

平成 27 年度戦略的イノベーション創造プログラム(衛星
測位活用に向けた基礎評価に関する調査)
報告書

平成 28 年 3 月 18 日

衛星測位活用検討コンソーシアム
代表機関:アイサンテクノロジー
共同機関:宇宙航空研究開発機構
東京海洋大学
衛星測位利用推進センター
構造計画研究所

目次

1	概要	4
1.1	目的	4
1.2	実施内容	4
1.3	体制と分担	4
2	調査結果概要	6
2.1	測位率と測位精度	6
2.2	都市間高速における衛星測位の可用性	7
2.3	走行環境による影響	8
2.4	マルチパス対策の検討	9
2.5	3次元地図の利用と電波伝搬シミュレーション	9
2.6	本年度調査での判明事項	10
3	計測走行	11
3.1	概要	11
3.2	機器構成	12
3.3	使用機器	12
3.3.1	受信機	12
3.3.2	アンテナ	14
3.3.3	計測車両	15
3.3.4	その他の機材	16
3.4	計測経路	16
3.4.1	コース1:都心一般道(1)	16
3.4.2	コース2:都心一般道(2)	17
3.4.3	コース3:都市間高速(1)	18
3.4.4	コース4:都市間高速(2)	19
3.5	計測時間帯と衛星配置	21
3.5.1	計測時間帯	21
3.5.2	衛星配置	23
4	データ解析方式	29
4.1	対象衛星システム	29
4.2	測位方式	29
4.3	解析方式の組み合わせ	30
5	データ評価の方法	31
5.1	参照座標	31
5.1.1	MMS 精度検証	31

5.1.2	地殻変動補正	32
5.2	評価方法	33
5.2.1	位置精度評価	33
5.2.2	可用性評価	34
5.2.3	マルチ GNSS の評価	34
5.2.4	測位方式に関する評価	35
5.2.5	地上環境の影響評価	35
5.2.6	電離層遅延の評価	35
6	解析及び評価結果	37
6.1	位置精度および可用性評価	37
6.1.1	都心一般道(1)銀座周辺	37
6.1.2	都心一般道(2)	39
6.1.3	都市間高速(1)	43
6.1.4	都市間高速(2)	45
6.2	マルチ GNSS	48
6.2.1	GPS	50
6.2.2	GPS+QZSS	51
6.2.3	GPS+QZSS+BeiDou	52
6.2.4	GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS	53
6.3	測位方式	54
6.3.1	1周波コード測位	54
6.3.2	2周波コード測位	62
6.3.3	L1-SAIF 補強(1周波コード測位)	68
6.3.4	DGPS(1周波コード測位)	75
6.3.5	2周波搬送波位相測位(RTK)	82
6.3.6	CMAS	89
6.3.7	MADOCA-PPP	96
6.4	リアルタイム測位	109
6.4.1	コード受信機(u-blox)	109
6.4.2	CMAS	114
6.4.3	MADOCA-PPP	119
6.5	地上環境の影響	126
6.5.1	測位中断の影響	126
6.5.2	都市間高速における測位劣化箇所	131
6.6	電離層遅延の評価	136
6.6.1	昼夜(時間帯)の評価	136

6.6.2	低緯度地域の評価	137
7	分析と検討.....	141
7.1	マルチパス.....	141
7.1.1	天空率との関係	141
7.1.2	電波伝搬シミュレーションによる分析.....	146
7.1.3	マルチ GNSS を利用した低減手法の検討	156
7.1.4	ドップラー支援を利用した低減手法の検討	160
7.2	新しい信号.....	161
7.2.1	L5 信号の評価.....	161
7.2.2	L5 信号の可用性	162
7.2.3	L5 信号の測距精度.....	164
7.2.4	L5 信号による測位.....	165
8	まとめと課題.....	168
8.1	本調査で判明したこと	168
8.2	課題	169
9	参考資料	170
9.1	各国の衛星測位システムとその動向.....	170
9.1.1	GPS.....	170
9.1.2	QZSS.....	170
9.1.3	GLONASS.....	170
9.1.4	BeiDou	171
9.1.5	Galileo.....	171
9.1.6	IRNSS	171
9.1.7	SBAS.....	171
9.2	測位方式	173
9.2.1	衛星測位システムによる測位の基本原理.....	173
9.2.2	1 周波コード測位.....	176
9.2.3	2 周波コード測位.....	178
9.2.4	L1-SAIF (1 周波コード位相測位)	179
9.2.5	DGPS(1 周波コード測位)	182
9.2.6	2 周波搬送波位相相対測位 (RTK)	184
9.2.7	CMAS/CLAS.....	186
9.2.8	MADOCA-PPP.....	191
9.3	略語表.....	196

1 概要

1.1 目的

自動走行における衛星測位技術の利用可能性の見極めを目的として実施された調査(「自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査」:平成26年度)の報告書より、マルチGNSS及び補強信号による衛星測位の可用性が示されると同時に、マルチパスによる精度劣化、信号遮断等による可用性、信頼性等々が課題として提起されている。本調査業務では、データ取得回数を増やすことで調査精度を高めることと、衛星測位技術を自動走行で利用するための阻害要素となるマルチパスや電離層遅延等の更なる分析・調査を行い、衛星測位技術による回避方法の検討を実施する。

1.2 実施内容

- 都心一般道および都市間高速を移動体(自動車)による測位計測を実施
 - 昨年度の走行経路を基準にコースを設定し、一部10~20回程度の計測走行を実施。
 - 昼夜による差異を調査するために夜間での走行を実施。
- 計測したデータを衛星システム、測位方式毎に網羅的な解析および評価分析を実施
 - 実用準天頂衛星システムで計画されているL1S(DGPS)方式での解析を実施。
 - Galileo及びL5に関する調査を実施。
- マルチパス低減手法および精度劣化認識
 - 電波伝搬シミュレーションによる精度劣化予測と、精度向上の手法を分析・検討。
 - ドップラー測位及び受信情報による測位精度向上手法を検討。
- 電離層遅延による影響を調査

1.3 体制と分担

本調査は経済産業省から委託を受けたアイサンテクノロジー株式会社を代表機関として、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)、一般財団法人 衛星測位利用推進センター(SPAC)、国立大学法人 東京海洋大学、株式会社構造計画研究所が衛星測位活用検討コンソシアムを結成し、国立研究開発法人 電子航法研究所(ENRI)に一部業務を再委託し、自動車メーカーが参画する特定非営利活用法人 ITS Japan に設置された準天頂衛星・マルチGNSS利活用検討会から助言を得ながら推進する体制で実施した。

また、実験に使用する受信機の専門技術支援として、フルノ電機株式会社、株式会社コア、ユーブロックス ジャパン(u-blox Japan)の協力を得ている。

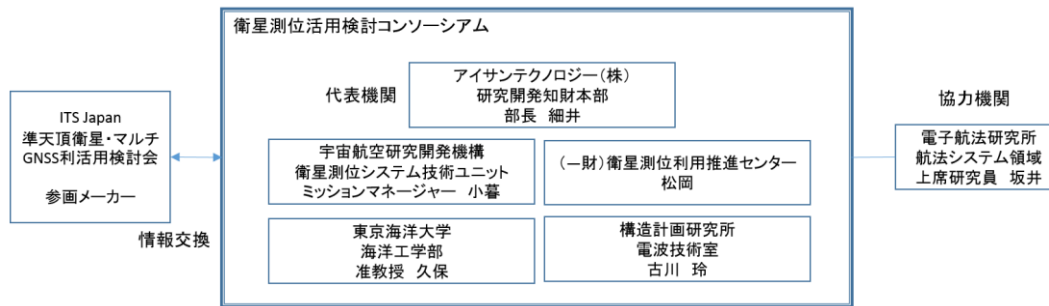


図 1.3-1 体制図

コンソーシアムのメンバーの役割分担は次表の様になっている。

表 1.3-1 役割分担表

アイサンテクノロジー	計測実施、コード受信機解析、精度評価分析、報告書とりまとめ
衛星測位利用推進センター	実験とりまとめ、CMAS 方式の解析。
東京海洋大	解析とりまとめ、RTK 方式。信頼性、マルチパス評価。
宇宙航空研究開発機構	実験計画とりまとめ、MADOCA 方式の解析。
構造計画研究所	シミュレータを用いたマルチパス除去及び遮蔽環境での影響予測の検証
電子航法研究所	データ解析 (L1-SAIF 補強方式、DGPS 方式)

2 調査結果概要

2.1 測位率と測位精度

昨年度調査では、都心一般道、首都高速および、都市間高速を12月にそれぞれ2回ずつ計測した。本年度は、計測コースを都心一般道と都市間高速に絞り、それぞれ15回、25回と計測回数を増やすことで、統計的評価、衛星配置状況による評価、昼夜間の評価等を実施し、昨年度調査結果の深堀を行った。

また、本年度は昨年度調査した測位方式に追加し、実用準天頂衛星システムのサブメータ級測位補強信号L1Sと同方式のDGPS、電離層遅延キャンセルを目的とした2周波コード測位(単独測位)、そしてMADCOCA-PPPの新しい方式MADCOCA-PPP AR(Ambiguity Resolution) + local補正を調査対象としている。

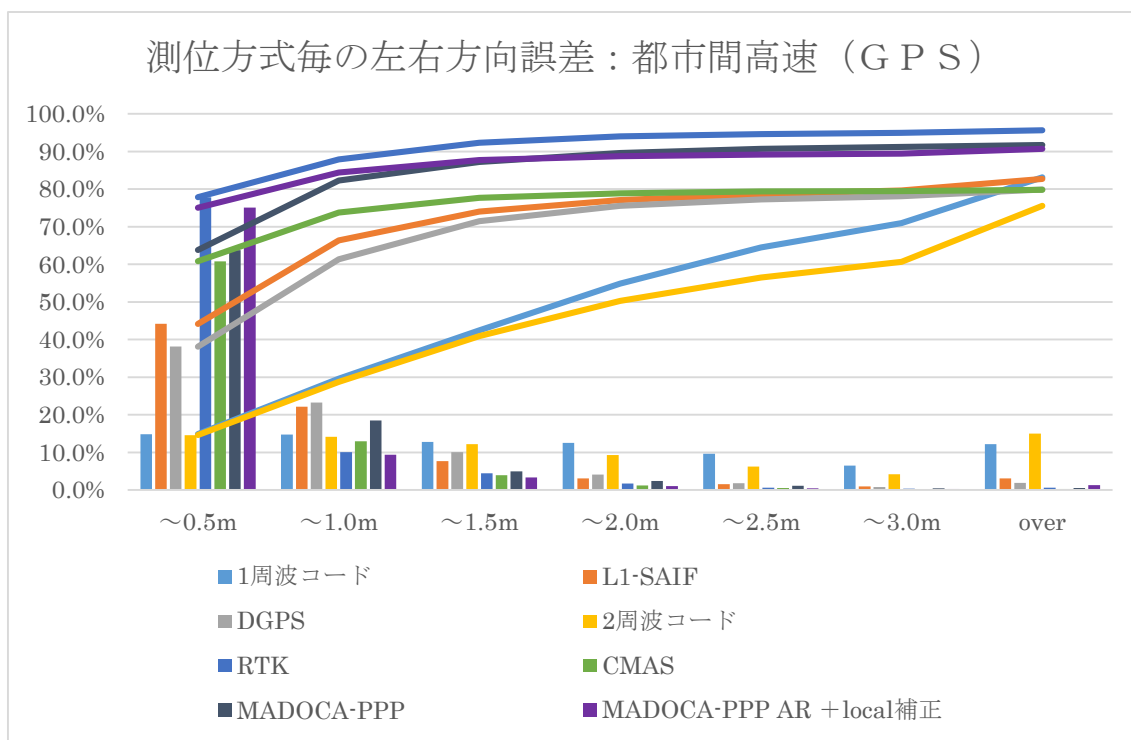


図 2.1-1 都市間高速での左右方向の測位精度(GPS)

全体的な精度としては、ほぼ昨年度同様であるが、衛星配置の悪い時間帯も含むため、平均化したものは、若干下振れした評価となっている。特にGPSの衛星の数、配置状況には大きく影響を受け測位率、測位精度の劣化がみられた。GPSの補完機能を持つ準天頂衛星が4機体制になることで、精度劣化の軽減が期待される。

準天頂衛星初号機「みちびき」で利用されたサブメータ級測位補強信号L1-SAIFと実用準天頂

衛星で採用された DGPS の比較は僅かに L1-SAIF の方が測位率、測位精度ともに上回ったが、ほぼ同性能と言える結果となった。

2 周波コード測位に関しては、想定していた性能が出なかった。主な原因として周波数間バイアスと、信号強度の低い L2P 信号の受信状況が影響したと考えられる。

新しく対象とした MADOCA-PPP AR + local 補正方式は MADOCA-PPP の課題であった初期化時間を短縮することで、大きく改善されている。

CMAS に関しては、他の搬送波測位の結果に比べてグラフ上では低くなっているが、これは CMAS のシステムの関係では搬送波位相での測位しか出力されていないためであり、性能が低いわけでは無い。

2.2 都市間高速における衛星測位の可用性

自動走行／走行支援における衛星測位の可用性について、測位率と測位精度で考察を行った。都市間高速道路の各走行の測位率、測位精度の平均値を下表に示す。

表 2.2-1 測位方式毎の測位率、左右方向誤差 (RMS)

測位方式	測位率	RMS[m]
1 周波コード	95.01%	2.3202
L1-SAIF	94.53%	1.1618
DGPS	94.48%	1.3290
2 周波コード	88.01%	3.1317
RTK	95.62%	0.6379
CMAS	80.27%	0.5282
MADOCA-PPP	92.12%	0.7149
MADOCA-PPP AR + local 補正	91.01%	0.4617

補強信号を利用する事でコード測位であっても、車線認識レベルであれば利用可能と思われる。また 1.0m 以内の測位精度を要求する場合は、搬送波位相測位 (RTK、CMAS、MADOCA-PPP) が必要になってくる。

利用頻度に関しては測位率が概ね 90～95%であることから、常に衛星測位で位置を取得し続けることは難しいと言える。ただし、衛星測位の利用頻度が数秒～十数秒に 1 回程度であれば、十分に利用可能と言える。

2.3 走行環境による影響

昨年度調査では測位率低下、測位精度劣化箇所の地上環境をピックアップした。本年度はピックアップされた情報を基に都市間高速における、測位精度が良い箇所と、悪い箇所を比較評価した。

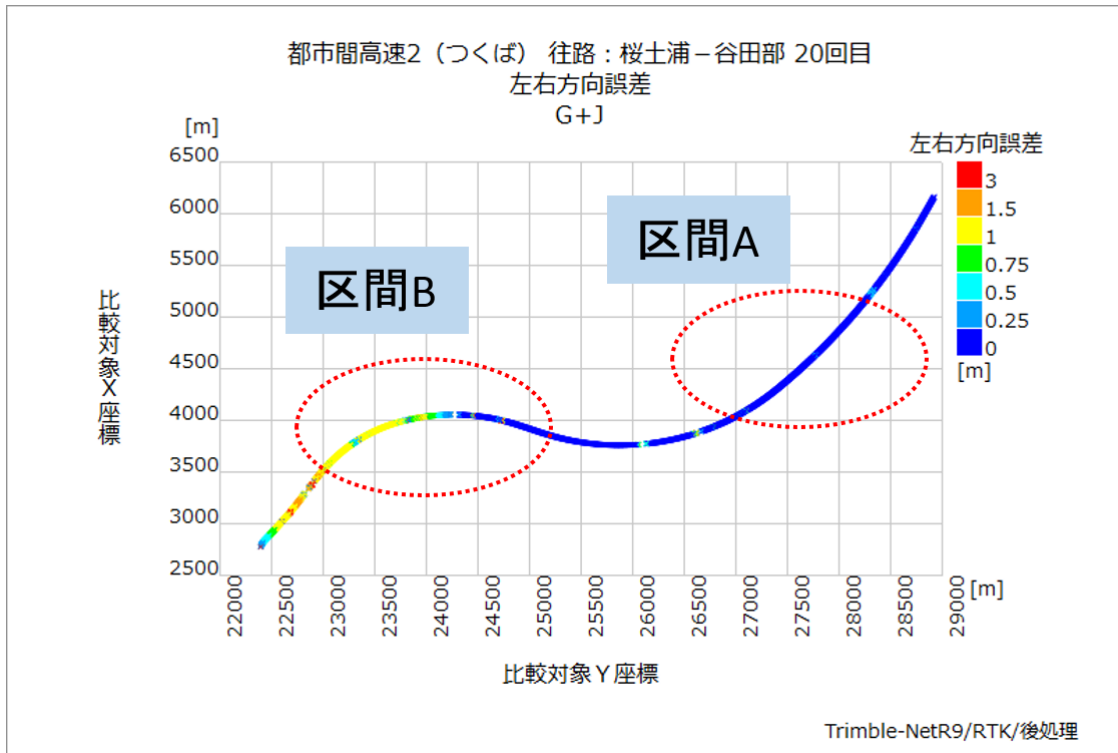


図 2.3-1 都市間高速走行環境比較箇所

表 2.3-1 測位率と左右方向誤差 (RTK 平均)

	測位率	Fix 率	0.5m 以内	1.0m 以内	1.5m 以内
区間 A	100.00%	85.16%	88.86%	95.89%	98.32%
区間 B	89.78%	53.00%	68.42%	80.57%	84.36%

法面、橋梁等により測位環境の悪い区間 B は区間 A より測位率、測位精度は低くなるが、衛星の配置が進行方向に広がっている場合は測位率の劣化は少なかった。逆に、遮蔽になりやすい進行方向の左側に衛星が集中した場合は劣化が大きくなる傾向が確認された。

2.4 マルチパス対策の検討

昨年度調査ではマルチ GNSS を利用する事で可視となる測位衛星数が増えた事を利用して、マルチパスの影響を受けたと思われる衛星の信号を手動で除去することで測位精度の改善の確認を行った。本年度は受信機から得られる情報を基にマルチパスの疑いのある信号を判別し除去する方法と、ドップラー支援を利用した測位を検討した。

銀座周辺のビル街の区間で、マルチパスを含む信号を除去する方法として、搬送波位相観測値の無い衛星からの信号と、信号受信機レベルが低い衛星をチェックし除去した。

表 2.4-1 マルチパス信号を含む衛星の除去

	測位率	RMS[m]	0.5m 以内	0.5~1m	1~1.5m
チェックなし	99.91%	12.6755	10.68%	9.75%	7.15%
チェックあり	97.48%	5.2771	14.12%	14.34%	10.46%

結果としては、衛星を減らした分だけ測位率は若干低下し、測位精度は RMS で 7m程改善した。

RTK でドップラー支援を利用した場合、測位率が 51%から 92%へと大きく改善し、測位精度も多少の改善がみられる。

表 2.4-2 ドップラー支援の利用

	測位率	RMS[m]	0.5m 以内	0.5~1m	1~1.5m
支援なし	51.54%	2.2761	30.67%	3.93%	2.74%
支援あり	92.41%	2.0674	57.41%	7.24%	5.69%

受信機単体で得られる情報のみでのマルチパス対策は、改善は確認できるが限界もあり、自動走行／走行支援での利用は難しいと言える。マルチパス環境への対応は他のシステムや情報の活用が必要となる。

2.5 3次元地図の利用と電波伝搬シミュレーション

3次元地図と、電波伝搬シミュレーションを利用する事で、直接見えない衛星(見通しの無い衛星)を、マルチパスを含む信号と判断し、衛星除去することでマルチパスによる大きな誤差が除けることを確認した。しかしながらこの手法は計算量が非常に多くリアルタイムでの利用はコストがかかってしまう。

そこで、3次元地図を利用し事前に衛星見通しマスクを情報化することで、本来見通しが無い衛星をマスクして測位演算に利用できないか検討を行った。

上空視界を方向角、仰角でグリッド化し、3次元地図と電波伝搬シミュレーションを用いることで、衛星の可視／不可視を判断し見通しマスク情報とした。

コンパクトな情報量で衛星見通しマスクデータを作成することが可能である。

2.6 本年度調査での判明事項

今回の調査結果として以下の事が言える。

- 高速道路の様な比較的上空視界の開けた箇所では、補強信号を利用した単独測位または、搬送波位相測位を利用することで安定した測位結果を得られる。しかしながら、遮蔽箇所では衛星配置次第で測位精度は不安定になる。
- マルチパス対策は受信機のみでも効果はみられるが限界がある。
- 衛星測位単独での利用は困難なため他のセンサ類との連携は必須。IMU 等の累積誤差修正等、常に使うのではなく、使える場所で使う考え方が適している。
- 事前に測位精度の安定箇所、不安定箇所がわかれば、衛星測位の信頼性も向上する。地図情報と組み合わせることで、より高度な利用が可能になる。

また自動走行／走行支援で衛星測位の活用に向け今後取り組むべき課題としては以下のものが考えられる。

- 測位精度の信頼性確保と信号信頼性の調査
- 地図情報の積極的な活用

3 計測走行

3.1 概要

計測走行は、準天頂衛星初号機「みちびき」からの補強信号配信スケジュールの調整を行い、2015年10月26日～10月30日までの5日間で実施した。選定した走行コースは昨年度の調査を参考にし、都心一般道および都市間高速とした。26日、27日の2日間は東京海洋大学越中島キャンパスを起点として、都心一般道での計測走行を実施した。28日から30日の3日間はJAXA 筑波宇宙センターを起点とし、都市間高速での計測を実施した。

計測走行を実施するにあたり、調査目的を満たすために十分な計測回数の確保、及び昼夜間の比較評価を考慮に入れ、事前に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、衛星配置の良し悪しを含む時間帯での走行を計画した。

計測車両には、リファレンスの取得と計測を同時に実施するために、MMS(Mobile Mapping System:高精度GPS移動計測装置)を利用した。計測機器の搭載及び、電源の確保から最も大型となるMMS Type-Sを使用した。Type-Sの標準レーザースキャナーは夜間計測不可能なため、輝度対応のレーザースキャナーを追加搭載した。このため雨天計測が不可能となったが、幸い天候には恵まれ計画通りの計測走行を行った。



図 3.1-1 計測走行写真

(左上:機材設置(機材設置)／右上:車内／左下:走行風景／右下:夜間走行後のデータ取り出し

3.2 機器構成

同時観測を実施するために、コード測位受信機 3 台、搬送波位相測位受信機 3 台（予備機含む）と LEX 用受信機(CMAS)一式を搭載した。コード測位受信機は、各受信機付属のアンテナをダッシュボードに設置し、搬送波位相測位受信機は MMS のアンテナから分配した。また LEX 信号受信用に別途アンテナを設置した。

また、データ解析時の基準局として、東京海洋大学越中島キャンパス及び JAXA 筑波宇宙センターに設置されている常設されている基準局を利用した。

また、受信機以外の搭載機材として、信号記録用に RF レコーダー、上空視界記録用に天空カメラを設置している。RF 取得に関しては分配による信号劣化を考慮して別途 MMS と同じアンテナを設置している。

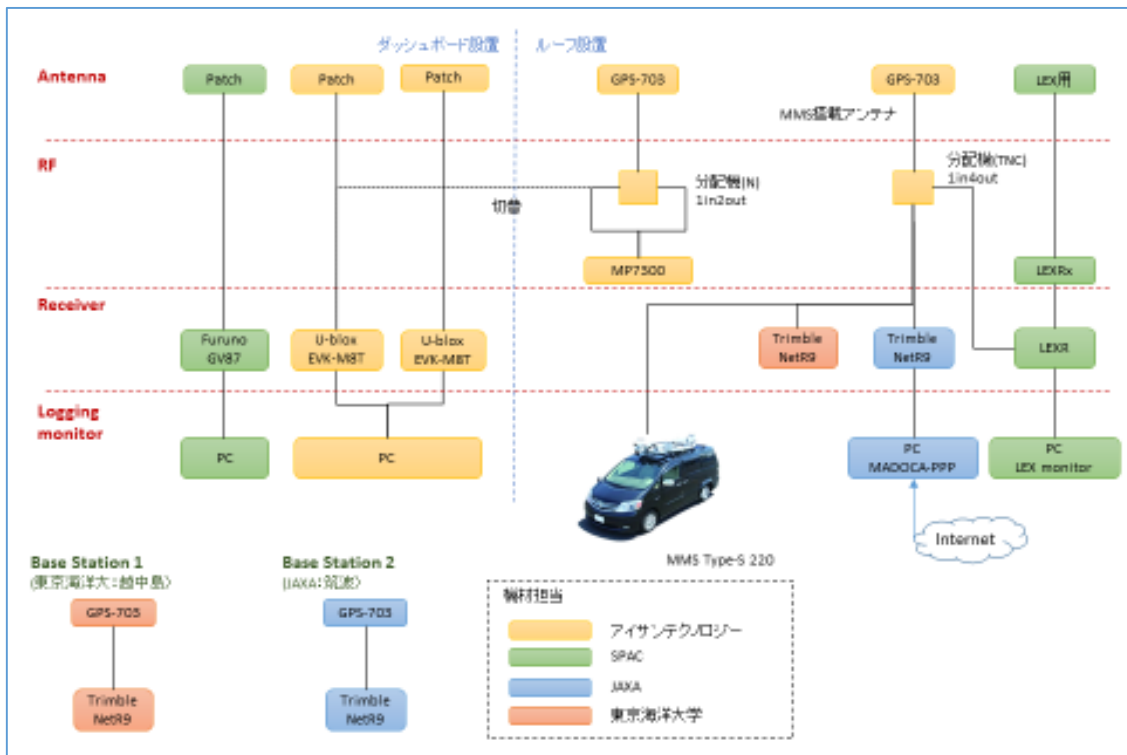






図 3.2-1 実験機器構成図

3.3 使用機器

3.3.1 受信機

受信機の選定に関しては、利用できる衛星システムおよび信号帯を中心に、実績のある受信機を選択している。利用した受信機を表 3.3.1-1 に示す。

表 3.3.1-1 使用受信機一覧

受信機名	メーカー	外観	測位方式	受信衛星システム	追尾チャンネル	出力周期
GV87	フルノ電機		コード測位	GPS QZSS GLONASS Galileo SBAS	26ch	1/2/5/10Hz
EVK-M8T	u-blox		コード測位	GPS QZSS GLONASS BeiDou SBAS	72ch	1/5Hz
NetR9	Trimble		搬送波位相	GPS QZSS GLONASS BeiDou Galileo SBAS	440ch	最大 50Hz
Delta-3	JAVAD		搬送波位相	GPS QZSS GLONASS BeiDou Galileo SBAS	864ch	最大 100Hz
LEXR LEXRx	三菱電機 フルノ電機		CMAS	GPS QZSS(LEX)	—	1/5Hz

また、各受信機が使用する衛星システム及び信号の設定を表 3.3.1-2 に示す

表 3.3.1-2 受信機の取得設定

衛星システム	信号	1周波コード受信機		搬送波位相測位受信機		
		GV87	EVK-M8T	NetR9	Delta-3	LEXR
GPS	L1 C/A	○	○	○	○	○

	L2P	×	×	○	○	○
	L2C	×	×	○	○	×
	L5	×	×	○	○	×
QZSS	L1 C/A	○	○	○	○	○
	L1-SAIF	×	×	×	○	×
	L2C	×	×	○	○	○
	L5	×	×	○	○	×
	LEX	×	×	×	○	○
GLONASS	G1	○	○※1	○	○	×
	G2	×	×	○	○	×
Galileo	E1	○	×	○	○	×
	E5a	×	×	○	○	×
BeiDou	B1	×	○※1	○	○	×
	B2	×	×	×	○	×
SBAS	L1 C/A	○	○	○	○	×
出力データ		VN86/87	M8T	NetR9	Delta3	LEXR
NMEA		—	○	—	—	○
RAW		○	○	○	○	○

※1:「EVK-M8T」は GLONASS と BeiDou の同時取得は不可。(他の衛星システムは同時取得可)

3.3.2 アンテナ

高精度受信機用のアンテナには MMS の天板にある後部アンテナ(GPS-703-GGG)を使用した。LEXR で使用する LEX 信号に関しては LEX 専用のアンテナを MMS の天板に設置し、コード受信機にはパッチアンテナを使用し、ダッシュボードに設置した。また、RF レコーダー用に NovAtel 社製のアンテナ(GPS-703-GGG)を MMS の天板に設置した。各受信機へは分配器を使用して分配する。各アンテナの対応信号を表 3.3.2-1 に示す。またアンテナの配置を図 3.3.2-1 に示す。

表 3.3.2-1

衛星システム	信号	NovAtel	Trimble	Furuno	u-blox
		GPS-703-GGG	Zephyr Model2	Patch Antenna	
GPS	L1	○	○	○	○
	L2	○	○	×	×

	L5	○	○	×	×
QZSS	L1	○	○	○	○
	L2	○	○	×	×
	L5	○	○	×	×
	L6	×	○	×	×
GLONASS	G1	○	○	○	○
	G2	○	○	×	×
	G3	○	○	×	×
BeiDou	B1	○	×	○	×
	B2	○	×	×	×
Galileo	E1	○	○	○	○
	E2	○	○	×	×
	E5a/b	○	○	×	×
	E6	○	○	×	×

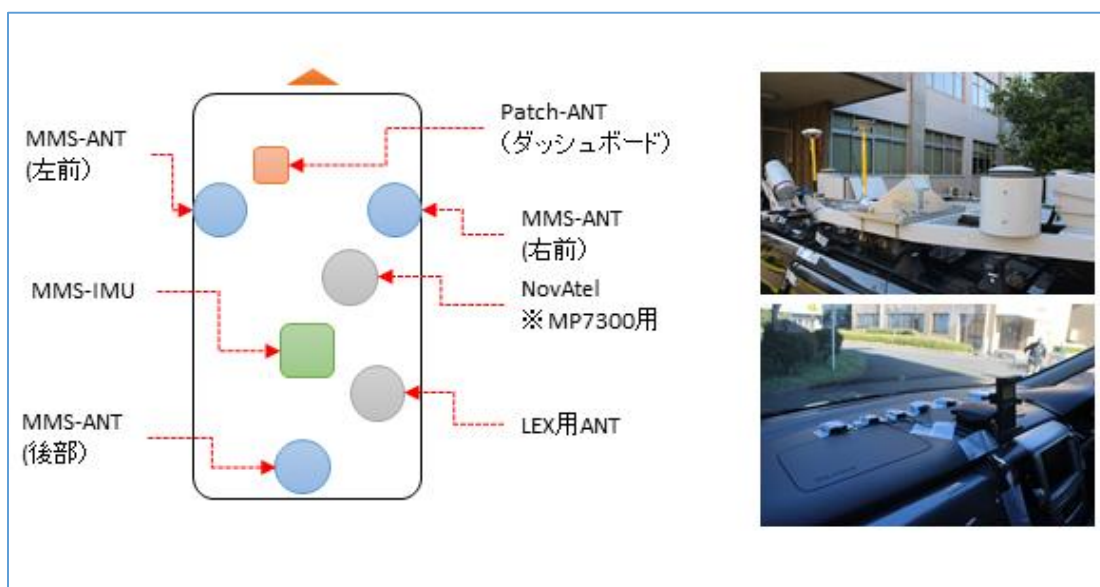


図 3.3.2-1 アンテナの配置図

3.3.3 計測車両

計測車両は三菱電機株式会社製の MMS を車両の天板に搭載したものを使用する。MMS は GPS アンテナと IMU、カメラ、レーザースキャナー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ことから本調査のリファレンスとして用いた。また、今回は夜間計測もあるため、反射輝度に対応している高密度レーザー

RIEGL VQ-250(雨天計測不可)を追加搭載する。



図 3.3.3-1 MMS 搭載車両



図 3.3.3-2 RIEGL VQ-250

3.3.4 その他の機材

一部の区間では、RF レコーダーと天空撮影用の魚眼カメラを搭載した。RF レコーダーは RF 信号をそのまま記録・再生が可能のため、記録時の条件が正確に再現可能であり、本調査では L1、L2 信号を記録した。



図 3.3.4-1 RF レコーダー



図 3.3.4-2 銀座天空

3.4 計測経路

3.4.1 コース 1: 都心一般道(1)

銀座ー日比谷間を中心とした建物等による遮蔽の多いコース。完全遮蔽区域(日比谷アンダーパス) 走行時の前後の信号遮断から復帰時の振る舞いの調査と、ビル街でのマルチパス軽減効果評価を目的として、衛星配置の異なる時間帯での測定データを取得した。

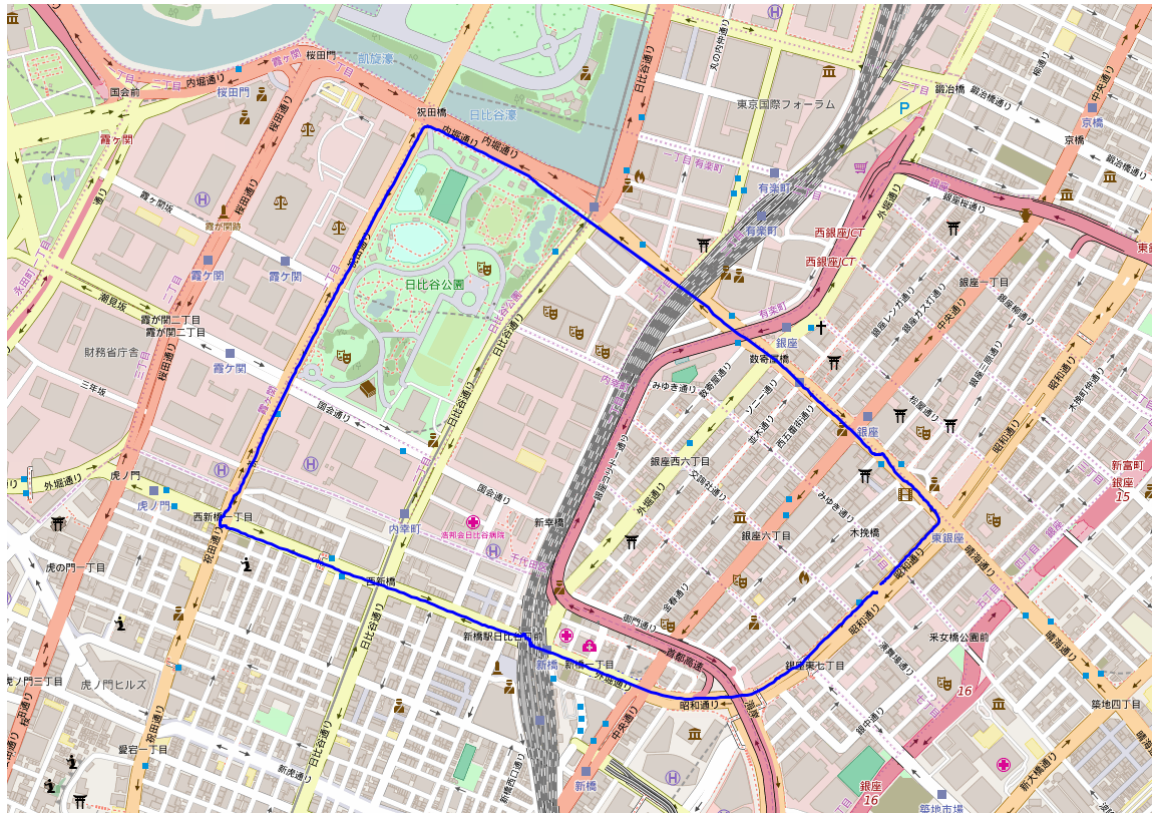


図 3.4.1-1 都心一般道(1)※Open Street Map

3.4.2 コース 2: 都心一般道(2)

昨年度と同じコース。地上環境のパターンが多く、遮蔽等地上環境変化に伴う測位精度の影響を調査することを目的としてコースを選定した。

都心一般道(1)の評価部分にあたる銀座－日比谷間を含んでいる。

評価を行うにあたり、都心一般道(1)、(2)内を3つのセクションに分けている。

- セクション 1: 都心一般道(2)全体
- セクション 2: 銀座周辺
- セクション 3: 日比谷アンダーパス周辺

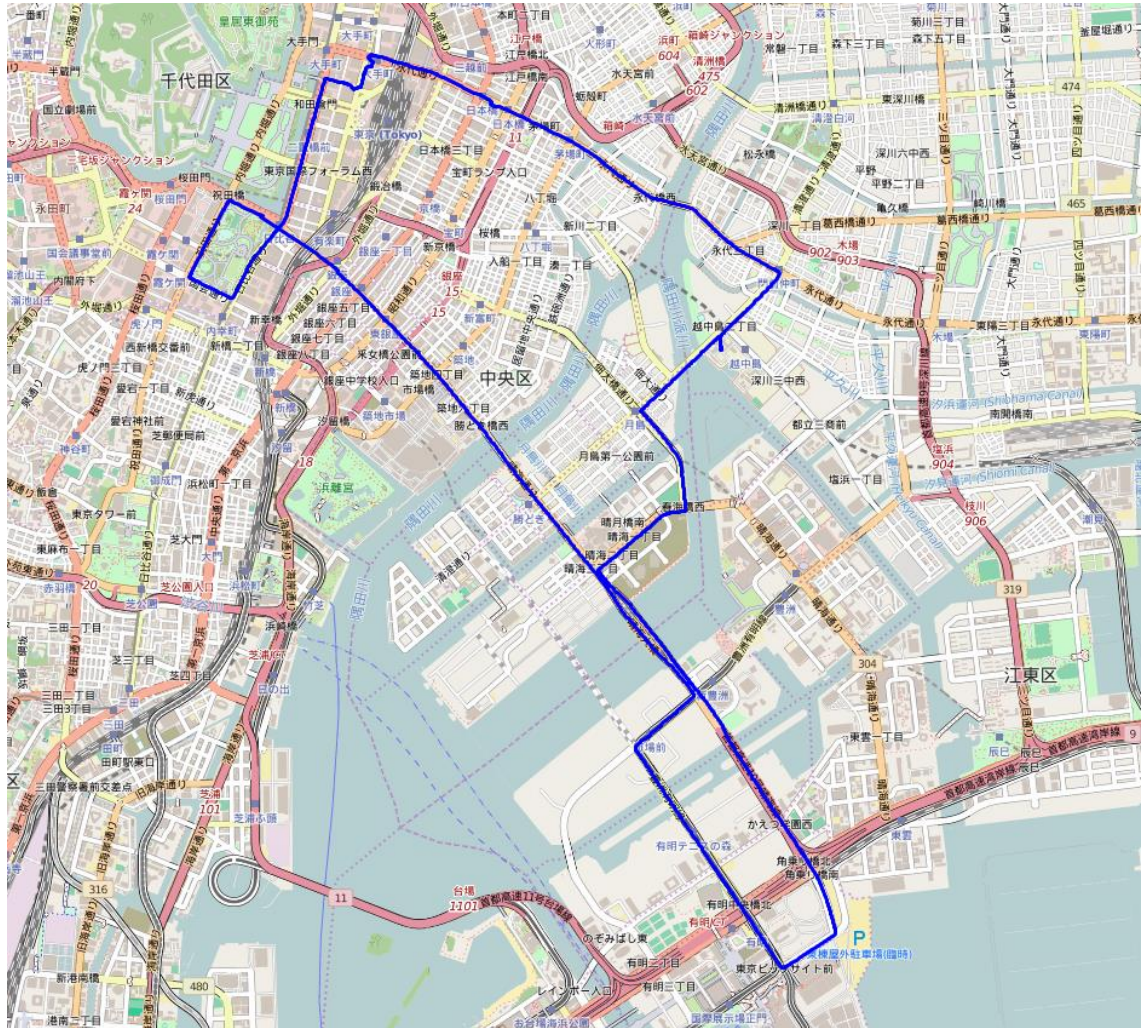


図 3.4.2-1 都心一般道(2)※Open Street Map

3.4.3 コース3:都市間高速(1)

昨年度と同じコース。桜土浦 IC 側は比較的オープンスカイ部分が多く、衛星測位の精度向上評価に適している。一方、谷田部 IC 側には法面や橋梁下となる箇所も何カ所が存在する。また、つくば JCT を利用することで、都市間高速における地上環境の様々な要素が含まれるコースである。

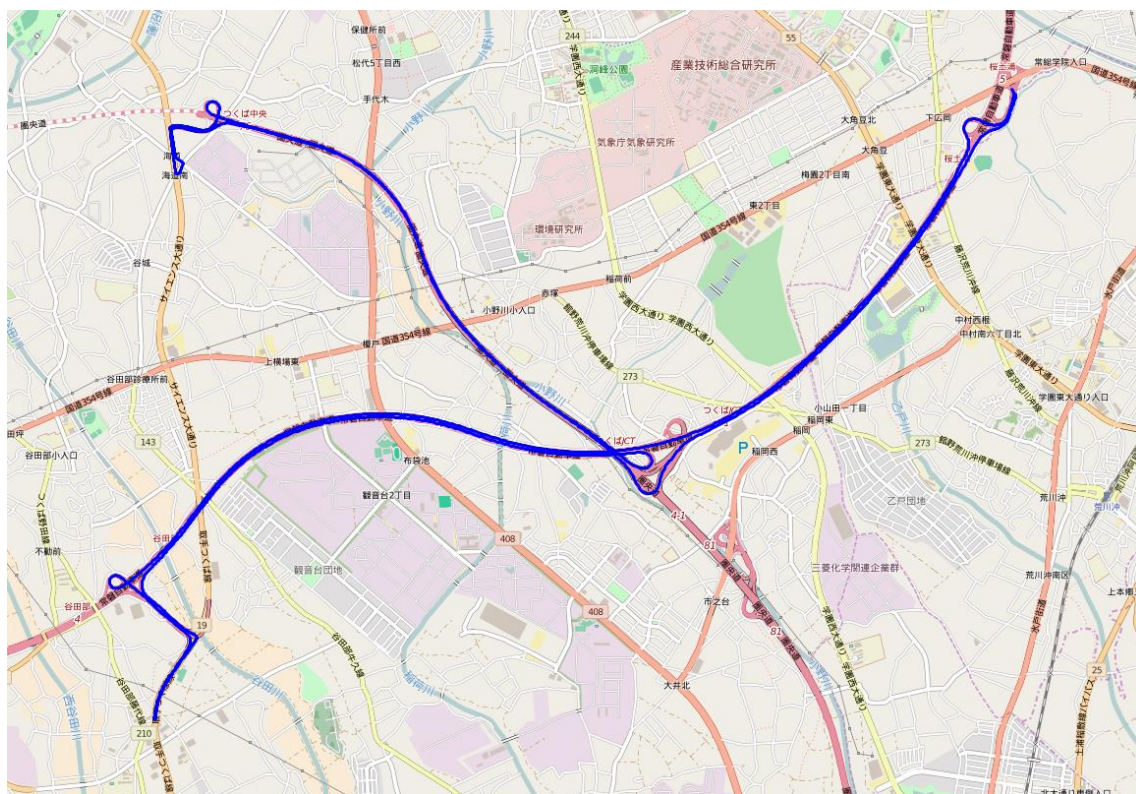


図 3.4.3-1 都市間高速(1)※Open Street Map

3.4.4 コース 4: 都市間高速(2)

都市間高速での衛星測位評価を行うために、都市間高速(1)の一部となる、桜土浦 IC－谷田部 IC 間を設定した。繰り返し往復測定を実施することで、様々な測位衛星環境下でのデータを取得し、統計的処理としてのデータ数を増やすことを目的としている。

都市間高速では以下の様にセクションを分けている。

- セクション 4: 都市間高速(1)の高速道路部
- セクション 5: 桜土浦 IC－谷田部 IC(往路)
- セクション 6: 谷田部 IC－桜土浦 IC(復路)

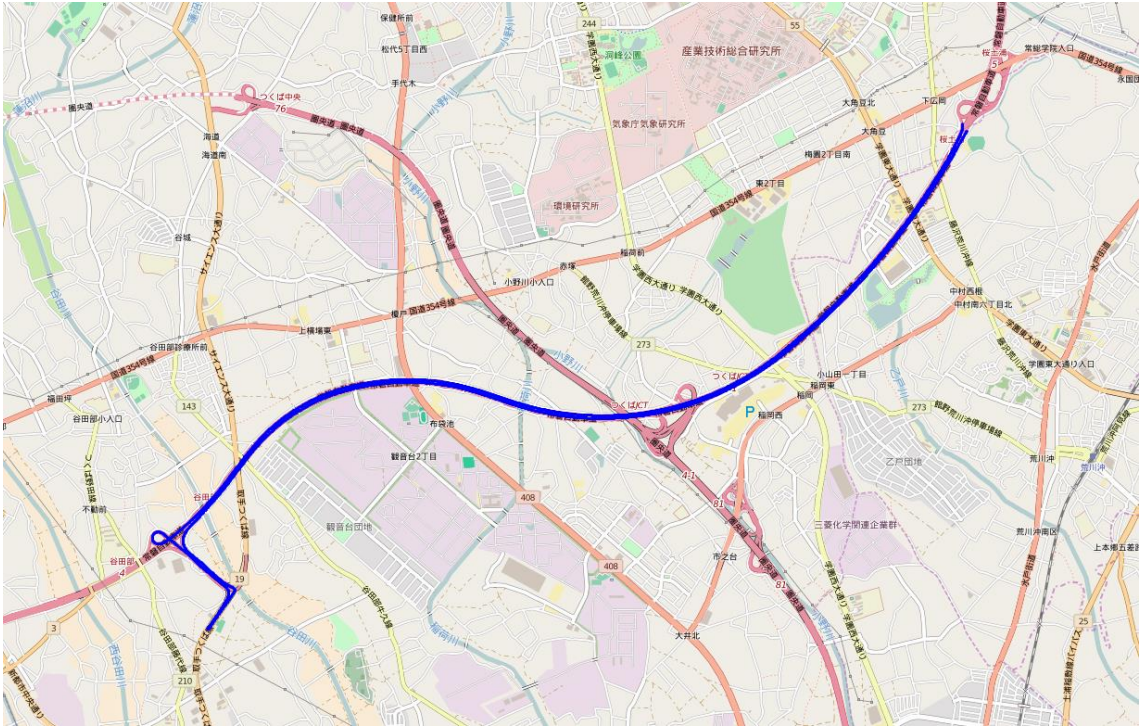


図 3.4.4-1 都市間高速(2)※Open Street Map

3.5 計測時間帯と衛星配置

3.5.1 計測時間帯

データの解析と評価のために、各コース、周回、セクション毎のタイムテーブルを作成した。時刻は UTC である。

表 3.5.1-1 計測時間

計測日	コース	周回	セクション	開始時刻 [hms]	終了時刻 [hms]	計測時間 [sec]	計測時間 [hms]
10月 26日	2	1	1	01:51:52.0	03:01:13.0	4161.0	9:21.0
			2	02:26:27.2	02:28:42.1	134.9	2:14.9
			3	02:28:42.1	02:30:02.2	80.1	1:20.1
	1	1	2	04:28:49.5	04:33:01.3	251.8	4:11.8
			3	04:33:01.3	04:34:26.8	85.5	1:25.5
		2	2	04:49:49.3	04:52:14.6	145.3	2:25.3
			3	04:52:14.6	04:53:37.1	82.5	1:22.5
		3	2	05:10:58.3	05:13:51.3	173.0	2:53.0
			3	05:13:51.3	05:15:17.8	86.5	1:26.5
		4	2	05:27:09.6	05:28:51.6	102.0	1:42.0
			3	05:28:51.6	05:30:21.0	89.4	1:29.4
	2	2	1	06:34:25.0	07:41:00.0	3995.0	6:35.0
			2	07:09:09.0	07:11:28.6	139.6	2:19.6
			3	07:11:28.6	07:12:43.1	74.5	1:14.5
	1	5	2	09:30:29.8	09:33:22.6	172.8	2:52.8
			3	09:33:22.6	09:34:57.0	94.4	1:34.4
		6	2	09:53:44.7	10:02:42.5	537.8	8:57.8
			3	10:02:42.5	10:04:01.3	78.8	1:18.8
		7	2	10:15:06.8	10:19:28.1	261.3	4:21.3
			3	10:19:28.1	10:20:48.2	80.1	1:20.1
		8	2	10:30:46.9	10:33:50.4	183.5	3:03.5
3			10:33:50.4	10:35:06.1	75.7	1:15.7	
10月 27日	1	9	2	01:40:23.8	01:43:46.9	203.1	3:23.1
			3	01:43:46.9	01:45:04.3	77.4	1:17.4
		10	2	02:02:02.3	02:03:41.1	98.8	1:38.8
			3	02:03:41.1	02:05:05.6	84.5	1:24.5

		11	2	02:20:37.7	02:22:56.2	138.5	2:18.5	
			3	02:22:56.2	02:24:06.0	69.8	1:09.8	
		12	2	02:36:34.3	02:39:14.2	159.9	2:39.9	
			3	02:39:14.2	02:40:27.9	73.7	1:13.7	
		2	3	1	04:14:37.0	05:29:08.0	4471.0	14:31.0
				2	04:53:11.7	04:56:04.7	173.0	2:53.0
	3			04:56:04.7	04:57:37.6	92.9	1:32.9	
	1	13	2	06:18:09.4	06:20:37.8	148.4	2:28.4	
			3	06:20:37.8	06:21:58.8	81.0	1:21.0	
		14	2	06:36:36.2	06:39:43.2	187.0	3:07.0	
			3	06:39:43.2	06:41:01.4	78.2	1:18.2	
		15	2	06:52:41.0	06:54:18.9	97.9	1:37.9	
			3	06:54:18.9	06:55:35.4	76.5	1:16.5	
	10月 28日	3	1	4	01:48:03.8	02:28:09.8	2406.0	40:06.0
				4	03:23:49.4	04:02:36.2	2326.8	38:46.8
4		1	5	04:59:54.0	05:07:09.4	435.4	7:15.4	
			6	05:11:03.8	05:18:15.2	431.4	7:11.4	
		2	5	05:22:14.8	05:29:16.7	421.9	7:01.9	
			6	05:33:29.4	05:40:38.3	428.9	7:08.9	
		3	5	05:46:37.6	05:53:51.7	434.1	7:14.1	
			6	05:59:19.9	06:06:30.5	430.6	7:10.6	
		4	5	06:11:11.0	06:18:04.3	413.3	6:53.3	
			6	06:22:05.4	06:29:22.2	436.8	7:16.8	
		5	5	06:35:30.2	06:42:26.4	416.2	6:56.2	
			6	06:48:38.6	06:55:53.4	434.8	7:14.8	
		3	3	4	08:14:59.9	08:54:39.5	2379.6	39:39.6
		10月 29日	4	6	5	00:51:06.0	00:58:14.5	428.5
6					01:01:52.7	10:09:01.6	428.9	7:08.9
7	5			01:13:12.9	01:20:13.8	420.9	7:00.9	
	6			01:24:41.7	01:31:40.5	418.8	6:58.8	
8	5			01:37:39.3	01:44:48.9	429.6	7:09.6	
	6			01:48:37.6	01:56:09.1	451.5	7:31.5	
9	5			02:01:27.8	02:08:27.6	419.8	6:59.8	
	6			02:12:43.9	02:19:32.4	408.5	6:48.5	
10	5			02:24:02.0	02:31:03.4	421.4	7:01.4	

			6	02:35:28.3	02:42:21.1	412.8	6:52.8	
	4	11	5	04:19:18.8	04:26:13.8	415.0	6:55.0	
			6	04:30:25.6	04:37:08.4	402.8	6:42.8	
		12	5	04:40:58.1	04:47:39.1	401.0	6:41.0	
			6	04:52:44.9	04:59:47.1	422.2	7:02.2	
		13	5	05:03:30.2	05:10:19.5	409.3	6:49.3	
			6	05:15:22.9	05:22:14.8	411.9	6:51.9	
		14	5	05:25:58.8	05:32:53.8	415.0	6:55.0	
			6	05:37:57.5	05:45:04.5	427.0	7:07.0	
		15	5	05:51:06.0	05:58:04.5	418.5	6:58.5	
			6	06:02:26.3	06:09:33.4	427.1	7:07.1	
		4	16	5	08:03:16.4	08:10:19.5	423.1	7:03.1
				6	08:17:25.0	08:24:23.2	418.2	6:58.2
			17	5	08:32:03.8	08:38:53.9	410.1	6:50.1
				6	08:43:45.5	08:50:41.7	416.2	6:56.2
	18		5	08:57:43.6	09:04:40.6	417.0	6:57.0	
			6	09:09:47.8	09:16:32.6	404.8	6:44.8	
	19		5	09:20:48.6	09:27:51.0	422.4	7:02.4	
			6	09:31:41.7	09:38:39.9	418.2	6:58.2	
	20		5	09:42:23.1	09:49:12.3	409.2	6:49.2	
			6	09:52:57.8	09:59:54.4	416.6	6:56.6	
10月 30日	4	21	5	00:54:56.3	01:01:47.2	410.9	6:50.9	
			6	01:05:59.8	01:12:54.7	414.9	6:54.9	
		22	5	01:17:11.3	01:23:49.4	398.1	6:38.1	
			6	01:28:47.3	01:35:34.8	407.5	6:47.5	
		23	5	01:40:28.5	01:47:14.5	406.0	6:46.0	
			6	01:51:50.7	01:58:40.2	409.5	6:49.5	
		24	5	02:04:02.5	02:10:54.4	411.9	6:51.9	
			6	02:16:39.5	02:23:36.9	417.4	6:57.4	
		25	5	02:26:50.8	02:33:43.6	412.8	6:52.8	
			6	02:37:02.9	02:43:44.2	401.3	6:41.3	

3.5.2 衛星配置

計測実施 1 週間前に TLE を利用して作成した衛星飛来予想を以下に示す。

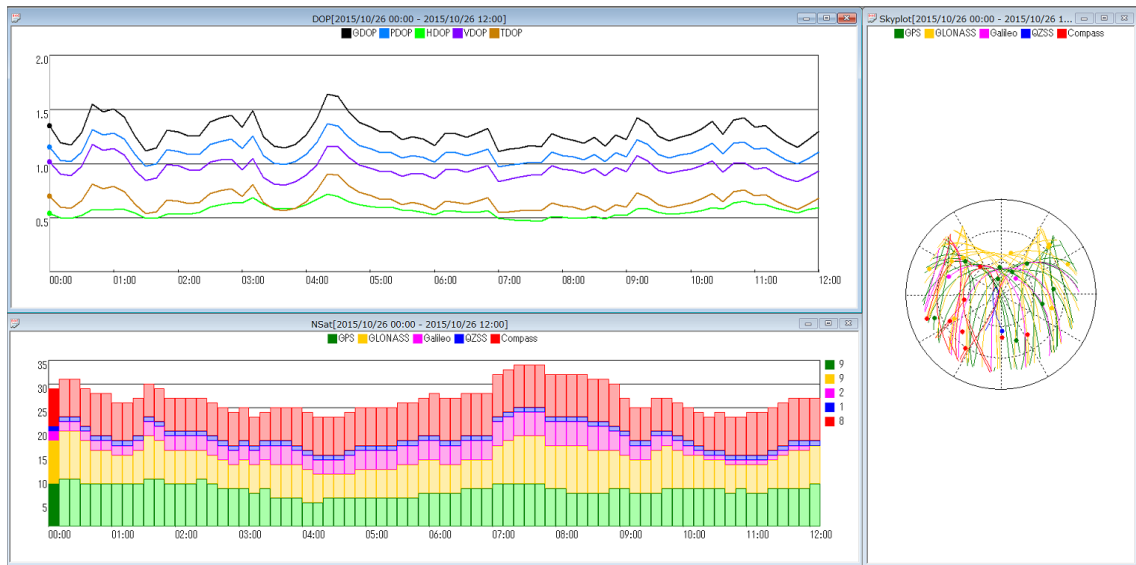


図 3.5.2-1 マルチ GNSS の衛星飛来予想: 2015/10/26 0:00~12:00(UTC)
 Station: 東京海洋大学越中島キャンパス / 仰角マスク 15°

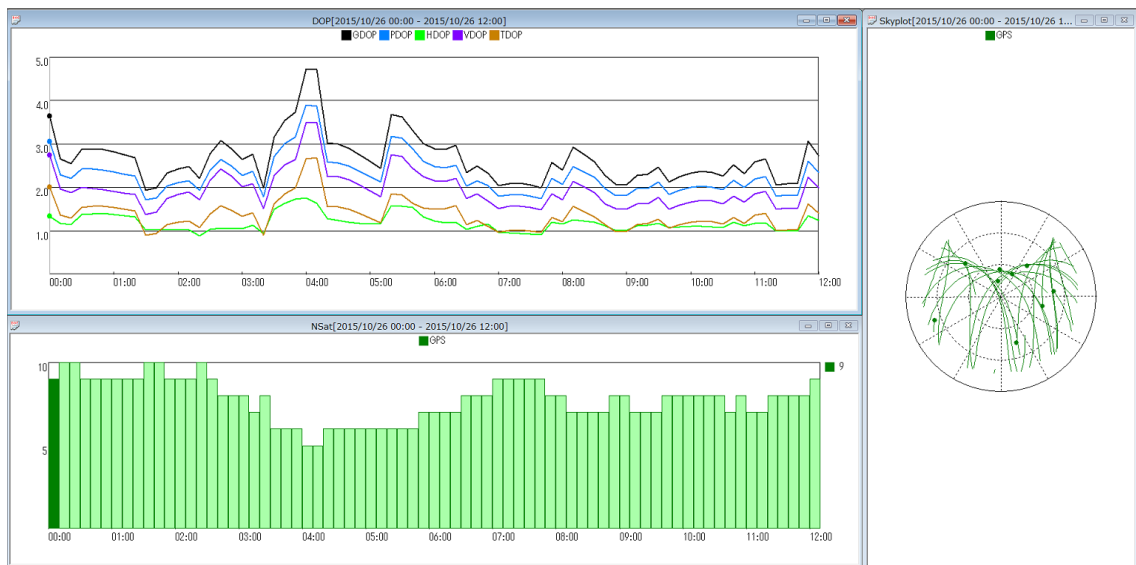


図 3.5.2-2 GPS の衛星飛来予想: 2015/10/26 0:00~12:00(UTC)
 Station: 東京海洋大学越中島キャンパス / 仰角マスク 15°

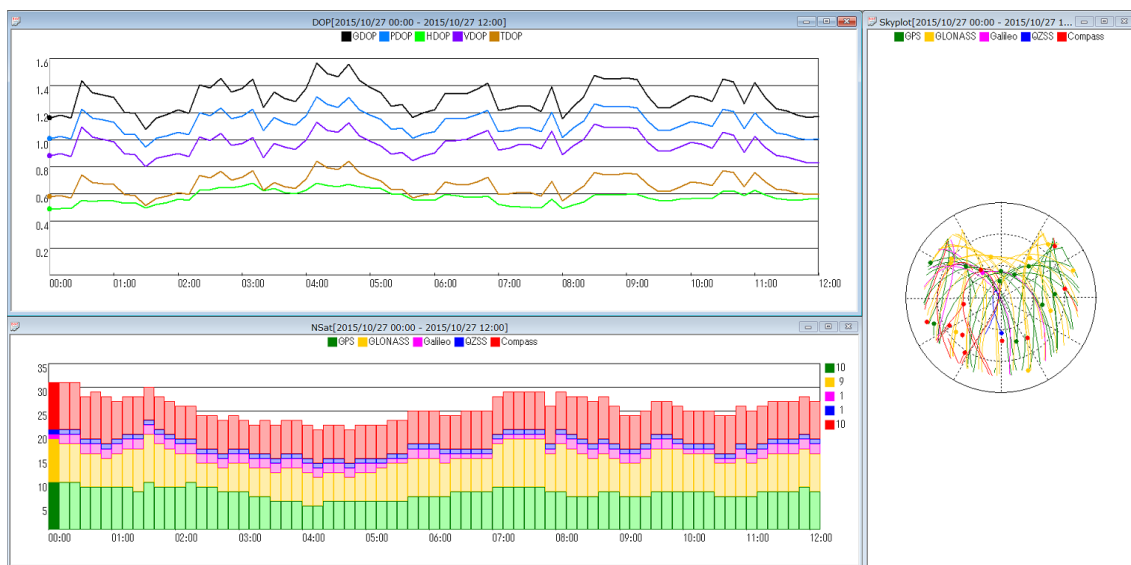


図 3.5.2-3 マルチ GNSS の衛星飛来予想: 2015/10/27 0:00~12:00(UTC)

Station: 東京海洋大学越中島キャンパス / 仰角マスク 15°

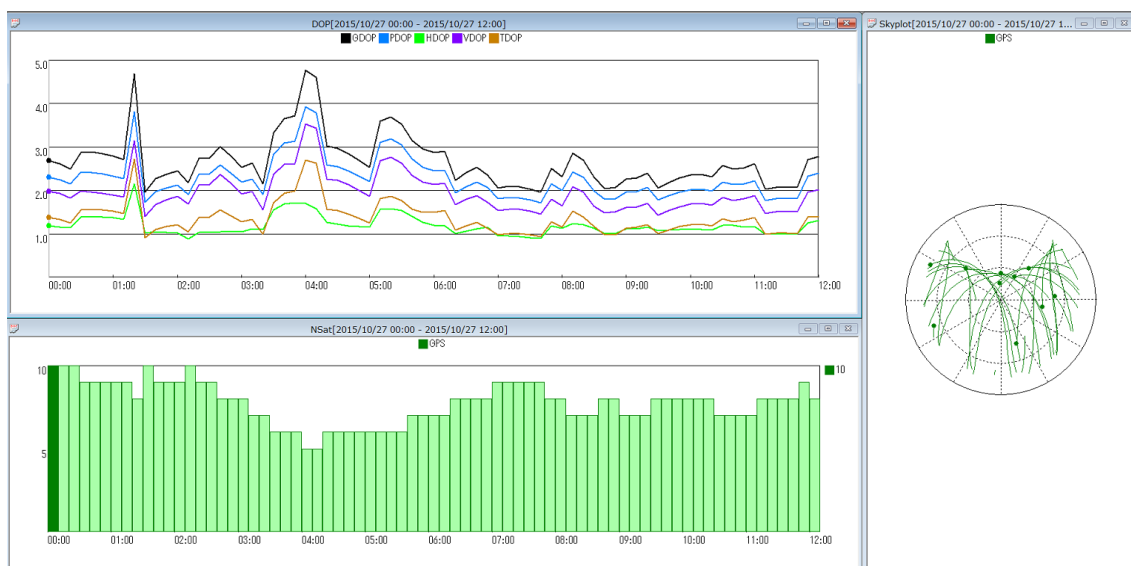


図 3.5.2-4 GPS の衛星飛来予想: 2015/10/27 0:00~12:00(UTC)

Station: 東京海洋大学越中島キャンパス / 仰角マスク 15°

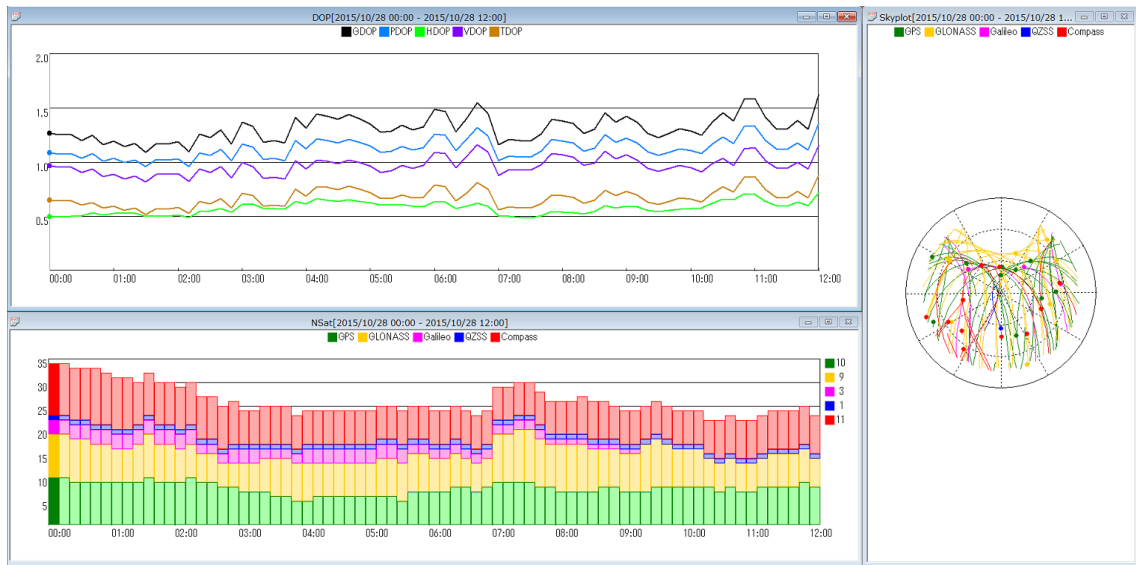


図 3.5.2-5 マルチ GNSS の衛星飛来予想: 2015/10/28 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°

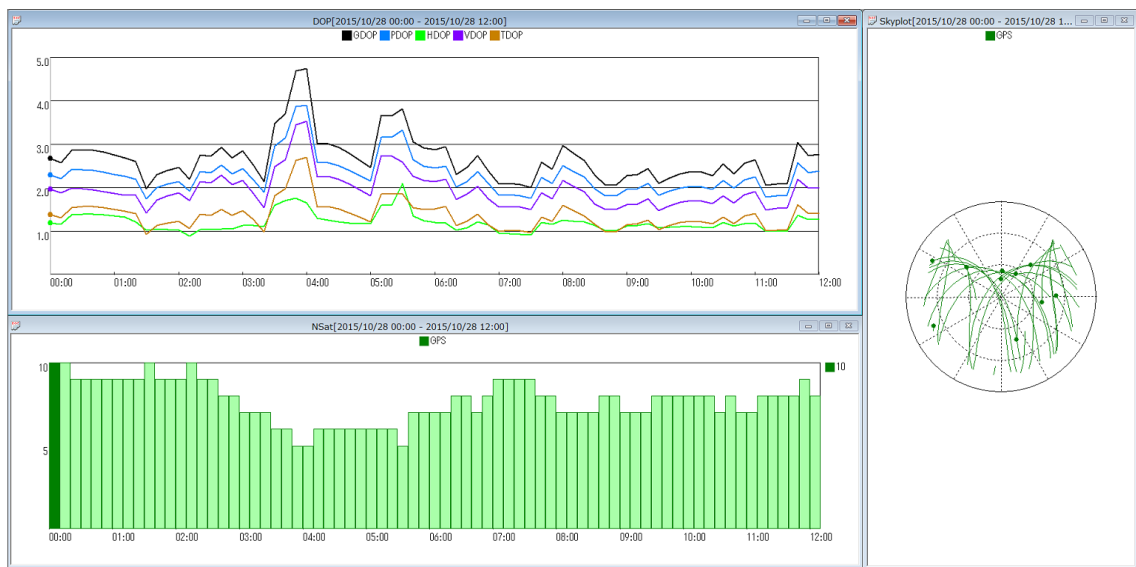


図 3.5.2-6 GPS の衛星飛来予想: 2015/10/28 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°

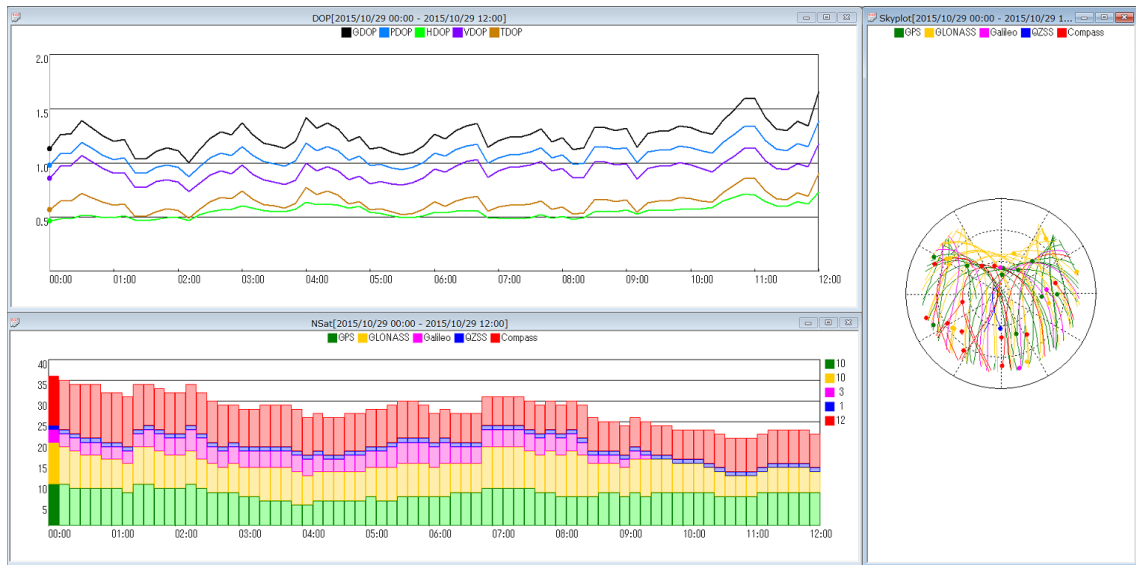


図 3.5.2-7 マルチ GNSS の衛星飛来予想: 2015/10/29 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°



図 3.5.2-8 GPS の衛星飛来予想: 2015/10/29 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°

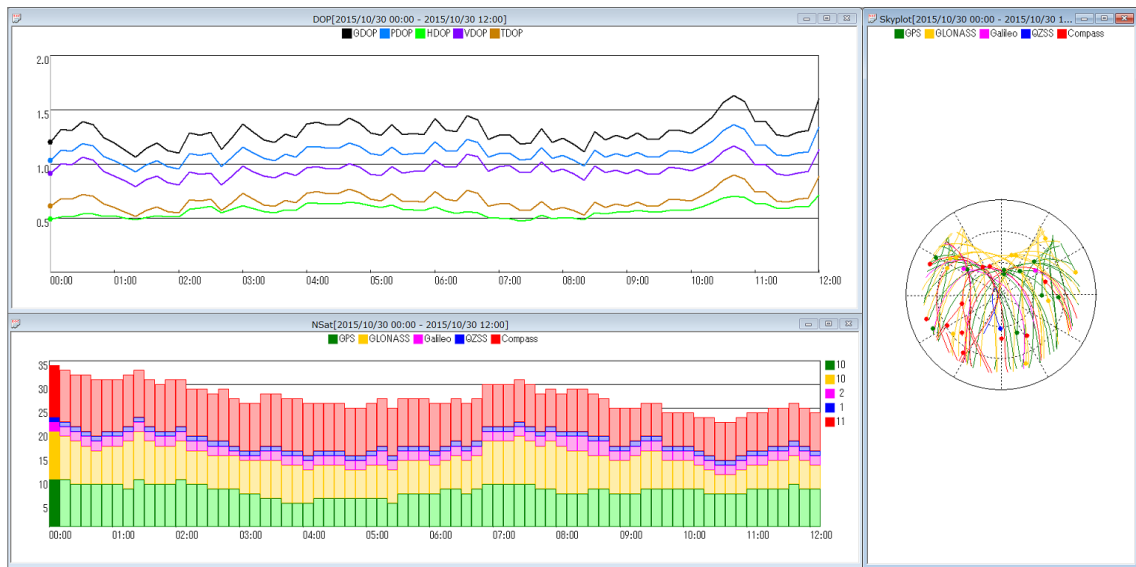


図 3.5.2-9 マルチ GNSS の衛星飛来予想: 2015/10/30 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°

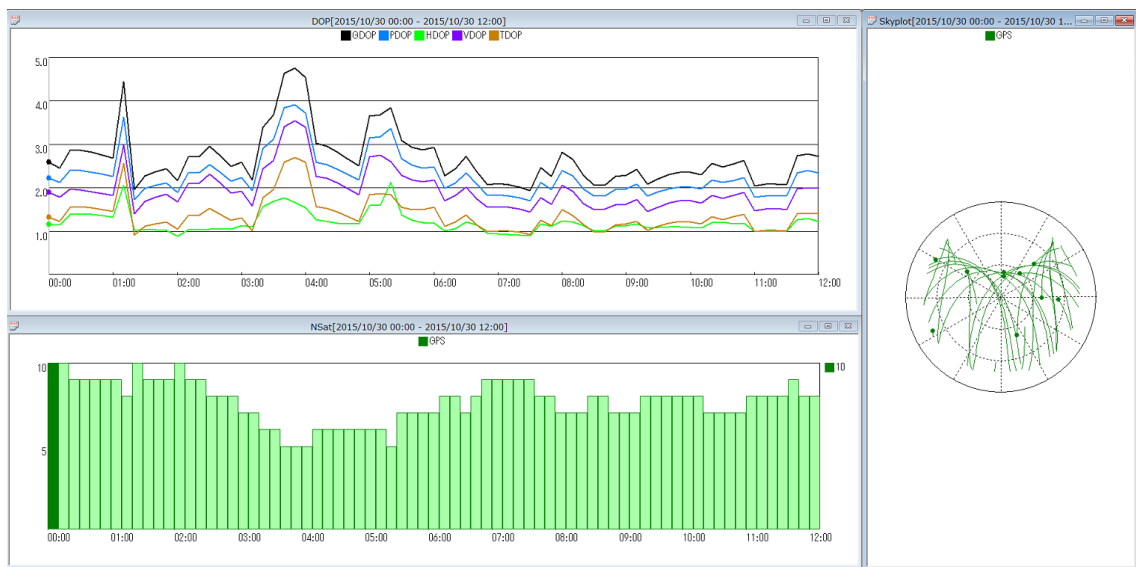


図 3.5.2-10 GPS の衛星飛来予想: 2015/10/30 0:00~12:00(UTC)
Station: JAXA 筑波宇宙センター / 仰角マスク 15°

4 データ解析方式

4.1 対象衛星システム

本調査では下表に示す衛星システムを利用した。アメリカの GPS の他、日本の QZSS、ロシアの GLONASS、中国の BeiDou そして EU の Galileo を対象とした。

表 4.1-1

システム名		周波数	プロバイダー
GPS	Global Positioning System	L1	アメリカ
		L2	
		L5	
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System	L1	日本
		L2	
		L5	
		L6	
GLONASS	Global Navigation Satellite System	G1	ロシア
		G2	
BeiDou	BeiDou Navigation Satellite System	B1	中国
		B2	
Galileo	-	E1	EU
		E5	

4.2 測位方式

測位方式は以下の 7 つの方式で評価を行っている。

- 1 周波コード測位
カーナビ等広く普及している測位方法。測位精度は概ね 10m 程度といわれているが、近年衛星軌道情報の向上や、より多くの測位衛星を利用する事で測位精度は向上している。
- L1-SAIF
準天頂衛星初号機「みちびき」のサブメータ級測位補強信号 L1-SAIF を利用したコード測位。測位精度は概ね数 m 程度。
- DGPS
実用準天頂衛星のサブメータ級補強信号 L1S で採用された方式。測位精度は概ね数 m 程度。
- 2 周波コード測位
2 つの周波数を利用する事で電離層遅延量を除去し、測位精度を向上させる。

- **RTK**
複数の受信機で同時に観測することで、受信機間の相対的な位置関係を計測し位置を決定する搬送波位相相対測位。測位精度は数 cm 程度。
- **CMAS**
準天頂衛星のセンチメートル級測位補強信号を利用した測位方式。測位精度は数 cm 程度
- **MADOCA-PPP**
精密軌道暦、クロック推定を補強信号として利用する事で測位精度を向上させる測位方式。測位精度は 10cm 程度。

4.3 解析方式の組み合わせ

測位データの解析は衛星測位システムと測位方式の組み合わせとなる。

表 4.3-1 データ解析の組み合わせ

	G	G+J	G+J+R	G+J+C	G+J+R+C+E
1 周波コード測位	○	○	○	○	○
1 周波コード測位 (L1-SAIF)	○	○			
1 周波コード測位 (DGPS)	○	○	○		
2 周波コード測位	○	○	○		
RTK	○	○		○	○
CMAS	○	○			
MADOCA-PPP	○	○	○		

補強信号を利用する測位方式 (L1-SAIF、DGPS、CMAS、MADOCA-PPP) については、補強対象衛星のみ利用した測位を解析している。またリアルタイム測位及びコード測位受信機による測位は、使用する受信機自体の対応範囲があるため、必ずしも表 4.3-1 に一致しない。

5 データ評価の方法

5.1 参照座標

MMS の自己位置を参照座標として使用した。

5.1.1 MMS 精度検証

5.1.1.1 MMS における精度指標

- MMS 計測精度指標
 - 車両自己位置の絶対正確度: 水平 XY=±6cm 以内・高さ Z=±15cm 以内
- ランドマークアップデート処理(調整処理)

以下の作業を行うことにより、絶対正確度を大幅に向上させることが可能である:

- 計測ルートへの定量的な GCP 点 (Ground Control Point) の設置と高精度計測
 - GCP 点を利用したランドマークアップデート処理による高精度解析の実施
- 標準解析結果の評価基準

要求精度範囲:

本計測において適用した精度指標は『移動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)』の第 6 条 1 項に掲げられている表を指標としている。

地図情報レベル・・・500(水平位置と標高点の標準偏差:0.25m 以内)

5.1.1.2 精度検証の方法

MMS の精度評価指標として、GNSS 基線解析結果による誤差予測値がある。誤差予測値の標準偏差が高ければ、標定点の真値と計測値のずれが大きい可能性を示している。この値をもとに標定点を定め、現地測量を行い、標定点の計測値と現地測量で得た真値を比較する。誤差が大きければ調整処理が必要となる。また、現地測量後の検証作業時に標定点が使用不可である場合は、精度のいいデータから標定点を新たに構成する。

本調査では、もともと精度の悪いであろう銀座一日比谷アンダーパス付近にのみ絞って精度検証作業と調整作業を行った。

5.1.1.3 精度検証と調整結果

精度検証を行った結果、表 5.1.1-1 のとおり、ほとんどの周回で調整処理が必要になった。ただし、コース 1 の 4 週目と 14 週目は調整ができなかった。

表 5.1.1-1 精度検証・調整結果

コース	周回	精度検証結果	調整結果
1	1	×	○
	2	×	○
	3	×	○
	4	×	×
	5	×	○
	6	×	○
	7	×	○
	8	○	-
	9	×	○
	10	×	○
	11	×	○
	12	×	○
	13	×	○
	14	×	×
	15	×	○
2	1	×	○
	2	×	○
	3	×	○

5.1.2 地殻変動補正

日本列島は 4 つのプレート(ユーラシアプレート、北米プレート、太平洋プレート、フィリピン海プレート)が衝突する場所の上にあるため複雑な地殻変動が起こり、1 年の内に数 mm から数 cm ずつ動いている。

本調査の参照値となる MMS の自己位置データは測地成果 2011 で出力される。これに対して、各受信機は現在座標を出力する。よって参照値と比較するには地殻変動量を考慮し、補正する必要がある。

今回は AT パラメータ(アイサンテクノロジー独自のパラメータ:後述)を使用し、今現在の座標を測地成果 2011 元期に戻すことにより、比較を行った。

AT パラメータ

全国には約 1200 点の電子基準点があり、高精度の測量網が整備され国土地理院がその管理運営を行っている。国土地理院から各電子基準点の「日々の座標値(F3 解)」という高精度の座標値が公開されている。

AT パラメータは、補正する点の近傍における電子基準点の F3 解から移動量を生成し、逆距離加重法(Inverse Distance Weighting:IDW)で補正を掛けるものである。

5.2 評価方法

5.2.1 位置精度評価

各測位結果は MMS の自己位置を基準に評価を行った。

MMS の精度検証の結果、誤差の値が閾値を超えているものに関しては除外して評価を行った。除外した計測データは以下となる。

都心一般道(1) : 1、2、3、4 回目

都市間高速(3) : 1、3、5、13、14、18 回目

このため都心一般道(1)のサンプルデータ数は 11 回、都市間高速(3)は 19 回となっている。また都市間高速(3)のコード測位関連に関しては、解析システム上の問題から 11、12、15 回目も除き 16 回で評価を行っている。

位置精度の評価は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で推定を行う
2. 評価対象となる測位データを世界測地系に変換
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
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

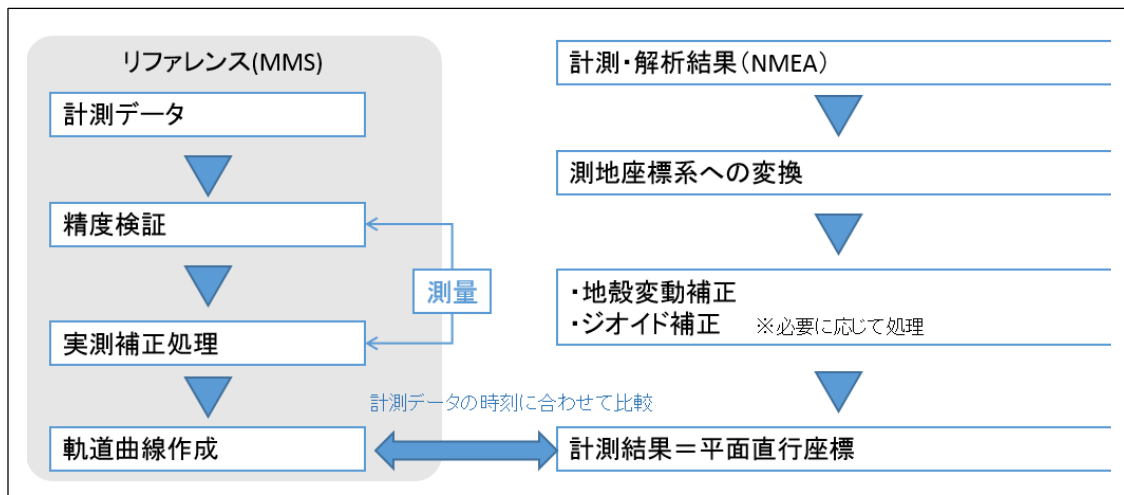


図 5.2.1-1 精度評価手順

また、評価対象とするデータ要素は表 5.2.1-1 に示す

表 5.2.1-1 精度評価要素

評価要素	内容
時刻	評価対象となる測位時間
真のアンテナ位置	真のアンテナ位置の世界測地系座標
測位の位置	測位データの世界測地系座標
速度	測位時の MMS の推定速度
進行方向誤差	推定した MMS の進行方向での差
左右方向誤差	推定した MMS の進行方向に対する左右方向の差
X、Y 方向誤差	世界測地系座標における位置の差
標高誤差	標高の差
可視衛星数	受信機から出力された可視衛星数
HDOP	受信機から出力された HDOP

5.2.2 可用性評価

可用性は、測位率、Fix 率について評価を行った。測位データの計測時間を基準に、各受信機の取得 Hz 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啓作においては 10Hz で評価した。

- ・ (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。

5.2.3 マルチ GNSS の評価

マルチ GNSS 測位評価における衛星測位システムは以下に示す組み合わせで行った。

表 5.2.3-1 マルチ GNSS の組み合わせ

	GPS	QZSS	GLONASS	BeiDou	Galileo
G	○				
G+J	○	○			
G+J+R	○	○	○		
G+J+C	○	○		○	

G+J+R+C+E	○	○	○	○	○
-----------	---	---	---	---	---

マルチ GNSS の比較評価は都心一般道(1)における 1 周波コード測位の評価を行っている。建物等の遮蔽により天空率の低い都心一般道(1)では主にマルチ GNSS の利用による測位率改善の効果を、都市間高速(1)においてはマルチ GNSS による測位精度の影響を評価している。

5.2.4 測位方式に関する評価

測位方式の評価は、マルチパス等の地上環境の影響が少ない、都市間高速(1)で行った。受信機等による影響差を無くすために、同じアンテナ、同じ受信機で取得したデータを後処理によりそれぞれの測位方式で解析を行っている。また、利用衛星測位システムによる差異が出ない様に、使用する衛星システムは GPS と QZSS のみとしている。対象とする測位方式は表 5.2.4-1 に示す。

表 5.2.4-1 測位方式

	測位方式
M1	1 周波コード測位
M2	1 周波コード測位 (L1-SAIF)
M3	1 周波コード測位 (DGPS)
M4	2 周波コード測位
M5	RTK
M6	CMAS
M7	MADOCA-PPP

5.2.5 地上環境の影響評価

地上環境の影響評価は次の 2 つのアプローチで行っている。

5.2.5.1 天空率による評価

走行時に撮影した天空写真を基に路上から見上げた天空率を算出し、測位への影響を評価した。

5.2.5.2 完全遮蔽前後の振る舞い

信号遮断時の測位の振る舞いを検証するために、日比谷アンダーパスをサンプルとして調査を実施した。10 数回の計測データを重ね統計的な評価を行っている。

5.2.6 電離層遅延の評価

5.2.6.1 昼夜間による電離層の影響差

電離層活動が比較的穏やかになる夜間の時間帯での計測結果と、昼間の計測結果を比較することで、昼夜の測位性能の差異の評価を行った。

5.2.6.2 低緯度地域測位の調査

電離層活動が活発な低緯度地域での測位データと、日本でのデータを比較評価した。データはMGA(Multi-GNSS Aisa)で設置されたブルネイの固定局(緯度 4 度)を利用して、つくばの固定局との電離層による遅延量を評価した。

6 解析及び評価結果

6.1 位置精度および可用性評価

今回調査対象とした計測走行コース毎の位置精度および測位可用性を評価する。
評価にあたり、後処理でのコード測位 (GPS+QZSS) の結果を用いている。

6.1.1 都心一般道(1)銀座周辺

都市部でのマルチパスの影響が大きい箇所として、東銀座交差点から数奇屋橋交差点までを北西に進む直線コースを設定した。道路の左右を建物で囲まれると同時に、交通量も多く停止、移動を繰り返す箇所であり、衛星測位にとっては非常に厳しいコースとなっている。

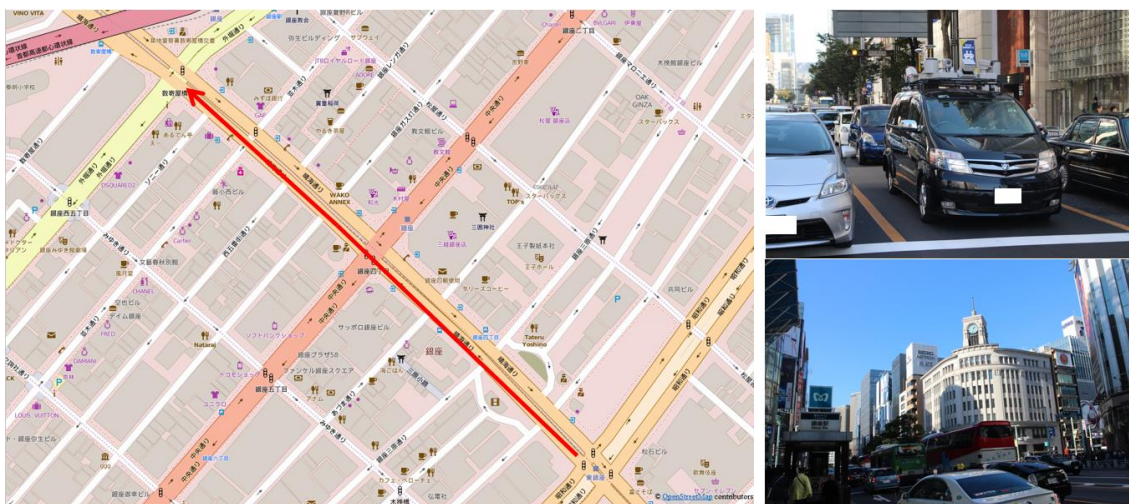


図 6.1.1-1 都心一般道(1)銀座周辺のコース図と、
計測時の写真(上:数奇屋橋交差点)、下:銀座4丁目交差点)

そのため MMS での計測後に補正を実施したが、精度管理上 4 回目と 14 回目の計測が十分な精度閾値内で無いと判断し、評価から外している。

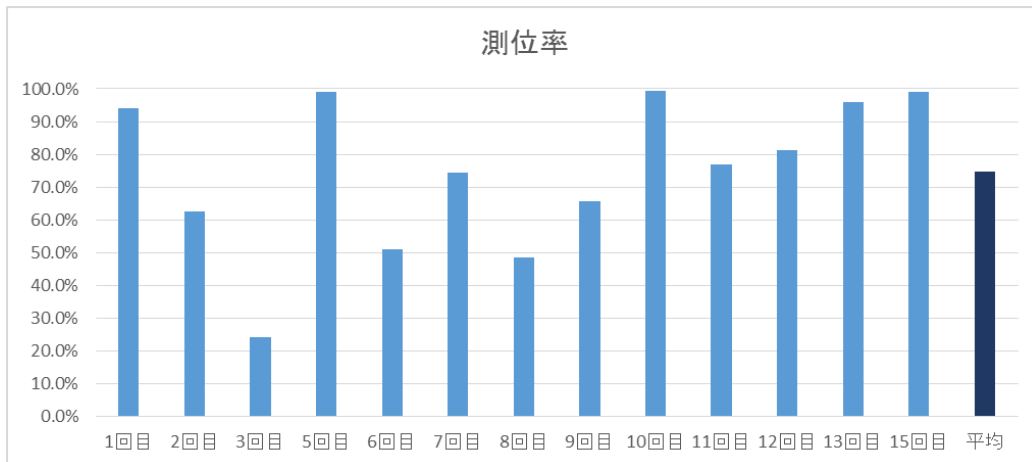


図 6.1.1-2 銀座周辺の測位率(コード測位(GPS+QZSS))

銀座周辺におけるコード測位(GPS+QZSS)の測位率は90%を超えるものもあったが、25%以下の測位率での計測等もあり平均としては74.76%となった。天空率の低い都市部では衛星の配置環境により大きく測位性能に差が出てきている。

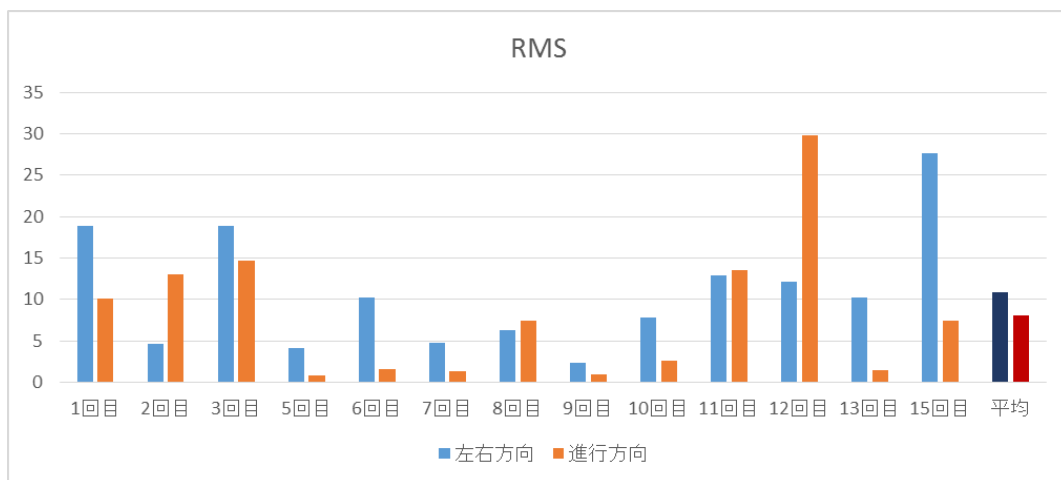


図 6.1.1-3 銀座周辺の測位精度:RMS(コード測位(GPS+QZSS))

左右方向のRMSが平均10.82m、進行方向は8.04mであり、マルチパスの影響を大きく受けていると思われる。左右を建物で挟まれた状態での測位となるため、左右方向の誤差が大きくなる傾向がみられる。

例として10回目の誤差を色分けして走行軌跡上に示す。

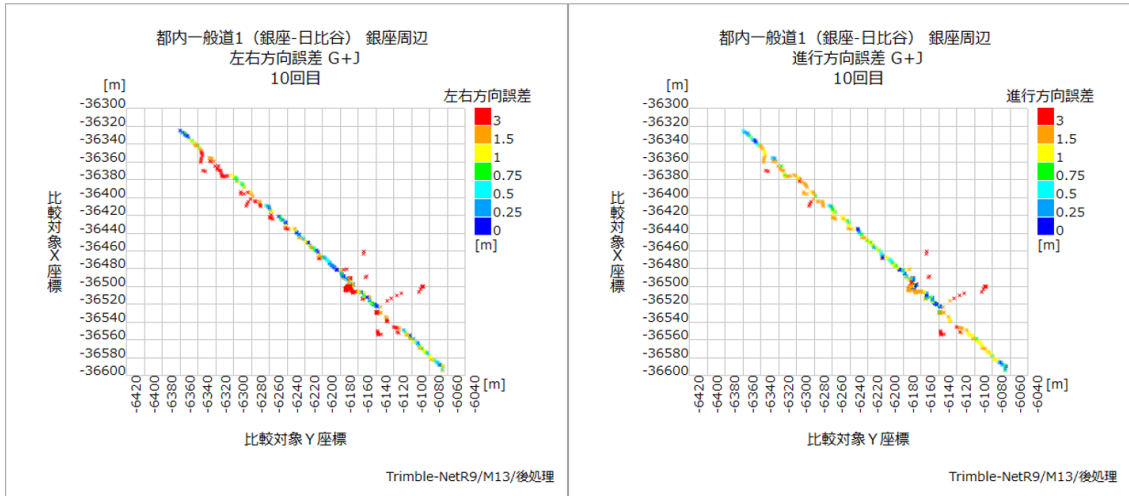


図 6.1.1-4 銀座周辺 左右方向／進行方向誤差の軌跡プロット

走行軌跡に対し、左右にスライドするように座標がズレる箇所が何カ所か確認できる。これらは信号待ち等による停車時、または低速度移動時に生じている。都市部の様な建物に囲まれマルチパスが生じやすい環境においては、停止することマルチパスを含む信号がロックされてしまい、このような現象が起きていると推測できる。

6.1.2 都心一般道(2)

2014 年度の調査でも走行したコース。東京海洋大学越中島キャンパスを起点とした周回コースであり、都心一般道(1)の銀座周辺をはじめとした丸の内、勝鬨橋等の建物によるマルチパスの影響が大きい箇所その他、首都高やゆりかもめによる上空視界遮蔽箇所等、様々な地上環境を含んだコースとなっている。

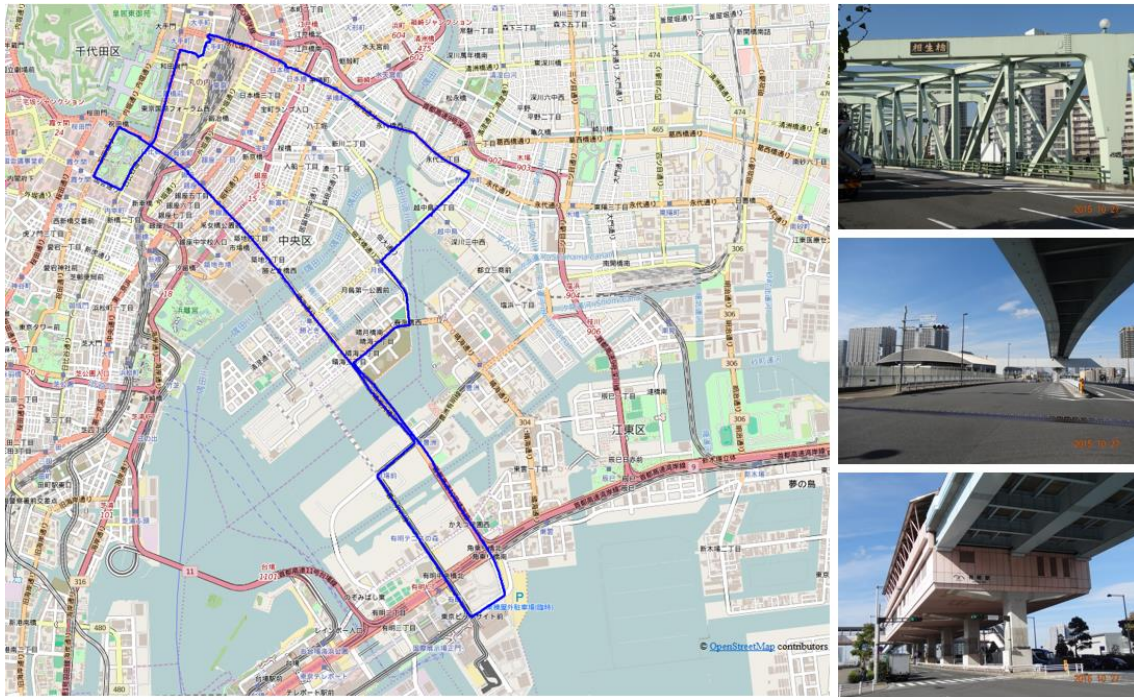


図 6.1.2-1 都心一般道(2)のコース図と、計測時の写真(上:相生橋、中:お台場:下:有明駅)

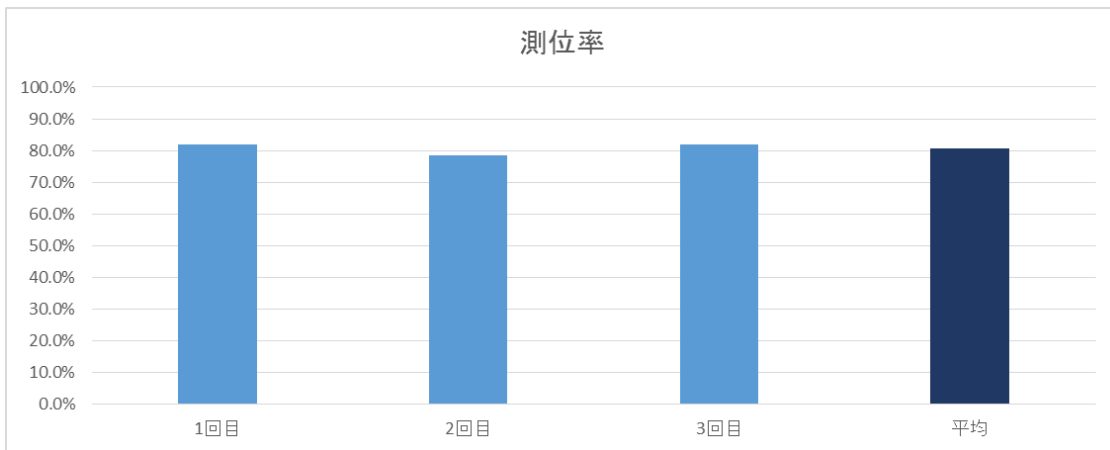


図 6.1.2-2 都心一般道(2) 測位率(コード測位(GPS+QZSS))

都心一般道(2)は計 3 回の計測を実施しており、測位率の平均は 80.72%となっている。3 回とも大きな違いは無い結果となった。

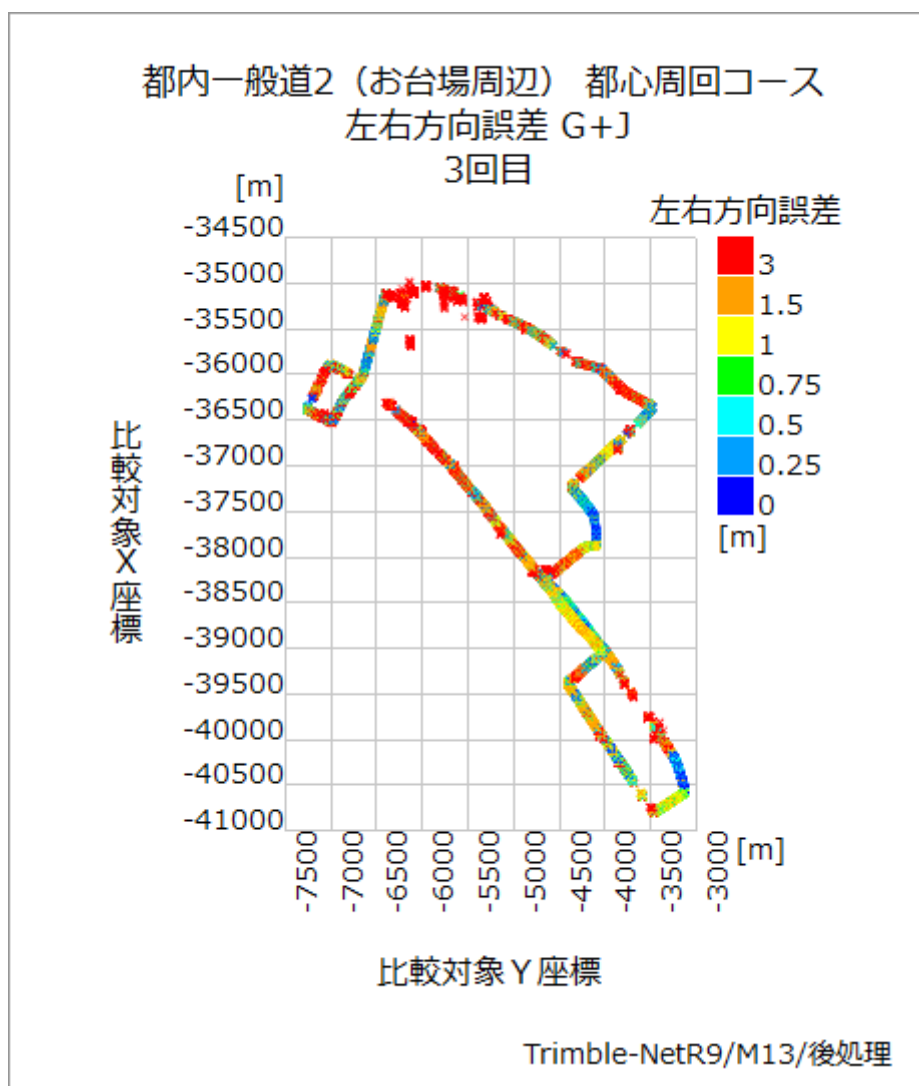


図 6.1.2-3 都心一般道(2) 左右誤差の軌跡プロット

例として 3 回目の軌跡プロットを示すが、お台場の首都高速高架下での上空視界遮蔽による測位不能、晴海通りを勝鬨橋から日比谷までのビル街での精度劣化、日比谷アンダーパスによる完全遮蔽による測位不能、そして丸の内周辺の高層ビル街による遮蔽からの測位精度劣化と測位不可能だった箇所が、主だった衛星測位率の低下および精度劣化の要因となっている。

左右方向の RMS が平均 19.24m、進行方向は 12.72m と比較的大きく、また左右方向誤差の方が、誤差量が大きい特徴がある。

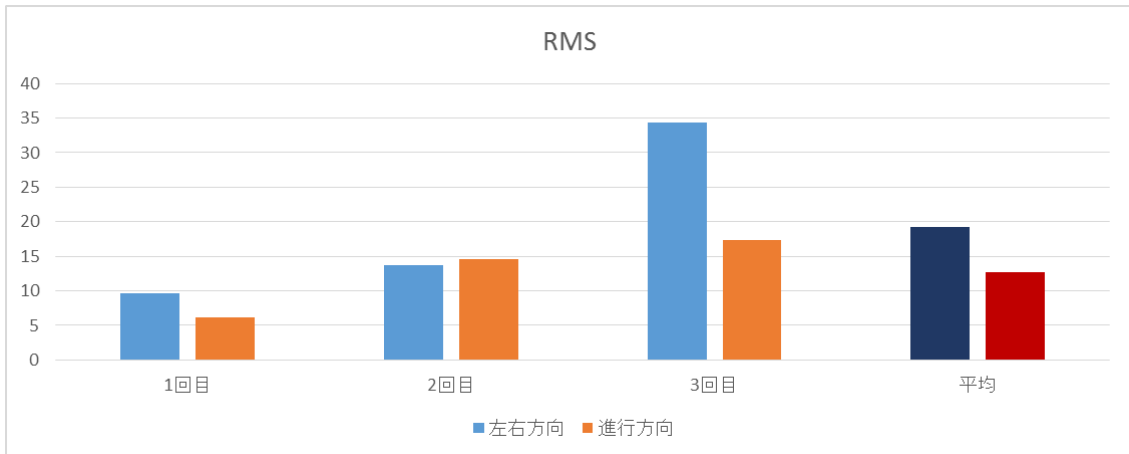


図 6.1.2-4 都心一般道(2)の測位精度:RMS(コード測位(GPS+QZSS))

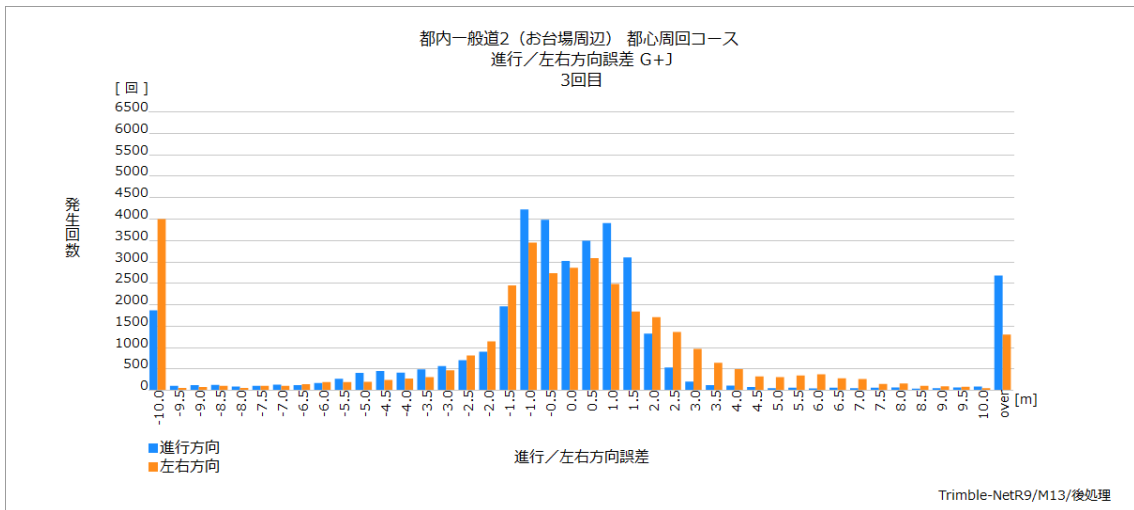


図 6.1.2-5 都心一般道(2) 左右/進行誤差のヒストグラム

図 6.1.2-5 より、多くの値は±2m 程度に収まっているが、10m 以上の誤差を持つ測位結果が多く存在することが確認できる。

累積距離(計測結果からの推定距離の為誤差を含む)での誤差の推移より、これらの誤差の発生個所が 3 計測とも類似しており、測位精度の劣化箇所は走行経路から、あらかじめ予測できると考えられる。

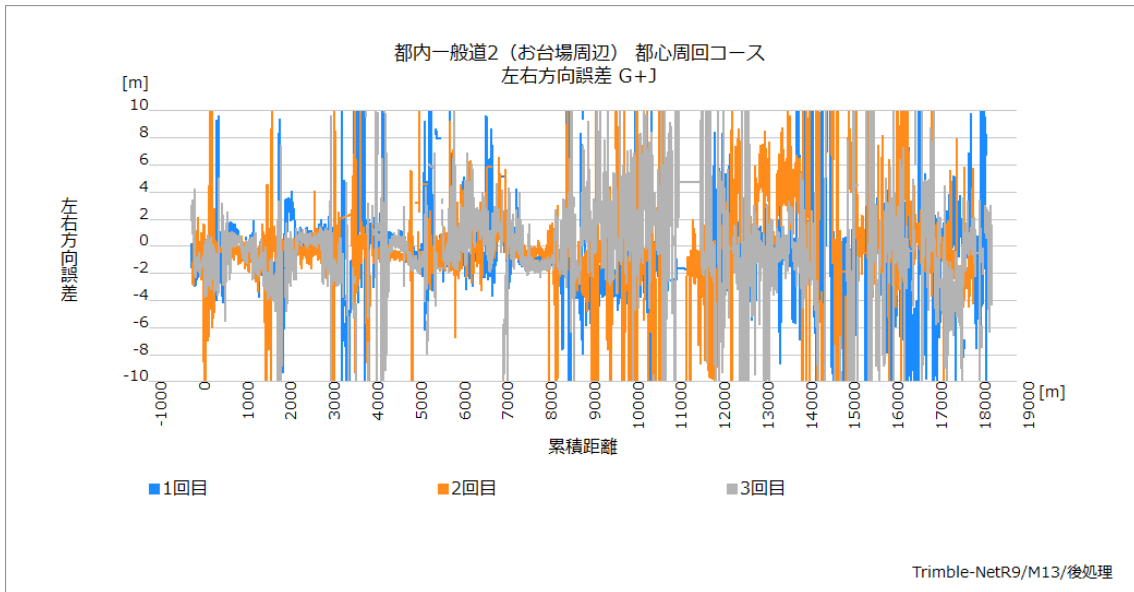


図 6.1.2-6 都心一般道(2) 累積距離による左右誤差の推移

6.1.3 都市間高速(1)

都市間高速は2014年度の調査と同じく常磐道を対象としている。桜土浦ICからつくばJCTを経てつくば中央ICで折返し、再びつくばJCTを経て谷田部ICで折返し、そのまま桜土浦ICまでの計測経路となっている。

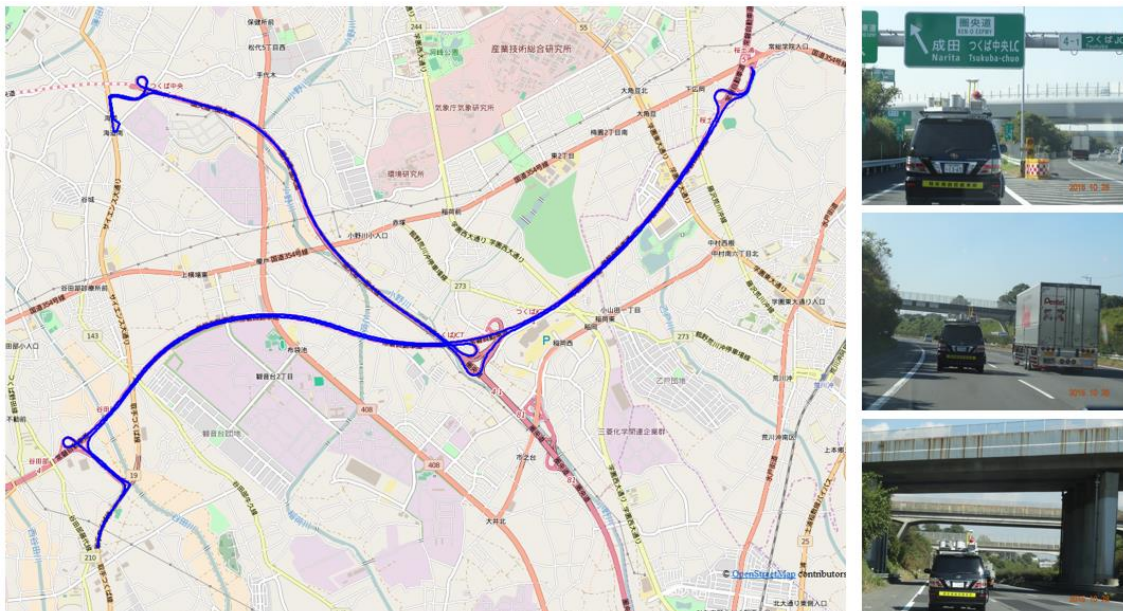


図 6.1.3-1 都市間高速(1)のコース図と、計測時の写真(上:つくばJCT、中:トラック並走:下:谷田部側の橋梁)

走行コースとしては JCT や橋梁等の一部の遮蔽と、法面による遮蔽のみで、比較的上空視界が開けている。測位率は平均で 97.60%となり、3 回の計測全て 96%以上であった。

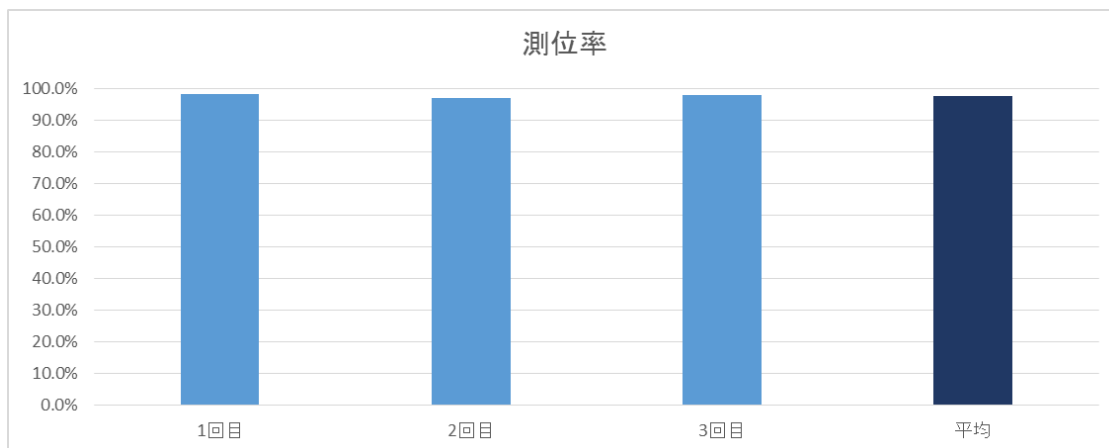


図 6.1.3-2 都市間高速(1) 測位率(コード測位(GPS+QZSS))

測位精度に関しても RMS は左右方向 1.26m、進行方向 1.20m と良い測位精度で計測ができています。ただし、2 回目は他の走行と比較して精度が低下している。

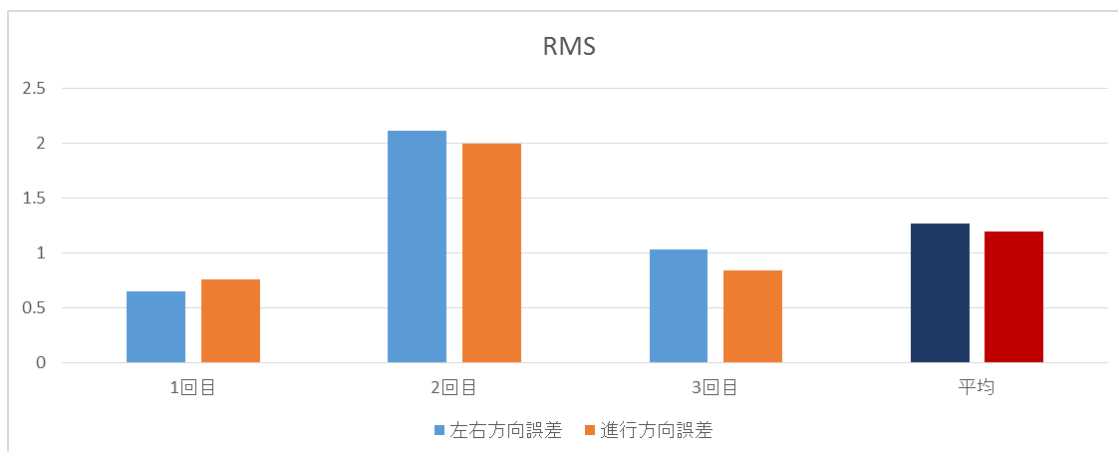


図 6.1.3-3 都市間高速(1)の測位精度:RMS(コード測位(GPS+QZSS))

2 回目の測位精度が他の走行と比較して低い要因としては衛星配置によるものが大きい。1 回目に対して 2 回目は約 3 個、3 回目は約 1 個可視衛星数が少ない。ある程度の測位精度を維持する場合、測位できる衛星数がいくつあるかは測位結果に大きく影響を与える。

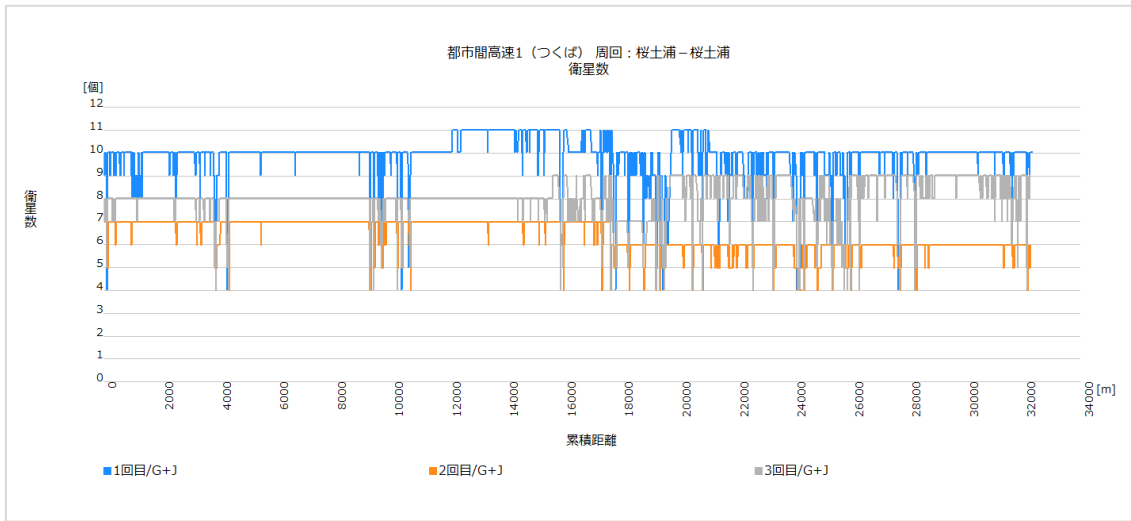


図 6.1.3-4 都市間高速(2) 可視衛星数の推移(コード測位(GPS+QZSS))

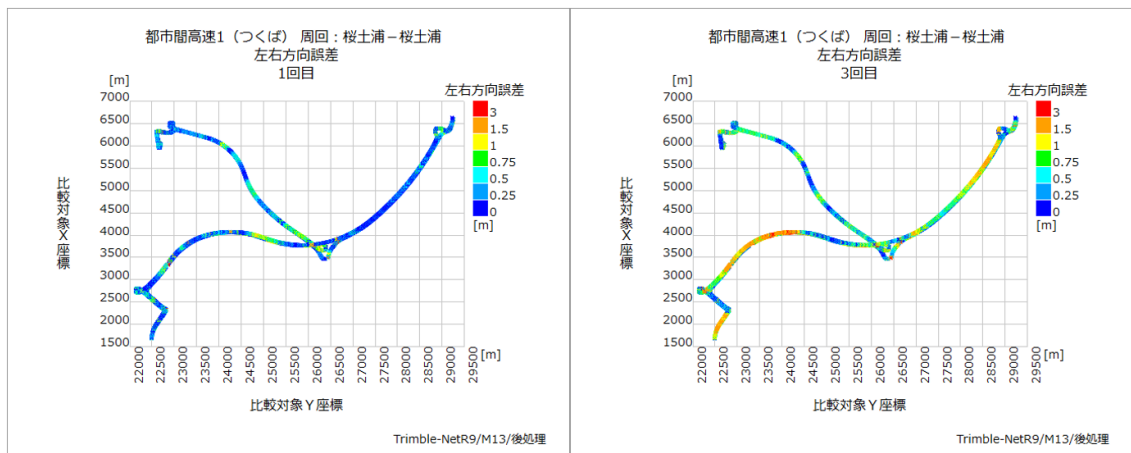


図 6.1.3-5 都市間高速(2) 左右誤差の軌跡プロット(左:1回目/右:3回目)

図 6.1.3-5 より、衛星測位数による測位精度の低下はコース全体ではなく一部の箇所で生じていることがわかる。特につくば中央 JCT から谷田部間は法面と複数の橋梁により、測位精度が大きく低下している。

6.1.4 都市間高速(2)

統計的に衛星測位の評価を行うため、走行数を増やすことを目的に都市間高速(1)の一部(桜土浦 IC-谷田部 IC 間)を往復で 25 回計測走行を行っている。また評価データとしては MMS の精度閾値を超えたものを除き 19 回の計測データを利用している。

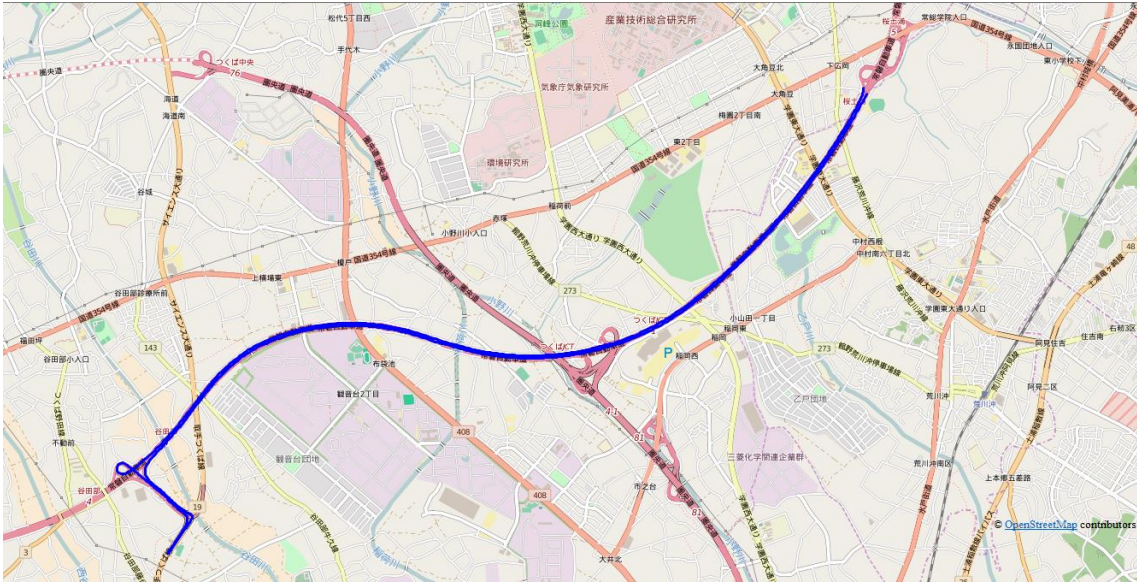


図 6.1.4-1 都市間高速(2)のコース図

桜土浦 ICー谷田部 IC 間(往路) 19 回の測位率の平均は 95.54% で全て 91% 以上の高い測位率となっている。

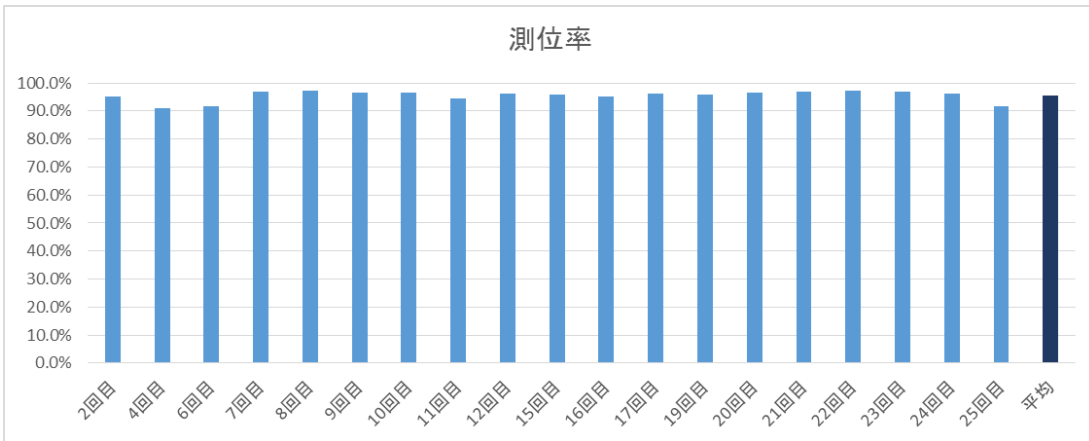


図 6.1.4-2 都市間高速(2)往路 測位率(コード測位(GPS+QZSS))

また、測位精度に関しても RMS の平均は左右方向誤差 1.18m、進行方向誤差は 1.06m と非常に高い精度となっている。最も悪いものでも左右方向誤差、進行方向誤差ともに 1.7m 程度であり、コース全体で上空視界が開けた都市間高速では GPS+QZSS のみのコード測位でも高い測位率、測位精度が期待できる。

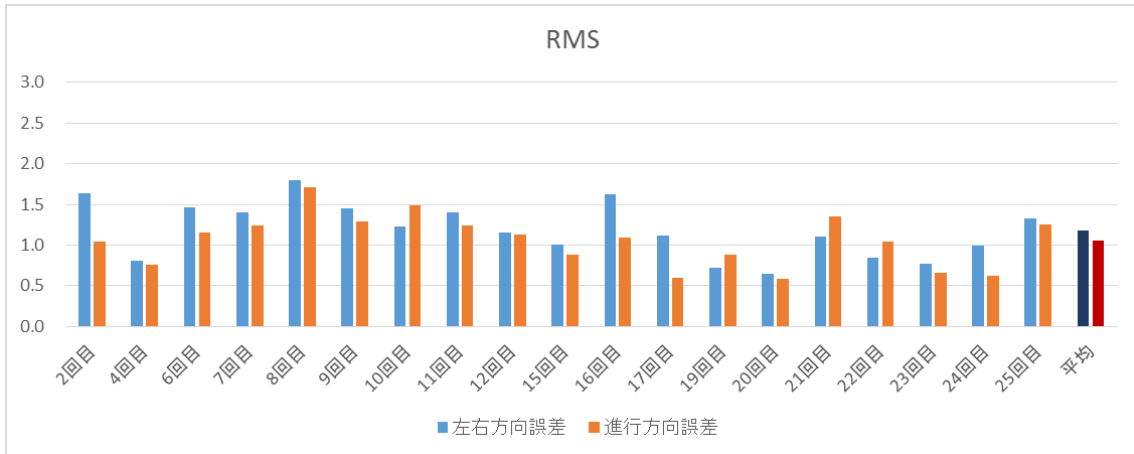


図 6.1.4-3 都市間高速(2) 往路の測位精度:RMS(コード測位(GPS+QZSS))

RMS の値が良い理由として、特に大きな誤差を持つ測位結果が少ないことが大きな要因であり、必ずしも高精度な測位を維持しているわけではない。誤差 1m程度 の目標であれば十分に利用する事が可能であるというレベルでもある。

RMS の値が比較的平均値に近い 12 回目のデータで確認をする。

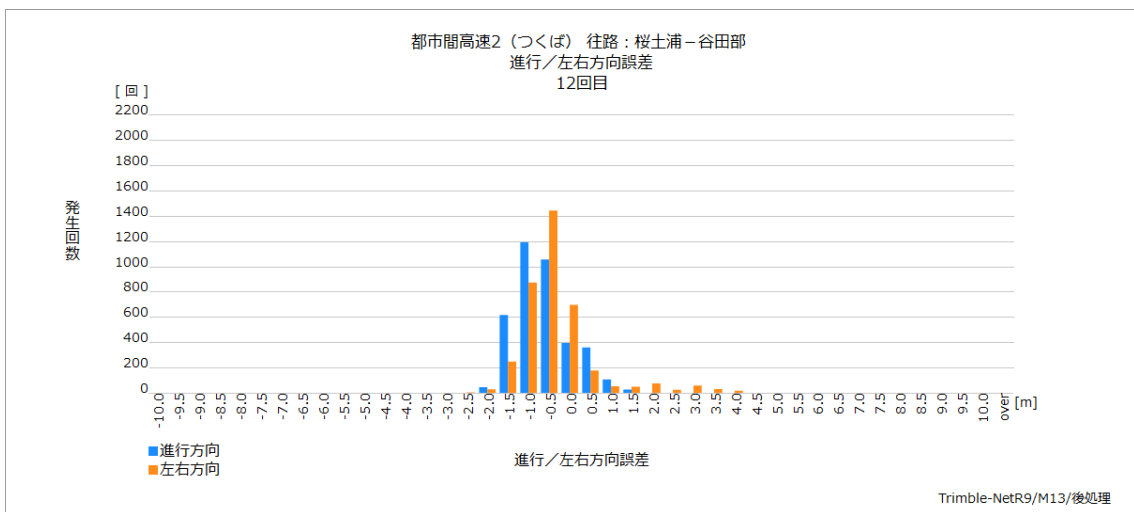


図 6.1.4-4 都市間高速(2) 左右/進行誤差のヒストグラム(12回目)

左右、進行方向ともに、2.0m以内に入っているが、特に 0.0m 付近に集中しているというわけでは無い。また左右方向誤差に関しては少数ではあるが 2.0m 以上の誤差が生じる事もある。誤差を軌道上にプロットすることで、どのような箇所で大きな誤差が出やすいのかがわかる。

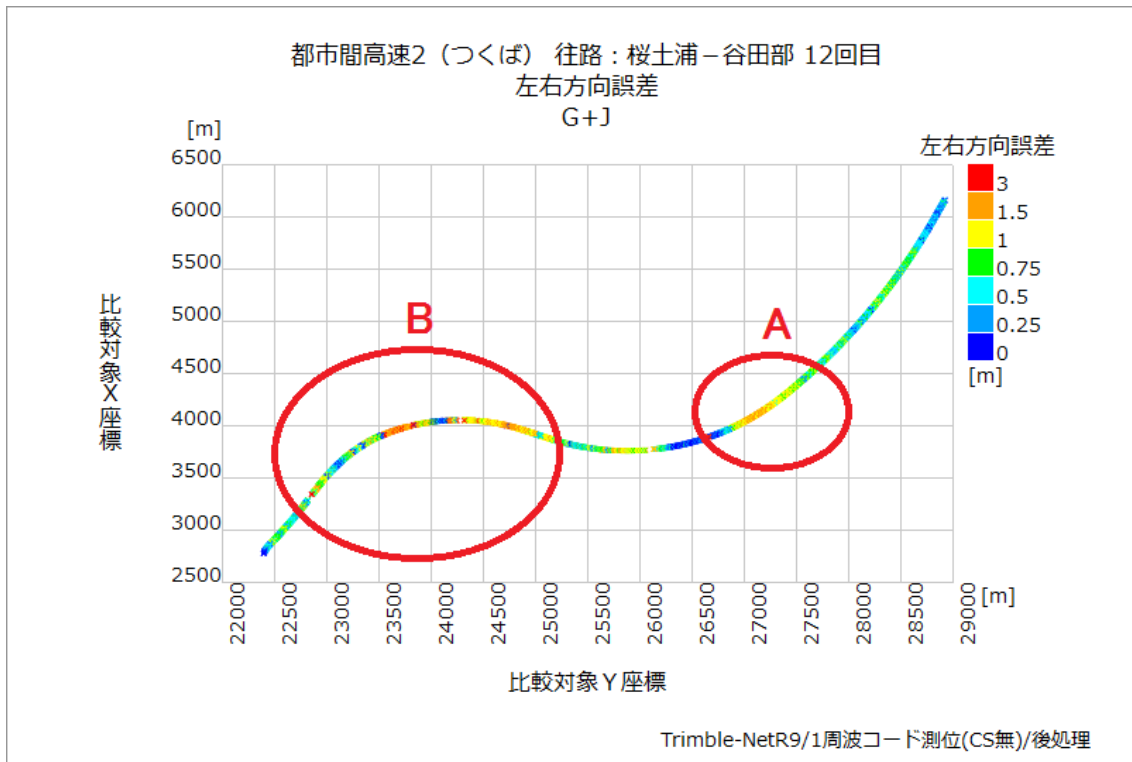


図 6.1.4-5 都市間高速(2) 左右方向誤差の軌道プロット(12回目)

図 6.1.4-5 に示した中央付近右側 A(桜土浦 IC 側)の測位精度劣化箇所は、つくば JCT の高架下通過に伴うものであり、同じく左側 B(谷田部 IC 側)の測位精度劣化箇所は、法面と連続する橋梁下通過により生じるものである。

測位劣化箇所からの精度復帰は比較的スムーズであり、連続した遮蔽等が無い場合は測位誤差も、さほど大きくならない傾向にある。

6.2 マルチ GNSS

近年従来の GPS、GLONASS に加え日本の QZSS や中国の BeiDou が測位に使用できるようになってきている。そこで複数の衛星システムを組み合わせることで、測位率や精度がどのように変化するかを評価した。

表 6.2-1 マルチ GNSS 評価条件

マルチ GNSS 評価条件	
組み合わせ	GPS GPS+QZSS GPS+QZSS+BeiDou GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS
測位方式	1周波コード測位(後処理解析)

コース	都心一般道(1)銀座周辺
-----	--------------

評価する衛星システムの組み合わせは「GPS」「GPS+QZSS」「GPS+QZSS+BeiDou」「GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS」の4パターンである。EUの衛星測位システムであるGalileoについては、データを取得できなかったため、評価対象から除外した。

測位方式は1周波コード測位(後処理解析)である。

評価対象コースは、建物などによる遮蔽が多く、複数衛星システムを使用することによって可視衛星数の数が大きく変動し、マルチGNSSの効果が顕著に表れると考えられるために都心一般道(1)銀座周辺を選択した。

以下に各周回における、それぞれの衛星システムの組み合わせの測位率を示す。

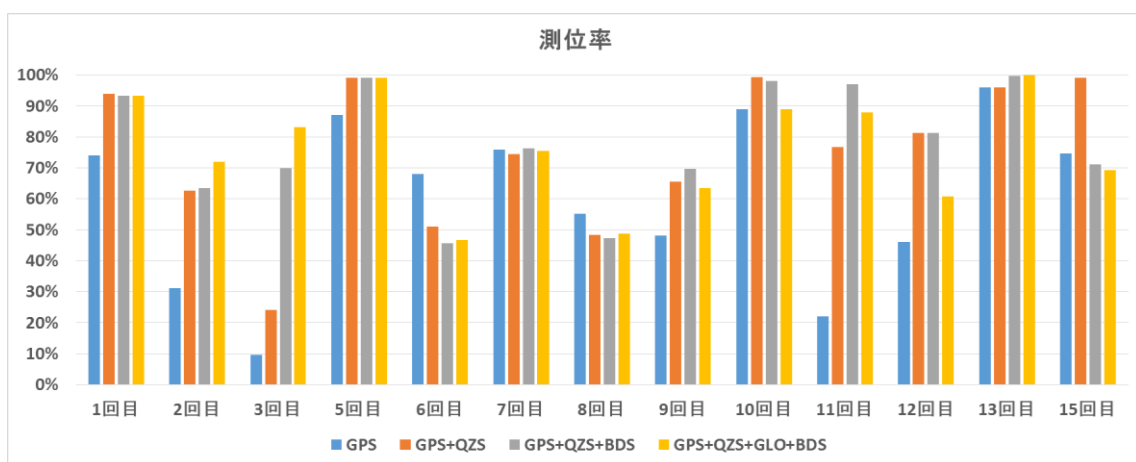


図 6.2-1 1周波コード測位:銀座 測位率

図 6.2-1 を見ると、概ね測位率は使用する衛星システムが増えるほど、改善していると判断できる。しかし、6回目や8回目の測位率については、GPS のみの場合の方が良い結果が出ている。また GLONASS を加えると測位率が悪くなっている部分もいくつか見られる。

2、3、11 回目では、GPS のみでは測位率が非常に悪いが、他の衛星システムを加えることで、測位率が大幅に改善している。これは、衛星配置が影響していると考えられる。

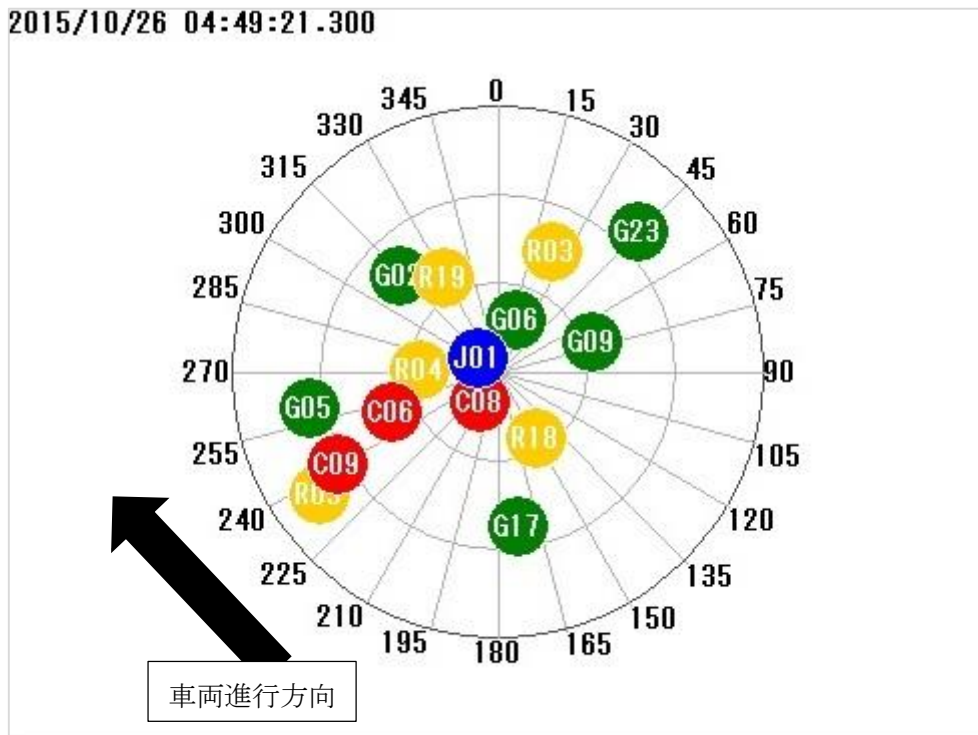


図 6.2-2 10/26 銀座周辺 2 回目走行時の衛星配置

図 6.2-2 は 2 回目の走行時の衛星配置である。衛星位置は IGS の精密暦から算出した位置であり、実際に受信した衛星と異なる場合がある。

衛星配置を確認すると、北東から南西にかけて衛星が多く位置していることがわかる。この衛星配置の時、実験車両は北西方向に向かって走行していた。すなわち車両進行方向に衛星が少なく、左右方向に多く配置されていたことになる。しかし銀座周辺の道路では車両の左右は高層ビルで空が遮られている。そのため GPS のみでは測位に必要な最低限の衛星数が確保できず、他の衛星システムを加えることで測位が可能になったと考えられる。

6.2.1 GPS

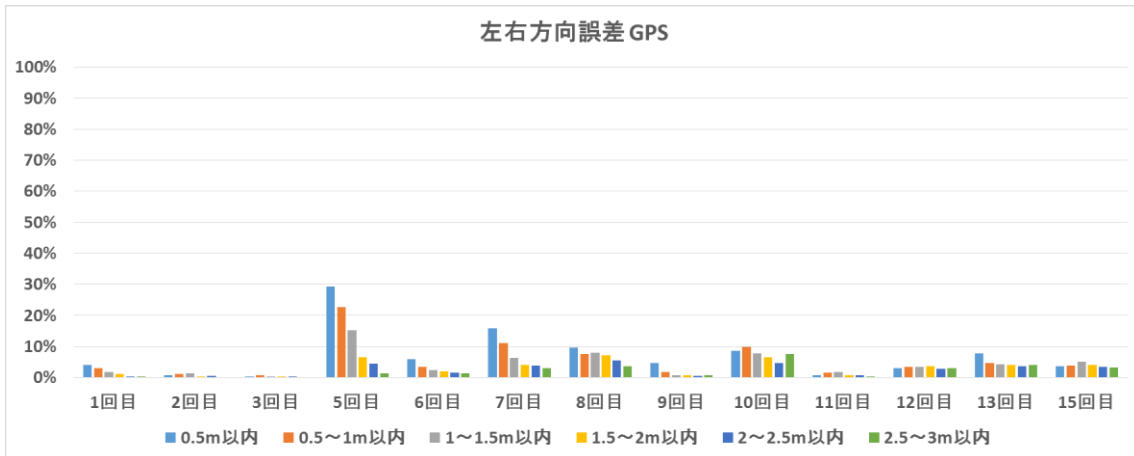


図 6.2.1-1 左右方向誤差 GPS

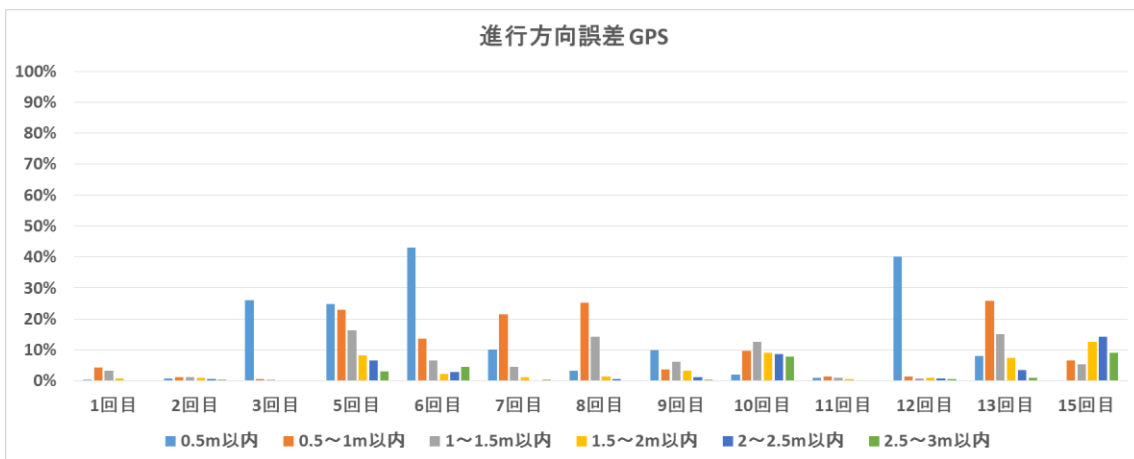


図 6.2.1-2 進行方向誤差 GPS

GPS の結果を以降のシステム組み合わせの評価基準とする。1 周波コード測位であることに加え、銀座周辺の測位環境の悪さによってこのような結果になっている。

6.2.2 GPS+QZSS

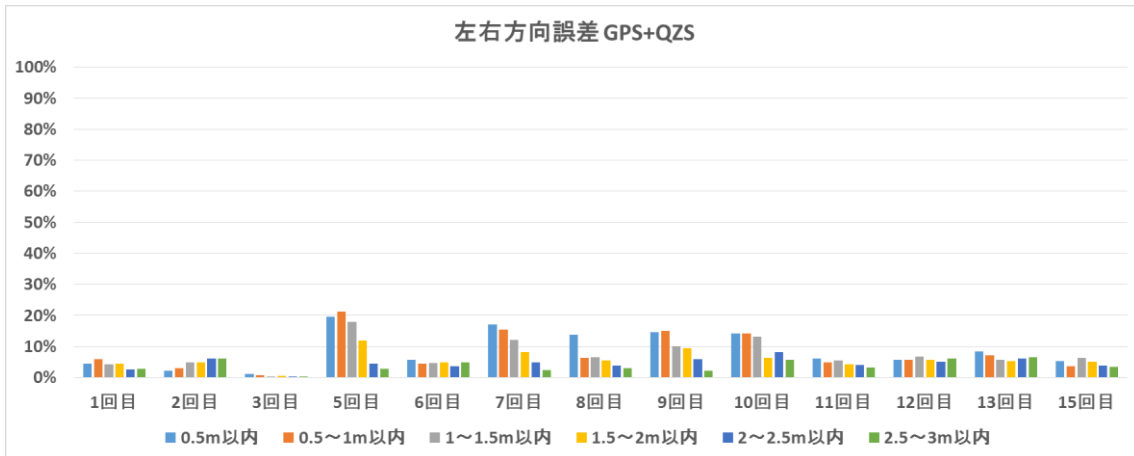


図 6.2.2-1 左右方向誤差 GPS+QZSS

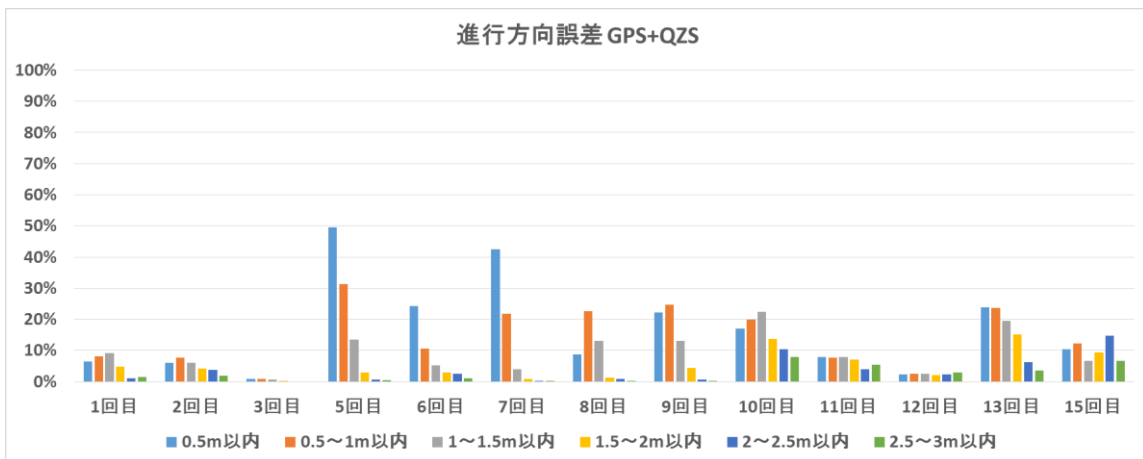


図 6.2.2-2 進行方向誤差 GPS+QZSS

GPS のみの場合に比べてわずかであるが精度は向上している。図 6.2.2-2 のように、QZSS を加えることによって測位率は改善されているが、銀座周辺のような測位環境の劣悪な場所での測位精度向上については、効果は限定的である。

6.2.3 GPS+QZSS+BeiDou

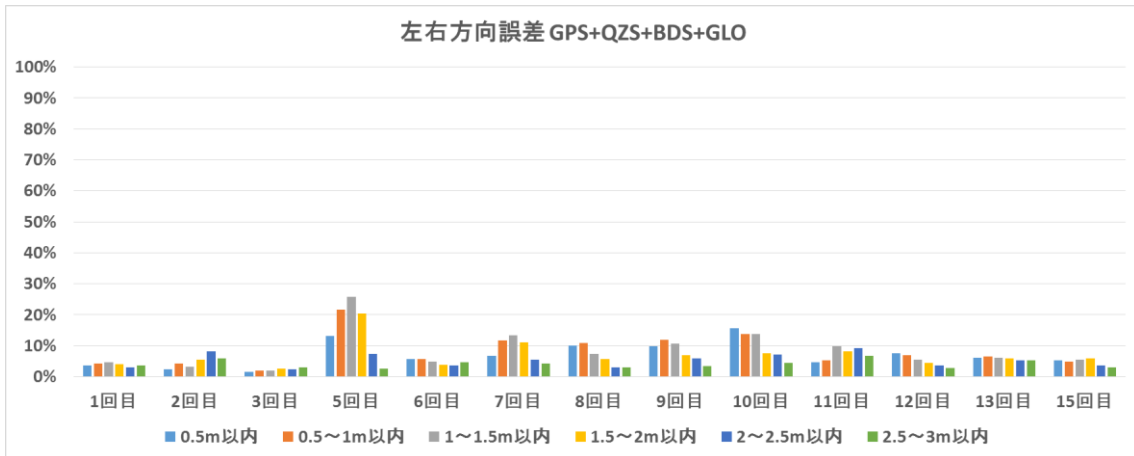


図 6.2.3-1 左右方向誤差 GPS+QZSS+BeiDou

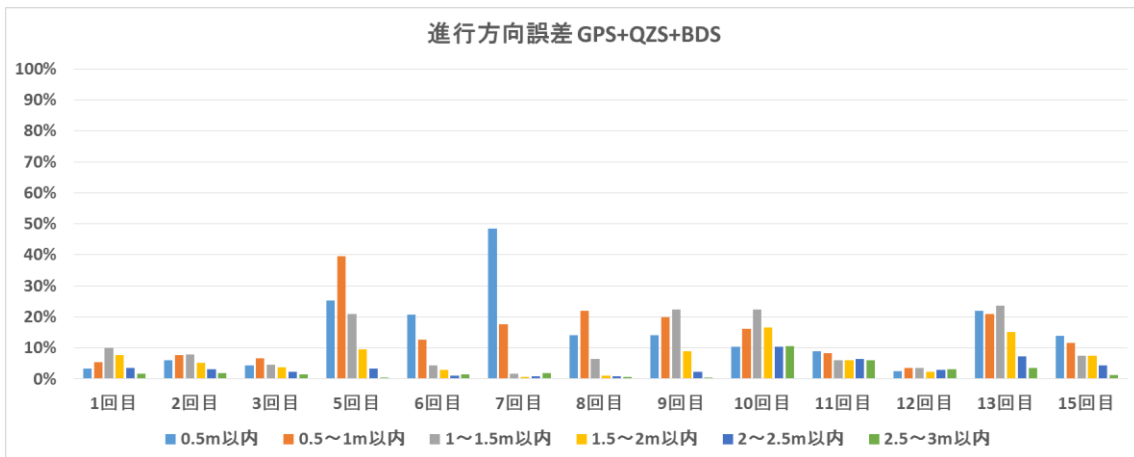


図 6.2.3-2 進行方向誤差 GPS+QZSS+BeiDou

BeiDou を加えると、左右方向誤差については 0.5m 以内に収まる割合が増えている。BeiDou の有無で 3 機程度衛星数が増加するため、測位率と精度が向上すると考えられる。

6.2.4 GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS

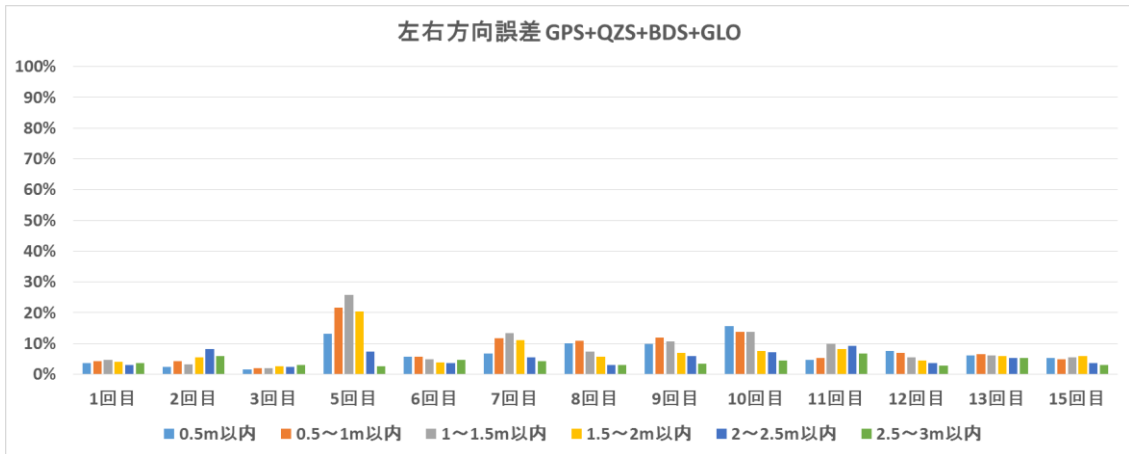


図 6.2.4-1 左右方向誤差 GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS

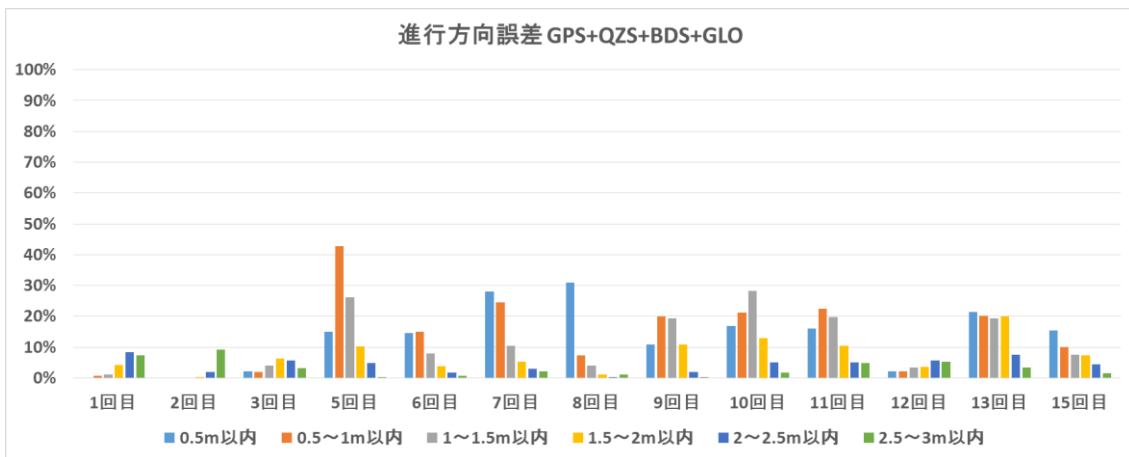


図 6.2.4-2 進行方向誤差 GPS+QZSS+BeiDou+GLONASS

GLONASS を加えた方がわずかであるが精度が劣化している。GLONASS は GPS に比べ衛星時計誤差や軌道情報誤差が大きいことが精度劣化につながっていると考えられる。

全体を通して、マルチ GNSS の併用による衛星測位可用性向上は有効であると考えられる。ただし精度については、マルチ GNSS を使用しても周囲の環境や衛星配置状況によっては逆に悪化する場合もある。銀座のような環境では、測位計算に使用できる衛星が増えれば、その分マルチパスの影響を受けやすくなる。そのため単純に衛星数が増えれば精度が上がるというものではないが、衛星数が増えれば特定の衛星を取捨選択することが可能になる。そのような新しい測位計算アルゴリズムによって、マルチ GNSS の効果を最大限に利用できるようになると考えられる。

6.3 測位方式

6.3.1 1周波コード測位

6.3.1.1 概要

1 つの受信機で受信した衛星からの電波のみで測位を行う方法で、単独測位といわれる。衛星からの信号に含まれる情報を基に、衛星までの疑似距離を求め自己位置を決定する。安価な仕組みでできるため、スマートフォンやカーナビ等で多く使われ普及している。疑似距離を求める際に必要となる電波伝搬時間の遅延や衛星軌道情報の誤差等の影響を受けるため、一般的に測位精度は 10m 程度といわれていたが、衛星軌道情報の高精度化や、受信機本体の精度向上もあり測位精度は向上してきている。

本調査では、一般的に利用されている L1 帯の信号を利用したコード測位を用いて評価を行っている。なお、測位方式そのものを評価するため、他の測位方式と同様に測量用受信機の RAW データを利用して後処理にて計算を行っている。

都市間高速 25 回の走行のうち 16 回のみを対象としている。

6.3.1.2 測位率

都市間高速では 95% の測位率となった。マルチ GNSS により可視衛星数の増加はそのまま測位率の向上につながるのだが、GLONASS を追加した際に測位率が低下している。これは昨年度の調査報告にもあるように、GLONASS の軌道情報誤差等が影響して測位解を得られないことが要因と推定される。

各走行回の測位率で示す様に 22 回目の計測が GLONASS を利用した際の測位率の低下に影響を与えており、おそらくはこのとき利用した GLONASS 衛星の 1 つ又は幾つかの軌道情報等に問題があったのではないかと推定される。

将来 GLONASS のアップグレードにより、この問題は解消していくことが期待される。

表 6.3.1-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G	G+J	G+J+R
測位率	95.01%	95.38%	93.17%

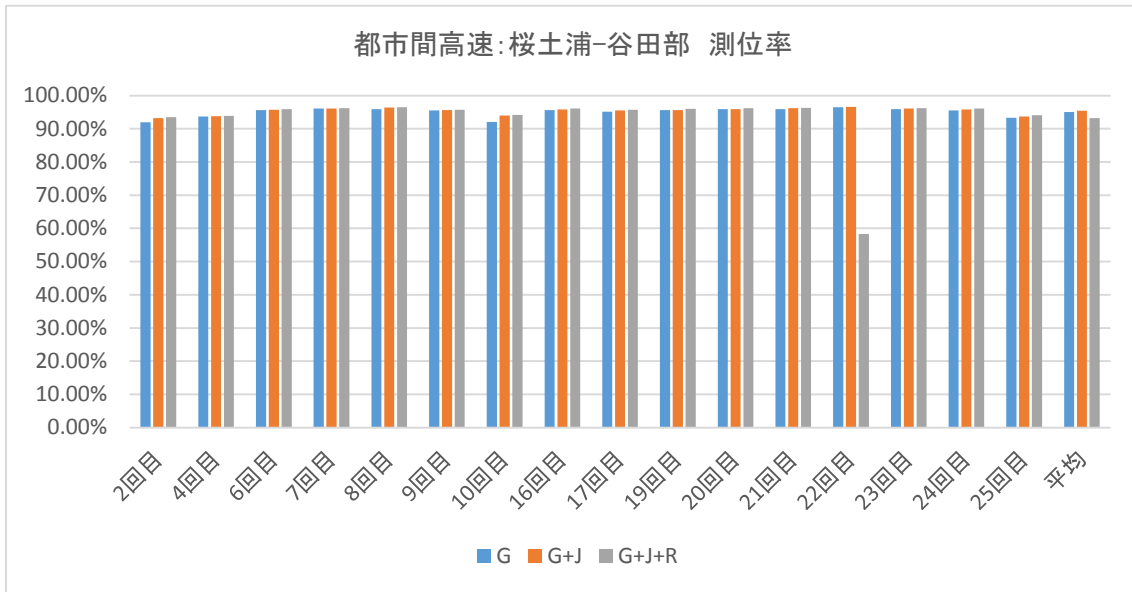


図 6.3.1-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

6.3.1.3 測位精度

左右方向誤差 1.0m 以内の測位精度は GPS のみで 30%台前半、GPS と QZSS でも 50%以下となっており、測位精度のバラつきが大きく、安定した測位精度となっていない。

表 6.3.1-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	16.73%	33.62%	48.16%	62.49%	73.55%	80.96%	95.01%
G+J	23.45%	47.69%	69.08%	80.93%	87.24%	91.04%	95.38%
G+J+R	20.18%	41.03%	62.81%	77.73%	85.18%	89.55%	93.17%

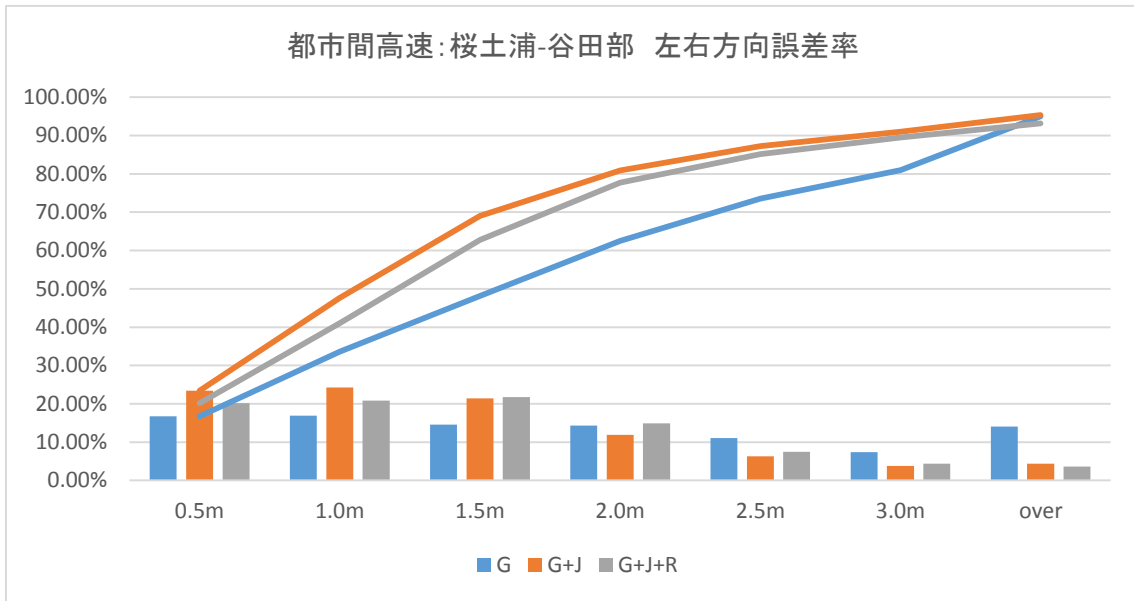


図 6.3.1-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

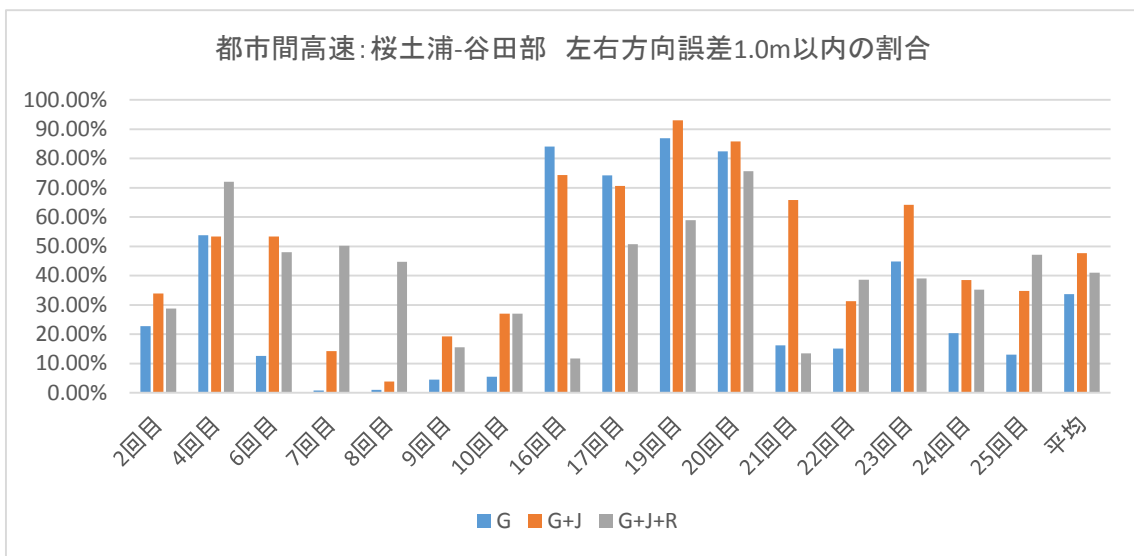


図 6.3.1-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m の割合

表 6.3.1-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	33.59%	56.79%	68.95%	76.01%	83.61%	88.23%	95.01%
G+J	41.24%	65.20%	77.60%	86.18%	90.90%	92.48%	95.38%
G+J+R	25.62%	47.77%	65.94%	80.03%	87.88%	91.26%	93.17%

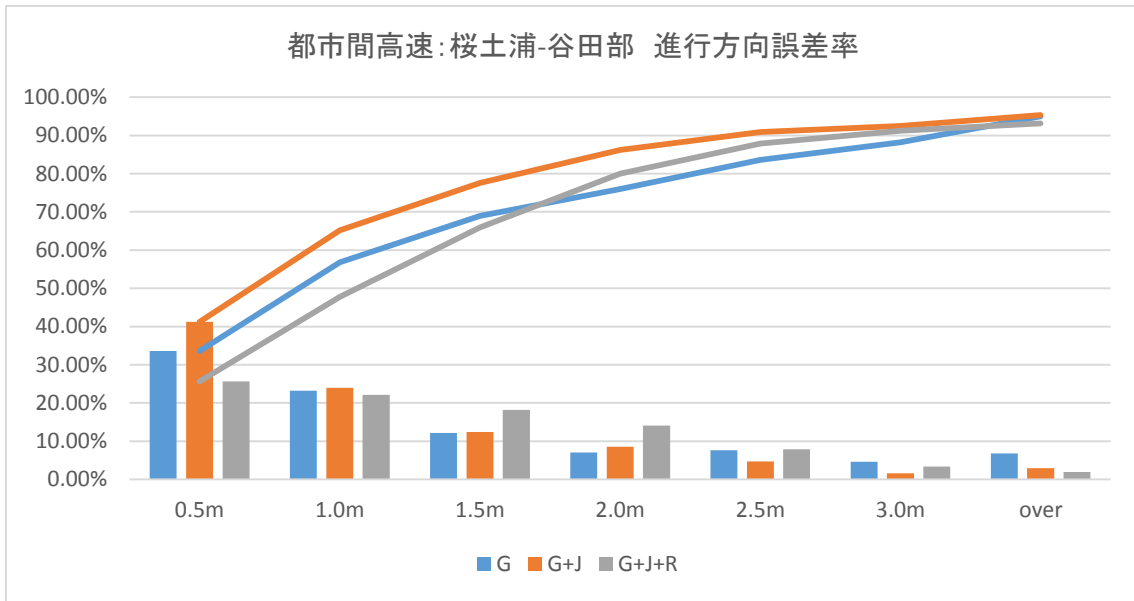


図 6.3.1-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

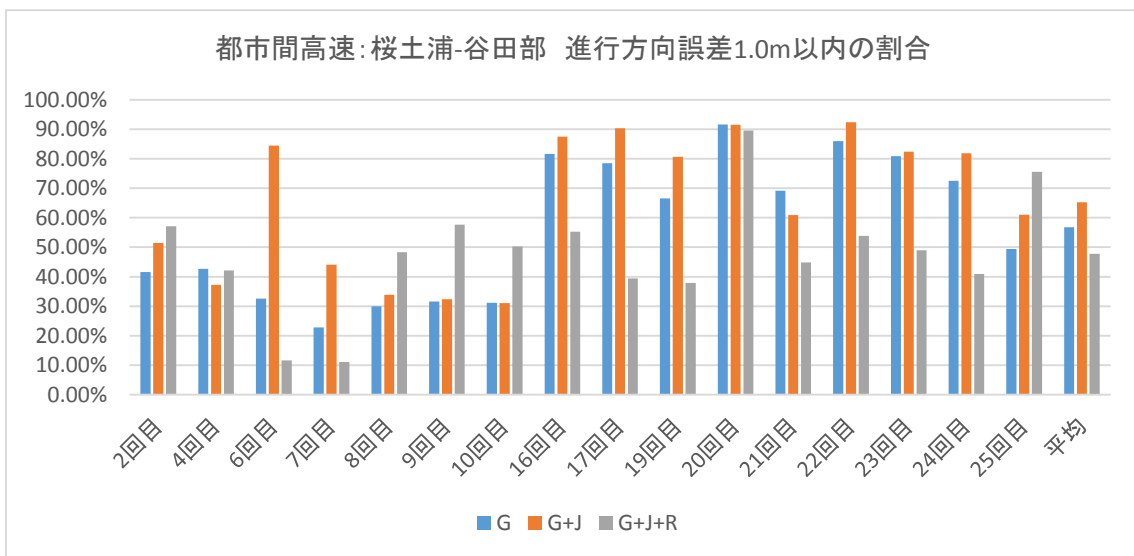


図 6.3.1-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m の割合

6.3.1.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

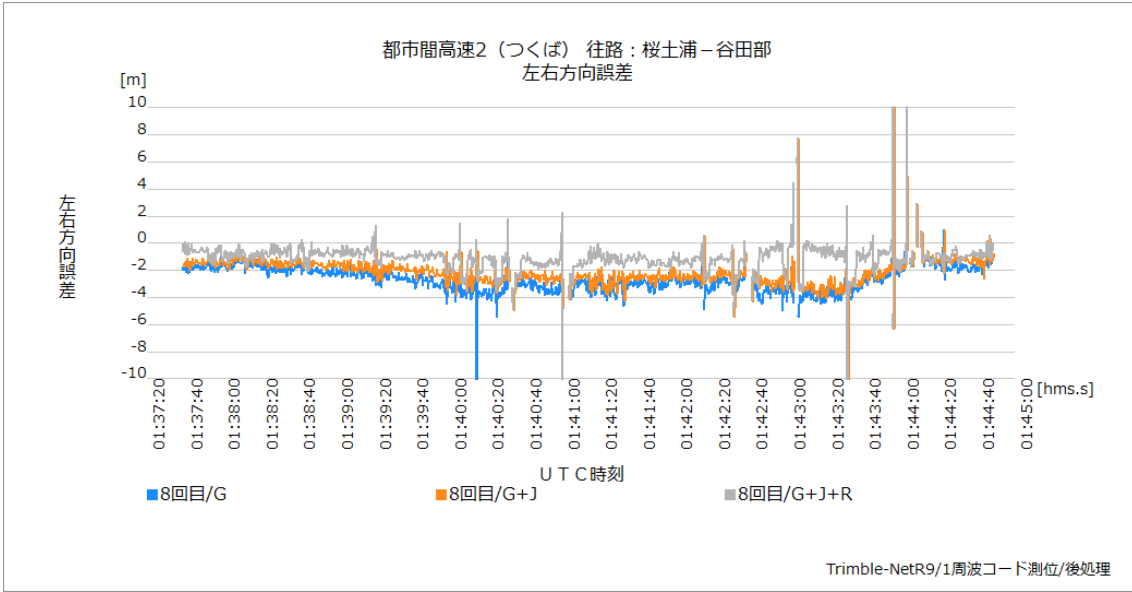


図 6.3.1-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

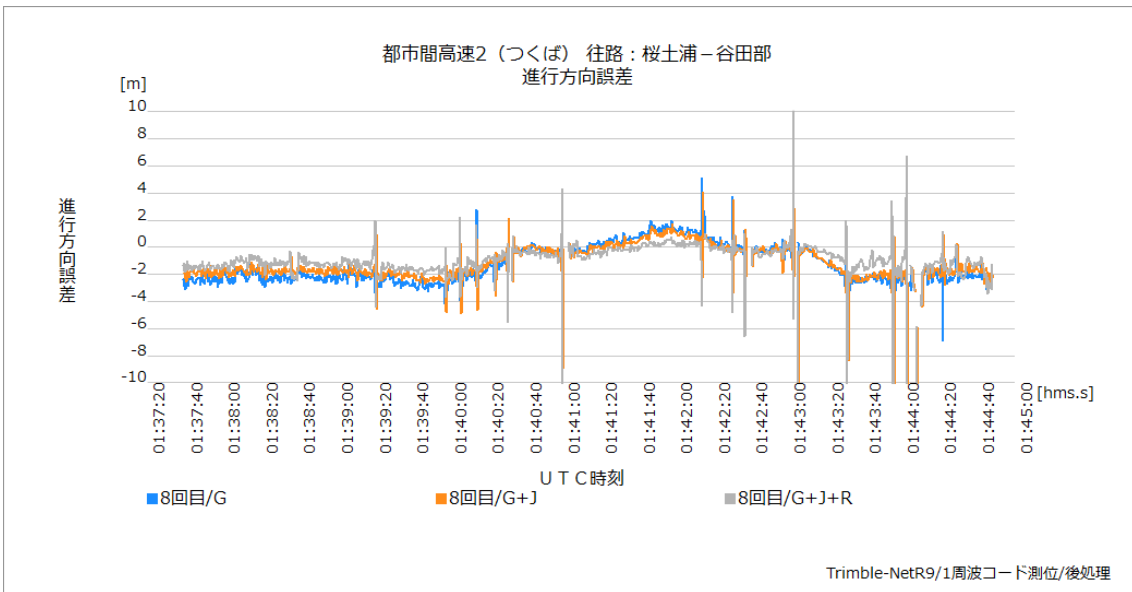


図 6.3.1-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

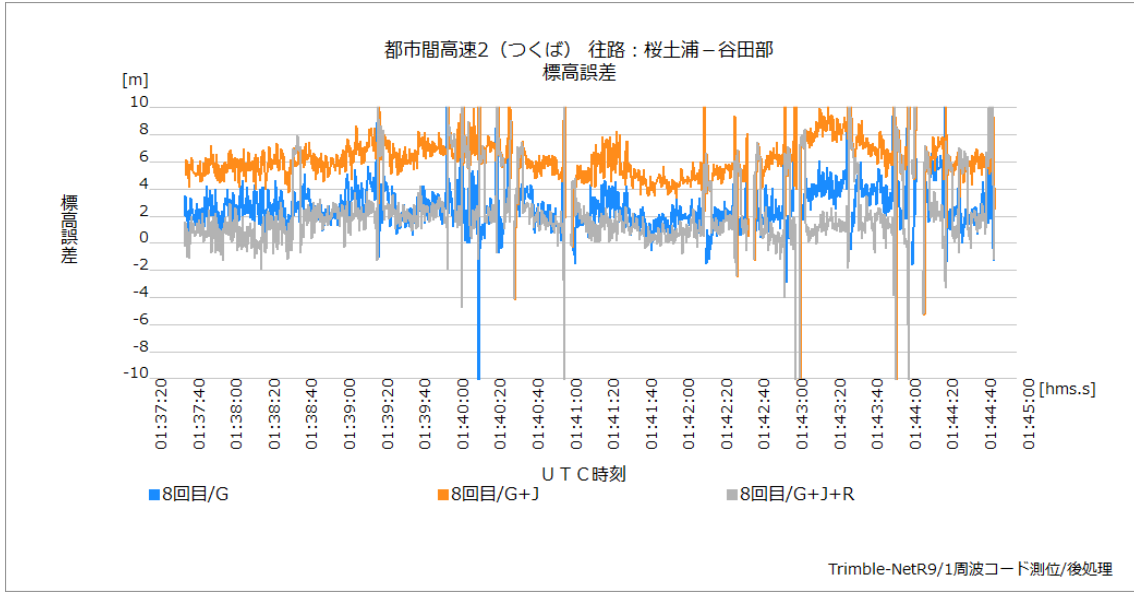


図 6.3.1-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

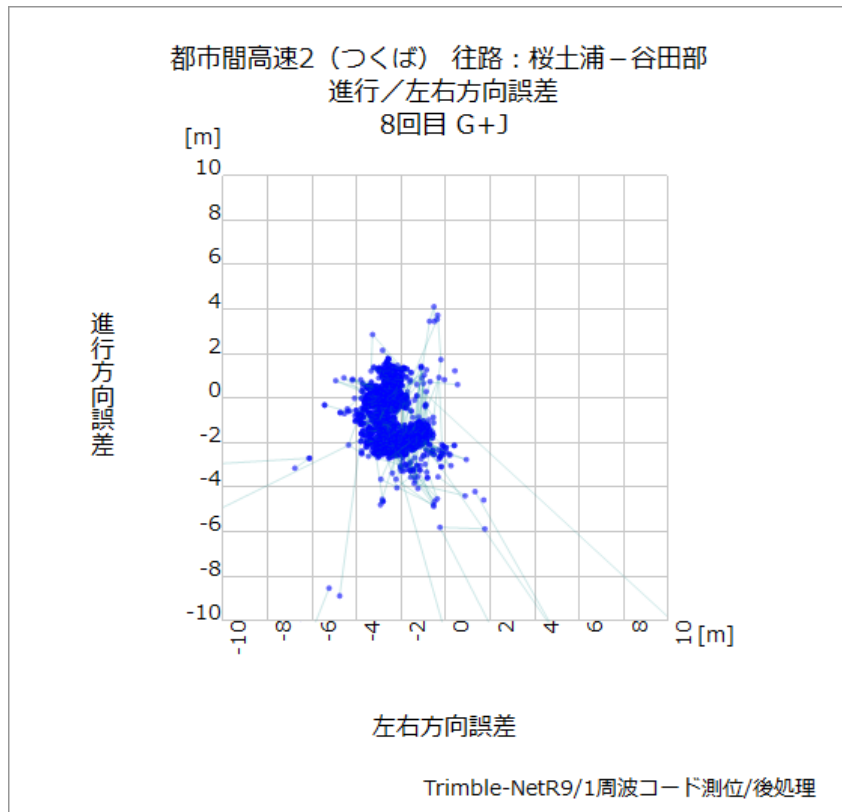


図 6.3.1-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS)

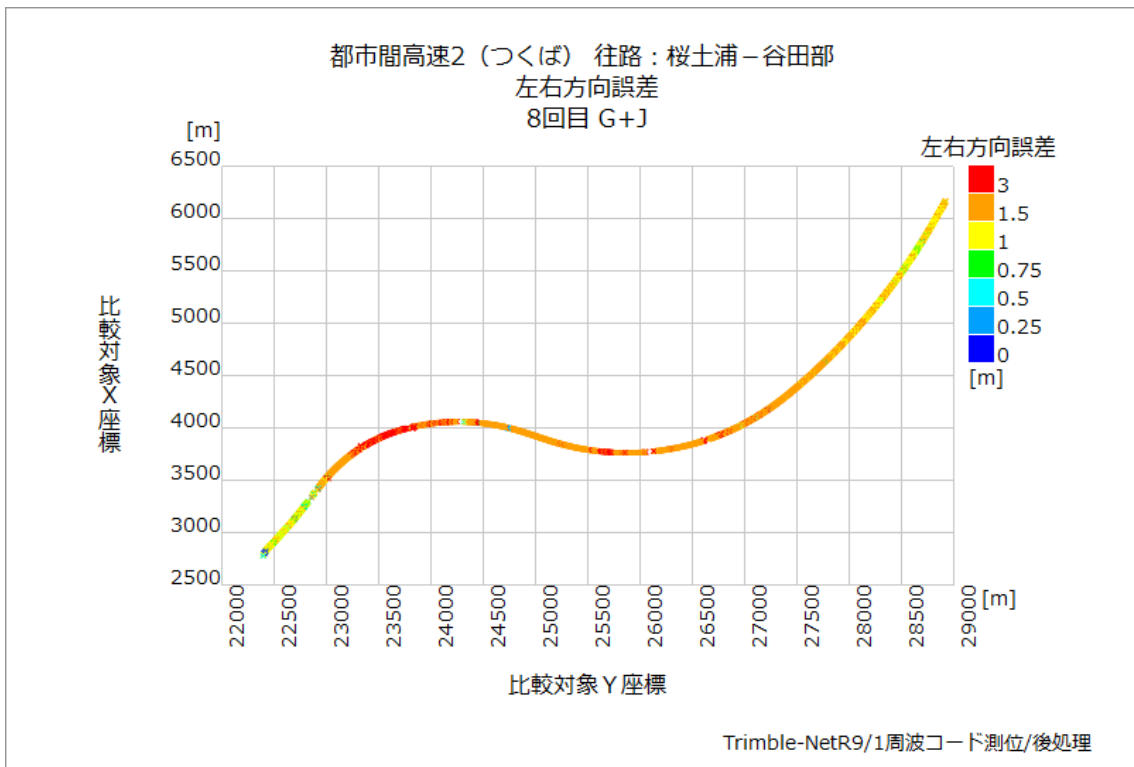


図 6.3.1-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット (GPS+QZSS)

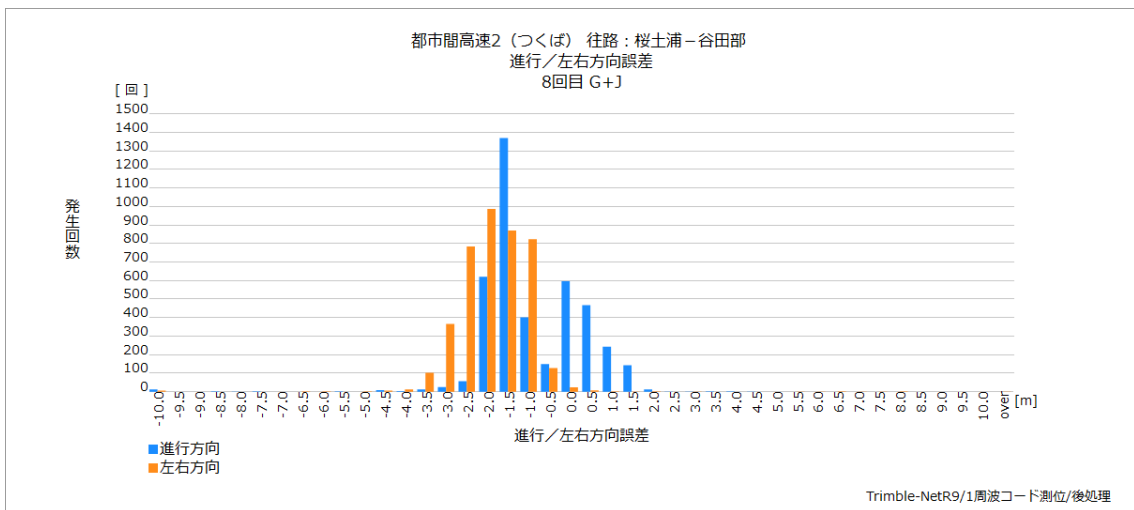


図 6.3.1-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム (GPS+QZSS)

1 周波コード測位の利用目安は概ね 3m以上となる。カーナビで利用されているマップマッチング等を利用する事で、地図上の位置としてプロットすることは可能であるが、自己位置の判断はできないレベルである。簡易で安価な受信機のみで利用可能な 1 周波コード測位は、利用者に判断を

求める情報提示程度までで、自動走行または走行支援に利用する事は、精度の不安定さから困難と言える。

6.3.2 2周波コード測位

6.3.2.1 概要

電離層での伝搬遅延は周波数に依存するため L1 信号、L2 信号 2 つの周波数帯を利用することで直接電離層遅延の補正ができる。測位方式の原理は単独測位と同じである。

ただし、受信機および衛星の送信機において L1 と L2 の経路が同じではないため、周波数間バイアス(IFB)が存在し、場合によっては疑似距離長で数 m の誤差要因になる場合もある。

本調査では GPS のみにおいて 2 周波コード測位を行った。

6.3.2.2 測位率

測位率は 88%と他のコード測位に比べ低い値となった。要因として L2 信号の信号強度が考えられる。GPS の L2 信号は L1 信号より 6dB 電力が小さいため、L1 信号より捕捉し辛い信号である。実用する際には L2 信号が受信できない場合は L1 信号のみでのコード測位で補完するといった対策や、電離層遅延量は大きく揺らぐものではないため、電離層遅延量のある程度の期間有効化することで測位率の向上を図るといった対策が考えられる。

表 6.3.2-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G
測位率	88.01%

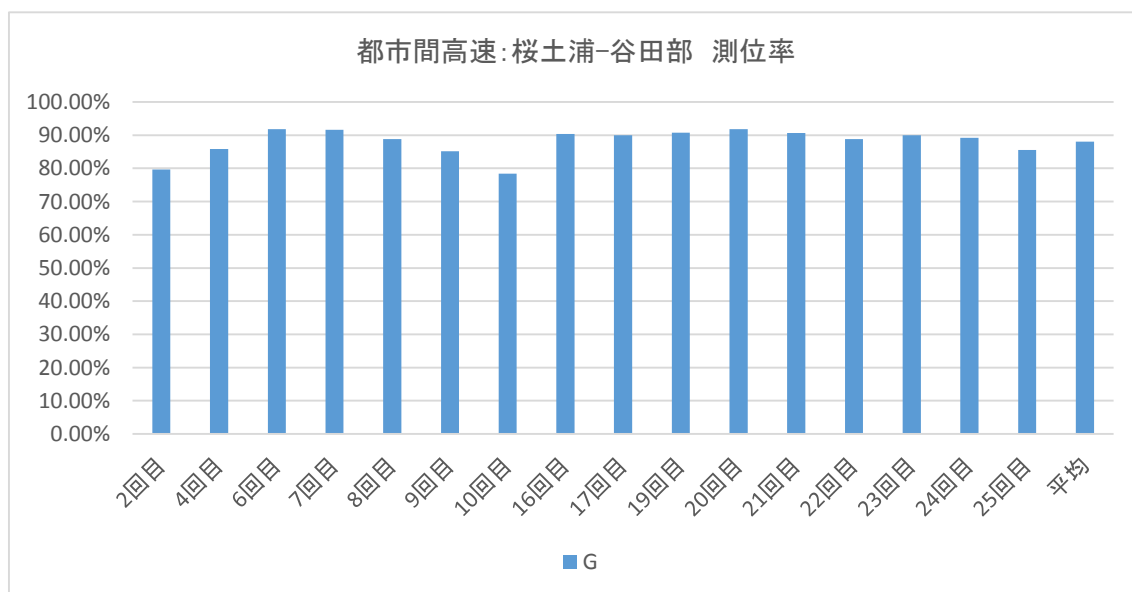


図 6.3.2-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

6.3.2.3 測位精度

2周波による電離層遅延キャンセルの効果は今回の計測結果からはあまりみられず、左右方向誤差 1.5m 以内で 50%を切る結果となっており、1周波コード測位と、ほぼ同程度の結果となった。測位できたもののうちでも左右方向誤差 1.5m 以内は 55%に届かなかった。測位精度の劣化要因は電離層によるもの以外にも幾つかあり、電離層遅延キャンセルだけでは測位精度の向上には限界がある。

表 6.3.2-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	17.21%	33.89%	48.26%	59.21%	66.56%	71.41%	88.01%

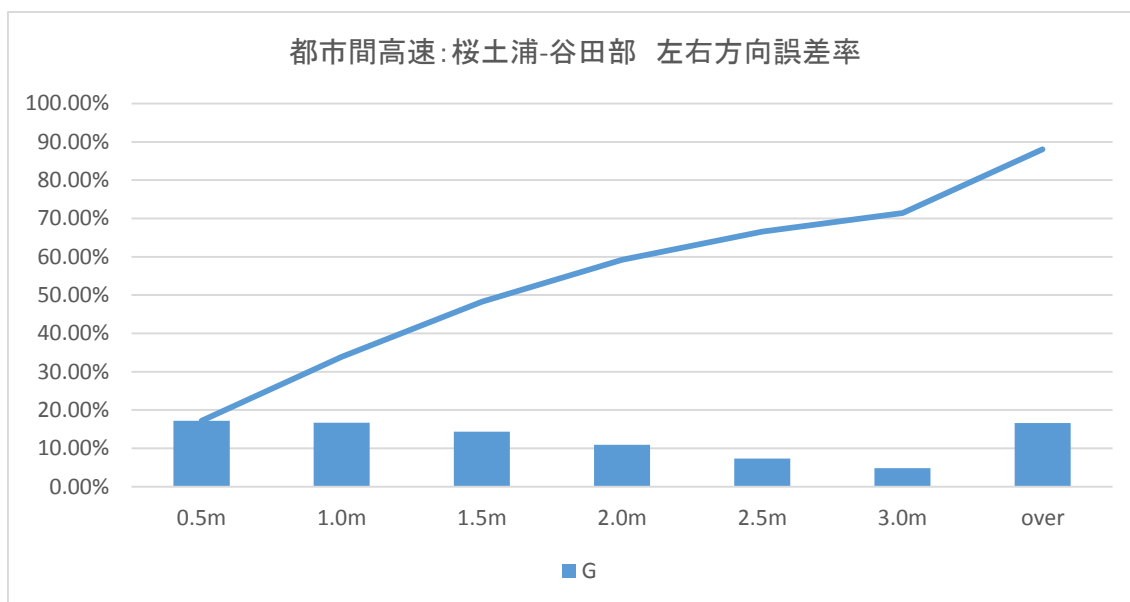


図 6.3.2-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

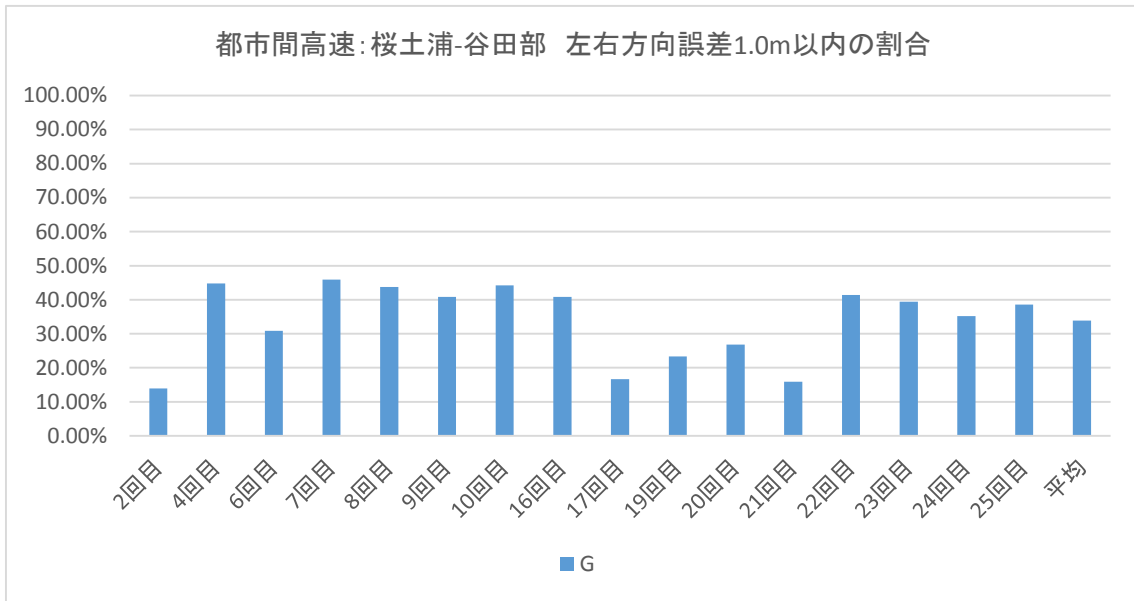


図 6.3.2-3 都市間高速: 桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m の割合

表 6.3.2-3 都市間高速: 桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	20.66%	39.02%	53.02%	62.98%	69.83%	74.11%	88.01%

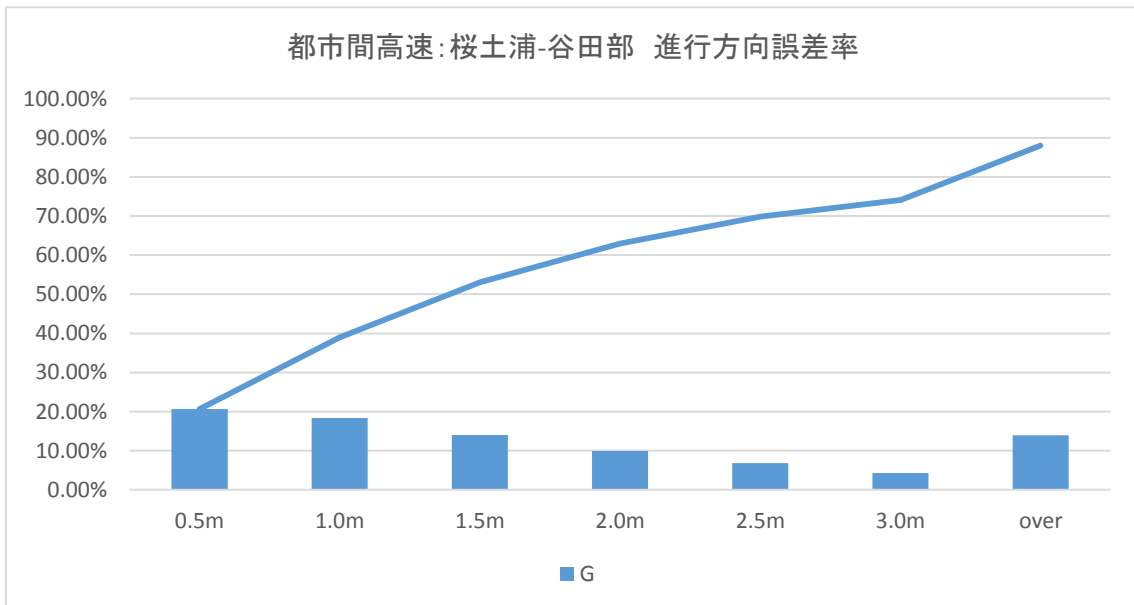


図 6.3.2-4 都市間高速: 桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

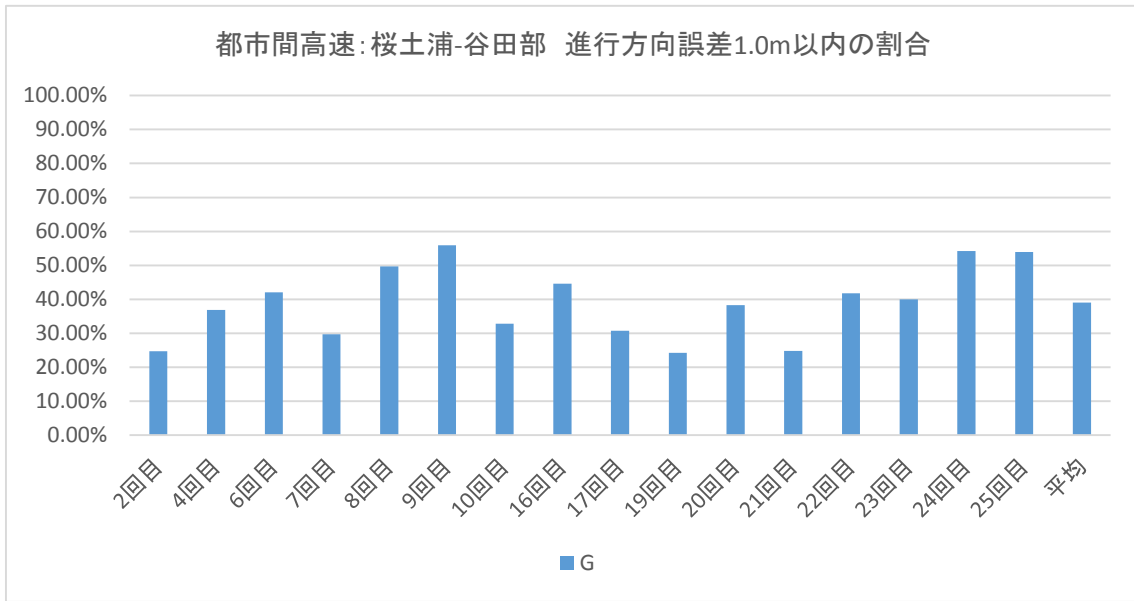


図 6.3.2-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m の割合

6.3.2.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

誤差の推移グラフを見ると、揺らぎ幅が 1 周波コード測位よりも大きくなっており、あまり安定した測位となっていないことがわかる。また、ヒストグラムからも測位誤差が他の測位方式に比べ全体に広がっており測位精度が安定していなかったことがわかる。

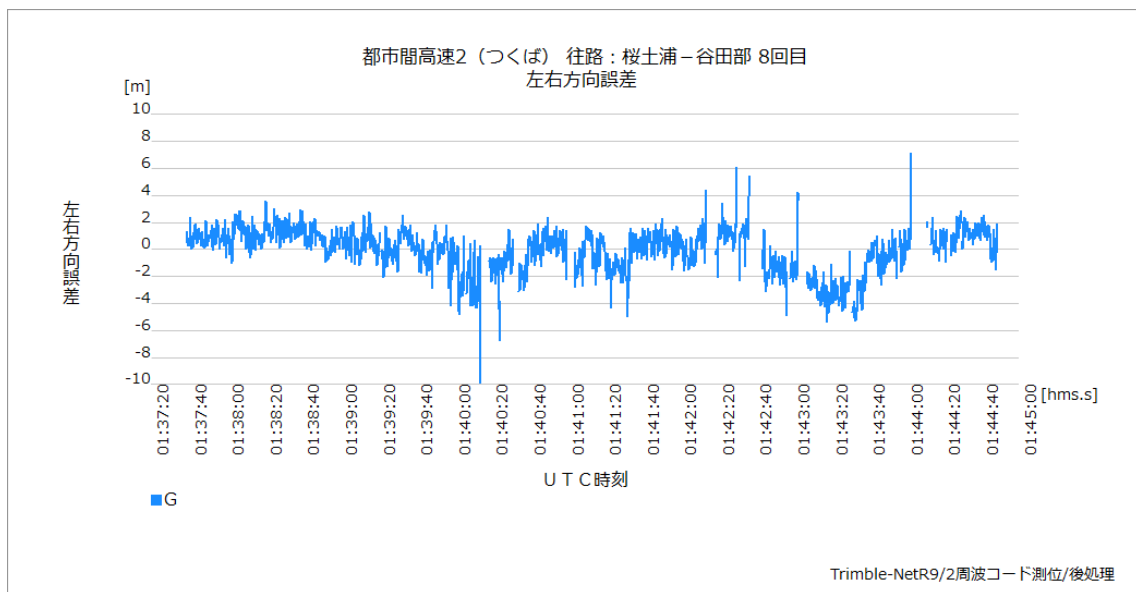


図 6.3.2-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

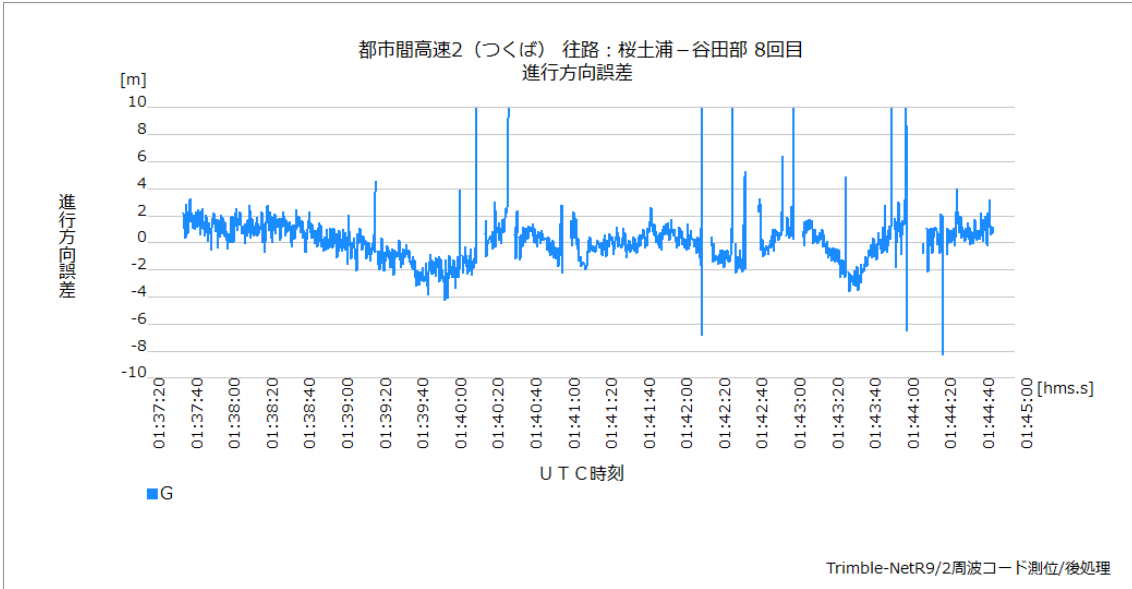


図 6.3.2-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

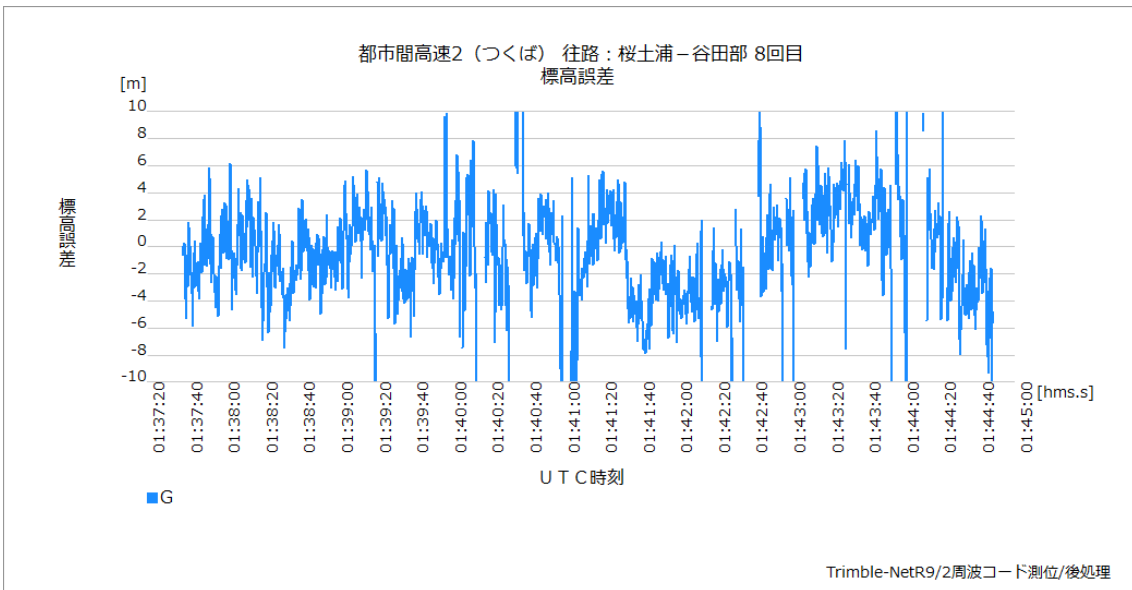


図 6.3.2-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

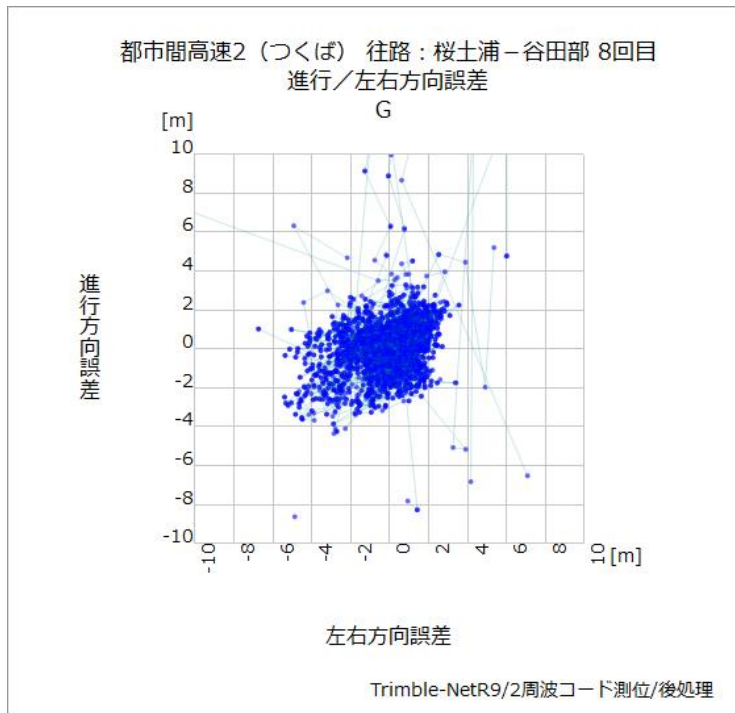


図 6.3.2-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS)

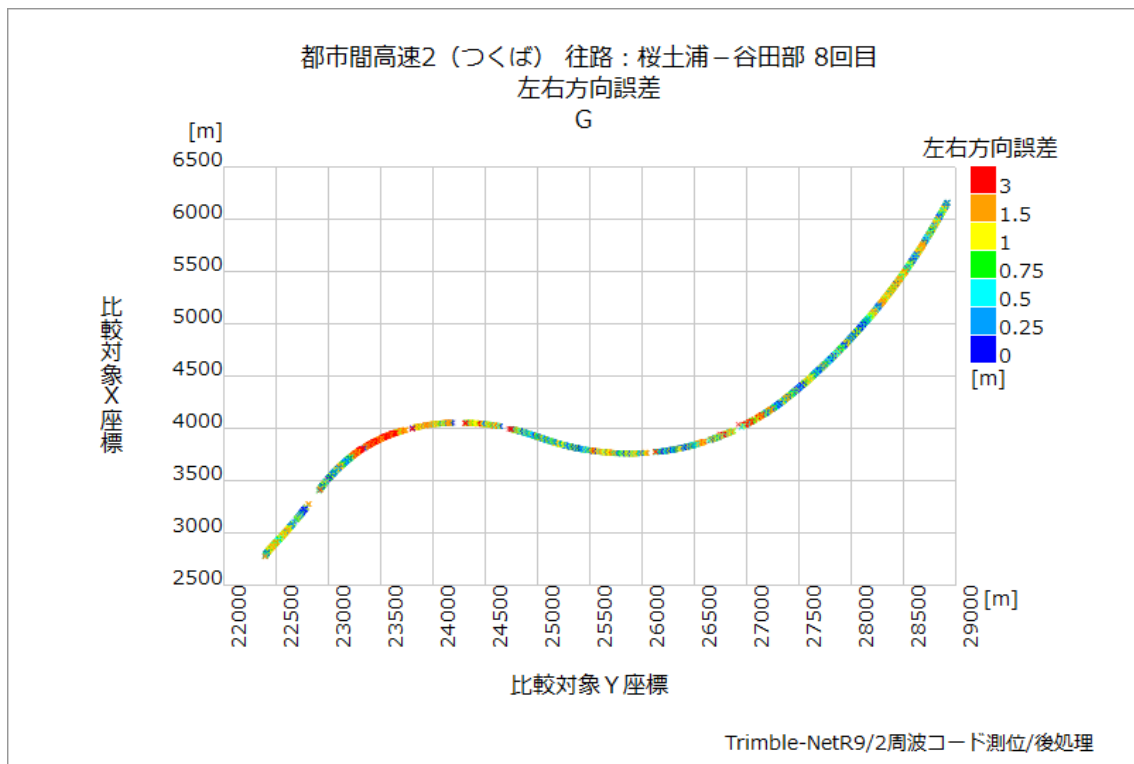


図 6.3.2-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット (GPS)

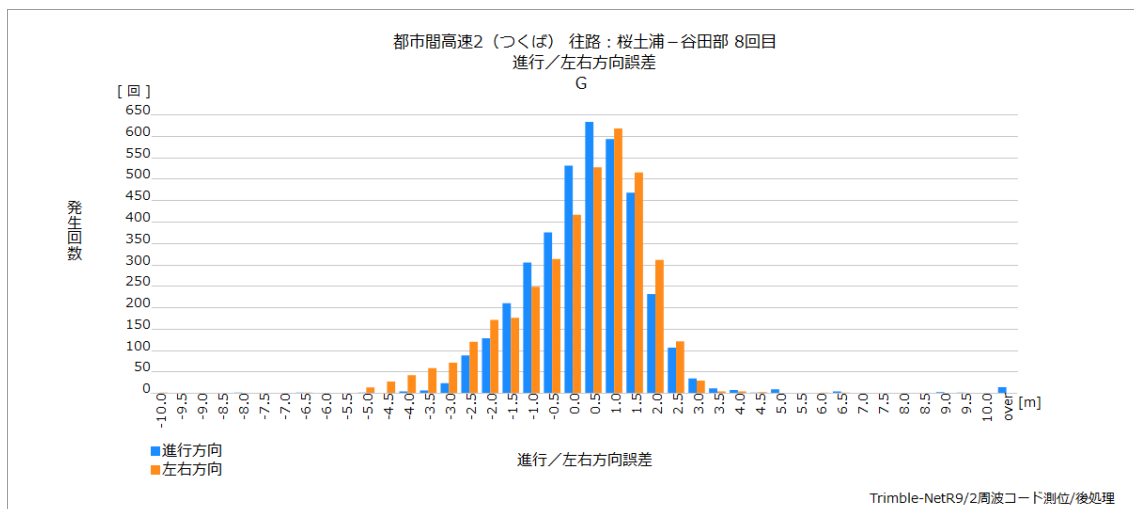


図 6.3.2-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム
(GPS)

固定局を必要とせず、補強信号の様に配信範囲の制約のない 2 周波コード測位による電離層遅延キャンセルは可用性としては魅力的であるが、電離層遅延キャンセルのみでは想定していたほど測位精度が向上しなかった。2 周波コード測位においては、他の測位補強方式と組み合わせることで、より高精度化に貢献できる可能性はある。

ただし、自動走行/走行支援において、2 周波受信機のコスト(費用、電力、サイズ等含めた)と精度向上のトレードオフは現段階では難しいと思われる。

6.3.3 L1-SAIF 補強(1 周波コード測位)

6.3.3.1 概要

単独測位であるコード測位は衛星の軌道情報から衛星の位置を推定し、その位置から受信機までの距離(疑似距離)を、電波伝搬時間を利用して求めている。このため単独測位の測位誤差の大きな要因は、衛星の軌道情報の誤差と、電波伝搬時間を決定する際に生じる誤差(衛星の時刻誤差や、伝搬時の電離圏、対流圏での信号遅延)となる。

L1-SAIF は、電子基準点を利用してこれらの誤差要因を推定し、それを補強信号として受信機に与えることで測位精度を向上させる仕組みとなる。

6.3.3.2 測位率

測位計算自体は 1 周波コード測位と同じため、1 周波コード測位の測位率と似たような値となっている。都市間高速では 95%前後の測位率となった。ただし、1 周波コード測位においては GLONASS を加えることで測位率が低下する結果となったのに対し、衛星軌道情報、時刻情報の誤差を L1-SAIF から与えられることで、GLONASS による測位率低下は抑制され、使用する衛星

システムを増やす分だけ測位率が向上する結果を得られている。

表 6.3.3-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G	G+J	G+J+R
測位率	94.53%	94.96%	95.15%

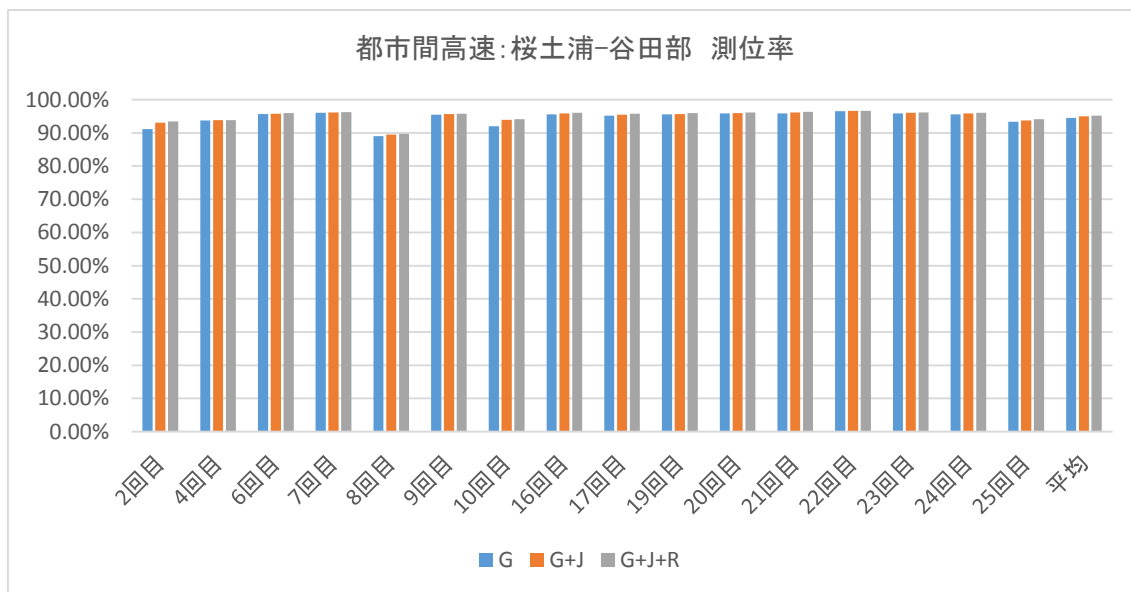


図 6.3.3-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

6.3.3.3 測位精度

補強信号を利用する事で、疑似距離誤差の低減および衛星位置の精度向上が効果的に機能しており、80%前後の測位が左右方向誤差 1.0m 以内となり、90%が 1.5m 以内となった。

また、マルチ GNSS の効果も顕著に表れており、GPS のみに対し、QZSS、GLONASS を加えることで、測位性能の向上が見られる。

表 6.3.3-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	52.25%	78.39%	87.26%	90.53%	92.12%	93.08%	94.53%
G+J	51.17%	78.47%	88.37%	91.30%	92.41%	93.18%	94.96%
G+J+R	60.44%	85.11%	91.46%	93.24%	94.00%	94.47%	95.15%

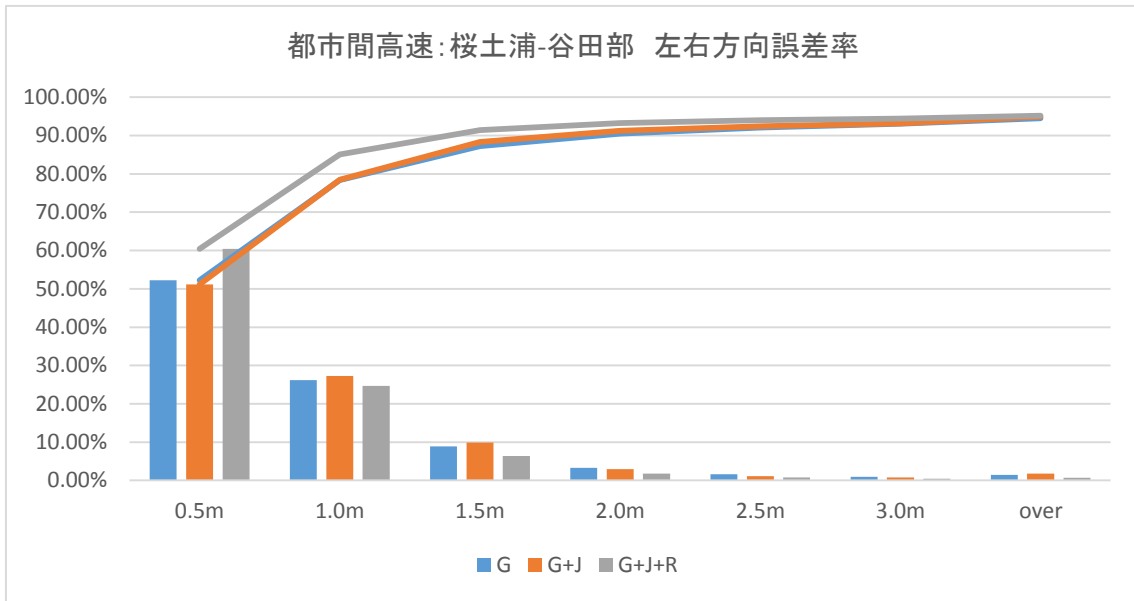


図 6.3.3-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

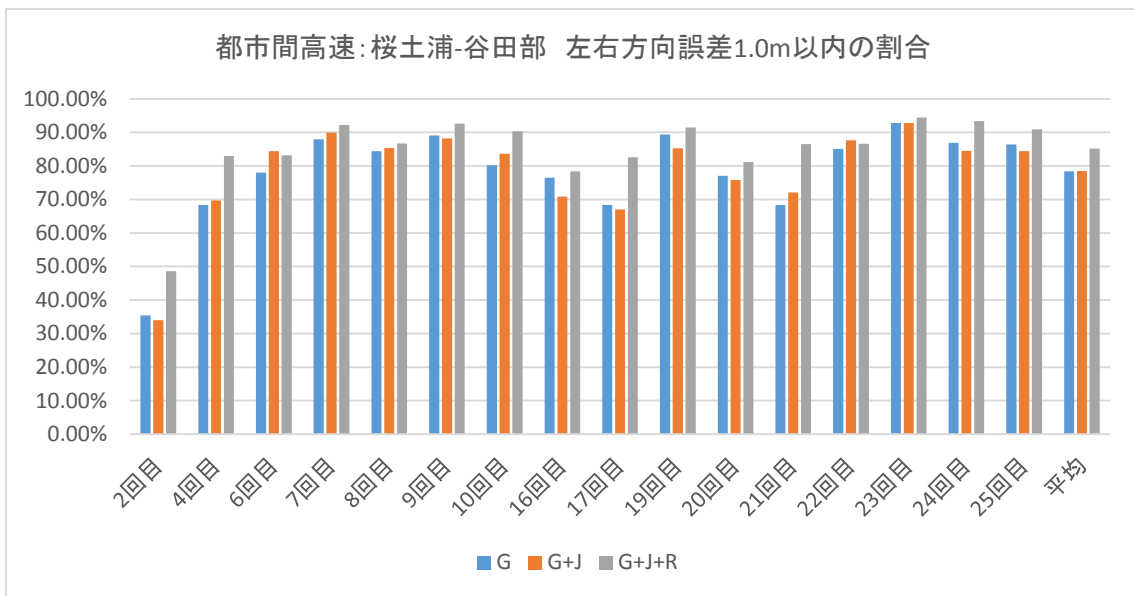


図 6.3.3-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m の割合

表 6.3.3-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	54.58%	80.64%	89.16%	92.40%	93.42%	93.81%	94.53%
G+J	55.06%	81.68%	90.35%	93.49%	94.28%	94.44%	94.96%
G+J+R	57.91%	85.84%	92.62%	94.28%	94.70%	94.83%	95.15%

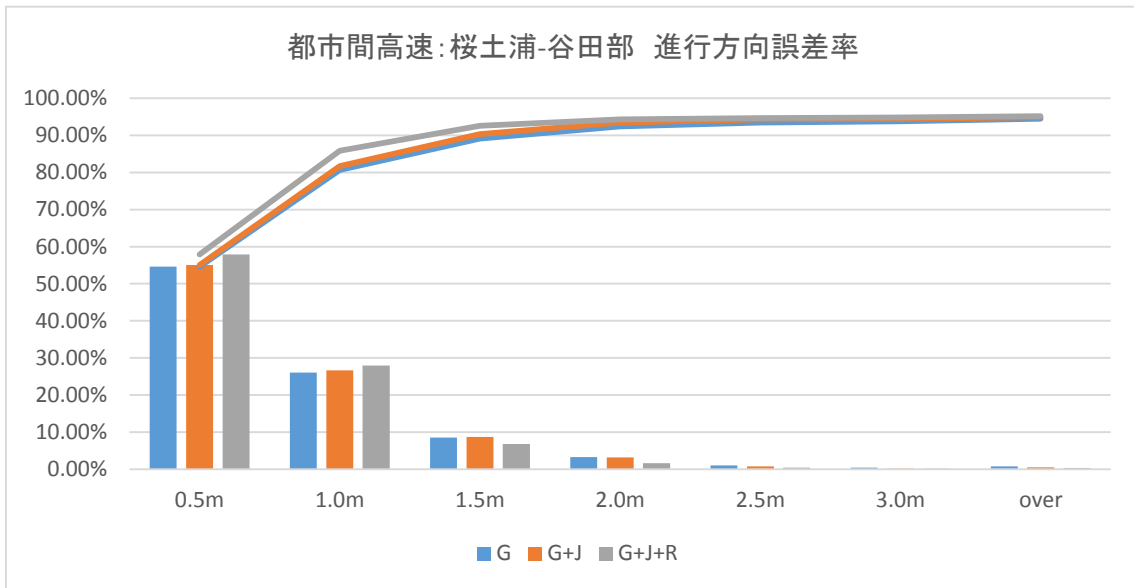


図 6.3.3-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

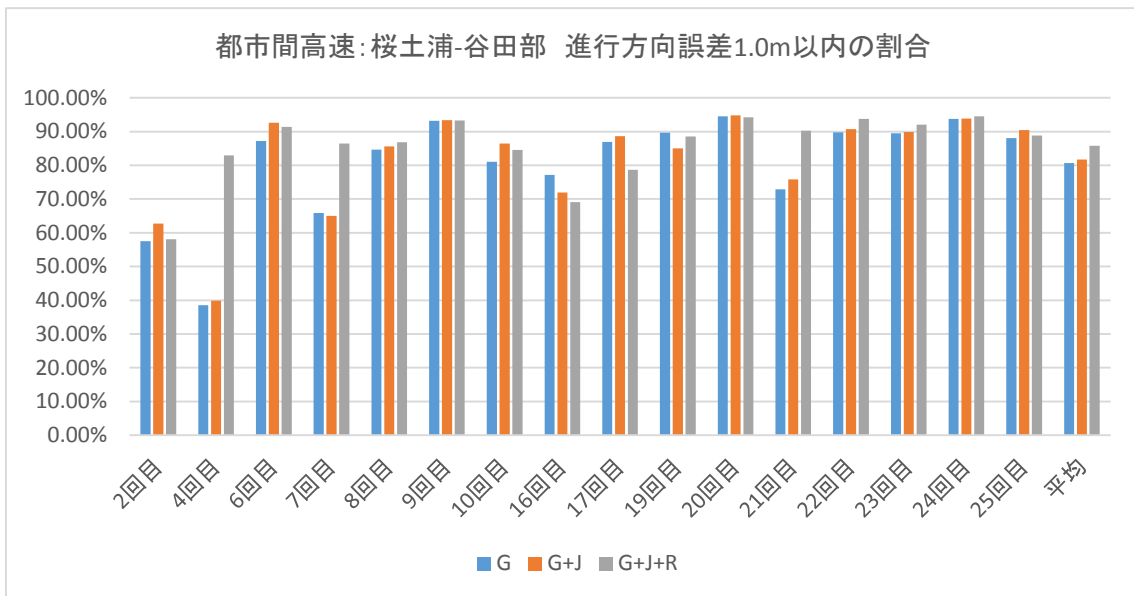


図 6.3.3-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m の割合

6.3.3.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

誤差の推移を見てもわかるように、地上環境の影響を受けた一部の箇所を除き、1 周波コード測位に比べ揺らぎが少ないのが特徴となっている。またヒストグラムで見てもバラつきが少ないことがわかる。L1-SAIF を利用する事で、測位精度の改善の他、バラつきの収束にもつながっている。

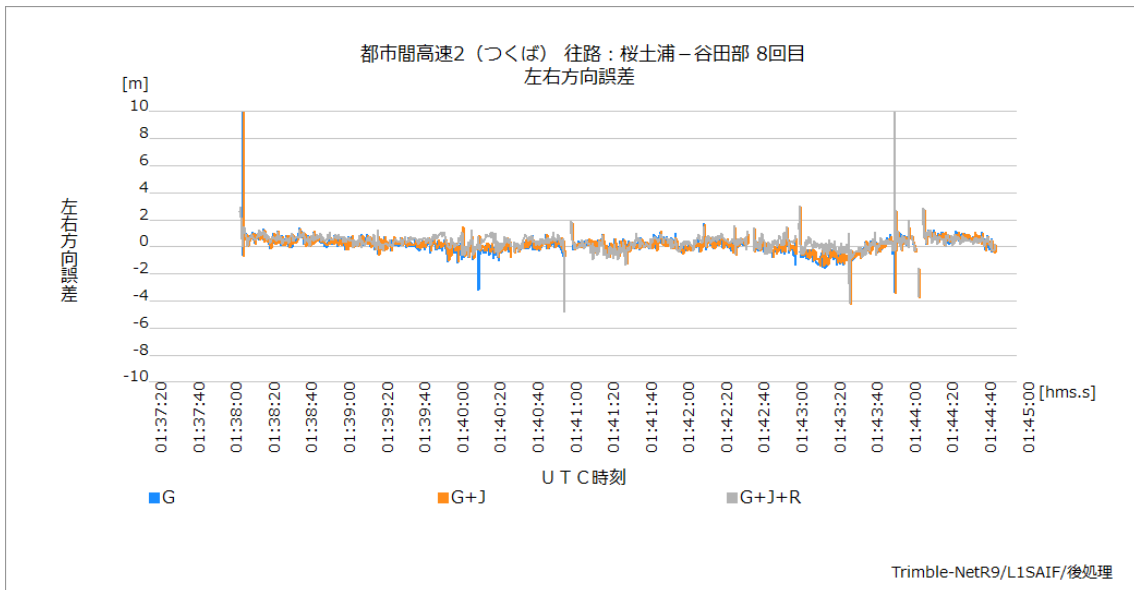


図 6.3.3-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

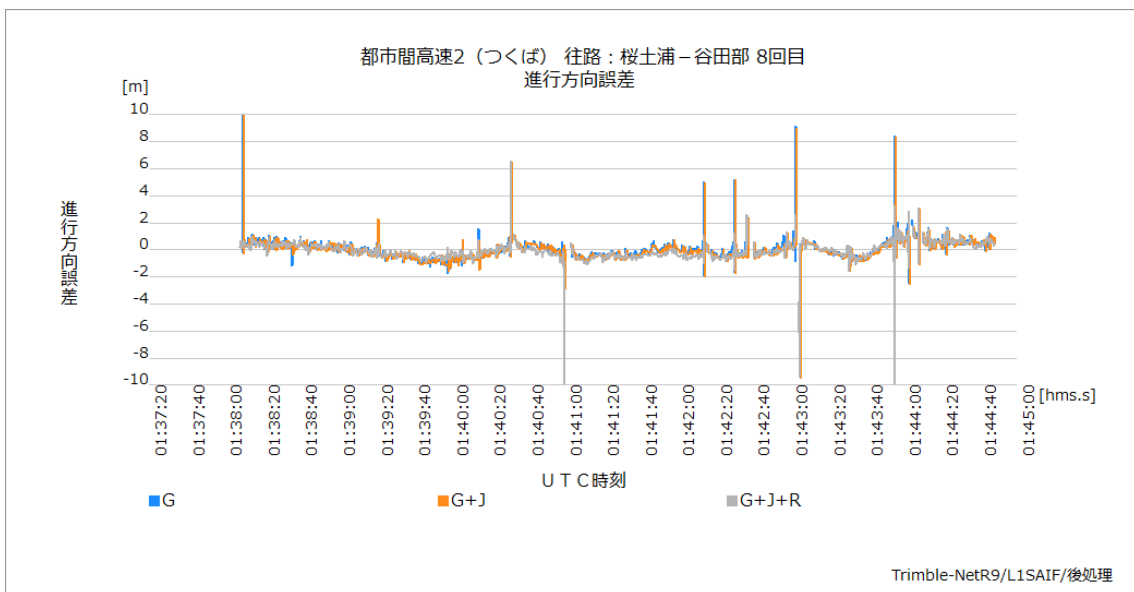


図 6.3.3-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

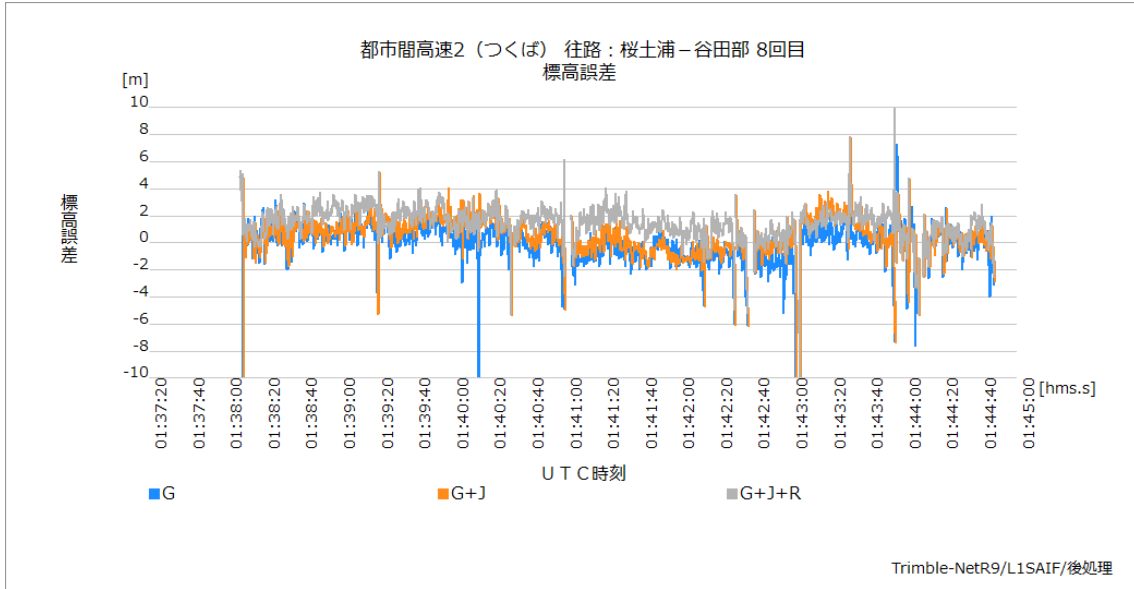


図 6.3.3-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

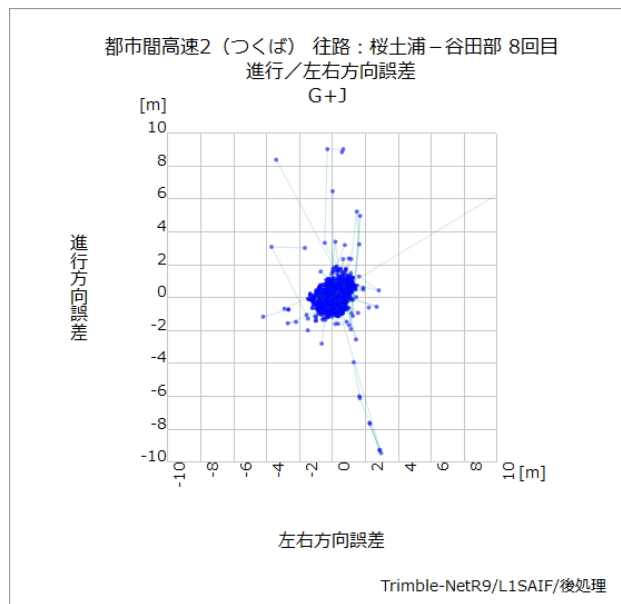


図 6.3.3-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS)

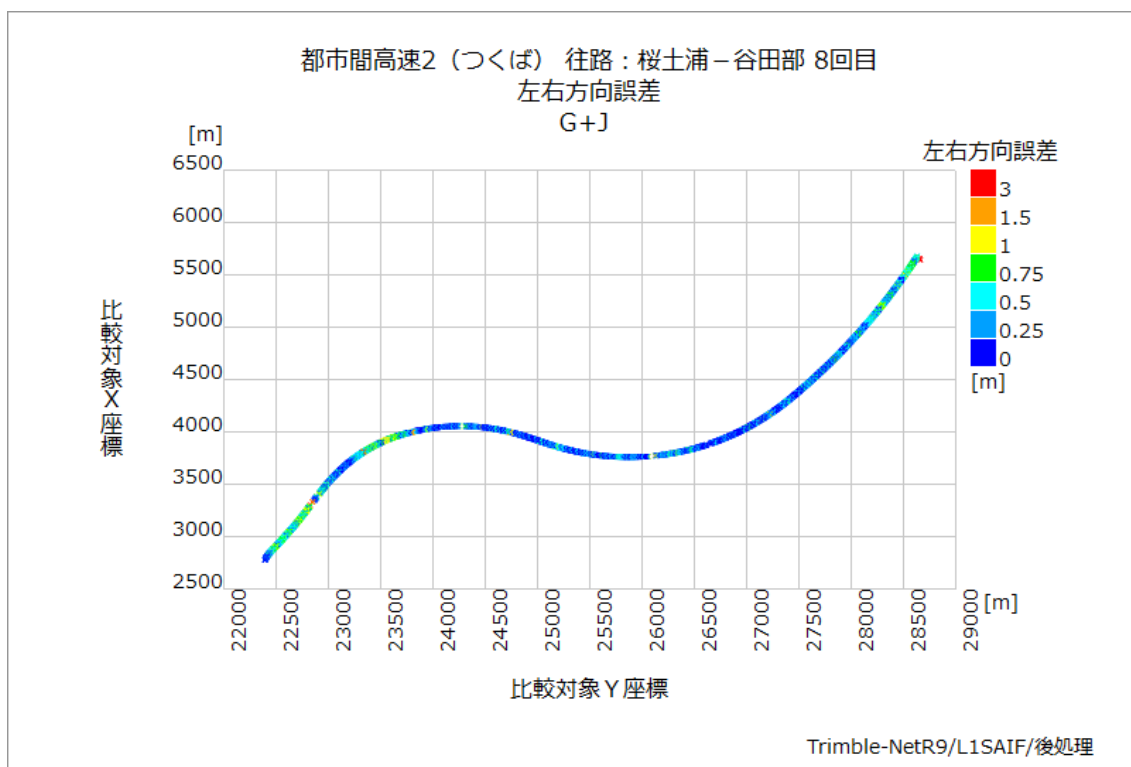


図 6.3.3-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット (GPS+QZSS)

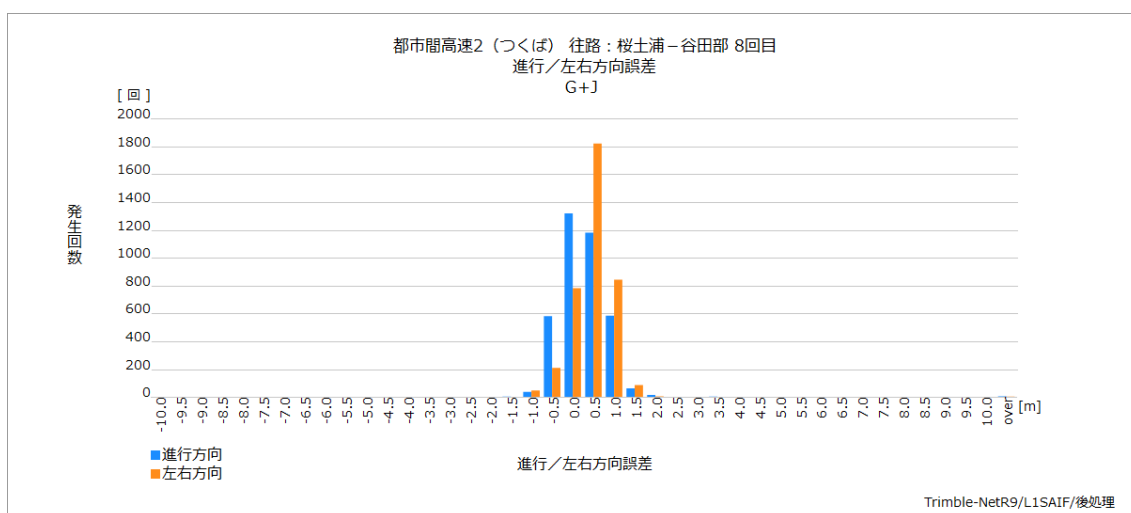


図 6.3.3-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム (GPS+QZSS)

L1-SAIF を利用する事で、左右誤差は概ね 1.5m 以内となる。このことは、安価なコード測位受信機でも L1-SAIF を利用する事で、自動走行/走行支援において、車線認識程度であれば利用の可能性はあると考えられる。

準天頂衛星初号機「みちびき」による利用実証では、L1-SAIF による補強対象システムは GPS と QZSS のみであったが、今回別途 GLONASS の補強情報も作成して行った。これにより、マルチ GNSS による測位率、測位精度の向上と合わせて効果的に補強情報が機能することが確認できている。Galileo および BeiDou の補強情報が利用可能になれば、更なる測位率、測位精度の向上が期待できる。

6.3.4 DGPS(1 周波コード測位)

6.3.4.1 概要

相対測位方式の一つである DGPS は、測位の原理自体は単独測位と同じものである。位置のわかっている固定局で受信した衛星の信号を基に衛星からの疑似距離誤差を算出し、これを補強情報として、測位点での測位に利用する事で測位精度を向上させる。

このため、測位精度は固定局から測位点までの距離に依存する事になる。

本調査では、なるべく実用準天頂衛星の L1S で採用されたものと同じに条件に近い状態で行っている。そのため、対象衛星システムは GPS と QZSS のみとしている。

6.3.4.2 測位率

DGPS を利用するためには、固定局および測位点双方で同一の衛星が可視となる必要がある。このため、測位率は若干低くなる傾向がある。本調査でも、1 周波コード測位と比べわずかではあるが測位率は低下している。

ただし、基本的に固定局は上空視界の良好な箇所に設置されることと、測位点に近い箇所ものを利用するため、大きな測位率の低下につながることはほとんどない。

表 6.3.4-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G	G+J
測位率	94.48%	95.27%

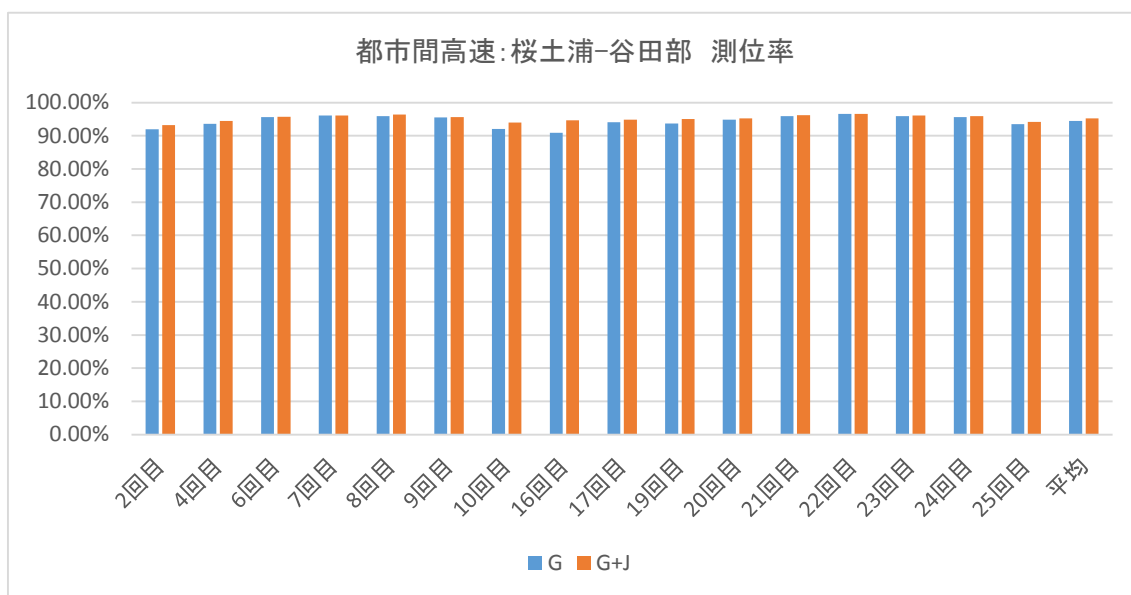


図 6.3.4-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

6.3.4.3 測位精度

GPS のみの場合、左右誤差 1.0m 以内が 73%程、1.5m 以内が 85%程となった。

測位精度は L1-SAIF に比べ若干低い結果となっているが、1 周波コード測位に比べ大幅な精度改善が確認できている。また GPS のみと比較し GPS と QZSS を利用したものの方が、精度が下がっているため、この件は継続的調査が必要となる。

走行毎の精度を確認すると、比較的走行回毎での差異が大きいことがわかる。L1-SAIF に比べ DGPS の方が衛星配置の状態に大きく左右される可能性があるため、長期での定点観測等による調査を行う必要がある。

表 6.3.4-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	45.15%	72.59%	84.49%	89.27%	91.34%	92.29%	94.48%
G+J	37.19%	64.33%	79.89%	86.99%	90.30%	92.26%	95.27%

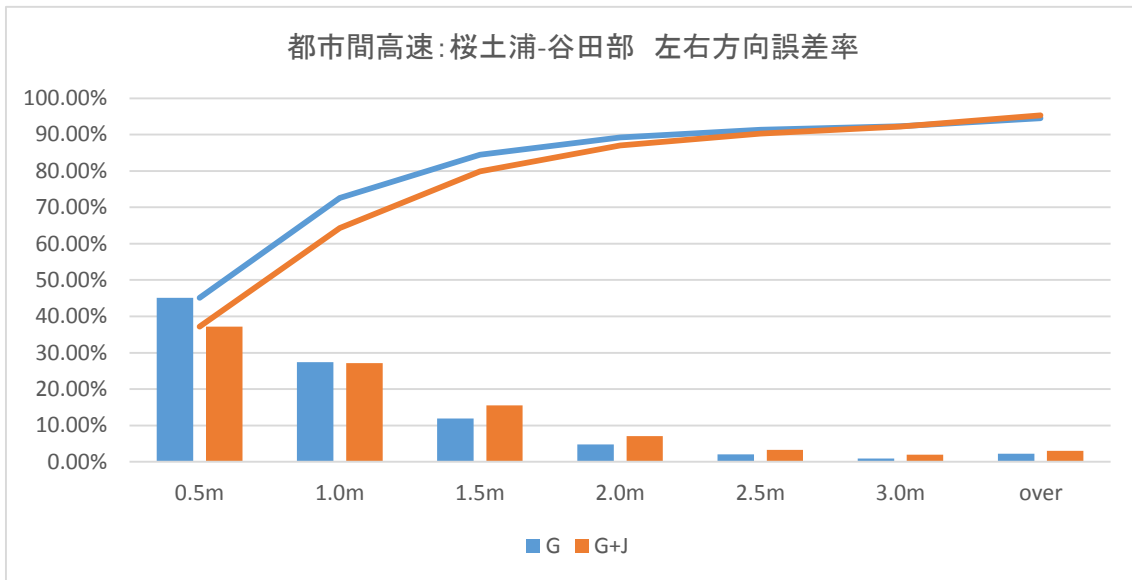


図 6.3.4-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

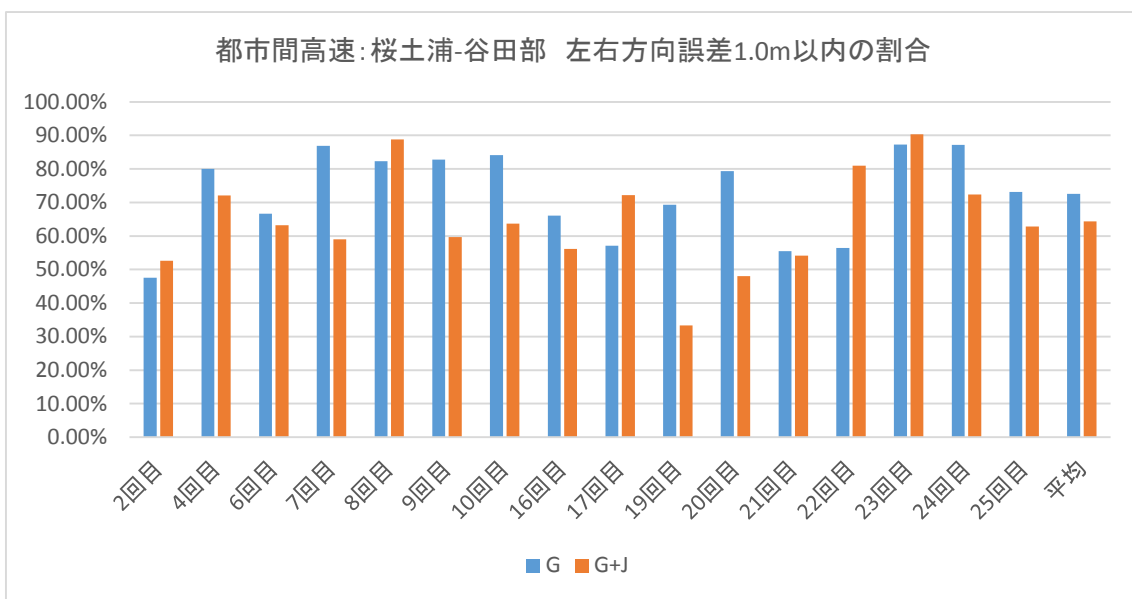


図 6.3.4-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m の割合

表 6.3.4-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	49.14%	76.09%	84.54%	88.04%	90.11%	91.20%	94.48%
G+J	37.31%	63.72%	76.63%	82.73%	87.00%	90.09%	95.27%

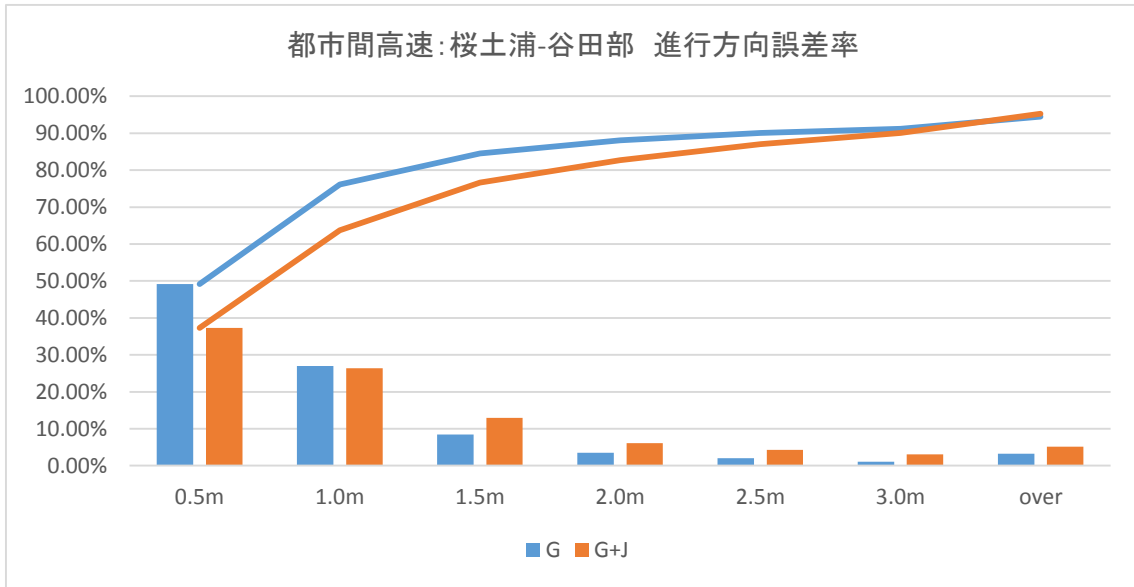


図 6.3.4-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

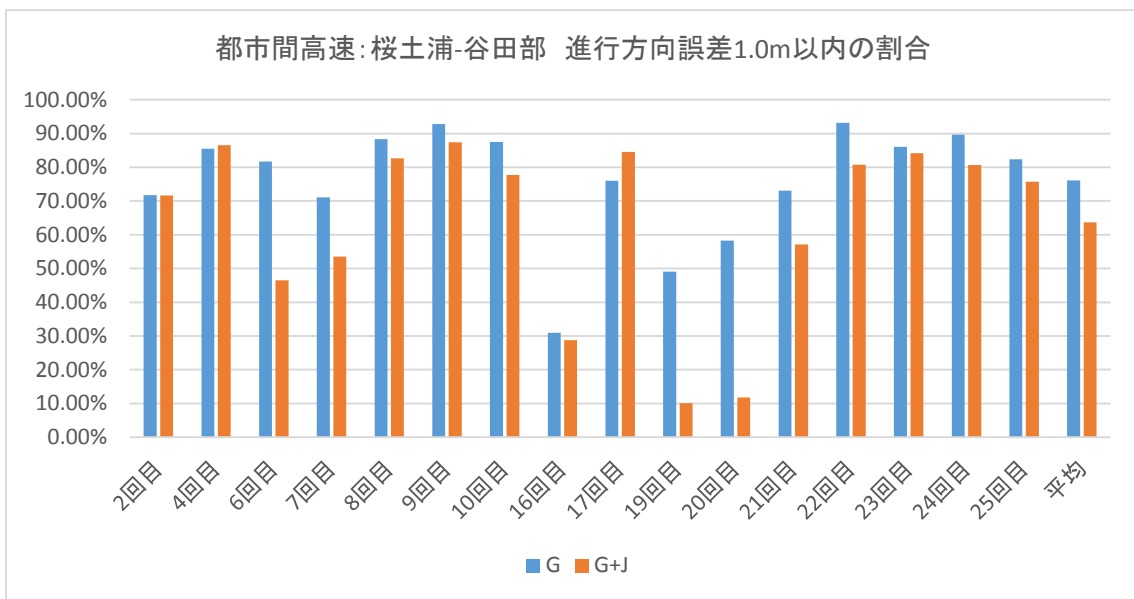


図 6.3.4-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m の割合

6.3.4.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

誤差の推移を見る限りではほぼ、L1-SAIFと同じような性格になっているが、若干ゆらぎが大きくなっている。遮蔽、マルチパスの影響を受けない限りは、ある程度安定感をもって使用できる測位方式の一つだと判断できる。

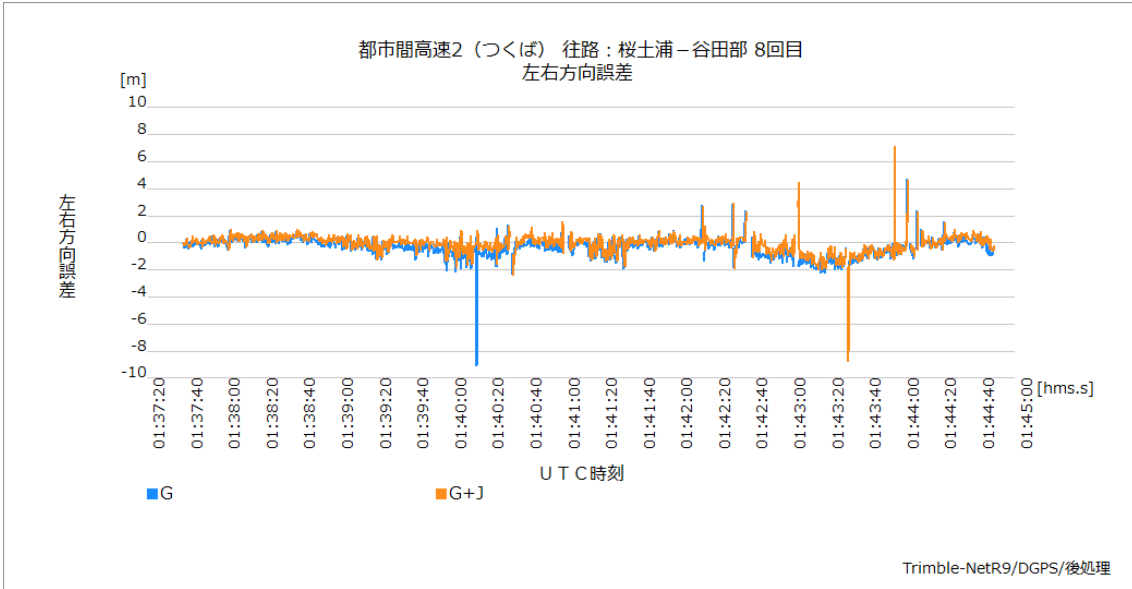


図 6.3.4-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

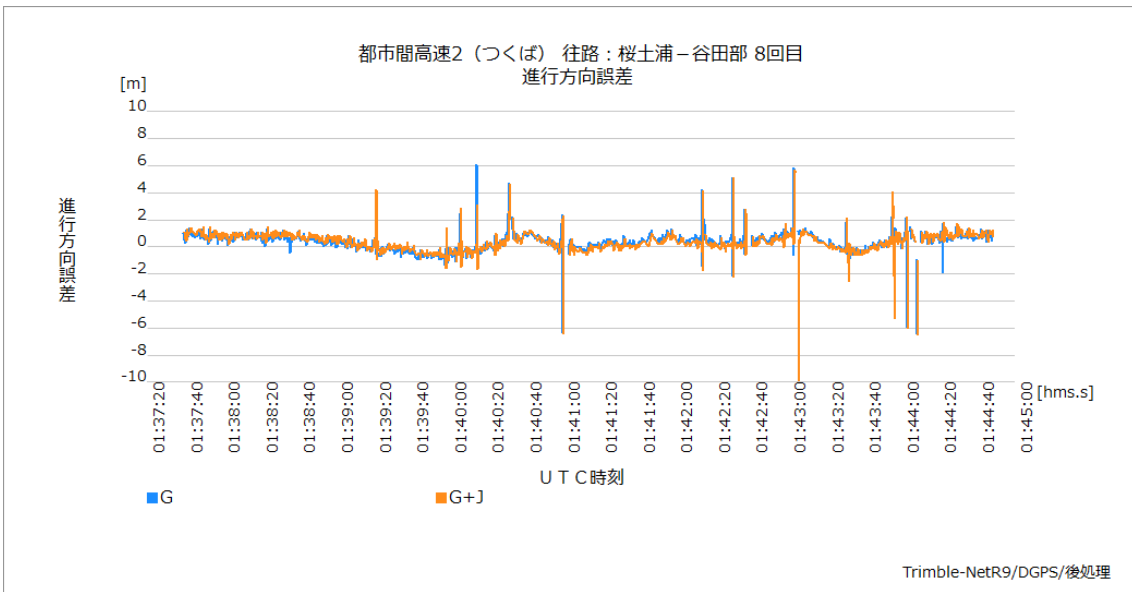


図 6.3.4-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

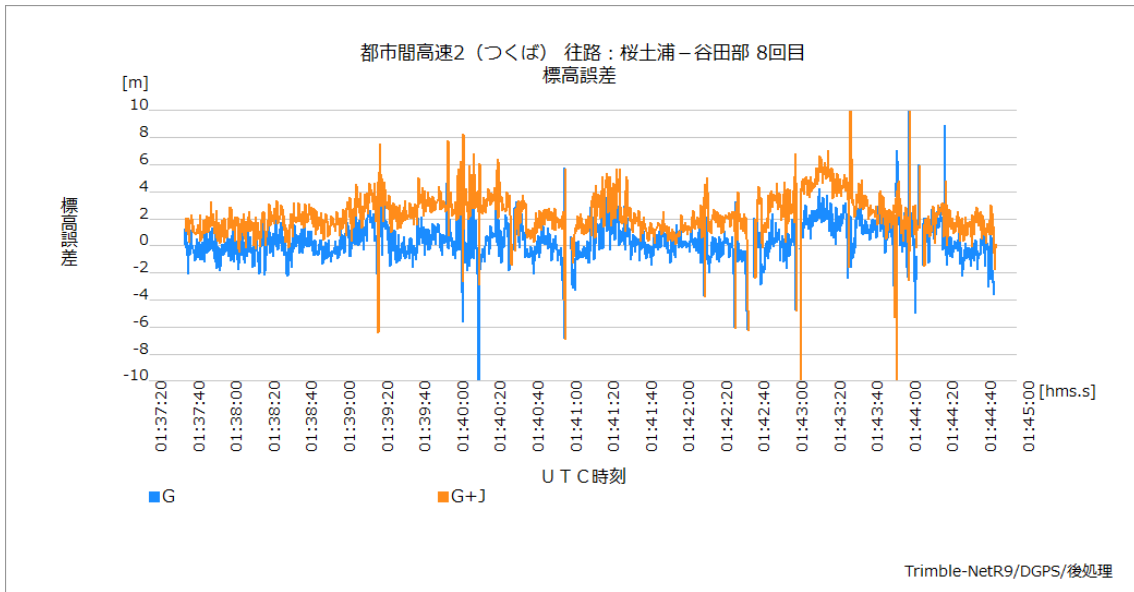


図 6.3.4-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

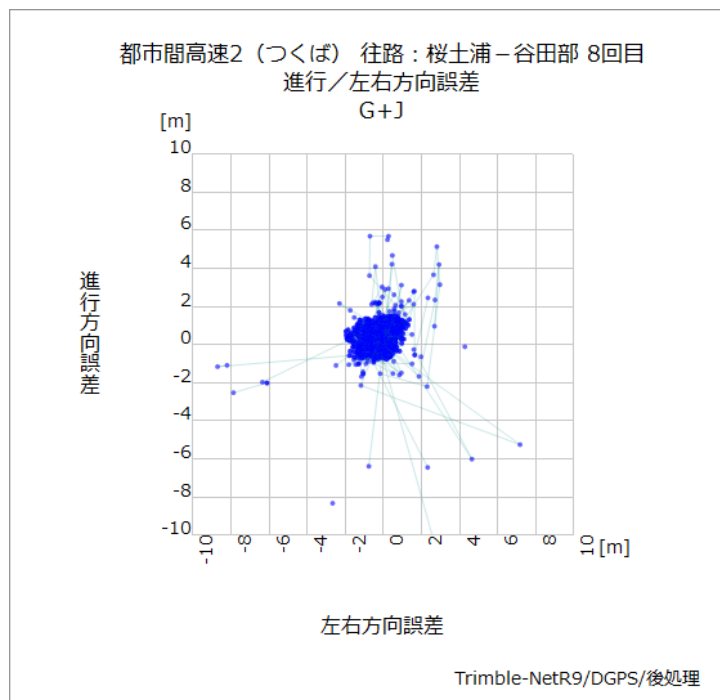


図 6.3.4-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS)

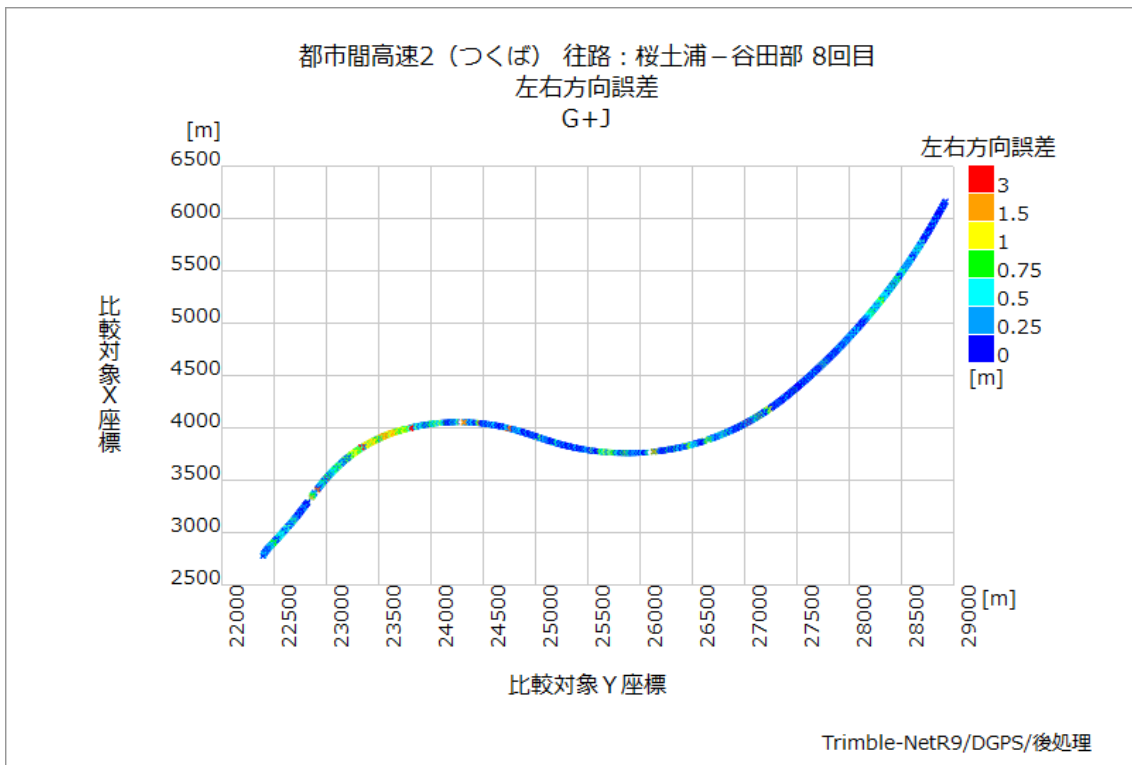


図 6.3.4-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット
(GPS+QZSS)

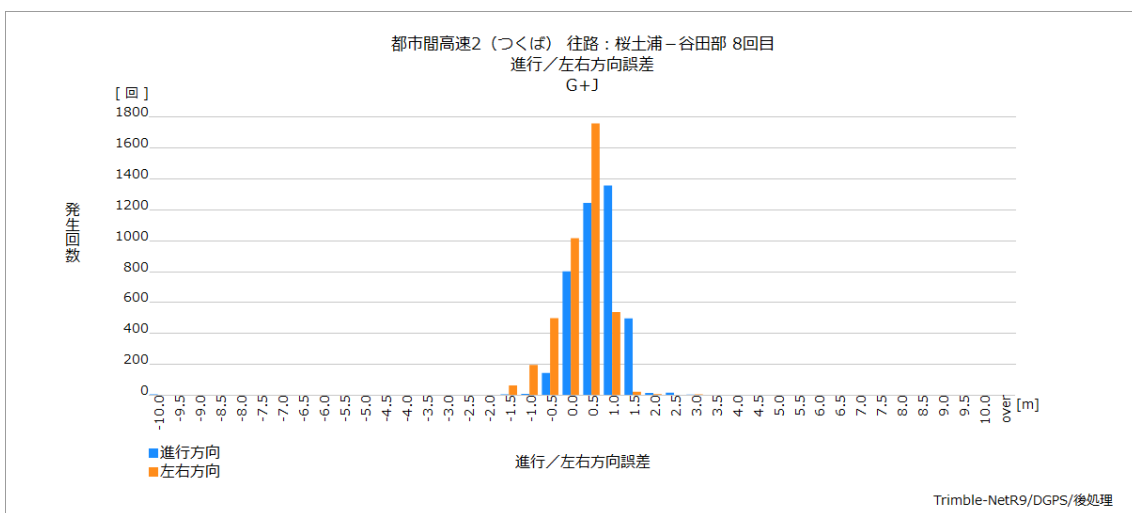


図 6.3.4-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム
(GPS+QZSS)

DGPS は本調査では、L1-SAIF を若干下回る性能となった。自動走行／走行支援における利用に関しては車線認識等に関して選択肢としては考えられるが、積極的利用の為には、測位率、測位精度の向上は必要不可欠となる。

また、DGPS を自動車のような移動体で使用する際には、固定局からの距離に依存してしまう測位性能と、固定局の変更等を伴う連続観測が課題となってくる。

さらに、実用準天頂衛星からの L1S 信号として補強情報を得る場合、将来のマルチ GNSS 対応を含めた対応衛星数の増加、固定局配置の最適化などが大きなポイントとなると思われる。

6.3.5 2 周波搬送波位相測位 (RTK)

6.3.5.1 概要

RTK 方式は、既知点 (基準局:Base Station) で受信した衛星からの電波から搬送波位相の積算値データ (搬送波位相データ:Carrier Phase) を測定し、これらの情報を含む測位情報を無線や携帯電話等の回線を利用し、観測点 (移動局:Rover Station) に伝送する。観測点でも同様に搬送波位相を測定し、基準局から伝送された測位情報とともに使用することで、観測点の三次元位置を求める。

搬送波の波数を単位とした位相データであるため、mm オーダーの高精度測距を実現しており、測位精度が高いため主に測量等の高精度測位を必要とする分野で利用されている。

本調査においてはリアルタイムではなく、基地局および移動局の測位情報を保存し後処理によって計算を行っている。

基地局は東京海洋大学に設置されている固定局の情報を利用した。

6.3.5.2 測位率

搬送波位相測位には 2 周波 (L1、L2) を利用するため、L1 信号のみで測位する方式と比較し、測位率は下がるが、本調査においては RTK 方式が測位可能であるデータ全てを対象としている。このため、単独測位の状態も測位できたとして測位率を計算している。

Fix 解は搬送波位相観測値の整数値バイアス (Ambiguity: 搬送波位相観測値を測距に使用した時に、搬送波長の正数倍の位相不明確量) の解が得られた状態での測位であり、RTK 測位本来の高精度測位が可能な測位状況のモノとなる。

表 6.3.5-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率 (平均値)

	G	G+J	G+J+C	G+J+R+C
測位率	95.56%	95.38%	95.84%	95.97%
Fix 率	63.30%	73.54%	77.45%	72.12%

全 25 周回の都市間高速 (桜土浦 IC—谷田部 IC 間) における測位率の平均は、GPS のみでも 95% を超えており、マルチ GNSS の貢献する幅は少なかったが、Fix 解については GPS のみと比較し、QZSS が加わるだけで 10% 以上 Fix 率は向上している。高仰角に QZSS が加わることで可視衛星数が増え Fix 率が向上したことが要因である。

QZSS の GPS 補完は移動体測位における高精度測位についても、有効に機能していると言える。

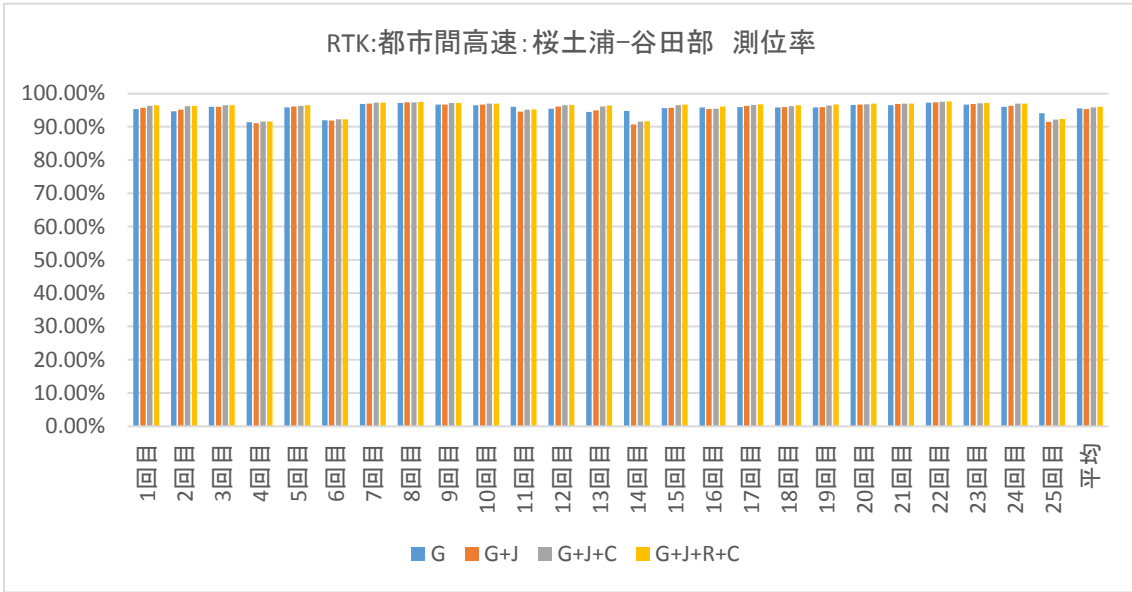


図 6.3.5-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

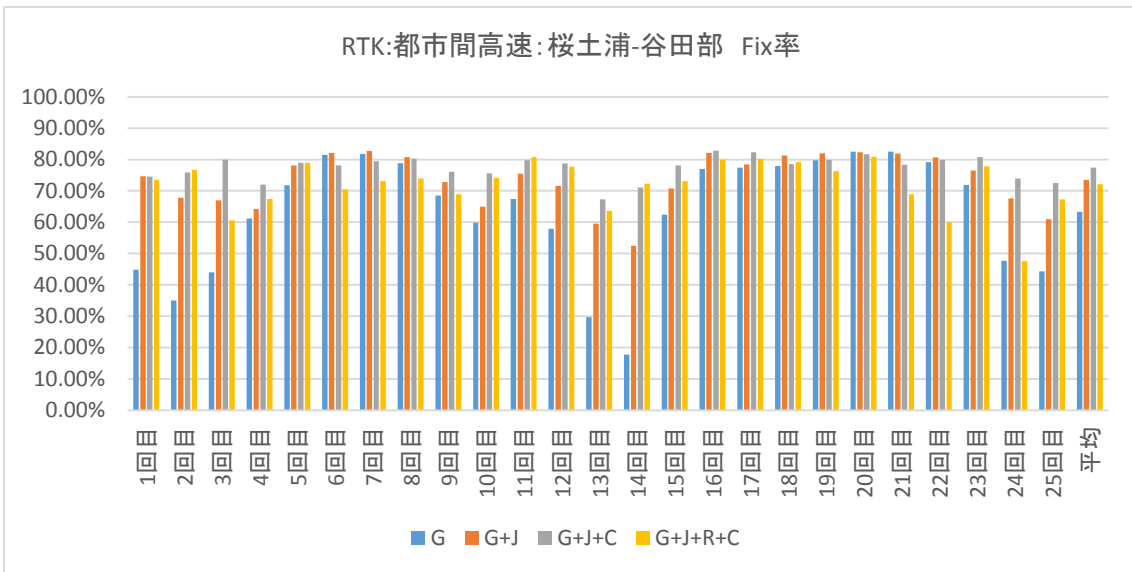


図 6.3.5-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 Fix率(走行毎)

6.3.5.3 測位精度

高精度測位に利用される RTK 方式は、移動体においても高い精度での測位ができています。単独測位解を含む測位精度としても、GPS のみで 90%以上が左右方向誤差 1.5m 以内となり、78%弱が 0.5m 以内となった。使用する衛星システムを増やすにつれ測位精度は向上する傾向にあり、GPS、QZSS、GLONASS、BeiDou を利用した場合左右方向誤差は 82%が、進行方向誤差は 90%以上が 0.5m 以内の精度となっている。

表 6.3.5-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	77.83%	87.88%	92.32%
G+J	80.14%	89.42%	92.98%
G+J+C	82.12%	90.55%	93.64%
G+J+R+C	82.46%	90.92%	93.67%

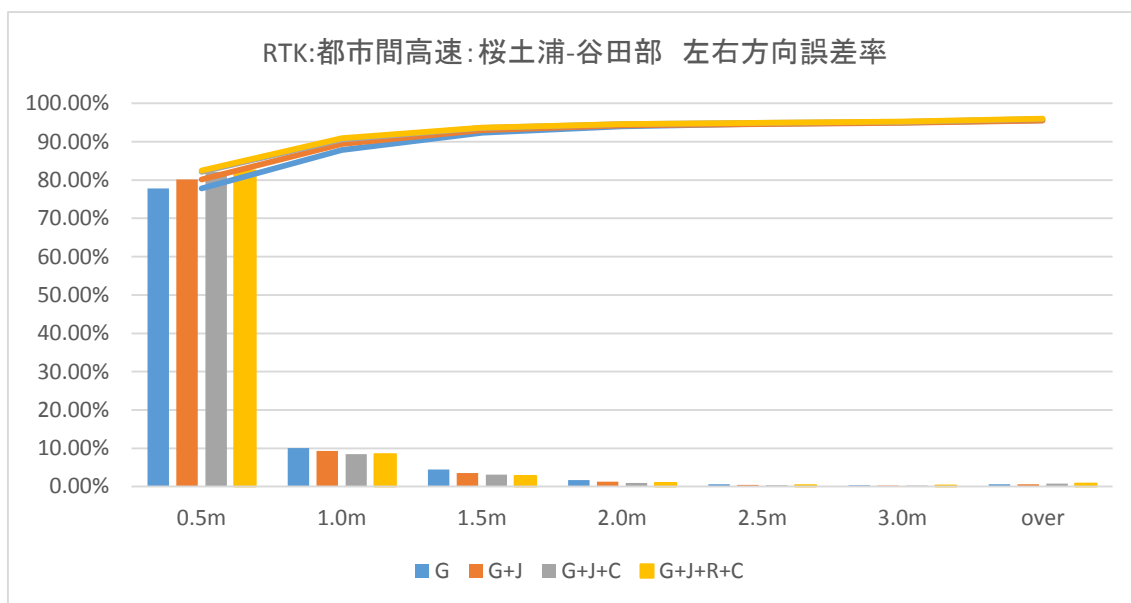


図 6.3.5-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

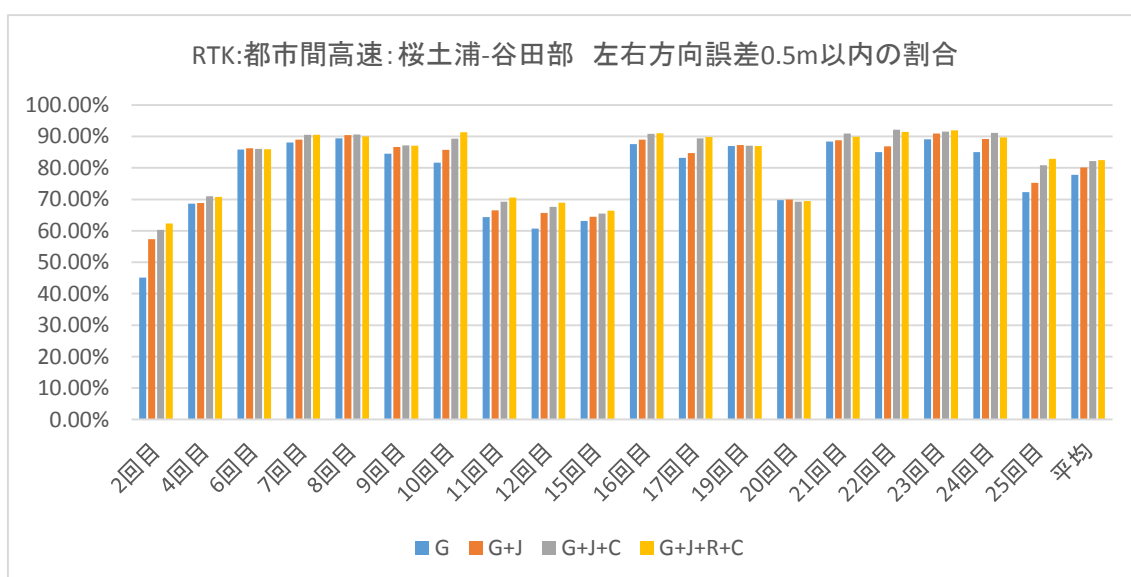


図 6.3.5-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 0.5m 以内の割合

表 6.3.5-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	85.49%	91.57%	93.46%
G+J	87.80%	92.24%	93.77%
G+J+C	89.99%	93.02%	94.04%
G+J+R+C	90.02%	92.87%	93.76%

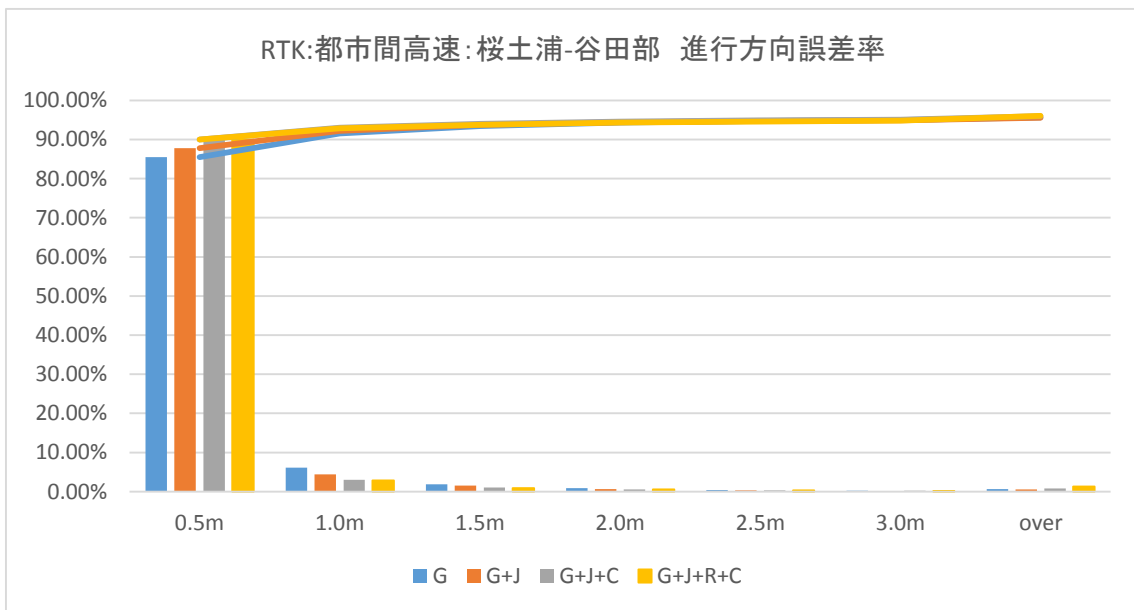


図 6.3.5-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

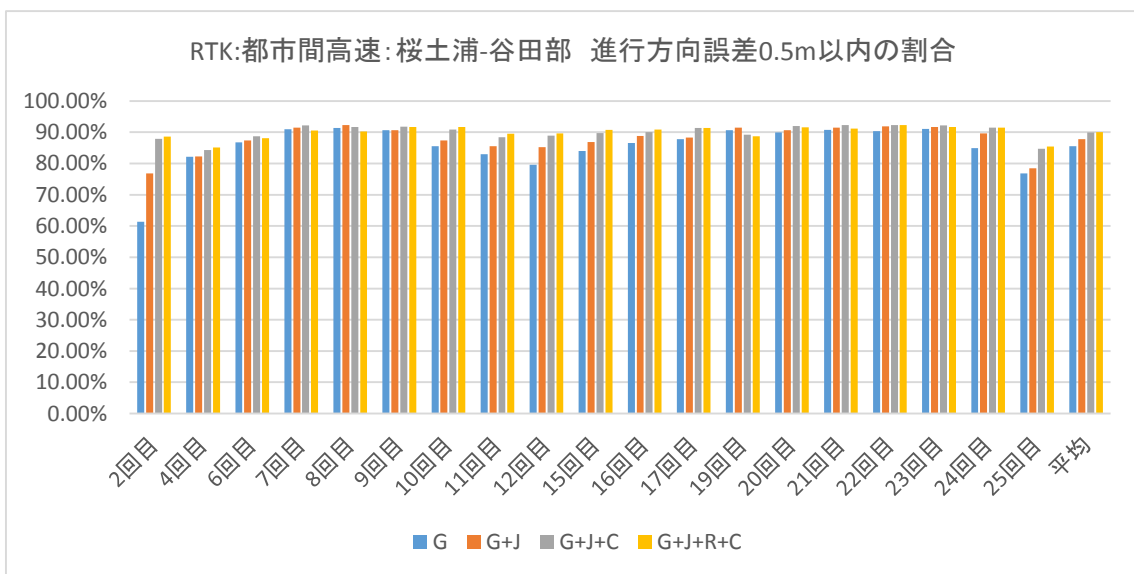


図 6.3.5-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 0.5m 以内の割合

6.3.5.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

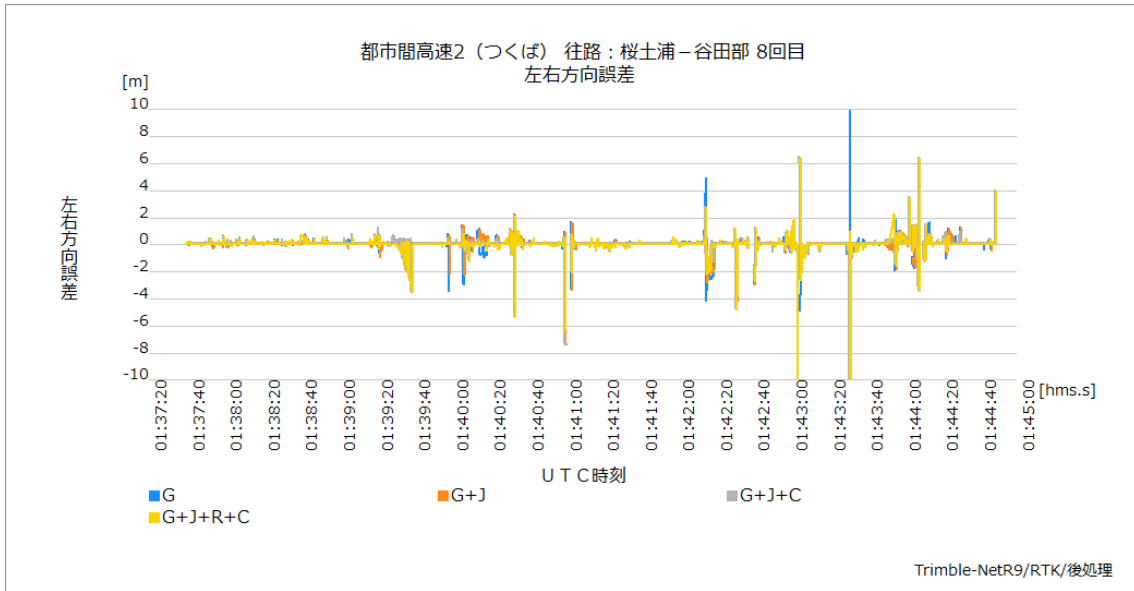


図 6.3.5-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

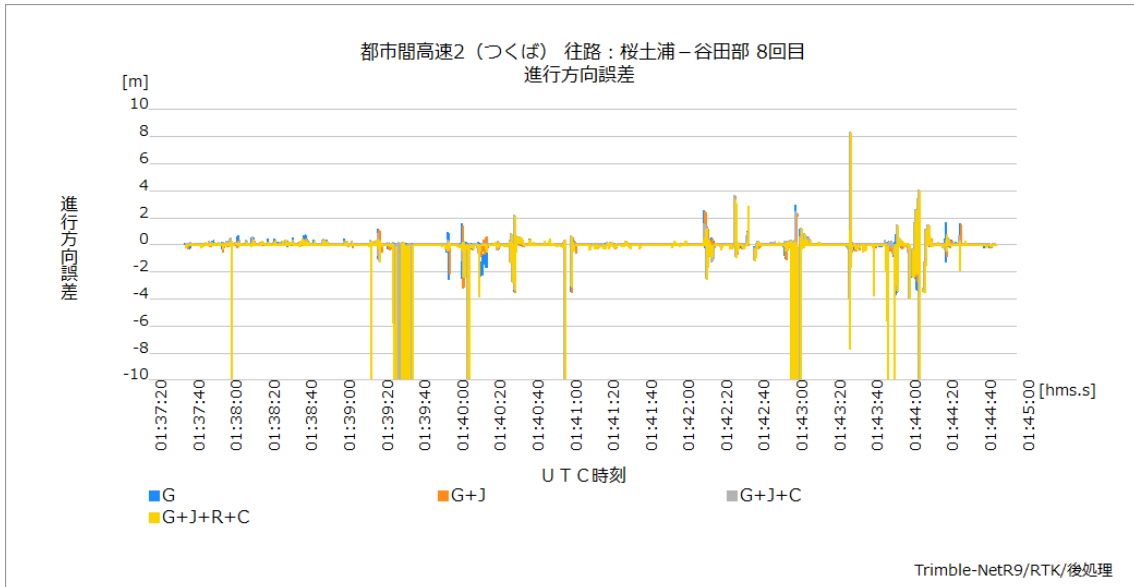


図 6.3.5-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

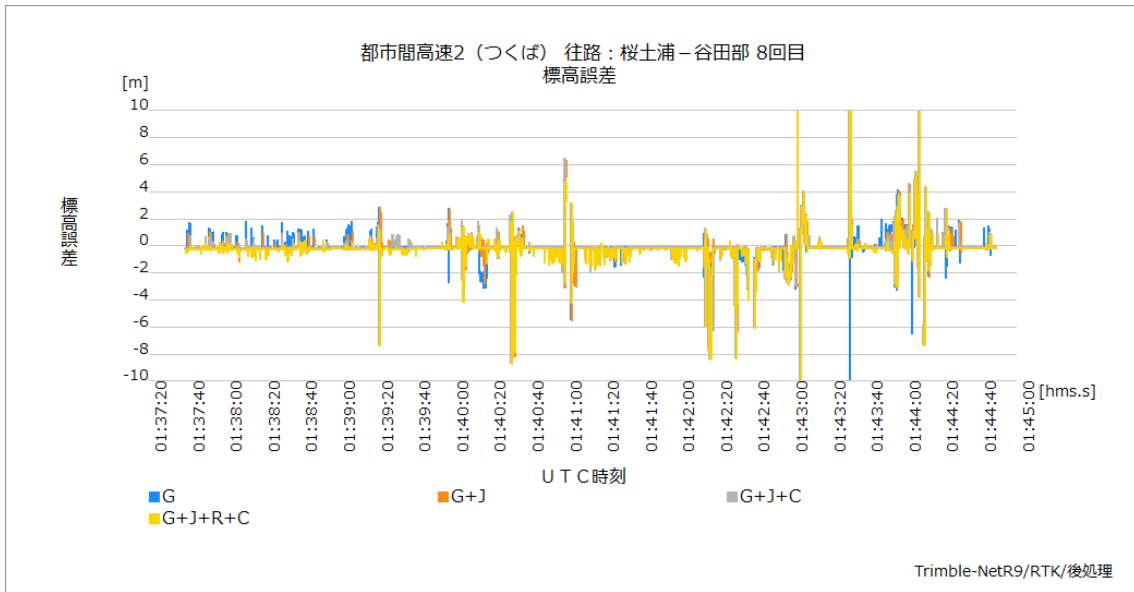


図 6.3.5-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

時系列での推移で確認できるように、基本的には安定した測位精度であるが、急激な測位精度の劣化と復帰が何カ所かで生じており棘のような状態になっている。これらは走行時の急激な地上環境の変化によるものと思われる。橋梁や法面等が主な要因であり、地上環境との相関により精度劣化が事前に予測できる可能性もある。

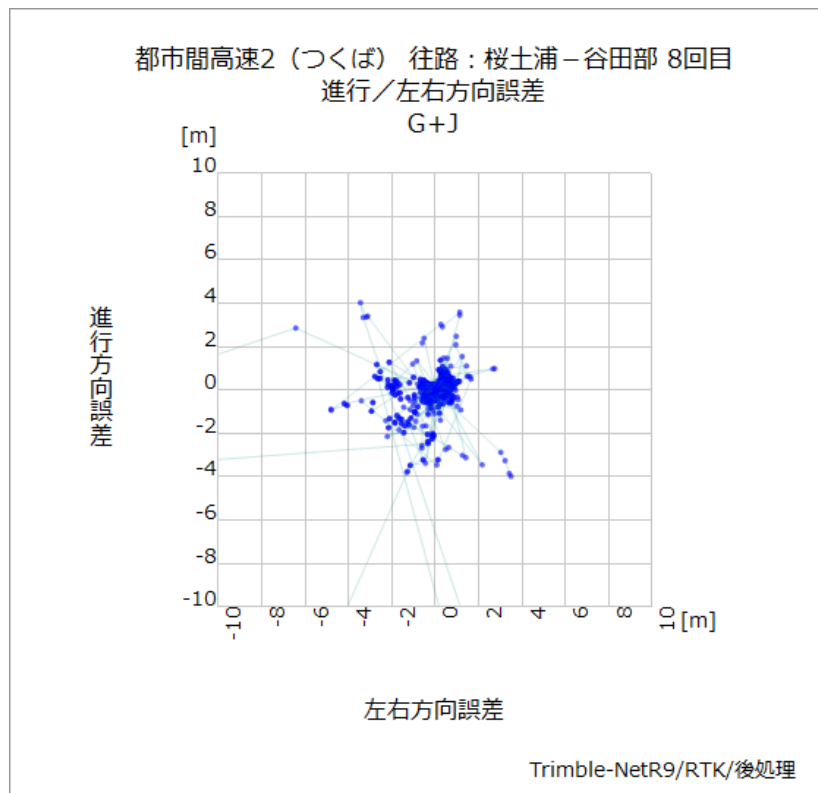


図 6.3.5-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散
(GPS+QZSS)

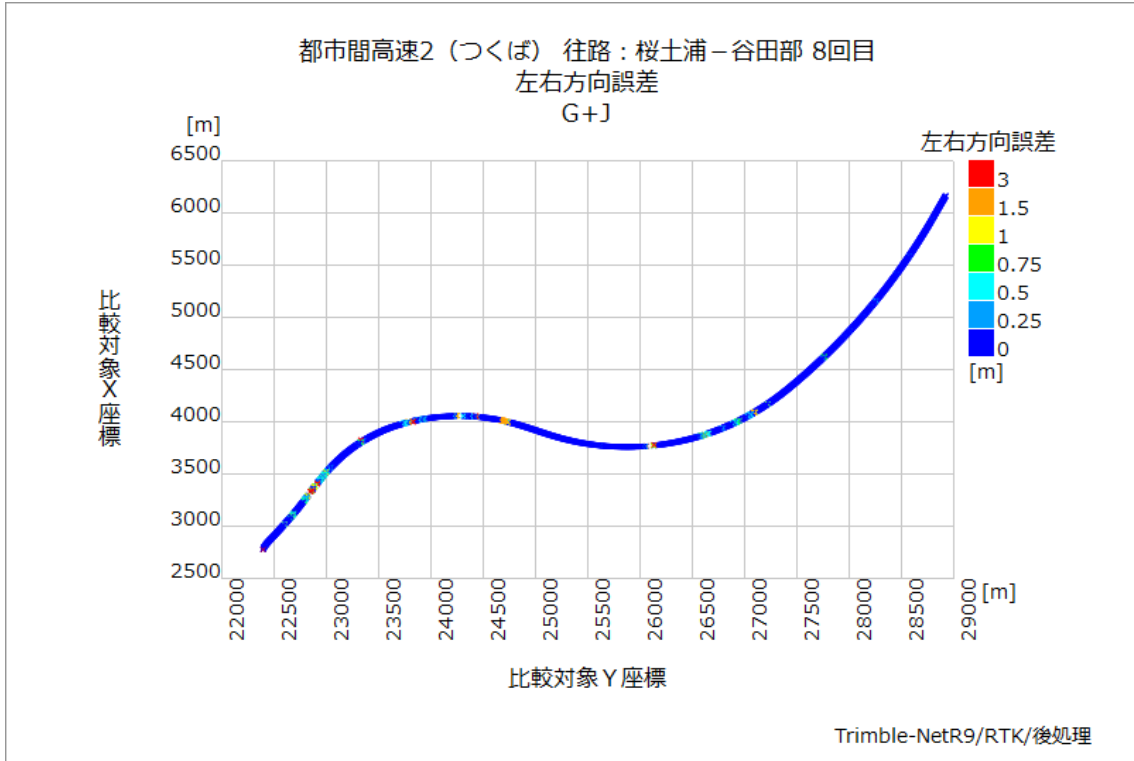


図 6.3.5-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット
(GPS+QZSS)

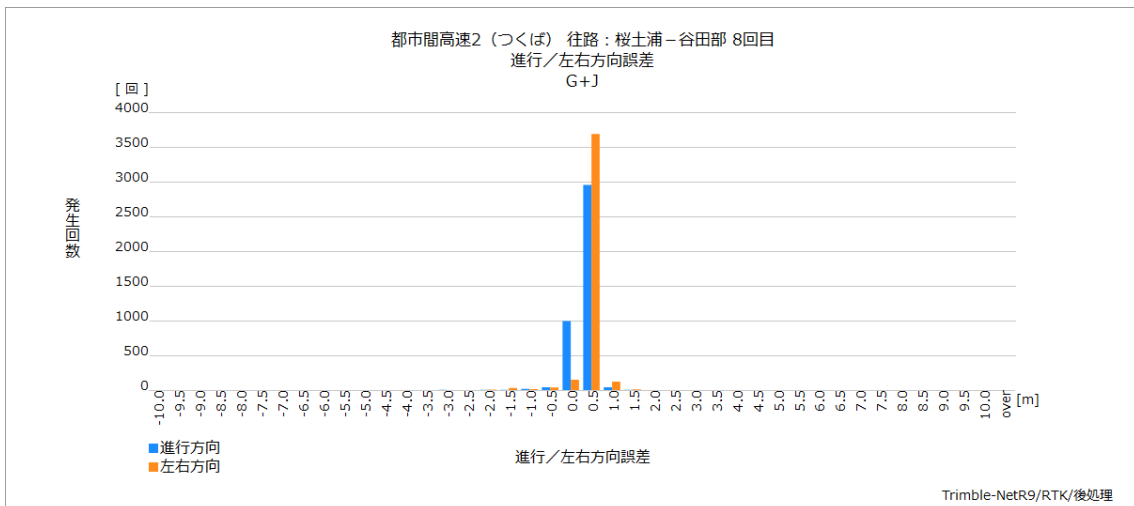


図 6.3.5-12 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム
(GPS+QZSS)

自動走行における RTK の利用においては高速道路等の比較的上空視界の開けた箇所においては、1.0m 以内の高精度な測位が期待できる。また測位率は低下するが Fix 解のみの利用であれば、より高精度な測位と信頼性を得ることが可能と考えられる。

高精度な RTK 測位の機器は 1 式で 100 万円を超えるものがほとんどであり、アンテナ等も大型のものを必要とする。さらに、自動走行でのリアルタイムでの使用には、地上設備や配信インフラ等の社会的コストが多くかかることが懸念される。

6.3.6 CMAS

6.3.6.1 概要

CMAS は、単独測位で RTK を実施する方式(RTK-PPP)をとっている。地上配信を使用せず、衛星から受信するだけで RTK 測位を行うものである。衛星から配信する補強情報としては、国際規格 RTCM 標準の SSR (State Space Representation)を用いる。

なお、2016 年度の秋には準天頂衛星の地上システムが 4 機体制に対するものに移行する。これに伴って、LEX/L6 信号を利用する測位補強システムは、CMAS 設備から CLAS 設備に移行する見通しである。

6.3.6.2 測位率

CMAS の補強情報を用いて、測位端末 LEXR で測位した結果を述べる。測位端末 LEXR は、測位率よりも精度を重視した調整を行っている。これは、実際の車両測位では自律航法との複合を行い測位率は容易に 100%となるので、衛星測位ができる時の精度を重視する方が、全体として最適なシステムを構成できるためである。測位航法学会訳 (Pratap Misra and Per Enge 原著) の「改訂第 2 版 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機」では、移動体における衛星測位と自立航法の複合は必然的なものと述べている。

本項では測位率についてまとめている。表 6.3.6-1、図 6.3.6-1 および図 6.3.6-2 に測位率および Fix 率の実験結果を示す。Fix の考え方は RTK 法と同じである。補強情報の伝送遅延時間は、実用時を想定して 8 秒としている。

表 6.3.6-1 都市間高速：桜土浦-谷田部 測位率（平均値）

	G	G+J
測位率	78.84%	81.41%
Fix 率	37.79%	54.66%

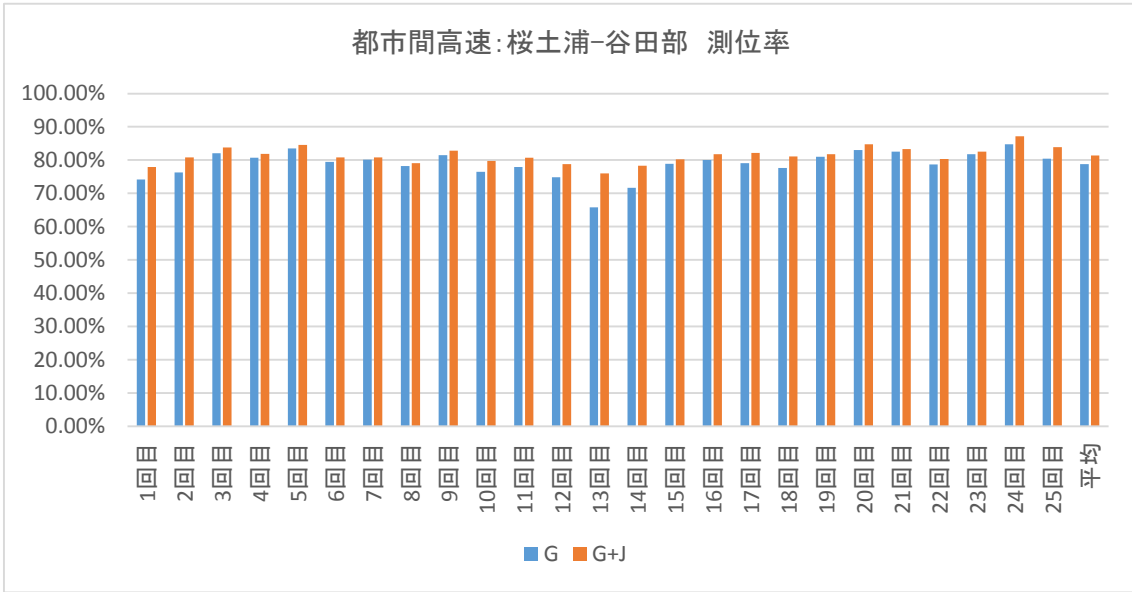


図 6.3.6-1 都市間高速：桜土浦-谷田部 測位率（走行毎）

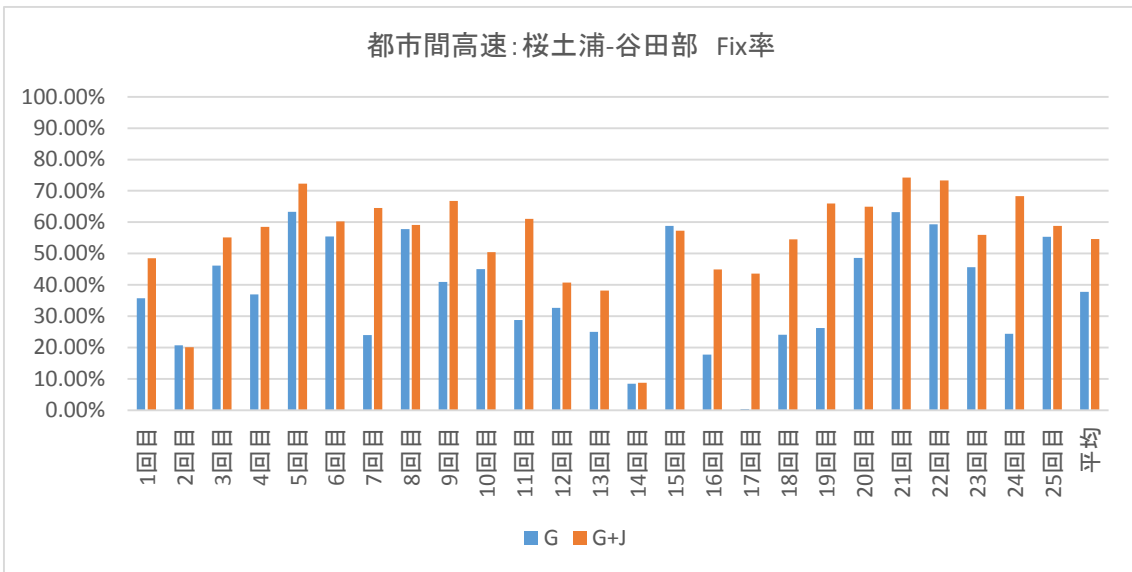


図 6.3.6-2 都市間高速：桜土浦-谷田部 Fix 率（走行毎）

この結果より、GPS だけの測位結果に対して、準天頂衛星を補強対象に加えたものでは、測位率・Fix 率とも向上することがわかる。

6.3.6.3 測位精度

表 6.3.6-2、図 6.3.6-3 および図 6.3.6-4 に左右方向の測位精度の実測結果を示す。また、表 6.3.6-3、図 6.3.6-5 および図 6.3.6-6 に進行方向の測位精度の実測結果を示す。ここでの測位精度とは MMS の精度が閾値内であった走行のみの平均値である。補強情報の伝送遅延

時間は、実用時を想定して8秒としている。

表 6.3.6-2 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右方向誤差率（平均値）

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G	60.79%	73.76%	77.70%	78.92%	79.42%	79.51%	79.79%
G+J	68.15%	77.07%	80.54%	81.24%	81.45%	81.57%	81.76%

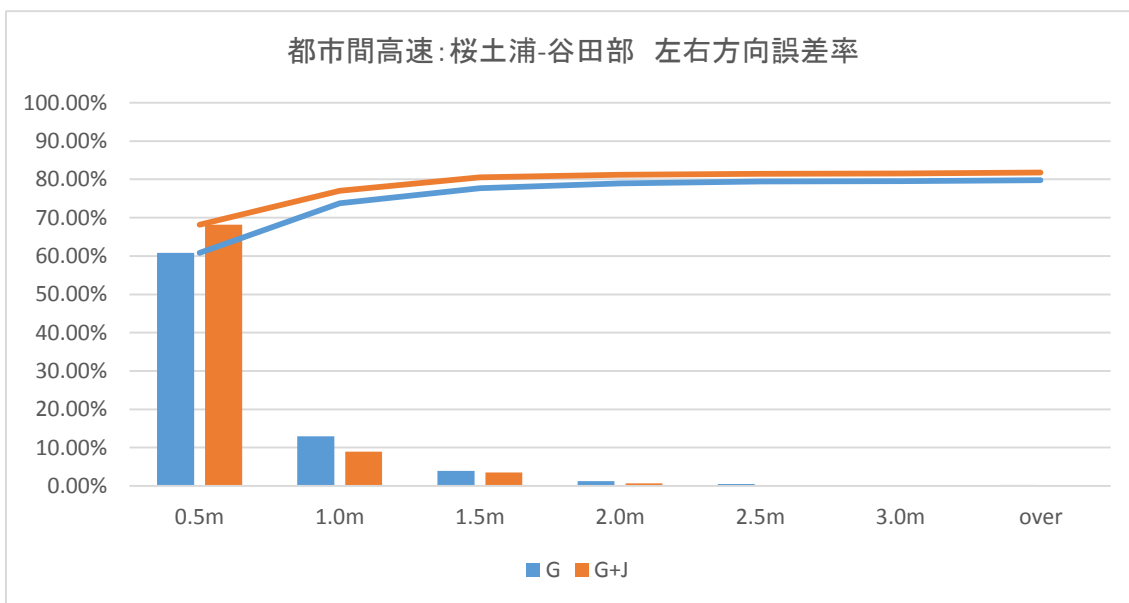


図 6.3.6-3 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

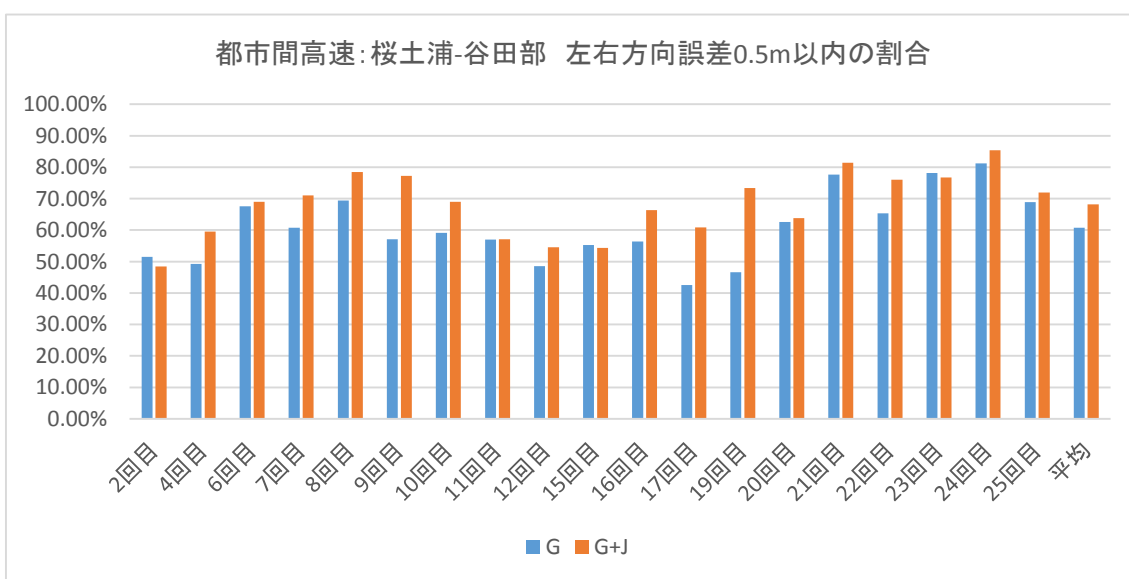


図 6.3.6-4 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右方向誤差 0.5m 以内の割合

表 6.3.6-3 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差率（平均値）

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	67.92%	77.57%	79.14%
G+J	75.54%	80.00%	81.27%

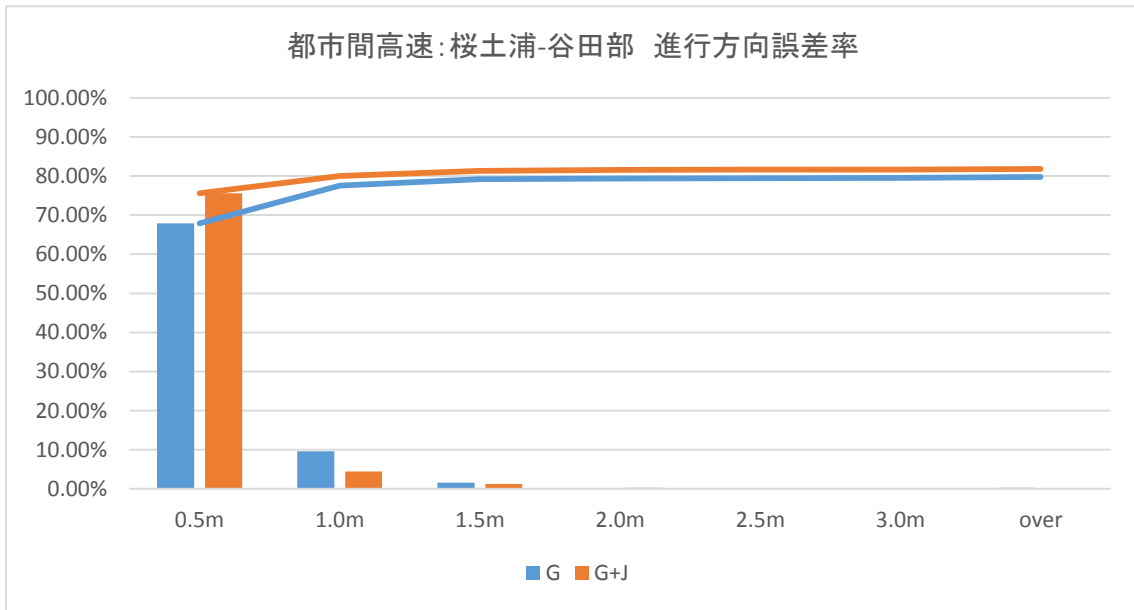


図 6.3.6-5 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

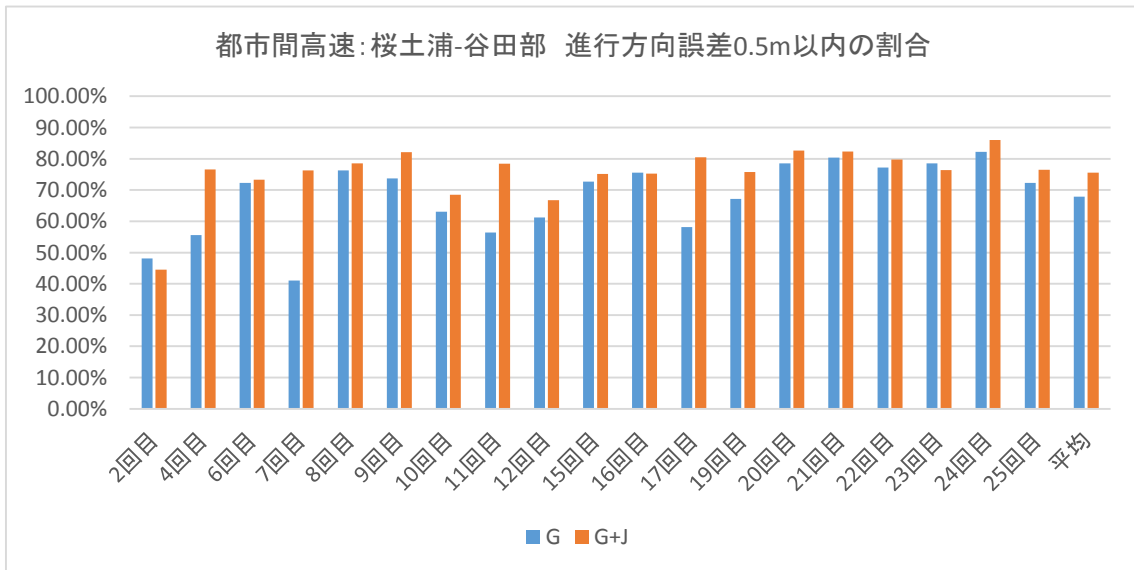


図 6.3.6-6 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差 0.5m 以内の割合

実験で用いた測位端末 LEXR は、CMAS の補強情報の全種類を使用して測位をする端末であるが、補強情報は要素毎に配信されるので、様々な組み合わせで利用することができる。今後、このような測位端末が登場してくることが予想されている。

6.3.6.4 都市間高速での振る舞い

例として 8 回目の走行の結果を示す。

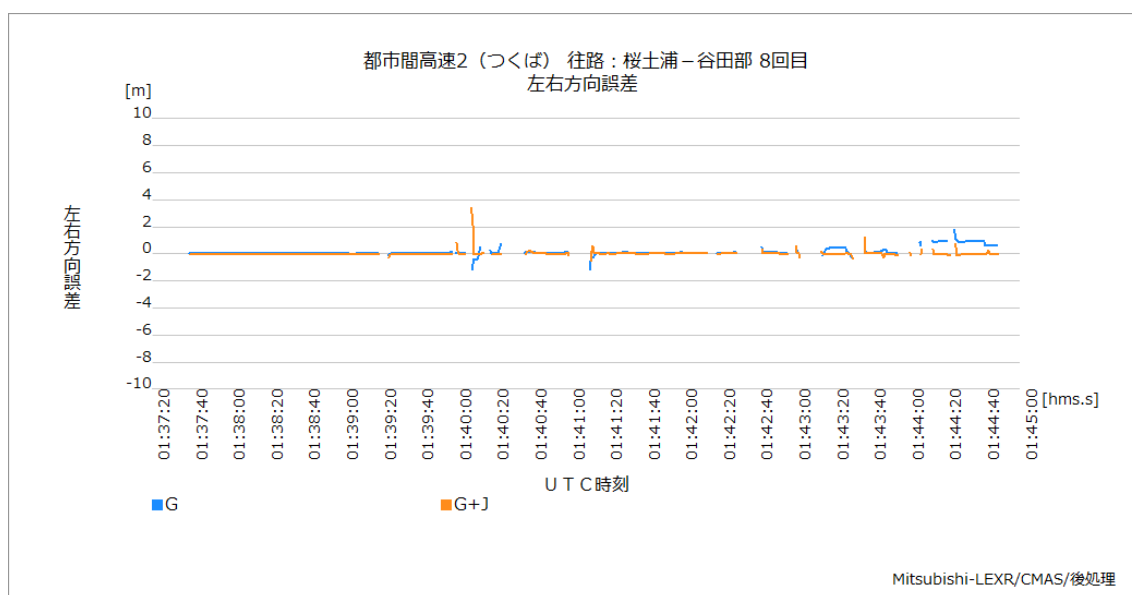


図 6.3.6-7 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

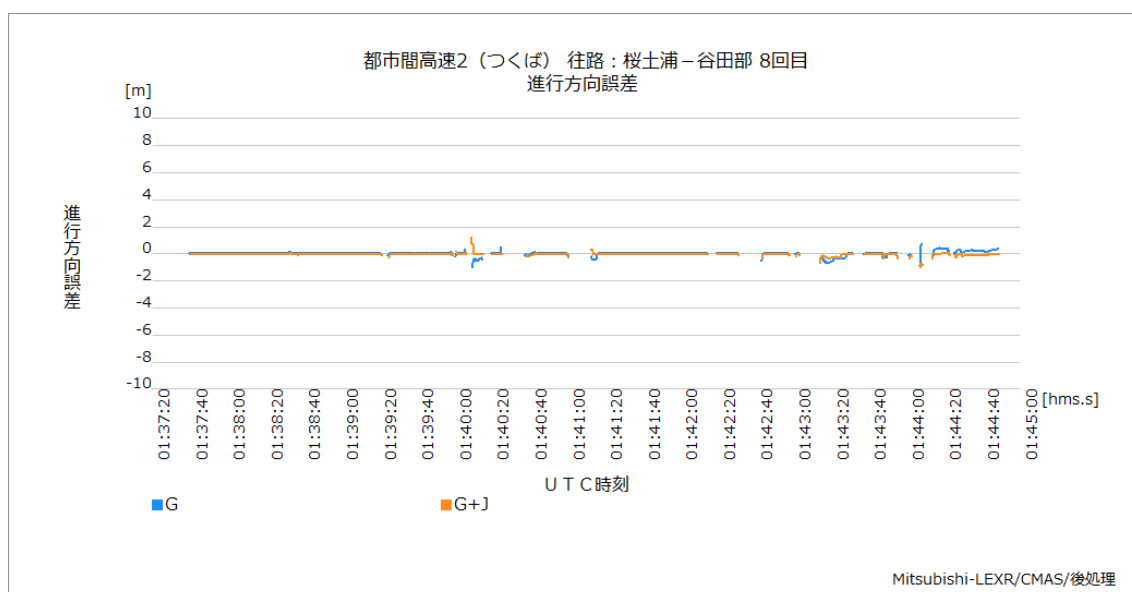


図 6.3.6-8 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

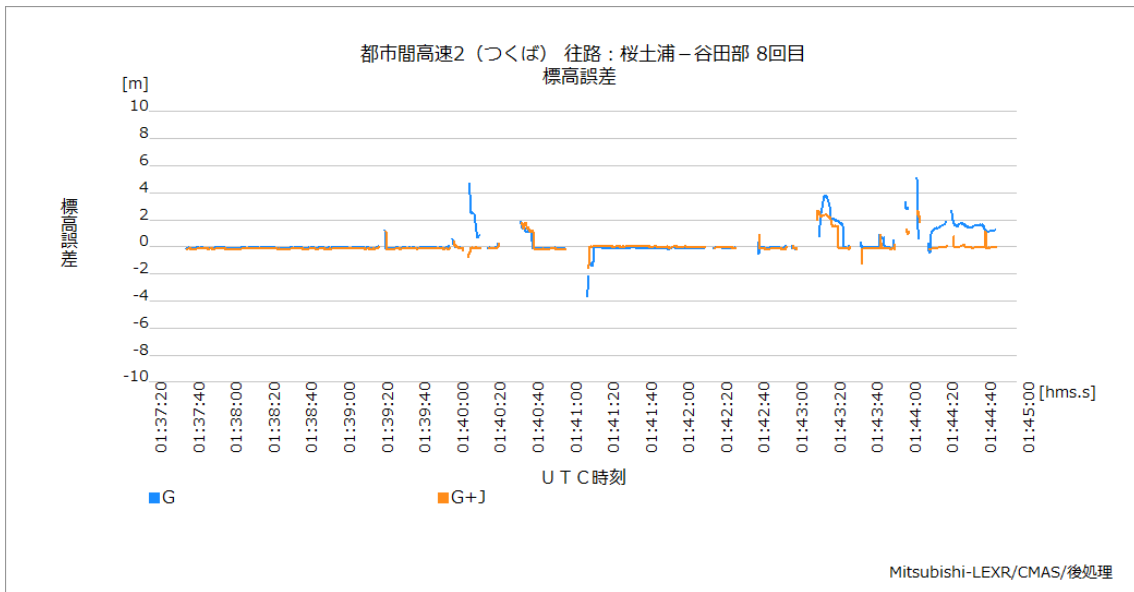


図 6.3.6-9 都市間高速：桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

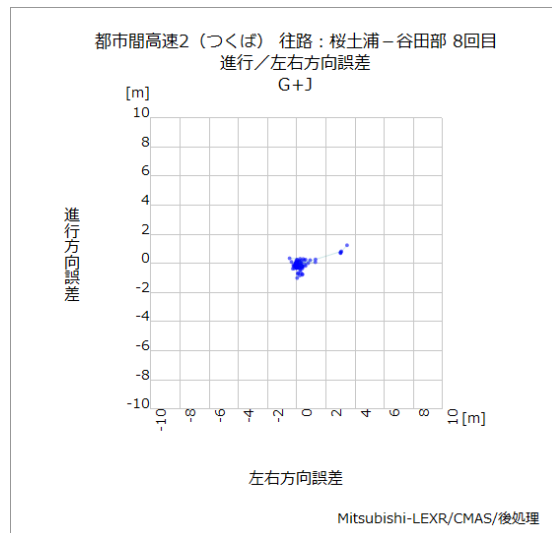


図 6.3.6-10 都市間高速：桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS)

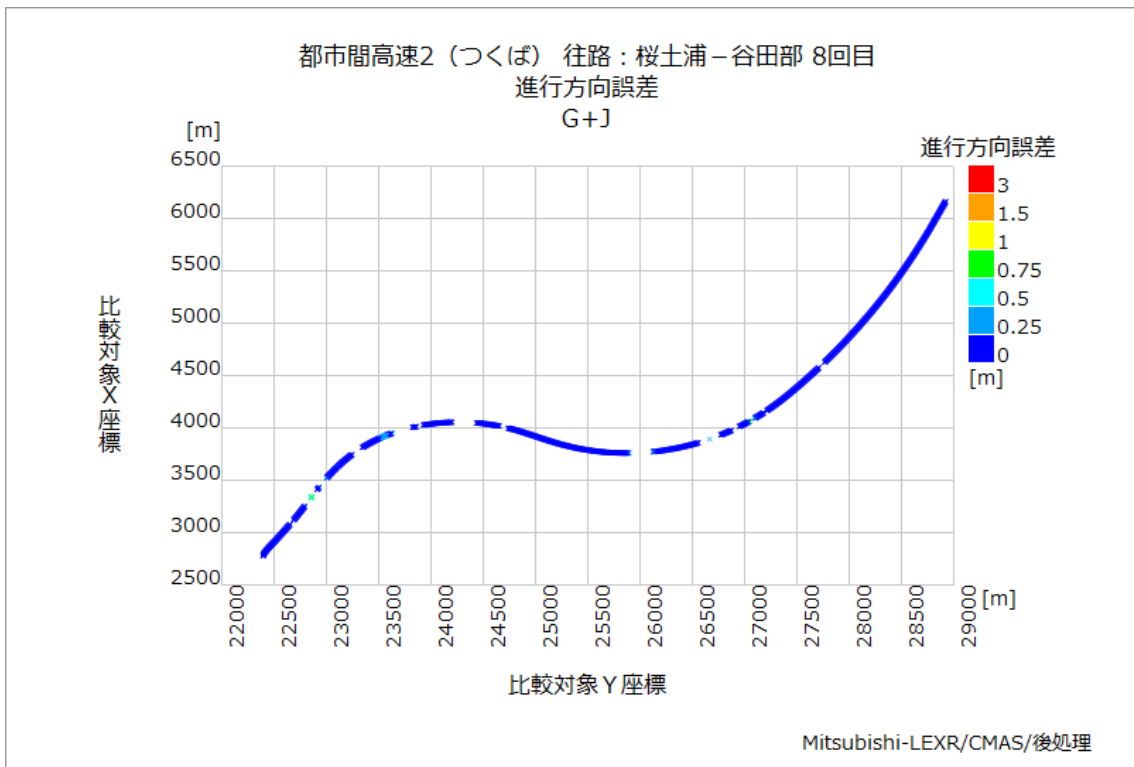


図 6.3.6-11 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット (GPS+QZSS)

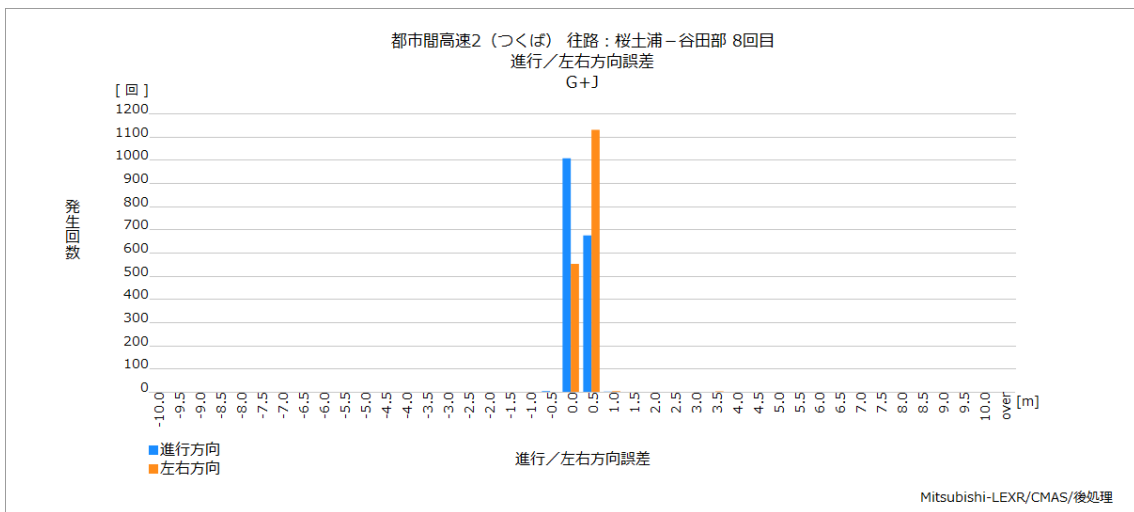


図 6.3.6-12 都市間高速：桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム (GPS+QZSS)

都市間高速道路においては、跨道橋・その他遮蔽体など衛星測位を妨げる要素があり、そこで測位が途切れる結果となっている。自律測位を複合することによって、この問題は解消し、測位率は 100%となる。

6.3.7 MADOCA-PPP

6.3.7.1 概要

MADOCA-PPP による後処理解析を行った。解析概要を以下に示す。

- 解析概要
 - 測位方式:2 周波 PPP-AR
 - 補強方式:MADOCA-PPP
 - 使用暦:MGF 最終暦 (※表 9.2.8-1 参照)
 - 補正情報:local 補正情報
 - ◇ 基準局:GSI 電子基準点桜川、岩瀬、越谷(基準局間隔約 55km)
※電子基準点データ(国土地理院)を元に、JAXA により local 補正情報の生成を行った。
 - ◇ local 補正情報適用周期:30 秒間隔
 - 計測経路:都市間高速(桜土浦 IC－谷田部 IC 間)
 - 使用機材
 - ◇ アンテナ:NovAtel GPS-703-GGG
 - ◇ 受信機:Trimble NetR9
 - 取得衛星システム:GPS/GPS+QZSS/GPS+QZSS+GLONASS

平成 26 年度 SIP「自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査」において、MADOCA-PPP では再収束時間、及びそれに伴う精度劣化が課題となっていた。本課題に対して、今年度新たに local 補正情報の使用、AR(Ambiguity Resolution)技術の適用を行った。local 補正情報では基準局において電離層、対流圏遅延量の値を推定し、ユーザ位置における補正情報を提供することで、MADOCA-PPP の初期収束、再収束時間短縮効果を得ることが可能である。また、AR 技術を用いることで、搬送波の位相の波数を整数値で求め、より高精度に測位することが可能である。以下に都市間高速(桜土浦 IC－谷田部 IC 間)における評価結果を示す。

6.3.7.2 測位率

全 25 周回往路の測位率、Fix 率の平均値を、GPS のみ用いた場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.3.7-1 に示す。また、全 25 周回往路毎に測位率、Fix 率を確認した。結果を図 6.3.7-1、図 6.3.7-2 に示す。

表 6.3.7-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G	G+J	G+J+R
測位率	90.60%	91.27%	92.91%

Fix 率	63.13%	61.20%	65.72%
-------	--------	--------	--------

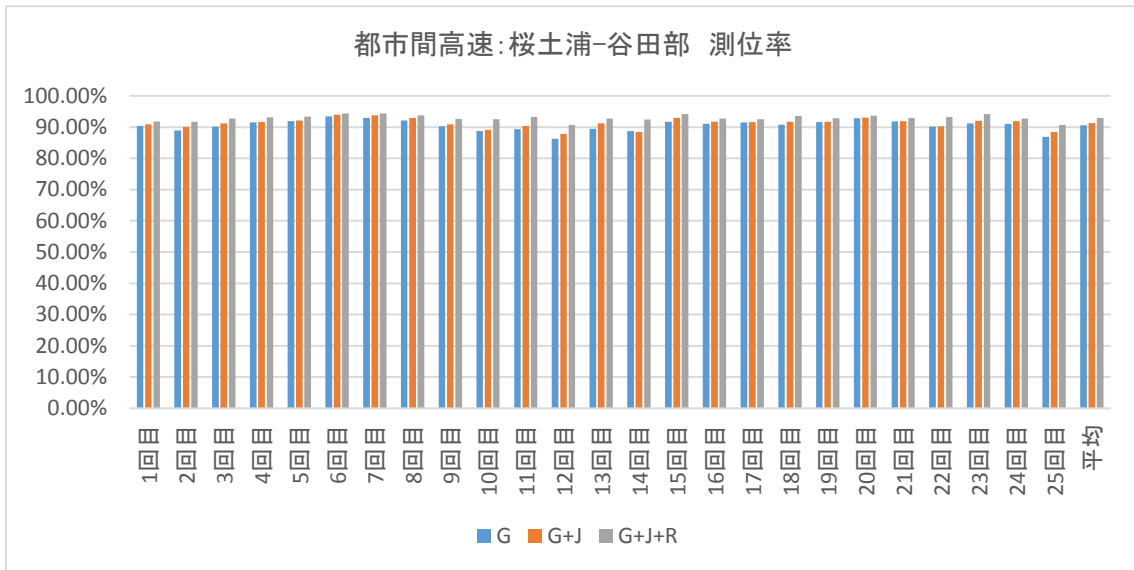


図 6.3.7-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

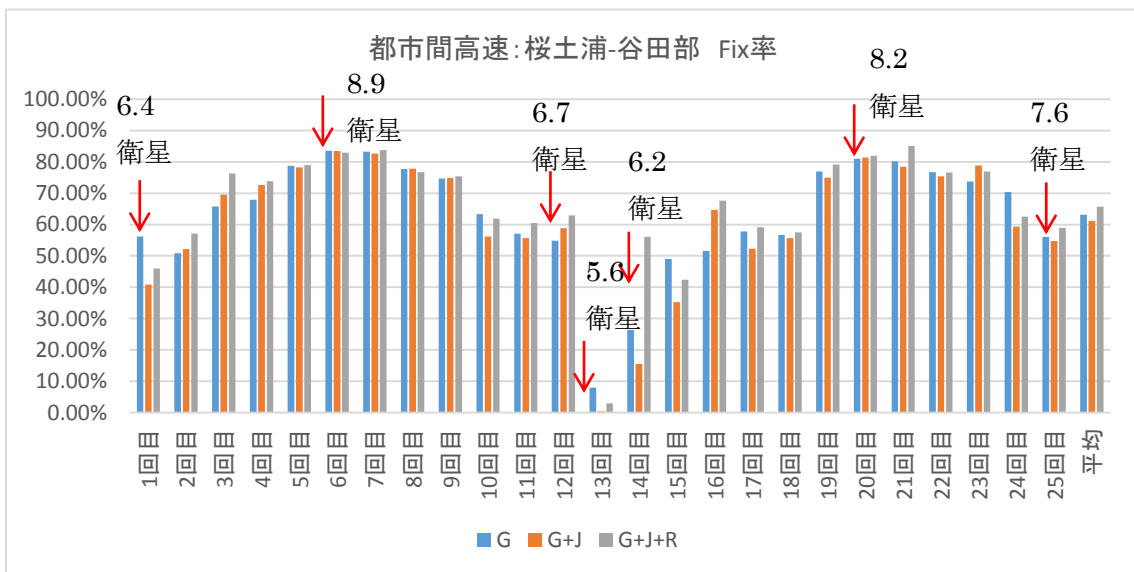


図 6.3.7-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 Fix 率(走行毎)

測位率は GPS 衛星のみ、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合において、それぞれ 90.60%、91.27%、92.91%と向上している。Fix 率は周回毎にバラつきはあるが、平均して 60～65%程度である。



図 6.3.7-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 GPS と QZSS 衛星数(走行毎)

Fix 率の変動について検討を行った。3 日間にわたり収録したデータにおいて、走行 6 周目往路と 21 周目往路が UTC にして 1 時頃であることから、Fix 率について日変動が見られていると考えられる。そこで AR を適用している GPS と QZSS の平均衛星数を全 25 周往路について求めたところ、図 6.3.7-3 のようになった。本結果より、衛星数の平均値と、Fix 率が相関していることがわかる。そのため、Fix 率の変動は、衛星配置による影響だと思われる。GPS と QZSS に加え、Galileo、BeiDou など、AR を適用可能な衛星が増加すれば、Fix 率の改善と安定性向上が期待できるとと思われる。

また、表 6.3.7-1 において GPS に QZSS を加えた場合に Fix 率が 2%程度低下している。本原因については、GPS に比べて QZSS の精密暦推定精度が悪い傾向を確認しており、この点が原因ではないかと考えている。

6.3.7.3 測位精度

リファレンスとなる MMS の測位結果が信頼できると判断した全 19 周回に対し、往路において、左右、進行方向誤差が 0.5m、1.0m、1.5m を下回る割合の平均値を、GPS のみ用いた場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.3.7-2、表 6.3.7-3 に示す。また、全 19 周回往路毎に左右、進行方向誤差 1.0m を下回る割合を確認した。結果を図 6.3.7-5、図 6.3.7-7 に示す。さらに、左右、進行方向誤差の平均値を値域毎のヒストグラムとして確認した。結果を図 6.3.7-4、図 6.3.7-6 に示す。

表 6.3.7-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下

G	75.06%	84.41%	87.74%
G+J	73.51%	84.74%	88.71%
G+J+R	77.25%	87.30%	90.17%

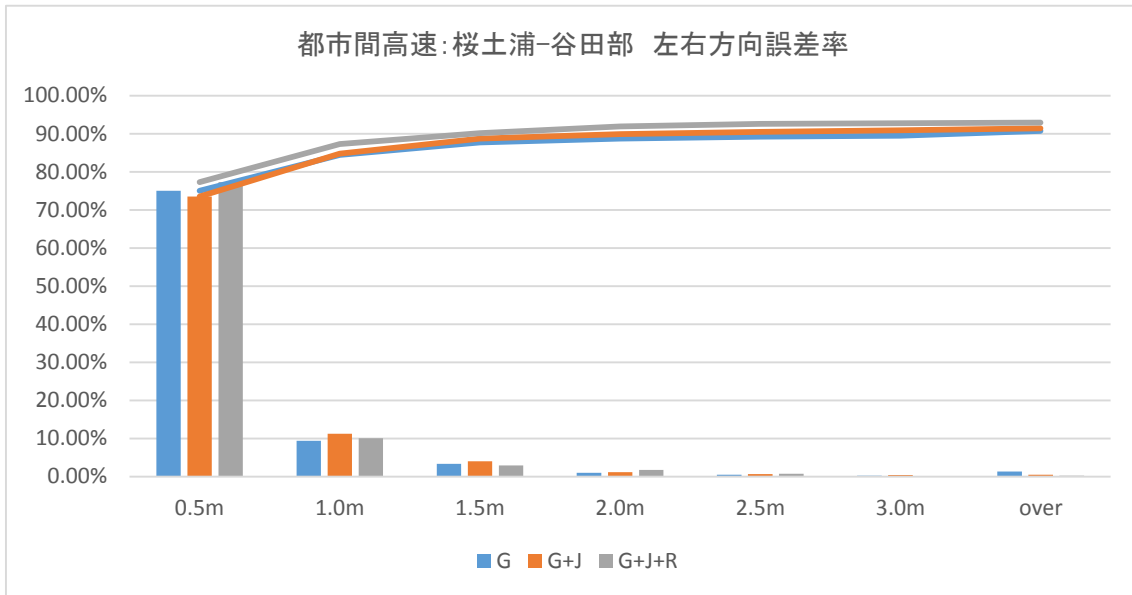


図 6.3.7-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

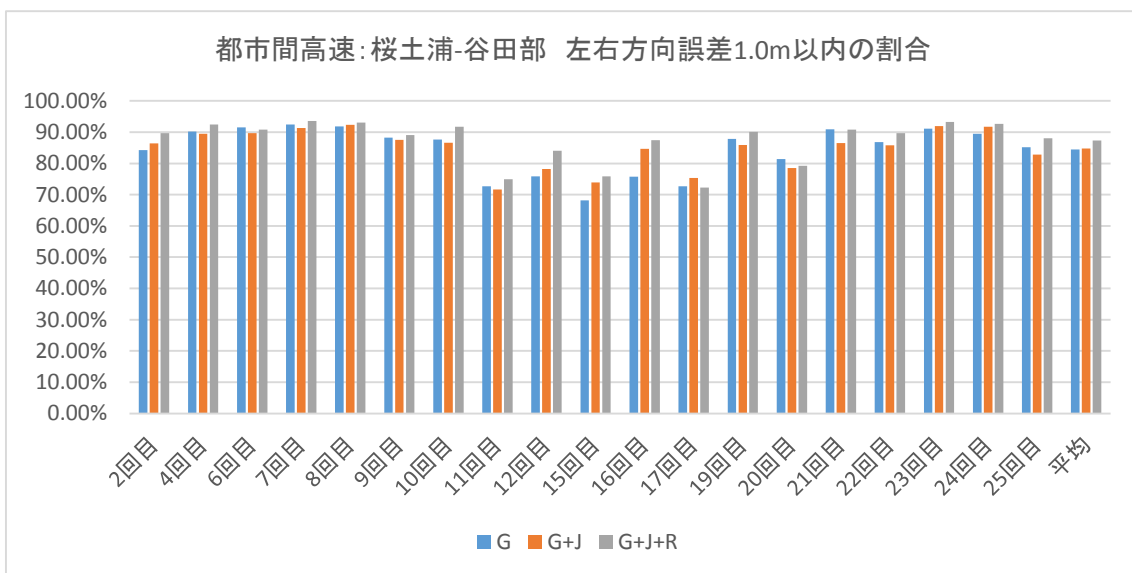


図 6.3.7-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m 以内の割合

表 6.3.7-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
--	---------	---------	---------

G	84.66%	88.87%	89.84%
G+J	85.66%	89.00%	90.02%
G+J+R	87.59%	90.54%	91.37%

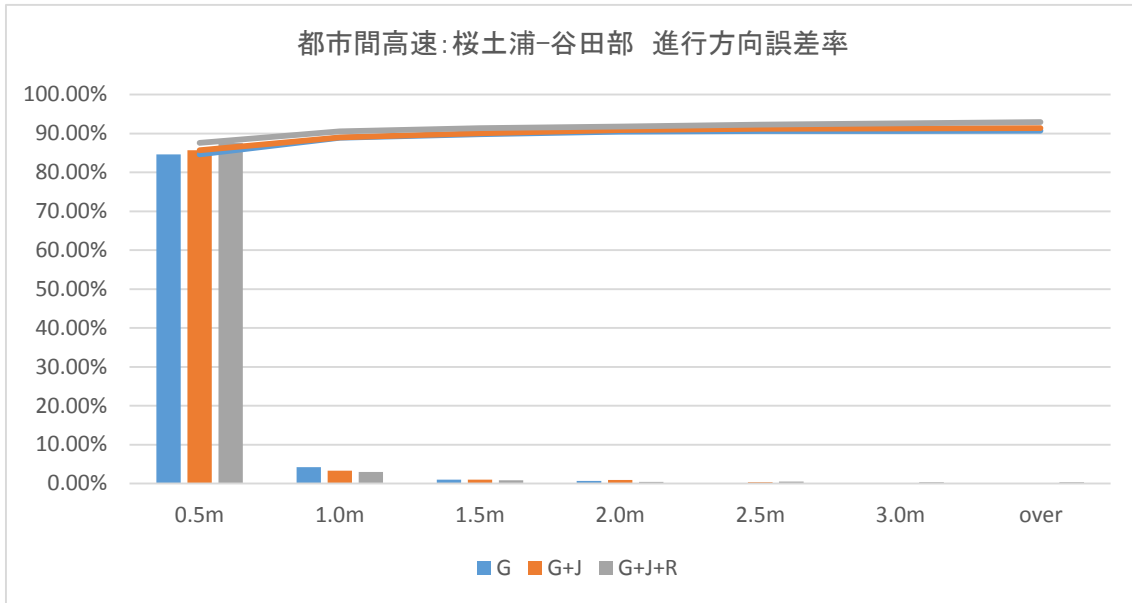


図 6.3.7-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

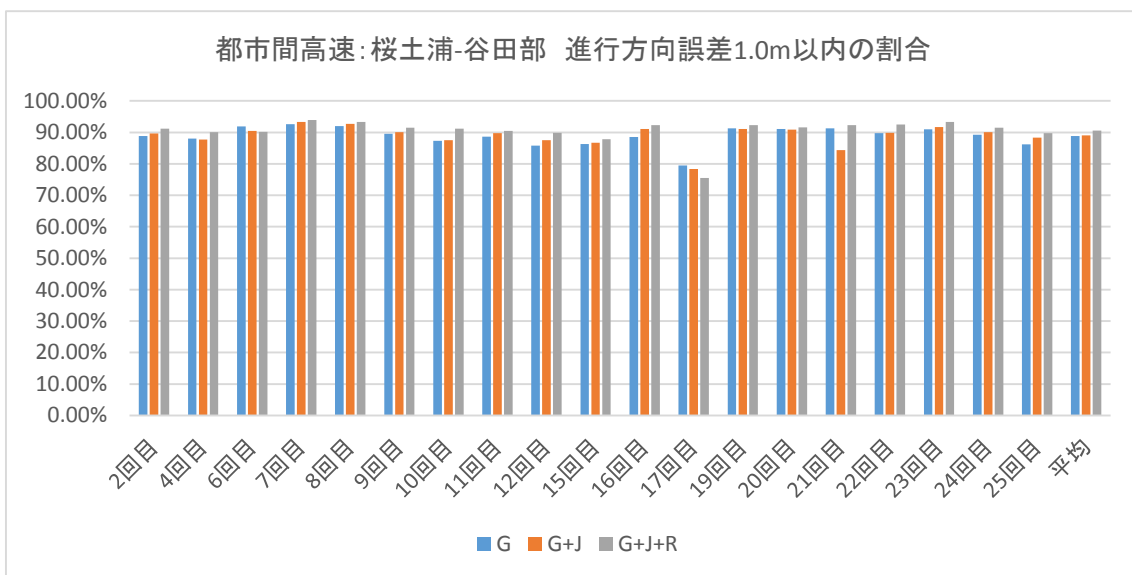


図 6.3.7-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m 以内の割合

左右方向誤差において0.5m、1.0mを下回る割合は、QZSSが加わることにより若干減少しているものの、左右方向、進行方向において、0.5m、1.0m、1.5mを下回る割合でみると、QZSS、GLONASS衛星を加える改善効果が確認されており、GPS、QZSSとGLONASSを併用した場

合、左右方向、進行方向誤差において、0.5m を下回る割合は 76.7%、87.6%を達成している。1.0m を下回る割合になると、86.85%、90.54%に上っており、高精度な結果が得られている。また、測位時の精度、Fix 時の精度について考察を行った。リファレンスとなる MMS の測位結果が信頼できると判断した全 19 周に対し、往路のデータに対して、左右、進行方向誤差が 0.5m、1.0m、1.5m を下回る点の、測位点全体に対する割合の平均値を、GPS のみ用いた場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.3.7-4、表 6.3.7-5 に示す。また、同様に左右、進行方向誤差が 0.5m、1.0m、1.5m を下回る Fix 解の、Fix 解全体に対する割合の平均値を、GPS のみ用いた場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.3.7-6、表 6.3.7-7 に示す。

表 6.3.7-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値、母数が測位全点の時)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	82.74%	93.05%	96.72%
G+J	80.45%	92.73%	97.08%
G+J+R	83.10%	93.91%	97.00%

表 6.3.7-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値、母数が測位全点の時)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	93.32%	97.97%	99.04%
G+J	93.74%	97.40%	98.52%
G+J+R	94.22%	97.40%	98.28%

表 6.3.7-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値、母数が Fix 解全点の時)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	91.79%	98.29%	99.59%
G+J	91.48%	98.16%	99.65%
G+J+R	91.23%	97.82%	99.14%

表 6.3.7-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値、母数が Fix 解全点の時)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下
G	99.87%	99.97%	99.99%

G+J	99.91%	100.00%	100.00%
G+J+R	99.47%	99.48%	99.48%

結果を見ると、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合、左右方向、進行方向誤差において、Fix 解が Fix 解全点に対して 0.5m を下回る割合は、91.23%、99.47%に達し、1.0m を下回る割合になると、97.82%、99.48%となり、Fix 解であれば約 98%の確度でサブメータの測位結果が得られることがわかる。

測位精度のバラつきについては、左右方向、進行方向共に、衛星数が少なくなり Fix 率が減少する 11 周目から 17 周目あたりで若干減少しており、衛星数と緩やかな相関がみられることがわかる。

6.3.7.4 都市間高速での振る舞い

より詳細な振る舞いを確認するために、例として 8 周目往路のデータをピックアップして結果を確認した。

6.3.7.4.1 都市間高速での精度

UTC 時刻と左右、進行方向、標高誤差の関係を、GPS を使用した場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を図 6.3.7-8、図 6.3.7-9、図 6.3.7-10 に示す。また、GPS と QZSS を併用した場合において、左右、進行方向誤差の水平プロットを図 6.3.7-11 に、走行経路上における左右方向誤差のカラープロットを図 6.3.7-12 に、左右、進行方向誤差のヒストグラムを図 6.3.7-13 に示す。

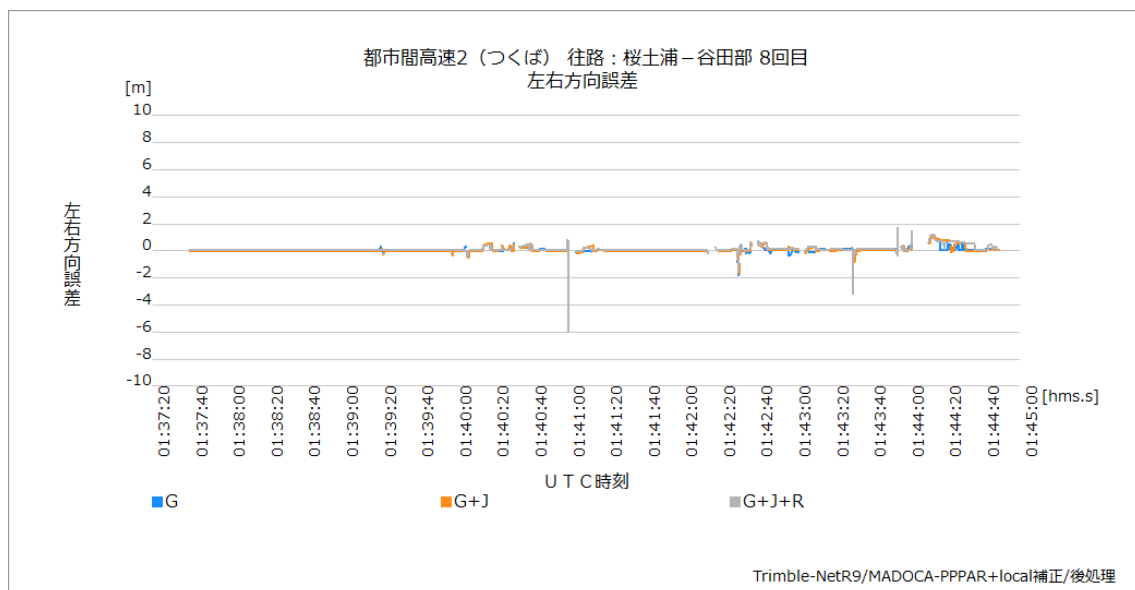


図 6.3.7-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

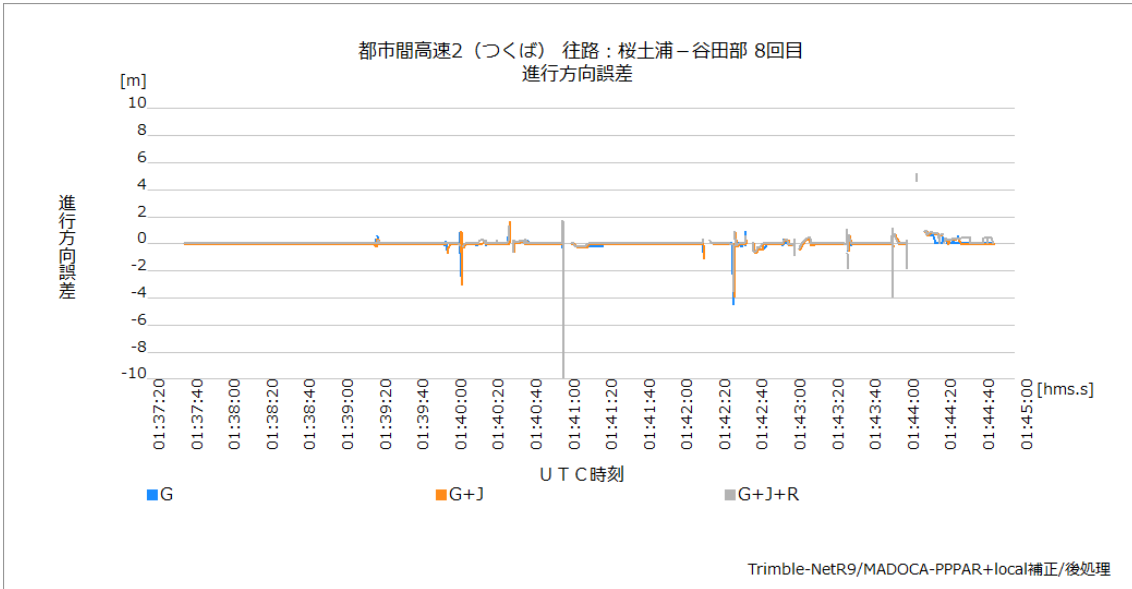


図 6.3.7-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

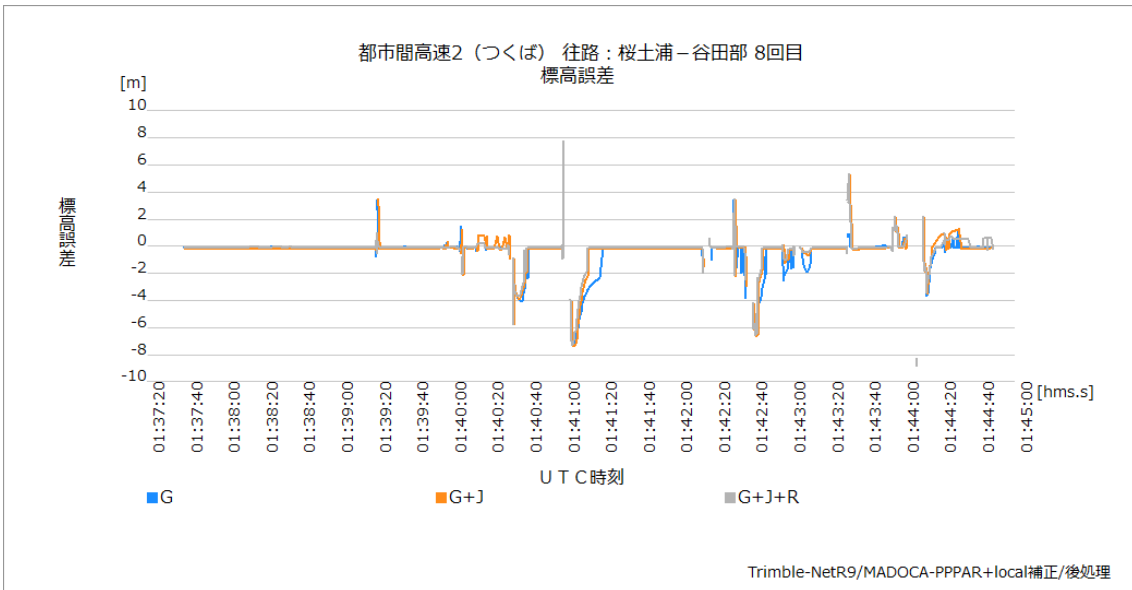


図 6.3.7-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

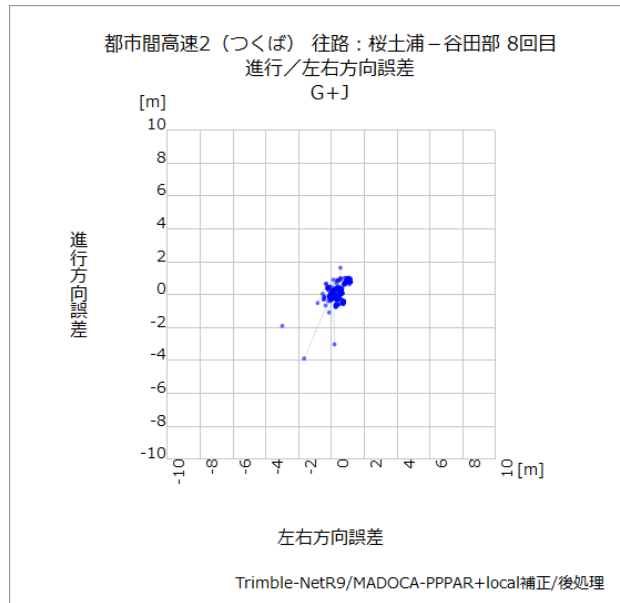


図 6.3.7-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS)

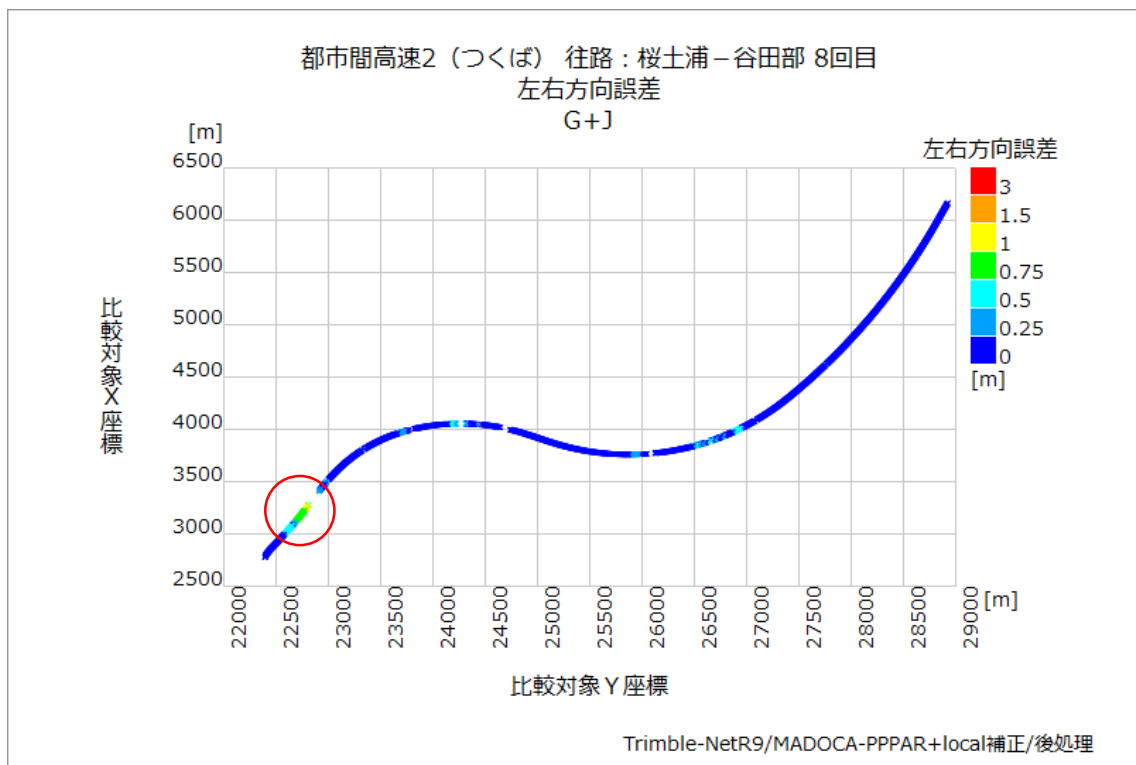


図 6.3.7-12 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット (GPS+QZSS)

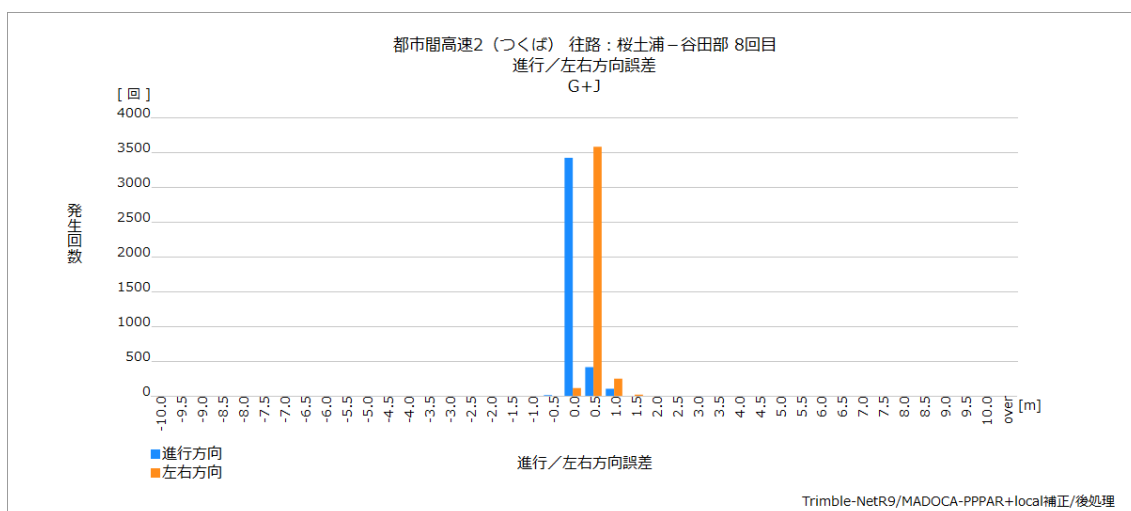


図 6.3.7-13 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム
(GPS+QZSS)

結果を見ると、進行、左右方向誤差は、測位中断前後に位置飛びが存在するものの、ほぼ誤差原点付近で推移しており、移動体でも十分な高精度が得られていることがわかる。

なお、図 6.3.7-12 における赤丸で囲った領域において 1m 以上の精度劣化が見られるが、当該箇所は大きな立体交差が存在する遮蔽環境であり、そのために精度劣化が生じていると思われる。

6.3.7.4.2 都市間高速での再収束時間、測位精度の改善効果

2周波 PPP-AR 測位に対し、local 補正情報を適用した場合と適用しない場合での、再収束時間、測位精度の改善効果を確認するために、測位中断を含む 2 つの時間帯において、進行方向誤差と UTC 時刻の関係を確認した。UTC 時刻と進行方向誤差の関係を UTC 1:39:00 から 1:41:20 まで確認した結果を図 6.3.7-14 に、同時時間帯における GPS クオリティ(1:単独測位、3:Float 解、4:Fix 解)を図 6.3.7-15 に示す。また、UTC 時刻と進行方向誤差の関係を UTC 1:42:00 から 1:44:40 まで確認した結果を図 6.3.7-16 に、同時時間帯における GPS クオリティを図 6.3.7-17 に示す。

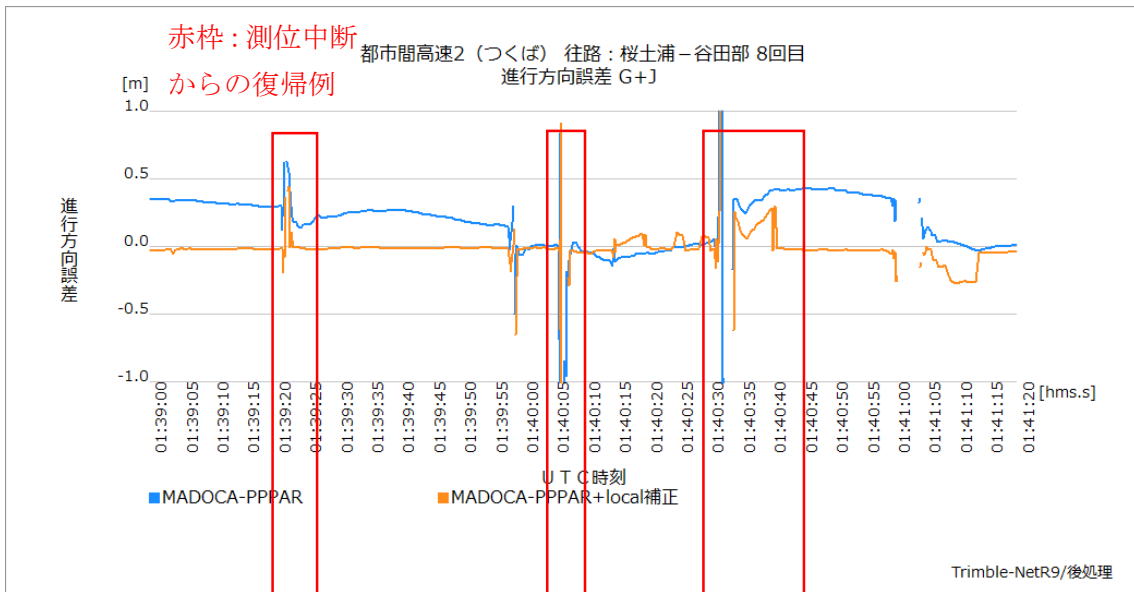


図 6.3.7-14 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移(時間帯①拡大)

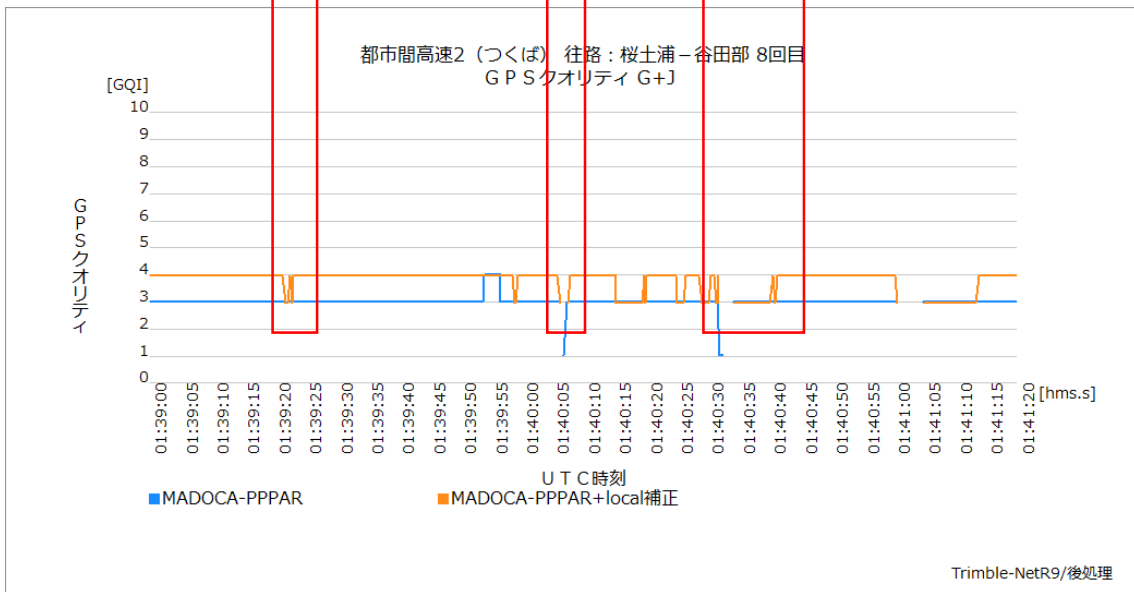


図 6.3.7-15 都市間高速:桜土浦-谷田部 GPSクオリティの時刻推移(時間帯①拡大)

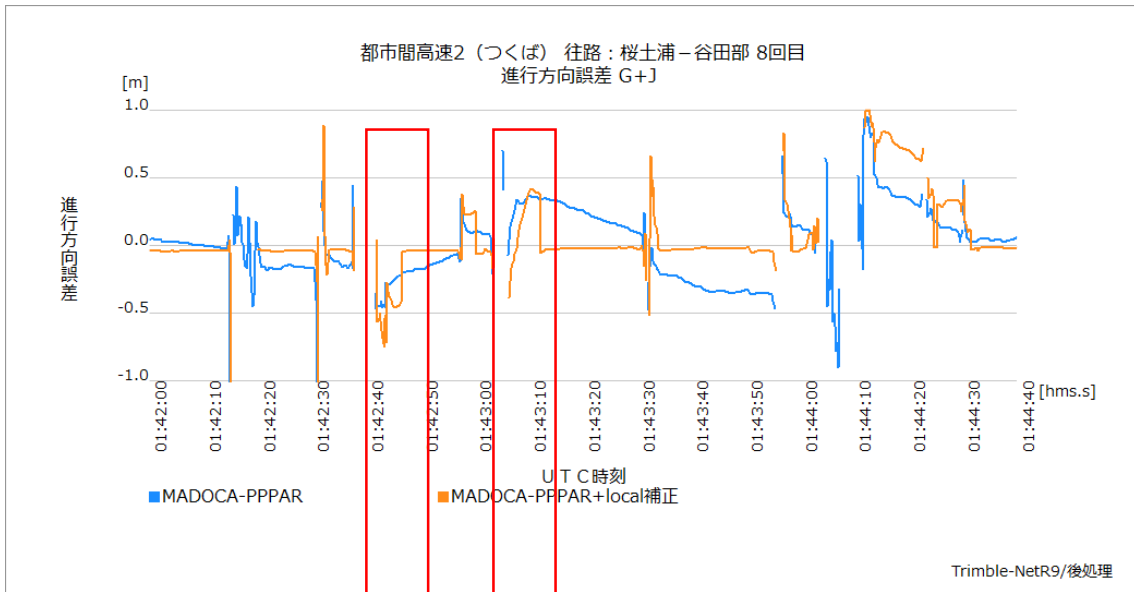


図 6.3.7-16 都市間高速：桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移(時間帯②拡大)

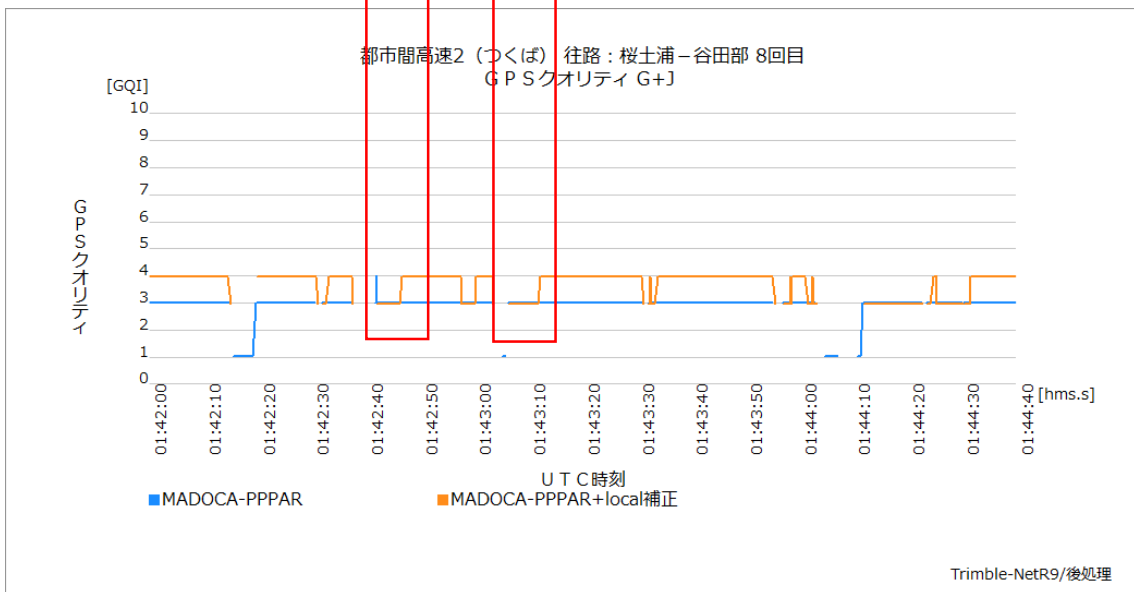


図 6.3.7-17 都市間高速：桜土浦-谷田部 GPSクオリティの時刻推移(時間帯②拡大)

結果を見ると、local 補正情報を適用することにより、Fix 解が得られており、また、数 10cm オーダーの揺らぎが見られなくなっていることがわかる。図 6.3.7-14 から図 6.3.7-17 において、再収束時間短縮例を赤枠で示した。測位が中断し、復帰した後、Fix したタイミングで測位誤差が小さくなり、収束時間が短縮されている傾向が確認できる。

6.3.7.5 MADOCA-PPP(後処理)まとめ

都市間高速(桜土浦-谷田部間)において、local 補正情報を適用した 2 周波 PPP-AR 測位方式による後処理解析を実施した。結果、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について、25 周回分往路の平均値として、測位率 92.91%、Fix 率 65.72%を得た。また、リファレンスとなる MMS の測位結果が信頼できると判断した全 19 周回に対し、往路のデータについて、左右、進行方向誤差が 0.5m を下回る割合の平均値を求めたところ、結果は 76.7%、87.6%となり、左右、進行方向誤差が 1.0m を下回る割合の平均値を求めたところ、結果は 86.85%、90.54%となった。また、Fix 解のみに限った場合、Fix 解全体に対して約 98%の点が誤差 1.0m に収まっており、本結果からサブ m レベルの高精度な測位結果が得られていることがわかる。MADOCA-PPP の課題となっていた再収束時間と、それに伴う精度劣化については、local 補正情報の適用と、AR 技術の併用で解決できる可能性が示された。今後はリアルタイム測位において、上記結果を確認していく必要がある。

6.4 リアルタイム測位

6.4.1 コード受信機(u-blox)

6.4.1.1

市販されているコード受信機として、u-blox 社の M8T を利用して計測を行った。

コード測位受信機のリアルタイム測位に関しては、測位設定、アンテナ等を変えながら行っていることもあり、同条件の測位評価のできる、都市間高速(桜土浦 IC－谷田部 IC 間)の走行のうち 16、17、19、20 回目の 4 走行を対象としている。

● 解析概要

- 測位方式:1 周波単独測位(コード測位)
- 補強方式:なし
- 計測経路:都市間高速(桜土浦 IC－谷田部 IC 間)
- 使用機材:
 - ◇ アンテナ:受信機付属アンテナ(ダッシュボード設置)
 - ◇ 受信機:u-blox EVK-M8T
- 取得衛星システム:GPS+QZSS+BeiDou

6.4.1.2 測位率

測位率は 4 回とも全て測位できており 100%となった。市販受信機ではフィルター等が強くなるため、多少信号遮断が起きても、推定測位等で補完されているものと思われる。

6.4.1.3 測位精度

測位精度も良好であり、左右方向誤差は 88%以上が 1.0m 以下となっており、1.5m 以下のものが 98%となった。

進行方向誤差に関しても約 83%が 1.0m 以下と高い精度となっており、3.0m 以上の誤差は生じなかった。

表 6.4.1-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G+J+C	64.43%	88.58%	98.08%	99.82%	99.88%	99.94%	100.00%

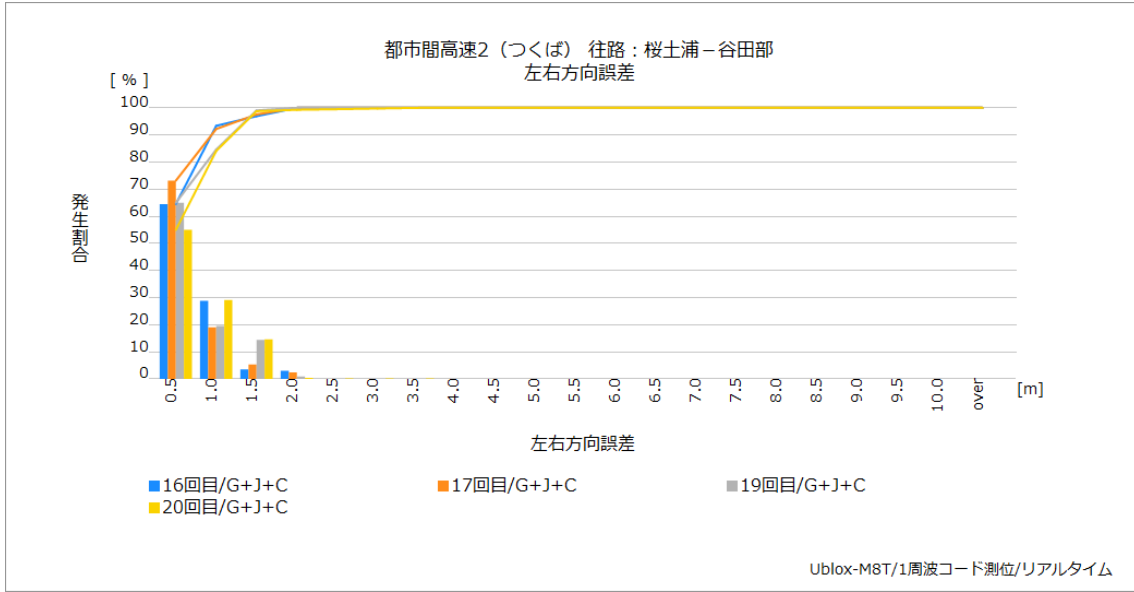


図 6.4-1-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

表 6.4.1-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G+J+C	57.85%	82.78%	93.15%	99.15%	99.94%	100.00%	—

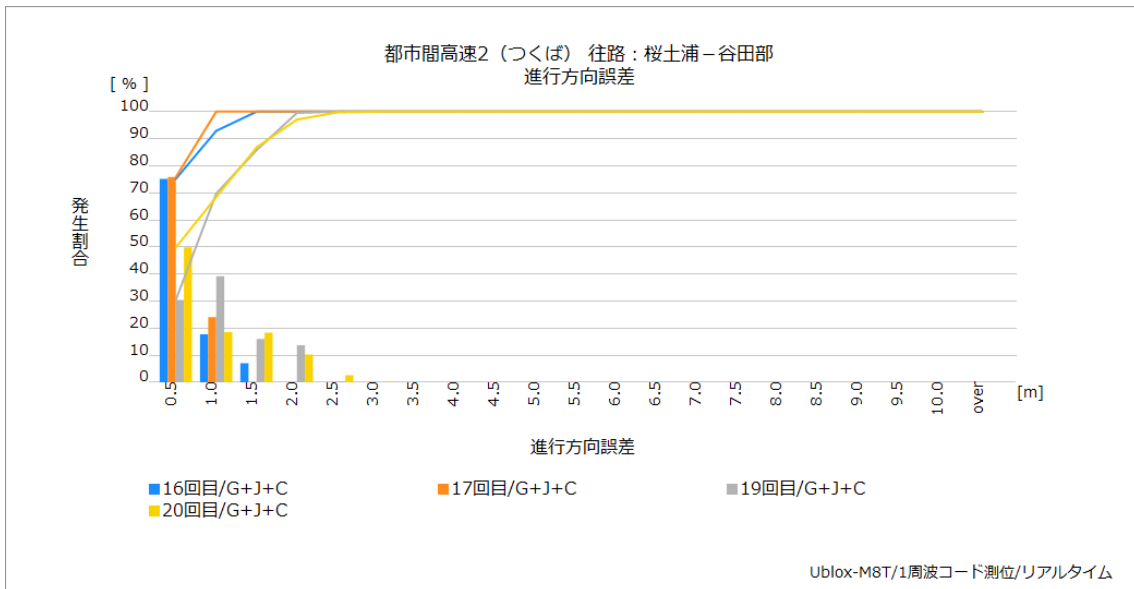


図 6.4-1-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

6.4.1.4 都市間高速での振る舞い

例として 16 回目の走行の結果を示す。

6.4.1.5 都市間高速での精度

測位精度の時刻推移を以下に示す。

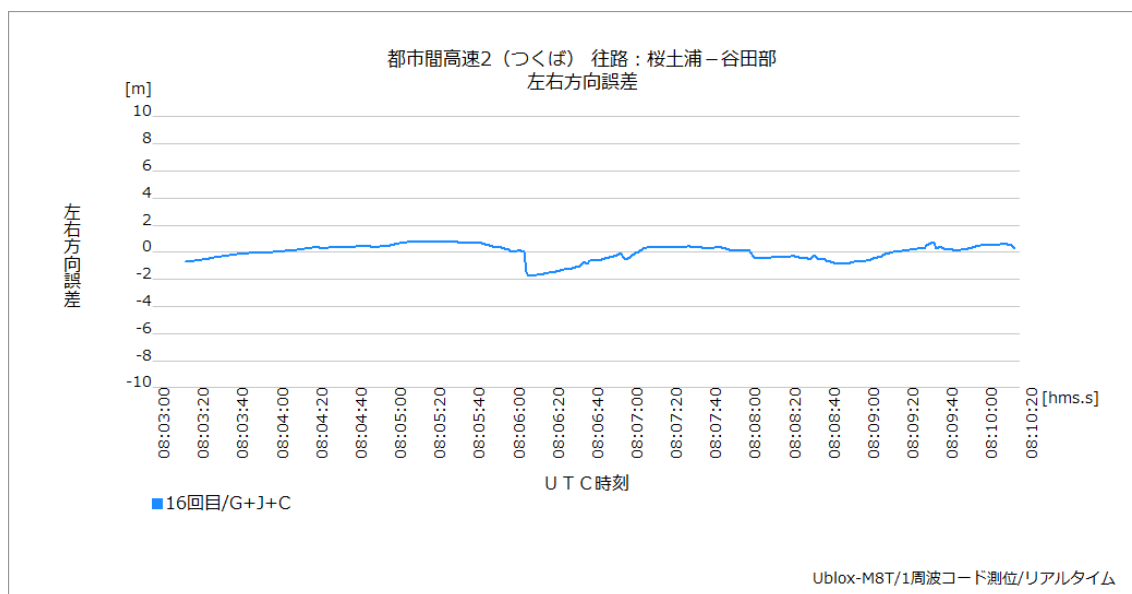


図 6.4.1-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

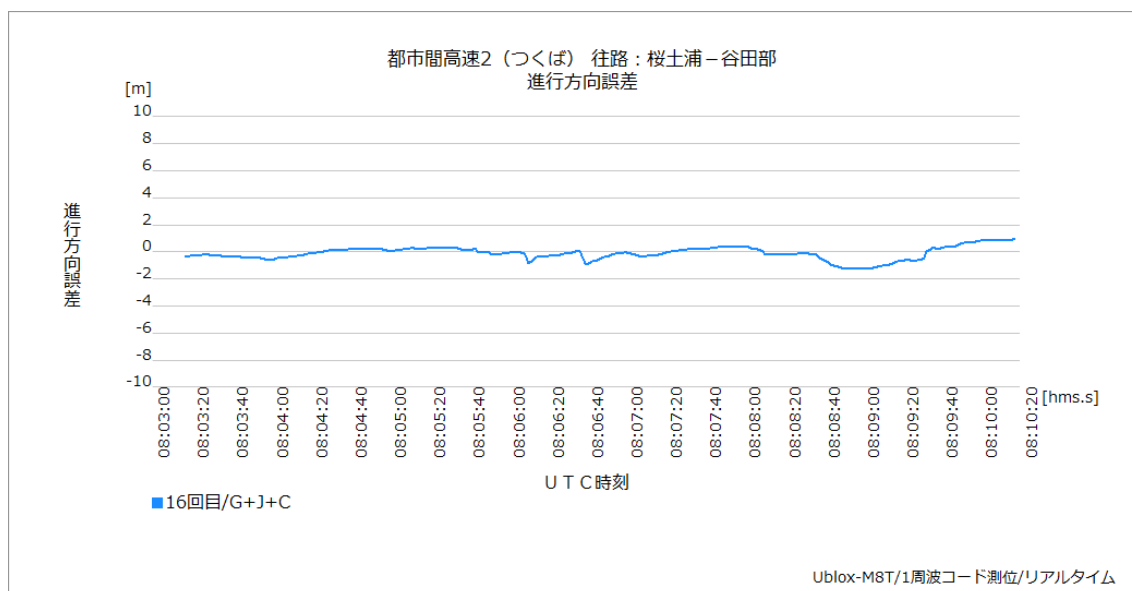


図 6.4.1-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

左右方向、進行方向とも、比較的安定している。ただし橋梁等の遮蔽による精度劣化を生じた場

合、精度復帰までには時間がかかる傾向がある。これは先にも述べたように受信機独自のフィルターによる影響と思われる。

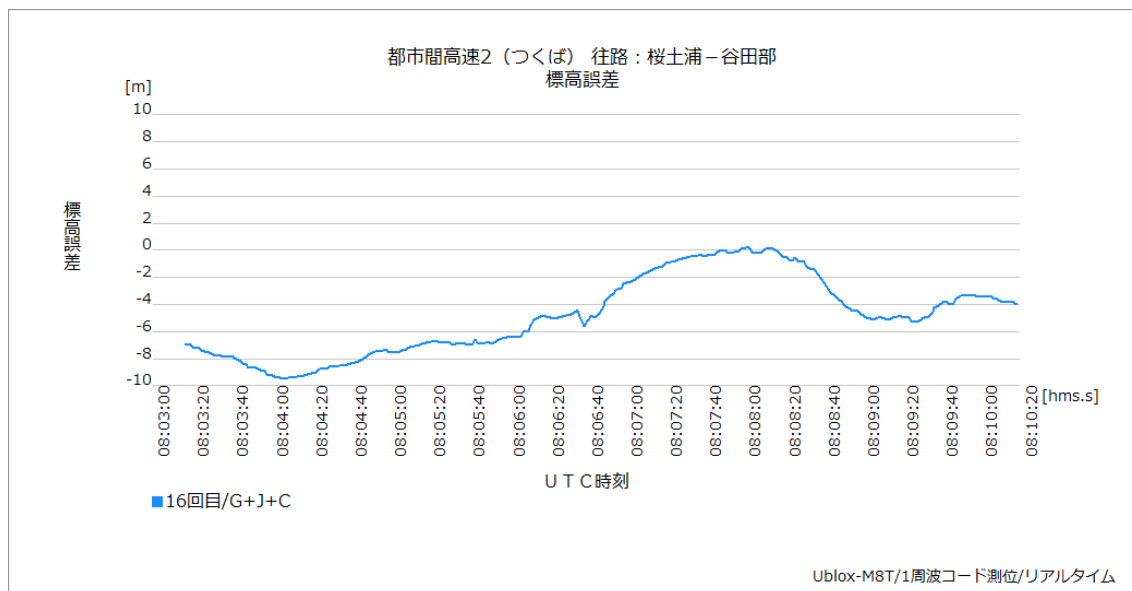


図 6.4.1-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

一般的な受信機では水平方向の精度を重視する傾向があるためか、高さ方向は大きな誤差が生じており不安定な精度となった。

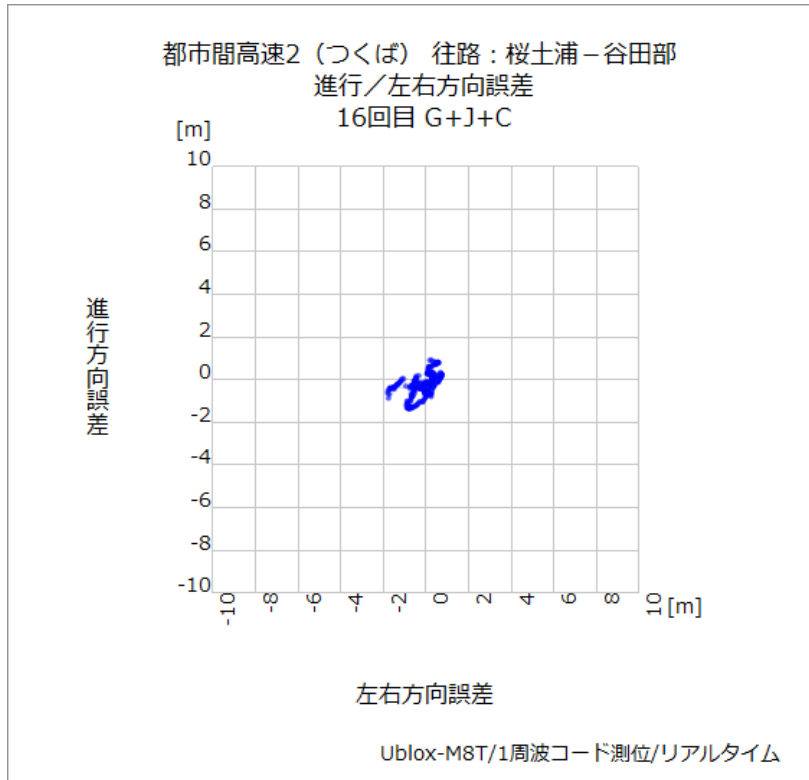


図 6.4.1-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散

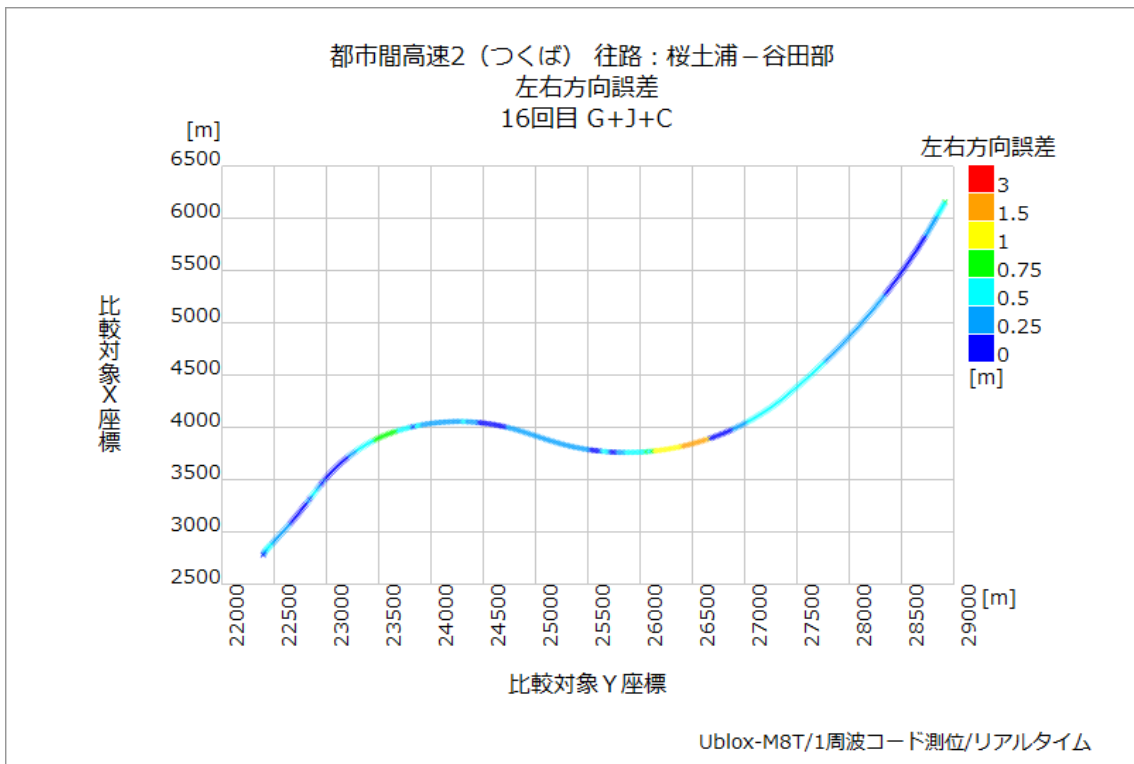


図 6.4.1-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット

走行軌跡を見ると、つくば JCT 付近の高架による遮蔽箇所が最も測位精度が劣化した箇所であることがわかる。また時刻推移でも確認できたように、後処理の各測位に比べ誤差をある程度引っ張っていることがわかる。

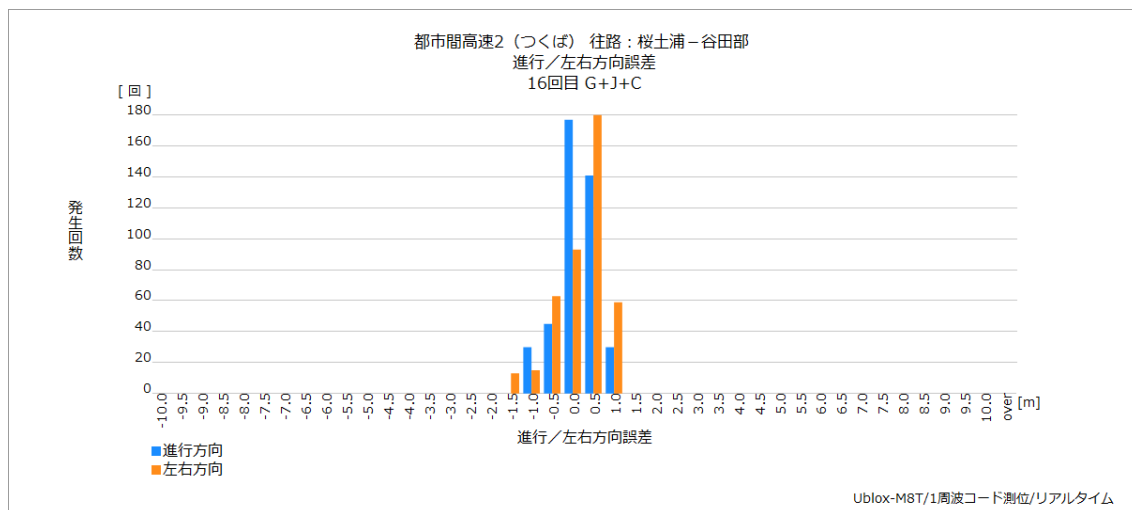


図 6.4.1-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム

ヒストグラムから測位精度のまとまりがあり、全体的に安定した測位となっていることがわかる。

6.4.1.6 コード測位受信機のまとめ

コード測位受信機はメーカー独自のフィルター等のアルゴリズムを採用することで、かなり高い測位率、精度を維持している。しかしながら、遮蔽による急な測位劣化等が生じると、そのフィルターが足かせとなり、精度復帰に時間がかかる傾向もある。

また、今回の測位において BeiDou を利用したことも大きな要因と考えられる。絶対的な利用衛星数が確保された状態での測位ができたため、安定した測位結果が得られたと考えられる。

6.4.2 CMAS

CMAS の補強情報を用いて、測位端末 LEXR によってリアルタイム測位を行い、位置の品質評価を実施した結果をまとめる。なお、実用システムである CLAS の場合は、補強情報伝送時間が異なるため、リアルタイム試験の結果は、異なるものになると予想される。

6.4.2.1 試験方法

表 6.4.2-1 に試験方法を示す。CMAS は、2015 年度に補強対象衛星として準天頂衛星を加える機能拡張を行った。その結果、従来は後処理のみで行っていた GPS+QZSS の測位試験をリアルタイムで実施し、補完と補強の相乗効果を確認できるようになった。

表 6.4.2-1 リアルタイム試験方法

No	項目	内容	備考
1	計測日	2016年2月8日	
2	時刻 (UTC)	02時35分~05時20分	QZSが高仰角である時間帯
3	場所	C3:都市間高速(1) C4:都市間高速(2)	
4	測位衛星システム	GPS および QZSS	
5	参照位置	MMSの自己位置	
6	LEX 伝送遅延	17秒程度	補強情報と測位は非同期
7	QZSS 精密暦	ドイツ研究機関提供	日本版は2016年度発表

6.4.2.2 使用した測位端末の位置付け

本調査の目的は、衛星測位のみ性能を明らかにすることである。ただし、実運用においては、跨道橋・トンネル・その他遮蔽体等で衛星測位ができない場所が存在する。衛星測位には「地球上の位置を与える」という優れた特性があるが、走行中の相対位置は、車速パルスや慣性センサ等を用いた方が、はるかに確実かつ安価に計測できる。

そのため、衛星測位によって衛星可視域で位置の正確度を確保し、その他のセンサで相対位置を得て複合するのが実際の使用法である。本調査で用いた測位端末 LEXR は、この考えに基づく衛星測位の試験装置である。ただし、試験装置ゆえに自律航法は備えていない。

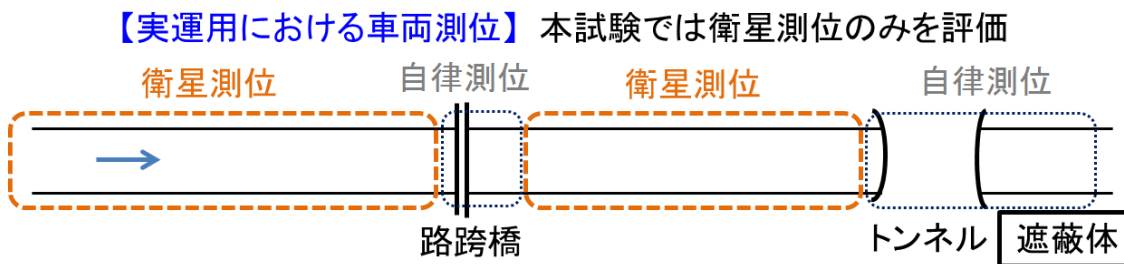


図 6.4.2-1 実運用における車両測位の説明図

6.4.2.3 位置の品質評価結果

CMASの補強情報を用いて、測位端末 LEXR で実施したリアルタイム測位試験における位置の品質評価結果をまとめる。本項では (1) Fix 解および (2) Fix+Float 解の2ケースを評価している。

(1) Fix 解

表 6.4.2-2 に Fix 解による位置の品質評価結果を示す。準天頂衛星初号機の地上システムお

よび CMAS は、実験装置であるため、17 秒程度の伝送遅延時間(DT: Delay Time)が発生するが、これが反映された測位結果となっている。

※伝送遅延時間：基準局で測位信号を観測した時刻から測位端末に配信されるまでの時間
一方、表 6.4.2-3 のとおり昨年度実施した後処理では、実用システムにおける伝送遅延時間を 8 秒と想定して位置の品質および測位率の評価を行っている。この伝送遅延時間は、位置の品質に直接に影響することが確認されていた。

表 6.4.2-2 Fix 解による位置の品質管理(リアルタイム測位：DT=17 秒)

場所	ID	開始時間 (UTC)	終了時間 (UTC)	RMS誤差[cm]		標準偏差[cm]		偏り[cm]		測位率 [%]
				水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	
C3	1	02:35:12	03:29:39	7.7	12.4	7.5	8.9	1.9	-8.7	58.6
	2	03:43:03	04:16:01	6.3	11.0	4.5	9.6	4.4	-5.4	39.0
	3	04:21:42	04:57:36	7.2	11.8	5.2	11.2	5.0	-3.9	51.9
C4	4	05:01:10	05:20:45	7.2	11.2	5.3	9.8	4.9	-5.4	60.0

表 6.4.2-3 Fix 解による位置の品質管理 (後処理測位：DT=8 秒)

場所	ID	開始時間 (UTC)	終了時間 (UTC)	RMS誤差[cm]		標準偏差[cm]		偏り[cm]		測位率 [%]
				水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	
C3	A	00:38:07	01:29:21	3.4	7.2	3.0	6.6	1.6	-2.9	81.0
	B	02:38:27	03:25:50	3.9	5.1	3.4	5.1	2.0	-0.5	75.6

(出典：平成27年度自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査報告書 275頁)

本年度のリアルタイム測位試験においては、Fix 解は高い精度を得ることができるが、伝送遅延時間が、正確度と測位率に直接に影響することを確認した。

(2) Fix+Float 解

表 6.4.2-4 に Fix+Float 解による位置の品質評価結果を示す。現段階の QZSS および CMAS は実験装置ゆえに 17 秒程度の遅延時間(DT)をもつが、前(1)項と同様この遅延時間が反映された測位結果となっている。

一方、表 6.4.2-5 は後処理結果であり、実用システムにおける伝送遅延時間の想定を 8 秒として位置の品質および測位率の評価を行ったものである。

表 6.4.2-4 Fix+Float 解による位置の品質管理(リアルタイム測位：DT=17 秒)

場所	ID	開始時間 (UTC)	終了時間 (UTC)	RMS誤差[cm]		標準偏差[cm]		偏り[cm]		測位率 [%]
				水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	
C3	1	02:35:12	03:29:39	109.8	48.8	109.7	48.8	3.7	-1.0	85.0
	2	03:43:03	04:16:01	187.3	158.0	181.1	135.2	47.8	81.7	85.0
	3	04:21:42	04:57:36	75.9	62.7	75.8	62.7	5.5	-0.9	85.1
C4	4	05:01:10	05:20:45	145.6	35.3	145.4	35.1	7.8	-4.0	83.8

表 6.4.2-5 Fix+Float 解による位置の品質管理 (後処理測位：DT=8 秒)

場所	ID	開始時間 (UTC)	終了時間 (UTC)	RMS誤差[cm]		標準偏差[cm]		偏り[cm]		測位率 [%]
				水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	
C3	A	00:38:07	01:29:21	32.0	56.9	32.0	56.3	0.8	8.5	97.7
	B	02:38:27	03:25:50	40.7	51.1	40.6	49.9	2.3	11.0	97.4

(出典：平成27年度自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査報告書 276頁)

これらの結果においても伝送遅延時間が正確度および測位率に直接に影響することを確認できる。Fix+Float の場合、偏りへの影響は少ないが、標準偏差すなわちバラつきが増大し、これが RMS 誤差を劣化させている。

6.4.2.4 補強情報の伝送遅延時間に関する考察

補強情報の伝送遅延時間と正確度の関係は、昨年度報告のとおり図 6.4.2-2 に示す性質をもっている。補強情報の伝送遅延時間が長くなると位置の品質は劣化する。本年度のリアルタイム測位試験においても、このことが確認されたと言える。

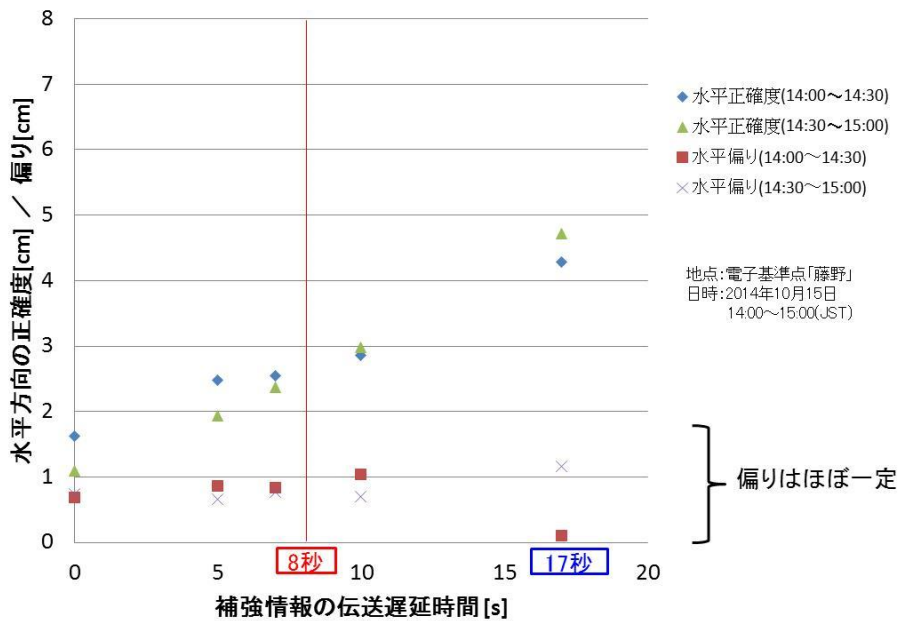


図 6.4.2-2 補強情報の伝送遅延時間と正確度との関係：補強情報と測位は同期

センチメートル級測位補強サービスの正確度と測位率を向上させるためには、この伝送遅延時間を短縮することが重要な課題である。

測位端末による解決策として、あえて遅延をもって補強情報と測位情報を「同期」させ、遅延分だけ自律航法を用いて予測（時間を現在に戻す）方法がある。このようにすれば、CLAS 補強情報の本来の目的どおり単独測位を RTK と同程度の精度で実現することができる。この機能を備えた測位端末が早期に市場投入されることが期待されている。

なお、準天頂衛星システムの今後の改良点として、衛星クロック補正（高速補正）は 5 秒毎に配信されていることから、理想的には伝送遅延時間を 5 秒以下にすべきである。

6.4.3 MADOCA-PPP

6.4.3.1 概要

MADOCA-PPP によるリアルタイム解析を行った。解析概要を以下に示す。

- 解析概要
 - 測位方式:2 周波 PPP
 - 補強方式:MADOCA-PPP
 - 使用暦:リアルタイム暦(※表 9.2.8-1 参照)
 - 計測経路:都市間高速(桜土浦 ICー谷田部 IC 間)
 - 使用機材
 - ◇ アンテナ:NovAtel GPS-703-GGG
 - ◇ 受信機:JAVAD Delta-3
 - 取得衛星システム:GPS+QZSS+GLONASS

平成 26 年度 SIP「自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における衛星測位活用に向けた基礎評価に関する調査」において、MADOCA-PPP では後処理解析による性能評価を実施した。昨年に対し、本年度は走行実験中に実験車両上でリアルタイムに PPP 測位を行い、得られた結果に対して性能評価を実施した。その結果を以下に示す。走行実験実施時点においては、PPP-AR 及びローカル補正情報適用のソフトウェア実装が完了していなかったため、PPP によるリアルタイム出力結果のみを示す。

6.4.3.2 測位率

全 25 周回往路における測位率の平均値を、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.4.3-1 に示す。また、全 25 周回往路毎に測位率を確認した。結果を図 6.4.3-1 に示す。

表 6.4.3-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(平均値)

	G+J+R
測位率	97.86%

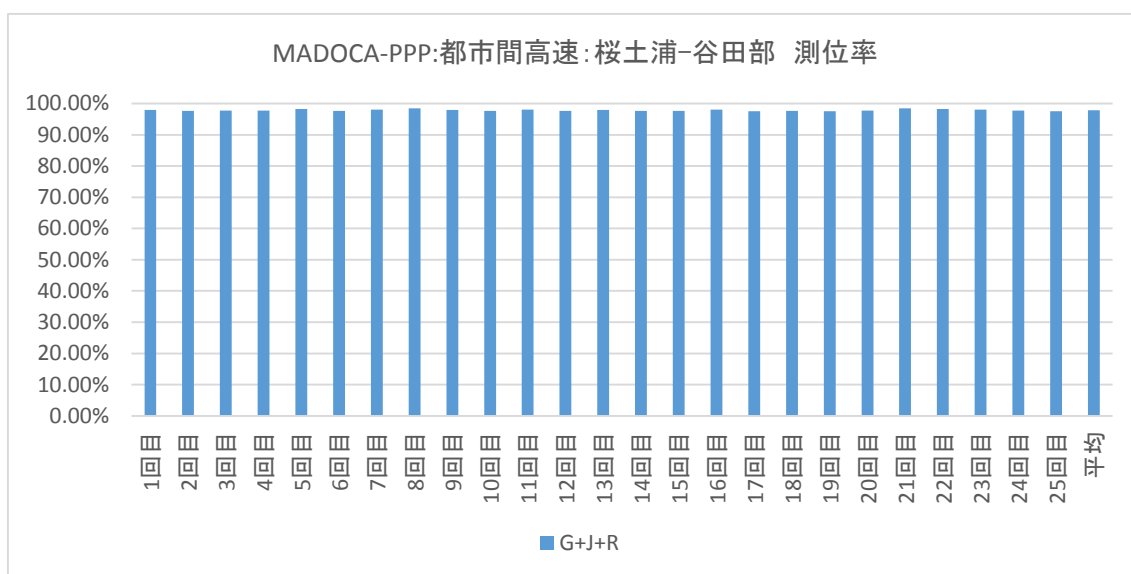


図 6.4.3-1 都市間高速:桜土浦-谷田部 測位率(走行毎)

測位率に周回毎のバラつきなどは見られず、安定してほぼ 100%の測位率が得られている。GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合において、測位率の平均値は 97.86%となっている。

6.4.3.3 測位精度

リファレンスとなる MMS の測位結果が信頼できると判断した全 19 周回において、往路に対し、左右、進行方向誤差を 0.5m 区切りにし、その誤差値を下回る割合の平均値を、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を表 6.4.3-2、表 6.4.3-3 に示す。また、全 19 周回毎に左右、進行方向誤差 1.0m を下回る割合を確認した。結果を図 6.4.3-3、図 6.4.3-5 に示す。さらに、左右、進行方向誤差の平均値を値域毎のヒストグラムとして確認した。結果を図 6.4.3-2、図 6.4.3-4 に示す。

表 6.4.3-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G+J+R	19.41%	36.54%	49.39%	61.52%	70.53%	76.29%	97.86%

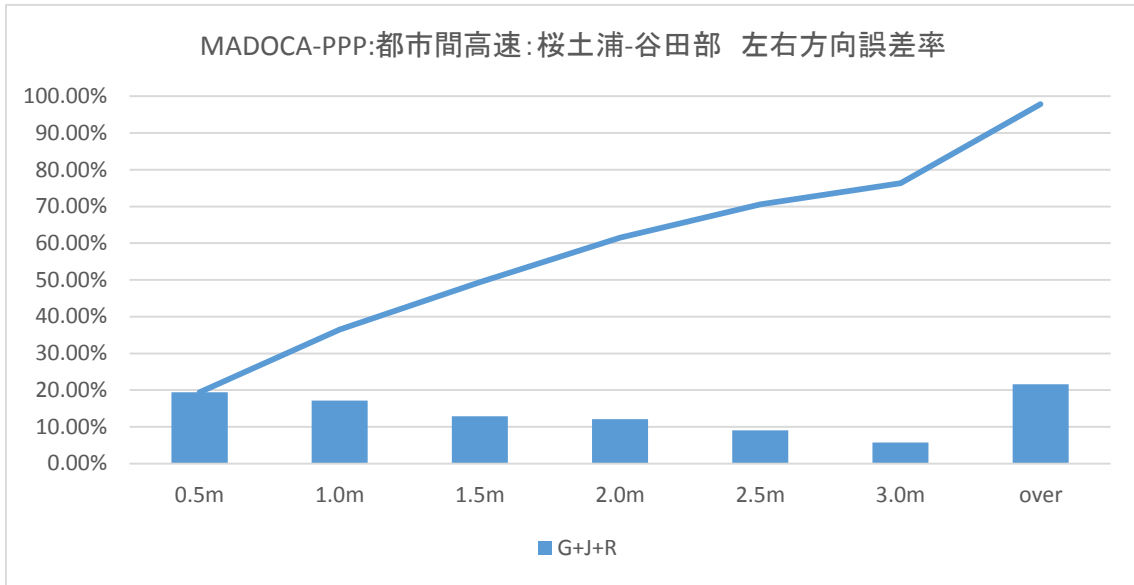


図 6.4.3-2 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差率

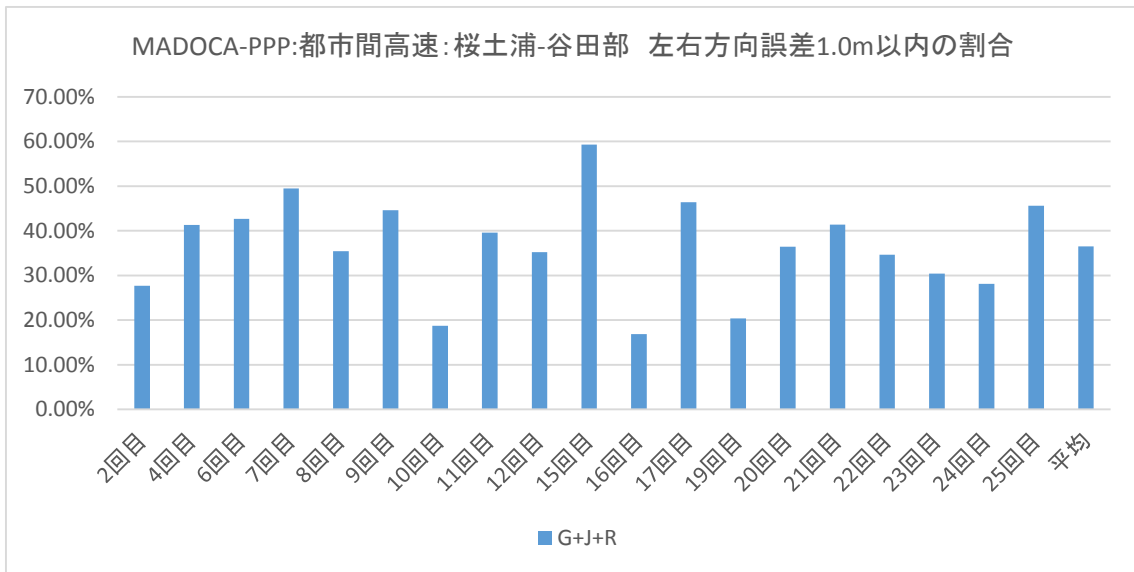


図 6.4.3-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差 1.0m 以内の割合

表 6.4.3-3 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率(平均値)

	0.5m 以下	1.0m 以下	1.5m 以下	2.0m 以下	2.5m 以下	3.0m 以下	All
G+J+R	16.45%	32.19%	48.50%	61.06%	69.47%	75.19%	97.86%

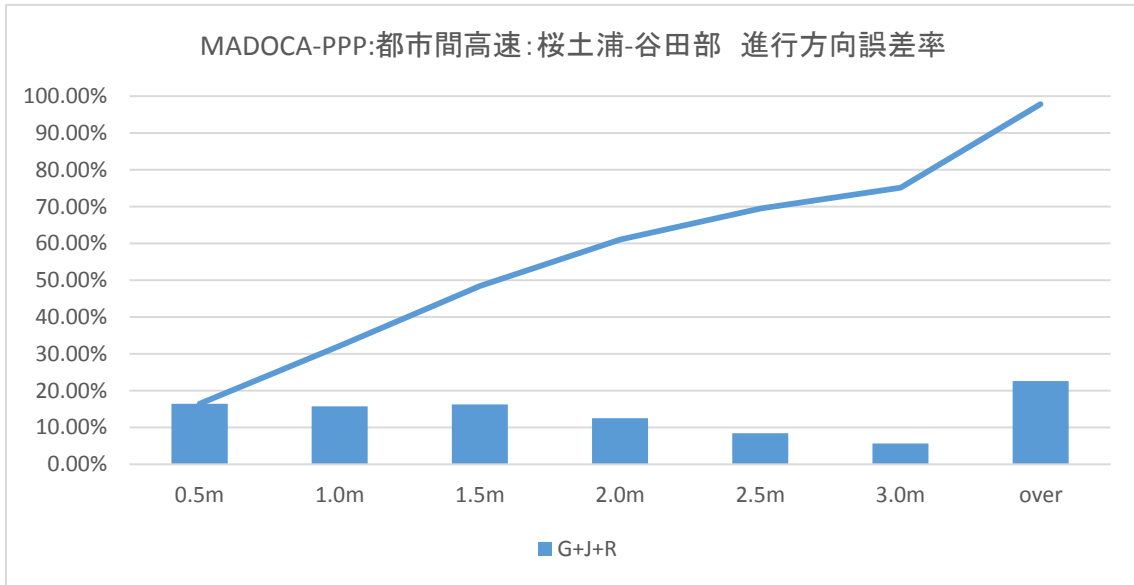


図 6.4.3-4 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差率

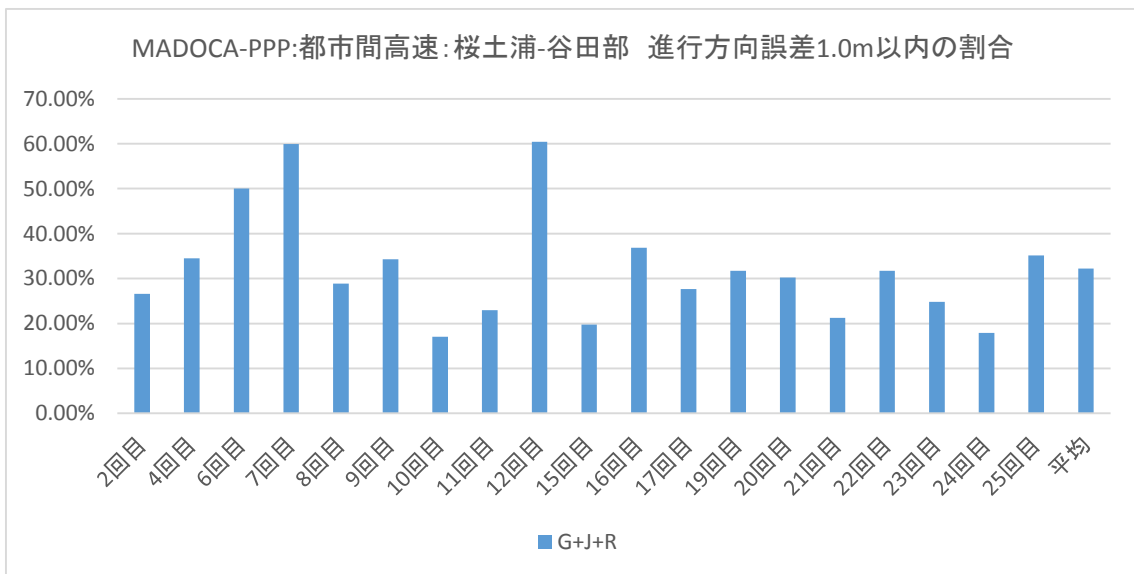


図 6.4.3-5 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差 1.0m 以内の割合

GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合、左右方向、進行方向誤差において、0.5m を下回る割合は 19.41%、16.45%、1.0m を下回る割合は 36.54%、32.19%となっており、サブメータ級の測位精度が得られていないことがわかる。また、左右方向、進行方向誤差共に 1.0m を下回る割合が 40%前後でばらついており、安定的な精度が得られていないことがわかる。

6.4.3.4 都市間高速での振る舞い

より詳細な振る舞いを確認するために、例として8周目往路のデータをピックアップして結果を確認

した。

6.4.3.4.1 都市間高速での精度

UTC 時刻と左右、進行方向、標高誤差の関係を、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について確認した。結果を図 6.4.3-6、図 6.4.3-7、図 6.4.3-8 に示す。また、左右、進行方向誤差の水平プロットを図 6.4.3-9 に、走行経路上における左右方向誤差のカラープロットを図 6.4.3-10 に、左右、進行方向誤差のヒストグラムを図 6.4.3-11 に示す。

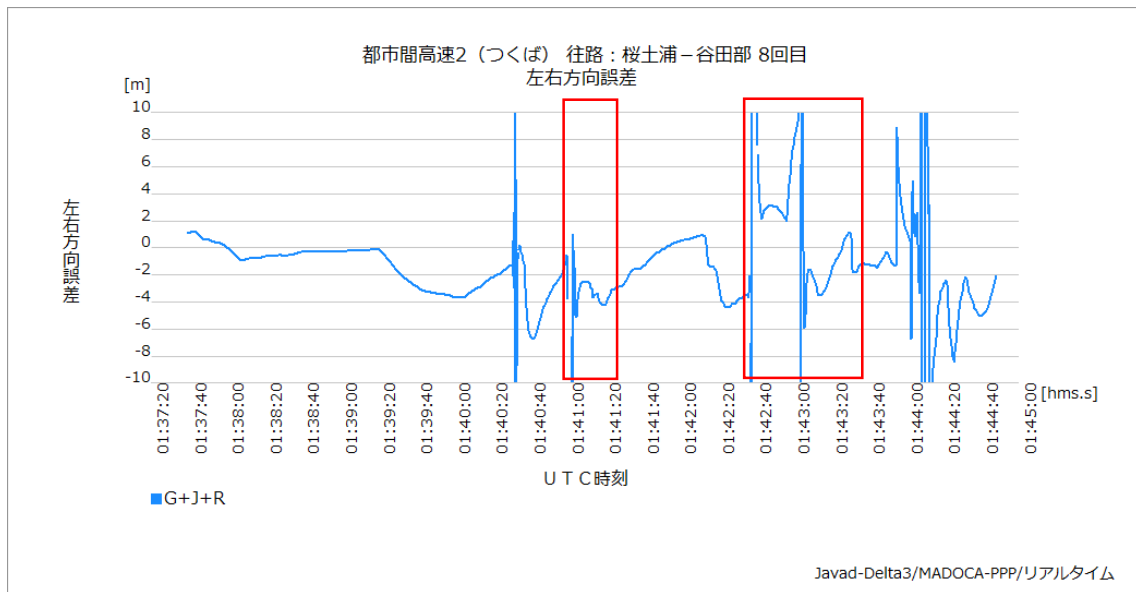


図 6.4.3-6 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差の時刻推移

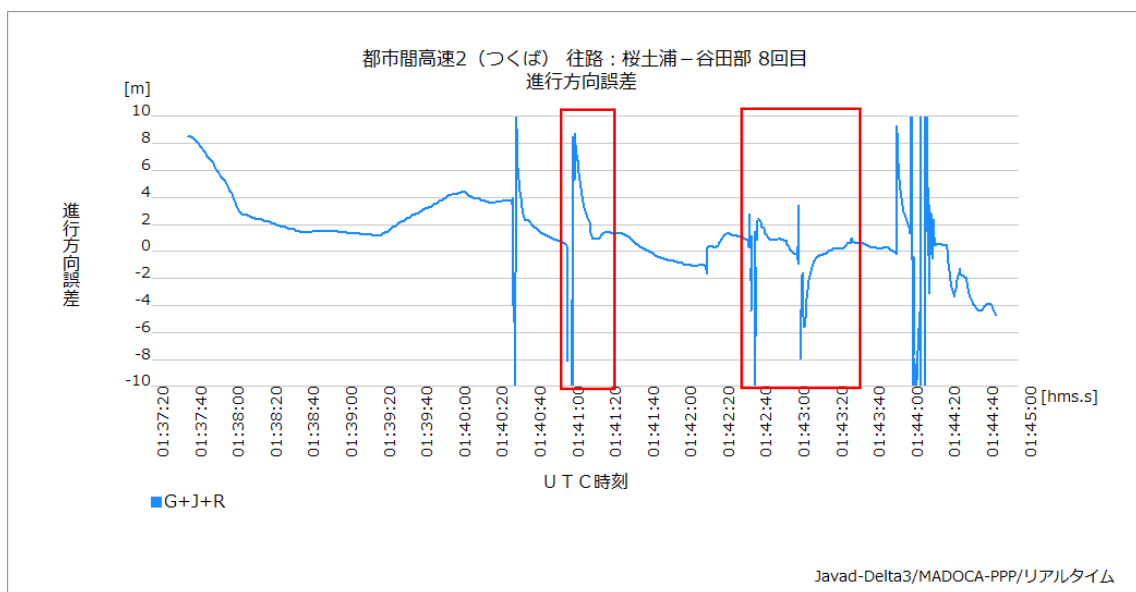


図 6.4.3-7 都市間高速:桜土浦-谷田部 進行方向誤差の時刻推移

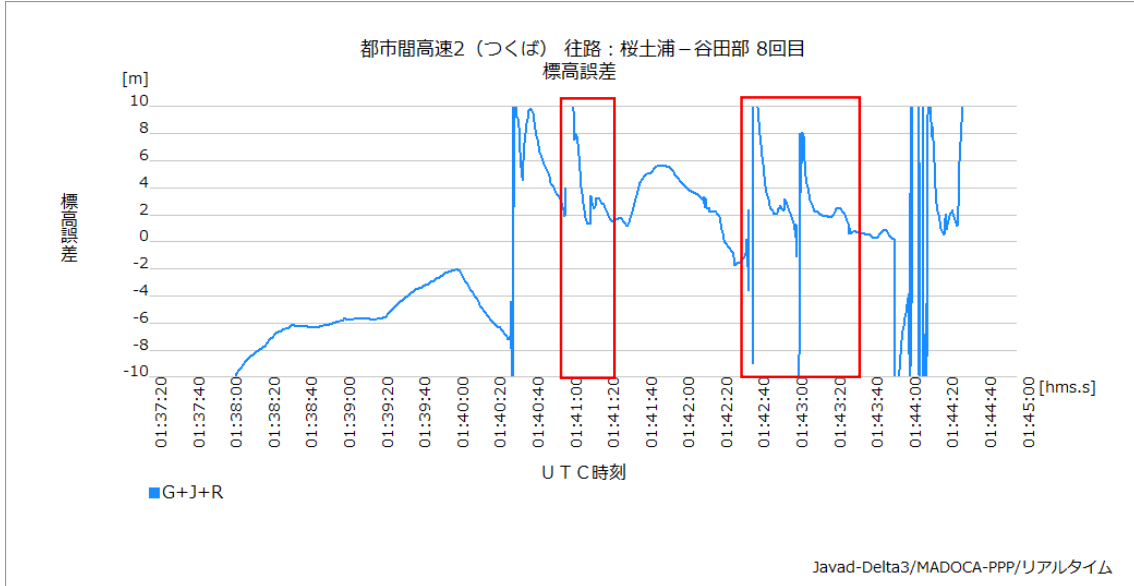


図 6.4.3-8 都市間高速:桜土浦-谷田部 標高誤差の時刻推移

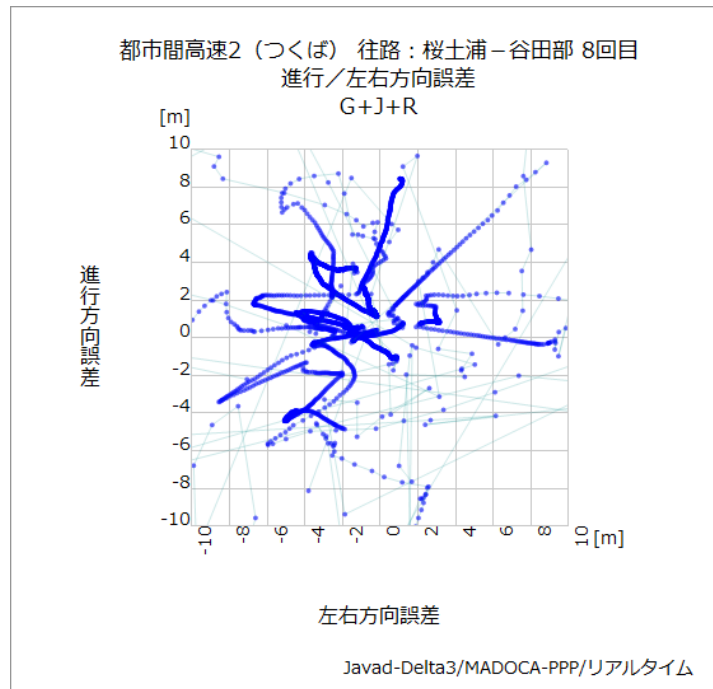


図 6.4.3-9 都市間高速:桜土浦-谷田部 誤差分散 (GPS+QZSS+GLONASS)

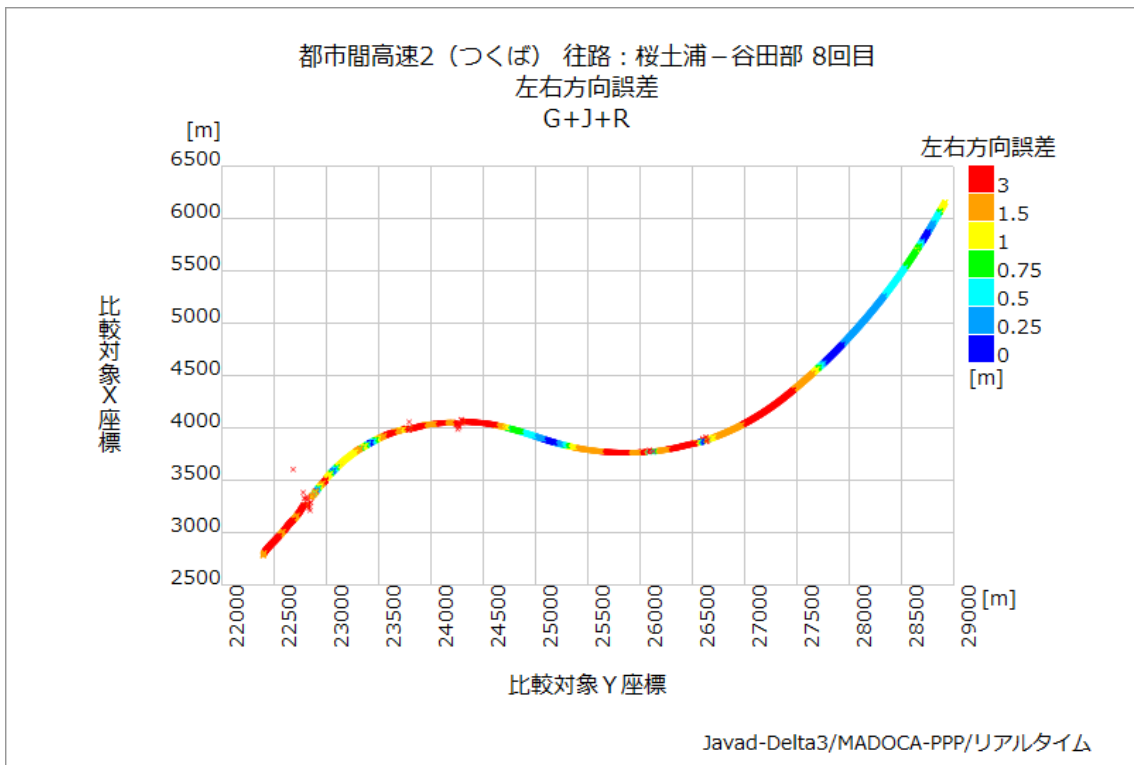


図 6.4.3-10 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右方向誤差プロット
(GPS+QZSS+GLONASS)

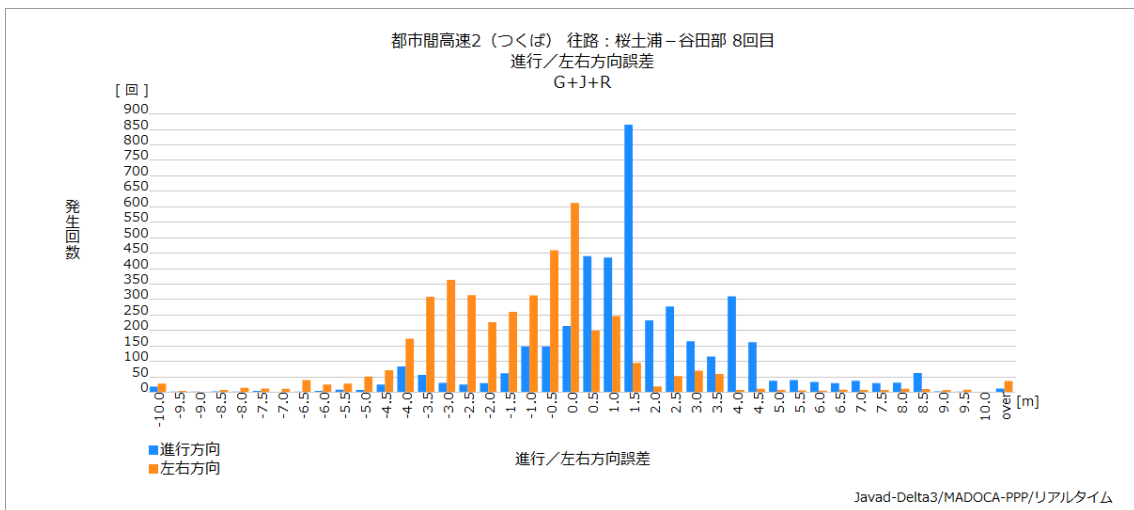


図 6.4.3-11 都市間高速:桜土浦-谷田部 左右/進行方向誤差ヒストグラム
(GPS+QZSS+GLONASS)

結果を見ると、測位結果がゆらいでおり、安定的な精度が得られていない。また、赤枠で記載した測位中断からの復帰箇所において、昨年度も課題となった再収束時間の遅さにより、誤差の増大が見られる。本走行コースは片道約 8 分程度であり、PPP の収束時間に比べて短時間である。そ

のため、精度が得られるまでに必要な収束時間が十分でなく、測位精度がばらついたと思われる。

6.4.3.5 MADOCA-PPP(リアルタイム)まとめ

都市間高速(桜土浦 ICー谷田部 IC 間)において、2 周波 PPP 測位方式によるリアルタイムデータ解析を行った。結果、GPS、QZSS と GLONASS を併用した場合について、25 周回往路の平均値として、測位率 97.86%を得た。また、リファレンスとなる MMS の測位結果が信頼できると判断した全 19 周回に対し、往路のデータについて、左右、進行方向誤差が 0.5m を下回る割合の平均値を求めたところ、結果は 19.41%、16.45%となり、左右、進行方向誤差が 1.0m を下回る割合の平均値を求めたところ、結果は 36.54%、32.19%となった。本結果からサブメータ級の高精度な測位結果が現状得られていない。昨年度の取り組みにおいて、MADOCA-PPP の課題となっていた再収束時間と、それに伴う精度劣化がリアルタイム測位結果についても再確認された。一方で、6.3.7 章で後処理解析にて示した、PPP-AR と local 補正測位の適用により、左右、進行方向誤差が 1.0m を下回る割合の平均値が 86.85%、90.54%と、後処理ではサブメータ級の高精度な測位結果が得られている。今後、リアルタイムにおいても、local 補正情報の適用と、AR 技術の併用により、上記課題解決の可能性を確認する必要がある。

6.5 地上環境の影響

6.5.1 測位中断の影響

測位中断の影響評価は日比谷アンダーパスを含む、数奇屋橋から祝田橋手前までの約 700m 区間での測位の振る舞いを調査した。

表 6.5.1-1 評価走行距離

	距離[m]	比率
数奇屋橋～日比谷アンダーパス	112	15.71%
日比谷アンダーパス内	383	53.72%
日比谷アンダーパス～祝田橋手前	218	30.58%
総延長	713	

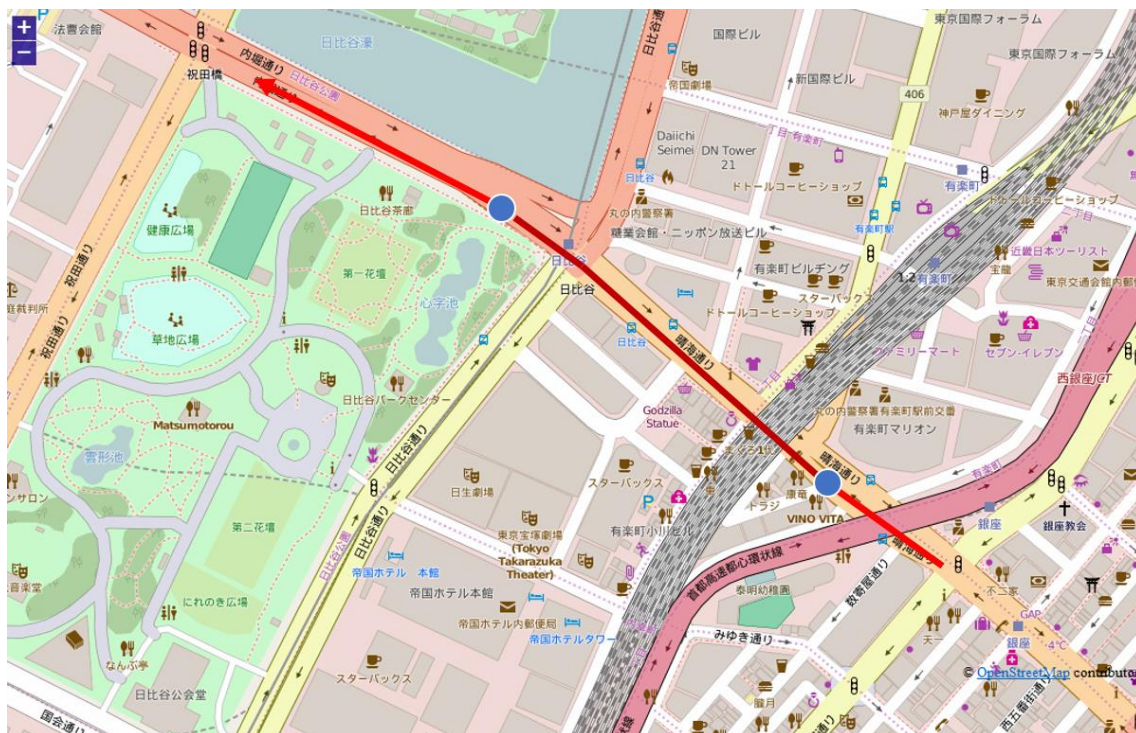


図 6.5.1-1 日比谷アンダーパス周辺の評価コース

なお、MMS 計測において精度閾値を超えている 4 回目、14 回目を除く 13 回分の RTK を評価対象とした。

表 6.5.1-2 マルチ GNSS 毎の測位/Fix 率(平均値)

	G	G+J	G+J+C	G+J+R+C
測位率	32.33%	33.50%	34.90%	34.90%
Fix 率	7.49%	9.58%	10.65%	12.18%

マルチ GNSS 利用による差に関しては、測位率(コード解、Float 解、Fix 解を含む)は、GPS のみと比較して他の衛星システムを併用した場合でも大きな差はみられないが、Fix 解においてはマルチ GNSS による差がみられる。

日比谷アンダーパスの出入り口における、マルチ GNSS による測位が寸断、または再開する時刻を GPS のみでの計測時を 0 として、利用したマルチ GNSS 毎の測位寸断、再開の時刻差を下の表に示す。

表 6.5.1-3 日比谷アンダーパス出入口での測位継続差(単位:秒)

回	IN			OUT		
	G+J	G+J+C	G+J+R+C	G+J	G+J+C	G+J+R+C

1	0.20	0.39	0.39	0.00	0.00	0.00
2	0.66	9.20	9.39	-1.60	-1.60	-1.60
3	0.00	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00
4	8.41	8.41	8.41	0.00	0.00	0.00
5	0.00	8.59	8.59	0.00	0.00	0.00
6	0.11	0.20	0.20	0.00	0.00	0.00
7	0.00	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00
8	0.21	7.61	7.61	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	8.20	8.20	8.20	-0.20	-0.20	-0.20
11	0.00	0.00	0.00	-0.39	-0.39	-0.39
12	7.61	7.80	7.80	0.00	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	6.00	6.40	6.40	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	-0.81	-0.81	-0.81
平均	2.09	3.95	3.96	-0.20	-0.20	-0.20

日比谷アンダーパス入り口付近は首都高速道路および東海道新幹線の高架に前後を挟まれた環境となるため、アンダーパスによる遮蔽以前に、これら構造物による遮蔽が発生しやすい環境となっている。このため入り口付近ではマルチ GNSS を利用する事による測位継続性が向上している。一方出口付近においては、マルチ GNSS のよる測位開始までの時間短縮効果は平均 0.2 秒であり、15 回中 4 回の計測でのみマルチ GNSS を利用する事で測位再開時間が早くなっていることが確認できた。またこのとき QZS1 機を加えるだけでその効果が表れている。

利用する測位演算のアルゴリズム上 GPS を優先して計算するため、測位再開時に GPS での測位解が求まらないと測位が再開されないことも要因の一つである。そのため GPS と同時に利用できる QZSS の効果が確認できる一方で、他の衛星システムによる測位開始時間の改善が表れていないと思われる。マルチ GNSS 衛星をより効果的に活用するための測位アルゴリズムの開発も進められており、測位再開開始時間の改善が期待できる。

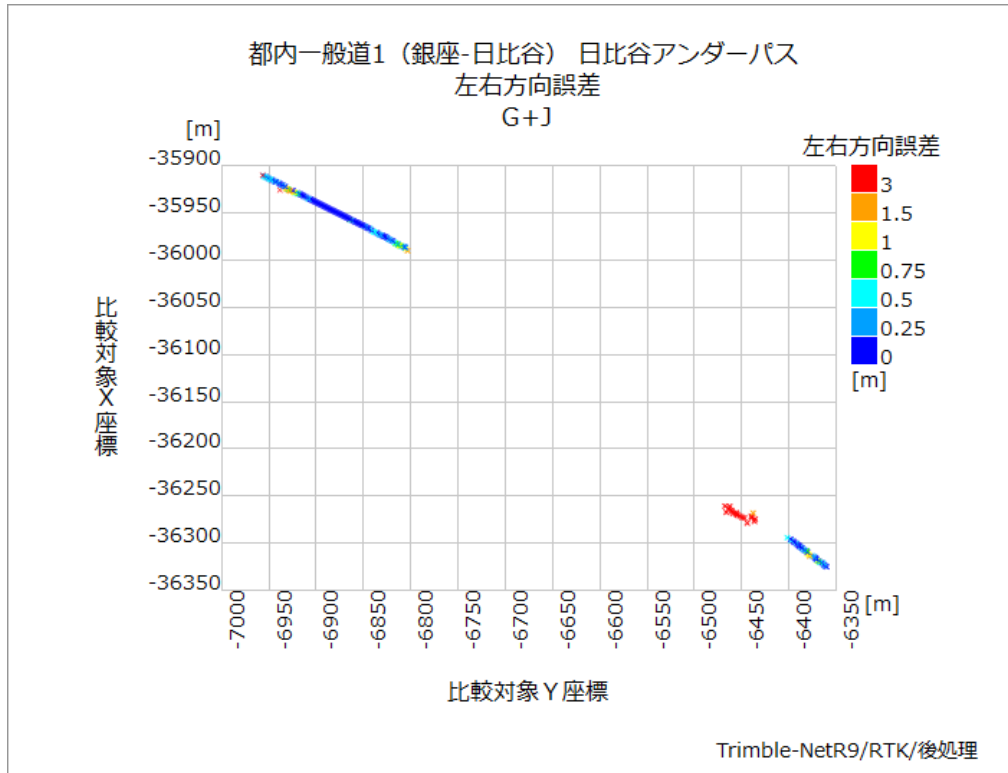


図 6.5.1-2 左右方向誤差のプロット(10回目/GPS+QZSS)

10回目の走行は比較的GPS衛星配置の良好だった時間帯となる。入り口側で一度寸断しているのは、首都高速道路高架下通過時の信号遮断により生じたもので、その後のアンダーパス進入時には、前方の東海道新幹線高架や左右の壁面の影響から測位精度の劣化が生じている。アンダーパス通過後の測位に関しては、測位に必要な可視衛星が得られた時点での測位再開となり、安定した精度が得られている。コード測位解を得てから、RTKのFix解を得るまでの時間は、0.2秒であった。

一方、GPS衛星の配置が良くない時間帯においては、首都高速道路高架下の通過開始と同時に測位不能となり、またアンダーパス通過後に測位復帰した後も、測位精度が安定しない結果となっている。ただし測位再開後、測位成果がコース内で復帰しなかったのは3回目の走行のみであり、その他の走行においては、多少の精度が劣化する箇所があるものの基本的には測位精度は安定していた。

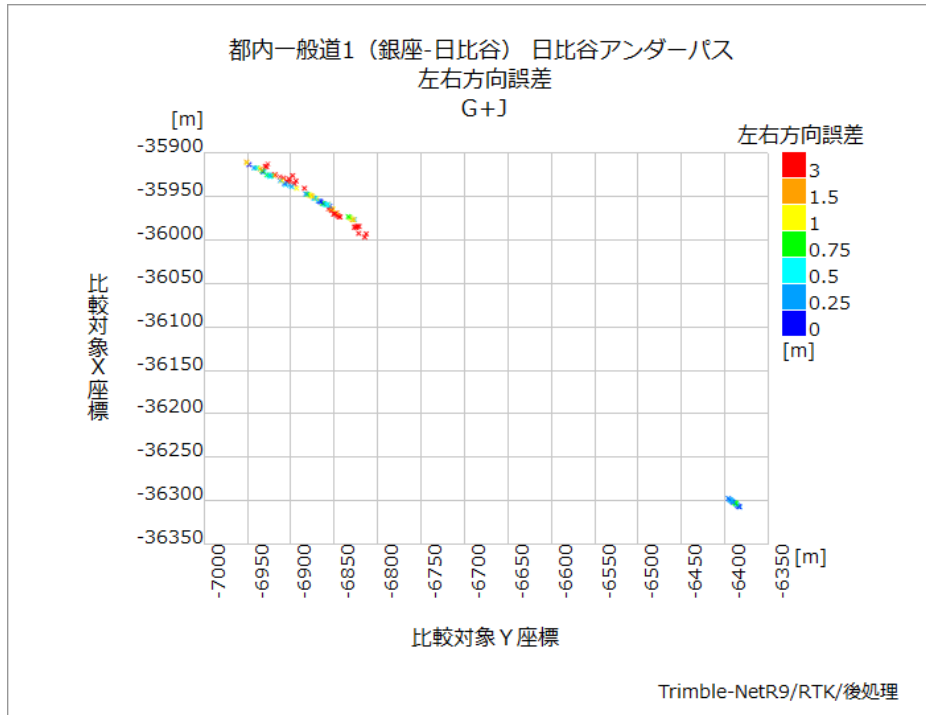


図 6.5.1-3 左右方向誤差のプロット(3回目/GPS+QZSS)

このようなケースの場合、GPS 以外の衛星も利用する事で、可視衛星数が増え、多少の測位改善が確認できる。今後の実用準天頂衛星および Galileo の整備が進むことでさらなる改善が期待できる。

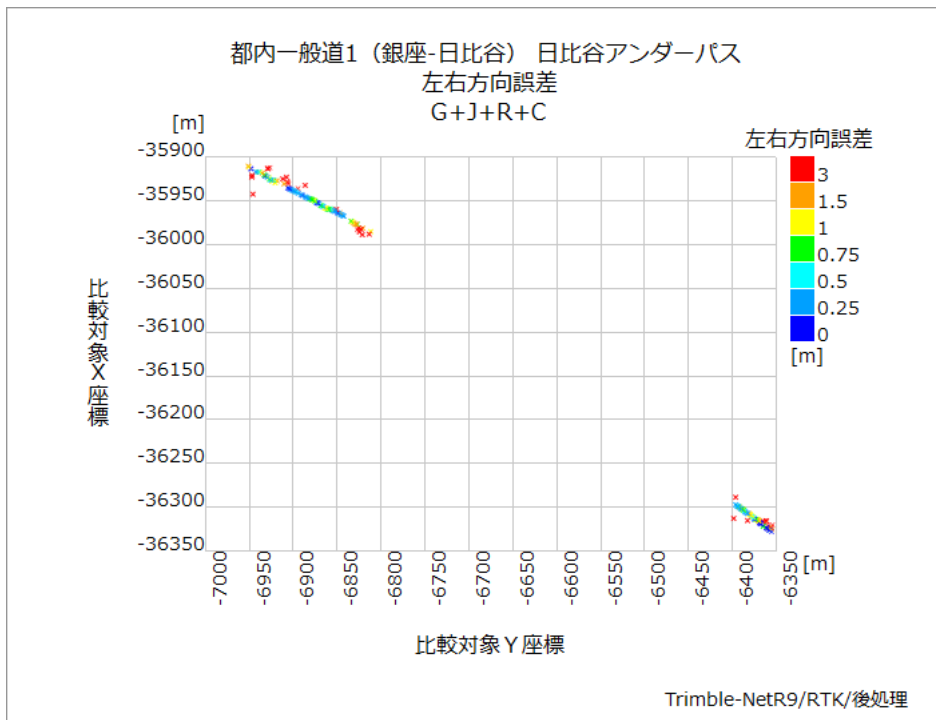


図 6.5.1-4 左右方向誤差のプロット(3回目/GPS+QZSS+GLONASS+BeiDou)

6.5.2 都市間高速における測位劣化箇所

都市間高速では、法面及び高架下通過等により測位率、測位精度が劣化しやすい箇所が存在している。そこで比較的上空視界の開けた箇所と、法面、高架のある箇所にかけて比較評価を行った。

上空視界の開けた箇所として、桜土浦 IC からつくば JCT までの一部を区間 A とし、法面および高架があるつくば JCT から谷田部 IC までの一部を区間 B としている。



図 6.5.2-1 区間 A



図 6.5.2-2 区間 B

区間 B においては 8 つの橋梁があり、またコース全般にわたり進行方向左側が法面となっている。



図 6.5.2-3 区間 B の橋梁、法面の様子(MMS データより)

評価対象には GPS+QZSS による RTK 測位を利用している。

区間 A および B の測位率、Fix 率の平均は以下の様になった。

遮蔽構造物の多い区間 B では区間 A に比べ測位率で 10%、Fix 率で 30%低下しており、これは特別な周回で起きたものではなく、全般にこのような傾向となっている。

表 6.5.2-1 測位率／Fix 率の平均

	区間 A	区間 B
測位率	100.00%	89.78%
Fix 率	85.16%	53.00%

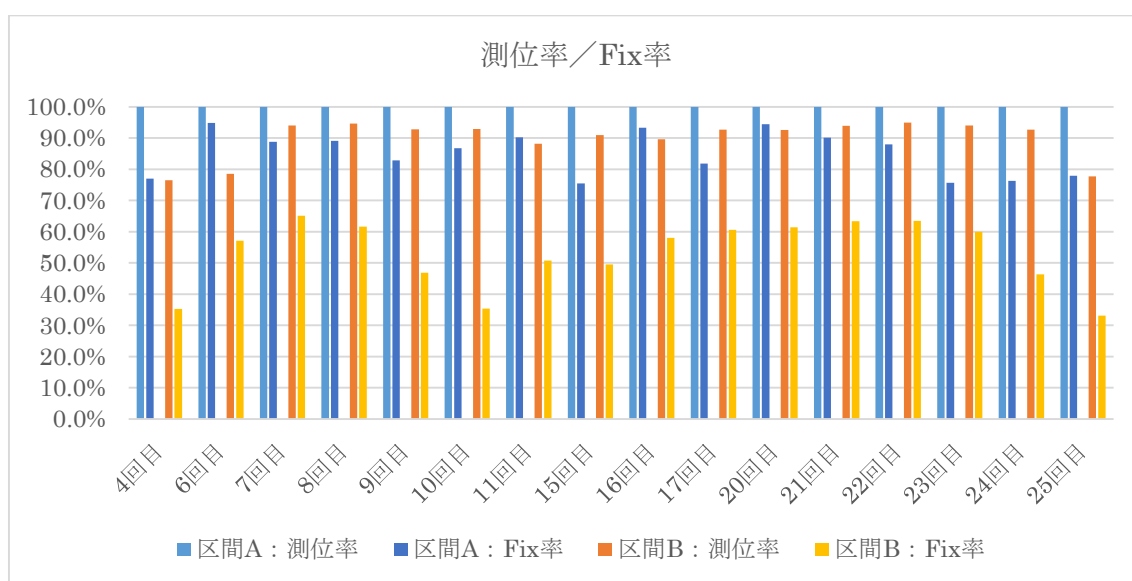


図 6.5.2-4 各周回の測位率と Fix 率

測位精度に関しても下記に示す様に明確な差が確認できる。全体を通して区間 B は区間 A と比較して 20%程低い値となっている。

※測位精度評価は測位できた値すべてを含む。

表 6.5.2-2 左右方向誤差の発生率の平均

	0.5m 以内	～1m 以内	～1.5m 以内	～2m 以内	～2.5m 以内	～3m 以内
区間 A	88.86%	7.03%	2.43%	1.37%	0.17%	0.04%
区間 B	68.42%	12.15%	4.36%	2.08%	0.76%	0.52%

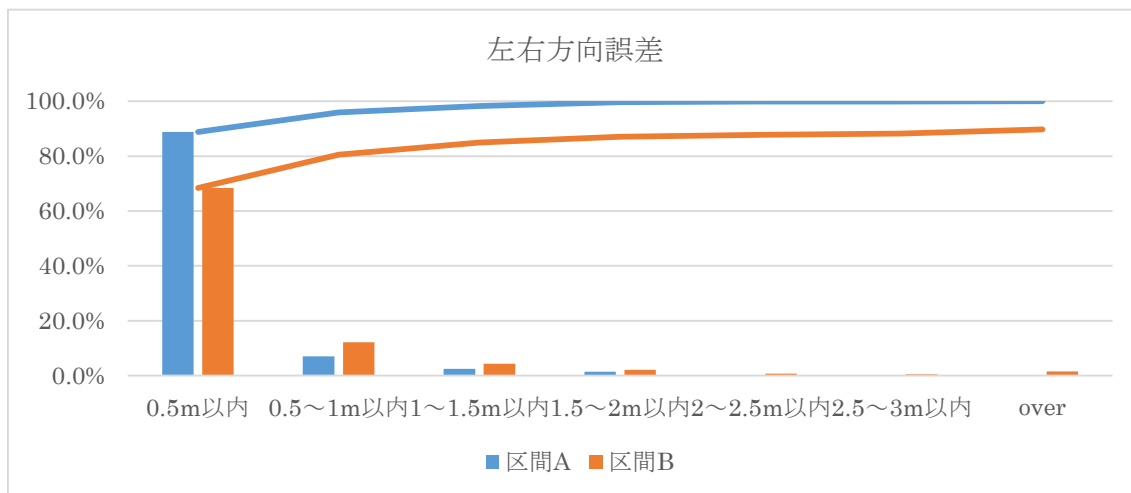


図 6.5.2-5 左右誤差の測位精度

都市間高速において、区間 A は、測位率 100%、測位精度も 95%が 1.0m 以内(左右方向)となり高い精度での位置情報取得が可能であったが、区間 B においては、測位率は 90%を下回り、左右方向誤差が 1.0m 以内の割合は 80%程度となった。

区間 B において、区間 A と比較し、あまり測位率/Fix 率が大きく変わらなかった 23 回目と、差が大きかった 25 回目の衛星配置を以下に示す。25 回目は 23 回目から約 40 分後の走行計測となる。

ともにオープンスカイの状態においては、HDOP は 1.0 となっており衛星配置は良好な状態だったと言える。また衛星数も GPS と QZSS あわせ、それぞれ 10 個、9 個となっている。しかしながら進行方向左手側に法面があるため、23 回目の走行においては、G23 の衛星からの信号が遮断されただけだったのに対し、25 回目では G28、G09、G19 の 3 衛星が遮断され、実際の可視衛星は 6 個となっており、G23 も不可視となる箇所もあった。

都市間高速において、遮蔽が少ない箇所では自動走行において衛星測位が利用しやすいが反面、遮蔽等がある箇所においては、10%程の測位率、測位精度の低下がみられる。

都市間高速道路における衛星測位システムを利用する場合、これら遮蔽による測位性能の低下箇所を把握して利用する事が望ましい。

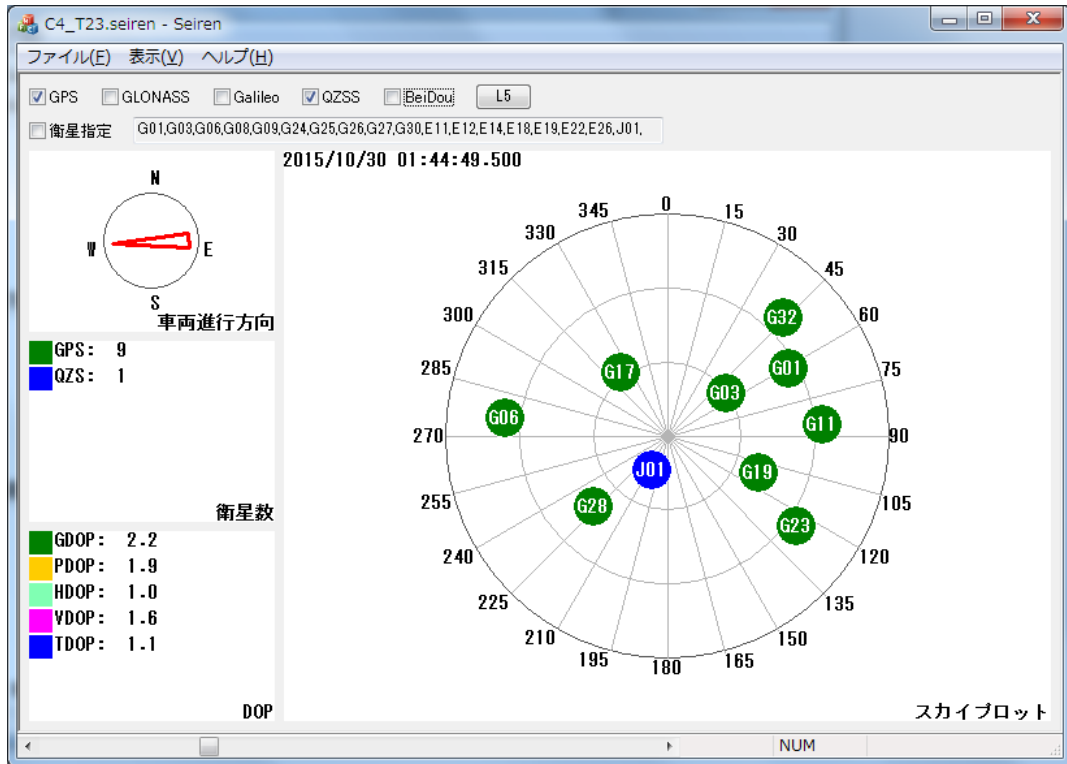


図 6.5.2-6 23 回目区間 B でのスカイプロット

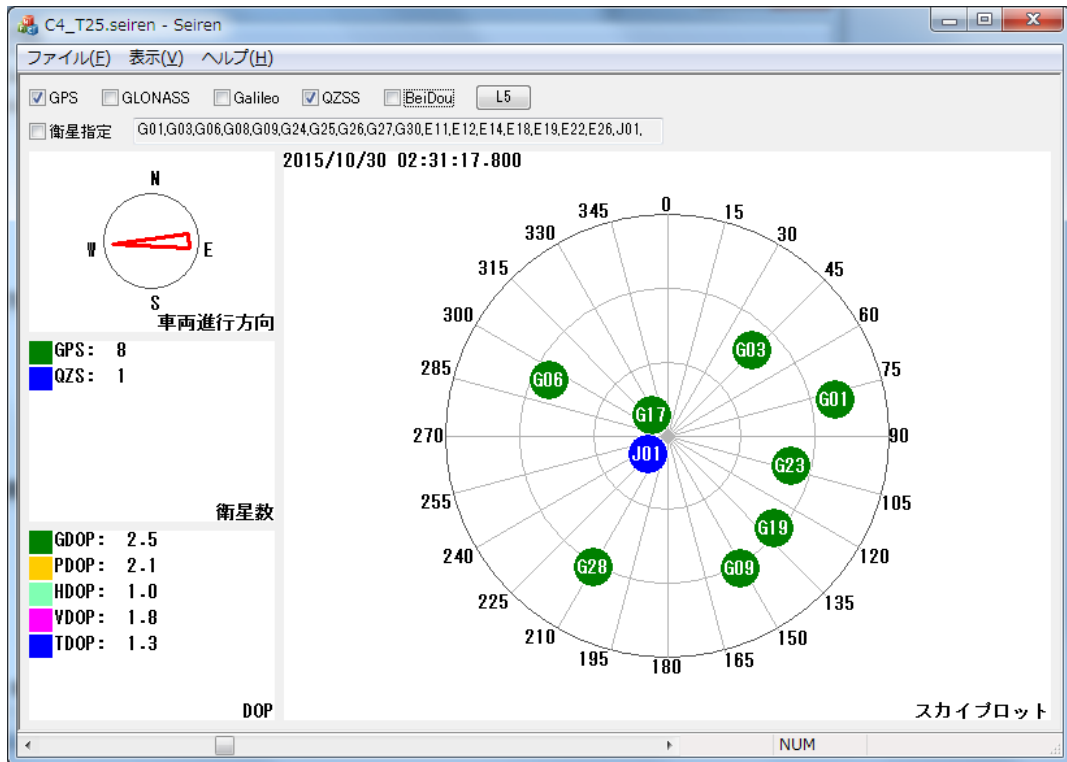


図 6.5.2-7 25 回目区間 B でのスカイプロット

6.6 電離層遅延の評価

6.6.1 昼夜(時間帯)の評価

測位衛星からの信号が地上に届くまでの間には電離層がある。信号が電離層を通過する際に、電子密度に比例して電波の速度が遅くなる。このため、信号の到達時間を利用して疑似距離を得る衛星測位にとって、電離層の全電子数(TEC)の変動は測位の精度に影響を与える。電離層は太陽からの紫外線などのエネルギーによって光電離現象が発生し、電子が増えるため電子密度が高い状態になっている。よって太陽からの紫外線等が届かない夜間は、昼間より全電子数が少なくなる。そこで、昼夜の電離層での電子密度の違いが衛星測位にどのような影響を与えるかを調査した。

今回の測位方式のうち電離層遅延量を正しく除去できないものは1周波コード測位のみとなるため、1周波コード測位での評価を行った。

評価コースは、10月28日に午前、午後、日没後の3回の走行を行った都市間高速(1)とした。走行の時間帯は以下の様になる。

表 6.6.1-1 評価対象時間帯

		開始時刻(JST)	終了時刻(JST)
1回目	午前	10:48:03	11:28:10
2回目	午後	12:23:49	13:02:36
3回目	日没	17:15:00	17:54:40

※2015年10月28日つくばでの日の入は16:49:46(JST)

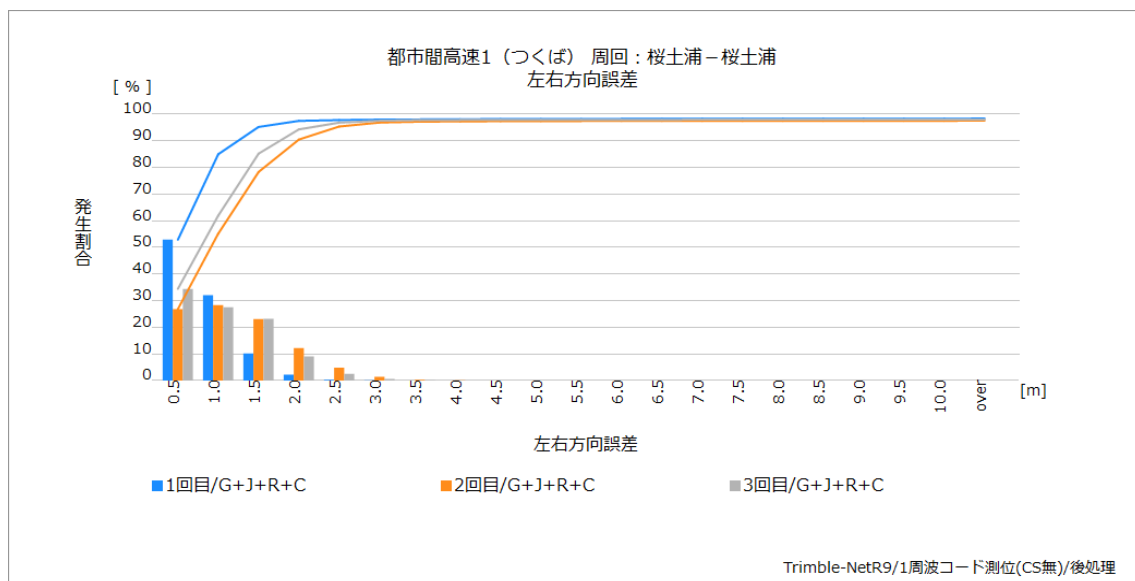


図 6.6.1-1 左右誤差ヒストグラム

左右方向誤差のヒストグラムを確認する限りでは、午後の精度が低いが、この背景は TEC ではなく、その時間帯での可視衛星数によるものの影響が出ている可能性がある。

GPS のみでは衛星数に大きな開きが生じるため、QZSS、GLONASS、BeiDou を加えたマルチGNSS での評価を行ったが、午後の時間帯となる 2 回目の計測では、他の計測時間帯にくらべ 2～4 個衛星数が少ない時間帯であり、これら衛星配置の影響が関係している可能性は非常に高い。

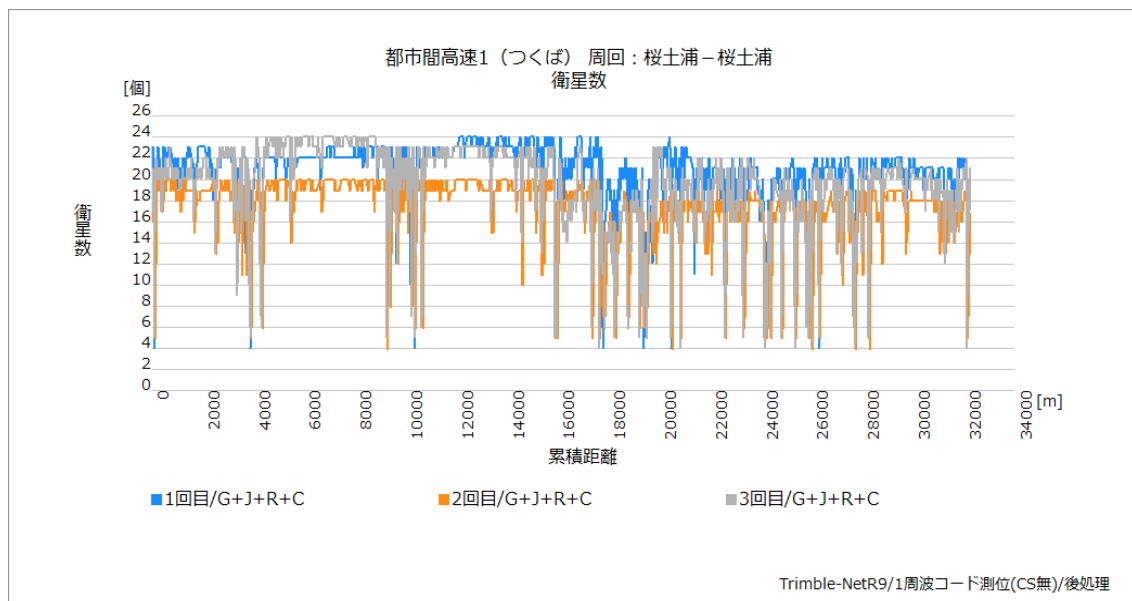


図 6.6.1-2 可視衛星数の推移

TEC と測位精度の関係は存在するが、電離層活動がそれほど活発でない日本では、昼夜間の差異に関しては TEC による影響より、測位時の衛星配置による影響の方が大きいと思われる。

6.6.2 低緯度地域の評価

一般的に、「低緯度地域では電離層の活動が激しく、衛星測位の結果に影響を及ぼす」といわれている。そこで日本と低緯度地域の電離層遅延量の比較を行った。

低緯度地域のデータとして、赤道近くの国であるブルネイ・ダルサラーム国の首都バンダリ・スリ・ブガワン(緯度:4 度 53 分 20 秒、経度 114 度 56 分 21 秒)に設置されている基準局のデータを使用した。日本側は JAXA 筑波宇宙センターに設置されている基準局のデータを用いた。

まず、各基準局の観測データ、航法メッセージデータから、準天頂衛星の①2 周波疑似距離による電離層遅延量、②GPS 航法メッセージ内の電離層遅延補正パラメータを用いた電離層遅延量、③QZSS 航法メッセージ内の電離層遅延補正パラメータを用いた電離層遅延量をそれぞれ求めた。①ではほぼ正確な電離層遅延量が求められる。②及び③によって得られた値がどれほど真値に近いかが比較するため、①と②、①と③の差分をそれぞれ求めた。(表 6.6.2-1)

表 6.6.2-1 電離層遅延量の評価について

評価データ①	2周波疑似距離の線形結合による電離層遅延量
評価データ②	Klobuchar モデル (GPS 航法メッセージのパラメータを使用) による電離層遅延量
評価データ③	Klobuchar モデル (QZSS 航法メッセージのパラメータを使用) による電離層遅延量
評価データ④	①と②の差
評価データ⑤	①と③の差
対象衛星	QZSS (J01)
対象コード	L1C/A、L2C
評価時間	つくば:2015年10月29日 00:00:00~23:59:59 (UTC) バンダリ・スリ・ブガワン:2015年12月10日 00:00:00~23:59:59 (UTC) ※日本時間=UTC+9時間 ブルネイ時間=UTC+8時間
計算サイクル	1/30Hz

以下に①、④、⑤のグラフを示す。なお各グラフにおいてつくばのデータが一部途切れているが、QZSS が南下し観測できていないためである。

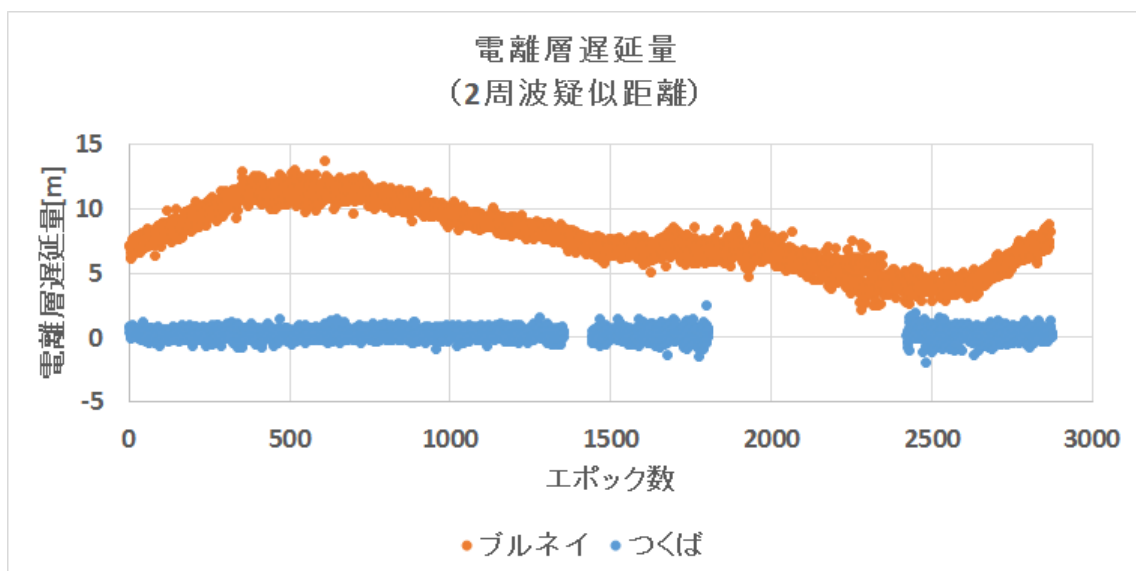


図 6.6.2-1 2周波疑似距離による電離層遅延量

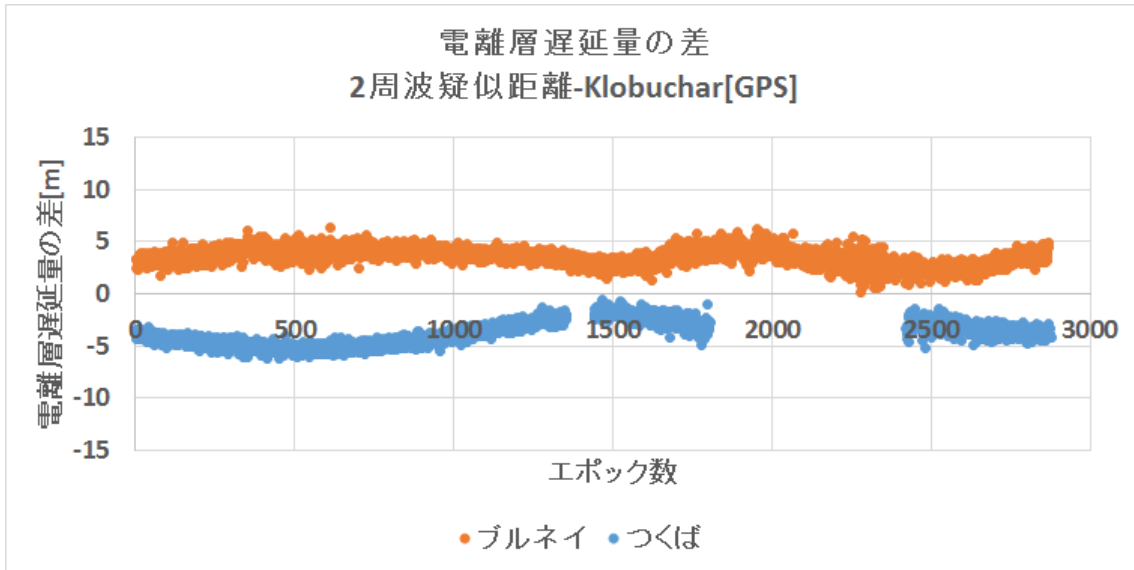


図 6.6.2-2 電離層遅延量の差(2 周波-GPS 航法メッセージ)

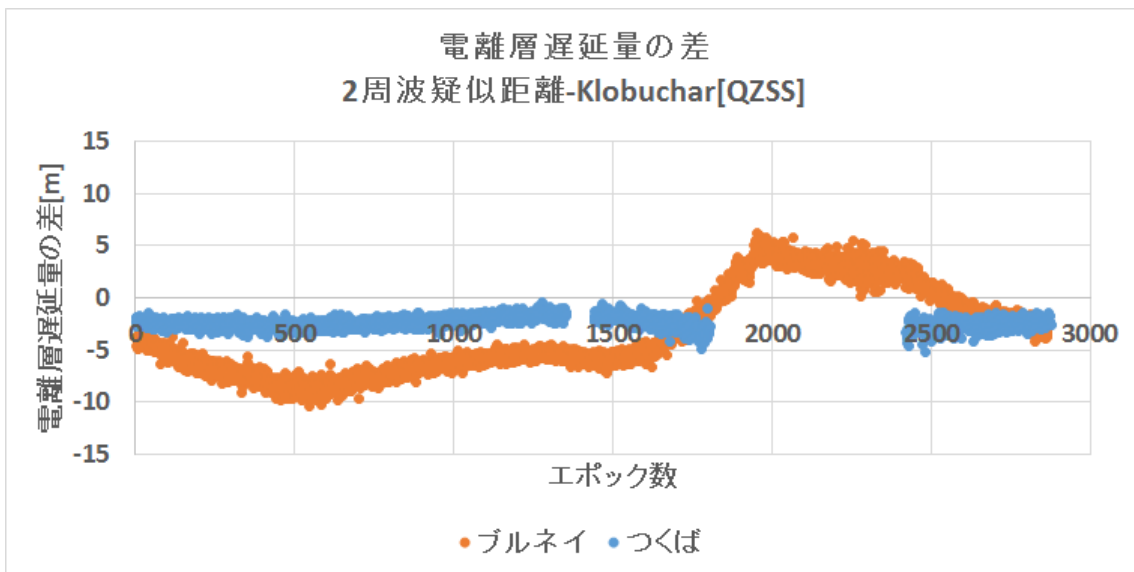


図 6.6.2-3 電離層遅延量の差(2 周波-QZSS 航法メッセージ)

まず図 6.6.2-1 を見ると、日本とブルネイの違いが顕著に表れている。ブルネイでの電離層遅延量は 1 日を通して大きく変動しているのに対して、つくばではほぼ一定の値で推移しており、先述の定説は正しいと言える。

ただしここで注意しなくてはならないのは、ブルネイにおいても短い時間に限っていえば、遅延量のバラつきは日本とそれほど変わらないということである。「低緯度地域では電離層の活動が激しい」というのは、電離層の活動が活発な時と静穏な時の差が大きいという意味であり、常に遅延量が大きくばらつくという意味ではない。

次に図 6.6.2-2 を見ると、GPS 航法メッセージのパラメータでの補正では、ブルネイでも日本でも依然として数 m の誤差が残っている。GPS 航法メッセージのパラメータは 8 つのパラメータ量で全世界の電離層遅延量を計算するため、この程度の残差は仕方がないと言える。

しかし図 6.6.2-3 のつくばのデータでは 2 周波疑似距離による遅延量と QZSS 航法メッセージのパラメータによる遅延量の差は 0 に近く、非常に小さいことがわかる。このことから QZSS のパラメータは非常に有効であると言える。

逆にブルネイ側では、GPS のパラメータを用いた場合に比べて差が大きくなっている。

今回の分析で、低緯度地域の電離層遅延量は 1 日の中での変動量が大きく、遅延量そのものも日本と比べて大きいことがわかった。

また QZSS が配信している電離層遅延補正パラメータは日本近傍に限れば、非常に有効であると言える。

7 分析と検討

7.1 マルチパス

マルチパスとは建物などに反射／回折した電波のことで、直接波とは異なる経路をたどってアンテナに到達する。衛星測位では、衛星から電波が発信された時刻と電波がアンテナに到達した時刻の差で衛星までの距離を測定するため、マルチパスを受信すると実際より距離が長く測定されてしまい測位誤差の要因の一つとなっている。

マルチパスには可視衛星によるものと不可視衛星によるものがある。特に不可視衛星からのマルチパスは直接波が観測できていないため、測位誤差への影響が大きい。

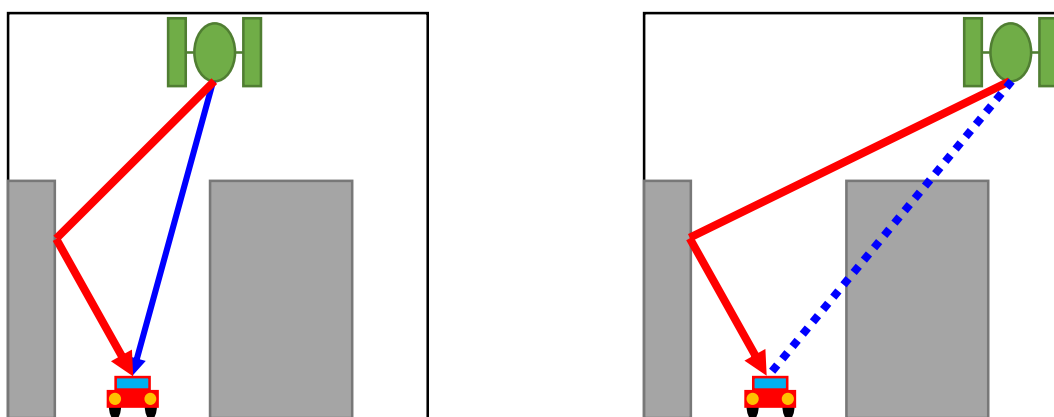


図 7.1-1 可視衛星によるマルチパス(左)と不可視衛星によるマルチパス(右)

マルチパスの検出と低減は、特に都市部において重要な課題である。マルチパスの低減手法は、①アンテナに基づくもの ②受信機技術に基づくもの ③データ処理によるもの、の3種類に分類される。①及び②については、チョークリングアンテナやコリレータの工夫によってマルチパスの低減が図られている。③については、測位計算アルゴリズムや不可視衛星の検出／除去アルゴリズムの研究がなされている。

7.1.1 天空率との関係

7.1.1.1 評価の概要

都市間高速(2)において天空カメラを用いて撮影した写真から天空率を計算し、測位の評価を行った。評価を行うに際して、写真撮影点から±10秒の区間を評価している。

評価対象

- 測位方式:RTK
- 対象衛星システム:GPS+QZSS

7.1.1.2 撮影ポイント

撮影ポイントは、周辺環境を考慮し7カ所設定して実施している。

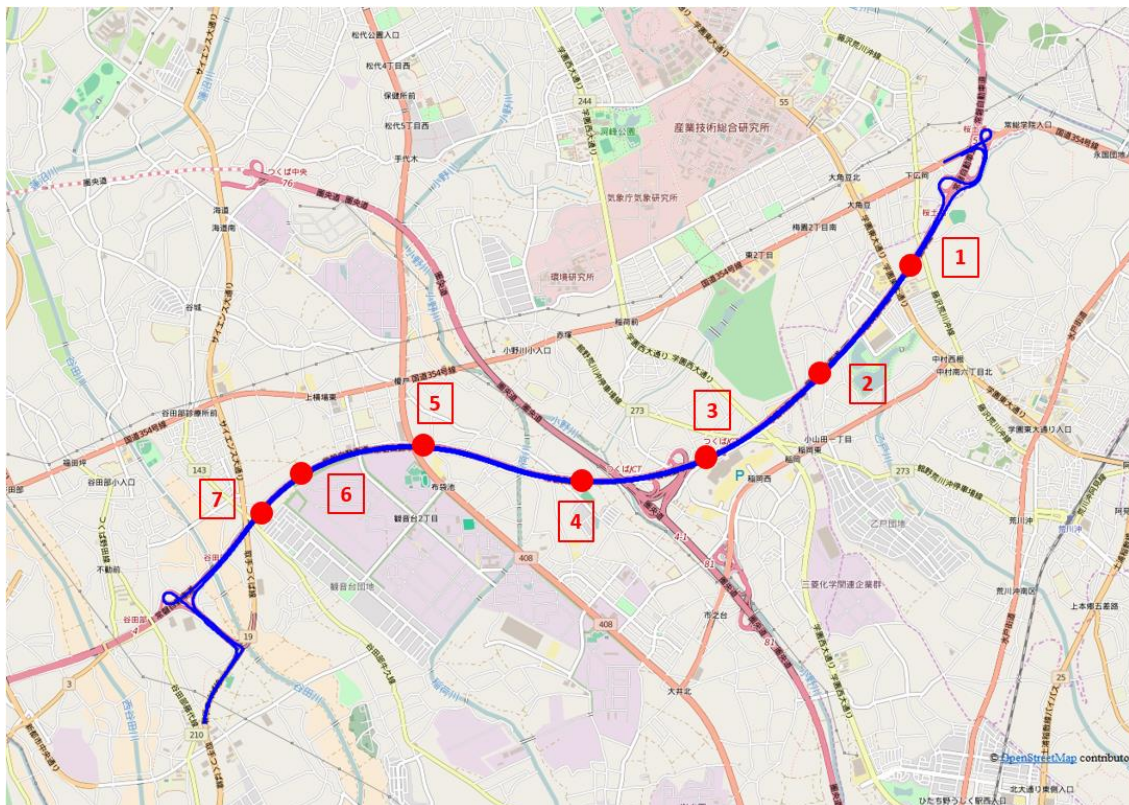









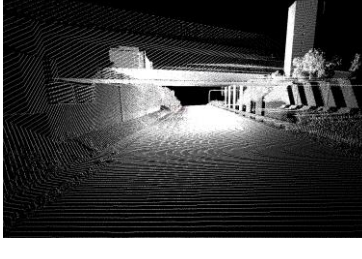

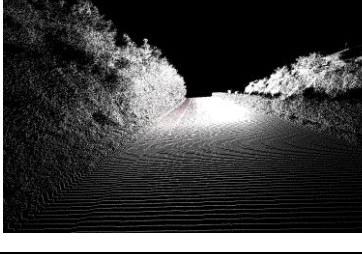




図 7.1.1-1 撮影箇所

各撮影箇所での天空写真及び、周辺環境を 表 7.1.1-1 評価箇所情報に示す。

表 7.1.1-1 評価箇所情報

	天空カメラ	レーザースキャナー	備考
1			開空 左手樹木

2			開空
3			JCT 入り口 開空
4			JCT 通過 左手フェンス
5			橋梁下 左手法面
6			橋梁通過後 左手法面
7			橋梁真下 左手法面

天空率と測位率、測位精度の関係を以下に示す。天空率と測位率の間には一定の相関関係がみられる。また測位精度に関しては、天空率の低い箇所では精度が劣化する。特に橋梁、法面を含む 5、7 は Fix 率が 30%を下回っている。

また測位精度は 3、6、7 が特に劣化している。3、6 は天空率が低かったわけではないが、つくば JCT 手前、または橋梁下通過後という事で、周辺構造物によるマルチパスの影響が考えられる。

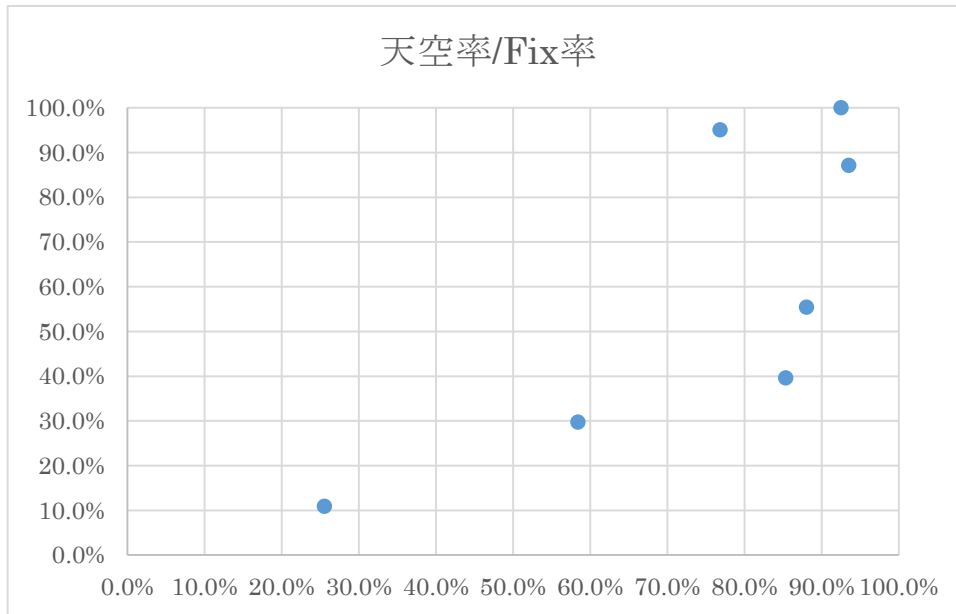


図 7.1.1-2 天空率(横軸)と Fix 率(縦軸)

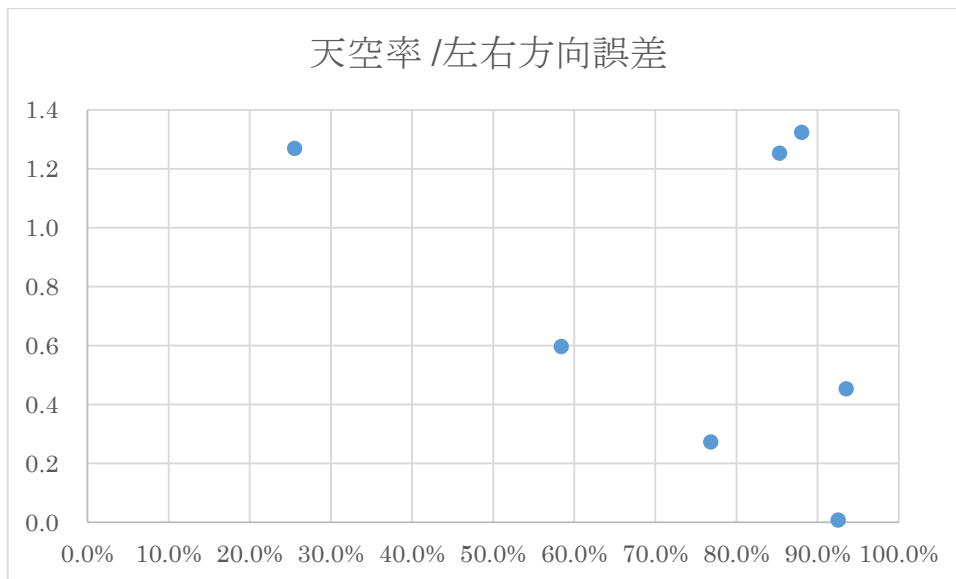


図 7.1.1-3 天空率(横軸)と左右誤差の RMS(縦軸)

表 7.1.1-2 天空率/測位率/測位精度

	天空率	測位率	Fix 率	RMS[m]	
				左右方向	進行方向
1	76.80%	100.00%	95.05%	0.2736	0.0521
2	93.50%	100.00%	87.13%	0.4538	0.847
3	88.00%	100.00%	55.45%	1.3246	1.4059
4	92.50%	100.00%	100.00%	0.0077	0.0063
5	58.40%	94.06%	29.70%	0.597	0.7261
6	85.30%	100.00%	39.60%	1.2535	0.9093
7	25.50%	96.04%	10.89%	1.2705	0.8842

天空率が低いことで、測位率/Fix 率の低下、測位精度の劣化は確認できるため、測位の指標にはなりうる。ただし、測位精度に関しては、単なる天空率のみではなく、天空のどの位置が遮蔽されているかが大きく影響するため、天空率が高くても測位精度が劣化する可能性がある。

7.1.2 電波伝搬シミュレーションによる分析

7.1.2.1 概要

携帯電話の置局設計などにおいて、都市部のマルチパスフェージング環境を模擬する際に、電波伝搬シミュレータと3D建物モデルが使われている。衛星測位においても、衛星と受信機の配置を考慮して数値計算を行うことで、都市部の建物によるマルチパスの影響を考慮した電波の伝搬シミュレーションが可能である。

本調査では、一般に入手可能な3D建物データと電波伝搬シミュレータを用いて、測位誤差低減効果の検証を行った。

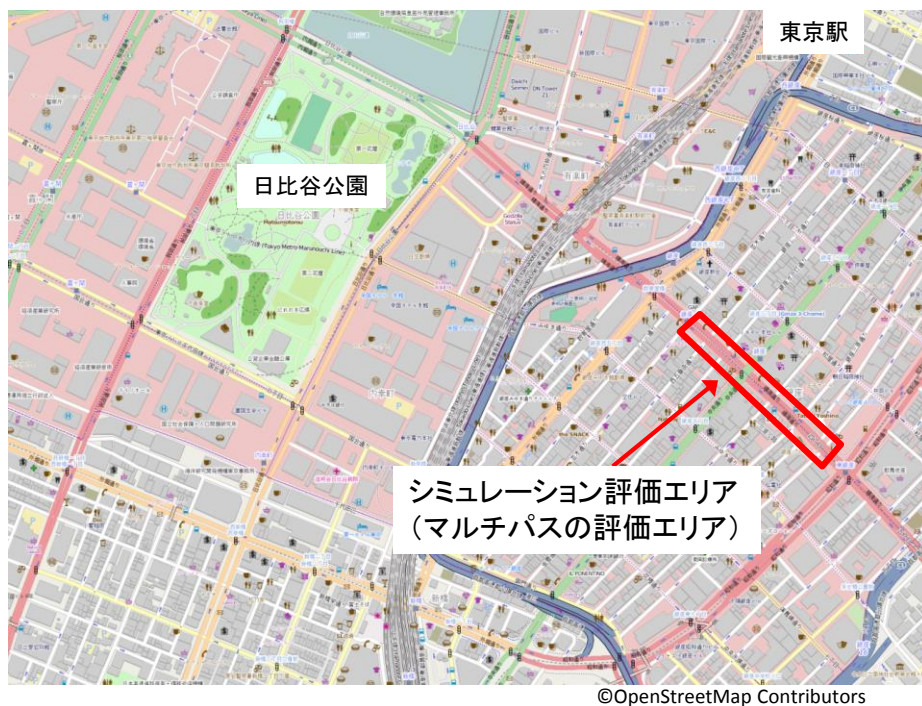


図 7.1.2-1 評価エリア

評価対象とするエリアはマルチパスの影響が大きい銀座四丁目交差点から三原橋交差点付近とした。

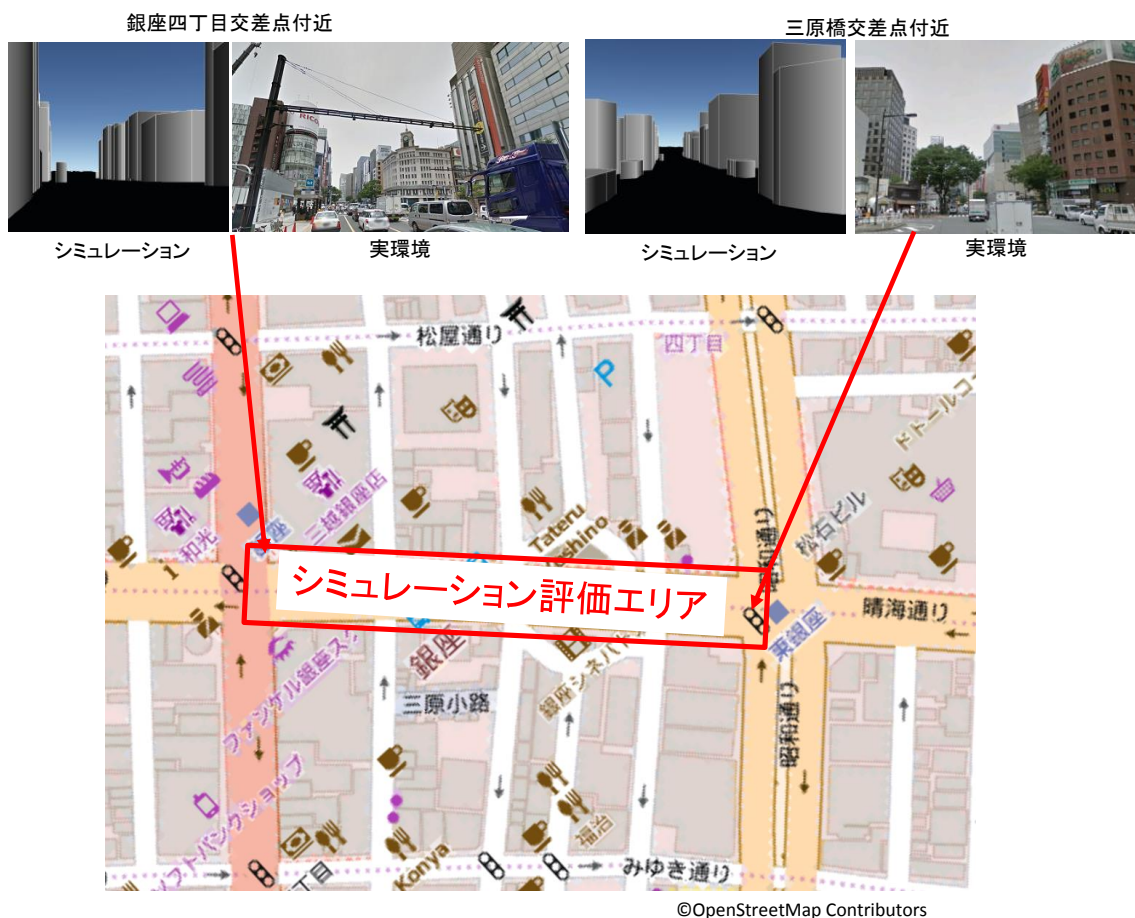


図 7.1.2-2 実環境とシミュレーション内の評価エリア

電波伝搬シミュレータにより、以下の3つをシミュレーションすることで、実際のマルチパスの状況を推測することができる。

- 衛星と受信機間の見通しの推定
- 受信電力の推定
- 擬似距離など観測量に含まれる誤差量の推定

これらの内、受信電力は受信機で得られる SNR 値などの観測量を利用すれば良いため、電波伝搬シミュレーションを用いる必要はない。

また、擬似距離など観測量に含まれる誤差量の推定を行う場合、アンテナの指向性や、受信機に搭載されているコリレータなど、受信機に依存した情報が必要となる。

本調査では、受信機に依存せず受信機では得られない誤差低減に使用し得る情報として、3D 建物データと電波伝搬シミュレータを用いて、衛星と受信機間の見通しを推定する。また、推定結果を観測データの衛星選択に利用する事で、誤差低減の検討を行った。

見通しあり、なしの定義を以下に示す。

- ・見通しあり:衛星と受信機の上に直線を引いた場合、建物に遮蔽されない。
- ・見通しなし:衛星と受信機の上に直線を引いた場合、建物に遮蔽される。

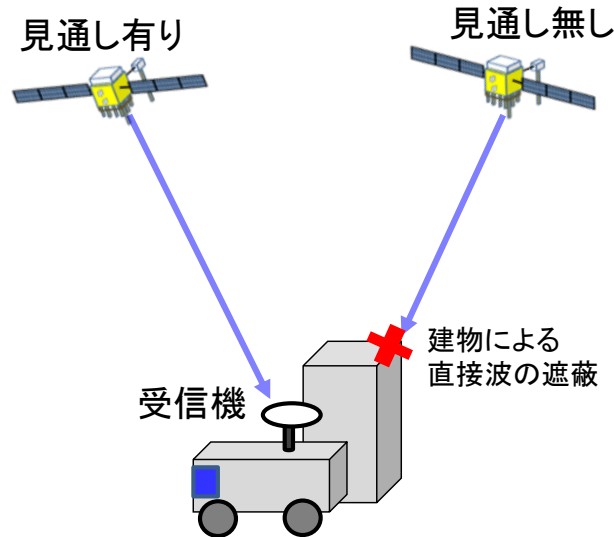


図 7.1.2-3 シミュレーションの建物と見通し

電波伝搬シミュレーションは以下の様に実施した。

- ① 受信機における受信時刻とその時の MMS の位置の組み合わせを、シミュレーション上の受信点とする。
- ② MMS の位置周辺の建物を読み込む。
- ③ ①で指定したシミュレーション上の受信点と受信機で実測した RINEX 航法メッセージファイルに記録されたエフェメリスを用いて、各受信点において信号を受信した衛星の信号送信位置を算出する。
- ④ 各受信点の位置と衛星の位置と 3D 建物データを用いて、見通し判定を行う。

各計算試行で共通の計算条件は以下とした。

衛星システム:GPS、GLONASS、QZSS、BeiDou

3D 建物データ:Zmap AreaII¹ 関東詳細地図

衛星測位電波伝搬シミュレータ:GPS-Studio²

計算対象とする建物:受信機周辺 150m の建物

計算インターバル:1Hz

¹ <http://www.zenrin.co.jp/product/gis/zmap/zmaparea.html>

² <http://network.kke.co.jp/products/gps-studio/>

シミュレーションによる分析

7.1.2.1.1 計算試行 1 回目

計算試行 1 回目における設定を以下に示す

計算対象エリア: 銀座周辺のマルチパス評価エリア

日時(UTC): 2015/10/26 2:25:25~2:28:14

計算対象受信機: Trimble NetR9

使用した航法メッセージ: 5245K53320201510260000A.15P

使用した観測ファイル: 5505R50153201510260000A.15o

各衛星の見通し判定結果を示す。

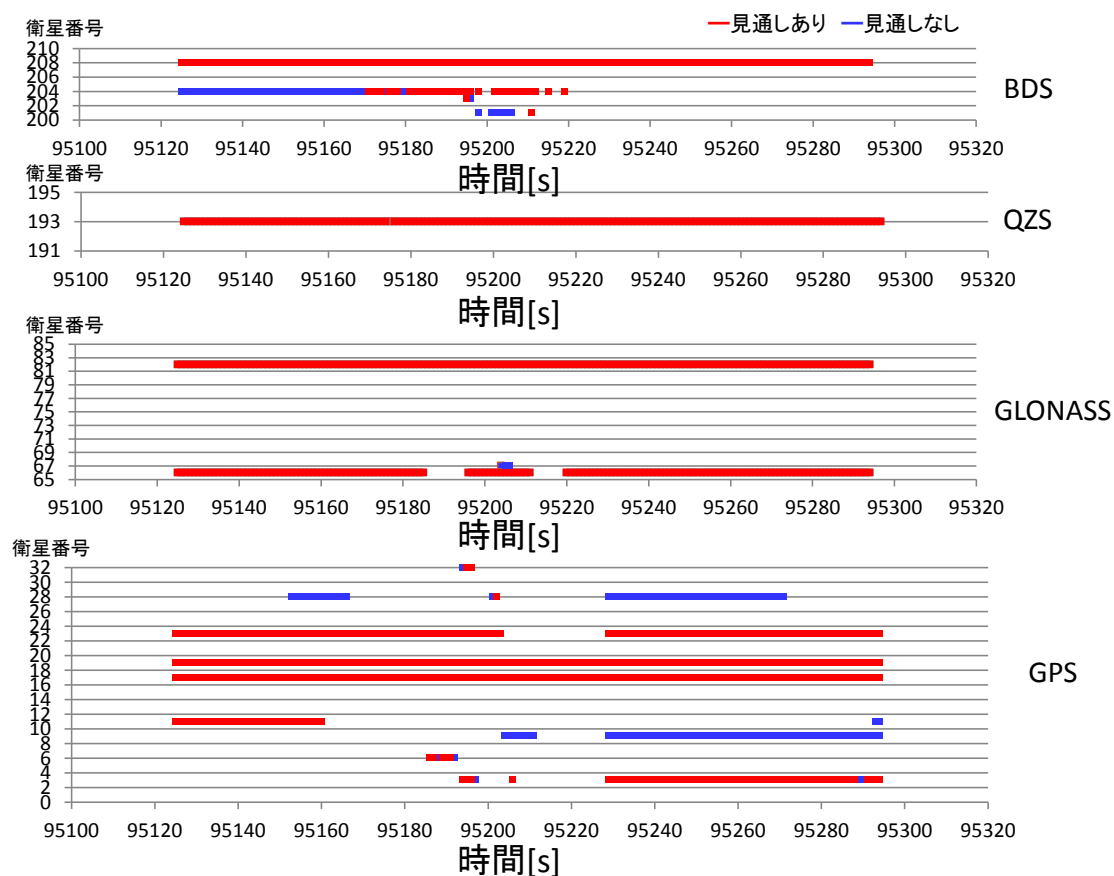


図 7.1.2-4 衛星の見通しの変化

見通しのあった衛星数の場所における変化を図 7.1.2-5 に、時間における変化を図 7.1.2-6 に示す。



©OpenStreetMap Contributors

図 7.1.2-5 見通し衛星数の位置変化

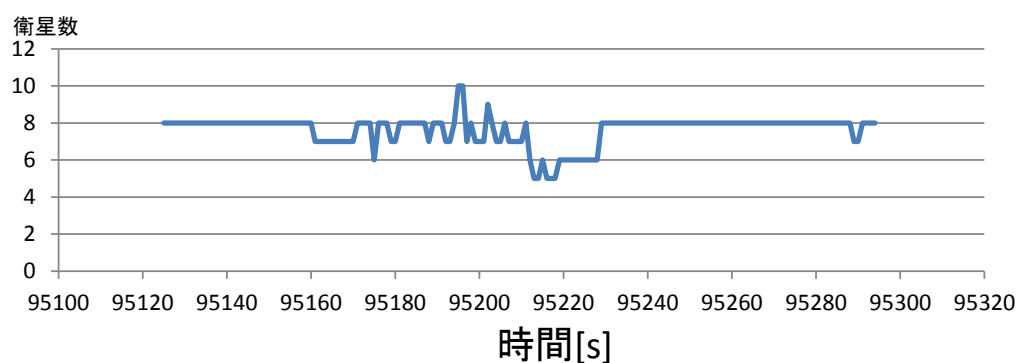


図 7.1.2-6 見通し衛星数の時系列変化

7.1.2.1.2 計算試行 2 回目

計算試行 2 回目における設定を以下に示す

計算対象エリア: 銀座周辺 のマルチパス評価エリア

日時(UTC): 2015/10/26 4:26:40~4:31:59

計算対象受信機: Trimble NetR9

使用した航法メッセージ: 5245K53320201510260000A.15P

使用した観測ファイル: 5505R50153201510260300A.15o

衛星毎の時間的な見通しの変化を下図に示す。

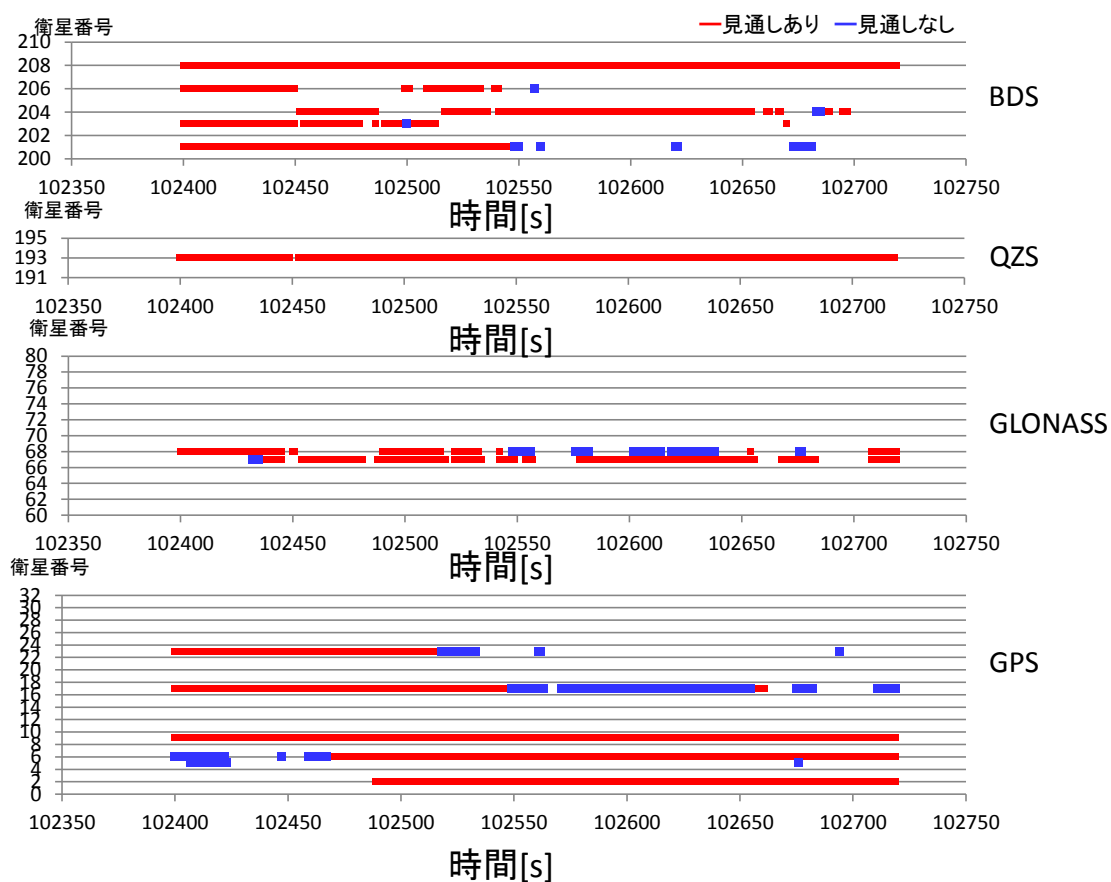


図 7.1.2-7 各衛星の見通しの時系列変化

見通しのあった衛星数の場所における変化を図 7.1.2-8 に、時間における変化を図 7.1.2-9 に示す。



図 7.1.2-8 見通し衛星数

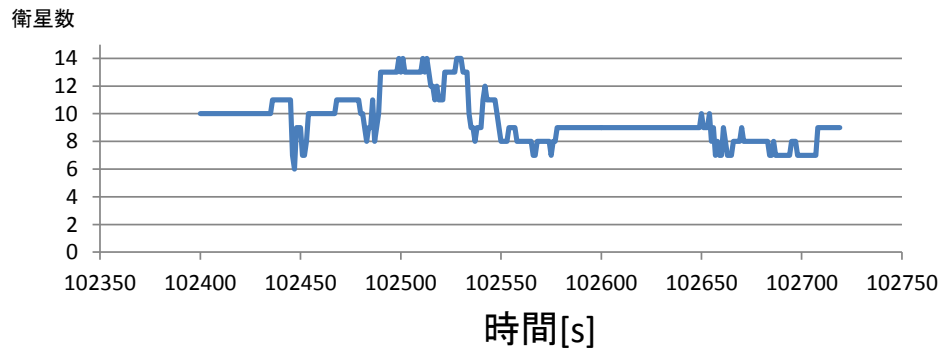


図 7.1.2-9 見通し衛星数の時系列変化

7.1.2.2 シミュレーションによる誤差低減手法の検討

シミュレーションによる見通し判定結果を測位に適用する。推定結果を観測データの衛星選択に利用する事で、誤差低減の検討を行った。検討対象は衛星数が多い計算試行2回目で計算した2015/10/26 4:26:40～4:31:59とした。

観測情報 5505R50153201510260300A.15o から、シミュレーションと同一時刻のデータを切り出し、1Hz に変換し、normal_5505R50153201510260300A_s1_042640_043159_1Hz.obs を作成した。

また、normal_5505R50153201510260300A_s1_042640_043159_1Hz.obs に対し、シミュレーションにより推定した見通し判定結果を用い、見通しがある衛星のみを抽出し、sim_5505R50153201510260300A_s1_042640_043159_1Hz.obs を作成した。

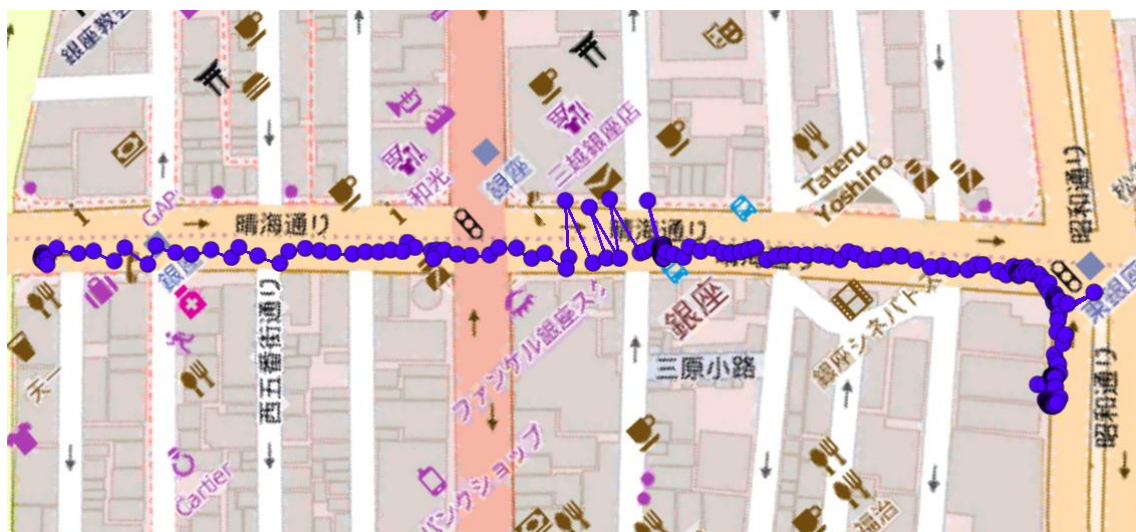
4:26:40～4:31:59 の期間において、5245K53320201510260000A.15P と normal_5505R50153201510260000A_s1_042640_043159s .15o を用いて単独測位を行った結果を図 7.1.2-10 に示す。5245K53320201510260000A.15P と 5505R50153201510260300A_sim.15o を用いて単独測位を行った結果を図 7.1.2-11 に示す。

図 7.1.2-10、図 7.1.2-11、より、電波伝搬シミュレーションによる見通し判定による衛星選択を行った結果、測位結果の飛びなどが低減されていることが、図 7.1.2-10 の黄色の線で囲った測位誤差の大きい箇所が除去されていることなどから解る。



©OpenStreetMap Contributors

図 7.1.2-10 1Hz に変換した観測ファイルをそのまま使用し単独測位



©OpenStreetMap Contributors

図 7.1.2-11 1Hz に変換した観測ファイルから見通しの衛星を選択し単独測位

7.1.2.3 事前計算による誤差低減手法の検討

電波伝搬シミュレーションの計算には、時間が掛かるため、車両などに電波伝搬シミュレータを搭載して、リアルタイムに実施することは現実的でない。ある位置における衛星と受信機の見通しは、受信機の位置と周辺の建物に依存するため、全ての仰角と方位角を網羅的に計算しておくことは可能である。

本調査では、銀座四丁目交差点から三原橋交差点までの車道を進行方向及び左右方向に 2m 間隔に区切り、中心点に受信点を配置し、事前計算を行った場合の効果について検証した。

各受信点の上空に仮想的な衛星を配置し、見通し判定を行った。仮想的な衛星は、各受信点から仰角 10° 毎に 10° から 80° まで、方位角 30° 毎に -180° から 180° まで各受信点から一定距離 ($20,000\text{km}$) 離れた地点に配置し、それぞれの組み合わせ毎に見通し判定を行い、結果をシミュレーション見通しリストとして保存した。

受信点に対する仮想的な衛星の配置と概要を図 7.1.2-12 に示す。

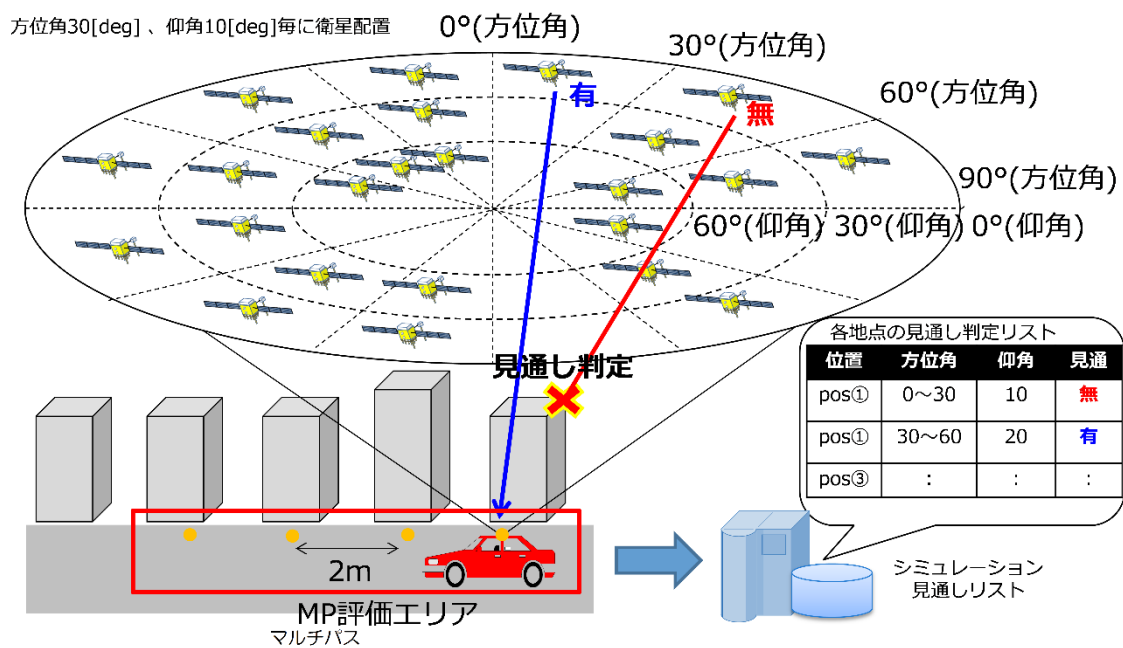


図 7.1.2-12 仮想的な衛星の配置とシミュレーションの概要

7.1.2.3.1 計算結果

図 7.1.2-13 に三原橋交差点付近の各受信点における、見通しがあった仮想衛星の数を示す。仰角方向には 8 分割、方位角方向には 12 分割となるため、最大の仮想衛星数は 96 となる。

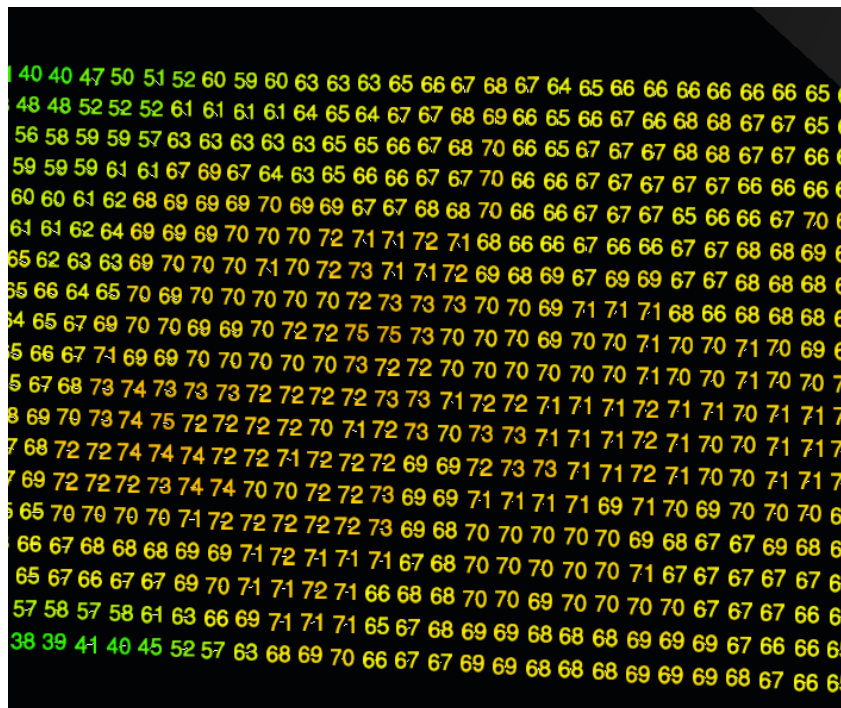


図 7.1.2-13 三原橋交差点付近の見通しがあった仮想衛星数

図 7.1.2-14 に見通しがあった仮想衛星数のカラーマップを示す。

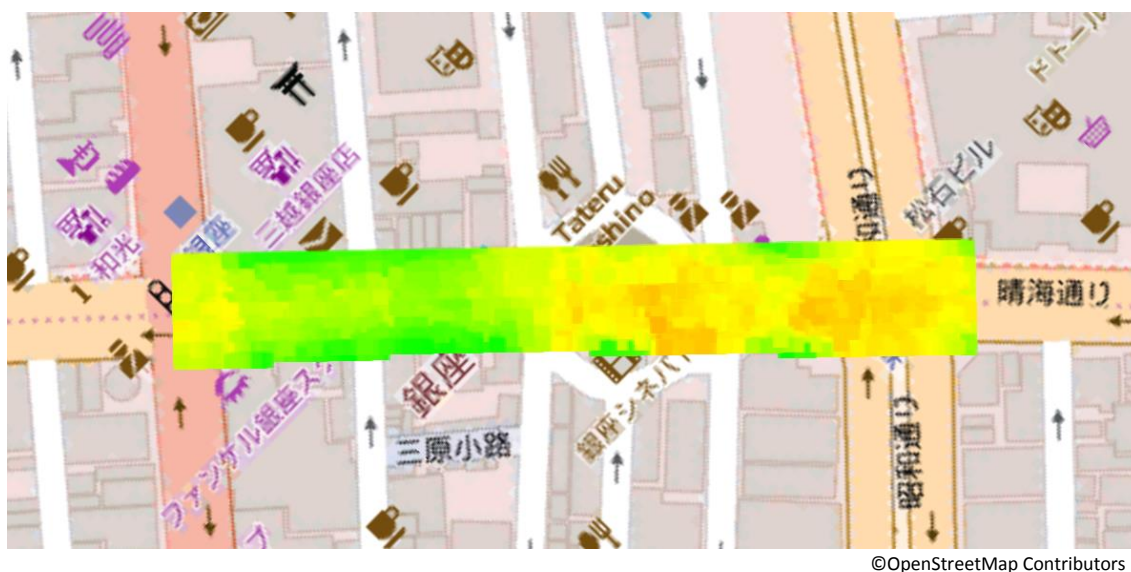


図 7.1.2-14 見通しがあった仮想衛星数

この結果を用いて、観測情報をフィルタリングすることにより前に述べた測位への利用が可能であり、観測情報への適用もリアルタイムに実施可能である。

7.1.2.4 まとめ

本調査では、市販の 3D 建物データと、電波伝搬シミュレーションによる測位誤差低減手法の検討を行い、見通し判定のみ実施する場合においても、測位誤差が低減される可能性が得られた。この手法が汎用的な状況において、効果的であるか検証するためには、より多くのデータを用いた検証が必要である。

7.1.3 マルチ GNSS を利用した低減手法の検討

マルチパスを受信している衛星の観測値を測位計算に使用しないことで、マルチパスによる測位誤差を取り除くことができるが、使用できる衛星数が減ってしまい測位そのものができなくなる可能性がある。しかしマルチ GNSS を利用することで、マルチパスを受信している衛星を除去しても、測位に十分な衛星数を確保することができる。

本調査では測位計算に使用する衛星を選択するアルゴリズムを新たに構築し、マルチパスの低減を図った。

7.1.3.1 搬送波位相による判断

マルチパスの多く発生する箇所となった銀座周辺のデータを利用し別途 DGPS による計算を行い評価した。

反射が発生した信号を受信する場合、搬送波位相が正しく測定されなくなる。このことに注目し、搬送波位相が測定できなかった信号を除去することで、マルチパスの除去が可能か検討した。搬送波位相によるチェックにより、幾つかの誤差を修正することはできたが、残念ながらマルチパス低減に大きな効果は無かった。左右方向誤差で 1.0m 以内の割合は搬送波位相チェック無しが 20.43%だったのに対し、チェック有が 21.18%、1.5m 以内はチェック無しが 27.58%、チェック有が 29.17%と修正できたものはわずかであった。

表 7.1.3-1 搬送波位相のチェックの有無による測位率及び左右方向の測位精度

	測位率	RMS[m]	0.5m 以内	0.5~1m	1~1.5m
チェックなし	99.91%	12.6755	10.68%	9.75%	7.15%
チェックあり	99.47%	11.8021	11.17%	10.02%	7.99%

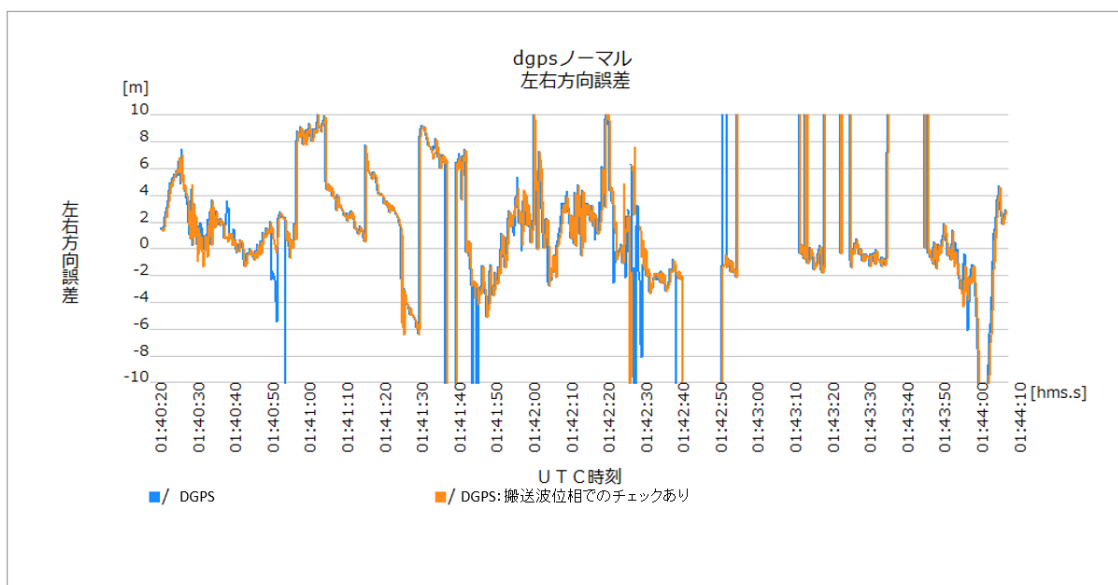


図 7.1.3-1 搬送波位相チェックによる左右方向誤差

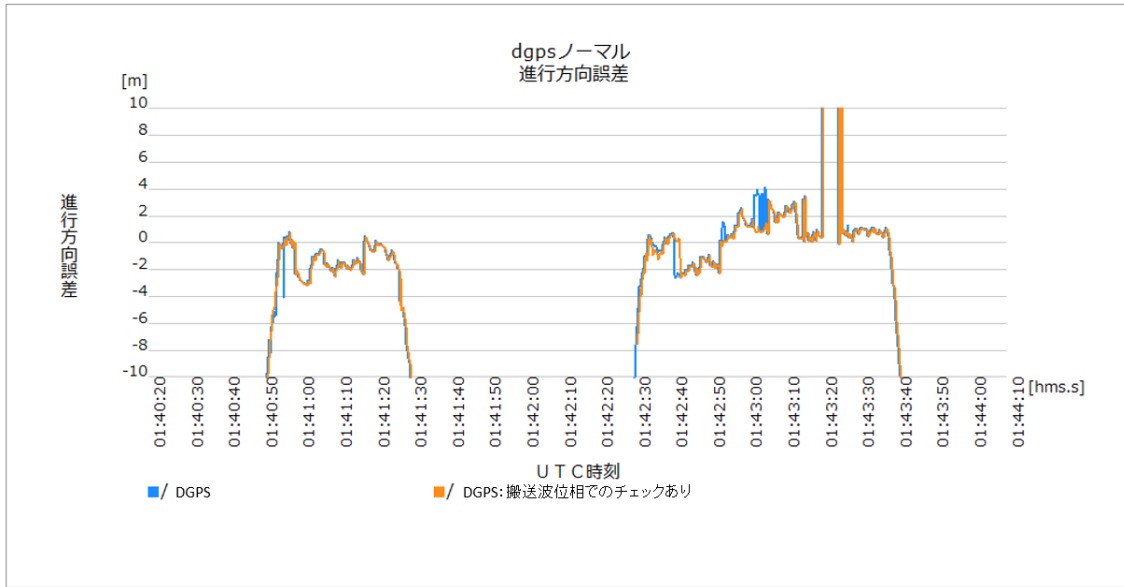


図 7.1.3-2 搬送波位相チェックによる進行方向誤差

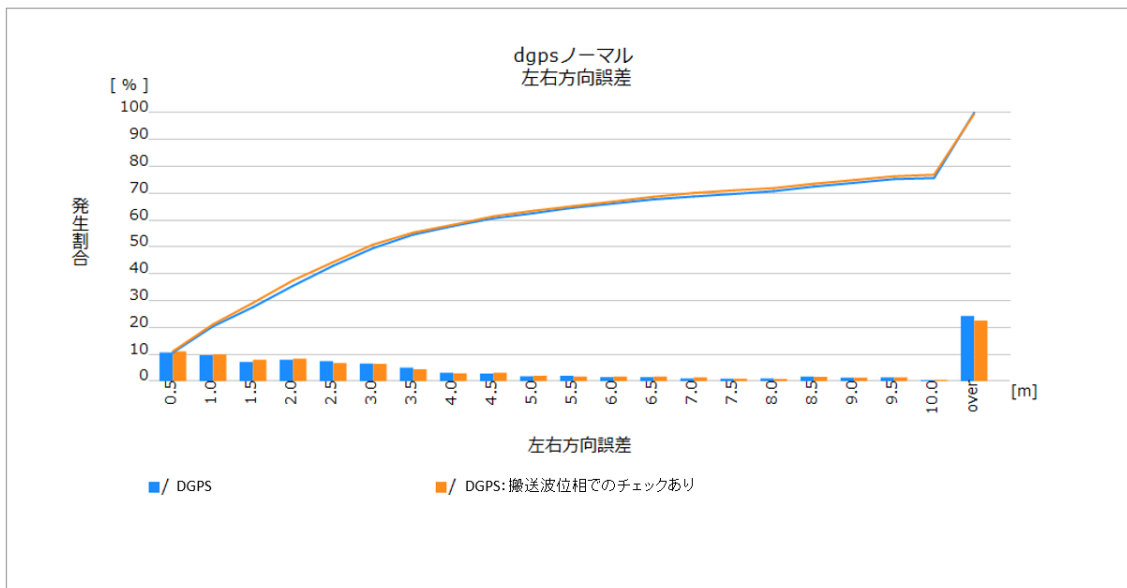


図 7.1.3-3 搬送波位相チェックによる左右方向誤差の発生率

7.1.3.2 信号レベルの利用

搬送波位相チェックに加えて、信号レベルが減衰していると思われるものを除くことによるマルチパスの低減効果を検討した。

信号レベルチェックを加えることで、左右方向誤差 1.0m 以内が 28.46%、1.5m 以内が 38.92%と 8%~10%程度の改善がみられた。

表 7.1.3-2 搬送波位相および信号レベルのチェックの有無による
測位率及び左右方向の測位精度

	測位率	RMS[m]	0.5m 以内	0.5~1m	1~1.5m
チェックなし	99.91%	12.6755	10.68%	9.75%	7.15%
チェックあり	97.48%	5.2771	14.12%	14.34%	10.46%

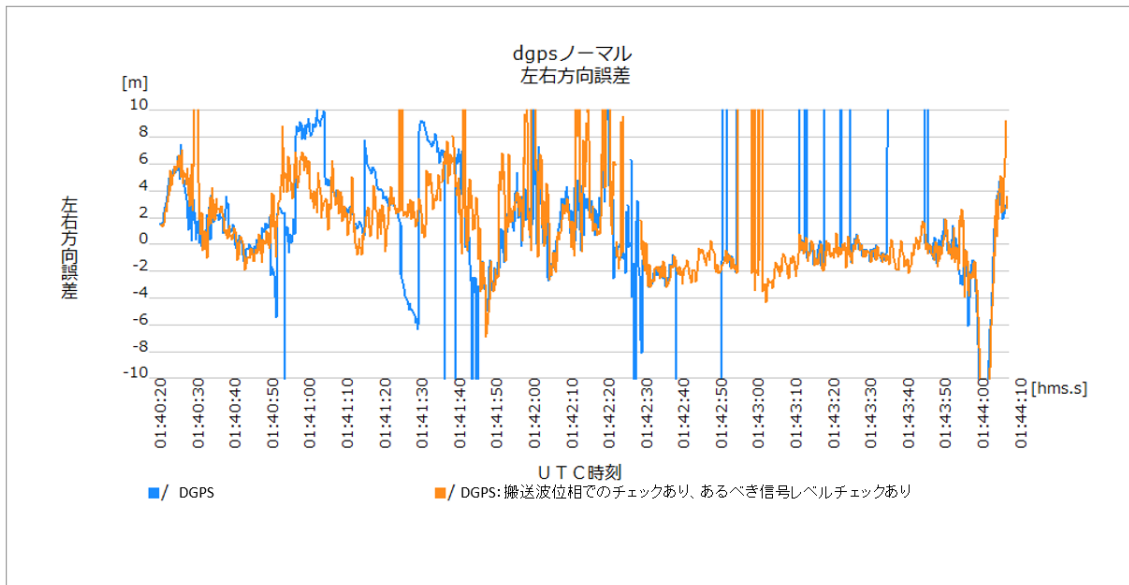


図 7.1.3-4 搬送波位相チェック、信号レベルチェックによる左右方向誤差

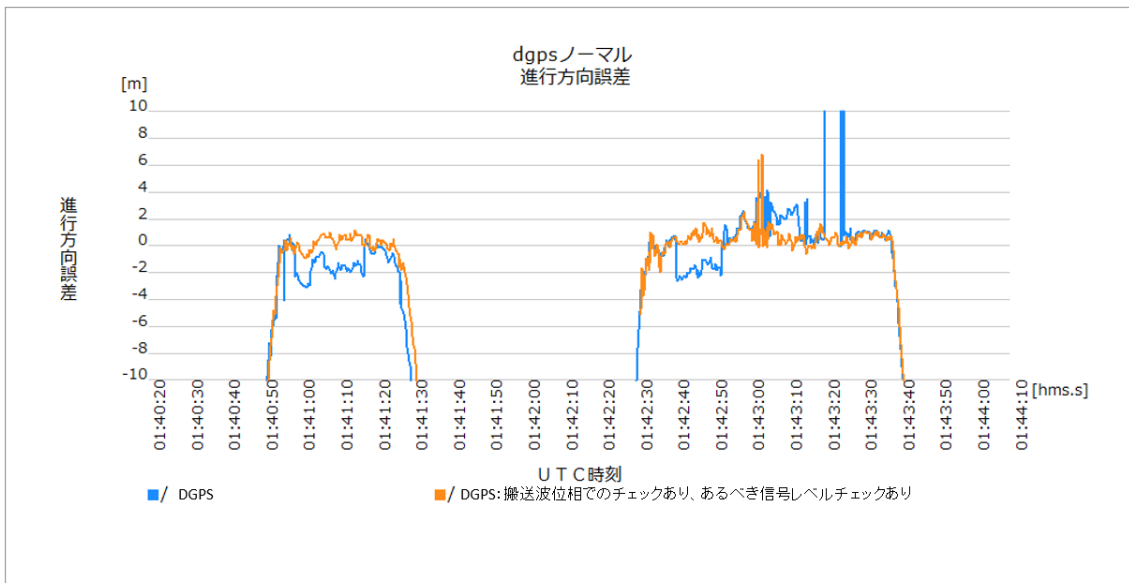


図 7.1.3-5 搬送波位相チェック、信号レベルチェックによる左右方向誤差

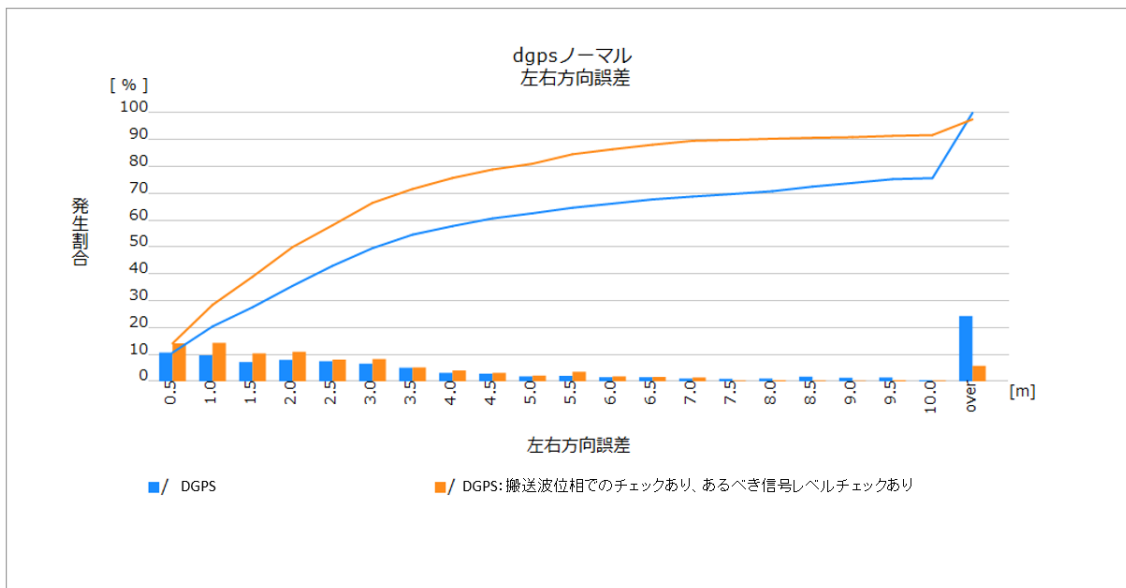


図 7.1.3-6 搬送波位相チェック、信号レベルチェックによる左右方向誤差の発生率

マルチ GNSS による衛星数の増加を前提とした衛星除去による測位精度改善は一定の効果があるが、自動走行／走行支援において利用可能なレベルまでは達しなかった。

7.1.4 ドップラー支援を利用した低減手法の検討

ドップラー周波数は衛星測位において疑似距離や搬送波位相に次いで重要な観測値である。ドップラー周波数は疑似距離に比べ、マルチパスによる影響を受けにくい。

ドップラー支援による測位性能の向上評価は、RTK 方式で銀座周辺のデータで行った。

マルチパスによる疑似距離の値が正しく得られないことにより RTK では測位解を得られなくなるが、ドップラーを利用した測位解を与えることで、測位率はドップラー支援無しの 51.54%から約 40%増の 92.41%となった。またドップラー支援により測位精度も向上し、ドップラー支援無しが左右方向 RMS2.28m、ドップラー支援有りが 2.07m となった。ただし、ドップラーを利用した測位は累積誤差を生じるため連続で使い続けると精度劣化を生じる。正しい衛星測位による位置補正も合わせて利用していく必要がある。

表 7.1.4-1 ドップラー支援の有無による測位率及び左右方向の測位精度

	測位率	RMS[m]	0.5m 以内	0.5~1m	1~1.5m
支援なし	51.54%	2.2761	30.67%	3.93%	2.74%
支援あり	92.41%	2.0674	57.41%	7.24%	5.69%

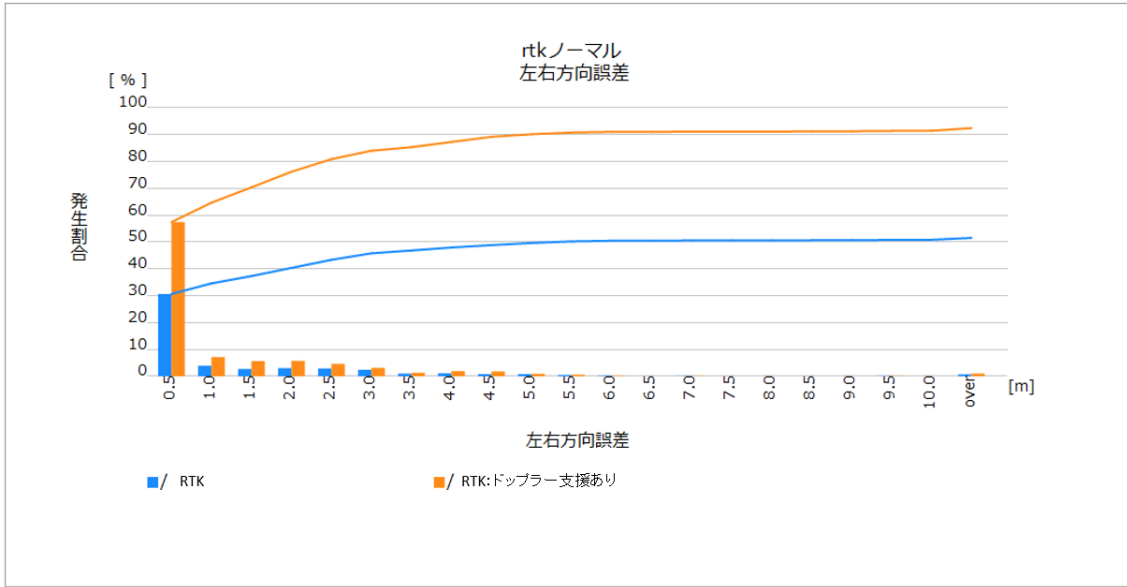


図 7.1.4-1 ドップラー支援による左右方向誤差の発生率

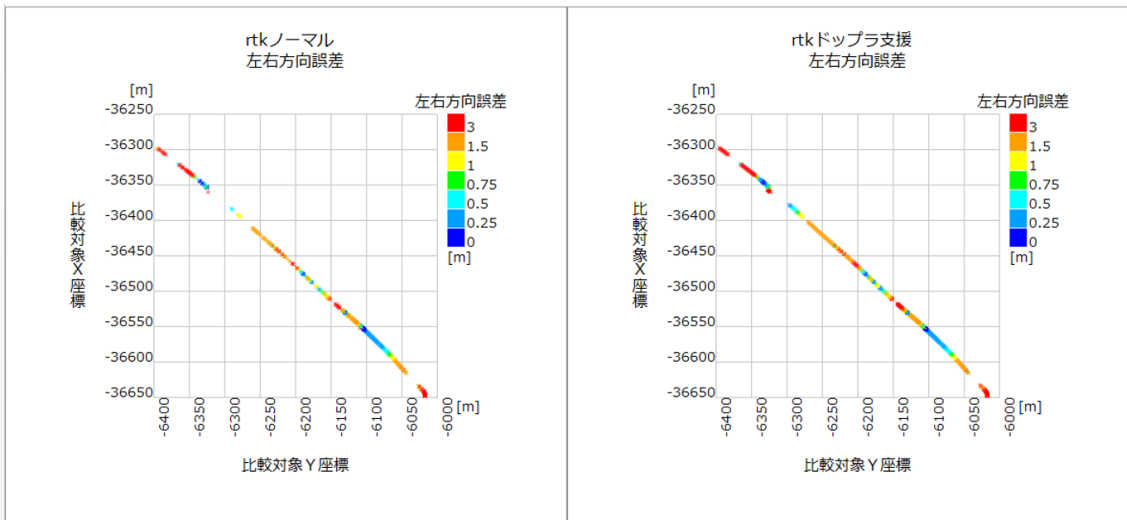


図 7.1.4-2 ドップラー支援による走行軌跡(左右方向誤差)

7.2 新しい信号

7.2.1 L5 信号の評価

L5 信号は GPS の最新機種である GPS ブロック II F および準天頂衛星から送信されている、新たな民生用測距信号である。また Galileo から同じ周波数の E5a 信号が送信されており GPS との併用が可能である。

L5 信号は疑似距離測定精度が高く、SN 比も L1 に比べて高い。また衛星測位の信頼性向上にもつながる。GPS は L1C/A の他に、主に軍事用に用いられる L2P/Y 信号も発信しているが、L2P/Y は L1C/A を経由しなければ捕捉、受信できないという制約があり、L1C/A に何らかの問題

が発生した場合、L2P/Y も使用不能に陥ってしまうことになる。そうなると世界中の GPS 受信機は測位不能になってしまうが、L5 信号があれば受信機は測位を続けることができる。

上記のような理由のため大きな期待が寄せられる。

GPS はブロック II R-M 以降の衛星から L2C という信号を発信しているが、技術的理由で測距精度が低いため、一般的にはあまり使われていない。

本調査では後処理解析で L5 によるコード測位を試み、その可用性と測位結果の評価を行った。コースは都市間高速(2)、中でも GPS+QZSS+Galileo で測位可能だった 10 回目の走行の復路を評価対象とした。

7.2.2 L5 信号の可用性

L5 信号は新たな測位信号であるが故、L5 を発信している衛星は多くはない。実験を実施した時点での L5 対応の衛星は以下の 18 機である。

表 7.2.2-1 L5 対応衛星(2015/10/29)

GPS	G01,G03,G06,G08,G09,G24,G25,G26,G27,G30
QZSS	J01
Galileo	E11,E12,E14,E18,E19,E22,E26

実際に疑似距離を観測でき航法メッセージを取得できたのは上表のうち、一部の衛星である。図 7.2.2-1 は評価コース走行時のある時刻における L5 対応衛星の配置である。衛星位置は IGS の精密暦によって算出した(仰角マスク 15°)。

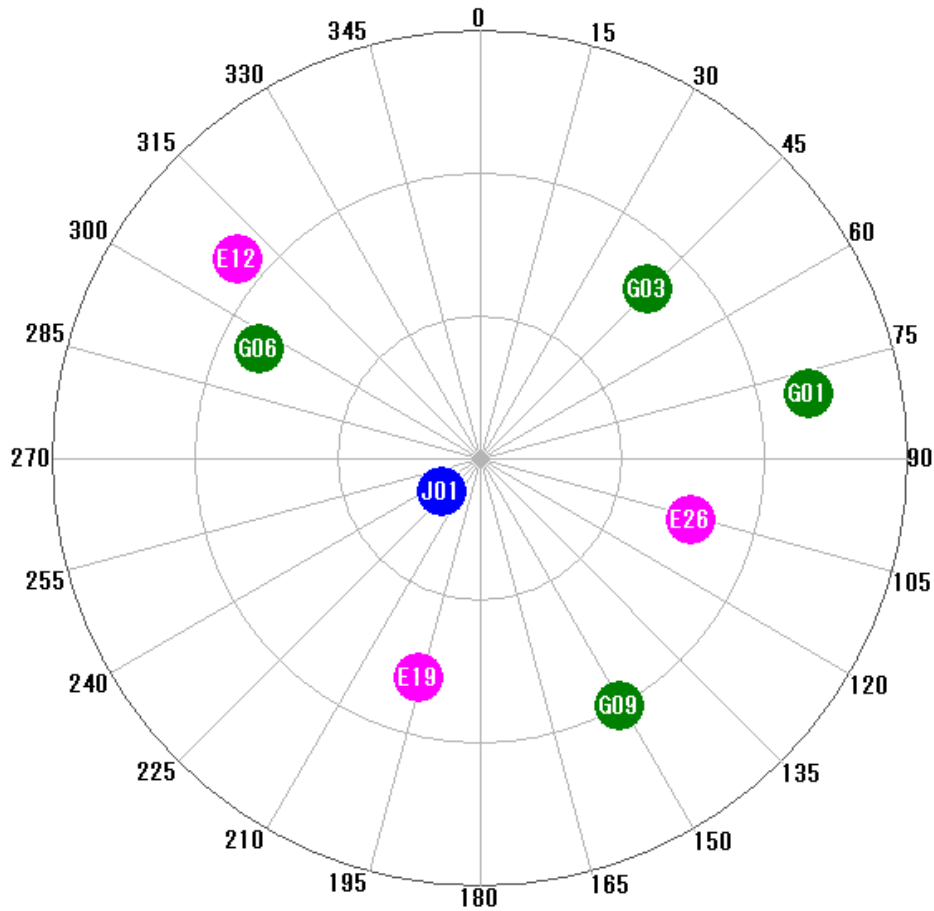


図 7.2.2-1 精密暦による衛星の配置

図 7.2.2-1 によると GPS が 4 機、QZSS が 1 機、Galileo が 3 機となっている。実際の測位計算では、航法メッセージが取得できていない場合や、何らかの遮蔽により信号を捕捉できない場合、疑似距離誤差が大きすぎるため計算対象から外される場合などがあり、測位に使用できる衛星数はさらに減少する。事実、評価対象のデータで測位計算を行うと、L5 の疑似距離が観測されているにもかかわらず、計算に使用されない衛星がいくつかあった。

その結果評価コースにおける、測位率は約 64%であった(観測データのロギング用 PC の不調により、コースの途中で観測データが途切れていたため、測位率の計算は観測が正常に行われていた時間を対象とした)。L1 によるコード測位の測位率と比べるとかなり低い値となっている。

本調査では、各衛星の L5 の SN 比が異常に低い値が出力されていた。そのため、疑似距離誤差が大きくなり測位できない箇所が増えたと考えられる。

前述したとおり、L5 信号は SN 比が高いことが特徴であるため、原因の調査が必要である。

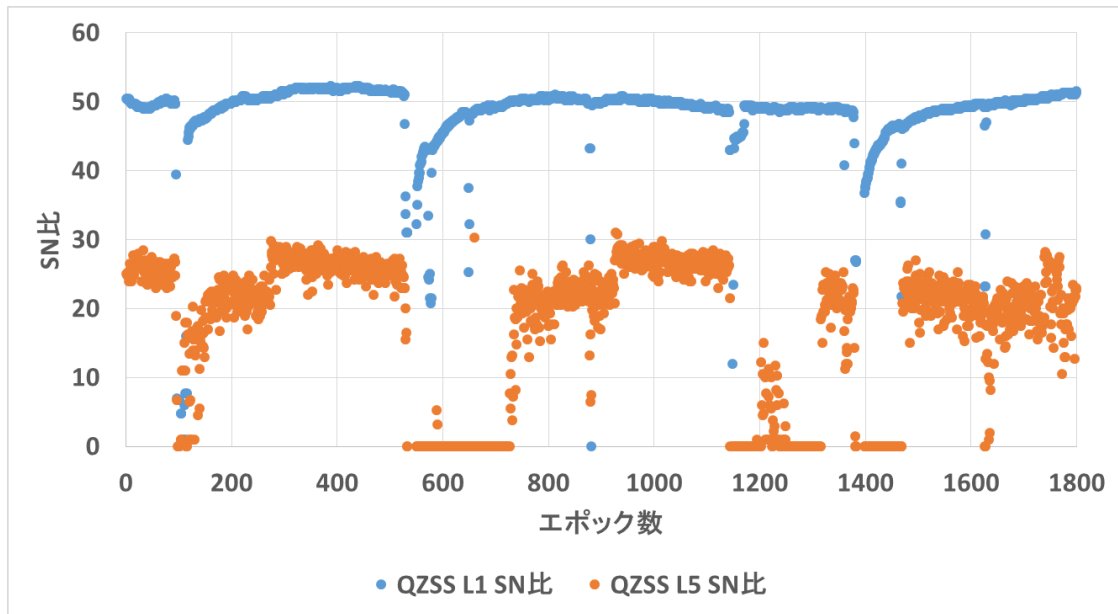


図 7.2.2-2 QZSS L1/L5 SN 比

7.2.3 L5 信号の測距精度

前述したとおり、L5 は L1C/A に比べて測距精度が向上している。その測距精度を確認するため、精密暦から求めた衛星位置と車両位置から、真の衛星との距離を算出し、L1C/A および L5 による疑似距離観測値と比較し、疑似距離の誤差を求めた。信号そのものの測距精度と関係のない、対流圏遅延量、電離層遅延量、受信機時計誤差、衛星時計誤差は除去している。次の図は、L1C/A の疑似距離誤差と L5 の疑似距離誤差の差分である。差分が正の値の場合は L5 の疑似距離誤差の方が小さくなる。衛星は GPS、QZSS、Galileo から観測された回数が多いものをそれぞれ1つずつ選択した。

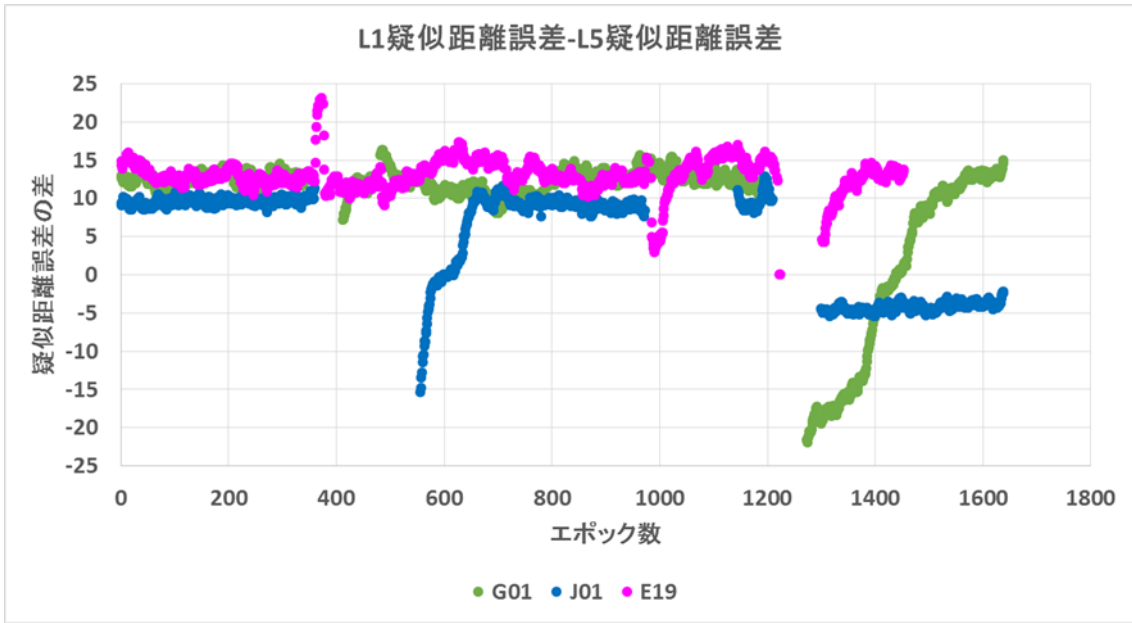


図 7.2.3-1 疑似距離誤差の差分

図 7.2.3-1 から、一部の区間を除いて概ね L5 の疑似距離誤差の方が小さいことがわかる。

7.2.4 L5 信号による測位

L5 信号によるコード測位は L1C/A の場合と同じく、観測された疑似距離と航法メッセージによって計算することができるが、電離層遅延量は搬送波の周波数に依存するため特別な処理が必要である。

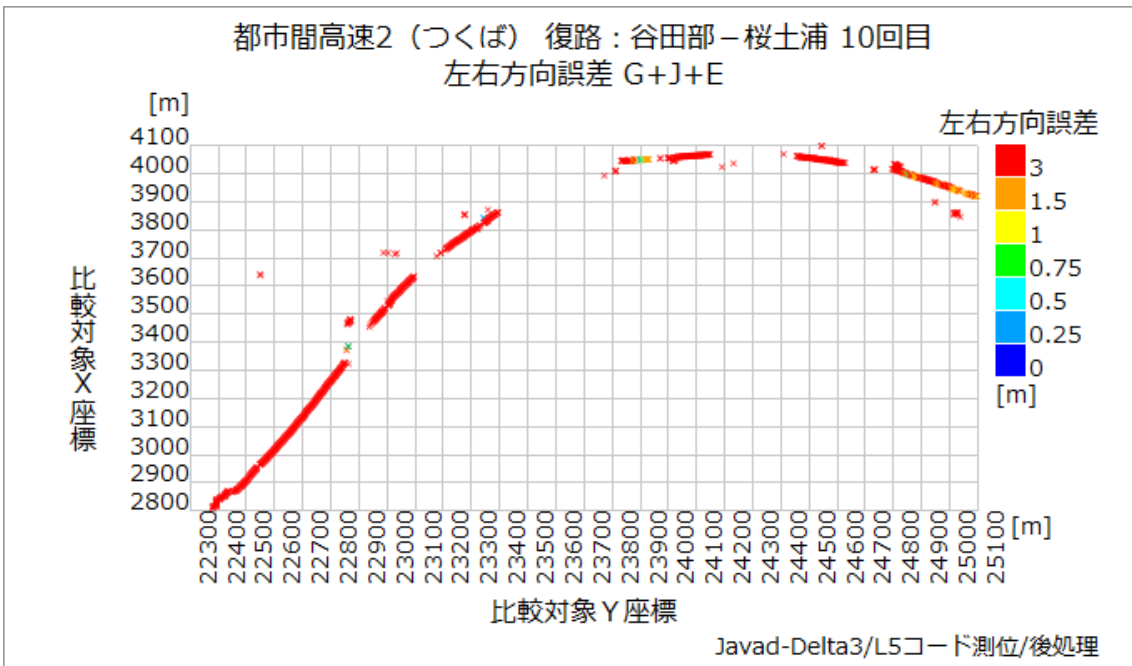


図 7.2.4-1 L5 コード測位左右方向誤差走行軌跡

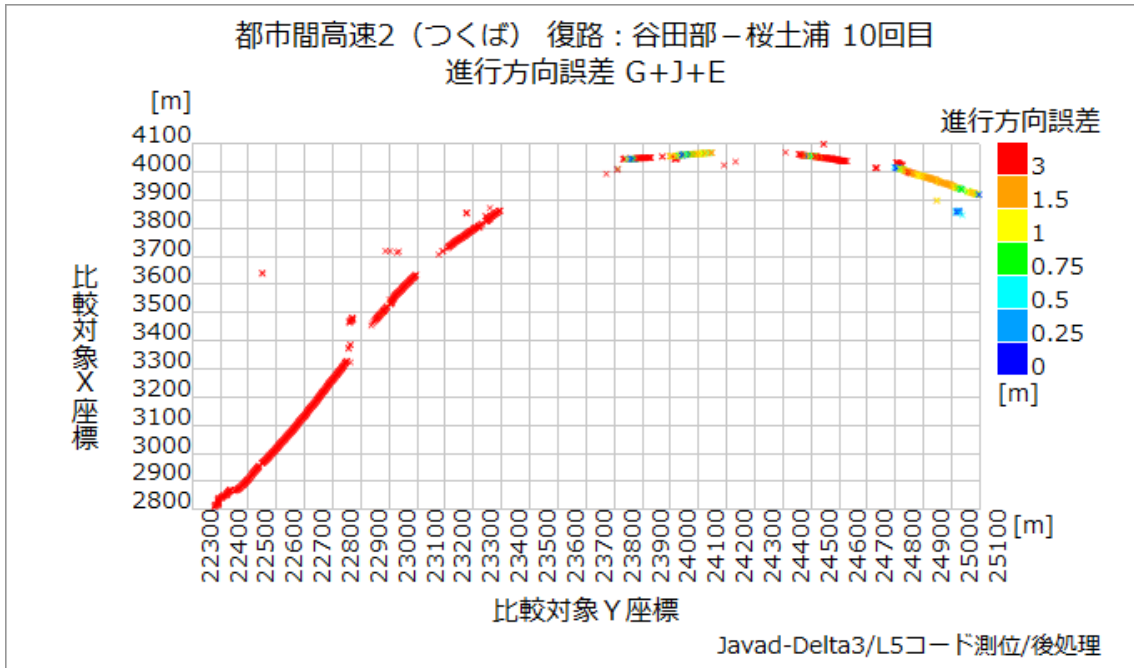


図 7.2.4-2 L5 コード測位進行方向誤差 走行軌跡

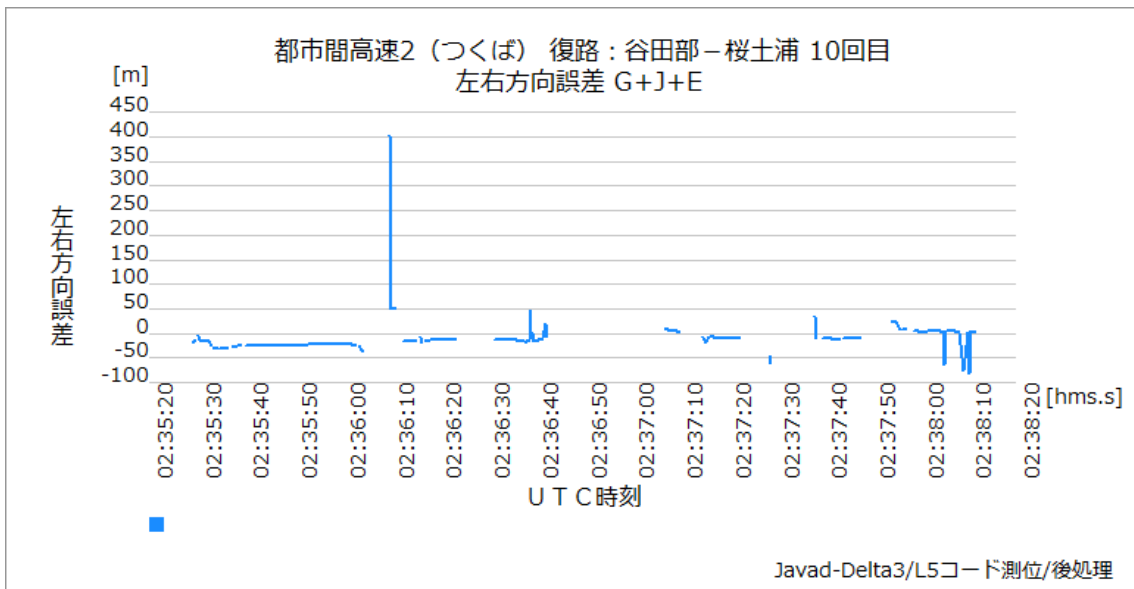


図 7.2.4-3 L5 コード測位左右方向誤差

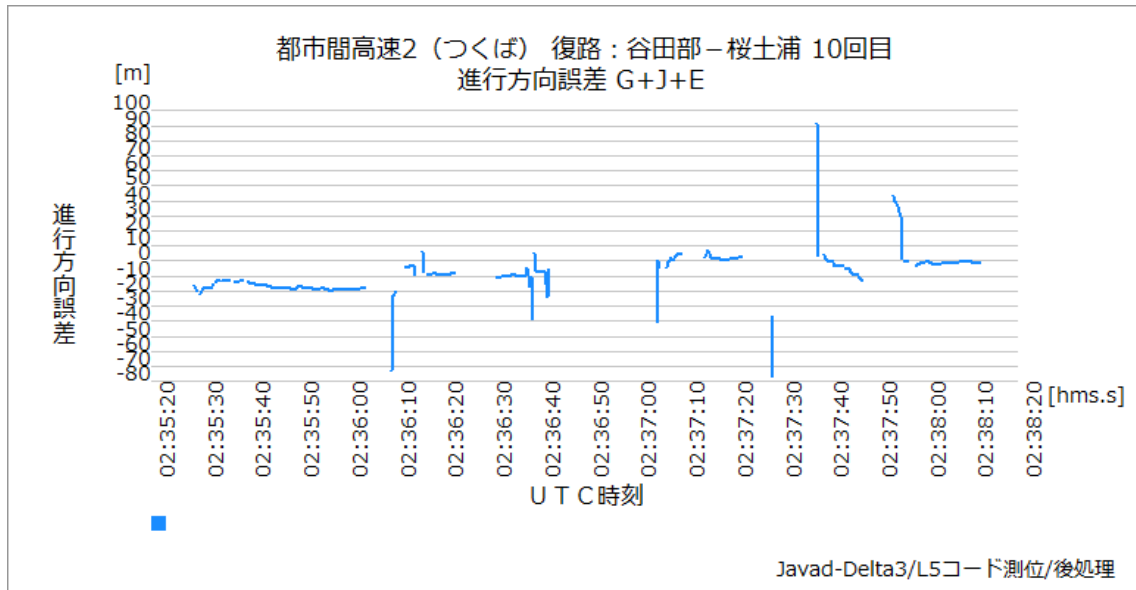


図 7.2.4-4 L5 コード測位進行方向誤差

評価結果のグラフを確認すると測位精度はかなり低い。前述したような SN 比の異常のため疑似距離の誤差が大きくなり、このような結果になったと考えられる。

L5 信号については今後も継続的に調査を行う必要がある。

8 まとめと課題

8.1 本調査で判明したこと

- 都市間高速での衛星測位の可用性について
 - カーナビ等で利用されている従来のコード測位（単独測位）では難しかった車線認識は、補強情報（DGPS または L1-SAIF）を利用する事で測位精度が改善され、コード測位でも可能であることが判明した。
 - ◇ コード測位の補強信号である L1-SAIF と DGPS は、ほぼ同じ精度となった。
 - 2周波コード測位の効果は見られなかった。日本上空の様に比較的電離層が安定している地域では、電離層遅延量のみ除去しても精度があまり変わらないことと、2周波を必要とすることで若干測位率が下がっていることが要因と思われる。
 - 1.0m 以内の測位精度を必要とする場合は、搬送波位相相対測位を利用する必要がある。
 - ◇ 従来の RTK 方式では固定局との通信が必要となるが、CMAS あるいは MADOCA-PPP の様な配信型の補強情報が利用可能になることで、移動体における搬送波位相相対測位の導入への敷居は大きく下がった。
 - ◇ MADOCA-PPP は AR および local 補正を利用する事で、従来の課題であった収束速度が大幅に改善され、測位率、測位精度の向上につながった。
 - 都市間高速等であっても、橋梁、法面等の遮蔽により、測位不能または測位精度が低下する箇所も存在する。そのため衛星測位のみで常に正しい位置情報を得ることは困難であった。
 - ◇ 他の情報（センサ、地図等）を併用活用することで情報補完を行い利用する必要がある。
- 都心一般道におけるマルチパスについて
 - 受信機のみでも、観測情報を利用する事で測位率、測位精度の改善が確認できた。しかし、受信機のみでの性能向上には限界がある。
 - ◇ 搬送波位相、信号レベル、見通し衛星等による衛星選択は、マルチ GNSS を利用する事で大きく測位率を下げることなく測位精度の改善が図れたが、マルチパスの影響除去には限界があった。
 - ◇ ドップラー支援による測位改善は測位率の向上に大きく寄与したが、累積誤差が発生するため、利用には制約がある。
 - 完全遮蔽からの復帰はスムーズであり、マルチ GNSS を利用する事で測位復帰時間は短縮される。一方完全遮蔽の区間に入る際に部分的な遮蔽によりマルチパスの影響を受けやすい。
 - 電波伝搬シミュレータによる見通し衛星の判別は可能であるが、毎回計算するこ

とはコスト的に困難。3次元地図情報を利用した衛星フィルターを作成し、衛星選択の新たなアルゴリズムを検討した。

- その他
 - QZSS の航法メッセージに含まれる電離層補正パラメータは性能が高く、利用することで電離層遅延を補正するのに有効である。(日本上空)
 - 低緯度地域での電離層擾乱は大きく、測位性能に大きな影響を与えるため、東南アジアをはじめとした低緯度地域では電離層対策は重要となる。
 - ◇ QZSS の電離層補正パラメータが日本だけでなく低緯度地域でも利用可能になれば、測位性能向上が期待できる。
 - L5 信号は整備過程のため、想定とは異なり L1C/A 信号より低い受信強度となった。ただし、ビットレートの効果として疑似距離は L1C/A より精度が高い値が得られた。

8.2 課題

- 都市間高速での可用性
 - 地上環境による測位率、測位精度劣化箇所は位置情報として扱えるため、空間情報と併用して衛星測位情報を利用する技術の検討が必要。
 - 補強信号の地上配信は配信方法も含めて検討を行う必要がある。
 - 衛星測位の性能と同時に、利用のためには測位信頼性が重要となる。このため測位信頼性や測位精度阻害に対する調査、検討が必要。
- マルチパス対策
 - 受信機のみでのマルチパス対策には限界があるため、他の情報(センサ、地図等)との併用または組み合わせることによる測位率、測位精度向上に向けた調査、検討が必要。
- 電離層遅延対策
 - 電離層擾乱の大きい地域での調査検証が必要。2周波コード測位や DGPS による測位改善の確認を実施する必要がある。
- 衛星システムのアップグレードに伴う継続的な調査
 - GPS、BeiDou、GLONASS、Galileo は今年度に複数機の測位衛星が軌道投入されている。実用準天頂衛星も含め 2020 年までに衛星測位システムは大きくアップグレードされていく計画となっている。このような各システムの測位性能の変化を継続的に調査する必要がある。

9 参考資料

9.1 各国の衛星測位システムとその動向

9.1.1 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 II F 衛星を含め、32 機が衛星軌道に投入され、その内 30 機が運用されている。基本的な衛星配置は、地上約 20,200km 上のほぼ円軌道を 12 時間周期でまわり、6 軌道に各 4 機、つまり 24 機配置されている。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。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、これは軌道と衛星時計の誤差や電離層と対流圏の遅延が含まれる。GPS の SIS-URE は年々改善されている。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、今後は 2016 年に新たなブロック III を打ち上げ、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予定である。

9.1.2 QZSS

準天頂衛星 (QZS: Quasi-Zenith Satellite) システムは日本の地域航法衛星システムで、GPS の補完・補強を主な目的としている。2010 年には初号機「みちびき」が打ち上げられ、現在は実証実験中である。QZS は他の測位衛星よりもはるかに高い高度約 32,000km~40,000km 上空を特殊な準天頂軌道 (対地同期軌道の一種) を描いて静止軌道と同じ周期 (約 23 時間 56 分) で周回しており、日本の上空に長く滞在できるように設計している。軌道は 8 の字を描き、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。

インターフェース管理文書 (ICD: Interface Control Document) に表記されている SIS-URE は GPS に依存するため 2.6m (95%) であり、RMS も約 0.36m 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&センチメータ級のサービス、簡易メッセージ機能を使った災害通報などがある。今後は 2017 年に 3 機打ち上がり、4 機体制となった 2018 年からオープンサービスが開始され、2023 年度には 7 機体制になる予定である。

9.1.3 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、名目周期 11 時間 15 分 44 秒で高度 19,100km を円軌道で周回している。衛星は 3 軌道上に 8 機で計 24 機配備され、その内 3 機は予備衛星である。現在は 2016 年 2 月 7 日 (JST) に打ち上げられた GLONASS-M 衛星を含め、28 機が衛星コンステレーションに投入され、22 機が運用状態である。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、1.8m 程度で GPS の約 0.8m と比べると 1m ほど高いが、ICD 内に記載されている 3.7m よりも低く、年々下がっている。今後は 2011 年に打ち上げられた現在試験中の 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。

9.1.4 BeiDou

BeiDou は中国の衛星測位システムで、初号機が 2007 年に打ち上げられ、現在は 2016 年 2 月 1 日 (JST) に打ちあがった 21 号機を含め、軌道に投入されている衛星は 19 機となる。衛星軌道は中軌道 (MEO: Medium Earth Orbit)、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 は上空 21,528km、GEO と IGSO は上空 35,786km に配置され、グローバル対応になる 2020 年の完全運用には 35 機体制となる計画である。オープンサービスでの SIS-URE は 95% の確率で 2.5m 以下である。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、測位精度の向上が期待される。

9.1.5 Galileo

Galileo は EU 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、概念設計終了時には相互運用可能な独自のシステムとなっている。初号機は 2005 年に打ち上げられ、2015 年 12 月 17 日 (JST) に 2 機打ち上げられたのを最後に現在は 12 機となっている。衛星は 23,222km 上空の 3 つの MEO 面に投入され、2016 年に初期運用、2020 年には 30 機 (6 機は予備機) 体制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) 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。

9.1.6 IRNSS

インドの独立した地域航法衛星システムで、衛星コンステレーションは全 7 機で構成され、うち 3 機は GEO、4 機は対地同期軌道 (GSO: Geosynchronous orbit) に投入される。2013 年に初号機が打ち上がり、2016 年 1 月 20 日 (JST) の打ち上げ成功により、現在は 5 機になっている。2016 年には全 7 機の配備が完了する予定である。精度に関してはインド洋周辺で 20m、インド主要部で 10m 程度となる見込みである。

9.1.7 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へ送信するため、測位精度の向上が見込まれる。
各国の SBAS として米国の WAAS や欧州の EGNOS、日本の MSAS などがある。

9.2 測位方式

9.2.1 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 (modulation) 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、システム毎に全ての衛星が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、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 L1C/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。

$$\phi(t) = E[p(t)p(t + \tau)] \quad (9.2.1-1)$$

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、

$$\phi(t) = \begin{cases} \sigma^2 & (\tau = 0) \\ 0 & (\tau \neq 0) \end{cases} \quad (9.2.1-2)$$

(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。

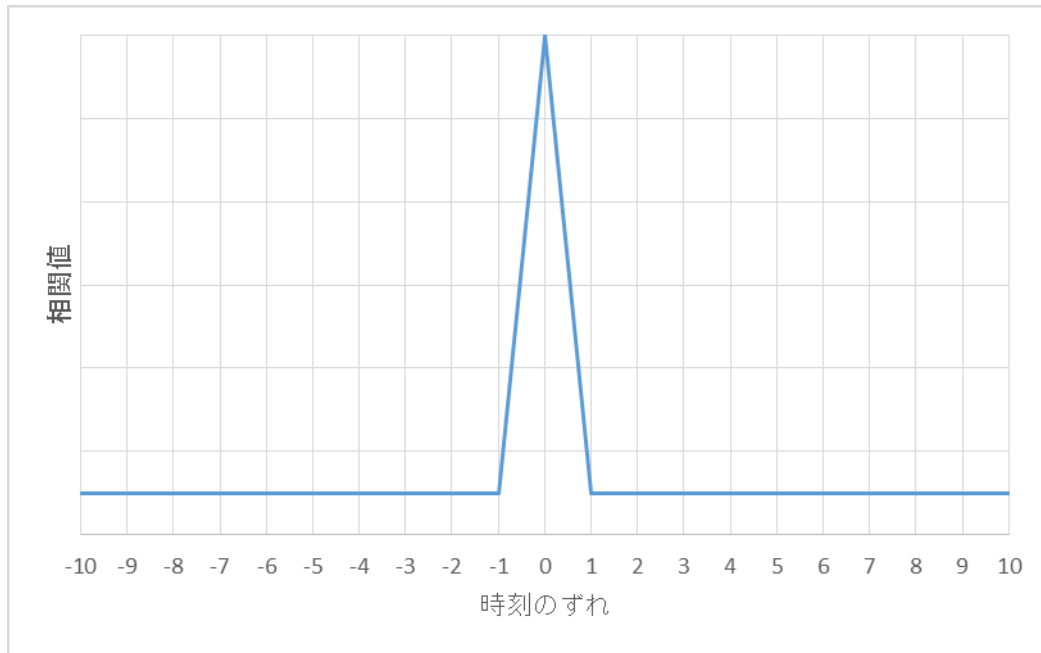


図 9.2.1-1 自己相関

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 符号パターンのことを「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。

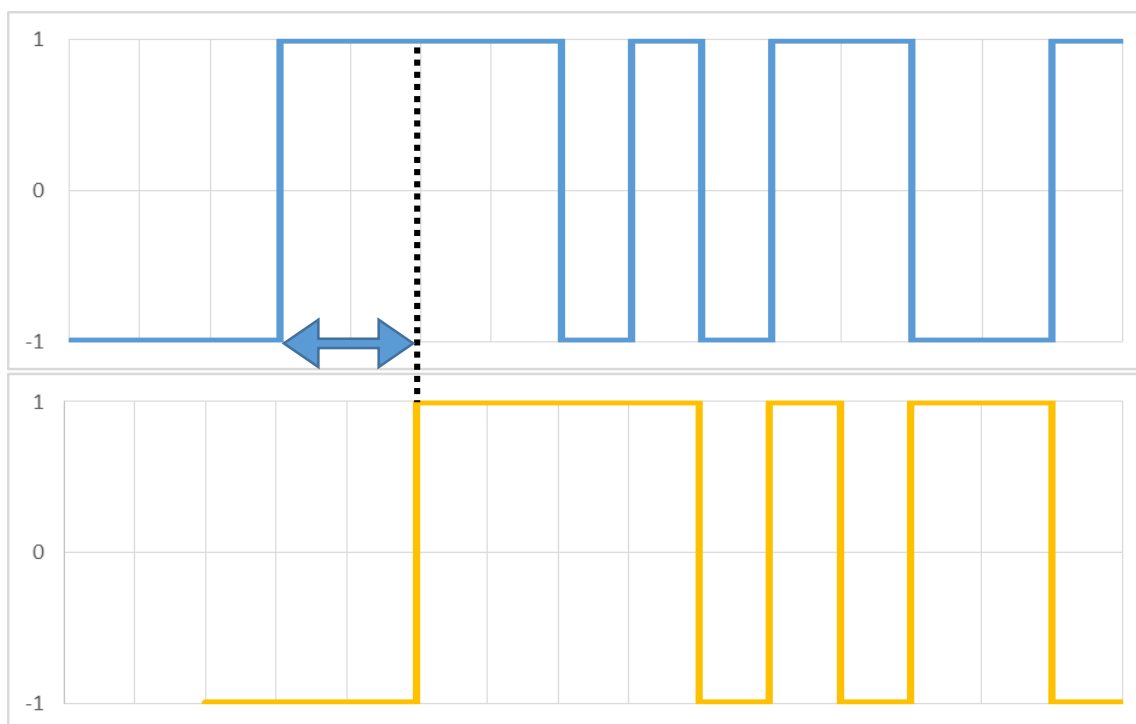


図 9.2.1-2 受信コード(上)とレプリカコード(下)

■ 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 9.2.1-1 例:GPS のエフェメリス

$IODE$	衛星軌道情報場号
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

また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。

9.2.2 1 周波コード測位

1 周波コード位相測位は、衛星測位において最も基本的な測位方式である。前節で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。

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t) &= R_r^s(t) + c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta lon + \Delta Trop \\ R_r^s(t) &= \sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} \end{aligned} \quad (9.2.2-1)$$

$\rho_r^s(t)$: 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

Δlon : 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。 Δlon 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。

(9.2.2-1)を解くにはテーラー展開によって線形化する。

$$\begin{aligned} \rho_r^s(t) - \Delta Ion - \Delta Trop \\ = R_{r0}^s(t) - \frac{X^s(t) - X_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta X_r - \frac{Y^s(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta Y_r \\ - \frac{Z^s(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^s(t)} \Delta Z_r + c \Delta T_r \end{aligned} \quad (9.2.2-2)$$

行列表示

$$l = Ax$$

$$l = \begin{bmatrix} \rho_r^1(t) - \Delta Ion^1 - \Delta Trop^1 \\ \rho_r^2(t) - \Delta Ion^2 - \Delta Trop^2 \\ \vdots \\ \rho_r^n(t) - \Delta Ion^n - \Delta Trop^n \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{X^1(t) - X_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & -\frac{Y^1(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & -\frac{Z^1(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^1(t)} & c \\ -\frac{X^2(t) - X_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & -\frac{Y^2(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & -\frac{Z^2(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^2(t)} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X^n(t) - X_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & -\frac{Y^n(t) - Y_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & -\frac{Z^n(t) - Z_{r0}}{R_{r0}^n(t)} & c \end{bmatrix} \quad (9.2.2-3)$$

$$x = \begin{bmatrix} \Delta X_r \\ \Delta Y_r \\ \Delta Z_r \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

$R_{r0}^s(t), X_{r0}, Y_{r0}, Z_{r0}$: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

(9.1.2-5)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。

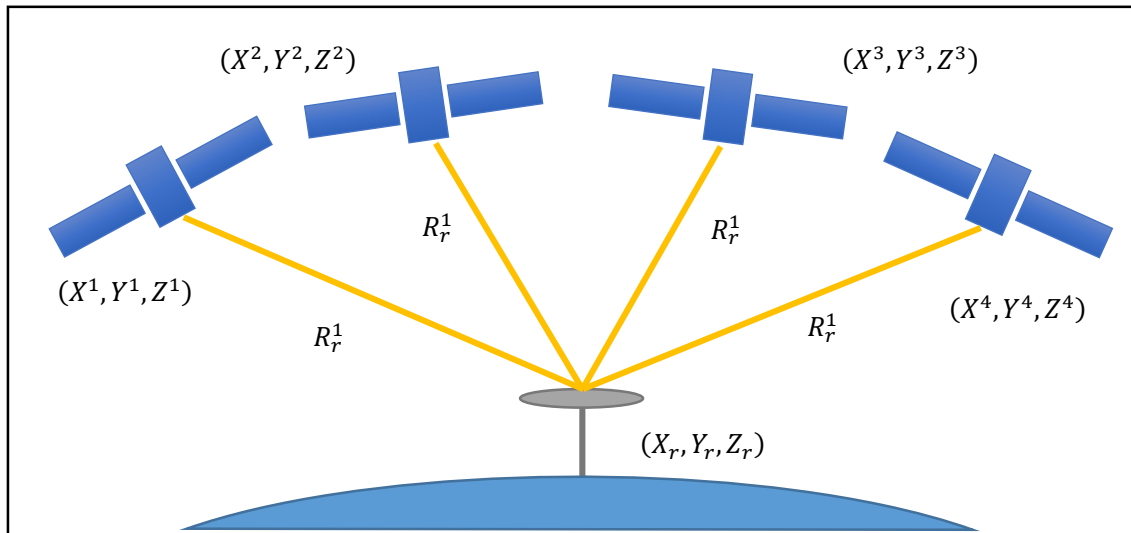


図 9.2.2-1 コード測位

また、搬送波位相も同時に観測されている場合「キャリアスムージング」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 2 周波搬送波位相相対測位の項で述べるが、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バラつきが少ない。しかし真の距離と一定のバイアス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バラつきは大きい、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。

9.2.3 2 周波コード測位

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。

(9.2.2-1)について周波数に関する項をまとめると、

$$\rho_r^s(t) = R_r^s(t) + \Delta Ion + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \quad (9.2.3-1)$$

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。

$$\begin{aligned} \rho_{r1}^s(t) &= R_{r1}^s(t) + \Delta Ion_1 + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \\ \rho_{r2}^s(t) &= R_{r2}^s(t) + \Delta Ion_2 + (c\Delta T^s + c\Delta T_r + \Delta Trop) \end{aligned} \quad (9.2.3-2)$$

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。

$$\rho_{r_1}^s(t) - \rho_{r_2}^s(t) = \Delta Ion_1 - \Delta Ion_2 \quad (9.2.3-3)$$

ここで電離層遅延量は定数 A と周波数 f_i を用いて

$$\Delta Ion_i = \frac{A}{f_i^2} \quad (9.2.3-4)$$

であるから

$$\Delta Ion_2 = \frac{f_1^2}{f_2^2} \Delta Ion_1 \quad (9.2.3-5)$$

となり

$$\Delta Ion_1 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\rho_{r_2}^s(t) - \rho_{r_1}^s(t)) \quad (9.2.3-6)$$

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除去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。

9.2.4 L1-SAIF (1周波コード位相測位)

サブメータ級測位補強

準天頂衛星システムが放送する測距信号のうち、サブメータ級の補強信号である L1-SAIF (Submeter-class Augmentation with Integrity Function) は、ICAO (国際民間航空機関) による補強信号の国際標準規格 SBAS (Satellite-Based Augmentation System: 静止衛星型衛星航法補強システム) をベースとして、広域ディファレンシャル補正情報を提供するものである。特徴としては以下のような点が挙げられる。

① 単独測位

1 台の L1 1 周波数対応受信機でサブメータ級の測位ができ、ユーザ側では基準局受信機は不要である。

② 広範囲で利用可能

ユーザ測位精度の地域依存性が少なく、日本全国で利用できる。

③ GPS L1 信号との親和性

GPS L1 信号と同一の周波数及び変調方式にて放送されるので、受信機フロントエンド及びアンテナは共用できる。

信号形式

L1-SAIF 信号は GPS と同一の L1 周波数 (1575.42 MHz) にて準天頂衛星 QZS-1 より放送されており、GPS と同じ 1.023 Mcps の C/A コードによる拡散変調方式が採用されている。PRN 番号

の割当ては表 9.2.4-1 のとおりで、QZS-1 の L1-SAIF 信号は PRN183 である。

補強情報の符号化方式は SBAS と同一である。すなわち、データ速度は GPS の 50 bps に対して 250 bps と高速化されている。すべての L1-SAIF メッセージは図 9.2.4-1 のように 250 ビットから構成されており、毎秒 1 メッセージが放送される。メッセージの先頭ビットの送出タイミングは、GPS のサブフレーム(6 秒毎)先頭に一致する。

L1-SAIF メッセージには 0~63 のタイプが定義されており、それぞれのフォーマットに従って補正情報が收容される。タイプ 0~28、62~63 は SBAS と同一の基本メッセージであり、ディファレンシャル補正情報は高速補正、長期補正、電離層遅延補正に分けられ、それぞれ衛星クロック(変化の速い成分)、衛星軌道及びクロック(変化が遅い成分)、電離層伝搬遅延の補正に用いる。タイプ 52~60 は L1-SAIF 独自の拡張メッセージで、大気遅延補正の高精度化や QZS 自身の軌道情報を放送する実験に用いる。

L1-SAIF 信号の詳細な仕様は、他の補完信号とともに IS-QZSS として規定されている。IS-QZSS には、信号形式及びメッセージ内容の定義に加えて、ユーザ受信機側の処理アルゴリズムも記載されている。これは補正情報の利用手順をあらかじめ詳細に定めることで補正情報の解釈に起因する誤りを防止するためで、GPS IS や SBAS SARP s とも同様である。以上のとおり、L1-SAIF 信号の RF 形式及び変調方式は GPS と同一、メッセージ形式は SBAS と同一となっており、その関係はのように表される。

表 9.2.4-1 準天頂衛星 L1 周波数の PRN 番号

PRN	信号名	衛星
183~187	L1-SAIF	QZS #1~5
188~192	L1-SAIF	予備
193~197	L1 C/A	QZS #1~5
198~202	L1 C/A	予備

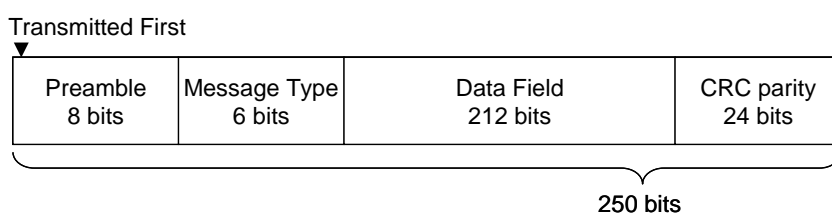


図 9.2.4-1 L1-SAIF メッセージの伝送フォーマット

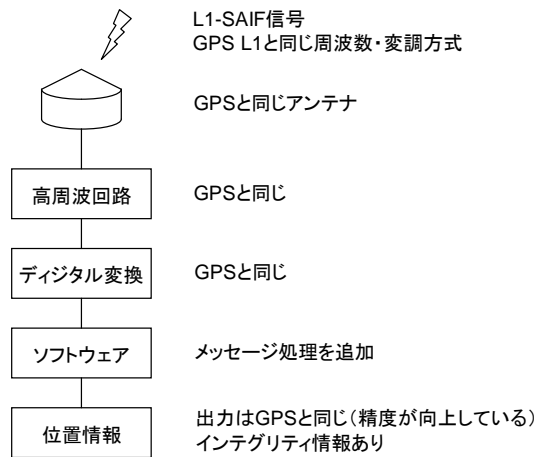


図 9.2.4-2 L1-SAIF と GPS の共通性

L1-SAIF 実験局

準天頂衛星が放送する L1-SAIF 信号に乘せられる補強メッセージについては、L1-SAIF 実験局 (L1SMS:L1-SAIF Master Station)にて生成される。L1SMS が生成したメッセージは JAXA 筑波宇宙センターに設置されている準天頂衛星の主制御局 (MCS:Master Control Station)に送信され、MCS により準天頂衛星にアップリンクされる。

L1SMS による補強メッセージの生成には、サービスエリア内の複数地点における GNSS 測定データが必要であり、このためには通常は国土地理院の電子基準点ネットワーク(GEONET)を利用している。

全体の構成は、図 9.2.4-3 のとおりである。L1-SAIF 実験局は GEONET の GNSS 測定データを受信・処理し、生成した補強メッセージを JAXA MCS に送信する。このメッセージは L1-SAIF 信号に乘せられてユーザに向けて放送される。

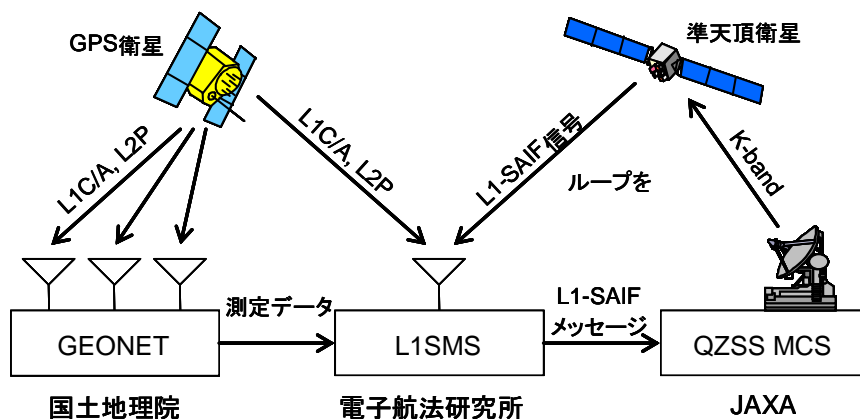


図 9.2.4-3 準天頂衛星補強系の全体構成

定点観測における L1-SAIF の結果

東京海洋大学構内建屋屋上にて取得した静止観測データと、当日の L1-SAIF による補強を施した場合の測位結果を図 9.2.4-4 に示す。評価対象時間帯は、2.3 項の C1 (市街地一般道) 走行日時のうちの T1 及び T2 の時間帯 (2014/12/13 の 03:00:00~04:06:12 及び 05:45:58~06:52:22 (UTC)) とし、使用している衛星システムは GPS、QZSS 及び GLONASS である。T1 及び T2 の時間帯での水平/垂直の RMS 値は、それぞれ 58.8 cm / 78.2 cm 及び 68.7 cm / 105.4 cm であった。

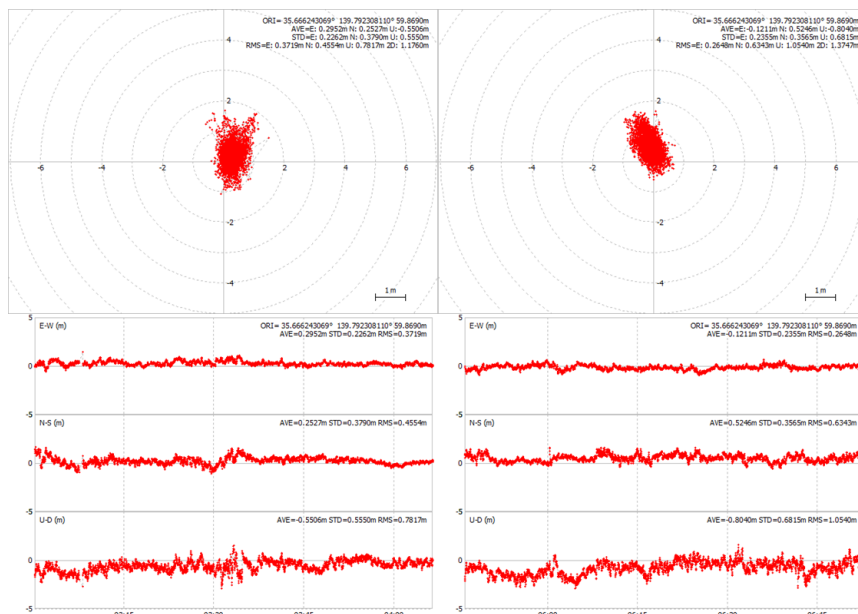


図 9.2.4-4 T1 (左)、T2 (右) における L1-SAIF 補強メッセージによる測位結果

9.2.5 DGPS (1 周波コード測位)

DGPS/DGNSS (ディファレンシャル GPS/GNSS) 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わかっている点 (= 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、それによって移動局側での測位結果を補正して精度を改善する。この補正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、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、それでもなお残る誤差が存在する。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が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。

1周波コード測位と同様に以下の式が得られる。

$$\rho_r^s(t) = R_r^s(t) + C_{DGPS} + c\Delta T_r \quad (9.2.5-1)$$

C_{DGPS} : DGPS 補正值

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、DGPS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。

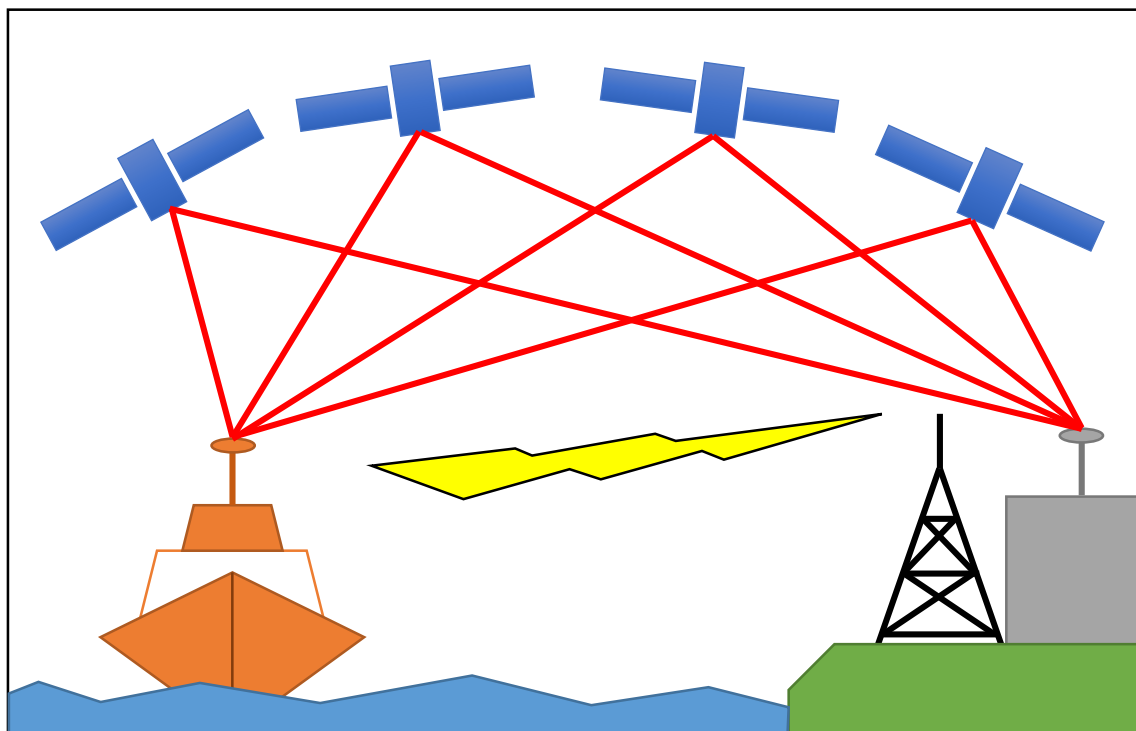


図 9.2.5-1 船舶用 DGPS サービスのイメージ

9.2.6 2 周波搬送波位相相対測位 (RTK)

RTK 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ある。搬送波位相の測定値に決められた波長をかけると、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、一方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。

$$\Phi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda} R_r^s(t) + N + f(\Delta T^s + \Delta T_r) \quad (9.2.6-1)$$

$\Phi_r^s(t)$: 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(9.2.6-1)式について、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。

$$\begin{aligned}\Phi_A^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_A^j(t) + N_A^j + f^j(\Delta T^j + \Delta T_A) \\ \Phi_B^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_B^j(t) + N_B^j + f^j(\Delta T^j + \Delta T_B)\end{aligned}\tag{9.2.6-2}$$

$$\Phi_A^j(t) - \Phi_B^j(t) = \frac{1}{\lambda_j} \{R_A^j(t) - R_B^j(t)\} + (N_A^j - N_B^j) + f^j(\Delta T_A - \Delta T_B)\tag{9.2.6-3}$$

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。

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^j(t) &= \frac{1}{\lambda_j} R_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \Delta T_{AB} \\ \Phi_{AB}^k(t) &= \frac{1}{\lambda_k} R_{AB}^k(t) + N_{AB}^k + f^k \Delta T_{AB}\end{aligned}\tag{9.2.6-4}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^j(t) - \Phi_{AB}^k(t) &= \frac{1}{\lambda} \{R_{AB}^j(t) - R_{AB}^k(t)\} + (N_{AB}^j - N_{AB}^k) \\ \Phi_{AB}^{jk} &= \frac{1}{\lambda} R_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}\end{aligned}\tag{9.2.6-5}$$

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、(9.2.6-3)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。

$$\begin{aligned}\blacksquare_{AB}^j &= \blacksquare_A^j - \blacksquare_B^j \\ \blacksquare_{AB}^{jk} &= \blacksquare_{AB}^j - \blacksquare_{AB}^k\end{aligned}\tag{9.2.6-6}$$

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。

RTK 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、またアンビグイティの決定も正確になるため、測位精度が向上する。

9.2.7 CMAS/CLAS

本調査に用いたセンチメートル級測位補強システム（CMAS : CentiMeter-class Augmentation System）は、①補強情報の生成、②補強情報の配信(表現)および③補強情報を用いた測位演算を含む総合システムである。本項では、補強情報の生成、表現、測位演算のそれぞれで用いられる方式について説明する。

また、実用準天頂衛星システムのセンチメートル級測位補強サービス（CLAS : Centimeter Level Augmentation Service）は、信頼性を高めた実用システムとして構築されるが、採用されている方式は基本的に CMAS と同じものと考えられる。

9.2.7.1 測位演算方式

CMAS で生成された補強情報は、国際機関の海事無線技術委員会(RTCM : Radio Technical Commission for Maritime services) が制定した RTCM 標準 10403.2 で定義され規格化が進められている SSR (9.2.7.2(2)項参照)を用いる。SSR は、衛星クロック誤差(GNSS clock error)、衛星軌道誤差(GNSS orbit error)、衛星コードバイアス(GNSS code bias)、衛星位相バイアス(GNSS phase bias)、電離層擾乱(Ionospheric disturbance)、対流圏擾乱(Tropospheric disturbance) に対する補強情報であり、ユーザに向けて放送される。

ユーザの測位端末では、これらの補強情報を用いて測位を行う。CMAS の全ての補強情報を用いた測位は、表 9.2.7-1 中の「RTK-PPP」に分類される。補強情報を部分的に用いれば他の測位演算方式が可能であり、それは測位端末のアルゴリズムに依存する。

なお、2016年2月に CLAS のパフォーマンススタンダード(PS)およびユーザインタフェース仕様書(IS)が公表され、詳しい内容が明らかにされた。

表 9.2.7-1 測位演算方式の分類

精密単独測位		RTK-PPP Real-Time Kinematic PPP	DF-RT-PPP (2周波PPP) Dual Frequency Real-Time PPP	SF-RT-PPP (1周波PPP) Single Frequency Real-Time PPP
補強情報の対象	衛星クロック誤差	○	○	○
	衛星軌道誤差	○	○	○
	衛星コードバイアス	○	○	—
	衛星位相バイアス	○	—	○
	電離層擾乱	○	—	○
	対流圏擾乱	○	—	○
水平正確度*		3 cm 程度	10 cm 程度	30 cm 程度
初期位置算出時間		1分	30分	5秒

(注)*RMS誤差。衛星数と配置が良好で、電離層・対流圏等の伝搬路の状態が平穏であり、マルチパス誤差の影響が無視できる場合。

従来の RTK は基準局の観測データを用いた相対測位により測位解を求めていたが、RTK-PPP では補強情報を生成し、明示的に測位端末に与えることにより、単独で精密な測位ができる測位演算方式となっている。

9.2.7.2 補強情報の生成および表現の方式

CMAS の機能系統を図 9.2.7-1 に示す。測位端末に補強情報を与えるために CMAS が測位補強設備で用いている補強情報生成方式および補強情報表現方式について以下に示す。

(1) 補強情報生成方式

国土地理院が日本全国に約 1,200 点整備している電子基準点のうち、250~300 点を基準局とし、ネットワーク型 RTK 法と同じ方法によって図 9.2.7-1 に示す誤差要因毎に補強情報を生成している。

(2) 補強情報表現方式

補強情報（補正データ）の表現の方式には観測空間表現（OSR : Observation Space Representation）と状態空間表現（SSR : State Space Representation）がある。補正データの配信に用いる L6 信号 1 回線は 2000bps と回線容量が限られているため、補正データの容量を極小化できる SSR 方式 を用いている。

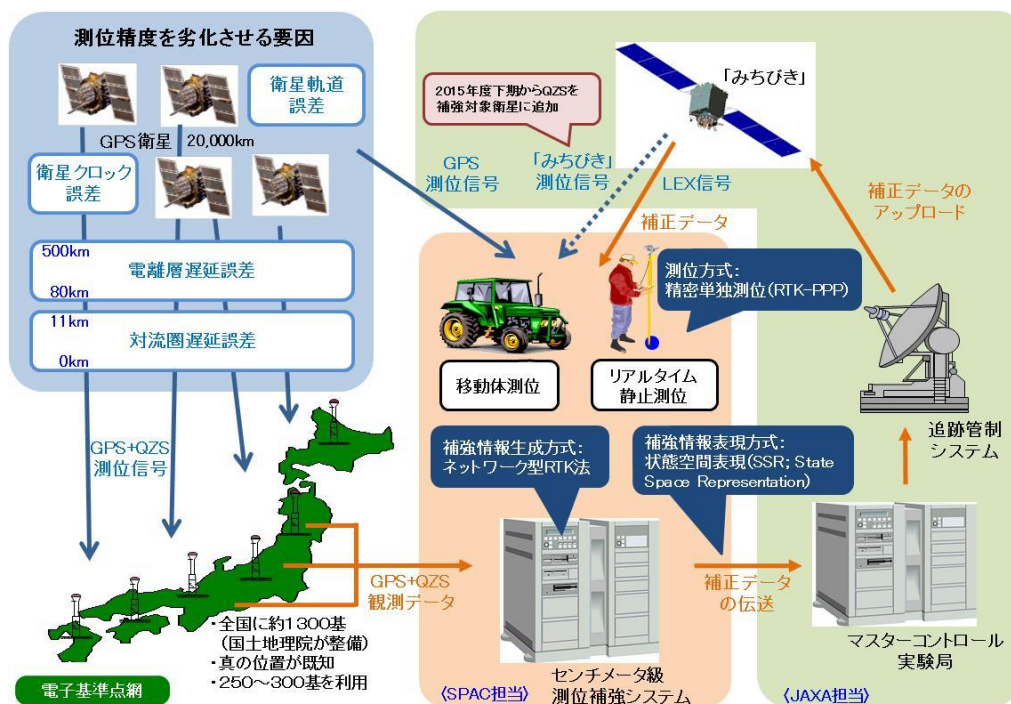


図 9.2.7-1 センチメートル級測位補強システム (CMAS) の機能系統図

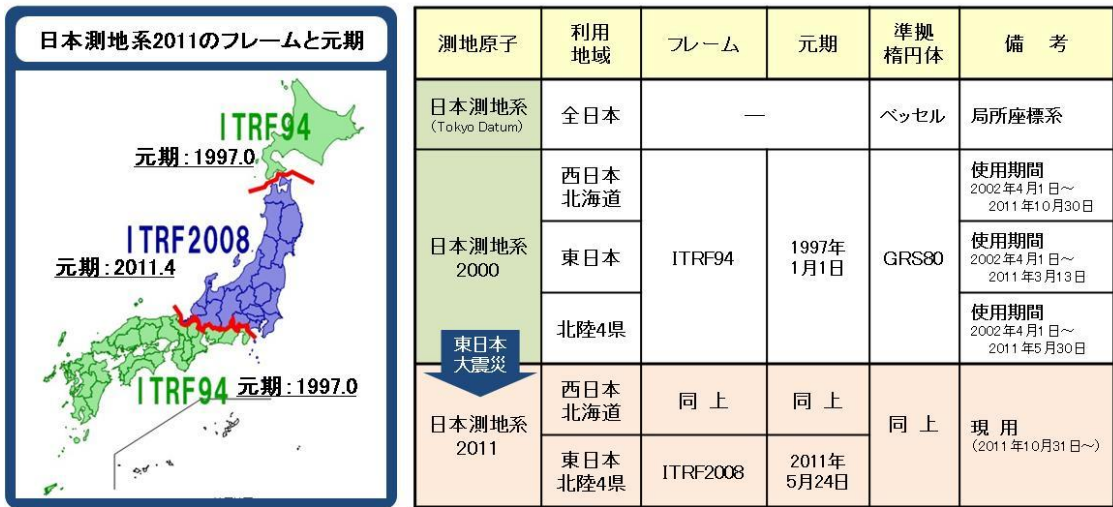
9.2.7.3 測位補強システムの測地系

(1)日本の測地系

各国では法律により測地系を定めているが、日本の国土では測量法によって図 9.2.7-2 に示すように測地系を規定している。

2001 年度末までは、日本測地系 (Tokyo Datum) と呼ばれる測地系を用いてきた。これは局所座標系に属する測地系であり、世界測地系に対し東京付近で 400m 程度のズレが存在した。そこで、2002 年度から世界測地系に属する日本測地系 2000 が採用され、その後、東日本大震災 (東北地方太平洋沖地震) の発生により、2011 年 10 月 31 日に日本測地系 2011 へ移行した。

なお、現在用いられている日本測地系 2011 では各地形・地物の座標は、現在の座標ではなく、元期の座標で規定されている。



- ITRF：国際地球基準座標系(International Terrestrial Reference Frame)
- GRS80：測地基準系1980(Geodetic Reference System)、長半径 6378137m、扁平率 1/298.257222101

図 9.2.7-2 日本の測地系

(2) CMAS における位置の基準

CMAS は電子基準点を基準局にしているため、補強情報を用いて得られる測位結果は IGS05 に基づく現在座標である。従って、日本測地系 2011 に基づく地図との整合性を確保するためには、図 9.2.7-3 に示すように電子基準点の日々の座標値 (F3 解) の変動履歴を用いて地殻変動補正を行う必要がある。

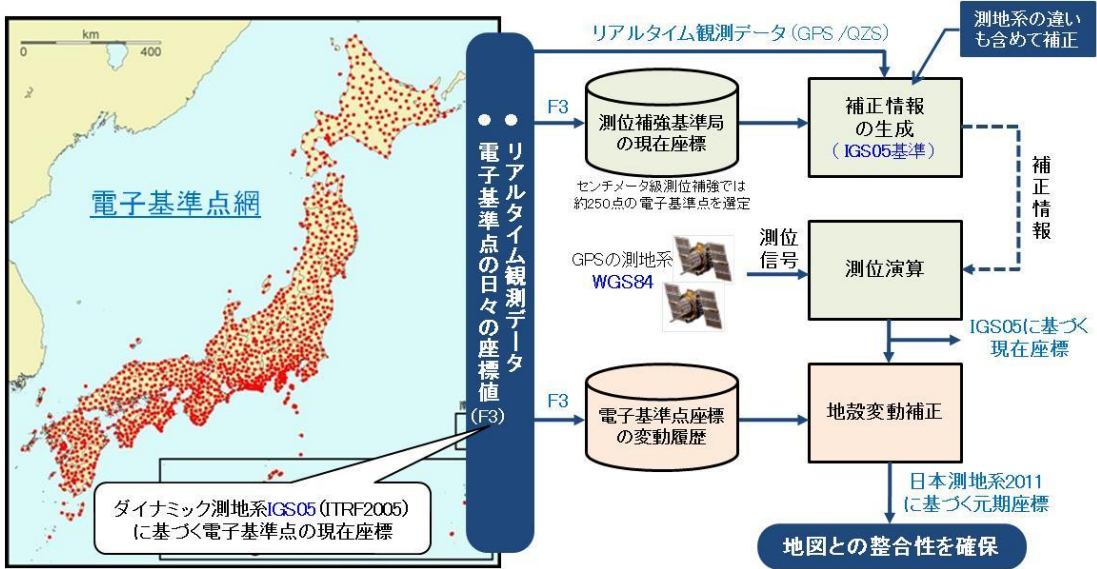


図 9.2.7-3 CMAS における位置の基準

9.2.7.4 静止定点における位置の品質評価結果

静止定点における位置の品質評価結果を図 9.2.7-4 に示す。時間帯 T2 では衛星配置が劣

化し標準偏差が大きくなっているが、いずれの時間帯も CMAS の開発目標である水平 3cm (RMSE)、垂直 6cm (RMSE)を満足している。RMSE は Root Mean Square Error の意である。

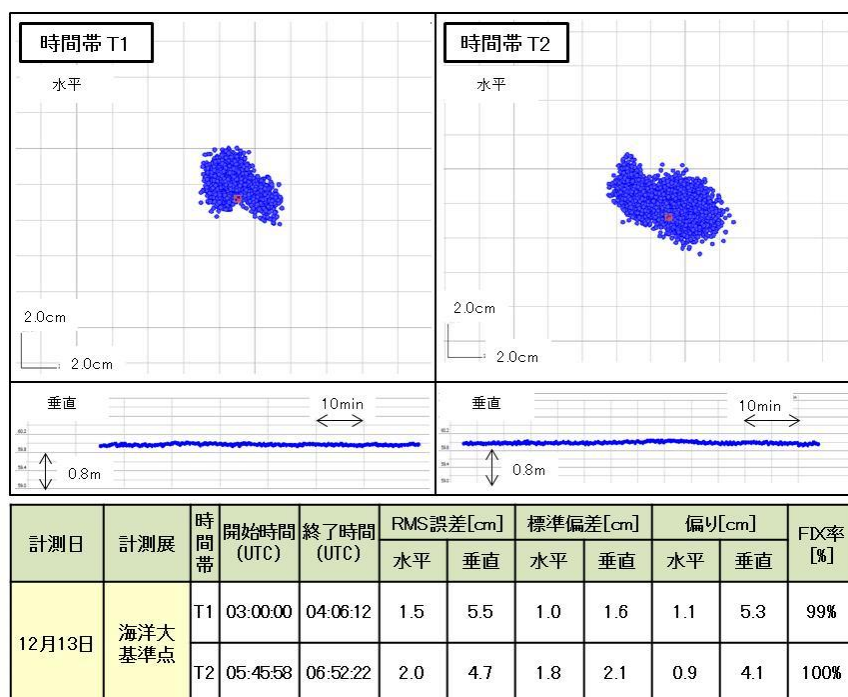


図 9.2.7-4 静止定点における位置の品質評価結果

9.2.7.5 ハイブリッド測位の効果

自律航法を複合してハイブリッド測位を行うと 100%の測位率を容易に得ることができる。その代表例を図 9.2.7-5 に示す。

ハイブリッド測位では、衛星測位の弱みであるマルチパス誤差の影響を避けることができる。一方で、自律航法区間では「地球上の位置」は得られないため、累積誤差が発生するという課題がある。その誤差量は自律航法で用いる慣性計測装置等の誤差に依存する。

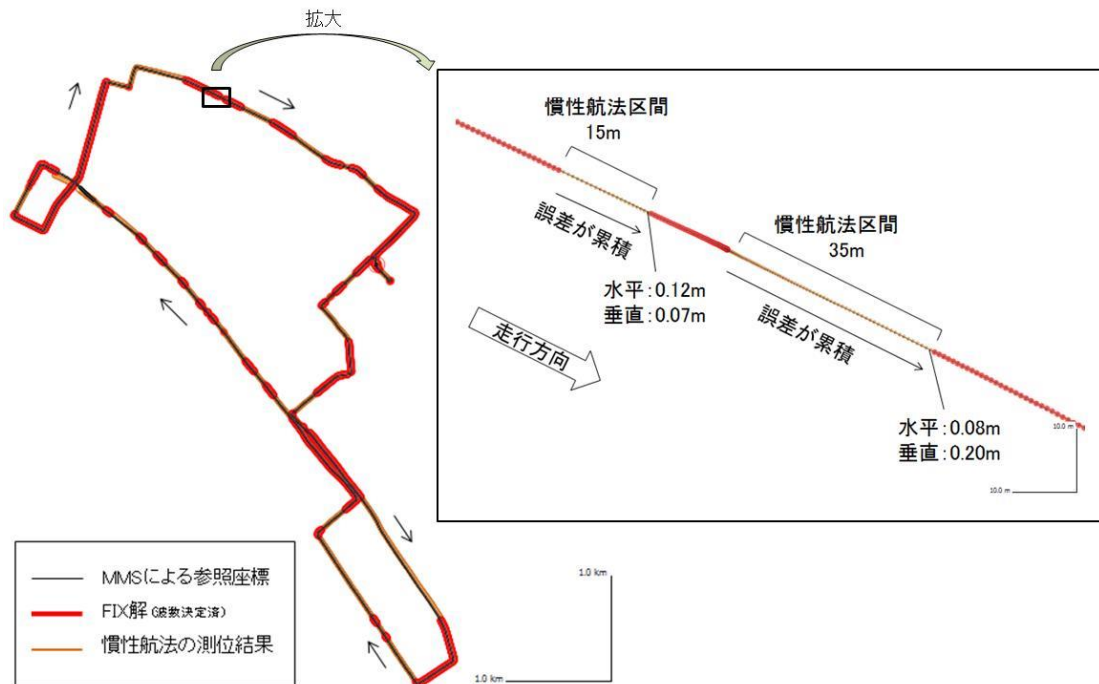


図 9.2.7-5 ハイブリッド測位の実施例

9.2.7.6 一周波搬送波測位における位置の品質評価

CMAS は移動体測位に適合するよう、初期位置算出時間(TTFF : Time To First Fix)を短縮し得る二周波搬送波位相測位（開発目標：60 秒以下）を基本としているが、この補強情報は一周波搬送波測位にも適用可能である。

TTFF が若干長くても許容できる用途では、一周波搬送波位相測位のニーズがある。CMAS を用いて計測した結果、TTFF は 2~4 分程度であるが、位置の品質は二周波搬送波位相測位と同等である。

9.2.7.7 搬送波位相測位におけるアウト라이어処理

実用的な搬送波位相測位では、統計的な異常値を除去するアウト라이어処理を行うのが通例である。例えば、国が制定した公共測量マニュアル等では、このアウト라이어処理に相当する作業規程が定められている。航空測量やモバイルマッピングという高精度移動体測位にも該当する。

9.2.8 MADOCA-PPP

9.2.8.1 PPP

PPP（単独搬送波位相測位；Precise Point Positioning）とは、世界中に配置したモニタ局の観測データを元に高精度に測位衛星の軌道及び時刻等を推定し、この結果を元にした補正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手法である。特徴

としては以下のような点が挙げられる。

① 単独測位

1 台の複数周波数対応受信機で高精度な測位ができるため、ベース受信機の設置が困難な洋上測位や地殻変動モニタリングなどの分野での活躍が期待されている。

② グローバルなシステム

ユーザ測位精度の地域依存性が少なく、補正情報を取得できればどこでも高精度な測位を行うことができる。

③ cm 級の高精度測位

衛星送信時の搬送波初期位相バイアス推定値を用いて、搬送波位相の波数を整数値として求めること（これを PPP-AR と呼ぶ。9.2.8.2 項で詳述）で、センチメートル級の測位を実現できる。通常、初期位相バイアスを用いないで、波数を実数解として求める場合 (PPP) は、10cm 級の精度が得られる。

PPP は地上の基準点に依存せずに広範囲のユーザに高精度測位サービスを提供することが可能なため、精密農業、津波ブイ、地殻変動監視、GNSS 気象学等をはじめとする多数の理学・工学応用が期待されている。

9.2.8.2 PPP -AR

先述の通り、PPP では搬送波位相観測値を使用する。この観測量には搬送波位相アンビギュイティ (Carrier Phase Ambiguity) と呼ばれるバイアス項が含まれ、この搬送波位相アンビギュイティには、整数アンビギュイティ、衛星の初期位相成分である FCB (Fractional Cycle Bias) と受信機の初期位相成分が含まれる。FCB と受信機初期位相成分 (=端数) を精確に求めることができれば、整数アンビギュイティを”整数値”として求めることにより、PPP 測位解の精度を向上することができる。相対測位である RTK 等においては、2 つの受信機 (基準局受信機とユーザ受信機) と複数の衛星からの観測量の二重差を取ることで端数部分である FCB と受信機初期位相成分を除去することで、整数アンビギュイティを”整数値”として求めることが可能であるため、観測量から精確に波数 (=衛星アンテナとユーザアンテナ間の距離) を求めることができ、この結果測位解が精度良く求まる。このような技術を AR (Ambiguity Resolution) と言い、AR によって求まった測位解を Fix 解と呼ぶ。一方、単独測位の一つである PPP は、ユーザ受信機で複数の衛星からの観測量を得ることは可能である (一重差) ため受信機の初期位相成分の除去は可能であるが、相対測位と異なり基準局を持たないため FCB を除去することができない。その結果本来整数値である整数アンビギュイティは”整数値”として求まらず小数点を含む”実数値”として求まるため、従来の PPP では Fix 解を求めることが困難とされてきた。

しかし最近になり、後述の MGM-Net のように世界中に配置した数多くのモニタ局の観測データを使って、FCB を精度よく推定してこれらを測位ユーザ側に取り込むことで、PPP

においても AR を可能とする技術が開発されてきた。PPP において AR を導入し Fix 解を求め手法を PPP-AR と呼び、従来の PPP と比較して測位精度の向上が確認されている。JAXA では、上記実現のために必要なシステムとして、複数 GNSS に対応したリアルタイム GNSS 基準局網「MGM-net」及び高精度軌道・時刻推定用ソフトウェア「MADOCA」を開発するとともに、継続的な運用と、プロダクト配信を実施している。

9.2.8.3 MGM-Net

高精度で軌道・時刻を推定するためには、定常的にデータを取得するモニタ局の数と配置が重要になるが、「みちびき」を受信可能な局は、JAXA が保有する準天頂衛星システムのモニタ局(MS)では国内外の 9 局(国内：サロベツ、小金井、沖縄、父島、国外：ハワイ、キャンベラ、グアム、インド、タイ)に限られてしまう。

そこで、国際協力の下、高精度軌道・時刻推定に必要なモニタ局ネットワークとして、「MGM-net」(Multi-GNSS Monitoring Network)の構築を 2011 年度より進めている。各国の宇宙機関や測位関連機関等とのコラボレーションにより、構築中の局も含めて 113 局(2016 年 3 月時点)のネットワーク網を構築した(図 9.2.8-1 参照)。

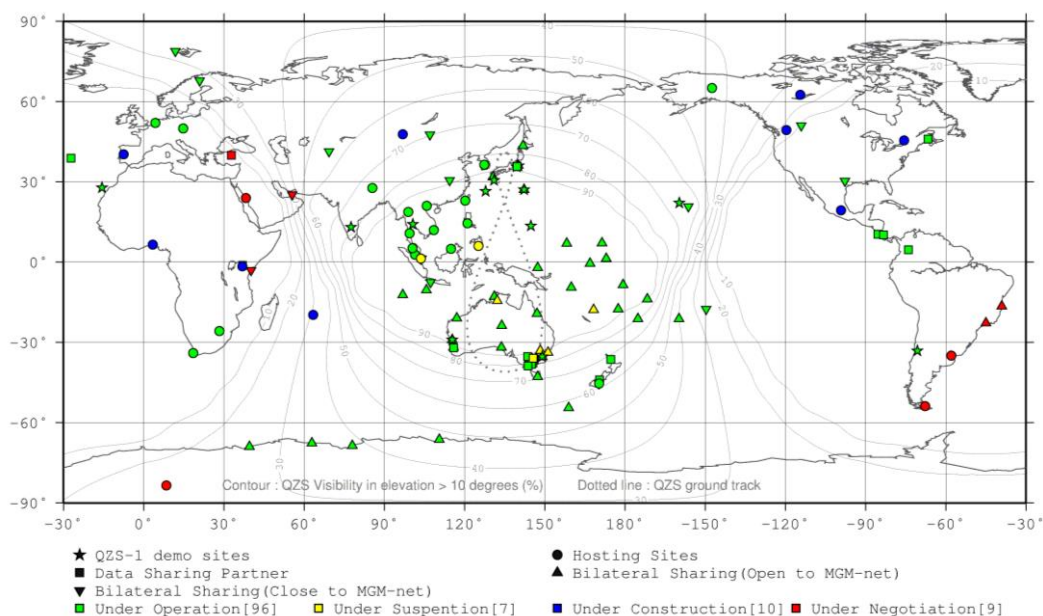


図 9.2.8-1 MGM-Net 網の構築状況 (2016 年 3 月現在)

9.2.8.4 MADOCA

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 や PPP-AR 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。2011 年度に後処理での推定機能(オフライン機能)、2012 年度にリアルタイムでの推定機能が整備された。MADOCA でリアルタ

イムに推定された補正情報は「みちびき」の LEX 信号（※1）経由またはインターネット経由で配信される。前者については、補正情報から LEX メッセージを生成する機能 LMG(LEX Message Streamer)によって LEX フォーマットとなり、準天頂衛星地上システムであるマスタコントロールステーション (MCS) から沖縄にある追跡管制局へ送信され、「みちびき」の LEX 信号経由でユーザへリアルタイムに配信される。後者については、補正情報を RTCM SSR(Radio Technical Commission for Maritime services / State Space Representation)フォーマットとして NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) Caster 経由でリアルタイムに配信される。図 9.2.8-2 に MADOCA の補正情報を利用したリアルタイム PPP のシステム概要を示す。また、2016 年 3 月時点でユーザが利用可能である MADOCA 暦とその概要について表 9.2.8-1 に示す。

※1 LEX 信号(1278.75MHz/2kbps)とは、測位精度や信頼性を高める目的の実験用信号である

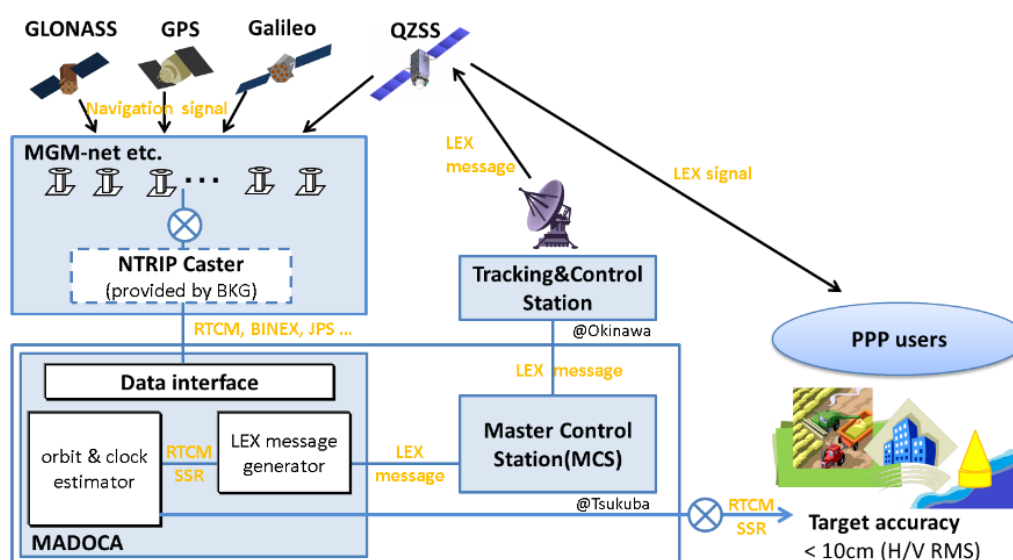


図 9.2.8-2 リアルタイム MADOCA-PPP のためのシステム概要

表 9.2.8-1 ユーザ配信中の MADOCA 暦の種類とその概要

Product		Accuracy (*1)	Latency	Updates	Interval	Delivery	Format
Real Time	orbit	~10 cm	-	-	30 s	LEX signal / Ntrip Caster	LEX format / rcm ssr
	clock	~1 ns	(real time)	(real time)	1 s		
Ultra Rapid	orbit	~5cm	real time (predict half) 2~8 hours (observed half)	at 2,8,14,20 UTC	300 s	Download from web page*	sp3
	clock				30 s		clk
Rapid	orbit	~5cm	15~39 hours	at 0 UTC daily	300 s	Download from web page*	sp3
	clock				30 s		clk
Final	orbit	~3 cm	2 days	everyday	300 s	Download from web page*	sp3
	clock	~100 ps			30 s		clk

* <http://mgmnds01.tksc.jaxa.jp/>

*1 精度については IRU,IGR,IGF との比較 (GPS)

9.2.8.5 PPP の課題とその解決手段 (local 補正情報の適用)

PPP は一般的に初期収束時間・再収束時間を要するという課題を抱えていることが知られている。PPP 測位解の収束に時間がかかることは、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ことに起因する。サイクルスリップが生じると搬送波位相アンビギュイティが変化するため、特に自動車等の移動体での PPP 測位においては、トンネル通過後の測位開始時のみではなく、ビルや高架、歩道橋などの遮蔽物によって頻繁に生じるサイクルスリップが原因となって再収束過程に入ることが多く、実利用を考えると如何に収束性を改善できるかが大きな課題となっている。

PPP を行うには複数のパラメータを推定する必要があり、その中でも搬送波位相アンビギュイティの収束に要する時間が支配的である。電離層遅延量や対流圏遅延量の推定についても同じく時間を要するが、MADCOCA のプロダクトを用いて周辺の基準局で推定したこれらの遅延量から求めた補正量をユーザに地上通信回線を用いてユーザに提供し、アンビギュイティ推定時の初期値をより正確に与えることで搬送波位相アンビギュイティの収束を高速化することが可能である。MADCOCA-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を目標に研究開発を進めている。最終暦を用いた後処理では、ローカル補正情報を用いた PPP-AR 方式で初期化時間を 1 分以内に短縮可能であることを確認しており、現在、リアルタイムでその性能を得るための改善・改良に取り組んでいるところである。

9.3 略語表

表 9.3-1 略語表

AR	Ambiguity Resolution
AT	Aisan Technology
BINEX	Binary Exchange format
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BPSK	Bi-Phase Shift Key(ing)
C/A	Coarse/Access(Code)
CDMA	Code Division Multiple Access
CLAS	Centimeter Level Augmentation Service
CMAS	CentiMeter-class Augmentation System
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Commercial Service
DF	Dual Frequency
DGNSS	Differential GNSS
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution of Precision
DT	Delay Time
ENRI	Electric Navigation Research Institute
EU	European Union
FCB	Fractional Cycle Bias
FDMA	Frequency Division Multiple Access
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
IFB	Inter Frequency Bias
IGS	International GNSS Service
IGSO	Inclined Geosynchronous Orbit
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IODE	Ephemeris Issue of Data
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IS	Interface Specification
ITRF	IERS Terrestrial Reference Frame
ITS	Intelligent Transport Systems
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JST	Japan Standard Time
L1SMS	L1-SAIF Master Station
LAMBDA	Least squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
LEX	L-band experiment
LEXR	LEX Recorder
LEXRx	LEX Receiver
LMG	LEX Message Streamer
MADOCA	Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis
MCS	Master Control Station
MEO	Medium Earth Orbit
MGA	Multi-GNSS Asia
MMS	Mobile Mapping System
MP	Multipath
MS	Monitor Station
MSAS	MTSAT Satellite Augmentation System
MTSAT	Multi-functional Transport Satellite
NMEA	National Marine Electronics Association
NTRIP	Network Transport of RTCM via Internet Protocol
OC	Open Access, CDMA (GLONASS)

OCS	Operational Control System
OS	Open Service
OSR	Observation Space Representation
OTF	On The Fly
P	Protect, Precision (Code)
P/Y.P(Y)	Protect, Precision (Code)
PDOP	Position DOP
PN.PRN	Pseudo Random Noise (Code)
PPP	Precise Point Positioning
PS	Performance Standard
QZS/QZSS	Quasi Zenith Satellite System
RF	Radio Frequency
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Error
RT	Real Time
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Service
RTK	Real Time Kinematic (positioning)
SAIF	Submeter-class Augmentation with Integrity Function
SARPs	Standards and Recommended Practices
SBAS	Space/Satellite Based Augmentation System
SF	Single Frequency
SIP	Strategic Innovation Promotion Program
SIS	Signal in Space
SN.SNR	Signal to Noise Ratio
SoL	Safety of Life
SPAC	Satellite Positioning Research and Application Center
SSR	Space State Representation
TDOP	Time DOP
TEC	Total Electron Content
TLE	Two Line Element
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
TTFF	Time To First Fix
URE	User Range Error
UTC	Coordinated Universal Time

VDOP	Vertical DOP
VRS	Virtual Reference Station
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS	World Geodetic System