

社会基盤構造物の環境負荷・便益評価と バンコク地下鉄建設事業への適用例

稲積 真哉¹・大津 宏康²・勝見 武³・有菌 大樹⁴

¹正会員 京都大学大学院助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: inazumi@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院教授 経営管理研究部 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: ohtsu@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院教授 地球環境学堂 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: tkatsumi@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

⁴学生会員 京都大学大学院学生(修士課程) 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: arizono@toshi.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究は社会基盤構造物の整備事業が与える環境影響を定量的に予測し、環境影響を考慮した整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を検討するものである。また、当該手法はタイ王国・バンコク地下鉄建設事業に対して適用しており、バンコク地下鉄の建設・運用段階における環境負荷および環境便益の定量化を試みている。さらに、本適用例では定量化された環境負荷および環境便益に関する社会負担を貨幣価値に換算し、環境コストとして経済的内部収益率 (EIRR) に組み込むことによって、当該建設事業が及ぼす環境影響を環境経済学的な観点から評価することができた。

Key Words : cost benefit analysis, emission factor, environmental cost, infrastructure

1. はじめに

近年、環境保全に対する関心は世界的に高まっており、京都議定書に記されたCO₂等の温室効果ガス削減目標等が世界メディアを賑わせている。一方、開発途上国では経済の急激な発展において環境規制が追随できず、大気汚染等の環境悪化が深刻化している。

本研究の対象であるタイ王国・バンコク首都圏（バンコク都にサムートプラカン、パトンタニ、サムートサコン、ナコンパトムおよびノンタブリの周辺5県を加えた地域）における地下鉄整備（以後、“バンコク地下鉄建設事業”と略称する）は、タイ国高速鉄道公社（Mass Rapid Transit Authority ; MRTA）が建設主体となり1996年より推進されている。その内、ブルーラインと称される一部区間は国際協力銀行（Japan Bank for International Cooperation ; JBIC）の円借款事業として1996年に着工され、2004年には運行が開始された。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および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。

バンコク地下鉄建設事業で代表されるように、社会基

盤構造物は国や地方自治体等の公共団体からの整備補助、もしくは国際的な政府開発援助（Official Development Assistance ; ODA）を受け、公共事業として建設ならびに運用されることが多い。すなわち、社会基盤構造物は公共性が高いため、整備事業自体に起因する費用および便益のみを評価するのでは不十分である。言い換えれば、社会基盤構造物整備事業は、周辺環境や周辺社会への影響を十分に配慮して実施する必要がある。

社会基盤構造物の整備が及ぼす環境影響の一つには、温室効果ガスの一つであるCO₂の排出等が挙げられる。例えば、社会基盤構造物の整備においてCO₂を多量に排出すれば、それは将来の社会へ多大な負担を強いる結果をもたらす。すなわち、事業実施の意思決定においてはCO₂の排出等で代表される環境影響を考慮しなければならない。また、環境への関心が高い現在では社会基盤構造物の整備事業においても環境影響を定量的に予測し、さらには評価する必要がある。

本研究は社会基盤構造物の整備事業が与える環境影響を定量的に予測し、環境影響を考慮した整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を検討する。さらに、当該手法をバンコク地下鉄建設事業に適用し、環境会計

に基づくバンコク地下鉄建設の事業評価を試みる。

2. 環境負荷・便益評価手法の検討

近年では、様々な分野において温室効果ガスであるCO₂、および大気汚染物質であるSO_xならびにNO_x等で代表される様々な環境影響物質の排出を抑制する取組みが実施されている。同時に、社会基盤構造物の整備事業のみならず全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、すなわち、環境影響評価を実施する必要がある。

環境影響評価手法の一つであるライフサイクルアセスメント（Life Cycle Assessment ; LCA）^{1),2)}は国際的にも規格化されており、対象とする製品の製造、使用および廃棄段階を含めた、製品に関する全ての段階（ライフサイクル）における環境影響を総合的に評価することができる。同時に、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),4),5)}。また、(社)土木学会は上記の成果を基に、LCAに用いるCO₂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^{3),4),5)}。

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遡及的排出も含めたCO₂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⁵⁾。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⁵⁾。

図-1は検討する社会基盤構造物の環境負荷・便益評価手法の概要を示しており、本手法は土木環境システムおよび土木計画学分野において既に検討されているLCAに準じるものである。環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）の検討では、事業全体における環境影響の評価対象期間の設定ならびに事業実施が及ぼす環境影響の領域設定に未確定な要素があり、これらの確定は重要な作業である。検討する環境負荷・便益評価手法では、社会基盤構造物の整備事業に着目し、社会基盤構造物のプロジェクトライフを考慮した環境影響評価期間を設定する。一方、環境影響領域の設定では、整備事業自体が環境へ直接及ぼす環境影響領域（以後、“直接的な環境影響領域”として呼称する）、ならびに整備事業自体が全産業を網羅した地球規模で捉えられる環境に及ぼす環境影響領域（以後、“間接的な環境影響領域”として呼称する）を、後述する排出係数の概念を

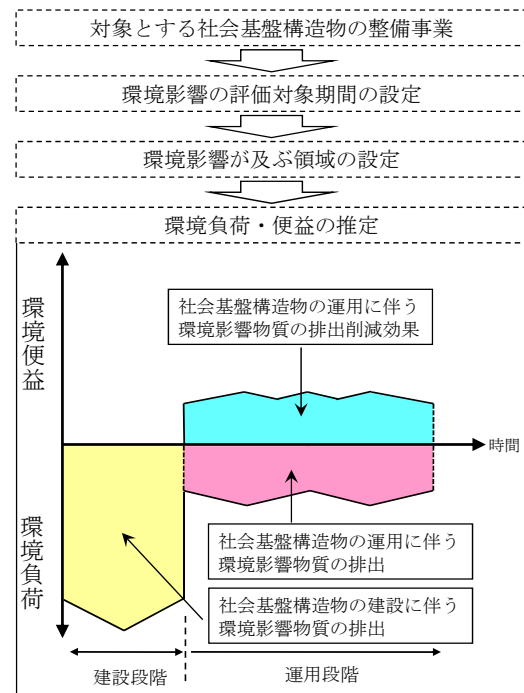


図-1 環境負荷・便益評価手法の概要

を用いて各々設定する。さらに、本研究では社会基盤構造物の整備事業によって得られる環境への正の影響（環境便益）をも環境影響領域の設定に考慮する。

環境便益に関して、社会基盤構造物の運用は社会システムの変化、すなわち周辺環境の変化をもたらすことが期待される。例えば、地下鉄の整備・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し、自動車交通量が減少し、追従して自動車走行速度の上昇が期待できる。よって、自動車交通に伴う環境影響物質排出量は、整備・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。本研究では、このような社会基盤構造物の運用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する^{3),4),5)}。

一般に総称される“環境に優しい社会基盤構造物（エコな社会基盤構造物）”の対象は、社会基盤構造物の運用に伴う環境影響物質排出（環境負荷）（図-1参照）を低減することである。そこで、検討する環境負荷・便益評価手法では上記2項目に加え、社会基盤構造物の建設段階における環境負荷を考慮することで、社会基盤構造物のプロジェクトライフにおける環境負荷・便益を評価するものである。さらに、社会基盤構造物のプロジェクトライフにおいて推定された環境負荷・便益に対する環境コストを用いた環境会計の導入の試みは、社会基盤構造物のCO₂排出権取引への利用、ならびにエコな社会基盤構造物の確立の一助となることが期待される。

(1) 排出係数と環境影響領域の設定

環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）を検討する上で、環境影響物質排出量の推定は必須である。社会基盤構造物の整備事業に伴う環境影響物質の排出量の推定においては、社会基盤構造物を構成する、または関連する各要素の排出係数を用いる。

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を関連付ける係数であり、各要素に対して式(1)で表すことができる。

$$EM_i = E_i \times W_i \quad (1)$$

ここで、 EM_i ：要素*i*からの環境影響物質排出量、 E_i ：要素*i*の排出係数、および W_i ：要素*i*の使用量である。

現在、日本では種々の機関によって様々な要素の排出係数（後述する間接的な排出も含む）や推定方法が整備されており、間接的な排出も含む排出係数を推定するための方法として積上げ法ならびに産業連関分析法を挙げることができる⁹⁾。これらの推定方法では、各要素の排出係数を製造、流通および最終消費の各段階や、国内外の消費支出および資本形成等の影響に分けることができ、要素*i*の排出係数を式(2)のように表すことができる。

$$E_i = e_{ip} + e_{id} + e_{ic} + \dots \quad (2)$$

ここで、 E_i ：製造・流通・消費等の全工程を考慮した要素*i*の排出係数、 e_{ip} ：要素*i*の製造に伴う排出係数、 e_{id} ：要素*i*の流通に伴う排出係数、および e_{ic} ：要素*i*の消費に伴う排出係数である。すなわち、要素*i*の排出係数 E_i は各工程において詳細に区分することができる。

本研究では文献⁷⁾に示された産業連関分析法に基づく各要素の排出係数を参照しており、表-1は社会基盤構造物を構成する代表的な要素（資材類としてコンクリートおよび鉄筋、ならびに燃料類としてガソリンおよび軽油）に関する、CO₂、SO₂およびNO₂の排出係数である（日本国内のデータであることに注意）⁷⁾。一方、同じく代表的な構成要素として挙げられる電力に関しては、生産段階（発電時）においてCO₂、SO₂およびNO₂が発生するものの、流通および消費段階において環境負荷は発生しない。ただし、電力は種々の需要を誘発するポテンシャルを有している⁷⁾。そこで、電力の排出係数（ E_e ）には発電時の環境影響物質排出（ e_{ep} ）に加え、社会の電力需要を誘発することによって起因する環境影響物質の排出（需要誘発排出； e_{em} ）、および社会基盤構造物等の資

表-1 資材類および燃料類の排出係数

(a) CO ₂					
	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
資材類					
コンクリート	t-CO ₂ /t	0.198	0.007	0	0.205
鉄筋	t-CO ₂ /t	0.927	0.014	0	0.941
燃料類					
ガソリン	kg-CO ₂ /L	0.492	0.070	2.321	2.883
軽油	kg-CO ₂ /L	0.308	0.039	2.657	3.004

(b) SO ₂					
	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
資材類					
コンクリート	kg-SO ₂ /t	0.089	0.010	0	0.099
鉄筋	kg-SO ₂ /t	1.466	0.030	0	1.496
燃料類					
ガソリン	g-SO ₂ /L	2.532	0.175	0.035	2.742
軽油	g-SO ₂ /L	1.694	0.077	2.618	4.389

(c) NO ₂					
	単位	生産 e_{ip}	流通 e_{id}	消費 e_{ic}	計 E_i
資材類					
コンクリート	kg-NO ₂ /t	0.433	0.028	0	0.461
鉄筋	kg-NO ₂ /t	3.294	0.082	0	3.376
燃料類					
ガソリン	g-NO ₂ /L	3.059	0.457	2.566	6.082
軽油	g-NO ₂ /L	2.080	0.231	17.60	19.91

表-2 電力の排出係数

	単位	直接排出 e_{ep}	消費誘発 e_{em}	資本形成 誘発 e_{ef}	計 E_e
CO ₂	kg-CO ₂ /kWh	0.424	0.106	0.034	0.564
SO ₂	g-SO ₂ /kWh	0.254	0.159	0.048	0.461
NO ₂	g-NO ₂ /kWh	0.265	0.256	0.094	0.615

本形成を誘発することによる環境影響物質排出（資本形成誘発排出； e_{ef} ）を考慮する必要がある。表-2は、日本国内の電力（火力発電）に関するCO₂、SO₂およびNO₂の排出係数の内訳を示している⁷⁾。なお、本研究の対象地域であるタイ王国を考えた場合、タイ王国の電力は火力発電が中心であり、また日本国内とタイ王国における電力（火力発電）の排出係数に大きな違いはないとの報告がある⁸⁾。ただし、表-1および表-2に関して、本研究ではタイ国内における排出係数を設定・適用することが妥当であるものの、当該排出係数に関連する適当なデータを入手することができなかった。そのため、本研究では表-1および表-2で示した各要素に関する日本国内の排出係数をバンコク地下鉄建設事業に対して適用している。

式(2)に着目し、環境負荷・便益評価手法における環境影響領域を設定する。すなわち、社会基盤構造物を構成する種々の要素*i*の排出係数を、左辺 E_i で表現する場合は直接的且つ間接的に捉えられる環境影響領域（間接的な環境影響領域）を設定することになる。一方、種々の要素*i*の使用条件等を考慮して特定の右辺 e_i で表現す

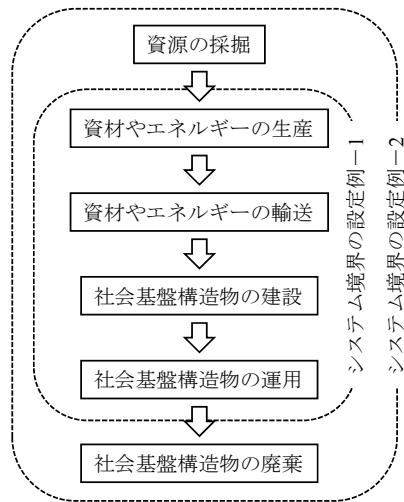


図2 社会基盤構造物のライフサイクルにおけるシステム境界の概念

る場合は、社会基盤構造物の整備事業自体が環境へ直接及ぼす直接的な環境影響領域であると定義する。本定義は、社会基盤構造物が様々な要素から構成されており、全ての要素に関する製造、流通および消費段階における環境影響物質排出量を把握しなければならない場合（ E_i として示される排出係数を用いる場合）や、例えば建設機械や自動車からの CO_2 排出のような消費段階のみに関する環境影響物質排出量を把握しなければならない場合（ e_i として示される排出係数を用いる場合）もある。

元来、例えば表-1 および表-2 のように推定された要素 i の排出係数は、技術革新や経済の変化等に依存した変数でなければならない。しかしながら、排出係数は過去の情報等から推定できるものの、排出係数の将来動向を推定することは困難である。そのため、推定された排出係数は時間に依存しない一定値として仮定する。

(2) 環境影響評価期間の設定

環境負荷・便益評価における環境影響評価期間は、システム境界⁶⁾を考慮して設定する。システム境界とは図-2に示すとおり、対象物（例えば、社会基盤構造物）のライフサイクル（資材等の製造・調達に始まり、社会基盤構造物の建設、運用および廃棄段階）において、いずれのプロセスまでを詳細に検討するかを表す⁶⁾。

既往の研究⁹⁾では、社会基盤構造物の廃棄段階における環境影響は他の段階と比較して非常に小さい。従って、環境負荷・便益評価手法の検討においても社会基盤構造物の廃棄段階における環境影響は考慮しない。また、検討する環境負荷・便益評価手法では、社会基盤構造物のシステム境界を建設段階および運用段階に大別して設定する（図-2におけるシステム境界の設定例-1に相当）。これより、間接的もしくは直接的な環境影響領域の設定

表-3 環境影響物質の被害費用原単位

環境影響物質		被害費用原単位	
二酸化炭素	CO_2	2.6~9.6	(円/kg- CO_2)
二酸化硫黄	SO_2	67.3~1,010	(円/kg- SO_2)
二酸化窒素	NO_2	73.7~113	(円/kg- NO_2)
メタン	CH_4	16.9	(円/kg- CH_4)
亜酸化窒素	N_2O	218	(円/kg- N_2O)
アンモニア	NH_3	403	(円/kg- NH_3)
塩化水素	HCl	175	(円/kg- HCl)
浮遊粒子状物	$\text{PM}_{2.5}$	403~1,820	(円/kg- $\text{PM}_{2.5}$)
浮遊粒子状物	PM_{10}	2,450~11,100	(円/kg- PM_{10})

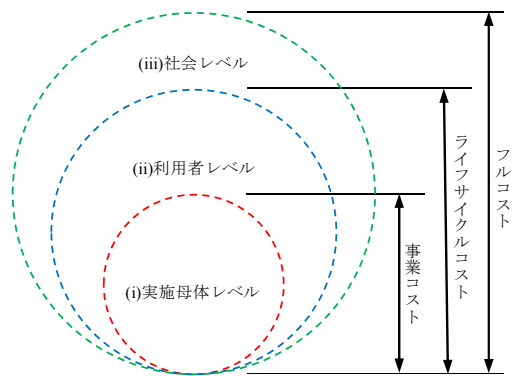
下、社会基盤構造物の建設段階および運用段階における環境影響物質の排出量は各々推定される。

(3) 環境コストの導入

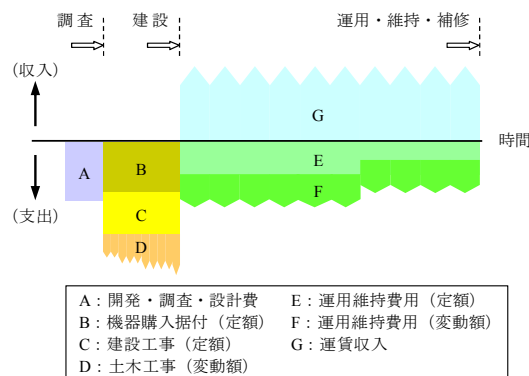
検討する環境負荷・便益評価手法では、(1)および(2)で述べた環境影響領域および環境影響評価期間の設定の下、社会基盤構造物の整備事業に伴う環境影響物質の排出量を推定することができる。さらに、本評価手法は推定された環境影響物質の排出量を、後述する被害費用の原単位を用いて貨幣価値（環境コスト）への換算を試みる。すなわち、本評価手法の適用は、社会基盤構造物の整備事業が及ぼす環境影響を環境コストに基づいて評価することも可能である。

近年では環境影響物質の排出に対して対価を支払う概念が定着しつつあり、当該対価を被害費用¹⁾と呼ぶ。さらに、環境影響物質の単位排出量に対する費用が被害費用原単位である。ここで、環境影響物質の被害費用原単位に関しては、現在に至るまで多くの研究が実施されている^{1), 9)}。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に、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独自で設定している。表-3は日本における CO_2 等の環境影響物質の被害費用原単位について、文献^{1), 9)}を調査・総合することでまとめた一例である。なお、表-3における被害費用原単位は、排出抑制費用、排出量取引のシミュレーション結果および排出権取引市場価格等を通じて設定されている。ここで、表-3より被害費用原単位のばらつきは大きく、統一された原単位として定まっていない現状にあると考えられる。よって、本研究では表-3に示すような変動幅を有する被害費用原単位を用い、社会基盤構造物の整備事業が及ぼす環境影響の貨幣換算（環境コストの導入）を試みる。ただし、本研究の対象であるタイ王国等の諸外国へ表-3を適用する場合には価値観、物価および為替等の違いを考慮する必要がある、本点は本研究における今後の検討課題の一つとして認識している。

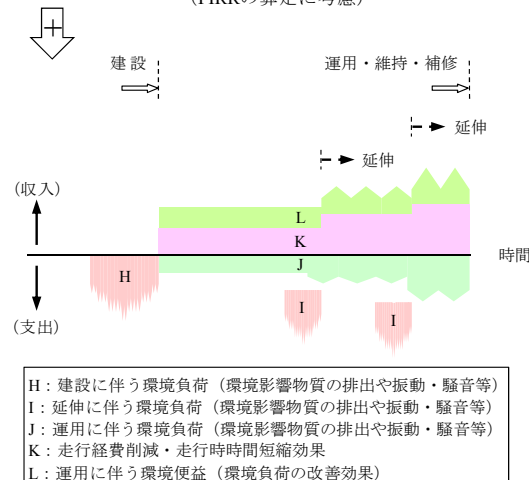
なお、一連の整備事業に要する費用は、(i)実施母体レ



(a) 事業費用・便益の三層構造



(b) 企業レベルにおける費用便益
(FIRRの算定に考慮)



(c) 利用者・社会レベルにおける費用便益
(EIRRおよびEIRR_{env}算定に考慮)

図3 事業コストの三層構造と地下鉄整備事業を
対象とした費用便益分析の概略

ベルにおける費用便益, (ii)使用者レベルにおける費用便益, および(iii)社会レベルにおける費用便益に区別することができる(図3(a)参照)¹⁾。これまで, 企業等の事業実施母体は主として(i)および(ii)を考慮し, 事業を立案・遂行してきた。この要因には, 事業実施主体の収支に対して(i)および(ii)が大きく影響を与えることが挙げられる。一方, 環境に対する関心が寄せられている現在,

事業実施主体は(i)および(ii)に止まらず, (iii)をも考慮した事業の立案・遂行が望まれる。なお, (iii)を考慮するためには, 事業が及ぼす環境影響を考慮し得る事業評価手法の確立が重要である。

上記(iii)を具体的に考慮する一つとして, 整備事業の内部収益率 (Internal Rate of Return ; IRR) に着目する。IRRとは投下した資本を事業で生じる便益を用いて返済していく際, 一定の年限で返済可能な最大利率であり¹⁰⁾, この利率が大きいほど投下資本の回収は早期に行われ, 一般に好ましいプロジェクトであると判断される。また, IRRは事業の純現在価値を0とする割引率であり, 式(3)を満たす i によって定義される。

$$\sum_{t=1}^n \frac{(b_t - c_t)}{(1+i)^t} = 0 \quad (3)$$

ここで, t : 年次, b_t : t における便益, c_t : t における費用, および n : プロジェクトライフである。

IRRは, 財務的内部収益率 (Financial Internal Rate of Return ; FIRR) と経済的内部収益率 (Economic Internal Rate of Return ; EIRR) に区別される¹⁰⁾。FIRRとは事業実施母体の収支に関する内部収益率であり, 上記(i)のみ考慮して算定される。一方, EIRRとは(i)に加え, (ii)をも考慮して算定される。ここで, 図3(b)ならびに(c)では地下鉄整備事業を対象としたFIRRならびにEIRRの算定において考慮すべき要因を示している。なお, 本論文では環境コストまでを考慮して算定されるEIRR, すなわち, (i), (ii)および(iii)を考慮して算定されるEIRRをEIRR_{env}として記述している。図3より, 社会基盤構造物の整備事業のように公共性の高い事業を実施する際には, EIRR_{env}を判断指標の一つとして事業内容を決定することが望ましい。そのため, 検討する本評価手法では社会基盤構造物の整備事業が及ぼす貨幣換算された環境コストを導入することによって, 環境影響を考慮した整備事業のEIRR_{env}を算定する。

3. バンコク地下鉄建設に伴う環境負荷・便益

バンコク地下鉄建設事業では社会基盤構造物としての地下鉄ネットワークを建設および運用するため, 資材や燃料を消費することで環境影響物質を排出する。一方, バンコク地下鉄の運用によっては, 自動車交通から鉄道交通へと交通手段の推移をもたらし, 結果的に周辺域における自動車交通量の減少および自動車走行速度の増加が期待される。これを環境影響の観点から考えると, バンコク地下鉄が建設された場合では, 運用段階において

表4 バンコク地下鉄建設事業に伴う環境負荷・便益要因

	環境負荷	環境便益
建設段階	資材、燃料および電力の製造・運搬・消費 作業員の集中動員 周辺域における交通規制（渋滞促進）等	
運用段階	電力の製造・運搬・消費 利用者の集中 等	周辺域における自動車交通量の削減

注) 環境負荷・便益の対象には、環境影響物質の排出、騒音、振動ならびに臭気等が挙げられる

元来自動車交通によって排出されていた環境影響物質の排出を削減することができる。よって、バンコク地下鉄の運用は環境に対して便益を供することが期待できる。なお、上記シナリオは温室効果ガス排出権取引等におけるベースライン&クレジットの概念¹⁾に基づく。

表-4は、バンコク地下鉄建設事業において想定される環境負荷および便益に関する要因の一部を示しており、環境負荷・便益評価には様々な項目を考慮する必要がある。なお、本評価では表-4において、バンコク地下鉄建設事業における建設段階ならびに運用段階で用いられる資材、燃料および電力に起因する環境影響物質（CO₂、SO₂およびNO₂）の排出を環境負荷、さらに、バンコク地下鉄の運用がもたらす周辺自動車交通量の減少に伴う環境影響物質の排出量削減を環境便益として限定した。なお、本評価では数多く存在する環境影響物質の内、影響度が比較的大きいと考えられたCO₂、SO₂およびNO₂のみを対象としていることに留意しなければならない。

(1) バンコク地下鉄建設事業

地下鉄が建設される以前、バンコク首都圏の交通は9割が道路交通に依存しており、交通渋滞が深刻なものとなっていた。例えば、ラッシュ時の自動車平均走行速度は時速8 kmまで低速化し、速度低下に伴う年間の経済損失はタイの国内総生産（Gross Domestic Product ; GDP）の3%に相当するとも言われている。また、道路に依存した交通は、多量の石油資源の消費によって深刻な大気汚染を引き起こしており、大気汚染の軽減も大きな課題となっていた。さらに、バンコク首都圏の人口は2000年度において約640万人であり、2020年までに約1,400万人に増加することが見込まれている。よって、バンコク首都圏においては自動車依存に伴う交通問題を抜本的に解決することが急務であった。

上記の問題を解決するための手段として、道路交通の立替となる大量輸送手段整備が考えられた。タイは国家経済社会開発計画の一つとして、バンコク首都圏に鉄道ネットワークを整備する方針を固め、MRTAを建設主体として1996年にバンコク地下鉄建設事業を開始した。な

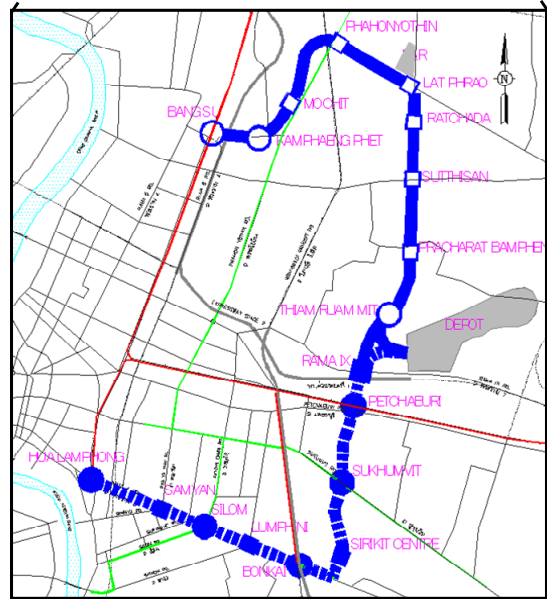
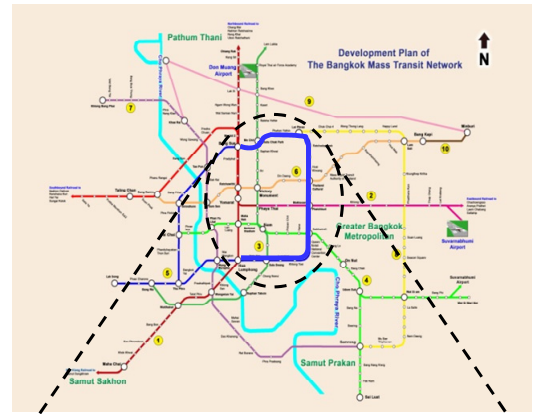


図4 バンコク地下鉄建設事業における評価対象区間

お、バンコク地下鉄建設事業は現在も整備が進められており、JBICを介して日本の円借款が利用されたバンコク地下鉄ブルーラインの一部区間においては2004年7月3日から運行が開始された。ここで、実施する環境負荷・便益評価は運行が開始された本区間を対象としており、総延長約20 kmおよび全18駅（ファランポーンからバーンス駅間）である（図-4参照）。なお、本区間の運行時間は6～24時であり、通勤時間帯は2～4分間隔、ならびに通常時間帯は4～6分間隔で運行されている。地下鉄車両は全18編成（1編成3両連結、定員886人）である。また、本区間の環境負荷・便益評価は1996～2004年を建設段階、さらに2004年以後を運用段階として区分している。

運行が開始された本区間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、および駅部は開削工法によって掘削された。さらに、本区間の総事業費は約3,600億円であり、トンネル部、駅部および車両基地等の土木工事に2,200億円の円借款が投入されている。一方、バンコク地下鉄の運営・経営は、

表-5 バンコク地下鉄の建設に用いられた資材、燃料および電力量

(a) 資材類						
		距離 (m)	単位長さ当り使用量 (t/m)		資材使用量 (×10³ t)	
			コンクリート	鉄 筋	コンクリート	鉄 筋
地下トンネル						
シールドトンネル	廃 土 セグメント	32,003 32,003	12.7	0.9	406.4	28.8
開削トンネル (幅 25 m)	廃 土	337				
	埋戻し	337				
	地下連壁	337	134.4	12.2	45.3	4.1
	スラブ	337	168.0	15.2	56.6	5.1
開削トンネル (幅 7.5 m)	廃 土	190				
	埋戻し	190				
	地下連壁	190	94.1	8.5	17.9	1.6
	スラブ	190	43.7	4.0	8.3	0.8
開削トンネル (幅 5 m)	廃 土	785				
	埋戻し	785				
	地下連壁	785	94.1	8.5	73.9	6.7
	スラブ	785	29.1	2.6	22.9	2.1
開削トンネル (幅 5 m)	廃 土	66				
	埋戻し	66				
	地下連壁	66	94.1	8.5	6.2	0.6
	スラブ	66	42.6	3.9	2.8	0.3
トラックスラブ						
トンネル部	コンクリート	32,003	4.1		131.2	
	強化材	32,003		0.1		3.2
駅 部	コンクリート	4,644	11.3		52.5	
	強化材	4,644		0.1		0.5
地下駅						
地下駅	廃 土	4,644				
	埋戻し	4,644				
	地下連壁	4,644	134.4	12.2	624.2	56.7
	スラブ	4,644	168.0	15.2	780.2	70.6
合 計					2,228.4	181.1

(b) 燃料および電力				
	電力消費率	定格出力	総稼動時間	電力使用量
シールドマシン	0.429 (-)	1,000 (kW)	9.60×10⁴ (hrs)	4.12×10⁷ (kWh)
	燃料消費率	定格出力	総稼動時間	燃料消費量
バックホウ (小型)	0.175 (L/kWh)	100 (kW)	9.60×10⁴ (hrs)	1.68×10⁶ (L)
バックホウ (大型)	0.175 (L/kWh)	250 (kW)	5.38×10⁵ (hrs)	2.35×10⁷ (L)
クラムシェル	0.175 (L/kWh)	100 (kW)	3.52×10⁵ (hrs)	6.16×10⁶ (L)
	燃料消費率	片道輸送距離	輸送土砂量	燃料消費量
ダンプカー	0.0612 (L/km-t)	10 (km)	8.52×10⁶ (t)	5.21×10⁶ (L)

25年の有期にて民間企業グループに託されている。

(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影響物質の排出量（環境負荷量）の推定は、間接的および直接的な環境影響領域に区別して実施する。ここで、建設段階における評価対象はトンネル部、駅部、車両および車両基地である。なお、バンコク地下鉄の建設に用いられた各資材、燃料および電力の使用量は表-5に示しており、バンコク地下鉄に関する予算報告および工期日程等から推定している。

表-6は、バンコク地下鉄の建設段階において間接的および直接的な環境影響領域へ排出されたCO₂、SO₂およびNO₂量を示している。ここで、間接的もしくは直接的な環境影響領域は、建設に用いられた各資材、燃料および電力の排出係数を E_i もしくは e_c （電力に関しては $e_{en}+e_g$ ）と表現することで設定している。これより、バンコク地下鉄建設に伴う間接的な環境影響領域における環境影響物質（CO₂）の排出量（表-6(a)参照）を、文献⁶⁾でまとめられた各土木構造物単体の建設として統合された排出係数（表-7参照）を別途用いて算出される環境影響物質（CO₂）の排出量と比較した結果、両者のCO₂排

表-6 バンコク地下鉄の建設段階における環境負荷の推定

(a) 間接的な環境影響領域							
	使用量 W	CO ₂ 排出係数 E_i	SO ₂ 排出係数 E_i	NO ₂ 排出係数 E_i	CO ₂ 排出量 $E \times W$	SO ₂ 排出量 $E_i \times W$	NO ₂ 排出量 $E_i \times W$
コンクリート	2,230 ($\times 10^3$ t)	0.205 (t-CO ₂ /t)	0.099 (kg-SO ₂ /t)	0.461 (kg-NO ₂ /t)	457 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	221 (t-SO ₂)	1,028 (t-NO ₂)
鉄 筋	180 ($\times 10^3$ t)	0.941 (t-CO ₂ /t)	1.496 (kg-SO ₂ /t)	3.376 (kg-NO ₂ /t)	170 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	270 (t-SO ₂)	608 (t-NO ₂)
燃料 (軽油)	36.6 ($\times 10^3$ t)	3.004 (t-CO ₂ /t)	4.390 (kg-SO ₂ /t)	19.9 (kg-NO ₂ /t)	110 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	161 (t-SO ₂)	728 (t-NO ₂)
電 力	41.2 ($\times 10^6$ kWh)	0.564 (kg-CO ₂ /kWh)	0.461 (g-SO ₂ /kWh)	0.615 (g-NO ₂ /kWh)	23.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	19.0 (t-SO ₂)	25.3 (t-NO ₂)
合 計					760.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	671.0 (t-SO ₂)	2,389.3 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 E_i は表-1 および表-2 に基づく。

(b) 直接的な環境影響領域							
	使用量 W	CO ₂ 排出係数 e_k	SO ₂ 排出係数 e_k	NO ₂ 排出係数 e_k	CO ₂ 排出量 $e_k \times W$	SO ₂ 排出量 $e_k \times W$	NO ₂ 排出量 $e_k \times W$
コンクリート	2,230 ($\times 10^3$ t)	0 (t-CO ₂ /t)	0 (kg-SO ₂ /t)	0 (kg-NO ₂ /t)	0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0 (t-SO ₂)	0 (t-NO ₂)
鉄 筋	180 ($\times 10^3$ t)	0 (t-CO ₂ /t)	0 (kg-SO ₂ /t)	0 (kg-NO ₂ /t)	0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0 (t-SO ₂)	0 (t-NO ₂)
燃料 (軽油)	36.6 ($\times 10^3$ t)	2.657 (t-CO ₂ /t)	2.62 (kg-SO ₂ /t)	17.6 (kg-NO ₂ /t)	97.3 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	95.9 (t-SO ₂)	644 (t-NO ₂)
電 力	41.2 ($\times 10^6$ kWh)	0.140 (kg-CO ₂ /kWh)	0.207 (g-SO ₂ /kWh)	0.350 (g-NO ₂ /kWh)	5.77 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	8.53 (t-SO ₂)	14.4 (t-NO ₂)
合 計					103.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	104.4 (t-SO ₂)	658.4 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 e_k は表-1 および表-2 に基づく。

表-7 統合された排出係数を用いた環境負荷の推定

	使用量 W	CO ₂ 排出係数 E	CO ₂ 排出量 $E \times W$ ($\times 10^3$ t-CO ₂)
本体構造物			
シールドトンネル	32,003 (m)	8.84 (t-CO ₂ /m)	283
開削トンネル	1,378 (m)	16.43 (t-CO ₂ /m)	22.6
盛 土	328.2 (m)	6.49 (t-CO ₂ /m)	2.13
付帯構造物			
スラブ軌道	57,476 (m)	0.29 (t-CO ₂ /m)	16.4
地下駅	18 (駅)	31,130 (t-CO ₂ /駅)	560
車両基地	1 (箇所)	6,123 (t-CO ₂ /箇所)	6.12
車 両			
アルミニウム車両	99 (両)	91.3 (t-CO ₂ /両)	9.04
合 計			899.3

出量に大きな差異なく、推定されたCO₂排出量はおおよそ妥当なレベルであると考えられる。以上を踏まえた上、表-6ではバンコク地下鉄の建設段階における環境影響物質の大部分が用いられた各資材、燃料および電力の製造段階における排出である。また、直接的な環境影響領域における環境負荷物質排出総量（表-6(b)参照）は、間接的な環境影響領域における総排出量（表-6(a)参照）のおおよそ1/7である。よって、バンコク地下鉄の建設に伴う各資材、燃料および電力消費の環境負荷は相対的に小さい。なお、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間接的な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。

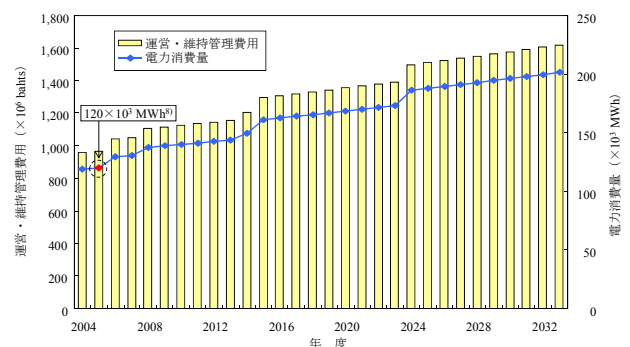


図-5 バンコク地下鉄の運営・維持管理費用の将来動向に基づく電力消費量の推定

(3) 運用段階における環境負荷および便益

a) 環境負荷

バンコク地下鉄の運用段階における環境負荷は、主として電力消費に起因する。なお、バンコク地下鉄の運用段階における電力消費量は、地下鉄走行および付帯施設運行を合計して約 120×10^3 MWh（2005年度）と報告されている¹¹⁾。また、バンコク地下鉄の電力消費量は、今後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。そこで、電力消費量の将来予測には、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と同程度に（比例して）電力消費量も増加すると仮定し、電力消費量の将来動向を図-5に示すように推定した。

表-8 バンコク地下鉄の運用段階における環境負荷の推定

(a) 間接的な環境影響領域							
年 度	電力使用量 W	CO ₂ 排出係数 E_e	SO ₂ 排出係数 E_e	NO ₂ 排出係数 E_e	CO ₂ 排出量 $E_e \times W$	SO ₂ 排出量 $E_e \times W$	NO ₂ 排出量 $E_e \times W$
2004	119 ($\times 10^6$ kWh)	0.564 (kg-CO ₂ /kWh)	0.461 (g-SO ₂ /kWh)	0.615 (g-NO ₂ /kWh)	67.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	54.9 (t-SO ₂)	73.1 (t-NO ₂)
2005	120 ($\times 10^6$ kWh)	0.564 (kg-CO ₂ /kWh)	0.461 (g-SO ₂ /kWh)	0.615 (g-NO ₂ /kWh)	67.7 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	55.3 (t-SO ₂)	73.8 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	201 ($\times 10^6$ kWh)	0.564 (kg-CO ₂ /kWh)	0.461 (g-SO ₂ /kWh)	0.615 (g-NO ₂ /kWh)	113.3 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	92.7 (t-SO ₂)	123.6 (t-NO ₂)
合 計					2,782.4 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	2,274.3 (t-SO ₂)	3,034.1 (t-NO ₂)

(備考) 表中の排出係数 E_e は表-2 に基づく。

(b) 直接的な環境影響領域							
年 度	電力使用量 W	CO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_{ef}$	SO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_{ef}$	NO ₂ 排出係数 $e_{em}+e_{ef}$	CO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$	SO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$	NO ₂ 排出量 $(e_{em}+e_{ef}) \times W$
2004	119 ($\times 10^6$ kWh)	0.140 (kg-CO ₂ /kWh)	0.207 (g-SO ₂ /kWh)	0.350 (g-NO ₂ /kWh)	16.7 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	24.6 (t-SO ₂)	41.6 (t-NO ₂)
2005	120 ($\times 10^6$ kWh)	0.140 (kg-CO ₂ /kWh)	0.207 (g-SO ₂ /kWh)	0.350 (g-NO ₂ /kWh)	16.8 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	24.8 (t-SO ₂)	42.0 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	201 ($\times 10^6$ kWh)	0.140 (kg-CO ₂ /kWh)	0.207 (g-SO ₂ /kWh)	0.350 (g-NO ₂ /kWh)	28.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	41.6 (t-SO ₂)	70.4 (t-NO ₂)
合 計					690.7 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	1,021.2 (t-SO ₂)	1,726.7 (t-NO ₂)

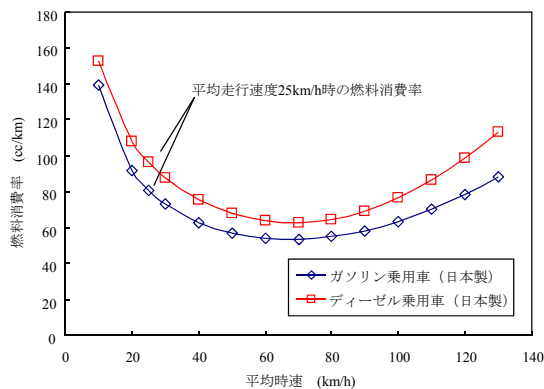
(備考) 表中の排出係数 $e_{em}+e_{ef}$ は表-2 に基づく。

図-6 自動車走行における時速と燃料消費率の関係

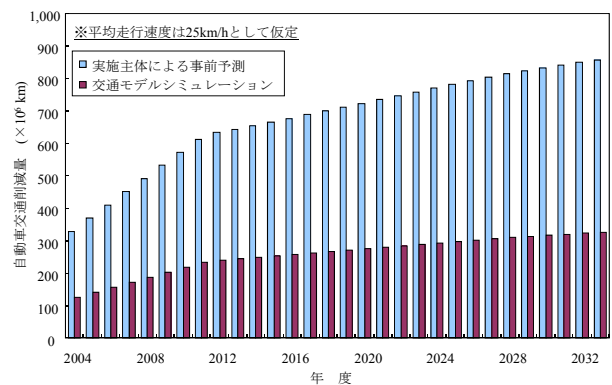


図-7 バンコク地下鉄の運用段階における自動車交通削減量の推定

表-8は、バンコク地下鉄の運用段階において間接的および直接的な環境影響領域へ排出されたCO₂、SO₂およびNO₂量を示している。ここで、間接的もしくは直接的な環境影響領域は、建設段階と同様、運用に伴って消費される電力の排出係数を E_e もしくは $e_{em}+e_{ef}$ として考慮することで設定している。なお、バンコク地下鉄の運用期間（供用年数）は、運営・経営が25年間の有期で民間企業グループに託されている現状を考慮し、30年間として想定している。ただし、ISOにおいては評価期間の設定によって結果に差が生じる懸念がある場合には感度分析による確認を推奨しており、さらに、既往LCA研究⁴⁾では交通基盤施設の評価期間として50～60年が一般的である。よって、本研究で想定した評価期間30年は今後、感度分析の実施や評価期間の延長化も検討する必要がある。表-8より、間接的および直接的な環境影響領域において

バンコク地下鉄で評価期間として想定した30年に及ぶ運用は、建設段階（表-6参照）と比較して多量の環境影響物質を排出している。すなわち、地下鉄で代表される社会基盤構造物の整備事業では、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、表-6および表-8を比較すれば、長期に及ぶ運用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、建設段階と運用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。

b) 環境便益

バンコク地下鉄の運用に伴う環境便益は、地下鉄周辺部における自動車交通量の減少に伴う環境影響物質の排出量削減が挙げられ、自動車交通に伴う環境影響物質の排出量を決定する必要がある。

具体的には、シャシダイナモ試験等¹²⁾から求められる自動車の平均速度と燃料消費量の関係、自動車走行速度、

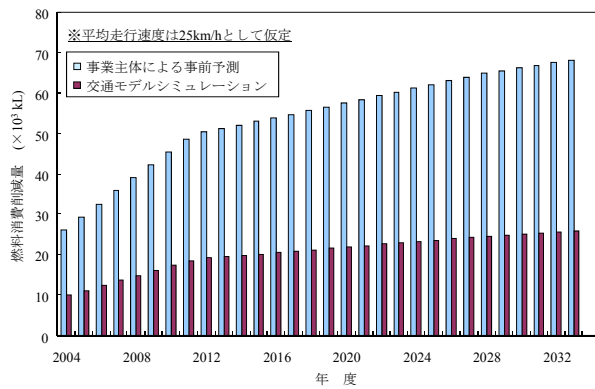


図-8 バンコク地下鉄の運用段階における燃料削減量の推定

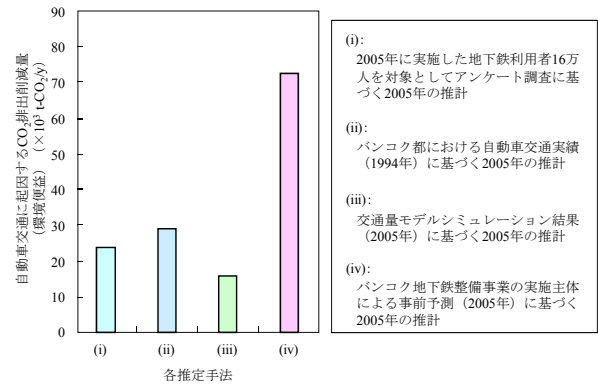


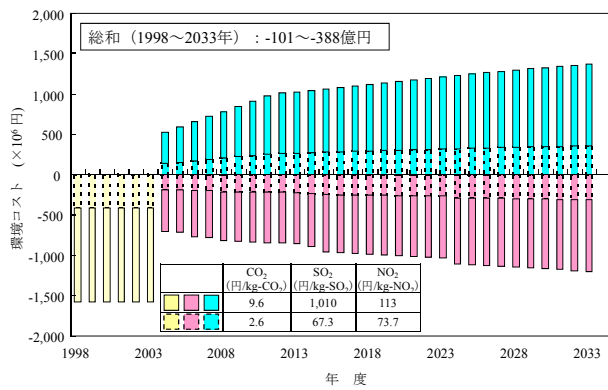
図-9 各推定手法を用いた自動車交通に起因する年間CO₂排出削減量

表-9 バンコク地下鉄の運用段階における環境便益の推定

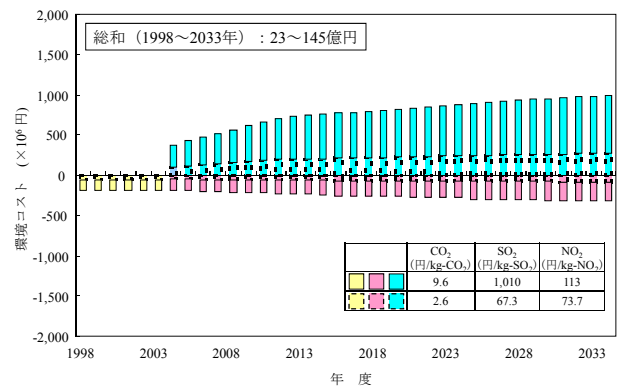
(a) 間接的な環境影響領域							
年 度	燃料削減量 (ガソリン) W	CO ₂ 排出係数 E_i	SO ₂ 排出係数 E_i	NO ₂ 排出係数 E_i	CO ₂ 排出量 $E_i \times W$	SO ₂ 排出量 $E_i \times W$	NO ₂ 排出量 $E_i \times W$
2004	9.9 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	28.6 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	27.3 (t-SO ₂)	60.5 (t-NO ₂)
2005	11.2 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	32.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	30.7 (t-SO ₂)	68.0 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	25.9 ($\times 10^3$ kL)	2.88 (kg-CO ₂ /L)	2.74 (g-SO ₂ /L)	6.08 (g-NO ₂ /L)	74.7 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	71.1 (t-SO ₂)	158 (t-NO ₂)
合 計					1,736 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	1,680 (t-SO ₂)	3,727 (t-NO ₂)
(備考) 表中の排出係数 E_i は表-1 に基づく。							
(b) 直接的な環境影響領域							
年 度	燃料削減量 (ガソリン) W	CO ₂ 排出係数 e_c	SO ₂ 排出係数 e_c	NO ₂ 排出係数 e_c	CO ₂ 排出量 $e_c \times W$	SO ₂ 排出量 $e_c \times W$	NO ₂ 排出量 $e_c \times W$
2004	9.9 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	23.1 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.350 (t-SO ₂)	25.6 (t-NO ₂)
2005	11.2 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	26.0 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.394 (t-SO ₂)	28.8 (t-NO ₂)
(中略)							
2033	25.9 ($\times 10^3$ kL)	2.32 (kg-CO ₂ /L)	0.0352 (g-SO ₂ /L)	2.57 (g-NO ₂ /L)	60.2 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	0.913 (t-SO ₂)	66.6 (t-NO ₂)
合 計					1,422 ($\times 10^3$ t-CO ₂)	21.6 (t-SO ₂)	1,575 (t-NO ₂)
(備考) 表中の排出係数 e_c は表-1 に基づく。							

自動車交通量および燃料の排出係数（表-1参照）を用いて、自動車交通が及ぼす環境影響物質の排出量を推定する。ここで、図-6はシャシダイナモ試験から得られた自動車（日本製乗用車）の平均速度と燃料消費量の典型的な関係である¹²⁾。なお、バンコク首都圏においても日本製乗用車が大半を占めているため、図-6はバンコク首都圏においても適用できると判断している。次いで、バンコク地下鉄が建設された場合（以降，“with”と略す）および建設されなかった場合（以降，“without”と略す）における地下鉄周辺部での自動車交通量および自動車走行速度の情報が必要となる。そこで，withおよびwithoutにおける地下鉄周辺部での自動車交通量（削減量）の将来予測には、交通量モデルシミュレーション、

ならびに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を参照する（図-7参照）¹¹⁾。ここで、参照した交通量モデルシミュレーションはeBUM（extended Bangkok Urban Model）と呼称され、withにおいて求められた交通容量および交通特性と、実施された交通量調査結果（バンコク首都圏における交通容量および交通特性等）との整合性を確認した上、withoutにおける交通容量および交通特性を導くものである¹¹⁾。一方、図-7において予測された自動車交通削減量を基本に、バンコク首都圏における自動車交通事情を考慮して自動車走行速度を25 km/hの一定値として仮定（図-6参照）することで推定された、自動車交通に伴う燃料消費削減量は図-8に示し



(a) 間接的な環境影響領域



(b) 直接的な環境影響領域

図-10 バンコク地下鉄建設事業における推定された環境コストの推移

ている。

なお、参照した交通量モデルシミュレーションの妥当性を確認するため、図-9は(i)バンコク地下鉄利用者（16万人）に対して実施した“地下鉄開業以前に利用していた交通機関”に関するアンケート調査結果（2005年実施）、(ii)バンコク都における交通手段実績（1994年実績）、(iii)交通量モデルシミュレーション、ならびに(iv)バンコク地下鉄建設事業の実施主体による事前予測から最終的に推定された自動車交通に起因するCO₂排出削減量（2005年における年間推定量）を示している。これより、参照した交通量モデルシミュレーションを用いて最終的に推定されるCO₂排出削減量は、他の手法から推定されるCO₂排出削減量と比較してオーダーレベルを伴う違いがなく、環境影響物質の将来的な排出削減量を妥当に予測できるものと考えられる。

表-9は、間接的および直接的な環境影響領域において、バンコク地下鉄の運用に伴う周辺自動車交通から排出されるCO₂、SO₂およびNO₂の削減量（環境便益）を表している。なお、表-9の前提として、バンコク地下鉄の運用期間（供用年数）は30年間として仮定しており、自動車交通に伴う燃料消費削減量は図-8における交通量モデルシミュレーション結果を用いている。さらに、間接的もしくは直接的な環境影響領域は、自動車交通に関連する消費燃料（ガソリン）の排出係数を E_i もしくは e_c として表現することで設定している。表-9(a)より、バンコク地下鉄の運用によって期待される間接的な影響領域における環境影響物質の排出削減量（環境便益）は、表-8(a)で示された運用に伴う環境影響物質の排出量（環境負荷）と比較して、オーダーレベルを伴う違いがない。すなわち、バンコク地下鉄の運用は間接的な環境に対して多大な負の影響を与えるものではない。ただし、表-9(b)で示される直接的な環境影響領域における環境便益（環境影響物質の排出削減量）は、間接的な環境影響領域（表-9(a)参照）と比較して小さい。この要因として、燃料は

消費段階と比較して製造および流通段階においてSO₂およびNO₂を多量に排出する特徴を有するためである（表-1参照）。

(4) 環境コストを導入したバンコク地下鉄建設事業評価

バンコク地下鉄建設事業に関する環境負荷・便益評価では、建設および運用段階で推定された環境影響物質の排出量を、環境影響物質の被害費用原単位を用いて環境コストとして換算し、環境経済学的な観点から環境影響を考慮した事業評価を試みる。ここで、社会基盤構造物の整備事業に関する環境負荷・便益評価における環境コストの導入、すなわち、環境負荷・便益に基づく環境会計は2章で述べたとおり、整備事業自体の社会的責任を明確にするため、図-3に示される事業コストおよびライフサイクルコストに加え、環境コストを考慮するフルコストまでを総合的に明確にする意味がある。なお、環境影響物質の排出量から環境コストへの換算には、表-3に示す環境影響物質の被害費用原単位を用いる。

a) 建設・運用に伴う環境コストの推移

図-10は、バンコク地下鉄建設事業に関する間接的および直接的な環境影響領域において推定された環境影響物質（CO₂、NO₂およびSO₂）の排出量を環境コストとして示している。これより、バンコク地下鉄建設事業における間接的な環境影響領域を想定した図-10(a)では、評価期間として想定した30年に及ぶ運用段階を通して環境コストは正值、すなわち、総合的に環境に対して便益をもたらす。しかしながら、建設段階の環境コストは負値であり、建設ならびに運用段階を合計すると、バンコク地下鉄建設事業は30年の運用を想定した場合、101～388億円の環境コストを消費することに相当する。一方、直接的な環境影響領域における環境コストを示した図-10(b)では、建設段階において生じる環境コストが運用段階と比較して安価である。従って、建設ならびに運用段階の環境コストを合計すれば、30年の運用を想定した

表-10 環境コストを考慮した経済的内部収益率 (EIRR および EIRR_{env}) の算出

年 度	費用 (×10 ⁶ Baht)		便益 (×10 ⁶ Baht)		純受益 (×10 ⁶ Baht)	間接的な環境コスト (×10 ⁶ Baht)		純受益 (×10 ⁶ Baht)	直接的な環境コスト (×10 ⁶ Baht)		純受益 (×10 ⁶ Baht)
	地下鉄 建設	運営・ 維持管理	時間短縮 効果	走行費用 削減効果		負 荷	便 益		負 荷	便 益	
1998	-25,733				-25,733	-660		-26,393	-72		-25,805
1999	-16,905				-16,905	-660		-17,565	-72		-16,977
2000	-16,905				-16,905	-660		-17,565	-72		-16,977
2001	-1,869				-1,869	-660		-2,529	-72		-1,941
2002	-7,165				-7,165	-660		-7,825	-72		-7,237
2003	-19,406				-19,406	-660		-20,066	-72		-19,478
2004		-957	1,064	176	283	-70		213		13	296
2005		-965	1,286	197	518	-48		470		16	534
2006		-1,041	1,553	221	733	-45		688		18	751
2007		-1,050	1,875	247	1,072	-22		1,050		21	1,093
2008		-1,106	2,263	277	1,434	-14		1,420		24	1,458
2009		-1,116	2,729	311	1,924		2	1,926		27	1,951
2010		-1,126	3,291	348	2,513		5	2,518		29	2,542
(中略)											
2033		-1,620	225,882	4,801	281,483		11	281,494		45	281,528
合 計					1,307,557			1,304,727			1,396,586
EIRR = 10.72%						EIRR _{env,G} = 10.54%			EIRR _{env,L} = 10.73%		

バンコク地下鉄建設事業は23～145億円の環境コストが収入されることに相当する。

上記のとおり、バンコク地下鉄建設事業が負うべき環境コストは環境影響領域の設定によって異なる。一方、図-10で推定された環境コストは、バンコク地下鉄建設事業の社会的妥当性・必要性の判断指標として用いられることも想定される。よって、環境影響領域の設定によって異なる環境コストを考慮し得る社会的妥当性・必要性の判断指標が必要であり、図-10にて示された環境コストを考慮し、バンコク地下鉄建設事業に関するEIRR_{env}の算出を試みる。

b) 環境コストを考慮した経済的内部収益率

EIRR（経済的内部収益率）とは2章で述べたとおり、事業が及ぼす社会便益を基本に求められる費用便益分析指標の一つである。ここで、バンコク地下鉄建設事業において事業主体が事前に算出したEIRRには、費用として地下鉄整備費用および運営・維持管理費用が計上され、便益として走行費用削減効果ならびに時間短縮効果が計上されている。その結果、バンコク地下鉄の建設段階および30年間の運用に伴い算出されたEIRRは10.72%である（表-10参照）。なお、事前に算出されたEIRR = 10.72%は、東南アジア地域において一般的な基準となる割引率10%を上回っており、バンコク地下鉄建設は社会経済的観点から効率的な事業として見なされる。上記に対して、推定された環境コスト（図-10参照）を環境負荷・便益費用としてEIRR算定に考慮した結果、EIRR_{env} = 10.54～

10.73%が得られた（表-10参照）。これは、環境コストを考慮したEIRR_{env}の指標においても、バンコク地下鉄建設事業の社会経済的妥当性が示される結果である。総合すれば、環境への関心が高まった現在において、バンコク地下鉄建設事業は環境影響物質の排出に伴う環境影響を考慮した上で、妥当な事業であると判断できる。なお、バンコク地下鉄建設事業に起因する環境コストの事業総費用に占める割合が非常に小さかったことが、事前に算出されたEIRRと環境コストを考慮したEIRR_{env}に大きな差異が生じなかった要因である。

上記のとおり、検討した環境負荷・便益評価手法ならびに環境コストを組み込んだEIRR_{env}は、社会基盤構造物の整備事業における環境影響を考慮した事業判断の一指標として用いることが可能である。

4. おわりに

本研究では、環境影響を考慮した社会基盤構造物の整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を検討した。さらに、バンコク地下鉄建設事業へ環境負荷・便益評価手法を適用することで環境影響評価を実施し、環境影響を考慮した当該地下鉄建設の事業評価を試みた。その結果、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環境便益を定量化することができた。さらに、バンコク地下鉄建設事業における環境影響を貨幣換

算し、経済的内部収益率（EIRR）に組み込むことによって、地下鉄建設事業の環境影響を経済的な視点からも考慮することができた。

本研究では要素の排出係数設定において、文献⁷⁾で示された日本国内のデータを参照した。一方、バンコク地下鉄建設事業で代表される海外プロジェクト等を対象とする際には、採用する排出係数の妥当性ならびに事業現場に即した要素の排出係数の決定を更に詳細に検討する必要がある。同時に、環境影響物質の被害費用原単位は地域や時代に即して変化するものと考えられる。本研究では環境影響物質の被害費用原単位を一定値として $EIRR_m$ を算出したものの、元来、被害費用原単位は、時々刻々と変化する値として考慮する必要がある。ただし、社会基盤構造物の建設に対する事業性評価（社会的妥当性・必要性評価）としての費用効果分析や費用便益分析の中に環境コストを取り入れるためには、本研究で実施した環境経済学的な視点が欠かせないと考えられる。しかしながら、環境影響を貨幣価値に換算することに関する議論の余地は残される⁹⁾。最後に、社会基盤構造物は供用年数が長期に及ぶため、将来における不確実性が大きい。そこで、確率統計等の手法を用いて不確実性を考慮した環境影響評価を実施していく必要があると考えられる。

謝辞：本論文の一部である環境負荷・便益評価手法のバンコク地下鉄建設事業への適用事例は、京都大学（研究代表者：大津宏康）が国際協力銀行から受託した円借款事業事後評価に基づくものであり、関係各位には貴重な意見と情報を提供いただいた。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。なお、本評価は投稿時点（2008年4月現在）において途上であり、国際協力銀行の正式な見解を紹介するものでないことに留意されたい。

参考文献

- 1) 國部克彦, 伊坪徳宏, 水口 剛: 環境経営・会計, 丸善, pp.81-90, 2007.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 6) 稲葉 敦: LCAの実務, 産業環境管理協会, 2005.
- 7) 日本建築学会: 建物のLCA指針, 日本建築学会, CD-ROM, 2001.
- 8) 下村恭民, 稲葉 敦, クロード・シーゲンターラー: タイ開発事業を対象とした環境会計による環境評価手法の拡充, 円借款事業評価報告書2007, 国際協力機構, pp.53-54, 2007.
- 9) 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.
- 10) 飯田恭敬: 土木計画システム分析—最適化編, 森北出版, 1991.
- 11) Pacific Consultants International: *MRT Blue Line Post Evaluation Project: Final Draft Report*, Pacific Consultants International, 2007.
- 12) 大城 温, 松下雅行, 並河良治, 大西博文: 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数, 土木技術資料, Vol.43, No.11, pp.50-55, 2001.

(2008. 4. 4 受付)

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF INFRASTRUCTURES AND ITS APPLICATION ON SUBWAY IMPROVEMENT PROJECTS IN BANGKOK

Shinya INAZUMI, Hiroyasu OHTSU, Takeshi KATSUMI and Hiroki ARIZONO

This study aims to establish an environmental impact assessment method that offers environmental accounting along with the improvement projects of social infrastructures. The application of this method can contribute to the evaluation of the profitability of improvement projects considering the environmental impact.

From the results obtained, it was possible to quantify the environmental impact and benefit through the life cycle of the Bangkok subway line, Thailand. Furthermore, it was possible to evaluate the environmental impact of the Bangkok subway improvement project from an economical viewpoint by converting the environmental impact and benefit into monetary terms (by including it in the economic internal rate of return, EIRR).