

社会資本整備における低炭素化のあり方

環境研究部長

山本 聡

社会資本整備における低炭素化のあり方

環境研究部長 山本 聡

1. はじめに

地球温暖化の議論が、東日本大震災や景気後退の影響もあり、以前ほどの盛り上がりはなくなってきた。最新（2009年度）の温室効果ガス排出量の確定値を見ると、リーマン・ショック等の影響もあり、見かけ上は1990年の基準年の値を下回る数値になっているものの、低炭素化の努力だけの成果ではなく、景気の回復や経済成長により直ぐ帳消しになってしまうことも予想される。また、エネルギー政策等の方向性次第では、他の分野には更なる削減目標が課せられることもあり得る状況になっている。

社会資本整備の分野における二酸化炭素（CO₂）排出量の削減に対する取組みは、十数年来の建設投資が減少していることや、資材の製造等に係るCO₂排出量を他分野でカウントしている状況の下で建設産業のみで発生するCO₂排出量の削減の余地が小さいこともあり、抜本的な改良策の考案等は必ずしも活発ではなかった。また、低炭素化に取り組めない一つの理由として、資材製造等に関わるCO₂排出量を社会資本整備の関係者の視点にあわせて算定する手法が確立されていなかったことから、低炭素化を目指す試みが行いにくい環境にあったことが挙げられる。

本稿では、国土技術政策総合研究所が実施した、総合技術開発プロジェクト「社会資本のライフ・サイクルをとおした環境評価技術の開発」（2008～2010年度）における研究成果の一部を紹介することを通じて、社会資本整備における低炭素化のあり方について考察するものとする。このプロジェクトは、原料の採取から工事の施工までの全体のCO₂排出量を評価する尺度の開発を一つの目的として実施したものである。

紹介する研究成果の一つは、公益社団法人土木学会と協力して開発した、社会資本整備に伴うCO₂排出量の算定技術である。この算定技術はライフサイクル思考に基づくもので、社会資本整備に伴うCO₂排出量の最適削減シナリオを検討し、低炭素化に向けた関係主体の役割を明確化することが可能である。

もう一つは、都市緑化等、及びコンクリート塊の再資源化によるCO₂固定技術に関する研究成果である。都市緑化等については、国土技術政策総合研究所が作成した、樹種の相対成長式及び年間CO₂固定量の算定式について紹介する。コンクリート塊の再資源化については、CO₂固定量に関する知見がほとんどなかったため、2010年度に全国調査を実施した。この調査の概要を紹介する。これらの研究で得られた新たな知見は、上述のCO₂排出量の算定技術にも反映している。

なお、温室効果ガスの大部分はCO₂であることから、本稿の以降では、分りやすさを重視して、温室効果ガスとすべきところであってもCO₂と表現することがある。

整備分野における CO₂ 排出量は、1990 年度に比較して相当程度減少していることは確実である。とは言うものの、外部の要因に依存しない自発的な取組みによって CO₂ 排出量の削減に努めることが必要である。

平成 20 年 3 月に閣議決定を踏まえて全部改訂された京都議定書目標達成計画においては、社会資本整備に密接に関連すると思われる地球温暖化対策として、表-1 に示す通り、エネルギー起源の CO₂ 排出量の削減に資する「建設施工分野における低燃費型建設機械の普及」、非エネルギー起源の CO₂ 排出量の削減に資する「混合セメントの利用の拡大」、吸収作用の保全・強化に資する、道路、河川・砂防、港湾、下水処理施設等における緑化の推進が示されている。

3. 社会資本整備における低炭素化の方向性

3.1 排出の抑制と吸収作用の保全・強化

地球温暖化を招く CO₂ 濃度の上昇は、排出源による CO₂ 排出量と吸収源による CO₂ 吸収量の均衡が崩れることが原因である。よって、低炭素化の方策は CO₂ 排出量の抑制と吸収作用の保全・強化に大別できる。

社会資本整備の事業における CO₂ 排出量の抑制としては、京都議定書目標達成計画に示される低燃費型建設機械の普及のほかにも、内包する CO₂ 排出量がより少ない建設資材の調達、建設資材の調達総量を減らすための構造物の形状の工夫、建設機械の稼働方法の工夫等が考えられる。社会資本の維持管理を含めると、構造物の長寿命化や修繕方法の工夫

表-1 京都議定書目標達成計画における社会資本整備が関連する地球温暖化対策

効果の分類	対策メニュー	対策の内容
エネルギー起源の CO ₂ 排出量の削減	建設施工分野における低燃費型建設機械の普及	「低燃費型建設機械の使用を奨励し、公共工事において積極的に活用することにより低燃費型建設機械の普及を促進する等、建設施工分野における省 CO ₂ 化を推進する。」
非エネルギー起源の CO ₂ 排出量の削減	混合セメントの利用の拡大	「セメントの中間製品であるクリンカに高炉スラグ等を混合したセメントの生産割合・利用を拡大する。また、グリーン購入法に基づく率先利用の推進により、国等が行う公共工事において混合セメントの率先利用を図る等、混合セメントの利用を促進する。」
吸収作用の保全・強化	都市緑化等の推進	「『緑の政策大綱』や市町村が策定する『緑の基本計画』等、国及び地方公共団体における緑の保全、創出に係る総合的な計画に基づき、引き続き、都市公園の整備、道路、河川・砂防、港湾、下水処理施設、公的賃貸住宅、官公庁施設等における緑化、建築物の屋上等の新たな緑化空間の創出を積極的に推進する。」

も CO₂ 排出量の抑制に貢献しうる。事業の実施前後の我々の活動の変容まで視野を広げると、社会資本整備は、交通流の改善や交通機関分担の変化、集約型の都市づくり等を通じた CO₂ 排出量の削減にも貢献しうる。

一方、吸収作用の保全・強化としては、京都議定書目標達成計画にも示されている都市緑化等による CO₂ 固定が代表的である。社会資本整備においては、都市公園や道路緑化等を通じて CO₂ 固定に貢献している。都市緑化等による CO₂ 固定量は、年間約 70 万トンであるとされている。また、京都議定書目標達成計画には示されていないものの、社会資本整備で広く利用される、コンクリートやコンクリート塊を再資源化した再生砕石は、セメント水和物の炭酸化を通じて CO₂ を固定する。

3.2 ライフサイクル思考の必要性和有効性

CO₂ 等の排出量の抑制等に向けて、各主体が実施可能な取組みを進めることが重要であることは言うまでもないが、実施する取組みの決定にあたっては、ライフサイクル思考が重要である。これは、CO₂ は大気中で安定であり、その影響は長期かつ広範囲に及ぶことから、特定の時点・地点における排出量ではなく、総量の削減が必要であるためである。ライフサイクルを通じた総量が重要である点は、地球環境問題が、騒音や大気質といった従来の公害型の問題と決定的に異なる特徴の一つである (図-2)。

ライフサイクル思考に基づき、原料の採取から工事の施工までで社会資本整備に伴い排出される CO₂ の内訳を図-3 に示す。建設機械の稼働等に必要となるエネルギー消費等によって建設現場で排出される CO₂ 排出量は 1 割程度であり、約 9 割は建設資材の製造等の上流側の産業において排出されている。すなわち、社会資本整備に伴う CO₂ 排出量の大部分は、ライフサイクル思考に基づくことで初めて削減の対象となりうる。よって、社会資本

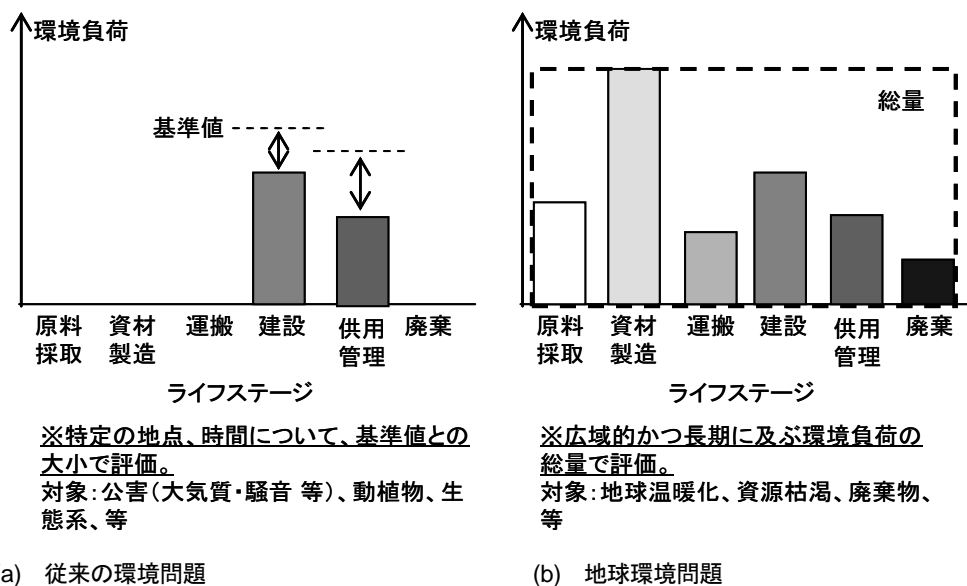


図-2 従来の環境問題と地球環境問題の相違

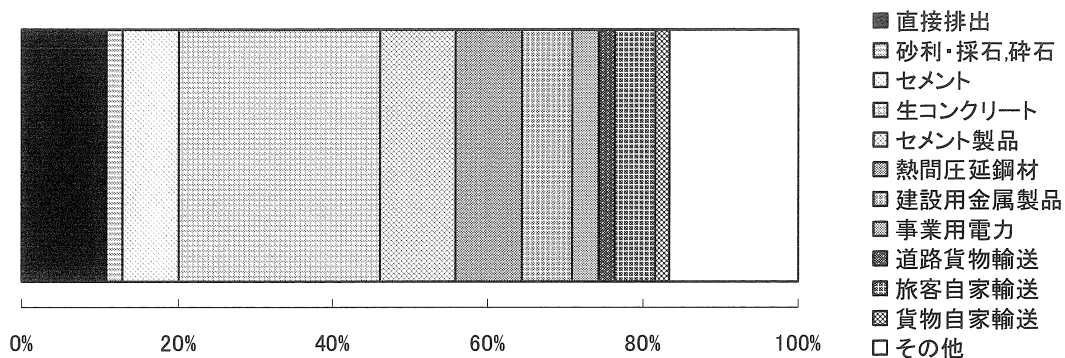


図-3 社会資本整備に伴う CO₂ 排出量の内訳

整備における低炭素化にあたっては、ライフサイクル思考は必須であると言える。また、社会資本整備は、施工に至るまでの様々な手続きにおいて各種の検討がなされており、これらの検討にあたって適宜低炭素化の検討も実施することで、様々な側面での低炭素化が図れると考えられる。

3.3 社会資本整備におけるライフサイクル思考のあり方

3.3.1 ライフサイクルアセスメント

ライフサイクル思考に基づく環境評価はライフサイクルアセスメント（LCA）と呼ばれる。前節で述べたとおり、社会資本整備における低炭素化についても LCA は必要かつ有効な手法である。なお、LCA は、元々、対象の原材料の採取から廃棄に至る生涯における様々な環境要素を統合的に取り扱う手法であるものの、本稿においては、工事の施工までの CO₂ 排出量を取り扱うカーボンフットプリントの意味で用いる。

製品やサービスの分野においては LCA が普及しつつあり、その重要な環境要素の一つとして、CO₂ 排出量の効果的な削減の一助となっている。社会資本整備の低炭素化については、ライフサイクル思考の必要性があり、かつ検討の場が整っているにもかかわらず、製品やサービスの分野に比べて LCA の定着が遅れているものと見られる。社会資本整備に関する LCA を検討した既往の事例については、研究レベルにおいて個別の分野、工事、建設資材等を対象に蓄積されつつあるものの、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。

社会資本整備において LCA の定着が遅れている主な原因は二つ考えられる。一つは、LCA の黎明期から確立期にかけて製品やサービスを前提に検討がなされたため、LCA 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。もう一つは、社会資本へ LCA 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。

3.3.2 LCA の役割

図-3 に示した CO₂ 排出量の内訳によって明らかである通り、社会資本整備における低炭

素化に向けて、建設業に限らず、関連する他の産業界や大学等の学界とも認識を共有し、各々の役割を明確化するための共通手法が必要である。

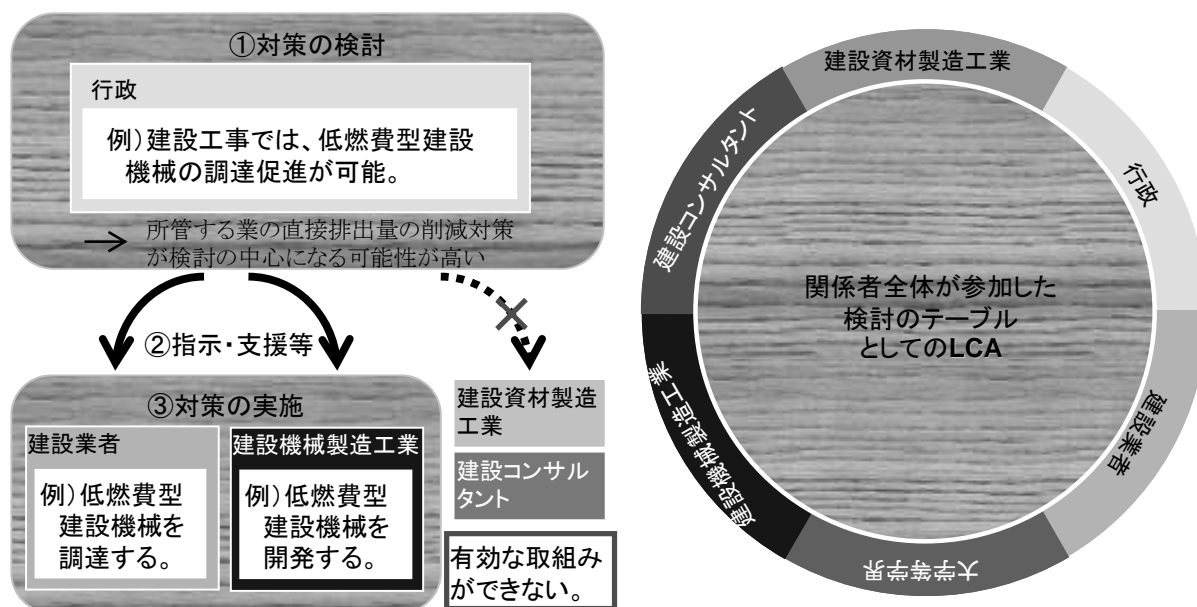
また、従来の上位下達型のモデルでは、対策が部分的なものに留まりかねず、それらの積み重ねは全体最適につながらないことがあり得る。関係者が多岐にわたる地球環境問題については、実施する主体が自ら対策を検討する手法が求められる。

関係者が自ら全体最適のシナリオを検討する共通の手法として、対象のゆりかごから墓場までを通しての環境に及ぼす影響を評価する LCA は適している (図-4)。

4. 社会資本整備の二酸化炭素排出量の算定技術の開発

本章では、公益社団法人土木学会と協力して開発した、社会資本整備に伴う CO₂ 排出量の算定技術について紹介する。土木学会に、図-5 に示す様々な分野の産学官の専門家からなる委員会等が設置され、検討体制が構築された。これは、先述の通り、関係者との認識の共有が重要であると考えられるからである。各委員会には、環境、材料、土木分野の産学官の専門家が参画し、社会資本 LCA の理論、CO₂ 等の排出原単位の作成手法及び作成のための一次データ、社会制度における社会資本 LCA の活用方策等について議論が展開され、その回数は平成 20 年度から 22 年度まで 38 回に及んだ。

この算定技術は、原料の採取から工事の施工までを対象としている。従って、供用や廃



(a)上位下達型 対策の実施主体が限定されるため、地球環境問題に不向き。 (b)関係者連携型 関係する主体全体としての最適化が図れるため、地球環境問題に適する。連携を図る手法としてLCAが有効。

図-4 地球温暖化における、上位下達型の検討と、LCA を中心とした関係者連携型の検討の相違

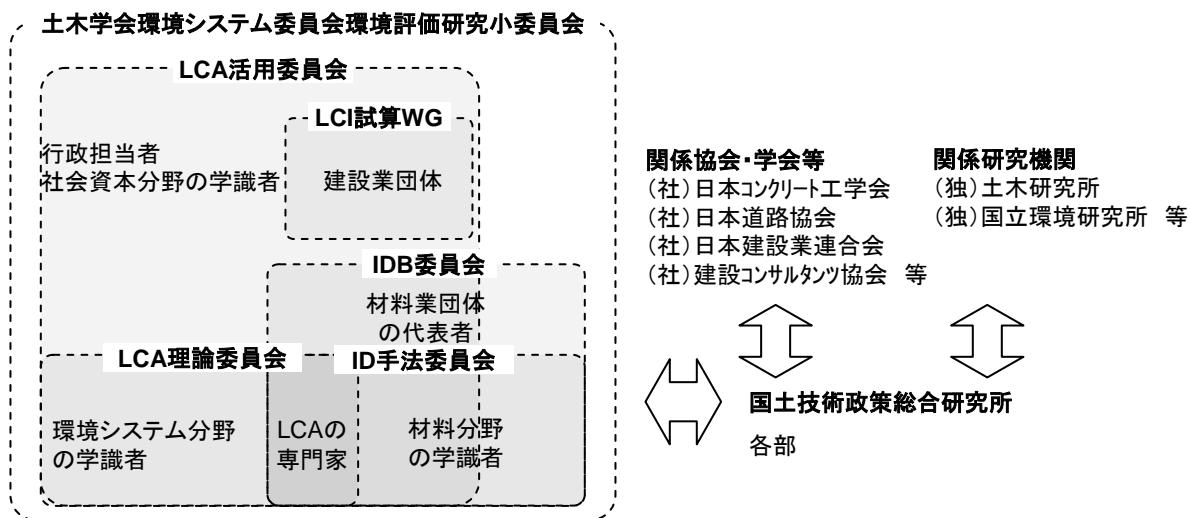


図-5 検討体制

棄段階における CO₂ 排出量を含めた評価が必要である場合には、社会資本の各分野における開発状況等を踏まえて、別途考慮する必要がある。供用や廃棄段階を技術開発の対象外としたのは、供用時の CO₂ 排出は社会資本の分野によって排出源や量が様々であり、手法の共通化になじまないと考えられることや、社会資本については機能が廃止された後に解体等のプロセスが生じるかどうかは建設需要に依存している側面が強く、社会資本の整備段階でその判断が困難であるためである。なお、社会資本が一般に長寿命であること等を踏まえると、廃棄段階の CO₂ 排出量がライフサイクルを通じた CO₂ 総排出量に占める割合は限定的であるものと推察される。

4.1 CO₂ 排出量の算定技術に求められる条件

社会資本整備に携わる事業者、設計者、施工者等が LCA を実施する際の関心は、事業全体の CO₂ 排出量の変化、及び CO₂ 排出量と費用等その他の要素とのバランスであると考えられる。社会資本整備に関する LCA は、これらの関心に対する解を示せる手法であることが必要である。前者について、社会資本整備における低炭素化は、工事全体やさらに波及影響も含めた全体として実施すべきものである。よって、低炭素化のための具体的な取組みを検討する手法である LCA は、個別の施工技術や建設資材単独の環境性能だけではなく、それらを用いることによる工事全体の CO₂ 排出量の変化を算定できることが必要である。後者について、社会資本整備においては、費用、耐久性、施工性等、従来重視してきた評価要素がある。したがって、CO₂ 排出量を新たな評価要素として追加する際に、既存の評価要素との関係を明らかにする必要がある。

これらの関心に応えるために、CO₂ 排出量の算定技術は次に示す条件を満たすことが求められる。

- ・ LCA に基づき、ライフサイクルを遡った総量の算定が可能である。

- ・ 工事全体の排出量の算定が可能であり、かつ一部の施工技術等を変更することによる排出量の変化を示すことができる。
- ・ 千差万別の現場条件等、社会資本整備の特徴を踏まえた算定が可能である。
- ・ 費用等の要素との関係を説明できる。
- ・ 評価を実施する各々の段階で低炭素化の配慮を検討できる。
- ・ 上記の要件が、あらゆる工事やその構成要素について、首尾一貫した共通の考え方の下で満たされている。

4.2 評価技術の技術的特徴

4.2.1 LCAによるCO₂排出量の計算式

LCAによるCO₂排出量は、式(1)によって算定できる。

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

ここで、CO₂：LCA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。

工事費用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。したがって工事費用の積算における単価をCO₂排出原単位に置換すればCO₂排出量を計算できる。しかしながら、建設分野の専門家にとって適切なCO₂排出原単位を設定することは困難である。よって、社会資本整備に伴うCO₂排出量の算定技術の開発では、CO₂排出原単位の整備が中核になる。

4.2.2 整備したCO₂排出原単位

整備したCO₂排出原単位の例を表-2に示す。計画の構想段階においては、社会資本の機能や基本構造が検討されるため、道路の構造形式別の延長当たり・車線当たりのCO₂排出原単位に代表される、構造物の単位量当たりのCO₂排出原単位とした。設計段階においては、構造物の配置や代表断面の形状が検討され工種別の数量が算出されるため、工種当たりのCO₂排出原単位とした。施工段階においては、社会資本を具現化するための施工方法や使用資材が検討されるため、建設機械の供用日当たり、建設資材の単位投入量当たりのCO₂排出原単位とした。

表-2 CO₂排出原単位の例

(a)構想段階用 ☆はt-CO₂

構造形式	排出原単位
土工	946 (☆/km/車線)
橋梁	12,579 (☆/km/車線)
トンネル	4,468 (☆/km/車線)
...	

(b)設計段階用 ☆はkg-CO₂

工種～細別	排出原単位
掘削工(軟岩)	5 (☆/m ³)
A種コンクリート工	233 (☆/m ³)
(舗装)表層工	8 (☆/m ²)
...	

(c)施工段階用 ☆はkg-CO₂

資材、建設機械	排出原単位
普通ポルトランドセメント	915 (☆/t)
早強 "	944 (☆/t)
中庸熱 "	929 (☆/t)
...	

4.2.3 CO₂ 排出原単位の特徴

LCA の理念によって導き出される要件として、対象とするライフステージの範囲で、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、活動項目と各々の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。

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計算が困難であり、個々の技術や製品に関する CO₂ 排出量の大小を評価し、CO₂ 排出量の削減対策を検討す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適した手法である。

本研究では、CO₂ 総排出量に対する影響が特に大きい建設資材を対象に、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 (図-6)。

各建設資材の製造に係る主要な資源、エネルギー投入に関しては、積み上げ法によって設定した。まず、必要となる品目区分について、工事費用の積算に係る図書類における分類や、各建設資材製造工程における材料やエネルギー投入状況に基づいて整理した。次に、関連する公的統計、業界統計、学術論文等の資料を収集し、品目区分の詳細化の実現性及び最も妥当な資料の選択を実施した。関連資料のみでは詳細化が困難である場合には、各

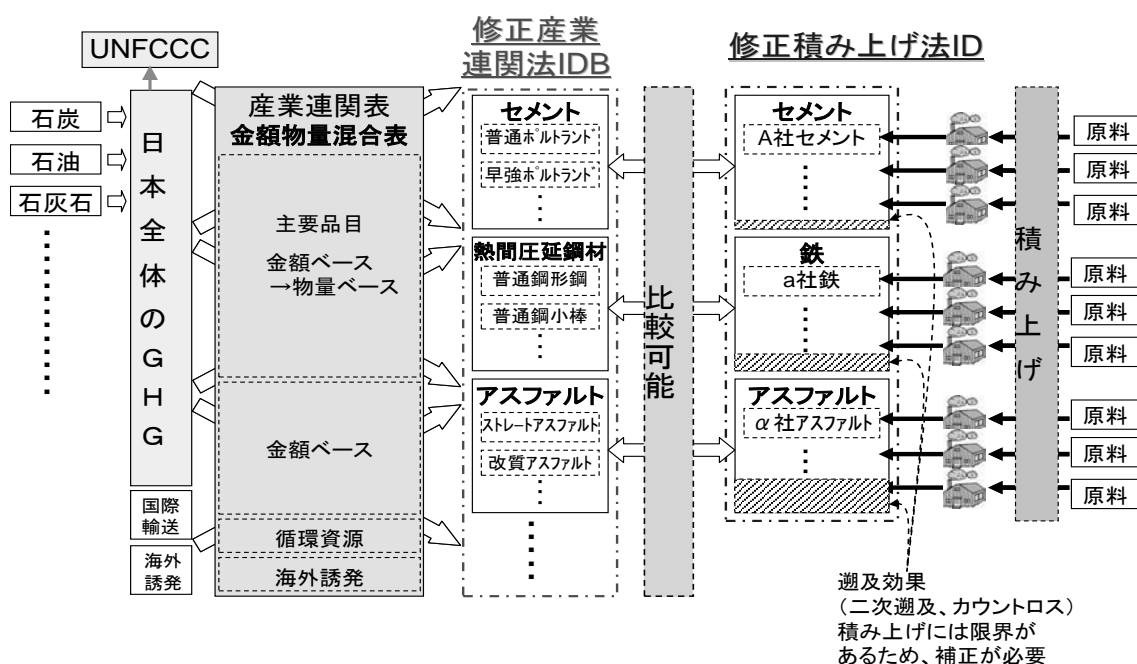


図-6 積み上げ法と産業連関法を組み合わせた CO₂ 排出原単位の作成イメージ

材料に関する専門家に対するヒアリングを実施し、知見を得た。資料及びヒアリングで得られた知見に基づき、各品目製造に係る主要な資源、エネルギー投入量等を設定した。

関連資料及びヒアリングによって設定した資源、エネルギー投入量とCO₂排出原単位の積和のみでは、計算条件の共通性を担保することができない。そこで、関連資料で投入量を把握できないものについて産業連関表を基本に設定し、社会資本整備用の投入産出表（Input-Output Table、IO表）を作成した（図-7）。IO表と各品目のCO₂排出原単位は互いに関連しており、一本の行列式で表現できる。CO₂排出原単位は、この行列式を解くことで求めている。

この手法によって、積み上げ法を用いた主要な資源、エネルギー投入については、品目区分の詳細化等が可能になっている。また、同様の手法によって投入量を設定すれば、現場条件等を反映した計算も可能である。さらに、計算条件は、産業連関表を援用したIO表に基づく一括計算をしているため、網羅性や共通性を確保していると言える。

4.2.4 積算体系との関係

CO₂排出量の計算は工事費用の単価をCO₂排出原単位に置き換えることで可能であり、また、本研究では工事費用の積算を行う施工段階のCO₂排出原単位の整備を基本として、上位の意思決定段階のCO₂排出原単位を整備している。そこで、工事費用の積算体系と対応させることで、幅広い工事、事業を対象に包含したCO₂排出原単位を作成した。

一部の事業区分を除き、社会資本整備の積算システムは体系化されている（図-8）。最も上位の階層であるレベル0の「事業区分」は、道路や河川の予算制度上及び事業執行上の区分であり、これに漏れる事業はないと見てよい。「道路改良」や「橋梁下部」と言った

	石灰石	砂利・採石	碎石	軽油	A重油	セメント産出	セメント①	セメント②	セメントX	セメント他投入	企業内研究	生コン①	生コン②
石灰石	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
砂利・採石	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
碎石	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
軽油	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
A重油	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
セメント産出	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
セメント①							#					#	#
セメント②							#					#	#
セメントX							#					#	#
セメント他投入							#	#	#	#		#	#
企業内研究	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
生コン①													
生コン②													

図-7 作成したIO表のイメージ（着色セルは、元々の産業連関表から変わった箇所の例を示す。）

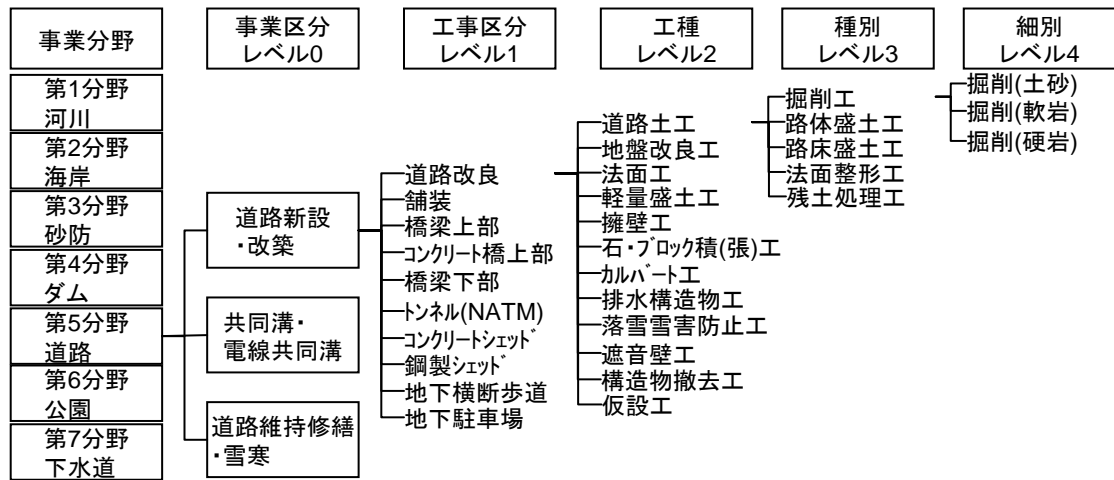


図-8 国土交通省所管土木事業（港湾・空港除く）の工事工種及び積算体系（レベル4まで）

工事の種類は、レベル1で決定される。中間のレベルを介して、積算の基本となるレベル4の「細別」では、検収対象とならない単位仮設物も取り扱われる。つまり、積算に対応することで仮設工等に伴うCO₂排出量も算定できる。レベル1からレベル4までの体系によって、CO₂排出量の算定対象とする工事に関するあらゆる作業区分が網羅される。

レベル4で設定された作業区分を構成する労務費、材料費等は、レベル5で設定される「規格」に応じてレベル6の「積算要素」で計上される。レベル6において計上される費用の構成要素を図-9に示す。積算要素では、建設資材、燃料の調達に係る費用から機械減耗に係る費用まであらゆる費用が計上され、作業を実施するために必要となるあらゆる資本が網羅される。

積算では、「財源措置の枠の把握」や「損をしないような適切な価格の決定」等のため、あらゆる活動に係る費用が計上されるため、活動の網羅に適していると考えられる。

4.2.5 CO₂ 排出原単位の階層化の手順

CO₂ 排出原単位の集約方法を図-10に示す。

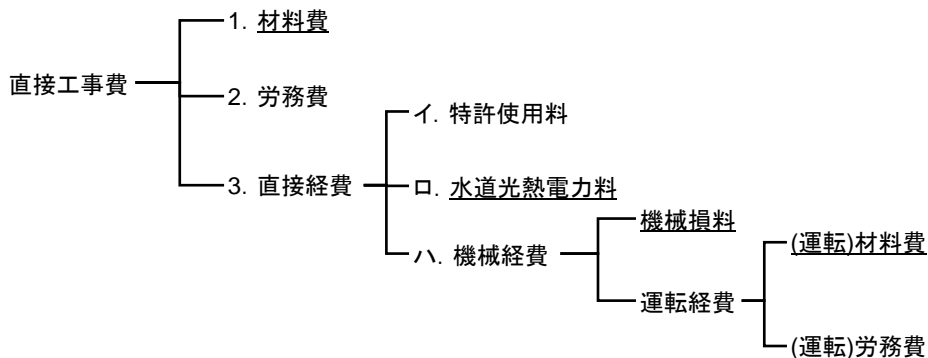


図-9 直接工事費の構成要素

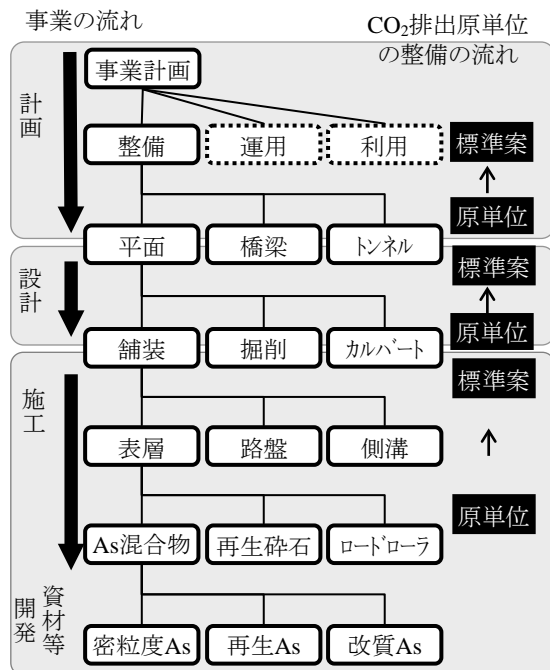


図-10 CO₂排出原単位の階層化

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や土木工事積算基準マニュアル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。計画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形式別の車線・延長あたりのCO₂排出原単位として作成した。

CO₂排出原単位の階層化は、CO₂排出量の計算の省力化のほかに、データベースの更新を簡素化する効果がある。上層のデータベースを下層のデータベースの集約によって算定したこと、及び最も下層の資機材に関するデータベースは公的

一次統計や業界統計に基づく算定としたことにより、データベースは根拠資料の最新版が出るたびに更新できる。

施工段階用のデータベースは、建設資材に関する公的一次統計、業界統計、及び建設機械等損料表等を基礎にしている。これらのほとんどは毎年(度)更新される。また、5年に一度の産業連関表の公表時に更新される。設計段階や構想段階用のデータベースは、施工段階用のデータベースの更新に付随して更新されるほか、細別の資機材利用状況等の設定に用いた土木工事積算基準マニュアルの改訂時等に更新される。

4.3 算定技術を活用した今後の低炭素化の展望

開発したCO₂排出量の算定技術を用いて、経済性、省資源性、施工性、耐久性等の改善を目的として元々開発された施工技術をCO₂排出量の側面で再評価したり、工事における効果的なCO₂排出量の削減対策を検討したりすることが可能である。本節では、これらの活用の具体例によって、社会資本整備分野におけるライフサイクルを通じた低炭素化の今後の展望の一端を示す。

4.3.1 試算対象

省資源性や施工性の改善を目的に開発された二つの施工技術を対象とし、それぞれ従来一般的であった技術とのCO₂排出量を比較した。更に、各々を道路改良工事と橋梁下部工事に適用した際の工事全体のCO₂排出量の変化量を試算した。対象とした施工技術及び工事の概要を表-3に示す。

4.3.2 施工技術の再評価

施工技術の再評価結果は、図-11の実線で囲まれた範囲に示す通りである。

省資源性に優れた固化技術は、従来石灰系の材料によってなされていた地盤改良を製紙工場で産出される副産物で代替することができるため、CO₂排出量を地盤改良工で9割削減することが明らかになった。また、施工性に優れたコンクリートの工法は、高強度の鉄筋を用いるものの、鉄筋及びコンクリートの投入量を大きく減らせるため、高炉B種コンクリートを用いた場合に比べて、橋梁躯体工で2割削減することが明らかとなった。

これらの例が示す通り、従来は省資源性や施工性等の観点でのみ優れた技術の中に、CO₂排出量の削減の観点でも価値が高い技術が見られることが確認された。CO₂排出原単位の小さい材料への転換や材料投入量の削減につながる技術は、CO₂排出量の削減にも資する場合が多いと考えられる。

4.3.3 工事におけるCO₂排出量の削減対策の検討

道路改良工事と橋梁下部工事に関する試算結果は、図-11の破線で囲まれた範囲に示す通りである。

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

表-3 試算事例

(a) 道路改良工事		(b) 橋梁下部工事		
工事規模	延長469.4m, 幅員10.5m, 2車線	工事規模	橋長371.5m, 幅員23.5m, 4車線	
<p>(切土部) 100 1050 175 350 [cm] (盛土部) ※スケールは切土部と同じ</p>		<p>2.5% 2500 9600 5300 2500 1350 5000 1350 ▽8.865 ▽7.085 L=16.50m n=6本</p>		
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)	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 (地盤改良工)	標準案	生石灰系改良材	施工技術 (橋脚躯体工)	
	比較案	製紙スラッジ灰を用いた省資源性に優れた固化技術		比較案
			比較案	施工性と耐久性に優れたコンクリート

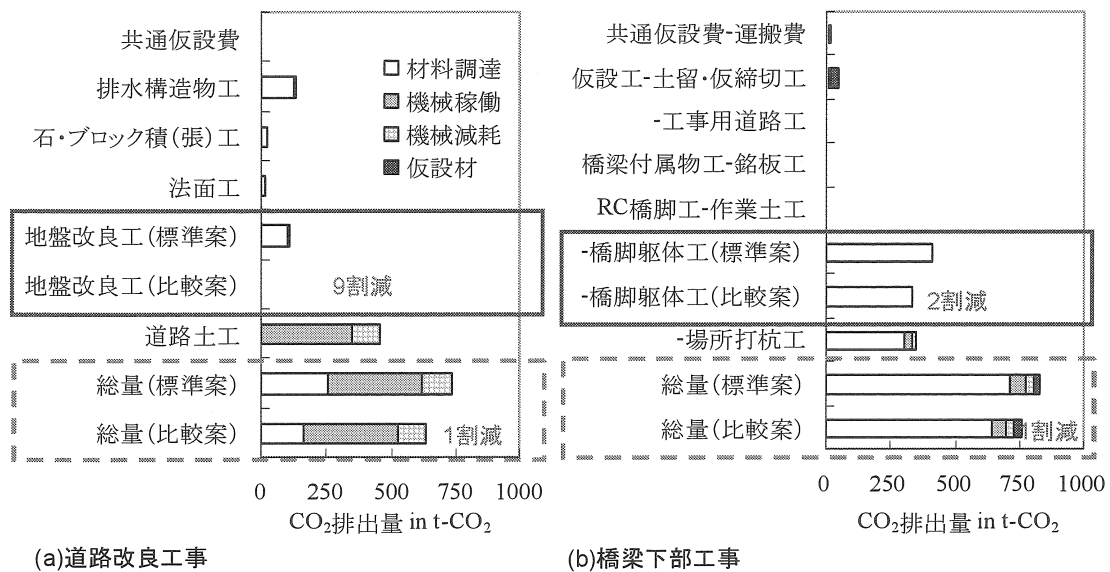


図-11 試算結果

現場内利用をしている道路土工の影響が大きいので、掘削や盛土等に伴う機械稼働に起因するCO₂排出量の影響が大きい。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割減と大きく異なるものの、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、橋梁下部工事の橋脚躯体工については、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。

これらの例が示す通り、工事全体のCO₂排出量の削減に向けて、施工技術単体のCO₂排出量だけではなく、工事の工種の構成や、CO₂排出量に大きな影響を及ぼす工種の構成要素に着目した対策の検討が効果的である。

4.4 活用にあたって留意が必要な課題

開発した算定技術には、いくつかの課題が残されており、活用用途によっては結果に大きな影響を及ぼすため留意が必要である。式(1)に示したCO₂排出量の計算式と対応させて整理すると、次に示す通りである。

4.4.1 活動量 x 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、実態の把握が今後の課題である。

4.4.2 CO₂ 排出原単位 e 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。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。しかしながら、社会資本向けの鉄鋼に関して、この考えが完全に適用可能であると判断するには更なる知見の蓄積が必要である。また、現在の CO₂ 排出原単位は、LCA 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特に大きな影響を受けうる。

4.4.3 投入係数の項目 i 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。

4.5 実用化に向けた取組み

CO₂ 排出量の算定技術の開発が一定の成果を得たことを受けて、今後は社会資本整備への導入に向けて、算定技術の普及や具体的な制度設計、運用体制の確立が必要になる。開発された算定技術が社会資本整備の従事者に広く活用され、検討された対策が実施されて初めて、CO₂ 排出量の削減につながる。

試算事例で示した通り、従来低炭素化を意図して開発されたわけではない工法であっても、CO₂ 排出量の削減に資する技術が数多くあると見られる。同様に、施策についても気づかないうちに低炭素化に貢献していたものや、今後低炭素化の効果が見込まれるものがあると考えられる。実用化に向けて、社会資本整備の従事者が CO₂ 排出量の削減対策に自発的に取り組みたくなるような事例を数多く掘り起こしていくことが重要であると考えている。

社会資本整備の手続きへの導入に向けては、特に工事費用との関連性を明確にしていく必要があると考えている。そのため、事例の掘り起しと並行し、CO₂ 排出量の変化と工事

費用の変化の関係について、主要な工種を中心に整理していくこととしている。

事例の蓄積を進めながら、社会資本整備への具体的な導入手法について検討し、実現するための運用体制に関する検討に取り組んでいく予定である。

5. 社会資本整備における吸収作用の保全・強化に関する研究動向

本章では、社会資本整備における CO₂ の吸収作用として、都市緑化等、及びコンクリート塊の再資源化を取り上げ、国土技術政策総合研究所における研究について紹介する。

5.1 都市緑化等による二酸化炭素固定

京都議定書の報告に当たって、わが国では植生回復を報告項目として選択している。この植生回復は、道路や都市公園などの公共施設において新たに緑化することによることによる吸収量を算出するものであるが、算出に当たっては、IPCC が作成した「土地利用、土地利用変化及び林業に関するグッド・プラクティス・ガイダンス」を採用することが定められている。なお、このガイダンスにおいては、アメリカにおける樹木の成長量の研究成果から求めた年間の成長量がデフォルト値（10 の樹種グループ別に）として示されており、自国のデフォルト値等が無い場合には使用することができるとしている。そこでわが国の報告においても、これまではこのアメリカのデフォルト値を使用して報告してきた。しかしながら、アメリカのデフォルト値を使う場合には、樹齢 20 年を超えると樹木の成長量と枯損等による損失量は等しいと仮定して算出対象外にせねばならず、わが国の実態に合わない。また、このガイダンスにおいては、自国における成長量等を用いることが推奨されている。そこで、国土技術政策総合研究所では、我が国における 50 年前後の樹齢までを適用範囲とした、都市緑化に多く使われている樹種の相対成長式及び年間 CO₂ 固定量算定式の作成を順次進め、京都議定書あるいはそれ以降の報告への活用を目指している。ここでは、これまでに作成した樹種の算定式の作成方法及び結果について紹介する。

5.1.1 方法

(1) 調査対象木

都市緑化に多く用いられている代表的樹種である、クスノキ、シラカシ、ケヤキ、イチヨウ、マテバシイ、プラタナス類、サクラ類の 7 種類とした。調査木は、関東地方の平野部の圃場等で育成され、最近は剪定されていない 15 年前後から 50 年前後までの樹齢の異なる樹木を最低でも 5 本以上（サクラ類は 3 本）選定した。

なお、CO₂ 固定量の算定対象は、木質化することで長期間固定が継続する幹・枝・根からなる木質部とし、葉は算定対象からは除外した。

(2) 伐倒・根の掘取りと木質部生重の算出

調査木は、できるだけ落葉樹の葉が落葉している冬季に行った。作業はまず、地上部を地際で伐倒した後、幹については地上 0.2m の位置から原則 1m 間隔に階層を区切り、根元側から階層毎（0.2m、1.2m、2.2m・・・）に切断した。次に枝を幹から分枝している位置に

より分離した。引き続き、幹については階層別の全生重を測定するとともに、樹幹解析に使用する円板を採取した。枝については、葉を分離した後で全生重を測定した。根は伸長する全範囲を掘取った。掘削には細根まで丁寧に掘り取れるよう、圧縮空気を噴射して土壌を除去するエアースコップを活用した。掘取った根は、土を落とした後で全生重を測定した。

(3) 木質部乾重の算出

次に木質部の乾燥重量を求めるために、幹や枝については階層毎に、根については主根部と細根部からそれぞれサンプルを採取し、生重を測定した。さらに、そのサンプルを恒温乾燥機に入れ、85°Cにセットし、それ以上乾燥が進まなくなるまで乾燥させて乾重を測定した。さらに、求めた生重と乾重によりそれぞれの部位・階層別の生乾重比を算出した。最後に、調査木の部位・階層別の全生重に、それぞれの生乾重比をかけ、調査木の器官別の全乾重及びそれらを合わせた木質部全乾重を算出した。

(4) 樹齢の判読

調査対象木の伐倒時点における樹齢は、地上 0.2m の切断面に見られる年輪より判読した。また、得られた各樹木の地上 0.2m から 1m おきに切断した各階層の切断面の年輪を読み取るにより樹幹解析を行い、個々の樹木の生育特性等を調べた。以下の作業は樹種ごと（本数の少ないサクラ類は除く）と、樹種全体の両方で作業を行ったが結果は樹種全体の結果のみを示す。

5.1.2 結果

(1) 胸高直径と木質部乾重との相関関係

一般に、樹木の各器官の重量等の物理量 (Y) と樹木の形状寸法 (X) との間には、相対成長式 $Y=aX^b$ (a, b は定数) が成り立つことが知られている。そこで、樹木の木質部全乾重を Y とし、樹木の形状寸法を X として相対成長式を求めた。なお、樹木の形状寸法 (X) としては胸高直径を用いた (図-12)。

(2) 胸高直径と樹齢の相関関係

次に、胸高直径が年と共にどのように成長するかを明らかにするため、各調査対象木の樹齢と胸高直径の関係を調べた。樹齢と胸高直径の関係をグラフに示すとほぼ直線関係を示したため、直線回帰式を求めた (図-13)。

(3) 年間木質部乾重成長算定式の作成

次に、図-12 によって得られた近似式 ($Y=0.0604X^{2.6173}$) と図-13 の回帰式 ($Y=1.1246X-1.4146$) によって得られた年間の平均的な胸高直径成長量約 1.1cm を用いて、全樹種統合の年間木質部乾重成長量算定式を求めると、次式が得られた。

$$Y=0.0604\{(X+1.1)^{2.6173}-X^{2.6173}\} \quad (2)$$

ここで、Y:年間木質部乾重成長量(kg)、X:胸高直径(cm)である。

また木質部の炭素含有量は、樹種に関わらず乾燥重量の約 50%程度であることが知られているため、木質部乾重成長量に 50%を乗じることにより年間の炭素固定量を求めることができる。さらに、ここで求まる年間の炭素固定量の値に、CO₂ と C の分子量の比 (44/12) を乗じることにより樹種毎の年間 CO₂ 固定量算定式を求めることができる。これにより、

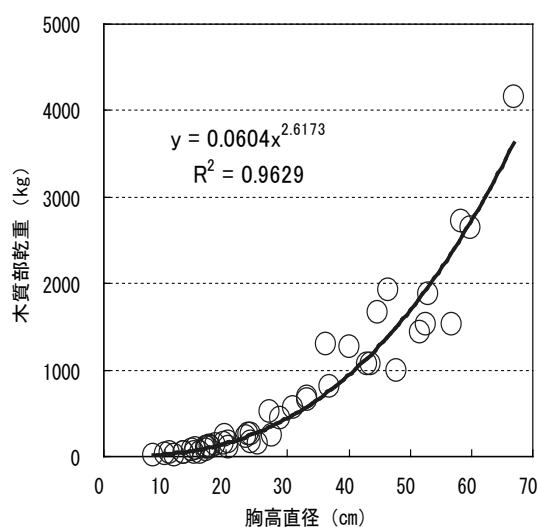


図-12 樹種を統合した場合の胸高直径と
木質部乾重の相対成長式

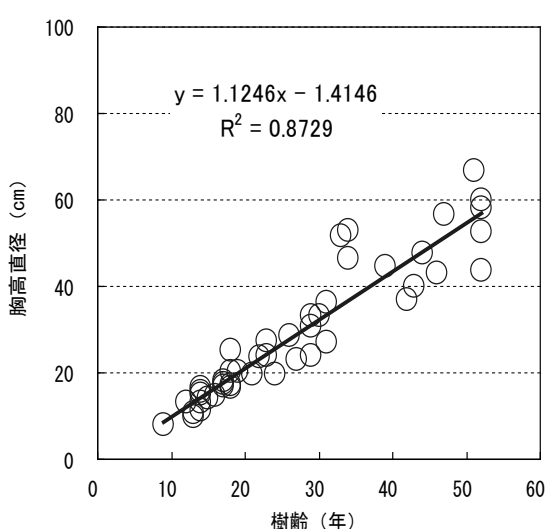


図-13 樹種を統合した場合の樹齢と
胸高直径の関係

木質部乾重を CO₂ 固定量に換算することにより、全樹種統合の年間 CO₂ 固定量算定式を求めると、次式が得られた。

$$Y=0.111\{(X+1.1)^{2.6173}-X^{2.6173}\} \quad (3)$$

ここで、Y:年間 CO₂ 固定量 (kg)、X:胸高直径(cm)である。

また、図-13 の式より樹齢から胸高直径に換算すれば、樹齢からも年間 CO₂ 固定量を算出できる。国土技術政策総合研究所では、これらをもとに、求めようとする樹木の胸高直径または樹齢を入力すれば、容易に年間 CO₂ 固定量を算出できるように HP 専用の頁を設けている。

5.2 コンクリート塊の再資源化による CO₂ 固定

5.2.1 メカニズム

コンクリート中ではセメントと水が反応し、セメント水和物を構成している。セメント水和物の pH は概して高く、初期のコンクリートにおいて約 12.5 である。そのため、大気中の CO₂ が、コンクリートの表面を通じて内部に溶解込み、炭酸イオンになると、酸塩基反応が生じ、炭酸カルシウムとして固定される (図-14)。この反応は炭酸化と呼ばれ、コンクリートの pH が低下する「中性化」の主要要因である。

第一のライフサイクルを終えたコンクリートが解体されると、その約 98% は再生砕石に再資源化され、道路の路盤材等に再生利用されている。再生砕石への再資源化にあたっては、望まれる所定の粒度分布を得るため、解体後のコンクリート塊の破碎、粒度調整が行われる。破碎、粒度調整の前後で、CO₂ 固定速度が飛躍的に高まる変化が生じる (図-15)。

- コンクリートの比表面積の増大
- 炭酸化が進行していない新破断面の出現

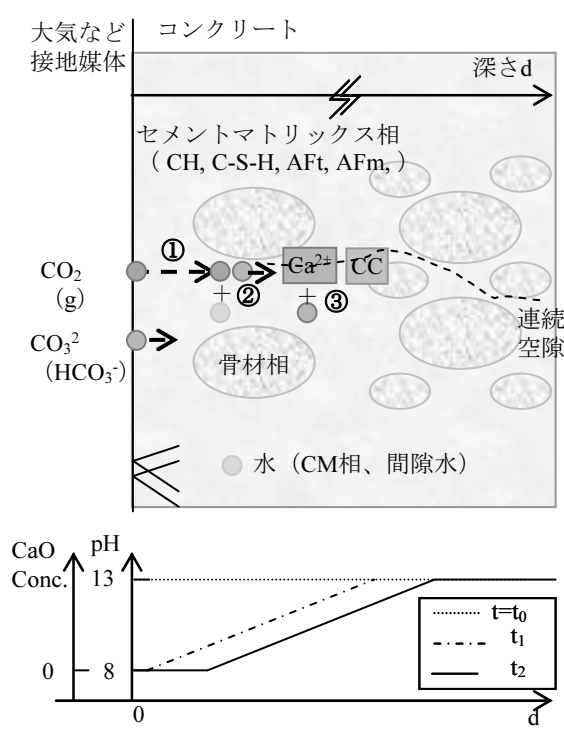


図-14 コンクリートによるCO₂固定のイメージ

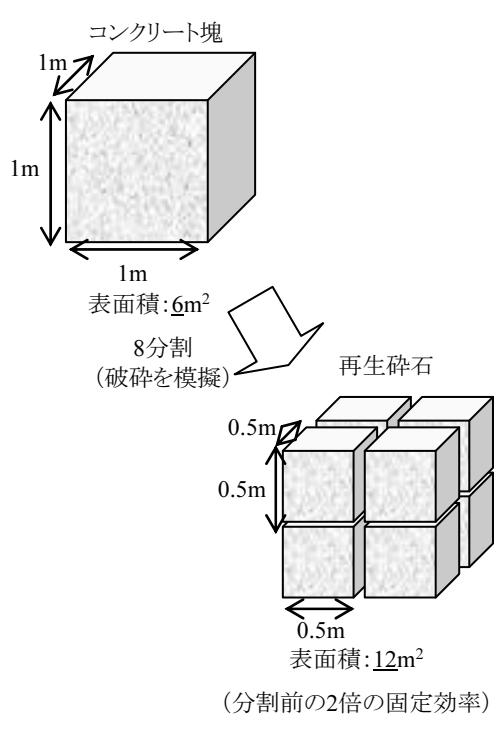


図-16 再資源化によるCO₂固定速度の上昇

•比表面積が大きい微粒分へのセメント水和物の偏在
 炭酸化はコンクリート表面から徐々に進行する反応であるため、比表面積の増大によりその速度は増大する。さらに、破碎によって生じる新破断面は、炭酸化が進行していないセメント水和物が主流であると考えられるため、単純に比表面積が増大する以上のCO₂固定速度の増大が見込まれる。CO₂固定速度の一層の増大が見込まれる点では、セメント水和物の微粒分への偏在も、セメント水和物の新破断面を効率的に増やすため、同様である。

5.2.2 現状の取扱い

中性化は鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食を招く原因の一つであるため、従来は抑制すべき現象として広く認知されていた。ただし、再資源化された再生碎石を路盤材等に用いている限りは、鉄筋腐食の問題が生じることは無いため、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定が耐久性の観点から問題になることは無い。

わが国においては建設リサイクルが発達し、2008年度において約3000万トンに及ぶコンクリート塊が再資源化されている状況である。しかしながら、コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量に関する国内外の知見は極めて限られ、建設リサイクルを通じた低炭素化への貢献について定量的に評価することは不可能であった。

5.2.3 国土技術政策総合研究所における研究の状況

国土技術政策総合研究所は、関係者の協力を得て、2010年度にコンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量について全国調査を実施した。

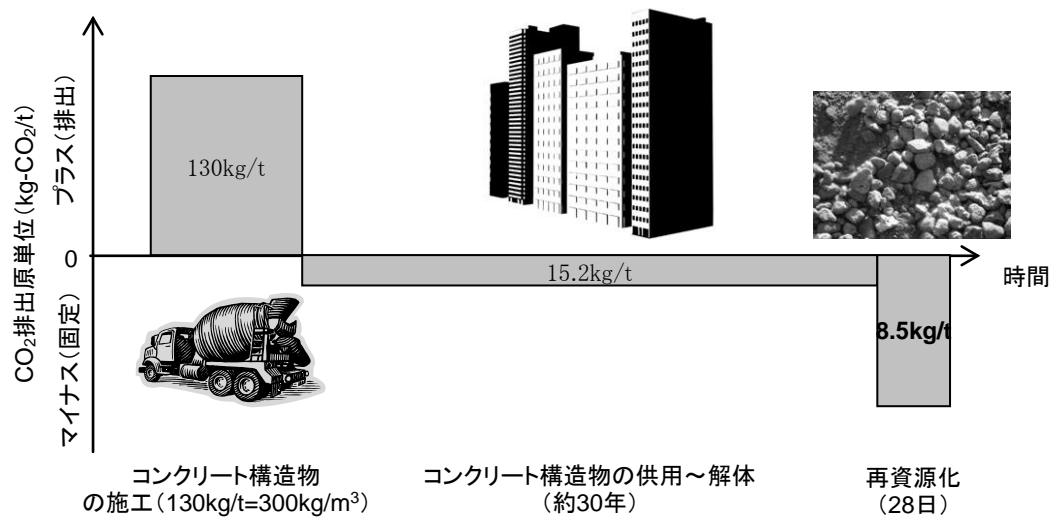


図-16 調査結果

調査の結果を図-16に示す。コンクリート塊の再資源化によるCO₂固定量は、平均で約8.5kg-CO₂/tであった。2008年度において再資源化された約3000万トンのコンクリート塊が平均的に同量のCO₂を固定しているとする、年間の固定量は26万トンに及ぶ。

さらに、CO₂を固定する母体であるセメント水和物の消費状況を調べた結果、最大で現状の4倍以上のCO₂固定も可能であると考えられた。現在は、再資源化方法の拡大に対応するため、再資源化方法の工夫によるCO₂固定の促進方法等について研究を進めている。

6. おわりに

本稿では、国土技術政策総合研究所が取り組んでいる低炭素化に関する研究について紹介し、低炭素化のあり方について考察した。社会資本整備において低炭素化のために取り組むべき対策は非常に幅広く、現状実施されているものは一部に過ぎないと考えている。

現状の取組みが限定的であることの大きな要因は、要因や影響の範囲が広く関係者が多岐にわたる地球温暖化に対して、各関係者の取組みを客観的に評価する手法が確立されていなかったためであると考えている。したがって、今般開発されたCO₂排出量の評価技術や、その技術にも反映されているCO₂固定に関する研究成果の意義は非常に大きいものであると自負している。本稿で紹介したCO₂排出量の評価技術やCO₂固定技術が普及し、社会資本整備による低炭素化の取組みが一層活性化することが期待される。

また、本稿では割愛したものの、社会資本整備は、人々の行動変容を導くことによって、低炭素化に貢献しうる。例えば、交通流の改善は自動車からのCO₂排出量の削減に足して、非常に大きな効果をもたらすと考えられる。国土技術政策総合研究所では、波及影響によるCO₂排出量の変化の評価手法についても研究を実施している。

研究成果は、国土技術政策総合研究所のウェブページ等に適宜掲載しているため、詳細についてはそちらを参照していただければ幸いである。