

トンネル工事における CIM/ICT の取組み

ー山岳トンネル CIM ソフトの開発、

シールド工事における人工衛星データの活用ー

Development of CIM and ICT Technologies for Tunnel Construction

- A New CIM Software for Mountain Tunneling and Shield Tunneling with Satellite Data -

宮田岩往*

要 旨

山岳トンネル工事、およびシールド工事において CIM/ICT 技術を施工に活用した事例を報告する。山岳トンネル工事において CIM を導入するには、基本となる 3 次元地盤モデルを作成し、トンネル掘削や地山に関する各種計測データの登録、煩雑な 3 次元 CAD の操作などで多大な時間を必要とし、現場への導入と運用には高いハードルがあった。そこで、データ作成の簡易性と快適な操作性を実現する山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発して、現場の実務で CIM を効率的に運用した。シールド工事では、シールド機の掘進に合わせて直上の道路やその周辺地域の地表面変位状況を把握し、その変位量を最小限に抑えながら安全に掘進することが重要である。しかし、道路上の交通状況や周辺地域における私有地の問題から従来の測量器による測量が困難な場合も多く、また計測に多大な労力を要している。そこで、SAR 衛星データを用いて地表面変位測量を実施し、従来のレベル測量と同等の精度で、面的な変位量を効率的かつ安全に計測できることを実証した。

キーワード：CIM、ICT、準 3 次元地盤モデル、可視化、SAR 衛星

1. まえがき

国土交通省は、建設事業全体の高度化と生産性向上を目的に平成 24 年度から CIM¹⁾ の試行業務を開始し、平成 25 年度からは試行工事へと段階的に適用範囲を拡大して導入効果・課題の検証を進めてきた。平成 28 年度末には、工種ごとの CIM 導入ガイドラインを策定し、CIM の取組みをより広く進めている。また、平成 28 年度から開始した i-Construction²⁾ は、当初の ICT 土工に続いて、今年度から ICT 舗装工、ICT 浚渫工が導入され、施工段階で 3 次元モデルを活用する動きが活発化しており、CIM の本格導入に向けた動きが加速している。また、様々な ICT 技術が急速な進歩を遂げており、これらの ICT 技術を施工現場に活用することで、建設事業における課題とされる生産性向上への期待も高まっている。

今回、これらの CIM/ICT 技術をトンネル工事に適用し、山岳トンネル工事については CIM の導入を、シールド工事については ICT 技術を施工現場に適用し、施工管理の高度化と生産性向上に取り組んだ。

山岳トンネル工事へ CIM を導入するに当たっては、基本となる 3 次元地盤モデルを作成し、同モデルにトンネル掘削や地山に関する各種計測データを連携させる必要がある。しかしながら、これらの作業には煩雑な 3 次元 CAD の操作などで多大な時間を必要とし、また、導入した CIM を円滑に運用するためには、その扱うデータ量の多さから高性能なパソコンが必要であるなど、現場への導入とその運用には高いハードルがあった。そこで、施工現場の実務で CIM を効率的に運用するためのトンネル CIM 用ソフトウェアの開発を行った。開発にあたり、航空測量などによって取得される大量の点群データを統合表示でき、大量データの高速度処理が可能で高いレスポンスを持つパソコ社保有の 3 次元基本ソフトウェア「PADMS」をベースとして、それを山岳トンネル CIM 用にカスタマイズすることにより、データ作成の簡易性と快適な操作性を実現し、これにより現場の CIM 導入、運用にかかる負荷を大幅に軽減させることができると考えた。また、CIM の本格導入に向けて CIM 技術検討会³⁾ トンネル WG⁴⁾ で取り纏めた「CIM トンネルモデル作成ガイドライン」⁵⁾ を念頭に開発を進

*管理本部情報システム部

めた。この CIM 技術検討会は、建設関係団体のメンバーで構成され、平成 24 年に発足した会であり、国土交通省の CIM 制度検討会と有機的に連携し、CIM の本格的な導入に向けて検討を進めており、平成 28 年度からは CIM 制度検討会と統合し、「CIM 導入推進委員会」として活動を継続している。本報では、これらの山岳トンネル工事における CIM の取組みについて報告する。

シールド工事では、道路上の交通状況や周辺地域における私有地の問題から従来の測量器による地表面変位測量が困難な場合も多く、また計測に多大な労力が掛かっていることから、効率的かつ安全に地表面変位状況を計測する測量手法の確立が課題となっている。そこで、人工衛星によって撮像された SAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダー) ⑩ のデータを用いることで、効率的かつ安全に地表面変位を計測できると考え、従来のレベル測量と同等の精度で計測できるか検証を行った。これらのシールド工事における ICT 技術を活用した取組みについて報告する。

2. 山岳トンネル工事における CIM の取組み

2.1 概要

山岳トンネル工事の施工現場において CIM を円滑に運用するために山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発して実工事に適用し、山岳トンネル工事における施工情報の可視化による施工管理の高度化と生産性向上に取り組んだ。

2.2 山岳トンネル CIM ソフトの開発

従来、山岳トンネル工事へ CIM を導入するには、ハイスペックなハードと 3 次元 CAD ソフトによる煩雑な操作により 3 次元地盤モデルを作成するなど、導入準備と現場での実務運用には高いハードルがあった。そのため、パスコ社が保有する「PADMS」をベースに、現場実務でスムーズに活用できる山岳トンネル CIM ソフトを開発した。「PADMS」は、元々 UAV や航空機、MMS など多種多様な計測センサーによって取得・生成された点群データなどの大容量 3 次元基盤情報データを、複数取り込んで統合表示させる機能を保有しており、大量データの高速処理を得意としているソフトウェアであった。そこで、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルには、国土地理院から公開されている基盤地図情報、およびトンネル線形情報の 3 次元データと、地質平面図・地質縦断面図の 2 次元図面を組み合わせることで簡易的に 3 次元地盤モデルを表現する「準 3 次元地盤モデル」を採用することとした (図-1)。この「準 3 次元地盤モデル」は、「CIM トンネルモデル作成ガイドライン」に準拠しており、最小の手間と時間で 3 次元地盤モデルが作成できる点が優れている。これによ

り、3 次元地盤モデルの作成時間が飛躍的に短縮できた。

また、日々の掘削管理に使用している測量・計測システムなどで得られる切羽情報 (切羽の写真・切羽観察記録・地山評価点)、支保工パターン、削孔検層システムなどによる切羽前方探査情報、およびボーリングデータなどの情報を「準 3 次元地盤モデル」に取り込んで連携させることで、山岳トンネル工事に関する施工情報を可視化・一元管理できるトンネル CIM モデルを構築した (図-2)。このトンネル CIM モデルは、図-3 に示すように切羽ごとの切羽観察記録がデータベース化されて自動連携されており、図-4 に示すように切羽ごとの切羽写真や切羽断面の天端部、左肩部、右肩部および総合地山評価点が点数によって色分けされて表示される。

また、図-5 に示すように地山等級に合わせて実際に設置された実施支保工パターンがパターンごとに色分けされて表示される。この CIM モデルには、他にもボーリングデータや削孔検層システムデータなどの切羽前方探査データを統合して表示させることができ、モデルから削孔検層システムによる削孔エネルギー値グラフを参照することもできる (図-6)。

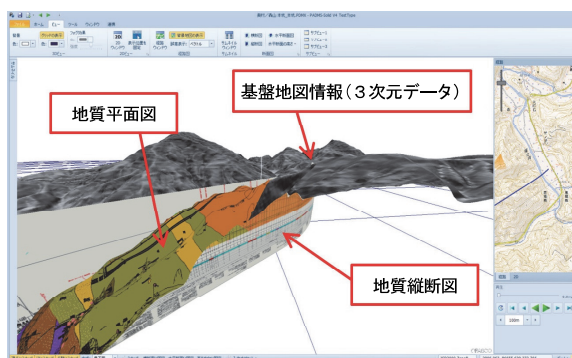


図-1 準3次元地盤モデル

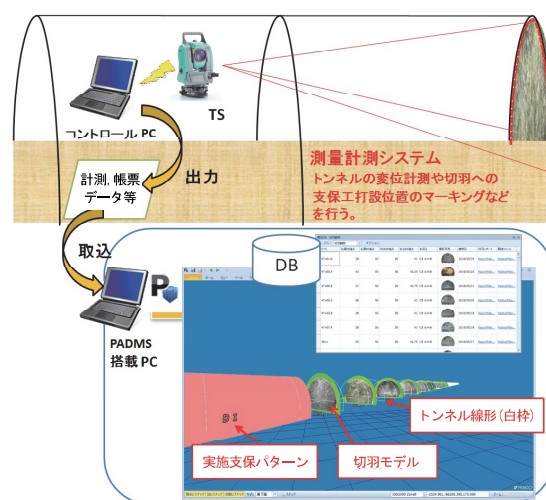


図-2 測量・計測システムとのデータ連携

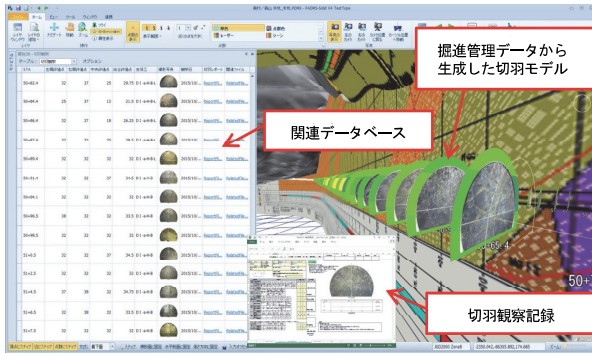


図-3 切羽情報とデータベースとの連携

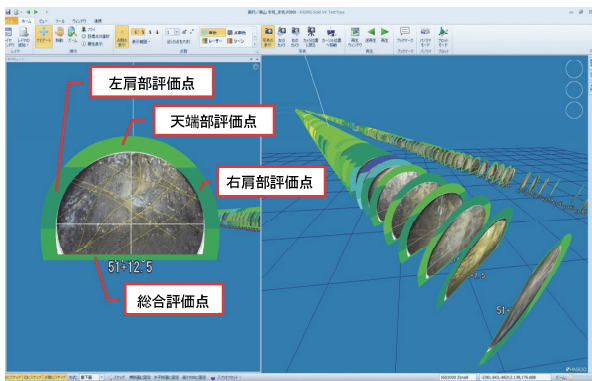


図-4 切羽写真と地山評価点の表示例

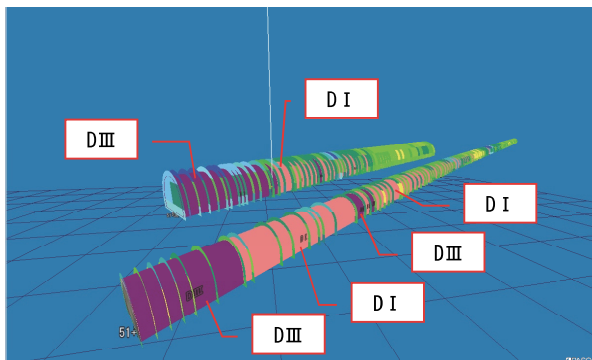


図-5 実施支保工パターン表示例

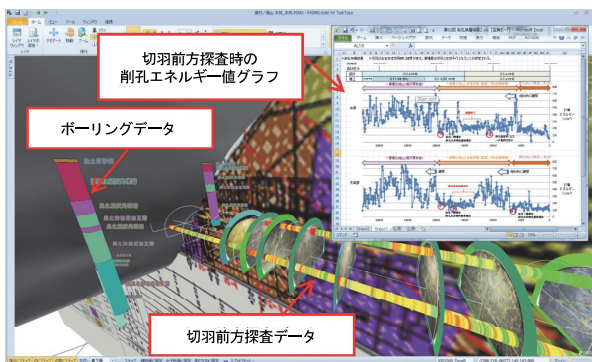


図-6 切羽前方探査データおよびボーリングデータ

2.3 実施結果

山岳トンネル工事の施工現場において CIM を円滑に運用するために山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発し、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルに「準 3 次元地盤モデル」を採用することで、3 次元地盤モデルの作成に要する時間を 1/10 に低減した。具体的には、本坑および避難坑の延長がそれぞれ約 1.7km の工事で、従来は約 10 日程度要していたモデル作成時間が約 1 日に短縮できた。また、日々の施工管理で蓄積している測量・計測システムのデータを取り込むことで、簡単に施工情報の可視化が可能となった。さらに、大量データの高速処理と高いレスポンスに強みをもつパソ会社の「PADMS」をベースに開発したことで、さほどスペックが高くない通常のパソコンでも動作できるようになり、実際の施工現場における実用レベルでのトンネル CIM の効率的な運用を実現した。

3. シールド工事における ICT 技術の取組み

3.1 概要

掘進管理データから生成した切羽モデル

シールド工事の施工現場において、人工衛星によって撮像された SAR データを用いた変位測量をシールド工事に適用し、従来のレベル測量と同等のミリ単位の高精度を確保しつつ、地表面を面的かつ広範囲に測量できることを実証した。

3.2 SAR 衛星による測量手法

SAR 衛星は、地球を周回するレーダー衛星の一種で、地球に向けてマイクロ波を照射し、その反射波を受信することによって対象物の観測を行うものである。SAR 衛星は、太陽光を光源として撮影するという通常の撮影原理とは異なり、自らマイクロ波を照射し、その反射情報から地表面を観測するため、天候の影響を受けにくく、悪天候時や夜間においても地表面の情報の取得が可能である。

今回の計測は、2007 年と 2010 年にドイツの宇宙機関が打ち上げて運用している TerraSAR-X (図-7) と呼ばれる SAR 衛星のデータを利用した。なお、この SAR 衛星の回帰日数 (撮影頻度) は 11 日周期となっている。

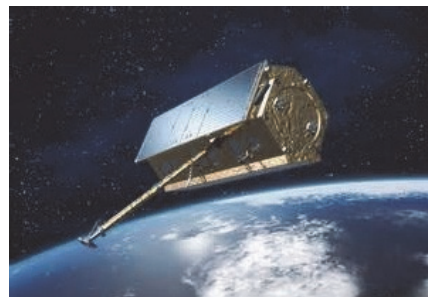
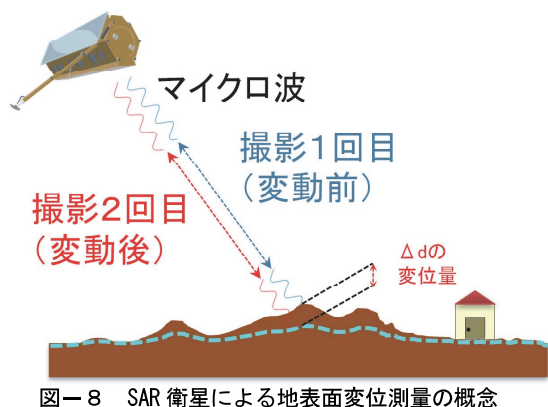


図-7 TerraSAR-X

今回用いた反射波データ解析手法は、図-8に示すように異なる時期における受信波長の位相差の違いから変位量を推定するもので、地面、電柱、照明灯、建築構造物の上面や側面など、SAR衛星データを安定して計測可能な点(PS点)を抽出し、このPS点における位相差データ(Δd)を用いて解析を行うものである。



3.3 シールド工事への適用

今回適用したシールド工事における掘進ルートの周辺は、駅に近く戸建住宅および集合住宅が密集するエリアであり、交通量が多い上に歩道が狭く、従来のレベル測量のみでは測量位置制限を受けることが懸念されていた。適用したシールド工事の概要を表-1に、SAR衛星の観測内容を表-2に示す。SAR衛星による対象地域の観測は、衛星進行方向の測点間隔0.24mで、シールド掘進開始から完了までの約1年2か月の期間に計30回以上実施した。この高密度・高頻度でのSAR衛星観測は国内初の事例である。

3.4 SAR衛星による地表面変位計測の精度確認

SAR衛星による地表面変位計測結果と現地におけるレベル測量を比較することで精度検証を実施した。図-9は、現地のレベル測量値-SAR衛星による測量値の誤

差を度数分布表示させたものである。SAR衛星による地表面変位測量の精度は、現地レベル測量結果を真値とした場合、平均二乗誤差(以下、RMSE)において1.8mmの結果となった。また、本工事の完了時点における変位状況は、現地のレベル測量において平均-0.7mm(標準偏差1.4mm)、SAR衛星による地表面変位測量において平均-0.7mm(標準偏差1.6mm)であり、両者とも本工事による変位が小さいという同様の傾向を示している(図-10)。また、計測したPS点は、シールド機の掘進ルート上を、10m²あたり約6点の高い観測密度で観測できており、地表面の変位を面的に捉えることができた(図-11)。

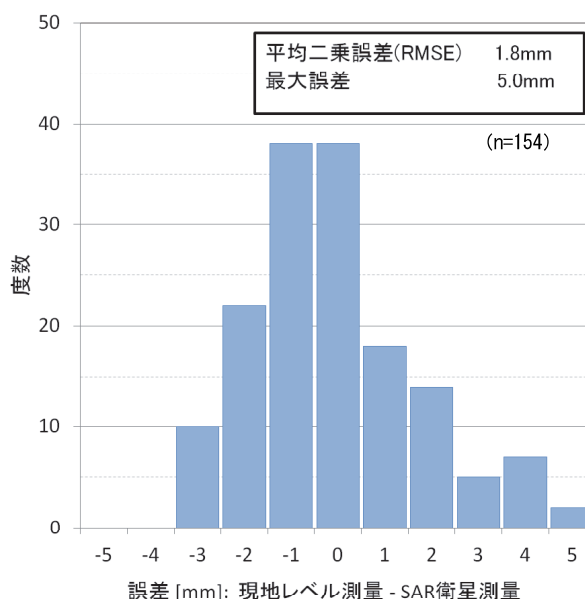


表-1 適用したシールド工事の概要

工事名称	新川第6排水区新川6号幹線(雨水)(その1)公共下水道工事
工事場所	京都市西京区川島松ノ木本町他地内
発注者	京都市上下水道局
施工業者	奥村組・岡野組・日新建工特定建設工事共同企業体
工事概要	泥土圧式シールド工法 延長1,176m シールド外径2,890mm

表-2 SAR衛星の観測内容

衛星名	高度	観測幅 ^{※1}	回帰日数	入射角度	地上分解能 ^{※2}
TerraSAR-X(独)	514 km	4km×3.7km	11日	40度	0.24m

※1: 直角方向×衛星進行方向 ※2: 衛星進行方向

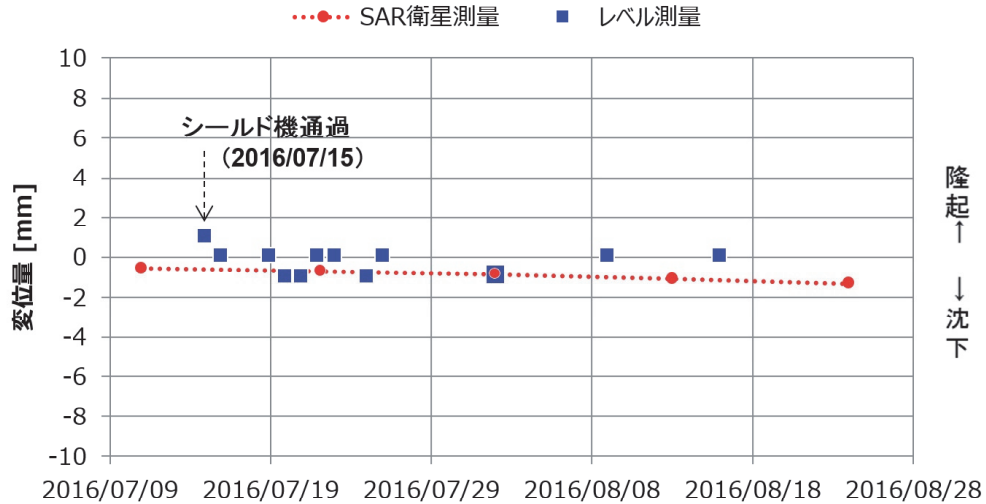


図-10 No.28 地点付近における変位測量結果の比較

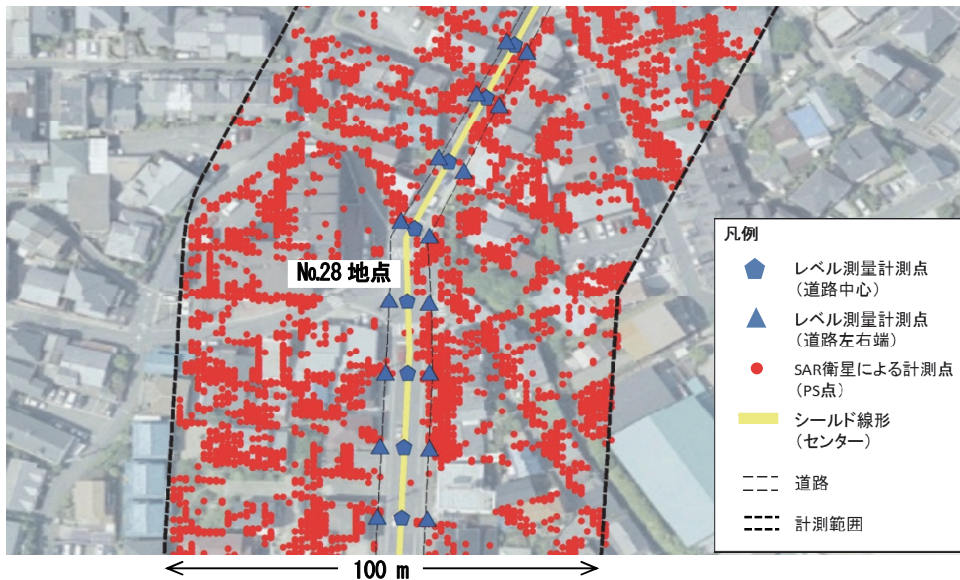


図-11 No.28 地点付近における計測点の比較

3.5 実施結果

現場のレベル測量と同程度（RMSE 1.8mm、最大誤差 5.0mm）の良い精度で変位傾向を捉えることができた。また、計測した PS 点は、10m²あたり約 6 点の高い観測密度であり、地表面の変位を面的に捉えることができた。

課題としては、現場での変位計測を開始する前から、事前に SAR 衛星による計測を行っておく必要があることと、SAR 衛星による変位計測間隔は 11 日周期となることから、リアルタイムでの計測はできないため、日次で測量する地表面変位測量を補完する位置付けとなることである。

4. あとがき

国土交通省が推進している CIM を山岳トンネル工事に、また最先端の ICT 技術である SAR 衛星データによ

る地表面変位測量をシールド工事に適用した。

山岳トンネル工事については、山岳トンネル CIM 用ソフトウェアを開発し、トンネル CIM の基となる 3 次元地盤モデルに「準 3 次元地盤モデル」を採用した。また、日々の施工管理で蓄積している測量・計測システムのデータを取り込むことで、施工情報の可視化による施工管理の高度化とトンネル CIM の効率的な運用を実現し、生産性を向上した。このトンネル CIM モデルには山岳トンネル施工に関する情報がデータベース化されており、竣工後は CIM 本来の目的である維持管理データとしても活用できる。また現在、このトンネル CIM モデルを用いて切羽前方地山の予測への活用を検討しているところである。

シールド工事については、最先端の ICT 技術である SAR 衛星データによる地表面変位測量を現場適用し、衛星進行方向の測点間隔 0.24m でシールド掘進開始か

ら完了までの約1年2か月の期間に計30回以上観測を行った。このような高密度・高頻度での SAR 衛星観測は国内初の事例となった。実際の変位測量開始前から事前に計測を行っておくことと、衛星の回帰日数により計測間隔が11日周期となることなどの課題もあるが、建設業従事者の減少への対応として有効な ICT 技術であり、シールド工事に限らず工事全般に広く適用範囲を拡大し、業務効率化に最適な活用場面の検討と今回の測量手法のレベルアップを図っていきたい。

【参考文献】

- 1) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、pp.2-3、2016.6
- 2) 国土交通省大臣官房技術調査課 工事監視官 山下眞治、「国土交通省における CIM の取り組み【CIM の新たな検討体制】」、CIM 2016、一般財団法人経済調査会、pp.4-5、2015.7
- 3) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、p.1、2016.6
- 4) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告」、p.14、2016.6
- 5) CIM 技術検討会、「CIM 技術検討会 平成 27 年度報告【別冊資料】」、pp.59-62、2016.6
- 6) 山中雅之、森下 遊、大坂優子、「干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出」、国土地理院時報、No.124、pp.1-14、2013
- 7) 塚本耕治、「削孔検層法によるトンネル切羽前方探査—打撃によるエネルギーを指標に用いた地山評価—」、土木技術、Vol.70、No.9、pp.27-32、2015.9