

# 衛星測位技術「RTK-GNSS」の出来形管理への適用に向けた計測精度確保の方策

梶田洋規

## 1. はじめに

建設事業における「品質確保、熟練工不足対策、コスト縮減、建設事故防止」等に資する取組みとして、国土交通省では、ICT（情報通信技術）を利用した情報化施工の導入・普及を図っており、その一環として、国土技術政策総合研究所（以下、「国総研」）では、「トータルステーション（TS）を用いた出来形管理」の検討を行っている<sup>1),2)</sup>。

TSを用いた出来形管理は、その効果とともに課題や要望もあげられている。その1つが、必要な精度が得られる計測距離の短さである。そこで、TSに代え、より長距離の計測に適した衛星測量技術「RTK-GNSS」を出来形管理へ導入すべく検討を行ってきた<sup>3),4),5),6)</sup>。RTK-GNSSは、3～4級基準点測量に利用できる精度を有するが、衛星配置や気象の変動により計測値が刻々と変化し、土工の出来形管理に必要な計測精度は確保できない状態になることが確認できている<sup>3)</sup>。製品の小型化や初期化（衛星と受信機の距離を確定する等の計測開始状態になるまでの準備）時間の短縮といった利便性は、技術開発により向上しているが、計測精度が向上している感はない。これは、技術的に難しいことに加え、開発の市場ニーズが小さいことが原因と推察される。そのため、RTK-GNSSの計測精度向上の現実的な対応方策として、抜本的な技術開発を必要としない運用方法の工夫やソフトウェアへの簡単な機能追加が考えられる。

本稿では、平成21～23年度にRTK-GNSSを固定しGPSのみ使用して取得した計測データを分析し、運用方法や簡単な追加機能で計測精度の向上を図る方策を検討したので紹介するものである。

## 2. RTK-GNSSを用いた出来形管理の課題

### 2.1 RTK-GNSSの概要

RTK-GNSSは、受信アンテナ2基を利用して計測することで公共測量が行える計測精度を確保す

る測量方法であり、図-1の通り、座標の既知点上に1基（基地局）を固定し、計測したい地点に1基（移動局）を設置する。基地局と移動局は無線通信することから、免許不要な無線方式の場合、移動局は基地局から概ね半径500m～1km程度の範囲で計測可能である。複数の移動局が1基の基地局を共有して利用可能で、マシンコントロール（MC）やマシンガイダンス（MG）のシステムを搭載した重機とセットでRTK-GNSSを利用すれば、導入コストを抑えられる。

### 2.2 RTK-GNSSの導入で期待される効果

土工工事の5現場で、RTK-GNSSとTSで出来形管理を二重に行い、作業効率の比較を行った<sup>3)</sup>。延長40mの小さな現場では、計測の効率化より初期設定の増加が大きくTSの約1.7倍の時間がかかったが、試行延長180mの現場では計測の効率化が大きくTSの約3割の時間で済んだ（図-2）。

つまり、RTK-GNSSに適した条件が見極めて導入すれば、高い作業効率を得ることができる。

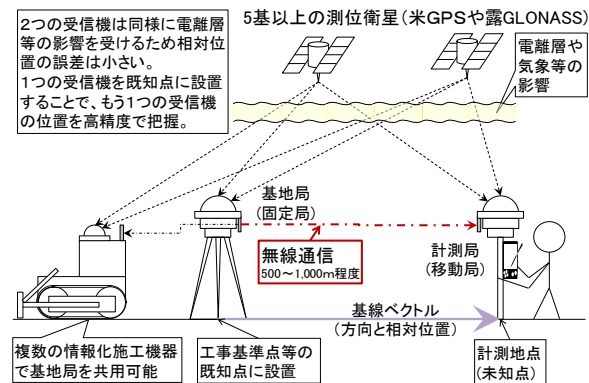


図-1 RTK-GNSSの概要

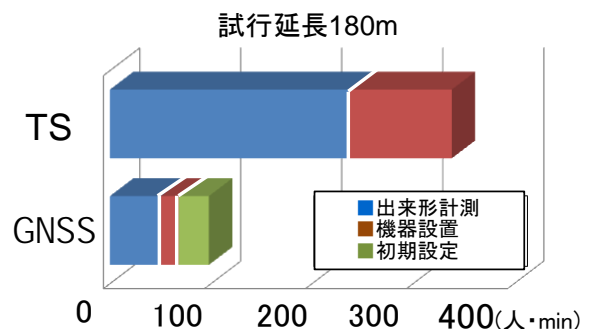


図-2 GNSSとTSの作業効率の比較（一例）

Research on improvement method of the measurement precision for the application of "GNSS RTK System" to as-built management

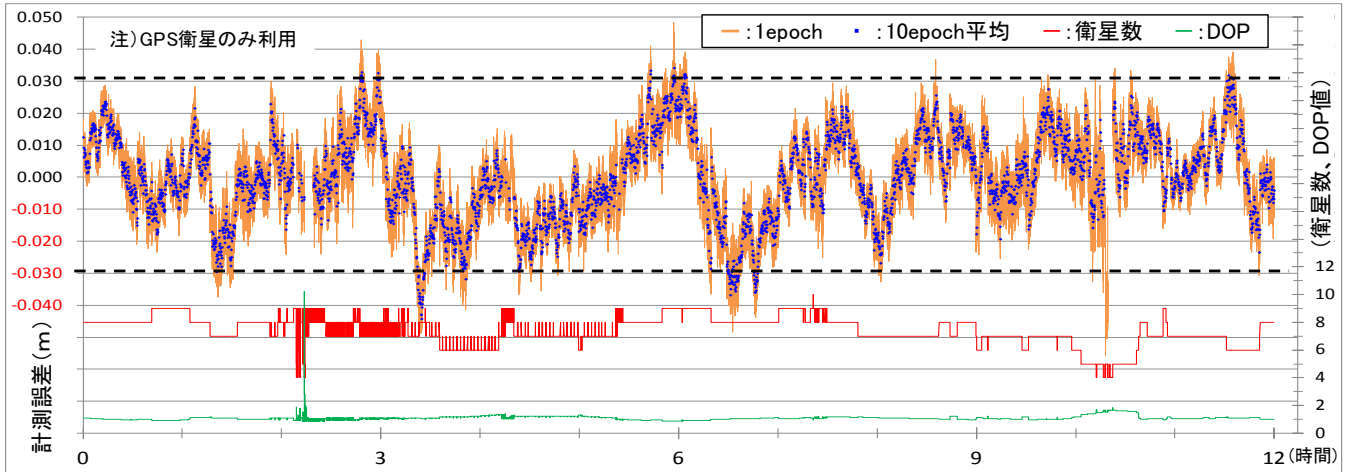


図-4 RTK-GNSSを固定して12時間連続で取得した鉛直方向の計測誤差(全データ平均値との差)

工種	測定項目	規格値(mm)	測定基準	測定箇所
道路土工(盛土)	基準高▽	±50	施工延長40mにつき1箇所、延長40m以下のものは1施工箇所につき2箇所。	
	法長	L<5m: -100 L≥5m: 法長の-2%		
	幅(W1, W2)	-100	基準高は、道路中心線及び端部で測定。	

図-3 道路土工(盛土)の出来形管理基準及び規格値

なお、完成時の出来形管理以外にも、日々の施工管理や丁張り設置等にも利用できるため、実工事では、もっと大きな作業工数の削減が期待できる。

### 2.3 RTK-GNSS導入に際しての課題

#### 2.3.1 誤差の許容範囲

衛星は全て受信アンテナ上方に位置するため、鉛直方向の誤差は水平方向の約1.5倍と大きい。我が国の土工の出来形管理基準の規格値(許容誤差)は、鉛直方向は水平方向より厳しく、基準高の規格値は±50mm以内である(図-3)。直轄工事の検査では、検査官が施工者の計測機器を利用することが多いため、施工管理時と検出時で計測機器の誤差が+側と-側に振れた場合を考えると、機器の持つ計測誤差を出来形管理の計測許容誤差の1/2以内とする必要がある。施工誤差として3cm程度を考慮すると、鉛直方向の計測精度は誤差±1cm以内を確保することが望まれる。

#### 2.3.2 RTK-GNSSの計測値の特徴

RTK-GNSSでは、衛星が移動するために信号が取得可能な衛星数や配置が変化し、刻々と計測値が変動する。また、実現場では、重機、森林、法面、建物等による反射波(マルチパス)等の影響を受けるため、計測値が変動する。

平成21年度に、RTK-GNSSを定位置に固定し毎秒1データを12時間連続で取得したデータでは、約30分~2時間周期で±2cm程度の波に±1cm程

度の小さな波が重なり±3cm程度の大きな波を形成している(図-4)。

出来形管理で1点の計測に長時間をかけることは現実的でないことから、3~4級基準点測量と同様に10秒間で取得した10データを平均処理(10epoch平均)することが考えられる。その場合、±1cmの小さな波が平準化されるが、±2cm程度の大きな波の平準化効果は期待できない<sup>4)</sup>。なお、過去に、計測時間と計測精度向上の検証実験を行ったが、平均するデータ数を10データから多少増やしても精度向上の効果は無かった。

図-4のデータの10epoch平均値について、計測精度の度数分布を見ると、±1cm以下のデータは約50%しかなく、このままでは、土工の出来形管理(施工者による施工管理と発注者による検出)で広く利用するのは困難である(図-5)。

#### 2.3.3 RTK-GNSSを用いた出来形管理の懸念

RTK-GNSSを出来形管理で利用する際に問題となるのは、その計測誤差の大きさとともに、

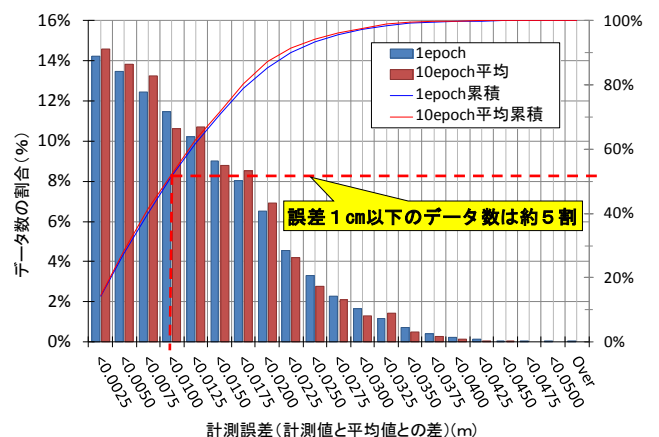


図-5 取得データ(鉛直方向)の誤差の頻度

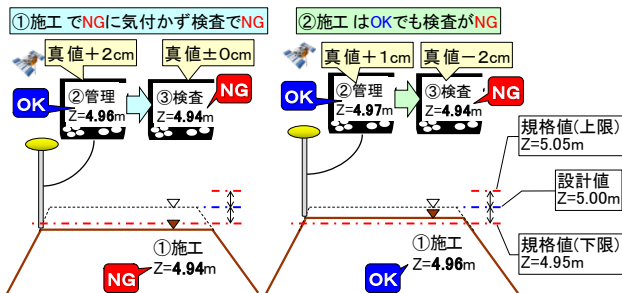


図-6 検査時に発生が懸念される問題(イメージ)

刻々と計測値が変化し再現性がないことである。計測精度の誤差が大きくても再現性がある計測機器を使用し、施工者がしっかりと施工管理していれば、同じ条件で検査官が現場検測する限りは同様の値を示すことになり、全体的に少しずれるだけで問題が顕在化しない。しかし、土工の高さ管理の規格値±50mm以内に対し、再現性がない±3cm程度の計測誤差では、しっかり施工管理しているにも関わらず検査で不合格箇所が見つかるといった問題の発生が懸念される(図-6)。しかも、大きな波は30分～2時間程度の大きな周期のため、直ぐ再計測しても同じ様な値を示してしまう。

### 3. 計測精度の向上・確保に関する検討

通常、RTK-GNSSを用いて計測を行う場合、計測精度を確保するために「受信衛星数」や「DOP値※」といった指標で良好な状態か管理している。12時間連続計測した図-4のデータで、それらと計測精度に相関関係があるか検証してみたが、ほとんどで、衛星数6基以上、DOP値2.0以下と良好な条件下の中で、より高い計測精度が得られる程の相関関係は認められなかった<sup>5)</sup>。そこで、±1cmの計測精度(鉛直方向)を確保するに資する新たな指標を抽出し検証することとした。

#### 3.1 初期化に着眼した計測精度向上対策

計測値の変動は、衛星の移動による変化の影響によるため、その影響をリセットするが如く定期的に初期化することで、計測精度が確保できると考え、その仮説の効果を検証した。

##### 3.1.1 初期化して短時間計測する方法

初期化して直ぐは、精度に関係する衛星配置の変化が小さいことから計測精度が高いと考え、「初期化して短時間計測する」ことを繰り返してデータを取得した。毎秒1データで10分間程度を目標に連続取得することを17回繰り返し、計

7,624データを取得した。データ取得開始時の受信衛星数は全て6以上、VDOP値(鉛直方向のDOP値)は全て3以下で良好な状態である。

17回のデータは、全体のバラツキ度合いを見る指標の標準偏差を見ると、最大は6.2mmと高い精度に見えるが、出来形管理は個々の点の管理であり、その精度に直接関係する誤差の最大値は17回のデータで最大は23.8mmである。

出来形管理時に想定している10epoch平均値の誤差(絶対値)の度数分布では、1cm未満が96.4%、全データが17.5mm以内となる(図-7)。初期化後、時間が経過する程、衛星の配置状況が変化することから、初期化後5分以降のデータを削除した場合、0.25mm未満の割合は減ったが、1cm未満が98.5%、全データが15mm以内となり、計測精度の向上が伺える。

##### 3.1.2 初期化時と同じ衛星より受信する方法

前記3.1.1の方法では、計測できるのが5分間と短時間で実用性に乏しい。そこで、初期化状態から大きな変化が無く、より長い時間の計測作業が可能な方法を考案し検証した。

取得データを分析する中、受信している衛星が変わると計測誤差が大きくなることが確認でき(図-8)、それは、より条件が良くなるはずの受信衛星数が増える場合であっても若干ではあるが起きることがあることが認められた<sup>6)</sup>。

逆に見れば、同じ衛星から受信する間のデータであれば大きな誤差要因の1つがない状態となることから、その状態の計測精度を検証すべく「初期化して約1時間計測」を25回繰り返し、初期化時と同じ衛星から受信している間と受信する衛星

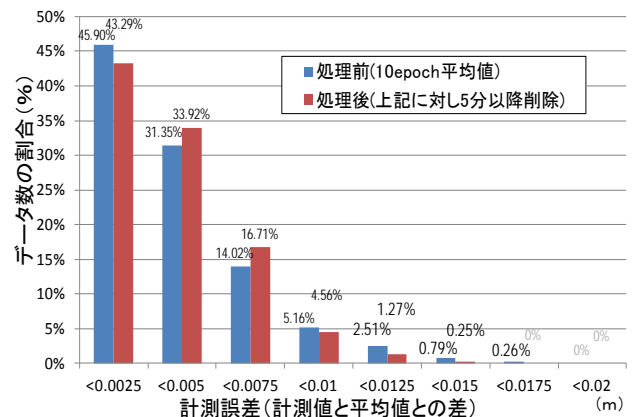


図-7 10epoch平均値の誤差の頻度

※土木用語解説：DOP値



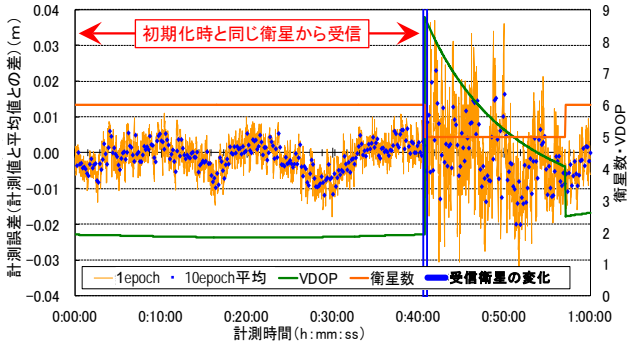


図-8 衛星の変化による誤差への影響

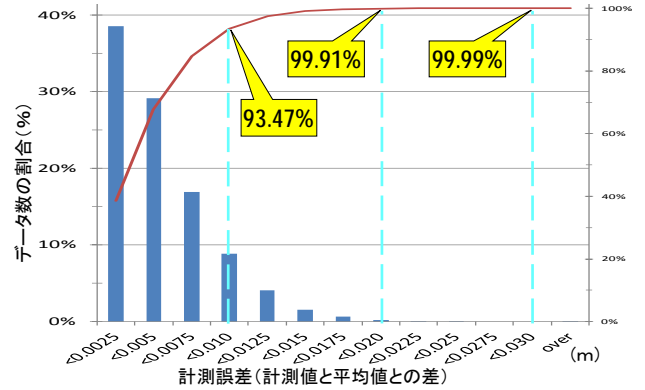


図-10 誤差の頻度(全体)

が変わって以降にデータを分けて分析し、前者の精度が高いか確認することとした。

約1時間連続取得したデータ25回分をつなぎ合わせた25時間分のデータを見ると、全87,011データより10epoch平均値は8,697データ得られ、その内の28.5%の2,479データが初期化時と同じ衛星から受信し続けている状態である(図-9)。

受信衛星数は、ほぼ5基以上で大半は6基以上、VDOP値は一部に高いものがあるが1.8~2.2に集中しほぼ3以下と、大半は良好な環境下であり、12時間連続取得データ(図-4)のような $\pm 3\text{cm}$ 程度の大きな波形は無く、 $\pm 2\text{cm}$ 程度の波となった。

計測誤差の度数分布を見ると、10epoch平均値の場合、1cm未満は93.5%、2cm未満は99.9%であり、全体でも良好な計測値である(図-10)。

10epoch平均値の計測精度の度数分布を、受信衛星が初期化時と同じ状態と異なる状態で比較すると、初期化時と異なる状態では、1cm未満が92.4%、最大値が3.84cmであったのに対し、初

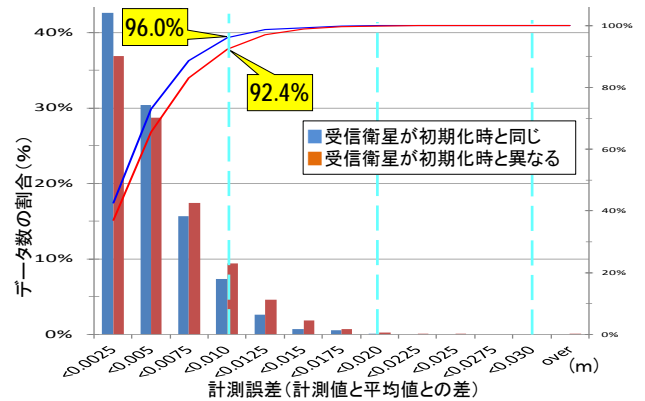


図-11 誤差の頻度(受信衛星の状態別)

期化時と同じ状態では、1cm未満が96.0%、最大値が1.98cmであり精度の向上が伺える(図-11)。

### 3.1.3 初期化直後の初期値を確認する方法

前述の図-7のデータの解析において、初期化直後にも関わらず、既知点での鉛直方向の計測値(初期値)の誤差が大きいデータがあった。その場合、初期化直後に計測誤差を確認し、誤差が大

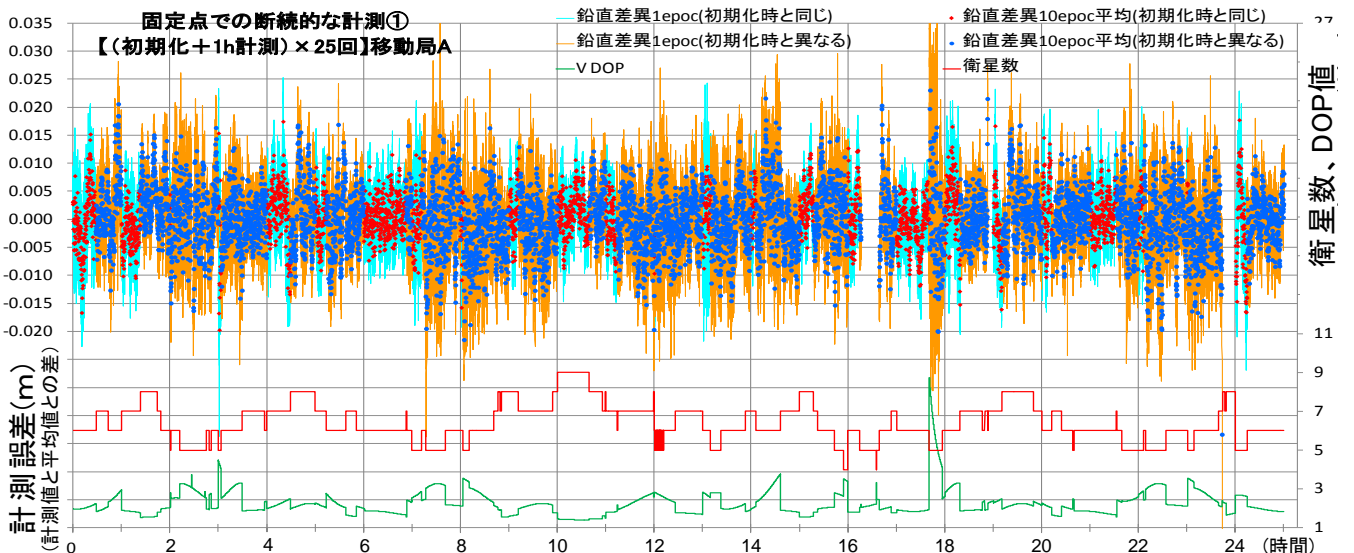


図-9 RTK-GNSSを固定して初期化後1時間計測(25回)で取得した計測値(鉛直方向)

きい場合は再初期化する方法であれば、手戻りがないことから現場導入に適した方法と考えられる。そこで、図-7の17回取得したデータから初期化直後10mm以上の誤差を持つ2回のデータを削除したところ、ほぼ目標とする誤差1cm以内となり、その有効性が確認できた(図-12)。

次に、それを図-10の約1時間×25回計測のデータ(平成23年度取得データ)に当てはめてみることにした。この約1時間×25回計測は計測環境に恵まれているようで、データ初期化直後の10epoch平均値が1cm以上のデータが無かった。そのため、5mm以上のデータを2つ(約2時間分)削除してみたが、初期化時と同じ状態では、誤差1cm未満が96.1%で、データを削除しない場合と比べ僅か0.1%の向上であった。サンプル数が少ないため断言できないが、初期化直後の計測値が良いデータ群に対して、小さな値で規制することに有効性は無く、再初期化をする効果がある規制値は1cm程度と思われる。

3.2 ローカライゼーション時の計測精度確保方策

衛星測位では、現場の座標系とGNSS座標系は異なることから、GNSS座標系を現場座標系に変換するローカライゼーション(座標変換)を行う必要がある(図-13)。その現場で最初に設定すれば、以降の工事期間中、その設定を利用することで、現場の座標に変換した計測値が表示される。

RTK-GNSSの計測値は、前述の通り±1cmを超える大きな変動がある。そのため、ローカライゼーション時の計測精度によって、以降の計測全体の計測精度に影響を与えられ(図-14)。その対策として、ローカライゼーションを計測精度の良い時間帯に行ったり、長時間かけて

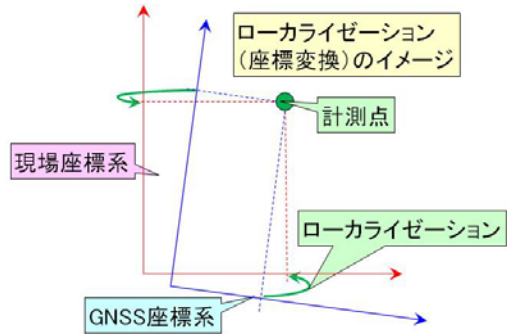


図-13 ローカライゼーションのイメージ

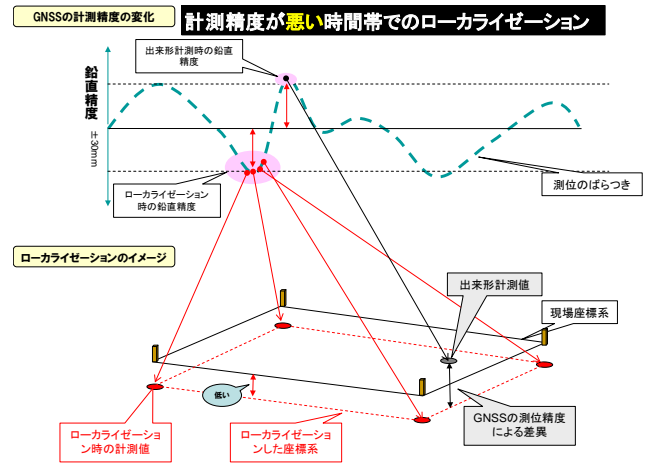


図-14 ローカライゼーションの仕方による精度への影響

行う等によって、計測全体の精度確保を図ることができると考えられる。

3.3 定期的な確認による計測精度確保方策

基準点測量でRTK-GNSSを利用する場合、新たに設置する基準点を1通り計測した後に、同じ点を再度計測して、同じ点に対する2つの計測値の差を見て、計測値が異常値となっていないか確認する手順となっている。

施工現場において、1通り出来形管理した後に、最初の計測点に戻り再計測する方法では、RTK-GNSSのメリットである作業効率が半減する上に、1回目の計測が終わった時点では次の施工に移れないため、導入効果が期待できなくなる。

それに代わる計測精度の確認方策として、出来形計測を行う経路の途中で、定期的に既知点を計測して計測精度を確認する方法とした(図-15)。万一、既知点で大きな誤差が判明した場合には、前の確認した既知点に戻り再計測することになる。頻繁に既知点で確認すると手間がかかるので、確認手間と手戻りを勘案し、定期的な確認は100~200m毎に行うことを目安として考えている。

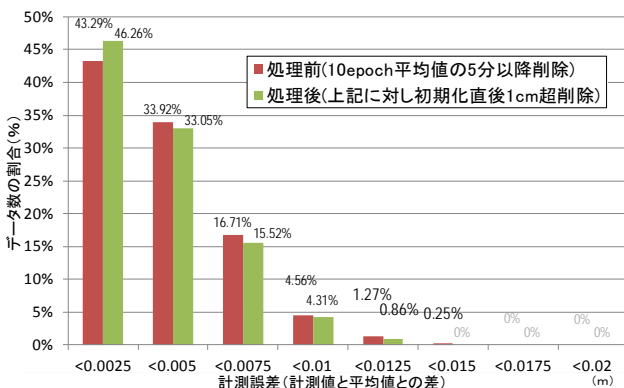


図-12 10epoch平均値の精度向上策の効果

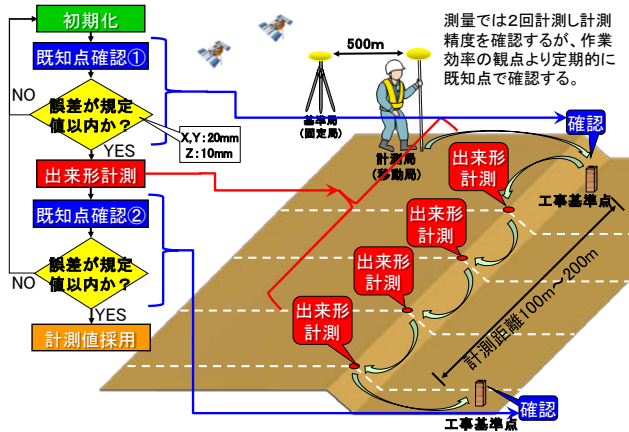


図-15 定期的な計測精度の確認

なお、定期的に確認する既知点は、工事開始時の起工測量時など工事基準点を設置する際、計測箇所を見据えて設置しておくこととなる。

#### 4. 考察

データからは、土工の出来形管理に必要な計測精度（鉛直方向）の確保に、「衛星配置を予想し、初期化後に長く受信できる同じ衛星から受信し、受信できなくなったら再初期化する機能」や「初期化直後に精度確認し、誤差10mm以上だと再初期化する運用」は有効な方策と成り得る可能性がある。しかし、4万強と9万弱の膨大なデータ数を利用しているものの、計測精度の検証の観点からは、天空が開けアンテナの受信条件の良い箇所で一時期だけ計測したデータに過ぎず、様々な現場・時間帯で広く必要な計測精度を確保できる裏付けとはならず、今後も、様々な場所でデータを取得し検証する必要がある。ただ、RTK-GNSSの特性を熟知した利用者が、条件を見極め、完成形状の施工管理と検査職員の出来形検測の両方に利用するのでは無く、施工途中も含め施工者の施工管理のみで慎重に扱うのであれば、利用可能と考えられる。国総研では、「施工管理データを搭載したRTK-GNSSによる出来形管理要領」の試行案を作成し国総研ホームページ上<sup>2)</sup>に掲載しており、RTK-GNSSの利用に際して、参考にして頂けると幸いである。

#### 5. 今後の展開

将来に向け、先で提案したような方策の確立が望まれるが、直ぐの実用化は期待できない。一方、RTK-GNSS単体で必要な計測精度を安定して得

ることは難しいことから、レーザー光を利用して高さを補完する方式が開発されている。新たな機器の追加費用が必要だが、安定して必要な計測精度を得ることができる。GNSSを利用した出来形管理は、高さを補完する方式を利用することが当面の現実的な方策であるため、これまでの知見を基に、要領と併せて利用する手引きの形で整理した。また、その方式は計測精度確認の公的制度がないことから、現場で計測精度を確認するガイドラインを手引きの付属として作成したので、今後、現場検証等を行って確立したいと考えている。

#### 謝 辞

(一社)日本測量機器工業会には、多大なご助言を頂きました。ここに記して厚くお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 国総研 情報基盤研究室「研究分野 情報化施工」：  
[http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bunya/cac/index\\_cac.html](http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bunya/cac/index_cac.html)
- 2) トータルステーションを用いた出来形管理  
情報提供サイト：<http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/ts/>
- 3) 梶田洋規、北川順、遠藤和重、藤島崇、椎葉祐士：施工管理データを搭載したRTK-GNSSによる出来形管理の適用に関する検討、2010年度 土木情報利用技術講演集、Vol.35、2010年10月21日
- 4) 梶田洋規、北川順、平城正隆：情報化施工に利用する衛星測量技術「RTK-GNSS」で取得したデータの特徴、土木技術資料、第53巻、第5号、pp.18~21、2011年5月
- 5) 梶田洋規、北川順、重高浩一：衛星測位技術「RTK-GNSS」の施工管理への適用に関する検討、平成23年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、2011年11月
- 6) 梶田洋規、北川順、重高浩一：衛星測位技術「RTK-GNSS」の出来形計測精度の確保方策の検討、平成24年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、2012年11月

梶田洋規



国土交通省国土技術政策総合研究所  
高度情報化研究センター情報基盤研  
究室 主任研究官  
Hiroki KAJITA