

ずいそう

# 山岳トンネル工事における機械化の歴史

河田 孝 志



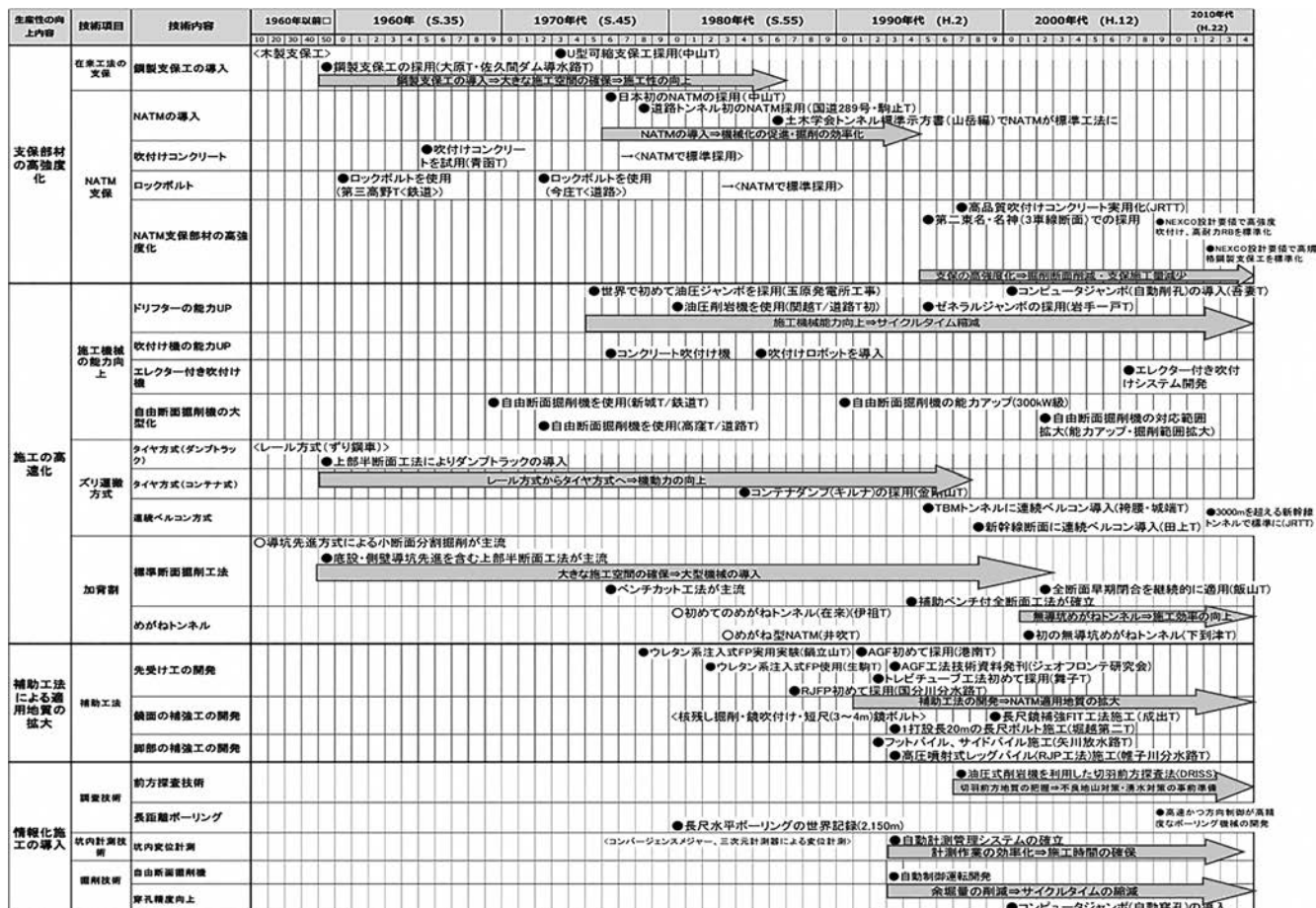
1980年3月に岡山大学大学院工学研究科土木工学専攻を修了、4月に清水建設(株)土木本部技術部(現在の土木技術本部)トンネルGに配属となった。2024年3月に44年間勤めた清水建設を退社、現在は河田コンサルタント事務所代表として、母校である岡山大学工学部の非常勤講師、セーフティ・グローバル推進機構の理事・建設委員会委員長、複数の会社の顧問を務めている。

入社以来、国内8現場14年、海外2現場10年のトンネル現場経験と土木技術本部での私の経験を踏まえ、山岳トンネルの機械化の歴史について述べさせていただきます。

1977年に上越新幹線中山トンネルで本格導入されたNATM(New Austrian Tunneling Method)は膨

張性の地山で従来の施工では困難が予測された道路トンネルにおいても試験採用され、1986年には土木学会標準示方書で標準工法となった。鋼製支保工と矢板で地山を支えていた矢板工法に対して、NATMは地山が持っている保持力を最大限利用し、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工を用いて、モニタリングを行い、地山の安定を確保しながらトンネルを施工する工法である。私が入社した1980年は矢板工法がまだ主流の時代であったが、ヨーロッパのNATMの技術を学習、実践し急速に普及が進んだ。

この工法の導入が、山岳トンネルの大断面化、機械化を促進し、生産性の向上と安全性の向上に大きく貢献した。



図一 山岳トンネル建設における生産性の向上の年表

トンネルの施工順序は、以下で示される。

掘削（削孔→装薬→発破、機械掘削）→ずり出し→（こそく）→吹付け→鋼製支保工→ロックボルト

各施工時にトンネル専用の機械を使用するが、この50年間で大きく変遷している。図－1に山岳トンネル建設における生産性の向上の年表並びに下記に各作業手順の変遷を示す。

#### ・発破工法における地山削孔機の変遷

レッグドリルによる人力削孔（～1960年代）空圧式ドリルジャンボ（1970～1980年代→油圧式ドリルジャンボ（1980年代，2ブーム，3ブーム）→コンピュータジャンボ

#### ・自由断面掘削機の変遷

炭鉱での試用（1960年代，40kW）→炭鉱から山岳トンネルへ（1970年代，40kW→90kW）→軟岩用から中硬岩，能力の向上と多様化（1976～1989年代，90kW→350kW）→機械掘削作業の無人化（2000年～現在，遠隔操作，自動化）

#### ・吹付け機の変遷

人力吹付け（1970年代，乾式吹付け，5m<sup>3</sup>/hr）→機械吹付け機（1980年代，6～10m<sup>3</sup>/hr，乾式→湿式）→一体型（1990～2010年代，10～20m<sup>3</sup>/hr，急結材供給装置，コンプレッサー搭載，エレクター一体型）→自動吹付け機（2010年～現在，掘削断面に合わせて自動吹付，2ブーム化）

#### ・ずり出し方式の変遷

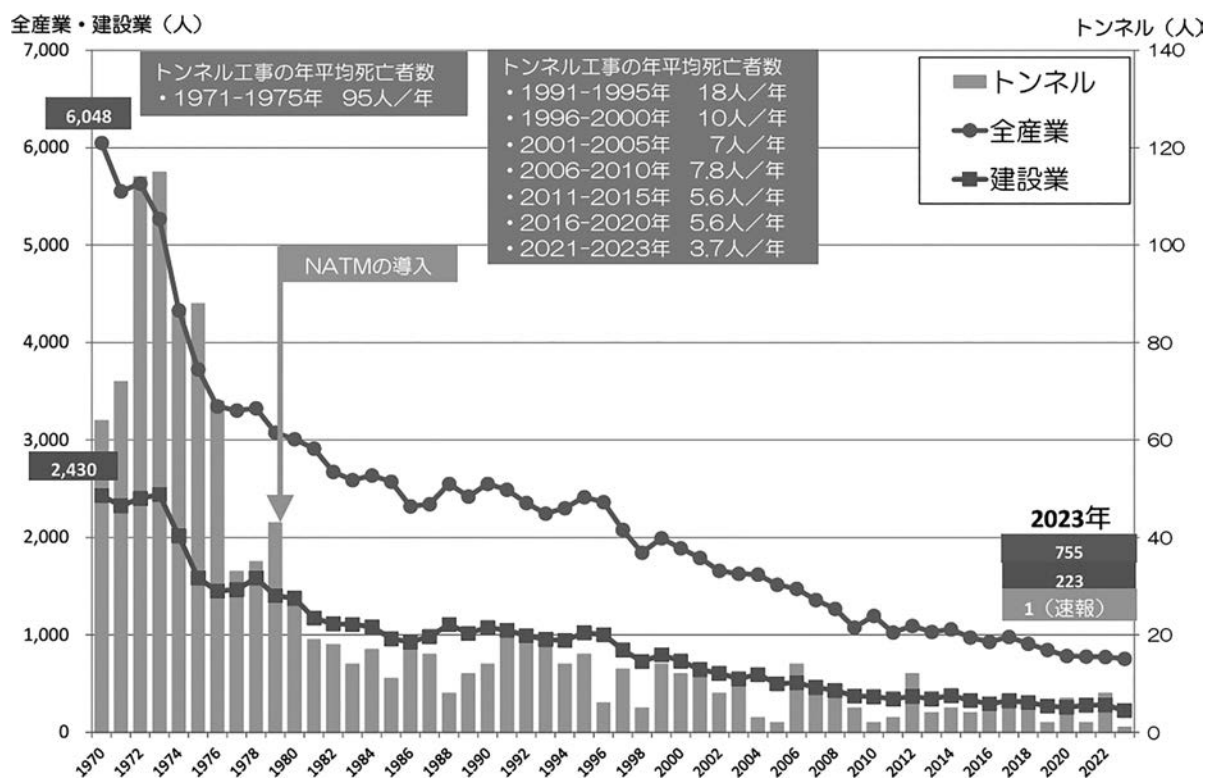
レール方式（ずり鋼車）→タイヤ方式（1960年代～，10tダンプトラック）→タイヤ方式（20tダンプトラック→30t，トンネル用アーキュレートダンプトラック，コンテナ方式，バックモニター，後方走行時の運転席回転）→ベルトコンベア方式（2km以上の長大トンネルでは生産性，安全性，環境改善を目的に採用が多い）

#### ・ロックボルトの施工機械

ロックボルトの施工は切羽削孔機で削孔，モルタルポンプでモルタル充填，人力でロックボルトを挿入→ロックボルト自動打設機（2020年代）



写真－1 ガントリージャンボと自由断面掘削機



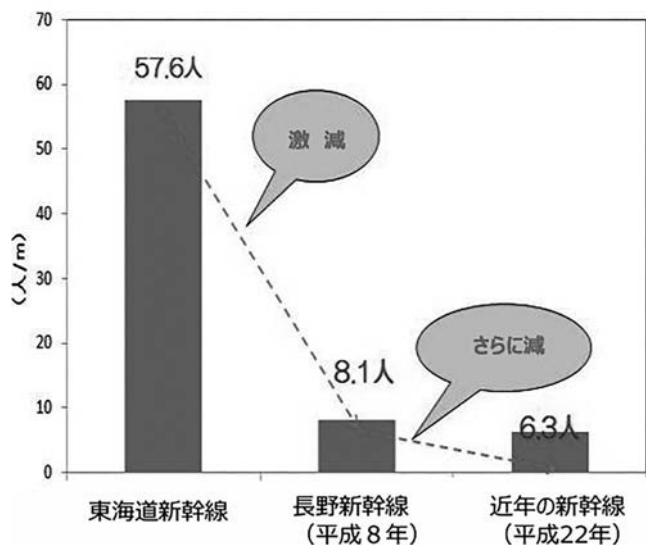
図－2 全産業、建設業、トンネル工事における死亡者数の推移



- ・自由断面掘削機とガントリージャンボの組合せによるミニベンチの施工（1990年代）（写真—1）、上・下半の同時作業を可能、作業サイクルの短縮ならびに省力化と施工個所の集約化による安全性の向上が図れた。

建設業において最も危険な作業と言われてきた山岳

### トンネル1mあたりに要する作業員数の比較



出典：新幹線のインフラコストと建設技術の進展、  
廣田良輔、土木学会誌、1997.9付録  
新幹線工事における山岳トンネルの変遷、金澤博、  
トンネルと地下、2011.3巻頭言

図—3 トンネル施工の生産性の向上

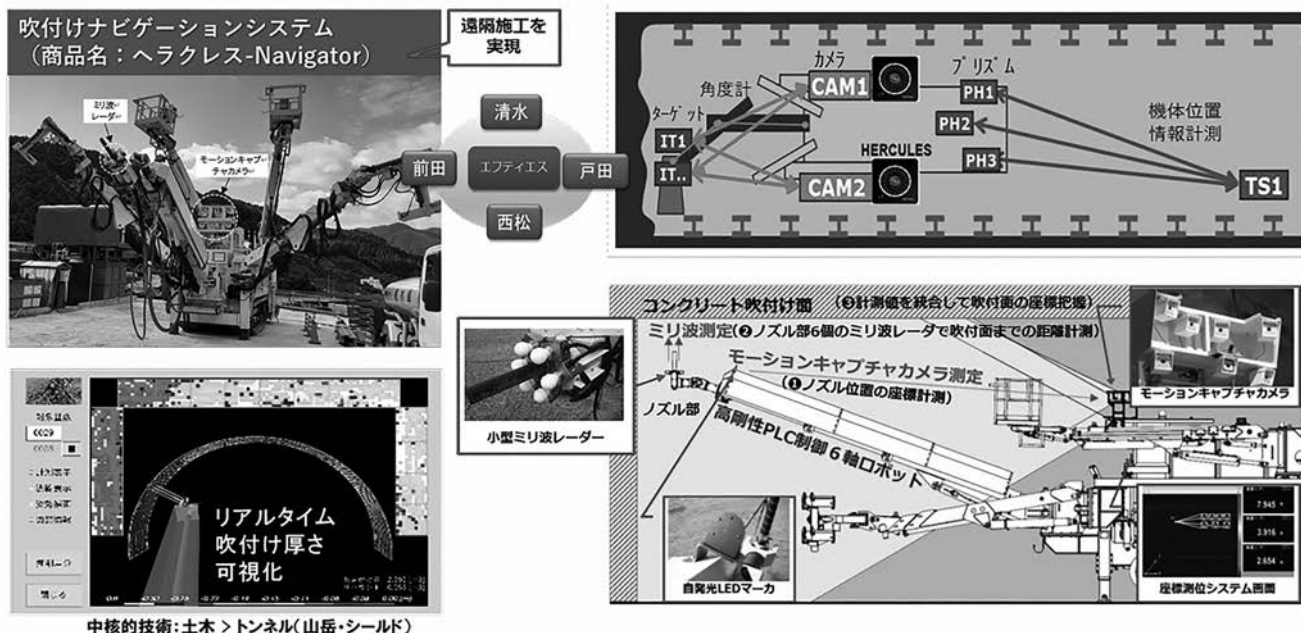
トンネル施工は関係者の皆様方の努力により、1970年代のトンネル工事における年間の死亡者数は95人/年、2021～2023年は3.7人/年で1975年以降進めてきたトンネル掘削断面の加瀬割の大型化、機械化、NATMの導入によって大幅に減少（図—2）している。また、トンネル1m掘削に要する人数は1960年代に施工された東海道新幹線が57.6人に対して、2010年代に施工した新幹線では6.3人と大幅に省人化（図—3）がなされている。2020年代に入ると削孔機械、吹付け機械（図—4）、ロックボルト打設機械（図—5）、覆工コンクリートシステムの自動化（図—6）が進み、さらなる生産性、安全性の向上が図れている。

トンネル坑内の換気設備の改善コントラファン的大型化、集塵機の設置、アルカリフリー液体急結材の使用による吹付け時の粉塵抑制、ベルトコンベアの採用によるダンプトラック走行時の粉塵削減、LEDライトの採用により坑内の照度確保により、トンネル坑内の環境改善がなされている。さらに、情報通信技術（ICT）を活用し、人・モノ・環境が情報を共有することで、安全を確保するSafety2.0の考えを導入し、人と機械の接触災害の防止が図られている。従来、作業環境が悪く、危険で苦渋作業と言われてきたトンネル施工も機械化の進展により、大きく変わってきている。

トンネル施工が建設工事の中で最も安全で、生産性が高い工種と言われるよう今後も努力していきたい。

### — ロボット施工生産性システム（吹付け）—

#### 次世代型吹付けロボット（5社共同開発）



図—4 吹付け機の自動化



従来ロックボルト工



最新技術(全自動)

## 従来のロックボルト工

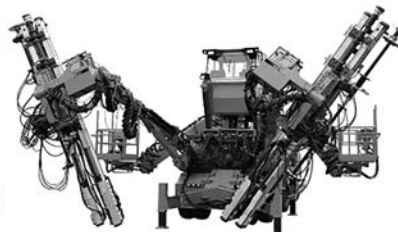
- ①穿孔(機械操作:2名)
- ②モルタル充填(人力:2名)
- ③ロックボルト挿入(同上)

※上記手順のように常に切羽直下に人が滞在して作業を行っている



## ロックボルト自動打設機

- ①穿孔(機械操作:1名)
- ②モルタル充填(全自動)
- ③ロックボルト挿入(全自動)



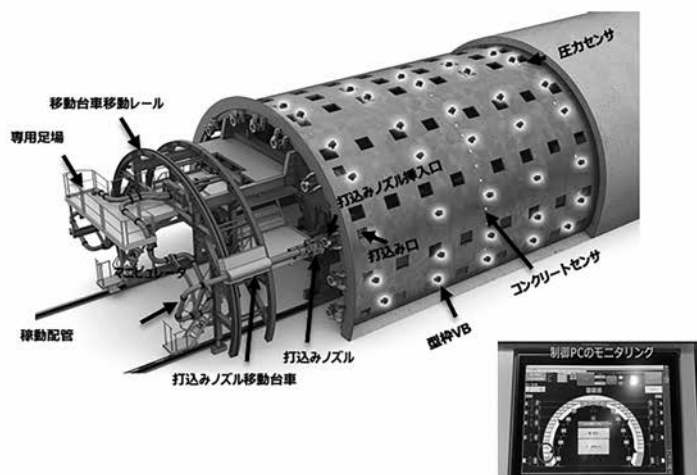
安全性の向上: 切羽直下に人が滞在していない

35%生産性の向上

図—5 ロックボルトの自動化

## ●覆エコンクリート打設自動化の最新技術

## ■Phase-3 自動化 山岳トンネル覆エ自動施工システム



## 1.吹上げ式自動打込み



・ポンプ車からコンクリートを自動圧送し、吹上げ方式で打込む

## 2.パターン自動締固め



・自動制御した型枠パイププレートにおいて、規定の締固めエネルギーが得られるまで加振する

## 3.マニピュレータ方式自動配管切替え



・マニピュレータ方式により、自動で配管を切替えながら左右均等に打上げていく

清水建設(株)提供

図—6 覆エコンクリートシステムの自動化

## 《参考文献》

- 1) 厚生労働省: トンネル建設工事の工法等について, 平成28年度第1回トンネル建設工事の切羽付近における作業環境等の改善のための技術的事項に関する検討, 2016年11月,  
<https://search.app/ku9fEnnkgQwNVyx7>
- 2) 二木幸男: 自由断面掘削機の経緯と発展の歴史: 建設機械施工 Vol.71 No.11 November 2019,  
<https://jcmnet.or.jp/bunken/kikanshi/2019/11/118.pdf>
- 3) 河田孝志: 我が国の建設技術発展の歴史と未来 ~これまでの50年とこれからの50年~ (一社)計画・交通研究会 2023年度第4回イブニ

ングセミナー, 2024年2月,

<https://search.app/XTSxjPpzU9Wojvfz9>

- 4) 清水建設(株): 重機接触災害リスク低減システム, 人と機械が協調して作業の安全を確保, 2022年3月,  
<https://search.app/XTF5Rq7Xn9Ar1QKB7>

——かわた たかし 河田コンサルタント事務所代表,  
セーフティグローバル推進機構理事——