

地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A SUBWAY SYSTEM

岩渕 省* 四宮明宣** 中嶋芳紀*** 松本 亨* 井村秀文*
Akira IWABUCHI*, Akinobu SHINOMIYA**, Yoshinori NAKAJIMA***, Tohru MATSUMOTO*, and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT: We conducted a life cycle assessment for the subway system in Fukuoka City. We estimated the direct and indirect energy requirements necessary for the construction of subway tunnels using the actual design and specification data such as the amount of basic materials, fuels and machines used for construction. We studied three different construction methods: cut and cover, mountain, and shield tunnelling. The estimated per length energy requirements of the tunnels constructed by these three methods are 4,900 TOE/km, 6,900 TOE/km, and 10,300 TOE/km, respectively. These values are roughly proportional to the per length construction cost of the tunnels. The total energy required for construction is almost 14 times as large as that required annually for the operation and maintenance of trains and stations.

KEYWORD: life cycle assessment(LCA), subway system construction, life cycle energy(LCE), life cycle CO₂ (LC-CO₂)

1. はじめに

製品LCAの概念が社会資本整備のためのさまざまな事業にも拡大され、各種構造物・施設の建設に関するILCA（インフラストラクチャ・ライフサイクルアセスメント）が活発に行われ始めた¹⁾。ここで、ILCAの研究現状を見ると、理念・手法の概念整理、算定に使用される基本的な原単位の整備などが概ね完了し、さまざまなプロジェクトや事業計画の環境評価においてLCA的な考え方や手法を如何に適用していくか、たとえば、従来からの環境影響評価（EIA）との相互関係、環境資源勘定との結合²⁾などが今後の研究課題となりつつある。しかし、社会資本整備の事業は多種多様であり、その特性は事業ごとに大きく異なる。一般的な手法を具体的な事業に適用する場合の技術的問題点や、得られた結果を事業の特性に応じてどのように解釈・評価すべきかという実証研究も必要とされる。これは、個々の事業の設計や施工を担当する立場からの現実的なニーズでもある。

著者らはこれまでに、都市の社会基盤システムを構成する下水道システム³⁾、港湾整備⁴⁾、一般廃棄物処理システム⁵⁾、道路整備⁶⁾などについて、具体的な事例を対象にILCAを実行してきた。その第一の目標は、一定の分析枠組みに基づいて、特性の異なる各種事例についてILCAを実行し、事業特性に応じた手法適用上の問題点や算定結果の意味を検討することである。同時に、著者らによる一連の研究においては、その1つの目標として、個別事業ごとのILCAの結果を統合し、1つの都市の社会システム全体についての環境評価を行うことを目指している。ここでは、都市活動にともなう資源・エネルギーの収支をフローとストックの両面から定量化することを当面の作業目標としている⁷⁾。

以上のような研究の位置づけの下に、本論文では、都市内交通システムとして重要な位置を占める地下鉄の整備についてILCAを実行する。具体的には福岡市地下鉄建設をケーススタディ対象とする。ただし、分析の第一段階として、地下鉄本体の建設に関わる負荷に中心を置いて評価する。また、分析ステージとしては、インベントリ分析までにとどめ、インパクト分析は行わない。評価指標としては、エネルギー消費量（LCE）とそれに密接に関連した二酸化炭素排出量（LC-CO₂）とする。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

**株式会社東京設計事務所

***住友建設株式会社

*Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

**Tokyo Engineering Consultants Co., Ltd

***Sumitomo Construction Co., Ltd

2. 本研究の評価対象及び分析手法

(1) ILCAの課題

ILCAの考え方や手法については、対象とする社会基盤システムの特性を反映して、製品LCAとは異なる考慮が求められる部分がある。例えば、環境影響を評価するに際してのシステム境界や、資本財としてのライフサイクル範囲をどう設定するか、対象システムの機能をどう評価するかといった問題である。地下鉄の例では、その建設・運用の影響は道路等の他の交通システムにも広く波及する。地下鉄建設工事による直接的な環境負荷の他に、例えば、地下鉄の供用によって減少した自動車交通とそれによる環境改善効果等も重要な意味を持つ。このような波及効果まで含めて評価するためにはシステム境界を広く設定しなければならないが、それに応じて追加的な分析が必要となる。また、建設されたトンネルの寿命を設定することは現実問題として難しく、この意味においてはライフサイクルの設定も難しい。また、環境負荷に関する数字は、その絶対値だけでは評価しにくく、得られる輸送能力や利便性との比較において、対象システムと同等の機能を持つ他のシステムとの比較によって初めて意味を持つ面が強い。しかし例えば、地下鉄と道路とでその機能を同等に揃えて比較するための方法も未確立である。このような方法論上の問題は、ILCA全般についての今後の研究課題となっている。

(2) 評価対象

ILCAの評価レベルとしては、(Ⅰ)ハードウェアとしての個別の構造物、施設あるいはそれらの集合体の建設にともなう環境負荷を中心に評価するレベル、(Ⅱ)インフラストラクチャーとしての機能に着目し、施設の建設のみならずその利用による環境負荷も含めて評価するレベル、(Ⅲ)他のインフラ施設と連携して提供する社会システム的な機能やそれによって享受されるサービスとその便益なども考慮して環境負荷を評価するレベルの3つの段階で考えることができる。交通インフラ施設のILCAの研究例としては、トンネル建設⁸⁾、道路構造の違いによる建設及び利用⁹⁾などの研究が報告されているが、それらは上記(Ⅰ)または(Ⅱ)のレベルにある。

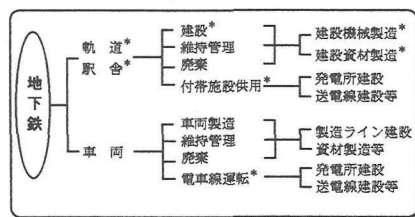
交通システムの建設は、既存の交通システムのみならず社会・経済にも大きな影響を与えるから、(Ⅱ)さらには(Ⅲ)のレベルの評価が重要な意味を持つ。しかし、これらのレベルでILCAを実行するには、既存の交通システムとの競合関係や代替関係、経済効果などをも考慮した影響の予測・評価が必要になる。これは、環境影響評価(EIA)においても同様に問題となる部分である。しかし、この分析は、ILCA固有の領域と言うよりは交通システム分析の領域に入り込んだ課題であり、それ自体で広範な分析作業を必要とする。このため、本論文における評価は、分析の第一段階としてレベル(Ⅰ)にとどめる。

ここで、本分析の対象となるハードウェアとしてのシステムの範囲を図示したのが図1である。上記のような理由から、地下鉄の軌道建設に主眼を置いた分析とし、トンネル掘削工事の工法別の比較、建設および運転段階の累積エネルギーの比較を行う。なお、ここでは、関連データの入手が困難であったため、施設の維持・保守、車両の製造や維持管理などは評価の対象外としている。

以上のとおり、本研究の分析範囲は、かなり制約されたものになっているが、システム境界の拡張、評価指標の拡大(例えば、大気汚染改善効果など)については、今後の課題として認識しているところである。

(3) 事業の概要

本論文では、福岡市地下鉄整備事業を分析対象とする。福岡市地下鉄は、1981年に営業距離5.8kmで開業したが、以後さらに整備が行われ、



* : 本論文での分析対象
図1 評価の対象範囲



図2 福岡市地下鉄路線図

1997年現在における営業距離は17.8km、駅数は19である。1993年、地下鉄としては国内初の空港乗り入れが完成し、それとともに、西鉄福岡駅、JR博多駅、福岡空港という市内の交通拠点が地下鉄により結ばれ、交通利用者の利便性が増している（図2）。

（4）分析手法

ILCAの代表的な手法として、積み上げ計算による方法と産業連関分析による方法があるが、現状では、一方の方法だけで分析を完結させることは難しく、2つの方法を混合して使用することが多い。以下の分析においても、このアプローチを採用する。分析においては、まず、「福岡空港線地下鉄明細内訳書」¹⁰⁾をもとに、単位地下鉄延長距離あたりの建設エネルギー消費量

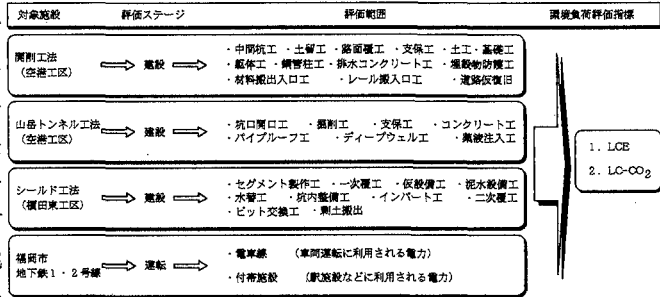


図3 評価の枠組み

(TOE/km:ただし、1 TOE=10⁷kcal) 及び建設二酸化炭素排出量 (T-C/km) を算出する。具体的には、データ入手可能な地下鉄福岡空港線の中から3つの工法（開削工法、山岳トンネル工法、シールド工法）による工事工区をそれぞれ設定する（図3）。その工事工区の明細内訳書をもとに、使用された建設機械や建設資材、燃料などの規格や使用量および各工事金額などを求め、それに各種エネルギー原単位を乗じる（表1）。ここで、エネルギー消費分析の対象範囲の内訳は次の通りである。

- ①直接投入エネルギー：工事現場の建設機械等に使用される軽油、電力、ガソリンを対象とする。
- ②間接投入エネルギー（建設機械製造）：ダンプトラック等の建設機械の製造に投入されるエネルギーを対象とする。工事に用いられる建設機械の製造エネルギーは損料に比例して減価償却されるものとして、使用時間あたりの製造エネルギーを算定し、これに機械の運転時間に乗じることで建設機械製造によって誘発されるエネルギーとする。機械損料は福岡市交通局の地下鉄明細書に基づく。建設機械の製造エネルギーは、1985年の産業連関表（183部門中の鉱山・土木建設機械部門）により求めた金額当たりのエネルギー消費原単位を用いて計算する。
- ③間接投入エネルギー（建設資材製造）：コンクリートや鋼材等の建設資材製造によって誘発されるエネルギーを対象とする。

上記の方法により、投入エネルギーを積み上げて建設エネルギー消費量とし、それを各工事距離で除することにより、工法別建設エネルギー消費原単位とする。なお、剩土を処分地まで搬出するダンプトラック等の燃料は①の中に計上している。しかし、処分地に搬入された後の処理については考慮していない。

二酸化炭素排出量についても同様の方法による。

表1 本研究で使ったエネルギー消費原単位及び二酸化炭素排出原単位

原単位利用項目	エネルギー消費原単位	二酸化炭素排出原単位	備考	出典
軽油	9,200 kcal/l	0.740 kg-C/l		(15), (17)
ガソリン	8,400 kcal/l	0.675 kg-C/l		(15), (17)
電力	2,250 kcal/kWh	0.129 kg-C/kWh	転換時のロスを考慮する	(15), (17)
建設機械	1.14 TOE/百万円	0.91 T-C/百万円	「鉱山・土木建設機械」と同じとする	(16)
コンクリート	313 Mcal/m ³	67.30 kg-C/m ³		(17)
セメント	908 Mcal/ton	225 kg-C/ton	原料（石灰石）からの二酸化炭素発生量を含む	(17)
砂利・土砂	53 Mcal/m ³	0.56 kg-C/m ³		(17)
採石	56 Mcal/m ³	0.64 kg-C/m ³		(17)
合板	868 Mcal/ton	48.7 kg-C/ton	比重を0.5とする	(17)
製材	137 Mcal/ton	7.8 kg-C/ton	比重を0.5とする	(17)
鋼材・鉄筋等	5,657 Mcal/ton	520 kg-C/ton	「粗鋼」と同じとする	(17)
銅管	3.76 TOE/百万円	3.29 T-C/百万円		(17)
鋼管	3.09 TOE/本	2.70 T-C/本	SCW50-CF TY	820,800円/本 (16)
鋼杭	3.26 TOE/百万円	2.82 T-C/百万円	鋼鍛造品・その他の鉄鋼製品	(16)
鋼杭	0.02 TOE/本	0.02 T-C/本	H300*300, $\phi=20.0\text{m}$	7,000円/本 (16)
鋼矢板	3.26 TOE/百万円	2.82 T-C/百万円	鋼鍛造品・その他の鉄鋼製品	(16)
鋼矢板	0.09 TOE/枚	0.07 T-C/枚	3型 $\phi=8.0\text{m}$	26,472円/枚 (16)

3. 単位距離あたりのLCE, LC-CO₂の算出

(1) 開削工法

開削工法とは地面を直接上から掘り下げて、本体構造物を所定の位置に造築後、その上部を埋め戻して復旧する工法である。福岡市の地下鉄工事延長距離の約70%に採用している標準工法であり、駅部のほとんどがこの工法によって、矩形断面に建設されている。

今回はデータ入手上の制約により、地下鉄1号線空港工区の駅部の工事データをもとに算出する。駅部と駅間の断面形状は必ずしも同一ではなく、同じ工事工法でもその施工工区によって断面形状は異なる。そのため駅部以外の一般工区については、その断面形状が矩形であると仮定し、駅部について得られた結果をトンネル断面比及び距離によって換算して求める。

開削工法の施工工程のうち表2、3にあげる工程を対象とする。支障物の撤去や試掘などの準備工や詳しい工事データを手入手することができなかった防水工、空港駅部だけに限定される連絡通路工事など、その他の開削工法の工事工区に見られない施工工程は分析の対象外とする。

対象工程別の一般部1km当たりの環境負荷原単位を表2、3に示す。全体のエネルギー消費量の約半分を躯体工が占めている。これは、構造物本体の造築に消費されるコンクリートや鉄筋などの資材による間接エネルギー消費量が多いためである。

土工・基礎工において全体の17.8%のエネルギーが消費される。これは地面を掘削するための建設機械やその剰土搬出のためのダンプトラック等運搬機械に投入される直接エネルギー消費量が多いためである。剰土の搬出先として、自由処分地と指定処分地とがある。自由処分については、その把握が困難であり、かつ指定地処分が全体の約85%を占めることを考え、ここでは指定地処分のみ計上する。

(2) 山岳トンネル工法 (NATM)

山岳トンネル工法とは、開削工法によりナトム掘削のための基地を造り、そこから岩盤を掘る掘削機械を使って横穴式に地中を掘り進み、支保工で土圧を支えながらコンクリートでトンネルを造る工法である。地下鉄1・2号線の約10%に採用されている。山岳トンネル工法による横断面の形状は複線標準型や単線型などさまざまであるが、評価対象工事工区では単線並列型を採用している。

山岳トンネル工法の施工工程としては表4、5にあげる工程を対象とする。本研究では、(1)の開削工法と同じ空港工区の、終端部過走線を評価の対象とする。そのためにトンネル発進基地の立坑の開削工事は評価に含めず、駅部側から進めるナトム掘削のみを対象とする。また、詳しい工事データを手入手することのできなかった防水工は対象外とする。薬液注入工で用いられた薬液は、製造による原単位が不明確であることから使用資材の対象外とする。

本研究の対象工程と一般部1km当たりの環境負荷原単位を示す(表4、5)。鋼管や鋼材などの資材による間接エネルギー消費量が大きいため、パイプルーフ工が占める割合が最も大きい。全体のエネルギー消費の各々約20%を占める支保工とコンクリート工においては鋼材や鉄筋とともに、吹付コンクリートや覆

表2 開削工法のエネルギー消費量

(単位: TOE/km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
中間坑工	75	73	344	492	10.0
土留工	45	22	90	157	3.2
路面覆工	3	0	1	4	0.1
支保工	1	0	187	188	3.8
土工・基礎工	572	163	142	877	17.8
躯体工	35	12	2,642	2,689	54.7
鋼管柱工	0	0	195	195	4.0
排水コンクリート工	0	0	13	13	0.3
埋設物防壁工	7	5	253	265	5.4
材料搬出入口工	0	0	29	29	0.6
レール搬入口工	0	0	0	0	0.0
道路復旧	1	0	6	7	0.2
合計	739	275	3,903	4,916	100.0

表3 開削工法の二酸化炭素排出量

(単位: T-CO ₂ /km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
中間坑工	53	58	573	684	7.3
土留工	33	17	104	154	2.9
路面覆工	2	0	0	3	0.1
支保工	1	0	205	206	3.9
土工・基礎工	457	130	81	668	12.7
躯体工	28	9	3,327	3,364	63.7
鋼管柱工	0	0	171	171	3.2
排水コンクリート工	0	0	24	24	0.5
埋設物防壁工	6	4	253	263	5.0
材料搬出入口工	0	0	37	37	0.7
レール搬入口工	0	0	0	0	0.0
道路復旧	1	0	2	3	0.0
合計	581	219	4,776	5,576	100.0

表4 山岳トンネル工法のエネルギー消費量

(単位: TOE/km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
坑口開口工	7	2	387	397	5.7
掘削工	340	139	0	479	6.9
支保工	13	30	1,406	1,450	20.9
コンクリート工	14	15	1,448	1,476	21.3
パイプルーフ工	239	377	2,175	2,791	40.3
ディープウェル工	204	36	23	263	3.8
薬液注入工	19	47	0	66	1.0
合計	837	646	5,440	6,922	100.0

表5 山岳トンネル工法の二酸化炭素排出量

(単位: T-CO ₂ /km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
坑口開口工	5	1	558	565	7.5
掘削工	273	101	0	375	5.0
支保工	8	22	2,010	2,040	27.1
コンクリート工	11	11	1,989	2,011	26.7
パイプルーフ工	149	274	1,910	2,334	31.0
ディープウェル工	121	26	20	167	2.2
薬液注入工	12	34	0	46	0.6
合計	580	470	6,487	7,537	100.0

いコンクリートの使用によるエネルギー消費量の割合が大きい。

(3) シールド工法

シールド工法は、ジャッキを利用して、円筒形の推進機（シールド）を土中に押し進め、その前方で土を掘削し、後方でコンクリートや鋳鉄のセグメントを円形に組み立てながらトンネルを建設する工法である。シールド方式の選択にあたっては、交通量の多い幹線道路や空港場内を通るなど地上での制約があることや掘削地盤の特性などから泥水加圧式によるシールド工法が用いられ、福岡空港下など約2.5kmに採用されている。シールド掘削による外径は10mである。

本研究では地下鉄1号線の榎田東工区958.9mを対象として、単位距離当たりの環境負荷を求める。シールド工法の施工工程としては、基地や立坑の建設、シールド機械の製造や組立、覆工等がある。立坑は開削工法により建設されるが、工事終了後は中間換気所として利用されるためにシールド工法の評価対象外とする。構造物本体の造築に使用されるセグメントは、道路および空港場内に使用されるコンクリートセグメントと民有地部に使用されるタグタイル鋳鉄セグメントがあるが、それぞれコンクリート製品、鉄製品とする。シールド機械の間接エネルギー消費量も、他の建設機械と同様に損料に比例して減価償却されるものとして、使用時間あたりの製造エネルギーを算定する。

本研究の対象工程と一般部1kmあたりの環境負荷原単位を表6、7に示す。構造物本体を構成するセグメントが、エネルギー消費量のほとんどを占める。セグメントの使用量は、全体の約8割をコンクリートセグメントがしめている。しかし、コンクリートセグメントとタグタイル鋳鉄セグメントをそれぞれコンクリート製品と鉄製品としたために、セグメント製作工で消費されるエネルギーの約9割をタグタイル鋳鉄セグメントが占める。また、シールド工法で消費される直接エネルギーのほとんどは、電力の消費によるものである。

4. 算出結果の比較

(1) 単位距離あたり環境負荷の比較

上で求めた3工法の単位距離あたりエネルギー消費量を比較したのが表8である。1kmあたりのエネルギー消費量は約5,000～10,000TOEである。シールド工法によるエネルギー消費が最も大きく、最も小さい開削工法の約2倍となる。

表8 工法別の地下鉄建設1kmあたり環境負荷原単位比較

	開削工法	山岳トンネル工法	シールド工法
エネルギー消費量 (TOE/km)	4,916	6,922	10,337
二酸化炭素排出量 (T-C/km)	5,576	7,537	9,619

次に工法別のエネルギー消費量を直接投入分と間接投入分に分けて比較すると(図4)、いずれの工法においても、建設資材による影響が大きい。特にシールド工法では、構造物本体のセグメントによる影響が大きい。本研究では、最も負荷量の大きいセグメントの原単位を単純にコンクリート製品と鉄製品とに区分したが、より精密には、構成素材などから正確な原単位を算出し、評価を行う必要がある。

(2) 金額あたり環境負荷の比較

評価対象区間の工事金額¹⁰⁾をその工事距離で除して、1kmあたりの建設コストを算出する。この際、工事金額はGDPデフレーター¹¹⁾により1990年価格に換算する。ただし、いずれの工法も工期が複数年にわた

表6 シールド工法のエネルギー消費量

(単位: TOE/km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
セグメント製作工	0	0	7,029	7,029	68.0
一次覆工	347	67	129	543	5.2
仮設備工	130	35	281	447	4.3
泥水設備工	434	226	687	1,347	13.0
水替工	13	0	0	13	0.1
坑内整備工	1	1	0	3	0.0
インパート工	11	16	318	344	3.3
二次覆工	2	9	89	100	1.0
ビット交換工	18	4	138	159	1.5
掘土搬出	256	95	0	352	3.4
合計	1,213	453	8,671	10,337	100.0

表7 シールド工法の二酸化炭素排出量

(単位: T-C/km)					
工程	直接	間接 (機械)	間接 (資材)	合計	割合 (%)
セグメント製作工	0	0	6,940	6,940	72.1
一次覆工	199	49	277	525	5.5
仮設備工	77	26	261	364	3.8
泥水設備工	254	165	129	548	5.7
水替工	7	0	0	8	0.1
坑内整備工	1	1	0	2	0.0
インパート工	6	11	677	695	7.2
二次覆工	1	6	121	129	1.3
ビット交換工	10	3	121	134	1.4
掘土搬出	206	70	0	276	2.9
合計	763	330	8,526	9,619	100.0

たことから、工事年度を特定できない施工工程や工事金額については、工期の中間年度に工事金額が投入されたものとする。その結果を比較すると、開削工法で2,638百万円/km、山岳トンネル工法で3,502百万円/km、シールド工法で5,010百万円/kmである。工事金額と環境負荷量とは、ほぼ比例関係にある。

次に金額あたりの環境負荷を算出する。工法別に算出した単位距離当たりの環境負荷量を1kmあたりの工事金額で除して、金額あたりの環境負荷原単位とする。その結果を表9に示す。また、参考として建設部門産業連関表¹²⁾による金額あたりの算出値を、同じくGDPデフレータにより補正した結果と比較する。建設部門産業連関表の部門分類には地下鉄建設の分類がなく、これに近いと考えられる分類は鉄道軌道であるが、比較のため、都市高速道路とその他の土木の値も記す。分析方法の違いがあるため、必ずしも厳密な比較はできないが、算出結果と鉄道軌道の値は比較的近い。

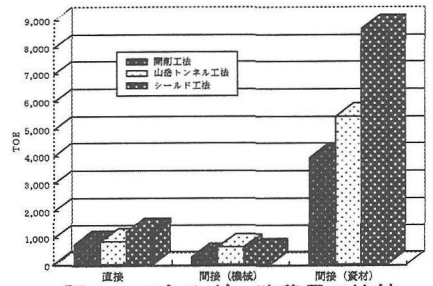


図4 エネルギー消費量の比較

表9 金額あたりの環境負荷原単位
(建設産業連関表からの算出結果との比較)

工法	開削工法	山岳トンネル工法	シールド工法
1kmあたりの工事金額 (百万円/km)	2,638	3,502	5,010
エネルギー消費原単位 (TOE/百万円)	1.86	1.98	2.06
二酸化炭素排出原単位 (T-C/百万円)	2.11	2.15	1.92
建設産業連関表の分類			
	鉄道軌道	都市高速道路	その他の土木
エネルギー消費原単位 (TOE/百万円)	1.86	1.95	1.58
二酸化炭素排出原単位 (T-C/百万円)	1.56	1.62	1.29

(3) 施工規模の比較

各工法の施工規模を比較するために、一般部の掘削断面積を工法別に比較すると以下ようになる。

開削工法：山岳トンネル工法：シールド工法＝124.7 (m²): 74.5 (m²): 78.5 (m²)＝1.00 : 0.60 : 0.63

福岡市地下鉄整備事業では、一般にシールド工法による断面積が最も大きく、開削工法の断面積は駅から十分離れた地点では約70m²と最も小さい。しかし開削工法による施工工区は、施工断面の広い駅部と駅から離れた地点とを結ぶルート部分が多いため、その平均的な値を掘削断面積とする。このことから同じ掘削断面規模でトンネルの建設を行うと、開削工法による環境負荷と山岳トンネル及びシールド工法による環境負荷との差がより拡がると考えられる。

中牟田、前川ら⁸⁾は、トンネル建設において単純に施工掘削規模を同一にした場合には、シールド工法と山岳トンネル工法との二酸化炭素排出量には大きな差がないと報告している。しかし、彼らの対象としたのはシールド工法による鉄道トンネルと山岳トンネル工法による道路トンネルであり、単純な比較には問題がある。

本研究で対象とした工法はいずれも、同じ地域における地下鉄整備に採用されているものであり、同一条件での比較という意味でより正しいと考えられる。

5. 地下鉄システムの建設及び運転についての評価

(1) 地下鉄運転

地下鉄システムとして評価するには、建設だけでなく、運転等の評価が必要である。地下鉄運転のために投入されるエネルギーとしては、電力のみを対象とする。電力以外に使用される水道水など、その他の項目については詳しいデータが無いために対象外とする。

地下鉄車両は、直流1,500Vの架空単線式による電気方式によって運転される。その運転エネルギーとして送電された電力は、地下鉄専用の電力施設である5ヶ所の変電施設によって配電され、総延長52.6kmの

電車線によって車両に伝えられる。また、この電力は駅部の照明や空調などにも利用されている¹³⁾。

地下鉄の運転にともなう環境負荷を評価するには、車両運転に直接投入される電車線電力と駅部などの施設に投入される付帯電力とを対象とする必要がある。地下鉄1号線の開業した1981年度から、データの入手可能な1995年度までの使用電力量¹⁴⁾を電車線電力と付帯電力とに分けて年間のエネルギー消費量を算出する。評価対象は車両や施設の運転に限っているため、車両や構造物の維持・補修に関する環境負荷は考慮していない。営業距離や利用者の増加にともない変化している車両走行距離は、電車線電力の使用量に密接に関連している。このため、図5に、算出結果とあわせて年間の延べ車両走行キロも示す。

(2) 地下鉄整備全体のLCA

前述したように工事工法によって環境負荷が異なり、福岡市地下鉄整備事業全体を対象としたLCAを行うためには、各々の工事区間と算出した原単位を対応させる必要がある。そこで43の工事工区について、各々の工区延長距離や採用工法などの概要を整理する。対象とした工区延長距離は18.5kmであり、工事工法の約70%を占める開削工法と山岳トンネル工法、シールド工法の3工法が主に採用されている。この3工法以外の工事工法としてはケーソン工法や、在来線との接続駅において採用された高架工法がある。本研究では、これらの工法は全体の営業距離に占める割合が10%未満であり地下鉄の工法として一般的でないことや、高架工法を用いた一部工区は地下鉄車両専用の駅ではなく、在来線との相互乗り入れ駅であることから評価の対象外とする。建設エネルギーは、施設の建設期間が数十年におよび、その経年的内訳までは不明のため、その区間の開業時にまとめて投入されたものとして計上する。駅部は全て開削工法により建設され、開業時にその建設エネルギーが投入されたとする。地上駅の2駅とJR博多駅地下に建設された1駅は、地下鉄の駅としては他と特性が異なるためここでは評価の対象外とする。

建設及び運転にともなう累積エネルギーの経年変化を図6に示す。建設については、1981年7月の開業時に47.2千TOEが初期投入され、1995年度までの累積量はその約3倍の140.0千TOEである。また、1995年度までの運転の累積エネルギー消費量は、付帯施設による消費が81.6千TOE、電車線による消費が82.1千TOEである。両者の合計は建設の値を上回っている。1995年度の建設による累積二酸化炭素排出量は153.0千T-C、運転による累積二酸化炭素排出量は93.8千T-Cとなる。

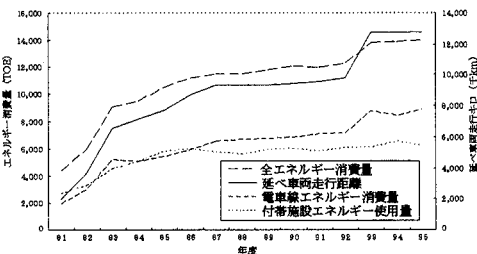


図5 地下鉄運転にともなう
年間エネルギー消費量の推移

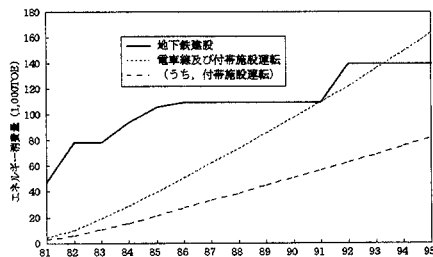


図6 累積エネルギー消費量

6. まとめ

福岡市地下鉄を対象事例として、建設・運転にともなう累積エネルギー消費量を評価した。地下鉄建設に採用される代表的な3工法の単位距離あたり建設エネルギー消費量について、開削工法は4,920TOE/km、山岳トンネル工法は6,920TOE/km、シールド工法は10,340TOE/kmという値が得られた。また、CO₂排出量について、開削工法は5,580T-C/km、山岳トンネル工法は7,540T-C/km、シールド工法は9,620T-C/kmである。このように、工事工法によって、値に大きな差が見られた。現実における工法の選択は、地形・地質、建設予定地の土地利用状況、工期、予算などの要素によって決定されており、エネルギー消費量などの環境負荷はほとんど考慮されていないのが現状である。ただし、本分析の結果から見ると、同じ工事距離で見ると、建設工事単価が大きいほど環境負荷は大きい傾向にある。工事費から見た設計の合理化は、環境負荷の削減にとっても好ましいと言える。

社会資本の整備にあたっては、建設段階の環境負荷評価を行うとともに、その経済性や安全性などを考慮する必要があると思われる。しかし地下鉄の場合、建設に大きなエネルギーが必要ではあるが、その完成後は運転エネルギーが重要となる。累積エネルギー消費量で比較すると、福岡市地下鉄の場合、開業14年で、運転エネルギーが建設エネルギーを上回った。建設に投入されるイニシャルエネルギーは大きい¹⁾が、その量は運転エネルギーの14年分でしかないという見方もできる。このように、地下鉄システムだけを見れば、長期的には運転エネルギーの方が大きく、施設の維持保守や利用される車両など運用によるランニングエネルギーの評価も重要な課題である。ただし、その運転エネルギーは、輸送人員・輸送距離当たりで見ても、自動車利用よりはるかに小さいことも重要である。

特に、地下鉄システムの根幹を形成するトンネルは、一度完成させれば相当の長期間にわたって利用可能である。社会資本の整備にはそれなりの環境負荷がともなうが、一度建設したストックからは、その後継続的にサービスを引き出すことができる。交通システムとしての整備効果を考えるためには、本論文で示したような環境負荷も考慮した上で、移動時間短縮や利用料金から見ての利便性や便益、道路整備とセットになった自動車交通との比較検討などの総合的な評価が必要である。

最後に、本研究のためにデータ・資料などをご提供いただいた福岡市交通局計画部計画課の皆様には厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 盛岡 通: 土木建設システムにおけるLCAの考え方と事例, 第4回地球環境シンポジウム講演集, pp.29-34, 1996.
- 2) 谷川寛樹, 松本 亨, 井村秀文: 都市を対象とした環境資源勘定の構築に関する研究, 環境システム研究, Vol.24, pp.442-448, 1996.
- 3) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 森下兼年, 池田秀昭: 下水道システムのライフサイクルアセスメント: LCE及びLC-CO₂による評価, 土木学会論文集, No.552/VII-1, pp.75-84, 1996.
- 4) 中嶋芳紀, 河野幸次, 松本 亨, 井村秀文: 港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究: 福岡市アイランドシティのケーススタディ, 土木学会論文集, No.566/VII-3, pp.35-47, 1997.
- 5) 井村秀文, 中嶋芳紀: 一般廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメントに関する研究, 環境システム研究, Vol.23, pp.261-267, 1995.
- 6) 岩淵 省, 中嶋芳紀, 松本 亨, 井村秀文: 道路整備のライフサイクルアセスメントに関する研究, 土木学会第51回講演概要集, pp.494-495, 1996.
- 7) 井村秀文ら: 地域規模の資源・エネルギー収支とマクロ的環境インパクトの定量化手法, 文部省科学研究費重点領域研究「人間地球系」研究報告書B009-E11, pp.75-93, 1996.
- 8) 土木学会 LCA検討小委員会: 土木建設業における環境負荷評価, 平成8年度調査研究報告書, 1997.
- 9) 加藤博和, 林 良嗣, 登 秀樹: 道路構造代替案の地球環境付加に関するライフサイクルの評価手法, 環境システム研究, Vol.24, pp.272-281, 1996.
- 10) 福岡市交通局: 福岡空港線地下鉄明細内訳書.
- 11) 財団法人エネルギー経済研究所: エネルギー・経済統計要覧, 財団法人エネルギーセンター, 1996.
- 12) 建設省建設経済局調査情報課: 昭和60年建設部門分析用産業連関表, 建設物価調査会, 1989.
- 13) 福岡市交通局: 福岡市高速鉄道事業概要, 昭和57年~平成8年.
- 14) 福岡市交通局: 電気量と電気料金の経緯資料.
- 15) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課: 総合エネルギー統計, 通商産業研究社, 1995.
- 16) 銭谷賢治, 井村秀文: 建設にともなう環境負荷の定量化に関する研究, 環境システム研究, Vol.22, p.147-153, 1994.
- 17) 酒井寛二, 漆崎昇: 建設業の資源消費解析と環境負荷の推定, 環境情報科学, Vol.21, No.2, p.133, 1992.