

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

新村 太郎^a 那須 仁予^a

Verification of the Accuracy and Reproducibility of
Local-Area RTK-GNSS over 4G Lines over Time
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 (2020) developed a low cost and easy local-area RTK-GNSS system that uses existing GNSS satellites, the internet, 4G connection and a caster server, to provide real-time horizontal and vertical positioning within a few centimeters, and the accuracy of the system was verified at each level points basically once. However, the quality of the data may change due to changes in environmental conditions that affect the system, such as the position of GNSS satellites, weather condition and 4G connection condition. Another important purpose of this system was to be low cost and easy to operate. To evaluate the actual cost performance, it was also necessary to verify how well the whole system can withstand changes over time.

In order to evaluate these, we have conducted a series of precision surveying observations using local-area RTK-GNSS at the fixed point on the university campus over a period of about two and a half months from mid-November 2019 to the end of January 2020. It was found that this system was completely maintenance free at least for this period and could always provide data with sufficient accuracy.

キーワード: 低コスト精密測量システム、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、Rtkgps+

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

1. はじめに

新村・那須 (2020) ¹ は GNSS (Global Navigation Satellite System : 全球測位衛星システム) 利用して、現在位置情報を水平および垂直方向に数 cm 以内の精度でリアルタイムで得ることができるローカル・エリア RTK-GNSS² 測量を、安価で行うシステムを構築して精度の検証を行った。ここでは自ら立ち上げたローカル・エリア RTK-GNSS² 基準局の情報を 4G 回線でインターネットに接続して、キャスターサーバ経由で必要な情報を配信した。精度の検証は最寄りの水準点数カ所で行い、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。確認作業はそれぞれ基本的に 1 回のみであった。しかしながら GNSS 衛星の位置関係や気象条件、4G 回線の状況などシステムに影響する諸条件の変化によって、データの品質が変わる可能性がある。また当システムは安価で手軽に運用できることをもう 1 つの重要な目的として設計したが、実際のコストパフォーマンスを評価するためには、精度の保持、ハードウェアの耐久性、接続の安定性を含めてシステム全体が経時変化にどの程度耐えうるかも検証する必要がある。以上のことから、2019 年 11 月半ばから 2020 年 1 月末の約 2 ヶ月半にわたって大学構内の定点において、ローカル・エリア RTK-GNSS² による精密測量を連続的に行った。本論ではその検証プロセスと得られたデータの分析結果を報告する。

2. ローカル・エリア RTK-GNSS²

RTK-GNSS³ は GNSS 衛星から放送される L1 帯もしくは L2 帯 (あるいはそれら両方) の搬送波を利用して、衛星と受信機との間の距離を精密に知ることによって高い精度で測位を実現するものである。図 1 のように、位置が未知である場所に設置する移動局と、正確な位置が既知である基準局の組み合わせからなり、1) 衛星と基準局、および衛星と移動局のそれぞれの間の正確な距離を求めた後、基準局、移動局のそれぞれの衛星からの相対的な正確な位置が判明し、絶対的な位置が既知である移動局に対する移動局の相対的な距離と方向 (基線ベクトル) が判明することによって基準局の正確な位置が判明する。このプロセスでは基準局の正確な位置と、両局と衛星との正確な距離を知ることが重要となる。特に後者において搬送波位相を用いるが、その正確な推定のためには、搬送波を効率良く受信して搬送波位相を正確に処理する受信機と、搬送波位相から正確な距離を求めるための処理手法が必要である。

新村・那須 (2020) では ublox 社 ⁴ が開発した安価な GNSS 受信モジュール NEO-M8P シリーズ ⁴ を使用して基準局と移動局に使用し、基準局では Raspberry Pi 3 Model B+ にインストールされた OS (Raspbian) 上で RTKLIB⁵ を使用して信号処理と送信を行った。システムの構成は図 2 の通りである。受信局では目的に応じて、Windows10 をインストールしたノート PC と Android OS をインストールしたスマートフォンを使った。前者では RTKNAVI⁵ を使用して処理データの検証を行い、後者では Rtkgps+⁶ を使用して精密測位を行った。基準局を熊本学園大学 11 号館 (7 階建て) の屋上に設置した。基準局のデータは 4G 回線を通じてインターネットに接続してインターネット上にあるキャスターサーバを経由して基準局のデータを利用できるようにした。移動局では 4G 回線を通じてキャスターからの情報を得

た。このシステムの詳細と測位データの検証結果は新村・那須 (2020)¹で報告した。

ネットワーク RTK-GNSS⁷ は公衆のデータ通信網（現在ではインターネットが中心）を通じて既存の基準点情報提供サービスから必要な情報を取得して精密測量を実現するものであるが、ローカル・エリア RTK-GNSS² は、独自に設置した基準点のデータを様々な通信手段で移動局側が取得して使用する形態である。旧来は有線や独自の無線装置を使用してデータの送受信をしていたが、現在では TCP/IP 技術と対応機器の普及によって、無線 LAN 技術や 4G などの公衆データ通信網とインターネットを使用して簡単に通信手段を確保できるようになった。基準局の機能をデータ配信を含めて独自に運用することによって、ネットワーク RTK-GNSS³ サービスを利用した場合と比較して、精密測量にかかるコストを格段に下げることができるようにした。

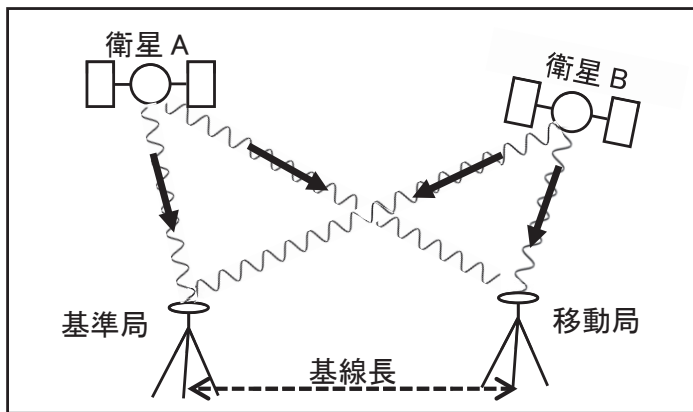


図1 RTK-GNSS³の基本的構成

正確な位置が既知である基準局と位置が未知である移動局のそれぞれにおいて同時に複数の GNSS 衛星の搬送波位相を観測して、衛星からの正確な距離を求める。4つ以上の衛星を使用して3次元的な正確な位置関係を知ることによって、基準局から移動局への相対的な位置（基線ベクトル）を算出して、移動局の正確な位置を求める。図は新村・那須 (2020)¹から引用。

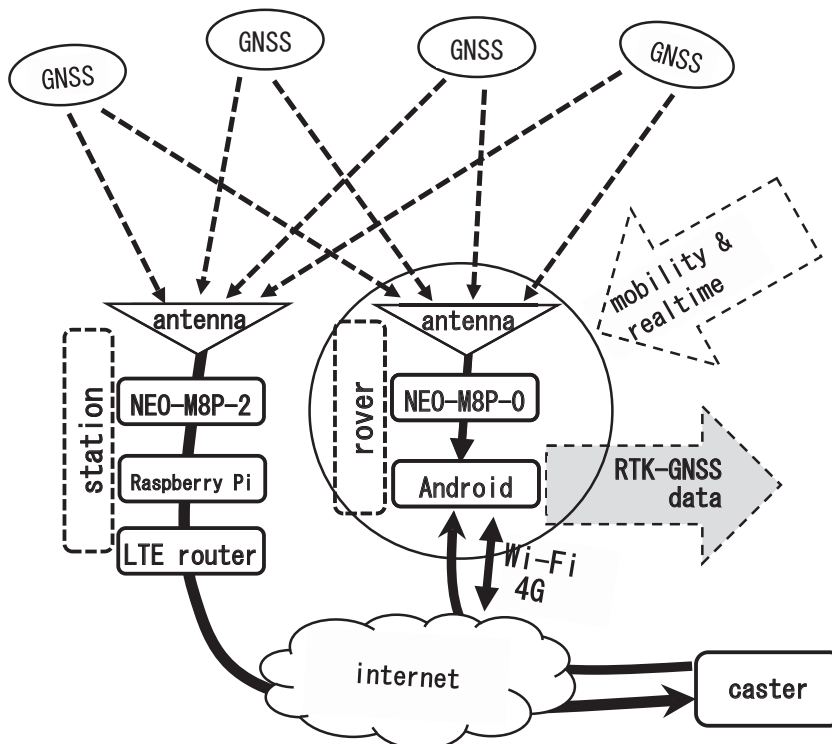


図2 RTK-GNSS³ 測量システムの全体の構成

移動局 (rover) の受信機 NEO-M8P⁴ は非常に小型で消費電力も小さく、RTK 解はスマートフォンに搭載された Android OS 上の Rtkgps+⁶ で求めることができる。スマートフォンは元々 Wi-Fi や 4G 接続できることや可搬性に優れるため、rover 全体としてかなり小型軽量で可搬性にすぐれており、リアルタイムで RTK による精密な位置データを取得することができる。図は新村・那須 (2020)¹から引用。

3. 移動局によるローカル・エリア RTK-GNSS² 測定の定点観測結果

図3のA、Bの航空写真に、基準局および連続測定の定点の場所を示した。前述のように基準局は周辺に遮るものがない7階建ての校舎の屋上に設置した。連続測定は校舎や大学の関連の建物、樹木に囲まれた場所に定点を定めて行った。電波の受信環境は極端に悪くもなく、良くもないという中間的な場所である。写真C、Dのように植え込みの縁のレンガの上に場所を定めてアンテナを置いた。設備の都合上、固定して設置することができなかったため、測定の度にレンガの境界の模様を目安にしてアンテナを置いた。そのため数mm程度の設置上のずれが生じている可能性はあった。水準点等で行ったように、Garmin社製eTrex20J⁸も同じ場所において、比較のためにD-GPS⁹測定も行った。測定は2019年11月19日から2020年1月31日までの約2ヶ月半の間、およそ週末と年始年末を除くほぼ毎日、任意の時間に基本的に1回行った。周辺は写真Cのように、方角で北西側の植え込みに5m程度の高さの樹木があり、写真Fのように上空の一部を樹木の枝が覆っている他は、特に遮るものはない。すぐ近くに樹木がある北西および東側以外は比較的開けているが、南側約20mには4階建ての鉄筋の建物、西側約30mには5階建ての鉄筋の建物、北側約30mには1階建ての鉄筋の建物があり、特に4階建て以上の建物からは状況によってマルチパスの影響が予想された。ローカル・エリア RTK-GNSS²による測定の結果を表1に、同時に行ったD-GPS⁹による結果を表2に示した。

新村・那須(2020)¹は測定時の天候(特に降雨)がローカル・エリア RTK-GNSS²測定の精度に影響する可能性を指摘した。よって、ここでは測定時の天候を上空の印象や降水の有無で判断して記録した。使用したアプリRtkgps+⁶が当初はみちびき¹⁰に対応していなかったため、対応したものに入れ替える2019年11月29日まではGPS¹¹とBeiDou¹²のみの信号を使用した。みちびき¹⁰を受信していない2019年11月20日および2019年11月28日はそれぞれ最初の計測ではFIXせず、時間をおいた2回目でFIXした。みちびき¹⁰を受信するようになった2019年12月2日以降はすべて最初の計測でFIXしてデータを取得できた。測定を行った期間には、みちびき¹⁰は4機運用されていた。1機は静止軌道上にあるので常に受信でき、その他の3機のうちいずれかも常にほぼ真上くらいに来ていた。みちびき¹⁰の受信が可能か否かは、ローカル・エリア RTK-GNSS²測位でFIX解を得ることにに対して非常に大きな影響があった。



図3 熊本学園大学内におけるローカル・エリア RTK-GNSS² の連続測量

写真 A、B とも熊本市内にある熊本学園大学周辺の航空写真で、A は Google マップによるもの、B は航空機から撮影したもの。A の赤い枠が熊本学園大学のおおまかな敷地境界で、A、B にそれぞれある塗りつぶした赤い丸は基準局のアンテナ設置場所、赤い丸枠が連続観測を行った場所。写真 C の赤い丸枠の所を測量のための定点としてアンテナを置いた。植え込みの縁のレンガの上に、写真 D のようにレンガの境界を目安にして、毎回同じ場所にアンテナを置いた。比較のために D-GPS⁹ 測量ができる Garmin 社製 eTrex20J⁸ も同様の場所において測量を行った (E)。測量は 2019 年 11 月 19 日から 2020 年 1 月 31 日までの約 2 ヶ月半の間、およそ週末と年始年末を除くほぼ毎日、任意の時間に行った。写真 C の左側、方角では北西側の植え込みに樹木があり、写真 F のように上空の一部を樹木の枝が覆っていた。南側約 20m には約 20m の高さの鉄筋の建物、西側約 30m には約 25m の建物があった。

表1 大学内の定点におけるローカル・エリア RTK-GNSS² 測定の結果

測量実施年月日時刻		天気	測定結果					DOP	
年月日	時刻 (JST)		緯度(° N)	経度(° E)	Ratio	高度 (m)	衛星 補足数	HDOP	VDOP
2019/11/19	13:14	晴れ	32.80389422	130.72949672	11.6	52.633	12	0.65	1.36
2019/11/20	11:01	晴れ	32.80389433	130.72949683	6.8	52.639	12	0.76	1.39
2019/11/21	15:03	晴れ	32.80389422	130.72949681	3.7	52.653	11	0.88	2.00
2019/11/22	8:44	くもり	32.80389453	130.72949675	21.4	52.636	12	0.65	1.36
2019/11/25	15:34	くもり	32.80389433	130.72949700	17.3	52.741	11	0.67	1.33
2019/11/26	9:29	晴れ	32.80389436	130.72949686	6.2	52.648	14	0.63	1.08
2019/11/27	10:43	くもり	32.80389433	130.72949678	10.8	52.693	16	0.76	1.48
2019/11/28	17:10	晴れ	32.80389436	130.72949675	4.3	52.625	13	0.75	1.36
2019/11/29	12:02	晴れ	32.80389439	130.72949694	3.8	52.679	11	0.76	1.53
2019/12/2	15:59	晴れ	32.80389428	130.72949683	149.4	52.672	11	0.66	1.07
2019/12/3	12:23	晴れ	32.80389433	130.72949678	13.2	52.660	15	0.66	1.26
2019/12/4	11:17	晴れ	32.80389439	130.72949686	3.4	52.649	15	0.68	1.12
2019/12/5	18:03	晴れ	32.80389436	130.72949675	3.5	52.643	16	0.64	1.22
2019/12/6	12:21	晴れ	32.80389433	130.72949669	10.6	52.661	14	0.70	1.59
2019/12/7	10:27	くもり	32.80389447	130.72949681	4.2	52.636	14	0.63	1.04
2019/12/9	16:36	晴れ	32.80389436	130.72949678	7.1	52.674	14	0.66	1.11
2019/12/10	10:11	晴れ	32.80389439	130.72949681	9.4	52.642	13	0.63	1.07
2019/12/11	10:58	くもり	32.80389439	130.72949675	62.9	52.629	13	0.71	1.34
2019/12/12	18:03	晴れ	32.80389436	130.72949672	111.1	52.640	15	0.63	1.15
2019/12/13	11:52	晴れ	32.80389439	130.72949678	3.9	52.675	15	0.70	1.59
2019/12/15	19:35	晴れ	32.80389439	130.72949675	3.3	52.646	15	0.61	1.11
2019/12/16	16:27	くもり	32.80389428	130.72949672	4.5	52.682	15	0.76	1.35
2019/12/17	18:12	くもり	32.80389447	130.72949678	19.1	52.657	16	0.63	1.11
2019/12/18	13:20	くもり	32.80389431	130.72949675	17.7	52.646	15	0.74	1.44
2019/12/19	17:58	くもり	32.80389444	130.72949681	31.8	52.631	16	0.65	1.25
2019/12/20	11:55	晴れ	32.80389431	130.72949669	9.9	52.647	14	0.69	1.47
2019/12/23	20:15	晴れ	32.80389442	130.72949678	3.3	52.658	15	0.63	1.31
2019/12/24	16:20	晴れ	32.80389436	130.72949675	3.1	52.667	14	0.68	1.21
2019/12/25	14:45	くもり	32.80389436	130.72949697	3.3	52.672	14	0.64	1.04
2020/1/6	15:06	くもり	32.80389439	130.72949664	6.2	52.676	14	0.76	1.38
2020/1/7	16:22	くもり	32.80389436	130.72949675	5.6	52.661	18	0.62	1.07
2020/1/8	12:11	雨	32.80389442	130.72949672	10.4	52.664	15	0.68	1.19
2020/1/9	18:00	くもり	32.80389439	130.72949672	7.0	52.666	16	0.56	1.11
2020/1/10	12:26	晴れ	32.80389442	130.72949706	3.1	52.700	12	0.71	1.26
2020/1/11	12:26	くもり	32.80389436	130.72949672	32.9	52.634	11	0.70	1.24
2020/1/14	16:16	くもり	32.80389439	130.72949669	4.0	52.632	17	0.64	1.17
2020/1/15	14:16	くもり	32.80389447	130.72949681	15.3	52.625	14	0.63	1.05
2020/1/16	16:20	くもり	32.80389439	130.72949675	9.3	52.649	16	0.63	1.24
2020/1/20	20:23	くもり	32.80389433	130.72949661	3.8	52.620	10	0.69	1.31
2020/1/21	16:18	晴れ	32.80389428	130.72949672	3.5	52.649	14	0.59	1.05
2020/1/22	21:42	くもり	32.80389433	130.72949675	8.1	52.652	12	0.71	1.27
2020/1/23	21:18	くもり	32.80389444	130.72949669	4.4	52.636	12	0.65	1.14
2020/1/24	12:00	くもり	32.80389442	130.72949661	29.2	52.603	12	0.74	1.39
2020/1/27	16:32	くもり	32.80389444	130.72949697	4.5	52.697	13	0.57	1.00
2020/1/28	10:02	雨	32.80389439	130.72949672	5.6	52.657	12	0.69	1.35
2020/1/29	13:17	くもり	32.80389436	130.72949678	19.4	52.678	14	0.63	1.07
2020/1/30	17:16	晴れ	32.80389439	130.72949672	3.1	52.660	18	0.57	1.14
2020/1/31	11:00	晴れ	32.80389433	130.72949689	4.9	52.710	9	0.71	1.21

表 2 大学内の定点における D-GPS⁹ 測定の結果

測量実施年月日時刻		天気	測定結果			DOP	
年月日	時刻(JST)		緯度(° N)	経度(° E)	高度(m)	HDOP	VDOP
2019/11/19	13:14	晴れ	32.803883	130.729514	27	1.05	2.11
2019/11/20	11:01	晴れ	32.803881	130.729472	21	0.83	1.53
2019/11/21	15:03	晴れ	32.803914	130.729494	15	0.82	1.66
2019/11/22	8:44	くもり	32.803894	130.729497	36	0.88	1.65
2019/11/25	15:34	くもり	32.803922	130.729478	24	0.84	1.37
2019/11/26	9:29	晴れ	32.803792	130.729550	41	0.82	1.28
2019/11/27	10:43	くもり	32.803825	130.729447	44	0.80	1.39
2019/11/28	17:10	晴れ	32.803878	130.729481	22	0.77	1.17
2019/11/29	12:02	晴れ	32.803872	130.729519	30	0.81	1.91
2019/12/2	15:59	晴れ	32.803875	130.729478	27	0.93	1.55
2019/12/3	12:23	晴れ	32.803883	130.729486	21	0.77	1.68
2019/12/4	11:17	晴れ	32.803700	130.729489	54	0.81	1.47
2019/12/5	18:03	晴れ	32.803903	130.729464	22	0.76	1.36
2019/12/6	12:21	晴れ	32.803881	130.729544	24	0.69	1.45
2019/12/7	10:27	くもり	32.803861	130.729525	28	0.67	1.20
2019/12/9	16:36	晴れ	32.803869	130.729467	24	0.83	1.26
2019/12/10	10:11	晴れ	32.803881	130.729483	20	0.68	1.21
2019/12/11	10:58	くもり	32.803806	130.729497	38	0.82	1.88
2019/12/12	18:03	晴れ	32.803869	130.729481	24	0.70	1.32
2019/12/13	11:52	晴れ	32.803883	130.729542	17	0.77	1.76
2019/12/15	19:35	晴れ	32.803897	130.729483	30	0.70	1.34
2019/12/16	16:27	くもり	32.803883	130.729469	31	0.93	1.52
2019/12/17	18:12	くもり	32.803856	130.729489	27	0.77	1.71
2019/12/18	13:20	くもり	32.803889	130.729506	25	0.89	1.64
2019/12/19	17:58	くもり	32.803894	130.729508	23	0.73	1.52
2019/12/20	11:55	晴れ	32.803900	130.729481	20	0.78	1.32
2019/12/23	20:15	晴れ	32.803875	130.729489	22	0.80	1.51
2019/12/24	16:20	晴れ	32.803864	130.729497	26	0.93	1.66
2019/12/25	14:45	くもり	32.803875	130.729458	19	0.82	1.37
2020/1/6	15:06	くもり	32.803886	130.729506	22	0.92	1.64
2020/1/7	16:22	くもり	32.803892	130.729503	20	0.66	1.18
2020/1/8	12:11	雨	32.803867	130.729508	23	0.79	1.31
2020/1/9	18:00	くもり	32.803872	130.729506	40	0.71	1.38
2020/1/10	12:26	晴れ	32.803917	130.729528	31	0.93	1.42
2020/1/11	12:26	くもり	32.803867	130.729489	29	0.91	1.49
2020/1/14	16:16	くもり	32.803894	130.729511	22	0.76	1.78
2020/1/15	14:16	くもり	32.803883	130.729467	40	0.83	1.36
2020/1/16	16:20	くもり	32.803906	130.729525	31	0.77	1.52
2020/1/20	20:23	くもり	32.803856	130.729517	27	0.89	1.59
2020/1/21	16:18	晴れ	32.803889	130.729497	24	0.76	1.61
2020/1/22	21:42	くもり	32.803878	130.729428	39	0.96	1.61
2020/1/23	21:18	くもり	32.803872	130.729464	39	1.12	1.89
2020/1/24	12:00	くもり	32.803889	130.729481	18	1.10	2.81
2020/1/27	16:32	くもり	32.803842	130.729467	55	0.65	1.23
2020/1/28	10:02	雨	32.803894	130.729519	30	0.95	1.70
2020/1/29	13:17	くもり	32.803864	130.729408	31	0.84	1.39
2020/1/30	17:16	晴れ	32.803900	130.729497	22	0.71	1.25
2020/1/31	11:00	晴れ	32.803908	130.729539	32	0.82	1.21

—表 1、表 2 の備考—

DOP は GNSS View から決めた。ローカル・エリア RTK-GNSS² では、2019 年 11 月 29 日までは GPS⁹ と BeiDou¹¹、12 月 2 日以降はそれらに加えてみちびき¹⁰ の信号も受信して使用した。D-GNSS⁹ ではすべての期間、GPS¹¹、GLONASS¹³、みちびきの信号を受信して使用した。DOP はそれら受信する GNSS に応じて決めている。

天気は測位時の様子で 1 日を通した天気ではない。また判断基準は気象庁の定める定義ではなく雲量に関係なく上空が比較的厚い雲に覆われていればくもりとし、わずかながらでも降水があれば雨とした。

各測位時のデータの詳細や上空の様子は nsoturon (@nsoturon)¹⁴ のツイッター上に記録した。2019 年 11 月 20 日 10:50 に行った計測 1 回目では FIX せず。FLOAT にはなるもののすぐに None になった。17:35 の計測 2 回目で FIX してデータを取得。2020 年 1 月 22 日の計測時はもやに包まれた。2019 年 11 月 28 日 15:15 の計測 1 回目では FIX せず。FLOAT のまま変化なし。機器の接続をリセット (アダプターを抜き差し) するが効果なし。17:10 の計測 2 回目で FIX してデータを取得。

表 1 および表 2 を元にして、日ごとのローカル・エリア RTK-GNSS³ と D-GNSS⁹ による測位の結果から、日ごとの値の変化をそれぞれ図 4 と図 5 にプロットした。また、表 3 には RTK-GNSS² 測位によるデータの緯度、経度、高度それぞれについて階級値ごとの頻度を求めて図 6 にそれらをプロットしてヒストグラムとして示した。全体の分布が分かるように階級幅は緯度および経度では 0.00000005°、高度では 0.02m で階級を分けた。ヒストグラム上で緯度は平均値 32.80389437° を含む階級値 32.80389438° を中心にしてほぼ左右対称の正規分布に近い。また、経度および高度では大きい値の側に少数であるが値が分布しているが、経度は平均値 130.72949678° を含む階級値 130.72949678°、高度は平均値 52.656m を含む階級値 52.65m をそれぞれ中心として、全体的におよそ左右対称の正規分布に近い形をしている。測定数がそれぞれ 48 個だったために、外れた値の影響を受けるが、測定数が十分な数になれば正規分布もしくはそれに近似される分布になることが予想される。統計処理をするために測定数はまだ少なくてあいまいさは残るが、ある程度の傾向を把握できることが期待される。特に、ローカル・エリア RTK-GNSS² による測位を行う際に、どのように値がばらつくか、そしてそのばらつきと測定環境などから要因を見つけ出して、実際に現場で測量を行う際にどのようなことに留意し、また、得られた位置データをどのような信頼性や精度をもつかを把握して使用することが望まれる。前章までの水準点等で行った検証のための測位では、基準となる位置データが既知であったために、その数値と測定データとを比較して検証を行うことができた。しかしながら学内の定点での測位では、正確かどうかの比較を行う対象としての真の値が未知である。したがって、先ず統計的な手法で真の値を推定することを考えた。

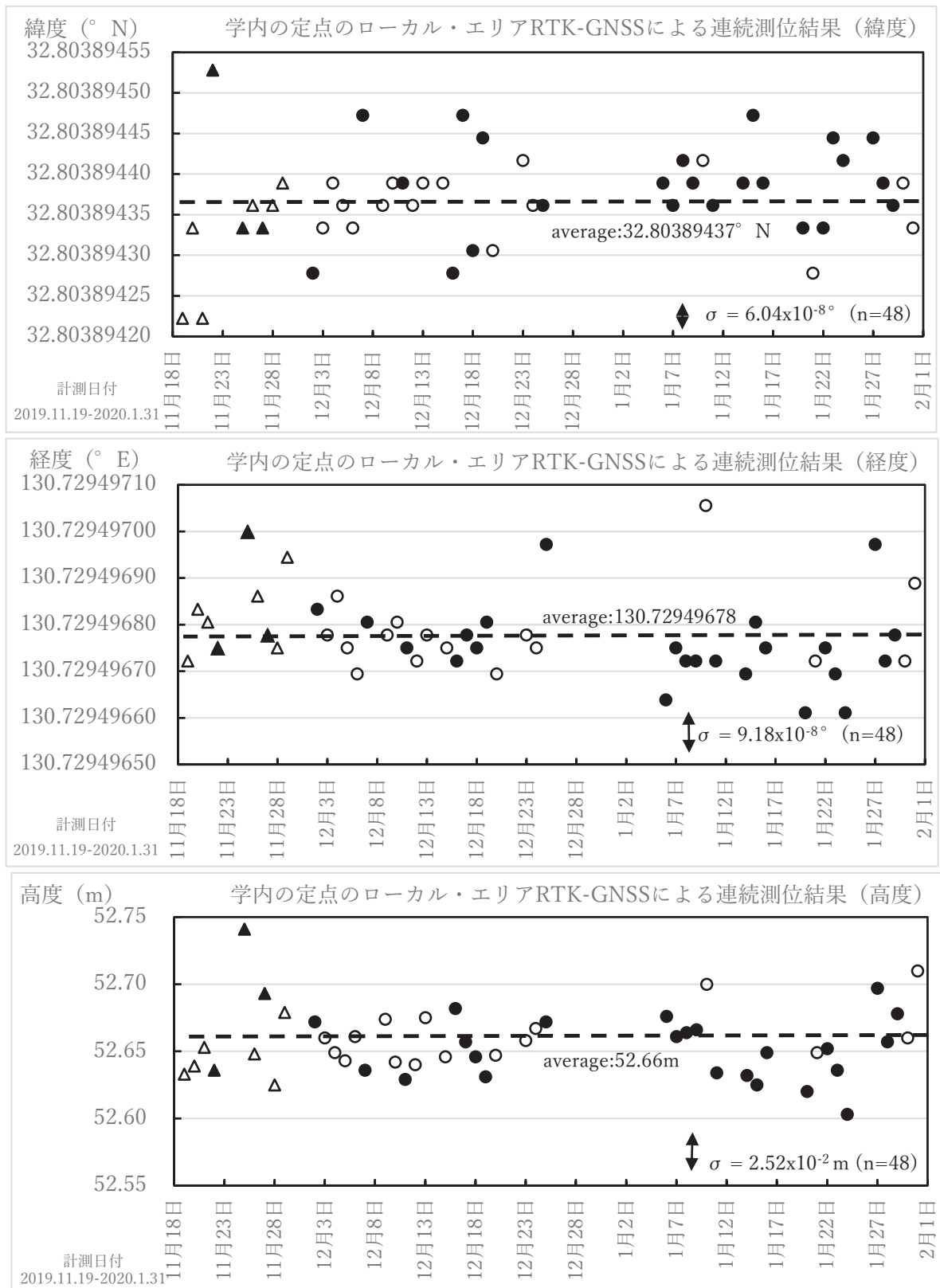
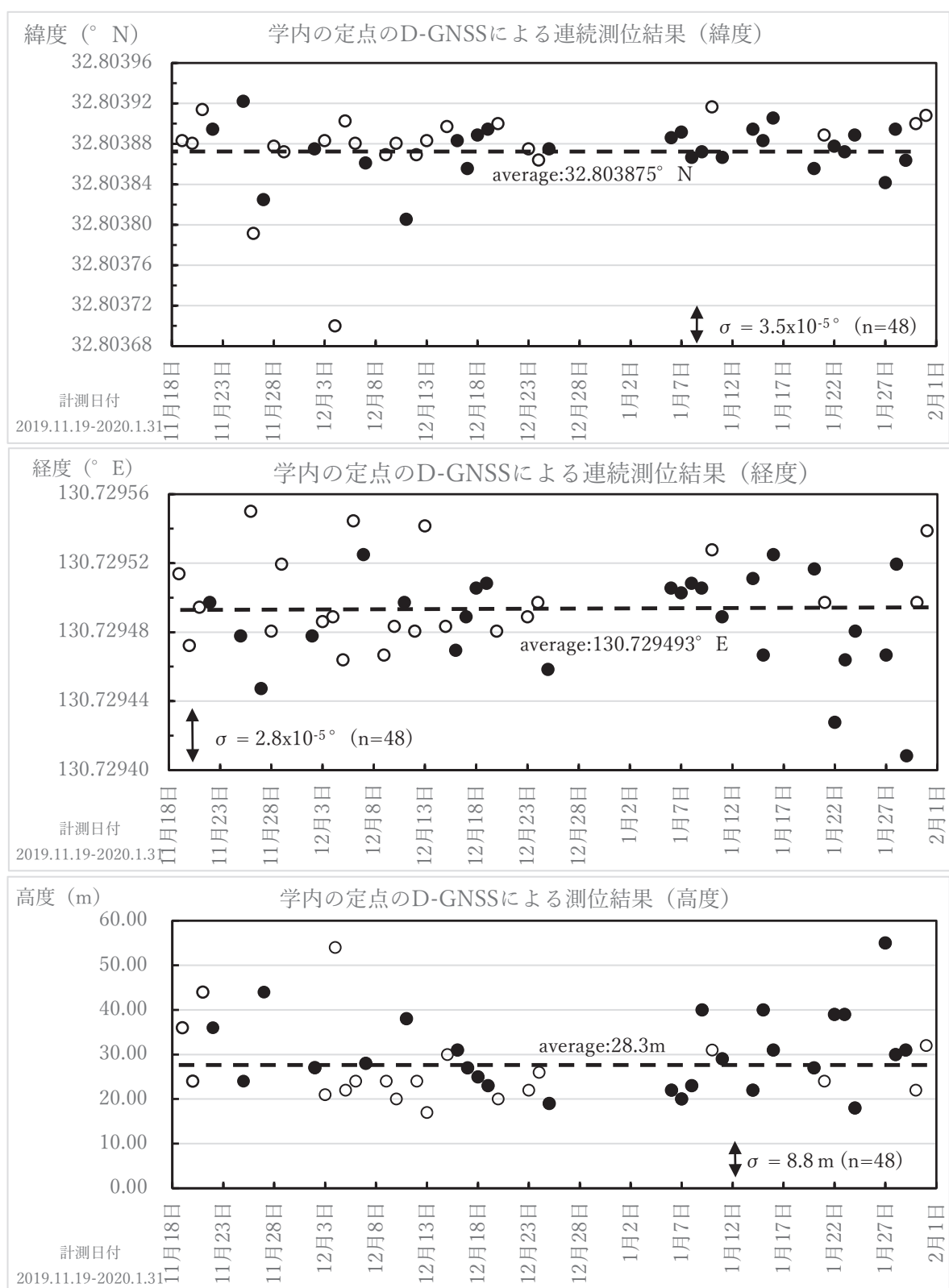


図 4 熊本学園大学内の定点におけるローカル・エリア RTK-GNSS² の連続測位結果

凡例 △: GPS¹¹、BeiDou¹² を受信、晴れ；▲: GPS¹¹、BeiDou¹² を受信、くもりや雨、
○: GPS¹¹、BeiDou¹²、みちびき¹⁰ を受信、晴れ；●: GPS¹¹、BeiDou¹²、みちびき¹⁰ を
受信、くもりや雨

水平の破線はそれぞれの期間を通しての平均値。右下の矢印は標準偏差が長さに相当する。

図5 熊本学園大学内における D-GNSS⁹ の連続測位結果

凡例 ○: 晴れ; ●: くもりや雨

破線は全体の平均値。右下、左下の縦方向の矢印の長さが標準偏差の値の大きさに相当する。

表3 大学内の定点における日ごとの
ローカル・エリア RTK-GNSS² 測位結果の値の度数

緯度の値の度数		経度の値の度数		高度の値の度数	
階級値	度数	階級値	度数	階級値	度数
130.72949708	1	130.72949708	1	52.75	1
130.72949703	1	130.72949703	1	52.73	0
130.72949698	2	130.72949698	2	52.71	2
130.72949693	1	130.72949693	1	52.69	3
130.72949688	3	130.72949688	3	52.67	14
130.72949683	7	130.72949683	7	52.65	15
130.72949678	17	130.72949678	17	52.63	12
		130.72949663	3		

階級は階級値を中心に、緯度および経度では 0.00000005°、高度では 0.02 の階級幅である。それぞれ度数の合計は 48。

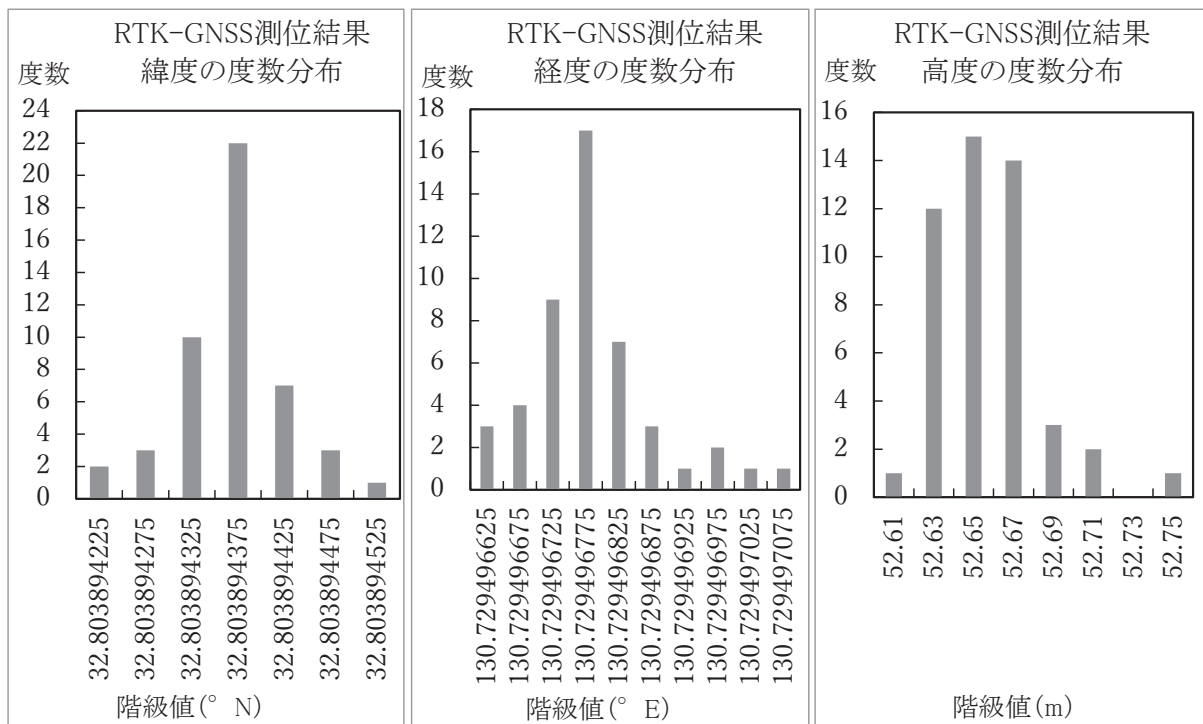


図6 大学内の定点における日ごとのローカル・エリア RTK-GNSS² 測位結果の値のヒストグラム

表3を元に、緯度、経度、高度の測定結果について階級ごとに区切り、ヒストグラムを作成した。階級幅は水平方向には 0.00000005°、上下方向には 0.02m である。経度および高度では、大きい値の側に少数であるが値が分布しているが、全体的には平均値を含む階級値を中心とした正規分布に近い形をしている。平均値は緯度で 32.80389437、経度で 130.72949678、高度で 52.656 であった。

4. 考察

(1) 真の値の推定

図4、5の日々の測位結果のグラフでは、測定値はおよそ平均値に近いところに多くまとまっており、平均値から遠ざかると数は少なくなる。これは図6のヒストグラムでデータの分布が平均値を中心にした正規分布に近い形をしていることからいえる。日々の測定値の中で例えば図5で、D-GNSS⁹の緯度の12月4日のデータは全体の中で唯一極端に小さい値であり、集中した範囲から外れている。そこまで大きくないにしても経度、高度にも数個の外れた値がみられる。ローカル・エリア RTK-GNSS²のデータにおいても図4では特に緯度、経度、高度データとも、11月のみちびきを受信できていない時期には平均から大きく外れた値が目立つ。その他、みちびきを受信できるようになっても散発的に外れた値も見られる。例えば経度の12月25日、1月10日、1月27日のデータはいずれも大きい側の値に外れていて、高度の1月24日、1月31日はそれぞれ低い、高い方に大きく外れている。これらのように大きく外れた値は結果的に大きな誤差をもったデータとなる可能性が高い。そしてこれらの誤差がランダムなものであるか系統的なものであるかについては、判断するに十分なデータはないが、少なくとも真の値を推定する際に影響を及ぼす恐れがある。そこで緯度および経度データを使用してデータの平面分布を作成した(図7上)。ここでは緯度および経度の平均に相当する点を×で記した。この平面分布から、特に経度が大きい側に平均から大きく外れた値がいくつか分布しており、これによって本来点の集中域の中心にあるだろう平均値を、経度が大きい側にずらしていることが予想される。図7下に、この図とヒートマップおよびカーネル密度分布を重ねて比較した。ヒートマップでは色が暖色系ほど、集中度が高くなっている。カーネル密度は等値線で集中度を表現している。ヒートマップおよびカーネル密度とも、どの範囲まで広げて集中域を出すかというパラメータの設定によって、はっきりと閉じた集中域をどのように出すかが決まってくる。ローカルな集中によって大きく左右されるために、たまたまどこかに集まった場所があると、代表値がそこに大きく引きずられる恐れもある。図上にある×印は、単に緯度方向と経度方向の平均がクロスする場所であって、必ずしも平面上で全体の中心を代表する場所ではない。今回のケースでは経度方向の極端な値に引っ張られているために、平面上で偏りが影響を受ける。そこで各点までの直線距離を重さとして考えた重心を考えた。最も全体を軽くすることが最も偏りが無いという意味になる。とりあえず小数点8桁目で1グリッドを構成する格子を考え(精度は格子の大きさが小さくすればいくらかでも高くなる)、そこからすべての測定点の平面座標への距離を算出し、その合計値をそのグリッドの重さとした。図8に計算結果を示した。各格子の中にすべての測定点への距離の合計を入れて、その数値が小さいほど寒色系になるように色をつけた。色がない最も左の列と下の行が座標をあらわしており、列が緯度の4桁目から8桁目の数字、行が経度の4桁目から8桁目の数字をあらわす。したがってここで最も距離が小さい、すなわち偏りが小さい座標は、北緯 32.80389437、東経 130.72949676 である。ヒートマップやカーネル密度の中心は、小数点8桁でみると緯度では同じであるが、経度では東経 130.72949675 付近であり、これより小数第8位で1だけ小さい。これは上で述べたようにローカルな集中度に引っ張られてわずかに西に偏ったことになる。また全体の平均値は

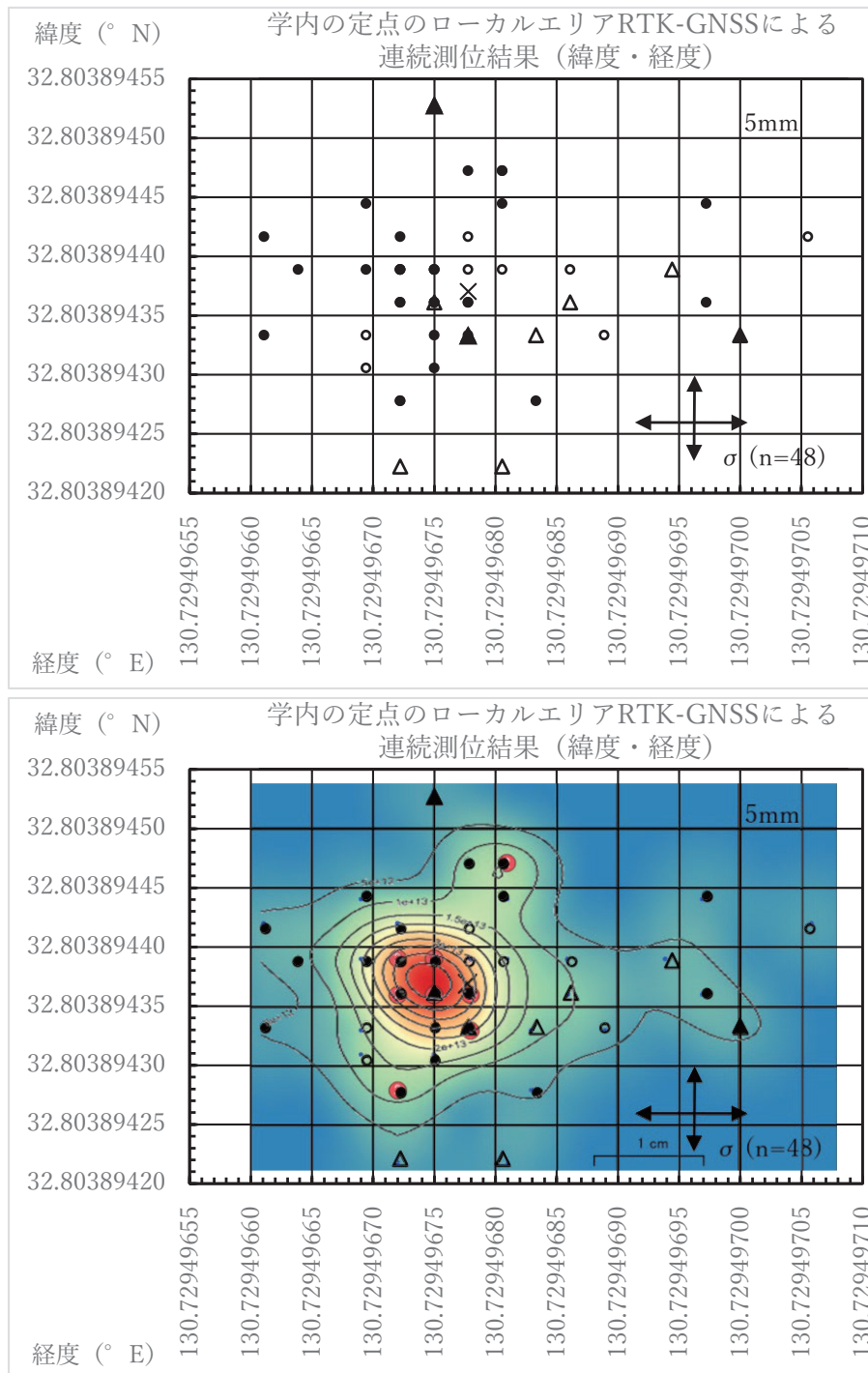


図7 ローカル・エリア RTK-GNSS² による連続測位結果と代表値の推定

上：表1の計測データを元に経度と緯度をそれぞれX、Yとみて図上に計測点をプロットした。中央付近の×印は、経度と緯度のそれぞれの単純平均をあわせた点。格子の1マスの実際の大きさはおよそ5mmである。

下：上の図に、QGISで作成したヒートマップとRで作成したカーネル密度分布図を重ねた。ヒートマップは青から赤系の色で表現されており、集中度が高い場所ほど暖色系で表示される。カーネル密度はRのノンパラメトリック密度推定法を使用。閉じた等値線の中心が、より密度が高いことを示す。どちらもほぼ同じ分布を示しており、これは右側に外れた値の影響を受けている単純平均に比べて、数が多く同じ点に複数の点が重なるより狭い範囲に集中している左側のエリアに中心がある。1マスの実際の大きさはおよそ5mmである。

同様にして緯度は同じであるが、経度が東経 130.72949678 で、重心として決めた値より小数第 8 位で 1 だけ大きい。すなわちこの平面上で各点への距離の合計を最小とする点は、カーネル密度などローカルな集中に引っ張られることと、たまたま極端に外れた値にひっぱられる単純平均の両方の偏りをキャンセルした中間の値と評価できる。

9440	547.89	520.79	497.35	479.29	466.30	458.17	455.75	458.06	464.66	475.49	489.73
9439	535.56	507.61	482.17	464.18	450.81	441.23	440.66	444.00	451.27	463.27	478.05
9438	528.88	500.38	475.35	456.04	441.97	433.27	431.65	435.31	443.41	455.81	471.40
9437	527.20	498.54	473.43	453.66	438.92	429.70	428.04	431.76	440.07	453.11	469.36
9436	530.02	501.64	476.17	456.87	441.84	430.71	430.34	433.85	441.57	455.36	471.82
9435	537.11	509.79	485.93	466.61	451.87	442.44	439.80	442.54	450.23	462.88	478.89
	9670	9671	9672	9673	9674	9675	9676	9677	9678	9679	9680

図 8 すべての測定点への平面距離が最小となる点を求める

図 21 で表示したような平面上の各測定点に対しての平面での直線距離を、0.00000001° の格子ごとに求め、最もその値が小さい場所を偏りのない代表値とした。図の最も左の 1 列は格子の緯度（北緯）をあらわし、32.8038° に続く小数点第 5 位から 8 位の桁に相当。最も下の 1 行はその経度（東経）をあらわし、130.7294 に続く小数点第 5 位から 8 位の桁に相当。計算結果で数値の小さい所を寒色系で表現している。距離の合計の数値が 428.04 である北緯で 32.80389437、東経 130.72949676 が最も数値が小さく、代表値としてふさわしい点と考えた。

図 4、5 を見ると、2 ヶ月分の時間変化、データの多様性を見ることができる。データの取捨選択は、時には何かしらのバイアスをかけてしまい、データの信憑性を下げることになるが、今回のような測定においては、図 6 のヒストグラムで確認したようにおおよそ正規分布をしているため、その分布から大きく外れているデータは他とは異なる要因によっていると予想されるために、採用しない方が真の値を決めるための精度を上げると考えられる。よって、標準偏差の 2 倍、2 σ を信頼性のある範囲として、平均値からそれをこえたら外れ値として不採用にするという方法で平均をあらためて計算した。平均値は北緯 32.80389437、東経 130.72949676 であり、前述の方法と同様の値になった。

(2) 測定精度に与える環境要因

前節では単に統計的な方法のみならず、様々な方法で真の値（に限りなく近い）値を探ってきた。正規分布と判断するにはあいまいさが残るサンプル数ではあるが、最終的には統計的な手法で算出することが有意であることが分かった。よってここではこの数値を使って、計測値の信頼性と計測環境との関連性について考察する。

定点におけるローカル・エリア RTK-GNSS² 測位で最も影響が大きかったことは、みちびき¹⁰ の信号を使用できるかどうかであった。図 4 から明らかなように、図上で三角形の凡例で示されている計測開始頃の 11 月 20 日頃からのデータは、特に緯度方法で大きな誤差をもつものが目立つ。誤差が小さい測定値もある。これは衛星の配置によって、受信数や衛星の配置が良ければ良好なデータ、悪ければ品質の悪いデータになり、状況によって非常にデータの品質に差が出ることをあらわす。実際に、FIX しなかった時に同じ日に再度異なる時間帯で計測した場合には FIX した良好なデータを得ることができた。このような状況では、衛星の配置や数をあらかじめ把握して、良好な状況であると予想した時でなければ、確実に FIX した正確なデータをとることは難しいことを意味する。日本上空にとどまることを目的として運用されているみちびきの恩恵がいかに大きいかが分かった。特に従来のコード測量では、みちびきがないと何となく誤差が大きくなるという程度だけであったが、FIX 解を得ることができるかどうかが決定的なポイントとなる RTK 測量においては、非常に重要な事項であるといえる。

図 4 のプロットにおける黒塗りとそうでないものは、天気の様子を示している。黒く塗っていないものは晴れ、そうでない黒塗りは測定時にくもりや雨の天気である。おおよそ、塗っていない、中が白いものは平均値の線の近くに集まっていて、黒塗りは線の近くにも離れた所にもばらばらと分布している。ばらつき具合を示す代表的な統計値は標準偏差であるため、これらに着目して数値を求めた（表 4）。ローカル・エリア RTK-GNSS² とコードによる D-GPS⁹ では標準偏差の桁が 8 桁目と 5 桁目であり 3 桁異なる。すなわちばらつき具合が前者は後者の 1/1000 ということであり、1 回あたりの測定精度以上に長期的に見たデータの再現性が前者では非常に高いことが分かる。そして、ローカル・エリア RTK-GNSS² における天気の違いによるばらつき具合であるが、経度については若干晴れの方が小さい程度ではほぼ同じであるが、晴れの場合にはくもり、雨に比べて 0.67 倍であり、明らかに小さい。高度は 0.86 倍であり、それほど大きくない。D-GNSS⁹ では、天気による違いは経度、高度では若干晴れの方が小さいだけで大きな差はなく、緯度では逆に約 1.87 倍で、晴れの方が悪い結果になった。これは図 5 の緯度の結果をみると明らかなように、12 月 4 日のデータが圧倒的に大きく外れているために、標準偏差に大きく影響している。

天気が GNSS 測量に与える影響は、内藤（2000）¹⁵ をはじめとした「GPS 天気予報」という手法があるように、GNSS 衛星の電波伝播に大気の状態が大きく影響していることが分かっている。大気中の水蒸気によって電波の速度が落ちることが主な原因である。実際に D-GNSS⁹、ローカル・エリア RTK-GNSS² では基準局で受信したデータと比較する際に大気中の水蒸気量の影響は補正されるために、精度は保たれる。しかしながら、水蒸気量が多くなるほど補正が難しくなり、誤差が大きくなると予想される。D-GPS⁹ のように時折大きな

誤差を含むデータがあると統計的にみて天気の影響は分からなくなるが、安定していて精密なデータを要するローカル・エリア RTK-GNSS²においては考慮すべき要因の一つといえる。

表7 測定結果の各種統計値

			経度(° E)	緯度(° N)	高度(m)	n
RTK-GNSS	平均	全体	130.72949678	32.80389437	52.656	48
		外れ値除外	130.72949676	32.80389437	52.654	48
	標準偏差 σ	全体	9.18E-08	6.04E-08	2.52E-02	26
		みちびきなし	8.86E-08	8.59E-08	3.52E-02	16
		みちびきあり	8.87E-08	5.06E-08	2.21E-02	23
		ありで晴れ	8.74E-08	3.74E-08	1.96E-02	48
		ありで晴れ以外	8.77E-08	5.61E-08	2.27E-02	48
D-GNSS	平均	全体	130.729493	32.803875	28.3	48
		晴れ	130.729500	32.803875	25.9	22
		晴れ以外	130.729487	32.803875	30.3	26
	標準偏差 σ	全体	2.80E-05	3.50E-05	8.8	48
		晴れ	2.56E-05	4.53E-05	8.3	22
		晴れ以外	2.89E-05	2.42E-05	8.7	26

(3) Ratio と測位精度

表1、2にあるように、ローカル・エリア RTK-GNSS²による測位において、Ratio、捕捉衛星数、PDOP は受信データの精度にかかわる数値である。Ratio は前述の通り、GNSS 衛星の搬送波の整数値バイアスを求める時に出てきた解を評価する数値であり、経験的に3以上でFIX 解とされている。Ratio が大きいほど、より正確で信頼できる値であると考えられている。受信状況が安定していれば、通常は時間が経過するほど大きくなる。一般の測量ではこの値が上限の999になるまで待つからデータを採用することをルールとしているケースも少なくない。本研究はこの手法の測量において、いかに正確で信頼できるデータが取得可能かを検証することも大きな目的であるが、同時に簡易さも重要な要素として考えており、計測に必要な時間も含まれている。測定においていったんFIX 解が得られればRatio が上がるために待つことなく、ほとんどすぐにその数値を記録することが多かったが、計測中に他の作業を行い時間が経過して、その間にRatio が上がったこともあり、結果的に様々なRatio の数値を得た。図9ではデータの信頼性の指標としての(外し値を除いた)平均値からの距離とRatio を比較した。

左の図ではRatio が約60、110、150の3つのデータがある。最初の2つは距離が5mm以下であり非常に精度が高い。3つめは10mmを超えるが精度が悪くはない。ここでは数は少ないものの、Ratio が100を超えても必ずしも距離が5mm以下の非常に精度が良いデータを得られるとは限らないことが分かる。右側のRatio が20以下の図から、Ratio が3を超え

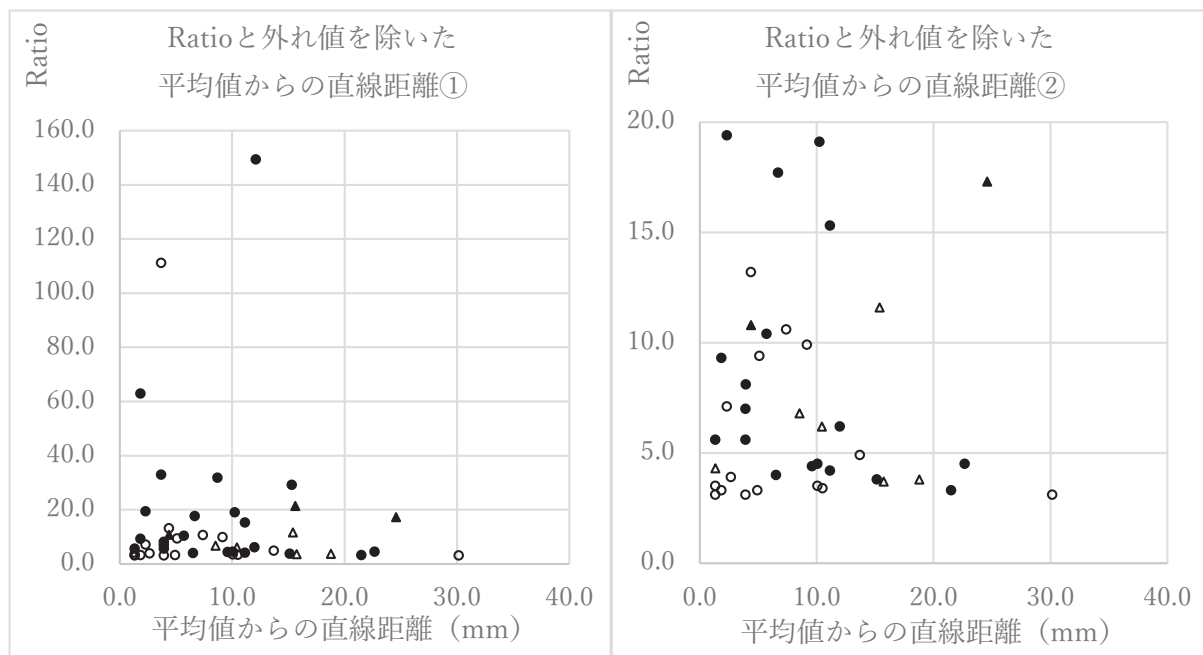


図9 Ratio と外れ値を除いた平均値からの直線距離

右側の図は左側の図の、Ratio が 20 以下の部分を分かりやすくするために縦に伸ばしたもの。

てすぐの、Ratio が 3 ～ 4 程度のデータでも 1 つを除いては晴れであればすべて 15mm 以下であった。Ratio が 4 未満でも距離は最大で 30mm 程度である。すなわち Ratio が大きくなると数 cm（ここでは 3.0cm 以内）の精度のデータを得ることが可能であることが分かる。Ratio が 6 以上になるとみちびきを受信していない 2 つのデータを除くと、さらに精度は高くなり、すべて 12mm 以下である。みちびきを受信していないと、受信可能な衛星数が少なくなり、マルチパスなどの影響が強くなって若干精度が落ちることが予想される。

(4) HDOP、VDOP と測位精度

前述の通り HDOP、VDOP はそれぞれ GNSS 衛星の配置が水平方向と垂直方向の測位に対してどれだけ条件が悪い配置になっているかを示す。すなわち数値が大きいほど測位精度に悪い影響が出ることになる。図 10 に HDOP、VDOP と平均値からの直線距離をプロットした。上記の通りであればグラフは正の相関を示すことになるが、図上では相関はみられない。PDOP は元々、かつて使用できる GNSS 衛星が少ない時代に想定された数値で、これらの数値が 3 を超えたら測位データが劣化するという目安であった。今回の計測では HDOP は 0.9 以下、VDOP もほとんど 1.7 未満という状況であったために、これら PDOP による違いよりも別の要因が関係したと考えられる。

(5) 捕捉衛星数と測位精度

捕捉衛星数が大きいと、明らかに平均値からの差が小さくなっている (図 11)。すなわち誤差の小さい精度の良いデータになっていることが分かる。また、捕捉数が多い中では晴れの場合は、一部の例外を除いてくもりや雨の時に比べて誤差は小さい傾向である。捕捉衛星数が 14 を超えるあたりから急に誤差が小さくなっている。

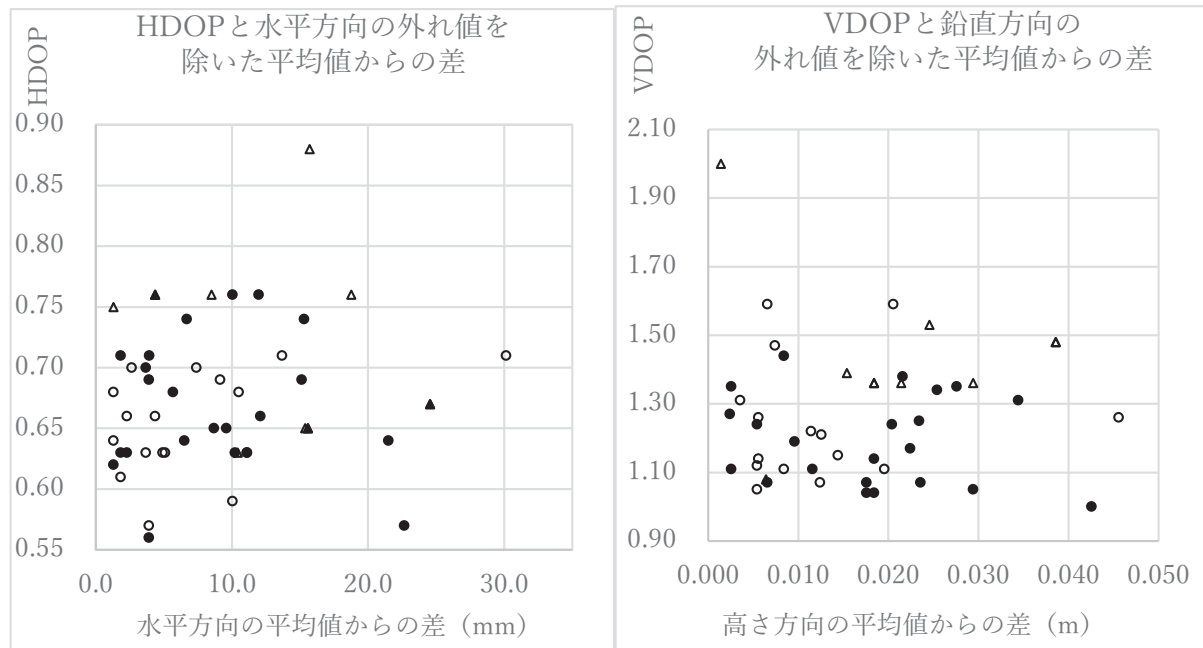


図 10 PDOP (HDOP と VDOP) と外れ値を除いた平均値からの直線距離

HDOP、VDOP と平均値からの距離、すなわち誤差にはほとんど影響がない。

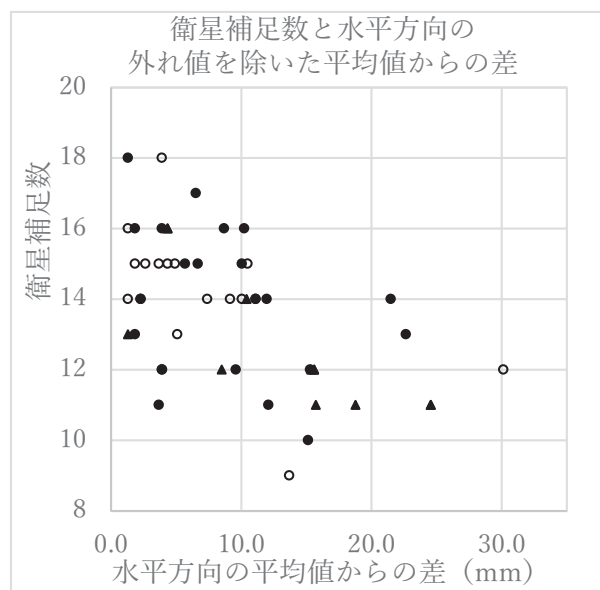


図 11 捕捉衛星数と外れ値を除いた平均値からの直線距離

捕捉衛星数が大きいと、明らかに平均値からの差が小さくなっている。すなわち誤差の小さい精度の良いデータになっていることが分かる。また、その中でも晴れの場合は、くもりや雨に比べて同じ捕捉衛星数でも誤差は小さいようである。ただし一部の例外は除く。

捕捉衛星数が 14 を超えるあたりから急に誤差が小さくなっている。

5. 結論

新村・那須 (2020)¹ で構築したローカル・エリア RTK-GNSS² システムにおいて、時間が経過しても、常に測位結果の正確さに十分な再現性があるかどうかを確認した。2019 年 11 月 19 日から 2020 年 1 月 31 日の約 2 ヶ月半にわたり、週末などを除いてほぼ毎日大学内の定点でローカル・エリア RTK-GNSS² および D-GNSS⁹ による位置計測（標高も含む）を行った。期間中は特にシステムにハードウェア的、およびソフトウェア的にトラブルはなく、データの中継や配信を行うネットワーク関連の機器やシステムにも問題はなく、これらについての補修や設定変更など一切する必要はない全くのメンテナンスフリー状態であった。

時間の変化にともなって測定データが劣化することは特に確認されなかった。データはおおよそ正規分布しており、予想される真の値に近いほどデータが集中していた。予想される真の値からのばらつきには偏りが見られ、そこから東方向には最大で約 6cm、西方向には最大 3cm、南北両方向で約 3cm、高さ方向で約 4.5cm であった。水平方向でばらつきが生じたのは、計測地周辺の建物への距離や建物の高さが異なっているために、GNSS 衛星受信の影のつき方や、建物を反射したマルチパス信号の悪影響の程度が方向によって異なるためと考えられる。

天候が悪い日には比較的誤差の大きいデータが目立ったが、要求される誤差が数 cm 以内ということであれば、今期間の測定時の天候状態の範囲であれば、常に十分な精度で測定ができることが分かった。今回は屋外で人が測量を行った際に数 cm 以内の精度で再現性が得られるかを確認することが目的であったために、数値としては十分な結果であるといえる。計測を行う環境や状況が異なる船舶や車の自動運行等で精密な測量データが必要な場合には、過酷な気象条件下の状況も把握する必要がある。今後は計測の自動化および無人化によって人が計測することができない過酷な気象条件下のデータも取得することと、湿度などの定量的な気象、環境データも同時に計測して位置データとの関連性をより明らかにすることが課題である。

6. まとめ

安価で手軽なローカル・エリア RTK-GNSS² システムは約 2 ヶ月半の間、全くメンテナンスフリーで、人が観測することが可能な環境下では常に目標精度内（3 次元方向すべてに数 cm 以内）のデータを取得可能であることが判明した。この手法による精密測量の用途を広げるためには、さらに高い精度が要求された場合に必要な測定条件を明らかにすること、そして通常の測量のみならず拡張した利用方法に耐えるかどうかを確認するために、様々な条件下での精度の変化を確認する必要がある。今後は自動化および無人化して 24 時間連続して計測を行うことが次の課題として考えられる。

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) CQ 出版社ホームページ「全国で 1cm 測位! RTK-GPS」
<https://toragi.cqpub.co.jp/tabid/865/Default.aspx> (2020 年 2 月 17 日最終アクセス).
- (3) 浪江宏宗「RTK-GPS の原理と応用」
<http://www.nda.ac.jp/~nami/research/pdf/CGSIC2001.pdf> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (4) ublox 社 ホームページ「NEO-M8P series」
<https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8p-series> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (5) RTKLIB ホームページ「RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning」
<http://www.rtklib.com/> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (6) 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).
- (7) 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 (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (8) GARMIN 社 ホームページ「eTrex 20J」
<https://www.garmin.co.jp/products/discontinued/eTrex20J/> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (9) 久保信明 (2019) 衛星測位概論・今後の展開, 日本ロボット学会誌, 37, 7, 567-572.
- (10) みちびき (準天頂衛星システム) ホームページ「GPS と一体運用可能なみちびきで位置情報を高精度測位」
<https://qzss.go.jp/index.html> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (11) GPS.GOV ホームページ「Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics」
<https://www.gps.gov/> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (12) BeiDou Navigation Satellite System ホームページ「China Successfully Launched the 52nd and 53rd BDS Satellites」
http://en.beidou.gov.cn/WHATSOEVER/201912/t20191216_19691.html (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (13) GPSSoft.ru ホームページ「Г л о б а л ь н а я н а в и г а ц и о н н а я с п у т н и к о в а я с и с т е м а Г Л О Н А С С」
<http://www.gpssoft.ru/glonass.html> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (14) nsoturon (@nsoturon) "1/31 (金) 晴 11 時 00 分"
<https://twitter.com/nsoturon/status/1223064874529345536>, 午前 11:06, 2020 年 1 月 31 日, tweet.
- (15) 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.