8T を利用し、GPS+QZSS 及び GPS+QZSS+GLONASS の同時受信設定で測

位実験を行った。それぞれの EVK-M8T 付属のアンテナをダッシュボード上に設置して測位を行っている。

ここでは GPS+QZSS でのリアルタイム計測結果について評価を行う。
都市間高速道路全 8 回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.2-1 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	17,265	17,265	100.00%	—	—
区間 A	4,075	4,075	100.00%	—	—
区間 B	4,662	4,662	100.00%	—	—
区間 C	4,274	4,274	100.00%	—	—

※1Hz で測位を実施

8 回の走行実験全てで測位できており、測位率は 100.00%となっている。都市間高速のコースがオープンスカイとはいえ、実際には橋梁や高架等による信号遮蔽箇所が存在するにもかかわらず、100.00%の測位率を実現しているのは、推定測位や、強力なフィルタ処理が行われていると考えられる。

表 2.4.2-2 測位精度（全周回平均、区間毎）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	1.184	2.391	1.374	2.698	1.991	3.989
区間 A	1.093	1.861	1.143	2.039	1.782	3.498
区間 B	1.071	2.127	1.194	2.283	1.837	3.670
区間 C	1.182	2.408	1.407	2.467	2.099	3.907

※「95.45%」の表記について

一般に標準偏差 (σ) の 2 倍の値を 2σ と呼び、データの分布が正規分布に従う場合、全データの 95.45% が平均値 $\pm 2\sigma$ の値に含まれる。

表中の「95.45%」の欄には、実際の計測データを絶対値が小さい順に並べ替え、その番号が「(有効データ数) × 95.45%」に当たるデータの絶対値を表記している。

左右方向誤差は、いずれも RMS が 1m 程度であり、車線認識できる程度の測位性能が確認できた。また進行方向に関しても RMS はいずれも 1.5m 以下、標高も RMS 2.00m 程度となった。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラムの形にまとめたものである。

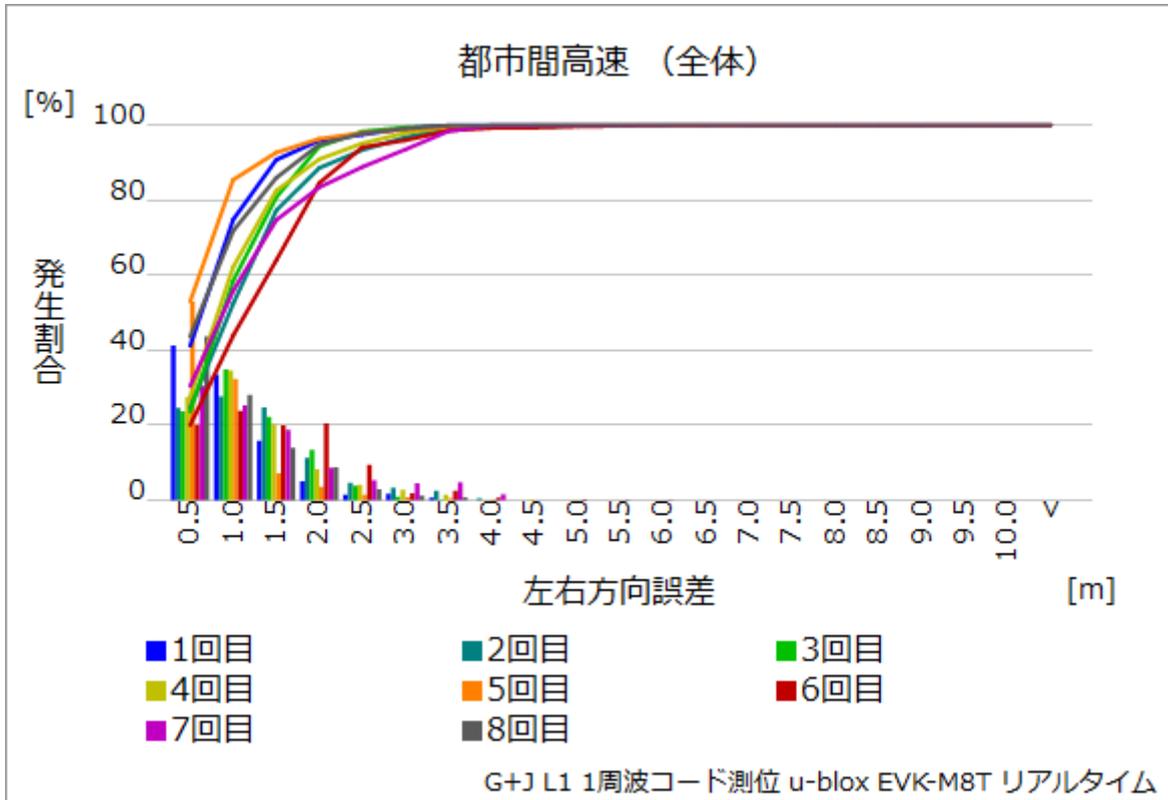


図 2.4.2-1 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

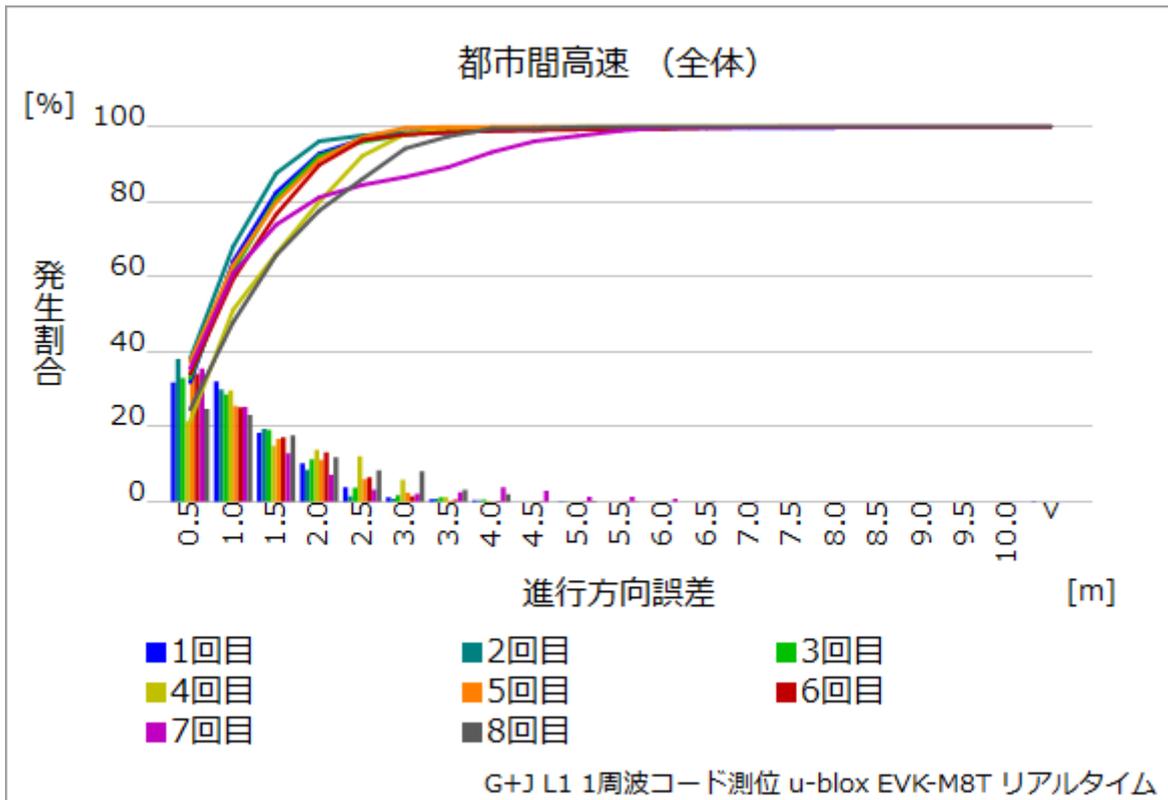


図 2.4.2-2 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

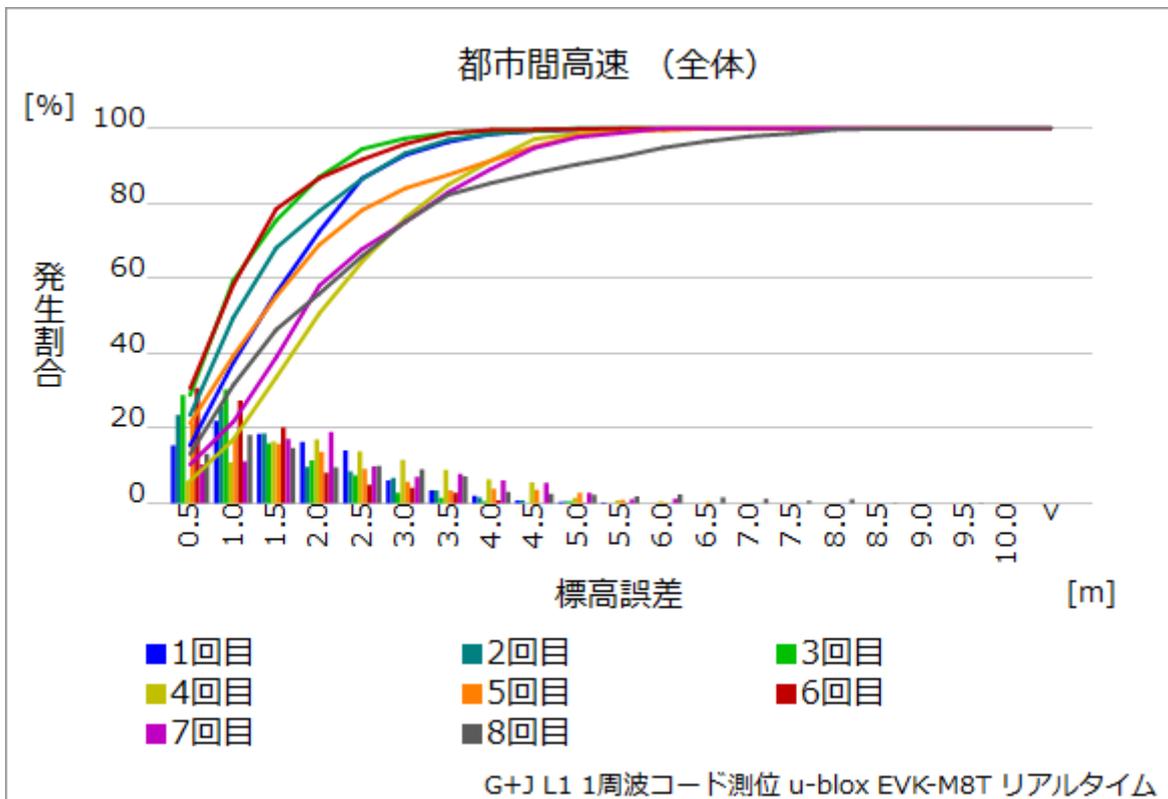


図 2.4.2-3 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

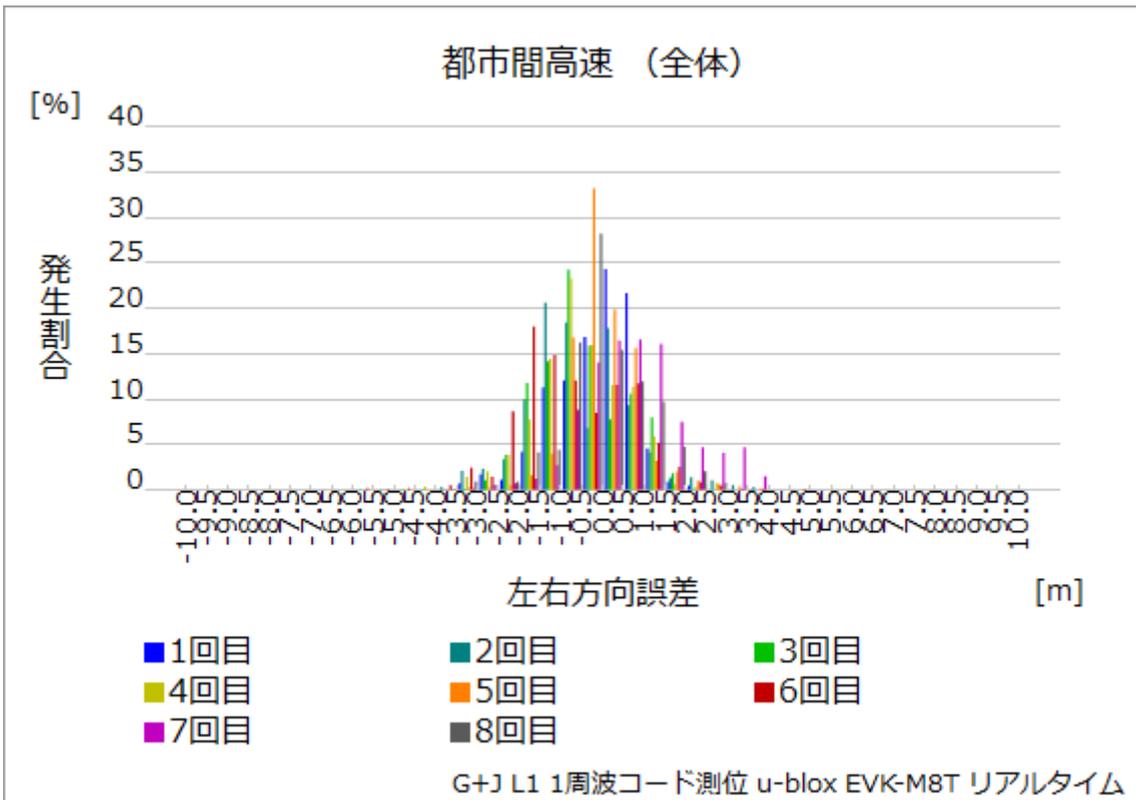


図 2.4.2-4 左右方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

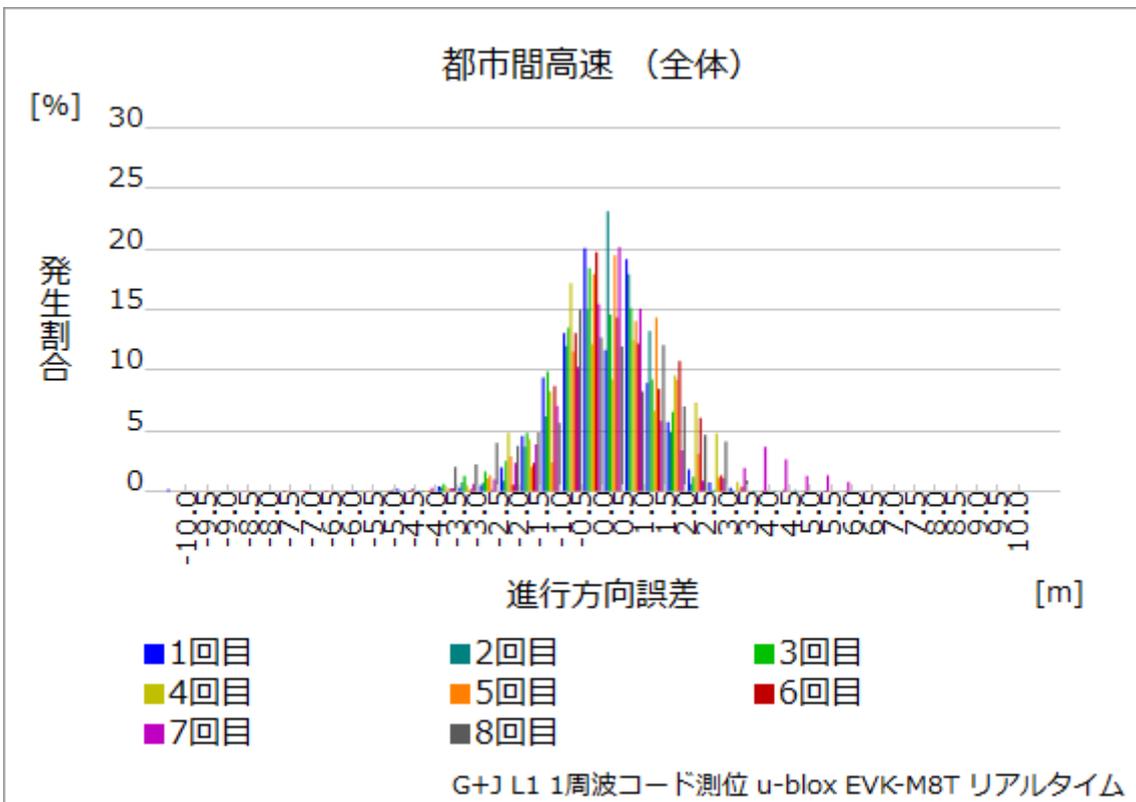


図 2.4.2-5 進行方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

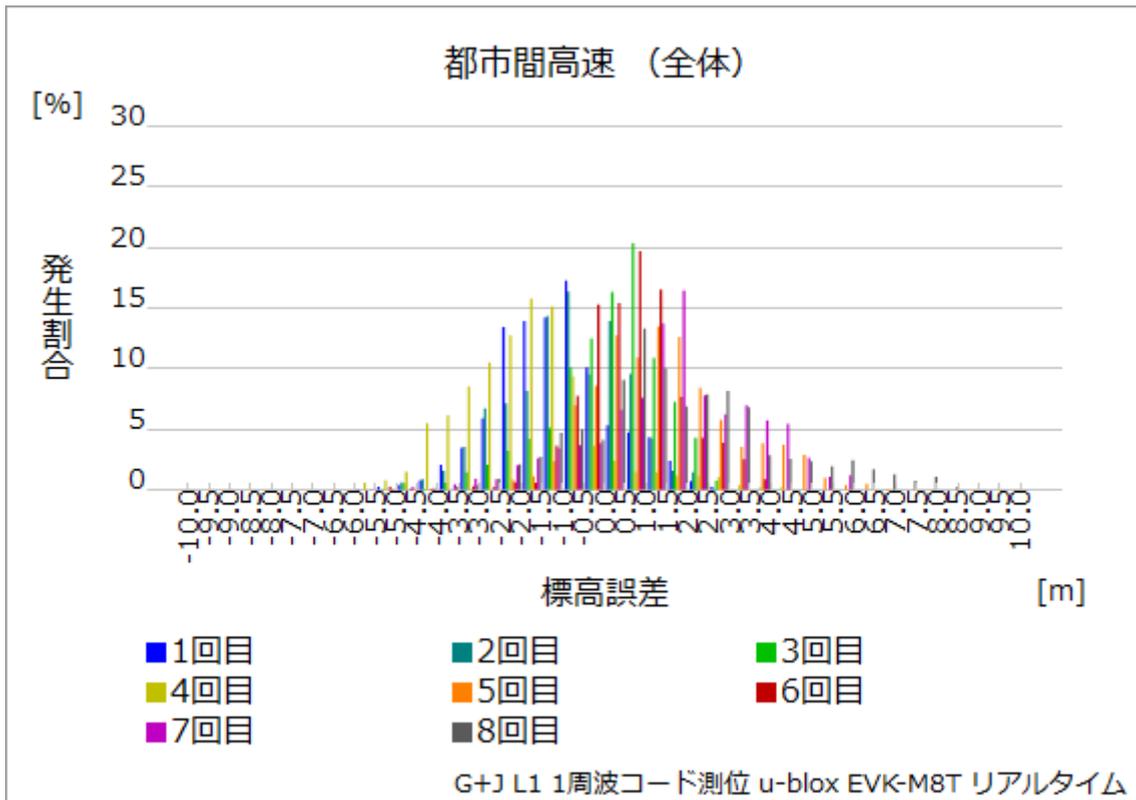


図 2.4.2-6 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率をみると以下のようなになる。

表 2.4.2-3 左右方向誤差 発生割合 (周回・区間毎)

周回	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m
1	74.85%	90.75%	48.65%	81.14%	89.40%	97.72%	82.64%	92.33%
2	52.46%	77.24%	35.30%	81.18%	74.49%	86.99%	39.85%	63.73%
3	58.50%	80.72%	61.58%	77.82%	50.27%	76.17%	63.44%	79.92%
4	62.24%	82.54%	44.49%	81.16%	79.86%	87.74%	58.14%	79.73%
5	85.40%	92.68%	98.20%	100.00%	69.50%	81.63%	85.93%	93.53%
6	43.95%	63.90%	1.20%	13.40%	54.42%	79.03%	59.86%	79.58%
7	55.90%	74.57%	89.19%	100.00%	61.83%	94.30%	59.13%	74.95%
8	71.86%	85.93%	84.81%	91.90%	56.18%	77.14%	75.20%	88.37%
平均	63.14%	81.03%	57.92%	78.32%	67.00%	85.09%	65.53%	81.52%

都市間高速の中でも比較的上空視界の良好な区間 A (桜土浦 IC~つくば JCT~つくば中央 IC) では、ほとんどの走行で 75%以上が左右誤差 1.5m 以内であった。

6 回目の走行で、特に区間 A が他の走行に比べ極端に低い値となっている。要因として考えられるのが、こういった受信機ではフィルタにより初期位置誤差を引きずってしまう傾向があるため、それが要因ではないかと推定される。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下ようになった。

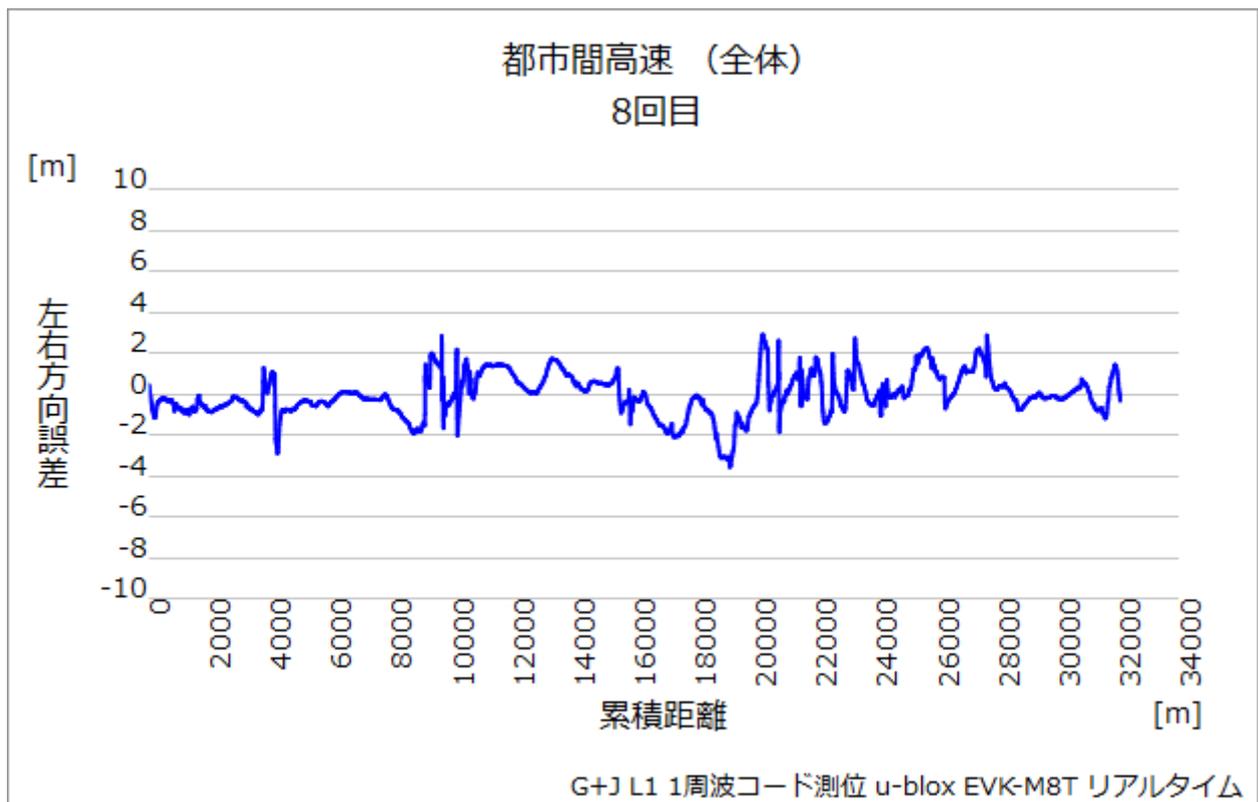


図 2.4.2-7 左右方向誤差の走行距離推移

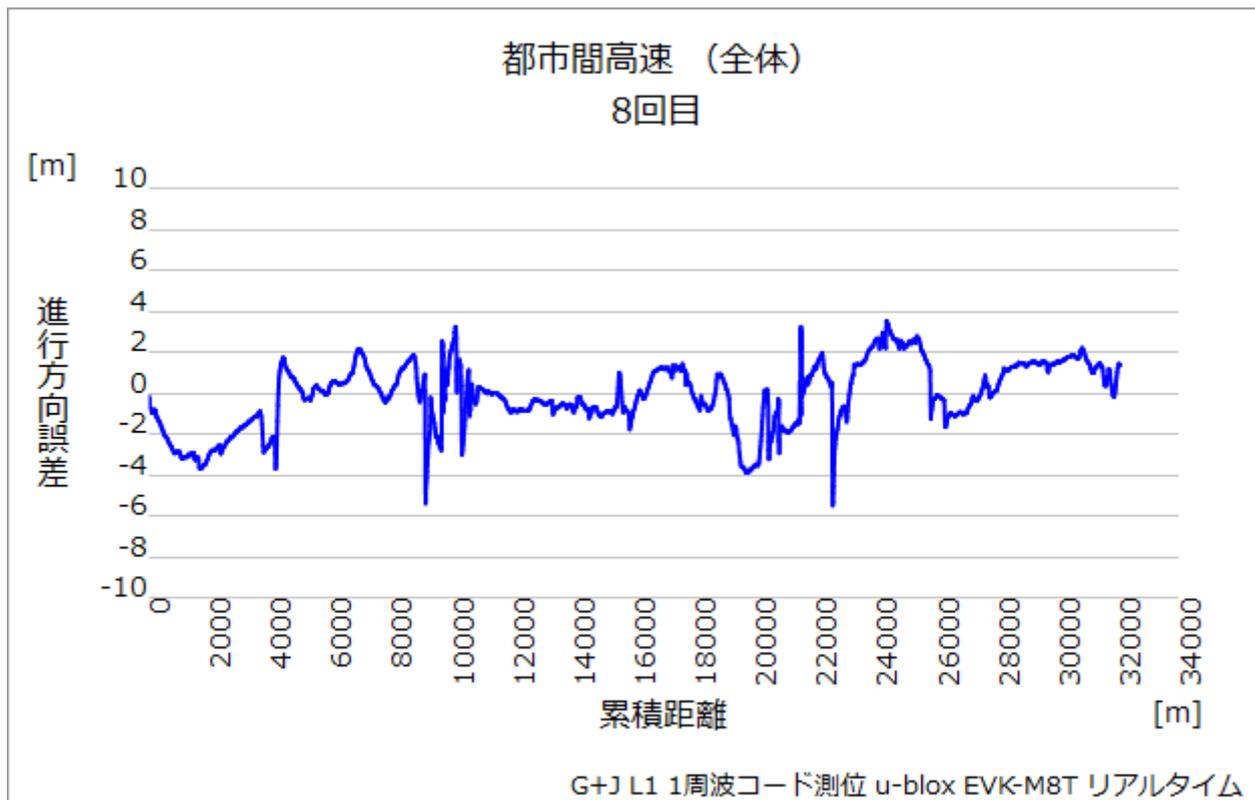


図 2.4.2-8 進行方向誤差の走行距離推移

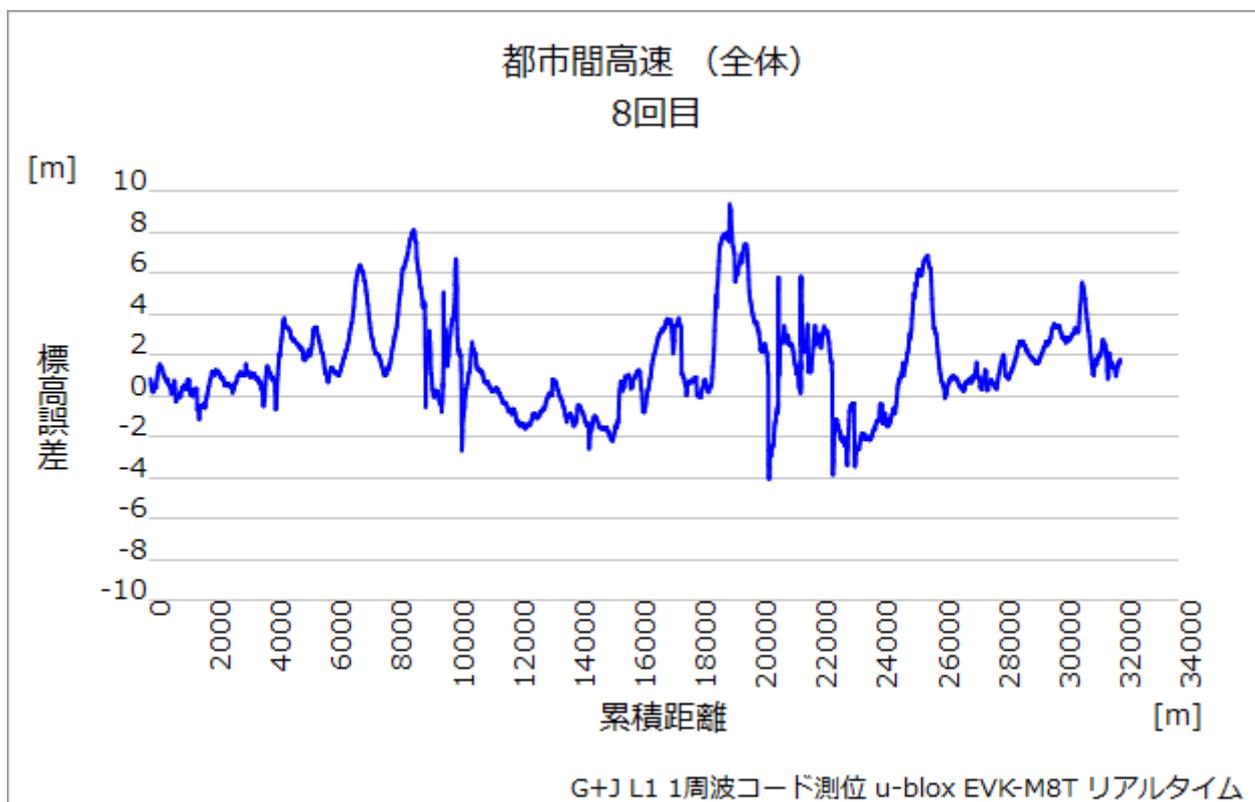


図 2.4.2-9 標高誤差の走行距離推移

左右方向誤差に比べ進行方向誤差の方が、揺らぎが大きく、また標高誤差に関してはより大きな振れ幅となっていることが確認できる。なお、距離 9,000m 付近ならびに 21,000m 付近は折返しの為の ETC 通過及び IC のランプ、一般道走行による揺らぎとなる。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

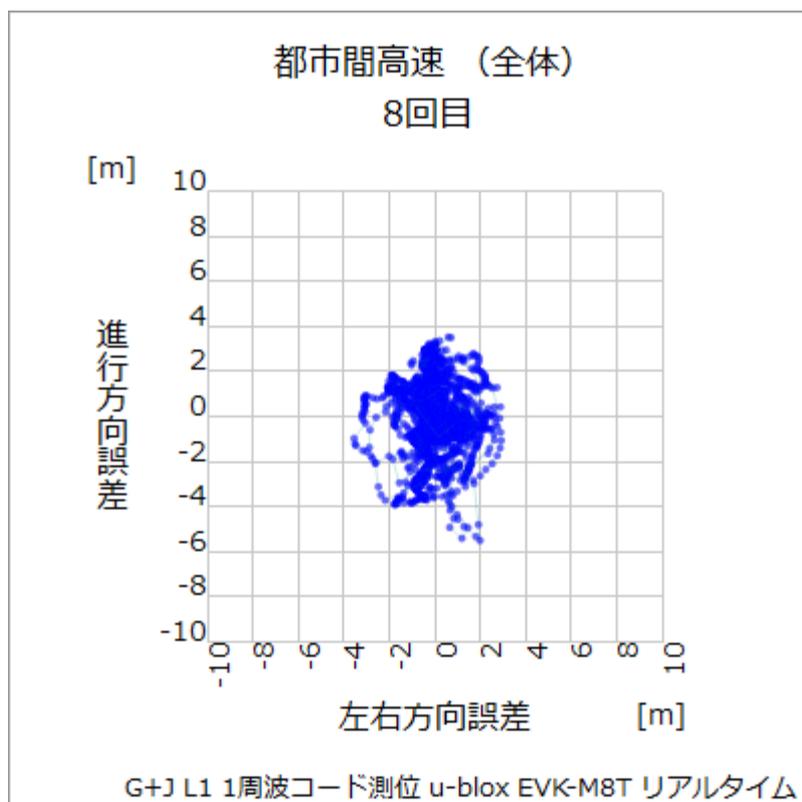


図 2.4.2-10 左右／進行方向誤差分布図

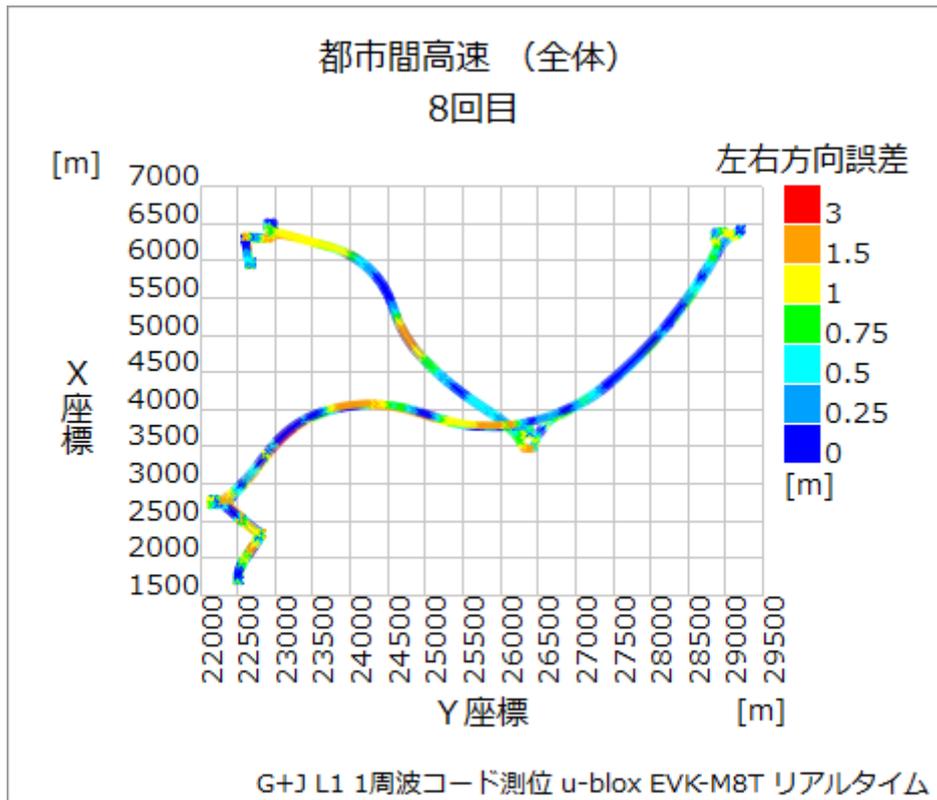


図 2.4.2-11 左右方向誤差プロット

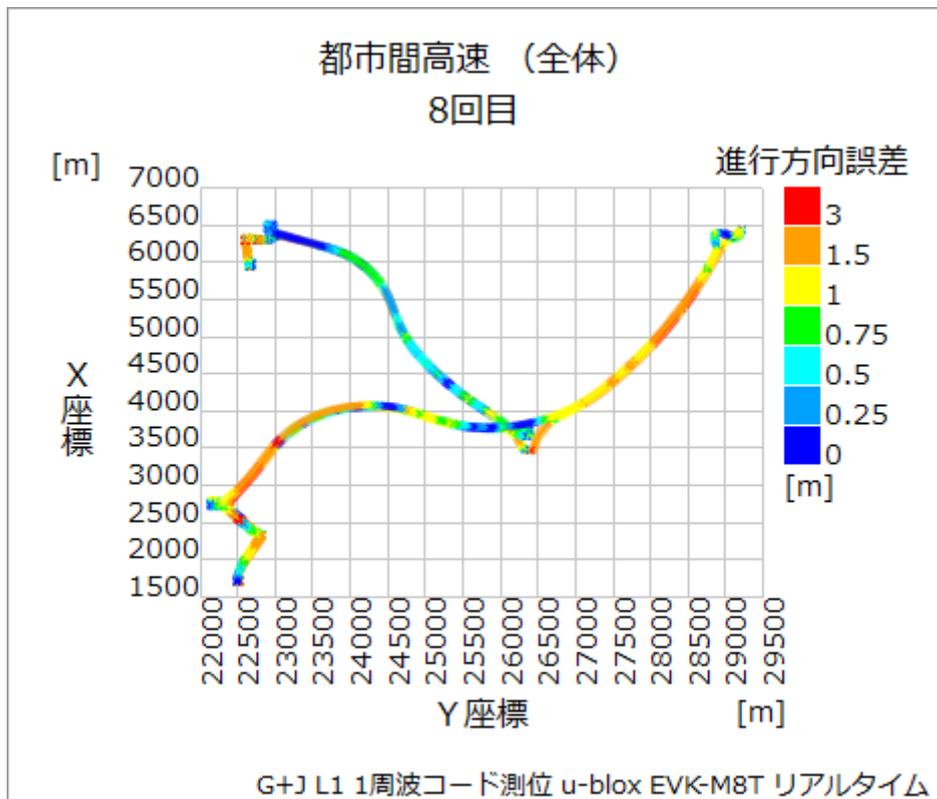


図 2.4.2-12 進行方向誤差プロット

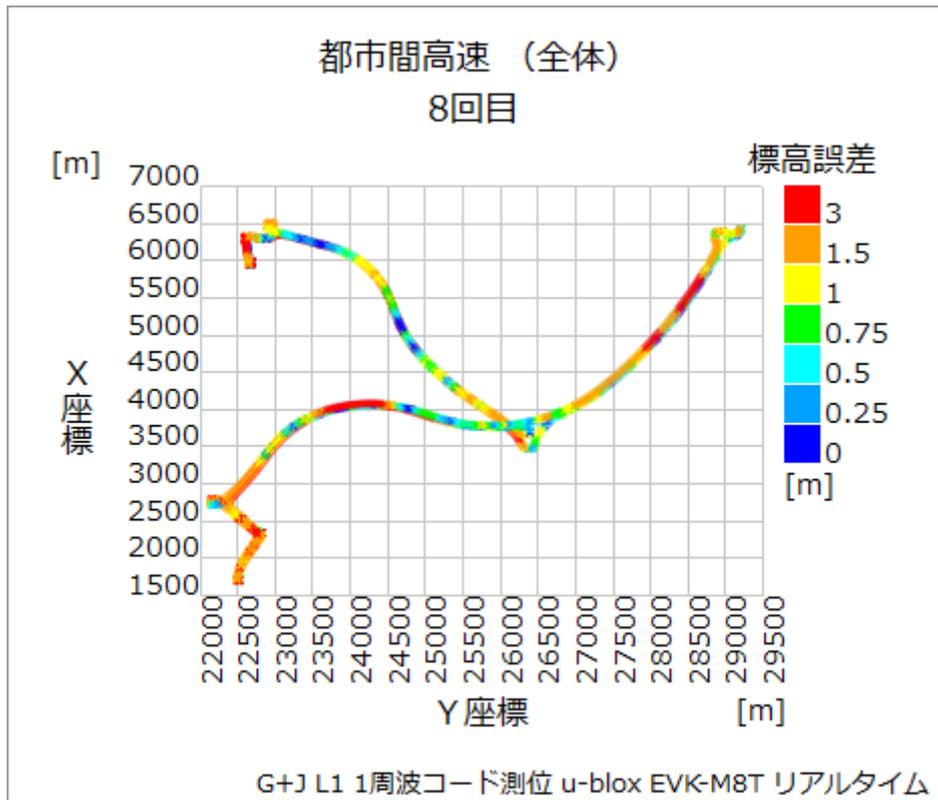


図 2.4.2-13 標高誤差プロット

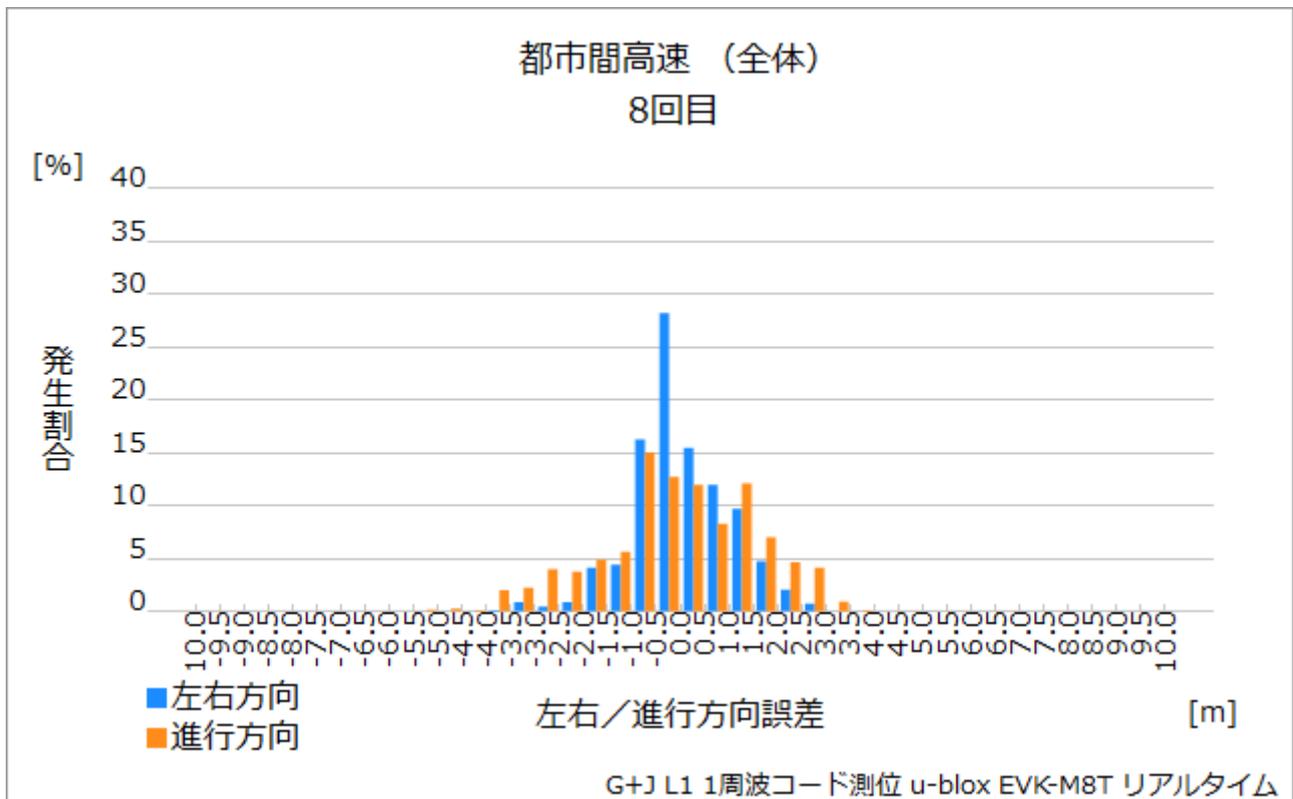


図 2.4.2-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

1周波のコード測位受信機（GPS+QZSS）では水平方向誤差の幅としては数 m 生じるものの、概ね真値が中央値となり、マルチパス、遮蔽の影響の少ない都市間高速道では 80%程度が左右方向誤差 1.5m 以内に入っている。また測位率が 100%となっており、高い測位精度と合わせ、フィルタによる推定の効果が確認できた。こういった受信機で準天頂衛星の補強信号等が利用されることで、更なる測位性能の向上が期待できる。

2.4.2.2. Trimble NetR9（後処理）

Trimble 社の NetR9 は、最大 440 チャンネルの GNSS マルチ衛星システムトラッキング性能を持つ多目的基準局受信機であり、後処理のための RTK 用の移動固定局、連続観測基準局（CORS）としても利用されている。対応する衛星システムは GPS、QZSS、GLONASS、BeiDou、Galileo、SBAS、対応する測位信号は L1/L2/L5 である。RAW データも出力可能であり、通信はシリアルポート、USB、Bluetooth、イーサネットが利用可能である。

本調査では、GPS+QZSS+GLONASS+Galileo+BeiDou の同時受信設定で測位実験を行った。アンテナは MMS 後部に搭載されている NovAtel 社製 GPS-703-GGG を使用した。

ここでは GPS+QZSS での計測結果について評価を行う。

都市間高速道路全 8 回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.2-4 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	172,576	157,202	91.09%	—	—
区間 A	40,676	37,982	93.38%	—	—
区間 B	46,547	41,300	88.73%	—	—
区間 C	42,668	36,759	86.15%	—	—

※10Hz で測位を実施

後処理では、衛星測位が可能であった測位結果のみ評価を行っている。このためリアルタイム計測で利用した u-blox EVK-M8T のような推定測位等の処理を行っていないため、測位率はリアルタイム計測より低い値となっている。

表 2.4.2-5 測位精度（全周回平均、区間毎）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	1.148	1.653	1.187	1.716	2.460	3.162
区間 A	0.982	1.492	1.090	1.558	2.198	2.587
区間 B	1.108	1.730	1.221	1.501	2.706	3.034
区間 C	1.413	1.806	1.361	1.889	2.710	3.569

左右方向誤差、進行方向誤差ともにオープンスカイの区間 A で 1m 程度であり、誤差の大きい区間 C でも 1.4m 程度であった。標高誤差は約 2.7m 以下であった。これは、u-blox EVK-M8T と同程度の誤差である。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラム
の形にまとめたものである。

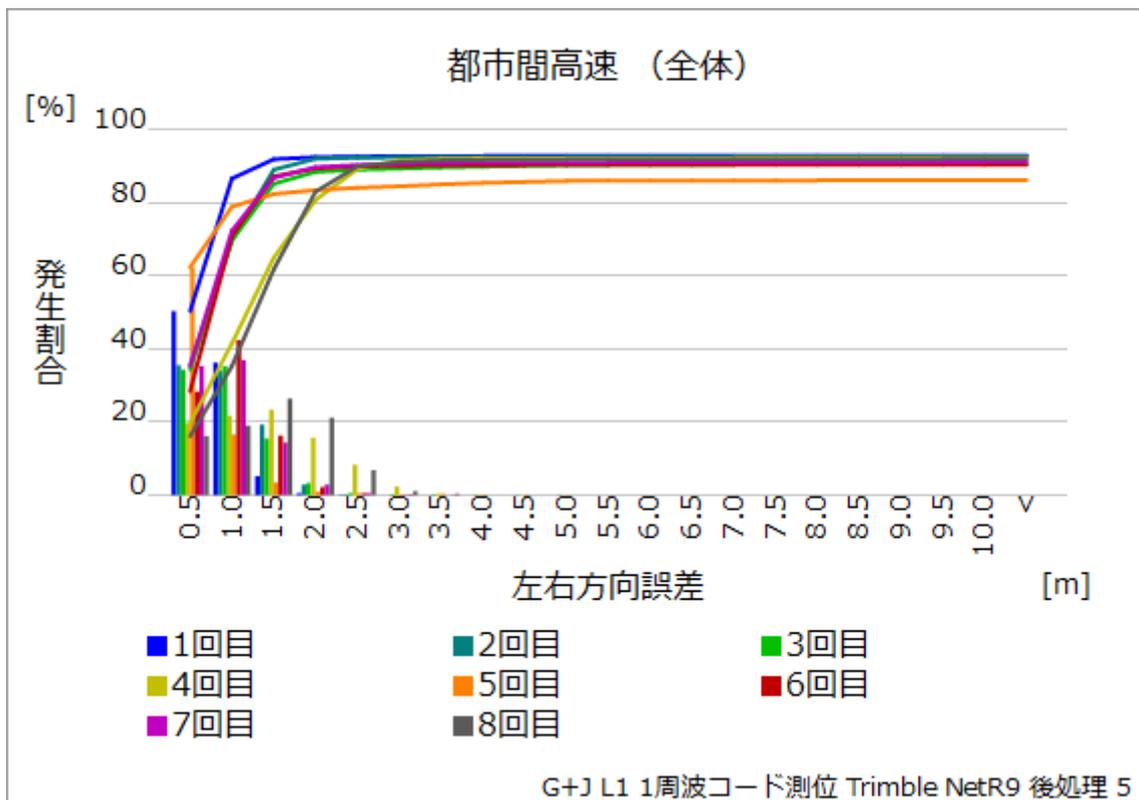


図 2.4.2-15 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

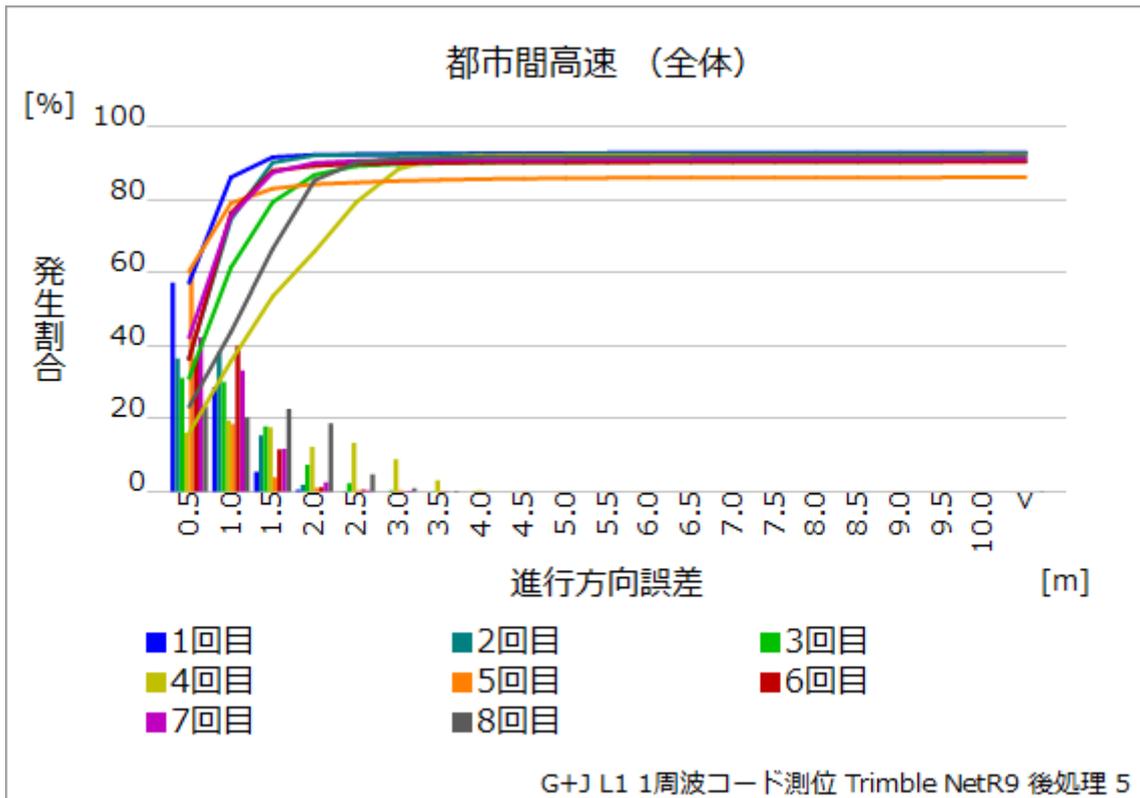


図 2.4.2-16 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

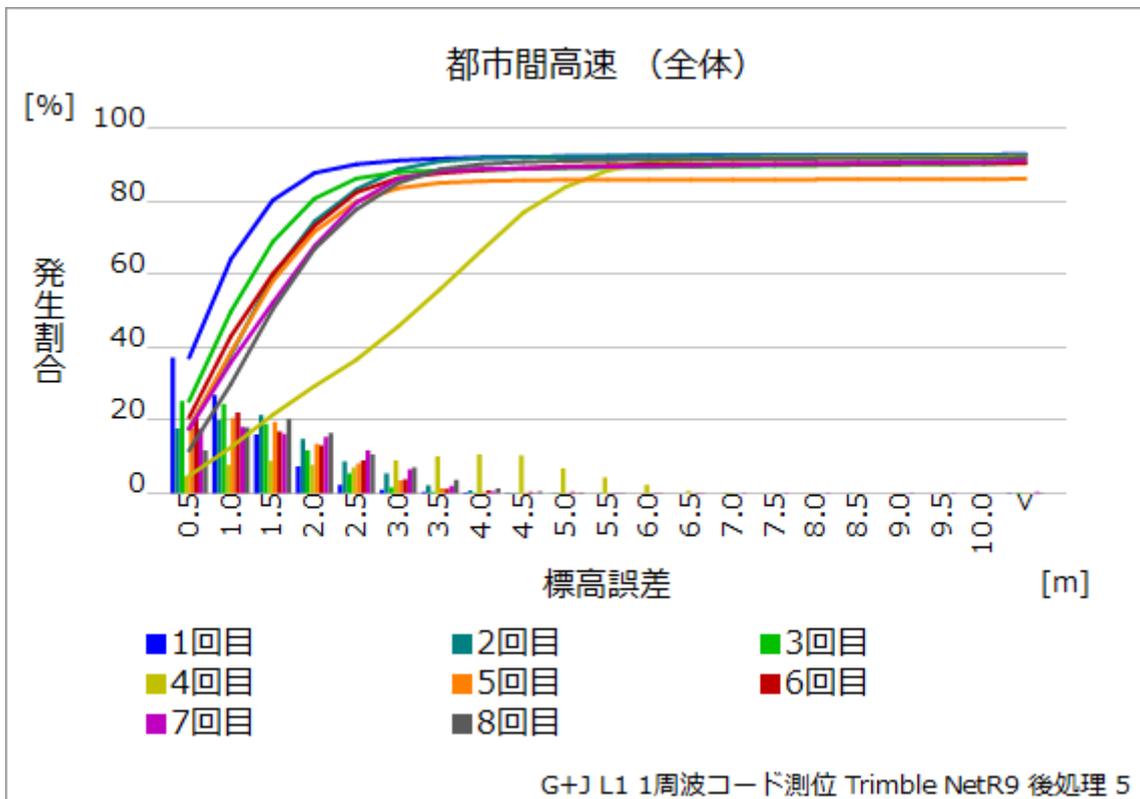


図 2.4.2-17 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

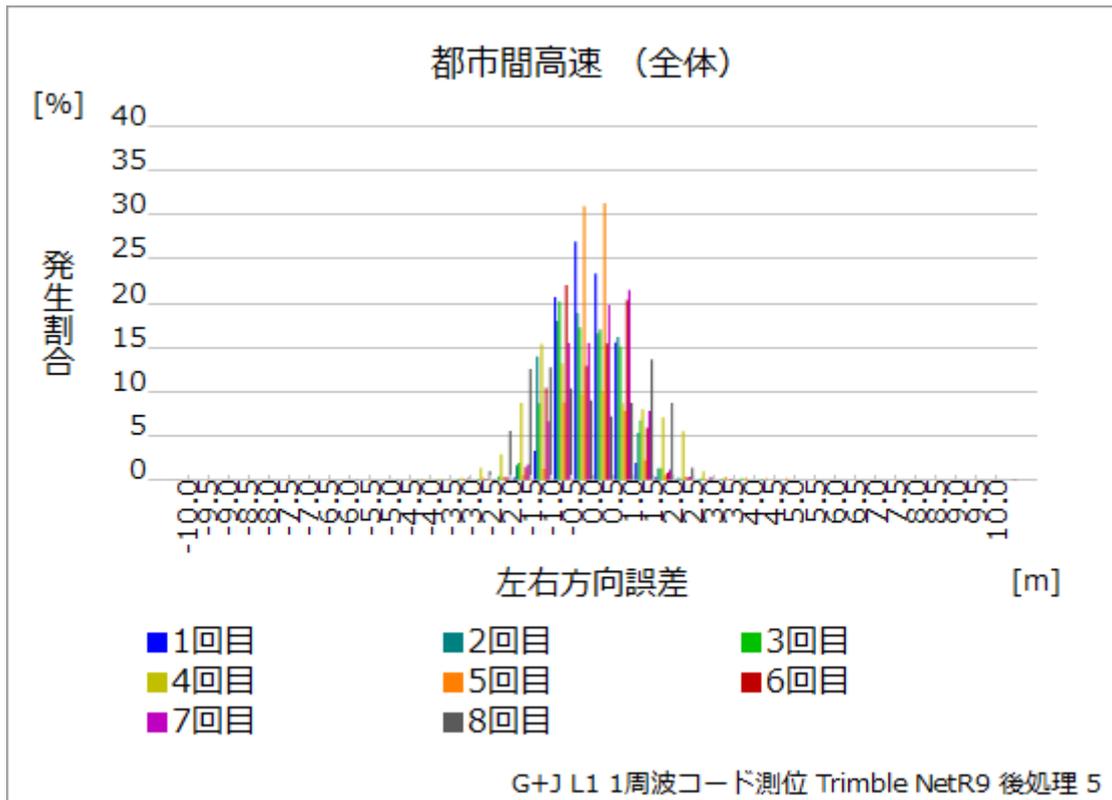


図 2.4.2-18 左右方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

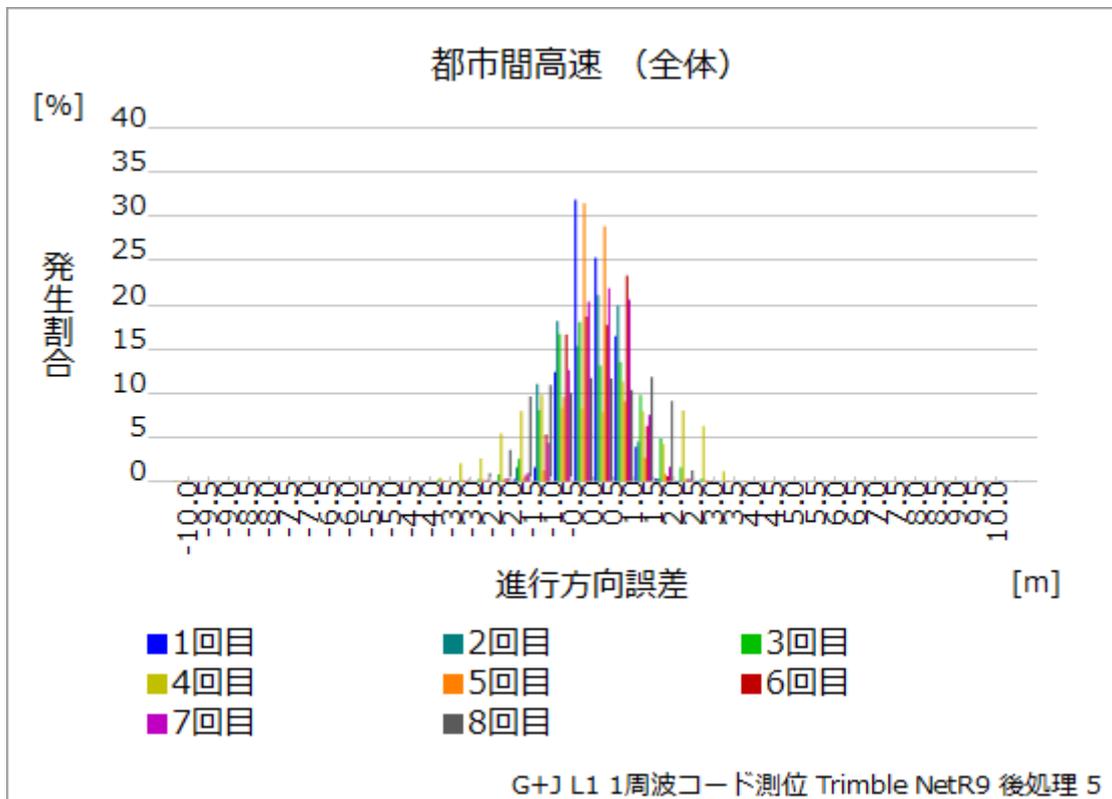


図 2.4.2-19 進行方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

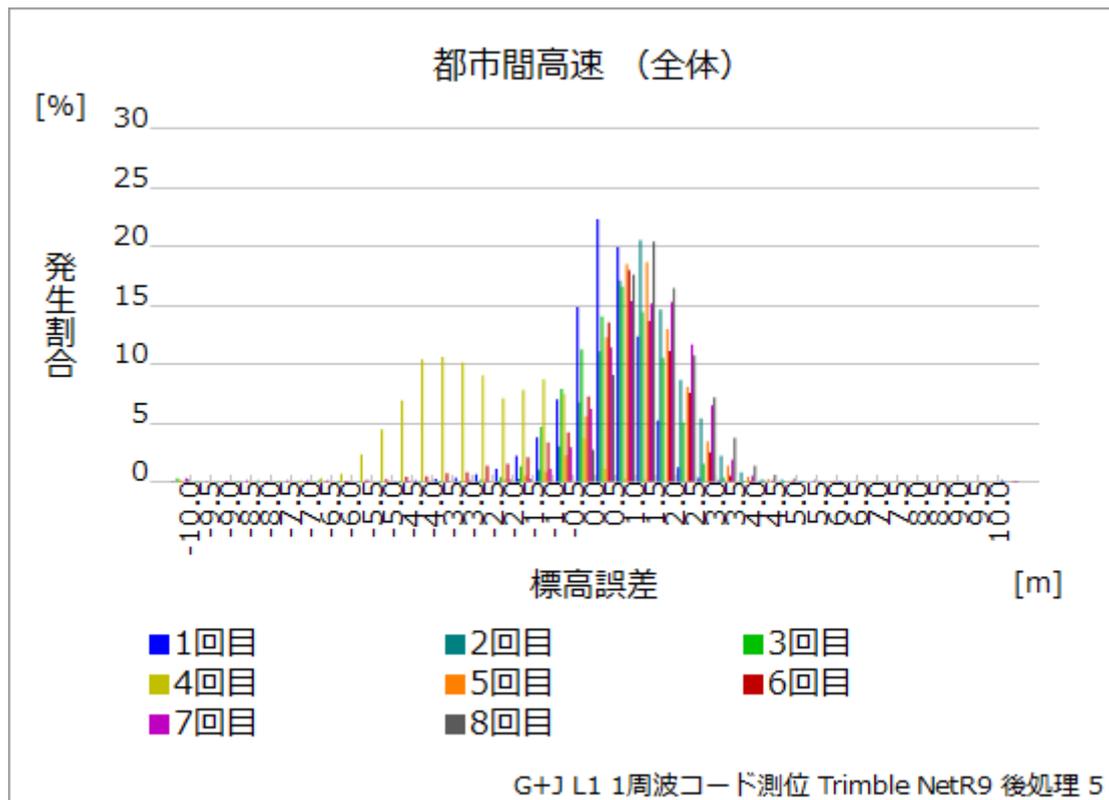


図 2.4.2-20 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率をみると以下のようなになる。

表 2.4.2-6 左右方向誤差 発生割合 (周回・区間毎)

	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m
1	86.59%	91.88%	90.45%	94.39%	81.23%	87.76%	79.69%	85.68%
2	69.67%	89.00%	58.24%	91.51%	66.63%	83.72%	79.98%	87.25%
3	69.69%	85.13%	78.04%	89.82%	66.72%	83.67%	66.44%	80.31%
4	41.56%	64.97%	55.61%	85.04%	31.75%	50.39%	38.19%	60.37%
5	78.88%	82.35%	84.46%	89.30%	74.53%	78.21%	70.25%	73.07%
6	70.84%	87.15%	68.50%	90.56%	70.35%	87.16%	69.70%	83.84%
7	72.33%	86.80%	70.50%	88.23%	75.33%	85.97%	65.86%	77.91%
8	35.32%	61.74%	27.46%	50.14%	15.42%	52.85%	50.11%	70.41%
平均	65.61%	81.13%	66.66%	84.88%	60.24%	76.22%	65.03%	77.36%

全区間では、左右方向誤差 1.5m 以内が 8 回中 6 回で 80%を超えていた。誤差が著しく大きかった 4、8 回目は、いずれも区間 B で精度が低く、ともに 1.5m 以内が 50%程度であり、さらに 8 回目は区間 A も 50%程度だった。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下ようになった。

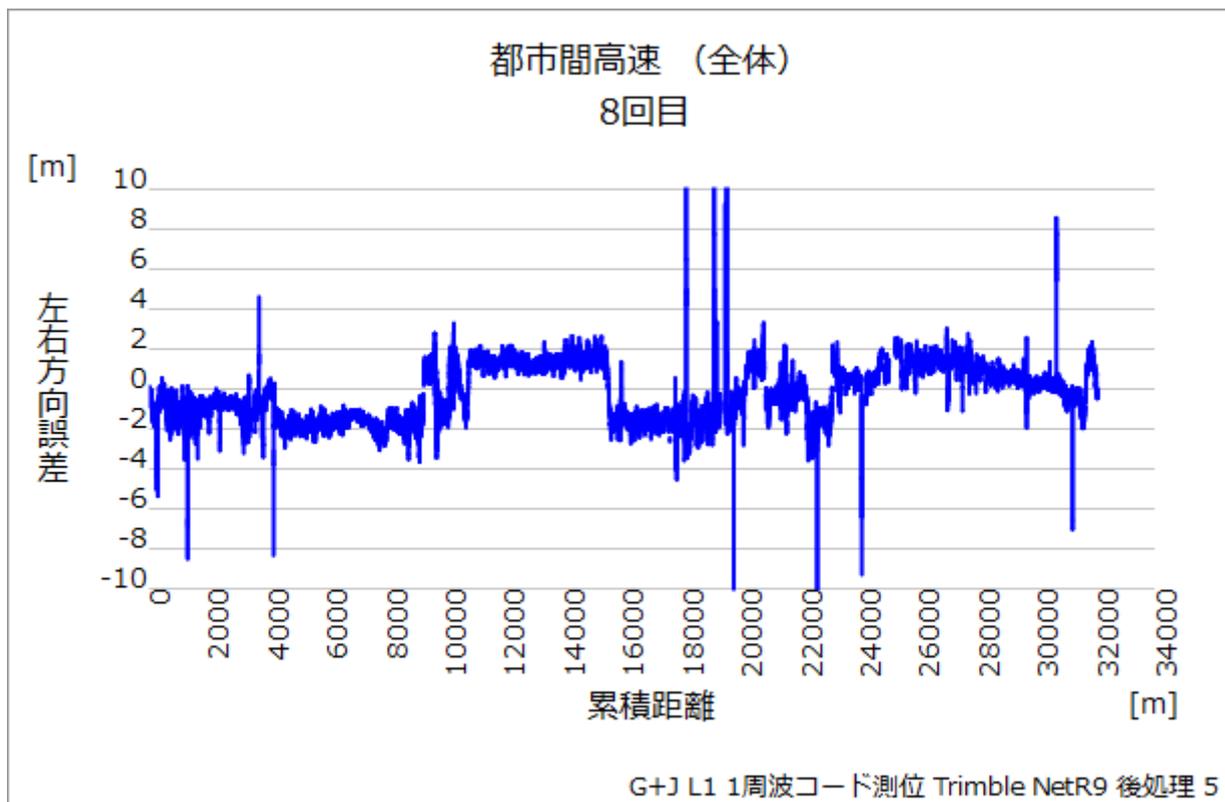


図 2.4.2-21 左右方向誤差の走行距離推移

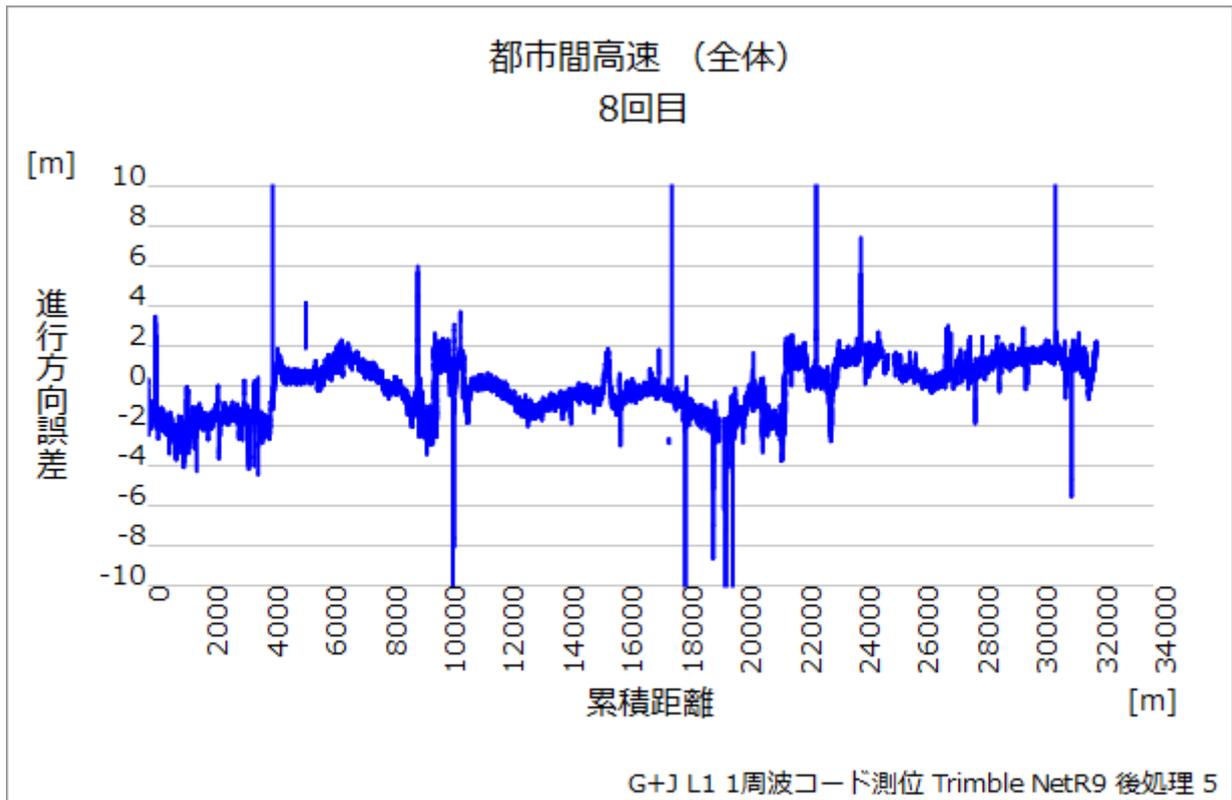


図 2.4.2-22 進行方向誤差の走行距離推移

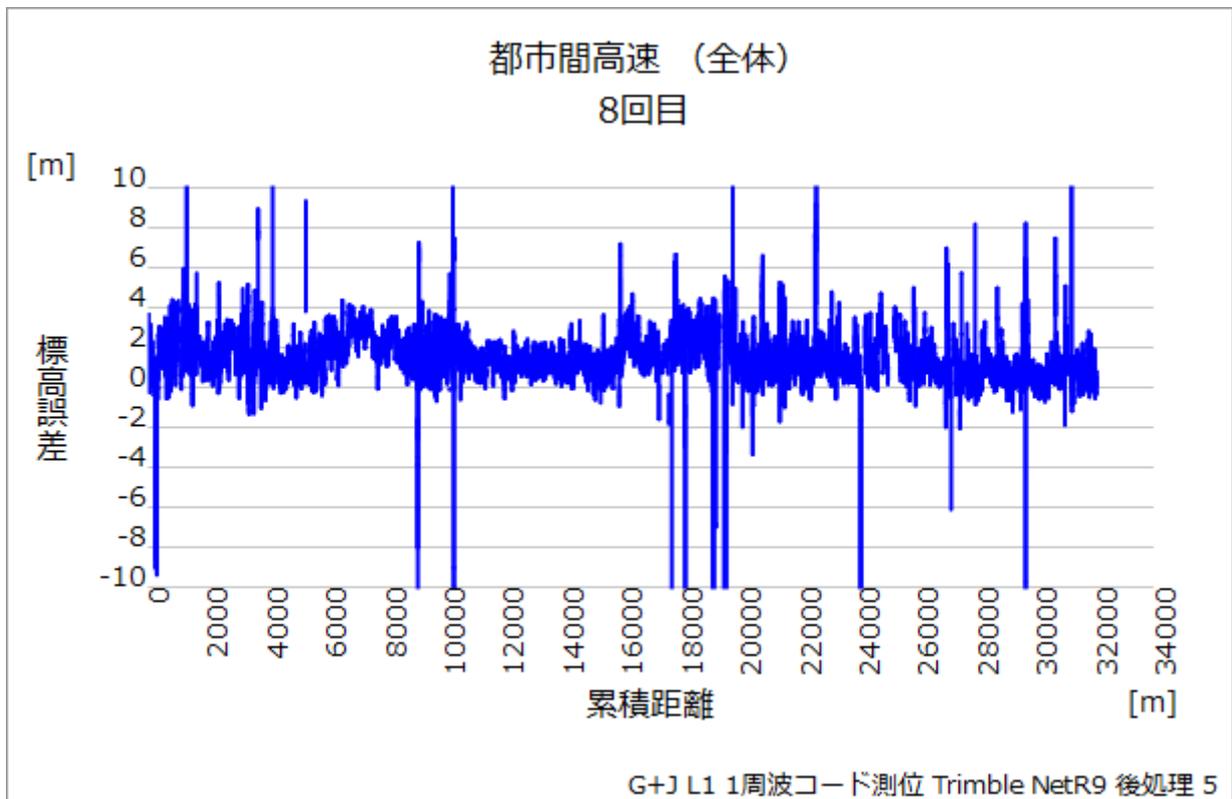


図 2.4.2-23 標高誤差の走行距離推移

進行方向誤差より左右方向誤差の方が、揺らぎが大きく、オープンスカイの区間 A で左右に振れていることが確認できた。標高誤差に関しては、揺らぎの振幅が激しく、これにより RMS が大きくなっていることが確認できた。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

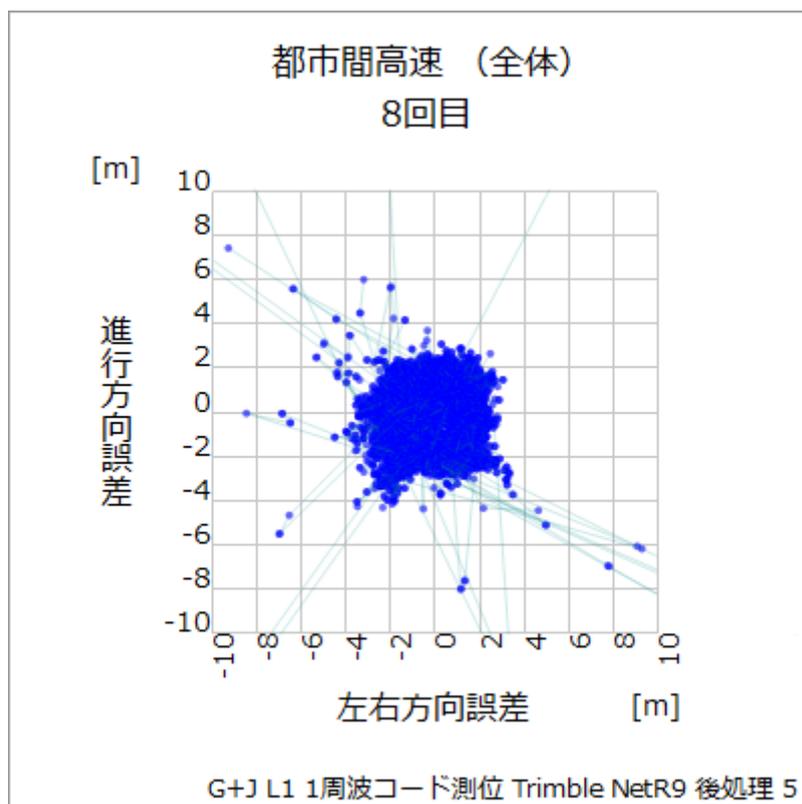


図 2.4.2-24 左右／進行方向誤差分布図

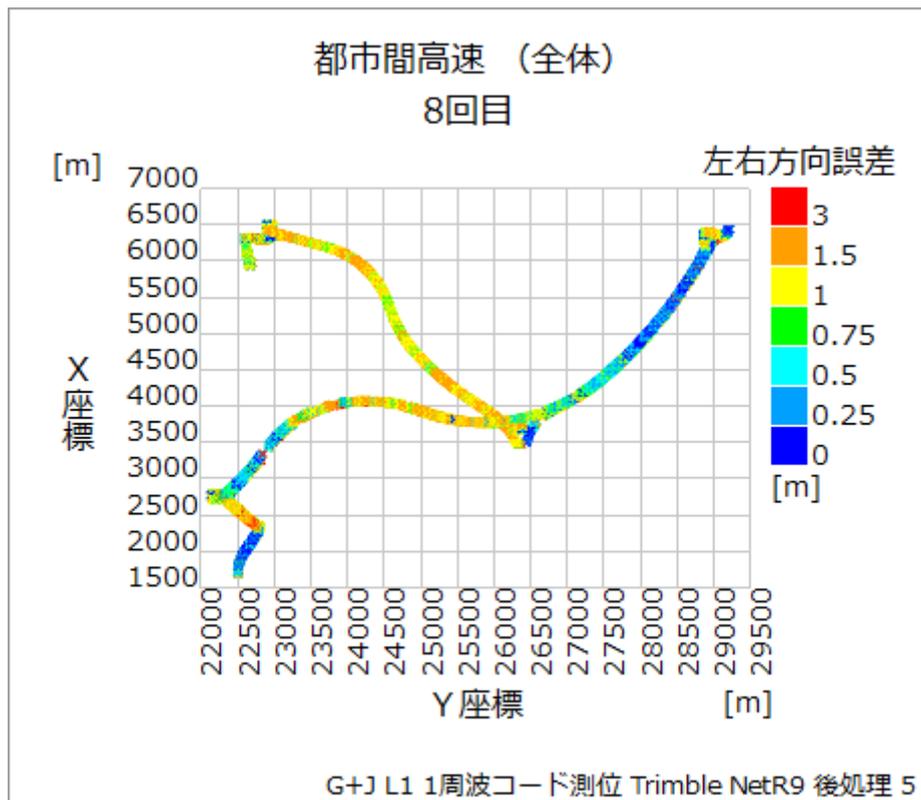


図 2.4.2-25 左右方向誤差プロット

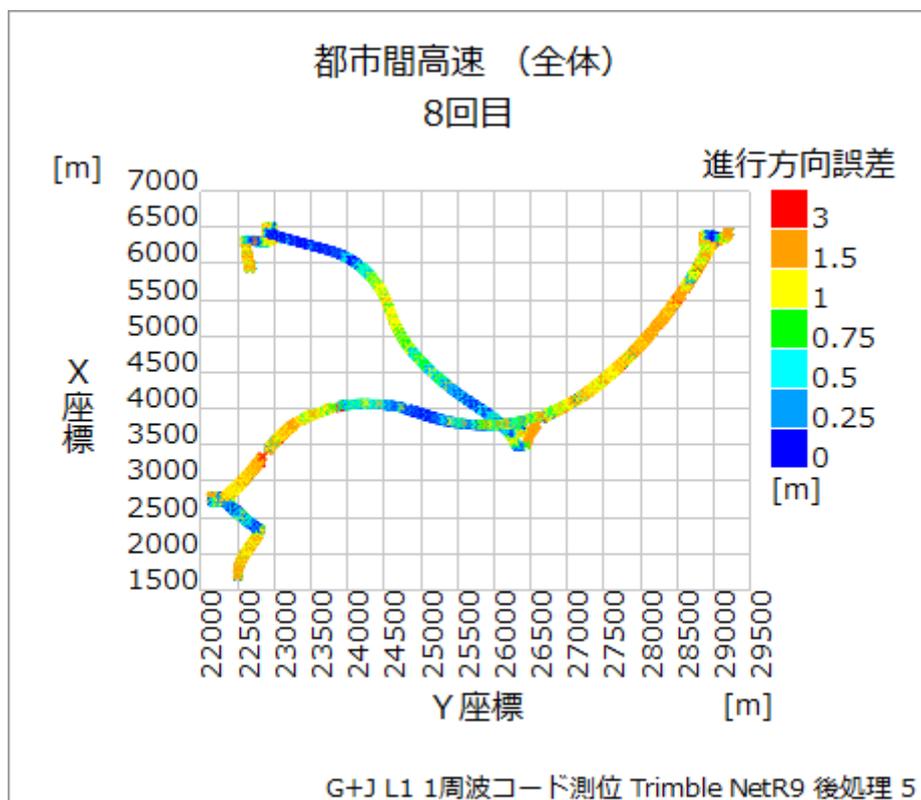


図 2.4.2-26 進行方向誤差プロット

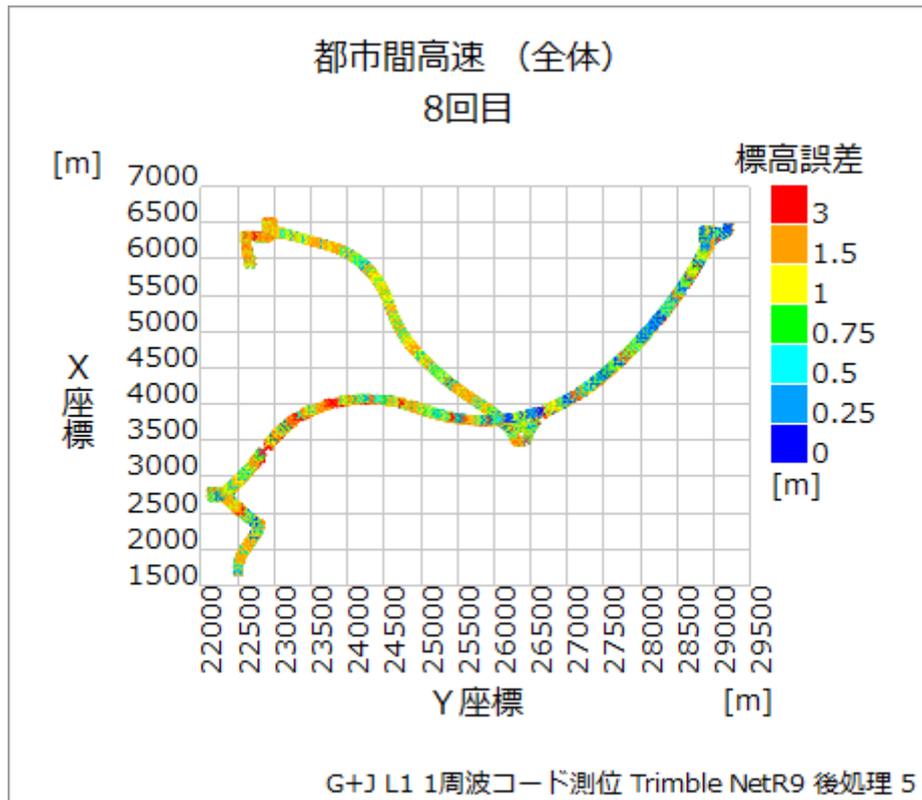


図 2.4.2-27 標高誤差プロット

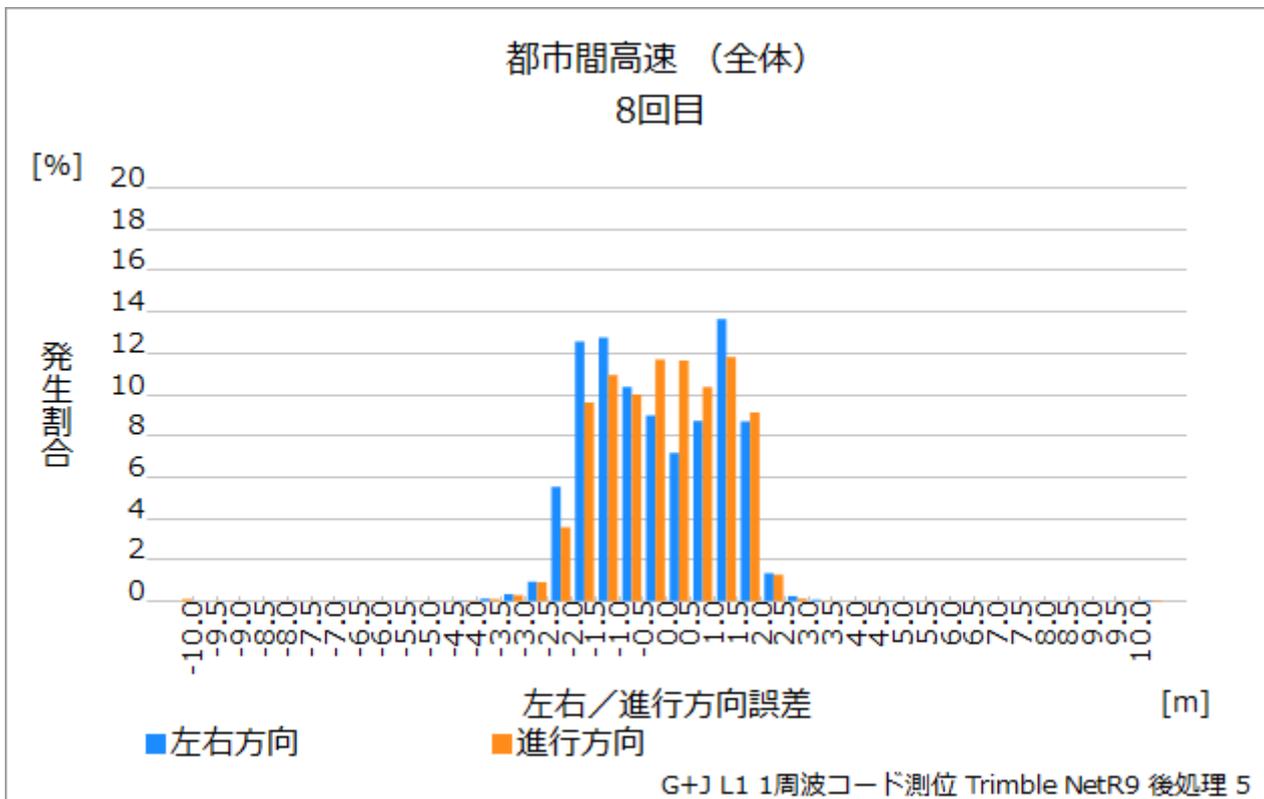


図 2.4.2-28 左右/進行方向誤差ヒストグラム

左右方向、進行方向誤差は、ともにヒストグラムが中心に来ており、確度は高いことが確認できたが、幅が広いので精度はそこまで高くない。また、左右方向誤差は中心が窪んでいるため、左右に振れていることがわかる。ただし、8回目は4回目とともに他周回とくらべて著しく精度が下がっており、平均をみれば、RMS1.5m以下が約81%となり、u-blox EVK-M8T程度の精度と確度が確認できる。

2.4.3. コード測位（多周波）

2.4.3.1. NovAtel FlexPak6

NovAtel社のFlexPak6は、NovAtel社製の高性能のGNSSボードである「OEM628」を内蔵したモデルであり、コンパクトかつ軽量の3周波受信機である。衛星システムはGPS、GLONASS、Galileo、QZSS、BeiDou、SBASに対応しており、L1/L2/L5帯を同時にトラッキング可能である。また、RAWデータも出力可能であり、シリアルポートやUSBポート等複数の出力ポートを搭載している。

本調査では、GPS+GLONASSの同時受信設定で測位実験を行った。アンテナはMMS後部に搭載されているNovAtel社製GPS-703-GGGを使用した。

ここではGPS+GLONASSでのリアルタイム多周波コード測位の結果について評価を行う。

都市間高速道路全8回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.3-1 測位率・Fix率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix数	Fix率
全区間	17,265	17,262	99.98%	—	—
区間 A	4,075	4,074	99.98%	—	—
区間 B	4,662	4,662	100.00%	—	—
区間 C	4,274	4,272	99.95%	—	—

※1Hzで測位を実施

測位率については、信号遮蔽箇所が存在するにもかかわらず、いずれもほぼ100%となっている。これはカルマンフィルタにより推定を行っているためと考えられる。

表 2.4.3-2 単独測位解（推定無し）の割合（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数（推定無し）	測位率（推定無し）
全区間	17,265	15,331	88.80%
区間 A	4,075	3,729	91.51%
区間 B	4,662	3,927	84.23%
区間 C	4,274	3,553	83.13%

区間 A は測位数全体の 10%、区間 A より信号遮蔽が多い区間 B、C は 16%程度が推定となっている。

表 2.4.3-3 測位精度（全周回平均、単独測位解（推定無し）のみより算出）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	0.538	0.916	0.543	0.977	1.894	2.513
区間 A	0.537	0.845	0.586	1.009	1.718	2.163
区間 B	0.575	0.958	0.425	0.870	1.903	2.410
区間 C	0.463	0.817	0.546	0.840	1.978	2.606

左右方向誤差は、いずれも RMS が 0.5m 程度であり、車線認識できる程度の測位性能が確認できた。1 周波コード測位より 0.5m ほど良い結果となっている。また進行方向に関しても RMS はいずれも 0.5m 程度、標高も RMS 2.00m 以下となった。標高の RMS の 2 倍よりも 95.45%が少し小さいのは全体が真値よりもずれているからである。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラム の形にまとめたものである。

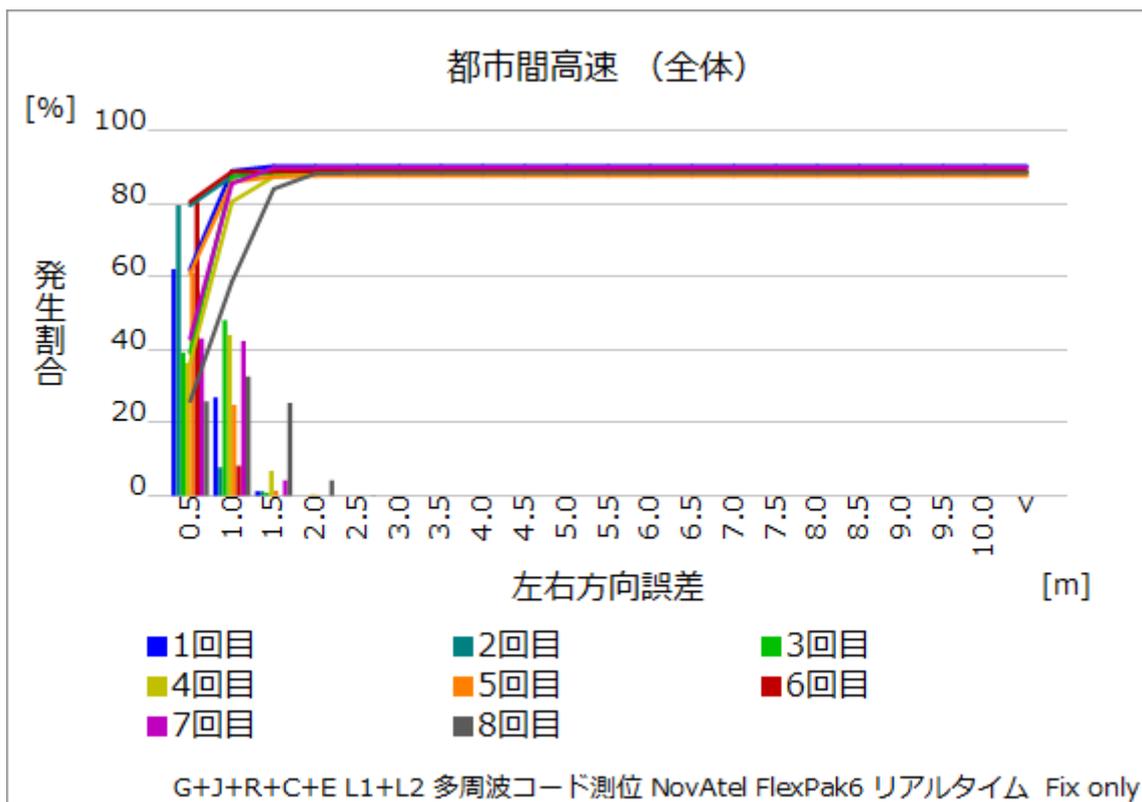


図 2.4.3-1 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

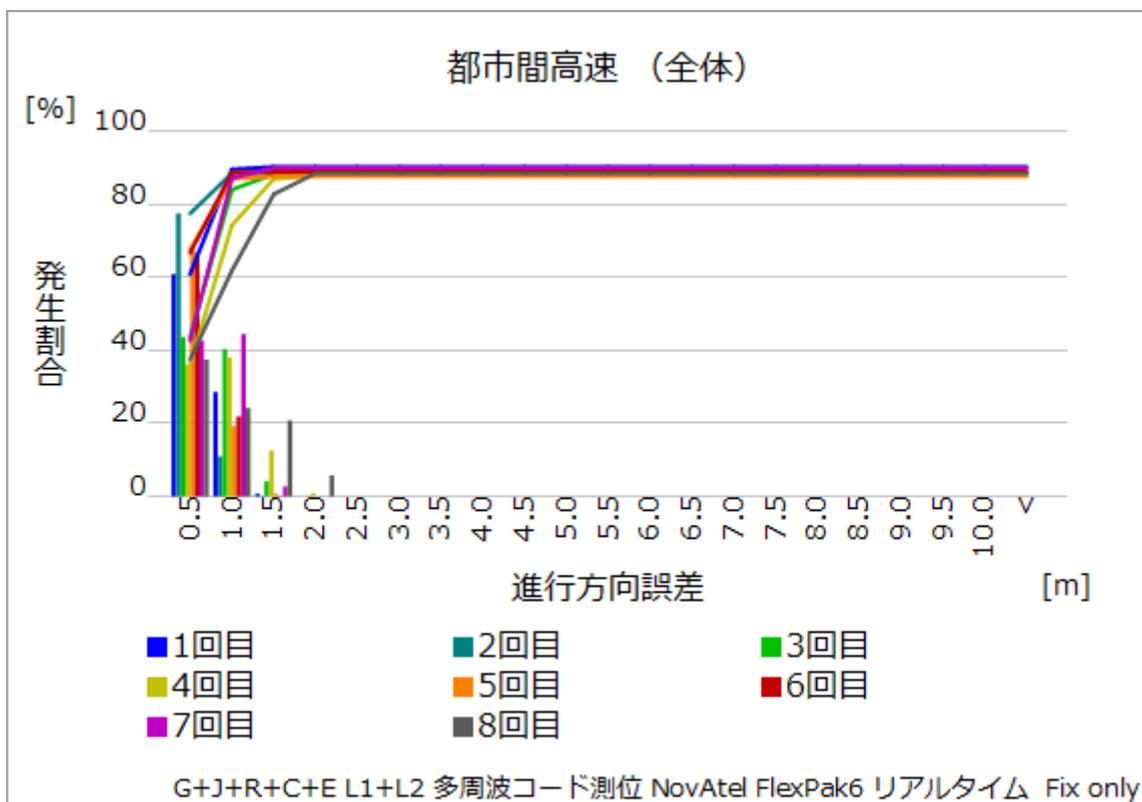


図 2.4.3-2 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

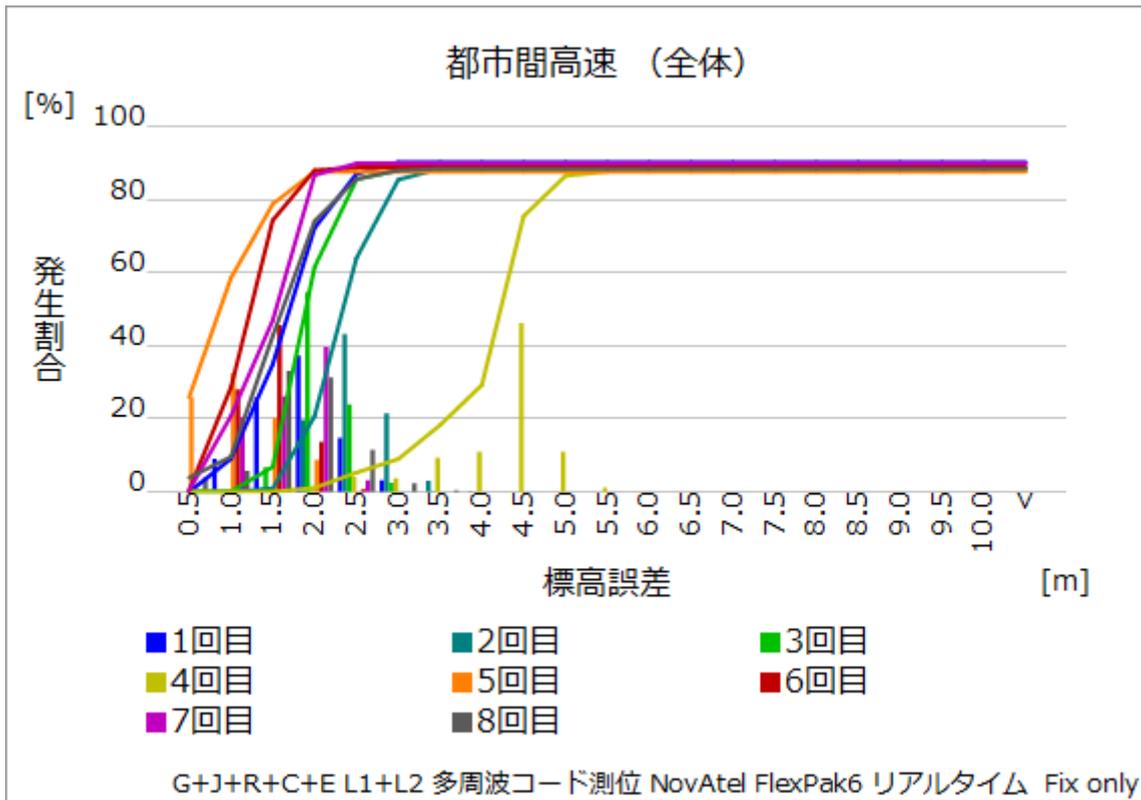


図 2.4.3-3 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

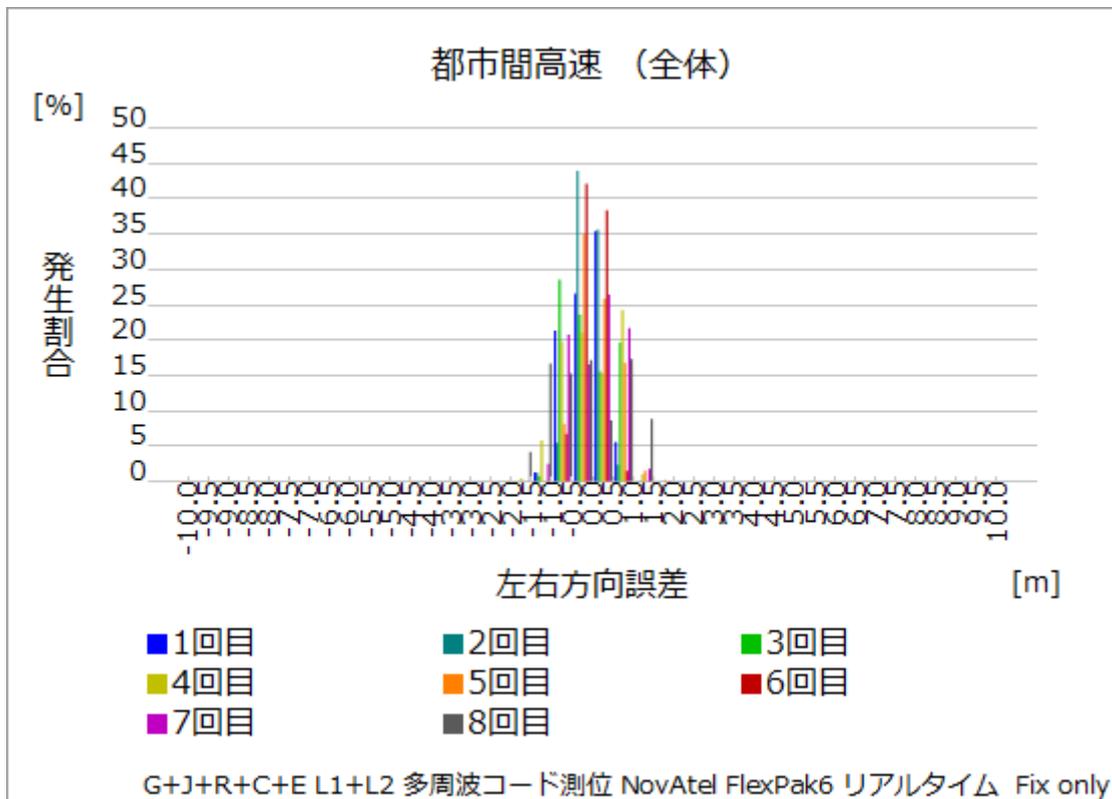


図 2.4.3-4 左右方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

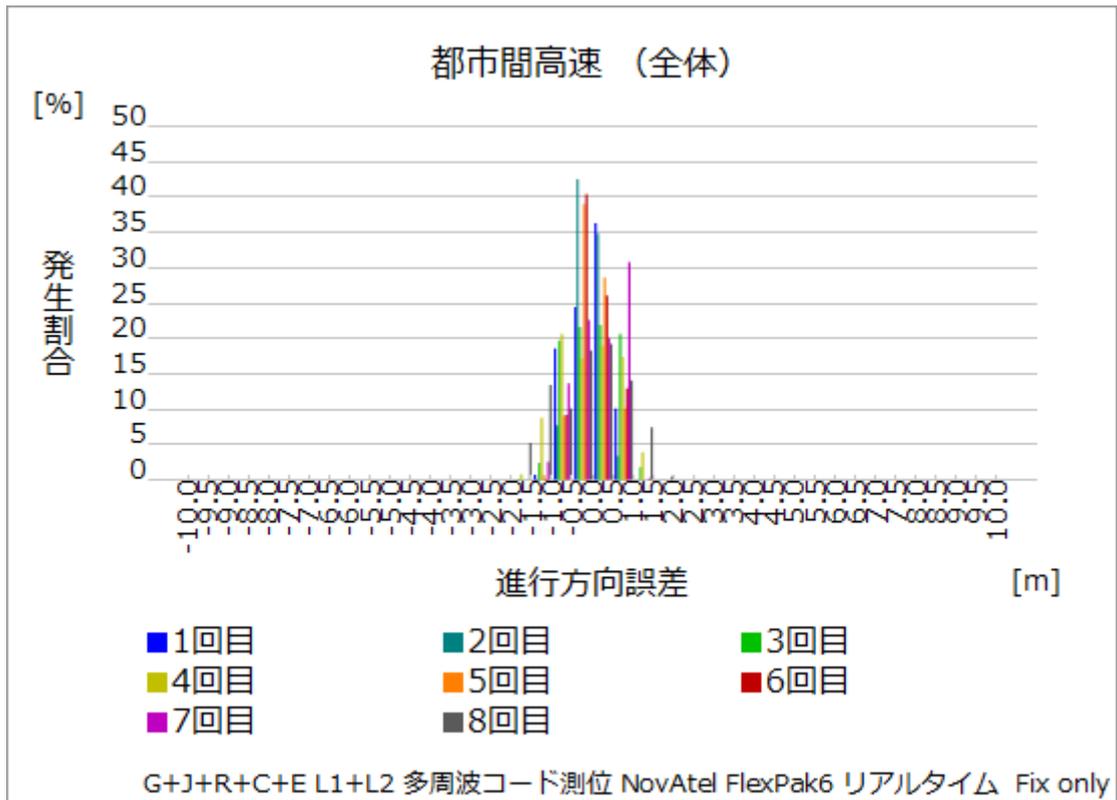


図 2.4.3-5 進行方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

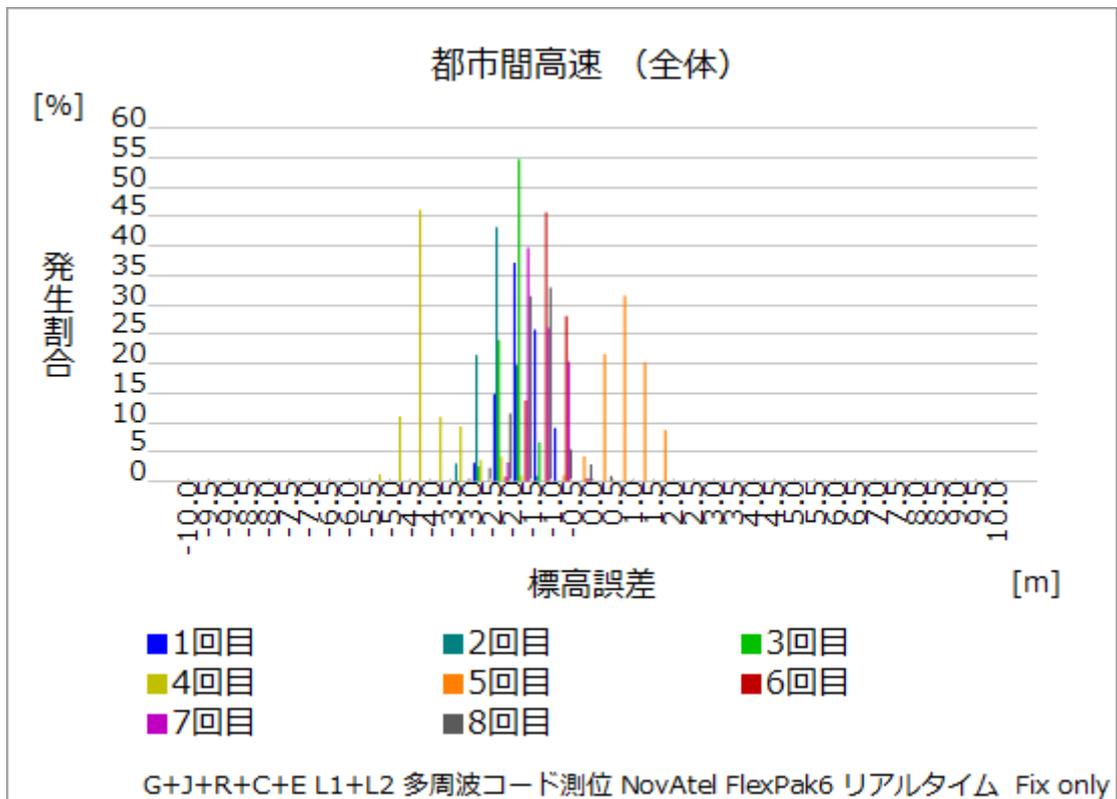


図 2.4.3-6 標高誤差 発生割合（ヒストグラム）

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率をみると以下のようになる。

表 2.4.3-4 左右方向誤差 発生割合（周回・区間毎）

周回	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m
1	88.97%	90.26%	92.82%	92.82%	84.50%	84.50%	83.73%	83.73%
2	87.43%	88.66%	90.39%	90.59%	85.62%	85.62%	81.58%	81.58%
3	87.43%	88.29%	92.28%	92.48%	83.59%	84.80%	81.44%	82.95%
4	80.50%	87.38%	85.37%	89.78%	71.63%	83.36%	77.65%	82.20%
5	85.90%	87.38%	89.42%	89.62%	77.64%	82.67%	83.65%	83.65%
6	88.76%	88.81%	90.80%	90.80%	84.92%	84.92%	86.20%	86.38%
7	85.51%	89.82%	92.14%	92.14%	74.27%	83.59%	76.27%	83.43%
8	58.64%	84.05%	44.53%	81.38%	51.89%	77.66%	70.99%	80.53%
平均	82.89%	88.08%	84.72%	89.95%	76.76%	83.39%	80.19%	83.06%

オープンスカイの続く区間 A では、8 回目を除いて 85%以上が 1m 以内で、全区間でも同様に 80%以上が 1m 以内となった。ただし、8 回目はすべての区間で一番誤差が大きくなった。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下のようになった。

※Fix は単独測位、UnFix は推定を表している。

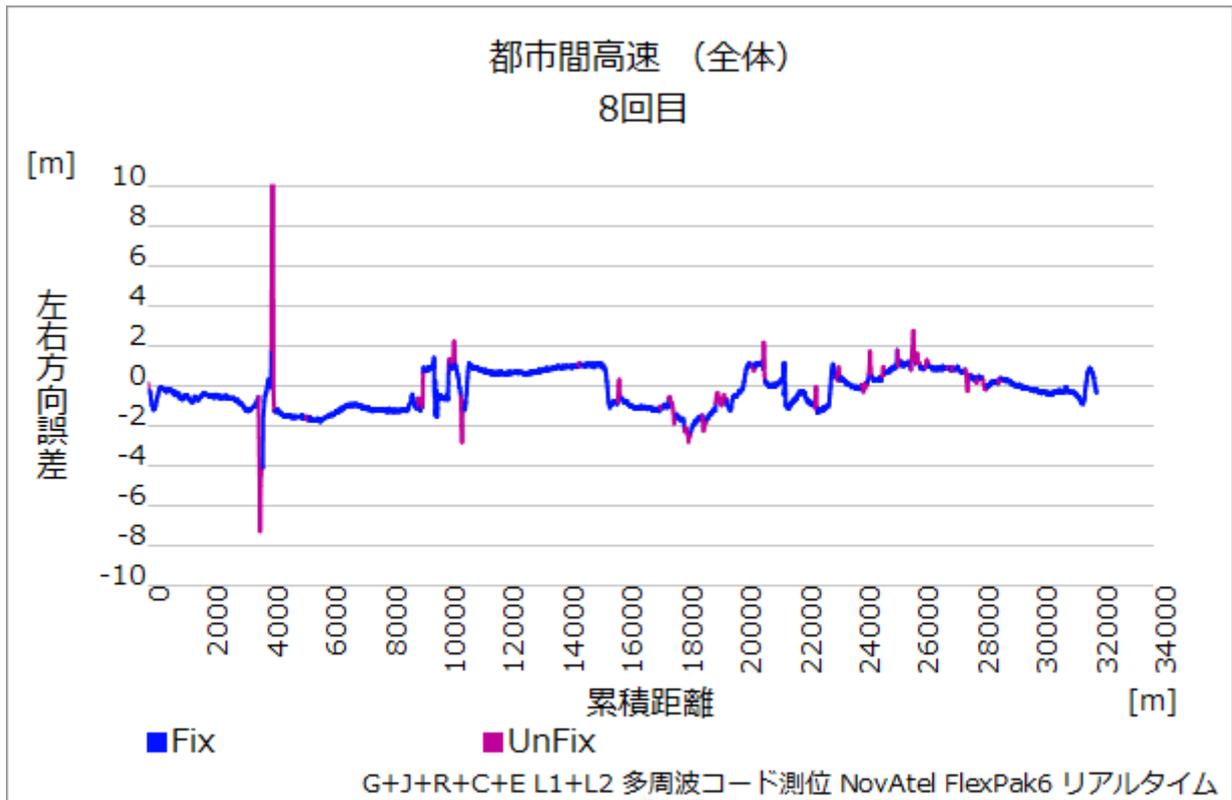


図 2.4.3-7 左右方向誤差の走行距離推移

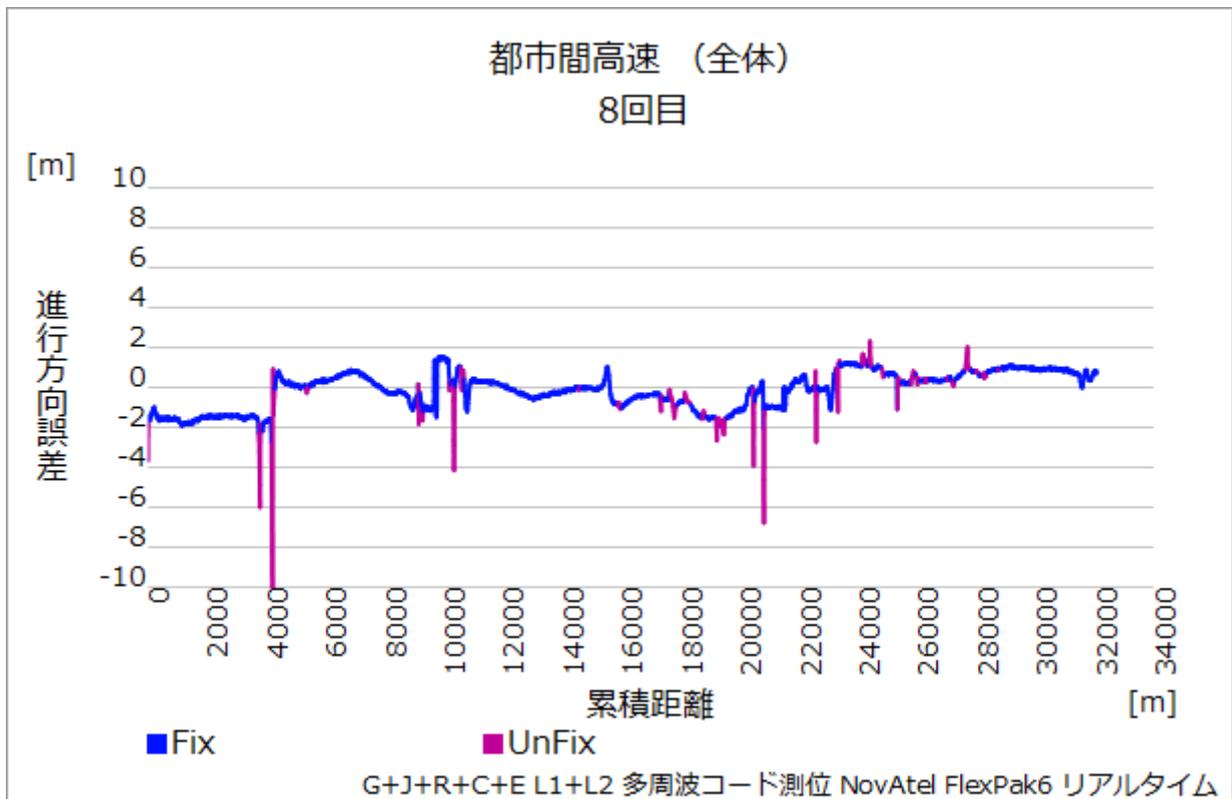


図 2.4.3-8 進行方向誤差の走行距離推移

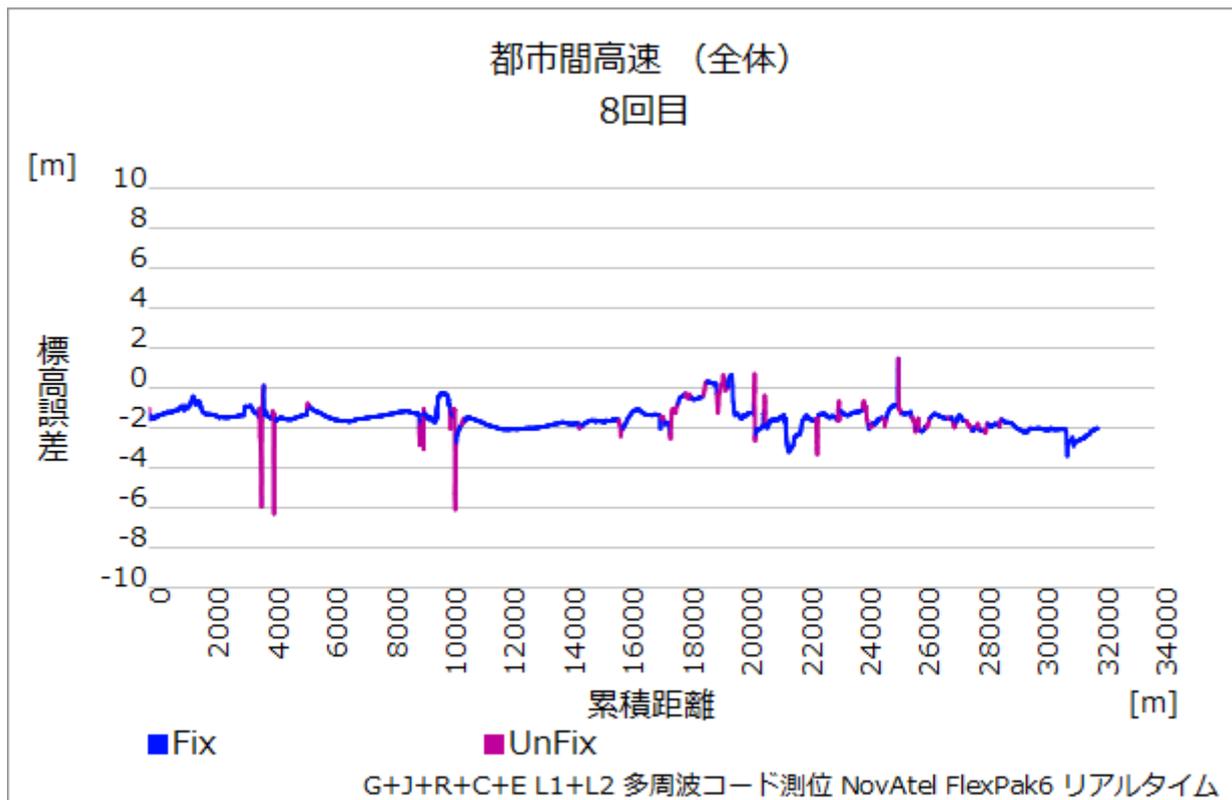


図 2.4.3-9 標高誤差の走行距離推移

左右方向誤差も進行方向誤差も揺らぎは同程度であったが、推定箇所は左右方向誤差の方が安定している。標高誤差は、揺らぎは少ないが誤差が大きい。また、推定により測位率は向上しているが、誤差は大きいことがわかる。推定箇所の 4000m 地点の大きな誤差は JCT の高架下、10000m 地点の誤差はつくば中央 IC の ETC、後半の小間隔で推定となる区間は主に橋梁下によるものである。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

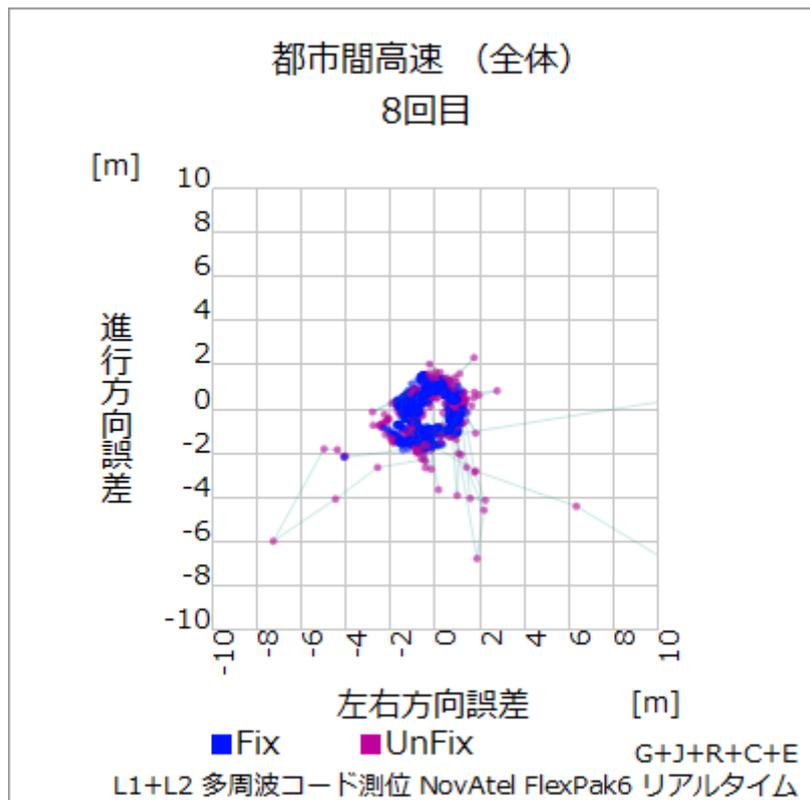


図 2.4.3-10 左右／進行方向誤差分布図

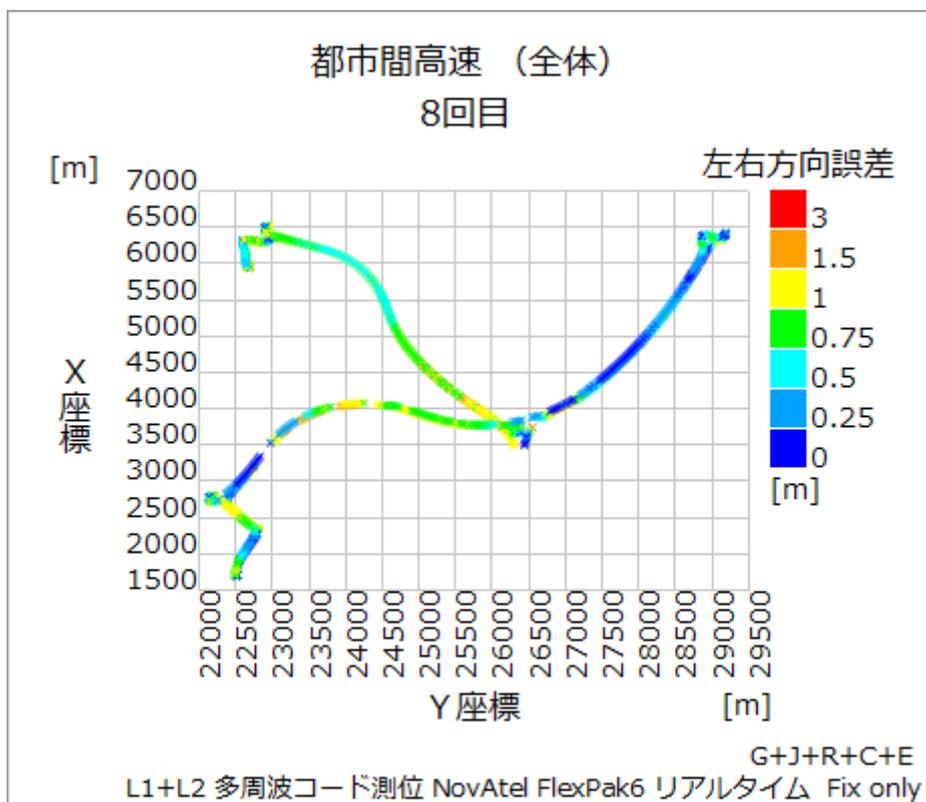


図 2.4.3-11 左右方向誤差プロット

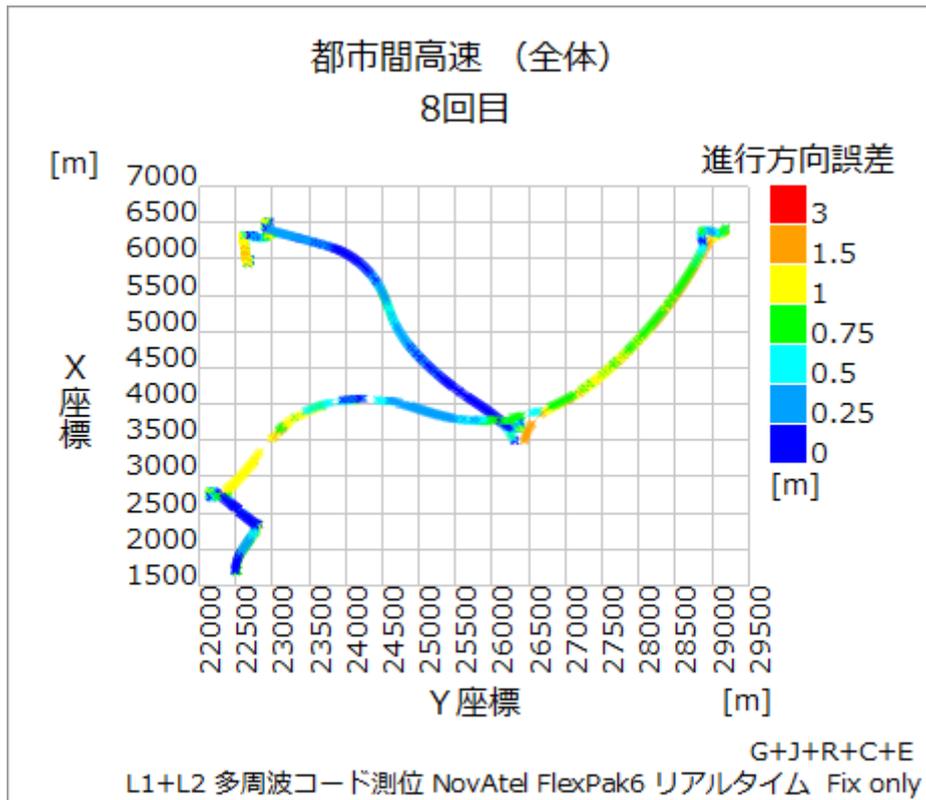


図 2.4.3-12 進行方向誤差プロット

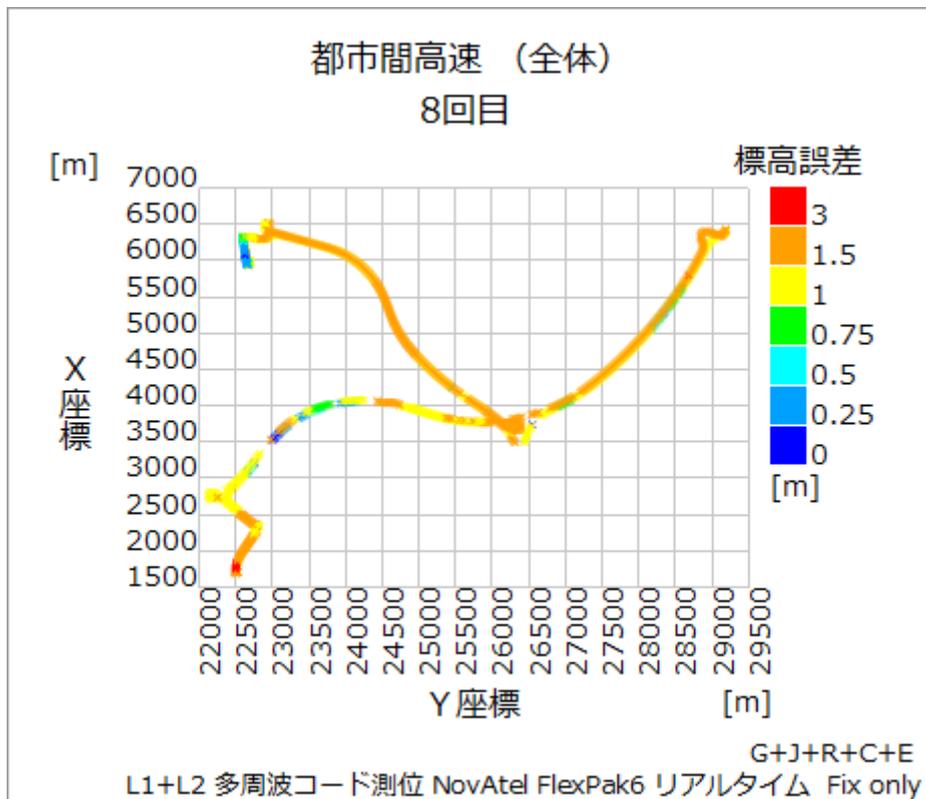


図 2.4.3-13 標高誤差プロット

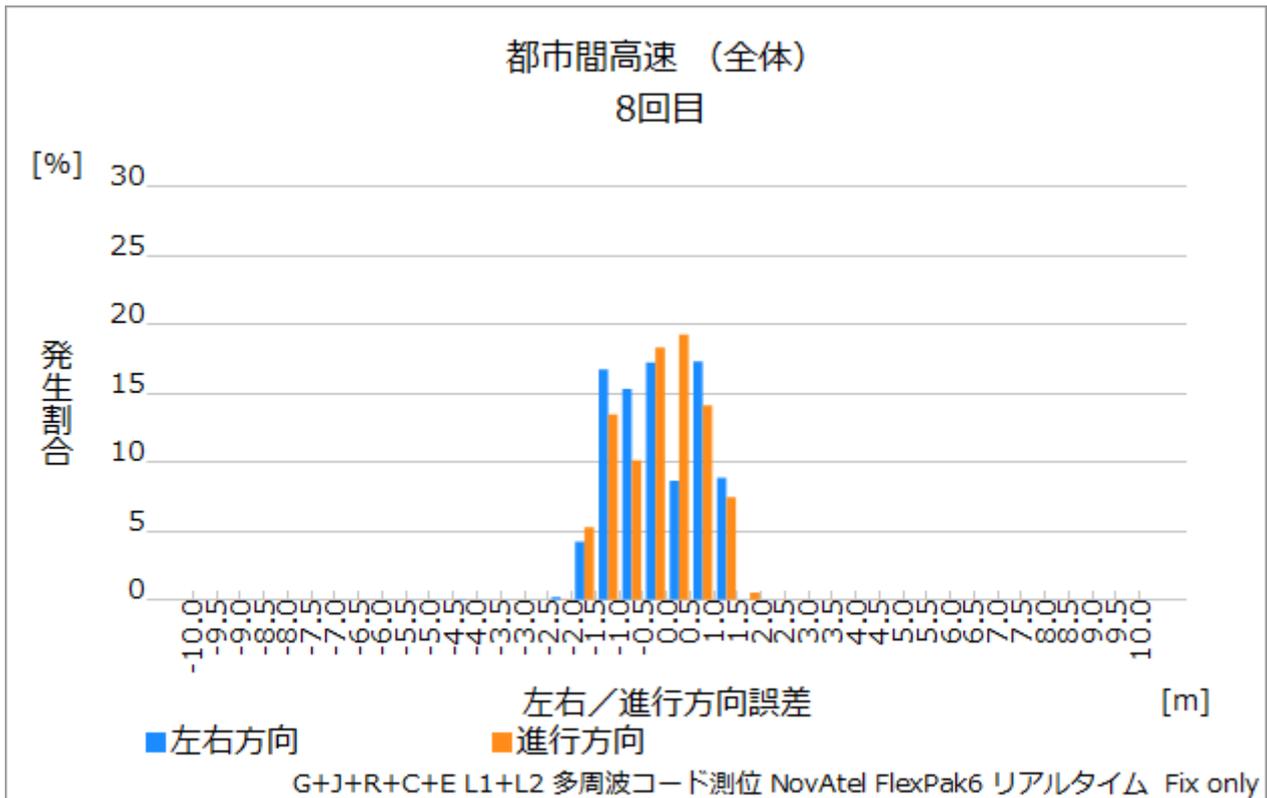


図 2.4.3-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

左右方向誤差は、オープンスカイのつくば ICT からつくば中央 IC 付近で誤差が大きくなっている。一方、進行方向誤差は、オープンスカイの桜土浦 IC からつくば ICT 付近で誤差が大きくなっている。散布図を見ると、点がドーナツ状になっており、ここから車体方向に関係なく、測位結果が一定方向にオフセットしていることがわかる。また、ヒストグラムからも精度が低いことが確認できる。ただし、8 回目は他周回に比べて著しく精度が低いことに注意する。8 回目以外の周回では、左右方向誤差 1m 以内が 80% 以上あり、高い精度が確認できた。全周回の平均では、測位率がほぼ 100% であり、推定無しでも 90% 程度となった。また、1 周波コード測位と比べて 0.5m ほど左右方向誤差が小さいことが確認できた。このことから、多周波により電離層遅延誤差がうまく補正できていると考えられる。

2.4.3.2. Trimble NetR9 (後処理)

受信機の説明や観測条件に関しては、2.4.2.2 を参照。

ここでは GPS+QZSS での 2 周波での計測結果について評価を行う。

都市間高速道路全 8 回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.3-5 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	172,574	155,648	90.19%	—	—
区間 A	40,674	37,701	92.69%	—	—
区間 B	46,547	40,672	87.38%	—	—
区間 C	42,668	36,306	85.09%	—	—

※10Hz で測位を実施

測位率はオープンスカイの区間 A で約 93%、一番低い区間 C で約 85%となり、わずかに 1 周波コード測位の場合より低下した。

表 2.4.3-6 測位精度（全周回平均、区間毎）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	2.026	3.192	1.997	3.053	4.379	6.793
区間 A	1.687	2.498	2.032	2.867	3.918	6.259
区間 B	2.099	3.464	2.200	2.834	4.619	6.181
区間 C	2.282	3.655	1.948	3.420	4.893	9.920

左右方向、進行方向ともに 1 周波コード測位に比べて 60cm~1m 程度誤差が大きくなっている。2 周波で電離層遅延誤差を解消している場合には、その他の誤差が増幅される場合がある。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラム
の形にまとめたものである。

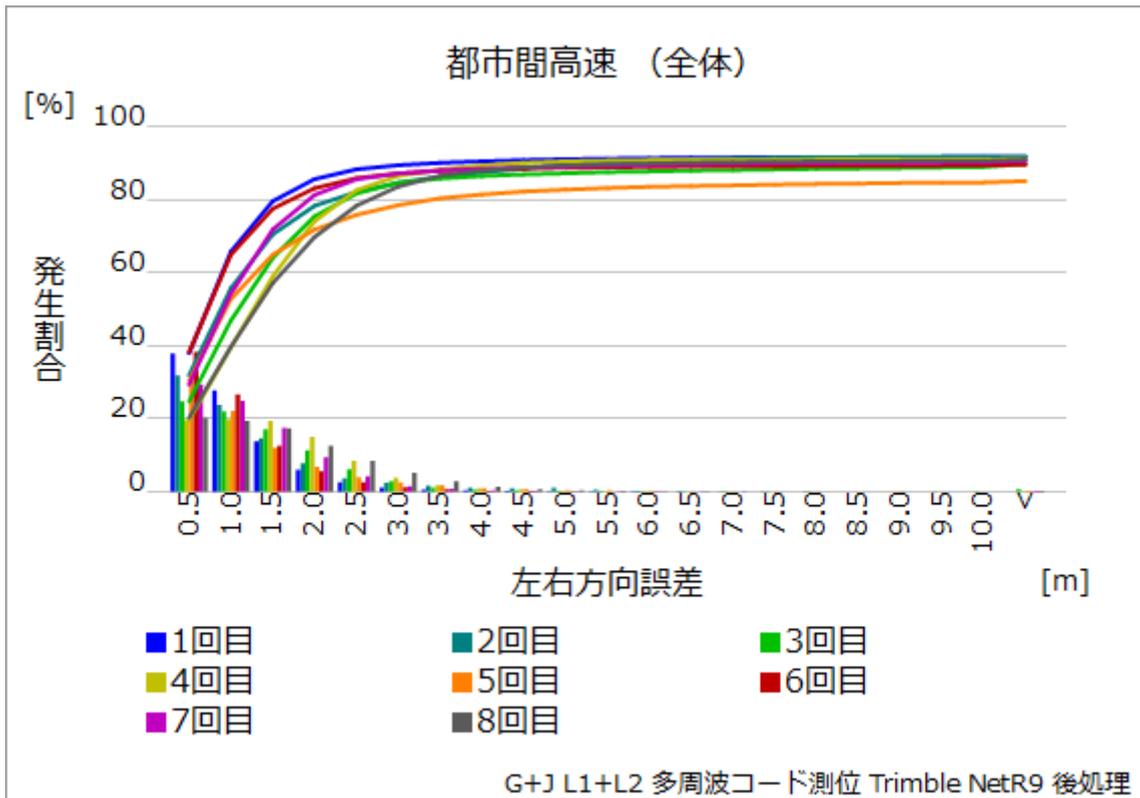


図 2.4.3-15 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

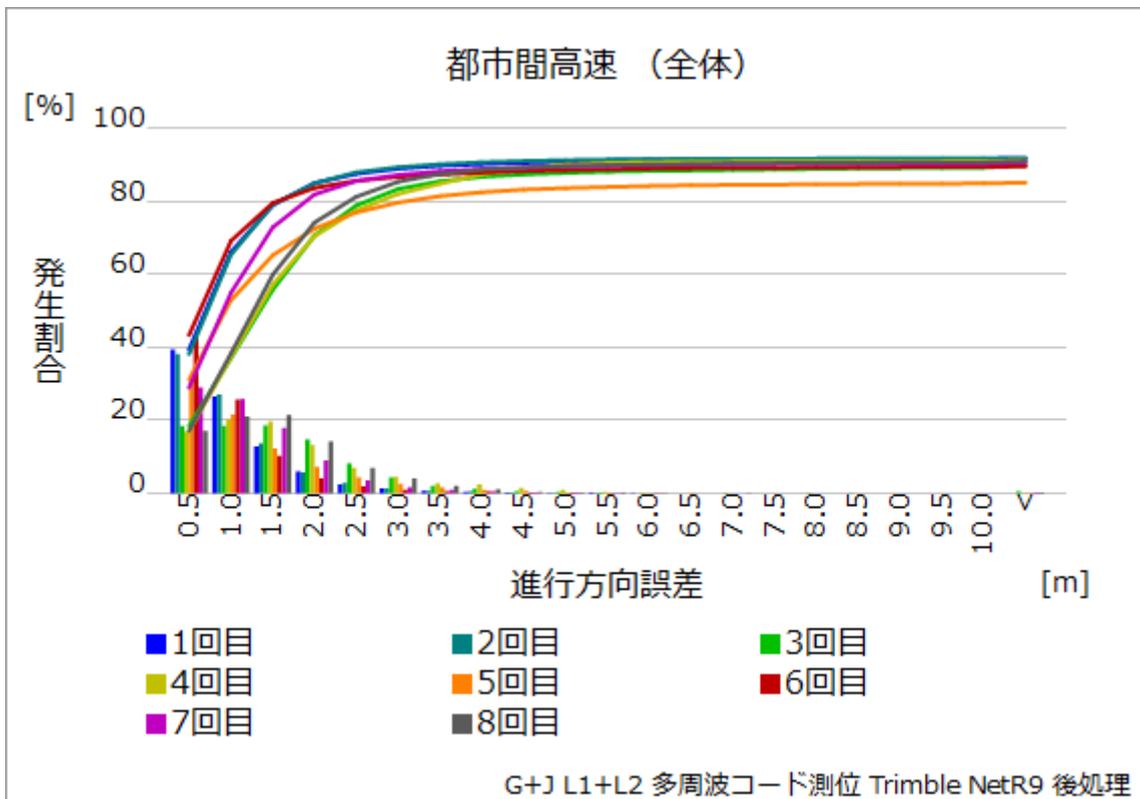


図 2.4.3-16 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

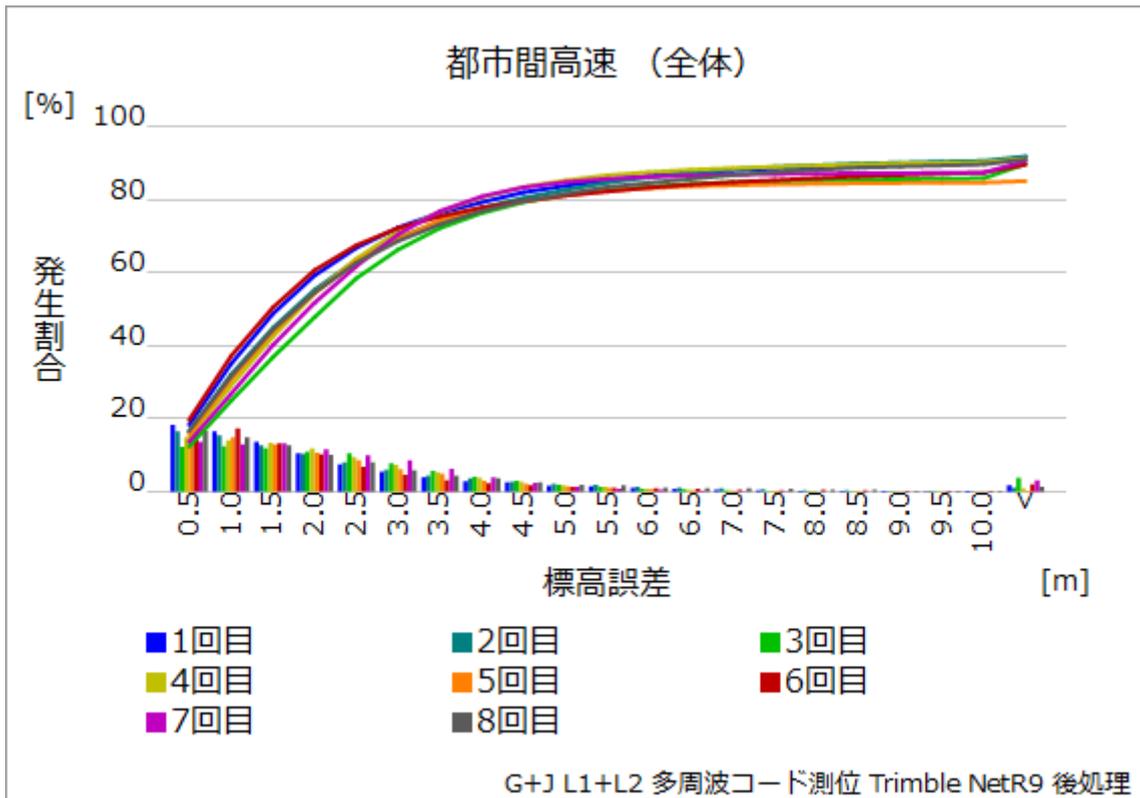


図 2.4.3-17 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

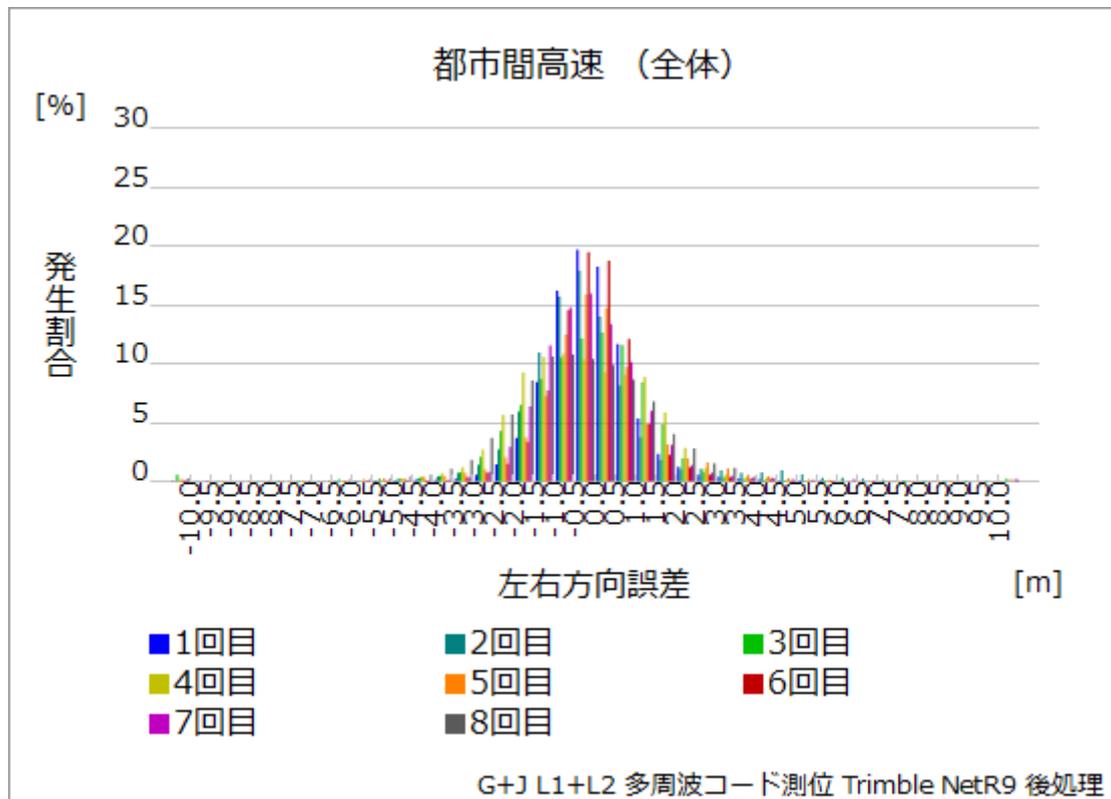


図 2.4.3-18 左右方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

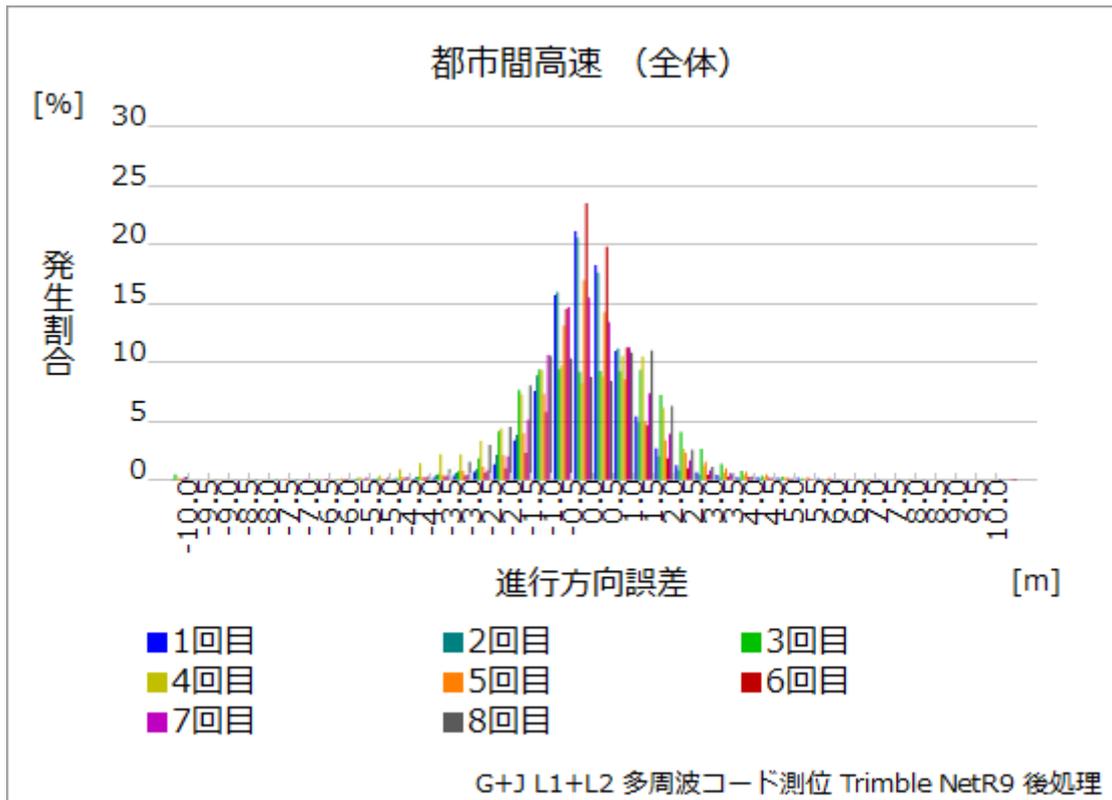


図 2.4.3-19 進行方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

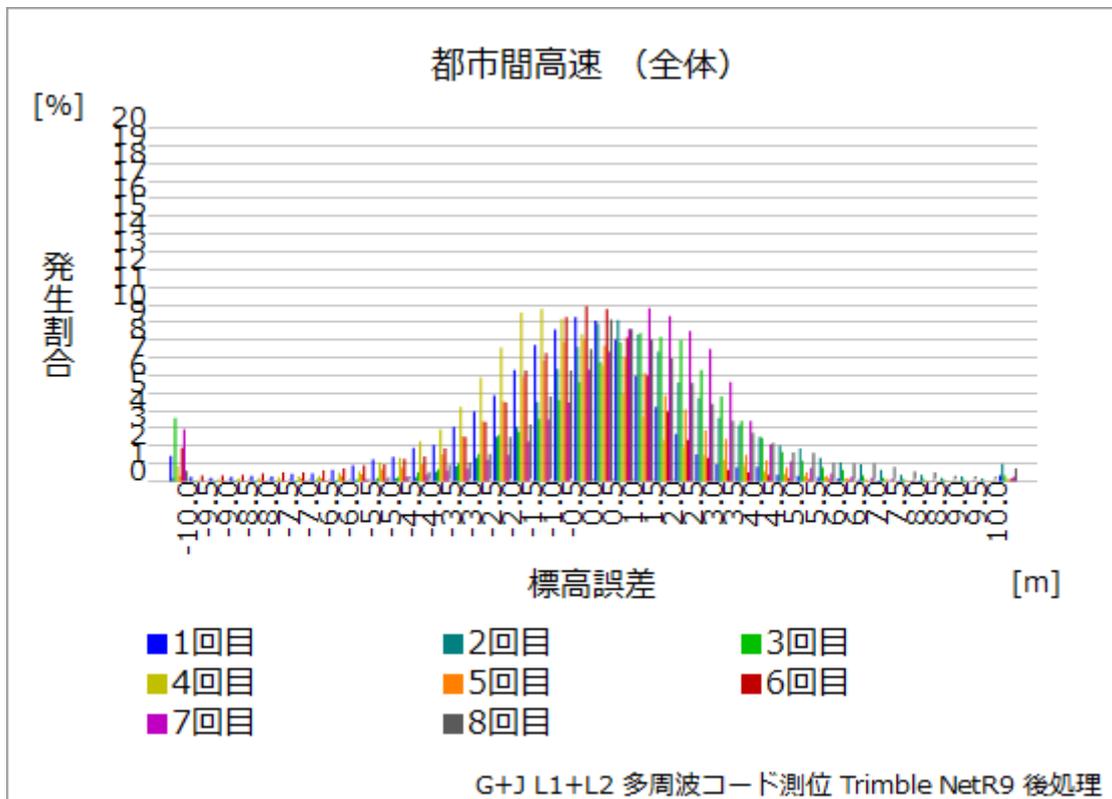


図 2.4.3-20 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率をみると以下のようになる。

表 2.4.3-7 左右方向誤差 発生割合（周回・区間毎）

	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m
1	65.77%	79.59%	73.08%	87.39%	62.39%	72.39%	67.53%	78.90%
2	55.80%	70.50%	73.68%	87.17%	56.87%	68.27%	39.28%	57.94%
3	46.93%	64.06%	57.82%	73.99%	52.86%	70.26%	33.56%	50.37%
4	39.57%	58.98%	43.57%	64.38%	37.15%	55.99%	48.49%	64.18%
5	52.82%	64.94%	61.74%	74.98%	51.75%	61.44%	41.92%	53.97%
6	64.93%	77.51%	71.71%	84.03%	64.59%	77.37%	60.17%	72.70%
7	54.29%	71.83%	62.33%	78.82%	61.75%	76.77%	39.48%	56.99%
8	39.75%	57.15%	44.81%	63.57%	46.58%	62.40%	39.11%	57.73%
平均	52.48%	68.07%	61.09%	76.79%	54.24%	68.11%	46.19%	61.60%

全区間では左右方向誤差 1.5m 以下の割合が平均 68%程度となり、1 周波コード測位より 10%程度低い結果となった。この傾向は他の区間でも見られる。また、1 周波コード測位と同様に 4 回目と 8 回目が著しく精度が低い。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下のようになった。

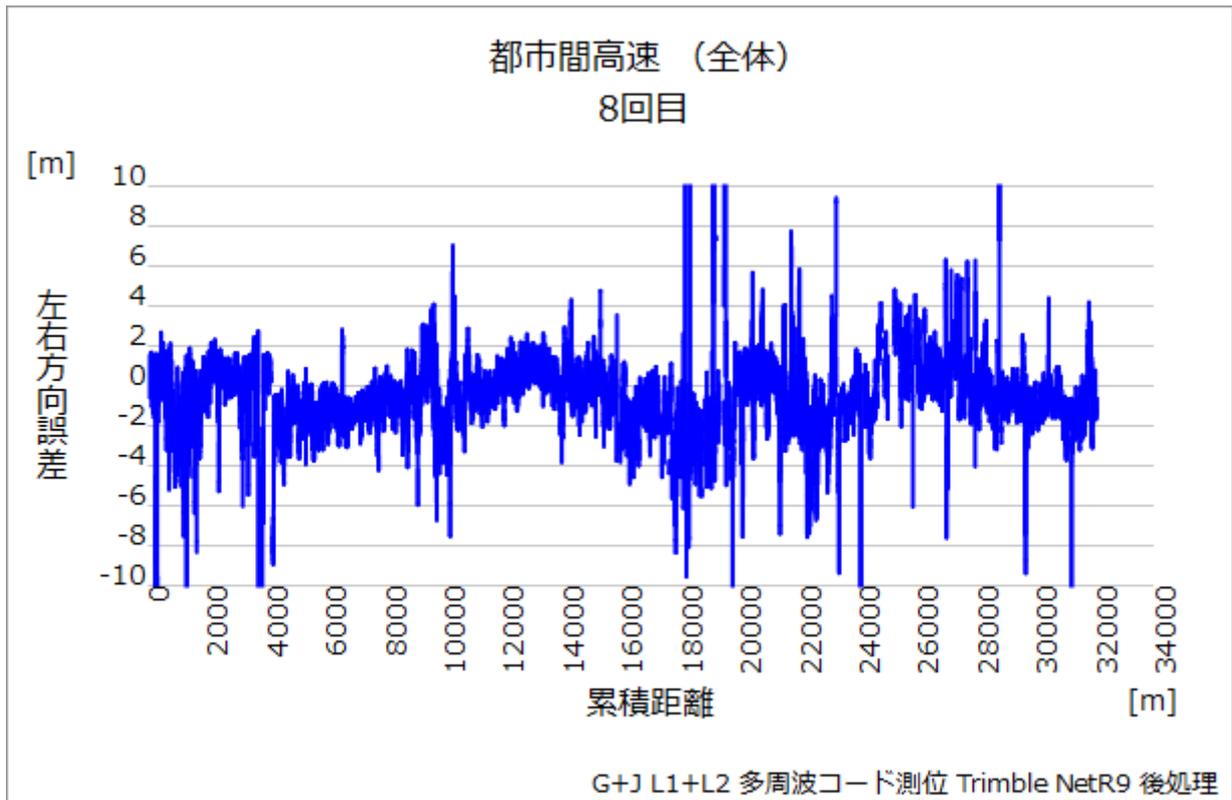


図 2.4.3-21 左右方向誤差の走行距離推移

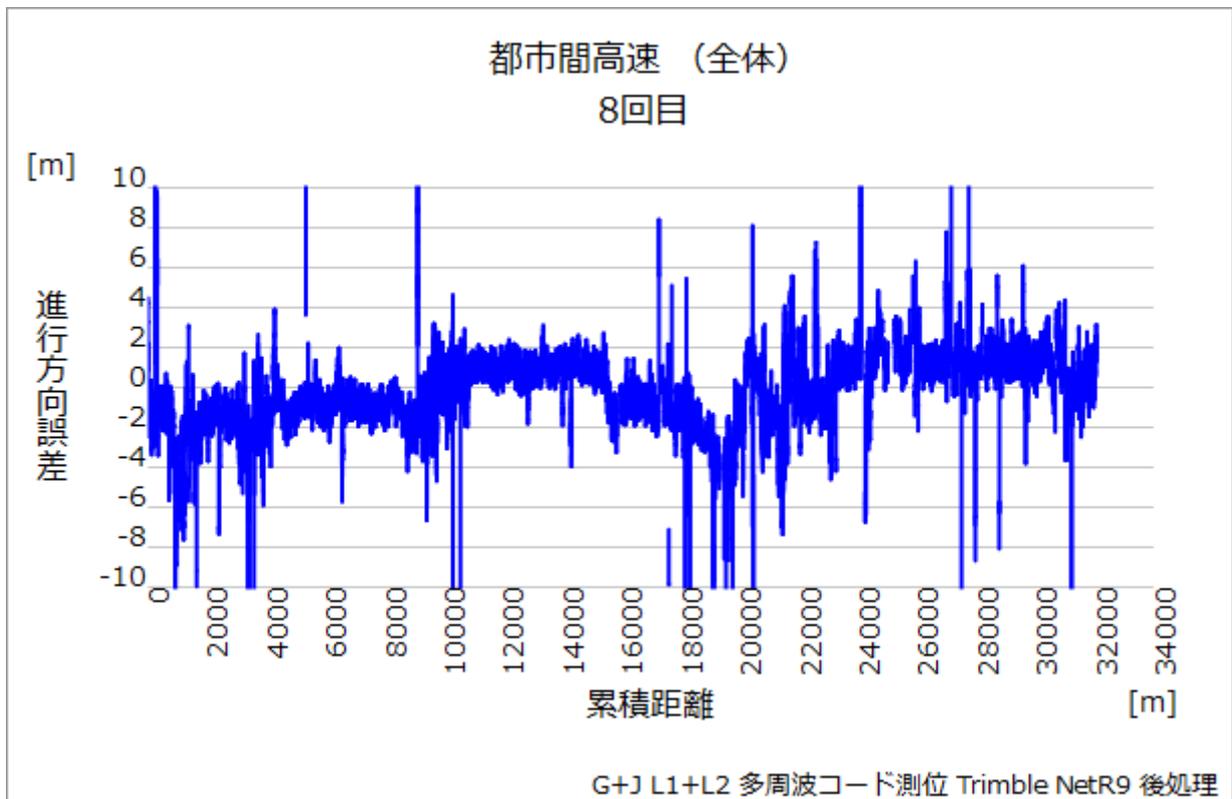


図 2.4.3-22 進行方向誤差の走行距離推移

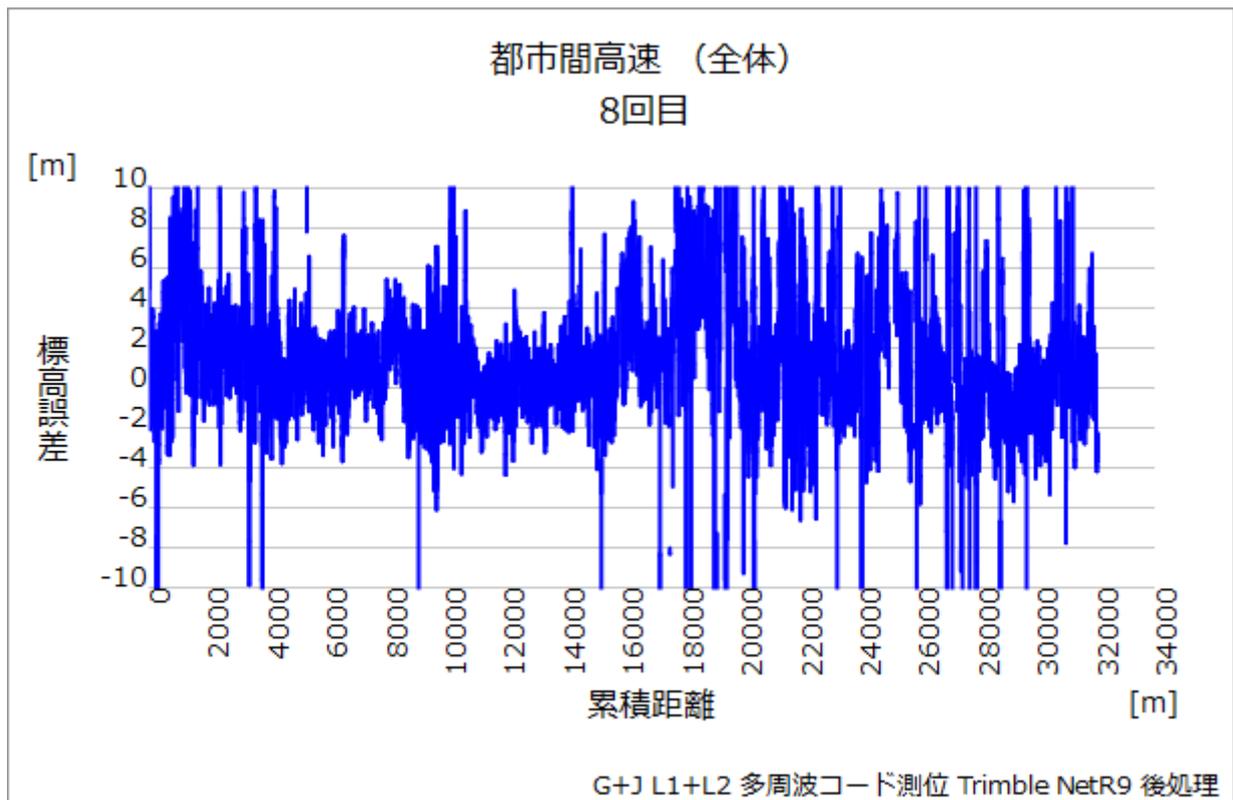


図 2.4.3-23 標高誤差の走行距離推移

左右方向誤差の方が進行方向誤差より、やや揺らぎが大きく、ともに 18,000m 付近の橋梁や法面が続く地点で誤差が大きくなっていることが確認できた。標高誤差の方は、左右方向、進行方向誤差よりも揺らぎが大きくなった。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

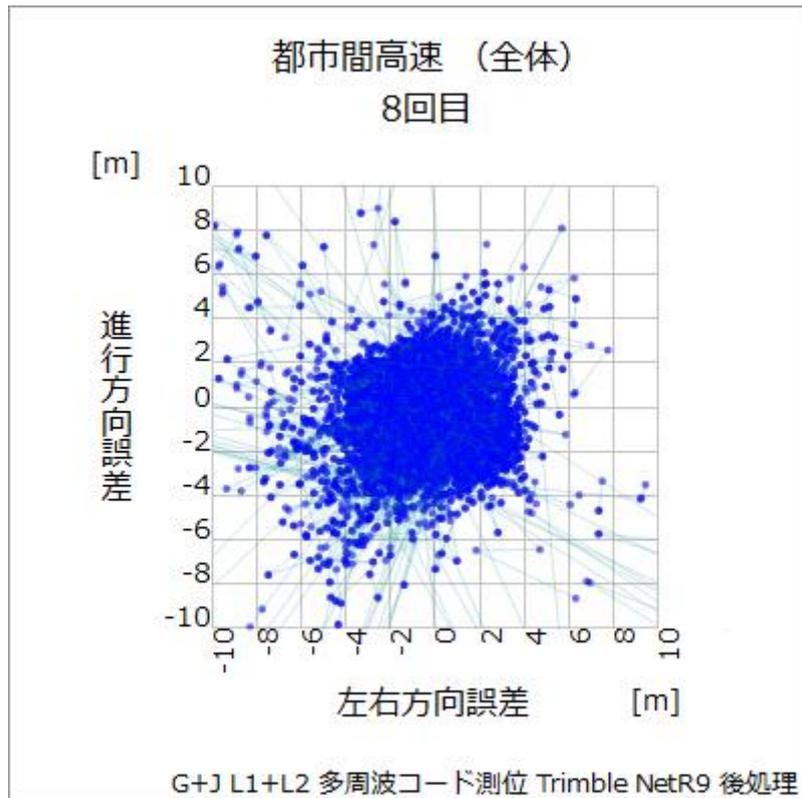


図 2.4.3-24 左右／進行方向誤差分布図

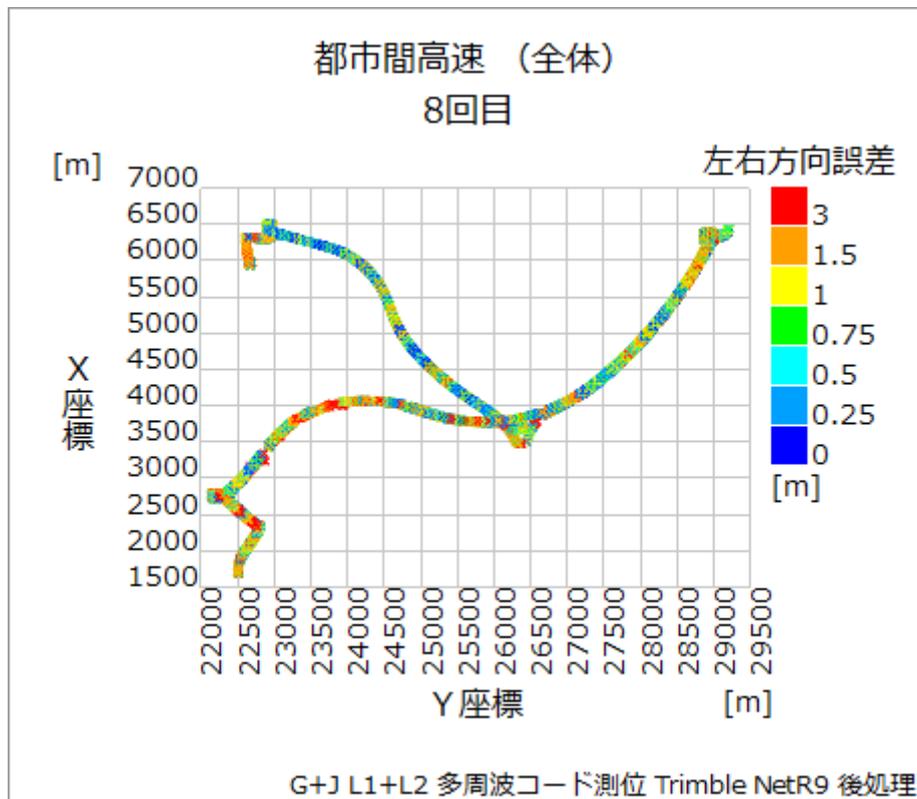


図 2.4.3-25 左右方向誤差プロット

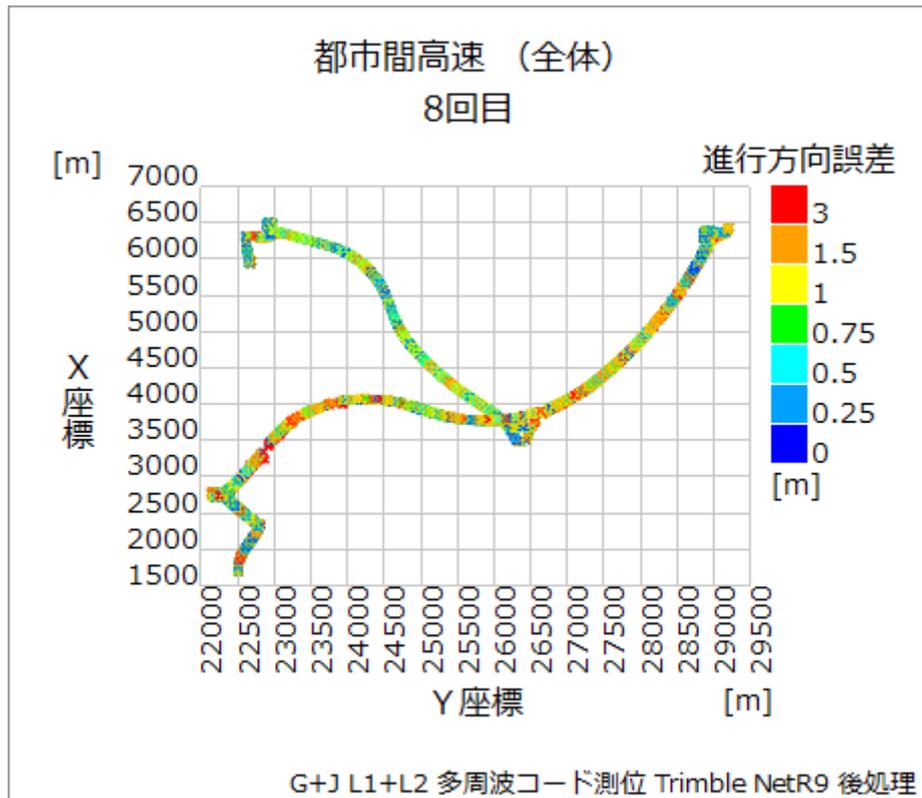


図 2.4.3-26 進行方向誤差プロット

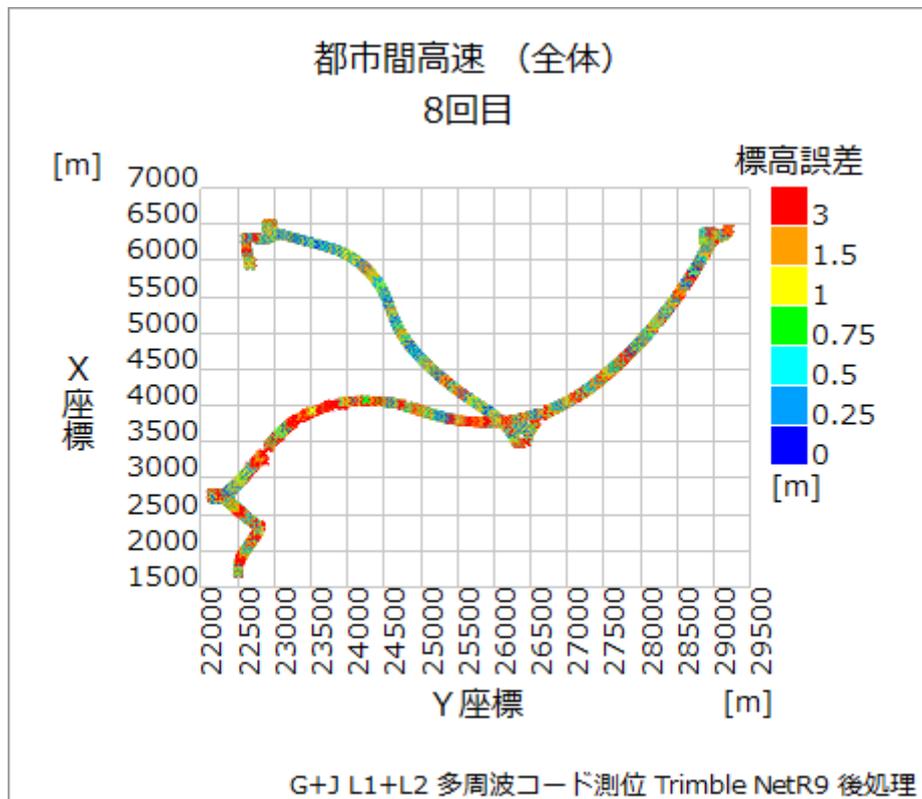


図 2.4.3-27 標高誤差プロット

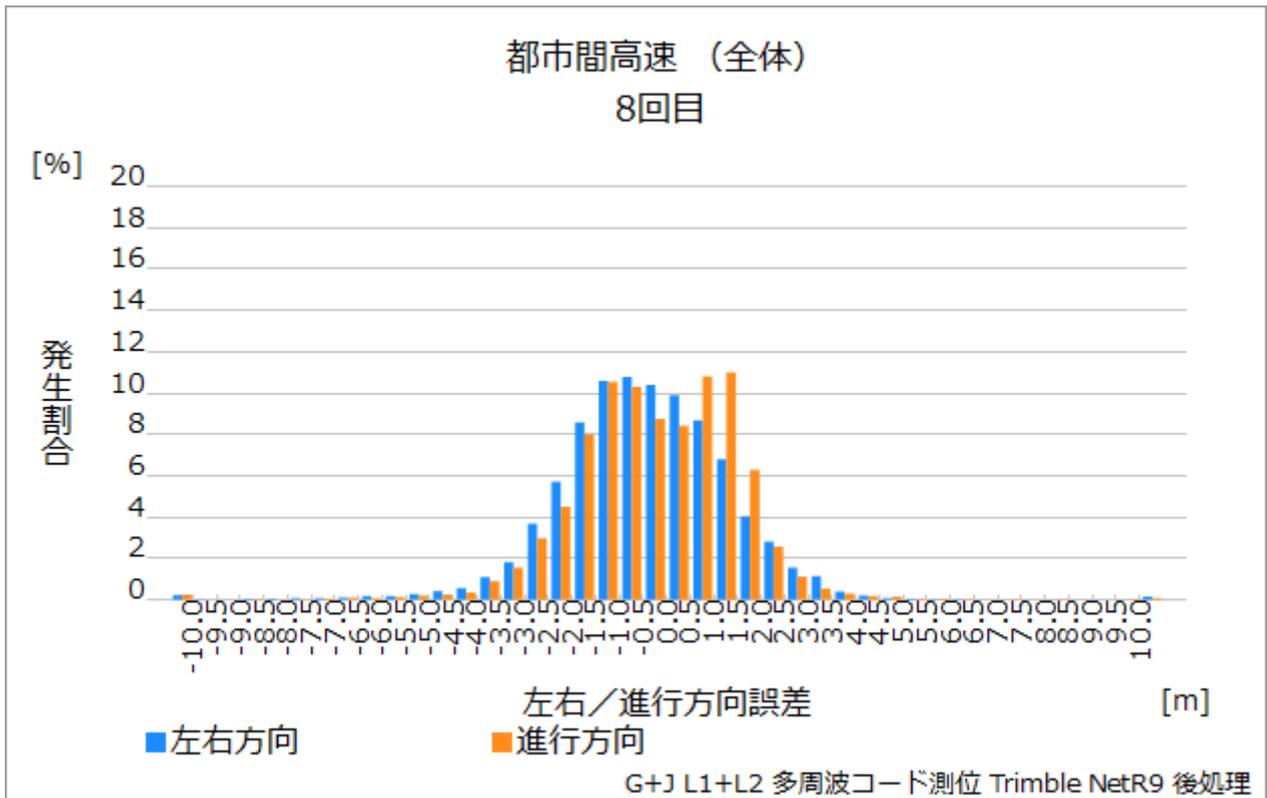


図 2.4.3-28 左右/進行方向誤差ヒストグラム

測位率に関しては、1周波とほぼ変わらなかったが、ヒストグラムがなだらかであることから精度が低下していることが確認できる。しかし、ヒストグラムの中心が0.0に近いことと分布図から確度は高いことがわかる。また、プロット図の色が急激に変化していることから誤差が激しく変化していることが確認できる。後処理ではフリー線形結合により電離層遅延キャンセルを行っているが、これによりその他の誤差が増加したことが要因と考えられる。リアルタイムで使用した NovAtel Flex Pak6 では、これら誤差に対する処理等がされているため、高精度な測位結果になったと推定される。

2.4.4. QZSS L1S (DGPS) 補強

2.4.4.1. Trimble NetR9 (後処理)

受信機の説明や観測条件に関しては、2.4.2.2を参照。

ここではGPS+QZSSでのL1S (DGPS) 補強を用いた計測結果について評価を行う。

都市間高速道路全8回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.4-1 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	172,576	156,855	90.89%	—	—
区間 A	40,676	37,928	93.24%	—	—
区間 B	46,547	41,191	88.49%	—	—
区間 C	42,668	36,655	85.91%	—	—

※10Hz で測位を実施

測位率に関しては、90%程度と 1 周波コード測位とほぼ変わらない結果となった。

表 2.4.4-2 測位精度（全周回平均、区間毎）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	0.554	0.805	0.596	0.794	1.226	1.668
区間 A	0.425	0.682	0.469	0.664	0.981	1.411
区間 B	0.680	0.820	0.716	0.725	1.544	1.563
区間 C	0.548	0.808	0.620	0.812	1.282	1.688

左右方向、進行方向誤差ともに、1 周波コード測位より 50cm 程度 RMS が向上している。95.45%も全ての区間で 1m 以内と L1S の精度（水平：1m）を満たしていることが確認できた。標高に置いても 1m 程度の誤差改善が見られ、こちらも L1S の精度（垂直：2m）を満たしている。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラム
の形にまとめたものである。

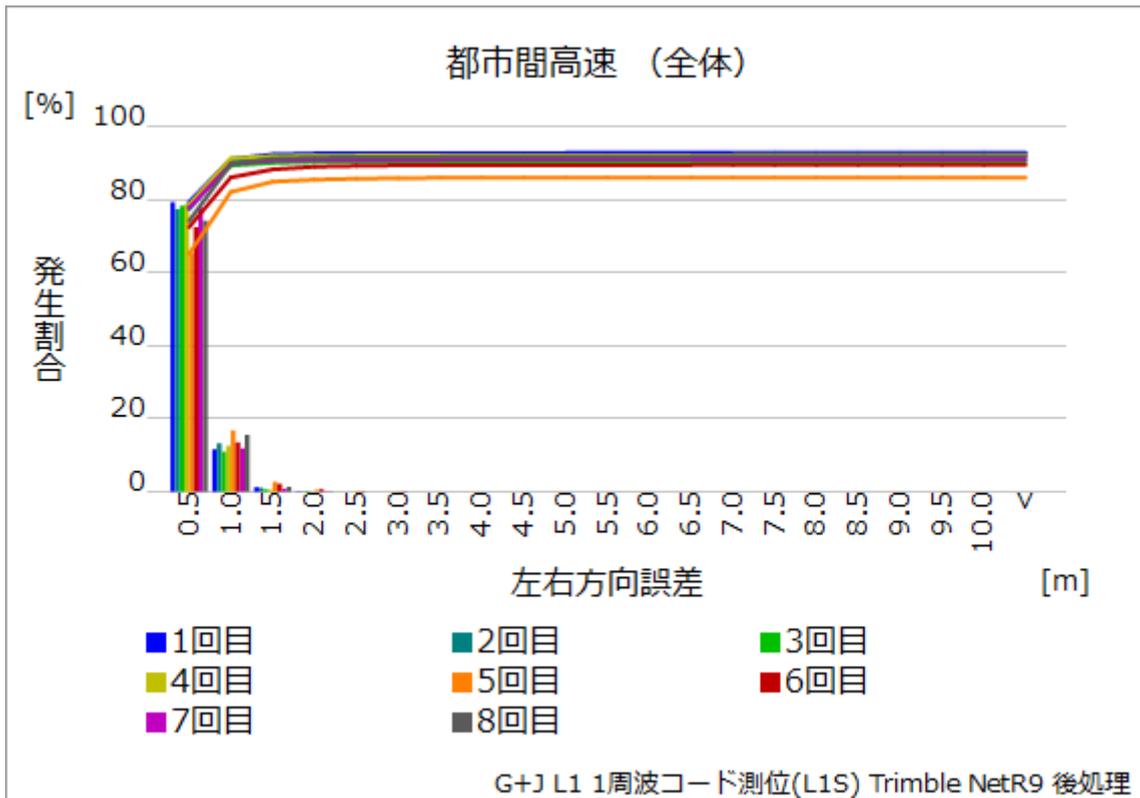


図 2.4.4-1 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

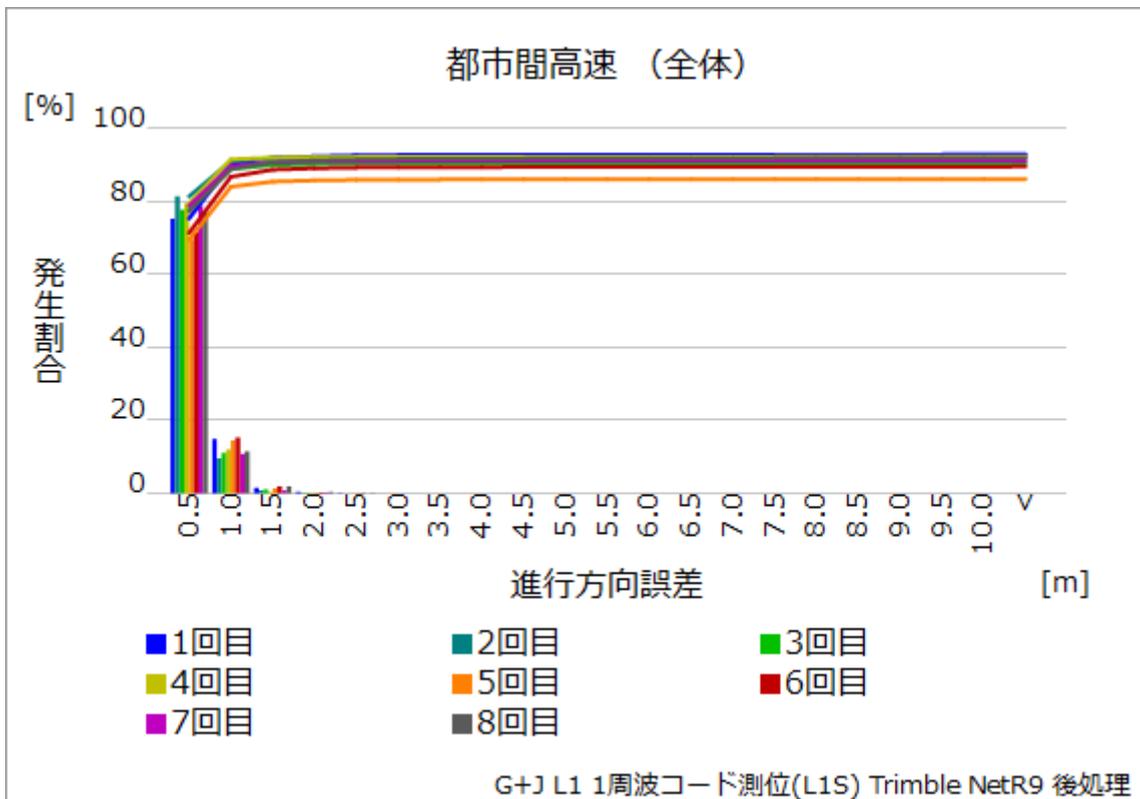


図 2.4.4-2 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

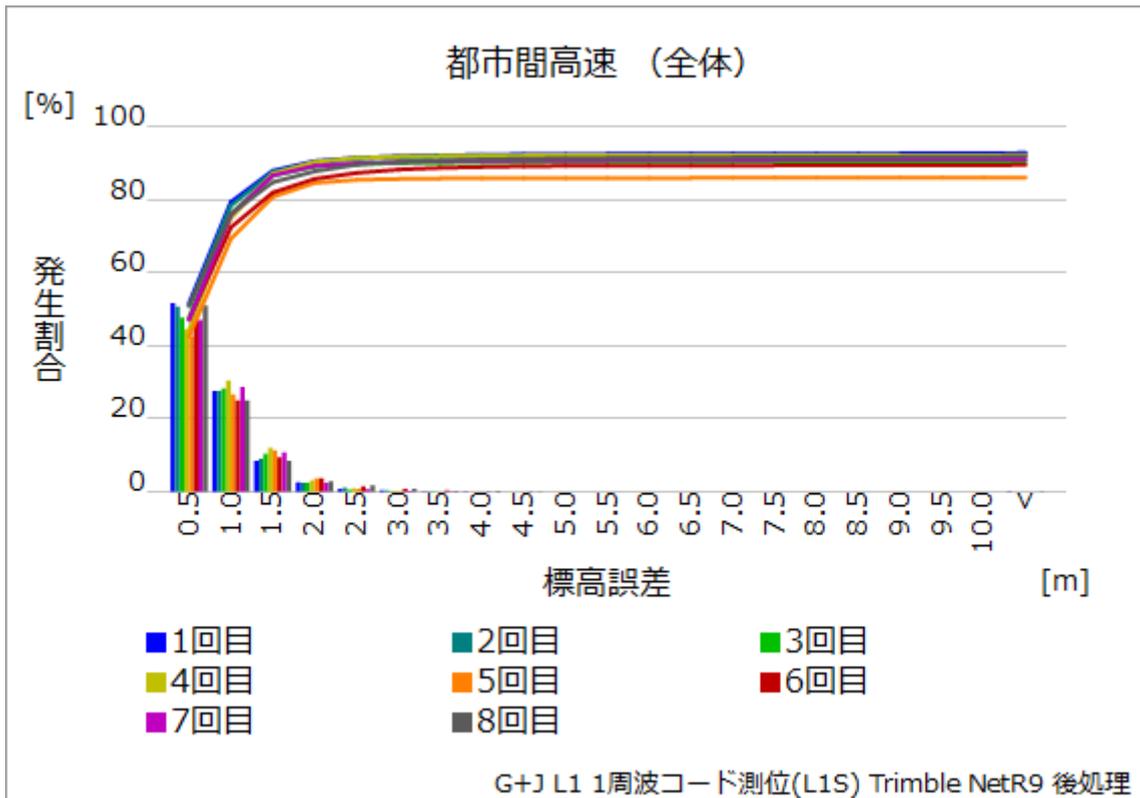


図 2.4.4-3 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

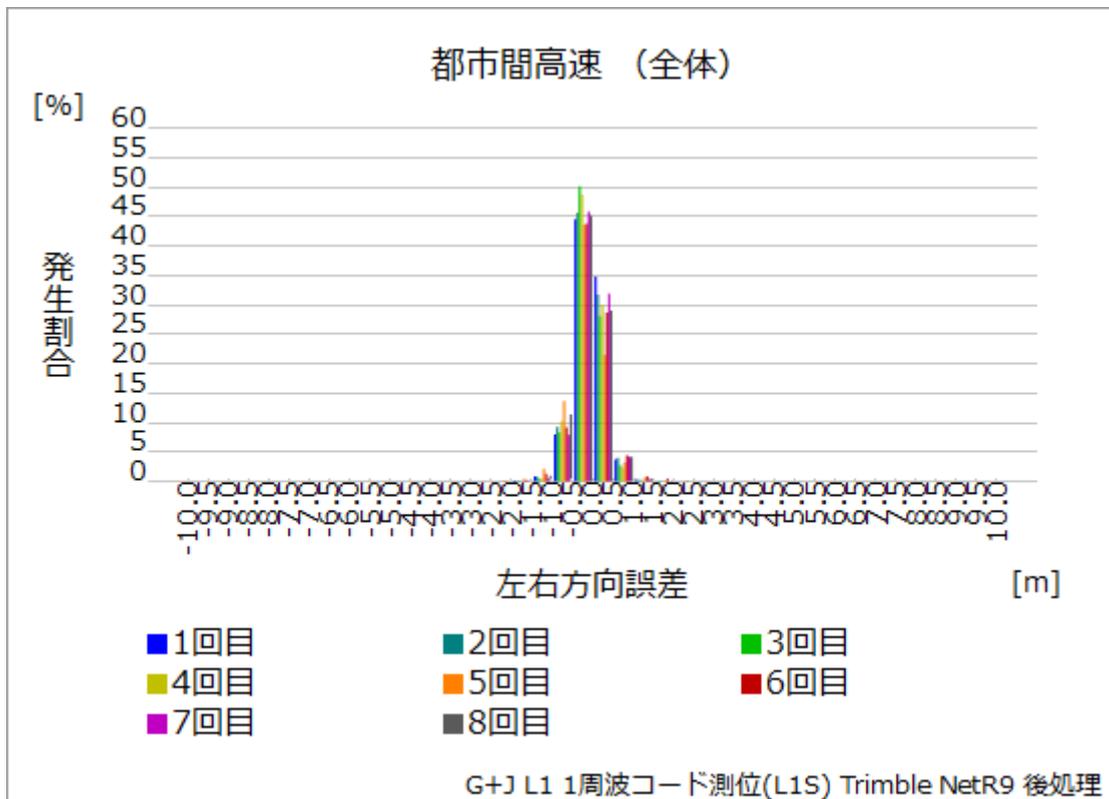


図 2.4.4-4 左右方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

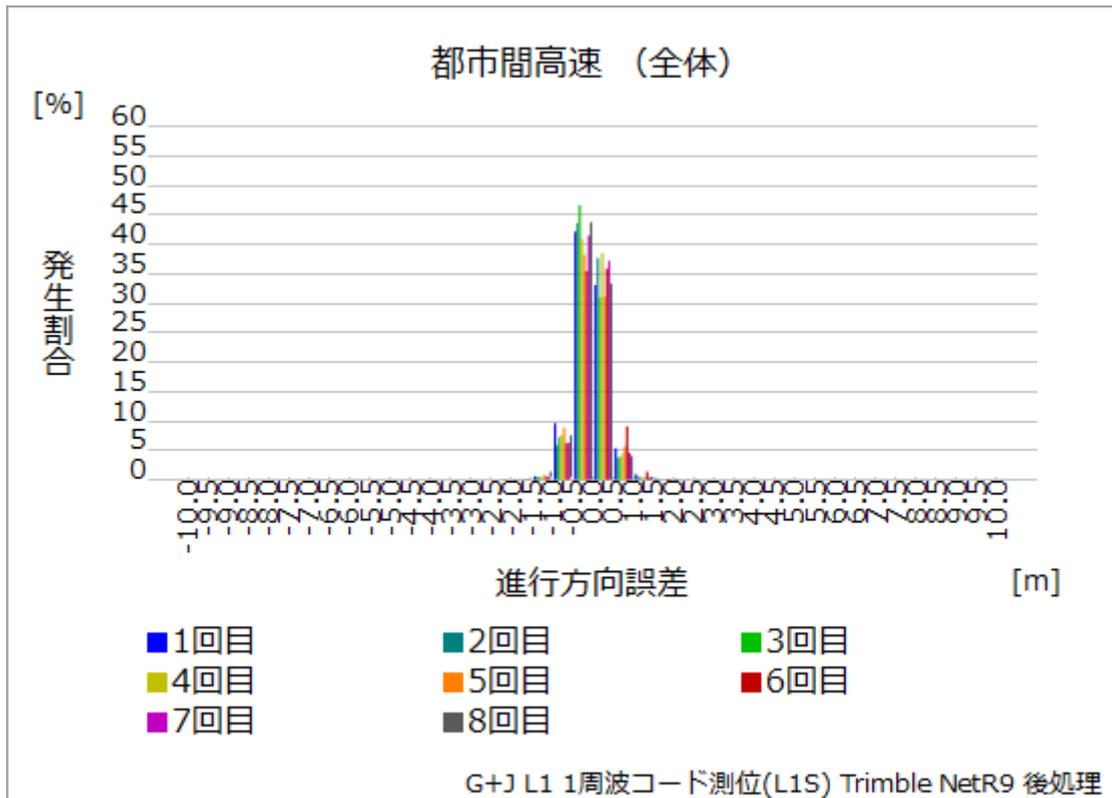


図 2.4.4-5 進行方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

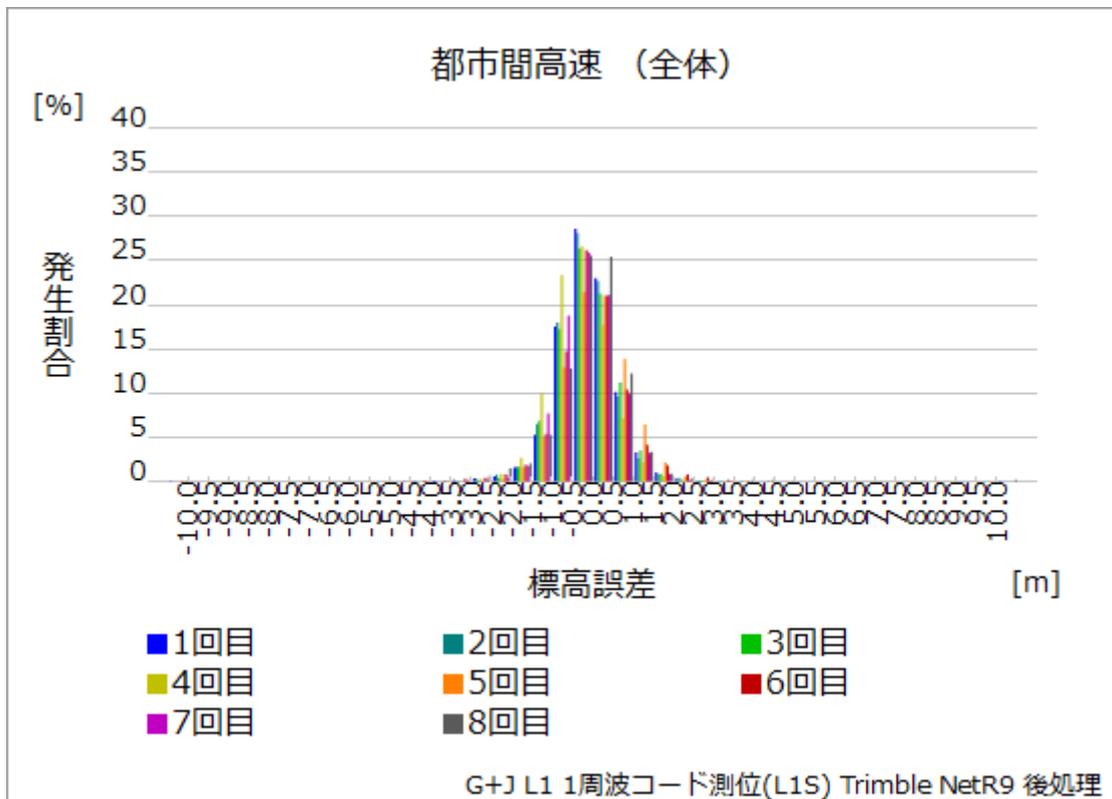


図 2.4.4-6 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率をみると以下のようになる。

表 2.4.4-3 左右方向誤差 発生割合（周回・区間毎）

	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m
1	91.10%	92.37%	93.99%	94.52%	86.02%	88.16%	86.50%	87.38%
2	90.68%	91.81%	93.58%	94.15%	85.87%	87.67%	87.44%	88.48%
3	89.31%	90.07%	92.54%	92.94%	87.44%	88.05%	84.99%	86.02%
4	91.30%	91.90%	93.03%	93.72%	89.41%	89.98%	87.48%	87.59%
5	82.11%	84.92%	88.64%	89.98%	78.94%	82.47%	73.85%	76.61%
6	86.08%	88.27%	92.55%	92.95%	87.87%	88.73%	82.37%	84.96%
7	89.77%	90.72%	90.83%	91.58%	86.99%	87.80%	82.25%	83.76%
8	89.78%	91.24%	92.49%	93.35%	87.85%	89.90%	85.26%	85.85%
平均	88.77%	90.16%	92.21%	92.90%	86.30%	87.84%	83.77%	85.08%

ほとんどの周回で左右方向誤差 1m 以内が 85%以上となった。85%以下となった 5 回目は、全ての区間で最低となった。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下のようになった。

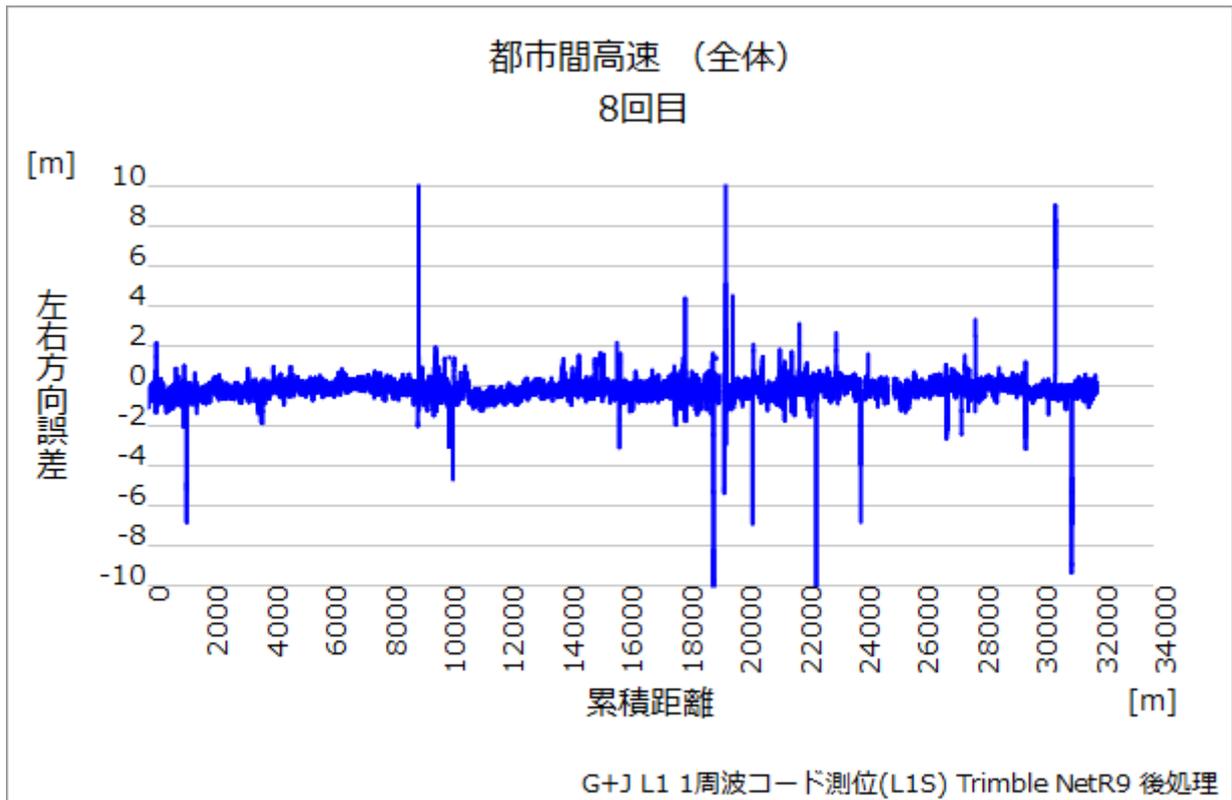


図 2.4.4-7 左右方向誤差の走行距離推移

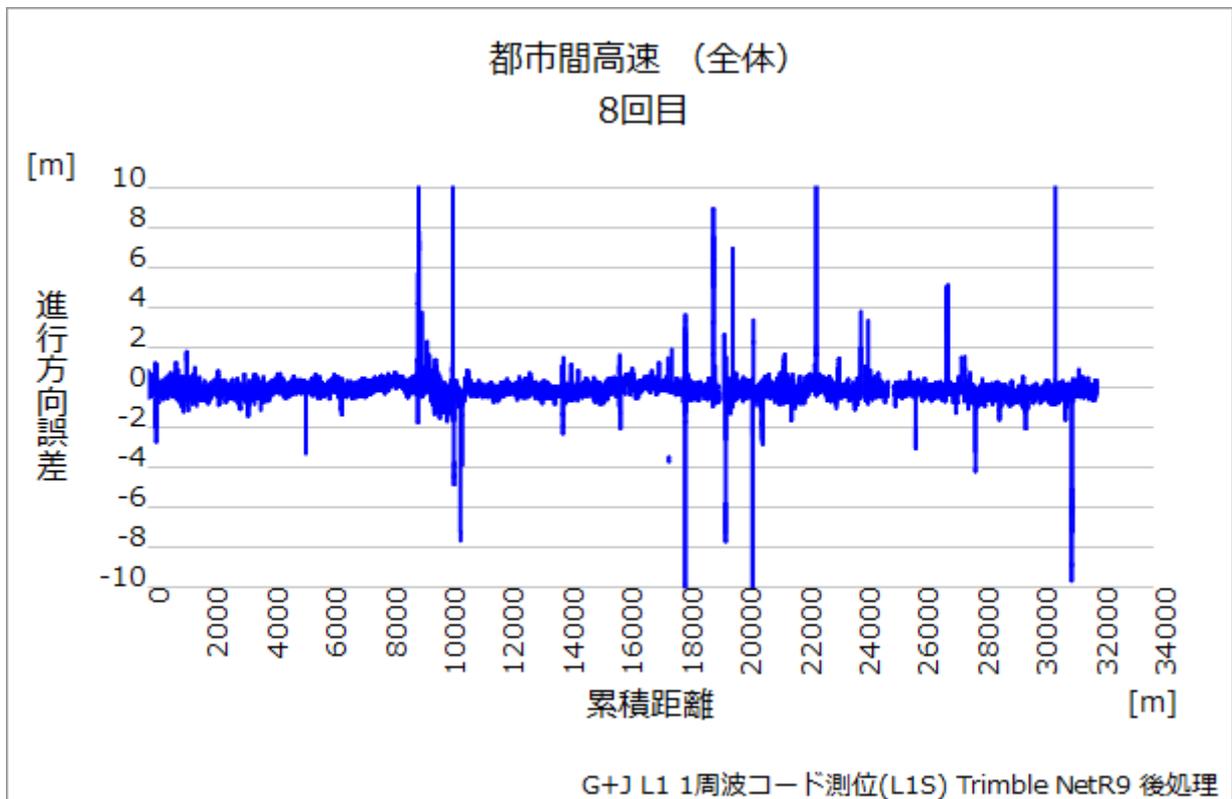


図 2.4.4-8 進行方向誤差の走行距離推移

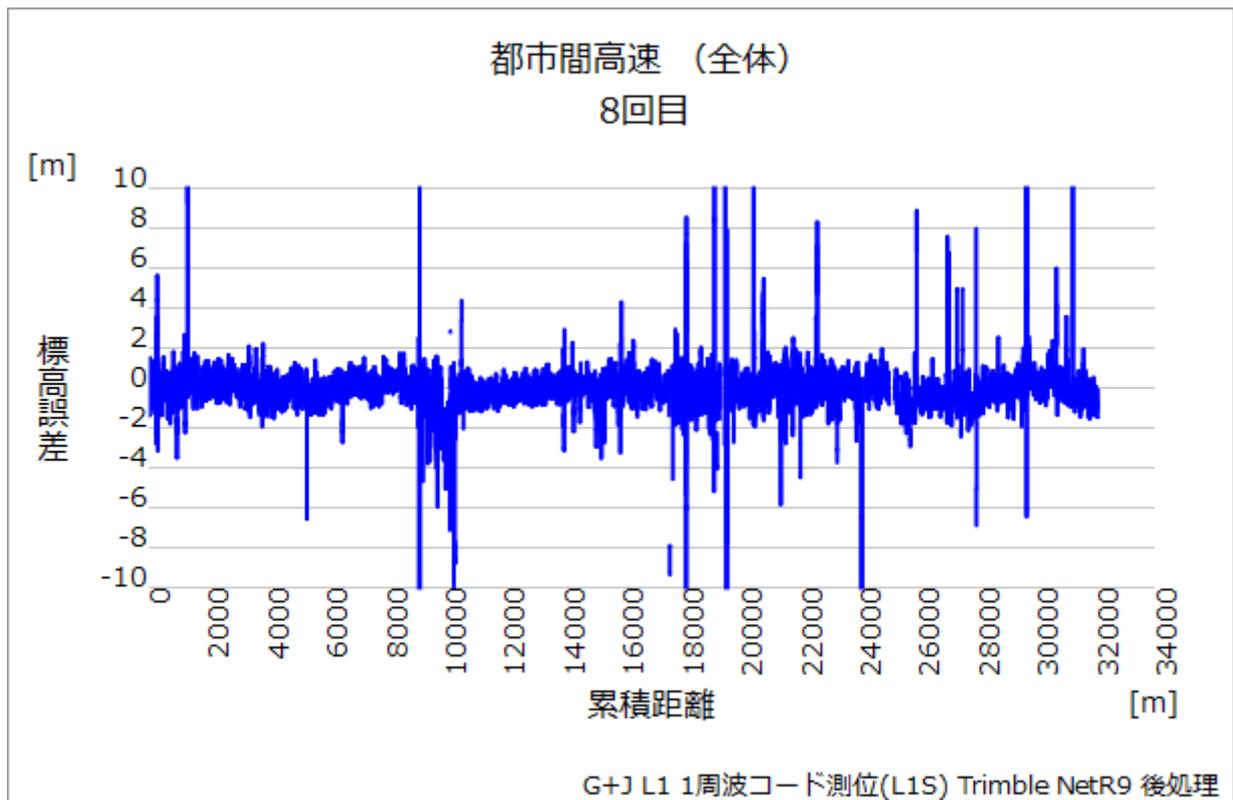


図 2.4.4-9 標高誤差の走行距離推移

左右方向、進行方向誤差ともに揺らぎは少なく、1周波コード測位と比較して誤差が大きくなる区間が改善されていることが確認できた。9,000m 付近の誤差はつくば中央 IC の ETC によるもの、20,000m 付近の誤差は橋梁下と法面の影響によるものと考えられる。標高誤差も 1周波コード測位と比べて改善されていることが確認できる。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

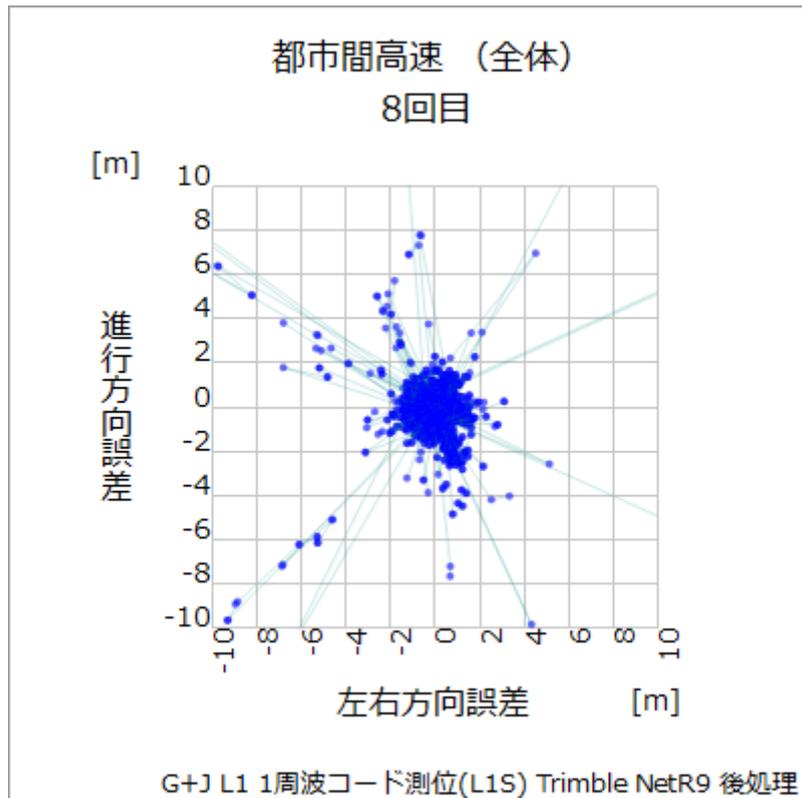


図 2.4.4-10 左右／進行方向誤差分布図

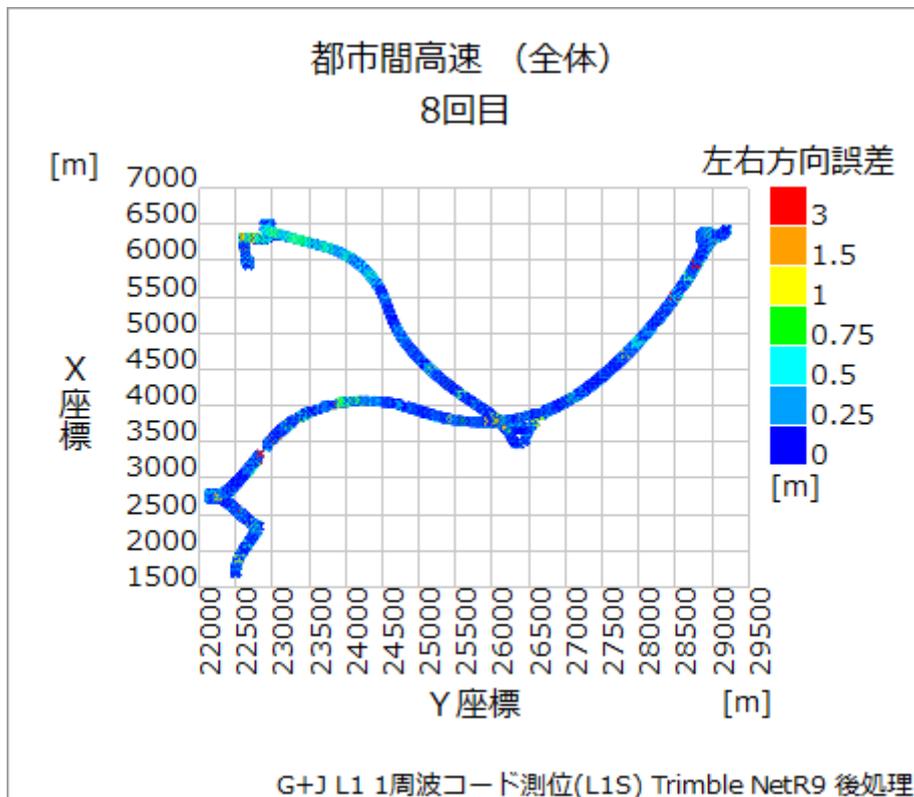


図 2.4.4-11 左右方向誤差プロット

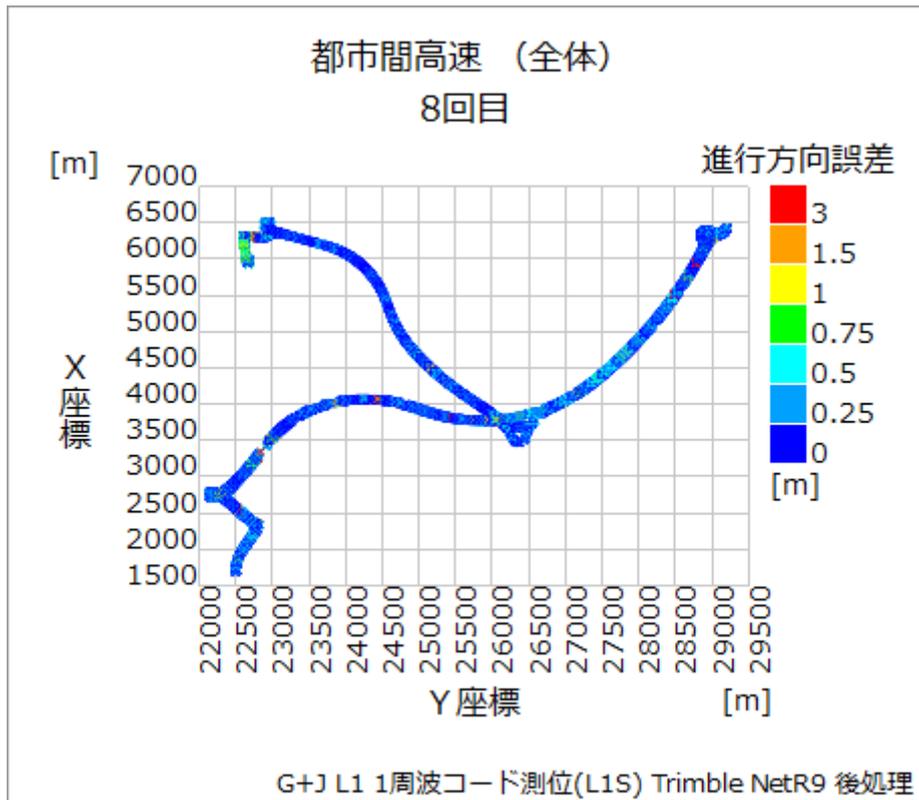


図 2.4.4-12 進行方向誤差プロット

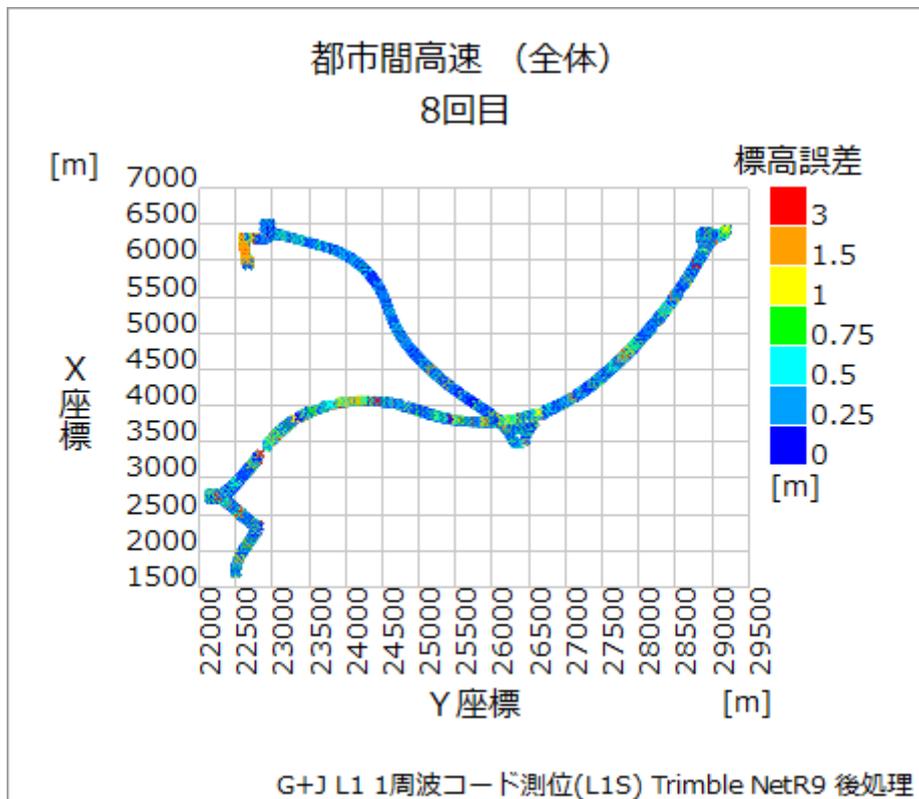


図 2.4.4-13 標高誤差プロット

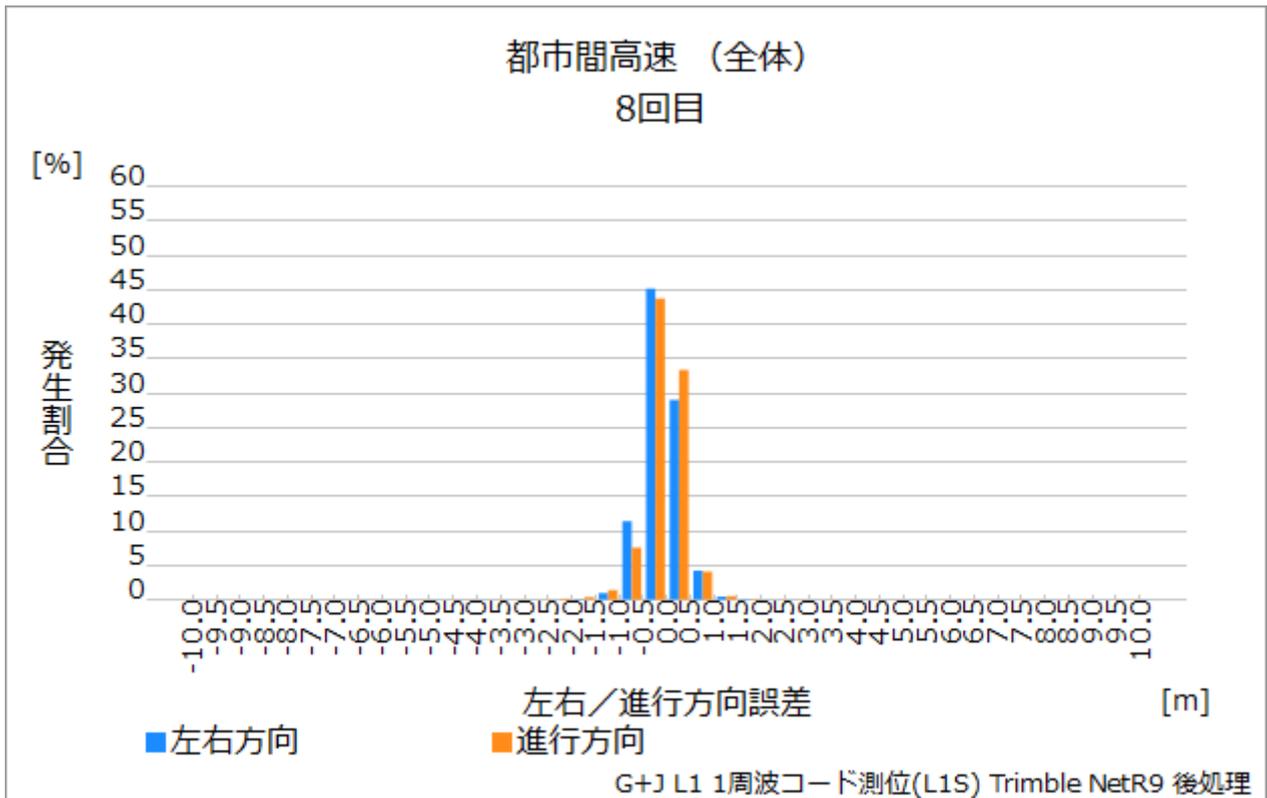


図 2.4.4-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

測位率に関しては、1周波コード測位とほぼ変化せず、左右方向、進行方向、標高誤差は向上した。これはヒストグラムからもわかる。また測位精度に関しても、L1Sの精度を全区間で満たしていることを確認した。

2.4.5. RTK

Trimble社のSPS855は、高精度の工事測量用のアンテナ分離型受信機であり、基準局としても移動局としても高い信頼性を持つ。アンテナ分離型のため、浚渫船等の船舶に設置されることもある。衛星システムはGPS、GLONASS、Galileo、QZSS、SBASに対応しており、測位信号はL1/L2/L5帯に対応している。また、RAWデータも出力可能であり、シリアルポートやUSBポート等複数の出力ポートを搭載している。

本調査では、GPS+QZSS+GLONASS+Galileo+SBASの同時受信設定で測位実験を行った。アンテナはMMS後部に搭載されているNovAtel社製GPS-703-GGGを使用した。

ここではGPS+QZSS+GLONASS+Galileo+SBASでのリアルタイム計測結果について評価を行う。都市間高速道路全8回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.5-1 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	172,578	172,544	99.98%	148,128	85.83%
区間 A	40,678	40,678	100.00%	36,850	90.59%
区間 B	46,548	46,518	99.94%	36,915	79.31%
区間 C	42,668	42,664	99.99%	33,517	78.55%

※10Hz で測位を実施

測位率はいずれも 100% に近く、Fix 率もオープンスカイの区間 A で約 90%、信号遮蔽のある区間 B、C でも約 80%、全体で約 85% となった。測位率が高いのは、Float 解以外に単独測位や DGNSS の結果が出力されているためである。

表 2.4.5-2 測位精度（全周回平均、区間毎、Fix 解のみ対象）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	0.023	0.036	0.023	0.037	0.188	0.232
区間 A	0.023	0.032	0.020	0.032	0.193	0.232
区間 B	0.026	0.038	0.020	0.034	0.186	0.225
区間 C	0.021	0.036	0.028	0.044	0.193	0.238

左右方向誤差、進行方向誤差ともに RMS は 3cm 以下となり、標高に関しては、RMS は 19cm 程度となった。信号遮蔽のある区間 B、C でも Fix すれば、オープンスカイの区間 A と RMS の差はない。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラムの形にまとめたものである。

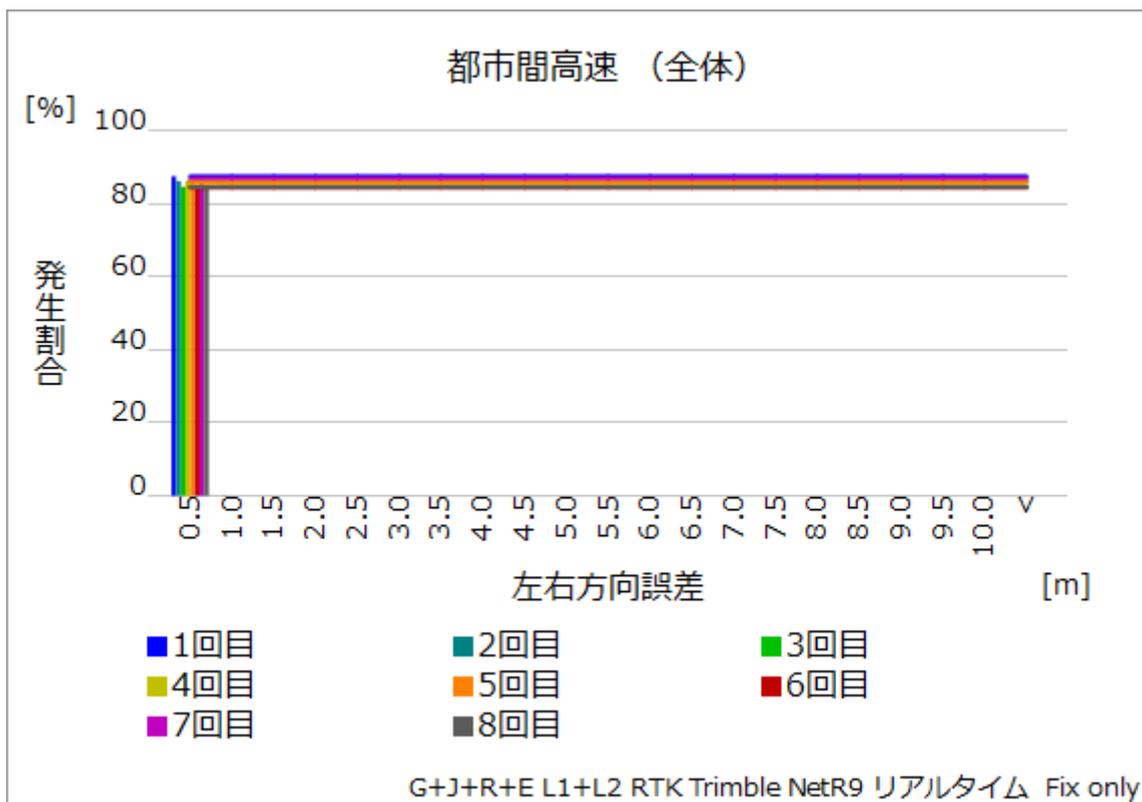


図 2.4.5-1 左右方向誤差 発生割合（累積グラフ）

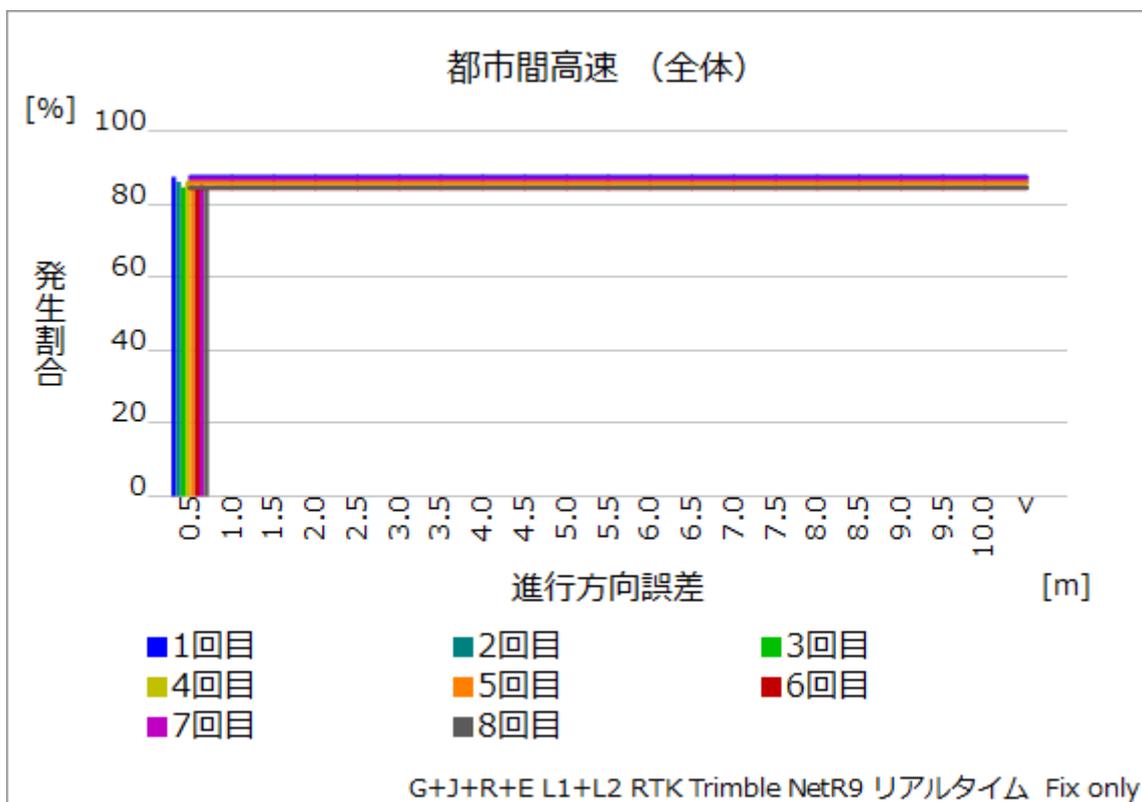


図 2.4.5-2 進行方向誤差 発生割合（累積グラフ）

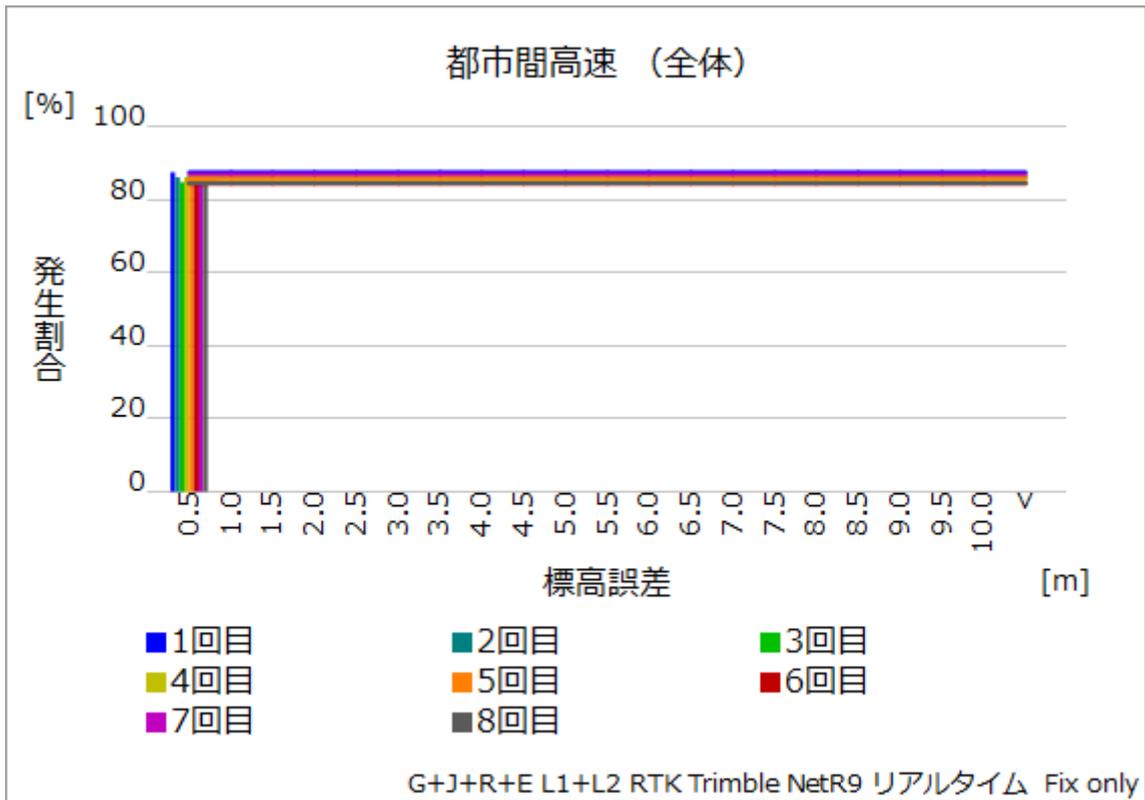


図 2.4.5-3 標高誤差 発生割合（累積グラフ）

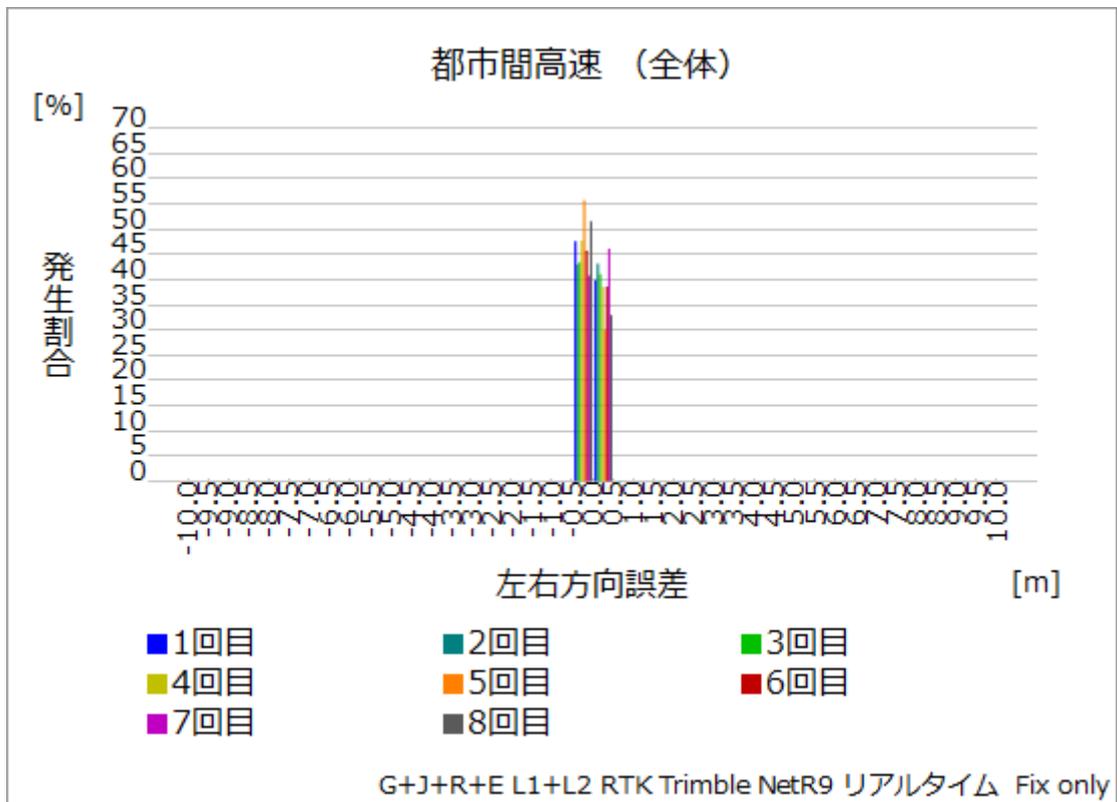


図 2.4.5-4 左右方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

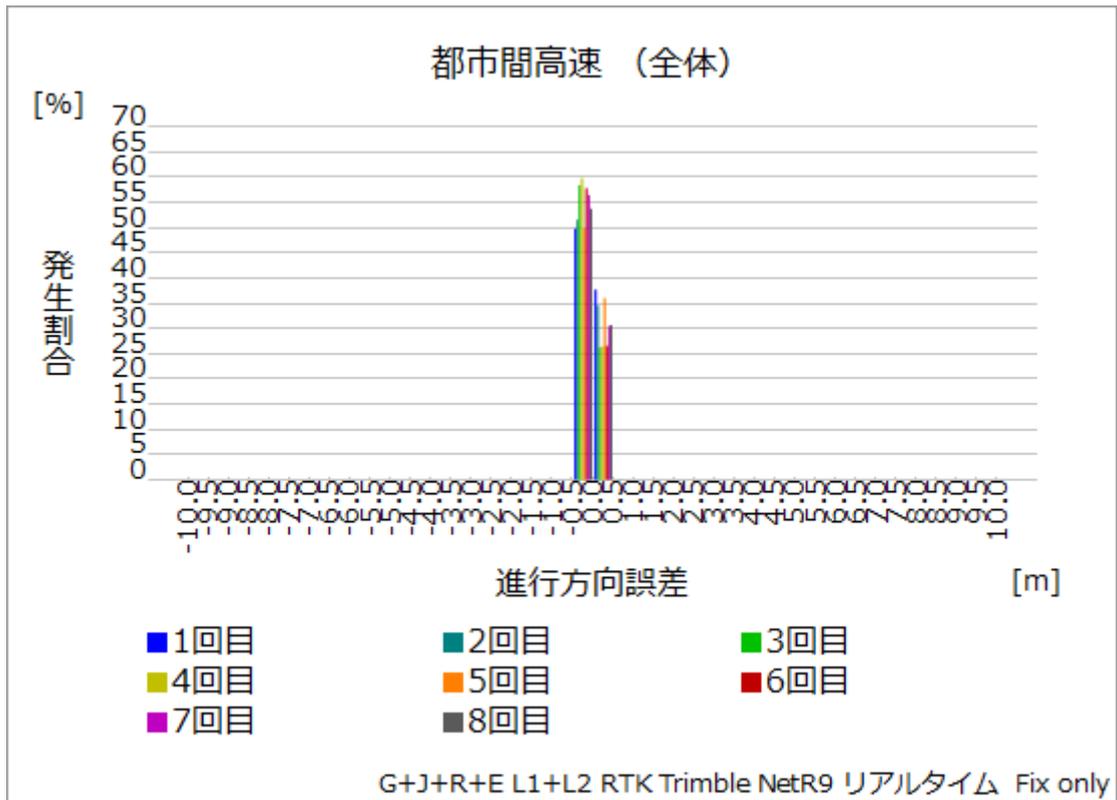


図 2.4.5-5 進行方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

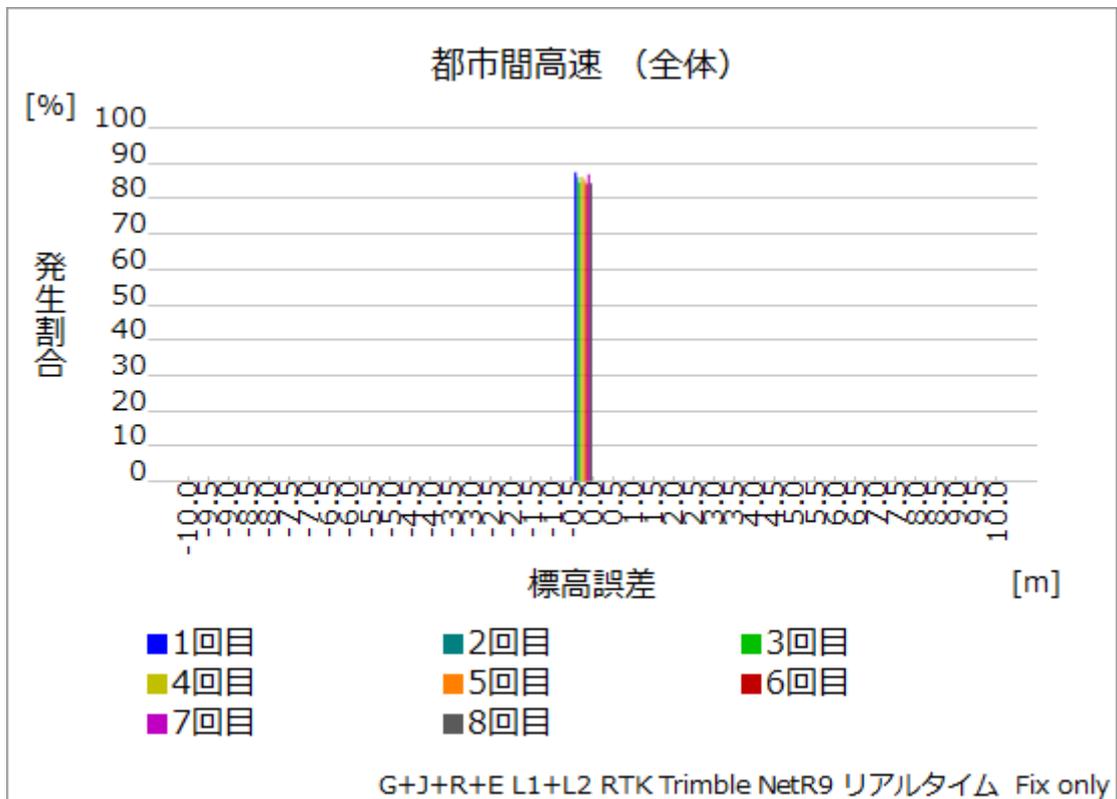


図 2.4.5-6 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率は以下の表のようになる。

表 2.4.5-3 左右方向誤差 発生割合 (周回・区間毎)

周回	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m
1	87.50%	87.50%	91.17%	91.17%	80.05%	80.05%	78.70%	78.70%
2	86.12%	86.13%	92.75%	92.75%	79.06%	79.06%	78.10%	78.12%
3	84.77%	84.77%	89.96%	89.96%	80.33%	80.33%	78.01%	78.01%
4	86.27%	86.27%	91.67%	91.67%	79.92%	79.92%	78.62%	78.62%
5	85.70%	85.70%	90.60%	90.60%	78.70%	78.70%	81.20%	81.20%
6	84.33%	84.33%	89.08%	89.08%	80.06%	80.06%	77.53%	77.53%
7	86.91%	86.91%	89.59%	89.59%	78.74%	78.74%	79.00%	79.00%
8	84.50%	84.50%	89.80%	89.80%	77.56%	77.56%	77.29%	77.29%
平均	85.76%	85.76%	90.58%	90.58%	79.30%	79.30%	78.56%	78.56%

左右方向誤差は、オープンスカイの区間 A で 1m 以下が約 90%、信号遮蔽のある区間 B、C でも約 80%、全区間では約 85%となった。1m と 1.5m で割合がほぼ同じなのは Fix 解のみだからであるが、2 回目で差異が生じているのは、ミス Fix が発生したためと考えられる。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下ようになった。

※Fix は Fix 解、UnFix は Float 解、単独測位解と DGNSS の測位解を合わせたものを表している。

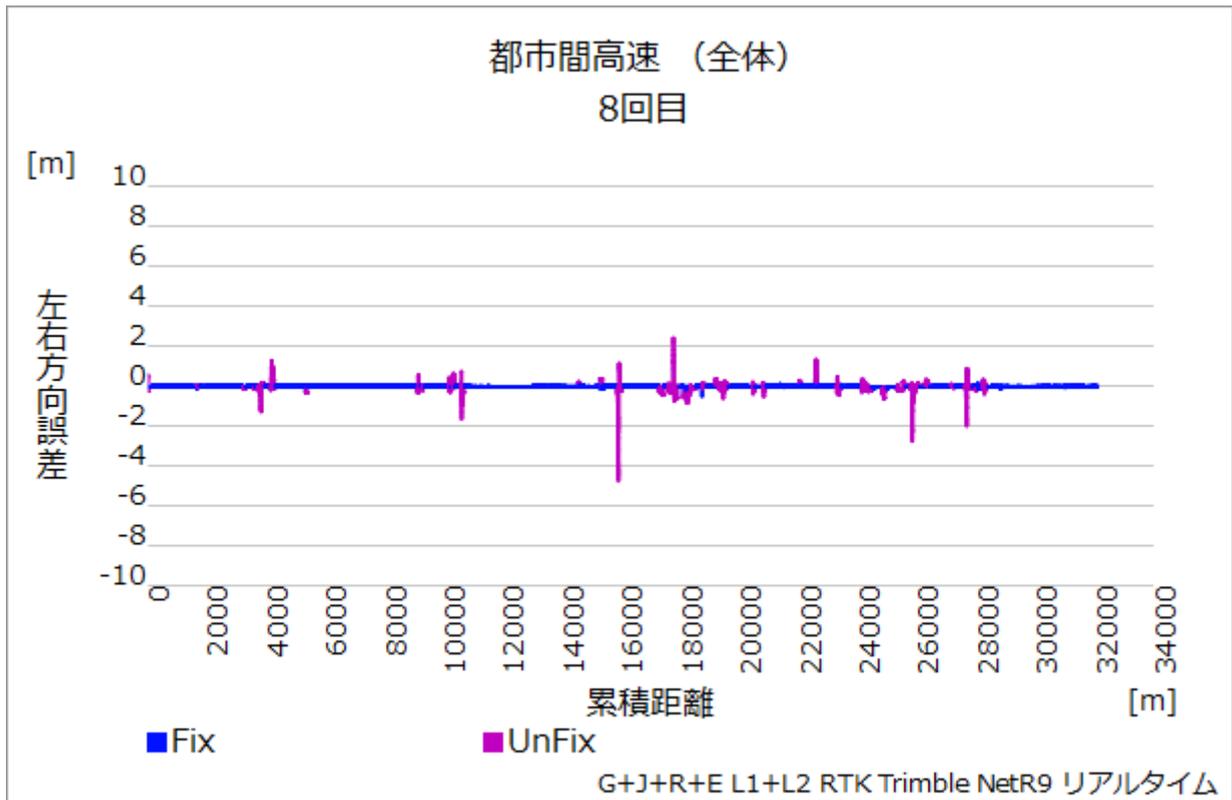
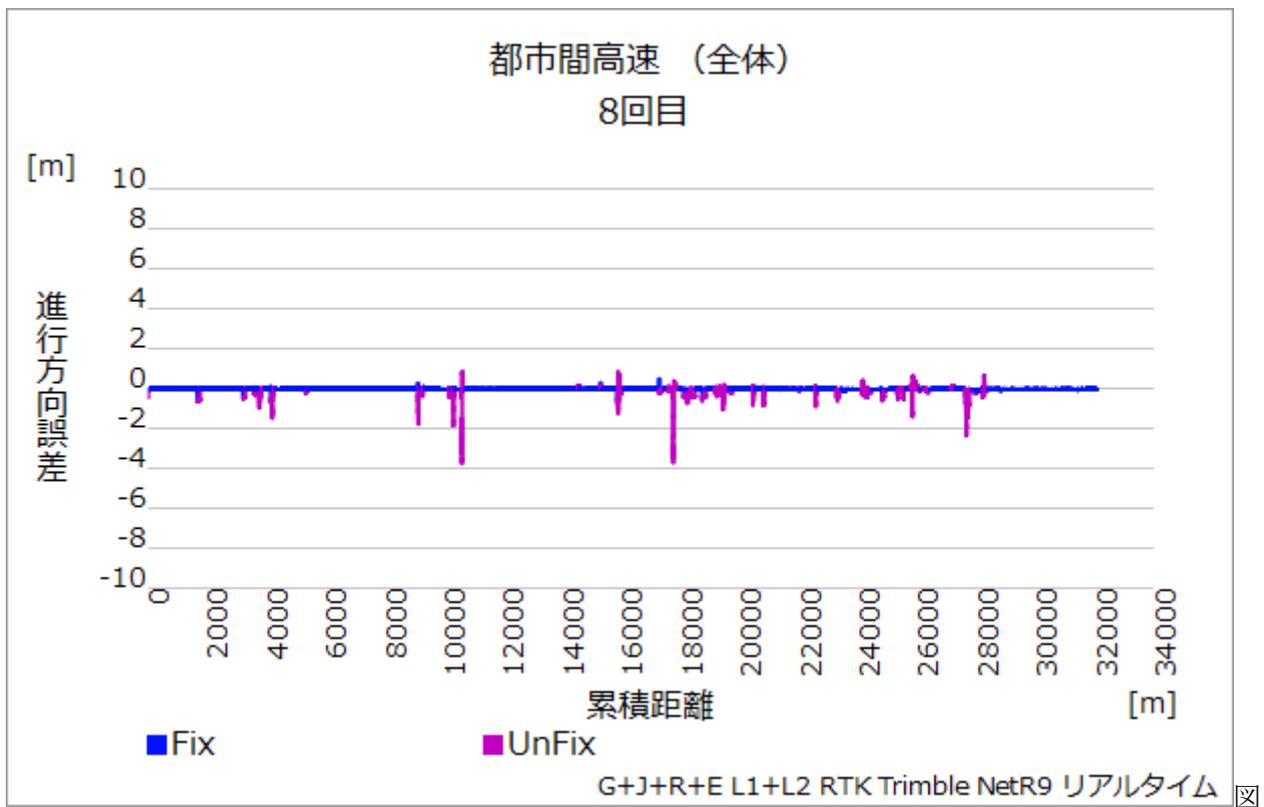


図 2.4.5-7 左右方向誤差の走行距離推移



2.4.5-8 進行方向誤差の走行距離推移

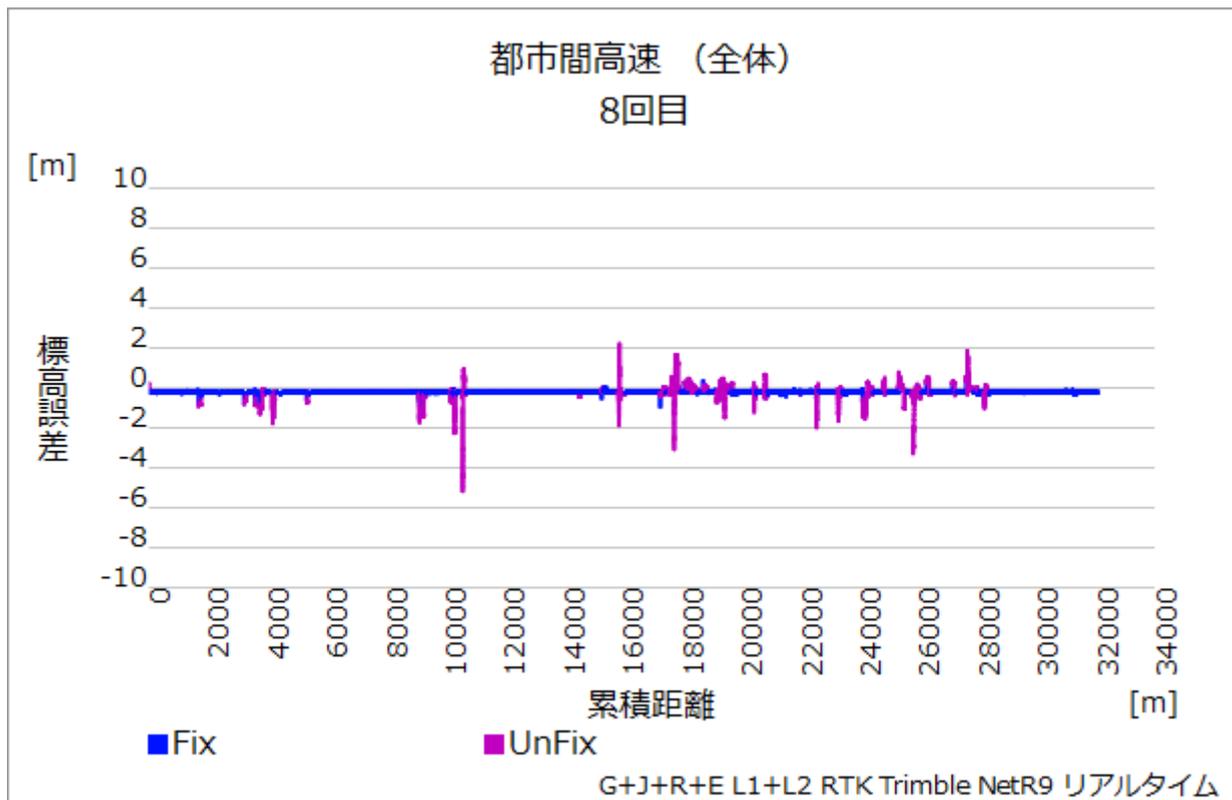


図 2.4.5-9 標高誤差の走行距離推移

左右方向誤差、進行方向誤差とも Fix 解の部分は揺らぎがかなり小さく、UnFix の部分で誤差が大きい。標高誤差も同様である。4000m 地点の誤差は JCT の高架下、10000m 地点の誤差はつくば中央 IC の ETC、後半の雑音のような区間は主に橋梁下や法面によるものである。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

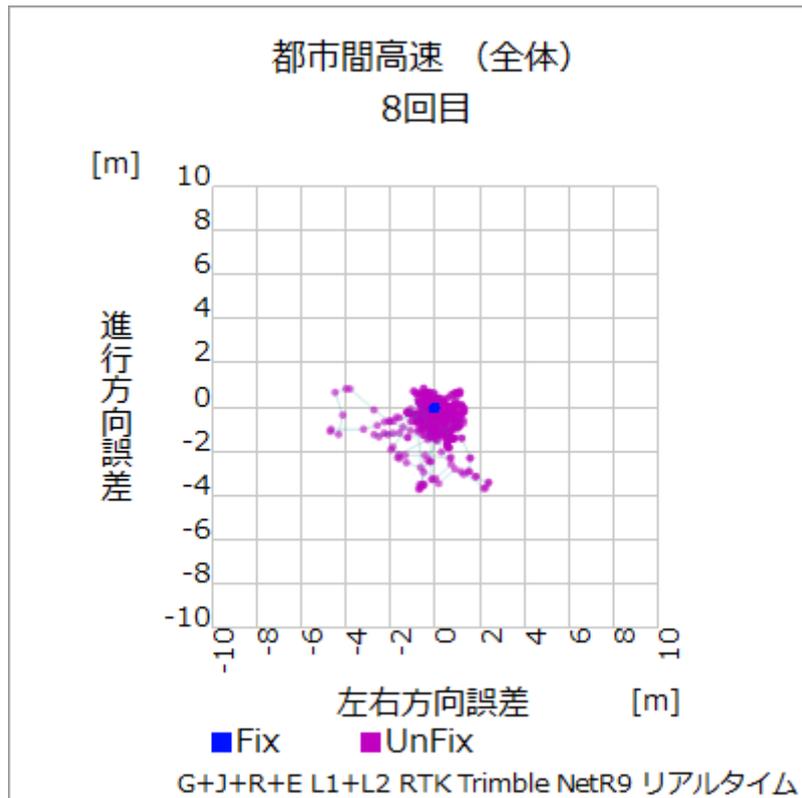


図 2.4.5-10 左右／進行方向誤差分布図

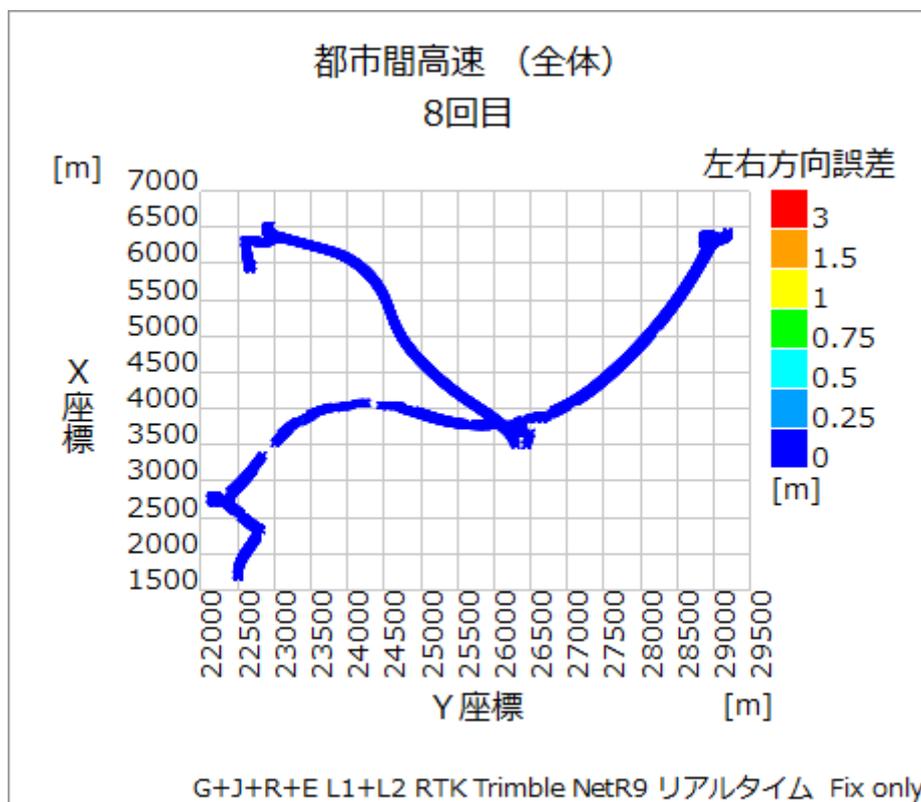


図 2.4.5-11 左右方向誤差プロット

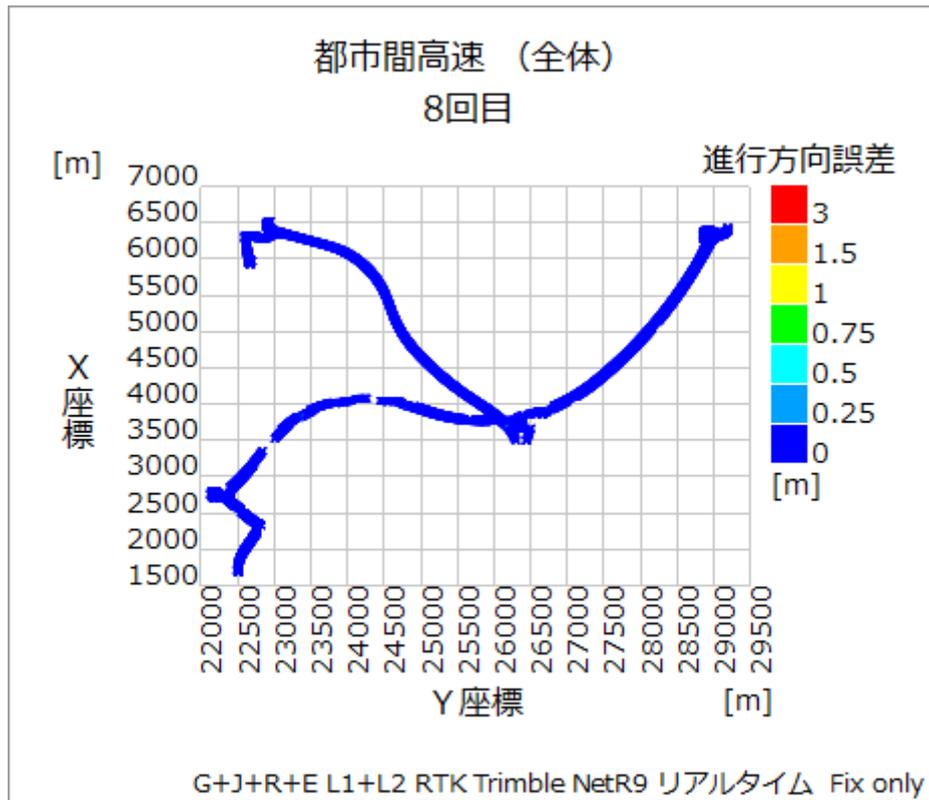


図 2.4.5-12 進行方向誤差プロット

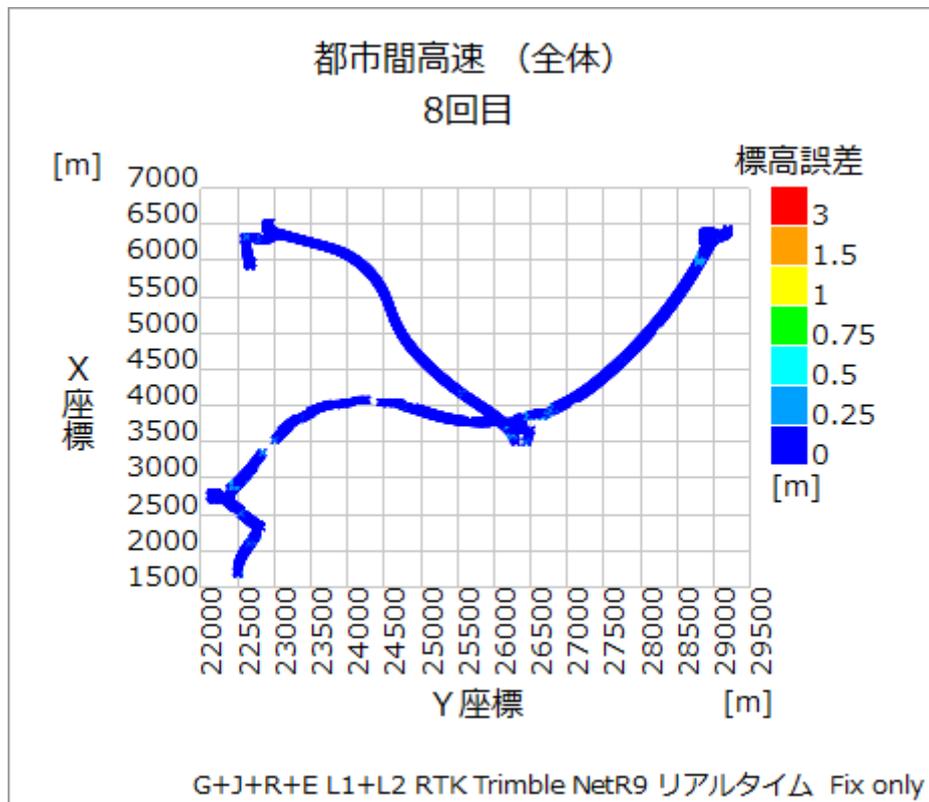


図 2.4.5-13 標高誤差プロット

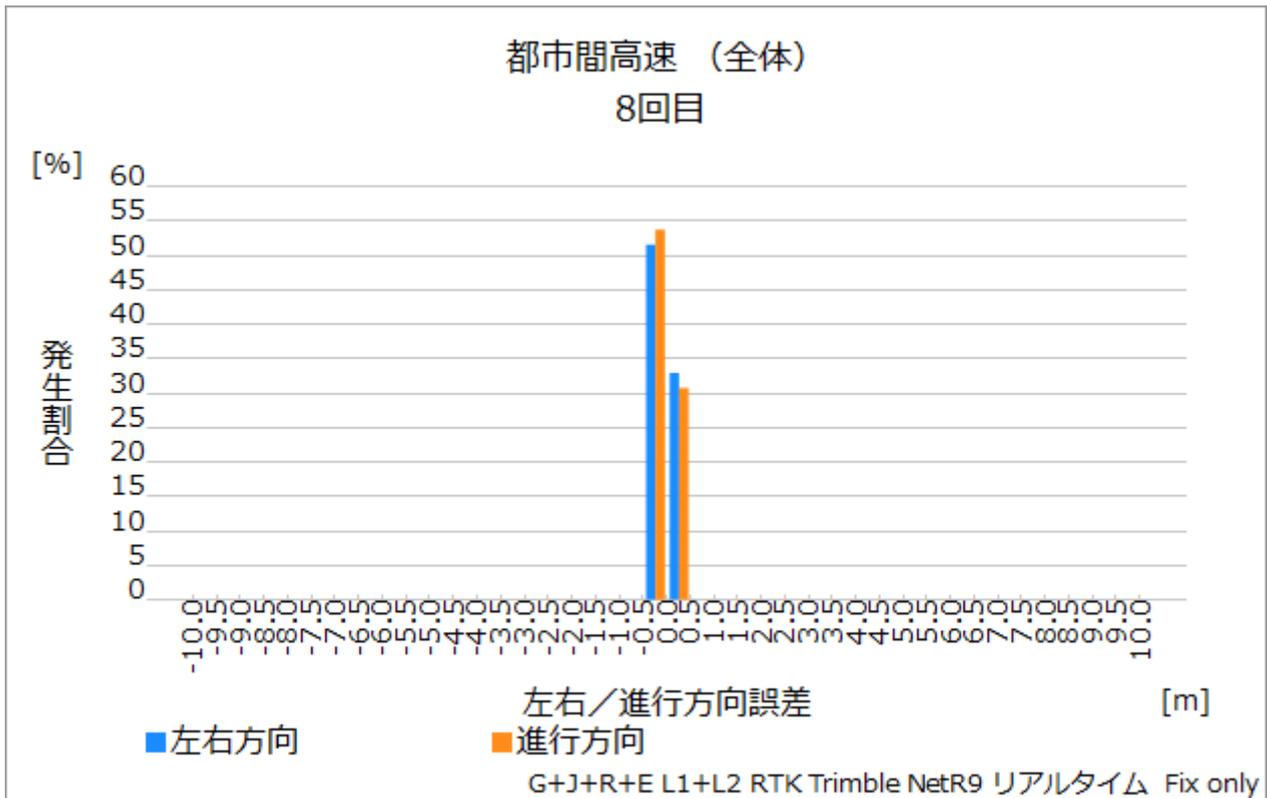


図 2.4.5-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

Fix 解だけでも全区間で 85%あり、左右、進行方向誤差も 3cm 以内となり、RTK の精度となっていることが確認できた。分布図からも中心に点がまとまっていることから、確度も高いことが確認できた。

2.4.6. QZSS L6 (CLAS) 補強

MELCO 製の AQLOC は、センチメートル級測位補強サービス (CLAS) のプロトタイプ端末であり、L1、L2 に加え、L6 帯に対応している。衛星システムは GPS+QZSS に対応している。出力は USB typeB や LAN が使用可能である。

本調査では、GPS+QZSS の同時受信設定で測位実験を行った。アンテナは MMS のループに追加搭載した JAVAD 社製 TyrAnt-G2 を使用した。

ここでは GPS+QZSS でのリアルタイム計測結果について評価を行う。

都市間高速道路全 8 回中 6 回の測位データを解析し評価している。

ただし、5、6 回目は電源トラブルのためデータを取得できなかった。

表 2.4.6-1 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	132,186	124,466	94.16%	84,059	63.59%
区間 A	30,686	29,451	95.98%	18,671	60.85%
区間 B	35,026	32,300	92.22%	20,172	57.59%
区間 C	31,846	28,567	89.70%	18,392	57.75%

※10Hz で測位を実施

測位率は、ほぼ 90%を超えていたが、Fix 率は 60%程度と RTK より 20~30%程低かった。測位率もオープンスカイの区間 A が一番良いが、信号遮蔽箇所が存在する区間 B、C と大きな差はなかった。

表 2.4.6-2 測位精度（全周回平均、区間毎、Fix 解のみ対象）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	0.084	0.120	0.071	0.072	0.119	0.152
区間 A	0.102	0.130	0.036	0.066	0.085	0.141
区間 B	0.064	0.105	0.054	0.139	0.128	0.402
区間 C	0.092	0.113	0.117	0.091	0.130	0.175

左右方向誤差は、6cm~10cm 程度、進行方向誤差は 3~12cm 程度となった。いずれの方向も区間 C が低く、オープンスカイの区間 A でも左右方向が RMS 10cm 程度となった。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラムの形にまとめたものである。

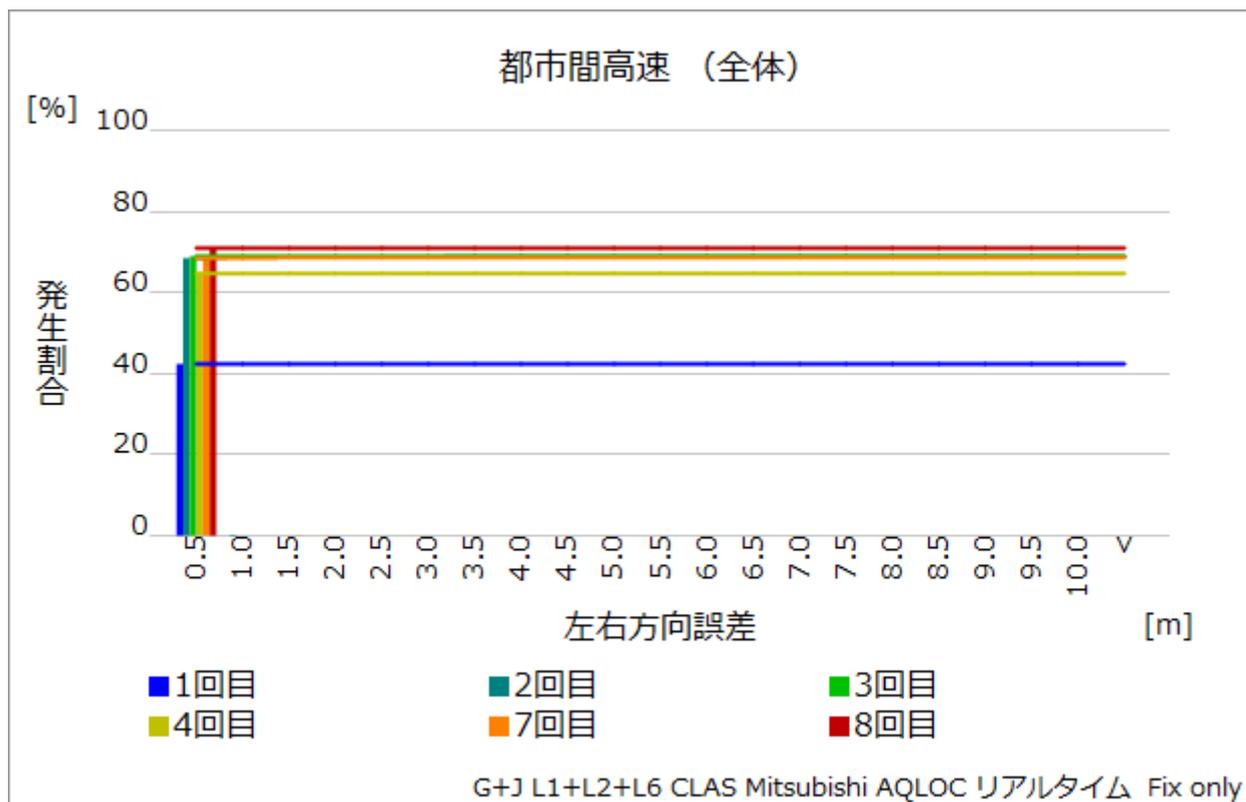


図 2.4.6-1 左右方向誤差 発生割合 (累積グラフ)

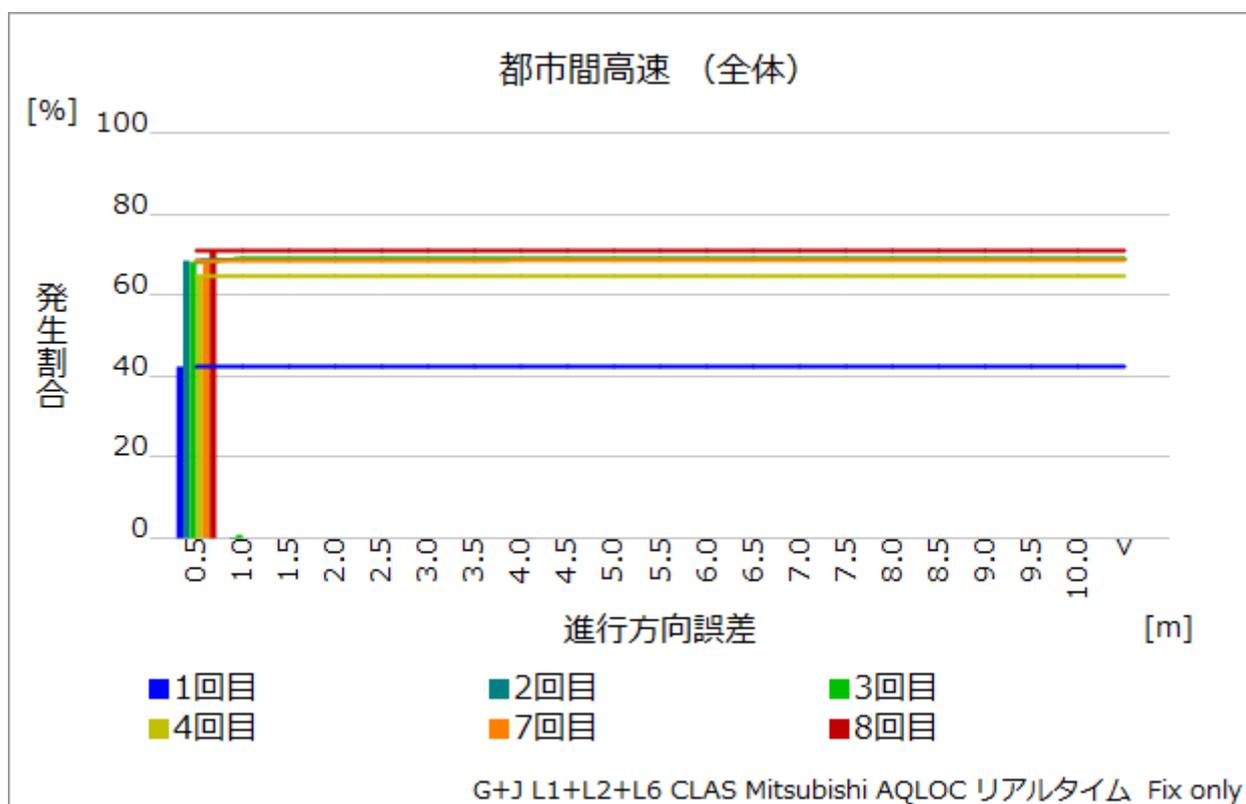


図 2.4.6-2 進行方向誤差 発生割合 (累積グラフ)

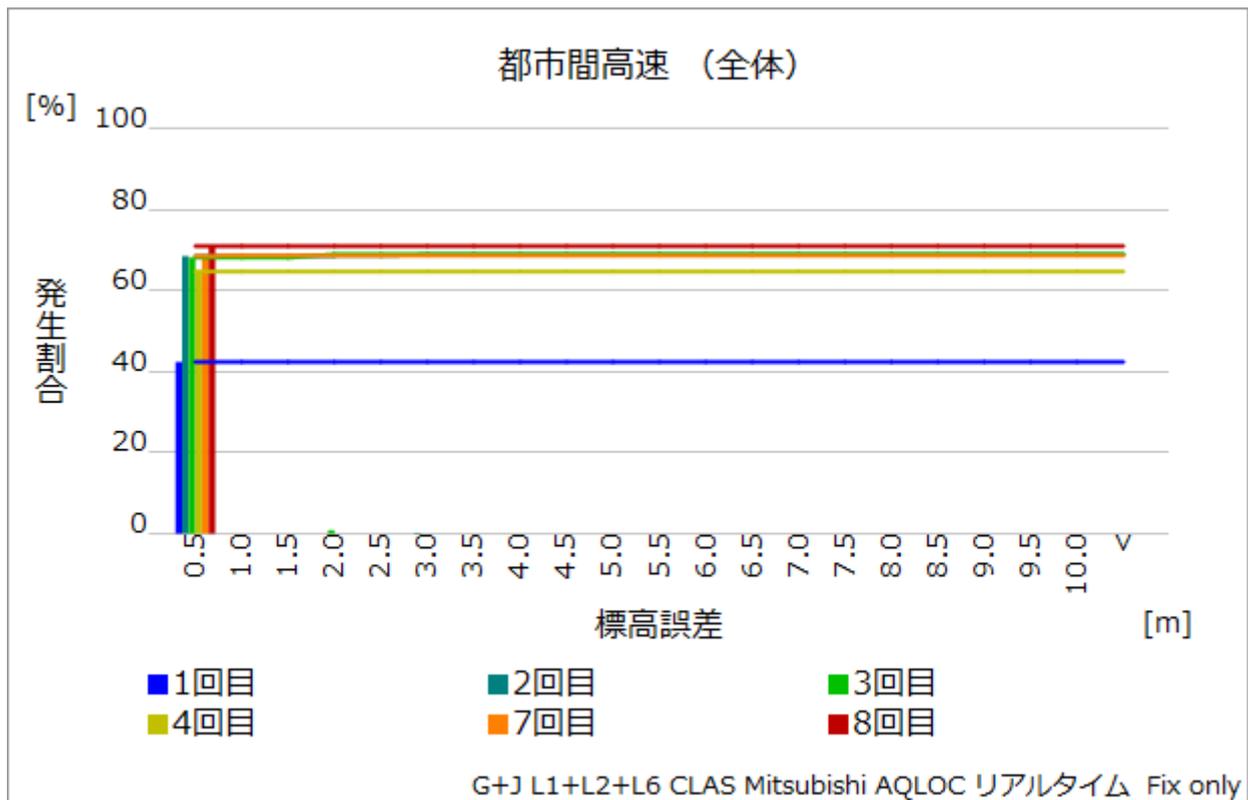


図 2.4.6-3 標高誤差 発生割合 (累積グラフ)

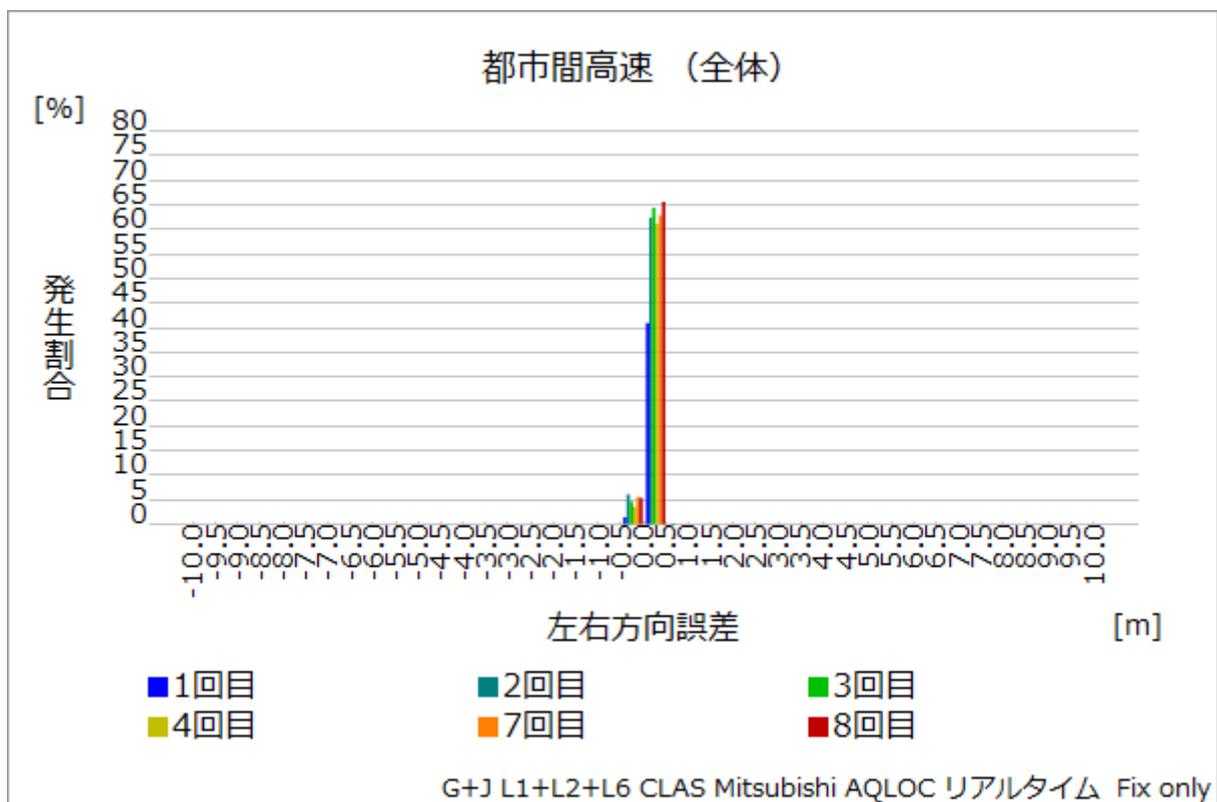


図 2.4.6-4 左右方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

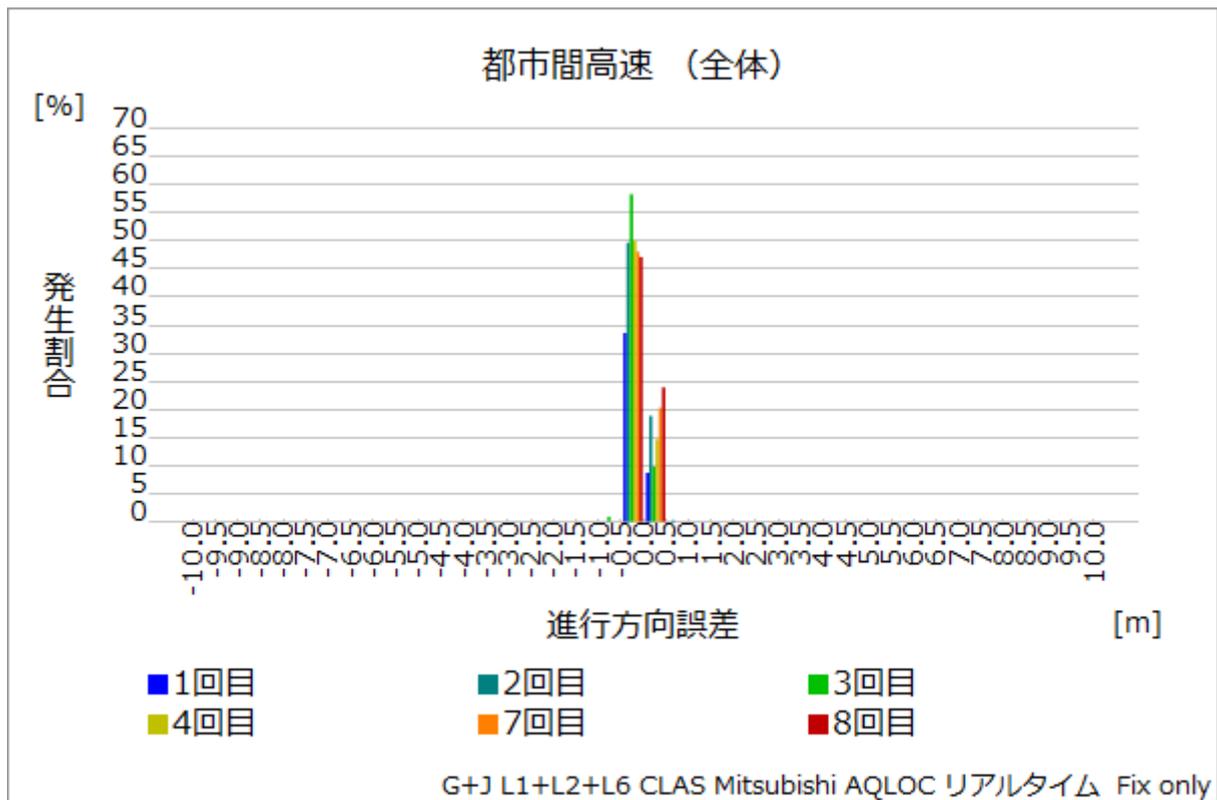


図 2.4.6-5 進行方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

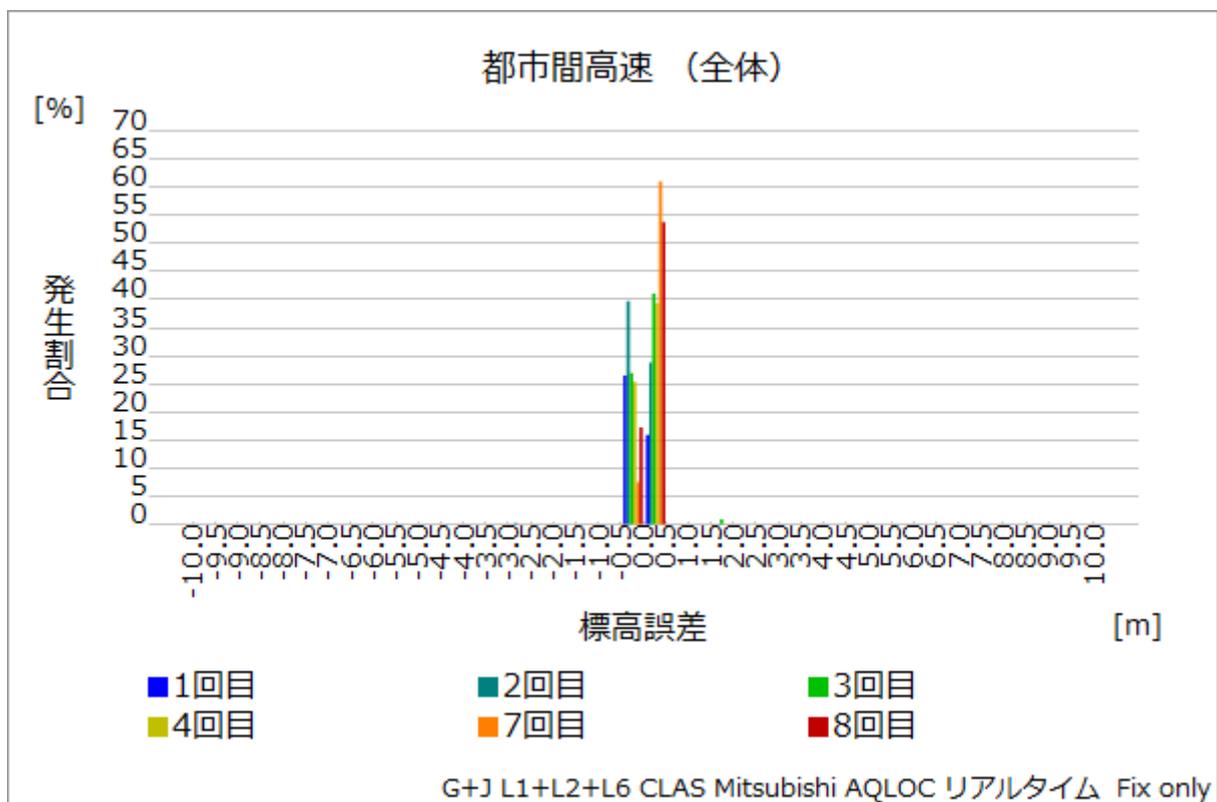


図 2.4.6-6 標高誤差 発生割合 (ヒストグラム)

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率は以下の表のようになる。

表 2.4.6-3 左右方向誤差 発生割合（周回・区間毎）

周回	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m	～1m	～1.5m
1	42.44%	42.44%	29.29%	29.29%	33.49%	33.49%	57.74%	57.74%
2	68.84%	68.84%	67.98%	67.98%	65.29%	65.29%	54.58%	54.58%
3	69.06%	69.06%	83.22%	83.22%	64.45%	64.45%	57.50%	57.50%
4	64.74%	64.74%	54.15%	54.15%	56.80%	56.80%	61.43%	61.43%
5	—	—	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—
7	68.51%	68.63%	59.26%	59.26%	66.93%	66.93%	53.20%	53.76%
8	71.03%	71.03%	74.20%	74.20%	59.87%	59.87%	61.58%	61.58%
平均	64.10%	64.12%	61.35%	61.35%	57.80%	57.80%	57.67%	57.77%

左右方向誤差は、全区間のほとんどの走行で 1m 以内が 60%以上となった。しかし、1 回目は区間 A、B がオープンスカイにも関わらず Fix 率 30%となっている影響で、他の周回と比べて 20%程低くなっている。また、3 回目の区間 A は 83%と他の区間と比べて高かった。著しく精度の低い 1 回目は、利用衛星数が多く、低仰角の衛星を測位に利用している可能性がある。これは測位の演算処理上の課題と考えられる。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下ようになった。

※Fix は Fix 解、UnFix は Float 解または単独測位解である。

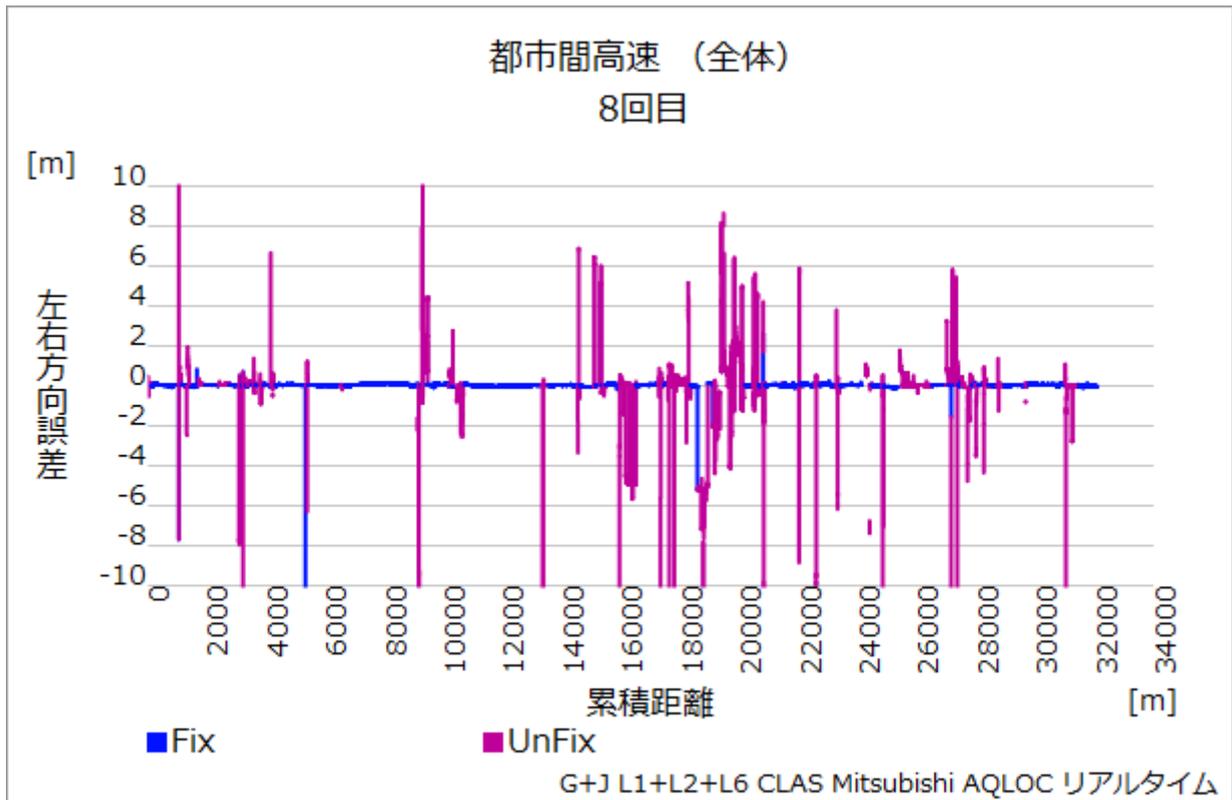


図 2.4.6-7 左右方向誤差の走行距離推移

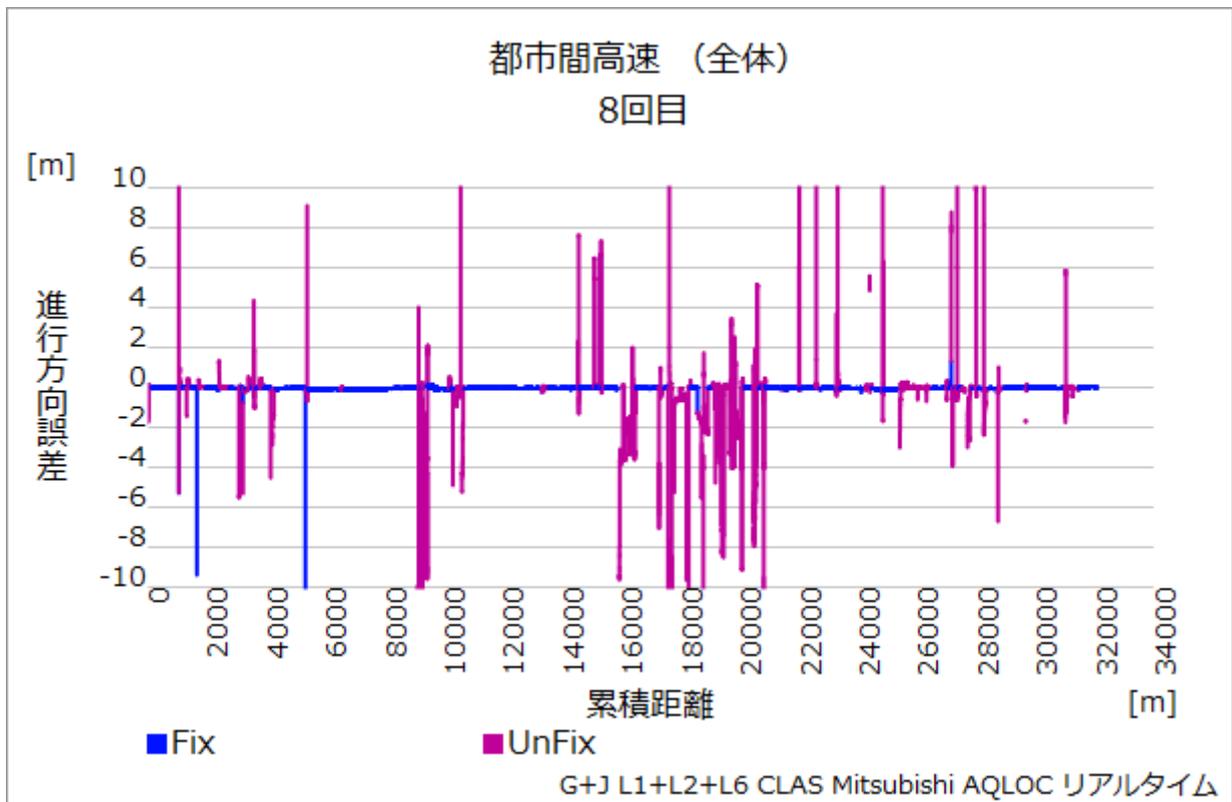


図 2.4.6-8 進行方向誤差の走行距離推移

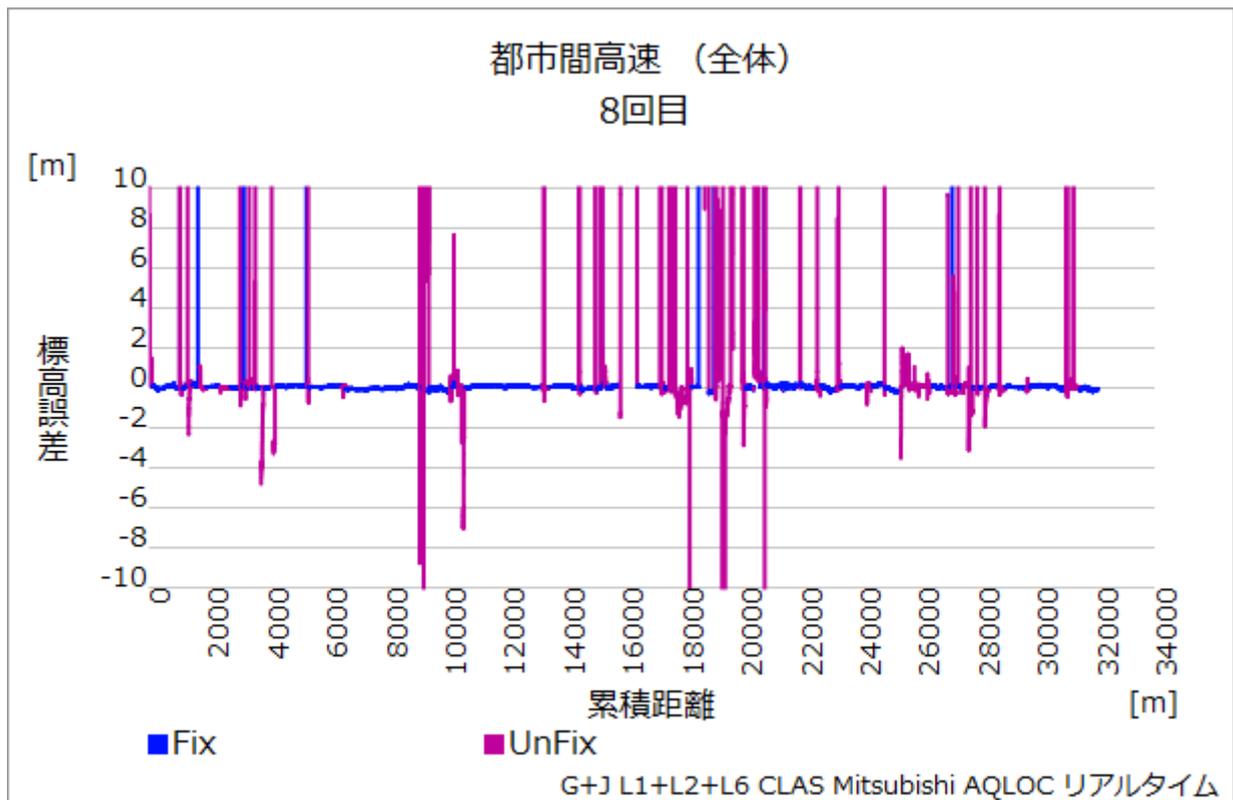


図 2.4.6-9 標高誤差の走行距離推移

左右方向や進行方向の誤差に比べて、標高誤差の揺らぎが大きい。1000m 付近の誤差は電光掲示板、4000m 地点の誤差は JCT の高架下、10000m 地点の誤差はつくば中央 IC の ETC、14000m～20000m までの雑音のような区間は、つくば JCT～谷田部 IC の区間の橋梁下や法面によるものである。28000m 付近の誤差は、つくば JCT による。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

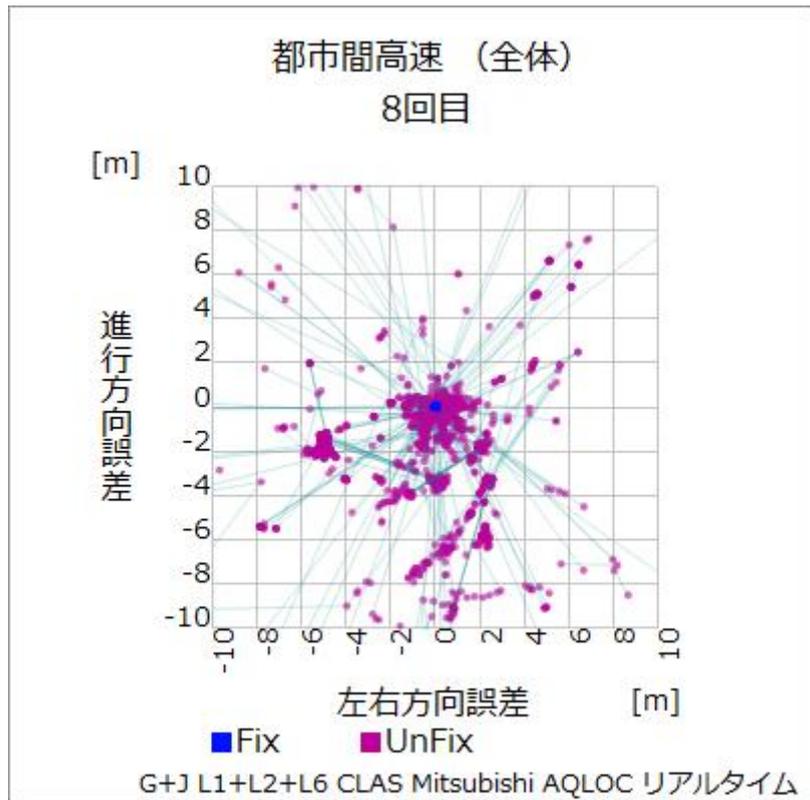


図 2.4.6-10 左右／進行方向誤差分布図

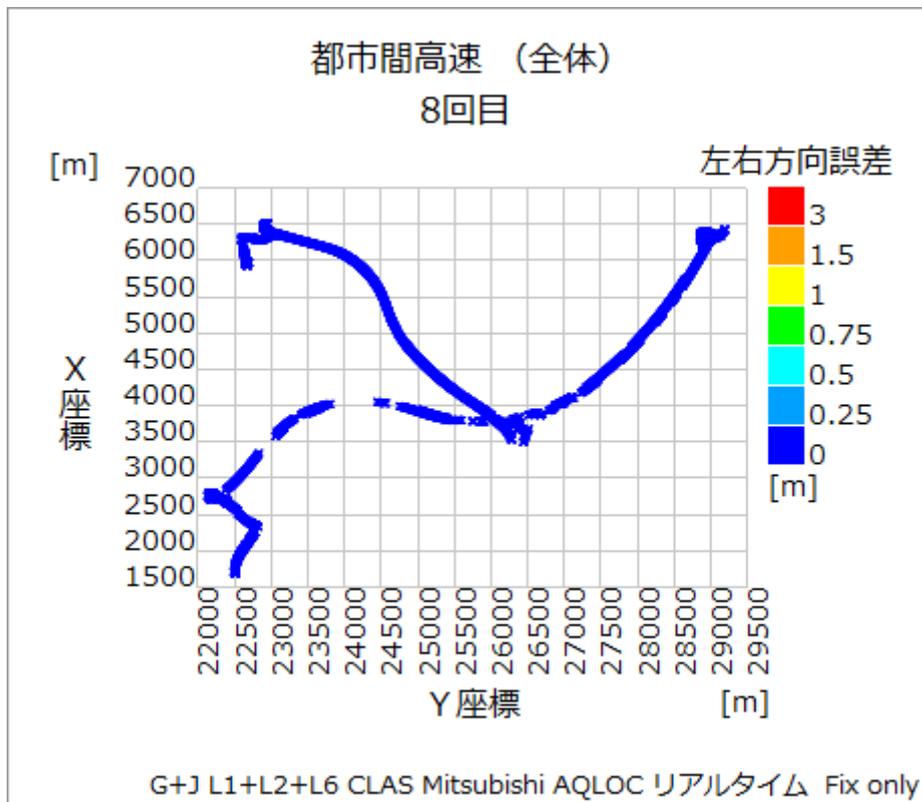


図 2.4.6-11 左右方向誤差プロット

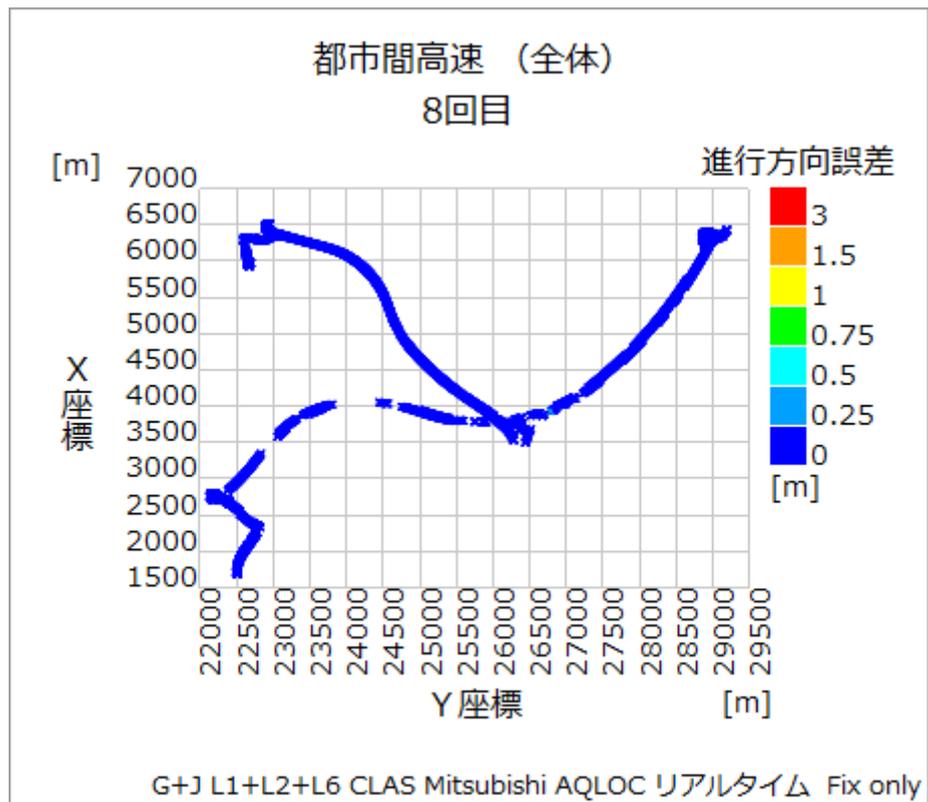


図 2.4.6-12 進行方向誤差プロット

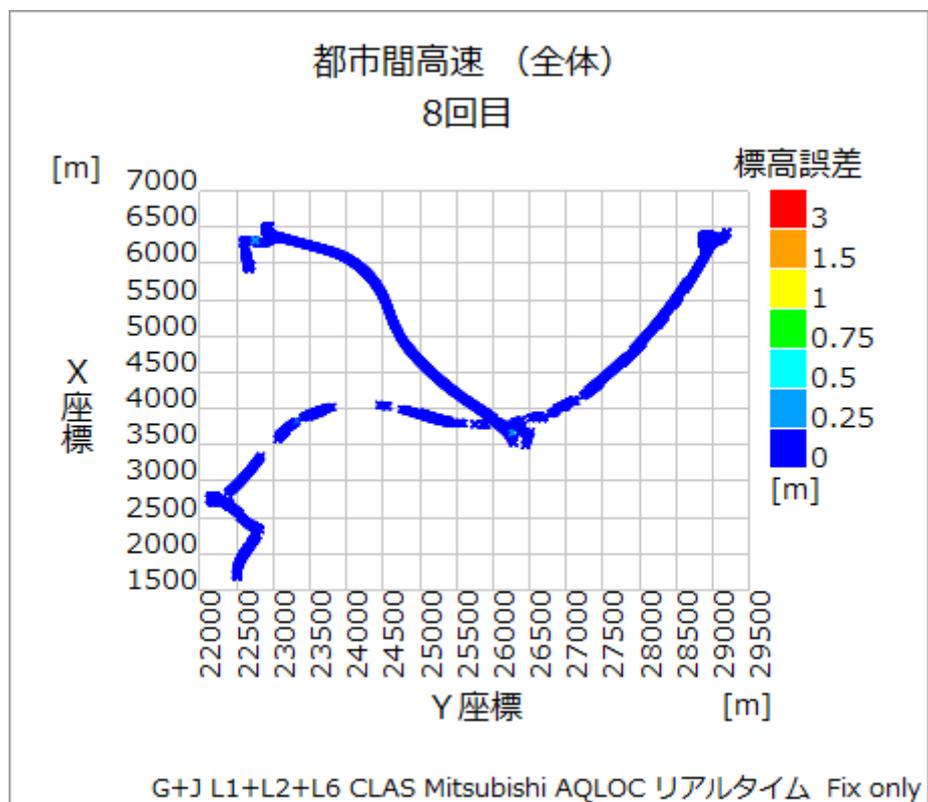


図 2.4.6-13 標高誤差プロット

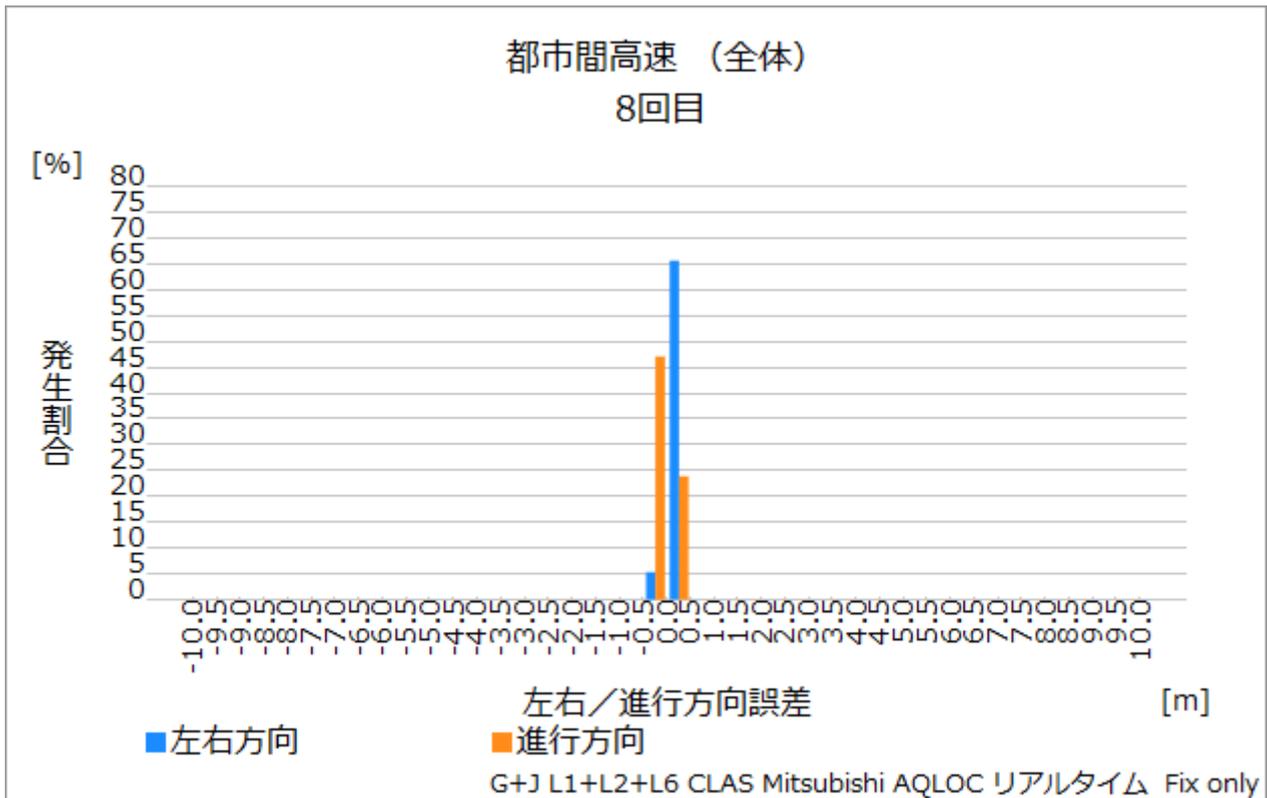


図 2.4.6-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

測位率は 95%ほどあるが、Fix 率が 70%と少し低かった。これは信号遮蔽からすぐに復帰できていないことがプロット図から確認できる。分布図からは、UnFix の解が乱れていることが確認できる。しかし、CLAS の測位精度 (RMS : 水平 6cm、垂直 12cm) に関しては、いずれの区間も水平精度を少し満たしていなかったが、近い精度であることが確認できた。垂直方向に関しては測位精度を満たしている区間も確認できた。

2.4.7. MADOCA-PPP AR

受信機の説明や観測条件に関しては、2.4.2.2 を参照。

測位計算は、JAXA の MALIB プログラムを利用している。

ここでは GPS+QZSS+GLONASS でのリアルタイム計測結果について評価を行う。

都市間高速道路全 8 回中 4 回の測位データを解析し評価している。

表 2.4.7-1 測位率・Fix 率（全周回合計、区間毎）

区間	全データ数	測位数	測位率	Fix 数	Fix 率
全区間	85,094	78,660	92.44%	60,171	70.71%
区間 A	20,004	18,931	94.64%	15,950	79.73%
区間 B	23,114	20,658	89.37%	15,634	67.64%
区間 C	21,354	18,924	88.62%	13,634	63.85%

※10Hz で測位を実施

測位率は、いずれの区間も 90%程度であるが、Fix 率はオープンスカイの区間 A で約 80%、信号遮蔽の多い区間 C で約 64%と約 16%の差が出た。

表 2.4.7-2 測位精度（全周回平均、区間毎、Fix 解のみ対象）

区間	左右方向		進行方向		標高	
	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
全区間	0.074	0.156	0.069	0.139	0.269	0.402
区間 A	0.065	0.118	0.063	0.124	0.289	0.413
区間 B	0.101	0.173	0.068	0.132	0.260	0.425
区間 C	0.066	0.121	0.082	0.170	0.249	0.390

左右、進行方向ともに RMS は 6~8cm 程度だが、信号遮蔽を含む区間 B で左右方向誤差が 10cm 程度と少し高かった。標高誤差に関しては、RMS が約 25~29cm となった。

以下のグラフは全 8 回の走行の左右方向・進行方向・標高誤差の発生割合を累積グラフ・ヒストグラムの形にまとめたものである。

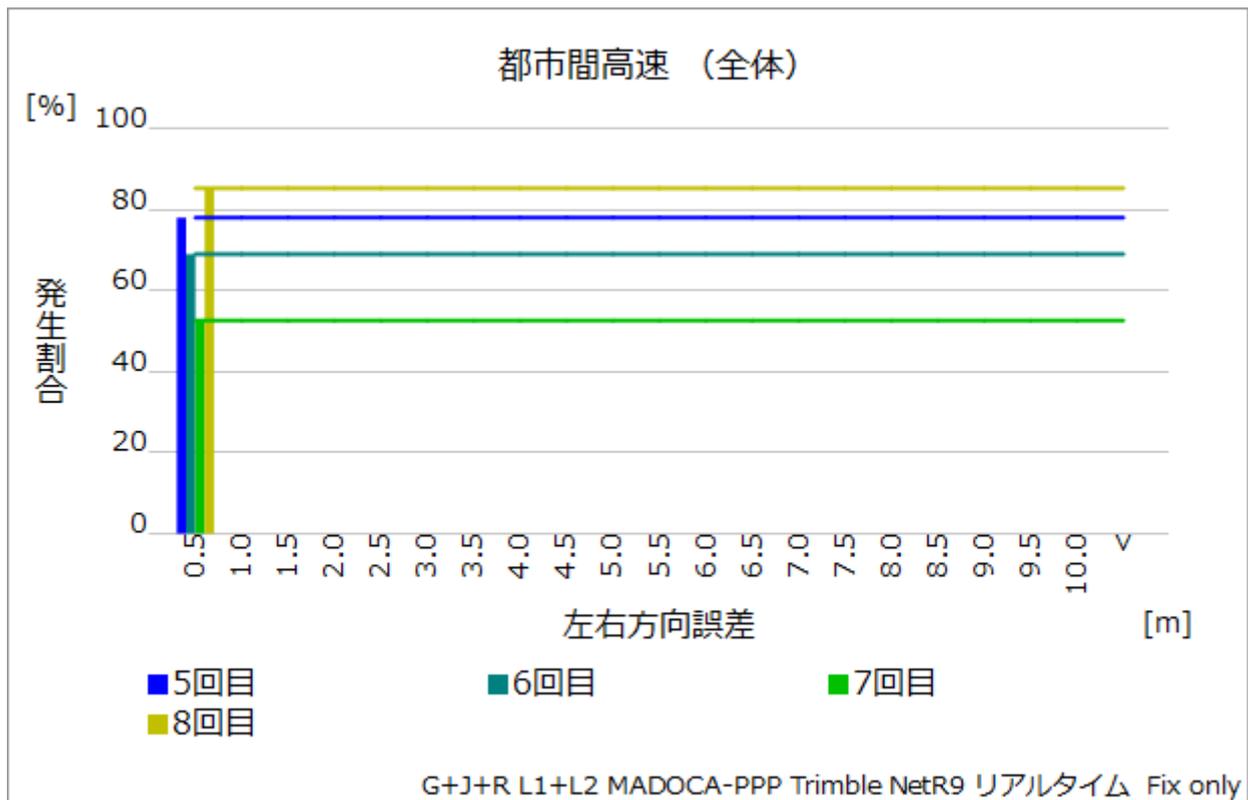


図 2.4.7-1 左右方向誤差 発生割合 (累積グラフ)

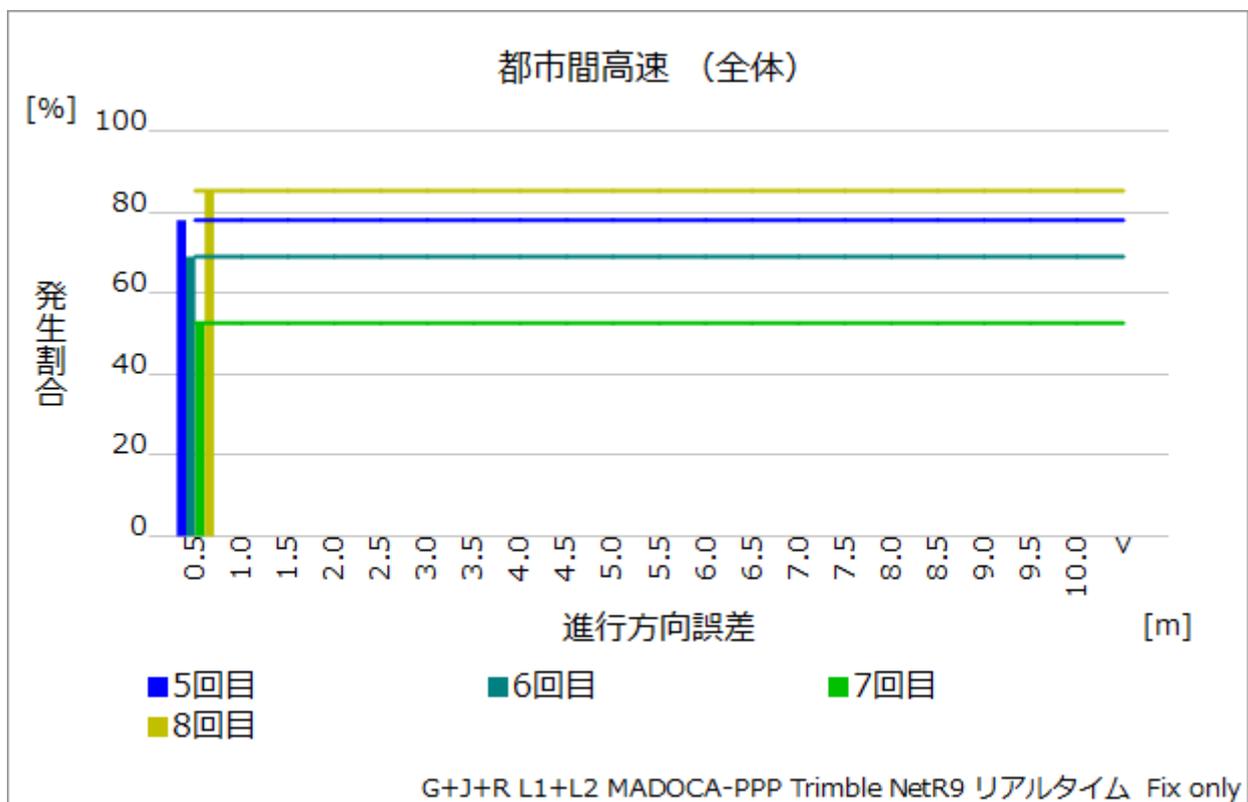


図 2.4.7-2 進行方向誤差 発生割合 (累積グラフ)

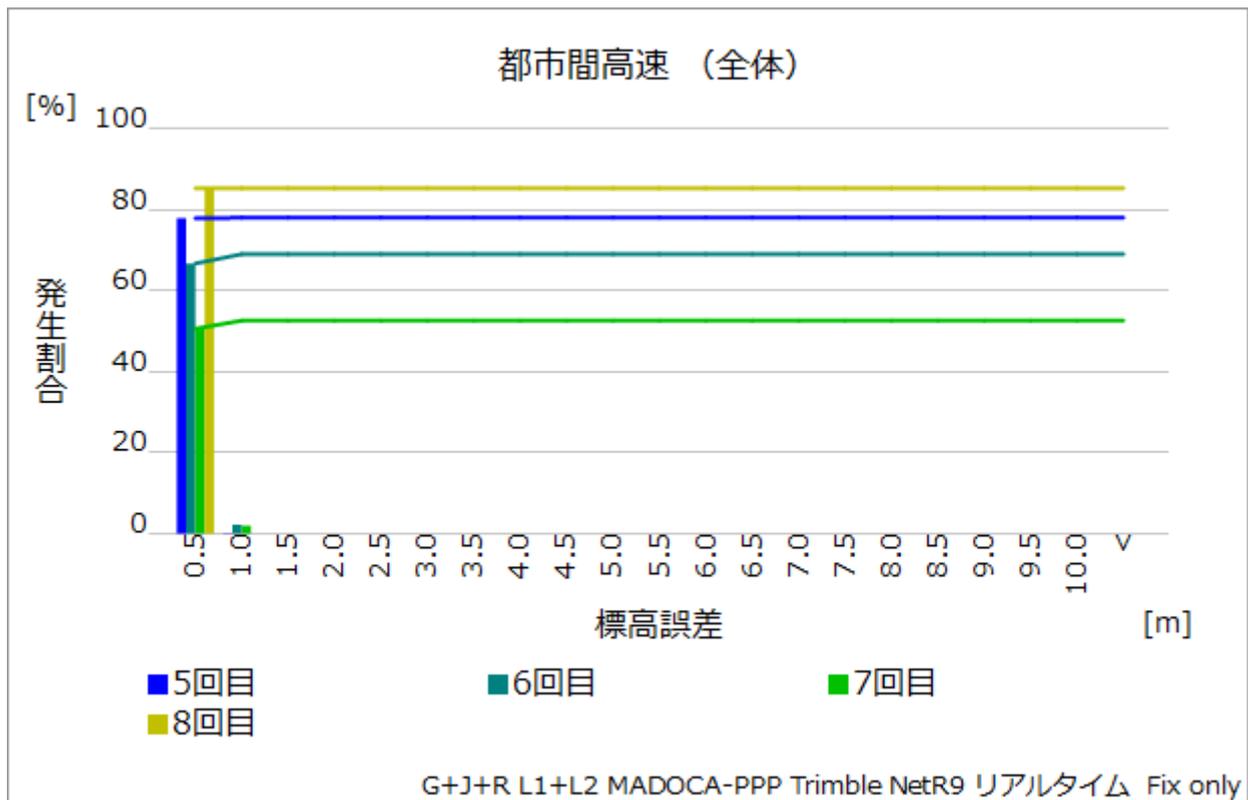


図 2.4.7-3 標高誤差 発生割合 (累積グラフ)

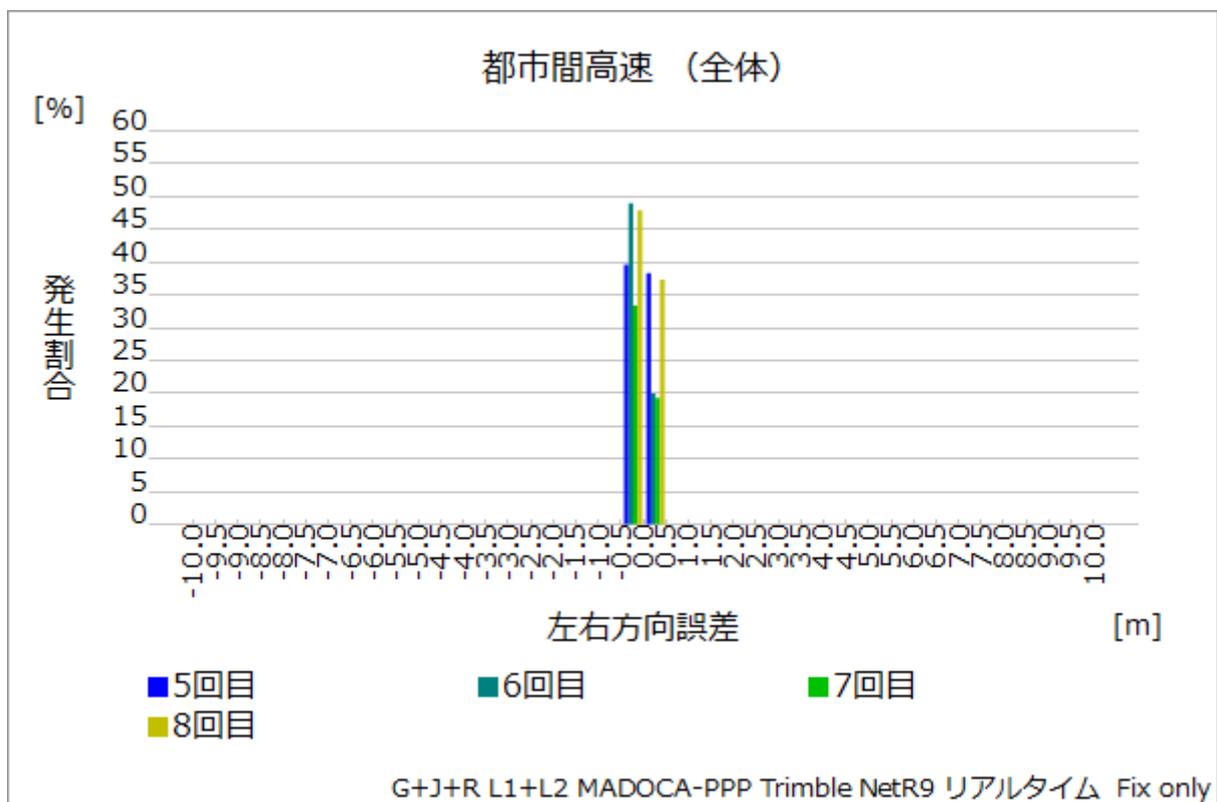


図 2.4.7-4 左右方向誤差 発生割合 (ヒストグラム)

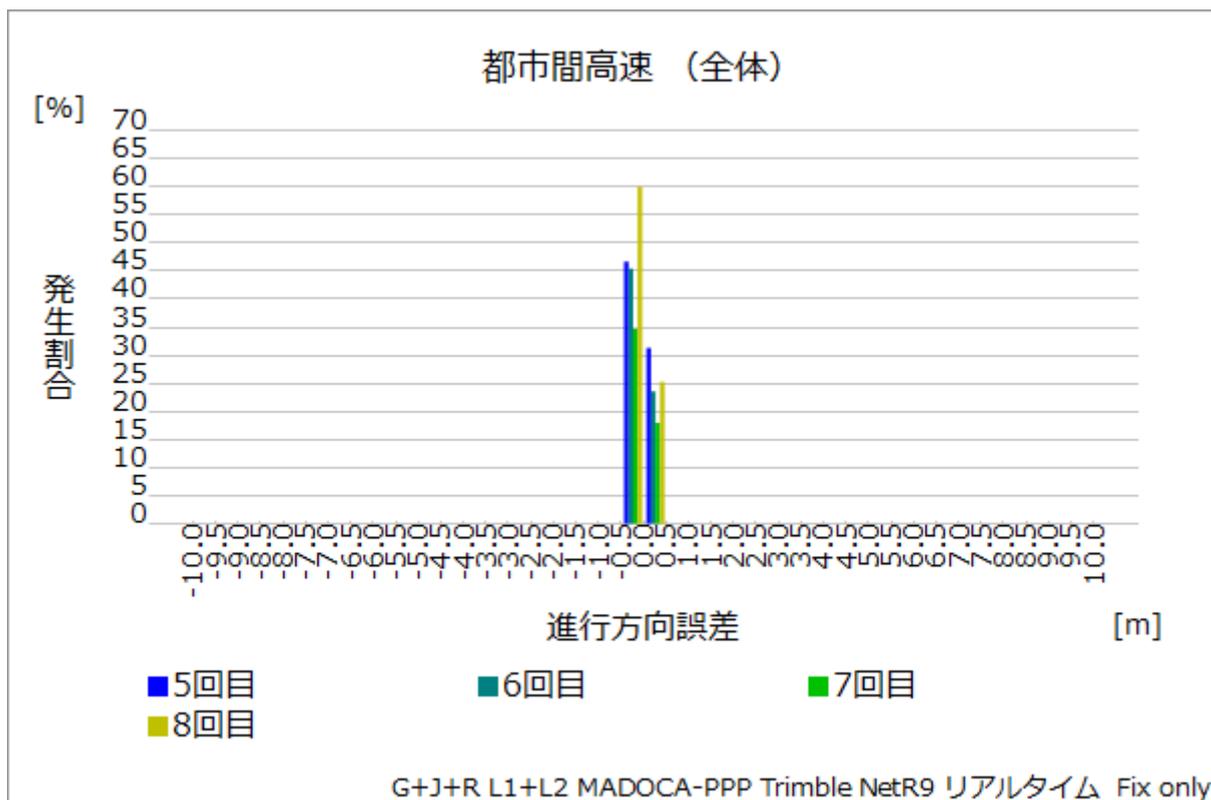


図 2.4.7-5 進行方向誤差 発生割合（ヒストグラム）

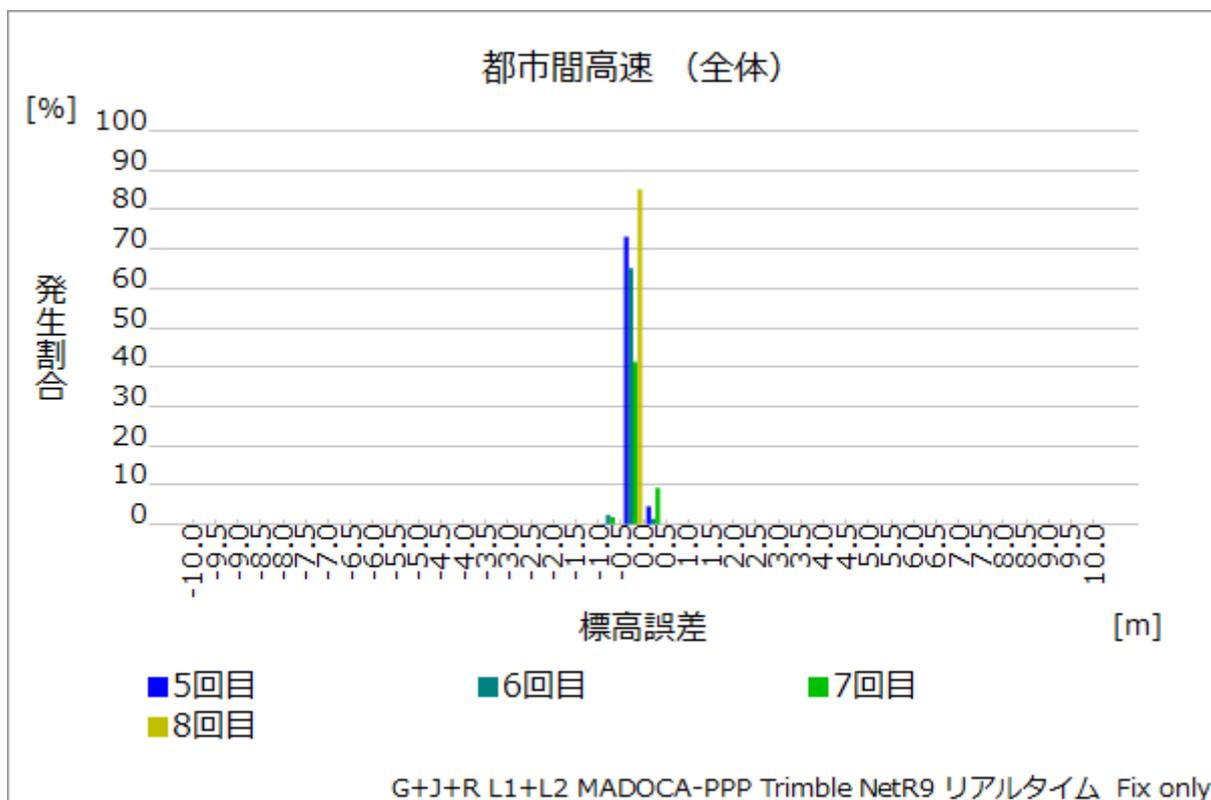


図 2.4.7-6 標高誤差 発生割合（ヒストグラム）

左右方向誤差の 1.0m 以下、1.5m 以下の出現率は以下の表のようになる。

表 2.4.7-3 左右方向誤差 発生割合 (周回・区間毎)

周回	全区間		区間 A		区間 B		区間 C	
	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m	~1m	~1.5m
1	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	—
5	78.03%	78.03%	91.74%	91.74%	80.12%	80.12%	53.19%	53.19%
6	69.04%	69.04%	86.76%	86.76%	71.93%	71.93%	40.37%	40.37%
7	52.64%	52.64%	54.02%	54.02%	38.42%	38.42%	81.44%	81.44%
8	85.30%	85.30%	86.90%	86.90%	80.07%	80.07%	81.72%	81.72%
平均	71.25%	71.25%	79.86%	79.86%	67.64%	67.64%	64.18%	64.18%

オープンスカイの区間 A では、ほとんどの周回で 1m 以内が 85%以上となった。また、8 回目は全ての区間で 1.5m 以内が 80%以上となった。区間 A より信号遮蔽の多い区間 B、C で測位精度が低くなるという特徴が確認できたが、7 回目は区間 A で 54.02%と低く、区間 B は 40%を下回った。7 回目は利用衛星数が多く、低仰角の衛星を測位に利用している可能性がある。

以下、8 回目の走行を用い、コースを通した評価を行う。

左右方向誤差、進行方向誤差及び標高誤差の走行距離による推移は以下のようになった。

※Fix は Fix 解、UnFix は単独測位解または Float 解である。

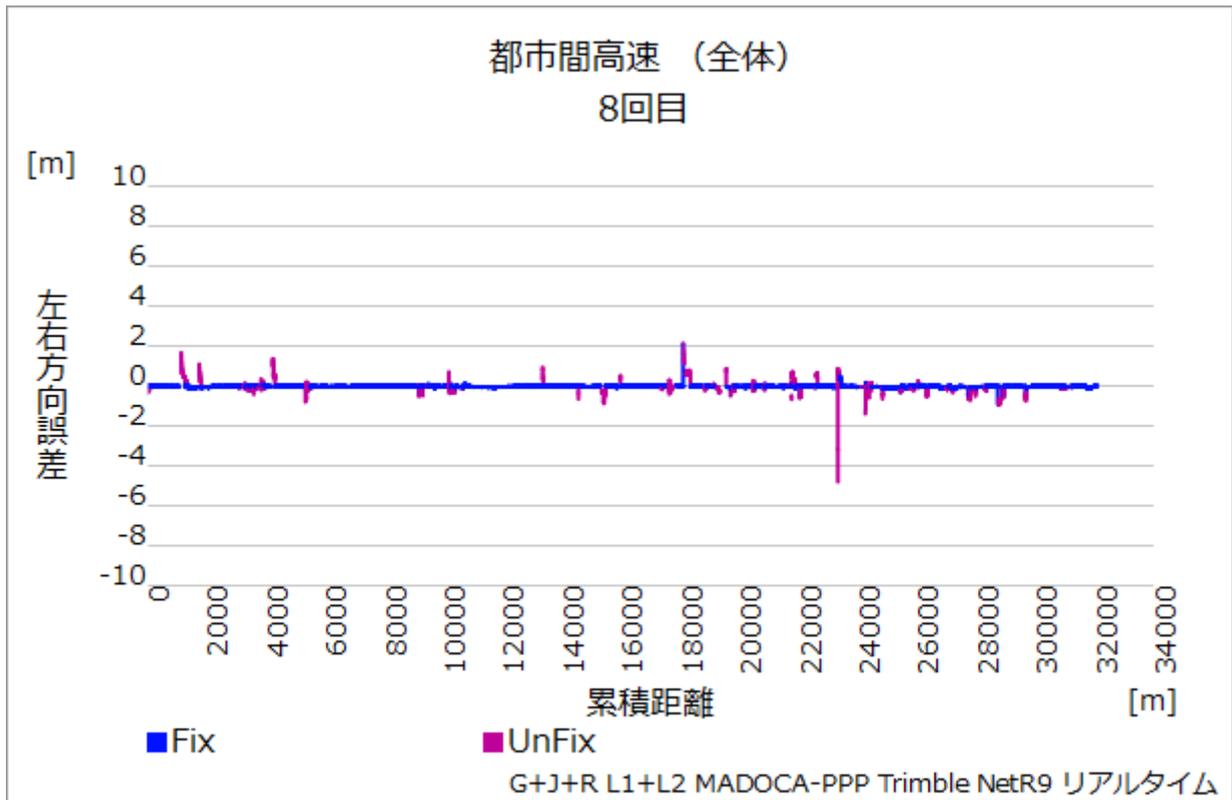


図 2.4.7-7 左右方向誤差の走行距離推移

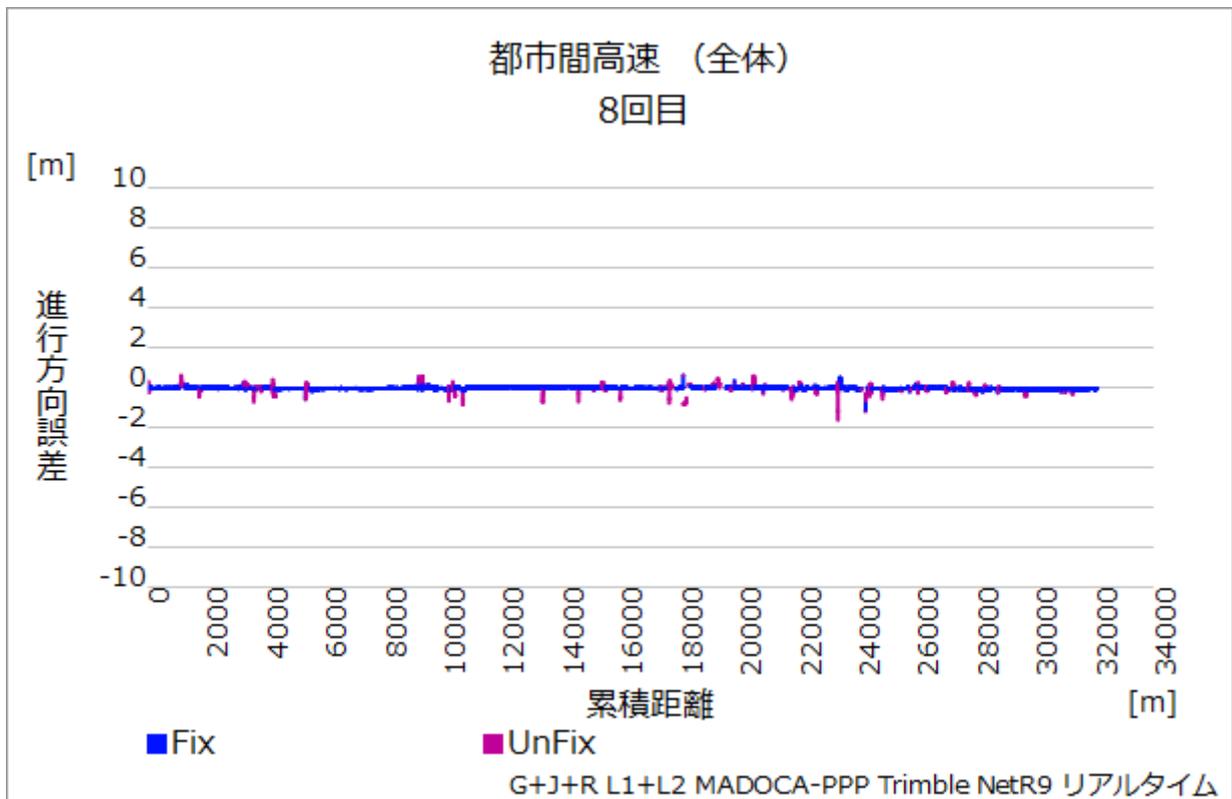


図 2.4.7-8 進行方向誤差の走行距離推移

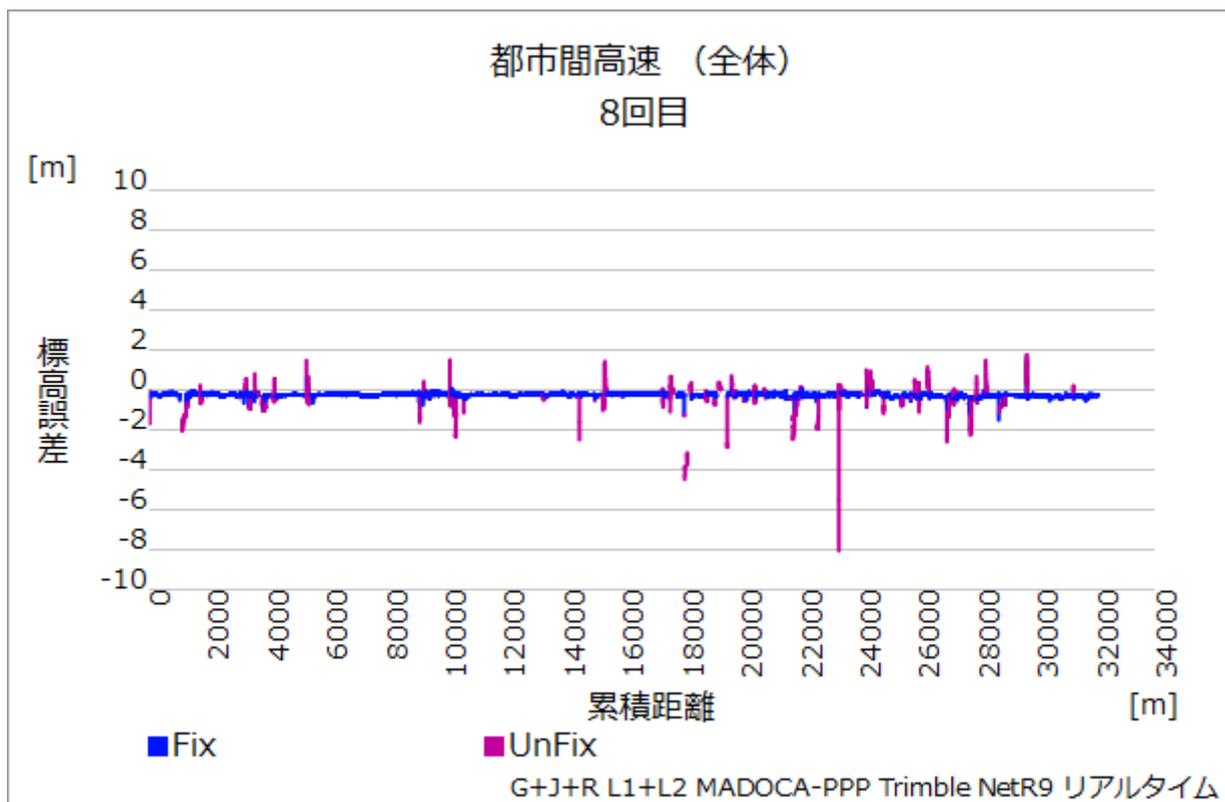


図 2.4.7-9 標高誤差の走行距離推移

左右、進行方向誤差に関しては、揺らぎは少なく安定しており、UnFix も誤差は小さい。標高誤差は左右、進行方向に比べて少し揺らぎが大きい。

以下、左右方向・進行方向誤差の分布図、走行経路上への誤差プロット図、及び左右方向・進行方向誤差の発生割合のヒストグラムを示す。

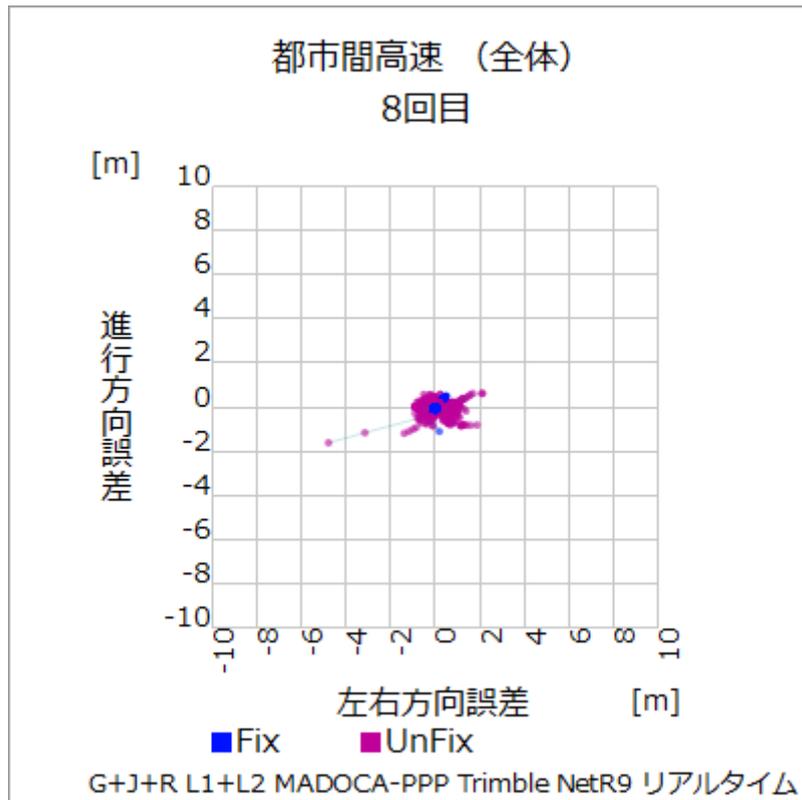


図 2.4.7-10 左右／進行方向誤差分布図

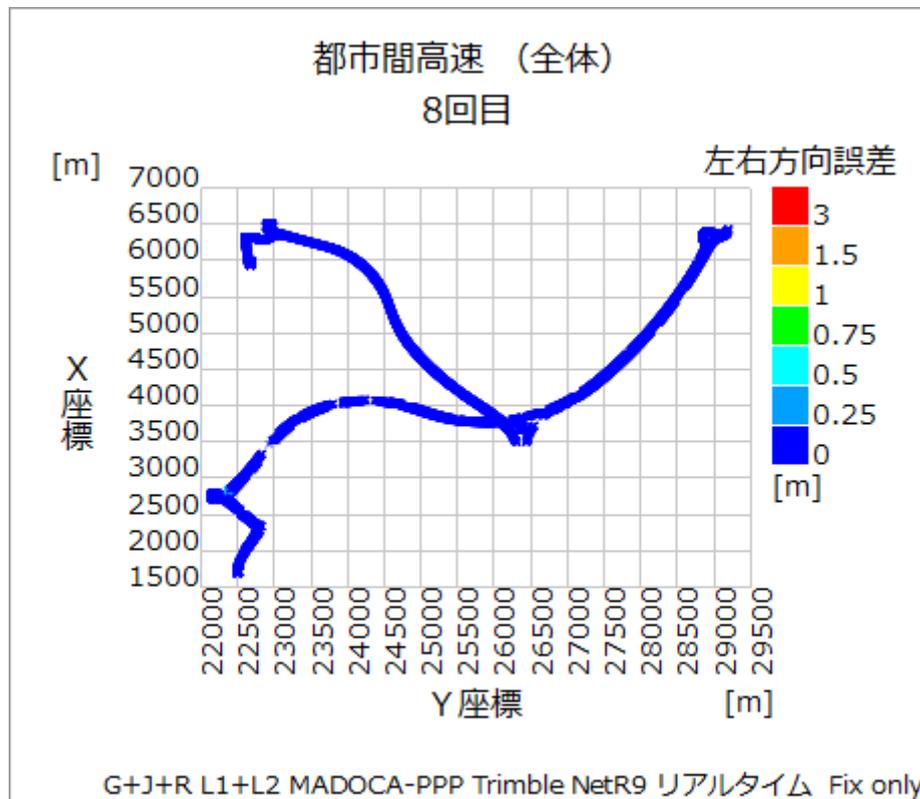


図 2.4.7-11 左右方向誤差プロット

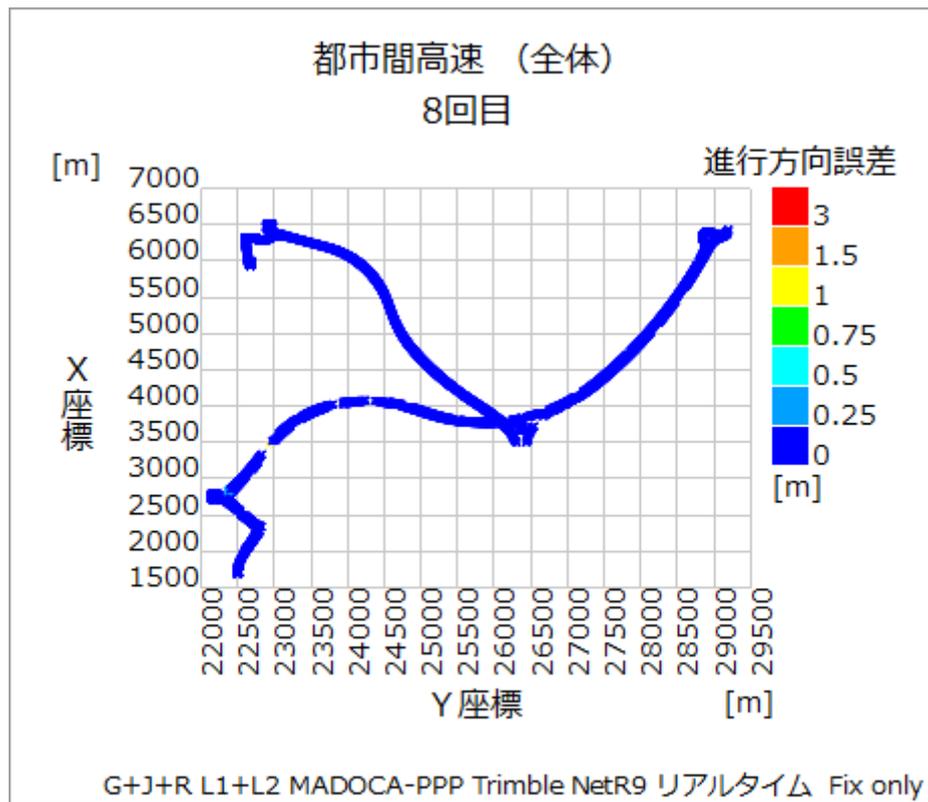


図 2.4.7-12 進行方向誤差プロット

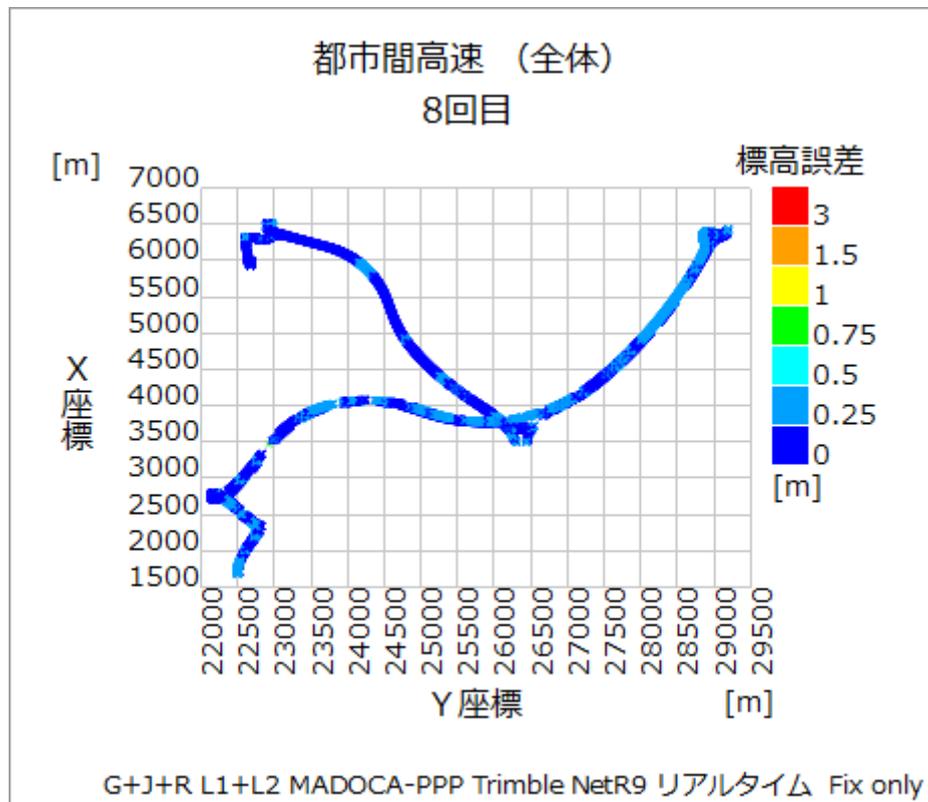


図 2.4.7-13 標高誤差プロット

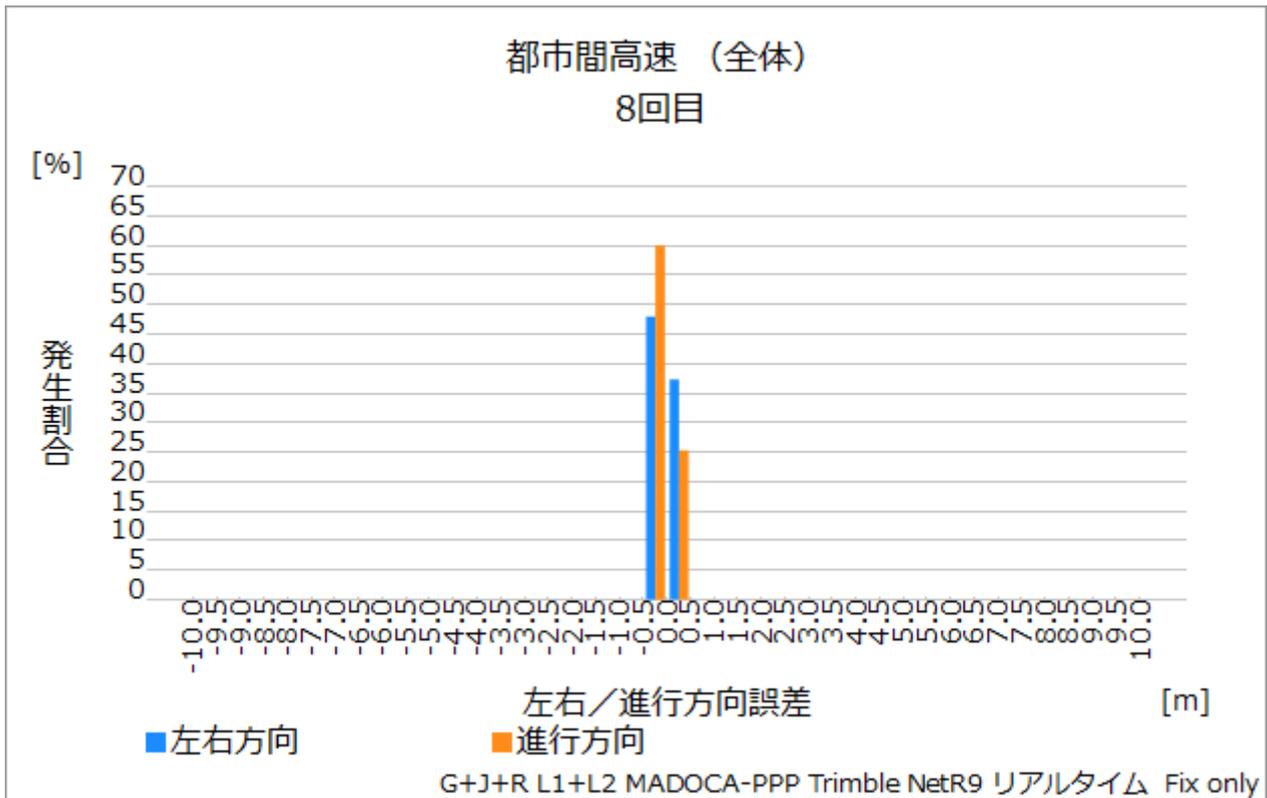


図 2.4.7-14 左右/進行方向誤差ヒストグラム

左右方向、進行方向ともに 85%以上のデータが 50cm 以内に入っており、分布図からも精度が高く安定していることが確認できる。標高誤差に関しては、全体的に 25cm 以上の誤差がある。MADOCA の測位精度（水平 RMS 6cm、垂直 RMS 12cm）には少し満たないが、近い精度であることが確認できた。

2.4.8. L1-SAIF

搬送波位相測位受信機の RAW データを用いて後処理による L1-SAIF の評価も行った。対象としたのは 12 月 21 日の 4 回の走行となる。同条件になるように同じ RAW データから後処理による 1 周波コード測位も計算し、比較評価を行っている。

表 2.4.8-1 測位率・精度

測位/補強方式	衛星システム	測位率	RMS[m]		
			左右方向誤差	進行方向誤差	標高誤差
コード測位	G	93.50%	1.388	1.387	2.716
	GR	92.36%	1.391	1.424	2.381
L1-SAIF	G	93.36%	0.362	0.577	1.145
	GR	93.75%	0.387	0.86	1.241

L1-SAIF を利用する事で、大きく測位精度が改善されていることがわかる。特に左右方向誤差に関しては RMS が 40cm を切る結果となっている。これは上空視界が比較的開けていることが大きく寄与してい

と思われる。

L1-SAIF を利用した測位の左右方向誤差が、車線認識の目安になる 1.5m 以下になった割合は GPS のみが 93.18%、GPS+GLONASS が 93.61% となった。これらの測位率は、それぞれ 93.36%、93.75% であり、測位できたデータの内での 1.5m 以内になる割合は、99.81%、99.85% であり、1.5m 以上の誤差の発生が非常に少なかったことがわかる。

コード測位の場合、この割合はそれぞれ 90.05%、83.62% であり 1 割またはそれ以上の計算結果が 1.5m 以上の誤差を生じている。

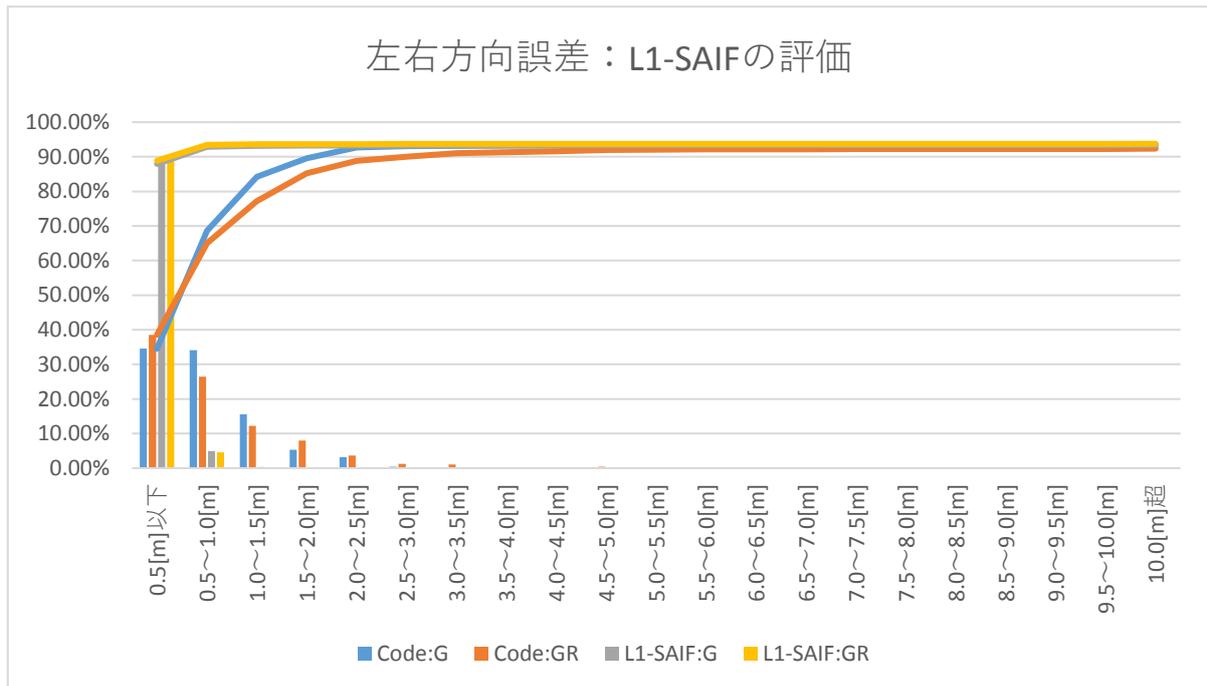


図 2.4.8-1 左右方向誤差 累積グラフ

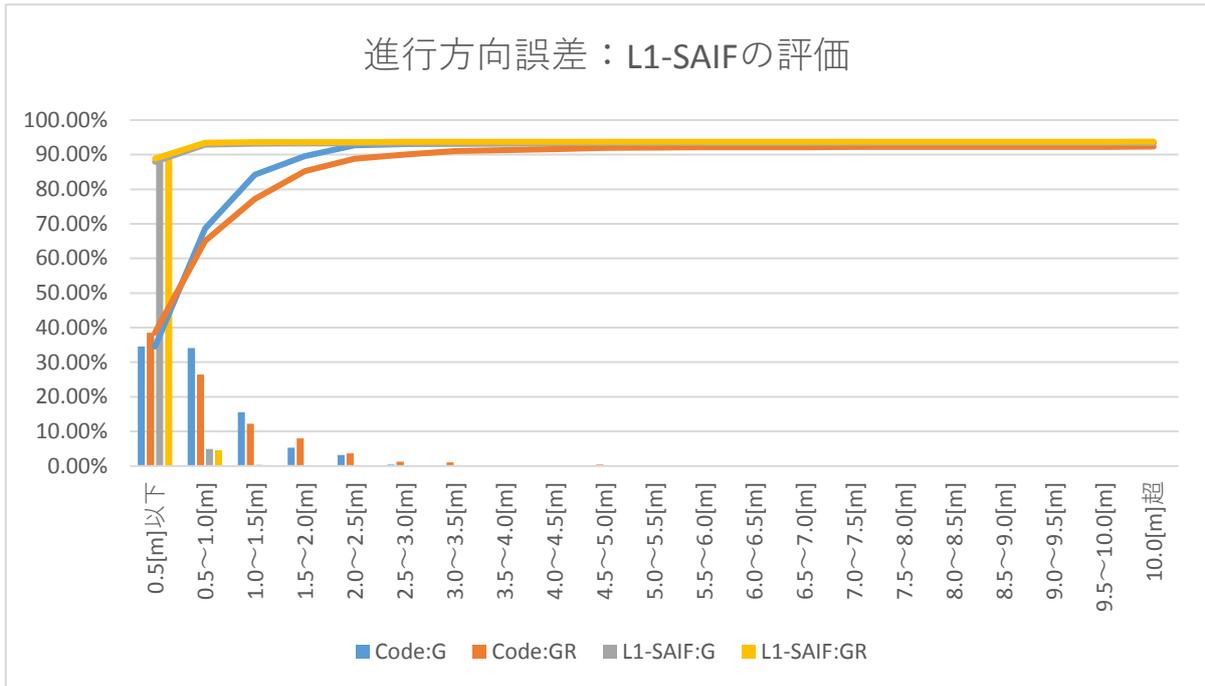


図 2.4.8-2 進行方向誤差 累積グラフ

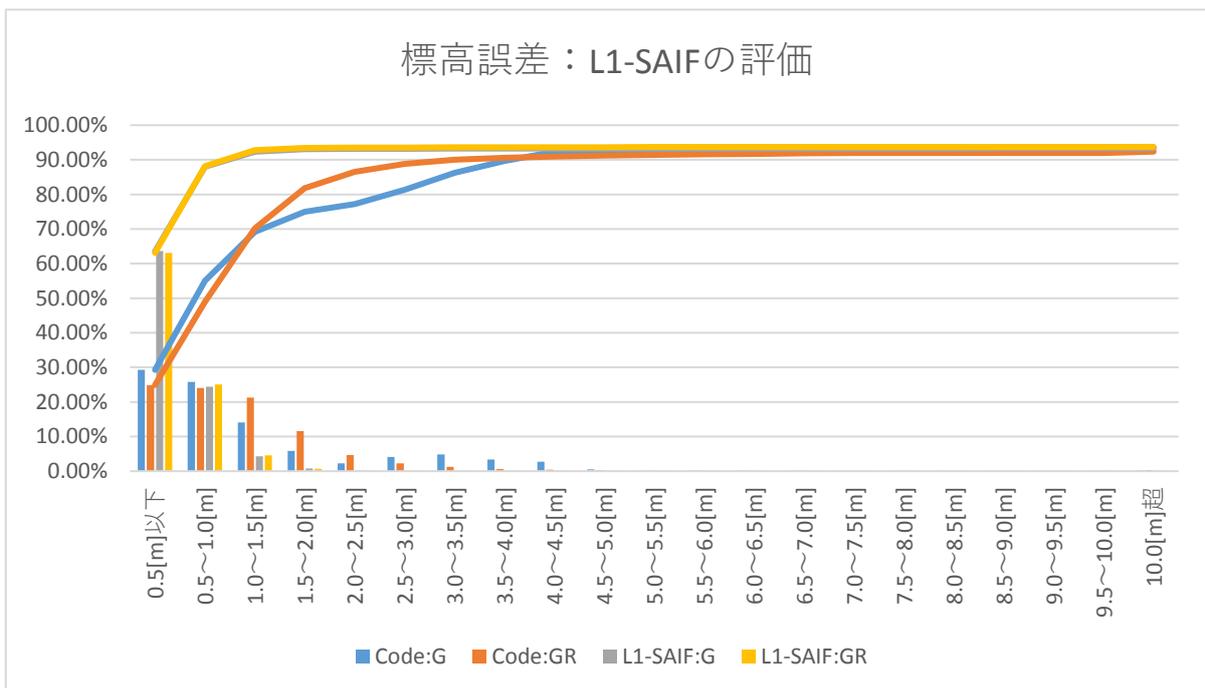


図 2.4.8-3 標高誤差 累積グラフ

進行方向誤差、標高に関しても同様に L1-SAIF の補強による測位精度の改善が確認できる。

2.5. 測位精度評価その 2：マルチ GNSS の評価

2.5.1. マルチ GNSS 概要

日本では地域的衛星測位システム（RNSS: Regional Navigation Satellite System）である QZSS に加えて、地球的衛星測位システム（GNSS: Global Navigation Satellite System）である米国の GPS、ロシアの GLONASS、中国の BeiDou が利用可能だった。2016 年 12 月より欧州の Galileo の初期サービスが開始され現在 4 つの GNSS と 1 つの RNSS、そして SBAS（MSAS）の利用が可能となっている。

これらの衛星測位システムを複数組み合わせることで利用すること（マルチ GNSS）により、利用衛星数が増え、測位可用性、精度の向上が期待されている。

本調査では、衛星測位システム毎のマルチ GNSS の影響を明確化するために、Trimble 社の NetR9 で取得した RAW データを利用し、後処理により測位計算を行い評価している。

評価対象としたマルチ GNSS の衛星測位の組み合わせは以下の 9 種類となる。都市間高速全体を同じ受信機からの RAW データを利用して、後処理により測位計算を行い評価している。

表 2.5.1-1 マルチ GNSS 評価の組み合わせ（RTK）

No.	名称	GPS	QZSS	GLONASS	BeiDou	Galileo
1	G	○				
2	GJ	○	○			
3	GR	○		○		
4	GC	○			○	
5	GE	○				○
6	GJR	○	○	○		
7	GJC	○	○		○	
8	GJCE	○	○		○	○
9	GJRCE	○	○	○	○	○

2.5.2. 1 周波コード測位

1 周波コード測位によるマルチ GNSS の評価は、GPS、QZSS、GLONASS のみで実施した。

表 2.5.2-1 測位率・測位精度

	測位率	左右方向誤差		進行方向誤差		標高誤差	
		RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]	RMS[m]	95.45%[m]
G	91.00%	1.169	1.683	1.197	1.719	2.355	2.964
GJ	91.01%	1.148	1.653	1.187	1.716	2.460	3.162
GJR	91.01%	1.159	1.675	1.197	1.724	2.493	3.392

GPS のみで測位性能が高かったせいか、マルチ GNSS による著しい効果は確認できなかった。

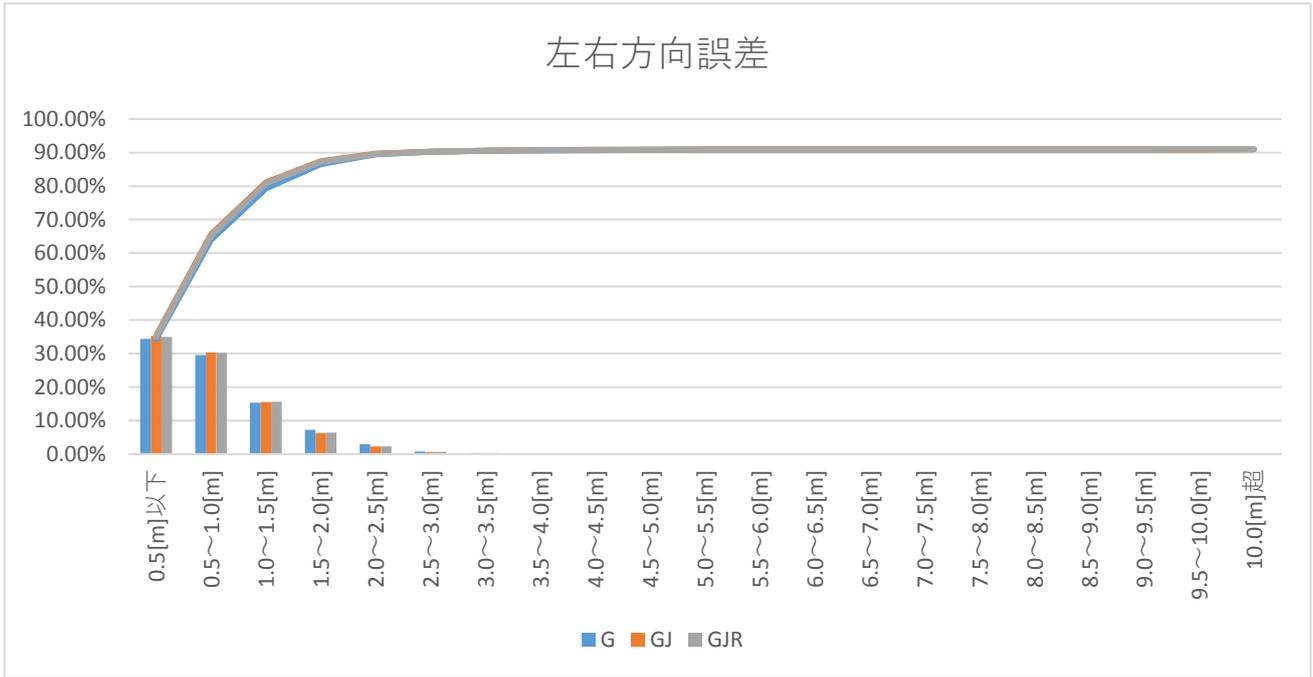


図 2.5.2-1 左右方向誤差 累積グラフ

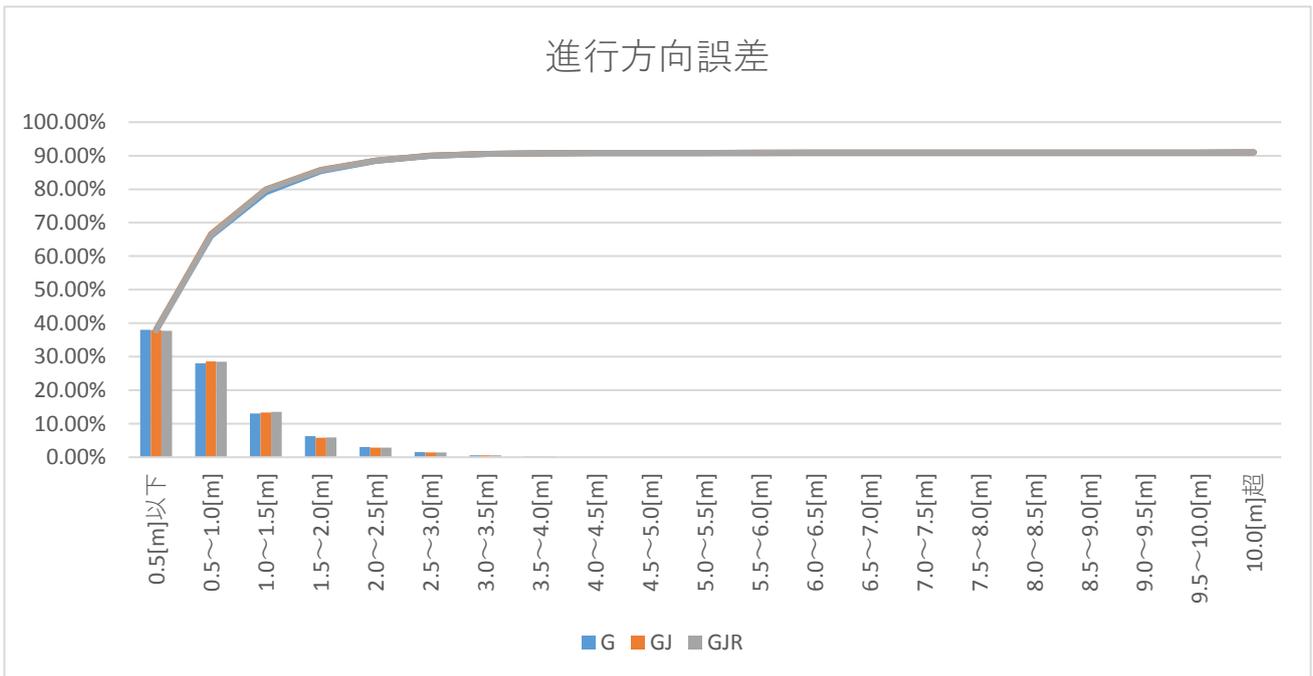


図 2.5.2-2 進行方向誤差 累積グラフ

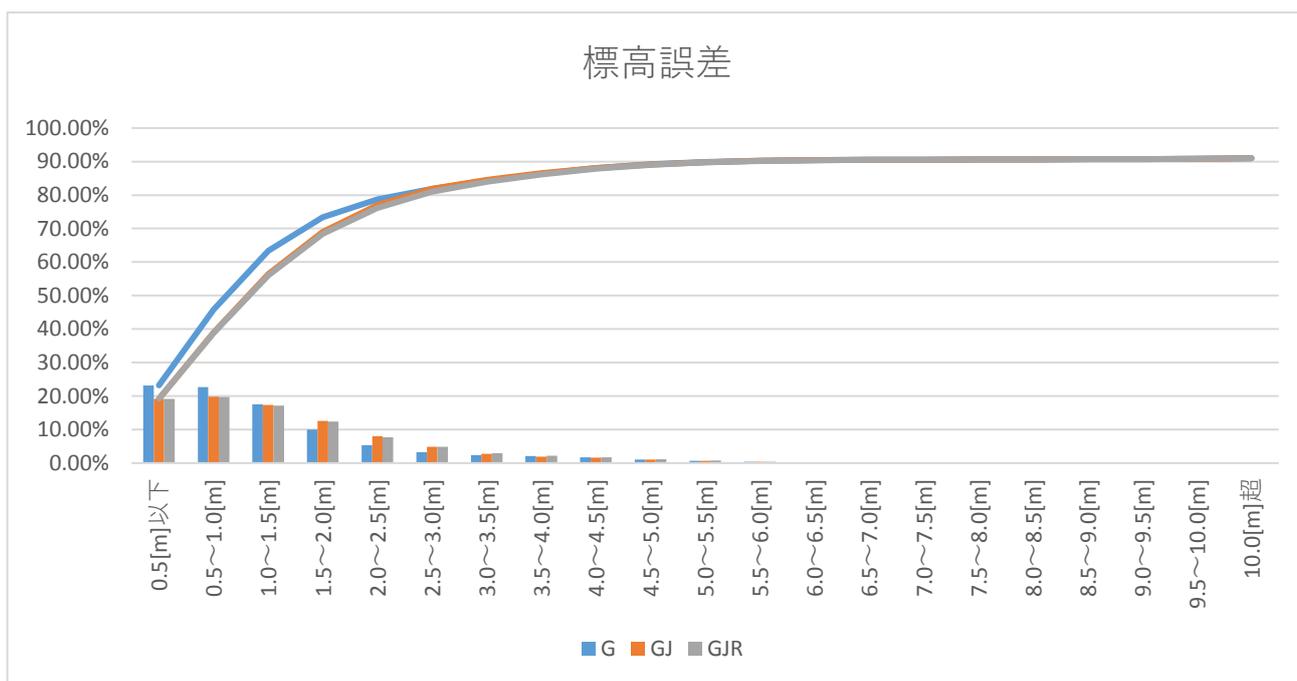


図 2.5.2-3 標高誤差 累積グラフ

2.5.3. RTK

次に後処理による RTK 測位の結果を示す。

表 2.5.3-1 マルチ GNSS による測位率、測位精度 (RTK)

	測位率	Fix 率	0.5[m]以下	1.0[m]以下	1.5[m]以下
G	97.38%	82.69%	90.50%	94.53%	95.83%
GJ	97.51%	82.71%	90.62%	94.84%	96.08%
GR	97.49%	86.61%	92.41%	95.00%	96.05%
GC	97.79%	84.98%	93.14%	95.08%	95.87%
GE	97.53%	84.93%	92.11%	95.11%	96.06%
GJR	97.62%	86.41%	92.57%	95.24%	96.23%
GJC	97.85%	84.98%	93.17%	95.22%	96.01%
GJCE	97.91%	85.29%	93.66%	95.47%	96.11%
GJRCE	97.94%	80.08%	93.26%	95.30%	95.93%

比較的上空視界の良好な環境下での走行実験だったため、どの組み合わせでも測位率は 97%台、水平距離誤差 0.5m 以下は 90%台前半であり衛星測位システムの組み合わせによる測位率、測位精度とも著しい差はなかった。

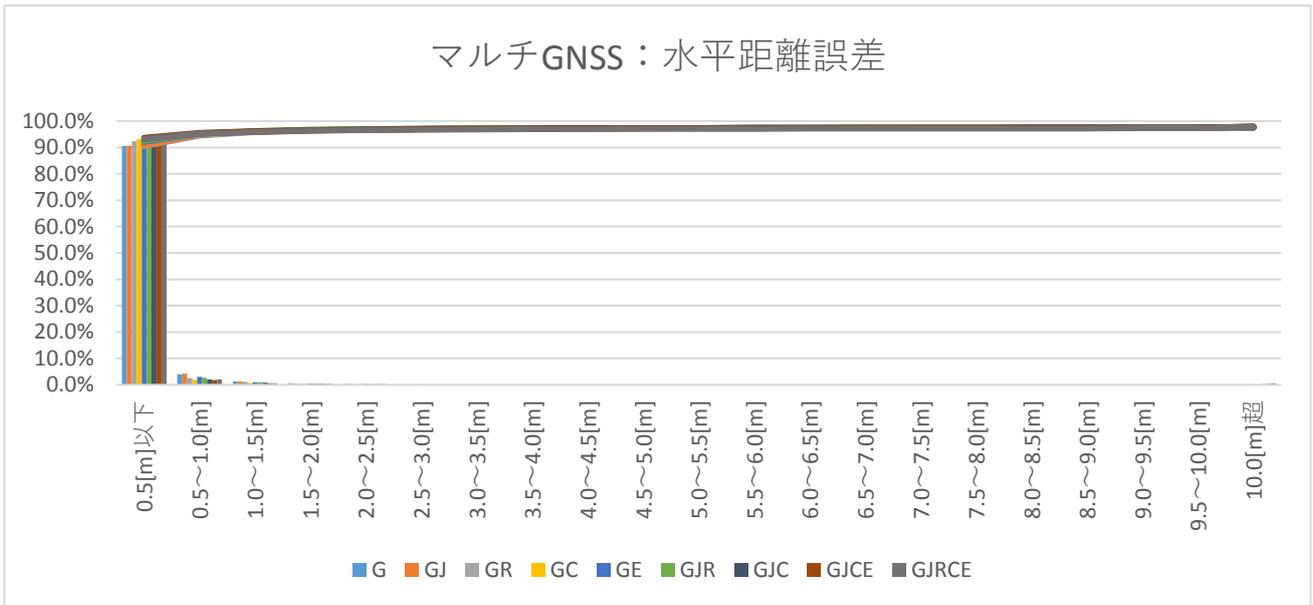


図 2.5.3-1 マルチ GNSS : 水平距離誤差 (RTK)

左右方向誤差、進行方向誤差、標高誤差に関して測位衛星システム組み合わせ毎の発生頻度を示す。

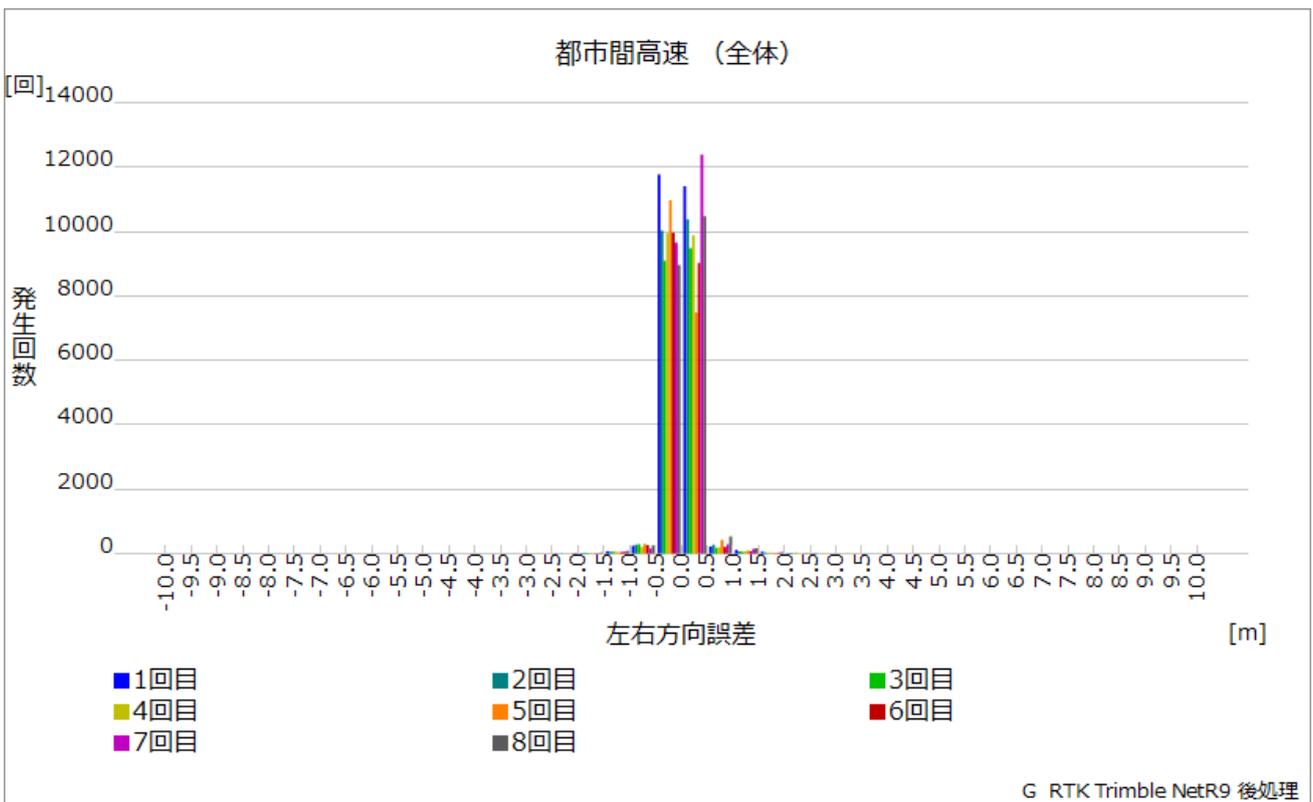


図 2.5.3-2 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：G (RTK)

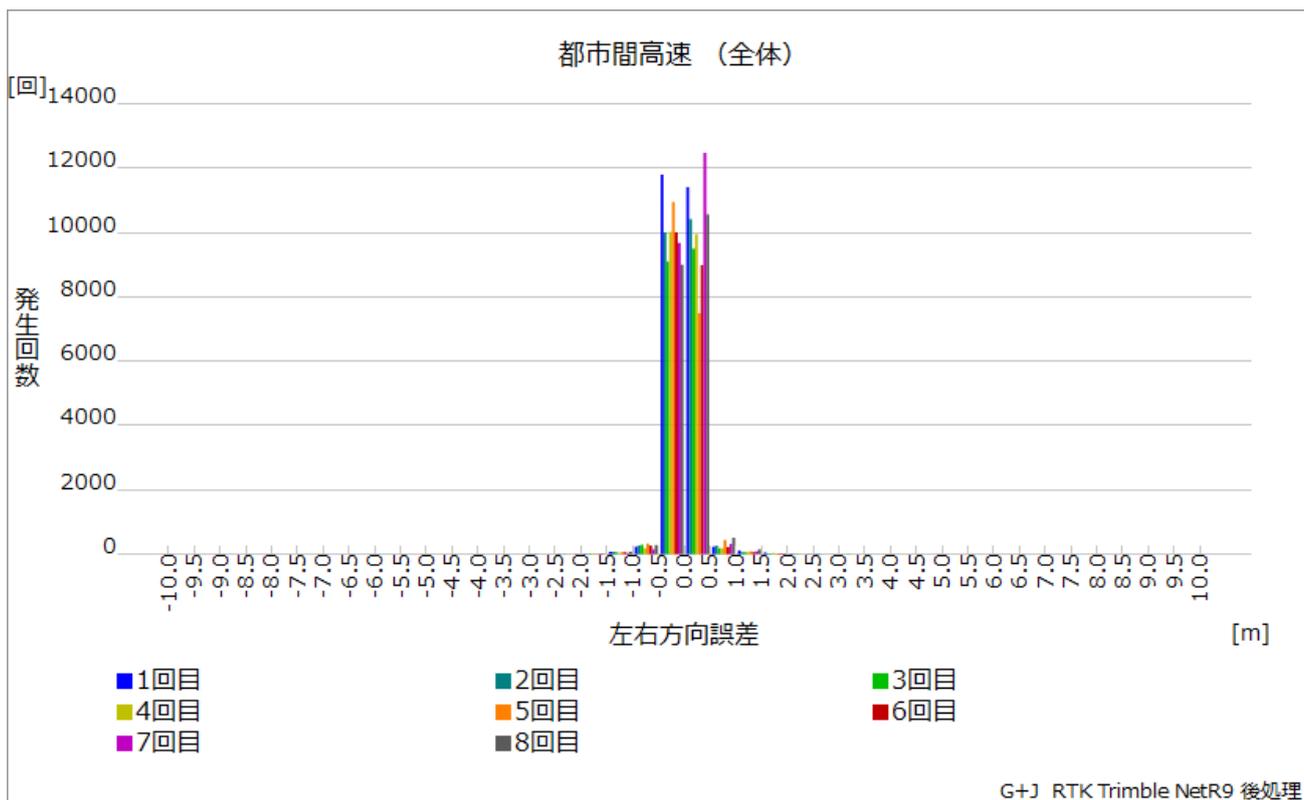


図 2.5.3-3 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GJ (RTK)

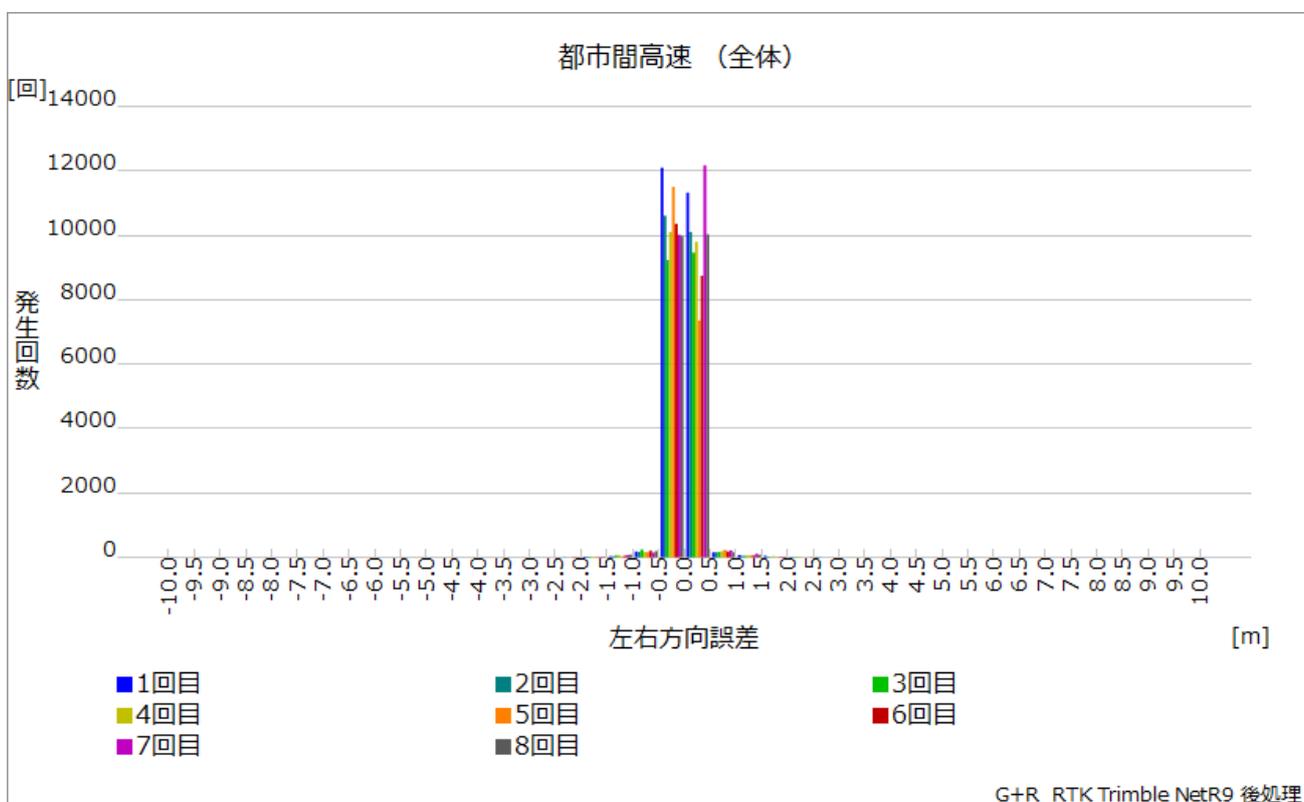


図 2.5.3-4 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GR (RTK)

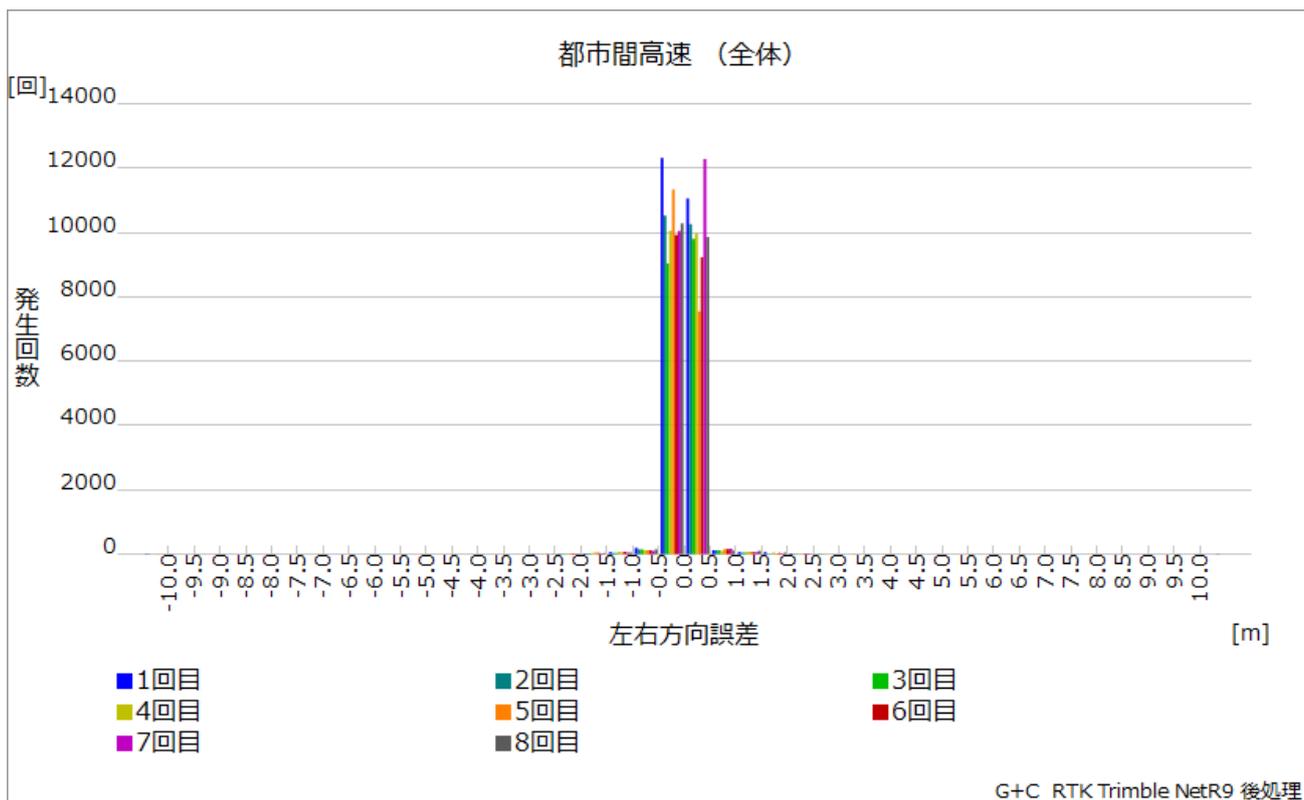


図 2.5.3-5 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GC（RTK）

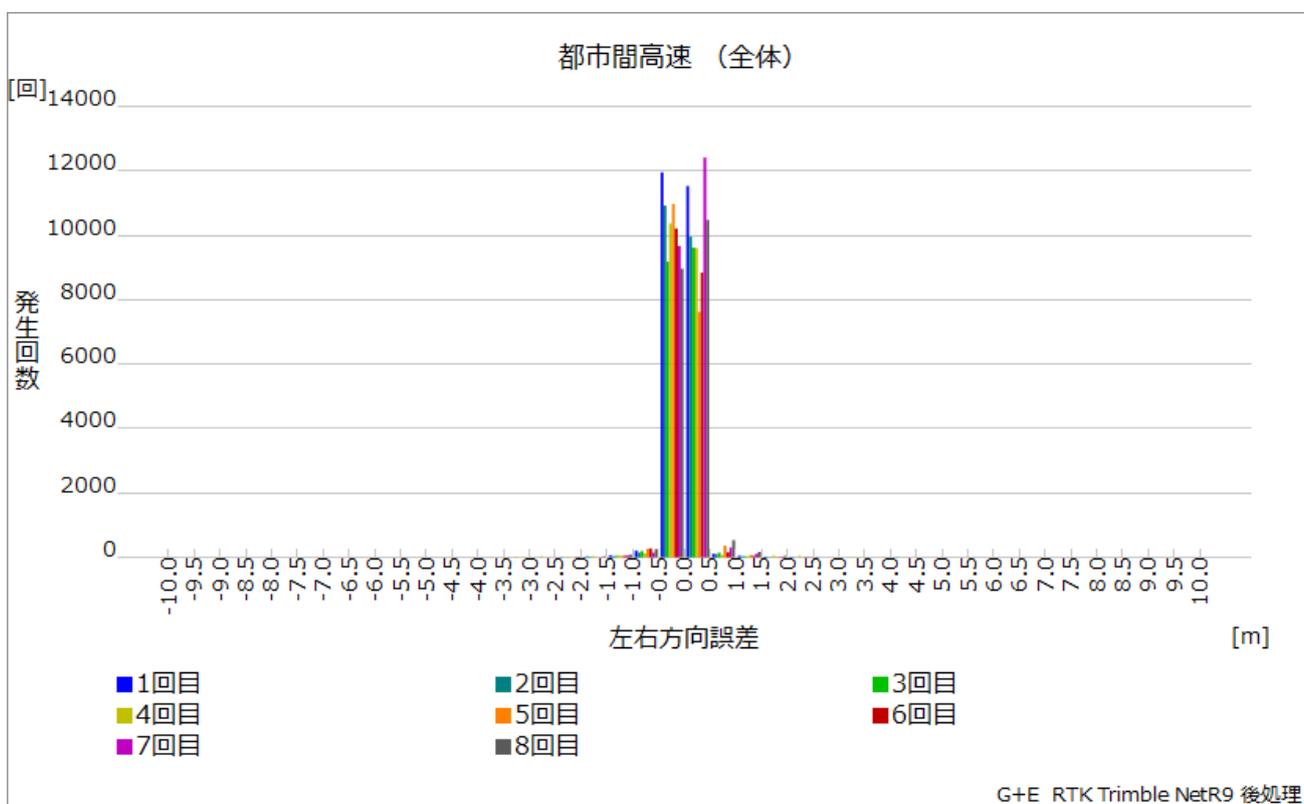


図 2.5.3-6 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GE（RTK）

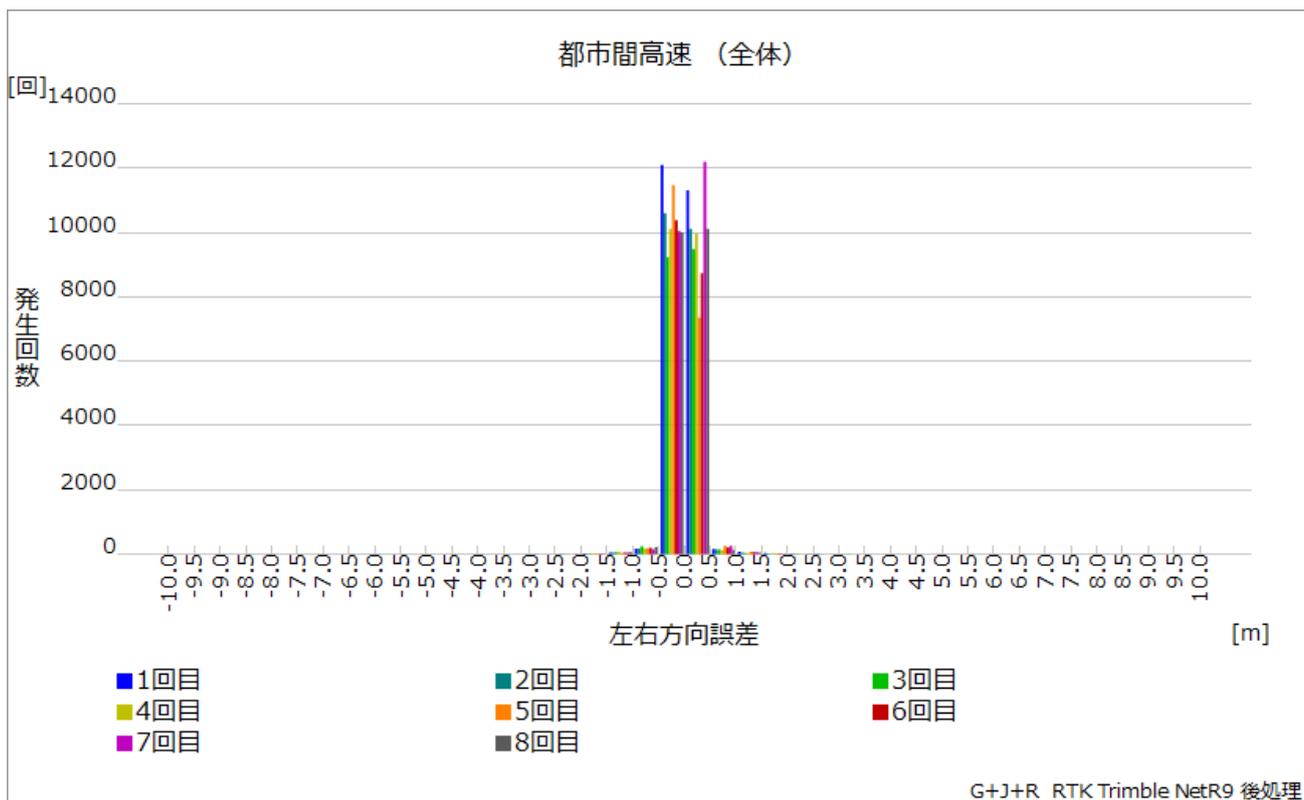


図 2.5.3-7 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GJR (RTK)

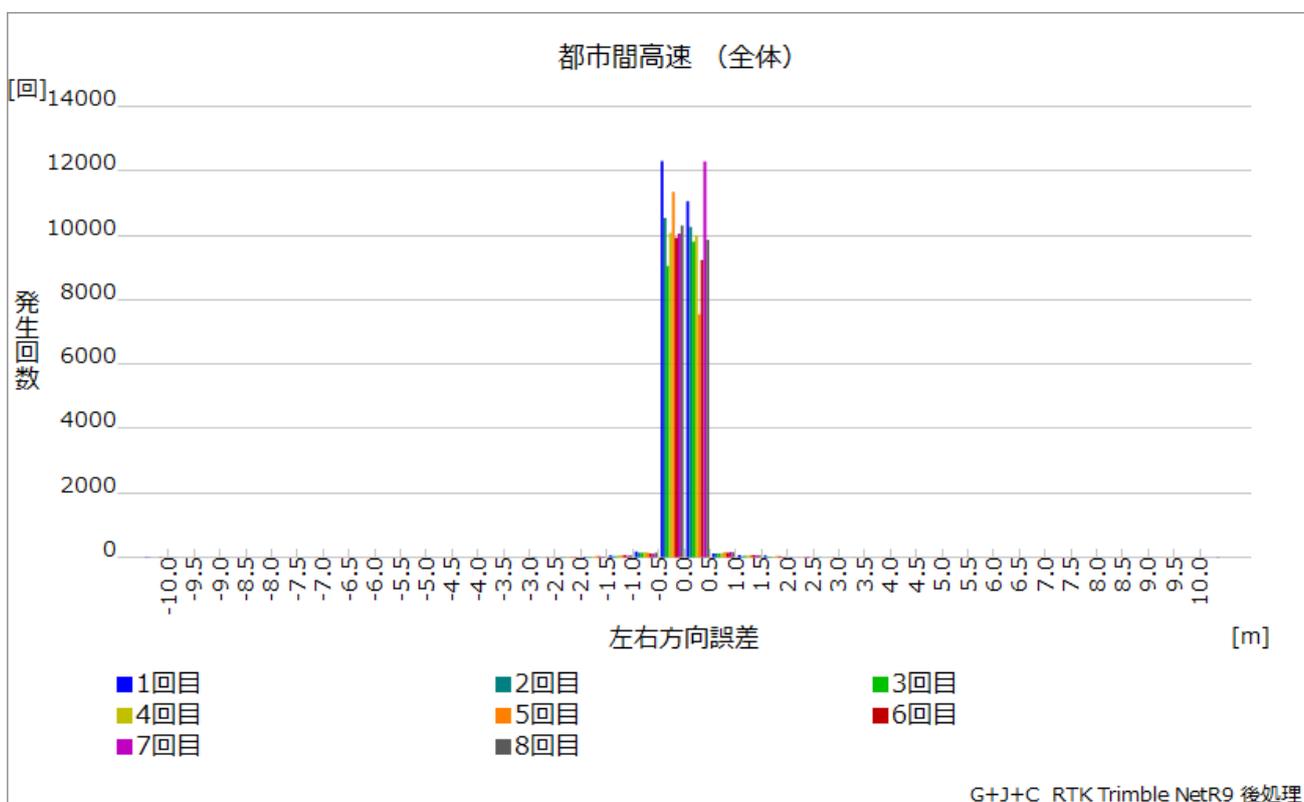


図 2.5.3-8 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GJC (RTK)

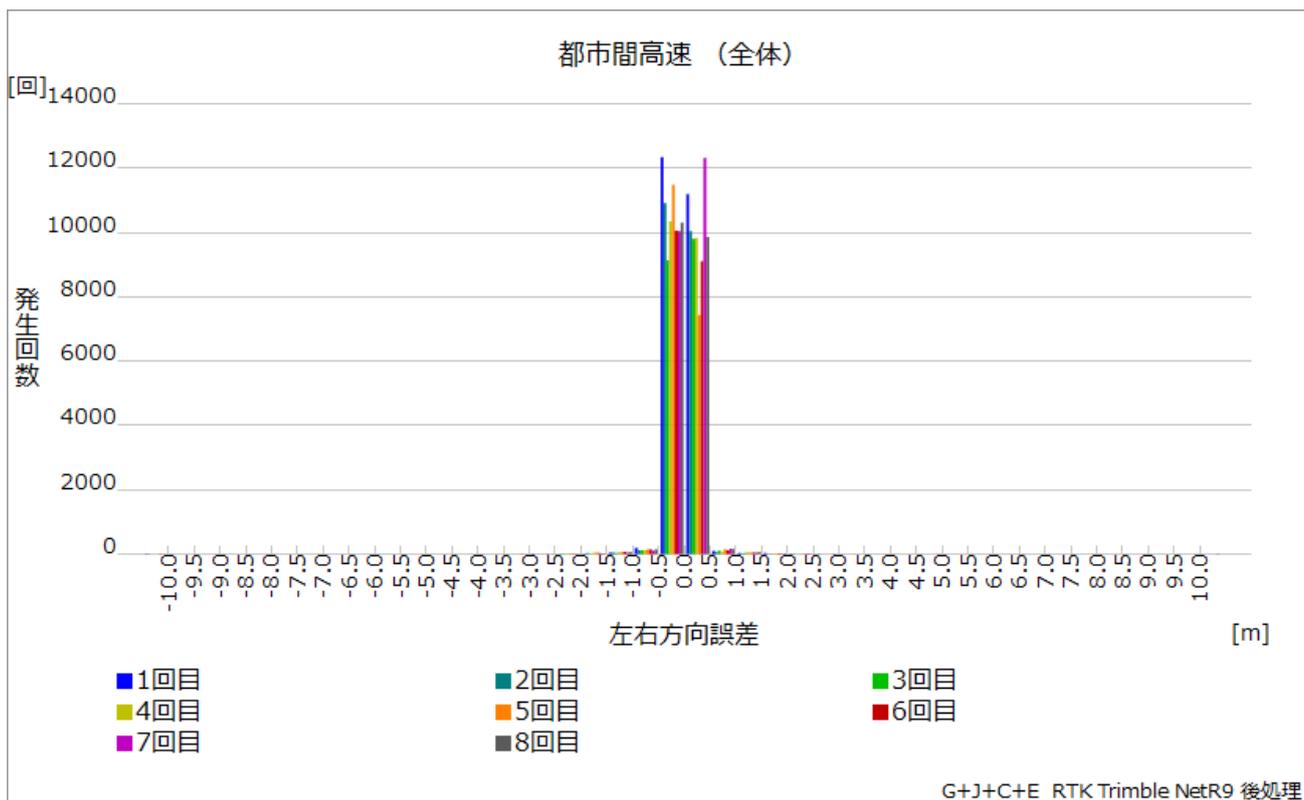


図 2.5.3-9 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GJCE (RTK)

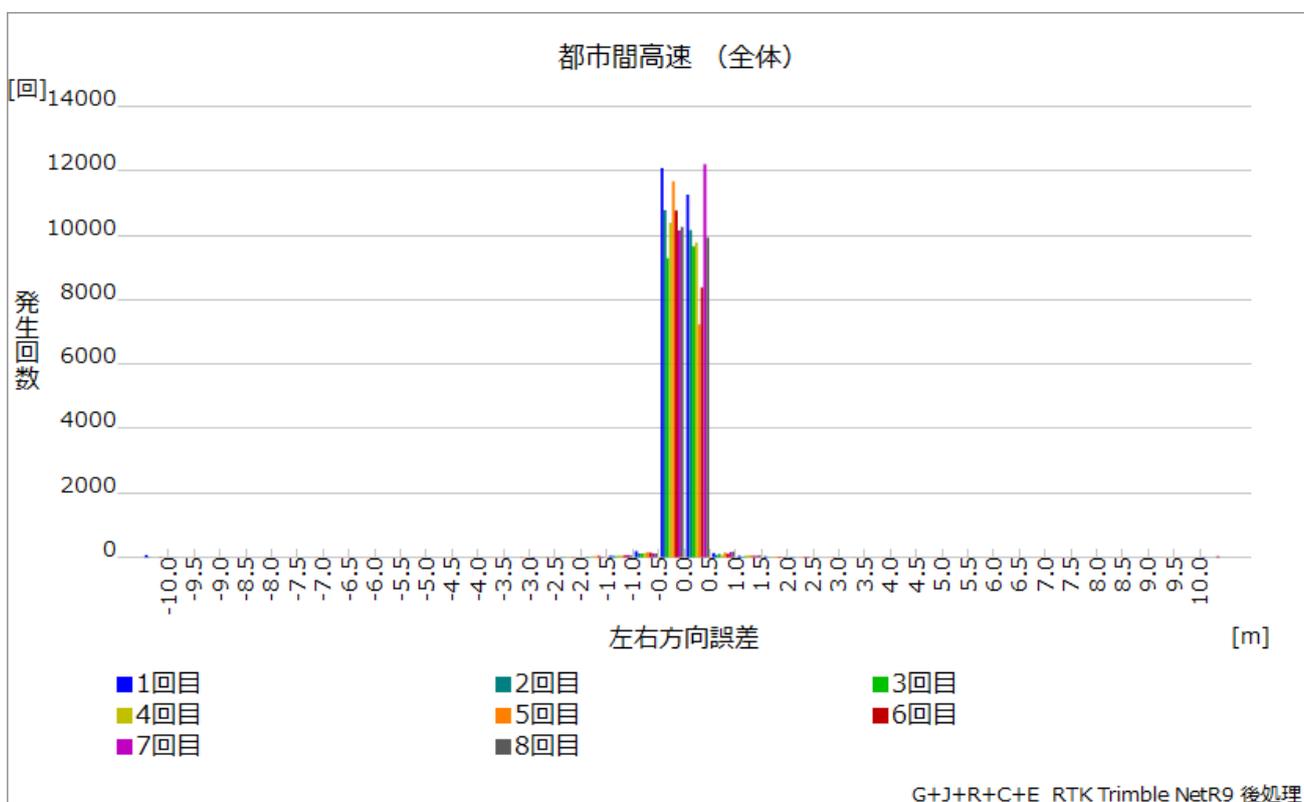


図 2.5.3-10 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム左右方向誤差：GJRCE (RTK)

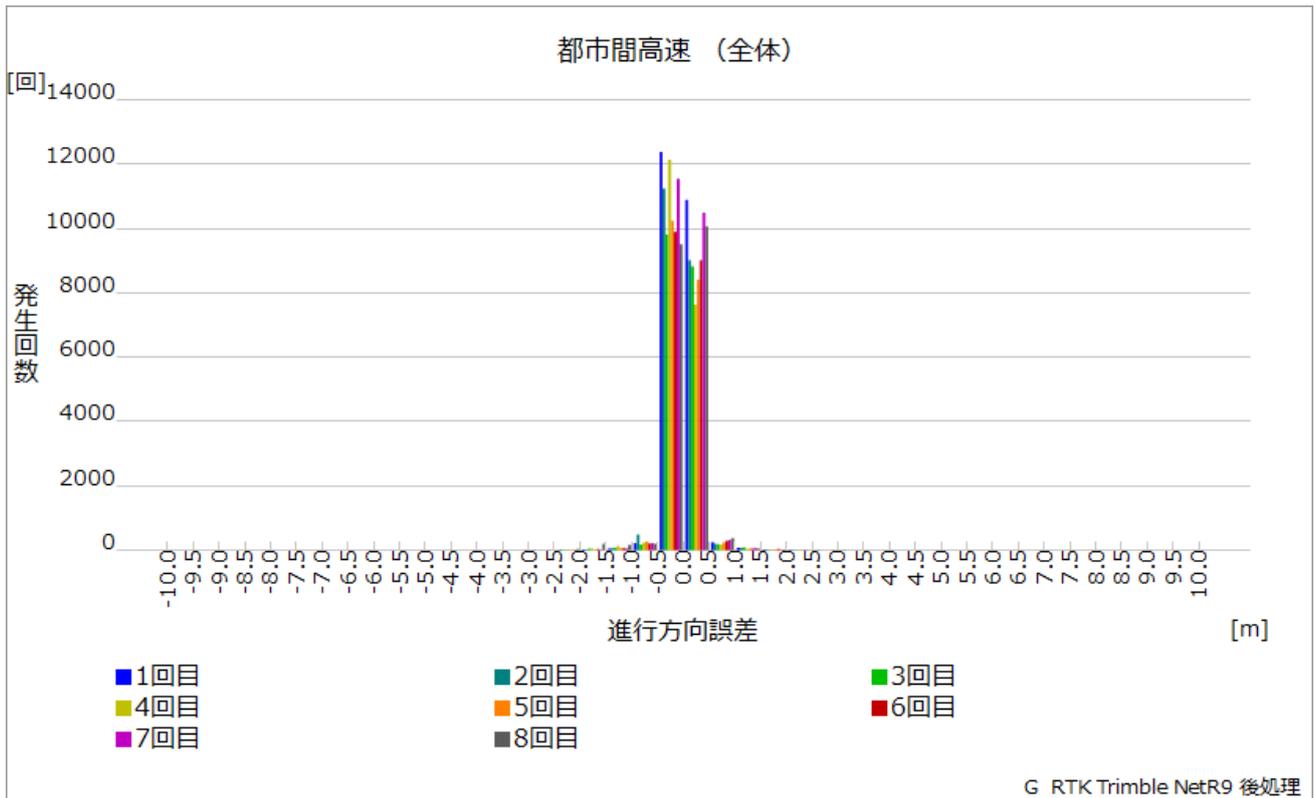


図 2.5.3-11 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進行方向誤差：G（RTK）

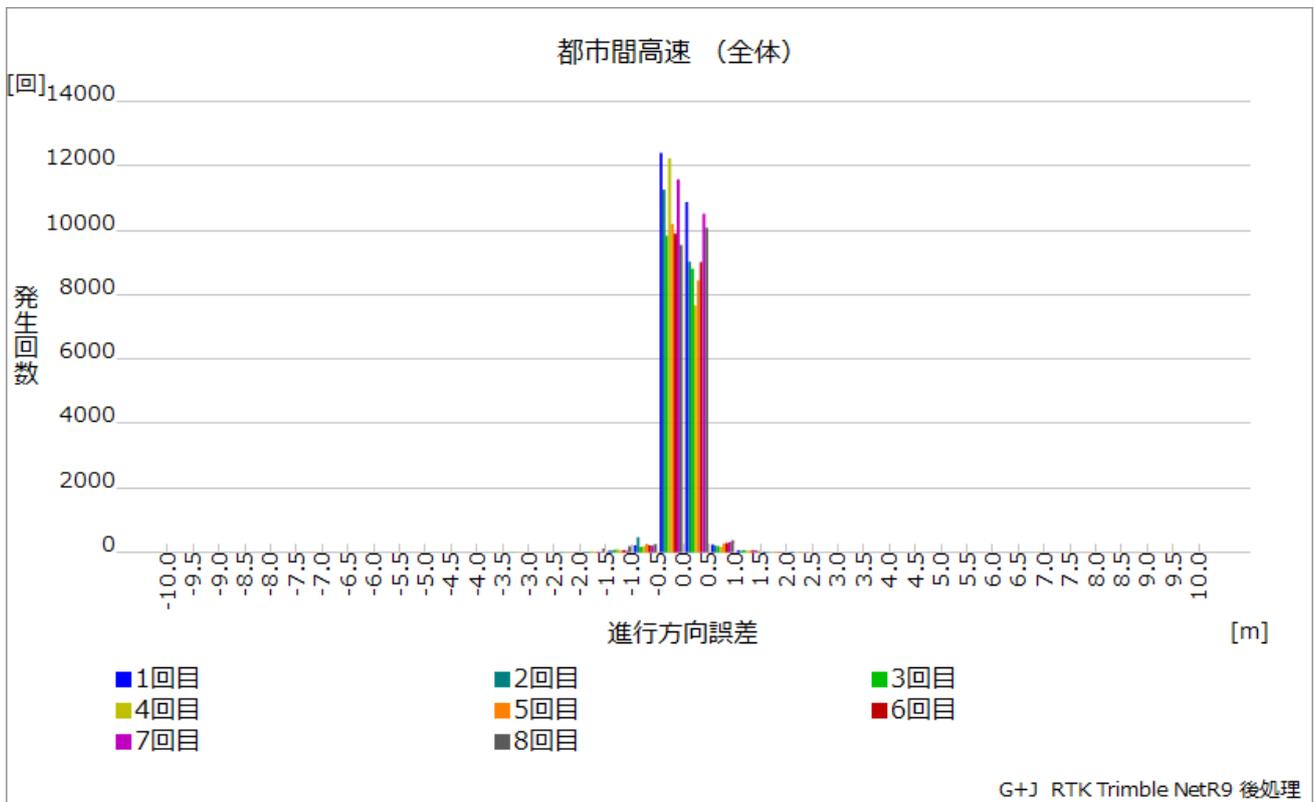


図 2.5.3-12 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GJ（RTK）

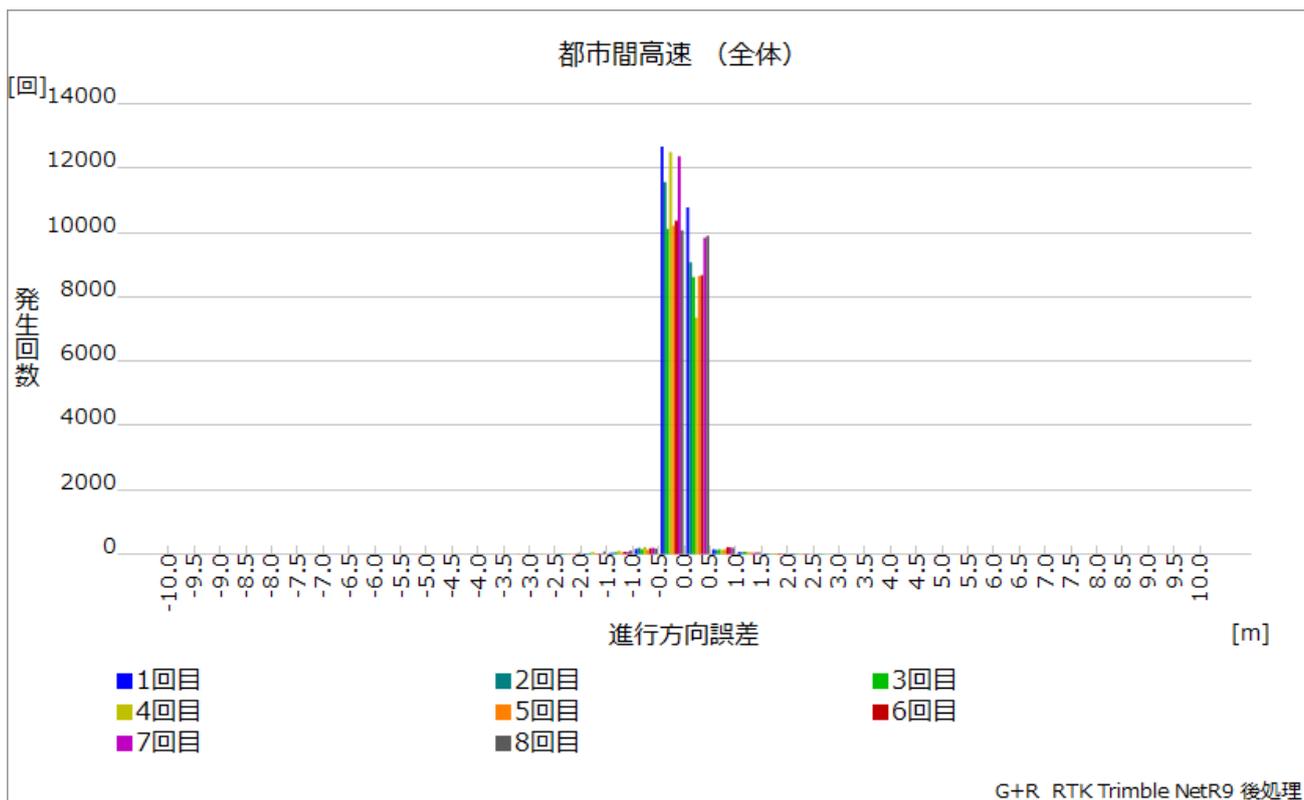


図 2.5.3-13 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GR (RTK)

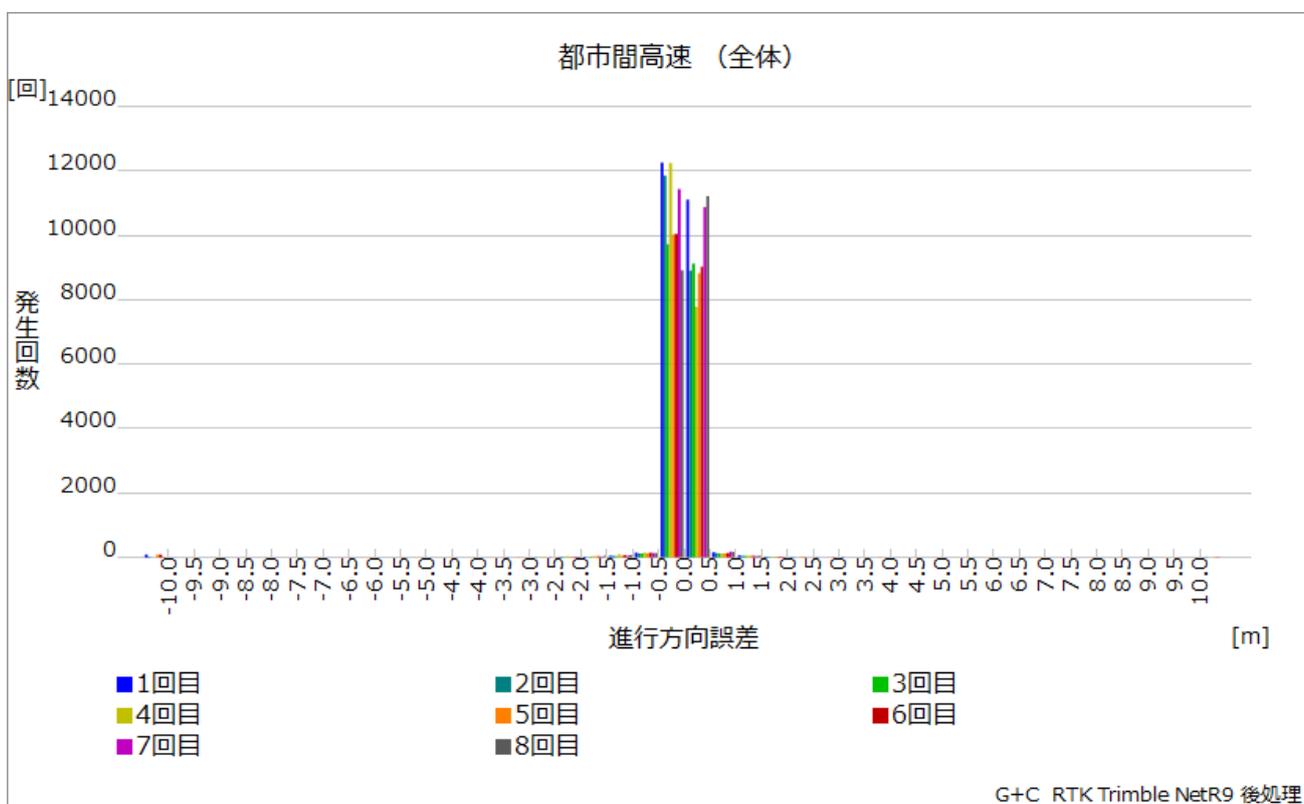


図 2.5.3-14 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GC (RTK)

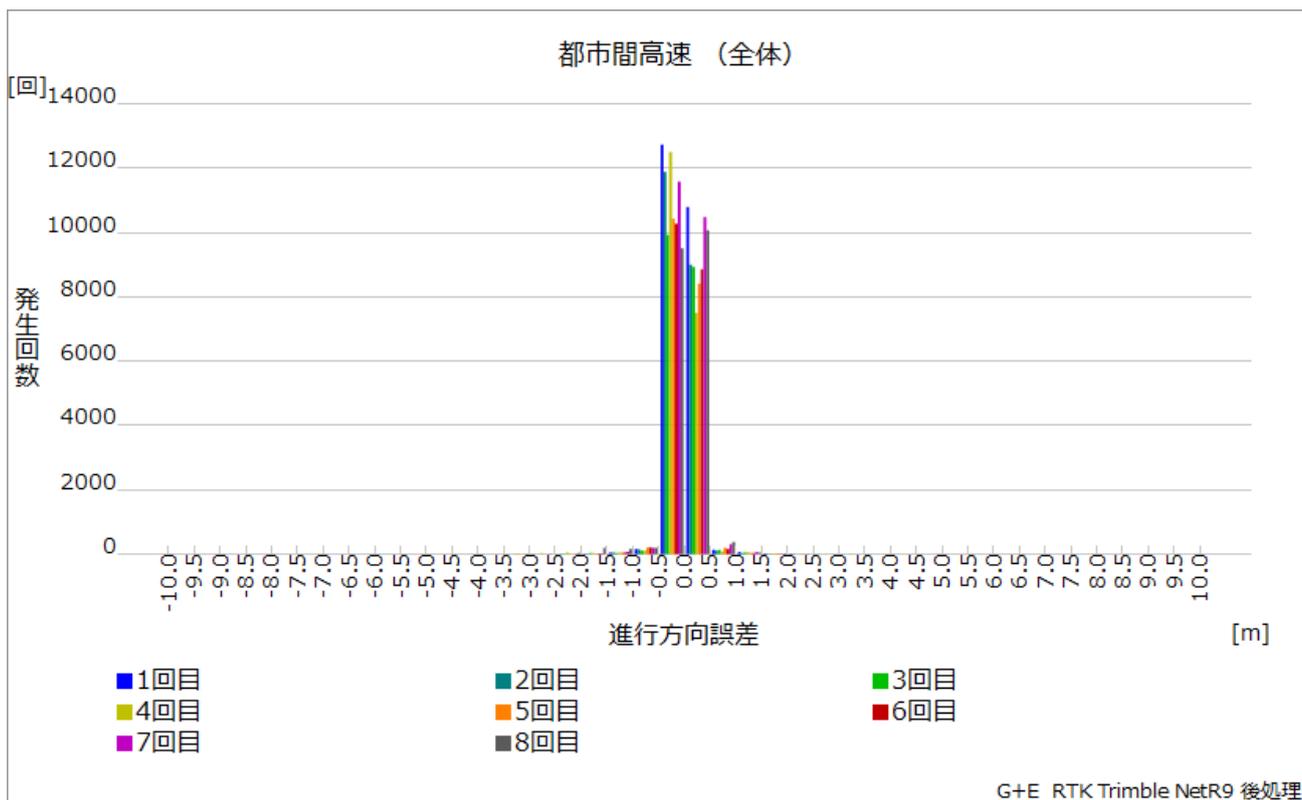


図 2.5.3-15 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GE (RTK)

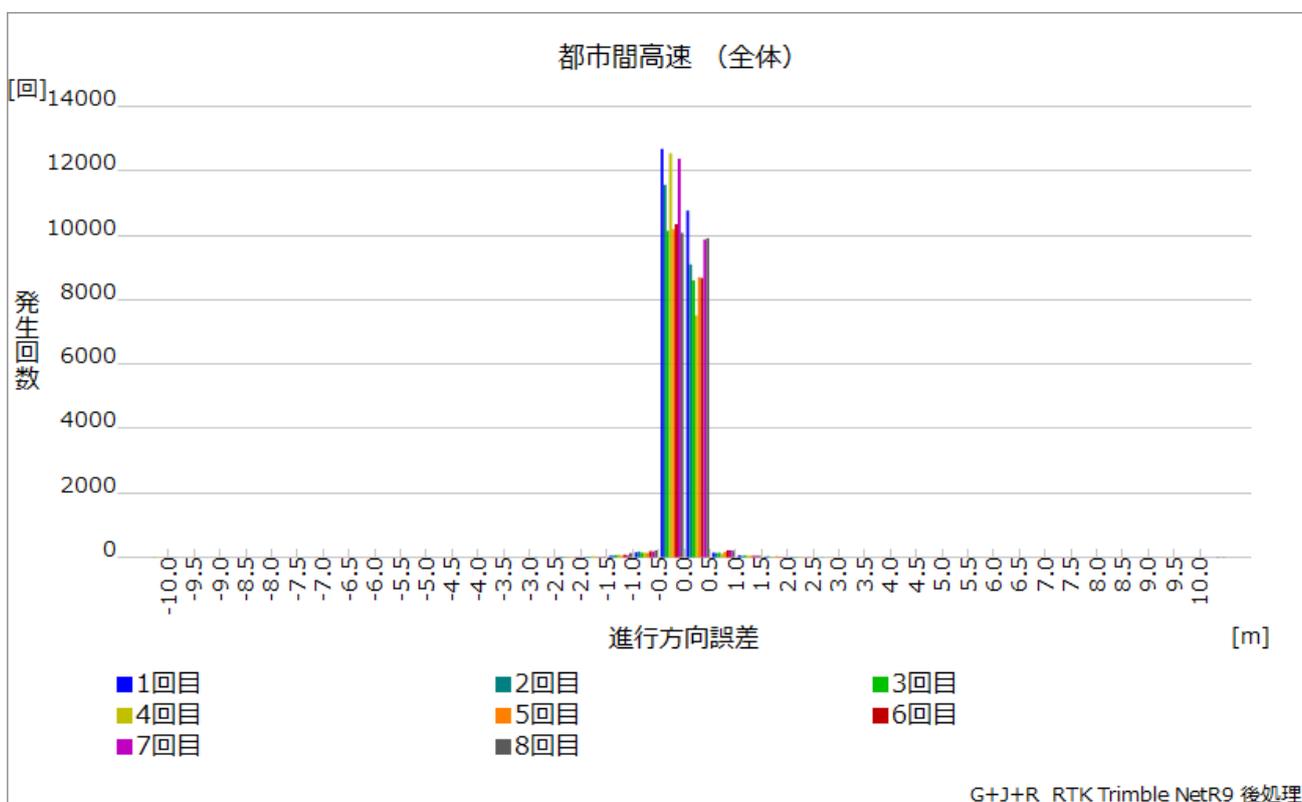


図 2.5.3-16 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GJR (RTK)

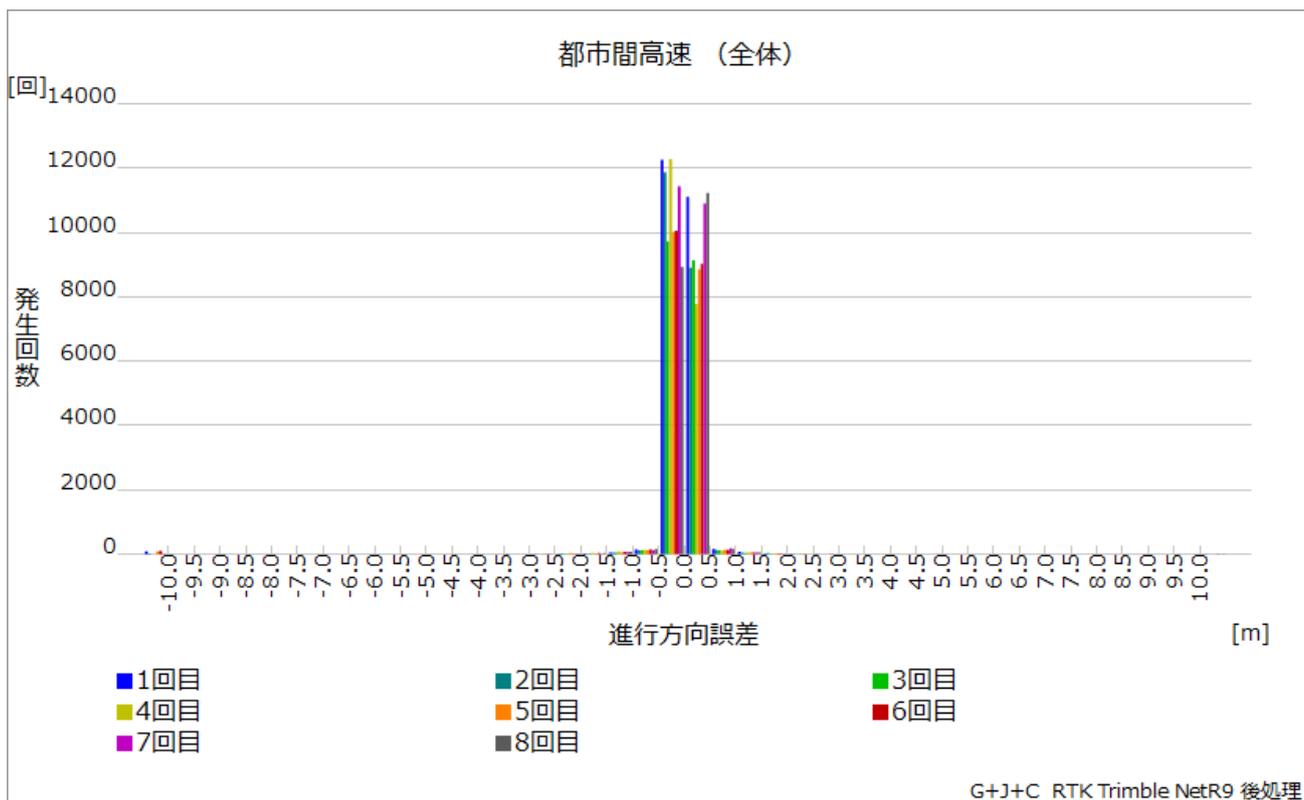


図 2.5.3-17 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GJC (RTK)

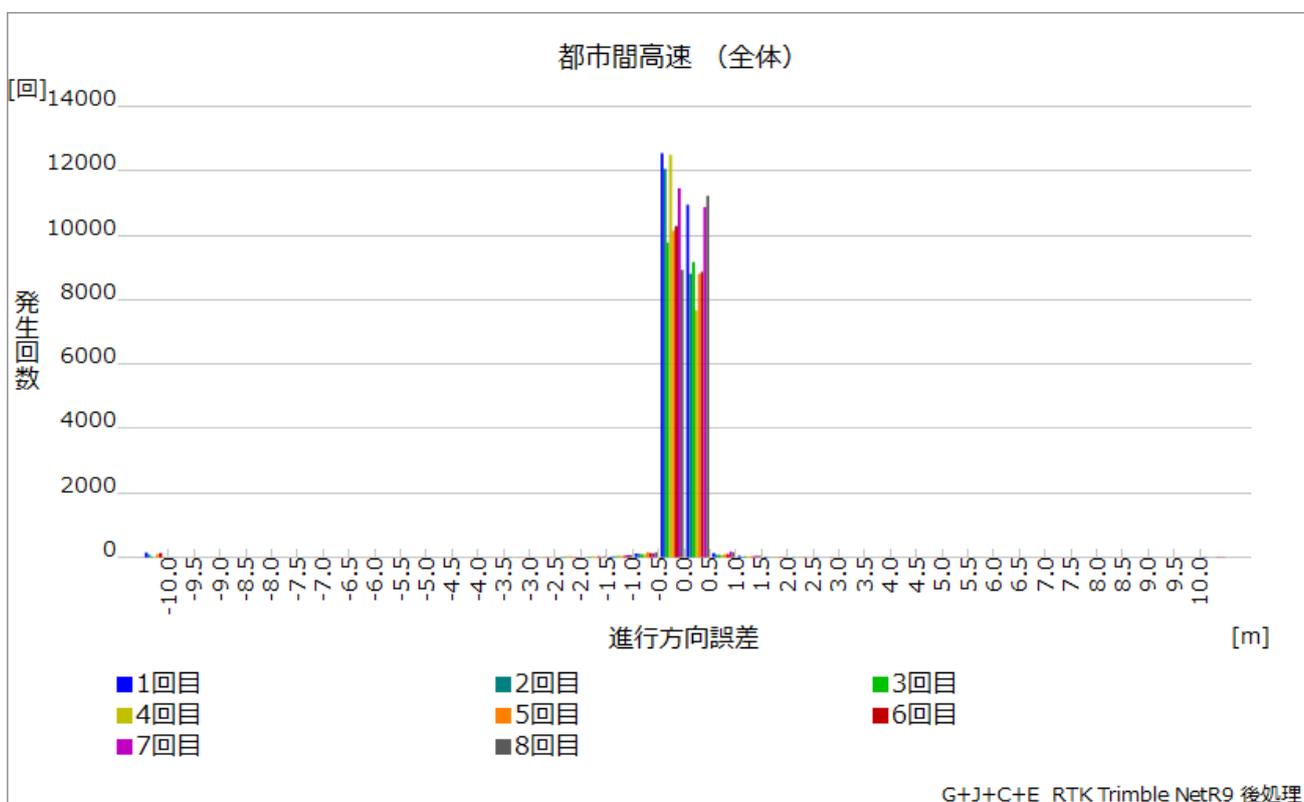


図 2.5.3-18 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GJCE (RTK)

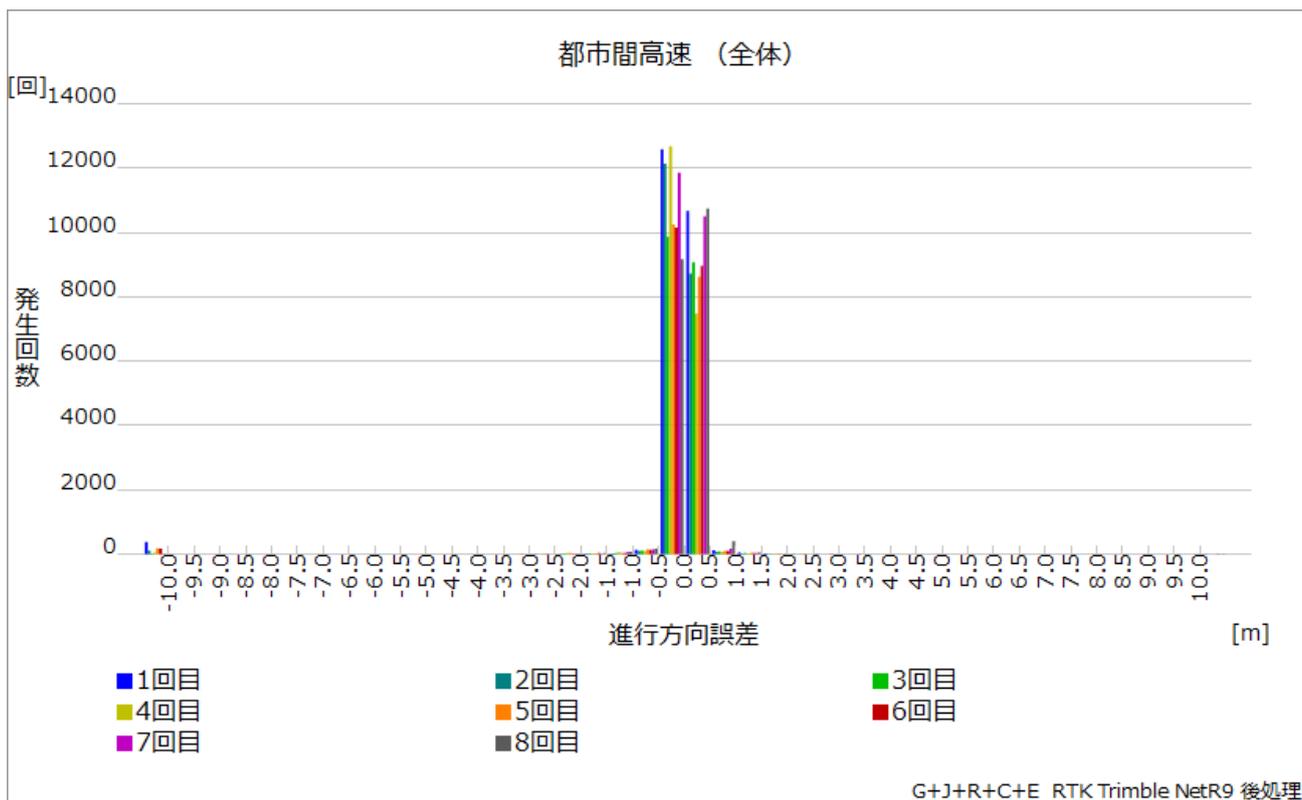


図 2.5.3-19 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム進捗方向誤差：GJRCE (RTK)

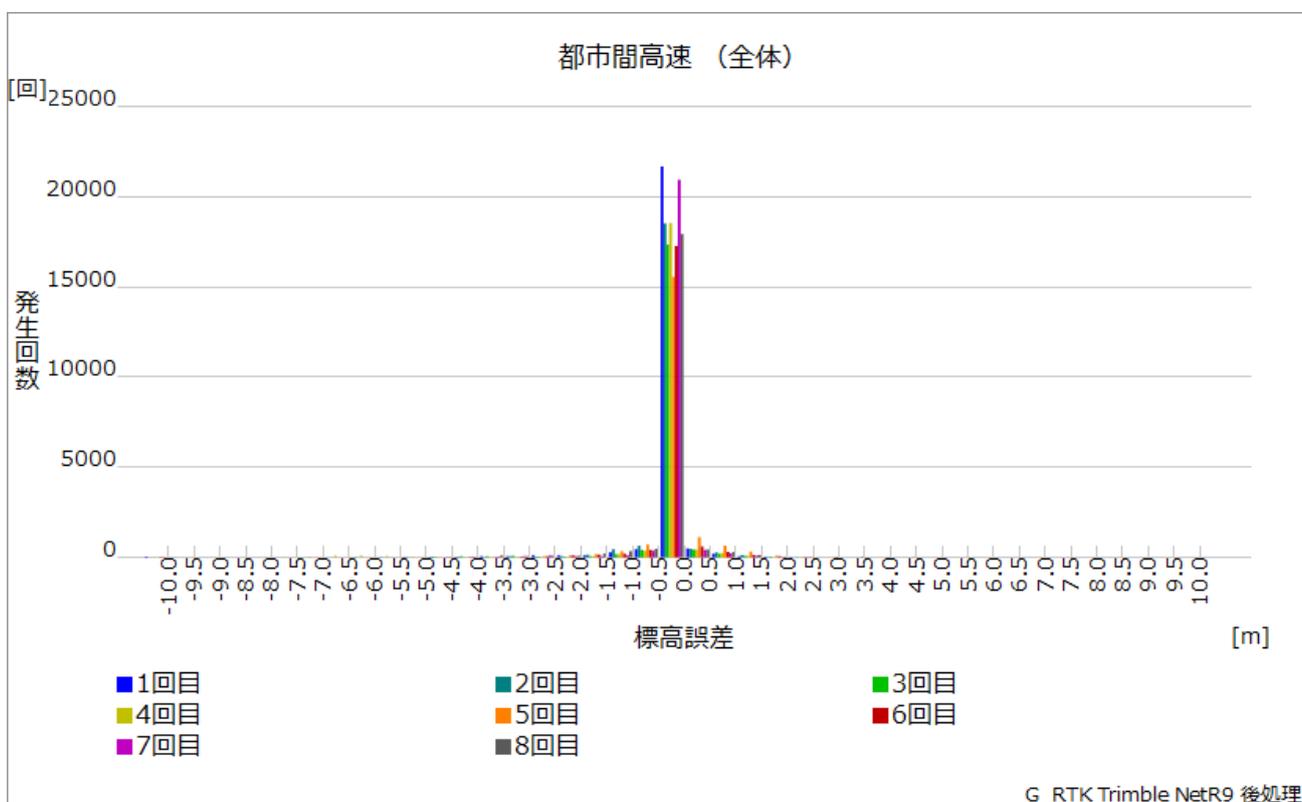


図 2.5.3-20 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：G (RTK)

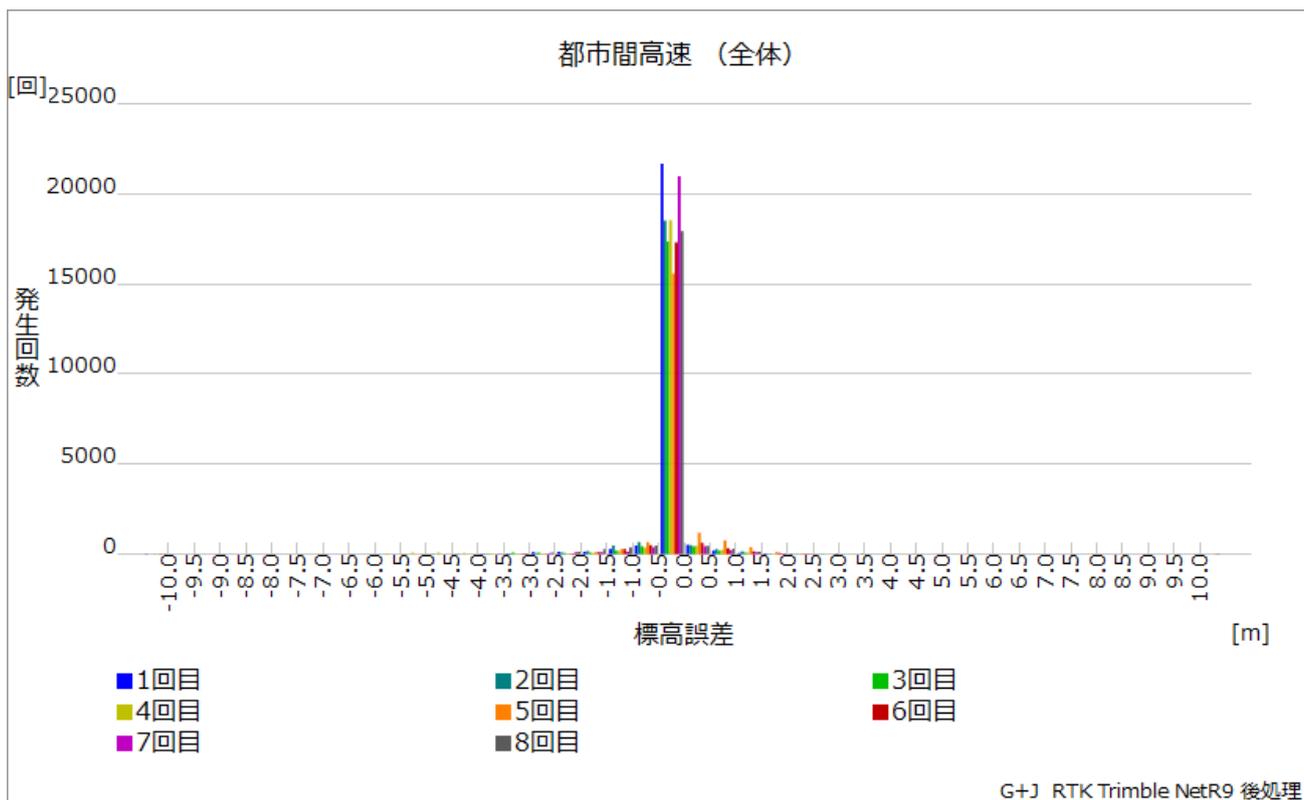


図 2.5.3-21 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GJ (RTK)

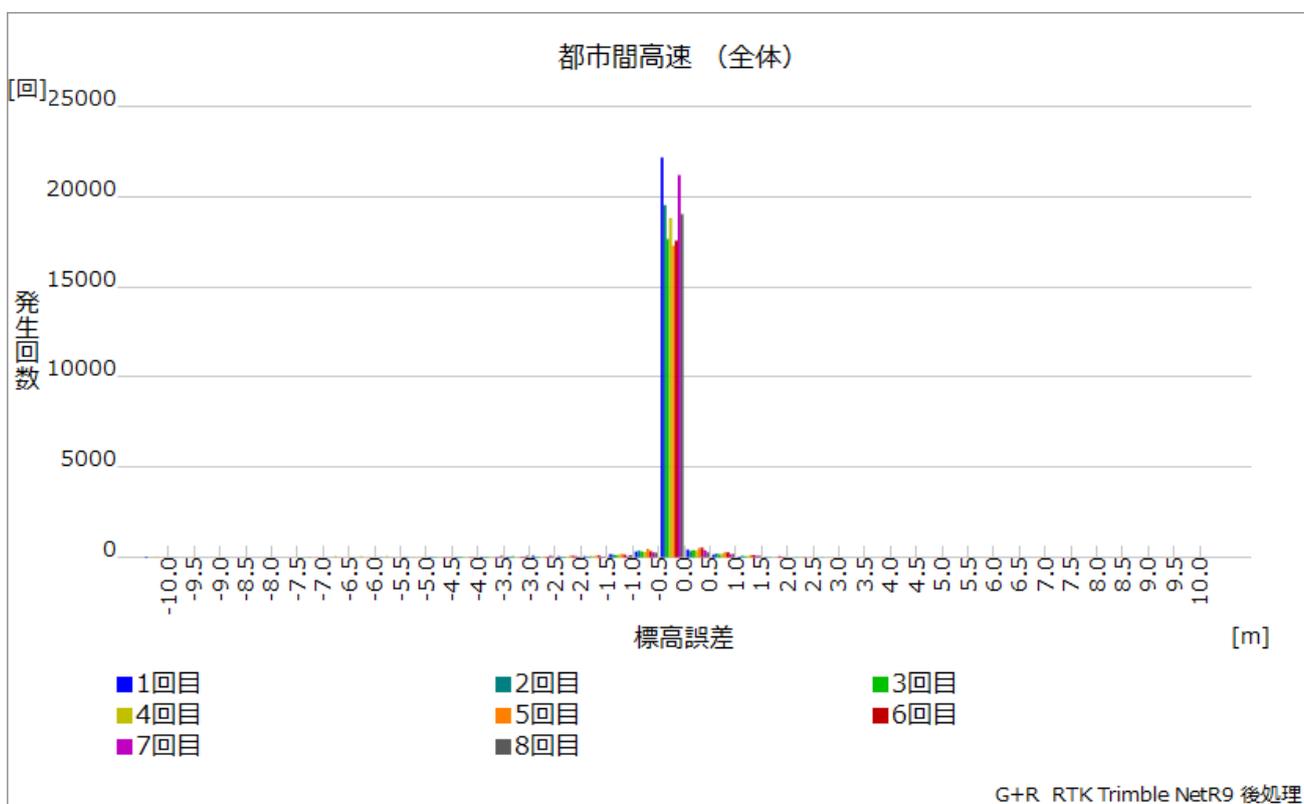


図 2.5.3-22 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GR (RTK)

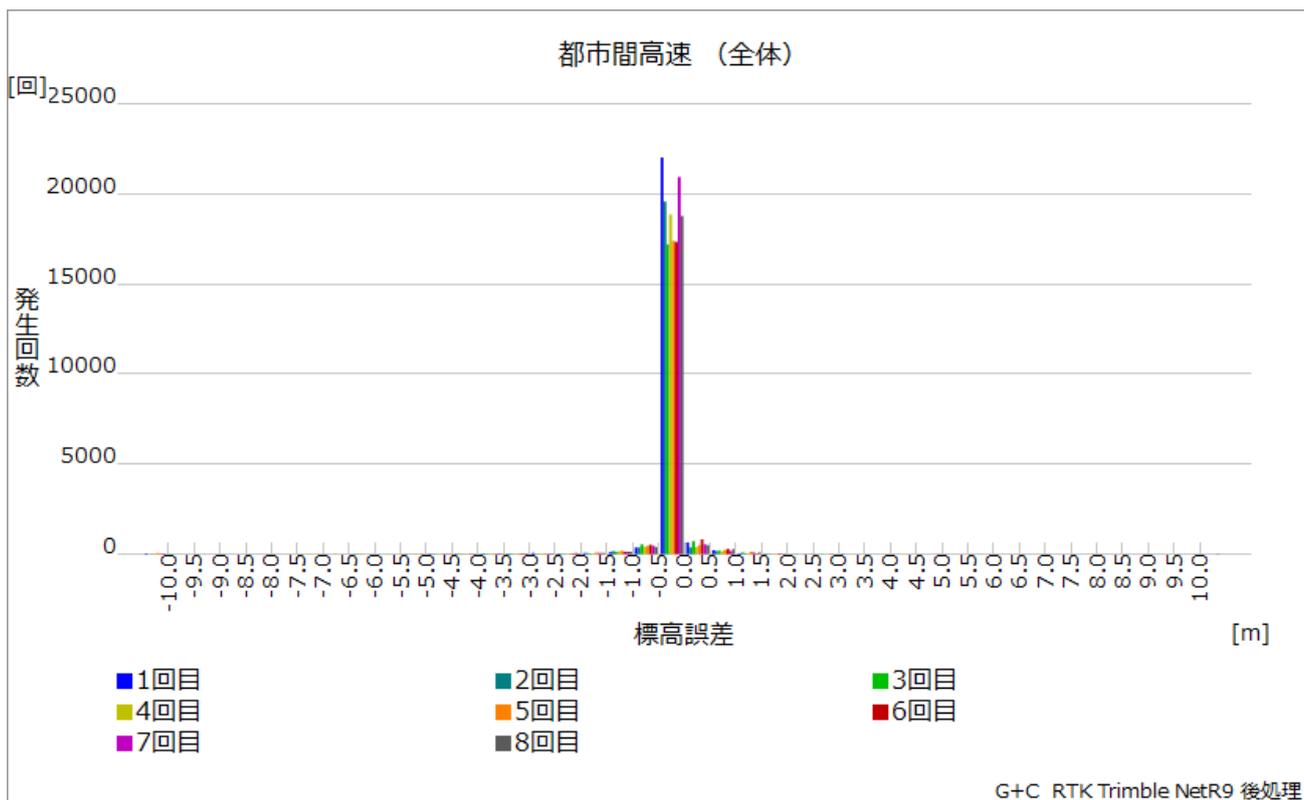


図 2.5.3-23 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GC (RTK)

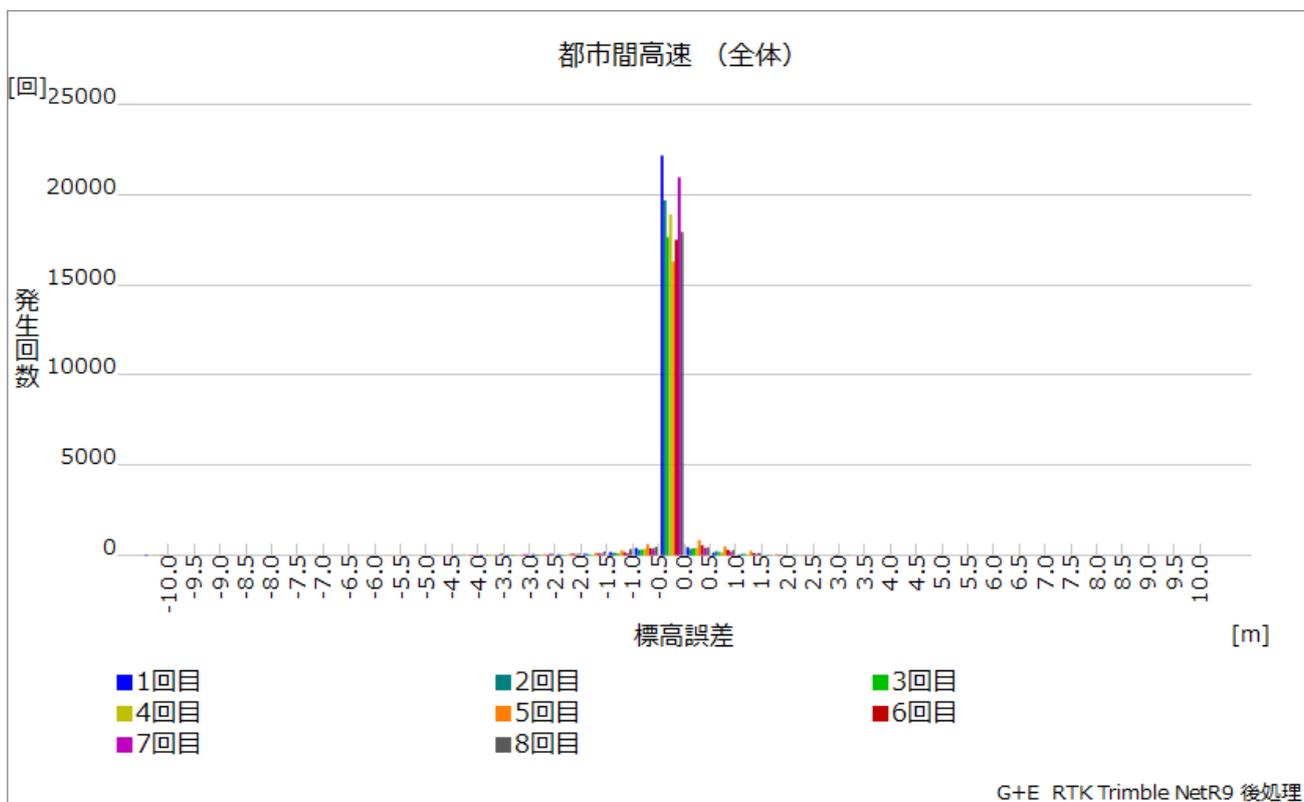


図 2.5.3-24 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GE (RTK)

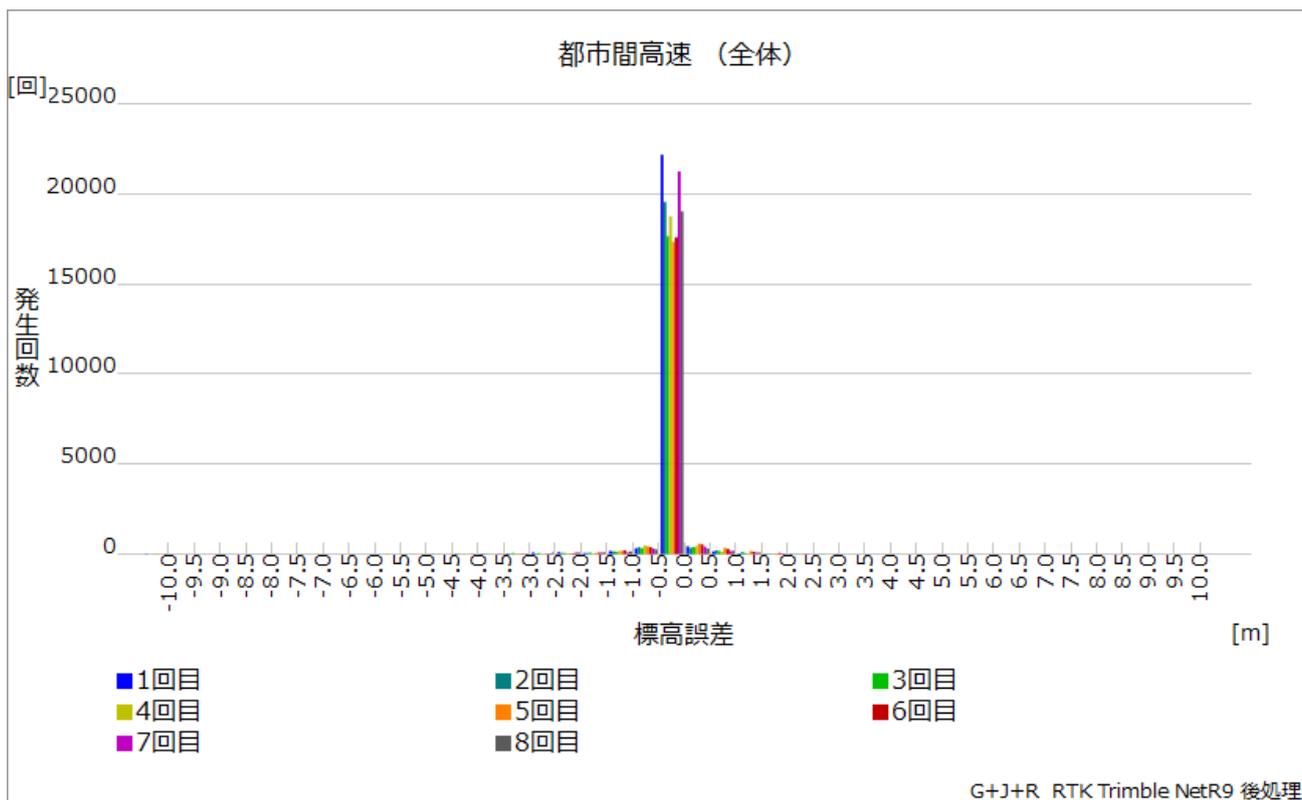


図 2.5.3-25 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GJR（RTK）

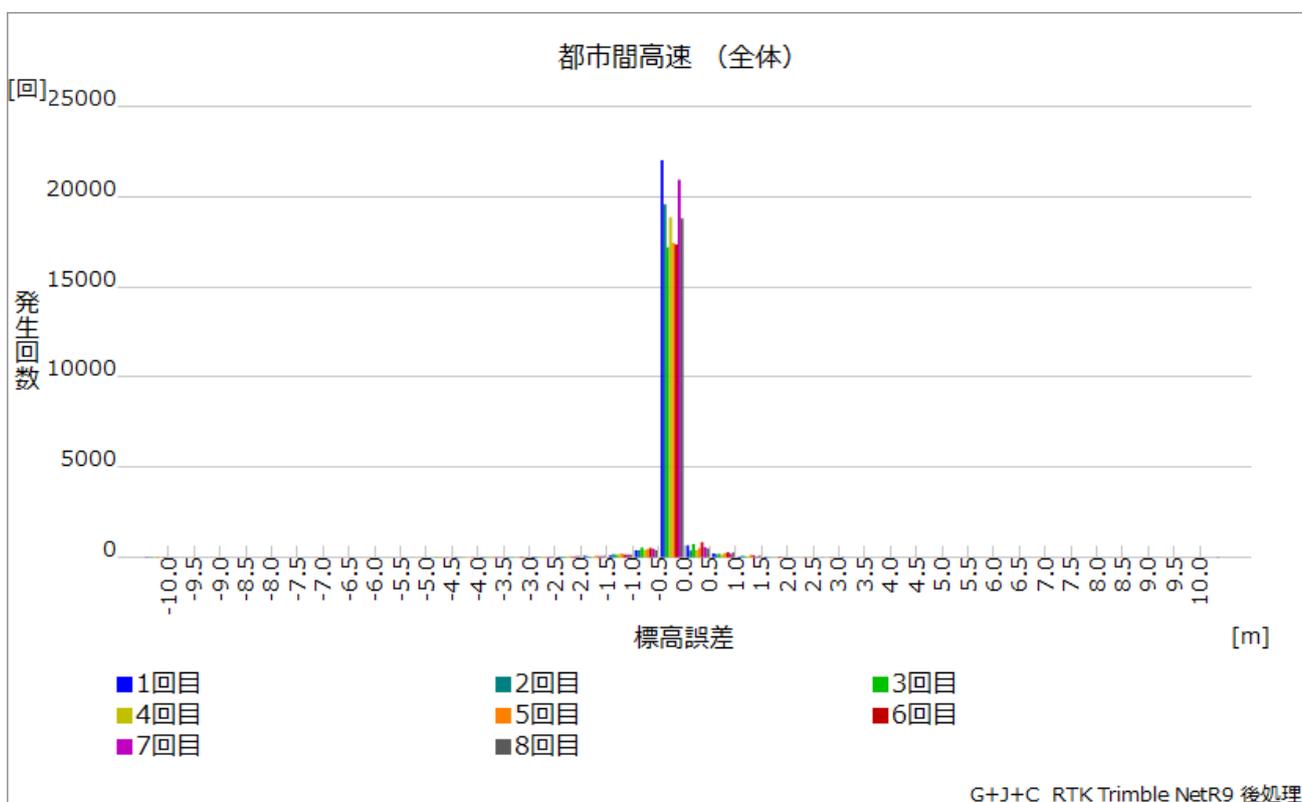


図 2.5.3-26 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GJC（RTK）

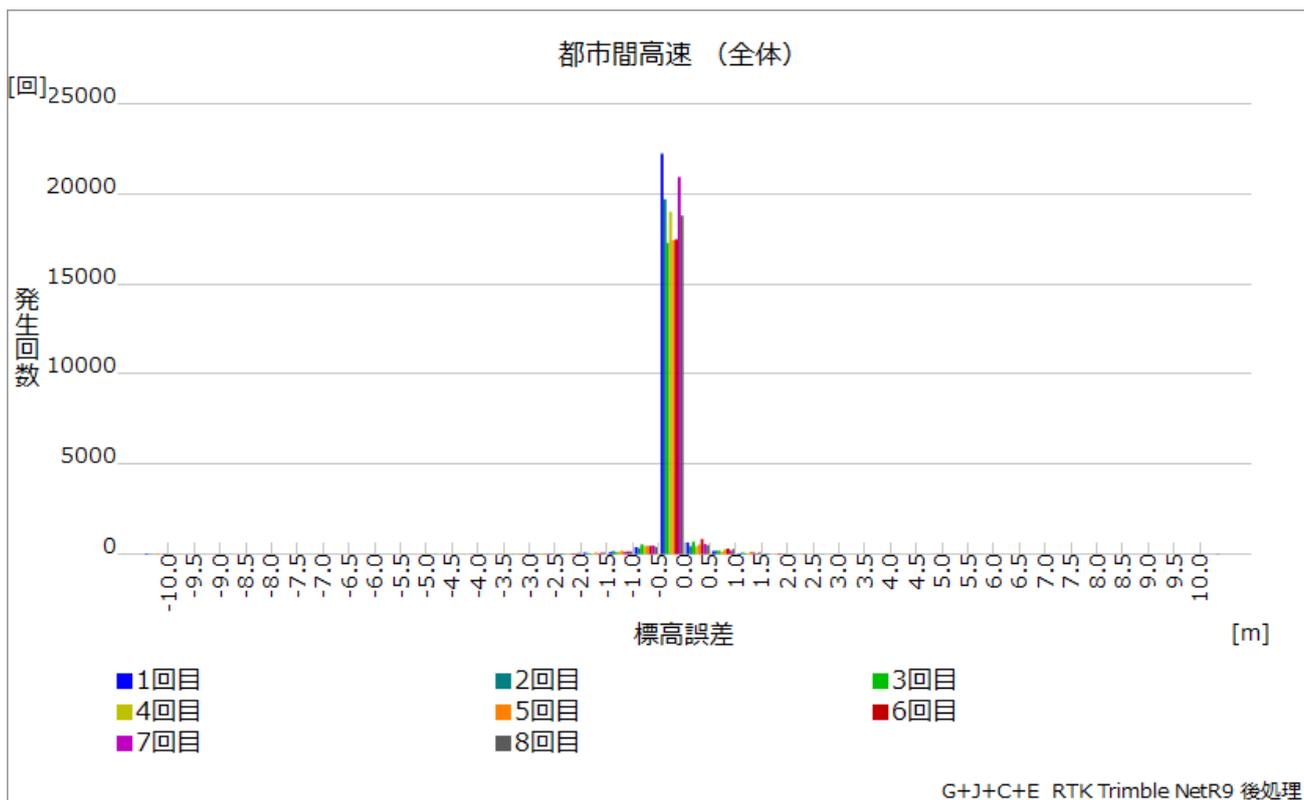


図 2.5.3-27 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GJCE (RTK)

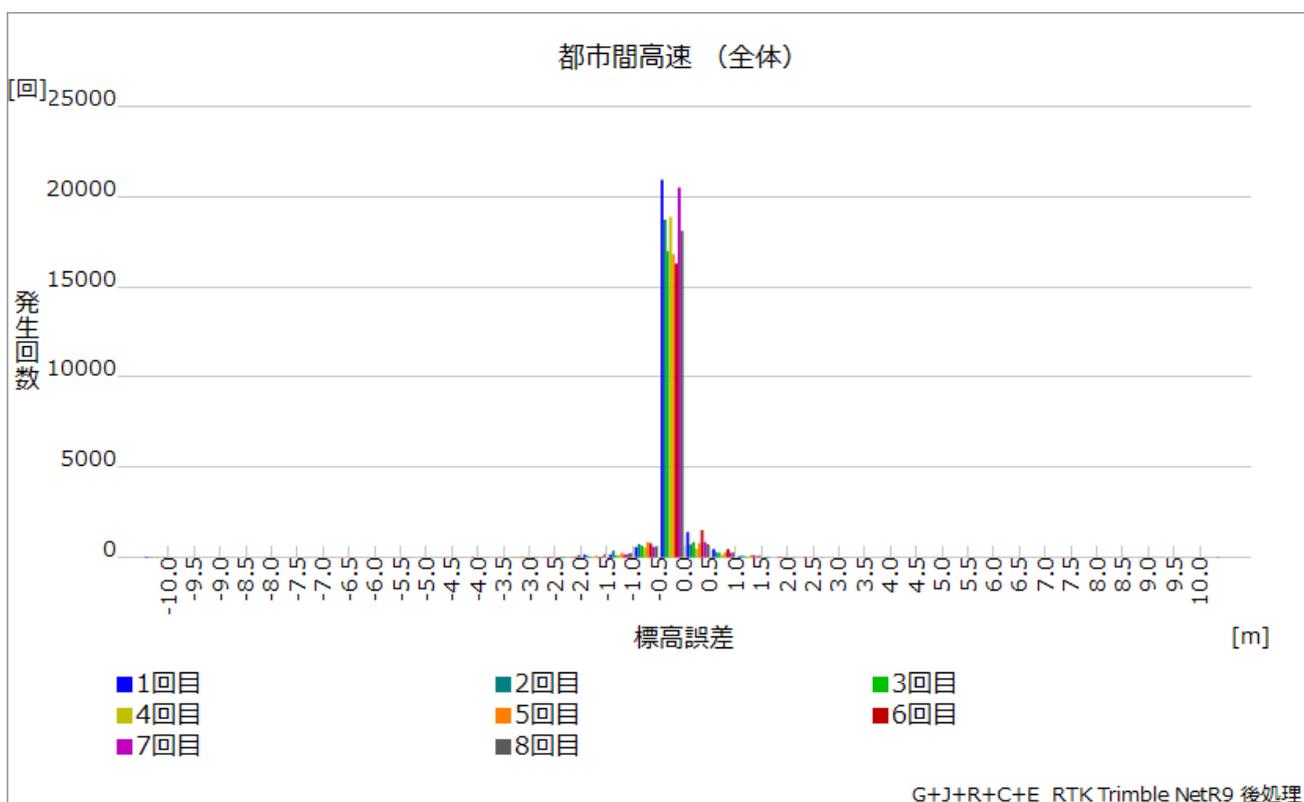


図 2.5.3-28 マルチ GNSS 精度評価：ヒストグラム標高誤差：GJRCE (RTK)

2.5.4. マルチ GNSS による可視衛星数

複数の衛星測位システムを併用することで、利用可能な衛星数は大幅に増える。現状の測位受信機では GPS での測位が必須となるため、GPS 衛星が 4 機以上可視である必要があるが、GPS、QZSS、GLONASS、Galileo、BeiDou を利用した場合、仰角マスク 55 度でも 10 機前後の衛星数が可視となる。

以下に走行実験当日（2016 年 12 月 21 日）0:00～8:00（UTC）における、つくばでの衛星システム毎の可視衛星の状態を示す。なお仰角マスクは 15 度に設定している。

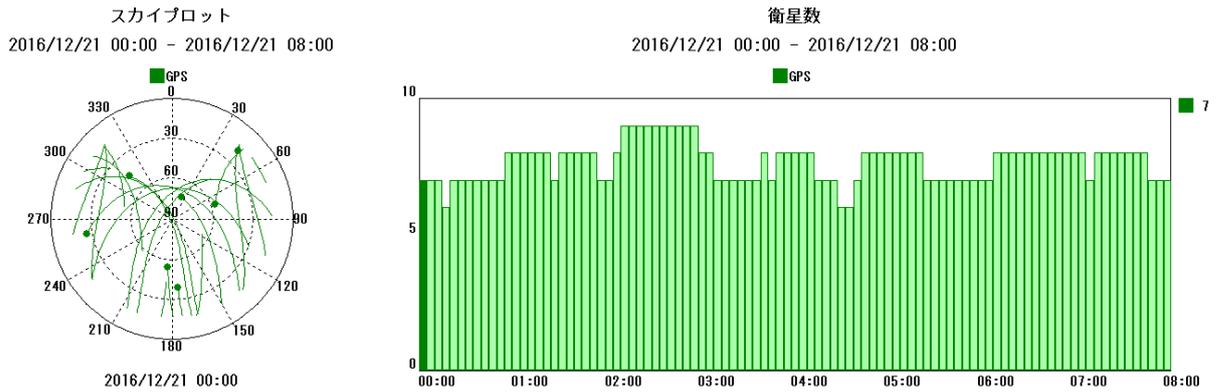


図 2.5.4-1 スカイプロット・衛星数 (G)

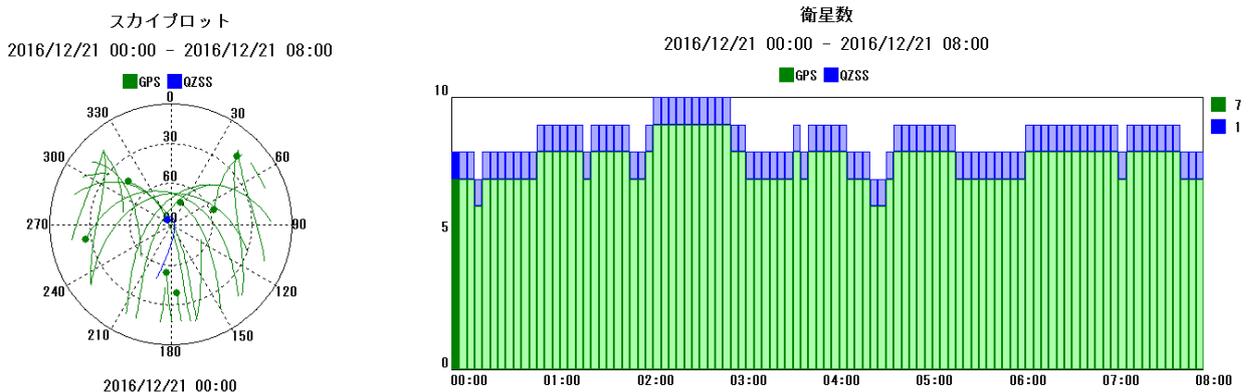


図 2.5.4-2 スカイプロット・衛星数 (GJ)

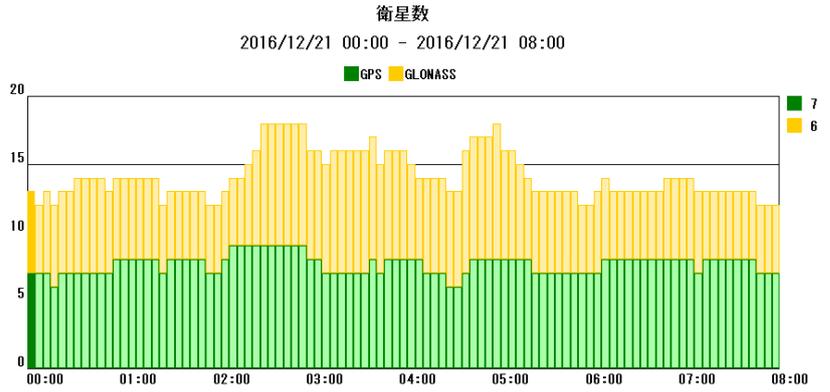
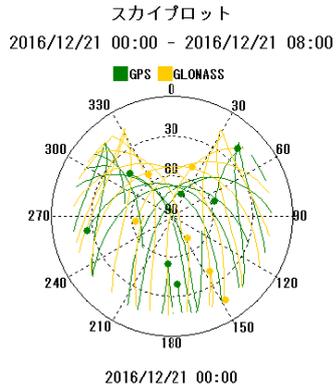


図 2.5.4-3 スカイプロット・衛星数 (GR)

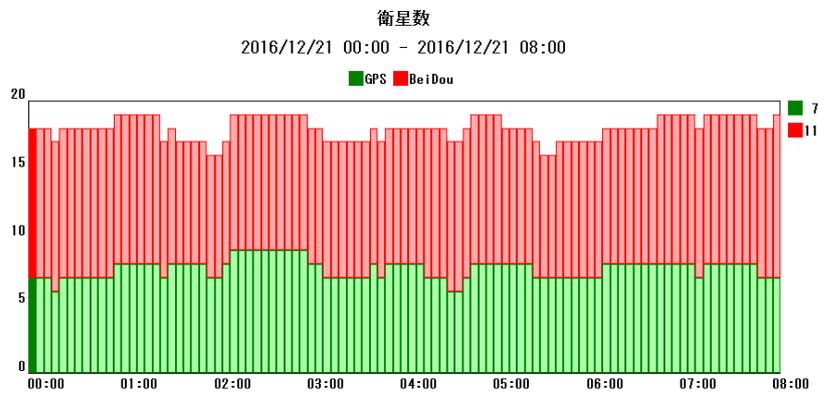
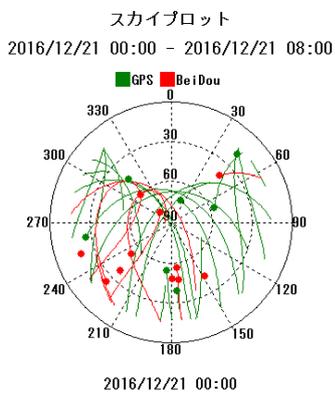


図 2.5.4-4 スカイプロット・衛星数 (GC)

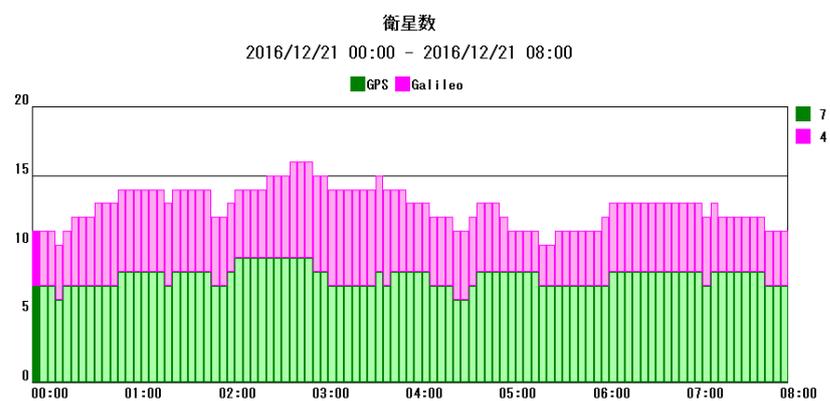
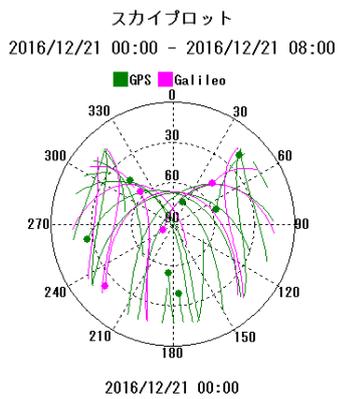


図 2.5.4-5 スカイプロット・衛星数 (GE)

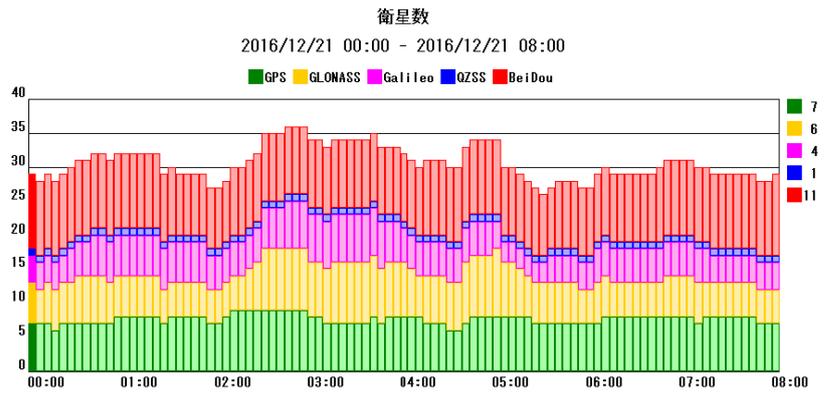
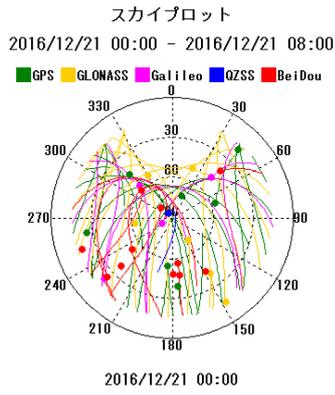


図 2.5.4-6 スカイプロット・衛星数 (GJRCE)

QZSS、Galileo、BeiDou に関しては、今後も衛星数が増加する計画であるため、今後さらに利用可能な衛星数が増加することが見込まれる。

3. 時刻・進行方向の評価

3.1. 実施概要

衛星測位によって得られる時刻が、自動走行／走行支援における時刻同期やタイミングの基準として使用可能か調査することを目的とし、複数の受信機を搭載した車両による時刻精度検証実験を行った。また静止観測において受信機の時刻性能を検証する実験を合わせて行った。

3.1.1. 目的

自動走行システムの実現に向けて、車車間通信が今後普及すると見込まれるが、位置情報の正確さに加えて時刻情報の正確さも必要とされる。

例えば 60km/h で走行している車両では、0.1 秒の時刻ズレがおおよそ 1.7m の進行方向誤差として現れる。車車間通信においてそれぞれの車両の位置関係を把握する際、一方の時刻にズレがあればそれは実際の車両位置との差につながり、重大な事故が起きかねない。

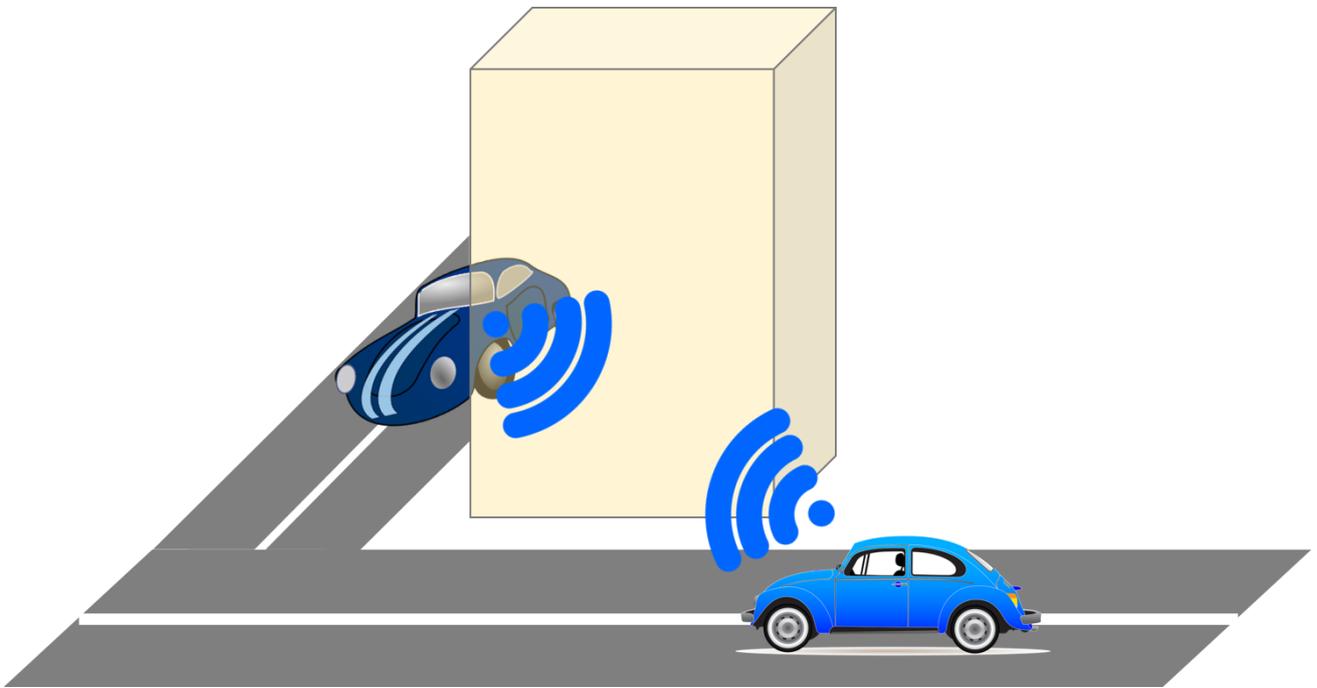


図 3.1.1-1 車車間通信のイメージ

衛星測位では位置と時刻を合わせた 4 次元情報を測位計算によって求める。測位衛星にはそれぞれ原子時計が搭載されており、同一システム内で時刻が同期されているほか、異なるシステム間でもそれぞれの時刻の差が正確に分かっており、ユーザは原子時計を基準とした正確な時刻を得ることができる。実際に GPS を時刻源とした NTP サーバや、インフラシステムの時刻同期に GPS を使用する例がある。

しかし次の図のように、測位結果がユーザに到達するまでには、受信機が測位計算のために行う内部処理に要する時間や、測位結果を何らかの形でユーザへ送信する際に要する時間などが少なからず発生するはずである。さらに、位置と時刻を同時に求めるため測位誤差がそのまま時刻の誤差として現れる。

このように、ユーザが受け取った測位結果に付随する時刻情報が、どの時点の時刻であるか、またその時刻が正確であるかということは、ユーザ側で把握することは難しい。

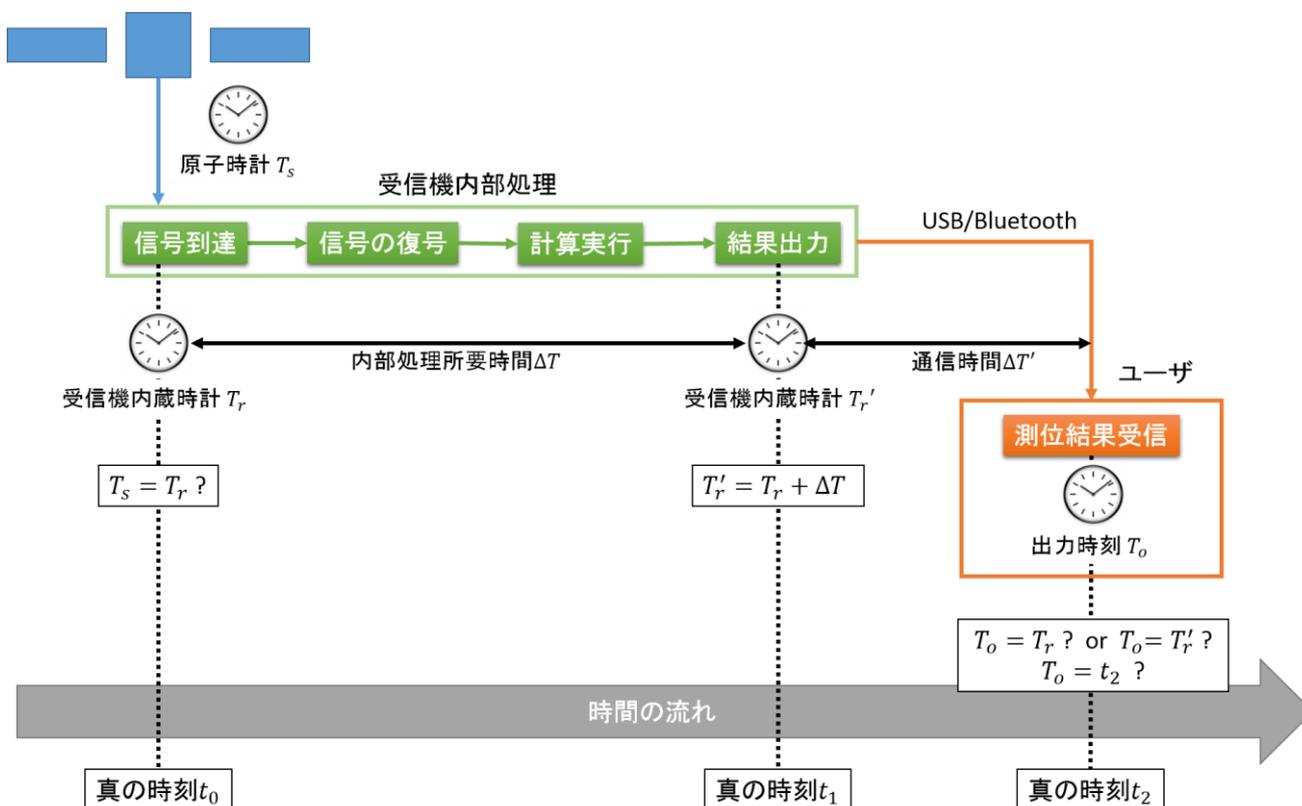


図 3.1.1-2 衛星測位演算の時刻処理

そこで以下の 2 種類の実験を行った。

1. 移動体通過時刻測定
2. GNSS 受信機時刻性能評価

1. では、車両があらかじめ座標を正確に求めたポイントを通過した時刻を計測する。GNSS 受信機が出力した結果と比較し、図 3.1.1-2 のうち受信機内部処理に係る部分にあたる部分の時刻誤差を評価する。また測位方式毎に時刻精度の差があるか調査する。

2. では受信機が出力した時間とユーザがそれを受け取った時間の差を比較する。図 3.1.1-2 のうち、通信時間に係る部分を検証することを目的としている。

3.1.2. 時刻の取得

衛星測位によって得られる時刻を評価するために、衛星測位とは異なる方法で正確な時刻を取得する必要がある。本実験では情報通信機構 (NICT) の NTP サーバ (ntp.nict.jp) を利用した。NICT の NTP サーバは日本標準時と直結されており、正確な時刻を得られる。日本標準時は 18 台のセシウム原子時計と水素メーザ 4 台から構成されている。[1]

※NTP (Network Time Protocol)

ネットワークに接続された機器の時計を正しい時刻に校正するための通信プロトコル (RFC1305)。OSI 基本参照モデルの第 7 層 (アプリケーション層) に位置する。NTP は階層構造を持ち、最上位の階層には原子時計などの正確な時刻源に直結されたサーバが位置する。下位の階層に位置する機器は上位の階層の時刻と同期することによって、自身の時計を校正する。

3.1.3. GPS を用いた時刻の取得

前述したとおり、GPS やその他の測位衛星は精密な時刻を計測することができる原子時計を搭載しており、ユーザは位置情報のみならず時刻情報も得ることができる。このため NTP 最上位層の時刻源として GPS を用いたタイムサーバが利用されることもある。タイムサーバに用いられる時刻同期用 GPS 受信機は、通常の測量・ナビゲーション用の受信機と構成及び時刻の取得方法が異なる。

通常の受信機では、3次元の位置とともに時刻を最小 2 乗法などによって求める。しかしここで求めた時刻には大なり小なり誤差が含まれており、タイムサーバ等で利用するには精度に欠ける。

時刻同期用の受信機では、予めアンテナを設置する点の座標値を入力しておき、1 つ又は複数の衛星の疑似距離から受信機時刻の修正値を求め時刻を出力する。さらにこうした時刻同期用の受信機は、正確な間隔のパルス信号を出力する機能を備えており、ユーザは時刻情報とパルス情報を組み合わせて正確な時刻 (およそ 0.1 マイクロ秒) を得ることができる。

本調査ではこのような時刻同期用の受信機ではなく、通常の測量・ナビゲーション用受信機の出力する時刻を調査対象とする。

3.2. 移動体通過時刻測定

3.2.1. 概要

3.2.1.1. 実験方法

GNSS 受信機から出力された時刻と実際の時刻に差があるか検証するため、車両に GNSS 受信機を搭載し、一定の速度で走行する。走行する車両が指定のポイントを通過した瞬間の時刻を測定し、GNSS 受信機から出力された時刻と比較を行う。

3.2.1.2. 実験コース

移動体通過時刻測定におけるコースは、一定速度で走行することや沿道に機器を設置する必要があることから、一般道ではなく一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) の城里テストコースを使用した。テストコースのうち、比較的勾配の少ない直線を計測区間として選択した。

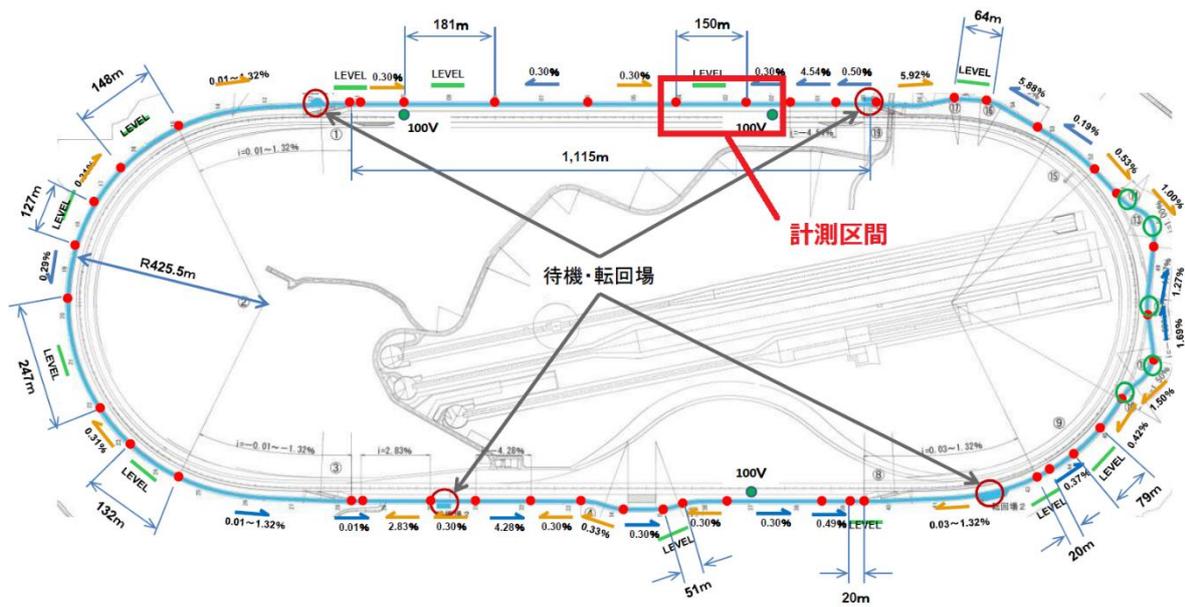


図 3.2.1-1 実験コース全体図



図 3.2.1-2 実験コース写真

3.2.1.3. スケジュールと衛星配置

走行実験は平成 28 年 12 月 27 日に実施した。実験当日は雨天であったため、降雨の少ない時間帯を見計らって計測を行った。

実験当日の衛星飛来予測による GPS+QZSS の測位衛星の状態は以下のようになっている。

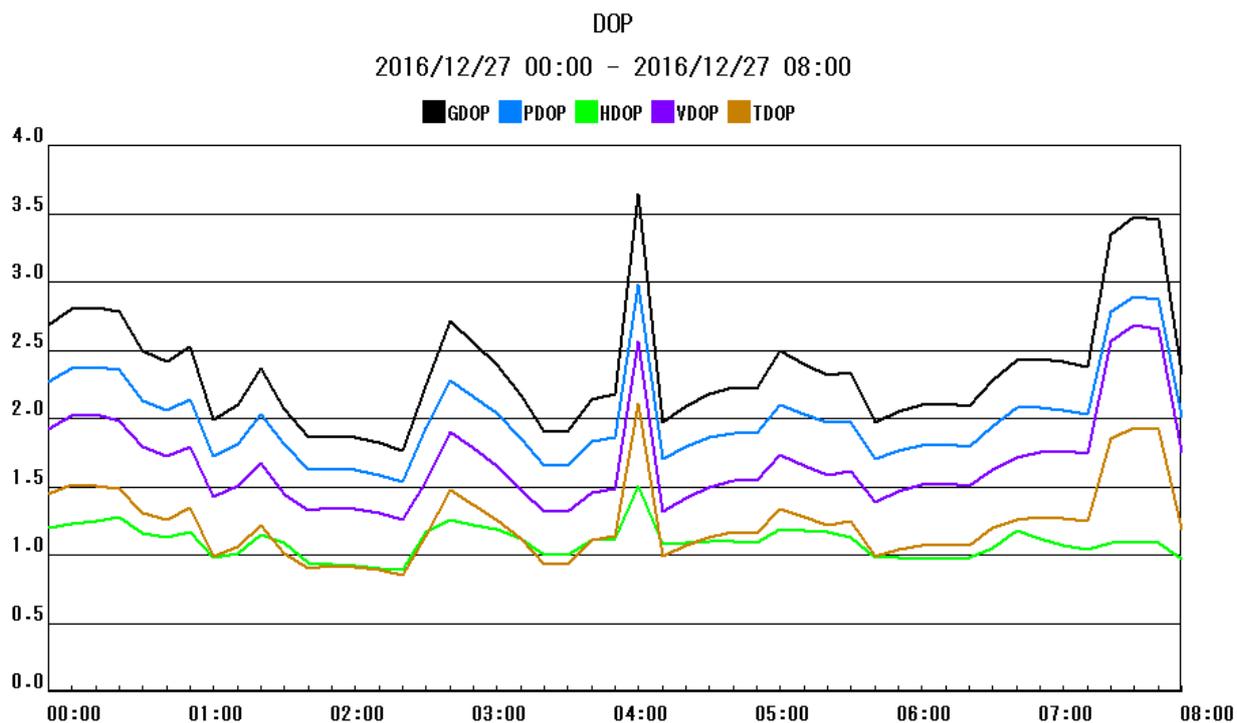


図 3.2.1-3 DOP (12月27日)

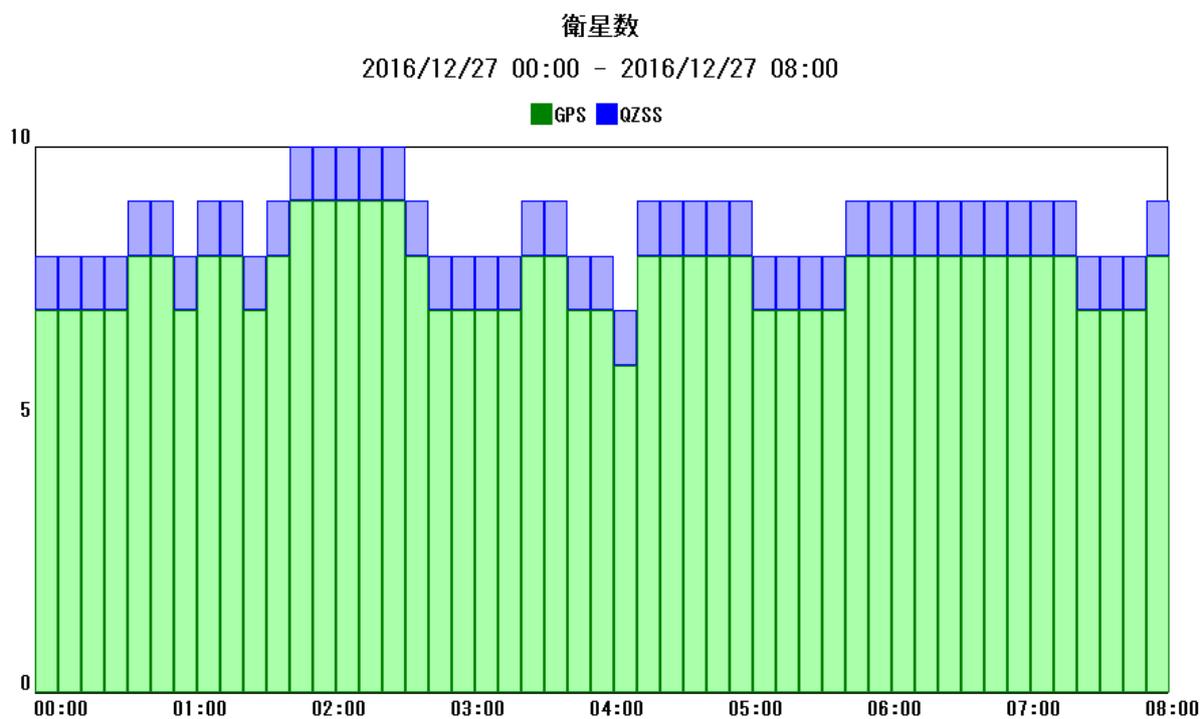


図 3.2.1-4 衛星数 (12月27日)

UTC 04:00 ごろに若干 DOP が悪くなっているが、それ以外は良好な衛星配置である。

以下に走行時刻を示す。

表 3.2.1-1 走行時刻一覧

セット	20[km/h]	40[km/h]	60[km/h]	80[km/h]	100[km/h]
1	05:57	05:54	06:00	06:02	06:04
2	06:07	06:10	06:12	06:15	06:17
3	06:19	06:22	06:24	06:26	06:29
4	06:32	06:35	06:37	—	—

3.2.1.4. 取得データ

20km/h、40km/h、60km/h、80km/h、100km/h の 5 段階の速度を 1 セットとし 4 セット計測した。4 セット目走行中に降雨により実験を中止した。

コード測位に使用した u-blox EVK-M8T のうち、GPS+QZSS の方の受信機でデータの欠損があったため、評価の対象から除外する。また、本実験では後処理データについての解析は実施しない。

表 3.2.1-2 取得データ一覧

	受信機名	メーカー	測位方式	衛星システム	アンテナ
1	EVK-M8T	u-blox	1 周波コード測位	GJ	受信機付属
2	EVK-M8T	u-blox	1 周波コード測位	GJR	受信機付属
3	SPS855	Trimble	RTK	GJR	NovAtel GPS-703-GGG
4	NetR9	Trimble	MADOCA-PPPAR	GJR	NovAtel GPS-703-GGG

3.2.2. 機器構成

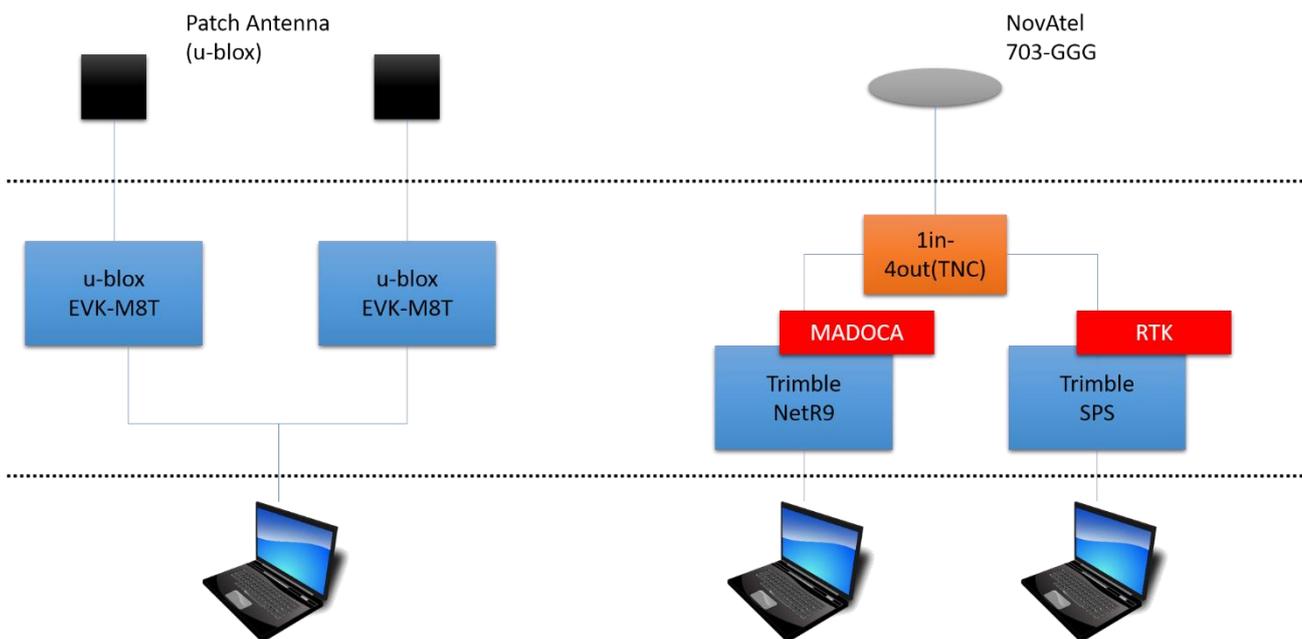


図 3.2.2-1 車両機器構成

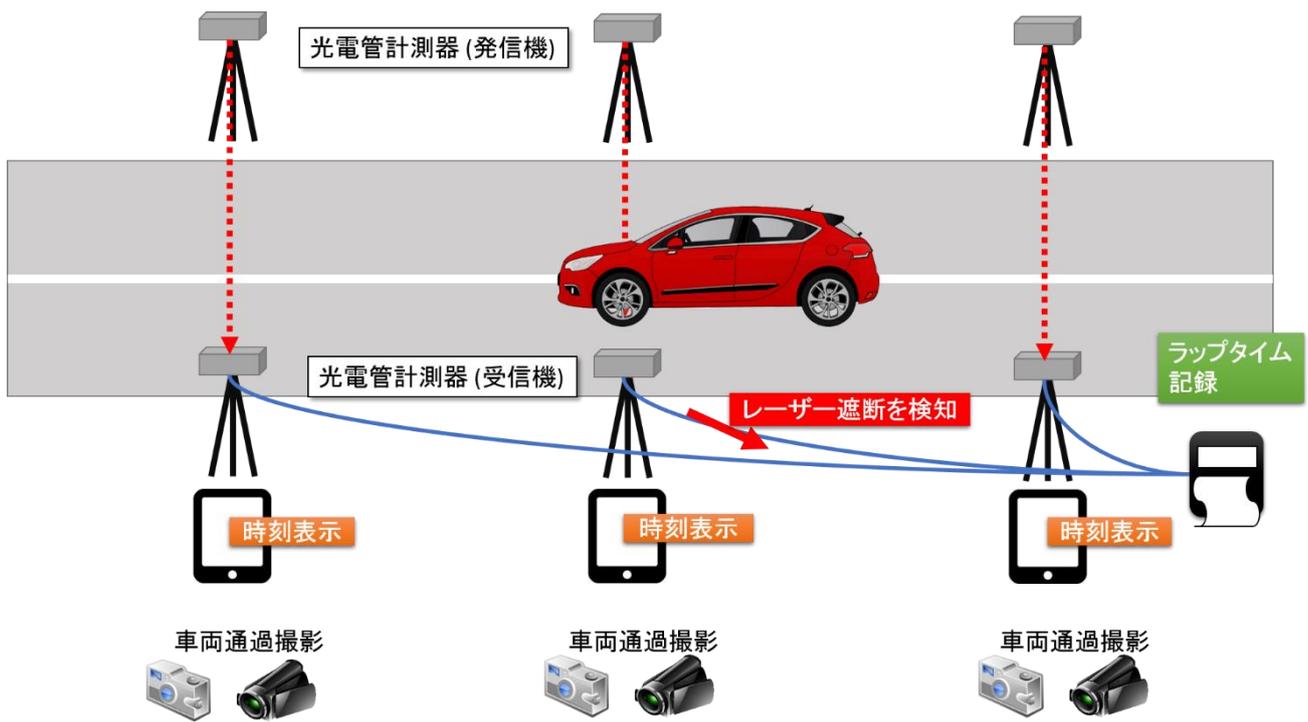


図 3.2.2-2 計測機器構成

3.2.2.1. 受信機

使用した各受信機を以下に示す。

表 3.2.2-1 受信機

メーカー	u-blox	Trimble	Trimble
機種名	EVK-M8T	SPS855	NetR9

各受信機についての詳細は「2.2.1」を参照のこと。

3.2.2.2. アンテナ

使用した各アンテナを以下に示す。

表 3.2.2-2 アンテナ

メーカー	u-blox	NovAtel
機種名	EVK-M8T 付属 アンテナ	GPS-703-GGG

各アンテナについての詳細は「2.2.2」を参照のこと。

アンテナの位置関係を以下に示す。なお、本実験において考慮しなければならないアンテナのオフセットは車両進行方向の値のみであるので、左右方向のアンテナオフセットは記載しない。

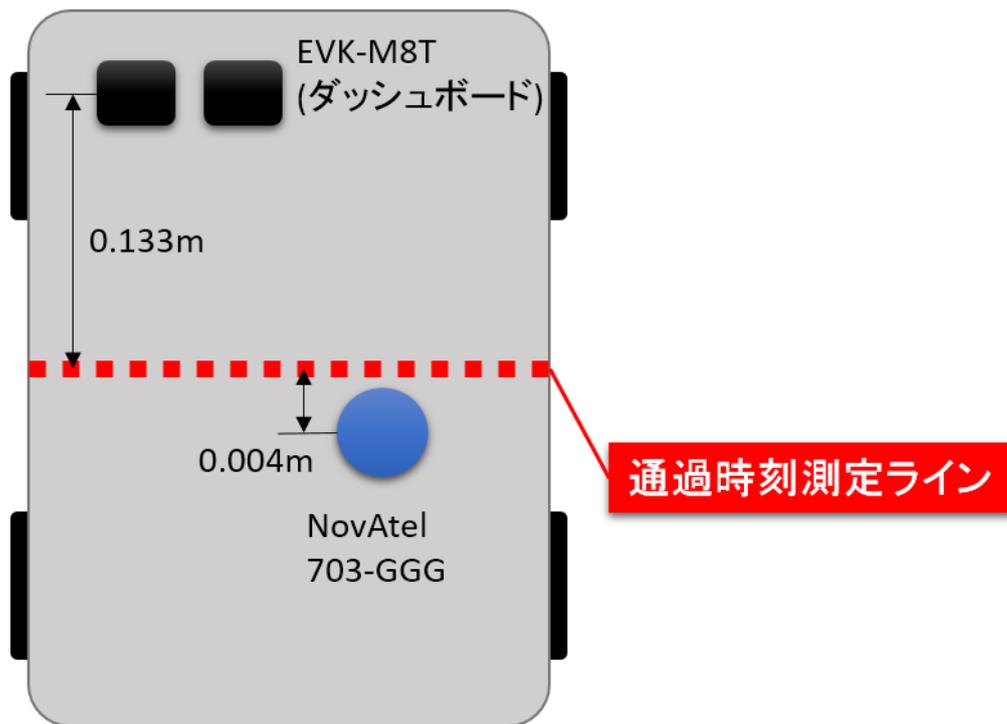


図 3.2.2-3 車両アンテナ位置

3.2.2.3. 計測車両

ワンボックスカーに機材を搭載し実験を行った。本実験では走行軌跡の参照座標を取得する必要はないため MMS ではなく一般車両を使用している。



図 3.2.2-4 車両・機材写真

車両ルーフにはマグネット台座を固定し、アンテナを設置した。車両内部に各 GNSS 受信機や記録用 PC、電源装置等を搭載し実験を行った。

3.2.2.4. その他の機器

表 3.2.2-3 光電管計測器

外観	項目	仕様
	品名	光電管計測器
	メーカー	玉川商店 http://keisoku.eek.jp/

陸上競技等で使用される光電管計測器。タイム測定ポイントに発信機と受信機を1台ずつ設置する。発信機からはレーザー光が照射され、受信機は発信されたレーザー光を受信する。移動体が発信機と受信機の間を通過すると、レーザー光が遮断され受信機がそれを検知する。各ポイントの受信機はケーブルで記録装置と接続され、各受信機でレーザー光の遮断が検出された時間を記録することができる。正確なラップタイムを計測するために使用した。

表 3.2.2-4 測量用 GNSS スマートアンテナ

外観	項目	仕様
	品名	Leica Viva GS15
	対応周波数	<ul style="list-style-type: none"> ・ GPS L1/L2/L5 ・ GLONASS L1/L2
	チャンネル数	555
	ネットワーク RTK 精度	水平 8 mm + 0.5 ppm 垂直 15 mm + 0.5 ppm

Leica Viva GS15 は GNSS アンテナと受信機が一体となった高精度測量用スマートアンテナである。携帯電話等の通信回線を通じてネットワーク RTK による測位が可能である。操作は専用のコントローラを通じて行う。通過時刻測定ポイントの座標値を取得するために使用した。

今回使用したネットワーク RTK の方式は VRS、配信業者は株式会社ジェノバ、補正対象システムは GPS である。

3.2.3. 評価方法

3.2.3.1. 参照座標・参照時刻

通過時刻測定ポイントの座標値は測量用 GNSS 受信機 Leica GS15 を用いて VRS によって取得した。

各ポイントの座標値を以下に示す。

表 3.2.3-1 座標値一覧

ポイント		X[m]	Y[m]	H[m]	B[deg]	L[deg]	ジオイド高[m]
P1	1	53343.560	44134.100	148.731	36.47976246	140.3258697	41.446
	2	53347.439	44140.463	148.805	36.47979712	140.3259409	41.446
P2	1	53428.800	44081.904	148.560	36.48053306	140.3252920	41.453
	2	53432.698	44088.253	148.606	36.48056789	140.3253631	41.453
P3	1	53514.053	44029.621	148.556	36.48130377	140.3247134	41.460
	2	53517.940	44036.004	148.607	36.48133851	140.3247849	41.459

※X、Yは平面直角座標 9 系。H は標高。

各測定ポイント間の距離はおよそ 100m とした。

各ポイントの位置関係は次の図のとおりである。

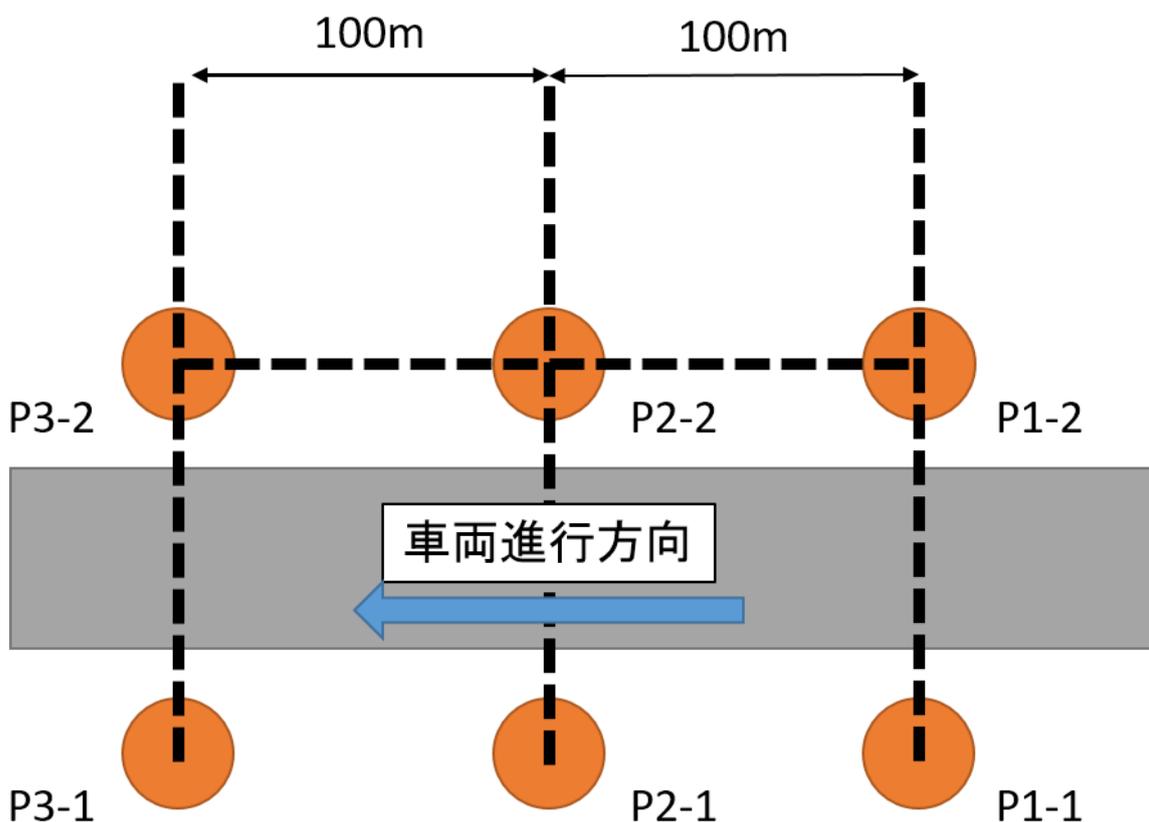


図 3.2.3-1 通過時刻測定ポイント位置関係

通過時刻測定の参照となる時刻は、車両通過の瞬間を時刻表示用端末とともに撮影することで計測した。車両には目安となるようビニールテープでマーキングしてある。



図 3.2.3-2 ビニールテープによるマーキング

各ポイントにおける、カメラ画像とラップタイムから割り出した車両通過時刻を以下に示す。

表 3.2.3-2 車両通過時刻一覧 (セット1、セット2)

セット	km/h	ポイント	通過時刻	セット	km/h	ポイント	通過時刻
1	20	1	05:57:21.18	2	20	1	06:07:35.86
		2	05:57:40.23			2	06:07:52.53
		3	05:58:00.52			3	06:08:11.21
	40	1	05:46:55.58		40	1	06:10:26.34
		2	05:47:04.90			2	06:10:36.09
		3	05:47:13.90			3	06:10:45.77
	60	1	06:00:20.39		60	1	06:12:58.88
		2	06:00:27.00			2	06:13:05.27
		3	06:00:33.58			3	06:13:11.77
	80	1	06:02:36.72		80	1	06:15:20.94
		2	06:02:41.58			2	06:15:25.73
		3	06:02:46.50			3	06:15:30.56
100	1	06:04:49.51	100	1	06:17:33.46		
	2	06:04:53.21		2	06:17:37.33		
	3	06:04:56.93		3	06:17:41.16		

表 3.2.3-3 車両通過時刻一覧 (セット3、セット4)

セット	km/h	ポイント	通過時刻	セット	km/h	ポイント	通過時刻
3	20	1	06:19:41.18	4	20	1	06:32:50.33
		2	06:19:57.59			2	06:33:07.85
		3	06:20:16.46			3	06:33:26.16
	40	1	06:22:26.38		40	1	06:35:39.62
		2	06:22:35.86			2	06:35:48.71
		3	06:22:45.60			3	06:35:57.70
	60	1	06:25:00.07		60	1	—
		2	06:25:06.78			2	—
		3	06:25:13.38			3	—
	80	1	06:27:11.22		80	1	—
		2	06:27:16.15			2	—
		3	06:27:20.99			3	—
	100	1	06:29:35.23		100	1	—
		2	06:29:39.02			2	—
		3	06:29:42.88			3	—

※通過時刻は UTC (HH:mm:ss.SSS)

3.2.3.2. 精度評価の方法

各受信機が出力した NMEA データの GGA センテンスに含まれる時刻から、NMEA データ上のポイント通過時刻を求める。カメラ画像とラップタイムから求めた時刻=真の通過時刻と比較し、差分 (GGA 時刻 - 真の通過時刻) を求める。

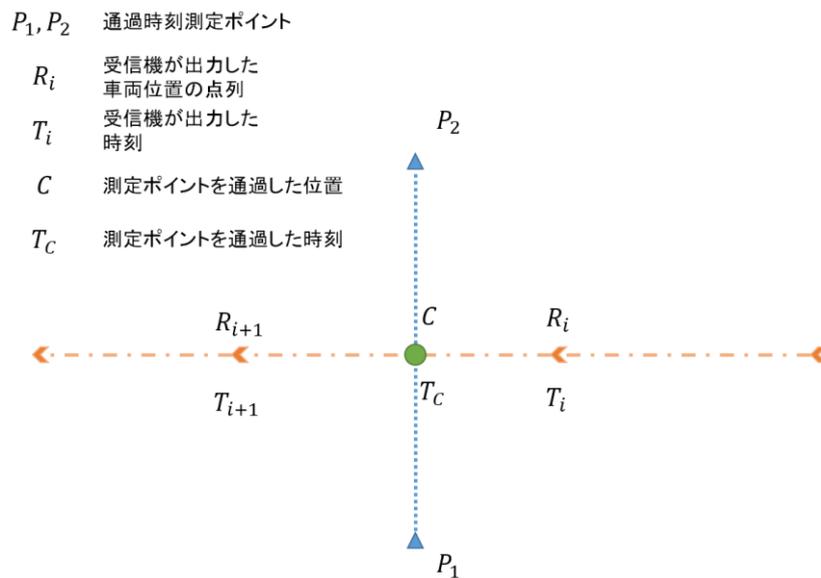


図 3.2.3-3 時刻差の計算方法

$$T_c = T_i + (T_{i+1} - T_i) \times \frac{\text{dist}(C, R_i)}{\text{dist}(R_{i+1}, R_i)}$$

$\text{dist}()$ は点間距離を表す。

時刻差 $\Delta T = T_c - T$ (Tは真の通過時刻)

3.2.4. 時刻精度評価

3.2.4.1. コード測位

以下にコード測位のポイント1における時刻差を示す。

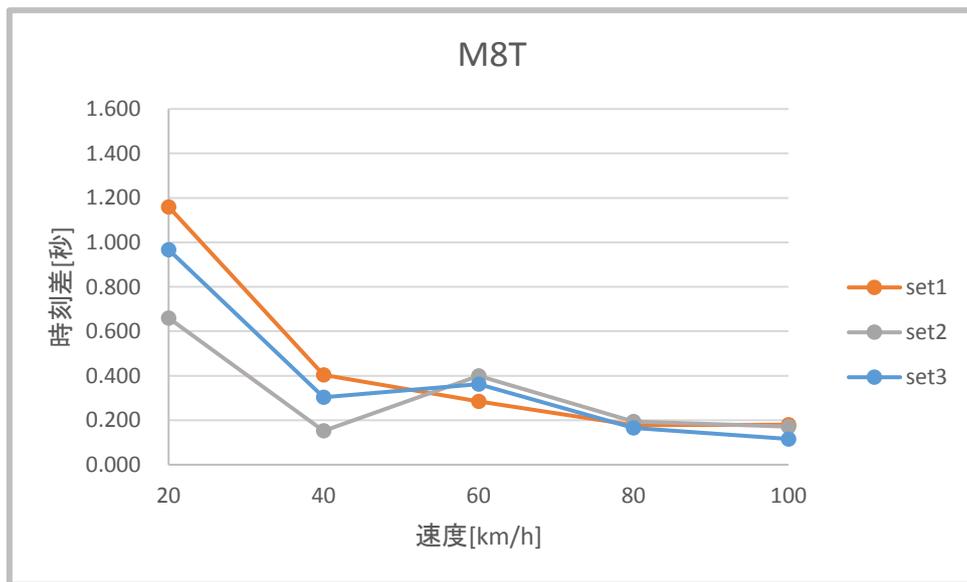


図 3.2.4-1 時刻差-速度グラフ (u-blox EVK-M8T)

折れ線グラフは各測定ポイントにおける速度と時刻差の関係を表す。

速度が上がるにつれ、真の時刻との差が小さくなっている。理由の一つとしてカルマンフィルタによるフィルタリングが考えられる。移動体においてカルマンフィルタを使用したとき、低速度では位置精度が上がらない場合がある。

3.2.4.2. 搬送波位相測位

以下に搬送波位相測位のポイント1における時刻差を示す。

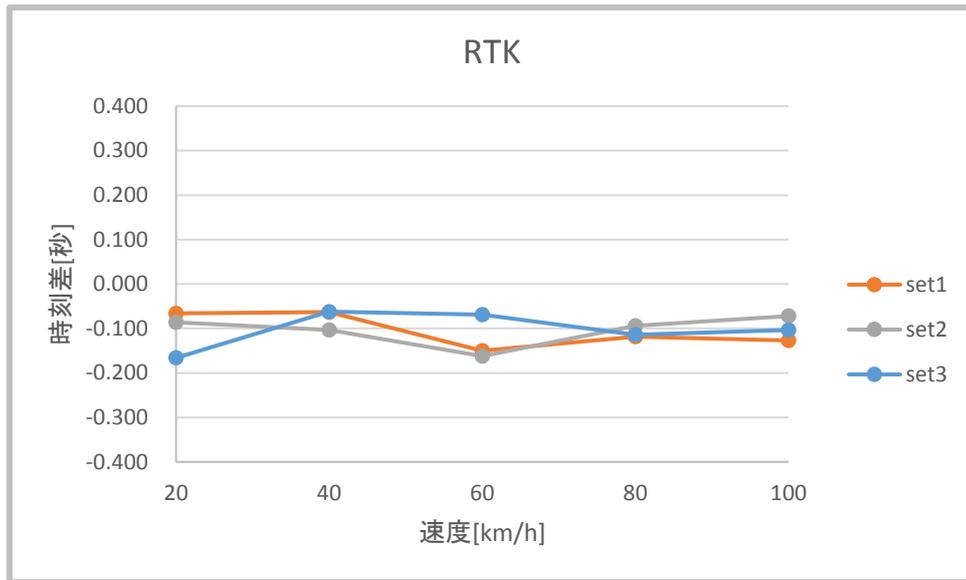


図 3.2.4-2 時刻差-速度グラフ (RTK)

速度によらず安定して 0.2 秒未満の差となっている。しかし時刻差の値が負であり、データ上では実際より早く通過していることになる。これはフィルタリングの影響と考えられる。

3.2.4.3. MADOCA-PPP AR

以下に MADOCA-PPP AR のポイント 1 における時刻差を示す。

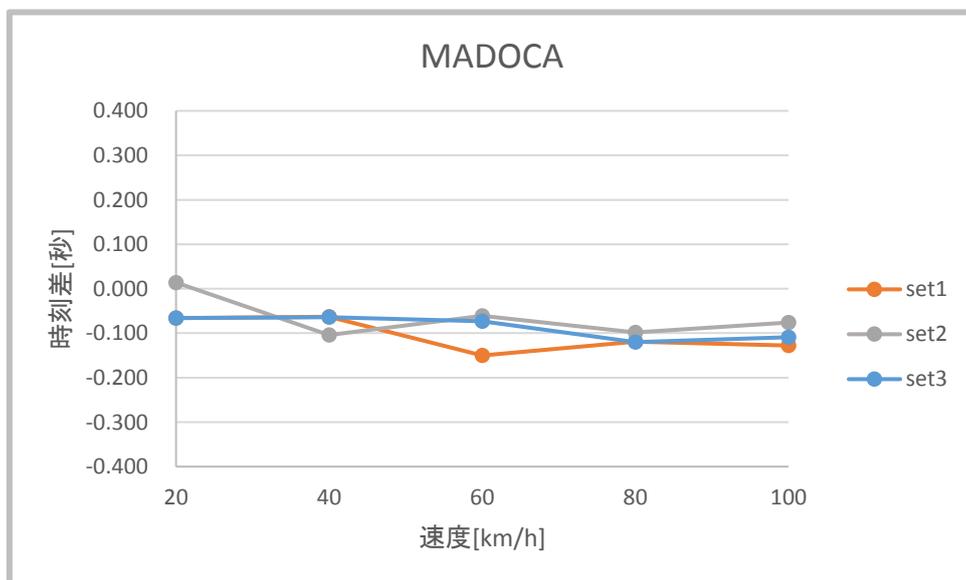


図 3.2.4-3 時刻差-速度グラフ (MADOCA-PPP AR)

RTK と同様にこちらも安定している。こちらもほとんど時刻差が負の値である。MADOCA による PPP を行うソフトウェアも内部でカルマンフィルタを使用しているため、このような結果になっていると考

えられる。

3.3. GNSS 受信機時刻性能評価

3.3.1. 概要

3.3.1.1. 実験方法

GNSS 受信機の時刻性能を評価するため、静止観測において GNSS 受信機が出力する時刻と、PC のシステム時刻を比較する。

3.3.1.2. 実験場所と観測時間

愛知県名古屋市中区白川公園

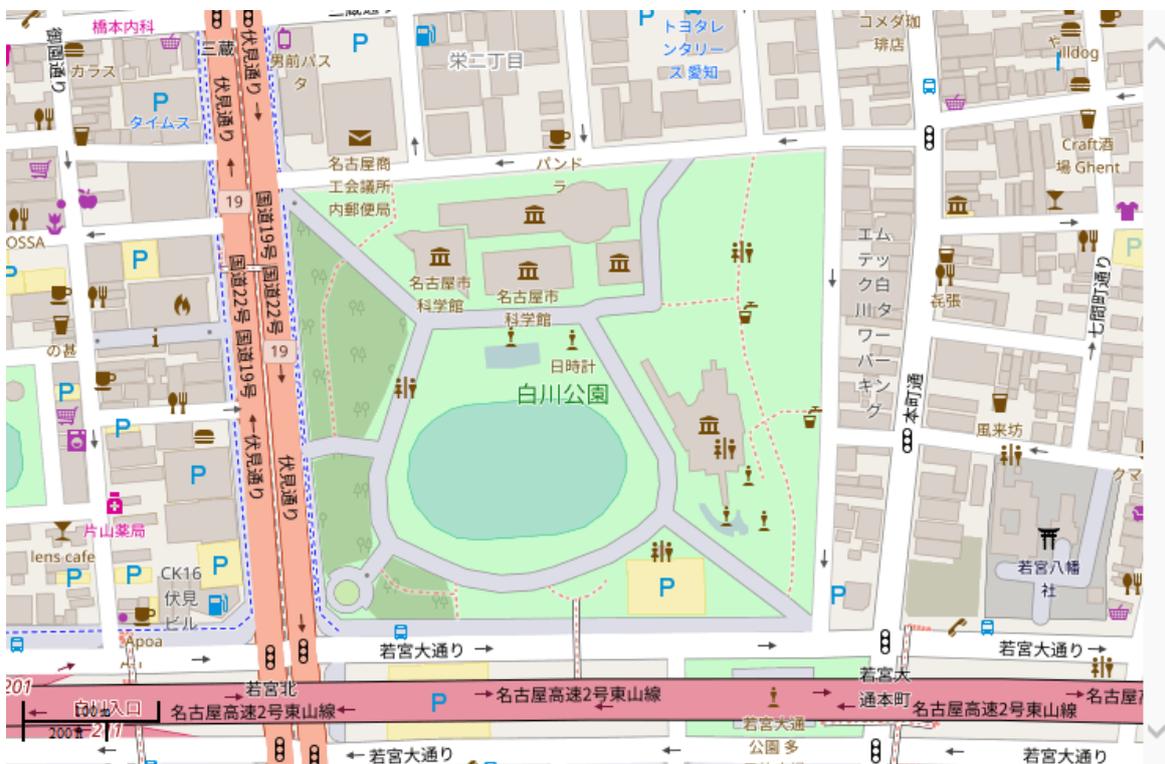


図 3.3.1-1 実験現場地図

JARI テストコース「3.2.1.2」を参照。

QZSS L6 補強のみ、補強データ配信の関係で、12/27 に JARI テストコースにて静止観測を行った。

表 3.3.1-1 静止観測時刻

測位方式	日付	観測開始時間 (UTC HH:mm)	観測終了時間 (UTC HH:mm)
QZSS L6 補強	2016/12/27	07:00	07:12
コード測位	2016/12/29	02:06	03:10

3.3.1.3. 衛星配置

以下に 2016/12/29 に静止観測を行った時間の衛星配置を示す。

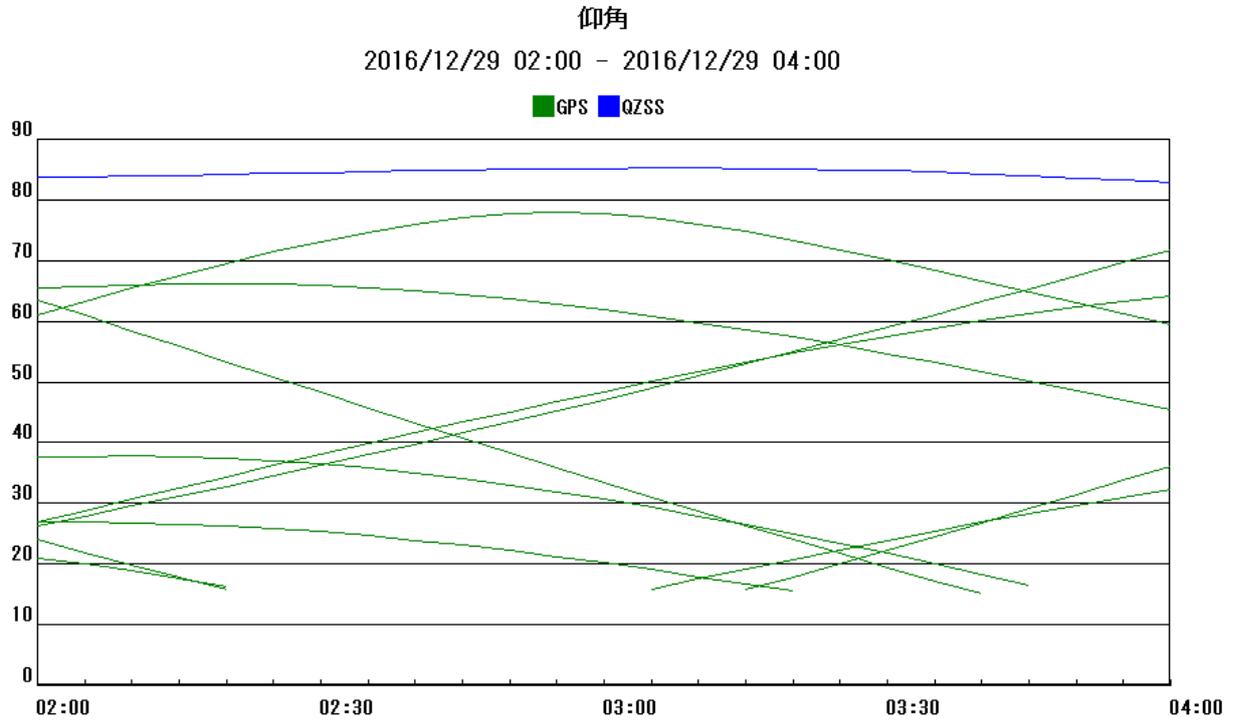


図 3.3.1-2 衛星仰角 (12月29日)

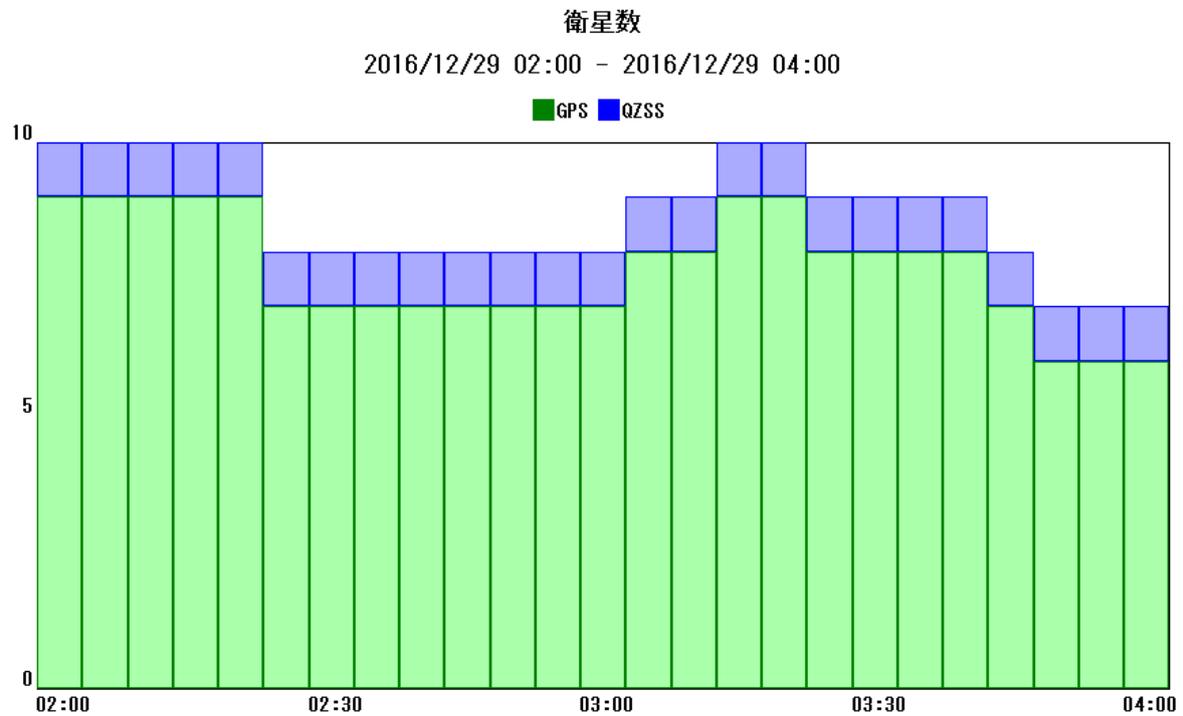


図 3.3.1-3 衛星数 (12月29日)

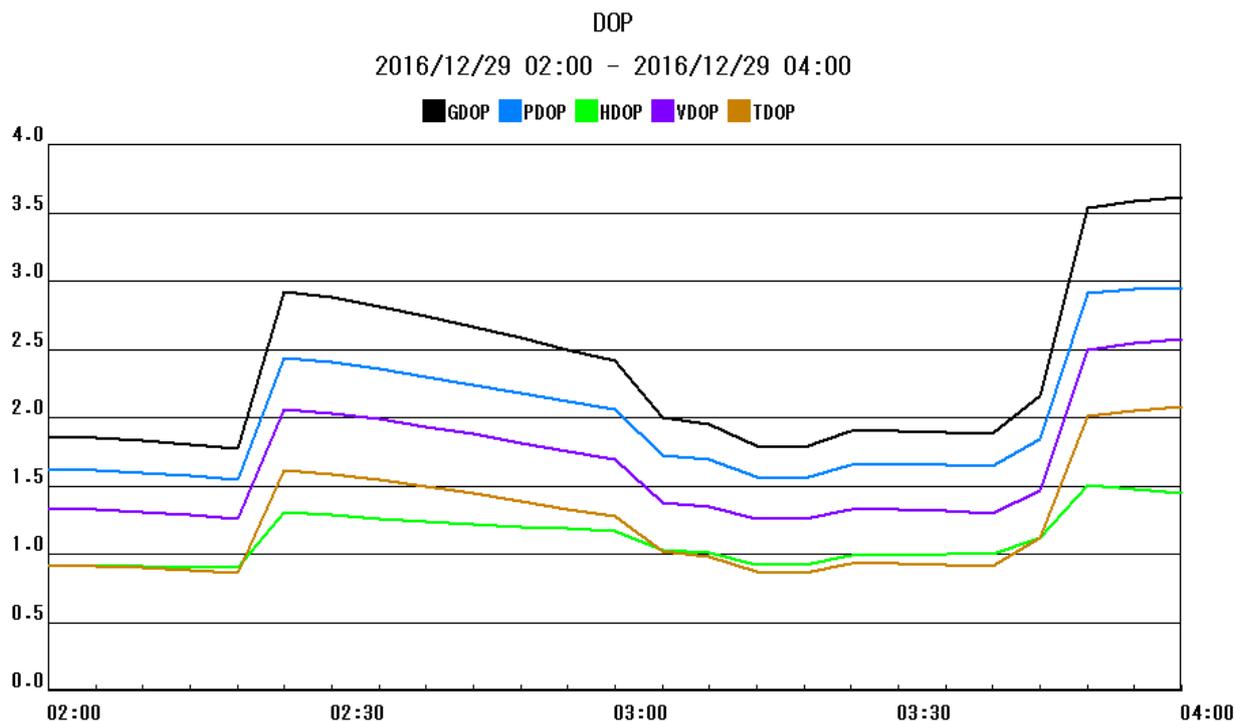


図 3.3.1-4 DOP (12月29日)

準天頂衛星も高仰角に位置し、概ね良好な衛星配置となっている。

2016/12/27 の衛星配置は「3.2.1.3」を参照のこと。

3.3.1.4. 取得データ

データはアイサンテクノロジー作成のタイムスタンプツール (3.3.2.3) を介して取得した。

表 3.3.1-2 取得データ一覧

測位・補強方式	衛星システム	受信機	アンテナ
1周波コード測位	GJ	u-blox EVK-M8T	受信機付属アンテナ
		NEC QZ-1	内蔵アンテナ
	GJR	u-blox EVK-M8T	受信機付属アンテナ
		NEC QZ-1	内蔵アンテナ
QZSS L6 補強	GJ	MELCO AQLOC	JAVAD アンテナ

対象となる受信機は、専用のソフトウェアによって動作するような受信機/測位方式ではタイムスタンプツールが使用できないため、受信機から直接 NMEA 形式のデータが出力できるものに限られる。

3.3.2. 機器構成

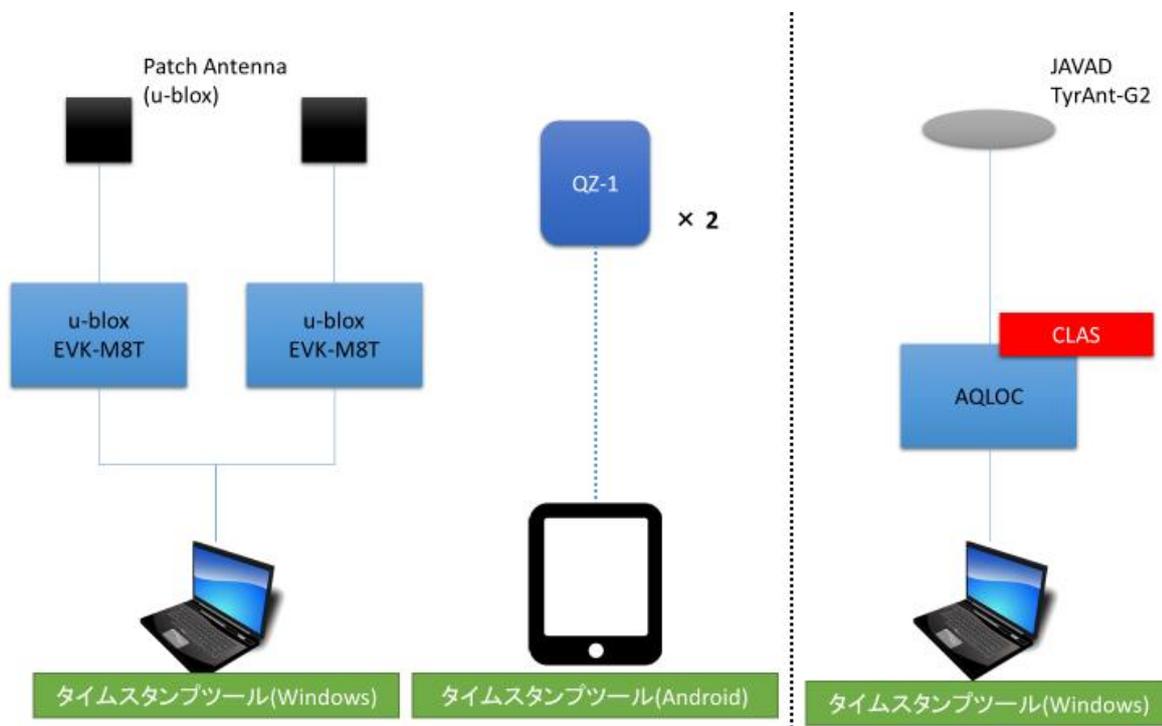


図 3.3.2-1 機器構成（静止観測時）

3.3.2.1. 受信機

使用した受信機を以下に示す。各受信機についての詳細は「2.2.1」を参照のこと。

表 3.3.2-1 受信機

メーカー	u-blox	NEC	MELCO
機種名	EVK-M8T	QZ-1	AQLOC
通信	USB	Bluetooth	USB

3.3.2.2. アンテナ

使用した各アンテナを以下に示す。各アンテナについての詳細は「2.2.2」を参照のこと。

表 3.3.2-2 アンテナ

メーカー	u-blox	NEC	JAVAD
機種名	EVK-M8T 付属アンテナ	QZ-1 内蔵アンテナ	TyrAnt-G2

3.3.2.3. タイムスタンプツール

一部の GNSS 受信機は、RS232C や USB、Bluetooth によるシリアル通信を行い、NMEA 形式の測位

結果を出力することができる。

そこで、GNSS 受信機とシリアル通信を行いつつ、GNSS 受信機から NMEA の GGA センテンスが出力された瞬間の時刻を、タイムスタンプとしてログファイルに記録するツールを作成した。

タイムスタンプは NMEA と同一のログファイルに、GGA センテンスのすぐあとの行に出力される。
例)

```
$GNGGA,020607.00,3509.86206,N,13653.95453,E,1,10,0.91,11.1,M,35.7,M,,*71
$STAMP,20161229,020608.197
```

タイムスタンプとして出力される時刻は、事前に NTP サーバと同期させた各端末のシステム時刻を利用する。

3.3.3. 評価方法

3.3.3.1. PC の時刻同期性能

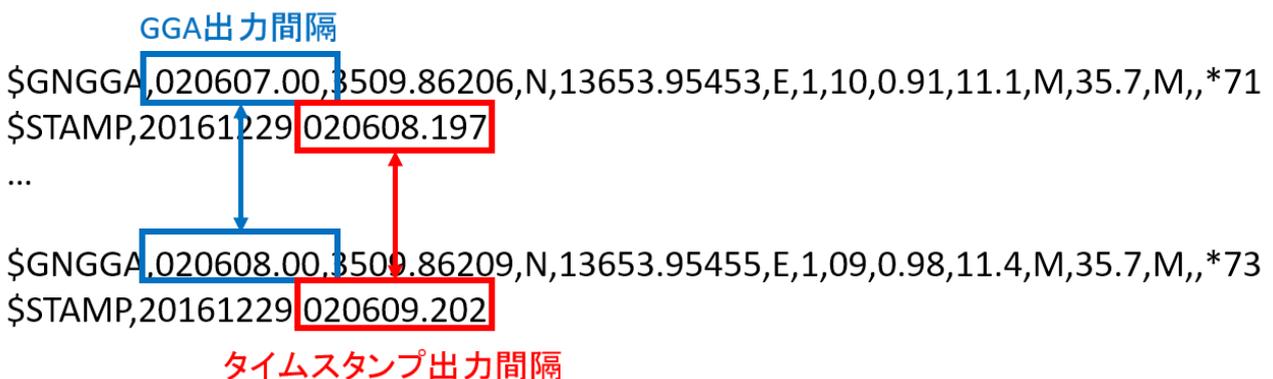
データ記録のために用いた Windows の PC は観測を開始する前に NICT の NTP サーバと同期しているが、同期の精度は 0.1 秒以下から数秒の範囲でばらつきがあり、本実験の目的からすれば精度が十分でないことが実験実施後に判明した。これは時刻同期する際のネットワーク通信環境等に起因すると考えられる。

ただしごく短い時間に限れば PC 内の時計のズレは少ないと考えられるため、絶対時刻を評価するのではなく、出力間隔に着目することとする。すなわち、あるスタンプ時刻と 1 つ前のスタンプ時刻で差をとり、これを出力間隔として評価する。

本実験で使用した受信機の GGA 時刻の間隔は全て 1 秒 (1Hz 出力設定の受信機) もしくは 0.1 秒 (10Hz 出力設定の受信機) であるが、スタンプ時刻の出力間隔が一定でなければ、測位計算や通信による時刻ズレが発生していると考えられる。

3.3.3.2. 時刻性能評価の方法

ファイルに出力されたタイムスタンプの間隔を計算し、受信機毎に評価する。



3.3.4. 時刻性能評価

3.3.4.1. コード測位 1

u-blox EVK-M8T の出力間隔グラフを以下に示す。

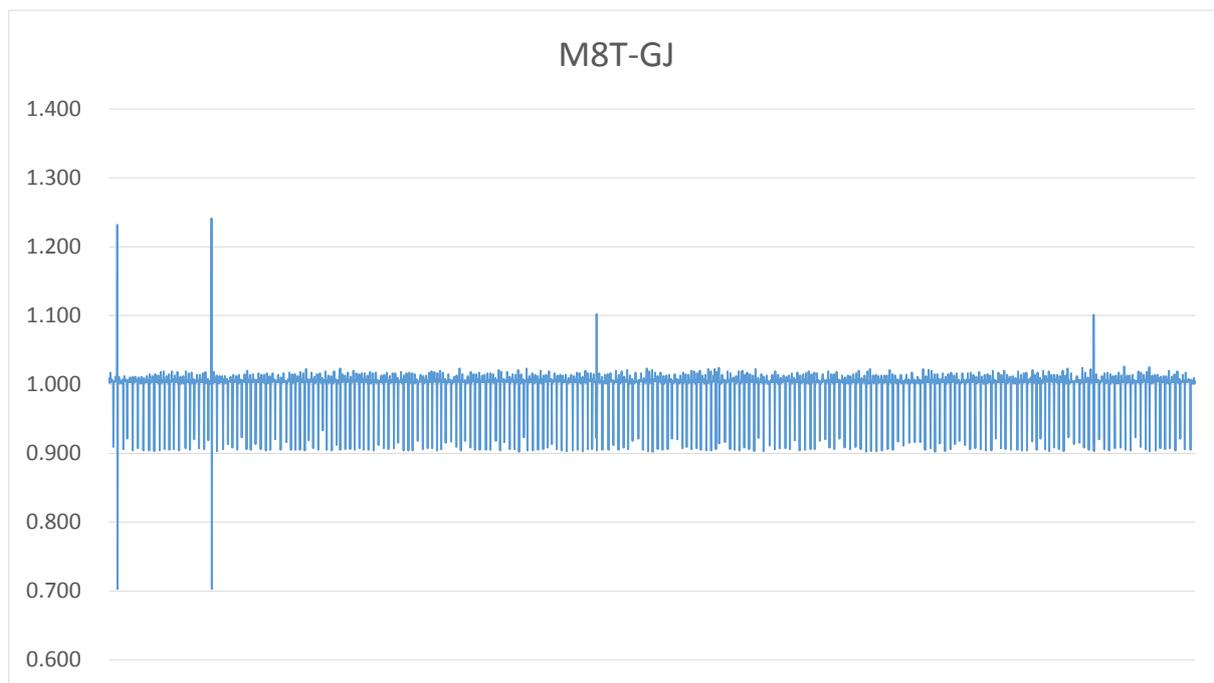


図 3.3.4-1 出力間隔グラフ (u-blox EVK-M8T、GJ)

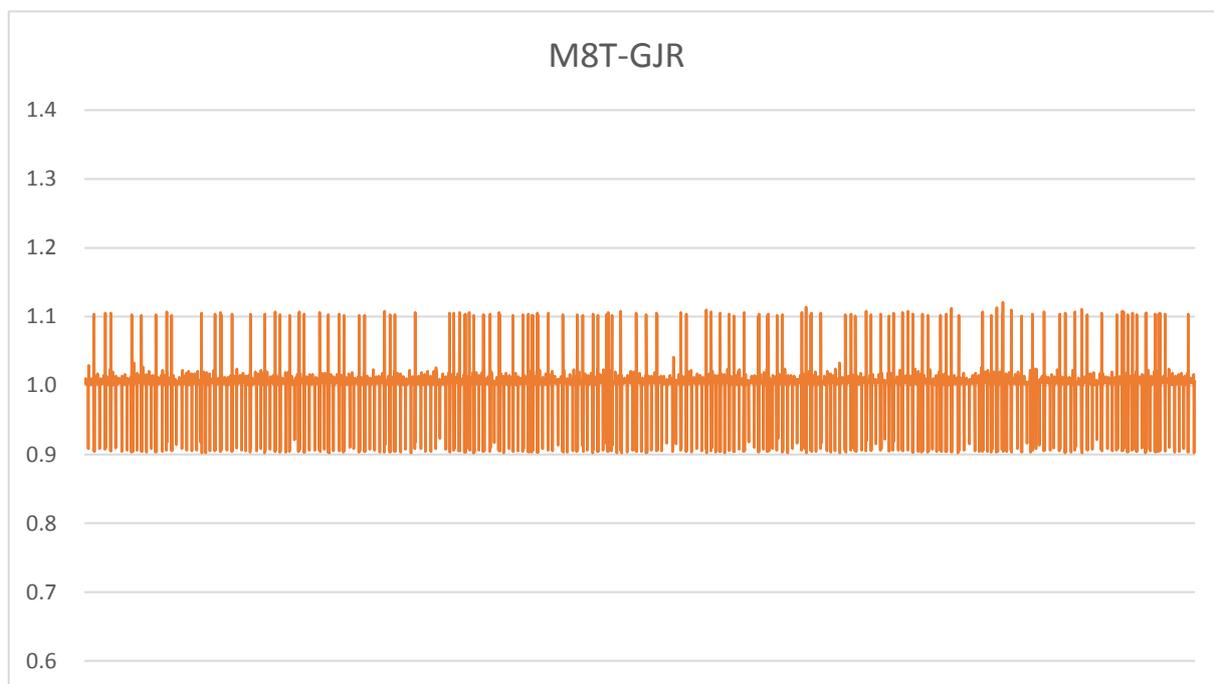


図 3.3.4-2 出力間隔グラフ (u-blox EVK-M8T、GJR)

EVK-M8T GJR 出力間隔 (一部)

表 3.3.4-1 出力間隔表（一部分のみ、u-blox EVK-M8T、GJR）

GGA 出力時刻 [HHmmss.SSS]	スタンプ時刻 [HHmmss.SSS]	GGA 出力間隔[秒]	スタンプ出力間隔[秒]
21040.000	21041.277	1.000	1.002
21041.000	21042.280	1.000	1.003
21042.000	21043.187	1.000	0.907
21043.000	21044.292	1.000	1.105
21044.000	21045.201	1.000	0.909

EVK-M8T のそれぞれの受信機の測位結果出力周期は 1Hz である。±0.1 秒程度のズレが頻繁に発生している。これは出力周期 1Hz にもかかわらず 0.9 秒程度もしくは 1.1 秒程度の間隔で出力されていることになる。また 0.01 秒程度の細かいズレも見られるが測定誤差の範囲内と判断する。

3.3.4.2. コード測位 2

NEC QZ-1 出力間隔グラフを以下に示す。

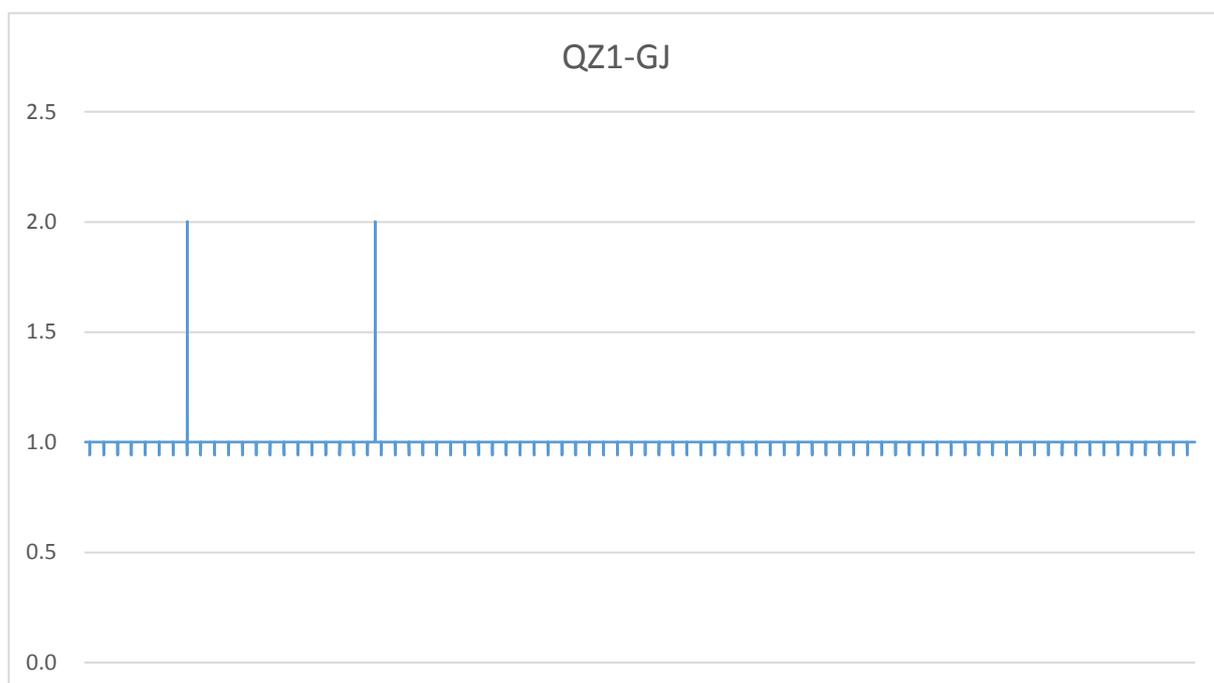


図 3.3.4-3 出力間隔グラフ（NEC QZ-1、GJ）

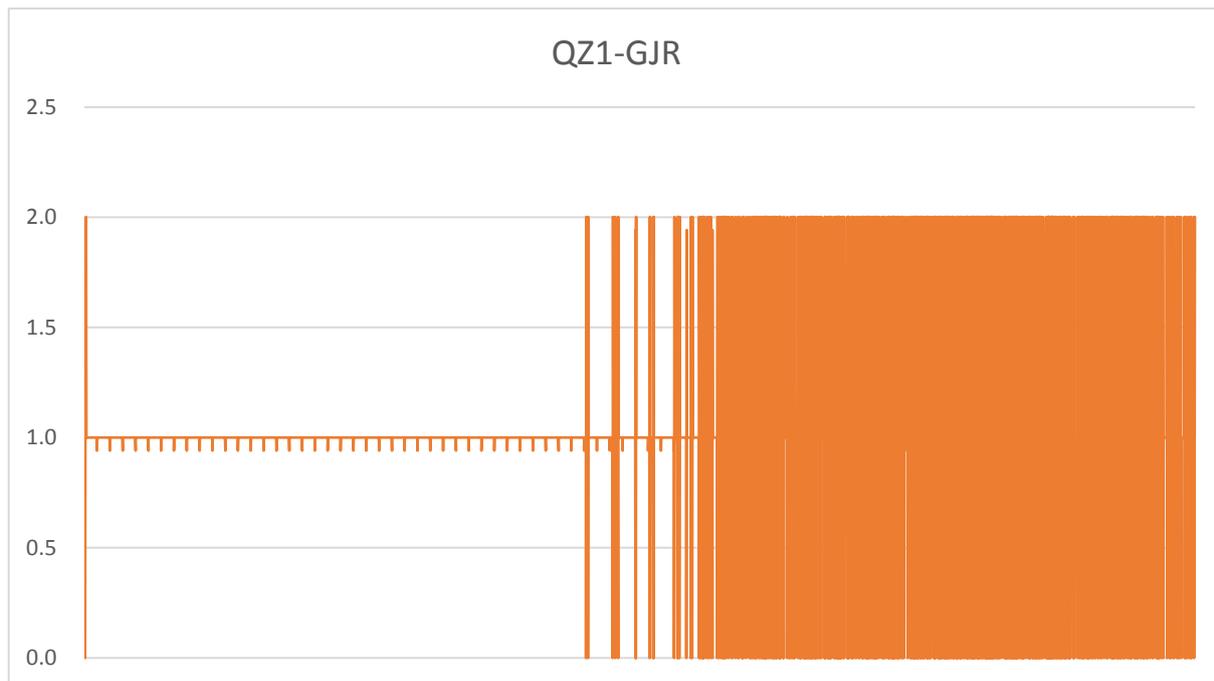


図 3.3.4-4 出力間隔グラフ (NEC QZ-1、GJR)

QZ-1 GJR 出力間隔 (一部)

表 3.3.4-2 出力間隔表 (一部分のみ、NEC QZ-1、GJR)

GGA 出力時刻 [HHmmss.SSS]	スタンプ時刻 [HHmmss.SSS]	GGA 出力間隔 [秒]	スタンプ出力間隔[秒]
24914.000	24912.012	1.000	1.001
24915.000	24914.014	1.000	2.002
24916.000	24914.014	1.000	0.000
24917.000	24915.015	1.000	1.001
24918.000	24917.017	1.000	2.002
24919.000	24917.017	1.000	0.000
24920.010	24919.019	1.010	2.002
24921.000	24920.020	0.990	1.001
24922.000	24920.020	1.000	0.000
24923.000	24921.021	1.000	1.001
24924.000	24923.023	1.000	2.002
24925.000	24924.024	1.000	1.001
24926.000	24925.025	1.000	1.001
24927.000	24926.026	1.000	1.001
24928.000	24926.026	1.000	0.000

QZ1 のそれぞれの受信機の測位結果出力周期は 1Hz である。

GJ ではほぼ 1 秒間隔で出力されているのに対し、GJR の後半はズレが頻繁に発生している。計算結果を確認すると、2 秒間隔があいた後に、同一スタンプ時刻で 2 エポック分の GGA が出力されている。

3.3.4.3. QZSS L6 (CLAS) 補強

QZSS の L6 (CLAS) について評価を行った。

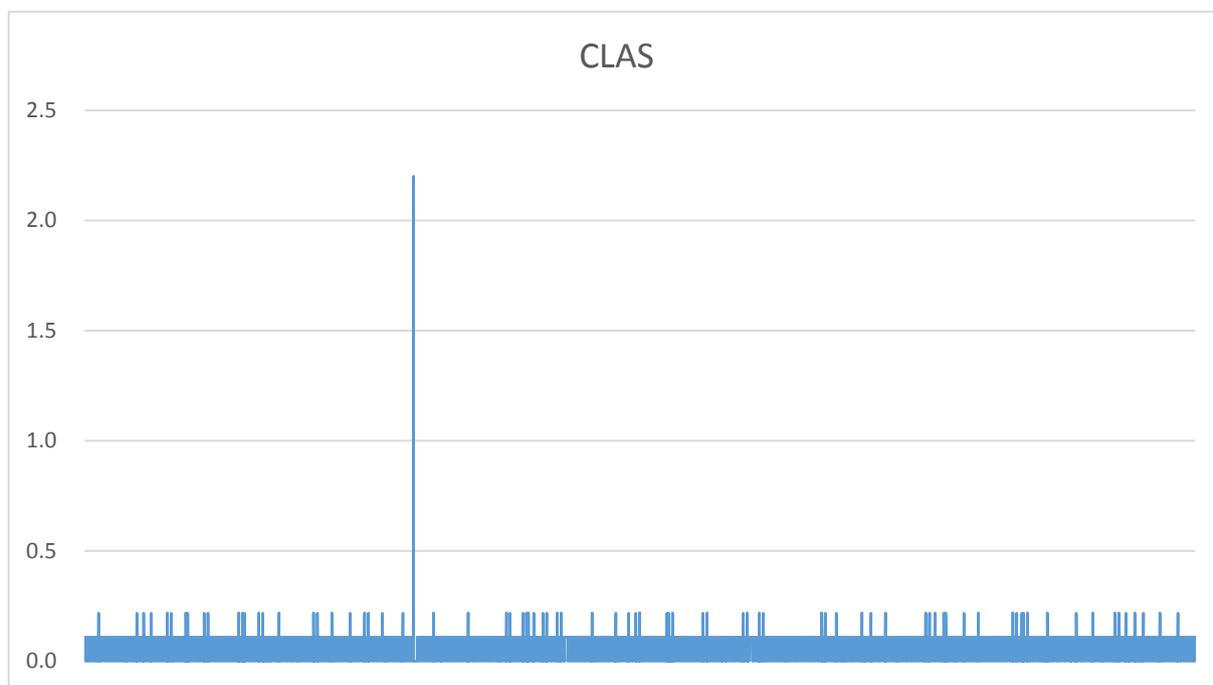


図 3.3.4-5 出力間隔グラフ (CLAS)

AQLOC の測位結果出力周期は 10Hz である。頻繁に 0.2 秒程度の間隔で出力されている。さらにおよそ 2.2 秒の遅れが発生しており、22 エポック分がまとめて出力されていると考えられる。

表 3.3.4-3 出力間隔表 (一部分のみ、CLAS)

GGA 出力時刻 [HHmmss.SSS]	スタンプ時刻 [HHmmss.SSS]	GGA 出力間隔[秒]	スタンプ出力間隔[秒]
70420.300	70355.763	0.100	0.109
70420.400	70357.963	0.100	2.200
70420.500	70357.963	0.100	0.000
70420.600	70357.963	0.100	0.000
70420.700	70357.963	0.100	0.000
70420.800	70357.963	0.100	0.000
70420.900	70357.963	0.100	0.000
70421.000	70357.963	0.100	0.000

70421.100	70357.963	0.100	0.000
70421.200	70357.963	0.100	0.000
70421.300	70357.963	0.100	0.000
70421.400	70357.963	0.100	0.000
70421.500	70357.963	0.100	0.000
70421.600	70357.963	0.100	0.000
70421.700	70357.963	0.100	0.000
70421.800	70357.963	0.100	0.000
70421.900	70357.963	0.100	0.000
70422.000	70357.963	0.100	0.000
70422.100	70357.963	0.100	0.000
70422.200	70357.963	0.100	0.000
70422.300	70357.963	0.100	0.000
70422.400	70357.963	0.100	0.000
70422.500	70357.963	0.100	0.000
70422.600	70357.963	0.100	0.000
70422.700	70358.072	0.100	0.109

3.3.4.4. 時刻誤差の要因

検証の結果、ログデータ上では正しい出力間隔になっていても、実際には数エポック分がまとまって出力されている可能性が確認できた。

この現象が受信機と記録用端末のどちらに起因するかは不明であるが、いずれにせよ高いリアルタイム性／時刻同期性が求められるシステムにおいては大きな問題となる。

4. ダイナミックマップ上での測位誤差要因の検討

4.1. 検討概要

4.1.1. 目的

自動走行システムの実現に向けては、ダイナミックマップ上での高度な自律センサと地物による位置標定を前提としたうえで、これを補完するために衛星測位情報を活用することが検討されている。これらを踏まえたうえで、ダイナミックマップでの位置の考え方を整理しつつ、実際に衛星測位を利用する際に生じる測位誤差の要因を検討し、ダイナミックマップ上で衛星測位を利用するうえでの課題を抽出し、検討を行った。

4.1.2. 検討方法

ダイナミックマップの位置精度を検証し、どのような精度でダイナミックマップが作成されるのかを把握し、実測データを基に衛星測位の誤差要因の影響を調査する。

これら 2 つの情報を基にダイナミックマップ上で衛星測位の位置情報を利用するための問題点を把握すると同時に、ダイナミックマップ上で衛星測位を活用する方法を検討した。

4.2. ダイナミックマップの位置精度

4.2.1. ダイナミックマップ基盤企画会社へのヒアリング

ダイナミックマップの位置情報精度に関しては、ダイナミックマップ基盤企画株式会社（DMP）※にヒアリングを実施した。

目的：ダイナミックマップの位置情報に関する調査

日時：平成 28 年 1 月 17 日 13:00～14:30

場所：ダイナミックマップ基盤企画会社

参加者：中島代表取締役、技術部 小野部長代理、根本課長代理（ダイナミックマップ基盤企画会社）
細井（アイサンテクノロジー）、松岡（衛星測位利用推進センター）

➤ ダイナミックマップの精度に関して

- ・ 地図情報レベル 500 相当を目標とする。
- ・ 全ての箇所で地図情報レベル 500 を満たす事が困難であるため、いい箇所、悪い箇所は明確にする。

➤ ダイナミックマップの計測方法

- ・ MMS（Mobile Mapping System）を利用して計測を行う。

➤ 精度の点検方法

- ・ GCP（Ground Control Point）による精度検証を実施する。
- ・ ただし、高速道路での設置は困難なので、検討をしている。

➤ 位置情報の基準

- ・ ダイナミックマップの位置の基準の考え方は測量（JGD2011）と同じ。
- ・ 地図の更新等を考えると、測量と同じ基準の方が適している。

- ▶ 対象となる地物等
 - ・ 基本的には道路の情報であり、SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）等で利用する地物の情報は含まない。SLAMに必要な情報等は競争領域と位置付けている。
- ▶ ダイナミックマップと衛星測位の整合に関して
 - ・ 位置を JGD2011 に合わせるものと、周辺情報を見てマップマッチングを行う考え方があり、SLAMと衛星測位の組み合わせ方がポイントとなると考えている。
 - ・ 地球上の全体的な位置がわからなくてもマップマッチングは不可能ではないが、衛星測位により初期位置を与える必要がある。
- ▶ 品質評価に関して
 - ・ 特に品質基準等は定めていない。
- ▶ ダイナミックマップの課題
 - ・ 地図（直角座標系）上の北方向と、実際の北方向では角度が異なる。
 - ・ 何処の国でも利用できるように、やり方の明確化が必要である。
 - ・ ある程度までは地殻変動の影響はないが、1m 等の変動量があると問題になる。
 - ・ 高さの情報が標高なのか楕円体高なのかが決まっていないため、現在は両方入っている。

※ダイナミックマップ基盤企画会社（DMP）

DMP は平成 27 年度に「ダイナミックマップ構築に向けた試作・評価に係る調査検討」を実施した「ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム」に参画した 6 社（三菱電機株式会社、株式会社ゼンリン、株式会社パスコ、アイサンテクノロジー株式会社、インクリメント・ピー株式会社、株式会社トヨタマップマスター）が「ダイナミックマップ協調領域」のデータ仕様やデータ構築手法の標準化、メンテナンス手法等の実証ならびに決定を行い、永続的な整備・更新を前提とした事業化の検討を行うために設立した。

4.2.2. ダイナミックマップ作成時の位置情報

DMP へのヒアリング結果より、ダイナミックマップの作成時の位置情報の決定手法は、国土地理院の公共測量作業規程関連マニュアル・要領のひとつ「移動体計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル（案）」（平成 24 年 5 月）に準じていることが確認できた。

数値地形図データの位置精度と地図情報レベルの関係は以下ようになる。

表 4.2.2-1 数値地形図データの位置情報及び地図情報レベル

地図情報レベル	水平位置の標準偏差	標高点の標準偏差	等高線の標準偏差
250	0.12 以内	0.25m 以内	0.5m 以内
500	0.25m 以内	0.25m 以内	0.5m 以内
1000	0.70m 以内	0.33m 以内	0.5m 以内
2500	1.75m 以内	0.66m 以内	1.0m 以内
5000	3.50m 以内	1.66m 以内	2.5m 以内
10000	7.00m 以内	3.33m 以内	5.0m 以内

ダイナミックマップは地図情報レベル 500 を目標とし、困難な場合はそれ以下の精度になるとしているため、高精度な測位が可能な場所で、水平で 25cm 程度が位置精度の基準となってくる。

ただし、表記上標準偏差であるため、必ずしも 25cm の精度が維持されているわけではない。

また、「移動体計測車両による測量システムを用いる数値地形図データ作成マニュアル(案)」では精度管理として、

第 13 条

作業機関は、測定の正確さを確保するため、適切な精度管理を行い、その結果に基づいて精度管理表を作成し、これを計画機関に提出しなければならない。

2 作業機関は、各工程別作業の終了時、その他適切な時期に所要の点検を行わなければならない。

3 作業機関は、作業の終了後速やかに点検測量を行わなければならない。

とあるが、ダイナミックマップ作成において、点検の実施は必ずしも行われるわけではないため、地図情報レベル 500 の精度を必ずしも満たしているという状況ではない。これは、ダイナミックマップが測量法に準拠した空間情報ではなく、自動走行に必要な情報として定義されていることが理由となっている。一方、地理情報の品質は地理情報標準第 2 版 (JSGI 2.0: Japanese Standards for Geographic Information 2.0) に品質原理として定義されている。これは作成される空間データ毎に品質要求定義書が作成され、要求定義書に基づいた品質評価を実施することで空間データの品質を維持する仕組みが提示されている。品質基準は空間データの作成コスト(費用・時間)に比例するため、早期に広域なデータを要求されるダイナミックマップでは、JSGI に基づく品質要求は行われていない。

このことより、ダイナミックマップ上で衛星測位を利用する際の留意点として

- ・ 衛星測位とダイナミックマップの座標系の違い
- ・ ダイナミックマップの位置精度の品質基準が未定義等が挙げられる。

4.2.3. 衛星測位の誤差要因

衛星測位の精度を決定する大きな要素には、「衛星配置」と「測距精度」の 2 つがある。

4.2.3.1. 衛星配置

測位に利用可能な衛星の数および配置は衛星測位の精度に大きく影響を与える。

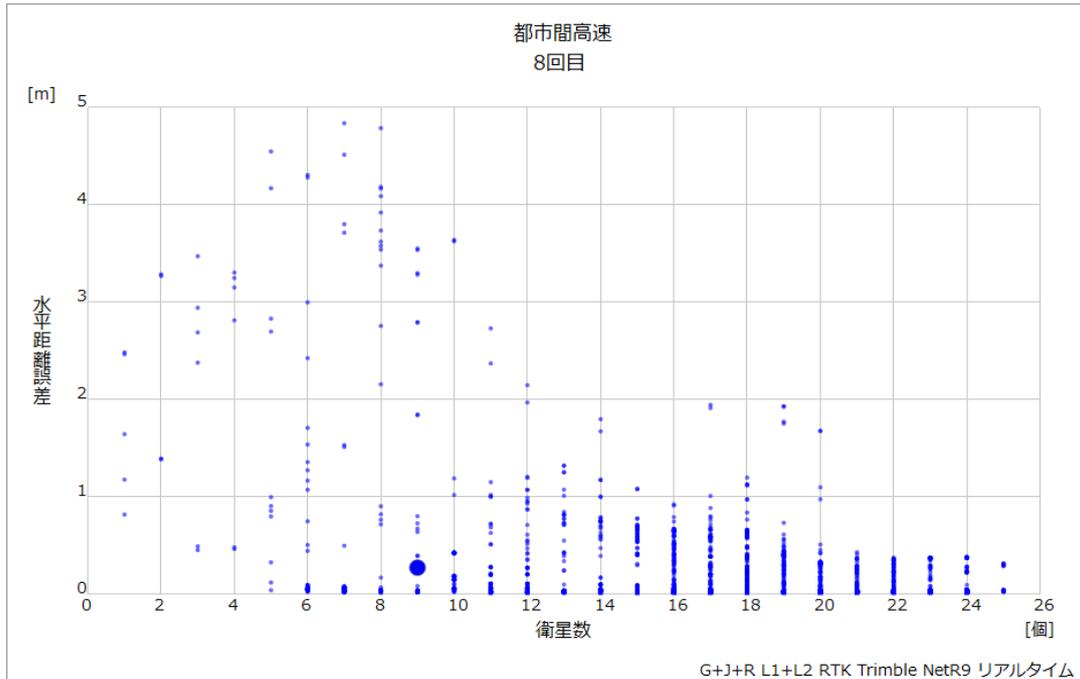


図 4.2.3-1 衛星数-水平距離誤差プロット図

図 4.2.3-1 は、都市間高速 8 回目の一部（つくば中央 IC～谷田部 IC 間）での利用衛星数（横軸）と水平距離誤差（縦軸）をプロットしている。GPS、QZSS、GLONASS、BeiDou と多くの衛星システムを利用した測位の結果であるが、利用している衛星数が多いほど誤差が小さくなる傾向がわかる。なお、少ない衛星数でも測位結果が出ているのは受信機の推定測位の結果と考えられる。

ただし、同時に処理できる最大衛星数は受信機の性能に依存するため、可視衛星数が多くても必ずしも全部の衛星が測位計算に利用されるわけではない。

一般的には低仰角にまんべんなく衛星が分布し、高仰角にも衛星があるような配置が望ましいと言われる。測位に利用する衛星の視線方向の単位ベクトルを結んで作られる立体の体積が大きいほど良いことになる。

受信機から見た衛星の幾何配置による指標には DOP (Dilution of Precision) が用いられる。DOP は値が大きいほど測位のバラつきが大きくなる。

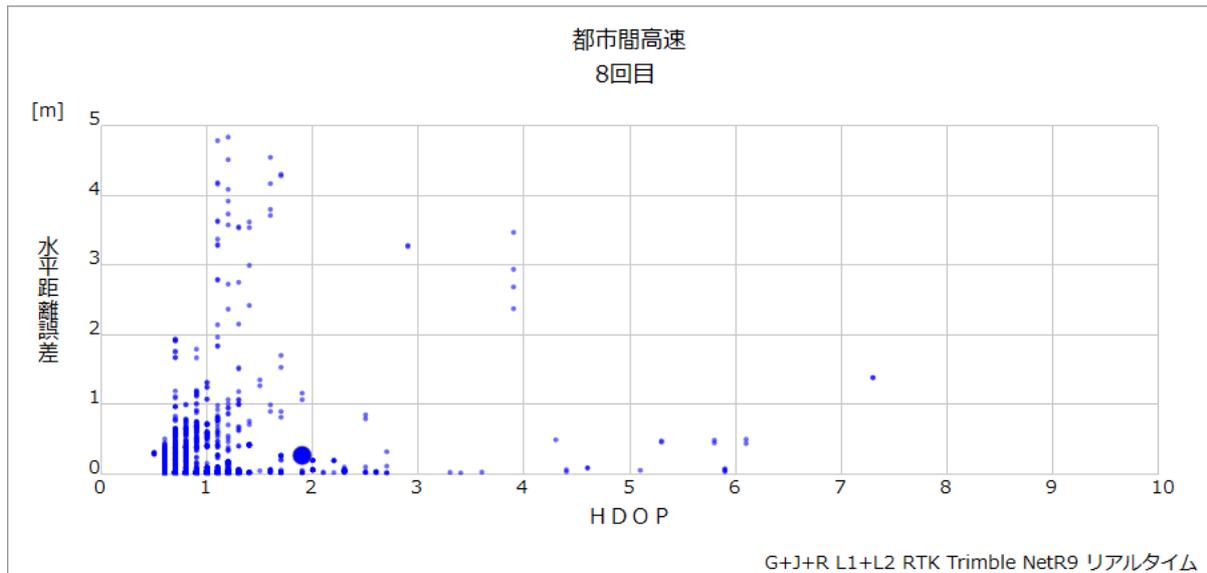


図 4.2.3-2 HDOP-水平距離誤差プロット図

同じく都市間高速 8 回目の一部（つくば中央 IC～谷田部 IC 間）での HDOP（横軸）と水平距離誤差（縦軸）をプロットした。HDOP の値が 1 を超えたあたりから大きな誤差が出現し始めている。一見 HDOP がある程度大きくなると大きな誤差のデータが少ないように見えるが、これはマルチ GNSS で測位しているため衛星数も多く HDOP も比較的小さくなることから、データそのものが少ないことと、測位計算自体が出来なかったためである。

DGPS のように基準局と移動局の両方で受信可能な共通衛星で測位計算を行う方式の場合、必然的に利用可能な衛星が少なくなるため DOP 値は悪化し、衛星の測位精度に影響を与えることがある。

4.2.3.2. 測距精度

測距精度とは疑似距離（衛星からの見かけの距離）の測定精度を指す。疑似距離は衛星からの信号が受信機まで到達する時間を利用して求められる。測距精度の誤差要因には、衛星クロック、衛星位置、電離層遅延、対流圏遅延、マルチパス、受信機等が挙げられる。測位精度は測距精度と DOP 値の積に概ね比例する。

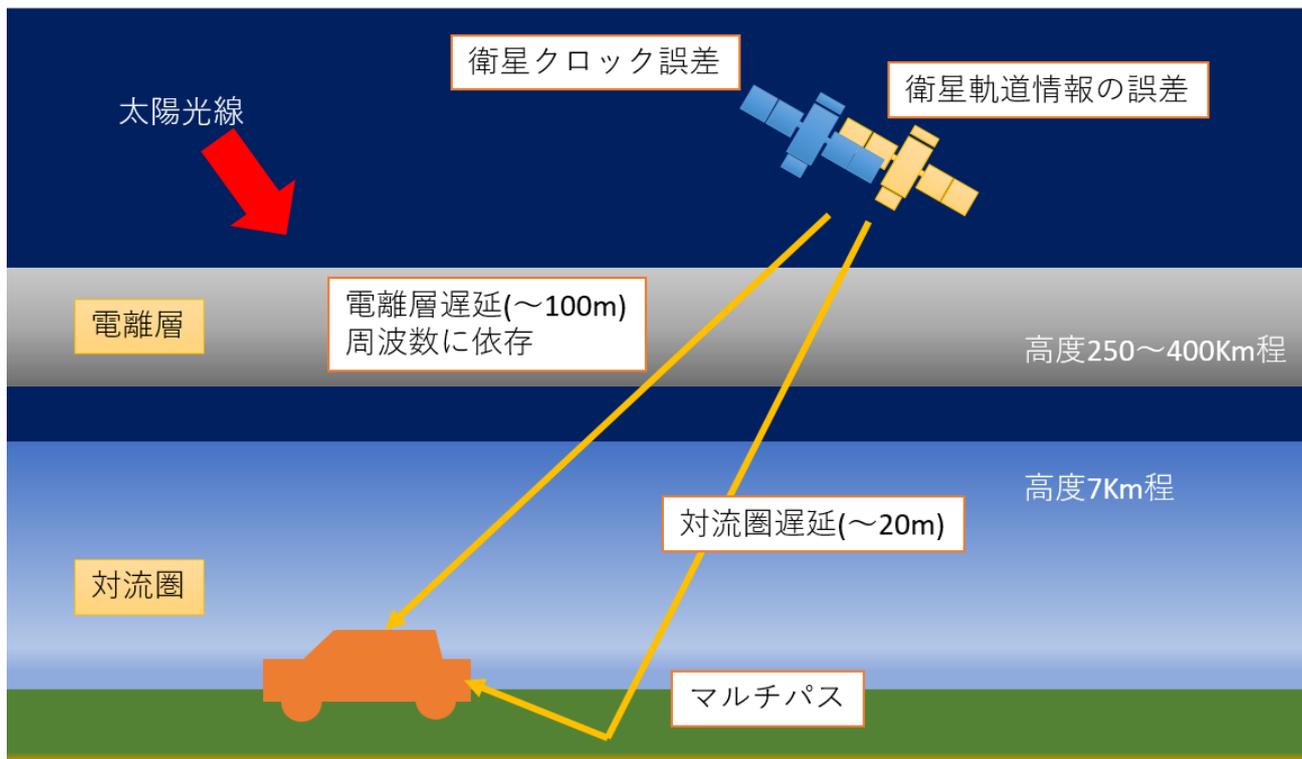


図 4.2.3-3 測距精度の誤差要因

大気圏遅延やマルチパスによる影響は、低仰角ほど大きくなる。このため仰角マスクを適用し、低仰角にある衛星を利用しないことで、測距誤差を低減することが可能である。仰角マスクを高くすることで測距精度を向上させることができるが、高くしすぎると衛星数が減少し測位精度が低下する。都市間高速 8 回目の搬送波位相受信機の RAW データを使用し、後処理で仰角マスク毎のコード測位を評価した。測位計算には GPS、QZSS、GLONASS を利用している。

表 4.2.3-1 仰角マスク毎の測位率・水平距離誤差

仰角マスク	測位率	水平距離誤差						
		RMS	〜0.5m	〜1.0m	〜1.5m	〜2.0m	〜2.5m	〜3.0m
5°	97.88%	1.969	10.96%	54.63%	87.90%	94.96%	96.94%	97.27%
10°	97.79%	2.127	6.82%	51.67%	86.31%	94.55%	96.76%	97.23%
15°	97.32%	1.43	1.13%	23.25%	68.29%	89.94%	95.63%	96.29%
30°	97.22%	1.993	0.24%	6.64%	32.80%	65.51%	80.00%	90.21%
45°	87.39%	11.285	0.00%	0.00%	0.05%	0.85%	4.38%	13.32%

都市間高速のような比較的遮蔽物の少ない走行経路の場合、衛星数の多さが低仰角の影響より大きくなる。

仰角マスク 5 度もしくは 10 度が比較的精度が良いが、RMS は 15 度が最も良い結果となっている。これは低仰角の衛星を用いたことにより、マルチパス等で大きな誤差を持つ場合があることを示している。また、仰角マスクを 45 度まで上げてしまうと、測位率自体も 10%程低下してしまう。都市間高速では、

仰角マスク 5 度～15 度が適切と考えられる。

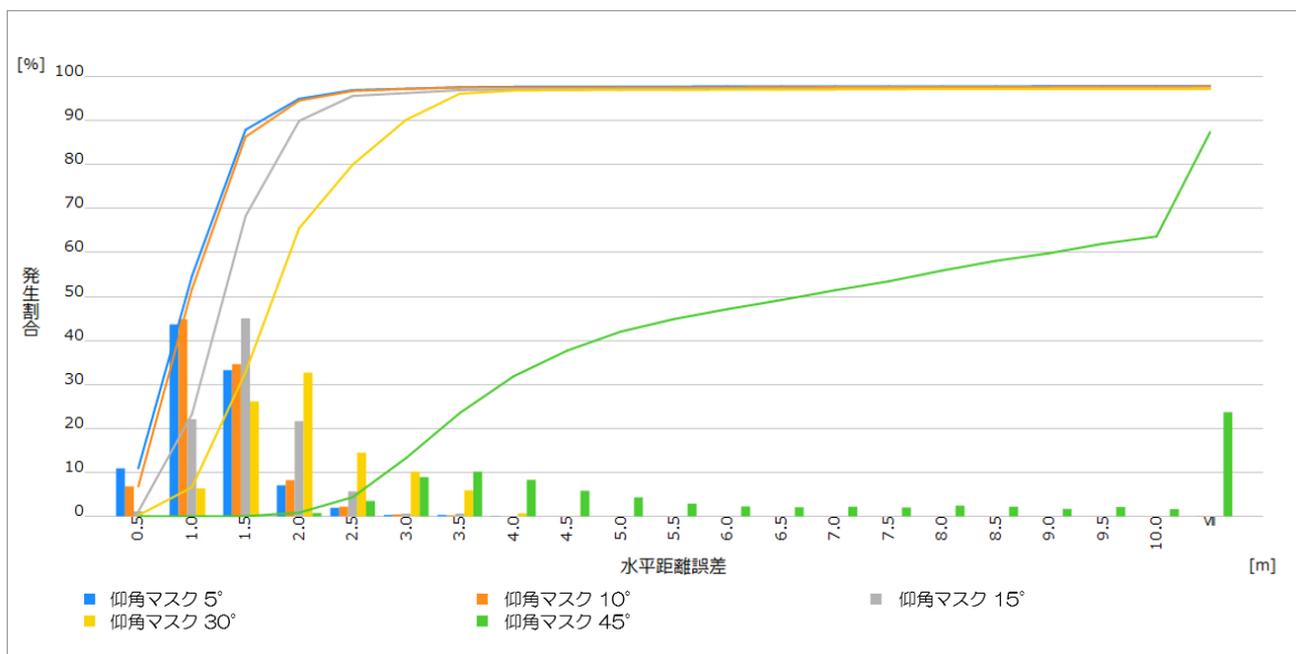


図 4.2.3-4 水平距離誤差 (仰角マスク毎)

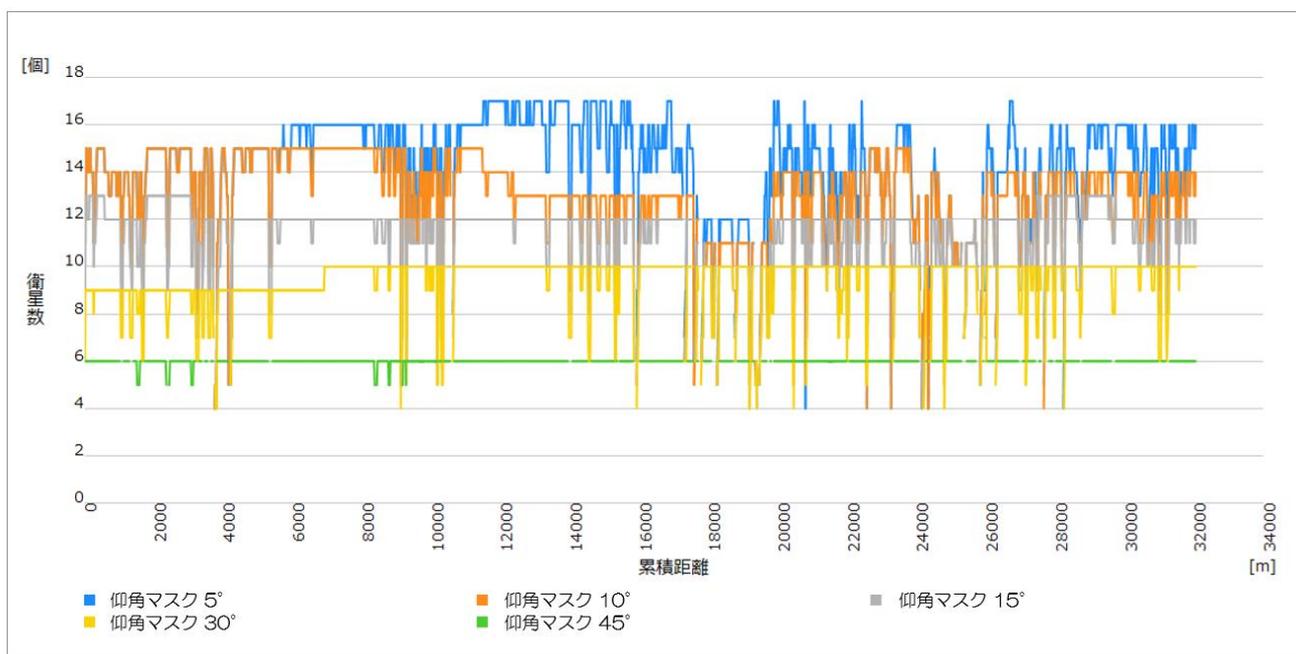


図 4.2.3-5 利用衛星数の推移 (仰角マスク毎)

仰角マスク 15 度以下であれば、概ね 12 個の利用衛星があったことがわかる。測位精度を維持するためには、12 個以上の衛星が利用可能であることが望ましいと考えられる。

GPS、QZSS、GLONASS に加え Galileo、BeiDou 等の衛星システムを利用する事で、より多くの測位衛星が利用可能となり、高仰角マスクを採用する事も検討できる。

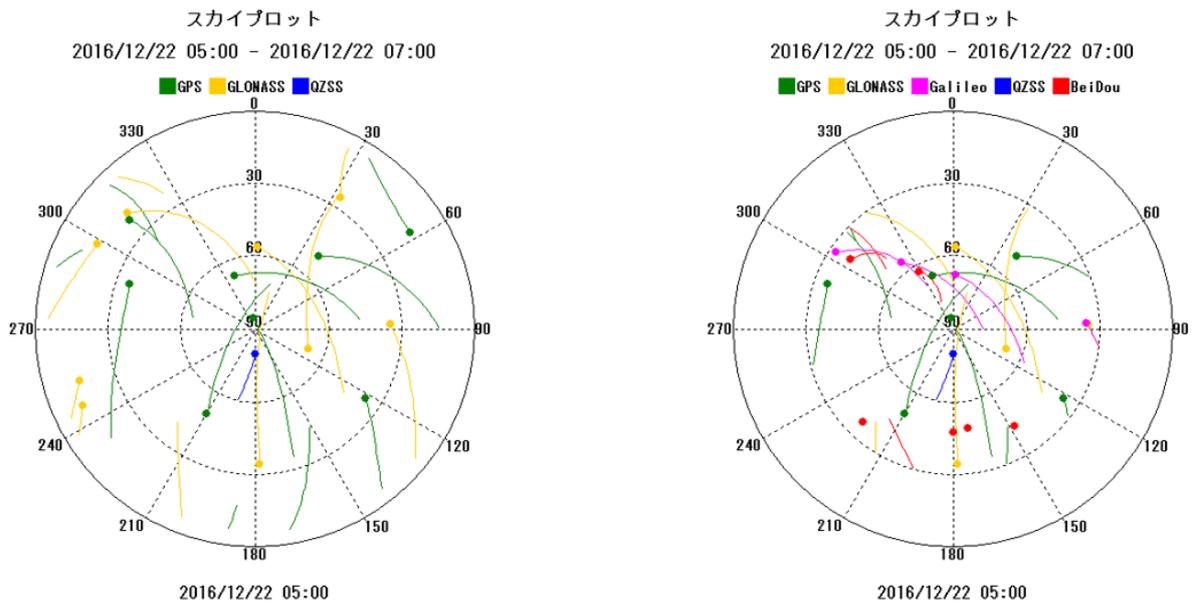


図 4.2.3-6 スカイプロット (左：仰角マスク 5 度 GJR、右：仰角マスク 30 度 GJRCE)

上図は計測当時の衛星配置を衛星軌道情報より作成したものである。左は GPS、QZSS、GLONASS を対象とした仰角マスク 5 度のスカイプロットであり、16 個程の衛星が可視となる。右は Galileo、BeiDou を加えたもので、仰角マスクを 30 度になっているが、20 個ほどの衛星が可視となっている。

衛星クロック誤差

測距信号の時刻は衛星に搭載された原子時計によって決定される。測位衛星にはセシウム、ルビジウム原子時計が複数台搭載されている。セシウム原子時計の精度は 10^{-15} 程度であり、誤差は 1 億年に 1 秒程となるが、商業用はこれより少し精度の低いものが使われている。

衛星からの航法メッセージには、衛星クロックの補正パラメータが含まれており、 ± 1 ミリ秒の範囲で補正することが可能であるが、数 m 以内の疑似距離補正残差が生じる。

衛星軌道誤差

航法メッセージに含まれるエフェメリス（軌道情報）で計算した衛星位置は、真の位置に対して数 m の誤差を生じる。この位置の誤差の内、受信機からの視線方向成分は疑似距離の誤差となる。国際 GNSS 事業 (IGS: International GNSS Service) から提供される精密軌道歴を利用する事で衛星位置に起因する測位誤差を抑えることが可能であるが、リアルタイムで最終決定暦を得ることはできない。

電離層伝搬遅延

衛星からの電波が地上に届くまでの伝搬経路には、電離層がある。電離層伝搬遅延は、電波が電離層を通過する際の電子密度に比例し、電波の周波数の二乗に反比例するある量だけ電波の速度が遅くなる事で生じる。電離層の性質は一様ではなく、昼と夜、太陽活動の活発化等の影響を受ける。また、電離層内の経路によっても遅延量が異なる。電離層伝搬遅延量は周波数依存するため 2 周波の差分を使う事で直接補正ができるが、他の誤差が増加することとなる。また 1 周波でも電離層遅延量を推定するモデルを作

り補正することで、電離層遅延による誤差を半減程度にすることが可能である。DGPS は基準局における測定値を利用して補正する方法であり、遅延量そのものを棄却できるため高い補正が可能であるが、反面基準局が遠いと電離層通過経路が異なるため、精度が低下する。

対流圏伝搬遅延

地上付近の対流圏でも伝搬遅延が生じる。対流圏での遅延は湿度と気圧で遅延量が決まる。対流圏は地上から 7km 程度までしかないため、傾斜係数が大きく、仰角 5 度の遅延量は垂直方向の遅延量の 10 倍程度になる。

マルチパス

直接波以外に反射波、回折波があると、相関波形が崩れ測距誤差の要因となるマルチパスを発生させる。マルチパスの抑制には、ナローコリレータやストロボコリレータ等の相関器の工夫によるものと、チョークリング方式等アンテナの工夫により到来波を抑える方法がある。しかし、これらは完全にマルチパスを抑えられるものではない。ただし、搬送波位相情報を用いたキャリアスムージングによりマルチパスの影響を小さくすることができる。

マルチパスに関しては第 6 章「衛星測位の測位信頼度の検証」にて詳細に検討する。

4.2.3.3. 車速による衛星測位の影響

今回の計測において、車速による顕著な測位結果への影響は確認できなかった。都市間高速での計測の為、20 m/s (70 km/h 程) の車速での計測が中心となるが、コースの設定上折返し等で一部一般道を走行するため、データとしては 0~80 km/h のデータが存在している。

以下、コード測位受信機での進行方向、左右方向の誤差を車速毎に示す。進行方向、左右方向ともに速度に対して誤差は帯状となっており、車速は測位精度に影響を与えない結果となった。

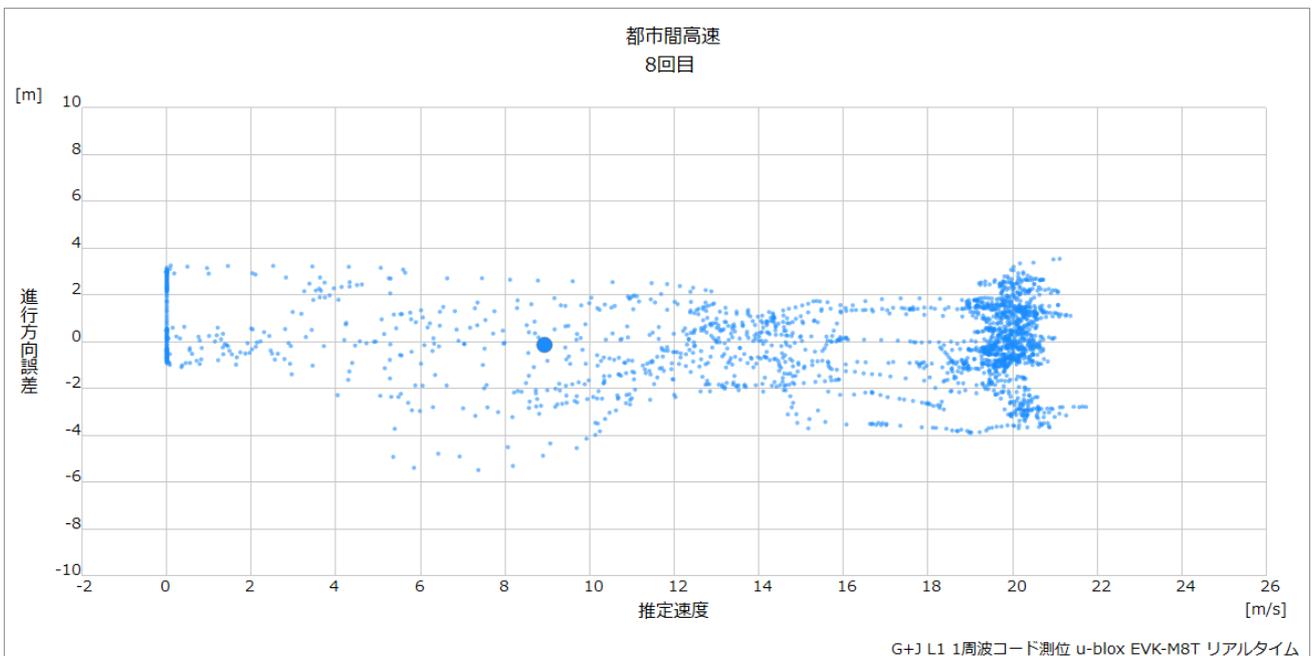


図 4.2.3-7 推定速度-進行方向誤差プロット

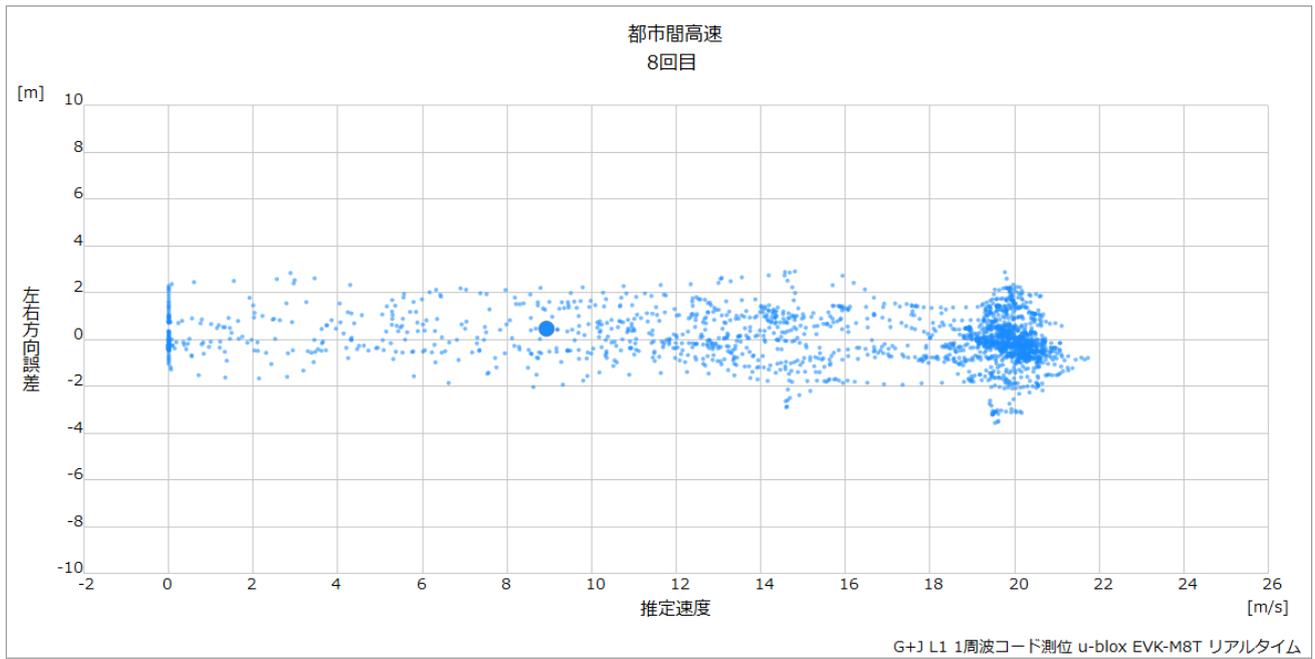


図 4.2.3-8 推定速度-左右方向誤差プロット

4.2.3.4. 上空視界の影響

天空カメラの情報を基に、上空視界が特徴的な5カ所を選定し評価を実施している。

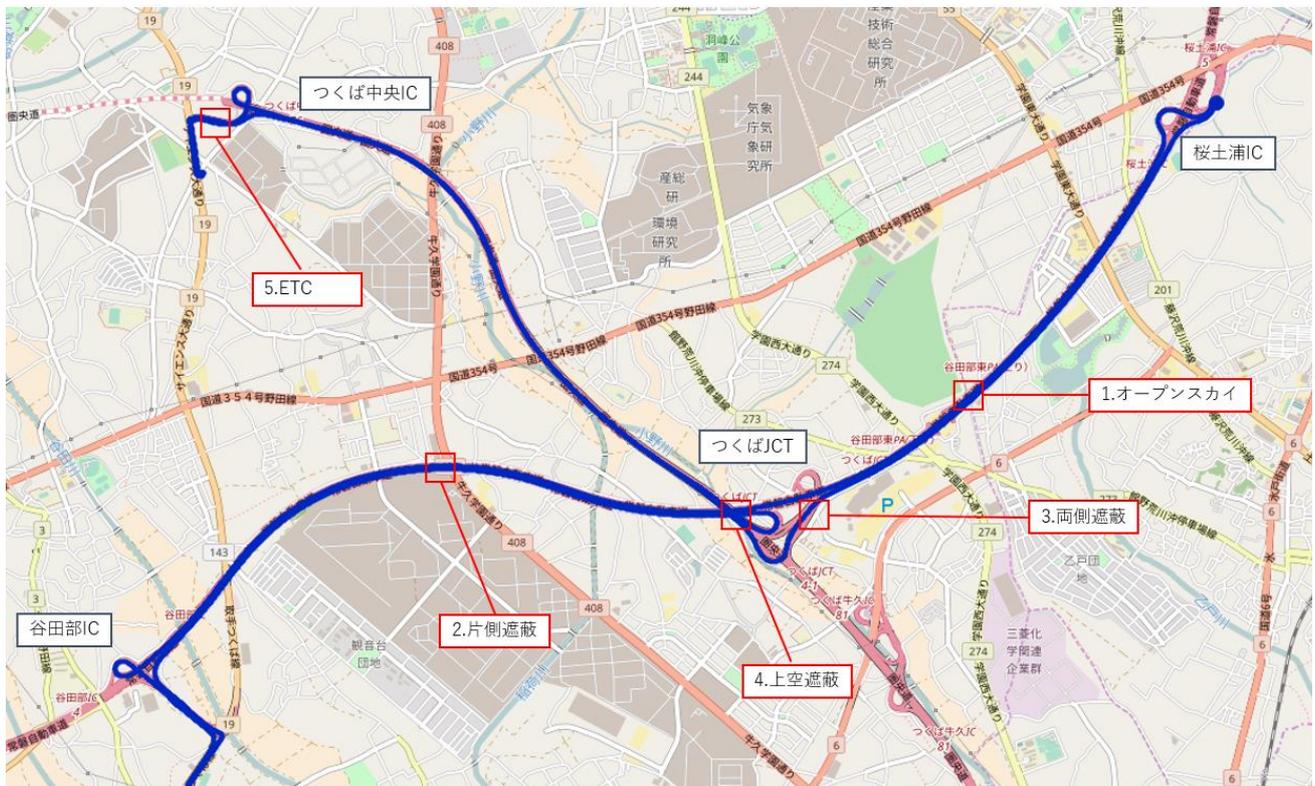


図 4.2.3-9 上空視界 検討箇所

測位評価・分析対象は天空写真撮影を行った 3 回目の走行データであり、リアルタイム計測の RTK 方式、利用衛星システムは GPS+QZSS+GLONASS+Galileo である。

表 4.2.3-2 調査対象時刻・天空率

No.	環境	場所	開始時刻 (UTC)	終了時刻 (UTC)	天空率 (正射影) [%]
1	オープンスカイ	つくば JCT→桜土浦 IC	5:20:38.9	5:20:48.9	98.2
2	片面遮蔽	つくば JCT→谷田部 IC (※手前に橋梁有)	5:09:13.3	5:09:15.2	92.0
3	両面遮蔽	つくば JCT 手前 (桜土浦 IC→つくば JCT)	4:53:35.9	4:53:45.9	94.0
4	上空遮蔽	つくば JCT (谷田部 IC→桜土浦 IC)	5:19:13.1	5:19:15.4	12.6
5	ETC	つくば中央 IC (出)	4:58:29.8	4:58:32.4	4.4

オープンスカイ

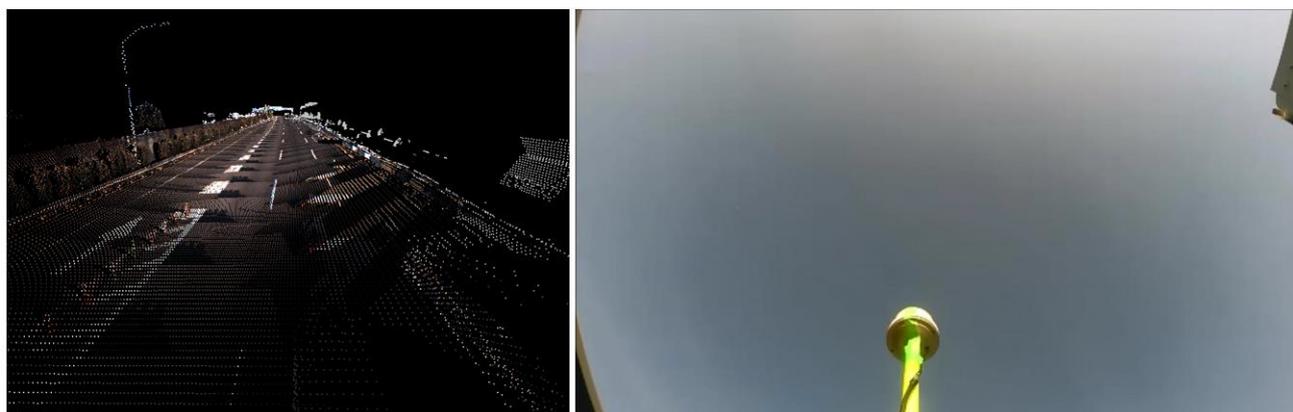


図 4.2.3-10 MMS 点群データ・上空写真 (オープンスカイ)

左は MMS で取得した点群データであり、少し手前から評価箇所を見たものとなる。右はルーフに設置した天空カメラで広角撮影 (対角 175 度) した画像である。

障害物がないため、GPS、QZS、GLONASS 合わせて 20 個以上の利用衛星があり、HDOP も 1 未満であり、良好な環境での測位となる。

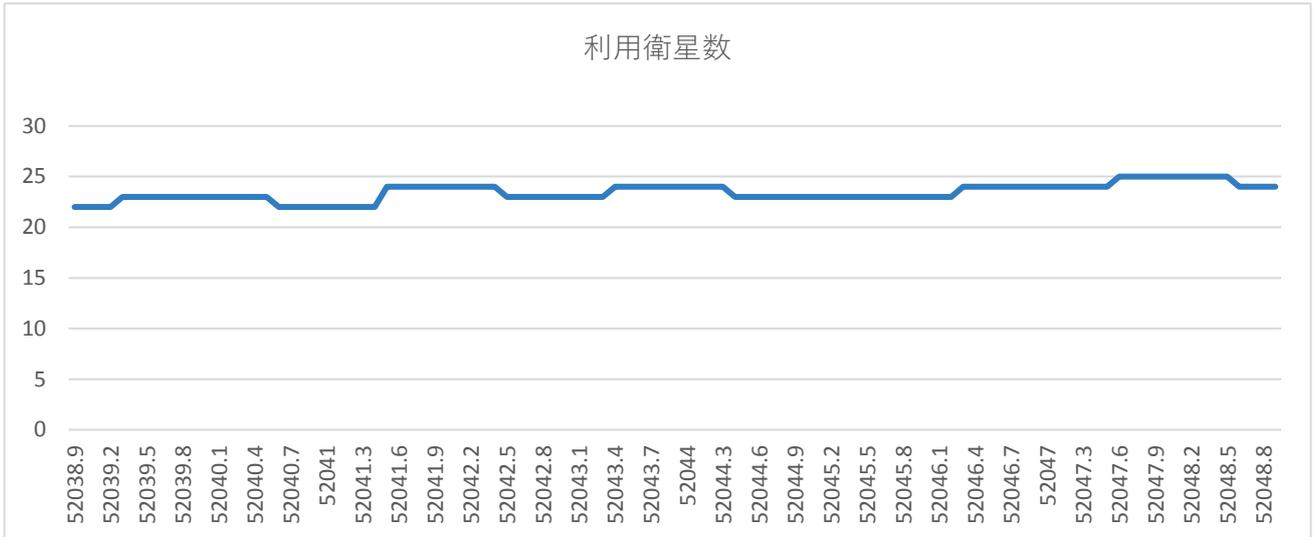


図 4.2.3-11 利用衛星数時刻推移

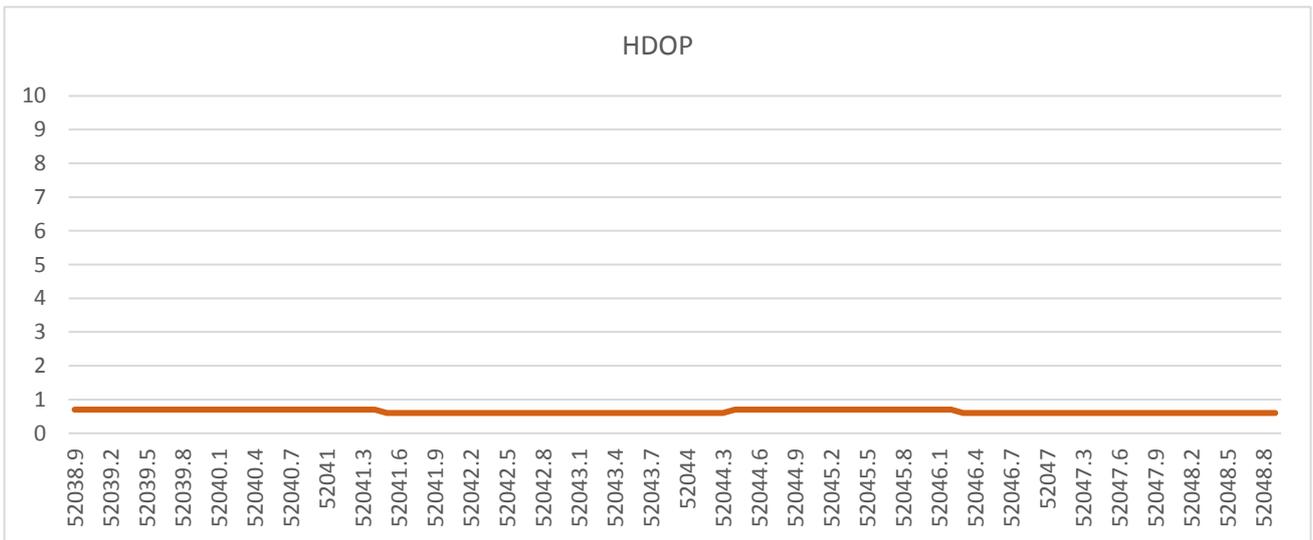


図 4.2.3-12 HDOP 時刻推移



図 4.2.3-13 Quality Indicator 時刻推移

測位の品質指標である Quality Indicator は全て Fix 解 (=4) となっており、高精度な測位結果となっている。実際に左右方向、進行方向、水平距離ともに測位誤差は小さく、特にイレギュラーとなるデータも存在しなかった。

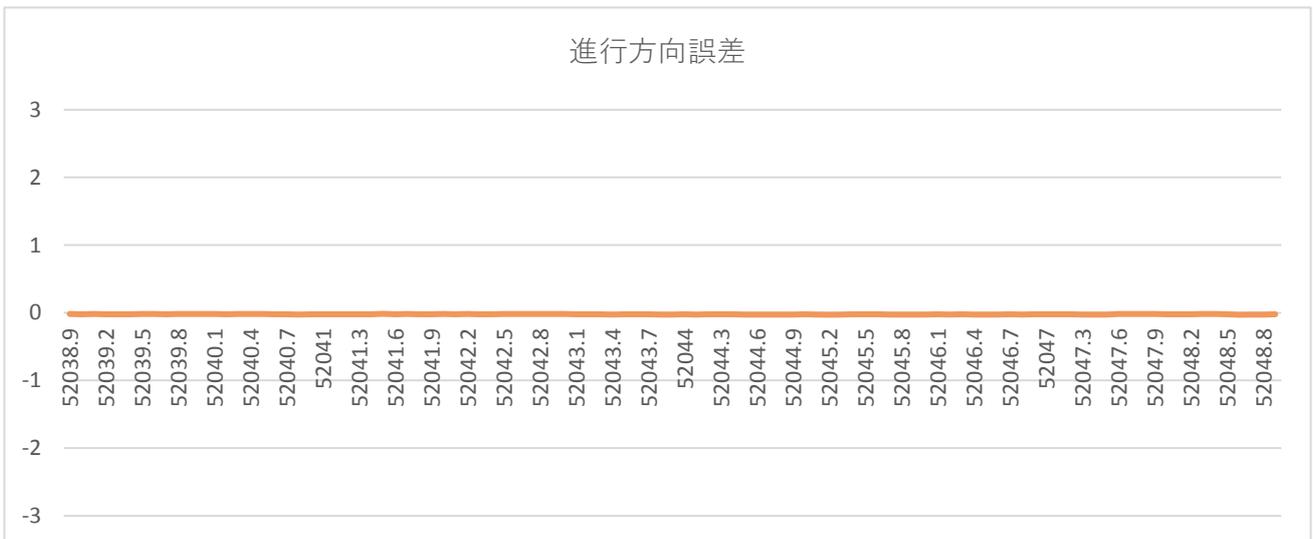


図 4.2.3-14 進行方向誤差時刻推移



图 4.2.3-15 左右方向誤差時刻推移

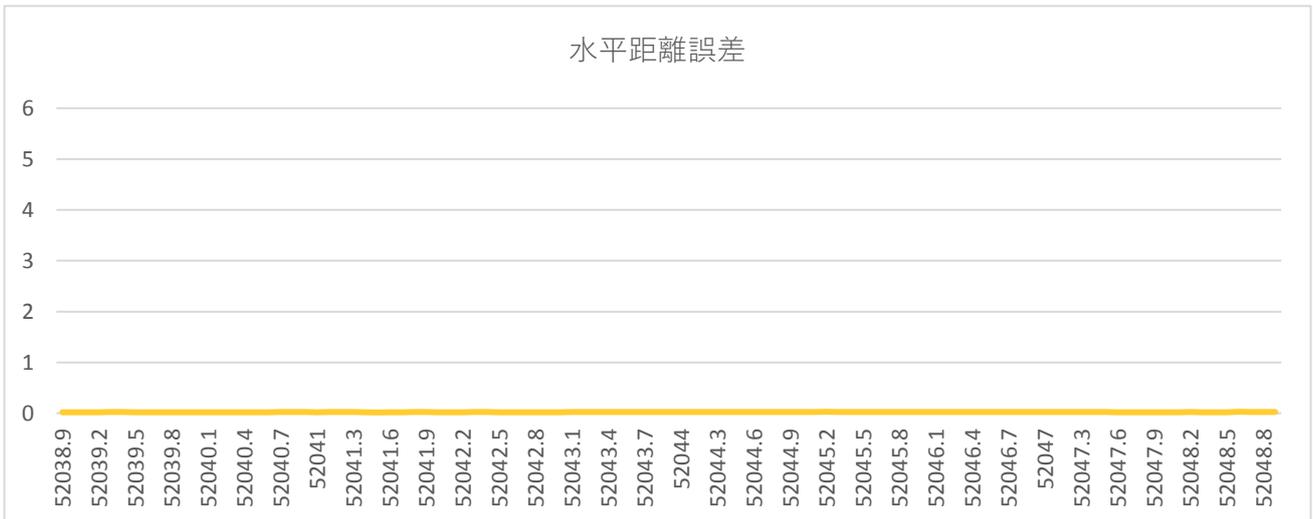


图 4.2.3-16 水平距離誤差時刻推移

片側遮蔽

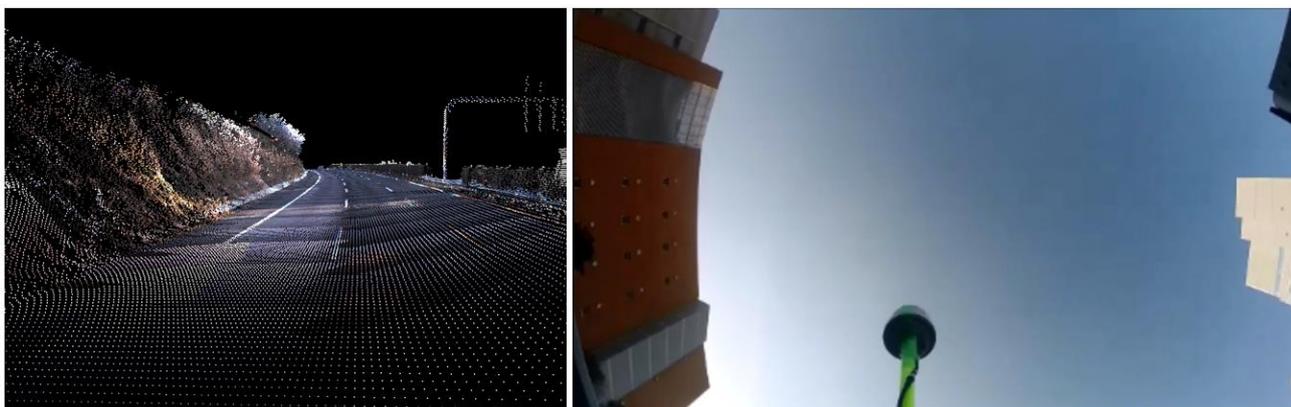


図 4.2.3-17 MMS 点群データ・上空写真（片側遮蔽）

進行方向左手に法面と建物があり、部分的な遮蔽が生じているが、天空率自体はそれほど低くない箇所である。ただし、手前が橋梁下となるため、その影響を受けた状態での測位評価を行っている。

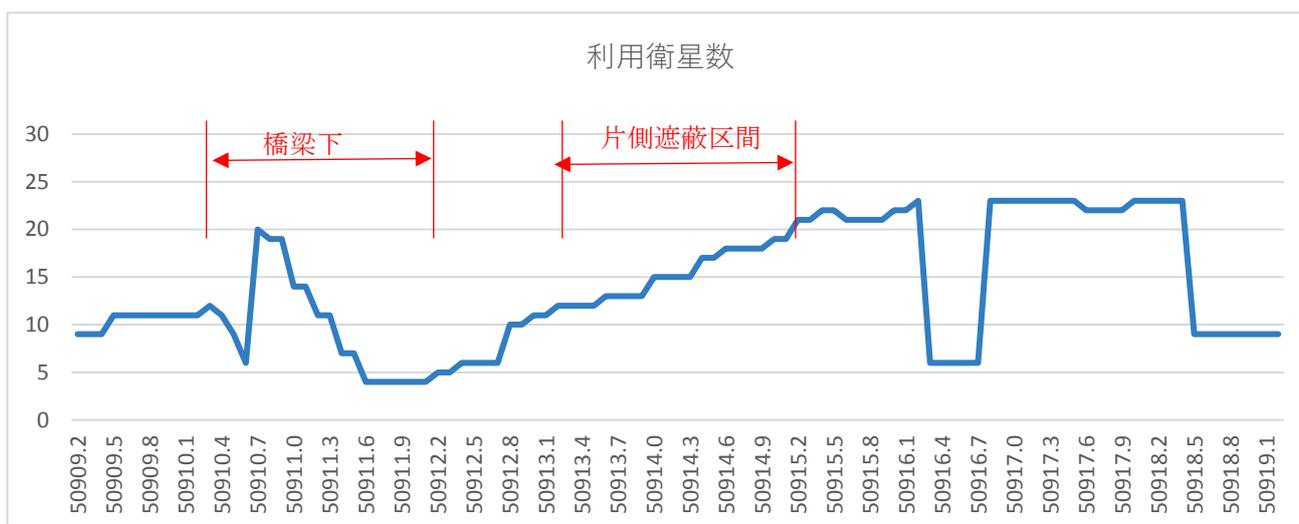


図 4.2.3-18 利用衛星数時刻推移

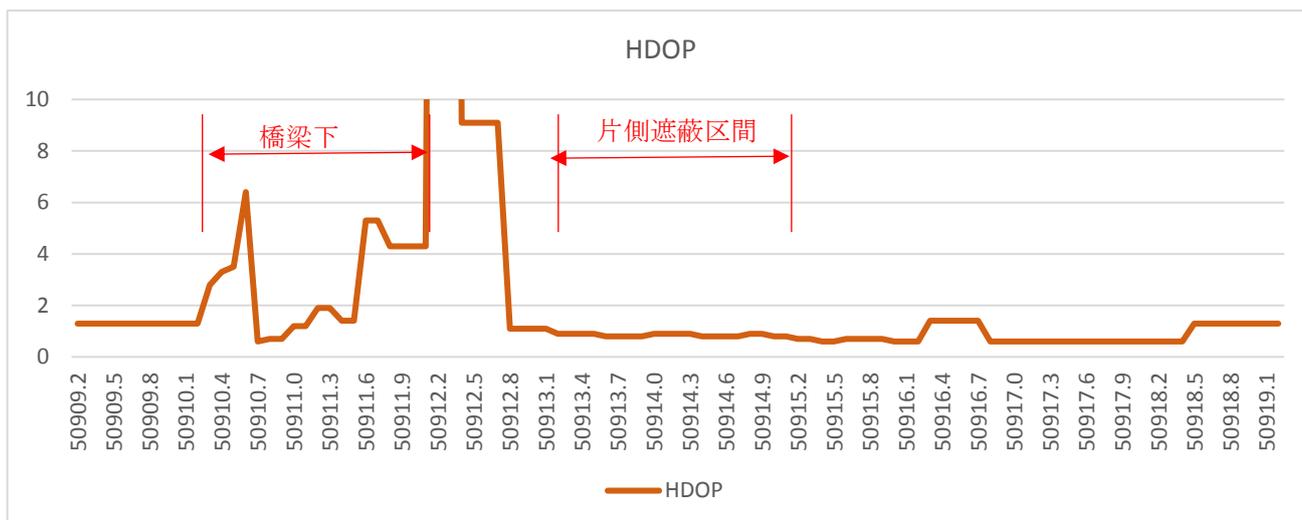


図 4.2.3-19 HDOP 時刻推移



図 4.2.3-20 Quality Indicator 時刻推移

橋梁下を通過する手前から利用衛星数は下がりはじめ、橋梁出口あたりでは、利用衛星がわずか 4 機となり、HDOP の値もグラフをはみ出し 77.9 まで跳ね上がっている。橋梁通過後、左手の部分遮蔽の影響もあり、利用衛星数と HDOP は緩やかに回復している。

一方 Quality Indicator は橋梁に入る前から Float 解であり、橋梁下では単独測位状態になり、橋梁通過後の片側遮蔽状態では DGPS 測位までしか出来ず、Fix 解を得られることは無かった。

片側遮蔽区間通過後に、利用衛星数が一時的に減少するが、Quality Indicator がそのタイミングで Float 解になっていることから、L2 信号が受信できており RTK での計算が可能になったと考えられる。同時に、使用衛星が L2 も受信できる衛星となったため、結果として利用衛星数が減ってしまい、再び DGPS 状態になったものと考えられる。片側遮蔽区間においては、こういった利用衛星数の出入りによる影響が測位性能自体を不安定にすることがわかる。



図 4.2.3-21 進行方向誤差時刻推移

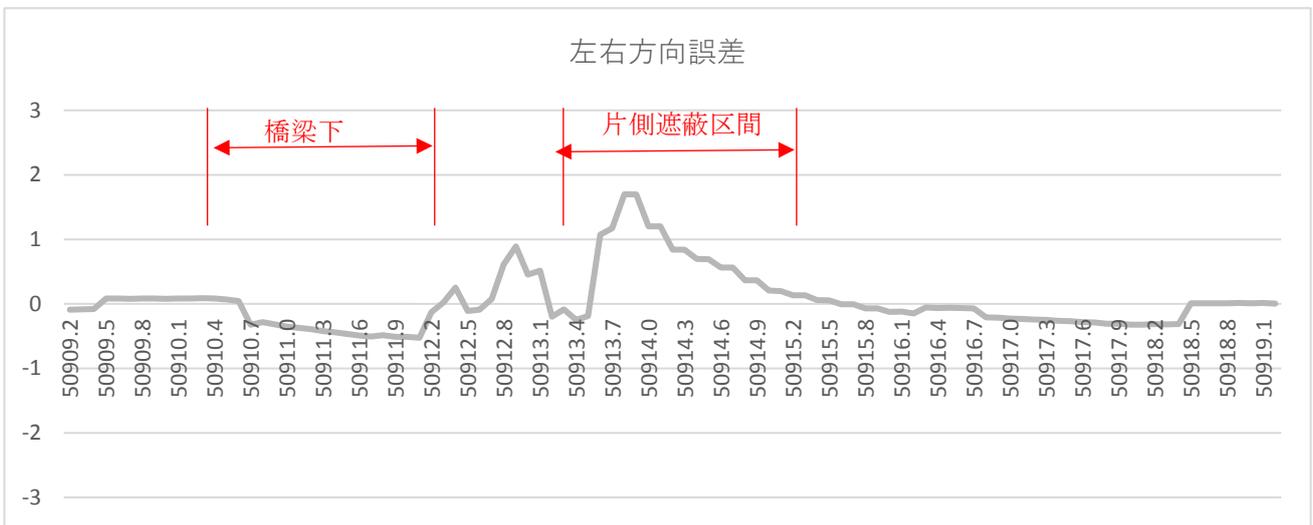


図 4.2.3-22 左右方向誤差時刻推移



図 4.2.3-23 水平距離誤差時刻推移

単独測位になっているため精度はあまり良くないが、左右方向誤差で振り幅は 2m 程度であり、通常の単独測位程度のふらつきと言える。片側遮蔽区間内から測位精度は徐々に回復しており、遮蔽区間を抜けて約 3 秒後には Float 解での測位が可能になっている。

多周波搬送波位相測位のようなマルチパスを低減できる測位方式では、マルチ GNSS による衛星数確保ができる場合は測位精度の復帰等はスムーズであると言える。

両側遮蔽



図 4.2.3-24 MMS 点群データ・上空写真（両側遮蔽）

JCT 周辺では道路構造も複雑になり、両側を遮蔽される場合もある。またこういった箇所は橋梁下通過や、進行方向の変化もあり、可視衛星の状況が大きく変化する場所ともなっている。

今回検証した、つくば中央 JCT で桜土浦 IC 方面から、つくば中央 IC へ向かう場合も可視衛星の状況は大きく変化しており、JCT 周辺での測位は不安定な状態となっている。

また、この区間では、道路標識による遮蔽の影響も確認できている。

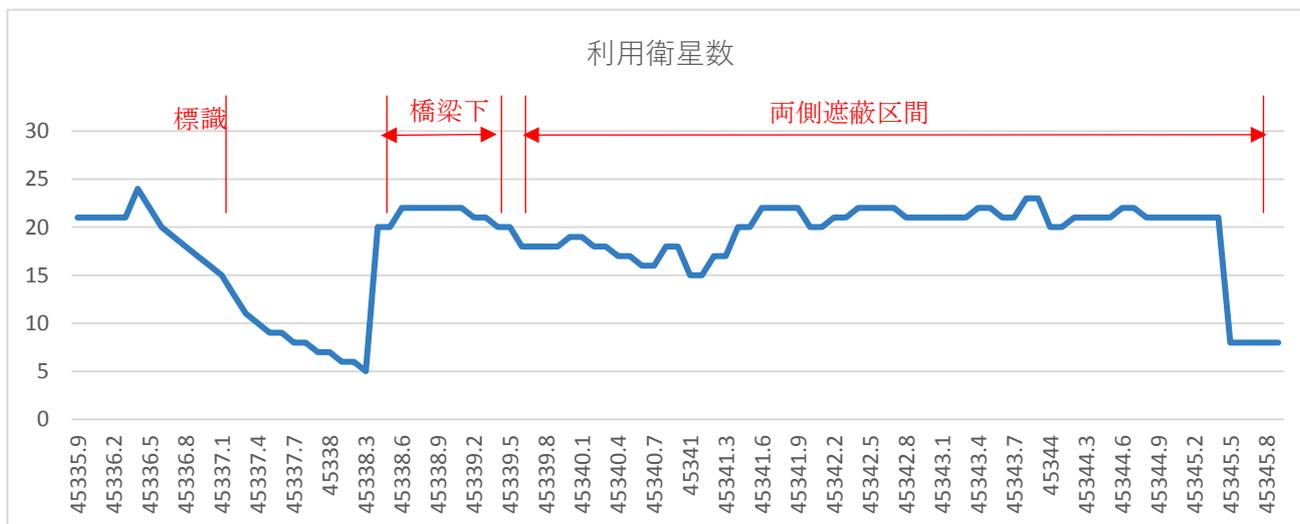


図 4.2.3-25 利用衛星数時刻推移

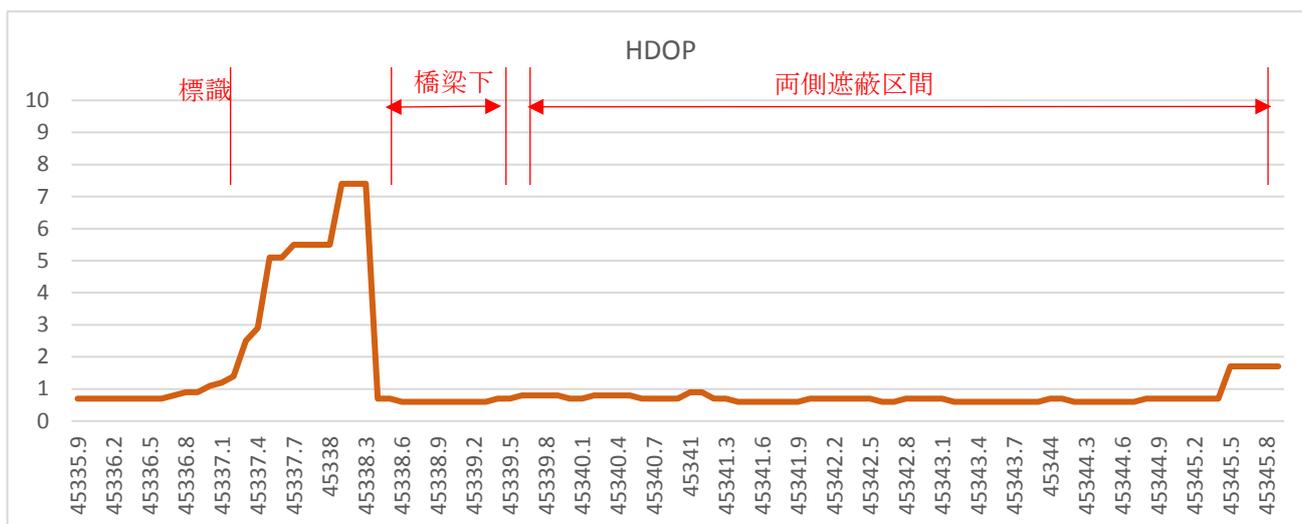


図 4.2.3-26 HDOP 時刻推移



図 4.2.3-27 Quality Indicator 時刻推移

マルチ GNSS の効果により、低仰角の側面が遮蔽状態であっても、可視衛星数は確保できたことから、利用衛星数、HDOP に関しては大きく劣化はしてはいないが、測位状態自体は RTK が利用できない時間帯が続いた。この要因としては電波強度の低い L2P が受信できなかったためであると想定でき、同時に受信できている L1 C/A に関しては、反射波であった可能性が考えられる。

また、左右方向誤差では一定方向にオフセットの様な測位誤差が生じていることから、一部の衛星の反射波による影響が出ているように考えるのが妥当であると思われる。

つくば JCT での走行経路においては、登りにより左右の遮蔽となる道路との高さの差が徐々に少なくなるため、合流となる両側遮蔽終了手前あたりから、Fix 解が得られ測位精度は RTK 本来の状態となる。このタイミングで、L1 C/A のみでの測位から、L2P も必要となる測位に切り替わるため、利用衛星数等は一旦低下する。

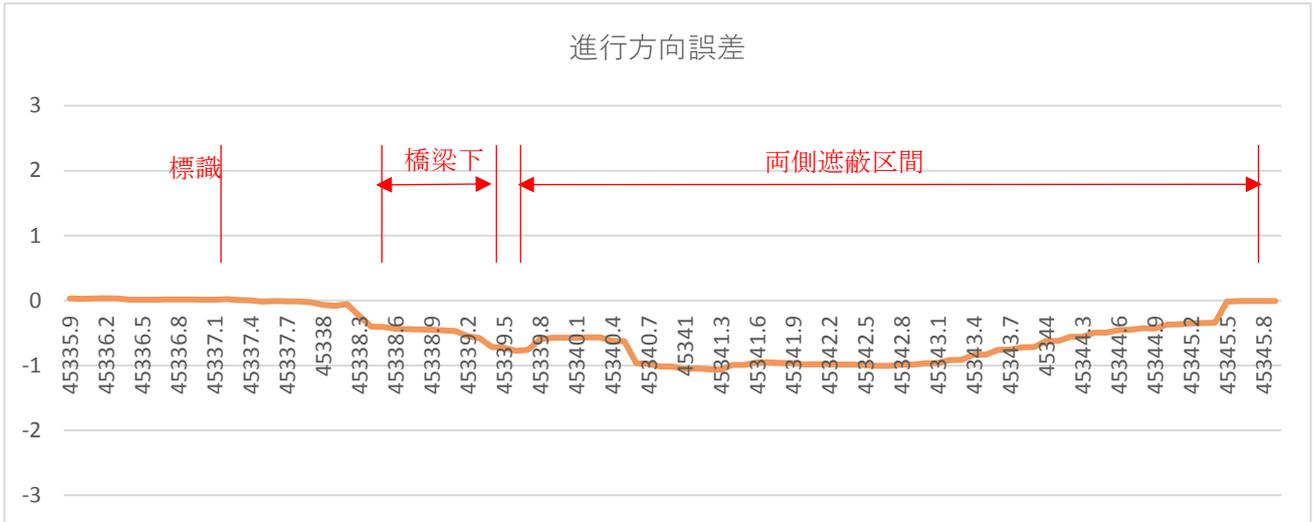


図 4.2.3-28 進行方向誤差時刻推移

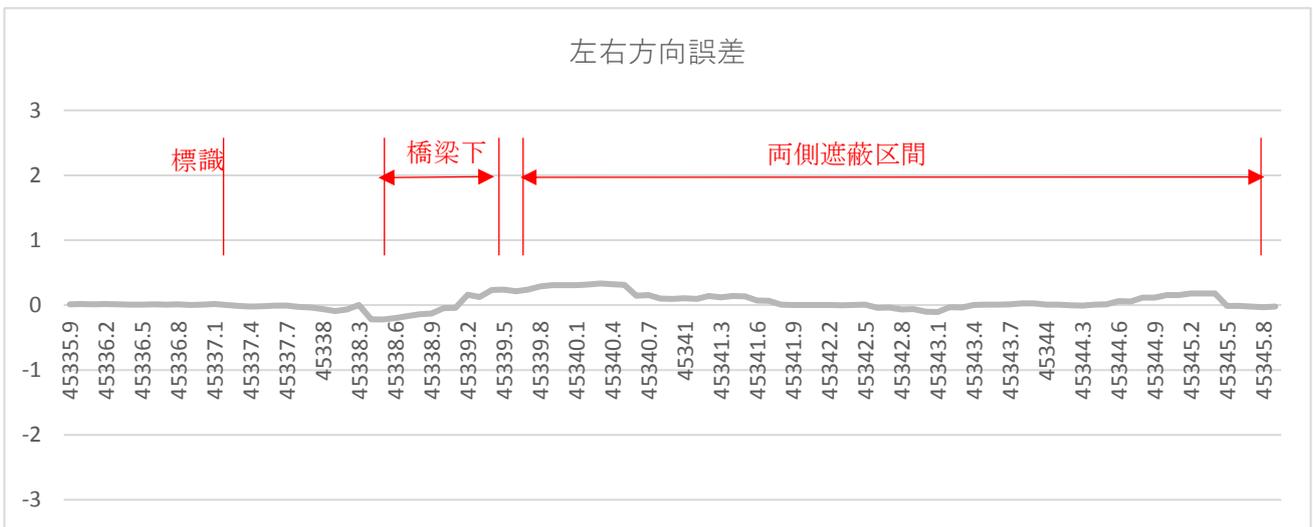


図 4.2.3-29 左右方向誤差時刻推移

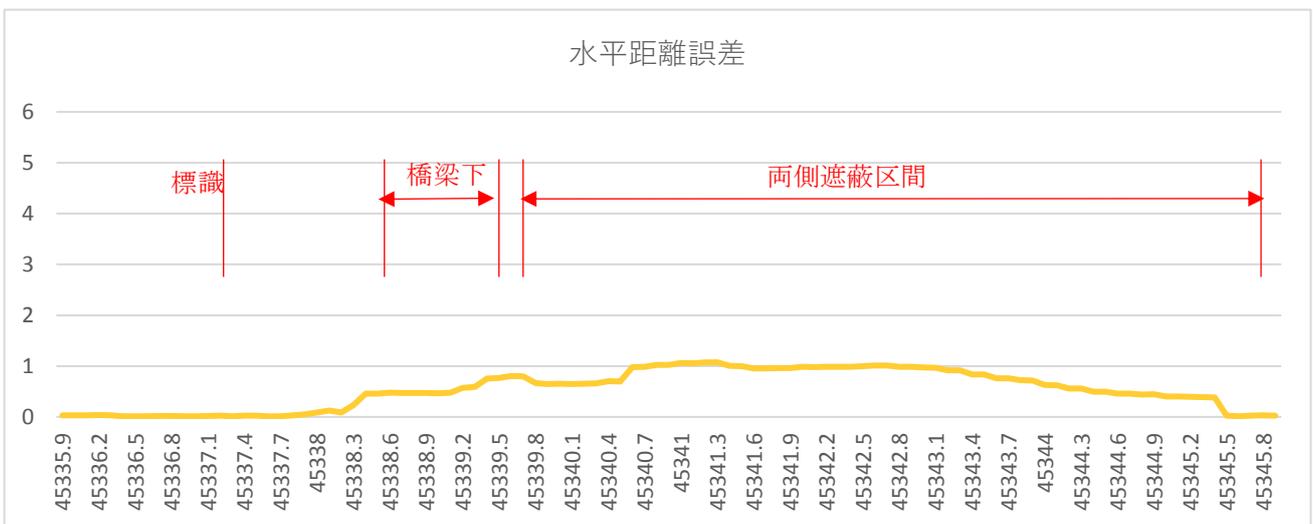


図 4.2.3-30 水平距離誤差時刻推移

JCT 周辺は衛星測位環境が目まぐるしく変化し、安定した測位結果を期待することは難しい箇所であると言える。このため JCT での衛星測位の信頼性が低いため、位置情報の取得には別の手法を用いた方が適していると言える。

上空遮蔽

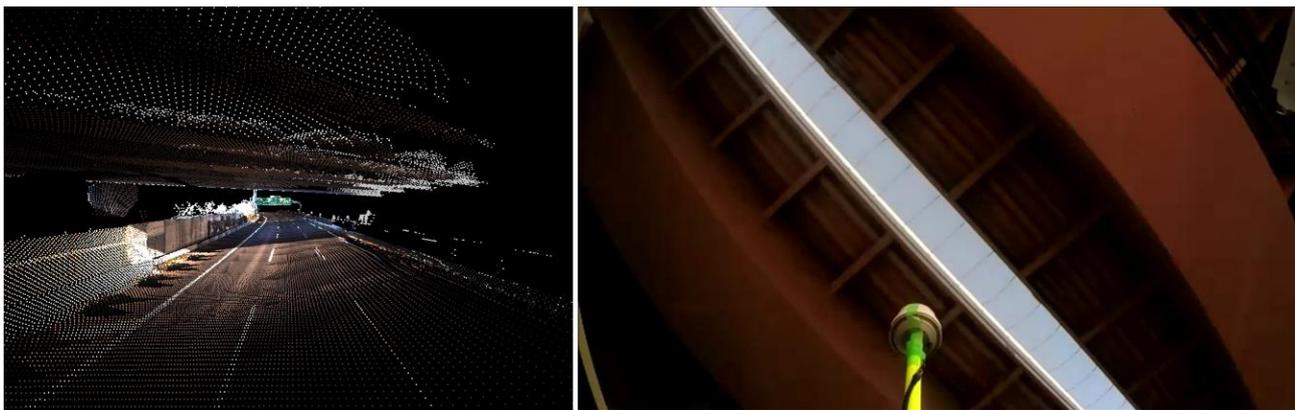


図 4.2.3-31 MMS 点群データ・上空写真（上空遮蔽）

今回の走行コースではトンネル等は含まないため、橋梁等で上空が遮られる区間が最も長い、つくば JCT 下通過時（谷田部 IC～桜土浦 IC）で検証を行っている。橋梁通過自体は 2 秒ほどであるが、10Hz での搬送波位相測位受信機を利用した RTK であるため、上空視界遮蔽による影響は直接確認できている。

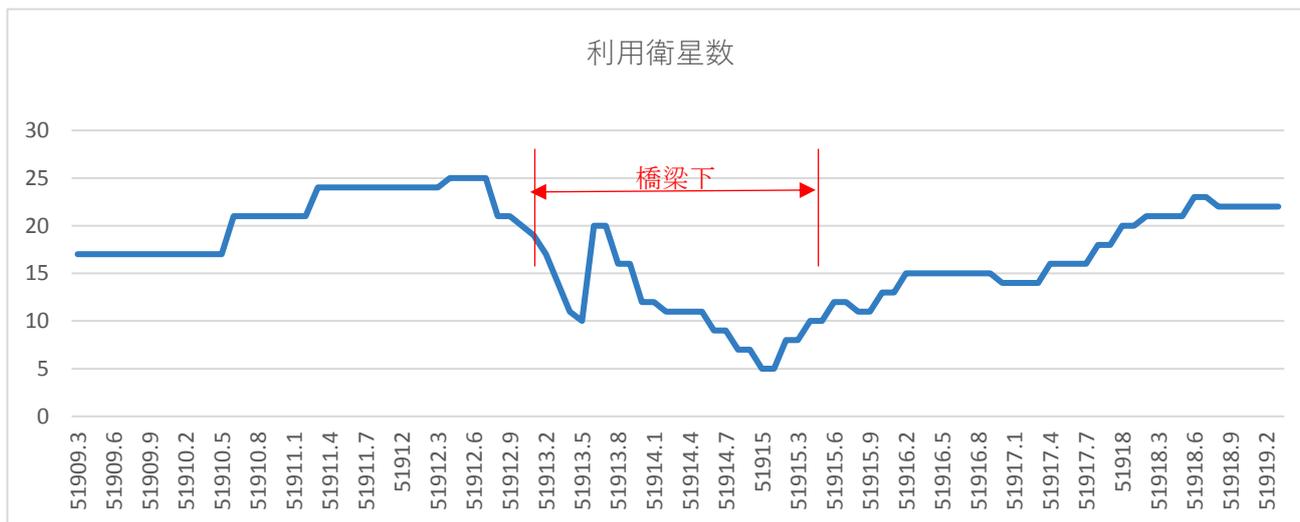


図 4.2.3-32 利用衛星数時刻推移

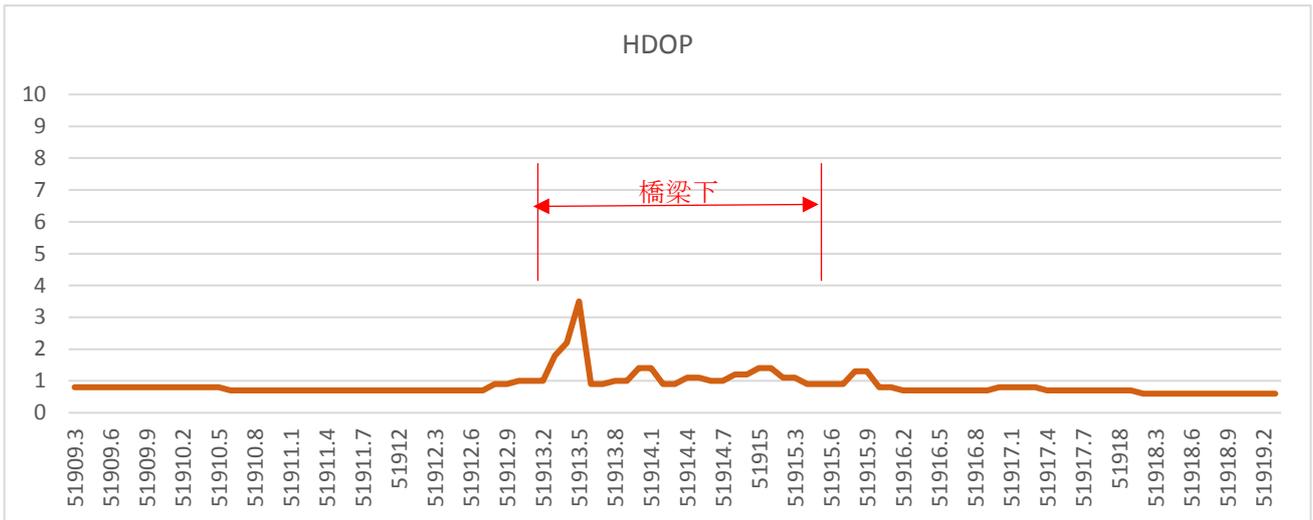


図 4.2.3-33 HDOP 時刻推移

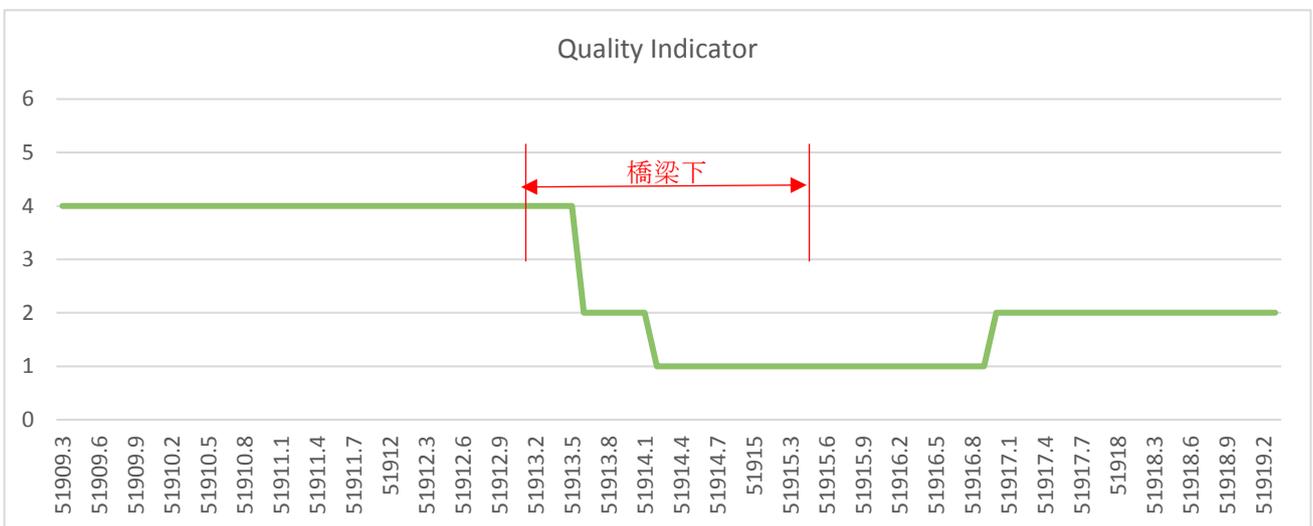


図 4.2.3-34 Quality Indicator 時刻推移

上空遮蔽の場合、他の部分遮蔽に比べ衛星数の回復に時間を必要とすることが確認された。それに伴い測位状況の橋梁下通過 5 秒後でも **Fix** 解が得られなかった。

このことは測位精度にも影響を与えており、橋梁下侵入 0.4 秒後あたりから測位精度が劣化し始め、橋梁下通過後も侵入前の精度に戻るには時間がかかることが確認できている。

また、橋梁通過直後に大きく測位精度にゆらぎが生じることから、衛星数の確保の問題と同時に、橋梁による反射波の影響も原因として考えられる。

このように上空視界を遮断される場合、衛星測位の精度回復までには時間を必要とすることから、上空視界遮断直後の衛星測位の利用は難しいと思われる。

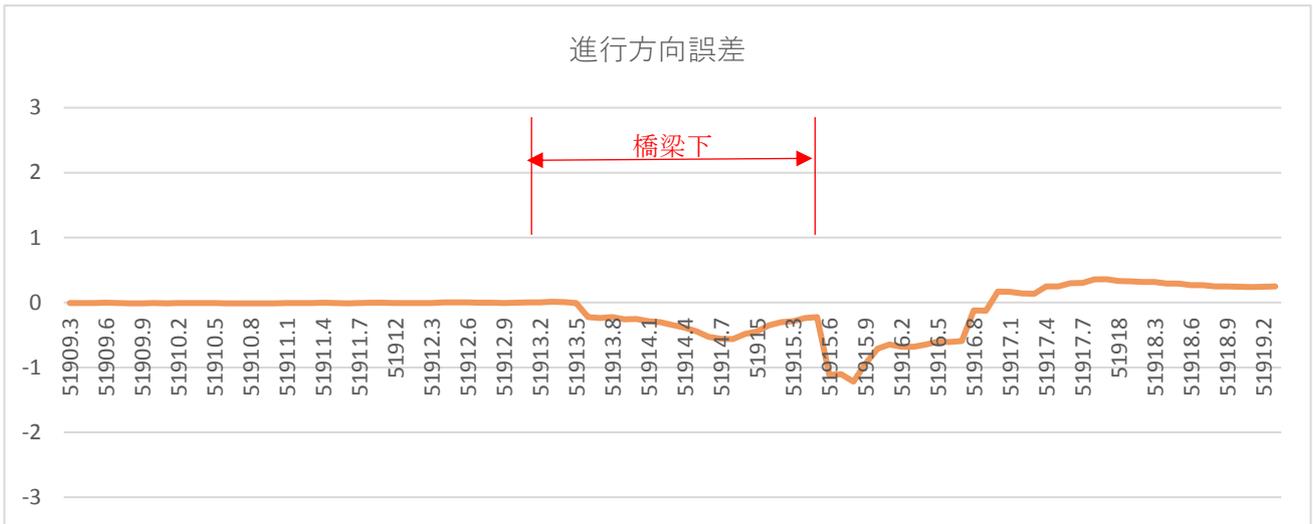


圖 4.2.3-35 進行方向誤差時刻推移



圖 4.2.3-36 左右方向誤差時刻推移

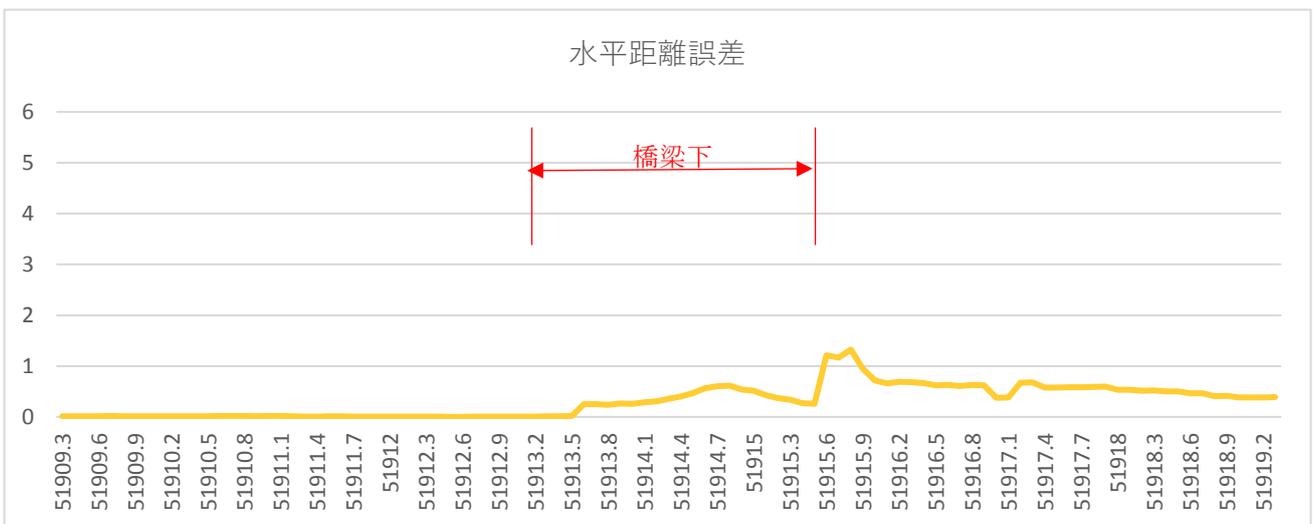


圖 4.2.3-37 水平距離誤差時刻推移

ETC 通過

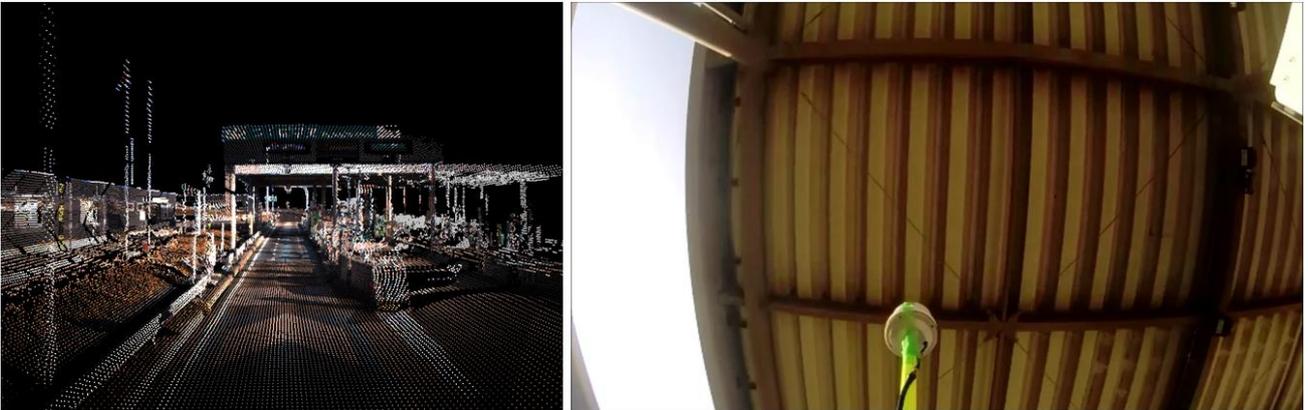


図 4.2.3-38 MMS 点群データ・上空写真 (ETC 通過)

ETC 通過箇所では利用衛星数は一瞬大きく減少するものの、すぐに回復する一方、測位状態は **Fix** 解を得られない状態が続いた。このことから ETC 通過直後 **L2P** が受けられない状態が続いたと考えられる。**L2P** は他の通信の影響を受けやすく、携帯電話のアンテナや中継局付近でも信号劣化の事例があることから、ETC の電子機器やその機器の信号等に影響を受けた可能性もある。

ETC 周辺では、電波環境の評価調査を実施し、衛星測位で利用される信号帯にどのような影響を与えるかを評価する必要がある。

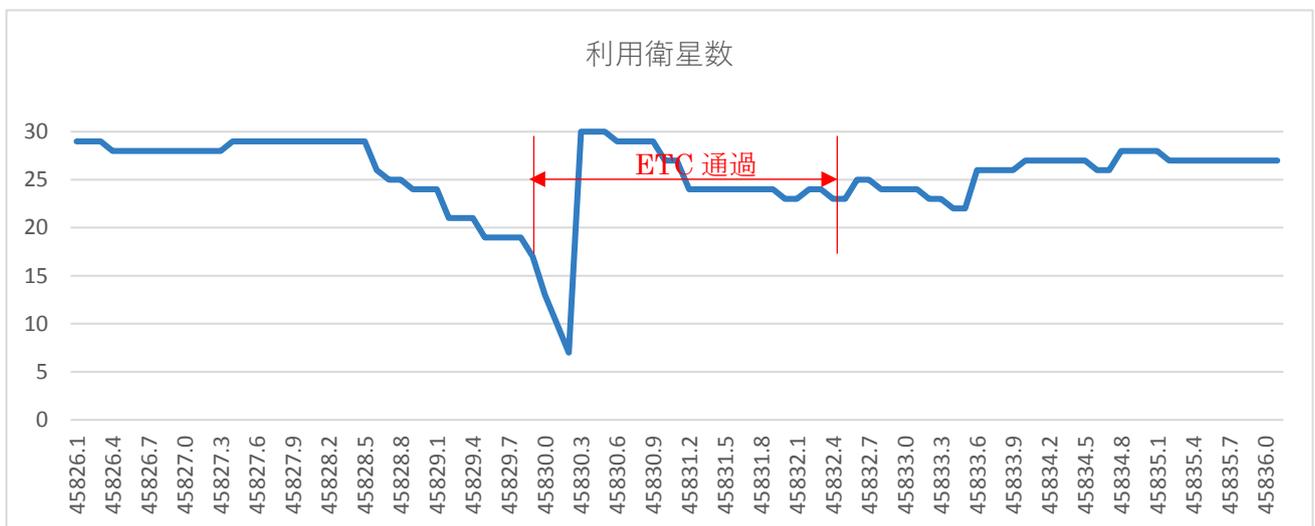


図 4.2.3-39 利用衛星数時刻推移

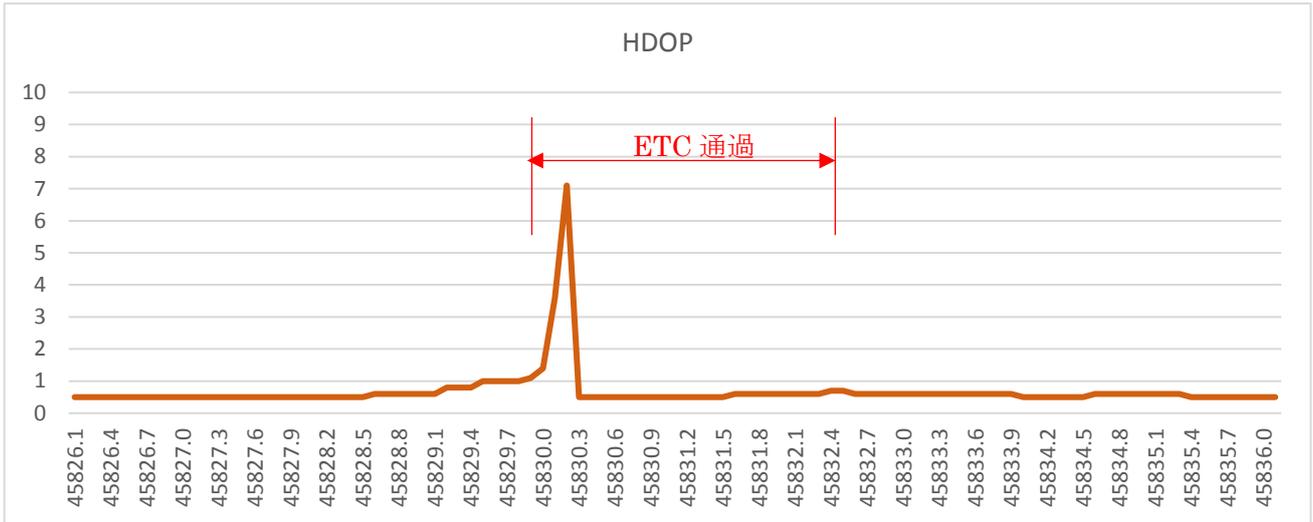


圖 4.2.3-40 HDOP 時刻推移

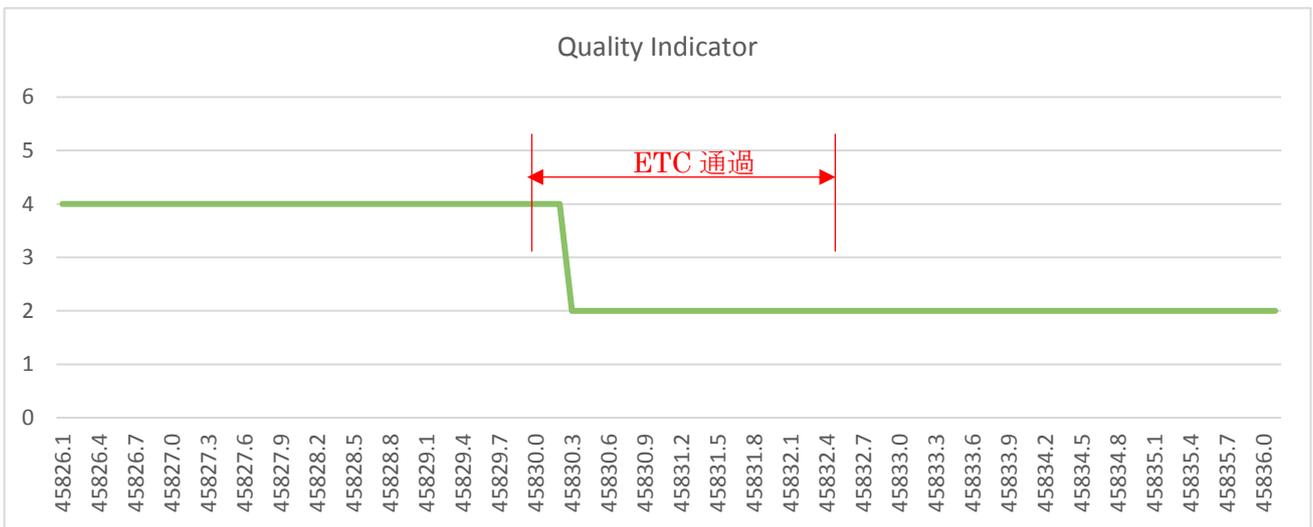


圖 4.2.3-41 Quality Indicator 時刻推移

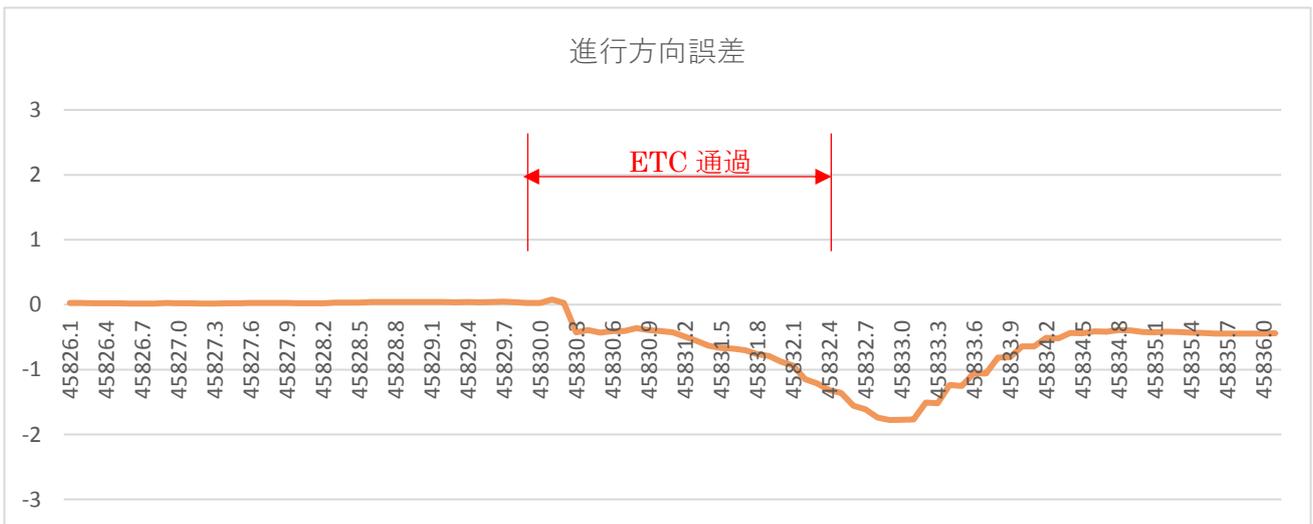


圖 4.2.3-42 進行方向誤差時刻推移

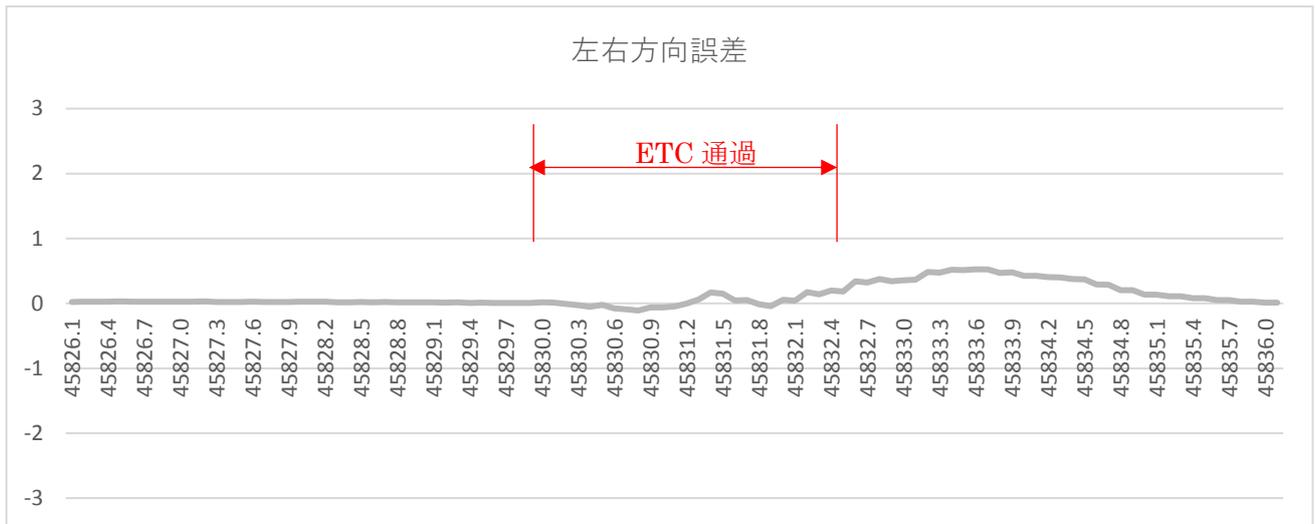


図 4.2.3-43 左右方向誤差時刻推移

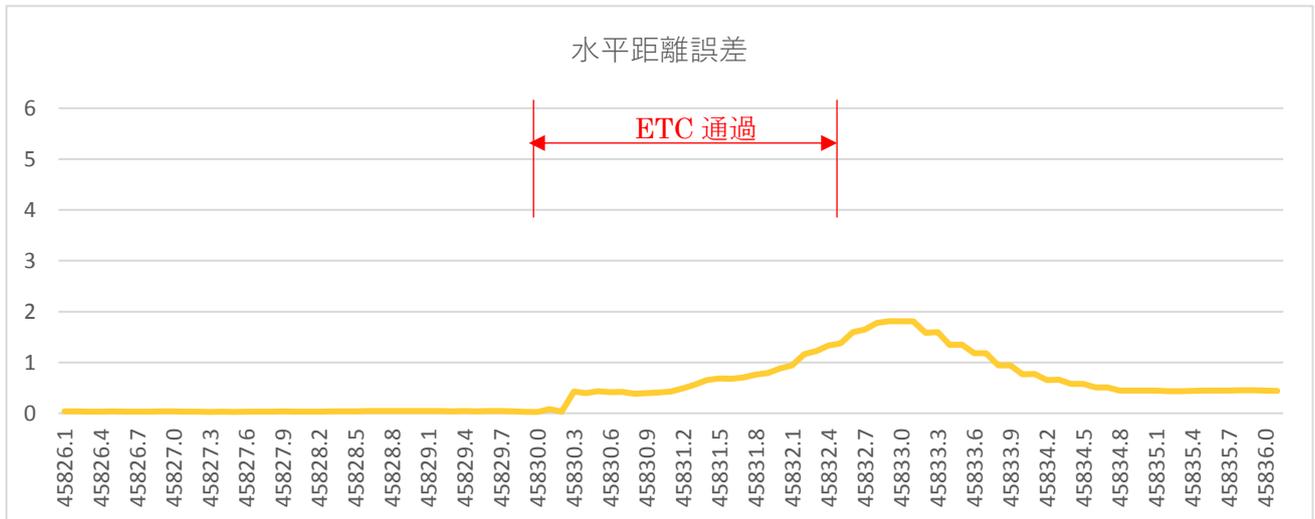


図 4.2.3-44 水平距離誤差時刻推移

4.3. ダイナミックマップ上での衛星測位の誤差要因の検討

衛星測位の各誤差要因においては、以下の事が言える。

- ・ 可視衛星数、衛星配置
 - 可視衛星数、HDOP による測位劣化の認識が可能
 - 仰角マスクの設定により、測位性能の向上が可能
 - マルチ GNSS 利用に伴う利用衛星数の増加により改善する。
- ・ 衛星の軌道誤差、時刻誤差、電離層遅延、大気圏遅延等
 - 準天頂衛星の補強信号による補正が可能
 - 搬送波位相測位により補正が可能
- ・ 遮蔽による測位誤差の影響
 - 走行経路の地上環境把握により測位精度劣化箇所の認識が可能

ダイナミックマップの位置情報は、MMS での計測結果に依存することがわかった。MMS は計測時に衛星測位と IMU 等、他のセンサ類との計測誤差を評価し、測量結果の品質基準の一つとして判断する仕組みを有している。

MMS で利用する衛星測位方式はネットワーク型 RTK を利用したものであり、衛星の軌道誤差、時刻誤差、電離層遅延、大気圏遅延等に関しては誤差の低減が行われている。また、計測に際し衛星飛来予想等を利用した計画を立て、衛星配置の良い時間帯での計測作業が行われている。つまり MMS の衛星測位の主な品質劣化の要因は地上環境によるものが大きいと考えられる。

MMS 計測時の測位品質を利用する事で、ダイナミックマップ上で衛星測位の精度劣化の可能性のある場所を識別することがある程度可能であるため、これらの情報を利用し、衛星測位の利用が困難な箇所を特定しておくことは、ダイナミックマップ上で衛星測位を利用するうえで有効であると考えられる。

測位精度の許容範囲においては、衛星測位の誤差に、ダイナミックマップの誤差を加味して設定する必要がある。このため誤差の余白を含めて、ダイナミックマップ上で衛星測位による位置の判断、車線判断を行う事が重要となる。

また、受信機に採用されている移動体向けフィルタは、拘束モデルにより測位結果をある程度修正されている。ただし強いフィルタは、車両の方向が変わる際や、車両停止の時には逆に測位精度の劣化を引き起こす場合がある。ダイナミックマップや走行経路情報、速度情報を利用する事により、衛星測位の測位結果の信頼度を判断する事は有効であると考えられる。

また、フィルタを通して発生する測位誤差に関しては、ダイナミックマップの基線情報と比較することで衛星測位結果を除去または不採用とすることが可能であり、これらの仕組みにより適切な衛星測位結果のみを利用できるようにすることは、ある程度の効果が期待できる。

5. 静的な位置特定の検討

5.1. 検討概要

5.1.1. 目的

地理空間情報と、衛星測位により得られる位置情報の座標系の違いを明確化し、地理空間情報上で衛星測位を正しく利用するための要件を整理する。高精度地図情報と、衛星測位により得られた位置情報との間に生じる歪みやズレを検出する方法を検討し、これら位置情報の座標の整合性を図る手法を検討することで、高精度地図の更新等への可用性を検討する。

5.1.2. 検討方法

衛星測位により得られる位置情報と、測量・地図に利用される静的な日本測地系の位置情報の違いを調査する。具体的には以下の調査を行う。

- ▶ 日本測地系と衛星測位の位置情報の基準に関する調査
- ▶ 日本測地系の位置の決定手法の調査

地殻変動等の時間軸における位置情報の変化と、それにより日本測地系の位置情報と、衛星測位により得られる位置情報との間に生じる歪みを調査する。具体的には以下の調査を行う。

- ▶ 測地系の変更、セミ・ダイナミック補正、PatchJGD 等の位置情報の整合に係る技術を調査
- ▶ 電子基準点網 (GEONET) 並びに、セミ・ダイナミック補正、PatchJGD の各パラメータを利用し、地殻変動等による日本測地系上の歪みを時系列で調査

5.2. 日本の位置情報

日本測地系と衛星測位により得られる位置情報の基準及び位置の決定手法を説明する。

5.2.1. 測地系の概要

測地系とは、地球上の位置を経緯度座標として表すための基準であり、現在標準となりつつある全地球的 (グローバルな) 測地系では地球楕円体及び座標系 (フレーム) で構成され、日本の測量法においては、さらに標高の基準であるジオイドも含まれる。

5.2.1.1. 座標系と原子

地球上の位置は、原子と座標系の組によって表現される。この組を座標参照系という。測地基準系または測地系とは、測地原子のことである。日本の測地原子には、日本測地系、日本測地系 2000、日本測地系 2011 がある。測地座標系には (緯度、経度)、平面直角座標系の (X 座標、Y 座標) がある。日本の鉛直原子は、歴史上、東京湾平均海面のただ一つである。鉛直座標系で代表的なものは標高である。従って、日本の測地系は、高さ方向も含めれば参照座標系内に二つの原子をもつため複合座標参照系となる。このため、3 次元ではなく “2+1” 次元の位置情報となる。

例えば、参照座標系として以下のものが存在する。

- ▶ 日本測地系 2011 / (緯度、経度)
(識別名 : JGD2011 / (B, L))
- ▶ 日本測地系 2011 / 平面直角座標系 VII (X 座標、Y 座標)

(識別名：JGD2011 / 7 (X, Y))

- 東京湾平均海面 / 標高

(識別名：TP / H)

- 日本測地系 2011、東京湾平均海面 / (緯度、経度)、標高

(識別名：JGD2011, TP / (B, L) , H)

5.2.1.2. 準拋橢円体

地球橢円体とは、回転橢円体を地球のジオイド面 (5.2.1.6 参照) に近似したモデルのことをいい、さらに地球に結合 (5.2.1.4 参照) したものを準拋橢円体という。回転橢円体は、幾何学的に長半径と円のつぶれ具合を表す逆扁平率で特徴づけられる。準拋橢円体を与えることにより、測地座標 (緯度、経度、橢円体高) で表示することが可能となる。次の表は地球橢円体の例である。

表 5.2.1-1 地球橢円体の例

橢円体名	年	長半径[m]	逆扁平率	使用国
Bessel	1841	6377397.155	299.152813	日本、欧州
GRS80※1	1980	6378137	298.257222101	全世界
WGS 84※2	1980s	6378137	298.257223563	全世界

※1 日：測地基準系 1980、英：Geodetic Reference System 1980

※2 日：世界測地系 1984、英：World Geodetic System 1984

5.2.1.3. 座標系 (フレーム)

座標系には、いくつも種類があり、測地学においては全地球的座標系と局所的座標系に大きく分けられる。その中でもよく利用される地心直交座標系、橢円体座標系、平面直交座標系について説明する。

- 全地球的座標系

- ・ 地心直交座標系

地心直交座標系の例として、衛星測位において、よく利用される地心地球固定座標系 (ECEF: Earth Centered Earth Fixed) がある。この座標系は、地心と座標系原点を一致させ、さらに北極方向、地心とグリニッジ子午線面を通る方向に座標軸を一致させることにより、座標系と地球を固定する。これにより、衛星の位置を (X, Y, Z) と表せる。

- ・ 橢円体座標系 (測地座標系)

橢円体座標系とは、橢円体に零子午線が定まったときに、橢円体上の座標が、緯度 (φ)、経度 (λ)、橢円体高 (h) により表される仕組みである。とくに、この経緯度は測地緯度、測地経度と呼ばれる。日本の測量法においても橢円体座標 (測地座標) を地理学的座標系と定めているが、橢円体高は定めていない。

一般的に、地心直交座標系と橢円体座標系は併用して用いられる。つまり上の ECEF 系の例を挙げたときと同様に、橢円体を座標系に結合する (5.2.1.4 参照)。すると次の座標換算式が得られる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N+h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N+h) \cos \varphi \sin \lambda \\ \{N(1-e^2) + h\} \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

ただし、 N は卯酉線曲率半径、 e は第1離心率である。

➤ 局所座標系

・ 平面直角座標系

地心直角座標系のようなグローバルな座標系は、地表に住んでいる人間にとっては分かりにくく、地図のような平面の方が分かりやすい。球面でも非常に小さな範囲では平面とみなせることを利用して、球面の一部を平面に投影する方法がある。その中の一つにガウス・クリューゲル法がある。この投影法の特徴は等角投影であり、日本では地籍測量や公共測量で使用されている。ガウス・クリューゲル法には例として、ユニバーサル横メルカトル (UTM) 座標系や平面直角座標系がある。UTM 座標系は国土地理院発行の 1/10,000~1/200,000 の地図に、平面直角座標系は 1/2,500、1/5,000 の地図に採用されている。

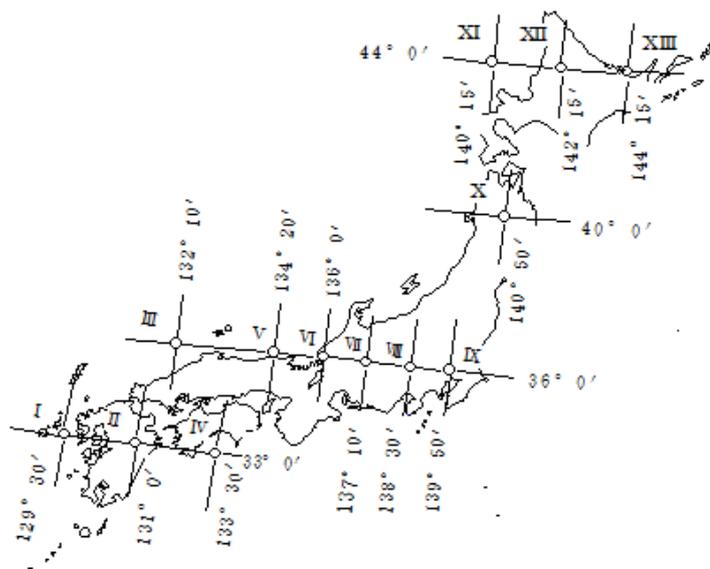


図 5.2.1-1 平面直角座標系原点[5]

5.2.1.4. 地球と楕円体の結合

測地座標系で位置表示を行うには、地球楕円体を実際の地球に結合 (固定) する必要がある。楕円体の結合方法は、三角測量時代と衛星測位時代で異なる。例えば、前者の例は日本測地系であり、後者の例には日本測地系 2000、日本測地系 2011、WGS 84 等がある。

一般的な議論により、ある 3 次元直角座標系に楕円体を固定するには、並進の 3 パラメータ (X_0, Y_0, Z_0) と回転の 3 パラメータ ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) の計 6 パラメータが必要である (下図参照)。

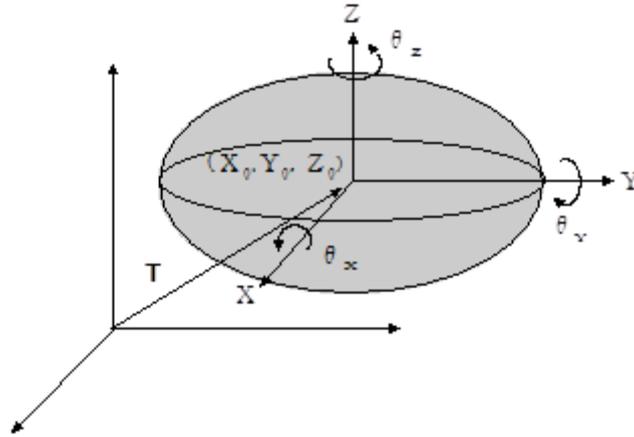


図 5.2.1-2 楕円体の並進パラメータと回転パラメータ[5]

➤ 三角測量時代の結合

経緯度原点において、天文測量により天文経緯度を観測し、その観測値と楕円体の測地経緯度を一致させる。このとき、経緯度原点で楕円体面とジオイド面を接する（つまり鉛直線偏差が0）ようにすれば、並進パラメータが決定する。次に、天文方位角を観測し、自転軸と楕円体の短軸が平行になるようにすれば、回転パラメータも決定する。

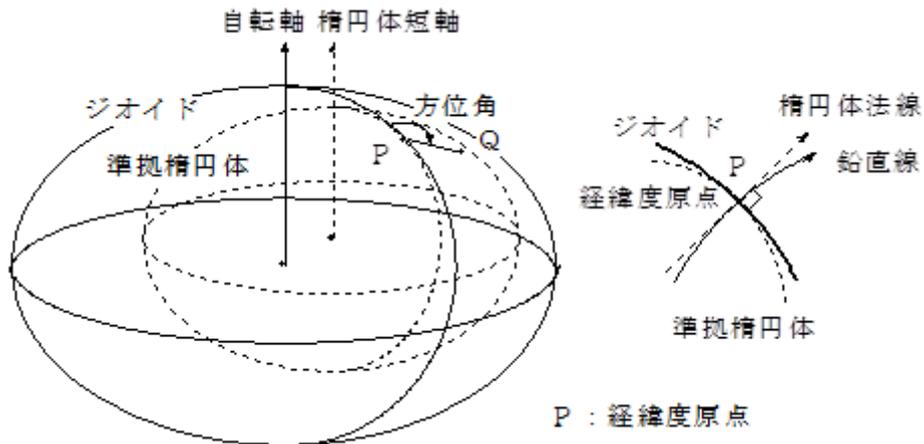


図 5.2.1-3 楕円体の結合イメージ（三角測量）[5]

➤ 衛星測位時代の結合

衛星測位時代は、地球に固定された座標系、例えば ITRF 系（5.2.3.1 参照）や WGS 84 系（5.2.3.2 参照）の座標系（フレーム）を採用し、地心と同一の座標系原点と地球楕円体を一致させることにより、位置を定める。これにより並進パラメータが決定する。X 軸は、楕円体の零子午線と赤道の交点及び原点を通る方向とし、Z 軸は楕円体の短軸とすれば、回転パラメータが決定する。

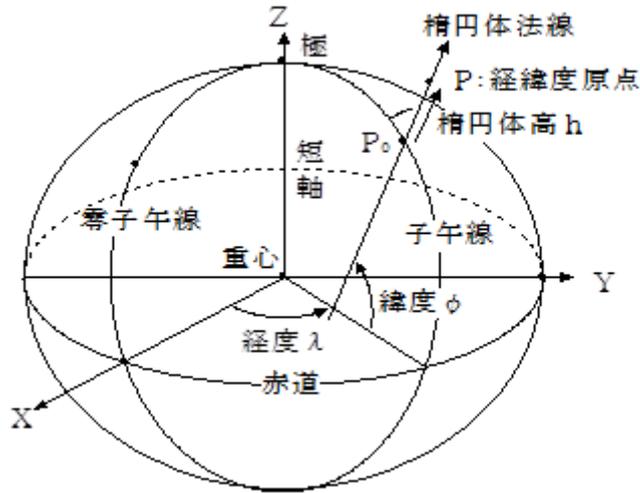


図 5.2.1-4 楕円体の結合イメージ (衛星測位) [5]

5.2.1.5. 座標変換

原子同士の変換を座標変換、座標系同士の変換を座標換算という。2次元の座標変換もあるが、ここでは3次元の座標変換のみ説明する。測地座標系から地心直交座標系への座標換算は式(5.1)を参照。また、日本測地系における座標変換は5.2.2.4を参照。

日本の測地測量において、3次元の座標変換として Bursa Wolf 変換モデル及び Veis 変換モデルがある。ここでは、ITRF 系間の座標変換及び ITRF 系と WGS 84 基準フレーム間の座標変換のベースとなる Bursa Wolf 変換モデルについて説明する。

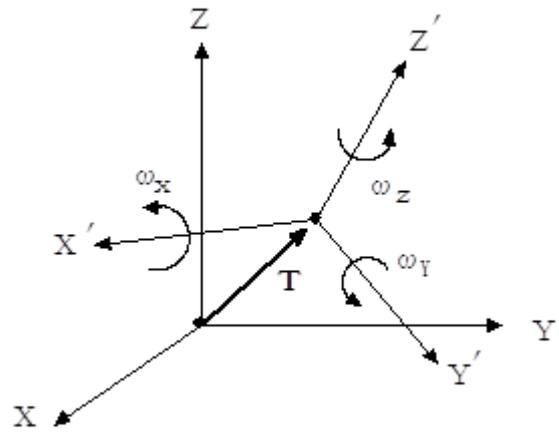


図 5.2.1-5 3次元の座標変換[5]

図 5.2.1-5 に示す座標 $\mathbf{X} = {}^t(X, Y, Z)$ と座標 $\mathbf{X}' = {}^t(X', Y', Z')$ との関係は次の式で表される。

$$\mathbf{X} = k \cdot \mathbf{R}_Z(\omega_Z) \mathbf{R}_Y(\omega_Y) \mathbf{R}_X(\omega_X) \mathbf{X}' + \mathbf{T} \quad (5.2)$$

ただし、左上の添字 t は転置、 k は縮率を表す。平行移動 \mathbf{T} と回転行列 \mathbf{R} は、次の式である。

$$\mathbf{T} = {}^t(T_X, T_Y, T_Z) : \text{両座標系の原点移動量 (並進)}$$

$$\mathbf{R}_X(\omega_X) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_X & \sin \omega_X \\ 0 & -\sin \omega_X & \cos \omega_X \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_Y(\omega_Y) = \begin{pmatrix} \cos \omega_Y & 0 & -\sin \omega_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \omega_Y & 0 & \cos \omega_Y \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$\mathbf{R}_Z(\omega_Z) = \begin{pmatrix} \cos \omega_Z & \sin \omega_Z & 0 \\ -\sin \omega_Z & \cos \omega_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

上式において、回転角 ω が小さい場合、 $\sin \omega = \omega$ 、 $\cos \omega = 1$ 、 $\omega^2 = 0$ と置けるので、次の式が成立つ。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (1+s) \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

ここで、 k は方向によらない一定の縮率とすると、 $k = 1 + s$ で表され、 s は微小な量である。ベクトル表示は、次の式となる。

$$\mathbf{X} = (1+s)\mathbf{R}\mathbf{X}' + \mathbf{T} \quad (5.5)$$

ただし、このとき

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

である。パラメータは、 $(T_X, T_Y, T_Z, s, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z)$ の7つであることから7パラメータ変換と呼ばれることがある。

▶ ITRF 系の場合

式(5.4)において、 $s = D$ 、 $\omega_X = -R_X$ 、 $\omega_Y = -R_Y$ 、 $\omega_Z = -R_Z$ のように各軸の反時計まわりの回転を正、各軸の回転角が微小とすれば、 $DR_X = DR_Y = DR_Z = 0$ となり、ベクトル表示による次の式を得る。

$$\mathbf{X}_s = \mathbf{R}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{X} + \mathbf{T} \quad (5.7)$$

ただし、 $\mathbf{X}_s = \mathbf{X}$ 、 $\mathbf{X} = \mathbf{X}'$ と置き換えた。

スカラー表示は次で表せる。

$$\begin{aligned} X_s &= X + T_X + DX - R_Z Y + R_Y Z \\ Y_s &= Y + T_Y + DY - R_X Z + R_Z X \\ Z_s &= Z + T_Z + DZ - R_Y X + R_X Y \end{aligned} \quad (5.8)$$

この式は、ITRF 系間の座標変換及び ITRF 系と WGS 84 基準フレームの座標変換の式であり、右手系座標系とは異なることに注意する必要がある。

※ITRF93 や ITRF2008 との座標変換では、7パラメータはエポックと各パラメータの変化率を表すパラメータによって定まる。

5.2.1.6. ジオイド

ジオイドとは、世界平均海面のことである。より正確に言えば、地球の重力ポテンシャルの等ポテンシャル面のうち、世界平均海面に最も近いものをジオイドと定める。実際には、各国で使用されるジオイドの定義は異なり、例えば、日本では東京湾平均海面をジオイドと定め、標高の基準としている。

「日本測地系」では、高さの基準をジオイドとし、ジオイドから地表までの高さを標高という。標高の基準は日本水準原点で定めている。右図より楕円体高はジオイド高と標高との和によって定まる。世界測地系に移行後は、日本経緯度原点での VLBI (Very Long Baseline Interferometry : 超長基線電波干渉法) や GNSS 測量により、楕円体面による高さの基準の定義も可能だったが、従来との整合性も考慮し、新たな測量法でも高さの定義は変更されていない。

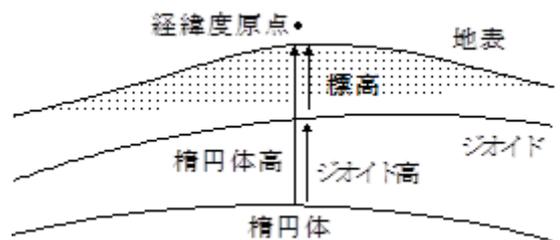


図 5.2.1-6 ジオイドと標高、楕円体高[5]

5.2.1.7. 地殻変動地帯における測地系

地殻変動の影響が大きい地域の測地基準系には、スタティック測地系、ダイナミック測地系、セミ・ダイナミック測地系がある。スタティック測地系は測地成果が決定すれば、測地成果を時間変化に対して一定として扱う。つまり、時間の経過とともに成果の歪みによる誤差は増える。対照的にダイナミック測地系は、常に測地成果を改定するため、観測値と測地成果の整合性が保たれるが、コストが掛かり、また位置の基準としての安定性に欠ける。以上の二つ測地系の折衷として、測地成果は元期で一定だが時間に伴う歪みに関して地殻変動補正を行うセミ・ダイナミック測地系がある。ニュージーランドは、2000年1月を元期とするセミ・ダイナミック測地系を採用している。その後、ニュージーランドに習い日本も採用した。元期への補正は、セミ・ダイナミック補正（5.3.3.1 参照）による。

5.2.2. 日本の測地系

日本には、時代により3つ測地系が存在する。具体的には、明治時代から2001年度まで使用されてきた「日本測地系 (Tokyo Datum: TD)」、世界測地系へ初めて移行した「日本測地系 2000 (Japanese Geodetic Datum 2000: JGD2000)」、東日本大震災後の「日本測地系 2011 (Japanese Geodetic Datum 2011: JGD2011)」がある。大きな違いは、日本測地系が日本のみで使用される、ある種の局所的な座標系であるのに対し、日本測地系 2000、日本測地系 2011 はグローバルな座標系であるという点である。

表 5.2.2-1 日本の測地系

	日本測地系	日本測地系 2000	日本測地系 2011
使用年	1880年～2001年	2002年～2011年	2011年～
準拠楕円体	Bessel 楕円体	GRS80 楕円体	GRS80 楕円体
座標系 (フレーム)	—	ITRF94	ITRF94 (西日本・北海道) ITRF2008 (東日本・北陸4県)

5.2.2.1. 日本測地系

日本測地系は、明治時代に構築された近代測量の測地基準系であり、日本測地系 2000 に移行するまで約120年間使用されてきた。そのため、現在も多く地図等がその影響下にある。世界測地系導入前の測地系であることや、Bessel 楕円体が現在使用されている GRS80 楕円体と大きく異なることから、日本測地系と世界測地系の間には大きなズレがある。

具体的には、楕円体の形状を決定する長半径は、GRS80 楕円体より約 740m も短い。そのため、楕円体の中心も世界測地系と比べて約 830m もずれている。

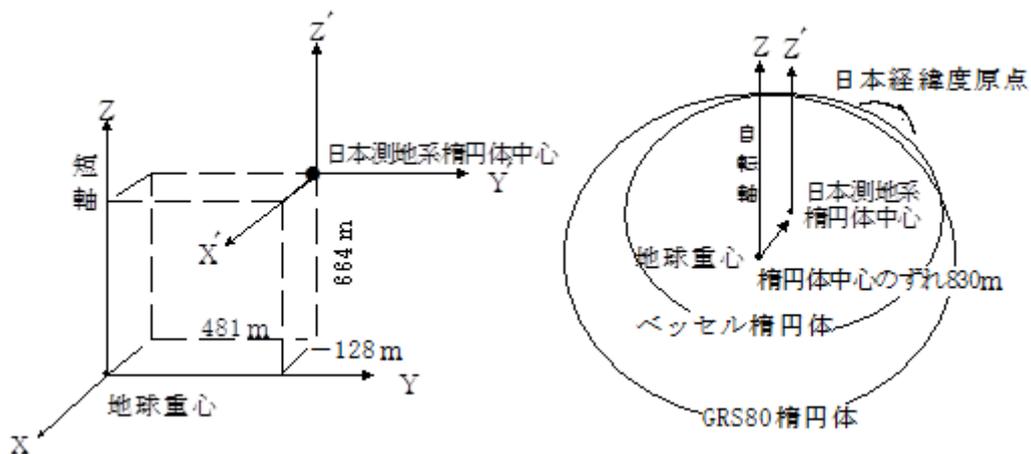


図 5.2.2-1 日本測地系と世界測地系のズレ[5]

以下の表の数値は、測量法が 1959 年に公布されたときに定められたものである。数値は天文測量による。地球へ楕円体を結合する方法は、5.2.1.4 を参照。

表 5.2.2-2 日本測地系の概要

日本経緯度原点	地点	東京都港区麻布台2丁目 18 番 1 地内旧東京天文台子午環の中心点
	経度	東経 139° 44′ 40.5020″
	緯度	北緯 35° 39′ 17.5148″
	原点方位角	156° 25′ 28.442″ (旧東京天文台の子午環の中心点において真北を基準として右回りに測定した鹿野山一等三角点の方位角)
日本水準原点	地点	東京都千代田区永田町一丁目一番二地内水準点標石の水晶板の零分画像の中点
		東京湾平均海面上 24.4140 メートル
準拋楕円体 (Bessel)	長半径	6,377,397.155 メートル
	扁平率	1/299.152813

5.2.2.2. 日本測地系 2000

日本測地系 2000 では、衛星測位に対応するため初めて世界測地系が導入された。ただし、測地座標系は日本測地系と同じ“2+1”次元の座標系である。測量成果は標高も含めて測地成果 2000 と呼ばれている。経緯度原点に関しては、鹿島 VLBI 観測点が日本測地系 2000 の事実上の原点であったが、測量法上は、日本経緯度原点数値 (測地原子) が測量法施行令第 2 条において、次のように定められている。

表 5.2.2-3 日本測地系 2000 の概要

日本経緯度原点	地点	東京都港区麻布台二丁目十八番一地内日本経緯度原点金属標の十字の交点
	経度	東経 139° 44' 28.8759"
	緯度	北緯 35° 39' 29.1572"
	原点方位角	32° 20' 46.209" (上記地点において真北を基準として右回りに測定した茨城県つくば市北郷一番地内つくば超長基線電波干渉計観測点金属標の十字の交点の方位角)
日本水準原点	地点	東京都千代田区永田町一丁目一番二地内水準点標石の水晶板の零分画像の中点
		東京湾平均海面上 24.4140 メートル
準拋楕円体 (GRS80)	長半径	6,378,137 メートル
	扁平率	1/298.257222101

5.2.2.3. 日本測地系 2011

2011 年東北地方太平洋沖地震により、測量成果が大きく影響を受けた。これにより、水平変動は最大約 5 メートル、上下変動は最大約 1 メートルに達し、国土地理院は測量成果の修正を行った。それに伴い、測地原子は日本測地系 2000 から日本測地系 2011 へ移行した。測量成果の修正範囲は、東北、関東及び北陸の 1 都 19 県である。日本測地系 2011 の測量成果は、標高の成果も含め測地成果 2011 と呼ばれている。日本経緯度原点の測地原子は、測量法施行令第 2 条において、次のように改正されている。

表 5.2.2-4 日本測地系 2011 の概要

日本経緯度原点	地点	東京都港区麻布台二丁目十八番一地内日本経緯度原点金属標の十字の交点
	経度	東経 139° 44' 28.8869"
	緯度	北緯 35° 39' 29.1572"
	原点方位角	32° 20' 46.209" (上記地点において真北を基準として右回りに測定した茨城県つくば市北郷一番地内つくば超長基線電波干渉計観測点金属標の十字の交点の方位角)
日本水準原点	地点	東京都千代田区永田町一丁目一番二地内水準点標石の水晶板の零分画像の中点
		東京湾平均海面上 24.3900 メートル
準拋楕円体 (GRS80)	長半径	6,378,137 メートル
	扁平率	1/298.257222101

5.2.2.4. 日本測地系における座標変換

測量法・国土調査法・不動産登記法に基づいて作成された地図は、同一点であっても時期により座標値が異なるが、TKY2JGD (下記参照) 及び PatchJGD (5.3.3.2 参照) により相互変換可能である。

➤ TKY2JGD

「日本測地系」と「日本測地系 2000」（、「日本測地系 2011」）とでは地球のモデルが違うため、座標を同時に扱う場合に座標変換が必要である。この座標変換を行うプログラムが TKY2JGD であり、国土地理院から公開されている。座標変換パラメータは、既知点である一二三等三角点の約 3.8 万点の新旧座標差から、約 1km×1km の格子点上にクリギング法により与えられたものである。格子内の内挿には、バイリニア補間を用いる。

5.2.3. 衛星測位の測地系

衛星測位においては、準楕円体が地球の中心となるように測地基準系を決めている。これは、衛星測位はグローバル測量であり、全世界共通の測地基準系が必要なためである。この節では、主な衛星測位の座標系である、国際地球基準系（International Terrestrial Reference System: ITRS）、WGS 84 座標系について説明する。

5.2.3.1. 国際地球基準系（ITRS）

ITRS は、右手系の地心直交座標系を定めるものであり、その実現値である ITRF（International Terrestrial Reference Frame）系は、国際地球回転・基準系事業（International Earth Rotation and Reference Systems Service: IERS）によって構築、管理されている。1987 年の ITRF0 から始まり、現在は ITRF2014 が最新である（2017 年 2 月現在）。日本では、日本測地系 2011 おいて ITRF94 と ITRF2008 が採用されている。

ITRF 系は、以下の ITRS の定義に基づいている。

表 5.2.3-1 ITRS の定義

原点	座標系の原点は大気及び海洋を含む地球の全質量に対する地球重心
長さ	単位はメートル（SI）を採用
座標軸の方向	座標軸の方向：BIH（Bureau International de l'Heure：国際報時局）1984.0 による
時間的变化	全地球上の地殻変動に関して No Net Rotation 条件を使う

5.2.3.2. WGS 84

WGS 84 は、ドップラー観測による NNSS (Navy Navigation Satellite System) の後継航行システムとして開発されたもので、現在は GPS の基準座標系として採用されている。

WGS 84 は、座標系、楕円体高、地球重力ポテンシャル等の総合システムとして定義される。実際には、WGS 84 楕円体 (5.2.1.2 参照) を準拋楕円体とする WGS 84 系が使用されている。WGS 84 座標系は、IERS のテクニカルノートに従う。これは、右手系の地心直交座標系である。準拋楕円体とは、以下の定義により結合される。

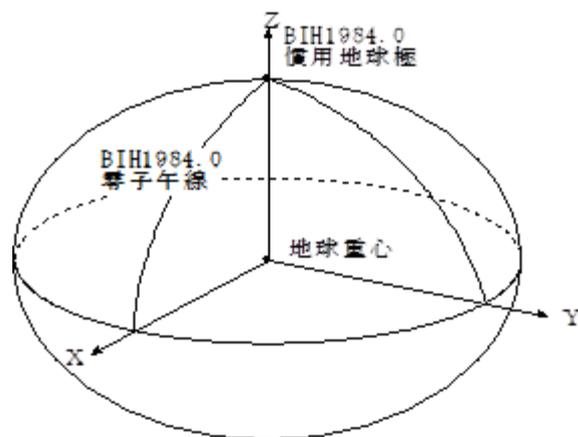


図 5.2.3-1 WGS84 座標系[5]

表 5.2.3-2 WGS84 の定義

原点	地球の質量中心
Z 軸	BIH によって定義された慣用地球極 (Conventional Terrestrial Pole: CTP)
X 軸	IERS 基準子午線 (IRM: IERS Reference Meridian) と原点を通る CTP 赤道面との交線
Y 軸	X 軸及び Z 軸と地心直交右手系をなす

WGS は、以下の表で示すように度々更新されている。

表 5.2.3-3 WGS84 の更新履歴

名前	実施日 (GPS 放送暦)	元期	正確さ [m]
WGS 84 (Doppler)	1987 年	なし	1-2
WGS 84 (G730)	1994 年 06 月 29 日	1994.0	0.1 (成分毎の RMS)
WGS 84 (G873)	1997 年 01 月 29 日	1997.0	0.05 (成分毎の RMS)
WGS 84 (G1150)	2002 年 01 月 20 日	2001.0	0.01 (成分毎の RMS)
WGS 84 (G1674)	2012 年 02 月 08 日	2005.0	0.01 未満 (成分毎の RMS)
WGS 84 (G1762)	2013 年 10 月 16 日	2005.0	0.01 未満 (成分毎の RMS)

WGS 84 系は ITRF 系とは異なるが、現在はほとんど差がなく、同一とみなされる。

5.2.3.3. 準天頂衛星システムの座標系 (JGS)

QZSS の座標系は、JGS (日本衛星測位測地系: Japan satellite navigation Geodetic System) と呼ばれ、GPS や Galileo の座標系と同様、ITRS に近づけるように運用されている。GPS 及び Galileo との座標系オフセットは、0.02m 以下である。

定義は以下で与えられる。

表 5.2.3-4 JGS の定義

原点	地球の質量中心 (GRS80 楕円体の幾何的中心に一致させる)
Z 軸	IERS の基準極 (IRP: IERS Reference Pole) 方向
X 軸	IERS 基準子午線 (IRM) と原点を通る Z 軸に垂直な赤道面との交点方向
Y 軸	X 軸及び Z 軸と右手系地心地球固定直交座標系をなす

5.2.3.4. WGS84 座標系から日本測地系 2011 への座標変換

衛星測位で得た座標は多くの場合 WGS84 座標系で表される。一方、我々が利用する地図は現在、日本測地系 2011 (JGD2011) を元に作成されている。この座標は、西日本・北海道の ITRF94 と東日本・北陸 4 県の ITRF2008 の 2 つの座標系に分かれる。よって、衛星測位結果と地図では座標系が異なるため、衛星測位結果を地図にマッピングするには座標変換を考慮すべきである。つまり、WGS84 から ITRF94、WGS84 から ITRF2008 への 2 つの座標変換を地域別に行う必要がある。しかし、WGS84 から ITRF 系への座標変換パラメータは、現在、公の機関からは公開されていない (ITRF90 と WGS84 (Doppler) 間の変換パラメータは存在する)。そもそも現在では WGS84 と ITRF 系はセンチメートル単位で一致しているため、座標変換する必要はなく同一視される。

しかし、座標変換だけでは JGD2011 の成果 (座標値) と整合性はない。なぜなら、時間 (元期) を考慮していないからである。つまり、西日本・北海道での座標値は元期が 1997 年 1 月 1 日、東日本・北陸 4 県での座標値は元期が 2011 年 5 月 24 日であるため、この元期から現在までの地殻変動量を補正しないと行けない。2017 年 3 月現在、地殻変動量は関東 10cm 程度、東北 1m 程度である。従って、高精度の衛星測位と地図を利用する場合、地殻変動補正を行う必要があり、この補正方法に関しては 5.4.2 で説明する。

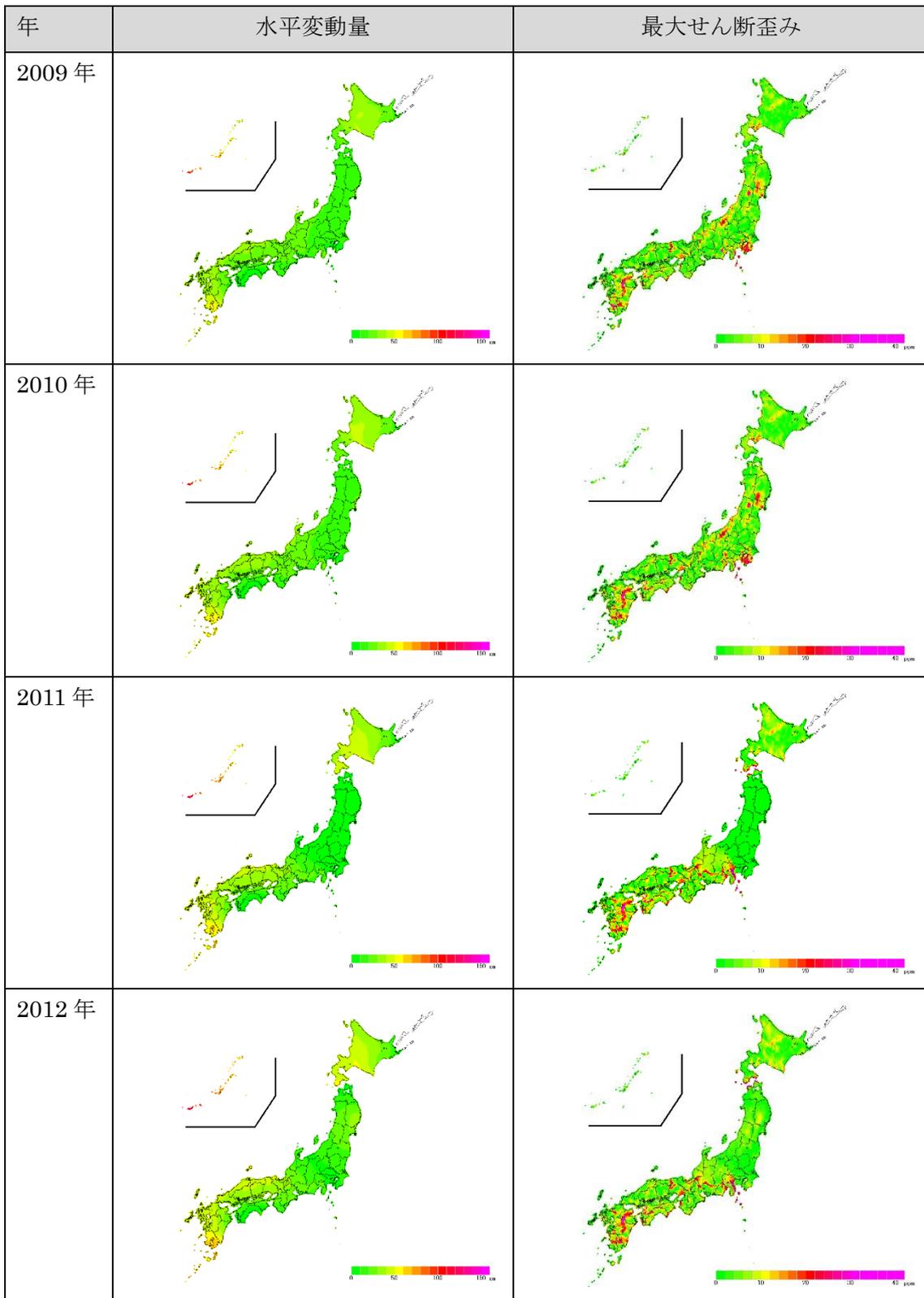
5.3. 日本の位置情報の歪み

5.3.1. 日本測地系の歪みの要因

日本列島は 4 つのプレート (ユーラシア、北アメリカ、フィリピン海、太平洋) のぶつかり合う境界に位置するため、地殻変動が活発に起きている。地殻変動には、主に定常的な地殻変動と地震や火山活動による大きな地殻変動があり、大地震の後には余効変動が観測される。これらの現象は、時間の経過とともに基準点の位置関係に歪みを生じさせる。定常的な地殻変動における歪み速度は、平均的に年間 0.2ppm (parts per million : 100 万分の 1) である。これは、10km の距離が 10 年間に 2cm ほど歪む量である。

5.3.2. 時間軸で見る日本の歪み

地殻変動による歪みの補正 (5.3.3 参照) は、PatchJGD やセミ・ダイナミック補正によって処理される。ここでは、セミ・ダイナミック補正の座標変換パラメータから、水平変動量・最大せん断歪みを図化したものを、時系列で紹介する。



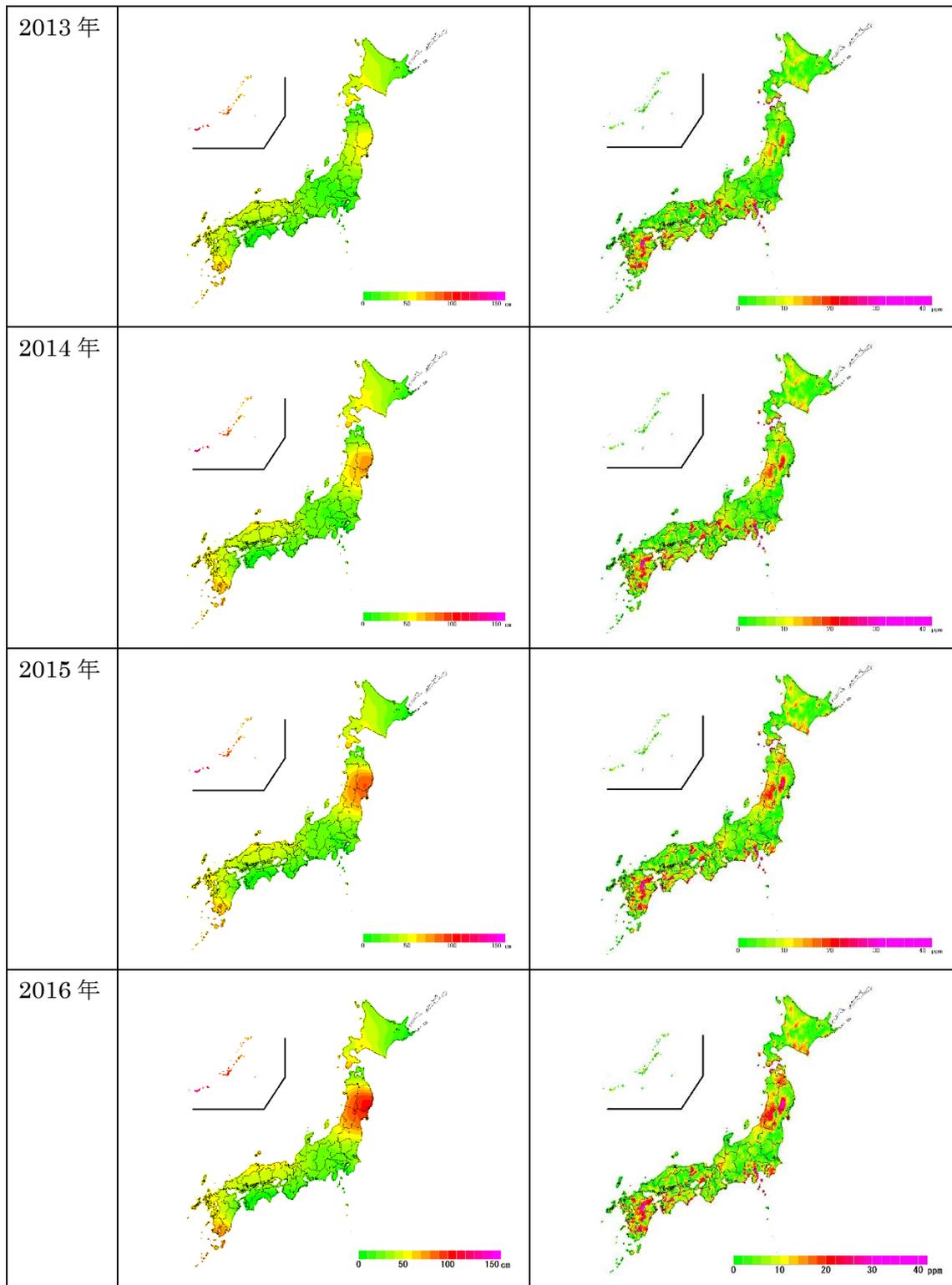


図 5.3.2-1 地殻変動による水平変動量と最大せん断歪み（2009－2016年）

水平変動量は、上図から北海道、山陰地方、九州地方、沖縄地方で大きいことが確認できる。2011年以降は東北地方で大きく変動している。これは、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の余効変動の影響と考えられる。

最大せん断歪みは、日本全体で生じている。特に、火山の多い九州で多くの歪みが発生しているのがわかる。2011年には、東北地方で歪みが解消されているが、これは東北地方太平洋沖地震により、成果を改定したためである。また、神奈川県付近で歪みが大きいのは、自然現象で生じた歪みではなく、異なる元期の境界であるためだと考えられる。水平変動量と同様に、2011年以降は地震による余効変動の影響のため、東北地方でも大きな歪みが生じている。

これら変動量や歪みは、位置情報の精度に影響を与えるため、高精度な情報を利用するためには取り除かなければいけない問題である。

5.3.3. 歪みの補正方法

歪みの補正方法には、定常的地殻変動を補正するセミ・ダイナミック補正、大地震による大きな地殻変動を補正する PatchJGD がある。以下、その二つの補正方法を説明する。

5.3.3.1. セミ・ダイナミック補正

この補正方法は、確率統計的に定常の変動量を推定し、クリギング法により格子に内挿する方法である。座標変換パラメータは毎年4月1日に更新され、同年1月1日のデータにより生成される。日本では、2010年からGNSSを用いたスタティック法において、1級基準点測量に限り、セミ・ダイナミック補正を行っており、2014年からは2級基準点測量にまで拡大されている。

セミ・ダイナミック補正の手順を示す。

- ① 各電子基準点の元期座標に地殻変動補正量を加え今期座標を得る。
- ② ①で得た各電子基準点の今期座標と未知点間の現在観測値が、今期基線ベクトルとなる。
- ③ 3次元網平均を行い、未知点の今期座標を得る。
- ④ 未知点の今期座標から地殻変動補正量を引いて、未知点の元期座標を得る。

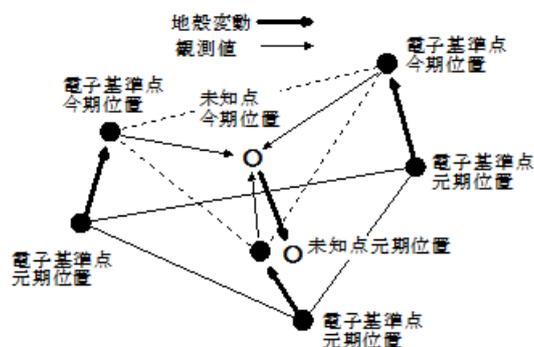


図 5.3.3-1 セミ・ダイナミック補正イメージ[5]

5.3.3.2. PatchJGD 座標補正

大きな地震による復旧測量において、全面改測では大きなコストが掛かるため、旧観測量を使用した改算または一部改測とその成果にもとづく内挿による改算が行われてきた。このような経緯から PatchJGD が作成された。座標補正パラメータは、電子基準点及び高度地域基準点の既知点を使用して、約 1km×1km の格子点上にクリギング法によって与えられたものである。補正後の座標値はバイリニア補間により求まる。下図は、座標補正パラメータが公開されている地域である。座標補正パラメータは国土地理院から公開されている。

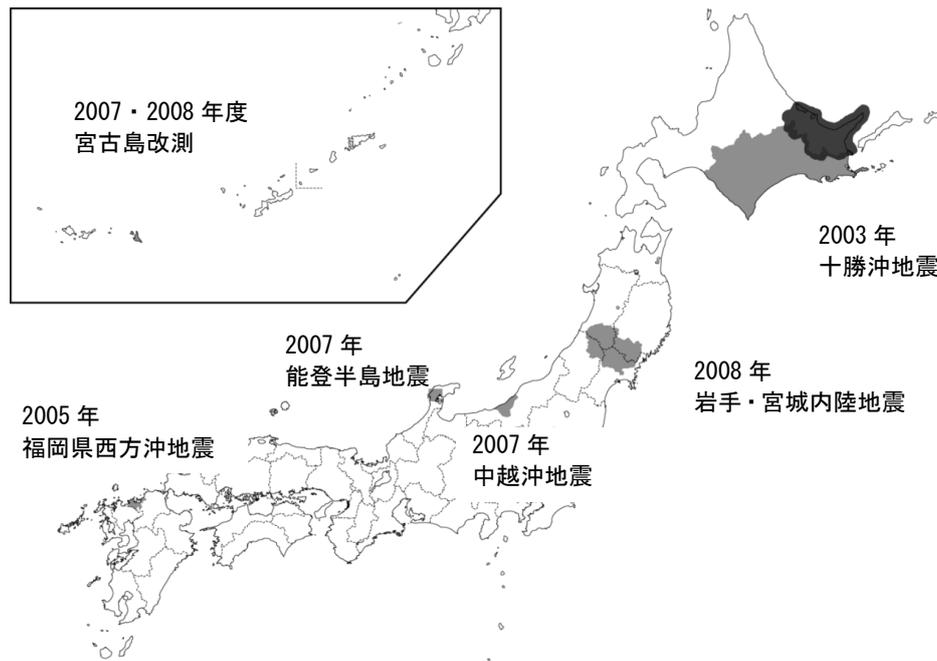


図 5.3.3-2 PatchJGD 座標補正パラメータの公開地域[5]

最近では、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震において座標補正パラメータが公開されている。

5.4. 高精度地図と衛星測位の整合手法の検討

5.4.1. 日本測地系と衛星測位のズレ

日本測地系の時代は、天文測量や三角測量の時代であり、衛星測位時代のグローバルな測地系とは数百 m のズレがあった (5.2.2.1 参照)。この問題は現在も多くの上国で存在している。そこで、国連総会は、人々の生活や経済活動において正確な緯度・経度を測ることの重要性を認めて、地球上の位置の基準を世界各国で連携して維持することを平成 27 年 2 月 26 日に決議した。

しかし、衛星測位で決められた正確な位置をもつ最近の地図でも地殻変動の影響により、位置情報に無視できない歪みを生じる。本調査では、衛星測位と地図の歪みによって生じた直線的な差を“ズレ”とよび、特に水平方向のズレに関する整合手法を検討する。

5.4.2. 電子基準点網 (GEONET) を利用した位置情報補正

国土地理院は、約 1,300 点の電子基準点から定常的に座標値を計算し、地殻変動の監視を行っている。解析方法には表 5.4.2-1 の 3 種があり、解析結果は一部を除いて外部公開されている。この解析結果、とくに精度の高い F3 解を用いた位置情報補正手法を紹介する。

位置情報補正には、細かい条件を含めば無数の手法が存在するが、ここでは 2 つの手法に絞って説明する。一つは、距離に比例して補正量を決定する方法で逆距離加重法 (Inverse Distance Weighting: IDW) と呼ばれる。他方は、確率統計に基づいて補正量を決定するセミ・ダイナミック リダクション (SD/R) という手法がある。ただし、どちらも電子基準点から得た地殻変動量を使用することと、その変動量を用いて、ある点で変動量の内挿を行うことは同じである。

表 5.4.2-1 電子基準点解析結果の種類と特徴

	F3 解 最終解 (Final)	R3 解 速報解 (Rapid)	Q3 解 迅速解 (Quick)
暦	IGS 最終暦 (Final)	IGS 速報暦 (Rapid)	IGS 超速報暦 (Ultra-Rapid)
セッション※	24 時間	24 時間	6 時間
更新頻度	1 週間分を 1 週間毎	翌々日 1 日毎	3 時間毎
公開	○	○	×

※セッションは解析範囲で、解析結果はセッション単位で平均値をとる。

5.4.2.1. 逆距離加重法

この手法は、補正を行う点から各電子基準点までの距離の逆数を重みとした補間法である。メリットは計算が簡単なことであり、デメリットは近傍の点に（変動量の精度の良し悪し関係なく）大きく左右されることである。実際の計算は、次の通りである。ある点を P とし、電子基準点を P_i とする。この間の距離を $D(P, P_i)$ とし、重みを $W_i = 1/D(P, P_i)$ とする。各電子基準点での変動量を U_i とすれば、ある点 P での変動量は $U = (\sum_i W_i U_i) / \sum_i W_i$ で求められる。

5.4.2.2. セミ・ダイナミック リダクション

日本は地殻変動の影響が大きく、特に東北地域は東北地方太平洋沖地震の余効変動のため、年間 10 数 cm ずれる。衛星測位においては、リアルタイムで高精度な単独測位（PPP-RTK）が近年多く研究されている。しかし、地殻変動を補正するセミ・ダイナミック補正は年に 1 回の更新のみで、最大 15 か月分の地殻変動量が累積される（図 5.4.2-1 参照）。この状況下において、高精度地図に対して衛星測位によるセンチメートル級の位置情報を得るには、より更新頻度の高い補正方法及びサービスが必要となる。また、地図へのマッピングには、歪みではなく水平変動量（ズレ）を補正する必要がある。以上の経緯から SD/R が開発された。

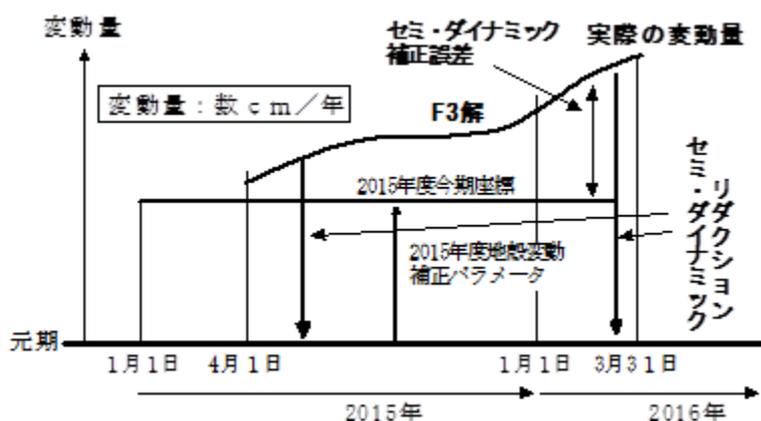


図 5.4.2-1 セミ・ダイナミックリダクション イメージ[5]

SD/R の補正処理は、セミ・ダイナミック補正を参考にしており、地域メッシュと呼ばれる日本を覆う格子に対して、確率統計的に変動量を内挿し、補正パラメータを作成する。変動量の計算は F3 解を使用し、補正パラメータの生成にはクリギング法を用いる。そして補正する点を含む格子の中で、作成した補正パラメータにより、バイリニア補間を行う補正方法である。メリットは地殻変動の定常的な変化をとらえられることと補正パラメータを作成すれば、計算が簡単なことであり、デメリットは補正パラメータを作る計算が少し複雑であるところである。

5.4.2.3. セミ・ダイナミック補正と SD/R

この 2 つの手法は、地殻変動による変動量を補正する点では一致しているが、根本的に異なる補正方法である。なぜなら、セミ・ダイナミック補正は歪みを補正し、SD/R は位置を補正するからである。どちらの手法も直接は位置を補正するが、セミ・ダイナミック補正は歪みによって生じた角度を補正するものである。具体的な補正対象は、せん断歪みと呼ばれ、地震を起こすような形自体を変形させる歪みのことである。

5.5. 位置整合手法の評価

5.5.1. 評価手法

地図は基準点の座標値を基に作成されるため、地図と衛星測位結果を比較するには、測地成果の座標値と基準点における衛星測位結果を比較すればよい。つまり位置整合手法の評価を行うためには、基準点の座標値と位置整合を施した衛星測位結果の比較を行えばよい。

衛星測位は、高精度単独測位の PPP-RTK 方式で 1 時間の静止観測を行う。使用衛星システムは GPS/QZSS、補強サービスに CLAS を用いる。比較に使用する座標値は、測位結果の平均値を採用する。

5.5.2. 東北地域での位置情報補正の評価

2011 年 3 月 11 日、東北地方太平洋沖地震が発生し、それにより東北地域では大きな余効変動が観測されている。そこで、地殻変動の大きな地域における SD/R の検証のため、基準点「利府」、「気仙沼」、「村山」、「亘理」、「福島」の 5 点を観測した評価を行う。

はじめに、各基準点での静止観測の結果を表 5.5.2-1 に示す。「福島」を除いて DRMS は 1.5cm 以内であり、これは信頼できる精度である。

表 5.5.2-1 各基準点の静止観測精度

	標準偏差[m] (南北方向)	標準偏差[m] (東西方向)	DRMS[m]
利府	0.006	0.005	0.008
気仙沼	0.005	0.004	0.007
村山	0.004	0.004	0.006
亘理	0.012	0.007	0.014
福島	0.041	0.067	0.078

次に SD/R 補正を行っていない測位結果の位置のズレ量を表 5.5.2-2 に示す。水平方向に 0.7~1m (年間 10cm 以上) ずれており、余効変動の大きさがわかる。図 5.5.2-1 は地殻変動量を地図にベクトルで表示したものである。

表 5.5.2-2 各基準点の地殻変動量 (SD/R 前)

	変動量[m] (南北方向)	変動量[m] (東西方向)	変動量[m] (水平方向)
利府	-0.325	0.876	0.934
気仙沼	-0.338	0.993	1.049
村山	-0.268	0.872	0.912
亶理	-0.278	0.808	0.854
福島	-0.121	0.701	0.711



図 5.5.2-1 地殻変動量 (SD/R 前)

最後に基準点と SD/R で補正した衛星測位結果を比較した結果を表 5.5.2-3 に示す。すべての基準点で水平の変動量が 4cm 以内に収まっていることがわかる。図 5.5.2-2 は SD/R 前と補正後を比較したグラフであり、SD/R は地殻変動補正手法として有効であることがわかる。

表 5.5.2-3 各基準点の地殻変動量 (SD/R 後)

	変動量[m] (南北方向)	変動量[m] (東西方向)	変動量[m] (水平方向)
利府	0.006	-0.022	0.023
気仙沼	0.005	-0.023	0.024
村山	0.015	-0.028	0.032
亶理	0.003	-0.027	0.027
福島	0.018	-0.035	0.039

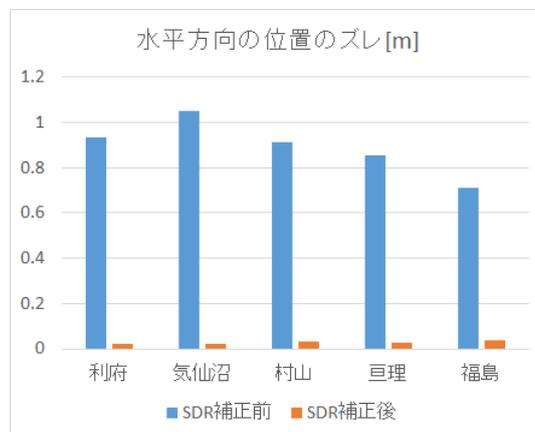


図 5.5.2-2 各基準点の地殻変動量 (SD/R 前後比較)

6. 衛星測位の測位信頼度の検討

6.1. 摘要

研究目的

自動走行システムの実現に向けた衛星測位の信頼性の評価と信頼度の測定方法の検討

方法

- ① マルチパス環境での静止試験（RTK-GNSS 測位）による衛星測位の信頼性の調査
- ② 静止試験によって得られた結果から、衛星測位の信頼性の低下原因を推定
- ③ 上記①、②によって得られた知見をもとに、移動体に適用可能な衛星測位の信頼度の測定方法の検討

結果

- ① 静止試験により、GPS、QZSS、GLONASS、Galileo、BeiDou を複合し、使用する衛星が増加することで衛星測位の信頼性が向上することを明らかにした。
- ② マルチパスが衛星測位の信頼性を低下させる原因であることを明らかにし、マルチパスを除去することで、設定した信頼度を満足することを示した。
- ③ 正しい信頼度を測定するために、(1)できる限りマルチパスを除去する、(2)RTK-GNSS のミス FIX 解を検出・除去することが有効であることを示した。
- ④ 移動体で利用可能なミス FIX 解の検出手法として、INS (Inertial Navigation System) によって推定した事前誤差共分散と観測値の誤差共分散を比較する方法を提案した。

課題

本研究では自動走行システムの実現に向けた衛星測位の信頼性の評価と信頼度の測定方法の検討を実施した。正しく衛星測位の信頼度を測定するために、INS を利用する手法を提案したが、今後実際の移動体データを用いてその性能を検証する必要がある。

6.2. 研究背景

6.2.1. 背景

自動車の普及に伴う交通事故や交通渋滞は、世界中で甚大な社会的損失をもたらしており、今後の世界的な人口増大に伴う自動車保有の増加や高齢化、都市の過密化の進展により、こうした問題も深刻さを増すものと考えられる。例えば、交通死者数は近年減少傾向にあったが、去年は 15 年ぶりの増加となっており、事故低減に向けた更なる取り組みが必要である。こうした中、自動車分野における新たな取り組みである自動走行への期待は大きい。

自動走行システムの実現に向けては、ダイナミックマップ上での高度な自律センサと地物による位置標定を前提とした上で、これを補完するために衛星測位情報を活用することが検討されている。米国の GPS(Global Positioning System)代表される衛星測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)、屋外環境での位置情報の取得手段として広く利用されている。

ここで、車両の自動走行などの移動体における GNSS 測位では、その精度と可用性（測位が可能な時間

および場所の割合)の二つが大きな問題として存在する。高層ビルや高架橋などの構造物が多い都市部では、衛星から配信される測位信号が障害物で遮蔽され、単独のGNSSだけではしばしば衛星数の不足に陥りがちである。しかし、近年では世界的な測位需要の高まりを受け、各国がGNSSの整備を急速に推し進めている。現在GNSSには、アメリカのGPSの他に、ロシアのGLONASS、欧州のGalileo、中国のBeiDou、インドのNavIC、そして日本の準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellites System)などがある。これに伴い、測位に利用可能な衛星数は急速に増加しており、表 6.2.1-1 に示すように 2017 年現在、測位衛星数は合計 103 機と非常に多くの衛星が地球を周回している[10]。また、日本における衛星の位置を配置した図 6.2.1-1 に示すように、日本の上空だけでも常時 20~30 機以上の衛星が利用可能である。GNSS 測位では測位信号から衛星-アンテナ間の距離を算出し、幾何学的にアンテナの位置を求めるという原理上、通常 4 機以上の衛星が測位に必要となる。マルチ GNSS を利用することで都市部のような環境においても十分な衛星数を確保することができ、測位の可用性は大幅に向上している。しかしながら、都市環境においては GNSS 衛星の増加が測位精度の向上には直結しない。都市環境では GNSS 衛星からの電波がビルなどの建物に反射、回折してアンテナに到達するマルチパスと呼ばれる現象により、測位精度が大きく低下する。特にマルチパスが発生する環境においては、突発的に大きな測位誤差が発生し、GNSS の測位の自動走行などへのアプリケーションの利用が困難となる。

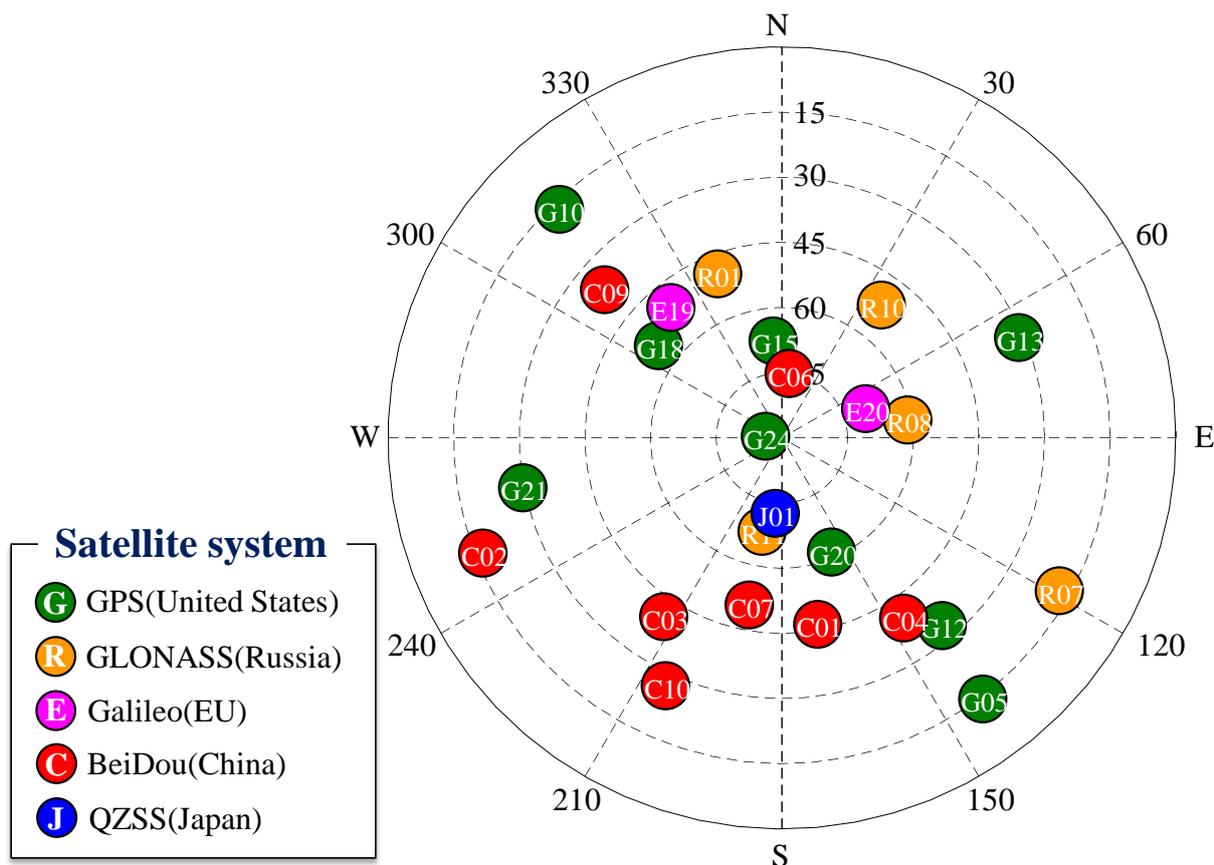


図 6.2.1-1 2017 年 1 月 1 日における東京上空の GNSS 衛星配置

表 6.2.1-1 利用可能な GNSS 衛星数

Country / Region	GNSS	Number of satellites	
		2017	2020
United States	GPS	31	32
Russia	GLONASS	24	24
Europe Union	Galileo	18	30
China	BeiDou	22	35
India	NavIC	7	7
Japan	QZSS	1	4
All	—	103	132

6.2.2. マルチパス

前節で述べたように、GNSS 測位における課題として、高層ビルや高架橋などの障害物が立ち並ぶ都市部での測位精度の劣化がある。主な原因は、図 6.2.2-1 に示すように衛星からの測位信号がアンテナ周囲の障害物で反射、回折し、2 つ以上の経路を通過してアンテナに到達する、マルチパスと呼ばれる現象である。ここで、信号が障害物に遮られずに直接波を受信できる、可視(LOS: Line-of-Sight)衛星によるマルチパス波は LOS マルチパスと呼ばれる。一方で、信号が障害物によって遮られ、直接波が受信されない不可視(NLOS: Non-Line-of-Sight)衛星によるマルチパス波は NLOS マルチパスと呼ばれる。

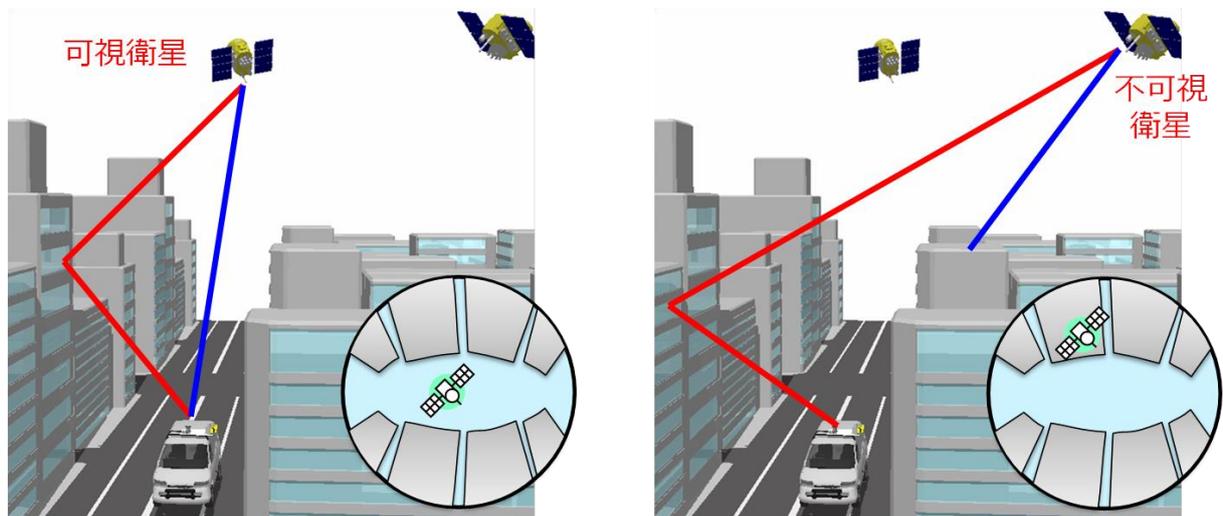


図 6.2.2-1 都市環境におけるマルチパス

LOS マルチパスは相関器などの工夫により受信機的设计次第でこれを軽減することが可能である。Narrow-Correlator[11]や Strobe-Correlator[12]と呼ばれる信号相関器を用いることで、LOS マルチパスの低減が可能である。しかしながらこれらの手法は、マルチパス波と同時に直接波がアンテナに入射することを前提としているため、LOS マルチパスによる影響を低減することは可能であるが、NLOS マルチパスの低減は困難である。この NLOS マルチパスによる測距誤差は、一般的に正規分布にはならずバイアス誤差となるため、都市部などのマルチパス環境での測位解は突発的に大きな測位誤差を含み、

GNSS 測位の信頼性が低下する[13]。

実際の都市環境での GNSS 衛星測位の NLOS マルチパスの例を図 6.2.2-2 に示す。ビルが立ち並ぶ都市環境において、GNSS アンテナを固定した静止実験により GNSS データを取得した。さらに、実験地点で魚眼カメラを用いて撮影した天頂画像上に、観測した全衛星の位置を投影した。図 6.2.2-2 において、不可視衛星は建物上に位置する衛星であり、実際の都市環境ではビルによる反射、回折により多くの NLOS マルチパスを受信していることが確認できる。このような環境では、マルチパスによる大きな測位誤差が発生すると考えられる。このような場合において、GNSS 測位の信頼度、つまり GNSS 測位解がどれほどの誤差を含んでいるのかを示す指標が、実際のアプリケーションにおいて GNSS 測位を利用するのに非常に重要となる。事前に GNSS 測位解がどれほどの誤差を含んでいるのかという情報を利用することができれば、アプリケーションにおいて求められる位置精度に応じた GNSS 測位解の取捨選択が可能となる。

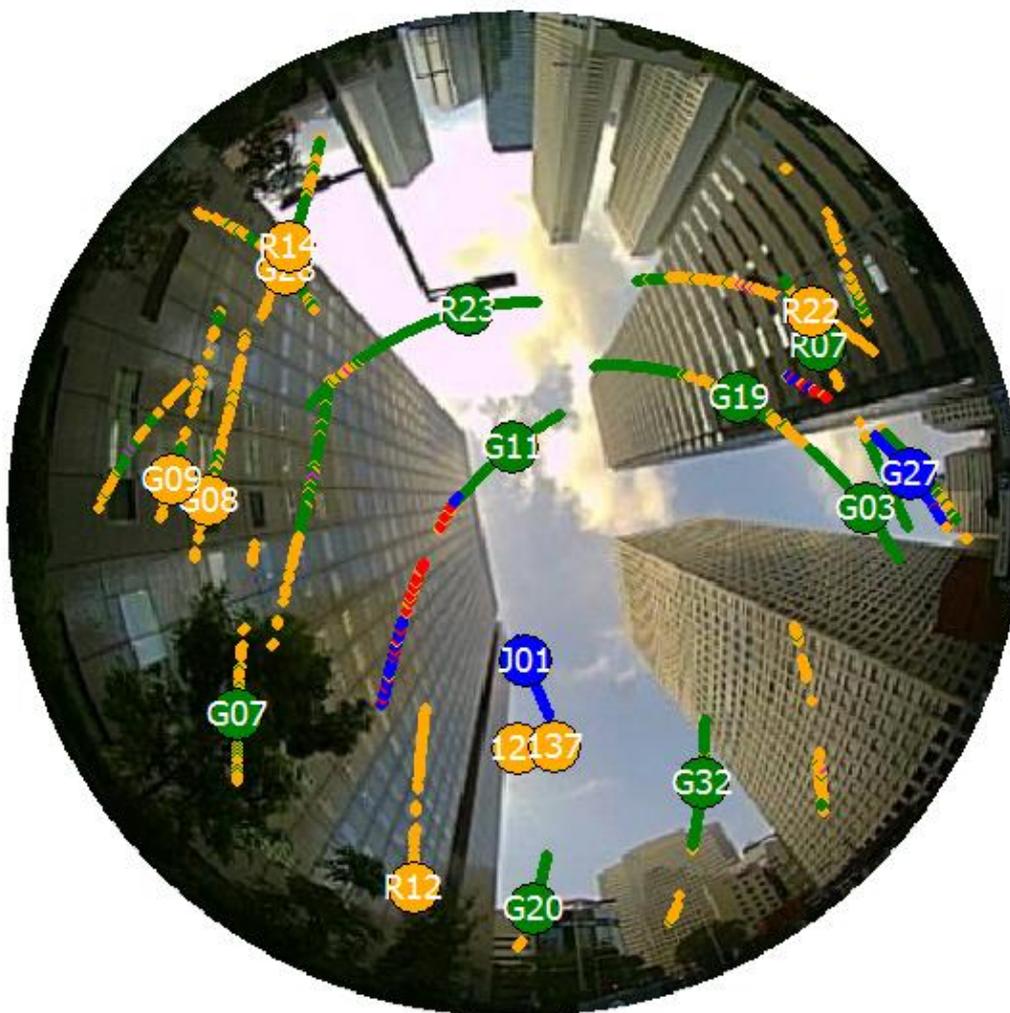


図 6.2.2-2 都市環境における GNSS 測位の現状

6.3. 研究目的・方法

前節で示したように、都市環境における GNSS 衛星測位では、大きな測位誤差が発生し、衛星測位の信頼性が低下する。そこで本研究では、衛星測位の信頼性の評価と、衛星測位の正しい信頼度の測定方法の検討を実施する。自動走行において GNSS を利用するためには GNSS による測位解の信頼性の評価が重要になる。また、衛星測位の正しい信頼度を推定することができれば、現在の GNSS 測位解を自動走行へ利用するかどうかの指標となり、GNSS 測位の安全な利用が可能となる。

具体的には、下記の内容を実施する。

- マルチパスが発生する環境における静止実験による GNSS 測位の信頼性の調査
- 静止試験によって得られた結果から、衛星測位の信頼性の低下原因を調査
- 上記によって得られた知見をもとに、移動体に適用可能な衛星測位の信頼度の測定方法の検討

これらを実施することで、将来の自動運転における GNSS 測位の有効な利用の指針を確立する。

6.4. 衛星測位の信頼性の定義

6.4.1. 誤差楕円

ここで、本研究における GNSS 測位の信頼性を「GNSS 測位計算によって求められる測位解の誤差の分散」と定義する。GNSS 測位では、測位解は正規分布であると仮定し、GNSS 測位解の分散は、その測位解がどの程度の誤差を含んでいるのかを表している。GNSS 測位解の分散は、GNSS の衛星配置によって定まる DOP (Dilution Of Precision) に大きく依存する。一般的に RTK-GNSS 測位では測位解を算出するのに時系列フィルタであるカルマンフィルタが利用されるため、カルマンフィルタによって推定された測位解の共分散行列が、その測位解のもつ誤差を表している。

ここでは、簡単のために水平方向の二次元の測位解の誤差分布を考える。水平方向の測位解 \mathbf{x} 、その誤差共分散行列 Σ は次のように表される。

$$\mathbf{x} = [x \quad y]^T \quad (1)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、この測位解の誤差共分散行列から、等確率曲線に相当する共分散楕円が得られ、次式で表される。

$$\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{xy}{\sigma_x \sigma_x} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} = D^2(1 - \rho^2) \quad (3)$$

ここで、 D は測位解からのマハラノビス平方距離であり、この場合自由度 2 の χ^2 分布に従う。また、 ρ

は x と y の相関係数であり、次のように求められる。

$$\rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

式(3)から、ある信頼度を設定した場合に、その楕円の内側に測位解を観測する確率 P は D の関数であり、

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{2}\right) \quad (5)$$

となる。ここで自由度 2 の χ^2 分布表を表 6.4.1-1 に示す。この確率 P が 95% となる場合、 D は約 5.99 であり、99% の場合は、約 9.21 である。

例えば信頼度を 95% と設定した場合 ($D=5.99$)、測位解を中心に、得られた共分散行列から楕円を描いた場合、測位解がその楕円内に入る確率は 95% となる。

表 6.4.1-1 各地点における使用 GNSS アンテナ・受信機

自由度	95%	97.5%	99%	99.5%
2	5.991	7.378	9.210	10.597

ここで、例として、次の式で示す共分散行列の誤差楕円を求める。信頼度が 95%、99% のそれぞれの原点を中心とした誤差楕円を図 6.4.1-1 に示す。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

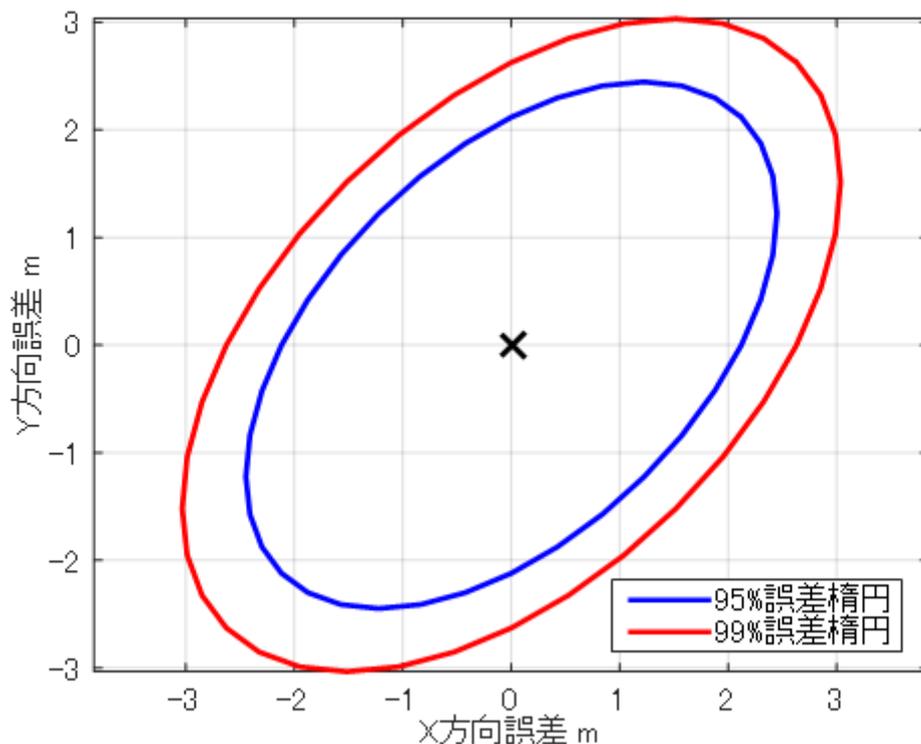


図 6.4.1-1 95%、99%の誤差楕円

以上の議論により、任意の GNSS 測位解の信頼度を設定し、GNSS 測位解の誤差共分散行列を用いて楕円を描くことで、GNSS 測位の信頼性を評価することが可能となる。

6.4.2. 衛星測位の信頼性の低下

前節では測位解の誤差共分散行列から任意の信頼度で誤差楕円を描くことで、GNSS 測位の信頼性の評価が可能であることを示した。しかしながら、前節で示した誤差楕円は、GNSS の測位誤差が正規分布に従うことを仮定している。GNSS の測距誤差の多くは正規分布とみなすことができるが、いくつかの誤差要因（例えばマルチパス誤差）に関しては正規分布にはならない。特に NLOS マルチパスに関しては、正規分布にはならないことが知られている。このため、都市環境においては、測位解の信頼度を超える測位誤差が発生する場合、例えば次のような現象が発生すると考えられる。

- ・ 99%の誤差楕円の外に測位解が発生する割合が 1%を超える

図 6.4.2-1 にその例を示す。この場合、正しい信頼度をどのように決定するのかという問題が発生する。設定した信頼度が確かではない場合、衛星測位の信頼性が低下していると考えられる。この場合 GNSS 測位結果の信頼性があいまいとなり、自動走行などの GNSS 測位結果を利用するアプリケーションでは、GNSS 測位の利用が困難となる。

そこで本研究では、この衛星測位の信頼性低下の原因を調査し、正しく信頼度を見積もる方法を検討する。信頼性の低下の調査のために、座標が既知の点で GNSS の静止観測を行うことで、設定した信頼度

を GNSS 測位解が満足するかを調査する。

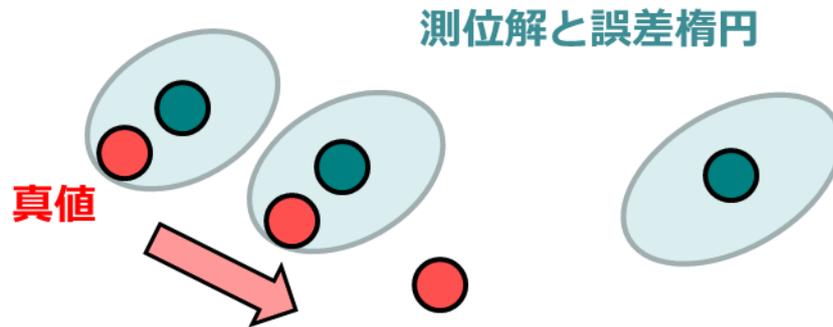


図 6.4.2-1 誤差楕円の外に測位解が発生する場合

6.5. 静止試験

6.5.1. 実験概要

衛星測位の信頼性を評価するために、マルチパス環境における GNSS の静止観測データの取得を行った。実験日時、場所を下記に示す。

【日時】：平成 28 年 12 月 26 日（月）11:35～13:35

【場所】：東京海洋大学越中島キャンパス内（東京都江東区越中島 121-6）

図 6.5.1-1 に実験場所周辺の航空写真とデータ取得地点を示す。図 6.5.1-1 中の 2 地点（①、②）でそれぞれ GNSS データを連続的に 1 時間取得する。また、同時に魚眼カメラでデータ取得地点周辺の建物の配置を撮影することで、マルチパス信号の特定を可能にする。データ取得地点の座標は、事前に RTK-GNSS 測位により算出した。地点①、地点②の座標を、表 6.5.1-1 に示す。



図 6.5.1-1 上空全体図

表 6.5.1-1 各地点の座標

地点番号	緯度 [度]	経度 [度]	楕円体高 [m]
1	35.66651383	139.79255568	39.724
2	35.66642644	139.79257356	39.961

6.5.2. 実験方法

6.5.2.1. GNSS アンテナ・受信機

使用する GNSS 受信機、アンテナ、魚眼カメラの概要を表 6.5.2-1 に示す。またそれぞれの外観を、図 6.5.2-1、図 6.5.2-2、図 6.5.2-3 に示す。GNSS 受信機として Trimble 社のマルチ GNSS 対応受信機である NetR9、NovAtel 社のマルチ GNSS 対応アンテナ 703-GGG を使用する。また、どの衛星がマルチパス誤差を生じているかの特定や、受信環境の詳細な評価のために、アンテナ設置位置での天空画像を取得する。この天空画像の取得のために、オプト製の魚眼カメラである NM33 を使用する。

表 6.5.2-1 使用 GNSS アンテナ・受信機・魚眼カメラ

機材	メーカー	型番
GNSS アンテナ	NovAtel	703-GGG
GNSS 受信機	Trimble	NetR9
魚眼カメラ	オプト	NM33



図 6.5.2-1 GNSS 受信機 (Trimble NetR9)



図 6.5.2-2 GNSS アンテナ (NovAtel 703-GGG)



図 6.5.2-3 魚眼カメラ(オプト NM33)

6.5.2.2. GNSS 解析設定

データを取得する GNSS は、GPS、QZSS、GLONASS、BeiDou、Galileo とする。データ取得周期は 1Hz で、それぞれの地点で 1 時間の静止データを取得する。使用する測位手法は、後処理 RTK-GNSS と

し、使用衛星システムは、GPS のみ、GPS+QZSS、GPS+QZSS+GLONASS、GPS+QZSS+GLONASS+Galileo+BeiDou の 4 パターンとする。表 6.5.2-2 に使用する測位手法と解析パターン一覧を示す。

表 6.5.2-2 測位手法と使用 GNSS

測位手法	後処理 RTK-GNSS			
使用 GNSS	GPS (G)	GPS+QZSS (GJ)	GPS+QZSS+GLONASS (GJR)	GPS+QZSS+GLONASS +Galileo+BeiDou (GJRCE)

GNSS 基準局は東京海洋大学屋上の基準局 (Trimble NetR9) を利用する。基線長は地点①でおよそ 35m、地点②でおよそ 30m である。GNSS データ解析には RTKLIB (2.4.2 p11) を利用する [14][15]。RTKLIB の設定を、表 6.5.2-3 に示す。表 6.5.2-3 に示すパラメータ以外は、デフォルトの値を用いている。

表 6.5.2-3 RTKLIB の設定

パラメータ	設定値
Positioning mode	Kinematic
Integer Ambiguity Res.	Instantaneous/ON/ON
SNR Mask	無し/有り (35dBHz)

6.5.3. 実験・解析手順

東京海洋大学越中島キャンパスの座標が既知の 2 地点において、それぞれ三脚で GNSS アンテナを固定し、GNSS 受信機として NetR9 を用いて 1 時間 GNSS 観測データを取得する。GNSS 観測データの取得後、GNSS アンテナと同場所において、周囲の建造物の影響を判断するために、魚眼カメラを用いて周囲の上空の画像を撮影する。ここで、魚眼カメラ撮影時のカメラの水平は水準器を用いて調整する。魚眼カメラの方位角は、磁気コンパスでおおよそその磁北方向を算出し、その方位角が魚眼画像の上部方向となるように設置し撮影する。後処理において、正確な真北方向が撮影画像の上部方向となるように、画像に写ったランドマークとなる建物と、地図から算出したランドマークまでの方位角が一致するように撮影した魚眼画像を回転し調整する。

データの取得後、次の手順で解析を実施する。

- ① それぞれの衛星システムの組み合わせによる測位精度の評価
- ② SNR マスクを設定し、マルチパスを除去することで、測位精度がどう変化するか調査
- ③ それぞれの衛星システムの組み合わせにおいて、設定した GNSS 測位の信頼度を満足したかの調査
- ④ SNR マスクを用いてマルチパスを除去することで、設定した信頼度を満足するかどうかの調査

以上の手順で実験と解析を行うことで、マルチパス環境での GNSS 測位の信頼性を調査し、移動体にお

ける信頼度の測定手法を検討するための指針とする。

6.5.4. 実験 1

6.5.4.1. 実験環境

図 6.5.4-1 に実験環境の写真を示す。また図 6.5.4-2 に実験環境で取得した魚眼カメラによる天空画像を示す。これらの図から確認できるように、実験場所は建物に囲まれた環境である。



図 6.5.4-1 実験環境の写真 (地点①)



図 6.5.4-2 実験環境の天空画像 (地点①)

6.5.4.2. 衛星配置

実験時の GNSS 衛星の配置を図 6.5.4-3 に示す。図中の G は GPS、J は QZSS、R は GLONASS、C は BeiDou、E は Galileo の衛星位置を表している。仰角 15° 以上の衛星は、GPS: 8 機、GLONASS: 8 機、Galileo: 4 機、QZSS: 1 機、BeiDou: 9 機であった。

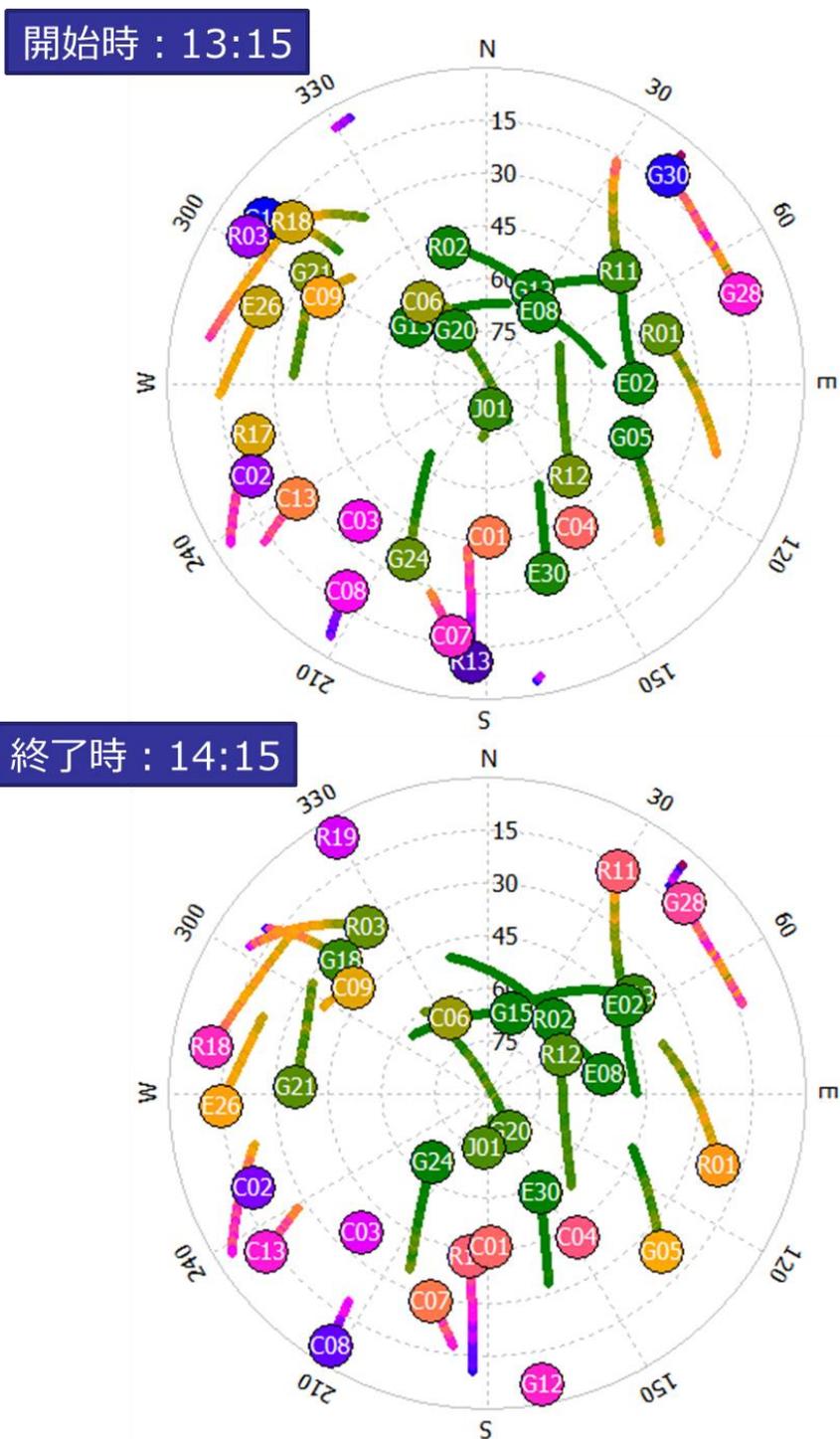
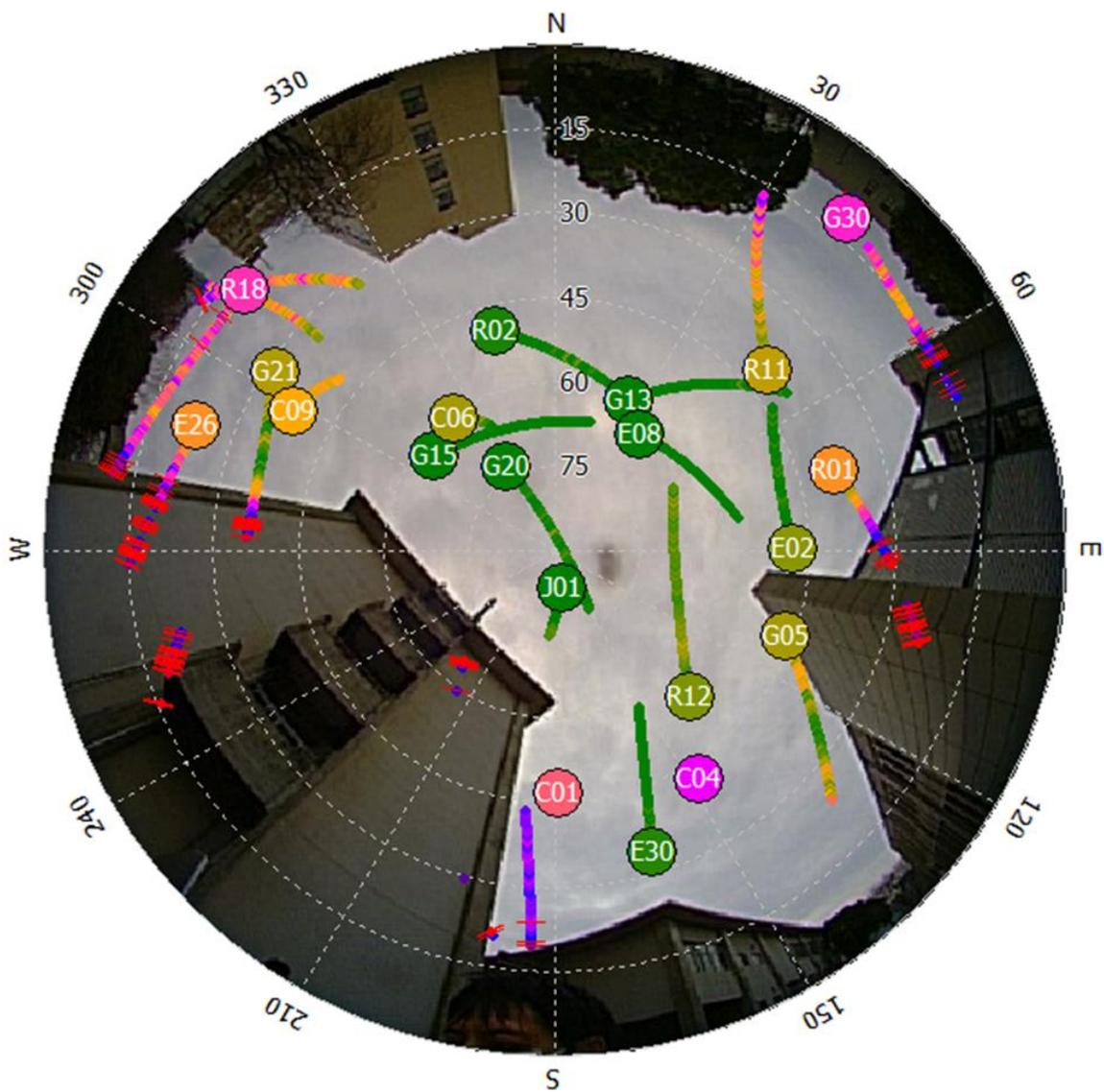


図 6.5.4-3 実験時の衛星配置 (地点①)

6.5.4.3. 天空画像と GNSS 配置

図 6.5.4-4 に取得した天空画像に GNSS の配置を重ねた画像を示す。図中の衛星軌跡の色は、信号強度の大きさを表している。この図からわかるように、建物の影に隠れた不可視衛星からの NLOS 信号を受信していることが確認できる。また、魚眼画像から確認できる周囲の建物の配置と GNSS の信号強度は相関があり、建物付近の衛星からはマルチパスを受信し、信号強度が低下していることが確認できる。



緑：信号强度高
 赤：信号強度低
 |：サイクルスリップ

図 6.5.4-4 天空画像と GNSS 配置 (地点①)

6.5.4.4. 測位精度の評価

図 6.5.4-5 それぞれの衛星システムの組み合わせの場合の SNR マスクを用いなかった際の RTK-GNSS の水平方向の測位結果、ENU 方向の時系列の測位誤差を示す。これらの図の原点は事前に計測した真値となっている。図中の緑色のプロットは RTK-GNSS の FIX 解を示し、黄色のプロットは FLOAT 解を示している。同様に図 6.5.4-6 に SNR マスク (35dBHz) を使用した際の、それぞれの衛星システムの組み合わせにおける RTK-GNSS の測位解を示す。また、表 6.5.4-1 に、それぞれの場合の FIX 解が得られた時間割合である FIX 率を示す。

まず SNR マスクを使用しない場合、図 6.5.4-4 から確認できるように測位に使用する GNSS データには多くのマルチパスが含まれていると考えられる。この場合、マルチパスの影響により、衛星システムを追加していき衛星数が増えても FIX 率が上昇しないことが確認できる。一方、SNR マスクを用いた場合には、GPS、GPS+QZSS のみの場合は SNR マスクによる衛星数の低下、衛星配置の悪化により SNR マスクを用いなかった場合と比較して FIX 率が低いことが確認できる。しかしながら、GLONASS、BeiDou を複合することで 100% 近くへ大幅に向上することが確認できる。

以上の評価により、マルチパスを除去することで RTK-GNSS 測位の利用性と精度が向上することが確認できる。また、マルチパス除去とマルチ GNSS による測位を複合することで、より衛星測位の利用率と精度が向上することが確認できる。

表 6.5.4-1 それぞれの衛星システムを用いた場合の FIX 率 (地点①)

		G	GJ	GJR	GJRCE
SNR マスク無し	FIX 率 %	62.2	78.9	68.4	71.3
	個数	2240/3600	2839/3600	2464/3600	2567/3600
SNR マスク有り	FIX 率 %	8.6	46.8	93.5	99.1
	個数	311/3600	1685/3600	3365/3600	3568/3600

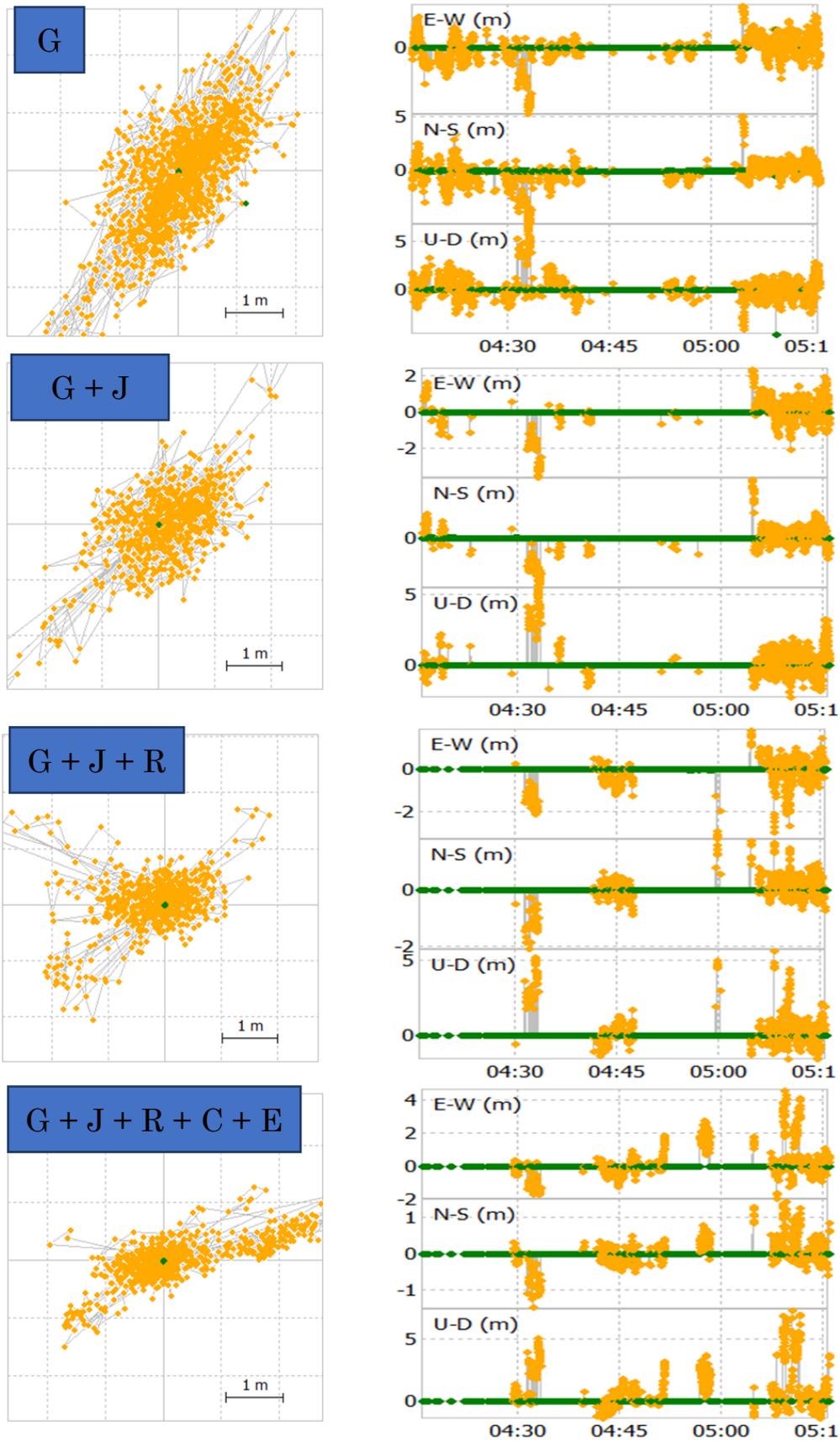


図 6.5.4-5 RTK-GNSS 測位結果 (SNR マスク無し)

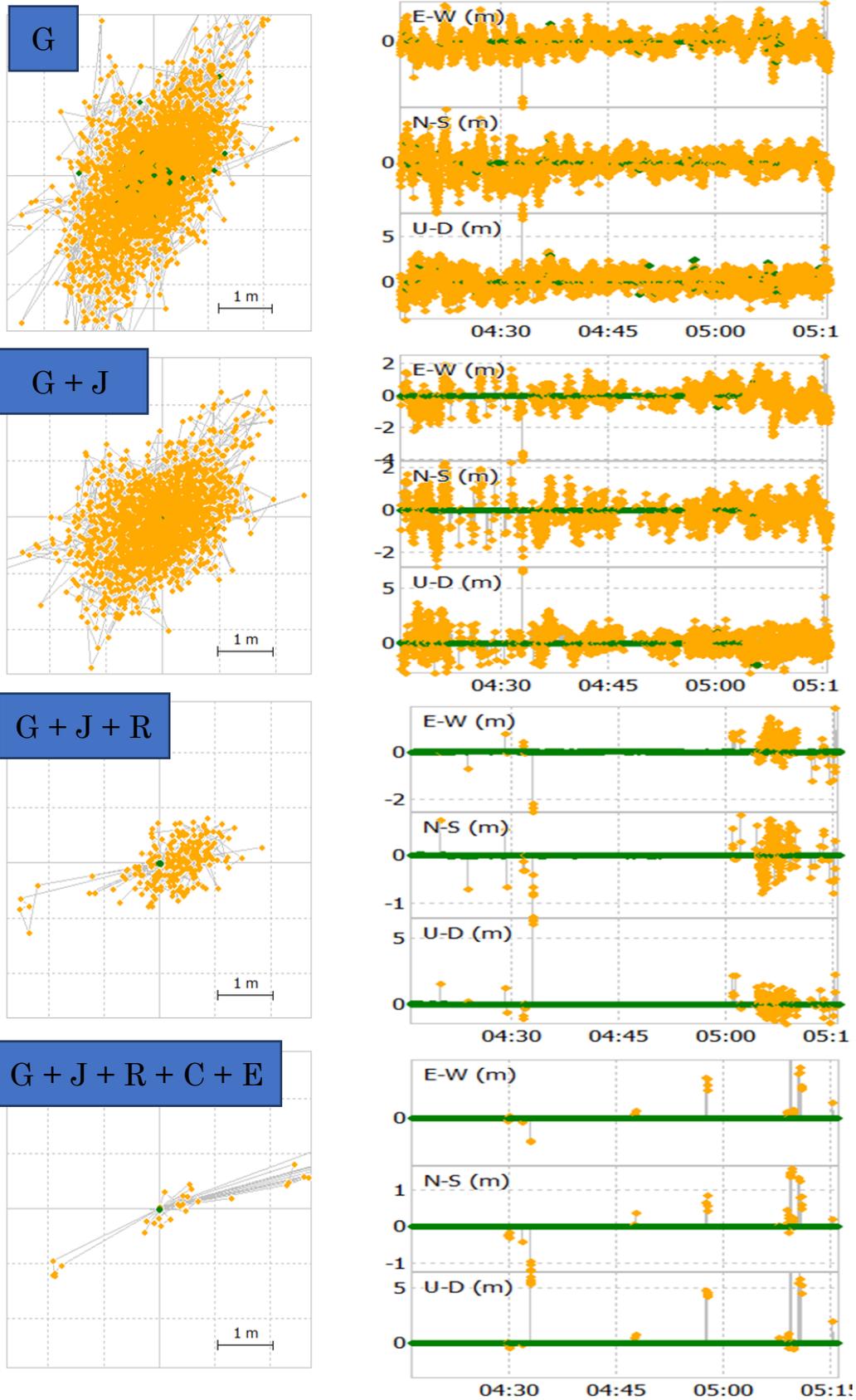


図 6.5.4-6 RTK-GNSS 測位結果 (SNR マスク有り)

6.5.4.5. 測位信頼性の評価

前節で示した誤差楕円の計算を用いて、RTK-GNSS 測位結果の信頼性を調査する。ここで、信頼度として、95%の誤差楕円、99%の誤差楕円について評価を行う。カルマンフィルタで推定されたあるエポックにおける測位解とその誤差共分散から、式(3)を用いて測位解を中心に誤差楕円を描き、事前に静止測量により計測した真値がその中に含まれるかを判定する。

まず、RTK-GNSS の全ての測位解についてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.4-2 に示す。表中の青で示した項目は、設定した信頼度を満足したことを示し、赤で示した項目は設定した信頼度を満足していないことを示す。

表 6.5.4-2 から、SNR マスクを用いた場合は、使用する衛星システムの増加、衛星数の増加に伴い、誤差楕円内に測位解が入る割合が増加していることが確認できる。SNR マスクを用いた場合の GJR、GJRCE のケースに関しては、信頼度 99%を設定した場合に全ての測位解が誤差楕円内に存在した。設定した信頼度を満足できなかったのは、SNR マスクを用いて GPS のみを用いた RTK-GNSS の場合のみとなった。

表 6.5.4-2 誤差楕円の評価 (すべての RTK-GNSS 測位解)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	98.4	98.8	96.4	97.6
		誤差楕円外 個数	57/3600	42/3600	112/3125	75/3131
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	98.8	99.8	99.4	99.9
		誤差楕円外 個数	45/3600	7/3600	20/3590	3/3590
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	99.8	99.9	99.3	99.0
		誤差楕円外 個数	7/3600	4/3600	22/3125	31/3131
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	98.8	99.8	100	100
		誤差楕円外 個数	44/3600	7/3600	0/3590	0/3590

次に、RTK-GNSS の FIX 解のみについてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.4-3 に示す。表中の青で示した項目は、設定した信頼度を満足したことを示し、

赤で示した項目は設定した信頼度を満足していないことを示す。いくつかの項目で、設定した信頼度を満足していないことが確認できる。SNR マスクを使用した場合と比較して、使用しない場合は信頼性が低下していることが確認できる。

表 6.5.4-3 誤差楕円の評価 (FIX 解のみ)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	98.4	98.8	95.8	97.2
		誤差楕円外 個数	35/2240	35/2839	103/2464	73/2567
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	85.9	99.6	99.4	99.9
		誤差楕円外 個数	44/311	7/1685	20/3365	3/3568
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	99.9	99.9	99.3	98.8
		誤差楕円外 個数	2/2240	4/2839	18/2464	31/2567
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	85.9	99.6	100	100
		誤差楕円外 個数	44/311	7/1685	0/3365	0/3568

次に、RTK-GNSS の FLOAT 解のみについてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.4-4 に示す。FLOAT 解については、全ての項目で、設定した信頼度を満足していることが確認できる。特に SNR マスクを使用した場合には、すべての項目で誤差楕円内に測位解が入った割合はほぼ 100%となった。

表 6.5.4-4 誤差楕円の評価 (FLOAT 解のみ)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	98.4	99.1	98.6	99.6
		誤差楕円外 個数	22/1360	7/761	9/661	2/564
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	99.9	100	100	100
		誤差楕円外 個数	1/3289	0/1915	0/225	0/22
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	99.6	100	99.4	100
		誤差楕円外 個数	5/1360	0/761	4/661	0/564
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	100	100	100	100
		誤差楕円外 個数	0/3289	0/1915	0/225	0/22

6.5.4.6. 考察

本節で示したマルチパス環境での GNSS 静止測位試験において、得られた知見を下記にまとめる。

- ・ マルチ GNSS を利用し、衛星数が増加するに従って RTK-GNSS 測位の利用性、精度、信頼性は向上する
- ・ SNR マスクを利用し、マルチパス信号を除去することで、測位の利用性、精度、信頼性は向上する
- ・ マルチ GNSS の利用と SNR マスクの利用を併用することで、特に利用性、精度、信頼性の向上に大きな寄与がある

- ・ FLOAT 解は全て設定した信頼度を満たしているため、マルチパスの影響により間違った搬送波位相の整数バイアスが推定される、ミス FIX 解が信頼性を低下させる要因となっている

6.5.5. 実験 2

6.5.5.1. 実験環境

図 6.5.5-1 に実験環境の写真を示す。また図 6.5.5-2 に実験環境で取得した魚眼カメラによる天空画像を示す。これらの図から確認できるように、実験場所は建物に囲まれた環境であり、前節で示した実験①よりもさらに天空が建物により遮蔽されていることが確認できる。



図 6.5.5-1 実験環境の写真 (地点②)

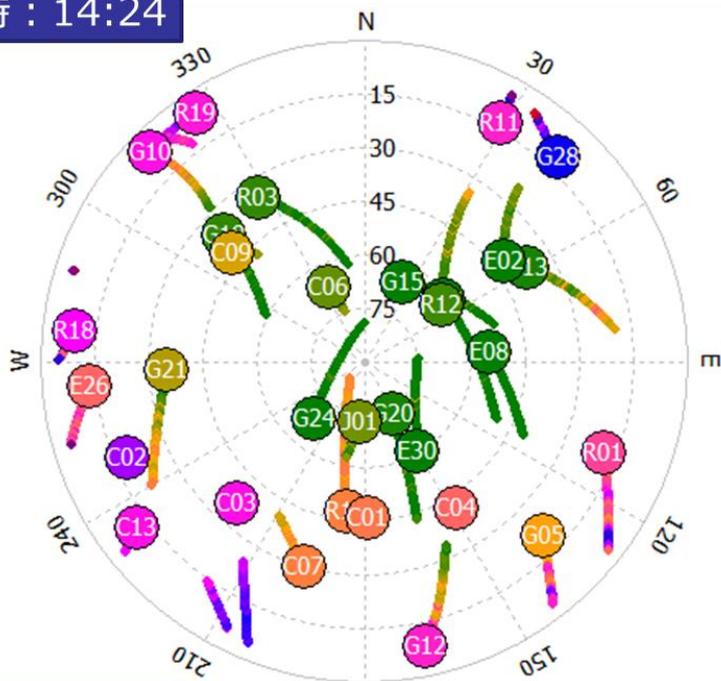


図 6.5.5-2 実験環境の天空画像（地点②）

6.5.5.2. 衛星配置

実験時の GNSS 衛星の配置を図 6.5.5-3 に示す。図中の G は GPS、J は QZSS、R は GLONASS、C は BeiDou、E は Galileo の衛星位置を表している。仰角 15° 以上の衛星は、GPS: 9 機、GLONASS: 6 機、Galileo: 3 機、QZSS: 1 機、BeiDou: 8 機であった。

開始時 : 14:24



終了時 : 15:24

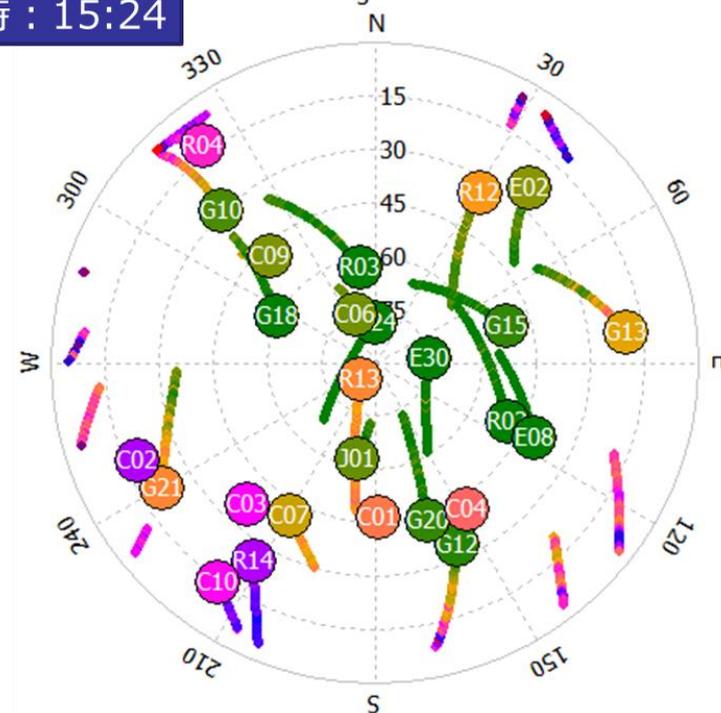


図 6.5.5-3 実験時の衛星配置 (地点②)

6.5.5.3. 天空画像と GNSS 配置

図 6.5.5-4 に取得した天空画像に GNSS の配置を重ねた画像を示す。図中の衛星軌跡の色は、信号強度の大きさを表している。この図からわかるように、建物の影に隠れた不可視衛星からの NLOS 信号を受信していることが確認できる。また、魚眼画像から確認できる周囲の建物の配置と GNSS の信号強度は相関があり、建物付近の衛星からはマルチパスを受信し、信号強度が低下していることが確認できる。ま

た建物の影に隠れた衛星では、頻繁にサイクルスリップが発生していることが確認できる。

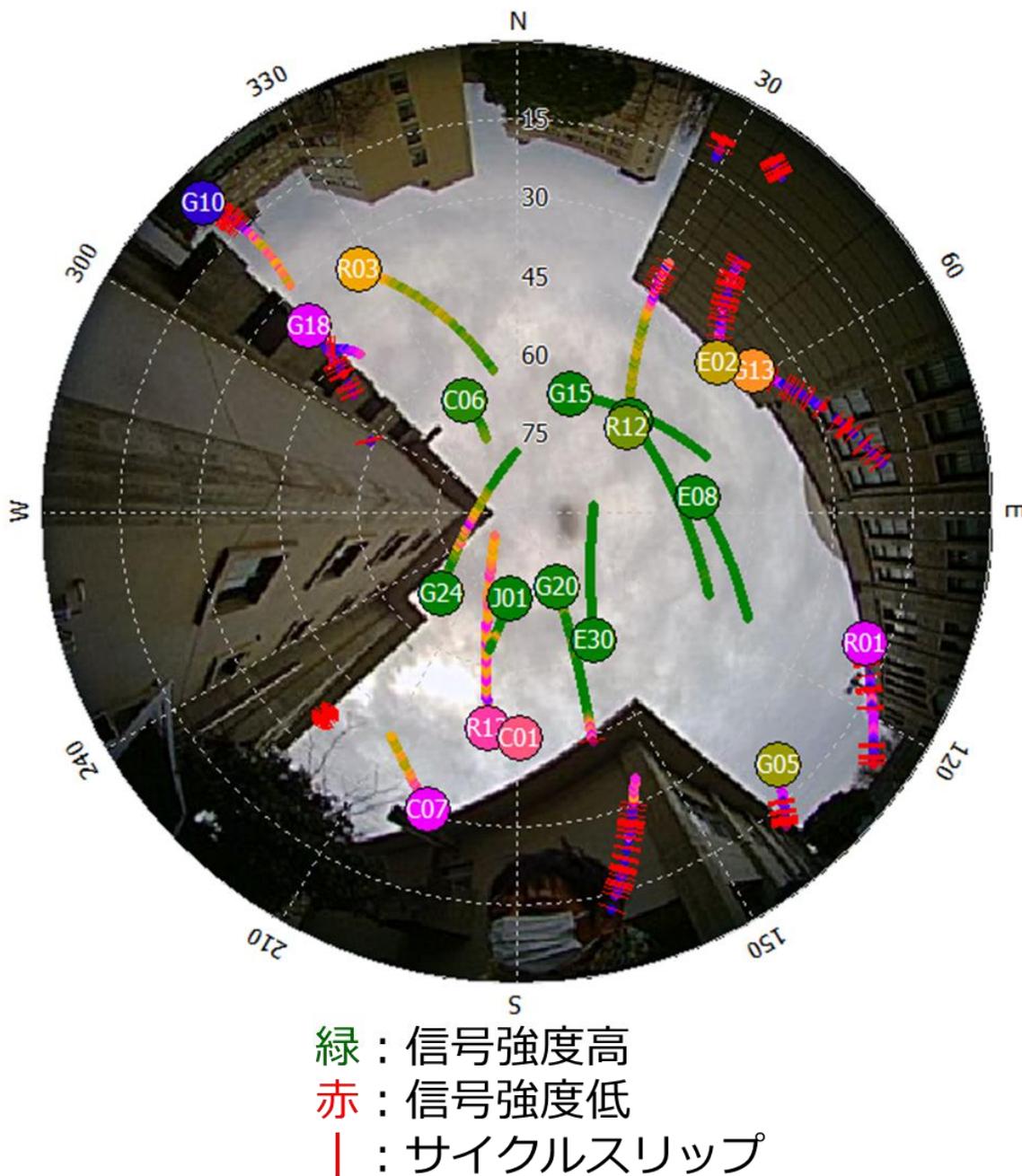


図 6.5.5-4 天空画像と GNSS 配置 (地点②)

6.5.5.4. 測位精度の評価

図 6.5.5-5 にそれぞれの衛星システムの組み合わせの場合の SNR マスクを用いなかった際の RTK-GNSS の水平方向の測位結果、ENU 方向の時系列の測位誤差を示す。これらの図の原点は事前に計測した真値となっている。図中の緑色のプロットは RTK-GNSS の FIX 解を示し、黄色のプロットは FLOAT 解を示している。同様に図 6.5.5-6 に SNR マスク (35dBHz) を使用した際の、それぞれの衛星システ

ムの組み合わせにおける RTK-GNSS の測位解を示す。また、表 6.5.5-1 に、それぞれの場合の FIX 解が得られた時間割合である FIX 率を示す。

前節で示した地点①と比較して、大幅に FIX 率が低下していることが確認できる。SNR マスクを使用しない場合、測位に使用する GNSS データには多くのマルチパスが含まれていると考えられる。一方、SNR マスクを用いた場合には、GPS、GPS+QZSS のみの場合は SNR マスクによる衛星数の低下、衛星配置の悪化により FIX 率が低いことが確認できる。しかしながら、GLONASS、BeiDou を複合することで FIX 率は大幅に向上することが確認できる。

以上の評価により、地点①と同様に、マルチパスを除去することで RTK-GNSS 測位の利用性と精度が向上することが確認できる。また、マルチパス除去とマルチ GNSS による測位を複合することで、より衛星測位の利用率と精度が向上することが確認できる。

表 6.5.5-1 それぞれの衛星システムを用いた場合の FIX 率 (地点②)

		G	GJ	GJR	GJRCE
SNR マスク無し	FIX 率 %	1.3	0.6	3.5	16.1
	個数	47/3600	22/3600	127/3600	580/3600
SNR マスク有り	FIX 率 %	2.1	0.3	5.6	33.9
	個数	77/3600	11/3600	200/3600	1219/3600

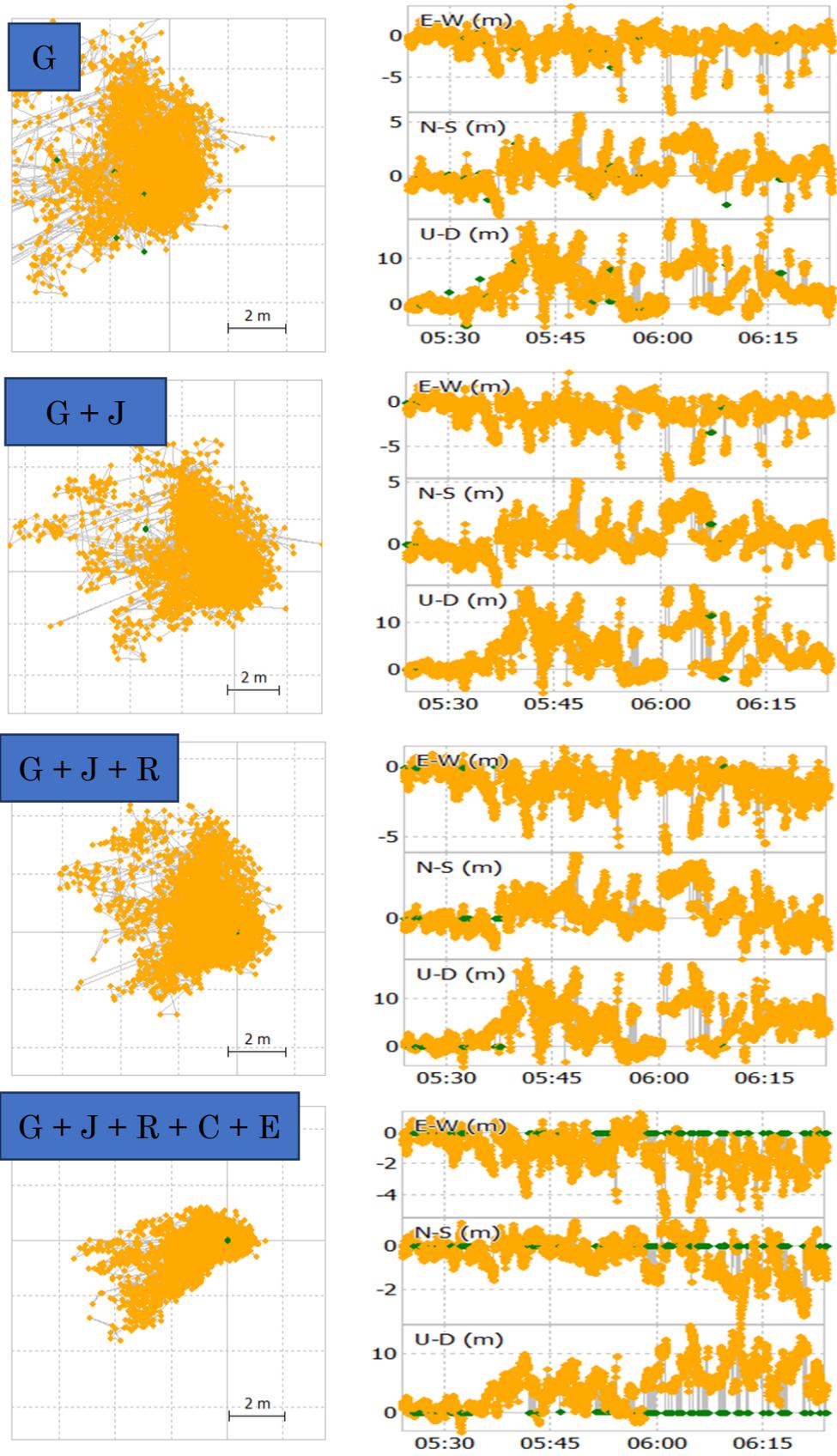


図 6.5.5-5 RTK-GNSS 測位結果 (SNR マスク無し)

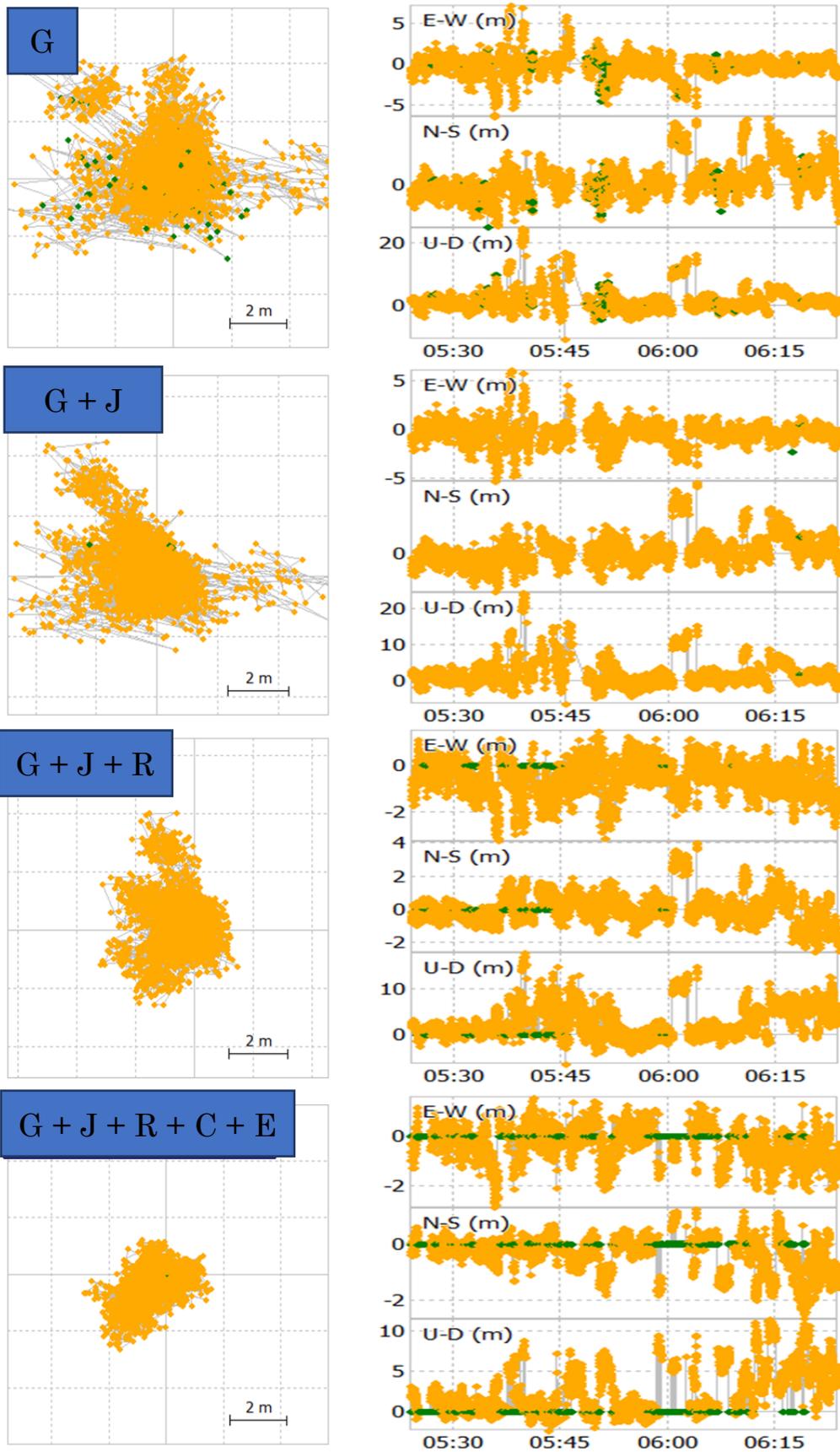


図 6.5.5-6 RTK-GNSS 測位結果 (SNR マスク有り)

6.5.5.5. 測位信頼性の評価

前節で示した地点①と同様に、GNSS 衛星測位の信頼度として、95%の誤差楕円、99%の誤差楕円について評価を行う。カルマンフィルタで推定されたあるエポックにおける測位解とその誤差共分散から、式(3)を用いて測位解を中心に誤差楕円を描き、事前に静止測量により計測した真値がその中に含まれるかを判定する。

まず、RTK-GNSS の全ての測位解についてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.5-2 に示す。表中の青で示した項目は、設定した信頼度を満足したことを示し、赤で示した項目は設定した信頼度を満足していないことを示す。

表 6.5.5-2 から、よりマルチパスが多く、上空視界が限られた環境では、SNR マスクを用いない場合は、全てのパターンに設定した信頼度を満足できなかった。一方、SNR マスクを使用することで、95%誤差楕円に関しては全てを満足した。

表 6.5.5-2 誤差楕円の評価 (すべての RTK-GNSS 測位解)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	90.5	91.3	91.1	87.3
		誤差楕円外 個数	343/3600	312/3600	319/3600	458/3600
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	97.3	99.4	98.4	88.1
		誤差楕円外 個数	87/3244	21/3246	58/3600	428/3600
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	94.2	95.2	95.9	94.1
		誤差楕円外 個数	208/3600	173/3600	147/3600	211/3600
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	97.6	99.6	99.4	95.3
		誤差楕円外 個数	79/3244	12/3246	21/3600	171/3600

次に、RTK-GNSS の FIX 解のみについてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.5-3 に示す。FIX 解のみの評価では、SNR マスクを使用する、しないにかかわらず、全ての項目で、設定した信頼度を満足していないということが確認できる。SNR マスクを使用することで、使用しない場合と比較して信頼性は向上するが、設定した信頼度は達成できなかった。

表 6.5.5-3 誤差楕円の評価 (FIX 解のみ)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	8.5	22.7	64.6	47.8
		誤差楕円外 個数	43/47	17/22	45/127	303/580
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	1.3	0	77.5	64.9
		誤差楕円外 個数	76/77	11/11	45/200	428/1219
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	12.8	27.3	84.3	74.3
		誤差楕円外 個数	41/47	16/22	20/127	149/580
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	1.3	0	89.5	86.0
		誤差楕円外 個数	76/77	11/11	21/200	171/1219

次に、RTK-GNSS の FLOAT 解のみについてそれぞれ設定した信頼度を満足するかどうか評価を行った。誤差楕円の評価結果を表 6.5.5-4 に示す。FLOAT 解については、SNR マスクを利用した場合には全ての項目で、設定した信頼度を満足していることが確認できる。SNR マスクを使用しなかった場合には、すべての項目で設定した信頼度を満足できなかった。

表 6.5.5-4 誤差楕円の評価 (FLOAT 解のみ)

			G	GJ	GJR	GJRCE
信頼度 95%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	91.6	91.8	92.1	94.9
		誤差楕円外 個数	300/3553	295/3578	274/3473	155/3020
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	99.7	99.7	99.6	100
		誤差楕円外 個数	11/3167	10/3235	13/3400	0/2381
信頼度 99%	SNR マスク 無し	誤差楕円内 割合 %	95.3	95.6	96.3	97.9
		誤差楕円外 個数	167/3553	157/3578	127/3473	62/3020
	SNR マスク 有り	誤差楕円内 割合 %	99.9	100	100	100
		誤差楕円外 個数	3/3167	1/3235	0/3400	0/2381

6.5.5.6. 考察

本節で示したマルチパス環境での GNSS 静止測位試験において、得られた知見を下記にまとめる。

- ・ よりマルチパスが支配的な環境では、SNR マスクを利用してマルチパスを除去しても、設定した信頼度を満足できなかった
- ・ FLOAT 解は全て設定した信頼度を満たしているが、FIX 解は信頼度を満たしていない。マルチパスの影響により間違った搬送波位相の整数バイアスが推定される、ミス FIX 解が信頼性を低下させる要因となっている

6.6. 正しい信頼度の算出手法の検討

前節ではマルチパス環境における静止試験による GNSS データにより、GNSS 測位の信頼性の評価を行った。ここで得られた知見から GNSS 測位の信頼性が低下するのは、マルチパスによるミス FIX 解が原因であることがわかる。

そこで、移動体に適用可能な、正しい信頼度の算出手法の検討を行う。正しく信頼度を算出するためには、次の二点が重要だと考えられる。

- ① できる限り観測データのマルチパスを低減、またはマルチパスが含まれる GNSS 信号を測位計算から除外する
- ② RTK-GNSS の測位結果からミス FIX 解を低減させる、または検出、除去する

以上の二点を考慮することで、GNSS 衛星測位において正しい信頼度を推定することが可能だと考えられる。以下、それぞれに対して、移動体に適用可能な手法を検討する。

6.6.1. マルチパスの低減

マルチパスを低減するための一般的な手法として、アンテナでのマルチパス抑制、受信機内部の信号処理の工夫、信号品質による観測データの選択・重み付けなどの手法がある。6.2 節で述べたように LOS マルチパスは、相関器などの工夫により受信機的设计次第で軽減することが可能である。Narrow-Correlator や Strobe-Correlator と呼ばれる信号相関器を用いることで、LOS マルチパスの低減が可能である。しかしながらこれらの手法は、マルチパス波と同時に直接波がアンテナに入射することを前提としているため、LOS マルチパスによる影響を低減することは可能であるが、NLOS マルチパスの低減は困難である。また、アンテナでのマルチパスの抑制や受信機内部の信号処理に関しては、使用するアンテナ、受信機に依存するためユーザ側で工夫することは難しい。さらに NLOS マルチパスを信号処理により低減するのは困難なため、NLOS マルチパスを識別し測位計算から除外することで、測位の信頼性の向上が期待できる。

反射、回折して受信機に到達する NLOS マルチパスは、一般的に信号強度が低下する。前節でも示したように、衛星仰角、信号強度などを利用して、衛星選択や衛星の重み付けを行うことで、マルチパス誤差の低減が可能である[16]。しかしながらこの手法で、全てのマルチパス信号を完全に除外するのは困難である。NLOS マルチパスの識別、除外手法として、カメラを用いた衛星選択手法が提案されている。赤外全周カメラ(IR-ODV: Infrared Omni-Directional Vision)を用いて GNSS アンテナ周囲の障害物情報を取得することで、NLOS 衛星を識別する手法や[17][18]、可視光魚眼カメラを用いた衛星選択手法が研究されている[19][20]。これらのカメラによる手法では、GNSS 受信機に加えて新たにセンサを使用するため、システムが複雑化することが課題である。

一方、三次元地図による衛星の可視性判定を用いる手法が研究されている[21][22]。事前に取得した都市環境の三次元モデルを利用することで、衛星の可視性を判定し、NLOS マルチパスの識別、除外を行う。この手法の場合、追加のセンサは必要ない。しかしながら、三次元地図の取得手法の問題や、三次元地図の更新の問題などが存在する。

6.6.2. ミス FIX 解の低減と検出

前節で示したように、RTK-GNSS 測位の信頼性を低下させるのは、マルチパスに起因する RTK-GNSS 測位のミス FIX 解である。ミス FIX 解とは、搬送波位相の整数バイアスが誤って推定された測位解であり、このミス FIX 解を減少、または発生した際に検出することで、GNSS 測位の信頼性の向上が期待できる。

ミス FIX 解の低減手法として、FIX 解の検定に利用される ratio test の閾値の調整が考えられる。ratio test では搬送波位相の整数バイアスの実数解と、最適整数解、次善整数解を使って解の信頼性を評価する手法である。ここで、検定の閾値としては、経験的に 2~5 程度の固定値が使われることが多い。この閾値をより厳しい値とすることで、ミス FIX 解の低減が可能である。しかしながら、FIX 率とミス FIX 解の割合はトレードオフとなる。

ミス FIX 解の検出手法として、慣性航法センサ (INS: Inertial Navigation System) の利用が考えられる。移動体においては、INS や車両速度情報を RTK-GNSS 測位に複合することが可能である。図 6.6.2-1 にその概要を示す。一般的に RTK-GNSS 測位ではカルマンフィルタによって測位解とその分散が計算されるが、INS によって前回の位置の推定値から予測される位置の事前共分散と、RTK-GNSS によって観測された測位解の分散を比較することで、カルマンフィルタの観測更新に GNSS の測位解を利用するかどうかを判定する。カルマンフィルタでは、事前推定値と観測値の差はイノベーションと呼ばれ、イノベーションの値に閾値を用いて観測データの外れ値を検出することで、RTK-GNSS 測位のミス FIX を位置推定から棄却可能である。これにより、移動体における位置推定の信頼度を向上させることが可能となる。

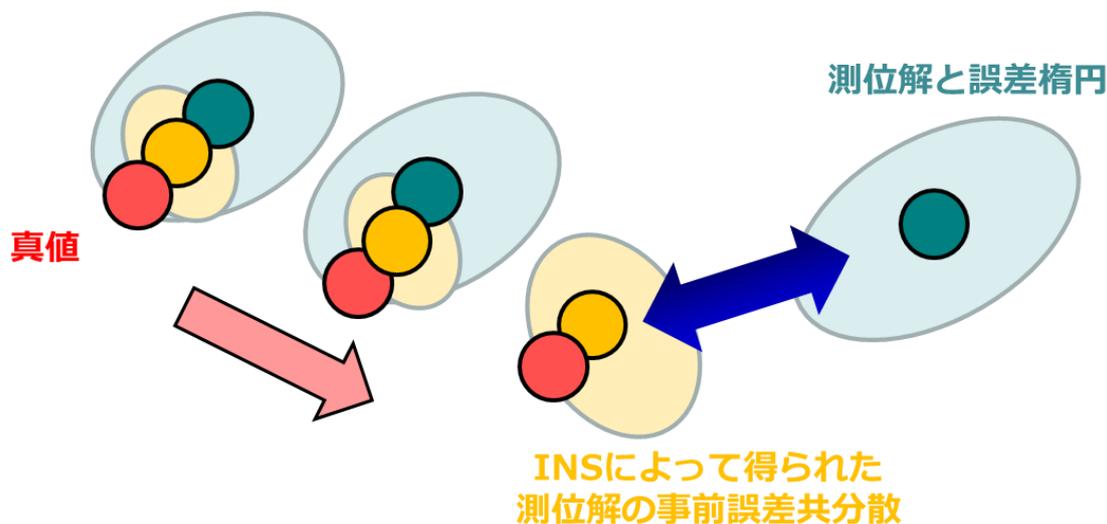


図 6.6.2-1 INS を用いたミス FIX 解の検出

6.7. 結言

本研究では、自動走行システムの実現に向けた衛星測位の信頼性の評価と信頼度の測定方法の検討を実施した。具体的には、マルチパス環境での静止試験 (RTK-GNSS 測位) による衛星測位の信頼性の調査を実施し、静止試験によって得られた結果から、衛星測位の信頼性の低下原因を推定した。静止試験によ

り、GPS、QZSS、GLONASS、Galileo、BeiDouを複合し、使用する衛星が増加することで衛星測位の信頼性が向上することを明らかにした。また、マルチパスが衛星測位の信頼性を低下させる原因であることを明らかにし、マルチパスを除去することで、設定した信頼度を満足することを示した。

静止試験によって得られた知見をもとに、移動体に適用可能な衛星測位の信頼度の測定方法の検討を行った。正しい信頼度を測定するために、(1) できる限りマルチパスを除去する、(2) RTK-GNSS のミス FIX 解を低減、検出・除去することが重要なことを示した。具体的な移動体で利用可能なミス FIX 解の検出手法として、INS によって推定した事前誤差共分散と観測値の誤差共分散を比較する方法を提案した。

7. 衛星信号のセキュリティ調査

7.1. はじめに

GPS に代表される GNSS (Global Navigation Satellite System) によって提供される位置・時刻情報は、カーナビゲーションやスマートフォンによる位置情報サービスなどの身近なアプリケーションから、輸送車や列車などの車両管理やネットワークサーバーの時刻管理など、高度なセキュリティが求められるシステムまで広く利用されている。さらに、これら民生向けの GNSS 信号はオープンサービスとして仕様を公開し、誰もが無償で利用することができる。

しかし、高度 20,000km の GNSS 衛星から送信される電波の受信電力は、雑音電力の数百から数千分の 1 程度と非常に微弱である。そのため、他のデバイスから発信される電波によって容易に干渉を受けてしまう。これら電波干渉の多くは意図しない偶発的なものであるが、一方で人為的に強力な電波で GNSS 信号を遮断し、位置情報サービスを無効化するためのデバイスも市販されている。

さらに、民生向けの GNSS 信号は、誰もが利用できるオープンサービスとしてその仕様を公開しているため、悪意ある攻撃者が偽物の信号を生成し、放送することも可能である。GNSS 信号になりすました偽物の信号が放送されれば、GNSS 受信機は攻撃者による偽物の信号によって求められた位置と時刻情報を本物として受信機ユーザに提供してしまう。現在の民生用 GNSS 信号の仕様や GNSS 受信機には、このような偽物の信号と本物を見分ける機能はなく、受信機ユーザは悪意ある攻撃に対して非常に脆弱である。

これら民生用 GNSS 信号の脆弱性 (vulnerability) は、そのアプリケーションの範囲が急速に広がるにつれて重要な問題として認識されるようになった。米国では 2010 年に Position Navigation and Timing National Executive Committee が Department of Homeland Security (DHS) に民生用 GPS 信号の脆弱性に関する調査を要請し、DHS Homeland Infrastructure Threat and Risk Analysis Center が 2011 年に報告書を提出している [23]。その中で、交通、緊急通報、通信、金融、電力などのセキュリティを必要とするインフラまでが、脆弱な民生用 GPS 信号に強く依存している問題が指摘されている。例えば、旅客鉄道の運用支援として用いられている位置情報に対して攻撃を仕掛けることで、列車の衝突など利用者の生命に関わる事故が引き起こされる可能性が考えられる。また、位置情報だけではなく、GPS 受信機から得られる精密な時刻情報は、通信ネットワークや金融取引などの中継基地やデータサーバにも広く利用されている。これらに対する攻撃が、大規模な通信不具合や、経済的混乱を招く恐れもある。報告書では、このようなアプリケーションに対して、GPS 信号への攻撃の影響を軽減する手段や、攻撃を検出できる受信機の開発を推奨している。

日本においても、独自の測位衛星である準天頂衛星システム (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) の構築が進められている。2010 年 9 月には、技術実証のための初号機「みちびき」が打ち上げられ、2019 年までに衛星 3 機を追加することで、4 機体制でシステムが運用される。さらに、新宇宙基本計画では、2023 年を目途に 3 機増やして 7 機体制にすることが明記されている。

このように、国内外で今後ますます利用の広がる GNSS 信号について、すべてのユーザが安心して信頼できるサービスが受けられるよう、意図的な GNSS 信号への攻撃に対策が強く求められる。本研究では、このような GNSS 信号への攻撃の事例について調査し、それらが民生向け GNSS 受信機に与える影響について明らかにする。同時に、これら攻撃を検知さらには抑制する技術について調査し、その効力を検討する。

7.2. GNSS 信号への攻撃

GNSS 信号に対する攻撃は、大きく以下の 2 つに分類される。本研究では、これら 2 種類の攻撃について調査・検討を行う。

- **Jamming:** 妨害電波。GNSS 信号と同じ周波数帯の電波を発信して通信を攪乱する手段。正規の GNSS 信号が受信できないために、測位などの受信機機能が妨害される。このような攻撃は、**denial of service** と呼ばれる。
- **Spoofing:** なりすまし。偽物の GNSS 信号を放送することで、受信機に間違っただ位置情報を計算させる手段。受信を妨害する **jamming** とは異なり、受信機ユーザは攻撃者が意図する偽物の位置・時刻情報を本物と信じてしまう。

7.2.1. Jamming

電波強度が微弱な GNSS 信号にとって、**jamming** は非常に容易な手段であり、図 7.2.1-1 に示すような小型のデバイスで簡単に妨害されてしまう[24]。これらは PPD (Privacy Protection Device または Personal Privacy Device) と呼ばれ、位置情報サービスによる個人位置の特定を妨害する目的で販売されており、インターネットで数十ドル程度から入手可能である。これら PPD のユーザの多くは、あくまでも自分の所有するスマートフォンなどの位置情報サービスの妨害のために利用しており、他者への意図的な攻撃を目的としたものではないと思われる。しかし、PPD の電波出力は、容易に数十から数百キロメートル先の GNSS 受信機に影響を及ぼしてしまう。



図 7.2.1-1 シガーソケット型 GNSS jammer [24]

7.2.1.1. PPD の信号特性とその影響

PPD の信号については、Mitch らによって詳細な特性が報告されている[25]。PPD から発信されるほぼすべての電波は、**chirp** 信号と呼ばれるものである。これは、時間とともに連続波 (CW: continuous wave) の周波数を増減させ、ある周波数帯をスイープする広帯域な周波数変調のひとつである。図 7.2.1-2 に PPD から送信されている **chirp** 信号の例を示す。GPS L1 信号の周波数 (1575.42MHz) を中心に、20MHz 程度の帯域でスイープしている様子が観測されている。

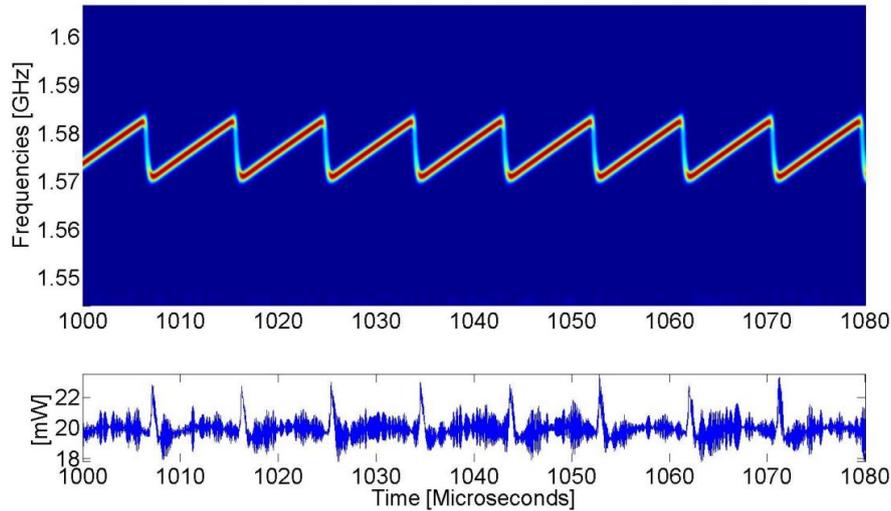


図 7.2.1-2 PPD による chirp 信号[25]

さらに、これら PPD が GNSS 受信機に及ぼす影響について、Kuusniemi らによって複数の市販 GPS 受信機について調査が実施されている[26]。GNSS 信号の変調には、直接拡散方式 (DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum) によるスペクトラム拡散が利用されている。その拡散コードの長さは、GPS L1 C/A 信号で 1023 チップである。したがって、理想的な逆拡散によって得られる処理利得は、

$$G_p = 10 \times \log_{10} 1023 = 30.1 \text{ [dB]}$$

となる。実際には、異なる拡散コード間の相互相関により雑音電力が微増するため、27dB 程度となる。スペクトラム拡散の特性上、単調な CW による干渉は、逆拡散処理による処理利得分だけ拡散されてしまう。そのため、J/S 比 (jammer to signal ratio) が処理利得以下の CW 信号による jamming は、GNSS 信号の受信に影響しないことになる。しかし、実際には、jamming 信号は CW とは限らず、何らかの変調による帯域を持っているため、より低い J/S 比であっても影響を受けてしまう。

Kuusniemi らの調査結果を表 7.2.1-1 に示す。これより、ほぼすべての市販 GPS 受信機において、J/S 比が 25dB で測位精度の大幅な劣化や測位率の低下が確認される。この J/S 比は、前述の検討からも妥当な数値と言える。

表 7.2.1-1 Jamming が市販 GPS 受信機の測位精度におよぼす影響[26]

		Mean (m)	Std (m)	Max (m)	%
uBlox 5H	no jam	1.0	0.6	3.8	100
	max J/S≈15 dB	1.4	0.7	4.6	100
	max J/S≈25 dB	9.2	8.7	129.3	16
uBlox 5T	no jam	1.0	0.6	4.0	100
	max J/S≈15 dB	1.5	0.8	6.5	100
	max J/S≈25 dB	4.2	5.5	94	26
Fastrax IT500	no jam	2.2	1.0	5.3	100
	max J/S≈15 dB	2.3	1.0	6.5	100
	max J/S≈25 dB	3.7	5.2	85.4	16
Fastrax IT600	no jam	1.3	0.6	3.2	100
	max J/S≈15 dB	1.3	0.7	3.2	100
	max J/S≈25 dB	5.9	3.6	16.4	100
Nokia N8 GPS	no jam	2.6	2.4	32.4	100
	max J/S≈15 dB	3.1	3.8	34.0	100
	max J/S≈25 dB	3.9	2.2	22.4	16
NovAtel	no jam	1.0	0.7	4.8	100
	max J/S≈15 dB	2.4	3.9	90.5	30
	max J/S≈25 dB	5.4	7.3	92.1	8

地上における GPS L1 C/A 信号の最小受信電力は、仕様書によって-130dBmと規定されている[27]。Kuusniemi らの調査結果より、J/S 比が 25dB 以上で測位結果に影響が出ることから、そのときの jamming 信号の電力は-105dBmとなる。一方で、図 7.2.1-2 に示す Mitch らの調査結果より、PPD の送信電力は約 20mW (= 13dBm) である。これらより、一般的な PPD が市販の GPS 受信機に影響を及ぼす範囲を求めてみる。簡略化のために、電力の減衰は自由空間伝搬損失のみとし、送信・受信アンテナはどちらも等方性アンテナとする。これより、フリスの伝達公式は次式で表される。

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

ここで、 P_r と P_t はそれぞれ受信と送信電力、 λ は波長、 d は伝搬距離である。Kuusniemi および Mitch らの調査結果より、

$$\frac{P_r}{P_t} = -105 - 13 = -118 \text{ [dB]}$$

であることから、GPS L1 C/A 信号の波長 $\lambda = 0.19$ [m]について伝搬距離を求めると、

$$d = 12,010 \text{ [m]}$$

となる。一見、20mW と微弱に思える PPD の送信電力であるが、12km も離れた GPS 受信機にまで影響を及ぼしてしまう。

7.2.1.2. PPD による jamming の事例

非常に広範囲に影響を及ぼしてしまう PPD などの GNSS 信号 jammer は、米国や欧州、中国において、その使用だけではなく流通や販売までもが法律で禁止されている。日本国内では PPD の流通や販売、所持は違法とならないが、ほぼすべての PPD の送信電力は電波法で規定される微弱無線局の電界強度を上回ることから、無線局免許なしでの PPD からの送信は違法となる。

しかし、これら PPD の利用は違法であるものの、十分な取り締まりがなされているとはいえない。Curry らによる SENTINEL プロジェクトでは、イギリス国内に GPS jamming を検出するセンサを複数台設置し、約 1 年間の観測を実施している[28]。プロジェクト期間の 1 年間で約 1,000 件の GPS jamming が検出され、その多くが交通量の多い日中に発生している。このことから、jamming 信号の発信源は、車両管理のための GPS 受信機を妨害するために商用バンなどに搭載された PPD によるものと考えられる。

アメリカの Newark 空港では、2009 年に GBAS (Ground-Based Augmentation System) を導入して以来、定期的な GPS jamming の警告に悩まされていた。FFA では、その対策の一環として、2010 年 1 月に jamming 信号の方向探知機を導入している。同年 4 月には PPD を搭載した車両が探知機で追跡され、PPD が没収された[29]。しかし、その後も同様の事象が引き続き発生しており、2012 年にはトラックに PPD を搭載していたドライバーが逮捕され、32,000 ドルの罰金が科せられている。

しかし、Newark 空港における GBAS の jamming は、違法な PPD を利用したドライバーに責任はあるものの、GBAS の GNSS アンテナの設置場所にも問題があるといえる。図 7.2.1-3 に計 4 台の GNSS アンテナ (図中 GBAS RSMU) の設置場所を示す。交通量の多い高速道路から 200m 程度しか離れておらず、しかも冗長系であるべき 4 台のアンテナがすべて高速道路と並行して隣接している。これにより、高速道路を通行する車両に搭載されて PPD によって、すべてのアンテナが順番に jamming を受けてしまう。GBAS を設置した当初は、高速道路を通行する車両による jamming など想定していなかったと思われるが、PPD による被害が顕在化した今では、冗長系として不適切なアンテナ配置であるといえる。

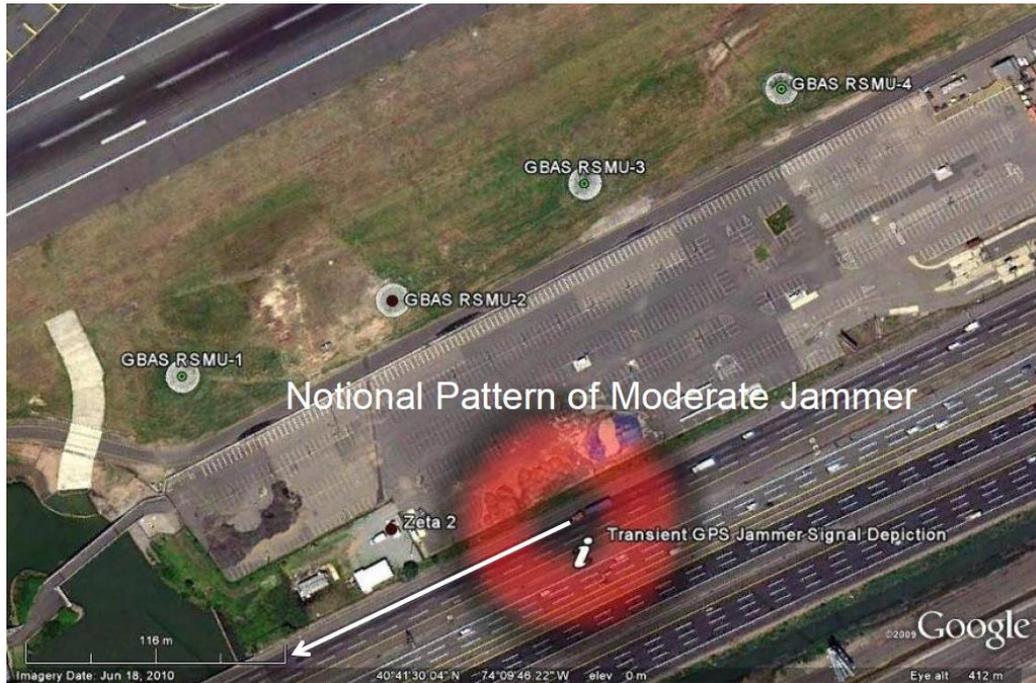


図 7.2.1-3 Newark 空港の GBAS 用 GNSS アンテナと高速道路[29]

7.2.1.3. 軍による jamming の事例

GNSS 信号の jamming は、民間の PPD によるものだけではなく、軍による電子戦のひとつとしても実行されている。

韓国では、2010 年以降、北朝鮮による GPS 信号の jamming が定期的に観測されている。Jamming 信号の電力も増加しており、重大な事故には発展していないものの、2016 年の春には 962 機の民間航空機において jamming によるものと思われる GPS 受信機の異常が報告されている。さらに、航空機だけではなく、700 隻の漁船、1,786 基の移動通信基地局にも影響が及んでいる[30]。

アメリカ空軍においても、装備品である GPS 受信機の anti-jamming 性能を評価するために、ニューメキシコ州の Holloman 空軍基地において、JAMFEST と呼ばれるフィールド試験が定期的に行われている[31]。さらに、2016 年 6 月には、カリフォルニア州の Naval Air Weapons Station において、図 7.2.1-4 に示すカリフォルニア州全域を含む西海岸に影響の及ぶ大規模な GPS jamming が実施された。FAA からは、航空機の GPS 受信機にも影響が出るとして、注意を呼び掛ける NORTAM が出されている[32]。実際に、上空を飛行する小型飛行機では、GPS 信号の受信が妨害され、測位不能となったことが報告されている。



図 7.2.1-4 Naval Air Weapons Station における大規模な GPS jamming[32]

7.2.2. Spoofing

Jamming による攻撃は、PPD のような簡易的なデバイスであっても、広範囲な影響を容易に及ぼすことができる。しかし、GNSS 信号の受信そのものを妨害するため、ユーザは攻撃を受けていることを容易に判別可能である。これに対して、spoofing による偽物の GNSS 信号は、何の対策もなければ本物と見分けることはできず、spoofing 攻撃を受けた GNSS 受信機は、攻撃者の意図した偽物の位置・時刻情報をユーザに提供することになる。

7.2.2.1. Spoofing の事例

GPS 信号の spoofing が注目を集めるようになったのは、2011 年 12 月に発生したイラン軍による CIA の無人偵察機 RQ-170 の鹵獲であろう[33]。イラン軍は GPS 信号の偽装によって RQ-170 が基地に帰着したと誤認識させることに成功したと主張している。

さらに、2012 年 6 月に、University of Texas at Austin の Humphreys らによって、フライト中の小型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を GPS spoofing によって乗っ取るデモンストレーションが実施された[34]。この実験で使用された UAV と spoofer (spoofing 装置) を図 7.2.2-1 に示す。



図 7.2.2-1 UAV と GPS spoofer [34]

一般に「ドローン」と呼ばれる小型無人航空機の利用は、amazon が Prime Air と呼ばれる商品配達サービスを計画するなど、ホビーユーザによる空撮だけではなく商業利用へも本格的な広がりを見せている。5年から10年後には、30,000機以上のドローンが上空を飛行するようになると予想されている。Humphreysらは、ドローンへのGPS spoofing 対策が不十分な現状では、悪意ある攻撃者によって、これら無数のドローンがミサイルのように墜落させられると警告している。

これら無人偵察機の鹵獲やドローンのGPS spoofing のデモは、あくまでも単体のデバイスに向けた限定的な攻撃であり、一般ユーザをターゲットとしたものではなかった。しかし、ロシアの首都モスクワの政府機関が集まる赤の広場周辺、通称クレムリンでは、2016年6月ころからスマートフォンのGPS機能が正常に動作しないという現象が確認されている[35]。クレムリン周辺では、GPSによる測位結果がそこから30kmも離れたヴヌーコヴォ国際空港を示すことを、モスクワ市民だけではなく、現地を訪れた観光客など、多くの一般ユーザが確認している。この現象について、ロシア政府からの正式なアナウンスは何もないものの、すべてのGPS受信機端末が同じ空港の位置を示していることから、GPS信号のspoofingが何者かによって発信されているのは明確である。このクレムリンにおけるspoofingは、政府機関の建物の周りをドローンが飛行するのを防ぐためと推測されている。市販のドローンの多くはGPSの位置情報をもとに空港などの施設に近づくことのできないジオフェンス機能を搭載している。GPS信号のspoofingによってドローンの位置をヴヌーコヴォ国際空港であると誤認識させることで、このジオフェンス機能を強制的に動作させ、ドローンの飛行を妨害していると考えられている。このspoofingによって人命にかかわるような事故は発生していないものの、UberなどGPSで走行距離を計測しているタクシーでは料金を計算できない事態や、スマートフォンによる位置情報ゲームのプレイに障害が生じている。

7.2.2.2. Spoofer

GNSS信号のspoofingは、単純に強力な電波を発信するだけのjammingに比べて洗練された攻撃であり、spoofing装置(spoofers)も複雑なものとなる。しかし、民生向けのGNSS信号は、オープンサービスとしてその仕様が一般に公開されているため、偽物の信号を作り出すことは原理的に可能である。

例えば、GNSS受信機の性能試験には、市販品のGNSS信号シミュレータが用いられる。これらは、基本的に偽物のGNSS信号を生成する無線信号発生装置であり、spoofingの攻撃に転用可能である。ただし、その価格は数万ドルから数十万ドルと、数十ドル程度で入手可能なjammerに比べて非常に高価である。これらGNSS信号シミュレータは、ユーザによってあらかじめ設定されたシナリオに従って、単純にGNSS信号を生成するだけである。しかし、Humphreysらが小型無人機の乗取りに使用したGPS信号のspoofers(図7.2.2-1)には、GPS信号の生成だけではなく、本物のGPS信号を受信する機能も実装されている。これにより、小型無人機で受信されているものと同じ本物のGPS信号を捕捉・追尾し、その情報から小型無人機に搭載されているGPS受信機を騙すための偽物のGPS信号をリアルタイムで生成している。このようなspoofersは、GNSS信号シミュレータより遥かに複雑な信号処理を必要とするが、Humphreysらは無線通信工学について大学院レベルの教育を受けた博士課程の学生であれば、数千ドルの予算で開発可能であるとコメントしている。

7.2.2.3. ソフトウェア無線

GNSS信号のspoofersは、原理的に開発可能であっても、高度な高周波回路設計や信号処理の知識を必要

とする。そのため、わざわざ spoofer を開発してまで GNSS 信号を攻撃する者はいないであろうというのが一般的な見解であった。しかし、2015 年 8 月、世界的なセキュリティ会議である DEFCON において、中国のセキュリティ研究者である Lin らが低価格なソフトウェア無線（SDR: Software Defined Radio）とオープンソースのソフトウェアを利用した GPS 信号の spoofing をデモンストレーションし、大きな話題となった[36]。

SDR とは、ひとつの無線ハードウェアを制御するソフトウェアを書き換えるだけで、送受信する電波の周波数や変調方式を自由に変更できる無線機である。SDR の無線機は、高周波信号とベースバンドの変換を行う周波数変換器と、ベースバンド信号を PC などの汎用計算機で扱えるデジタル信号に変換する AD/DC コンバータから構成される。SDR のアイデア自体は 1970 年代には登場しているが、当時は数 MHz の広域なベースバンドを処理できる計算機が存在していなかった。しかし、PC に使われる汎用プロセッサの性能が向上したことで、PC と USB 接続が可能な安価な SDR 無線機が登場することになる。2013 年 2 月にクラウドファンディングサービスである kickstarter で紹介された bladeRF は、420 ドルという低価格でありながら、300MHz から 3.8GHz の広い周波数帯で、28MHz の広帯域信号の送受信が可能な SDR として注目を集め、目標額の約 2 倍である 19 万ドルの資金調達に成功した。さらに、同年 8 月には、さらに低価格な 300 ドルの SDR である HackRF One も登場し、目標額の約 8 倍である 60 万ドルもの資金を調達している。これらクラウドファンディングの成功により、いまでは高性能で安価な SDR が容易に入手できるようになった。これら代表的な低価格 SDR プラットフォームの外観を図 7.2.2-2 に示す。



図 7.2.2-2 低価格 SDR プラットフォーム

DEFCON において Lin らがデモンストレーションした spoofer は、GNSS 信号シミュレータと同様に、事前に設定したシナリオ通りの GPS 信号を生成するだけの装置であり、Humphreys らが開発したような本物の GPS 信号からリアルタイムで spoofing 信号を生成できるような高度なシステムではない。しかし、重要なことは、Lin らはインターネットセキュリティの専門家であって、無線通信や GPS の専門家ではなかったことである。DEFCON のデモンストレーションは、高周波無線技術の専門知識がなくても、低価格な SDR プラットフォームとオープンソースのソフトウェアだけで、誰でも GPS 信号の spoofing が可能であることを示している。つまり、これまで spoofer を開発してまでも GPS 信号を攻撃しようとする者はいないであろうという楽観的な憶測の根拠であった技術的なハードルが、低価格・高性能な SDR の出現

によって取り除かれたことになる。現時点で、GNSS 信号の spoofing は社会的な混乱を引き起こすほどの脅威ではないものの、安価な SDR によるカジュアルな GNSS 信号の spoofing により、偶発的な事故が発生する可能性は増加している。

7.2.2.4. Spoofing 攻撃の技術区分

GNSS 信号の spoofing は、GNSS 信号シミュレータなどによって単純に偽物の GNSS 信号を発信する攻撃から、Humphreys らによるデモンストレーションのように本物の GPS 信号からリアルタイムで spoofing 信号を生成するものまで、求められる技術が大きく異なる。Humphreys らは、これら spoofing 攻撃の技術的な要求について、図 7.2.2-3 に示す 3 段階に区分している[37]。

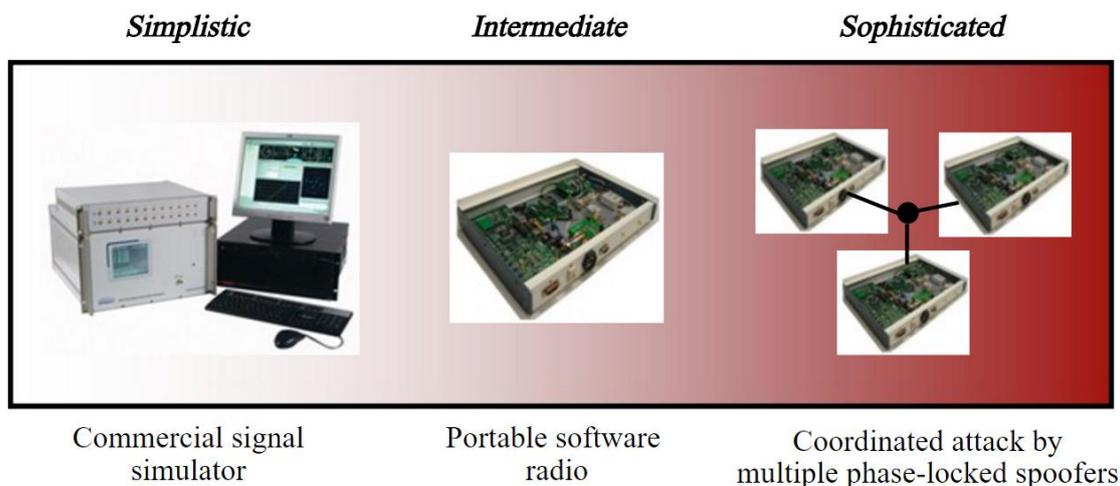


図 7.2.2-3 Spoofing 攻撃の技術区分[37]

- **Simplistic:** 市販の GNSS 信号シミュレータなどによって生成された偽物の GNSS 信号を単に放送するだけの spoofing 攻撃であり、攻撃対象の本来の位置情報は不要である。受信信号の強度なドップラーなどに急激な変化が観測されるため、受信機側で spoofing 攻撃を受けたことを検知されやすい。
- **Intermediate:** 攻撃対象の位置情報と受信される本物の GNSS 信号から、偽物の GNSS 信号をリアルタイムで生成し、ひとつのアンテナで攻撃対象に spoofing 信号を放送する。Spoofing 信号の電力を徐々に増加させ、本物の GNSS 信号を乗っ取ることから、受信機側での検知は Simplistic と比較して困難である。
- **Sophisticated:** Intermediate と基本的に同じであるが、複数の spoofer が協調して攻撃対象に spoofing 信号を放送する。それぞれの spoofer が個々の GNSS 衛星を模擬することから、本物の GNSS 信号との区別できず、受信機側での検知は難しい。

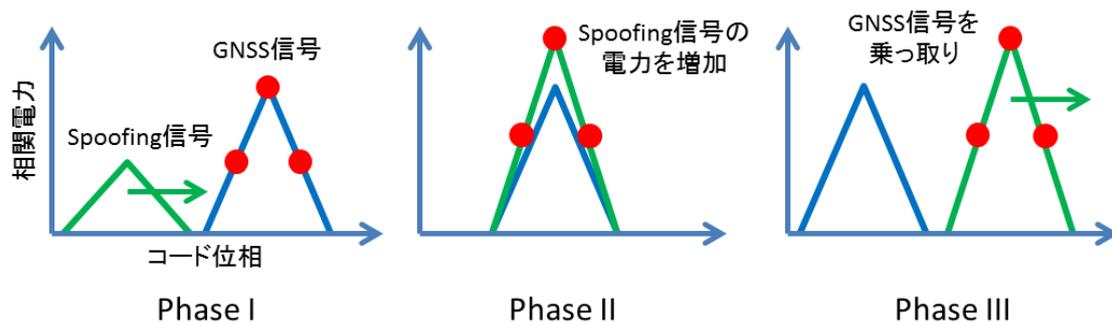


図 7.2.2-4 Spoofing による GNSS 信号の乗っ取り

Intermediate および Sophisticated な spoofing 攻撃における GNSS 信号の乗っ取りの過程を図 7.2.2-4 に示す。図中の赤点は、GNSS 受信機による信号追尾を表している。まず、攻撃対象となる GNSS 受信機の位置情報と本物の GNSS 信号の情報から、受信機で現在受信されている GNSS 信号と同じ spoofing 信号を生成して同期させる。同期後、spoofing 信号の電力を増加させることにより、受信機にそれまで追尾していた GNSS 信号ではなく、spoofing 信号を追尾させる。受信機が spoofing 信号を追尾してしまえば、攻撃者は GNSS 信号を乗っ取ることができる。

一見、単純な攻撃に思えるが、攻撃対象のアンテナで受信されているものとまったく同じ GNSS 信号を生成する必要があることから、何らかの手段で攻撃対象となる受信機の位置を知る必要がある。例えば、Humphreys らによる UAV の spoofing では、UAV から地上局に送られてくるテレメトリから、UAV の現在位置を把握している。さらに、より遠隔の UAV の位置を知るためには、航空レーダーなども必要になるであろう。このように、Intermediate 以上の spoofing 攻撃では、偽物の GNSS 信号を生成する以外の機能や装置が必要とされ、単に偽物の GNSS 信号を放送するだけの Simplistic な攻撃と比較すると、その技術的要求のレベルは各段に高くなる。現時点では、Intermediate 以上の攻撃が可能な spoofer は市販されていない。

7.3. GNSS 信号に対する攻撃の検知と抑制

GNSS 信号に対する攻撃に対抗する手段 (anti-jamming、anti-spoofing) は、まず GNSS 信号そのものと受信機側に大きく大別される。GNSS 信号には、GPS の P(Y)信号や Galileo の PRS (Public Regulated Service) など、拡散符号が暗号化された信号も放送されている。これら暗号化された信号は、暗号化のキーを知らない攻撃者が複製することはできないため、非常に有効な anti-spoofing の手段である。そのため、これらの信号は、軍用や政府機関など限られたユーザのみが利用でき、民間には公開されていない。さらに、GNSS 信号の暗号化は、信号そのものの受信を他の電波で妨害する jamming には効果がない。

一方、受信機側での対抗手段としては、民生向け GNSS 信号に対する攻撃の検知さらに抑制ための技術が数多く提案されている。これらの信号処理技術は、時間領域 (time domain)、周波数領域 (frequency domain)、空間領域 (spatial domain) の 3 つに大別できる。ここで、時間領域、周波数領域の技術は主にフィルタリングであり、空間領域の技術はアレーアンテナである。また、これらの 2 つの技術を組み合わせた time-frequency domain での信号処理や、STAP (space-time adaptive processing)、SFAP (space-frequency adaptive processing) などが存在する。さらに、これらの信号処理を相関処理 (correlation) による逆拡散の前か後で実施することで、pre-correlation と post-correlation に分類される。

これら信号処理による対策以外にも、相関処理後のさらに上流のレイヤにおける航法メッセージのデータビットや、測位演算後の位置情報を利用した対策も提案されている。しかし、これら上流の処理に進むためには、本物か偽物かにかかわらず GNSS 信号の相関処理が完了している必要がある。そのため、これらの手法は GNSS 信号の受信そのものを阻害する jamming には不向きであり、主に anti-spoofing の技術となる。

7.3.1. GNSS 受信機の構成

図 7.3.1-1 に一般的な GNSS 受信機の構成を示す。アンテナで受信された RF 信号は、低雑音増幅器(LNA: low noise amplifier)によって増幅された後、ダウンコンバータによって信号処理に適した中間周波数 (IF: intermediate frequency) 信号に変換される。さらに、AGC (automatic gain controller) によって、デジタル変換に適した信号レベルに調整され、ADC (analog-to-digital converter) によってデジタル化される。民生向けの GNSS 受信機では、ADC によって 2 ビットから 3 ビットのデジタル信号にサンプリングされることが多い。このような RF 信号を信号処理に適したデジタル信号に変換する前処理を行う回路を、フロントエンドと呼ぶ。

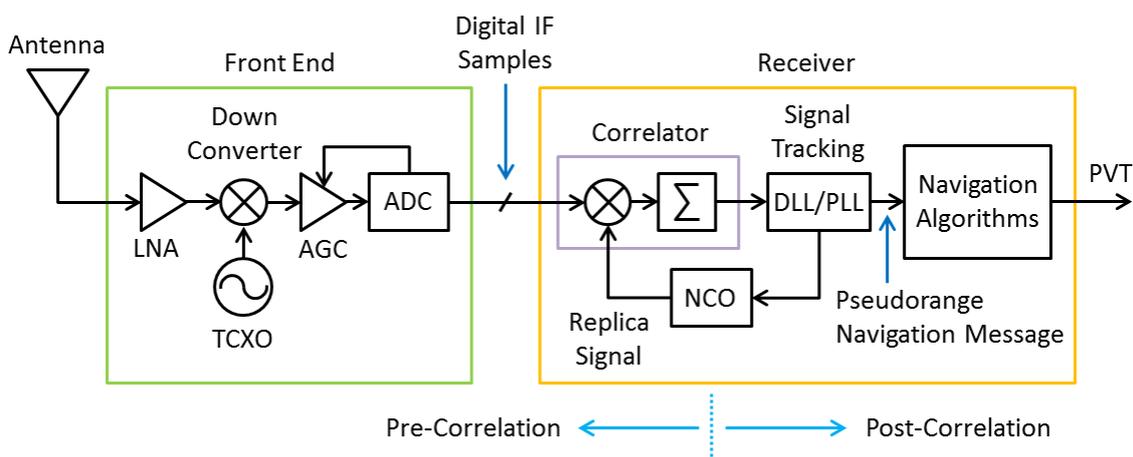


図 7.3.1-1 GNSS 受信機の構成

デジタル化された IF 信号に含まれる GNSS 信号は、まだスペクトル拡散されているために雑音に埋もれた微弱な信号である。そこで、相関器 (correlator) において受信した GNSS 信号と同じ符号列を持ったレプリカ信号を掛け合わせることで、逆拡散を行う。さらに、相関処理後の電力が最大となるように、DLL (delay locked loop) や PLL (phase locked loop) によって信号追尾を行う。DLL や PLL で得られた受信信号のダイナミクスに応じて、NCO (numerically controlled oscillator) によってレプリカ信号が生成される。同時に、DLL で得られる拡散符号の位相情報から、擬似距離の生成や航法メッセージの復号が行われる。これらの情報から測位演算によって受信機の位置、速度、時刻 (PVT) 情報が求められ、ユーザに提供される。

7.3.2. Jamming の検知

Jamming 信号の検知には、pre-correlation の手法として AGC のモニタリングと IF 信号のスペクトラムの

監視が挙げられる。また、post-correlation の手法として、各衛星の信号追尾で得られる S/N (signal-to-noise ratio) のモニタリングが提案されている。さらに、これらの手法を同期した複数アンテナと組み合わせることで、jamming 信号の TDOA (time difference of arrival) から jammer の位置を特定する手法も開発されている。

7.3.2.1. 3.1.1 AGC のモニタリング

アンテナで受信される GNSS 信号の電力は、スペクトル拡散によって熱雑音以下の電力となっている。熱雑音は受信機の温度によって多少の変動はあるものの、既知の値であり、ほぼ一定である。AGC では、この特性を利用して、ADC でサンプリングされた IF 信号の振幅の分布がガウス分布となるように、AGC のゲインを調整している。したがって、AGC のゲインは、通常一定値となる。

Bastide らは、この AGC のゲインをモニタリングすることで、熱雑音より強力な jamming 信号を検知する手法を提案した[38]。本手法は、ほぼすべての GNSS 受信機に搭載されている AGC の機能を利用することが利点といえる。しかし、AGC はフロントエンド内部にチップ化されているため、AGC のゲインを受信機外部に出力する機能は搭載されていないことが多い。そのため、本手法には、AGC を制御する電圧などを読み取る回路などを追加する必要があるという欠点もある。

一方、Bhuiyan らは、AGC によって調整された IF 信号の振幅がガウス分布に従うことを利用し、サンプリング信号の分布をモニタリングすることで jamming 信号を検知する手法を提案している[39]。フロントエンド内部にチップ化された AGC に対して、こちらはフロントエンドから出力されるデジタル化された IF 信号の分布をモニタリングすることになる。そのため、そのため、フロントエンドへの追加回路などは不要なうえ、単純なデジタル信号のカウンタ (running digital sum) で構成できる利点がある。図 7.3.2-1 に正常時と jamming 攻撃時の IF 信号分布の例を示す。

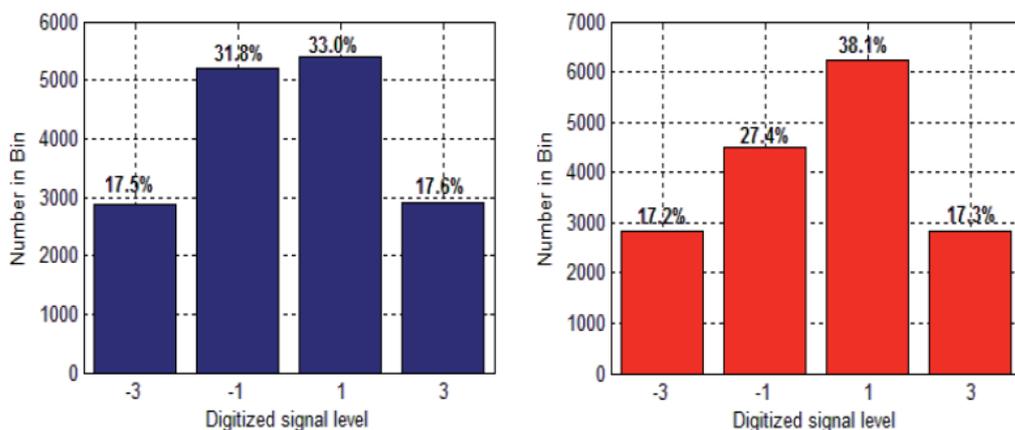


図 7.3.2-1 正常時 (左) と jamming 攻撃時 (右) の IF 信号分布[39]

これら AGC のモニタリングは、AGC のゲインや IF 信号の分布の時間的変化を観測しているため、時間領域での検知手法といえる。

7.3.2.2. 電力スペクトル密度の監視

熱雑音の電力より強力な jamming 信号であれば、受信信号の電力スペクトル密度 (PSD: power spectral

density) を周波数領域において監視することでも検知可能である。PSD の生成は、フロントエンドによってデジタル化された IF 信号を高速フーリエ変換 (FFT: fast Fourier transform) によるデジタル信号処理で実現される[40]。

FFT は確立したデジタル信号処理アルゴリズムであるが、AGC のモニタリング手法に比べて大規模な演算能力を必要とする。そのため、FFT を利用した PSD の生成には、演算能力の高い汎用 PC を利用するソフトウェア受信機が用いられることが多い[41]。また、FFT の周波数分解能は、IF 信号のサンプリング周波数で制限されてしまう。より詳細な PSD の生成には、高いサンプリング周波数を必要とするため、FFT の処理不可が増大してしまうという欠点がある。

7.3.2.3. S/N のモニタリング

逆拡散前の受信信号に含まれる jamming 信号は、基本的に相関器における逆拡散によって周波数領域で拡散される。そのため、逆拡散後の信号では、拡散された jamming 信号の電力分だけ、熱雑音電力が増加したように見える。そのため、DLL/PLL の信号追尾によって得られる S/N または C/N_0 (carrier-to-noise ratio) をモニタリングすることで、その急激な低下から jamming 信号を検知することも可能である。AGC のモニタリングやスペクトルの監視などの pre-correlation の手法とは異なり、S/N の値は GNSS 受信機からの出力としてユーザに提供される。そのため、S/N のモニタリングは、何か新しい回路や信号処理を追加することなく、どの GNSS 受信機にも適用できることが利点である。

しかし、S/N の急激な低下は、jamming だけではなく、例えば樹木や架橋などの構造物の下を通過することで、GNSS 信号が減衰された場合にも発生してしまう。Axell らによるフィールドテストでも、S/N のモニタリングは固定局における jamming 検知には有効であるが、移動体での利用は困難であることが確認されている[42]。そのため、Axell らは、S/N のモニタリングは、AGC のモニタリングなどの pre-correlation の手法と複合して利用することを推奨している。

7.3.2.4. Jammer の位置特定

Jamming の検知技術は、あくまでも受信した GNSS 信号が jamming の影響を受けているかどうかを判別するだけであり、その原因となる jammer の位置を特定するものではない。Lindstrom らは、同期した複数の受信機で観測される jamming 信号の受信タイミングから、ロランなどの双曲線航法で利用されている TDOA (time difference of arrival) によって、jammer の位置を特定する手法を提案している[43]。本提案では、jamming 信号の検知に AGC のモニタリングを採用している。同期した 2 個の受信機で検知される jamming 信号の時間差は、2 個の受信機を焦点とする双曲線を描く。そのため、3 個以上の受信機を用いることで、双曲線の交点から jammer の位置を特定することができる。

本手法を用いたシステムは、スウェーデン国防研究所 (FOI) の協力のもと、2009 年 5 月にフィールドテストが実施された[44]。その結果を図 7.3.2-2 に示す。東西に 450m、南北に 300m のフィールドで 4 個の受信機により、約 50m の精度で jammer の位置を特定している。

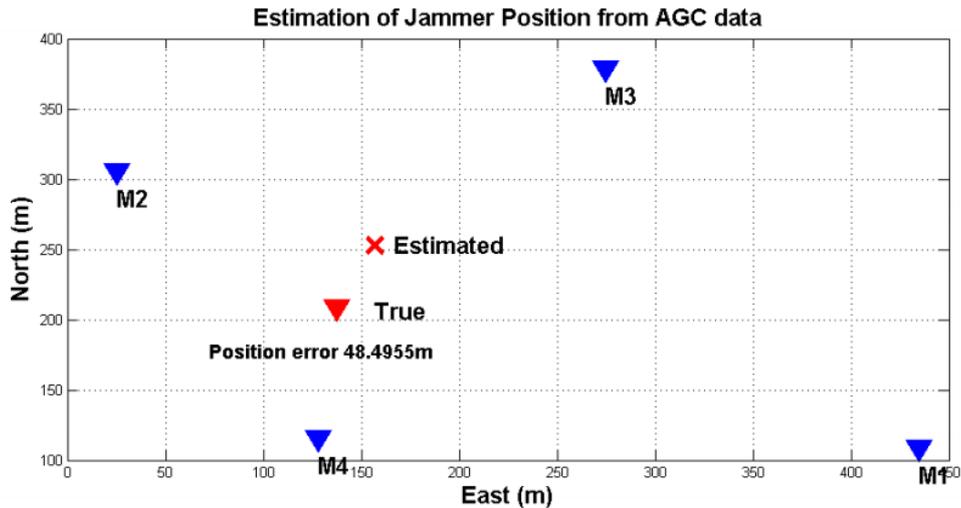


図 7.3.2-2 AGC による jammer の位置特定[44]

7.3.2.5. Jamming 検知技術のまとめ

Jamming 検知技術の実装の容易性と検知能力について、表 7.3.2-1 にまとめる。Pre-correlation の AGC モニタリングは実装性、検知能力ともにバランスのとれた手法といえる。さらなる検知能力の向上のために、より実装の容易な post-correlation の S/N モニタリングとの組み合わせが推奨される。

表 7.3.2-1 Jamming 検知技術の実装性と検知能力

Jamming Detection	Pre/Post Correlation	Domain	実装性	検知能力
AGC Gain Monitoring	Pre Correlation	Time Domain	中	中
Running Digital Sum	Pre Correlation	Time Domain	中	中
PSD Monitoring	Pre Correlation	Frequency Domain	低	高
S/N Monitoring	Post Correlation	Time Domain	高	低

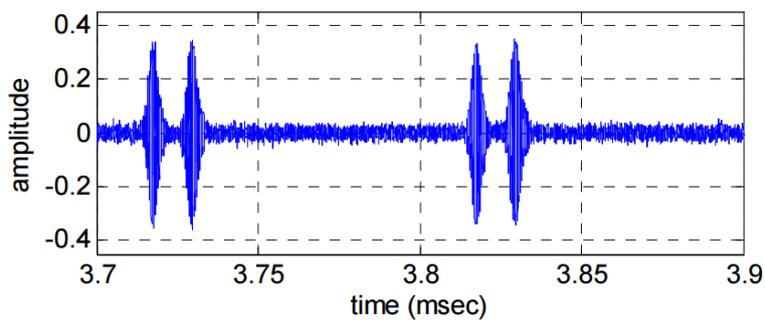
7.3.3. Jamming の抑制

GNSS 受信機における jamming の影響の抑制のためには、J/S 比を改善する必要がある。つまり、jamming の受信電力を減少させるか、GNSS 信号の受信電力を向上させるかのいずれかが必要となる。さらに、これらを実現するために、jamming 信号の特性に応じて、時間領域、周波数領域、またはこれらの複合である time-frequency 領域、さらには空間領域での手法がそれぞれ開発されている。本節では、PPD などによる意図的な攻撃だけではなく、他の無線通信機器による偶発的な jamming に対する抑制技術についても紹介する。

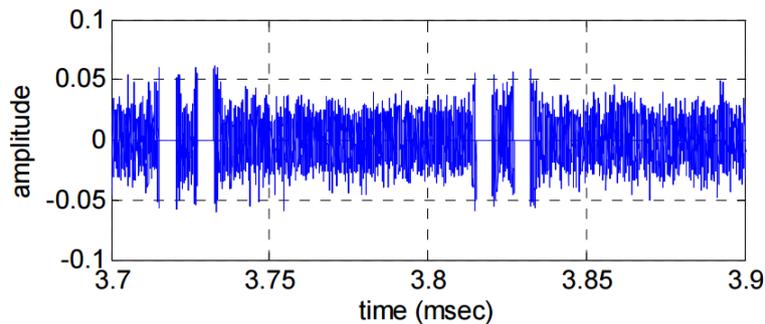
7.3.3.1. Pulse Blanking によるパルス信号の抑制

空港近傍の GNSS 受信機は、航空機管制に使われている無線通信機である DME (distance measuring equipment) や TACAN (tactical air navigation) の影響を受けやすい。これらは、無線ビーコンであり、1kW 以上の強力なパルス信号を放送している。

しかし、これらパルス信号のパルス幅は数マイクロ秒であり、GNSS 信号の逆拡散に必要な積分時間 (数ミリ秒) と比較して十分に短い。また、パルス信号の電力は大きく、振幅に閾値を設けることで検知も容易である。そこで、フロントエンドにおける pre-correlation の段階で、パルス信号が検知された時間区間は受信信号を無視することで、その影響を抑制する手段を pulse blanking と呼ぶ[45]。手法によるパルス信号除去の例を図 7.3.3-1 に示す。



(a) DME のパルス信号による jamming



(b) パルス信号の除去後の信号

図 7.3.3-1 Pulse blanking によるパルス信号の抑制[45]

7.3.3.2. 適応フィルタによる狭帯域信号の抑制

他の無線通信機器からの偶発的な電波干渉で最も多いものが、無線機の高調波スプリアスである。これは、局部発振周波数の整数倍の周波数成分であり、基本的に CW などの狭帯域な信号となる。

これら狭帯域信号の抑制は、pre-correlation の段階で何らかのフィルタによって行われる。特定の周波数成分を抑制するフィルタとして代表的なものはノッチフィルタ (バンドストップフィルタまたは帯域防止フィルタとも呼ばれる) である。さらに、これら高調波スプリアスの周波数は既知ではないため、抑制する周波数に応じて変化可能な適応フィルタ (adaptive filter) が必要となる。このような適応フィルタとして、時間領域では IIR (infinite impulse response) フィルタによる適応ノッチフィルタが[46]、周波数領域では FFT を用いた FDAF (frequency domain adaptive filter) が提案されている[47]。

図 7.3.3-2 にこれら適応フィルタの構成を示す。時間領域における IIR フィルタは、サンプリング信号の時間遅れと重み係数の乗算、そしてそれらの和で実装でき、演算負荷が少ないことが利点である。しかし、適切な重み係数の設計が複雑であるという欠点を持つ。一方、周波数領域における実装は、抑制する狭帯域信号の周波数と重み係数が 1 対 1 で対応しているため設計が容易であるという利点を持つが、FFT および IFFT (Inverse FFT) の演算負荷が高い点が欠点である。

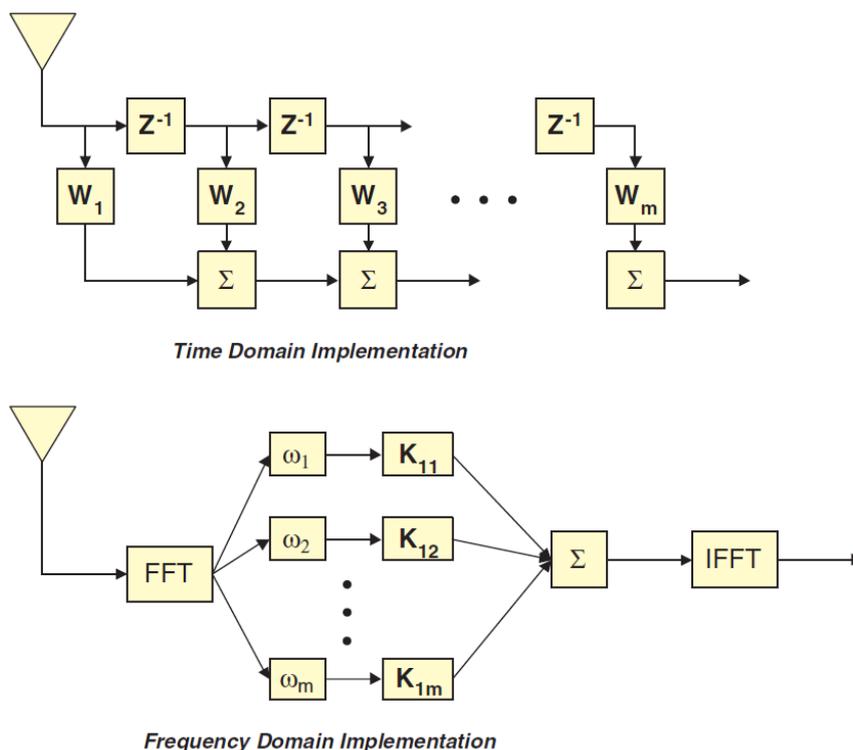


図 7.3.3-2 時間領域および周波数領域における適応フィルタの実装[48]

7.3.3.3. Time-frequency 領域における chirp 信号の抑制

他の無線通信機器によるパルス信号や高調波スプリアスによる偶発的な jamming が、いずれも狭帯域な信号であるのに対して、GNSS 信号の意図的な妨害を目的とした PPD が放送する chirp 信号は、GNSS 信号の帯域全体に広がる広帯域な信号である。そのため、pulse blanking や適応フィルタによる特定の時間領域または周波数領域における抑制効果は限定的である。

しかし、PPD による chirp 信号は、図 7.2.2-1 に示すように、CW 信号によってある周波数帯域を一定周期でスイープするパターンを示す。そのため、瞬間的に見れば chirp 信号は狭帯域な信号であり、ノッチフィルタで抑制することができる。さらに、time-frequency 領域において、chirp 信号の周期パターンを STFT (short-time Fourier transform) などによって高速に推定し、その周期に応じてノッチフィルタの周波数を制御することで、広帯域な chirp 信号を抑制することができる[49]。

図 7.3.3-3 に time-frequency 領域における jamming 抑制の構成を示す。本手法は広帯域な信号の抑制が可能であるが、その応用は chirp 信号のように周期的に CW の周波数が変動するタイプの信号に限定される。

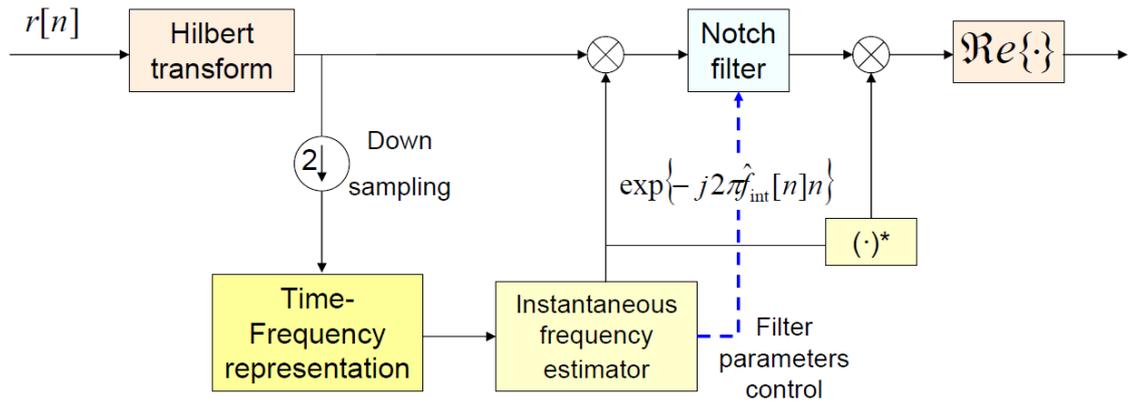


図 7.3.3-3 Time-frequency 領域における jamming 抑制[49]

7.3.3.4. アレーアンテナによる空間領域での抑制

信号処理による pre-correlation の抑制技術以外に、さらにその前段階であるアンテナにおいて、複数のアンテナ素子からなるアレーアンテナを用いることで、空間領域での jamming 信号の抑制が可能である。このようなアンテナは CRPA (controlled reception pattern antenna) と呼ばれ、各アンテナ素子で受信した信号の位相や振幅を環境に応じて制御することで、電氣的にアンテナの指向性を変えることができる [50][51]。

図 7.3.3-4 にアレーアンテナの構成を示す。ここで、重み係数 W_i は複素数であり、位相と振幅を制御する。これにより、null と呼ばれる不感帯が jammer に向くようにアンテナの指向性を制御し、jamming 信号の影響を抑制する。このような抑制手法を、null-steering と呼ぶ。同様に、アレーアンテナの指向性の制御において、主要なビームの向きを特定の GNSS 衛星に向けることも可能である。これにより、GNSS 信号の受信電力が向上し、J/S 比が改善することから、さらなる抑制の効果が期待できる。このような制御を beamforming と呼ぶ。

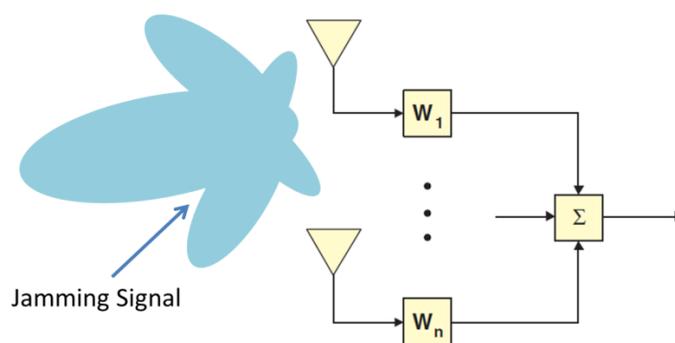


図 7.3.3-4 アレーアンテナの構成[48]

アレーアンテナでは、 n 個のアンテナ素子によって、 $n - 1$ 個の null または beam を生成することができる。一般に観測される GNSS 衛星数が数十機であるのに対して、jamming に使用される送信機は 1 台から数台程度である。そのため、CRPA は主に null-steering による jamming 信号の抑制を目的とし、2 個から 7 個のアンテナ素子で構成される。

さらに、空間領域における jamming 信号の到来方向だけではなく、異なる jamming 信号の種類にも柔軟に対応するために、時間領域における IIR フィルタを統合した STAP (space-time adaptive processing) と呼ばれるアレーアンテナが広く研究されている[52]。

図 7.3.3-5 に STAP の構成を示す。これからも明らかなように、STAP は図 7.3.3-4 のアレーアンテナにおける複素数の重み係数を IIR フィルタに置き換えたものである。複素数の重み係数と比較して、デジタル信号処理での実装に適しており、また演算負荷も比較的低いことから、GNSS 信号の CRPA に適した手法といえる。

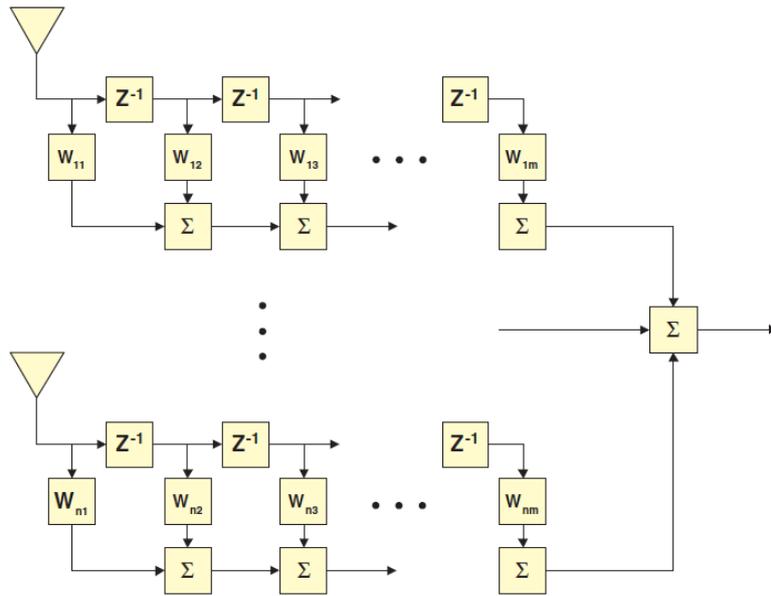


図 7.3.3-5 STAP の構成[48]

7.3.3.5. Jamming 抑制技術のまとめ

Jamming 抑制技術の実装の容易性と抑制能力について、図 7.3.3-1 にまとめる。アレーアンテナ以外の手法は、抑制可能な信号は基本的に狭帯域な信号であり、汎用的な jamming 抑制技術としてはその能力が限定的である。一方、空間領域におけるアンテナの指向性を制御するアレーアンテナは、基本的に信号源の特性に関係なく、広帯域な jamming 信号であっても null-steering による抑制が可能である。しかし、アンテナが大型化し、複数のフロントエンドを必要とするなど、ハードウェアの面でもリソースを必要とし、実装の容易性は低い。

表 7.3.3-1 Jamming 抑制技術の実装性と抑制能力

Jamming Mitigation	Jamming 信号の特性	主な信号源	実装性	抑制能力
Pulse Blanking	パルス信号	DME, TACAN	高	低
適応フィルタ	CW など狭帯域信号	高調波スプリアス	中	中
Time-Frequency Domain	Chirp など周期的な広帯域信号	PPD	低	中
アレーアンテナ	狭帯域および広帯域信号	上記各種	低	高

Jamming 抑制に最も効果の高いアレーアンテナによる CRPA の技術は、これまで主に軍用として研究開発が行われてきた。しかし、近年では、測量用の民生 GNSS 受信機メーカーの NovAtel が、軍用向けとはいえ、カタログ品として CRPA アンテナの販売している。さらに、イスラエルのベンチャー企業が、民生向け簡易的な anti-jamming デバイスとして、2 素子のアンテナからなる CRPA の販売を始めた。このデバイスは、現金輸送車の管理など、その位置情報にセキュリティを求める民間企業をターゲットとしている。このように、これまで軍事技術であった CRPA であるが、高周波半導体の小型化や高性能化や、DSP (digital signal processor) の高速化により、民生品としての市場拡大が予想される。

7.3.4. Spoofing の検知

GNSS 信号をより強力な電波で妨害する jamming に対して、spoofing の信号は本物の GNSS 信号と同じようにスペクトル拡散されており、受信電力は微弱である。そのため、表 7.3.2-1 にまとめた jamming 検知技術で広く用いられている pre-correlation の手法を、spoofing 信号の検知に適用することは困難である。スペクトル拡散されている spoofing 信号を検知可能な電力にするためには、GNSS 信号同様に逆拡散が必要となる。つまり、spoofing 信号の検知技術は、必然的に post-correlation の手法となる。この際に、本物の GNSS 信号も spoofing 信号と一緒に逆拡散される。これら 2 つの信号を見分ける手段として、主に時間領域で相関波形をモニタリングする SQM (signal quality monitoring) と、複数アンテナまたは既知の軌跡で運動するアンテナによる空間領域での spoofing 検知技術が開発されている。さらに、GNSS 受信機単体ではなく、慣性航法システム (INS: inertial navigation system) との複合航法による spoofing 検知も提案されている。

7.3.4.1. Signal quality monitoring (SQM)

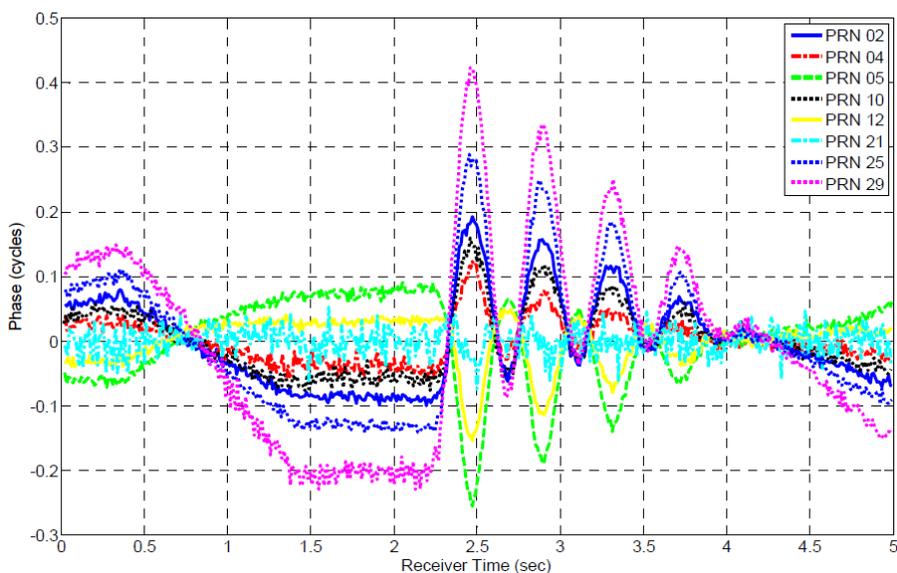
相関波形をモニタリングする SQM は、本来、マルチパス環境における GNSS 信号の信頼性のモニタリングのために開発された技術である。マルチパスは、構造物などで反射した GNSS 信号が再度受信されて

しまう現象であり、偽物の GNSS 信号を受信させようとする spoofing 攻撃との類似性が高い[53]。そこで、Cavaleri や Pini らは相関波形の対称性などを評価する ratio test や delta test といった SQM の手法を spoofing 信号の検知にも応用し、それらが有効であることを報告している[54][55]。

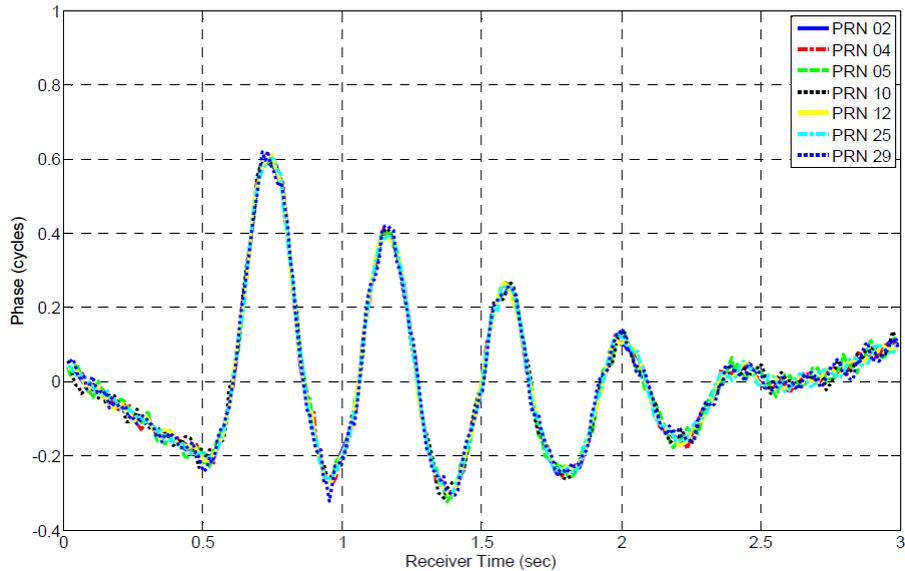
SQM の機能は、GBAS の基準局用 GNSS 受信機など、すでにいくつかの受信機には実装されている技術である。Spoofing 信号の検知に対して、その有用性も確認されているが、本来の機能の特性上、spoofing 信号とマルチパスが同時に存在する環境では、これら 2 つを見分けることができない。そのため、基準局など、オープンスカイでの使用を前提としている受信機であれば良いが、市街地などのマルチパス環境での利用は困難である。

7.3.4.2. 空間領域における spoofing 検知

本物の GNSS 信号と同じ構造をもつ spoofing 信号を時間領域や周波数領域で区別することは一般には難しい。しかし、本物の GNSS 信号が上空に分散する GNSS 衛星からそれぞれ到達するのに対して、spoofing 信号はすべての GNSS 信号がひとつの送信機から放送される。したがって、それらの到達方向によって区別する空間領域での spoofing 信号の検知は非常に有効である。



(a) アンテナの運動に対する GNSS 信号の搬送波位相の変化



(b) アンテナの運動に対する spoofing 信号の搬送波位相の変化

図 7.3.4-1 Synthetic antenna array による spoofing 検知[56]

Psiaki らは、ひとつの受信アンテナを既知の軌道で動かすことで、あたかも複数のアンテナで受信したかのような synthetic antenna array を形成する手法を提案している[56]。7.2.2.4 節の技術区分で述べた通り、spoofing 攻撃では攻撃者が意図するアンテナ位置で受信されると予想される信号を spoofer によって放送する。そのため、spoofing 攻撃を受けているアンテナに攻撃者が意図していない運動が発生した際には、それに応じたレンジやドップラーの変化がすべての GNSS 衛星について同等に発生してしまう。一方、本物の GNSS 信号であれば、アンテナの運動に対して信号が到達する方向がすべて異なるため、そのダイナミクスも視線方向 (line of sight) に応じて衛星毎に異なることになる。アンテナを運動させた際の搬送波位相について本手法を適応した例を図 7.3.4-1 に示す。本来は異なるダイナミクスを示すはずの搬送波位相が、spoofing 信号に対してはすべて同じ挙動を示していることが判る。

同様のことが、2つのアンテナからなるアレーアンテナでもいえる[57]。この場合、既知の軌跡で運動するのはアンテナではなく、衛星側となる。基線長が固定された2つのアンテナで観測される搬送波位相の1重差は、GNSS 衛星の運動に応じて変化することになる。しかし、ある場所に固定された spoofer によって観測される搬送波位相の1重差は、常に一定値を示すことになる。しかし、受信機側のアンテナを意図的に動かす synthetic antenna array に比べて、GNSS 衛星の運動は遅いため、spoofing 信号の検知に長時間の観測が必要となる欠点がある。

7.3.4.3. IMU との複合航法

Post-correlation のさらに上流での spoofing 検知技術として、INS などの他の航法センサとの複合航法が提案されている。GNSS と INS の複合航法は、車両の航法システムとして広く利用されており、市街地など GNSS による測位が困難である環境でのナビゲーションに有効である。

GNSS/INS 複合航法による spoofing 検知では、基本的に GNSS 受信機による測位結果を INS によって得られる航法データと比較することで、spoofing 攻撃を受けているかどうかを判断する。しかし、これら2

つの位置情報の差が、spoofing によるものなのか、INS に搭載される慣性センサのドリフトによるものなのかを区別することは難しい。そのため、Manickam らによる実験では、GNSS/INS 複合航法は瞬時的に位置情報が変化する spoofing 攻撃であれば検知可能であるが、ゆっくりと位置情報が変化する場合には判別できないと報告されている[58]。

7.3.4.4. Spoofing 検知技術のまとめ

Spoofing 検知技術の実装の容易性と検知能力について、表 7.3.4-1 にまとめる。Spoofing 信号の電力が十分に大きければ、表 7.3.2-1 に示す jamming の検知技術を利用することも可能である。しかし、spoofing 攻撃に必要とされる電力は jamming より十分に小さく、その検知のための手法は基本的に相関処理による逆拡散後の post-correlation となる。

表 7.3.4-1 Spoofing 検知技術の実装性と検知能力

Spoofing Detection	システムへの要求	受信環境への要求	実装性	検知能力
SQM	多数の相関器をもつ受信機	マルチパスのない受信環境	中	低
Synthetic Antenna Array	搬送波位相などの Raw データ出力	1 台の spoofer による攻撃	高	高
Two-Antenna Array	同期した 2 台の受信機とアンテナ	長時間の観測	中	中
GNSS/INS	慣性航法システムとの複合	位置情報が短時間で変化する spoofing	低	高

これらの spoofing 検知技術において、追加のシステムを必要とせず、基本的に受信機単体で実現可能な synthetic antenna array は、spoofing 信号の検知能力も高く、有望な技術である。例えば、GNSS 受信機を搭載したスマートフォンであれば、手に持った状態で自由に運動させることが可能である。さらに、2016 年に発表された Android 7.0 (Nougat) からは、従来の位置情報だけではなく、各 GPS 信号の擬似距離、搬送波位相、ドップラーが取得可能となった[59]。これにより、スマートフォンで円や星を描くなど、一定の運動をすることで、synthetic antenna array 技術による簡易的な spoofing 検知が現実的となった。現状では、スマートフォンに搭載可能なアンテナのサイズに限界があり、品質の高い raw データを取得することは難しいものの、誰もが所有するスマートフォンによる spoofing 検知は、魅力的なアプリケーションといえる。

7.3.5. Spoofing の抑制

Spoofing 信号は基本的に本物の GNSS 信号と同じ構成をしている。そのため、jamming 信号のように、pre-correlation の段階で blanking や適応フィルタによって抑制することは非常に困難である。そのため、さらにその前段階であるアンテナでの抑制が必要となる。このようなアンテナは、jamming 信号の抑制と

同様に、複数のアンテナ素子をもつ CRPA で実現される。

さらにその前段階である送信信号そのものにおける spoofing 抑制技術として、GNSS 信号の暗号化が挙げられる。GNSS 信号の暗号化は、偽物の信号を抑制するのではなく、暗号を解く鍵を持っているユーザだけが信号を利用できる認証システムである。そのため、GNSS 信号の暗号化は spoofing の抑制 (mitigation) ではなく GNSS 信号の認証 (authentication) と呼ばれる。

7.3.5.1. CRPA による spoofing 抑制

Jamming 信号による攻撃と同様に、基本的に spoofing 攻撃のための送信機は 1 台である。そのため、spoofing 信号の抑制は、CRPA による null-steering によって実現される。

CRPA による spoofing 抑制の効果については、Daneshmand らや Konovaltsev らによるフィールド試験で実証されている[60][61]。不感帯による受信信号の抑制は、jamming 信号のように狭帯域の信号だけではなく、広帯域な信号にも同じように効果がある。そのため、GNSS 信号と同じようにスペクトル拡散している spoofing 信号にも効果的である。さらに、Daneshmand らは、アンテナ素子が 2 つだけのシンプルな CRPA であっても、図 7.3.5-1 に示すような null-steering によって、十分な抑制効果が期待できることをシミュレーションで示している[62]。

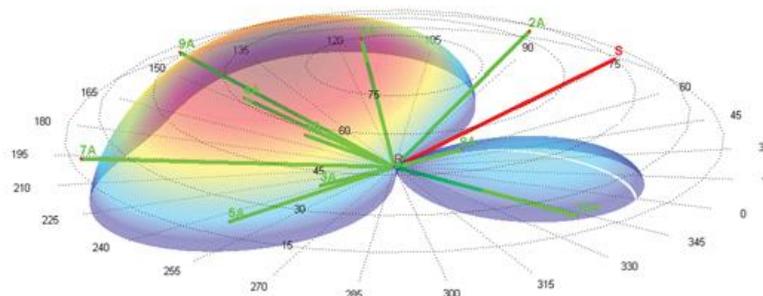


図 7.3.5-1 2 素子の CRPA による null-steering [62]

変調方式や帯域など、GNSS 信号と構造が異なる jamming 信号の抑制では、最小 2 乗誤差法 (MMSE: minimum mean square error) や定包絡線法 (CAM: constant modulus algorithm) といった、従来のアダプティブアレーアンテナのアルゴリズムを適応することができる[63]。これらは、電波環境に関する情報を受信信号から学びながら、指向特性および周波数特性を適応させるアルゴリズムであり、null-steering のために jamming 信号に関する情報を前もって必要としない。しかし、本物の GNSS 信号と構造が同じ spoofing 信号では、これら従来のアダプティブアレーアンテナのアルゴリズムを適応することは難しく、別途、spoofing 信号の到来方向 (DOA: direction of arrival) を特定する必要がある。

Appel らによって複数の DOA の特定手法が評価されているが、どの手法もリアルタイムの実装が困難であったり、オフラインでの厳密なキャリブレーションが必要であったりと、まだ実用的とはいえない[64]。Spoofing 信号の抑制に効果的な CRPA の実用化に向けて、高速で信頼性の高い DOA の特定手法の開発は、今後の重要な研究課題である。

7.3.5.2. GNSS 信号の暗号化

軍用や政府向けには、すでに暗号化された anti-spoofing 機能を持つ信号が放送されているが、オープンサービスの民生信号には、ユーザを限定してしまう暗号化の機能はない。また、GNSS 信号の構成は、システムの運用国側で厳密に規定されており、ユーザ側でその拡散コードの暗号化を行うことは不可能である。

一方、GNSS 衛星の軌道などの情報をユーザに送信している航法メッセージは、基本的にデータ通信の機能であり、GNSS 信号の構成そのものとは直接関係はない。これらも運用国側でデータ構造が規定されているが、そこに新しいデータを加えることは、拡散コードの暗号化に比べれば、まだ実現性のある提案といえる。

NMA (navigation message authentication) は、航法メッセージに、新しいデータとして電子署名を加えることにより、民生向けの GNSS 信号の認証を実現する手法である[65]。電子署名はオンラインバンキングの認証など、インターネットで広く利用されているセキュリティ技術である。しかし、高速なインターネット通信とは異なり、GNSS 信号の航法メッセージのデータレートは 50bps から 250bps と、非常に低速な通信である。また、電子署名のデータに利用できる航法メッセージのスロットも限られている。そのため、NMA での電子署名には、少ないビット数で十分なセキュリティを確保できる技術として、TESLA (timed efficient stream loss-tolerant authentication) が推奨されている[66]。

7.3.5.3. Spoofing 抑制技術のまとめ

Spoofing 抑制技術について、表 7.3.5-1 にまとめる。GNSS 信号そのもの、またはアンテナでの対応が必要な spoofing 信号の抑制には、技術的に選択肢が限られている。しかし、CRPA による null-steering も NMA による電子署名も、非常に強力で有効な anti-spoofing 技術である。ただし、CRPA では spoofing 信号の到来方向の特定技術の開発、NMA ではその実装に向けた GNSS 運用国との調整など、大きな課題も残されている。

表 7.3.5-1 Spoofing 抑制技術と課題

Spoofing Mitigation	Anti-Spoofing 技術	課題
CRPA	Null-steering による spoofing 信号の抑制	Spoofing 信号の到来方向の特定技術
NMA	電子署名による Authentication	実装に向けた GNSS 運用国との調整

7.4. まとめ

交通、緊急通報、通信、金融、電力など、セキュリティを必要とするインフラまでが民生用 GNSS 信号の強く依存している現在、jamming や spoofing による偶発的または意図的な事故に発展する危険性は増加している。既存の無線通信機器からの影響を避けられない jamming に関しては、測量用 GNSS 受信機などのハイエンドな製品において、比較的早い段階から pulse blanking や適応フィルタなどの初歩的な対策

がなされてきた。さらに、CRPAによる民生向けの anti-jamming デバイスが開発されるなど、民生アプリケーションにおける jamming の危険性に対する認識は高まっているといえる。

一方で、spoofing に関しては、信号の生成に高度な専門知識や高額な装置を必要とすることから、現実的な脅威にはならないであろうと楽観視されてきた。しかし、安価な SDR の出現により、ソフトウェアの知識だけで GNSS 信号の spoofing が可能になったことから、これまでのように楽観的ではいられない状況になりつつある。すでにこのような脅威に対して、PRS と呼ばれる暗号化された新しい GNSS 信号によるサービスが開始されている。しかし、これらは政府機関など限定されたユーザ向けであり、広く一般に利用されているオープンサービスの GNSS 信号は、spoofing の脅威に何の対策もないままである。

GNSS 信号の利用が拡大する中、益々高まる jamming や spoofing の脅威に対し、CRPA による null-steering は汎用的で効果の高い対抗手段である。アンテナの小型化や攻撃信号の到来方向の特定技術などの課題はあるものの、民生市場における今後の発展が期待される技術である。

8. 市販 GPS 受信機の spoofing 耐性実験

8.1. はじめに

偽物の GNSS 信号による spoofing 攻撃は、信号の生成に高度な専門知識や高額な装置を必要とすることから、現実的な脅威にはならないであろうと楽観視されてきた。しかし、安価なソフトウェア無線 (SDR: software defined radio) の出現により、ソフトウェアの知識だけで GNSS 信号の spoofing が可能になったことから、これまでのように楽観的ではいられない状況になりつつある。本研究では、このような SDR による GPS 信号シミュレータを構築し、市販 GPS 受信機の spoofing 耐性について調査する。

8.2. ソフトウェア無線

単純に電力の大きな妨害電波を発生する jammer とは異なり、GPS 信号を高周波の無線信号として出力するシミュレータは、高度な高周波回路の知識を必要とし、専用のデバイスも高価であった。

しかし、スマートフォンを始めとする近年の移動体無線通信機器の急速な普及により、これら無線信号の処理をすべてソフトウェアで実行するソフトウェア無線の開発プラットフォームが安価に入手できるようになった。表 8.2-1 に代表的な低価格帯の SDR プラットフォームをまとめ、その外観を図 8.2-1 に示す。

表 8.2-1 SDR プラットフォームの比較

	bladeRF [67]	HackRF One [68]
周波数	300MHz~3.8GHz	30MHz~6GHz
帯域	28MHz	20MHz
Duplex	Full	Half
量子化ビット数	12 bit	8 bit
サンプルレート	40Msps	20Msps
インターフェイス	USB 3.0	USB 2.0
Local Oscillator	VCTXCO (<1ppm)	XO (20ppm)
価格	\$420	\$300



(a) bladeRF [67]



(b) HackRF One [68]

図 8.2-1 SDR プラットフォームの外観

これら SDR プラットフォームは、デジタル化された Quadrature 信号をベースバンド信号として PC から受け取り、それを所望の中心周波数にアップコンバートし、RF 信号として送信する。例えば、GNSS の

ベースバンド信号は、一般に次式で記述することができる。

$$s(t) = \sqrt{2PC}(t - \tau)D(t - \tau)\exp(j2\pi f_D t + \phi)$$

ここで、 P は信号電力、 C は拡散コード、 D は航法メッセージである。 τ は疑似距離に相当する時間遅延であり、 f_D はレンジレートに相当する中心周波数からの周波数オフセットである。サンプリング時間毎に、すべての可視衛星の疑似距離とレンジレートを求め、上式より各衛星のベースバンドを算出し、それらを足し合わせることで、受信機で受信される GNSS 信号のベースバンドを模擬することができる。このような GNSS 信号のベースバンドを生成するソフトウェアとして、市販品では National Instruments 社の GPS Simulation Toolkit for LabVIEW や、Skydel 社の SDX software-defined GNSS simulator が挙げられる[69]。また、無償のオープンソースソフトウェアとして、海老沼氏が開発した `gps-sdr-sim` が GitHub にて公開されている[70]。

8.3. GPS 受信機の spoofing 実験

本研究では、SDR プラットフォームとして bladeRF を使い、`gps-sdr-sim` によって生成された GPS 信号のベースバンドを GPS L1 C/A の周波数 (1575.42MHz) で再生することで、spoofing 環境における車載用 GPS 受信機モジュールの挙動を評価する。

実際の spoofing 攻撃においては、通常の GPS 信号を追尾している状態の受信機から、その信号を乗っ取り、偽物の信号へ誘導しなければならない。そこで、本物と偽物の GPS 信号が混在した環境を模擬するために、2 台の GPS 信号シミュレータを同期させ、一方が本物の GPS 信号を、もう一方が偽物の spoofing 信号を生成する spoofing 環境シミュレータを構築する。

8.3.1. シミュレータの構成

Spoofing 環境シミュレータの SDR プラットフォームには、表 8.2-1 に示す nuand 社の bladeRF を使用する。bladeRF では、2016 年 1 月にリリースされたファームウェアから、複数台の同期機能が正式にサポートされた。

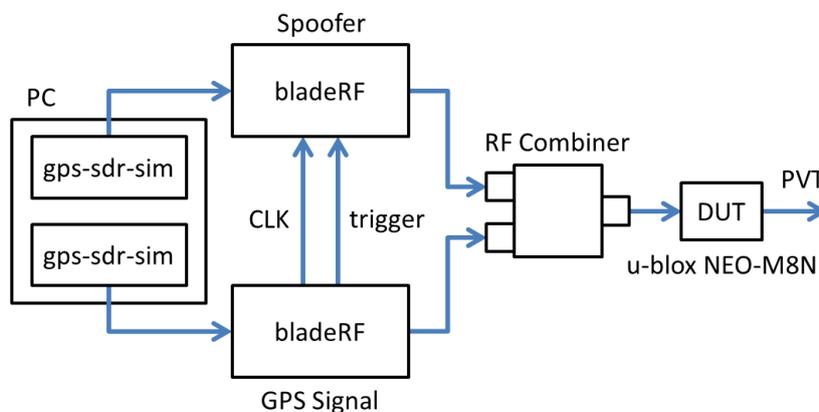


図 8.3.1-1 Spoofing 環境シミュレータの構成

図 8.3.1-1 に bladeRF の同期機能を利用した spoofing 環境シミュレータの構成図を示す。2 台の bladeRF の内、本物の GPS 信号を生成する「GPS Signal」をマスターとし、そちらに搭載されているクロックの信号を「Spoofer」と共有している。「Spoofer」は spoofing 信号を模擬するスレーブとなり、マスターから受け取る trigger 信号により時刻同期が行われる。「GPS Signal」と「Spoofer」で生成された RF 信号は、RF Combiner で電力合成され、試験対象である GPS 受信機に入力される。図 8.3.1-2 にクロックおよび trigger 信号を接続した 2 台の bladeRF からなる spoofing 環境シミュレータの外観を示す。

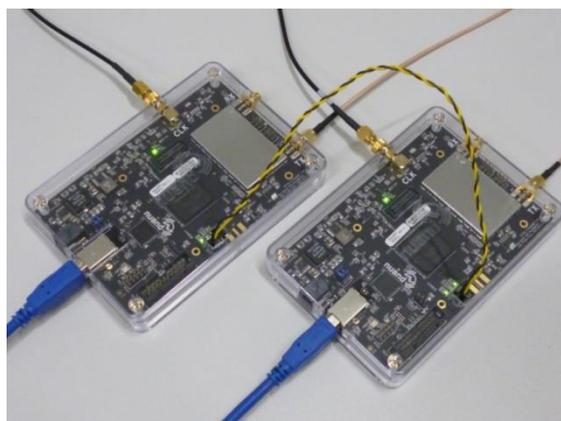


図 8.3.1-2 同期した 2 台の bladeRF からなる spoofing 環境シミュレータ

Spoofing の対象としては、図 8.3.1-3 に示す車載用 GPS 受信機モジュールである u-blox 社 NEO-M8N を選択した。NEO-M8N では、GPS 信号の受信状況などの詳細が、u-blox 社が提供するモニタリングソフトウェアである u-center で確認することができる。

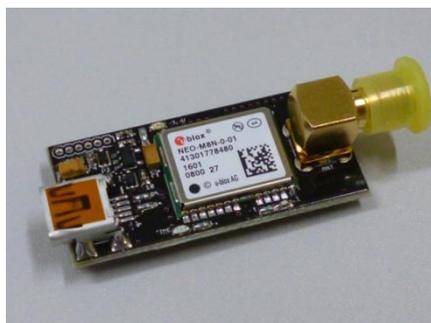


図 8.3.1-3 NEO-M8N 受信機基板

8.3.2. 非同期の *simplistic* な spoofing 攻撃

Spoofing 環境シミュレータによるシナリオとして、まずは Hamphreys らが定義する 3 段階の spoofing 攻撃レベルにおいて、最も初歩的なシミュレータによって生成された spoofing 信号を単に放送するだけの *simplistic* に相当するものを考える[71]。

この実験では、「GPS Signal」側で測位される真の位置に対して、東に 50m の偽物の位置を測位する信号を「Spoofer」とする。「GPS Signal」のみ、「Spoofer」のみでシナリオを実施した際の測位結果を図 8.3.2-1 に示す。「GPS Signal」による測位結果を原点とした局地座標系において、「Spoofer」による測位結果が東

50m の位置に確認できる。

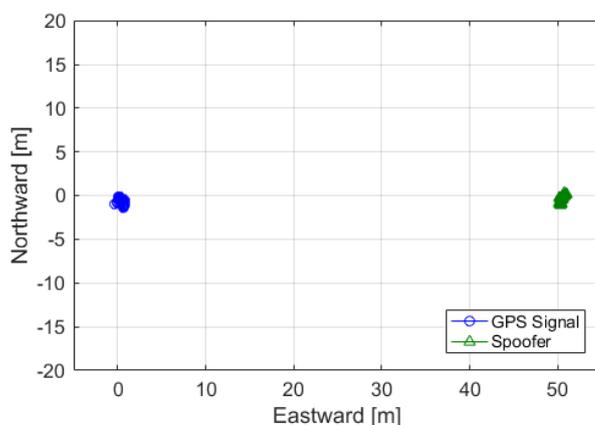


図 8.3.2-1 「GPS Signal」 および 「Spoofer」 単独での測位結果

単純に GPS 信号シミュレータで生成した信号による spoofing 攻撃を模擬するため、まずは 2 台の bladeRF を同期せずに、「GPS Signal」による測位後、「Spoofer」の信号を +10dB で発信する。このとき、NEO-M8N で観測された信号強度を図 8.3.2-2 に示す。

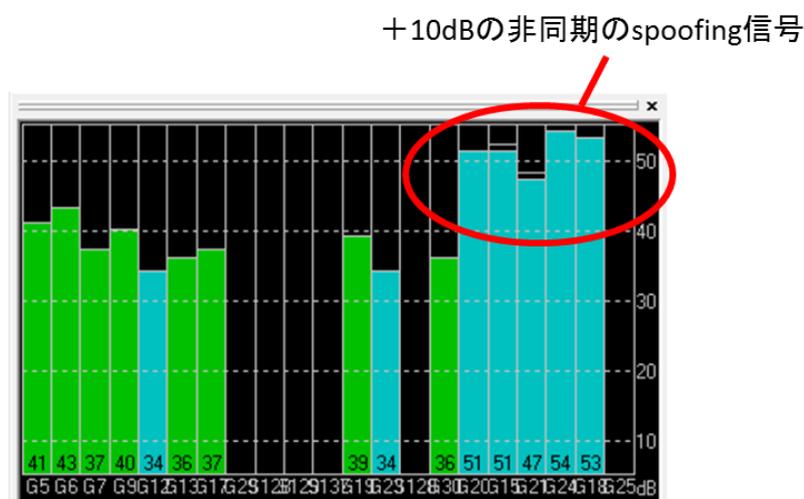


図 8.3.2-2 非同期の *simplistic* な spoofing 攻撃

+10dB の spoofing 信号は受信されているものの、測位演算には利用されず、測位結果には変化は見られない。これは、NEO-M8N の測位演算では、現在の追尾している信号を優先し、それらから航法メッセージなどが異なる信号は、たとえ受信電力が高くても測位演算には用いないというルールに従っているものと考えられる。これは、spoofing 信号より先に本物の GPS 信号を捕捉・追尾していなければならないが、非同期の *simplistic* な spoofing 攻撃には実装が容易で有効な対策といえる。

8.3.3. 同期した *simplistic* な spoofing 攻撃

Hampreys らが定義する 3 段階の spoofing 攻撃レベルにおける *simplistic* と *intermediate* の中間的な攻撃として、8.3.2 節と同様のシナリオにおいて、2 台の bladeRF が同期した場合を考える。ここでは、シミュレーション開始の 2 分間は「GPS Signal」の信号強度に対して「Spoofer」の信号を -20dB で発信する。その後、「Spoofer」の信号強度を増加させることで、spoofing 信号の影響を評価する。

図 8.3.3-1 に同期した *simplistic* な spoofing 攻撃における測位結果の東方向への時間変化を示す。本実験では、シミュレーション開始 2 分後の「Spoofer」の信号強度を、 -20dB 、 -10dB 、 -5dB 、 0dB 、 $+5\text{dB}$ としている。「GPS Signal」に対して「Spoofer」の信号強度が低い場合には、 -5dB のときに測位誤差の増加や周期的な変動が見られるものの、基本的に「Spoofer」の影響は微小であり、測位結果は原点に留まっている。しかし、「Spoofer」の信号強度が「GPS Signal」以上となると、次第に「Spoofer」の測位結果である東 50m に向かって、測位結果が移動している。また、その移動速度は、「Spoofer」の信号強度が高いほど速いことが確認された。

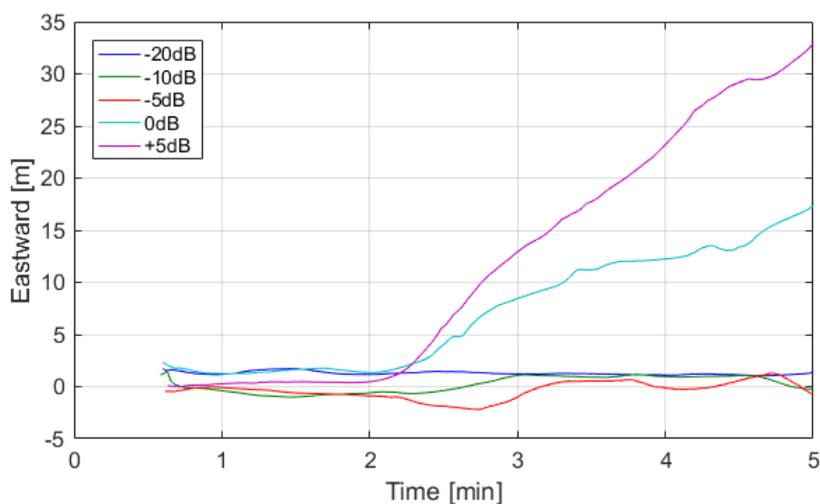


図 8.3.3-1 同期した *simplistic* な spoofing 攻撃

8.3.4. Intermediate な spoofing 攻撃

Spoofing 攻撃による GPS 信号の乗っ取りを模擬するために、Hampreys らが定義する 3 段階の spoofing 攻撃レベルにおける *intermediate* なシナリオを考える。ここでは、同期した 2 台の bladeRF において、「GPS Signal」の位置は静止点なのに対して、「Spoofer」はその位置から 2 分後に円を描くように動き出すシナリオとなっている。シミュレーション開始の 90 秒間は「GPS Signal」の信号強度に対して「Spoofer」の信号を -20dB で発信する。その後、「Spoofer」の信号強度を増加させることで、GPS 信号の乗っ取りを試みる。

Intermediate な spoofing 攻撃の結果を図 8.3.4-1 に示す。本実験では、シミュレーション開始 90 秒後の「Spoofer」の信号強度を、 -5dB 、 0dB 、 $+5\text{dB}$ としている。「GPS Signal」に対して「Spoofer」の信号強度が低い場合には、8.3.3 節の *simplistic* な spoofing 攻撃と同様に本物の「GPS Signal」の信号が優先され、GPS 信号の乗っ取りは失敗し、測位結果は「GPS Signal」の位置に留まっている。しかし、「Spoofer」の信号強度が「GPS Signal」と同じ場合、一部の GPS 信号の乗っ取りに成功し、測位結果は不完全な円を描

いている。さらに、「Spoofer」の信号強度が「GPS Signal」より高い場合には、すべての GPS 信号の乗っ取りに成功し、受信機からの測位結果は「Spoofer」が意図する円を描いている。

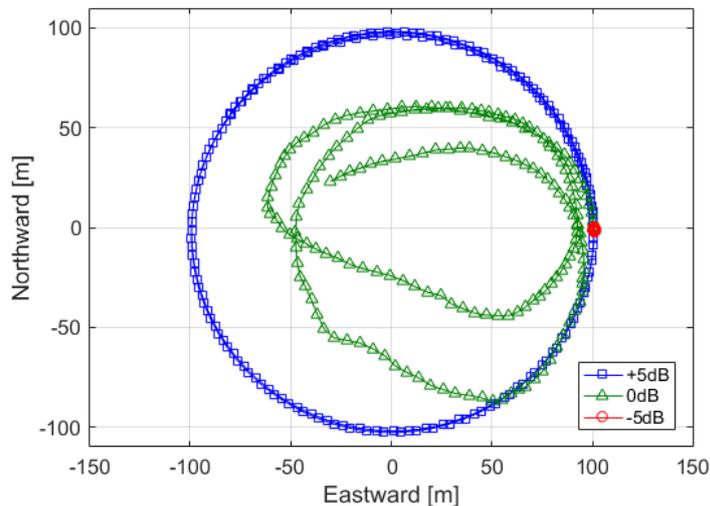


図 8.3.4-1 *Intermediate* な spoofing 攻撃による GPS 信号の乗っ取り

8.4. まとめ

本研究で開発した spoofing 環境シミュレータによる実験によって、評価対象となった NEO-M8T 受信機は、現在受信している GPS 信号を優先し、その後受信した信号はたとえ信号強度が高くても、測位演算には利用しないことが明らかとなった。これは、spoofing 信号より先に本物の GPS 信号を捕捉・追尾していなければならないが、単純に GPS 信号シミュレータで生成した信号を放送するだけの *simplistic* な spoofing 攻撃には有効な手段といえる。

本物の GPS 信号と spoofing 信号を同期させた *intermediate* な攻撃では、spoofing 信号の信号強度が本物の GPS 信号より数 dB 高いだけでも乗っ取りに成功することが示された。このような信号変動は、建物や樹木などの受信環境によっても発生するため、単純な信号強度変化のモニタリングだけでは、spoofing 攻撃を検知することは難しいといえる。

しかし、spoofing 攻撃を受けた GPS 受信機の挙動は、GPS 受信機内部のマルチパス抑制技術や測位結果のフィルタリングなどの設定に依存する。そのため、他の GPS 受信機が今回評価した NEO-M8T と同じ挙動を示すとは限らない。そのため、spoofing に対する特定の GPS 受信機の性能を評価するためには、本研究で開発した spoofing 環境シミュレータのように、本物と偽物の GPS 信号が混在した形でのシミュレーションが実施できるシステムが必須といえる。

9. まとめと課題

9.1. 総合的な衛星測位誤差の調査

9.1.1. 衛星測位精度・可用性調査

車載受信機の衛星測位精度・可用性調査に関しては、一通りの評価と同時に評価手法が示せてきた。衛星測位システムに関しては、各プロバイダ国から、ここ数年で様々な整備を推進する計画が出ている。日本の準天頂衛星システムは 2017 年度に 3 機の測位衛星の打ち上げを計画しており、2018 年度から実用サービスとしての運用が開始される。2016 年 12 月より初期サービスが開始された欧州の Galileo はフルオペレーションに向けた整備が進められており、順次衛星の打ち上げが予定されている。中国の BeiDou も現在のアジア地域限定の RNSS から地球規模の GNSS へのアップグレードを目指している。また、ロシアの GLONASS は他の衛星測位システムとの互換性から FDMA 方式から CDMA 方式への切り替えが進められている。米国の GPS も Block III 衛星にアップグレードが図られることで、L1C、L2C、L5 などの新しい信号に対応した衛星への入れ替えが進められている。

現段階での衛星測位の性能は、自動走行の実現を目指す 2020 年度には、大きく異なる測位性能を示す可能性もある。衛星測位に関しては必要に応じて情報収集を続けていく事、定点観測的に評価を行っていく必要がある。

衛星数が十分に確保できない遮蔽等が生じた場合、衛星測位は不可能になり位置情報は出力されないため、トンネル等の長い遮蔽区間から出てきた際の衛星測位の振る舞いを調査する場合は、INS やジャイロ等の複合センサを利用しない限りは、まったく意味をなさない評価となってしまう。センサ複合による測位は競争領域と位置付けられているため、このような実証実験は今まで実施されて来なかった。既に市場では IMU や DR に対応した受信機は出ており、これらを利用した遮蔽箇所での衛星測位の評価は実施すべき課題となっている。

また、RTK や L1S (DGPS)、MADCOCA-PPP AR のような基準局との距離に測位精度が依存する測位方式では、基準局から一定の範囲内にその利用可能範囲が限定される。自動車等で長距離移動を行う場合、同一の基準局で対応することが不可能であるため、基準局を切り替えて測位を行う必要がある。このようなケースでの実証実験は未だ実施されておらず、特に高速道路での長距離走行の評価は今後実施すべきテーマである。

9.1.2. ダイナミックマップで利用するための検討

本調査においては、衛星測位の誤差情報は実証実験のデータ分析により実施したが、デジタルマップに関しては情報収集による検討のみとなっている。利用可能なダイナミックマップが無かったため、走行実験で取得したデータをダイナミックマップに重ね合わせた位置精度評価は実施していない。

衛星測位の誤差、ダイナミックマップの品質がどのような影響度合いになるかを評価していく必要がある。また、衛星測位の位置情報をダイナミックマップに整合させ、活用する手法を検討していく必要がある。

特にダイナミックマップが測量法に準拠した位置の基準で作成されているため、地理空間情報の JGD2011 座標系と衛星測位の WGS84 座標系のズレを処理する必要がある。特に地殻変動による移動量は 1m を超える箇所もあるので、本年度で検証した電子基準点成果情報を利用する手法も含めて、検討および検証を行っていく必要がある。

9.2. データ信頼度の測定方法の検討

9.2.1. 衛星測位の信頼度の検討

本調査において信頼度評価手法に関しては、誤差分散を使用した測定方法を提示している。今後は信頼度をより向上するための手法について検討を行う必要がある。特にミス Fix の検知は困難であるため、他のセンサ類との組み合わせによる信頼度判断等を検討していく必要がある。また NLOS 等の検知方法としての三次元地図情報の有効性判断の他、コード測位時の信頼度評価等は引き続き実施していく必要がある。

9.2.2. 衛星信号のセキュリティ調査

本調査では机上調査を中心に、シミュレータによる評価実験を行っている。

欧州等では既に衛星信号のセキュリティに対して取り組みを始めているので、より深い調査が必要となってくる。また、実際に搭載した受信機に攻撃信号を与えて評価する実証実験も検討されるべきである。

9.3. 今後の自動走行における衛星測位の調査に関して

2014 年度から 3 か年にわたる調査で車載受信機での衛星測位の基礎評価は自体は一通り完了した。

今後は複合センサによる自己位置決定手法や、ダイナミックマップ利用、あるいは車車間通信も含めた通信セキュリティ等のプロジェクトでの応用的な範囲での衛星測位の活用を検討する必要がある。

10. 参考資料

10.1. 各国の衛星測位システムとその動向

10.1.1. GPS

GPSは米国の開発・運用する衛星測位システムで、1978年に初の実験衛星が打ち上げられ、現在は2016年2月5日（JST）に打ち上げられた最後のブロックⅡF衛星を含め、32機が衛星軌道に投入され、その内31機が運用されている。各衛星は地上約20,200km軌道傾斜角55度の中軌道（MEO: Medium Earth Orbit）を12時間周期でまわり、6軌道に各4機、計24機が配置される状態を基本としている。GPSは完全運用が始まってから20年が経過しており、1999年近代化計画の発表を経て、現在はブロックⅡR、ⅡR-M、ⅡFシリーズの衛星が運用されている。今後は2018年春以降に新たなブロックⅢ衛星（ⅢIA: 12機、ⅢIB: 8機、ⅢIC: 16機の合計36機）の打ち上げが予定されており、GalileoのE1信号や準天頂衛星システムと互換性を持つ新しいL1C信号の供給や信号レベルの強化などで、システムの精度や有効性（アベイラビリティ）、完全性（インテグリティ）などの信頼性を向上させる計画である。

GPSの運用管制システムOCS（Operational Control System）は、主管制局と監視局、地上アンテナで構成され、衛星を追跡し軌道と時刻を予測・決定する役割を担っている。

精度の指標としては衛星信号（SIS: Signal In Space）の品質評価指標の一つとして距離測定誤差（URE: User Range Error）があり、SIS-UREは衛星軌道と時計の誤差によって生じるユーザ視線方向の測距誤差である。GPSのSIS-UREは年々改善されてきており、2001年にはRMSで1.6m程度であったものが、2013年頃までには0.8m程度となり、最後のブロックⅡF衛星の運用が開始された2016年5月11日には0.365mを達成したと発表されている。

10.1.2. QZSS

準天頂衛星システム（QZSS: Quasi-Zenith Satellite System）は日本の地域航法衛星システムで、GPSの信号と互換性を持ち、その補完・補強を主な目的としている。2010年に初号機「みちびき」が打ち上げられ、現在は実証実験中である。準天頂衛星（QZS: Quasi-Zenith Satellite）は高度約32,000km～40,000kmを特殊な準天頂軌道（QZO: Quasi-Zenith Orbit）に沿って周回しており、その軌跡は南北に非対称な8の字を描く。QZOは対地同期軌道の一種で、衛星は静止軌道（GEO: Geostationary Orbit）と同じ周期（約23時間56分）で地球を周回する。軌道傾斜角は約40度、離心率は約0.1である。日本の上空に長く滞在できるように設計されており、アジア・オセアニア地域でも利用可能である。

管制はつくばのマスターコントロール実験局と沖縄の準天頂衛星追跡管制局で行われる。国内4箇所、海外5箇所の測位モニタ実験局ではモニタデータを収集し、マスターコントロール実験局へ送られるようになっている。

インターフェイス管理文書（ICD: Interface Control Document）に記載されているSIS-UREの要求仕様は2.6m（95%）であるが、95%精度で実績値は約0.74m、RMSで0.37m程度である。サービスに関しては、GPSを補完する機能に加え、サブメータ&センチメータ級の測位補強サービス、簡易メッセージ機能を使った災危通報などがある。今後は2017年度に追加3機（QZO 2機、GEO1機）が打ち上がり、4機体制となる2018年度からオープンサービスが開始される。また、2023年度をめどに7機体制での運用が開始される予定である。

10.1.3. GLONASS

GLONASS はロシアの衛星測位システムで、1982年に初号機が打ち上げられ、各衛星は名目周期 11 時間 15 分 44 秒で高度 19,100km 軌道傾斜角 64.8 度の MEO を周回している。基本的な衛星配置は 3 軌道上に衛星を各 8 機、計 24 機配備し、その内 3 機は予備衛星とするものである。現在はこの 24 機構成を維持するため 2016 年 5 月 29 日 (JST) に打ち上げられた GLONASS-M 衛星を含め、稼働中の衛星が 24 機、フライトテスト及び動作確認中の衛星が 2 機、予備衛星 1 機の計 27 機体制である。GLONASS の運用管制はシステム管制センターとグロナス時の責任を負う中央シンクロナイザー、衛星の追尾監視とデータ伝送を行う TT&C (Telemetry, Tracking and Command) 局から成り立っている。SIS-URE に関しては、2009 年時点で RMS 1.8m 程度と、GPS の約 0.8m と比べると 1m ほど大きかったが、ICD 内に記載されている 3.7m よりも低く、年々改善されてきている。今後は 2011 年に打ち上げられ試験中の GLONASS-K 衛星への入れ替えにより、インテグリティ情報やディファレンシャル補正情報、時刻補正情報が提供されるため、移動体におけるリアルタイム測位の精度向上が期待され、また救助探索機能も付け加わる予定である。

10.1.4. BeiDou

BeiDou は中国の衛星測位システムで、衛星軌道は MEO、静止軌道 (GEO: Geostationary Orbit)、傾斜対地同期軌道 (IGSO: Inclined Geosynchronous Orbit) の 3 つがあり、MEO は高度 21,528km 傾斜角 55 度、GEO と IGSO は高度 35,786km、IGSO は傾斜角 55 度に配置されている。衛星は初号機が 2007 年に打ち上げられ、2016 年 6 月 13 日 (JST) に打ち上がった 23 号機を含めて、2017 年 2 月現在、軌道に投入されている衛星は計 23 機 (GEO : 6 機、MEO : 8 機、IGSO : 9 機) となった。現在はアジア太平洋地域のみでの運用だが、2020 年までには全地球対応となる計画である。

民間向けのオープンサービスでの SIS-URE は 95% の確率で 2.5m 以下、測位精度は 10m 以内とされている。ICD によれば、インテグリティ情報やディファレンシャル情報も放送され、更なる測位精度の向上が期待される。

この他に軍・政府向けの高精度測位機能、ショートメッセージ機能などを備える。

10.1.5. Galileo

Galileo は欧州の衛星測位システムで、当初は他の GNSS の補完システムの構想だったが、現在は相互運用可能な独自のシステムとして開発されている。各衛星は軌道の傾きの方向が 120 度ずつ異なる、軌道傾斜角 56 度、軌道高度 23,222km の 3 つの MEO に投入され、2020 年には各軌道に 10 機ずつ、計 30 機 (うち 6 機は予備機) での完全運用を目指している。

運用管制はイタリアとドイツにある 2 つの管制センターと TT&C 局やアップリンク局、監視局などから構成される。Galileo は民生利用を意識しており、無料のオープンサービス (OS) の他に運輸事業用の高信頼サービス (SoL: Safety of Life) や有料な高精度の商用サービス (CS) などがあり、捜索・救助用の双方向メッセージ中継機能も搭載予定である。測位精度は OS では 1 メートル、CS では数センチとなる予定である。

Galileo の試験衛星初号機は 2005 年に打ち上がり、2016 年 11 月 17 日 (JST) には 15-18 号機が 4 機同時に打ち上げられた。現在は FOC (Full Operational Capability) のみで 14 機、IOV (In-Orbit Validation、

実証機)も含めた通算では18機体制となった。2016年12月15日には、初期サービスの運用が開始され、OS、Public Regulated Service(消防隊や警察等政府から認可されたユーザ向けの暗号化された測位サービス)、サーチ&レスキューサービスの3つが提供されている。まだ衛星の数が不十分なため、サービスを利用できない時間帯や地域があるとしており、2020年の完全運用を目指して今後も2017年夏、2018年第3四半期に衛星の打ち上げが予定されている。

10.1.6. NavIC

NavIC(Navigation Indian Constellation)はISRO(Indian Space Research Organization:インド宇宙研究機関)が開発している、インドの独立した地域航法衛星システムである。衛星全7機で構成され、うち3機は軌道高度約36,000kmのGEO、4機は高度35,700km、傾斜角約30度のIGSOに投入されている。2013年に初号機が打ち上がり、2016年4月28日(JST)の打ち上げ成功により、7機体制が完成した。7機目の打ち上げでシステムが完成したことに伴い、その名称をIRNSS(Indian Regional Navigation Satellite System)からNavICへと変更し、現在はサービス開始に向けた試験を行っている。また、今後さらに2台の予備航行衛星を打ち上げることを予定している。地上では18箇所の基地局で、衛星測距やモニタリング、航法パラメータの伝達を行っている。

NavICのサービスは、インド本土とその周辺1,500km圏内の国々に提供される予定で、契約者のみで使用できるRestricted Services(RS)と、全ての人が利用できるStandard Positioning Services(SPS)の2種類が提供される予定である。精度に関してはインド洋周辺で20m、インド国内で10m程度となる見込みである。

10.1.7. SBAS

SBAS(Space-Based Augmentation System)とは衛星型補強システムのことで、広域ネットワークにおいてGNSS観測されたデータを主管制局で衛星軌道や衛星時計、電離層遅延量などの補正パラメータに変換し、衛星を経由して利用者に送信するため、測位精度の向上が見込まれる。

基本的に静止衛星を用いた航空機向けのシステムとしてそれぞれの国の航空安全当局から認証され運用されており、SBASを利用することにより、航空機の位置が正確に求められるため、安全で効率的な飛行経路の設定が可能となる。航空安全当局が認証していることから高い信頼性が担保されており、かつ国際規格が定められていることから、船舶、自動車などの航空以外での利用も進んでおり、たとえばカーナビでは、多くの機種が「SBAS対応」として販売されている。

各国のSBASとして米国のWAAS(Wide Area Augmentation System)や欧州のEGNOS(European Geostationary-Satellite Navigation Overlay Service)、日本のMSAS(MTSAT Satellite-based Augmentation System)、インドのGAGAN(GPS Aided Geo Augmented Navigation)などがある。

また、今後運用が予定されているSBASとして、ロシアのSDCM(System for Differential Corrections and Monitoring)、韓国のKASS(Korean Augmentation Satellite System)、中国のBD-SBAS(BeiDou SBAS)、EGNOSベースのSBASでアフリカ地域全体をカバーするSAFIR(Satellite navigation service for AFrica Region)がある。

10.2. 測位方式

10.2.1. 衛星測位システムによる測位の基本原理

GPS に代表される衛星測位システムは、地球の周囲を周回する複数の人工衛星（測位衛星）から発信される電波を利用して、地表とその周囲の未知点の 3 次元座標、及び時刻を決定するグローバルな測位システムである。

衛星測位システムを用いて位置決定を行う際、利用者側から衛星に向けて電波を発信する必要はない。また衛星からの電波を利用するため屋内や水中など電波が届かない場所ではシステムは機能しない。

衛星測位システムを利用する場合、全てのシステムに共通する基本データが 2 種類ある。一つは未知点と衛星との間の距離、もう一つは衛星の位置情報（航法メッセージ）である。これらは衛星からの電波を受信することで測定または取得される。実際に測位を行うにはさらにいくつかの補助情報が必要となる。

■衛星からの信号

測位衛星は測位のための様々な信号と情報を電波に乗せて常時送信している。この電波はそれ自体が情報を持っているのではなく、変調によって必要なデータを乗せることで情報を伝達する。受信側では逆に電波から必要なデータを取り出して測位に利用する。この情報伝送のための電波を「搬送波」という。またロシアの GLONASS を除く衛星システムでは CDMA（符号分割多元接続：Code Division Multiple Access）という信号方式が採用されており、同一システムの全ての衛星は同一周波数で信号を送信している。GLONASS は FDMA（周波数分割多元接続：Frequency Division Multiple Access）方式を採用しており、衛星毎に周波数が異なる。GLONASS 以外のシステムでは、衛星毎に PN 符号（Pseudo Noise Code）と呼ばれる測位符号が割り当てられており、この符号をもとに衛星を識別し、分離して受信することができる。PN 符号は一定のパターンで繰り返す疑似雑音で、衛星システム毎にビット率や符号長などが異なり、また同一システム内でも複数周波数帯の搬送波毎に別の符号が割り当てられているため、それぞれの符号に対応している受信機でなければ所要のデータを取り出すことはできない。

■距離の測定

衛星からの信号は搬送波に対して、PN 符号と航法メッセージのデジタルデータ信号によって変調（modulation）を行ったものである。変調方式については衛星システムや信号によって異なるが、例えば GPS 及び QZSS の L1-C/A コードでは BPSK（Bi-Phase Shift Key）方式が採用されている。

PN 符号によって距離を測定するには、自己相関を利用する。PN 符号 $p(t)$ の自己相関関数 $\phi(t)$ は次のようになる。

$$\phi(t) = E[p(t)p(t + \tau)] \quad (10.2-1)$$

ここで E は期待値を、 τ は時刻のずれを表す。PN 符号は白色雑音と同じ性質なので、

$$\phi(t) = \begin{cases} \sigma^2 & (\tau = 0) \\ 0 & (\tau \neq 0) \end{cases} \quad (10.2-2)$$

（ σ^2 は $p(t)$ の分散）

となり、 $\tau = 0$ のときピークとなりそれ以外では 0 となる。

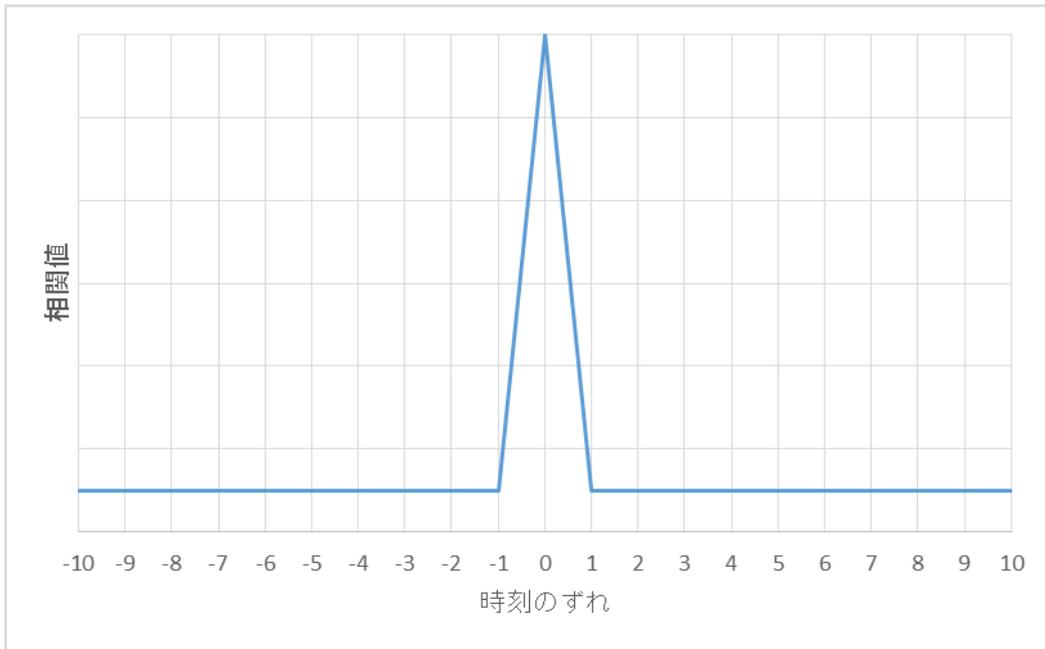


図 10.2-1 自己相関

受信機では、受信しようとしている衛星の PN 符号パターンを発生させる。受信機内で発生させた PN 符号パターンを「レプリカコード」と呼ぶ。受信機ではレプリカコードと受信した信号との相関が常にピークとなるようにコードの発生タイミングを調整する。この調整した発生タイミングが、衛星がコードを送信した時刻と受信機でそのコードを受信した時刻の差として測定される。電波は光速で伝搬するので、時刻差に光速を乗じることで衛星との距離が測定できる。ただし、こうして測定された距離には多くの誤差が含まれているため、「疑似距離」と呼ばれる。

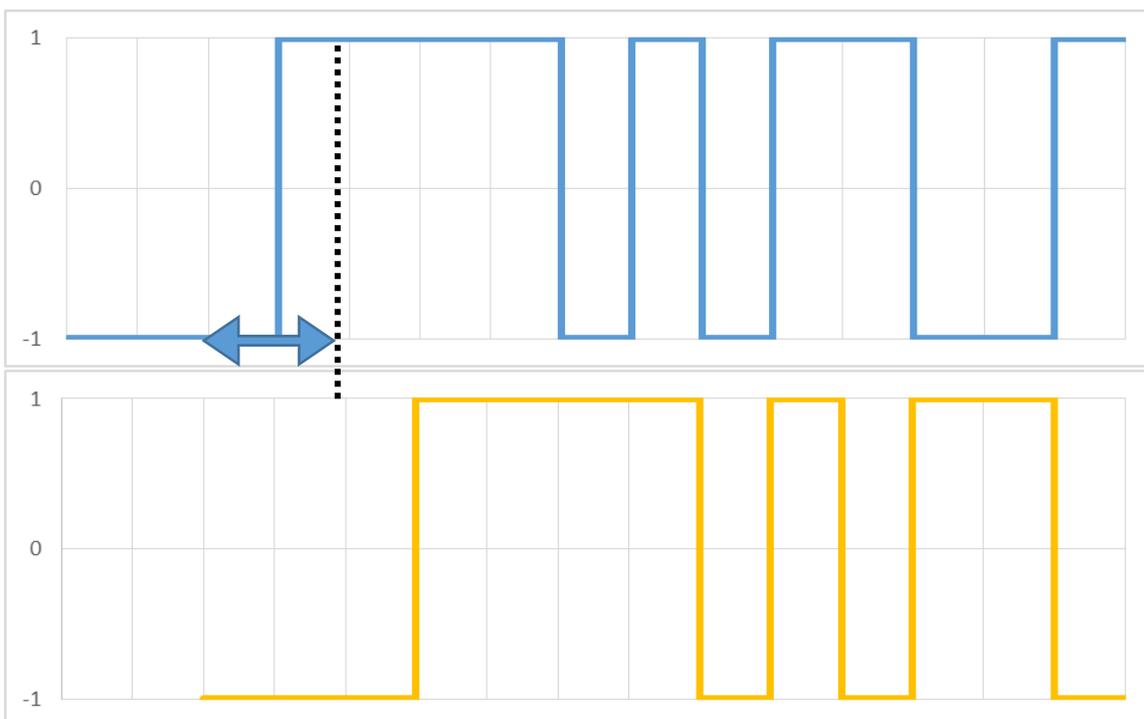


図 10.2-2 受信コード（上）とレプリカコード（下）

■衛星の位置

航法メッセージは前述の通り搬送波を変調して送信され、受信機では適切に復調を行う。航法メッセージには「エフェメリス」と呼ばれる軌道情報が含まれている。エフェメリスはその航法メッセージを送信した衛星自身の軌道情報で、ある時刻における衛星位置を求める際に使うパラメータが含まれる。航法メッセージにはエフェメリス以外に、その衛星システム全体の概略軌道情報である「アルマナック」や、電離層補正のためのパラメータ、衛星時計誤差の補正值、衛星自身の動作状態を表すヘルス情報などが含まれている。

表 10.2-1 例:GPS のエフェメリス

$IODE$	衛星軌道情報番号
C_{rs}	軌道補正係数
Δn	平均運動差
M_0	平均近点角
C_{uc}	軌道補正係数
e	離心率
C_{us}	軌道補正係数
\sqrt{A}	軌道半径
t_{oe}	エフェメリスエポック時刻
FIT	フィット間隔（エフェメリス有効期限）
C_{ic}	軌道補正係数
Ω_0	昇交点赤径
i_0	軌道傾斜角
C_{rc}	軌道補正係数
ω	近地点引数
$\dot{\Omega}$	Ω_0 の時間変化率
\dot{i}	i_0 の時間変化率

エフェメリスには有効期限が設けられており、当該時刻において有効であるエフェメリスのうち最も新しいものを選択し、衛星位置を求める。

■未知点座標値の算出

衛星までの距離と衛星位置がわかれば、3次元座標値 (x, y, z) と受信機の時計誤差 dT の4つを未知数として、未知点と衛星の間の幾何学的関係によって方程式が得られる。未知数が4つであるから4つの方程式が必要、すなわち同時に4つの衛星の位置と疑似距離が測定されていなければならない。

10.2.2. コード測位 (1 周波)

1 周波コード位相測位 (単独測位) は、衛星測位において最も基本的な測位方式である。既に述べたような手法によって疑似距離を算出し、エフェメリスによる衛星位置を用いて未知点の座標値を計算する。

単独測位の数学モデルを以下に示す。

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t) &= R_r^s(t) + c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Ion + \Delta Trop \\ R_r^s(t) &= \sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} \end{aligned} \quad (10.2-3)$$

$\rho_r^s(t)$: 測定された疑似距離 $R_r^s(t)$: 衛星と未知点の幾何学距離

c : 光速 ΔT^s : 衛星時計誤差 ΔT_r : 受信機時計誤差

ΔIon : 電離層遅延量 $\Delta Trop$: 対流圏遅延量

$X^s(t), Y^s(t), Z^s(t)$: 時刻 t における衛星位置

X_r, Y_r, Z_r : 未知点座標値

ΔT^s の衛星時計誤差はエフェメリスに含まれるパラメータによって求めることができる。 ΔIon の電離層遅延及び $\Delta Trop$ は衛星からの電波がそれぞれ電離層と対流圏を通過する際に生じる遅延である。これらは各遅延量のモデルと、航法メッセージ内のパラメータを用いて補正することが可能であるが、それだけでは正確ではない。特に電離層については航法メッセージに含まれる 8 つのパラメータで地球全体の補正を行うためその効果は電離層の影響を半減させる程度といわれている。観測地点の電離層の活動状況によっては大きな誤差が残留することになる。

(10.2-3)を解くためにテーラー展開によって線形化する。

$$\begin{aligned} &\rho_r^s(t) - \Delta Ion - \Delta Trop \\ &= R_{r0}^s(t) - \frac{X^s(t) - X_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta X_r - \frac{Y^s(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta Y_r \\ &\quad - \frac{Z^s(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta Z_r + c\Delta T_r \end{aligned} \quad (10.2-4)$$

行列表示

$$l = Ax$$

$$l = \begin{bmatrix} \rho_r^1(t) - \Delta Ion^1 - \Delta Trop^1 \\ \rho_r^2(t) - \Delta Ion^2 - \Delta Trop^2 \\ \vdots \\ \rho_r^n(t) - \Delta Ion^n - \Delta Trop^n \end{bmatrix} \quad (10.2-5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{X^1(t) - X_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & -\frac{Y^1(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & -\frac{Z^1(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & c \\ -\frac{Y^2(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & -\frac{Y^2(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & -\frac{Z^2(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X^n(t) - X_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & -\frac{Y^n(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & -\frac{Z^n(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & c \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

$R_{r0}^s(t), X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0}$: 幾何学距離、未知点の座標値の初期値
 $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, \Delta T$: 座標値、受信機時計誤差の初期値からの変化量

(10.2-5)では未知数が $\Delta X_r, \Delta Y_r, \Delta Z_r, \Delta T$ の4つになる。未知数には初期値を設定し、得られた変化量で初期値を更新する。この計算を数回繰り返すことで、測位結果が得られる。

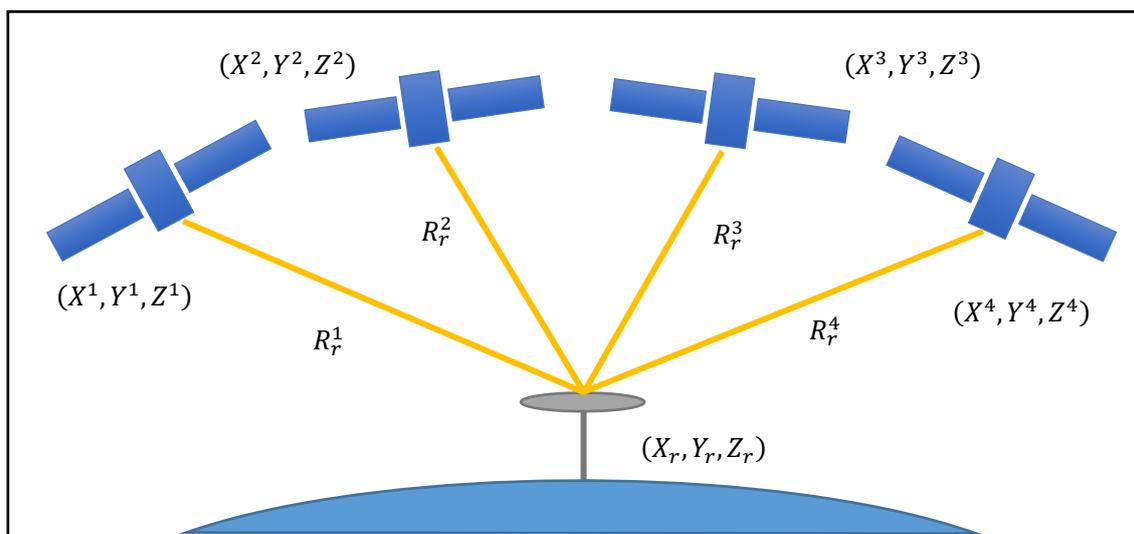


図 10.2-3 コード測位

また、搬送波位相も同時に観測されている場合「キャリアスムービング」というテクニックを用いることで、コード測位の測位精度を向上させることができる。搬送波位相についての詳細は **RTK** の項で述べるが、搬送波位相観測値を元に得られる疑似距離は、コードによる疑似距離に比べ圧倒的に測定値のばらつきが少ない。しかし真の距離と一定のバイアス分だけ誤差を含んでいる。それに比べコード疑似距離は測定値のばらつきは大きい、バイアスのような誤差は含んでいない。搬送波位相疑似距離に含まれるバイアスは観測が中断されない限り一定であるので、搬送波位相疑似距離のある時刻間における変化量は、真の距離の変化量にほぼ等しい。この搬送波位相疑似距離の変化量を用いて、コード疑似距離を修正し測位

精度の向上を図る方法がキャリアスムージングである。

10.2.3. コード測位 (2 周波)

2 周波コード測位の大きな利点の一つは電離層遅延による疑似距離誤差が除去できることである。電離層遅延量は周波数に依存する。

式(10.2-3)について周波数に関する項をまとめると、

$$\rho_r^s(t) = R_r^s(t) + \Delta Ion + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \quad (10.2-6)$$

となる。

このとき受信機で、同じ衛星から異なる周波数の疑似距離が測定されている場合、周波数毎に分けて表すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \rho_{r1}^s(t) &= R_{r1}^s(t) + \Delta Ion_1 + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \\ \rho_{r2}^s(t) &= R_{r2}^s(t) + \Delta Ion_2 + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \end{aligned} \quad (10.2-7)$$

疑似距離の測定値と電離層遅延量以外は等しいため差分を取る。

$$\rho_{r1}^s(t) - \rho_{r2}^s(t) = \Delta Ion_1 - \Delta Ion_2 \quad (10.2-8)$$

ここで電離層遅延量は定数 A と周波数 f_i を用いて

$$\Delta Ion_i = \frac{A}{f_i^2} \quad (10.2-9)$$

であるから

$$\Delta Ion_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta Ion_1 \quad (10.2-10)$$

となり

$$\Delta Ion_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\rho_{r2}^s(t) - \rho_{r1}^s(t)) \quad (10.2-11)$$

と電離層遅延量を求めることができる。後は得られた遅延量を用いて単独測位を行えば電離層遅延の影響をキャンセルした測位を行うことができる。

これが 2 周波コードによる電離層フリー結合である。

10.2.4. QZSS L1S (DGPS) 補強

DGPS (ディファレンシャル GPS) は相対測位に分類される測位方式の一つである。相対測位とは位置が正確に分かっている点 (= 基準局) での観測値を元に、未知点 (= 移動局) 側の誤差を補正する方式である。

DGPS では基準局で観測された疑似距離と、正確な座標値から算出した衛星との真の距離から測定誤差を求める。この測定誤差を元に移動局側での測位結果を補正して精度を改善する。これによって両地点での測定誤差のうち、共通する成分を打ち消すことができる。移動局と基準局の距離は最大数百 km まで、それを超えると精度が劣化する。また、移動局と基準局で同一の衛星が最低 4 つ観測されていなければならない。

移動局と基準局で共通する誤差成分とは、衛星時計誤差、衛星位置誤差、対流圏遅延、電離層遅延である。衛星時計誤差については、1周波コード測位の項で述べた通り、航法メッセージのパラメータを使って補正することができるが、それでもなお残る残差が存在する。ある衛星についての衛星時計誤差は全世界共通であるため、移動局と基準局の距離に依存しない。

エフェメリスから求めた衛星位置にも誤差が含まれている。ただし衛星位置誤差のうち、測位誤差に影響を与えるのは、観測点から衛星を見た方向すなわち視線方向の成分である。そのため、移動局と基準局の距離が大きく離れている場合、衛星の視線方向の成分が変わってしまい、DGPS 測位の精度が劣化する。対流圏遅延、電離層遅延については、数百 km の距離ではそれほど大きく誤差が変化しないとされているため、そのまま補正量を差し引くことで誤差を修正する。これらの誤差については、観測点の高さが誤差量に影響するため、移動局と基準局の高さが大きく異なる場合、両観測点における対流圏遅延量、電離層遅延量に差が生じ、測位結果が劣化する可能性がある。

これらの他に測位結果に大きく影響を与える誤差要因として、「マルチパス」が挙げられる。GNSS で使用されているマイクロ波は建物の壁面や地面などで容易に反射してしまう。この反射波は直接波と異なる経路でアンテナに到達するため、マルチパスと呼ばれる。マルチパスは直接波に比べ長い経路をたどっているため、受信機がマルチパスを受信すると、コードによって測定される距離が実際より長くなってしまい、測位結果に大きな誤差として現れる。しかしマルチパスの影響はアンテナの設置されている周囲の環境に依存するため、DGPS では補正することができない。むしろ基準局側でマルチパスを受信してしまうと、その影響が DGPS 補正量にも影響し、移動局側での測位精度が劣化してしまう。

以上のようにして基準局側で求めた測位誤差の補正量を使って移動局側での測位を行う。(10.2-3)式を修正して

$$\rho_r^s(t) = R_r^s(t) + C_{DGPS} + c\Delta T_r \quad (10.2-12)$$

C_{DGPS} : DGPS 補正值

となり、あとは単独測位と同様に測位解を求める。

リアルタイムで DGPS を行う場合は、この補正量を何らかの通信手段によって移動局側に伝送する必要がある。例えば海上保安庁が行っている船舶用 DGPS サービスでは 300kHz 前後の電波によって DGPS 補正情報を配信している。

実用準天頂衛星のサブメータ級測位サービスでは、ディファレンシャル補正情報を準天頂衛星の L1S 信号に乗せて放送することになっている。L1S 信号では地上監視局位置と、監視局における衛星毎の疑似距離補正值などを配信する。これによって 1~2m 程度（サブメータ級）の精度で測位を行うことができる。衛星の信号を通して配信されるため、準天頂衛星の信号が受信できていれば、従来の DGPS では必要であった地上の通信設備等が必要なくなり、ユーザは実質単独でサブメータ級の測位結果を得ることができる。また、L1S 信号ではディファレンシャル補正情報の他に、軌道時刻予報、衛星ヘルス情報なども配信する。さらに災害時には災危通報メッセージも配信する予定である。

10.2.5. RTK

RTK (Real Time Kinematic) は相対測位の一つである。前節の DGPS も相対測位であるが、RTK が DGPS と大きく異なる点は、距離の測定値として疑似距離ではなく搬送波位相を使用することである。搬送波位相とは、搬送波の波数のことで、搬送波が衛星から送信されて受信されるまでに位相が 2π から 0 に戻った回数である。搬送波位相の測定値に搬送波の波長を乗じると、距離の測定値となる。搬送波位相を用いる理由は、コードによる距離の測定には誤差が多いが、搬送波位相の測定値には測定誤差が少ないことである。ただし、搬送波位相測定値にはアンビギュイティと呼ばれる整数値バイアスが含まれており、これを正しく求めることが搬送波位相を使った測位の最重要課題である。また、アンビギュイティは衛星電波の受信が継続されている限り一定である。

$$\Phi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda} R_r^s(t) + N + f(\Delta T^s + \Delta T_r) \quad (10.2-13)$$

$\Phi_r^s(t)$: 搬送波位相測定値 λ : 搬送波波長

$R_r^s(t)$: 衛星との幾何学距離 N : アンビギュイティ

f : 搬送波周波数 ΔT^s : 衛星時計誤差 ΔT_r : 受信機時計誤差

搬送波相対測位では式(10.2-13)について、いろいろな差分をとることで誤差を取り除く。

まず基準局と移動局で衛星 j についての方程式の差分をとる。

移動局を観測点 A、基準局を観測点 B とする。

$$\begin{aligned} \Phi_A^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_A^j(t) + N_A^j + f^j(\Delta T^j + \Delta T_A) \\ \Phi_B^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_B^j(t) + N_B^j + f^j(\Delta T^j + \Delta T_B) \end{aligned} \quad (10.2-14)$$

$$\Phi_A^j(t) - \Phi_B^j(t) = \frac{1}{\lambda_j} \{R_A^j(t) - R_B^j(t)\} + (N_A^j - N_B^j) + f^j(\Delta T_A - \Delta T_B) \quad (10.2-15)$$

差分を取ることで、衛星時計誤差が取り除かれている。

さらに、衛星 j と衛星 k についての差分をとる。簡単のため $f_j = f_k$ とする。

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \Delta T_{AB} \\ \Phi_{AB}^k(t) &= \frac{1}{\lambda_k} R_{AB}^k(t) + N_{AB}^k + f^k \Delta T_{AB} \end{aligned} \quad (10.2-16)$$

$$\Phi_{AB}^j(t) - \Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \{R_{AB}^j(t) - R_{AB}^k(t)\} + (N_{AB}^j - N_{AB}^k) \quad (10.2-17)$$

$$\Phi_{AB}^{jk} = \frac{1}{\lambda} R_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}$$

受信機時計誤差が相殺されている。また数式上に表現していないが、(10.2-17)の時点で対流圏遅延と電離層遅延も相殺されている。

なおここまで式中に以下の差分表記を使用している。

$$\begin{aligned} \blacksquare_{AB}^j &= \blacksquare_A^j - \blacksquare_B^j \\ \blacksquare_{AB}^{jk} &= \blacksquare_{AB}^j - \blacksquare_{AB}^k \end{aligned} \quad (10.2-18)$$

これを 4 つ以上の衛星の組み合わせについて方程式を作り、最小二乗法などで解くことができる。しかしここで求められたアンビギュイティは実数値である。真のアンビギュイティは整数値であるから、得られた実数値アンビギュイティを元に最も確からしい整数値を探索する必要がある。整数値アンビギュイティの解法は OTF (On The Fly) 法、最小二乗アンビギュイティ決定法、LAMBDA (Least squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) 法などがある。整数値アンビギュイティが求められれば、その値を使用して測位計算を行う。整数値アンビギュイティが決定した状態で得られた測位解を「Fix 解」、整数値アンビギュイティが求められておらず、実数値アンビギュイティを用いて得られた測位解を「Float 解」と呼ぶ。

Kinematic 測位では、測位を始めた段階で最初にアンビギュイティの決定を行い（初期化）、その得られたアンビギュイティを保持した状態で相対測位を行うことで、移動局が静止していなくても精密な測位結果が得られる。

Real Time Kinematic 測位では、リアルタイムで測位を行うため、基準局での観測値を何らかの通信手段で移動局側に伝送する必要がある。

搬送波位相を使った測位において、複数の周波数における搬送波位相測定値を使うことができると、マルチパスの検出や、サイクルスリップと呼ばれる搬送波位相測定値の飛びを検出することができ、またアンビギュイティの決定も正確になるため、測位精度が向上する。

10.2.6. QZSS L6 (CLAS) 補強

CLAS (Centimeter Level Augmentation Service) 方式は準天頂衛星のセンチメートル級測位サービスで採用されている測位方式である。CLAS は準天頂衛星初号機「みちびき」から配信されていた実証実験用補強システムである CMAS (CentiMeter class Augmentation System) をベースに開発され、実用準天頂衛星から配信される予定である。CMAS からの変更点は、補強対象信号の追加（マルチ GNSS、マルチ信号）、サービス範囲の拡大、RTCM 規格への準拠、などである。

CLAS では国土地理院が日本全国に約 1,300 点整備している電子基準点のうち、250～300 点を基準局としており、それらから得た観測データをもとに、衛星軌道誤差、衛星時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延、といった誤差要因毎に補強情報を生成する。これらの補強情報の表現方法には、観測空間表現 (OSR: Observation Space Representation) と状態空間表現 (SSR: State Space Representation) がある。従来の RTK のように基準局の観測データを直接用いる方式が OSR、基準局の観測データから生成された補強情報を用いる方式が SSR である。SSR では OSR に比べて補正データの容量を極小化できるため、CLAS では SSR が採用されている。

各電子基準点から得られたデータは、CLAS のセンタシステムに集約され、補強情報が生成される。生成

された補強情報は準天頂衛星のマスターコントロール局に送られ、そこから準天頂衛星にアップリンクされる。準天頂衛星からは補強情報が L6 信号として地上に配信される。利用者は RTK のように基準局を設置する必要がなく、単独でセンチメートル級の精密測位を行うことができるため、測量や農業、IT 施工などの分野での利用が期待されている。

10.2.7. MADOCA-PPP AR

MADOCA とは複数 GNSS 対応高精度軌道・時刻推定ツール (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) のことで、PPP (単独搬送波位相測位: Precise Point Positioning) や PPP-AR (Ambiguity Resolution) に必要な複数 GNSS の軌道・時刻等を高精度に推定するツールである。

PPP とは、世界中のモニタ局で得られた観測データを元に高精度に衛星の軌道や時刻を推定し、この結果を元にした補強情報を利用することで、搬送波位相観測値を用いた精密単独測位を行う方式である。RTK に比べて、利用者が基準局を設置する必要がなく、また補強情報がグローバルなデータであるため、測位精度の地域依存性がないことが特徴である。

ただし PPP は相対測位ではないため、RTK の項で述べたようなアンビギュイティを解くことが困難である。しかし近年、数多くのモニタ局で衛星を観測することによって、PPP においても AR (アンビギュイティを解くこと) が可能な技術が開発されてきた。これが PPP-AR である。

MADOCA では MGM-net (Multi-GNSS Monitoring Network) のモニタ局から得たデータをもとに、高精度な衛星軌道と時刻の推定を行う。得られた補強情報はインターネット経由で配信される。インターネットでの配信により準天頂衛星の電波を直接受信できない地域においても、高精度な測位が可能となっている。

PPP の課題として、初期収束時間・再収束時間を要することが挙げられる。これは利用端末の場所に依存する誤差 (電離層、対流圏による影響など) が要因となり、搬送波位相アンビギュイティを精度良く推定するまでに時間を要するためである。利用者は近傍の観測点において推定された補正量を地上インフラ等によって受信して PPP 測位に取り込むことで収束の高速化を行うことができる。MADOCA-PPP においては、これらの補正量をローカル補正情報と称し、従来 30 分程度かかる収束時間を 1 分以内に短縮させることが可能とされている。

10.3. 略語表

表 10.3-1 略語表

ADC	Analog-to-Digital Converter
AGC	Automatic Gain Controller
AR	Ambiguity Resolution
BD-SBAS	BeiDou SBAS
BINEX	Binary Exchange format
BPSK	Bi-Phase Shift Key(ing)
C/A	Coarse/Access(Code)
C/N	Carrier-to-Noise (ratio)
CAM	Constant Modulus Algorithm
CDMA	Code Division Multiple Access
CLAS	Centimeter Level Augmentation Service
CMAS	CentiMeter-class Augmentation System
CRPA	Controlled Reception Pattern Antenna
CS	Commercial Service
CW	Continuous Wave
DC Report	Satellite Report for Disaster and Crisis Management
DGNSS	Differential GNSS
DGPS	Differential GPS
DHS	Department of Homeland Security
DLL	Delay Locked Loop
DME	Distance Measuring Equipment
DMP	Dynamic Map Planning Co., Ltd.
DOA	Direction Of Arrival
DOP	Dilution of Precision
DR	Dead Reckoning
DRMS	Distance RMS
DSP	Digital Signal Processor
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EGNOS	European Geostationary-Satellite Navigation Overlay Service
ENRI	Electric Navigation Research Institute
ENU	East, North, Up
FDAF	Frequency Domain Adaptive Filter
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform

FOC	Full Operational Capability
FOI	Försvarets forskningsinstitut
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GCP	Ground Control Point
GDOP	Geometrical DOP
GEO	Geostationary Orbit
GEONET	GNSS Earth Observation Network System
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GRS	Geodetic Reference System
GSI	Geospatial Information Agency of Japan
GSO	Geosynchronous orbit
HDOP	Horizontal DOP
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICD	Interface Control Document
IDW	Inverse Distance Weighting
IERS	International Earth Rotation and Reference System Service
IF	Intermediate Frequency
IFFT	Inverse FFT
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IODE	Issue of Data Ephemeris
IOV	In-Orbit Validation
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IR-ODV	Infrared Omni-Directional Vision
IS	Interface Specification
ISRO	Indian Space Research Organization
ITRF	IERS Terrestrial Reference Frame
ITS	Intelligent Transport Systems
J/S	Jammer to Signal (ratio)
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency

JSGI	Japanese Standards for Geographic Information
JST	Japan Standard Time
KASS	Korean Augmentation Satellite System
LAMBDA	Least squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LNA	Low Noise Amplifier
LOS	Line-of-Sight
MADOCA	Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MGM-net	Multi-GNSS Monitoring Network
MMS	Mobile Mapping System
MMSE	Minimum Mean Square Error
MSAS	MTSAT Satellite Augmentation System
MTSAT	Multi-functional Transport Satellite
NavIC	Navigation Indian Constellation
NCO	Numerically Controlled Oscillator
NLOS	Non-Line-of-Sight
NMA	Navigation Message Authentication
NMEA	National Marine Electronics Association
OCS	Operational Control System
OS	Open Service
OSR	Observation Space Representation
OTF	On The Fly
P	Protect, Precision (Code)
PDOP	Position DOP
PLL	Phase Locked Loop
PN.PRN	Pseudo Random Noise (Code)
PNT	Positioning, Navigation and Timing
PPD	Privacy Protection Device / Personal Privacy Device
PPP	Precise Point Positioning
PRS	Public Regulated Service
PS	Performance Standard
PSD	Power Spectral Density
QZO	Quasi-Zenith Orbit
QZS/QZSS	Quasi-Zenith Satellite (System)
RF	Radio Frequency
RINEX	Receiver Independent Exchange Format

RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Error
RNSS	Regional Navigation Satellite System
RS	Restricted Services
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Service
RTK	Real Time Kinematic (positioning)
S/N	Signal-to-Noise (ratio)
SAFIR	Satellite navigation service for AFRICA Region
SAIF	Submeter-class Augmentation with Integrity Function
SBAS	Space/Satellite Based Augmentation System
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SDR	Software Defined Radio
SD/R	Semi-Dynamic Reduction
SF	Single Frequency
SFAP	Space-Frequency Adaptive Processing
SIS	Signal in Space
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SLAS	Submeter Level Augmentation Service
SN.SNR	Signal to Noise Ratio
SoL	Safety of Life
SPAC	Satellite Positioning Research and Application Center
SPS	Standard Positioning Services
SQM	Signal Quality Monitoring
SSR	Space State Representation
STAP	Space-Time Adaptive Processing
STFT	Short-Time Fourier Transform
TACAN	Tactical Air Navigation
TDOA	Time Difference Of Arrival
TDOP	Time DOP
TEC	Total Electron Content
TESLA	Timed Efficient Stream Loss-Tolerant Authentication
TLE	Two Line Elements
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
TTFB	Time To First Fix
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
URE	User Range Error
UTC	Coordinated Universal Time

VDOP	Vertical DOP
VRS	Virtual Reference Station
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS	World Geodetic System

10.4. 参考文献

参考文献 (3 章)

[1] <http://jyy.nict.go.jp/tsp/PubNtp/index.html>

参考文献 (5 章)

[2] 中川弘之ほか, 2009, 「GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について」『国土地理院時報 2009 No.118』

[3] NGA, 2014, 「NATIONAL GEOSPATIAL-INTELLIGENCE AGENCY (NGA) STANDARDIZATION DOCUMENT DEPARTMENT OF DEFENSE WORLD GEODETIC SYSTEM 1984 Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems Version 1.0.0」

[4] 宇宙航空研究開発機構, 2016, 「準天頂衛星システム ユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS) 1.8 制定版」

[5] アイサンテクノロジー株式会社: 「地球上の位置を表す理論とその仕組み」

[6] アイサンテクノロジー株式会社: 「中根顧問の部屋」

https://atmsp.aisantec.com/atmspark/modules/info_m2/

[7] 国土地理院: 「セミ・ダイナミックな測地系の構築に向けた取り組みについて」

<http://www.gsi.go.jp/REPORT/JIHO/vol110-1.html>

[8] 国土地理院: 報道発表資料 「電子基準点の新しい「日々の座標値 (F 3)」ーより高い精度で地殻変動の監視が可能にー」

<http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi60002.html>

[9] 日本測地学学会: 「測地学テキスト」

<http://www.geod.jpn.org/web-text/#gsc.tab=0>

参考文献 (6 章)

[10] IGS International GNSS Service

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

[11] Van Dierendonck, A.J., Fenton, P. and Ford, T., “Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver,” Navigation, Journal of the Institute of Navigation, Vol.39, No.3, pp.265-283, USA, Fall 1993.

[12] L. Garin, J. Rousseau, “Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code and Carrier,” Proceedings of the ION GPS-97, pp.559-568, Kansas City, MO, September 1997.

[13] Paul D Groves, Ziyi Jiang, Morten Rudi and Philip Strode, “A Portfolio Approach to NLOS and Multipath Mitigation in Dense Urban Areas,” Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the ION Satellites Division, pp3231-3247, ION GNSS+ 2013, Nashville, Tennessee, September, 2013.

[14] RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning

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

[15] 高須知二, 久保信明, 安田明生, “RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価 および

応用," GPS/GNSS Symposium 2007, Tokyo, Japan, November 2007.

- [16] Groves, P. D. and Z. Jiang, "Height Aiding, C/N0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas" *Journal of Navigation*, Vol. 66, No. 5, 2013, pp. 653–659.
- [17] Jun-ichi Meguro, Taishi Murata, Jun-ichi Takiguchi, Yoshiharu Amano, and Takumi Hashizume, "GPS Multipath Mitigation for Urban Area Omnidirectional Infrared Camera," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Volume 10 Issue 1, pp.22-30, March 2009.
- [18] Taro Suzuki, "Multipath Mitigation Using Omnidirectional Infrared Camera for Tightly Coupled GPS/INS Integration," *Proceedings of ION GNSS 2011*, pp.2914-2922, 2011.
- [19] Taro Suzuki and Nobuaki Kubo, "N-LOS GNSS Signal Detection Using Fish-Eye Camera for Vehicle Navigation in Urban Environments," *Proceedings of ION GNSS 2014*, 2014.
- [20] Shodai Kato, Mitsunori Kitamura, Taro Suzuki, Yoshiharu Amano, "NLOS Satellite Detection Using a Fish-Eye Camera for Improving GNSS Positioning Accuracy in Urban Area," *Journal of Robotics and Mechatronics* Volume 28, Number 1, pp.31-39, February 2016.
- [21] Paul D. Groves, "Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons," *Journal of Navigation*, vol. 64, no.3, pp.417-430, 2011.
- [22] 荒川尚吾, 竹内栄二郎, 大野和則, 田所諭, "三次元地図を用いた GPS 衛星可視性に基づく複数測位解生成による移動体の位置推定," 第 18 回ロボティクスシンポジウム 2013 講演論文集, pp.155-162, 2013.

参考文献 (7 章)

- [23] Wales, B., "National Risk Estimate: Risks of United States Critical Infrastructure from Global Positioning System Disruptions," DHS Homeland Infrastructure Threat and Risk Analysis Center, November 9, 2011.
- [24] 福島荘之介, 齊藤真二, "PPD (個人用保護デバイス) による GPS への干渉," 平成 26 年度第 2 回電波航法研究会, 2014 年 9 月 19 日.
- [25] Mitch, R., Dougherty, R., Psiaki, M., Powell, S., O'Hanlon, B., Bhatti, J., and Humphreys, T., "Signal Characteristics of Civil GPS Jammers," *ION GNSS 2011*, Portland, OR, September 2011.
- [26] Kuusniemi, H., Airos, E., Bhuiyan, M, and Kroger, T., "GNSS jammers: how vulnerable are consumer grade satellite navigation receivers?," *European Journal of Navigation*, Vol. 10, No. 2, pp. 14-21, 2012.
- [27] ICD-GPS-200C, "GPS Interface Control Document, NAVSTAR GPS Space Segment / Navigation User Interfaces," IRN-200C-004, 2000.
- [28] Curry, C., "SENTINEL Project: Report on GNSS Vulnerabilities," Chronos Technology, April 2014.
- [29] Federal Aviation Administration, "GPS Privacy Jammers and RFI at Newark," Navigation Team AJP-652 Results, March 2011.
- [30] Yonhap News, "N. Korea's GPS jamming targeted at aircraft navigation systems," April 5, 2016.
- [31] Lagier, E., Craig, D., and Benschouf, P., "JAMFEST – A Cost Effective Solution to GPS Vulnerability Testing," *Journal of Global Positioning Systems*, Vol. 3, No. 1-2, pp. 40-44, 2004.
- [32] FAA, "Flight Advisory: GPS Interference Testing CHLK GPS 16-08," China Lake, California, June 07-30, 2016.

- [33] Rick Gladstone, "Iran Shows Video It Says Is of U.S. Drone," *The New York Times*, December 8, 2011.
- [34] Kerns, A., Shepard, D., Bhatti, J., and Humphreys, T., "Unmanned Aircraft Capture and Control Via GPS Spoofing," *Journal of Field Robotics*, Vol. 31, No. 4, pp. 617-636, 2014.
- [35] *The Moscow Times*, "The Kremlin Eats GPS for Breakfast," October 21, 2016.
- [36] Lin, H. and Qing, Y., "GPS Spoofing: Low-cost GPS simulator," DEFCON23, Las Vegas, NV, August 6-9, 2015.
- [37] Humphreys, T., Ledvina, B., Psiaki, M., O'Hanlon, B., and Kintner, P., "Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer," ION GNSS+ 2013, Nashville, TN, September 2013.
- [38] Bastide, F., Akos, D., Macabiau, C., and Roturier, B., "Automatic gain control (AGC) as an interference assessment tool," ION GPS/GNSS 2003, Portland, OR, September 2003.
- [39] Bhuiyan, M., Kuusniemi, H., Soderholm, S., and Airos, E., "The Impact of Interference on GNSS Receiver Observables – A Running Digital Sum Based Simple Jammer Detector," *Radioengineering*, Vol. 23, pp. 898-906, 2014.
- [40] Tani, A. and Fantacci, R., "Performance Evaluation of a Precorrelation Interference Detection Algorithm for the GNSS Based on Nonparametrical Spectral Estimation," *IEEE Systems Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 20-26, 2008.
- [41] Borre, K., Akos, D., Bertelsen, N., Rinder, P., and Jensen, SH., "A Software-Defined GPS and Galileo Receiver: A Single-Frequency Approach," Birkhaeuser, Boston, 2007.
- [42] Axell, E., Eklof, F., Johansson, P., Alexandersson, M., and Akos, D., "Jamming Detection in GNSS Receivers: Performance Evaluation of Field Trials," *NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 62, No. 1, pp. 73-82, 2015.
- [43] Lindstrom, J., Akos, D., Isoz, O., and Junered, M., "GNSS Interference Detection and Localization using a Network of Low Cost Front-End Modules," ION GNSS 2007, Fort Worth, TX, September 2007.
- [44] Isoz, O., Balaei, A., and Akos, D., "Interference Detection and Localization in the GPS L1 Band," International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2010.
- [45] Hegarty, C., Van Dierendonck, A., Bodyn, D., Tran, M., Kim, T., and Grabowski, J., "Suppression of Pulsed Interference through Blanking," IAIN World Congress, San Diego, CA, June 2000.
- [46] Chien, YR., "Design of GPS Anti-Jamming Systems Using Adaptive Notch Filters," *IEEE Systems Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 451-460, 2013.
- [47] Raimondi, R., Julien, O., Machabiau, C., and Bastide, F., "Mitigating Pulsed Interference Using Frequency Domain Adaptive Filtering," ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, September 2006.
- [48] Rounds, S., "Jamming Protection of GPS Receivers – Part II: Antenna Enhancements," *GPS World*, Vol. 15, No. 2, pp. 38-45, February 2004.
- [49] Borio, D., Camoriano, L., Savasta, S., and Presti, L., "Time-Frequency Excision for GNSS Application," *IEEE Systems Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 27-37, 2008.
- [50] Chen, YH., Lo, S., Akos, D., De Lorenzo, D., and Enge, P., "Validation of a Controlled Reception Pattern Antenna (CRPA) Receiver Build From Inexpensive General-Purpose Elements During Several Live-jamming Test Campaigns," International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, CA, January 27-29, 2013.
- [51] Fernandez-Prades, C., Arribas, and J., Closas, P., "Robust GNSS Receivers by Array Signal Processing: Theory

and Implementation,” Proceedings of the IEEE, Vol. 104, No. 6, pp. 1207-1220, 2016.

- [52] Ahmad, Z. and Yaoliang, S., “GNSS Interference Mitigation By Null Steering Antenna Utilizing Space Time Adaptive Processing,” Journal of Space Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 28-32, 2015.
- [53] Shepard, D. and Humphreys, T., “Characterization of Receiver Response Attacks,” ION GNSS 2011, Portland, OR, September 2011.
- [54] Cavaleri, A., Motella, B., and Pini, M., “Detection of spoofed GPS signals at code and carrier tracking level,” The 5th Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands, December 8-10, 2010.
- [55] Pini, M., Fantino, M., Cavaleri, A., Ugazio, S., and Lo Presti, L., “Signal Quality Monitoring Applied to Spoofing Detection,” ION GNSS 2011, Portland, OR, September 2011.
- [56] Psiaki, M., Powell, S., and O’Hanlon, B., “GNSS Spoofing Detection Using High-Frequency Antenna Motion and Carrier-Phase Data,” ION GNSS+ 2013, Nashville, TN, September 16-20, 2013.
- [57] Psiaki, M., O’Hanlon, B., Powell, S., Bhatti, J., Wesson, K., Humphreys, T., and Schofield, A., “GNSS Spoofing Detection Using Two-Antenna Differential Carrier Phase,” ION GNSS+ 2014, Tampa, FL, September 8-12, 2014.
- [58] Manickam, S. and O’Keefe, K., “Using Tactical and MEMS Grade INS to Protect Against GNSS Spoofing in Automotive Application,” ION GNSS+ 2016, Portland, OR, September 12-16, 2016.
- [59] Banville, S. and Van Diggelen, F., “Precise GNSS for Everyone: Precise Positioning Using Raw GPS Measurements from Android Smartphone,” GPS World, November 2016.
- [60] Daneshmand, S., Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., and Lachapelle, G. “A Low-Complexity GPS Anti-Spoofing Method Using a Multi-Antenna Array,” ION GNSS 2012, Nashville, TN, September 18-21, 2012.
- [61] Konovaltsev, A., Caizzone, S., Cuntz, M., and Meurer, M., “Autonomous Spoofing Detection and Mitigation with a Miniaturized Adaptive Antenna Array,” ION GNSS+ 2014, Tampa, FL, September 8-12, 2014.
- [62] Daneshmand, S., Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., and Lachapelle, G. “Low-Complexity Spoofing Mitigation,” GPS World, December 2011.
- [63] 菊間信良, “アダプティブアンテナ技術,” オーム社, 2003.
- [64] Appel, M., Konovaltsev, A., and Meurer, M., “Robust Spoofing Detection and Mitigation based on Direction of Arrival Estimation,” ION GNSS+ 2015, Tampa, FL, September 14-18, 2015.
- [65] Kerns, A., Wesson, K., and Humphreys, T., “A Blueprint for Civil GPS Navigation Message Authentication,” IEEE/ION PLANS, Monterey, CA, May 2014.
- [66] Perrig, A., Canetti, R., Tygar, J., and Song, D., “The TESLA Broadcast Authentication Protocol,” CryptoBytes, Vol. 5, No. 2, pp. 2-13, 2002.

参考文献 (8 章)

[67]<http://nuand.com/>

[68]<https://greatscottgadgets.com/hackrf/>

[69]<http://www.skydelsolutions.com/en/>

[70]<https://github.com/osqzss/gps-sdr-sim>

[71]Humphreys, T., Ledvina, B., Psiaki, M., O’Hanlon, B., and Kintner, P., “Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer,” ION GNSS+ 2013, Nashville, TN, September 2013.

