

基線長に対する2周波リアルタイムキネマティック測位

小野 安季良* 谷口 光希** 福田 清人***

Dual Frequency Real Time Kinematic Positioning by Changing Base Length

Akira ONO, Mituki TANIGUCHI and Kiyoto FUKUDA

概要

本研究では、基線長を変えて、移動体における1周波RTK測位と2周波RTK測位のFix率を調査した。その結果、基線長20km程度では、2周波RTK測位のFix率は88.2%であった。一方、1周波RTK測位では、基線長が10km未満でもFix率が30.3%と低い結果を得た。また、基線長20km程度の1周波RTK測位と2周波RTK測位の測位誤差は5cm程度であった。

キーワード：RTK測位，移動体，Fix率

1. 緒言

衛星を利用した測位では、移動体に搭載した受信機からの情報のみによる単独測位よりも、位置が正確にわかっている基準局からの補正情報を併用することで測位誤差を大幅に低減できる。その測位法を相対測位と呼び、代表的なものにRTK (Real Time Kinematic) 測位がある。基線長とは、利用する基準局と移動体との距離であり、これが近ければ、基準局と移動体で受信する電波の電離層や対流圏での遅延を共通項として処理できるので、測位誤差を数cmまで低減できる。ただし、RTK測位を行うには、基準局を設置するか基準局サービスと契約した上で、基準局からの補正情報を受け取るためのネットワーク環境が必要である。

われわれは、平成30年12月に、誰でも利用できるRTK基準局を詫間キャンパス内に設置し公開した¹⁾。その基準局を詫間基準局と呼ぶ。詫間基準局の位置は、国土地理院の電子基準点とのスタティック測位により求めたので非常に正確である。そして、詫間基準局で観測したGNSS (Global Navigation Satellite System) 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

*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

GNSSモジュールは、衛星からのL1信号にしか対応しておらず、RTK基準局として利用するには、移動体との基線長が10km以内に限られた。

このため、令和元年2月に詫間基準局のアンテナとモジュールを2周波対応に更新した³⁾。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取り除けること、また、RTK測位の演算処理が早くなることで、基線長が長い場合でも測位精度を保つことができる⁴⁾。文献5)では、2周波RTK測位のFix性能が評価されている。筆者らも、静止体の測位を国土地理院の電子基準点で2周波RTK測位を行ない、1周波測位に対する2周波測位の優位性を報告した⁶⁾。

本研究では、移動体における1周波測位と2周波測位のFix率を、基線長を変化させて調査したので報告する。

2. RTK測位の測位精度

GNSS衛星が受信機の天頂方向にあるときの衛星までの距離は約20,000kmで、地平線上にあるときは約26,000kmである。電波の速度は 3×10^8 m/sなので、衛星から受信機までの信号の伝搬時間は、およそ70msから90msとなる。また、衛星と受信機の時計が 1μ sずれているだけで、約300mの測位誤差が生じる。

図1にRTK測位の原理を示す。RTK測位は移動局の

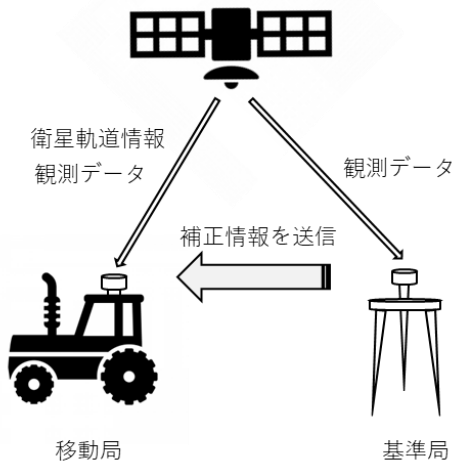


図1 RTK測位の原理

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。RTK 測位では、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、測位精度が向上する。一般に、RTK 測位による測位精度は式(1)で与えられる。

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

ここで、ppmは百万分率、 $D[\text{cm}]$ 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。

L1の1周波によるRTK測位では、電離層での遅延を完全に消去できないので、cmレベルの測位が可能となるには、移動局と基準局との基線長が10km以内に限られる。一般に、移動局と基準局の両者が2周波対応の場合、RTK測位の演算処理が早くなり、基線長が長い場合でも、高精度な測位が可能となる⁵⁾。2周波RTK測位では、高精度測位が可能となる基線長は受信機の性能にもよるが、電離層や対流圏の誤差を考慮できる一般的な測量用受信機では、基線長が約100kmでも1分以内に測位解を導出し、数cmの精度を達成するものもある。

3. 測位に利用する情報

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。図2に衛星から送られてくる測位信号のダイアグラムを示す。衛星からの送信信号は、CDMA(Code Division Multiple Access)技術が用いられる。搬送波

(L1では周波数1575.42MHzの正弦波)を衛星固有の疑似雑音符号でスペクトル拡散する。このため、複数の衛星から同じ周波数で同時に送信しても、この符号で区別できるので混信しない。疑似雑音符号のC/Aコード(Coarse/Acquisition code)のチップレートは1.023MHzである。航法データには、衛星自身の軌道情報や時刻、健康状態を示すフラグなどが含まれており、GPSのL1_C/Aでは50bpsで送信している。

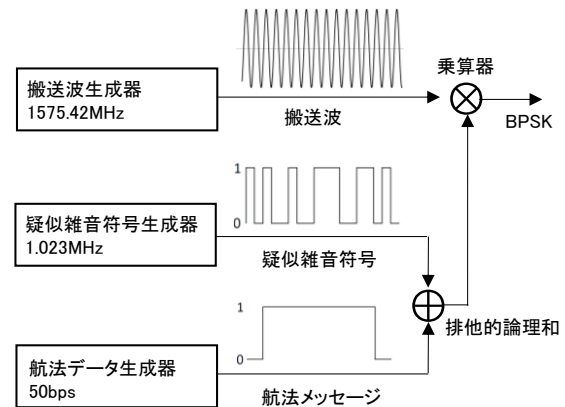


図2 衛星からの測位信号のダイアグラム(L1)

3.1. コード測位

コード測位は、もともとのGPS測位方法である。疑似雑音符号を搬送波に乗せて配信し、それを読み解くことで衛星と受信機間の距離を測定する。衛星と受信機間の距離は、受信機側で受信信号と疑似雑音信号との自己相関をとることで衛星からの到達時間を割り出して求める。複数の衛星で、到達時間から衛星と受信機間の距離に関する連立方程式を立て、それを解くことにより測位する。疑似雑音符号は1.023MHzで符号幅は、 $1/1.023 \times 10^6\text{s}$ であり、簡単のためこれを $1\mu\text{s}$ とする。 $1\mu\text{s}$ のチップ幅は300mの距離に対応する。到着時刻は、周囲に障害物や反射物がない環境では約0.1%の精度で測定できる⁷⁾。これは0.3mの測位精度に対応している。

3.2. 搬送波位相測位

搬送波位相測位は、図2の搬送波の位相を捕捉するものであり、高精度測位が実現できる。受信機が生成する搬送波信号の位相と衛星から受信した搬送波信号の位相の測定瞬間時における差を測定する。GPSのL1では、搬送波周波数は1575.42MHzであり、波長は約19cmである。これは、位相 360° が19cmに対応することを意味する。受信機で位相の追従ができれば、 $\pm 15^\circ$ 程度の精度が得られるので、最大でも8mm程度の

誤差で測位が可能となる⁸⁾。ただし、衛星と受信機間の波の数 N (何サイクル経過して受信機に到達したか) は不明であり、それを推定する必要がある。 N は整数アンビキュイティと呼ばれる。 N が正確にわかれば、非常に高精度な測位が可能となる。搬送波位相による連立方程式と 3.1. 節で述べたコード測位の連立方程式を併せて解くことで、高精度な測位を実現する。

4. 2周波測位の優位性

4.1. 測位の時間短縮

RTK 測位では整数アンビキュイティを求める際、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3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 = 347.82 MHz 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。また、Fix解が外れてFloat解になっても、再びFix解に早く戻ることができる。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。Float解とは、Fix解に入るまでの測位解である。Float解では、水平方向で20cm～数mの精度しか得られないが、Fix解では水平

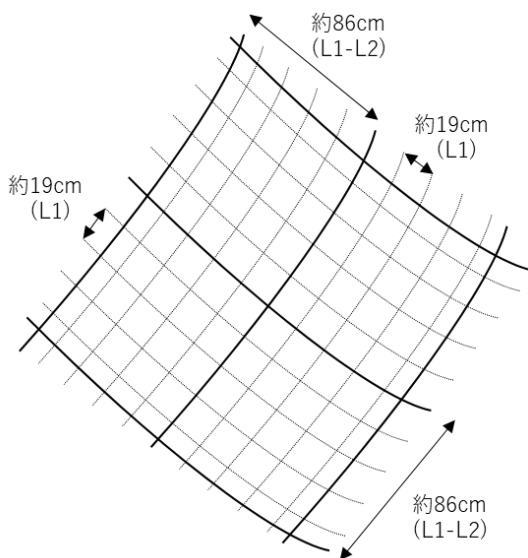


図3 測位解の導出

方向で数cmの精度が得られる。Fix率とは全エポックに対するFix解の割合である。

4.2. 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_T [m] は、式(2)で与えられる。

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

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4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、高精度な測位が可能となる。

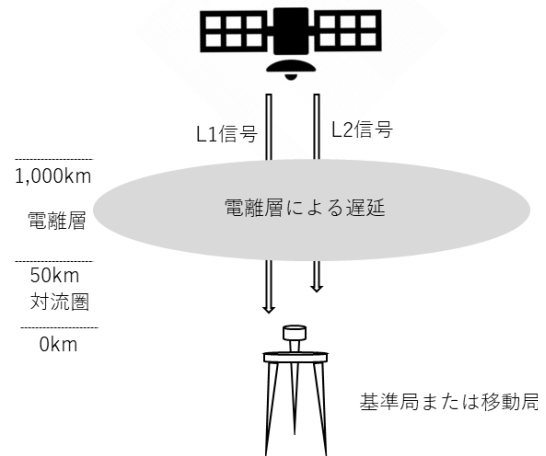


図4 搬送波周波数による電離層遅延

5. 実験方法

本実験では、実験時に移動体で各衛星から配信される測位ログデータを取得する。このとき、同時に移動体側で基準局が配信している測位ログデータをネットワーク環境を用いて取得する。情報配信局として rtk2go を利用し、基準局には託問基準局を選んだ。ネットワーク環境は、移動体(自動車)にPCを搭載し、PCとスマホをWiFiテザリングすることで確立し、基準局のログデータをPCに保存した。実験環境を図5に示す。

移動体に搭載したアンテナおよびモジュールは、それぞれ ANN-MB-00 (u-blox 製) および ZED-F9P (u-blox

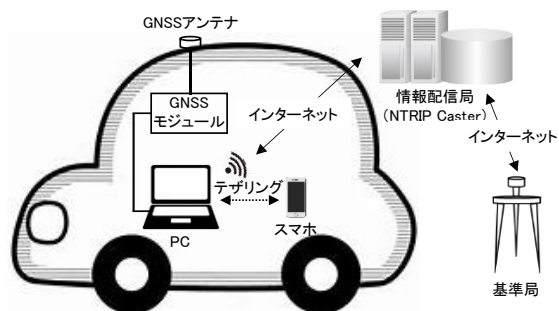


図5 実験方法

製)で、2周波に対応している。また、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、こちらも2周波に対応している。

1周波RTK測位と2周波RTK測位のFix率の算出は、以下の手順で行った。実験後に、移動体側で取得した移動体と基準局の測位ログデータを、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形式に変換し、観測ファイルと航法ファイルを取得した。移動体と基準局の観測ファイルと基準局の航法ファイルを用いて、RTKLIBの後処理解析ソフトウェアRTKPOSTにより、移動体を1周波と2周波でRTK測位した。利用衛星は、GPS、GLONASS、QZSSとし、仰角マスクを 35° 、SNRマスクを35dBと設定した。

実験は、基準局近隣の学校周辺、基準局から約8kmの三野駅周辺、約15kmの丸亀駅周辺、約20kmの坂出駅周辺で行った。

学校周辺の観測期間は、2021年3月1日14時から15分程度であり、学校から通称電波坂を下り詫間中学校前、ファミリーマート三豊詫間町店前を通り、県道232号線で学校に戻るルートである。

三野駅周辺の観測期間は、2021年3月22日13時40分から15分程度である。ファミリーマート三野店から県道220号線を通り国道11号へ、国道11号線を西へ向かいマルナカ高瀬店で右折、県道23号線に戻るルートである。

丸亀駅周辺の観測期間は、2021年3月19日14時40分から30分程度である。丸亀陸上競技場駐車場から国道11号に入り、土器川を超えて左折して浜街道へ向かい浜街道を左折、県道33号線で競技場に戻るルートである。

坂出駅周辺の観測期間は、2021年3月15日15時から30分程度である。坂出市立体育館から官庁通りに入り、県道33号線からローソン宇多津新開店を左折し、県道186号線を通り体育館に戻るルートである。



図6 基準局周辺での2周波RTK移動体測位



図7 三野駅周辺の2周波RTK移動体測位

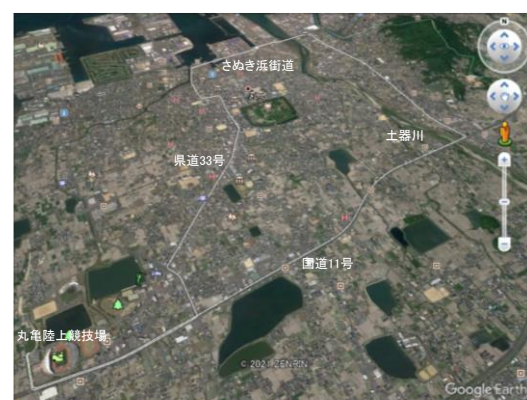


図8 丸亀駅周辺の2周波RTK移動体測位

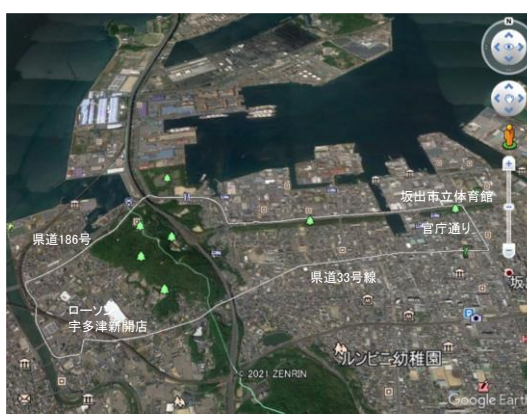


図9 坂出駅周辺の2周波RTK移動体測位

6. 実験結果

測位精度は、測位時の衛星配置や測位環境により大きく異なる。例えば、2車線で隣に大型トラックが並走した場合は測位精度が悪くなる。ここでは、同じ環境における1周波RTK測位と2周波RTK測位の測位精度について考える。

図6～図9は、基線長を変更して2周波RTK測位したときの測位結果をGoogle Map上に描いたものである。また、表1に1周波RTK測位と2周波RTK測位のFix率を示す。基線長が短い学校周辺では、1周波RTK測位も2周波RTK測位も高いFix率を示した。今回の実験で最も基線長が長い坂出駅周辺での2周波RTK測位のFix率は88.2%と高い水準を示した。また、1周波RTK測位では、一般的に基線長が10km以内のとき高いFix率を示すとされている。しかし、基線長が10km未満の三野駅周辺での1周波RTK測位のFix率は30.3%にとどまった。

表1 1周波と2周波のFix率

移動体ルート	基線長 (km)	Fix率 [%]	
		2周波	1周波
学校周辺	0.1～2.9	91.2	86.4
三野駅周辺	6.7～9.4	93.2	30.3
丸亀駅周辺	13.8～17.8	81.0	37.6
坂出駅周辺	19.4～22.8	88.2	45.5

図10および図11は、それぞれ坂出駅周辺を1周波RTK測位および2周波RTK測位したときの測位結果である。赤点がFix解であり、青点がFloat解である。①の箇所は、左側にJR瀬戸大橋線の高架があり、上空が遮られている。また、②の箇所は、街中であり道路の両側に中層ビルが建っている。2周波RTK測位では、Fix解から外れてもすぐにFix解に戻ったが、1周波RTK測位では、Fix解への戻りが遅かった。このため、Fix率にも差が現れた。

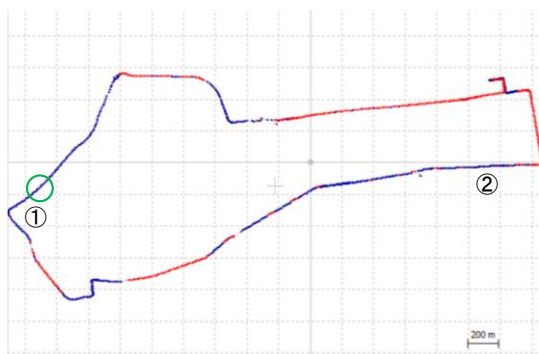


図10 坂出駅周辺の1周波RTK移動体測位

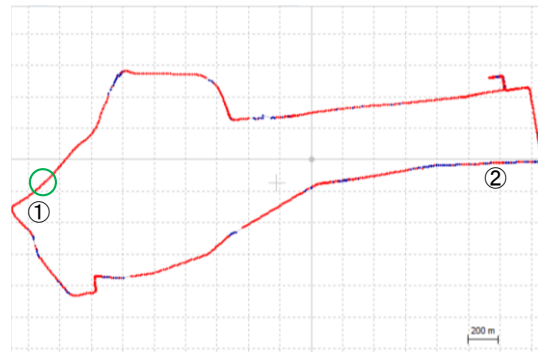


図11 坂出駅周辺の2周波RTK移動体測位

図12に図10緑丸箇所の一部を拡大したものを示す。この箇所では、2周波RTK測位結果はFix解、1周波RTK測位結果はFloat解であった。実線が2周波RTK測位結果であり、点線が1周波RTK測位結果である。測位結果に約5cmの差があった。

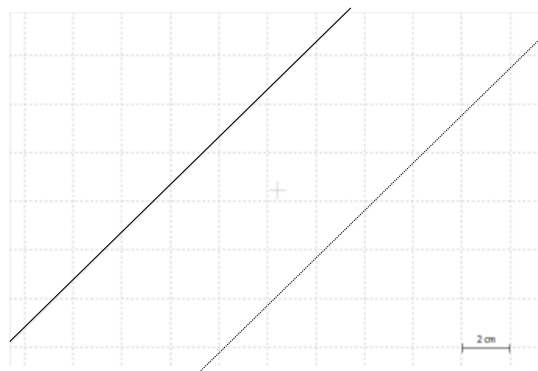


図12 1周波と2周波のRTK測位差

7. 結言

本研究では、基線長を変えて、移動体における2周波RTK測位のFix率を調査した。その結果、基線長20km程度までは、高いFix率を示すことを確認した。また、1周波RTK測位では、基線長が10km未満でもFix率が低く、その原因が基線長によるものか、測位環境によるものか調査することが今後の課題である。

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/> (2021. 3. 19)
- 3) 小野安季良, 谷口光希, 福田清人, “2周波対応 RTK 詫間基準局の設置”, 香川高等専門学校研究紀要, Vol. 12, pp. 127-132, 2021

- 4) 久保信明, “移動体搭載時 / 遠距離基準局での精度”, センチメートルGPS測位 F9P RTK キット・マニュアル, CQ出版社, pp. 42-44, 2020
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 測位航法学会誌, “精鋭GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機”, 松香堂書店, 2010
- 8) 久保信明, “オープン測位エンジン「RTK コア」③ GPS電波の位相差計算”, トランジスタ技術, CQ出版社, Vol. 55, No. 1, pp. 106-112, 2018