

カーボンニュートラルのための AI・デジタルツイン

阿部 雅人¹・杉崎 光一¹・全 邦釘²

¹ 正会員 株式会社ベシスコンサルティング (〒113-0033 文京区本郷一丁目5番11号)

E-mail: k.sugisaki@basisconsulting.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 東京大学大学院特任准教授 工学系研究科総合研究機構 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

E-mail: chun@i-con.t.u-tokyo.ac.jp.

カーボンニュートラル実現に向けた AI・デジタルツインの動向を調査し、今後の課題を展望する。GHG 排出源は多岐にわたることから、排出係数や活動量の計測・評価、関連データ等の連携や最適化等、AI やデジタルツイン技術の役割は大きい。インフラ分野においても、適用が進む BIM/CIM をベースとした排出量算定・最適化の研究開発が求められると考えられる。また、土木構造物は、都市全体の排出量への影響も大きい。単に構造物としてのスコープのみならず都市としてのスコープからの排出量低減を視野に入れる必要があり、今後、複雑な最適化問題を解く必要が出てくると想定され、量子計算や大規模データベース等のコンピュータサイエンスの先進技術の導入も必要であると考えられる。

Key Words: carbon neutral, GHG emission, civil structures, cities, artificial intelligence, digital twin

1. はじめに

温室効果ガス (Greenhouse Gas, GHG) を削減し、排出量と吸収量を均衡させるカーボンニュートラルへの取り組みが強く求められている¹⁾。学協会等における研究活動も活発化している²⁾。さらに、カーボンニュートラルを構造物のさらなる発展の領域として位置づけた動きもみられる³⁾。

本論文では、カーボンニュートラル、ネットゼロへ向けて、AI やデジタルツインが、どのように貢献できるか、また、その課題が何であるかを、既往の研究に基づいてレビューする。AI やデジタルツインは、デジタルトランスフォーメーション (DX) 推進の大きな力である⁴⁾が、本論文では、グリーントランスフォーメーション (GX) やサステナビリティトランスフォーメーション (SX) の文脈から展望する。

論文の構成は以下の通りである。

第2章では、カーボンニュートラル推進の基盤となる GHG のインベントリやプロトコルについて、インフラや構造物に関する視点から整理する。第3章では排出・吸収量の計測、第4章ではカーボンニュートラルに向けた材料や工法などの技術について論じる。次いで、排出量の評価・算定とそれを支援する情報基盤について第5章で、それらを用いた設計や最適化について第6章で取

り上げる。なお、構造物としては橋を中心として、建築や港湾構造物等の先進的な動向を含めて議論する。さらに、橋と密接に関連する都市の交通に伴う排出についても触れる。

2. GHG 排出・吸収量の算定・報告の方法

カーボンニュートラルを推進にあたっては、その基準となる GHG 排出・吸収量の算定が前提となる。我国では、国連気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) に基づき⁵⁾、国全体で1年間に排出・吸収する温室効果ガスの量を取りまとめた GHG インベントリを作成している⁶⁾。

GHG 排出量は、直接的に計測する場合もあるが、統計的に求められた単位活動量当たりの排出係数と、多種の GHG を二酸化炭素換算するための温暖化係数を用いて、以下のように推定されることが多い。

$$\text{排出量 (Emission)} = \text{活動量 (Activity Data)} \times \text{排出係数 (Emission Factor)} \times \text{温暖化係数 (Global Warming Potential)}$$

(1)

また、事業者レベルでも、CSR (Corporate Social Responsibility) 等の一環として、排出量削減やカーボンニュートラルへの取り組みが進められている⁷⁾。各事業

者の事業活動は購入や販売を通じてサプライチェーンで繋がっており、そこに大きな削減ポテンシャルが存在する可能性があることから、事業者単体の排出量のみではなく、事業者に対してはサプライチェーン全体の排出量を把握することが望まれ、サプライチェーンを含めたGHGプロトコルが提案されている⁹⁾。

事業者における排出量算定にあたっては以下のGHG算定報告原則に基づくことが求められる。

- ・ 目的適合性(Relevance) GHG インベントリが事業者のGHG 排出量を適切に反映し、かつ事業者内外の排出量情報利用者の意思決定ニーズに役立つようにすること。

- ・ 完全性(Completeness) 選定したインベントリ境界の範囲内に含まれるすべてのGHG 排出源と活動からの排出量を算入して報告すること。除外した排出源や活動があれば、開示してその理由を示すこと。

- ・ 一貫性(Consistency) 排出量の意味ある経時比較を可能にするために一貫した方法を用いること。時間の経過において、データ、インベントリ境界、手法またはその他の関連要素に変更があった場合は、それについて明確に言及すること。

- ・ 透明性(Transparency) すべての関連事項について監査証跡を明確に残せるよう、客観的かつ首尾一貫した形で開示すること。用いた仮定を開示し、使用した算定・計算手法や情報源の出典を明らかにすること。

- ・ 正確性(Accuracy) GHG 排出量の算定結果が、推定できる限りの実際の排出量を過大または過少に評価することのないように体系的になされ、また、それに伴う不確実性を可能な限り最小化するよう努めること。情報利用者が報告された情報をもとに意思決定を行うのに合理的に十分な正確性を保証すること。

サプライチェーン排出量は、一般に以下の形で表される¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \text{【サプライチェーン排出量】} &= \text{【Scope 1 排出量】} \\ &+ \text{【Scope 2 排出量】} + \text{【Scope 3 排出量】} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、Scope 1：直接排出量、Scope 2：エネルギー起源間接排出量、Scope 3：その他の間接的排出量である。文献 11)では、インフラ事業の建設時での算定方法が提案されている。建設事業に Scope をあてはめると以下のようなになる。

Scope 1：元請け等が燃料を使用する活動（直接排出）

Scope 2：元請け等が他社から供給された電気等を使用する活動（間接排出）

Scope 3：Scope 1、Scope 2 以外の間接排出

文献 11)では、Scope 3 の上流までを対象として、文献 10)に従って、活動に関するカテゴリを、表-1 のような形で示している。ここで、上流とは原則として購入した製品やサービスに関する活動を、下流とは原則として販売

した製品やサービスに関する活動を指す。なお、文献 11)は建設時までを対象としているため scope 3 の下流については、参考までに文献 10)で記載されている一般的な事業を想定した活動を記載した。インフラ事業では、scope 3 の下流は、供用維持管理段階にあると考えられるが、その具体化は今後の課題であるとされている。

表-1 各 Scope に対応するカテゴリと活動^{10),11)}

区分	カテゴリ	建設時に想定される活動	
自社の排出：元請け等の活動による直接排出、電気等の使用に伴う間接排出			
	直接排出 (Scope1)	・ 建設機械の稼働に伴う燃料の使用 ・ 土砂等の運搬、現場発生品及び支給品の運搬に伴う燃料の使用	
	エネルギー起源の間接排出 (Scope2)	・ 建設機械の稼働に伴う電力の使用 ・ 土砂等の運搬、現場発生品及び支給品の運搬に伴う電力の使用	
その他の間接排出 (Scope3)			
上流	1	購入した製品・サービス	・ 元請け等が購入する材料の製造
	2	資本財	・ 元請け等の資本財の建設・製造
	3	Scope1,2 に含まれない燃料及びエネルギー関連活動	・ 元請け等以外から調達する燃料や電気の調達時までの活動
	4	輸送、配送 (上流)	・ 調達物が元請け等に届くまでの物流
	5	事業から出る廃棄物	・ 建設現場で発生する廃棄物の輸送・処理
	6	出張	・ 元請け等及び協力会社の従業員の出張
	7	雇用者の通勤	・ 元請け等及び協力会社の従業員が建設現場へ通勤する際の移動
	8	リース資産 (上流)	元請け等が賃借しているリース資産の操業
下流	9	輸送、配送 (下流)	(自社が販売した製品の最終消費者までの物流に伴う排出)
	10	販売した製品の加工	(事業者による中間製品の加工に伴う排出)
	11	販売した製品の使用	(使用者(消費者・事業者)による製品の使用に伴う排出)
	12	販売した製品の廃棄	(使用者(消費者・事業者)による製品の廃棄時の処理に伴う排出)
	13	リース資産 (下流)	(賃貸しているリース資産の運用に伴う排出)
	14	フランチャイズ	(フランチャイズ加盟社における排出)
	15	投資	(投資の運用に関する排出)
	その他	(従業員や消費者の日常生活に関する排出等)	

インフラに関する別の視点として、都市としてのGHG排出量の算定に関する基準も提案されており¹²⁾、表-2にあるように都市境界内外の幅広い活動が対象となっている。表-3に示した、対象となる部門を見るとエネルギー、交通、廃棄物などのインフラ事業は網羅されており、文献11)で対象とされていない運用維持管理段階の排出は都市GHG排出量算定においては主たる対象となると考えられる。

表-2 都市のインベントリに関するScopeの定義¹²⁾

Scope	定義
Scope1	都市境界内に発生源を有する排出
Scope2	供給網による電力・熱・蒸気・冷房等の都市境界内での消費による排出
Scope3	その他都市境界内で行われる活動の結果として排出される都市境界外のあらゆる排出

表-3 都市のGHG排出部門¹²⁾

部門	下位部門
経常的エネルギー	住宅 商業・産業用建物および施設 製造業および建設 エネルギー産業 農業、林業および漁業活動 特定されない発生源 鉱業、工程、貯蔵、石炭輸送に伴う漏洩排出 石油ならびに天然ガスシステムからの漏洩排出
交通	道路 鉄道 水運 航空 オフロード
廃棄物	固形廃棄物 廃棄物の生物的処理 焼却及び野焼き 下水処理及び排出
製造工程および製品使用 (IPPU)	製造工程 製品使用
農業、林業および他の土地利用 (AFOLU)	家畜 土地 骨材源および二酸化炭素以外の土地からの排出
その他 Scope3	

3. 計測

排出量や排出係数の精度や信頼性はカーボンニュートラル実現の前提となる。そこで、排出・吸収量の推定を、各種計測から行う研究が行われている。例えば、我国では、地球観測衛星による排出量の計測にも取り組んでい

る¹³⁾。衛星データの分析や推定へのAIの適用も進められている¹⁴⁾。

また、排出源の活動量の計測も行われており、例えば、港湾での活動量に係る船舶や施設のリモートセンシングによる計測例も報告されている¹⁵⁾。

工事現場での排出量を低減していくにあたっては、建機等の活動量の計測が有効であると考えられる。施工管理や安全管理等を目的として、画像等で人や建機などの現場の状況をリアルタイムに把握可能なデータ基盤^{16,17)}やAI^{18,21)}の開発が進められている。これらを発展させ、排出量計測用途も含めた研究開発が望まれよう。特にリアルタイムの排出量計測が実現すれば、単に排出量の算定評価のみならず、現場の状況に応じて排出量を低減するように、建機の運用に逐次フィードバックするなど可能となろう。

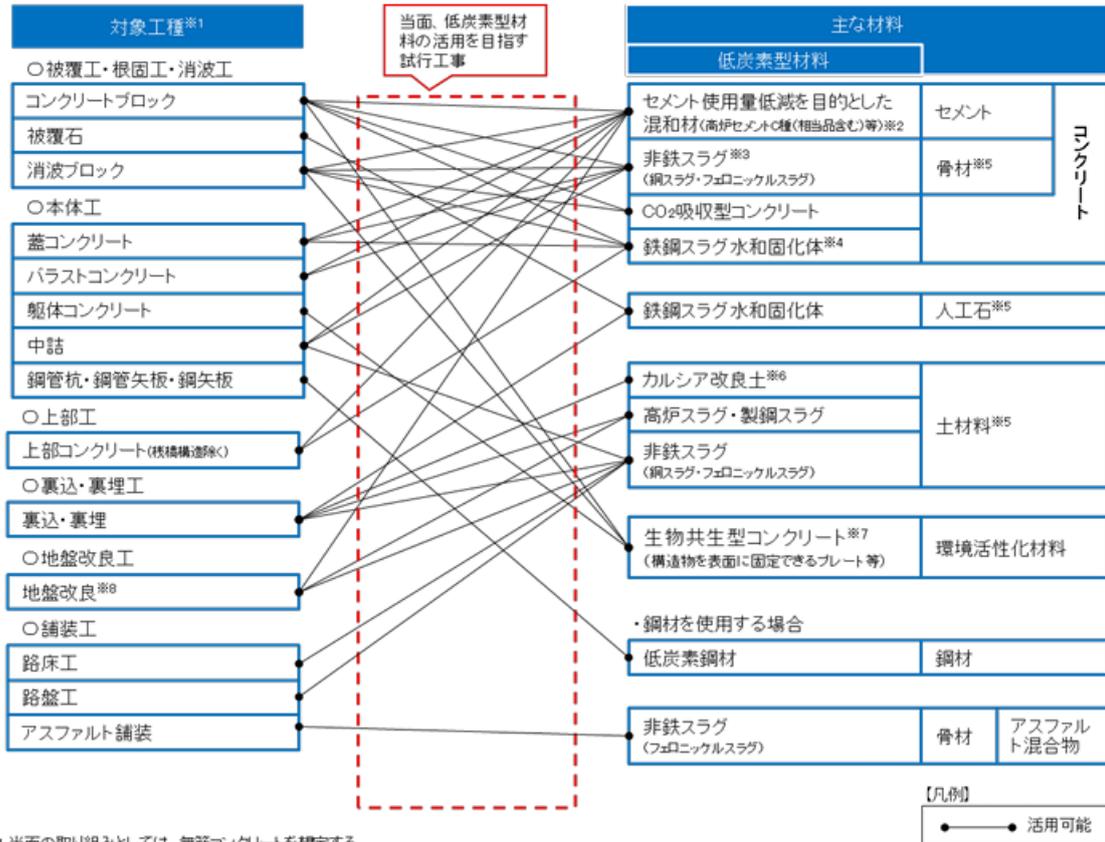
吸収源に目を向けると、近年、ブルーカーボンが注目されており、その計測の取り組みも進められている。ブルーカーボン²²⁾とは沿岸・海洋生態系が光合成によりCO₂を取り込み、その後海底や深海に蓄積される炭素のことである。ブルーカーボンの主要な吸収源としては、藻場(海草・海藻)や塩性湿地・干潟、マングローブ林があげられる。実際に原位置でのサンプルを取得した炭素計測^{23,24)}に加えてリモートセンシングの適用²⁵⁾も試みられており、その処理にはAIが有望な手法として期待されている²⁶⁾。

4. 材料・工法

カーボンニュートラルに向けた材料や工法の開発も進められている。例えば、文献27)では、港湾工事について工種と利用が想定される工法が、図-1のように示されている。

高炉スラグやフライアッシュなどの副産物系の材料を用いたり、再生骨材を利用したりすることで、排出量を低減したコンクリートが検討されている^{28,31)}。また、コンクリート内部の水酸化カルシウムなどが、大気中のCO₂を少しずつ吸収して反応していく炭酸化の現象を利用して二酸化炭素を吸収するコンクリートの研究開発も進められている^{32,34)}。

カルシア人工石は浚渫土や製鋼スラグ等の副産物から製造した代替石材でありCO₂排出量が低い特徴があるが、さらに、このカルシア人工石に炭素素材を添加・固定することでCO₂吸収型人工石(炭素固定人工石)を開発し、その効果を検証した研究も報告されている^{35,36)}。



※1 当面の取り組みとしては、無筋コンクリートを想定する。
 ※2 高炉セメントC種はJIS R5211に定義された高炉スラグの混入率が60~70%のものを指す。
 また、高炉セメントC種相当品とは、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混練材として混入し、高炉セメントC種相当の高炉スラグ混入率(60~70%)になるように配合した材料を指す。
 ※3 コンクリート用骨材に活用できる非鉄スラグのうち、フェロニッケルスラグは細骨材及び粗骨材に活用でき(JIS A 5011-2)、鋼スラグは細骨材に活用できる(JIS A 5011-3)。
 ※4 鉄鋼スラグ水和固化体は、工場や陸上施工ヤードなどで品質管理が行われることから、プレキャスト材を想定する。
 ※5 一般材料と比べ、運搬距離の短縮により低炭素化を図れる材料も検討の対象とする。
 ※6 炭素土とカルシウム改質材を混合し、炭素土中のCO₂を貯留することにより低炭素化を図れる材料も対象とする。
 ※7 藻場造成等の環境活性化に資するコンクリートのこと。
 ※8 地盤改良工に活用する場合、工法により適用の可否が異なる。

図-1 主な低炭素型材料と利用が想定される工種²⁾

護岸を解体・撤去後に同一断面の護岸を新たに建設することを具体的に想定し、護岸解体で発生した石材や土砂等を更新時の護岸の建設材料に再利用することによるCO₂排出量の削減効果が試算されている³⁾。

文献 38)では、実際の浚渫土砂を転炉系製鋼スラグ材で改質して利用した防波堤背後盛土の施工に対して、浚渫土砂の有機炭素量の詳細調査を行い、海中利用によるCO₂排出の可能性を検討している。鉄鋼スラグ水和固化体の護岸ブロックへの適用の事例も報告されている³⁹⁾。

実際の副産物を複数選定して、CO₂固定化素材のカーボンキャプチャー性能をデータベースにしたプロトタイプが提案されている⁴⁰⁾。さらに、このデータベースを活用して、具体的な産業廃棄物処分場を例に挙げて、その吸収性能を評価している。また、廃棄物・資源循環におけるAIやIoTの活用も報告されている⁴⁰⁾。

このようにコンクリートをはじめとして、副産物や再生材料等を活用した材料開発が進められている。材料開

発については、2024年のノーベル化学賞⁴²⁾にあるように、AIの有効性が着目されており、構造物材料設計にもAIの適用が研究されている⁴³⁾⁴⁴⁾。AIによる材料設計を進展させて、ロボットと統合し、自動的に実験検証まで行おうというAIロボット駆動科学も研究されている⁴⁵⁾。これら、先進的なAIによる材料設計技術を、低炭素土木材料開発へ適用することによる、さらなるイノベーションが期待される。

5. 評価・算定

GHG排出量の算定や評価に関する研究を、第1節では構造物の観点から、第2節では都市の観点から整理する。

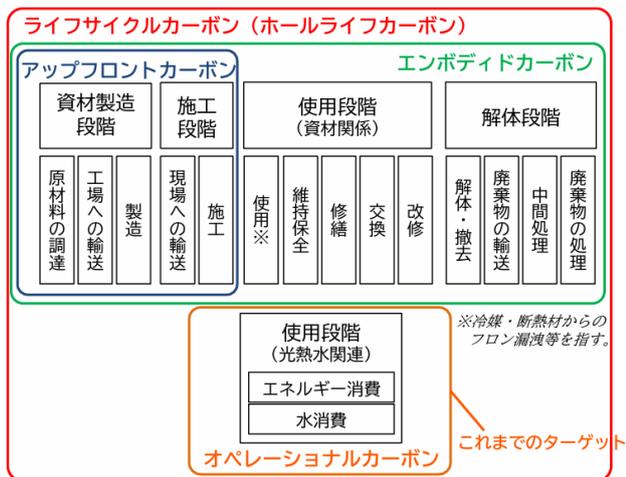


図-2 ライフサイクルカーボンの範囲⁴⁶⁾

表-4 CO₂排出量の算定を行う場面毎の算定主体及び方法、データ取得の容易性²⁷⁾

CO ₂ 排出量の算定を行う場面		主な算定主体	想定される算定方法	データ取得の容易性
計画段階	設備計画（構造物の配置，種類等）の検討	国，港湾管理者等	構造物あたりのCO ₂ 排出量（〇〇t-CO ₂ /構造物）の概略値を活用	構造物のCO ₂ 排出原単位の整備が必要
設計段階	構造形式や主要諸元等の検討	国，港湾管理者，設計者等	工種あたりのCO ₂ 排出量（ $\Delta\Delta$ t-CO ₂ /工種）の概略値を活用	工種毎のCO ₂ 排出原単位の整備が必要
施工段階	工事発注段階	国，港湾管理者等	工事積算に基づき，材料の製造や機械の移動によるCO ₂ 排出量を合算	一部のデータの取得が困難なもの，比較的充実
	工事実施段階（実施前）	施工者等	詳細な施工条件や調達条件に基づき必要に応じて算定	詳細なデータを多く取得可能
	工事実施段階（実施後）	施工者等	施工実績に基づき算定	実績により実態を反映したデータを取得可能

(1) 構造物

構造物のライフサイクルにおける排出量の算定や評価に関する研究も進められている。

文献 46)では，建築物のライフサイクルカーボンの算定ツールが提案されている。ここでは，図-2のように，ライフサイクルにおけるカーボンを構造物の躯体に関するエンボディッドカーボンと光熱費などの構造物の利用に伴うオペレーショナルカーボンに大きく分けている。エンボディッドカーボンのうち，施工段階までの排出をアップフロントカーボンと呼んでいる。このアップフロントカーボンは，文献 11)の算定対象である scope 1~3 の上流までの排出に相当すると考えられる。

港湾工事については表-4 のような設計施工の各段階を設定して，排出量算定の方法が提案されている⁴⁷⁾。このように段階によって算定方法が異なるのは，通常，設計段階ごとに得られる情報や不確実性が異なり，設計が進むにつれて詳細が確定していくためである。このような段階別に，排出係数や算定方法を例示したガイドラインが検討されている。具体的にケーソン式防波堤⁴⁸⁾やPC 栈橋⁴⁹⁾についての推定例も報告されている。

土木建築におけるコンクリート構造物全般について，維持管理を含めたライフサイクル全体の排出量削減への考え方が文献 50)51)に示されている。

橋梁については，アップフロントカーボンに相当する部分の，排出量を 200 橋について算定して傾向を分析した例が報告されている⁵²⁾。長大橋（セバーン橋他）について，維持管理を含めた長期の排出量の算定結果が文献 53)に見られる。

ライフサイクルコストの算定とライフサイクルカーボンの算定には類似性・関連性が見られ，例えば，文献 11)では，工事積算体系を利用した排出量算定が提案されている。橋について，ライフサイクルアセスメント（LCA）を利用することで，排出量・カーボンフットプリントを算定する研究も報告されている⁵⁴⁾。

排出量算定には多種多様なデータが必要となるため，デジタル化が進められている⁵⁵⁾。現在，適用が進められている BIM（Building Information Modeling）／CIM（Construction Information Modeling）⁵⁶⁾⁵⁹⁾は，関連データの連携に利用することも可能で，エンボディッドカーボン算定に活用されつつある。BIM/CIM を用いた橋⁶⁰⁾や舗装⁶¹⁾のライフサイクル排出量の算定方法が報告されている。文献 62)では，道路設計の排出量算定への BIM/CIM の適用が試行されている。このように，算定にあたっては，BIM/CIM などのデジタルツイン技術の活用が有効である。特に，エンボディッドカーボンの計算には BIM/CIM の詳細度を反映したデータモデルは適していると考えられる。

建築の例として，BIM と連動している解析ソフト等を

使うことで運用時のエネルギー排出などオペレーショナルカーボンの計算を行った報告がある⁶³⁾。また、文献 64)では、建築設計の各段階における詳細度や不確定性を反映した BIM の活用が提案されている。

全般的に建設時のエンボディッドカーボンに関する検討は豊富であるが、維持管理については研究途上であり、維持管理・供用段階における排出量データの収集・蓄積や、BIM/CIM の構築方法、排出量算定方法などが課題である。

(2) 都市

都市の排出量には、表-3 のように幅広い領域が含まれるため、橋や構造物への関連が深い道路交通や災害対応に焦点を当てて整理する。

道路については、国土交通省によって、脱酸素に関する取り組みがまとめられている⁶⁵⁾。関連して、電気自動車による影響などの政策に関する評価⁶⁶⁾や交通行動に伴う排出量の変化の推計⁶⁷⁾などの研究がある。排出量への影響が大きいと思われる渋滞の予測⁶⁸⁾や、推計のベースとなる精緻な交通行動の計測については AI を適用した研究例も見られる⁶⁹⁾⁷⁰⁾。このように排出量算定の精度や信頼性向上に向けて AI の果たす役割は大きい。

我国では、災害時の排出量は無視できないと考えられるが、被害推定や排出量算定⁷¹⁾⁷²⁾にあたっては AI やデータサイエンスの適用の余地は大きいと考えられる。

6. 設計・最適化

排出量を低減していくためには、前章までの論点を踏まえて、設計や最適化・意思決定に生かしていく研究が求められる。

(1) 構造物

排出量を低減する構造物の設計に関する研究は、建築物を対象としたものが豊富である。構造設計における課題の一つは、費用最小化が必ずしも排出量最小化につながらないことである⁷⁴⁾。鋼やコンクリートの建築物の多様な構造形式に対するライフサイクル排出量の比較検討例も見られる⁷⁵⁾。

設計において、排出量を反映するには、多様なデータの連携が必要となる。そこで、BIM の共通仕様である OpenBIM を利用した設計支援のためのデータの変換・連携が提唱されている⁷⁶⁾。文献 77)は、BIM をベースにした建築設計のためのデータを統合化し最小化するフレームワークの事例である。

一般に、設計の上流側の初期段階から排出量を考えた方がより高い性能が実現される場合が多い一方、初期段

階では詳細が定まっておらず不確定性が大きいというトレードオフがある。そこで、特に初期段階における排出量の不確定性の評価や推定精度の向上が重要となっている⁷⁸⁾⁷⁹⁾。この問題に対しても BIM の適用⁸⁰⁾や、さらに、BIM と自然言語処理⁸¹⁾を取り入れることでの算定の改善が試みられている。また、文献 82)は高層建築の BIM による低炭素化設計のためのフレームワークの例である。

橋の設計については、脱酸素に向けた課題を管理者や技術者、設計者などの立場から整理した論文⁸³⁾が見られる。排出量を考えた設計検討等として、改修と取り替えの比較⁸⁴⁾や橋の補修工法における排出量の比較⁸⁵⁾、耐久性に優れた低炭素の橋梁構造の提案と排出量算定などの構造選定や新構造の提案が行われている⁸⁶⁾。木構造の排出量の算定などもみられる⁸⁷⁾。また、ナレッジグラフによる橋の低炭素架設法の助言システムの報告がある⁸⁸⁾。

橋においてもやはり排出量を考慮した設計への BIM/CIM の活用が進んでいる。文献 89)では BIM/CIM を利用することでプレキャスト部材を桁や橋脚に用いた場合の排出量を算定し、その特質を論じている。このように BIM/CIM を用いることで代替案の検討が容易になると思われる。

今後、維持管理を含めた排出量データや BIM/CIM が整うにつれて、排出量の観点からの最適化が重要となると思われる。近年発展著しい量子計算などの先進的な最適化のアプローチ⁹⁰⁾を BIM/CIM と連携させる研究開発などが求められよう。

(2) 都市

前節のように橋梁について考える場合は、構造物のエンボディッドカーボンの低減が重要であるが、都市全体の排出を考えた場合には、橋単体としては排出量が最小でないとしても、例えば、維持管理時に渋滞や迂回が発生しない構造の方が全体最適となる場合も考えられる。具体的には、通行止め不要の補修方法や、当初から路側帯を広目にとって工事や点検の際の交通への支障を最小化するなどの交通と橋の双方の視点からの検討が望まれる⁹¹⁾⁹²⁾。また、災害時⁹³⁾や復旧⁹⁴⁾における排出量最小化の観点からもネットワークとしての機能を考えた構造物設計や対策が求められよう。

そのようなネットワークを考慮した排出量低減には、非常に多くの変数の最適化問題を解く必要があると考えられ、大規模なデータベース連携⁹⁵⁾⁹⁶⁾や AI ・量子計算等⁹⁷⁾の先進的なコンピュータサイエンス技術の適用研究が求められると考えられる。

7. 結論

本論文では、カーボンニュートラルに向けた AI・デジタルツインの動向を整理し、今後を展望した。排出源は多岐にわたることから、関連データ等との連携や最適化等、AI やデジタルツイン技術の役割は大きい。政策評価や具体的なシナリオを想定した GHG 排出量予測などの研究も進んでいる(98,99)。

インフラ分野においても、具体的な方向性の議論が進んでいる¹⁰⁰。適用が進む BIM をベースとした排出量算定・最適化の研究開発が求められると考えられる。また、土木構造物は、都市を含めた排出量への影響も大きいいため、単に構造物としてのスコープのみならず都市としてのスコープからの排出量低減を視野に入れる必要があると思われる。そのため、今後、複雑な最適化問題を解く必要が出てくると考えられ、量子計算や大規模データベース等のコンピュータサイエンスの先進技術の導入も必要であると考えられる。

謝辞：本稿は、JSPS 科研費 21H01417, 22H01561, および 23H00198 の助成を受けた研究で行われた結果を含みません。

参考文献

- 1) 春日昭夫：実践 建設カーボンニュートラル，日経 BP，2024。
- 2) 土木学会コンクリート委員会カーボンニュートラルに向けたコンクリート分野の新技术活用に関する研究小委員会：コンクリートライブラリー165 コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて，2023。
- 3) 日本コンクリート工学会：特集 カーボンニュートラルに貢献するコンクリート技術，コンクリート工学，Vol.59, No.9, 2021。
- 4) Kasuga, A.: Impact of carbon neutrality on structural concrete—Not a risk but an opportunity, Structural Concrete, Vol.21, No.2, 2023。
- 5) 杉崎光一，全 邦釘，阿部 雅人：デジタルツインの概念と土木工学への応用，AI・データサイエンス論文集，Vol.4, No.2, pp.13-20, 2023。
- 6) 環境省：温室効果ガスインベントリの概要，<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/overview.html>
- 7) 国立環境研究所：温室効果ガスインベントリ，<https://www.nies.go.jp/gio/aboutghg/index.html>
- 8) 環境省：グリーン・バリューチェーンプラットフォーム，https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/index.html
- 9) World Resources Institute: The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard, revised edition, 2004。
- 10) 環境省・経済産業省：サプライチェーンを通じた温

室効果ガス排出量算定に関する 基本ガイドライン (ver.2.6), 2024

- 11) 国土技術政策総合研究所：インフラ分野における建設時の GHG 排出量算定マニュアル (原案)，2024
- 12) World Resources Institute: GHG Protocol for Cities, An Accounting and Reporting Standard for Cities, version 1.1, 2021
- 13) 国立環境研究所 衛星観測センター：<https://www.nies.go.jp/soc/>
- 14) 市井 和仁, 渡辺 裕之, 谷口 弘智, 植山 雅仁, 近藤 雅征：機械学習を用いた地上観測・衛星観測データの統合による広域陸域熱・水・炭素フラックスの推定，日本リモートセンシング学会誌，Vol.38, No.2, pp.114-120, 2018。
- 15) 村田裕樹, 中村仁, 鈴木健之, 林悠介：カーボンニュートラルポート実現に向けた横浜港・川崎港における高分解能光学衛星画像を用いた船舶・貯油タンク群マッピングの取組み，日本リモートセンシング学会誌，Vol.42, No.3, pp.180-184, 2022。
- 16) 元村亜紀, 湯浅知英, 山中哲志：建設施工段階の汎用的なデジタルツインの実現—CPS 施工管理システムの開発—, AI・データサイエンス論文集，Vol.4, No.2, pp.89-96, 2023。
- 17) 山中哲志, 湯浅知英, 西川輝, 安田晋, 毛利亮太：建設施工段階におけるデジタルツインを構成するデータ基盤の開発，AI・データサイエンス論文集，Vol.4, No.3, pp.924-931, 2023
- 18) 早川健太郎, 黒台昌弘, 蒔苗耕司：映像解析に基づく施工管理指標を用いた施工マネジメントシステムの開発，土木学会論文集，Vol.80, No.22, 論文 ID: 23-22003, 2024。
- 19) 岩本拓己, 重松康祐：点群鳥観図を用いた DNN による油圧ショベル走行時の転倒予測，AI・データサイエンス論文集，Vol.5, No.1, pp.253-259, 2024。
- 20) 井上晴可, 梅原喜政, 今井龍一, 神谷大介, 田中成典：深層学習を用いた建設現場における複数カメラからの人物識別に関する研究，AI・データサイエンス論文集，Vol.3, No.J2, pp.406-416, 2022
- 21) 五箇亮太, 前田圭介, 藤後廉, 小川貴弘, 長谷山美紀：Spatial-temporal attention を導入した再帰型ニューラルネットワークに基づく重機との接触事故リスクの推定，AI・データサイエンス論文集，Vol.5, No.1, pp.117-125, 2024。
- 22) United Nations Environment Programme: Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon, 2009。
- 23) 富澤風汰, 畠山勇二, 上杉健史郎, 丸尾知佳子, 西村修, 坂巻隆史：内湾底質中のブルーカーボン貯留評価に向けた安定同位体分析，土木学会論文集，Vol.79, No.25, 論文 ID: 23-25031, 2023。
- 24) 遠藤徹, 菊池優宏, 中下慎也：形態別炭素の簡易分画手法による大阪湾の炭素の堆積状況の把握，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.78, No.2, pp. L_811-L_816, 2022
- 25) 村田裕樹, 佐藤広樹, 米澤千夏：ドローン空撮画像をもとにした人工衛星リモートセンシングによるブルーインフラ調査，日本リモートセンシング学会誌，Vol.44, No.1, pp.33-40, 2024
- 26) 山北剛久：ブルーカーボンのリモートセンシングによる定量化と応用：深層学習による藻場抽出と将来

- 予測へにむけたレビュー, 海洋理工学会誌, Vol.29, No.1, pp.25-30, 2024.
- 27) 国土交通省港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討 WG : 港湾工事における二酸化炭素排出量算定ガイドライン (設計段階編 (試行工事用)), 2024.
 - 28) 小林利充: 脱炭素社会に向けた低炭素型のコンクリートに関する取組み, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.770-775, 2021
 - 29) 小島正朗, 辻大二郎, 依田和久, 橋本学: エネルギー・CO₂ ミニマムセメント・コンクリートの開発と適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.776-781, 2021.
 - 30) 大塚拓: CO₂ の排出を抑えるフライアッシュの有効利用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.782-787, 2021.
 - 31) 伊代田岳史: CO₂ 吸着による再生骨材改質とコンクリートへの適用, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.807-812, 2021.
 - 32) 取達剛, 関健吾, 渡邊賢三, 坂井吾郎: 炭酸化養生による CO₂ 吸収型カーボンネガティブコンクリートの開発と今後の展開, コンクリート工学, Vol.59, No.9, p.813-818, 2021.
 - 33) 取達剛, 森泰一郎, 小島正朗: 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発—CUCO—Carbon Utilized Concrete—, コンクリート工学, Vol.61, No.6, 2023.
 - 34) 森泰一郎, 庄司慎: 二酸化炭素の固定化からコンクリートに高機能化を付与する炭酸化混和材について, コンクリート工学, Vol.60, No.4, pp.321-326, 2022.
 - 35) 田村勇一朗, 山崎彩花, 田中裕一: 低炭素型カルシウム人工石の開発と CO₂ 削減効果の検討, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 2024.
 - 36) 田中裕一, 田村勇一朗, 山崎彩花: カルシウム改質土による炭素固定の基礎検討と CO₂ 排出量の試算, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 2024.
 - 37) 山下真奈, 川端雄一郎, 中村董, 松村聡, 佐々木均: 護岸におけるエンボディドカーボンの, 試算と解体発生材の再利用による削減効果に関する一考察, 土木学会論文集, 2024, Vol.80, No.18, 論文 ID: 24-18036, 2024.
 - 38) 内藤了二, 阿部寿, 工藤博文, 酒向章哲, 田村勇一朗, 秋山吉寛, 岡田知也: 函館港における浚渫土砂の海中利用による CO₂ 排出削減効果—陸上処分との比較—, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 論文 ID: 23-18120, 2023.
 - 39) 中村董, 川端雄一郎, 森川忠泰, 石澤武紘, 木村匡伯: 鉄鋼スラグ水和固化体の護岸ブロックへの適用による CO₂ 排出量削減効果に関する一検討, 土木学会論文集, Vol.79, No.18, 2023.
 - 40) 小峯秀雄, 横井亨朱, 多賀春生, 斉藤泰久, 鈴木清彦: CO₂ 固定化素材を活用したカーボンキャプチャー都市環境創生に関する基礎研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.1, 2023.
 - 41) 小野田弘士: カーボンニュートラル・循環経済を見据えた AI・IoT の活用事例, 日本エネルギー学会機関誌えねるみくす, Vol.101, No.6, pp.669-674, 2022.
 - 42) <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2024/press-release/>
 - 43) 野口聖史, Hui Wang, 井上純哉: 材料設計における深層学習の応用: プロセス・構造・特性連関の抽出, 応用統計学, Vol.52, No.2, pp.75-98, 2023.
 - 44) 畠山敏: 材料科学における機械学習の利用と課題, 日本神経回路学会誌, Vol.28, No.1, pp.20-47, 2021.
 - 45) AI ロボット駆動科学イニシアティブ設立準備事務局: AI ロボット駆動科学 研究会 2024 実施レポート, 2024.
 - 46) 国土交通省: 建築物のライフサイクルカーボン算定ツール試行版を公開しました!
https://www.mlit.go.jp/report/press/house04_hh_001226.html
 - 47) 国土交通省: 港湾工事における二酸化炭素排出量削減に向けた検討 WG :
https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000046.html
 - 48) 中村董, 川端雄一郎, 辰巳大介: ケーソン式防波堤の建設時における CO₂ 排出量の傾向分析と概略推定手法の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, pp.I_307-I_312, 2022.
 - 49) 中平達也, 川端雄一郎, 中村董: 傾向分析に基づく PC 栈橋の建設時の CO₂ 排出量の簡易推定手法の提案, 土木学会論文集, Vol.80, No.18, 2024.
 - 50) 野口貴文: コンクリートのライフサイクルを通じたカーボンニュートラル化, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.730-736, 2021.
 - 51) 河合研至: カーボンニュートラルに向けた土木分野での取組みと方針, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.737-741, 2021,
 - 52) Collings, D.: The Carbon Footprint of Bridges. Structural Engineering International, Vol.32, No.4, pp.501-506, 2021.
 - 53) Collings, D.: Examples of carbon dioxide emissions data in the circular economy: highway transport, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering 2023 Vol.176, No.6, pp.15-19, 2023.
 - 54) Cao, J., Wang, D., Han, Z., Li, S., Zhao, H., Liu, X.: Carbon footprint of expressway bridges based on LCA, International Journal of Low-Carbon Technologies, Vol.19, pp.2218-2224, 2024.
 - 55) Yan, J., Lu, Q., Chen, L., Broyd, T., Pitt, M.: SeeCarbon: a review of digital approaches for revealing and reducing infrastructure, building and City's carbon footprint, IFAC-PapersOnLine, Vol.55, No.19, pp.223-228, 2022
 - 56) 榎谷有吾: 国土交通省における BIM/CIM の取組について, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.4, pp.15-28, 2024.
 - 57) 矢吹 信喜, BIM/CIM の基盤となるデータモデル, AI・データサイエンス論文集, 2024, 5 巻, 4 号, p.4-14
 - 58) 辰巳大介, 川上司: 維持管理に着目した既存港湾施設の BIM/CIM 用 3 次元モデルの効率的な作成方法, 土木学会論文集, 80 巻, 18 号, 2024
 - 59) 影山輝彰, 矢吹信喜: 鋼橋を対象にした工事数量算出用 3 次元プロダクトモデルに関する研究, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.I_43-I_52, 2017.
 - 60) Yang, Y., Yue, X., Luo, Y., Jin, L., Jia, B.: Building Information Modeling—Life Cycle Assessment: A Novel

- Technology for Rapid Calculation and Analysis System for Life Cycle Carbon Emissions of Bridges, Sustainability, Vol.16, No.23, 2024.
- 61) Oreto, C., Biancardo, S.A., Veropalumbo, R., Viscione, N., Russo, F., Abbondati, F., Dell'acqua, G.: Bim-lca integration framework for sustainable road pavement maintenance practices, International Journal of Transport Development and Integration, Vol. 6, No. 1, pp. 1-11. 2022.
 - 62) Manifold, J., Renukappa, S., Suresh, S., Georgakis, P., Perera, G. R.: Dual Transition of Net Zero Carbon and Digital Transformation: Case Study of UK Transportation Sector, Sustainability, Vol.16, No.17, 7852, 2024.
 - 63) Liu, S., Meng, X., Tam, C.: Building information modeling based building design optimization for sustainability, Energy and Buildings, Vol.105, pp.139-153, 2015.
 - 64) Cavalliere, C., Habert, G., Dell'Osso, G. R., Hollberg, A.: Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process, Journal of Cleaner Production, Vol.211, pp.941-952, 2019.
 - 65) 国土交通省：道路分野の脱炭素化政策集 ver1.0, 2024.
 - 66) 伊藤亜美, 伊藤佑亮, 森本章倫：複数の交通政策を考慮した EV のライフサイクルアセスメントに関する研究, 都市計画論文集, Vol.57, No.3, pp.614-621, 2022.
 - 67) 石橋澄子, 川合春平, 谷口守：COVID-19 流行を通じた自動車 CO2 排出量変化 - 流行下 5 時点における個人の生活行動データを用いた推計 -, 土木学会論文集, Vol.79, No.26, 2023.
 - 68) 白上龍, 北原稔也, 竹内孝, 鹿島久嗣：交通理論に基づいた深層学習による渋滞長予測, 人工知能学会論文誌, Vol.39, No.2, pp.C-N92_1-12, 2024.
 - 69) 濱村秀亮, 阿部光大郎, 山根智, 中村秀明：AI を用いたリアルタイム断面交通量調査システムの開発, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.458-465, 2023.
 - 70) TITHIPONGTRAKUL, N., 仲条仁, 城山晃一, 濱島彩織：スマートフォンとクラウドベース AI の活用による事業用車両向けの交通危険事象検知の技術開発, AI・データサイエンス論文集, Vol.3, No.J2, pp.461-469, 2022.
 - 71) 森本淳子, 橋隆一, 田中淳, 小川泰浩, 熊田勇斗, 小野幸菜, 岡島徹, 小澤信彦, 佐藤貴紀, 中村剛, 芳賀智宏, 堀田亘, 本郷悠夏, 柳井清治, 吉原敬嗣：令和 6 年能登半島地震により崩壊したグリーンインフラの現状と再生にむけた課題と提案, 日本緑化工学会誌, Vol.50, No.2, pp.171-193, 2024.
 - 72) 大杉裕康, 平山修久：地震住家被害による木材固定炭素開放量に基づく災害廃棄物 CO2 排出量評価手法の構築, 土木学会論文集, Vol.79, No.26, 2023.
 - 73) 木村匠, 中村真也：地すべり再発防止工事における二酸化炭素排出量, 農業農村工学会論文集, Vol.82, No.2, pp.73-80, 2014.
 - 74) Gauch, H.L., Hawkins, W., Ibell, T., Allwood, J.M., Dunant, C.F.: Carbon vs. cost option mapping: A tool for improving early-stage design decisions, Automation in Construction, Vol.136, 2022.
 - 75) Nadoushani, Z.S.M., Akbarnezhad, A.: Effects of structural system on the life cycle carbon footprint of buildings, Energy and Buildings, Vol.102, pp.337-346, 2015.
 - 76) 宮内芳維：bSDD から始まる openBIM による The End of Babel, AI・データサイエンス論文集, Vo.5, No.4, pp.29-32, 2024.
 - 77) Shadram, F., Johansson, T.D., Lu, W., Schade, J., Olofsson, T.: An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design, Energy and Buildings, Vol.128, pp.592-604, 2016.
 - 78) Marsh, E., Orr, J., Ibell, T.: Quantification of uncertainty in product stage embodied carbon calculations for buildings, Energy and Buildings, Vol.251, 111340, 2021.
 - 79) Yeo, Z., Ng, R., Song, B.: Technique for quantification of embodied carbon footprint of construction projects using probabilistic emission factor estimators, Journal of Cleaner Production, Vol.119, pp.135-151, 2016.
 - 80) Alwan, Z., Jones, B.I.: IFC-based embodied carbon benchmarking for early design analysis, Automation in Construction, Vol.142,104505, 2022.
 - 81) Forth, K., Abualdenien, J., Borrmann, A.: Calculation of embodied GHG emissions in early building design stages using BIM and NLP-based semantic model healing, Energy and Buildings, Vol.284, 112837, 2023.
 - 82) Gan, V.J.L., Deng, M., Tse, K.T., Chan, C.M., Lo, I.M.C., Cheng, J.C.P: Holistic BIM framework for sustainable low carbon design of high-rise buildings, Journal of Cleaner Production, Vol.195, pp.1091-1104, 2018.
 - 83) Duguid, B., Archer-Jones, C., Hendy, C., Lynn, C., O'Connor, K., Palmer, I., Sibert, B.: A framework for decarbonisation for bridge owners, engineers and designers, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering, 2024.
 - 84) MacKenzie, D.K.: Bridge engineering - Proving the sustainability case for refurbishment v replacement, Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability, CRC Press, London, 2024.
 - 85) 河合研至, 青木雄祐, 岩谷祐太, 本荘清司, 中野将宏, 福井誠司：高速道路橋の補修事例に基づく環境影響とその低減策に関する考察, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.67, No.3, pp.109-121, 2011.
 - 86) Zerín, A.I., Kasuga, A.: Life cycle assessment of next generation non-metallic bridges, Structural Concrete, Vol.24, No.2, pp. 1914-1931, 2023.
 - 87) 岩瀬鉄也, 佐々木貴信, 橋本征二, 荒木昇吾, 加用千裕：直交集成板を床版に用いた橋梁のライフサイクル温室効果ガス排出量, 木材利用研究論文報告集, Vol.18, pp.40-46, 2019.
 - 88) Ma, Z., Zhang, S., Jia, H., Liu, K., Xie, X., Qu, Y.: A Knowledge Graph-Based Approach to Recommending Low-Carbon Construction Schemes of Bridges. Buildings, Vol.13, No.5, 1352, 2023.
 - 89) Kim, H., Roh, S., Kim, J.: Embodied carbon of BIM bridge models according to the application of off-site prefabrication: Precast concrete applied to superstructure and substructure, Developments in the Built Environment, Vol.20, 100550, 2024.
 - 90) 芳賀葉, 山本佳士, 野々部宏司, 村松真由, 加藤準治：量子アニーリングおよび一般化 Benders 分解法を用いたトポロジー最適化に関する基礎的研究, AI・デ

- ータサイエンス論文集, Vol.5, No.3, pp.719-729, 2024.
- 91) 石橋寛樹, 陣内寛大, 石神晴久, 森田大樹, 岩城一郎: 仮想パーソントリップデータを活用した迂回シミュレーションに基づく橋梁の重要度評価, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.1-9, 2023.
- 92) 井林康, 松木遼, 松崎優輝, 長井宏平: 橋梁迂回路計算結果の維持管理優先度への反映のための基礎的検討, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.501-506, 2023.
- 93) 毛束隆太, 武藤裕花, 岡崎淳史, 小槻峻司: 災害被害数値モデルを用いた強化学習による洪水被害削減のための投資策の最適化, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.3, pp.186-193, 2024.
- 94) 合田哲朗, 渡辺賢, 堀江陽介, 中野雅章: レジリエンスを考慮した道路橋復旧計画における量子インスパイアード手法によるブラックボックス最適化の有用性に関する検証, AI・データサイエンス論文集, Vol.5, No.3, pp.800-810, 2024.
- 95) 北本朝展, 川崎昭如, 絹谷弘子, 玉川勝徳, 柴崎亮介, 喜連川優: 地球環境情報統融合プログラム DIAS データ共有に基づく社会課題解決, 情報管理, Vol.58, No.6, pp.413-421, 2015.
- 96) 白井 知子: 地球環境データベース— 30 年の歩みとこれから —, トランザクションデジタルプラクティス, Vol.2, No.2, 2021.
- 97) 石橋寛樹, 石神晴久, 濱野倫弥, 岩城一郎: 量子コンピュータに関する研究開発動向および土木分野への応用と将来展望, AI・データサイエンス論文集, Vol.4, No.3, pp.310-319, 2023.
- 98) 大城賢, 藤森真一郎: 日本の 2050 年ネットゼロ排出目標における残存排出量削減方策のシナリオ分析, 土木学会論文集 G (環境), 78, 5, pp.I_429-I_439, 2022.
- 99) 福嶋俊貴, 西村文武: 広域化・効率化による汚水処理の CO₂ 排出量削減ポテンシャルに関する研究, 土木学会論文集 G (環境), 78, 7, pp.III_149-III_156, 2022.
- 100) 土木学会構造工学委員会コンクリート委員会鋼構造委員会複合構造委員会: カーボンニュートラルに向けた土木構造物のあり方に関する実施すべき事項 (案), 2025.

AI and Digital Twin for Carbon Neutrality

Masato ABE, Koichi SUGISAKI and Pang-jo CHUN

This study investigates the trends of AI and digital twin technologies in achieving carbon neutrality and explores the future challenges. Since GHG emission sources are diverse, the role of AI and digital twin technologies is significant in areas such as measurement and evaluation of emission factors or activity level, data integration, and optimization. In the infrastructure sector, research and development on emission calculation and optimization based on BIM/CIM will be required. Moreover, civil engineering structures have a substantial impact on the overall emissions of cities. Therefore, it is necessary to consider emission reductions not only from the perspective of individual structures but also from the urban scale. In the future, complex optimization problems will need to be solved, and the introduction of advanced computer science technologies, such as quantum computing and large-scale databases, will be essential.