

土木工事の施工に伴う各種環境負荷の貨幣価値による統合評価
— トンネル工事を事例として —

Integrated Evaluation of Public Works in Terms of Environment by Monetary Unit
— Analysis on Construction of Tunnel as a Case Study —

阿部俊* 前田剛志* 近藤光男* 廣瀬義伸**
Suguru ABE*, Takeshi MAEDA*, Akio KONDO* and Yoshinobu HIROSE**

ABSTRACT; This study aims to evaluate public works in terms of the environment based on the Life Cycle Assessment (LCA). The environmental load is measured by monetary units by application of the Contingent Valuation Method (CVM) and the concept of return value. In the analysis, the construction of tunnel is taken as a case study. As a result, the amount of CO₂ generating in the process of production of materials for the tunnel is much bigger than in the construction site. The values of NO_x, noise and vibration pollution generating at the construction site are also measured. The values are not big because the area where the construction is taken place is not urbanized.

KEYWORD; Evaluation, Environment, Construction of Public Works, Life Cycle Assessment (LCA), Contingent Valuation Method (CVM)

1. はじめに

国民の生活水準の向上に伴い、環境に対する負荷が増大しており、現在のままでは持続可能な発展は望めない状況になっている。これ以上の環境負荷の増大を防止するためには第一段階として、産業活動や生活活動全般においてどの分野がどの程度の環境負荷を与えているのかを明確にすることが重要である。そのための一手法として、ライフサイクルアセスメント(LCA)の概念がある。ところが、インフラを対象としたLCAにおいては、各種環境負荷の統合評価に関する研究事例がほとんどないのが現状である。地球温暖化の負荷測定においては、科学技術庁エネルギー資源部などによって二酸化炭素(CO₂)の環境悪化寄与度を基準とした重み付けが試みられているが、未だ統一的な尺度がなく、しかも、大気汚染、振動、騒音などの全く系統の異なる環境負荷について総合的な計量・評価をおこなうこともできていない。

既往の研究におけるLCAの評価手法としては、特に環境負荷の大きい社会資本整備事業を対象とした場合、CO₂の排出量とエネルギー消費量に着目した研究が多い^{1), 2), 3)}。本研究では、実際に施工されている社会資本整備事業を対象として環境に与える影響を総合的に評価することを目的とした分析をおこなう。具体的には現在施工中のトンネル工事をケーススタディとして取り上げ、環境負荷に対してLCA、仮想市場法(CVM)や帰属価格の概念などを用いながら、大気汚染、振動、騒音といった負荷を貨幣価値で表現することを試みる。本研究の特徴としては、以下の2点をあげることができる。

- 1) LCAの概念を実際に施工している大型公共工事(トンネル工事)に適用していること(評価は供用開始前までとし、その後の維持・管理などは評価範囲外とした)

* 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻

Department of Ecosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokushima

** 徳島大学工学部建設工学科

Department of Civil Engineering, The University of Tokushima

- 2) 材料製造時、工事施工時を通して発生する CO₂ と工事用車両が通行することによって発生する大気汚染、振動、騒音など、まったく異なった環境負荷をすべて貨幣価値に換算し、一括表現していること

2. 工事に伴う環境負荷の推定

2.1 評価の範囲と工事の概要

今回評価の対象とする工事の概要は表－1のとおりであり、その評価範囲は工事の施工に関わる材料の製造時から施工完了時までとする。なお、材料生産時の固定資本形成に関わる排出負荷はデータベースの性格上、含まないこととする。また工事用車両が通行する道路沿線は山間部であるが、住宅や商店などが混在しており、工事施工により環境負荷を与えられると推定される地域は約 32,000m²、世帯数 307 件、住民数は 680 人程度である。

表－1 工事概略

工 事 名	Aトンネル工事	
工事場所	兵庫県神戸市	
工 期	33 ヶ月	
施工金額	3,500 百万円	
施工延長	約 1,800 m	
主要工種	トンネル掘削工	148,000m ³
	吹付コンクリート工	41,000m ³
	覆工コンクリート工	12,900m ³
	インバートコンクリート工	19,800m ³
	ずり処分工	148,000m ³

2.2 インベントリ分析

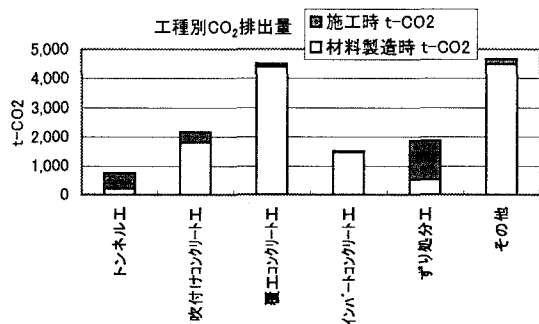
インベントリ分析とは ISO14000 によると、「対象とする製品システムに対するライフサイクル全体を通しての入力および出力のまとめ、ならびに定量化をおこなうライフサイクルアセスメントの構成段階」と定義されており、その手法はおもに積み上げ計算による方法と産業連関分析による方法があるが、本研究では前者を採用した。これら入出力の明細表を作る際の根拠には、工事設計書、建設物価版⁴⁾、および産業環境管理協会により集計されたデータベース⁵⁾などを使用し、データベースにない材料についてはそれに類似したものを代用した。

2.3 対象負荷の設定

本研究では地球規模の環境負荷として材料製造時、工事施工時に発生する二酸化炭素を、また地域環境に影響を与える負荷として、工事用車両が走行することによって発生する大気汚染、振動、騒音を評価することにした。それらを推計するためのデータとして、インベントリ分析により CO₂ の発生量および工事用車両数の推計をおこなう。

2.4 インベントリ分析の結果

インベントリ分析の結果を図－1 および表－2 に示す。近年、土木工事施工時に発生する CO₂ のうち、材料製造時に発生するものが大きな割合を占めるという見解が一般的⁶⁾であるが、本工事でも確認することができた。具体的に見ると、材料製造時に排出される CO₂ の量は、施工時に比べ 5 倍以上となっている。作業工種別にみると吹付けコンクリート工、



図－1 工種別の CO₂ 発生量

覆工コンクリート工、インパートコンクリート工などで使用する材料の製造時に発生する CO₂ が非常に高い比率となっている。また、ずり処分工において施工時の CO₂ の排出量が高い比率を占めるのは、トラックの稼働が高いためであることがわかる。インベントリ分析の結果から、CO₂ 排出量の削減をおこなうには、施工時の対応よりも、製造時の対応の方が、より効果的であることがわかる。

表－2 インベントリ分析の結果

材料製造時に発生する CO ₂		12, 905t-CO ₂
施工時に発生する CO ₂		2, 527t-CO ₂
工事用車両	10t ダンプトラック	43, 165 台
	4t ダンプトラック	382 台
	2t ダンプトラック	51 台

2.5 工事現場周辺環境負荷の推定⁷⁾

本研究で対象とした工事では、工事施工時および資機材搬出入時に多くの車両が工事現場周辺の生活道路を通行することが設計等を検討することによって明らかとなった。そこで、工事現場近隣の土地利用状況などを鑑み、車両の通行によって発生する大気汚染、および騒音、振動を主たる環境負荷要素とし、これらの負荷の量を推定した。

(1) 大気汚染

1) 予測項目

予測および評価の対象は、窒素酸化物 (NO_x) とする。

2) 対象区域の設定

対象区域は、工事用車両が通行する道路からの濃度の寄与分が、年平均値においてバックグラウンド濃度に対して一定以上の割合となる範囲とする。評価の対象であるNO_xのバックグラウンド濃度を通常0.010～0.025ppm程度と考え、さらに当該道路からのNO_xの寄与濃度が年平均値で0.001～0.003ppm以上、またバックグラウンド濃度の1割程度以上であることなどを考慮し、道路中心から0～160mの範囲を対象としている。

3) 大気汚染の予測式⁷⁾

大気汚染の発生を予測するモデル式はいくつか発表されているが、本研究では拡散計算による方法の中でパフモデルを採用した。なお、予測式には拡散幅が拡散時間の一次関数であると仮定して時間積分をおこなう簡易パフ式を用いた。予測に用いた拡散幅の計算式を式(1)に、時間別平均排出量の計算式を式(2)に、拡散式による基準濃度の計算方法を式(3)から式(5)に示す。

(a) 拡散幅の設定に相当する時間

$$t_0 = \frac{W}{2\alpha} \tag{1}$$

t_0 : 初期拡散幅に相当する時間 W : 車道幅員 (m)

α : 拡散幅に関する係数

(b) 時間別平均排出量の計算

$$Q_t = V_w \times \frac{1}{3600} \times \frac{1}{1000} \times \sum_{i=1}^2 (E_i \times N_{it}) \tag{2}$$

Q_t : 時間別平均排出量 (ml/s) E_i : 車種別排出係数 (g/km・台)

N_{it} : 車種別時間別交通量 V_w : 大気換算係数 (ml/g)

(c) 拡散式による基準濃度の計算

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \alpha^2 \gamma} \left[\frac{1 - \exp\left[-\frac{l}{l_0^2}\right]}{2l} + \frac{1 - \exp\left[-\frac{m}{l_0^2}\right]}{2m} \right] \quad (3)$$

$$l = \frac{1}{2} \left[\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2} + \frac{(z-H)^2}{\gamma^2} \right] \quad (4)$$

$$m = \left[\frac{x^2 + y^2}{\alpha^2} + \frac{(z+H)^2}{\gamma^2} \right] \quad (5)$$

Q : 排出強度 (cc/s)

$C(x, y, z)$: (x, y, z) 地点における濃度 (ppm)

H : 排出源の高さ (m)

α, γ : 拡散幅に関する係数

$\alpha=0.3, \gamma=0.18$ (昼間), 0.09 (夜間)

ただし、昼間は午前7時から午後7時までを、夜間は午後7時から午前7時までとする。

4) 予測結果

図-2は道路中心からの距離別の NO_x 濃度を表している。本研究では予測式によって求められた NO_x 濃度にバックグラウンド濃度を加算した値を使った。ここで用いたバックグラウンド濃度はこの付近での大気測定結果に基づいており、 0.016ppm を採用した⁹⁾。

この予測結果をみると、周辺環境に影響があるのは道路の中心から約70mまでの範囲であると考えられる。また、予測された値については道路から10m離れた地点での NO_2 濃度は一般車両と工事用車両の合計で 0.0213ppm 、一般車両のみで 0.0188ppm となっている。基準として、 0.02ppm を超えると息切れがする程度のレベルとされており、工事用車両が走行することにより、道路から15m付近までは人体に対して、わずかであるが健康面に影響があることが推察される。

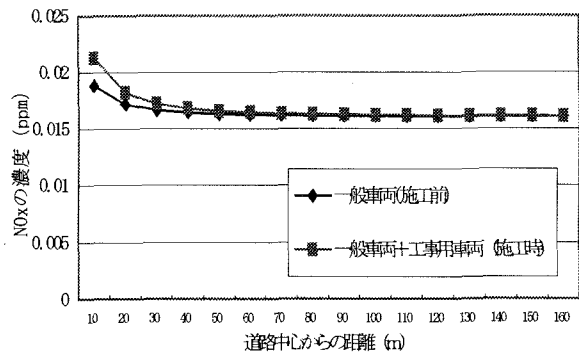


図-2 NO_x 濃度の予測結果

(2) 騒音

1) 予測項目

予測項目は、「騒音規制法」(昭和49年法律第98号) および「騒音に係わる環境基準について」(昭和46年5月25日、閣議決定)において、自動車交通騒音の評価は原則として中央値とするとされていることを勘案し、騒音レベルの中央値(L_{50})とする。

2) 騒音の予測式¹⁰⁾

騒音予測の基本的な計算方法は、波動方程式を解く方法と音をエネルギーの面から扱う方法に大別される。

ここでは、計算の簡便性および実用性を考え、後者の方法を採用することとする。本研究における騒音予測方法は、平均車頭間隔の計算式を式(6)に、平均パワーレベルの設定の計算式については式(7)と式(8)に、自動車交通騒音の中央値の算出式については式(9)に示す。

(a) 平均車頭間隔の計算

$$d = 1000V / N \quad (6)$$

d : 平均車頭間隔 (m)

V : 平均走行速度 (km/h)

N : 平均時間交通量 (台/時)

(b) 平均パワーレベルの設定の計算

$$L_w = 86 + 0.2V + 10 \log_{10} (a_1 + a_2) \quad (7)$$

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (8)$$

L_w : 平均パワーレベル (db)

a_1 : 小型車混入率

a_2 : 大型車混入率

(c) 自動車交通騒音の中央値の算出

$$L_{50i} = L_w - 8 - 20 \log_{10} l + 10 \log_{10} \left(\pi \frac{l}{d} \tanh 2\pi \frac{l}{d} \right) + \alpha_i \quad (9)$$

L_{50i} : 予測点*i*における自動車交通騒音の中央値 (db)

L_w : 1台の車から発生する平均パワーレベル (db)

α_i : 種々の原因による補正值

d : 平均車頭間距離 (m)

l : 音源から受音点までの距離 (m)

式(9)の右辺第1項～第4項までは、一般に一系列等間隔、等パワーレベルといわれる音源モデルから求められる理論式である。

3) 対象区域の設定

対象区域は、生活環境保全の対象となる住居、病院、学校の位置、土地利用状況および影響の程度などを勘案して設定するが、予測式の制約条件により適用範囲内を0～160mとする。

4) 予測結果

図-3 は道路中心からの距離別の騒音レベルを表している。このグラフを見ると予測したすべての距離において工事用車両の走行による影響が生じていることがわかる。道路付近では、工事用車両が走行することによって約18db、道路からかなり離れた地点でも、10dbほどの変化が生じている。最大値をみると一般車両のみでも41.99db、一般車両と工事用車両の合計では59.94db、となっている。これはそれぞれ、安眠に影響を及ぼすレベル、著しい不快感を感じるレベルに相当し、かなり騒音レベルが高い状況であるといえる。

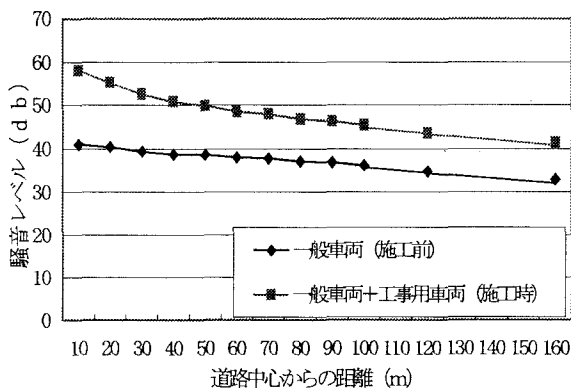


図-3 騒音予測結果

(3) 振動

1) 予測項目

予測式は、時間とともにその値が不規則かつ大幅に変動する。このため「振動規制法」(昭和51年法律第64号)において、その評価は、地盤振動に鉛直振動感覚補正をおこなった振動レベルの80%レンジの上端値 L_{10} をもっておこなうとされている。したがって、予測項目は振動レベルの80%の上端値とする。

2) 対象区域の設定

予測の対象とする区域は、周辺に住居があり振動による影響を受けると予想される範囲とする。道路直角方向の範囲については振動レベルが次第に小さくなることを考慮して設定する。

3) 振動の予測式¹¹⁾

道路交通振動の予測については、社団法人日本道路協会で算出している予測式を使用する。予測式は、平面道路、盛土道路、切土道路、掘割道路および高架道路の予測点およびそれ以遠における振動レベルを予測するものである。道路交通による振動に影響を及ぼす主要な因子としては、交通量、車線数、車速、地盤条件、道路構造、および道路からの距離を考慮している。500秒間の1車線あたりの等価交通量の計算式を式(10)に、振動レベルの計算法を式(11)に、距離減衰による補正值 α_l の算出については式(12)、式(13)に示す。

(a) 500 秒間の 1 車線あたりの等価交通量 (台/500 秒/車線) の計算

$$Q^* = \frac{500}{3600} \times \frac{l}{M} \times (Q_1 + 12 Q_2) \quad (10)$$

Q^* : 500 秒間の 1 車線あたりの等価交通量 (台/500 秒/車線)

l : 予測基準点から予測地点までの距離 (m)

Q_1 : 小型車時間交通量 (台/時)

Q_2 : 大型車時間交通量 (台/時)

M : 上下車線の合計車線数

(b) 振動レベルの計算

$$L_{10}' = a \log_{10} (\log_{10} Q^*) + b \log_{10} V + c \log_{10} M + d + \alpha_f - \alpha_l \quad (11)$$

L_{10} : 振動レベル 80%レンジの上端予測値 (db)

V : 平均走行速度 (km/h)

α_f : 地盤卓越振動数による補正值

a, b, c, d : 定数

(c) 距離減衰による補正值 α_l の算出

$$\alpha_l = \beta \frac{\log_{10} (l/5 + 1)}{\log_{10} 2} \quad (12)$$

$$\beta = 0.119 \times L_{10} - 3.2 \quad (13)$$

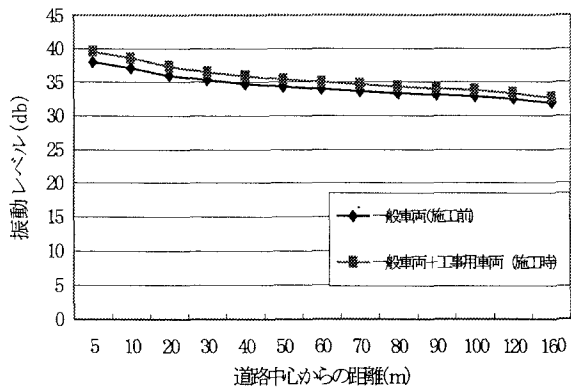
4) 予測結果

図-4 は道路中心からの距離別の振動レベルを表している。このグラフをみると道路からの距離が離れて

も施工前と施工時との振動レベルの差がほぼ一定であることがわかる。また、大気汚染や騒音と比べると道路からの距離による振動レベルの変化量が少ない。最大値をみると一般車両と工事用車両の合計で 39.55db、となっているが値としてはどちらも、付近に重大な影響を及ぼすレベルではないと考えられる。

3. 環境負荷の貨幣価値換算

さまざまな単位で表現されている環境負荷を貨幣価値に統一して計測することにより、代替工法の妥当性の比較・検討を容易にすることを目的として貨幣価値換算をおこなった。CO₂については帰属価格の概念¹²⁾、その他の環境負荷については仮想市場法¹³⁾を用いたアンケートの分析結果に基づいて推計した支払意志額より、各々の環境負荷を貨幣価値に換算する。



図－4 振動予測結果

3.1 帰属価格による換算

ここでは、帰属価格の概念を用いて材料製造時および工事施工時に排出される CO₂の量を貨幣価値に換算した。帰属価格とは、現時点において大気中の CO₂の蓄積量が増えたときに、将来の世代にどれだけの被害を与えるかということを推計し、適切な割引率によって、その現在価値に換算した価格のことである。なお、この帰属価格については、日本における CO₂1 トンあたりの帰属価格は 190 ドルと試算されている。¹⁴⁾これを 1 ドルあたりの円の換算レートを 110 円として円に換算すると、CO₂1 トンあたり 20,900 円になる。これに基づいて表－2 に示した CO₂についての貨幣価値を求める。

[材料製造時に排出する CO₂の帰属価格]

12,905 (トン) × 20,900 (円／トン) = 269,714,500 (円)

[工事施工時に排出する CO₂の帰属価格]

2,527 (トン) × 20,900 (円／トン) = 52,814,300 (円)

以上の計算結果からわかるように、トンネル工事から排出される CO₂の帰属価格の合計は約 2 億 7 千万円と、トンネル工事の施工金額 35 億円と比べて無視できない金額となっている。

3.2 工事用車両により発生する負荷の貨幣価値換算

仮想市場法を用いたアンケート結果に基づき、工事用車両により悪化した環境を工事開始前の状態にするために支払っても良いと考える支払意志額を推計し、それをもって環境の価値とする。

(1) アンケート内容

アンケートは仮想市場法の手法を用い、支払い意志額は仮想市場法の中でも最も回答しやすく、またバイアスの少ない 2 項選択方式を採用した。内容は環境が破壊されたときの状況を回答者に説明し、その環境を改善するために最大支払っても

表－3 身近な尺度への置き換え（騒音の例）

騒音レベル	具体的な影響事項
～35db	影響なし
35db～45db	安眠に影響を及ぼす
45db～55db	会話に影響を及ぼす
55db～	著しい不快感を感じる

良い金額を尋ねていくことにより、環境の価値の評価をおこなった。ここで環境のレベルは数値では回答者が理解するのが困難であるので、表-3 のように身近な尺度に置き換え表現した。また、状況説明や設問が適切でないとバイアスが生じるため、事前にプレテストを実施し、適切に意図が伝わるように配慮した。

(2) アンケート実施時期および実施場所

アンケートは平成 11 年 10 月 1 日兵庫県神戸市で 2,000 部を直接配布、回収は郵送とした。回収率は約 21%であり、回答について矛盾があるものを除外した回答者の属性を表-4 に示す。

(3) 支払い意志額の推計¹⁵⁾

回収したアンケートは以下の手順で分析をおこない、影響を受ける住民 1 人 1 ヶ月あたりの支払い意志額の推計をおこなった。

- ① 各設問において提示した支払い意志額に対する、賛成、反対の数を集計し、支払いの意志がある人の割合（以下、許諾率という）の算出
- ② 設問ごとに横軸を提示額、縦軸を許諾率としたグラフを作成し、①の値をプロットし、近似曲線の推定
- ③ ②で求めた近似曲線を積分することにより、各設問の支払意志額の推定
- ④環境負荷ごとに、横軸に環境の改善幅、縦軸に支払い意志額としたグラフを作成した後、③で求められた値をプロットし、近似曲線の推定

以上の手順により得られた環境改善幅と支払い意志額の関係を大気汚染を例として図-5 に示す。

(4) 各環境負荷の貨幣価値換算

2.5 で算出した工事現場近隣で発生する環境負荷を推計した結果、および 3.2.3 で推定した住民の支払い意志額曲線を用いて、工事用車両によって発生する負荷を貨幣価値に換算した。その手順を以下に示す。

- ① 各環境負荷について 2.5 で影響があると推定された地域に住む住民の分布とその地域での環境の変化の度合いの算出
- ② 環境改善幅と支払い意志額の関係を表わす関数を用いてその地域の住民の支払い意志額の算出

(5) 分析結果

環境の価値を求めた結果を表-5 に示す。この表より、合計では約 4 千 6 百万円となり、この金額以内で環境負荷を低減するための有効があればその対策を施す価値があるといえる。

表-4 回答者属性 【単位：人（%）】

性別	男性	202 (57.06)	年齢	10 歳代	10 (2.82)
	女性	152 (42.94)		20 歳代	94 (26.55)
職業	会社員・公務員	176 (49.72)		30 歳代	54 (15.25)
	自営業	21 (5.93)		40 歳代	72 (20.34)
	学生	26 (7.34)		50 歳代	57 (16.10)
	主婦	58 (16.38)		60 歳代	43 (12.15)
	無職	35 (9.89)		70 歳以上	24 (6.78)

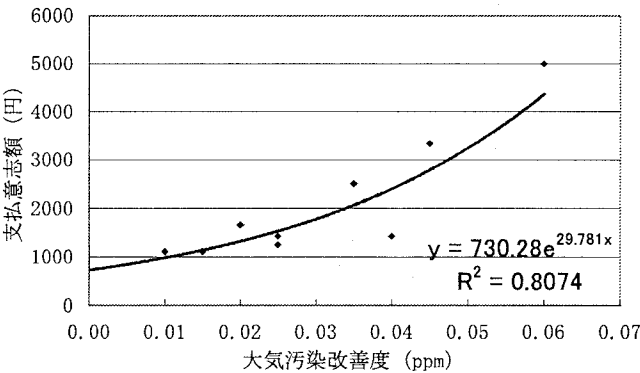


図-5 支払い意志額曲線（例：大気汚染）

表－5 工事用車両の走行に伴って生じる環境負荷の価値【単位：千円】

大気汚染	16,550
騒音	14,408
振動	15,202
合計	46,161

4. 結語

本研究では、土木工事の施工に伴って発生する環境負荷を帰属価格の概念やCVM アンケートの分析結果などを導入することによって貨幣価値を用いて計測する方法を提示し、実際のトンネル工事を取り上げてケーススタディをおこなった。本研究で提示したアプローチは、代替工法などがある場合の比較・検討の手段の一つとして簡易に活用が期待できるほか、工事請負金額による概算環境負荷量の把握に活用ができると考える。

環境価値の計測については、今回とりあげたトンネル工事を例にすると、対象工事の施工によって発生するCO₂は約323百万円（工事用車両が走行することによって排出する分は除く）、工事用車両によって発生する環境負荷は約46百万円、合計で約369百万円となった。この額は工事施工金額の1割近くに相当することがわかり、特に材料製造時に発生するCO₂がライフサイクル全体から見ても大きな割合を占めることを確認することができた。本研究で取り上げたトンネル工事は比較的人口密度の低い山間部での工事であり、これが人口密度の高い都市圏などでおこなわれる工事であれば、工事用車両によって発生する環境負荷の価値は大きく評価されると考えられる。今後は山間部、都市部といった様々な状況でのケーススタディを実施するとともに今回の研究で計測の対象外としたSO_x、CODやBODといった項目を付け加えることにより、より広い範囲で環境負荷を評価することが課題である。

【参考文献】

- 1) 加藤博和, 林良嗣, 登秀樹: 道路構造代替案の環境負荷に関するライフサイクル的評価手法, 環境システム研究 Vol. 24, pp282～293, 1996
- 2) 岩渕省, 四宮明宣, 中嶋芳紀, 松本亨, 井村秀文: 地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究, 環境システム研究 Vol. 25, pp209～216, 1997
- 3) 坂井寛二, 漆崎昇, 中原智哉: 建設資材の製造時の二酸化炭素排出量経時変化と土木分野への影響, 環境システム研究 Vol. 25, 525～532, 1997
- 4) (財)建設物価調査会: 建設物価, (財)建設物価調査会, 1999
- 5) LCA実務入門編集委員会: LCA実務入門, 丸善, 1998
- 6) 前出2)
- 7) (社)日本道路協会: 道路環境整備マニュアル, 丸善, 1989
- 8) 前出7), pp31～84, 1989
- 9) 阪神高速道路公団: 北神戸線(東伸部)環境計測業務報告書, 1997
- 10) 前出7), pp103～137
- 11) 前出7), pp141～168
- 12) 宇沢弘文: 地球温暖化の経済学, 岩波書店, pp1～9, pp135～163, 1995
- 13) 栗田浩一: 公共事業と環境の価値 CVMガイドブック, 築地書館, 1997
- 14) 前出12)
- 15) 前出13)