

環境コストを考慮した地下鉄構造物のライフサイクルアセスメント

Life Cycle Assessment of Subway Structure Based on Environmental Cost

稲 積 真 哉 (いなづみ しんや)

京都大学大学院助教 工学研究科

勝 見 武 (かつみ たけし)

京都大学大学院准教授 地球環境学堂

大 津 宏 康 (おおつ ひろやす)

京都大学大学院教授 経営管理研究部

有 蘭 大 樹 (ありぞの ひろき)

京都大学大学院修士課程学生 工学研究科

1. はじめに

近年では、様々な分野において温室効果ガスである CO_2 や大気汚染物質である SO_x ならびに NO_x 等の排出を管理・抑制する取組みが実施されている。同時に、社会基盤構造物の建設整備を含むすべての事業実施に際しては、各々事業が環境へ及ぼす影響を定量的に評価する必要がある、ライフサイクルアセスメント (LCA) を実施しなければならない。ここで、LCA とは対象とする製品のライフサイクルにおける環境影響を総合的に評価する規格¹⁾であり、具体的な評価手順等は各々評価実施主体が独自に決定している。また、LCA は主として工業製品を対象として実施されているが、社会基盤構造物由来の環境影響は多岐にわたり、そのため、社会基盤構造物の LCA は独自の発展をたどってきている²⁾。

本報は社会基盤構造物として地盤構造物のライフサイクルにおける環境影響を定量的に予測した上、環境コストの導入に基づく地盤構造物のライフサイクルコスト (LCC) を評価する。具体的には地盤構造物の一つとしてタイ王国バンコク首都圏における地下鉄建設事業に対して、バンコク地下鉄の LCA に基づく環境コストの定量化、ならびに環境コストを考慮した LCC を議論する。

2. 社会基盤構造物の LCA 動向

社会基盤構造物に対する LCA の適用は、1990年代以降、主として土木環境システム分野において多数の研究が実施されており、ニュータウンや輸送機関といった様々な対象に適用されている³⁾。また、(財)土木学会は上記の成果を基に、LCA に用いる CO_2 排出係数 (排出原単位) の推奨値を整備し、さらに建設業における LCA 適用の考え方について整理を行っている⁴⁾。

元来、社会基盤構造物に対する LCA の主目的は、建設段階において使用する原材料に対して適切的排出も含めた CO_2 排出およびエネルギー消費を推計し、それらを削減するための材料、構造ならびに工法の選択を検討することにあった²⁾。さらに、近年では社会基盤構造物に対する環境効率的な維持補修計画の立案に関して、LCA の適用が検討されている。

ただし、社会基盤構造物に対する LCA の適用に際しては、以下の課題が指摘される。

① ライフサイクル (耐用年数)

社会基盤構造物には、維持管理の方法によって半永久的に存在し続ける構造物もあるため、事前のライフタイム (耐用年数) 設定が困難である。

② 環境影響物質の排出係数

社会基盤構造物に対して LCA を適用するためには、各段階 (例えば、建設段階や操業段階等) において使用される各要素 (資材類、燃料および電力等) の使用量や環境影響物質の排出係数を詳細に検討しなければならない。しかしながら、LCA に用いる CO_2 排出係数の推奨値は整備⁴⁾されているものの、使用条件や評価目的に応じた係数の設定には困難を要する。

③ 社会への波及効果

社会基盤構造物の整備は社会全体に広範な波及効果をもたらすことから、LCA はその範囲を包括する必要がある。土木計画分野では産業連関分析のような経済理論をベースとして、国民経済全体への対策影響を無限の波及段階まで捕捉可能とする手法を用いて環境影響の推計を行う研究も実施されている⁵⁾。

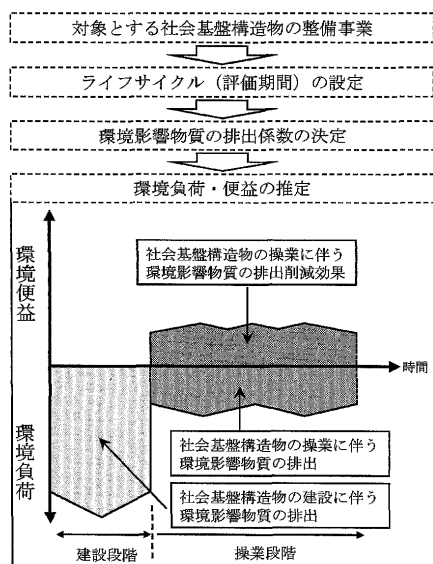
3. 環境コストを考慮する LCA

3.1 概 要

環境コストを考慮する LCA では図-1 に概略を示すとおり、地盤構造物の一つである地下鉄構造物の建設事業に着目し、地下鉄構造物のプロジェクトライフに基づくライフサイクル (耐用年数) を設定する。

さらに、地下鉄構造物のライフサイクルにおける CO_2 等の環境影響物質の排出は、地下鉄構造物のライフサイクルを構成する各要素 (資材類、燃料および電力等) の使用量に環境影響物質の排出係数を乗じて定量推計する。ただし、前述のとおり種々の要素に対する環境影響物質の排出係数は様々な機関から多く示されているものの、各要素の使用条件および評価目的等によってばらつきが大きい。そのため、本報では各要素に関する環境影響物質の排出係数に関する文献調査を実施した上、排出係数に確率密度分布を設定する (3.2参照)。

環境コストを考慮する LCA 手法では、地下鉄構造物の建設事業によって得られる環境への正の影響 (環境便益) も考慮する。例えば、地下鉄の建設整備ならびに運行は、自動車交通から鉄道交通へ移動手段の変化を促進



図—1 環境コストを考慮する LCA の概略

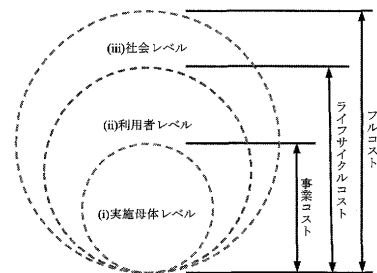
し、自動車交通量が減少し、追隨して自動車走行速度の上昇が予期できる。よって、自動車交通に伴う環境影響物質排出量は、整備ならびに運行された地下鉄周辺において減少することが期待できる。本報では、このような地下鉄構造物の建設事業に付随して生じる環境影響物質排出量の削減効果を環境便益と定義している。

地下鉄構造物のライフサイクルにおいて定量予測された環境影響物質の排出量は、被害費用原単位⁵⁾を用いて環境コストとしての換算を試みる。地下鉄構造物の建設事業に伴う環境影響の貨幣換算は、当該事業における事業者ならびに利用者レベルに加え、社会レベルを網羅した環境会計に基づく費用便益分析を実施する目的である(図—2 参照)。ここで、被害費用原単位とは CO₂ の排出権取引で代表されるように、環境影響物質排出に対する対価⁵⁾であり、現在に至るまで多くの研究が実施されている⁶⁾。なお、各々企業においては様々な研究ならびに排出権取引における市場価格を参考として、自社の社会的責任を明確にするべく環境影響物質の被害費用原単位を企業独自で設定している。そのため、被害費用原単位のばらつきも大きく、統一された被害費用原単位として定まっていない現状にある。よって、本報では既往研究や企業が算定した環境影響物質の被害費用原単位を参照することで、地下鉄構造物の建設整備が及ぼす環境影響のコスト化を試みる。

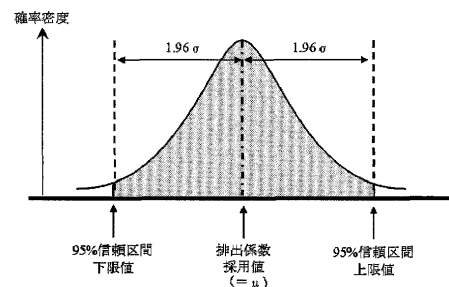
3.2 排出係数の不確実性

排出係数とは要素（例えば、資材、建設機械、燃料あるいは電力）の使用量と環境影響物質排出量に関連付ける係数であり、各要素に対して排出係数は定数である。一方、排出係数は元来、各要素の製造場所等によっても異なり、また、技術革新等に起因して変動する⁷⁾。よって、排出係数は場所や時間等を変数に持つ確率密度変数として扱うことが望ましい。

既に排出係数の不確実性に関しては種々の検討が行われており、一例として Good Practice Guidance (GPG)⁷⁾で示された排出係数の不確実性を参照している。具体的



図—2 事業費用および便益の三層構造



図—3 排出係数の確率密度分布

表—1 各カテゴリーにおける排出係数の不確実性⁷⁾

カテゴリー	排出係数の不確実性
1. エネルギー部門 CO ₂	5%
CH ₄ , NO ₂ , SO ₂	3%~10%
2. 工業部門 CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , SO ₂	1%~100%
3. 農業部門 CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , SO ₂	2%~60%
4. 林業部門 CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , SO ₂	-
5. 廃棄物部門 CO ₂ , CH ₄ , NO ₂ , SO ₂	5%~100%

には、排出係数の確率密度を正規分布として仮定した上(図—3 参照)、様々な文献で報告されている排出係数を引用し、標準偏差 σ を求めることで、式(1)で定義される排出係数の不確実性が算出される。

$$U = \frac{1.96 \times \sigma}{|m|} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 U : 排出係数の不確実性、 σ : 排出係数の標準偏差、および m : 排出係数の採用値である。

表—1 は、式(1)から算出された代表的なカテゴリーにおける排出係数の不確実性を表している⁷⁾。これより、社会基盤構造物の整備に深く関連する工業プロセスを必要とする要素（例えば資材類）の排出係数は、非常に不確実性が大きい。ただし、GPGにおける排出係数の不確実性は測定誤差等の精度よりも広義であり、排出量の推定結果に影響を与えるすべての要因が網羅されている。

本報において提案する環境コストを考慮する LCA では、既往文献^{8),9)}を参照することで各要素に関する環境影響物質の排出係数の採用値を決定する。さらに、排出係数の不確実性は表—1 を参照して任意に設定した上、式(1)より各要素の排出係数を標準偏差 σ の確率変数として仮定する。また、確率変数である排出係数に関して

報 告

モンテカルロシミュレーションを実施することで、環境影響物質の排出量を複数回推計する。

4. 地下鉄構造物への適用事例

4.1 バンコク地下鉄概要

タイ王国・バンコク首都圏における地下鉄を含む大量交通網整備事業は1990年代初頭から整備が進められている。その内、バンコク地下鉄ブルーラインの一部区間（総延長約20 km および全18駅）は、国際協力銀行（JBIC）の円借款事業として1996年に着工され、2004年に運行が開始された。ここで、バンコク地下鉄建設事業の背景には、バンコク首都圏における慢性的な交通渋滞ならびに大規模公共交通施設の欠如等に起因する環境問題が挙げられる。

実施するLCAは運行が開始されたブルーラインを対象としており、1998～2003年を建設段階とし、さらに2004年以後30年間の操業段階の評価期間（バンコク地下鉄のF/S段階における費用便益分析期間と同等）として想定している。なお、ブルーラインの建設はトンネル部、駅部および車両基地に大別され、トンネル部はシールド工法、駅部および車両基地は開削工法によって掘削された。

4.2 建設段階における環境負荷

バンコク地下鉄の建設段階における環境負荷評価は、トンネル部、駅部、車両および車両基地を対象とし、環境影響物質としてCO₂に着目している。表—2は当該工事の積算資料等¹⁰⁾から推定された資材類、燃料ならびに電力の使用量を示しており、各要素に対するCO₂排出係数の採用値および不確実性も併記する。

図—4は、表—2から推計されるバンコク地下鉄建設事業の建設段階におけるCO₂排出量の分布を示している。さらに、図—4を確率密度分布として仮定すると、95%信頼区間における建設段階のCO₂排出量は47.5×10⁴～97.5×10⁴ t-CO₂/6yearsである。

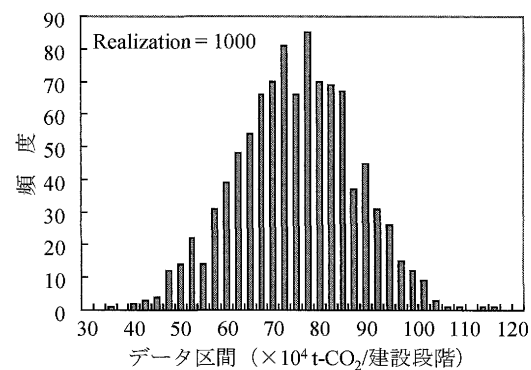
バンコク地下鉄で代表される社会基盤構造物の建設に伴う環境負荷を低減するためには、再生資源等の製造時に考慮される排出係数が小さい資材を積極的に使用することが重要であることは言うまでもない。また、各要素の輸送に伴う環境負荷の観点では資材の地元での調達も有効であると推察される。さらに、建設段階における施工条件（工法や機材配置等）によるCO₂排出量の削減効果に関する検討も不可欠である。

4.3 操業段階における環境負荷

バンコク地下鉄の操業段階における環境負荷評価では、地下鉄運行のための電力消費に起因するCO₂排出を対象とする。ここで、バンコク地下鉄の電力消費量は、将来的にも運営本数および車両数の増加等に伴い増大することが予測される。なお、30年に及ぶバンコク地下鉄の操業段階における電力消費量は、バンコク地下鉄建設事業の計画段階において予測された運営・維持管理費用の将来動向¹⁰⁾と比例関係にあると仮定し、電力消費量の将来予測も別途実施している。

表—2 建設段階で使用された各要素の使用量、CO₂排出係数および排出係数の不確実性

要素	使用量	CO ₂ 排出係数	不確実性
コンクリート	2.23×10 ⁶ t	0.205 t-CO ₂ /t	50%
鉄 筋	1.80×10 ⁵ t	0.941 t-CO ₂ /t	50%
燃 料	3.14×10 ⁷ L	3.004 t-CO ₂ /kL	5%
電 力	4.12×10 ⁷ kWh	0.564 t-CO ₂ /MWh	5%



図—4 建設段階におけるCO₂排出量の頻度分布

環境負荷評価の一例として、2007年度においてバンコク地下鉄は約1.2×10⁸ kWhの電力を消費している¹⁰⁾。すなわち、バンコク地下鉄は操業に伴い、6.5×10⁴～7.1×10⁴ t-CO₂/yearのCO₂を排出すると推計される（表—2における電力に関するCO₂排出係数ならびに不確実性を考慮）。

地盤構造物や社会基盤構造物の建設事業では、建設段階における環境負荷が一般的に着目される傾向にあるものの、建設段階および操業段階における環境負荷を比較すれば、長期に及ぶ操業段階における環境負荷に関しても詳細な考慮が必要であり、建設段階と操業段階を総合的に考慮した環境負荷を評価する必要がある。

4.4 操業段階における環境便益

バンコク地下鉄の操業に伴う環境便益評価では、バンコク地下鉄が建設された場合、および建設されなかった場合における地下鉄周辺部での自動車交通状況（自動車交通量、走行速度および燃料消費量）を予測し、自動車交通から排出されるCO₂排出削減量を推定する。なお、表—3に示された2007年度における自動車交通状況の予測は、eBUM (extended Bangkok Urban Method)¹⁰⁾を用いており、概略的にバンコク首都圏の道路ネットワークを反映した結果である。なお、バンコク地下鉄の操業に伴う将来的な自動車交通状況も、バンコク地下鉄建設事業の実施主体が計画段階において比較予測した2004～2033年の自動車交通削減量の推移傾向¹⁰⁾と比例関係にあると仮定した上、eBUMを用いた2007年度における自動車交通状況を基本に自動車交通状況の将来予測を別途実施している。

環境便益評価の一例として、バンコク地下鉄の操業に伴い、2007年度においては5.2×10⁴～5.8×10⁴ t-CO₂/

表—3 eBUMに基づく自動車交通状況(2007年度)

2007 年度		地下鉄あり	地下鉄なし
延距離	km/day	197,033,831	197,419,378
平均速度	km/hour	25.70	25.64
燃費	cc/km	79.4	79.5

year の CO₂ 排出削減量が推定される(表—2 における燃料に関する CO₂ 排出係数ならびに不確実性を考慮)。

4.5 環境コストの推移に基づく LCC 評価

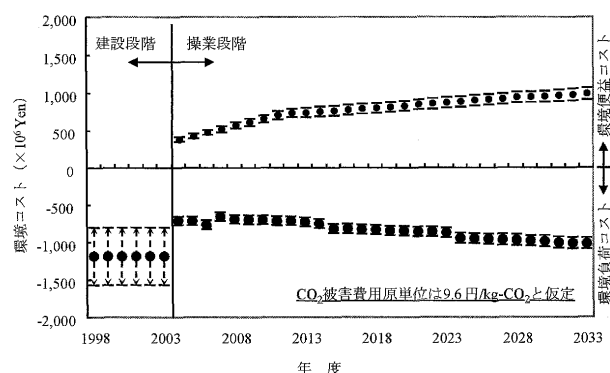
図—5 は、バンコク地下鉄建設事業において推定された CO₂ 排出量ならびに排出削減量を環境コストとして示している。ここで、環境コストへの換算に用いた CO₂ 被害費用原単位は、文献調査により得られた最大値である 9.6 円/kg-CO₂ を設定している⁵⁾。これより、バンコク地下鉄建設事業では、建設段階および操業段階を通じたライフサイクルにおいて推計される環境コストとしての LCC 総額は負値であり、建設ならびに操業段階を合計すると $8.34 \times 10^8 \sim 4.43 \times 10^9$ 円の環境コストを出費することに相当する。

図—5 で推計されたライフサイクルにおける環境コストの推移に対して、純現在価値 (NPV) に基づく LCC 評価を試みる。ここで、NPV とは事業実施に伴う将来の費用便益を現在価値に割引評価するための指標である。なお、NPV の算出に関しては割引率の設定が必要であり、本報では環境コストに関する割引率を 0.1% として仮定する¹¹⁾。その結果、バンコク地下鉄建設事業において推計された環境コストに関する NPV は $-8.87 \times 10^8 \sim -4.40 \times 10^9$ 円である。よって、NPV の指標においてもバンコク地下鉄はライフサイクルを通じて地球環境(温暖化)へ負の経済価値を及ぼすことが予期される。ただし、算出された NPV は環境コストの推移を対象としており、当該 NPV がバンコク地下鉄の LCC を総合的に評価した指標ではないことに留意しなければならない。なお、環境コストを考慮した事業内部収益率 (IRR) に基づくバンコク地下鉄建設事業の LCC 評価は文献¹²⁾にて報告している。今後は NPV や IRR による LCC 評価に関する議論を一層深めることで、社会基盤構造物の建設事業における環境影響等を考慮した社会レベル(図—2 参照)における LCC 評価指標を検討する必要がある。

5. おわりに

本報は環境影響を考慮した地盤構造物の建設事業評価に貢献し得る、環境コストを考慮する LCA を提案した。さらに、当該 LCA を地盤構造物の一つとしてバンコク地下鉄建設事業へ適用することで、環境コストに基づくバンコク地下鉄建設の事業性評価を試みた。

環境コストを考慮する LCA は地下鉄構造物のライフサイクルにおいて、不確実性を考慮した排出係数を用いることで環境影響を概略的に定量推計することができる。



図—5 バンコク地下鉄のライフサイクルにおける環境コストの推移

定量化された地下鉄構造物の環境負荷および便益は、対象環境影響物質の被害費用原単位を用い環境コストとして考慮することが可能である。これより、地盤構造物に対して環境コストを考慮した LCC 評価が可能である。

環境コストを考慮する LCA はバンコク地下鉄建設に適用し、バンコク地下鉄のライフサイクルにおける環境負荷および便益を定量化することができた。また、バンコク地下鉄構造物の LCA に基づく環境コストの定量化、ならびに環境コストを考慮したバンコク地下鉄建設事業の LCC を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 伊坪徳宏・稲葉 敦：ライフサイクル環境影響評価手法，産業環境管理協会，2005。
- 2) 加藤博和・柴原尚希：土木計画へのライフサイクルアセスメント適用に関する諸課題，第3回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，日本 LCA 学会，pp. 72～73，2008。
- 3) 井村秀文：建設の LCA，オーム社，2001。
- 4) 土木学会地球環境委員会 LCA 評価・環境パフォーマンス評価研究小委員会編：ISO-14030-40の規格化による建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント，鹿島出版会，2000。
- 5) 國部克彦・伊坪徳宏，水口 剛：環境経営・会計，丸善，pp. 81～90，2007。
- 6) 道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針（案），日本総合研究所，pp. 77～84，1998。
- 7) 国立環境研究所：京都議定書第5条1項に基づく温室効果ガス排出量・吸収量推計のための国内制度指針の概要，国立環境研究所，2002。
- 8) 稲葉 敦：LCA の実務，産業環境管理協会，2005。
- 9) 日本建築学会：建物の LCA 指針，日本建築学会，2001。
- 10) Pacific Consultants International: MRT Blue Line Post Evaluation Project; Final Draft Report, Pacific Consultants International, 2007。
- 11) Nordhaus, W. D.: The stern review of the economics of climate change, 2006。
- 12) 大津宏康・有蘭大樹・稲積真哉・勝見 武：環境影響評価および環境会計に基づくバンコク地下鉄整備事業の評価，第63回年次学術講演会概要集，土木学会，pp. 423～424，2008。

(原稿受理 2008.10.30)