準天頂衛星によるLEX-PPPを用いた 移動測位の遮蔽環境に応じた 測位精度に関する実験

岩上 弘明¹・佐田 達典²・石坂 哲宏³・江守 央⁴・池田 隆博⁵

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: cshi13004@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学教授 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: sada@trpt.cst.nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学助教 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: ishizaka.tetsuhiro@nihon-u.ac.jp

⁴正会員 日本大学助教 交通システム工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: emori.hisashi@trpt.cst.nihon-u.ac.jp

⁵学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

E-mail: ikeda.takahiro@trpt.cst.nihon-u.ac.jp

準天頂衛星が放送するLEX信号を用いた、単独搬送波位相測位 (PPP) によって、センチメートル級の測位精度が期待されている。日本の天頂付近に長時間留まる軌道を持つ衛星システムであるので、日本国内の山間部や都心部の高層ビル街などでも、測位できる場所や時間を広げることができる。本研究では、キャンパス内を仮想の街として、異なる遮蔽環境下で、LEX信号を利用したPPPによる測位精度の検証を行った。また、JAXAが開発した複数GNSS対応高精度軌道・時刻推定ツールMADDOCAによって生成した暦を用いた後処理PPP測位も実施し測位精度の比較を行った。その結果、遮蔽環境が測位精度に影響を与えることが確認された。

Key Words : QZSS, LEX-PPP, GPS, MADDOCA, Positioning accuracy

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency) は、準天頂衛星初号機「みちびき」を 2010 年 9 月 11 日に打ち上げた。準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System) は、日本の真上付近を長時間留まる軌道を持つ衛星システムである。山間部や都市部のビル街など、GPS (Global Positioning System) を用いて測位を行うために必要な数の衛星が見通せない場所においても、「みちびき」の信号を加えることにより測位可能な場所と時間を広げることができる¹⁾。

「みちびき」から送信される信号は、補完信号と補強信号がある。補完信号は、近代化GPSとの共存性、相互運用性を確保することから、近代化GPS信号をベースとしており、L1C/A信号、L1C信号、L2C信号、L5信号を送信している²⁾。補強信号は、L1-SAIF (L1-band Submeter-class Augmentation with Integrity Function) 信号及びLEX (L-

band Experiment) 信号を「みちびき」から送信することで測距補正情報の送信による高精度化、ヘルス情報の通知や故障判定による高信頼性化及びGPS衛星の捕捉支援情報等をユーザへ通知してユーザの利便性の向上に寄与することができる²⁾。LEX信号を利用して、単独搬送波位相測位 (PPP : Precise Point Positioning) を行うことで、これまで概ね10m程度の測位精度であるGPS単独測位に比べ、基準局を用いた相対測位と同等の測位精度である数cm～10cmまで向上することが期待されている。PPPとは、モニタ局の観測データを元に高精度に測位衛星の軌道及び時刻等を推定し、この結果を元にした補正情報を利用することで、搬送波位相観測値を用いた精密単独測位を行う手法である³⁾。

本研究では、異なる遮蔽環境でLEX信号を利用したPPPによる測位精度の検証を目的として、都市部のような異なる遮蔽環境で移動測位を行い、測位精度にどのような影響を与えるか明らかにする。

2. LEX-PPPの概要⁴⁾

LEX-PPPとは、「みちびき」から放送されるLEX信号を用いたPPPである。LEX信号には、現在地上に配置された「みちびき」のモニタ局（国内：4局、海外：5局）とGPS専用のモニタ局（国外：3局）の計12局で観測されたデータをもとに筑波のMCS（Master Control Station）で推定されたGPSと「みちびき」の時刻及び軌道等の補正情報が含まれる。生成されたLEX信号は沖縄にある追跡管制局より「みちびき」に送られ、ユーザへ放送される。

LEX-PPPの特徴として以下のようなことが挙げられる。

①単独測位

従来、高精度な測位を行うにはRTK（Real Time Kinematic）測位による2つの受信機間での搬送波の位相差を測定し、相対位置を求める手法があった。しかしLEX-PPPによる測位では、1台の受信機で高精度に測位が行える。

②グローバルなシステム

ユーザ測位精度の地域依存性が少なく、補正情報を取得できればどこでも高精度な測位を行うことができる。

③センチメートル級の高精度測位

GPSからの測位信号と「みちびき」からの補正信号を受信することでcm級の測位を実現できる。

「みちびき」からLEX信号を直接受信し測位を行うリアルタイムLEX-PPPの目標測位精度は水平方向30cm（RMS）、鉛直方向60cm（RMS）である。しかし、「みちびき」からのLEX信号は、観測環境によって途切れが発生するため、測位解を損失する場合がある。そこで、LEX信号を安定して受信できる環境を想定し、後処理LEX-PPPによる測位も行った。この場合、LEX信号の途切れは発生しないため、リアルタイムと比べ測位精度が向上することが期待できる。

3. MADOCAの概要

JAXAが開発したソフトウェアMADOCA（Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis）は、GPSの他にGLONASSやGalileoといった、複数のGNSSに対応しており、リアルタイムあるいは後処理で高精度に衛星の軌道と時刻の推定を行うシステムである⁴⁾。モニタ局の数も平成25年5月現在、42局が稼働中であり、今後さらに増える見込みである³⁾。本実験では、リアルタイムLEX-PPPによる観測データに対し、MADOCAによって生成した暦を用いた後処理MADOCA-PPPによる測位を実施した。目標の測位精度は、水平・鉛直方向ともに10cm（RMS）であり、リアルタイムLEX-PPPや後処理LEX-PPPと比べ、より高精度に測位が行えることが期待

図-1 観測ルート

表-1 観測日時

観測ルート名	観測日時
N1: 遮蔽物なし 東西南北直進ルート	2012年10月29日 14:47～14:58
N2: 遮蔽物なし 直進ルート	29日 15:07～15:39
N3: 東西方向遮蔽ルート	30日 11:34～12:08
N4: 南北方向遮蔽ルート	30日 15:23～15:55

できる。

4. LEX-PPPによる実験の概要

(1) 実験の目的

LEX-PPPの測位精度を検証するため、キャンパス内を仮想の街として、異なる遮蔽環境で移動測位を行い、遮蔽環境が、測位精度にどのような影響を与えるか検証する。

(2) 実験の方法

図-1に、走行ルートを示す。衛星の遮蔽環境による影響を把握するため、日本大学理工学部船橋キャンパスの遮蔽物のない交通総合試験路で2ルート（N1：東西南北直進ルート、N2：直進ルート）と、4階建ての建物と樹木が立ち並ぶキャンパス内で2ルート（N3：東西方向遮蔽ルート、N4：南北方向遮蔽ルート）の計4ルートを選定した。観測日時を表-1に示す。「みちびき」が高仰角に配置される日時を選定したため、2日間に分けて実施した。

走行回数は、各ルート往復5回行い、走行速度は歩行やシニアカーを想定した時速6kmに加えて、遮蔽物なしのN2で自転車等を想定した時速15kmでの観測も行った。LEX-PPP測位と仮想基準点を用いたネットワーク

図-2 機器構成

写真-1 NI3の実験状況

型 RTK-GPS 測位である VRS (Virtual Reference Station) 測位, および距離と角度が連続して同時に測位が可能な自動追尾型 TS (Total Station) による同時測位を行った。

(3) 実験機器の構成

図-2に、機器構成を示す。2台のセグウェイを用いて、1台には、JAVADのアンテナから分配器を用いて、LEX-PPP測位用の受信機であるJAVAD製Delta-G3TとVRS測位用の日立造船製NetSurvG6の2つを繋ぎ、アンテナの下にはTS用のプリズムを設置した。もう1台のセグウェイには、LEX信号の受信機（LEXR）と記録用のPCを搭載した。JAVADの受信機で受信したデータは、無線を通してPCに記録される。

5. 実験結果

本研究は、LEX-PPPの測位精度を検証するためVRSとTSによる同時測位を行った。しかし、VRSによる測位の結果は、通信が途絶えるなど安定した測位が行えなかったため、基準値をTSの測位結果で解析した。

TSによる測位結果は1秒毎に出力されるが、時刻同期を行っていないため、連続する観測点間の距離から速度を求めた。LEX-PPPによる測位結果からも同様に速度を求め、TSとLEX-PPPの速度を比較し、対応する点を求めた。したがって、比較した点は完全には同期していない。

図-3 NI1のプロット図

図-4 NI2(時速6km)のプロット図

図-5 NI2(時速15km)のプロット図

図-6 NI3のプロット図

図-7 NI4のプロット図

表-2 水平方向の距離誤差の平均値と標準偏差 (単位: m)

観測ルート	リアルタイム LEX-PPP		後処理 LEX-PPP		後処理 MADOCA-PPP	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
NI1	1.495	0.421	0.706	0.433	0.703	0.417
NI2(6km/h)	1.297	0.408	0.817	0.617	0.734	0.576
NI2(15km/h)	2.292	1.081	2.190	1.463	2.099	1.485
NI3	2.440	2.712	2.719	2.654	3.216	2.993
NI4	1.126	0.399	1.003	0.424	0.422	0.249

表-3 水平方向の目標精度の取得状況 (単位: %)

観測ルート	リアルタイム LEX-PPP	後処理 LEX-PPP	後処理 MADOCA-PPP
NI1		3	21
NI2(6km/h)		0	21
NI2(15km/h)		1	4
NI3		2	1
NI4		1	2

(1) 水平方向の結果

各測位結果の一部を平面座標上にプロットしたものを図-3から図-7に示す。遮蔽物がない環境での、NI1とNI2の時速6kmと時速15kmのプロットを示す図-3から図-5より、リアルタイムLEX-PPPによる測位では、東西方向、南北方向ともに較差が見られる。しかし、後処理LEX-PPPと後処理MDOCA-PPPによって南北方向の較差が改善され、TSの走行軌道の上にプロットされていることが確認できる。

遮蔽物がある環境でのNI3とNI4のプロット図を図-6と図-7に示す。東西方向が遮蔽されたNI3では、リアルタイム、後処理に関わらず安定した測位が行われていないことが得られた。南北方向が遮蔽されたNI4では、リアルタイムLEX-PPPと後処理LEX-PPPによる測位で東西方向と南北方向に較差が見られた。しかし、後処理

図-8 NI1の鉛直方向の結果

図-9 NI2(時速6km)の鉛直方向の結果

図-10 NI2(時速15km)の鉛直方向の結果

図-11 NI3の鉛直方向の結果

図-12 NI4の鉛直方向の結果

表-4 鉛直方向の距離誤差の平均値と標準偏差 (単位: m)

観測ルート	リアルタイム LEX-PPP		後処理 LEX-PPP		後処理 MADOCA-PPP	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
NI1	0.953	0.052	0.751	0.093	0.045	0.025
NI2(6km/h)	0.736	0.080	0.922	0.267	0.037	0.024
NI2(15km/h)	0.805	0.065	0.870	0.185	0.033	0.023
NI3	4.334	2.495	4.330	2.909	3.982	4.065
NI4	0.664	0.569	1.003	0.769	1.219	0.781

表-5 目標精度の取得状況 (単位: %)

観測ルート	リアルタイム LEX-PPP	後処理 LEX-PPP	後処理 MADOCA-PPP
NI1	3	5	100
NI2(6km/h)	21	13	100
NI2(15km/h)	5	6	100
NI3	3	4	2
NI4	58	32	15

MADOCA-PPPによる測位では、南北方向の較差が改善され、TSの走行軌道上にプロットされていることが確認できる。

観測ルート毎の解析処理別に得られた測位解の水平方向の精度を確認するため、表-2ではTSを基準とした距離誤差の平均値と標準偏差を示す。表-3では、目標精度に収まった測位解の割合を示す。遮蔽環境と測位解析方式に関わらず目標精度に収まっていない。しかし、遮蔽物がない環境と南北が遮蔽された環境では、後処理による測位精度の改善が見られ、東西方向が遮蔽された環境では、後処理による改善が見られず、測位精度に影響を与えることが確認できる。

(2) 鉛直方向

鉛直方向の座標値を時系列にプロットしたものを図-8から図-12に示す。遮蔽物がない環境でのNI1とNI2の時速6kmと時速15kmを示す図-8から図-10より、同様な傾向が見られた。リアルタイムLEX-PPPと後処理LEX-PPPに

表-6 観測ルート別の衛星数の割合 (単位: %)

衛星数	観測ルート				
	NI1	NI2 (6km/h)	NI2 (15km/h)	NI3	NI4
6	0.0	0.0	0.0	0.7	1.3
7	0.0	0.0	0.0	12.5	46.2
8	0.0	0.0	0.0	42.2	48.1
9	0.0	5.1	60.6	29.6	4.4
10	0.2	49.0	39.4	13.9	0.0
11	80.4	45.9	0.0	1.0	0.0
12	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0

よる測位は、どちらも基準となるTSによる測位よりも1m程度の較差があり、安定して測位が行えていない。後処理MADOCA-PPPによる測位では、TSとほぼ同等の測位結果が得られ、高精度に測位が行われていることが確認できる。

遮蔽物がある環境でのNI3とNI4を図-11と図-12に示す。どちらの遮蔽環境も、リアルタイム、後処理に関わらず安定して測位が行えていない。

表-4は、表-2と同様に観測ルート毎の測位解析方式別に得られた測位解の鉛直方向の精度を確認するため、TSを基準とした距離誤差の平均値と標準偏差を示す。表-5は、目標精度に収まった測位解の割合を示す。遮蔽物のある環境では、後処理MADOCA-PPPによる測位結果から、目標の測位精度で測位が行われていることが確認できる。しかし、遮蔽物のある環境では、目標精度に至らず安定して測位が行えていない。水平方向の結果と同様、東西方向が遮蔽された環境の較差が大きいことが確認できる。

(3) 衛星数と衛星配置

衛星数および衛星配置による精度への影響を調べるため、表-6に観測ルート別の各衛星数の割合、図-13では、衛星配置による精度劣化度 (DOP: Dulation of Presision) を示し、PDOP (Position DOP) は位置、HDOP (Horizontal DOP) は水平方向、VDOP (Vertical DOP) は鉛直方向の精度劣化度である。各衛星数の割合を見ると、周囲に遮蔽物のないNI1とNI2では衛星数が多く、特にNI1では10機以上で測位を行っている。しかし、遮蔽物のあるNI3とNI4では、測位時の衛星数の変化が多く見られ、衛星数もNI1、NI2と比較すると少ない。また、DOP値からは、NI1、NI2では値が低いことがわかるが、NI3、NI4の値は高いことがわかる。

図-14は、遮蔽物のあるルートNI3とNI4の実験時の衛星配置である。どちらも東西方向へ広がり十分なのに対し、南北方向への広がりが小さいことがわかる。

図-13 観測ルート別の DOP 値

図-14 NI3 (左) と NI4 (右) の衛星配置

6. 考察と今後の課題

本実験の結果から、リアルタイム LEX-PPP の測位精度は遮蔽環境に関わらず、目標とする測位精度には至らなかった。しかし、後処理によって南北方向の改善が見られたため、衛星配置が東西方向へ広がり十分なのに対し、南北方向への広がりが小さかったことが測位に影響したと考えられる。後処理 MADOCA-PPP による測位結果から、特に鉛直方向の遮蔽物なしの環境で目標の測位精度に収まった。これにより、モニタ局が増設されたリアルタイムでの MADOCA-PPP の高精度測位も期待できる。

また、遮蔽環境によって測位精度への影響が異なるこ

とが確認されたことから、衛星の数や配置によって測位精度に影響を与えと考えられる。較差が大きく安定した測位が行えていなかった東西方向遮蔽ルート NI3 では、可視衛星数が少なく測位精度に影響したと考えられる。南北方向遮蔽ルート NI4 は、NI3 より較差が小さかった理由として、東西方向が開けており東西方向からの測位信号が受信できていたことが考えられる。

今後の課題として、衛星数や衛星配置、マルチパスの影響を考慮して LEX-PPP の測位精度について検証を行っていく。

謝辞：データの解析や実験構成など多岐にわたるご指導・ご協力いただきました宇宙航空研究開発機構の吉川和宏氏に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) JAXA ホームページ, <<http://qz-vision.jaxa.jp>>, (入手 2013.5.14).
- 2) 宇宙航空研究開発機構：準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書, <http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/DOCS/IS-QZSS_15_RH_J.pdf>, (入手 2012.10.16).
- 3) 吉川和宏, 河手香織, 三吉基之, 小暮聡, 佐田達典, 高須知二, 平原康孝：準天頂衛星システムの LEX 信号を用いた PPP 実証実験, 電子情報通信学会信学技報, Vol.113, No.88, 2013.6.13.
- 4) 河手香織, 小暮聡, 中村信一, 三吉基之, 曾我広志, 平原康孝, 安田明生, 高須知二：準天頂衛星システムの LEX 信号を用いた PPP 実証実験地上システム開発状況, 電子情報通信学会技術研究報告, pp.37-42, 2012.6.

(2013. 10. 7 受付)

EXPERIMENT ON POSITIONING ACCURACY UNDER LIMITED SKY VIEW CONDITIONS USING LEX-PPP BY QZS

Hiroaki IWAKAMI, Tatsunori SADA, Tetsuhiro Ishizaka, Hisashi EMORI
and Takahiro IKEDA

Positioning accuracy of the centimeter level is expected by PPP (Precise Point Positioning) using LEX signals from QZS (Quasi Zenith Satellite). This satellite system has the orbit to stay for a long time above Japan so that the system enable to expand the areas and time duration of the positioning service provision in mountainous and urban area in Japan. This study examined the positioning accuracy of PPP using the LEX signal shielded in different environments at campus as a virtual urban area. And post-processing PPP using MADOCA (multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit/Clock Analysis) was conducted. As a result, it was confirmed that positioning accuracy has been affect by the shielded environment..