

(68) 3機の準天頂衛星を併用した GPS キネマティック測位の精度特性に関する研究

天野 遼太¹・佐田 達典²・江守 央³

¹ 非会員 日本大学 理工学部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: csro15002@g.nihon-u.ac.jp

² 正会員 日本大学教授 理工学部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.tatsunori@nihon-u.ac.jp

³ 正会員 日本大学准教授 理工学部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@nihon-u.ac.jp

近年、カーナビゲーションシステムや自動運転、国土交通省による取り組みである i-Construction など、衛星測位による位置情報を用いた技術開発が進められている。日本では高い精度での位置情報取得を目指し、準天頂衛星システム QZSS を整備しており、2018 年度からは 4 機体制での運用が開始される。本研究では、GPS と QZSS を併用した場合の精度向上効果について検証するため、GPS のみを用いた場合、GPS と QZSS を併用した場合について比較を行った。その結果、QZSS が増えるごとに高仰角に位置する衛星数も増加し、QZSS 3 機を併用した場合に精度が最も向上することが確認できた。また、高仰角だけではなく低仰角も含めた広い範囲に衛星が分布していることが精度向上において必要な条件であることがわかった。

Key Words : GPS, QZSS, DOP, elevation

1. はじめに

近年、カーナビゲーションシステムや自動運転、国土交通省による取り組みである i-Construction (アイ・コンストラクション)¹⁾ など、衛星測位による位置情報を用いた技術開発が進められている。衛星測位を行う上で、高仰角に衛星が位置している場合、マルチパスや電離層による誤差の影響を小さくすることができ、測位精度は向上するとされている。しかし、GPS 衛星のみでは高仰角での衛星数が限られており、高精度の位置情報を安定的に取得することができない。そこで、日本では準天頂衛星システム QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) を開発、整備し、高い精度での位置情報取得を目指している。QZSS は上空を 8 の字で飛行する準天頂軌道と静止軌道の 2 種類の衛星で構成されており、準天頂軌道

は日本のほぼ真上で長時間留まることが可能である。2010 年 9 月にみちびき初号機、2017 年 10 月にみちびき 4 号機が打ち上げられ、2018 年度からは 4 機体制での運用が開始される²⁾。

QZSS の測位精度の研究としては、酒井ら³⁾ が GPS と QZSS 1 機を併用した際の鉛直方向の精度向上効果について仰角別に検証を行った。この研究により、仰角 70° 以上において QZSS を使用することで鉛直方向精度の向上に効果がある可能性を示した。しかし、2 号機以降の打ち上げから間もないことから、QZSS を複数用いた精度向上に関する研究はされていない。そこで本研究では、QZSS を使用した場合の測位精度の向上効果について、GPS のみを使用し QZSS を用いない場合、GPS と QZSS を併用した場合、GPS と複数の QZSS を併用した場合について比較し検証を行うことを目的とする。

2. データと解析手順

(1) 使用するデータ

本研究では、日本時間 2018 年 3 月 6 日 12:00～2018 年 3 月 7 日 12:00 (UTC 2018 年 3 月 6 日 03:00～2018 年 3 月 7 日 03:00) に日本大学理工学部船橋キャンパス 7 号館屋上に基準局 A と移動局 B を設置に行った、データ取得間隔 1 秒のキネマティック測位のデータを用いる。屋上で実験を行ったことから、天空を遮蔽する建物はほぼ存在しない。そのため、上空に配置している衛星はほぼすべて観測可能な状況である(図-1)。なお、受信機は Trimble 社製の NetR9 を使用した。また、解析の際に使用する基準局 A と移動局 B の参照値は、電子基準点「白井」の観測データを用いたスタティック測位による基線解析で求めた。表-1 に求めた参照値を示す。

(2) 解析手順

RTKLIB ver. 2.4.2 を使用し、24 時間データから移動局 B の 1 秒ごとの座標データを仰角マスク 15° で求めた。QZSS の衛星数の増加による精度向上について検証するため、解析は表-2 に示す 4 パターンで行った。算出した移動局 B の座標について、平均

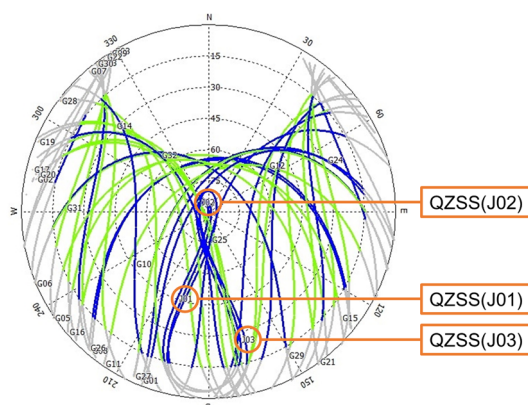


図-1 24 時間の天空図
(RTKLIB にて作成、仰角マスク 15°)

表-1 参照値

参照値	基準局 A	移動局 B
X 座標 (m)	-30571.329	-30571.479
Y 座標 (m)	20283.429	20276.501
標 高 (m)	45.352	45.348

表-2 解析パターン

解析 パターン	使用する衛星			
	GPS	QZSS (J01)	QZSS (J02)	QZSS (J03)
①	○			
②	○	○		
③	○	○	○	
④	○	○	○	○

値からのばらつきを示す標準偏差、参照値からのばらつきを示す RMS 誤差、HDOP、VDOP などをもとに精度の検証を行った。また、精度が向上した要因、および時間帯により精度にばらつきが出た要因について考察した。

3. 24 時間データを用いた解析結果と評価

(1) 統計値

解析によって得られた統計値を表-3 に示す。Fix 率はどのパターンでもほぼ 100%に近い値となった。各座標の平均値は参照値におおむね近い値となった。標準偏差、RMS 誤差を見ると、各座標とも QZSS の衛星数が増えるごとに値が小さくなっており、解析値のばらつきが小さくなっていることが確認できる。特に標高については、X 座標や Y 座標と比べ、大きく精度が向上していると言える。

(2) 分布図

24 時間データより求めた解析値と参照値をもとに、座標の各分布図(表-4)を作成した。

a) 平面分布図

表-4 の a) は平面座標 (Y 座標 - X 座標) の分布を示している。どのパターンにおいても解析値は 20mm 以内の範囲に収まっており、QZSS の衛星数が増えるごとにばらつきが小さくなっている。

b) 立面分布図

表-4 の b) は立面座標 (Y 座標 - 標高) の分布を示している。GPS のみの場合、解析値は 50mm 程度の範囲に散らばっているが、QZSS の衛星数が増えるごとにばらつきが小さくなり、QZSS を 3 機用いた場合では約 30mm の範囲に収まっている。

c) 標高の時系列変動図

表-4 の c) は時間ごとの標高の変動を示している。時間帯により解析値の上下のばらつきの幅は異なる

表-3 統計値

		① GPS のみ	② QZSS 1 機	③ QZSS 2 機	④ QZSS 3 機
Fix 率 (%)		99.985	99.984	99.976	99.980
平均 値	X 座標 (m)	-30571.479	-30571.478	-30571.478	-30571.478
	Y 座標 (m)	20276.498	20276.498	20276.498	20276.498
	標 高 (m)	45.348	45.347	45.347	45.347
標準 偏差	X 座標 (m)	0.00170	0.00157	0.00140	0.00128
	Y 座標 (m)	0.00136	0.00132	0.00130	0.00129
	標 高 (m)	0.00391	0.00339	0.00307	0.00278
RMS 誤差	X 座標 (m)	0.00177	0.00172	0.00164	0.00163
	Y 座標 (m)	0.00311	0.00304	0.00304	0.00300
	標 高 (m)	0.00393	0.00347	0.00321	0.00297

表-4 座標の各分布図

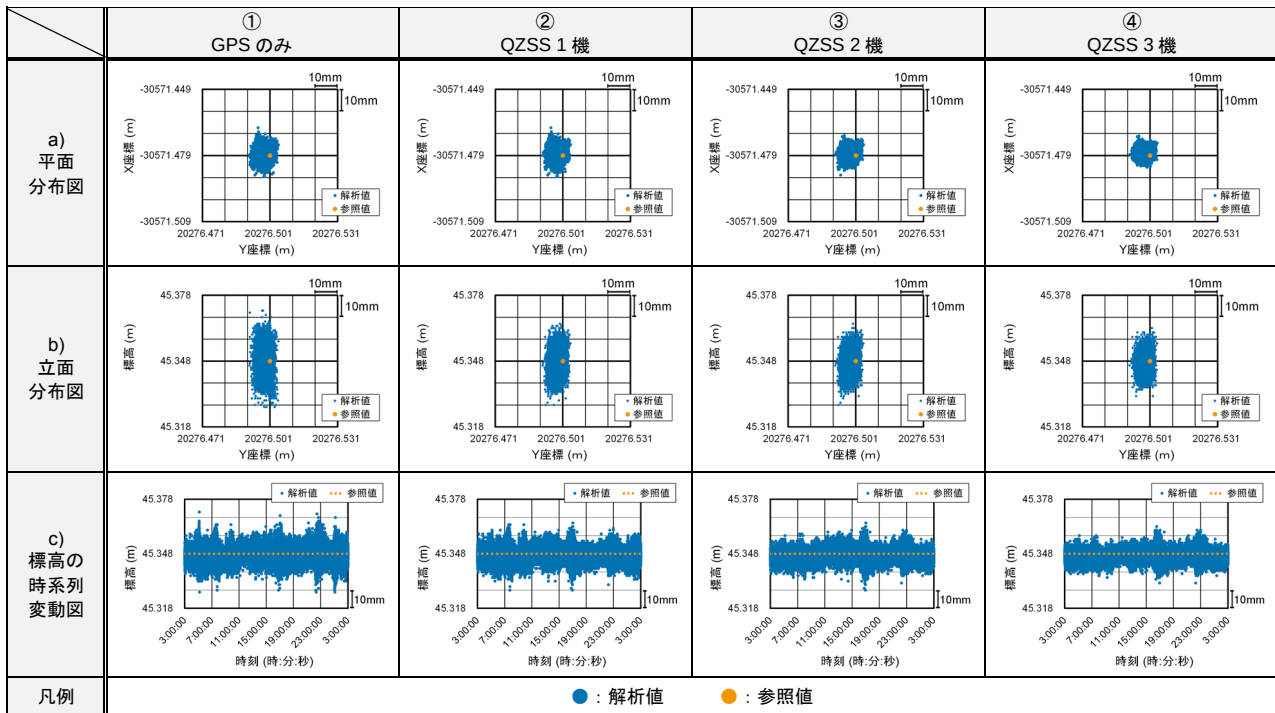


表-5 各 DOP の平均値

平均値	① GPS のみ	② QZSS 1 機	③ QZSS 2 機	④ QZSS 3 機
HDOP	1.226	1.157	1.110	1.070
VDOP	2.095	1.901	1.759	1.643

表-6 各 DOP の標準偏差

標準偏差	① GPS のみ	② QZSS 1 機	③ QZSS 2 機	④ QZSS 3 機
HDOP	0.252	0.230	0.219	0.199
VDOP	0.533	0.417	0.390	0.372

が、QZSS の衛星数が増えるごとにばらつきが小さくなっている。また、24 時間のうち UTC で 17 時頃と 23 時頃について、GPS のみを使用した場合でも QZSS を併用した場合でも共通して上下のばらつきの幅が特に大きくなっていることが確認できる。

(3) VDOP, HDOP

衛星の幾何学的配置が測位精度に及ぼす影響を示す指標として、精度劣化率 DOP (Dilution of Precision) がある⁴⁾。その中で、水平方向の精度劣化を示す水平精度劣化率 HDOP (Horizontal DOP) と、鉛直方向の精度劣化を示す鉛直精度劣化率 VDOP (Vertical DOP) について、各平均値、標準偏差を表-5、表-6 に示す。HDOP と VDOP を比較すると、VDOP に比べ HDOP の値が平均値、標準偏差ともに小さいことから、鉛直方向と比べ水平方向の精度が高いことがわかる。QZSS の衛星数で比較すると、QZSS の衛星数が増加するとともに DOP の平均値、標準偏差ともに小さくなっていることがわかる。特に VDOP について顕著に現れており、標準偏差は QZSS 3 機を併用した場合は GPS のみを用いた場合の 3 分の 2 程度となっている。

4. 測位精度に関する考察

(1) 最大仰角

図-2 は各時間帯で観測できる衛星のうち仰角が最も大きいものを抽出し、その仰角を時系列で示したものである。GPS のみを使用した場合と比較すると、QZSS が増えるごとに最大仰角が大きくなっていることがわかる。本実験時には、24 時間を通して最大仰角 70° 以上となることが確認できた。酒井ら³⁾の研究より、70° 以上の高仰角に位置している QZSS を使用することで鉛直方向の精度向上効果が高くなる可能性が示されていることから、今回の検証でも同様の結論が得られることが考えられる。

(2) 仰角ごとの観測衛星数

図-3、図-4、図-5 は、仰角 15° 以上における観測衛星数を仰角ごとに示したものである。QZSS を併用した場合、図-5 の仰角 60° 以上 90° 未満において衛星数の増加が顕著であることが読み取れる。GPS のみを使用した場合には高仰角に 1 機も衛星が存在していない時間があるのに対し、QZSS を 3 機併用した場合には 24 時間を通して高仰角に 2 機以

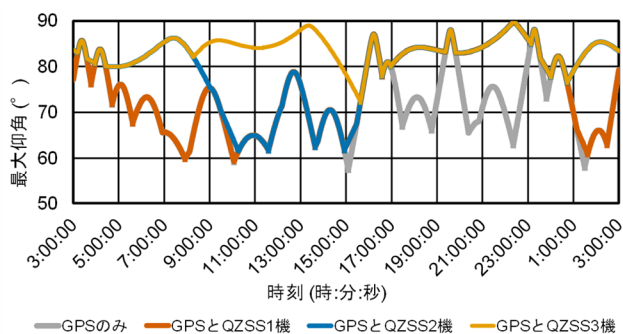


図-2 最大仰角

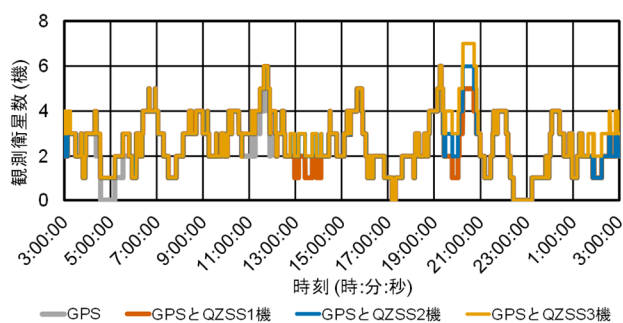


図-3 観測衛星数（仰角 15° 以上 30° 未満）

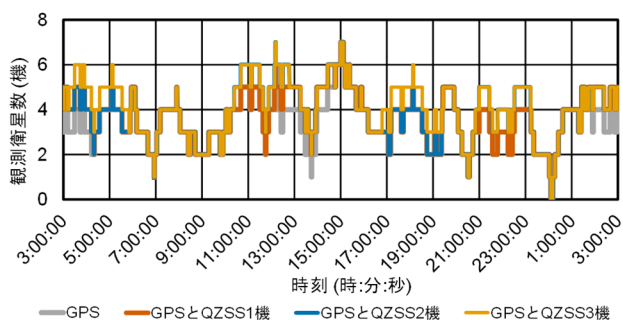


図-4 観測衛星数（仰角 30° 以上 60° 未満）

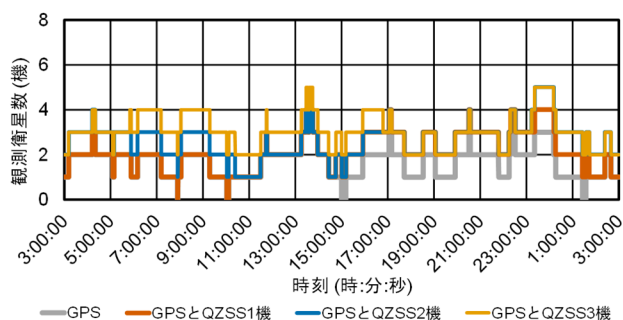


図-5 観測衛星数（仰角 60° 以上 90° 未満）

上存在していることが確認できる。このことから、高仰角に衛星が存在していることによる精度向上効果は高いことが考えられる。

また、ここで図-3 の 15° 以上 30° 未満の低仰角での衛星数に着目してみると、QZSS の併用の有無にかかわらず UTC で 17 時頃と 23 時頃において低仰角に衛星が 1 機も存在していないことがわかる。これは標高の時系列変動図での鉛直方向精度にばらつきのある時間帯と一致している。このことから、高仰角における衛星の存在だけではなく、低仰角も含めた広い範囲に衛星が分布していることが精度向上において必要な条件であることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、QZSS の衛星数増加に伴う精度向上効果についての基礎的な研究を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ QZSS を 3 機併用した場合において最も測位精度が向上することが確認できた。特に鉛直方向精度が大きく向上することがわかった。
- ・ QZSS の衛星数増加に伴って、高仰角に現れる衛星が増えることが確認できた。特に QZSS を 3 機併用した場合には、24 時間を通して仰角 70° 以上に衛星が現れることがわかった。
- ・ 高仰角だけではなく低仰角も含めた広い範囲に

衛星が分布していることが精度向上において必要な条件であると考えられる。

なお、今回使用したデータは建物の屋上で観測したものであることから、地平線上の天空を遮蔽する障害物がない状況であった。今後、天空に遮蔽物がある状況での観測も行い、精度向上について検証する必要がある。また、QZSS 4 機体制での精度の検証も行っていきたい。

謝辞：実験に際しては、株式会社ジェノバ（前 日本大学理工学部交通システム工学科）池田隆博氏にご協力いただきました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction, <<http://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>>, (入手 2018.5.30).
- 2) 内閣府 宇宙開発戦略推進事務局：準天頂衛星システム「みちびき」パンフレット, <http://qzss.go.jp/overview/download/isos7j0000000bl4-att/qzss_pamphlet_201803a.pdf>, (入手 2018.5.30).
- 3) 酒井昂紀・佐田達典・江守央：準天頂衛星の併用による GPS 測位の鉛直方向精度の向上効果に関する研究, 応用測量論文集, Vol.28, pp.109-119, 2017.
- 4) 近津博文・熊谷樹一郎・佐田達典・鹿田正昭・淵本正隆：空間情報工学概論, 公益社団法人日本測量協会, p.86, 2005.