

GNSS と維持管理

新時代を迎えた高精度衛星測位の可能性

岡 本 修

衛星測位は携帯電話をはじめ、多くのものに利用されている。ユーザは小型省電力な受信機を持つだけで、数 m ～数十 m の精度で測位できる。衛星測位には様々な測位法があるが、実時間に数 cm の高精度で測位できるリアルタイム・キネマティック法（以後、RTK 法）がある。この測位法に対応した受信機は、建設分野で多く利用されている。導入当初は衛星数は少なかったが、現在では我が国が管理運営する「みちびき」をはじめ、他の衛星システムの配備が進んだことで多衛星時代となり、まさに新時代を迎えている。本稿では、多衛星時代を迎えた各国の衛星システムやローコスト受信機の測位性能を紹介するとともに、維持管理への適用で生じる課題を示し、必要とされる要素技術に言及した。

キーワード：GNSS, QZSS, RTK, PPP-RTK, CLAS

1. はじめに

今日では携帯電話をはじめ、カーナビゲーション、デジタルカメラ、腕時計など身の回りの多くのものに GNSS 測位が利用されている。ユーザは小型省電力な受信機を持つだけで、それらを運営管理する衛星システム全体を意識することなく、地球上のどこにいるのかを数 m ～数十 m の精度で測位することができる。

衛星測位には様々な測位法があり、受信機の種類により利用できる測位法が異なる。より高精度な測位が可能な測位法の一つとして、実時間に数 cm の高精度で測位できる RTK 法がある。この測位法に対応した受信機は、1994 年に日本に導入され、建設分野を中心に利用されてきた。工事測量をはじめ、地すべり計測や斜面崩壊の監視等の防災分野にも多く利用されている。導入当初、利用できる衛星システムは米国が管理運営する GPS のみで衛星数は多くなかったが、現在では日本独自の衛星測位システムであるみちびきをはじめ、他の衛星システムの配備が進んだことで複数の衛星システム（以後、マルチ GNSS）の利用による多衛星時代となり、まさに新時代を迎えている。

本稿では高精度 GNSS 測位に焦点を当て、その問題点と今後の展望について述べる。また、現在注目されるローコスト受信機の実力を紹介するとともに、維持管理への応用について言及する。

2. 建設業における GPS 測位利用の経緯

建設業における衛星測位の利用検討は 1980 年代後半に始まる。レーザ測距と測角により測量する光学測量機の代替として、米国が管理運営する GPS 測位の導入に向けた応用研究が始まった。当時はまだ GPS 衛星の配備が完了しておらず、1 時間以上アンテナを三脚で固定して 2 点間の相対位置を後処理で算出する STATIC 法が主流だった。

RTK 法は 1994 年に日本に導入され、建設業を中心に重機の誘導といった新たな施工を検討する研究開発が開始された。これが施工で得られる様々な情報を活用する情報化施工の始まりとなる。この情報化施工では、造成工事における盛土の締め固め回数管理や、地盤を切り盛りする土工の出来形管理に広く GPS 測位が活用されるようになった。1994 年から始まった雲仙普賢岳の無人化施工試験では、遠隔操縦に必要な重機に装着され利用された。現在ではブルドーザーのブレード角の自動コントロール等にも利用されている。

公共測量では、国土交通省が RTK 法の利用について 2000 年に「RTK-GPS を利用する公共測量作業マニュアル」を取りまとめた。2002 年には電子基準点を利用した商用のネットワーク型 GPS 補正情報配信サービスが開始され、電子基準点を利用した RTK 法が利用可能となった。これを契機に公共測量でも RTK 法が利用されるようになった。

防災分野では、工事に伴う法面の挙動や斜面崩壊の

監視に RTK 法を利用した多点挙動監視システムが開発され利用されている。

このように建設業では、高精度 GNSS 測位となる RTK 法の応用研究がなされており、今日では多くの現場に利用されている。

3. 高精度 GNSS 測位の問題点

(1) 測位可能範囲の制限

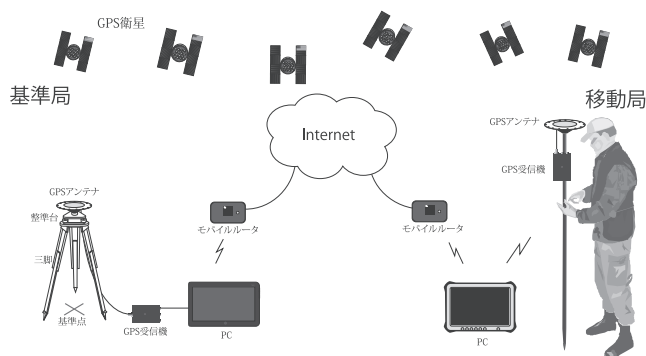
GNSS 測位の普及を阻む問題の一つとして測位可能範囲の制限がある。高精度 GNSS 測位では同時に 5 つ以上の衛星を継続して受信する必要がある。しかし、複数衛星からの直接波を測距することで測位計算する GNSS 測位は、写真—1 のような構造物や木々が障害物となる環境において遮蔽やマルチパスの影響で測位に必要な衛星数を確保できない場合がある。現在、GPS 衛星は 31 機が利用可能（2018 年 7 月末時点）であり、上空が開けていれば 7 機～12 機程度の衛星を受信可能であるが、高層ビルが建ち並ぶ都市部や木々に被われる山間部では、上空が見える範囲が大きく制限されるため、必要な衛星数を受信することさえ困難な場合がある。例えば 1 階建ての構造物が一つしかない環境であっても、構造物の壁際では上空が半分遮蔽され観測できる衛星数が大きく制限されるため高精度 GNSS 測位が難しい。実際に利用したい環境で測位できない場所が多く存在するため、他の測量機器との併用といった対策が必要となる。



写真—1 衛星数の確保が厳しい測位環境

(2) 導入コスト

高精度 GNSS 測位は、携帯電話やカーナビゲーションで利用される一般的な受信機とは異なり、衛星から放送される信号を地上まで送り届ける搬送波の位相を観測できる受信機が必要となる。図—1 に高精度衛星測位に必要なシステム構成の一例を示す。①基準局



図—1 高精度測位のシステム構成の一例

で受信する。②得られる観測データは通信手段を介してリアルタイムに移動局へ送信する。③移動局では計測点で得られる観測データと合わせて解析し、移動局の位置を算出する。このように高精度 GNSS 測位では 2 台の受信機が必要となる。日本への導入当初は数千万円以上していた高精度 GNSS 受信機は、現在では数百万円程度となった。基準局で得られる観測データは、国土地理院が構築した電子基準点で得られる観測データを配信する商用サービスで代用できるが、月 2～3 万円程度の配信サービスを契約する必要がある。

このように高精度 GNSS 測位の利用は現在でも高コストであり、普及の障害となっている。

4. GNSS 測位の展望

(1) 各国の衛星測位システムの発展

米国が管理運営する GPS は、1995 年に全 24 機の衛星配備が完了し正式運用が開始され、民生利用への無償開放が全世界にアナウンスされた。これまで GPS は一度もシステムダウンすることなく順調に運用され、現在 31 機（2018 年 7 月末時点）の衛星が利用可能となっている。GPS は、6 つの軌道面に各 4 機が配置されており 1 日に地球を約 2 周する周回軌道に投入されている。地上からは、衛星が見える方向が時々刻々と変化し、異なる衛星が時刻により入れ替わりに観測される。

GLONASS はロシアが管理運営する衛星測位システムである。3 つ軌道面に各 8 機が配置されており、現在 24 機（2018 年 7 月末時点）の衛星が利用可能である。GPS と違い、北極や南極を避けた周回軌道ではないため、北半球に位置する日本での利用は、GPS に比べて北側の衛星をより多く観測することができる。一時、経済状況の悪化から衛星が打ち上げできず、また短い衛星の寿命の影響により数も減少して、一日中継続して利用することが困難な時期もあったが、現

在では24時間利用可能となっている。GLONASSは衛星毎の放送周波数が異なるFDMA方式を採用していることから、基準局と移動局で異機種（他メーカ）の組合せとなる測位においてIFBの問題を抱えている。2018年よりGPSと同様のCDMA方式の衛星（GLONASS-K2衛星）への切り替えが始まっており2026年頃には切り替えが完了する計画となっている。

BeiDouは中国が管理運営する衛星測位システムである。静止衛星および8の字軌道と周回軌道の3つの軌道を組み合わせた衛星配備を進めており、現在29機（2018年7月末時点）の衛星が利用可能となっている。日本では、静止衛星を中心に南西の上空に片寄り観測することができる。GPSと同様にCDMA方式であることから、IFBの問題を抱えるGLONASSに代えて利用するユーザが増えつつある。

Galileoは欧州連合が管理運営する衛星測位システムである。30機の軌道周回衛星の衛星配備を進めているが、欧州の経済危機等により当初の計画よりも整備が遅れており、現在14機（2018年7月末時点）の衛星が利用可能となっている。

今後、マルチGNSSを利用することで衛星数は飛躍的に増加する。図—2¹⁾に衛星数の推移を示す。2013年当時、GPSとGLONASSで54機であったが、BeiDouおよびGalileoの配備が進んだ数年後には100機以上の衛星数となった。衛星数の増加は、前述した高精度GNSS測位の問題点を容易に解決できる。これは高精度衛星測位にとって、これまでにない大きな変革をもたらしている。

(2) みちびきによる補完・補強

我が国が管理運営する準天頂衛星システムとしてみちびきがある。みちびきには、補完と補強の2つの効

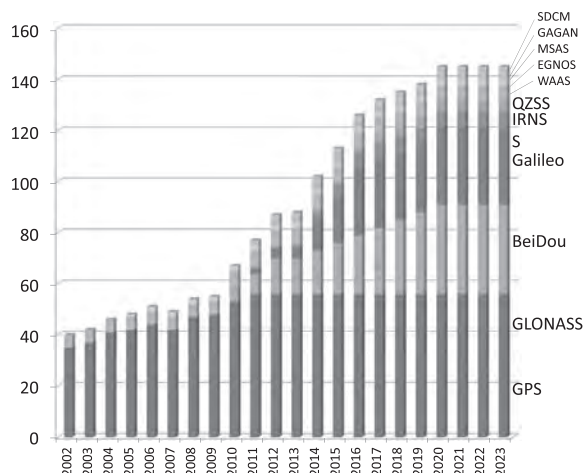
果がある。

補完は、みちびき衛星をGPS衛星の補完として利用することを指す。日本における米国のGPS利用を補完するため、1つの衛星が仰角80°以上に8時間程度日本上空に留まるような8の字軌道を採用した。特に上空が制限される都市部での受信衛星数の増加が期待できる。現在、1～4号機が運用されており、将来的には7機体制を目指している。みちびきを受信することのメリットは、単に受信衛星数が増えることに留まらない。高精度GNSS測位では、測位計算をする際にメイン衛星を決めるが、メイン衛星の切り替えは高精度測位を維持することを妨げる場合がある。一般的に受信が途切れる可能性が少ない一番高い仰角の衛星をメイン衛星として選択するが、みちびきを受信できる場合、このメイン衛星をみちびき衛星のまま長時間受信し続けることができるメリットがある。近年、みちびき衛星の受信をサポートする高精度GNSS受信機が発売されるようになった。

補強は、みちびき衛星から放送される補強信号を受信して、測位精度を改善することを指す。補強には、サブメータ級の補強信号サービスとなるSLAS、センチメータ級の補強信号サービスとなるCLASの他、JAXAが開発する精密衛星軌道・クロック推定ソフトウェアMADOCAにより生成した補強信号サービスがあり、無料で利用できる。このうち、高精度衛星測位に関するCLASとMADOCAの補強信号サービスを説明する。

CLASは、日本全土をサービス領域とした補強信号サービスで、2018年11月より正式運用を予定する。国土地理院が管理する電子基準点のデータを利用して衛星毎の軌道、クロック、バイアス誤差を推定することに加え、日本の地域毎（12地域）の電離圏、対流圏誤差を推定して補強信号を生成する。受信および測位計算には専用の受信機が必要となる。CLASによる測位方法はPPP-RTK法と呼ばれ、受信機1台で高精度測位できることが特長となる。収束時間1分程度で水平方向10cm程度（公称精度は水平方向12cm（95%値））となる測位精度が得られる。

MADOCAの補強信号サービスは、日本周辺の広範囲な海域において、受信機1台で高精度測位できるPPP法と呼ばれる測位方法に必要な補強信号サービスである。みちびき2～4号機から放送（2018年7月末現在）される補強信号の受信および測位計算には、専用の受信機が必要となる。全世界に配置される100局程度のGNSS基準局網により推定した衛星毎の精密な軌道、クロック、バイアス誤差を利用する。収



図—2 マルチGNSSの衛星数の推移
(宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 小暮聡氏提供)

束時間 15 ～ 30 分程度で水平方向 10 cm 程度となる測位精度が得られる。

CLAS や MADOCA の補強信号サービスに対応した受信機は、今後順次発売される予定である。

(3) 高精度 GNSS 測位に対応する受信機のローコスト・小型省電力化

構造物や植栽といった障害物のある環境では、上空の見える範囲が制限されるため測位に影響がある。近年、GPS に加えて他の衛星システムを同時利用するマルチ GNSS に対応した受信機を利用して衛星数を確保することが一般的である。高精度 GNSS 測位法の一つである RTK 法では、搬送波の位相を受信できる受信機が必要となる。受信機は、衛星から放送される 2 つの周波数の受信が可能な 2 周波受信機と、1 つの周波数の受信のみの 1 周波受信機に大別される。高精度 GNSS 測位で一般的に利用される 2 周波受信機は、高精度測位のための専用受信機となるため、出荷数が少なく開発費もかかるため 1 周波に比べて非常に高価となる。

RTK 法は、測位結果の解の種類として Float 解と Fix 解がある。それぞれの水平方向の精度は、Float 解で数 m ～ 20 cm 程度、Fix 解で数 cm となり、常に Fix 解である数 cm の精度が得られる訳ではない。測位開始時は Float 解であり、収束計算を経て Fix 解へ移行する。この移行の過程を初期化と言う。初期化には、周囲に障害物がなく上空が開けている理想的な環境で 20 秒程度かかる。周囲の障害物により受信できる衛星数が少ない場合、初期化に時間がかかり、条件によっては初期化できない場合がある。また、一度初期化が完了しても受信する衛星数が 4 機未満となる場合や高架下の通過による瞬断等でも Float 解に戻り、再初期化が必要となる。

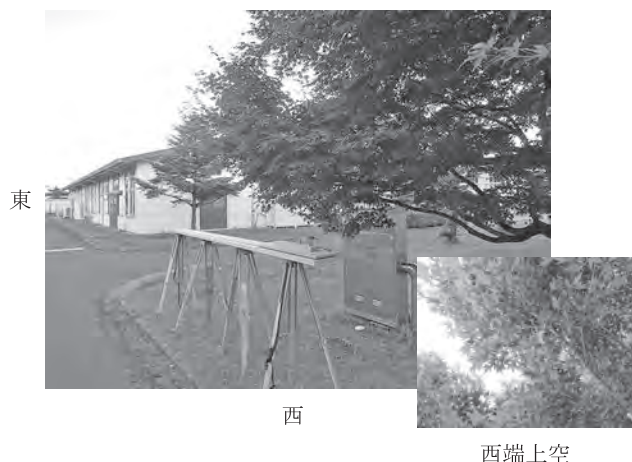
2 周波受信機は高価である反面、Fix までの収束を短時間に完了できる。1 周波受信機はローコストである反面、Fix までの収束に時間がかかり、GPS のみに対応した受信機では初期化に 10 分以上かかるため、RTK 法では実用できる性能を有していなかった。しかし、他の衛星システムを同時受信できる GNSS 受信機を利用することで衛星数を多く確保できるようになったため、ローコストな 1 周波受信機であっても 2 周波受信機に匹敵する収束時間で Fix できるようになった。安価な 1 周波受信機を採用することで大幅なコストダウンが図れるものの、RTK 法での利用実績が少なく測位性能の悪化が懸念されている。そこで次章では、ローコストな 1 周波 GPS/GLONASS 受信機

における Fix 時の測位精度および、空が見える範囲が厳しく制限される環境における Fix 解の維持性能を評価した結果を示し、実用可能な測位性能であることを示す。

5. ローコスト 1 周波受信機の測位性能

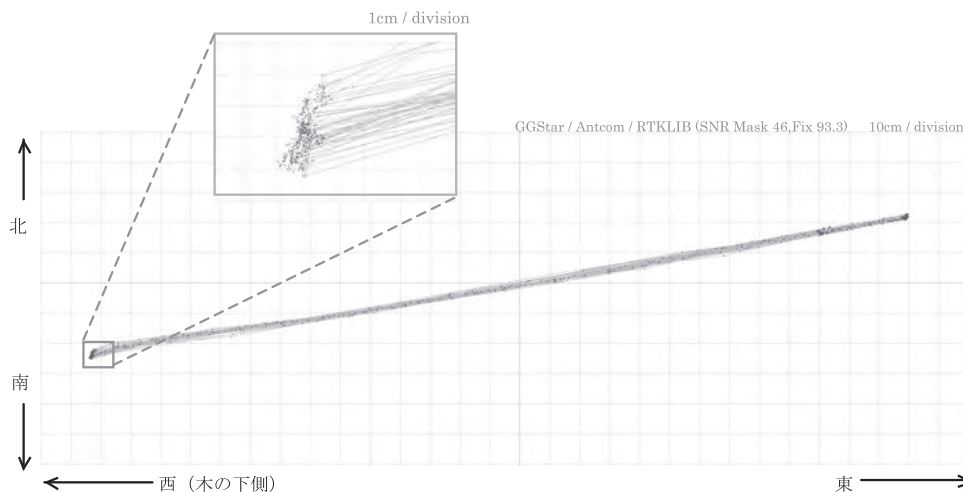
(1) 木の周辺における測位性能

実験は三脚上に水平に固定された可動範囲約 3 m のスライドレール上に、アンテナを付けた台車を載せて手動で 20 往復させる。アンテナの軌跡を記録して、その再現性からローコスト 1 周波受信機の測位精度を評価する。実験場所の様子を写真—2 に示す。実験場所となるモミジの木周辺は、写真—1 で紹介した南側に 3 階建ての校舎、北側は土手とその上に立ち並ぶモミの木と校舎という厳しい開空制限のある環境で、時間帯によっては米国 GPS だけでは測位計算に必要な衛星数を確保することが困難な場所である。スライドレールは、その上空の半分が木の下に入り込むように設置した。



写真—2 スライドレールの設置状況

測位結果を図—3 に示す。往復する軌跡の左側（西側）が木の下となる。トレース方向に対して直交方向のぶれの大きさは、西側となる木の下側端の付近が最大で 40 mm、その他の部分でも概ね 30 mm 程度となった。東西両端の測位結果のぶれの大きさに差が見られたものの、木の下に入り込む影響はごく僅かであった。スライド中に何度か Float 解となっているが、短時間で Fix 解に復帰し、Float 解の間も測位値が大きく逸脱することなく Fix 解と同様にトレースできた（図—3 には Float 解の測位結果もプロットしている）。



図—3 木の下のスライドレール往復時の測位結果 (1 目盛 10 cm, 拡大部 1 cm)

(2) 構造物周辺における測位性能

1 階建ての構造物である茨城高専実習工場周囲で実験を実施した。実習工場の周囲を 1 周する際に、精度数 cm となる Fix 解をどの程度維持できるか、また精度が悪い Float 解となった場合、どの程度の時間で Fix 解に復帰できるかを確認する。実習工場の南側は一部木が完全に覆い被さり衛星測位には非常に厳しい環境となる。また、実習工場北側には軒が張り出しており、その下に入ると南側に加えて真上の開空も制限される厳しい環境である。写真—3 に実習工場北側の軒の状況、実習工場南側の覆い被さる木の状況を示す。実験は実習工場南西側端より周囲を 1 周するコースとした。南側の木の下を通過する際には受信できる衛星数が減少し、一時的に Fix 解から Float 解になる。北側では、途中から軒下に入るルートを取り、上空及び南側の衛星の受信が大きく制限される。西側では隣接する 3 階建ての校舎と挟まれる場所で Fix 解を維持することが困難な場所である。



軒の状況 (北側)

木周辺 (南側)

写真—3 実習工場周囲の状況

図—4 に実習工場周囲を 1 周したときのローコスト受信機の Fix 解の維持状況の一例を示す。南側の木の下を通過した際、一度 Float 解になるがすぐに Fix 解に復帰している。北側の軒下に入った際は、Fix 解を維持できず二度 Float 解になるが、軒下での移動中に Fix 解へ復帰できた。西側でも一度 Float 解になるがすぐに Fix 解へ復帰した。このルートは米国 GPS のみ利用する受信機では Fix 解を維持することは難しいが、ローコストな 1 周波 GNSS 受信機では観測できる衛星数が増えて概ね Fix 解を維持できた。このような厳しい環境でもローコスト受信機による高精度測位は実用上問題ないことが確認できた。



図—4 実習工場周囲における Fix の維持状況

6. 受信機のコストダウンの経緯

高精度 GNSS 測位に利用できる受信機は、販売の中心となる測量向けの高機能な 2 周波受信機で未だ数百万円する。受信機が高価である理由は、2 周波対応であることの他に、RTK 法をサポートするための高価なオプションが必要であることが挙げられる。

このオプションなしで RTK 測位をする方法として RTKLIB²⁾ がある。RTKLIB は、パソコン上で測位計算するオープンソースのプログラムパッケージである。多くの受信機メーカーに対応しており、RTK 法をはじめ、多くの測位法をサポートしている。高精度測位の普及を目的にオープンソースとして提供されており、RTK 法のオプションが用意されていないローコスト受信機でも RTK 法が利用できるようになった。日本発の技術として世界で高い評価を得ており、このソフトウェアの登場をきっかけにローコスト受信機が注目されることになった。受信機メーカーが用意するブラックボックス化されたファームウェアとは違い、測位結果に疑問が生じた場合でも後処理解析で原因を突き止めること等が可能である（なお、前章の 1 周波受信機の測位性能の評価には RTKLIB を用いている）。

ローコスト受信機の価格は数十万円と安価である。近年では RTK 法に必要なオプションが組み込まれているものや、2 周波に対応するものが発売されるようになった。我々もこれまでに RTKLIB を用いた応用^{3),4)}に取り組んできたが、近年では利用例が増えている。

7. 維持管理への応用の課題

維持管理モニタリングに高精度衛星測位を利用するためには、幾つかの課題を解決する要素技術が必要となる。要素技術としては①省電力化、②小型軽量化、③他センサとの統合利用、④データ連続性の保証等がある。

①は、維持管理モニタリングは施工時から長期間の連続計測が求められる場合があるが、フィールドでは電力供給を受けることが困難な場合が多い。バッテリーのみで長期間連続運用するには受信機の省電力化が求められる。②は点検ロボット等への受信機、アンテナの組み込みの制約である。例えば無人ヘリコプターへの搭載では、大きさや重量の制限が厳しく連続飛行時間にも影響を与える。③は他のセンサ情報と位置情報の統合利用である。加速度センサ等に限らず画像等のデータと統合・融合することで各々のデータだけではわからない新たな情報を見出すことが期待される。④は計測機器の更新に伴うデータ連続性の保証である。

数十年に渡る長期間の観測では、衛星測位受信機の故障や受信できる信号の廃止等による更新が予想される。受信機メーカー毎に異なる測位アルゴリズムやフィルタの影響によって、得られた結果の更新前後の連続性を保証できないケースが想定される。機種に依存しない継続利用できる測位アルゴリズムが必要となる。

8. おわりに

本稿では、多衛星時代を迎えた各国の衛星システムおよびローコスト受信機の現状と展望を説明した。加えてローコスト受信機の測位性能を評価する実験結果を示し、十分な性能を有することを示した。また、維持管理への適用で生じる課題を示し、必要とされる要素技術に言及した。

建設業では、高精度 GNSS 測位を利用する多くのユーザが、2010 年頃までに導入した GPS/GLONASS 受信機を利用している。近年のマルチ GNSS による衛星数の増加や受信機のローコスト化は、高精度 GNSS 測位の応用分野を広げる新時代へ踏み出している。維持管理は期待できる応用分野の一つであり、今後の市場拡大が期待される。

J C M A

【参考文献】

- 1) 小暮聡：“アジア・オセアニア地域におけるマルチ GNSS の状況”，第 5 回 QZSS ユーザーミーティング発表資料，http://qz-vision.jaxa.jp/USE/is-qzss/usermeeting_report_05.html (2010)
- 2) 高須知二，久保信明，安田明生：“RTK-GPS 用プログラムライブラリ RTKLIB の開発・評価および応用”，日本航海学会 GPS/GNSS Symposium 2007 text, pp.213-218 (2007)
- 3) 岡本修，三浦光通，高橋徹：“土壌汚染状況調査での調査地点設定システムに用いる GNSS 測位の精度評価”，第 67 回土木学会年次学術講演会講演概要集，VI 部門，P.286 (2012)
- 4) 岡本修：“除染工事における GNSS の利用”，測位航法学会 GPS/GNSS Symposium 2012 text, pp.163-166 (2012)

【筆者紹介】

岡本 修（おかもと おさむ）
 (独)国立高等専門学校機構
 茨城工業高等専門学校
 国際創造工学科 機械・制御系
 教授

