

2. アジア地域を対象とした運輸部門からの CO₂ 排出量の長期的推計

Long-term projection on CO₂ emissions from transportation sector in Asia region

明石 修*・松岡 譲**

Osamu AKASHI, Yuzuru MATSUOKA

ABSTRACT; Reducing CO₂ emissions is one of the biggest environmental issues which is captivating international concern. CO₂ emissions from transportation sector are increasing in both developed and developing countries. In this research we focused on four countries in Asia such as Japan, China, India and Thailand which are thought to be on the various stage of economical development. We conduct long-term projection on CO₂ emissions from transportation sector for those four countries. For the first step, we estimate transportation demand for each country using passenger transportation demand model and freight transportation demand model. Passenger transportation demand model reflects time use constraint which is the limitation of time spends to transportation activity of one person in one day. Freight transportation demand model is a simple model which estimates future value using current trends. Second, we estimate the CO₂ emission using bottom-up type model. This model describes technology choice using linear programming method. As a result, we could conduct long-term projection on CO₂ emissions from transportation sector for each country in the different socio-economical situation.

KEYWORDS: Climate change, Transportation demand model, CO₂emission model

1 はじめに

気候変動問題への対応として、CO₂ 排出量を抑制することは国際的な課題である。数ある排出部門の中で、運輸部門からの CO₂ 排出量は、現在、先進国、途上国問わず増加傾向にある。さらに今後数十年の間には、経済発展や人口増加、モータリゼーションの進展等により、途上国においては大幅な排出量の増加が見込まれている。また、先進国においても、旅客需要を中心とした交通需要量の増加に起因する CO₂ 排出量の増加傾向が今後も継続する可能性がある。このような状況を考えると、今後、運輸部門における排出抑制対策の重要度は、世界各国において増加すると考えられる。排出抑制対策は排出量の長期的な見通しに基づいて設計される必要があるが、これまでのところ各国の運輸部門を対象とした長期の排出量推計は十分行われているとは言えない。また、各国の排出量の動向は、人口や GDP といった各国の社会・経済状況により異なると考えられるが、各国レベルで推計を行った研究は数少ない。

このような背景を踏まえ、本研究では、今後、人口増加や経済発展が見込まれているアジア地域を対象に様々な社会・経済の発展段階にある国を抽出し、2050 年までを対象として運輸部門からの CO₂ 排出量の推計を行った。対象とした国は、日本、中国、インド、タイの 4 カ国である。本研究ではこれら 4 カ国を対象としたが、データの許す限り韓国に関しても推計を行ったので参考までにその結果も併記する。

* 京都大学大学院地球環境学舎環境マネジメント専攻 Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

** 京都大学大学院地球環境学舎 Hall of Global Environmental Research, Kyoto University

2 研究の概要

運輸部門からの CO₂ 排出量の変化は、交通需要量の変化と単位交通需要量あたりの CO₂ 排出量の変化の 2 つに分解することができる。本研究では、CO₂ 排出量の変化がこれらの 2 つの要因のうちどちらによるのかをより明確化するため、これら 2 つを区別して考えた。具体的には、交通需要量を推計する交通需要推計モデルと単位交通需要量あたりの CO₂ 排出量ならびに総 CO₂ 排出量を推計する CO₂ 排出量推計モデルの 2 種類のモデルを構築した。交通需要量推計モデルとしては、旅客交通需要と貨物交通需要の 2 種類の需要に対応するために、旅客交通需要推計モデルと貨物交通需要推計モデルの 2 つのモデルを構築した。

図-1 に本研究の全体的構成を示す。

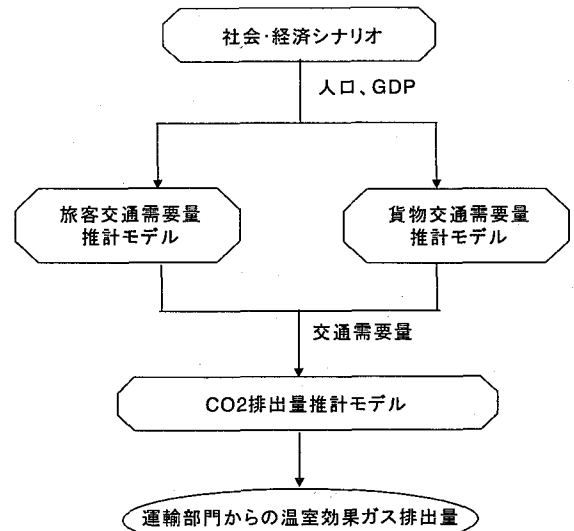


図-1 研究の全体的構成

3 交通需要量推計モデル

3.1 旅客交通需要推計モデル

旅客交通需要推計モデルは、交通手段別の交通需要量（人キロ）を推計するモデルである。本モデルでは、交通手段として、乗用車、バス、鉄道、航空の 4 つを取り扱った。

これまで、将来の旅客交通需要量に関する研究は数多くされているが、交通手段ごとの交通需要量を統合的に推計するものとしては、Schafer らが開発したモデル（Schafer et al. 2000）が知られている。Schafer らのモデルは中長期の交通需要量を推計するものであるが、対象とするのは世界を 11 に区分した地域である。本研究では、Schafer らのモデルの基本構造を踏襲しつつ、国レベルの推計を行うこととした。本研究で用いた旅客交通需要モデルは、総旅客交通需要量を求める部分と各交通手段の分担率を求める部分の 2 つの部分からなる。以下、(A) では、総旅客交通需要についてでは、(B) では各交通手段の分担率について述べる。

(A) 総旅客交通需要量

図-2 は、世界を 11 地域に区分し、1960～1990 年の一人あたりの旅客交通需要量（以下、PV/Cap）と一人あたり GDP（以下、GDP/Cap）の関係をプロットした図である（Schafer et al. 2000）。

この図から、全世界で共通して、GDP/Cap が PV/Cap の主要な駆動力になっていると考えられる。本モデルでは、式 (1) により、定式化を行った。パラメータの決定は、各国のデータを用いて行った。

$$PV/Cap = a \times (GDP/Cap)^b + c \quad (1)$$

a, b, c : パラメータ

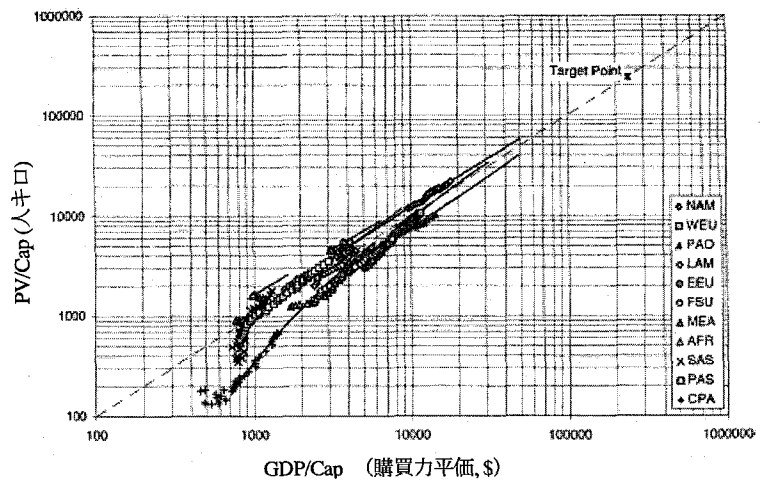


図-2 PV/Cap と GDP/Cap の関係

(B) 各交通手段の分担率

(1) 時間制約

本モデルでは、各交通手段の分担率を決定する際に、Travel Time Budget (以下、TTB) と呼ばれる時間制約を用いることとした。時間を用いて距離を計算するためには、速度が必要になる。本研究では、乗用車を 35km/h、バスを 20km/h、鉄道を 30km、航空を 600km/h と想定した。

Travel Time Budget とは Zahavi (1981) により明らかにされた交通に関する時間制約であり、一人あたりが一日に交通に費やす時間を意味する。図-3 は世界の 44 の町と 20 の国における TTB と GDP/Cap の関係を示したものである。この図より、社会・経済状況や地理的条件が異なる町や国においても TTB は大体 1~1.3 時間/人/日付近に集中していることが分かる。本モデルでは、対象国すべてにおいて TTB=1.1 時間/(人・日)と想定した。

さらに本研究では、乗用車、バス、鉄道、航空といったエネルギーを消費を伴う交通手段のみを対象とするために、これに対応して、TTB のうち上述 4 つの交通手段に費やす時間 (以下、TTB_{mot}) を算定する必要がある。図-4 は世界 11 地域の TTB_{mot} と PV/Cap の関係を表した図である (Schafer et al. 2000)。

この図から TTB_{mot} は、TV/Cap の上昇と共に増加するということが読み取れる。上述のとおり TV/Cap は、GDP/Cap の上昇と相関があることから、TTB_{mot} は、GDP/Cap の上昇と共に増加する傾向にあると言える。これは、所得が増加に伴い、徒歩や自転車からエネルギー消費を伴う交通手段に移行することを表している。本モデルでは、GDP/Cap=∞の極限状態のとき、TTB_{mot}=1.1 となるとして TTB_{mot} の定式化を行った。(このとき PV/Cap は最大値をとるが、その値は、TTB がすべて航空交通に費やされた場合の 240,000 人キロ/人となる。) TTB_{mot} の算定式を式 (2.1) ~ (2.3) に示す。パラメータの決定には、各国のデータを使用することとした。ここで、各国の TTB_{mot} の時系列データが必要になるが、現在のところ入手し得なかった。よって、式 (3) により TTB_{mot} を求めることとした。

$$TTB_{mot} = d + \frac{e}{(PV/Cap - f)^g} \quad (2.1)$$

$$d = -\frac{e}{(-f)^g} \quad (2.2)$$

$$e = \frac{1.1}{\left(\frac{1}{(24,000 - f)^g}\right) - \left(\frac{1}{(-f)^g}\right)} \quad (2.3)$$

$$TTB_{mot} = \sum_i \frac{PV_i / Cap / 365}{V_i} \quad (3)$$

TV_i 交通手段*i*の年交通需要量

V_i 交通手段*i*の平均速度

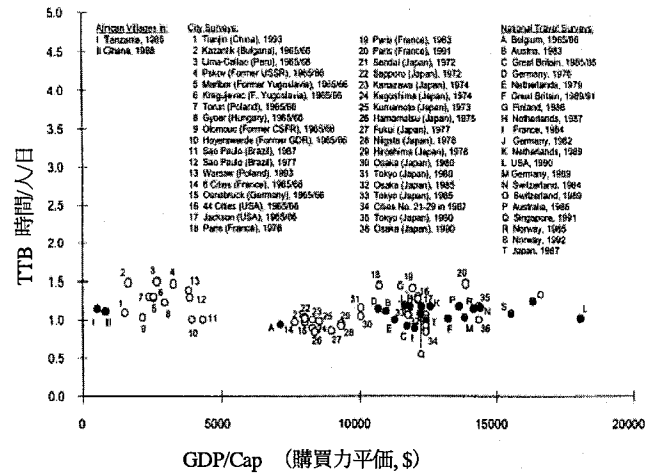


図-3 TTB と GDP/Cap の関係

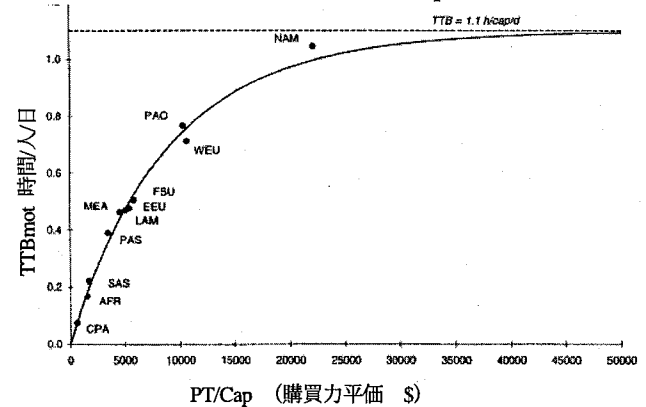


図-4 TTB_{mot} と PV/Cap の関係

(2) バスと鉄道の分担率

Schafer (2000) によれば、世界中の地域において GDP/Cap の増加とともにバスや鉄道といった低速輸送手段の分担率が減少することは、過去のデータより明らかである。本モデルでは鉄道の分担率(以下、 S_R) の推計式として式 (4) を用いた。なお式 (6) は $TV/Cap=240000$ の極限状態のとき、 $S_R=0$ となるように工夫した。バスの分担率 (S_B) は、低速輸送交通の分担率 (以下、 S_{LS}) より鉄道の分担率を差し引くことにより求めることとした。 S_{LS} の推計には、 S_R と同様、式 (4) を用いた。ただし、日本に関しては、2000 年において $S_R=0.21$ 、 $S_B=0.06$ となっており、 S_R に比べ S_B が極端に低い。よって、 S_B を求める際に S_{LS} から S_R を差し引かずに、式 (4) を独立に用い S_B を求めることとした。

$$S_i = j \left(\frac{1}{(PV/Cap - k)^i} - \frac{1}{(240,000 - k)^i} \right) \quad (4)$$

$$i = R, B, LS \quad i = R, B, LS$$

j, k, l : パラメータ j, k, l : パラメータ

(3) 乗用車と航空の分担率

乗用車の分担率 (S_C) と航空の分担率は (S_A) 下記の 2 つの式により求めることとした。ここで、 $(TV/Cap)_i$ は交通手段 i の一人一年あたりの旅客交通需要を表し、 V_i は交通手段 i の平均速度を表す。式 (5) は、「一人が一日に各交通手段に費やす時間の総和は TTB_{mot} に等しい」ことを表す時間制約式である。式(6) は「一人一年あたりの各交通手段の交通需要量の総和は、一人一年あたりの総旅客需要に等しい」ことを表す。

$$\sum_i \frac{(PV/Cap/365)_i}{V_i} = TTB_{mot} \quad (5)$$

$$\sum_i (PV/Cap)_i = PV/Cap \quad (6)$$

(C) 旅客交通需要量推計モデルの適用

各国ごとのデータを用いて式 (1) ~ (4) のパラメータを決定し、それらを用いて将来に向けてシミュレーションを行った。設定した将来の人口、GDP の値を表 1~2 に示す。人口は UN の World population projection (UN,2000) の中位推計値を使用し、GDP は国別の年増加率を設定し 2050 年まで外挿した。

表-1 人口の設定

	2000	2020	2040	2050
日本	127,096	125,958	115,594	109,220
中国	1,275,133	1,446,092	1,490,465	1,462,058
インド	1,008,937	1,291,290	1,503,345	1,572,055
タイ	62,806	75,097	82,030	82,491
韓国	46,740	51,409	52,632	51,560.471

(千人)

表-2 GDP の設定

	2000	2020	2040	2050
日本	3,207,344	4,651,606	6,912,041	8,425,740
中国	4,724,163	10,351,223	22,680,805	33,573,131
インド	2,772,730	7,403,937	19,644,848	31,999,387
タイ	378,476	825,240	1,808,203	2,676,582
韓国	691,772	1,252,427	2,262,023	3,039,970

(購買力平価, \$)

シミュレーションの結果を図-5 に示す。

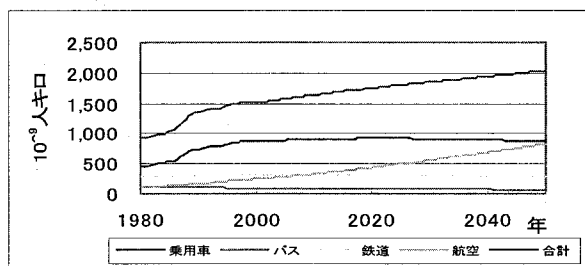


図-5 (a) 日本の旅客交通需要推計結果

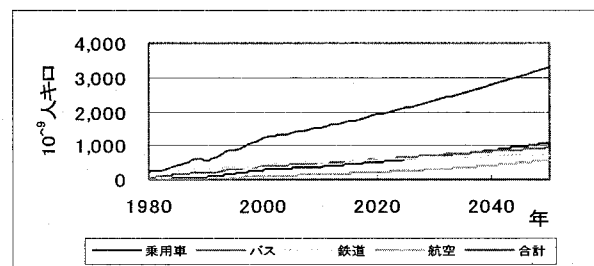


図-5 (b) 中国の旅客交通需要推計結果

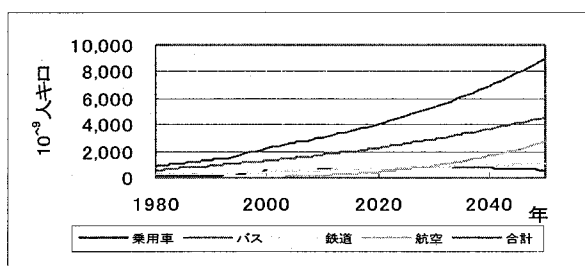


図-5(c) インドの旅客交通需要推計結果

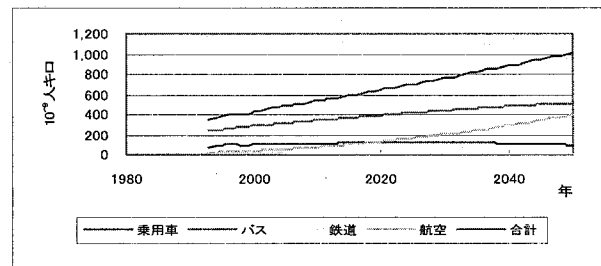


図-5 (d) タイの旅客交通需要推計結果

3.2 貨物交通需要推計モデル

(A) モデルの概要

貨物交通需要量(トンキロ)は、その国の産業構造と深い関連がある。一般に経済の発展に伴い産業の中心は、重工業からサービス産業へと移行するが、その際 GDP あたりの貨物交通需要量(以下、FV/Cap) は減少する。このようなことから、本研究では、GDP/Cap を説明変数とし、FV/Cap を推計することとした。具体的式は、式 (7) に示すとおりである。

$$(FV/Cap)_i = a(GDP/Cap)^b + c \quad (7)$$

a, b, c : パラメータ

(B) 貨物交通需要量モデルの適用

各国のデータを用いて式 (7) 中のパラメータを決定し、その値を用いてシミュレーションを行った。その結果を図-6 に示す。ただし、インドの船舶と航空、タイのトラック、船舶、航空、韓国のトラックと航空に関しては、回帰分析を行うだけのデータが存在しなかったため、他国のパラメータ値を用いてシミュレーションを行った。パラメータの採用には各国の国土の空間的な広がりやを考慮し、インドは中国のものを、タイ、韓国は日本のものを使用した。なお、シミュレーションを行う際に設定した人口、GDP は表-1、表-2 と同様である。

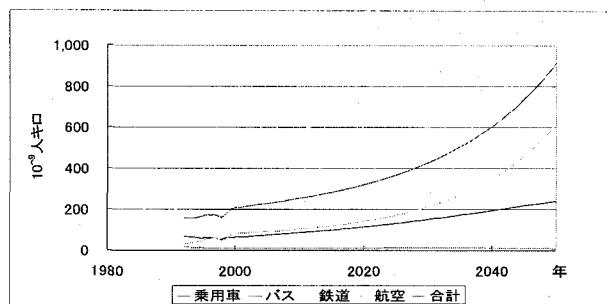


図-5 (e) 韓国の旅客交通需要推計結果

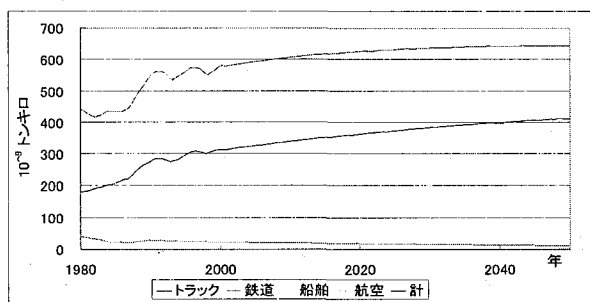


図-6 (a) 日本貨物需要量推計結果

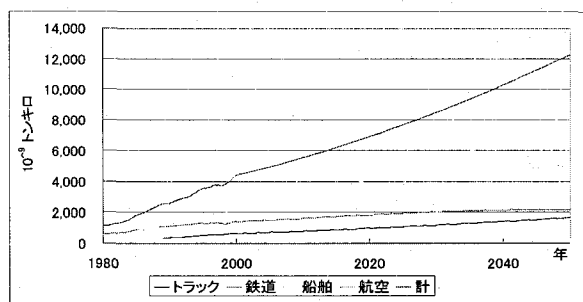


図-6 (b) 中国貨物需要量推計結果

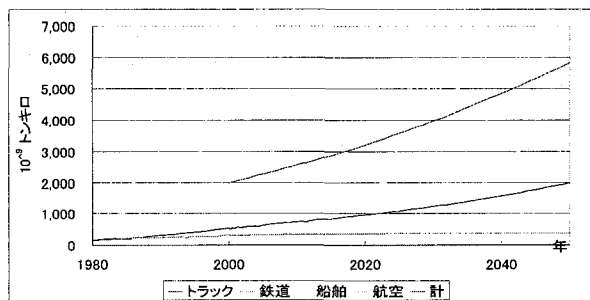


図-6 (c) インド貨物需要量推計結果

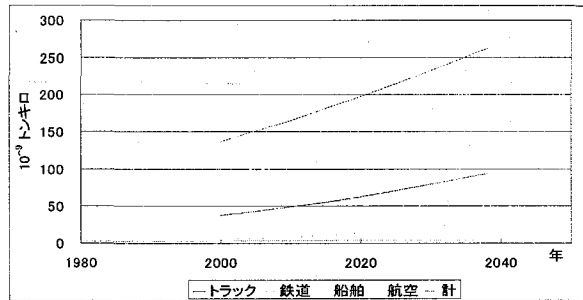


図-6 (d) タイ貨物需要量推計結果

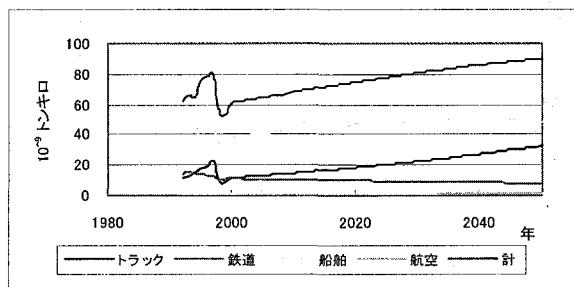


図-6 (e) 韓国貨物需要量推計結果

4 CO₂ 排出量推計モデル

4.1 モデルの概要

本研究では個々の輸送機器の積み上げにより CO₂ 排出量を推計するボトムアップ型モデルを構築した。モデルの中心的要素は、輸送機器を中心としたエネルギーシステムである。図-7に本モデルにおけるエネルギーシステムを示す。ここで輸送機器は、エネルギーを需要し、交通サービスを供給する機器として表現される。個々の輸送機器は、それぞれ初期費用、運転費用、1年間のエネルギー消費量、一年間に供給する交通サービスの量を性として持っている。本モデルの対象は、こうした属性を有する輸送機器が代替していく現象である。輸送機器の代替は、総コスト（初期投資費用、運転費用、運転時のエネルギー消費に伴う費用）を最小化するという戦略の下での機器選択の結果として起こるものとした。具体的には、総コストを目的関数として、制約条件の下で目的関数を最小化する線形計画法として定式化を行っている。制約条件としては、「輸送機器により供給されるサービスの量は所与の交通需要量を充足しなければならない」という制約を設けている。本モデルでは、交通手段別に交通需要量を与え、その交通需要量を満たすように各交通手段の内部でコストを最小化するような選択が行われるものとした。

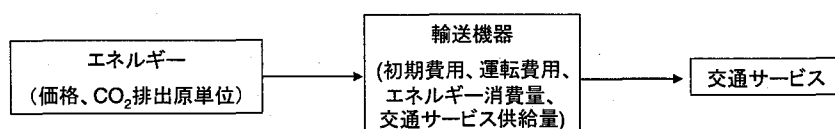


図-7 CO₂ 排出量推計モデルにおけるエネルギーシス

4.2 CO₂ 排出量推計モデルの適用

交通需要推計モデルにより算出された交通需要量を用いて、対象4カ国に対し CO₂ 排出量推計モデルを適用した。シミュレーション結果、を表-3に示す。

5 考察

表-4に2000年から2050年の間の各国の交通需要量と CO₂ 排出量の変化の大きさを表す指標として交通需要量、CO₂ 排出量それぞれの(2050年の値/2000年の値)を示す。ここで、日本の旅客部門を除き、交通需要量の指標値よりも CO₂ 排出量の指標値が大きくなっている。これは、旅客および貨物部門全体で見ると単位交通需要量あたりの CO₂ 排出原単位が増加していることを表している。すなわち、各々の交通手段の内部で高効率輸送機器への代替が進展するにも関わらず、それを上回る勢いで、CO₂ 他消費型の交通手段へ移行することを示している。この結果は、輸送機器単体に対する対策もさることながら、交通需要形態に対する対策が今後重要度を増すことを示唆している。

表-3 CO₂ 排出量の推計結果

		2000	2010	2020	2030	2040	2050
日本	旅客	167	175	185	191	195	198
	貨物	123	127	134	140	146	151
	計	290	302	319	331	340	349
中国	旅客	54	67	88	114	146	187
	貨物	147	185	230	284	346	422
	計	201	252	318	398	492	609
インド	旅客	62	88	153	246	384	602
	貨物	69	93	122	159	202	257
	計	131	181	275	405	587	859
タイ	旅客	38	44	55	67	81	98
	貨物	16	20	27	37	49	65
	計	54	64	82	104	130	163

Mt-CO₂

表-4 各国の交通需要量と CO₂ 排出量の変化

		交通需要量の変化	CO ₂ 排出量の変化
日本	旅客	1.34	1.19
	貨物	1.12	1.22
中国	旅客	2.71	3.46
	貨物	2.79	2.87
インド	旅客	4.00	9.72
	貨物	2.95	3.71
タイ	旅客	2.31	2.57
	貨物	2.24	4.16

文献

- Schafer, A., and D. Victor(2000): The future mobility of the world population, Transportation research part A, 171-205
 Zahavi, Y. (1981): The UMOT-Urban Interaction. DOT-RSPA-DPB 10/7, US Department of Transportation
 United Nations. (2001) World Population Prospects 2000