

## GNSS2周波対応ローコスト受信機の対流圏遅延推定における評価

Evaluation of GNSS dual-frequency low-cost receiver in tropospheric delay estimation

中川 豊<sup>1</sup>                      宮内 大樹<sup>2</sup>                      東野 武史<sup>3</sup>                      岡田 実<sup>4</sup>  
 Yutaka Nakagawa              Taiki Miyauchi              Takeshi Higashino              Minoru Okada

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 情報科学領域 ネットワークシステム学研究室<sup>1,2,3,4</sup>

## 1 Abstract

In recent years, low-cost dual-frequency GNSS receiver modules developed for consumers have become widespread on the market. When these receiving modules were compared with the high-performance receiving modules operated by GEONET [1] from the viewpoint of tropospheric delay estimation, they were found to have the same level of performance.

## 2 まえがき

衛星測位における誤差の大きな要因の一つは、電離層遅延の問題である。2周波対応のGNSS受信モジュールは、L1、L2帯の異なる周波数の観測値を利用して電離層の影響を精度よく補正できるため、1周波で衛星信号を受信する時よりも安定し正確な測位が可能である。ゲリラ豪雨のような局地現象の気象予測には、上空の水蒸気量の正確な見積もりが重要である。GNSSの対流圏遅延量の推定値から得られる情報を基に気象予測を行うためには、ある程度空間の広がりをもった対流圏遅延の情報が必要である。GEONETで構築されている以上に緻密な多点での同時観測網の構築が望まれるが、受信機等のコスト面からその実現は困難である。本稿では近年コンシューマ向けに開発されたローコスト2周波GNSS受信モジュールが市場にひろまりつつあるため、これらとGEONETの電子基準点の対流圏遅延量の推定の比較からその性能を評価することにした。

## 3 GNSS測位の誤差

図1はGNSSの測位における誤差要因のイメージである。一般には対流圏の高度は0~11km程度とされているが、実質的に測位に大きく影響されるのは対流圏の中・低層域の0~7km程度の高さと考えられる[2][3]。本稿では、精密衛星軌道、衛星時計推定値と搬送波観測データを使った精密単独測位(PPP: Precise Point Positioning, 以降PPP)を対象に述べる。PPPでは二重位相差観測も行われなため、干渉測位において無視される精密モデル項についても考慮する必要がある。受信機uで受信した衛星pの測位信号の搬送波位相観測値は $\phi_u^p$ は以下で表される。

$$\begin{aligned} \Phi_u^p &\equiv \lambda\phi_u^p \\ &= r_u^p + c(\delta t_u - \delta t^p) - \delta I_u^p + \delta T_u^p \\ &\quad + \lambda N_u^p + \Delta p_u^p + \varepsilon_\phi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $\phi_u^p$ は搬送波位相観測値(cycle)、 $r_u^p$ は受信機・衛星間幾何学距離(m)、 $\delta t_u$ は受信機時計誤差、 $\delta t^p$ は衛

星時計誤差(s)、 $\delta I_u^p$ は電離層遅延(m)、 $\delta T_u^p$ は対流圏遅延(m)、 $\lambda N_u^p$ は搬送波位相バイアス(cycle)、 $\Delta p_u^p$ はアンテナ位相中心変動(PCV:Phase Center Variation)(m)、 $\varepsilon_\phi$ はマルチパスを含んだ搬送波位相観測誤差(m)、 $\lambda$ は搬送波波長(m)である。PPPでは干渉測位で無視できる時計誤差や電離層遅延、対流圏遅延が誤差要因として現れるため、補正モデルなどを用いてこれらの影響を小さくする必要がある。表1[4]にPPPの測位誤差を示す。一般的に測位誤差の要因として最も大きなウェイトを占めるのは電離層遅延である。電離層遅延はほぼ搬送波周波数 $f$ の2乗に反比例する。従って2周波の搬送波位相に適当な係数を掛けて加算することによりその影響の大部分を消去することができる。PPPでは2周波線形結合と観測モデルによる電離層遅延の補正が測位誤差の精度にとって重要である。その他の誤差要因を含めて2周波受信機の測位誤差はcm級の精度が実現可能となっている。

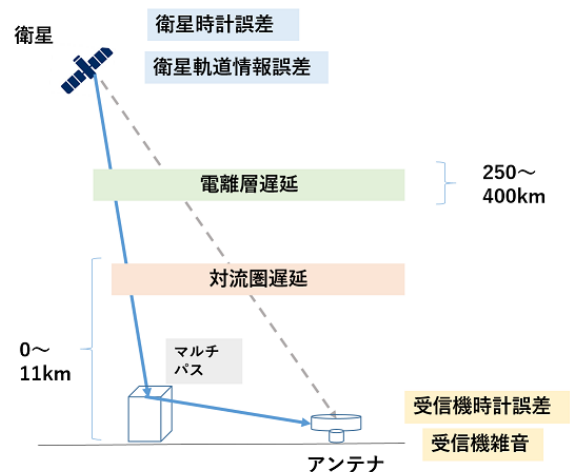


図1 GNSS測位誤差の要因([2]を一部修正)

表1 PPPの測位誤差[4]

誤差要因	誤差の精度
軌道/時計	精密暦 ~3cm/~0.1ns
電離層遅延	2周波線形結合 ~0.5cm
対流圏遅延	対流圏遅延モデル~0.5cm
ノイズ+マルチパス	搬送波位相 0.3~1cm
総合測位誤差	1cm~10cm

## 4 NAISTとIKOMAの対流圏遅延量の比較

本来では同じ地点で同時に2つの受信機から得られた対流圏遅延推定値を比較するべきであるが、現状では

受信機が設置できなかったため、図2に示すように大学(奈良先端科学技術大学院大学, 以降 NAIST) に最も近い GEONET の生駒電子基準点 (以降 IKOMA) と水平で 5km 弱離れた距離で観測し比較を行った。具体的に観測するのは対流圏全天頂遅延量 (ZTD:Zenith Total Delay, 以降 ZTD) である。比較に使用した NAIST のアンテナと受信モジュールを図3に示す。アンテナは NAIST の計算機サーバの時刻校正用受信機に設置されている既設のものである。アンテナの分配器に GNSS 受信モジュールを接続し、シングルボードコンピュータ Raspberry Pi 経由でデータをロギングしている。受信機モジュールは縦、横の寸法は僅か 3 × 2cm である。図4に参考に GEONET 電子基準点の例を示す。



図2 NAIST と IKOMA の位置関係



図3 NAIST のアンテナ (左) と受信機モジュール (右)



図4 GEONET 電子基準点の例 (国土地理院 HP から引用 [4])

表2にそれぞれの観測点の情報、受信機等諸元を示す。NAIST の受信機モジュールについてはローコストでありながら2周波に対応していることが大きな利点である。アンテナは既設のもの(チョークリングコイル)を利用したが規格が不明で PCV データの関連情報が得ら

れなかったため、IKOMA のアンテナと同様に扱った\*。最近では2周波対応のアンテナもコストが低くなる傾向がある。IKOMA の受信機はハイエンドであり L1,L2 帯のほか、L5 帯も受信可能であるが、対流圏遅延量に関してはその優位性はあまりないと考えられる。NAIST は準天頂衛星の QZSS も対応している。

表2 観測点およびシステムの諸元

	NAIST	IKOMA
所在地	生駒市高山町 8916-5	生駒市桜ヶ丘 7-15
緯度	34° 43' 55.66"	34° 42' 00.91"
経度	135° 44' 03.07"	135° 42' 07.39"
標高	120.2 m	155.3 m
受信機	U-BLOX ZED F9P	TOPCON NET G3
衛星	GPS GLONAS GALILEO QZSS	GPS GLONAS GALILEO
周波数	L1,L2	L1,L2,L5
アンテナ	Ashtech chokering coil model*	TOPCON TPSCR.G5
コスト	LOW	HIGH

## 5 NAIST と IKOMA のデータ分析

本研究では測位解析ソフト「RTK-LIB」を用いて、2019年7月の1ヶ月間に NAIST と IKOMA で得られた PPP 測位解析により得られた ZTD の推定値を比較する。PPP 測位のための設定値を表3に示す。図5に一般的な測位誤差の程度を示す平面分布のプロットを示す。縦軸は南北、横軸は東西で1目盛りは5mm である。特に明確な差は見られないが、NAIST の方が南北の変動が少ないことがわかった。

表3 PPP 測位の設定

Items	Set value
Positioning Mode	PPP-Static
Elevation Mask	15(deg)
SNR Mask	35(dB)
Earth Tide Correction	Solid
Satellite	GPS QZSS GLONAS Galileo
Ionosphere Correction	Ionosphere-Free Linear Combination
Troposphere Correction	Estimate ZTD + Grad
Satellite Ephemeris	Precise
Integer Ambiguity Res	GPS → Fix and Hold
Sampling Interval	1 minute (Both Input and Output)
OTL Data	ON
PCV Data	ON

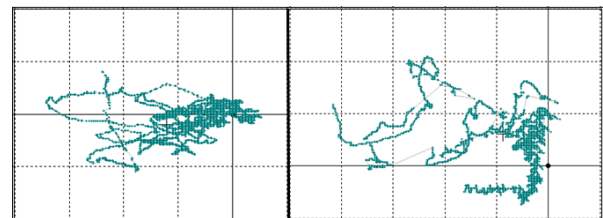


図5 測位データの平面分布

図6は NAIST と IKOMA のそれぞれについて、上から東西、南北、上下方向の測位の変動を示したものである。縦軸は測位の変動で1目盛りが0.02(m) である。横軸は時間で7月1日(左端) から7月31日(右端) までの1ヶ月間である。7月4日頃まで上下の変動が逆位相となっているが、その他は明確な差は見られない。

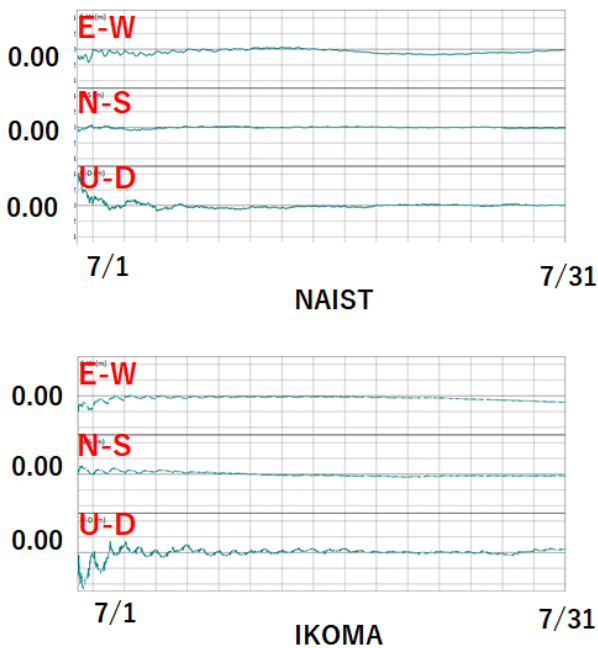


図 6 測位データの変動

次に図7に ZTD と降雨強度の時系列を示す。上のグラフが ZTD、下のグラフが降雨強度である。ZTD については概ね同期しているが少しバイアスに差が見られた。NAIST の標高は 120.2m に対して IKOMA は 155.3m であるが、NAIST のアンテナは地上 35m 以上の建物の上に位置しており、NAIST のほうが地面標高が高い分遅延量が小さいことを示している。

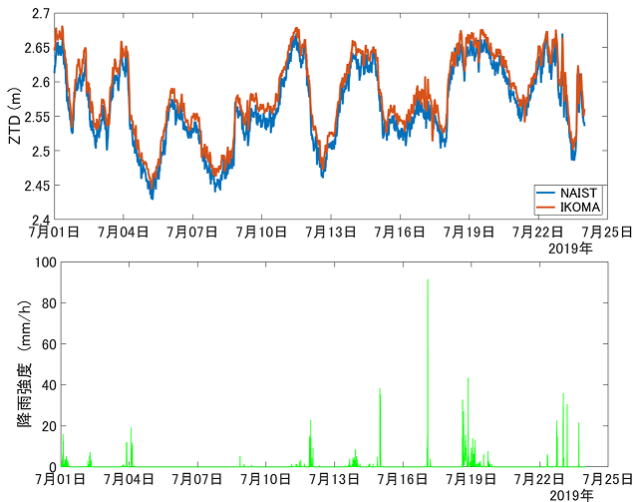


図 7 ZTD の時系列 (上) と降雨強度 (下)

ZTD が大きいと大気中の水蒸気量も大きくなり降雨強度も大きくなると考えられ、ZTD が大きくかつ急峻な増加傾向であると時間差を経て降雨強度が急増するケースが多いが、ZTD と降雨強度との明確な関連性を見いだすことは困難である。しかしながら ZTD が NAIST の場合については 2.54 以上、IKOMA の場合は 2.56 以上の場合に降雨が発生していることから、この ZTD の

閾値は降雨の有無の推定にとって重要な指標となり得る可能性がある。降雨予測の推定については著者らが取り組んでいる研究テーマである [5][6]。

表 4 に NAIST と IKOMA の ZTD の統計量の比較を示す。両者にほとんど差は見られなかった。なお統計量の各要素は以下のとおりである。

mean: 平均値, sd: 標準偏差, median: 中央値, trimmed: トリムされた平均値, mad: 中央絶対偏差値, min: 最小値, max: 最大値, range: レンジ, skew: 歪度, kurtosis: 尖度, se: 標準誤差

表 4 ZTD の統計量の比較

	mean	sd	median	trimmed	mad	min	max	range	skew	kurtosis	se
NAIST	2.56	0.06	2.56	2.57	0.07	2.43	2.67	0.24	-0.14	-0.88	0
IKOMA	2.58	0.06	2.58	2.58	0.06	2.44	2.68	0.24	-0.17	-0.87	0

また、ZTD について NAIST と IKOMA の相関を調べると図 8 のとおり決定係数 R-square は 0.97 と非常に強い相関となった。

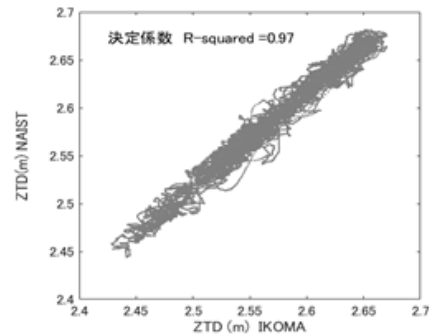


図 8 ZTD の相関

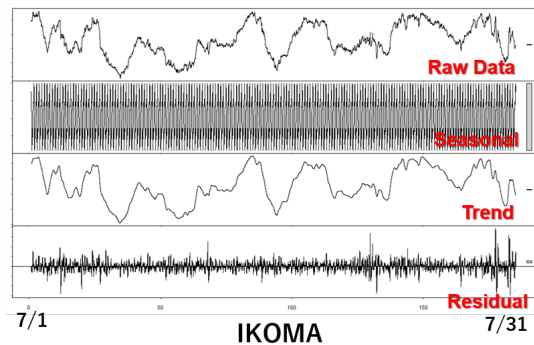
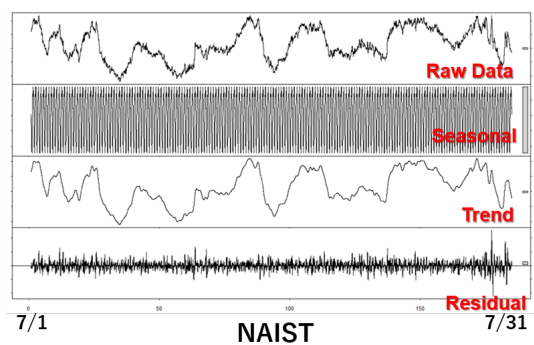


図 9 ZTD の時系列分析

図9はZTDの時系列の波形の分析である。縦軸はZTDの変化、横軸は時間で7月1日(左端)から7月31日(右端)までの1ヶ月間である。時系列データはいくつかの成分に分解し可視化することによってより詳細に分析することができる。一般には

$$\text{観測値} = \text{トレンド} + \text{周期変動} + \text{残差}$$

でトレンドは比較的滑らかな長期変動を示すものであり、周期変動は時間とともに一定のリズムで変動する成分である。残差は実際のデータを用いて推定された回帰式から算出される値と実際のデータとの差を表す。上はNAIST,下はIKOMAである。共に上から順にZTDの生データ、季節成分(周期性成分)、トレンド、残差を表す。全般に波形の分析についても明確な違いは見当たらないが、残差についてはNAISTの方が小さいことがわかった。なお波形の分解にはSTL分解(Seasonal Decomposition Of Time Series By Loess)を実施することで、元データをトレンド、季節性、残差に分解することができる。STL分解は、LOESS平滑化(locally estimated scatterplot smoothing)というノンパラメトリック回帰モデルを利用した。ノンパラメトリック手法はパラメトリック手法と比べて、母集団の分布などの前提を必要としない。そのためノンパラメトリック手法は広きにわたり適用できる利点がある(汎用性がある)。

## 6 まとめ

ZTDについて、NAISTとIKOMAの相関および、測位データのゆらぎ、時系列データの統計量、時系列データの分解の各視点においてNAISTとIKOMAの比較を行ったところ、何れも両者において明確な差は認められなかった。ローコストな受信機でもPPP測位でセンチメートル級に精度が向上しており、水平距離が約5km弱離れているため正確な比較とはならないが、ローコストな2周波対応の受信機の性能が精密な測量用のハイエンドな受信機にも劣らない性能であると考えられる。コスト面でGEONETの観測網より有利であり、より緻密なネットワークを構築することができるため、ゲリラ豪雨の予測精度の向上で防災にも貢献できる可能性がある。

ZTDは水蒸気による遅延量である天頂湿潤遅延ZWD(Zenith Wet Delay)と、乾燥大気による遅延量であるZHD(Zenith Hydrostatic Delay)との和で表すことができ、ZHDはZTDの中で大きなウエイトを占めるがその変動量は小さく、かつゆるやかである。一方ZWDは、300mm程度と全遅延の1割以上を占めている。一般的な大気の飽和水蒸気量における大気の水蒸気が占める体積比は約0.3%程度と非常に小さい値であるが、水蒸気が伝搬遅延へ及ぼす影響は大きく、場所や季節、天候によって大きく変化することが特徴である。今後は水蒸気の影響がより大きいZWDについての調査・分析も重点的に行うこととする。また改めて同地点でローコストとハイエンドの2周波受信機で対流圏遅延を観測し受信機による特性の違いを電氣的性能もあわせて検証を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 国土地理院 HP  
<https://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/eiseisokuchi41012.html>
- [2] 坂井 丈泰, “電子航法研究所, GPS/GNSS シンポジウム 2007, 東京海洋大学, Nov. 20, 2007”  
[https://www.enri.go.jp/sakai/pub/symp07\\_tutorial.ppt](https://www.enri.go.jp/sakai/pub/symp07_tutorial.ppt)
- [3] 宮川康平, 国土地理院, “-GNSS時代の幕開け-, 測地観測センター, 平成25年1月第10回北海道測量技術講演会”  
<https://www.gsi.go.jp/common/000078222.pdf>
- [4] 高須知二, “精密単独測位(PPP)によるスタティック・キネマティック測位精度の評価, 日本測地学会第104回講演会, 2005(発表資料)”
- [5] 中川豊, “奈良先端大学院大学, 衛星測位情報を利用した気象予測に関する研究, 修士論文, 2019年3月15日”
- [6] 中川豊ほか, “奈良先端科学技術大学院大学, 衛星測位情報を応用した降雨予測の検討, 電気関連学会関西連合大会論文, 2019.11”