

設立 50 周年記念特別座談会  
未来を支えるトンネル技術と持続可能なインフラの構築  
—トンネルと地下 2025.8 特集号フルバージョン—

JTA 記念事業実行委員会

## はじめに

**司会** 本日は、JTA 設立 50 周年記念の座談会にご出席頂き誠にありがとうございました。私は設立 50 周年実行委員会幹事長の佐原です。副幹事長である坂田氏と共に司会を務めさせていただきます。ご出席の皆様方のご協力ご支援よろしくお願いたします。

日本トンネル技術協会が、昭和 50 年 8 月国の認可団体となってから 50 年経つことを記念した事業は、「社会を支え、未来へつなぐトンネル・地下空間」をテーマとして、各種イベントを企画・実施しております。本日の座談会はその一環として実施するものであり、50 年を振り返りながら、ご自身の経験等からトンネル技術者に伝えたい技術的なこと、精神論的なこと、大切にしたい事柄などについて語って頂きたいと思ひます。

この 50 年間のトンネル技術を振り返るとその進歩は目覚ましく、山岳工法では矢板工法から NATM へ、小断面から超大面トンネルへの対応技術、各種不良条件下への対応技術等、また、シールド工法では、開放型から密閉型、多様断面、異形断面等ニーズに対応した施工が可能となっています。

近年においては、少子高齢化の中、工事に係る労働者不足、これまで活躍してきた経験豊富な技術者の退職が進みつつあります。また、建設後 50 年を超えるトンネルが増えつつあるという課題があります。これらを補填すべき策として、外国人労働者の採用、魅力ある労働作業環境設備、苦渋作業や危険作業を回避するための新技術(自動化・ロボット)等が技術提案され、多くの現場で実用化されつつあります。

本日の座談会では、近年の話題を 5 テーマ取り上げ、実施したいと思ひますので、闊達なご意見をお願いたします。

### テーマ 1. 技術の伝承、継続教育について

**司会** それでは、近年、トンネル技術者の確保、技術の伝承、外国人労働者の採用、働き方改革というキー

## 座談会出席者

R7.3 月現在

<司 会>

佐原 圭介 (独)鉄道・運輸機構鉄道技術センター  
設計部担当部長

坂田 聡 東京地下鉄(株)鉄道本部工務部次長

<パネリスト>出席者

日下 敦 (国研)土木研究所道路技術研究グループ  
トンネルチーム上席研究員

水野光一朗 東日本旅客鉄道(株)構造技術センター  
地下・トンネル構造ユニットマネージャー

阿部 紀征 首都高速道路(株)更新・建設部  
プロジェクト推進課 課長

増田 弘明 (株)高速道路総合技術研究所  
道路研究部トンネル研究室主任研究員

岡本 順 東京都下水道局建設部工務課長

上田 潤 (株)大林組土木本部 生産技術本部  
シールド技術部担当部長

岡村 正典 (株)奥村組技術本部技術戦略部長

女賀 崇司 鹿島建設(株)土木管理本部土木工務部  
トンネルグループ次長

秦 健二 清水建設(株)土木技術本部  
地下空間統括部水力計画グループ長

友野 雄士 大成建設(株)土木本部土木技術部  
トンネル技術室部長(担当)

中山 卓人 戸田建設(株)土木事業本部土木技術部  
技術 2 課課長代理

野口 達朗 西松建設(株)土木設計部設計二課主任

水谷 和彦 前田建設工業(株)土木事業本部  
土木技術部施工自動化グループ長

ワードがクローズアップしております。また、近年ゼネコンさんによる TV の会社のコマーシャルも、目立つようになりましたが、まずは、建設業における若手技術者の採用状況や対策については如何でしょうか。



佐原 圭介 氏

**岡村** 若手を確保するためには、働きやすい環境の整備、時間外労働の削減、確実な休日取得、仕事の魅力向上など、様々な課題があります。環境面では、都市トンネルのみならず山岳トンネルでも、坑内が明るくきれいに整備・整頓されている現場が以前に比べ増えてきました。また、各社が技術開発等で作業の効率化、遠隔化、自動化等を積極的に進めると同時に、発注者側の施策推進もあって時間外労働の削減や休日取得も進んでいるところです。

その一方で、大規模で迫力があり、自然を相手に様々な対応（工夫）をする建設工事（トンネル工事）の魅力・面白さを大いにアピールしていくことも非常に重要です。働きやすさだけでは入職動機には不足していると感じます。

これらを前提にCMの話ですが、当社は自社のPRはもちろんですが、業界の魅力が伝わり、建設業で働きたくなるような内容のCMづくりを心掛けています。社会資本・インフラ設備の重要性を主張するとともに、それを担うのが建設業であることをアピールすることが、入職者の増加につながると考えています。CMの反響を実感するには少し時間がかかりましたが、数年間継続することで、企業としての認知度が向上し、採用の場面でも「CM見ました」と言われることが増えました。「建設が、好きだ。」というキャッチコピーも記憶に残りやすく良かったと思っています。

**女賀** 近年、若者のトンネル現場離れが加速していると感じています。これは現場に常駐する技術者、技能者ともです。主な理由は、場所が山間部であり、仮設宿舍などでの共同生活の場合が多く、また、ほとん

んどが昼夜勤施工であり、嘗ての長時間勤務である印象が強いと、やはり危険であるなど山岳トンネル工事特有の環境が若い人達の嗜好に合っていないからだと思っています。



坂田 聡 氏

コマーシャルなどの宣伝効果でイメージを改善していくこと、興味を持ってもらうことは、まず入口として非常に重要なことだと思いますが、そもそもこのような建設業界或いはトンネル工種が持つネガティブなところの改善が望まれると思います。しかし、どれもなかなか容易ではないものばかりです。

まず我々ができることとして、魅力を感じ、トンネル現場に初めて従事してくれた人が更に魅力を感じられるようにすることが一つだと考えています。

「好きこそものの上手なれ」です。そのためには成功体験を積んでもらうことが重要で、例えば、やはり貫通する瞬間がその代表的なものであると思います。数年かけてきたすべての苦勞が報われ、また次の新たなトンネル工事へ挑む意思を与えてくれます。若い技術者には是非経験してもらいたいと考えます。

**友野** 若手技術者の採用にあたっては、テレビコマーシャルのイメージ戦略の幅広い効用として、土木関連の学生や転職希望の方のみではなく、現在の土木建築業界に必要とされている、ITやAIの力を持った方々に業界を知っていただく方策として捉えています。その上で、新卒、中途採用、業界を問わず、我々の仕事に魅力を感じてもらいたいと思います。ここで言う魅力は、すでに私たちが行っている仕事に対する魅力もありますが、一方で、「もしかしたら、私の持っている技術がここですぐに使える」というような業界を変えていくことができる魅力も含めて考えたいと思います。例えば、吹付けのプロの動作と仕上がりをAIに学習させれば、自動吹付けのプログラミングという困難な作業がたちまちに完成することも想像できます。既存の技術だけではない創発的な技術の必要性を発信することが、新たな就職希望者を増やすための方策の一つではないでしょうか。



友野 雄士 氏



岡村 正典 氏

**司会** 有難うございました。会社のPRとしてのCMの活用もさることながら、作業環境の改善、やりがいについてのPRは、必要と感じました。ところで、現場では外国人労働者にお会いするケースもあります。採用はどうなっているのでしょうか。

**友野** 外国人労働者の教育と管理については、私は安全、安心な環境で、衣食住の足りた尊厳ある環境整備が先決と考えます。現状の日本の賃金レベルから考えて、もはや手っ取り早く稼いで、帰国して母国で悠々暮らすというモデルは成立しないと思います。しかしながら一方で、先日テレビで会社紹介をしていた番組を思い出しました。とある鉄工所のチームの紹介なのですが、その会社では、社長、社員は全て外国の方々です。もちろん、日本の基準を満足する品質の仕事を20年以上続けているそうです。唯一の日本人は、役所向けの書類などを担当する方だけでした。その会社では、自国の食べなれた食事を皆で摂り、団らんと仕事の緊張がしっかりとありました。日本人が外国人の方々とは協力して業界を維持する場合の今後のモデルの一つを見た気がします。「外国の方にも一目置かれる矜持」を伝えることができるメンターが求められているのではないのでしょうか。

**岡村** 建設業で働く外国人労働者は年々増加し、現在は約3%の割合を占めています。日本人全体が人口減少している中、建設業の労働従事者も減少することは必至であり、外国人の手を借りる必要性も高まっています。ただし、トンネル技能者については、高い専門性を有することから、特殊技能労働者の数は急激には増えておりませんが、トンネル現場においても、覆工班や後方の作業担当など部分的に外国人の従事が増えてきています。今後は、外国人に限らず高い専門能力を持たない技能者であってもトンネル工事に従事できるような、技術開発による自動化、省人化などの促進

が求められると思います。

**司会** ありがとうございます。次に、トンネル工事の労働環境について、教えてください。

**友野** 働き方改革やゆとりの労働環境については、ゼネコンの一部員の立場から、「外勤（現場）と内勤」と「世代間や所属部署間のコミュニケーション」という視点で、焦点を絞って話します。

適正な工程、歩掛りによる契約は、受発注者双方でこれまで以上にタイムリーに改善することは必須です。一方、業態の特性として、我々の働き方改革の推進とゆとりの創造に必要なのは、内外勤の働き方をいかに公正にしていくかという一面があります。単純に労働時間の均一化という課題設定では解決できません。現場に求められる安全、品質、工程管理と、加えて求められる次世代の教育という重責を、内勤側がどのようにフォローしていくか、そのために求められる個々人のキャリアパスの育成、研修システム開発、適正配置の管理はますます重要性を増しています。

また、働き方改革の代表格として定着しつつあるテレワークなどの勤務形態は、とても効率的ですし、それをサポートするシステムの有効性も、コロナ禍で皆さん実感していると思います。ですが実は、これらの便利な方法は、それまでの社員間、社内外の交流と当事者間の共感がすでにあるからこそ成立するコミュニケーション形態ではないのでしょうか。

難しいのはこれからです。いきなりテレワークやリモートで知り合った人同士が、苦労を共にし、共感を醸成して、業界や社会の発展に資することができるかとても心配です。ここで解決策を示すことはできないのですが、問題提起に留めさせていただきます。

**女賀** 働き方改革による残業規制、労働時間の減少により、現場作業に費やす時間が短くなってきていることから、技術の伝承と育成方法の変革も喫緊の課題



女賀 崇司 氏

であると感じています。

昔はWEBカメラで施工状況を把握できるような設備もなく、私も若い頃は切羽に張り付いて、切羽観察や計測、立会等の待機時間は、坑夫さんと一緒に一部の作業をやっていたりと多くの時間を切羽作業そのものに費やしていましたが、今は、残業規制の観点から、そのような時間は与えられません。また、安全上の理由から危険な切羽直近作業に技能者以外が立ち入ること自体なかなか容易ではないケースも増えており、作業の本質や危険感受性を育てる時間はどうしても昔より短くなってしまいます。

そのため、トンネル掘削作業の施工システムは大きな変革が望まれる時代であり、従来方法に変えデータに基づいた自動化・遠隔化施工により安全性と生産性を飛躍的上げる、環境を改善することは非常に有効な手段であり、今現在が過渡期であると考えます。

**司会** このテーマの最後に技術者確保と技術の伝承について、ご意見がありましたらお願いします。

**岡村** トンネルの技術者や技能者の確保および育成は非常に重要な課題です。建設業全体の就職希望者が減る中で、トンネル工事への従事者も減少しています。対策の一つとして作業環境を改善し、現場に対する負のイメージを低減する努力も続ける必要があります。以前に比べ、都市トンネルのみならず、山岳トンネルも、坑内が明るくきれいに整頓された現場が増えてきました。このような環境改善は安全性の向上だけでなく、作業従事者のモチベーションアップにもつながると思います。それに加え、近年では都市部で働く者と山岳トンネルなど山間部の不便な場所で働く者との間の生活環境上の不公平感をなくす努力もしています。また、女性技術者の活躍にも期待し、更衣室や清潔なトイレなど女性にも安心して働くことができる職場環境づくりに努めています。男女問わず若手技術者が働



日下 敦 氏

きたい環境になることを目指しています。

働く環境を整備する一方で、働きやすさだけでは定着が図れないと考えています。大規模で迫力があり、自然を相手に予測しながら未知なる地質と戦うというトンネル工事の魅力を大いにアピールしていくことも大切だと思っています。

また、技能者の確保と育成も重要な課題です。トンネル作業員を目指す若手は非常に少なく、新たな入職者を確保することは大変困難であると聞いています。トンネル作業自体が非常に重労働であることも要因の一つであり、その解消を目的に作業の機械化（ロボット化）、遠隔化や自動化を進めているところです。技術の伝承については、トラブル対応や課題解決、その他さまざまなノウハウについての伝承が大切であり、人から人への伝承に加え、ノウハウをデータ化して必要に応じてアウトプットできるような環境づくりも進めています。これまでもデータベース化は進めてきましたが、検索する人の能力によって抽出できるノウハウが限定されてきたと思われます。今後はAIを活用するなどして、状況に応じた適切な過去の資料が導かれるようにしていきたいと思っています。

**司会** 施工者側からの発言でしたが、土木研究所からの感想は如何でしょうか。個人的でも結構です。

**日下** 職場環境を良くする取り組みは不可欠です。気をつけたいのは、人それぞれ価値観が違うということです。個人的には、意欲的に働く人が報われる仕組みづくりも重要だと感じています。気力体力とも十分に残しながら、やりたい業務が完了していないのに「時間だから止める」と言われて中途半端に終わるのはつらい状況となります。

研究所では、命令によりしぶしぶ行う仕事ももちろんありますが、興味本位や自己研鑽としての勉強の結果が業務成果にも活かされることが多々あり、業務と



水谷 和彦 氏



中山 卓人 氏

自己研鑽と趣味が必ずしも切り分けられない部分があります。人によっては、遅くまで残っていても良いのが良い職場環境とも言えます。

**司会** 働き方改革やゆとりある環境改善はもちろん大切ですが、やりがいのある環境が第一のように感じます。

## テーマ2. 自動化ロボット化、DXについて

**司会** テーマ1の課題とも関連性がありますが、AIとかDXの活用が最近話題に上がっています。自動化ロボット化、DXの実態について、各社の現場での利活用状況をお聞きしたいと思います。まずは、鋼製支保工建込みロボットを導入している前田建設工業(株)の水谷さん開発にあたっての留意点と実績についてお願いします。

**水谷** 「鋼製支保工建込みロボット」の開発着手時は、山岳トンネルにおける社会課題を整理し、切羽災害と技能労働者不足に課題を設定しました。その課題に対し、自動化技術により現場作業員(顧客)の安全性と生産性向上(価値)を実現しようと考えました。

山岳トンネルにおける労働災害事例では、切羽で93%、その中でも鋼製支保工建込み作業が41%で1位、装葉作業が36%で2位であり、この2つの作業で8割近く被災が発生しています。これらの作業はいずれも人力による切羽立入り作業であり、この機械化・遠隔化・自動化に取り組んでいます。もう一点気を付けているのが、自動化技術を開発していると自動化が目的になりがちで、そもそもの価値・顧客が何だったのかを、都度、思い返しています。価値を提供できるのであれば、機械(ハード)・制御(ソフト)技術だけでなく、材料技術、設計技術、施工技術などを駆使し、ひいては解決策は自動化技術でなくても良いと思っています。

ます。

今話した「鋼製支保工建込みロボット」の遠隔ナビゲーション技術は完成・現場導入を経て、第22回国土技術開発賞(2020年)やロボット大賞(2022年)、NETIS推奨技術(2024)といった外部評価もいただき、現在では多くの現場で活用いただいています。また、この技術はオペレータの慣れや技量がある程度必要であることから、全自動化の技術も開発しています。

当社では、次のステップとして、まだ、切羽における人力作業が残されている、装葉・結線作業となりますが、こちらの自動化技術も開発しており、これが完成すれば、切羽作業の安全性が飛躍的に向上するとともに、労務編成全体の省人化が図れることから、生産性も飛躍的に向上すると思っています。

**司会** 次に戸田建設(株)では、覆工打設のロボット化を目指し開発を進めていると聞いていますが、如何でしょうか。

**中山** 当社でも少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少や労働環境の改善といった社会課題への対応として、建設機械の自動化による安全性・生産性向上のため、山岳トンネルにおける一連の作業の自動化に取り組んでいます。

その中で、山岳トンネルの覆工コンクリートの打設ロボット化として「セントルフューチャーズ」を開発しました。覆工コンクリートの打設作業は、狭隘な作業空間において、重い打設口の開閉や窮屈な態勢でのコンクリートの締固めなどの苦渋作業を余儀なくされます。そこで、当社では、覆工コンクリートで主流な締固めを必要とするコンクリートでも、打込みから締固めまでの一連の打設作業を自動化する技術を開発しました。

コンクリート打設口を自在に切り替えることができる技術「スイッチャーズ」を使用することで打設ホー



秦 健二 氏

スの移動などの人力作業を不要としたほか、打ち上がり位置や天端部の充填を検知するセンサを使用してセントル内のコンクリートの充填状況を把握しています。コンクリートの締固めでは、打ち上がりを検知し上方へ移動するバイブレータなどを使用し自動化を図っています。そして、これらの機器を統合管理するシステムにより打込みから締固めまでの一連の打設作業の自動制御を可能としました。

このセントルフューチャーズですが、中国地方整備局発注の「令和3年度木与防災木与第1トンネル工事」に2023年11月から導入しています。打設開始初期の覆工スパンでは機能の一部を用いて打設を行っていましたが、2024年2月13日から全機能を用いた自動打設を開始しました。覆工コンクリートの打設を自動化することにより、現在適用中の現場では従来6名程度の人員を要していた打設作業を4名で行っています。

今後の展開として、現場での適用を継続し、打設作業に要する人員を従来の1/3にあたる2人程度に省人化することを目指し改良を加えていく予定です。さらに、各種センサから得られるデータの活用を幅を広げるなど、覆工コンクリート打設作業の自動化を推進していくことで、覆工自律型打設ロボットの開発を目指しています。

**司会** 一方、秦さんの清水建設(株)では、生成AIや施工の自動化等を展開中と聞いていますが、ご紹介いただけますでしょうか。

**秦** 山岳トンネル工事は、長い歴史の中で技術革新を重ねてきました。従来の矢板工法からNATMへ移行し、それまで培ってきた技術をベースに、機械を大型化・高性能化させることで施工の効率化が進められてきました。しかし、現在の建設現場はICT技術の急速な発展により、さらなる変革の時代を迎えています。これまで熟練技能者の技量に依存してきた穿孔、吹付け、

鋼製支保工、ロックボルトといった施工サイクルの自動化が進み「モノを造るのはロボット、判断と方向性を示すのは人」という新たなアプローチが主流となりつつあります。

また、清水建設(株)では、これまで人力で行っていた作業をPC制御による機械化施工へと置き換えて「覆工施工の自動化とDXの実現」を進めています。覆工コンクリートの打込みや締固めを機械化することで、品質の均一化(高品質化)を実現しました。これにより、技能者の技量に左右される仕上がりのばらつきを小さくすることが可能です。また、技能者が苦渋作業から解放され、トンネル現場における作業の在り方そのものが変革されています。これらの取り組みは、人の経験や行動をデジタル技術で置き換える、いわば覆工作業のDXの具現化と言えると考えています。更に、当社では測量と検査のデジタル化を進めています。トンネルを「造る」技術の進化に加え、「検査」もDXの恩恵を受けています。Digital出来形測量検測では、共通の閾値を基に誰でも次工程の判断が可能となり、今後施工の品質保証が効率的かつ正確に行えるようになると考えています。

その他に、地山の工学的評価や掘削補助工法、施工法、トンネル構造の決定にもDXを活用しています。例えば、削孔エネルギーの閾(しきい)値を基に補助工の実施位置を判断したり、機械データから地山強度を推定することで、トンネル構造やリング構造の最適な施工タイミングを決定することが可能です。切羽で起きている事象に対して、人の感覚に依存してきたことをデジタルデータで正確に把握し、迅速かつ適切な対応を行うことができます。

**司会** さて、これまで山岳工法のお話が主でしたが、シールド工法の自動化は、既かなり進んでいると思いますが、如何でしょうか。シールド工法を主体としてお聞かせ願います。

**上田 (株)大林組**は、労働力不足や技術の伝承不足の解消を目的に、シールド工事の自動化に取り組んでいます。シールド工事の自動化にあたっては、シールド工事を大きく、「坑内測量」、「シールド運転」、「掘削土砂搬出」、「裏込め注入」、「セグメント組立て」、「シールド設備」の6つの作業に分類し、さらに、それぞれの作業を、構成技術として細分化しています。まずは、構成技術の自動化を行い、構成技術を連携させて



上田 潤 氏

各作業を自動化します。そして、最終的には各作業を相互連携させ、シールド工事全体を自動化します。

例えば、シールド運転では、掘進指示書をもとに、オペレータがシールド機の方向制御や切羽の安定に必要な添加材注入量の調整、切羽土圧の制御を行っています。この方向制御、添加材注入量調整、切羽土圧制御が、先ほど説明した構成技術に該当しますが、いずれも、一人のオペレータが多くの掘進データを瞬時に判断して操作しますので、線形を確保したり、切羽を安定させるには、経験と技量が必要になります。これらを「AI自動方向制御システム」、「添加材自動制御システム」、「切羽土圧自動制御システム」として自動化し、オペレータが判断して操作していた、方向制御のためのシールドジャッキ選択や、添加材注入量の調整、切羽土圧制御のためのスクリーコンベヤーの回転数調整などを機械学習により、機械が自動で行います。

また、坑内測量も2つの構成技術に細分し、「坑内自動測量システム」、「掘進指示書自動作成システム」として自動化させ、シールド自動運転と相互連携させています。

現在、坑内測量からシールド運転までを相互連携し実現場に適用しています。現時点では、通常の掘進と同様にオペレータを配置し、機械の設定値や操作を確認してもらいながら自動運転を実施していますが、オペレータからは、自身の意図に添った操作であったといった評価もいただいております。

現在、残りの4つの作業の自動化を進めており、今後、6つの作業を相互連携させ、シールド工事全体を自動化させたいと考えています。

**野口** 西松建設(株)では、シールド工事での自動化技術の取り組みとして、文字認識技術(OCR)を活用したセグメント管理システムを開発、運用しています。本技術により、セグメントピースに印字されている製造



野口 達郎 氏

番号をタブレット端末で読み取ることで、セグメントの受け入れ、保管場所の見える化、組立指示までの一連の管理作業を効率化し、省力化につなげることが出来ました。

ついでながら、山岳トンネル工事においては、各掘削サイクルにおける施工機械の遠隔化・自動化に取り組んでいるところです。弊社においては、特にホイールジャンボの遠隔化・自動化技術の開発に力を入れており、すでに遠隔化については一定の成果が得られている状況です。

各工法の違いとして、シールド工事ではその工法自体がシステム化されていることが多く、工法自体を自動化することよりも管理作業(ソフト面)の自動化が主となっているように思います。一方山岳トンネルでは、施工機械の操作は作業員さんのスキルや経験によるところが大きく、機械・工法(ハード面)の自動化・遠隔化できる範囲が広くあるように感じます。作業員さんの減少と技術の伝承、安全確保の観点からも、山岳トンネルにおける自動化・遠隔化は各社喫緊の課題となっていると思います。

**司会** ここまで、施工の自動化・遠隔化の開発状況についての話がありましたが、日下さん、これらについて総括的に何かありますでしょうか。

**日下** 熟練技術者の作業や判断を機械に代替させようとすると、そもそも何の情報をもとにどう判断しているかを形式知化する必要があります。勘と経験に頼り切ってきた部分もあり、難しい分野と思います。

山岳トンネル工事では、切羽評価を遠隔で行うニーズは、受発注者とも高いものがあります。現場の情報のうち、視覚情報は遠隔地に解像度の良いものが転送できるようになってきていますが、どれだけ熟練した技術者でも視覚情報だけをもとに正確な判断を下すことはできません。では何の情報を追加すれば良いかと

いうと、答えが出ていないのが現状ではないでしょうか。

以前、切羽画像を用いた AI による地山等級判定を試行したことがあります。失礼ながら予想に反して正答率が高い結果が得られました。しかし、判断で重視した箇所をコンターで描かせると、写り込んだ既施工の支保工に着目しており、切羽をほとんど見ておらず、既施工の支保パターンを判定していただけでした。これでは使い物にならないと思います。説明責任を果たす AI と、その説明で良いかを判断して責任を取る人間とセットではないかと考えさせられました。

シールド工事でも、搬出された土砂を手で触って状況判断している部分もあります。数値データとして得にくいが大変な情報をどう扱うか、課題も多そうです。

山岳工法の施工の自動化・遠隔化という観点では、トータルでは TBM が最も進んでいるように思います。課題もありますが、熟練技術者が減少する将来を見据えると、適用現場を増やして最低限の技術継承はしておく必要があるのではないのでしょうか。かつての調査研究を思い出し、我が国でも改めて開発を再開した方がよいと考えます。

**司会** ありがとうございます。全自動化を期待するところですが、そこに至る前にすべきことがあると思います。特に山岳トンネルにおいては事前調査に限りがありますが、それが原因でのトラブルも想定されます。最近、積極的に切羽先進ボーリングをすべきと考える人がいますが、如何でしょうか。

**日下** トンネル工事は、突発湧水、可燃性ガス、重金属など常に懸念があり、事前の対策が奏功するものに対しては積極的に先進ボーリングをするのが良いと思います。一方で、標準支保パターンの事前選定ぐらいにしか活用されないのはもったいないと思います。施工時の支保パターンの選定においては、切羽全体の状況を見極めるとともに、既施工区間の変位状況とも照らし合わせながら判断するのが普通ではないでしょうか。先進ボーリングの点の情報が切羽を代表できるわけではないことは、言わずもがなであるが常に気に留めておきたい事項です。

**佐原** 我々が進めている整備新幹線のトンネル工事においても、先進ボーリングによる前方地山の把握に努めています。特に自然由来重金属の状況把握には、重要な情報として対策の要否判定にも活用しています。

また、前方の地下水の把握にも有効であり、ボーリング孔による水抜き効果も役立っています。

**野口** 切羽前方地山の地質の探査方法としては、様々な物理探査法がありますが、やはり先進ボーリングが視覚的に確認でき、最も実際の切羽状況の予測に効果的だと感じます。そのため最近では、弊社においても PS-WL (パーカッションワイヤーライン) 工法を良く提案しますし、他の現場でも良く実施していることを耳にします。しかしながら、PS-WL 工法では硬質地山ではコアが割れ、軟質地山ではコアがきれいに取れるなど、通常のボーリングと逆の結果となる場面も多いです。このような工法による性質をきちんと現場技術者が理解し、運用することが重要です。弊社では、PS-WL 工法に DRISS を搭載することも増えており、得られたデータを合わせて切羽前方地山の状況把握を行っています。

また、未固結地山・膨張性地山をはじめとする特に注意すべき地山においては、やはりコアボーリングを行い、コアの性状をきちんと確認することがトンネルの安定を確保するうえで重要であると考えます。

**司会** トンネルの自動化、ロボット化が進化している最中で、今後、更に AI が活用され、安全施工が図られると思います。関係者の活躍を期待いたします。

### テーマ 3. 維持管理の重要性について

**司会** ところでトンネルの保守管理がこれからますます重要と考えますが、トンネルの維持管理について、その状況をお聞きしたいと思います。はじめに高速道路では、如何でしょうか。

**増田** 道路点検とトンネル点検の効率化について、NEXCO3 社では 1,952 本、1,891km という大延長の高速道路トンネルを維持管理しているため、さまざまな課題を抱えています。

まず、供用中のトンネルでの点検は、車線規制下での作業となります。地域や路線によっては渋滞が発生しやすく、夜間作業で実施することもあります。高速道路の渋滞や通行止めは、社会的な影響が大きいですので、いかに効率的に短期間で点検を完了させるかが求められます。二つ目は、担い手不足が挙げられます。点検員の高齢化や入職者の減少に伴い、これまで長年の経験から培ってきた点検技術の伝承と技術者の確保



増田 弘明 氏

といった部分が懸念されます。三つ目は、道路資産の加速度的な供用年数の増加です。10年後には管理延長の約5割が供用から40年以上を迎えますし、20年後には約8割にも達しますので、点検作業の複雑化に伴うコストの増大が予想されます。

こういった課題を踏まえ、高速道路での点検は効率化・高度化を図って、短時間かつ正確に行う必要があります。規制回数の削減に向けた他工事との調整はもとより、近年では、画像技術・映像技術を駆使した点検手法を活用し点検を実施しています。高速道路のトンネル覆工の詳細点検は、5年ごとに実施され、覆工画像を撮影したのちに全面近接目視と全面打音が基本とされています。詳細点検2回目以降は、覆工ひび割れ展開図から得られるひび割れ評価点を使用し、前回点検時から変化が見られる場合、または、特記事項がある場合、有筋部区間の場合には、全面近接目視かつ全面打音を実施することが基本となっています。そのため、精度が高く客観的なひび割れ評価点を算出できるよう、TCI(トンネルひび割れ指数)を導入し点検の効率化を図っています。

撮影された覆工画像をもとに展開図が作成されますので、この点検手法の導入により、点検精度が向上すること、TCIは電子化されたひび割れ展開図から自動的に算出されますので、客観的で点検者の技能に左右されない評価点が得られることとなります。

また、点検技術者の育成と技術力向上を目的とした講習会の開催や、高速道路点検診断資格制度なども採用され、効率化に向けたさまざまな取り組みが行われています。

近年では、将来の効率的な維持管理と機能強化を見据えた、改築工事やリニューアル工事が実施されています。

改築工事の現状としては、NEXCO3会社におい

て暫定2車線区間の4車線化に向けた取り組みが行われています。供用路線の約4割が暫定2車線区間である現状は国際的にも稀な構造ですので、更なる機能強化へ向けて計画的に取り組む必要があります。4車線化工事は、既設トンネルであるI期線との近接施工になりますので、I期線への影響を考慮して施工することは当然のことながら、供用路線周辺的生活環境への配慮であったり、限られた施工ヤード内での施工となりますので、設備配置などにも苦慮しながら施工しています。4車線化工事の特徴としては、供用後の維持管理を考慮して、完成断面よりも幅広となる暫定断面で施工している事例や、トンネル両側に非常駐車帯を設置して、将来的にも対面通行が可能となるよう配慮している事例もありますし、積雪地では雪氷期のトンネル坑内への持ち込み雪対策として坑口部を拡幅している事例もあります。

また、リニューアル工事では、盤ぶくれ対策や覆工補強対策が実施されています。特に盤ぶくれ対策工事では、トンネルを対面通行規制にて対面通行化して工事を行っている事例があります。対面規制には関係各所との協議にも時間を要しますし、渡り線の構築などの準備工事が必要となりますので、多大な時間と労力を要します。一方で、車線規制での施工の場合には、活線施工となりますので、安全対策が重要となり、なおかつ、狭隘な施工ヤードでの作業となりますので、インバートの構築に非常に時間を要します。最近ではプレキャストインバートの適用や新技術の採用など、現地の交通事情に応じた、効率的な施工方法を採用し施工しています。

**司会** 鉄道トンネルでも、終電終了後の限られた時間でかつ厳しい条件下での維持管理となりますが、現状は如何でしょうか。

**水野** 現在供用中の在来線の鉄道トンネルの多くは、明治から昭和初期および高度経済成長期に建設されたものです。新幹線のトンネルは、高度経済成長期に建設されたものが多くあるほか、比較的最近建設されたものもあります。鉄道トンネルの多くは複雑な地形・地質にあるだけでなく、環境から多様な影響を受けるほか、地震の影響を受けることもあります。そのため、年々着実に経年する鉄道トンネルを適切に維持管理することが益々重要になっています。

鉄道トンネルの維持管理は、それぞれのトンネルが



水野光一朗 氏

建設されて以後、継続して行われてきています。しかしながら、1999年（平成11年）に相次いで生じたはく落を契機に、トンネルの維持管理の重要性が再認識されました。これ以後、「運輸省トンネル安全問題検討会」によって「トンネル保守管理マニュアル」が策定され、鉄道トンネルに対しては、従来の定期検査に加えて、「初回全般検査」と「特別全般検査」を行うことが当時の運輸省によって鉄道事業者に通達されました。

今回は、JTAの50周年の記念イベントですが、鉄道トンネルの維持管理に携わる技術者は、現在の維持管理体系となった経緯を忘れてはならず、これからもずっと継承していかなければなりませんので、初めに話をさせて頂きました。

トンネルの維持管理において、現地の目視による検査・点検では、覆工・く体の表面の調査や打音調査をすることはできますが、内部の情報をその場で得る機会は限られているため、日々の維持管理で技術者が得られる情報は限られています。そのため、変状の進行による変化に気づくことや変状の原因を考える（想像・空想）ことが重要です。特に、山岳トンネルでは、変状が比較的ゆっくりと進行する場合もあり、変化に気づきにくいことがあります。変状に対する対策（措置）を行うに際しては、変状の進行性（速度）や措置の実施時期などについて、的確な判断を求められ、難しい判断を求められることがあるように思います。特に、鉄道の山岳トンネルでは、最終列車と始発列車の間の短時間の夜間の時間しか維持管理の時間をまともって確保することができないといった時間的制約があります。山間にある鉄道山岳トンネルでは、そこにアプローチするために道路から離れていて、空間的な制約を受けることも多くあります。そのため、維持管理

に関わる技術者は現地での的確な判断と課題を解決するための判断といった技術の研鑽が求められると、日々感じています。また、個々の技術者が果たした技術の研鑽の成果を公開・交流することにより、さらにレベルアップさせることが重要です。今回の座談会もその機会の一つであると思います。

維持管理における技術の継承に関しては、建設時の情報の有無が維持管理での変状の対策に大きな影響を与える事例がみられます。トンネルの建設時に大変な苦労をされたことが維持管理に確実に継承され、生かされる仕組みづくりや、情報の発信側・受信側の両方での技術情報の継承の重要性の理解・実践が欠かせないと思います。すべてのトンネルで、大変な変状が発生するわけではありませんから、地域の主（ぬし）の大先輩からあのトンネルではこんなことがあった、といったことを受け継ぐということが日々の維持管理に役立つと思います。

少し話題が変わりますが、課題を解決するための技術開発については、この十年で大きく取り組み方が変わった印象を持っています。これまでの鉄道分野の技術開発というと、各社は独自路線で、オリジナルな技術の開発をする事例が多かったように思います。しかしながら、近年では道路分野の技術を活用して、鉄道分野への適用を果たした事例もあります。技術の応用と実構造物の適用までの時間が短くなり、大きなスピードアップが図られている素晴らしい事例です。

この10年では、10年で実現できるとは到底思えなかったことが、デジタル技術の目まぐるしい研鑽で実現されるようになっていきます。デジタル技術による技術者の支援で生み出された時間や人的リソースを、技術の研鑽、技術者の教育に活用することが大いに期待されていると思います。

技術の研鑽、交流、継承がトンネルの維持管理の肝心要であることを話しました。これからの10年を考えると、デジタル技術の研鑽は、ここ数年とも比べられないほどであると思います。しかしながら、デジタル技術による支援がどれほど進化しても、実構造物のトンネルに向き合う維持管理の技術者の役割は大きく、これからも変わらないと思います。

**坂田** 東京メトロでは、現在銀座線が98歳となるなど、9路線中5路線が建設後50年を超え、構造物の補修費用が大きくなっています。

全構造物延長 195.7km のうちトンネルが 166.8km と約 85%を占めています。トンネルの維持管理では、構築・漏水補修が主となっています。私達の維持管理で一番大変なのは、地下鉄ゆえの狭隘空間での作業、資機材搬入等が限定的であることです。これまでの大規模な補修・補強工事には、東西線の河川下にある潜函トンネルの漏水補修工事、同じく千代田線の河川下にあるシールドトンネルの補修補強工事、ダクタイトルセグメントで出来ているシールドトンネル駅の防錆工事、全線の開削トンネル RC 中柱耐震補強工事などが挙げられます。

鉄道構造物の検査は、通常全般検査が目視中心で 1 回/ 2 年の実施、特別全般検査が接近目視・打音の併用で 1 回/20 年の実施です。いずれも人での実施ですが、現在 ICT 技術の導入および DX 化の推進を検討中です。具体的には、タブレット PC に開発したアプリ：MRSI (Metro Railway System for Inspection) を導入し、タブレット PC 上に図面や既存検査データを読み込み、新規検査データの書き込みを行うことで検査を効率化しました。また、目視検査では限界があったトンネル高所部にドローンにて通常全般検査を実施するとともに、トンネル全線画像を統計的に処理して、重点打音範囲を可視化させた変状展開図で打音検査も実施しています。これらの取組みにより蓄積された検査データをもとに、変状の自動抽出・健全度の自動判定を考慮した開発検討を、グループ子会社と協働で行っています。

**司会** 高速道路と鉄道についての現状等についてお話を伺いましたが、今後のインフラメンテナンス時代において取り組むべき項目について、ご意見を伺いたします。

**日下** さまざまな点検支援技術が開発されてきており、今後の期待度も高い状況です。正確な診断に繋げるには、変状の進行性がひとつのキーワードであり、経年的な変化を追跡できる技術が必要であると考えます。

維持管理段階でトンネル周辺地山の情報が必要となった場合に、施工時の記録が残っておらず苦勞することが多々あります。施工時やそれまでに得られた貴重な情報を確実に維持管理段階に引き継ぐような取り組みが重要であると考えます。

外力によるひび割れが何年も前から発生しているの

に、外力によるものと認識できず対策が遅れ、進行してしまう事例があります。トンネルの構造の安定性に関わるような危険性の高い変状は、早期発見と早期対策が有効であり、それを見逃さないような技術が求められます。施工時のデータがあれば、変状原因の推定精度も向上します。現場で精度の高い診断ができるよう、土研でも関連する研究を進めています。

変状対策工が変状している事例が増えてきています。これらの健全性をどう診断するのか、変状対策工の変状対策をどうするのかについても今後考えていかねばならないと思います。

点検の際に発見した軽微な変状に対して、点検者がある場のできるような簡便かつ信頼性の高い補修工法の開発が求められます。現状では、軽微なうき・はく離を発見しても、たたき落としで除去できなければ、補修設計や補修工事で費用も時間も追加の交通規制も必要となり、効率が上がりません。対策完了までははく落リスクが残ることにもなります。

狭小かつ老朽化したトンネルの問題もあります。別線でトンネルを整備しようとしても立地条件の制約により不可能、当該トンネルをリニューアルしようとしても代替路が無く通行止めを伴う工事でもできない、ということで困っているトンネルは一定数あるように感じます。活線でトンネルの大規模更新が可能となる工法は今後ニーズが高まっていくのではないかと思います。

**司会** ところで、設立 40 周年を機会にスタートした維持管理業務講習会で、主に点検を主とした基礎編が 10 回、主に対策工を主とした実践編が 9 回迎えています。手応えは如何でしょうか。

**日下** JTA 主催の講習会ということもあり、施工者サイドの参加者が多い印象をもっています。トンネル完成後の維持管理に携わる機会がほとんど無い方もおられると思うが、皆さん熱心に聴講しておられます。維持管理段階で苦勞しないように建設段階で極力配慮しておくことが大事であり、講習会が施工者サイドの意識向上にも大きく貢献していると思うので、今後とも引続き実施してほしいと思います。

**司会** ご意見ありがとうございました。現状のトンネルでの課題解決策としては建設、維持管理のどの段階においても、いずれも効率化、省人化が望まれているように感じました。また、究極的には全自動化・ロ



阿部 紀征 氏



岡本 順 氏

ポット化が望まれているようです。コストのバランス、産官学と他業種とコラボして少しでも早く実現して頂きたいものと感じます。

#### テーマ 4. 今後のインフラ整備に望まれるトンネル技術

**司会** これまで現実の話を中心に議論しましたが、将来のインフラ整備に向けて、それぞれの事業を実現するため、推進するため、我々は何をすべきか、お聞きしたいと思います。

**阿部** 首都高では構造物の長期的な安全性を確保するために、2014年度から日本橋地下化などの更新事業を推進しており、昨年度には羽田トンネルなど新たな事業も追加され、事業に取り組んでいます。その中でも、日本橋地下化事業は、日本橋川周辺における国家戦略特区による都市再生プロジェクトとして日本橋川上空を取り戻すべく地下ルートへの移設が確定し、現在、日本橋周辺のまちづくりと一体となって地下化事業を推進しています。

地下化に伴うトンネル工事では、日本橋川や史跡・文化財の直下、また銀座線などの地下鉄や数多くのライフラインなどがあり、これを避けながら工事を行う難易度の高い工事となっています。

これらの工事を着実に進めていくためには、これまでの都市内トンネル工事で培われた技術を踏襲するだけでなく、さらに発展させていくことが重要と考えます。新宿線では山手通りの地下に大断面のシールドを2本併設しながらの施工や1台によるUターン施工、さらにシールド切開き工法の開発、採用もしており、それらの技術が品川線で約8 kmとなる長距離かつ高速掘進が実現され、さらにはそのノウハウが横浜環状北線、北西線のトンネル工事に生かされております。

また、日本橋地下化事業は、先に述べたとおり都市再生として日本橋まちづくりと連携して取り組む事業となり、地下ルートの一部は「立体道路制度」が適用され再開発と並行して工事を進めていくため、これまで以上の綿密な工事調整が必要となります。

さらに限られた工期で確実に実施していくためには、地元住民や首都高ユーザーのご理解が必要不可欠であり、「日本橋周辺のまちづくりには首都高の地下化なしでは実現しないことや再開発と一体となり景観や環境改善に努めていること」など、再開発と連携した事業PRが必要と考えています。現在、PR拠点の整備やメタバースを活用した未来への期待感を醸成するような取り組みを行っています。

**司会** 水路トンネルである下水道整備に望まれる技術は、如何でしょうか。

**岡本** 先ほど維持管理の重要性の議論の中で、日下さんから「活線での大規模更新が可能となる工法」のニーズが高まるとのご意見があった。まさに同感です。下水道のようなトンネル全断面を使用する水路トンネルの場合は、活用しながらの改修は、難しい面があります。水位、流速が小さい場合には供用しながらの改修技術が有効であり、現在もそのような技術が開発され用いられてきています。一方水位が高い場合や流速が早い場合で、これらを低下させることができない場合は、改修に先立ち、代替トンネルやバイパストンネルを整備し、水を切り替えざるを得ない状況となります。ここで都市トンネルの場合、掘進中に既設構造物、残置仮設物に遭遇することが度々あり、障害物の把握、除去等に多大な費用と時間を費やしています。代替トンネル整備にあたっては、過密化する都市部の地下におけるトンネル工事となることから、事前に掘進路線に支障物があるかどうかを地上等から精度よく把握する探査技術の確立が望まれます。支障物の事前把握に

## テーマ 5. 若者へ一言

基づきトンネル線形を決定することで、代替トンネル等の迅速な整備が可能となり、計画的な改修が可能となります。

**司会** 有難うございました。その他インフラ整備に望まれるトンネル技術について、一般論でも結構ですので、どなたかお願いします。

**日下** 多くのトンネルを建設してきたここ数十年は、一定の水準でものをつくるための技術基準が大きな役割を果たしてきました。今後は、現場の実情に応じた一品生産にこれまで以上に対応できる仕組みも必要になってくるのではないかと感じています。

また、上(宇宙空間)は何光年も遠いところまで分かるのに、下(地中)はせいぜい数mぐらいしか分からない、という話題になることがあります。R6年度の能登半島地震でも、航空写真や衛星写真により地表の状況はすぐに分かっても、トンネルの被害状況は坑内の調査をするまで分かりませんでした。調査技術のブレークスルーにより、地下深くまで、精度良く、かつ簡単に情報が得られるような時代になってほしいです。

**佐原** 整備新幹線のトンネル工事においても、想定外の地質の出現による工事の進捗が悪化し、課題となっています。着手前に現状でも、ボーリング等による地山のコア採取など直接的な方法や、物理探査などによる間接的な手段により、トンネル工事の着手前に地山状況の把握に努めていますが、探査性能の限界などの技術的課題や限られた調査予算といった制約から、掘削前にすべてのリスクを把握するのは限界があるのが現状です。掘削する以前に地山の性状をなるべく早くつかむためにも、物理探査等の調査技術向上が望めます。特に新幹線のようなルートを簡単に修正できないトンネルにおいては、掘削前に地山のリスクを確実に把握し、リスクを回避する掘削計画をたてられるようにすることが、重要であると思います。

**司会** 有難うございました。長期的安全性を確保した将来のインフラ整備では、これまでの経験と新しい技術で安全かつ急速施工を目指していただきたいと思います。また、維持管理での必要なデータの整理も重要と考えます。

**司会** 最後になりますが、これまでの経験から後輩に捧げたい好きな(伝えたい)言葉を皆さんからお願いします。

**日下** トンネルは事前に想定していたことと実現象が完全に一致することがまず無い分野であり、ともすれば「掘ってみるまで分からない。トラブルばかり。何なら掘ってみても分からないことだらけ。」と言われることもあります。しかしながら、発生した事象を、断片的な情報をつなぎ合わせて自分なりに解釈し、仮説を立てて検証する日々の連続であり、技術者冥利につきる分野であることは断言できます。経験豊富な大先輩の解釈も100%正しいとは限らないので、自分なりに考えて、楽しみながら色々な事にチャレンジしてほしいです。

**水野** 維持管理においても、解決すべき課題の難易度が高まっているように感じています。課題を解決していくためには、現状を的確に評価し、継承していくことが欠かせませんが、維持管理の業務では、個々の構造物に長く向き合っていけることが特徴でもあります。偉大な先輩からは、維持管理のレベルアップを果たしていくためには、技術ならびに個々の構造物の情報を継承していくことに加えて、構造物に対する愛情と課題を解決していく責任感が重要であることを節目・節目で熱心に教えて頂きました。「愛情と責任感」もこれからもずっと継承していかなければならないことであると思います。

**岡村** 現在、労働力不足を補うため、あるいは若手が働きやすい環境を目指すため、自動化や省力化を推進しています。それが実現し当然になった時、自動で進む作業が本当に安全なのか、本当に地質に合っているのか、本当に経済的なのか、という疑問を持って管理することができる目を養ってほしいと思います。そのた、あらゆることに興味を持ち、疑問を持ち、探求する、そしてそれを楽しいと感じて仕事に向き合っ欲しいと思います。

**司会** 皆さんの熱い思い有難うございました。

## まとめ

**司会** 本日は、お忙しいところありがとうございました。いくらでも話は続きそうです。そろそろ時間が参りましたので、このあたりで終わらせていただきたいと思います。設立 50 周年は、100 年に向けてのスタートであります。

今後とも協会の諸活動を通じ技術者の資質向上が図られることを期待し、座談会を終了いたします。

※令和 6 年 3 月 4-5 日 JTA 会議室にて収録・役職は当時のままです。



座談会の風景(1)



座談会の風景(2)