

2 周波対応 RTK 詫間基準局の設置

小野 安季良* 谷口 光希** 福田 清人***

Set up of Dual Frequency RTK Takuma Base Station

Akira ONO, Mituki TANIGUCHI and Kiyoto FUKUDA

概要

本研究では、学内に設置している RTK 基準局を 2 周波対応とした。また、電子基準点との間で 2 周波スタティック測位し、詫間基準局の位置を再取得した。その結果、測位精度は、全 Fix 解の中心からの広がりを示す 2drms で 2.75mm を得た。また、2018 年 10 月の設置時に測定した位置から、地殻変動により東に 3.64cm、南に 8.8 mm 移動していることが分かった。

キーワード： RTK 測位，基準局，2 周波対応

1. 緒言

移動体の測位は、単独測位と相対測位に大別できる。単独測位は、従来のカーナビなどで採用されている移動体のみで GNSS (Global Navigation Satellite System) 電波を受信して測位する方式で、測位誤差は 5m から 10m 程度である。一方、相対測位を用いれば測位誤差を大幅に改善できる。RTK (Real Time Kinematic) 測位は、相対測位の代表的な測位法であり、移動体と位置が正確にわかっている基準局で共通の電波を受信する。基準局と移動局の距離が近ければ、電離層や対流圏での誤差を共通項として処理し、移動体の測位に基準局からの補正情報を利用することで、測位誤差を数 cm まで低減できる。われわれは、平成 30 年 12 月に、誰でも利用できる RTK 基準局を設置し公開した¹⁾。基準局の位置は、国土地理院の電子基準点とスタティック測位で算出した。そして、詫間基準局で観測した GNSS データを、配信用サーバ NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) caster²⁾を用いてインターネット配信を開始した。しかし、この基準局の GNSS モジュールは、衛星からの L1 信号に

*香川高等専門学校 通信ネットワーク工学科

**香川高等専門学校専攻科 電子情報通信工学専攻

***香川高等専門学校 技術教育支援室

しか対応しておらず、RTK 基準局として利用するには、移動局との基線長が 10km 以内に限られた。

一方で、衛星からは L1, L2, L5, L6, S の 5 つの周波数帯で信号が送信されている。このうち、L1 と L2 は測位に利用でき、それらの信号に対応した 2 周波 GNSS モジュールが近年、安価となった。2 周波を利用することで、測位誤差要因の一つである電離層での遅延を完全に排除ことができ、測位精度を改善できる。移動局も基準局も 2 周波に対応すれば 2 周波 RTK 測位ができ、文献 3) では、2 周波 RTK 測位の Fix 性能が評価されている。筆者らも、移動体側を 2 周波対応として、2 周波単独測位を行ない、そして、国土地理院の電子基準点との 2 周波 RTK 測位をすることで、1 周波測位に対する 2 周波測位の優位性を報告した⁴⁾。一般に、移動体と基準局の両者が 2 周波対応の場合、RTK 測位の演算処理が早くなり、基準局と移動局の距離が長い場合でも、安定な測位が可能となる⁵⁾。

RTK 測位は非常に高精度の測位ができるので、携帯電話事業者でも 2019 年 11 月頃から、全国に約 1,300 箇所設置されている国土地理院の電子基準点に加えて独自の基準局を設置することで RTK 測位による測位サービスを開始している^{6,7)}。そして、農業や建設分野における正確な位置の算出およびロボット制御での利用

を目指している。

RTK 基準局は移動局に補正情報を与えるので、その位置が正確でなければ、移動局の測位結果にもその分だけ誤差を含むことになる。このため、基準局の座標はできるだけ正確である必要がある。設置時に正確に測位した基準局であっても、地震などによる地殻変動で基準局の位置にずれが生じることがある。詫間キャンパスに設置した基準局から最も近くにある国土地理院の三野電子基準点においても、この1年間で東方向に2cmの地殻変動が生じている⁸⁾。

本研究では、詫間基準局のGNSSアンテナとGNSSモジュールを2周波対応に変更するとともに、アンテナ位置を電子基準点との2周波スタティック測位により再取得したので報告する。

2. 単独測位と相対測位

衛星を用いた測位には、さまざまな測位法があるが、単独測位と相対測位に大別できる。

2.1. 単独測位

単独測位とは、測位したい移動局受信機のみで、衛星の位置情報と衛星からの電波の到達時間を取得し、衛星から受信機までの距離を求める。これを4機以上の衛星で行ない、受信機の位置を決定する測位法である。周囲の開けた環境で数mの測位誤差がある。

MADOCA や CLAS などの最先端の測位法では、地上で補正データを作成して QZSS へアップロードし、これを QZSS の L6 信号で配信して受信機でその補正データを測位に利用する。これらの測位法も、受信機のみで得られる情報を基に測位するので、単独測位に分類される。しかし、L6 信号をデコードできる受信機が必要であり、民間への導入はまだ先である。

2.2. 相対測位

相対測位は、移動局の測位に移動局受信機で各衛星から直接得られる観測データや航法メッセージ以外の他の情報を利用するものである。図1に相対測位の一つである RTK 測位の原理を示す。RTK 測位は移動局の測位に位置が正確に分かっている基準局の観測データを利用して、補正情報を得ることで測位精度を高める測位法である。移動局と基準局は測位に同じ衛星を使用し、共通に受信できる衛星数が多いほど、また、移動局と基準局の距離が近いほど電離層や対流圏での遅延が共通に含まれるためにそれらを消去でき、測位精度が改善できる。一般に、基準局が近いほど精度が上がり、RTK-GNSS による測位精度は式(1)で与えられる。

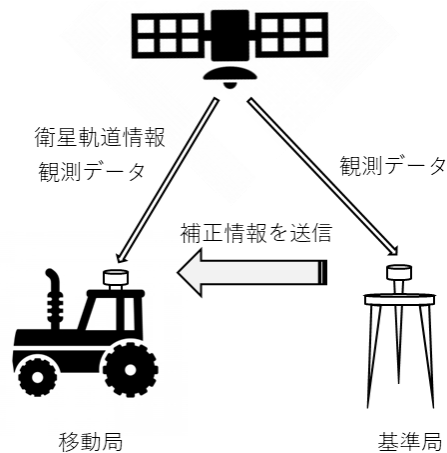


図1 RTK 測位の原理

$$1\text{cm} + 2\text{ppm} \times D \quad (1)$$

ここで、ppm は百万分率、 D cm は補正情報を得る基準局からの距離（基線長）である。例えば、 $D = 10\text{km}$ で精度 3cm、 $D = 20\text{km}$ で精度 5cm となる。

3. 2周波測位

世界では、衛星測位システムとして、GPS（米国）、Galileo（欧州）、GLONASS（ロシア）、BeiDou（中国）、そして QZSS（日本）などがある。全衛星システムで配信する信号の周波数帯が決められており、QZSS では L1、L2、L5 が測位に、L6 は測位補強信号、S は安否確認に利用される。

通常、1つの周波数帯のみを利用する1周波測位では L1（1575.42MHz）を、2つの周波数帯を利用する2周波測位では、L1 と L2（1227.60MHz）を測位に利用する。

3.1. 測位の時間短縮

RTK 測位などの高精度測位では、擬似距離だけでなく搬送波位相の情報を利用する。受信機において、各衛星から送られてくる搬送波の位相は正確にわかるが、何波長分伝搬して受信機に届いたかは不確定である。この不確定なものから真の測位解を求める際、信号の波長でメッシュを作り、全ての格子点で解を求め、解の確からしさから測位解を導出していく。

図2に示すように、1周波測位では、L1 信号の波長約 19cm でメッシュを構成する。2周波測位では L1 信号と L2 信号の2つの観測値から、L1-L2 の仮想観測値を生成する。L1-L2 = 347.82MHz となり、その波長は約 86cm とメッシュを広げることができる。2周波測位では 86cm のメッシュを利用し、解の候補を効率

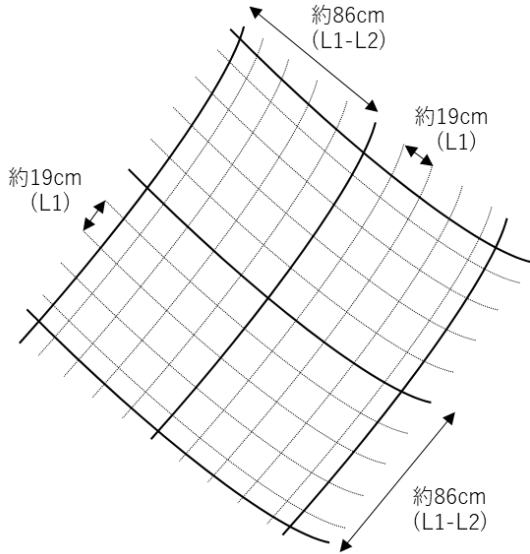


図2 測位解の導出

よく絞り込んでいくので、短時間で解を決定でき、Fix解モードに入りやすい。Fix解とは、RTK測位でたくさんある位置の候補から解を絞り込んでいく際、最も確からしい解と2番目に確からしい解との比が指定した条件を満たし、解を絞り込んだ後の測位結果である。

3.2. 電離層遅延について

地上50kmから1,000kmにある電離層を電波が通過するとき、電波の速度は電離層の電子密度に比例し、電波の周波数の二乗に反比例して遅くなる。その遅延量 D [m]は、式(2)で与えられる。

$$D = 40.3 N_e / f^2 \quad (2)$$

ここで、 f は電波の周波数、 N_e は経路上の総電子数である。

図3に示すように、2周波測位ではL1とL2の2つの信号を受信するので、その到達時間差から電離層遅延量を推定でき、電離層遅延による測位誤差を消去でき、測位精度を改善できる。このため、RTK測位において基準局と移動局の距離が長い場合でも、安定な測位が可能となる。

4. 地殻変動による基準局の位置補正の必要性

RTK測位では、移動局は基準局からの補正情報を利用して測位精度を向上するので、基準局の緯度、経度が誤っていると、それが移動局の測位精度に直結する。このため、地殻変動などで基準局の位置がずれた場合には、正しい位置に校正することが必要である。

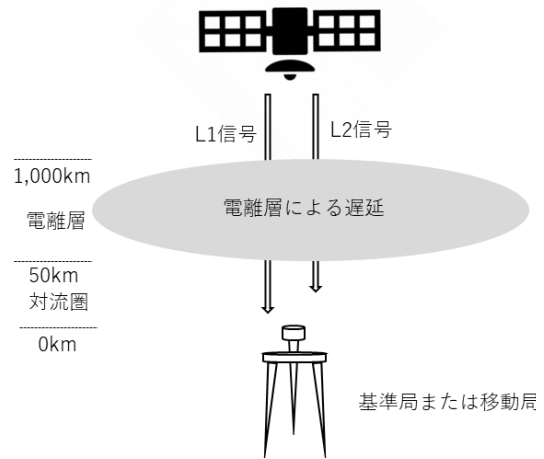
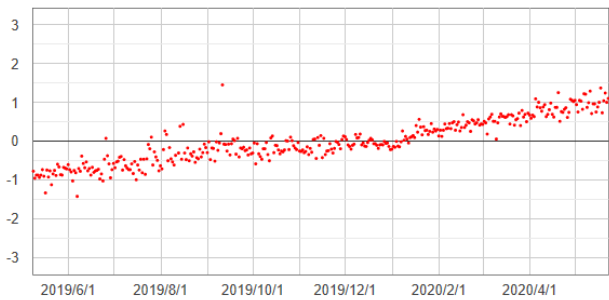
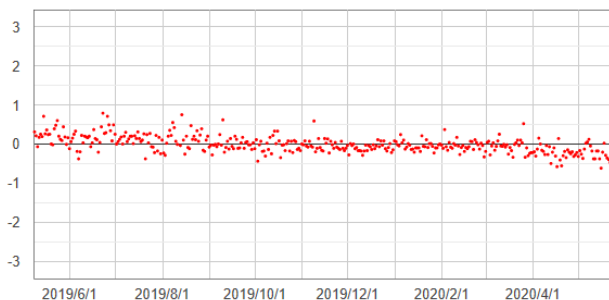


図3 搬送波周波数による電離層遅延

地震が少ない中国・四国地方でも定常的なプレート運動による地殻変動が生じている。図4は、基準局を設置している詫間キャンパスから最も近くにある国土地理院の三野電子基準点での2019年6月から2020年6月の1年間における座標変化をグラフ化したものである⁸⁾。縦軸の単位はcmである。図4(a)より東方向に約2cm、図4(b)より南方向に若干地殻変動があったことがわかる。



(a) 東西方向



(b) 南北方向

図4 三野電子基準点の地殻変動

5. 実験方法

本研究で測位するのは詫間基準局のアンテナ位置であり、位置を決定する際の補正情報は国土地理院の

三野電子基準点から得るものとする。静止体である基準局の正確な緯度、経度はリアルタイムに求める必要はないので、測位日の後日に得られる正確な電子基準点の座標値と衛星の軌道情報（精密暦）を用いて、後処理で基準局の正確な位置を求める。

詫間基準局のGNSS アンテナおよびGNSS モジュールは、それぞれ JCA225S (Geosense 製) および ZED-F9P (u-blox 製) で、2 周波に対応している。測位演算ライブラリは RTKLIB⁹⁾ を用いた。以下、すべての実験において、これまでの経験から仰角マスクを 15°、SNR マスクを 40dB と設定した。

5.1. 利用衛星システム（予備実験）

国土地理院の電子基準点データ提供サービス¹⁰⁾から三野電子基準点の GPS、GLONASS、Galileo および QZSS の観測データがダウンロードできる。このうち、GPS、Galileo、QZSS では CDMA（符号分割多元接続）方式が、GLONASS では FDMA（周波数分割多元接続）方式と CDMA 方式が併用されている。CDMA 方式と FDMA 方式では、測位解を求めるアプローチが異なる。本実験では、このうちどの衛星システムを利用すれば、詫間基準局の測位で Fix 率が高くなるのか調査した。Fix 率とは全エポックに対する Fix 解の割合である。

一般的に、測位精度の向上には利用衛星数の増加が有効である。しかし、文献 11) では、衛星システムに GLONASS を追加したとき、Fix 率が低下する報告もある。Fix 率は、使用しているアンテナ、モジュールおよび演算処理ライブラリとの相性もあるため、予備実験をして本研究で使用する衛星システムを調査した。予備実験では、衛星の軌道情報は衛星から常時放送されている放送暦を用いた。

実験の観測時間は、6 月 12 日 17:00 から 18:00 までの 1 時間とした。詫間基準局を単独測位してログファイルを取得し、後処理で L1 信号と L2 信号の 2 周波で三野電子基準点とスタティック測位した。三野電子基準点では、GPS、QZSS、Galileo および GLONASS の観測データが得られるので、利用衛星システムを変化して Fix 率を調査した。

5.2. 2 周波単独測位

2 周波単独測位による位置測定は、2 周波 RTK 測位精度の比較対象のため測定した。利用衛星システムは、予備実験の結果で決定し、観測時間は、6 月 17 日 9:00 から 6 月 18 日 9:00 までの 24 時間とした。エポックの間隔を 1 秒としたので、全観測点数は 86,400 点である。この実験は、単独測位のため衛星の軌道情報は、

詫間基準局で得られた放送暦を用いた。

5.3. 電子基準点を利用したスタティック測位

詫間基準局での観測データは、2 周波単独測位で取得したデータとし、後処理の際、基準局として詫間キャンパスから一番近くにある三野電子基準点（基線長約 7.5km）の観測データを補正情報データとした。電子基準点の観測データは、エポックの間隔が 30 秒であるので、全測位点は 2,879 点となる。電子基準点のデータ提供サービスはリアルタイムには利用できないので、詫間基準局での単独測位日の後日、国土地理院のサイトからその日の三野電子基準点の観測データと日々の座標値 (F3) をダウンロードした。実験日当日の三野電子基準点の緯度・経度を表 1 に示す。

表 1 観測日の三野電子基準点の座標

緯度	北緯 34. 217393880°
経度	東経 133. 71506745°
楕円体高 (m)	52. 380127838

また、IGS（国際ジオシンセティックス学会）の FTP サイト¹²⁾ から衛星軌道と時計に関する精密暦をダウンロードして、後処理解析を行った。

以下に、後処理による 2 周波 RTK 測位に必要なデータのダウンロード方法と RTKLIB により測位解を得るための処理手順を示す。

- (1) 詫間基準局で取得したログファイルを、RTKLIB のデータ変換ソフトウェア RTKCONV により、後処理解析できるように Rinex 形式に変換する
- (2) 国土地理院のサイトから、観測日当日の三野電子基準点の観測データおよび日々の座標値 (F3) をダウンロードする
- (3) IGS の FTP サイトから、衛星軌道と時計に関する精密暦をダウンロードする
- (4) RTKLIB の後処理解析ソフトウェア RTKPOST により、三野電子基準点と 2 周波スタティック測位演算をする
- (5) RTKLIB の表示ソフトウェア RTKPLOTT で測位結果をプロットする

6. 実験結果

6.1. 利用衛星システムによる Fix 率（予備実験）

表 2 は利用衛星システムと Fix 率および平均利用衛星数の関係を表したものである。三野電子基準点で観測データが取得できる全ての衛星システムを測位に利

表2 利用衛星システムとFix率

利用衛星システム	Fix率 [%]	平均利用衛星数
G	90.9	6.3
G+J	95.9	8.8
G+J+E	97.5	12.6
G+J+E+R	98.3	17.5

(注) G:GPS, J:QZSS, E:Galileo, R:GLONASS

用すると、測位に利用できる衛星数が最も多くなり、Fix率も最大となった。予備実験では、4つの衛星システムを測位に利用した場合、Fix率98.3%を得た。このため、読問基準局の位置測定にあたり、2周波単独測位および2周波を利用した電子基準点とのスタティック測位において、GPS、QZSS、GalileoとGLONASSの衛星システムを利用することにする。

6.2. 2周波単独測位

図5は読問基準局において、L1とL2の2周波による単独測位の全測位点をプロットしたものである。プロット点は86,368点であり、32点は観測データが正しく取得できなかった。緯度方向に5m、経度方向に5mの測位値の変動がある。文献1)で報告した1周波での測位値の変動より変動幅が小さくなり、測位解も中心付近に集中する結果を得た。このことから、2周波にすることで、単独測位においても測位精度の改善がみられる。また、取得した全観測点において緯度、経度の平均値を取った結果を表3に示す。

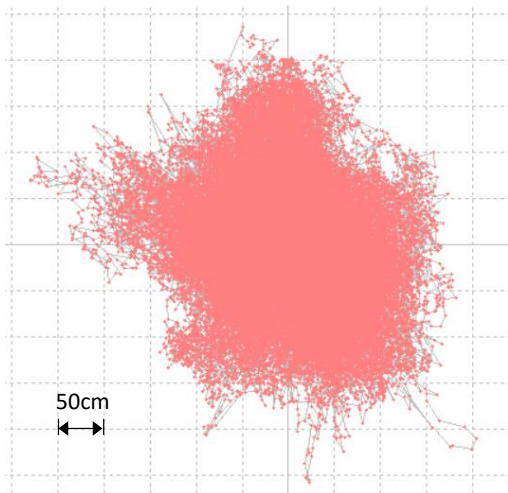


図5 2周波単独測位

表3 2周波単独測位による読問基準局の位置情報

緯度	北緯 34.23432030°
経度	東経 133.6367550°
楕円体高 (m)	60.55

6.3. 電子基準点を利用したスタティック測位

全観測点数2,879点に対して、Fix率は95.6%、Fix解は2,751点であった。図6は、Fix解のすべての測位結果の分布を示したものである。全Fix解の精度は、緯度方向に10mm、経度方向に10mmである。それらの緯度、経度の平均値を取った結果を表4に示す。全Fix解の中心からの広がりを示す2drmsを求めたところ、2.75mmであった。

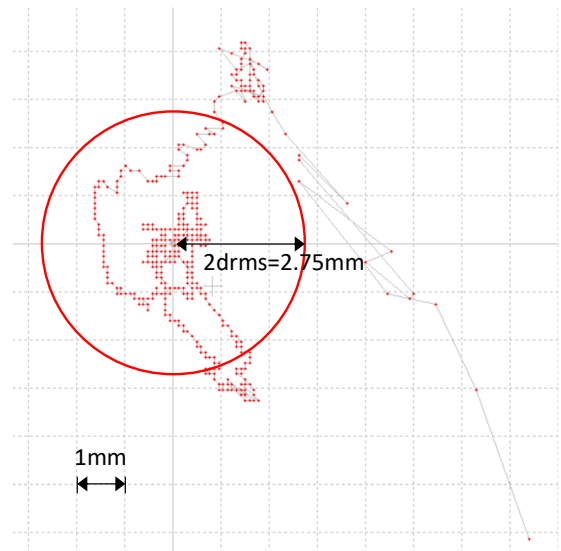


図6 電子基準点データを利用したRTK測位結果

表4 RTK測位による読問基準局の位置情報

緯度	北緯 34.23431863°
経度	東経 133.6367558°
楕円体高 (m)	61.99

7. 考察

今回測定した読問基準局の位置は、表4と得られた。われわれが、これまで公開していた読問基準局の位置を表5に示す。表5は2018年10月に三野電子基準点とで1周波スタティック測位したものである。当時から18か月経過し、緯度は0.00000008°、距離にして8.8mm南に移動し、経度は0.00000004°、距離にして3.64cm東に移動した。このことは、図4に示す近隣の三野電子基準点の地殻変動の結果と同じ傾向を示した。また、楕円体高は当時より3.0cm低い結果を得た。

表5 文献1)で公開した読問基準局の位置情報

緯度	北緯 34.23431871°
経度	東経 133.6367554°
楕円体高 (m)	62.02

8. 結言

本研究では、L1 と L2 の 2 周波で三野電子基準点との間でスタティック測位し、詫間基準局の位置を再取得した。

RTK 測位では、基準局のアンテナ設置と正確な位置が重要である。詫間基準局は、詫間キャンパス第 1 学科棟の屋上に設置しているため、上空に遮るものがないため受信電波が強くマルチパスの影響も受けない。また、本研究で詫間基準局の位置を再取得したので、移動局により適正な補正情報を配信できる。さらに、詫間基準局を 2 周波対応としたことで、利用する移動局との基線長が伸び、三豊市周辺の地域でも RTK 基準局として利用可能となった。この詫間基準局のデータは、インターネット回線を通して無償で配布しており、登録の必要もなく誰でも利用できる。

参考文献

- 1) 小野安季良, 宮内大輝, “詫間キャンパス RTK 基準局の設置と公開”, 香川高等専門学校研究紀要, Vol. 10, pp. 99-106, 2019
- 2) <http://www.rtk2go.com/> (2020. 6. 22)
- 3) 岡本修, “2 万円 2 周波 vs 300 万円 3 周波! 最新 RTK レシーバ Fix 性能対決”, トランジスタ技術, CQ 出版社, Vol. 56, No. 2, pp. 88-98, 2019
- 4) 谷口光希, “静止体における 2 周波測位の測位精度”, 2019 年度香川高等専門学校通信ネットワーク工学科卒業研究論文, 2020
- 5) 久保信明, “移動体搭載時 / 遠距離基準局での精度”, トランジスタ技術 SPECIAL, CQ 出版社, pp. 42-44, 2020
- 6) <https://robotstart.info/2019/06/03/sb-rtk-gnss.html>, (2020. 6. 22)
- 7) <https://robotstart.info/2019/05/29/docomo-gnss.html>, (2020. 6. 22)
- 8) 国土地理院, 地殻変動情報, <https://mekira.gsi.go.jp/index.html>, (2020. 6. 22)
- 9) http://www.rtklib.com/prog/manual_2.2.0.pdf
- 10) 国土地理院, 電子基準点データ提供サービス, <http://terras.gsi.go.jp/>, (2020. 6. 22)
- 11) 木谷友哉, “バイクの実走テストと 2 個使いでの角度センシング”, トランジスタ技術 SPECIAL 増刊センチメートル GPS 測位 F9P RTK キット・マニュアル, CQ 出版, 2020
- 12) <ftp://igs.ign.fr>, (2020. 7. 6)