

社会資本ライフ・サイクル・アセスメント に用いる資材インベントリ・データ のシステム境界の考え方について

神田 太朗¹・曾根 真理²・岸田 弘之³・花木 啓祐⁴

¹正会員 国土交通省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 茨城県つくば市旭一番地)
E-mail:dokan@nilim.go.jp

²正会員 国土交通省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

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所部長 環境研究部

⁴正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

社会資本の設計者や施工者が社会資本ライフ・サイクル・アセスメントを行うにあたって、調達する資材についての環境負荷原単位をまとめたインベントリ・データが求められる。インベントリ・データに計上する範囲は資材間で共通に定められる必要がある。本稿では設計者や施工者が用いる上で適切であり、かつ資材間で共通の資材インベントリ・データのシステム境界について検討を行った。その結果、一般に長寿命である社会資本に対しても現在の情報を基にしたインベントリ・データを用いざるを得ないこと、既存社会資本を都市鉱山として捉えることがこの課題を解決する一助となるとともに資材製造業者との考え方とも一致していることを明らかにした。

Key Words : Life Cycle Assessment, system boundary for material inventory data, carbon dioxide, waste material, natural resource

1. はじめに

国土交通省国土技術政策総合研究所は国土交通省総合技術開発プロジェクト「社会資本のライフ・サイクルをととした環境評価技術の開発」において社会資本ライフ・サイクル・アセスメント (LCA) に関する検討を行っている。

LCA は、ISO において「製品システムのライフ・サイクルを通した入力、出力及び潜在的な環境影響のまとめ並びに評価」と定義されている¹⁾。社会資本を製品システムと考えた LCA (社会資本 LCA) は、社会資本に用いる資材製造や資材原料採取等から社会資本の供用や解体・廃棄まで社会資本の一生を通した環境影響のまとめ並びに評価を行う手法である。この手法を用いることにより、従来建設現場での活動に対してなされることが多かった建設業における環境負荷削減対策を社会資本のライフサイクル全体を通した対策へ転換し、全体として最適な選択が可能となることが期待される。

本検討は、社会資本の設計者や施工者が LCA を実施することを一つの活用方法として想定している。一般に、

ライフサイクルを通した環境負荷量の計算 (Life Cycle Inventory-analysis, LCI) は資材等品目の使用量と環境負荷原単位の積和として式(1)により計算される。

$$S = \sum_i x_i u_i \quad (1)$$

ここで、 S : 環境負荷量, x_i : 品目 i の使用量, u_i : 品目 i の環境負荷原単位である。

この場合、設計者や施工者が直接関与しない資材製造や資源採取等、社会資本整備のより上流側の過程で生じる環境負荷原単位 u_i を資材ごとに整理した一覧表 (インベントリデータベース、以下、IDB と記す。)があれば、設計者や施工者の労力が省ける点で有益であり、実務において LCA を普及させるためには IDB は不可欠である。

既存の IDB としては、慶応大学、国立環境研究所、電力中央研究所がそれぞれ更新している産業連関表を利用した IDB が存在する。産業連関表を利用した IDB の品目 (資材や工法) は社会資本の設計者や施工者が積算に用いている品目と比較して名称の不一致や区分の粗さが問題である。これらの問題は製造業界の協力の下で各過程からの環境負荷を積み上げることで解決できると考

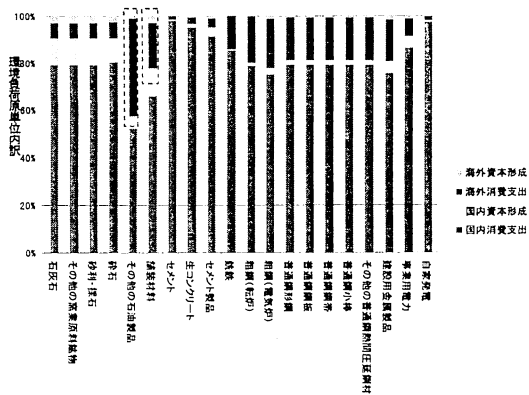


図-1 国内・海外からの環境負荷排出量

えられる。製造業界の協力を得て作成された積み上げ IDB として、経済産業省による LCA プロジェクトにおいて作成された IDB が存在する。しかしながら、この IDB は製造業界ごとに情報提供可能な範囲が異なっていたため、異なる製造業界間で資材の環境負荷を比較できる性質のものではない。例えば、海外における原料採取や国際輸送など国外における工程からの環境負荷を含めるか含めないかによって、石油製品の環境負荷は大きく変化しうる。建築学会が作成している IDB（1995 年データ）に海外における排出分を日本の固定資本形成マトリクスを用いて加味した試算例を図-1 に示す。海外における海外からの排出量は資材によって大きく異なり、アスファルトでは 4 割程度が国外における工程から生じている。社会資本 LCA に用いる資材 IDB の作成にあたっては、業界団体からの情報提供に基づいて環境負荷を積み上げる範囲（システム境界）を共通に定める必要があると言える。

以上から、本検討における重要な課題の一つとして社会資本の主要資材について製造業界間で共通のシステム境界を設定することがある。平成 21 年度までに、社会資本 LCA に用いる資材 ID のシステム境界の考え方について資材間で共通の事項の整理ができつつあるため、本稿ではその結果を報告することを目的とする。

2. 設計者・施工者による利用を考えた資材 ID のシステム境界の設定

通常、システム境界は対象とするシステム全体の環境負荷を計上することが不可能であるために計上する範囲を明示するために定められる。社会資本 LCA を行う場合のシステムは社会資本のライフサイクル全体である。そこには原料採取、資材製造、施工、供用、維持修繕、解体・廃棄などのあらゆるライフステージが含まれる。本

稿において扱う「資材 ID のシステム境界」は社会資本 LCA のシステム境界とは明確に区別されなければならない。本稿で扱う「資材 ID のシステム境界」は、設計者・施工者が社会資本 LCA を行う上で調達した資材に関わる環境負荷を資材 ID として算出するためのサブシステムの範囲である。

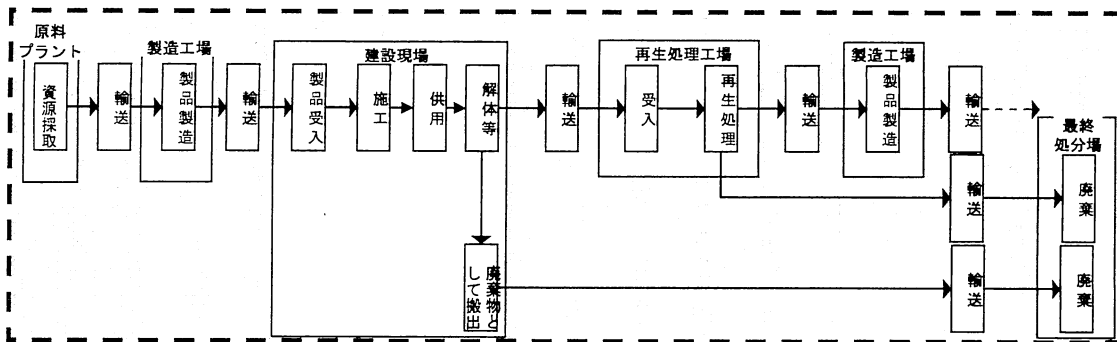
設計者・施工者が資材を選択する段階は概略設計の段階と詳細設計の段階に大別できる。これらの段階で原料調達にあたって選択する資材は材料単価表など積算図書に記載された品目であるが、詳細設計の段階では輸送コストなどより詳細を考慮して選択がなされる。設計者・施工者が原料調達にあたって利用する資材 ID のシステム境界について当初案を作成した（図-2）。当初案について、設計・施工者による資材の選択を可能とする IDB となるか、資材 IDB 整備によって上流から下流まで漏れなくライフサイクルの環境負荷を計算できるか検討した。

図-2(a) のシステム境界は、一つの社会資本の一生において生じる環境負荷全体を資材 ID として整理するものである。このシステム境界は社会資本のシステム境界と同様のものであるが、個別資材の環境負荷を計算する際には適さないと考えられる。なぜならば、社会資本は個別資材を複数組み合わせで構成されたり、調達した複数の資材を現場で配合して一つの部材とする場合がほとんどであり、建設現場において生じた環境負荷を調達した個々の資材に割り当てることが困難であるからである。

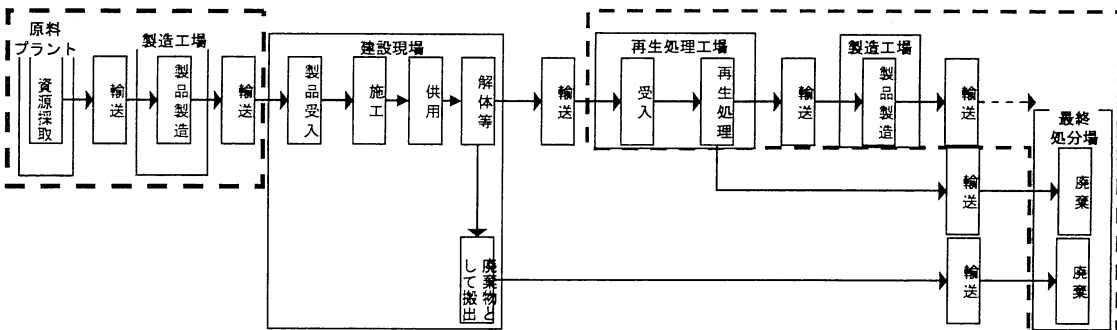
図-2(b) のシステム境界は、資材製造及び廃棄に関する部分からの環境負荷を資材 ID としてまとめるものである。また輸送に関してはコスト計算との親和性を考慮して建設現場への納品まで含めることを基本としている。結果として、建設現場からの環境負荷と建設現場から再生処理工場または最終処分場への輸送がシステム境界外となる。この考え方は建設現場における建設機械等の運転による環境負荷を対象外としていることから従来の削減対策が行われてきた範囲と相補的な関係にある。よって、従来の方法と組み合わせることで社会資本全体の環境負荷算出が可能であると考えられる。一方で、資材の性質や組み合わせ方によって解体の容易さが変化することで生じる環境負荷の増減を考慮することが困難であることが難点である。また、建設現場から再生処理工場や最終処分場までの輸送の相違が環境負荷原単位へ反映されないため、輸送距離に応じてリサイクルを行うか最終処分場を行うかの選択ができない点も難点である。

図-2(c) のシステム境界は、図-2(b) のシステム境界に社会資本の解体及び再生処理工場や最終処分場への輸送からの環境負荷が加わったものであり、図-2(b) に関する上述の問題点を解決している。

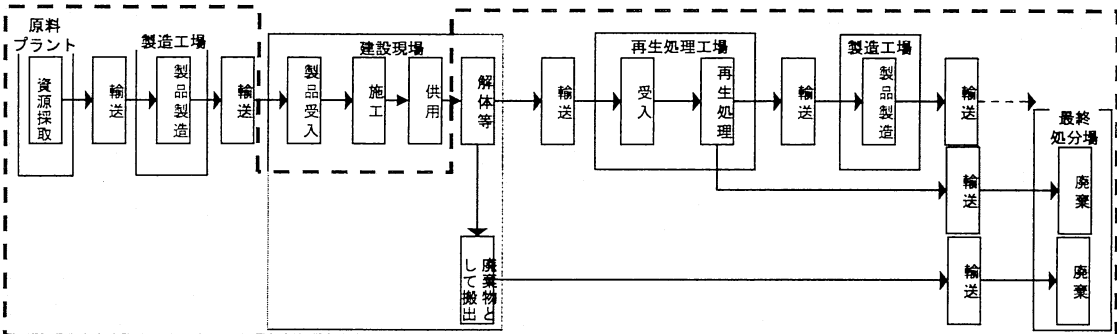
以上から、設計者や施工者が用いる資材 ID のシステム境界として図-2(c) が適切であると考えられる。



(a) 社会資本のライフサイクルに含まれる全てのライフステージがシステム境界内



(b) 資源採取から建設現場への資材の輸送まで及びリサイクル・廃棄に関わるライフステージがシステム境界内



(c) 資源採取から建設現場への資材の輸送まで及び社会資本の解体以降のライフステージがシステム境界内

図-2 資材IDのシステム境界案 (破線で囲まれた範囲)

表-1 調査概要

3. 現地調査及びヒアリング調査

(1) 調査概要

社会資本LCAに用いられる資材IDのシステム境界に関する考え方を整理するために、図-2 (a) ~ (c) を元に社会資本に用いられる主要資材について製造工場の現地調査及び製造業界関係者からのヒアリング調査を行った。主要資材としてセメント、鉄鋼、アスファルト合材を調査対象とした。これらの資材は国土交通省が実施している建設資材に関する各種調査²⁾において取り上げられている。調査概要を表-1に示す。

調査項目	対象資材	調査先	調査項目
現地調査	セメント	太平洋セメント 埼玉工場	・製品製造工程 ・投入燃原料 (特に副産物・廃棄物の利用状況) ・リサイクル状況 など
	鉄鋼	新日本製鐵君津工場	
	アスファルト合材	前田道路朝霞合材工場	
ヒアリング調査	セメント	社団法人セメント協会	・LCAのシステム境界 ・産業間の副産物の取引実態 など
	鉄鋼	社団法人日本鉄鋼連盟	
	アスファルト合材	アスファルト合材協会	

(2) 調査結果

a) 主要資材の製造工程における物質の入出力

調査対象とした資材製造における主たる原料についてまとめると以下のようである。

セメント製造の主原料は石灰石である。他に粘土や珪石が主原料として用いられる。燃料としては石炭の利用が多い。石灰石は主に国内のものが用いられ、セメント製造工場は石灰石山の近くで操業されている。セメント製造業の特徴は、天然資源のほかに各種産業から様々な副産物・廃棄物を受け入れていることである。副産物・廃棄物の例として、原燃料として都市ごみ、原料として下水汚泥や石炭灰、燃料として廃プラスチックや廃タイヤなどがある。

鉄鋼製造の主原料は鉄鉱石、石炭、石灰石である。鉄鉱石などは主として海外において採取したものを輸入している。鉄鋼製造の最大の特徴は天然資源を活用した高炉鉄と鉄スクラップを循環利用した電気炉系鉄が製造され、不可分の関係にあることである。

アスファルト合材の主原料は重油及び骨材である。骨材には建設現場からの解体物を循環利用されているものが多い。重油原料の原油は海外から輸入される。

b) 既存IDにおけるシステム境界

調査対象とした資材の内、セメントと鉄鋼については業界が中心となって取りまとめたIDが存在する。たとえばセメントIDのシステム境界は以下のようである。

セメントのIDのシステム境界は国内における天然資源の採取及び輸送、セメント製造、サービスステーションまでの製品輸送及び自家発電である。このIDは単年度の統計データに基づいて作成されている。これは他業界においても同様である。

4. 調査結果を踏まえた資材IDのシステム境界の設定

(1) 将来に関する不確実性の取扱い

各製造業界が作成しているIDは業界団体加盟企業から集計した単年度の統計データに基づいている。そのため、複数年のデータの変化を考慮することが困難である。一方で、社会資本の特徴の一つは寿命が非常に長いことであり、多くの工業製品の1サイクルが1年以下であることと対照的である。よって社会資本LCIの計算はその寿命の長さに対応した長期のデータを用いて算出されるべきである。

社会資本LCIに含まれる構造物のライフステージの概略を図-3に示す。横軸は時間を表わし、各行は一つの構造物のライフステージを概略的に示している。社会資本の寿命に対応した長期のデータを用いて計算することは、図-3の赤枠で囲まれた範囲について計算を行うことである。現実的に得られるデータは現在までのデータである

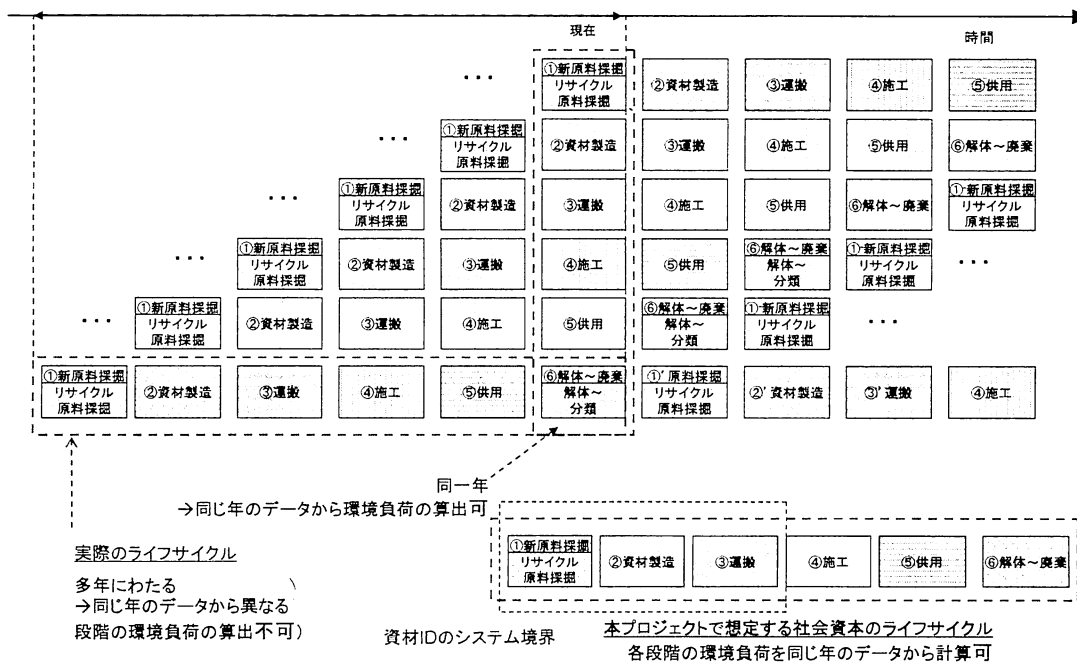


図-3 社会資本LCIにおける計算の便法

ため、これから建設される社会資本に関してLCIを行う場合には将来のシナリオを想定してデータを作成する必要がある。将来のシナリオを妥当に想定できるだけの十分な知見は現時点ではないため、この手法は大きな不確実性及び恣意性を含むことになると考えられる。不確実性の傍証として、建設廃棄物の再資源化等率の推移が挙げられる。建設副産物実態調査結果³⁾によれば、平成7年度において58%であった再資源化率は、平成20年度においては93.7%と大幅に向上している。これは、建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（建設リサイクル法、平成12年5月制定、平成14年5月施行）の影響によっている。この期間、再資源化量は、平成14年まで上昇したものの、それ以降は建設廃棄物排出量の減少が再資源化等率の上昇を上回り、減少に転じている。建設廃棄物排出量の減少は、公共工事に対する投資の減少に強く影響を受けている。このように、再資源化等率・量は公共工事を取り巻く法律や投資などに強く影響を受ける側面を有しており、将来の動向を予測することは容易ではないと考えられる。また、コンクリート塊など一部の再生資源については今後供給過多が予測されている。

別の考え方として、現時点において様々なライフステージにある構造物に関する情報を特定構造物の将来のライフステージに適用させる方法がある。これは図-3の黒枠で囲まれた範囲について計算を行うことである。黒枠の計算は、作業としては、現在の値は将来にわたって一定であるという将来シナリオを描いていることと変わらないため、不確実性は有するものの、恣意性を排除できる点で優れている。この便法は業界団体が作成しているIDの考え方だけでなく、単年度の経済取引に基づいて作成される産業関連法IDBの考え方とも一致している。

この便法の妥当性については、過去の社会資本に対してIDを遡って求めたLCI計算と現在のIDを用いたLCI計算を比較することで検証が理念としては可能である。しかしながら現状ではIDの歴史に比べて社会資本の寿命の方が長い場合が多いため、現時点では妥当な検証は困難であることから、今後データの蓄積を踏まえて検討が必要であると考えられる。

(2) 社会資本由来再生材の「原料採取」

ヒアリングによってセメント、鉄鋼、アスファルトの各業界が設定しているシステム境界にはリサイクル原料の投入が含まれていることが明らかになった。リサイクル原料の投入による環境負荷は、リサイクル原料を採取・輸送するための環境負荷に他ならない。また、リサイクル原料の採取は既存製品の解体に他ならない。この考えを社会資本に適用すれば、既存社会資本が解体され新たな資材が循環利用される場合には、解体によって生じた負荷は将来の社会資本の資源採取によって生じた環

境負荷であると考えられることになる。

現状、社会資本に用いられる資材はほとんどが循環利用されている³⁾。すなわち、既存の社会資本は将来の社会資本に対して都市鉱山としての役割を果たしている。よって、既存社会資本の解体は将来の社会資本のための資源採取であると言えることから、解体から生じた環境負荷を全量再生利用側に負わせることが妥当であると考えられる。

この考え方によって資材IDの精度を高める効果が期待できる。図-4に社会資本ライフステージの概略を示す。一般的な社会資本については供用期間が最も長く、次いで施工期間が長い。図-2(c)に示す供用後の解体・廃棄のライフステージをシステム境界に含める場合、資材製造と解体・廃棄の間にはシステム境界に含まれない建設現場における製品受入、施工、供用の各ライフステージが挟まれるため、取り扱う時間が長期になる。一方で解体を資源採取と考える場合には、解体から製品製造までのライフステージには、建設現場における製品受入、施工、供用のライフステージは含まれず、取り扱う時間が短期になる。上述のとおり、社会資本からの環境負荷に関する将来予測は現状では困難であるが、解体を資源採取と考えることで将来予測の範囲を短縮することができる。以て将来に関する不確実性を低減することができる。将来の不確実性の例としては、技術開発等による循環利用率、環境負荷原単位の変化や潜在的な廃棄物の顕在化⁴⁾などが挙げられるが、これらは全て計算の時間的範囲を短縮することで低減できる不確実性であると考えられる。

(3) 将来の解体・廃棄の取扱い

4. (2)において社会資本の解体は次の社会資本のための原料採取であると考えた。よって、将来の社会資本の解体はライフサイクルに含まれないこととなる。

このライフサイクルの考え方は社会資本の現状に即している点やLCI計算の不確実性を低減する効果が期待できる点で優れているが、将来の解体がライフサイクルに含まれないことは解体方法についての設計者による技術開発を停滞させかねない。LCAの導入によって社会資本整備関係者による環境負荷低減に向けた取組を促進する狙いがあることから、設計者は将来の利用方法や解体方法まで含めたシナリオを考慮して設計を行うことが重要である。

そこで、循環利用システム全体の環境負荷計算手法として将来の解体・廃棄による環境負荷と現状の解体・廃棄による環境負荷の差分を加えることを検討している。この考えでは、将来の解体段階からの環境負荷が現状と同じであれば環境負荷の差分は0であるため、将来の解体・廃棄をシステム境界外とした場合と全く同じである。

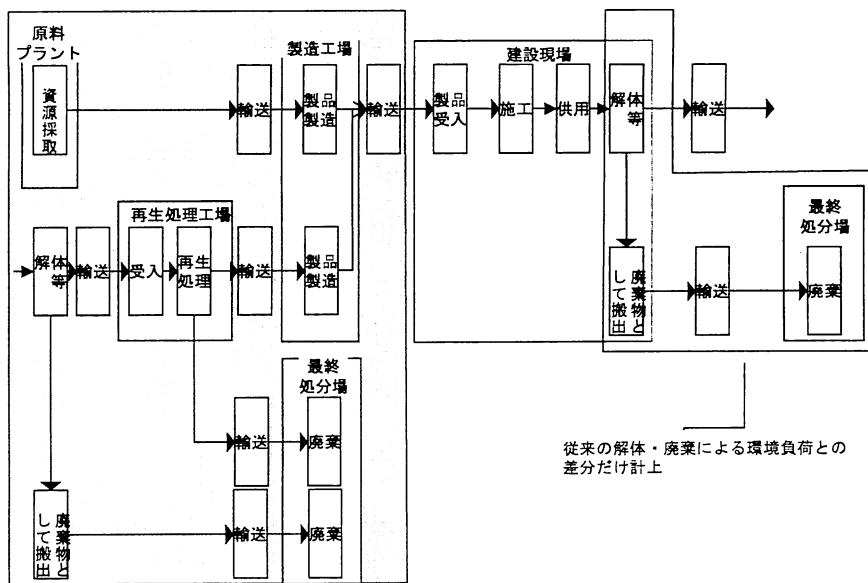


図-4 既存社会資本を都市鉱山と捉えた場合の資材IDのシステム境界（図-2（c）に対応）

一方で将来の解体・廃棄からの環境負荷が現状の解体・廃棄からの環境負荷と著しく異なる場合にはその差分が計上される。つまり、設計者による将来の解体・廃棄についての工夫をIDに反映することが可能である。また、高強度・長寿命等を目指した資材の開発がなされた結果解体の難易度が増した場合などについても解体・廃棄からの環境負荷の増分を適切にIDに反映することが可能である。本来であれば、寿命の変化等も考慮した上で環境負荷の変化の具体的な計算手法の検討が必要であるが、社会資本の寿命は強度や耐久性など物理的側面からのみ決まるものではないため、現時点では具体的な議論ができない状況である。今後の検討を踏まえて適切な計算手法を定めていくことが課題である。

5. まとめ

本稿においては、設計者や施工者が実施可能な社会資本LCAの開発に資するため、社会資本LCAに用いる資材IDのシステム境界について検討した。設計者や施工者が利用する上での利便性の観点から、資材IDのシステム境界は建設現場以外からの環境負荷に建設現場における解体からの環境負荷を加えた範囲が適切であると考えられる。資材ID作成やLCA実施にあたっては計算上の便法として現在の環境負荷原単位を用いざるを得ないことを示した。社会資本の主要資材は循環利用されることが多く各種資材製造業者による既存IDでは循環利用原料が原料採取の一部として組み込まれていることを考えると、既

存社会資本を都市鉱山として捉えることで、既存社会資本の解体・廃棄は将来の社会資本のための原料採取であると考えることが妥当である。この考え方によれば、解体・廃棄と資材製造等の工程が時間的に連続するため、将来に関する不確実性を減ずる効果が期待できる。一方で設計者や施工者は将来の解体・廃棄を見据えた社会資本整備を考えるべきであるから、将来と現状とで解体・廃棄からの環境負荷の差分を資材IDに反映させることを検討している。

謝辞：本研究にご協力いただいている久保和幸土木研究所上席研究員、栗島英明芝浦工業大講師、堺孝司香川大教授、白川直樹筑波大講師、鶴巻峰夫和歌山高専教授、野口貴文東京大准教授、橋本征二国環研主任研究員、藤田壮国環研室長、松野泰也東京大准教授、業界団体関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS ハンドブック 58-2 環境マネジメント，pp.263，2009
- 2) 例えば、国土交通省総合政策局建設市場整備課：主要建設資材需給・価格動向調査，<http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/chojou/mon.htm>
- 3) 国土交通省総合政策局：平成 20 年度建設副産物実態調査結果参考資料，<http://www.mlit.go.jp/common/000121183.pdf>
- 4) Seiji Hashimoto, Hiroaki Tanikawa, and Yuichi Moriguchi; Where will large amounts of materials accumulated within the economy go? – A material flow analysis of con-

SYSTEM BOUNDARY OF MATERIAL INVENTORY DATA FOR INFRASTRUCTURE LIFE CYCLE ASSESSMENT

Taro KANDA, Shinri SONE, Hiroyuki KISHIDA and Keisuke HANAKI

Inventory data is necessary for infrastructure planner to conduct infrastructure life cycle assessment. The inventory data could be made based on common system boundary between various materials used for infrastructure. In this paper, we considered how we should set the system boundary. We found that we can only use today's data to make the inventory data. We also found that uncertainty for future can be reduced by regarding existing infrastructure as social material stocks. This idea is coincide with ones of material manufacturers.