

LCA を考慮した社会資本整備による総合的環境評価に関する研究

INTEGRATION OF LCA INTO ENVIRONMENTAL
ASSESSMENT OF CIVIL INFRASTRUCTURES

中嶋芳紀*・岩淵 省*・松本 亨*・井村秀文*

Yoshinori Nakajima*, Akira IWABUCHI*, Tohru MATSUMOTO* and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT ; This paper presents on attempt of integration LCA into comprehensive assessment of economic benefit and environmental load pertinent to the construction and maintenance of civil infrastructures. Energy consumption and carbon dioxide emission induced by unit monetary demand of consumption work projects are calculated, using national IO-Tables and other statistical data. Then, the transportation infrastructures in Japan are taken up, and the total of the life cycle environmental load (LCE and LC-CO₂) for the past 30 years (from 1961 to 1993) is estimated. The road system accounts for 50 to 70 per cent of the total environmental load related to transportation infrastructures, while the share of air transport significantly increased since 1970s. Finally, the role played by the improved transportation infrastructures in the national economy is discussed.

KEYWORDS; life cycle assessment (LCA), environmental assessment, energy and economics, civil infrastructures, life cycle energy

1. はじめに

下水道、港湾、道路など、個々のインフラ施設の整備が誘発するエネルギー消費量や二酸化炭素排出量を評価指標としたライフサイクルアセスメント(LCA)については、最近活発に研究が展開され始めている。個々の構造物、その建設技術、あるいは構造物の総体によって成立する都市システム、社会システム等が地球環境的にどのようなインパクトを与えるかについて、LCAを行うことは大きな社会的要請となっている。社会資本施設のLCAは、大規模で複合的な施設であることや施設の供用期間が長いことなど、製品のLCAとは特性を異にする面がある。本研究では、社会資本施設を対象としたLCAをILCA (Infrastructure Life Cycle Assessment)と呼ぶ。

従来行われてきたILCAによる環境評価については、個々の施設の建設、運用により誘発される環境負荷評価といった、個別因子ごとのインベントリ分析にとどまっているのが現状である。しかし、個々の環境負荷評価だけでは不十分な面もある。たとえば、ある地域の施設Aの建設、運用によって環境負荷が発生するが、その結果間接的に他の地域の施設Bからの環境負荷の発生が低減するといっ

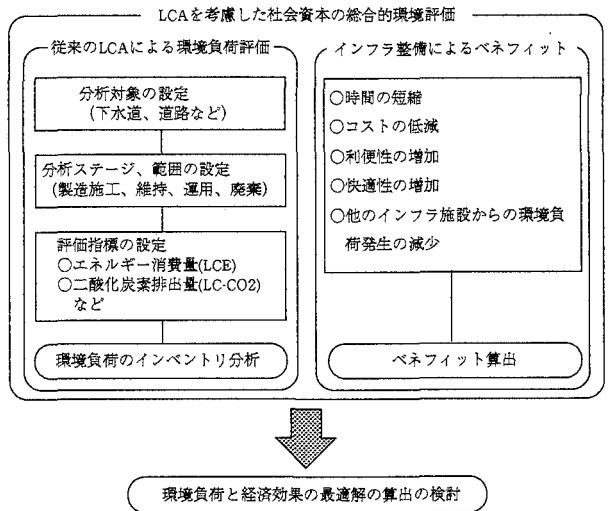


図1 LCA を考慮した総合的環境評価

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

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

たことが考えられる。また、施設の建設によって、その施設が存在しなかった場合に比べてさまざまなベネフィット（経済成長への寄与、時間の短縮、コストダウンなど）が発生するという経済効果も大きい。このように、ILCAを行う際には、製品のLCAとは異なり、社会資本整備の特徴を考慮し、環境評価の枠組みを設定する必要がある（図1）。すなわち、社会資本整備に関する環境負荷評価では、社会資本を構成する各種構造物、建設技術、構造物の複合によって構成されるインフラ及び都市システム、社会システムの全体を含めた環境負荷のトータルバランスによって評価する必要がある。

本研究では、全国的に整備されたインフラシステムとして、全国交通・物流システムをケーススタディ対象として、環境負荷と経済効果の両者を考慮した総合的な環境評価を試みる。本研究における評価の枠組みを図2に示す。環境負荷の評価指標としては、交通・物流システム建設、維持管理の際のエネルギー消費量(LCE)、二酸化炭素排出量(LC-CO₂)を指標とする。さらに、交通・物流システムの整備にともなう輸送量の変化から、交通整備により輸送量の増加による実質GDPへの寄与を算出した上で、環境負荷と経済効果についての最適解算方法についての検討を行う。

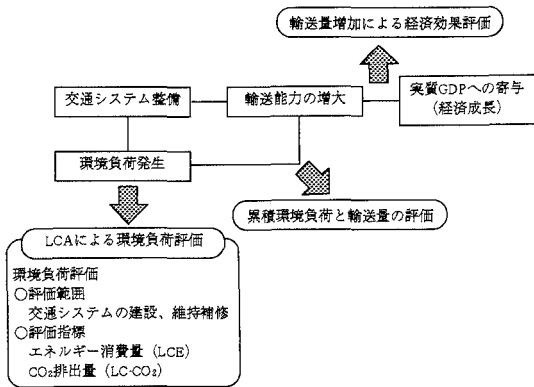


図2 本研究の枠組み

2. 交通システム整備による環境負荷

2. 1 分析手法

現在実行されているILCAの代表的な手法としては、積み上げ計算による方法（積み上げ法）と産業連関分析による方法がある。下水道、港湾といった具体的な構造物についての分析においては、材料レベルでのミクロなデータに、個々の工種、工法、運用に関する施設固有のデータを加えて、それら全体を積み上げることが必要となる。しかし、評価に必要な全データを材料や工事ごとに個々に得ることは実際上困難であり、ある部分においては産業連関分析で得られたマクロなデータを用いて2つの方法を併用して使用することが多い。

本研究では、陸上（道路、鉄道）・海上（港湾）・航空（空港）全体にわたる交通システムの建設・維持補修への1961年からの投入金額^{1) 2)}、1985年建設部門分析用産業連関表³⁾から得られた原単位より、トータルでの環境負荷発生量を算出する。なお、各施設整備については公共工事のみを対象とし、原則として民間土木工事は評価対象としていないが、鉄道のみ民間土木工事も評価対象とした。これは、鉄道以外の施設は民間工事の占める割合が極めて小さいが、鉄道については民間土木工事の占める割合が比較的高いためである。このため民間土木工事を対象から除外すると、鉄道整備による環境負荷発生量が過小評価になるためである。本研究における交通・物流システム整備における環境負荷の算出フローを図3に示す。

原単位は各工事ごとに異なるが、年によっても異なる。ここで、環境負荷を算出する際の原単位の採用にあたっては以下の2通りの考え⁴⁾がある。第一の方法は、各年ごとに算出された原単位を用いる方法である。第二の方法は、基準年の原単位をそのまま用いる方法である。ただし、いずれの方法を用いる場合にも、建設工事金額についてはデフレータにより別途補正する。

第一の方法は、現実に発生する環境負荷を評価する上で最適なアプローチであるが、産業連関表は5年おきに

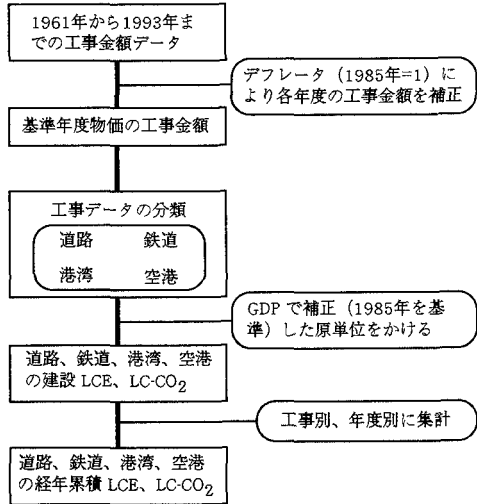


図3 交通・物流システム整備による環境負荷算出フロー図

しか作成されておらず、産業連関表の発行されている年についてしか原単位が求められない等、データ上の制約がある。第二の方法は、現存の社会資本を現在の技術で建設する場合の環境負荷を評価することができる。現実の技術の進歩を考慮すると、第二の方法による値は、第一の方法による値よりも小さく評価される。しかし、本研究のように過去30年にわたって時系列で評価を行い、社会資本整備の累積環境負荷を評価する場合には現実にはそぐわない面がある。原単位は技術革新により年々小さくなる傾向があり、また物価上昇による金額価値の変化も考慮する必要がある。そのため、基準年の原単位をそのまま採用すると、過去の建設、維持補修による環境負荷が過小評価されるおそれがある。したがって本研究では、1985年の建設部門分析用産業連関表の一般分類表（46部門）から得られた原単位を基準とし、各年度のGDPデフレーターにより補正した原単位を用いた。また、建設工事金額についても、1985年を基準年とするデフレーター（建設省所管土木工事費指数）により別途補正を行った。その上で、各工事を道路、鉄道、港湾、空港の工事、年度ごとに分類し、環境負荷を算出する。

2. 2 分析結果

1961年度から1993年度まで、道路、鉄道、港湾、空港の各施設整備に投入された金額（デフレーターで補正）と1985年建設部門分析用産業連関表から得られた原単位（各年度のGDPで補正）より、各年度のLCE、LC-CO₂を算出した（図4、図5）。また、各施設整備に投入された金額は新規施設建設だけでなく、維持補修も含んでいる。

時系列で見ると、1960年代から1970年代前半にかけて、交通・物流システム整備によるLCE、LC-CO₂が大きく、それ以降の年は1年あたりのLCE、LC-CO₂は小さくなっている。これは、1970年ごろまではGDPに占めるインフラ整備の比率が高く、また原単位も高いためである。

また、交通システム整備による環境負荷では、道路整備によるものが最も大きく、年度により多少のばらつきはあるものの、LCE、LC-CO₂ともに、約60～70%を占めている。鉄道については、1980年代に入ってから減少している。1970年度以降から、空港整備による環境負荷が増加している。

また、各施設ごとの累積LCE、LC-CO₂を図6に示す。

2. 3 環境負荷と輸送量の相関

1961年から1993年までの累積LCE、累積LC-CO₂と、1961年から1993年までの各年ごとの道路、鉄道、船舶、航空による貨物輸送量、旅客輸送量の変化⁵⁾の相関を検討する。例として、図7に累積LC-CO₂と貨物輸送量、図8に累積

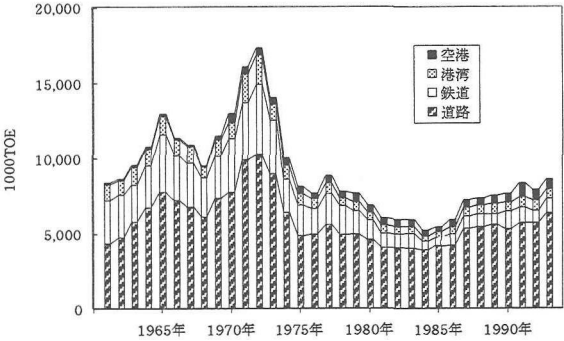


図4 各年の交通・物流システム整備によるLCE

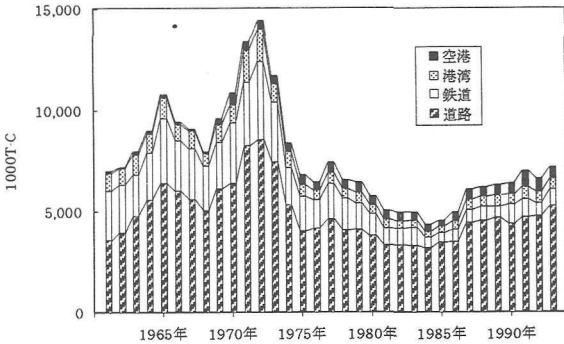


図5 各年の交通・物流システム整備によるLC-CO₂

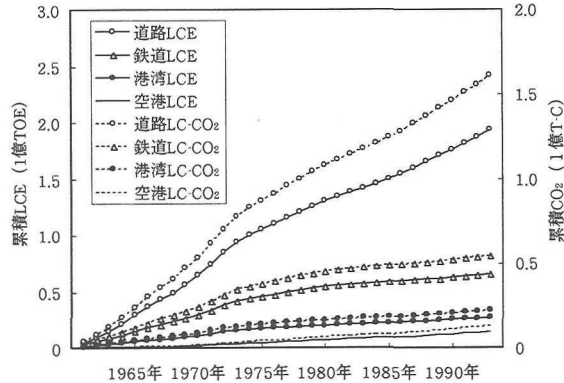


図6 交通システム整備による累積LCE、LC-CO₂

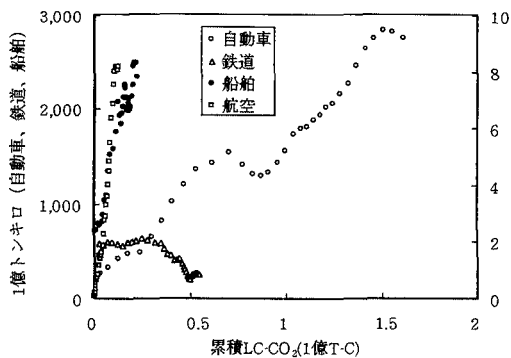


図7 累積LC-CO₂と輸送機関別貨物輸送量

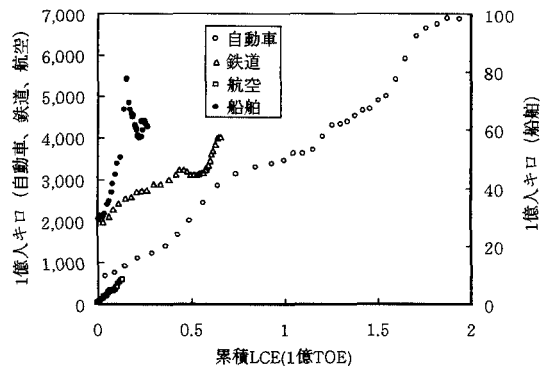


図8 累積LCEと輸送機関別旅客輸送量

表2 各輸送機関累積LCE・LC-CO₂と貨物・旅客輸送量の重回帰分析結果

	累積LCE-旅客輸送量 Y:旅客輸送量 (人キロ) X:累積LCE (TOE)	累積LC-CO ₂ -旅客輸送量 Y:旅客輸送量 (人キロ) X:累積LC-CO ₂ (T-C)	累積LCE-貨物輸送量 Y:貨物輸送量 (トンキロ) X:累積LCE (TOE)	累積LC-CO ₂ -貨物輸送量 Y:貨物輸送量 (トンキロ) X:累積LC-CO ₂ (T-C)
自動車	$Y=3262.32X+3.24 \times 10^{10}$ $R^2=0.9762$	$Y=3925.28X+3.24 \times 10^{10}$ $R^2=0.9762$	$Y=1297.81X+2.08 \times 10^{10}$ $R^2=0.9485$	$Y=1561.56X+2.08 \times 10^{10}$ $R^2=0.9485$
鉄道	$Y=2423.09X+2.07 \times 10^{11}$ $R^2=0.8648$	$Y=2906.99X+2.07 \times 10^{11}$ $R^2=0.8648$	$Y=-685.00X+7.20 \times 10^{10}$ $R^2=0.7506$	$Y=-821.79X+7.20 \times 10^{10}$ $R^2=0.7506$
船舶	$Y=138.19X+3.21 \times 10^9$ $R^2=0.6139$	$Y=166.79X+3.21 \times 10^9$ $R^2=0.6139$	$Y=7085.52X+6.06 \times 10^9$ $R^2=0.9296$	$Y=8551.83X+6.06 \times 10^9$ $R^2=0.9296$
航空	$Y=4068.17X+4.63 \times 10^8$ $R^2=0.9873$	$Y=4.85.28X+4.63 \times 10^8$ $R^2=0.9873$	$Y=63.60X-6.30 \times 10^8$ $R^2=0.9521$	$Y=68.56X-6.30 \times 10^8$ $R^2=0.9521$

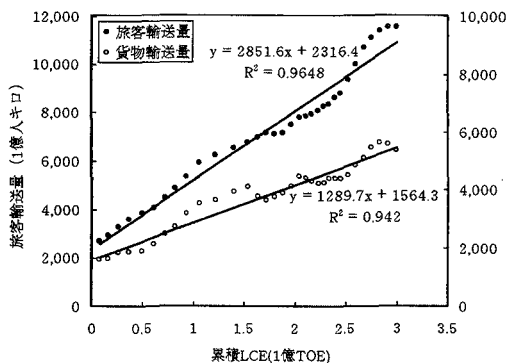


図9 累積LCEと輸送量

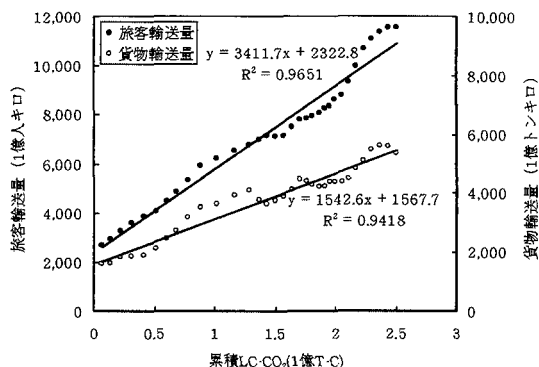


図10 累積LC-CO₂と輸送量

LCEと旅客輸送量の関係を示した。また、表1に、各輸送機関別の施設建設累積LCE、LC-CO₂と貨物・旅客輸送量の回帰式、重相関係数を示す。各交通機関別では、道路、航空輸送が貨物旅客ともに、累積LCE、LC-CO₂と輸送量の相関性が高く、施設整備により輸送量が有効な伸びとなっている。図9、図10に累積負荷量と輸送量の関係を示す。

1970年以降、航空輸送のシェアが増加しているが、空港整備による環境負荷の増加と一致していることが分かる。

3. 交通・物流システム整備による経済効果

3. 1 分析手法

ILCAを行うさいに、交通システムの整備により、1970年代から貨物輸送量、旅客輸送量とも伸びている。これは、我が国の経済成長とも一致する。図11、図12にGDP per capitaと貨物輸送量、旅客輸送量の関係を示す。交通システムの整備により、環境負荷を発生させる反面、このように経済的効果

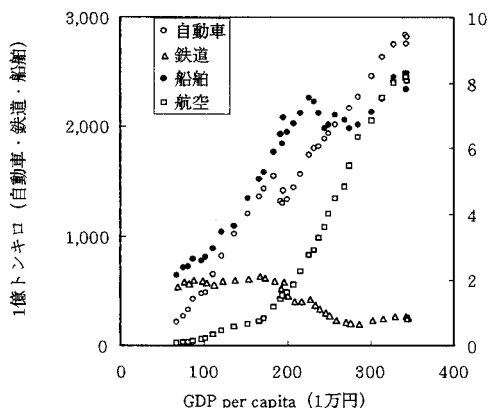


図 11 GDP per capita と貨物輸送量

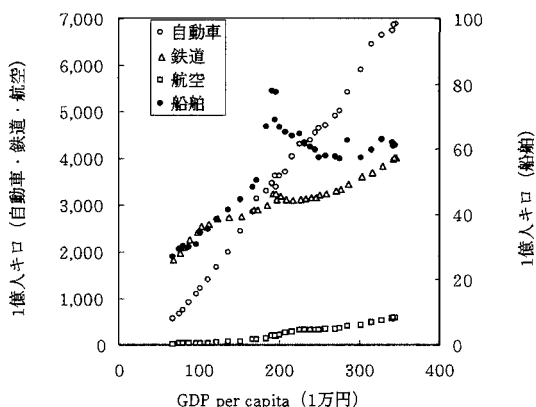


図 12 GDP per capita と旅客輸送量

も大きい。以下では、交通システムの整備による経済への寄与の算出についての検討を行う。

輸送量と経済効果の算出に関しては、輸送量（貨物、旅客）⁶⁾、GDP、総資本、労働力の変化等をデータベース⁷⁾として、コブ・ダグラス型生産関数による解析を行う。

一般に、経済システムからの財・サービスの生産（Y）は、生産要素（K, L, R）の投入量によって以下の式のように決定される⁸⁾。

$$Y = F(K, L, R) \quad (1)$$

我が国の国民総生産Yが、資本K、労働力L、総輸送量Rの3つの生産要素によって決まるとして、式（1）と置く。ここで、生産関数Fとして、コブ・ダグラス型を仮定してみる（ただし、必ずしも一次同時型とはしない）。ここで、Rは国内の物及び人の総輸送量であるが、特に物流に着目した場合、それは国内を流動する物資の総量であり、生産のために投入される物資の総量と正の相関を持つ量である。本研究ではYをわが国の実質国内総生産（GDP）とし、総輸送量Rの消費に伴う輸送に着目し、総輸送量Rを貨物輸送量M、旅客輸送量Nの2つから構成されるベクトル量として考えてみる。実質国内総生産寄与算出のためのパラメータを表2に示す。1969年から1993年までの輸送量、輸送シェアなどのデータを用いて、式（1）の生産関数を以下のように仮定する。

$$Y = F(K, L, M, N) \\ = A K^{\alpha} L^{\beta} M^{\gamma} N^{\delta} \quad (2)$$

ここで、式（2）については、各パラメータの単位がそれぞれ異なるため、1969年度を基準値（ Y_0 , K_0 , L_0 , M_0 , N_0 ）として、以降の年度の数値を基準値で除することにより無次元化した値を用いる。

式（2）の両辺の対数をとると、

$$\ln \frac{Y}{Y_0} = \ln A + \alpha \ln \frac{K}{K_0} + \beta \ln \frac{L}{L_0} + \gamma \ln \frac{M}{M_0} + \delta \ln \frac{N}{N_0} \quad (3)$$

式（3）で、

$$\eta = \ln \frac{Y}{Y_0}, \quad \eta_0 = \ln A, \quad \mu = \ln \frac{K}{K_0}, \quad \lambda = \ln \frac{L}{L_0}, \quad \mu = \ln \frac{M}{M_0}, \quad \nu = \ln \frac{N}{N_0}$$

と置くと

$$\eta = \eta_0 + \alpha \kappa + \beta \lambda + \gamma \mu + \delta \nu \quad (4)$$

式（4）に上記の各データを代入して重回帰分析を行い、交通・物流システムの整備による貨物・旅客輸送の変化による経済発展（実質GDPの伸び）への寄与 γ を試算する。

表 3 経済効果算出のためのパラメータ

Y: 財、サービスの生産（実質GDP）
K: 総資本ストック（公的資本・民間資本）
L: 労働力投入量（就業者人口×1人当たり総実労働時間）
M: 貨物輸送量総計
M1: 自動車貨物輸送量、M2: 鉄道貨物輸送量、
M3: 船舶貨物輸送量、M4: 航空貨物輸送量
N: 旅客輸送量総計
N1: 自動車旅客輸送量、N2: 鉄道旅客輸送量、
N3: 船舶旅客輸送量、N4: 航空旅客輸送量
A: 定数

また、以下の式 (5) の生産関数より貨物・旅客輸送機関別の解析も合わせて行う。貨物輸送量M, 旅客輸送量Nをそれぞれ輸送機関ごとに表2のように分類し、回帰係数 γ , δ も同様に輸送機関ごとに分類する。

$$Y=AK^{\alpha} L^{\beta} M_1^{\gamma_1} M_2^{\gamma_2} M_3^{\gamma_3} M_4^{\gamma_4} N_1^{\delta_1} N_2^{\delta_2} N_3^{\delta_3} N_4^{\delta_4} \tag{5}$$

と置く。ここで、式 (3) と同様に両辺の対数をとる。

$$\mu_k=\ln \frac{M_k}{M_{K0}}, \nu_k=\ln \frac{N_k}{N_{K0}}$$

と置き、自動車 (k=1), 鉄道 (k=2), 船舶 (k=3), 航空 (k=4) の輸送機関別の寄与を式 (6) により算出する。

$$\eta=\eta_0+\alpha \kappa+\beta \lambda+\sum_{k=1}^4 \gamma_k \mu_k+\sum_{k=1}^4 \delta_k \nu_k \tag{6}$$

3. 2 分析結果

式 (4) のM, Nに貨物輸送量, 旅客輸送量 (総輸送量) を代入した重回帰モデルから算出された偏回帰係数の値を表4, 実質GDPとの偏相関行列を示したものを表5に示す。表5から, 総貨物輸送量, 総旅客輸送量ともに, 実質GDPとの相関係数が高くなっており, 実質GDPへの寄与率が高いことを示している。また, 総貨物輸送量と総旅客輸送量との相関が高く, どちらか一方を採用することも考えられるが, 本研究では両者とも採用した。また, 式 (5) の重回帰モデルの偏回帰係数の値を表6, 各変量間の相関係数を表7に示す。

表4 式 (4) の重回帰モデルの回帰係数

η	α	β	γ	δ
-0.11	0.307	0.793	0.33	0.385

表5 式 (4) の重回帰モデルの相関行列

	実質国内総生産	資本ストック	年間実質労働力	貨物輸送量	旅客輸送量
実質国内総生産	1.0000	0.9922	0.8764	0.9466	0.9715
資本ストック	0.9922	1.0000	0.8259	0.9198	0.9715
年間実質労働力	0.8764	0.8259	1.0000	0.8288	0.8407
貨物輸送量	0.9466	0.9198	0.8288	1.0000	0.9664
旅客輸送量	0.9715	0.9715	0.8407	0.9664	1.0000

表6 式 (6) の重回帰モデルの回帰係数

η	α	β	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
-0.060	0.296	0.676	0.112	-0.013	0.035	0.019	-0.019	0.384	-0.080	0.025

表7 式 (6) の重回帰モデルの相関行列

	実質国内総生産	資本ストック	年間実質労働力	自動車貨物輸送量	鉄道貨物輸送量	船舶貨物輸送量	航空貨物輸送量	自動車旅客輸送量	鉄道旅客輸送量	船舶旅客輸送量	航空旅客輸送量
実質国内総生産	1.0000	0.9922	0.8764	0.9672	-0.9080	0.8406	0.9940	0.9927	0.9123	0.1037	0.9720
資本ストック	0.9922	1.0000	0.8259	0.9342	-0.9212	0.8602	0.9931	0.9817	0.8852	0.1487	0.9879
年間実質労働力	0.8764	0.8259	1.0000	0.9414	-0.8400	0.5678	0.8710	0.8544	0.7420	-0.2470	0.7584
自動車貨物輸送量	0.9672	0.9342	0.9414	1.0000	-0.8514	0.7536	0.9508	0.9670	0.8846	-0.0428	0.8964
鉄道貨物輸送量	-0.9080	-0.9212	-0.8400	-0.8514	1.0000	-0.6487	-0.9321	-0.8625	-0.7048	0.0391	-0.8716
船舶貨物輸送量	0.8406	0.8602	0.5678	0.7536	-0.6487	1.0000	0.8415	0.8582	0.8073	0.5049	0.9206
航空貨物輸送量	0.9940	0.9931	0.8710	0.9508	-0.9321	0.8415	1.0000	0.9803	0.8762	0.1287	0.9747
自動車旅客輸送量	0.9927	0.9817	0.8544	0.9670	-0.8625	0.8582	0.9803	1.0000	0.9353	0.1421	0.9695
鉄道旅客輸送量	0.9123	0.8852	0.7420	0.8846	-0.7048	0.8073	0.8762	0.9353	1.0000	0.2440	0.8777
船舶旅客輸送量	0.1037	0.1487	-0.2470	-0.0428	0.0391	0.5049	0.1287	0.1421	0.2440	1.0000	0.8777
航空旅客輸送量	0.9720	0.9879	0.7584	0.8964	-0.8716	0.9206	0.9747	0.9695	0.8777	0.8777	1.0000

4. まとめ

本研究では、エネルギー消費量 (LCE)、二酸化炭素排出量 (LC-CO₂) を評価指標としたLCAにより、交通システムの建設による環境負荷を算出した。またそれによる便益として、輸送量増加による経済効果 (実質GDP) への寄与算出を行い、環境負荷発生量と経済効果の両面から交通システムの評価を試みた。

1) 1961年以降から1970年前半にかけて、交通システム建設のよる環境負荷の発生が多くなっている。輸送施設別では、1970年前半までは、道路、鉄道建設にともなう環境負荷発生が多い。1975年以降は、交通システム建設による負荷発生量総計は減少しており、特に鉄道整備によるものが減少している。しかし、空港整備による環境負荷発生が増加している。これは、輸送量において航空輸送量のシェア増加、特に長距離旅客輸送において鉄道輸送から航空輸送へのシフトが進んでいることと一致する。施設建設による累積環境負荷発生と輸送量との関係は、高い相関関係が見られる。

2) コブ・ダグラス型生産関数により、輸送量増加の実質GDPへの寄与を評価した。貨物輸送量、旅客輸送量の変化とともに、実質GDPの成長と相関性が高い。輸送機関別の項目での重回帰モデルによると、鉄道貨物輸送が負の相関を示している。一方、自動車貨物輸送、航空貨物輸送は高い相関性を示しており、貨物輸送が、鉄道輸送から自動車輸送への変化と一致する。

交通システム整備にともなうベネフィットとして、輸送量増加と経済効果の関係に着目して評価を行った。交通システム整備にともなうベネフィットとしては、このほかに輸送時間の短縮、輸送コスト・運賃の低減などがある。輸送時間短縮の要因としては、高速道路の整備、鉄道の電化・複線化、空港整備による航空輸送のシェア増加など、施設建設と関連性が高いと考えられる。輸送時間の短縮は、輸送量増加だけでなく、輸送シェアの変化とも関係がある。今後は、交通システム整備に伴う経済効果評価の確立とともに、時間やコストの面からの評価も必要となる。

参考文献

- 1) 建設省建設経済局：公共工事着工統計年度報昭和40年版～平成4年版，建設物価調査会
- 2) 建設省建設経済局：建設統計要覧昭和53年版～平成7年版，建設物価調査会
- 3) 建設省建設経済局：昭和60年建設部門分析用産業連関表，建設物価調査会，1989
- 4) 池田秀昭，井村秀文：社会資本整備にともなう環境インパクトの定量化に関する研究，環境システム研究，Vol.21,pp.192-199,1993
- 5) 運輸省運輸政策局調査情報課：運輸経済統計要覧昭和45年版，昭和50年版，昭和55年版，昭和60年版，昭和63年版，平成6年版
- 6) 経済企画庁調査局：経済要覧平成7年版，1995
- 7) 東洋経済新報社：「パソコンによる経済学予測入門」，1992
- 8) 東洋経済新報社：ECONOMATE-X，1995（磁気データ）
- 9) 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