

2025 年度

AI を含むデジタル技術の活用による
地下インフラの効率的な整備・運用に関する調査研究

報 告 書

AI を含むデジタル技術を活用した
地下インフラの建設・運用に関する調査研究
(第 2 部会)

2026 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター

**AI を含むデジタル技術を活用した地下インフラの建設・運用に関する調査研究部会
(第2部会)**

委員名簿

部 会 長	栗 山 裕 司	鹿島建設株式会社
副 部 会 長	田 中 宏 典	戸田建設株式会社
委 員	岩 崎 広 幸	株式会社安藤・間
委 員	田 井 伶	株式会社鴻池組
委 員	深 澤 英 将	佐藤工業株式会社
委 員	森 桂 一	株式会社竹中土木
委 員	東 中 基 倫	株式会社地球科学総合研究所
委 員	山 田 宣 彦	鉄建建設株式会社
委 員	保 広 将 尚	東急建設株式会社
委 員	田 彦	東電設計株式会社
委 員	瀬 瀬 善 孝	西松建設株式会社
委 員	安 井 利 彰	前田建設工業株式会社
事 務 局	古 谷 充 史	一般財団法人エンジニアリング協会 (2025 年 10 月まで)
事 務 局	中 川 明	一般財団法人エンジニアリング協会 (2025 年 11 月から)

活動内容

2025 年度は AI を含むデジタル技術を活用したインフラの建設・運用に関する調査研究を実施した。地下インフラを「都市や地域の機能を支える地下施設」と定義し、特性に応じて 4 分類することで、技術の適用領域と課題の整理に資する枠組みを構築した。

まず AI および関連技術の基礎的動向を整理し、建設・運用段階における国内外の活用事例を収集・分析するとともに 2026 年度の提案につながる課題抽出を行った。さらに、4 施設への現地調査・ヒアリングにより実態把握を進め、知見の具体化を図った。

第 2 部会の活動状況

回	開催日	主要議事
第 1 回	2025 年 6 月 17 日	・ 自己紹介 ・ 2025 年度の活動テーマの確認 ・ 年間予定の確認
第 2 回	2025 年 7 月 14 日	・ 現地調査 訪問先選定・審議 ・ 各社の状況調査結果の発表 ・ 2025 年度活動方針の討議
第 3 回	2025 年 8 月 28 日	・ 現地調査 訪問先 仮決定 ・ 各章の担当委員からの方針発表 ・ 全体方針確認
第 4 回	2025 年 9 月 29 日	・ 現地調査 訪問先打診結果確認 ・ 各章の進捗確認 ・ まとめ方に向けての方針確認
第 5 回	2024 年 10 月 28 日	・ 現地調査（鹿児島東西道路） 質問書集約 ・ 報告書執筆作業進捗確認 ・ 意見交換
現地調査	2025 年 11 月 6 日	・ 鹿児島東西道路
現地調査	2025 年 11 月 7 日	・ 串木野国家石油備蓄
現地調査	2025 年 11 月 25 日	・ 首都圏外郭放水路
現地調査	2025 年 12 月 4 日 2025 年 12 月 9 日	・ 羽田クロノゲート 12/4（第 1 班） 12/9（第 2 班）
第 6 回	2025 年 12 月 11 日	・ 年間スケジュール確認 ・ 報告書同時編集ルール確認 ・ 報告書中間報告
第 7 回	2026 年 1 月 16 日	・ 年間スケジュール確認 ・ 報告書各章の進捗確認（進捗管理表） ・ 報告書の相互査読担当確認 ・ 報告書完了までの詳細スケジュール確認
第 8 回	2026 年 2 月 13 日	・ 報告書最終版原稿の提出 ・ 次年度部会活動方針の確認

AI を含むデジタル技術の活用による 地下インフラの効率的な整備・運用に関する調査研究 報告書

AI を含むデジタル技術を活用した 地下インフラの建設・運用に関する調査研究

目 次

1. 調査研究方針・概要	9
1.1 調査研究方針・概要	9
1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査	9
1.2.1 鹿児島東西道路（大成・大豊特定建設工事共同企業体）	9
1.2.2 串木野国家石油備蓄基地	10
1.2.3 首都圏外郭放水路	10
1.2.4 羽田クロノゲート	11
2. 地下インフラの現状と課題	12
2.1 地下インフラの種類と特性	13
2.1.1 地下インフラの定義と重要性	13
2.1.2 主要な地下インフラの種類と特性	16
2.1.3 地下インフラの技術的特性と相互依存性	19
2.2 現行 DX 技術の適用状況と課題	20
2.2.1 地下インフラ維持管理における AI を含む DX 技術の適用と期待	21
2.2.2 現行 AI を含む DX 技術の限界と課題	22
3. デジタル技術の概要	26
3.1 人工知能発展の歴史	26
3.1.1 第 1 次 AI ブーム（1950～1970 年代：推論・探索の時代）	27
3.1.2 第 2 次 AI ブーム（1980～1990 年代：知識の時代）	28
3.1.3 第 3 次 AI ブーム（2000 年代後半～2020 年前後：機械学習の時代）	29
3.1.4 展望（第 4 次 AI ブームへ）	31
3.2 AI 技術の基礎知識	32
3.2.1 AI の定義と分類	32
3.2.2 機械学習の基盤	33
3.2.3 深層学習（ディープラーニング）	34
3.2.4 自然言語処理（NLP）	35
3.2.5 応用分野	35

3.3 その他の関連技術	37
3.3.1 基盤技術	38
3.3.2 応用技術	40
3.3.3 運用・管理	41
3.3.4 リスク・社会実装	43
3.3.5 その他	44
4. 地下インフラ建設における AI の活用	46
4.1 設計段階での AI の活用	46
4.1.1 建築分野の活用事例	46
4.1.2 橋梁上部工への活用事例	47
4.1.3 地盤調査への活用事例	48
4.1.4 図面管理・設計照査業務への活用事例	49
4.2 工程管理での AI の活用	50
4.2.1 山岳トンネル工事での活用事例	51
4.2.2 橋梁工事での活用事例	52
4.3 品質・安全管理での AI の活用	52
4.3.1 場所打ちコンクリート杭の支持層への到達状況確認に適用した事例	53
4.3.2 コンクリート構造物の品質確保に適用した事例	54
4.3.3 シールドトンネルの施工管理に適用した事例	56
4.3.4 安全管理への適用事例	56
4.4 維持管理での AI の活用	59
4.4.1 送電線・鉄塔の設備点検への適用	59
4.4.2 地盤モニタリングへの適用事例	60
4.4.3 ガス管パトロール業務への適用事例	61
4.4.4 レールの腐食検知への適用事例	62
5. デジタル技術の活用事例	64
5.1 国内事例	64
5.1.1 施工重機の遠隔化・自動化技術	64
5.1.2 計測作業の遠隔化・自動化技術	71
5.1.3 切羽監視の遠隔化・自動化技術	73
5.2 国際事例	77
5.2.1 掘削機械の遠隔監視・自動制御（TBM・ロードヘッダ）	77
5.2.2 巡回・点検ロボット	79
5.2.3 切羽監視・安全管理	82
5.2.4 デジタルツイン・統合管理	84
5.3 トラブル事例	86
5.3.1 イベリア半島大規模停電	86
5.3.2 韓国における地熱発電の実証プロジェクト（浦項 EGS プロジェクト）	92

6. ヒアリング・現地調査	96
6.1 鹿児島東西道路（大成・大豊特定建設工事共同企業体）	96
6.1.1 調査概要	96
6.1.2 調査実施状況	96
6.1.3 調査結果	97
6.2 串木野国家石油備蓄基地（（独）エネルギー・金属鉱物資源機構）	102
6.2.1 概要	102
6.2.2 実施状況	102
6.2.3 結果	103
6.3 首都圏外郭放水路	107
6.3.1 調査概要	107
6.3.2 調査実施状況	107
6.3.3 調査結果	107
6.4 羽田クロノゲート	113
6.4.1 調査概要	113
6.4.2 調査実施状況	113
6.4.3 調査結果	113
7. 結論	119

図目次

図 2-1	地下インフラに AI を含む DX 技術を適用した際のイメージ図	12
図 2-2	地下インフラを体系的に整理 (AI にて作成)	13
図 2-3	水道管総延長と管路経年化率	14
図 2-4	下水管総延長と管路経年化率	14
図 2-5	埼玉県八潮市の陥没事故の概要	15
図 2-6	機械学習による社会インフラの被災予測 (通信設備) ²⁰	21
図 2-7	中小企業における DX 推進の課題 (従業員 20 人以下の企業) ²⁶	24
図 2-8	中小企業における DX 推進の課題 (従業員 21 以上の企業) ²⁶	24
図 3-1	人工知能技術発達の模式図 ²⁷	27
図 3-2	チューリングテスト概念図	28
図 3-3	エキスパートシステムの構成	29
図 3-4	CNN の概念図	30
図 3-5	生成 AI の概要	31
図 3-6	人工知能の定義と分類 (AI にて作成)	33
図 3-7	機械学習の分類と概要 (AI にて作成)	34
図 3-8	深層学習の概要と代表モデル (AI にて作成)	35
図 3-9	AI 技術の主な応用分野 (AI にて作成)	37
図 4-1	AI 建物設計	47
図 4-2	AI 部材設計 ³⁵	47
図 4-3	LLM を用いた橋梁上部工 BIM/CIM モデルの自動作成	48
図 4-4	AI を活用した災害レジリエンスの高いスマートシティ	49
図 4-5	支持層の深度分布を示す 3 次元マップの作成例 ³⁷	49
図 4-6	AI 差分抽出機能	50
図 4-7	コンピュータビジョンの分析 (物体検知状況)	51
図 4-8	サイクルタイムの比較・見える化のイメージ ³⁹	51
図 4-9	作業エリアを設定した撮影状況と自動算出される歩掛イメージ	52
図 4-10	地盤の硬さ (N 値)・土質の推定フロー	53
図 4-11	杭支持層到達確認システムの画面例 ⁴¹	54
図 4-12	コンクリート・アイ概念図	55
図 4-13	表層品質評価アプリによる出力帳票一例 ⁴²	55
図 4-14	MAIOS S-II 概要	56
図 4-15	上：作業員の接近を検知 下：警報エリアと停止エリアの設定イメージ	57
図 4-16	防犯カメラによる監視例	58
図 4-17	送電線異常抽出処理の流れ	59
図 4-18	送電鉄塔劣化判定処理の流れ ⁴⁶	59
図 4-19	光ファイバーをセンサーとして活用した常時微動の測定	60

図 4-20	本手法と従来の地中空洞調査技術の比較 ⁴⁷	61
図 4-21	A I カメラによるガス管パトロール業務	62
図 4-22	システムの仕組み	63
図 4-23	システム画面（イメージ）と拡大したシステム画面（イメージ） ⁴⁹	63
図 5-1	ヘッドマウントディスプレイの表示イメージ ⁵⁰	65
図 5-2	重機周囲のマッピング ⁵¹	66
図 5-3	3D モデルによるアシストシステム ⁵¹	67
図 5-4	測量用ミラー回収用の小型ウィンチ ⁵²	67
図 5-5	ロックボルト自動打設機の現場導入 ⁵³	68
図 5-6	ロックボルト施工装置 ⁵⁴	69
図 5-7	山岳トンネルのデジタルツイン ⁵⁶	70
図 5-8	バックホウの衝突防止システム ⁵⁷	70
図 5-9	四足歩行ロボット「心／KOCaRo」 ⁵⁸	71
図 5-10	ドローンによる切羽自動監視システムの概要 ⁵⁹	72
図 5-11	UGV の遠隔操作状況 ⁶⁰	73
図 5-12	トンネル切羽変状可視化システム概要 ⁶¹	74
図 5-13	RGB-D 画像を用いた肌落ち検知状況（左）と画像生成イメージ（右） ⁶² ...	74
図 5-14	切羽地質情報取得システムの概要 ⁶³	75
図 5-15	切羽遠隔監視システムの概要 ⁶⁴	76
図 5-16	切羽安全監視システムの概要 ⁶⁵	76
図 5-17	TBM Control Centre の VR イメージ図	78
図 5-18	四足歩行ロボット ANYmal による湿潤・不整地での作業	79
図 5-19	Boston Dynamics の汎用四足歩行ロボット「Spot」	80
図 5-20	3S Tunnel Defect Inspector のドローンとサポート車輛	81
図 5-21	監視システムのイメージ図	83
図 5-22	ALECS system のイメージ図	85
図 5-23	イベリア半島の地理的位置図	86
図 5-24	スペインの太陽光発電と風力発電分布図	87
図 5-25	スペインの高圧送電網	88
図 5-26	2025 年 4 月 28 日スペイン当日電力市場	89
図 5-27	イベリア半島大規模停電の影響領域	90
図 5-28	浦項 EGS プロジェクト位置図 ⁷⁷	92
図 5-29	水圧破碎時の微小地震震源分布（左）と浦項地震本震の破壊域模式図（右） ⁷⁸	93
図 5-30	Traffic Light System の例 ⁸⁰	94
図 5-31	浦項 EGS プロジェクトにおける圧入井（PX-1）に適用された TLS ⁸¹	94
図 6-1	鹿児島東西道路事業全体計画平面図	96
図 6-2	トンネル断面図	97

図 6-3	工事平面図	97
図 6-4	セグメント概要図	98
図 6-5	施工ヤード模型	99
図 6-6	地中拡幅部（スチールセグメント）	100
図 6-7	シールドマシンの模型	101
図 6-8	視察状況	101
図 6-9	串木野国家石油備蓄基地平面レイアウト図	102
図 6-10	岩盤タンク（堅坑部）	103
図 6-11	水封方式の概念図	104
図 6-12	ちかび展示館の館内写真	105
図 6-13	視察状況	106
図 6-14	首都圏外郭放水路の概要	107
図 6-15	第1立坑	109
図 6-16	第1立坑から臨んだ調圧水槽	109
図 6-17	ポンプ設備 ⁸⁸	110
図 6-18	中央操作室	111
図 6-19	龍Q館の展示ホール	112
図 6-20	視察状況（於：調圧水槽）	112
図 6-21	羽田クロノゲート位置図	114
図 6-22	クロスベルトソーター	116
図 6-23	集中管理室	117
図 6-24	視察状況	118

表目次

表 3-1	デジタル技術関連キーワード 階層図	37
表 3-2	ビッグデータ活用例	39
表 3-3	クラウドサービス分類	39
表 3-4	具体的な計測例と手法例	42
表 5-1	山岳トンネル工事における重機の遠隔化・自動化システムの例	64
表 5-2	イベリア半島大規模停電の時系列	89

1. 調査研究方針・概要

1.1 調査研究方針・概要

第2部会では、「AIを含むデジタル技術を活用したインフラの建設・運用に関する調査研究」をテーマに、2025年度から2026年度までの2年間にわたり調査・研究を実施する。2025年度は、AIを含むデジタル技術の現在の適用状況を調査し、建設・運用における課題の整理を実施した。

本調査研究での「地下インフラ」を「都市や地域の機能を支えるために地下に設置された各種設備や構造物」と定義し、多種多様なインフラをその特性から4つのカテゴリー（ライフラインインフラ、交通インフラ、通信インフラ、その他のインフラ）に分類した。これは、各インフラの特性（用途や構造的な特徴など）を明確にし、以降に続くAIを含むデジタル技術の活用事例やインフラの建設・運用における技術導入の課題に関する理解を深めることを目的としたものである。

調査においては、まずデジタル技術について本書の読解にあたり最低限必要な一般的な知識に加え、雑学的興味も考慮し、AI技術の変遷などについても調査した。また、本部会のテーマである「インフラの建設・運用」段階におけるAIを含むデジタル技術の活用事例を国内外で幅広く調査し、失敗例も参考に整理することで、2026年度に予定している提案内容につながる課題の明確化を図った。

さらに、これらの机上調査に加えて、地下インフラ施設やデジタル技術導入施設などを対象としたヒアリング・現地調査を実施し、調査の深度化を図った。2025年度の対象施設は「1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査」に示す4か所とした。各調査結果の詳細については、第6章にて述べる。

1.2 関連施設への現地調査・ヒアリング調査

1.2.1 鹿児島東西道路（大成・大豊特定建設工事共同企業体）

（1）調査概要

鹿児島東西道路は高規格幹線道路の結節点である鹿児島ICと鹿児島市中心市街地および重要港湾である鹿児島港を結ぶ地域高規格道路である。鹿児島ICから鹿児島市街地へのアクセス機能を強化するとともに、都市交通の円滑化と交通渋滞の緩和を目的とした道路であり、国土交通省九州地方整備局鹿児島国道事務所が建設管理を行っている。これまでに鹿児島IC～田上IC間（延長0.4km）が4車線、田上IC～建部IC（延長1.8km）が2車線で開通している。ここでは、大成・大豊特定建設工事共同企業体が工事を進めている田上ICから甲南IC（仮称）付近立坑までの下り線シールドトンネル（延長2.3km）を視察し、AIと遠隔技術を組み合わせた安全・施工管理技術やインフォメーションコーナーで活用されているVR技術などを確認した。

(2) 調査実施状況

日 時：2025 年 11 月 6 日（木）14:00～16:20

場 所：鹿児島東西道路シールド工事作業所

出席者：大成・大豊特定建設工事共同企業体

橋本所長

：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第 2 部会

栗山部会長、田中副部会長、岩崎委員、田井委員、深澤委員、森委員、東中委員、山田委員、保広委員、田委員、瀬瀬委員

事務局 塩崎副所長、中川主幹

1.2.2 串木野国家石油備蓄基地

(1) 概要

串木野国家石油備蓄基地は、鹿児島県いちき串木野市に位置し、水封式地下岩盤タンク方式による国家石油備蓄施設である。1986 年に立地が決定され、1994 年に全面完成。現在は独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が管理しており、民間の操業サービス会社が運営を担っている。本施設は、地下岩盤内に掘削されたトンネル型タンクに原油を貯蔵し、周囲の地下水压によって油の漏洩を防止する「水封方式」を採用しており、環境保全・安全性・経済性に優れた備蓄方式として国内外で注目されている。ここでは、現地説明を通じて、施設の概要や備蓄方式の技術的特徴、防災対策、DX 活用状況などについて確認した。

(2) 実施状況

日 時：2025 年 11 月 7 日（金）10：00～12：00

場 所：串木野国家石油備蓄基地

出席者：（独）エネルギー・金属鉱物資源機構

久保所長、東副所長

：日本地下石油備蓄（株）

塚田操油係長、大野担当

：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第 2 部会

栗山部会長、田中副部会長、岩崎委員、田井委員、深澤委員、森委員、東中委員、山田委員、保広委員、田委員、瀬瀬委員、安井委員

事務局 塩崎副所長、中川主幹

1.2.3 首都圏外郭放水路

(1) 調査概要

首都圏外郭放水路は、埼玉県の中川・綾瀬川流域における洪水被害を軽減するために地下 50m に整備された世界最大級の地下放水路である。当該流域は利根川、江戸川、荒川などの大河川に囲まれた皿状の低平地であるとともに河川の勾配が非常に緩やかであ

ることから、大雨の際に河川の水位が下がりにくく、これまでに多数の洪水被害が発生してきた。ここでは、国土交通省江戸川河川事務所が定期的開催する見学会に参加し、地底探検ミュージアム龍Q館、調圧水槽、第1立坑を視察した。さらに、大規模地下空間の有効な運用方法や、見学施設としてAR技術を活用している状況などを確認した。

(2) 調査実施状況

日 時：2025年11月25日（火） 15:00～17:00

場 所：首都圏外郭放水路（埼玉県春日部市）

出席者：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第2部会

栗山部会長、田中副部会長、東中委員、保広委員、瀬瀬委員

1.2.4 羽田クロノゲート

(1) 調査概要

物流大手のヤマトホールディングス株式会社が運営する羽田クロノゲートは、東京都大田区羽田旭町に立地し、羽田空港に隣接して環状八号線に面する大規模物流倉庫である。ヤマトホールディングスは、本施設を羽田空港、東京港、横浜港、首都高速道路、東名高速道、JR貨物（株）東京貨物ターミナル駅に近接する陸・海・空の結節点としており、大量の荷物を効率的に仕分けし配送している。ここでは、仕分け作業などにデジタル技術を積極的に活用しDXを進めていることを視察した。

(2) 調査実施状況

日 時：2025年12月4日（木） 9:00～12:00

2025年12月9日（火） 13:30～15:30

場 所：羽田クロノゲート

出席者：ヤマトホールディングス株式会社

松村様、村上様

（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第2部会

12月4日（木）

栗山部会長、東中委員、深澤委員、田委員、安井委員

12月9日（火）

岩崎委員、田井委員、山田委員、保広委員、瀬瀬委員

事務局 中川主幹

2. 地下インフラの現状と課題

都市機能の維持に不可欠な地下インフラの重要性を再確認する必要がある。老朽化の進行、自然災害の激甚化、維持管理コストの増大といった課題に対し、AIを含むDX（デジタルトランスフォーメーション）技術の導入が喫緊の課題となっている。

本章では地下インフラの種類と特性を概観し、特に現行デジタル技術の適用状況、そしてその限界と課題について、具体的な事例とデータを用いて考察する。

近未来においては、図 2-1 に示すように、地下インフラ分野においてDXの推進とAI技術の活用が進むことで、老朽化の進行状況の見える化や一元管理が可能となる。さらに、自然災害時の異常をリアルタイムで把握して被害拡大を防止できることが期待される。また、これらの取り組みにより維持管理コストの削減も実現できると考えられる。



図 2-1 地下インフラに AI を含む DX 技術を適用した際のイメージ図

※本図は AI にて作成したイメージであり、実際の地下インフラの配置や技術適用を正確に示すものではない。

2.1 地下インフラの種類と特性

2.1.1 地下インフラの定義と重要性

地下インフラとは、「水道管やガス管、電力ケーブル、通信線」など、都市や地域の機能を支えるために地下に設置された各種設備や構造物の総称として定義される。また、「多目的型地下インフラ」という概念もあり、これは防災、交通、生活支援など複数の機能を統合した地下空間のことを指す。本報告書では、地下に埋設されているライフライン（上下水道、ガス、電力、通信）を中心として、地下鉄や共同溝などの地下空間インフラも含めて取り扱うこととする。

地下インフラの定義においては、収容性、連続性、代替性、閉鎖性という4つの視点が重要である。収容性とは地上に収容できない施設や人・文化を地下に収容することを指し、連続性は物理的・機能的にネットワークとして連続性を持つことを意味する。代替性は地上空間の制約を補う代替空間としての役割を果たし、閉鎖性は人が利用する前提か否かによって設計が異なることを示している。

地下インフラの種類を体系的に整理したものを図 2-2 に示す。地下インフラは多種多様で数多くの構造物が存在するが、主要な分類として、本章では「ライフラインインフラ」「交通インフラ」「通信インフラ」「その他のインフラ」の4つのカテゴリーに分類する。

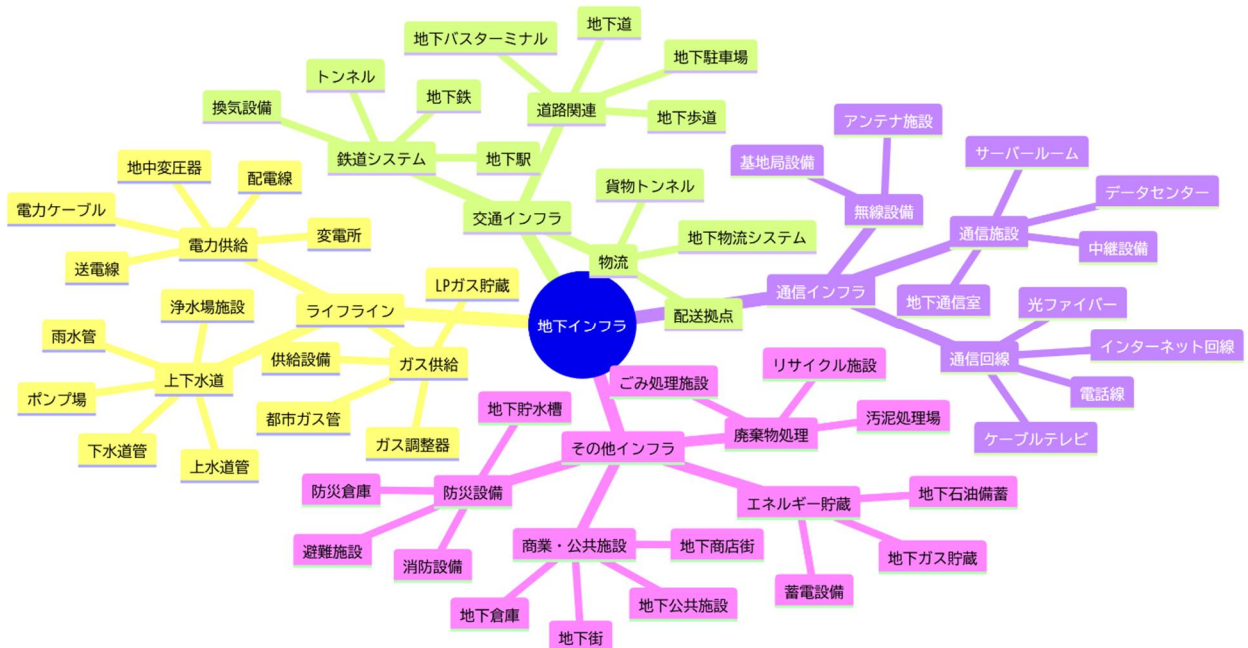


図 2-2 地下インフラを体系的に整理 (AI にて作成)

地下インフラは都市活動を支える基盤施設群として機能しており、その規模は膨大である。上下水道を例に挙げると、水道管総延長は約 77 万 km、管路経年化率（法定耐用年数を超過した管路延長／総管路延長）は 25.4%となっている（図 2-3）。なお、法定耐用年数は水道管 40 年、下水道管 50 年となっている。

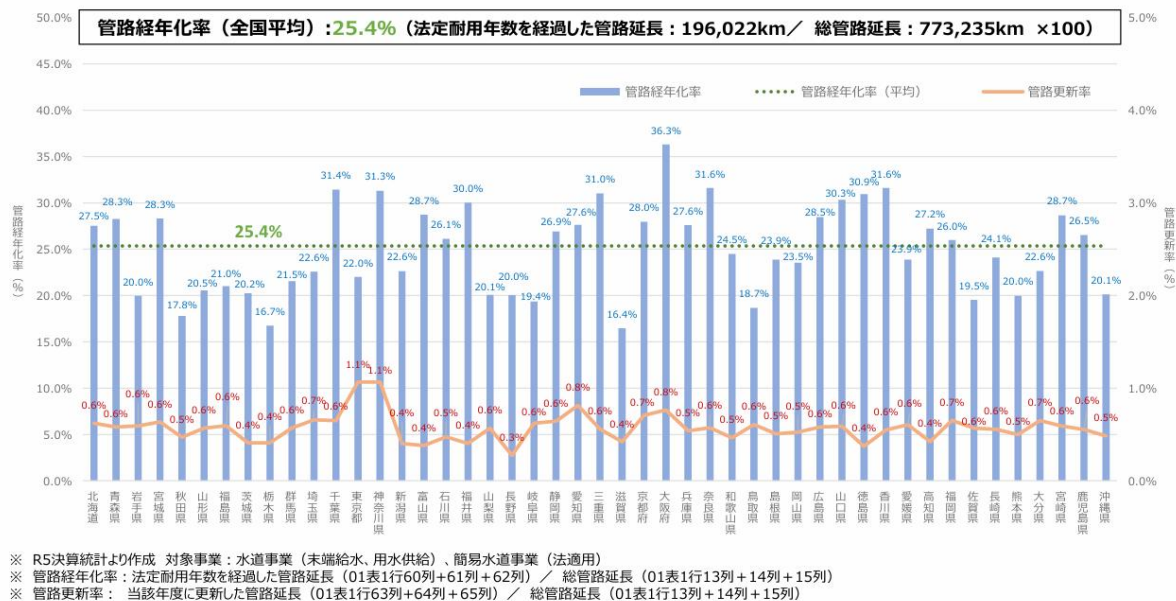


図 2-3 水道管総延長と管路経年化率¹

また、下水道管の総延長は約 50 万 km であり、管路経年化率は令和 5 年末時点では約 8% となっているが、20 年後には約 40%となるなど今後急速に増加する見込みとなっている（図 2-4）。

■ 管路施設の年度別管理延長(R5末現在)

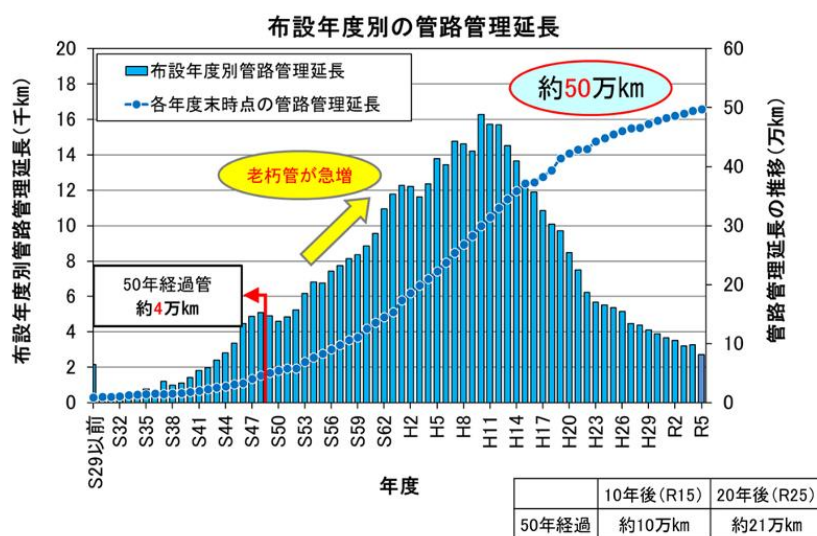


図 2-4 下水管総延長と管路経年化率²

¹ 総務省自治財政局準公営企業室：水道事業の現状等（最新追加資料）（参照 2025.7）
https://www.soumu.go.jp/main_content/001022598.pdf

² 総務省自治財政局準公営企業室：下水道事業の老朽化対策等（参照 2025.9）
https://www.soumu.go.jp/main_content/001033500.pdf

国土交通省下水道などに起因する大規模な道路陥没事故を踏まえた対策検討委員会の資料³によると水道管の年間漏水事故は約 2 万件発生しており、維持管理の重要性が浮き彫りになっている。令和 7 年 1 月 28 日に埼玉県八潮市で発生した下水道管劣化に起因する大規模な道路陥没事故により尊い命が失われたことは記憶に新しく、社会全体に下水道の維持管理の重要性を改めて認識させる深刻な出来事となった（図 2-5）。

(1)－1 埼玉県での陥没事故の概況

- 令和7年1月28日、埼玉県八潮市の県道において道路陥没が発生し、トラック運転手が車両ごと落下。
- 陥没箇所には、処理水量約61万m³/日の下水処理場に繋がる管径4.75mの流域下水道管路が埋設されており、下水道管の破損に起因すると考えられる陥没としては、最大級の規模。
- 陥没規模は拡大するとともに、関連する12市町の120万人に下水道（風呂、洗濯など）の使用自粛が要請されるなど、影響は更に拡大。現場では、現在も救助活動に向けた作業が継続中。

- 発生日時：令和7年1月28日（火）午前10時頃
- 発生場所：八潮市中央一丁目地内
県道松戸草加線（中央一丁目交差点内）
- 陥没規模：（1月28日当初）幅約9～10m、深さ約5m
（1月31日拡大後）幅約40m、深さ最大約15m
- 下水道管：管径4.75m、昭和58年（1983年）整備（経過年数42年）
令和4年度の調査時には、補修が必要な腐食は確認されず
- 接続先：中川水循環センター（処理水量約61m³/日）

図 2-5 埼玉県八潮市の陥没事故の概要⁴

³ 国土交通省：令和 6 年度 全国水道主管課長会議（参照 2024.6）

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/watersupply/content/001741376.pdf>

⁴ 国土交通省：下水道等に起因する大規模な道路陥没事故を踏まえた対策検討委員会（参照 2025.2.21）

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001866042.pdf>

2.1.2 主要な地下インフラの種類と特性

日本の地下には、私たちの生活や経済活動を支える多種多様なインフラが張り巡らされている。前項で分けた4つのカテゴリーにおける地下インフラの種類とそれぞれの特性を以下に示す。

(1) ライフラインインフラ

1) 水道管

令和5年度末時点で、全国の水道管の総延長は約77万kmに達した。このうち、法定耐用年数を経過した管路の延長は約19万km（総延長の約25.4%）におよび、老朽化が進行している¹。水道管の材質は多岐にわたり、铸铁・ダクトイル铸铁管は耐荷重に優れる一方で腐食や継手部の劣化に留意が必要であり、鋼管は高強度だが防食管理が必須となる。硬質塩化ビニル管（PVC）・ポリエチレン管（PE）などの樹脂管は耐食性と施工性に優れるものの外荷重・温度変化・水撃への配慮が求められる。老朽化の進行や維持管理コストの増大が課題となっており、DX～AI技術の導入が進められている。横浜市では、モデル地区に461基の水道スマートメーターを導入し、自動検針システムを構築した。定例検針データは検針員による検針結果と100%整合し、1時間値データも99%以上の高い取得率を達成した。しかし、導入における最大の課題はメーター本体や通信費などの高額な費用であり、官民連携や他都市との連携を通じて費用削減に取り組む方針である⁵。

2) 下水道管

令和5年度末時点で、全国の下水道管の総延長は約50万kmであり、標準耐用年数50年を経過した管路の延長は約4万km（総延長の約7%）となっている⁶。下水道管は主に鉄筋コンクリート管、陶管、硬質塩化ビニル管などが使用されており、管種によって劣化特性が異なる。特にコンクリート管は、下水中の硫黄分から発生する硫化水素が酸化して硫酸となり、管の腐食を引き起こす特性がある。一方、塩化ビニル管は耐薬品性に優れ、硫酸による腐食は受けにくい、可とう管であるためたわみやすい構造的特性を持つ。これら下水道管は、今後一気に更新時期を迎える見込みであり、老朽化を放置すると排水能力の停止や管路破損による道路陥没などが発生する。国土交通省のデータでは下水道管の劣化が原因と見られる道路陥没は年間2,600件以上発生している⁷。

⁵ 横浜市：横浜市水道局・日本水道協会「モデル地区における自動検針システム（スマートメーター）の導入」（参照 2022.7）

<https://www.jwrc-net.or.jp/docs/publication-outreach/keikaku/120.pdf>

⁶ 国土交通省：下水道の維持管理―下水道管の総延長と老朽化

https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/crd_sewage_tk_000135.html

⁷ 国土交通省：下水道管路メンテナンス年報（参照 2024.10）

<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001769140.pdf>

3)ガス導管

2024 年時点で、都市ガス導管の総延長は約 25.7 万 km、高圧の都市ガス導管は総延長 2,450km であり、低圧～高圧のガス導管の総延長の約 1%にあたる⁸。ガス導管は圧力に応じた材料を使用しており、高圧では強靱な鋼管、中圧では鋼管やダクタイル鋳鉄管、低圧では耐震性と耐食性に優れたポリエチレン管が主に採用されている。埋設された鋼管や鋳鉄管は経時的な腐食の進行に伴う漏えいリスクがあり、腐食対策が重要となる。ガス漏れや停電事故の防止、効率的な監視体制の構築が求められる。東京ガスネットワークは DX を活用したスマートメーターの広域導入を本格化しており、そのセンタースystemには東京ガス・大阪ガス・東邦ガスが共同開発した「SMANEO（スマネオ）」を採用しており、2022 年 12 月から利用を開始し、2024 年 1 月末時点で約 100 万台のスマートメーターを接続している。スマートメーターの通信機能により、遠隔検針・遠隔開閉を可能とする体制の整備を進めている⁹。

4)電力ケーブル

日本の電線総延長は約 138 万 km だが、このうち地中化されている電線の延長は約 8 万 km であり、全体の 5.8%に留まっている。ただし、東京都心部（千代田区、中央区、港区）では 88.3%、東京 23 区全体では 47.5%と、都市部での地中化率は高くなっている¹⁰。地中電力ケーブルは、架空線と比較して電気的特性（絶縁破壊電圧、体積抵抗率が高いなど）に優れ、電流容量が大きい（連続最高許容温度 90℃）という特徴を持つ。また、地中埋設により、景観の向上、災害時の電柱倒壊による道路閉塞の防止、気象条件の影響を受けにくいなどの利点がある。経済産業省が推進する「スマート保安センサー」技術は、IoT を使ったセンサーで電気設備に異常がないかを常に監視し、もし異常が見つければ大きな事故になる前に修理できるため、電気の安全を守り、点検作業を効率的にする効果が期待される¹¹。

(2) 交通インフラ

地下を走る鉄道トンネルや道路トンネルは、都市部の交通網を支える重要なインフラである。これらのトンネルは、建設場所（山岳、都市、水中など）や用途（鉄道、道路）

⁸ 高圧ガス保安協会：CCS パイプラインに関する情報共有及び規格策定に向けて（参照 2024.11.11）

https://www.khk.or.jp/Portals/0/khk/h2/committee/pipeline/01/20241111_pipeline_01-03.pdf

⁹ 東京ガスネットワーク：スマートメーターのセンタースystem共同開発『SMANEO』が日本ガス協会技術大賞を受賞（参照 2024.11.6）

<https://www.tokyo-gas.co.jp/network/nw-topics/2024/1107.html>

¹⁰ 国土交通省：無電柱化の推進に向けた取組等について（参照 2020.6）

<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/chicyuka/pdf10/06.pdf>

¹¹ PR TIMES：IoT を活用した高圧電気事故の予兆検知技術「スマート保安センサー」（参照 2022.7.29）

<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000062.000092488.html>

によって構造や特性が大きく異なる。例えば、道路トンネルは自動車の排出ガス対策として換気設備が重要であり、鉄道トンネルに比べて延長は短くなる傾向がある。また、トンネルの形状は、土や岩の圧縮力に強い特性を活かした丸い形が多い。維持管理においては、地山分類や不連続面の影響を考慮する必要がある。東京メトロでは、2019年3月から状態基準保全（CBM：Condition Based Maintenance）の導入に向けた技術開発に取り組んでおり、従来の時間基準保全（TBM）に加え、センシング技術やIoT、AI・ビッグデータ解析などの先端技術を活用して設備状態監視の充実を図っている。これにより、安全・安定性の向上、コスト削減・保全業務の効率化を実現している¹²。

(3) 通信インフラ

通信ケーブルを収容する地下トンネルである「洞道（とう道）」の総延長は、日本全体で約650km程度であり、このうち東京都内に約290km、大阪市内に約100kmが集中しており、主要都市の通信インフラを支えている¹³¹⁴。現在主流の光ファイバケーブルは、伝送損失が小さく（1.55μm帯で約0.2dB/km以下）、中継器なしで長距離・大容量伝送が可能である。また、細径・軽量で電磁免疫性に優れ、電磁放射がないため、地下洞道内での高密度配線に適している。広範囲にわたるネットワークの安定稼働が重要であり、故障の早期発見と効率的な管理が課題となっている。NTTグループは、全国に広がる大規模な光ファイバー網を保有しており、その維持管理において、AIを活用した故障予兆検知技術の開発と導入に積極的に取り組んでいる¹⁵。

(4) その他のインフラ

共同溝、貯留池、地下河川なども主要な地下インフラとして挙げられる。これらの地下インフラは、いずれも大規模な地下構造物であり、ライフラインの保護や浸水防止といった重要な都市機能を担う一方で、長期的な維持管理と適切な運用が不可欠な特徴を

¹² 東京メトロ：東京メトロ ニュースリリース「状態基準保全（CBM）の導入に向けた技術開発に取り組めます」（参照 2019.3.26）

<https://www.tokyometro.jp/news/2019/200786.html>

¹³ Impress Watch：『洞道』を行く！ NTTの長大地下インフラ、都内だけでも総延長290km（参照 2019.12.20）

<https://internet.watch.impress.co.jp/docs/special/1225244.html>

¹⁴ CNET Japan：災害から通信インフラを守る『巨大地下ダンジョン』--NTTのとう道（参照 2023.8.5）

<https://internet.watch.impress.co.jp/docs/special/1225244.html>

¹⁵ NTT ニュースリリース：IOWN APNの実現に向けた大容量光トランスポートネットワークの故障予兆部位推定技術を実証～高精度に故障を予測し事前対処を行うことで、通信断ゼロを目指す～（参照 2022.7.21）

<https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/07/21/220721b.html>

持っている。貯留池では、IoT センサーと AI を活用した遠隔監視システムの導入が進んでいる。リアルタイムで水位を把握し、降雨量に応じて水の流入や排出を自動制御することで、ピーク時の排水負荷を抑える仕組みがされている¹⁶。

2.1.3 地下インフラの技術的特性と相互依存性

地下インフラは、地中に埋設されているという特性から、地上インフラとは異なる技術的課題と相互依存性がある。

(1) 技術的特性

1) 視認性・アクセス性の制約

地中に埋設されているため、点検の可視性が低く、異常の早期発見が難しいという技術的な制約がある。補修や更新作業には掘削工事が伴い、時間・コスト負担が大きいため、維持管理コストの増大に直結する。

2) 地中環境への耐性要求

地盤変動、地下水、土壌腐食など、地中環境特有の要因による影響を受けやすく、これらに耐えうる材料選定や工法が求められる。

3) 複雑な埋設状況と空間制約

都市部では複数のインフラが狭い地下空間に錯綜して埋設されており、工事や維持管理の際に他インフラへの影響を最小限に抑えるための高度な技術と調整が必要となる。

4) 長寿命・耐久性設計と老朽化対応

一度埋設されると交換が困難なため、高い耐久性と長寿命が求められ、初期設計段階での技術的な検討が重要となる。一方で高度経済成長期に整備されたインフラが多く、築 30 年以上の施設が全体の 60% を占めるなど、耐用年数を超過したものが増加しており、事故や災害のリスクを高めている。

5) 災害時の脆弱性

地震や豪雨などの災害時に、地下インフラが損傷すると、ライフラインの供給停止などの影響が広域かつ長期化し、甚大な被害につながる可能性がある。

6) 人的リソースの制約

熟練者の退職により人手不足・技術継承が課題化し、保全・更新の生産性確保が難しくなっている。

(2) 相互依存性

都市部では複数のインフラが狭い地下空間に錯綜して埋設されており、その管理には

¹⁶ GIG + Magazine：リアルタイム×AI で水害リスクに備える：進化する遠隔水位監視システム（参照 2025.7.28）

<https://add.gig.co.jp/magazine/introduction-installation/3208/>

相互依存性を考慮した連携が不可欠である。地下インフラは材質・構造特性による維持管理要件の違いがあり、インフラ間の物理的・機能的相互関係が複雑に絡み合っている。

この相互依存性により、一つのインフラに問題が発生した際に連鎖的な影響を及ぼす可能性がある。例えば、2018年9月の北海道胆振東部地震では、地震による発電所の停止が北海道全域のブラックアウト（大規模停電）を引き起こし、その影響が他のライフラインに連鎖的に波及した。停電により水道施設のポンプが停止し、断水の復旧が停電期間より長期化するなど、インフラ間の相互依存性により被害が拡大した¹⁷。また、1995年の阪神・淡路大震災においても、各ライフラインシステムの被災規模が甚大であったことから、ライフライン相互連関が大規模な災害連鎖の中心的な位置を占めた。さらに、停電による動力喪失や通信機能麻痺による情報伝達不能が広範な影響を及ぼした¹⁸。

共同溝のように複数のインフラが同じ空間を共有するケースでは、一つのインフラの工事やトラブルが他のインフラに影響を及ぼす可能性があるため、異なるインフラ事業者間での情報共有と連携の促進が重要となる。国土交通省も地下インフラ状況把握システムの構築を進めており¹⁹、これにより工事の重複を避け、災害時の迅速な対応が可能となる。

2.2 現行 DX 技術の適用状況と課題

日本の社会インフラは高度経済成長期に集中的に整備され、その多くが老朽化の課題に直面している。前節で述べたように、地下インフラには固有の課題が存在する。そのため、点検や補修が容易でなく、老朽化の進行は社会生活に甚大な影響を及ぼす可能性がある。このような背景から、維持管理の効率化や高度化、そして安全性の向上を目標に、AIを含む DX 技術の適用が重要となっている。

¹⁷ 北海道胆振東部地震(平成 30 年) 大規模停電のインフラへの影響

https://www.isad.or.jp/wp/wp-content/uploads/2019/12/no138_35p.pdf

¹⁸ ライフライン機能停止と相互連関

https://www1.gifu-u.ac.jp/~nojima/pdf/1998_fukuisympo_j.pdf

¹⁹ 日刊工業新聞：国交省、地下インフラ状況把握システム構築へ(参照 2025.2.25)

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00741117>

Project PLATEAU：地下埋設物データを活用した都市開発の DX

<https://www.mlit.go.jp/plateau/use-case/uc23-04/>

2.2.1 地下インフラ維持管理における AI を含む DX 技術の適用と期待

現在、地下インフラの維持管理には、IoT センサー、AI、BIM/CIM、GIS、ロボット、ドローンなどの技術が適用されている。

このような技術動向の中で、NTT グループ²⁰では、地下埋設管路の高精度な 3 次元デジタル化を実現するため、通信用管路を対象に、TOF（Time Of Flight：距離計測）カメラやジャイロセンサを搭載した内部走査装置と、取得した点群データを接続処理することで管路全長の 3 次元形状を再現した。また、マンホール位置と結びつけて地理空間上の埋設位置を算出する手法を確立した。模擬環境での実験では、計測長 185m に対して誤差 0.10% 以内という非常に高精度な結果が得られた。

また、電柱の長年の維持管理で蓄積した設備被災時の点検データを活用し、豪雨起因の土砂災害に対する電柱の被災予測 AI モデルを構築した（図 2-6）。その結果、被災リスクを 98% の精度で予測することに成功した。さらに、管路や橋梁添架管などの通信設備についても、地震や河川氾濫に対する被災予測 AI モデルを構築し、高精度での被災リスク予測を可能とした。

このほかにも AI を含む DX 技術の活用により、予防保全への移行、点検効率化、意思決定の迅速化、安全性向上といった効果が期待されている。

通信設備の被災予測技術

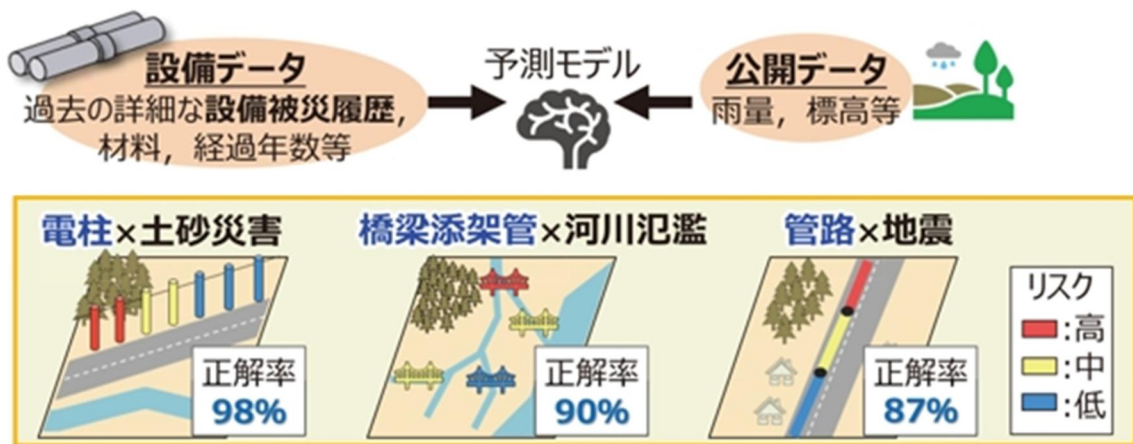


図 2-6 機械学習による社会インフラの被災予測（通信設備）²⁰

²⁰ NTT：NTT 技術ジャーナル記事（参照 2025.12.19）

<https://journal.ntt.co.jp/article/34714>

2.2.2 現行 AI を含む DX 技術の限界と課題

地下インフラ建設から運用（維持管理を含む）に至る段階において、AI を含む DX 技術の限界と課題を具体的な事例とともに論じる。

(1) データ取得・センシングの限界

データ取得・センシング技術には環境による制約がある。地中可視化サービス²¹として、地中レーダー探査は代表的なものであり、電磁波を用いて地下を探査し、高度な画像解析により広域かつ正確な埋設物情報を可視化する技術である。探査深度 0.5～1.5m の範囲にある直径 50mm 以上の埋設管を対象としており、目安の探査精度は水平・深度方向に±15cm である。しかし、土質などの環境状況や埋設物の大きさによっては、目安の探査精度が得られない場合もある。また、地中では GPS などの測位技術が利用しにくく、インフラの正確な位置情報を高精度で取得・管理する技術が求められている。

(2) AI モデル開発・活用の課題

AI モデルの開発・活用においては、データの蓄積が大きな課題となっている。建設経済レポート（No.76）²²によると、定期点検データを用いた劣化予測やセンサーによるモニタリング技術は、一部の大規模自治体で利用され始めている。しかし、研究段階の部分が多く中小自治体では普及していない。その理由として、構造物の個別性によるデータ収集の困難さや、技術開発に必要なデータの蓄積・公開が不十分であることなどが挙げられる。加えて、点検・診断の効率化と高度化においても課題がある。AI による画像解析や音響解析などを活用した自動検知・診断技術の導入が期待されるが、高品質な学習データの収集や誤検知の低減が課題となっている。

(3) データ連携・統合の課題

データ連携・統合においては、データ形式の不統一が大きな課題となっている。国土交通省が地方公共団体や業界団体などを対象に実施したアンケート結果によると、地下埋設物の正確な位置を把握するには、地下埋設物の位置を一元管理するデータ形式を揃えた情報データベースの構築が必要であるとの回答があった²³。

各インフラ管理事業者が個別にデータを管理しており、異なる形式のデータを標準化

²¹ HITACHI：地中可視化サービス（参照 2025.12.19）

https://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/app/social_infra_mnt/subsurface/index.html#gq

²² 建設経済研究所：No.76 建設経済レポート（参照 2024.3）

<https://www.rice.or.jp/wp-content/uploads/2024/04/76-1-3.pdf>

²³ 国土交通省：1.地下空間に関する事案（参照 2025.12.19）

<https://www.mlit.go.jp/common/001200763.pdf>

し、統合する仕組みが必要である。また、異なるインフラ事業者間での情報共有が不十分であり、地下空間全体の状況を把握するための連携が不足している。各事業者の連携構築とそれに伴う情報セキュリティの確保が重要である。

(4) コストと投資対効果

コスト面での課題も深刻である。AI 経営総合研究所によると、建設業界における AI 導入には大きなコスト差が存在する。AI カメラや施工管理支援システムなど既存のサービスを利用する場合、月額 5 万～30 万円程度のコストがかかる。一方、自社専用に AI を開発して運用する場合は、500 万～数千万円程度の投資が必要となる。特に、初期投資の負担が普及の制約となっている²⁴。具体例として、スマート水道メーターの導入状況が挙げられる。このシステムは初期投資が高額であるため、導入予算を捻出できない自治体が多く、全国的な普及には至っていない²⁵。このように、AI 技術の有用性が認識されていても、コスト面の課題が導入の障壁となっているケースは少なくない。

(5) 人材育成と組織体制

DX や AI に関する知識を有する人材が不足していることが課題の 1 つである。中小企業の DX 推進に関する調査²⁶によると、従業員 20 人以下の企業は 23.5%（図 2-7）、21 人以上の企業は 41.8%が DX 人材の不足が課題であると回答している（図 2-8）。ほかにも、予算の確保、経営者の意識や理解の不足などが挙げられる。AI を含む DX 技術の導入には、技術格差の解消と専門人材の育成・確保が不可欠である。特に中小自治体や中小企業においては、人材不足が技術導入の大きな障壁となっている。

²⁴ AI 経営総合研究所：建設業の AI 導入費用を徹底比較（参照 2025.12.19）

<https://ai-keiei.shift-ai.co.jp/construction-ai-cost/>

²⁵ キヤノンマーケティングジャパングループ：お役立ち情報水道スマートメーターは普及しない？検針を効率化させるツールを紹介（参照 2025.12.19）

<https://canon.jp/biz/product/ht-mobile/valinfo-lineup/valinfo-11>

²⁶ 中小企業基盤整備機構：中小企業の DX 推進に関する調査アンケート調査報告書（参照 2022.5）

https://www.smrj.go.jp/research_case/questionnaire/fbrion0000002pjw-att/DXQuestionnaireZentai_202205_1.pdf

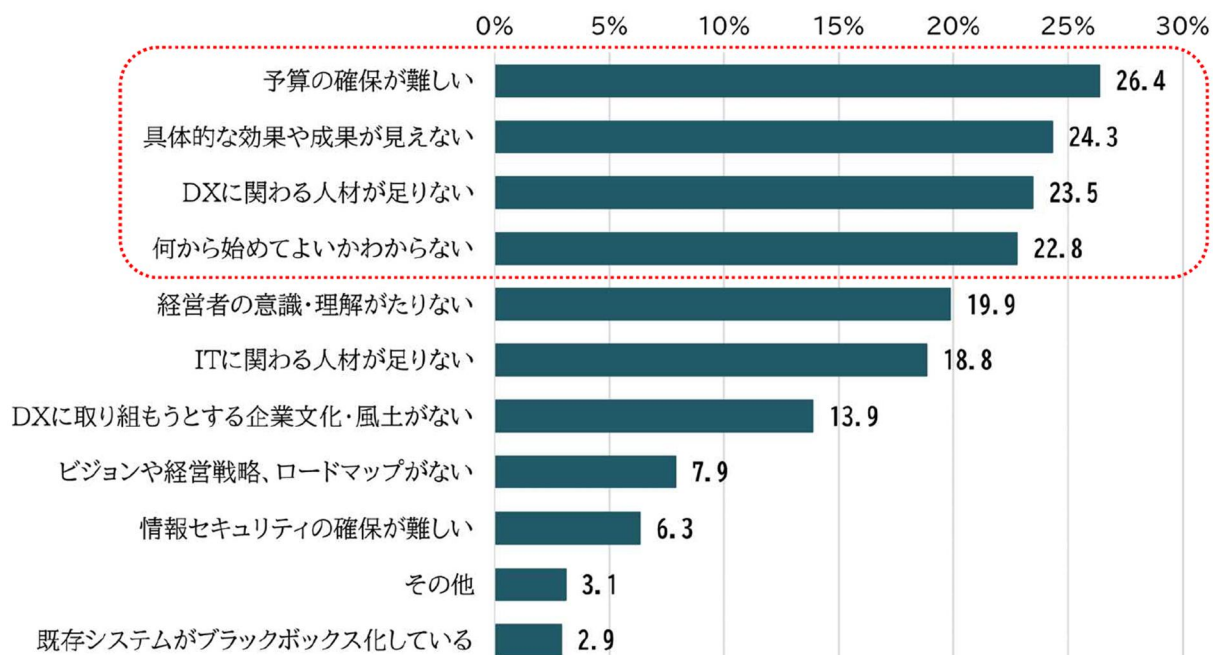


図 2-7 中小企業における DX 推進の課題（従業員 20 人以下の企業）²⁶

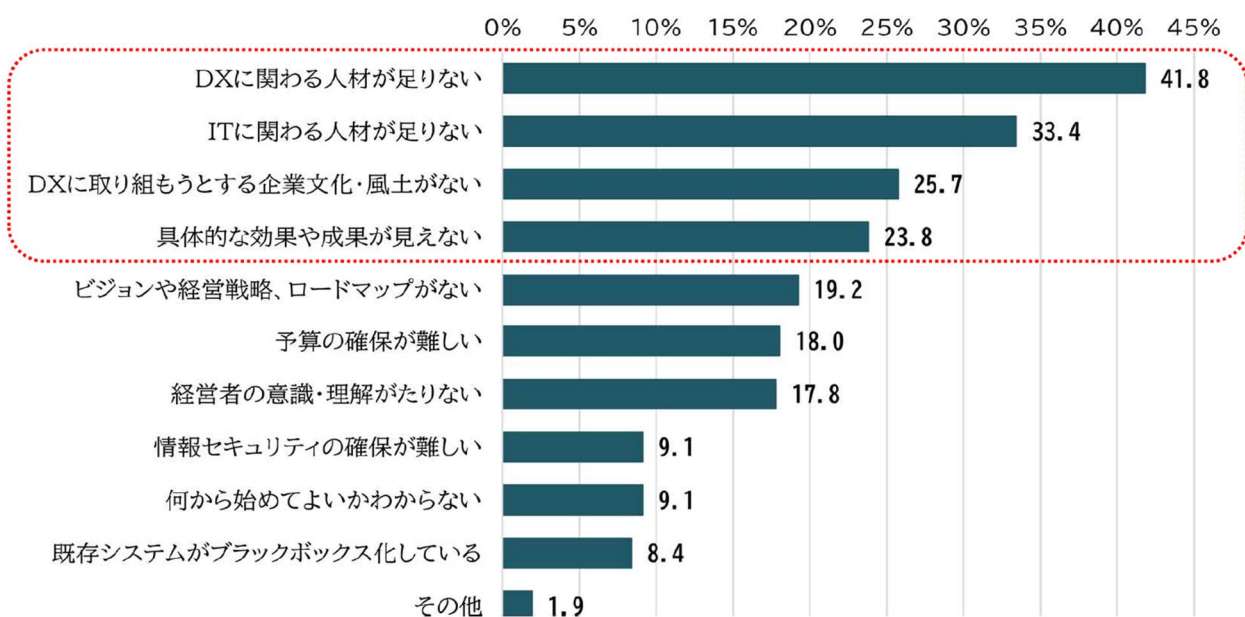


図 2-8 中小企業における DX 推進の課題（従業員 21 以上の企業）²⁶

(6) 社会実装における障壁

社会実装においては、複数の障壁が存在している。「技術格差」では、都市部と地方の間にインフラ整備に差がある。また、高齢者と若年層の間にデジタルリテラシーに格差が生じている。さらに、企業規模や個人の経済状況によって最新技術へのアクセス機会が不均等になっている。「市民理解の不足」については、AI の判断プロセスが不透明であることへの不安が存在する。個人データの収集・利用に対するプライバシー懸念、自動化による雇用喪失への恐れも大きい。さらに、専門的な技術説明が一般市民に理解されにくいことが障壁となっている。「法規制の遅れ」では、技術革新のスピードに法改正が追いついていない状況がある。AI 判断による事故や誤判断が発生した際の法的責任の所在が不明確であり、国ごとに異なる規制がグローバル展開の障壁となっている。これらの障壁は独立して存在するのではなく、相互に影響し合っている。技術格差が市民理解を妨げ、法規制の議論を遅らせる。法規制の不明確さが民間投資を躊躇させるなど、複合的に技術の普及を阻害している

こうしたことから、現状は経済的・組織的・制度的な基盤が整っていない。そのため、技術改良のみならず、経済・組織・制度の各側面を統合して取り組むべきと考える。

3. デジタル技術の概要

デジタル技術という言葉は非常に広い領域を示し、様々に定義されている。2025 年時点では企業活動における DX を推進するための重要な要素としてデジタル技術が挙げられており、(独) 情報処理推進機構の DX 白書 2023 では、「第 4 章企業競争力を高める経営資源の獲得・活用」において、一節を割き「IT システム・デジタル技術活用」についてその重要性が記載されている。(株) 野村総合研究所の用語解説では、DX を支えるデジタル技術として、人工知能 (Artificial Intelligence、以下 AI)、IoT (Internet of Things)、クラウドが挙げられている。また、株式会社 NTT データ関西では、「DX に必要不可欠な 7 つのデジタル技術」として、クラウド、AI、IoT、ビッグデータ、5G ネットワーク、デジタルツイン、ロボティック・プロセス・オートメーション (RPA) が挙げられ、それぞれについて簡便な解説が付されている。

上記資料では共通して AI を重要な技術としている。同様に、総務省の令和 6 年版情報通信白書 (2024)「第 3 章デジタルテクノロジーの変遷」は、生成 AI などの急速な発達とそれに伴うロボティクスなどの技術開発が主たる内容として記載されるなど、AI は現在のデジタル技術において最も注目される要素技術である。このような状況を背景に、本章ではデジタル技術のうち、AI 関連技術について主に記載する。3.1 節で AI の発展の歴史について概観し、3.2 節にて現在の AI 関連技術の基礎知識をまとめる。3.3 節ではその他の関連技術として、AI を含む注目されるデジタル技術について紹介する。

3.1 人工知能発展の歴史

1990 年代後半に一般へのインターネット普及が始まってから、およそ 30 年が経過した。現在では Google LLC などのビッグテックと呼ばれる大規模情報技術企業の隆盛、また 2010 年前後のスマートフォンの普及を背景として、文書、映像、動画などの膨大な情報がデジタル化され、ビッグテックが提供する記憶領域に保存されるようになった。これらの記憶領域にはインターネットを通して容易にアクセスできるようになり、そのサービスはクラウドと呼称され定着した。巨大な記憶領域に蓄積されたデータ (ビッグデータ) の解析は、マーケティングの成功など、多くのビジネス上の成果を生み出すようになっている。「大量のデータから価値ある知見を抽出する」ことの価値が広く認識されるようになり、データサイエンスが研究開発分野として大きく注目される流れが健在も継続している。

さらに、計算機の演算能力が向上したことでビッグデータ活用の相乗効果から、ディープラーニング (深層学習) などの機械学習手法が進化し、現在の人工知能技術の隆盛を生み出すに至っている。図 3-1 に人工知能技術の発達の模式図²⁷を示す。

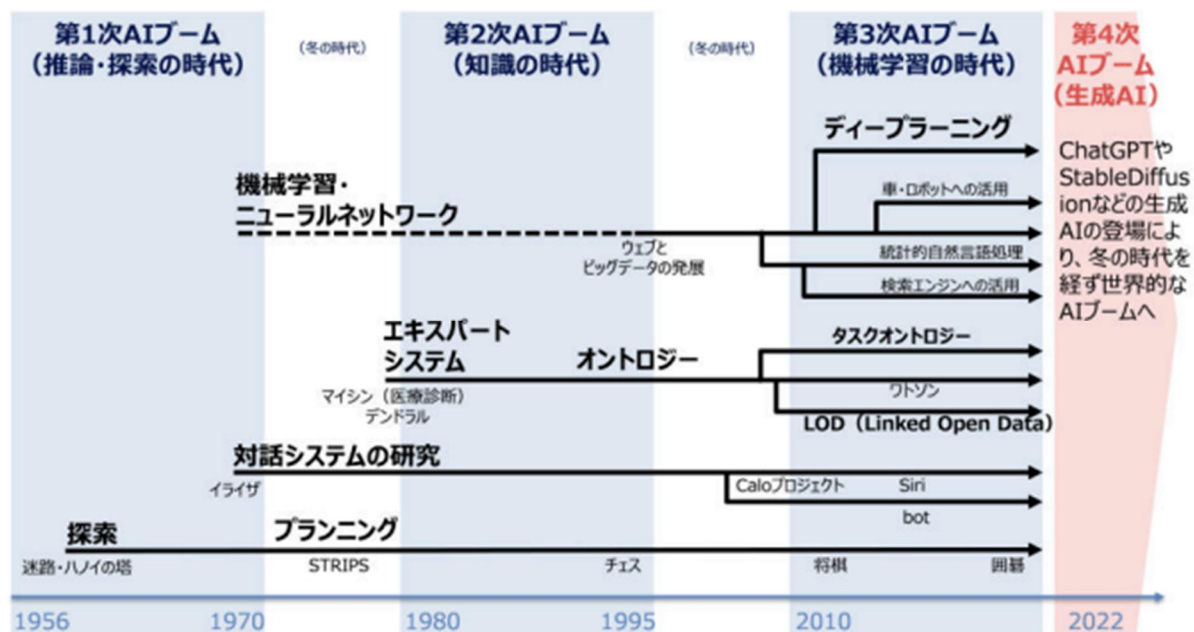


図 3-1 人工知能技術発展の模式図²⁷

図 3-1 中には、機械学習技術の進展が左から右に向かって示されており、それぞれ、第1次から第4次 AI ブームとしてまとめられている。以下にそれぞれの時期における技術やその活用について、簡便に示す。

3.1.1 第1次 AI ブーム（1950～1970 年代：推論・探索の時代）

1940 年代に汎用電子計算機が登場し、当時としては大規模な計算を高速に実施できるようになった。計算機は 1950 年代にはトランジスタ、1960 年代には IC と次々に集積化が進み、計算能力が向上していった。

計算機の誕生と同時期に、AI の概念が提唱されている。数学者のアラン・チューリングは、機械に「知能があること」に関する実験方法を提唱した。このテストは現在ではチューリングテストと呼ばれており、機械との会話において判定者が人間と見分けをつけられないことをもって、機械に知能があるとするという考え方²⁷である。図 3-2 にチューリングテストの概念図を示す。図中下部の判定者は、会話（文字情報）のみで、機械/プログラムについて判断する。

²⁷ 人工知能学会：人工知能の話題（参照 2025.10）、<https://www.ai-gakkai.or.jp/whatsai/AItopics3.html>,

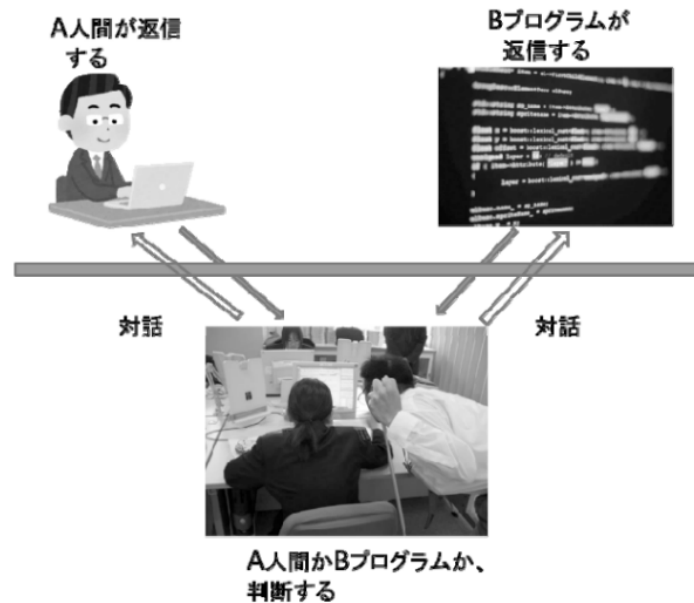


図 3-2 チューリングテスト概念図 ²⁸

1950年代から1960年代にかけてAI研究はブームになり、探索や推論を行う研究が行われた。データ構造（木構造）から特定の値を高速に探索する手法（探索木）²⁹、パズルやチェスの解法、STRIPS（プランニングシステム、初期状態・取り得る行動・達成される結果を与え行動計画を得る）などの開発が行われたが、期待される現実の複雑な問題に対する計算資源不足から、研究は下火になった。

3.1.2 第2次AIブーム（1980～1990年代：知識の時代）

1980年代には、更に計算機の演算能力が向上したことを背景に、AIの研究が再び、活発化した。第2次ブームでは、知識表現をどのようにAIに組み込むかが研究された。特定の分野における専門家の知識「知識ベース」や判断基準「推論エンジン」で構成されるエキスパートシステムが開発されるようになり、医療における画像診断の支援などに使用された。また指紋・文字認識やルールベース自然言語処理（カナ漢字変換など）として実用化されている。しかし実用に足る精度を得るためには、個別の知識ベース構築に膨大な手間（コスト）が必要となること、また目的を絞ることと拡張性とのトレードオフが問題視されるようになり、再び研究は下火となった。

近年では、機械学習技術の洗練、ビッグデータの活用によって、特定分野に特化したエキスパートシステムが再評価されている。

²⁸ 赤堀 侃司：2019, チューリングテストによるAIと人の特徴分析の予備的研究, AI時代の教育論文誌, 1巻, p. 1-6

²⁹ 株式会社インセプト：IT用語辞典「探索木」（参照 2025.12）, <https://e-words.jp/w/%E6%8E%A2%E7%B4%A2%E6%9C%A8.html>

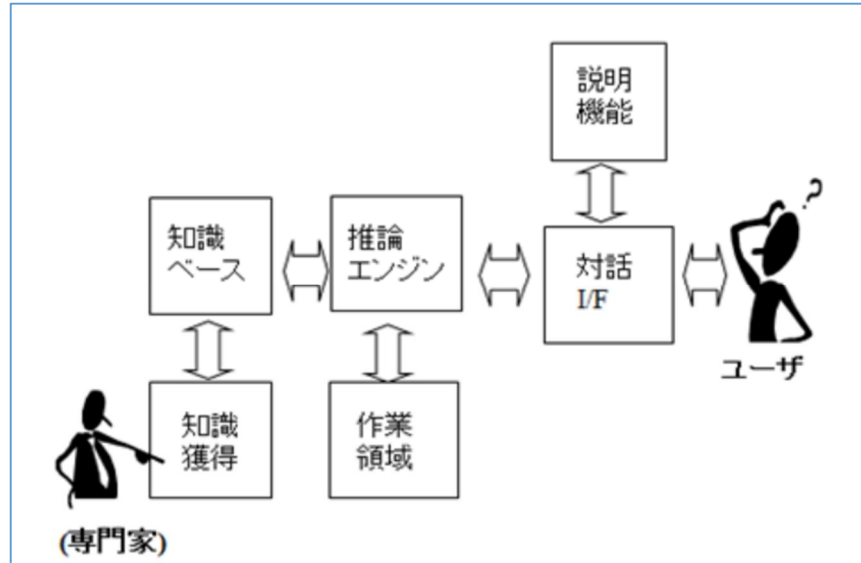


図 3-3 エキスパートシステムの構成 ³⁰

3.1.3 第3次 AI ブーム（2000 年代後半～2020 年前後：機械学習の時代）

1990 年代にインターネット上にウェブサイトが公開されるようになり、更に 2000 年代にブロードバンドが普及したことから、データ流通量が飛躍的に増加した。2010 年以降はスマートフォンが普及し、SNS（Social Networking Service）の登場によりインターネット上の画像、動画などの非テキストデータ量が爆発的に増加した。Google LLC などのビッグテック企業が、動画や音声のインターネット上の共有サービスを始め、多くの論文や公文書、個人のテキストなどもインターネット上でアクセスが可能になったことによって、データを大量（ビッグデータ）に入手して業務や研究に用いることができるようになった。

計算機の演算処理能力が向上したことやビッグデータの活用を背景として、AI 研究が大きく進展した。以下はその特徴である。

- ・ 統計的機械学習（SVM、ランダムフォレストなど）の活用。
- ・ CNN（Convolutional Neural Network）、RNN（Recurrent Neural Network）などのアルゴリズムを深層化することにより画像認識・音声認識が飛躍的に向上した。従前のアルゴリズムの深層化として実装されたことから Deep-learning と呼ばれる。

自然言語処理でも LSTM:（Long Short Term Memory）や Seq2Seq などのアルゴリズムが登場し、性能が飛躍的に向上した。

CNN は畳み込み積分（convolution）を用いる NN（neural network）を指しており、画像分析などに適した手法である。NN は脳の神経細胞（ニューロン）の仕組みを模倣した計算モデルであり、多段の情報を結合させて計算し予測や分類を行う手法として、古くから AI に用いられている。CNN は画像認識だけでなくテキストや音声、感情分析など幅広い領域

³⁰ 電子情報通信学会：知識ベース S3 群－3 編－8 章〈ver.1/2019/3/30〉

（参照 2025.10），<https://www.ieice-hbkb.org/portal/>

に適用されるようになっており、各種モデルのベースとされている。第 3 次 AI ブームにて大きく進展したディープラーニングの基礎的な手法となっている CNN について、図 3-4 に概念図³¹を示し、簡易な説明を記載する。

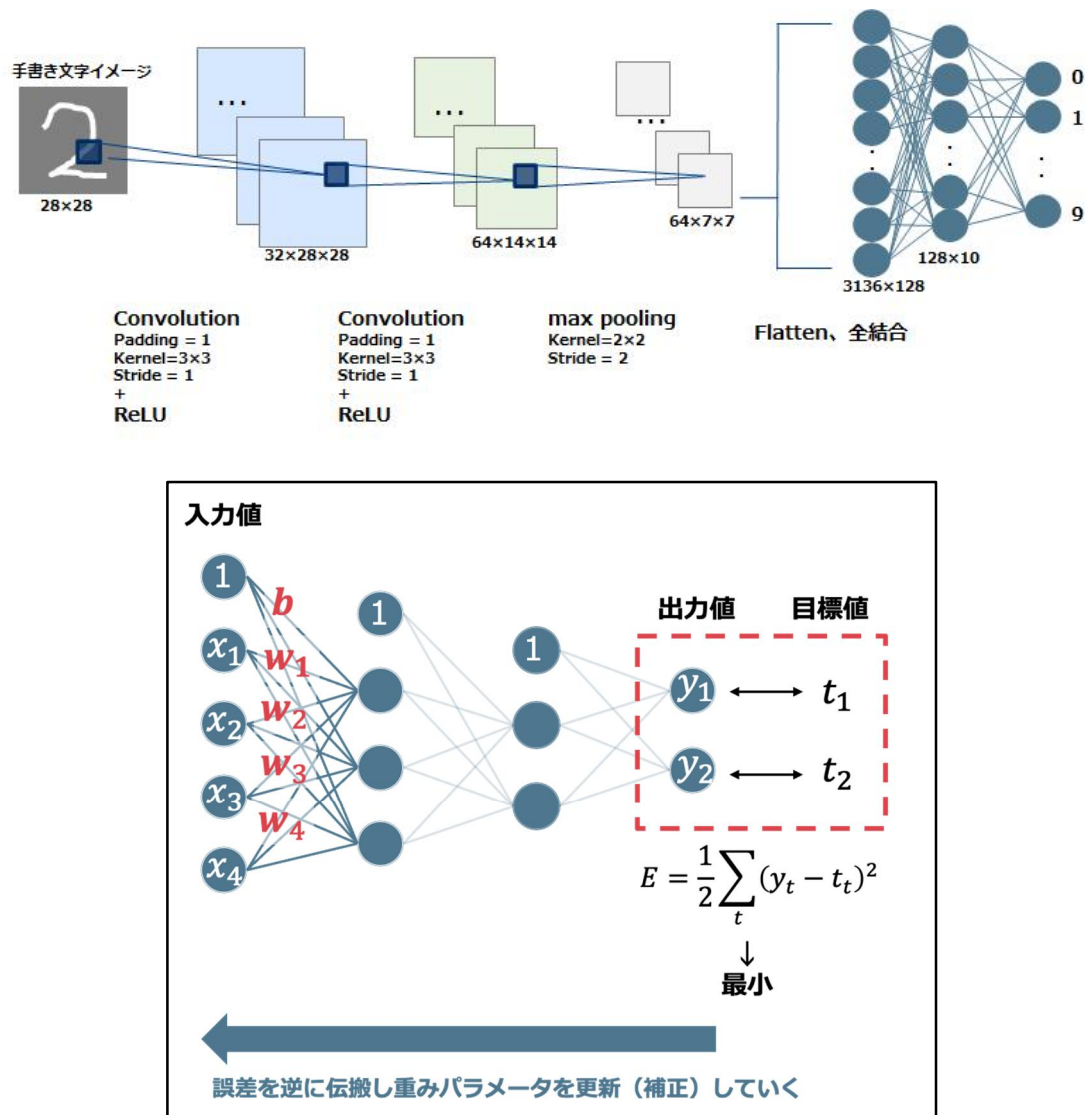


図 3-4 CNN の概念図 ³¹

図 3-4 は数字を認識する CNN を例示したものである。CNN は主に対象の特徴を抽出する「Convolution レイヤ（畳み込み層）」と畳み込んだデータ（特徴マップ）の解像度を下げる「Pooling レイヤ（プーリング層）」を階層化した構造を有している（図 3-4 左上）。畳み込み層とプーリング層では入力の一部領域の情報を減じて、局所的に次の層へと対応付けを行う。各層はフィルターもしくはカーネルと呼ばれる検出器を複数用いて情報を抽出する。初期層ではエッジ強調など低レベルの情報を検出し、層が深くなるにしたがってより

³¹ NPO 法人 AI 開発推進協会：Qiita 投稿「畳み込みネットワーク CNN」（参照 2025.11），<https://qiita.com/DeepTama/items/379cac9a73c2aed7a082>

抽象的な特徴を検出することとなる。最終出力に近い層では、すべての情報を連結し（全結合）し分類などを行う（図 3-4 右上では、数字 0 ～ 9 の分類のスコア・確率を出力する）。

実際にモデルを教育（機械学習）するにあたっては、図 3-4 下にあるように、出力値と目標値を比較することによって誤差を評価し、その誤差を NN に逆伝播させて特徴を抽出するフィルターのパラメータを学習する過程が必要である。このモデル更新を繰り返し、かつ多くの教育データを用いることによって、推定精度を向上させたモデルを得る。

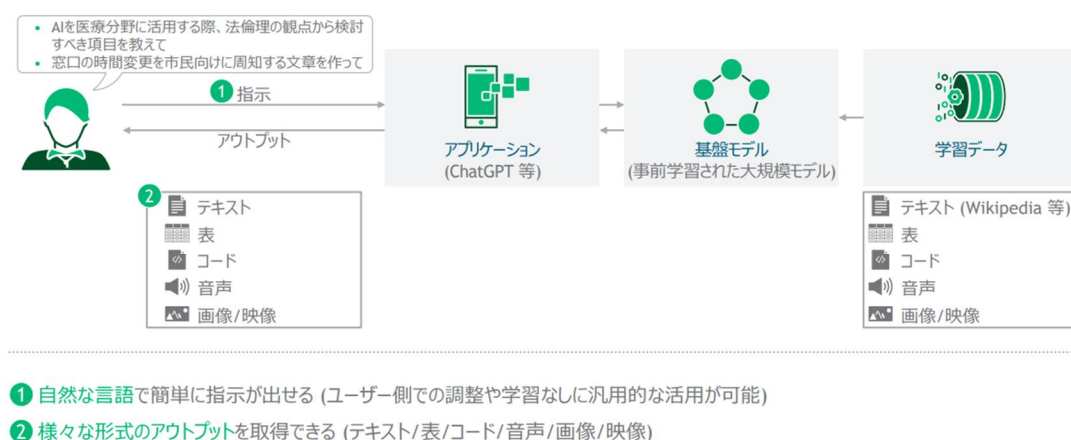
ディープラーニング技術の社会実装によって 2010 年代半ば以降、音声アシスタント（Siri、Alexa など）、医療画像診断、碁や将棋の AI 判定、株価予想など AI 応用が急拡大し商用化が進んだ。更に自動運転研究などの社会実装が期待されるようになっている。

3.1.4 展望（第 4 次 AI ブームへ）

ディープラーニング、ビッグデータの利用に象徴される第 3 次 AI ブームは、以前のブームとは異なり、下火になることなく研究と社会実装が続いている。特にビッグデータを学習することによって大規模言語モデル（LLM: Large Language Models）が作成されるようになり、曖昧な文からの意味抽出、言語生成など自然言語処理の精度が大きく向上したことは非常に大きな成果であった。

2020 年代に入って、ChatGPT や Google Gemini など生成 AI の登場により、第 4 次 AI ブーム（生成 AI 時代）が到来し、一般の消費者にも AI の利用が広がっている。例えばレポートや文章の要約、情報の検索に基づく文章作成などの言語処理に留まらず、抽象的な言語情報から画像や動画を生成するような作業も、一般のユーザーがスマートフォンのアプリケーションをインターフェースとして実施できるようになっている。

インターネット上の情報検索においても利用され、各種情報を検索し個別に閲覧するような作業を検索エンジン側の AI が実施し検索結果と合わせてサマリーを提示するようになっている。1 年に満たない短期間で、様々な新しいサービスが実装されており、AI の使用がより一般的になっていくことが予想される。



(出典) ポストン コンサルティング グループ Bommasani et al. “On the Opportunities and Risks of Foundation Models,” Center for Research on Foundation Models, 2021 を基に分析

図 3-5 生成 AI の概要

以下、今後の展望についてまとめる。

- ・ ビッグデータの活用において一般に用いられるようになった DX の理解や、新型コロナウイルス流行を契機としたリモートワークによるインターネット上のコミュニケーションの一般化によって、データの共有や活用による効率化が体感され、生成 AI を用いた効率化も受け入れられる下地ができており、更なる実装が期待されている。
- ・ これまでの人工知能に関わるアルゴリズム開発などの技術的な発展は、計算能力不足などの資源不足によって、ブームの終焉を迎えている。現在の第 4 次 AI ブームは、データとそれを処理する半導体チップの相補的な能力向上によって、急速に進展している。一方で、生成 AI が必要とするエネルギーの膨大さ、更に学習データの不足による性能の限界も話題となっており、ブレイクスルーが必要な状況も生じている。期待される技術として、量子コンピューターなどの超高性能計算機や、6G 通信などの次世代通信基盤が挙げられている。
- ・ 計算機やアルゴリズム研究などの AI の研究とそのインターネット上での進展は目覚ましいが、社会実装との乖離は小さくなく、特に物理的なアクションを伴う実装は、社会システムの受容と併せて発展途上にあると考えられる。ニーズが非常に高いと考えられる車両の自動運転なども、多くの要素技術が開発されているものの、法的整備などは未だ慎重に進められている状況である。このようなギャップには、AI 関連技術の実装による経済成長の余地があると考えられる。

3.2 AI 技術の基礎知識

3.2.1 AI の定義と分類

AI とは、人間の知的活動（認識、判断、学習、推論、予測、言語理解など）をコンピューターで模倣・実現する技術の総称である。AI はその知能の範囲に応じて大きく二つに分類される。弱い AI（Narrow AI）は画像認識や翻訳、音声対話など特定の領域・タスクに特化した AI である。一方、強い AI（General AI）は人間と同等以上の知能や自我を持つとされる理論上の概念であり、汎用的人間並みの知性を備えた AI を指す。しかし現時点（2025 年時点）では強い AI は実現されておらず、現実利用されている AI の多くは弱い AI に分類される。

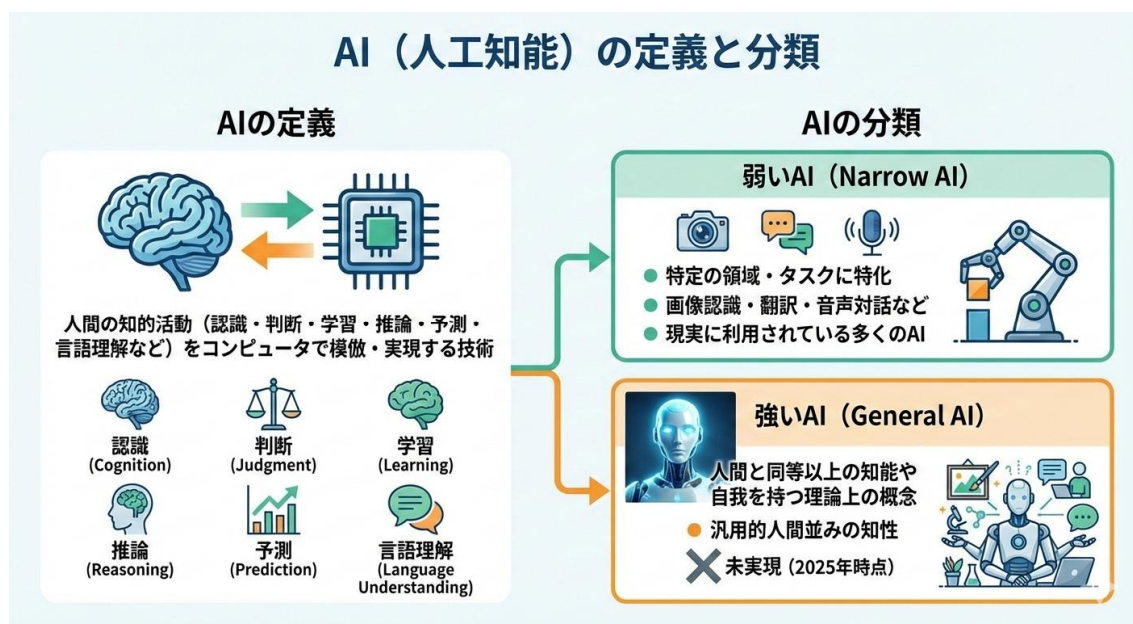


図 3-6 人工知能の定義と分類（AI にて作成）

3.2.2 機械学習の基盤

AI 技術の中核には機械学習の手法がある。機械学習は、アルゴリズムがデータから規則やパターンを自律的に学習し、新たなデータに対して予測や判断を行う技術である。機械学習の手法は取り扱うデータと課題の性質に応じて大きく三種類に分類できる。

(1) 教師あり学習

正解ラベル付きのデータから入力と出力の関係を学習する手法である。あらかじめ与えられた例題（入力とそれに対応する正解）をもとにモデルを訓練し、未知のデータに対する予測や分類を行う。代表的な用途は需要予測や画像・音声の分類タスクである。

(2) 教師なし学習

ラベル（正解）のないデータからデータ内の構造やパターンを見出す手法である。データをクラスタ（グループ）に分けたり次元圧縮によって特徴を抽出したりすることで、潜在的な構造を学習する。主な用途としてクラスタリング（グループ分け）や異常検知などが挙げられる。

(3) 強化学習

試行錯誤を通じて最適な行動戦略を学習する手法である。エージェント（学習者）が環境とインタラクションを繰り返し、報酬を最大化する行動を学ぶ。ロボットの制御や自動運転車の運行最適化など、環境からのフィードバックを伴うタスクで成果を上げている。

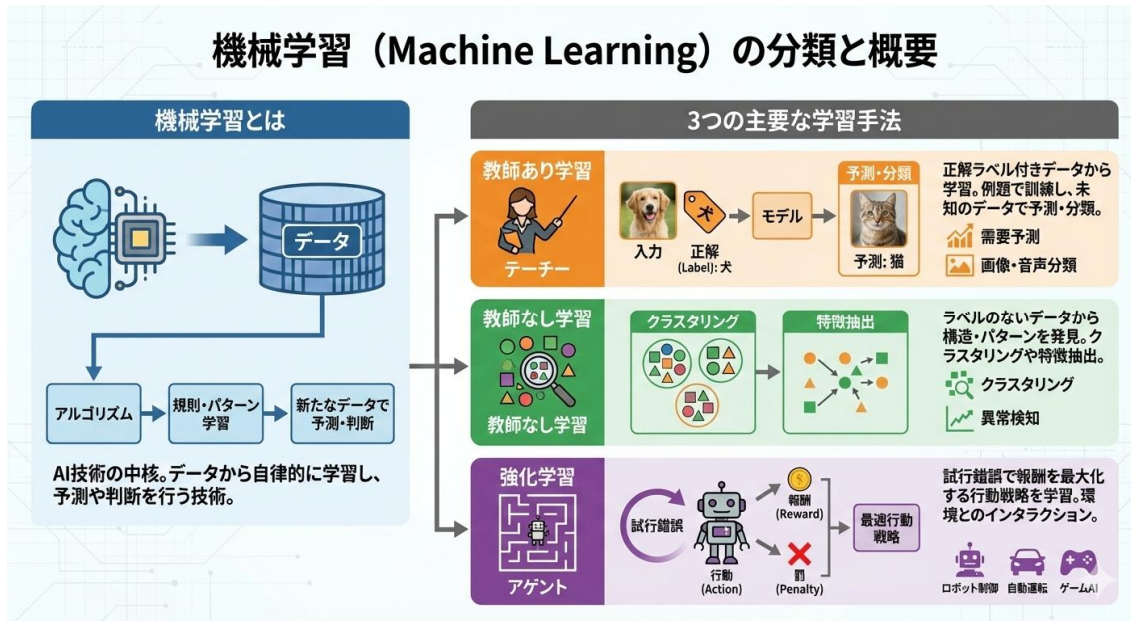


図 3-7 機械学習の分類と概要 (AI にて作成)

3.2.3 深層学習 (ディープラーニング)

深層学習 (ディープラーニング) は機械学習の一種であり、人間の脳神経回路を模した多層構造のニューラルネットワークによって大量のデータから特徴を自動抽出・学習する技術である。多層のニューラルネットワークを用いることで、人手による特徴量設計 (売り上げ予測なら「気温」や「曜日」、画像認識であれば「画素のピクセル値」などを抽出する仕組みが該当する) を介さずにデータから高次のパターンを学習できる点が特徴である。これにより画像や音声など複雑なデータに含まれる微小な特徴も捉えることが可能となり、各種の認識精度が飛躍的に向上した。深層学習には様々なモデルが存在するが、その代表例として以下が挙げられる。

(1) NN (ニューラルネットワーク)

多層パーセプトロン (全結合層からなる基本的なニューラルネットワーク) により、入力データから中間表現を段階的に抽出し最終的な予測を行う。多層構造によって特徴抽出が自動化され、人間が指定しなくともモデル自身が有用な特徴を学習する。

(2) CNN (畳み込みニューラルネットワーク)

畳み込み層とプーリング層を持つネットワークで、主に画像データの認識に用いられる。画像中の局所的な特徴 (エッジや模様など) を効率よく抽出でき、高い性能で画像分類や物体検出を実現する。現在の画像認識分野における事実上の標準手法である。

(3) RNN/LSTM

時系列データや文章データのように順序のあるデータに適した再帰型ニューラルネットワーク (RNN) およびその発展形である長短期記憶ネットワーク (LSTM) である。系

列データの過去の情報を内部状態に保持しながら処理できるため、音声認識や機械翻訳など時間的文脈を考慮するタスクで高精度な予測を可能にした。

(4) Transformer

近年登場した自己注意機構（Self-Attention）に基づくモデルであり、従来の RNN に代わって自然言語処理の主流となっている。Transformer は文章中の単語同士の関係性を効率よく捉えることができ、大規模言語モデルをはじめとする高度な生成 AI の「基盤」となっている。実際、ChatGPT をはじめとする最新の大規模言語モデル（LLM）のほとんどが Transformer アーキテクチャを採用している。

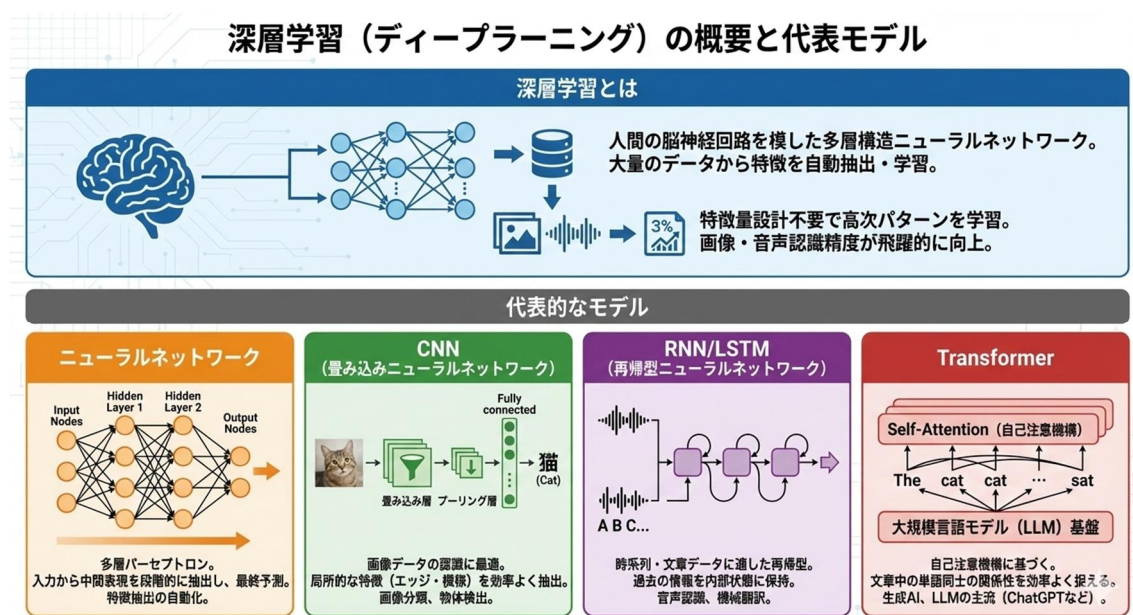


図 3-8 深層学習の概要と代表モデル（AI にて作成）

3.2.4 自然言語処理（NLP）

自然言語処理（NLP: Natural Language Processing）は、人間の言語をコンピュータで理解し生成するための技術分野である。文章や音声といった自然言語データを入力とし、その意味内容の解析や新たなテキストの生成も可能である。典型的な応用例として、機械翻訳、対話システム（チャットボット）、文章の要約生成、自動質問応答システムなどが挙げられる。NLP 分野は Transformer 系が主流の技術である。

3.2.5 応用分野

AI 技術は現在、産業から社会基盤に至る幅広い分野で応用が進んでいる。以下に主要な応用領域と具体例を示す。

(1) 医療

画像診断支援: X 線・MRI 解析による異常検知

創薬: 候補物質の予測・最適化による開発効率化

(2) 交通

自動運転: センサー情報に基づくリアルタイムな走行判断

交通流最適化: 信号制御やナビゲーションによる渋滞緩和

(3) 建設

施工管理: ドローン画像解析による進捗確認

インフラ点検: 橋梁や設備の劣化を自動検知

(4) 金融

与信判断: 属性や履歴データに基づく返済能力予測 (クレジットスコアリング)

不正検知: 取引パターンの異常検知による被害防止

(5) エネルギー

需給最適化: 需要予測とスマートグリッドによる電力制御

予知保全: センサーデータからの設備故障兆候の検知

(6) 製造業 (スマートファクトリー)

外観検査: 製品の傷や汚れを画像認識で自動検出し、検品を自動化

生産プロセス最適化: 製造ラインのデータを解析し、歩留まり向上や不良品発生を抑制

(7) 小売り、EC、サービス

レコメンデーション: 購買履歴から「おすすめ商品」を提案 (Netflix や Amazon など)

無人店舗: カメラと重量センサーで商品を認識し、レジ無し決済を実現

カスタマーサポート: チャットボットによる 24 時間自動応答

(8) 農業 (スマートアグリ)

収穫ロボット: 果実の色や形を認識して自動で収穫

生育管理・病害検知: 葉の状態や気象データから最適な水やり・肥料のタイミングを判断

(9) セキュリティ

サイバーセキュリティ: 未知のウイルスや攻撃パターンを検知・遮断

監視システム: 不審者の行動パターンや顔認証による入退室管理

(10) クリエイティブ (生成 AI)

コンテンツ制作: 文章、画像、動画、プログラムコードの自動生成による業務効率化



図 3-9 AI 技術の主な応用分野（AI にて作成）

3.3 その他の関連技術

本報告書の 2 章、4 章、5 章について、頻出するデジタル技術関連のキーワードを AI によって抽出し、階層的に表 3-1 に整理した。頻出キーワード（表中、赤文字表示）、また今後重要になると考えられる技術について簡単に解説する。

表 3-1 デジタル技術関連キーワード 階層図

分類	キーワード	サブ・キーワード
基盤技術	AI（人工知能）	AIモデル・AIカメラ・AIチャットボット
	IoT	IoTセンサー・スマートメーター
	クラウド	
	ビッグデータ	
応用技術	BIM/CIM	3次元モデル、Text to BIM
	デジタルツイン	
	ロボット、自動化	四足歩行ロボット、UGV
	ドローン	自律飛行、点検・監視
	遠隔化	遠隔操作・監視
運用・管理	モニタリング	設備点検、地盤監視
	品質・安全管理	AI安全管理、品質評価アプリ
	工程管理	AI工程最適化
	状態基準保全	CBM、予兆検知
	データ連携・統合	
リスク・社会実装	サイバーセキュリティ	
	予兆検知	災害・事故予測
	社会実装・人材育成	DX人材、技術格差

3.3.1 基盤技術

(1) IoT (Internet of Things)

1) 概要

IoT は、身の回りのあらゆるモノがインターネットにつながり、相互に情報をやり取りする仕組みを指す。従前はパソコンやスマートフォンが主要なインターネット接続機器であったが、現在は家電、車両や工場での工作機械、さらには橋やダムといったインフラまでがインターネットに接続されており、管理や制御、また情報の収集を担っている。IoT を支える重要な技術が GPS 等の位置センサーや温度センサーなどの「IoT センサー」であり、対象に応じて適切なセンサーが選択される。

2) 応用例

- ・スマートメーター、センサーと通信モジュールを用い、電力、ガスなどの検針作業を自動化。
- ・スマートホーム（家電制御、防犯、エネルギー管理）。
- ・インダストリー4.0（工場設備の予知保全、最適生産）。
- ・インフラ監視（橋梁、トンネル、上下水道の健全度把握）。

(2) ビッグデータ

1) 概要

ビッグデータとは、人的作業では全体を把握することが困難な巨大なデータ群である。明確な定義は存在しないが、Volume（量）、Variety（多様性）、Velocity（速度あるいは頻度）の「3つのV」を高いレベルで備えていることが特徴である³²。

- ・Volume（量）： 数PB（ペタバイト）といった規模の膨大なデータ量。
- ・Variety（多様性）： Excelに代表される整理されたデータだけでなく、SNSの書き込み、GPS位置情報、動画、音声、センサーログなど、多種多様な形式が含まれる。
- ・Velocity（速度）： 時々刻々生成され、リアルタイムで処理・分析されるスピード感。
- ・Value（価値） や Veracity（正確性） を加えて「5V」と呼ぶこともある。
- ・IoTはビッグデータの入り口になる。

2) 活用例

ビッグデータを対象にAIを用いて分析することによって、様々な情報を抽出、学習することが可能となった。表3-2に例を示す。

³² NEC ソリューションイノベータ株式会社：コラム「ビッグデータとは？基礎知識と活用事例を解説」（参照 2025.12），https://www.nec-solutioninnovators.co.jp/sp/contents/column/20220318_big-data.html

表 3-2 ビッグデータ活用例

分野	活用の実例	得られた成果
小売・流通	コンビニの購買履歴 + 天気 + 行事	天候に応じて、食料の需要予測を行い、仕入れに反映するなど、精度の高い需要予測。
交通・インフラ	タクシーの走行データ（位置・速度）	渋滞が発生しやすい場所を特定し、リアルタイムで最適なルートを提示。
マーケティング	EC サイトの閲覧履歴 + 検索ワード	顧客情報に合わせたレコメンド（お勧め）機能。
防災・都市計画	スマホの基地局データ（人口流動）	災害時に人流を把握し、効率的な避難誘導や救援に活用。
金融	クレジットカードの利用パターン	遠隔地での高額利用など、不正利用の即時検知。

(3) クラウド

1) 概要

クラウドとは、これまで自分のパソコンや会社のサーバーなど利用者が導入し管理する記憶領域に保存・インストールしていたデータやソフトウェアを、インターネットを通じて必要な時に必要な分だけ借用した記憶領域に保存し、また計算資源を利用する仕組みを指す。

2) 利点

初期投資削減、柔軟なスケーリング、BCP（事業継続計画）強化。

3) 種類

クラウドでは、サービスが担う領域に応じて IaaS（基盤）、PaaS（開発環境）、SaaS（アプリケーション）に分類される。表 3-3 に分類をまとめる。

表 3-3 クラウドサービス分類

種類（略称）	内容	具体例
SaaS （サース/サース）	アプリケーションを使う	Gmail, LINE, Zoom, Google ドライブ, Salesforce
PaaS（パース）	アプリケーションの開発環境を用いる	Google App Engine, Microsoft Azure（開発用プラットフォーム）
IaaS（アイアース）	サーバーなど基盤だけを用いる	AWS（Amazon Web Services）, Google Cloud（計算資源）

3.3.2 応用技術

(1) BIM/CIM

1) 概要

BIM (Building Information Modeling)、CIM (Construction Information Modeling) は、ともに建設プロジェクトを 3 次元モデルで管理し効率化する仕組みを指す。3D CAD との大きな違いは、素材や強度、点検履歴などの属性情報を併せて管理されることである。それぞれは対象とする分野が異なっており、前者は建造物を対象とし、建造物内部の構造や配管などの設備を対象とすることが特徴である。後者は、土木分野が対象であり、地形や地質、周辺環境などの広域情報との連動が重要とされる。

2) 利点

- ・設計、施工におけるミスの減少（干渉チェック）
- ・関係者間の合意形成の円滑化（完成形の共有）。
- ・維持管理への利用（対象物の完成後も引き続き、各箇所の属性情報を更新可能）

3) その他

建設業界の DX の主たる手法として導入が進んでいる。

- ・原則義務化：国土交通省の直轄工事では、2023 年度から BIM/CIM の活用が原則として義務付けられている³³。
- ・行政のデジタル化：2026 年からは、建築確認申請を BIM データで行う試みも段階的に開始される予定であり、手続きのスピードアップが期待されている。

(2) デジタルツイン

1) 概要

デジタルツインは現実空間の、ヒト・モノ・コトの様々なデジタルコピーをサイバー空間上に表現する先進技術である。単なる 3D モデルではなく、以下の 3 つのステップで構成される。

- ・データの収集：現地の IoT センサー、ドローン、カメラなどから、温度、揺れ、人流などのデータを取得。
- ・デジタル空間への再現：取得したデータを、クラウド上の BIM/CIM モデルに反映させる。
- ・予測とフィードバック：デジタル空間でシミュレーションを行い、その結果を現実世界の運用や改善に活かす。

2) 利点

デジタルツインを用いて、現実では困難な試行錯誤（テスト、予測、最適化）を仮想空間で繰り返し行い、その結果を現実世界へフィードバックできる。土木建

³³ 国土交通省：「直轄土木業務・工事における BIM/CIM 適用に関する実施方針」の解説（参照 2025.12）、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001590428.pdf>

築分野では、デジタルツインを活用することで、業界の課題である「安全性」「人手不足」「老朽化」について以下のような利点をもたらすと考えられる。

- ・施工の最適化：デジタルツイン上の事前シミュレーションにより、最適な工程を策定する。
- ・維持管理の高度化：デジタルツイン上で橋の歪みやひび割れの進行状況を確認でき、効率的な修繕が可能となる（適切な IoT センサー利用が必須）。
- ・エネルギー管理の効率化： 建造物内の人流に合わせて空調や照明を制御することによってエネルギー消費を最適化できる。

3) 適用例

- ・スマートシティ：都市全体の建物、道路、地下埋設物などをデジタル化し、豪雨などの事象に対して、冠水など災害のリアルタイムシミュレーションに利用する。
- ・建設現場の遠隔管理：3D モデルと現場のカメラ映像や IoT センサーなどを利用して、工事進捗の自動管理、監視を行う。
- ・大規模インフラの劣化予測：センサーから得た振動や歪みのデータをデジタルツインに反映し、劣化予測を行う。

4) その他

「BIM/CIM」との大きな違いは、IoT センサーなどで得たリアルタイムな情報を同期させることである。

3.3.3 運用・管理

(1) モニタリング

1) 概要

建築・土木分野におけるモニタリング（計測・監視）とは、構造物や地盤の状態をセンサーや最新技術を用いて継続的に観測し、その変化を数値化・可視化することを指し、以下のステップで構成される。

- ・計測： センサー（加速度、歪み、傾斜など）やカメラ、ドローンなどを用いてデータを取得する。
- ・伝送・蓄積： 取得したデータをネットワーク（クラウド）経由でサーバーなどに集約する。
- ・診断・評価： 蓄積されたデータを解析し、異常の有無を判定する。

2) 利点

- ・安全性の向上（事故の未然防止）： 目視では気づけない微細な変位や内部の歪みを検知し、崩落などの重大事故を未然に防ぐ。
- ・維持管理コストの最適化： 事後保全ではなく、予知保全によって、補修費用の大幅抑制を可能とする。
- ・点検の効率化と省人化： 高所作業や、危険箇所へのアクセス頻度を減少させ、人手不足を軽減できる。

・災害時の迅速な状況把握：地震や豪雨に際して、構造物の安全性をリアルタイムに判定することを可能とする。

3) 具体的な計測例と手法例

具体例を表 3-4 に示す。

表 3-4 具体的な計測例と手法例

対象	計測内容	主な手法・センサー
橋梁（橋）	振動、たわみ、ひび割れ	加速度センサー、歪みゲージ、光ファイバーセンサー
トンネル	内空変位（断面の歪み）、湧水	レーザースキャナー、自動追尾トータルステーション
斜面・地盤	傾斜、地下水位、伸縮	傾斜計、パイプ歪み計、衛星データ（SAR）
建設現場	作業員の安全、重機の位置	ウェアラブルセンサー、GPS（GNSS）、AI カメラ

4) その他

デジタルツインとの連携： モニタリングはデジタルツインを実現するためのデータ収集に不可欠であり、適切な手法を選択し、更新していくことが重要である。

(2) データ連携・統合

1) 概要

建築・土木分野におけるデータ連携・統合とは、調査、設計、施工、維持管理という建設プロジェクトの各フェーズで発生するバラバラなデータを、一つの共通基盤でつなぎ合わせ、プロジェクト全体で活用する仕組みを指す。データ連携の核となるのは、CDE（共通データ環境：Common Data Environment）という考え方である。

・情報の集約： BIM/CIM モデルを中心に、点検写真、IoT センサーの数値、コスト情報、工程表などを一つのプラットフォームに集約する。

・ライフサイクルでの活用： 設計、施工、維持管理への情報引き継ぎをデジタルにて行い効率化する。

2) 利点

「手戻り」と「二度手間」の解消：データ統合により、最新情報に全員がアクセスできるため、作業バージョンのミスなどによるロスを抑制できる。

・意思決定の迅速化：現場の進捗状況、資材の在庫、予算の消化率などが統合されたダッシュボードで可視化される。リアルタイムの数値に基づき、迅速かつ正確な判断を下せるようになる。

- ・高度な分析と予測：「施工記録」と「維持管理記録」を統合しビッグデータとして扱うことで、AI などによる相関分析が可能になる。

3) その他

データ連携を支える主要な技術、プラットフォームを下に示す。

- ・ PLATEAU（プラトー）： 国土交通省が進める日本全国の 3D 都市モデル整備プロジェクト。都市の 3D 形状に「用途地域」や「建物構造」などの属性データを統合しており、防災シミュレーションや人流分析に活用されている。

- ・ データ連携基盤（Autodesk Construction Cloud, Terasmart など）： クラウド上で BIM モデルや現場写真を一元管理し、発注者、設計者、施工者がリアルタイムで情報を共有するための専用ツール。

3.3.4 リスク・社会実装

(1) サイバーセキュリティ

1) 概要

コンピューター、ネットワーク、デジタル情報（データ、個人情報、システムなど）を、マルウェア感染、情報漏洩、不正アクセスなどのサイバー攻撃から守るための技術や対策の総称である。デジタル化が進む状況において、インターネットや IT 機器を安全に利用し続けるために不可欠である。システム保護だけでなく、従業員の意識向上やインシデント対応体制の構築など包括的な取り組みを指し、以下の要素を守ることを基本とする。

- ・ 機密性（Confidentiality）、情報が許可なく漏洩しないようにする。
- ・ 完全性（Integrity）： 情報が改竄されないようにする。
- ・ 可用性（Availability）： 必要なときに情報やシステムが利用できるようにする。

2) 対策

- ・ IT と OT の分離・境界防御： 事務用ネットワーク（IT）と、現場の機器制御ネットワーク（OT）を適切に分離し、ウイルスの混入を防ぐ。
- ・ サプライチェーン・リスク管理： 自社だけでなく、外注先や協力会社のセキュリティ対策状況も確認する。
- ・ 多要素認証の導入： クラウドへのログインをパスワードだけでなく、スマホ通知や生体認証などを組み合わせて強化する。
- ・ バックアップと復旧訓練： 「攻撃は防ぎきれない」という前提に立ち、万が一データが暗号化されても復旧できる体制を作る。

3) その他

- ・ 「ゼロトラスト」という考え方が主流となっている。「すべてを疑い、すべてのアクセスを検証する」という概念に基づき対策することが推奨されている。
- ・ 情報セキュリティが、デジタルデータだけでなく、紙媒体を含むすべての情報資産を保護対象とすることに対し、サイバーセキュリティは主にネットワークを介してやり取りされるデジタルデータや IT 資産を対象として特化し、より広範囲

の脅威から守ることを指す。

(2) 予兆検知

1) 概要

土木・建築分野における予兆検知とは、構造物や地盤が致命的な破壊（崩落や故障）に至る前に、センサーによる計測データや AI を用いてその「前兆」を捉え、警告を発する仕組みを指す。予兆検知はデジタルツインなどをベースとして、AI を活用することによって実現することが期待されている。

- ・平常時の学習： 正常な状態の構造物の揺れ方、温度、歪みなどのパターンを機械学習する。
- ・微細な変化の抽出： センサーから送られてくる膨大なデータの中から異常を検知・抽出する。
- ・予測とアラート： 変化の継続による基準値超えなどのリスク予測を行い、管理者へ通知する。

2) 事例

・橋梁の劣化予測と予防保全

手法： 橋に設置した加速度センサーで、車が通った際の振動を常時監視する

活用： 鉄筋の腐食や、コンクリートの微細な亀裂により、橋梁の「固有振動数」がわずかに変化することを検知し予防保全に活用する。

・斜面・山留めの崩壊予兆検知

手法： 崩壊の恐れがある斜面に傾斜計や伸縮計を設置して、状況を連続計測する。

活用： 土砂崩れ直前に、地盤に数ミリ単位で「クリープ（ゆっくりとした動き）」が生じることが予想される。クリープの速度について崩壊のリスクが判断される場合は、退避勧告を速やかに行う。

・建設機械の故障予兆

手法： シールドマシン（トンネルを掘る機械）やクレーンの油圧、振動、温度をモニタリングする。

活用： 金属の摩耗による異常振動や油温の上昇を検知し機械故障のリスクを予測し、予防保全に活用する。

3.3.5 その他

(1) 通信技術

通信技術は、デジタル技術をインフラの維持や管理に使用する上で、非常に重要な技術である。光ファイバーによる大量高速通信、また 5G と呼ばれる高速無線通信が普及しつつあり、また 6G と呼ばれる次世代技術の開発が進んでいる。

- 1) 5G：高速、大容量、低遅延。自動運転や遠隔医療を支える通信基盤として整備が進んでいる。

- 2) 6G（2030 年代想定）：100 倍の通信速度、宇宙通信の実現、AI との統合利用が見込まれる。
- 3) IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）は、NTT 株式会社が提唱する光ネットワークを用いる次世代の情報通信基盤構想であり、推進団体である IOWN Global Forum には世界中から 150 を超える企業や団体が参加している³⁴。

(2) 量子コンピューティング

従来型計算機が不得意とする組み合わせ最適化・材料探索に適用可能な次世代の計算技術として期待されている。AI 学習の高速化にも寄与すると考えられており、研究が進んでいるが、一般的に使用できる技術となるには、さらに時間を要すると考えられる。

³⁴ 日本電信電話株式会社：IOWN 構想とは（参照 2025.12）,
<https://group.ntt.jp/group/iown/>

4. 地下インフラ建設における AI の活用

建設分野では、熟練技能者の高齢化や人手不足、長時間労働の解消、さらには品質管理・安全管理の高度化といった構造的課題が顕在化している。加えて、BIM・CIM の適用やクラウド・IoT の普及により、設計から施工・維持管理までの全ライフサイクルでデータを根拠とした判断が可能となり、AI の導入は今後の技術発展を支える重要な潮流である。

本章は、地下インフラを中心とする建設現場で AI を含むデジタル技術を実装し、生産性・品質・安全性を総合的に向上させるための知見を体系化することを目的とする。具体的には、(1) 設計段階での AI 支援による高度化・効率化、(2) 工程管理におけるリアルタイム可視化と最適化、(3) 品質・安全管理での自動検査・予兆検知、(4) 維持管理での CBM（状態基準保全）・デジタルツインの高度化、について地下インフラに限定されない分野横断の事例も含めて整理する。これにより、従来の「経験と勘」に依存した意思決定を、センサー・映像・設計データ・施工データを統合したマルチモーダル AI による客観的判断へと転換するための実践的枠組みを示す。

4.1 設計段階での AI の活用

インフラ建設の設計業務における AI 技術の活用は、業務効率化や品質向上、安全性の強化など多方面で大きな成果を挙げている。従来の設計業務は技術者の経験や過去の事例に依存していたが、AI の導入によりデータ解析や自動化が進むことにより、より高度な設計が可能となってきた。ここでは具体的な事例を交えつつ、AI 技術の活用状況を整理する。

4.1.1 建築分野の活用事例

建築分野では AI 技術を活用した設計支援の取り組みが進展している。(株)竹中工務店は、構造設計業務の高度化と効率化を目的として、AI を組み込んだ構造設計支援システムを開発した(図 4-1、図 4-2)。本システムは、同社が長年運用してきた BIM 統合型構造設計システム「BRAINNEX」を基盤とし、過去約 500 件の建築事例と 30 万部材の設計データを学習した AI モデルを搭載している。導入効果として、類似事例検索時間は従来比で約 1/20、断面推定は約 1/10、部材設計の繰り返し検討時間は約 1/5 に短縮され、設計業務の生産性向上に寄与している。これにより、構造設計者はより創造的な業務に集中でき、設計品質の向上と工期短縮が期待される。

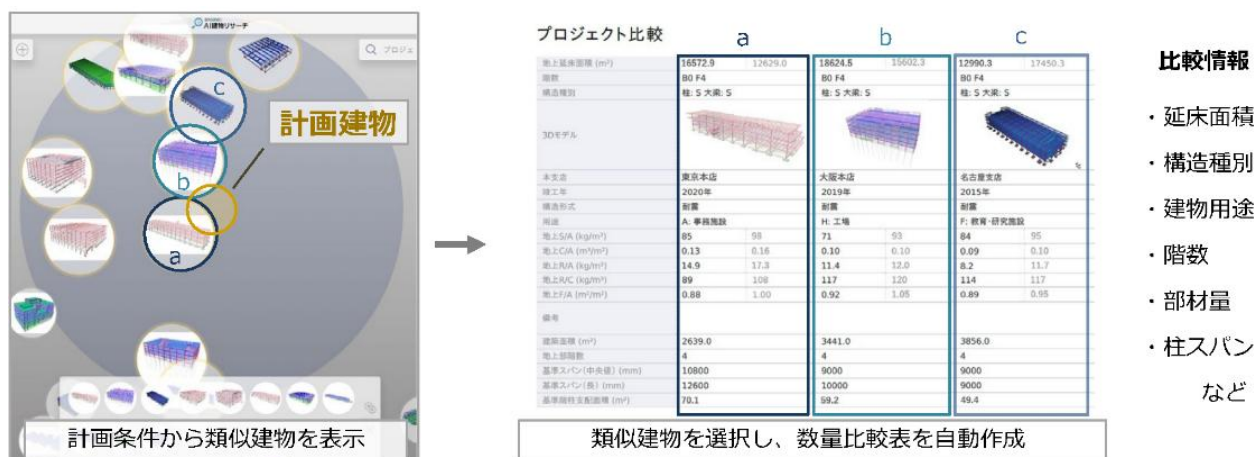


図 4-1 AI 建物設計³⁵

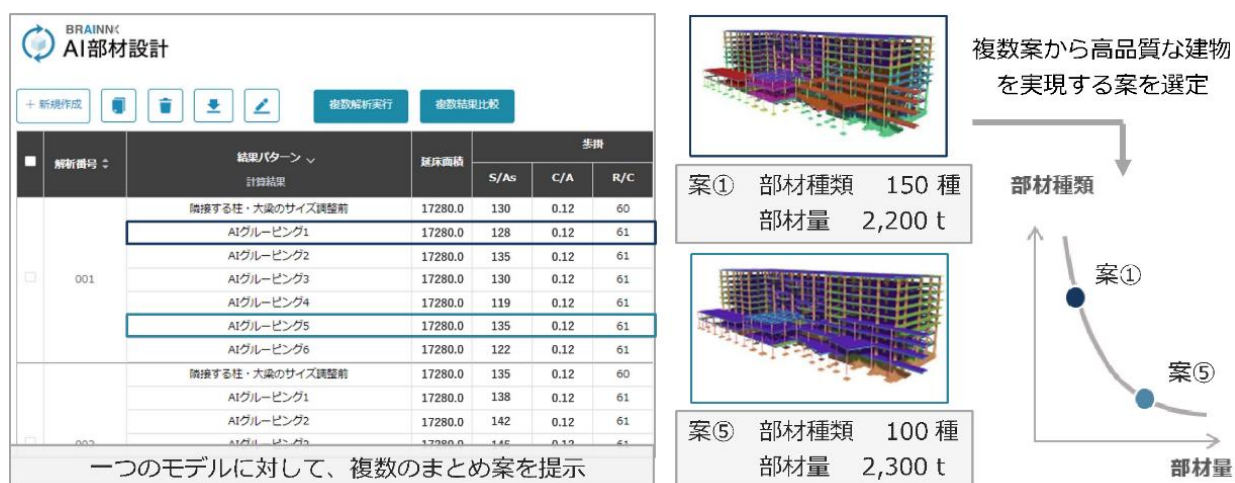


図 4-2 AI 部材設計³⁵

4.1.2 橋梁上部工への活用事例

橋梁上部工の BIM/CIM モデル自動生成は、設計段階から施工・維持管理までを貫く情報基盤として 3 次元モデルを迅速かつ一貫性をもって構築するための技術であり、近年の BIM/CIM 原則適用の潮流の中で実装が加速している。従来、主桁・横桁・床版・支承といった多数の部材を専門ソフト上で一つずつ配置し、寸法・属性を手作業で付与する工程は膨大な工数と熟練を要した。これに対して自動生成は、設計図書やパラメトリック条件、場合によっては自然言語で記述された設計意図を入力とし、部材ライブラリとルールベース・AI 推論を組み合わせることで 3 次元モデルを自動的に組み立てる。モデルは IFC などの標準フォーマットで出力され、数量・材料・施工条件などの属性も付与されるため、施工計画

³⁵ (株)竹中工務店：プレスリリース「構造設計をクリエイティブに「構造設計 AI システム」を開発」（参照 2023.9.19）

<https://www.takenaka.co.jp/news/2023/09/03/>

の立案や維持管理台帳への連携が容易になる。こうした自動化によって、モデル作成時間の短縮と設計変更への即応性向上、干渉検出や整合性確認の早期実施による品質向上が期待できる。

この分野における具体的な取り組みとして、中央コンサルタンツ（株）と（株）Malme が 2025 年 9 月に開始した「橋梁上部工 BIM/CIM モデル自動生成」の共同研究が挙げられる（

図 4-3）。両社は LLM（大規模言語モデル）を用いて自然言語から直接 3 次元モデルを生成する「Text to BIM」技術を核に、テキストベースの設計データから橋梁上部工のモデルを自動生成する概念実証（PoC）を進めている。初期フェーズでは予備設計データを対象に、設計者がチャットで設計条件や修正指示を入力すると、AI がそれを解釈し、桁断面・スパン長・床版仕様などのパラメータをモデルに反映して即時更新するワークフローを構築する。将来的には「Vision to Model」を掲げ、既存の図面資料や現地計測結果（点群・写真など）を活用したモデル生成にも拡張し、維持管理段階での 3 次元データ作成の省力化まで視野に入れている。

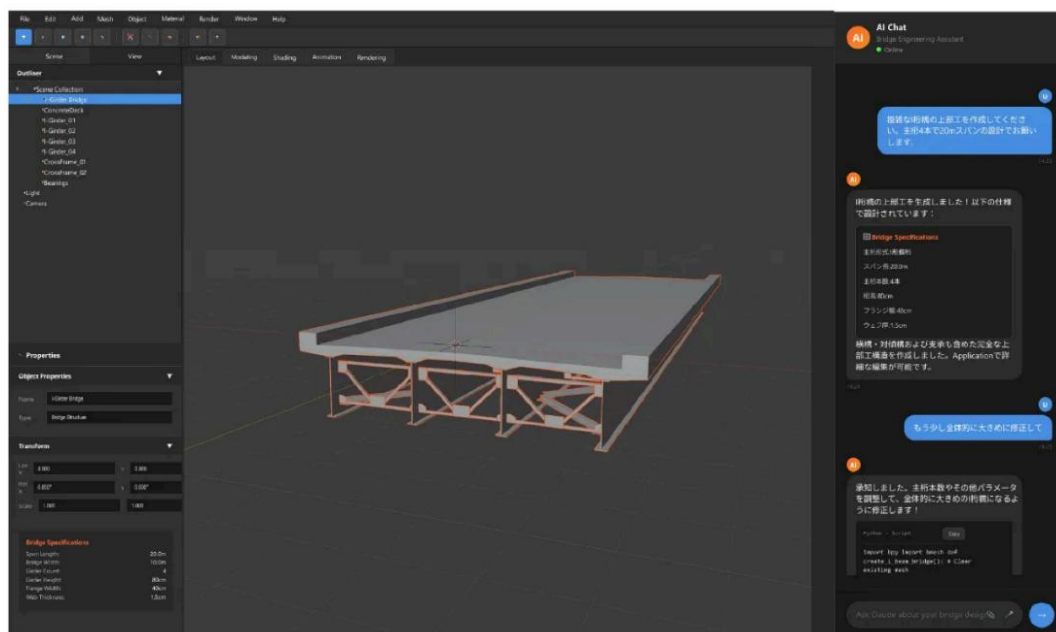


図 4-3 LLM を用いた橋梁上部工 BIM/CIM モデルの自動作成³⁶

4.1.3 地盤調査への活用事例

学校法人芝浦工業大学の地盤工学研究室（稲積真哉教授）は、AI を中核に据えた地盤強度予測システムを開発した（図 4-4、図 4-5）。人工ニューラルネットワーク（ANN）にアンサンブル学習（バギング）を組み合わせ、標準貫入試験・ミニラムサウンディング試験の結果と、緯度・経度・標高などの地理情報を機械学習で統合した。東京都世田谷区 433

³⁶ (株)Malme: News「中央コンサルタンツ(株)との共同研究開始について」(参照 2025.9.2)
<https://malme.net/news/xF5v9W2S>

地点のデータを AI に学習させることで、支持層深さの予測精度を従来比 20% 向上させ、半径 1km の支持層分布 3D マップを自動生成した。これにより、安定した建設用地の抽出、液状化リスクのピンポイント評価、都市の災害レジリエンス向上に貢献する。今後は地下水条件の追加や沿岸・非沿岸での特化モデル開発を進め、設計・施工計画やデジタルツインへの応用が期待される。

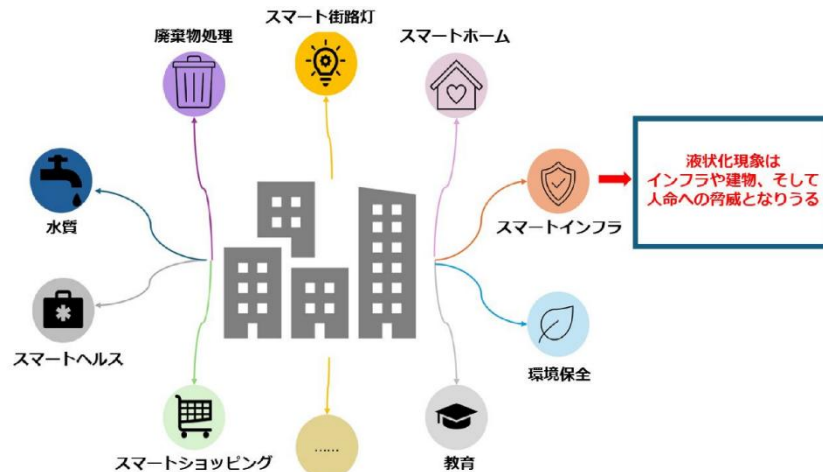


図 4-4 AI を活用した災害レジリエンスの高いスマートシティ³⁷

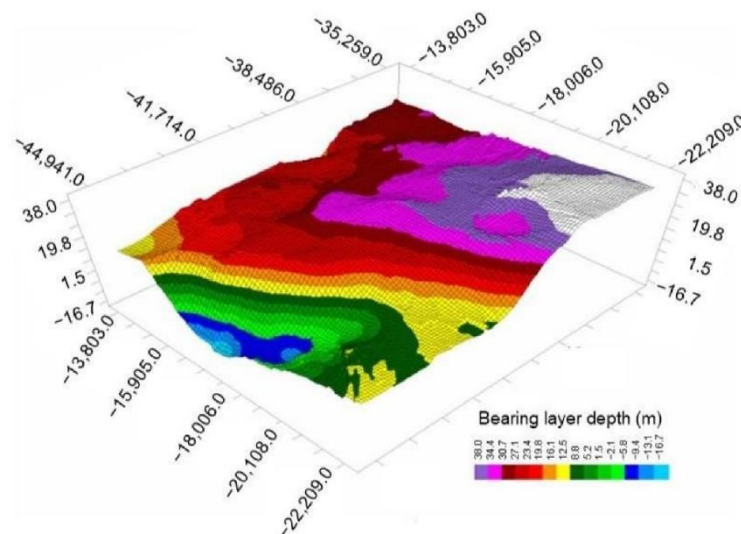


図 4-5 支持層の深度分布を示す 3 次元マップの作成例³⁷

4.1.4 図面管理・設計照査業務への活用事例

ダム・道路・橋梁などのインフラ設計では、多数の図面版の作成・修正・照査が必要であり、過去版を含めると数百～数千枚に及ぶこともある。従来、この膨大な図面の最新版管理や紙・PDF 上の修正確認は人手と目視に依存しており、修正漏れによる品質低下のリスクが指摘されている。

³⁷ 学校法人芝浦工業大学：ニュース・プレスリリース「AI 技術を活用した地盤強度予測システムの開発」（参照 2024.11.8）

https://www.shibaura-it.ac.jp/assets/20241108_shibaurapress.pdf

スクが指摘されてきた。2016 年以降、国土交通省では土木施設の詳細設計業務において、照査における受注者の「赤黄チェック」が義務化され、指摘事項・修正履歴の一覧化が一般化して作業負荷が増加する一方、長時間労働の解消と人手不足への対応が喫緊の課題となっている。

八千代エンジニアリング（株）が開発した TERNO は、土木インフラ設計における図面管理・照査業務を支援するクラウド型アプリケーションであり、Box と連携した版管理ダッシュボードと AI アシスト機能（差分抽出・図面サーチ）を中核として、設計・照査プロセスの品質向上と省力化を実現する（図 4-6）。2025 年 6 月に無料体験版の提供が開始され、設計者の実務負担軽減と DX 推進を目的に正式提供に向けた検討が進められている。

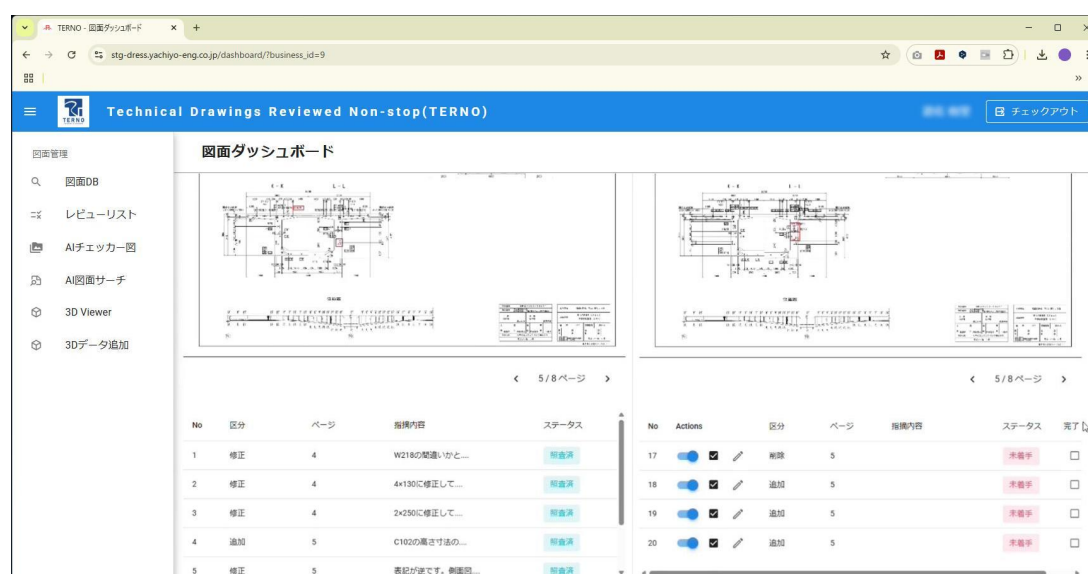


図 4-6 AI 差分抽出機能³⁸

本節で示したように、AI 技術の導入によってインフラ設計業務は大きく変革している。設計精度の向上、作業時間の短縮、人為的ミスの防止、安全性確保など多くのメリットが生まれており、今後も AI のさらなる活用が期待される。将来的には、より複雑な設計課題への対応や、設計から施工・維持管理まで一貫した AI 活用が進むことで、土木分野全体の生産性と品質の向上に寄与することが予想される。

4.2 工程管理での AI の活用

地下インフラ建設の工程管理に AI を活用する事例は、近年急速に増加している。AI によって工程の最適化、品質向上、リスク低減、人的資源の効率的配置が実現され、従来の経験と勘に頼った管理から脱却しつつある。以下に、具体的事例を交えて整理する。

³⁸ 八千代エンジニアリング(株)：プレスリリース「AI を活用し設計・照査をサポートするアプリ「TERNO」を開発」（参照 2025.6.16）

https://www.yachiyo-eng.co.jp/news/2025/06/post_908.html

4.2.1 山岳トンネル工事での活用事例

山岳トンネル工事における施工サイクルの自動記録・分析を目的として（株）大林組とソウル大学が共同開発した CyclEye は、切羽近傍に設置したクラウドカメラ 1 台を主センサーとし、画像認識（物体検知・追跡・姿勢推定）と音声認識（音響シーン分類・音響イベント検出）を統合するマルチモーダル AI により、建設機械の配置・作業種別・各工程の所要時間（サイクルタイム）および作業停止時間（ダウンタイム）を 24 時間 365 日自動収集・可視化する（図 4-7、図 4-8 サイクルタイムの比較・見える化のイメージ 39）。これにより、従来人手では困難であった連続計測とデータ主導の施工マネジメントが可能となり、生産性向上や CO₂排出量推定、夜間のずり出し量推定などの派生的効果が期待される。

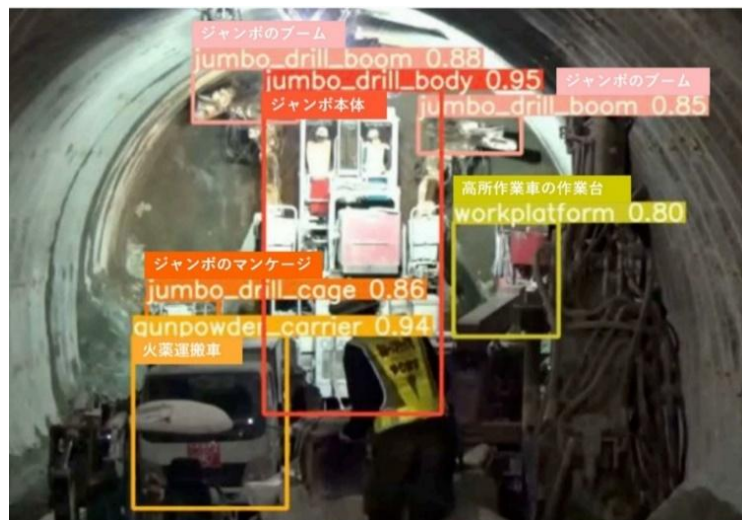


図 4-7 コンピュータビジョンの分析（物体検知状況）³⁹

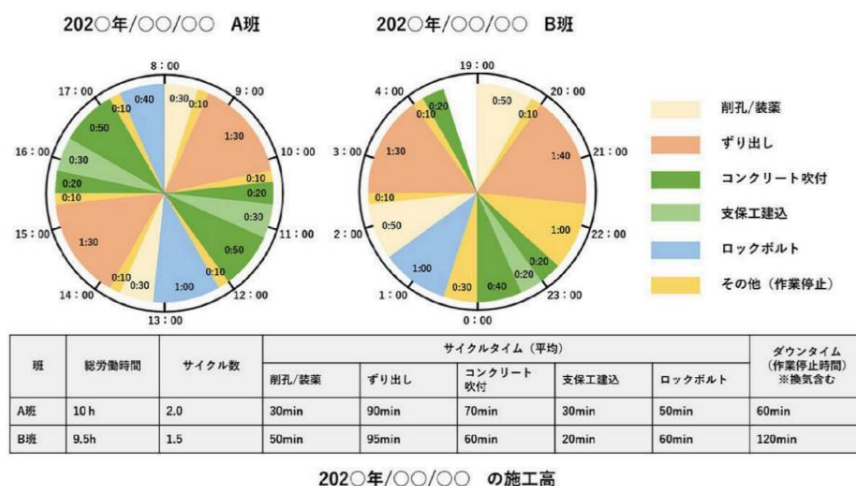


図 4-8 サイクルタイムの比較・見える化のイメージ³⁹

³⁹ (株)大林組:プレスリリース「山岳トンネル掘削の作業状況を自動的に把握する「CyclEyeTM (サイクライ)」を開発」(参照 2022.2.21)

https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20220221_1.html

4.2.2 橋梁工事での活用事例

鹿島建設（株）は、現場常設の固定カメラ映像を画像 AI と独自アルゴリズムで解析し、指定作業エリア内の技能者数と作業時間を分単位でリアルタイムに自動把握するシステムを開発した（図 4-9）。複数カメラの連携と同一人物識別により死角や二重計数を回避し、発信機不要・市販カメラで導入可能とした。解析結果は社内クラウドに自動保存され、遠隔地からの確認に対応する。橋梁建設現場で有効性を実証し、出来高データと連携して正確な歩掛の自動算出と従来の歩掛調査の無人化を達成しており、データ集約・分析による作業計画へのフィードバックと生産性向上に資する。

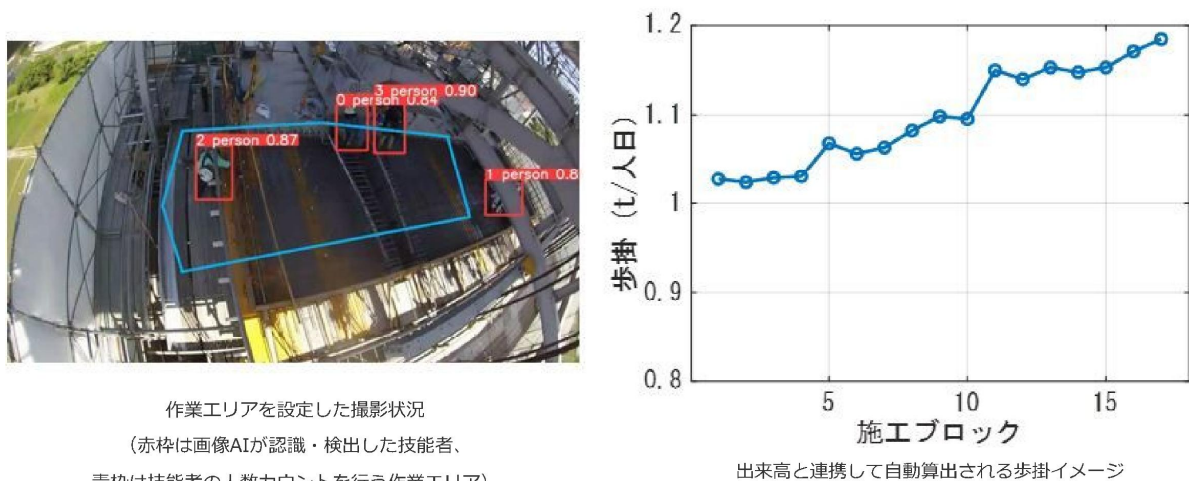


図 4-9 作業エリアを設定した撮影状況と自動算出される歩掛イメージ⁴⁰

これらの事例から分かるように、インフラ建設の工程管理における AI 活用は、リアルタイムな進捗把握、リスク予測、最適な資源配分、迅速な意思決定、品質管理の高度化など多方面で効果を発揮している。今後は、AI と BIM、IoT の連携がさらに進み、より高度で自律的な工程管理が主流となることが期待される。

4.3 品質・安全管理での AI の活用

土木工事の現場施工管理において、品質管理と安全管理は特に重要な課題である。近年、AI 技術の導入によってこれらの分野に大きな変革がもたらされている。従来は現場担当者の経験や目視確認、手作業による記録に依存していたが、AI の活用によりデータの収集・解析が自動化され、より高精度で効率的な管理が可能となっている。以下に、品質管理と安全管理に特化した AI 活用の具体的な事例を交えながら整理する。

⁴⁰ 鹿島建設(株)：プレスリリース「画像 AI を用いて技能者の人数と作業時間をリアルタイムかつ正確に、自動で把握するシステムを開発」（参照 2024.2.29）

<https://www.kajima.co.jp/news/press/202402/29c1-j.htm>

4.3.1 場所打ちコンクリート杭の支持層への到達状況確認に適用した事例

(株)大林組は、場所打ちコンクリート杭施工においてAIを活用した「PiRuler-GEO」を開発した。掘削機のデータと設計情報をもとに、土質や地盤の硬さをリアルタイムで推定し、従来の目視確認と併用することで支持層到達の精度を向上させた（

図 4-10、図 4-11）。AI は、公共工事の膨大な杭データを活用し、現場ではタブレットで情報共有も可能である。特に支持層が傾斜する場合に効果を発揮し、手戻り工事やコスト増加・工期遅延を防止できる。今後は現場導入や外部レンタルも予定している。

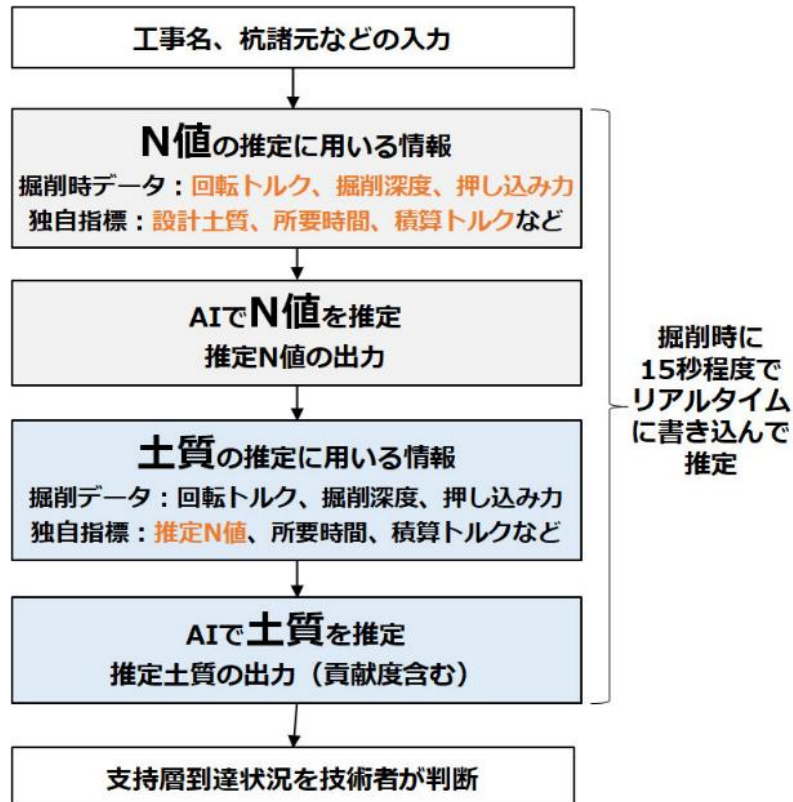


図 4-10 地盤の硬さ（N 値）・土質の推定フロー⁴¹

⁴¹ (株)大林組：プレスリリース「場所打ちコンクリート杭の杭支持層到達確認システム「PiRuler-GEO（パイルーラー ジオ）」を開発」（参照 2023.8.10）
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20230612_1.html

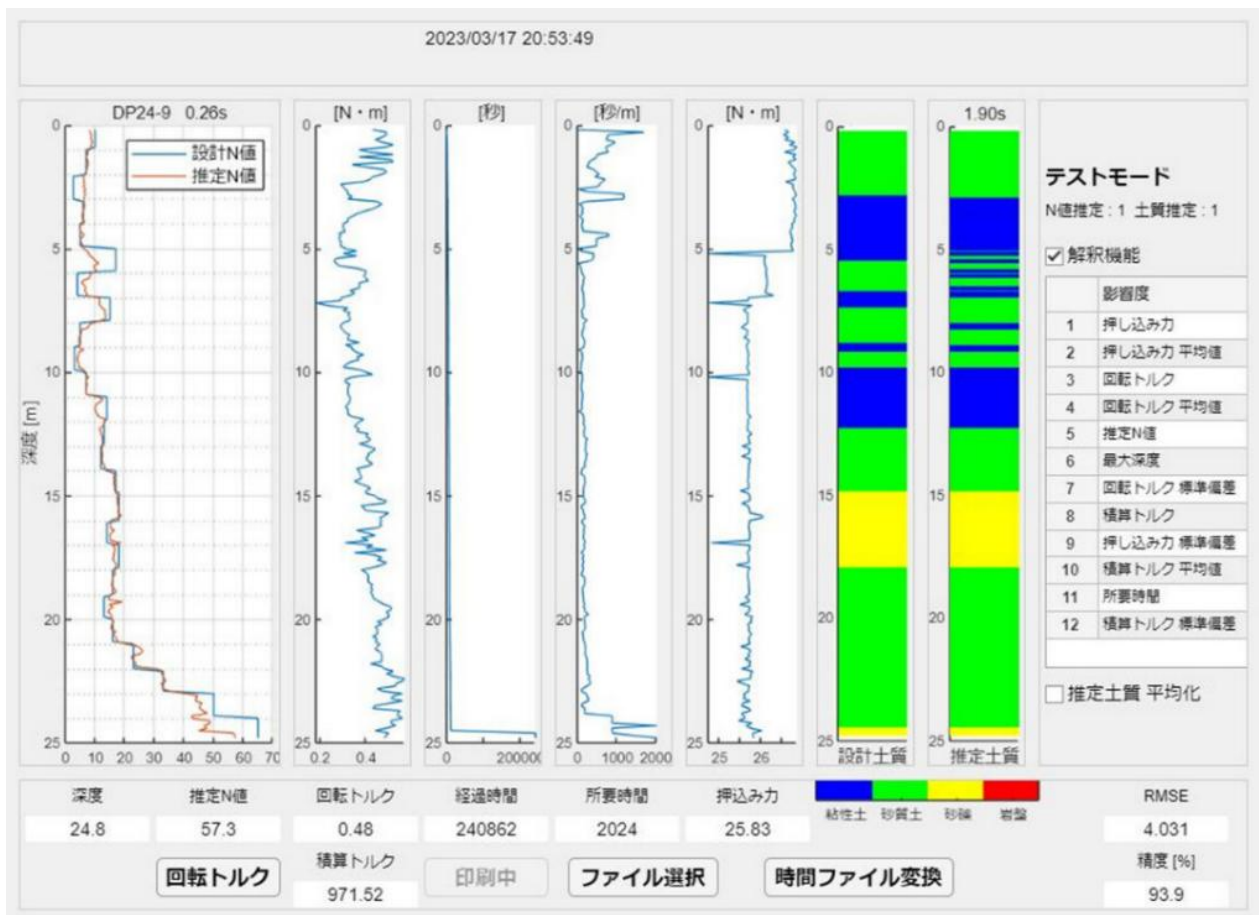


図 4-11 杭支持層到達確認システムの画面例 ⁴¹

4.3.2 コンクリート構造物の品質確保に適用した事例

構造物工事では、AIが表面状況を解析し、品質の適正をリアルタイムで判断する事例がある。AIが膨大なデータを学習することで、施工中の異常や品質不良の兆候を即座に検知できるため、早期対応による品質確保を実現している。

鹿島建設（株）は、コンクリート構造物の品質を確保・向上するためのシステム「コンクリート・アイ」の構築を進めている（図 4-12、図 4-13）。生コンクリートの現場受け入れ時の性質や状態、コンクリート打継面の処理状態や打設後の表層の品質など、各段階における「コンクリートの状態」をリアルタイムで「見える化・データ化」し、それを分析することで、コンクリート品質の改善活動（PDCA サイクル）に反映するシステムである。



図 4-12 コンクリート・アイ概念図⁴²

●送信データ [ノロ漏れ]の評価指標

●AI判定結果 AIによる判定結果と比較するため、あなたの点数を入力してください。

評価者	打重ね線	色つや	表面気泡	沈みひび割れ	ノロ漏れ	砂すじ
AI	-	-	-	-	-	-
ユーザ	4.0	3.5	3.5	4.0	3.5	4.0

AI 評価値の表示

評価者	打重ね線	色つや	表面気泡	沈みひび割れ	ノロ漏れ	砂すじ
AI	3.7	3.7	3.6	4.0	3.7	3.7
ユーザ	4.0	3.5	3.5	4.0	3.5	4.0

ワンタッチで帳票出力

表層目視評価結果

検査箇所: プレス現場
出稼箇所: Aブロック
評価者氏名: []
日時・時間: 2022/9/13 10:30
測定者氏名: []

	評価値	AI判定	備考欄
①打重ね線	4.0	3.7	1点
②色つや	3.5	3.7	
③表面気泡	3.5	3.6	
④沈みひび割れ	4.0	4.0	
⑤多量砂すじ・目詰り・ノロ漏れ	3.5	3.7	
⑥砂すじ	4.0	3.7	

◆全体記事 化粧合板で打設した。0項目いずれも良好な評価結果が得られている。

◆改善策の結果 標準前回の50cm→40cmに変更することで、打重ね時間間隔を短く管理することができた。

◆次回改善策 表面気泡をより少なくするため、型枠バイブレータを適用する。

【検査依頼時期】
※調査者の目視評価と実地評価が異なるよう、手書きでコメントを記載。

図 4-13 表層品質評価アプリによる出力帳票一例⁴²

⁴² 鹿島建設(株)：プレスリリース「AIでコンクリート構造物の表面品質を評価するアプリを開発」(参照 2022.9.13)

<https://www.kajima.co.jp/news/press/202209/13c1-j.htm>

4.3.3 シールドトンネルの施工管理に適用した事例

MAIOSS-IIは、前田建設工業（株）が開発したシールドトンネル施工のデジタルトランスフォーメーション（DX）基盤であり、AI 技術の中核に据えた施工管理システムである。本システムは、従来の熟練技術者の経験に依存していた暗黙知を形式知化することを目指し、シールドトンネル工事の施工データをリアルタイムで収集・解析し、AI を用いて施工の自動化・省人化をサポートする（図 4-14）。

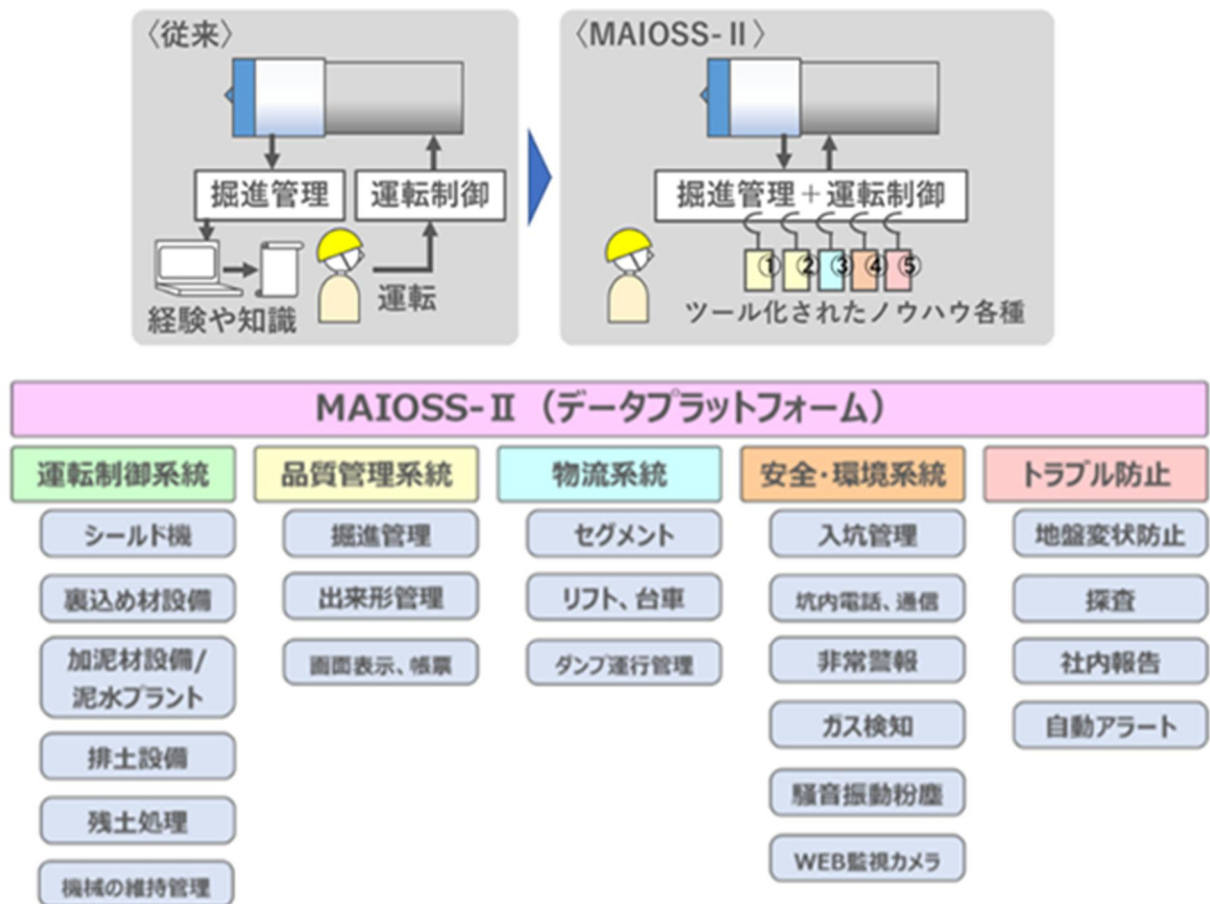


図 4-14 MAIOSS-II 概要⁴³

4.3.4 安全管理への適用事例

現場の安全確保は事故や災害の防止に直結するため、AI の導入による効果が特に大きい分野である。（株）大林組の「クアトロアイズ」は、AI と高精度カメラを組み合わせた建設現場向けの接触防止システムである（図 4-15）。重機に複数のカメラを設置し、作業員の位置や動きを AI がリアルタイムで認識し、危険な距離に近づくと重機を自動停止し、事故リスクを低減する。現場状況に応じて設定変更も可能で、安全性向上と効率的な作業運営

⁴³ 前田建設工業（株）：技術・サービス「シールド DX に向けた基盤を整備 MAIOSS-II シールド統合管理システム」

https://www.maeda.co.jp/tech_service/detail/maioss-2.html

を支援する。違反行為を即座に警告できるため、現場の安全意識向上と事故防止に貢献している。



図 4-15 上：作業員の接近を検知 下：警報エリアと停止エリアの設定イメージ⁴⁴

（株）竹中工務店では、AIを活用した顔認証や動線解析により、現場に立ち入る人員の管理や不審者の検知を強化し、現場のセキュリティ向上にも寄与している（図 4-16）。

防犯カメラの画像解析結果を分析し、犯罪理論の1つ「日常活動理論」に基づき犯罪発生を検出することで対象空間内の犯罪リスクを算出、自動監視するシステムである。対象空間内の人や資産の位置関係から対象空間内の犯罪リスクや上昇を検出し、警備員などに警告・対応して、犯罪を未然に防ぐことができる。

⁴⁴ (株)大林組：技術・ソリューション「AIを活用した安全管理 クアトロアイズ」
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d217.html

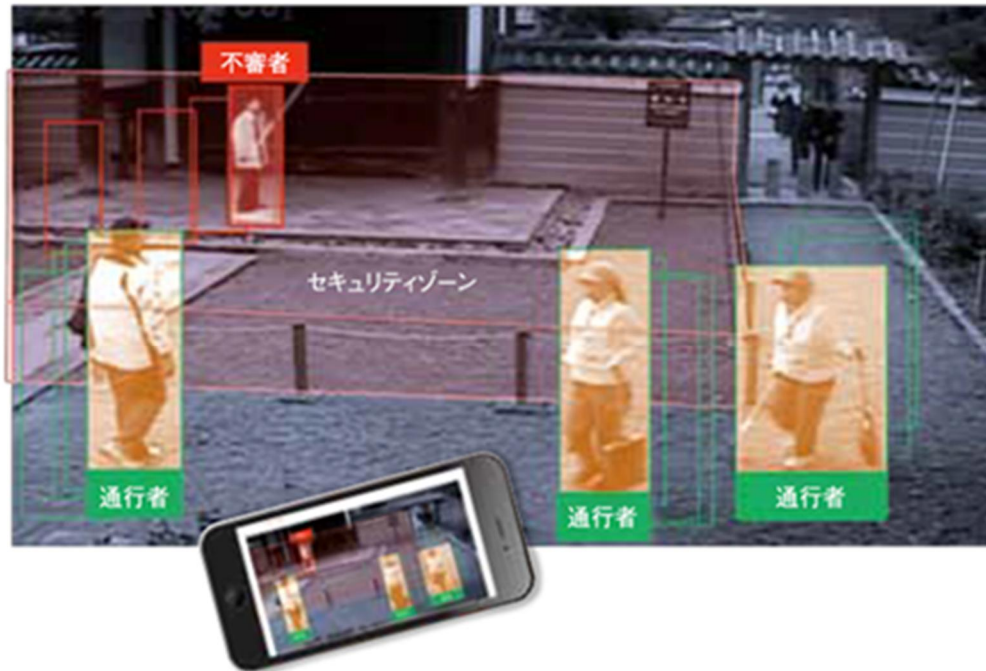


図 4-16 防犯カメラによる監視例⁴⁵

この他にも、AI チャットボットや音声認識技術を活用し、現場からの安全報告や異常発生時の記録を自動化する取り組みも進められている。担当者がスマートフォンやタブレットで音声入力するだけで、AI が日報や異常報告を自動作成し、管理者へ迅速に共有できる仕組みである。

このように、品質管理と安全管理における AI 技術の活用は、現場担当者の負担軽減と業務効率化、精度向上に大きく貢献している。今後は、AI と IoT の連携によるさらなる自動化や、データ蓄積による予防保全・リスク管理が進むことで、土木現場の品質・安全管理は一層高度化していくことが期待される。

⁴⁵ (株)竹中工務店：ソリューション「ISSOP-EYE」
<https://www.takenaka.co.jp/solution/disaster/issop/>

4.4 維持管理での AI の活用

地下インフラの維持管理における AI 活用は、水道管や下水道管以外にも幅広い分野で進んでいる。以下に具体的な事例を交えて紹介する。

4.4.1 送電線・鉄塔の設備点検への適用

三菱電機（株）は、九州電力送配電（株）と共同で送電線および鉄塔の巡視点検に着目し、ヘリコプターで撮影した画像から点検対象の設備を抽出し、劣化を自動判定するための AI 技術の実証、評価に関する取り組みを実施中である（図 4-17、図 4-18）。

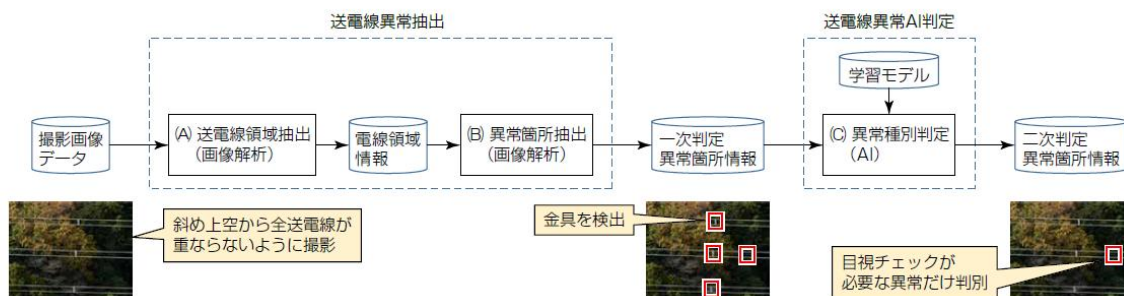


図 4-17 送電線異常抽出処理の流れ⁴⁶

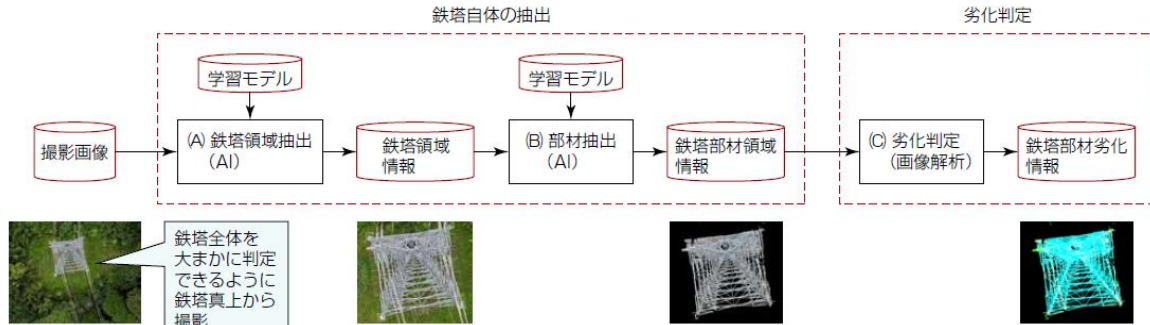


図 4-18 送電鉄塔劣化判定処理の流れ⁴⁶

⁴⁶ 三菱電機(株)：特集論文「画像解析・AI技術を活用した送電線・鉄塔の保全高度化」
<https://www.giho.mitsubishielectric.co.jp/giho/pdf/2023/2306103.pdf>

4.4.2 地盤モニタリングへの適用事例

NTT（株）と（国研）産業技術総合研究所は、既存の通信光ファイバーを活用して広範囲の地盤特性を常時モニタリングする手法を実証し（図 4-19、図 4-20）、シミュレーションにより地中空洞の形成を推定できる可能性も確認されている。従来の地中空洞化調査は専用機器による現地測定が必要で、数年に 1 回の点検周期であったが、この技術により 1 日に 1 回など高頻度かつ遠隔で、地中深さ約 3～30m の広範囲を監視できる。また、既存の通信光ファイバー網（地下管路長：約 62 万 km）を活用できるため、さまざまな場所を効率的に検査可能である。この技術は、既存インフラを活用した広域・低コスト監視を実現し、都市防災や減災、インフラ維持管理の高度化への貢献が期待される。

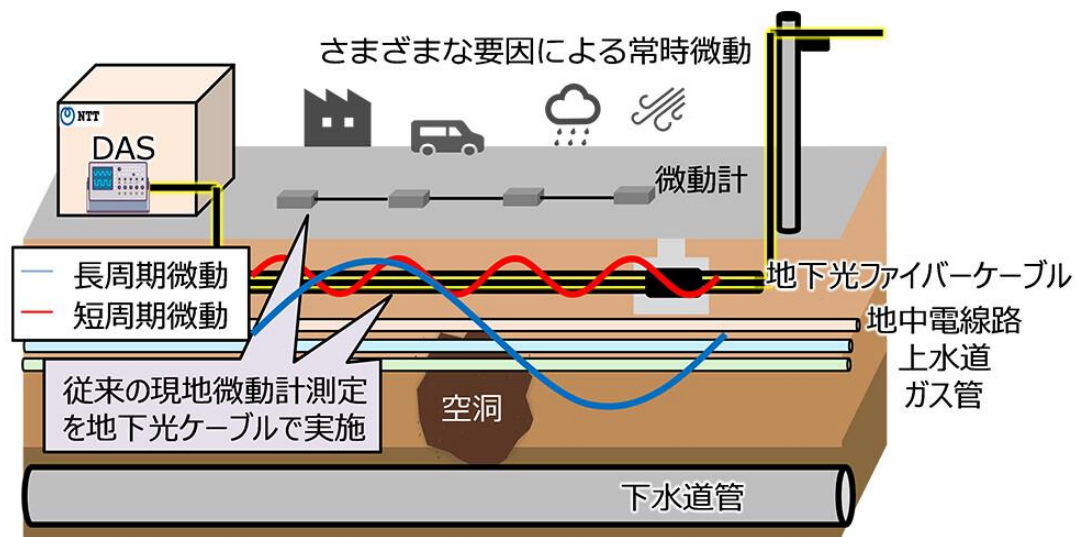


図 4-19 光ファイバーをセンサーとして活用した常時微動の測定⁴⁷

⁴⁷ NTT(株)：ニュース「道路陥没リスクの早期発見に向けた光ファイバーによる地盤モニタリング手法を実証」（参照 2025.10.21）

<https://group.ntt.jp/newsrelease/2025/10/21/251021a.html>

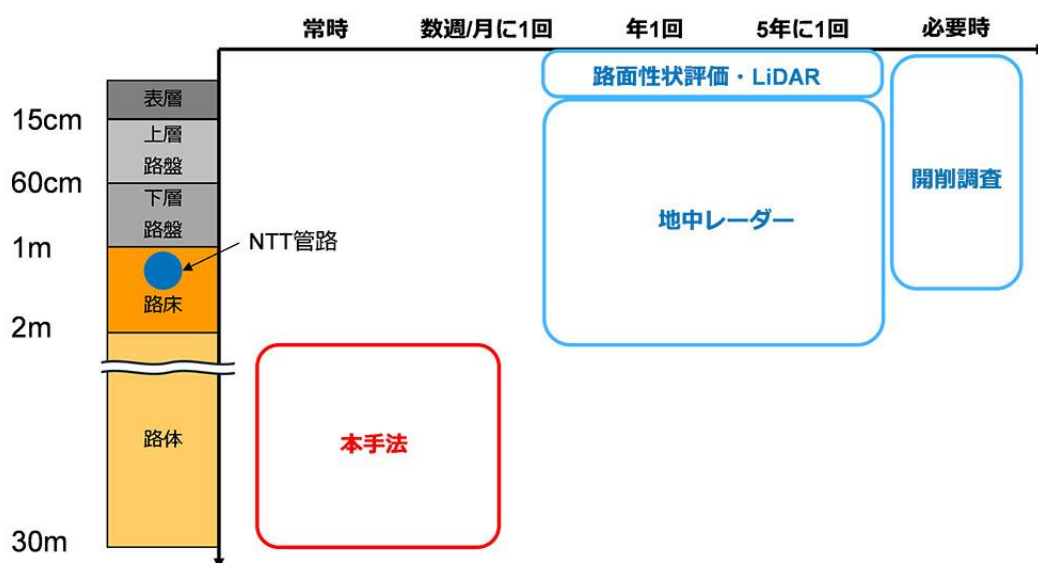


図 4-20 本手法と従来の地中空洞調査技術の比較 ⁴⁷

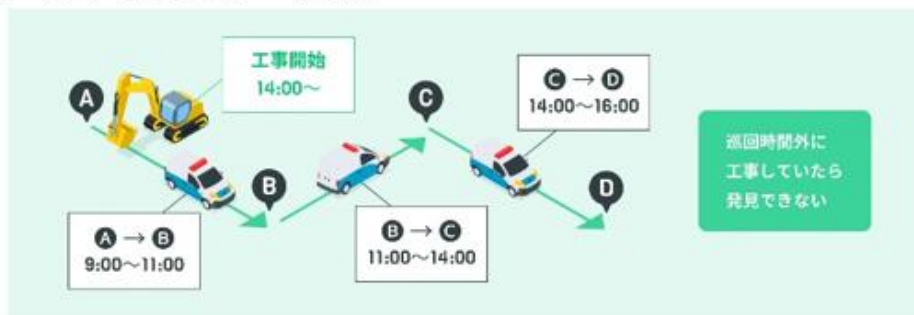
4.4.3 ガス管パトロール業務への適用事例

大阪ガス（株）は2021年6月1日より、大阪シティバスの路線バスにAIカメラを搭載し、ガス管パトロール業務の試験運用を開始した（図 4-21）。従来はパトロール車による人手での巡回を実施し、事前に届け出なく行われている工事がいないか確かめることが目的であった。ただ、巡回時間外に実施されている工事を発見できない課題があった。AIカメラを路線バスに設置することで、巡回頻度を高め、ガス管破損リスクの低減や保安品質向上を図る。また、AIカメラの映像はバスの安全運行にも活用でき、両社の連携により社会的な安全確保に貢献する。さらに、AIが過去の漏洩データや地質・交通状況を学習し、今後リスクが高まる区間やタイミングを予測することで、計画的な補修や交換作業が可能となっている。

(路線バスへの搭載イメージ)



(AI カメラ導入前のパトロール業務)



(AI カメラ導入後の運用イメージ)

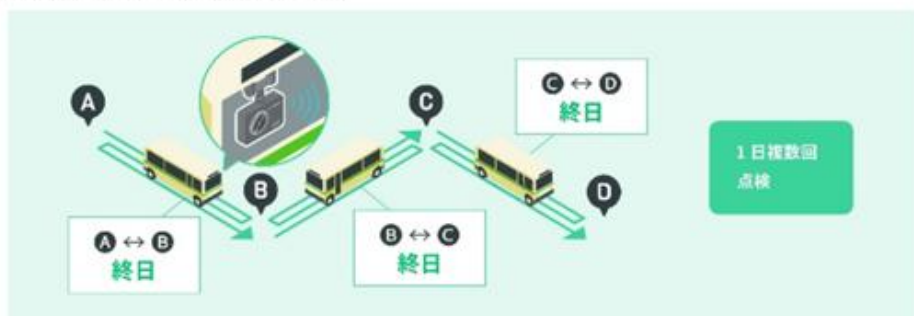


図 4-21 A Iカメラによるガス管パトロール業務⁴⁸

4.4.4 レールの腐食検知への適用事例

東京地下鉄（株）、日本電気（株）、日本電気通信システム（株）は、AIと画像解析技術を活用してレールの腐食位置やサイズを検知するシステムを共同開発し、千代田線で2025年8月から本格的に導入した（図 4-22、図 4-23）。

具体的には、ディープラーニングを搭載した機械学習ソフトウェア「NEC advanced Analytics-RAPID 機械学習」の領域抽出機能により、腐食箇所をピクセル単位で抽出する。これにより、腐食位置の特定やサイズの把握が自動化され、広範囲かつ短時間でその解析

⁴⁸ 大阪ガス(株)：プレスリリース「「工事現場をAIで自動認識する車載カメラ」によるガス管パトロール業務の試験運用開始について」（参照 2021.5.31）

https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/1295809_46443.html

これまで CBM（状態基準保全）の技術開発に取り組んできた東京地下鉄（株）は、湿潤環境で腐食が進みやすい区間における保守管理の効率化と安全性向上を目指し、2019～2021 年度に検証、2023 年度に開発、2024 年度に精度向上を実施した。今後は他路線への展開も予定している。

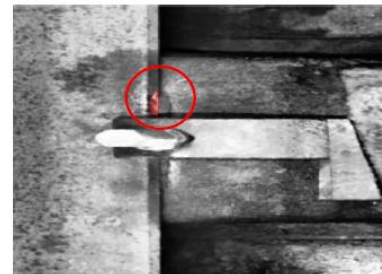
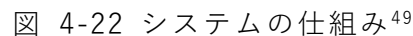


図 4-23 システム画面（イメージ）と拡大したシステム画面（イメージ）⁴⁹

https://www.tokyometro.jp/news/images_h/metroNews250926_g39.pdf

5. デジタル技術の活用事例

建設業界では、様々な工種や分野においてデジタル技術が活用されている。その中でも我々が調査対象とする地下インフラのうち山岳トンネルを主な対象としてデジタル技術の活用事例を紹介する。

5.1 国内事例

5.1.1 施工重機の遠隔化・自動化技術

(1) 概要

山岳トンネル工事では切羽直下での労働災害が問題になっており、2016年には切羽立ち入りの原則禁止、肌落ち防止対策、切羽監視責任者の選任を示す「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」が厚生労働省によって策定され、さらに2018年にはガイドライン策定時に考慮されていなかったケースにも対応できるように改正が実施された。また、熟練者不足も問題になっており、省人化や生産性向上に取り組むために、2016年には「i-Construction」、2024年には「i-Construction 2.0」が国土交通省によって策定されている。これらの安全性や生産性に関する問題の解決策のひとつとして重機の遠隔化・自動化の開発が進められてきており（表 5-1）、2025年からは「省人化施工試行工事（トンネル）」の発注も行われている。

表 5-1 山岳トンネル工事における重機の遠隔化・自動化システムの例

社名	システム名
(株)安藤・間	i-NATM
(株)大林組	OTISM
鹿島建設(株)	A ⁴ CSEL for Tunnel
清水建設(株)	シミズ・スマート・トンネル
大成建設(株)	T-iROBO
戸田建設(株)	ToP-NATM
西松建設(株)	Tunnel RemOS

(2) 重機の遠隔化技術

切羽から離れた位置に専用のスペースを設けて、コントローラを操作することで無人の重機を稼働させる、遠隔化技術の開発が各社で進められている。作業員が切羽から離れることにより、安全性の向上が見込まれる。操作側のスペースは、現場ヤード内の場合にはコンテナハウスを設置し、遠隔地の場合には専用の部屋を管制室のように整備する事例が見られる。コントローラは、卓上レバー、ゲームコントローラ、重機の運転席と同様にレバーやペダルなどが設置されているコックピットなどが用いられている。制御の手法としては、重機の運転席に専用のデバイスを設置してレバー、ペダル、ハンド

ルなどを物理的に動かす手法、運転席をフリーにして万が一の不具合時に有人操作に切り替えられるように CAN (Controller Area Network) 信号などで電氣的に動かす手法がある。また、重機に複数のネットワークカメラを設置して周囲の映像を取得する場合がほとんどであるが、各関節の角度・伸縮や油圧・電力などの施工データを併せて取得する場合もある。操作側と重機側には通信設備が備えられ、操作信号、映像、施工データなどの情報が双方向でやりとりされる。

例えば、佐藤工業（株）ではドリルジャンボの遠隔操作システムを開発している（図 5-1）⁵⁰。当技術では、180 度魚眼カメラによる 4K 映像、PTZ カメラによる詳細ズーム映像、ヘッドマウントディスプレイのカメラによるパススルー映像の 3 種類の画像を合成したものをヘッドマウントディスプレイで見ることが可能である。そのため、多数のカメラとディスプレイを使用する従来の方式では操作に熟達求められるのに対し、あたかも実際のドリルジャンボの操作室にいる感覚で遠隔操作することが可能になっている。また、開発当初は有線接続で制御していたが、最終的には帯域の広い周辺の他の Wi-Fi との干渉を抑制できる屋外長距離通信指向型アンテナを用いることでドリルジャンボと遠隔操作室の間の無線化を行っている。



図 5-1 ヘッドマウントディスプレイの表示イメージ⁵⁰

⁵⁰ 京免継彦、中田範俊、吉田直人、江田正敏：ヘッドマウントディスプレイによる重機遠隔操作システムの開発、佐藤工業技報 No.50

(3) 重機の自動化技術

前にプログラミングした内容にしたがって重機を稼働させる自動化技術の開発も各社により進められている。遠隔操作の場合には遠近感の把握の困難さや習熟度などが原因で有人操作と比較して作業効率が低下してしまう傾向があるものの、自動化技術を併せて活用して作業員の操作を軽減することで省人化や生産性向上が見込まれる。自動化技術では映像データだけでなく、LiDAR で取得した重機周囲の点群データも用いて制御する事例が多く見られる。自動化技術は“自動”と“自律”の 2 つに大別され、前者では事前に設定した閾値や手順にしたがって決まった制御を機械的に行うのに対し、後者では周囲にある他重機の稼働状況や物体との位置関係などに合わせて流動的に行う。その際に用いられる技術の一例として、点群データを用いて環境地図を作成し自己位置を推定する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) がある。

例えば、(株)安藤・間は自由断面掘削機の自動化技術を開発している(図 5-2、図 5-3)⁵¹。当技術では、重機に搭載している LiDAR および機体位置の測量結果からマッピングを行って、切削チップが配列された半球形のドラムの移動経路を専用 PC で自動生成する。それとともに、重機の電流電圧、油圧、振動、温度などの計測データからドラムの速度を自動調整している。また、遠隔操作用のシステムも併せて開発しており、実機と連動した 3D モデルによるアシストシステムを活用することで移動、掘削、集土、排土といった一連の動作を遠隔地からも制御できるようになっている。

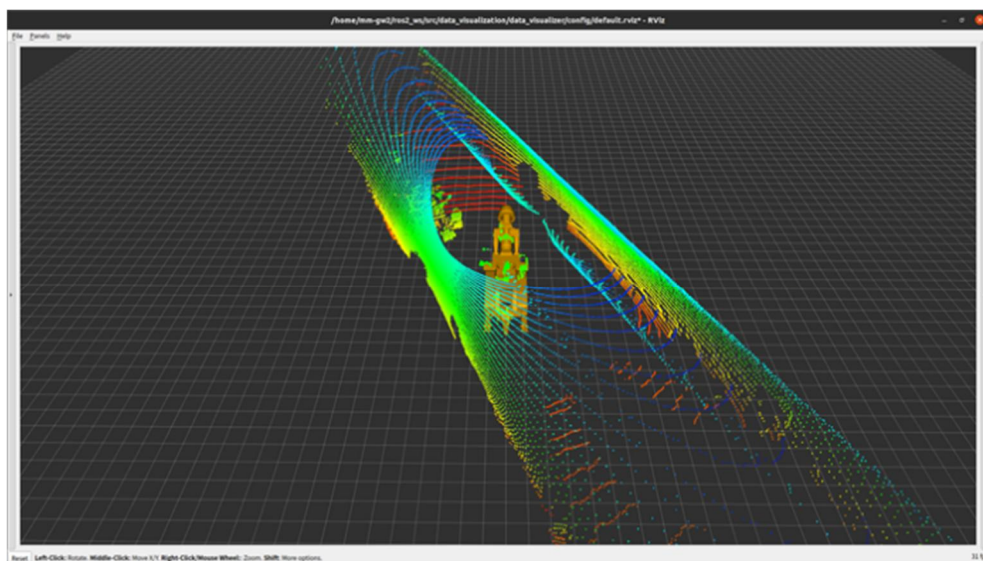


図 5-2 重機周囲のマッピング⁵¹

⁵¹ (株)安藤・間：積込み機能付き AI-ロードヘッダの開発 (参照 2025.12)

<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2025/20250228.php>

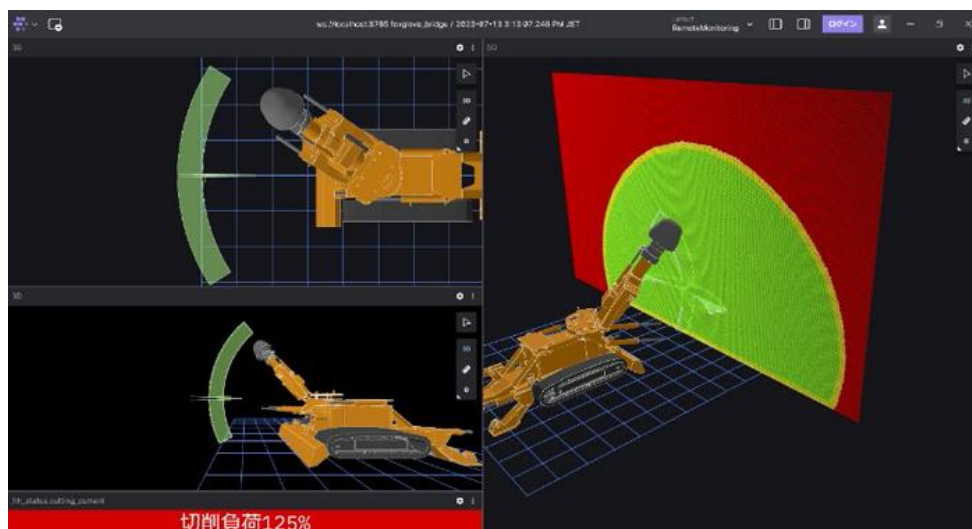


図 5-3 3D モデルによるアシストシステム ⁵¹

前田建設工業（株）は、ワンボタンで鋼製支保工の建込みが可能な「全自動鋼製支保工建込みロボット」を開発した（図 5-4）⁵²。当技術では鋼製支保工へ測量用ミラーを設置しており、それを建て込み後に小型ウィンチで自動回収する機構を有している。従来のガイダンスを使用した遠隔操作の際は作業時間が 12 分であったのに対し、当技術では 7.5 分にまで短縮されることを確認している。また、開発段階では、支保工に引いたラインをトレースして走行する小型ロボットにより測量用ミラーを回収するシステムも作成している。

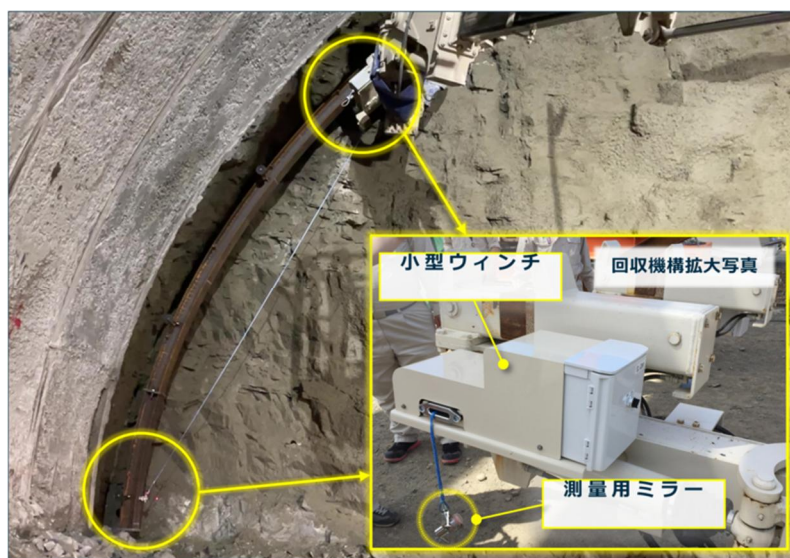


図 5-4 測量用ミラー回収用の小型ウィンチ ⁵²

⁵² 前田建設工業(株)：山岳トンネル「全自動鋼製支保工建込みロボット」を開発
(参照 2025.12)

<https://www.maeda.co.jp/news/2022/09/06/5338.html>

戸田建設（株）は、ロックボルト自動打設機「ロボルト」を施工現場へ導入している（図 5-5）⁵³。当技術は、従来は搭載されていなかったモルタル供給装置を一体化するとともに、のみ先を打設位置に誘導するためのマシンガイダンスを実装することで、ロックボルト作業の自動化を実現している。また、キャビンを後方に 10 度傾けることで、運転席内の作業員は楽な姿勢のまま天端付近を視認することが可能である。これらにより切羽直下での作業や重量物の扱いから解放され、必要人員が 1 人になるとともに作業時間が 40%程度短縮される。同社ではすべてのドリルジャンボに後付け可能なロックボルト施工装置の開発も行っている（図 5-6）⁵⁴。当技術では、1 基手前のロックボルト頭部を 3 カ所測定することにより削孔位置出しを可能にすることで、坑内測量システムとの連携を不要にしている。このようなガイダンス装置に併せてロックボルト押込み装置や定着材射出装置、直感的に操作可能なタッチパネルを実装することで、ロックボルト作業の自動化を実現している。



図 5-5 ロックボルト自動打設機の現場導入⁵³

⁵³ 戸田建設(株)：山岳トンネルのロックボルト打設自動化を実現（参照 2025.12）

<https://www.toda.co.jp/assets/pdf/20200422.pdf>

⁵⁴ 戸田建設(株)：すべてのドリルジャンボに搭載可能な後付けロックボルト施工装置を開発（参照 2025.12）

https://www.toda.co.jp/news/2025/20250819_006107.html

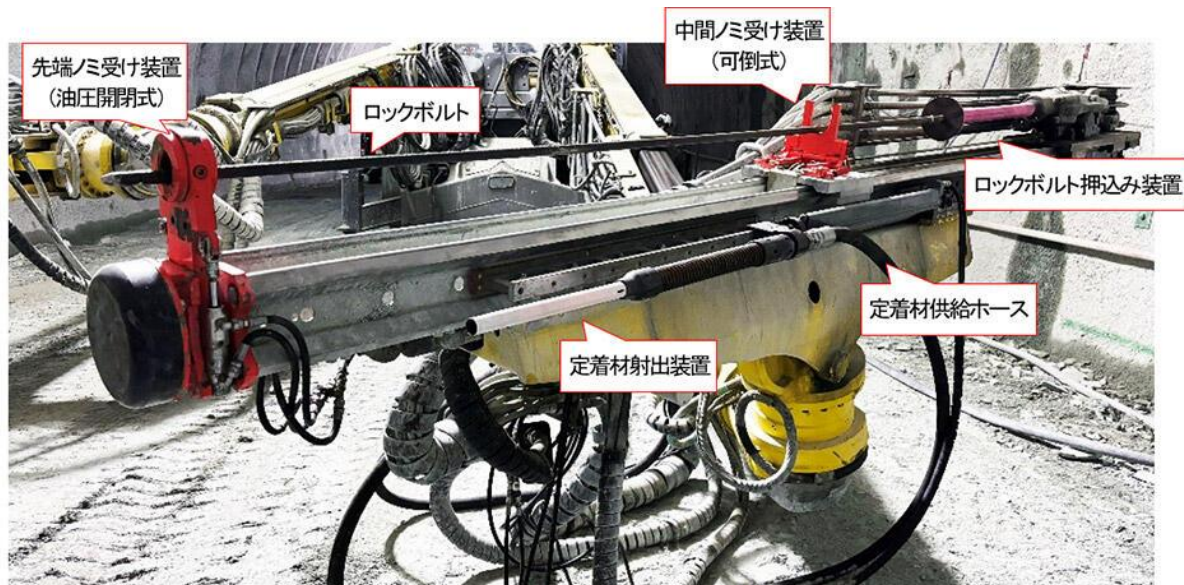


図 5-6 ロックボルト施工装置⁵⁴

(4) 関連技術

遠隔化・自動化技術を活用する際には、高精細な映像を遅延なく利用するために通信技術の選定も重要な要素となる。例えば西松建設（株）では、多数同時接続や大容量通信といった特長を持ち複数重機の遠隔同時施工への応用が期待される 28GHz 帯のローカル 5G 通信を国内で初めて山岳トンネルへ適用した⁵⁵。ホイールローダの遠隔操作を施工現場内で試行した結果、映像伝送遅延や通信上の不具合は生じず、有人運転に近い約 20km/h での走行やずりの積込み・投入時のバケット操作を実施できることを確認している。また、2 拠点間で大容量かつ低遅延の IOWN（NTT（株））の山岳トンネルへの適用も検討され始めており、現場外からの遠隔化・自動化の本格的な実装も期待される。

遠隔化・自動化に資する技術の例として、西松建設（株）ではデジタルツインプラットフォームの構築を進めている（図 5-7）⁵⁶。当技術は、現場内の重機の位置・姿勢・稼働状況、環境データ、設備稼働状況、作業員のバイタルデータなどを IoT ゲートウェイを介して専用クラウドに収集し、リアルタイムかつ俯瞰的に可視化する。これにより遠隔地からの現場全体の把握や AI を活用した監視・警報も可能になるため、現場技術者の負担軽減、省力化、効率化が見込まれる。遠隔化・自動化技術を用いて重機から離れて作業をするにあたり、このように現場状況を認識できるシステムは有用であると考えられる。また、鹿島建設（株）ではバックホウの衝突防止システムを開発した（図 5-8）

⁵⁵ 西松建設(株)：国内初 トンネル坑内においてローカル 5G を使用したホイールローダの遠隔操縦を試行（参照 2025.12）

<https://www.nishimatsu.co.jp/news/2021/5g28ghz5g.html>

⁵⁶ 西松建設(株)：山岳トンネルデジタルツインプラットフォームの構築（参照 2025.12）

https://www.nishimatsu.co.jp/news/2025/post_150.html

57。当技術では 2 台の二次元 LiDAR、3 台の傾斜センサー、モニタをバックホウに搭載しており、事前に設定した範囲内に既設構造物などが検知された際には、運転手への警報やバックホウの自動停止が行われる。元々は有人操作を想定して開発されたように見受けられるが、山岳トンネル重機の遠隔化・自動化においても当技術を活用することで狭隘な坑内での接触・衝突を軽減できることが期待される。

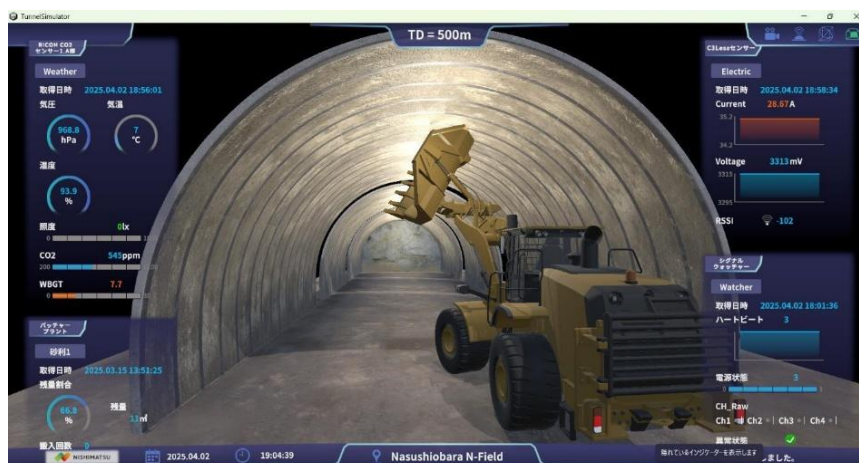


図 5-7 山岳トンネルのデジタルツイン ⁵⁶



図 5-8 バックホウの衝突防止システム ⁵⁷

⁵⁷ 鹿島建設(株)：バックホウ作業による既設構造物への接触や衝突を防止（参照 2025.12）
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202505/22c1-j.htm>

5.1.2 計測作業の遠隔化・自動化技術

(1) 概要

作業員による重機作業の遠隔化・自動化に併せて、現場職員の切羽近傍での被災リスクの低減や人の進入が困難な環境下での計測を目的として、計測作業などの遠隔化・自動化技術の開発も進められてきている。従来は現場職員が車両や手持ちで運んでいた計測機器を自走式の装置などに搭載し、無人で運搬・計測を行う事例が見られる。

(2) 四足歩行ロボット型の装置

四足歩行ロボット型の装置は、積載できる機器の重量がある程度限られるものの、段差を乗り越えての移動が可能である。米国の Boston Dynamics 社の「Spot」が広く知られている。

例えば（株）鴻池組は、切羽近傍の画像撮影を主な目的として独自に四足歩行ロボット「心／KOCaRo」を開発している（図 5-9）⁵⁸。深度カメラと画像認識技術を活用したライントレース機能により床面に敷設したカラーテープに沿った自律走行が可能であり、22km/h での走行や 45cm の段差の乗り越えが可能である。



図 5-9 四足歩行ロボット「心／KOCaRo」⁵⁸

(3) ドローン型の装置

ドローン型の装置は、搭載可能な機器が小規模なものに限られるとともに常に飛行している必要があるため連続稼働時間は短い傾向があるものの、他の重機などと干渉しないため切羽作業の最中に使用しやすいというメリットがある。

例えば戸田建設（株）は自律飛行ドローンによる切羽自動監視システムを開発してい

⁵⁸ (株)鴻池組：四足歩行ロボットでトンネル工事の安全性を革新（参照 2025.12）
<https://www.konoike.co.jp/news/2025/202507073450.html>

る（図 5-10）⁵⁹。GNSS が利用できない山岳トンネルにおいてもドローンが自律飛行できるように、坑内に設置したマーカーを利用した非 SLAM 型を採用している。機体には障害物検知センサーが搭載されており、自動で障害物を検知・回避しながら定められた飛行経路を維持できる。また、機体には 4K カメラが搭載されており、ストリーミング動画の配信や AI 切羽評価のための切羽写真の撮影が可能である。

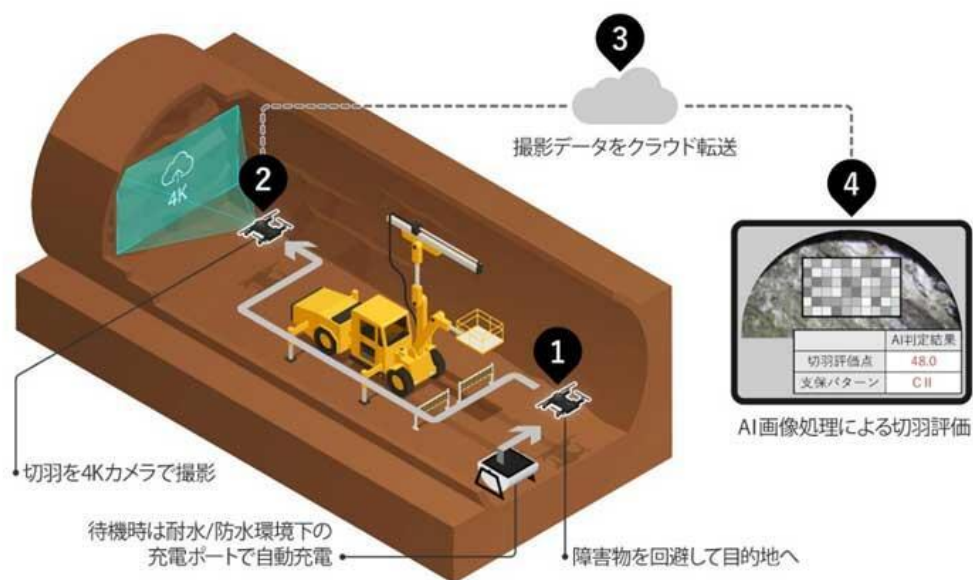


図 5-10 ドローンによる切羽自動監視システムの概要⁵⁹

(4) 台車型の装置

台車型の装置は、計測用装置としては比較的大型になるため重機との干渉の可能性や保管場所への配慮が必要になるが、その分搭載できる機器の選択肢の幅が広い。不陸でも走行できるように、クローラで走行する事例が見られる。

例えば（株）大林組は、縦 1.2m、横 1.0m、高さ 1.5m の大きさで、操作リモコンによる遠隔操作が可能な出来形・監視 UGV を開発している（図 5-11）⁶⁰。搭載したスキャナーを用いて掘削面や吹付けコンクリート面の形状を三次元点群データとして取得し設計断面と比較することで、高精度な出来形管理が可能である。また、併せて搭載しているカメラで切羽状況を監視することで安全性の向上が可能であり、今後は遠隔臨場、AI による切羽評価、崩落検知などへの活用も想定されている。

⁵⁹ 戸田建設(株)：自律飛行ドローンによる切羽自動監視システムを開発（参照 2025.12）
https://www.toda.co.jp/news/2025/20250129_003460.html

⁶⁰ (株)大林組：トンネルの出来形測定と作業監視を遠隔操作で行う「出来形・監視 UGV」を開発（参照 2025.12）
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20221017_1.html

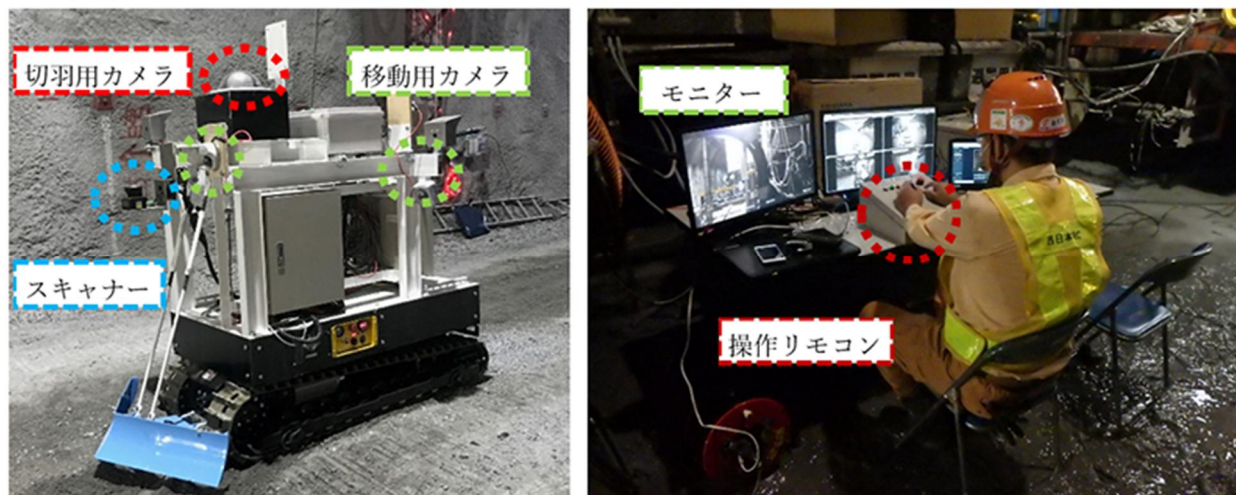


図 5-11 UGV の遠隔操作状況 ⁶⁰

5.1.3 切羽監視の遠隔化・自動化技術

(1) 概要

遠隔化・自動化技術の開発が進められているものの、標準化に至るまでには期間を要し切羽近傍への立ち入りをすぐにゼロにすることは困難であるため、切羽状況の監視技術の開発・適用は引き続き必要であると考えられる。

(2) 切羽面の状況把握技術

落盤や肌落ちなどの発生を予測するためには、切羽面の状況把握が重要である。

例えば（株）竹中土木は、切羽の肌落ちや崩落・崩壊の兆候を捉えて事前に知らせる「トンネル切羽変状可視化システム」を開発した（図 5-12）⁶¹。当技術では、側壁に設置した高精度のレーザー距離計で切羽の押し出し挙動をリアルタイムに計測する。管理レベルを超過した際にはラインレーザーによる切羽面への直接的なマーキング、AR 技術を用いたウェアラブル端末での可視化、クラウドシステムを介した発信、ヘルメットハンマーによる伝達などが行われるため、工事関係者全員が切羽の状況をリアルタイムに把握できる。

⁶¹ 建設業労働災害防止協会：トンネル切羽変状可視化システム（参照 2025.12）
https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/entry/003070.html

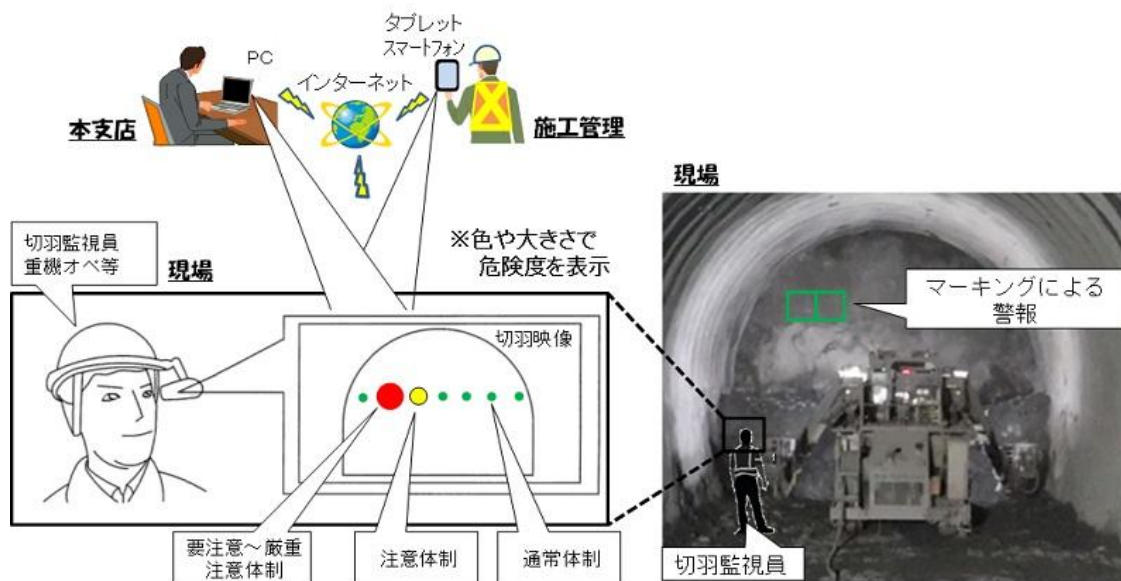


図 5-12 トンネル切羽変状可視化システム概要⁶¹

東急建設(株)は、肌落ちの検知技術を開発している(図 5-13)⁶²。従来技術では RGB 画像のみを使用するため重機などの支障物を肌落ちとして誤認識することがあったのに対し、当技術では RGB 画像と距離画像 (Depth 画像) の両方を同時取得できる RGB-D カメラを活用することで肌落ちと支障物を判別できるため、高精度に検知することが可能である。実現場で実証試験を行った結果、撮影した動画からリアルタイムに肌落ちが検知されることを確認している。



図 5-13 RGB-D 画像を用いた肌落ち検知状況 (左) と画像生成イメージ (右)⁶²

⁶² 東急建設(株)：山岳トンネル工事における肌落ちのリアルタイム検知技術を開発 (参照 2025.12)

https://www.tokyu-cnst.co.jp/topics/assets/201208_Newsletter.pdf

(株) 安藤・間は、切羽評価の主要指標を定量評価可能な「切羽地質情報取得システム」を開発している(図 5-14)⁶³。当技術は、ドリルジャンボの穿孔データ(穿孔速度、打撃圧、回転圧、フィード圧)を基に圧縮強度を AI による回帰分析で算出する。それとともに計測車両に搭載したスペクトルカメラとステレオカメラで切羽を撮影して、風化変質と割れ目間隔を自動算出する。マルチスペクトル画像から抽出されるスペクトル反射率曲線と岩盤の風化度の関係を学習した AI を用いて、画像から風化度の分布図を出力できる。また、ステレオカメラ画像から切羽面の三次元形状を取得し、形状の変化点を割れ目として抽出できる。

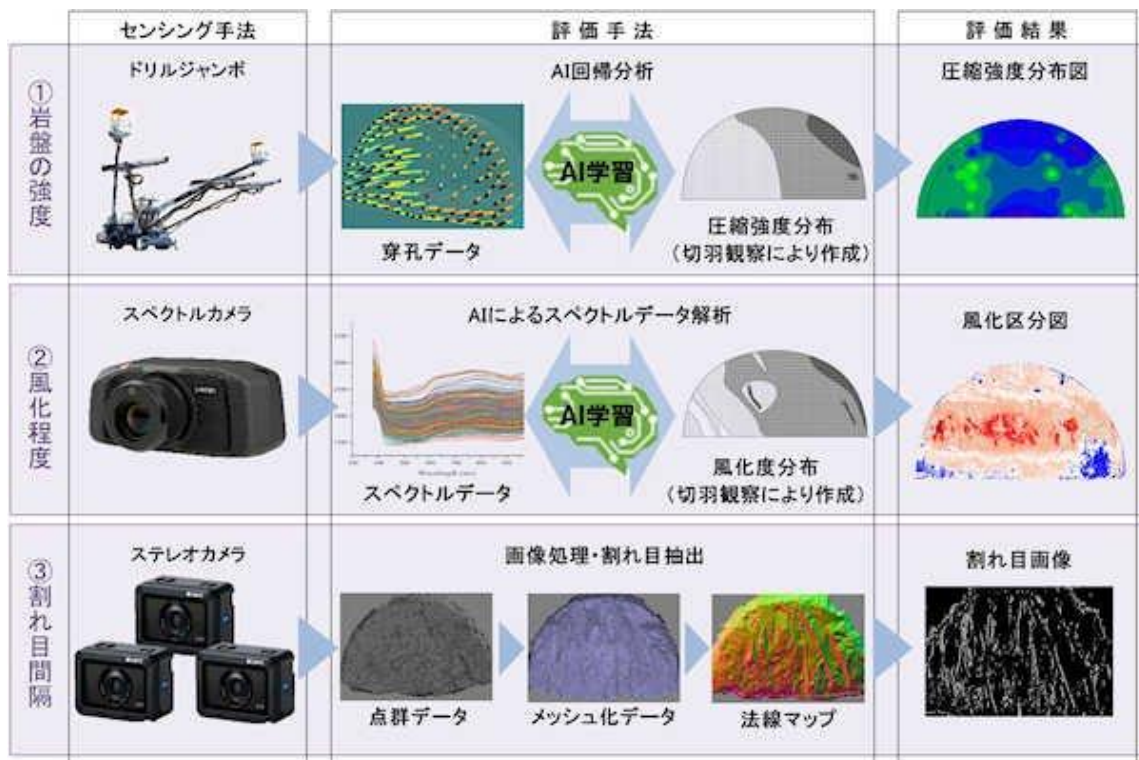


図 5-14 切羽地質情報取得システムの概要⁶³

(3) 切羽近傍の状況把握技術

落盤や肌落ちなどによる被災を防止するために、切羽近傍への人や重機などの立ち入り状況の把握が重要である。

例えば東急建設(株)は、切羽遠隔監視システム車両を開発している(図 5-15)⁶⁴。当技術では、重機に搭載した監視カメラの 4K 映像や集音マイクの音声の確認、カメラの PTZ 操作、切羽エリアへの LED 警報の発報などを後方の監視車両から行うことがで

⁶³ (株)安藤・間：山岳トンネル切羽の地質を自動判定(参照 2025.12)

<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2019/20191211.php>

⁶⁴ 東急建設(株)：「切羽遠隔監視システム」の試験導入を開始(参照 2025.12)

<https://www.tokyu-cnst.co.jp/topics/2804.html>

きる。カメラ操作や警報発報などの制御信号用の無線設備は別途設けられており、監視映像や音声の遅延・欠損が発生しない仕様になっている。これにより切羽監視責任者が作業エリアから離れることができ、被災リスクの低減や心身的負担の軽減などの効果が期待される。



図 5-15 切羽遠隔監視システムの概要⁶⁴

戸田建設（株）は、AI を用いた切羽安全監視システムを開発した（図 5-16）⁶⁵。当技術は、トンネル肩部に設置したカメラの映像を AI で画像解析することにより、立入禁止範囲内に存在する人物を検知し、視認性の高い光と音で周囲の工事関係者に周知する。これにより、切羽監視責任者が立ち入りを見落としてしまった場合や、重機の出入りが激しく立入禁止の明示ができない場合にも立ち入りを検知することが可能となり、監視の効率化や強化が期待される。

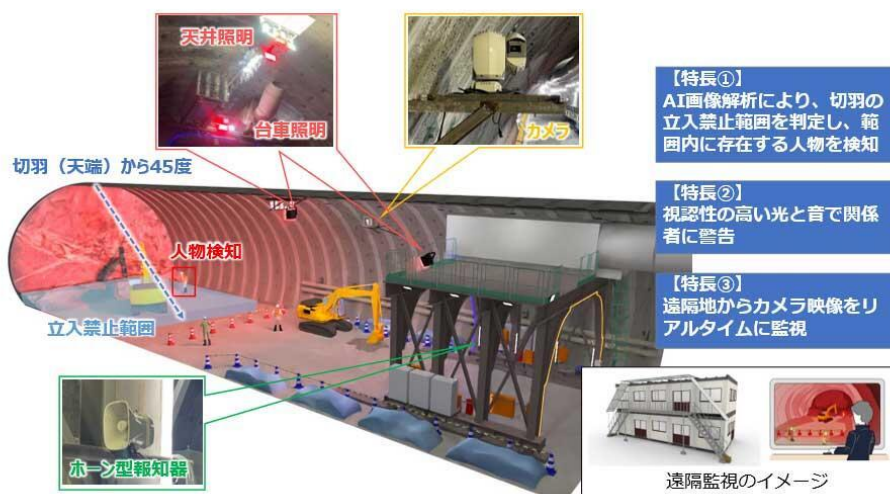


図 5-16 切羽安全監視システムの概要⁶⁵

⁶⁵ 戸田建設（株）：AI 画像解析技術を用いた切羽安全監視システムを開発（参照 2025.12）
https://www.toda.co.jp/news/2025/20250321_003564.html

5.2 国際事例

5.2.1 掘削機械の遠隔監視・自動制御（TBM・ロードヘッダー）

(1) 概要

トンネル建設において、掘削工程は全体の工程進捗と施工品質に影響を及ぼす重要度の高いプロセスである。従来、TBM やシールドマシンやロードヘッダー（山岳工法）の運転は、地山の変化を読み取る熟練オペレータの経験と勘に依存していた。しかし、熟練技能者が不足しているとともに、施工の安全性向上が求められているため、AI や IoT を活用した自動運転・遠隔制御技術の導入が進んでいる。本項では、大規模な TBM 施工を統合管理するスペイン ACCIONA 社の「TBM Control Centre」を国際事例として取り上げ、前節の国内事例で紹介した（株）安藤・間の「AI ロードヘッダー」との自動化へのアプローチを比較・分析する。

(2) TBM Control Centre（ACCIONA／スペイン）

TBM Control Centre（TCC）は、スペインの建設会社 ACCIONA 社が開発した、トンネルボーリングマシン（TBM）の運転状況をリアルタイムで監視・分析・最適化するための統合プラットフォームである。

このシステムでは、TBM に搭載された約 65,000 個のセンサーから、推進力、トルク、回転数、注入圧、地質情報、温度、振動などの多様なデータを 0.25 秒単位で取得し、クラウド上に集約する。これらのデータは AI によってリアルタイムに解析され、掘進パラメータの自動最適化、異常兆候の早期検知、ピット摩耗の予測といった機能に活用されている。

さらに、TCC の特徴的な機能として、VR 技術を活用した「仮想運転室（Virtual Cockpit）」（図 5-17）が挙げられる。これは、TBM の運転状況や地質断面、施工パラメータを 3D で可視化し、遠隔地の技術者が VR 空間上でリアルタイムに状況を把握・支援できる仕組みである。複数拠点からの同時接続が可能であり、現場に常駐せずとも、専門家が遠隔から意思決定やトラブル対応を行える。

実際の適用例として、ブラジル・サンパウロ地下鉄 6 号線の建設プロジェクトでは、現地施工現場とスペイン本社が TCC を通じて常時接続され、掘進状況の監視や施工パラメータの調整が行われた。これにより、掘進速度の安定化、トラブルの未然防止、施工品質の向上といった成果が得られている。

以上のように、TCC は AI・ビッグデータ・VR を融合した高度な施工支援基盤として、人工知能による施工判断と遠隔協調体制の構築を実現している。



図 5-17 TBM Control Centre の VR イメージ⁶⁶

(3) 比較と考察

ACCIONA 社の TCC と（株）安藤・間の AI ロードヘッダーは、共に「掘削機械の自動化」を目指しているが、そのアプローチには、対象とする機械の特性や現場環境の違いが色濃く反映されている。

1) 特徴の違い

TCC は、TBM という巨大プラットフォームを対象とし、約 65,000 個のセンサーの情報をクラウドに集約して「遠隔からの意思決定支援」を行うことに主眼を置いている。VR による可視化など、人間（専門家）が判断しやすくするためのインターフェースが充実しており、システム全体で安全性を担保する思想である。対して AI ロードヘッダーは、現場内で完結する「機械単体の自律化（エッジ制御）」を志向している。LiDAR による SLAM や AI による動作生成など、機械そのものが環境を判断して動くロボティクス技術が中核にあり、通信インフラが脆弱な山岳トンネル奥地でも自律稼働できる即応性を重視している。

2) 適用範囲と目的の違い

TCC は大規模プロジェクトにおける「施工管理の高度化」を、AI ロードヘッダーは切羽直下作業からの「完全無人化（省人化）」を最優先の目的としている。国内の山岳トンネル現場では、狭隘な空間で複数の重機が稼働するため、（株）安藤・間のような「個々の重機が賢く動く」技術のニーズが高い。一方で、TCC のような統合監視技術は、長大トンネルや都市部シールドでの採用が進むだろう。

今後は、TCC のような上位の統合管理システムと、AI ロードヘッダーのような自律型重機が連携し、「現場の自律施工」を「遠隔から統合管理」する階層的な自動化システムへと進化していくことが予想される。

⁶⁶ ACCIONA: 「Tunnel Boring Machines Enter Immersive Realities」(参照 2026.1)
<https://experience.acciona.com/innovation/tunnel-boring-machines-immersive-realities>

5.2.2 巡回・点検ロボット

(1) 概要

トンネル施工や維持管理の現場では、切羽や坑内の巡回・点検作業が日常的に行われているが、これらの作業は狭隘かつ暗所での作業となるため、転倒・有害ガスなどのリスクが常に伴う。また、長距離トンネルや夜間作業では作業員の負担が大きく、熟練者の減少も相まって、点検作業の省人化・自動化が求められている。

こうした背景のもと、近年では四足歩行ロボットや自律走行型台車、ドローンなどを活用した巡回・点検技術の開発が進められている。これらのロボットは、カメラや LiDAR、センサーを搭載し、遠隔操作または自律的にトンネル内を移動しながら、構造物の状態や環境情報を収集・記録できる。

本項では、スイスの ANYmal と米国の Spot、香港の 3S Tunnel Defect Inspector を国際事例として取り上げ、前節の国内事例で紹介した（株）鴻池組の「心／KOCORO」や戸田建設（株）の自律飛行ドローンとの技術的特徴と運用形態を比較・分析する。

(2) ANYmal (ETH Zurich×ANYbotics／スイス)

スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETH Zurich) とロボティクス企業 ANYbotics 社が共同開発した「ANYmal」は、産業施設や地下インフラの点検用途に特化した四足歩行ロボット(図 5-18)である。最大 20kg のセンサー機器を搭載可能で、RGB カメラ、LiDAR、熱画像センサー、マイクなどを組み合わせることで、構造物の状態や環境情報を多角的に取得できる。

ANYmal の最大の特徴は、自己位置推定と環境マッピングを同時に行う SLAM 技術を活用した高い自律性にある。事前に地図を用意することなく、未知のトンネル内を自律で移動し、障害物を回避しながら巡回点検を実施できる。また、点検ルートの自動生成や、取得データのクラウド連携による遠隔モニタリングにも対応しており、点検作業の省人化と安全性向上に大きく貢献している。



図 5-18 四足歩行ロボット ANYmal による湿潤・不整地での作業⁶⁷

⁶⁷ ANYbotics: 「ANYmal - Autonomous Robotic Inspection Solution」(参照 2026.1)
<https://www.anybotics.com/robotics/anymal/>

(3) Spot (Boston Dynamics／米国)

「Spot」は、図 5-19 に示すように、米国の Boston Dynamics 社が開発した汎用四足歩行ロボットであり、建設現場やプラント、トンネルなどの巡回点検に広く導入されている。最大 14kg の機器を搭載可能で、360 度カメラ、LiDAR、赤外線センサー、マイクなどを組み合わせて、構造物の変状や環境異常を検出する。

Spot は、事前に設定したルートに従って自律巡回でき、点検結果はクラウド上に自動保存される。また、遠隔操作モードも備えており、通信環境が整っていれば、遠隔地からの操作やリアルタイム映像の確認も可能である。特に、段差や階段、傾斜地などの不整地に強く、従来の台車型ロボットでは対応困難だった環境でも安定した移動性能を発揮する。

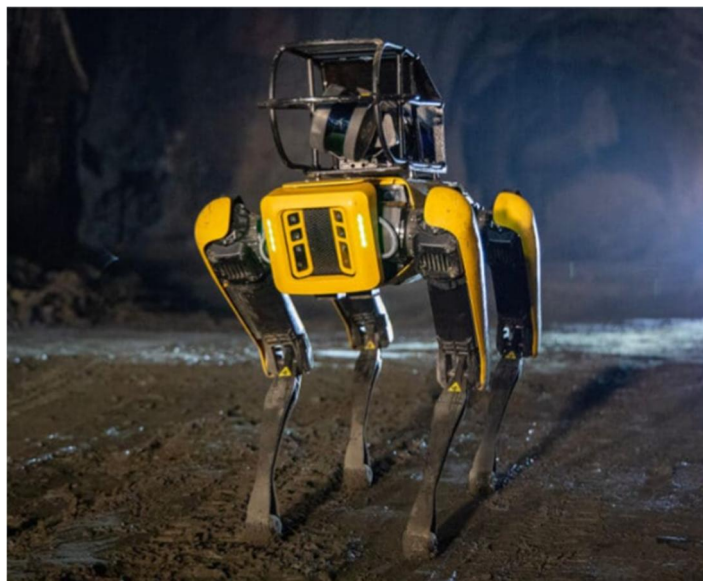


図 5-19 Boston Dynamics の汎用四足歩行ロボット「Spot」⁶⁸

(4) 3S Tunnel Defect Inspector (CEDD × HKPC／香港)

香港では、CEDD（土木工程拓展署）と HKPC（香港生産力促進局）が共同で、トンネル内の欠陥検出を目的とした「3S Tunnel Defect Inspector」を開発・導入している。このシステムは、ドローンに高精度カメラとエッジ AI を搭載し、トンネル内を自律飛行しながら壁面のひび割れ、剥離、漏水などの変状を自動検出するものである。

本システムの特筆すべき点は、ドローンが単独で機能するのではなく、地上を走行する「サポート車両 (Smart Mobility Cart)」が随伴する構成となっていることである（図 5-20）。ドローンが壁面を撮影する際、サポート車両はドローンの動きに合わせて真下を自動追従し、搭載された高輝度 LED で暗いトンネル内を強力に照明支援する。これにより、従来のドローン単独飛行で課題となっていた「照度不足」や「バッテリー・積載重

⁶⁸ Boston Dynamics: 「Spot | Boston Dynamics」(参照 2026.1)

<https://bostondynamics.com/products/spot/>

量の制約」を解消し、より鮮明な画像取得と長時間の連続点検を可能にしている。

飛行制御には、トンネル内に設置されたマーカーを用いたビジュアルナビゲーション方式を採用しており、GNSS が利用できない環境でも安定した飛行が可能である。取得された画像データは、ドローン本体の AI によってリアルタイムに解析され、異常箇所が自動的にシステムの図面上でマーキングされる。点検結果はクラウドにアップロードされ、管理者が遠隔から確認・分析できる仕組みとなっている。

このように、3S Tunnel Defect Inspector は、空（ドローン）と陸（サポート車両）の連携によって点検の無人化・自動化を実現するとともに、人的リスクの低減と点検精度の向上を両立させた先進的な事例である。

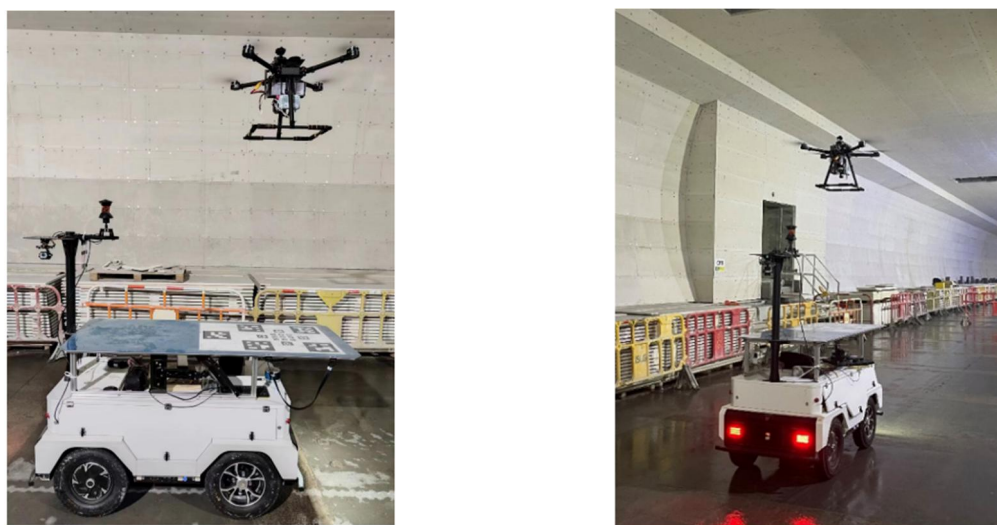


図 5-20 3S Tunnel Defect Inspector のドローンとサポート車両⁶⁹

(5) 比較と考察

上記の国際事例に共通するのは、「人が立ち入りにくいトンネル環境において、ロボットやドローンを活用して安全かつ効率的に点検作業を行う」という基本的な目的である。いずれの技術も、従来の目視点検や手持ち機器による作業に比べて、省人化・高精度化・記録性の向上といった利点を有している。

ここで、国内事例と比較すると、対象とする工程と技術アプローチに明確な違いが見られる。国際事例（ANYmal や 3S Tunnel Defect Inspector）は、主に完成した覆工コンクリートなどを対象とし、ひび割れや漏水といった「構造物の物理的な変状検知（維持管理・品質検査）」に重点を置いている。これらは SLAM 技術や高性能 LiDAR を駆使し、複雑な空間の自己位置推定と高精細なデータ取得を強みとする。

これに対し、国内事例である（株）鴻池組や戸田建設（株）の事例は、トンネル工事で最も危険が伴う「切羽（掘削面）の状況把握」に特化している点が特徴である。具体

⁶⁹ Yang et al. (2024) , HKIE Transactions, Article 20240007
<https://www.hkie.org.hk/hkietransactions/upload/2025-03-25/THIE-2024-0007.pdf>

的には、(株) 鴻池組の四足歩行ロボットは、落石や崩落の危険がある切羽直近への人の立ち入りを避けるため、遠隔操作による代替観察を主眼としている。戸田建設(株)の自律飛行ドローンは、切羽写真の撮影から AI 評価、帳票作成までの一連のプロセスを自動化し、従来 2 時間要した作業を約 17 分に短縮するなど、「施工サイクルの効率化と労働安全の確保」を目的としている。

技術的な特性に着目すると、国際事例が SLAM による完全自律移動を志向するのに対し、国内事例は「現場での確実な運用」を最優先した技術選択が見られる。例えば、(株) 鴻池組はあえて「ライントレース機能」を採用することで、不整地や粉じん環境下でも迷わず安定した自律走行を実現している(将来的に 3D-LiDAR も検討)。戸田建設(株)は、GNSS が届かない環境下でも安定飛行が可能な「非 SLAM 型」の制御に加え、障害物回避機能やメンテナンスフリーの充電ポートを組み合わせることで、動的に変化する施工現場での完全自動運用を確立している。

5.2.3 切羽監視・安全管理

(1) 概要

山岳トンネル工事において、切羽近傍は最も危険性の高い作業エリアの一つである。肌落ちや落盤、ガス噴出といった突発的な災害リスクが存在し、作業員の安全確保が常に課題となってきた。特に、切羽への立ち入りを最小限に抑えるための遠隔監視技術や、立入検知・警報システムの導入は、近年の安全管理の中核をなしている。

また、切羽監視責任者の負担軽減や、人的監視の限界を補う目的で、AI やセンサーを活用した自動検知・通知技術の開発も進められている。本項では、国際的な先進事例としてドイツ Herrenknecht 社の切羽監視システムを取り上げ、前節で紹介した日本国内の(株) 竹中土木や東急建設(株)、戸田建設(株)の事例と比較する。

(2) Tunnel Face Monitoring System (Herrenknecht/ドイツ)

Herrenknecht 社は、世界的な TBM メーカーとして知られ、掘進機の運転支援や安全管理に関する多様なソリューションを提供している。その中でも、切羽監視に特化した「Tunnel Face Monitoring System」(図 5-21)は、レーザースキャナー、カメラ、傾斜センサーを組み合わせ、切羽面の変位や押し出し、崩壊兆候をリアルタイムで検出するシステムである。

このシステムは、TBM の先端部に設置されたセンサー群からのデータを中央制御室に送信し、切羽面の変形や異常挙動を 3D で可視化する。さらに、AI によるパターン認識により、通常時と異なる動きを自動的に識別し、警報を発する機能も備えている。これにより、作業員が切羽に立ち入る前に危険を察知し、事前に対応を講じることが可能となる。また、同社は作業員の動線や重機の位置をリアルタイムでトラッキングする機能も提供しており、切羽近傍の安全管理を包括的に支援している。



図 5-21 監視システムのイメージ図⁷⁰

(3) 比較と考察

Herrenknecht 社の Tunnel Face Monitoring System は、TBM 掘進データと切羽画像を一元管理し、中央制御室で統合的に監視する点に特徴がある。これに対し、国内事例（5.1.3 参照）は、現場の作業員に対して直接的に情報を伝達する機能に重点を置いている点が対照的である。

例えば、切羽変状の把握において国内の（株）竹中土木のシステムは、検知結果をクラウドへ送るだけでなく、切羽面へのレーザー照射や AR 端末、ヘルメットハンマーへの振動を通じて現場内にいる作業員へリアルタイムに危険を通知する仕組みを実装している。これは、遠隔監視だけでなく「現場での即時回避」を重視した設計と言える。

また、切羽近傍の安全管理においてもアプローチの違いが見られる。Herrenknecht 社がタグを用いた「作業員トラッキング（位置管理）」を主眼とするのに対し、国内の戸田建設（株）の「AI 切羽安全監視システム」は、危険エリアへの侵入を検知した際、視認性の高い光と音でその場の作業員に直接警告を発する機能を有している。これは、管理者がモニタ越しに監視するだけでなく、光や音を用いて現場の作業員へ直接警告し、事故を未然に防ぐ「能動的な安全支援」である。

さらに、東急建設（株）の「切羽遠隔監視システム車両」は、切羽から離れた安全な場所に独立した監視拠点を設けるアプローチである。Herrenknecht のような大規模な中央制御室を持たない山岳トンネル現場において、車両という形態で機動的な遠隔監視環境を構築し、監視員の被災リスク低減を実現している。

総じて、国際事例は TBM システムと一体化した「統合管理・集中監視」に優れているのに対し、国内事例は AR 表示や光・音による警報、移動式監視車など、個々の現場環境や作業員の行動特性に合わせて機能を選択・付加できる「独立性」と「現場作業員への直接支援」に強みを持つ。今後は、国際的な潮流である統合管理の利点を取り入れつつ、これら国内独自の現場支援技術をデータ連携させることが、安全性と生産性の更なる向上における鍵となる。

⁷⁰ VMT GmbH: 「Herrenknecht.Connected | Real-time data for microtunnelling」（参照 2026.1）
<https://vmt.global/tunnelling/en/system/herrenknecht-connected-mt/>

5.2.4 デジタルツイン・統合管理

(1) 概要

建設現場における情報管理は、従来、紙図面や個別の電子ファイルに依存しており、施工・維持管理の各フェーズで情報の断絶や重複、伝達ミスが発生しやすい構造となっていた。特にトンネルのような長大かつ複雑な地下構造物では、施工進捗、重機の稼働状況、環境条件、作業員の動線など、多様な情報をリアルタイムに把握・統合することが求められている。

こうした課題に対し、近年注目されているのが「デジタルツイン」技術である。これは、現実の施工現場の状態をセンサーや IoT 機器によってデジタル空間に再現し、リアルタイムで可視化・分析・制御するものである。施工の効率化や安全性向上に加え、維持管理フェーズへの情報継承や、AI による最適化支援にもつながる。

本項では、ドイツ STRABAG 社の「ALECS system」を国際事例として紹介し、日本国内の西松建設（株）によるデジタルツイン構築事例と比較・考察する。

(2) ALECS system (STRABAG/ドイツ)

ALECS system はドイツの大手建設会社 STRABAG が開発した、トンネル施工に特化した統合型デジタル管理システムである。図 5-22 により、イメージ図を示す。BIM(Building Information Modeling) を中核に据え、IoT センサー、施工機械、作業員の動態情報などをリアルタイムで連携させることで、施工現場の「デジタルツイン」を構築し、施工の最適化やリスク管理を同時に実現している。

ALECS system では、以下のようなデータが自動的に収集・統合される

- ・ TBM の掘進速度、推進力、トルク、注入圧などの施工パラメータ
- ・ 支保工（セグメントやロックボルトなど）の設置位置・時刻・品質情報
- ・ 地質条件（掘削面の分類、湧水、変位など）
- ・ 重機の稼働状況、位置、燃料消費、保守履歴
- ・ 作業員の位置情報、入退場履歴、バイタルデータ（心拍・体温など）
- ・ 環境センサーによる温度、湿度、粉塵、ガス濃度、照度などの安全指標

これらの情報は、BIM 上にリアルタイムでマッピングされ、現場管理者は PC やタブレット端末を通じて、施工全体の進捗やリスクを俯瞰的に把握できる。また、AI による異常検知アルゴリズムが組み込まれており、地山の変位傾向や重機の異常挙動、作業員の危険行動などを自動的に検出し、警報や対応指示を発信する機能も備えている。

さらに、ALECS system は、施工履歴やセンサーデータを時系列で蓄積し、維持管理フェーズにおけるトンネル健全性評価や補修計画の立案にも活用可能である。欧州各国の都市鉄道や高速道路トンネルにおいて導入が進んでおり、施工の透明性と説明責任の確保にも寄与している。

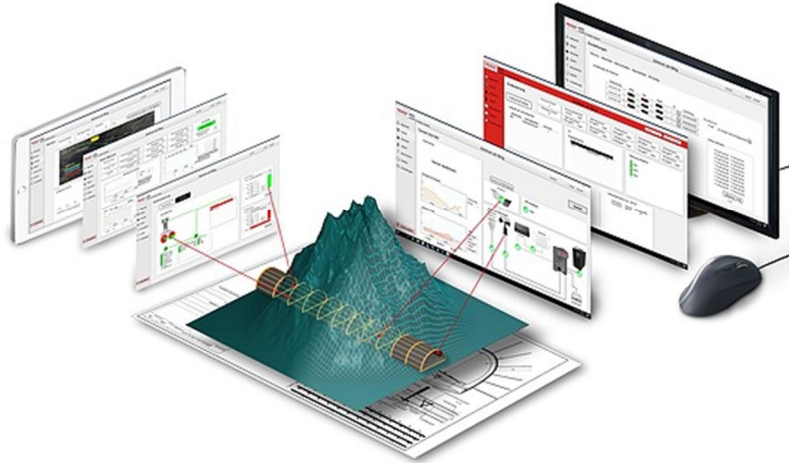


図 5-22 ALECS system のイメージ図⁷¹

(3) 比較と考察

ALECS system は、「施工現場の全体像をリアルタイムに把握し、データに基づく判断と最適化を可能にする」ことを目的としており、TBM 施工におけるデジタルツインの概念を具現化したシステムである。

一方、日本国内においても、西松建設（株）が山岳トンネル現場において、IoT ゲートウェイを活用したデジタルツインプラットフォームの構築を進めている。同社のシステムは、重機の位置・稼働状況や環境センサーの情報をクラウドに集約するだけでなく、トンネル坑内に「ローカル 5G」環境を構築し大容量・低遅延通信を活かしたホイールローダの遠隔操縦などを試行している点が特徴である。これにより、単なる「監視（モニタリング）」にとどまらず、サイバー空間からの操作がフィジカル空間の重機にリアルタイムに反映される、高度なサイバー・フィジカル・システム（CPS）の実装を進めている。

両者を比較すると、ALECS system は TBM という「単一の巨大システム」の中で、掘進・支保・地質データを密結合させ、マシン全体の自律最適化を目指す「システム統合型」のアプローチと言える。対して西松建設（株）の事例は、ホイールローダやドリルジャンボなど、本来独立して稼働する「複数の重機群」を、ローカル 5G という高速通信インフラによって繋ぐことで統合管理・遠隔制御しようとする「ネットワーク統合型」のアプローチに特徴がある。これは、多種多様な重機が混在し、通信環境の確保が難しい日本の山岳トンネル（NATM）の課題に対し、通信インフラの刷新からアプローチした実践的な解といえる。

⁷¹ STRABAG Infrastructure & Safety Solutions: 「Intelligent Systems for Construction Sites」
(参照 2026.1)

<https://www.strabag-iss.com/en/services/intelligent-systems-for-construction-sites>

5.3 トラブル事例

5.3.1 イベリア半島大規模停電

(1) イベリア半島大規模停電の事例の概要

イベリア半島はヨーロッパ南西部に位置し、北側はピレネー山脈によって他のヨーロッパ大陸部と隔てられている（図 5-23）この地理的条件により、地域の電力系統はヨーロッパ大陸系統との連系容量が相対的に限定されている。

2025 年 4 月 28 日（月）12 時 33 分（CEST）、スペインおよびポルトガルを含むイベリア半島全域において、大規模な広域停電が発生した。この事象によりイベリア半島のほぼ全域が電力供給を喪失し、フランスの一部地域でも短時間の停電が発生した。本件の特異性は、台風や地震といった自然災害、あるいはサイバー攻撃による外部要因が否定されている点にある。再生可能エネルギー（以下、再エネ）の出力変動を制御するために導入された AI による需給調整システムが、系統内に発生した「広域動揺」などの物理的予兆を正しく評価できず適切な回避制御を行えなかったことに起因する内部崩壊型のインフラ事故である⁷²。



図 5-23 イベリア半島の地理的位置図⁷³

(2) イベリア半島大規模停電のインフラ背景と制御システムの構造

事故当時、スペインおよびポルトガルは再エネ導入の先進地域であり（図 5-24）、当日

⁷² 永田真幸：「イベリア半島における大規模停電 ―判明していること・解明が期待されること―」，電力中央研究所 説明資料，2025.6.3

⁷³ Google map （参照 2026.2）
<https://www.google.com/maps/>

の市場データによれば、太陽光発電などの出力過多により電力価格がネガティブプライス（発電する側が金銭を支払う）で推移する時間帯が発生していた。イベリア半島の電力系統はピレネー山脈によって欧州大陸から地理的に半ば孤立しており、フランスとの連系線容量は国内需要に対して限定的であった。スペイン・フランス間の連系線（AC4ルートおよびHVDC）が系統安定性の生命線であったことが示されている。

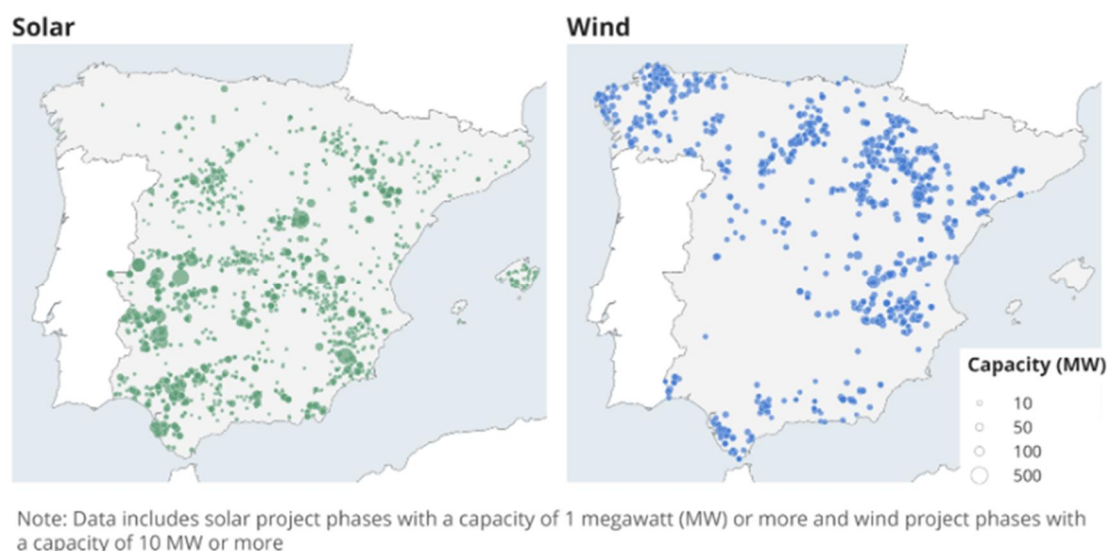


図 5-24 スペインの太陽光発電と風力発電分布図⁷⁴

イベリア半島は地理的に欧州大陸から孤立した形状をしており、外部系統との接続点が限られている(図 5-25)。フランスとの連系線容量は約 3GW（2025 年時点）であり、これはスペイン国内の総容量に対して非常に細い「パイプ」に過ぎない。国内で余剰電力が発生した場合、この限られた連系線を通じて外部へ放出（輸出）するか、揚水発電などで吸収するしかないという、物理的なボトルネックを抱えた構造であった。

変動する再エネ電源と脆弱な系統を安定運用するため、スペイン国営送電会社(REE)は、AIを活用した高度な制御システムを導入していた。

- 1) 市場連動型制御: ネガティブプライス常態化に伴い、AIは経済性を最優先し、余剰電力を揚水発電への蓄電やフランスへの輸出（潮流制御）で処理していた。
- 2) 動揺検知: 系統内の周波数や電圧の微細な変動を監視し、安定化させる役割を担っていた。

⁷⁴ Global Energy Monitor. Global Solar Power Tracker, Global Wind Power Tracker, Solar Asset Mapper.



図 5-25 スペインの高圧送電網⁷⁵

(3) イベリア半島大規模停電の事故発生のメカニズムと時系列詳細

停電は突発的な事故ではなく、「特異な条件下」において AI がリスクを過小評価し続け、物理的な限界点を超えた瞬間に連鎖崩壊を起こしたものである。

1) 発生前の特異条件

2025 年 4 月 28 日の午前中、系統内では以下の複合条件が重なり、運用上の「極端な事象」が発生していた⁷⁷。

- a) 高出力: 快晴により、太陽光発電がピーク出力 (約 35GW) に達していた。
- b) 低負荷: 祝日かつ適温であったため、空調需要などが少なく、国内電力消費が極端に低かった (約 27GW)。同期発電機 (火力など) が多数停止し、インバーター電源 (太陽光・風力) が主体となっていたため、周波数変動に対する物理的な抵抗力 (慣性) が低下していた。
- c) 限界運用: 余剰電力を処理するため、揚水発電をフル稼働させて負荷を作り出し、さらにフランスへの送電 (輸出) も限界容量付近で行われていた。この需給アンバランスにより、図 5-26 のように電力市場価格が 0 ユーロを下回ることで、推移する時間帯が発生していた。

この「高出力・低負荷・フル輸出」という状況下で、系統電圧は上昇傾向にあったが、AI は過去の学習データに基づき「許容範囲内の揺らぎであり、現行の運用モードで対応可能」と判断していた。

⁷⁵ 永田真幸：「イベリア半島における大規模停電 ～スペインの報告書に見る停電の要因と電力系統の視点からの示唆～」，電力中央研究所 説明資料，2025.7.14

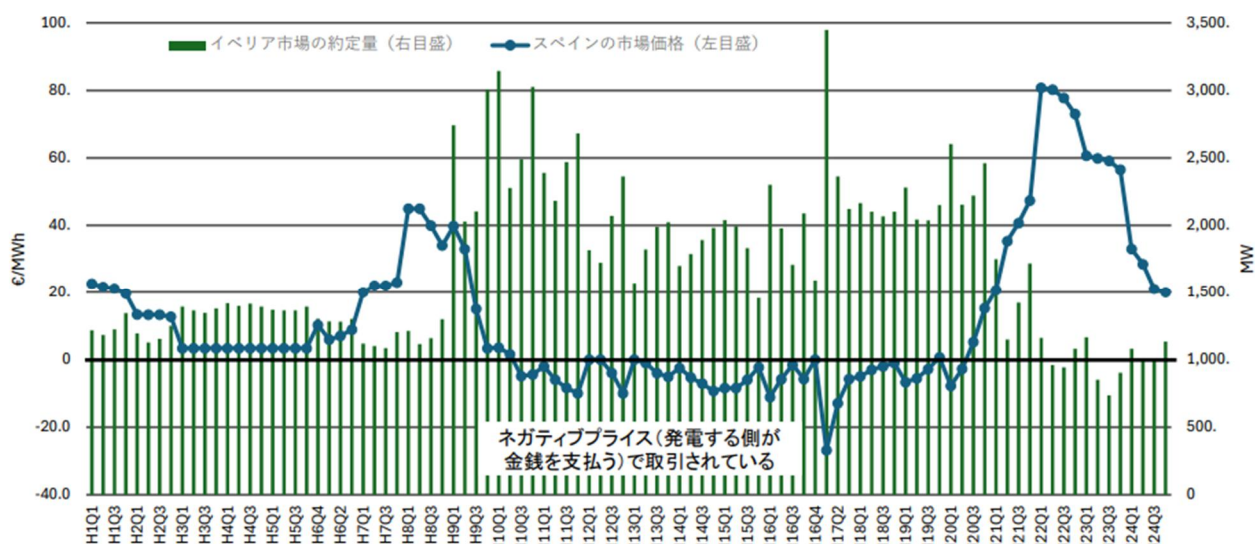


図 5-26 2025 年 4 月 28 日スペイン当日電力市場⁷⁵

2) 崩壊までの時系列

正午過ぎ、一部地域での電圧不安定化を契機に、事態は急速に悪化する。詳細な経過は

表 5-2 の通りである。

表 5-2 イベリア半島大規模停電の時系列

時刻	事象内容
10:30	一部地域で電圧が定格（100%）から 95%以下に低下。調相機が自動起動。AI は「短期的な揺らぎ」と判断。
11:15	周波数が基準値（50.0Hz）から 49.8Hz まで低下。AI は「許容範囲内」と判断し、外送制限や蓄電停止を行わず。
12:03～12:07	第 1 波の電力揺らぎ（主周波数 0.64Hz）が発生。外送電力が急変し、フランス連系線に過負荷が発生。HVDC 制御が遅延。
12:19～12:21	第 2 波の電圧揺らぎ。複数地域で遮断器が作動。AI は「局所的な反応」と判断し、系統全体のモード切替を行わず。
12:30	フランスとの連系線が遮断。スペイン国内の発電所が連鎖的に停止。周波数が急落。影響領域は図 5-27 に示す。

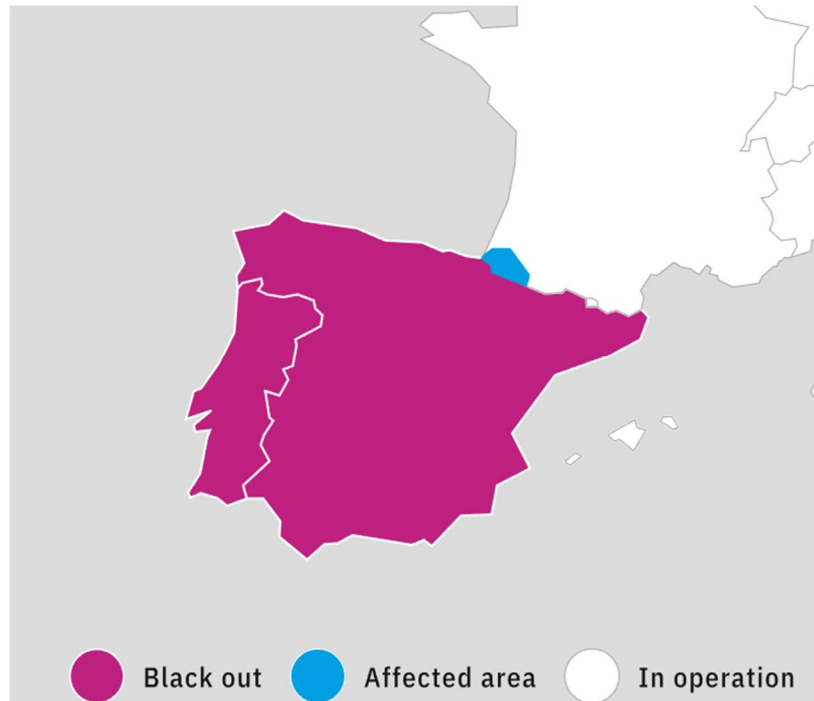


図 5-27 イベリア半島大規模停電の影響領域⁷⁶

(4) イベリア半島大規模停電の AI 判断と物理現象の乖離（技術的要因分析）

本事例における最大の問題点は、デジタル空間上の AI アルゴリズムと、現実空間のインフラ設備が持つ「物理的な挙動」との間に致命的な乖離があったことである。

1) 物理的応答遅延の無視

AI モデル上の計算では、制御指令を出せば「即座に」状態が変化すると仮定されていた可能性がある。しかし、現実の HVDC 変換所や揚水ポンプなどの巨大なインフラ設備には、操作指令から実際に動作が完了するまでに数秒～数分の物理的な応答遅れが存在する。今回のケースでは、AI がモード切り替えを指令した時点で既にシステムは不安定化しており、巨大な慣性を持つインフラ設備の動作が完了する前に、より反応の速いハードウェア側の保護装置が作動してしまった。これは、制御ループの中に物理的な時間定数を正しく組み込んでいなかった設計ミスと言える。

2) 学習データの偏りと外挿性の欠如

AI は過去の膨大な運転データを学習していたが、その大半は「通常運用時」のデータであった。今回のような「再エネ発電比率が極端に高く、かつ需要が極端に低い」という複合的なエッジケースに関する学習データは不足していた。統計的 AI は、学習データの範囲内（内挿領域）では高い精度を発揮するが、未経験の領域（外挿領域）に対しては予測精度が急激に低下する傾向がある。AI は未知の状

⁷⁶ ENTSO-E (2025) 「28 April 2025 Blackout」 ENTSO-E Official Website, (参照 2026.1)
<https://www.entsoe.eu/publications/blackout/28-april-2025-iberian-blackout/>

況に対し、過去の経験則に基づいて楽観的な予測を出力し続け、リスクを見誤った。

3) 保護システムとの競合

AIは「システム全体の最適化」を目指して運用を継続しようとしたが、個々の設備（変電所や発電所）に設置されているアナログな保護リレーは「個別設備の保護（自衛）」のために動作した。AIが「全体としてはまだ耐えられる」と判断していても、現場の保護装置が限界を超えた瞬間に遮断動作を行い、AIの制御前提が次々と崩れていく（接続されているはずの設備が脱落している）という、上位系（AI）と下位系（物理保護）の競合が発生した。

(5) イベリア半島大規模停電によりインフラ管理へのAI技術的提言

イベリア半島の事例は、電力分野に限らず、あらゆる社会インフラの自動制御システム構築において重要な教訓を示している。今後のシステム設計においては、以下の観点が不可欠である。

1) 物理モデル内包型 AI の実装

単に過去の統計データを学習させるだけでなく、流体力学、熱力学、電気工学といった「物理法則」や、設備の「動作速度限界」を拘束条件としてAIモデルに明示的に組み込む必要がある。これにより、物理的に不可能な操作（瞬時の弁閉鎖や急激な出力変動など）や、物理法則に反する予測を系統的に排除し、現実のインフラ挙動に即した制御が可能となる。

2) エッジケースを想定したシミュレーション学習

実データが存在しない異常事態（大洪水、震災、機器の同時故障など）については、高精度な物理シミュレーションによって生成した「合成データ」を用いてAIを追加学習させるべきである。「想定外」を事前にデジタル空間で経験させることで、極端事象に対するAIのロバスト性（堅牢性）を向上させることができる。

3) 「人間」と「物理保護」を最終防壁とする設計

AIはあくまで支援ツールであり、最終的な安全性のためにはハードウェア側のインターロックや、人間による判断が優先される設計思想を堅持すべきである。AIが判断不能に陥った際に、システムを安全な側に誘導する物理的な仕組みを、デジタルの外側に確保しておくことが不可欠である。

5.3.2 韓国における地熱発電の実証プロジェクト（浦項 EGS プロジェクト）

(1) 概要

浦項 EGS プロジェクトは、韓国慶尚北道浦項市で実施されていた EGS 地熱発電の実証プロジェクトである(図 5-28)⁷⁷。EGS(地熱増産システム: Enhanced Geothermal Systems)は、地下深部に十分な熱エネルギーがあるものの熱水や蒸気の供給が不足している地域において、高温岩盤に水を高圧注入して亀裂を生じさせる（水圧破砕する）ことで人工的に地熱貯留層を造成し、地熱発電を可能にする技術である。当プロジェクトでは韓国で最も熱流量の高い地域のひとつである浦項において地熱エネルギー生産の可能性を実証することを目的としており、1MW 以上の電力供給が期待されていた。しかし、浦項地震（2017 年 11 月 15 日、マグニチュード 5.5）の震源が圧入井（PX-2）での水圧破砕時に発生した微小地震の分布域に位置していることから、2016 年 1 月から 2017 年 9 月までに実施された一連の水圧破砕が浦項地震を誘発したと結論付けられ（図 5-29）⁷⁸、プロジェクトは中止されている。

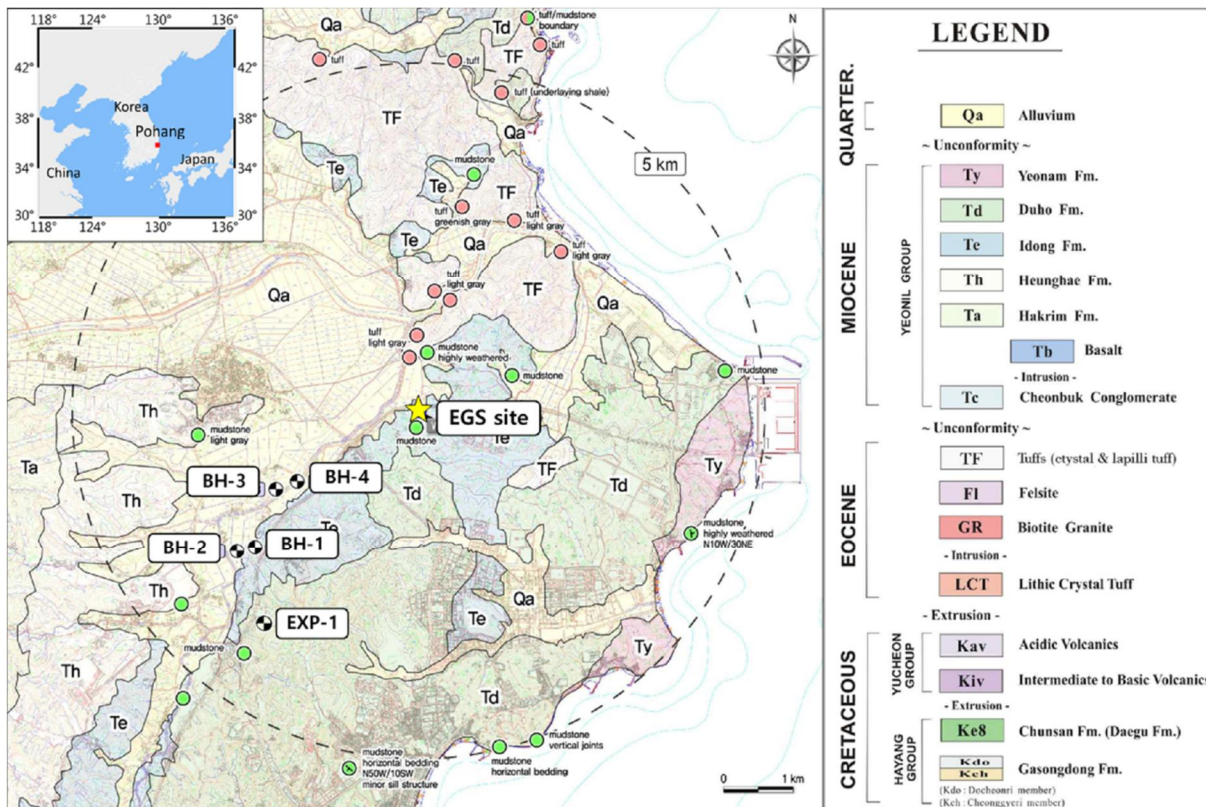


図 5-28 浦項 EGS プロジェクト位置図⁷⁷

⁷⁷ Sehyeok Park, Kwang-Il Kim, Linmao Xie, Hwajung Yoo, Ki-Bok Min, Myungsun Kim, Byoungjoon Yoon, Kwang Yeom Kim, Günter Zimmermann, Frédéric Guinot, Peter Meier, 2020, Observations and analyses of the first two hydraulic stimulations in the Pohang geothermal development site, South Korea, Geothermics, Volume 88.

⁷⁸ Geological Society of Korea, 2019, Summary report of the Korean Government Commission on relations between the 2017 Pohang Earthquake and EGS Project.

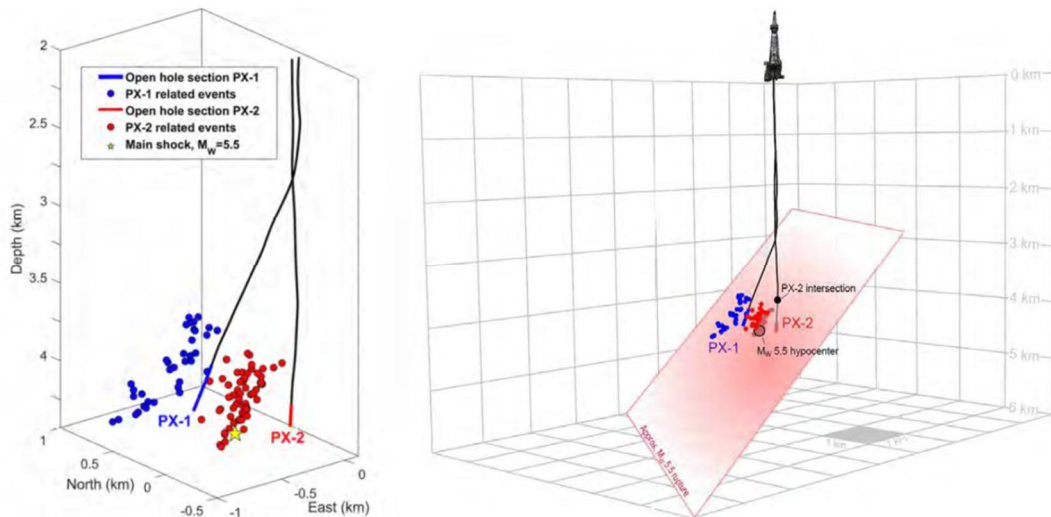


図 5-29 水圧破碎時の微小地震震源分布（左）と浦項地震本震の破壊域模式図（右）⁷⁸

(2) 微小地震のモニタリング技術

EGS などの地下への流体圧入による地震活動の誘発リスクは従前から知られており⁷⁹、当プロジェクトにおいても $M_w 2.0$ を超える規模の地震動を発生させないように TLS (Traffic Light System) が導入されていた。TLS は多種多様なセンサデータを一元的に収録して時系列グラフや平面図上にリアルタイムに表示できるシステムであり、ビッグデータの総合管理や異常・復旧などの自動通知が可能である（図 5-30）⁸⁰。当プロジェクトにおいては、地表露出の基盤岩上に設置された三成分速度型地震計による PGV（地動最大速度、Peak Ground Velocity）に基づいてリアルタイムに即時警報（5 段階のレベル分け）を発報した上で震源やマグニチュードを推定し、レベルに応じて注水速度の減少や注入水の回収などのアクションを選択する仕組みになっていた（図 5-31）⁸¹。

⁷⁹ 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、2020、超臨界地熱発電技術研究開発 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発 水圧・減圧破碎による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究 2018 年度～2019 年度成果報告書

⁸⁰ (株)ナレッジフォーサイト：製品案内（参照 2026.1）

https://knowledgeforesight.com/?post_product=kf_monitor

⁸¹ Hanned Hofmann, Günter Zimmermann, Marton Farkas, Ernst Huenges, Arno Zang, Maria Leonhardt, Grzegorz Kwiatak, Patricia Martinez-Garzon, Marco Bohnhoff, Ki-Bok Min, Peter Fokker, Rob Westaway, Falko Bethmann, Peter Meier, Kern Shin Yoon, Jai Won Choi, Tar Jong Lee, Kwang Yeom Kim, 2019, First field application of cyclic soft stimulation at the Pohang Enhanced Geothermal System site in Korea, Geophysical Journal International, Volume 217.

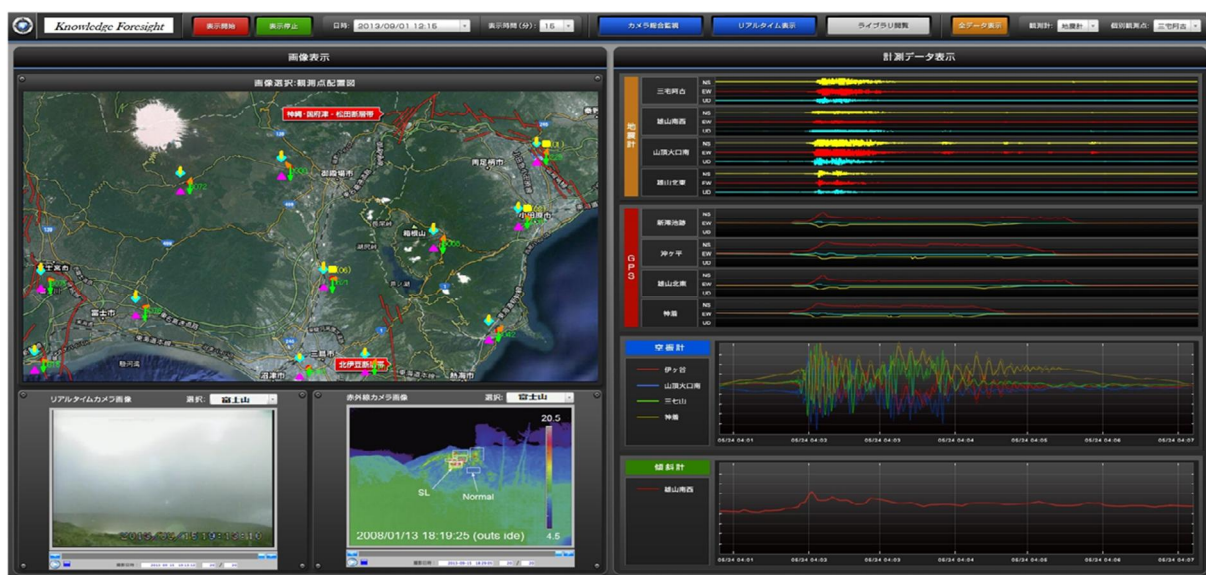


図 5-30 Traffic Light System の例⁸⁰

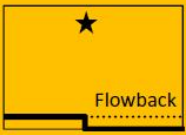
PGV ($\mu\text{m/s}$) @ MSS01	M_w	Stage	Injection rate (Event @ high rate)	Injection rate (Event @ low rate)	Adjusted injection rates for next cycle
≥ 100	≥ 2.0	5	Flowback	Flowback	Flowback
≥ 52	≥ 1.7	4	Flowback	Flowback	Flowback
≥ 27	≥ 1.4	3			
≥ 10	≥ 1.0	2			
< 10	< 1.0	1			
Legend: ★ Induced seismic event — adjusted injection rate ... planned injection rate					

図 5-31 浦項 EGS プロジェクトにおける圧入井 (PX-1) に適用された TLS⁸¹

(3) トラブルの要因や教訓

当プロジェクトでは計測データを収集していたにもかかわらず大きなトラブルを招く事態になってしまった。Geological Society of Korea による報告書⁷⁸では複数の原因や教訓が挙げられているが、そのうちのいくつかを以下に記したとおり、計測データを適切に分析できていなかったことを示す記載が多くあった。今後我々が計測データを活用する場合においてもデータの適切な取り扱いが重要であるということを認識させられる事例であった。

1) タイムリーで適切な努力

地震リスクの分析・調査に必要なすべてのデータが収集されており、その中でも地震リスクの再評価に最も重要なデータは浦項地震発生の半年も前に利用可能な状態であったものの、実際に分析・調査が行われたのは浦項地震の発生後であったと報告されている。また、報告書では、進展する地震活動を監視・分析するためにプロジェクトチームはタイムリーで適切に対応すべきであると提言されている。これらのことより、明確な理由は示されていないものの、十分なデータが収集されていたにもかかわらずプロジェクトの最中に活用されるまでには至っていなかったと推察される。

本事例からは、データをリアルタイムに活用することの重要性を学ぶことができる。昨今では人手不足や働き方改革などの影響によりすべてのデータを人力でリアルタイムに監視することは困難であると考えられるが、本章で紹介したようなデジタル技術や AI 技術を活用することによって被害を回避または軽減できたのかもしれない。

2) データの共有

地震活動の監視・分析には国内外の複数の機関が関与しており、データの交換や分析の流れが複雑化していた。報告書ではオープンアクセス政策の重要性が提言されている。

データ分析を最大限に実施するためには、各機関がデータをスムーズに得られる環境の構築が重要である。本章で紹介したいくつかの事例のように、クラウドへの集約や AI による警報によって、関係各所での共有が可能になると考えられる。

3) 監視組織の設立

当プロジェクトにおける運用上の意思決定はプロジェクトチーム内部だけで行われており、地震リスクを適切に考慮するためには独立した監視組織を設立すべきであると報告書で提言されている。

データの分析や解釈にあたっては公平な立場での判断が必要であり、例えば社内のお他チーム間や上位組織による監査などを行うという手法が考えられる。

6. ヒアリング・現地調査

6.1 鹿児島東西道路（大成・大豊特定建設工事共同企業体）

6.1.1 調査概要

鹿児島東西道路は高規格幹線道路の結節点である鹿児島 IC と鹿児島市中心市街地および重要港湾である鹿児島港を結ぶ地域高規格道路である。鹿児島 IC から鹿児島市街地へのアクセス機能を強化するとともに、都市交通の円滑化と交通渋滞の緩和を目的とした道路で、国土交通省九州地方整備局鹿児島国道事務所が建設の管理を行っている。これまでに鹿児島 IC～田上 IC 間（延長 0.4km）が 4 車線、田上 IC～建部 IC（延長 1.8km）が 2 車線で開通している（図 6-1）。今回は大成・大豊特定建設工事共同企業体が工事を進めている田上 IC から甲南 IC（仮称）付近立坑までの下り線シールドトンネル（延長 2.3km）を調査した。なお九州地方では初めてのシールド工法による道路トンネルの建設工事とのことである。



図 6-1 鹿児島東西道路事業全体計画平面図⁸²

6.1.2 調査実施状況

日時：2025 年 11 月 6 日（木）14:00～16:20

参加者：大成・大豊特定建設工事共同企業体 橋本所長

：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会

第 2 部会 栗山部会長、田中副部会長、岩崎委員、田井委員、深澤委員、森委員、東中委員、山田委員、保広委員、田委員、額委員

事務局 塩崎副センター長、中川主幹

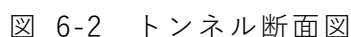
受領資料：鹿児島 3 号東西道路 シールドトンネル（下り線）新設工事（パンフレット）

⁸² 鹿児島国道事務所 H P（参照 2025. 12.5）

<https://www.qsr.mlit.go.jp/kakoku/works/road/touzai/>

(1) 工事概要

掘進土層は発進から約 700m の低土被区間が軟質シラス、残り約 1,600m の高土被り区間が中硬質シラスとなっている。シラスとは入戸火砕流堆積物であり、工事で留意したのが化学反応性ということで、地盤改良の際にセメントとの反応によって所定の強度が発現しないという問題や、掘削土砂を臨海部の埋め立て工事に流用するための受け入れ品質を確保するために苦労したとのことである。



⁸³ 大成・大豊特定建設工事共同企業体、鹿児島3号東西道路 シールドトンネル（下り線）新設工事「パンフレット」、鹿児島、鹿児島東西道路シールド作業所

使用するセグメントは約 80% が RC、約 20% が鋼製セグメントである。鋼製を使用する理由は非常駐車帯や避難連絡口用に後工程で地中拡幅工事を行うためである。道路トンネル用途ということでトンネル火災を想定し、RC セグメントはポリプロピレンを混入してコンクリートの爆裂を防止する仕様としている。鋼製セグメントは RC セグメントより桁高を 100mm 小さくすることにより、耐火パネルを設置できるようにしている。2025 年 11 月 6 日時点では掘進は 2,100m 完了し、到達準備を行っていた。

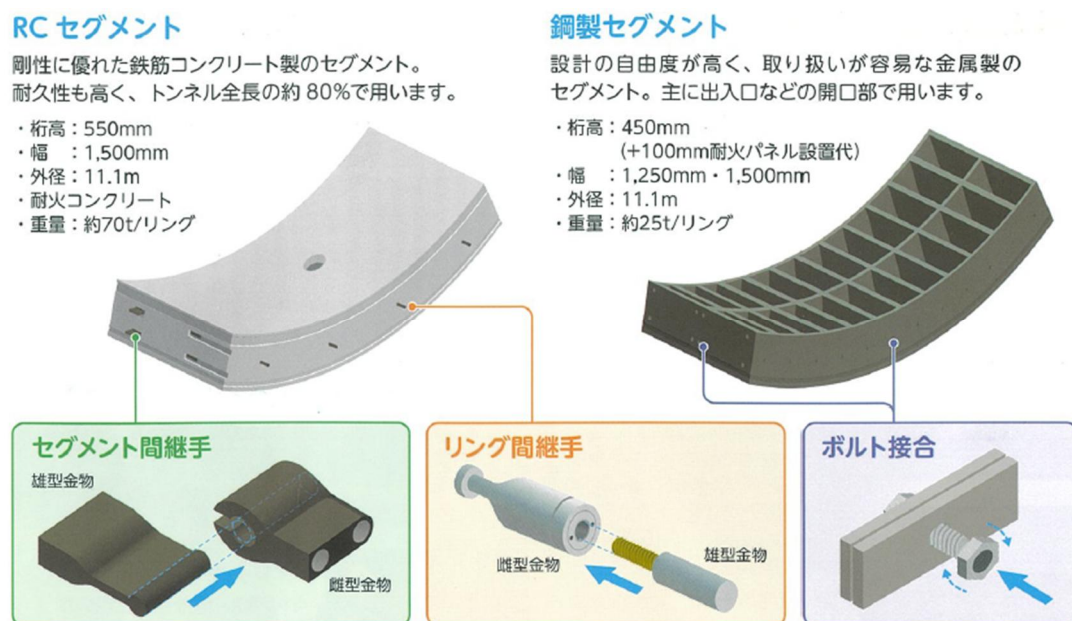


図 6-4 セグメント概要図⁸³

(2) 工事の特徴・工夫

本工事では、下記に挙げる様々な課題に対して工夫をしていた。

1) 狭隘な工事ヤード

元々6車線であった鹿児島市のメインストリートの中州通りの中央2車線を占用して発進立坑が設けられており、残土搬出や資機材の搬出入が日常的に行われている。シールド工事への引き渡し時点では立坑構造物が部分完成しており、資機材投入開口の幅が12m、高さが5.8mと小さかったため、シールドマシン投入時には機体をできるだけ小さく分割したとのことである。機体を投入後に立坑内で組み立てるために、エアキャスター方式で回転させるといった工夫をしていた。また、狭隘な工事ヤードの有効利用のため、防音ハウスを2階建て構造とし、1階部を工事車両専用通行（残土運搬車両、資機材搬入車両）、2階部を残土仮置き場および資機材置き場としていた。さらに、2階部からバックホウによる残土の積み込みやクレーンによる資機材の荷取りを行う工夫をしていた。



図 6-5 施工ヤード模型

2) シラス地盤

シラス地盤の特徴として、密度が小さいポーラスな性状であるため薬液注入工法では想定量よりも多く注入しなければならなかったとのことである。またカルシウム成分が多く、セメントとの化学反応性が高いために強度発現が遅く、石英分が多いためカッタービットやマシンにて摩耗対策を行っているとのことであった。なお、摩耗の許容値 60mm に対してヒアリング時は 43mm とのことであった。

3) 低土被り

最低土被りは 6.5m であり、マシン径 D に対して約 $0.5D$ という超低土被り区間が存在している。切羽圧の管理などによる慎重な掘進管理の効果で先行隆起 3mm、最終沈下 1mm とのことであった。地上部は交差点であるため、高層ビルの上からノンプリズムトータルステーションで計測（測点数 40 点）を行ったとのことだった。

4) 急傾斜地への到達

シールド到達部は山岳部の斜面であり、既存道路トンネルに近接している箇所である。一般的にもトンネルの坑口はすべり破壊に注意した到達準備を行う必要があるが、すべり検討を行うとともに鋼管杭での防護工を設置していた。

5) 地中拡幅

掘進延長内には非常駐車帯や避難口を設けるために鋼製セグメント区間で 7 カ所の地中拡幅を行う計画となっている。手順としては、拡幅部の地盤を凍結させ、既に組み立てている鋼製セグメントを撤去し、凍土を掘削して拡幅するというになっている。地山を露出させることになるために非常に慎重な施工が求められる。



図 6-6 地中拡幅部（スチールセグメント）

6) DX の活用

鹿児島東西道路下り線シールドトンネル工事（大成・大豊 JV）では、AI と遠隔技術を組み合わせた高度な安全・施工管理システムが構築されている。資材運搬台車の安全対策として、単なる映像記録ではなく、RGB カメラ（可視画像）と深度センサ（LiDAR など）を併用した AI 人検知システムを搭載している。これは、RGB 画像による属性認識と、デプス画像（深度情報）による対象までの距離・立体形状の把握を組み合わせることで、暗い坑内でも作業員を確実に検知し衝突を回避する仕組みである。掘進管理においては、高解像度カメラの映像解析により掘削土砂のシラス成分やマシンの方向制御を AI が判断している。さらに、セグメント組み立て用のエレクターには遠隔操作システムを導入しており、切羽直下ではなく後続台車内に設置された専用コックピットから操作している。この際、坑内光ネットワークを介して伝送されるカメラ映像や、クリアランスを表示するガイダンスモニターを参照することで、遠隔地からでも高精度かつ安全な組み立てを実現している。

7) 地域住民との交流

発進ヤード近くにインフォメーションコーナーを設けて地域住民との交流を積極的に図っていた。防音ハウスで囲まれたヤード内、シールドマシンの掘削の方法がわかる「動く模型」（図 6-7）などを展示して地域住民にわかりやすく説明していることがうかがえた。その他、同コーナー内においては、VR 体験や各種施工状況の動画、会社の PR 動画もあった。

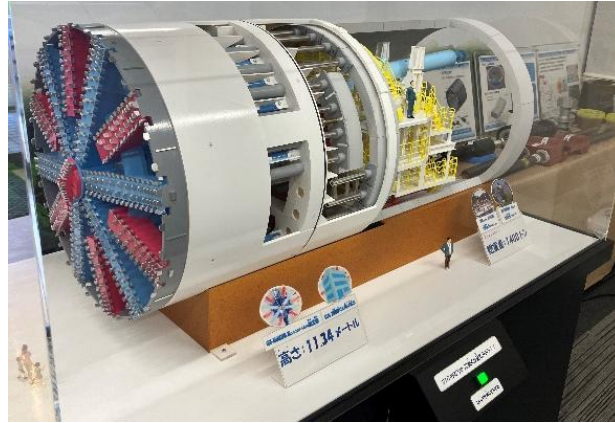


図 6-7 シールドマシンの模型

8) 作業所の体制など

シールド工事は昼夜 2 交代制で作業が行われており、他に 3 工区あり、企業体の職員は総勢 31 人とのことであった。なお、作業所職員の平均年齢は 29 歳であり、若手職員が多い印象だった。これまで約 6 年間工事をして、ゼロ災害ということであった。

(3) その他

九州地方では初めてのシールド工法による道路トンネル建設工事ということで注目されている。それ以外にも、掘削残土は有価物認定を受けることにより港湾工事に流用するという環境にやさしい工事であること、工事近隣への説明責任を果たすために誰でも気軽に入れて工事のことを知ることができるインフォメーションセンターの開設など社会的な配慮を特徴としている。また、シラス土壌の掘進、シールド工事での無水掘削、低土被り区間および高土被り区間の存在など、技術的にも難易度の高い工事となっている。さらに、土日は完全休業日として工事関係者のワークライフバランスにも貢献している。第 2 部会の視察目的の一つとしての DX や AI の導入状況についても前述のとおり確認できた。

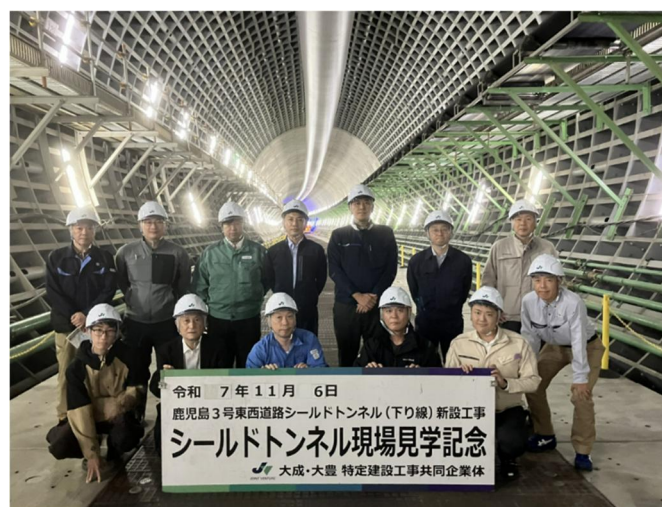


図 6-8 視察状況

6.2 串木野国家石油備蓄基地（（独）エネルギー・金属鉱物資源機構）

6.2.1 概要

串木野国家石油備蓄基地（図 6-9）は、鹿児島県いちき串木野市に位置し、水封式地下岩盤タンク方式を採用した国家石油備蓄施設である。1986 年に立地が決定され、1994 年に全面完成。現在は（独）エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が管理しており、日本地下石油備蓄株式会社が運営を担っている。本施設は、地下岩盤内に掘削されたトンネル型タンクに原油を貯蔵し、周囲の地下水圧によって油の漏洩を防止する「水封方式」を採用しており、環境保全・安全性・経済性に優れた備蓄方式として国内外で注目されている。今回の見学では、施設の概要、備蓄方式の技術的特徴、防災対策、DX 活用状況などについて、現地説明を通じて確認した。



図 6-9 串木野国家石油備蓄基地平面レイアウト図⁸⁴

6.2.2 実施状況

日 時：2025 年 11 月 7 日（金）10：00～12：00

場 所：串木野国家石油備蓄基地

参 加 者：（独）エネルギー・金属鉱物資源機構

久保所長、東副所長

：日本地下石油備蓄（株）

塚田操油係長、大野担当

：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会

第 2 部会 栗山部会長、田中副部会長、岩崎委員、田井委員、深澤委員、
森委員、東中委員、山田委員、保広委員、田委員、瀬瀬委員、
安井委員

事 務 局 塩崎副センター長、中川主幹

⁸⁴ 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構．“串木野国家石油備蓄基地”

．(参照 2026. 1.21) JOGMEC. https://www.jogmec.go.jp/about/domestic_007-10.html

6.2.3 結果

我が国における地下空間の高度利用事例の一つとして、串木野国家石油備蓄基地の見学を実施した。地下岩盤を活用した水封式備蓄方式は、地上型タンクとは異なる構造的・運用的特徴を有しており、地下インフラの安全性・環境性・持続可能性を考える上で極めて示唆に富むものであった。以下に、現地での説明および観察に基づき、技術的特徴・施工背景・運用体制・DX活用状況などについて報告する。

(1) 施設の概要と構造的特徴

串木野国家石油備蓄基地は、鹿児島県いちき串木野市の海岸沿いに位置し、地下岩盤内に掘削された10基のトンネル型タンクに原油を貯蔵する国家備蓄施設である。また、施設の備蓄容量は約175万キロリットルである。

タンク（図6-10）はそれぞれ長さ555m、高さ22m、幅18mであり、地下約100mの深度に掘削されている。これらのタンクは、周囲の岩盤と地下水によって構造的に安定化されており、地震や火災といった自然災害に対しても高い耐性を有する。また、地上には大規模なタンク構造物が存在しないため、景観や土地利用への影響が少なく、地域住民との共生にも配慮された設計となっている。



図 6-10 岩盤タンク（堅坑部）⁸⁵

⁸⁵ 日本地下石油備蓄株式会社 串木野事業所（1994）. 串木野地下石油備蓄基地の完成とオイルインについて. 石油の開発と備蓄, 1994(8), 96.

（参照 2026.1.21） https://oilgas-info.jogmec.go.jp/res/projects/default_project/project/pdf/3/3117/199408_096a.pdf

(2) 水封方式の技術的原理と安全性

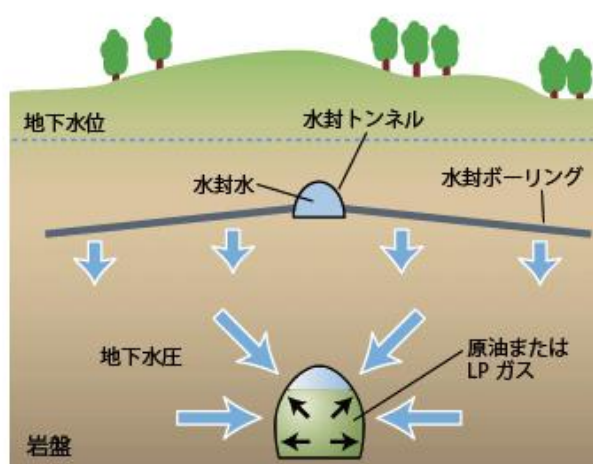
本施設の最大の特徴は、「水封式地下岩盤タンク方式」による原油の貯蔵である。この方式は、スウェーデンで開発された技術を日本の地質条件に適合させたものであり、地下水圧を利用して原油の漏洩を防止する仕組みとなっている(図 6-11)。

具体的には、タンク内の原油は地下水よりも比重が軽いため、常に水層の上位に分離した状態で貯蔵される。タンクの底部には湧水が自然に溜まり、一定水位を超えると自動的に排水される構造となっている。これにより、原油が岩盤の割れ目などから漏出することを防ぎ、環境への影響を最小限に抑えることが可能となっている。

また、タンク周辺には地下水位観測孔が多数設置されており、常時の水位監視が行われている。これにより、地下水圧の変動や漏洩の兆候を早期に把握し、迅速な対応が可能となる。地震時には自動的にバルブが閉鎖される仕組みも導入されており、災害時のリスク低減にも寄与している。



原油を貯めるための地下空洞
〈串木野国家石油備蓄基地(鹿児島県)〉
※写真提供/独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)



「水封式地下岩盤タンク方式」の概念図
※独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)資料を基に作成

図 6-11 水封方式の概念図⁸⁶

(3) DX・モニタリング技術の導入状況

本施設では、近年のデジタル技術の進展を受け、運用の高度化・効率化を目的とした DX への取り組みが進められている。

地下水位やタンク内圧、湧水量、温度、ガス濃度などの各種パラメータは、センサーを通じてリアルタイム計測され、施設内の中央計器室および JOGMEC 本部にて常時モニタリングされている。これにより、異常の兆候を早期に検知し、予防的な保守対応が可能となっている。

⁸⁶ 九州電力. “知っておきたいエネルギーのおはなし (8)”. エネコミ. 2016-12.

(参照 2026. 1.21) https://www.kyuden.co.jp/enecommi/study/study_08.html

(4) 地域連携と情報発信の取り組み

串木野基地では、地域住民や一般市民への情報発信にも積極的に取り組んでいる。その一環として、旧作業用トンネルを活用した「ちかび展示館（図 6-12）」が整備されており、地下備蓄の仕組みや石油の重要性、災害時の対応などについて、模型や映像を通じてわかりやすく紹介している。展示館は、全長約 780m のトンネル空間を活用しており、実際の岩盤構造や施工時の様子を体感できる貴重な施設である。特に、毎年開催される「ちかびフェスティバル」では、地下インフラへの理解を深めるための「岩盤トンネル見学バスツアー」が実施され、普段は立ち入ることのできない地下空間のスケールや堅牢性を市民が直接体感できる貴重な機会となっている。また、地域の安全を担う消防・警察・陸上自衛隊と連携した車両展示なども行われており、単なる施設開放にとどまらず、地域の防災機関と連携した「地域一体型のインフラ広報活動」として定着している。

また、施設では年 1 回の総合防災訓練を実施しており、地域の消防・警察・自治体と連携した実践的な訓練が行われている。2025 年 10 月にも最新の訓練が実施され、災害時の対応体制の確認と改善が図られた。



図 6-12 ちかび展示館の館内写真⁸⁷

(5) 今後の展望と課題

串木野基地は、我が国における地下岩盤備蓄の先駆的事例として、30 年近くにわたり安定した運用を続けている。今後は、老朽化設備の更新とともに、AI・IoT を活用したスマート保全体制の構築が求められる。

本施設のような地下空間の高度利用は、都市部における土地制約や災害リスクへの対応

⁸⁷ いちき串木野市総合観光サイト「みなと色」．“ちかび展示館（串木野国家石油備蓄基地）”（参照 2026.1.21） <https://ichiki-kushikino.com/experience/ちかび展示館（串木野国家石油備蓄基地）/>

策として、今後ますます重要性を増すと考えられる。今回の見学を通じて、地下空間の安全・環境・社会的受容性を高めるための技術的・制度的工夫を学ぶことができた。



図 6-13 視察状況

6.3 首都圏外郭放水路

6.3.1 調査概要

首都圏外郭放水路は、埼玉県の中川・綾瀬川流域における洪水被害を軽減するために地下 50m に整備された世界最大級の地下放水路である（図 6-14）。当該流域は利根川、江戸川、荒川などの大河川に囲まれた皿状の低平地であるとともに河川の勾配が非常に緩やかであることから、大雨の際に河川の水位が下がりにくく、これまでに多数の洪水被害が発生してきた。今回は国土交通省江戸川河川事務所が定期的に行っている見学会に参加する形で、地底探検ミュージアム龍 Q 館、調圧水槽、第 1 立坑を見学した。

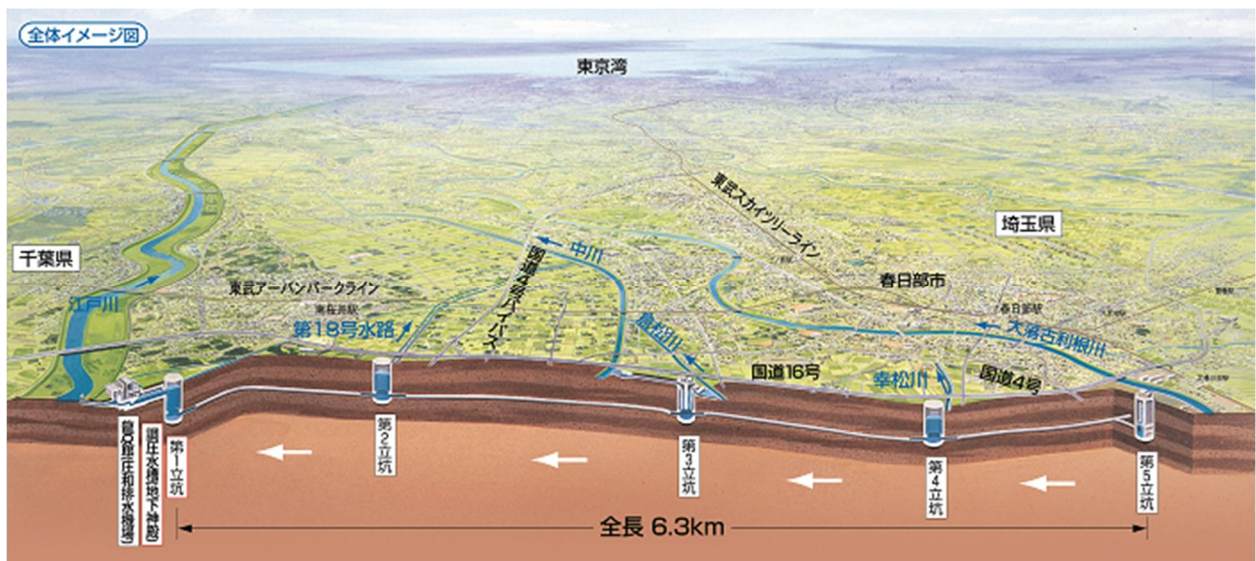


図 6-14 首都圏外郭放水路の概要⁸⁸

6.3.2 調査実施状況

日 時：2025 年 11 月 25 日（火）15:00～17:00

参 加 者：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第 2 部会
栗山部会長、田中副部会長、東中委員、保広委員、瀬瀬委員

受領資料：首都圏外郭放水路パンフレット

6.3.3 調査結果

(1) 事業計画

当該流域を水害から守るため、1980 年に中川・綾瀬川が総合治水対策特定河川として指定されるとともに国および東京都、埼玉県、茨城県および 3 都県の関係市区町で構成される「中川・綾瀬川流域総合治水対策協議会」が設立され、1983 年には「中川・綾瀬

⁸⁸ 国土交通省江戸川河川事務所：首都圏外郭放水路（参照 2025.12）

<https://www.ktr.mlit.go.jp/edogawa/gaikaku/>

川流域整備計画」が策定された。その後 1993 年には首都圏外郭放水路の工事が開始され、2002 年には第 3 立坑から江戸川までの部分通水、2010 年には完全通水が開始されている。総工費は約 2,300 億円で、試算によると部分通水開始から 2019 年までの約 18 年間で約 1,484 億円の浸水被害が軽減されている。

(2) 施設概要

施設は、水を地下に取り込む「立坑」、地下で水を送り込む「トンネル」、水の勢いを弱めてスムーズな排水を促す「調圧水槽」、水を江戸川へ吐き出す「ポンプ設備」などで構成される。これらの施設は大落古利根川から江戸川までを結ぶように分布しており、立坑から取り込まれた水はトンネルや調圧水槽を経てポンプ設備により江戸川に放水される。将来の地上の土地利用に影響を及ぼさない、地域の分断を防ぐ、用地取得に時間を要しないなどの理由から、通水は地下 50m の深さで行われている。外郭放水路に水が取り込まれる頻度は平均で約 7 回/年であり、2025 年には視察時点までに 2 回稼働しているものの江戸川への放水には至っていない。

(3) 立坑

第 1 から第 5 までの 5 カ所ある立坑は、いずれも深さが約 70m であり、トンネルで直列につながっている。内径は、第 1～3 立坑が 31.6m、第 4 立坑が 25.1m、第 5 立坑が 15.0m である。

このうち第 2～5 立坑では、付近の河川の水位が上昇して堤防に設けられた「越流堤」の高さを超えると、自然に洪水を取り込む仕組みになっている。その際に大きなゴミが流入しないよう、ゴミをスクリーンで捉えて除塵機で連続的にかき上げている。第 3 立坑と第 5 立坑では、水を斜めに流入させて壁に沿って流れ落とす渦流式ドロップシャフトを採用しており、水が垂直落下することによる底面の損傷を防いでいる。取り込まれた水は調圧水槽へ向かうが、調圧水槽まで到達しなかった水は第 3 立坑の残水処理ポンプで倉松川へ排出される。これは施設を空にしておくことで次の洪水の際により多くの水を取り込めるように準備しておくとともに水の腐敗を防ぐための仕組みであり、水量が多い場合には排水に 3 日間程度かかることもある。

第 1 立坑には他の立坑から取り込まれた水が送られ、立坑内の水位が調圧水槽の床面よりも高くなると調圧水槽へ水が送られる仕組みになっている（図 6-15）。この立坑は付近の河川からの流入施設を持っておらず、維持管理のための階段やリフトが設置されている。

第 1～5 立坑をつなぐトンネルは、全長約 6.3km、内径約 10m、地上からの深さ約 50m である。施工には密閉型泥水式シールド工法が採用され、掘削土は江戸川の堤防に再利用された。

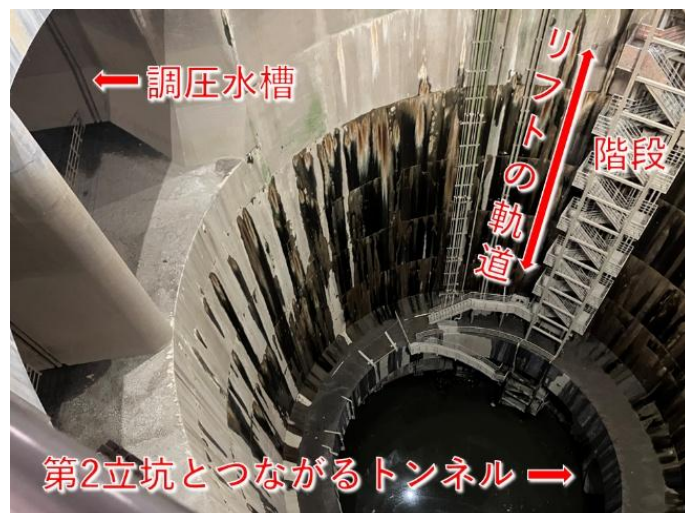


図 6-15 第 1 立坑

(4) 調圧水槽

調圧水槽は、長さ 177m、幅 78m、高さ 18m、地上からの深さ 22m の巨大水槽であり、そのスケールや光景から「地下神殿」とも呼ばれる（図 6-16）。流れてきた水の勢いを弱める、ポンプ運転を安定させる、緊急停止時に発生する急激な水圧の変化を調整する、などの役割を担っている。洪水の後には土砂が数 cm 程度堆積するため、天井からブルドーザーやコンテナをクレーンで搬入して清掃している。その際にブルドーザーが第 1 立坑へ転落しないように、車止めが設置されている。

水槽内には長さ 7m、幅 2m、高さ 18m、重さ 500t の柱が 59 本配置されており、天井を支えるとともにその自重で地下水圧の揚力による水槽の浮き上がりを防ぐ役割を担っている。渦の発生を抑制してスムーズに水を流すため、断面形状は真円ではなく小判型になっている。

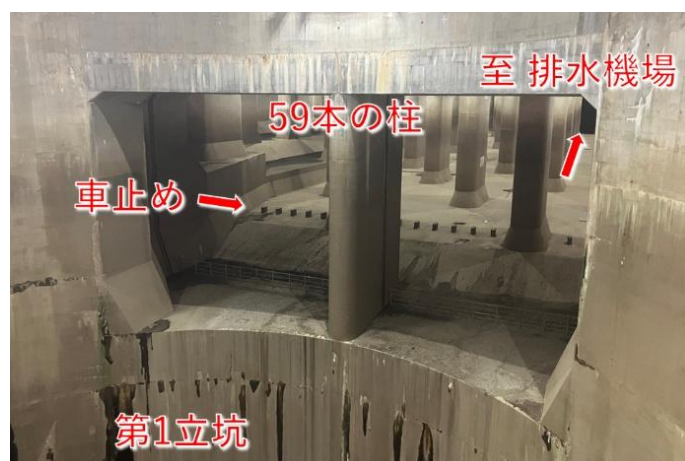


図 6-16 第 1 立坑から臨んだ調圧水槽

(5) 床和排水機場

排水機場には、調圧水槽から水を吸い上げるためのポンプ設備、水を排出するための排水樋管、設備の監視・制御を行う中央操作室などがある。

ポンプは1台当たりの排水能力が $50\text{m}^3/\text{s}$ 、揚程が14mの国内最大級のものであり、設置されている4台すべてのポンプをフル稼働させることによって1秒間に最大で 200m^3 の水を排出できる（図 6-17）。ポンプの稼働には、航空機用のガスタービンを改造したものを利用している。

排水樋管は首都圏外郭放水路から江戸川へ水を排水するための施設であり、幅 5.4m、高さ 4.2m の門が6基ある。江戸川からの逆流を防ぐ役割も担っている。

中央操作室には約30個のモニタが設置されており、各施設・河川に設置された56台のカメラや雨量・水位などが表示された情報表示盤を確認し、3台の端末でゲート開閉やポンプ施設の起動・停止などの操作を行う（図 6-18）。具体的には、カメラの向き・ズーム操作、各立坑の流入施設のスピーカーによる注意喚起の放送、非常用ボタンによるエンジン停止などが可能である。非常用ボタンはワンプッシュで使用でき、誤操作防止のために蓋を取り付けるといふ工夫がなされている。施設を操作したすべての情報は、飛行機のフライトレコーダーと同様に電子データと紙に記録される。平時は1人体制で操作するが、大雨の際には複数人体制となる。なお、運用にはAIを活用していないとのことであった。



図 6-17 ポンプ設備⁸⁸



図 6-18 中央操作室

(6) その他

外郭放水路には、洪水被害の軽減以外にもいくつかの役割がある。

1) 見学施設としての役割

床和排水機場には展示館「地底探検ミュージアム龍 Q 館」(埼玉県春日部市)が併設されており、定期的に見学会が開催されている(図 6-19)。見学の際には、一般公開されている「インフラガイド多言語音声アプリ」や「洪水疑似体験 AR アプリ」も活用できる。また、第 1 立坑と調圧水槽にはライブカメラが設置されており、内部の様子がインターネット上で閲覧可能である。なお、「龍 Q 館」という名称は、春日部市に伝わる「火伏の龍」伝説と「AQUA(水)」に因んで名づけられている。

2) 広場としての役割

調圧水槽の上には、サッカーやグラウンドゴルフなどができる多目的広場が整備されており、イベントの開催にも利用されている。

3) 取材・撮影場所としての役割

独特な景観を有する調圧水槽や中央操作室は、映画、テレビドラマ、雑誌、広告などの撮影にも活用されている。



図 6-19 龍 Q 館の展示ホール



図 6-20 視察状況（於：調圧水槽）

6.4 羽田クロノゲート

6.4.1 調査概要

物流大手のヤマトホールディングス株式会社羽田クロノゲートは、羽田空港に隣接し環状八号線に面する東京都大田区羽田旭町に立地する大規模物流倉庫である。ヤマトホールディングスは、本施設を羽田空港、東京港、横浜港、首都高速道路、東名高速道、JR 貨物（株）東京貨物ターミナル駅に近接する陸・海・空の結節点としており、大量の荷物を効率的に仕分けし配送している。仕分け作業などにデジタル技術を積極的に活用し DX を進めていることを視察した。

同施設は、ヤマト運輸の集荷・仕分け・出荷を担う物流の拠点としての役割だけでなく、同グループの物流の結節点であることを利用した高付加価値サービスを担っている。今回の見学では、施設の概要、および物流における大規模 DX 事例を視察し、同グループの特徴を活かした高付加価値サービスについて情報を得ることができた。以下に、調査実施状況、また調査結果として施設概要、DX 技術の活用、および高付加価値サービスの概要について示す。

6.4.2 調査実施状況

日 時：2025 年 12 月 4 日（木） 9:30～11:30

2025 年 12 月 9 日（火） 13:30～15:30

参 加 者：（一財）エンジニアリング協会 地下利用推進部会第 2 部会

12 月 4 日（木）

栗山部会長、東中委員、深澤委員、田委員、安井委員

12 月 9 日（火）

岩崎委員、田井委員、森委員、山田委員、保広委員、瀬瀬委員

事務局 中川主幹

受領資料：羽田クロノゲート見学パンフレット

6.4.3 調査結果

(1) 施設概要

羽田クロノゲートは、羽田空港近くの荏原製作所羽田工場の跡地に建設され 2014 年に開業したヤマトホールディングスの物流拠点である。同グループは、日本国内に羽田、厚木、中部、関西、沖縄に大規模物流拠点を設けており、羽田クロノゲートは同グループの旗艦拠点であり、空港、港湾、高速道路、鉄道に近接する陸・海・空の結節点となる物流拠点に適した立地である（図 6-21）。



図 6-21 羽田クロノゲート位置図

物流棟は7階建てであり、1階がトラックヤードとなっている。集荷、出荷を担うトラックは1階の搬出入口（着車バース）にて横付けでき、直接荷台から建物内に貨物を出し入れできる構造になっている。最大104台のトラックが入構可能である。2階には仕分け装置が設置されている。仕分けフロアは上下に区切られており、それぞれ全自動の大型主コンベア（クロスベルトソーター）が2式稼働する。集荷された荷物は1階でコンベアを用いて2階の仕分け装置に送られ、行き先ごとに仕分けされて1階に戻される。この過程は後述のとおり、ほぼ完全に自動化されている。なお、クール便は荷受け時点から別系統にて処理されており、仕分けも低温室で行われるため、いわゆるコールドチェーンが成り立っている。施設の3階から7階については、同施設が大規模結節点であることを活かし、後述の高付加価値サービスを行うフロアであるとの説明があった。

羽田クロノゲートでは、基本的に午前中は他ベースからの貨物受け入れ、午後はベースからの出庫に切り替えて業務が実施されている。各営業所での最終荷受けの時間が19:00前後であることから、羽田クロノゲートでは20:00前後が各営業所からの荷受けおよび仕分け作業のピークになることが多いとの説明であった。羽田クロノゲートからのトラックの出発は、21:00以降順次実施され、全国共通のシステムにて管理が行われる。しかし、全国一括管理ではなく、各ベースにて入出庫するトラックを分割管理することであった。トラックの管理システムは、仕分けシステムの管理と同様に、2階に設けられており、見学コースから内部を見ることができた。同施設では、今回参加した見学コースが常時開催されており、ヤマトホールディングスの歴史、仕分け設備および管理施設、同社の高付加価値サービスについて、見学し説明を受けられる。費用は無料で

あり、随時開催されているが事前予約が必要である。以下、見学において説明されたヤマトホールディングスの歴史、また近年注力している取り組みについて列記する。

1) ヤマトホールディングスの歴史について

- ・ 1918 年銀座で創業、当時全国で 200 台程度しかなかったトラックのうち 4 台を所有し、貸し切りで魚の運送や三越の輸送を行っていた。
- ・ 定期路線運輸（東京－横浜－小田原）を開始し、関東一円の定期路線（ヤマト便）に発展、複数荷主の貨物の一括輸送網を開始した。
- ・ 昭和 20 年代までに、海外輸送、美術品輸送なども開始、マッカーサーの米国帰国は、ヤマトが実施した。
- ・ クロネコマークは、同業当時の社員のご家族の落書きを元に 1957 年に誕生したもので、「丁寧な荷扱い」の象徴として定着している。
- ・ 1976 年に宅配サービスを開始 最初は電話集荷にて開始し、初日の取り扱い貨物数は 11 個であった。当時、個人客の貨物輸送は、郵便と国鉄のみが選択肢であったところに風穴を開けた。1989 年公開の映画「魔女の宅急便」をスポンサーした頃には、全国的に「宅急便」の名称が認知されている。

2) 近年注力している取り組みについて

- ・ 注力している不在連絡票の右肩のギザギザは猫の耳をモチーフにしているとともに、触覚にて区別できるよう、目の不自由な人にも識別が容易なデザインとするなど、ユニバーサルデザインを心がけている。
- ・ 現在では気候変動対策を積極的に行っている。（過疎エリアでの路線バスの座席利用による荷物輸送、大型連結トラックの利用や、複数企業での共同輸送、EV トラックの積極的導入など）
- ・ 貨物専用機を 3 機所有しており、羽田を拠点に新千歳、北九州、那覇間を運航し、生鮮物などをメインに輸送するなど、利便性の向上に努めている。

(2) DX 活用状況

羽田クロノゲートでは昼夜を問わず 1 時間に最大 48,000 個（大型トラック 75 台分）の荷物を仕分けることができるような設備が設けられている。

仕分けの流れを以下に示す。

- 1) 着車バースに到着したトラックから集配荷物がベルトコンベヤーに載せられ 2 階の仕分け作業場に送られる。荷物には荷受け情報（いつどこで荷受けしてどこに届けるのか、どのような荷物なのか）を識別できる番号が付与されている。
 - ・ ベルトコンベヤーの流れにおいて、スキャナーが荷受け情報を読み取る。
- 2) 荷物を識別したあと、仕分け作業用のクロスベルトソーター（図 6-22）に荷物を送り込む。

- ・ クロスベルトソーターは時速 9.7km でフロア内を循環している。
 - ・ クロスベルトソーターには 1,336 枚のセルと呼ばれるパレットが並んでいる。
 - ・ セルはメインコンベヤーの向きに直交する小型ベルトコンベヤーである。
 - ・ 荷受け情報はセルに引き継がれる。
 - ・ 1つのセルに1つの荷物が載る。
 - ・ 荷物がスムーズにセルに載せられるよう、荷物を送り込むコンベヤー終端部はクロスベルトソーターに斜行しており、クロスベルトソーターの速度に合わせて、荷物を送り込む仕組みになっている。
- 3) 出荷先に応じて、荷物をクロスベルトソーターから降ろして仕分けする。
- ・ 荷受け情報に対応した箇所でセルのベルトが駆動して、荷物をクロスベルトソーターから出荷先に応じたベルトコンベヤーに移動させる。
 - ・ クロスベルトソーターと仕分け先には高低差がないため、荷物に衝撃を与えることはない。

クロスベルトソーターは延長 1,070m、2 系統で運用されている。通常時の荷物量であれば 1 系統で十分にさばける能力を持っており、仕分けを継続しつつ、片方の系統を停止させられるため、随時メンテナンスが可能である。



図 6-22 クロスベルトソーター ⁸⁹

仕分け作業は全自動化されている。機器の稼働状況を確認するため、各所にカメラが設置されており、荷物の仕分け状況は集中管理室（図 6-23）で監視されている。何らかの異常を検知した場合にはモニタに異常箇所が示され、近くにいる担当者に対応の指示が送られるという体制になっている。

⁸⁹ ヤマトホールディングス株式会社 WEB 羽田クロノゲート, (参照 2025.12)

<https://www.yamato-hd.co.jp/facilities/haneda-chronogate/>,



図 6-23 集中管理室 ⁸⁹

(3) 高付加価値サービスの概要

ヤマトホールディングスでは大規模な物流拠点を最大限に活用し、単なる荷物輸送だけではなく、以下のような高付加価値サービスを実施していることの紹介があった。以下に箇条書きにて示す。

- ・ 家電修理：家庭で使用している家電が故障した場合に一般的にはメーカー工場で修理が行われるが、羽田クロノゲート内で修理サービスを提供している。流通パスを減らすことにより、修理期間を短くできることが利点である。
- ・ 医療機器ローナー支援：病院で使用される手術用のメスなどの医療器材は高価かつ種類が多く、使用後には洗浄など入念なメンテナンスが必要であるため、各医療施設で管理し保有することは大きなコストが生じている。ヤマトホールディングスではこれらの保管場所と洗浄設備を羽田クロノゲートに設けており、全国の病院に必要な機材を配送し、使用後の洗浄などのメンテナンスサービスを行っている。
- ・ オンデマンドプリント：少量や特殊な印刷物のプリントサービスである。同種の業態と比べて輸送パスが効率化されるため、納期を早めることができる。
- ・ FRAPS (Free Rack Auto Pick System)：様々な小口部品を高頻度で輸送する必要がある場合、ヤマト運輸にて部品を集約し、注文（バーコード管理）に合わせて、ピッキングして出荷するサービスを提供している。集中管理を物流と近接させることでコストを圧縮できる。KDDI が au ショップの機器管理に利用⁹⁰している。

⁹⁰ ヤマトホールディングス株式会社プレスリリース、(参照 2025.12)

https://www.yamato-hd.co.jp/news/h27/h27_94_01news.html

- ・ 入管代行：海外からの貨物などの搬入に際して、輸入通関手続き代行を行っている。
- ・ 印鑑など製造支援：機械による自動印鑑製造をクロノゲートで実施しており、配送と直結した高効率の製造をオンデマンドで実施できる。

(4) 所感

物流の大規模結節点を保有し運用することによって、本来の物流業務に加えて、大きな付加価値をつけたサービスを提供できていることを知ることができた、直接的なユーザーへのアクセスを確保している同社ならではのサービスであると感じ、オンデマンドに対応できる体制構築は、DX と物理的なサービスとの結合の好事例であると感じた。

見学コースの最後に設けられた部屋では、一面に標語が示してあり、ヤマトホールディングスの掲げる目標や社会奉仕活動が紹介されていた。カーボンニュートラルを含め社会に貢献する企業であることを改めて認識するとともに、宅急便、クール宅急便の運用と発展が、弛まぬ努力の結果であると感じた。また直接消費者と接触する同社の企業価値を高める活動として見学コースなど広報の重要性を認識できた。



(左：2025 年 12 月 4 日、右：2025 年 12 月 9 日)

図 6-24 視察状況

7. 結論

第2部会では「AIを含むデジタル技術を活用した地下インフラの建設・運用に関する調査研究」というテーマに対して、地下インフラの現状を調査し、その中でAIなどの活用によってDXがどのように進んでいるかという基礎調査の観点で研究成果をまとめた。本年度の活動のうち調査研究に関する報告は以下の第2章から第5章となっている。

第2章： 地下インフラの現状と課題

第3章： デジタル技術の概要

第4章： 地下インフラ建設におけるAIの活用

第5章： デジタル技術の活用事例

巷にはAI、DXという言葉が溢れており、関連技術は日進月歩であるものの、果たしてこのテーマを扱った我々委員もその何たるかを理解できたとは考えていないが、現状技術を可能な限り調べまとめている。第2章では地下インフラに用いられているデジタル技術、第3章ではデジタル技術の歴史・変遷や基本事項、第4章では建設における様々なシーンで適用されている技術の紹介、第5章ではトラブルを含む事例という、それぞれの切り口によってまとめることで、委員自身だけでなく読者も学べる内容となっている。

なお本年度の報文の目次構成は、生成AIに対して活動テーマなどの条件を与えることによって得られたものを基本として、各委員が執筆を進める中で内容に即して節・項を整えたものである。予備情報の整理、方針策定、意見調整などの活動開始時の煩わしい部分をAIが担ってくれたことにより、非常に円滑に活動が進んだと感じている。AIをテーマに扱っている以上、当然の取組みとも言えるが、初歩的なレベルでの活用方法によって人間の作業が軽減できたものと自負している。

2025年10月に高市内閣が発足した。高市内閣の抱える外国人労働者問題の背景には労働者不足があると言われているが、今後AI、DXによる効率化の波があらゆる業態に押し寄せてくるものと考えられる。これにより労働者不足の解消につながる可能性もあるが、一方で人間とAIの共存問題が新たに生まれてくることも懸念されている。このような問題についても今後取り上げていきたい。

2025年度は、2026年度の導入としての位置づけでもあり、地下インフラの現状やAI、DXの基本、事例などを調査した。2026年度では本年度の調査結果を踏まえて、地下インフラの“建設”の中でのAI、DXに視野を広げ、またDX技術の導入時の課題や解決策を分析し、最終的には未来展望として仮想空間だけでなく日常生活の中でのフィジカルAIや自律的なAIエージェントなどの新たな技術の導入の可能性にまで言及していく予定である。