

QZSS による測位特性評価

-GPS 補完衛星としての効果検証-

An Evaluation of the QZSS Positioning Characteristics
- An Evaluation of Performance as GPS Complementary Satellite-

山本義幸[†]

Yoshiyuki YAMAMOTO

Abstract: This paper describes the positioning accuracy using QZSS (Quasi Zenith Satellites System). The QZSS is the first satellite positioning system in Japan. The first satellite, called as Michibiki in Japanese name, of QZSS was launched in November 2010. The QZSS has the two main characteristics, 1) Flying zenith over Japan and 2) GPS (Global Positioning Systems) complementary. Until now, the high positioning accuracy by only the GPS can not observed in the urban area and mountainous area because the signals from the GPS are reflected by high-rise buildings. Under the satellite positioning environment on the ground level, it is expected that the positioning accuracy could be improved using the QZSS, which has the satellite located near zenith over Japan any time. For the main characteristics above mentioned, how the positioning accuracy by the combination of the QZSS and the GPS was examined in this research. The results showed that the positioning accuracy by the combination of the QZSS and the GPS was higher than that by only the GPS.

1. はじめに

QZSS(Quasi Zenith Satellite System:準天頂衛星システム(みちびき))の初号機が日本で初めての測位衛星として平成 22 年 9 月に打ち上げられた。本衛星システムは、アメリカの測位衛星 GPS の補完衛星として位置づけされている。QZSS の最大の特徴としては、長時間にわたって日本の天頂に位置するような軌道をとることである。このような特徴的な軌道は、日本特有の狭いエリアに都市が集積し、ビルなどの隣立によって測位衛星からの信号を確保するための上空視界があまりよくないことが背景として設定されている。現在は、1 機のみが打ち上げられているが、今後、2 機以上の打ち上げが予定されており、24 時間にわたって 1 機以上が日本の上空に位置する測位体制とする方向で計画されている。

[†] 愛知工業大学 工学部 電気工学科(豊田市)

本研究は、昨年打ち上げられた国産測位衛星 QZSS による測位特性について、QZSS の特徴である天頂に位置する点に焦点をあて、当初目的である GPS 補完衛星としての位置づけから GPS による測位結果と対比しとりまとめたものである。

2. QZSS(準天頂衛星システム(みちびき))

QZSS は、現在は初号機しか打ち上がっていないが、今後は初号機を含め 3 機以上の測位衛星でのシステム運用が予定されている。地上軌跡は、図-1 のような 8 の字形であり、他の衛星のように地球を周回するような地上軌跡とは大きく異なる。

衛星測位において、誤差要因の一つとしてマルチパスというものがある。マルチパスとは、衛星から発せられた電波が本来は受信機に直接的に受信されなくてはいけないが、建物や木などに反射してから受信機に到達す

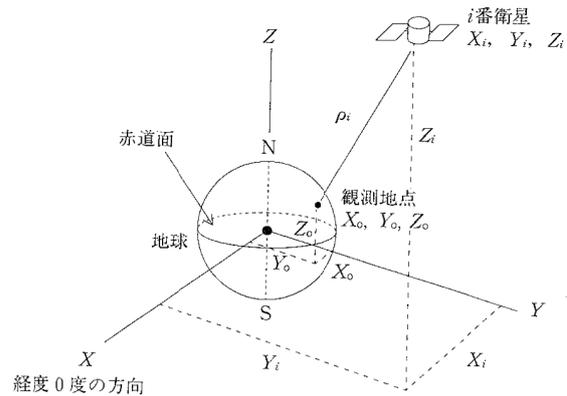
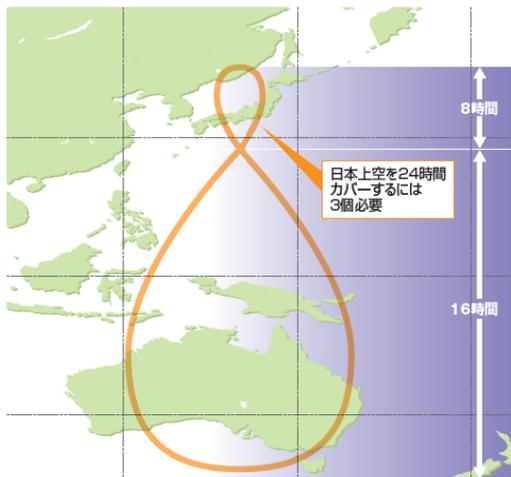


図-3 測位衛星と観測地点の幾何学的関係

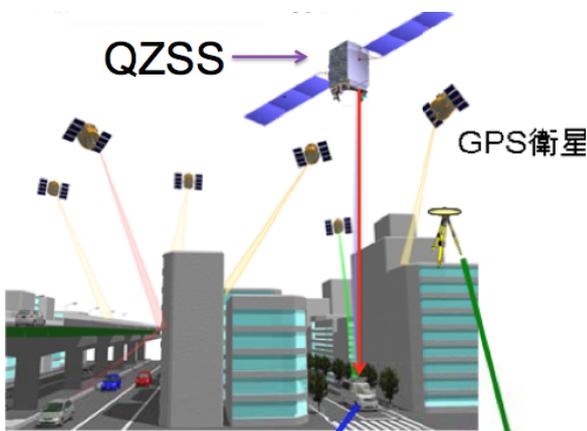


図-2 QZSS の特徴

ることをいう。このマルチパスが起こると、実際に測位したい場所の正確なデータが得られないため、データの精度が落ちてしまう。特に、日本は狭いエリアに都市が集積し、全球にわたって周回する GPS などの測位衛星からの信号はビルの谷間においてマルチパスが発生し、測位精度を低下させることが多かった。これに対して、図-2のようにQZSSは天頂に位置するためマルチパスの影響が少なく、ビルの谷間や山間部などの測位精度向上が期待されている。

3. 衛星測位

式(1)は、図-3 に示す観測地点（受信機設置点）と測位衛星の位置関係における衛星測位の基本式である。“測位”の定義は、観測地点の位置を算出することである。

$$\sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2} = c(\tau + \Delta\tau) = \rho_i + c\Delta\tau \quad (1)$$
 ここで、 X_i, Y_i, Z_i : 測位衛星の位置、 X_0, Y_0, Z_0 : 観測地点の位置、 c : 光速(299,792,458m/s)、 τ : 電波の到達所要時間、 $\Delta\tau$: 受信機時計誤差、 ρ_i : 疑似距離である。

(未知数)
 X_0, Y_0, Z_0 : 観測地点の位置
 $\Delta\tau$: 受信機時計誤差

(既知数)
 X_i, Y_i, Z_i : 測位衛星の位置
 c : 光速(299,792,458m/s)
 τ : 電波の到達所要時間
 ρ_i : 疑似距離 ($\rho_i = c\tau$)

図-4 測位計算におけるパラメータ

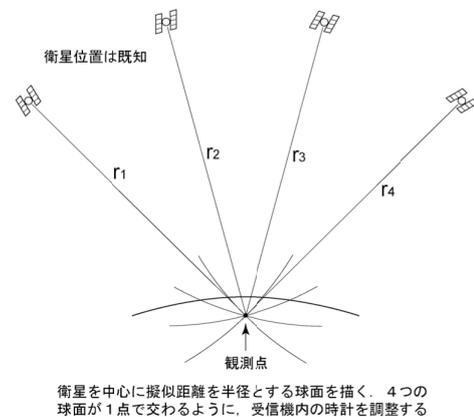


図-5 測位における衛星，観測点，距離の関係

式形としては、測位衛星から受信機までの距離に関する方程式となっている。図-4は、この方程式におけるパラメータの未知数，既知数をとりまとめたものである。測位衛星の位置 (X_i, Y_i, Z_i) は、衛星からの電波に載せられた情報から算出される。電波の所要到達時間 (τ) は、衛星からの電波に載せられた電波発射時の時刻とその電波が到達したときの受信機の時刻との差で算出される。疑似距離 (ρ_i) は、算出された電波の到達所要時間 (τ) と光速を乗じることによって算出される。よって未知数

のパラメータは、測位する観測地点の位置 (X_0, Y_0, Z_0) と受信機時計誤差 ($\Delta \tau$) の4つとなる。受信機時計誤差 ($\Delta \tau$) とは、測位衛星に搭載されている時計は原子時計で正確であるが、受信機の時計は腕時計程度のもので測位では無視できない程度の誤差であって、これは未知である。よって未知数は4つとなるので、図-5に示すように4つ以上の衛星と観測地点との距離に関する方程式を解くことによって観測地点の位置を算出(測位)することができる。

4. 標準偏差による測位精度評価

衛星測位結果で示される観測点の位置は、真の位置に対して誤差を含む。これを測位誤差という。測位結果で示される位置を \vec{x}_M , 真の位置を \vec{x}_T とすると、測位誤差 \vec{e} はこれらの差で式(2)で表される。

$$\vec{e} = \vec{x}_M - \vec{x}_T \quad (2)$$

測位誤差の統計的な様子は、測位精度といい、測位精度が高いというのは、誤差が小さく正確な測定が行われていることを指す。測定値の精度については、ばらつきの尺度である標準偏差により表されるのが一般的である¹⁾。標準偏差とはある系列の要素が平均値からどれだけばらついているかを表す値であって、系列 $e_i, i=1, \dots, n$ の標準偏差 σ_e は次式により定義される。

$$\sigma_e = \sqrt{V_e} \quad (3)$$

$$V_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 \quad (4)$$

ここで、 \bar{e} 系列 e_i の平均値、 V_e : 分散。

本研究では、上記で述べた手法によって取得した測位データの標準偏差を算出し、精度の良否を評価した。

5. 天空比による上空視界の定量化

QZSSは、天頂に位置し、ビルの谷間や山間部などこれまでGPSからの信号受信が良好でなかった場所での測位精度の向上が期待されている。そこで、本研究では、水平面から上空にわたる空間を撮影可能な魚眼カメラによって図-6のように上空視界を撮影し、天空比を算出した。天空比とは魚眼カメラ撮影画像(天空写真)のうち、建物や木などを除いた空の割合である。天空写真では、図-6に示すように中心に向かうにつれて仰角(高度角)の高い上空が撮影されており、上空を覆う地物と高度との関係が把握可能で、高度別の天空比の算出も可能となる。

6. 衛星配置の定量化: DOP(Dilution of Precision: 精度

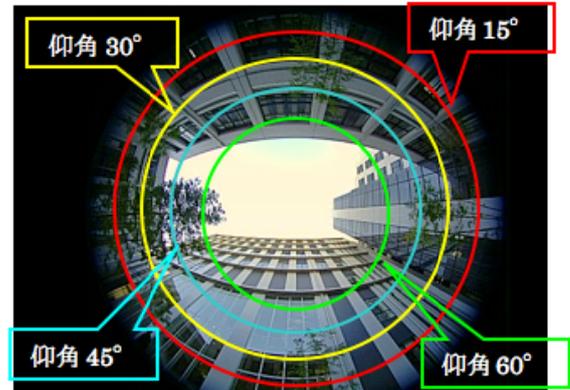


図-6 魚眼カメラの撮影画像(天空比0~25%)

低下率)

衛星の配置状態が測位精度に大きく影響することが知られている。その定量指標としてDOP(Dilution of Precision: 精度低下率)が提唱されている。図-7, 8は、測位に使用する衛星の位置関係が異なる場合の測位誤差への影響を示したものである。上述したとおり測位計算で使用する衛星から観測地点までの距離には誤差が含まれている。測位は、図に示すように各衛星からの距離を半径とする円の交差点が観測地点となる。しかしながら、距離の誤差があるため、測位計算で算出される観測地点は図において黒の網かけで示す範囲内となる。この範囲は、衛星が離れている場合と近づいている場合で異なり、衛星が離れるほど誤差範囲は狭くなり、すなわち測位精度が高い結果となる。この衛星配置が測位精度に与える影響を示す指標がDOPである。DOPは、衛星位置の高度角および方向角を基に次式を基本として算出される。

$$\begin{aligned} l_i &= \cos(el) \sin(az) \\ m_i &= \cos(el) \cos(az) \\ n_i &= \sin(el) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 l_i : 衛星位置のx方向成分、 m_i : 衛星位置のy方向成分、 n_i : 衛星位置のz方向成分、 i : 衛星番号、 el : 衛星位置の高度角、 az : 衛星位置の方向角である。

式(5)にて測位に使用する衛星位置のx, y, z方向を算出し、これらを成分とする行列Aにおいて式(6)(7)に示す計算式でDOPを算出する²⁾。

$$A = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{pmatrix}$$

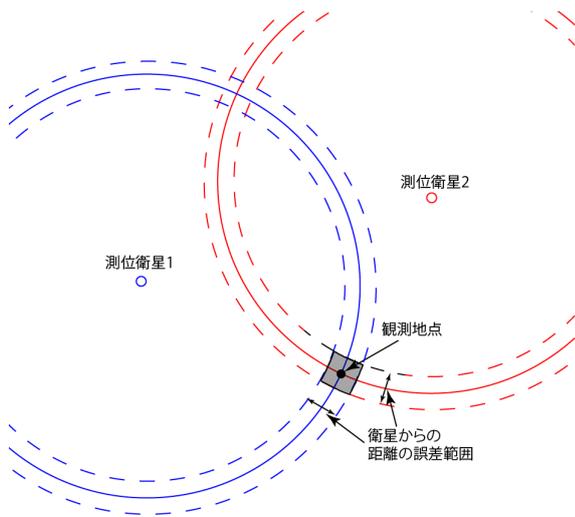


図-7 衛星の配置状態 (離れている場合)

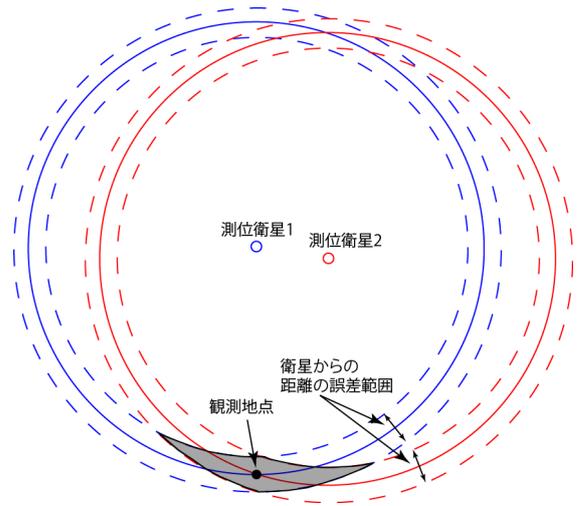


図-8 衛星の配置状態 (近づいている場合)

$$(A^T \cdot A)^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$DOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} \quad (7)$$

例えば, 図-9 における衛星配置においては, 以下のように算出される。

$$(A^T \cdot A)^{-1} = \begin{pmatrix} 8/9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8/9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16/3 & -10/3 \\ 0 & 0 & -10/3 & 7/3 \end{pmatrix}$$

$$DOP = \sqrt{(8/9) + (8/9) + (16/3)} = 2.67$$

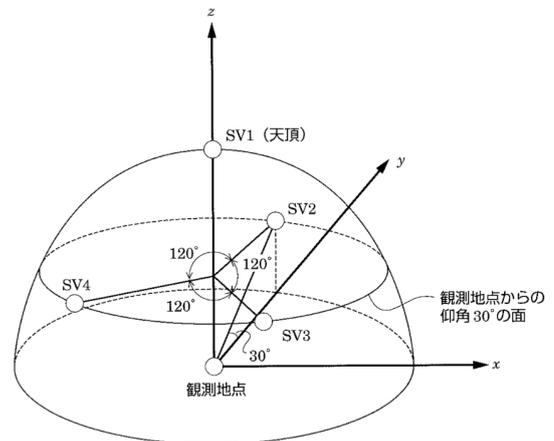


図-9 DOP 算出における衛星と観測地点の幾何学的モデル例

7. 測位特性評価

QZSS の特徴である天頂に位置するという点に焦点をあて, 校内のいくつかの地点において魚眼カメラにて上空を撮影し, 天空比が 0~25%, 25~50%, 50~75%, 75~100% の 4 地点を選定した。なお, 天空比が 75~100% の地点は, オープンスカイと呼ばれ衛星測位においては上空視界において衛星からの信号を遮断および散乱させる地物がない受信状態が最も良好な場所である。図-10 に観測地点の位置, 表-1 に観測地点での観測概況を示す。これら 4 カ所にて 24 時間 1 秒間隔で GPS ならびに QZSS の信号を受信し, 天空比の違いによる測位状況ならびに測位精度の評価及びこれらの評価結果を基に今後の QZSS



図-10 観測地点位置図

が 3 機態勢になった場合に測位精度がどのように変わるかシミュレートした結果を示す。

7・1 天空比の違いによる測位可能率

表-2は、天空比の違いによる測位可能率を示したものである。測位可能率は、式(8)で算出される。

$$\text{測位可能率} = \text{測位数} / 5760 \quad (8)$$

ここで、5760は24時間に15秒間隔で取得されるデータの総数である。

表から分かるように25～100%の天空比の地点では、GPSならびにGPS+QZSSにおいてもほぼ24時間にわたって測位されていることが示された。0～25%の天空比では、GPSならびにGPS+QZSSにおいてもおよそ6割の測位可能率であって、若干GPS+QZSSの測位可能率が上回った。総じて、GPSとGPS+QZSSの測位可能率に大きな差異は認められなかった。

7・2 天空比の違いによる測位精度評価

表-3は、15秒間隔で計算した天空比の違いによるGPSとGPS+QZSSの測位結果の標準偏差を示したものである。なお、図-11のように15秒ごとの測位結果を2次元座標上(東西、南北方向)にプロットし、さらに算出した標準偏差の範囲を描き視覚的な評価も重ねて行った。結果として、いずれの天空比においてもGPS+QZSSの方が標準偏差値が低く、すなわち、QZSSからの信号を利用した測位結果の方が高い精度を示した。天空比が75～100%のオープンスカイの地点では、東西方向ならびに南北方向ともに、標準偏差は1mを下回り高い測位精度を示した。天空比が下がるにつれ、いずれの方向における標準偏差は高くなっているが、これは、上空視界における建物によってマルチパスが生じ、それによる測位精度の低下が現れたものと思われる。もっとも、天空比0～25%の地点では、標準偏差が数10km程度と測位としての信頼性に乏しい結果が示され、上空の大部分を占める建物によってマルチパスが甚だしく発生したものと思われる。

7・3 衛星の配置状態(DOP)と測位精度の関係

図-12は、オープンスカイにおけるGPS+QZSSの衛星の配置状態(DOP)と測位精度の関係を示したものである。x軸はDOP、y軸は東西方向と南北方向の測位誤差から算出した水平誤差である。青色で示した点は、15秒間隔での算出結果を示しており、おおむねDOPが高くなるにつれ水平誤差の程度も高くなっていることが確認できる。赤色で示した点は、DOPの値の低いものから360個づつデータを取りまとめ、平均値をプロットしたものである。この赤色で示したデータにおいて、相関分析を行った結果、以下に示す近似式と相関係数が算出され、DOPと水平誤差において比較的高い相関性を確認した。

表-1 観測地点での観測概況

観測場所	観測日時	天空比
新1号館カフェ	7/14/14:20 ～7/15/14:20	0%～25%
機械棟屋上	11/24/15:00 ～11/25/15:20	25%～50%
7号館屋上	11/14/9:30 ～11/15/9:30	50%～75%
2号館屋上	7/11/11:30 ～7/12/11:30	75%～100% (オープンスカイ)

表-2 天空比の違いによる測位可能率

天空比(%)	GPS(測位数)	GPS+QZSS(測位数)
75～100	100%(5760)	100%(5760)
50～75	100%(5760)	100%(5760)
25～50	97.4%(5732)	97.4%(5736)
0～25	59.0%(3397)	61.8%(3561)

表-3 天空比の違いによる測位精度評価

天空比(%)	組み合わせ	標準偏差(m)	
		東西方向	南北方向
75～100	GPS	0.784	1.032
	GPS+QZSS	0.781	0.897
50～75	GPS	1.658	1.318
	GPS+QZSS	1.088	1.295
25～50	GPS	2.173	2.707
	GPS+QZSS	2.109	2.582
0～25	GPS	36428.086	18053.577
	GPS+QZSS	35581.987	17633.707

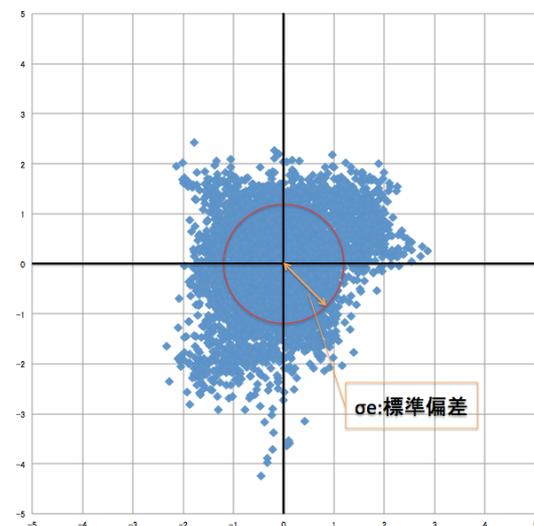


図-11 測位結果の視覚化

$$\text{水平誤差 (m)} = 0.67 \times (\text{DOP}) - 0.19$$

(相関係数: 0.726) (9)

360 個のデータは、1 時間 30 分の観測でのデータ数に相当する。通常、測量の分野における衛星測位観測は、1 時間から 2 時間程度である。よって、この相関解析でも見られたように、1 時間 30 分のタイムスパンにおいて DOP が測位精度に大きく関わることから、衛星の配置状態を確認して観測を実施する必要性を確認した。

7・4 3 機態勢の測位精度予測の結果

QZSS は、今は 1 機のみが日本上空を周回している。今後、2 機打上げられ 3 機態勢で必ず 1 機は日本の天頂に位置する運用が予定されている。そこで、3 機態勢になった場合、測位精度はどのような程度になるかについてのシミュレートを行った。上述の解析でも使用したオープンスカイでの GPS の 24 時間観測データにおいて QZSS が必ず 1 機天頂に位置する、すなわち毎時高度角 90°、方向角 0° の QZSS が 1 機存在するものとして DOP の再計算を行った。15 秒ピッチでの DOP を計算し、上述の解析と同様に DOP の低い値から 360 個ずつデータを平均し、図-12 で使用した今回観測した 1 機態勢での DOP と比較したものを表-4 に示す。1 機の場合、3 機態勢で必ず天頂に 1 機存在するとして計算した DOP ならびにその差を比較すると 1 機態勢の場合とこれから計画されている 3 機態勢での DOP では大きな差異は見られなかった。現段階では、今後上がる QZSS の後継機がどのような周期でどのような軌道を周回するかの情報が得られなかったため、予測計算において単純に 1 機は天頂にいるとして計算した結果であって、今後得られるより詳細な軌道情報等を入力データとすることによって本予測結果は変わる可能性がある。

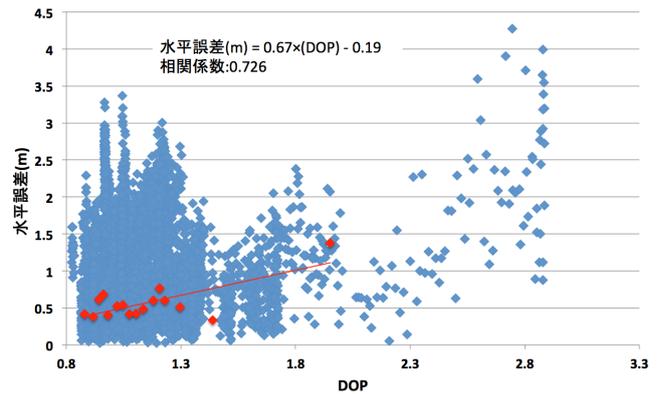


図-12 DOP と測位精度の関係

表-4 3 機態勢での DOP の予測結果

No.	DOP (1 機)	DOP (3 機)	差
1~360	0.90	0.90	0.00
361~720	0.93	0.95	0.02
721~1080	0.96	0.97	0.02
1081~1440	0.98	1.01	0.03
1441~1800	1.00	1.03	0.04
1801~2160	1.04	1.05	0.02
2161~2520	1.06	1.08	0.02
2521~2880	1.09	1.10	0.01
2881~3240	1.12	1.12	0.00
3241~3600	1.15	1.14	-0.01
3601~3960	1.19	1.17	-0.02
3961~4320	1.22	1.21	-0.01
4321~4680	1.24	1.26	0.02
4681~5040	1.31	1.33	0.02
5041~5400	1.45	1.53	0.08
5401~5760	1.96	2.05	0.09

8. まとめ

本研究は、一昨年打上げた国産初の測位衛星 QZSS の測位特性に関して、GPS の測位結果との比較検証から、QZSS の当初目的である GPS 補完衛星としての効果特性に焦点をあて評価を行った。結果として、測位可能率、測位精度ともに QZSS からの信号を含む測位計算によって向上が見られた。オープンスカイにおいては、標準偏差として 1m 以下の高い測位精度を確認した。ただし、天空比 0~25% の観測地点からの結果で見られたように、上空視界の悪い場所においては、マルチパスの影響は避けられず、実用として使える精度の保証は示されなかった。また、衛星の配置状態と測位精度との相関分析においては、有意な正の相関を確認した。15 秒間隔のデータを 360 個づ

つ、すなわち 1 時間 30 分の観測スパンでの平均値において相関性が確認されたわけであるが、通常、測量の分野で行われる観測スパンに相当する結果であり、今後、QZSS を活用した衛星測位の作業規定作成において有用な知見と考えら得る。3 機態勢での DOP の予測解析では、大きな DOP の向上、すなわち測位精度の向上が予想される結果は得られなかったが、3 機態勢での軌道情報が明らかとなり、3 機全てからの受信が可能な衛星配置などであれば捕捉する衛星の配置状態が向上することが予想され、今回の予測結果より高い精度向上がみられる可能性がある。今後、測位精度を向上させるための課題として、マルチパスなどの障害による影響について観測データや

DOPなどを確認し、エラー原因を追及する点が挙げられる。また今回の研究での測位計算は、いわゆる単独測位によるものであり、相対測位などの測位手法や計算手法を変えることによって測位精度特性がどのようになるかに関しても今後の検討課題としてあげられる。

謝辞

本研究は、JAXAが実施している準天頂衛星初号機「みちびき」の技術実証実験計画の一環である多地点・多利用形態におけるGPS補完性能の検証実験に参加したものである。さらに、平成23年度愛知工業大学教育・研究特別助成によって行った。関係各機関に謝辞を表す。

参考文献

- 1)坂井丈泰：GPS 技術入門,東京電機大学出版局,東京, 2009
- 2)佐田達典：GPS 測量技術,オーム社, 東京, 2009