

# White Paper: 成長するインフラ

高橋 悠太<sup>1\*</sup>・木暮 洋介<sup>2</sup>・菊池 恵和<sup>3</sup>・吉田 龍人<sup>1\*\*</sup>・藤井 純一郎<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術創発研究所 AI解析研究室  
(〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8 CSタワー)

E-mail\*: [yt-takahashi@yachiyo-eng.co.jp](mailto:yt-takahashi@yachiyo-eng.co.jp) (Corresponding Author)

\*\*\*: [ry-yoshida@yachiyo-eng.co.jp](mailto:ry-yoshida@yachiyo-eng.co.jp)

\*\*\*: [jn-fujii@yachiyo-eng.co.jp](mailto:jn-fujii@yachiyo-eng.co.jp)

<sup>2</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術創発研究所 シナリオ解析研究室

E-mail: [ys-kogure@yachiyo-eng.co.jp](mailto:ys-kogure@yachiyo-eng.co.jp)

<sup>3</sup>正会員 八千代エンジニアリング株式会社 技術創発研究所 社会資本空間デジタル化研究室

E-mail: [ys-kikuchi@yachiyo-eng.co.jp](mailto:ys-kikuchi@yachiyo-eng.co.jp)

本 White Paper (以下、白書) は、従来までの土木分野におけるインフラに対する考えを改め、現在の技術革新を基に捉えなおすことで次世代のインフラに対する考え方を検討し、これらに求められる技術やビジョンの整理紹介を目的とする。本白書が土木インフラ関係者、あるいは最先端技術を持って土木インフラ分野への参画を考える経営者・技術者を対象とする。現在インフラへ適用されている技術水準、適用が進められる社会課題、将来社会が到達すべきビジョンを示し、Well-being な社会実現への貢献を目指す。

**Key Words:** *Digital Twin, Growing up Infrastructure, Faster Society, Paradigm Shift for Infrastructure*

## 第0章 はじめに

本来、白書は政府の発行する「政策提案書」である。民間企業が発行する場合、潜在的な顧客を対象とした現有技術の適用事例紹介、あるいは社会課題への適用提案、他社事例を含め整理した報告書の体裁をとる。本白書はこれらの体裁を受けつつ、シンクタンクなどの研究機関が発行する体裁をとる。すなわち技術テーマにおける「現状分析」「課題対応」「将来構想」と3つの時間軸で構成する。現状分析(第1章)は現在の政府・民間がどのようにインフラを捉えなおし、DX・GX・SXに対応しているかを整理する。既存インフラに対し、AI技術、UAVやドローンを含めたセンシング、ビッグデータ分析などが現状どのように適用されているか、公開情報を中心として整理する。課題対応(第2章)は官民間問わずインフラ管理に対しての課題を整理し、どのような技術開発や規制緩和が進められているかを示す。将来構想(第3章)では現状と課題を基に、技術的特異点と予

測される20~30年後の社会における「成長するインフラ」を例示し、そのパラダイムシフトに必要な過程を構想する。本章では特にすべての時間軸に通底する国際的な動向や国内の取り組みの中でも、データ流通に関連する取り組み・技術概念について整理し、高速化する社会と求められる成長するインフラ、すなわちインフラのデジタルツインを定義する。成長するインフラの概念が時間と共に拡大し、規制と技術が相克する中で、求められる組織の対応を整理することで、高速化する社会で経営者・技術者が生存するために何が求められるかを示す。

現代社会はVUCA(Volatility: 変動性, Uncertainty: 不確実性, Complexity: 複雑性, Ambiguity: 曖昧性)の時代と考えられている。以前よりこれら時代の特性は存在していたが、デジタル技術の発展と共に国境を越えた問題がデータとして顕在化し、インターネット技術によって瞬時に拡散することで、より顕著になったと考えられる。社会の変化がこれら情報の高速移動に対応しようとする、社会変化自体が高速化する。高速で移動する物体が外乱により想定とは異なる軌道を描くことがあるのは、力学

的には自明である。そこから類推するに、例えばインフラの開発破棄を行う意志決定と合意形成においては、所要時間中に社会情勢が変化し、インフラが本来の目的を達成できなくなることを、これまで以上に考慮にいれなくてはならない。いま高速で変化しつつある社会は、情報・データの収集・蓄積・移動・活用によってさらに高速化し、土木分野における従来の観念を置き去りにする。そして、対応できなかった土木技術者を、新しい技術と情報を持つ非土木技術者が駆逐することが現実的に生じうる。すなわち、高速化する社会では、

- ・ データが高速大量に収集・蓄積・移動・活用される DFFT (Data Free Flow with Trust) が実現する。
- ・ そのデータや情報に基づき社会情勢やニーズが多様となり、また従来の対応速度を超えて変化し、さらにデータの移動は高速化する。
- ・ そのためインフラの必要根拠となる将来予測は、従来以上に変動し、不確実な、多様複雑で曖昧な社会を将来に外挿して行う必要が出てくる。

本稿では、これらを高速化する社会の定義とする。

高速化する社会において、その未来を現在の情報のみで確定的に議論することは困難であるが、大きな潮流を捉えることで方向性を議論することはできる。そこで本章では、インフラが高速化する社会に対応するために必要となる機能や特性、すなわちデジタルツインについて、国内外の法規制や政府の取り組みを整理することで、世界の潮流と方向性を理解することを目指す。

#### ・ 国外のデータ取り扱い規制について

##### ・ 米国 NIST CyberSecurity Framework<sup>(01)</sup>

NIST SP800 番台の上位概念として、元来重要インフラの運用者を対象としたサイバーセキュリティ対策についての枠組みを示したものであったが、改定を経て業種を問わず管理全体の指針を示す文書となった。2014年に策定され、2018年の改定ではサプライチェーンのリスク管理が追加された。サイバーアタックに対し、識別、防御、検知、対応、復旧の段階を考慮し、攻撃を受けた後の復旧までを言及している点が挙げられる。デジタルツインないし Cyber Physical System (CPS) についても、セキュリティの対象とされている。IoT の進展とともに拡大するデジタルツインについて、確実なセキュリティが求められるため、本文書に準拠しない企業は米国はもとより、データを連携する我が国の公共事業に関わる企業・事業においても排除される可能性を有している。我が国でも経済産業省が CFS と対応したサイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク (CPFS)<sup>(02), (03)</sup> を 2019 年に提唱している。

##### ・ 米国 NIST SP 800-53 Rev.5 / B<sup>(04,05)</sup>

米国は機密情報を Classified Information (CI)、機密以外の重要情報を Controlled Unclassified Information (CUI) として定義し、本規定は国立標準技術研究所 (NIST) により示された CI についての米国政府内情報システムについての技術適合規格ガイドラインとなる。政府内に対しては強制力を持つが、米国政府は民間組織においても活用を推奨している。2006 年 3 月に発行された FIPS Publication 200<sup>(06)</sup> (連邦政府の情報および連邦政府の情報システムに対する最低限のセキュリティ要求事項) は連邦標準規格として強制力を持つ。17 のセキュリティ関連分野にわたり規定しているが、具体的なセキュリティ管理策を選択・特定する指針は記載されておらず、具体的な指針を示す文書として本文書が発行された。個人情報を含むデータについては、プライバシー保護の根拠となる OECD による Fair Information Practice Principles<sup>(07)</sup> (個人情報の公正な運用についての原則) に基づく。

Rev.5 が 2020 年に発表され、汎用コンピュータシステム・サイバーフィジカルシステム (CPS)・クラウド・モバイルシステム・産業/プロセス制御システム・IoT デバイスが保護対象とされた。ISO/IEC27001 や CSF 等の規格/ガイドラインとの整合もマッピング等にて示されている。本版から政府を主語とする記載が消え、民間組織の活用も想定・推奨されている。NIST SP 800-53 B はベースラインを提示している。管理策ベースラインは、採用組織が条件と環境に応じてシステムの影響レベル (低・中・高) ごとに 3 つのセキュリティ管理策を示し、取り決める際のベースラインを提示する目的で定められた。NIST SP 800-53 の中から選ばれた管理策の一覧としたもので、導入の際の指針となることを期待されている<sup>(08)</sup>。

##### ・ 米国 NIST SP 800-171<sup>(09)</sup>

本規格は CUI 保護のため、取り扱い民間企業への遵守事項とし、読者としてシステム開発ライフサイクル管理の責任者 (例: プログラム管理者, ミッション・ビジネスオーナー, 情報オーナー・担当者, システム設計者と開発者, システム・セキュリティ技術者, システムインテグレーターなど), 取得または調達責任者 (例: 契約担当者など), システム・セキュリティ・リスク管理および監督の責任者 (例: 許可責任者, 最高情報責任者, 最高情報セキュリティ責任者, システムオーナー, 情報セキュリティ管理者など), セキュリティ評価・監視責任者 (例: 監査者, システム評価者, アセッサ (アプレイヤー), 独立検証者・認証者, 分析者など) を対象としている。主に責任者としながらも職種が広いため、該当しないことが難しいとも指摘されている<sup>(10)</sup>。

本規格に準拠しない企業とその製品やサービスは、グローバルサプライチェーンから排除される可能性を有し

ている<sup>011)</sup>。米国においては電力やガスなどの重要インフラ産業、機械、農業など他の産業へも拡大するとされている。EU ないし英国においてもエネルギー、交通、銀行、金融、ヘルスケア、水道、デジタルの7分野に該当する企業が欧州または国際的に受け入れられている標準・仕様の導入推奨を求める NIS Directive 法<sup>012)</sup>が制定され、2018年から適用・準拠されている。我が国においても2023年から防衛省および防衛装備庁の調達において5年の移行期間において、NIST SP800-171 に準ずることを調達先に求めるとされている。今後防衛産業のみならず重要インフラやその他産業への適用が考えられる。導入の際、自組織のCUIを定義し、要求される水準と現状とのギャップを認識した上での対策が求められる。対策の立案実装するためにも長期間の準備を要することから、経営層にはNIST SP 800-171 への対応をビジネス戦略や経営リスク、事業継続計画の中に組み込むという役割が求められる。例えば、河川分野においてIoT水位計へのアクセス権限を外部から掌握することで、偽のデータに書き換える。偽データを基にダムの放流や住民避難の判断を誤らせることで、テロを行うということも可能になる。この時、通常アクセス権限の管理以外にも機器のバックドアを恒常的に調査し対策を行うとともに、被害を受けた場合の対応策と復旧策の運用についても整理する必要が出てくる。

・EU General Data Protection Regulation (GDPR)<sup>013)</sup>

EU 域内における個人情報保護とその取扱いについての法令であり、2018年に施行された。原則として、EU域外への個人情報の持ち出しを禁じている。ただし、EUによる十分性認定を受けた国家の場合、標準契約条項等の措置を取らなくとも個人データの移転が民間業者においても可能になる。ただし、さらに第三国への転送を行う場合、その十分性認定を受けていない場合、標準契約条項等の措置を必要とする点に留意する。

・EU AI 規制法案<sup>014)</sup>

EU が2021年AI規制に関する法案 (REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL LAYING DOWN HARMONISED RULES ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ARTIFICIAL INTELLIGENCE ACT) AND AMENDING CERTAIN UNION LEGISLATIVE ACTS) を発表した。許容できないリスクのあるAIはEUにおけるシステムへの採用やサービス提供を禁止し、その次のレベルであるハイリスクAIには品質管理義務やAI提供者・利用者に義務が課される。GDPRとの兼ね合いから、EUで個人情報を含めて学習したAIモデルを日本などの域外で使用する場合、規制対象になる可能性が考えられる。ソースコードの開示要求なども挙げられるが、条件付き

での対応が検討されている。ハイリスク AI の対象には人の生態識別はもとより重要なインフラの管理・運営分野で利用される場合が例示されている<sup>015),016)</sup>。

・我が国のデータ取り扱い規制について

・サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク(経済産業省)<sup>02),03)</sup>

米国のCFSに対応し、また Information Security Management System (ISMS, 規格はISO27001) についても包含する形で経済産業省が2019年に提唱している。Society 5.0 において実現する社会をフォアキャスト的に示し、CPSが実現していく社会において、サイバー攻撃などからどのように社会を守るか、具体例や各国規制の対応関係等を明らかにしつつ整理している。例えば、重要インフラのデジタルツインなどサイバー空間へのサイバー攻撃によりフィジカル空間に影響を与える場合の他に、IoT機器を奪取・改ざんして誤ったデータを送信し、サイバー空間に攻撃を加える場合等が考慮されている。サプライチェーン・サイバーセキュリティ・コンソーシアム(SC3)を設立<sup>017)</sup>し、産業界全体での対策に乗り出している(図0-1)。



図0-1 SC3

・改正著作権法

2018年にIoT、ビッグデータ、AIなどに用いる場合、鑑賞等の目的で利用しない(例えば、学習用途に限定)などの一定の場合において、著作物の利用を認める規定が盛り込まれた。また2020年改定において、著作物(画像や音)の写り込みについての制限が、正当な範囲内であれば利用可能に変更となった。これは巡視や点検の際、写り込みがあったとしても、その権利を侵害しない範囲であれば学習に使用することは制限を受けない可能性を示す。他にも、AIの学習に用いるデータの収集、開発を行う第三者への学習データの提供行為や、ソースコードのリバースエンジニアリング自体、画像から3DCGを作成するなどは著作権の権利制限対象となる。ただし、例えば画像から3DCGなどを作成する場合、「当該写真などの著作物の表現上の本質的特徴を感得することができる態様でCG映像が作成されることとなる場合には、当該CG映像に含まれる写真などの著作物について、そ

の視聴等を通じて、視聴者等の知的・精神的欲求を満たすという効用を得ることに向けた利用がされることが想定されることから、当該写真などの著作物の当該CG映像への複製行為は権利制限の対象とならないものと考えられる。」<sup>018)</sup>とされる。

#### ・改正個人情報保護法

2017年の改正により、個人情報に対し特定の個人が識別できないよう、元となった個人情報を復元できないよう加工したものを匿名加工情報とし、個人情報として扱われない。そのため、本人の同意不要で第三者へのデータ提供が可能となる。ただし、完全に個人を識別できず、復元できない形に加工することに限界がある点が指摘されている。2020年の改正により、仮名加工情報が新設され、他の情報と照合しない限り識別できない、かつ容易に照合できないよう個人情報を加工したデータであれば、個人情報として扱わないことが可能になった。また、2021年個人情報保護委員会により、複数人の個人情報を学習データに使用して生成したAIの持つパラメータはそれら個人の対応関係が排斥される限り、個人情報に該当しないとされているなど、Federated Learning等の適用を制限しないように設計されている<sup>019)</sup>。

#### ・NFTホワイトペーパー（自由民主党）<sup>020)</sup>

2022年3月に提出され、Web3.0時代を見据えた国家戦略の策定・推進体制の構築、NFTビジネス発展に必要な施策、コンテンツホルダーの権利保護に必要な施策、利用者保護に必要な施策、ブロックチェーンエコシステムの健全な育成に必要な施策、社会的法益の保護に必要な施策の6視点に関し、それぞれ細目を設定し提言を行っている。Web3.0の対応窓口として大臣を設置する、自社のガバナンストークンについては保有しているのみの場合は非課税とする、規制によりイノベーションを萎縮させないことを意識する等、具体的な提言が多いことが分かる。発表内容に対し、識者団体より海外・民間人材の活用と取引を目的としない他社のガバナンストークンを原則非課税とする、政策スタンスを事前規制型から事後監視型へ転換することなどが新たに提言されている。これを取り入れ、暗号資産に関する税制や上場審査、会計の課題、DAOの環境整備などについて、新たに反映したホワイトペーパーを作成するとされている。

#### ・アナリシス

これまでの情報を整理し、高速化する社会における成長するインフラについて再定義する。まず、高速化する社会に対応してインフラそのものが変化することは容易ではないと考えられる。このことから、高速化する社会における成長するインフラは、デジタルツイン上にある

インフラモデルの解像度が上がることによって、その便益をより高められるようになることで実現する。

従来、物理空間上のインフラと計測されたデータは少量・低次元・低解像度であればデジタルツインとは定義されなかった。ただし、前提である少量・低次元・低解像度の基準となる課題に規制による基準がある場合、この解消によってデジタルツインが成立しうる。すなわちデジタルツインが物理空間とデジタル空間との双子であるならば、インフラに関するデータを計測し、両空間を紐づけする限り、広義のデジタルツインは既に存在しているといえる。一方で、狭義のデジタルツインとは、現在さまざまな取り組みが進められている局所的・限定的な高解像度のデジタルツインであり、現在我々に認識されつつあるとすると、この両者の間に、現時点で最も実現可能性の高い「実用的な」インフラのデジタルツインがあるといえる。この可能性は技術進歩（時間経過）や規制緩和と共に広義のデジタルツインに移行していくと考えられる。そのため、デジタルツインの概念とその便益は、新しい概念を作り出す段階ではなく個々が発展・活用する段階になりつつあるといえる。すなわち、ファーストペンギンが多大なリスクを取って挑戦して始まる概念形成する段階ではなく、小さなリスクがあっても果敢に挑戦する余力・意志のある2線級のフォロワーが果実を得る段階に移りつつあるといえ、各国もその環境づくりに尽力している。したがって、最良のデジタルツインとエコシステムを選択するために「選択しない」を選択し続ける場合、また、リスクを取って先行した組織が利益の最大化に失敗した場合、今後は後発の大組織や大資本に追随・淘汰される可能性が高く、リスクのない投資では間に合わなくなる段階に来ているとも考えられる。データ収集と分析、基盤となる技術への投資、あるいはその意志決定やアイデアを有する組織がデジタルツイン時代で利益を最大化できると考えられる。

イノベーションを起こす組織の誕生を促進する社会環境には、収集したデータが活用できるエコシステムを形成可能な規制を設けること、同時に規制の総量自体を減少させるということが求められる。例えば、AIの学習データに関わる著作権に関して、学習に用いるデータについては直接的な被害が生じない限り自由な学習が認められるなど、我が国は世界的にも先進的な規制を持つ。このように、権利を適切に制限しながらもイノベーションを阻害しない規制を設計することは、技術の急速な進歩に対応しながらも不断のイノベーションが求められる高速化する社会において、規制と衝突するコストを下げるために重要と考えられる。しかし、一部の規制緩和にとどまるのみで、実態として新技術の導入や他領域・他地域への適用などが行われていないという課題も存在する。例えば、5年に1度の目視点検を義務付けた橋梁定

期点検は 2014 年から始まり、2019 年から目視に代わる技術の適用が認められることとなった。2020 年 12 月には原則として目視点検を将来的に廃止することとなったが、2023 年 1 月段階においても国交省様式の点検調書は 3D モデルへの対応やセンサーによる目視点検なしでの代替を想定しておらず、実態として途上にある。加えて、センサーデータによって代替する場合、従来までの 5 年に 1 度とする頻度を超える点検が可能となる。これを利用した点検期間の弾力的な変更などは検討されておらず、規制緩和を生かした制度設計への再整備が今後求められていくと考えられる。

規制の総量自体を削減することも同様に必要となる。急速な技術進歩はさまざまな縦割りや複数の分野を跨いで課題を解決することを通して進み、社会実装が目指されることとなる。これらイノベーションの種となる取り組みは同時多発的に発生するため、イノベーションの促進・継続を求めるならば規制との衝突を確率的に減らせるよう、総量の増加を抑える・減らすということが求められる。我が国では許認可の数は 2002 年より 2017 年で 1.5 倍に増加しているとされる<sup>021)</sup>。イノベーションの発生が確率的であることは自明であり、特定分野に補助金を付与する、あるいは規制を設定・強化するのみでイノベーションを持続させることは当たる宝くじのみを買い続けるということであり、現実的でない。そのため、社会として必要な規制措置を最小限として不断の見直しを続け、規制に阻まれない可能性を高め続ける環境を設定することは、インフラのデジタルツインという公共性の高い空間を活用する上で、極めて重要な取り組みになる。

#### ・ChatGPT を中心とした LLM についての補足

本白書を執筆中の 2022 年 11 月 OpenAI 社から ChatGPT が発表され、急速に LLM を中心とした技術が一般普及するところとなった。本来、本技術は各章で取り扱う単なる技術に過ぎないが、各国で ChatGPT の取り扱いについて大きな反響を呼び、さまざまな対応がとられていることから、急遽現段階での情報を整理し、本章に記載することとした。急速に自体が変化する中で整理した情報であるため、現段階での最新情報と異なる点があることに留意願う。

GPT(Generative Pre-trained Transformer)シリーズは 1 が 2018 年、2 が 2019 年と出るなど発展が著しく、2020 年に発表された GPT-3 はその性能から人が書いた文章と見分けがつかないため、当初危険性が訴えられるなどした。改良型の GPT-3.5 をベースとして ChatGPT が発表され、API を利用することで誰でも安価な費用で利用できることとなった。さらなる改良型である GPT-4 が発表され、同種の技術(StableLM, Prometheus)も続々発表されるなど、著しい進歩は未だ続いている。

LLM およびその API としての対話生成型 AI インターフェースの進歩に対し、各国が規制を含む様々な対応を示している。好意的な対応もあり、また規制方針が示された後、調査や対応策の整備と共に対応が変更されることもある。例えば 2023 年 3 月、イタリアでは ChatGPT が個人情報違法に収集している恐れがあるとして、データ保護当局が使用規制方針を示したが、同年 4 月末開発元の OpenAI が改善策を示したとして解除した<sup>022)</sup>。英国では 2023 年 4 月に生成 AI などに対し、情報保護当局が 8 つの留意点を示した。GDPR を遵守し、データ管理者が根拠とする法を明確にした上で、リスク評価を求めることで法的責任の明確化を試みている<sup>023)</sup>。米国でも規制についてのパブリックコメントが実施された<sup>024)</sup>。

我が国では DFFT の観点からこれらの LLM ないし Foundation Model, そして対話生成型 AI インターフェースの利用に対し、国家として規制するだけでなく、情報の取り扱いに関する整備が進めば、イノベーションを阻害しないよう活用を行うとしている。OpenAI の CEO と岸田総理が G7 首脳として初めて面会し<sup>025)</sup>、日本語データの学習強化をはじめとしたさまざまな提案が CEO からなされている。ただし、地方においては 2023 年 4 月神奈川県横須賀市が試験運用を始める一方、同年同月鳥取県は県庁業務での使用を禁止している<sup>026)</sup>。

各国の対応を鑑みるに、個人情報保護についての懸念から規制が検討されている。民間においても企業内での利用方針が整備されるなどしており、今後利用者が増加し課題が解決される過程で、規制は徐々に最適化されていくと考えられる。この試行過程において、大局的視点ではイノベーションを阻害しない最適な規制とエコシステムの形成に向けての様々な変化に注意し、局所的な視点としては試行を繰り返すことで知見を蓄積することが求められる。したがって、ChatGPT の出現は要素技術として本章で示した方向性についてはおおむね誤っておらず、むしろその加速が期待・懸念されると考えられる。

#### ・提言

社会環境に合わせて、あるいは先行して、企業を含む組織や既存システムの近代化は成長するインフラの果実を利用・最大化するために必要となる。ここでは、DAO 概念をインフラ管理に適用する場合について考える。例えば地方自治体が管理する 1 橋梁について DAO を設立し、自治体予算を根拠にガバナンストークン・通常トークンを発行する。ガバナンストークンは周辺住民や主な利用者に対して譲渡・販売する。通常トークンはガバナンストークンの保有対象者以外にも販売し、その収益を維持管理費に充てるとする。その他トークン保有者によって運営される DAO 内で補修や廃棄などについて議論・発注し、必要に応じてトークンの発行や売買を

実施する。ガバナンストークンは DAO を運営する上で優先権を与える、トークンに付随する評決権の重みを変更するなどして、現実世界においてより密接な関係者の意見を取り入れながら、通常トークンとの発行数との兼ね合いを考慮して 1 橋梁当たりの経済価値を直接評価することで、その価値を高めることができると考えられる。このようなテクノロジーを活用した新たな土木産業は十分な余地を有している。

道路や橋梁、ダムや堤防などのインフラ性能が高まるとともに人類社会は発展してきた。より多くの人々が受益者となるように計画し、B/C の良いインフラを建設することで、長期間そのインフラから便益を享受できた。現在、多様な価値観を持ち、目まぐるしく変化し、その対応を求める高速化する社会は、未来において、VUCA の特性がさらに激しくなる。この時、従来のインフラ建設・管理は本来果たすべき役割に加え、自らの状態についてデータを示し、価値を高め、管理・修繕費用を捻出することさえ求められる。データを収集 (Digitization) し、分析 (Digitalization) し、活用 (Digital transformation) するエコシステムを構築するには、まずデータを集める意義を共有し、例外なくすべてをデータ化すること、そのデータを分析活用可能とするデジタルツインな手段について試行し続けること、データとその分析結果を社会で共有し、イノベーションによって活用先を作り出し続けることが求められる。このサイクルは従来の土木技術のみならず、他分野との共同によって高速化すると考えられる。

データと共に成長するインフラは未来社会において、土木技術者とデータサイエンティストの垣根を越えて CPS 上で管理される。この時、より多くのデータを処理し、付加価値を高めるプレイヤーは、デジタルツインを構築活用するサイクルに習熟する組織であり、個々に優れた技術者が目的の応じて機動的に働くことのできる組織である。この習熟度と組織風土は、適用できない組織を「多様でない組織」と判断することを可能とし、高速化する社会の変化速度を超える速度での変革を現在の組織に要求する。土木技術者の経験はデータによって置き換わり、唯一性は消失する。しかし、より多くの人々が受益者となるように計画し、経済的な意味だけでなく B/C の良いインフラを建設して社会に貢献する意志と組織力は未来社会においても求められる。このような未来社会においても現在の土木技術者たちが活躍するために、DX の 3 ステップである Digitization, Digitalization, Digital transformation を進めること、また非土木技術者の参画を促してイノベーションを引き起こすことが求められる。

## 第1章 現段階での技術的取り組みと課題

### ・技術的取り組みについてのレビュー

インフラ分野が直面している、あるいは、今後直面するであろう課題について議論した文書は膨大である (e.g., 国土交通省<sup>1-12)</sup>, 土木学会<sup>1-3)</sup>, 建設コンサルタンツ協会<sup>1-4)</sup>). これらの文書で取り上げられる課題は、大きく分けて以下の3つに集約される:

- i) 土木インフラの持続可能性担保,
- ii) 土木インフラの機能高度化,
- iii) 労働環境の改善.

上記の課題を解決してゆく上では、デジタル技術の活用が不可欠になる。以下では、上記の課題に対する状況を整理し、土木インフラの維持管理などの仕組みにおいてデジタルが求められる根拠を提示する。

i) 土木インフラの持続可能性の担保とは、住民が安心してインフラを利用できる環境を将来にわたって維持することと定義する。限られた予算の中で土木インフラへと投資することの重要性を、社会全体として再認識する必要があると考えられる今、例えば World economic forum<sup>1-5)</sup>は、インフラ分野におけるデジタル転換が他の産業分野と比較して遅れていることを指摘し、デジタル技術の導入を促す新たなビジネスモデルを構築する必要があると主張している。前提として、インフラをあって当然のものとする意識を変え、自然環境や人間と同様に、生態系を構成する要素のひとつとして捉えなおすことが有効であると述べている。

ii) 土木インフラの機能の高度化とは、デジタル技術の活用によって土木インフラに様々な機能を付与することと定義する。前提として、デジタル技術の発展に適應する形で、インフラ整備・維持管理の仕組みを改良することが求められる。例えば、交通インフラにとって自動運転への適応は大きな課題である。内閣官房は、官民 ITS 構想・ロードマップ 2020<sup>1-6)</sup>において、2025年には高速道路でのレベル4自動運転システムを搭載した自動車が市場化される見込みとしている。自動運転社会を見据え、NEXCO 東日本<sup>1-7)</sup>は、今後の高速道路に求められる機能について議論しており、安全性のように基本的な目標となる機能から、エンターテインメント性のように今後の新しい目標となる機能までを段階的に設定している。

同様に、種々のデジタルデータを介して土木インフラの機能を評価し、その整備効果を社会全体に示してゆることが求められる。従来のインフラ整備においては、限られたデータの中で、技術者による判断に基づき、単一機能の最大化を図ってきた。しかし、機能を高度化するためには、単一機能への特化を前提とした整備だけでなく、より多様な機能を付与することも必要となる。加えて、インフラの価値を客観的な指標で正しく評価し、整

備効果を客観的に説明することが求められる。例えば、インフラ整備による付加価値額の変化などの顕在化していないストック効果を、空間的応用一般均衡モデル (SCGE モデル) を用いて評価するため、前提として統計データを拡充することの必要性が示されている<sup>1-8), 1-9)</sup>。

iii) 労働環境の改善においては、デジタル転換を通して、インフラ分野を生産性の向上と人的負担の軽減を両立した産業へと発展させてゆくことが求められる。国土交通省<sup>1-10)</sup>は、インフラ分野における DX (Digital Transformation) を推進する上でのアクションプランを示している。特に、行政手続きのデジタル化、情報の高度利用、現場作業の遠隔化を重視している。経済産業省<sup>1-11)</sup>は、産業全体としての DX を実現する上で、個々の企業が取り組むべき課題や対応策を示している。具体的に、digitization (i.e., 紙文書のデジタルデータ化), digitalization (i.e., 個別業務・個別プロセスのデジタル化), digital transformation (i.e., 業務・プロセスの組織横断的なデジタル化) という3段階のデジタル転換が必要としている。

情報通信分野においても、情報通信技術の発展がインフラ分野にもたらす影響について言及されている (e.g., 総務省<sup>1-12)</sup>, KDDI<sup>1-13)</sup>, NEC<sup>1-14)</sup>, 情報通信研究機構<sup>1-15)</sup>)。情報通信分野から見たインフラ分野への貢献として、ICTによるインフラ整備・維持管理の省力化が挙げられている。ロボティクス技術による重作業の省人化・無人化や、センサー技術によるインフラモニタリングの高度化が注目されている。長期的な視点では、ロボティクス技術やセンサー技術はフィジカル空間とサイバー空間とが情報通信基盤によって密接に接続される CPS (Cyber Physical System) 社会において、両空間の間でデータを送受信するために不可欠な技術になると考えられる。

建設業務に関わるデジタル技術の事例<sup>1-16)</sup>や日本建設連合会の提案<sup>1-17)</sup>が挙げられ、実用化段階のデジタル技術が網羅的に紹介されている。本章では各技術領域が例えば3年後におけるインフラ分野のデジタル転換をどのように支えるか、近年の研究開発動向を交えて整理する。加えて、デジタル技術によって実現しえるインフラ整備・維持管理のシステムを構想した上で、その実現に向けて解決しなければならない技術面および制度面での課題を示す。

まず、インフラ整備・維持管理について、今後の在り方を体系的に提案した報告として、三菱総合研究所によるインターストラクチャー構想<sup>1-18)</sup>や、NTTによるIOWN構想<sup>1-19)</sup>などが挙げられるが、本章ではこれらステークホルダーによる構想を鑑み、前述の三課題を払拭した次世代のインフラ整備・維持管理の在り方として「成長するインフラ」を構想する。「成長するインフラ」はインフラのデジタルツインと考え、実現に向けて、今具体的にどの技術および制度が必要となるかを整理する。

## ・デジタル転換の基盤となる技術領域

産業全体のデジタル転換を実現するための基盤となる技術領域を概観する。特に、社会的背景とインフラ分野におけるニーズを整理し、各々の技術領域における研究開発の必要根拠を提示する。

本章で想定する技術領域を図 1-1 に示す。すなわち、本章では前述の 3 課題解決のため、デジタルデータ、デジタルツール、自動化技術という 3 つの技術領域における研究開発を基盤とし、それらを連携させることによってデジタル転換が実現するという構図を想定する。なお、図中に記載されている構成要素は、インフラ分野において有用になると考えられる技術例を示している。



図 1-1 デジタル転換の基盤となる技術領域

## ・デジタルデータ (ICT 政策とのかかわり)

デジタルデータは一般に、計算機で処理可能な数値データのことを指す。PC やスマートフォンをはじめとする ICT デバイスの普及により、生活様式に関する多様なデジタルデータが取得可能となりつつある (e.g., 携帯電話基地局データ、GPS データ、Wi-Fi アクセスポイントデータ、交通系 IC カードデータ)。スマートウォッチをはじめとする体に装着できる IoT デバイス (i.e., ウェアラブルデバイス) も普及し始めており、心身に関するデータ収集も可能となってきた<sup>120)</sup>。今後、このようなデジタルデータの蓄積・共有が進むことで、データ活用を前提とした産業構造への変革が起こると考えられている<sup>121)</sup>。そのため、企業にとっては競争力の強化に向け、データ活用を通じた付加価値の創出や、デジタル人材の確保が急務となっている。近年の ICT 政策においても、持続的な経済成長に向けて、データ活用の推進を念頭に置いたものが多くを占めている。

2023 年現在、わが国の ICT 政策においては、デジタル庁の指揮する、デジタル社会の実現に向けた重点計画<sup>122)</sup>が根幹をなす。「誰一人取り残されないデジタル社会」の実現に向けた行動指針を提示し、具体的な戦略として、デジタル田園都市国家構想総合戦略<sup>123)</sup>や包括的データ戦略<sup>124)</sup>が位置づけられる。

デジタル田園都市国家構想総合戦略は、「全国どこでも誰もが便利で快適に暮らせる社会」の実現に向けた取組みを提示した。従来の地方創生を引き継ぎ、地域における仕事を創出する、地方への人の流れの創出する取組みを加速するとしている。その中で、各地域の事情に即したデータ連携基盤を始めとするデジタルインフラを構築するとしている。この総合戦略に紐づくデジタル田園都市国家インフラ整備計画<sup>125)</sup>においては、光ファイバー、5G、データセンター、海底ケーブルなどのデジタルインフラの整備計画についても提示している。

包括的データ戦略は、「信頼と公益性の確保を通してデータを安心して効率的に使える仕組みを構築するとともに、世界からもわが国のデータやその生成・流通のあり方に対する信頼を確保し、世界でわが国のデータを安心して活用でき、また、世界のデータをわが国に安心して預けてもらえる社会」の実現に向けた取組みを提示し、デジタルツインの実現、人間中心のデータ利活用、新たな価値の創出を図るとしている。

わが国の ICT 政策における目指すべき未来社会の共通認識として、Society 5.0 や Connected Industries などが打ち出されている。Society 5.0 とは、サイバー空間とフィジカル空間とを高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会課題の解決を両立する人間中心の社会のことを指す。日本経済団体連合会<sup>126)</sup>は、Society 5.0 の実現に向けて、必要なデータが入手できること、必要なデータが使えること、データビジネスが持続的に成立すること、それが社会に受け入れられることが必要であると述べている。一方、Connected Industries とは、多種多様なデータを介して機械、技術、人が繋がることによって付加価値を創出してゆく産業社会のことを指す。経済産業省<sup>127)</sup>は、Connected Industries の実現に向けて、データ活用を行う目的・方針の明確化と、その目的・方針を実行するための支援とが必要であると述べている。

科学技術・イノベーション基本計画<sup>128)</sup>は、2030 年を見据え、今後 5 年間で政府が Society 5.0 の実現に向けて行うべき科学技術・イノベーション政策を提示したものである。国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革、知のフロンティアを開拓し価値創造の源泉となる研究力の強化、well-being と課題への挑戦を実現する教育と人材の育成を図ることとしている。その中で、サイバー空間とフィジカル空間とが好循環を生み出す社会を目指し、安心してデータや AI を活用できるようにするとともに、国内システムの改革に取り組むことが優先事項であるとしている。

データ活用の裾野を広げてゆく上で、デジタル人材の育成を図る取組みはとりわけ重要になるものと考えられる。例えば総務省は、地方公共団体におけるデータ利活用ガイドブック<sup>129)</sup>を公開するなど、データ活用の啓発

に注力するなどとしている。デジタル庁の取り組みを中心に、近年のわが国が取り組む ICT 政策全般において、デジタルデータの収集・共有、特に活用可能であることが重視されているとことが分かる。

#### ・デジタルデータ（インフラ分野における活用）

インフラ分野における活用が見込まれるデータとして、i) 3次元形状データ、ii) 数値データ、iii) 画像データが挙げられ、デジタルデータの形で収集・蓄積してゆくことが望まれる。以下では、現状の標準的な収集アプローチを概観する。

i) 3次元形状データとは、橋梁やダムなどの土木構造物の3次元形状、すなわち、x軸・y軸・z軸の座標値を計測したデータのことを指す。3次元形状データは、3次元モデルを作成するソースデータとなる。データの構築方法として、レーザーやドローン空撮画像などから構築(SfM: Structure from Motion)する、あるいは図面やBIM/CIMデータから構築する方法が挙げられる。3次元モデルは視覚的に構造を確認できることから、情報共有と事後の確認を容易にできると考えられている。また、点群で表され、相対関係によって定義されるため、基準となる実際の長さや地球上での座標位置を入力することでフィジカル空間とデジタル空間を紐づけるデジタルツインを構築することができる。センサやカメラ等で得られた物理データや画像データを座標位置に基づいて追加・紐づけすることでモデルの解像度を高めたり、紐づけられたデータを基に数値計算で状態を推定したりできると考えられている。

ii) 数値データとは、例えばセンサーで得られた加速度等の力学的な情報を持ったデータや、車両交通量や旅行速度を計測した道路交通データなども含まれる。目視、トラフィックカウンター、プローブカーデータ、カメラ映像のAI解析などで計測され、国土交通省では道路交通センサスにおいて目視による計測を廃止し、CCTV映像のAI解析などへ移行するとしている<sup>130)</sup>。同様に、人の通過・滞留や移動履歴を計測値および計測値をもとに推計・加工した人流データもある<sup>131)</sup>。スマートフォンなどの位置情報（基地局データ、GPS、Wi-Fiアクセスポイント等）、レーザーやカメラ映像による計測が考えられる。スマートフォンを用いる場合、移動軌跡データは取得できないが、出発地と到着地のデータ(ODデータ)を取得し、契約時の情報などから性別や年代等属性情報を取得できる場合が多い。Wi-FiアクセスポイントやBluetooth等発信電波をもとに位置情報を推計する場合、レーザーおよびカメラ映像による計測と同距離の移動を対象としており、Wi-Fiパケットセンサーやビーコンを設置して取得する。にぎわいや施設の利用状況を評価するなどへの活用が期待されている。

iii) 画像データはカメラで得られたデータで、AIによる活用が目覚ましい。監視カメラやCCTVカメラなど固定カメラや、ドローンやスマートフォンで撮影するカメラでデータを取得する。固定カメラでは決まった画角の中で多様な画像データを蓄積し、異常を検知する。ドローン等で撮影する場合、背景が異なることため、AIの学習用データを十分に得ることは困難だが、広範囲の情報を収集することが可能になる。画像データは蓄積に大きなデータ容量を求めるが、交通量のように数値化することで実用上の負荷を減らす、あるいはAIの進歩に伴って再利用することで付加価値を高めることが期待されている。

デジタルデータの取得における課題として、現状では計測機器の設置コストが高いこと、計測基準が決まっていないこと、既存データの多くが依然として図面や書類によって管理されていること、目的とするデータの入手および加工に膨大な労力を要すること、非公開となるデータが多く網羅的なデータが入手できないことなどが指摘されている<sup>130)</sup>。従って、活用するに十分な量・品質のデータが収集・共有されているとはいえない。インフラ分野におけるデジタルデータの活用を推進する上で、データ収集の高速化・高精度化、データ共有の円滑化・リアルタイム化が求められることからデータ共有の高度化に関する近年の研究においては、サイバー空間上のデータベースとも言えるデジタルツインに情報を格納し、必要に応じて目的のデータを抽出する方法が検討されている<sup>132)</sup>

#### ・デジタルツール

デジタルツールは一般にデジタル技術により業務を管理・支援するアプリケーションのことを指す。経済産業省はDX推進にあたり、データとデジタル技術を活用して業務そのものや組織、プロセス、企業文化、風土を変革するとともに、競争上の優位性を確立する必要があるとしている<sup>133)</sup>。業務効率化や生産性向上、コスト削減、ペーパーレス化などの課題を解決しえるデジタルツールの普及が求められており、デジタルツールの導入は従事者にデジタル転換の有効性を周知する上で効果的とされ、実際にデジタル技術を体感してもらうことは、DXの推進において重要なプロセスと考えられている。

既に一般で普及しているデジタルツールとして、ビジネスチャット(e.g, Slack)やWeb会議システム(e.g, Zoom, Google Meets)などが挙げられる。業務効率化を支援するクラウドシステムや管理ソフトウェアも普及し始めており、例えばバックオフィス業務の自動化を目的としたRPAツール(e.g, WinActor)や、データ分析・可視化による業務改善を目的としたBIツール(e.g, Microsoft Power BI)などが挙げられる。

インフラ分野においては、i-Construction<sup>134)</sup>の推進を背景に、デジタルツールの積極的活用が進められている。例えば日本建設連合会<sup>135)</sup>は、インフラ分野にとって有用性が高いデジタルツールを整理している。i-Constructionに伴うインフラ分野のデジタル転換の嚆矢として、BIM/CIMの導入が原則として義務付けられ、設計・施工・維持管理の各段階において3次元モデルを活用することとされる一方、3次元モデルの作成にかかる作業コストの高さがBIM/CIM普及を阻害する要因となっており、後述の自動設計やAI活用が期待されている。

#### ・自動化技術

RPAによるパソコン操作の自動化や、APIによるデータ連携の自動化が実用化段階にあり、あらゆる産業分野において業務の自動化が進みつつある。一方で、インフラ分野においては、業務の自動化は困難であるとされてきた。インフラ分野における業務をi)設計、ii)施工、iii)維持管理という3段階の過程に大きく分けて考えると、設計においては現場ごとの単品受注生産という生産方式が、施工においては屋外現場での集約型労働という労働環境が、維持管理においては技術者による専門知識や経験に基づく判断の必要性が、それぞれ業務の自動化における制約となってきた。しかし近年、労働生産性の向上や人手不足の解消が喫緊の課題として認識される中で、そうした課題をデジタル技術の恩恵によって解決する取り組みがなされている。

i) 設計における自動化技術として、パラメトリックデザインが挙げられる。CADソフトウェアにおいて、地形条件や躯体寸法などを入力変数として、3次元モデルを自動作成する。あらかじめ用意されている構造物のテンプレート (i.e., パラメトリックモデル) の中から作成したいモデルを選択し、寸法情報を入力することで、その情報が反映された3次元モデルを自動作成する。パラメトリックモデルは自動化・省力化に有用とされるが、異なるソフトウェア間でのデータの受渡しなど基準化の観点で課題が残されている<sup>136)</sup>。

ii) 施工における自動化技術として、ICT建機による自動施工が挙げられる。センサーや制御装置が装着された建機に対し、事前に作成した作業データに基づいて自動的に指示を送ることによって1人の作業員で複数の建機を制御する<sup>137)</sup>。今後、高速・大容量通信(5G/6G)を使用して建設現場の映像を送受信することにより、遠隔地からの制御も可能になると考えられる。無人化・自動化への移行が進み、遠隔型・非接触型の働き方が可能となれば、労働環境の是正だけでなく、感染症対策などの社会情勢への適応という観点でも有効となると考えられる。

iii) 維持管理における自動化技術として、センサーによって計測されたデータを対象としたAIによる分析が

挙げられる。従来は技術者が限られたデータと経験に基づいて行ってきた操作や判断を、ドローンを含むセンサーで収集した大量のデータを学習させたAIによって代替させる。画像解析に基づくコンクリートのひび割れ検出や、時系列予測に基づくダム の自動制御などが実用段階にある<sup>138)</sup>。

また、UAVをはじめとする小型モビリティによる3Dモデリングおよび自動点検も注目されている。小型モビリティに3Dセンシング機器を搭載し、作業員は地上に居たままで点群データを計測する。特に、LiDAR (Light Detection And Ranging) は小型化が進んでおり、小型モビリティと組み合わせ、データ計測における省力化手段として注目されている。地上を移動しながら作業する従来の測量手法に比べて効率的であり、人による点検に危険が伴う、あるいは点検が困難なダムなどの巨大構造物に対しても有効とされる。

#### ・デジタルツイン

デジタルツインとは、物理空間の環境や物体をデジタルな空間に複製したモデルのことを指す。総務省<sup>139)</sup>では特に、フィジカル (物理) 空間とサイバー (デジタル) 空間との間でのリアルタイムな情報交換によって現状分析や将来予測を行うことができる動的なモデルのことをデジタルツインと定義している。現状では、フィジカル空間とサイバー空間との間での情報交換が無い静的なモデルも含める場合が多く、構造解析や流体解析において用いられるCAEもデジタルツインの一種だと言える。

デジタルツインはこれまで、工場内の生産ラインなど小規模なシステムのモデル化・シミュレーションにおいて適用されてきた。一方で、土木インフラを含む都市ネットワークなど、より大規模かつ複雑なシステムに対してデジタルツインの考え方を適用するためには、フィジカル空間におけるシステム全体の状態をリアルタイム、あるいは高い頻度で観測し続けるための計測技術が必要とされる。大規模な土木インフラを扱うリアルタイム性の高いデジタルツインを実現する上では、特にフィジカル空間におけるデータ収集を高速化・高精度化するための計測技術、フィジカル空間とサイバー空間との間でのデータ伝送を円滑化するための通信技術、サイバー空間における将来予測シミュレーションを精緻化するための数理モデリング技術が必要と考えられる。これらの技術を通して、フィジカル空間とサイバー空間との連携を高速化してゆくことが求められる。

既に公開されている大規模なデジタルツインの構想として、NVIDIAのOmniverse、NTTのIOWN、国土交通省のPLATEAU、内閣府のRESUSなどが挙げられる。また、デジタルツインを構築するためのソフトウェアとして、ダッソー・システムズの3DEXPERIENCEなどが商用化

されている。デジタルツインの活用方法として、計測・数値計算によって得られたデータを双方向で活用する方法が検討されており、例えば3次元モデルデータの作成や景観検討において、構造物の色や質感などを再現することができる (Real to Digital)。また、実際に現場で設計した構造物などの収まり具合や、現実での修正方法をシミュレーションし、最適な手法を選択できる (Digital to Real)。

## ・アナリシス

### ・2025年における成長するインフラの定義

近年の研究開発の動向を鑑み、解決され始めた課題を整理する。また、次世代の土木インフラの姿を現状から構想し、実現に向けて今後解決を要する課題を明らかにする。例えば、バスやタクシーが自動運転化すると、運転手一人当たりの生産性が向上する。運賃抑制が可能になり、公共交通機関の運行エリア・時間帯・頻度などの利便性を向上する余力が生まれる。古いインフラを新しいインフラに徒に置き換えていくのではなく、既存インフラを様々な技術や使い方の工夫によって最大限に活用しながらも、ニーズに対する合理的な解を導き出すことで、人口減少・超高齢化社会においても持続可能な経済成長を支えるインフラとして再設計する必要がある。そこで、**現段階でのデジタル技術を取り込むことで実現しえる土木インフラを、本時間軸における「成長するインフラ」と定義する。**これはすでに実現している、あるいは、短期間のうちに将来的に実現しえる技術を前提とする点に留意する。

今から数年間で起こりうるデジタルツインの構築と活用について考察し、今求められる取り組みについて整理・提案する。例えば2024-2027年の期間で、PLATEAUは全国500都市で整備され、都市部での局所的な狭義のデジタルツインが確立し、初期段階においては研究や行政で使用される。デジタルツイン上でのシミュレーションを行った資料や研究が蓄積され、効率化やスピニング起業が発生する。ただし、端末スペックの制限や利用法が確立されていないため、一般市民はまだその利益を感じられず、広くオープンにデータを共有できる環境も確立していない。都市部や工場ではIoT機器を介して、フィジカル空間とサイバー空間のつながりが強まり、一体化が進む。この段階における成長するインフラの条件とは、**データ収集・共有、サイバー空間での演算、演算結果に基づいた意思決定、フィジカル空間へのフィードバック**からなるCyber Physical System (CPS)が試行され、その機能がバージョンアップ可能な土木インフラであることと定義する。

### ・2025年における成長するインフラの機能

この段階での成長するインフラとは、具体的には、

- i) データ収集・共有、
- ii) サイバー空間での演算、
- iii) 演算に基づいた意思決定、
- iv) フィジカル空間へのフィードバック

からなるCyber Physical System (CPS)が高速で循環し、その機能がバージョンアップされ続ける土木インフラを指すこととする。

i) データ収集とは、土木インフラの新設・更新を検討する上で必要となるあらゆるデータを収集する過程となる。センサーの高精度・高感度・ロバスト化やドローンやロボットによる計測自動化を通して、データが従来よりも高速かつ高精度で収集されるようになる。民間企業から研究者に至るまで、デジタルツイン上に集約されたデータにアクセスし、土木インフラに関わる様々な演算を実施できるようになる。一般市民においても、一部土木インフラの状態やリアルタイムの利用状況を、アプリケーションなどを通して把握できるようになる。

ii) サイバー空間での演算とは、土木インフラに関わる様々な将来予測をデジタルツイン上で行う過程となる。デジタルツイン上に蓄積された大量のデータによってデータ駆動型アプローチの精度が飛躍的に向上し、これまで以上に理論駆動型アプローチを補強してゆく。継続的に収集されるデータを追加することで予測精度を高め、また新たな分析を行うなど、既存のデジタルツインが付加価値を高めることができるようになる。AIが進歩することでデータ整理や説明が改善され、また知見を得るだけでなく、新たな分析手法が提案されるようになる。

iii) 演算に基づいた意思決定とは、デジタルツイン上での将来予測の結果をもとに、土木インフラの新設・更新の必要根拠を提示する過程となる。共有されたデータをもとに議論がなされるため、真に必要とされる整備計画が、社会全体でのより公正な意思決定を経て採択されるようになる。AIは情報提供や文章作成等によって意思決定を補助し、使用者がAIの誤りに注意しながら活用することで、効率のかつ合理的な議論を進めることが可能となる。

iv) フィジカル空間へのフィードバックとは、上記i)-iii)を経て決定した土木インフラの新設・更新を実行に移す過程となる。設計・施工・維持管理にかかる様々な作業は、デジタル技術を活用した自動化を通して、人的負担を最小限に抑えながら、従来よりも高速かつ安全に完了する。この過程で得られたデジタルツインからの出力との齟齬はデータ化され、デジタルツインに反映される。

上記にそれぞれ示される過程を内包する「成長するインフラ」を構築する上では、デジタルデータ・デジタルツール・自動化技術など、インフラ分野におけるさまざまなデジタル化が前提条件となる。

### ・成長するインフラのユースケース

莫大なデジタルデータ、洗練されたデジタルツールに加え、安価で堅牢な自動化技術により、データの効率的な収集・分析が可能となれば、インフラの維持管理において「実用的なデジタルツイン」を構築・活用できる。今後、3D都市モデルデータや3D点群データをオープンデータとして公開が進められると考えられ、公開したデータをいかにして更新していくかが課題となる。特に、デジタルツインにおいてリアルタイム性の高い人流データ等を扱う場合は、基盤となる3Dデータについても更新頻度の高さが求められる。また、災害などによる突発的な変化に対しても、ドローン等を活用して信頼性の高いデータを迅速に提供することが求められる。

ドローン (DamLook, GoganGo) やセンサー (車載センサー・橋梁スクリーニング, TRAVIC) , デジタルツール (i-MASTER) などの基盤技術の統合・相互転用は、技術進歩や事業強化においては極めて重要となる。ただし、そうしたオープンイノベーションに向けた課題は多い。例えば、建機の自動化において、それぞれの制御ソフトの詳細は公開されておらず、他社とのデータ連携が極めて困難であり、また制御ソフトの公開やデータ連携に理解を示す企業自体も少ないことが指摘されている<sup>140)</sup>。

物理モデルを組み合わせた複雑な処理が可能な AI システム (GNN, PINNs 等) の開発・検証, エッジ化や量子コンピューターを代表とする計算効率化, モデル評価手法の開発やデータの標準化は、土木分野に留まらず社会全体の課題への対応や商業ベースでの普及および信頼性の向上にそれぞれ求められる。例えば、深層学習においては、複雑なシステムになるほど多くの学習データが必要となるが、とりわけ土木分野において、信頼性の高いデータの不足が課題となっている。理由として、土木構造物は一般に一品生産物であるため、工場製品と比べて個体差が大きく、データの網羅性が低いことが指摘されている<sup>138)</sup>。センサの計測コスト (特に設置コスト) も一般的に高価であり、計測手法や計測位置は技術者の裁量により定められ、同種のデータが揃わないことが多い。また、管理者の意向により非公表となるデータが多いことや、対策予算の都合など、様々な事情によりデータが操作され得ることも課題である。さらに、実現を再現するための実験が必然的に大規模となり、コストが大きくなることも問題となっている。ただし、こうした課題はデータの蓄積と電力当たりの計算能力向上、技術の洗練によって加速度的に解決されると考えられる。

データが蓄積され続ける社会においては、そのデータに付加価値を与えるとともに、持続的なイノベーションを可能とするような工学系人材と情報系人材との融合人材を育成することが求められることが予想される。従来より続く、両分野における技術者間の情報共有を通じた

技術進歩に加え、進歩を前提とした新世代人材の特性を生かすことが求められる。融合人材の訓練にあたって、特に研究開発部門においては、OJT だけでなく、Problem Based Learning に基づく分野融合型の課題を解決する経験が有効であると考えられており、現在さまざまな組織で検討が進められている。

### ・提言

現在から3年後を見据えた技術分析から、技術は規制をはじめとする外的な要因に衝突するまで進歩し続けるものと考えられる。あるいは、橋梁定期点検における目視点検の原則廃止やドローン自律飛行の一部解禁のように、部分的な規制緩和と前後しながら進歩してゆくものと考えられる。従って、成長するインフラの実現に向けて、国内外の動向を考慮しながら現段階で実現可能なデジタルツインを積極的に構築してゆくことで課題を洗い出し、その過程で得られた技術を統合・応用して事業化すること、あるいは、人材育成を進め、組織・技術者のコンピテンシーを強化することが望ましいといえる。またこの時、従来のアナログ効用にとらわれず、データに基づきデジタル技術の効用を最大化することが重要となる点に留意する。

現時点で既に存在する課題としては、データの不足、依然としたデータ計測における経済的・人的コストの過多、データベースの乱立、データ共有のリスクと利益とのトレードオフ、モビリティ・ドローン等の自律運転の商用ベース化、3次元データ利用の一般化などが挙げられる。また、より学術的な課題としては、目的関数が不確かな問題に対する AI の利用方法の確立、物理モデル・理論モデルの拡充、シミュレーションに基づいた意志決定手法の確立、データ駆動型の便益評価サイクルの高速化などが挙げられる。

これらの課題に対応し、規制等の外的要因が徐々に解決される時期としては、2035年前後になるものと想定している。次章では、現段階で課題対応が始まっている事例を整理する。

## 第2章 デジタルツインの接続と成長

社会インフラはその位置・機能が固定され、維持管理に時間・費用が掛かり、破棄することも困難である。国の土台となる社会インフラは安定のほか、時代や技術の変化とともに、より大きな・新しい役割を求められてきた。将来、最終的には道路や橋梁等既存インフラの必要・存続可否に関する検討に至ると考えられる。そこでインフラとして現在求められている機能の本質を見定め、これからの社会インフラの在り方を問うことで、従来のインフラに求められる役割とその獲得可否を示す。本章

では、ハードである社会インフラとデータ化・デジタルというソフトについて、現在の技術革新を整理し、より長期的な技術進歩を考慮したインフラ概念の再検討する。現在適用が進められるサービスや各ステークホルダーのビジョンを整理し、現時点から中長期（10年前後）での課題や前章の最後に上げられた課題を含め、分析と提案を行う。

#### ・官公庁のビジョンについてのレビュー

我が国の公的機関を中心に整理する。国土交通省では、毎年国土交通白書を発行しており、2022年度については第2章第11章・第10章において、国土交通行政における、今後検討を実施すべきDXの取組みを示している<sup>24)</sup>。DXの推進に向け、国土交通省全省にわたる推進組織を設置するほか、DXによる業務や工事等の高度化・効率化を図るとされている。また、デジタル庁が決定した、「デジタル社会の実現に向けた重点計画」<sup>22)</sup>に記載されているデジタル化施策についても国土交通省に關係する施策を紹介している。DXの推進による効果については、道路についてはETC2.0プローブ情報等の普及台数など、具体的に数値を用いて示すほか、オープンデータについては実際にオープン化した内容について公表する。ただし、普及効果の測定が難しく、オープンデータの活用状況や活用可能性については不透明であることが今後の課題として挙げられる。

国土交通省ではAIターミナルによる港湾管理も検討されている<sup>23)</sup>。少子高齢化等による労働人口の減少に起因する厳しい労働環境への忌避に対し、AI技術を用いて熟練技術者の荷役ノウハウを継承、生産性向上を図るものである。近年の港湾、コンテナ船の大型化等を背景に積卸量、陸路輸送を行うトレーラーの使用量が増加していることから、AIによるヤードクレーンの自動化やコンテナ配置を最適化する。港湾内での荷役処理、港湾へ入構するトレーラーのゲート処理の効率化を図ることを目標としており、2023年度には港湾での各船舶の運航スケジュールを遵守し、併せて船舶の到着待ちを行うトレーラーの路上待機を解消するなど、世界最高水準の生産性・良好な労働環境を実現することが期待される。導入に向けて、複数の港湾における実証実験が行われ、公表資料として整理されているが、全国のコンテナターミナルへの導入促進が課題となる他、実現に向けては港湾関連の各種データ連携基盤の構築・活用が必要となる。各コンテナターミナルの位置する自治体や実際に工事を行うゼネコン、維持管理等を今後実施することになると想定される大手建設コンサルタントの動向に注意が必要と言える。

総務省では、スマートなインフラ維持管理に向けたICT基盤の確立について検討を進めている<sup>24)</sup>。センサー

で計測したデータを高信頼かつ低消費電力で収集・伝送する通信技術等を確立し、国際標準化の推進を目的とする。既存インフラは、機能等に応じて複雑な構造を持っており、計測箇所や目的とする計測事象に応じて、観測に必要なセンサーの設置間隔やセンサーの性能、データの必要な収集品頻度等が異なっている。そのため、高頻度な通信を行う必要があるデータのやり取りには、局所集中型低消費電力無線通信技術を、比較的低頻度なデータのやり取りで問題ない場合は広範囲型低消費電力無線通信技術を活用する。複数の局所集中型低消費電力無線通信技術を広範囲型低消費電力無線通信技術によって集約を行うことにより、ICTを活用した社会インフラ管理を効果的・効率的実施を狙うとしている。今後は、社会インフラの維持管理を実際に行っている国土交通省との連携、特に維持管理が必要な社会インフラへのセンサー技術の活用ということが必要になってくるほか、蓄積したデータの保存や国土交通省で管理しているデータプラットフォームとの連携についても今後課題になってくると考えられる。

農林水産省では申請を電子化するため、職員自らUIを作成するなど積極的にデジタル化を進めており、水路・漁港の維持管理データを共有することで、土木分野との包括的横断的な管理も可能になるなど、デジタルを通じた他省庁との連携について、今後検討を進めていくことも効果的と考えられる<sup>25)</sup>。

内閣官房では、国の各省庁を包括管理する部署として、省庁横断的に実施すべき内容としてデジタル田園都市国家構想基本方針を整理している<sup>26)</sup>。地方からデジタルの実装を進め、地方と都市の差を縮めていくことで、世界とつながる「デジタル田園都市国家構想」実現に向け、具体的な実現方針を整理した。デジタル田園都市国家構想実現会議における意見交換を鑑み、「デジタルの活用意義」「価値観の共有」「共助による推進」「役割分担と連携」「取組みの可視化」「国民的な機運醸成」「地方創生の取組の継承・発展」という7つの前提を整理している。ただし、デジタル田園都市国家構想実現会議の参加者の大半は国の大臣であり、自治体等からの参加者が少ないことから実際の現場の意向が反映できているか、また実効性については課題が残る。実施方針には達成目標整理としてKPIが設定されているが、同じく実現可能性について課題がある。国民へのデジタル田園都市国家構想自体の周知が進まないことも想定されるため、具体的な対策等も含めて整理を要する。

デジタル庁は2021年9月に発足した組織であり、内閣官房にて今まで検討されていたIT総合戦略について、発展的な新組織として位置づけられている。従来検討されてきた国の規制等、デジタル原則を踏まえた規制の横断的な見直しについて実施する<sup>27)</sup>。具体的には、まず4

万以上の法令についてアナログ的な規制を洗い出し、3年間でデジタル原則への適合実現を目標とする。このために、テクノロジーマップの整備を実施し、数千ある規制を類型化することにより、国が実施している項目について、規則の一括的な見直しを実施することにより、デジタル基盤整備等と連動して社会でのデジタル化を推進すること、この作業を3年以内に終えるとしている。第1回規制改革関係府省庁連絡会議にて決定されたが、規則の横断的な見直しが含まれることから、地方自治体を含めた協力体制が必須となってくるほか、受注者である民間企業を含めた協力体制・コミュニケーションが実現には必須であるといえる。これに向けては、先述の各省庁の事例のほかにも具体的な事例を整理する必要がある他、自治体の対策を整理を要すると考えられる。

土木分野全体の方向性を示している土木学会においても、インフラ維持管理へのAI技術適用のための調査研究を実施している<sup>28)</sup>。実際にインフラ維持管理・更新・マネジメント技術等のプログラムでAIを取り入れているものが多い一方、それらの技術を取りまとめたものが少ない。AI関連研究を体系的に整理し、インフラ維持管理におけるAI活用の現状と将来像を提示している。例えば、インフラ維持管理へのAIの活用方法、実際のデータを用いたAI技術のインフラ維持管理への適用、AIの技術を社会インフラ・維持管理に適用した課題解決方法の紹介、及びこれらの手法を整理した論文を収集・分類・データベース化して高度な活用への貢献することが挙げられる。各委員会で検討したデータの思考実験等の情報も整理しているほか、今後の活用ビジョンや今後の課題等についても整理されている。ただし、検討については各自が実施することになっているほか、整理された情報は土木技術に関するものや、情報技術に関するもののみで、その他の事例についても整理を行う必要がある。

建設コンサルタント協会についても、年に1回建設コンサルタント白書を整理しており、国土交通省等の官公庁に意向を鑑みている<sup>29)</sup>。白書では、短期的にはDX領域を明確化するとともに、長期的にはDXを事業として展開することを目指しており、DXをベースとした、新しい業務領域の検討、公的データをオープン化することあたってルール整備、DXの新領域への展開や異業種との連携・受入れが示されている。具体的な対策として働き方改革に向けてガイドラインを策定されているが、他については対策の具体的な項目が記載されていない。

#### ・道路交通分野についての民間事例

民間事例として日本工営などは国土交通データプラットフォームの整備に向けて、自治体が所有する維持管理情報とのデータ連携の可能性について、国土交通省を発

注した業務を受託している<sup>24)</sup>。従来、国土交通省は維持管理データやETCプローブ情報、交通流動データなど様々なデータを所有しているものの、データの保有は個々の部局ごとに実施しており、十分に連携が出来ていないことが課題となっていた。個々の部署ごとに保有するデータを連携し、業務の効率化やスマートシティ等の国土交通省の施策の高度化を目指すほか、民間等のデータと連携して産学官連携によるイノベーションの創出を目指している。実現に向けては、各自治体にも連携可能性のあるデータがあるかどうかをアンケート・ヒアリングにより確認を行ったほか、データ連携の実現に向けたAPI実装を行い、実際のデータ取得が可能かどうかを検討している。自治体へのアンケート・ヒアリングからは保存内容や情報量が自治体により大きな差が生じているほか、活用による自治体への恩恵が明らかになっていないといった課題がある。また、データベースの構築に向けて、フォーマット標準化等を事前に検討が考えられる。

パシフィックコンサルタンツでは、自治体より発注された道路維持管理業務において、携帯性や性能の高いスマートフォンを活用した、道路の維持管理にむけた情報登録を行うシステムを構築した<sup>24)</sup>。従来機能と異なる点として、スマートフォンアプリと管理用DBを構築するPCアプリを分割することにより、既存のスマートフォンでの活用を可能とした。パトロールや通報といった日常の道路管理における情報収集や対応管理を支援するとともに、災害時の迅速な情報共有にも利用が期待される。上記アプリは自治体導入されたが、国土交通省におけるデータ連携プラットフォームへの連携可能性が模索されている。フォーマット等の統一や他社を受け入れられるシステムかの確認、その他道路管理効率化方法について調査を要すると考えられる。

長大ではワイヤを用いた移動式橋梁点検ロボット「ARANEUS」を開発している<sup>24)</sup>。橋梁下面を3次元的に移動可能としたワイヤ移動式の橋梁点検システムであり、ワイヤを8本して固定することで、1本のワイヤが破断しても他のワイヤで制御することにより、ロボットを安定し落下を防止している。強風等の状況下でも作業可能で、実際に200m弱の長さとなる橋梁に対し試行実験が行われている。実施結果を人手で実施した際の精度の比較や、データ伝送方法の検討については今後過大となる懸念がある。ロボットは今後点検結果を鑑み、簡易修繕まで対応可能となるようなシステムを追加予定となっている。

北海道に本社を擁し、厳しい天候条件や寒い箇所での採用が多いドローンでは、これらの条件や高所など劣悪な環境下においても、効率的かつ安全に点検を実施できるよう、音声認識を用いて入力した点検結果をデータ化し、データと実際の損傷写真をリンクさせて自動的に報

告書を作成できるシステムを開発した<sup>213)</sup>。厳しい環境条件であっても社会インフラの維持管理のため開発され、すでに活用が始まっている。

ニュージェックによる走行型計測（MIMM）点検技術は橋梁のみならず、トンネルにおいても、走行型計測システムを積んだトラックを走行させ、トンネル壁面画像・レーザによる点群データ取得を同時に実施し、トンネルの健全性を評価する技術を検討している<sup>214)</sup>。従来はトンネルの調査は打音検査がメインとなっていたが、壁面画像を活用して覆工コンクリート表面のひび割れ・豆板の観測、3次元レーザ等による点群データの活用を行えばコンクリート表面の凸凹や変形トンネルの変形の検証など、様々な内容の分析が可能となることが期待され、実際のトンネルでの試行実験が為されている。

建設技術研究所では打音検査自体を遠隔化・デジタル化を行うレーザー打音検査装置を開発した<sup>215)</sup>。従来、トンネルの点検については、専門技術者の目視確認や打音検査により実施されることが多かったため、手間・時間を要するほか、技術者の技量に応じて点検結果が変わる場合も考えられた。近年の少子高齢社会の進行に伴い人手不足も顕著となる状況も鑑み、打音検査を補完・支援するシステムが必要と考えられた。具体的には、ハンマーで打音するのではなく、「振動励起レーザー」により覆工コンクリートを振動させ、「振動計測レーダー」により、耳の代わりに振動を計測する2種類のレーダーを活用して打音検査の代替を行う。現在は供試体による検証実験が行われた段階である。

大日本コンサルタントでは、道路整備の優先度等の検討に向けて、AIを使って地域の災害リスクを総合的に評価する防災・減災システムを開発した<sup>216)</sup>。拠点間の移動所要時間を平常時と災害時で分けて分析し、過去の災害情報や道路情報、周辺道路の維持管理状況等を蓄積したAIにより、通行止めリスク等を踏まえた最適な整備優先度・施工の組み合わせを決定する。各自治体の予算・期間・能力等に応じた最適な予算化による、道路整備の効率的な執行が可能に、また道路の整備進捗状況は時々刻々と整備するため、整備進捗状況を逐次整備事業計画に反映することが可能となる。ただし、現時点では導入事例はない。

また、地域全体の最適化を目指す計画だけでなく、構造設計事態にもAIの活用が検討されており、安藤・ハザマでは構造計算結果を得るまでの所要時間を半減させる構造設計支援システムを開発している<sup>217)</sup>。構造計算には部材情報からトライアンドエラーにより構造計算の最適化を実施していた。構造計算モデルに用いている部材をAIにより自動的にグルーピングし、RPAによる適切かつ効率的な構造計算を誘導するもので、作業の効率化に伴う働き方改革の実現にも貢献している。

また、構造設計支援システムの検討は、国内のみならず海外でも実施されており、中国にある西安天華建築設計の開発したTransBIMでは、建築施工図を作成可能となる人工知能を組み込んでいる<sup>218)</sup>。このシステムは、CADで作成した基本設計図と解析に必要なパラメータを入力すると、AIアルゴリズムによりパラメータの分析が自動で実行され、BIMが生成されるほか、構造分析・設備分析等もAIが自動で実施し、実際に意匠・構造・設備に関する施工図を1週間程度で作成した。自治体による審査に合格するなど、実務面でも問題のないレベルの水準まで到達できている。ただし、前述の安藤・ハザマが設計したシステムと同様に実用事例はまだなく、今後の実装について、注目する必要がある。

#### ・河川分野についての民間事例

建設技術研究所は各河川に設置されている監視カメラの画像から、AIが越水の発生や砂州の変化を検知するシステムを開発している<sup>219)</sup>。閾値を超過した場合は住民や自治体に自動で通知するほか、大雨が予想される際における検知降雨量予測データなどから、河川の将来推移をAIが予測し、越水や砂州の変化を予測し、ダムにおける放水などの河川管理施設の操作タイミングを予測する。水位予測については他社でも実施されているが、本システムは越水や砂州の変化の予測等についても提案が可能となっている。実際に鳥取県において新技術の取り組みが検討されており、解析結果が近年一定の精度に到達している。ただし、夜間については状況の視認が難しいため夜間帯についてもカメラに示された画像の検知精度向上が必要なほか、推移予測や河川管理施設の操作タイミング、越水等の現象が発生すると思われるタイミングの予測精度向上が今後に向けた課題と考えられる。

一方、水位予測・計測については他社においても検討が進められており、NTTPCや構造計画研究所では、河川監視による防災分野での実証実験の検討を行っている<sup>220)</sup>。撮影した画像データにバーチャル水位計の情報を付加し、推移予測を実施する。予測の際に過去の水位や雨量データを数理工学技術で解析し、全国6県における実証実験からはおおむね実際の水位とバーチャル水位計の計測結果が一致することが確認できている。過去の水位データがない河川においても、数理工学技術を活用し水位予測が可能と確認した。

洪水予測手法については、流量計を用いなくても分析可能となる手法についても検討が進められており、JFEエンジニアリングではAI技術とレーダ雨量データのみを活用した洪水予測手法の検討を行っている<sup>221)</sup>。流量計を用いないことで、簡便かつ安易な予測が可能となるほか、洪水予測にはダムの放流量を含めた検討が可能であるなど、精度を高めた検討が可能となっている。精

度については土木研究所と協力し、全国6地点で分析を行い精度が確保されていることを確認している。また、クラウドを利用し、インターネットによる配信を行うことで安価な利用形態となるようにし、実際に WinmuSe® Caesar として商用化している<sup>222)</sup>。

河川の管理手法等に関する検討は建設コンサルタントのみならず、他業種においても行われており、みずほリサーチ&テクノロジーズにおいては、河川周辺の航空写真から機械学習により、水域分類の自動実施を試みている<sup>223)</sup>。水域分類は現地における踏査や航空写真を用いた人力による目視判読が主であり、時間とともに変化する河川の網羅的・即自的な把握が困難であった。従来、学習データの作成までにとどまっており、自動分類まで実施した事例がみられない。サービスの具体的な内容として、土木研究所・寒地土木研究所から貸与されたデータを用いて、画像の色味成分のみを用いた水域の分類を実施した。分類には深層学習モデルである U-Net を活用している。

#### ・その他インフラ分野についての民間事例

電力分野においては、効率化に向けて電力設備・機器の状態基準保全(一定の周期ではなく、施設・機器の劣化状況により修理を行う)の実践に向け新たな取り組みがなされている。従来はクローズした空間であったため制御監視システムのセキュリティについては考慮を要しなかったが、データのオープン化に向けては外部ネットワークと接続する必要が生じ、セキュリティ確保が求められている。電力中央研究所では、統計的機械学習・パターン認識による維持管理技術等を検討している<sup>224)</sup>。状態基準保全の検討として「さび画像に基づく配電柱腕金の再利用判定」「油中ガス分析データに基づく電力用変圧器の不具合判定」「水力発電所の発電機の異常予兆検出」が挙げられるほか、セキュリティ確保について「制御システムにおける侵入検知手法」の検討が挙げられる。実データや画像を用いた実証実験、侵入検知システムについて、外部のシステムを用いた評価をしている。

下水道分野についても、交換優先順位の明確化・劣化診断精度向上による維持管理費用の縮減可能性の整理にむけて、EY と Fracta は AI を活用した管理劣化予測システムを開発した<sup>225)</sup>。上水道分野で確立されている水道管の劣化予測技術を下水道分野にも活用したもので、腐食箇所を従来手法の半分以下の時間で見つけることが出来る。滋賀県大津市において実証実験が行われており、交換頻度を減らす可能性が示されている。維持管理や改修頻度を減らしたことにより生じる実運用上の課題、費用縮減効果についても今後整理が必要と考えられる。

環境分野について AI の活用が進んでおり、富士通九州ネットワークテクノロジーズが開発した QSAS-Bird を

用いたフクロウの生息状況の効率的把握に用いられている<sup>226)</sup>。学習させた野鳥の鳴き声を AI が学習し、目的の鳴き声を検出する。夜行性であるフクロウの生息状況の調査は夜行に実施されるため、目視での確認が困難なため、IC レコーダーにより録音した音声データを後日人手で聞いて確認していたが、AI ソフトによる事前検出で、録音時間を3%程度まで減らすことが可能となった。

#### ・建設施工分野についての民間事例

清水建設では、AI を活用して日々の測量からシールド掘進機の操作までの流れを合理化するシステムにより、屈伸計画の立案からシールド機の運転に至るまでの一連の施工サイクルの自動化を実現した<sup>227)</sup>。「施工計画支援 AI」・「掘進操作支援 AI」を組合せて日々の掘進作業後の測量データを反映し、施工計画に反映するなど作業上の課題についても速やかに修正できる。精度については実際の工事現場においてモデリングを行い、条件を満たす計画を立案し、その通りに掘削を行った結果、方位角変化量の誤差はわずか0.02度に収まり、実用上問題ないことが確認されている。2022年3月より本システムを用いた自動運転の実証試験を兵庫県姫路市において適用している<sup>228)</sup>。

地盤ネット総合研究所は戸建て住宅向けの地盤解析に関するサービスを開発している<sup>229)</sup>。地盤解析は調査ポイント毎の深度、荷重、回転数、土質、音感、水位や、支持力や沈下量計算、建物周辺の造成、擁壁の有無、近隣地形などを総合評価した人的判断となっていた。過去十数万件に及ぶ膨大な解析物件データを AI で学習した。調査現場から iPad アプリでデータ通信し、リアルタイムで調査データや位置情報をシステムに連動させ、AI による判定を自動送信するシステムを構築した。過去十数万件に及ぶ膨大な解析物件データを AI に学習させ、改良・検証を重ねた結果、人手解析において求められる解析基準に合致した信頼性の高い解析結果を得られたとされている。現時点で考慮が出来ていない不同沈下のデータを含めること、災害発生後のデータを含めて分析を行うことが課題として挙げられている。

#### ・社会問題としてのインフラ維持管理

社会インフラの ICT 活用が進むのに伴い、各施設へのサイバー攻撃を受けた場合、石油パイプラインや上下水道、電力施設等インフラの機能停止が懸念される。サイバー攻撃によりセンサー管理システムを掌握することで、例えば、ダムを制御を止めて大洪水を発生させる、上水道へ高濃度の薬物を混入させ機能を停止させる等、生活インフラを機能停止させることが可能となる。今後はこれらのサイバー攻撃に対してどのように対抗を行うのか、これらのサイバー攻撃を実施した容疑者をいかに特定するかが課題である。サイバー攻撃による社会インフラの

破壊を防ぐためには、ハード・ソフトの対策が必要となる。現在想定されている課題を整理し、対応策を示す必要がある<sup>230)</sup>。

#### ・AIを用いたデマや Disinformation

AIにより合成された画像を真実のように SNS 上に掲載し、フェイクニュースが拡散する問題があった。2022年10月には、画像生成 AI「Stable Diffusion」を用いて台風15号によるものとされる偽の被災状況が拡散された<sup>231)</sup>。2016年4月に発生した熊本地震において、「動物園からライオンが逃げた」とする偽情報が拡散された際、全く別の場所で撮影されたと考えられるライオンの画像が添付され、最終的に偽計業務妨害罪(不起訴)となっている<sup>232)</sup>。静岡の事例では、投稿後に不自然な点に気づいた他のユーザーなどの喚起があり、12時間後にはフェイク画像であることが投稿者から明らかになった。今後 AI の画像生成技術が向上に伴い、これらの偽情報を迅速に探知・警告することが求められるようになると考えられる。

#### ・AI開発に伴う環境破壊

AI・ICTの活用が進むにつれて、AIの活用自体が環境破壊につながるのではないかという指摘がマサチューセッツ大学アマースト校の研究成果より指摘されている<sup>79)</sup>。AIモデルは巨大化が進んでおり、学習に用いる計算コストも増大している。この研究では米国エネルギー省の電力使用量のデータから、AIモデルの学習に伴うCO<sub>2</sub>の量を計算・整理を行った。1つのAIモデルの訓練で、乗用車5台が製造されてから廃車されるまでの間(走行中も含め)に放出するCO<sub>2</sub>の量に匹敵するCO<sub>2</sub>を排出しているという結果が示されている。今後更なるモデル巨大化・更新のため、学習頻度が増加すると考えられている一方、AIモデルの学習を効率化するための対策、例えばモデリング計算の最適化や、パラメータ数の最適化分散型機械学習アルゴリズムの導入等、技術進歩を考慮しておらず、ESG投資を生かした積極的な技術開発により解決可能であるとも考えられる<sup>233)</sup>。

#### ・6G等次世代通信インフラについて

NTT等が検討している IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)は光通信を利用し、電力効率の大幅な向上により増大する情報量に対応通信の大容量化・低遅延化を実現する<sup>234)</sup>。現在人類が利用する電子回路を光子回路に変更し、高速大容量通信ならびに膨大な計算リソース等を提供可能な、ネットワーク・情報処理基盤を構想している。量子コンピュータとの親和性から、機密性や安定性を高度なレベルで提供可能とされている。2024年までに局地的な実装を目指し、2030年には本格的な社会実装を目指している。

#### ・アナリシス

##### ・定義

整理したビジョンや技術・サービスを基に、2033年の課題を想定し、対策を検討する。前提として、技術の進歩とデータの増大に伴い、局所的なデジタルツインが様々構築され、接続・精緻化する技術やサービスが出現すると考えられる。データ収集において、フォーマットを完全に標準化することは不可能であるため、様々な形式で集められる。この段階における成長するインフラの条件を、データがオープンになることでアクセス可能なユーザーが増え、データ整形や分析が容易に可能な方法が生まれ、得られた分析結果を活用するデータのエコシステムが存在するインフラと定義する(図2-1)。

##### ・国家レベルの大域的視点

大量のデータを収集・整形して生成された国土交通省 PLATEAUなどの3Dモデルと現実をリアルタイムにつなぐCPSを構築する場合、消費電力・通信量は現在よりもはるかに大きくなることが予想される。総務省や IOWNなどの取り組みは消費電力削減・通信容量拡大に寄与すると考えられる<sup>235)</sup>。IOWNは2024年局地的な実装を目指しており、2033年は本格的な実装に進むため、土木分野のさまざまな領域において交差すると考えられ、現段階でも積極的な参画に十分価値がある。これら公的な



図2-1 成長するインフラの条件

取り組みや、データのオープン化は現在も行われているが、例えば公的なDBであるxRoadにおいても、人による操作が入ることで生じた誤りがあるなど、データの連携ができていない段階ではない<sup>236)</sup>。これらの誤りや実用性の低さはデータの活用意欲を減退させるが、同時にブルーオーシャンとなるため、積極的に活用することで改善点を見出し、実用性を高めることで先行的利益を拡大することができることに留意する必要がある。

##### ・民間レベルの局所的視点

民間でもさまざまな企業がカメラ含むセンサー等で得

られたデータをデータベース化している。ただし、各企業が独自に DB を構成したり、機器の仕様を決定する。このような状況で得られたデータを共有することは未だ困難である。これを局所的デジタルツインと定義したとき、成熟の過程でそれぞれ連携・接続して精緻化と拡張を指向し、フォーマットを統一することなく整形・分析を容易に実行できる技術が求められる。精緻化するにはさらなるデータを必要とし、結果や活用が規制されれば、改善する利益はもちろんデータ共有する利益すら減退させるため、規制緩和や見直しに加え、自治体・企業においてもこれらデータを活用し、データ駆動で変化に対する迅速な対応が求められる。例えば、洪水予測手法やダム放流タイミング推定手法などがさまざまな自治体・企業によって開発されている。ただし、安全性をどのように担保するか、規制設計が求められるため、必要なデータを収集することに加え、これらの設計に企業も積極的に参加してデータを共有し、10年後の市場を作り出していく努力が必要となる。

#### ・10年後の社会と市場

個々の技術においては規制がなければ不要な技術が淘汰され、全体としてはデータが乱雑に共有され、探索・整形・利用法が進歩する。例えば、橋梁河川護岸に供するコンクリートのひび割れは裏込め材の粒径を考慮し、幅 2mm 前後で健全度の評価が変化する<sup>23)</sup>。この場合、ドローン標準のカメラ解像度では接近を要することとなり、技術的要求水準が高くなることから、民間が避けたいコスト上昇に直結する。ただし、ひびの幅は計測誤差を含み、裏込め材の粒径も目安であることから、これらの基準が絶対とは言えない。しかも、ひび全体の幅、護岸が発揮すべき性能や裏込め材粒径の確率的分布等収集されたデータによって規制が最適化されると、2mm という基準に合わせて開発された技術は陳腐化・淘汰される。

利用法が様々なユーザーにより検証され、結果・手法の信頼性が担保される。この時、PINNs やデータ同化など力学的解から信頼性を担保する物理的側面と、技術の同一性やデータの非改竄性などを担保する電子的側面が考えられる。後者においては Block Chain (BC) 技術による担保などが考えられる。莫大なデータと信頼性の高い手法により得られた分析結果に基づき、規制は素早く合理的に見直され、安全性信頼性の担保しながらイノベーションを促進する。

#### ・提言

データを乱雑に共有可能とする、優れた探索・整形・分析手法の進歩は、手法が活用されるエコシステムの形成に依存しており、単なる表面的な規制緩和だけでは十

分でない。例えば、道路上を自律飛行可能なドローン機体は現段階で認可されたものがなく、実態として自律飛行を活用することができない。データを蓄積し、手法の信頼性を高めながら規制を再設計していく過程で生じていることから、データ駆動化することでデータに基づき判断が加速されると同時に、データの利用先を作り出すことが求められる。これには事前規制型でなく事後監視・修正型へのパラダイムシフトを必要とする。我が国では事前規制型にしばしばなることから、国際競争力維持向上のため、国内外の動向を理解したうえで、デジタルツインを接続・精緻化しデータを収集・共有・分析・活用する組織が求められる。このような組織は一朝一夕に構築できず、極めて強力な DX 化とその実行に伴うガバナンスを必要とする。過去の成功体験に基づくアナログデータにとらわれず、徹底された「例外なき DX」によってのみ取り組みによる蓄積の定着活用が最大化される。したがって、デジタルツインの黎明期において十分に蓄積した技術・人材・データを例外なき DX の徹底によって活用し、次代の準備を進めることが求められ、10年後、この蓄積を活用し、データ駆動に基づく EBPM な規制緩和に伴う迅速な判断・対応を可能とすることが経営者・技術者に求められる。

### 第3章 すべての DX が前提となる社会

技術の進化に伴い、人々を取り巻く環境は目まぐるしく変化した。激変する環境で確実に成果を生み出すためには、現在の技術到達点を正しく把握し、中長期的な将来ビジョンを明確に描くことが求められる。本章では土木技術者が今後の活動を発展させる指針として、インフラの未来像を提示する。人々の生活や産業等の基盤のことを総称してインフラと称するが、2023年3月時点で表現されるインフラと未来のインフラが内包する意味は異なると考えられる。例えば、かつてインターネット回線は1997年の利用率がわずか10%程度であった<sup>34)</sup>が、今や当然のようにインフラの1つとして数えられることから、この30年でインフラという言葉の意味に内包されたと言える。データ通信技術およびデータ分析技術の発展により、ICT 技術は大きな進化を遂げた。これまでにない機能や仕組みでありながら、未来の生活に不可欠となる基盤のことを「進化するインフラ」と定義する。本章では30年後を未来と捉え、訪れる未来像を提示するとともに、30年後のインフラにおいて要求される新たな機能や仕組みを整理する。描く未来の実現とさらなる発展に向けて、今日から投資すべき技術やビジョンを示す。

・30年前から現在までの変化

過去のある時点で予測された未来と現状の比較を行うため、ドラえもんという作品を例にとる。ドラえもんは藤子・F・不二雄氏によって描かれた国民的漫画で、ドラえもんにはひみつ道具と呼ばれる 22 世紀に存在する架空の機器が登場する。連載開始年は 1970 年、1 話完結の短編漫画が掲載された最終年は 1991 年である<sup>32)</sup>ため、短編漫画内に掲載された道具は今から 30 年以上前に今よりも先の未来を予測したものであると言える。

これらひみつ道具には現時点で類似した道具や技術が実現している。表 3-1 に例を示す。

表 3-1 実現したひみつ道具例

ひみつ道具	普及した技術 (例)
トレーサーバッチ	GPS、スマートタグ
無人たんさロケット	ドローン
ほんやくコンニャク	Google 翻訳、ポケトーク
きさがきタイプライター	Notta
まんが製造箱	ばいどん (漫画)
オコノミボックス	スマートフォン

2019 年に発足した「TEZUKA 2020」プロジェクトにおいて制作された漫画「ばいどん」<sup>33)</sup>はキャラクターデザインと物語のあらすじを AI に作成、手塚治虫の作風を再現した。漫画ドラえもんは一般の漫画家である藤子氏が子ども向けの漫画として描いたものであるため、描かれた未来はシーズというよりもニーズベースで予測されたものであると想定されるが、既に多くの道具が実現している。ドラえもんに出てくるひみつ道具が単に未来を予言しただけではなく、人々を未来に導いた可能性がある点に注目する。リアル・ドリーム・ドラえもん・プロジェクト<sup>34)</sup>や四次元ポケットプロジェクト<sup>35)</sup>など、ドラえもんおよびドラえもんの有するひみつ道具を再現しようとする取り組みはこれまでに多数行われており、ドラえもんで描かれた未来像を実現するために尽力した研究者やエンジニアは少なくない。

漫画で描かれた空想世界が 30 年の間に現実となった理由は、情報技術の発達に他ならない。特に、機器の処理能力向上が人々の暮らしを革新させたと考えられる。Google 翻訳や Notta、ばいどんといった技術・取り組みは近年飛躍的に向上した AI 技術を用いている。第 3 次人工知能ブームと呼ばれ、火付け役は計算機の性能向上であるとも言われている。NVIDIA 社が発明した汎用的 GPU である GeForce256<sup>36)</sup>によって、人工知能の解析手法の中でも単純な行列計算を多用する深層学習の計算が高速化された。

携帯電話は 90 年代初頭に NTT から販売されたムーバ N<sup>37)</sup>から 30 年で飛躍的な進化を遂げた。当時の携帯電話

の機能は電話の発信・受信のみに限定されており、機能を限定することでようやく機器の大きさを携帯できるサイズに収めていた。翻って、スマートフォンは手で持てる大きさでありながら搭載機能は無数にある。電話、メール (チャット)、メモ帳、時計、カメラ・ビデオカメラ、地図 (+ナビ)、カレンダー、スピーカー、マイク、財布、ポイントカード、電卓、ゲーム機、歩数計、ライト等の機能が 1 つの機器に集約されているなど、このような形態になることを 30 年前から想定できていたとは考え難い。写真・本・動画・音楽などがデータとして、クラウドを経由することで際限なく外へ持ち出すことが可能となった点は機器の処理能力向上と共にアプリケーションなどソフトの性能向上が大きく寄与していることがよく分かる。

・土木建設業の進歩

土木建設分野で扱う対象は半世紀もの期間供用される等、デジタル機器の処理能力向上やソフトウェアアプリケーションの高度化などに対し、軽々な適用を避けるため導入に積極的でない点があった。その中でも、自動操縦する重機による自動施工など、デジタル技術の進歩を大きく取り入れた技術もあった。国交省が提案する指定区域内高速道路を条件付きで自動運転レベル 3 を達成する車両の型式をホンダが取得し、既に販売する<sup>38)</sup>などしている。一般道を走行可能となる時、PLATEAU<sup>39)</sup>等で構築された 3D 都市モデルなどの活用が期待されている。今までの取り組みの延長線上にある技術としても洋上風力発電施設建設や無電柱化、スーパー堤防や AI による洪水予測など、現在ではさまざまな技術を取り込んでいる。

・社会システムの進化を構想する産学官の取り組み

産官学の取り組みを例示し、社会的な動向を整理する。官の取り組みとして各国政府が掲げるビジョンに着目する。我が国においては、内閣府がデジタル田園都市国家構想<sup>310)</sup>で提唱している。本構想はデジタル技術によって地方を繋ぎ、技術イノベーションを原動力として社会課題解決を目指す。このような社会を含め、次世代の社会として Society5.0<sup>311)</sup>を提唱している。我が国が目標とする未来社会のコンセプトを示したもので、サイバー空間とフィジカル空間を融合させた Cyber Physical System (CPS) 構築により、イノベーションに基づく経済発展と社会課題解決を目指している。

国外の事例として、アメリカでは Connected Government Act<sup>312)</sup>、Modernizing Government Technology Act<sup>313)</sup>、21st Century Integrated Digital Experience Act<sup>314)</sup>などといったデジタル政府による行政サービス向上のための法制化が既に実現している。中華人民共和国では国家イノベーション駆動発展戦略綱要<sup>315)</sup>、国家情報化発展戦略綱要<sup>316)</sup>、第 13 次

五カ年（2016～2020）国家情報化計画<sup>317</sup>などデジタル推進に関連する政策を矢継ぎ早に公表した。同国ではデジタル技術による革新（イノベーション）を政策の方針としている。EUでは2020年に Shaping Europe's digital future<sup>318</sup>を、2021年には Digital Compass 2030<sup>319</sup>を発表した。Digital Compass 2030ではスキル、インフラストラクチャー、ビジネス、行政といった4つの指標でのデジタル化を目標とするデジタルコンパスを提唱した。さらに2020～2030年までの10年を Digital Decade と称し、ヨーロッパ全体のデジタル技術の変革に取り組んでいる。このように世界各国でデジタルデータの収集・活用が重要な政策の一つと捉えられている。

学の分野では、特に人工知能分野の発展に注目する。人工知能分野でのトップカンファレンスの1つとして数えられる NeurIPS では、投稿論文本数が2017年は324万件だったのに対し2021年には912万件に増加した<sup>311</sup>。企業研究も含まれ、データを取り扱う研究が産学共通して盛んである。国内でも数理・データサイエンス・AI教育プログラム認定制度<sup>320</sup>による人材育成が始まり、文理を問わない全国各地の大学生・高専生のデータサイエンティストとしての素養を育むとしている。

産の分野では、三菱総合研究所が公表する未来社会構想 2050<sup>321</sup>において、2050年に目指すべき世界の姿に関して言及されている。①デジタル経済圏の台頭、②覇権国のいない国際秩序、③脱炭素を実現する循環型社会、④変容する政府の役割、⑤多様なコミュニティが共存する社会、⑥技術によって変わる人生、といった6つの項目が未来のトレンドとして示されている。これらの多くはデジタル技術の発展が前提となっている点に留意する。国内大手ゼネコンでも、大成建設は「2030年の技術、その先の未来。」と題し将来必要となる技術を例示している<sup>322</sup>。トピックとして、みらいの交通、農場、都、ビル、建設が挙げられている。交通分野ではコンパクト・プラス・ネットワークに注目した自動運転の小型モビリティが普及し、高密度輸送実現を想定した。農林水産業との融合分野として、既存のビルを木質化、都市型農場の併設、6次産業化などが挙げられている。宇宙分野では、月地下都市などを提案している。清水建設は「シミズ・ドリーム」と題し、海面都市、海上の植物都市、宇宙開発などを提案している<sup>323</sup>。大林組については、光合成する建築など、SDGsな建設分野の未来を提案している<sup>324</sup>。

まち全体のデジタル化を目指すスマートシティの取り組みは国内外の様々な企業によって展開され、TOYOTAの woven city<sup>325</sup>やテンセントのネットシティ<sup>326</sup>、Googleの Downtown West<sup>327</sup>などが挙げられる。サウジアラビアでは THE LINE<sup>328</sup>が NEOM の一大プロジェクトとされ、長さ170km、幅200m、高さ500mのビルに線状都市を構

築するとしており、2021年10月に建設開始したとされている。これら産官学それぞれの取り組みを概観すると、①デジタルデータの収集・蓄積・共有、②デジタルデータの解析、③解析結果の活用というプロセスが未来の社会を構築する土台となることが予測される。特に土木建設分野ではスマートシティやコンパクトシティなど、デジタル技術を活用した次世代型の都市構築が目標となっている。

#### ・デジタル社会を実現する基盤技術

デジタル社会構築を実現する基盤技術としてデータの収集・計測に関する技術を整理する。データを計測するためのセンシング技術は、機器の処理能力と共に進歩してきた。分解能やサンプリングレートの向上等高性能化に加え、小型化、省電力化、低価格化、低環境負荷なども著しい。例えば、タッチセンサー、加速度センサー、ジャイロセンサー、磁気センサー、指紋センサー、GPSセンサー、光センサー、イメージセンサーなど、フィーチャーフォンには搭載されていなかったが、スマートフォンの普及に伴い低価格化し、普及が進んだとも言われている。

ロボットやドローンもセンサーから得られたデータに基づきに制御される。センサーの高性能化・低価格化に伴いこれら遠隔操作・無人化を含むロボティクス技術が進歩したことによって、さらに計測可能なデータ空間が拡張された。例えば、UAVや水中ドローンなど、人間が到達することが困難であった領域や、ロボットで危険な作業や繰り返し作業を自動化してフィードバックデータを得られるようになった。

データを蓄積・共有・活用する技術も進歩している。クラウド化は官民間問わず、世界的には極めて遅まきながらも進められている。特に、蓄積が進んで巨大化し、活用がまだ十分でないビッグデータを活用することは官民ともにイノベーション創発の好機と考えられている。データの蓄積・共有が進むにつれ、通信の安定性とデータの信頼性を担保することがますます重要に、また困難になる。通信インフラはデジタル化の前提条件とも言え、今後は Beyond 5G を中心に無線通信機能が飛躍的に向上すると考えられている。総務省は2030年代にアクセスネットワークにおける通信速度と同時接続数を5Gの10倍、コアネットワークにおける通信速度を現在の100倍とすることを目標としている<sup>31</sup>。Beyond 5Gを見据えた取り組みとして、NTTは IOWN 構想<sup>329</sup>を発表した。光通信関連技術に基づき、通信用電力消費の圧縮、容量・速度の大幅な改善を目指すとしている。例えば、通信速度電源効率100倍、伝送容量125倍、エンド to エンド遅延は1/200とすることが目標とされている。他にも通信帯域の拡張のため、アメリカの連邦通信委員会では実

験用のテラヘルツ波を研究用途に限定して開放する<sup>330)</sup>など、通信の安定性や容量拡張は世界的にも焦眉の急となっている。これらの取り組みなども相まって、デジタルデータの総量は指数的に増加している。

データの蓄積量・通信量の増加に伴い、蓄積されたデータの信頼性・通信やデータに関するセキュリティの重要性が増す。BlockChain (BC) はデータの唯一性を担保し、またデータと資産が結びつくことで取り扱うデータの信頼性が BC 上の信頼性と直結するため、信頼性の低い、あるいは機微なデータが流通することを抑止することができる<sup>331)</sup>。ただし、この抑止力は BC の普及によって高まるため、現段階でデータの信頼性を確保する実用性が十分とは言えず、フィジカル空間での取り組みが必要となる。セキュリティクリアランス (SC) は元来国家の機密・機微データに民間人がアクセスするために設けられた制度であるが、電子化することで BC 上における身分証明書として振る舞うことができる。BC の普及が進めば、DAO<sup>332)</sup>によって個別の SC が発行され、DAO の有するローカルデータにアクセスできるようになり、安全かつ信頼あるデータとして自らのデータを DAO に提供することができる。DAO はフィジカル空間での SC と、他の DAO が発行する SC からアクセス・参加者の信頼性を判断することができ、データの共有や活用がより安全に行われる。

データの蓄積・共有に伴い、分析技術、AI 解析技術の発展は目覚ましい。

近年では超大規模データ・超大規模モデルによって構築した事前学習モデルを個別のタスクにて活用することが可能となり、Foundation Model と呼ばれる巨大モデルが誕生した。自然言語処理モデルにおいて、モデルのパラメータ数増加に伴うモデルの表現力向上が示されており、現段階でも数千億から兆オーダーのパラメータを持つモデルが誕生している。OpenAI が開発した言語モデル GPT-3 は 1750 億のパラメータを持つ<sup>333)</sup>。発表された当時の計算機で学習 1 回に 460 万ドルのコストがかかること、計算コストがモデルパラメータ増加の障壁となっているため、計算機の性能向上が期待される。ムーアの法則が示すように、集積回路は素子数が微細化することで配置密度が高まることから、指数関数的にサイズ・処理能力が向上するとされたが、現在ではナノスケールの加工が必要となるなど高度な製造技術が求められるなど、単純な演算性能向上の限界が指摘されている。計算手法の革新的技術として量子コンピュータ<sup>334)</sup> (QC) が挙げられ、特定の問題に対しては従来の計算速度を超えるとされている。先述の IOWN 技術と組み合わせることで、通信・演算を一体として最適化するという取り組みを検討されている。主となる計算機の性能向上と通信速度の向上はエッジコンピューティングやクラウドコンピュ

ーティングの技術進歩を促進すると考えられる。

現在も進むデジタル化を支え、促進するこれら技術を概観すると、以下のように整理する。

- ① センサーの高性能化やロボティクス技術の進歩により、より簡便にデータが取得可能となる。
- ② データプラットフォームなどにデータが蓄積されてビッグデータ化し、活用が模索されると同時に BC や SC を活用してセキュリティの堅牢性が高められる。
- ③ Beyond 5G の技術によって高速通信が実現し、各種センサーが取得したデータを即座に計算マシンやストレージに送付することが可能となる。
- ④ 大規模パラメータを持つ AI により超高精度で汎用性の高い技術・サービスが出現する。
- ⑤ QC のようなさらに高い演算能力を持った計算機が登場し、またエッジコンピューティング・クラウドコンピューティングの処理速度が向上する。

#### ・フォアキャストした未来

既存インフラが急激な予想外の進化を果たすことは考え難い。多くの土木技術者が思い描くように、道路等インフラに大量の IoT センサーが設置され、当たり前のようにデータ取得・分析・共有が可能になると想定する。

道路は早期実現が期待される自動運転において非常に重要な役割を持つと考えられるが、自動運転レベル 5：完全自動運転が目標とされる現在、レベル 4 の条件付き完全自動運転はおろか、レベル 3 の条件付き自動運転が高速道路などの一部区間において認められた段階にある。著名なテスラの車両であっても、カメラ・GPS・超音波センサ等の車載センサーから得られた情報に依存している<sup>336)</sup>。摩耗した停止線の認識など解決困難なタスクは多数存在し、自動運転の全てを車載センサーから得られた情報のみで解決することは非効率的と言える。また、テスラ・オートパイロットの認識する対象や車両制御アルゴリズムは明らかでないなど、道路という公共物を利用する上で、解決すべき市場と規制の課題もある。今後自動運転を可能とする条件の拡大やレベル向上を加速的に実現するためには、自動車側の空間認識技術向上だけでなく、道路側から自動運転を支援する仕組みや適切な規制整備が必要と考えられる。

従来、運転者は走行位置や信号現示、道路標識などを視覚から取得してきた。視覚から情報を得るということはすなわち、道路等インフラ側も情報を視覚的に伝達する必要があることを意味し、信号標識等の物理的な設備を必要とした。道路上に設置された IoT 機器と相互に情報をやり取りするコネクテッドした自動運転車両のみが走行を許される未来の道路インフラが想定される時、運

転者は信号や標識を視覚的には必要としない。すなわち、3次元地図情報、位置情報、信号・標識情報などがIoT機器によって発信される。車両からは他車との車間距離や自転車・歩行者を検知する。位置情報と紐づけられた3次元モデル空間と自車や道路に設置された機器のGPS情報から自己位置を把握し、各走行車両は相対距離を保って走行することで、渋滞発生を抑制できる。

この時、歩行者がスマートフォン等携帯可能なIoT機器によって情報を取得することができれば、信号等や標識を物理的に設置・更新する必要がなくなる。「ネットワークに繋がらない権利」を行使する場合や携帯機器の不調によって情報が得られない場合対策を要するが、対策費用に見合うか議論すること、あるいはその費用を直接受益者が負担することが考えられる。この時、DAO化された地域共同体は迅速かつデータ駆動で議論・判断することができる。フィジカル空間のインフラ機能を変更することは困難だが、サイバー空間のインフラは状況に合わせて容易に機能を変更できる。したがって、交通規制の新設・統廃合に加え、事故リスクを忌避して導入が進まないリバーシブルレーン制度などの道路空間の最適化が促進されると考えられる。

#### ・データ駆動型のインフラ運営

自動運転というデジタル技術を起点とし、当たり前を整備されてきた公共空間の在り方を変える。データ取得、取得データの共有、データの分析、分析結果の活用による付加価値の創造、すなわちインフラのDXが為される。この潮流は道路など交通分野に留まらず、データが取得・共有・活用される分野において急速に進むことが予想される。土木工学はしばしば経験工学であるとされ、設計基準書や点検要領の指標が経験知に基づいて定められてきた。特に、インフラ維持管理は人が目視で実施することを前提とし、実施頻度や評価指標が定められてきたが、蓋然性という観点から必ずしも正しいとは言えない。センサー等で取得したデータに基づいて判断するデータ駆動型のインフラ維持管理を考える。

例えば、笹子トンネル天井板落下事故後、橋梁やトンネルは5年に1度以内の頻度での近接点検が義務付けられた<sup>337),338)</sup>。この頻度に絶対的根拠はなく、また架設後50年経過した橋梁と新設5年目の橋梁を同じ頻度で点検するということが起きる。本規制を設定した際、妥当な期間として設定された基準も、センサーやセンサーデータの分析技術の発展に伴い、見直しや弾力的な運用が求められる。2019年より橋梁点検は近接目視と同等の技術であれば目視以外の手法の使用が認められている<sup>337)</sup>。ただし、人の作業の直接的代替を強いるこれらの基準を満たすことは現実的でない。例えば、橋梁の健全度評価には0.1mmオーダーのひび割れ幅計測が要求される<sup>337)</sup>。

Segmentationによってひび割れを検知し、ひび割れ幅を推定するとき、ドローン等による橋梁の近接撮影、膨大なデータ処理、実距離の測定などのコスト増に直結する課題が考えられる。加えて、高解像度画像はデータ容量を圧迫する。データ蓄積・通信・処理技術の発達に伴い、将来的な解決が期待できるが、発達を促すためには技術が活用される環境を必要とする。

従来の目視等人を基準とする制度に対するセンサー等による代替技術の利点は、従来1度の点検等でインフラの状態を規定するのではなく、継続的に行うことで信頼性を高められる点にある。ただし、機器の水準によっては橋梁スクリーニング技術のように、複数回測定による精度補間を求められる。この時、人による出力と異なり、機械による出力は確率的で客観的な指標として現れるため、結果の評価に曖昧さを許容できなくなる。この点を理解し、新技術を受容する環境が将来のインフラ運営に求められる。空飛ぶクルマやドローン物流なども、天候による運航停止や貨物遺失が考えられ、データ計測・共有に伴うためデータという形で、従来以上に問題が顕在化されてしまう。未来社会はこれらを技術のみで解決するのではなく、複数の技術組み合わせにより、可能性を減じる形で実現し、そのリスクをデータという形で可視化する。データ化されたリスクを使用者が許容できる範囲で技術・サービスが利用される。例えば、鉄道改札は切符という鉄道サービスを利用する権利を管理する上で必要とされたが、6G通信技術と画像認識技術等の個人特定技術、BC技術を活用する個人を紐づけない暗号化等情報処理技術によって個人の移動が特定されれば、切符を購入する・入録することは完全に不要となる。この時、改札に物理的なゲートを設置する必要がなくなる。誤認識等が考えられるが、そのリスクと利便性を比較して技術は活用される。

所有の概念も、既にサブスクリプションやシェアリングエコノミーの出現により変化が始まっているが、技術進歩によって拡大が進むと考えられる。アプリが充実し、短い時間でも自動運転車を簡単に利用することが誰でも可能になり、タクシーやマイカーという概念がなくなるとも考えられる。この時、同時に駐車場活用も進むと予想できる。車両位置が把握され、全体最適化されるため駐車場附置率の緩和や既設駐車場の商用開放や短時間開放が可能となる。この時、TRAVIC<sup>339)</sup>などの認識技術や電子杭のように自己位置を示す機器が個々の車両位置をデータ上と一致させる、すなわちデジタルツインさせるために必要となり、位置データを補完する。所有概念の変化は住居にも表れると考えられる。COVID-19によりテレワークが一般化し、地方に半移住・ワーケーションする利点が高まった。シェアリングエコノミーやデリバリーの発達で家具や私物が減少し、都心の狭小物件が評

価されるなどしている<sup>340)</sup>。上記の現況は技術進歩によって最適化され、複合的なサービスが生まれていく。例えば、現在問題となっている空き家・遊休地などが多数存在するが、取引が安全性を担保しつつデジタル化されることで、所有者不明なることを防ぎながら共有・付加価値化する機会を増加させる。

これら所有概念の変化、伴われる技術の進歩はインフラについても生じうる。土木技術者が携わる企画・調査・計画・設計・施工・維持管理の各フローが完全に自動化される。土木技術者減少は減少数を補う機械化・効率化が達成される。現代で人が時間をかけて検討しているものの多くが自動化されるため、土木技術者に求められる技術的素養も変わる。機械化・自動化されることはデータによって全て判断されることを意味するため、データサイエンスの素養が不可欠になる。工学的素養は体系化されている知識が多く、AIによる代替は容易な点が挙げられる。経験工学的な知識はデータ化と蓄積に伴ってAIに学習される。この時、得られたデータは利用する住民やステークホルダーによるDAOに共有され、さまざまな意志決定に活用できる。劣化を示すデータと運用状況を示すデータを基にBCは常に最適化されるよう計算され、劣化・需要予測から将来の見通しを基に修繕や拡張、廃棄の意志決定がDAOで決定される。この概念は図3-1に示す模式図によって表現される。

デジタル民主主義が前提とされるような社会において、従来の政府・自治体を通した国民・住民の所有管理ではなく、DAOを通して直接所有・管理する形になる。DAOで提案された業務に対し、技術者は海外の技術者であってもBCを通して信頼性が保証され、AIが翻訳・整理した要求仕様に従い、VR技術を活用して現地に向かうことなく設計を行い、ロボットやドローンにより得られたデータを基にロボットにより自動施工され、設置されたセンサーを基に管理され、場合によってはロボット等で修繕される。センサーを管理するロボットやAIが出現し、人はこれらを監督し、得られたデータからより高度な知見を得る、あるいは付加価値を生み出すことが求められる。生み出された知見や付加価値をAIとDAOで価値換算し、トークンで報酬が支払われる。そのため、現在の土木技術者はロボットエンジニア・データサイエンティストという職種に入れ替わることが想像できる。この時、インフラは本来果たすべき役割に加え、自らの状態についてデータを示し、機能を拡張して価値を高め、管理・修繕費用を捻出することさえ求められる。そして維持管理者ないし社会に対し、成長した自らに適した合理的組織、合理的対応を要求する。

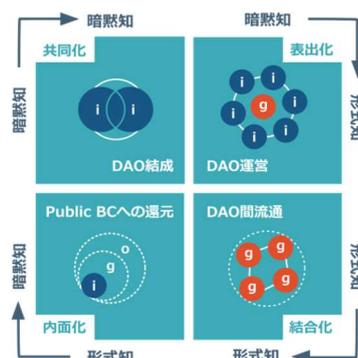


図3-1 未来のインフラの意思決定サイクル

#### ・成長するインフラ

DXed (DXされた) 社会における合理的判断は詳細なデータと、そこから得られた分析結果を基に下される。必要なデータを見極めて集め、分析技術を十分精緻化することが求められるが、その実現に大量のデータと試行が必要となる。すなわち、データ化領域を拡大し、データの利用法を拡張することでしか、十分必要なデータと対応する分析技術を「成長させる」ことができない。現段階で保有するデータは、他者がより高い解像度で大量に保有した段階で陳腐化する。そのため、常にデータを増やし、その利用法を研ぎ澄まし続ける以外には、DXedな社会では付加価値を生み出すことが困難になる。データの質・量と分析技術の進歩と共に、インフラはデジタル空間で解像度が高くなる。デジタル空間のインフラ、すなわちインフラのデジタルツインを活用することが付加価値を生み出すため、データをオープンにしてデジタルツインを構築する戦略であっても、デジタルツインを活用可能であれば十分有効となる。AIの進歩により、分析手法・利用法の探索も自動化すれば、インフラの「成長」も一部自動化する。このように、DXを通してインフラを「成長させ続ける」、そして自動で「成長する」インフラにすることが、未来において求められる。

#### ・非連続的未来からのバックキャストしたインフラ

ドラえもんにおいて提示された未来のように、非連続的な想像によって示され、のちに実現される未来がある。非連続的に想像された未来からバックキャストすることで、過去から現在の変化を未来に外挿しただけでは想定しえない2050年への過程を考える。非連続的未来であっても、前提にはSingularityがある。本概念はThe singularity is near<sup>341)</sup>にて提唱され、人間が技術の力によって生物学的な限界を超越する「特異点」を意味する。すなわち、AIが人類の知能を超える転換点、さまざまな自律的思考を可能とする汎用AIの出現を意味する。

この時、人はデジタル空間に対し、NTTのIWON構想で定義されたナチュラル：人間がストレスを感じること

なく自然に享受できる心地良い状態や、Pixy Dust Technologies の落合が示すデジタルネイチャー<sup>34)</sup>：人・モノ・自然・計算機・データが接続され脱構造化された新しい自然が実現していると仮定する。例えば、人は電子機器を体に装着し、感覚器官を拡張することに忌避感がなくなってきたと考えられる。神経系を拡張し、事故などで周囲が遅延して動くように感じるタキサイキア現象を誘発することで体感時間を拡張し、実時間で1秒間を1時間などと拡張する。この間、VR 技術を活用することで、1秒間で1時間のコンテンツを体験することができ、1日24時間の軛から解放される。

高速通信・高速演算技術により、時間拡張中の使用者同士を接続し、体験を共有する。娯楽は時間拡張中に体験できれば、労働時間以外・休暇は休息が目的となり、すなわち現代のアスリートのような生活となる。労働時間の拡張も可能であるが、AIにより単純な作業は既に代替されているため、労働は付加価値を高める複雑な思考を必要とすることから、時間拡張中に行うことは不向きで、あまり用いられない。さらに休息を効率化するような技術やサービスが出現する。例えば、睡眠管理や神経系のケアを可能とする機器が誕生し、すぐに入眠し、最適な睡眠時間で起床できるよう睡眠を高品質化する。同時に神経系をケアする電気信号やアロマのような物質を直接投与ないし散布する。極小化された娯楽の時間を除き、労働時間外はこのように休息に専念することで生活する。

AIによる生活の最適化が行われており、現在2023年世界がAIを使える人間が有利になるAI社会とするなら、AIを使いこなせるAI社会に既に通過していると想定する。そのため、AIを活用し、仮想的にさまざまなアイデアをシミュレーションすることが、画像やイラストを生成するように可能となると、アイデアを数多く発想することができる人間が有利になるアイデア化社会が既に到来していると考えられる。このうち、より優れたアイデアを思いついたことが評価されるアイデア社会が到来すると考えられる。この時、アイデアを生み出すことは体力や集中力が必要であるため、一般的に若年であるほど有利とされることから、若い間に優れたアイデアを提案して十分な収入を得た後、第二の人生を送るなど、この点もプロアスリートのような生活スタイルになる。安宅<sup>34)</sup>が述べるようにAIを使いこなすことは読み書きそろばんと同様と考えられ、30年後を生きる者にとって最低限のリテラシーとなる。

このような社会において、実時間は極めて貴重な時間になりうる。移動時間は、それ自体に付加価値がない限り消滅する。すなわち、不要な交通インフラとは付加価値のない、ストーリーのないインフラと言える。あえて実時間を使って通過した橋梁、道路、トンネルは体験者

固有のストーリーとなり、付加価値を持つ。交通インフラは発展したAIやロボットにより極めて安価に管理されるため、現代のわれわれにとっては小さな付加価値をも担保することができる。このような体験は他者の時間拡張中に体験されることで、より価値が高まる。再体験が価値を高めるため、一時的に架橋する・道路を作り出すような技術は持続的でない点を考慮し、あまり用いられない。あえて断絶した空間を作るために空飛ぶ車やドローンタクシーが利用されるが、道路を移動する体験に紐づく付加価値がある限り、地上交通がなくなることはない。この時、デジタル化が進むことでアナログな現実の価値が最大化されたと言える。

防災インフラと生活インフラは堅牢性・冗長性が最大限優先される。AIやロボットにより管理コストは極小化しているため、それら管理機能を守るためにも堅牢性・冗長性が求められる。景観を変化させるような防災インフラについては、ヴェネツィアのMOSE<sup>34)</sup>のように変形機構を持つようになり、必要に応じて使用されるようになる。生活インフラは電気・水道・ガスなどが小グリッド化し、冗長性を増す。小規模化が進んで住環境を問わず居住・労働可能なため、生活インフラ、特に水の供給容量が大きい地方への移住が促進する。都市に集積する利点が極めて小さくなり、都市機能の分散化が進む。実時間を豊かにする自然やレジャー施設が空き地に建てられ、郊外と都市は雑多な混在領域で繋がる。デジタル空間では漫画・アニメなど非現実的な世界の再現にも価値が現れる一方で、現実世界のストーリー再現に価値が生じる。

#### ・土木技術者のこれから

フォアキャストした未来への道程とバックキャストした未来からの逆算を整理したが、共通点は社会を支えるインフラは人が身体を放棄する以外には絶対必要なものと考えられるが、その発展と維持を支えるのはデータに基づき、AIやロボットを活用して管理できる技術になるという点にある。これら技術は一朝一夕に確立されないが、デジタル技術とロボット工学に基づくもので、土木技術は必要条件でしかなく、非協力的であると殊更に淘汰されかねない。すなわち、データサイエンティストやロボットエンジニアを超える速度で自らの領域を変革しなくてはならない。この時、土木技術者も「成長するインフラ」の一部になる。20-30年後の土木分野を生み出す技術は今から取り組まなくてはならず、その技術を支えるのはデータと計測・収集・分析・活用するデジタル技術である。未来からバックキャストした我々の使命は、すべてをデータ化すること、デジタル技術を指向し改良すること、分析によって得られた知見を活用する先を探し続けることになる。この試行をサイクルし続ける

ことで得られる知見を整理し、土木分野・組織のニューロンに人材という形で格納し、成長し続けることが求められる。すなわち、同時に技術者の変革・成長が求められる。この過程を経て、Singularity の実現した世界においても、AI には代替不可能な知恵を持った「土木技術者」が存在する社会があることを期待する。

## 第4章 おわりに

道路や橋梁、ダムや堤防などのインフラ性能が高まるとともに人類社会は発展してきた。より多くの人々が受益者となるように計画し、B/C の良いインフラを建設することで、長期間そのインフラから便益を享受できた。現在、多様な価値観を持ち、目まぐるしく変化し、その対応を求める高速化する社会は、未来においてさらに VUCA が激しくなる。この時、従来のインフラ建設・管理は本来果たすべき役割に加え、自らの状態についてデータを示し、価値を高め、管理・修繕費用を捻出することさえ求められる。データを収集(Digitization)し、分析(Digitalization)し、活用(Digital transformation)するエコシステムを構築するには、まずデータを集める意義を共有し、例外なくすべてをデータ化すること、そのデータを分析活用可能とするデジタルツインな手段について試行し続けること、データと分析を社会で共有し、イノベーションによって活用先を作り出し続けることが求められる。

このサイクルは従来の土木技術のみならず、他分野との共同によって高速化すると考えられる。データと共に成長するインフラは未来社会において、土木技術者とデータサイエンティストの垣根を越えて CPS 上で管理される。この時、より多くのデータを処理し、付加価値を高めるプレイヤーは、デジタルツインを構築活用するサイクルに習熟する組織であり、個々に優れた技術者が目的の応じて機動的に働くことのできる組織である。この習熟度と組織風土は、適用できない組織を「多様でない組織」と判断することを可能とし、高速化する社会の変化速度を超える速度での変革を現在の組織に要求する。土木技術者の経験はデータによって置き換わり、唯一性は消失する。しかし、より多くの人々が受益者となるように計画し、経済的な意味だけでなく B/C の良いインフラを建設して社会に貢献する意志と組織力は未来社会においても求められる。DX の 3 ステップである、Digitization, Digitalization, Digital transformation を進めることは、この未来社会においても現在の土木技術者たちが活躍するために、また非土木技術者の参画を促してイノベーションを引き起こすために必要となる。

本白書では「成長するインフラ」というテーマで編集を行った。各章を通し、成長するインフラとはインフラ

のデジタルツインと定義し、はじめにで前提となる各国の法規制動向、第1章では直近のデータ化・デジタル技術について整理した。そのうえで、第2章では10年後の未来を見据えた技術開発を整理し、規制整備の必要性について論じた。第3章では前述の情報とさまざまな組織の長期ビジョンからフォアキャストした未来を整理し、同時に Singularity を前提とした非連続的未来を想像してバックキャストを行った。

各章を共通して得られた知見は、「あらゆるデータを増やし、あらゆるデータを分析し、活用する先を探し続ける」ことに他ならなかった。デジタル技術を高度化すること、その技術を使いこなす人材や知見を組織に備えることは至極当然の手段であるが、これを怠惰な欲求に抗って加速し続けることは容易でない。至極当然な正論を実行し続けるには、極めて強いリーダーシップと不断の努力を肯定する組織が必要になる。本白書を参考に未来の「成長するインフラ」について想像し、それに向かって読者がそれぞれの立場での躍進が期待される。

本稿の記載は2023年4月段階を想定しており、本稿の情報は執筆段階でも陳腐化し続けている。我が国と我が国の土木分野は現段階において、未だ国際的国内的な潮流に完全には遅れておらず、デジタル化によって既存資源を最大化し、社会の信頼を高められる機会を保持している。本稿記載が全て陳腐化する前に、本稿を参考にすべき事業・組織・規制の変革が果たされ、新たなイノベーションにより、高速化する社会における成長するインフラが持続可能な形で実現することを期待する。

## REFERENCES

- 0-1) NIST : Helping organizations to better understand and improve their management of cybersecurity risk,  
<https://www.nist.gov/cyberframework>
- 0-2) 経済産業省：サイバー・フィジカル・セキュリティ対策フレームワーク，2019.
- 0-3) 東京都産業労働局：情報セキュリティに関する各種フレームワークの概要，  
<https://www.cybersecurity.metro.tokyo.lg.jp/security/KnowLedge/435/index.html>
- 0-4) Joint Task Force: Security and Privacy Controls for Information Systems and Organizations, NIST SP 800-53 Rev.5, 2020.
- 0-5) Joint Task Force: Control Baselines for Information Systems and Organizations, NIST SP 800-53 Rev.5, 2020.
- 0-6) 米国国立標準技術研究所情報技術ラボラトリコンピュータセキュリティ部門（独立行政法人情報処理推進機構および NRI セキュアテクノロジーズ株式会社訳）：連邦政府の情報および情報システムに対する最低限のセキュリティ要求事項，FIPS PUB 200, 2006.

- 0-7) OECD: Privacy,  
<https://www.oecd.org/sti/economy/oecdguidelinesonthe-protectionofprivacyandtransborderflowsofpersonaldata.htm>
- 0-8) 久野保之：Eva コラム：NIST SP 800-53 Revision. 5,  
<https://www.eva.aviation.jp/evacolumn-nist-sp-800-53-revision-5/>
- 0-9) Ron R., Victoria P., Kelly D., Mark R., Gary G.: Protecting Controlled Unclassified Information in Nonfederal Systems and Organizations, NIST SP 800-171 Rev. 2, 2020.
- 0-10) Manage Engine: NIST SP 800-171 とは,  
[https://www.manageengine.jp/solutions/nist\\_publications/nist\\_SP800-171/jp/](https://www.manageengine.jp/solutions/nist_publications/nist_SP800-171/jp/)
- 0-11) 国分俊史：エコノミック・ステイトクラフト 経済安全保障の戦い(日本経済新聞出版)
- 0-12) ENISA: Supporting the implementation of Union policy and law regarding cybersecurity.,  
<https://www.enisa.europa.eu/topics/cybersecurity-policy/nis-directive-new>
- 0-13) intersoft consulting services AG: General Data Protection Regulation (GDPR),  
<https://gdpr-info.eu/>
- 0-14) EUR-Lex: Document 52021PC0206 -EN-,  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52021PC0206>
- 0-15) 経済産業省：EU の AI に関するフレームワーク、資料 5, 2021.
- 0-16) 総務省：EU の AI 規制法案の概要, 参考, 2022.
- 0-17) 経済産業省：事務局説明資料, 資料 3, 産業サイバーセキュリティ研究会, 2022.
- 0-18) 文化庁：デジタル化・ネットワーク化の進展に対応した柔軟な権利制限規定に関する基本的な考え方, 2019.
- 0-19) 個人情報保護委員会：複数人の個人情報を機械学習の学習用データセットとして用いて生成した学習済みパラメータは、個人情報に当たりますか,  
[https://www.ppc.go.jp/all\\_faq\\_index/faq1-q1-8/](https://www.ppc.go.jp/all_faq_index/faq1-q1-8/)
- 0-20) 平将明：NFT ホワイトペーパー(案),  
<https://www.taira-m.jp/2022/03/nft.html>
- 0-21) 総務省行政評価局：許認可等の統一的把握の結果について, 2018.
- 0-22) 産業経済新聞社：イタリア、チャット GPT の使用禁止を解除 運営会社が改善策示す,  
<https://www.sankei.com/article/20230429-6DOCRLTR7NISVIKI635X22X3FU/>
- 0-23) 日本経済新聞社：イギリス当局、生成 AI 利用の留意点公表 法的責任明記,  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGR047ND0U3A400C2000000/>
- 0-24) 朝日新聞社：バイデン政権、チャット GPT など AI 規制検討「安全の保証を」,  
<https://www.asahi.com/articles/ASR4D440SR4DUHBI00M.html>
- 0-25) Bloomberg: ChatGPT 開発オープン AI の CEO、日本語サービス拡充検討―首相と面会後に語る,  
<https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2023-04-10/RSVQEPDWLU6801>
- 0-26) 日本経済新聞：鳥取県が ChatGPT 禁止 知事「民主主義の自殺」,  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCC204F50Q3A420C2000000/>
- 1-1) 国土交通省：2040、道路の景色が変わる～人々の幸せにつながる道路～, 2020.
- 1-2) 国土交通省：国土交通白書, 2022.
- 1-3) 土木学会：Beyond コロナの日本創生と土木のビッグピクチャー～人々の well-being と持続可能な社会に向けて～, 2022.
- 1-4) 建設コンサルタンツ協会：建設コンサルタント白書, 2022.
- 1-5) 根本祐二：インフラ老朽化対策と更新投資ファイナンスに関する考察, フィナンシャル・レビュー, No.147, pp.87–109, 2022.
- 1-6) 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議：官民 ITS 構想・ロードマップ 2020, 2020.
- 1-7) NEXCO 東日本：自動運転社会の実現を加速させる次世代高速道路の目指す姿 (構想) , 2021.
- 1-8) 佐藤啓輔, 小池淳司：SCGE モデルを活用した道路整備のストック効果最大化検討, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) , Vol.76, No.2, pp.114–127, 2020.
- 1-9) 小池淳司, 高村望, 山崎雅人, 織田澤利守：応用一般均衡モデルを利用した貨物輸送の時間短縮価値の推計, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) , Vol.76, No.5, pp.1507–1514, 2021.
- 1-10) 国土交通省：インフラ分野の DX アクションプラン, 2022.
- 1-11) 経済産業省：DX レポート 2, 2020.
- 1-12) 総務省：情報通信白書, 2022.
- 1-13) KDDI：Beyond 5G/6G ホワイトペーパー, 2021.
- 1-14) NEC：社会インフラを通じて、すべての人が豊かさを享受できる社会の実現を目指す NEC の取り組みについて,  
<https://jpn.nec.com/techrep/journal/g21/n01/210102.html>
- 1-15) 情報通信研究機構：Beyond 5G/6G white paper, 2022.
- 1-16) 木村駿：建設 DX, 日経 BP, 2020.

- 1-17) 日本建設業連合会：建設DX事例集，2022.
- 1-18) 三菱総合研究所：フロネシス 20 号新インフラ論：「インターストラクチャー」がスマートな未来を創る，ダイヤモンド社，2019.
- 1-19) NTT：IOWN 構想とは？その社会的背景と目的，<https://www.rd.ntt/iown/0001.html>
- 1-20) 塚本昌彦：ウェアラブルの最新事情と行動変容，日本健康教育学会誌，Vol.30，No.1，pp.79-85，2022.
- 1-21) World economic forum: Data-driven economies: Foundations for our common future, 2021.
- 1-22) デジタル庁：デジタル社会の実現に向けた重点計画，<https://www.digital.go.jp/policies/priority-policy-program/>
- 1-23) 内閣官房：デジタル田園都市国家構想総合戦略，2022.
- 1-24) デジタル庁：包括的データ戦略，2021.
- 1-25) 総務省：デジタル田園都市国家インフラ整備計画，2022.
- 1-26) 日本経済団体連合会：Society 5.0 を実現するデータ活用推進戦略，2017.
- 1-27) 経済産業省：データ利活用のポイント集，2020.
- 1-28) 内閣府：科学技術・イノベーション基本計画，2021.
- 1-29) 総務省：地方公共団体におけるデータ利活用ガイドブック Ver. 2.0，2019.
- 1-30) 国土交通省：令和3年度全国道路・街路交通情勢調査の実施について，2021.
- 1-31) 国土交通省：地域課題解決のための人流データ利活用の手引き Ver1.0，2022.
- 1-32) 小山誠稀，矢吹信喜，福田知弘：橋梁とセンサの連携データモデルに基づくデータベースの構築と検証，土木学会論文誌 F3 (土木情報学)，Vol.77，No.2，pp.197-1113，2021.
- 1-33) 経済産業省：「DX 推進指標」とそのガイダンス，2019.
- 1-34) 国土交通省：i-Construction，<https://www.mlit.go.jp/tec/i-construction/index.html>
- 1-35) 日本建設業連合会：お手軽便利な ICT ツール集，<https://www.nikkenren.com/kenchiku/saving/tools/search.html>
- 1-36) 国土交通省：データ交換を目的としたパラメトリックモデルの考え方 (素案)，2021.
- 1-37) 浜本研一：自動化による建設施工の革新とその展望-大規模システムの制御系設計論の構築を目指して，計測と制御，Vol.60，No.7，pp.504-508，2021.
- 1-38) 全邦釘：土木工学分野における人工知能技術活用のために解決すべき課題と進めるべき研究開発，AI・データサイエンス論文集，Vol.1，No.11，pp.9-15，2020.
- 1-39) 総務省：デジタルツインの現状に関する調査研究の請負成果報告書，2021.
- 1-40) 小原好一：情報化技術の発展とともに夢を持てる建設業界を目指して，建設機械施工，Vol.71，No.11，pp.39-43，2019.
- 2-1) 国土交通省：令和4年版国土交通白書2022～気候変動とわたしたちの暮らし～，国土交通省 HP，<https://www.mlit.go.jp/statistics/file000004.html>
- 2-2) デジタル庁：デジタル社会の実現に向けた重点計画，デジタル庁 HP，<https://www.digital.go.jp/policies/priority-policy-program/>
- 2-3) 国土交通省：ヒトを支援する AI ターミナル，国土交通省 HP，[https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_00001.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_00001.html)
- 2-4) 総務省：スマートなインフラ維持管理に向けた ICT 基盤の確立 基本計画書，2023.
- 2-5) 農林水産省：農業DXをめぐる現状と課題，2021.
- 2-6) 内閣官房：デジタル田園都市国家構想基本方針令和4年6月7日閣議決定，2022.
- 2-7) デジタル庁：デジタル原則を踏まえた規則の横断的な見直しについて，2022.
- 2-8) 土木学会技術推進機構：SIP インフラ連携委員会報告 インフラ維持管理へのAI 技術適用のための調査研究報告書，2019.
- 2-9) 一般社団法人建設コンサルタンツ協会：令和4年度建設コンサルタント白書，2022.
- 2-10) 片柳貴文，藤原鉄朗，遠藤和志，高石光博，九鬼和広，竹内恭一：国土交通データプラットフォームの整備に向けて，こうえいフォーラム第29号，2021.
- 2-11) パシフィックコンサルタンツ株式会社：スマートフォンアプリを用いた道路管理の効率化，パシフィックコンサルタンツ HP，<https://www.pacific.co.jp/service/209.html>
- 2-12) 株式会社長大：ワイヤー移動式汎用橋梁点検ロボット「ARANEUS」による目視点検システム，長大 HP，<https://www.chodai.co.jp/products/case/012478.html>
- 2-13) 株式会社ドーコン：音声認識を用いた橋梁点検支援システム，ドーコン HP，<https://www.docon.jp/tec-topics/t0007>
- 2-14) 株式会社ニュージェック道路グループ：走行型計測 (MIMM) による道路トンネル健全性評価技術，ニュージェック HP，<https://www.newjec.co.jp/assets/pdf/mimm.pdf>

- 2-15) 株式会社建設技術研究所：レーダー打音検査装置の社会実装，建設技術研究所 HP，  
<https://www.ctie.co.jp/tech/tech876.html>
- 2-16) 大日本コンサルタント株式会社：防災・減災 DX ー先進的道路都市整備計画支援サービスー，大日本コンサルタント HP，  
<https://www.ne-con.co.jp/field/technologydevelopment/disaster-prevention-dx/>
- 2-17) 株式会社 安藤・間：AI を活用した構造設計支援システムの開発～誰もが熟練者と同等の構造計算が可能な環境を構築～，安藤・間 HP，<https://www.ad-hzm.co.jp/info/2022/20220307.php>
- 2-18) 36Kr Japan：中国初、AI による建築施工図が審査合格 「TransBIM」 利用で完成まで最短 3 日，36 Kr Japan HP，<https://36kr.jp/197444/>
- 2-19) 株式会社建設技術研究所：AI 技術を用いた河川管理高度化技術の開発に取り組んでいます。、建設技術研究所 HP，  
[https://www.ctie.co.jp/news/tech/2020/20201204\\_65.html](https://www.ctie.co.jp/news/tech/2020/20201204_65.html)
- 2-20) 株式会社 NTTPC コミュニケーションズ，河川監視による防災分野での実証実験結果について～クラウドを活用した AI 画像解析による水位計測や数理工学技術を活用した水位予測の有効性を検証～，NTTPC コミュニケーションズ HP，  
<https://www.nttpc.co.jp/press/2022/02/202202241500.html>
- 2-21) 深見和彦，今村仁紀，奥野義博，山根総一郎，渡辺直樹，瀬戸口忠臣，山口以昌，園田克樹，古本直行：人工知能技術を活用した洪水予測手法の開発，土木研究所共同研究報告書，2009.
- 2-22) JFE エンジニアリング株式会社：河川水位予測情報配信サービス，JFE エンジニアリング HP，  
<https://winmuse.jp/rivers/>
- 2-23) 加田匠：機械学習による河川画像の土地分類手法の技術開発，みずほリサーチ&テクノロジーズコンサルティングレポート Vol.2，2022.
- 2-24) 小野田崇：電力中央研究所によける主な AI 研究の取り組み，人工知能 29 巻 5 号，2014.
- 2-25) EY 新日本有限責任監査法人：EY と Fracta が日本初の AI を活用した下水道管路劣化予測手法を構築，EY Japan HP，[https://www.ey.com/ja\\_jp/news/2022/07/ey-japan-news-release-2022-07-11](https://www.ey.com/ja_jp/news/2022/07/ey-japan-news-release-2022-07-11)
- 2-26) 富士通株式会社：シマフクロウの音声認識プロジェクト，富士通 HP，  
<https://www.fujitsu.com/jp/about/environment/activities/owl/>
- 2-27) 杉山博一，増田湖一：AI によるシールドトンネル施工管理の合理化 ー計画支援 AI と操作支援 AI の開発ー，清水建設研究報告第 98 号，2022.
- 2-28) 清水建設株式会社：「シミズ・シールド AI」によるシールド機自動運転に着手～AI を活用したシールド施工合理化システムを現場実装～，清水建設 HP，  
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021052.html>
- 2-29) 地盤ネットホールディングス株式会社：人工知能 (AI) を活用した戸建住宅向け地盤解析を開始～業界初の人工知能による地盤解析実用化へ～，2017.
- 2-30) 合同会社 コンデナスト・ジャパン：米国でパイプラインが操業停止に追い込まれた事件は、ランサムウェア攻撃の脅威を世に知らしめた，コンデナスト・ジャパン HP，<https://wired.jp/2021/05/10/colonial-pipeline-ransomware-attack/>
- 2-31) 株式会社 Spectec：静岡災害デマ、画像生成 AI の急速な進化がもたらす新しい時代，Spectec HP，  
[https://spectec.co.jp/report/202209\\_shizuoka\\_typhoon15\\_fake/](https://spectec.co.jp/report/202209_shizuoka_typhoon15_fake/)
- 2-32) 株式会社熊本日日新聞社：「ライオン逃げた」熊本地震のデマ 熊本市動植物園あの時 国内初の猛獣県外避難、余震に脅えた動物たち，熊本日日新聞 HP，<https://kumanichi.com/articles/604283>
- 2-33) Emma S., Ananya G. and Andrew M.: Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP, In the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL), 2019.
- 2-34) Roy S., Jesse D., Noah A. and Oren E.: Green AI, Computers and Society (cs.CY); Computation and Language (cs.CL); Computer Vision and Pattern Recognition (cs.CV); Machine Learning (cs.LG); Methodology (stat.ME), 2019.
- 2-35) 日本電信電話株式会社：IOWN，日本電信電話 HP，  
<https://www.rd.ntt/iown/>
- 2-36) 国土交通省：全国道路施設点検データベースの現状と今後，第 7 回道路技術懇談会資料，2023.
- 2-37) 国土交通省 水管理・国土保全局 河川環境課：堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領 参考資料，2019.
- 3-1) 総務省：令和 4 年版情報通信白書，2023.
- 3-2) テレビ朝日：衝撃の事実。ドラえもん第 1 話は 6 パターン存在した！ 50 周年を記念し、単行本「0 巻」が発売，<https://post.tv-asahi.co.jp/post-104731/>
- 3-3) 栗原聡，中島篤，国松敦：いかにして『ぱいどん』は生まれたのか？，人工知能学会学会誌，35 巻 3 号，pp410-417，2020.
- 3-4) バンダイ：『ドラえもん・ザ・ロボット』2004 年 3 月下旬発売，2004.
- 3-5) tasko：四次元ポケット PROJECT，  
<https://tasko.jp/works/%E5%9B%9B%E6%AC%A1%E5%85%83%E3%83%9D%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88project/>

- 3-6) NVIDIA : NVIDIA の歴史,  
<https://www.nvidia.com/ja-jp/about-nvidia/corporate-timeline/>
- 3-7) NTT docomo : ムーバ,  
[http://history-s.nttdocomo.co.jp/list\\_mova.html](http://history-s.nttdocomo.co.jp/list_mova.html)
- 3-8) HONDA : 自動運転レベル 3 で培った技術がもたらす安全運転支援, <https://www.honda.co.jp/stories/049/>
- 3-9) 国土交通省 : Plateau, <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- 3-10) デジタル庁 : デジタル田園都市国家構想,  
[https://www.digital.go.jp/policies/digital\\_garden\\_city\\_nation/](https://www.digital.go.jp/policies/digital_garden_city_nation/)
- 3-11) 内閣府 : Society5.0 とは,  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/)
- 3-12) United States government : Connected Government Act, 2018.
- 3-13) United States government : Modernizing Government Technology Act, 2017.
- 3-14) United States government : 21st Century Integrated Digital Experience Act, 2018.
- 3-15) 国立研究開発法人科学技術振興機構アジア・太平洋総合研究センター : 国家イノベーション駆動発展戦略要綱【仮訳・編集】 , 2016.
- 3-16) 国立研究開発法人科学技術振興機構 : 中共中央弁公庁・國務院弁公庁『国家情報化発展戦略綱要』 , 2016.
- 3-17) みずほ総合研究所 : 中国五カ年計画と長期目標の概要, 2020.
- 3-18) European Union : Shaping Europe's digital future,  
[https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/shaping-europes-digital-future\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/shaping-europes-digital-future_en)
- 3-19) European Union : Europe's Digital Decade: digital targets for 2030 , [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/europes-digital-decade-digital-targets-2030_en)
- 3-20) 内閣府 : AI 戦略,  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/index.html>
- 3-21) 三菱総合研究所 : 未来社会構想 2050, 2019.
- 3-22) 大成建設 : 2030 年の技術、その先の未来。 ,  
[https://www.taisei-techsolu.jp/tech\\_center/topics/2030/](https://www.taisei-techsolu.jp/tech_center/topics/2030/)
- 3-23) 清水建設 : シミズ・ドリーム,  
<https://www.shimz.co.jp/topics/dream/>
- 3-24) 大林組 : つくるを拓く,  
<https://www.obayashi.co.jp/makebeyond/>
- 3-25) トヨタ : TOYOTA WOVEN CITY,  
<https://www.woven-city.global/jpn/>
- 3-26) NBBJ , Tencent Shenzhen Headquarters Project (Net City),  
<https://www.nbbj.com/work/tencent-shenzhen-headquarters-project-net-city>
- 3-27) Google : Downtown West Mixed-Use Plan,  
<https://realestate.withgoogle.com/sanjose/>
- 3-28) NEOM : THE LINE,  
<https://www.neom.com/ja-jp/regions/theline>
- 3-29) NTT : IOWN, <https://www.rd.ntt/iown/index.html>
- 3-30) Federal Communications Commission : FCC TAKES STEPS TO OPEN SPECTRUM HORIZONS FOR NEW SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2019.
- 3-31) NTT Data : ブロックチェーンの仕組み,  
<https://www.nttdata.com/jp/ja/services/blockchain/002/>
- 3-32) 世界経済フォーラム第四次産業革命日本センター Note : 【開催報告】 DAO (分散型自律組織) 勉強会, <https://note.com/c4irj/n/n1216632fc310>
- 3-33) 山本和英 : GPT-3 から我々は何を学ばばいいのか, Japio YEAR BOOK 2020 寄稿集, pp332-335, 2020.  
[https://www.japio.or.jp/00year-book/files/2020book/20\\_5\\_06.pdf](https://www.japio.or.jp/00year-book/files/2020book/20_5_06.pdf)
- 3-34) 産総研マガジン : 量子コンピューターとは,  
[https://www.aist.go.jp/aist\\_j/magazine/20220518.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20220518.html)
- 3-35) Synced : NeurIPS 2021 Announces Its 6 Outstanding Paper Awards, 2 Datasets and Benchmarks Track Best Paper Awards, and the Test of Time Award,  
<https://syncedreview.com/2021/12/01/deepmind-podracers-tpu-based-rl-frameworks-deliver-exceptional-performance-at-low-cost-156/>
- 3-36) TESLA : 運転の未来,  
<https://www.tesla.com/jp/autopilot%20>
- 3-37) 国土交通省道路局 : 橋梁定期点検要領, 2019.
- 3-38) 国土交通省道路局 : 道路トンネル定期点検要領, 2019.
- 3-39) 八千代エンジニアリング : TRAVIC,  
<https://www.yachiyo-eng.co.jp/government/pickup/TRAVIC/>
- 3-40) 毎日新聞 : , ワンルームの半分以下 東京都心の「極小物件」に若者注目のわけ,  
<https://mainichi.jp/articles/20220725/k00/00m/040/067000c>
- 3-41) Ray Kurzweil : The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology, PENGUIN BOOKS, 2006.
- 3-42) デジタルネイチャー研究室 : VISION,  
<https://digitalnature.slis.tsukuba.ac.jp/vision/>
- 3-43) 安宅 和人 : 時代局面を考える,  
<https://note.com/api/v2/attachments/download/3df0b96a2162dfde5924d897568fc58d>
- 3-44) Mose : Mose System,  
<https://www.mosevenezia.eu/mose/?lang=en>

## GROWING UP INFRASTRUCTURE IN FASTER SOCIETY

Yuta TAKAHASHI, Yosuke KOGURE, Yoshikazu KIKUCHI, Ryuto YOSHIDA  
and Junichiro FUJII

This white paper attempts to revise the conventional theory of infrastructure in the field of civil engineering. By rethinking the current technological innovations, the next generation's view of infrastructure are verified and the technologies and visions required in the future are introduced. Civil engineering infrastructure professionals, as well as managers and engineers who are considering participation in the field of civil engineering infrastructure with cutting-edge technologies are target of readers. This contributes to the realization of a well-being society by presenting the level of technology currently applied to infrastructure, the social issues to be addressed by the application, and the vision that society should achieve in the future.