

(69) 準天頂衛星の併用による GPS 搬送波位相測位 における鉛直方向精度の向上効果に関する研究

酒井 昂紀¹・佐田 達典²・江守 央³

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: csko16007@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.tatsunori@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: emori.hisashi@nihon-u.ac.jp

国土交通省は 2015 年に交通施設などのインフラ整備における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指す新しい取り組みである *i-Construction* を発表した。その中で ICT 技術の全面的な活用があげられているが、衛星測位技術はその中核を担っている。衛星測位は従来の GPS に加え GLONASS, QZSS 等の測位衛星を使用することで利用可能性は高まった。しかし、平面方向に比較し鉛直方向の精度が劣るため、高さ情報は ICT 施工では本格的には使われてはいない。本研究は、鉛直方向精度を向上させる方法の一つとして天頂付近に長時間滞留できるわが国の準天頂衛星 QZSS に注目し、その効果を検証するため、QZSS を併用した場合と GPS のみを使用した場合と比較して鉛直方向精度を仰角別に検討を行った。その結果、QZSS の仰角が 60° 以上では GPS のみの場合とほぼ同等の精度であったが、仰角 80° 以上では、QZSS を併用することで鉛直方向精度向上にわずかであるが有利になることがわかった。

Key Words : GPS, QZSS, vertical accuracy, elevation

1. はじめに

国土交通省は 2015 年に交通施設等のインフラ施設における生産性を向上させ、魅力ある建設現場を目指す新しい取り組みである *i-Construction*¹⁾ (アイ・コンストラクション) を発表した。*i-Construction* の取り組みの中に ICT 技術 (情報通信システム) の全面的な活用があり、衛星測位、レーザスキャナ測量等の 3 次元データを導入することで測量にかかる時間の短縮が期待できるとされている。

衛星測位に関しては、従来は GPS (Global Positioning System) のみを使用していたが、近年はロシアの GLONASS、日本の準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)、EU の Galileo 等を使用し、使用可能衛星を増やすことで衛星測位ができる範囲や時間帯の拡大により測位の利用可能性を高めることが期待されている。

衛星測位の特徴として水平方向には衛星が満遍なく配

置されているため高い測位精度が期待できる。しかし、鉛直方向は地平線より下にある衛星の信号を受信できないため、水平方向よりも測位精度が低下する傾向があるため、現段階では高さ情報は ICT 施工では本格的に使われていない。

衛星測位の鉛直方向精度向上に関する研究として酒井ら²⁾は測位に使用する衛星の配置と鉛直方向精度に関する研究を行った。この研究では、測位に使用する衛星の位置 (仰角, 方位角) に注目し、鉛直方向精度が最も良くなる衛星の組み合わせを選ぶ基準を明らかにすることを目的とした。その結果、仰角 60° 以上の高い仰角に位置する衛星を使用することで鉛直方向精度が向上することを示した。

わが国の衛星である QZSS は、8 の字軌道³⁾を有し (図-1)、日本のほぼ真上に長時間滞留できるため、GPS と比較して高い仰角に位置する時間が長い。そのため、GPS と比較して QZSS を併用して測位することで鉛直方向精度が向上することが期待できると考えられる。

本研究では 24 時間の観測データを用いて解析を行い、QZSS を使用した場合での鉛直方向精度の向上効果について GPS のみを使用した場合と比較して仰角別の検討を行うことを目的とする。

2. 衛星位置と鉛直方向精度に関する測位実験

(1) 実験手順

日本時間 2016 年 6 月 26 日 9:00–6 月 27 日 9:00 に日本大学理工学部船橋キャンパス 7 号館屋上にて GPS, QZSS を使用し、データ取得間隔 1 秒のキネマティック測位を 24 時間行った。屋上で測位実験を行ったため、地平線上の天空を遮蔽する建物がほぼない。そのため、上空に配置している衛星はすべて観測可能である。図-2 に示すように基準局 A と移動局 B の双方に GNSS アンテナ・受信機を設置した。受信機はトリンプル社製の NetR9 を使用した。基準局 A と移動局 B の参照座標は、据え付け誤差を無くすため実験日と同じ日に千葉県白井市にある電子基準点「白井」の 24 時間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。参照座標を求める際に使用した解析ソフトは Trimble Business Center である。



図-1 QZSS 衛星の軌道 (出典：内閣府 HP)



図-2 実験状況

(2) 解析手順

キネマティック測位で観測した 24 時間データ (日本時間 6 月 26 日 9:00~翌日 9:00) で 1 秒ごとの B 点の座標データを求めた。解析は観測データ 1 時間ごとに区切り、全ての解析で使用する衛星の数を同じにするため基線解析に必要な衛星の最低個数である 4 機の GPS, QZSS を 1 時間毎に選択し解析を行った。

QZSS を併用した場合において鉛直方向精度が向上するかを検証するため、最大仰角に位置する衛星として QZSS を使用した場合と GPS を使用した場合との比較を行う。また、QZSS は L1, L2 の他に L5 を送信しているが、GPS には L5 を送信していない衛星がある。そこで、L5 信号の使用有無による影響を評価するため、最大仰角に位置する衛星が QZSS (L5 あり), GPS (L5 あり), GPS (L5 なし) の 3 つに分けて解析を行った。具体的には、以下の条件に決定した。

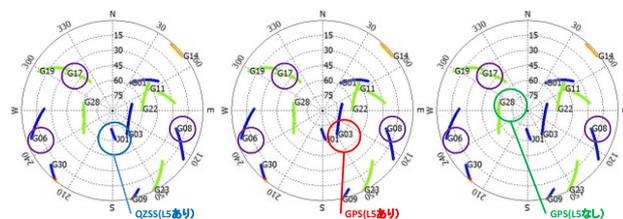
条件 A: QZSS (L5 あり) と仰角 15° 以上に配置する GPS から 3 機の組み合わせ

条件 B: 最大仰角に位置する GPS (L5 あり) と仰角 15° 以上に配置する GPS から 3 機の組み合わせ

条件 C: 最大仰角に位置する GPS (L5 なし) と仰角 15° 以上に配置する GPS から 3 機の組み合わせ

図-3 は条件 A, B, C の一例である。なお、最大仰角以外の衛星 3 機は各パターンとも L5 信号の有無に関わらず GPS を使用した。

衛星を 4 機選択して 1 秒毎に基線解析を行い移動局 B の位置を算出し、白井の電子基準点により求めた移動局 B の参照値 (表-1) との較差、標準偏差を求めた。各条件の最大仰角ごとの標高値の統計値を作成し、衛星の仰角と鉛直方向精度との関係を検証した。また、参照値を基準として $\pm 0.02\text{m}$ の区間で標高のヒストグラムを作成し、仰角ごとの各条件の頻度分布を検証した。なお、較差が 0.1m 以上のデータは外れ値として本解析から除外した。



条件 A 条件 B 条件 C

図-3 条件別の衛星組み合わせ例 (天空図)

表-1 参照値

参照座標	基準局A	移動局B
X座標 (m)	-30571.332	-30571.480
Y座標 (m)	20276.422	20276.499
標高 (m)	45.402	45.389

表-2 標高の統計値 (最大仰角 50° 以上 60° 未満)

条件	A	B	C
	QZSS(L5あり)	GPS(L5あり)	GPS(L5なし)
総データ数	20620	81239	90613
Fix解の数	16993	52368	63142
Fix率 (%)	82.4	64.5	69.7
基準値内の数 (標高較差0.1m以内)	16969	52325	63104
外れ値の数	24	43	38
平均値 (m)	45.388	45.388	45.389
標準偏差 (m)	0.010	0.009	0.009
RMS誤差 (m)	0.015	0.012	0.012

表-4 標高の統計値 (最大仰角 70° 以上 80° 未満)

条件	A	B	C
	QZSS(L5あり)	GPS(L5あり)	GPS(L5なし)
総データ数	65294	79757	134367
Fix解の数	36665	55510	96142
Fix率 (%)	56.2	69.6	71.6
基準値内の数 (標高較差0.1m以内)	36634	55459	96084
外れ値の数	31	51	58
平均値 (m)	45.393	45.388	45.389
標準偏差 (m)	0.007	0.006	0.007
RMS誤差 (m)	0.010	0.009	0.009

表-3 標高の統計値 (最大仰角 60° 以上 70° 未満)

条件	A	B	C
	QZSS(L5あり)	GPS(L5あり)	GPS(L5なし)
総データ数	21346	178502	150309
Fix解の数	14617	129053	100972
Fix率 (%)	68.5	72.3	67.2
基準値内の数 (標高較差0.1m以内)	14602	129041	100844
外れ値の数	15	12	128
平均値 (m)	45.388	45.387	45.386
標準偏差 (m)	0.009	0.008	0.009
RMS誤差 (m)	0.014	0.010	0.012

表-5 標高の統計値 (最大仰角 80° 以上)

条件	A	B	C
	QZSS(L5あり)	GPS(L5あり)	GPS(L5なし)
総データ数	104930	24904	52648
Fix解の数	75643	15789	37026
Fix率 (%)	72.1	63.4	70.3
基準値内の数 (標高較差0.1m以内)	75616	15779	37024
外れ値の数	27	10	2
平均値 (m)	45.390	45.388	45.386
標準偏差 (m)	0.006	0.007	0.007
RMS誤差 (m)	0.009	0.009	0.010

3. 実験の解析結果と評価

(1) 統計値から見た仰角ごとの解析結果

表-2 から表-5 は標高の標準偏差, 参照値を基準とする RMS 誤差等の統計値を示している. 表-2 は最大仰角 50° 以上 60° 未満, 表-3 は最大仰角 60° 以上 70° 未満, 表-4 は最大仰角 70° 以上 80° 未満, 表-5 は最大仰角 80° 以上でのそれぞれの統計値を示す. なお, RMS 誤差は測定値の参照値との近さを表すもので正確度の統計量である.

各条件の結果を最大仰角ごとに見ると, 各条件とも最大仰角衛星の仰角が大きくなるに従い標高の標準偏差, RMS 誤差が小さくなり, 鉛直方向精度が向上している.

総データ数を見てみると仰角 80° 未満では条件 A が他の条件より総データ数が少ない. しかし, 仰角 80° 以上になると条件 A が他の条件よりデータ数が多くなった. QZSS は, 仰角 80° 以上の滞在時間が GPS より長いためデータ数が多くなったと考えられる.

標高の標準偏差を見てみると, 各条件とも最大仰角が大きくなるにつれて標準偏差が小さくなるのがわかった. 条件別に見てみると, 仰角 80° 未満では GPS のみを使用した B 条件, C 条件がわずかに有利となる結果となったが, 仰角 80° 以上になると QZSS を使用した条件 A がわずかに有利となる結果となった.

RMS 誤差を見てみると, 最大仰角が大きくなるにつれて各条件とも RMS 誤差が小さくなる. 条件別に見ると仰角 80° 未満では GPS のみを使用した条件 B, 条件 C がわずかに有利となる結果となったが, 仰角 80° 以上では QZSS を用いた条件 A が条件 B と同じ値になる結果

となった.

(2) ヒストグラムから見た仰角ごとの解析結果

図-4 から図-6 は標高のヒストグラムを示す. 図-4 は仰角 60° 以上 70° 未満, 図-5 は仰角 70° 以上 80° 未満, 図-6 は仰角 80° 以上でのヒストグラムを示す. 橙色の棒は参照値を含むレンジを表している.

図-4 を見ると, GPS のみを使用した条件 B, 条件 C では左右対称の形となった. 特に条件 B では参照値を含むレンジが最頻値となったので正確性は高い. しかし, QZSS を使用した条件 A は左右対称の形にならず, バラツキの幅が大きい. このことから, 仰角 60° 以上 70° 未満では QZSS を使用した場合, 鉛直方向誤差が大きいことがわかった.

図-5 を見ると, 各条件とも左右対称の形となり GPS のみを使用した条件 B, 条件 C では参照値を含むレンジが最頻値となった. しかし, QZSS を使用している条件 A では参照値より大きい 49.394m 付近のレンジが最頻値となった. このことから, 仰角 70° 以上仰角 80° 未満では GPS のみを使用した条件の方が鉛直方向精度が高いことがわかった.

図-6 を見ると, 各条件とも左右対称の形となり, QZSS を使用した条件 A では参照値を含むレンジが最頻値となった. 条件 B では参照値より僅かに小さい 45.388m 付近のレンジが最頻値となり, 条件 C では参照値より小さい 45.385m 付近のレンジが最頻値となった. このことから, 仰角 80° 以上では QZSS を使用した条件の方が鉛直方向精度がわずかながら高いことがわかった.

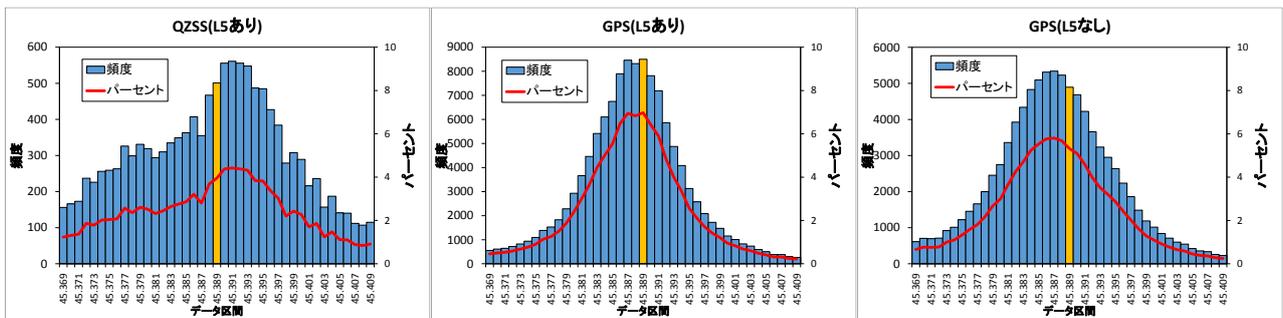


図-4 標高のヒストグラム（最大仰角 60° 以上 70° 未満）
（左：条件 A，中央：条件 B，右：条件 C）

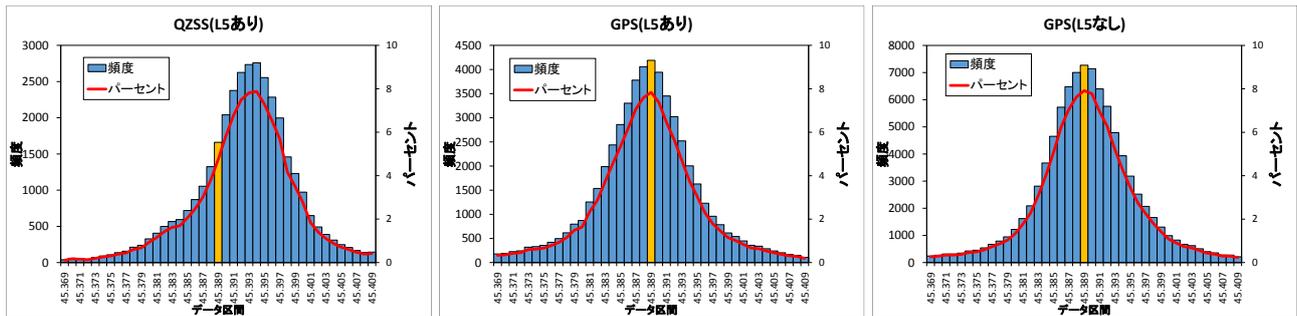


図-5 標高のヒストグラム（最大仰角 70° 以上 80° 未満）
（左：条件 A，中央：条件 B，右：条件 C）

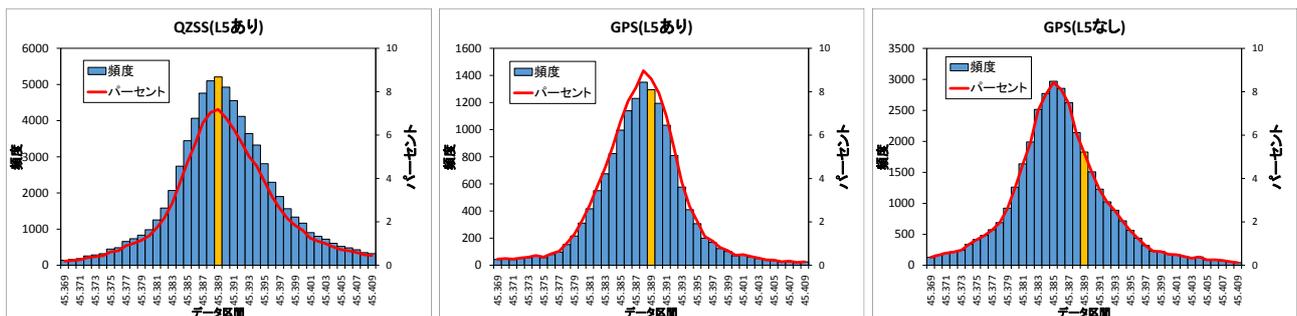


図-6 標高のヒストグラム（最大仰角 80° 以上）
（左：条件 A，中央：条件 B，右：条件 C）

4. おわりに

本実験は、QZSS を使用した場合での鉛直方向精度の向上効果について GPS のみを使用した場合と比較して仰角別に実験を行った。その結果から以下のことがわかった。

- 測位に使用する衛星の最大仰角が大きくなるほど、標高の標準偏差、RMS 値は小さくなり、鉛直方向精度が向上した。
- 最大仰角が 80° 未満では QZSS を使用した場合、GPS のみよりも鉛直方向精度は若干劣るが、最大仰角が 80° 以上ではわずかではあるが精度が高くなる。

以上のことから、仰角 80° 以上で QZSS を併用することで鉛直方向精度の向上が見られた。

今後は、同様の実験を異なる環境で行い、鉛直方向精度向上効果を検証していきたい。また、2017 年中に打ち上げられる QZSS の 2 号機から 4 号機の効果に関しても検討をしていきたい。

謝辞

本研究は平成 28 年度科学研究費助成金（基盤研究 C）26420521 の助成を受けた。ここに記して謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) 国土交通省：i-Construction ～建設現場の生産性向上の取り組みについて～，
www.mlit.go.jp/common/001113551.pdf（入手 2017.1）。
- 2) 酒井昂紀・佐田達典・江守央・池田隆博：測位に使用する衛星の配置と鉛直方向精度に関する研究，応用測量論文集，vol.27，pp.67-76，2016。
- 3) 内閣府：みちびき（準天頂衛星システム），
<http://qzss.go.jp/index.html>（入手日付：2017.1）。