

山間部建設現場における衛星測位シミュレーション ー簡易かつ高精度なシミュレーションによる予測ー

前田建設工業株式会社

正会員 ○工藤 新一

正会員 河野 浩之

正会員 工藤 敏邦

フジミコンサルタント株式会社

秤谷 嘉明

株式会社構造計画研究所

正会員 江森 洋都

古川 玲

吉敷 由起子

1. はじめに

近年、ICT 施工の導入が進み、建設現場では、マシンコントロール (MC) やマシンガイダンス (MG) に対応した建機の利用が増加している。それとともに、トータルステーションや GNSS (Global Navigation Satellite System) による位置情報の利用も拡大している。その一方で、山間部の建設現場においては、掘削の進捗に伴い RTK-GNSS (Real Time Kinematic-GNSS) に必要な衛星が捕捉しにくくなり、ICT 土工が施工不能となる、もしくは掘削精度が悪くなるケースが確認されている。これらの問題を未然に防止するためには、電波伝搬解析による高精度な衛星測位の予測が有効であると考えられる。

本稿では、山間部のダム建設現場 (図-1) を対象として、現地の衛星測位状況を調査し、電波伝搬解析の有効性を検証するとともに、現場運用を考慮した簡易かつ高精度な衛星測位の予測方法を検討した。これらの結果について報告する。

2. 衛星測位状況の調査

(1) 衛星測位の予測方法

衛星測位の予測は、任意の日時・場所における衛星や、GNSS 受信機の位置およびその周辺の環境情報をもとにシミュレーションを行う。衛星測位シミュレーションの種別としては、衛星と GNSS 受信機の見通し状況を模擬する見通しシミュレーション (見通し解析) や、周辺の構造物や地形による遮蔽やマルチパスを考慮したレイトレース法による電波伝搬シミュレーション (電波伝搬解析) などが挙げられる。

今回は、比較的精度の高い衛星測位の予測ができる「電波伝搬解析」を適用し、衛星測位のシミュレーションを実施した。また、周辺地形、掘削形状、現地の植生状況 (樹高を 10m と仮定) を反映させた 3D モデル (図-2) を作成・利用し、実際の基準局と移動局の位置を考慮して、RTK-GNSS の測位状況を予測した。



図-1 ダム建設現場 (岐阜県 内ヶ谷ダム)

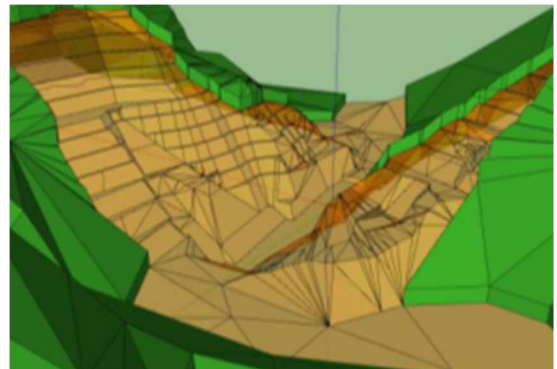


図-2 作成した 3D モデル

シミュレーションは、基準局と移動局共通で補足可能かつ信号が高品質な衛星の数により判定した。受信した信号が SNR (Signal to Noise Ratio) $\geq 38\text{dB}$ である衛星を信号が高品質な衛星とし、RTK-GNSS に最低限必要な 6 機以上であれば衛星測位 OK、5 機以下を NG と判定するようにした。

キーワード RTK-GNSS, 衛星測位シミュレーション, MC/MG, ICT 土工, 3D モデル, 山間部現場

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株) TEL 03-5276-5166

なお、ソフトウェアは、電離層誤差、対流圏誤差、マルチパス誤差の影響を考慮した測位精度および測位率をシミュレーションできる GPS-Studio¹⁾を使用した。

(2) 現地調査の概要

現地調査では、シミュレーションの対象日に、①移動局・固定局で捕捉される衛星名と衛星数、②信号品質・SNR、③RTK-GNSS 利用の可否、④測定位置からの見通し状況等の調査を実施した。調査状況および使用した機器を図-3 に示す。

3. 電波伝搬解析の適用性

(1) 電波伝搬解析による予測と現地調査結果の比較

電波伝搬解析による予測と現地調査結果の比較の一部を図-4 に示す。全般を通して、衛星測位シミュレーションでは数か所で NG となっているが、実際の現地調査では殆どの箇所で GNSS 衛星測位が OK という結果になった。また、衛星測位がシミュレーションでは NG で、現地調査において OK となった箇所は、掘削法面の切り出し部分や法面脇の樹木に近い場所に集中していることが判った。



図-3 調査状況および使用機器

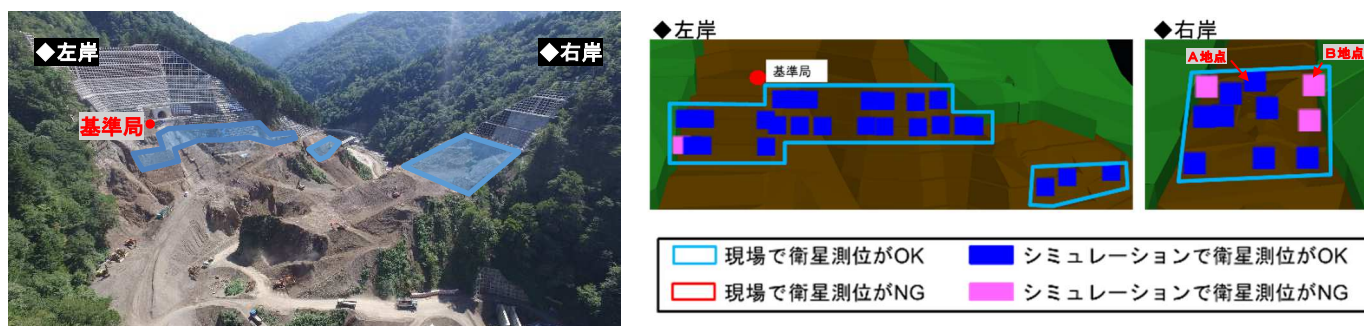


図-4 シミュレーションと現地調査結果の比較（一例）

(2) 電波伝搬解析の有効性

図-5（左）にシミュレーションと現地調査に相違がなかった右岸 A 地点、図-5（右）に相違があった右岸 B 地点における使用衛星と全天球写真をそれぞれ示す。

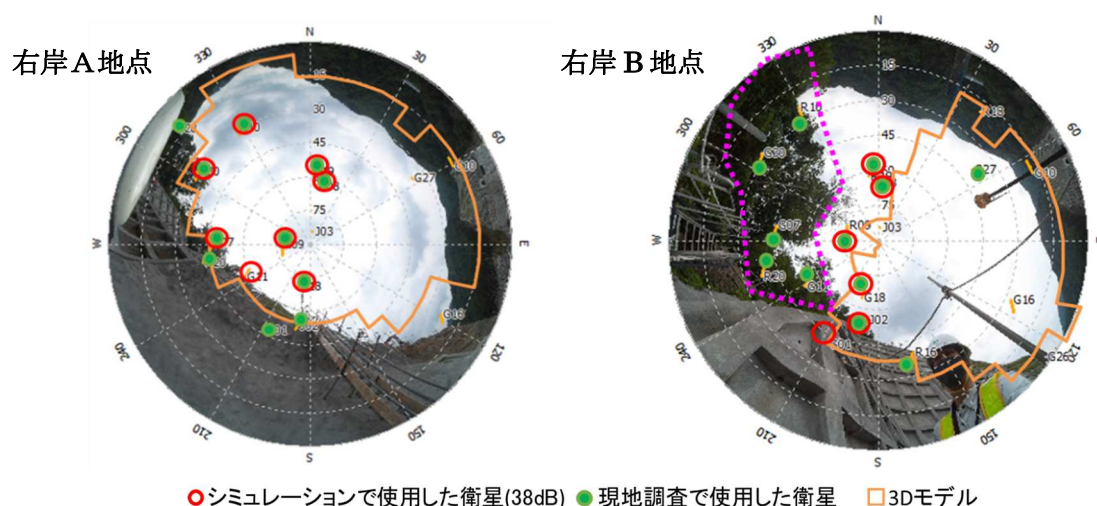


図-5 シミュレーションと現地調査結果の相違

右岸 A 地点においては、3D モデル（図中橙色線）と現地の地形がほぼ整合している。法際のシミュレーションで見通せていないが、現地においては品質が良く、利用可能となっている衛星が若干存在するが、概ねシミュレーションと現地調査の結果は整合しているといえる。

一方、右岸 B 地点において、シミュレーションに使用した 3D モデルと実際の地形を比較したところ、樹木の張り出しの程度（図中紫色破線部）が大きく異なっており、結果に大きな影響を及ぼしたと推測される。

また、樹木付近の上空に位置する衛星の信号品質として SNR を確認すると、樹木により衛星は見通せていないが高品質な信号を受信しているものや、構造物と空の境界付近で見通せているが信号の品質が悪いものがあることを確認した。これらが、衛星測位の予測精度に大きく影響しているものと考えられる。

以上の結果より、シミュレーションと現地調査結果が整合しないデータについても、詳細に検証することで相違の原因が特定できるため、山間部において GNSS を活用して施工する際には、事前に電波伝搬解析により GNSS 衛星測位の状況を確認することが有効であると考えられる。

また、今回の調査により、樹木なども含めた 3D モデルの精度が結果に大きな影響を及ぼすため、概略な調査だけではなく、ドローンや 3D レーザースキャナ等の計測を実施し、正確な地表面形状や樹木の高さを 3D モデルに反映することの必要性が明らかとなった。

4. 簡易かつ高精度な衛星測位予測方法の検討

電波伝搬解析は、予測精度が高い反面、計算量も多くなるというデメリットがある。建設現場での運用においては、高い予測精度を保ちつつ、短時間で予測することが望まれる。以上のことから、電波伝搬解析よりも簡易な見通し解析を使用し、より高精度な予測が可能かを検討した。なお、本稿の衛星測位シミュレーションには GPS-Studio¹⁾を使用した。

両シミュレーションでは、図-6 のような山間部の建設現場の 3D モデルを使用し、データは 1 時間毎の 12 時間分を合計 2 日分取得した。GNSS 受信機を 98 台（1 日目 40 台、2 日目 58 台）配置した。使用した衛星システムは GPS・QZSS・GLONASS であり、信号は全て L1 帯を使用した。

本稿では、電波伝搬解析の結果を真と仮定し、見通し解析をベースとした手法から、その結果を再現できるように着目した評価を実施した。

(1) 電波伝搬解析と見通し解析の差異

電波伝搬解析では、高精度測位において、ある衛星を使用するかどうかの判定を、信号の品質で判定する。図-7 のように、高精度測位を実施する際に最低限必要な 6 機を満たしているかを判定している。受信信号の品質は SNR を用い、SNR が 38 dB を超えていれば、高品質な衛星信号であると判断した。

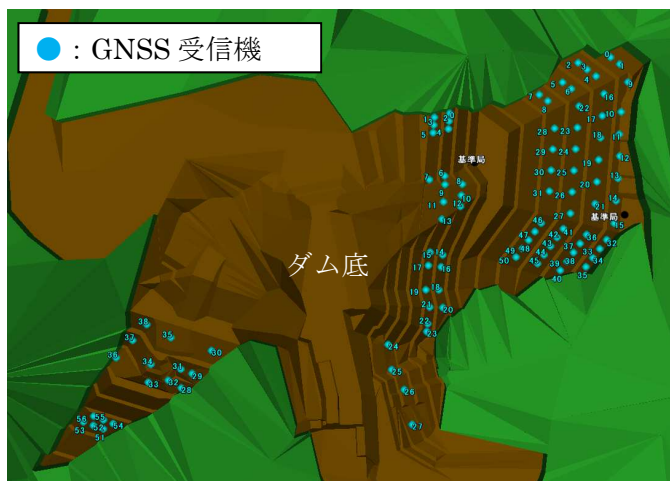


図-6 シミュレーション環境

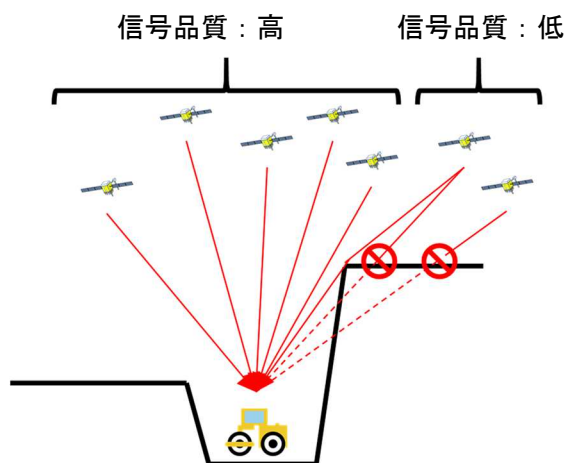


図-7 衛星の信号品質

見通し解析では、見通しの有無により衛星の品質を判定した。それぞれの結果の組合せは図-8 の通りである。電波伝搬解析で高品質かつ見通し解析で見通しが有った場合と、電波伝搬解析で低品質かつ見通し解析で見通しが無かった場合は、両シミュレーションが同じ結果と判定し、それ以外は異なる結果と判定した。その結果を図-9 に記す。電波伝搬解析と見通し解析が同じ結果であった比率は赤枠の 81%であった。異なる結果と判定されたのは残りの 19%であった。異なる結果の内訳は電波伝搬解析では信号品質が低い、見通し解析では見通しが有ると判定されていた結果がほぼ全てであった。これは周囲の地形によるマルチパスの影響により信号品質が下がる現象を、見通し解析だけでは模擬できていないことが原因と考えられる。

		見通し解析による、見通し判定	
		有	無
電波伝搬解析による信号品質	高	同	異
	低	異	同

図-8 解析結果の比較（差異）

(2) 見通し解析の精度向上

本研究では、簡易な手法である見通し解析をベースとし、電波伝搬解析のような高精度化を目指し、以下の 2 点を検討した。

① 衛星数の閾値を異なる結果の比率に合わせ増加

高精度測位の必要条件である衛星数の閾値 6 機を、異なる結果の比率に合わせて機数を増やすことで、異なる結果があった場合でも確率的にそれ以外の衛星で正しく判定が行えると考えられる。

② 低仰角衛星の除外

低仰角の衛星を除外して判定することで、異なる結果となる衛星を除外できると考えられる。図-10 は 3D モデルの天空画像上の衛星位置に、全時間帯の判定結果をプロットした

結果である。異なる結果判定が発生しているのは山の稜線付近が主であり、マルチパスが原因であると考えられる。法面の掘削などを行うエリアでは、法面と逆側の約半分の空が開けていることが多い。開けている側の山の稜線付近に位置する低仰角の衛星を除外することで、異なる結果と判定される衛星の大部分を除外可能であると考えられる。

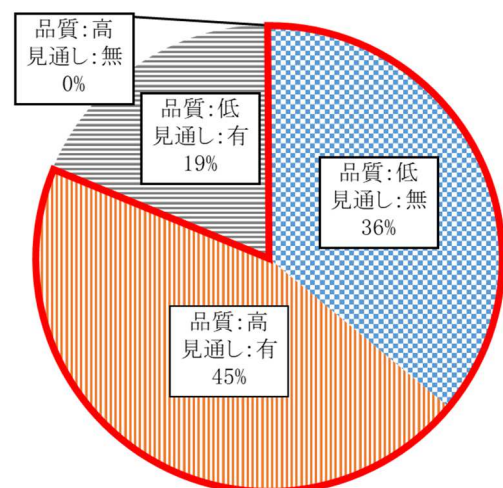


図-9 解析結果の比較（割合）

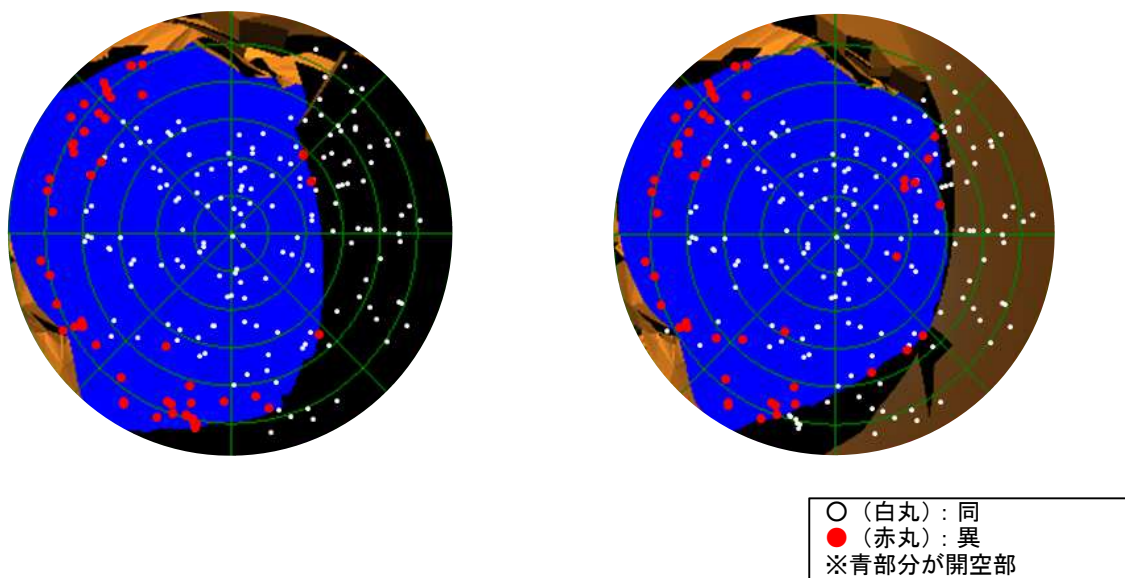


図-10 天空画像にプロットした見通し解析の結果

(3) 精度向上の評価

前項(2)の②のように低仰角（20度以下の）衛星を除外した結果を、図-11 に記す。電波伝搬解析と同じ結果と判定されたのは、81%から 89%に向上していることを確認した。また同じ結果と判定されていた衛星が除外された割合は 0.3%であり、低仰角の衛星を除外した場合でも同じ結果の判定には殆ど影響を与えていないことを確認した。

前項(2)の①と②を組合せ、各日時と場所における解析を行った。衛星の閾値は誤判定の比率である 11%増加させ、7機とした。電波伝搬解析では全組合せ（1176 通り）のうち 92%で高精度測位が可能であったのに対し、提案手法を適用した見通し解析の場合は 94%と電波伝搬解析と近い結果を得られた。

電波伝搬解析と異なると判定された結果を確認すると、図-12 のように発生位置に特徴があった。この場所の特徴を分析することでより高い精度の判定が行えると考えられる。

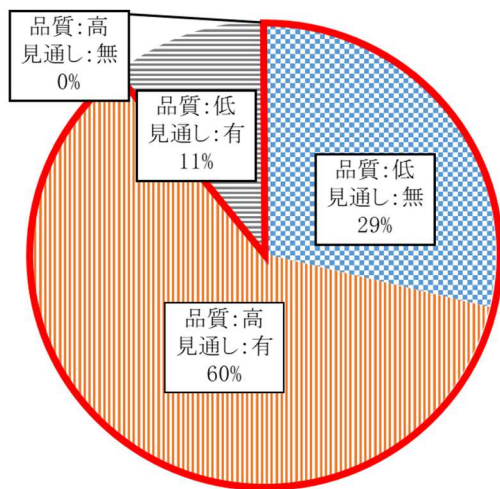


図-11 低仰角衛星を除外した場合の解析結果



図-12 電波伝搬解析と異なると判定された地点

5. おわりに

今回の調査により、山間部建設現場での電波伝搬解析の有効性が明らかとなった。また、見通し解析でのマルチパスの考慮不足により、電波伝搬解析と異なる結果が発生することを考慮し、高精度測位に必要な衛星の閾値を上げ、さらに低仰角の衛星を除外することで、判定精度が電波伝搬解析に近づくことを確認した。

電波伝搬解析と異なると判定された結果は、発生場所として特徴があるため、今後はその場所の特徴を分析し、より高い精度の予測について検討する。また、今回の結果を他の建設現場にも適用し、本手法の妥当性やパラメータの一般化などの検討を進める。

最後に、本件にご協力いただきました、岐阜県および現場作業所の関係者皆様に深く謝意を表します。

参考文献： 1) GPS-Studio, <https://network.kke.co.jp/products/gps-studio/>