

高速道路と新幹線のライフサイクル炭素排出量の比較研究

高速道路や高速鉄道といった大規模な交通施設はその建設のみならず、運用、維持管理にも直接的にまた間接的に莫大な資材やエネルギーの投入を必要とするため、ライフサイクル分析の導入の必要性が論議されている。本研究はライフサイクル分析用産業連関モデルを構築し、車両の走行や施設の建設工事の他、車両の製造、建設や維持のための資材の製造に必要とされるエネルギーなど、大規模交通施設の「揺りかごから墓場まで」に必要とされるエネルギー、発生する炭素酸化物の量を推計するものである。東北新幹線と東北自動車道をケーススタディとし、ライフサイクル分析を行うとともに、仮想的なシナリオの下に高速道路システムと新幹線システムのライフサイクル炭素排出量の比較を行った。

キーワード 大規模交通施設, ライフサイクル分析, ハイブリッド型産業連関表

稲村 肇

INAMURA, Hajime

工博 東北大学情報科学研究科教授

モンクット・ピアンタナルチャイ

Mongkut, PIANTANAKULCHAI

タマサート大学講師

武山 泰

TAKEYAMA, Yasushi

博(工) 東北大学情報科学研究科助教授

1 緒言

本研究の主題は交通施設プロジェクトから発生する炭酸ガスを推計するライフサイクル分析手法の開発である。ライフサイクル分析の本質は当該事業の材料、技術、工程の評価をそれぞれの生涯を通して環境面、経済面の観点から事前に分析することである。従来ライフサイクル分析の多くはプロセス分析法が用いられてきた。これは個別商品のリサイクルなど、関係する品目が少ない場合には有効であるが、交通施設といった多様な中間投入を必要とするものには適用し難い。また、これは間接的な炭酸ガス排出量を推計しにくいのみならず、主観的にそのバウンダリを決めねばならず、またその設定によって結果が異なるという問題を持っている。本研究では直接的、間接的なエネルギー投入量の推計のしやすさ、定常的に高い精度(400部門以上の産業分類)のデータの供給が保証されているという利点を持つ産業連関分析の枠組みを使用した。定式化においては、最も単純な形の競争輸入型輸入外生型モデルを用いた。これにより、国内のみではなく、全世界への影響が計測されることとなる。ここでは暗黙のうちに、世界の技術構造が日本と同様であるとの仮定をおいているが、輸出入は相対的に小さいため、結果に対する影響は小さいものと考えられる。

産業連関分析は近年特に排出係数などのデータが整備されてきたこともあり、環境問題、エネルギー問題を分析するために様々な拡張がなされてきた。Leontief(1970)は公害防止活動を含めた環境分析用産業連関表を提案

し、産業別単位生産額当たりの大気汚染物質排出量を計算した。また同じ表を使って90部門の直接、間接の大気汚染発生原単位を計算した。Gutmanis(1975)は様々な経済仮説の下での汚染の発生量の分析、環境対策コストの分析、原材料代替の効果、など様々な環境政策を拡張IO表で論じた。Lave(1977)はカリフォルニアのBART鉄道計画と高速道路の拡張計画との比較研究を行った。彼は交通施設の建設、自動車の生産・運用を考慮し、鉄道システムの建設投資には膨大なエネルギーが消費され、これは運用段階でのエネルギー節約で埋め合わせすることは出来ないと結論づけた。Lave(1995)はまたアメリカの519部門の産業連関表を用いて、自動車、冷蔵庫、コンピューター、および紙コップとプラスチックコップのライフサイクル分析を行い、経済全体への影響を評価した。このように産業連関分析はプロジェクトや商品の環境に対する直接、間接的影響を分析できる点で優れているが、従来型の産業連関表は家計の使用エネルギーやクズ、廃棄物といった副産物を陽表的に扱えないため環境影響分析としては問題があった。

Rose(1977)は技術変化や投資を含む動的モデルを開発した。またRose(1991,1996)は従来の公害防止対策を含む拡張IOモデルはかなりバイアスを含んでいると批判し、投入産出バランス、価格調整、投入代替を含む3段階モデルを提案した。Herendeen(1974)とBullard et al.(1975)は消費に伴うエネルギー消費の推計にIO分析を適用した。

地球温暖化問題に対する関心の高まりに伴い、最近

我が国でも炭素(炭酸ガス)の排出に関する多くの研究がある。Hayami et al.(1993)は日本の1985年の産業連関表を使用して単位生産当たりのCO₂の排出量を計算した。Hetherington(1996)はイギリスに関し同様の研究を行った。Kondo et al.(1996)は自動車のLCA分析にIO分析を適用し、産業部門毎の内包CO₂排出量を計算した。Moriguchi(1996)は炭素排出量を基準にガソリン自動車と電気自動車の比較を行った。上記の研究がすべてプロダクトミックスがないと仮定しているのに対しNishimura et al.(1997)は部門モデルと加工過程モデルという2つのモデルを組み合わせこの仮定を緩和した。産業連関表はもちろん金銭ベースでの取引を示しているが、炭酸ガスの排出量は物理量である。したがって炭酸ガス排出量の推計には価格が大きな問題となる。同じ石油製品であっても電力会社のように大量消費産業のエネルギー取得価格は一般の産業より遥かに安い。こうした問題を避ける最善の方法はハイブリッドモデル、すなわちエネルギー取引を物理量単位、その他の取引を金銭単位で取り扱うことである。

一方、交通部門に関しては、自動車からの排気ガスの寄与が大きいことから、運用時のエネルギーまたは大気汚染排出の問題に主眼があった。すなわち運用時のエネルギー比較により自動車は電車の〇〇倍の炭酸ガスを排出する、といった研究やエンジンマップを使って渋滞緩和は炭酸ガス排出を〇〇%減少させる、といった研究である(Kulash et al.(1977)参照)Laveの研究を例に挙げるまでもなく交通施設の建設に使用される原材料や機械の製造、更にはその原材料の製造にも膨大なエネルギーを必要とする。交通施設をシステムとして扱い、ライフサイクル評価をしたものに、中村(1998)、中嶋(1997)がある。しかし、それらの研究は産業連関表を伝統的な手法でそのまま使用しているため、先に述べた家計消費部門の影響や燃料価格の変化に対応できるものとなっていない。

上記の背景の下に本研究の目的は以下の3点にまとめられる。

- ・家計を内生化した産業連関モデルによるライフサイクル分析を提案する。
- ・ハイブリッド型産業連関表を提案し交通施設整備プロジェクトのライフサイクル分析を行う。
- ・東北自動車道と東北新幹線を例に取り、鉄道と道路のライフサイクル排出量の比較分析を行う。

2 家計を内生化した産業連関モデルによる交通施設のライフサイクル分析

2.1 分析の枠組み

本章では東北新幹線プロジェクトを例に取り1990年取引基本表(列411×行527)¹⁾の産業部門数を405部門(後述の家計部門内生化を含めて406部門)に統一して分析を行う。

分析の流れは図1に示される。まず各段階ごとにライフサイクルコスト(LCC)を推計する。次にそのLCCをI-Oモデルに代入して各産業の生産誘発額を求め、その値に部門別排出係数を乗じることにより炭素排出量を求める。本研究で用いた排出係数は、本藤ら(1996)によって推計された部門別排出量を各産業の生産額でそれぞれ除したものである。家計の内生化、最終需要コンバータについては2.2, 2.3でそれぞれ後述する。

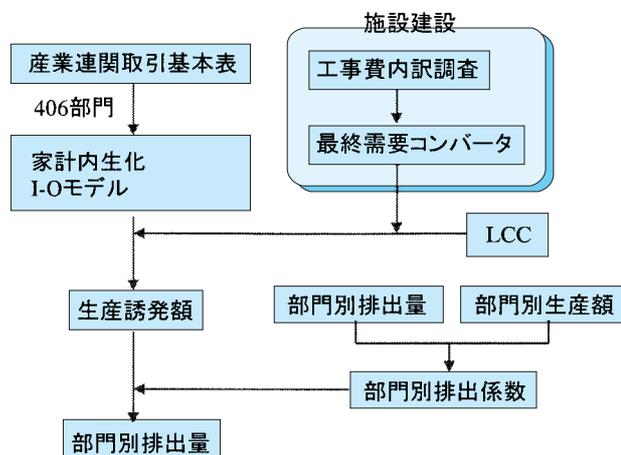


図1 分析の流れ

2.2 家計部門の内生化

家計は家事や暖房、自動車利用で直接的に炭素を排出するだけでなく、故紙や鉄くずを排出することによっても炭素を排出し、これらの一部は内生部門に再投入されている。通常のI-Oモデルにおいては、家計は外生部門として扱われているため、家計が排出するものによる炭素排出への影響を考慮することができない。交通施設整備においては工事の種類によって労働投入率が異なるため、同じ金額の工事でも工種によって家計からの排出量は異なることになる。そこで本章のモデルでは、プロジェクト・ライフサイクルに関わる雇用者家計消費に伴う直接排出に加えて、プロジェクトの波及所得効果による一般家計部門の間接的排出増効果を求めるために家計支出を内生化した評価モデルを導入する。産業連関表において、家計収入は付加価値部門の雇用者所得で代表が可能であり、一方、家計消費支出は最終需要部門であり付加価値部門を持たない。そこで、平均消費性向を

用いて家計を以下のように内生化し、このモデルを用いて分析を行なう。

$$\begin{pmatrix} q_i \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I - A & -hC \\ -V & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} f_i \\ f_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Q = \sum_i^{405} e q_i + e_y \quad (2)$$

ただし、
 q_i : 均衡産出額(列ベクトル)
 f_i : 外生最終需要額(列ベクトル)
 y : 均衡所得額(スカラー)
 f_y : 外生家計所得額(スカラー)
 I : 単位行列
 A : 産業連関表のマトリックス成分 x_{ij} を q_i で徐した投入係数行列
 h : 1990年の平均消費性向(スカラー)
 C : 家計所得単位当たりの第 i 品目家計購入額を示す消費係数(列ベクトル)
 V : 第 j 産業の単位生産当たりの雇用者所得を示す所得係数(行ベクトル)
 e_i : 部門別排出係数
 e_y : 家計の排出係数
 Q : 炭素排出量

2.3 東北新幹線のライフサイクル分析

モデルの有効性をチェックするためここでは東北新幹線を例に取り、ケーススタディをおこなう。対象区間は東京 - 盛岡間である。ライフサイクル分析はもちろん対象プロジェクトの始まりから終わりまでが分析対象となるべきである。実際、レールや橋梁、隧道に至るまで殆どの施設は限定された物理的耐用年数を持つが、世界の鉄道の歴史から明らかのように、鉄道システムそのものは数百年にわたり供用され続けている。しかし、こうした長期間の分析は必要となる再投資の是非といった不確実性が增大するため、本研究では個別施設の最長の物理的耐用年数である60年を分析対象期間とする。使用する産業連関表は1990年基本表である。工事の工種別内訳は建設省建設経済局1990年度版建設工事の産業連関表、平成2年度公共事業工事費等内訳調査報告書、1993、およびJR東日本の資料に依った。

2.3.1 建設・製造段階

まず材料別の使用量を求める必要がある。新幹線に限らず、土木建築工事は橋梁やトンネルなどの種類によって、投入資材の種類やその構成は異なるため、炭素排出量も当然異なる。しかし最も詳細な産業連関表においても、ほとんどの施設の建設活動は鉄道軌道建設部門で一括して扱われている。そこで、公団関係土木工事費内

訳調査³⁾を用いて、工種ごとに家計を含む406部門からの投入係数である最終需要コンバータを作成する。最終需要コンバータは投入材料の構成を表しており、これを用いて以下のように最終需要を求める。

$$f_{iy}^k = C^k d_{iy}^k \quad (3)$$

ただし、
 f_{iy}^k : 工種 k に関する産業 i の最終需要・外生家計所得
 C^k : 工種 k の工事費
 d_{iy}^k : 工種 k に関する産業 i の最終需要・家計外生所得コンバータ

同調査においてその内訳区分は直接費、間接費、一般管理費をあわせて44区分に分かれており、工種は以下に示す7種類である。

軌道工事 高架橋工事 シールド工事
 橋梁工事 山岳隧道工事 開削トンネル工事
 その他の工事

最終需要コンバータの作成のために、工事費の内訳区分を産業連関表の各部門に対応させる。間接費、一般管理費はその内訳区分が粗いため、公共事業工事費等内訳調査報告書、建設省資料をそれぞれ用いた。対応部門が複数存在する内訳区分については、産業連関表における鉄道軌道建設部門の投入額によりその比率を設定する。

鉄道施設の法定耐用年数は全て60年以下であり、隧道や橋梁などの大規模施設の耐用年数は約60年である。そこでシステム全体の周期を60年とし、耐用年数がより短い施設等は年数に応じて更新して、ライフサイクル建設コスト(LCCC)を求める。さらに卸売物価指数を用いて平成2年の価値に換算する。この工種別LCCCを前述した分析フローに従ってI-Oモデルに代入し、炭素排出量を求める。車両費については鉄道車両部門、用地費については仲介手数料6%を乗じた値を不動産仲介・管理部門の最終需要とする。

2.3.2 運用・維持段階

運用・維持段階の費用は会社全体で公表されており、路線別のデータは公表されていない。したがって東北新幹線のための運行費用を求める場合には、何らかの仮定のもとに推計を行わなければならない。ここではJR6社、大手民鉄15社のデータを用いて各費用との関係を単回帰分析により求めた(表1)。その相関式を用いて各費用の推計を行った。その結果をI-Oモデルに代入して年間あたりの炭素排出量を求める。これに鉄道システムの周期60年を乗じて運用・維持段階におけるライフサイクル排出量とする。

- a) 施設修繕費は相関式に東北新幹線の線路延長を代入して推計する。
- b) 車両数のデータから東北新幹線の車両修理費を推計するが、新幹線と普通電車では、その修理費は大きく異なると考えられる。そこで新幹線車両数が全車両数の約3分の2をしめるJR東海の1両あたりの車両修理費に東北新幹線車両数を乗じた値を用いた。
- c) 業務費は相関式に東北新幹線の旅客人キロを代入して推計する。ここで業務費に対応するI-Oの部門は家計外消費支出部門であるため、家計外消費支出でコンバータを作成し、各部門の最終需要とする。
- d) 動力費は相関式に東北新幹線の旅客人キロを代入して推計する。新幹線の単位輸送量あたりのエネルギー消費量は普通電車の約1.23倍である(運輸経済研究センター(1994))ため、その分を調整した上で普通電車の動力費算出式を求め、そこから求めた動力費に1.23を乗じた値を新幹線の動力費とする。動力は事業用電力と自家発電の2つである。JR東日本の自家発電は大半が水力発電であるため、取引基本表より水力発電のコンバータを作成する。

表 1 運用・維持費用の推計に用いたデータ

目的変数	説明変数	相関係数	t 値 使用データ
施設修理費	線路延長	0.903	13.3 ①
車両修理費	車両数	0.889	12.3 ②,③,④
業務費	旅客人キロ	0.925	15.3 ⑤
動力費	旅客人キロ	0.875	11.5 ⑤

推計に用いたデータは以下の通りである。

- 東北新幹線の線路延長
- JR東海の車両数
- JR東海の車両修理費
- 東北新幹線の車両数
- 東北新幹線の旅客人キロ

2.3.3 廃棄段階

(1) 施設廃棄処理量の推計

鉄道用材料使用実態調査(1992)により東北新幹線施設(大宮～盛岡)の材料別重量構成が推計されている。ここでは大宮～盛岡と東京～大宮が同じ施設構成、材料構成を持つものと仮定して、東北新幹線全体としての材料別重量構成を推計する。施設廃材の内、レール部分に使用されている鉄は、約100%がリサイクルされているため、全廃棄処理量からレール部分を除いたものを施設廃棄処理量とする。

(2) 車両の廃棄処理量の推計

現在、車両数が408両、耐用年数は20年であるので、年間の平均廃棄車両数は20.4両となる。200系車両1両

あたりの材料別重量構成比は辻村ら(1996)によって推計されており、本研究でもその結果を用いて車両廃棄量を求めた。中古部品再利用が20%、金属材料リサイクルが55%であり、その他は埋め立てられているため、対象とする車両廃棄処理量の25%を埋め立て分とする。

(3) 廃棄処理費用の推計

東北新幹線が通る1都5県における県別の処理単価を施行単価資料(1996)、ヒアリング調査により求めた。県別の処理費を求めるために2つの仮定をおいた。第一に、県別の施設重量は県内における東北新幹線の営業キロに比例する。第二に、原則的に県内で発生する廃棄物はその県で処理する。しかし東京都と埼玉県に処分場は存在しないため、中間処理後は栃木県まで運び、最終処分とする。求められた費用のうち、取り壊し費用は鉄道軌道建設部門、その他の費用は産業廃棄物処理部門の最終需要とする。産業廃棄物処理部門は埋め立てと焼却を区別していないため、その排出原単位は非常に大きい。しかしコンクリートや土を埋め立てても炭素は排出されないため、その最終処分に関しては産業廃棄物処理部門の直接排出量を除いた。内田ら(1998)によって車両一両あたりの解体・破砕・運送費用が推計されているため、その結果を車両処理に用いた。また全ての車両は、最も規模の大きい仙台総合車両所で廃棄されるとし、最終処分単価は宮城県の値を用いた。これらの費用は全て産業廃棄物処理部門の最終需要とし、施設の分析と同様に最終処分に関しては産業廃棄物処理部門の直接排出量を除いた。

2.4 分析結果

2.4.1 建設段階からの排出量

工種別の排出量を図2に示す。施設建設に伴う排出量の48%が橋梁や隧道などの大規模工事であった。その他の工事が大きな割合を占めたのは、車庫や運転保安設備などの耐用年数の短い施設により、LCCが大きくなったためである。

工種別にその単位距離あたりの排出量を求め、その結果を図3に示す。また同図において産業連関表の

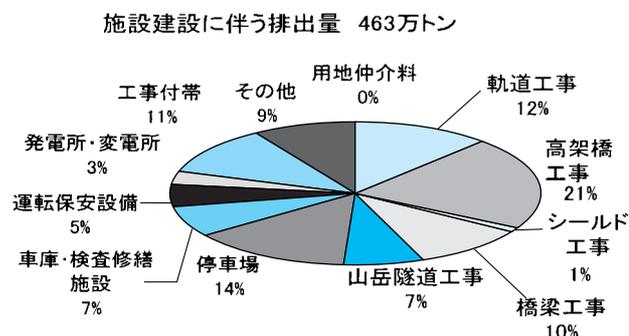


図 2 建設工事に伴う炭素排出量

406部門を12工程に分け、工程別の排出割合を示した。図3より、工種によってその排出量は大きく異なり、また全ての工種についてセメントや鉄などの素材製造プロセスの割合が大きいことが分かる。

また工種ごとに家計からの排出比率を求め、その結果を図4に示す。これより家計からの排出量は消費による直接排出量よりも波及所得による間接排出量の方が大きいことがわかる。また工種によって機械、燃料、労働投入割合が異なるため、排出比率は大きく異なり、軌道工事とシールド工事では約22%の差があることが分かった。シールド工事では家計からの排出は小さいがその他の工事ではそれが比較的大きいことより、家計を内生化しない分析と比較して、本結果は各工種別の格差が減少することとなった。

2.4.2 運用・維持段階からの排出量

東北新幹線の輸送量を60年間で 7.3×10^{11} 人kmとして計算を行った。運用・維持段階では特に動力の比率が高く、約半分を占めている。その動力に伴う排出量のほとんどが事業用電力からの排出である。これは自家発電への投入額が小さいことも理由の一つであるが、それ以上に水力発電が炭素をほとんど排出しないことに起因

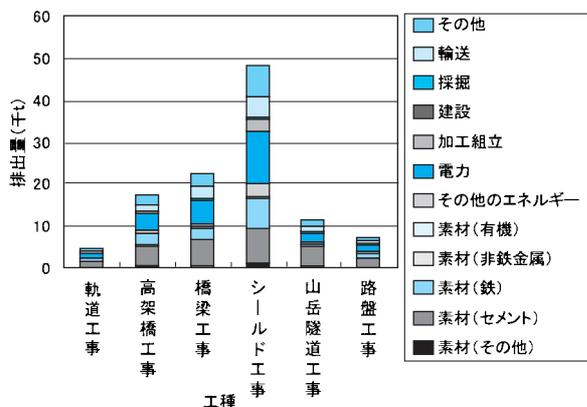


図3 工種別1km当たりの炭素排出量

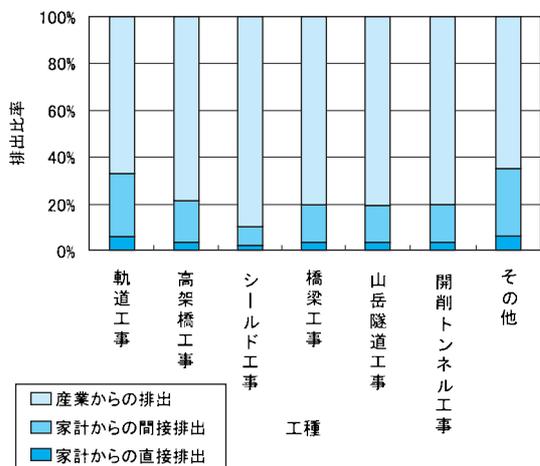


図4 工種別1km当たりの家計からの排出比率

している。施設修理費は事業用発電に次いで大きな割合を占めているが、このメンテナンス費用は施設規模に大きく依存するため、建設費用との関係は大きい。

2.4.3 廃棄段階からの排出量

廃棄処理に関しては、ほとんどが施設の廃棄に伴うものであり、その内訳は取り壊し費用が32%、収集・運搬が29%、中間処理が30%、最終処分が8%という結果であった。車両の廃棄に伴う排出はわずか1%不足であった。施設廃棄による排出量が圧倒的に車両よりも大きい、車両のリサイクル率の高さが大きく影響している。

2.4.4 ライフサイクル排出量

図7は各段階における炭素排出量の割合を示している。東北新幹線がライフサイクルに排出する炭素は1,139万トンである。

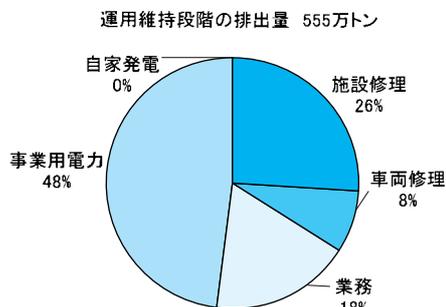


図5 運用維持段階での排出量

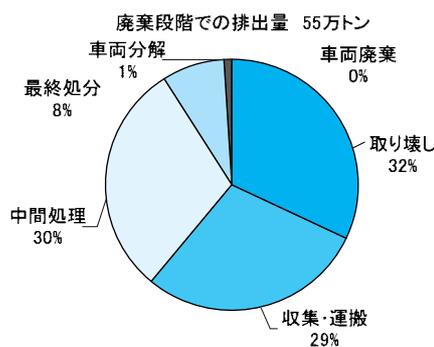


図6 廃棄段階での排出

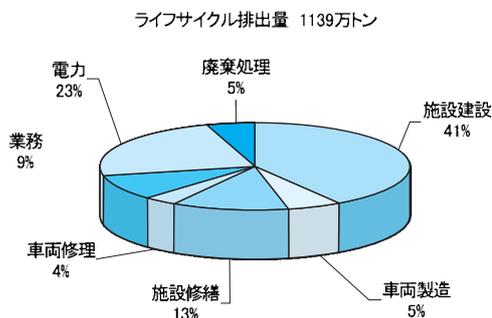


図7 新幹線のライフサイクル炭素排出量

また施設の建設、補修における排出量は54%である。それに対してモーダルシフト推進政策の根拠である動力による排出量は、全体の23%であった。これより交通システムの環境負担性を議論する場合には、走行エネルギーのみならず、そのライフサイクル、特に施設の建設、維持に伴う排出を考慮する必要があることが確認された。

3 ハイブリッド型産業連関表を用いた ライフサイクル排出量分析

3.1 分析の枠組み

本章で使用する産業連関モデルはハイブリッド型産業連関モデルと呼ばれるものである。産業連関分析の基本モデルは式 $X=AX+Y$ で一般に金額表示となっており、エネルギーの取引ももちろん金額で表示されている。環境問題、特に炭酸ガスの排出問題を考えるとき化石燃料の消費は中心的課題であるが、その価格は時間的に非常に大きく変動している。また、石油等の化石燃料の価格は取引の規模によって非常に異なる。いま、中小企業が自家発電等のために購入する重油価格と大手の電力会社の調達価格を比較すると5倍程度の開きがある。従って、金額ベースでエネルギー消費を推計し、平均価格で物量に変換すると、炭素の排出量で大きな誤差が生じることは明らかである。

この問題を避けるため、エネルギー部門を物理的投入量(炭素重量:トン)で扱い、他部門を従来通り金額表示で扱うハイブリッドモデルを提案する。ここでエネルギー部門と呼ぶのは、石炭、原油、天然ガス、石炭製品、石油製品、ガス供給、石灰石の7部門である。ただし石灰石はその加工過程で大量の炭酸ガスを発生するため特別にエネルギー部門に入っている。

ハイブリッドモデルのバランス式は

$$\begin{bmatrix} X_{ne} \\ X_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ne/ne} & A_{ne/e} \\ A_{e/ne} & A_{e/e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ne} \\ X_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{ne} \\ Y_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

数値の単位はそれぞれ

$$\begin{bmatrix} A_{ne/ne} & A_{ne/e} \\ A_{e/ne} & A_{e/e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\$}{\$} & \frac{\$}{\text{ton-C}} \\ \frac{\text{ton-C}}{\$} & \frac{\text{ton-C}}{\text{ton-C}} \end{bmatrix}$$

X_{ne} = 非エネルギー部門の生産額

X_e = エネルギー部門の生産額

Y_{ne} = 非エネルギー部門の最終需要額

Y_e = エネルギー部門最終需要額

$A_{ne/ne}$ = 非エネルギー部門内の投入係数

$A_{ne/e}$ = 非エネルギー部門からエネルギー部門への投入係数

$A_{e/ne}$ = エネルギー部門から非エネルギー部門への投入係数

$A_{e/e}$ = エネルギー部門内の投入係数

マトリックス S を使って、ハイブリッドモデルから炭素排出に関係するエネルギー部門からの投入を抽出する。式(5)はそうした関係を示している。

$$E = S(I - A)^{-1}Y = S \begin{bmatrix} B_{ne/ne} & B_{ne/e} \\ B_{e/ne} & B_{e/e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{ne} \\ Y_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= B_{e/ne}Y_{ne} + B_{e/e}Y_e$$

E : エネルギー部門からの排出

S_{ij} = $(m \times n)$ 行列: i, j がエネルギー部門の時
= 0 それ以外

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & & & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 東北自動車道のライフサイクル分析

東北自動車道のライフサイクル分析においても、建設事業のみならず、運営、維持管理についても考える。運用時においては、維持管理のみならず、自動車からの燃料消費による炭素の直接排出、自動車製造による間接排出を考慮する。プロジェクトライフの終了後、高速道路を破壊して廃棄する場合には膨大なエネルギーが費やされると考えられる。しかし、鉄道と異なり道路は歴史的に壊されて廃棄されたことはほとんどなく、それは非現実的で、あまりにも非効率的であるため、ここでは考慮しない。

使用する産業連関表は1990年基本表である。工事の工種別投入係数は建設省建設経済局1990年度版建設工事の産業連関表、平成2年度公共事業工事費等内訳調査報告書1993、および日本道路公団東北支社の資料に依った。表2に抜粋を示す。

3.2.1 建設段階

鉄道の場合と同様、産業連関表においては500部門を越える詳細な基本表でも道路建設工事は1部門に統合されている。従ってここでは建設工種ごとの投入構成比を建設実績から集計する必要がある。

都市間高速道路や新幹線といった大規模土木事業の建設には長期間を必要とする。また、一つのプロジェクトが長期にわたる段階計画を持つ場合も少なくない。実際、東北自動車道においても図8および表3のように段階的に建設されている。契約年が異なれば、工事の単価、材料の価格は変動する。産業連関表は価格ベースで

作成されているため、この価格変動の影響は無視できない。そこで本モデルにおいては表 4に示すように建設工事の価格コンバータを使用して1990年の基準価格に調整を行った。

3.2.2 維持管理費用

新幹線の場合とほぼ同様に推計する。基本データは日本道路公団の資料による。

3.2.3 自動車生産からの排出

自動車の生産プロセスからの炭素排出はもちろん自動車産業部門として、その原材料からの間接排出も分析に含まれている。しかし、ここで重要なことは高速道路を利用する自動車を特定することである。自動車の生産部門には主として高速道路を利用する大型トレーラーや大型トラックと軽自動車のようにほとんど利用しない自動車が含まれている。両者の中間投入構造は当然異なるため、それを補正する必要があるが、本研究では行っていない。

表 2 道路工事の投入係数(主要工種のみ)

	舗装	橋梁	土工
砕石	0.052	0.002	0.061
セメント	0.001	0.004	0.003
生コンクリート	0.014	0.053	0.025
セメント製品	0.031	0.021	0.038
鋼材	0.001	0.022	0.003
建設用金属製品	0.024	0.155	0.026
工作用機械	0.003	0.002	0.000
電力	0.006	0.004	0.005
水	0.001	0.001	0.000
卸売	0.047	0.044	0.042
道路貨物輸送	0.001	0.001	0.001
港湾運送	0.001	0.001	0.001
情報サービス	0.001	0.001	0.005
土木建築サービス	0.036	0.022	0.031
分類不能	0.014	0.009	0.015
付加価値	0.375	0.478	0.389
総産出	1.000	1.000	1.000

表 3 東北自動車道の建設費用と請負契約年

	区間1 東京 ~ 川口	区間2 川口 ~ 岩槻	区間3 岩槻 ~ 仙台南	区間4 仙台南 ~ 盛岡	区間5 盛岡 ~ 安代	区間6 安代 ~ 青森
土工工事	6,400	50,140	50,260	19,630	14,970	29,330
舗装	2,990	28,080	19,460	6,030	3,360	7,820
トンネル	0	1,980	6,360	12,810	17,330	28,620
橋梁	5,060	31,510	33,590	12,150	22,360	18,370
その他工事	22,400	84,790	76,210	31,660	26,380	47,400
間接工事	17,570	46,100	45,010	14,680	10,000	19,850
総費用	54,420	242,600	230,890	96,960	94,400	151,390
契約年	(1970)	(1966)	(1968)	(1970)	(1971)	(1968)

3.2.4 自動車の基本走行条件

自動車からの直接走行排出ガス量は、車種、エンジンの種類(ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン)と排気量、走行スピード、重量、乗車人数と積載貨物量によって異なるため、それらを考慮に入れる。ここでは乗用車、トラック、バスの3車種を取り上げる。排出係数は80km/hの場合の値を用いる。乗車人数、積載貨物重量に関しては、高速道路利用実態調査の結果を使用する。

3.2.5 分析対象地域と分析期間

ライフサイクル分析のフローが図 9に示されている。680kmの高速道路はその地理的条件、人文条件、自然条件が大きく異なるため、図 8に示す6区間に分割して分析がなされ、結果の比較が行われる。鉄道と同様に、道路システムそのものは数百年にわたり供用され続けるが、本章では個別施設の最長の物理的耐用年数である60年を分析対象期間とする。



図 8 分析対象地域

表 4 道路工事用の価格コンバータ

	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6
契約年	(1970)	(1966)	(1968)	(1970)	(1971)	(1968)
1975年価格	1.72	2.09	1.92	1.72	1.62	1.92
1985年価格	2.62	3.17	2.87	2.62	2.29	2.60
1990年価格	2.95	3.56	3.23	2.95	2.58	3.23

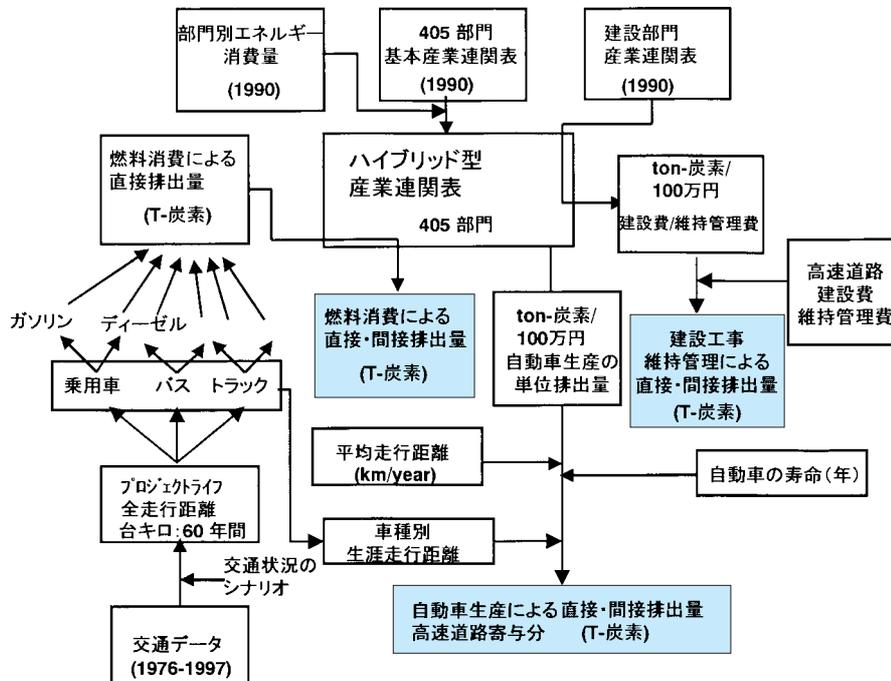


図 9 高速道路のライフサイクル分析の流れ

3.2.6 交通量

高速道路交通量は1976～1997の20年間のデータを日本道路公団から入手した。この交通量はもちろん車種別に対象の6区間に整理して使用する。その分割の概要を図 10に示す。これに依れば自動車交通の半分以上(56%)がトラック交通であり、関東と東北の経済の強い結びつきを表している。

3.3 分析結果

分析結果を表 5に示す。建設工事の中では、鉄鋼やセメントといったエネルギー消費型資材を多量に使用する橋梁が最も高い排出原単位を持っている。バスと大型トラックは重量的には大きな相違はないが、トラックは小型の占める割合が比較的多いためバスの原単位が大きい。

くなっている。また、バスは内装に石油製品を使う等、エネルギー消費型資材が多いことから直接排出、総排出ともトラックの2.5倍程度となっている。表中、燃料消費で1.047kg-C/kg-Cで表示されているのは燃料のガソリンや軽油に含まれる炭素0.643kg-C, 0.721g-Cに加えて産出、製造、輸送の際に発生する炭素を加えると直接間接で1.047kg-Cの炭素を放出することを表している。

表 6は東北自動車道のライフサイクル排出量の推計結果を示している。ライフサイクル排出量の約90%が運用時の自動車の燃料消費に依ることが明らかとなった。また、建設工事と自動車生産が約5%程度であり、維持管理はわずか0.5%のみであった。車種別に言えば交通量で53%であったトラックが、排出量で73%を占めることが明らかになった。

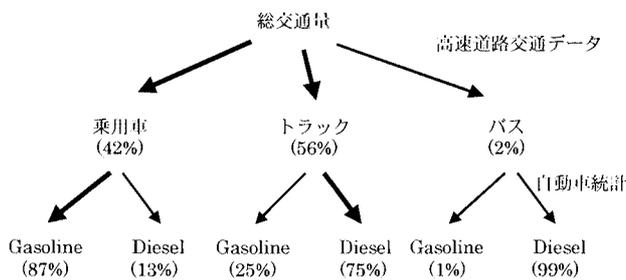


図 10 交通量の分割

表 5 炭素排出原単位

項目	直接排出	直接+間接	単位
高速道路建設			
橋梁	0.207	1.200	トC/100万円
舗装	0.267	0.877	トC/100万円
隧道/土工	0.257	0.901	トC/100万円
その他工事	0.204	0.915	トC/100万円
維持管理	0.195	0.922	トC/100万円
自動車生産			
乗用車	0.023	1.042	トC/台
トラック	0.029	1.552	トC/台
バス	0.077	4.179	トC/台
燃料消費			
ガソリン	0.643	1.047	kg-C/リットル
軽油	0.721	1.047	kg-C/リットル

表 6 東北自動車道のライフサイクル炭素排出量

	直接排出 単位：1000トン	直接+間接 単位：1000トン	比率
自動車生産	47	2,200	5.0%
乗用車	33	1,500	
バス	1	55	
トラック	13	720	
建設工事	12	2,200	4.8%
土工工事	2	500	
舗装工事	2	200	
隧道工事	1	180	
橋梁工事	1	470	
その他	6	850	
維持管理	52	250	0.5%
自動車交通	38,400	41,000	89.6%
乗用車	9,400	9,800	
バス	990	1,040	
トラック	28,000	30,000	
合計	39,000	45,000	100.0%

表 7 車種別炭素排出の内訳

単位：1,000トン

	自動車 製造	高速道路 建設工事	高速道路 維持管理	自動車 走行	合計
乗用車	1,500	920	100	9,800	12,000
バス	55	44	5	1,000	1,100
トラック	720	1,200	140	30,000	32,000

表 8 車種別炭素排出原単位

車種	ライフサイクル排出量	単位
乗用車	44.91	トン-C/100万人扣
バス	6.91	トン-C/100万人扣
トラック	44.27	トン-C/100万ト扣

表 9 東北自動車道の交通比率

車種	交通比率
乗用車	41.73
バス	2.22
トラック	56.05
小型トラック	(13.12)
大型トラック	(42.93)
合計	100.00

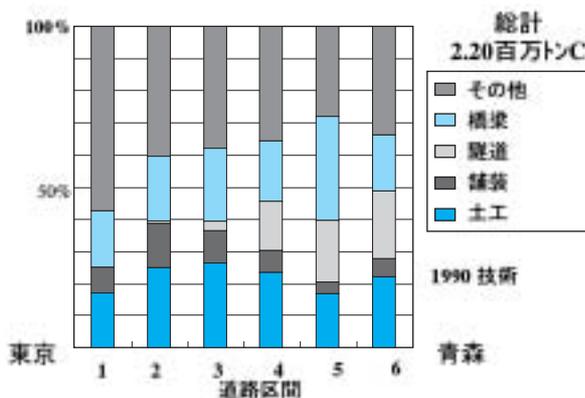


図 11 高速道路区間別、工種別炭素排出の比率

表 7は車種別炭素排出の内訳、表 8は車種別炭素排出原単位、表 9は車種別交通比率を示している。自動車の生産に関しては電子部品等、複雑な部品を使う乗用車からの排出が大きくなった。建設工事と維持管理に関しては交通量の比で案分したため交通量と同様である。車両製造・走行、道路建設・維持まで含めた全体では、トラックは乗用車の2.5倍以上もの炭素を排出していることになる。排出原単位は人キロとトンキロで単位が違うため比較にはならない。ただ、乗用車がバスと比較して約6.5倍の炭素排出で有ることが分かった。

地理的条件が異なれば、工事方法も異なり、事業費も異なることは当然である。図 11は高速道路の区間別、工種別炭素排出の違いを工種別の比率で表したものである。区間1は既成市街地の中を通るため、その他工事の比率が著しく高くなっている。区間2は市街をなるべく避けたため、区間3とそれほど変わらない。仙台以北は隧道の比率が高い。ここで、橋梁にはコンクリート高架橋が含まれている。区間5は特に橋梁の比率が高い。

4 東北新幹線と東北自動車道のライフサイクル排出量比較

4.1 分析の枠組み

新幹線と高速道路の比較は困難である。それは以下の2つの理由による。

- 1) 高速道路では貨物と人間の両方が利用するのに対し、新幹線は乗客だけである。すなわち輸送の機能や単位が異なる。
- 2) 建設工事の規模や交通量が異なる。

そこで、交通機関の建設費や維持管理費は交通量に依存するとし、高速道路は全て乗用車が利用するとして、トラックを乗用車に換算して比較を行うこととする。バスやトラックの乗用車への換算(PCE: Passenger Car Equivalent)には様々な方法や数値が有るが、この換算は結果に対しての感度があまり高くないため、ここでは単純に交通台数として捉える。

第2章では家計を内生化した産業連関モデルを用い、第3章ではハイブリッド型産業連関モデルを用いた。本章では新幹線と高速道路の比較を行うため、両モデルの結合形である家計を内生化したハイブリッド型産業連関モデルを用いた。ただ、道路施設との比較のため、第2章で推計した新幹線のライフサイクル炭素排出量から廃棄にかかる排出部分は除外してある。

4.2 現状システムの評価

表 10は現状の東北新幹線と東北自動車道のライフサイクル排出量を示したものである。建設段階での排出量は5倍近い差がある。これは新幹線は線形制約が厳しく、高架や隧道の区間の割合が高いこと、停車場や車庫等の付帯設備が大きいことによる。乗客数、交通量は60年の間、現在の水準が続くと仮定している。東北自動車道の60年間の炭素排出量は1,346万トンと東北新幹線の60年間の排出量1,084万トンよりは多いが、その差はわずか24%程度である。それは新幹線の建設時における排出量が非常に大きいことと、運用段階に関しては旅客輸送、すなわち乗用車の交通のみで比較している事による(トラックを考慮すれば2倍程度となるだろう)。

図 12は現状システムのライフサイクル評価を時系列で図示したものである。交通量が一定という仮定下においてはシステム供用後、約60年間は東北自動車道の方が東北新幹線より累積炭素排出量は少ない。これは非常に興味深い結果である。現状のシステムをそのまま60年間供用すれば、両システムによる総炭素排出量は図 12で示した直線で見ると、2,430万トンとなる。

4.3 シナリオによる高速道路と新幹線の比較

前記の東北自動車道と東北新幹線の比較は現状システムの比較であって、高速道路と新幹線とどちらが環境

に優しいか?といったシステム間の比較にはなっていない。それは最初に記したように、両システムは機能が異なり、また規模も異なるからである。そこで両システムの機能を旅客輸送、乗用車の交通といった類似機能に限定して、累積炭素排出量を指標とした評価をする。

表 11はシナリオ別の高速道路と新幹線の評価である。異なるシステムの規模を統一するために、ここではもし新幹線がなかった(高速道路のみで両システムの旅客を輸送する)とした場合と、逆に高速道路がなかったとした場合、というシナリオの下に比較をおこなう。

高速道路も新幹線も既存の単独システムで両システムの全ての旅客を輸送することは困難であり、何らかの(鉄道車両の増加や道路の車線増)システムの拡張(初期投資)が必要であろう。輸送容量を正確に推計し、必要投資額を推計することは困難であるため、ここでは交通量に比例して投資が必要であると仮定して推計を行った。図 13は既存交通施設のシステムの拡張を含んだ評価を図示したものである。

表 11において、高速道路の現状システムの供用開始時点での炭素排出が0.96(96万トン)であるのに対し、「高速道路のみ」のシナリオにおいて供用開始時点で2.57(257万トン)となっている。これは60年間の総旅客交通量が現状システムの4.39(4,390億人キロ)から2.66倍の11.69(1兆1,690億人キロ)へのシステム拡張を想定して

表 10 現状の東北新幹線と東北自動車道のライフサイクル排出量

東北新幹線	項目	百万トン	東北自動車道	項目	百万トン
	建設工事	4.63		建設工事	0.96
	車両製造	0.66		自動車製造	1.53
	軌道維持	1.44		道路維持	0.11
	車両維持	0.42			
	駅舎等維持	1.00			
	運用電力	2.66		燃料消費	10.85
	合計	10.84		合計	13.46

表 11 シナリオ別ライフサイクル評価

		輸送 人キロ (x10 ¹¹)	LC排出 炭素 (x10 ⁶ トン)	炭素 /100万人キロ (供用時)
新幹線(現状)	供用時	0	4.63	8.51
	60年後	7.30	10.84	
高速道路(現状)	供用時	0	0.96	28.44
	60年後	4.39	13.46	
新幹線+高速 道路(現状)	供用時	0	5.59	16.01
	60年後	11.69	24.30	
高速道路のみ	供用時	0	2.57	28.44
	60年後	11.69	35.82	
新幹線のみ	供用時	0	7.41	8.51
	60年後	11.69	17.37	

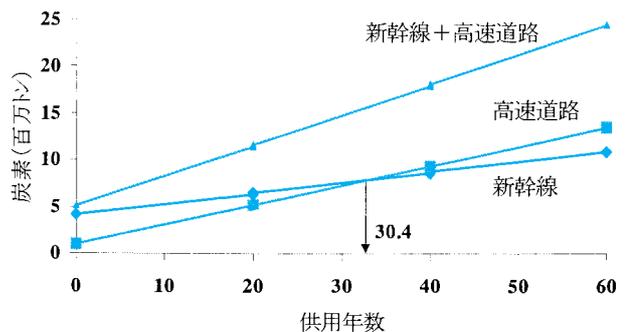


図 12 現状システムのライフサイクル評価

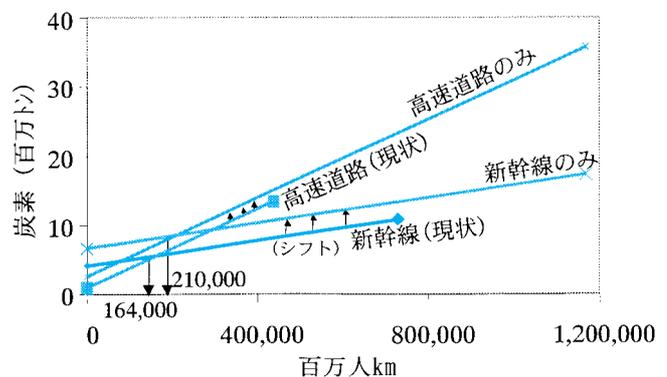


図 13 システムの拡張を考慮したライフサイクル評価

いることに対応している。新幹線が463万トンから741万トンになっているのも同様である。

図 13で横軸は累積旅客輸送量であり、右端は60年間の累計1,169,000百万人キロ(1兆1,690億人キロ)を示している。で示したなだらかな直線が新幹線の現状システムであり、60年間の供用で7,300億人キロの輸送量となっている。その上の長い平行線が新幹線を拡張した想定による、累積炭素排出量の直線である。拡張システムの60年間の供用で累積炭素排出量が17.37百万トン(1,737万トン)にとどまることがわかる。で示した急な短い直線が東北自動車道の現状システムの時系列炭素排出を示している。その上の平行直線は拡張したシナリオによる推計の結果である。

現状システムでは約30年後に東北自動車道の累積炭素排出が東北新幹線を上回ると述べたが、旅客輸送ベースでいえば1,640億人キロ程度で両システムの累積炭素排出が逆転することを図は示している。高速道路または新幹線の単独システムを想定した場合はわずか10年程度(10.8年=210/1169×60年)で高速道路の累積炭素排出量が新幹線を上回ることがわかる。

5 結論

本研究では第2章において産業連関モデルを導入した交通施設のライフサイクルアセスメントを提案し、東北新幹線を例に取り、モデルの有用性を検討した。その結果、施設の建設、補修における炭素排出量は全体の54%だったのに対して、モーダルシフト推進政策の根拠である動力による排出量は、全体の23%であった。これより交通システムの環境負担性を議論する場合には、走行エネルギーのみならず、そのライフサイクル、特に施設の建設、維持に伴う排出を考慮する必要があることを再認識することとなった。さらにここでは家計の内生化モデルを提案し、ケーススタディにおいてその有用性を確認した。

第3章ではエネルギー価格の変動や取引価格の大きなばらつきに対処できるハイブリッド型産業連関モデルを提案し、東北自動車道に適用した。

東北自動車道を6区間に分割して推計を行った結果、地理的、人文的相違による炭素排出構造の相違が明らかとなった。また、東北自動車道工事による炭素排出は220万トンと、東北新幹線の463万トンと比較して半分以下であることが明らかとなった。これは特に駅舎の工事とコンクリート高架橋が多いのが原因である。

第4章では新幹線と高速道路の比較評価を行った。表 11にも示したとおり、60年間に必要とされる旅客輸送量は約1.2兆人キロである。莫大な初期投資にも関わ

らず、60年間の旅客輸送を全て新幹線システムに頼れば、現状システムと比較して693万トンの炭素排出(2,550万トンの炭酸ガス)を減少させることができる。また逆に高速道路だけに頼れば、1,152万トンの追加的炭素(4,224万トンの炭酸ガス)が排出されることが明らかとなった。

本研究においては、家計からの排出も含めた総CO₂排出量を計測すべく家計を内生化した。貯蓄と投資の関連において課題が残っている。平均消費性向と所得により貯蓄が決定し投資額も決定する構造になっており、外生要因である投資を含む最終需要の変化によって平均消費性向が決定されるという問題が生じている。この点は今回の計測においては信頼性を損なうものではないと考えるが、理論上は解決すべき今後の課題である。

謝辞：本研究を遂行するに当たって研究の機会を与えてくれた運輸政策研究機構に感謝します。また、積極的にデータを提供し研究の遂行を助けていただいた、JR東日本東北本社、日本道路公団東北支社に感謝いたします。また、国土交通省(道路局、東北運輸局)にも様々なデータ提供並びにご協力いただいたことを紙面を借りて感謝いたします。

参考文献

- 1) 本藤祐樹, 西村一彦, 内山洋司: 産業連関表による財・サービス生産時のエネルギー消費量とCO₂排出量, 電力中央研究所報告, 1996
- 2) 中村秀樹, 加藤博和, 丸田浩史, 二村達: 都市間高速道路の横断面構成の相違によるCO₂排出量のライフサイクル評価, 環境システム研究, Vol.26, pp1-10, 1998
- 3) 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, 土木学会論文集, No.566/VII-3, pp35-47, 1997
- 4) 鉄道用材料使用実態調査グループ: 鉄道用材料の使用実態と動向, 鉄道総研報告, Vol6 No.12, 1992
- 5) 内田博行, 松岡茂樹: ステンレス車両のリサイクル, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 1998
- 6) 吉岡完治, 外岡豊, 早見均, 池田明由, 菅幹雄: 環境分析のための産業連関表の作成, 1992
- 7) 財団法人運輸経済研究センター: 環境と運輸・交通, 1994
- 8) Bullard, C., III, and R. Herendeen 1975. Energy impact of consumption decisions. Proceedings of the IEEE 69, no.3: 484-493.
- 9) Gutmanis, I. 1975. Input-Output Models in Economic and Environmental Analyses. Proceedings of the IEEE 63, no.3: 431-437.
- 10) Hayami, H., A. Ikeda, and K. Yoshioka 1993. Estimation of Air Pollutions and Evaluating CO₂ Emissions from Production Activities: Using Japan's 1985 Input-Output Tables. Journal of Applied Input-Output Analysis 1, no.2: 29-45.
- 11) Herendeen, R. 1974. Affluence and energy demand. Mechanical Engineering 96: 18-22.
- 12) Hetherington, R. 1996. An input-output analysis of carbon dioxide emissions for the UK. Energy Convers. Mgmt 37: 979-984.
- 13) Kondo, Y., Y. Moriguchi, and H. Shimizu 1996. Creating an inventory of Carbon Dioxide Emission for Japan: Comparison of Two Methods. Ambio 25, no.4: 304-308.
- 14) Kulash, J., R. Mudge, D. Prywers 1977. Urban Transportation and Energy: The Potential Savings of Different Modes, Background paper, CBO's National Resources & Commerce Division. Congressional Budget Office, USA.
- 15) Lave, C.A. 1977. Rail Rapid Transit and Energy: The Adverse Effects. Transportation Research Record 648: 14-30.
- 16) Lave, L. B., E.C. Flores, and C.T. Hendrickson 1995. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges. Environmental Science & Technology 29, no.9: 420A-426A.
- 17) Leontief, W. 1970. Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach. The Review of Economics and Statistics 52, no.3:

- 18) Moriguchi Y, Y. Kondo, and H. Shimizu 1996. Life cycle assessment of transportation systems -its concept and a case study on GHG emissions from motor vehicles-. Submitted to the OECD Conference towards Sustainable Transport, March 24-27, 1996, Vancouver Canada.
- 19) Nishimura K, H. Hondo, and Y. Uchiyama 1997. Estimating the embodied carbon emissions from the material content. Energy Convers.Mgmt 38, Suppl.: S589-S594.
- 20) Rose, A. 1977. A Simulation Model for the Economic Assessment of Alternative Air Pollution Regulations. Journal of regional science 17, no.3: 327-344.
- 21) Rose, A. and C.Y. Chen 1991. Sources of change in energy use in the U.S. economy, 1972-1982. Resource and Energy 13: 1-21.
- 22) Rose, A. and S. Casler 1996. Input-output structural decomposition analysis: A critical Appraisal. Economic Systems Research 8, no.1: 33-62.

参考資料

- i) 総務庁：平成2年度産業連関表，全国統計協会連合会
- ii) 東洋経済新報社：経済統計年鑑，92，1992
- iii) 建設省建設経済局：平成2年度土木工事費内訳調査結果及び平成2年度公団関係土木工事費内訳調査結果，1993
- iv) 建設省建設経済局：平成2年度公共事業工事費等内訳調査報告書，1993
- v) 建設省資料
- vi) JR日本資料
- vii) 運輸省：平成2年度鉄道統計年報，政府資料等普及調査会
- viii) 財団法人経済調査会：施行単価資料，1996

(原稿受付 2001年5月18日)

Life Cycle Inventory Analysis of Transportation System - Comparative Study of Expressway and Shinkansen -

By Hajime INAMURA, Mongkut PIANTANAKULCHAI and Yasushi TAKEYAMA

Life cycle inventory analysis of transportation system has lately attracted a considerable attention. Huge amount of materials and energy are required for large scale transportation system not only on its operation phase but also on its construction process, maintenance works and demolition process. This study develops the model based on Input-Output framework for life cycle assessment. Life cycle carbon emission of transportation systems is estimated in the context of inter-city expressway and Shinkansen in Tohoku region of Japan. It was found that the Shinkansen system emits more than half of life-cycle carbon dioxide in the initial stage, and only 23 percent of emission derive from its train operation. The Shinkansen system emits much larger amount of carbon dioxide than the Expressway system in the construction phase, however, the life-cycle emission for sixty years is almost half of the road system.

Key Words ; **transportation system, life cycle assessment, hybrid I-O analysis, structural decomposition analysis**
