

## マルチ GNSS を情報化施工に利用するための技術解説 Technical Description to Utilize Multi-GNSS for ICT Construction

### 測地観測センター

酒井和紀・山尾裕美・鎌苅裕紀・佐藤雄大・後藤清<sup>1</sup>・古屋智秋・辻宏道

### Geodetic Observation Center

Kazuki SAKAI, Hiromi YAMAOKA, Yuki KAMAKARI, Yudai SATO,  
Kiyoshi GOTO, Tomoaki FURUYA and Hiromichi TSUJI

#### 要 旨

国土地理院では、平成 23 年度から平成 26 年度にかけて、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）による高精度測位技術の開発」（以下「マルチ GNSS 総プロ」という。）を行い、その中で情報化施工の一部で用いられているリアルタイム測位に、マルチ GNSS を活用するための技術開発を行ってきた。その技術開発の一環として、リアルタイム測位を模した試験観測を行い、マルチ GNSS を活用した際の効果を検証したところ、特に上空視界が限られた場所でマルチ GNSS の効果が大きくなることが分かった。

#### 1. はじめに

GNSS（Global Navigation Satellite System / 全球測位衛星システム）を利用して位置情報を取得する場合、米国の GPS だけでなく、日本の準天頂衛星システム、ロシアの GLONASS、欧州連合の Galileo など、複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）を利用することによって、これまで GPS だけでは測位のできなかった都市部や山間部などの上空視界に制限のある場所でも、測位が可能となる範囲の拡大が可能となる。

近年、大規模な土木工事において、ICT（情報通信技術）を活用した情報化施工の導入件数が増えている。情報化施工とは、GNSS や TS（トータルステーション）などを利用して位置情報を取得し、建設機械を自動で制御するもので、作業効率及び品質が高く、大きな効果が期待される。また、国土交通省では、施工を含むあらゆる建設生産プロセスにおいて ICT 技術を全面的に導入するため、3 次元データを一貫して使用できるよう、新基準を整備したところである。

情報化施工で用いられているリアルタイム測位にマルチ GNSS を活用するための技術については、マルチ GNSS 総プロにより技術開発を進めてきた。

本稿では、主な GNSS の現状と今後の動向、情報化施工へのマルチ GNSS の導入により期待される効果、及び利用の際の留意事項等について報告する。

#### 2. マルチ GNSS とは

人工衛星から発信される測位信号を利用して位置を決定するシステムを衛星測位システムといい、複数の測位衛星（宇宙部分）、測位衛星の運用管理を行う管制局（地上部分）及び利用者の受信機とアンテナ（利用者部分）により構成されている。

衛星測位システムの総称を GNSS といい、代表的なものに米国の GPS がある。その他に、日本の準天頂衛星システム、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo などがあり、各国で整備が進められている。

GNSS を用いた測位を行う場合、4 機以上の衛星からの測位信号を同時に受信する必要がある。従来は GPS のみを利用するのが一般的であり、日本上空には GPS 衛星が常時 5～11 機程度飛んでいるため、上空視界の良い場所では衛星数を気にする必要はない。しかし、高層ビル街や山間部等の上空視界に制約のある場所では、衛星からの信号が建物や樹木、地形によって遮られてしまうため、GPS 衛星を同時に 4 機以上捕捉することが難しく、測位できない場合がある。

近年、各国の GNSS の整備により、GPS 以外の測位衛星が利用可能となってきたことから、複数の衛星測位システムを組み合わせる「マルチ GNSS」技術を用いることで、上空視界に制約のある場所でも測位が可能となることが期待され、また、使用可能な測位衛星の数が増加することによる測位精度の向上も期待されている。

#### 2.1 主な GNSS の現状と今後の動向

##### 2.1.1 GPS

GPS は米国の国防総省により開発された衛星測位システムである。GPS 衛星は L バンドの搬送波に CDMA（符号分割多元接続）方式で測距信号や航法メッセージを乗せて送信している。もともとは軍事利用目的で開発されたが、現在では測量に利用されるほか、カーナビゲーションやスマートフォンに機能が搭載されるなど、広く民生用に利用されている。2016 年 6 月現在、31 機の衛星が配備されている。

米国は GPS の性能向上の需要に応えるとともに国際的な競争力を保つため、GPS 近代化計画を進め

ている。GPS 近代化計画では、従来の L1 帯及び L2 帯搬送波や L1 C/A コードに加え、L5 帯搬送波や L2C コード、L1C コードといった新しい民生用の測位信号を加えることが計画されている。2005 年 9 月には、L2C コードを送信可能な GPS 衛星 (Block IIF) の初号機が打ち上げられ、2016 年 6 月までに 12 機が配備されている。また、2016 年以降、すべての近代化 GPS 信号 (L5 帯搬送波、L2C コード、L1C コード) を送信可能な GPS 衛星 (Block III) の打ち上げが予定されている。

### 2.1.2 準天頂衛星システム

準天頂衛星システムは、GPS の補強・補完を目的として日本で開発された衛星測位システムである。日本上空の滞在時間を長くするために、地球に軌道を投影した場合に非対称の 8 の字を描く「準天頂軌道」と呼ばれる軌道に衛星が配備されており、2010 年 9 月に初号機「みちびき」が打ち上げられた。GPS の補完を目的の一つとしており、GPS の民生用信号と同じ仕様の測位信号を送信している。また、GPS の補強を目的とした独自の信号 (L6 信号及び L1-SAIF 信号) も送信している。

現在、軌道に配備されている準天頂衛星は 1 機のみであるが、2018 年度から 4 機体制となる予定である。

### 2.1.3 GLONASS

GLONASS は旧ソビエト連邦により開発され、現在はロシアが運用している衛星測位システムである。2016 年 6 月現在、23 機の衛星が配備されている。GLONASS は GPS と異なり、FDMA (周波数分割多元接続) 方式で測位信号を送信しているため、異機種受信機間の基線解析において GLONASS を用いる場合には、GLONASS 受信機チャンネル間バイアス (Inter Frequency Bias, 以下「IFB」という。) を考慮する必要がある。なお、次世代 GLONASS (GLONASS-K, GLONASS-K2 及び GLONASS-KM) については、GPS 等との互換性を確保するため、従来の FDMA 方式に加え、CDMA 方式の信号を送信する予定である。

### 2.1.4 Galileo

Galileo は欧州連合により整備された衛星測位システムである。2011 年 10 月に最初の実運用機 2 機が打ち上げられ、2016 年 6 月現在、14 機の衛星が配備されている。GPS と同じ L1 帯 (E1)、L5 帯 (E5a) の搬送波を用いた民生用の測位信号が使用可能であり、2020 年までに 30 機体制の完全運用となる予定である。

## 2.2 マルチ GNSS を利用する際の留意事項

マルチ GNSS を利用し、異なる衛星測位システム間で位相差を取る解析を行う場合、衛星測位システムや受信機の組み合わせによっては下記のバイアスの補正が必要となる (古屋ほか, 2014, 国土地理院, 2015a)。

- **IFB (Inter Frequency Bias)**  
受信機回路を衛星によって異なる周波数の信号が通ることによって発生するバイアス。バイアスの大きさは受信機種によって異なるため、異機種受信機間における GLONASS を含めた解析の際に補正が必要となる。
- **ISB (Inter System Bias)**  
異なる衛星系の信号を処理する際に受信機回路で発生するバイアス。バイアスの大きさは受信機種によって異なるため、異機種受信機間における異なる衛星系間で位相差を取る解析では補正が必要となる。
- **L2P(Y)-L2C 1/4 サイクルシフト**  
L2P(Y)信号と L2C 信号の間で 1/4 サイクルのずれが存在するが、位相のずれの方向が受信機種によって異なるため、異機種受信機間における L2P(Y), L2C を併用した解析では補正が必要となる。

## 3. 情報化施工

平成 25 年 3 月に国土交通省が策定した情報化施工推進戦略では、情報化施工を「建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設生産プロセスのうち「施工」に注目して、ICT (情報通信技術) の活用により各プロセスから得られる電子情報を活用して高効率・高精度な施工を実現し、さらに施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用することによって、建設生産プロセス全体における生産性の向上や品質の確保を図ることを目的としたシステムである。」と定義している。

具体的には施工に関する技術として、施工箇所の設計データと現データの差分をオペレータに提供して建設機械の操作を補助する MG (Machine Guidance) 技術や、建設機械の自動制御を行う MC (Machine Control) 技術がある。また、施工管理に関する技術としては、TS を用いた出来形管理技術や、TS・GNSS を用いた盛土の締め固め管理技術がある。

情報化施工を導入することにより、土木構造物の施工品質向上や構造物の維持管理の効率化、工期短縮、施工作業の効率化、安全性の向上が期待される。

情報化施工における技術的要素としては、情報化通信技術、観測・計測技術、情報処理技術、遠隔操作技術等が挙げられるが、本稿では観測・計測技術

のうち、特に GNSS を用いた位置計測技術に焦点を当てる。

### 3.1 情報化施工における GNSS の利用

情報化施工では、位置計測技術の一つとして GNSS が利用されている。建設機械に取り付けた GNSS アンテナで測位衛星からの信号を受信し、建設機械の現在位置を計算により求める。情報化施工においては、計測した位置をその場で利用する必要があるため、RTK-GNSS 方式やネットワーク型 RTK-GNSS 方式を用いてリアルタイムで測位を行う。

#### 3.1.1 RTK-GNSS 方式

RTK-GNSS はリアルタイムキネマティック GNSS の略で、基準局（施工現場の座標既知点に設置した GNSS 観測局）の観測データを移動局（建設機械）の GNSS 受信機等に無線で送信し、移動局の観測データと合わせて処理することにより、移動局の位置をリアルタイムで計算する手法である。RTK-GNSS 方式で測位を行うためには、同時に 5 機以上の測位衛星の信号を受信する必要がある。

#### 3.1.2 ネットワーク型 RTK-GNSS 方式

ネットワーク型 RTK-GNSS 方式は、全国約 1,300 点に設置された GNSS 連続観測点である電子基準点のリアルタイムデータを用いて計算される補正情報を位置情報サービス事業者より取得し、移動局（建設機械）の位置をリアルタイムで計算する手法である。ネットワーク型 RTK-GNSS 方式では、施工現場に基準局を設置する必要がないため、基準局用の GNSS 機器を準備するコストや基準局設置のための測量の手間を省くことができる。また、通信手段として無線ではなく携帯電話等を用いるため、無線通信技師の資格が不要となる。ネットワーク型 RTK-GNSS 方式で測位を行うためには、同時に 5 機以上の測位衛星の信号を受信する必要がある。

### 3.2 情報化施工へのマルチ GNSS 導入により期待される効果

前章で説明したように、各国の衛星測位システムの整備が進行中であることを考慮すると、今後利用可能な衛星数が更に増えることが予想される。複数の衛星測位システムを一体的に利用するマルチ GNSS 技術を導入することにより施工現場上空に飛来するすべての測位衛星を利用することが可能となるため、都市部や山間部のように上空視界が限られていて GPS のみでは衛星数が確保できず測位が困難な施工現場でも、測位が可能となることが期待される。また、仰角マスクを適用しても十分な衛星数を確保できると考えられ、マルチパスの影響を抑え

て測位精度を向上させることも期待される。

写真-1 は都市部において観測を行った際の上空状況である。観測点の周囲にあるビルにより上空視界が制限されるため、GPS のみの場合、捕捉される衛星は 3 機となり測位ができない状況にある。しかし、マルチ GNSS を利用することで捕捉される衛星は 9 機となり、測位可能となる。

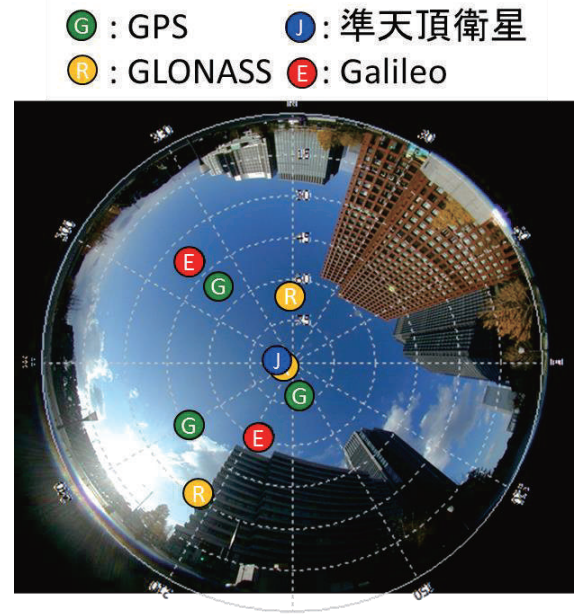


写真-1 平成 26 年 12 月 14 日 1 時 (UTC) における都市部での上空状況

図-1 は上空視界が良好な点を基準局とした、基準局と移動局の 2 地点間の、GPS のみによる L1 キネマティック解析とマルチ GNSS を用いた解析の結果を比較したものである。GPS のみを用いた解析では FIX 率が低くなっているが、マルチ GNSS を用いた解析では FIX 率が高く標準偏差が小さくなったことから、マルチ GNSS により改善していることがわかる。

### 3.3 情報化施工における GNSS 利用の留意点

RTK-GNSS やネットワーク型 RTK-GNSS を利用することによりリアルタイムで高精度な測位結果が得られるため、情報化施工における位置計測技術として利用が進んでいる。しかし、施工現場の状況によっては GNSS の利用に向かない場合もある。上空に飛来する測位衛星の数は時々刻々と変化するため、例えば、都市部のビル街や山間部のように上空視界が制限された場所では、時間帯によって測位に必要な衛星数を確保できない場合がある。また、あまりに上空視界が狭い場所では、時間帯によらず、測位に必要な衛星数を確保できない場合もある。



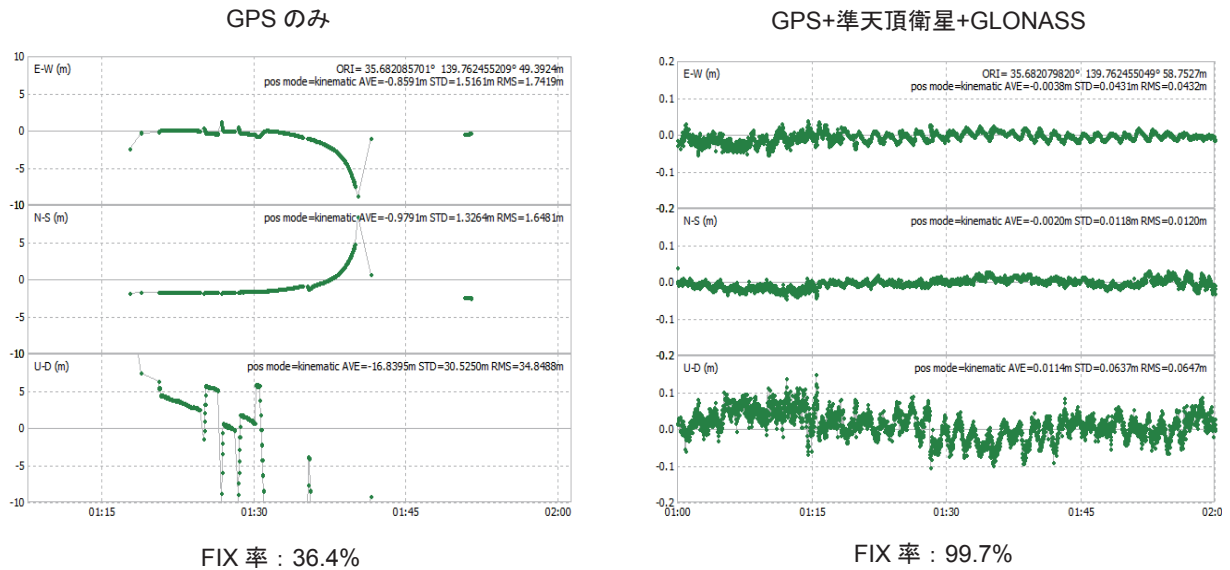


図-1 仰角マスク 15度にした場合の GPS のみ及びマルチ GNSS による解析結果

また、測位に必要な衛星数を確保できたとしても、衛星配置が悪化することにより、測位精度が悪化する場合や、初期化に時間がかかる場合もある。

さらに、都市部のビル街や山間部では、周囲の建物や地形（崖や法面等）で反射した電波によって生じるマルチパス誤差が測位精度を劣化させる可能性もある。マルチパスは低仰角にある測位衛星からの信号を受信する場合に起こりやすいため、その影響を抑えるためには、ある角度以下に位置する衛星からの信号を使用しないようにする仰角マスクの適用が有効である。しかし、都市部のビル街や山間部のように上空視界が制限された場所では、仰角マスクを適用することにより、元々数少ない利用可能な衛星数が更に減ってしまう可能性がある。

写真-2～写真-4 及び図-2～図-4 は国土地理院構内において、ネットワーク型 RTK-GNSS の精度検証を行った例である。使用した衛星系は GPS と GLONASS で、上空視界が良い観測点、森の中を切り開いて道路を建設することを想定した観測点、山腹斜面に道路を建設することを想定した観測点で、それぞれ 15 分間観測を行った。上空視界が良い観測点では FIX 解がすぐに得られ、標準偏差は 1cm 以内に収まっている。しかし、それ以外の上空視界が制限される観測点では、FIX 解を得るまでに時間がかかり、また FIX 解であっても解の精度が悪かった。この原因としては、受信できる衛星数が少ないことや、衛星配置に偏りがあることなどが考えられる。

このように、上空状況が非常に悪い場合には、マルチ GNSS を用いても FIX 解が得られないことや FIX 解が得られてもその精度が悪いこともあるため、観測を行う際には上空状況や衛星配置に留意する必

要がある。

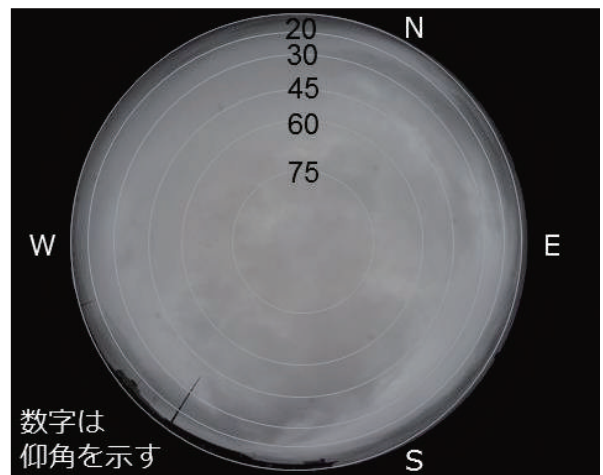


写真-2 上空視界が良い観測点における上空状況

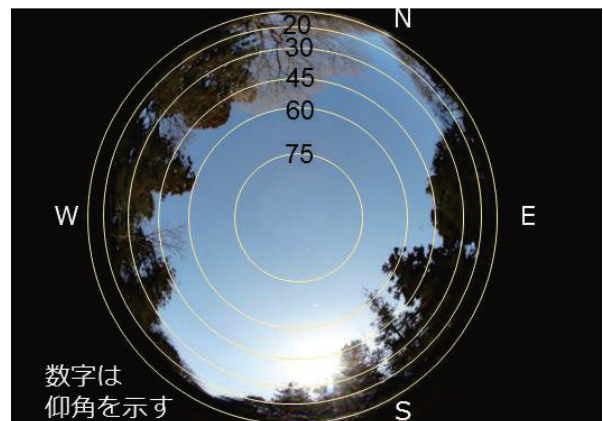


写真-3 森の中を切り開いて道路を建設することを想定した観測点における上空状況

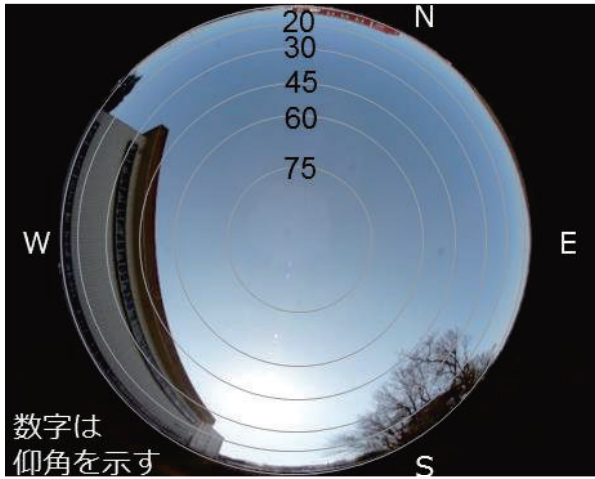


写真-4 山腹斜面に道路を建設することを想定した観測点における上空状況

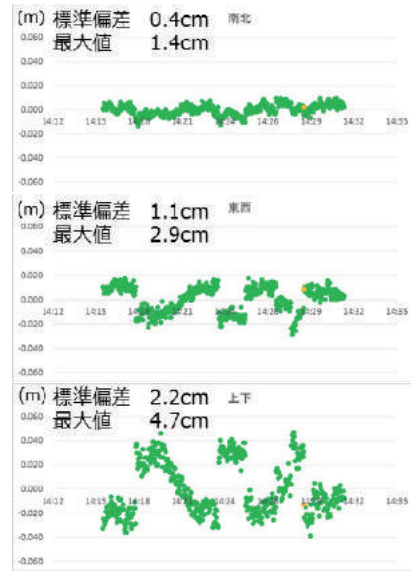


図-4 山腹斜面に道路を建設することを想定した観測点で得られた FIX 解

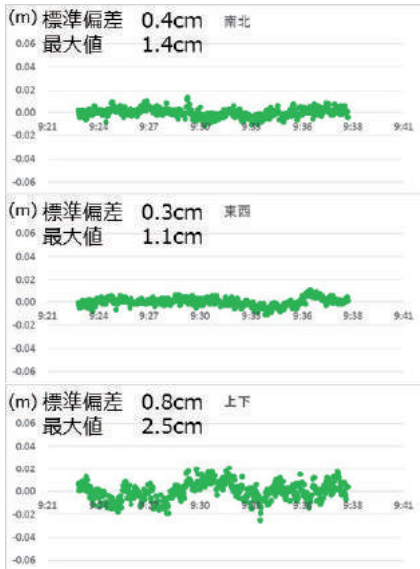


図-2 上空視界が良い観測点で得られた FIX 解



図-3 森の中を切り開いて道路を建設することを想定した観測点で得られた FIX 解

#### 4. 情報化施工を想定した試験観測

##### 4.1 概要

マルチ GNSS 総プロでは、平成 27 年 3 月 24 日に茨城県つくば市内にある国土地理院長距離 GNSS 比較基線場周辺の図-5 に示されたエリアにおいて、情報化施工における GNSS 観測を模した試験観測を実施した。自動車に GNSS アンテナ及び受信機を搭載した移動局（写真-5）を情報化施工における建設機械に見立て、低速（時速 5km）で走行しながら 1 秒間隔で取得した GNSS 観測データを用いてキネマティック測位を行った。基準局は、長距離 GNSS 比較基線場の測点 No.4 に設置した（写真-6）。基準局と移動局の距離は 300m 以内である。また、1 級 TS により移動局を自動追尾する観測を行い（写真-7）、得られた測位結果を基準として GNSS 観測を評価した。GNSS 解析には、国土地理院がマルチ GNSS 総プロにおいて開発したマルチ GNSS ソフトウェア



図-5 試験観測エリア



「GSILIB」(GNSS Survey Implementation Library) (国土地理院, 2015b) を使用した。衛星軌道には放送暦を使用し, 電離層補正を broadcast, 対流圏補正を saastamoinen として解析を行った。



写真-5 自動車に GNSS アンテナ及び受信機を搭載した移動局



写真-6 基準局



写真-7 TS による移動局の位置の観測

#### 4.2 解析結果

情報化施工における GNSS 観測に擬して L1, L2 の 2 周波を用いたキネマティック測位を行った。また, 仰角マスクを 4 種類 (15 度, 25 度, 35 度, 45 度) 設定することにより, 上空視界の比較的良好な状況から悪い状況までを模した解析を行った。各仰角マスクに対して, GPS のみと, マルチ GNSS (GPS+準天頂衛星+GLONASS+Galileo) を使用した解析について, FIX 解の RMS 及び FIX 率を比較し, マルチ GNSS の効果を評価した。なお, RMS は TS の観測結果を基準として算出した。結果を図-6~図-9 に示す。

仰角マスクが 15 度~35 度の場合, GPS のみを用いた解析とマルチ GNSS を用いた解析で, RMS 及び FIX 率に大きな差異はない(図-6~図-8)。これは, 上空視界が比較的良好な場合には, GPS のみでも高精度測位を行うのに十分な衛星数を確保できるためである。仰角マスクが 45 度の場合, GPS のみを用いた解析では FIX 率が低く RMS も大きいのに比べ, マルチ GNSS を用いた解析では全観測で高精度解が得られ (FIX 率 100%), RMS も上空視界の条件が良い場合と同程度となり, 明らかな改善効果が見られた (図-9)。

本試験観測の結果から, 建設機械を模した移動体における GNSS 観測でマルチ GNSS を用いることにより, 上空視界の悪い場合でも FIX 率が増加し, 測位精度が改善することが示された。

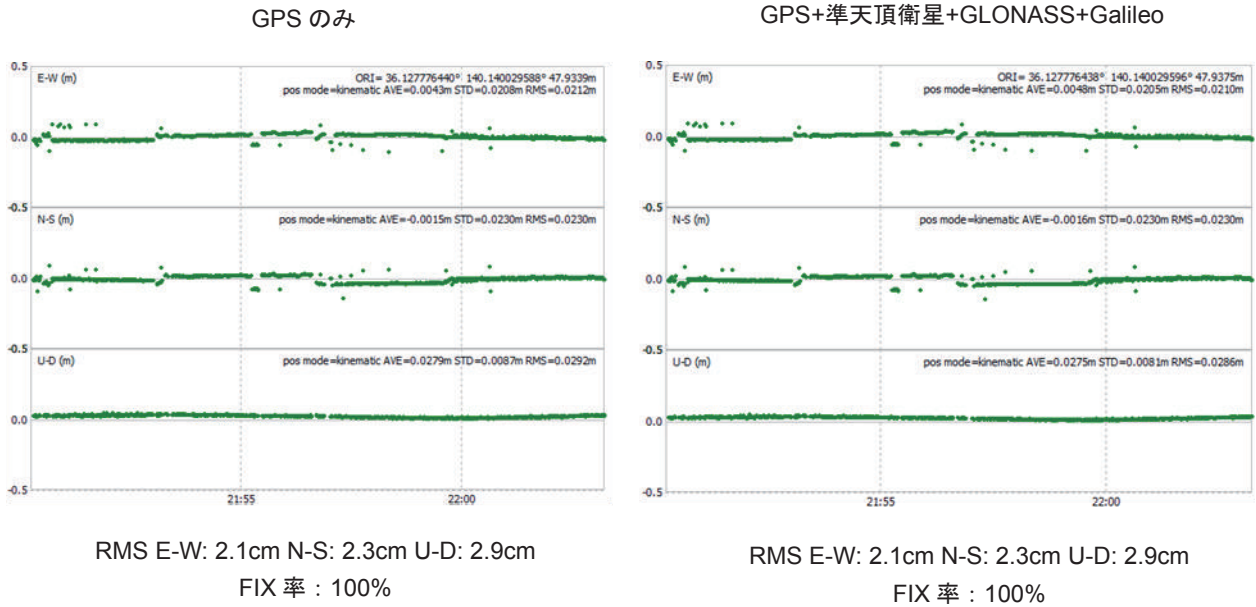


図-6 仰角マスク 15度における GPS のみを用いた解析 (左) とマルチ GNSS を用いた解析 (右) の比較

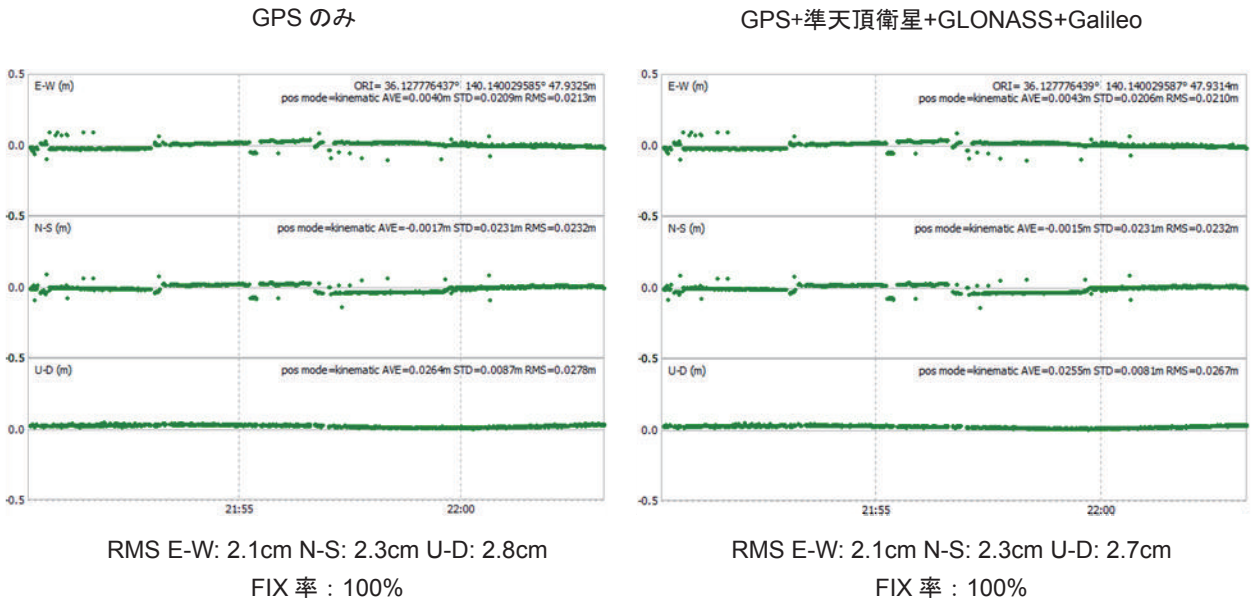


図-7 仰角マスク 25度における GPS のみを用いた解析 (左) とマルチ GNSS を用いた解析 (右) の比較

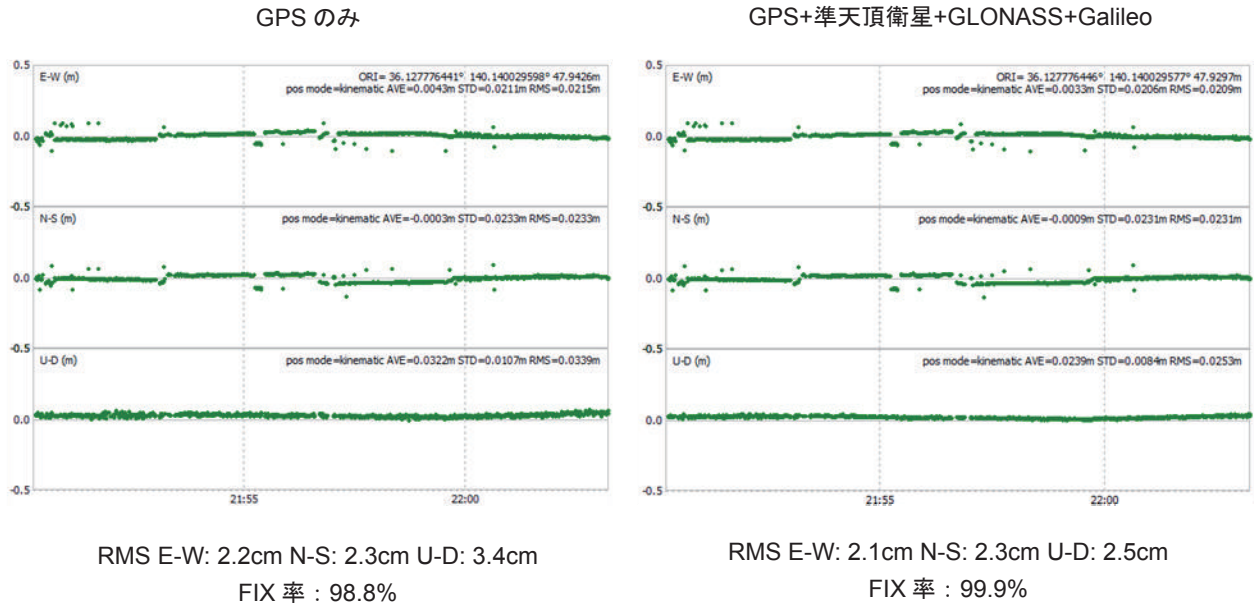


図-8 仰角マスク 35度における GPS のみを用いた解析 (左) とマルチ GNSS を用いた解析 (右) の比較

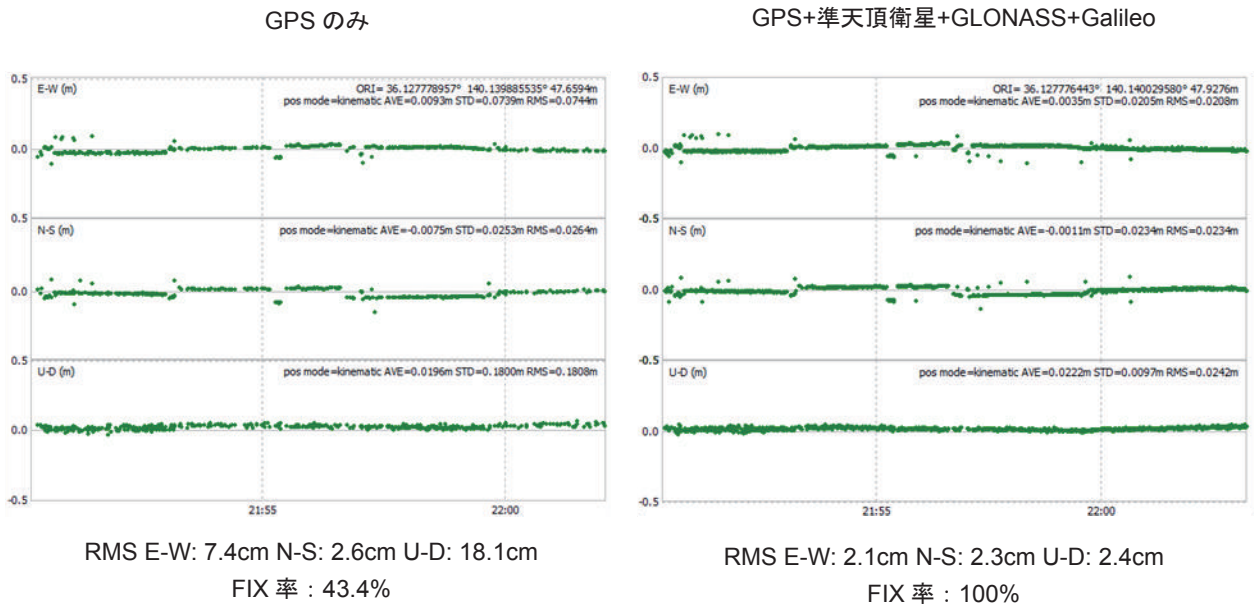


図-9 仰角マスク 45度における GPS のみを用いた解析 (左) とマルチ GNSS を用いた解析 (右) の比較



## 5. まとめ

情報化施工などの、移動体をリアルタイムに制御することが求められる分野では、GNSS によるリアルタイム測位の重要性が高まっている。

国土地理院では、平成 23 年度から平成 26 年度に実施したマルチ GNSS 総プロの中でリアルタイム測位にマルチ GNSS を活用するための技術開発を行ってきた。

その技術開発の一環として、リアルタイム測位を模した試験観測を行い、マルチ GNSS を活用した際の効果を検証した。その結果、GPS のみを用いて仰角マスク 45 度とした場合 FIX 率が 50%以下まで低下するなど顕著な精度劣化が生じたのに対し、マルチ GNSS を用いることで、高い仰角マスクを用いた場合でも特に精度が劣化することなく測位が可能であることが分かった。これは、都市部や山間部など

の上空視界が限られた条件下でも高精度測位が行える可能性を示す。ただし、3.2 節で示したように、都市部や山間部ではマルチパス誤差が増加するため、マルチ GNSS を用いても FIX 解が得られないもしくは FIX 解が得られてもその精度が悪いという可能性もあり、観測を行う際には周辺環境や衛星配置に留意する必要がある。

今回行った検証の結果、特に上空視界が限られた場所でマルチ GNSS が大きな効果があることが分かった。今後、準天頂衛星や Galileo 衛星の新たな打ち上げが計画されており、利用できる衛星数の増加が見込まれることから、マルチ GNSS を用いたリアルタイム測位を利用できる範囲のさらなる拡大が期待される。

(公開日：平成 28 年 10 月 4 日)

## 参考文献

- 古屋智秋, 酒井和紀, 万所求, 辻宏道, 畑中雄樹, 宗包浩志, 川元智司 (2014) : GSILIB の開発, 国土地理院時報, 125, 125-131.
- 国土地理院 (2015a) : 高度な国土管理のための複数の衛星測位システム (マルチ GNSS) による高精度測位技術の開発, [http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss\\_main.html](http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html) (accessed 8 Jul. 2016).
- 国土地理院 (2015b) : マルチ GNSS 解析ソフトウェア「GSILIB」の公開, <http://datahouse1.gsi.go.jp/gsilib/gsilib.html> (accessed 8 Jul. 2016).