

安価な一周波タイプローカル・エリア RTK システムと ネットワークを使用したリアルタイム精密測位の検証

新村 太郎^a 那須 仁予^a

Validation of Real-Time Precision Positioning Using Inexpensive Single-Frequency Type Local Area RTK System and Networks

Taro SHINMURA^a & Masayo NASU^a

^a熊本学園大学経済学部

Faculty of Economics, Kumamoto Gakuen University

abstract

Shinmura and Nasu (2020¹, 2021²) constructed and verified an inexpensive and easy-to-handle local area RTK-GNSS^{3,4,5,6} positioning system and obtained stable data with an accuracy of less than a few centimeters. In this study, we extended this system to automatically perform RTK positioning every second to verify the accuracy and reliability of real-time data. The positioning was conducted at two reference stations. One was at location where there were obstacles to GNSS satellite signal reception such as buildings and trees on the university campus, (the ground fixed point which was used in Shinmura and Nasu, 2021). The other was at the rooftop of the 11-story school building, the rooftop fixed point where the reference station had already been set up, the sky was open and there were very few obstacles to GNSS satellite signal reception. At the ground station, the network connection status, temperature and relative humidity were also measured simultaneously. 600 data were acquired in 10 minutes, and the data with the highest ratio were selected for analysis.

At both the ground and the rooftop fixed points, in the distribution of the difference between the representative value and the value determined as the most concentrated value of the data, there was a large gap of about 3.0×10^{-7} degrees where the distribution became less. After evaluating the data quality using this as the boundary between normal and missed fix values, we explored the causes of the quality decline and found a way to improve the overall quality at the data processing stage. The quality of the overall data was evaluated in the size of the standard deviation to determine the variability, and whether

the representative values fell within the error range of two times the standard error. For the ground fixed point, the standard error of all data was more than 10 times more accurate than that of D-GNSS, but this was inadequate as expected for RTK positioning. By filtering the data with less than 15 satellites reception and less than 9 ratio value, the data quality and reliability were improved to a satisfactory level. For the rooftop fixed point, the standard error of all data was about 1 mm in both horizontal and height directions, which was much more accurate than the data from the ground fixed point, and we could obtain highly accurate and reliable data with less scatter. By filtering the data in a similar way, it was possible to obtain accurate RTK positioning data in real-time without degrading the quality of the data. This result shows that it is possible to obtain accurate and reliable RTK positioning data in real-time by using statistical processing to eliminate outliers. And furthermore, it would be able to be applied to automatic driving of automobiles, automatic flight of drones, and ground motion and deformation monitoring systems.

キーワード：低コスト精密測位システム、ローカル・エリア リアルタイムキネマティック GNSS、ユビキタスネットワーク、みちびき、RTKLIB

key word: Low-cost Precise Positioning System, Local-Area RTK-GNSS, Ubiquitous Networking, QZSS, RTKLIB

1. はじめに

現在では GNSS (Global Navigation Satellite System) 衛星から放送される信号コードを利用するコード測位⁸は、世界中でスマートフォンやカーナビをはじめとした身近な電気・電子製品で一般に広く使用され、人々の暮らしや社会を支えている。GNSS 衛星の数は年々増加して受信精度は向上し、なおかつ様々な補正方法と組み合わせて使用されているが、一般的にはまだ数 m の誤差が含まれている。一方で GNSS 衛星から放送される信号の搬送波そのものとその位相を利用する搬送波位相測位²では数 mm ~ 数 cm の小さい誤差で高精度な測位を行うことができ、主として測量などの産業分野で活用されている。この測位方法では高感度のアンテナと受信機が必要であり、コード測位のための機器に比較して大きいことと高価であるために、利用範囲はまだ限られている。この測位方法は測位する対象の状態によって、静止している場合はスタティック測位、動いている場合はキネマティック測位に分けられている。

新村・那須 (2021)⁶は大学の学内案内システムの構築作業において、大学内の建物や施設の簡易測量を行うために、キネマティック測位の1つである RTK (Real-Time Kinematic) 測位を利用した。またそれに先立ち、新村・那須 (2020)⁵では RTK 測位を安価で行うためのシステムを構築し、基準点の最寄りの数カ所の水準点で RTK 測位を行い、実際に正しい位置情報 (緯度、経度および高度) を取得できることを確認した。新村・那須 (2021) では 2 ヶ月半にわたって連続的に日ごとの RTK 測位データを取得することによって、測位結果

は時間が経過してもほぼ一定の精度で再現性が保たれていることを確認した。

RTK はリアルタイムで精密な位置情報を得ることができることから、自動車の自動運転のアシストやドローンの自動飛行、地殻変動や土砂災害の監視など様々な活用方法が考えられる。新村・那須 (2021) では人が日に 1 回測定するという方法であり、測定の際にはデータが安定するまで数分間もしくはそれ以上の時間をかけた。時には数分単位でデータの安定性が変動することもあったが、正確に記録はされていない。RTK 測位では受信した GNSS 衛星の電波と、ネットワークなどを介して取得した基準局のデータを処理して位置情報を算出するために、受信可能な GNSS 衛星の数とその配置、受信に影響する周辺の建物や植生、気象条件、さらに基準局データの取得状況 (ネットワークの状況) など、様々なことがデータの精度に影響を与える。本研究では RTK 測位データをリアルタイムで取得した場合にどのような精度が期待されるかを明らかにするために、新村・那須 (2020) で構築した RTK 測位システムに改良を加えて、RTK 測位を 1 秒ごとに自動的かつ連続的に行って記録している。またその精度に影響を与える要因を特定するために、ネットワーク接続状況や環境データ (温度および湿度) も同時に取得して RTK 測位データの精度と比較を行っている。本論では新村・那須 (2021) のデータと比較を行うことによって短い期間における変動を確認することを目的とした。RTK 測位に影響を与える可能性がある気候と植生の条件をできるだけそろえるために、同じ時期である 11 月のデータのみ使用して比較を行い、データを分析した。他の期間のデータについては稿をあらためて報告する。

2. システム構成

RTK 測位は測位対象の位置に設置する移動局と、移動局のために補正データを送信する基準局で構成される。基準局については新村・那須 (2020) で構築したシステムをそのまま使用したので説明は省略する。移動局は新村・那須 (2021) で測位を行った場所 (以下、地上定点と表現する) に設置した。ここでは校舎や周辺の構造物、植生のために信号を受信可能な GNSS 衛星の数が限られるばかりでなく、減衰やマルチパスが生じて測量結果を悪化させている⁹ (図 1B)。測位結果に悪影響をもたらす要因を絞り込むために、新村・那須 (2020) で設置した学内の校舎屋上にある基準局に隣接した位置にも移動局を設置した (図 2) (以下、屋上定点と表現する)。ここは空が開けており、障害物やマルチパスを引き起こすものが周辺にほとんどない。

(1) 地上定点

新村・那須 (2021) では測位を行うたびに機材を対象位置に持参して、人の手でアンテナを置いて測位を行った。データの処理はスマートフォン (Android OS) にインストールした専用アプリ「rtkgps+」¹⁰ を使用した。今回は同じ受信機材 (アンテナと受信機 NEO-M8P-0¹¹) を使用したが、自動かつ連続的に測位を行うために対象位置にアンテナを固定して、データ処理用のコンピュータを含めたシステム一式を常時設置した (図 1A)。アンテナおよび GNSS 受信機は新村・那須 (2021) で使用した機器構成と同様の Tallysman Wireless 社の TW2710 (アンテナ) および ublox 社の NEO-M8P-0 (受信機) である。新村・那須

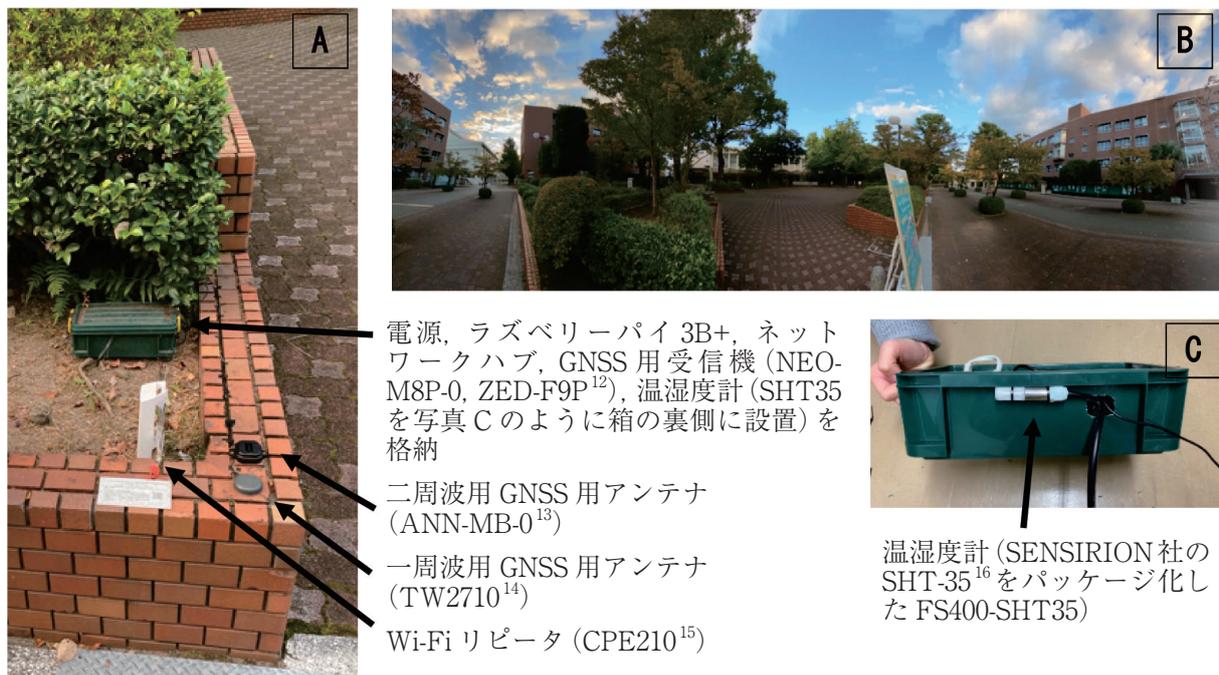


図1 移動局(地上定点)の設置状況と機器構成

写真 A のように植え込みのレンガの上に一周波および二周波用 GNSS 衛星受信アンテナを固定(強力な両面テープを使用)。それぞれのアンテナで受信された信号は同軸ケーブルをつたい, それぞれ緑色の箱にある受信機 (ublox 社の一周波用 NEO-M8P-0 および二周波用 ZED-F9P) に入る。写真 C のように緑色の箱の植え込み側の外側に温湿度計 (SENSIRION 社の SHT-35 をパッケージ化した FS400-SHT35 で相対湿度精度は 1.5%RH, 温度精度は 0.1℃) を設置して, データはラズベリーパイに I²C 入力される。Wi-Fi リピータ (TP-LINK 社 CPE210) はラズベリーパイを研究室の LAN に接続して, 基準局データの受信と測位データの送信を行う。データの処理の流れは文中および図 3 に記載した。写真 B のように周辺は校舎や植生によって囲まれている。植生は人工的に植えられた広葉樹が主体であるため, 季節による GNSS 衛星の電波の受信状況は大きく異なる。本論で対象とした期間である 11 月は 1 年の中でも受信状態が比較的良好な時期である。



図2 屋上定点に設置した基準局および移動局

11階建ての校舎屋上に設置されたパラボラアンテナの支柱を利用して GNSS 衛星データ受信用のアンテナを設置した。アンテナは右から二周波基準局用, 一周波基準局用 (新村・那須, 2020 で報告したものと同様, 本論文で利用), 一周波移動局用 (地上定点と同じもので本論文で利用), 二周波移動局用。

(2021) では、測位を実施する時には設置場所のレンガの模様を基準にして決めた定点に手でアンテナを置いて、測位終了後に撤去した。今回は同じ場所にアンテナを常時固定した。ここでは RTK 測位データを処理するためにラズベリーパイ 3B+ に OS として Raspbian をインストールして使用した。RTK 測位に必要なプログラムとライブラリがそろっている RTKLIB¹⁷ を「測位衛星による高精度測位技術の研究開発」ホームページ¹⁸ からダウンロードしてコンパイルおよびインストールして使用した。RTKLIB のうち移動局用の処理プログラム (rtkrcv) を使用して 1 秒おきに約 10 分間連続的に処理を行うためのシェルスクリプトを作成して、cron によって定期的に行うさせた。ここでは 10 分間に取得した約 600 個のデータから最も ratio の高い結果を 10 分間の代表値として記録した。ラズベリーパイは Wi-Fi リピータ経由で研究室内の Wi-Fi アクセスポイントに接続しており、そこからさらに学内 LAN を経てインターネット接続した。使用する基準局データはインターネット上にあるキャスタサーバ経由で取得した。rtkrcv の設定ファイルおよび動作させるためのスクリプトと cron の内容を本論文末の付録 A および B に示した。データの流れを図 3 にまとめた。

温度と湿度を自動観測するために、機器を格納したコンテナ外部に温湿度計 (SENSIRION 社の SHT35 をステンレスおよびプラスチックハウジングして防塵防水対策をした FS400-SHT35) を取り付けて (図 1C)、取得した信号を I²C 入力でラズベリーパイに入力して RTK 測位データと同様に 10 分おきに取得した。さらにネットワーク接続の監視を行うためにラズベリーパイでから Wi-Fi のアクセスポイントとキャスタサーバに対してそれぞれ ping を毎 10 分に約 10 分間行った結果を集計してファイルに出力した。これらのデータはラズベリーパイ内部のファイルに記録されると同時に、データの取得状況をリアルタイムで確認できるように外部サーバへ自動的に転送した。温度と湿度の自動計測とネットワーク監視のための cron 設定とスクリプトを付録 A および C に示した。

(2) 屋上定点

新村・那須 (2020) で構築した基準局システムのアンテナから十数 cm 離れた所に、屋上定点としてアンテナを設置した (図 2)。ここは空が開けており、かつ周辺には避雷針の他に設置地点より高い建物や構造物はないために、受信可能な GNSS 衛星数は多く、マルチパスの影響は非常に小さい。移動局としての機器構成と設定は前述の地上定点とほぼ同様であるが、温湿度計測とネットワーク接続の監視は行っていない。機器構成とデータの流れを図 4 に示した。新村・那須 (2020) の基準局システムでは、ネットワーク接続は基準局データ処理用のラズベリーパイに USB ドングルを接続していたが、ネットワーク再接続のための OS の再起動時に RTK データ取得が中断しないように、別のラズベリーパイに USB ドングルを接続してネットワーク接続・監視を行わせた。ここでの RTK 測位に関する移動局としての設定と動作は、地上定点と同様であり、毎 10 分に約 10 分間のデータを集計してログと代表値をファイルに出力して、管理用サーバに転送した。

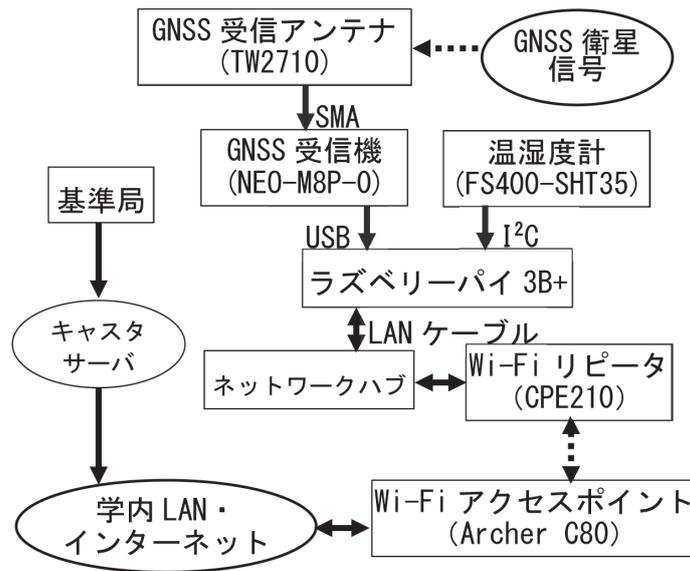


図3 地上定点の機器構成と関連するネットワークおよびデータの流れ

矢印はデータの流れて、実線は有線、破線は無線の区間。ラズベリーパイ 3B+ には、GNSS 衛星信号を受信機で受信して処理された RTK データが、シリアルポートとして認識された USB 経由で入力される。基準局情報はインターネット上にあるキャストサーバを経由してネットワークを通じてラズベリーパイが受け取り、RTK データとあわせて処理されて正確な位置情報が出力される。温湿度計 (SENSIRION 社 SHT35) からはラズベリーパイの I²C にデータが入力されて処理される。

Wi-Fi 接続は TP-Link 社の Wi-Fi ルータ CPE210 をリピータとして設定、Archer C80¹⁹ をアクセスポイントとして設定して使用した。

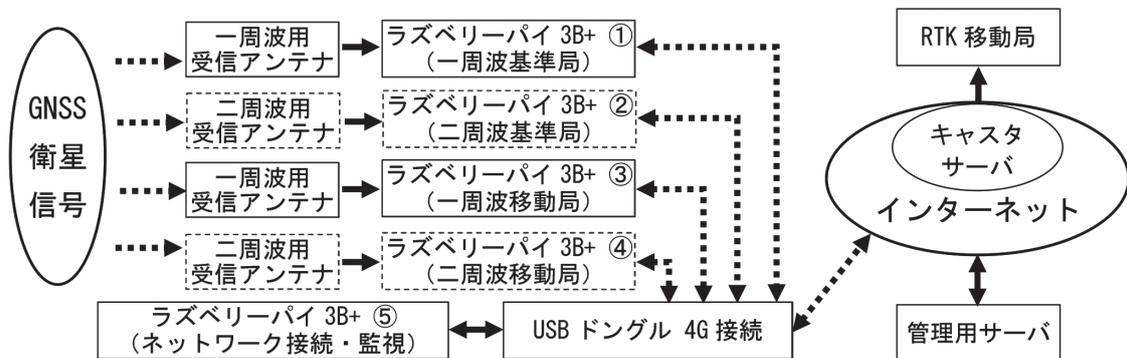


図4 校舎屋上に設置した基準局および屋上定点の機器構成と関連するネットワークおよびデータの流れ

矢印はデータの流れて、実線は有線、破線は無線の区間。ラズベリーパイは①～⑤の5台を使用した。そのうち一周波用の基準局用、移動局用およびネットワーク接続・監視用の合計3台を本論でデータ取得に使用した。一周波用のアンテナは Tallysman Wireless 社の TW-3710²⁰ で受信機 (ublox 社の NEO-M8P-2) に接続。二周波用のアンテナおよび受信機は地上定点と同様。ネットワーク接続・監視用のラズベリーパイの USB ポートに接続した USB ドングル (ピクセラ社の PIX-MT100²¹ にイオンモバイルの SIM を入れて使用) によってインターネット接続した。基準局のデータはインターネット上にあるキャストサーバへ送られる。移動局はキャストサーバ経由で基準局データを受信する。ネットワーク接続・監視用のラズベリーパイは1分ごとにネットワーク接続を監視して、切断された場合は本体を再起動することによって再接続する。さらに外部の管理用サーバから ssh 接続できるように、ssh によるトンネルを設定した。

3. 測定結果と考察

地上定点は 2021 年 4 月、屋上定点は同年 11 月に設置して測定を開始した。RTK 測位による精密な位置データをリアルタイムで常に取得、配信するためには、システムがハードとソフトともに安定して連続的に動作し、なおかつネットワーク経由のデータ通信が滞りなく行われる必要がある。ここでは先ずシステムの動作状況と必要となった保守やシステム改良について報告し、その後に地上定点、屋上定点で取得したデータの解析を行っていく。

地上定点においてラズベリーパイによって毎 10 分おきに RTK 測位を開始した。データを 1 秒間に 1 個取得して、10 分間に取得した約 600 個のデータから RTK 測位の品質の目安となる ratio の値が最も大きいデータを抽出して 10 分間の代表の値とした。RTK 測位の 1 秒ごとのすべてのデータはログとして記録して、10 分おきの RTK 測位の代表値と気温、湿度およびネットワーク状況のデータはログとは独立したファイルに出力した後、管理用サーバに転送した。ここでは 10 分ごとの集計データを解析に用いた。1 分毎の細かいリアルタイムデータについては、稿をあらためて報告する。屋上定点の移動局システムでは、温湿度とネットワーク状況を除いた RTK 測位結果は、地上定点と同様な手順、方法、形式で出力した。

(1) システムの動作状況と改良

地上定点のシステムは 2021 年 4 月に設置されて動作を開始し、本論を執筆している 2022 年 1 月時点も継続してデータを取得している。動作開始してからの約 9 ヶ月間に起きたトラブルとその対処方法および結果は以下の通りである。

① 2021 年 8 月、地上定点でラズベリーパイのマイクロ SD カードのトラブルによって、OS がカーネルパニックを起こしてシステムそのものがフリーズした。装置は密閉されたコンテナに格納されており、電源やラズベリーパイの発熱によって熱がこもり易い状況であった。気温が高い上に、夏の強い直射日光がコンテナの一部に当たると加熱されて内部の温度がさらに上がるために、ラズベリーパイ本体を中心として高温になったと考えられる。高温な状態に晒され続けたマイクロ SD カードに不具合が生じた可能性が高いため、耐久性のあるマイクロ SD カードに交換した上に、ラズベリーパイに冷却ファンを取り付けた。その後は同様のトラブルは起きていない。

② 時期を問わず基準局側の USB ドングルの 4G 接続が時々切れて、基準局データの送信が止まり、定点の移動局でシングルモードの測定のみが続くことになった。ラズベリーパイに接続した USB 機器が不安定になった原因は、ラズベリーパイに供給される電力が元々小さかったために USB 機器に供給される電力がさらに小さくなって生じた。当初は 1A の安価な充電器を使用していたが、対策として 3A タイプの充電器にそれぞれ 1 台のみラズベリーパイを接続するようにした。その後 4G 接続が切れる頻度は激減したが、なくなることはなかった。USB ドングル PIX-MT100 には再接続することが仕様で明記されていないために詳細は不明であるが、本製品はノートパソコンなどに取り付けて長くても数時間程度の使用を想定したものであり、何十日間も継続して使用することを想定した仕様ではなく、何らかの理由で回線が切れた場合に再接続を行う仕様ではないことが予想される。そのため非常に安定した動作が要求される場合は、回線への再接続が明記された装置を使用する必要がある。

今回は安価で構築するということが目的の1つであったために、この装置を継続して使用することにした。そしてその対策として、ネットワーク接続を監視して、切れた場合にはOSを再起動してUSB ドングルが4G回線へ再接続するようにした。RTK 基準局や移動局に使用しているラズベリーパイのOS²³を再起動すると、RTK 測位のための動作が強制的に中断されて、予想外のトラブルを引き起こす恐れがあるため、それらとは独立したラズベリーパイにUSB ドングルを設置して、上記のネットワーク接続動作および監視を行わせた。cronによって毎分一定回数のpingのパケットを管理サーバや安定して運用されているインターネット上の複数のサーバに対して送り、すべてのサーバから応答がない場合にはネットワークが切断したと判断してOSを再起動させた。このしくみを取り入れて以来、基準局データの配信が数分間以上止まることはなくなった。

③ 地上定点のアンテナ線の断線 (コネクタ部分) によってGNSS衛星の電波が全く受信できなくなった。収納時に物理的に強いテンションがかかったために内部で断線したと思われる。信号線などの細い線の扱いには細心の注意を払う必要があるが、正常なデータの取得が中断した場合には即座に調査する必要がある。正常でないデータを自動的に判断する基準をどう定めるかについては、今後の課題であるが、最新のデータをいつでも管理サーバ上のwebで公開して、容易に確認できるようにした (図5)。

RTKログ

1周波 学内定点

```
202201240010 IPAddr:192.168.0.120 : ping-to-WiFiR 0% loss, ave=7.003 ,mdev=22.100 ms : ping-to-CAS 0% loss, ave=25.007
,mdev=14.669 ms: 11C 95% RTK: 2194 54432.000 32.803894182 130.729496880 52.6343 1 17 0.0059 0.0047 0.0142 0.0029 0.0050
-0.0032 1.01 97.5
```

2周波 学内定点

```
202201240015 RTK: 192.168.0.121 IPAddr:2194 54639.997 32.803888759 130.729501520 44.0576 1 5 0.1958 0.3004 0.4937 0.2393
0.3498 0.2987 1.00 6.6
rtk.conf
```

1周波 基準局隣

```
202201240010 RTK: 192.168.1.30 IPAddr:2194 54588.000 32.803790556 130.730540772 86.3687 1 21 0.0055 0.0042 0.0114 0.0013
0.0015 -0.0051 1.00 999.9
```

図5 ホームページ²²上に表示された定点で取得した最新データ

最新のデータのみをホームページで公開したことによって、ネットワーク接続と定点の移動局のシステムがすべて正常動作しているかの確認ができる。またRTKではなくシングルモードが継続した場合は基準局に何らかの不具合が発生している可能性があることも即座に分かる。1周波学内定点のデータは左から、日付と時刻、IPアドレス、pingの結果、気温と相対温度、GPST、緯度、経度、高度、測位モード、捕捉衛星数、北と東と上方向への標準偏差、北-東と東-上と上-北の共分散行列の各成分、age (基準局データとの時間差)、ratio。

(2) 地上定点の RTK 測位結果

図 6 に RTK 測位結果のうち fix 解 (ratio が 3 以上)^{9,24} の 10 分ごとの代表値を時間順にプロットした。float 解 (ratio が 3 未満) は除いた。左上の図 6A は縦軸に緯度 (度)、横軸に時間を取り、約 26 日間における 10 分ごとの代表値を示した。得られたデータの ratio の分布にはギャップがあり、それにしたがってグループ分けすると大きく 3 つのグループに分けることができた。色は ratio によるグループの違いであり青が 3 ~ 10、黄色が 10 ~ 100、赤が 800 以上である。3 つあるグラフの最も上ではすべてのデータ (n=1442) がプロットできるデータ範囲 (32.8020 度 ~ 32.8060 度) で示した。ratio が最も低いグループ (青) はややばらつくものの、このスケールでは数個のデータを除いてほとんどが 32.8040 度付近に集中している。中央のグラフは上のグラフの縦軸の緯度のスケールを 10 倍拡大して、データが集中する範囲が全体の範囲の中央付近にくるように表示した (32.80370 度 ~ 32.80410 度)。この表示範囲では青いデータのばらつきは大きくなるが 32.80390 度付近に集中する傾向にある。ratio が中間グループ (黄) は、この表示範囲では青色のグループと同様に 32.80390 度付近に集中するが、数個のデータを除いてほぼ一直線上に並んでおり、集中の度合いは非常に高い。最も ratio が高いグループ (赤) はデータ数が少ないが黄色のグループと同様の傾向である。ここでの緯度の範囲におけるデータの集中の程度を確認するために、図 6B に同様の範囲でデータの数をヒストグラム表示した (図 6B の上の図)。中央の 32.80389 度 ~ 32.80390 度の区間に 867 個のデータがあり、他の区間に比較して圧倒的に多い。この区間内でさらにデータが集中している 32.8038938 度 ~ 32.8038946 度の範囲を図 6A の下に示した。中央のグラフの集中域を約 500 倍拡大したことになる。ここでは縦軸の 1 目盛りが約 2cm に相当する。青色および黄色のグループは数個のデータを除いて全て、赤色のグループは全て 32.8038940 度 ~ 32.8038944 度の範囲に入る。グラフでは一見この範囲でデータがまんべんなく分布しているように見えるが、重なってプロットされている可能性もあるので、ヒストグラムとして図 6B の下に示した。ヒストグラムから、この範囲のほぼ中央の 32.80389420 度 ~ 32.80389422 度のデータ区間が最もデータ数が多く、正規分布に近い形でデータが分布しているのが分かる。よってこの定点の座標の緯度はこの区間の中央であるおよそ 32.80389421 度と推定することができる。

同様にして図 6C において経度のデータをプロットすると、集中域は 130.7294969 度 ~ 130.7294972 度の間にあることが分かる。集中域の幅はおよそ 3cm であり緯度の場合と同様である。これをヒストグラムに表示してデータが集中している区間から経度の真の値を推定するとおよそ 130.72949704 度である (図 7)。高度について図 6D にプロットして集中域を確認すると、およそ 52.60m ~ 52.70m の領域にあることが分かり、これをヒストグラムに表示してデータが集中している区間から高度の真の値を推定するとおよそ 52.655m である (図 7)。またこれらの値と、fix した全データおよび図 6 における ratio によるグループごとの位置データの平均値と標準偏差を計算してまとめると表 1 のようになる。この中で緯度、経度、高度ともに最もばらつきが小さいのは ratio が 10 ~ 100 の範囲のデータである。経度と高度の値では、ヒストグラムから得られた分布のピーク値と平均値が異なっており、経度では約 3cm の差、高度では約 4cm の差である。ratio が 800 ~ の範囲では ratio が 3 ~ 10 の



図6 地上定点における RTK 測位結果 (10分ごとの FIX 値の代表値と分布)

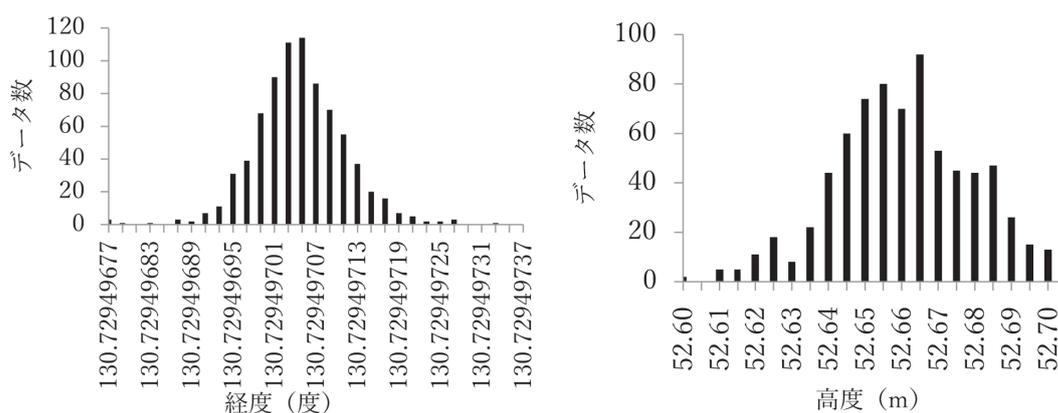


図7 地上定点における RTK 測位結果のうち経度(左)と高度(右)の集中域におけるデータ数分布

表1 地上定点における fix 値による位置データとそれらの ratio による値

ratio	データ数	緯度 (度)		経度 (度)		高度 (m)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
3~(全体)	1442	32.80388817	0.00005567	130.72950310	0.00005263	55.511	16.768
3~10	1094	32.80388622	0.00006368	130.72950509	0.00006011	56.445	19.132
10~100	333	32.80389421	0.00000682	130.72949667	0.00000763	52.617	1.784
800~	15	32.80389661	0.00000742	130.72950063	0.00001812	51.655	2.162
ヒストグラムによる分布のピーク		32.80389421	-	130.72949704	-	52.655	-

範囲に比較して緯度と高度ではばらつきが若干大きいのに対して、経度のばらつきは倍以上ある。ratio は RTK データの品質を表す示標であるから、ratio が 800 ~ の範囲では、本来ならば最も良好なデータが得られているはずであるが、地上定点のような受信環境が悪い場所では ratio の高いミス fix 値が算出されてばらつきを大きくしている。また ratio が 3 ~ 10 の範囲では fix データの中には、図 6 から明らかなようにミス fix データとして大きく外れたデータが数多く含まれている。ばらつきは 1% 未満の数少ない外れ値を含めば数百メートル、数 % 程度の外れ値を含めると数十メートルのばらつきとしてみられる。分布のピークの値と平均値の差は約 1m であり、3 つのグループの中で最も大きい。データの精度や信頼性は新村・那須 (2021) で報告した GNSS 衛星のコード波を利用した従来のハンディ GPS 受信機 (D-GPS を使用) に近く、RTK 測位としては使うことができない低い精度である。

(3) 地上定点のRTK測位データの信頼性と精度

新村・那須（2021）では2019年11月から2020年1月にかけて地上定点においてRTK測位を行った。ここでは測定を開始してから数分間もしくはそれ以上の時間データを監視して、fixした状態が継続していることを確認してからデータを記録した。そして全データの解析を行って推測される真の値を求めた。ここではそのデータを元にして今回取得したデータの評価を行う。GNSS測位においては周辺の植生や大気の状態ほかの様々な要因によって値が変化するが、本報告と新村・那須（2021）は1年のうち同じ時期に測定を行っていることから、年変動の影響による差は非常に小さいと仮定した。また本報告の2年前の測定であるために、今回のような精密測位の評価においては地殻変動による地面の動きを考慮しなければならない。地殻変動による地面の動きは、国土地理院が提供するセミ・ダイナミック補正²⁵を利用して変動量を推測することができる。地上定点の位置で、新村・那須（2021）が測定を行った2019年と本報告の測定を行った2021年のそれぞれのパラメータで元期データを求め、その差をこの2年間の地殻変動量と仮定した。緯度、経度とも 1.0×10^{-8} 度は約1mmであるため、2年間の推定変動量は南へ約12mm、東へ約74mm、上方へ約1mmである。新村・那須（2021）における定点の座標および高度に推定変動量を加えて2021年の推定値を求めた結果を表2に示した。表1にあるデータの分布のピーク値を比較すると、緯度では推定値の方が0.00000004度小さく、経度では0.00000046度大きく、高度は同一である。実際の変動量と比べてセミ・ダイナミック補正による推定変動量の方が特に経度方向で大きかった。基準局の座標値は2年以上更新していないため、今後更新してデータを再確認するとともに、さらに長期間に渡って連続的にデータを取得してRTK測位の精度から見たセミ・ダイナミック補正の有効性を検証していく必要がある。

図6で確認したデータのばらつき具体から、ミスfixによる外れ値も多く確認されたが、値が集中する範囲では正規分布に近い形でデータが分布しており、ピークがはっきりと確認できた。このピーク値は、前述の新村・那須（2021）による観測値の解析結果をジオ・ダイ

表2 セミ・ダイナミック補正と過去の測位データを利用した地上定点の座標の推定

	北緯（度）	東経（度）	高度（m）
新村・那須（2021）	32.80389437	130.72949676	52.654
元期（2019年）*	32.803897175	130.729492072	52.616
元期（2021年）*	32.803897297	130.729491336	52.615
2年間の予想変動量**	-0.000000122	+0.000000736	+0.001
2021年の推定値***	32.80389425	130.72949750	52.655

* 国土地理院の「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」²⁵に新村・那須（2021）の代表値を入力した。

** 元期（2019年）と元期（2021年）の差を2年間の変動量として推定した。

*** 予想変動量を上記代表値に加えた。

ナミック補正した推定値と大きく変わらないことから、今回の位置データの代表値として使用した。これを用いて今回得られたデータについて、どのような性質のデータが良好であり、一般的な統計処理によって精度と信頼性のあるデータを得ることができるか検証する。得られたデータの平均値に対して標準誤差の2倍の数値を誤差範囲とし、その誤差範囲に上記の代表値が入るかどうかなを確認した（表3）。

表3 統計値から求めた地上定点の位置データの信頼性の評価

ratio	緯度（度）			経度（度）			高度（m）		
	平均	標準誤差	信頼性*	平均	標準誤差	信頼性*	平均	標準誤差	信頼性*
3～（全体）	32.80388817	0.00000147	×	130.72950310	0.00000139	×	55.511	0.442	×
3～10	32.80388622	0.00000193	×	130.72950509	0.00000182	×	56.445	0.578	×
10～100	32.80389421	0.00000037	○	130.72949667	0.00000042	○	52.617	0.098	○
800～	32.80389661	0.00000192	○	130.72950063	0.00000468	○	51.655	0.558	○

*（平均値）± 2 ×（標準偏差）の範囲に代表値が入れば信頼性ありと判断した。

表3から明らかなように、ratioが3～10の範囲は信頼性がなく、それ以外の2つの範囲では信頼性があると判断された。3～10の範囲のデータ数は全体の約76%を占めることから、ここでは本来RTK測位で精密データとして判断されるfix値が全体として信頼性のないデータを単純に統計処理して使用することはできないことになった。次節でこれに対する対処方法について検討する。

（4）地上定点のRTK測位データの信頼性低下の原因と対処方法

GNSS衛星の受信環境が悪い所では様々な要因でミスFIXが生じる⁹。その原因を探ってRTK測位時にそれを避ける仕組み（受信環境を変えること以外の）を取り入れることが可能であれば、RTK測位データの信頼性を向上させ、短時間でデータを取得することが可能になる。新村・那須（2021）ではRTK測位の結果に対して、ratio、HDOPとVDOP、捕捉衛星数を用いて影響を調べた。その結果をまとめると以下のようになる。

- ・ratioは6以上で平均値からの距離が小さくなる（良好になる）傾向にあるが、ratioが大きくてもすべての値が良好というわけではない。
- ・HDOPおよびVDOPとデータの品質には関連はみられない。
- ・捕捉衛星数が14を超える（15以上）と品質の良いデータが大幅に増える。

また、新村・那須（2020）では天候が悪化した時のみ水準点の数値との差が大きい測位データがあったこと、新村・那須（2021）では悪天候の日のデータが平均からの距離が大き

い傾向にあったことなど、天候による影響も確認された。さらに、ネットワーク状況によって基準局のデータの受信状況が変化して、古いデータを使用することもあることから、age (解析に使用する基準局データと移動局データの時間差を秒で表現した数値) は初期設定では30秒が限度となっているため、それ未満のageでどの程度の影響があるか確認する必要がある。以下にratio, 捕捉衛星数, age, 湿度とデータの品質の関係を確認した結果を述べる。データの品質は代表値 (表2) との差が小さいほど良好であるとした。

① ratio と RTK 測位データの品質

ratio は ratio-test (Teunissen, 1995²⁴) を略した語で、高須 (2007)⁶ は RTK 測位におけるデータの信頼性を示す重要な指標であるとした。本研究においてもこれに従って信頼性のある RTK 測位による高精度データは、ratio が3以上の fix 解を使用した。受信環境が比較的悪い状況であると、信号の減衰やマルチパスなどの影響によって異常な GNSS 衛星信号を受信することにより、fix 解でありながら本来の精度をもたない間違っただけの位置情報を示すミス fix が生じることになるが、その原因と対策についていくつかの事例が報告されている (例えば白井・久保, 2012⁹)。本研究の地上定点での測位についても同様に、ここで理想的でない環境におけるミス fix のデータの出現の状況とその要因、対策について考察する。

図8は fix 値の ratio を縦軸にして、横軸は、測位によって得られた10分間の代表値の緯度の値と、表1に示した代表値 (32.80389421 度) との差を精度とみなしてプロットした図である。左の図では ratio の全ての範囲を対象とし、右の図では ratio が3から10の低い範囲を拡大して表示した。図6と同様に ratio の分布のギャップを境界として3つのグループに分けてそれぞれの凡例で示した。横軸は、精度が高くて非常に小さい値 (1.0×10^{-9} 程度) やミス fix で非常に大きい値 (1.0×10^4 程度) までであるため対数表示とした。グラフ上で差が0の値は表示できないために値に0.0000000001を加えて表示した (0.0000000001が実際には0.0000000000)。以下縦軸に他の要素を取った場合も同様な方法で表示した。

図8の左図から、どのratioのグループにも差の絶対値が非常に大きい値が含まれていることが分かる。このことからミス fix した場合は元のratioに関係がなく、ミス fix を除外するための条件を見つけることが重要であることが分かる。△の凡例で示されたratioが10～100のグループの大部分は差の絶対値がおよそ 3.0×10^{-7} より小さい。実際の長さに換算すると約3.0cmであることから、大部分のデータが直径6cmの円の範囲内にあることになり、精密な測位値が連続して得られていることが分かる。また、3つのグループともおよそ 3.0×10^{-7} 付近にデータがないもしくは極端に少ない領域を確認することができる。このギャップを真の fix 値とミス fix 値の境界と仮定して信頼度の目安として利用する。今後解析のプロセスとの関連を具体的に確認する必要があるが、ここでは経験的にどのような処理が有効であるか探ることにする。右図では左上と右下にデータが集まっている領域がある。右下はratioが小さく代表値との差が大きい場所であることから、ratioがfix値を示す3以上であっても4～5までの範囲には信頼性の低いデータ、すなわちミス fix の可能性が高いデータの割合が多いことを示す。また左上は反対にratioが高く、かつ信頼性の高いデータが集まっている。この範囲の測量値は表3の通りそのままではばらつきが大きすぎて使えないが、図

の左上の範囲, ratio が特に 9.0 以上になると信頼性の高い値として統計処理をして使用できる可能性がある. ratio が 3 ~ 10 の範囲のデータの数全部で 1094 個であり, このうち ratio が 9.0 以上は 248 個であるため, ratio だけで判断するならば 25% 程度のデータは測定されてすぐのリアルタイムでも ratio で判断して使用することができることになる. ratio が 10 以上の良好なデータは約 350 個であるために, 上記の 248 個の信頼できるデータが加わることは, リアルタイムで迅速かつ連続的に正確なデータを得ることにつながる. 一方で, これら良好な範囲 (ratio が 9 以上) であっても低い割合ではあるが大きく外れた値があるために, これらを除外する条件を別に見つける必要がある.

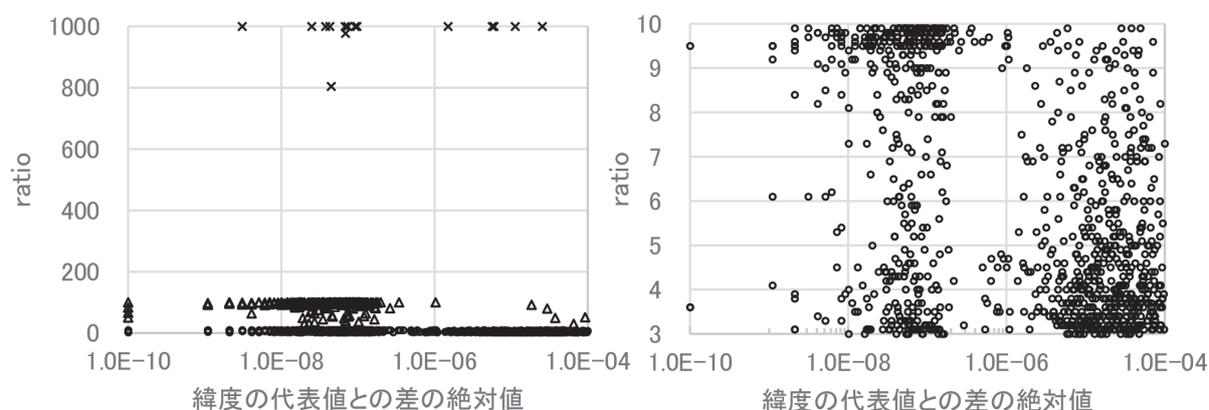


図8 ratio と RTK 測位データの品質

地上定点における RTK 測位結果の緯度と代表値 (表 1 の 32.80389421 度) との差の絶対値をデータの品質の目安とした. 0 の値を表示させるために 0.0000000001 を加えた. 左の図の ratio が 10 以下の部分が右図. 凡例 □: ratio が 3 ~ 10; △: ratio が 10 ~ 100; ×: 800 以上.

横軸の代表値との差が 0.0000003 度付近にギャップがある. ratio が 10 ~ 100 のみを表示した右の図で, ratio が 9.5 付近で差がギャップの値以下になる割合が急に増える.

② 捕捉衛星数と RTK 測位データの品質

図 9 に ratio が 3 から 10 の信頼性がないと判断されたグループ (表 3) のデータのみについて, fix 値の緯度と代表値 (表 1) との差を横軸, 捕捉衛星数を縦軸としてプロットした. グラフでは左上と右下にデータが多く集まった領域が確認できる. 右下の領域は捕捉衛星数が少なくて代表値との差が非常に大きいデータが集まっている. 捕捉衛星数が少なければ, マルチパスなどの悪影響を受けたデータによる誤差を補正する程度が小さくなることから, 結果的に良くないデータになるためにこのような分布になる. また, 左上には逆に捕捉衛星数が多くて代表値との差が小さいデータが集まっている. 捕捉衛星数が多ければ, 前述の事項と逆の理由で良好なデータになる. 新村・那須 (2021) では衛星数が 15 以上になると良好なデータが増えるという結果が報告されているが, ここでもほぼ同様である. 以上のことから, 捕捉衛星数が 15 以上という条件はリアルタイムデータにおけるデータの良否の区別の際の有力な判断材料となる.

図の左下に捕捉衛星数が少ないにもかかわらず比較的良好なデータが 4 つあるが, 統計的

にほとんど無視できる数である。一方で右上の捕捉衛星数が多いにもかかわらず良好ではないデータは比較的データ数が多く無視できない。これらについては他の要因を調べて捕捉衛星数が多くても良好なデータとして判断しない基準を加える必要がある。

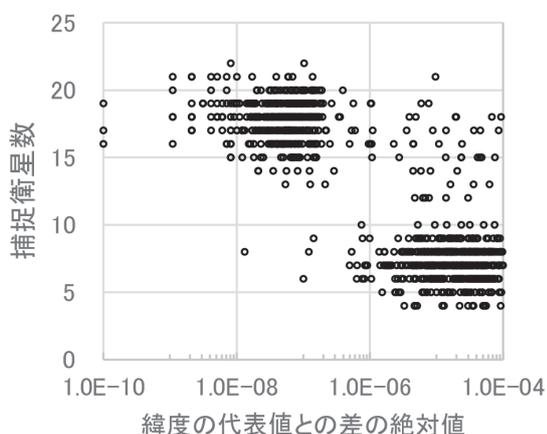


図9 捕捉衛星数と RTK 測位データの品質

ratio が 3 から 10 の信頼性がないと判断されたグループのデータのみをプロットした。グラフでは左上と右下にデータが集まっている領域が見られる。右下の領域は捕捉衛星数が少なくて座標代表値との差が非常に大きいデータが集まっていて、左上は逆に捕捉衛星数多くて代表値との差が小さいデータが集まっている。新村・那須 (2021) では衛星数が 15 以上になると良好なデータが増えるという結果であったが、ほぼ同様である。しかし右上に 15 以上でも差が大きい例外的なデータが分布している。

③ age と RTK 測位データの品質

age は、移動局で受信したデータと転送されてきた基準局データを処理して RTK 測位データを解析する時に、使用する基準局データが何秒前のデータであるかというデータの鮮度をあらわしたものであり、1 秒以下のものは 1 秒として表現される。基準局データは大気を通ってきた電波が、途中にある電離層や大気中の水蒸気量などに影響を受けて、媒体としての特性の変動²⁶を補正することに役立ち、RTK 測位において精密で安定したデータを解析するために不可欠である。age が大きくなるということはそれらの要素の古い情報を使用して解析を行うため、データの品質を低下させる可能性がある。使用した RTKLIB ではデフォルトで age が 30 秒以上のものは fix 値としないように設定されていて、今回はその設定をそのまま使用した。age が大きくなる原因は基準局のコンピュータの処理によって発生する遅れ、通過するネットワークの帯域やトラフィック、安定性、データを中継するキャストサーバの性能や稼働状況など様々な要因が考えられる。特に基準局情報は Ntrip (The Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)²⁸ というプロトコルで送信され、これはトランスポート層では TCP を使用するために、データを処理するコンピュータの性能や稼働状況が良好であっても、通信路のトラフィックや安定性によってはデータの再送などによって遅延が生じることもある。特に本研究で使用している基準局は 4G の無線回線によってデータを送信している (図 3) ために、回線の状態や上流のトラフィックによる影響を受けやすい。さらに移動局が Wi-Fi によって大学の学内 LAN と接続して基準局の情報を受信するために、Wi-Fi の電波状況にも影響を受ける (図 4)。このようなネットワークの環境との関連についての検討は稿をあらためて報告する。ここでは単に age の大きさに対する評価を行った。

通信路や関連機器の状況が良好であれば、基準局でデータが作成されてから移動局で使用されるまでの時間は 1 秒以下であり、これはすべて 1 秒として記録される仕様であるために、

図 10 のグラフ上では age が 1 のところにデータが特に集中している。4 秒までは比較的データが多く、5 秒を超えると急に少なくなる。全体として左上にデータの分布が少ない領域が確認される。age が 15 秒を超えるあたりから差が 2.0×10^{-7} 以下の良好なデータの割合が小さくなっている。一方で右下の領域に分布するデータの数は左下の領域と大きな差は見られないため、age が小さいだけで必ずしも良好なデータにはなるとは限らないことが分かる。

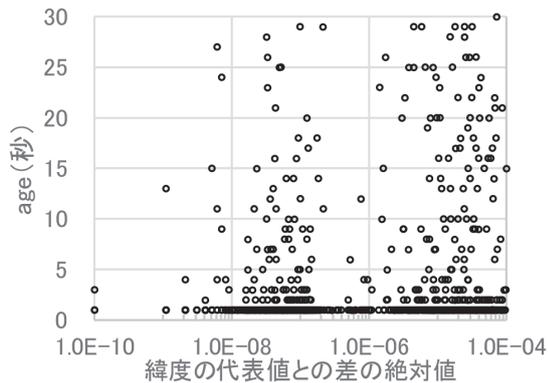


図 10 age と RTK 測位データの品質

age (秒) は基準局で作成された補正情報が移動局で使用されるまでにかかった時間である。データ処理するコンピュータなどの機器に十分な性能があって稼働状況が良好で、データの通信路であるネットワークの諸状況が良好であれば、1 秒以下で届いて処理されるが、それらはすべて age=1 となる。そのためグラフ上では age が 1 のところにデータが集中している。age がおよそ 15 秒以上では差の値が 3.0×10^{-7} 度以下である良好なデータの割合が減少している。

④ 相対湿度と RTK 測位データの品質

前述の通り新村・那須 (2020) および新村・那須 (2021) は、悪天候時の RTK 測位結果には比較的良好でないものが見られる傾向があったことを報告した。ここではさらに天候の傾向の一つの指標となる相対湿度を同時に計測してデータの品質と比較した。図 1 に示した温湿度計を移動局の装置を格納するコンテナの外側に取り付け、10 分おきにラズベリーパイで RTK 測位データとともに取得した。その結果を図 11 に示した。左の図は時間に関係なくすべてのデータをプロットしたものである。 3.0×10^{-7} から 5.0×10^{-7} の間はデータが少ないが、前述のようにミス fix 値と真の fix 値との演算上のギャップである。この図からは相対湿度とデータの品質に関して特に関係は見られない。相対湿度が高くなることによって空気中の水蒸気が増加してデータに悪影響を及ぼすとすれば、左下から右上にかけてデータが多く分布することになるが、ここではそのような傾向は見られない。

温湿度計は直射日光を避けるために、植え込みの中に入るように設置されているため、地面から 15cm 程度の所にある。そのため地中の水分の影響を強く受けることになる。晴れた日の昼間は気温が上昇することによって相対湿度は低下するが、夜間は気温の低下と地面の結露の影響を受けて相対湿度は上昇する。このような大きな日変化があるため、図 11 左上にプロットされている湿度は 30% から 100% まで多様にまんべんなく分布している。地表付近の限られた範囲の湿度変化に対しては上述のように関連は見出せなかったが、悪天候によって大気鉛直方向に広く湿度が高い領域があらわれれば、影響が出る可能性がある。上記の日変化による湿度の上昇と天候の悪化による湿度の上昇と区別するために、日中の気温が高い時間帯のデータのみで比較したのが右側の図である。地上定点に最寄りの気象庁のアメダス観測所は熊本であるため、気象庁のホームページから 2021 年 11 月の「日の 10 分ご

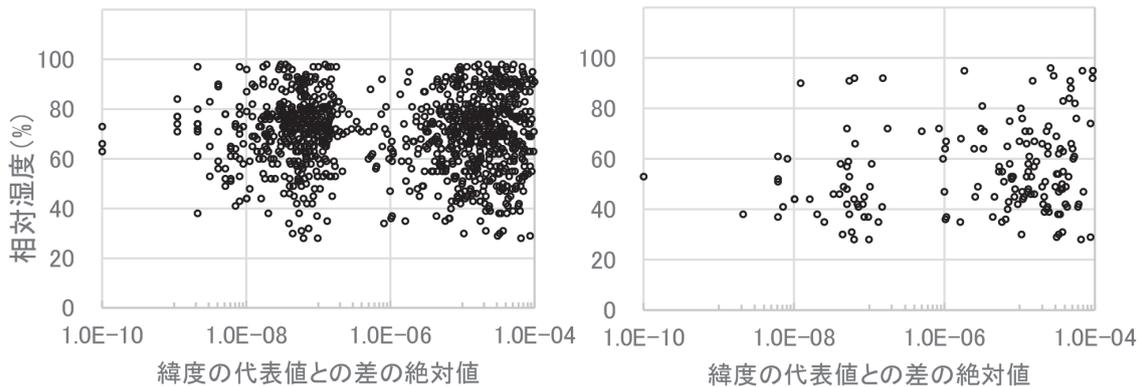


図11 相対湿度とRTK測位データの品質

左図はすべての時間帯におけるデータ，右図は13時～15時台のデータのみをプロットした．左図の場合は日変化による，特に夜間の気温低下時の湿度の上昇も含まれる．右図は晴れた日には湿度が低くなる日中の時間帯のデータだけであるため，湿度が高い時は天気が悪い可能性が高い．左図からは湿度とデータの品質に相関は見られないが，右図では左上の領域にデータが特に少ないことから，昼間で天気が悪い時は高い品質のデータの割合が落ちる傾向にあったことが分かる．

との気象データ²⁷⁾を確認した．気温が最も高くなる時は14時台が多いため，図11右図では13時から15時台のデータのみを使用した．図上の代表値との差の絶対値が 3.0×10^{-7} 以下である品質の良いデータは，左上の相対湿度60%以上の領域では左下の60%以下の領域に比べて割合が少ない．品質の良いデータで相対湿度が60%以上のデータは9個，60%未満は36個であるため，前者は全体の20%，品質の悪いデータでは54個と74個なので，相対湿度が60%のデータは42%である．また60%以上では品質の良いデータと悪いデータの割合が1:6，60%未満では1:2であることから，相対湿度が60%以上でデータの品質が落ちる割合は60%未満の3倍である．以上から明らかに昼間の相対湿度が高いことがデータの品質を落とす原因になっていることが分かった．

リアルタイムのRTK測位を考えた場合，品質の良いデータを品質の悪いデータの3分の1の割合で破棄してしまうことになることや，昼間の限られた時間帯でしか適用できないことから，捕捉衛星数やratioによるフィルタリングに比較して有効性は低い．今後，湿度計を地面から離れた場所に設置した上で，夜間の気温の低下が湿度に影響することをパラメータとして取り入れた上で悪天候による湿度の上昇のみを検知するアルゴリズムを取り入れることによって，相対湿度のデータをリアルタイムRTK測位に活用できる可能性はある．

⑤ データのフィルタリングによる質の向上

以上のようにデータの品質に影響を与える要因として評価を行った中で，捕捉衛星数，ratio，13～15時台の相対湿度による影響を確認することができた．ratioが3～10のグループのデータについて，捕捉衛星数とratioの条件によってフィルタリングしてデータを統計処理した結果を表4にまとめた．フィルタリングしないデータ1094個に対して，捕捉衛星数15以上という条件をつけると，データ数が元の42.6%である466個に減少するが，これ

らに対して統計処理を行うと緯度，経度，高さそれぞれ誤差が半分以下になった。標準偏差は，元の 30.0%，27.8%，21.5%（平均で 26%）になり，データのばらつきが大幅に減少する。データ数あたりでばらつきを小さくする，すなわち精度を高める効率（ $1 \div$ 標準偏差の割合 \times データ数の割合）は平均で約 1.6 倍である。

さらに ratio が 9.0 以上（元々 10 以下なので結果的に ratio は 9.0 ～ 10.0）の条件によってフィルタリングを行うとデータ数が元の 19.6% である 214 個に減少するが，誤差は元の約 30 ～ 50 分の 1 程度になり，標準偏差は元の 2.3%，1.3%，2.1%，平均で約 2% になり，さらに大幅に減少した。精度を高める効率は平均約 10.3 であり，捕捉衛星数だけに比較して約 6.4 倍もの効果があった。さらに，気温が高い時間帯（13 時台から 15 時台）の相対湿度が 60% 以下という基準では，6 個のデータが 60% を超えており除外した。その結果は上記の 2 つの条件をあわせた結果のうち緯度の標準偏差が 0.00000001 増加したのみで，他の数値は全く変わらなかった。水蒸気が多いことによる悪影響は ratio や捕捉衛星数にも及ぶため，すでに外れ値として除外されていたことと，悪影響がほとんどなかった平均値に近い値が除外されたことから結果がほとんど変化しなかった。すなわち，単独で相対湿度の条件でフィルタリングを行った場合は有意に効果が認められたが，他の条件と組み合わせると該当するデータはすでにフィルタリングされていることから，現段階では不確実性が残る相対湿度でのフィルタリングをあえて使用する必要はないと考えられる。

2 つの条件でフィルタリングした結果では標準誤差は緯度方向で約 4mm，経度方向で約 6mm，鉛直方向で約 2.0cm であり，非常に小さい上に，この 2 倍を誤差とした範囲には，頻度の最も高い代表値が入る。ratio が 3 ～ 10 というデータのグループには外れ値も多く含まれていたために，統計処理しても使用できないものであったが，2 つの単純な条件を加えるだけで非常に精度と信頼性の高い統計値を導くことができる良好なデータにすることができた。

ratio がこのグループより高い 2 つのグループ（10 ～ 100 および 800 ～）は元々精度，信頼性とも比較的高いものであったが，上記の 3 ～ 10 のグループを加えた全体では，このグループのデータ数が圧倒的に多いことと外れ値が非常に多いことから，全体のデータをそのまま統計処理して使うことはできなかった（表 3）。上記の 2 つの条件でフィルタリングし，さらに 2 つのグループも同様にフィルタリングを行って統計処理をした結果を表 5 に示した。最も ratio の高いグループはデータ数が 15 個から 9 個に減少し（減少率は 40.0%），中間のグループは 333 個から 323 個（減少率は 3.0%），最も低いグループは 1094 個から 214 個に減少（減少率は 80.4%）した。本来であれば最も ratio が高いグループは信頼性が高いはずであるが，今回のデータでは高いとは言えず，その原因については他の月のデータも含めて今後明らかにする必要がある。表 5 にすべてのグループでフィルタリングを行って統計処理したデータを示した。データ数は全体で 1442 個から 546 個になり 62.1% の減少率であった。緯度，経度および高度それぞれの平均値は，上述の ratio 3 ～ 10 のグループ単独の改善値とほぼ一致しており，差はすべて 1cm 以下である。標準偏差もそれぞれ若干改善され，誤差は半分以下になった。緯度，経度，高度ともそれぞれの分布のピーク値は非常に小さくなった標準誤差ではあるが，その 2 倍の範囲内にすべて入り信頼性の高いデータであると言える。

表4 ratio3～10のグループのデータについてフィルタリングを行って改善した結果

条件	データ数	データ内容	平均	標準偏差 (σ)	標準誤差	信頼性*	σの割合 (%)**	データ数割合 (%)***
なし **** (元のまま)	1094	緯度(度)	32.80388622	0.00006368	0.00000193	×		
		経度(度)	130.72950509	0.00006011	0.00000182	×		
		高度(m)	56.445	19.132	0.578	×		
衛星数 15以上	466	緯度(度)	32.80389444	0.00001913	0.00000089	○	30.0	42.6
		経度(度)	130.72949837	0.00001672	0.00000077	○	27.8	
		高度(m)	52.761	4.113	0.191	○	21.5	
衛星数 15以上 & ratio 9.0以上	214	緯度(度)	32.80389410	0.00000144	0.00000010	○	2.3	19.6
		経度(度)	130.72949711	0.00000076	0.00000005	○	1.3	
		高度(m)	52.653	0.395	0.027	○	2.1	

* (平均値) ± 2 × (標準偏差) の範囲に代表値が入れば信頼性ありと判断した.

** フィルタリングしていない該当データの標準偏差との割合.

*** フィルタリングしていない該当データのデータ数との割合.

**** 取得したデータのうち fix データすべて.

表5 全体のデータについてフィルタリングを行って改善した結果

条件	データ数	データ内容	平均	標準偏差 (σ)	標準誤差	信頼性*	σの割合 (%)**	データ数割合 (%)***
なし **** (元のまま)	1442	緯度(度)	32.80388817	0.00005567	0.00000147			
		経度(度)	130.72950310	0.00005263	0.00005263			
		高度(m)	55.511	16.768	16.768			
衛星数 15以上 & ratio 9.0以上	546	緯度(度)	32.80389420	0.00000120	0.00000005	○	2.2	37.9
		経度(度)	130.72949706	0.00000053	0.00000002	○	1.0	
		高度(m)	52.658	0.248	0.011	○	1.5	

* (平均値) ± 2 × (標準偏差) の範囲に代表値が入れば信頼性ありと判断した.

** フィルタリングしていない該当データの標準偏差との割合.

*** フィルタリングしていない該当データのデータ数との割合.

**** 取得したデータのうち fix データすべて.

(5) 屋上定点の RTK 測位結果

図 12 に屋上定点における RTK 測位結果のうち fix 解 (ratio が 3 以上) の 10 分ごとの代表値を時間順にプロットした。float 解 (ratio が 3 未満) は除いた。左上の図 A は縦軸に緯度 (度)、横軸に時間を取り、約 26 日間における 10 分ごとの代表値を示した。地上定点での測位結果と同様に、得られたデータの ratio の分布にはギャップがあり、それにしたがってグループ分けすると地上定点とほぼ同じ範囲で 3 つのグループに分けることができた。色は ratio の違いであり青が 3 ~ 10, 黄色が 10 ~ 100, 黒が 300 以上である。3 つあるグラフの最も上ではすべてのデータ (n=3588) がプロットできるデータ範囲 (32.80378 度 ~ 32.80380 度) で示した。地上定点ではこの全体のばらつきの範囲の幅は 0.004 であったが、ここでは 0.00001 であり、2 桁小さいため全体として非常にまとまったデータである。ratio が最も高いグループ (黒) はややばらつくものの数個のデータを除いてこのスケールではほとんどが 32.80379 度付近に集中している。最も ratio が小さくかつデータ数が少ない 3 個の青色のプロットが集中域から大きく外れて分布している。中央のグラフは上のグラフの縦軸の緯度のスケールを 500 倍拡大してデータが集中する範囲が全体の範囲の中央付近にくるように表示した (32.8037900 度 ~ 32.8037910 度)。この表示範囲では黒いデータは若干ばらついているデータを除いて大部分が 32.8037905 度付近に集中している。ratio が中間のグループ (黄) は、この表示範囲では黒色のグループと同様に 32.8037905 度付近に集中している。最も ratio が低いグループ (青) も黄色のグループとほぼ同様の傾向である。ここでの緯度の範囲におけるデータの集中の程度を確認するために、図 12B に同様の範囲でデータの数をヒストグラム表示した (図 12B の上の図)。中央の 32.80379057 度付近に尖ったピークが確認できるため、この周辺を拡大して図 12A の最も下に示した。図 12A の中央のグラフの縦軸を 5 倍拡大した。ここの縦軸の 1 目盛りは約 1cm に相当する。黒色のグループはこの範囲で多少ばらついてものもあるが、そのほとんどと黄色と青色のすべてのデータは 32.8037905 度 ~ 32.8037906 度の範囲に入る。この範囲でデータをヒストグラムにあらわした (図 12B の下)。上のヒストグラムの横のスケールの約 5 倍である。この範囲のほぼ中央の 32.80379055 度 ~ 32.80379056 度のデータ区間が最もデータ数が多い。データは正規分布している。屋上定点の緯度はこの区間のピーク値であるおよそ 32.80379056 度と推定することができる。

図 12A と同様にして図 12C において経度のデータは全体が 130.730535 度 ~ 130.730565 度 の間にプロットされる。集中域の幅はおよそ 2cm であり緯度の場合とほぼ同様である。これをヒストグラムに表示してデータが集中している区間から経度の値を推定するとおよそ 130.73054082 度である (図 13)。高度について図 12D にプロットして集中域を確認すると、およそ 86.36m ~ 86.38m の間にあることが分かり、これをヒストグラムに表示してデータが集中している区間から経度の値を推定するとおよそ 86.375m である (図 13)。

屋上定点は上空を遮るものがほとんどない開けた場所に設置してあるため、受信可能な GNSS 衛星数が多く、マルチパスもほとんど起きていないと思われる。地上定点とは対照的な環境である。そのことが受信データの特徴によくあらわれており、特に ratio の高いデータの割合が圧倒的に高く、データのばらつきが小さい。

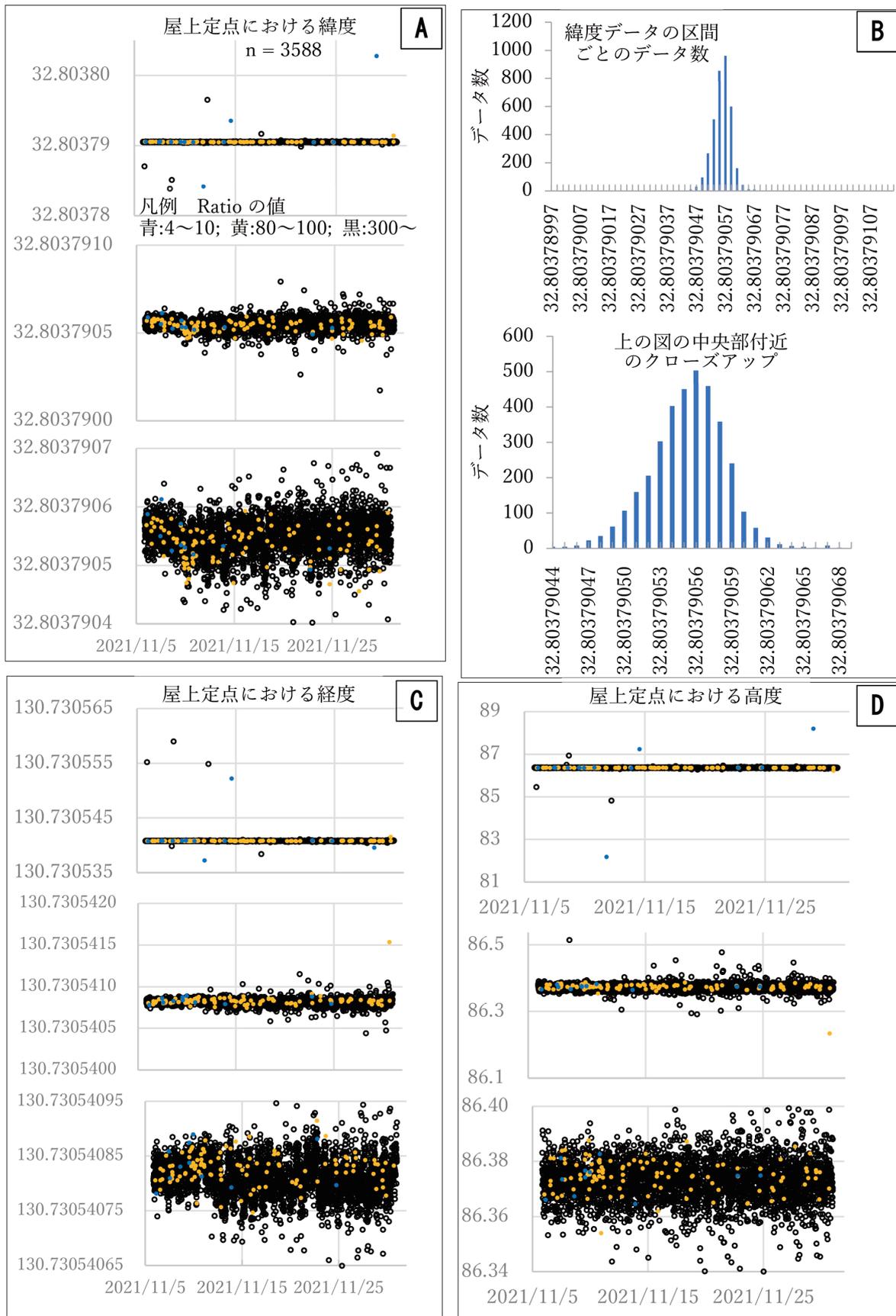


図 12 屋上定点における RTK 測位結果 (10分ごとの FIX 値の代表値と分布)

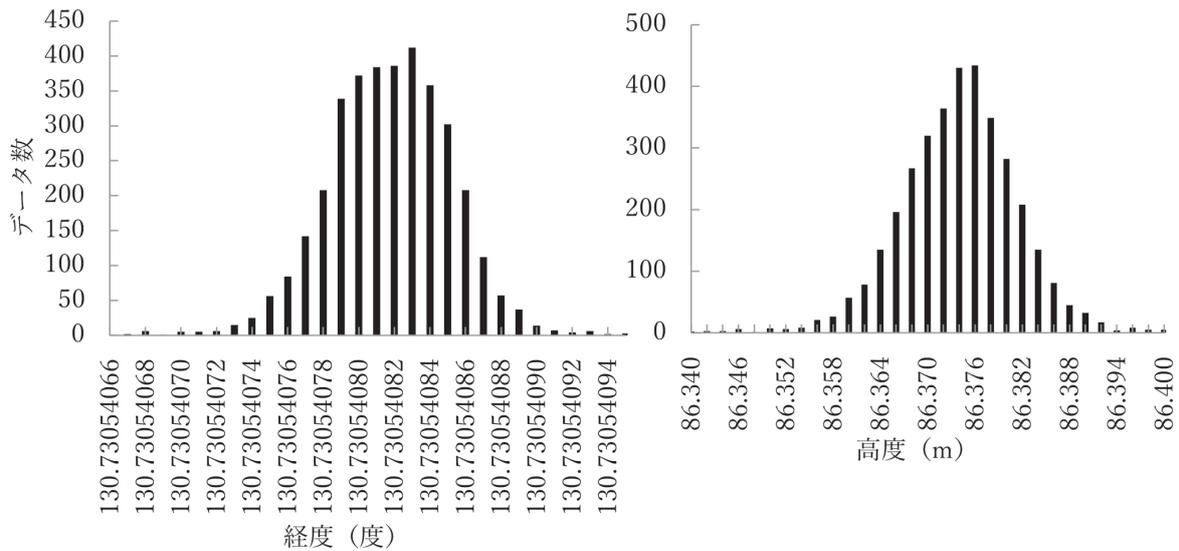


図 13 地上定点における RTK 測位結果のうち経度(左)と高度(右)の集中域におけるデータ数分布

図 14 のグラフはそれぞれ地上定点(左)および屋上定点(右)の緯度および経度のデータのピーク値付近をプロットしたもので、中央付近の十字が分布のピーク値であり、1目盛りが約 1cm に相当する。右の屋上定点のデータはピーク値付近のやや左下を中心として非常によくまとまっている。一方で左の地上定点のデータはそれに比較するとばらついている。いずれもこの領域以外の外れ値を除けば、このデータが集まった塊の中央付近を RTK 測位の結果として数 cm から数 mm の誤差で決めることができる。屋上定点のピーク値の位置が、データがまとまった緑色～赤色の円の範囲の中心から少し外れているのは、背景のヒートマップから明らかなようにデータの密度が右上に偏っているからである。

屋上定点のデータの大部分はこの円形の内部に分布しているため、ほとんどが数 mm 程度のばらつきである。図 15 は屋上定点の経度のデータについて図 12 よりも横軸の時間を延ばしたものである。縦軸は測定された経度の値(度)で 1 目盛が約 5mm に相当する。横軸は時間で、縦の目盛線はそれぞれの日の正時に相当する。黒丸は ratio が 300 以上のグループの値であり、これは夕方から夜にかけての時間に経度は小さくなって、その後、上下変動をしながら値が大きくなり、再び夕方から夜の時間帯に急激に小さくなるということを繰り返すという日変化が確認できる。黄色は ratio が 10～100 であるが、これはほとんど午後の値が小さくなる前や後にのみ出現しており、ratio が小さいデータが出現するということは、この時間帯は GNSS 衛星の電波の受信環境が若干悪化することを意味する。GNSS 衛星のほとんどの周回周期は約半日であるために、約 1 日で上空の衛星の配置がほぼ再現される。衛星配置の他、アンテナへの太陽光線の当たり具合やそれにとまなう建造物などの変形、屋上にある電気電子機器から発せられる電磁波などの可能性も日変化として考えられる。また、この影響が受信局に対するものか、それとも同じ屋上に設置してある基準局によるものかを含めて今後確認する必要がある。変動幅は 1cm から 2cm であるため、RTK 測位においては無視できない大きさであり、補正式を適用して変動をキャンセルすることは今後の課題である。

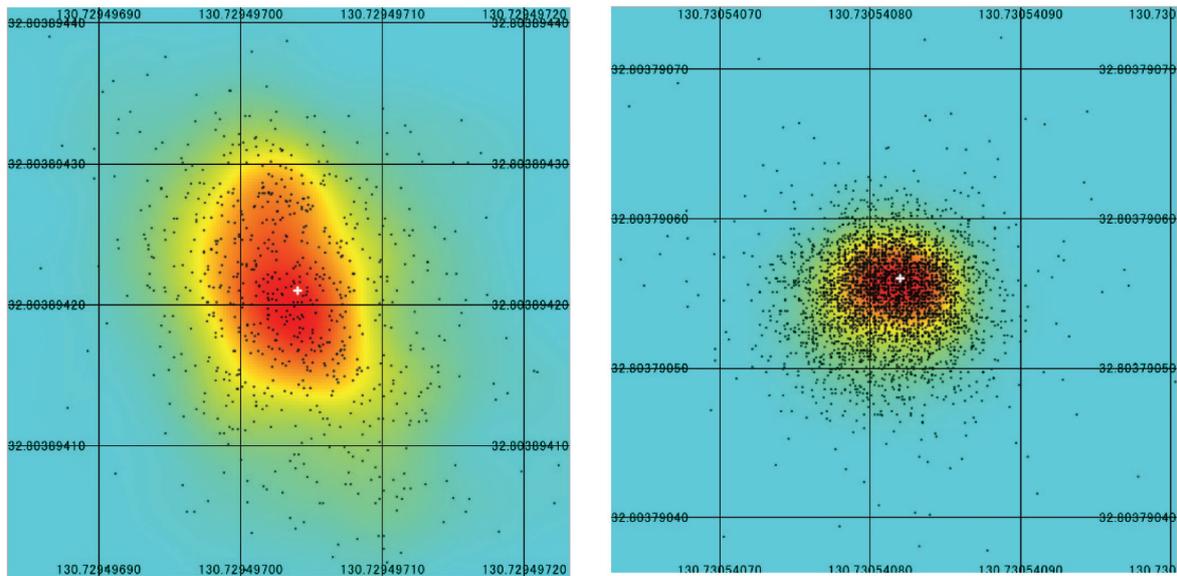


図14 地上定点(左)および屋上定点(右)の緯度および経度のピーク値付近のデータ分布とヒートマップ

それぞれ縦軸が緯度(北緯, 度), 横軸が経度(東経, 度)をあらわす. 中央付近の白抜きの十字が緯度, 経度それぞれ別にヒストグラムから求めた分布のピーク値である. 1目盛りが約1cmに相当する. 左の地上定点のデータに比較して右の屋上定点の方が受信環境が良好であるため, データの分布の集中度が高く, ほぼ対称的に分布している. 左図の地上定点における集中域がおよそ南北方向でばらつきが大きいのは, 校舎や植え込みの樹木の配置によって, 東西方向に比較して南北方向のGNSS衛星の信号の受信環境が悪いからと考えられる. 右の屋上定点のデータでは, プロットされたデータが重なっているために分布の集中域が円形の中心部のように見えるが, ヒートマップで重なりも含めて表示させると中心のやや右上に集中域があることが分かる. ヒートマップによる集中域とヒストグラムから判断した分布の集中域はほぼ一致している.

ヒートマップはQGIS3.22で作成した. ヒートマップのカーネル帯域幅は地上定点では20mm, 屋上定点では10mmで作成した.

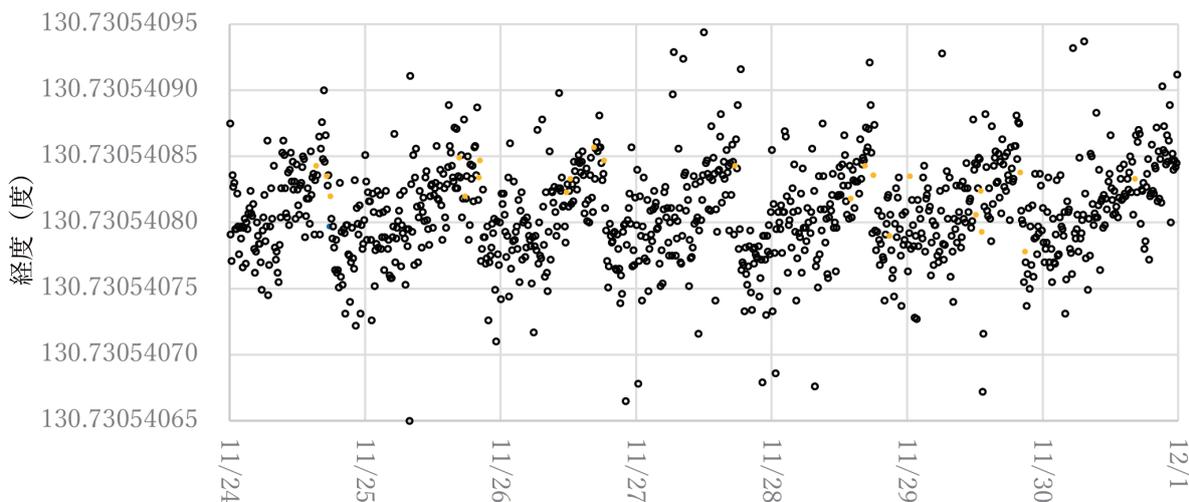


図15 屋上定点の経度データの2021年11月24日から11月30日までのデータ

縦軸は測定された経度の値(度)で1目盛りが約5mmに相当する. 横軸は時間で, 縦の目盛線はそれぞれの日の正時に相当する. 黒丸はratioが300以上のグループの値であり, これは夕方から夜にかけての時間に経度は小さくなって, その後, 上下変動をしながら値が大きくなり, 再び夕方から夜の時間帯に急激に小さくなるということを繰り返している.

(6) 屋上定点の RTK 測位データの精度と信頼性

屋上定点の RTK 測位結果について fix した全データおよび図 12 における ratio によるグループごとのデータを統計処理した結果を表 6 にまとめた。また地上定点と同様な手段で統計結果の信頼性について標準誤差を用いて判断した結果を表 7 にまとめた。ratio が 400 以上のグループは全体のデータの大部分（全データ数の 96.5%）を占めている。標準偏差は他のグループと比較すると緯度、経度、高度とも非常に小さい。そのため全データの標準偏差も、地上定点の値と比較すると 3 桁小さい。図 14 の分布でも明らかであったが、ここでは数値でもって受信環境によって RTK 測位結果のデータの質が大きく異なることが確認できた。

表 3 にまとめた地上定点のデータの評価と同様の手法で、屋上定点のデータについても評価した。表 7 のように標準誤差の 2 倍を誤差の範囲として、その中に代表値を含むかどうかを判定方法とした。屋上定点のデータは ratio が低いグループでも地上定点と比較すると 1 桁小さいことから、多少の外れ値を含んではいるものの全体的には代表値付近まわっている。信頼性の判定では標準誤差が非常に小さい、すなわち誤差の範囲が非常に狭くなっているにもかかわらず代表値が入り、基本的にすべてのデータで信頼性があると判定された。表中の信頼性が△で記した部分は、ratio が大きいグループで、精度が良くばらつきが非常に小さいために標準誤差が有効数値で 0 になってしまうため判定ができない。この緯度および高度は代表値から小数点 8 桁目で 2、実際の長さでは約 2mm 異なるのみであり、RTK 測位の精度を考慮すれば十分に信頼性のあるデータである。

表 6 屋上定点における fix 値による位置データとそれらの ratio による値

ratio	データ数	緯度 (度)		経度 (度)		高度 (m)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
4~(全体)	3588	32.80379055	0.00000030	130.73054083	0.00000050	86.372	0.084
4~10	14	32.80379118	0.00000386	130.73054131	0.00000330	86.269	1.286
80~100	113	32.80379060	0.00000057	130.73054096	0.00000132	86.360	0.146
400~	3461	32.80379054	0.00000016	130.73054082	0.00000040	86.373	0.021
ヒストグラムによる分布のピーク		32.80379056	—	130.73054082	—	86.375	—

表7 統計値から求めた地上定点の位置データの信頼性の評価

ratio	緯度（度）			経度（度）			高度（m）		
	平均	標準誤差	信頼性*	平均	標準誤差	信頼性*	平均	標準誤差	信頼性*
4～（全体）	32.80379055	0.00000001	○	130.73054083	0.00000001	○	86.372	0.001	○
4～10	32.80379118	0.00000103	○	130.73054131	0.00000088	○	86.269	0.344	○
80～100	32.80379060	0.00000005	○	130.73054096	0.00000012	○	86.360	0.014	○
400～	32.80379054	0.00000000	△**	130.73054082	0.00000001	○	86.373	0.000	△**

* （平均値） $\pm 2 \times$ （標準偏差）の範囲に代表値が入れば信頼性ありと判断した。

** 標準誤差は小数点9桁以下であるために有効数字を8桁とするとゼロになり、データの質とは関係なく誤差の範囲を定めることができない。

(7) 屋上定点のRTK測位データの外れ値の原因について

上記のように、屋上定点のようなGNSS衛星の信号の受信環境が良好な場所では、取得データのうち約96.5%が十分な精度と信頼性のあるデータであり、残りの3.5%のデータについても統計的にはRTK測位データとしては十分な精度と信頼性があった。そのため、外れ値を含んでいても今回のような方法（1秒おきにデータ取得して10分おきにratioの最大のデータを採用する）でRTK測位データを取得すればそのままデータを使用すれば良い。しかしながら、自動車をはじめとした乗り物などの制御、ドローンの自動飛行などそのものが正確に安全に制御されるためには秒単位で精密で信頼性の高いデータを取得する必要がある。地盤の動きをリアルタイムで把握する防災目的でも同様である。これらのケースでは、データを数分間ためてから良いデータを抜き出して使用するのではなく、秒単位の測位時にリアルタイムで有効なフィルタリングを行って良好なデータを取得することが必要である。以下、地上定点のケースと同様な方法で外れ値の抽出とその要因の分析を行った。

① ratioとRTK測位データの品質

屋上定点のRTK測位結果のうち緯度のデータについて、それぞれと代表値（データ頻度のピーク値）との差をデータの品質として横軸に、ratioを縦軸にしたグラフを図16に示した。左図は縦軸のratioをすべてのデータが入る範囲でとり、右図では100以下での詳しい分布を見るために縦軸を100以下に設定した。地上定点のデータの品質を判別した時と同じく、代表値との差が 3.0×10^{-7} を境にしてそれ以下のデータを品質が良いデータとした。左図に見られるようにratioが1000に近いところでも品質の悪いデータがあった。また右図のratioが10以下の範囲では、品質の悪いデータ3個はratioが6以下である。従って右図からは地上定点で定めたratioが9以下は品質が悪いデータとして除外するための基準は、今

回の場合も適切である。しかしながら、ratio が 9 より大きい品質が悪いデータについては除外する方法を検討する必要がある。

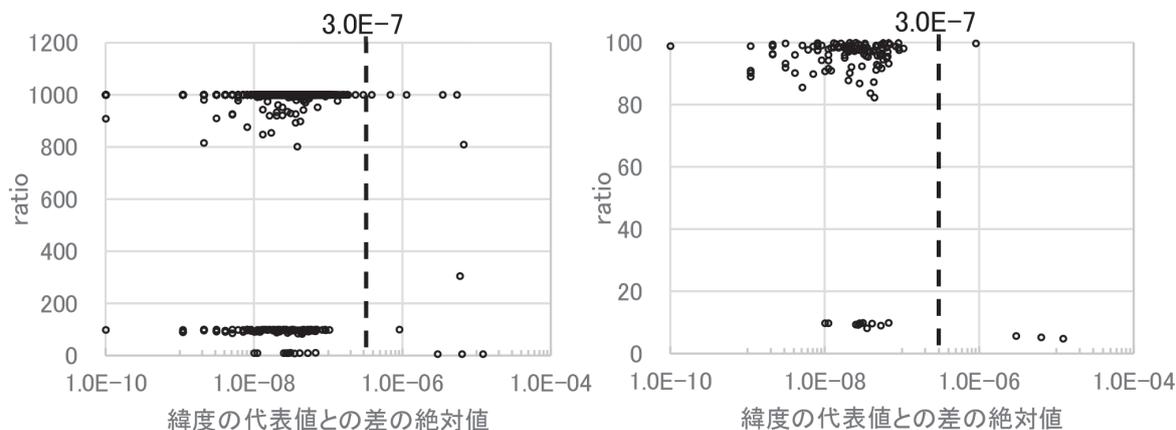


図 16 ratio と RTK 測位データの品質

左図は縦軸の ratio をすべてのデータが入る範囲、右図では ratio が 100 以下の範囲。地上定点のデータの品質を判別した時と同じく、代表値との差を 3.0×10^{-7} を境とした。これをグラフに縦の破線として表した。左図に見られるように ratio が 1000 に近いところでも品質の悪いデータがある。右図の ratio が 10 以下の範囲では、品質の悪いデータ 3 個は ratio が 6 以下であり、品質の良いデータは 8 以上である。地上定点で定めた ratio が 9 を閾値とすることはここでも有効である。

② 捕捉衛星数と RTK 測位データの品質

地上定点のデータの品質を分けるために、捕捉衛星数で 15 を閾値とすることは有効な手段であった。屋上定点のデータについても同様に捕捉衛星数 15 が有効な基準かどうか判断するために、図 17 のグラフの縦軸に捕捉衛星数をとって表示した。品質の良いデータの大多数は、グラフの左上の捕捉衛星数が 15 を超えた範囲に分布している。また、品質が良好でないデータ多くは右下の領域に分布し、これは捕捉衛星数 15 の基準で除外することが可能である。破線を境に左下に分布する捕捉衛星数が 15 以下であるが良好なデータについては、数が圧倒的に少ないために除外してしまっても問題ない。この捕捉衛星数 15 で除外できないデータは全部で 4 個である。全データ数は 3588 個であるから無視できる少ない数ではあるが、ここでこれらがどのような性質のデータであるか調べた結果を表 8 にまとめた。

天気と相対湿度は気象庁のホームページ「過去のデータ検索」²⁷ の観測点「熊本」における 1 時間ごとのデータを引用した。これによると No. 4 のこの日時では天気が雷であり、1 時間あたり 8.0mm の降水があったことが記録されている。これ以上の強度の降水量は同じ日の 17 時台にも観測されているが、データの品質は悪くない。雷については 11 月に観測されていないために確認は得られないが、雷は大気中に強い電流を流す現象であることから、GNSS 衛星の信号受信に悪影響を与える可能性は高く、No.4 のデータの品質悪化の要因として考えられる No.3 は age が若干大きい程度である。図 18 に屋上定点のデータにおける age

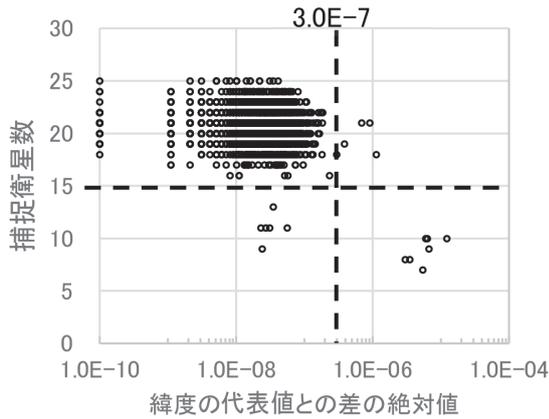


図17 捕捉衛星数とRTK測位データの品質

屋上定点の fix データの緯度データについて、代表値との差を横軸にとり、 3.0×10^{-7} 以下のデータを品質の良いデータとする。縦の破線の左側がそれに該当する範囲である。また地上定点のデータの品質を分ける有効な基準として捕捉衛星数では15を閾値とした。図のように左上にデータが集中している部分は15以上である。右下の品質が悪いデータは15より小さい。右上および左下のデータはこの方法には合わない。特に右上のデータについては検討が必要。

表8 統計値から求めた地上定点の位置データの信頼性の評価

No.	取得日時	天気*	相対湿度*	代表値との差	捕捉衛星数	age	ratio
1	11月17日 13:30	晴	39%	1.1E-06	18	1	999.9
2	11月21日 11:50	晴	50%	6.9E-07	21	1	999.9
3	11月29日 13:30	晴	36%	3.9E-07	19	29	999.9
4	11月30日 16:10	雷	95%	9.1E-07	21	10	99.7

* 気象庁のホームページ²⁷から取得した。

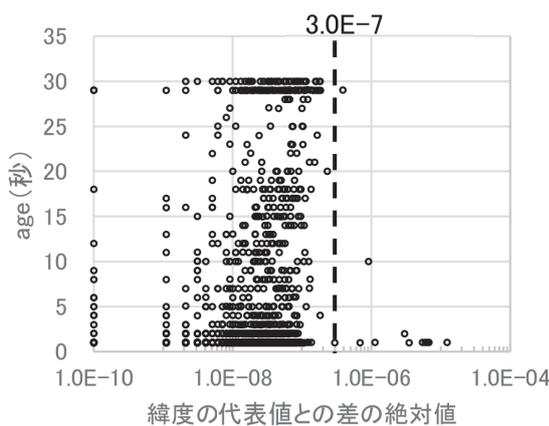


図18 ageとRTK測位データの品質

ageは基準局のデータが生成された時点から基準局へ転送されて受信するまでの時間である。屋上定点の移動局は基準局と同じLAN内にあるが、インターネット上にあるキャスタサーバを介するため、状況によっては遅延が生じる。ageは30秒を超えるとタイムアウトとして基準局データは破棄されるため、上限が30秒となっている。データ転送にはUSBドングルにイオンモバイルのSIMを使用しており、SIMは使用容量が契約上限に達すると低速度通信になる。30秒近くかかっているデータはそのような状況で転送されたものが多いと考えられる。遅延が大きくてもほとんどのデータは品質が良い範囲(差が 1×10^{-7})にあるため、ここではフィルタリングの手段としては適さない。

データの品質の関係を示した。age が 30 近いデータであっても、そのほとんどは良質なデータである。よって原因は不明である。残りの No.1 および 2 については、どの要素も今回検討したデータを悪化させる要因をもっていない。

図 14 の右図のように、受信条件が良好な状態ではデータの大部分はまとまっている。上記のように要因を特定できない良質ではないデータに対しては、短い時間（1 秒以下）でデータを取得しながら統計処理を行って、次に得られたデータが外れ値であれば除外するという方法が有効であろう。

4. まとめ

新村・那須（2020, 2021）による安価で手軽に扱うことができるローカル・エリア RTK-GNSS 測位のためのシステムを構築して検証を行った結果、数 cm 以下の精度で安定してデータを得ることができた。今回はこのシステムを拡張して 1 秒おきに自動的に RTK 測位を行うシステムを作成し、RTK 測位をリアルタイムで使用する場合のデータの精度と信頼性を確認した。測位を行う移動局は新村・那須（2021）で使用した大学キャンパス内の建物や樹木などの、GNSS 衛星電波受信に対して障害物がある場所（地上定点）と、基準局をすでに設定した上空が開けて電波受信の障害が非常に小さい 11 階建ての屋上（屋上定点）の 2 箇所を実施した。地上定点ではネットワーク接続状況、気温と相対湿度も同時に計測した。10 分間で取得した 600 個のデータのうち最も ratio が高いデータを選んで 10 分おきのデータとして今回解析の対象とした。2021 年 11 月の約 1 ヶ月間のデータを解析した結果、以下が明らかとなった。

- ① 地上定点では取得データ 3623 個のうち fix 値は 1442 個（全体の約 39.2%）であり、屋上定点では 3588 個すべてが fix データであった。上空が開けていることと障害物がないことは、GNSS 衛星電波を利用した RTK 測位で fix 値を得るためには重要である。
- ② 地上定点と屋上定点の両方のデータともデータが集中する値を代表値とすると、そこから絶対値で 3.0×10^{-7} 付近に分布のギャップがあった。これを正常の fix 値とミス fix 値の境界として、データ品質について評価した上で品質低下の原因を探ったところ、データ処理の段階で全体の品質を改善する方法が判明した。全体のデータの品質の判定は、ばらつきをみる標準偏差の大きさと、標準誤差の 2 倍を誤差とした数値を誤差範囲として代表値をその範囲に含むかどうかという 2 つの方法で行った。
- ③ 地上定点
 - (ア) 全データの標準誤差は水平方向で約 14 ~ 15cm、高さ方向で約 44cm であった。一般に普及している D-GNSS による測位精度に比較すると 10 倍以上の精度であるが、一般に数 cm 以下という RTK 測位の精度としては不十分である。これはミス fix 値が多く含まれているためである。緯度、経度、高さデータとも誤差範囲に代表値が入らないため統計データとしての品質は低い。特に ratio が低い（3 ~ 10）データおよび ratio が高い（800 以上）データではばらつきが大きく、ミス fix 値が多く含まれていた。
 - (イ) 捕捉衛星数を 15 付近でデータの品質にギャップがあったため、15 以上という条件

でデータをフィルタすると、扱うことができるデータ数は元の約43%に減少するものの、標準偏差は水平方向で元の約30%以下、高さ方向で約20%になった。また、統計データとしての品質は改善した。

- (ウ) さらにratioが9付近でデータの品質にギャップがあったため、9以上という条件でデータをフィルタすると、扱うことができるデータ数は元の約20%に減少するものの、標準偏差は水平方向と高さ方向とも約1~2%になった。また、統計データとしての品質もさらに改善した。特にデータ数が多く最もばらつきが大きかったratioの低いグループにおいては大きく改善したために全体のデータの質を変えることになった。
- (エ) ageと相対湿度(13時台~15時台)もデータの品質に若干影響がみられたが、上記ア、イほどの効果はなく、さらに閾値を決めてフィルタすると扱うことができるデータ数が大幅に減少してしまう。

④ 屋上定点

- (ア) 全データの標準誤差は水平方向、高さ方向とも約1mmであった。地上定点のデータに比較して格段に精度が高い。また平均値と代表値の差が水平方向で1mm以下、高さ方向で3mmであり、ばらつきの小さい精度、信頼性とも高いデータであった。
- (イ) 地上定点と同様な方法でフィルタリングを行うと、良質なデータをあまり減らすことなくミスfixした外れ値を除外できた。これはリアルタイムで正確なRTK測位データが必要な際に、データ取得とともに最初から定められた数値でフィルタできるため、有用な手法である。
- (ウ) 全fixデータ3588個のうち4個は上記のフィルタリングでも除外できなかった。1つは雷によるものであると思われるが、他の3個については原因不明である。
- (エ) データを取得した際に、捕捉衛星数が15以上およびratioが9以上という2つのフィルタを行い、さらに統計処理を行って外れ値を除外しながらRTK測位を行えば、リアルタイムで常に精度と信頼性が高いデータを取得し続けることができる。これは自動車の自動運転やドローンなどの自動飛行、さらに地盤の動きを監視するシステムとして有効である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、熊本学園大学の管財課には、基準局設置作業のために校舎建物の屋上へ出入りすることと設置することについて理解と協力を得た。深く感謝申し上げます。本研究は2021年度熊本学園大学研究助成を使用した成果によるものである。

参考資料一覧

- (1) 新村太郎・那須仁予 (2020) : 「安価な受信機とインターネットを使用したローカル・エリア RTK-GNSS 精密測量システムの構築と検証」, 熊本学園大学論集 『総合科学』, 26 (1), 15-50.
- (2) 新村太郎・那須仁予 (2021) : 「経時過程における 4G 回線を利用したローカル・エリア RTK-GNSS の精度と再現性の検証」, 熊本学園大学論集 『総合科学』, 26 (2), 1-20.
- (3) 今江理人 (1996) 「GPS の原理と応用」, 電気学会誌, 116, 10, pp.672-675.
- (4) 浪江宏宗 「RTK-GPS の原理と応用」
<http://www.nda.ac.jp/~nami/research/pdf/CGSIC2001.pdf> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (5) 浪江宏宗・高須知二・久保信明・安田明生 (2016) 「RTK-GNSS 測位における高速地球周回衛星を利用した瞬時アンビギュイティ決定手法の提案」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, 1, 245.
- (6) 高須知二 「RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術」
http://gpspp.sakura.ne.jp/paper2005/gpssymp_2007.pdf (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (7) 坂井丈泰 「GPS/GNSS の基礎知識 (GPS/GNSS シンポジウム 2007 チュートリアルセッション)」
<https://www.enri.go.jp/~sakai/pub/symp07a.pdf> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (8) 電子航法研究所 「GPS の SA 解除について」
<https://www.enri.go.jp/~sakai/saoff.htm> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (9) 白井友子, 久保信明 (2012) 都市部における RTK-GPS の信頼性向上, 日本航空宇宙学会論文集, 60, 1, 40-47.
- (10) Google Play 「RTKGPS+」
<https://play.google.com/store/apps/details?id=gpsplus.rtkgps&hl=ja> (2019 年 11 月 29 日最終アクセス).
- (11) ublox 社 ホームページ 「NEO-M8P series」
<https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8p-series> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (12) ublox 社 ホームページ 「ZED-F9P module」
<https://www.u-blox.com/en/product/zed-f9p-module> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (13) ublox 社 ホームページ 「ANN-MB-0 series」
<https://www.u-blox.com/en/product/ann-mb-series> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (14) Tallysman 社 ホームページ 「TW2710 Single Band GNSS Antenna」
<https://www.tallysman.com/product/tw2710-single-band-gnss-antenna/> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (15) tp-link 社 ホームページ 「CPE 210 2.4GHz 300Mbps 9dBi Outdoor CPE」
<https://www.tp-link.com/jp/service-provider/business-wireless/cpe210/> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (16) SENSIRION 社 ホームページ 「SHT35-DIS-B」
<https://sensirion.com/jp/products/product-catalog/SHT35-DIS-B/> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (17) RTKLIB ホームページ 「RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning」
<http://www.rtklib.com/> (2022 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (18) RTKLIB ライブラリ 「tomojitakasu/RTKLIB」
<https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB.git>

- (19) tp-link 社 ホームページ「Archer C80 AC1900 MU-MIMO Wi-Fi ルーター」
<https://www.tp-link.com/jp/home-networking/wifi-router/archer-c80/> (2022年1月6日最終アクセス).
- (20) Tallysman 社 ホームページ「TW3710 Single Band GNSS Antenna」
<https://www.tallysman.com/product/tw3710-single-band-gnss-antenna/> (2022年1月6日最終アクセス).
- (21) 株式会社ピクセラ「LTE 対応 USB ドングル PIX-MT100」
http://www.pixela.co.jp/products/network/pix_mt100/ (2022年1月13日最終アクセス).
- (22) ホームページ「SHINMURA Taro's web site」
<https://www.shinmura.jp/taro/> (2022年1月13日最終アクセス).
- (23) ホームページ「Raspberry Pi OS」
<https://www.raspberrypi.com/software/> (2022年1月13日最終アクセス).
- (24) Teunissen P J G and Verhagen S (2007) On GNSS Ambiguity Acceptance Tests, Proceedings of IGNSS Symposium 2007, Sydney.
- (25) 国土地理院「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」
<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html> (2022年1月13日最終アクセス).
- (26) 内藤勲夫 (2000) GPS 気象学 – GPS 大気遅延情報の気象学・測地学への応用 –, 地学雑誌, 109, 6, 964-970.
- (27) 気象庁ホームページ「過去の気象データ検索」
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/> (2022年1月13日最終アクセス).

付録

A 地上定点のラズベリーパイにおけるスケジュール設定

- ① RTK 測量およびデータ転送のためのメインスクリプトの実行.

```
0,10,20,30,40,50 * * * * /home/pi/TEMP-HUM-RTK.sh >/dev/null 2>&1
```

- ② ネットワーク接続状況の監視および記録のために Wi-Fi リピータを介した Wi-Fi アクセスポイントへの ping を約 10 分間実行して結果を転送.

```
0,10,20,30,40,50 * * * * tmp1=$(ping -w 590 192.168.0.1 | tail -2 ); echo -n $tmp1 | cat -e  
| cut -d " " -f 6,14 | sed -e s/" /"¥"/ | cut -d "/" -f 1,3,5 | sed -e s/"¥"/" loss, ave="/ |  
sed -e s/"¥"/" ,mdev="/ | sed -e 's/$/ ms/' > /home/pi/log/ping-WIFI
```

- ③ キャスタサーバと (160.16.134.72) の接続状況の監視および記録のために ping を約 10 分間実行して結果を転送.

```
0,10,20,30,40,50 * * * * tmp2=$(ping -w 590 160.16.134.72 | tail -2 ); echo -n $tmp2 | cat  
-e | cut -d " " -f 6,14 | sed -e s/" /"¥"/ | cut -d "/" -f 1,3,5 | sed -e s/"¥"/" loss, ave="/  
| sed -e s/"¥"/" ,mdev="/ | sed -e 's/$/ ms/' > /home/pi/log/ping-CAS
```

- ④ 外部のサーバ (124.41.117.17) からラズベリーパイにアクセスして動作の確認, 保守を行うため ssh によるトンネルを常に作成しておく.

```
* * * * * if ! /usr/bin/netstat -ant | grep "124.41.117.17:22 ESTABLISHED" ;  
then `usr/bin/ssh -R 1234:localhost:22 -f -N taro2@124.41.117.17` ; fi >/dev/null  
2>&1
```

B 地上定点での RTK 測量およびデータ転送のためのメインスクリプト

```
#!/bin/bash  
# 毎 10 分ごとに実行する  
  
DIR="/home/pi"  
LOG_DIR="/home/pi/log"  
LOG_FILE="`date +%Y%m%d%H%M`-log"  
DATA="$LOG_DIR/pos"  
DATA2="$LOG_DIR/pos2"  
TIME="`date +%H%M`"  
# 昨日の日付を変数として使用  
LOG_FILE2="`date +%Y%m%d%H%M --date '-1 days`-log"  
YEAR2="`date +%Y --date '-1 days`"  
MONTH2="`date +%m --date '-1 days`"  
DAY2="`date +%d --date '-1 days`"  
  
#ping の結果が書かれたファイルがあれば変数に入れて元のファイルは消去  
if [ -e $LOG_DIR/ ]; then  
PING_WIFI=`cat $LOG_DIR/ping-WIFI`
```

```

PING_CAS=`cat $LOG_DIR/ping-CAS`
rm -f $LOG_DIR/ping-WIFI
rm -f $LOG_DIR/ping-CAS
fi

# 正午には前日のログの整理をする
if [ $TIME -eq 0000 ]; then
  FILE=$LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}????-log      #10分ごとのデータ
  for FILENAME in $FILE
  do
    cat $FILENAME >> $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-log # 日付名をつけたファイル
    にまとめる
    rm $FILENAME          #10分ごとのデータを削除
  done

  timeout 20 scp $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-log taro2@www.shinmura.jp:/home/
  taro2/public_html/log
  # rm $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-log # 日ごとにまとめたファイルを転送したら
  消去する？
  mv $LOG_DIR/pos.log $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-all-log #1日に取得した全部の
  データを日付名のファイルにする
  timeout 30 scp $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-all-log taro2@www.shinmura.jp:/home/
  taro2/public_html/log
  # rm $LOG_DIR/${YEAR2}${MONTH2}${DAY2}-all-log #1日に取得した全部のデータを転送した
  ら消去する？
fi

#rtkrvc が動いていたら実行
isAliveRtkrcv=`ps -ef | grep "rtkrvc" | grep -v grep | wc -l`
if [ $isAliveRtkrcv = 1 ]; then
  # すでに動いている rtkrcv をいったん停止
  ps aux | grep rtkrcv | grep -v grep | awk '{ print "kill -9", $2 }' | sh
  touch $LOG_DIR/$LOG_FILE
  # 年月日時分をログファイルに記録
  date "+%Y%m%d%H%M" | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  echo " IPaddr:" | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  /usr/sbin/ifconfig | grep "inet " | cut -d " " -f 10 | grep -v "127.0.0" | tail -1 | tr -d "\n" >> $LOG_
  DIR/$LOG_FILE
  #ping の前 10 分の結果をログファイルに記録
  echo " : ping-to-WiFiR " | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  echo $PING_WIFI | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  echo " : ping-to-CAS " | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  echo $PING_CAS | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE
  # 温度と湿度をログファイルに記録
  python $DIR/TEMP-HUM.py | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/$LOG_FILE

```

```

#10 分間計測した位置データ測定結果のうち ratio が最大の行を温度湿度と同じログファイルに記録
sed -e 's/ / /g' $DATA > $DATA2
sed -e 's/ / /g' $DATA2 > $DATA
sed -e 's/ / /g' $DATA > $DATA2
sed -e 's/ / /g' $DATA2 > $DATA
rm -f $DATA2
for DATAFILE in $DATA
do
RATIO=`tac $DATAFILE | cut -d " " -f 15 | sort | tail -2 | sort -r | tail -1`
done
i=1
while read line
do
RATIO2=`echo $line | cut -d " " -f 15`
STATUS=`echo $line | cut -d " " -f 6`
if [ $i -gt 2 ];then # ヘッダの先頭 2 行部分を無視する
# if [ "$STATUS" = "1" ];then #status が 1 (FIX) のデータを選択
if [ "$RATIO2" = "$RATIO" ];then #ratio が最大のデータを選択
MAX="$line" # 該当のデータを出力する
fi
# fi
fi
let ++i
done < $DATA
echo $MAX >> $LOG_DIR/$LOG_FILE

echo "# " | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/pos.log
date +%Y%m%d%H%M --date '-10 minute' | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/pos.log
echo " - " | tr -d "\n" >> $LOG_DIR/pos.log
date +%Y%m%d%H%M >> $LOG_DIR/pos.log
cat $DATA >> $LOG_DIR/pos.log #10 分間取得したデータを pos.log というファイルに追加
rm -f $DATA #10 分間のデータを消去
#10 分間のデータをまとめたので rtkrcv を起動
$DIR/RTKLIB/app/rtkrcv/gcc/rtkrcv -s -d /dev/tty1 -o $DIR/RTKLIB/app/rtkrcv/rtk.conf
#10 分間のデータをまとめたファイルを転送
sleep 20
LOG_FILE3=`date +%Y%m%d%H%M`-log"
timeout 10 scp $LOG_DIR/${LOG_FILE3} taro2@www.shinmura.jp:/home/taro2/public_html/log

else
#tkrcv が動いていなかったら上のデータをまとめる作業はせずに rtkrcv を起動するだけ
$DIR/RTKLIB/app/rtkrcv/gcc/rtkrcv -s -d /dev/tty1 -o $DIR/RTKLIB/app/rtkrcv/rtk.conf
fi

```

C 地上定点の温度計測のスク립ト

```
#!/usr/bin/env python
import smbus
import time
i2c = smbus.SMBus(1)
addr=0x44

def sign16(x):
    return (-(x & 0b1000000000000000) |
            (x & 0b0111111111111111))

#main
i2c.write_byte_data(addr,0x23,0x34)
time.sleep(0.5)
i2c.write_byte_data(addr,0xe0,0x0)
data = i2c.read_i2c_block_data(addr,0x0,6)
rawT = ((data[0] << 8) | (data[1]
rawR = ((data[3] << 8) | (data[4]
# print (hex(data[0]);print(hex(data[1]);print(hex(rawT));print(bin(rawT))
raw_sT = sign16(int(hex(rawT),16))
temp = -45 + raw_sT * 175 / 65535
#print (str(temp) +"C")
# print (hex(data[3]);print(hex(data[4]);print(hex(rawR));print(bin(rawR))
RH = 100 * rawR / 65535
print (": "+str(temp) +"C"+" "+str(RH) +"%"+" RTK: ")
```