

## マルチ GNSS による測位特性評価

### An Evaluation of the Multi GNSS Positioning Characteristics

山本義幸<sup>†</sup>

Yoshiyuki YAMAMOTO

**Abstract:** This paper shows the positioning accuracy by the multi-GNSS (Global Navigation Satellite Systems). In the field of the satellite positioning systems, the GPS (Global Positioning Systems), which is maintained by the United States government, is very famous in the world. Recently, the GLONASS (Global Navigation Satellite System:Russia), the Galileo (EU), the Baidu (China) and the QZSS (Quasi Zenith Satellite System: Japan) are running and are freely accessible by anyone with a receiver. The GNSS is defined as space-based positioning system environment using mutually these satellite systems. However, it has not been clearly indicated that how positioning accuracy using the multi-GNSS are resulted because there are not many receivers of the GNSS for consumers in the world. In this research, the signal information from the multi-GNSS was received by being applied in JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)'s QZSS Experiment. The results from processing the signal information showed that the GNSS combination of the GPS and the QZSS has the highest positioning accuracy.

#### 1. はじめに

マルチ GNSS(Global Navigation Satellite System:全地球航法衛星システム)測位と呼ばれる衛星測位システムの利用が普及しつつある。これまでの衛星測位は、主に、アメリカの GPS(Global Positioning System)を利用したものがほとんどで、一般にも“衛星測位=GPS”として周知されている。これに対して、軍事的な緊張も弱まり、民間利用を念頭に置いた新たな測位衛星が宇宙空間を周回している。ロシアの GLONASS ならびに一昨年打ち上げられた日本の QZSS といった測位衛星の運用も安定しており、受信機メーカーもこれらの測位衛星からの信号受信への対応を進めている。このような状況で、従来の GPS だけを利用した衛星測位から、複数種の測位衛星を利用した測位へと進行しており、このような複数種の測位衛星を利用した全球的な測位システムをマルチ GNSS と呼んでいる。しかしながら、マルチ GNSS に対応した受信機が十分に市場に流通してないため、マルチ GNSS によ

る測位特性について十分な評価結果は示されていない。

本研究は、GPS、GLONASS、QZSS の 3 つの測位衛星で構成するマルチ GNSS の測位特性について、学内にて取得した測位衛星信号の受信データを基に測位計算を行い、測位精度検証を行うとともに、その精度に関わる要因分析を行った結果を示す。

#### 2. マルチ GNSS

表-1 は、マルチ GNSS として取り上げた測位衛星の概要を示したものである。GPS、GLONASS は、複数の軌道に 4〜8 機の衛星を配置しグローバルに周回する数十機態勢で運用している。QZSS は、現在、1 機のみ運用で日本からオーストラリアにかけての上空に滞在しており、今後 2 機以上を打ち上げ日本上空(天頂)に 24 時間位置する計画となっている。

図-1 は、学内の観測点にて 24 時間にわたって受信した GPS、GLONASS、QZSS および EU(欧州連合)が打ち上げた Galileo の全測位衛星からの信号の受信状況を示

<sup>†</sup> 愛知工業大学 工学部 都市環境学科(豊田市)

表-1 マルチ GNSS 測位衛星の概要

測位衛星	国	個数	周期	軌道数
GPS	アメリカ	32	約12時間	6
GLONASS	ロシア	24	約12時間	3
QZSS	日本	1	約24時間	1

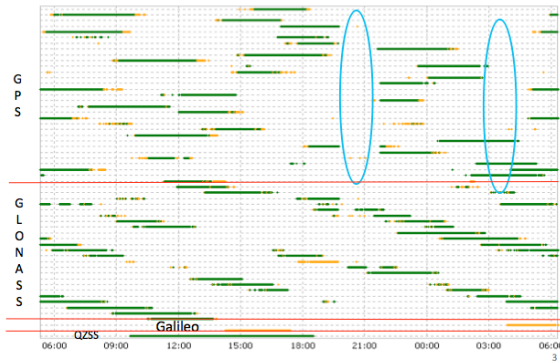


図-1 時間帯別 GNSS 信号受信状況

したものである。これは、衛星測位の分野では“可視性”と呼ばれる。図が示すように、各測位衛星は周回しているため信号は数時間単位程度での取得であり、GPS のみでは時間によっては信号を受信できない時間帯がある。例えば、図上の○の時間では GPS のみでは受信している衛星数が少ないが、GLONASS も含めると捕捉できる衛星数が多くなる。このような捕捉衛星数の向上、それに起因する測位精度向上などがマルチ GNSS のメリットとして期待されている。

### 3. 衛星測位

式(1)は、図-2 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。

$$\sqrt{(X_i - X_o)^2 + (Y_i - Y_o)^2 + (Z_i - Z_o)^2} = c(\tau + \Delta\tau) = \rho_i + c\Delta\tau \quad (1)$$

ここで、 $X_i, Y_i, Z_i$ : 測位衛星の位置、 $X_o, Y_o, Z_o$ : 観測地点の位置、 $c$ : 光速(299,792,458m/s)、 $\tau$ : 電波の到達所要時間、 $\Delta\tau$ : 受信機時計誤差、 $\rho_i$ : 疑似距離である。

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-3は、この方程式におけるパラメータの未知数、既知数を取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 ( $\tau$ ) 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 ( $\rho_i$ ) は、算出された電波の到達所要時間 ( $\tau$ ) と光速を乗じることによって算出される。よって

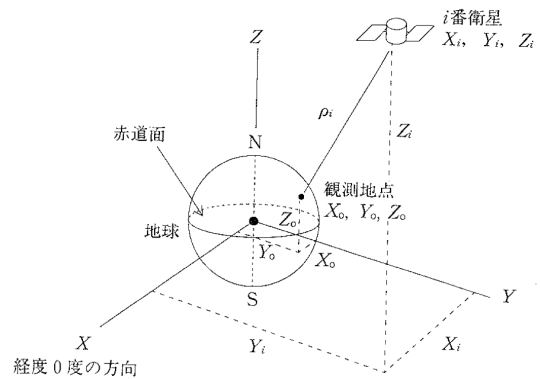


図-2 測位衛星と観測地点の幾何学的関係

(未知数)

$X_o, Y_o, Z_o$ : 観測地点の位置

$\Delta\tau$ : 受信機時計誤差

(既知数)

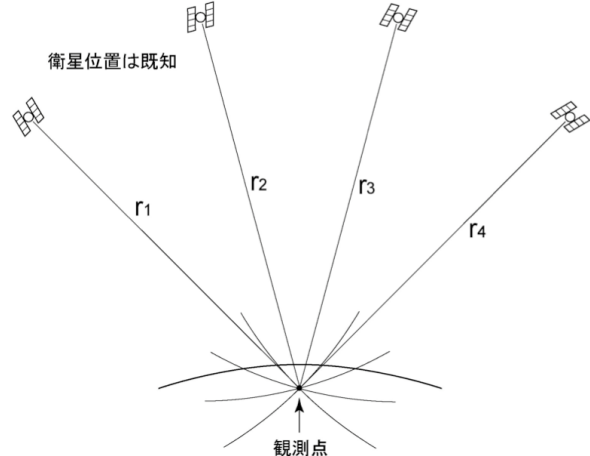
$X_i, Y_i, Z_i$ : 測位衛星の位置

$c$ : 光速(299,792,458m/s)

$\tau$ : 電波の到達所要時間

$\rho_i$ : 疑似距離 ( $\rho_i = c\tau$ )

図-3 測位計算におけるパラメータ



衛星を中心に疑似距離を半径とする球面を描く。4つの球面が1点で交わるように、受信機内の時計を調整する

図-4 測位における衛星、観測点、距離の関係  
未知数のパラメータは、測位する観測地点の位置 ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) 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-4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。

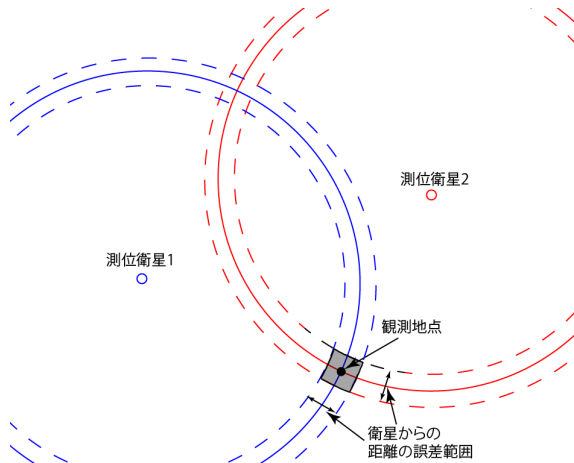


図-5 衛星の配置状態 (離れている場合)

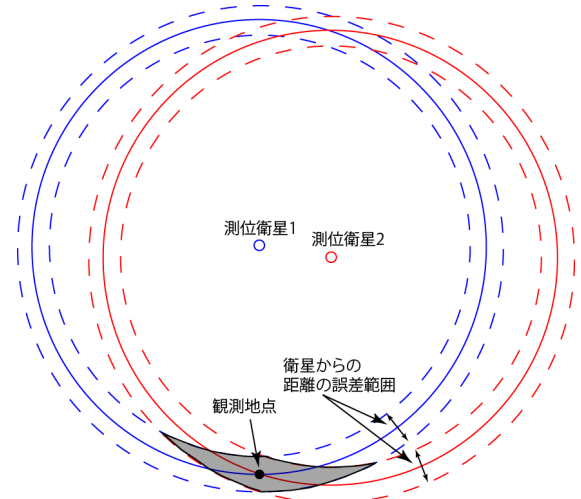


図-6 衛星の配置状態 (近づいている場合)

#### 4. 測位精度評価法

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 $\bar{x}_M$ 、真の位置を $\bar{x}_T$ とすると、測位誤差 $\bar{e}$ はこれらの差で式(2)で表される。

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

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<sup>1)</sup>。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 $\sigma_e$ は次式により定義される。

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

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

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、精度の良否を確認した。

#### 5. 衛星配置の定量化: DOP (Dilution of Precision: 精度低下率)

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-5, 6 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)に示す計算式で DOP を算出する<sup>2)</sup>。

$$A = \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 1 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 1 \\ l_4 & m_4 & n_4 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

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

$$DOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2}$$

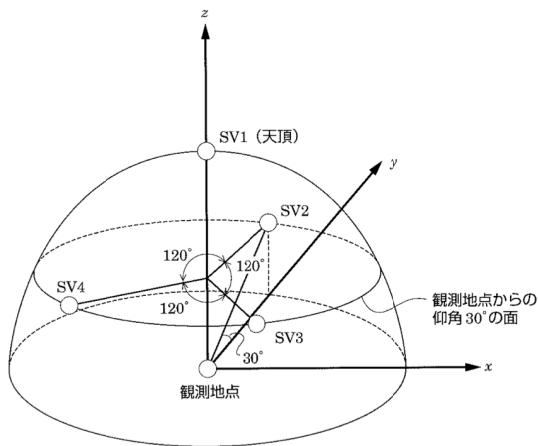


図-7 DOP 算出における衛星と観測地点の幾何学的モデル例

例えば、図-7 における衛星配置においては、以下のよう  
に算出される。

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

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

6. マルチ GNSS 測位特性評価

GNSS 測位解析において、本学 2 号館屋上で平成 23 年 7 月 11 日 11:30～平成 23 年 7 月 12 日 11:30 まで観測したデータを使用した。写真-1 は、受信機設置場所、写真-2 は設置地点の天空写真、写真-3 は観測で使用した受信機器である。天空写真で明確に分かるように上空視界は良好で測位衛星からの信号受信に影響を与える地物が存在しない地点として選定した。1 秒間隔で測位信号を受信したが、解析にあたっては、15 秒間隔の受信信号のデータを使用した。

測位解析対象とした GNSS の組合せは、GPS、GLONASS、QZSS の 3 つの測位衛星で組合せ可能な以下の 6 種類である。これらの組合せでの測位結果を示し、測位精度に与える影響に関する要因評価を行った。

- ・ GPS
- ・ GPS+GLONASS
- ・ GPS+QZSS
- ・ GPS+GLONASS+QZSS
- ・ GLONASS
- ・ GLONASS+QZSS

6・1 測位精度評価

表-2 に、GNSS の組合せ別の東西方向ならびに南北方向の標準偏差の一覧である。なお、図-8 のように 15 秒



写真-1 受信機設置場所 (本学 2 号館屋上)

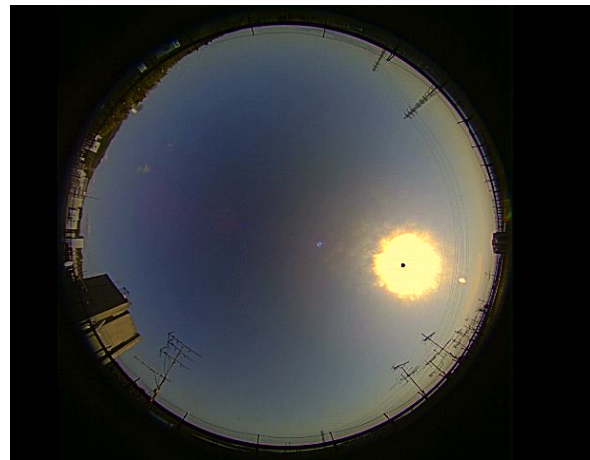


写真-2 受信機設置地点の天空写真



写真-3 受信機器

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。GPS が含まれる組合せの標準偏差は、おおむね、東西, 南北方向ともに標準偏差が 1m 程度という高い測位精度が示された。もっともよい測位精度を示したのは、GPS+QZSS であった。とりわけ南北方向において 90cm 程度の高い測位精度が示された。一方、GLONASS を含む組合せの測位精度は他の組合せと

## マルチ GNSS による測位特性評価

表-2 GNSS 測位精度結果

組み合わせ	標準偏差	
	東西方向(m)	南北方向(m)
GPS	0.784	1.032
GPS GLONASS	0.791	1.343
GPS QZSS	0.781	0.897
GPS GLONASS QZSS	0.828	1.207
GLONASS	3.550	4.538
GLONASS QZSS	112.622	112.057
	6機以上 3.369 5機 300.189	6機以上 3.727 5機 292.989

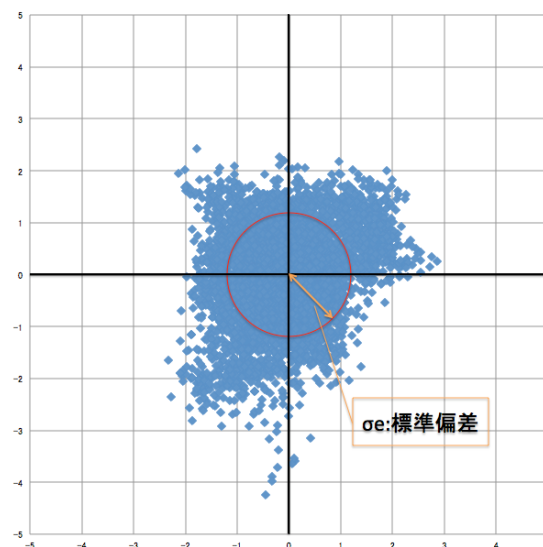


図-8 測位結果の視覚化

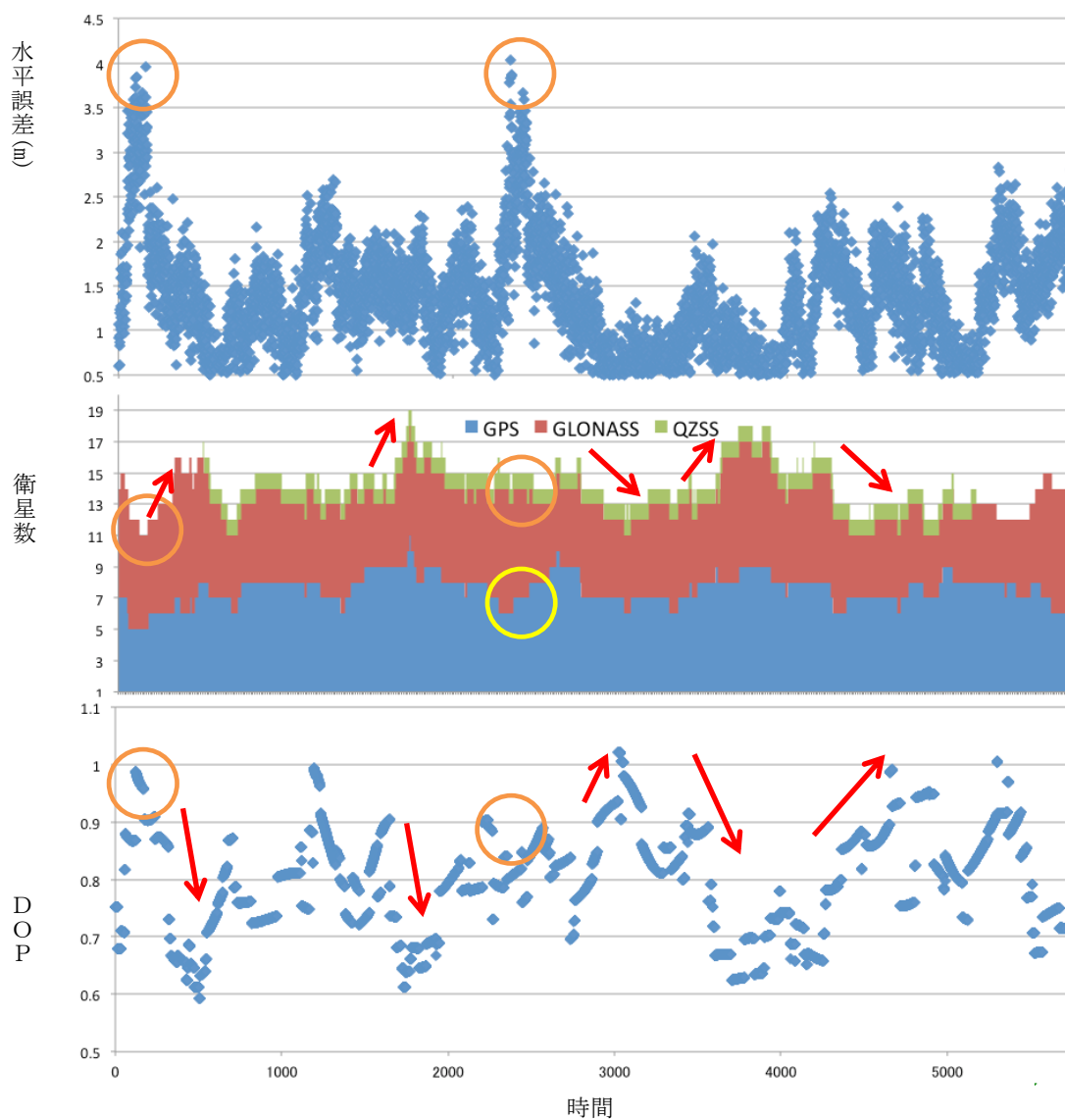


図-9 測位精度および測位環境の時間変化

比較して低い傾向が示された。GPS+GLONASS の標準偏差は、他の結果と同様に 1m 程度を示したが、GLONASS+QZSS の標準偏差は 100m 以上を示し、実用上として測位に利用できる結果は示されなかった。しかしながら、GLONASS+QZSS で 6 機以上の標準偏差では 3~4m 程度で大幅に精度が向上することが示された。さらに、GLONASS のみでの標準偏差よりも若干低い値が示された。5 機の場合にこのような大きな標準偏差となる要因については明確な結論を見いだすことはできなかった。既往の研究結果では、GLONASS 搭載の原子時計の誤差も指摘されており、測位計算手法の検討が必要なものと思われる。

## 6・2 測位精度および測位環境の時間変化による測位特性評価

図-9 は、本研究で設定した GNSS の組合せのうち可視衛星数の増加に伴う精度向上が期待される GPS+GLONASS+QZSS の測位精度と衛星数そして DOP の時間変化を表したものである。横軸が全て観測開始から終了までの 15 秒間隔の時間推移を示しており、縦軸は、15 秒ごとの、東西方向と南北方向の誤差から算出した水平誤差(m)、衛星数、DOP となっている。

衛星数は、GPS のみでは 6 機程度であるが、GLONASS が加わって常時 11 機程度の測位衛星からの受信が可能となることが示された。最低 4 機からの信号受信によって測位が可能なることを考えると十分な衛星捕捉数である。DOP に関しては、衛星数の増加に比例して DOP が低下する傾向が示された。DOP の低下は測位精度の向上につながるものであって、衛星数の増加にともなって、結果として、それらの衛星が全天に広がり高い測位精度が期待される良好な衛星の配置状態となったものと思われる。おおむね、この DOP の増減に応じて水平誤差も変動し、衛星の配置状態が測位精度に関わるというセオリーどおりの結果がみられた。例えば、観測開始付近の水平誤差が急増しその後急減している時間帯では、衛星数が 15 機から 11 機まで減少し、それから 16 機まで増加、それに応じて DOP も 0.7 から 1 程度まで上昇し、0.6 まで減少するという、水平誤差~衛星数~DOP の合理的な関連性が明確に確認される。しかしながら、観測期間の中盤の水平誤差が急増している時間帯では、観測開始時に見られた合理的関連性が明確には確認できなかった。しかしながら、衛星数の構成に着目してみると、GPS の衛星数の減少から増加へと転じている時間帯と一致しており、単純に衛星数の増減が水平誤差へ影響を与えるだけでなく、それを構成する衛星の種類と機数も水平誤差に影響を与えるものと思われる結果も示された。

## 7. まとめ

本研究では、昨今の測位衛星の充実にとまなう“GPS から GNSS へ”の流れにおいて、GNSS を利用した測位精度はどの程度であり、また、その測位精度はどのような特性を有するかについて実観測データを使用して検証を行った。測位精度に関しては、GPS を含む組合せにおいて、東西、南北方向ともに 1m 程度の標準偏差であった。最も精度が高い組合せは GPS と QZSS の組合せによるものであった。元来、QZSS は GPS の補完衛星として打上げられたものであって、諸仕様自体が GPS との併用で精度向上が上がるように設計されているため、このような結果が得られたのではないかと推測される。しかしながら、QZSS の地上軌跡は日本からオーストラリアにかけてのみであり、全球では利用できない点が短所である。一方、GLONASS が関連する組合せの測位精度は、他の結果と比較して低い結果が示された。これに関しては、測位計算手法自体の見直しが必要ではないかと考えている。測位精度に関わる要因特性としては、衛星数ならびに衛星の幾何学的配置を示す DOP をとりあげ分析を行った。結果としては、衛星数の増加に伴う DOP の改善が確認され、GNSS で最も期待されている“可視衛星数の増加→測位精度向上”を裏付ける結果が得られた。また、捕捉衛星の種類および数の構成が測位精度に与える影響も確認された。市販の受信機および解析ソフトウェアでは測位計算に使用する衛星を選択することが可能であり、実利用において測位精度を向上させる鍵として、GNSS による測位においては、測位計算に使用する衛星の選択基準の指針策定が今後の検討課題として考えられる。

## 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