

低コストGNSS受信機の 性能評価に関する研究

A study on the performance evaluation
of low-cost GNSS receiver

久保 信明* 高橋 漱*

山口 範洋** 横島 喬**

By Nobuaki Kubo*, So Takahashi*

Norihiro Yamaguchi**, Takashi Yokoshima**

* 東京海洋大学学術研究院

** 清水建設株式会社

Abstract:

Survey-grade GNSS receiver guarantees a highly accurate and reliable positioning solution, and is widely used in construction sites and survey. In recent years, we can use many GNSS satellites because of the continuous deployment of multi-GNSS. Since low-cost GNSS receivers capable of multiple frequency bands were released in late 2018, it is expected that they can be used for general operating in construction sites even not for public survey. Since the industries related to accurate position information are diverse, the economic spread by cost reduction is extremely large. As low-cost GNSS receivers become popular in the near future, it is an urgent and important subject to evaluate the performance of low-cost GNSS receivers.

In this study, the performance of low-cost GNSS receivers was investigated in the different environments, assuming the use in the construction field and the surveying field. Survey-grade GNSS receiver was also checked simultaneously to compare the test results. Test and comparison were carried out both in post-processing mode and real-time mode. Experimental results revealed that the difference in performance in terms of accuracy and reliability between low-cost GNSS receiver capable of multiple frequency bands and survey-grade receiver was small in all environments.

Keywords: RTK-GNSS, Low-cost GNSS Receiver, Survey-grade GNSS Receiver, i-Construction

キーワード: RTK-GNSS, 低コストGNSS受信機, 測量級GNSS受信機, i-Construction

1. はじめに

近年、国土交通省が打ち出した、i-Constructionという名目のコンセプトにより、建設現場のオペレーションや施工管理等で ICT 技術が積極的に導入され始めている¹⁾。ICT 技術の利用は、20 年以上も昔から各建機メーカーやゼネコン、測量会社で取り組まれてきた重要なテーマではあるが、現場で実用に至った画期的な事例はそれほど多くはない。一方、近年の通信技術や UAV 等の要素技術の飛躍的な進歩により、「建設現場の生産性革命」という綱領が2016年に国土交通省の i-Construction 委員会により提示され、2016 年度は「生産性革命元年」と名付けられており、現場での運用に ICT 技術を活用することが規定された。上記の綱領が情報化施工の皮切りとなり、2018 年度は綱領が打ち出されてから3年目ということから、上記業種に関連する大手企業が本格的な運用準備に入っており、部分的には既に新技術や新システムが導入されている(次頁の図 1.1)。

既存の建設現場等で、精密な位置情報を得るために RTK 測位を利用している建機等のシステムでは、数百万円規模の価格帯で、L1 帯、L2 帯などの複数周波数帯の信号受信に対応した(以下、多周波対応と呼ぶ)測量級 GNSS 受信機が導入されている。現場の人員の安全確保やマシンの自動運転を見据えた正確な位置情報を把握するシステムという観点では、マシン一台一台に GNSS 受信機を導入する必要があり、稼働台数の多い建機や重機の制御、及び現場の人員管理には信頼性の高い大量の低コスト GNSS 受信機が必要とされる。昨今、RTK 測位が可能な高性能の多周波対応低コスト GNSS 受信機が販売開始されたことにより、低コスト GNSS 受信機が測量級 GNSS 受信機の代替物となりうる可能性がでてきている。公共測量や精密な施工等においては、これまで通り高品質な位置を提供してきた測量級 GNSS 受信機を利用し、稼働台数が多く、現場のオペレーションを支援するようなシステムには、低コスト GNSS 受信機の利用が期待されている。低コスト GNSS 受信機は、ユーザビリティ等の面で測量級 GNSS 受信機に劣る部分はあるが、現場で操作しやすい機能を追加したとして、依然として低コストであることに変わりはない。現場でのアプリケーションに応じて、ローバ側の観測データをサーバで収集して、サーバで

位置を一括計算することも可能である。価格帯と精度の観点から GNSS の市場範囲のイメージを図 1.2 に示す。

本研究では、i-Construction の潮流にのっとり、測量級 GNSS 受信機の出力と低コスト GNSS 受信機の出力の解析結果を様々な環境で比較することで、現状市販されている低コスト GNSS 受信機が、高コスト測量級 GNSS 受信機に対してどの程度代替可能であるかを調査する。ここ数年で販売されはじめた低コスト GNSS 受信機は、マルチ GNSS の恩恵により、単一周波数の低コスト GNSS 受信機を利用しても RTK の性能が大きく改善するケースは発表されている²⁾。特に比較的開けた環境での測位実験では、測量級 GNSS 受信機に近い利便性を示していた。しかしながら、ビル街での静止点及び移動体での実験結果では、測位解の飛びが見られ、また利便性も測量級 GNSS 受信機と比較して低下する結果となっていた³⁾。一方、低コストでの多周波対応 GNSS 受信機が発売されるようになり、その性能が、特にビル街等でどの程度のものか注目されている。以上の観点より、本研究では個々のアルゴリズムの改善による性能向上というよりは、代表的な GNSS 受信機の性能を様々な環境で比較することを主眼とした。特に多周波対応型低コスト GNSS 受信機と測量級 GNSS 受信機において、基線が 10km 程度までの短基線での RTK の性能の差を明らかにすることを目的とした。

本論文の構成を以下に記述する。2 章で実験に利用する GNSS 受信機やアンテナの紹介と実験データ及び解析方法の概要を述べる。3 章で各データの後処理及びリアルタイムの比較用解析結果を示し、4 章で実験結果に関する考察を行った。最後に 5 章で本稿をまとめる。

2. GNSS 受信機の紹介と実験データの概要

2.1 GNSS 受信機について

本研究では、建設現場の重機等に搭載される衛星測位機器として高いシェアを誇る、Trimble 社製の「NetR9」と「SPS855」を多周波対応測量級 GNSS 受信機として選択した。低コスト GNSS F9P)を選択した。GNSS 受信機と各 GNSS 受信機に対応する GNSS アンテナに関する詳細は表 2.1 に示す。



図 1.1 建設現場への ICT 技術の導入(国土交通省)

出所: 国土交通省 i-Construction 推進コンソーシアム(企画委員会) 資料1

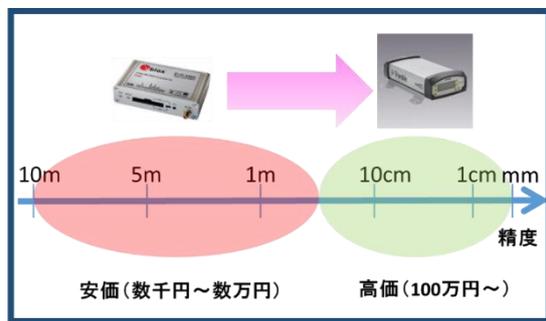


図 1.2 GNSS 受信機の精度と価格帯(u-blox, Trimble)

表 2.1 データの取得に使用した GNSS 受信機と対応する GNSS アンテナ

評価対象	使用GNSS 受信機の名前	使用GNSS アンテナの名前
多周波対応 測量級GNSS 受信機 (移動局)	Trimble社 NetR9(左) SPS855(右)	NovAtel社(左) GPS-703-GGG TOPCON社(右) CR-G5
一周波対応 低コストGNSS 受信機 (移動局)	u-blox社 NEO-M8P(左) NEO-M8T(右)	Tallysman社(左) TW4721 TOPCON社(右) CR-G5
多周波対応 低コストGNSS 受信機 (移動局)	u-blox社 ZED-F9P	u-blox社(左) ANN-MBシリーズ TOPCON社(右) CR-G5
多周波対応 測量級GNSS 受信機 (基準局)	Trimble社 NetR9	Trimble社 Zephyr2 Geodetic

2.2 実験データについて

GNSS 受信機に応じて、データとして扱える衛星システムや周波数帯、さらには複合可能な信号等が異なるため、各受信機の利用可能な衛星の信号について本節で述べる。多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 と SPS855 に関しては、測位に使用可能な衛星システムが、GPS、QZSS、Galileo、GLONASS、BDS の全種類である。また、多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P も同様に全種類の衛星システムが使用可能である。一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P に関しては、使用可能な衛星システムが、GPS、QZSS と BDS または GLONASS の組み合わせである。各 GNSS 受信機で使用可能な衛星システム及び受信できない個別の衛星情報、周波数帯域名とコード名を表 2.2 に示す。後処理解析については、どの周波数帯を利用したか明示するが、リアルタイムの受信機内蔵の RTK エンジンについては、どの衛星や周波数帯の信号を利用しているか開示されていないため、詳細には分からないことを明記しておく。

表 2.2 使用可能な衛星システムと受信できない個別衛星及び周波数帯とコード名

受信機種別 (会社名)	使用可能な衛星システムと個別衛星	使用可能な周波数帯域名とコード*
NetR9 SPS855 (Trimble)	GPS QZSS † Galileo GLONASS BDS ††	L1-C/A, L2P, L2C, L5 L1-C/A, L2C, L5 E1, E5a, E5b, E5alt G1, G2 B1, B2, B3
ZED-F9P (u-blox)	GPS QZSS Galileo GLONASS BDS †††	L1-C/A, L2C L1-C/A, L2C E1, E5b G1, G2 B1, B2
ZED-M8P (u-blox)	GPS QZSS ††† GLONASS or BDS	L1-C/A L1-C/A G1 or B1

† SPS のみ 199 番は受信不可

†† SPS のみ 2018 年以降の衛星は受信不可

††† 静止衛星は受信不可

‡ 199 番は受信不可

性能評価用の実験データは、4 種類の環境(①~④)で取得した。オープンスカイ環境だけでなく、建設現場や測量現場で問題になりそうな環境下でデータを取得した。

- ① 周囲に遮蔽物のないオープンスカイ環境下(静止データ, 東京海洋大学構内)
- ② 反射波や回折波等の影響が大きな環境下(静止データ, 東京海洋大学構内)
- ③ ビル等の障害物や木等が存在する環境下(移動体データ, 東京海洋大学構内)
- ④ ビルや高架等が存在する都市部一般道路の環境下(移動体データ, 東京海洋大学より台場付近)

2.3 解析方法について

解析は平等な条件で行うことが極めて重要である。そのため、実験データの後処理解析では高精度測位のオープンソースとして広く知られている「RTKLIB」を利用した⁴⁾。RTKLIB は東京海洋大学情報通信工学研究室の産学連携研究員である高須知二氏が開発したフリーでダウンロード可能な GNSS 測位計算ソフトウェアである。利用したバージョンは ver.2.4.3 b31 である。なお、国土地理院で開発され公開されている GSILIB でもほぼ同様の解析が可能である⁵⁾。解析条件と評価方法も極めて重要である。本稿では、平等な条件での比較を行うために、解析条件は標準的な設定値としてすべて同じにした。評価方法は、RTK の性能でよく利用される Fix 率(解析したエポック数のうちの Fix 解の割合: Fix 解は整数値バイアスを実数値で推定した後、最適な整数値に置き換えて決定した測位解)と信頼性で評価した。信頼性の定義は、今回公共測量ではなく、現場での建機や人間のオペレーションの運用のしやすさ及び簡易的な測量を目的としているため、それらの位置把握として、アンテナの精密位置または Fix 解の平均値相当から 10[cm] 以内にある割合で評価した。10[cm] の精度があれば、移動体向けの汎用的なアプリケーションを運用しやすいと考えられる。解析条件の概要を以下に示す。

- ・マスク角: 15 度
- ・測位に利用する衛星の最低信号強度: 35[dB-Hz] (L1 帯について)
- ・RTK のアンビギュイティ決定方法: 瞬時 AR(1 エポックの観測データのみを利用した方法)
- ・擬似距離と搬送波位相の雑音比: 100 対 1

リアルタイムの解析は、SPS855 と NEO-M8P、ZED-F9P の 3 つの受信機で実施した。それぞれの受信機は RTK のエンジンを内蔵している。基準局のアンテナは同一とし、Trimble 社製のものとした。東京海洋大学第 4 実験棟の屋上に設置しているアンテナである。この 1 つのアンテナから NetR9 受信機にケーブルが接続されており、Ntrip 経由で補正データを送信した。補正データの形式は RTCM3.2 MSM7 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS/QZSS とした。補正データは移動側に設置したスマートフォンのテザリングで受信し、ノートPC 経由でそれぞれの受信機へ入力した。受信機の RTK エンジンの設定に関しては、移動体向けのデフォルト値を採用した。SPS855 受信機では、Kinematic mode を、u-blox 受信機では、Automotive mode を選択した。

3. 実験データの概要と結果

この章では、4 種類の実験の概要とそれぞれの受信機の観測データを用いた RTK の後処理結果を示す。あわせて、2.2 節で示した②から④の実験についてはリアルタイムの結果も示した。

3.1 オープンスカイ環境での静止点測位

はじめに、建物の屋上で静止点測位(短基線)を評価した。実験場所は東京海洋大学越中島キャンパス(東京都江東区越中島)の構内にある第 4 実験棟屋上であり、屋上に設置されている GNSS アンテナからの信号を、分配器を使用して 3 つに分岐し、基準局、移動局ともに 2 章の 2.1 節で示した 3 種類の GNSS 受信機を用いて GNSS の観測データを取得した。実験状況と基準局と移動局の GNSS アンテナの写真を図 3.1 と図 3.2 に示す。2018 年 12 月 15 日の 4 時 45 分(UTC)から 24 時間分(86400 エポック)のデータを 1[Hz]で取得した。標準的なオープンスカイ環境においては、単一周波数でもマルチ GNSS の RTK 測位では、Fix 率が非常に高いことが分かっている。特に多周波対応 GNSS 受信機に関しては、性能として差が見られないため、Fix 解の精度に焦点を当てた。

測位に使用した衛星システムは、NetR9 と ZED-F9P が GPS/QZSS/Galileo/GLONASS/BDS で、

NEO-M8P が GPS/QZSS/BDS である。

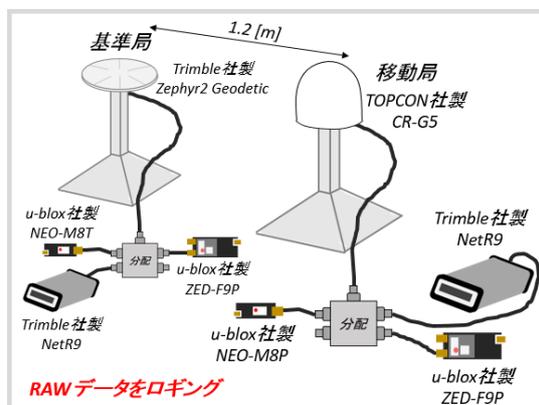


図 3.1 実験状況(屋上の静止点測位)



図 3.2 屋上の静止点測位で使用した GNSS アンテナ

いずれの結果の図においても、Fix 解のみを示しており、座標原点はあらかじめ分かっている移動局のアンテナの精密位置を表している。なお、アンテナの精密位置に関しては、国土地理院により公開されている、近傍の電子基準点(東京千代田)の F3 解(日々の座標値)を基準に RTK 測位で算出した平均位置を採用した。

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.3 と図 3.4 に示す。Fix 率は 99.98[%]であり、アンテナの精密位置から 10[cm]以内にある解の割合を表す信頼性に関しては 100[%]であった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.0024[m]と極めて良好な値であった。続いて、一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.5 と図 3.6 に示す。基準局のデータは NEO-M8T、移動局のデータは NEO-M8P を使用して取得されたものである。Fix 率は 99.99[%]となり、信頼性に関しては 100[%]であった。

Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.0025[m]と測量級 GNSS 受信機と同等の値であった。最後に、多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した観測データの後処理による結果を図 3.7 と図 3.8 に示す。基準局と移動局のデータは ZED-F9P を使用して取得されたものである。Fix 率は 99.98[%]であり、信頼性に関しては 100[%]であった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.0023[m]と、測量級 GNSS 受信機と同等の値であった。

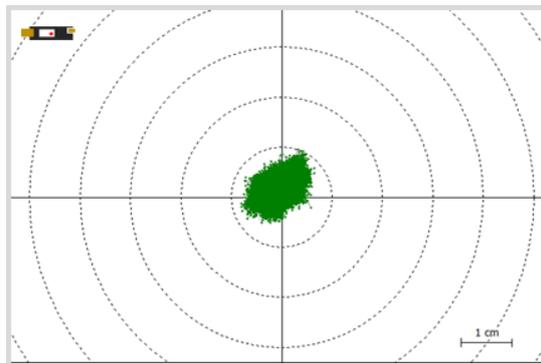


図 3.6 水平方向のプロット図(NEO-M8P)

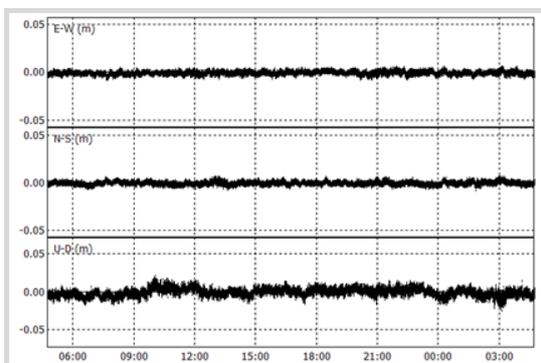


図 3.3 経度/緯度/高さの時系列推移(NetR9)

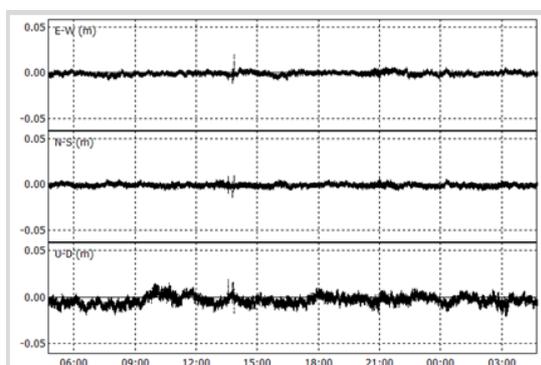


図 3.7 経度/緯度/高さの時系列推移(ZED-F9P)

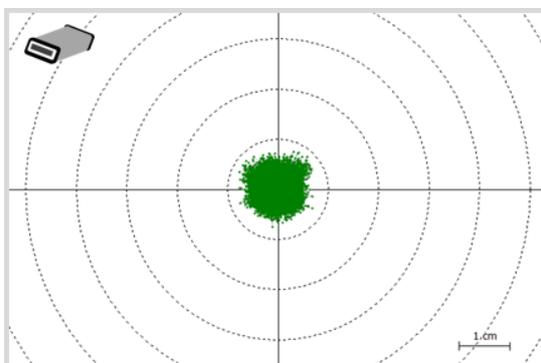


図 3.4 水平方向のプロット図(NetR9)

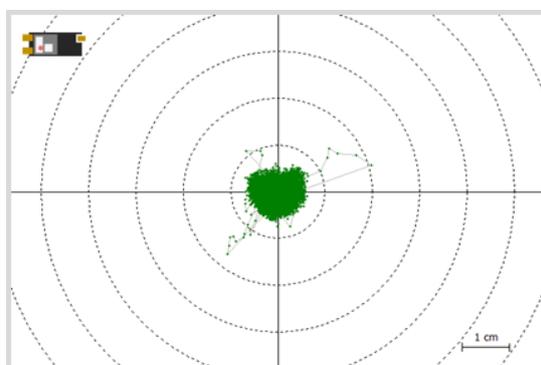


図 3.8 水平方向のプロット図(ZED-F9P)

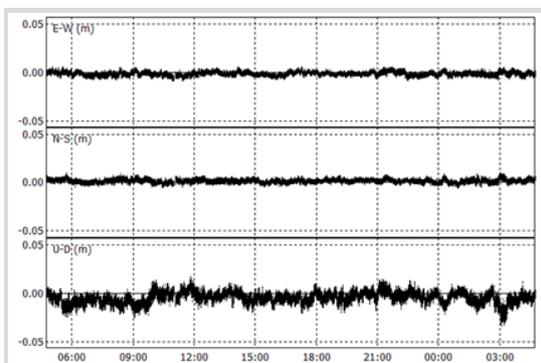


図 3.5 経度/緯度/高さの時系列推移(NEO-M8P)

上記の結果より、オープンスカイ環境下においては、多周波対応及び一周波対応の低コスト GNSS 受信機を利用しても測量級 GNSS 受信機と同じ性能を得られることが分かった。一周波対応の低コスト GNSS 受信機でも同等の性能が得られた要因は、GPS と QZSS に加えて BDS を利用することで測位に利用可能な衛星数が大幅に増加したためである。

3.2 周囲が構造物に囲まれた悪環境での静止点測位(遮蔽環境で、反射波と回折波の受信)

都市部等で、測量業者が実際に測量すべき地点は 3.1 節で示したようなオープンスカイ環境ばかりではなく、建物等で電波伝搬経路が部分的に遮蔽された地点が数多く存在する。東京海洋大学越中島キャンパスの構内で、同様のマルチパス波の影響が多くある環境で、2018 年 12 月 25 日の 3 時 00 分(UTC)から 24 時間分(86400 エポック)の静止点測位(短基線)のデータを 1[Hz]で取得し、RTKLIB を利用して後処理解析による評価を行った。3.1 節と同様に、基準局、移動局ともに 3 種類の GNSS 受信機同士を用いて GNSS の観測データを取得した。GNSS アンテナに関しては、移動局はそれぞれの GNSS 受信機に対応した GNSS アンテナを使用している。図 3.9 と図 3.10 に移動局の実験状況と GNSS アンテナの写真を示す。基準局は 3.1 節と同様である。後処理解析の設定に関しては、3.1 節で使用された設定と同一のものを採用している。測位に使用した衛星システムは、NetR9 と ZED-F9P が GPS/QZSS/Galileo/GLONASS/BDS で、NEO-M8P が GPS/QZSS/BDS である。

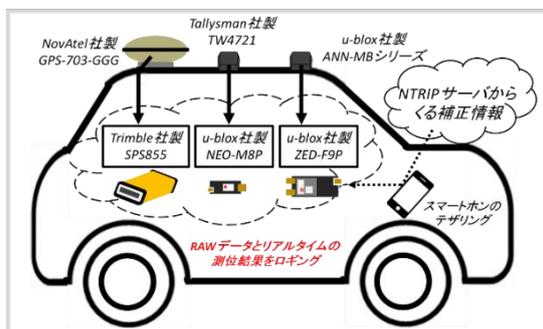


図 3.9 実験状況(悪環境下での静止点測位)



図 3.10 実験風景と移動局の GNSS アンテナ

以降の結果のいずれの図においても、座標原点は全 Fix 解の平均位置を表しており、以降の標準偏差や信頼性の計算に利用した。ここでは、Fix 解の平均位置自体の信頼性が問われるため、3つのアンテナ中心間の距離を巻尺で測定した長さを利用して検証した。一周波対応低コスト GNSS 受信機では、まともな Fix 解自体がなかったため、検証できていない。多周波対応測量級 GNSS 受信機と多周波対応低コスト GNSS 受信機のアンテナ同士の巻尺により測定した長さは 76.0[cm]で、それぞれの全 Fix 解の平均位置の距離差は 75.8[cm]で 1[cm]未満のレベルでは一致していた。多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で基準局、移動局ともに取得した観測データの後処理による結果を図 3.11 と図 3.12(次頁)に示す。Fix 率は 17.03[%]であり、Fix 解の平均位置から大きく逸脱したミス Fix 解は生じなかった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.012[m]であった。Fix 解の平均位置から 10[cm]以内にある解の割合を示す信頼性は 100[%]であった。続いて、一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.13 と図 3.14 に示す。基準局のデータは NEO-M8T を使用した。Fix 率は 1.53[%]で、Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 4.52[m]、信頼性は 55.39[%]と低い値であった。最後に、多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で基準局、移動局ともに取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.15 と図 3.16 に示す。Fix 率は 2.47[%]であり、Fix 解の平均位置から大きく逸脱したミス Fix 解は生じなかった。Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.012[m]であった。Fix 解の平均位置から 10[cm]以内にある解の割合を示す信頼性は 100[%]であった。

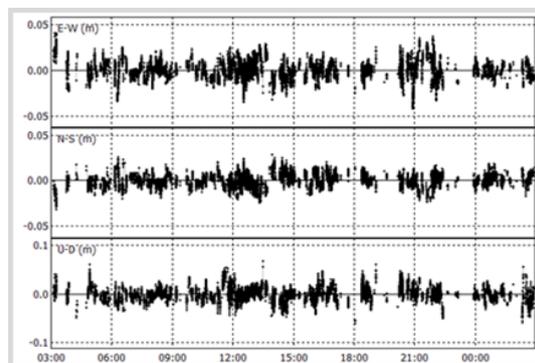


図 3.11 経度/緯度/高さの時系列推移(NetR9)

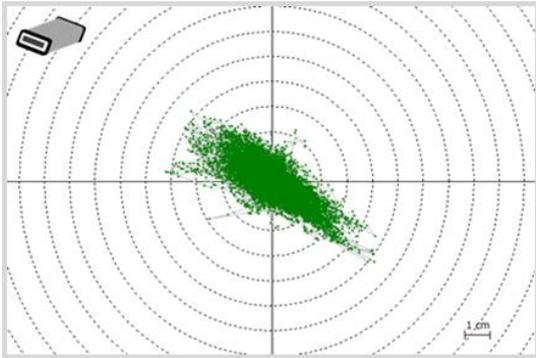


図 3.12 水平方向のプロット図(NetR9)

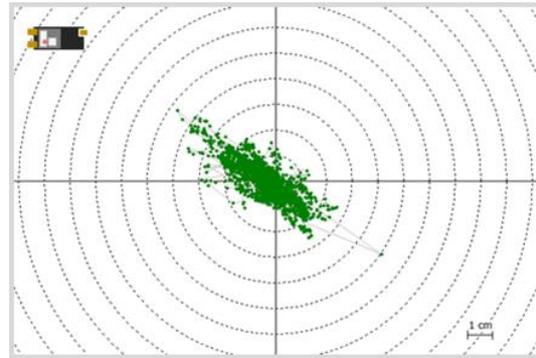


図 3.16 水平方向のプロット図(ZED-F9P)

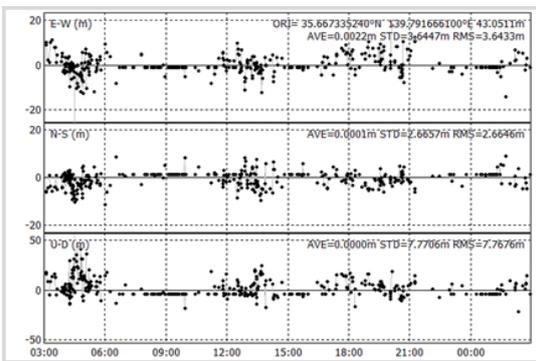


図 3.13 経度/緯度/高さの時系列推移(NEO-M8P)

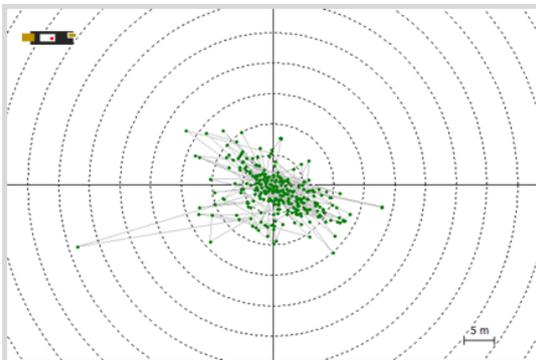


図 3.14 水平方向のプロット図(NEO-M8P)

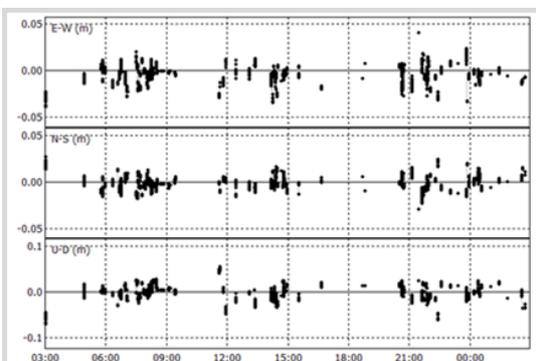


図 3.15 経度/緯度/高さの時系列推移(ZED-F9P)

以上の結果より、多周波対応測量級 GNSS 受信機との Fix 率の差は、やや大きい結果となり、信頼性については同等であった。Fix 率に大きな差がでた理由の1つは、擬似距離の精度が、測量級受信機と比較して低コスト受信機はあまり良くないことがあげられる。今回 1 エポックの観測データのみで RTK の性能をチェックしているため、擬似距離の精度に RTK の性能が依存し、その結果として RTK の Fix 率が低下していると考えられる。なお、この 24 時間での擬似距離での DGNSS の水平方向の精度に関しては、標準偏差で NetR9 が 3.27[m], NEO-M8P が 5.51[m], そして ZED-F9P が 3.99[m]であった。低コスト GNSS 受信機の 2 台は、擬似距離を利用した測位精度がやや悪い結果となっていた。一周波対応低コスト GNSS 受信機では、このような環境では通常の設定では正しい Fix 解を得ることができないことがわかった。Fix した測位解が比較的北西と南東の方向に分散する傾向を示しているが、その方角の上空の大部分が建物に遮蔽されたことによる衛星配置の影響が主な要因である。上記のような環境では、建物の壁面に対して垂直の方向に解が分散することが知られている⁶⁾。

同様に、2019 年 1 月 9 日の 3 時 30 分(UTC)から同じ地点で 24 時間分(86400 エポック)、SPS855 と ZED-F9P のリアルタイムのデータ(静止点測位)を 1[Hz]で取得した。SPS855 の出力による Fix 率は 83.46[%]で、Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.292[m]であり、信頼性は 73.56[%]であった。ZED-F9P の出力による Fix 率は 48.11[%]で、Fix 解のみの水平方向の誤差の標準偏差は 0.031[m]であり、信頼性は 99.49[%]であった。Fix 解の平均位置から大きく逸脱したミス Fix 解は生じなかった。Fix 率が上記の後処理解析よりも多いが、カルマンフィルタ等

を利用して、擬似距離の誤差を抑制することで RTK の Fix 解を増加させていることが 1 つの要因である。実際に RTKLIB を利用して、カルマンフィルタのモードで計算すると、結果が改善されることを確認した。なお、このように建物に囲まれた環境では、魚眼カメラや精密な 3D 地図の情報を利用することや、観測データの品質を厳しくチェックすることで RTK の性能が改善されることも確認している⁷⁾。

3.3 建設現場等を想定した低速の移動体測位

建設現場内での低速移動体環境相当を評価するために、東京海洋大学海洋工学部構内にて 2018 年 12 月 26 日の 10 時頃(UTC)に移動体(短基線)のデータを 5[Hz]で取得し、RTKLIB を利用して後処理解析を行い、同時に受信機内部の RTK エンジンで計算して出力することができる RTK の結果も取得した。低速で移動する建機や重機の位置情報、現場の人員の安全確保のための位置情報の把握という観点で精度を評価した。後処理解析の設定は、3.1 節の解析と同一のものを採用した。測位に使用した衛星システムは、NetR9 と ZED-F9P が GPS/QZSS/Galileo/GLONASS/BDS で、NEO-M8P が GPS/QZSS/BDS である。実験状況や使用したアンテナは 3.2 節と同様であり、実験車両が走行した経路と各区間の走行環境を図 3.17 に示す。走行経路には、建物や木に囲まれている区間が多く存在する。図 3.17 の赤で示された経路を矢印の方向に実験用車両のクリーブ現象(時速 7~8[km])のみの走行で 5 周分(43 分 30 秒分のデータ)周回した。実験時のそれぞれの受信機やアンテナの設置状況も併せて、図 3.18 に示した。



図 3.17 走行経路と各区間の電波受信環境 (低速の移動体測位)

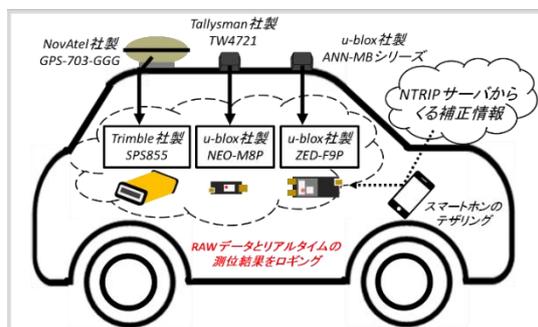


図 3.18 実験状況(低速の移動体測位)

多周波対応測量級 GNSS 受信機である SPS855 で取得した観測データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を次頁の図 3.19 と図 3.20 に示す。基準局のデータは前節までと同様に、NetR9 を使用して取得されたものであり、いずれの図においても、座標原点は基準局位置を表している。緑色のプロットが Fix 解、黄色のプロットが Float 解、青色のプロットが DGNSS 解を示している。図 3.19 の後処理の結果で青色の DGNSS 解が見られないが、瞬間 AR の設定では、DGNSS 解は Float 解に含まれていると考えてよい。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 61.69[%]で、受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 58.10[%]となった。続いて、一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した観測データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を次頁の図 3.21 と図 3.22 に示す。基準局のデータは NEO-M8T を使用して取得されたものである。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 22.34[%]で、受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 8.39[%]となり、後処理の結果と比較して、リアルタイムの結果が低い Fix 率となった。比較的周囲の開けた走行区間でないと Fix していないことが分かる。また Fix 解の位置について、大きな飛びがいくつか見られた。最後に、多周波対応低コスト GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した観測データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を次頁の図 3.23 と図 3.24 に示す。基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 52.12[%]で、受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 73.09[%]となり、後処理の結果と比較して、リアルタイムの結果が高い Fix 率となった。測量級

GNSS 受信機と同様に、Fix 解の中で大きく飛んだ結果はほぼ見られなかった。

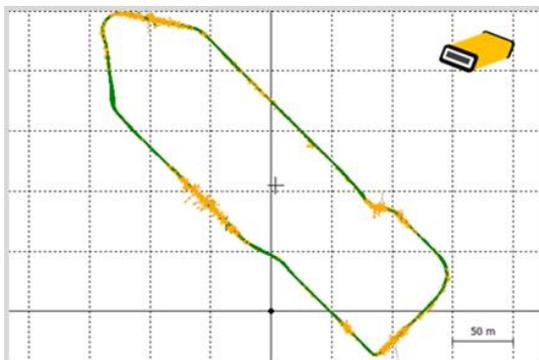


図 3.19 後処理の結果 (SPS855)

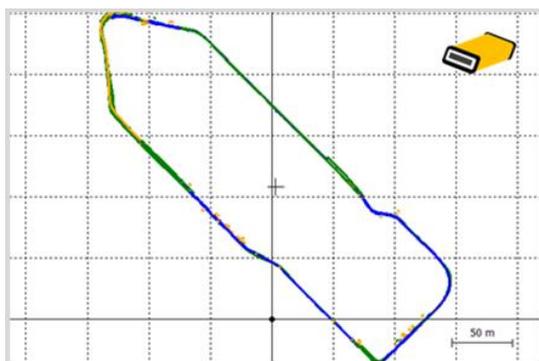


図 3.20 リアルタイムの測位結果 (SPS855)

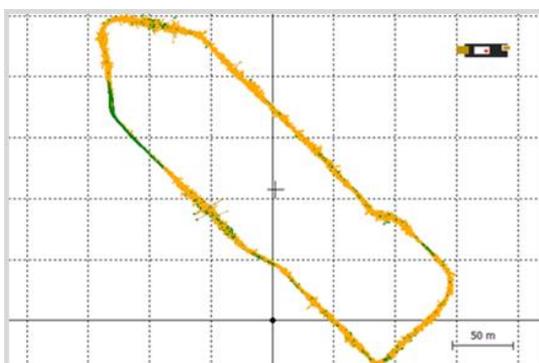


図 3.21 後処理の結果 (NEO-M8P)

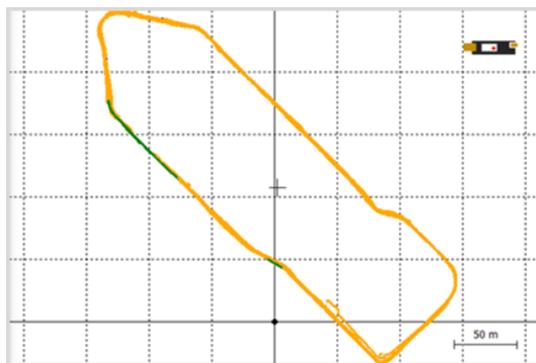


図 3.22 リアルタイムの測位結果 (NEO-M8P)

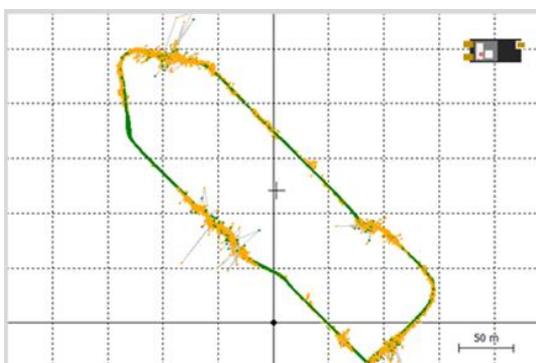


図 3.23 後処理の結果 (ZED-F9P)

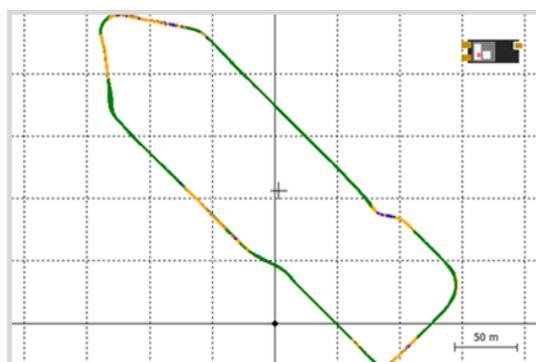


図 3.24 リアルタイムの測位結果 (ZED-F9P)

後処理解析結果のミスFix 解の割合をある程度評価するために、それぞれの同じ時刻の RTK 解の位置同士を距離差で比較した。正しい Fix 解同士であれば、この距離差は常に一定になるはずで、もしどちらかまたは両方が誤った Fix 解であれば、この距離差が大きくなる。SPS855 に使用したアンテナと ZED-F9P に使用したアンテナ間の距離は 76.0[cm]であり、SPS855 の Fix 解との比較を実施した。ZED-F9P に

に関して、同じ時刻の RTK 解同士で 10[cm]以上逸脱した測位解は、5848 エポック中 13 エポックのみ存在した。また、SPS855 に使用したアンテナと NEO-M8P に使用したアンテナ間の距離は 43[cm]であり、NEO-M8P に関して、同じ時刻の RTK 解同士で 10[cm]以上逸脱した測位解は、2353 エポック中 105 エポック存在した。この結果より完全に正しい Fix 解であるかどうかの判断はできないが、多周波対応低コスト GNSS 受信機の Fix 解の信頼性は、多周波対応測量級 GNSS 受信機と大きくは変わらないことがわかった。

3.4 標準的な都市部での高速の移動体測位

3.3 節と同様に、高速道路や広い敷地を想定した建設現場での移動体において、どの程度の精度が保証されるかを評価するために、東京都江東区内及び付近の都市部にて 2018 年 12 月 20 日の 5 時頃 (UTC)に移動体のデータを取得し、RTKLIB を利用して後処理解析を行った。走行経路には、中層及び高層ビルが散在し、高架下も多数存在する。現場内で随時稼働している建機や重機の位置情報の把握という観点で精度を評価した。後処理解析の設定に関しては、3.1 節で使用した設定と同一のものを採用している。使用したアンテナは 2.1 節の表 2.1 には記載されていない Trimble 社製の「540AP」である。540AP から各 GNSS 受信機に対して分配器を使用して信号を分配した。本節の実験では、同時に Applanix 社製の「POSLV」という装置で cm 級の精密なレファレンスとなる位置を取得していたため、そのレファレンスとなる位置を基準として、精度を評価した⁸⁾。使用した POSLV の型番は 620 で、多周波対応測量級 GNSS 受信機と 6 軸の FOG (光ファイバジャイロ)、そして DMI (高精度な車輪速計)の出力を統合したシステムである。今回利用した後処理統合解析 (RTK-GNSS と FOG 及び距離センサの統合測位)において水平方向のスペックが GNSS の RTK 有りで 2[cm](RMS)、GNSS が利用できずに 1 分経過後で 10[cm](RMS)であった。走行経路に関しては、東京海洋大学海洋工学部の構内をスタート地点としており、東京都江東区お台場まで 25 分程度走行した。実験車両が走行した経路と実験状況を図 3.25 と図 3.26 に示す。



図 3.25 走行経路(高速の移動体測位)

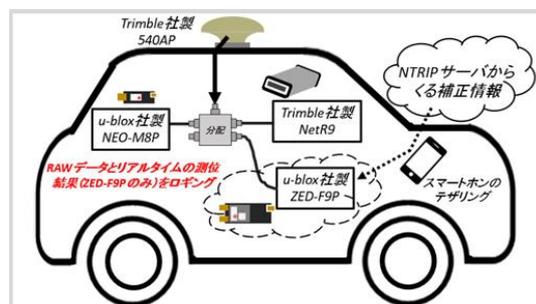


図 3.26 実験状況(高速の移動体測位)

多周波対応測量級 GNSS 受信機である NetR9 で取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.27 に示す。基準局のデータは NetR9 を使用して取得されたものである。いずれの図においても、座標原点は基準局位置を表しており、緑色のプロットが Fix 解、黄色のプロットが Float 解、青色のプロットが DGNSS 解を示している。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 65.31[%]であった。同様に、一周波対応低コスト GNSS 受信機である NEO-M8P で取得した観測データの後処理による結果を次頁の図 3.28 に示す。基準局のデータは NEO-M8T を使用して取得されたものである。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 40.77[%]であった。最後に、多周波対応低コスト

GNSS 受信機である ZED-F9P で取得した観測データの後処理による結果と受信機によるリアルタイムの測位結果を図 3.29 と図 3.30 に示す。基準局のデータと移動局のデータはともに ZED-F9P を使用して取得されたものである。RTKLIB による後処理解析の Fix 率は 59.88[%]で、受信機によるリアルタイムの測位結果の Fix 率は 86.69[%]となり、後処理の結果と比較して、リアルタイムの結果が高い Fix 率となった。

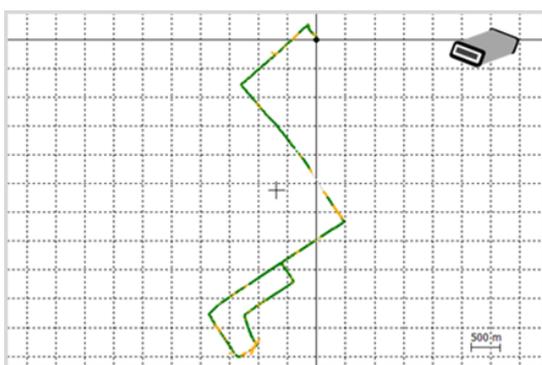


図 3.27 後処理の結果(NetR9)

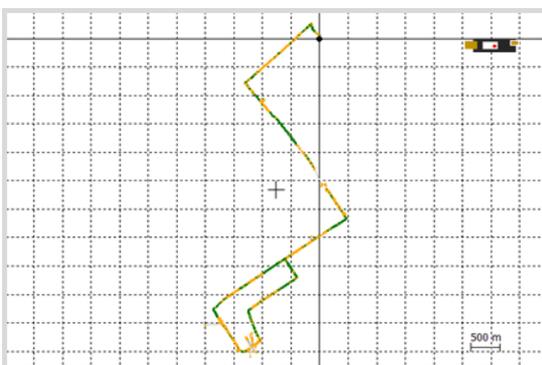


図 3.28 後処理の結果(NEO-M8P)

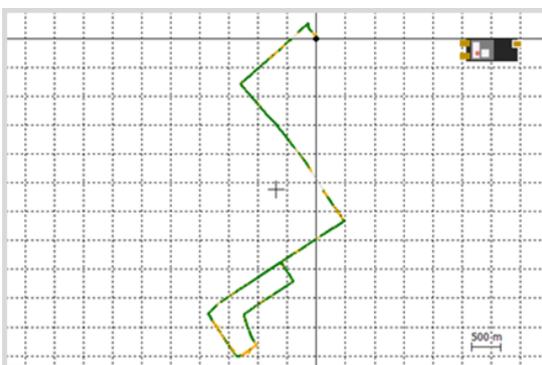


図 3.29 後処理の結果(ZED-F9P)

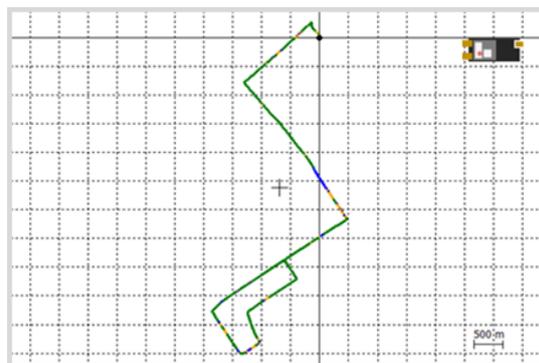


図 3.30 リアルタイムの測位結果(ZED-F9P)

後処理解析結果の精度やミス Fix 解の割合を評価するために、同一のアンテナから取得したレファレンス位置と RTK 解の位置同士を比較した。NetR9 に関しては、レファレンスに対して標準偏差が 0.31[m]で、信頼性に関しては静止点と同様の評価(全 Fix 解のうち、レファレンスの位置から 10[cm]以内に入っている割合)で、98.65[%]であった。NEO-M8P に関しては、標準偏差が 0.86[m]であり、信頼性に関しては 96.25[%]であった。ZED-F9P に関しては、標準偏差が 0.46[m]であり、信頼性に関しては 98.92[%]であった。なお、ZED-F9P のリアルタイム結果に関しては、標準偏差が 0.058[m]であり、信頼性が 99.83[%]となり、レファレンスの位置から大きく逸脱したミス Fix 解はほとんど生じなかった。

4. 結果を踏まえた代替可能性に関する考察

3章で示した実験により得られた後処理結果(RTK の Fix 率、Fix 解の標準偏差、水平 10cm 以内の割合)を表 4.1 にまとめた。多周波対応測量級 GNSS 受信機を多周波測量級、一周波対応低コスト GNSS 受信機を一周波低コスト、多周波対応低コスト GNSS 受信機を多周波低コストとした。それぞれの結果は、上より Fix 率、標準偏差(レファレンスとなる精密位置がある場合)、水平位置が精密位置より 10[cm]以内の割合を示した。ただし、実験環境の 2 つ目の結果は、Fix 解の平均位置より 10[cm]以内の割合を、実験環境 4 つ目の結果はレファレンス位置より 10[cm]以内の割合を示していることに注意されたい。

表 4.1 後処理解析結果の比較まとめ

実験環境	指標	多周波 測量級	一周波 低コスト	多周波 低コスト
周囲に遮蔽物のないオープンスカイ環境下 (静止データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	99.98[%] 0.0024[m] 100[%]	99.99[%] 0.0025[m] 100[%]	99.98[%] 0.0023[m] 100[%]
建物に囲まれたマルチパスの影響の大きい環境下 (静止データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	17.03[%] 0.012[m] 100[%]	1.53[%] 4.52[m] 55.39[%]	2.47[%] 0.012[m] 100[%]
ビル等の障害物や木等が存在する環境下 (低速移動体データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	61.69[%] - -	22.34[%] - -	52.12[%] - -
ビルや高架等が存在する都市部一般道路の環境下 (移動体データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	65.31[%] 0.31[m] 98.65[%]	40.77[%] 0.86[m] 96.25[%]	59.88[%] 0.46[m] 98.92[%]

オープンスカイ環境下では受信機による性能差は3つの指標ともに見られなかった。この結果はRTKのFix解が得られた場合、低コスト受信機でもmmレベルの精度が得られていることを示している。以降のマルチパス環境の3つについては、測量級GNSS受信機が優れた結果となった。マルチパス波の影響が大きな静止環境下の後処理解析においては、Fix率で多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の間には15[%]程度差が見られた。標準偏差については両者で同程度であった。一周波対応低コストGNSS受信機では、まともなFix解が得られていないことがわかった。2つのリアルな走行場所での移動体データの後処理解析において、多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の差に関しては、Fix率で10[%]以内程度で、精度に関してはほぼ同程度であった。一周波対応低コスト受信機に関しては、少なくとも今回のようなマルチパス環境下での使用において、測量級受信機に対する代替は難しいといえる。

次に、リアルタイム結果を上記の表4.1と同じ指標で表4.2にまとめた。表4.2を見るとわかるように、実際には一部の試験環境と受信機で実施しているため、後処理解析と比較して、実運用上問題ないレベルかという観点で検証した。最初のマルチパスの影響の大きい静止環境では、測量級GNSS受信機のFix率が後処理解析結果と同様に高かった。後処理解析結果のFix率と比較して、測量級GNSS受信機、多周波対応低コスト受信機いずれもリアルタイムのほうが、Fix率が高かった。標準偏差やFix解の平均位置より10[cm]以内の割合の結果が、測量級GNSS受信機でやや低い結果となったが、受信機に内蔵され

るRTKエンジンはブラックボックスのため、今後は、自前で開発したリアルタイム用のRTKエンジンで確認する必要があるといえる。マルチパス環境下の低速移動体では、測量級GNSS受信機は、ほぼ同様のFix率となった。多周波対応低コストGNSS受信機は70%を超えるFix率で後処理解析結果より高いFix率となった。一方、両者の直接の比較はできなかったが、ビルや高架などが存在する都市部一般道路の環境下において、多周波対応低コストGNSS受信機は86.69[%]のFix率となった。レファレンス位置より10[cm]以内の割合の結果は99.83%となった。

以上の結果より、後処理解析性能において、多周波対応低コストGNSS受信機は、測量級GNSS受信機に対して、RTKの性能がやや劣るかもしくはほぼ変わらないといえる。受信機の内部エンジンの利用を想定した場合は、多周波対応低コストGNSS受信機のFix率が後処理解析結果より高くなったが、上述の通り、受信機に内蔵されるRTKエンジンはブラックボックスのため、今後は、自前で開発したリアルタイム用のRTKエンジンで確認する必要があるといえる。

表 4.2 リアルタイム結果の比較まとめ

実験環境	指標	多周波 測量級	一周波 低コスト	多周波 低コスト
建物に囲まれたマルチパスの影響の大きい環境下 (静止データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	83.46[%] 0.29[m] 73.56[%]	- - -	48.11[%] 0.03[m] 99.49[%]
ビル等の障害物や木等が存在する環境下 (低速移動体データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	58.10[%] - -	8.39[%] - -	73.09[%] - -
ビルや高架等が存在する都市部一般道路の環境下 (移動体データ)	Fix率 標準偏差 10cm以内	- - -	- - -	86.69[%] 0.06[m] 99.83[%]

5. まとめ

本稿では、測量級GNSS受信機の出力と低コストGNSS受信機の出力の解析結果を比較することで、現状市販されている低コストGNSS受信機が、測量級GNSS受信機に対してどの程度代替可能であるかを調査した。3章と4章で示した結果より、多周波対応低コストGNSS受信機と測量級GNSS受信機の間には観測データの質及びRTKの測位性能としては、擬似距離の精度以外には大きな差は見られなかった。一方、一周波対応低コストGNSS受信機は、オープンスカイ環境であれば利用できるものの、マルチ

パス環境になると、その性能は多周波対応 GNSS 受信機に及ばないことが明らかであった。受信機のリアルタイムの RTK 測位性能に関しては、多周波対応低コスト GNSS 受信機の方が測量級 GNSS 受信機よりも性能がやや高い結果が得られたが、受信機に内蔵される RTK エンジンの性能差によるものであると予測され、自前のリアルタイム RTK エンジンで再度検証する必要がある。上記の結果を踏まえて、測量分野や建設分野で利用されている既存のシステム中の測量級 GNSS 受信機に対して、多くの GNSS 受信機をセンサとして利用する現場支援の場面においては、多周波対応低コスト GNSS 受信機が利用可能ではないかと考えられる。広大な敷地の測量や、重機や建機等が行き交う建設現場等では、正確な位置情報を把握可能な、できる限り安価なシステムが要請されている。測量級 GNSS 受信機で対応すべき公共測量等のアプリケーションは残しつつも、新たに ICT 施工を行っていく上でのコスト面での課題をクリアできるため、より多くの GNSS 受信機をセンサとして利用するという意味において、多周波対応低コスト GNSS 受信機の利用価値が存在すると考えられる。

今後の課題は、継続してより多くの現場実環境での性能を比較するとともに、異なる機種間での RTK の性能がどのように変化するかまたは変化しないのかを調査することである。また今回利用した小型のパッチアンテナで、Fix 率等について大きな問題は見られなかったが、アンテナの位相中心については詳細に調査する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省 i-Construction 委員会, “建設現場の生産性革命,” 平成 28 年, <http://www.mlit.go.jp/common/001127288.pdf> (Accessed 23/1/2019)
- 2) 菊池錬, 久保信明 “マルチ GNSS による 1 周波 RTK 瞬時 AR 性能の評価” 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月
- 3) 菊池錬, 久保信明 “GPS+BeiDou の 1 周波 RTK の瞬時 AR 性能について” 測位航法学会シンポジウム, 2014 年 10 月
- 4) <http://www.rtklib.com/> (Accessed 23/1/2019)
- 5) <http://datahouse1.gsi.go.jp/gsilib/gsilib.html> (Accessed 23/1/2019)
- 6) S. Takahashi, N. Kubo, N. Yamaguchi, and T. Yokoshima, “Real-Time Monitoring of Structure Movements Using Low-Cost, Wall-Mounted, Hand-held RTK-GNSS Receivers” Proceedings of the 31st International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), pp. 2074–2086, 2018.
- 7) Hiroko Tokura, Nobuaki Kubo, “Efficient Satellite Selection Method for Instantaneous RTK-GNSS in Challenging Environments” Trans. Japan Soc. Aero. Space Science, Vol.60 No.4 pp. 221–220, 2017
- 8) <https://www.applanix.com/jp/products/poslv.htm> (Accessed 23/1/2019)