

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

新村 太郎^a 那須 仁予^a

Construction and Verification of Precise Survey System
Using Low Cost Receivers for Local-Area RTK-GNSS
and the Internet

Taro SHINMURA^a & Masayo NASU^a

^a 熊本学園大学経済学部

Faculty of Economics, Kumamoto Gakuen University

abstract

Positioning data with cm or mm level precision gives us a lot more possibilities than with low level (meter level) precision. Real Time Kinematic (RTK) is a popular GNSS positioning method used in case of high-precision applications. Only high cost GNSS receivers provided better RTK solution because of the number of GNSS was not enough, but those were not affordable for many surveyors. The increase in the number of GNSS made low cost GNSS receivers to provide better RTK solution recently, and ubiquitous networking connected to the internet enables rober-receivers to get parameters for correcting positioning signals of GNSS from station-receivers.

In this study, the precision and reliability of position solution obtained from a low cost Local-Area RTK-GNSS system using NEO-M8P-2 module receiver with Raspberry Pi 3b+ as a station system and NEO-M8P-0 module receiver with a smartphone as a high mobility rober system, were evaluated.

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

現在ではGPS (Global Positioning System : 全地球測位システム)¹をはじめとした多くのGNSS (Global Navigation System Satellite) が地球を周回して位置情報の提供を行っており、一般の人々の生活から産業に至る各所において測位データが活用されている。コードデータを利用する一般的な測位方法では数メートルにおよぶ誤差が含まれるために、現在位置を最寄りの道路上などに補正するマップマッチングなどのソフトウェア上の補正システムを利用しなければ日常の実用にならない。また、絶対的な位置情報が必要な測量には活用することができない。

一方で、搬送波を利用する測位方法では数mmから数cmの精度で測位が可能である。そのための受信機を含んだシステムは、年々価格は下がるものの未だにとっても高価であることと、計測に手間がかかるために現在もなお主として産業用途としてのみ普及している状況である。近年GNSSの搬送波を利用した測位のためのライブラリが公開された。モジュールレベルではあるが、安価な受信機も登場した。各国から打ち上げられているGNSSの多くは、共通の規格で民生向けの測位のための信号も発しており、年々利用できるGNSSが増加している。現在では4Gを中心とした公衆網や、ローカルではあるが様々な場所に設置されているWi-Fiによる無線LANサービスは、電波を使用して様々な場所からインターネットに接続でき、全体として大きな汎用ネットワークを築き、日本国内ではほぼユビキタス化している。これらの技術を組み合わせることによって、任意の場所に設置した基準局と離れた所にある移動局をインターネット経由で接続したローカル・エリアRTK (Real Time Kinematic)²-GNSSを利用して安価で手頃なリアルタイムで高精度な位置計測が可能になりつつある。

本研究は上記の技術を実装する機器の組み上げと設定を行い、ローカル・エリアRTK-GNSSの基準局を設置し、移動局を使用して実際に手軽に精度の高い位置計測ができるかどうかを検証した。本論は特にこれらの過程と基準点等における位置測量を行った結果を中心に報告する。

2. ローカル・エリアRTK-GNSSによる精密測量

(1) GPS

一般にGPSは、狭義には米国の人工衛星を使用した全球測位システムであるGPSである。広義には米国以外の国々がそれと共通の仕様をもつ測位衛星を打ち上げて運用しているシステムを含んだGNSSとしてGPSという名称は使用されている。ここでは広義のGPSという語を使用せずGNSSを使用する。またかつては、全球衛星測位システムが狭義のGPSのみであった時代があり、GPSという名称を使用していたが、現在ではGPSを含むGNSSで利用できるシステムについては、GPSという語をGNSSに置き換えて表現する。

米国のGPS衛星は1987年に初号機が打ち上げられた。当初は軍事利用が主な目的であったが民間にも利用が解放されていたために、測位のための様々な試みや製品開発が行われた。1993年には米国大統領によって民生運用に足る精度を満たした「初期運用宣言」がなされ、世界中で広く、個人でも人工衛星を利用した測位が可能となった。運用開始当初から一般にも解放されていた1575.42MHzのL1帯には、測位コード(C/Aコード)が含まれて

おり、その伝搬時間に光速をかけあわせることによって人工衛星と受信機間の距離（様々な誤差を含むために疑似距離という）を知ることができる（コードの一区切りの長さは約 293m）。現在の一般的な受信機の精度は 1/100 程度であるために、コードの約 1/100 の分解能が測位の精度の目安になるが、様々な影響や誤差によって実際の精度は低くなっている。さらに、運用開始当初には測位精度を故意に悪くする SA（Selective Availability）が行われていたため、実質的な精度は 100m 程度であった。2000 年には SA が廃止されて精度は 10 ～ 30m 程度に向上し。また SA の影響を避ける以前にも様々な補正を行って精度向上の工夫がなされており、最大で 3m 前後の精度実績も報告されている（打田、1995³ など）。D-GPS やマップマッチングなどの技術と合わせることで、現在ではカーナビやスマートフォンなどの携帯端末をはじめとする多くの機器に受信システムが内蔵されて、リアルタイムの位置情報が活用されている。

GPS は 1993 年に米国において正式な運用宣言がなされた後、GPS の人工衛星はさらに打ち上げられて追加され現在では 29 機が運用中⁴である。他国でも次々に測位のための人工衛星が打ち上げられ、ロシアの GLONASS は 26 機⁵、EU の Galileo は 27 機⁶、そして中国の BeiDou は 24 機⁷が運用されている。これらが発する信号は地球上の広い範囲で受信することができるために GNSS（汎地球測位航法衛星システム）とよばれている。また受信範囲は限られるが、日本の QZSS（みちびき）（4 機）⁸、インドの NAVIC（IRNSS）（7 機）⁹も GNSS に含めて表現されることも多く、ここではそれにしよう。

(2) GNSS による精密測位

図 1 に GNSS の測位方法についてまとめた。単独コード測位および D-GPS においては、GNSS の衛星から送られる電波（コード信号）の到達時間から距離を算出して、測量の原理によって複数の衛星との位置関係（距離と方向）から受信機の位置を決定する¹⁰。電波が到達するまでに受ける物理的な影響などが測位の誤差となる。D-GPS は位置が既知の受信データと比較することによって誤差を減らしているが、誤差が数 m になることも多い。

干渉測位は電波の搬送波の波数を求めることによって距離を算出するために精度は格段に上がる¹¹。PPP、PPP-AR、PPP-RTK などは QZSS（みちびき）の L6 データによる cm 級測位であるが受信のための機材は未だ高額であり、相対的に安価になったといわれる最新の受信機でも最低の構成で約 50 万円¹²であるために、当システムの開発には適さない。現在では 2018 年 11 月から 4 機体制で運用され始めた「みちびき」の L6 信号によるセンチメートル級測位に代表されるように、新しい技術による精度の高い測位方法も使用され始めている。しかしながら、他の GNSS 信号と互換性がないこと、新たに高価な受信装置が必要であること、受信するエリアが限られていることなどの理由によって普及の速度は遅い。スマートフォンやカーナビなどで一般に利用される具体的な見込みもない。

干渉測位のうちスタティック測位は精度が高いものの測定時間がかかり（短くても 20 分以上）、さらにデータの解析は測定後に行わなければならない¹⁴。キネマティック測位では測位にかかる時間が数十秒～数分であるためにスタティック測位に比べて格段に短く、いったん測位が可能になると移動しながら測位することもできる（キネマティック）。さらに測位結果が測定と同時に解析される（リアルタイム）。

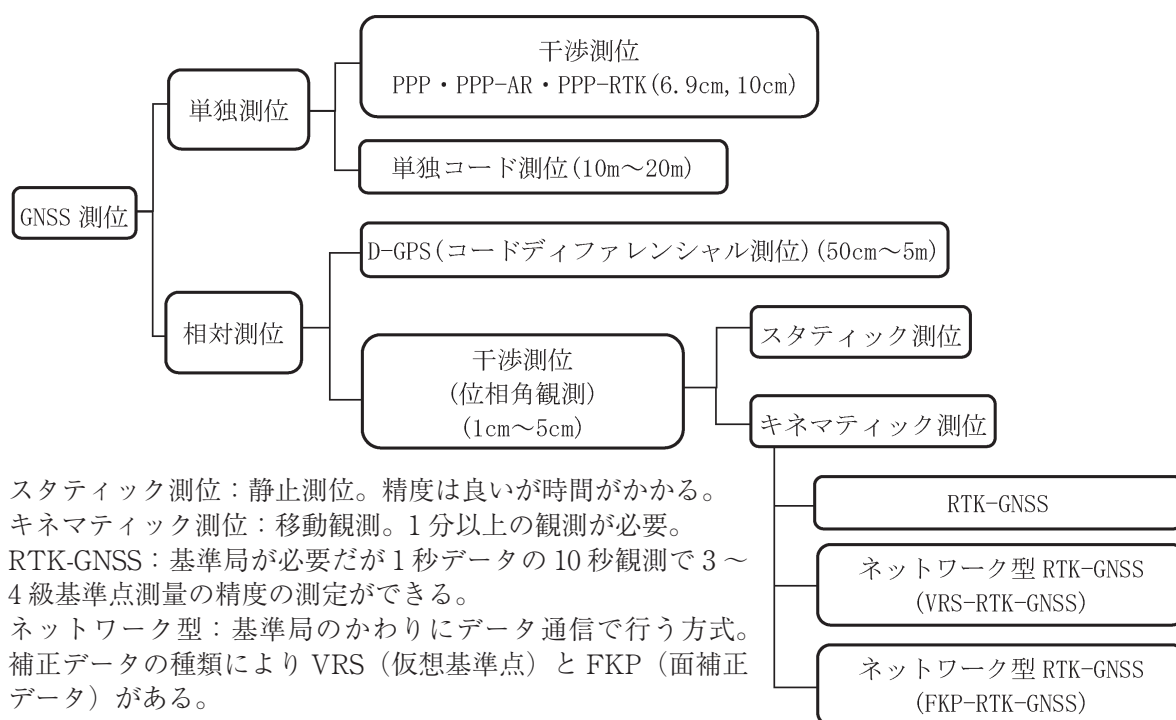


図1 GNSSの測位方法の種類

国土交通省 九州地方整備局 ホームページ「情報化施工を実現する技術 汎地球測位航法衛星システム (GNSS)¹³⁾」の図を修正して使用。

(3) RTK-GNSS 測量

RTK-GPS (realtime kinematic GPS) はGPS衛星の測位信号を使ってリアルタイムで利用者受信機の位置をcmレベルの精度で決定する精密測位技術である¹⁵⁾。現在ではGPS以外の多くのGNSSもRTK測量に使用されているためにRTK-GNSS測量という表現が広く使用されている¹⁶⁾。GPSのL1およびL2信号は、現在多くの国が運用しているGNSSにおいて同様の規格で使用されている。汎用の規格として広く普及しているために、これらの信号を使用した精度の高い測位は以前から試みられてきている。例えば重松ほか(1995)¹⁷⁾では1993年に行った、精度が0.2m程度の特種な高精度ディファレンシャル方式およびリアルタイムキネマティック・オンザフライ方式による測量を海洋土木工事に活用するための検証と導入結果を報告している。両者とも位置情報が既知である基準局（ここでは固定局表現している）と位置情報が未知で測位の対象である移動局の組み合わせで構成されている。前者ではさらに従局が必要になり、その位置や移動局との間の障害物の影響によってデータの質の悪化、場合によっては測定不能になるなどの弱点を指摘した。リアルタイムキネマティック・オンザフライ方式は従局の設置が必要ないために、移動局の位置に制約が少なく、動いていても初期化およびリアルタイムでの計測が可能であることから、有用な手法であることが検証された。

GNSSを利用したリアルタイムキネマティック (RTK-GNSS) における基準局と移動局間の通信は、100～300m程度の比較的短距離では簡易な特定小電力無線装置が利用できる一方で、それより遠い場合は専用のテレメータシステムを用意しなければならなかった。90年代後半の携帯電話の通信のデジタル化は、屋外においてPCをインターネットやネット上に

ある他端末へ接続することが可能になった。RTK-GNSS においても携帯電話網を利用したダイヤルアップ接続によって、容易に基準局と移動局の通信を行うことができるようになった。2000 年代前半における GNSS 衛星の数では、RTK-GNSS における基線長は 10km 程度が限界であった。そのために独自に基準局を設置して RTK-GNSS を行うローカル・エリア RTK-GNSS においては、移動局にあわせて基準局を設置する必要があった。2002 年 5 月から国土地理院が全国に設置した電子基準点のデータが民間へ開放されることによって、電子基準点を基準局として活用するネットワーク RTK-GNSS という方法が利用されるようになった。電子基準点の設置密度は必ずしも基線長が 10km 以下になることを保証しないが、複数の電子基準点のデータを組み合わせることによって仮想的に 10km 以下の基線長にある基準局データを算出して、正確な測位データを得ることが可能になった。ネットワーク RTK の補正データは計算センターで作成されるが、計算センターで作成されたネットワーク RTK の補正データを移動局側で取得する場合、移動局の単独測位結果を一度計算センターに送信しなければならず、移動局と計算センター間で双方向通信回線が必要である。この当時は、基線長 10km のローカル・エリア RTK-GNSS の 2drms は約 3cm、ネットワーク RTK-GNSS では約 2cm で、FIX 率はそれぞれ 70% と 90% であり、ネットワーク RTK-GNSS の方が精度と安定度とも上回っていた。また両 RTK-GNSS とも、基準局への接続は 1 つの移動局からのみ可能であるという制約もあった。

図 1 におけるネットワーク型 RTK-GNSS では VRS、FKP とともに全国に設置されている国土地理院の電子基準点のデータを基準局として利用できるように全国で利用できる。これを利用するためにはデータの提供サービスを行っている会社と契約をする必要があり、例えば株式会社ジェノバでのネットワーク型 GNSS サービス¹⁸の例として、従量プランでは登録料 20000 円、基本料金月額 2000 円、リアルタイムデータ使用料金 1 分あたり 100 円、後処理データ使用料金 1 分あたり 40 円かかる。PPP と同様に受信機は高額なものがほとんどであり、ホームページ上で価格が表示されている例では受信機単体で約 40 万円¹⁹、パッケージ製品では 100 万円以上^{20,21}である。現在では GNSS の数が大幅に増えたことから、基線長が 20km 程度でもローカル・エリア RTK-GNSS による高い精度で安定した測位が可能になった。さらに 4G 回線の普及とインターネット上にあるキャスターによって、基準局の情報を同時に複数の移動局へ送信できることが可能である。特に受信機の低価格化と RTKLIB^{22,23}の利用によって容易に基準局を設置することが可能になったため、高いサービス料金を支払う必要のあるネットワーク RTK-GNSS のメリットは小さくなってきた。

(4) RTK-GNSS の原理

前述のとおり RTK-GNSS による測位では、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 2 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、以下のステップで基準局の位置が判明することになる。

- 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る。
- 2) 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する。

- 3) 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）位置が判明する。
- 4) 基準局の正確な位置が判明する。

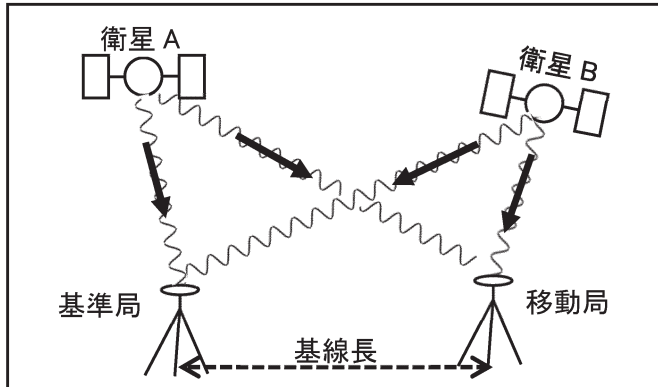


図2 RTK-GNSSの基本的構成

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次元の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。

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。図3にその原理と手法についてまとめた。ある時点における衛星と受信機の間にある搬送波のうち、一波長分を単位とする波数には、整数部分とそれ以外の実数部分に分けることができる。整数部分を整数値バイアス（整数値 Ambiguity）という。受信機では精度 $1/100$ で搬送波の位相を観測することができるため、もし整数値バイアスが分かれば、波長が 19.029cm の $L1$ 信号を観測することによって、原理的には約 2mm の精度で衛星と受信機間の距離を知ることができる。しかしながら、整数値バイアスは観測値から直接得ることができない。また、衛星の時計の誤差や軌道のずれ、信号が伝わる際に通過する電離層と対流圏で生じる信号伝搬の遅延、受信装置におけるアンテナ位相特性、時計の誤差、そして地上で電波の反射によって生じるマルチパスなどの影響によって精度は著しく低下する。マルチパスはアンテナを鉄製のベースに設置して受信状態の良い（周囲に電波を反射する建物などが無い）地点を選択することによって軽減される。アンテナ位相特性はキャリブレーションを行うことによって軽減される。誤差要因のうちこれら以外は、図4のように衛星間一重位相差（複数の異なる衛星の信号を処理する）と、受信機間一重位相差（異なる受信局で信号を受信する）を組み合わせて位相を二重差の状態で信号を受信して処理することによって軽減することが可能である。さらに信号の処理において、受信される観測において大気を通過する距離が長い低角度にある衛星を使用しない（仰角マスク）、信号強度が小さい場合は使用しない、あるべき（軌道から導き出される位置関係から算出される）信号強度を持つなどの項目によって一定以上の品質を持つデータを使用することによって測位精度を高めることができる。

整数値バイアスは、先ず複数の衛星から受信したデータ（コードと搬送波位相）を比較して未知数として、逐次近似計算によってFLOAT解を求める。FLOAT解からさらに精度の高い整数値バイアスの値を導き出すために、現在ではLAMBDA（Least-squares

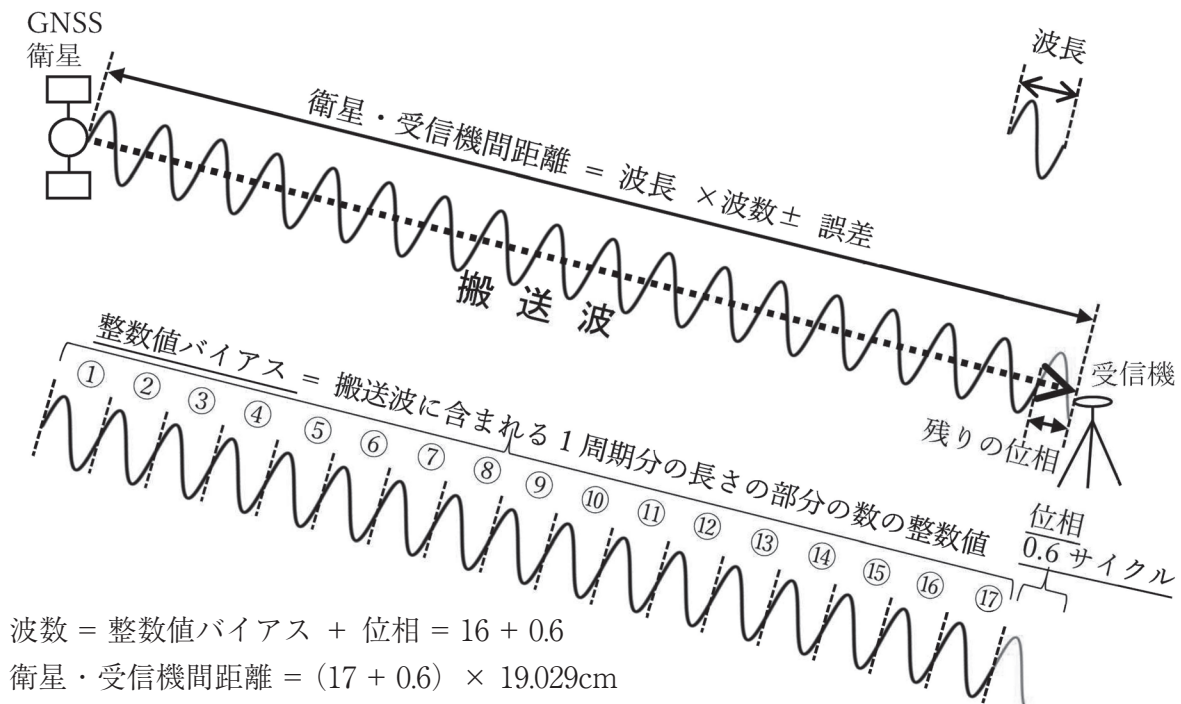
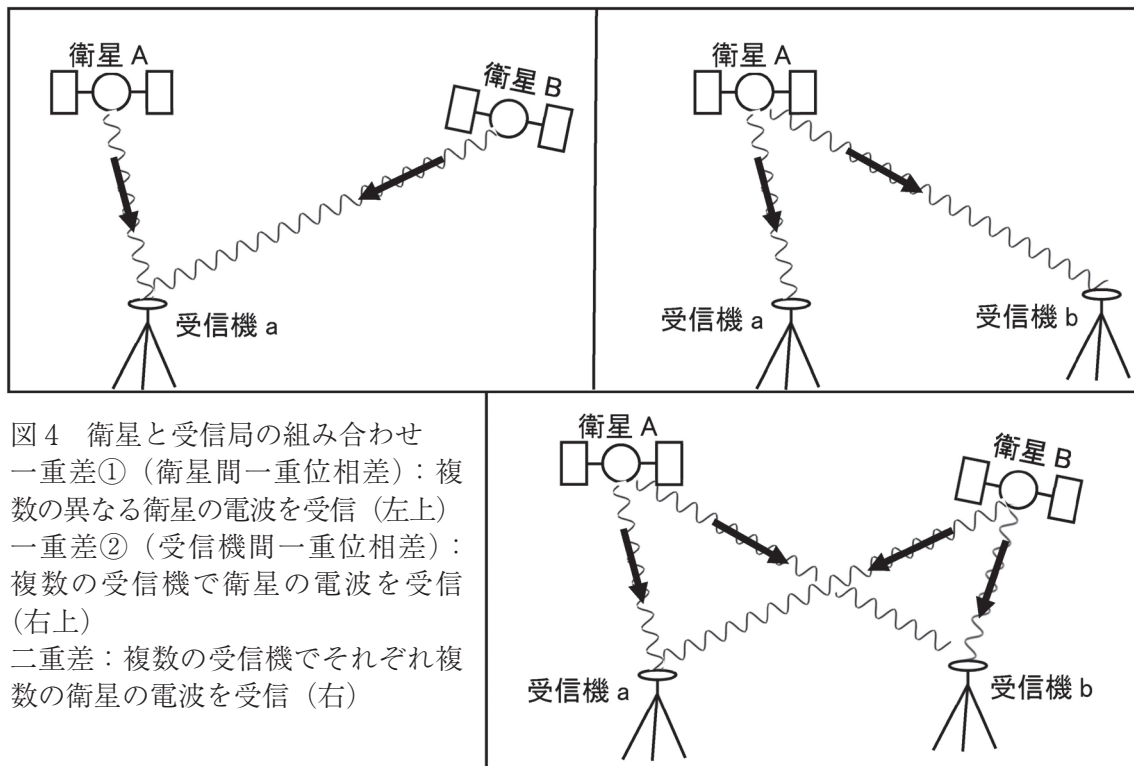


図3 衛星・受信機間の距離の求め方（搬送波の整数値バイアスと位相）

衛星から放送された搬送波を GNSS 受信機で受信すると、衛星・受信機間距離は搬送波に含まれる波数に波長（L1 信号では 19.029cm）を乗じたものである。波数是一周期分の長さがいくつあるかによるが、その整数部分を整数値バイアスといい、残りが位相である。位相は受信機で 1/100 の精度で判明するが、受信した時点では整数値バイアスは不明である。ここでは整数値バイアスを仮に 17 として表現しているが、実際の GNSS の高度は 2 万 km を超えているため、1 億を超えた数字になる。



AMBIGUITY Decorrelation Adjustment) 法という特殊な最小二乗法を用いることが一般的である (Teunissen and Verhagen, 2007²⁴ ほか)。LAMBDA 法では FLOAT 解を、Z 変換 (無相関化)、整数格子点探索 (探索範囲の決定)、逆 Z 変換 (最適な組み合わせの決定) の順に処理した後に Ratio test (Alfred, 1995²⁵) を行い、FIX 解として精度の高い整数値バイアスを推定する。Ratio test は LAMBDA 法により推定された整数値バイアスの最善解と次善解の残差の比 (次善解の残差 / 最善解の残差) を求め、一般的に 3 以上を FIX 解とするチェックである。3 という定数は経験的に決められた目安としての数字であり、確率のおよび統計的な根拠はない (白井・久保, 2012²⁶)。

(5) ローカル・エリア RTK-GNSS

ネットワーク RTK-GNSS とローカル・エリア RTK-GNSS は、移動局と基準局を組み合わせ、搬送波位相を用い、同様の解析手法で移動局の正確な位置情報を得るという点ではほぼ同様な方法であるが、後者はかつて以下の 3 点が劣っているために前者が普及していた。

- 1) 独自に基準局を設置するコストと運用コスト。
- 2) 基準局と移動局間の通信手段の確保。
- 3) 基線長が 10km 程度を越えると精度が落ちる。

しかしながら以下のように現在ではすべて解決し、逆にネットワーク RTK-GNSS において電子基準点のデータサービスにコストがかかることがデメリットとなって、ローカル・エリア RTK-GNSS が注目されるようになった。

- 1) 低価格の受信モジュールが開発されたことと RTKLIB の普及。
- 2) 4G 回線の普及と無料のキャストサービスの開始。
- 3) GNSS 衛星の増加によって有効な基線長が伸びた。

よって、本研究では、ublox 社が開発した安価な GNSS 受信モジュール NEO-M8P シリーズ²⁷ を使用し、さらに独自の基準局を利用したローカル・エリア RTK-GNSS 測量を行うことを試みた。NEO-M8P シリーズのうち、NEO-M8P-0²⁷ を移動局用として、RTCM3 の出力に対応した NEO-M8P-2²⁷ を移動局用とすることとして、これらそれぞれにモジュールにアンテナ端子とコンピュータ接続用の USB 端子を備えた「ピンポイント GPS チューナ DIP キット A」²⁸ および「ピンポイント GPS チューナ DIP キット B」²⁸ を使用した。これらは合計で約 5 万円、アンテナの合計は約 3 万円であり、前述の PPP や RTK の機器に比較して価格は 50 から 10 分の 1 以下である。さらに独自の基準局を利用することによって、上述のネットワーク型 RTK-GNSS における電子基準点データサービスの費用はかからないために、コストが非常に低い。基準局と移動局はその場に応じて様々な設定方法を用いて通信することが可能である。距離が近ければ Bluetooth、Wi-Fi、TCP/IP を介したネットワーク接続することも可能である。また、GNSS の観測データや補正データの送受信を行う NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) を実装したインターネット上にあるキャスト²⁹ と呼ばれる中継サーバを利用して基準局のデータを取得することができる。現在では 4G 回線のサービスエリアが広いことから、基準局と移動局との通信をそれぞれ 4G 回線に接続してインターネット上のキャストに接続することによって、移動局で測量を行う際の場所の制約を非常に小さくすることができる。

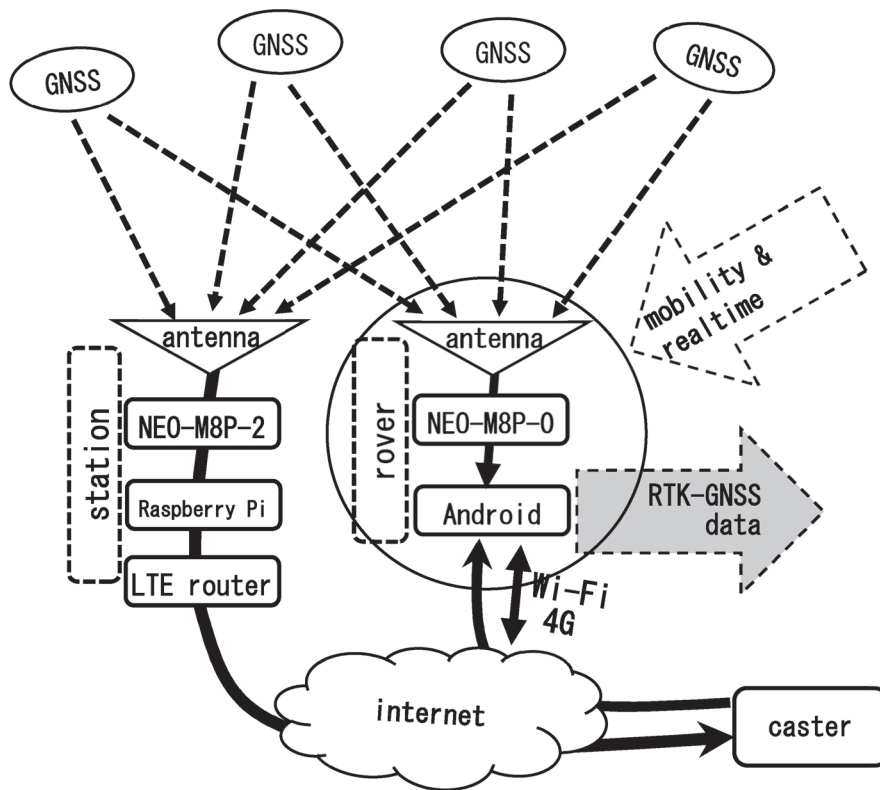


図5 ローカル・エリア RTK-GNSS 測量システムの全体の構成

移動局（rover）の受信機 NEO-M8P 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 RTK+ 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。

RTK の測位やデータ解析は RTKLIB²² を使用した。基準局におけるデータの処理と送信は「Raspberry Pi 3 Model B+」、移動局におけるデータ受信と処理は Windows10 を搭載したノート PC および Android OS を搭載したスマートフォンを使用した。システム全体の構成とデータの流れを図5に示した。

3. 基準局の設置と設定（準備）

(1) Windows PC（OS は Windows10）の準備

- ①「RTKLIB²³」（RTK の測位やデータ解析用のライブラリおよびアプリケーション群）をホームページからダウンロードしてインストール。
- ② NEO-M8P-2 のユーティリティ「u-center³⁰」をホームページからダウンロードしてインストール。u-center を USB シリアルドライバとして認識させるようにインストール時の設定画面で「Use Windows USB Serial Driver」にチェックを入れる。

(2) アンテナの設置

Tallysman Wireless 社の GNSS 受信用アンテナ TW-3710³¹ を熊本学園大学 11 号館（7 階建）屋上の見晴らしがきく場所に設置した（図6）。元からある衛星放送受信用のパラボラアンテナの支柱にアルミ製の中空ポール（肉厚 2mm）を

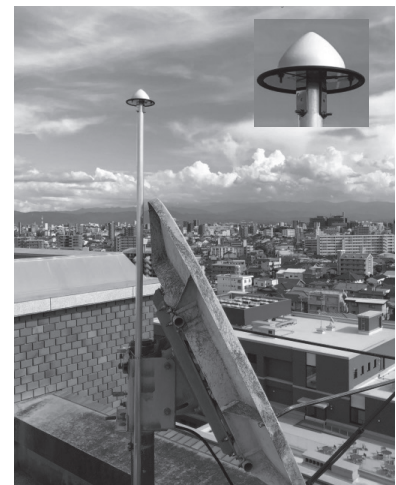


図6 基準局用アンテナ設置状態
Tallysman Wireless 社の GNSS 受信用アンテナ TW-3710 をステンレス製のリフレクター板を介して、衛星放送受信用パラボラアンテナの支柱にくくりつけたアルミ製のポールの先端に固定した。周辺にさえぎるものがない校舎の屋上で、地上高約 40m。右上はアンテナ部分の拡大写真。

くくりつけ、その先に鉄製のリフレクター板を介して（マルチパスの受信を防ぐため）アンテナを取り付けた。アンテナ本体下に接続したケーブルは、アルミ製ポールの中を通して下から取り出した。

(3) 座標の取得のための NEO-M8P-2 の設定

吉田 (2019)³²にしたがってユーティリティ「u-center」を使用して NEO-M8P-2 の設定を行った。主要な手順は以下の通りである。

- ① Windows PC (OS は Windows10) にユーティリティ「u-center」をダウンロードしてインストールする。u-center を USB シリアルドライバとして認識させるようにインストール時の設定画面で「Use Windows USB Serial Driver」にチェックを入れる。COM ポートとして認識されるようになる。
- ② NEO-M8P-2 を USB ケーブルで PC に接続する。u-center を起動して、ウインドウ画面の下のコネクタアイコンが緑色に点滅していることを確認。点滅していない場合は COM ポートの設定（番号）が間違っているので、Windows のデバイスマネージャーでの設定と u-center での設定を合わせる。メニューの「Receiver」「Port」で同じ COM の数字を選択する。
- ③ シリアルポートの転送速度を 115200 に設定する：メニューの「Receiver」「Baudrate」で 115,200 を選択。
- ④ メニューの「View」「Messages View」を選択し、以下の各設定を行う（オ～コ）。「UBX」-「CFG」-「CFG」で「Save current configuration」にチェックを入れておき、オ～コそれぞれの設定をした後に、「Messages View」ウインドウの左下にある「Send」ボタンをクリックして、設定を保存する。
- ⑤ 搬送波の波数のカウントによって RTK 演算をするように設定：メニューの「View」「Configuration View」を選択し、「UBX」-「CFG」-「DGNSS」で「3=RTK fixed: Ambiguities are fixed whenever possible」を選択。
- ⑥ 受信する GNSS の種類とそれぞれの設定（GPS、BeiDou および QZSS の信号を受信するようにする）：「UBX」-「CFG」-「GNSS (GNSS Config)」で「GPS」、「BeiDou」、「QZSS」にチェックを入れる。
- ⑦ 受信した各種情報（衛星の受信状態情報、測位情報（位置、速度、時刻）、搬送波位相などの観測データ、放送歴や航行についての情報）を USB に出力を割り当てるように設定：「UBX」-「CFG」-「MSG (GNSS Config)」で、Message のプルダウンから以下を選択し、それぞれで「USB」欄にチェックを入れる：01-35 NAV-SAT、01-07 NAV-PVT、02-15 RXM-RAWX、02-13 RXM-SFRBX。
- ⑧ ナビゲーションモードの設定：「UBX」-「CFG」-「NAV5(Navigation5)」で、Dynamic Model は「2-Stationary」、Fix Mode は「3 Auto 2D/3D」、UTC Standard は「0-Automatic」をそれぞれプルダウンから選択。
- ⑨ USB から出力するフォーマットの選択：「UBX」-「CFG」-「PRT(PORT)」で、Target は「3-USB」、Protocol In は「0+1+5 - UBX+NMEA+RTCM3」、Protocol は「0+1+5 - UBX+NMEA+RTCM3」。

- ⑩動作モードの設定：「UBX」-「CFG」-「TMODE3」で、Mode は「1 - Survey-in」。
- ⑪設定の保存を実施：メニューの「Receiver」「Action」「Save Config」。

(4) 基準局の座標を決めるための計測とファイルの取得

- ①アンテナを設置した場所で、アンテナ線の端に NEO-M8P-2 を接続。NEO-M8P-2 と Windows PC を USB ケーブルで接続。「u-center」を起動し、COM の番号と転送速度を確認。接続されていることを確認。
- ②計測開始：「u-center」のツールボタン「Record」（赤い丸い絵）をクリック。
- ③計測を行って 2019 年 9 月 7 日 17 時から 9 月 8 日 24 時の 31 時間分の計測データを取得した（ファイルの拡張子 ubx）。

(5) 位置解析①：データの分離

- ①受信データの分離を行うために RTKCONV（RTKLIB にあるアプリケーションの一部で同名の exe ファイルから実行）を起動する。
- ②上記(4)ウで取得した位置データを RTKCONV に読み込ませる：「RTCM,RCV RAW or RINEX OBS ?」の表示の下欄でファイルを選択。
- ③Format は u-blox を指定して、「Convert」をクリックして実行。
- ④「RINEX OBS/NAV/GNAV/HNAV/QNAV/LNAV and SBS」欄の下に、位置データから分離した衛星情報ファイルおよび起動情報ファイルの場所とファイル名がそれぞれ表示される（拡張子はそれぞれ obs と nav）。

(6) 位置解析②：最寄りの電子基準点データの取得

- ①国土地理院の「電子基準点データ提供サービス」³³を使用するためにアカウントを取得。
- ②「電子基準点 観測データ取得」をクリックして、ログイン作業を経た後、電子基準点の検索画面（地図形式）が表示されるので、該当する電子基準点「ここでは『熊本』」を選択。
- ③「ダウンロード」をクリック後、データダウンロードの画面上、「任意時間のデータダウンロード」で、JST で 2019 0907 20:00:30 ~ 2019 0908 19:59:30 の期間、衛星は GRJE、RINEX のバージョンは Ver3.02 で取得した。
- ④さらに、「電子基準点データ提供サービス」「各種データ（観測データ以外のデータや情報の取得）」「日々の座標値 [F3]」で上記と同様の電子基準点『熊本』の最新の日々の座標値ファイル（拡張子 pos）をダウンロード。

(7) 位置解析③：RTKPOST によって基準局の位置を決定

- ①RTKPOST（RTKLIB にあるアプリケーションの一部で同名の exe ファイルから実行）を起動する。
- ②Interval は 30s に設定。「RINEX OBS : Rover」に分離したファイル（上記 (5) ④）のうち拡張子が obs のものを指定。「RINEX OBS : Base Station」に上記 (6) ③で取得したデータのうち拡張子が o のものを指定。「RINEX *NAV/CLK.SP3,IONEX or SBS/EMS」に上から順に上記 (6) ③で取得したデータのうち拡張子に n、q、l が含まれるものを指

定。「Solution」は出力される解析結果のファイル名。

- ③「Options」「Settin1」では以下のように設定。Position Mode : Kinematic (RTK 測位実施)、Frequency/Filter Type : L1 (L1 信号を使用)、Elevation Mask : 15 (仰角 15 度以上のデータを使用)、衛星選択では GPS、Galileo、QZSS にチェックを入れる。
- ④「Options」「Position」では上記(6)④で取得したファイル (拡張子 pos) から、電子基準点の最新の位置データ (最終行) をテキストエディタで読み、8 月 24 日の緯度 32.842101855(08 24)、経度 130.76480463、高度 92.119703313 をそれぞれ Base Station の位置欄に記入した。
- ⑤「Execute」をクリックして解析を行い、出力ファイルから FIX したデータのみを取り出し、明らかにミス FIX であると分かるものを除いて平均値を求めた。その結果、基準局の位置として緯度は北緯 32.80379167 度、経度は東経 130.730539121 度、高度は 86.38531916m を得た。

4. 基準局の設定と運用

(1) NEO-M8P-2 の設定

- ①上記「3. 基準局の設置と設定 (準備)」で使用した NEO-M8P-2 をそのまま基準局用にするために、PC に接続して次の箇所を「u-center」で変更した。
- ②メニューの「View」「Messages View」を選択し、出力データの変更:「UBX」-「CFG」-「MSG (GNSS Config)」で、Message のプルダウンから以下を選択し、それぞれの「USB」欄のチェックを外す: 01-35 NAV-SAT、01-07 NAV-PVT。
- ③動作モードの設定変更:「UBX」-「CFG」-「TMODE3)」で、Mode は「2 - Fixed Mode」、Fixed Position は上記「3.(7)⑤」で得られた基準局の位置を入力 (精度は空欄)。
- ④設定の保存を実施: メニューの「Receiver」「Action」「Save Config」。

(2) 基準局用コンピュータ (Raspberry Pi) の設定

- ①基準局のアンテナから受信して NEO-M8P-2 で処理されたデータを発信するための端末として「Raspberry Pi 3 Model B+」、OS は Raspbian を使用した。
- ②GitHub 上にある RTKLIB のライブラリ²²をダウンロードしてインストール。
- ③基準局のデータを配信するために Raspberry Pi を学内の Wi-Fi に接続するように設定したが、通常の WPA2 エンタープライズへの接続設定では認証されないために断念した。そのかわりデータ通信用 SIM を入れたピクセラ社製の LTE 対応 USB ドングル (ルーター)³⁴を raspberry Pi の USB ポートに装着して、4G 回線によってインターネット接続させた (図 7)。

(3) データの配信

データの以下のコマンドを rc.local に記述して起動時自動的に実行するようにした。

```
$ /home/pi/RTKLIB/app/str2str/gcc/str2str -in serial://ttyACMO:115200#UBX -out ntrips://akaushi:cqntripupload@160.16.134.72:80/KUMAGAKU
```

コマンド、引数の意味は以下の通りである。

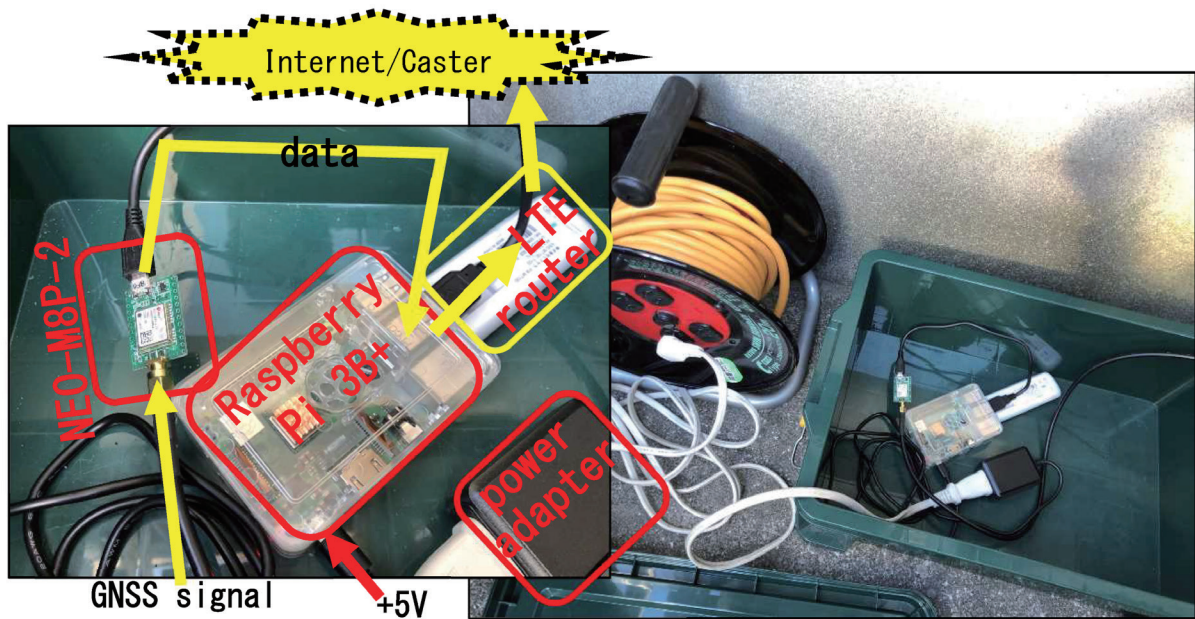


図7 基準局用の機器構成とデータの流れ

右の写真のように機器類は通常蓋付きの箱におさめられて雨天にも対応。左は機器部分の拡大写真とデータの流れ。GNSS 信号はアンテナケーブルを通じて NEO-M8P-2 に入り、処理をされて USB ケーブルによって Raspberry Pi に送られる。Raspberry Pi に USB 接続された LTE ルーターによって、データはインターネットを介してキャスターサーバーに送られて、移動局へデータが提供される。

- ・ `/home/pi/RTKLIB/app/str2str/gcc/` : 実行ファイル `str2str` のあるディレクトリ
- ・ `str2str` : データを移動局へ受け渡すための機能がある実行ファイル
- ・ `-in serial://ttyACM0:115200#UBX` : 入力データ (NEO-M8P-2 をあらわすシリアルデバイス、通信速度、形式)
- ・ `-out ntrip://akaushi:cqntripupload@160.16.134.72:80/KUMAGAKU` : 出力データ (GNSS の補正データを送信するプロトコルで、ユーザー名 `akaushi`、パスワード `cqntripupload` で、キャスターサーバー (IP アドレス) `160.16.134.72`、80 番ポート、マウントポイント `KUMAGAKU` でデータをクライアント (移動局) へ提供する。

(4) キャスターの利用メリット

上記の設定は、基準局から移動局へ直接データを配信するのではなく、キャスターサーバーが仲介している。そのためネットワーク上で移動局から基準局への直接のアクセスがなく、基準局の通信回線およびコンピュータの性能とも低スペックでも運用できる。また、外からのアクセスを制限しても基準局としての運用上支障はないために、ネットワークセキュリティ上安全でもある。特に今回は基地局が屋外に設置されているため、簡素で故障しにくく、大きな電力が必要のないことは管理上で大きなメリットになった。万が一、落雷や強風、豪雨、人為的なミスなどによってコンピュータが故障した場合にも、安価であるために代替え機を用意することも容易である。

(5) 公開基準局への登録

キャスターサーバーは公開されているために、基準局から送信しているデータの情報を公開することは、第三者が容易に基準局のデータを利用できることになる。今回設定したRTK-GPSは安価で運用にも特に大きな費用はかからない上に、精密な位置情報の測定が可能であるが、基準局と移動局の間が20km以上離れてしまうと実用には難しいとされている³²。国内で広く使用するためには基準局の密度がある程度ある必要がある。そのためRTK-GPSの普及と公開を目指して基準局の設置をよびかけているプロジェクト「全国基準局設置プロジェクト」³⁵がある。今回はこのプロジェクトが運営する「善意の基準局掲示板」³⁶に登録を行い、第三者も利用できるようにした。

5. 移動局の設定

基準局の設置と設定および動作、さらにキャスターを介したデータの取得が正常にできているかを確認するために、Windows 10を搭載したノートパソコンを使用した。Windows OS上で動作するRTKNAVI²²およびRTKPLOT²²によって、測位に関する様々なデータのモニタリングを行い、測位結果をリアルタイムで図上に表示させて動作の状況と精度を確認した。その上で簡易かつポータブルな方法で計測することができるかを検証するために、Android OS搭載のスマートフォンにRtkgps+^{37,38,39}をインストールして使用した。以下にこれらの設定について記述する。

(1) NEO-M8P-0の設定

前々章の3の(3)においてNEO-M8P-2に対して行った設定をUSB接続したWindows PC上の「u-center」を使用して実施した。

(2) RTKNAVIの設定

NEO-M8P-0によって受信されたデータがUSB接続したWindows PC上のソフトウェア「RTKNAVI」によってリアルタイムで解析されて、精密な測位データを得ることができる。データの受信と解析ために行った各種設定は、吉田(2019)³²を参考にして以下のように行った。

① RTKLIBのインストールと設定

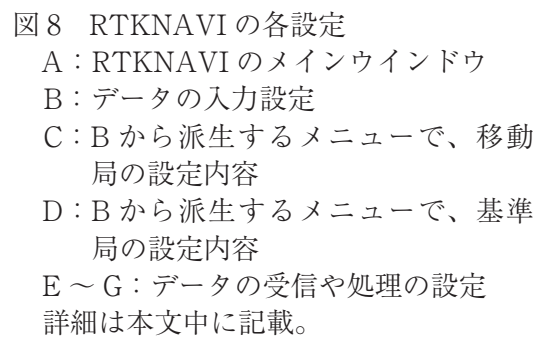
RTKLIBのホームページから最新版（ここではrtklib 2.4.3 b31）のファイルをダウンロードする。リンク先のgithubにバイナリーファイルと関連のライブラリーファイルがあるので、まとめて1つのディレクトリに保存する。

② 入力ソースの設定（受信機からのデータ入力の設定、移動局の設定、基準局のデータ取得の設定）

rtknavi.exeを実行する。図8-AのようにRTKLIBのウィンドウがあらわれる。右上のI（Input Streamsの設定）をクリックして以下を設定。

・ 移動局の設定

図8-Bの[(1)Rover]にチェックを入れ、[Type]を[Serial]、[Format]は[u-blox]、[Opt]の[...]をクリック。図8-Cのように、PortのCOM番号（NEO-M8P-0が認識されているCOMポート番号を指定）、Bitrate：115200bitに、Byte Size：8bits、Parity：None、Stop Bits：1 bit、



Flow Control : None、[OK] をクリック。

・ 基準局の設定

図 8-B の [(2)Base Station] にチェックを入れ、[Type] を [NTRIP Client]、[Format] は [u-blox]、[Opt] の [...] をクリックし [NTRIP Client Options] のウインドウ (図 8-D) で前章で基準局に設定した内容の通りに設定 (NTRIP Caster Host : 160.16.134.72、Port : 80、Mountpoint : KUMAGAKU、User-ID : akaushi、Password : ntripupload)。[OK] をクリック。ここでは NTRIP のキャスター経由でデータを受信する設定。

③測位モードの設定① (データの処理モードや使用する衛星データのフィルタリングの設定)

図 8-A、RTKNAVI のウインドウで下の [Option] をクリック。[Setting 1] のウインドウ (図 8-E) で次のように設定。Positioning Mode : Kinematic (測位モードは Kinematic)、Frequencies/Filter Type : L1 (L1 信号のみ受信)、Elevation Mask/SNR MASK : 20 (20 度以下の低仰角にある衛星を使わない)、さらに右の [...] をクリックして図 8-F のウインドウで [Rover]、[Base Station] にチェックを入れ、L1 の欄をすべて 40 (データの精度が高くなるように移動局および基準局とも項目にあるすべての仰角にある衛星の信号は 40dB より大きいもののみ使用する)、[OK] をクリック。[Settings 1] のウインドウ (図 8-E) に戻り、Excluded Satellites : C02 (BeiDou C02 は低仰角 (20 度程度) の静止衛星で、受信データの質が落ちるための除外)、衛星一覧で使用する [GPS]、[QZSS]、[BeiDou] にチェックを入れる。[OK] をクリック。

④測位モードの設定② (整数値アンビギュイティの処理についての設定)

[Settings 2] のタブをクリック (図 8-F)。[Integer Ambiguity Res GPS/GLO/BDS] で順に [Fix and Hold] (GPS では FIX させて保持する)、[OFF] (GLONASS では使用しない)、[ON] (BeiDou) の設定にする (整数値バイアス (アンビギュイティ) の処理で FIX させるという設定)。[OK] をクリック。

⑤測位モードの設定③ (基準局の位置データの設定)

[Positions] のタブをクリック (図 8-G)。[Base Station] の項目に基準局の緯度、経度、高度を入力。ここでは前章で基準局の設定の際に設定したデータで、それぞれ、[32.803791672]、[130.730539100]、[86.3792] を入力。[OK] をクリック。

(3) RTKNAVI による測位

アンテナを受信状態の良い場所に設置して、RTKNAVI のウインドウの左下にある [Start] をクリックする。図 9 のように、右上の棒グラフは移動局の受信状況、右下がネットワーク上のキャスター経由で取得した基準局の受信状況、左には解の状態 (FIX か FLOAT)、緯度、経度、高度、Ratio、使用している衛星数 (Sat) などが表示される。また、ウインドウ下の中央にある [PLOT] をクリックすると、RTKPLOT が起動して、測位点をリアルタイムでビジュアルに表示する。測位状況を直感的に把握できるために、衛星データの受信状況が安定しているかどうかをリアルタイムで確認できる。特にミス FIX (処理上では FIX であるが、受信状況が不安定などの理由で実際には正しくない測位データ) のデータを明確に区別することができる。どのような状況下でミス FIX になるかを把握するために、非常に有

用な手段である。

図9の上の図はFLOAT状態の測位状況画面をスクリーンショットしたものである。グラフの下に(1)として移動局の入力元(ここではCOM3)、(2)として基準局の入力元(ここではキャスターのIPアドレス)が表示される。衛星補足数が11であるが安定していないためにRatioが1.1でありFLOAT解として扱われる。実際に右下のプロットのウインドウでは、測量結果が2～3m内にばらついている。図9の下図はFIXした状態であり、衛星補足数は15、Ratioは3.0であり、プロットのウインドウでは、測量結果が5mm以内に分布している。FLOAT状態とFIX状態では、ばらつきの状態が大きく異なる。

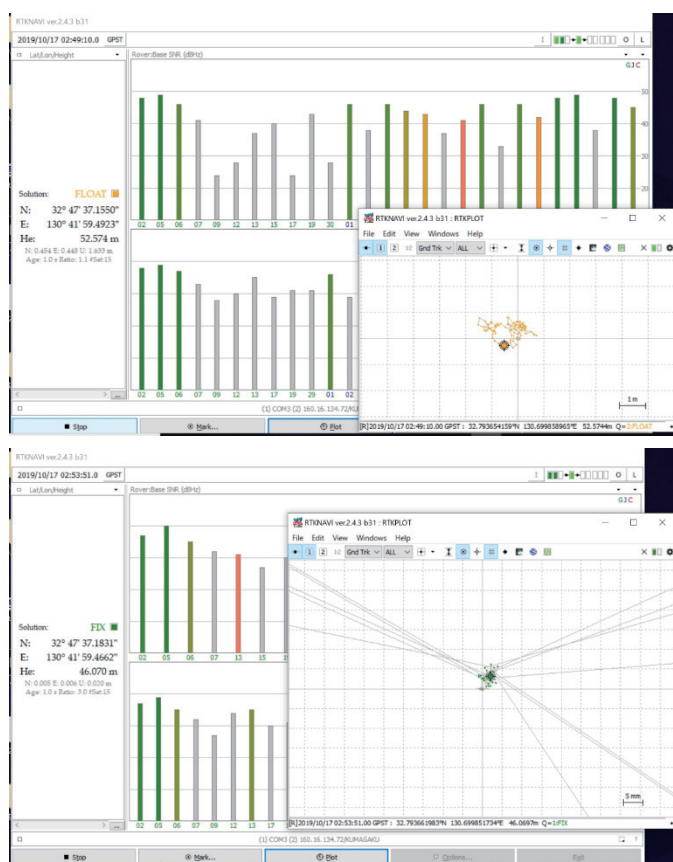


図9 RTKNAVIを使用した測量中のウインドウ(それぞれの右下はRTKPLOTによる測量結果のプロット図)

上: FLOAT 状態

測定開始から数分経過してもFLOAT状態のままであり、衛星補足数は11でRatioは1.1、プロット画面では測量結果が2～3mの範囲で大きくばらついている。スケール巾は1m。

下: FIX 状態

上記のFLOAT状態から5分後でFIXした状態。衛星補足数は15に増え、Ratioは3.0、プロット結果は5mm以内に集中している。スケール幅は5mm。2019年10月17日に後述の熊本市内の水準点にて測量。使用したPCはDELL社製でWindows10 64bit、使用ソフトウェアはRTKNAVI2.4.3b31とRTKPLOT。

(4) Rtkgps+ の設定

Android OS搭載のスマートフォン上で動作する「Rtkgps+」(図10)は、上記「RTKNAVI」と同様にNEO-M8P-0によって受信されたデータをリアルタイムで解析して精密な測位データを導くものである。ここではオリジナルの「Rtkgps+」³⁷⁾を「みちびき」のデータを受信して使用できるようにコンパイルし直したもの^{38,39)}を使用した。設定は「RTKNAVI」の設定を参考にして以下のように行った。



図10 Rtkgps+ とスマートフォンを利用したローカル・エリア RTK-GPS 測量

上：測量に使用した Huawei 製スマートフォンで OS は Android 7.0。スマートフォンの USB 端子（ここでは Type-C）で NEO-M8P-2 に接続。隣は GNSS 用アンテナ（Tallysman Wireless 社 TW2710⁴⁰）。

右：Rtkgps+ で測量中の画面で、FIX している状態。RTKNAVI と同様に基準局と移動局における衛星データの受信状況が棒グラフで表示される。各種データが数値として表示される。プロット表示はないが、ローカル・エリア RTK-GNSS 測量に関するデータがすべて1つの画面で表示されている。



I. 表示を Status 画面にする（なっていない場合）

- ① 左上の「rtk+」をタップ
- ② [Status] をタップ

II. Input streams（入力データ）の設定

- ① 設定画面で、[Input streams] をタップ。
- ② [INPUT ROVER] をタップして、以下を設定する。

1) Enable rover : ON

2) Type : USB

3) Stream settings :

- ・ Baudrate : 115200
- ・ Data bits : 8
- ・ Parity : None
- ・ Stop bits : 1

4) Format : u-blox LEA-*T

それより下の項目は何も設定しない。

- ③ [INPUT BASE] をタップして、以下を設定する。

1) Enable base : ON

2) Input Base : NTRIP Client

3) Stream settings :

- ・ Host : 160.16.134.72
- ・ Port : 80
- ・ NTRIP Mountpoint : KUMAGAKU
- ・ NTRIP user : akaushi
- ・ NTRIP password : cqntripupload

4) Format : u-blox LEA-*T

5) Antenna : 設定しない

6) Receiver option : 設定しない

7) Commands at startup/shutdown : 設定しない

8) Transmit GPGGA to Base station : OFF
[INPUT CORRECTION] をタップして、以下を確認する。

Enable correction : OFF

III. Processing options の設定

- ① 設定のメニューを上にはスワイプして、メニューの一番下にある

Processing options

Solution options

が表示されるようにする。

② [Processing options] をタップして、以下を設定する。

- 1) Positioning mode : Kinematic
- 2) Frequencies : L1
- 3) Navigation system : GPS, QZSS, BeiDou の 3 つにチェック
- 4) Elevation mask(°) : 20
- 5) SNR mask(dbHz) : 40
- 6) Integer ambiguity resolution set
 - ・ GPS Integer ambiguity resolution : Fix and Hold
 - ・ Glonass Integer ambiguity resolution : Off
 - ・ GPS Integer ambiguity resolution : On
 - ・ BeiDou Integer ambiguity resolution : On
 - ・ Min ratio to fix ambiguity : 3.0
 - ・ Min lock to fix ambiguity : 0
 - ・ Min elevation to fix ambiguity : 0.0
 - ・ Min fix count to hold ambiguity : 10
 - ・ Min elevation to hold ambiguity : 0.0
 - ・ Outage to reset ambiguity : 5
 - ・ Slip threshold(m) : 0.05
 - ・ Max age of diff(s) : 30.0
 - ・ Synchronous solution : off
 - ・ Reject threshold of GDOP : 30.0
 - ・ Reject threshold of innov(m) : 30
 - ・ Max Number AR iterations : 1
 - ・ Number of filter iterations : 1
 - ・ Minimum sats to fix integer ambiguity : 4
 - ・ Minimum sats to hold integer ambiguity : 5
 - ・ Minimum sats to drop in AR : 10
 - ・ Use Ecv Std Devs : Off
 - ・ Max Pos Var to fix ambiguity : 0.25
 - ・ AR filtering to reject bad sats : On
 - ・ Variance fix and hold(cycle²) : 0.1
 - ・ Gain for GLO and SBAS to adjust ambiguity : 0.01
 - ・ Output single solution : Off

- ・ Disable L2-AR : off
 - ・ Init by restart : On
 - ・ Max averaging epochs : 1
 - ・ fix integer ambiguity : 4
- 7) Rec dynamics : チェックなし
 - 8) Earth tides correction : OFF
 - 9) Ionosphere correction : Broadcast model
 - 10) Troposphere correction : Saastamoinen model
 - 11) Satellite Ephemeris/Clock : Broadcast ephemeris
 - 12) Satellite PCV : チェックなし (変更不可)
 - 13) Receiver PCV : チェックなし (変更不可)
 - 14) Phase windup correction : チェックなし (変更不可)
 - 15) Reject eclipsing satellite : チェックなし (変更不可)
 - 16) RAIM FDE : チェックなし
 - 17) Processing cycle(s) : 10
- #### IV. Solution options の設定
- ① [Solution options] をタップして、以下を設定する。
- 1) Output header : チェックなし
 - 2) Time format : GPS time
 - 3) Latitude/Longitude Format : ddd mm ss.sss : Degree minute second
 - 4) Field Separator : 半角スペースを入れる (この文字でなくて動作)
 - 5) Height : Ellipsoidal
 - 6) Geoid Model : Embedded
 - 7) Nmea interval(s) for RMC/GGA messages : 0.0
 - 8) Nmea interval(s) for GSA/GSV messages : 0.0
 - 9) Output solution status : OFF
 - 10) Debug trace : OFF
 - 11) Output GPS mock locations : チェックなし
 - 12) Enable test mode : チェックなし
 - 13) User defined Proj4 projection :

- +proj=longlat+ellps=WGS84
+datum=WGS84 +no_defs
- V. Input streams (入力データ) の設定
[INPUT BASE] をタップして、以下を設定する。
- 1) Base station position:
Lat/Lon/Height(deg/m) にして
・ Lat : 32.803791672
・ Lon : 130.730539100
・ Height : 86.3792
- VI. 時刻表示の設定
右上の点3つが縦に並んでいる部分をタップ、「Select time format」をタップし「Local」にチェックを入れる。
- VII. 動作させる
- ① ネットに接続していることを確認して、接続していなければ、接続させる。
 - ② いったん Rtkgps+ を終了する。
 - ③ NEO-M8P を USB に接続させる (アンテナが接続されていなくてもよい)。
 - ④ Android の「設定」→「機器接続」→「USB 接続設定」→「USB 機器を検出」を順にタップする。
 - ⑤ 「検出中・・・」と表示されて数秒で「USB が接続されました」と表示される。
 - ⑥ Rtkgps+ を起動する。「USB connected」と表示される。
 - ⑦ 右上の点3つが縦に並んでいる部分をタップ。
 - ⑧ 「Start service」をタップ。
 - ⑨ 画面下の上に Rover (自分側)、下に Station (基準局) の GNSS の受信強度が表示される。
 - ⑩ Rover 側で NEO-M8P のみ接続してアンテナを接続していない場合は、Station (基準局) の GNSS の受信強度のみが表示される。
 - ⑪ 停止する場合は、⑦の同じ場所をタップして、「Stop service」をタップする。

6. 移動局によるローカル・エリア RTK-GNSS 測量 (計測環境とデータの正確さ)

緯度、経度および高度という位置情報が明確に管理されているものの代表は基準点⁴¹であり、特に国土地理院の管理する水準点等は位置情報および管理状況が公開されている⁴²。基準局、キャスターおよび移動局の動作状況の把握とデータの精度の確認、現場における周辺環境の測量への影響を把握するために、基準局の最寄りの水準点等においてローカル・エリア RTK-GNSS 測量を試みた。水準点6カ所、電子基準点 (の付属標) 1カ所の合計7カ所で実施した (図11)。測量結果とそれに関連する情報を表1、2、3にまとめた。

地点①～⑤では地表面での電波の反射によるマルチパスの軽減や、アンテナと上空との間の遮蔽物をできるだけ少なくするために水準点の上に三脚を設置してその上にアンテナを置いた (図12、13)。三脚は水準点の標石の球分頂上に軸を目分量で合わせて設置した。

三脚の上端には鉄製のアンテナプレートがあり、これは地面等で反射した電波をカットしてさらにマルチパスの影響を小さくする。アンテナはこの鉄製のプレートにマグネットで固定した。表1に測量結果として記入されている高度は、測定された数値から三脚で上乗せされた分を差し引いた値である。⑥では、水準点の直上でも比較的障害物が少ないことと、三脚設置による水準点からの微妙なずれを無視できるように、水準点の上にアンテナを直接置いた。

表1 水準点におけるローカル・エリア RTK-GNSS 測量の結果と既存データとの比較

名称、住所など		①熊本大学	②白川公園	③菊陽町 大字久保田	④熊本市 北区龍田	⑤熊本市 中央区松原町	⑥九州測量 専門学校
測量日		2019.10.09	2019.10.09	2019.10.09	2019.10.17	2019.10.17	2019.12.11
測量時刻 (JST)		16:21	17:31	22:01	10:51	11:53	13:38
分類		一等水準点	一等水準点	一等水準点	一等水準点	一等水準 交差点	基準水準点
基線長 (km)		1.2	1.4	11.1	4.1	3.1	5.3
基準点コード		L010000 001875	L010000 001874	L010000 001881	L010000 001877	L060000 001873	L000000 000051
元期 (2011) ^{*a}	緯度 (° N)	32.81415308	32.80484633	32.85888419	32.83338483	32.79366525	32.84226428
	経度 (° E)	130.72776053	130.71601517	130.82890461	130.75694647	130.69984731	130.76461794
	標高 (m)	19.0002	14.8322	70.1830	48.1114	11.9149	54.9852
	ジオイド高 ^{*f} (m)	32.5858	32.5733	32.6326	32.631	32.5596	32.6424
	高度 (m) ^{*h}	51.5860	47.4055	102.8156	80.7424	44.4745	87.6276
今期 (2019) ^{*b}	緯度 (° N)	32.81415032	32.80484353	32.85888162	32.83338216	32.79366240	32.84226164
	経度 (° E)	130.72776523	130.71601991	130.82890909	130.75695105	130.69985211	130.7646225
	高度 (m) ^{*h}	51.626	47.442	102.8546	48.160	44.508	87.6754
RTK- GNSS による FIX 解	緯度 (° N)	FLOAT 解のみ	ミス FIX	32.85888161	32.83338181	32.79366200	32.84226164
	経度 (° E)	FLOAT 解のみ	ミス FIX	130.82890906	130.75695119	130.69985175	130.76462228
	高度 (m)	FLOAT 解のみ	ミス FIX	(104.182) ^{*i}	80.749	44.130	87.606
	Sat			19	17	15	13
	Ratio			3.2	3.9	6.6	13.5
RTK・ 今期差 ^{*c}	緯度 (° N)			-0.00000001	-0.00000035	-0.00000040	0.00000000
	経度 (° E)			-0.00000003	0.00000014	-0.00000036	-0.00000025
	高度 (m)			(1.3274) ^{*i}	-0.04	-0.378	-0.0694
D-GPS ^{*d}	緯度 (° N)			—	32.833422	32.793664	32.842258
	経度 (° E)			—	130.756964	130.699875	130.764661
	高度 (m) ^{*h}			—	75	50	96
D-GPS・ 今期差 ^{*e}	緯度 (° N)				0.000040	0.000002	-0.000004
	経度 (° E)				0.000013	0.000023	0.000038
	高度 (m) ^{*h}				-6	5	8
PDOP	HDOP	0.67	0.74	0.67	0.62	0.72	0.75
	VDOP	1.47	1.32	1.24	1.22	1.41	1.48
備考		三脚、ノート PC を使用。 FIX しなかった。	三脚、ノート PC を使用。 FIX したがミ ス FIX。	三脚、ノート PC を使用。	三脚、ノート PC を使用。	三脚、ノート PC を使用。	スマートフォ ンで Rtkgps+ を使用。

*a: 元期データ: 基準点の位置 (測地成果 2011)、国土地理院「基準点成果等閲覧サービス」⁴²、
 *b: 今期データへの変換: セミ・ダイナミック補正: 国土地理院「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」⁴³、
 パラメータファイル名: SemiDyna2019.par Ver.1.2.0⁴³、*c: RTK の測定値から今期の値を差し引
 いた値、*d: eTrex20 による D-GPS の測定値、*e: D-GPS の測定値から今期の値を差し引いた値、
 *f: ジオイド高: 国土地理院「ジオイド高計算」、*g: 使用した Rtkgps+ は Google Play 上のもの
 ではなくみちびき受信に対応した tmizu23 氏によるもの^{38,39}、*h: 高度は楕円体高 (標高にジオイ
 ド高を加えて補正⁴⁴)、*i: 三脚の高さの補正なし。RTK-GNSS の測量は、熊本学園大学内に設置
 した基準局を使用。移動局は、RTK-GNSS のアプリケーションは、ノート PC を使用している場
 合 (①～⑤) は RTKNAVI、スマートフォンを使用している場合 (⑥) は Rtkgps+ を使用した。
 VDOP、HDOP はそれぞれ垂直方向、水平方向の位置精度劣化度で、衛星の幾何学的配置を指数
 化したもの (GNSS View⁴⁵ 上で算出) で、数値が大きいほど正確な位置情報を推定する条件は悪い。



図11 ローカル・エリア RTK-GNSS 測量を行った地点と基準局設置場所（熊本学園大学）

地点①から⑥の水準点および地点⑥の電子基準点付属標においてそれぞれローカル・エリア RTK-GNSS 測量を行った。地図は国土地理院の「地理院地図⁴⁶⁾」の一部を加工して使用した。スケールバー（図右下）の長さは1km。

また、地点①～⑤では測量の状況をリアルタイムで把握するために RTKPLOT を使用した。そのため Windows OS が動作するノートパソコンを用いて RTKNAVI で測量を行った。地点⑥では、大学内を実際に測量することを想定し、可搬性を優先にして Android OS をインストールしたスマートフォンを使用した（図10）。いずれの場合も 4G 回線を通じてキャスターに接続して、基準局のデータを受信した。ノートパソコンを使用した場合はスマートフォンのテザリング機能を経由して 4G 回線に接続した。アンテナで受信した信号は NEO-M8P-0 で処理された後、USB ケーブルを介してノートパソコンに入り、RTKLIB を含む RTKNAVI（Windows の場合）や Rtkgps+（Android の場合）で処理されて位置情報が出力される。RTKLIB による解析では高い精度の位置情報は FIX 解として出力されるが、FIX 解に至る前の不安定な位置情報は FLOAT 解として出力される。

表1の各地点の元期の座標と高度は、国土地理院の基準点成果等閲覧サービス⁴²⁾に掲載されているものである。これは実際に測量した値を地殻変動による動きを逆算して2011年の元期に換算した値に相当する。これらをさらに、web上のサービスとして提供されている国土地理院のセミ・ダイナミック補正（測量日に最も近い SemiDyna2019.par Ver.1.2.0⁴³⁾のパラメータを使用）を行って、それぞれの地点の2019年に予想される座標値と高度の値を今期（2019）の欄に示した。また、地図上で表示される標高は場所による若干の重力の違いの影響を受けて、地球上の場所によって基準が変わるために、国土地理院のジオイド高計算サービス⁴⁴⁾で得られたジオイド高を標高に加えて、楕円体高を高度として扱った。RTK-GNSS のデータにおいて、FIX 解の緯度経度および高度、さらに衛星補足数を Sat、Ratio test の結果を Ratio として示した。前述のように Ratio が3以上で FIX 解として出力される。測量した結果が正しい位置情報であるかどうかを確認するために、今期に補正した測量データとの差分を計算した。ただし今期データは推測された値であるために絶対ではない。また、比較のために Garmin 社製の eTrex20⁴⁷⁾ による D-GPS 測量の結果も併記した。精度は 3m である。PDOP は Position Dilution of Precision の略で衛星の幾何学的配置を指数化した位置精度劣化度をあらわす。数値が大きいほど衛星の配置や数が精度の高い位置情報の算出が難しくなる。VDOP は垂直方向、HDOP は水平方向の位置情報についてであり、両者の二乗和の平方根が PDOP である。各地点の状況と測量結果の詳細について以下に記載する。



図 12 熊本大学内の一等水準点 (L010000001875) におけるローカル・エリア RTK-GNSS 測量の様子 (左) と上空の様子 (右上)、水準点の標石 (中央下)、アンテナ部分 (中央上)、受信機 NEO-M8P-0 (右下) の拡大写真

白色の直方体が水準点の標石で、上部中央のドーム状部分 (球分体) の頂部 (球分頂) が水準点の成果値 (水準点の高さ) の場所である。三脚の軸を球分頂に垂直になるように設置。支柱の先端の鉄製のアンテナプレート (地面等で反射した電波をカットするためのもの) 上に GNSS 受信アンテナをマグネットで固定。アンテナで受信した信号は NEO-M8P-0 で処理されて、ノートパソコンに USB ケーブル経由で入り RTKNAVI で処理されて位置情報が出力される。右下写真 NEO-M8P-0 の下側がアンテナケーブル、上側が USB ケーブル経由で PC に接続している。ノートパソコンはスマートフォンのテザリング機能によって 4G 回線に接続して、キャスト経由で基準局のデータを受け取る。

- (1) 地点① 基準点コード L010000001875⁴² (熊本市中央区黒髪、国立大学法人熊本大学敷地内、基線長約 1.2km、2019 年 10 月 9 日実施) (図 12)

水準点の標石は図 12 のように檜や広葉樹が 2 ～ 4m 程度の間隔で集まった茂みの中に設置されていた。周辺は樹木で囲まれ、上空は木々の枝葉で密に覆われていた。電線も真上をやや離れた所を通っていた。GNSS の電波を受けるには非常に条件が悪かった。20 分以上測定を行っても FLOAT 解のみで、FIX 解を得ることができなかった。

- (2) 地点② 基準点コード L010000001874⁴² (熊本市中央区草葉町、白川公園内、基線長約 1.4km、2019 年 10 月 9 日実施)

水準点の標石は図 13 のように数本の樹木が植えられていて、さらに電柱がすぐ近くにある場所に設置されていた。周辺は数本の樹木で囲まれ、上空は木々の枝葉で密に覆われ、電線が複数通過していた。東から南方の約 20m 離れた位置には 10 階建て以上のマンションがあった。衛星の電波の受信強度は低く、さらに建物によるマルチパスの影響も強いと考えられる。ここでは地点①とは異なり測定開始から約 30 分間に数回 FIX データが得られた。図 13 の RTKPLOT 画面における緑色の点が FIX したポイントであるが、それぞれが数 m

離れている。黄色い点はFLOAT解によるデータであり、緑の点以上にばらついている。表1に示したこの水準点の今期の位置を、図13の右図上に赤い点で表示した。緑色の点は赤い点から1～10m程度離れた点に分散しており、黄色いFLOAT解のデータと比較して赤い点に集まってはいない。すなわちRTK-GNSSの計算プロセスによって正しく導かれたFIX解とはいえない。白井・久保(2012)²⁶では正しい位置から10cm以上離れたデータは、FIX解として表示されていても、偶然に条件をパスできただけのミスFIXデータであるとしている。この後の地点③以降の地点では安定したFIX解が算出されたが、そこでは公表されている既存の測量データと比較して非常に差が小さいだけではなく、測量中のFIX解のばらつきは数mm～2cm程度の範囲にあり、それをはずれるデータは全くなく、非常にまとまっていた。ここ地点②のFIX解として算出された4つのデータは、ばらつきと位置の不確かさの両面において明らかにミスFIXといえる。さらに、この地点では正しいFIX解は1つも得られていないことになる。すなわち、たとえFIX解と算出されていても、ばらついていた場合はミスFIXである可能性が高い。FIXデータとして採用する際には、時間が経過してもデータのばらつきが非常に小さいことが重要な判定基準であることが確認できた。

地点①と比較すると、上空が樹木の枝葉で覆われていることは共通である。①ではミスFIXすらないという違いが生じた理由は、②では周辺に高い建物があり、①ではない。すなわち①では安定したデータを得るための十分な信号強度が得られなかったが、②では周辺の高い建物に電波が反射してマルチパスの信号をある程度強い信号としてとらえられて計算されたため、偶然ミスFIXのデータを出す結果になったと考えられる。白井・久保(2012)²⁶でも同様に、都市部の高い建物間での測量の際にミスFIXが解析されることが多いと報告している。マルチパスは一見すると矛盾したデータのために、解析の際に結果が不安定になって収束せず、その結果Ratioが低くなってFIX解が得られにくくなることが予想されるが、信号強度が十分である場合には、確率的にミスFIXが生じてしまう。白井・久保(2012)²⁶ではミスFIXであっても全体的にはFLOAT解よりも正確なデータであることが多いと報告しているが、図13のプロット図においても同様にFLOAT解は画面を大きくはずれた誤差の大きいデータも一部あって、ミスFIXの緑の点はそれに比較するとまとまっている。ただし数mの精度になってしまうため、要求される精度を満たすことは少ないであろう。別の手段で位置を決める必要がある。

(3) 地点③ 基準点コード L010000001881⁴² (菊陽町大字久保田、道路脇の空き地、基線長約11.1km、2019年10月9日実施) (図14)

地点①、②と異なり、農村地帯にある集落と広い耕作地の間を走る道の脇で、道路周辺は開けており、上空にはほぼさえないものがない状態。図14の左が周辺風景で、右が測量状態をプロットした図。左図の図の方眼1マスは5mmであるから、測定開始後間もない間ですでに50回以上連続でFIX解のみであり、すべて1cm四方の範囲に入った。測地成果2011⁴²を今期に変換⁴³した値との差は、約1mm南側、約3mm西側であった。非常に安定して正確な数値を得ることができた。測定環境が良ければこの程度の非常に安定した正確なデータを得ることができることが判明した。高さに関しては現場で三脚の高さの計測をしなかったために正確な数値は不明であるが、球分頂とアンテナの間の距離に相当する三脚の分の長

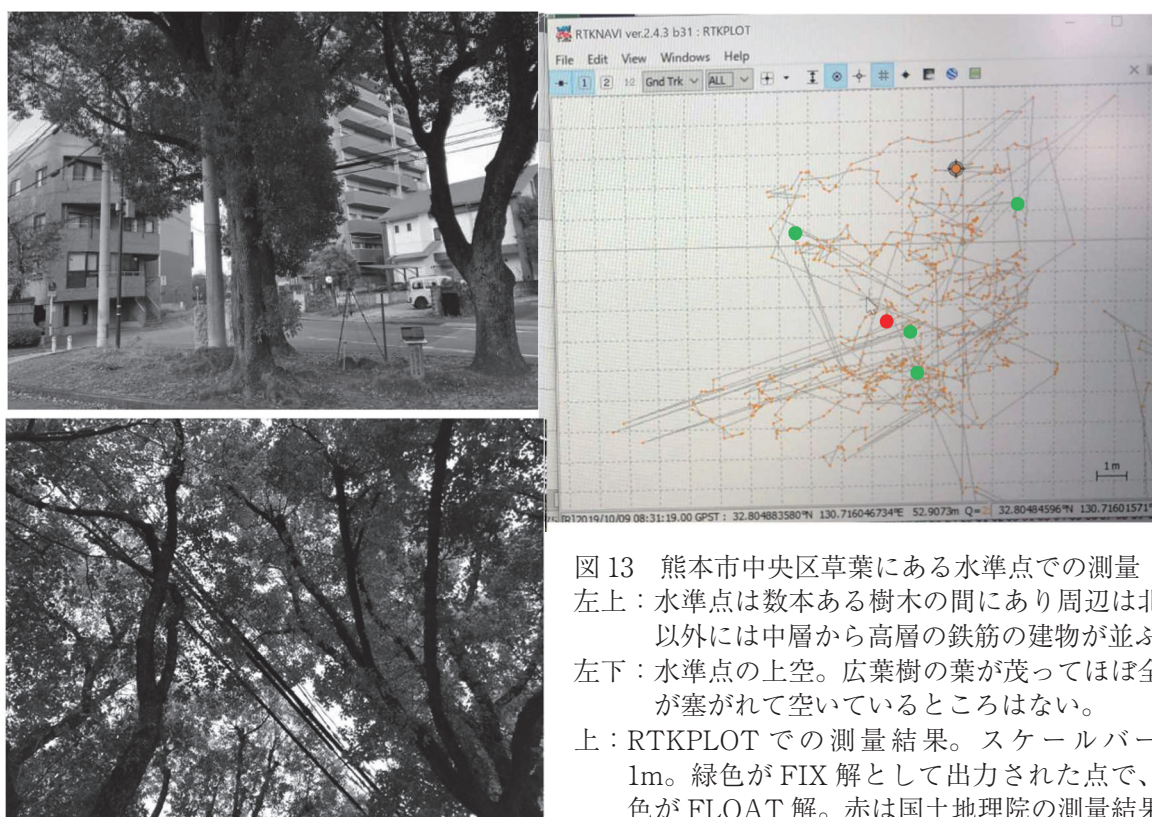


図 13 熊本市中央区草葉にある水準点での測量
左上：水準点は数本ある樹木の間にあり周辺は北側
以外には中層から高層の鉄筋の建物が並ぶ。
左下：水準点の上空。広葉樹の葉が茂ってほぼ全体
が塞がれて空いているところはない。
上：RTKPLLOT での測量結果。スケールバーは
1m。緑色が FIX 解として出力された点で、黄色
色が FLOAT 解。赤は国土地理院の測量結果から
推定された今期の位置。黄色の大きい点は測
量中の最新の解の位置。緑と赤色の点は分か
りやすくするためにここでは実際より大きい丸
印として表示した。

さは 1m 数十 cm と推定できる。データは今期よりも 1.3274m 高い数値であるため、誤差は 70cm 以下であったと推測できる。

(4) 地点④ 基準点コード L010000001877⁴² (熊本市北区龍田、交差点脇のスペースで、基線長約 4.1km、2019 年 10 月 17 日実施) (図 14)

交通量のある交差点脇のスペースであり、水準点は地面に埋まりかけている状態。すぐ脇にある電柱の上にはランスや電線があり、1～2m 隣にはコンクリートブロック製の壁と 1 階建てのプレハブ小屋があるが、上空は比較的開けていた。しかしアンテナを球分頂に直接設置すると上空へ開けた部分が非常に狭くなり、測量の品質は著しく低下すると思われた。そのため約 2m 伸ばした三脚の上にアンテナを設置した。データは FIX が続き安定し、半径 1cm の中に計測データはすべておさまった。今期の位置に変換⁴³した測地成果 2011⁴²のデータに比較すると、南に約 3.5cm、東に約 1.4cm、さらに下に約 4cm ずれた値であった。地点③に比較して PDOP はほとんど同じで、基線長が半分以下であるにもかかわらず、若干データの質は落ちた。周辺の構造物が、受信状況に影響したと思われる。ハンディ GPS レシーバー eTrex20 の結果は、北に約 4.0m、東に約 1.3m、下に約 6m ずれた値であった。ローカル・エリア RTK-GNSS に比べると精度は 2 桁悪い。

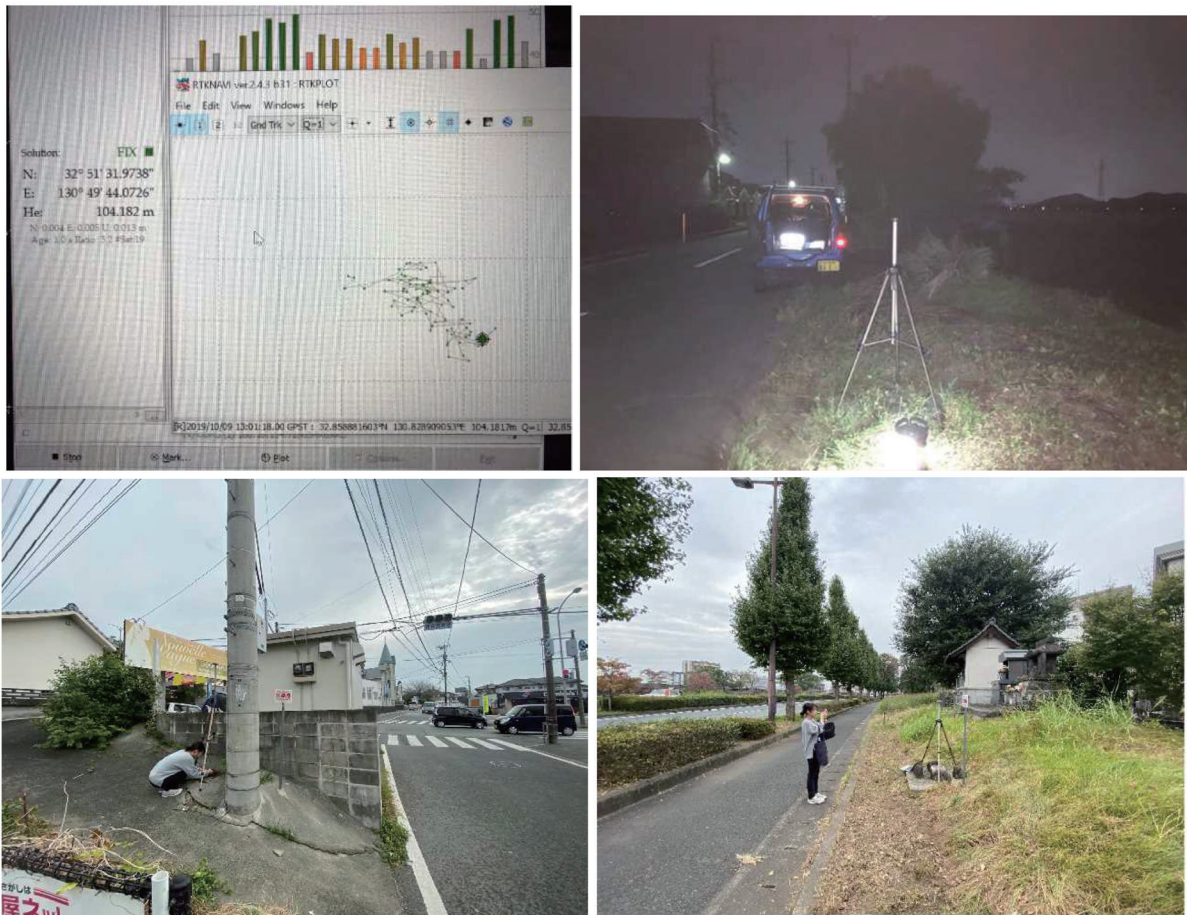


図14 地点③の測量結果と地点③～⑤の周辺の様子

- 左上：地点③では測量開始後30秒程度でFIXして、そのまま継続し、50以上のデータはすべて1cmの範囲に入り、非常に正確かつ安定したデータであった。
- 右上：地点③の周辺の風景。農村の集落と広い耕作地の間を走る道路の脇で、周辺も上空も開けていて条件は非常に良かった。
- 左下：地点④の周辺の風景。すぐ脇に電柱があるが全体としては周辺視界、上空とも開けていた。
- 右下：地点⑤の周辺の風景。大通り脇の歩道に接する空き地で、周辺も上空も開けていて条件は非常に良かった。

(5) 地点⑤ 基準点コード L060000001873⁴²（熊本市中央区松原町、片側2車線の大通り脇の脇の歩道脇の空きスペース、基線長約3.1km、2019年10月17日実施）（図14）

交通量の多い大通りの脇であるが、広い歩道と空きスペースがある場所であるため、周辺および上空は良く開けていた（図14）。この水準点は地点④とは異なり、かこう岩でできた標石が地上に露出しているが、球分頂の上はアンテナが安定しないため三脚を使用した。周辺と上空が開けているにもかかわらず、計測開始後数分間経過してもFIXしなかった。三脚のエレベーターを上げて30cm程度高い位置にして、やっとFIXし始めた。今期の位置に変換⁴³した測地成果2011⁴²のデータに比較すると、南に約4.0cm、西に約3.6cm、さらに下に約37.8cmの差であった。D-GPSでは北に約0.2m、東に約2.3m、上に約5mの差であった。RTKのデータでは、基線長は地点③・④および⑥よりも短い、誤差は全体的に大きく、特に高度が1桁大きかったため別の日に再度測定を行った。結果は表2の通りであ

る。ここではアンテナと受信機はこれまでと同じものを使用した。データ処理にはノート PC ではなく Android OS 搭載のスマートフォンにおいて、Rtkgps+ という RTKNAVI と同様の RTKLIB で RTK データの解析を行うアプリケーションを使用した。基準局を設置した熊本学園大学内においてノート PC 上の RTKNAVI とスマートフォン上の Rtkgps+ による測量結果を比較したところ、差は 2 ～ 5mm であったため、両者間の補正は必要ないと判断した。今期の位置に変換⁴³した測地成果 2011⁴²のデータとの差は南に約 2.6（前は 4.0）cm、西に約 1.9（前は 3.6）cm、下に約 10.4（前は 37.8）cm であった。特に高さ方向が大幅に改善された。HDOP および VDOP がそれぞれ約 10%、約 18% 良くなったが、地点③・④および⑥の HDOP および VDOP と値の精度の間には、はっきりとした相関はみられない。地点⑤の今回の計測と他との最も大きな違いは天候であった。計測中に雨が降り出した。大気中の水滴や水蒸気が電波の受信もしくはデータの補正のプロセスに対して悪影響を与えた可能性があるが、これに関する詳しい検証を行った報告はこれまでにないため、今後の課題である。

表 2 地点⑤の水準点における 2 度目のローカル・エリア RTK-GNSS 測量の結果

日時	緯度 (° N)	経度 (° E)	高度 (m)	Sat	Ratio	HDOP	VDOP
2020.02.18 13:47	32.79366214	130.69985192	44.404	18	23.7	0.65	1.17

- (6) 地点⑥ 基準点コード L0000000000051⁴²（熊本市北区龍、学校法人九州測量専門学校敷地内、敷地の端にある基準水準点、北側にコンクリートの壁があるが上空は概ね開けていた、基線長約 5.3km、2019 年 12 月 11 日実施）（図 15）

ここでは前述の地点⑤の 2 度目の測量と同様に、Android OS の Rtkgps+ によって測量を行った。また同様にアンテナを標石の球分体の上（球分頂）に直に置いて計測した（図 15）。



図 15 地点⑥の基準水準点の標石（右）と測量の様子（左）
周辺が構造物で囲まれているとマルチパスの影響が強くなり、上空が開けていないと使用できる衛星が少なくなるために三脚等によって高い場所にアンテナを設置する必要があるが、設置の際の誤差によって数値が悪くなる可能性がある。比較的開けていれば球分体の上に直接アンテナを乗せることによって、設置による誤差をなくすることができる。

今期の位置に変換⁴³した測地成果 2011⁴²のデータに比較すると、緯度の差は 0cm、西に約 2.5cm、下に約 6.9cm の差であった。D-GPS では北に約 0.4m、東に約 3.8m、上に約 5m の差であった。D-GPS のデータに比較するとこれまでの傾向と同様に 2 桁精度が高かった。

(7) 地点② 基準点コード EL04930261102⁴² および EL14930261103⁴² (熊本市北区龍、学校法人九州測量専門学校敷地内、電子基準点とそのすぐ下に設置されている付属標、基線長約 5.3km、2019 年 12 月 11 日実施) (図 16)

上記の地点①から⑥までの測量データの検証のために参照した位置データは、以下の三段階の処理をしたものである。

ア. 国土地理院が 2016 年の熊本地震の後に測量を実施。

イ. 全国の基準は「測地成果 2011⁴²」であるために元期を 2011 年として変換 (測量成果として公開されているデータ)。

ウ. 本研究では 2019 年に測量を実施したために、比較検証のために地殻変動分を推定したセミ・ダイナミック補正⁴³によって 2019 年の推定値になるように変換。

ここでの変換モデルについては、どの程度まで数値が保証されているか不明である。一方、電子基準点は GNSS のデータを常に受信して、正確な現在の位置データをほぼリアルタイムで配信している。電子基準点がリアルタイムで測定しているデータと、電子基準点にあわせてローカル・エリアネットワーク RTK-GNSS 測量を行って得られたデータを比較すれば、上記の変換による影響がない結果を得ることができる。しかしながら、電子基準点で受信した信号を自分の受信機に引いて測量をすること、および電子基準点で使用しているアンテナに自分のアンテナを乗せて測量することはできない。よって以下のように電子基準点の付属標を活用する方法を試みた。

電子基準点の本体は約 5m の金属製の塔であり、その先端にアンテナが取り付けられている。本体のすぐ下に二等水準点に相当する付属標が設置されている (図 16)。付属標の中央

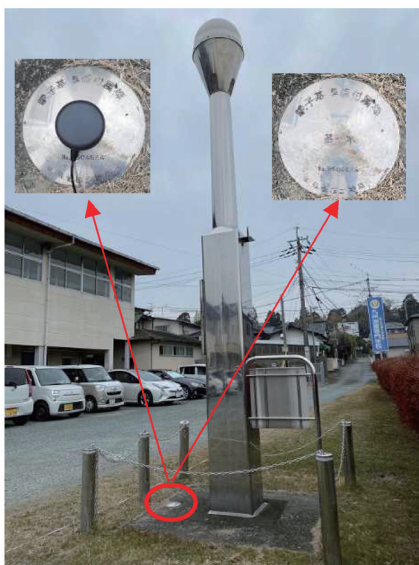


図 16 電子基準点「熊本」

熊本市北区にある学校法人九州測量専門学校の駐車場に設定されている電子基準点 (基準点コード EL04930261102⁴²)。日本全国約 1300 ヶ所に設置された GNSS 連続観測点の一つ。高さ約 5m のステンレス製の柱の上部に GNSS 衛星の電波を受信するアンテナ、内部に受信機と通信用機器等が格納されている。設置年度によっていくつかのバージョンがあり、これは 94 型。GNSS の連続観測結果をリアルタイムで国土地理院測地観測センターの GEONET 中央局に送信している。基礎部分の写真左側には電子基準点付属標とよばれる金属標が設定されており (写真右上)、基準点コード EL14930261103⁴² の二等水準点である。中央の水準点上にアンテナを置いて (写真左上) 測量を行った。

部にある十字の刻みが水準点に相当するので、これに合わせてアンテナを乗せて計測した。セミ・ダイナミック補正の影響を小さくするために、電子基準点の元期データと付属標の元

表 3 地点⑤の電子基準点および水準点に関する諸データと測量結果

電子基準点「熊本」 ^{*a} 基準点コード：EL04930261102	① 測地成果 2011 ^{*a} (20160714 作業)	② セミ・ダイナミック 補正で①を 今期 (2019) に変換 ^{*b}	③ 2019.12.11 12:00:00 (日々の座標値) ^{*c}
緯度 (° N)	32.84210456	32.84210192	32.84210183
経度 (° E)	130.76479994	130.76480453	130.76480475
標高 (m)	59.419	59.467	
楕円体高 (m)	92.07 ^{*d}	92.12 ^{*d}	92.12

電子基準点「熊本」付属標 ^{*a} 基準点コード EL14930261103	④ 測地成果 2011 ^{*a} (20160819 作業)	⑤ セミ・ダイナミック 補正で④を 今期 (2019) に変換 ^{*b}	⑥ 元期における 相対位置で換算 ③ - (① - ④)
緯度 (° N)	32.84210100	32.84209836	32.84209827
経度 (° E)	130.76479369	130.76479828	130.76479846
標高 (m)	54.359	54.407	
楕円体高 (m)	87.01 ^{*d}	87.06 ^{*d}	87.06

ローカルエリア RTK-GNSS 測量結果と誤差	⑦ 測量結果 ^{*e}	誤差 ⑦ - ⑤	誤差 ⑦ - ⑥
緯度 (° N)	32.84209844	0.00000008	0.00000017
経度 (° E)	130.76479875	0.00000047	0.00000029
楕円体高 (m)	86.953	-0.11	-0.11
平面の直線方向の誤差 (cm)		4.8	3.4

D-GPS ^{*f} 測量結果と誤差	⑧ 測量結果	誤差 ⑧ - ⑤
緯度 (° N)	32.842100	0.0000002
経度 (° E)	130.764775	-0.0000023
標高 (m)	53	
楕円体高 (m)	86	-1

RTK : Ratio 47.1
RTK : Sat 12
HDOP=0.74^{*g}
VDOP=1.34^{*g}

^{*a}: 元期データ：基準点の位置（測地成果 2011）、国土地理院「基準点成果等閲覧サービス」⁴²、
^{*b}: 今期データへの変換：セミ・ダイナミック補正：国土地理院「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」⁴³、
パラメータファイル名：SemiDyna2019.par Ver.1.2.0⁴³、^{*c}: 日々の座標値 [F3]: 国土地理院「日々の座標値 [F3] ダウンロード⁴⁸」、^{*d}: 高度は楕円体高（標高にジオイド高を加えて補正）。ジオイド高は国土地理院「ジオイド高計算」⁴⁴、
^{*e}: RTK-GNSS の測量は、熊本学園大学内に設置した基準局を使用。移動局で使用した RTK-GNSS ではスマートフォンを使用しアプリケーションは Rtkgps+（Google Play 上のものでなくみちびき受信に対応した tmizu23 氏によるもの^{38,39}）を使用した。
^{*f}: eTrex20 による D-GPS の測定値、^{*g}: 「GNSS View」を使用した。

期データを比較して相対的な位置関係を決め、ローカル・エリア RTK-GNSS 測量実施時に近い電子基準点の測量データから付属標の位置を推定し、比較を行った。さらにセミ・ダイナミック補正の影響を確認するために、付属標の元期位置データをセミ・ダイナミック補正によって 2019 年の今期データに変換した。これらの結果を表 3 にまとめた。

表 3 において、測地成果 2011 における電子基準点の位置（①）とその付属標の位置（④）から、相対的な位置関係を求めると、付属標は電子基準点に対して、0.00000356° 緯度が小さく、0.00000625° 経度が小さく、5.06m 高度が低いことになる。それぞれの位置をそれぞれセミ・ダイナミック補正で今期（2019 年）に変換しても、相対的な位置は変わらない。水平方向にして数十 cm、高さ方向でも約 5m の差であり、広域的な地殻変動でそれぞれがばらばらに動くことはない。

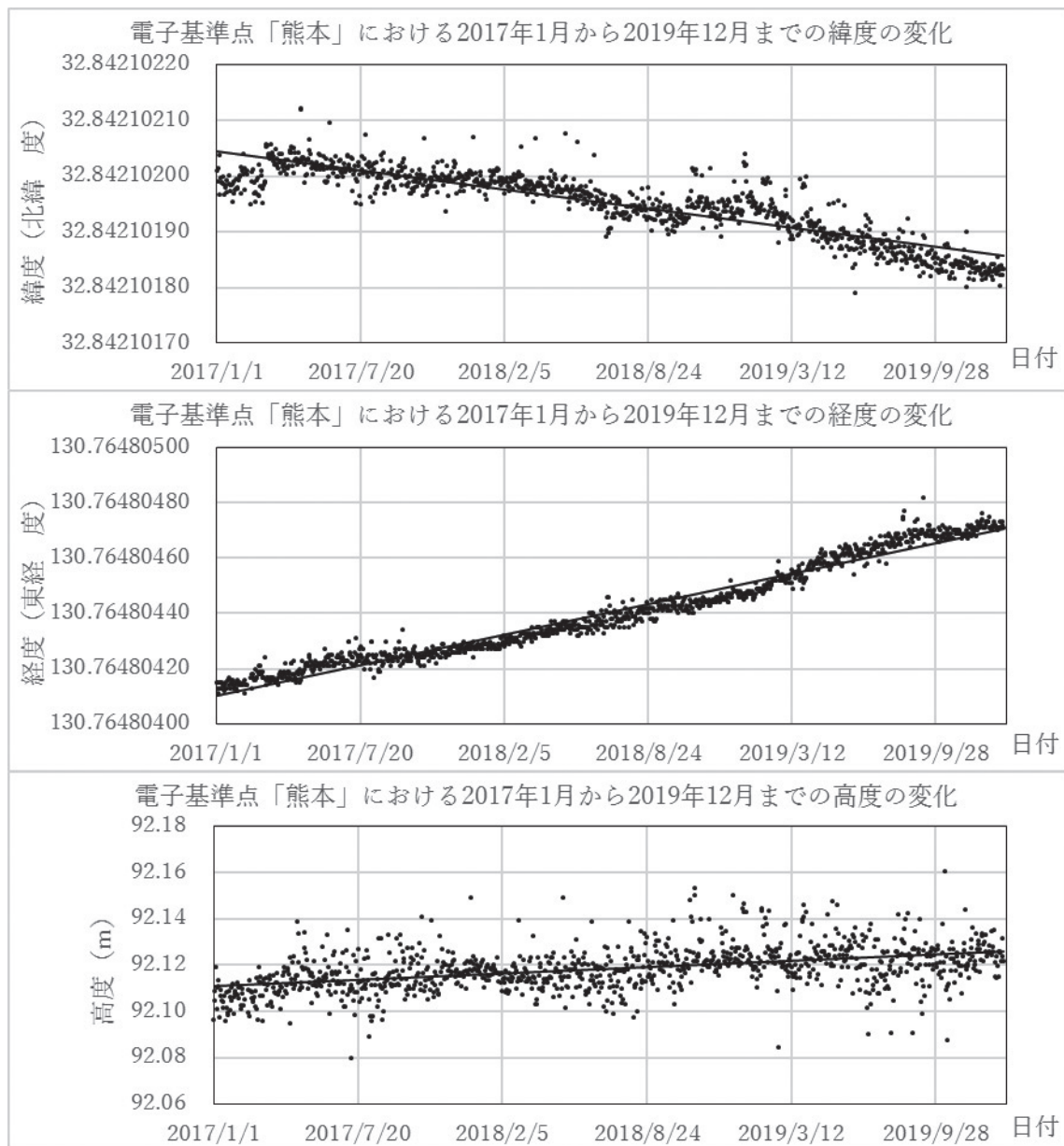


図17 電子基準点「熊本」における2017年1月から2019年12月までの緯度、経度および高度の変化

データは国土地理院「日々の座標値 [F3] ダウンロード」⁴⁸ から1日ごとのデータをダウンロードしてプロットした。図中の直線はエクセルによって自動的に線形近似させたもので、横軸の日付の時間単位は1日を1としたものである。緯度は時間にもなって増加しており、地盤が地殻変動によって継続的に南へ移動していることを示し、年間平均移動量は1年間で約6mmである。同様にして経度の増加は地盤の東への移動を示しており、年間平均移動量は約20mm。高度の変化は少ないが徐々に増加しており、年間平均約5mmの上昇を示している。それぞれの直線の要素は以下の通りである。

緯度 傾き：-0.000000000172、切片：32.842109385
 経度 傾き：0.000000000553、切片：130.764780488
 高度 傾き：0.000013741330、切片：91.523581058

RTK-GNSS 測量を行った 2019 年 12 月 11 日の電子基準点における日々の座標値（表 3 の③）に対して、付属標との位置関係（表 3 の①－④）を元にして、付属標の位置を予測した（表 3 の⑥）。この予測値と、測地成果 2011 をセミ・ダイナミック補正して求めた 2019 年の今期の値を比較することによって、セミ・ダイナミック補正の精度の評価を行った。セミ・ダイナミック補正における補正値は年単位で決められているために、補正値は 1 年間の平均値に近い。一方で比較を行うデータは 12 月に取得したものであるから、約半年分補正が追いつかなくなることが予想される。元期の 2011 年から今期の 2019 年の補正値は 8 年分の蓄積であるために、1 年あたりに換算してさらに半分にすれば半年分に相当する。しかしながら、2016 年 4 月の熊本地震において大きな地殻変動が起きたために単純に 1 年あたりの換算値を求めることはできない。そこで熊本地震の翌年 2017 年の始めから 2019 年末の約 3 年間にわたる電子基準点の位置データの変化から推測することを試みた。図 17 はここ（電子基準点「熊本」）の測位データを日々の緯度、経度、高度データをグラフ上に表示したものであるが、多少の季節変動や小さい割合で見られる突発的な振れも含まれるが、おおよそ直線上にまとまって一定方向に変化している。それぞれの回帰直線を求めて半年あたりの変化量を求めると、緯度は約 0.00000003° 減少、経度は 0.00000010° 増加、高度は約 3mm 増加である。電子基準点データを今期（2019）に補正した値（表 3 の②）にさらにこれらの補正を加えると、北緯 32.84210189° 、東経 130.76480463° 、高度 92.125m である。日々の座標値（表 3 の③）と比較すると日々の座標値の方が緯度は 0.00000006° 小さく、経度は 0.00000012° 大きく、高度は 5mm 小さい。緯度と経度は長さに換算するとそれぞれ約 6mm、12mm である。さらに回帰直線上のデータを比較するとこれらはさらに小さくなり、緯度は 0.00000003° 小さく、経度は 0.00000007° 大きく、高度における差はない。以上のことからセミ・ジオダイナミック補正は月単位の補正をさらに加えれば、実際に現地で測定するデータと誤差数 mm の範囲内の精度があることが分かった。また電子基準点における値の季節変動はこれらより大きく、突発的な大きく値が振れる時にはこれらを超えていた。

ローカル・エリア RTK-GNSS の測定結果の値（⑦）は、セミ・ダイナミック補正の値に比較して緯度は約 0.00000008° プラス、経度は約 0.00000047° プラス、高度は約 110mm マイナスになる。電子基準点の測定値から推定した位置と比較すると、緯度は約 0.00000017° プラス、経度は約 0.00000029° プラス、高度は約 110mm マイナスになる。これらも上述の電子基準点の測定値の長期的な観測地における統計的な巾に比較して大きい、セミ・ダイナミック補正と観測値の差の 2 倍以下である。具体的な長さに変換すると、直線距離で水平方向に 3～5cm、垂直方向に 11cm の差になる。今回、付属標は電子基準点のステンレス製のピラーから数十 cm 離れただけの地表にあり、そこにアンテナを設定してローカル・エリア RTK-GNSS 測量を行った。電子基準点のピラーによって東側の空間は上空を含めて大幅に遮られている。さらに 10m 程度西側には建物があるために、マルチパスの影響は無視できない。RTK-GNSS による測量では、一般的に数 cm から 10cm 程度が実際の精度といわれており（白井・久保、2012²⁶ など）、特に高さ方向では誤差が大きくなる。ここでの測量結果は、上空および周囲の状況は必ずしも理想的でなく、前述のいくつかの水準点での環境（表 1）に比較して PDOP は大きめで衛星数 12 は若干少なく（表 3）、マルチパスの影響の恐れは強いと思われる状況であった。本研究で設置した安価で簡易な基準局を使用し、スマートフォ

ンによる簡易な移動局との組み合わせでは、このような環境においても公表されている位置情報の数値に比較して十分な精度で測量結果を得ることができたといえる。D-GPS のデータ (表3) は緯度方向で約 20cm プラス、経度方向で約 230cm プラス、高さは約 1m 低いという数値であり、他の水準点での測量結果に比較して特に高さ方向の誤差が小さかった。

7. コストと手軽さについての評価

前述の通り、導入コストは基準局と移動局の受信機が合計で約 5 万円、アンテナの合計が約 3 万円であり、基準局のコンピュータ (Raspberry Pi 3b+) が約 1 万円、通信用の LTE 対応 USB ドングルが約 1 万円、設置のための消耗品等は約 1 万円以下で、合計約 11 万円。運用コストはわずかな電気代と通信費である。ここでは低価格のプロバイダのデータ通信プランを契約したため通信費用は月当たり約 500 円。設置場所の Wi-Fi を使用できれば、USB ドングルの導入は不必要であり、通信費用も実質的に無料となる。移動局は、普段使用している Android を組み込んだスマートフォンがあれば導入費用と通信費用は実質的に無料である。基準局で使用したアプリケーション、ライブラリおよび移動局で使用したアプリもすべて無料である。前述の産業用として販売されている受信機を含んだパッケージの価格が 100 万円以上であり、最安値のネットワーク型 GNSS サービスが登録料 20000 円、基本料だけでも月当たり 2000 円かかることから、安価な受信機と既存の通信回線や通信機器と無料のソフトウェアを利用できる本システムの導入および運用費用は、十分に低コストといえる。特に長期にわたって使用する場合には、実質的に運用費用がゼロに近いことが大きく影響するであろう。

移動局のためのコンピュータとして、計測の詳しい状況をモニタリングするために当初はノートパソコンを使用した。目的を位置情報を得ることに絞れば Android を搭載したスマートフォンで十分である。これに USB 接続した小さな基板と小型のアンテナを接続するのみで、条件が良ければ測定現場において数分以内で計測ができることから、十分に手軽といえる。これまでに電子機器が進化の過程で小型化されてスマートフォン本体に組み込まれていったことを考えれば、これらについても将来的に同様のことが期待できる。

8. まとめ

ローカル・エリア RTK-GNSS は条件を整えれば数 cm 以下の誤差で簡易測量を行うことが可能である。従来の GNSS 測量では未だ数 m の誤差があり、一般の測器を使用した測量はコストがかかることを考慮すると、低コストで手軽に高精度の測量ができるために様々な場面での活用が期待できる。例えば放置された土地境界の確認、建物の配置の確認、農業における作物や土壌の地理的把握、地理教育が重要視されつつある学校教育現場での実習。さらにドローンと組み合わせて本体位置の把握や上空からの地表面の動きの監視など。

上記のように様々な活用が期待されるものの、計測環境が結果に与える影響を十分に把握して、目的に応じた条件をそろえることが必要になる。今回、安価で手軽な精密測量が可能かどうかの検証を目的としたが、条件によって結果が微妙に異なってくることも同時に判明したそれらをあわせて今回の精密位置計測の結果と特徴を以下にまとめた。

① ローカルエリア RTK-GNSS は、汎用ネットワークのユビキタス化によってインター

ネット接続を経由して基準局と移動局を結ぶことにより、数 mm から数 cm の精密な位置測定が可能であることが実証された。

- ② 基準局および移動局のシステムの導入費用は産業用として販売されているネットワーク RTK-GNSS の製品（恐らく当時は最安値）の 10 分の 1 以下のコストである約 10 万円であった。
- ③ 基準局の運用コストは既存のネットワーク回線を利用できればほぼ無料であるが、ない場合でも低価格の 4G のデータサービスのみで可能である。
- ④ 移動局の運用コストは現在使用している Android のスマートフォンとその通信サービスを利用すればほとんどゼロである。
- ⑤ 樹木の葉による電波の遮蔽がかなり強いために、茂みの中での RTK-GNSS 測量は不可能に近い。葉が落ちた季節に行うか、2 周波による RTK-GNSS の検討を行う必要がある。
- ⑥ 上空からの電波の受信が弱くても、樹木や構造物からのマルチパスによって測位が可能な場合もあるが、データの品質は極端に悪く、FIX データが得られたとしてミス FIX である。
- ⑦ 開けた場所であっても（恐らく）天候が原因で特に高度に関しては数十 cm の誤差が出ることがあった。天候や湿度などの環境データを含めた同一地点での位置の連続測定を行い検証する必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ツイッターアカウント tmizu23 氏には、「みちびき」データの受信と処理を可能にした Android アプリ「Rtkgps+」のインストール用の apk ファイルを提供していただいた。学校法人九州測量専門学校には、敷地内へ立ち入って電子基準点におけるローカル RTK-GNSS 測量を行う許可をいただいた。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。以上の方々に深く感謝申し上げます。

参考資料一覧

- (1) 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).
- (2) 今江理人 (1996)「GPS の原理と応用」, 電気学会誌, 116, 10, pp.672-675.
- (3) 電子航法研究所「GPS の SA 解除について」<https://www.enri.go.jp/~sakai/saoff.htm> (2020年1月6日最終アクセス).
- (4) U.S. Department of Homeland Security ホームページ「Navigation Center, The Navigation Venter of Excellence」<https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus> (2020年1月6日最終アクセス).
- (5) GPSSoft.ru ホームページ「Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС」<http://www.gpssoft.ru/glonass.html> (2020年1月6日最終アクセス).
- (6) United space in Europe ホームページ「Applications Galileo satellites」http://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Galileo_satellites (2020年1月6日最終アクセス).
- (7) BeiDou Navigation Satellite System ホームページ「China Successfully Launched the 52nd and 53rd BDS Satellites」http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201912/t20191216_19691.html (2020年1月6日最終アクセス).
- (8) 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).
- (9) GOVERNMENT OF INDIA, Department of Space, Indian Space Research Organisation ホームページ「Satellite Navigation」<https://www.isro.gov.in/spacecraft/satellite-navigation> (2020年1月6日最終アクセス).
- (10) 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> (2020年1月6日最終アクセス).
- (11) 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).
- (12) 株式会社コア ホームページ「業界初！クラウド型みちびきcm精度測位受信機 Cohac ∞ Chronosphere-L6S 販売開始のお知らせ」<https://www.core.co.jp/news/129> (2020年1月6日最終アクセス).
- (13) 国土交通省 九州地方整備局 ホームページ「情報化施工を実現する技術 汎地球測位航法衛星システム (GNSS)」http://www.qsr.mlit.go.jp/ict/technology/jitsugen_3.html (2020年1月6日最終アクセス).
- (14) 坂本利弘, 岩崎亘典, 石塚直樹, SPRAGUE D (2019) 小型 GNSS 受信機および測位演算プログラムパッケージ「RTKLIB」による対空標識の簡易・高精度測位手法に関する事例研究, 日本リモートセンシング学会誌, 39, 2, 123-132.
- (15) 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).
- (16) 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グ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.
- (17) 重松文治・斎藤勉・小林正典 (1995) GPS を利用した高精度海上測位システムの評価と応用, 海洋調査技術, 7, 9-20.
- (18) 株式会社ジェノバ ホームページ「高精度 GNSS 補正情報配信サービス」<https://www.jenoba.jp/service/jenoba/plan/> (2020年1月6日最終アクセス).

- (19) 株式会社ダイツホームページ「GNSS G6【ダイツ】」https://www.daitsu555.com/gnss_g6.html (2020 年 2 月 17 日最終アクセス).
- (20) 株式会社アカサカテックホームページ「1 周波 RTK-GNSS 受信機「RTF300」」<http://www.akasakatec.com/2018/06/rtf300/> (2020 年 2 月 17 日最終アクセス).
- (21) 株式会社 CSS 技術開発ホームページ「低価格 GNSS 受信機 CHC-GNSS 販売・レンタル」<https://chcgnss.css24.jp/#css-price> (2020 年 2 月 17 日最終アクセス).
- (22) 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).
- (23) RTKLIB ライブラリ「tomojitakasu/RTKLIB」<https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB.git>
- (24) Teunissen P J G and Verhagen S (2007) On GNSS Ambiguity Acceptance Tests, Proceedings of IGSS Symposium 2007, Sydney.
- (25) Alfred L (1995) GPS Satellite Surveying, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York, 368-371.
- (26) 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.
- (27) 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).
- (28) 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).
- (29) トランジスタ技術 ホームページ「全国基準局設置プロジェクト」<https://toragi.cqpub.co.jp/tabid/865/Default.aspx> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (30) ublox 社 ホームページ「u-center GNSS evaluation software for Windows」<https://www.u-blox.com/en/product/u-center> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (31) Tallysman 社 ホームページ「TW3710 Single Band GNSS Antenna」<https://www.tallysman.com/product/tw3710-single-band-gnss-antenna/> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (32) 吉田紹一 (2019) 『1cm ピンポイント GPS「RTK」スタートアップ・マニュアル』CQ 出版社 トランジスタ技術 2019 年 2 月号別冊付録, pp.63.
- (33) 国土地理院「電子基準点データ提供サービス」<https://terras.gsi.go.jp/>.
- (34) 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/ (2020 年 1 月 13 日最終アクセス).
- (35) 「全国基準局設置プロジェクト」<https://toragi.cqpub.co.jp/tabid/865/Default.aspx> (2020 年 1 月 6 日最終アクセス).
- (36) 「善意の基準局掲示板」<http://rtk.silentsystem.jp/> (2019 年 9 月 6 日最終アクセス).
- (37) 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).
- (38) はてなブログ「自然環境保全のための周辺技術 RTKGPS+ を Windows でビルド」<http://tmizu23.hatenablog.com/entry/2019/10/28/205553> (2019 年 11 月 29 日最終アクセス).
- (39) GitHub「Release test build apk・tmizu23/RtkGps」<https://github.com/tmizu23/RtkGps/releases/tag/0.1> (2019 年 11 月 29 日最終アクセス).
- (40) Tallysman 社 ホームページ「TW2710 Single Band GNSS Antenna」<https://www.tallysman.com/>

product/tw2710-single-band-gnss-antenna/ (2020年1月6日最終アクセス).

- (41) 国土地理院ホームページ「基準点とは」<https://www.gsi.go.jp/chubu/profile-kijunten-kijunten.html> (2020年2月17日最終アクセス).
- (42) 国土地理院ホームページ「基準点成果等閲覧サービス」<https://sokuseikagisl.gsi.go.jp/> (2020年2月17日最終アクセス).
- (43) 国土地理院「SemiDynaEXE Ver.1.0.1」<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/semidyna/web/index.html> (2020年1月13日最終アクセス).
- (44) 国土地理院「ジオイド高計算」<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/geoid/calcgh/calcframe.html> (2020年1月13日最終アクセス).
- (45) みちびき (準天頂衛星システム: QZSS) 公式サイト (内閣府)「GNSS View」<https://qzss.go.jp/technical/gnssview/index.html> (2020年1月13日最終アクセス).
- (46) 国土地理院「地理院地図」<https://maps.gsi.go.jp/> (2020年9月10日最終アクセス).
- (47) 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).
- (48) 国土地理院「日々の座標値 [F3] ダウンロード」https://terras.gsi.go.jp/pos_main.php (2020年1月13日最終アクセス).