低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響

Huseyin TIRTOM¹・山口 裕通²・奥村 誠³・金 進英⁴

¹非会員 東北大学研究支援者 災害科学国際研究所（〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館148室）

E-mail: tirtom@irides.tohoku.ac.jp

²学生会員 東北大学大学院 工学研究科（〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館147室）

E-mail: h-ymgc@plan.civil.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所（〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館152室）

E-mail: mokmr@m.tohoku.ac.jp

⁴正会員 東北大学助教 災害科学国際研究所（〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 通研2号館149室）

E-mail: kim@irides.tohoku.ac.jp

OECDによる環境的に持続可能な交通（EST）の概念など、交通システムを考える上で低炭素化や環境負荷の軽減が重要な課題となっている。都市間旅客交通において低炭素化を図ろうとすれば、航空や高速バス等の利用を抑えて鉄道への転換を図ることが課題となる。しかし鉄道はインフラの維持に大きな固定費用がかかるため、導入できる路線が限定される。そのため、一つの路線により多くの利用者を集約する必要性から、旅客に迂回を強いることとなり、その結果所要時間の増加につながる可能性がある。つまり、低炭素化とネットワークの利便性の間にはトレードオフの関係がある。本論文は、トルコを例として、都市間交通のマルチモーダルなネットワークを計画する際に、低炭素化の制約の強さがもたらす影響を、数理計画モデルを用いて明らかにする。

Key Words : *intercity transportation, multi-modal, network design, low carbon*

1. はじめに

OECDによる環境的に持続可能な交通（EST）の概念に見られるように、交通システムを考える上で低炭素化や環境負荷の軽減が重要な課題となっている。都市間旅客交通で低炭素化や環境負荷の軽減を実現するには、「移動の効率性を確保しつつ、環境負荷の小さい交通のモーダルシェアを高めていくことが必要である」¹⁾。つまり、航空や高速バスからエネルギー消費の少ない鉄道への転換が有効な政策となる²⁾。実際に、EUでは短距離の航空フィーダー路線を高速鉄道で代替させるアイデアが提案され³⁾、実行されている。

しかし、鉄道のサービス特性を踏まえると、CO₂削減政策によって移動利便性が犠牲になる可能性がある。CO₂削減には鉄道の整備や高速化によって鉄道シェアを高めることが求められるが、航空や高速バスと異なり、鉄道には連続的な専用空間を整備・維持する必要があることから莫大な固定費用を要するといったサービス特性がある。この莫大な固定費用をまかなうために、鉄道は

それぞれのリンクで可能な限り多くのODペアの旅客に対してサービスを提供することが求められる⁴⁾。よって、鉄道のモーダルシェアを高めるためには旅客数の小さい区間の利用者を十分な旅客数を確保できる別の路線に誘導する必要がある。この結果、CO₂削減政策によって、都市間旅客交通ネットワーク全体で見ると所要時間が増大し、移動利便性の低下につながる恐れがある。

そこで、本研究では、CO₂削減レベルに応じた最適都市間旅客交通ネットワークの構造を分析し、CO₂削減量とネットワークの移動利便性との関係を明らかにする。これは、都市間旅客交通の低炭素化政策を検討する際に重要なファクターとなりうるものである。具体的には、トルコの都市間交通ネットワークを対象として、CO₂削減レベルに応じた最適都市間旅客交通ネットワークの構造（ネットワークの形状と各リンクの頻度）を、著者らが開発した都市間旅客交通のMulti-modal Network Planning Model（以下、MNPモデル）を用いて導出する。そして、その結果を比較することによって、CO₂削減と移動利便性とのトレードオフ関係を明らかにする。さらに、都市

(ノード) ごとに発生交通量の移動利便性を算出し、CO₂削減レベルに対する移動利便性への影響の都市ごとの違いを考察する。

これまでも、交通とCO₂削減を対象とした研究は数多く行われてきた（例えば、低炭素交通システムの構築に向けた長期計画を検討した中村ら⁹⁾など）。しかし、ほとんどの研究は都市内交通に着目したもので、本研究が対象とする都市間交通とは対象が異なる。さらに、自動車交通の削減に主眼が置かれ、（新規整備・利用者の増加による）公共交通の利便性向上とCO₂削減が両立する都市内交通では、本研究で着目する移動利便性とCO₂削減量とのトレードオフ関係は存在しない。

数少ない都市間交通のCO₂排出量に着目した研究では、競合関係にある複数のモード間におけるCO₂排出量の比較が行われてきた。例えば、稲村らの研究⁶⁾では、東北新幹線と東北自動車道の旅客輸送部分のライフサイクル炭素排出量を比較している。また、柴原らの研究⁷⁾では、新幹線と航空が競争関係にあるODペアを対象に、それぞれのライフサイクルCO₂排出量と所要時間を比較し、多くのODペアで新幹線が優位となることを示している。しかし、これまでの分析では「あるレベルの低炭素化政策を進めるには、どのような都市間旅客ネットワーク構造への転換が求められるか？それにより移動利便性がどれだけ、どのように低下しうるか？」という疑問に答えるような分析はされていない。柴原らの分析では所要時間とCO₂排出量削減との関係を分析しているが、新幹線整備による移動利便性の向上とCO₂排出量削減が両立するようなODペアを抽出するというレベルにとどまっている。つまり、「サービス維持のために多くの旅客の集約が必要であるという鉄道の特性のために、ネットワーク全体で移動利便性が低下しうる」というトレードオフ関係は明らかにされていない。そこで、本研究ではこの鉄道のサービス特性を踏まえた、MNPモデルによって、CO₂削減目標量に応じた最適ネットワーク構造を推定する。そしてその結果を分析することで、CO₂削減目標量を大きくすることで移動利便性が低下するトレードオフ関係と、そこで発生しうる問題を明らかにする。

2. 低炭素化政策を加味したMNPモデル

著者らは、複数モードを考慮した最適ネットワークを計画するためのMNPモデルを提案し⁸⁾、最適ネットワーク上における複数モード間の補完関係について分析してきた⁹⁾。本研究では、このMNPモデルに総CO₂排出量に関する制約条件を新しく導入する。そして、トルコの都市間交通ネットワークに適用し、CO₂削減量とネットワ

ークの移動利便性との関係を考察する。本章では、新しく追加した総CO₂排出量の制約条件に加え、既発表⁸⁾のMNPモデルの定式化についても簡単に説明する。

(1) MNPモデルの基本構成

本モデルでは、複数のOD間の旅客数を所与とした上で、これらの旅客を複数のモードからなるネットワーク上に配分して、利用者全体の総旅行時間と運営費用の和を小さくするような各リンクの航空便・列車の頻度を定める。この問題は、混合整数計画問題として定式化される。このとき、解の実行可能性を保証するため、各リンクにおいては、通過旅客数が頻度によって決まるリンク容量以下であるという制約と、通過旅客数によって決まる収入がその頻度を維持するコストを上回るという制約を置いている。

なお、ここでは形成されるネットワークと頻度の空間構成に関心があるため、個々の利用者の経路選択行動や個々の事業者の採算性は考慮しない。もちろんこのモデルにより得られた利用者の経路配分を実現するためには、経路別に運賃の差を付けて旅客を誘導することが必要であるが、事業者間の金銭のやり取りがキャンセルアウトするように運賃を設定する問題は、別途線形計画問題として定式化でき、解の存在が保証できる。

(2) 内生変数とパラメータ

都市ごとにノード $n \in N$ を置き、それらをつなぐ方向別のリンクをモード別 ($m \in M$) に定義する $(i, j) \times m \in L$ 。またモード間の乗継を明示的に表現するため、各都市ノード n をモード別の着ノード $n_- \times m$ とモード別の発ノード $n_+ \times m$ に区分し、その間に乗継リンク $(m, m') \times n$ を設定する。一方起終点ゾーン $(k, l) \in K \times K$ 間のOD交通量 T_{kl} は所与とする。

内生変数は旅客の流動を表す4つの変数と、リンクサービスの有無および頻度を表す2つの変数である。旅客の流動を表す変数のうち、通常モード別リンクに流れる交通量は、出発地 k ごとに定義して X_{ij}^{km} で表す。ノードにおける乗継交通量も出発地別に定義して $Y_n^{kmm'}$ で表す。このほか、出発地における新規の乗車数をモード別に B_k^m と表し、目的地における各出発地からの到着者数をモード別に A_n^{km} と表示する。一方、列車・便については、リンク、モードごとに、設定の有無を表す0-1変数を Z_{ij}^m で表し、頻度を F_{ij}^m で表す。

外生的に与えるパラメータは以下のとおりである。通常のリンクにおけるモードごとの所要時間を t_{ij}^m 、各ノードの一人当たりの乗継所要時間を $\tau_n^{mm'}$ とする。なお同一モード内での乗継は、そのノードを乗車したまま通過する場合と区別できないことに注意する。モード別の

1便当たりの最大容量を h^m , 最大設定可能頻度を g_{Max}^m とする. 列車や航空便の運航に伴う1頻度あたりのCO₂の排出量を c_{ij}^m とする. さらに, 各リンクのサービスを維持するためのコストを, 固定費用部分と頻度に比例する変動費用部分に分け, それぞれを d_{ij}^m および e_{ij}^m とおく. またリンクの運賃を f_{ij}^m とおき, 全ての旅客の時間価値を一定値 v とおく.

(3) 目的関数 (社会的費用最小化)

本モデルでは目的関数として, 旅客の総一般化費用と事業者の総利潤の和である社会的費用をとりあげる. ここで運賃はリンクごとに所与とするが, 運賃は利用者から運営者への移転に過ぎず, 社会的にみればキャンセルするため, 求めるべき社会的費用は, 利用者の総旅行時間の金銭換算値と総運営費用の総和として与えられる. すなわち目的関数は, 先に定義したパラメータを用いて次のような内生変数の線形式で与えられる:

$$SC = (\sum_i \sum_j \sum_m t_{ij}^m \sum_k X_{ij}^{km})v + (\sum_n \sum_m \sum_{m'} \tau_n^{mm'} \sum_k Y_n^{kmm'})v + (\sum_i \sum_j \sum_m d_{ij}^m Z_{ij}^m + e_{ij}^m F_{ij}^m). \quad (1)$$

式(1)の右辺の各項は順に, 乗車中の総所要時間の金銭換算値, 乗継所要時間の金銭換算値, 総運営費用を示す.

なお, 交通事業者が競争的で参入と退出が自由な場合, 利潤はゼロとなり各リンクの運賃は, そのリンクで必要とされる費用を利用者数で分割した額に設定されるという状況を考えれば, この社会的費用は利用者の一般化費用と解釈することができる.

(4) 交通量に関する制約条件

まず, 交通量の保存条件を記述する. 着ノード n における到着交通量について, 以下の2式が成立する.

$$\sum_{i \in N^-(n)} X_{in}^{km} = A_n^{km} + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (2)$$

$$\sum_m A_n^{km} = T_{kn}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K \quad (3)$$

式(2)は, 着ノードに到着した旅客が, そのノードを最終目的地にする旅客とそのノードで乗継を行う旅客に分かれることを示している. 式(3)は各モードで最終目的地に到着した出発地別の交通量の和が, OD交通量に等しいことを表わしている. 同様に発ノード n から出発する旅客について, 次の2式が成立する.

$$B_n^m + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'} = \sum_{j \in N^+(n)} X_{nj}^{km}, \quad \forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{l \in K} T_{nl} = \sum_{m \in M} B_n^m, \quad \forall n \in K \quad (5)$$

式(4)は, ある発ゾーンを出発地としてモード m に乗車する旅客と, そのゾーンでモード m に乗継いだ旅客が, その発ゾーンからの旅客数に等しいことを表わしている. 式(5)は, そのゾーンを出発地とするOD交通量の和は, いずれかのモードを用いて出発することを保障している.

次に頻度設定に関する制約条件を記述する. あるリンクにモード m のサービスが存在する場合 ($Z_{ij}^m = 1$) のみ, 正の頻度を設定することができる:

$$F_{ij}^m \leq g_{\text{Max}}^m Z_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A. \quad (6)$$

旅客を乗せずに車両を動かす「回送」は, CO₂排出を生み出すため合理的ではない. 本研究では回送を行わないものと考え, 頻度について次の連続条件を付与する:

$$\sum_{i \in N^-(n)} F_{in}^m = \sum_{j \in N^+(n)} F_{nj}^m, \quad \forall n \in N, \forall m \in M. \quad (7)$$

最後にリンク×モードごとに, 頻度・旅客数の関係を記述する. まず旅客数は頻度から計算される容量の範囲内におさまる必要がある:

$$\sum_k X_{ij}^{km} \leq h^m F_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A. \quad (8)$$

さらに, リンクの旅客数から得られる収入額が, 頻度を維持するための運営費用を上回るという条件は, 以下のように表現できる:

$$f_{ij}^m \sum_k X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m Z_{ij}^m + e_{ij}^m F_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A. \quad (9)$$

(5) CO₂排出量に関する制約条件

本研究では, 低炭素化政策の影響を分析するために新しくCO₂排出量制約を付与する. 各モードの運行頻度に対応してCO₂が排出されるので, 総排出量を TCO_2 以下に抑えるという条件は, 以下のような線形式で表現できる:

$$\sum_i \sum_j \sum_m c_{ij}^m F_{ij}^m \leq TCO_2. \quad (10)$$

(6) 定式化のまとめと解法

最後に, 変数の定義域として

$$X_{ij}^{km} \geq 0, \quad Y_n^{kmm'} \geq 0, \quad B_k^m \geq 0, \quad X_n^{km} \geq 0 \quad (11)$$

および,

$$Z_{ij}^m \in \{0, 1\}, \quad F_{ij}^{km} \geq 0 \quad (12)$$

が加わる. 頻度 F_{ij}^{km} は整数値に限定してもよいが, ここでは週のなかで異なる便数の日があることも認め, 平均頻度を表す実数と考える. さらに利用者の利便性の立場から, 設定頻度に最小限度 g_{Min} を設定する必要がある場合には, 新たに次の制約条件を追加することで対応できる:

$$F_{ij}^{km} \geq g_{\text{Min}} Z_{ij}^m, \quad \forall (i, j) \times m \in A. \quad (13)$$

図-1 トルコの都市間旅客交通ネットワーク (基準ネットワーク形状)

以上、式(1)を目的関数とし、式(2)～(13)を制約条件とする問題は、少数の0-1変数 (z_{ij}^m) を含む混合線形計画問題となる。したがって多くの数学ソフトウェアに実装されている混合整数計画法のプログラムのパッケージを利用して容易に解くことができる。

3. トルコを対象とするケーススタディー

(1) トルコの都市間交通ネットワークと分析の設定

本研究ではトルコ国内の11の主要都市を結ぶ図-1のような都市間交通ネットワークを対象に検討を行う。取り上げる交通モードは、航空、鉄道（高速・在来）、高速バスである。このうち高速鉄道は、現在1区間で営業中、2区間で建設中であるが、本研究では整備計画が存在する5つの区間は整備が完了したものとして扱う。

表-1に示すように、トルコ国内最大の都市は人口1380万人のIstanbul (IST) であるが、国土の北西端に位置しているため、各都市との間に航空便が設定されている。さらに、首都である第二の都市Ankara (ANK, 人口490万人) との高速鉄道が現状では未完成であることが、CO₂排出量を大きくする原因となっている。

モデル中のパラメータ値としてモード間の乗継所要時間 $\tau_n^{mm'}$ は全ノードに共通して表-2の値を与える。各モードの単位距離当たりのCO₂排出量を表-3のように設定し、リンク距離を乗じた値をパラメータ c_{ij}^m として用いる。この数値は、Kato et al.¹⁰⁾の数値を参考に設定した。その他のリンクに関する運賃、固定費用、変動費用のパラメータ値は現状に合わせて設定するが、紙面の都合上省略する。

トルコ国内では残念ながら、幹線旅客純流動調査のような調査は行われておらず、OD交通需要の実態はわからない。そこで、本研究では距離だけを抵抗要因とする

表-1 各都市の人口

都市名	人口 (万人)
Istanbul (IST)	1380
Ankara (ANK)	490
Izmir (IZM)	400
Bursa (BUR)	260
Adana (ADA)	210
Antalya (ANT)	200
Konya (KON)	200
Kayseri (KAY)	120
Eskisehir (ESK)	70
Afyon (AFY)	70
Sivas (SIV)	60

表-2 乗継所要時間

Modes	乗継所要時間(min)
Rail to Rail	20
Rail to Air	100
Rail to Bus	40
Air to Air	60
Air to Bus	100
Bus to Bus	20

表-3 CO₂排出原単位

Modes	Vehicle Capacities (passengers)	CO ₂ Emissions (g/frequency-km)
Rail	400	5
HSR	400	3.9
Air	165	34
Bus	54	9

重力モデルを作成し、人口データに基づいて表-4のような仮想的なOD交通量を与えることとした。

(2) CO₂排出制約なしの最適ネットワーク構造

まず排出制約なしケースとして、総CO₂排出量に関する式(10)の制約条件を取り除いて、社会的費用を最小化

表-4 OD交通量 (推計値 単位: 人/day)

	IST	BUR	IZM	ESK	AFY	ANT	ANK	KON	SIV	KAY	ADA	total
IST	0	16,560	11,415	7,425	3,480	4,035	21,705	4,770	810	2,175	2,475	74,850
BUR	16,560	0	7,755	7,095	1,860	1,395	6,765	1,755	180	525	600	44,490
IZM	11,415	7,755	0	1,380	2,010	3,135	4,380	2,055	180	495	780	33,585
ESK	7,425	7,095	1,380	0	1,935	645	5,355	1,080	75	240	255	25,485
AFY	3,480	1,860	2,010	1,935	0	1,305	3,930	2,175	60	225	7,710	24,690
ANT	4,035	1,395	3,135	645	1,305	0	2,550	3,030	135	465	1,050	17,745
ANK	21,705	6,765	4,380	5,355	3,930	2,550	0	9,885	1,185	4,590	3,255	63,600
KON	4,770	1,755	2,055	1,080	2,175	3,030	9,885	0	345	1,815	2,580	29,490
SIV	810	180	180	75	60	135	1,185	345	0	1,590	390	4,950
KAY	2,175	525	495	240	225	465	4,590	1,815	1,590	0	1,815	13,935
ADA	2,475	600	780	255	7,710	1,050	3,255	2,580	390	1,815	0	20,910
total	74,850	44,490	33,585	25,485	24,690	17,745	63,600	29,490	4,950	13,935	20,910	353,730

図-2 排出制約なしケースのネットワーク構造 (数字は日頻度)

表-5 排出制約なしケースの計算結果

旅行時間 (10^3 hours/day)	1,052
運営費用 (10^3 \$/day)	3,466
社会的費用 (10^3 \$/day)	8,193
CO ₂ 排出量 (10^3 kg/day)	2,387

する最適ネットワーク構造を算出する。

モデルの解は図-2のようになり、図-1と比較すると、すべての設定可能な航空リンクと高速鉄道リンク、在来鉄道のリンクではサービスが提供され、正の便数が設定されている。航空または鉄道のサービスが設定されたリンクにはバス路線は設定されない。4つのモードの分担率を乗車区間の旅客キロに基づいて計算すると、高速鉄道30%、在来鉄道20%、高速バス13%、航空37%である。表-5に示すように、この解における社会的費用は1日当たり8,193 (10^3 \$/day)であった。そして、CO₂総排出量は2,387 (10^3 kg/day)であり、以下ではこの値を基準値 $TCO_2^{n-const}$ として、総排出量制約値 TCO_2 を設定していく。

(3) CO₂排出制約と最適ネットワーク構造

本研究では、式(10)右辺の総排出量制約値 TCO_2 を10%ずつ減らした、5パターンのCO₂排出制約を設定し、それぞれで社会的費用を最小とするネットワーク構造を算出した。その算出結果を用いて、旅客キロに基づいて算出した各モードの分担率を図-3に、その算出されたネットワーク構造 (各リンクの頻度) を図-4に示す。

図-3 CO₂排出制約値と最適モード分担率の関係

図-3のCO₂排出制約量とモード分担率との関係を見ると、予想通りの結果が得られていることが確認できる。つまり、CO₂排出制約が厳しい (TCO_2 が小さい) ほど、最適ネットワーク構造における、CO₂排出原単位が大きい航空のシェアが小さく、鉄道 (Rail + HSR) のシェアが大きいことが確認できる。なお、高速バスのシェアはCO₂排出制約を厳しくしても変わらない。この原因は、最適ネットワーク構造の算出結果を見ながら後述する。

数値は図-2（排出制約なしケース）との頻度の差分。細線は±0.

図-4(a) 10%CO₂排出量削減時の最適ネットワーク構造

数値は図-2（排出制約なしケース）との頻度の差分。細線は±0.

図-4(b) 20%CO₂排出量削減時の最適ネットワーク構造

数値は図-2（排出制約なしケース）との頻度の差分。細線は±0.

図-4(c) 30%CO₂排出量削減時の最適ネットワーク構造

表-6(a) 10%CO₂排出量削減時の計算結果

旅行時間 (10 ³ hours/day)	1,086 (1.03)
運営費用 (10 ³ \$/day)	3,318 (0.96)
社会的費用 (10 ³ \$/day)	8,198 (1.00)
CO ₂ 排出量 (10 ³ kg/day)	2,148 (0.90)

括弧内は排出制約なしケースとの比

表-6(b) 20%CO₂排出量削減時の計算結果

旅行時間 (10 ³ hours/day)	1,122 (1.07)
運営費用 (10 ³ \$/day)	3,180 (0.92)
社会的費用 (10 ³ \$/day)	8,223 (1.00)
CO ₂ 排出量 (10 ³ kg/day)	1,909 (0.80)

括弧内は排出制約なしケースとの比

表-6(c) 30%CO₂排出量削減時の計算結果

旅行時間 (10 ³ hours/day)	1,168 (1.11)
運営費用 (10 ³ \$/day)	3,089 (0.89)
社会的費用 (10 ³ \$/day)	8,336 (1.02)
CO ₂ 排出量 (10 ³ kg/day)	1,671 (0.70)

括弧内は排出制約なしケースとの比

数値は図-2（排出制約なしケース）との頻度の差分。細線は±0.

図-4(d) 40%CO₂排出量削減時の最適ネットワーク構造

数値は図-2（排出制約なしケース）との頻度の差分。細線は±0.

図-4(e) 50%CO₂排出量削減時の最適ネットワーク構造

次に、図-4の最適ネットワーク構造（ネットワークの形状と各リンクの最適頻度）から、CO₂排出制約量に応じた最適ネットワーク構造の差異を見る。まず、排出制約なしケースから10%減($TCO_2 = 0.9 \times TCO_2^{n-const}$)のCO₂排出量制約を設定した結果である図-4(a)をみると、IZM-ADAとANK-ADA間の2つの航空路線の頻度が排出制約なしケースより小さく、IZM-AFY, ESK-AFY, ANK-ESK間の3つの鉄道路線の頻度が排出制約なしケースより大きい結果であった。これは、排出制約なしケースでは航空ルート（IZM-ADA-ANK）を使っていたIZM-ANK間の旅客が、CO₂排出量を減らすために鉄道ルート（IZM-AFY-ESK-ANK）に誘導されることによる。なお、高速バスの頻度は、すべて排出制約なしケースと同じである。

次に、20%減($TCO_2 = 0.8 \times TCO_2^{n-const}$)のCO₂排出量制約を設定した結果である図-4(b)では、IST-SIV間の航空サービスが存在しない。また、高速バスの頻度を見ると、

鉄道に転換され排出制約なしケースより小さい値をとるリンク（IST-BUR間）と、航空から高速バスに転換され排出制約なしケースより大きい値をとるリンク（ANT-AFY, KON-ANT間）が両方みられる。

30%減($TCO_2 = 0.7 \times TCO_2^{n-const}$)のCO₂排出量制約を設定した結果である図-4(c)では、さらに航空便の減少と鉄道・高速バス便の増加が進む。なお、このとき基準ネットワーク（図-1）には存在するが、排出制約なしケースでは頻度がゼロであったAFY-ANK間の高速バスサービスが設定されている。これは、ESK-ANK間の高速鉄道リンクの頻度が上限（100）に達してしまったために、その輸送力を補強し航空からの転換を図るために高速バスサービスが活用される。このように、高速バスが鉄道を補完するために活用され、CO₂排出制約を厳しくしても、高速バスのシェアは維持される結果となっている。

40%減($TCO_2 = 0.6 \times TCO_2^{n-const}$)のCO₂排出量制約を設定した結果である図-4(d)では、IST-ANK, ANK-ADA間

表-6(d) 40%CO₂排出量削減時の計算結果

旅行時間 (10 ³ hours/day)	1,255 (1.19)
運営費用 (10 ³ \$/day)	2,870 (0.83)
社会的費用 (10 ³ \$/day)	8,512 (1.04)
CO ₂ 排出量 (10 ³ kg/day)	1,432 (0.60)

括弧内は排出制約なしケースとの比

表-6(e) 50%CO₂排出量削減時の計算結果

旅行時間 (10 ³ hours/day)	1,368 (1.30)
運営費用 (10 ³ \$/day)	2,720 (0.78)
社会的費用 (10 ³ \$/day)	8,867 (1.08)
CO ₂ 排出量 (10 ³ kg/day)	1,193 (0.50)

括弧内は排出制約なしケースとの比

の航空サービスがなくなり、航空から鉄道への転換がさらに進む。また、高速鉄道の容量不足が悪化するために、補完する高速バスサービスの頻度も大きくなる。

最後に、図-4(e)の排出制約なしケースから50%減($TCO_2 = 0.5 \times TCO_2^{n-const}$)のCO₂排出量制約を設定した結果をみると、さらに航空サービスが少なくなり、鉄道と高速バスが中心のネットワークとなることがわかる。この中で高速バスは、ANTと鉄道ネットワークを接続するフィーダーの役割と、IST-ESK-ANKの区間で頻度の上限に達している高速鉄道を補完する役割を果たしていることが読み取れる。

(4) CO₂排出制約と移動利便性のトレードオフ

図-5にCO₂排出量制約値に応じた、社会的費用と時間費用、運営費用を示す。まず、運営費用について見ると、CO₂排出量制約値を厳しくする（小さくする）ほど、運営費用は小さくなる。これは、運営費用が特に大きい航空から、鉄道への転換が進むことに起因する。また、社会的費用と時間費用は、CO₂排出量制約値を厳しくする（小さくする）ほど、大きくなる。このように、低炭素化政策を進めるほど、時間費用が大きくなる（移動利便性が低下する）という、CO₂排出量制約値と移動利便性のトレードオフ関係の存在が確認できた。次節では、より詳細な都市ごとのトレードオフ関係を分析する。

(5) CO₂排出制約と各都市の移動利便性

図-4から分かるように、CO₂排出制約による影響はそれぞれの都市ごとに大きく異なることが想定される。そこで、本節ではトレードオフ関係を都市ごとに分析する。本研究で用いたMNPモデルでは、リンク交通量を発地ゾーン（都市）毎に取り扱っているために、それぞれの都市ごとに、発生交通量の時間費用の総和を算出して、

移動利便性の変化を確認することができる。

図-6にCO₂排出制約量毎に、各都市ごとの排出制約なしケースを基準とする時間費用の比を算出した結果を示す。図-6から、都市ごとの時間費用は、概ねCO₂排出制約を厳しくすればするほど大きくなる傾向にあり、都市ごとに見ても、CO₂排出制約と移動利便性との間にはトレードオフの関係が存在することがわかる。ただし、その変化率を見ると、都市ごとに大きく異なることがわかる。具体的には、AFY, BUR, ESK, KONといったネットワークの中心に立地する都市では、50%のCO₂排出制約時でも時間費用は排出制約なしケースの1.1倍未満であるのに対して、最大のADAでは1.6倍も時間費用が増加して移動利便性が低下する。つまり、全体最適を目的関数として低炭素化政策を実施すると、特にネットワークの端に位置する一部の都市の移動利便性を極端に低下させることがわかる。

図-5 CO₂排出制約値と社会的費用との関係

図-6 CO₂排出制約値と都市ごとの時間費用との関係

4. おわりに

本研究では、筆者らが提案した都市間旅客交通のMNPモデルを用いて、CO₂排出制約のレベルの違いによる最適都市間交通ネットワーク構造の差異について考察を行った。具体的には、トルコ国内の11都市の都市間旅客交通ネットワークを対象にして航空、在来鉄道、高速鉄道、高速バスの4つの交通モードの最適リンク頻度の差異や分担率の違いをみることで、CO₂排出量制約と移動利便性のトレードオフ関係の存在を確認した。また、低炭素化を進めるためには、二酸化炭素排出量が多い航空については鉄道に転換することが求められるが、高速バスについては鉄道のサービス特性や容量制約によって実現できないサービスを補完する役割を持ちうるということがわかった。

さらに、都市ごとのCO₂排出量制約量と移動利便性との関係を分析することで、全体最適を目的関数とした低炭素化政策は、一部の都市の移動利便性を極端に低下させてしまう可能性を明らかにした。このことから、都市間旅客交通の低炭素化政策を進めるに当たっては、都市ごとの移動利便性にも着目して、地域間の公平性に注意しながら計画する必要がある。

謝辞：本研究は日本学術振興会科学研究費補助金(基盤(B) 25289157)の成果である。

参考文献

- 1) 鈴木温, 泊尚志, 屋井鉄雄: 英国と米国カリフォルニア州の交通計画体系における都市間交通と気候変動の考慮, 運輸政策研究, Vol. 14, No. 1, pp. 2-16, 2011.

- 2) Gonzalez-Savignat, M. : Competition in air transport—the case of the high speed train—, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, pp. 77-108, 2004.
- 3) Horn, M. T.: Multi-modal and demand-responsive passenger transport systems: a modeling framework with embedded control systems, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, pp. 167-188, 2002.
- 4) Okumura, M. and Tsukai, M. : Air-rail inter-modal network design under hub capacity constraint, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 7 (CD-ROM), 2007.
- 5) 中村一樹, 林良嗣, 加藤博和, 福田敦, 中村文彦, 花岡伸也: アジア開発途上国都市における低炭素交通システム実現戦略の導出, 土木学会論文集 D3, Vol. 68, No. 5, pp. 857-866, 2012.
- 6) 稲村肇, モンクット・ピアンタナクルチャイ, 武山泰: 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, 運輸政策研究, Vol. 4, No. 4, pp. 11-22, 2002.
- 7) 柴原尚希, 服部有里, 森本涼子, 加藤博和, 林良嗣: LCA を用いた航空と新幹線の CO₂ 排出量の比較, 第17回地球環境シンポジウム講演集, pp. 19-25, 2009.
- 8) Okumura, M., Tirtom, H. and Yamaguchi, H. : Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012)*, pp. 309-314, 2012.
- 9) Tirtom, H. , Yamaguchi, H. and Okumura, M. : Analysis of potential multimodal connections in intercity network of Turkey, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 9 (CD-ROM), 2013.
- 10) Kato, H., Shibahara, N., Osada, M. and Hayashi, Y. : A life cycle assessment for evaluating environmental impacts of inter-regional high-speed mass transit projects, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 3211-3224, 2005.

(2014. 2. 28 受付)

LOW CARBON POLICY AND OPTIMAL STRUCTURE OF MODAL-MIX NETWORK FOR INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION

Huseyin TIRTOM, Hiromichi YAMAGUCHI, Makoto OKUMURA and Jinyoung KIM

Environmentally sustainable transportation becomes an important issue as well for intercity passenger transportation, where modal shifting from energy consuming airline and bus service, to energy efficient high speed railway is most feasible measure. Strategic redistribution of network-wide demand onto the improved rail links is necessary in order to collect enough income to support the railway service requiring large fixed cost. This paper presents an optimal modal-mix planning model in intercity passenger transportation, which aims to design a modal mix network minimizing the social cost, under the condition that total CO₂ emission does not exceed the given level. The proposed model is formulated as a mixed integer linear programming model, which can be numerically solved by general solver programs. The proposed model was applied to the intercity network of Turkey, and used to design the network structure corresponding the different levels of CO₂ emission. It is found that, tightening CO₂ threshold increased travel times and so social cost.