

社会資本整備を対象としたカーボンフットプリント手法の開発、及び公共事業への導入によるCO₂排出量の削減の可能性について

神田 太朗¹・菅林 恵太²・木村 恵子³・曾根 真理⁴

¹国土技術政策総合研究所研究官 環境研究部道路環境研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

²国土技術政策総合研究所交流研究員 環境研究部道路環境研究室 (同上)

³国土技術政策総合研究所研究官 環境研究部道路環境研究室 (同上)

⁴国土技術政策総合研究所室長 環境研究部道路環境研究室 (同上)

地球温暖化の防止に向けて、あらゆる主体にCO₂排出量の削減等の対策が求められている。CO₂は環境中で安定であり、その影響が空間的・時間的に広域・長期に及ぶため蓄積総量の削減が重要である。蓄積総量を予測・評価する手法としてカーボンフットプリント(CFP)が有効である。本稿では、国土技術政策総合研究所が開発した社会資本整備のCFP(社会資本CFP)の手法を紹介する。社会資本CFPは、公共事業の各種の意思決定に活用することを念頭に開発されたものであり、土木工事の積算体系等に精通した関係者にとって使いやすい手法になっている。工事等のCO₂排出量の試算によって、工事全体のCO₂排出量を効果的に削減可能な技術等の評価手法として社会資本CFPを利用できる可能性が示された。

キーワード CO₂排出量, カーボンフットプリント(CFP), ライフサイクルアセスメント(LCA)

1. はじめに

(1) 社会資本整備におけるCFPの必要性及び有効性

地球温暖化の防止は現代の人類に共通の課題である。温室効果ガスの排出量の大部分を占めるCO₂排出量の削減に、あらゆる主体が取り組んでいる。

CO₂は大気中で安定であるため、瞬間的・局地的な排出量の削減ではなく、蓄積総量の削減が重要である。よって、CO₂排出量の削減対策に用いる基礎情報を得るための予測・評価手法としては、カーボンフットプリント(CFP)が適している。このため、工業製品やサービスの分野を中心にCFPが普及しつつあり、CO₂排出量の効果的な削減の一助になっている。

社会資本分野においても、次に示す二つの理由により、CFPはCO₂排出量の削減に向けた予測・評価手法として有効であると考えられる。

- ・社会資本整備に係わるCO₂排出量の大部分は、建設業ではなく、建設資材の製造等の上流で生じている。
- ・社会資本整備の意思決定の手続きにおいて、CO₂排出量の削減を様々な側面から検討する機会がある。

前者について、産業連関表による環境負荷原単位データブック¹⁾を元にするると、2005年における建設業からのCO₂排出量は国内総排出量の1%であるのに対して、上流

側の工程を含めると同15%に上ると推計される。この事実は、社会資本整備関連のCO₂排出量を削減していく上でCFPが必要であることを示している。

後者について、社会資本整備は、計画の構想から工事の施工まで、複数の事業段階における意思決定を経てなされる。各事業段階では意思決定事項が異なり、構想、設計、施工と事業の進行を経て、社会資本の機能や基本構造など全体的な事項に関する概略的な決定から構造物の断面形状や建設資材など一部の事柄に関する詳細な決定までがなされる。したがって、各意思決定におけるCO₂排出量の削減への配慮には無駄がなく、かつ一通りの手続きを通して様々な側面からの工夫が可能である。この事実は、社会資本整備の意思決定システムが、CFPを導入する上で適していることを示している。

(2) 社会資本整備におけるCFPの現状と本研究の目的

しかしながら、社会資本については、個別の分野、工事、建設資材等に関するCFPの事例は研究レベルで蓄積されているものの、幅広い対象について共通の考え方を適用した制度化には至っていない。

社会資本分野の制度においてCFPの定着が遅れている主な原因は二つ考えられる。一つは、CFPの黎明期から確立期にかけて製品やサービスを前提とした検討がなされたため、CFPの枠組みが必ずしも社会資本の特徴に馴

染まないことである²⁾。もう一つは、社会資本へCFPの応用を試みた先駆的な事例は、個別の対象に関する検討が主であり、制度化を見据えた検討は僅かであったため、制度化の前提となる手法の共通化が進まなかったことである。

そこで、社会資本の特徴を反映し、各事業段階で分野横断的に適用可能なCFP手法の開発を目的に研究を実施した。本稿は、今般開発したCFP（社会資本CFP）について、技術的特徴、社会資本整備に係る既存制度との関係を述べた上で、実工事に関する試算を通じて社会資本CFPによるCO₂排出量の削減の可能性を示すものである。

なお、社会資本CFPは、原料の採取から工事の竣工までを対象に開発されたものであり、社会資本の運用段階におけるCO₂排出量の予測・評価は対象としていない。

2. 社会資本CFP手法の開発

(1) CFPの基本

CFPによるCO₂排出量の算出は式(1)によって可能である。

$$CO_2 = \sum_i (x_i \times e_i) \quad (1)$$

ここで、CO₂：CFPによるCO₂排出量、 x ：活動量、 e ：CO₂排出原単位であり、添え字 i は活動項目を表わす記号である。積算体系との関連で理解すれば、 x は数量、 e は単価、 i は細別やその構成要素に相当する。

したがって、積み上げる活動項目を適切に設定し、各々の活動項目に関して適切な活動量およびCO₂排出原単位を代入すれば、妥当な計算結果を得ることができる。

(2) 社会資本CFPの技術的特徴

a) 従来の技術的課題

CFPの計算自体は単純であるものの、適切な x 、 e 、 i の設定は簡単ではない。CFPの理念によって導き出される要件として、関連するCO₂排出量を網羅していることが挙げられる。網羅性は、活動項目と各活動項目に対応したCO₂排出原単位の双方に関わる要件である。

活動項目に関しては、社会資本整備に直接投入されるあらゆる活動を漏れなく対象とすることが必要である。しかしながら、種々雑多な活動も含めて漏れなくデータセットを準備することは煩雑、かつ困難である。

それぞれのCO₂排出原単位については、原料採取まで遡って上流の産業等におけるCO₂排出をすべて内包していることが求められる。CO₂排出原単位の作成手法には産業連関法と積み上げ法があり、網羅性の観点で優れているのは産業連関法である。産業連関法は、国内のあらゆる経済主体間の経済フローを示した産業連関表に物質フローを関連付けることで、上流におけるCO₂排出量を

内包させる手法である。一方、産業連関法は、マクロ統計をベースにしているため、活動項目の細分化や現場条件等を反映したCFPが困難であり、個々の技術や製品に関するCO₂排出量の大小を評価し、CO₂排出量の削減を図る手法としては難点がみられる。積み上げ法は、産業連関法とは対照的に、網羅性等に課題が見られるものの、活動項目の細分化や現場条件等の反映には適した手法である。

b) 社会資本CFPにおける技術的課題の解決

社会資本CFP手法の開発にあたっては、活動項目の設定と各々の活動項目に対応したCO₂排出原単位の作成が最も重要なテーマである。社会資本CFPでは、次に示す方法で網羅性に関する技術的課題を解決した。

活動項目の網羅性については、土木工事において発達している工事費用の積算体系に対応することで解決を図った。積算の目的の一つは工事の適切な価格を決めることであるため³⁾、費用を構成する要素には、直接投入されるあらゆる活動が列挙されていると考えられる。

各々のCO₂排出原単位については、特にCFPへの影響が大きい建設資材⁴⁾のCO₂排出原単位を重点的に開発した。産業連関法と積み上げ法を組み合わせることで、一方の長所によって、もう一方の短所を補う手法を開発し、この手法に基づいてCO₂排出原単位を作成した⁵⁾。

3. 社会資本CFPの使い方 —既存制度との関係—

(1) 各事業段階で用いる社会資本CFPのデータベース

社会資本CFPの技術開発にあたっては、従来の技術的

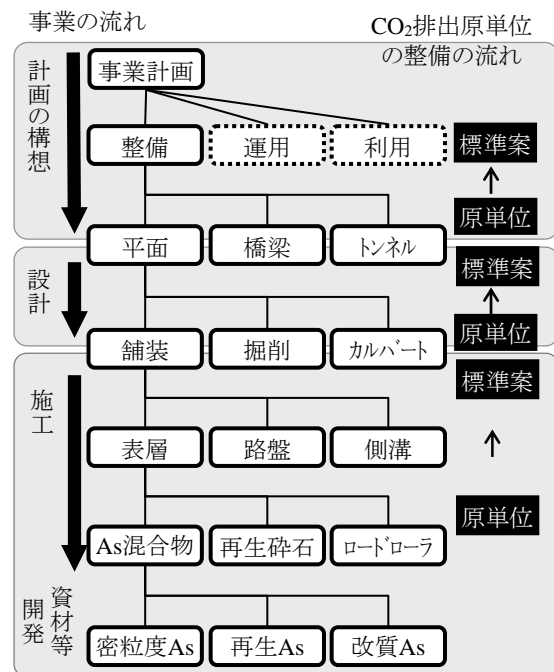


図-1 事業段階ごとのCFPに対応したCO₂排出原単位の階層化

課題の解決を図った基礎的なCO₂排出原単位のデータベースを先ず作成し、それらを集約した階層的なCO₂排出原単位を整備した(図-1)。施工段階用のデータベースは、材料や建設機械等の単位使用量あたりのCO₂排出原単位で構成され、工事費用の積算要素に対応している。設計段階用のデータベースは、施工段階用のデータベースを国土交通省土木工事積算基準²⁾や土木工事積算基準マニュアル³⁾(以下、「積算基準等」という。)を用いて集約化したものであり、各々のCO₂排出原単位は工種や細別の作業単位に対応している。構想段階用のデータベースは、具体的な工事の事例についてCO₂排出量を計算し、道路事業であれば構造型式別の車線・延長あたりのCO₂排出原単位として作成した。

階層化によって、各事業段階におけるCFPの実施に係る労力を最小限に留めている。次節において、施工段階を例にし、社会資本CFPの具体的な方法について述べる。

(2) 社会資本CFPの具体的な方法 —施工段階の例—

a) 施工段階の社会資本CFPと土木工事の積算体系の関係

施工段階における工事費用の算出方法と社会資本CFPの計算方法の共通点を図-2に示す。

土木工事は諸条件が千差万別である環境において注文を受けてから多様な目的物の性質に応じて施工されるた

め、その価格は工事ごとに求められる積算のスタイルが採られる。積算の方法については、積算基準等によって体系化されており、作業単位のレベル4に相当する「細別」の費用を算出し、これを積み上げて直接工事費を算出することが基本である。細別の費用は、レベル5の「規格」に定められる工事独自の要件に対応する「積算要素」(レベル6、内訳書や単価表等に基づく。)の材料調達、機械稼働に係る燃料消費、機械減耗等の各種数量と単価の積和によって算出される。

施工段階の社会資本CFPは、工事の設計書の内訳書や単価表における単価をCO₂排出原単位に置き換えることで可能である。設計書の置換えによることで、工事の目的物のCO₂排出量だけでなく、材料のロス率や検収対象とならない仮設物に係るCO₂排出量も含めて、工事に係るCO₂総排出量の算出が可能である。また、CO₂排出量の計算は単価欄の置換えだけで可能であるため、計算実施者の労力は比較的軽い。なお、積算基準等の改訂に伴ってCFP手法も更新できるため、社会情勢の変化や技術革新への迅速な対応も可能である。

b) 各積算要素に係るCO₂排出量の算出方法

各積算要素に係るCO₂排出量の算出方法を表-1に示す。材料調達や機械稼働による燃料消費に係るCO₂排出量は、材料・燃料の投入量あたりのCO₂排出原単位を用い



図-2 工事費用とCO₂排出量の算出方法の共通点

表-1 各積算要素に係るCO₂排出量の算出方法

積算要素	算出式
材料調達	投入量 * CO ₂ 排出原単位 例：100 (m ³) * e (kg-CO ₂ /m ³) (生コンクリート18N-8-20)
機械稼働	投入量 * CO ₂ 排出原単位 例：20 (l) * e (kg-CO ₂ /l) (軽油1.2号)
機械減耗	供用日数 * 機械質量 * CO ₂ 排出原単位 例：1 (日) * 19.8 (t) * e (kg-CO ₂ /t/日) ※数量を運転時間で設定する場合は、「供用日数」を「運転時間 * (13欄) / (15欄)」に置き換える。
仮設物利用	賃料 * CO ₂ 排出原単位 例：100 (千円) * e (kg-CO ₂ /千円) ※e = (賃貸に係る CO ₂ 排出原単位 + 減耗に係る CO ₂ 排出原単位) . 減耗については重仮設と軽仮設を区別。

て算出できる。

建設機械の減耗に係るCO₂排出量は、供用日当たり機械質量あたりのCO₂排出原単位を用いて算出できる。供用日数は単価表等の数量、機械質量は実際の数値、または建設機械等損料表⁷⁾に記載の数値を用いればよい。なお、損料が運転時間を用いて算出されている場合には、建設機械等損料表の「運転1時間当たり換算値損料 (13欄)」と「供用1日当たり換算値損料 (15欄)」の比を用いて運転時間を供用日数に換算すればよい。

仮設物に係るCO₂排出原単位は、損耗分と賃貸分から構成されている。賃貸を採用したのは、仮設物の調達形態が自社保有からリースに変化しつつある状況を考慮したためである。減耗分については、転用状況を勘案して重仮設と軽仮設の数値を分けている。

4. 社会資本CFPIによるCO₂排出量の削減の検討

— 施工段階の例 —

(1) 試算対象

道路改良工事及び橋梁下部工事について、具体的な工事事例の設計書を用いてCO₂排出量を試算するとともに、一部の施工技術を変更することによる工事全体のCO₂排出量の変化を試算した。対象とした工事及び施工技術の概要を表-2に示す。

(2) 試算結果

工事全体のCO₂排出量の試算結果を図-3に示す。また、一部の施工技術の標準案を比較案に変更することによるCO₂排出量の変化を図-4に示す。

工事全体のCO₂排出量について、材料調達、機械稼働、機械減耗等の構成要素に着目すると、道路改良工事では機械稼働が最も大きな割合を占める一方、橋梁下部工事

では材料調達が支配的である。すなわち、道路改良工事では、外部からの材料の調達がなく土砂の現場内利用をしている道路土工の影響が大きい。一方、RC橋脚工における場所打杭工と橋脚躯体工の影響が大きい橋梁下部工事では、鉄筋コンクリートが大量に利用されるため材料調達に起因するCO₂排出量の影響が大きい。道路改良工事については、機械減耗に係るCO₂排出量も一定の割合を占めている。

施工技術の変更によるCO₂排出量の変化について、工種 (または種別) あたりのCO₂排出量の変化は道路改良工事で9割減、橋梁下部工事で2割減で大きく異なるもの

表-2 施工段階におけるCFPIの試算事例の概要

(a) 道路改良工事

工事規模	延長469.4m, 幅員10.5m, 車線数2	
工種構成	道路土工, 地盤改良工, 法面工, 石・ブロック積(張)工, 排水構造物工, (共通仮設費)	
施工技術 (地盤改良工)	標準案	残土処理工(生石灰系改良材)
	比較案	FTマッドキラー工法 (NETIS-CB-010011-V)

(b) 橋梁下部工事

工事規模	橋長371.5m, 幅員23.5m, 車線数4	
工種 (種別) 構成	RC橋脚工(場所打杭工, 橋脚躯体工, 作業土工), 橋梁附属物工(銘板工), 仮設工(工事用道路工, 土留・仮締切工), (共通仮設費)	
施工技術 (橋脚躯体工)	標準案	高炉B種コンクリート
	比較案	自己充てん型高強度高耐久コンクリート (NETIS-HR-050003-A)

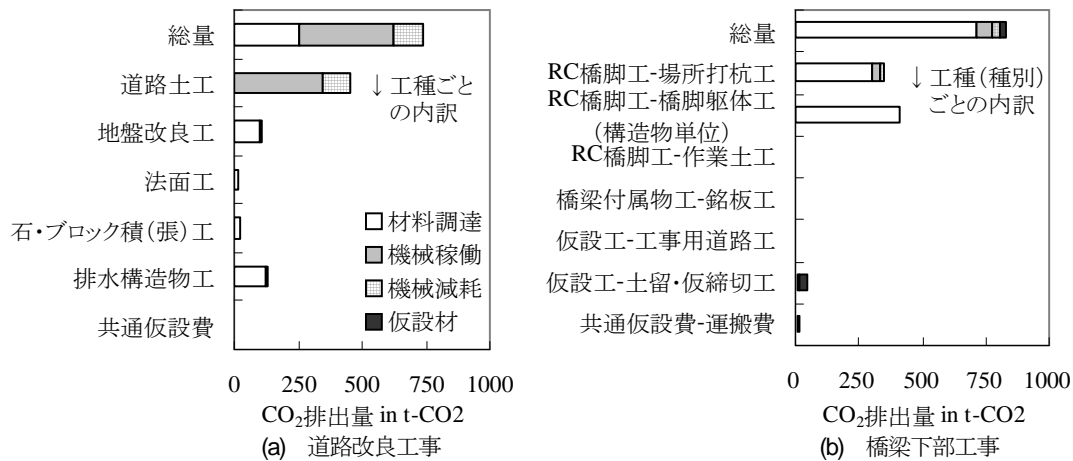


図3 工事全体のCO₂排出量

の、工事全体のCO₂排出量の変化はともに1割減で同程度であった。工事全体のCO₂排出量の変化は、それぞれの施工技術によるCO₂排出量の削減量と、当該技術を適用可能な作業量によって決まる。つまり、道路改良工事の地盤改良工に適用した比較案については、標準案に比べて大幅なCO₂排出量の削減が可能であるものの、地盤改良工のCO₂排出量が工事全体に占める割合が元々小規模であったために、工事全体としては1割減に留まり、橋梁下部工事の橋梁躯体工については、逆に種別で2割減の技術であっても工事全体の1割減につながったと説明できる。

工事全体のCO₂排出量を削減する観点からは、各施工技術の適用が工事全体に及ぼす影響を知ることが重要であり、そのためには工事全体のCO₂排出量が算出可能であることが必要である。したがって、社会資本の関係者においてCO₂排出量の削減を効果的に図る上で、社会資本CFPが開発された意義は大きいと言える。

5. 社会資本CFPの利用上の留意点及び現状の限界

(1) 手法上の課題

a) 対象による限界

社会資本CFPは、原料の採取から工事の竣工までを対象に開発されたものであり、社会資本の運用におけるCO₂排出量は対象としていない。したがって、道路交通等に起因するCO₂排出量や社会資本の長寿命化によるCO₂排出量の削減等の予測・評価に適用することはできない。道路のルート検討等、利用に起因するCO₂排出量が大きな影響を及ぼすと考えられる場合は、各分野における予測・評価手法の開発状況等を踏まえて別途対応する必要がある。また、長寿命化等の技術の予測・評価に関しては、社会資本の寿命を適切に設定する手法の確立が前提であるものの、現時点で確立されたものはない。今後の検討にあたっては、社会資本の寿命が耐久性等の物理的要因によって規定される場合よりもむしろ需要等の社会的要因によって規定される場合が多いと見られる実態⁸⁾や、意思決定の主体によって社会資本の捉え方が異なる点に留意することが必要であると考えられる。

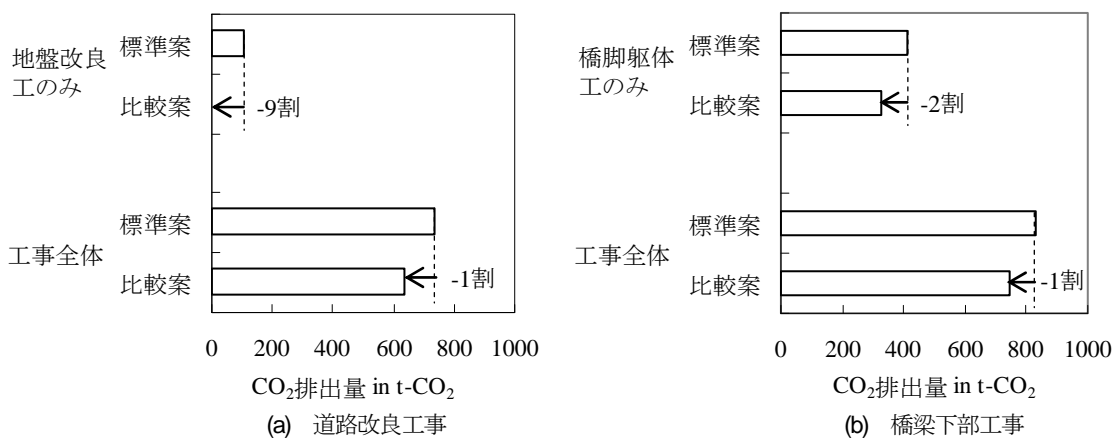


図4 施工技術の変更によるCO₂排出量の変化

b) 活動量に関する課題

活動量の設定に関しては、工事費用の積算時等において設定した数量と実際の活動量は厳密には一致しないことに注意が必要である。現場の地盤の性状や天候、周辺で同時に進行している工事の状況等によって建設機械の稼働時間、供用日数、材料の調達方法等が変化しうる。また、任意仮設等、受注者の裁量に委ねられている部分については、現在の計算手法と実態の整合性が不明であり、実態の更なる把握が今後の課題である。

c) CO₂排出原単位に関する課題

社会資本の主要な材料であるセメント系材料、鉄鋼製品、アスファルト加熱混合物のCO₂排出原単位について、考え方によって大きな数値の変動が今後生じうる。

セメント系材料は、コンクリートの水和反応後に大気中のCO₂を固定する⁹⁾ものの、その固定量は供用年数等によって異なるため、現時点ではCO₂排出原単位に反映できていない。仮に反映すると、セメントのCO₂排出原単位は1割程度低下しうる。鉄鋼製品については複数回の再生利用が定着し、マルチステップリサイクル（以下、「MSR」という。）と呼ばれる考え方に基づくCO₂排出原単位が提唱されている¹⁰⁾。しかしながら、社会資本整備用の鉄鋼に関して、この考えが完全に適用可能であるかについては更なる検討が必要であると考えられるため、現在の社会資本CFPでは用いていない。また、現在のCO₂排出原単位は、CFPの原則に照らして国外における活動に起因するCO₂排出量を含んだ数値としているため、京都議定書等に基づく考え方とは大きく異なる。原油の採掘や国際輸送の影響が一定の割合を占めているアスファルト加熱混合物等はこの相違の影響を受けうる。

d) 活動項目に関する課題

活動項目に関しては、現在までにCO₂排出原単位が整備されていない項目の取扱いや、具体的な材料等が決定されていない早期の事業段階における仮定の影響に課題が残る。未整備の項目が全体のCO₂排出量に重大な影響を及ぼしうる場合には、別途対応が必要である。また、早期の事業段階におけるCO₂排出量の削減の検討にあたっては、仮定による結果の揺らぎに注意が必要である。

(2) 運用に向けた課題

社会資本CFPの本格的な運用にあたっては、その計算手法やCO₂排出量の目安について関係者が知見を共有していることが必要である。現時点では手法が開発されたばかりであり、ノウハウやCO₂排出量に関する感覚が共有されていない。したがって、先行的事例の蓄積等を通じて本格的運用に向けた体制を整えることが課題である。

6. まとめ

本稿では、社会資本CFPの技術的特徴、社会資本整備

に係る既存制度との関係について述べた上で、実工事に関する試算を通じて社会資本CFPによるCO₂排出量の削減の可能性について考察した。社会資本CFPは次に示す特徴を有する。

- 社会資本整備に係る各事業段階に応じたデータベースが開発され、各種の意思決定におけるCO₂排出量に関する検討に利用可能である。
- 積算体系等の既存制度に対応することで、計算実施者の労力削減を実現している。積算体系への対応はCFPの技術面でも、計算の網羅性の確保に資している。
- 工事全体のCO₂排出量や一部の施工技術等を変更することによるCO₂排出量の変化を容易に算出可能であり、CO₂排出量の削減を検討する上で有用な情報を提供することが可能である。

謝辞：本研究の実施にあたっては、公益社団法人土木学会の環境システム委員会が設置した、「LCA活用方策検討委員会」（座長：石田東生筑波大学教授）、「インベントリ・データ作成手法検討委員会」（座長：花木啓祐東京大学教授）、「インベントリ・データベース作成委員会」（座長：岸田弘之国土技術政策総合研究所研究総務官）、「LCA理論検討委員会」（座長：藤田壮国立環境研究所室長）、「LCI試算WG」（座長：鶴巻峰夫和歌山高等専門学校教授）に、内容の精査・検証等のご協力を頂いた。本研究は、総合技術開発プロジェクト「社会資本のライフサイクルをとらえた環境評価技術の開発」（2008-2010年度）の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 南齋規介・森口祐一・東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID），独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター，2002。
- 2) 井村秀文（編著）：建設のLCA，オーム社，2001。
- 3) （財）建設物価調査会：土木工事積算基準マニュアル，2010。
- 4) 瀧本真理・曾根真理・岸田弘之・藤田壮：社会資本 LCA に用いるインベントリ・データ・ベースの対象品目のスクリーニングに関する検討，環境システム研究論文集，Vol.38，pp.203-211，2010。
- 5) 曾根真理・神田太朗・瀧本真理・岸田弘之・花木啓祐・藤田壮：建設資材に共通した，個別製品の二酸化炭素排出量計算手法の提案，日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，Vol.6，pp.346-347，2011。
- 6) （財）建設物価調査会（国土交通省大臣官房技術調査課監修）：国土交通省土木工事積算基準，2010。
- 7) （社）日本建設機械化協会：建設機械等損料表，2010。
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果（IV），国土技術政策総合研究所資料，第444号，pp.11-18，2008。
- 9) 神田太朗・曾根真理・岸田弘之：コンクリートの供用および再資源化による二酸化炭素の固定に関する全国調査，コンクリート工学，Vol.49，No.8，pp.9-16，2011。
- 10) 米澤公敏：鉄鋼業における LCA への取り組みについて，日本 LCA 学会誌，Vol.2，No.2，pp.127-135，2006。