

技術展望

社会インフラ (土木・建築) 分野におけるDX進展への期待

Expectations for DX Progress in the Field of Building and Infrastructure

半谷 公 司*
Koji HANYA

抄 録

社会インフラ分野におけるDXに関する議論を発散させないこと、またDXの専門家や学術関係者から広範な助言を得る切っ掛けをつくることを目的に、当該分野における課題とDX進展への期待を整理する。

Abstract

In order to avoid divergent discussions on DX in the field of building and infrastructure and to provide an opportunity to obtain extensive advice from DX experts and academics, I will summarize the challenges and expectations for DX development in this field.

1. はじめに

社会インフラ分野においても脱炭素要求は加速しており、従来からある自然災害の頻発、労働人口減少、老朽化の進行等の差し迫った課題群と合わせて対応する必要がある(図1)。検討対象となる社会インフラ、手段として期待されるDX、脱炭素をはじめとする課題群のいずれもが多岐にわたる。市場における立場や役割によってそれぞれ見え方が異なることから、当該分野関係者の間においても議論が発散することがある。ひとつの企業の中においても、DXの進展は、たとえば製造・販売・技術・研究という従来の垣根を引き下げ、本質課題の議論こそが重要にならう

としている。

そのような状況の中、本稿は、DXの専門家や学術関係者から広範かつ実効性の高い助言を得る切っ掛けをつくることを目的に、社会インフラ分野の状況を簡潔に整理し、またDX進展への期待を示す。そのため関連事項を分類、整理しながら紹介するが、個々の正確な説明はそれぞれの関連文献を参照されることを前提とする。

2. 本稿における“社会インフラ”の定義

国土交通省は“維持管理が必要な社会インフラ”として、道路、治水(河川、砂防)、下水道、港湾、公営住宅、公園、海岸、空港、官庁施設を挙げている。これらは国と地方公共団体が管理する施設である。これらの他に民間が主に関わる低層住宅から高層ビル、住宅以外の工場や倉庫などの建築構造、あるいはエネルギーや鉄道に関連する施設も対象になる。これらをまとめた広義の社会インフラを、本稿で扱う“社会インフラ(Building and Infrastructure)”と定義し、表1のように整理する。なお製鉄所を含む各種工場や、発電所などのエネルギー設備は、産業インフラというカテゴリーに分けている。

3. 社会インフラ分野におけるDX

3.1 3つのDX

社会インフラ分野においても、DXという表現には、様々な意味や期待が含まれる。本稿では下記3種類のDXを整

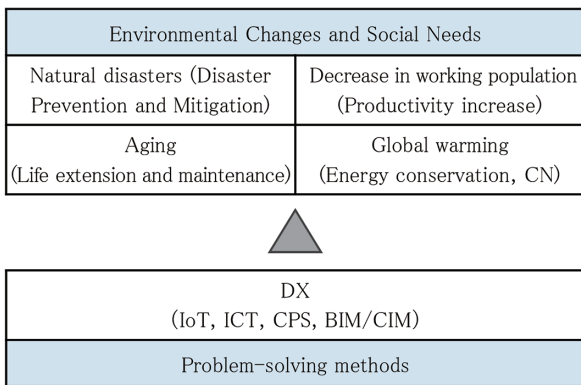


図1 環境変化と社会ニーズ群および問題解決の手段
Environmental changes, social needs, and problem-solving methods

* 鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 博士(工学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

表1 本稿で対象とする広義の社会インフラ
The broader meaning of social infrastructure covered in this report

Social infrastructure	Roads, railroads, water supply, electricity (transmission facilities), gas, communications (towers), ports, levees, dams, stations, airports, Important buildings (hospitals, city halls, schools)
Industrial infrastructure	Various plants including steel works, Power plants and other energy facilities
Building	High-rise buildings (offices, condominiums, hotels, commercial facilities) Low-rise residential buildings (apartment buildings, detached houses, commercial facilities), warehouses

表2 本稿におけるDXの分類
Classification of DX in this report

DX-A	Technology to reproduce/transcend human proficiency with data science (big data, machine learning, etc.)
DX-B	Technology for data sharing and virtualization of machining/construction processes (3D databasing and virtualization, etc.)
DX-C	Cases where the business model and/or concept is more important than the technology (using/not using the latest technologies listed above)

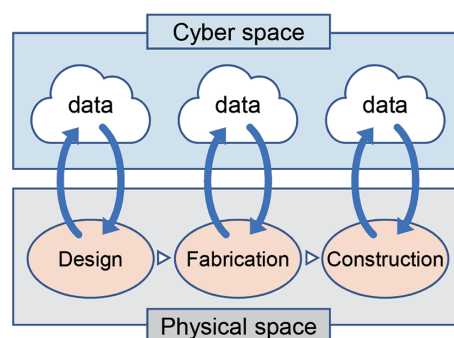
理する(表2)。なおこれらの分類は足元状況を共有化し、当該分野の特徴への理解を促すための整理であり、正確な分類ではないことを理解されたい。

(DX-A) 熟練した人の技術をデータ科学で再現あるいは超越することを狙うもの:

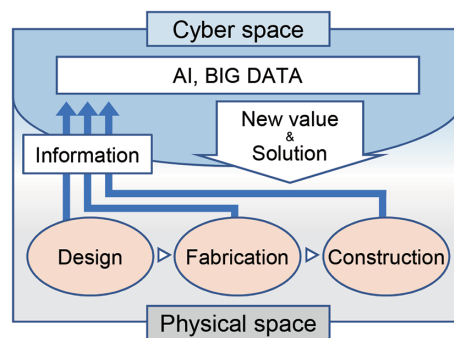
IoTやビッグデータで得られたデジタル情報をAI等で解析して、熟練技術者のノウハウとしてブラックボックス化している情報処理を再現する技術、あるいはそれらを超えた人の思考では及ばない新たな結果を得るもの。日本製鉄(株)は季刊誌²⁾の中で、業務プロセス改革と生産プロセス改革を目指すデジタル改革の両輪として掲げていることからわかるように、製造業の関係者の多くが最初にもつDXのイメージに該当すると思われる。

(DX-B) 加工/建設する前にバーチャルで完成形を見えるようにすることを狙うもの:

3Dモデルの共有化による建設後イメージの共有化、あるいは時間的/空間的な干渉確認などによる建設プロセスの効率化を狙うもので、BIM/CIM(Building/Construction Information Modeling)の利用が中心になる。国土交通省はi-Constructionを掲げ、3Dデータの標準化やオープンデータ化、その利活用などの環境整備、新たなビジネス創出を目指す取り組みがなされている。将来的には、航空業界等で先行しているデジタルツイン(CPSモデル: Cyber-Physical System)による建設後の維持管理の効率化などへの応用も期待されている³⁾。建設業の関係者の多くが最初にもつDXのイメージに該当すると思われる。



(a) Information Society to date (Society 4.0)



(b) Society 5.0

図2 社会インフラ分野におけるこれまでの情報社会から Society5.0 への変化イメージ
Schematic diagram of change from the Society 4.0 to Society 5.0 in the field of building and infrastructure

(DX-C) その他の技術:

上記以外にAI等の最新技術を開発/活用する以前の段階に課題があり、システム化の難度は相対的に小さく、既存技術で対応可能なものもある。上記のDX-A, DX-Bに相当する技術の一部は活用するとしても、それ以前の売り方やビジネスモデルの設計が本質課題になることも多いようである。本稿ではその状況を共有化し、議論を分散させないためにも、他二者と分けて整理している。

3.2 Society5.0に向けて

また別の整理として内閣府が掲げる Society5.0が参考になる⁴⁾。経済発展や社会的課題の解決に向けて様々な視点での取り組みや方針を示し、これらを実現するための手段として、DX(仮想空間(デジタル情報)と現実空間(モノ)を高度に融合させたシステム)を挙げている。この Society 5.0の考え方を社会インフラ分野における代表的な工程である設計(Design)、加工(Fabrication)、建設(Construction)へ当てはめると、図2のように整理できる。これまでの情報社会(Society4.0)では、各工程で別々のデジタル情報にアクセスし、人の指示に基づき計算、解析、可視化がなされるが、各工程の情報は一部例外を除いてそれぞれ独立している。Society5.0においては、情報はビッグデータとして集約・管理され、AIにより解析され、設計者や施工者へ作業のヒントや改善策が提供されるとされている。社会イ

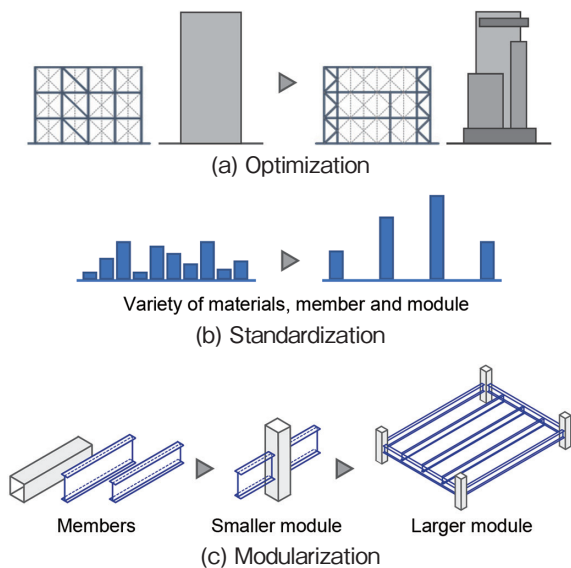


図3 Society5.0を実現するための研究開発の3つの視点
Three approaches to R&D for Society 5.0

インフラ分野において、ここまで進化したシステムが一般化するには時間を要すると思われるが、Society5.0へ向けた変化は止まらないであろう。

この将来に向けた変化を前に、今進めるべき現実空間におけるモノの工夫として、最適化、標準化、モジュール化がある(図3)。本稿ではそれぞれ以下のように整理する。

- (a) 最適化：利便性や経済性を保ちつつ、省材料、省作業、省CO₂を実現するための構造設計、構造詳細、建設工程における無駄を省くこと。
- (b) 標準化：材料の種類を統一することを通して省CO₂を狙うもの。またより限られた種類の材料や部材で、市場の多様なニーズに応えられるようにすること。
- (c) モジュール化：対象をより大きな要素、まとめ、機能でとらえて最適化、標準化を狙うこと。

4. カーボンニュートラルに向けた社会インフラ分野の課題と期待

4.1 ライフサイクルCO₂削減への貢献

実効性高くCO₂を削減するためには、ライフサイクル全体で考える必要があり、DXへの期待のひとつは部分最適をなくすことであるといえる。社会インフラにおけるライフサイクルは、材料製造、計画、設計、加工、建設、運用、メンテナンス、撤去、リサイクルであり、これらを通して全体最適を達成することがゴールになるであろう。議論のために、各プロセスにおけるCO₂削減のための検討視点の一例を以下に列挙する。

計画、設計プロセスにおいて排出されるCO₂はライフサイクルの中で相対的に小さいといえる。構造部材それぞれの軽量化や、それらの数の削減が有効であり、材料の高強度化や、より合理的な利用技術の採用により、後工程で生じるCO₂の削減の鍵を握る工程となる。計画、設計プロセ

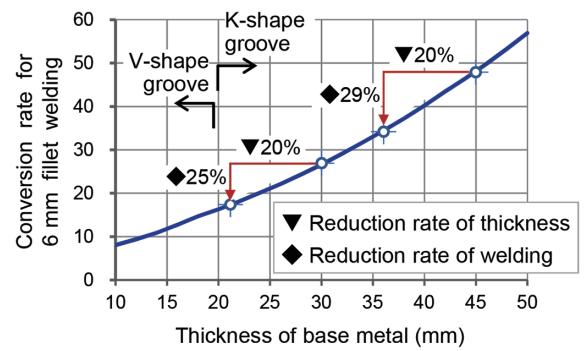


図4 鋼材板厚削減量と溶接（溶材、作業）削減量の関係の一例

An example of the relationship between steel thickness reduction and welding (welding material and work) reduction

スでは、それらを事前に見えるようにすることが期待されており、後述するBIM/CIM技術がそれを担うことになる。

加工プロセスでは、切断や溶接の効率化が一段ととなる。たとえば鋼材板厚と溶接量のそれぞれの削減量の関係の一例は図4のようになる。この例はいわゆる6mm換算率⁵⁾に基づく、やや粗い比較ではあるが、板厚よりも溶接量の削減率は大きく、鋼材が厚いほどその効果が大きいことがわかる。鋼材の強度を高め、その板厚を薄くすることは確実に効果が得られる取り組みであるといえる。

建設、撤去のプロセスは一定のCO₂排出量を占めており、建設会社等が中心になりその削減に向けた取り組みがなされている。ライフサイクルでの議論をするには、“つくり易さ”だけでなく、“分解し易さ(解体性)”へも配慮した技術開発が今後加速するであろう。

ライフサイクルの中で多くを占めるのは、材料製造時と運用時に生じるCO₂である。道路や橋梁などでは、運用時CO₂の削減は主に自動車側の課題として扱われている。その一方、建築構造、特に住宅や事務所では運用時CO₂は、ライフサイクルCO₂に対して、材料製造時以上に大きなインパクトを与える。この運用時CO₂については後述する。なお運用時も含めたライフサイクルCO₂を積算するツールは、たとえば文献6)に示されるものなどが用意されている。

材料製造プロセスで排出されるCO₂について、日本製鉄では2030年をターゲットとしてCO₂総排出量を2013年起点で30%削減することを掲げている。また2050年ビジョンとして複合的な手段によるカーボンニュートラルを目指している⁷⁾。鉄鋼材料の殆どは水平リサイクルされている。また文献8)等によれば、建設の他、自動車、家電、飲料缶などを含む国内の鋼材は平均的に100年で5回再生されると試算されている。一方文献9)等によれば、社会においてリサイクルされる鋼材の量は急を増やすことはできないとされており、CO₂抑制と経済発展を両立させるためには、高炉と電炉でバランスよく鋼材を供給していくことが重要であるということが理解できる(図5)。このようなりサイクルを前提としたライフサイクル全体における客観的かつ

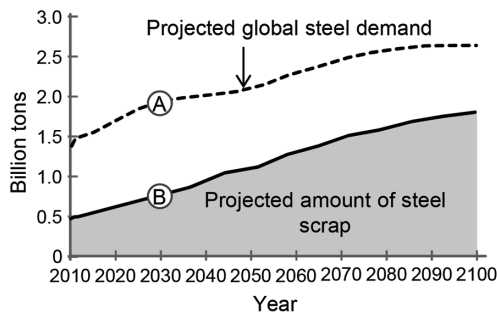


図5 スクラップ発生量および鉄鋼需要の推移⁹⁾

Future projection for amount of steel scrap and global steel demand⁹⁾

本質的な CO₂ 排出量を市場全体で共有化していくことは必須であり、その手段として DX への期待は大きい。

4.2 進行中の変化 (BIM/CIM の進展)

社会インフラ分野における進行中の DX の事例として、BIM/CIM があることは 3 章で述べたとおりである。それらを活用したデータ連携は既に始まっており、特に海外 (欧米や ASEAN 諸国) におけるそれらの活用は国内より先行している。

BIM/CIM とは、3D の建設データを建設プロセス全体で共有する仕組みである。それらの情報は既に溢れていることから、本稿での紹介は割愛し、ごく簡単なイメージを図 6 に示す。図 2 と同じく工程を設計、加工、建設の 3 つに集約してモード化しており、BIM/CIM がプラットフォームとなりデータが共有されることで労働生産性が上がるとされている。一方、たとえば国内の建築鉄骨分野の BIM においては、設計工程と加工工程とでデータが分断されており、両者の中でのデータのやり取りに課題が残るといわれてきた。設計 BIM は机上における 3D 情報が主であることから計算機の中で検討が閉じているのに対し、加工 BIM では 3D 情報 (バーチャル/サイバー) から鉄骨加工作業 (フィジカル) へ展開する必要があるためである。これはデータの互換性だけでなく、擦り合わせ手法 (工程間のコミュニケーションにより最適化やコストダウンがなされる手法)、あるいはデータ瑕疵問題 (データの瑕疵により生じる損害補償の責任の所在に関する問題) などが課題になるとされている。擦り合わせによるメリットを最大化できる現行手法は、国内の企業や技術者の強みでもある、いわゆる“レガシーシステム”のひとつであり、それらも活かしたうえで日本型の BIM/CIM を進められるか否かが今後の市場における課題になるであろう。

なお、この根本課題のひとつとされてきた設計工程と加工工程の BIM データの受け渡しを担うビジネスは既に存在しており、今後その発展と、それに伴う BIM/CIM のいっそうの一般化が期待されている。

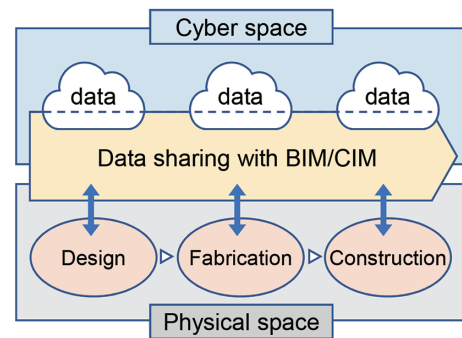


図6 BIM/CIM による建設データの共有
Construction data sharing using BIM/CIM

4.3 加速させるべき本質的な変化

日本製鉄は、LCA 視点で本質的に貢献できる材料および利用技術の開発を進めていく。下記 2 つのアプローチが考えられる。

4.3.1 情報の可視化と共有化による本質的価値の定量化: L-LCA (Longer Life Cycle Assessment)

建築構造のライフサイクルにおける CO₂ (以下、LCCO₂) 排出は建設時より運用時の方が多く、60 年長期では 3 倍以上になるという試算もある。たとえば低層住宅における LCCO₂ 構成を、林野庁の資料¹⁰⁾ に基づき鉄骨住宅を対象に計算した結果の一例は図 7 となる。建設完了までのいわゆるエンボデイド CO₂ は全体の 20% 前後にとどまり、冷暖房のために生じる CO₂ は現行断熱仕様では全体の約 30% に及ぶとされる。断熱性を改善することによる、運用時 CO₂ ひいては LCCO₂ 圧縮のための検討は有効だといえる。

道路橋などでは構造体の性能改善を通じた運用時 CO₂ 圧縮は難しいとされており、構造体の長寿命化やメンテナンス作業の効率化が対策となる。たとえば鋼材製造時の CO₂ 材料重量をそれぞれ 30% 削減し、両者の削減効果の積としてエンボデイド CO₂ を半減 (0.7×0.7≒0.5) することをまず狙いたい。次にメンテナンス技術の強化により構造寿命を 2 倍に引き延ばすことで、CO₂ を当初の 1/4 (0.7×0.7×0.5≒0.25) まで圧縮することを目指したい (図 8)。これを実現できる条件を揃えることは簡単ではないと思われるが、研究目標として掲げていきたい。

このような断熱仕様の改善、あるいはメンテナンスも含めたインフラ長寿命化による省 CO₂ 効果が、施主や設計者ひいては社会全体に見えるようにできることが DX への大きな期待である。

鋼材は廃棄される数%を除くほぼ全量が水平リサイクルされるといふ大きなメリットをもつ材料である。何度も繰り返されるリサイクルも含めたいっそう長いライフサイクルで評価できるように、その中で全体最適化を目指していくことが本質的な貢献のひとつだと考える。これは将来の地球環境に向けて市場全体で共有化すべき重要な価値観

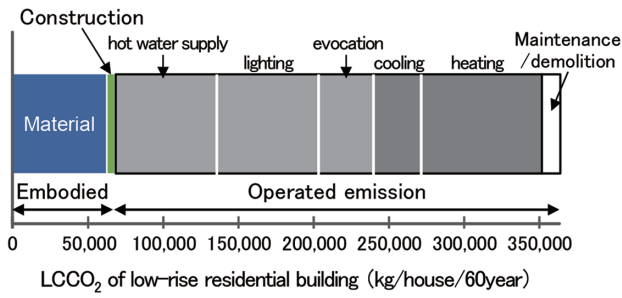


図7 低層住宅が60年間で排出するCO₂とその構成の一例
Life cycle CO₂ emissions in low-rise housing over 60 years and its composition (an example)

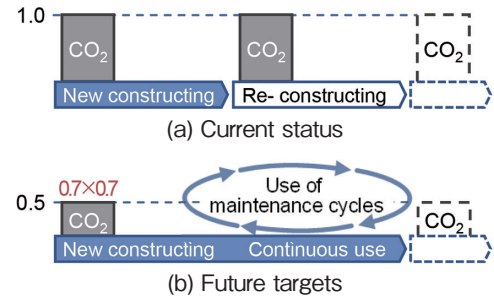


図8 軽量化と長寿命化によるCO₂削減ターゲットのイメージ
CO₂ reduction target due to weight reduction and longer operating life

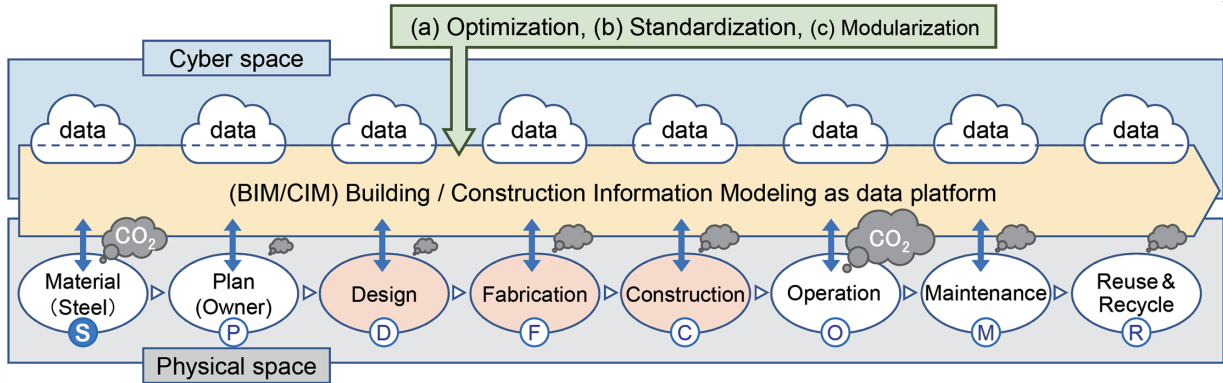


図9 社会インフラ分野における理想的なデータ共有化
Ideal construction/operation data sharing in the field of building and infrastructure

であり、より長いLCAという意味で、本稿ではL-LCA (Longer Life Cycle Assessment) とよぶ。

BIM/CIMは、L-LCAの視点で整理されたCO₂排出量等に関する情報を共有化するためのプラットフォームとしての役割も期待されており、その際の設計情報やCO₂排出量は図9のようなイメージの中で共有化されていくことになる。図中の記号は、それぞれS(材料)、P(計画)、D(設計)、F(加工)、C(建設)、O(運用)、M(メンテナンス)、R(リサイクル)であり、一巡の建設プロセスを示すものである。L-LCAの価値観においては、図10に示すような資源循環スパイラルにおけるいっそう長いライフサイクルでの全体最適化が必要であり、それを定量化し共有化できるようにすることこそが本質課題へ近づくことであり、社会インフラ分野のDXへの最大の期待と考える。

4.3.2 最適化、標準化、モジュール化の促進による課題群への対応

CO₂最小化のみを考えても、木材と鋼材の混構造、コンクリート構造への高炉と転炉の両スラグの更なる活用など、鉄鋼に関するものだけでも構造は複雑化していく。省材料、省作業、長寿命化などの課題が加われば、設計のいっそうの複雑化は避けられない。

鋼材を効率的に活用するための最新の設計技術や利用技術の一部は鉄鋼メーカーが開発し保有している。L-LCAの

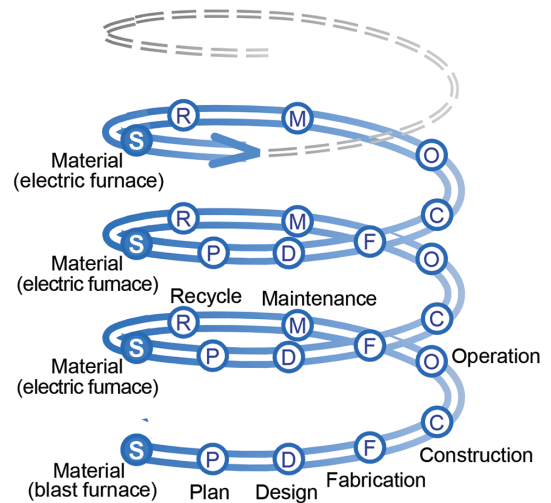


図10 繰り返されるリサイクルを前提とした理想的な建設プロセス
Construction process and recycling spiral (Ideal longer life cycle)

中での全体最適化のためには市場全体での協力が必要になる。日本製鉄は課題解決に資する設計技術や利用技術をこれまで以上に積極的に提供していく。先に示した最適化、標準化、モジュール化を実現するための工夫としてDX、特にクラウドコンピューティングへの期待は大きい。たとえば建築構造のような3D鉄骨骨組の幾何学的な最適設計法は建設会社を中心に進められている。日本製鉄は鉄鋼

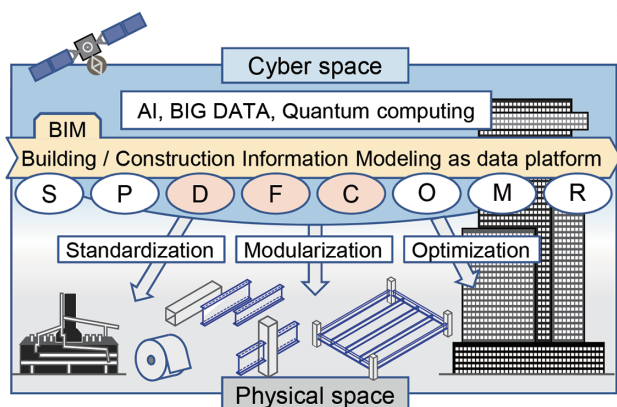


図 11 最適化，標準化，モジュール化の促進による課題群への対応

Approach to a complex set of issues by promoting optimization, standardization and modularization

メーカーとして、材料特性と組み合わせた構造最適化を提供することで、またデータプラットフォームである BIM からアクセスできる仕組みを提供することで、L-LCA 視点での CO₂ 最小化に貢献できると考えている。

BIM/CIM をプラットフォームとした、企業や業種の境界をまたぐデータ連携の課題は克服される前提での議論となるが、先に述べた内閣府が示す Society5.0 の考え方になぞらえると、社会インフラ分野における将来のあるべき絵姿は、図 11 のような模式図に整理ができる。最終ゴールである社会インフラそれぞれにおける最適化と、材料、部材、モジュールにおける標準化という、一部相反する特性を含む目標を両立させる手段が必要になるということである。この手段としての DX への期待も大きい。

5. その他のDX関連技術への期待

上記の他、様々な DX 関連技術があり、社会インフラの課題群の解決に大きく寄与するいくつかの技術を以下に紹介する。なお機械学習を伴う AI 技術や施工ロボット技術は、開発の対象や方針が多岐にわたること、また積極的に開発を進める建設会社等から十分な情報が提供されていることから、本稿における議論の対象から外している。

5.1 Cyber-Physical System (CPS) (図 12)

航空業界で先行している CPS やデジタルツインの考え方を社会インフラ分野へ導入すること、特に維持管理のために活用することが期待されている。たとえば地震被害を受けた道路橋梁を対象に、被災前後の固有周波数を計測し、計測した周波数変化に合致する損傷モードを同定する技術が実用化されている¹¹⁾。今後いっそう高度化するセンシング技術と、3D 有限要素モデル (FE analysis model) がネットワーク上で一体となり、橋梁に限らず様々な社会インフラを対象に広範な分析が日常的に行われるようになるであろう。

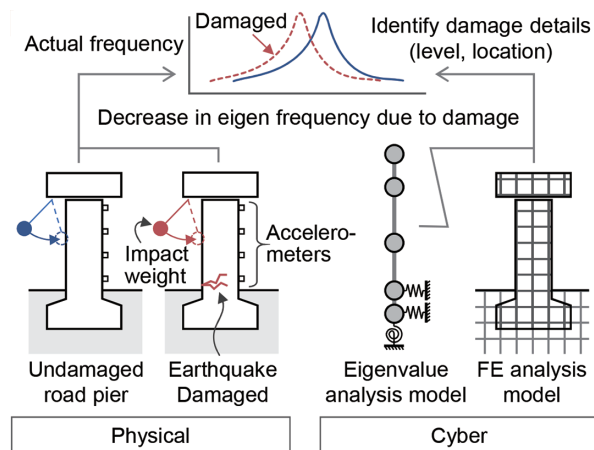


図 12 社会インフラ分野における CPS の一例
An example of CPS in the field of building and infrastructure

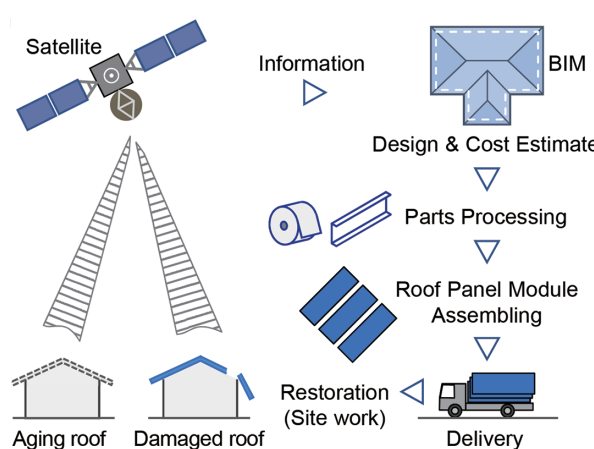


図 13 人工衛星を活用した屋根構造の改修・復旧システム
Satellite-based roofing component repair and restoration system

5.2 人工衛星の活用 (図 13)

老朽化した屋根の点検や補修、暴風災害による屋根被害の状況把握や修理のために、衛星（地球観測衛星や準天頂衛星）を活用する技術がある。米国の例¹²⁾では、衛星画像を利用して、補修設計とその見積もりまでが安価かつ即座に得られるシステムが提供されている。ドローンを活用して屋根の健全性を評価する技術は国内でも一般化されつつあるが、衛星を活用することで、ユーザーがオンライン上のプログラムに住所を入力するだけで検討が開始される仕組みを実現している。図 13 は、本システムにおけるデータと物の流れを模式的に示したものである。このシステムの価値をいっそう高めるには、最終工程である現場での屋根工事の簡単化や工期短縮も行えるようにすることであろう。また図 3 に示した最適化、標準化、モジュール化が重要な開発視点であることを改めて実感できる。

定点観測衛星データを入手解析することで、橋梁や大型建造物の地盤変動や季節温度差による膨張収縮がトレース可能である。年単位の経時劣化や地盤変動の影響を構造種別毎に比較できる。また GPS を高精度化したシステムでは

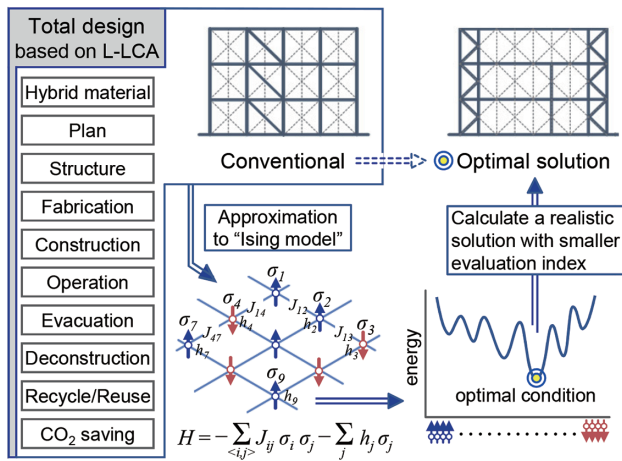


図 14 量子コンピューティングへの期待（総合設計における多目的最適化問題の解を量子アニーリングで導出するイメージ図）

Expectations for quantum computing: Schematic diagram of using quantum annealing to find a solution to a multi-objective optimization problem in integrated design

オープンスカイで 1cm 単位の測位制度が得られており、補修箇所を精緻に特定することができる¹³⁾。

5.3 量子コンピューティングへの期待（図 14）

10～15 年後への期待として、量子コンピューティング技術の適用を挙げておく。巡回セールスマン問題やナップザック問題など、従来のノイマン型計算機では膨大な時間がかかる課題を短時間で解ける手法である¹⁴⁾。実務設計に直接適用することは現実的とはいえないが、たとえばひとつの建造物の中に、鉄鋼、コンクリート、木材、あるいはそれらのハイブリッド部材を、施主の要望に応えながら最適活用する場面においては、ひとつのガイドラインを提示する技術になる可能性に期待したい。なお現実的には、量子計算だけで問題を解くことは余り得策ではなく、既存のアルゴリズムの中で負荷の大きな設計事項について基本方程式であるイジングモデルに近似できるか否かを検討し、サブルーチン的に量子アルゴリズムに置き換えて計算効率を上げることを指向することになるであろう。脱炭素政策の中、今後設計者は、材料の複雑化、接合点数の最少化、工期の最短化、運用時の冷暖房費圧縮、火災時避難経路の最適化、解体性やリサイクルへの配慮などを通して、最終的に CO₂ を最小化するという要求を突き付けられることになる（図 14）。経済産業省が国力強化のために量子コンピュータ活用を強く志向していることを踏まえれば、鉄鋼製造プロセスで培ってきた DX 基盤力を、社会インフラ分野の L-LCA 型統合設計技術へ展開することで技術優位性を高めるための検討は将来必要になるであろう。

6. おわりに

社会インフラ分野における DX に関する議論を发散させ

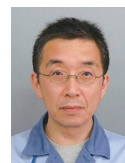
ないこと、また DX の専門家や学術関係者から広範な助言を得る切っ掛けをつくることを目的に、当該分野における課題と、DX 進展への期待を整理した。

実効性の高い CO₂ 削減をなすためには、部分最適でなく全体最適を狙う必要がある。検討対象とする領域を広げ、時間軸を延ばして議論するための L-LCA (Longer Life Cycle Assessment) という視点を提案した。材料 (S) - 計画 (P) - 設計 (D) - 加工 (F) - 建設 (C) - 運用 (O) - 維持管理 (M) - 再利用 (R) の建設スパイラルの中で、CO₂ 削減効果を定量化し共有化するための手段として DX への期待を示した。

Society5.0 への進化に向けて、最適化、標準化、モジュール化の議論を加速させる必要性を示した。市場ニーズを満たすための最適化と、CO₂ 削減と生産性向上のための標準化とは、相反する傾向が含まれる。これらを両立させるための手段としての DX への期待を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省：社会資本に関する実態の把握結果、メンテナンス戦略小委員会第 5 回配布資料、2013 年 2 月 26 日
- 2) 日本製鉄(株)：季刊ニッポンスチール、鉄×DX、07、(2020.12)
- 3) 国土交通省：委員会設置について など、BIM/CIM 推進委員会第 1 回配布資料、2018 年 9 月 3 日
- 4) 内閣府：Society5.0、https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/、2021 年 6 月
- 5) 国土交通省：鋼道路橋数量集計マニュアル(案)、2023 年 3 月
- 6) 掛上恭：住友林業の LCA 事業・One Click LCA の紹介、日本 LCA 学会誌、19 (1)、(2023)
- 7) 泉山雅明：日本製鉄技報、(417)、5 (2021)
- 8) 醍醐市朗：鉄鋼材料のリサイクル、材料の科学と工学、54 (2)、(2017)
- 9) Pauliuk, S. et al.: Environmental Science & Technology、47、3448-3454 (2013)
- 10) 林野庁：木材利用促進・省エネ省 CO₂ 実証業務報告書、2015 年 3 月
- 11) 羽矢洋：衝撃振動試験法による鉄道橋梁下部構造物の健全度診断、コンクリート工学、46 (1)、(2008)
- 12) roofr: The all-in-one sales toolbox for roofers、<https://roofr.com/>
- 13) 久保信明：図解よくわかる衛星測位と位置情報、日刊工業新聞社、2018 年 3 月
- 14) 香月諒大：量子コンピューティングガイドライン 量子アニーリング/イジングマシン編、NTT データ、2021 年 1 月



半谷公司 Koji HANYA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 博士(工学)
千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511