

土木建設システムにおけるLCAの考え方と事例

SCHEME AND PRACTICES OF LIFE-CYCLE ASSESSMENT IN CIVIL AND CONSTRUCTION SYSTEMS

土木学会地球環境委員会

環境負荷評価(LCA)研究小委員会

盛岡 通*

Tohru MORIOKA

Abstract : Scheme of Life-cycle assessment is developed for engineering practices to evaluate carbon dioxides emission intensity in civil and construction systems such as road pavement, dams, tunnels, bridges and municipal wastewater treatment facilities. Emissions due to consumption of heavy materials such as cement, concrete and steel are found to account for fairly large percents of total CO_2 discharge.

Keywords : Life-cycle assessment, material consumption, carbon dioxide emission, impact assessment, Civil engineering systems

1. はじめに

LCAの考え方は、活動や事業にともなう主たる効果と好ましくない影響を分析、評価する分析・評価・審査・管理のシステムとして従来の評価システムにない特徴をもっている。そのことは、金銭的な単位で費用便益を衡量評価する**費用便益分析**や環境影響を物的単位で計量して環境保全対策を含めた代替案を評価する**環境影響評価**と比較すれば顕著である。

すなわち、社会経済活動それ自身が一連の不可分の長期的効果を財や施設、さらに社会基盤の履歴に応じて、有していることに注目した評価をおこなうことで、一連の不可分の各段階の効果を**ライフサイクル**に沿って集計した地球のもしくは広域的インパクトを全体として減少してゆく技術政策と社会政策を発見し、選択し、実施してゆく**評価システム**であり、その道具としての科学的、技術的要件についての検討が進められている。

同時に、産業活動や事業活動そのものの環境調和性や環境適合性を評価し、管理運営してゆく制度としては、**事業所ごとに環境管理**をおこない、第一に**商品やサービスレベルの環境配慮**を、第二には活動や事業の直接的な**変換プロセスの環境配慮**を、第三は活動や事業をおこなう**空間場それ自身の環境共生**を、そして第四には社会的存在として**地球共同体としての間接的で協調的貢献**をおこなうことなどを包括的に推進するマネジメント・システムの社会化が検討されている。

このうち地球的な資源消耗や環境汚染などに重点をおきながら、事業所の活動を物的な環境インパクトの面から社会的に評価することを、環境管理監査システムとして国際的に共通して制度化しようという動きが強まっている。ISO14000シリーズがそれであり、経済活動のなかで外部化されやすい要素のなかで、まず品質をISO9000シリーズで中枢的評価対象として内部化したのに続く試みである。事業所の提供する財はひとつひとつは市場を通して流通する私的財であっても、その集合的效果に着眼した適正な規制を競争の共通の土俵としてつくろうというものである。注意すべきことは、ISOではすでにTC207でライフサイクルアセスメントの技術的要件を検討しつつ、同時にエコラベリングの社会的情報制度なども協議しているが、近い将来には廃棄物管理を、さらに中長期の将来には事業活動にともなう労働安全衛生を事業活動の企画のなかにおり込んでゆくという姿勢を示している。

* 大阪大学工学部環境工学科、Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., 平成6年度に地球環境委員会に土木建設業環境管理システム小委員会LCA検討部会(部会主査 盛岡 通)として発足し、平成8年度より小委員会としての活動に発展・メンバーは阿部 徹(旧委員 山本 聡)、井村秀文、乙間末広、金 聲漢、小泉泰通、児玉浩一、小室信幸、酒井寛二(幹事)、下畑隆司、鈴木輝彦(旧委員 高野佳博)、船水正雄、高柳則男、鶴巻峰夫、内藤 弘(幹事)、花木啓祐、藤岡莊介、真下 章、村岡 譲、宗形直樹、盛岡 通(主査から小委員長)、森下 研の21名。

すなわち、土木建設システムにとっては、事業それ自身の**目的達成のパフォーマンス**を事業主体の利害から評価・管理する段階から、建設物や社会基盤の供用中を中心とした品質を評価・管理する段階に進み、さらにその**社会的産物のプロセスとライフ**を貫いた**総合的な評価**と規格づくりをおこなう段階へ発展しつつあり、その着眼点としての環境管理であり、かつライフサイクルアセスメントであることに注意を払う必要がある。

2. 土木建設システムのライフサイクル環境負荷を評価する場合の特徴

(1) スコーピング

負荷の概略と検討範囲の設定（スコーピング、Scoping）の面では次のような特徴をもつ。

- ① ライフサイクルの各段階の表現でみると、**建設段階、供用段階、解体・廃棄段階**を共通に有していて、資材については源により大きな差がない限り**資材ごとの原単位**を与える方式が妥当で、いわゆる資源採取段階をいつも区別してゆく必要はない。鉄とセメントについて、品種や産地を配慮するのが当面の方策。
- ② 土木構造物ではその**供用時に生じる環境負荷の幅と量**が大きいと予想されるが、基盤や施設を利用することで生じる環境負荷については扱いを別とし、当面は運転・維持管理にともなう負荷を供用時の負荷として計上するのが現実的。ただし、都市システムの環境負荷からみた**計画選択問題**の重要性は将来課題として認識している。
- ③ 施設そのものがきわめて**使用期間が長く**、例えばダムのように解体や廃棄を想定しにくい建造物がある。しかし、社会的な機能向上の要請に応じて解体・更新される例も少なくないところから、耐用年数をより長期とすることの環境負荷削減を検討することも重要である。
- ④ 土木建設システムにおける出口側としての廃棄物のリサイクルによる環境負荷の削減と、再生資源を資材として活用してゆく資源の側での環境貢献を想定することができる。その評価を客観的に実施するには、**境界**を定めることによって**比較代謝システムとの差異**を明確にすることが必要。

(2) インベントリー・アナリシス

負荷項目の同定（インベントリー・アナリシス、Inventory analysis）の面の特徴は、実際の事例の検討によって明らかになるが、事前の概略検討によって次のことが明らかである。

- ① 土木建設システムでは、補修時や維持管理をも含めたプロジェクト・マネージメントの経験により、いわゆる業務を分割して細分化し環境負荷に結びつけることには十分なノウハウがある。それには**積算**によって費用を勘定することが広くおこなわれてきたからである。ただ、その**インベントリーの階層数**や、その項目の総数がきわめて多いためにそのデータの収集には体系的なとりくみとツールが必要となっている。特に、施工段階では施工工種が多様であり、大規模工事の施工部分もいくつかに分割され、施工につきものの資材、建材、工具、消耗品の種類も多い。
- ② 積算の基本構造は**工程数量に環境負荷原単位を乗じる**ものであるが、工程の分割単位の精粗により、インベントリーの規模は変化する。また、近年の新たな工法の登場により**工法の代替案**を想定する幅が拡大している。例えば、橋梁の上部構造では鉄鋼構造とPC橋とではインベントリーも変化するもので、それらの選択による差が強調される項目と構成を描く。
- ③ 投入される機材のうち重機類については稼働時の燃料消費とは別にその製造の段階での環境負荷を計上する必要があるが、**耐用年数による減価償却**と同様の扱いで鉄など構成主要資材の重量で扱えばインベントリーの項目は単純化しうる。
- ④ 土木構造物のうちで、供用時に照明や動力に加えて資材を投入することの顕著な供給処理施設や交通施設がある。社会基盤としてのサービスを完結するシステムを一体としてインベントリーを描く必要があるときには、**サービスの供用時の機械、資材、動力**の項目が増加する。港湾の埠頭の護岸とクレーンのように、負荷計算上で独立で、代替案評価上も**独立**な場合には、**別途に扱う**ことが合理的である。

(3) インパクト・アナリシス

環境負荷の影響分析（インパクト・アナリシス、Impact analysis）の面の特徴については、事前には次の点をうかがい知ることができる。

- ①属地的な影響の主要なものを網羅的にとりあげる環境影響評価と異なり、ライフサイクルの各ステージを縦断的に集約することの意義の高い環境負荷は、地球温暖化をまねく**二酸化炭素排出量**である。土木建設システムは資材の消費量が多く、現場施工にともなう廃棄物や残土の排出も顕著なので、次には**廃棄物量、総資源消費量**を取りあげる。
- ②インパクト・アナリシスでは、建設時、供用時、廃棄時の3つの**ステージごとの量と相対比率**を示すことにより、重点的な評価および改善の領域を発見することができる。また、積算費目の大項目によっては、構造物に特有の分類ごとに二酸化炭素排出量を集計して表現するのが効果的である。
- ③二酸化炭素の総排出量に占める**建設段階の内部内訳**を表現するとき、資材に内包されている分と施工時の機材や動力による分を区分するのは一般的ではあるが、**運搬項目**だけを別途集計することもある一方で、土木工事以外の建築工事、機械工事、電気工事を区分する方式もあろう。

3. 5つの代表的な土木構造物のライフサイクル負荷の試算

2年目の平成7年度には、暫定的な環境負荷原単位の設定と、代表的な5つの土木構造物についてのライフサイクル負荷の試算をおこなった。その結果の要約を以下に示すが、計算例のうちのいくつかはシンポジウムで別途報告しているので参照してほしい。

(1)共通的な基礎データ

社会的要請の緊急度やデータの入手容易さから二酸化炭素量を取りあげ原単位を算定し、廃棄物については取扱い方を検討した。一般に環境負荷の原単位の算定法には「**産業連関分析法**」と「**積上計算法**」がある。それらには長所と短所があるので、併用するのが望ましい。

- ①セメントや鉄などの**主要資材**については**積み上げ法**を用い、運輸や主要機材についても積み上げ法を可能な限り用いる。
- ②施工段階で用いる多様な資材や機材については、産業連関表の基本分類（400分類）の金額ベース（生産者価格）を用いて、当該財を含むと考えられる分類産業の単位**最終消費額**から誘発される生産活動の際の燃料等消費より算定する。

(2)道路舗装

土木事業で二酸化炭素排出量の多い部門として道路事業がある。その内訳をみても**舗装材料の二酸化炭素排出量**の多さが目立つ。同時に、**リサイクル材の利用と再生工法の採用**を積極的に進めることによって、環境負荷の削減が可能となる。

道路舗装では、**舗装部分の標準構成**を設定し、次に修繕（オーバーレイ）のピッチと解体までの時間的シナリオを作成する。ついで、アスファルトもしくはコンクリートの新規資源を使用するか、再生加熱アスファルトを使用するか、現場での路上表層再生利用工法を採用する**代替案**を設定する、**新規資材と再生資材の原単位**の大きさによって結果は直接に左右される。

6.5m幅、1km延長の車道の舗装を対象としたワーキング・グループの計算結果を図1～2に示す。

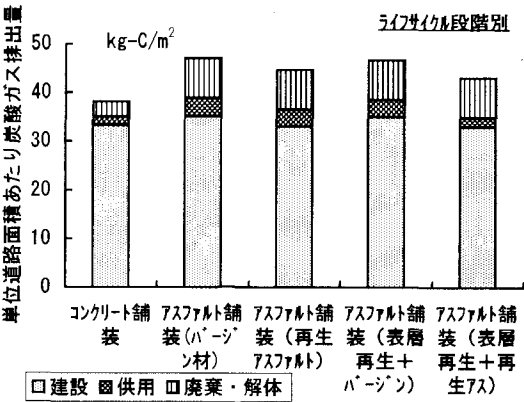


図-1 LCA段階別のCO₂排出量

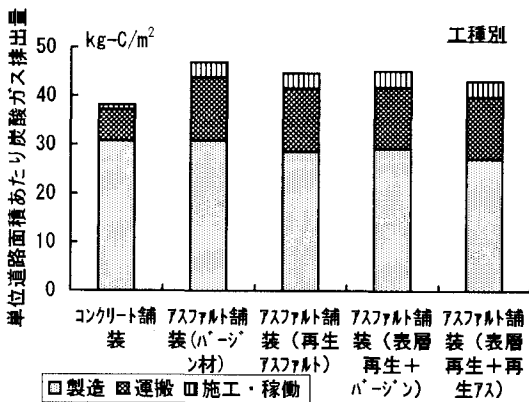


図-2 工程別CO₂排出量

再生アスファルトで路上表層再生工法を採用することで10%弱の二酸化炭素排出量を削減しうる。耐用年数の長く維持修繕の少ないコンクリート舗装の場合の排出量も約20%少ない。また、舗装材の製造では全体の45～70%を占めている。

(3)ダム

ダム建設は複合工事であり、総合構造物である。調査、設計、施工、運用、維持管理の各ステージを区分するが、二酸化炭素の発生の大部分が**施工段階に集中**する。ダムの提体構造により工種の細目は異なるが、ロックフィルダムを対象としてワーキング・グループでは試算をおこなった。掘削、盛立、打設などの工事にともなう動力消費などでは現場の地形や地盤などの条件により重機などの稼働時間が異なるので、試算では実際の設計例をもとに積み上げをおこなっている。インベントリーの施工（レベル1）のうちのレベル2で直接工事のみに限定し、さらにレベル3で転流工、掘削工、盛立工など20の工種に分け、例えば盛立工ではフィルター盛立（レベル4）、ロック材等の掘削（レベル5）、原石山ベンチカット（レベル6）、クロラドリル（レベル7）、燃料消費（レベル8）などと細分化している。

提高70mで、提体積350m³の中央コア型**ロックフィルダム**について試算した結果を図-3に示す。総量は炭素量5万4千トンで、15.37kg-c/m³に相当する。

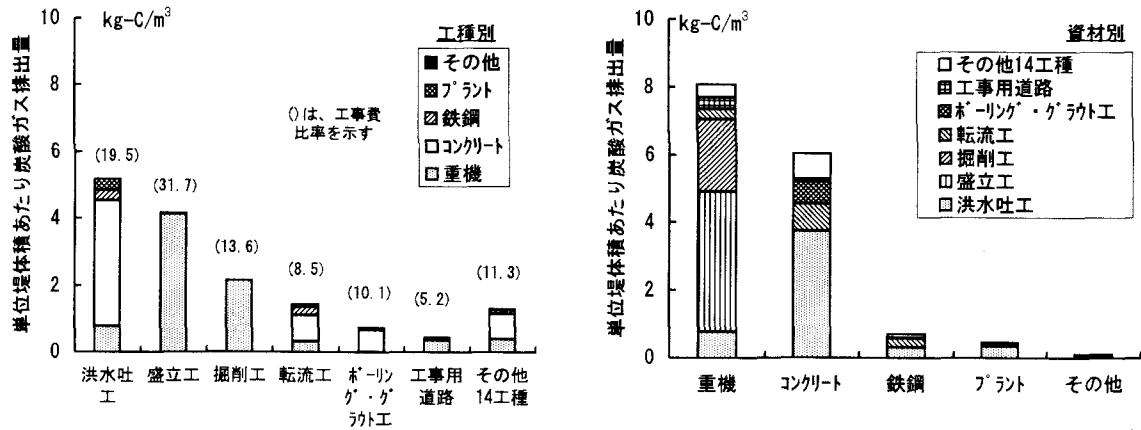


図-3 ロックフィルダムの施工ステージの二酸化炭素排出量

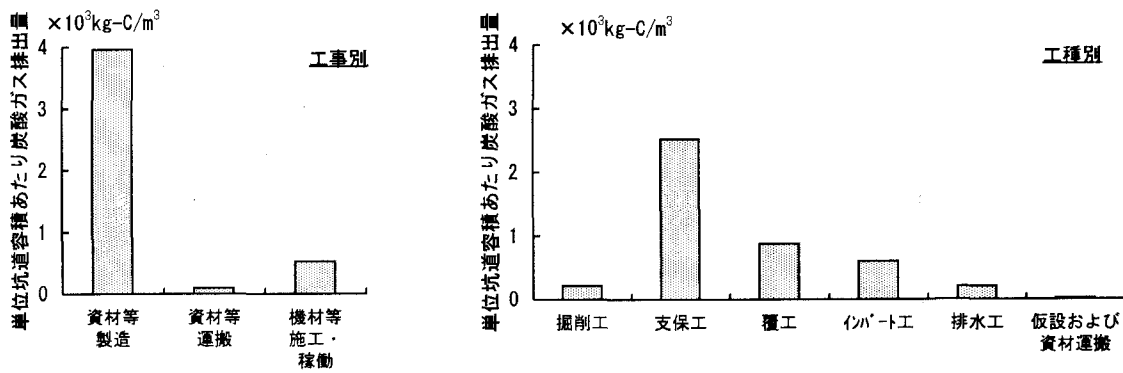
洪水吐工と盛立工の二酸化炭素排出量の多さが目立つが、特に洪水吐工では工事比率で19.5%のシェアなのに炭素量では33.7%に達する。排出の資材・機材別では**重機関係**が52.5%と最大の項目になっている。提体とほぼ同量（330万m³）の副産物が発生したが、このうち18%の本工事への再利用の他の82%を運動用地の造成や連絡道路用に**再利用した関連分**をダムの環境負荷から差し引くと37%減となる。また、机上で設計変更した場合の環境負荷の削減を検討した試算では1%を越える効果はみられなかった。

(4)トンネル

山岳トンネルのNATM工法をケース・スタディとして試算した。まず、調査、設計、施工、維持管理、廃棄のライフのうち、施工ステージの占める割合が高いので、50年のライフで幅員11m、トンネル延長427mの**山岳トンネルのNATM工法**について二酸化炭素排出量を算定した。積算の手順による積み上げ法でおこなっている。

大、中、小項目の構成のうちでは、「土木工事」の「支保工」の「材料」に属する**吹付コンクリート**の数量の多さに起因して843t-cの最大排出量を示す。他方、**資材等の製造、運搬、施工・稼働**の三分類のなかでは、支保工の吹付コンクリートに加えて、覆工の材料の覆工コンクリート（336t-c）とインバート工のインバートコンクリート（238t-c）などを加えて1447t-cと全体の78%を占める。その構成を示したものが図-4である。

ワーキング・グループでは、代替工法の開発を含めて、工期の短縮や工種の簡素化のほかに、骨材にリサイクル材を利用することや強度を確認しつつ二次覆工や支保工の一部を省略することの効果も検討されている。



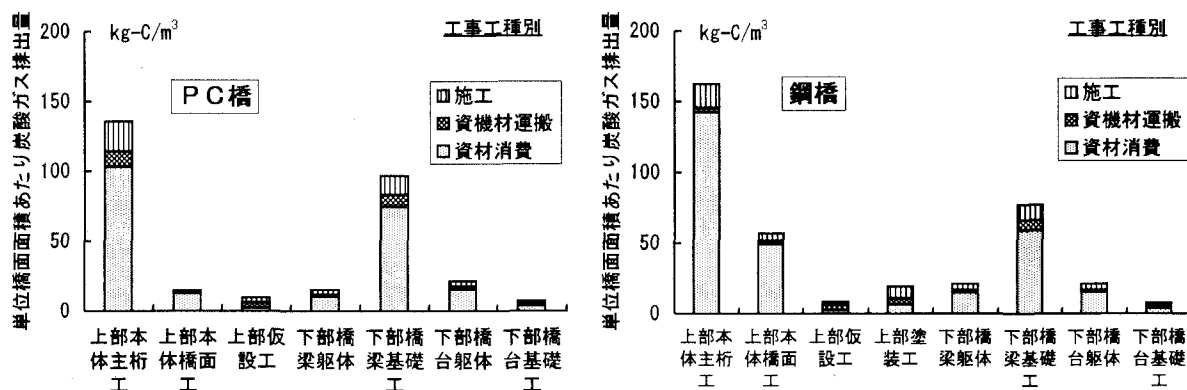
図－4 トンネル建設工事の二酸化炭素排出量

(5)橋梁上部工

橋梁上部工では、橋梁位置における制約条件をクリアする**数種の形式を比較**し、経済性、施工性、構造特性、景観などの視点から相対評価して望ましい形式を選定する。しかし、詳細な積算に耐えうるためには諸元が必要であり、ここではそれを算出したのちに、二酸化炭素排出量を計算し、その結果と経験をもとに、予備設計の段階で環境負荷軽減を評価因子の一つとして導入する概略計算のあり方について考察することとしている。

橋長470m、幅員12mの9スパンの**鋼版桁とPC箱桁**を比較対象としている。資材の生産、運搬、施工と50年の供用期間（廃棄は考慮せず）をライフ・ステージとして、原単位に工事量を乗じてもとめた。ここでは建設省積算基準に示される車両の損耗率や施工現場条件に応じた資材等の運搬距離をもちいた。また、上部工について鋼橋の場合には5回分の再塗装の効果を加えた。

結果を示すと、図－5 のようになる。工費と二酸化炭素排出量の両面からPC橋が有利となっている。しかし、機材消費による排出割合が73（PC）～78（鋼）%を占めることからわかるように、この**資材生産時の排出を最終消費の責任**に帰すとの前提による比較での判定であり、工法上の工夫は別途検討する必要がある。とは言え、資材消費の占める割合が相対的に大きいことから、主材料のみの資材消費に起因するもののみを2つの形式について比較したり、さらに橋梁の比較設計レベルの数量品目のみで比較してみると、やはり2つの橋梁形式の差は比例的な傾向を示していることから、**概略数量に単位をかけて工費を算定してゆく際に二酸化炭素原単位を乗じることで、設計熟度の低い段階でも相対比較は可能**との結論を得ている。



図－5 橋梁工事の二酸化炭素排出量

(6) 下水道終末処理施設

下水道終末処理施設では、他のワーキング・グループの対象とは異なり、**供用時の動力や薬品等の消費**などの占める割合が無視できない。廃棄時の算定は未だ現実的ではないが、建設施工時の土木、建築、機械、電気についても区分する必要がある。

供用30年として、計画日最大下水流量10万4千 m^3 の標準活性汚泥法の下水処理施設を対象として試算をおこなう。主要工事数量、延べ床面積、素材重量などに原単位を乗じるが、下水道施設に特有な反応による二酸化炭素の生成を別途計上する。

試算の結果を図-6に示す。ライフ・サイクルでの炭酸ガス排出量のうち、**プラント動力**が全体の約65%、管理設備動力が約10%と大きな割合を占め、建設時の負荷(14%)よりも相当に大きい。その内訳は土木工事が過半を占め、そのうちの60%以上が資材消費による。理論的に生物反応により生じる二酸化炭素量は全体の20~25%にもものぼると予想されるが、これは施設の責任に帰すことができない。

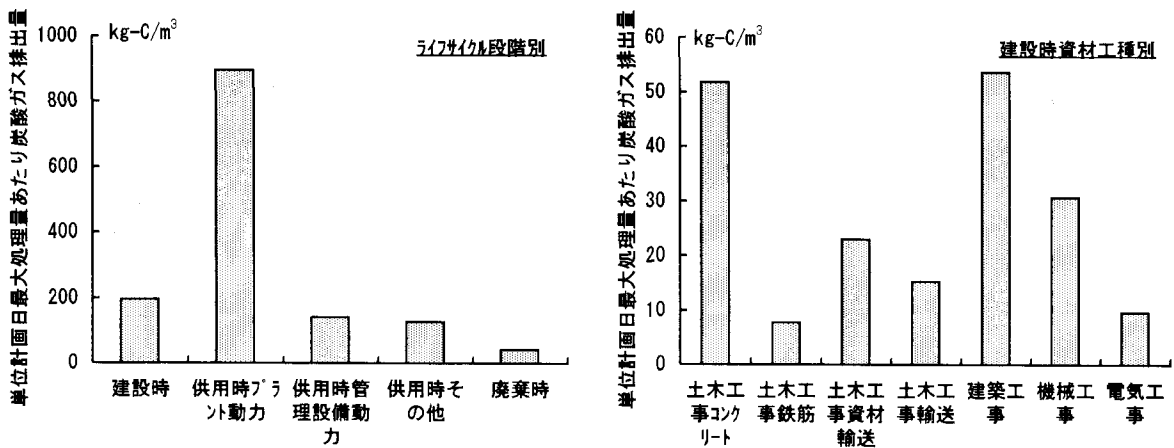


図-6 下水道終末処理施設の建設にともなう二酸化炭素排出量

4. おわりに

小委員会では、約1年半にわたり、土木建設システムのライフサイクルにわたって環境負荷の解析手法を検討してきた。環境指標として二酸化炭素にしぼりこみ、主要排出原因ごとの排出原単位を提案するとともに、代表的な5種類の構造物について排出量推定法を示すとともに、具体的に試算をおこなった。今後、構造物の種類を増加させ、他の環境負荷についても検討を進め、改善のための代替案の選択が可能な設計システムの提案をも試みたいと考えている。