



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、セーフティー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く。

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。

生産性の向上内容	技術項目	技術内容	1960年以前	1960年 (S.35)	1970年代 (S.45)	1980年代 (S.55)	1990年代 (H.2)	2000年代 (H.12)	2010年代 (H.22)																						
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
支保部材の高強度化	在来工法の支保	鋼製支保工の導入	●木製支保工	●鋼製支保工の採用(大原T・佐久間ダム導水路T)	●U型可縮支保採用(中山T) 鋼製支保工の導入→大きな掘削空間の確保⇒施工工事の向上	●日本初のNATMの採用(中山T) →道路トンネル初のNATM採用(国道289号・鈴鹿T)	●土木学会トンネル標準示方書(山岳編)でNATMが標準工法に																								
		NATMの導入				●吹付けコンクリートを試用(青函T)	→<NATMで標準採用>																								
	NATM支保	吹付けコンクリート				●ロックボルトを使用(第三高野T・鉄道T)	●ロックボルトを使用(今庄T・道路T)	→<NATMで標準採用>																							
		ロックボルト							●高品質吹付けコンクリート実用化(JRTRT)																						
		NATM支保部材の高強度化						●第二東名・名神(3車線断面)での採用	●NEXCO設計要領で高強度吹付け、高耐久性を標準化																						
施工の高速化	施工機械の能力向上	ドリッパーの能力UP				●世界で初めて油圧シャンボを採用(玉原発電所工事)		●コンピュータージャンボ(自動削孔)の導入(若狭T)																							
		吹付け機の能力UP				●油圧削岩機を使用(関越T・道路T切)	●ゼネラルシャンボの採用(岩手一戸T)																								
		エレクター付き吹付け機				●コンクリート吹付け機	●吹付けロボットを導入																								
	ズリ運動方式	自由断面掘削機の大型化				●自由断面掘削機を使用(新城T・鉄道T)	●自由断面掘削機の能力アップ(300kW級)	●自由断面掘削機の対応範囲拡大(能力アップ・掘削範囲拡大)																							
		タイヤ方式(ダンプトラック)	●レール方式(すり鋼車)	●上部半断面工法によりダンプトラックの導入	●自由断面掘削機を使用(高座T・道路T)																										
		タイヤ方式(コンテナ式)		レール方式からタイヤ方式へ⇒機動力の向上		●コンテナダンプ(キルナ)の採用(金剛T)	●TBMで連続ペルコン導入(特壁・端壁T)	●3000mを超える新幹線トンネルで標準化																							
	加害削	連続ペルコン方式					●新幹線断面に連続ペルコン導入(田上T)																								
		標準断面掘削工法	○導坑先進方式による小断面分割掘削が主流	●底設・側壁導坑先進を含む上部半断面工法が主流	大きな施工空間の確保⇒大型機械の導入	●ベンチカット工法が主流	●全断面早期閉合を継続的に適用(飯山T)																								
		めがねトンネル				○初めてめがねトンネル(在来)(伊予T)	●補助ベンチ付全断面工法が確立																								
補助工法による地盤質の拡大	補助工法	先受け工の開発				○初めてめがねトンネル(井戸T)	●無頭坑めがねトンネル⇒施工効率の向上																								
		鏡面の補強工の開発				○めがね型NATM(井戸T)	●初の無導坑めがねトンネル(下到津T)																								
		脚部の補強工の開発																													
	情報化施工の導入	前方探査技術				●ウレタン系注入式FP実用実験(鍋立山T)	●AGF初めて採用(港南T)	●ウレタン系注入式FP使用(生野T)	●トレピューブ工法初めて採用(舞子T)	●RJFP初めて採用(国分川分水路T)	●油圧式削岩機を利用した切羽前方探査法(DRSS)	●油圧式削岩機を利用した切羽前方探査法(DRSS)	●高かつ前方削御が高精度なボーリング機種の開発																		
		長距離ボーリング				●ウレタン系注入式FP使用(生野T)	●AGF工法技術資料発刊(ジェフロン研究会)	●トレピューブ工法初めて採用(舞子T)			●補助工法の開発⇒NATM適用地質の拡大																				
		坑内計測技術				●RJFP実用化⇒NATM適用地質の拡大		●長尺鏡補強TF工法施工(成出T)	●打設長20mのドリルボルト施工(堀越第二T)	●フットバイル、サイドバイル施工(矢川放水路T)	●高圧噴射式レグザーバル(RJP)工法施工(横子川分水路T)																				
		坑内実位計測				●長尺水平ボーリングの世界記録(2,150m)	●自動計測管理システムの確立	●自動計測管理システムの確立	●計測作業の効率化⇒施工時間の確保																						
高強度化	耐震技術	自由断面掘削機				●コンバージョンスマート、三次元計測による施工計測	●自動計測管理システムの確立	●自動計測管理システムの確立	●計測作業の効率化⇒施工時間の確保																						
		骨孔精度向上					●自動計測管理システムの確立	●自動計測管理システムの確立	●計測作業の効率化⇒施工時間の確保																						
							●自動計測管理システムの確立	●自動計測管理システムの確立	●計測作業の効率化⇒施工時間の確保																						

図-1 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。図一1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業手順の変遷を示す。

・発破工法における地山削孔機械の変遷

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）→コンピュータージャンボ

・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、5m³/hr）→機械吹付け機（1980年代、6～10m³/hr、乾式→湿式）→一体型（1990～2010年代、10～20m³/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

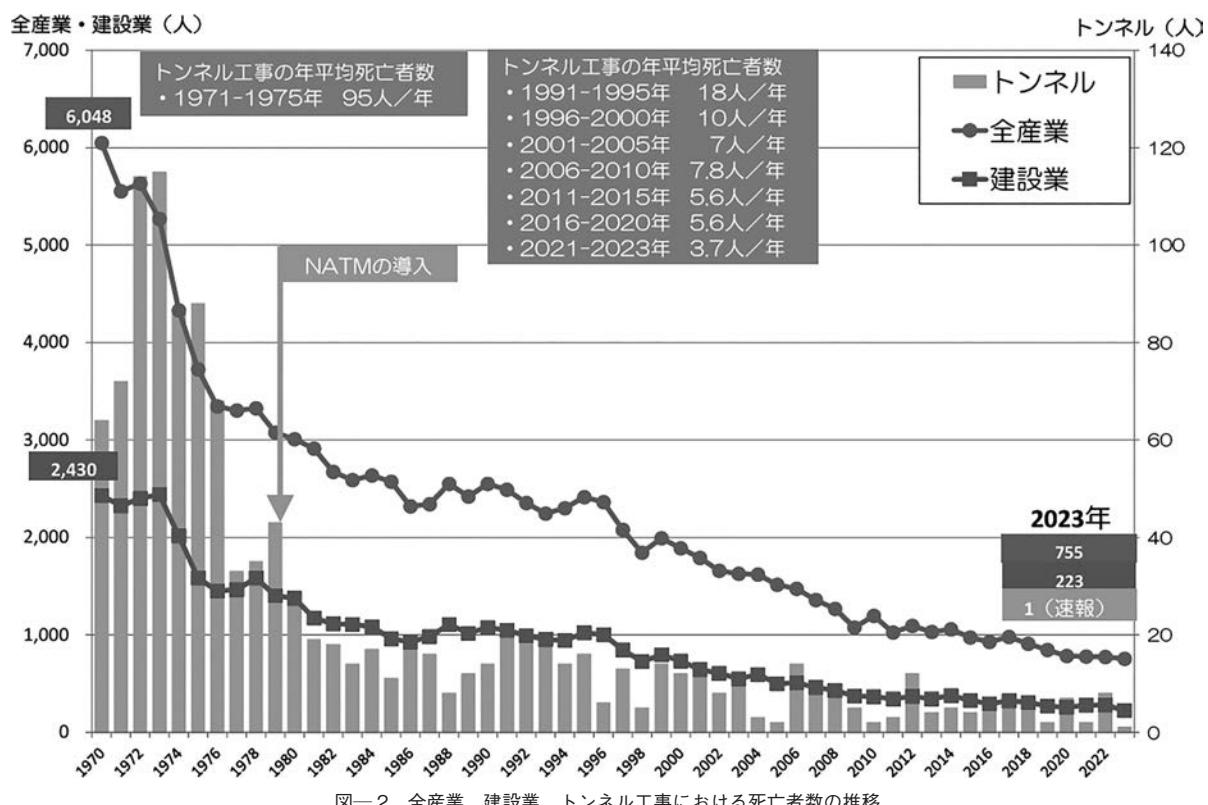
レール方式（ずり鋼車）→タイヤ方式（1960年代～、10tダンプトラック）→タイヤ方式（20tダンプトラック→30t、トンネル用アーキュレートダンプトラック、コンテナ方式、バックモニター、後方走行時の運転席回転）→ベルトコンベア方式（2km以上の長大トンネルでは生産性、安全性、環境改善を目的に採用が多い）

・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）



写真一1 ガントリージャンボと自由断面掘削機

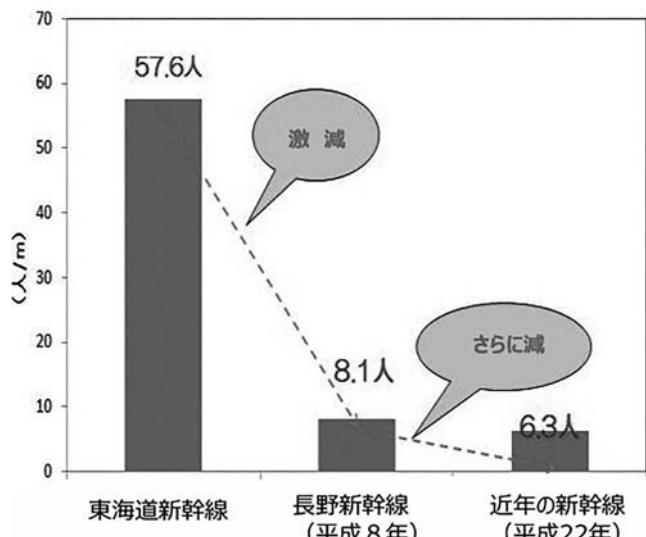


図二 全産業、建設業、トンネル工事における死亡者数の推移

- ・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）（写真一1），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

一 ロボット施工生産性システム（吹付け）一

次世代型吹付けロボット（5社共同開発）

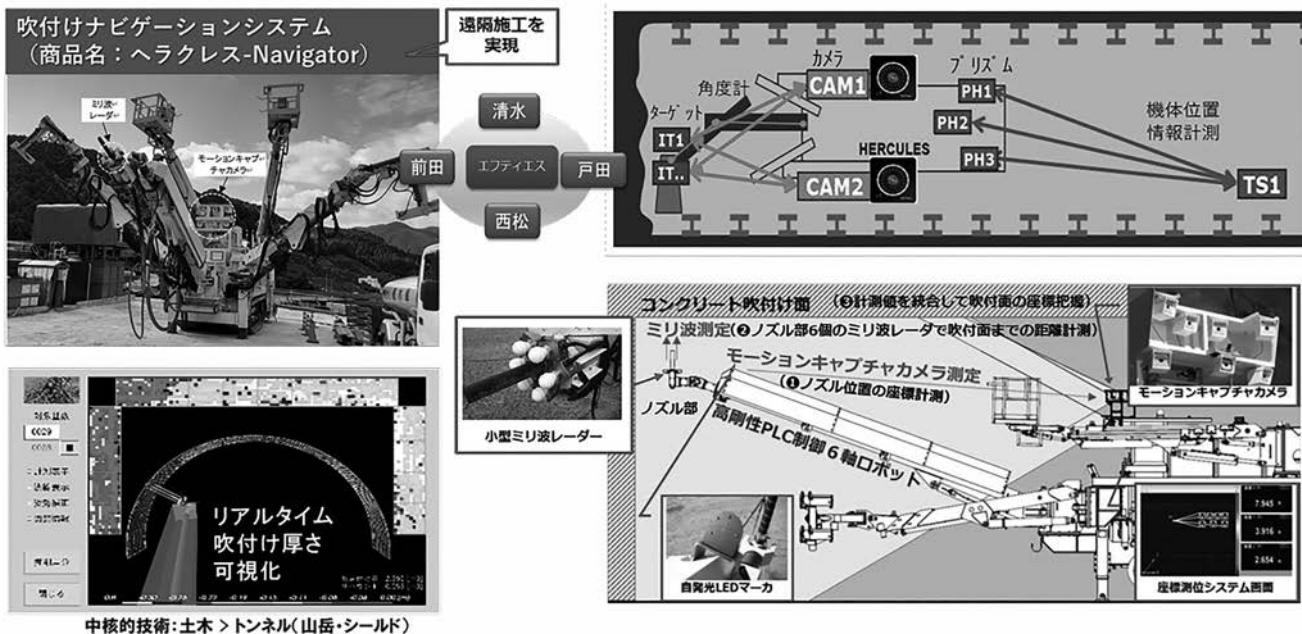


図-4 吹付け機の自動化

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、安全性の向上が図られている。

トンネル坑内の換気設備の改善コントラファンの大型化、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の考え方を導入し、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。

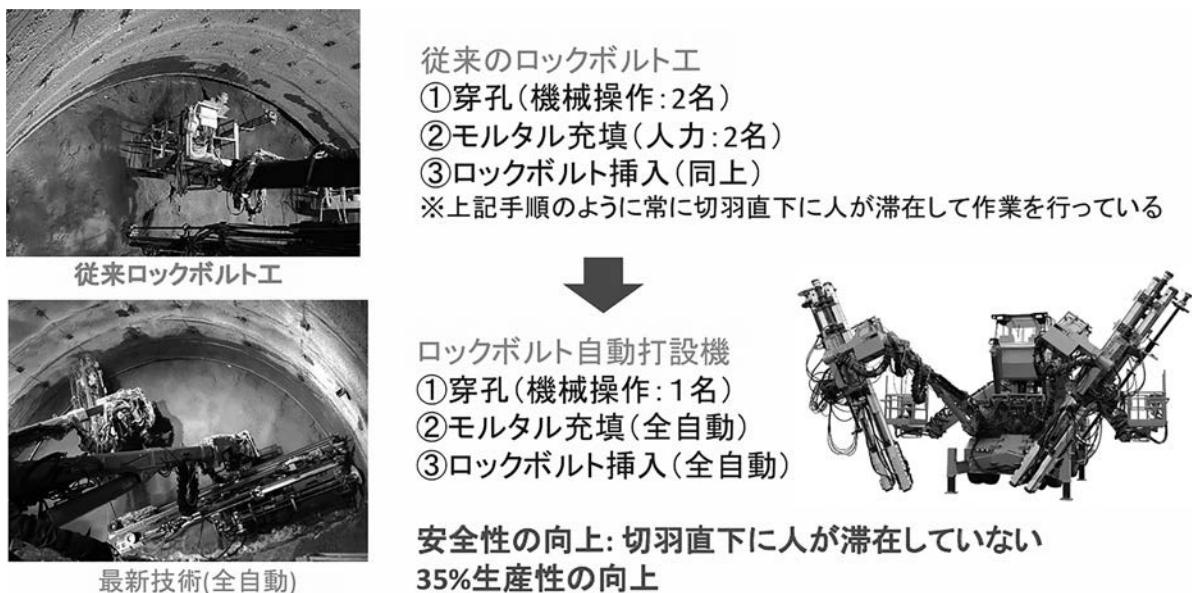


図-5 ロックボルトの自動化

●覆工コンクリート打設自動化の最新技術

■Phase-3 自動化 山岳トンネル覆工自動施工システム

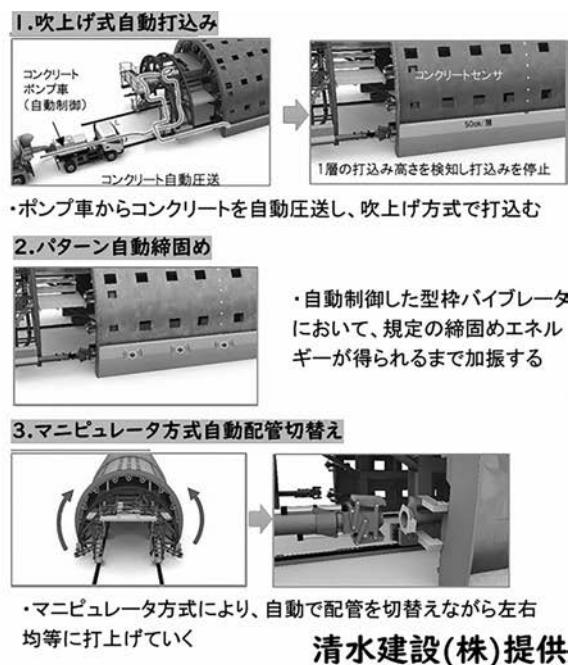
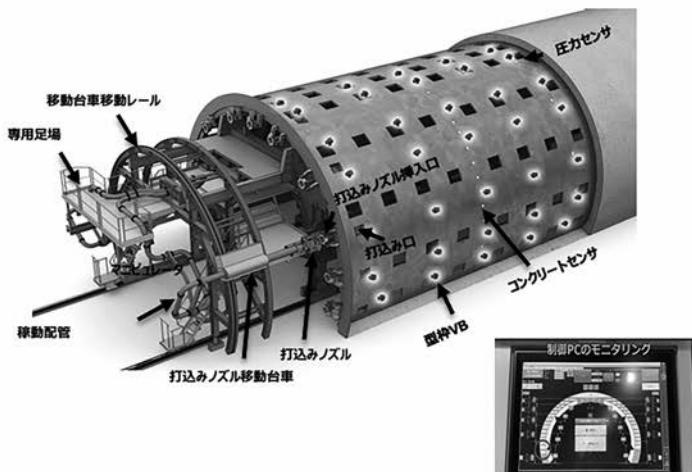


図-6 覆工コンクリートシステムの自動化

清水建設(株)提供

《参考文献》

- 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/kcu9fEnnkQwNVyx7>
- 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://jcmanet.or.jp/bunken/kikanshi/2019/11/118.pdf>
- 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>
- 清水建設㈱：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、
セーフティーグローバル推進機構理事——