

都市旅客交通システムの 低炭素化戦略のバックキャスト手法

伊藤 圭¹・加藤 博和²

¹非会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))

²正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町C1-2(651))

E-mail:k.ito@urban.env.nagoya-u.ac.jp

都市内旅客交通起源のCO₂排出の大幅削減を長期的に達成するため必要となるマクロ的な戦略の方向性を導出する方法論の開発を目的とする。

低炭素化戦略は、移動量そのものの削減であるAvoid戦略、低炭素な輸送機関への利用転換を図るShift戦略、低炭素技術の導入を進めるImprove戦略から構成されるとする。各サブ戦略を構成する施策のCO₂削減量を定量把握することで、目標達成に必要な戦略の構成を時系列で導出する必要がある。そのために、バックキャストによる必要施策導出手法を構築する。その核に、モータリゼーション進展メカニズムをモデル化し組み込むことで、経済の発展から成熟に至る変化に合わせた都市内旅客交通の不可逆的な変化を考慮した戦略の導出を可能とする。

構築した手法を、モータリゼーションが進展した日本、及び、現在モータリゼーションが進展しつつあるアジア途上国における都市に適用し、都市ごとに低炭素化戦略の構成が定量的に導出される。

Key Words : *backcasting method, low carbon transport, mass transit*

1. はじめに

気候変動の緩和策に関する国際的な取り組みが進んでいる。気候変動枠組条約の第16回締約国会議(COP16)では、将来の気温上昇を2℃以内に抑えるという大目標が設定され、途上国にも削減行動を求めたうえで、先進国が支援することなどが合意された(カンクン合意)。その上でCOP21では、すべての国が温室効果ガスの排出目標を定め、削減を進めることとなった(パリ協定)。この目標に対して取り組みを進めるために、将来を見越した上で現在の行動を決めるという検討手法が必要である。つまり、未来を予測するフォアキャスト(forecast)に対して、将来のあるべき姿を事前に描き、それを実現するために将来時点までになすべきことを検討し実施する「バックキャスト」¹⁾が求められる。

低炭素化の取り組みは人間活動のあらゆる分野で求められ、運輸部門も例外ではない。特に、都市内旅客交通は、大きな温室効果ガス排出要因となっている一方で、その需要が多い場合には鉄道等の大量輸送機関の運営が成り立つことから、そういった低炭素化に資する交通インフラの整備へ投資を怠らなければ、エネルギー効率改善では到達しえない排出削減が可能な環境でもある。財政状況や交通状況が異なる国、都市において、都市内旅

客交通を低炭素化するため、どのような施策がどのような時期に実施されるか示される必要がある。

世界交通学会はCOP16に対して、交通の低炭素化を主要な課題とすべきであることを求め、①交通発生そのものの抑制(Avoid)、②排出量の多い交通機関から少ない交通機関への利用転換(Shift)、③個別の輸送機関の技術革新(Improve)の3つのサブ戦略に含まれる施策群を組み合わせることで目標を達成しうることを示した²⁾。数ある低炭素化施策を戦略という形でまとめ上げ、各戦略によって交通がどれだけ低炭素化されるかを明らかにすることは、経済状況や交通形態が異なる世界の諸都市がその特徴に沿った低炭素化施策を検討・実施する方向性を示すもので、政策判断においても有効と考えられる。

本研究では都市内旅客交通を起源とするCO₂排出量を対象に、長期的にその大幅削減を達成する戦略を導出する方法論の開発を目的とする。そのため、Avoid、Shift、Improveの各戦略において代表的な施策に焦点を当て、必要となる施策の実施規模を算出する。得られた施策の実施規模から、各戦略が持つ都市内旅客交通CO₂排出量削減量を算出することで、都市内旅客交通システムの低炭素化戦略が定量的に導出される。

2. 都市内旅客交通低炭素化戦略の導出

(1) Avoid・Shift・Improve戦略の中心となる施策

バックキャストリングによる低炭素化戦略の導出とは、将来の都市空間構造・経済状況・社会状況を前提に、目標とする低炭素化水準を達成するための各サブ戦略に寄与する施策の導入時期、導入規模を導出するものである。前述した世界交通学会の提言では、実際に取り組みされている低炭素化施策の事例を「戦略 (Avoid, Shift, Improve)」と「手段 (技術, 規制, 情報, 経済)」という二軸によるマッピングを行い (CUTE マトリクス), 個々の施策がどのサブ戦略に寄与するか示している (図-1)。

しかし、個々の施策がどの程度機能し、互いに補完関係にあるのかは必ずしも明確ではない。例えば、Shift 戦略に位置づけられるパーク&ライドや連携的な運賃体系は、公共交通が十分機能していなければその効果を発揮できない。また、Avoid 戦略に位置づけられるスプロール開発規制は、単体では移動量の抑制という効果が生じるが、公共交通の高度化と同時に進めることで、Shift 戦略にも寄与する施策となりうる。

このとき特に、各サブ戦略において低炭素化への寄与が大きい代表的な施策を取り上げ、その推進を助けたり相乗効果をもたらす他の施策群を合わせて実施することは、将来の都市内交通のあり方を大まかに規定する。本研究では長期的な低炭素化を意図していることから、都市空間構造と交通行動の両方を変化させる施策を代表的な施策と位置付ける。その上で、Avoid 戦略として立地規制・誘導による都市空間構造の高密度化を取り上げ、都市が高密度になることによる排出量削減を評価する。Shift 戦略として、乗用車利用を代替する施策を取り上げ、特に鉄道整備を評価する。Improve 戦略としては、車両単体の燃費改善による削減を取り上げ、CUTE マトリクスの各施策実施による効率化を評価する。

(2) 都市空間構造・交通インフラ (モード)・技術の3要素による都市内旅客交通起源CO₂排出量の描写

各低炭素化施策は、長期的に都市内旅客交通の姿を変え、CO₂ 排出量を変化させる。そのため、都市内旅客交通起源 CO₂ 排出量の算出には、長期的に変化を追跡可能な指標を用いる必要がある。この場合、例えば個人行動についての非集計データを用いて都市内旅客交通を詳細に表現するといった必要はなく、都市スケールでの交通行動の変化、例えば乗用車保有率の変化や、分担率の変化を表現することが有効と考えられる。また、都市スケールの指標によって交通行動を表現するため、政策変数の整合も図る必要がある。以上を踏まえ、都市内旅客交通を構成する 3 要素として都市空間構造・インフラ・技術を挙げて都市内旅客交通の将来像を描写する。

戦略 手段	AVOID	SHIFT	IMPROVE
技術	<ul style="list-style-type: none"> 公共交通指向型開発 多極型開発 物流効率化 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄道・バス高速輸送システム整備 軌道系輸送システム・バス・パラトランジットの接続改善 新パーソナルモビリティシェア用施設・歩行空間整備 	<ul style="list-style-type: none"> 自動車の電化 再生可能エネルギー・バイオマス燃料開発 スマートグリッド
規制	<ul style="list-style-type: none"> スプロール開発規制 	<ul style="list-style-type: none"> バス幹線・端末分離 小地区内巡回交通サービス 自動車通行・駐車規制 	<ul style="list-style-type: none"> 排出基準
情報	<ul style="list-style-type: none"> テレワークキング ネットショッピング ライフスタイル啓発 	<ul style="list-style-type: none"> 高度道路交通システム公共交通運行管理 	<ul style="list-style-type: none"> エコドライブ 高度道路交通システム交通流管理 車両性能ラベリング
経済	<ul style="list-style-type: none"> 立地補助・課税 	<ul style="list-style-type: none"> パーク&ライド 連携的な運賃体系 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料税・炭素税 低排出車減税

図-1 CUTE マトリクスによる都市内交通低炭素化施策の整理²⁾

(3) 低炭素化施策導出手順

低炭素化施策を導出するため、「将来のあるべき姿を事前に描き、それを実現するために将来時点までになすべきことを検討し実施する」バックキャストリング手法に沿って、戦略の導出を行う。

まず、都市内旅客交通起源 CO₂ 排出量の将来目標値を設定する。本研究では、2050年を目標年度とし、2010年の排出量をもとに削減目標を設定する。CO₂ 排出量としては、乗用車、バス、鉄道の3つの輸送機関を扱う。

次に、2050年における都市内旅客交通起源 CO₂ 排出量を予測する。Improve 戦略による CO₂ 削減量は各輸送機関に関わる車両技術・燃費の改善をシナリオとして外生的に設定する。これによって推計される 2050 年における旅客交通起源 CO₂ 排出量と排出目標値との差分を把握した上で、目標を達成するため、Avoid 戦略、Shift 戦略を各地域でどの程度実施する必要があるか検討する。Avoid 戦略として都市域拡大抑制を、Shift 戦略として鉄道整備をそれぞれ実施する場合の施策規模を算出する。以上から、各サブ戦略を実施した場合の CO₂ 削減量が、都市指標とともに導出される。

(4) 都市内旅客交通起源CO₂排出量の推計方法

本研究では乗用車、バス、鉄道を対象として都市内旅客交通起源 CO₂ 排出量を推計する。各輸送機関の排出量算出式は以下のとおりである。

a) 乗用車

乗用車起源 CO₂ 排出量は、乗用車保有台数に 1 台当たり走行距離と排出係数を乗じることで算出する (式 2-1)。

$$E_c = N \cdot C \cdot L_c \cdot e_c \quad (2-1)$$

ここで、 E_c : 乗用車起源 CO₂ 排出量 [t-CO₂/年]

N : 人口 [1000 人]

C : 乗用車保有率 [台/1000 人]

L_c : 1 台当たり走行距離 [km/台]

e_c : 排出係数[t-CO₂/km]

将来の排出量を予測するにあたっては、これらの指標のうちいくつかはシナリオに基づき将来値を与え、それ以外は推計モデルを構築し算定する。ケーススタディにおいて、日本の都市における排出量を推計する場合、乗用車保有率と1台当たり走行距離の2変数はモデル化したうえで将来値を推計する。アジア途上国の都市の場合、データ制約から走行距離のモデル化が困難であるため、保有率のモデル化を行う。

b) 鉄道・バス

日本の都市の場合、鉄道・バスを起源とするCO₂排出量は、鉄道統計年報および道路交通センサス自動車起終点調査を用いて、各輸送機関の年間走行距離、エネルギー消費量を集計し、排出係数を乗じることでCO₂排出量を算出する。また、将来における排出量は、それらの輸送機関の運行量と輸送需要の変化が必ずしも一致しないことから、運行量が輸送需要にかかわらず維持されるという仮定を置き、排出係数を乗じて算出する。また、低炭素施策として整備する鉄道からのCO₂排出量は、一車両当たり年間走行距離に排出係数を乗じることで算出する(式2-2)。

$$E_t = l_t \cdot e_t \quad (2-2)$$

ここで、 E_t : 鉄道起源CO₂排出量[t-CO₂/年]

L_t : 1車両当たり走行距離[km/車両/年]

e_t : 排出係数[t-CO₂/km]

3. モータリゼーション進展予測モデルの構築

(1) モータリゼーションによる都市内交通の変化

Avoid 戦略, Shift 戦略に属する各施策を長期にわたり実施すると、交通行動も長期的に変化していく。上述したような都市内における鉄道整備は鉄道旅客需要を高め、更に駅周辺への居住を進めることで相乗効果を生み出す。このように、都市内旅客交通の形態は、過去の交通インフラや都市空間構造に関する施策の積み重ねによって決まってくる。例えば、東京は発展の早い段階で鉄道が整備されていたため、鉄道利用を前提とした都市空間構造が形成された。その結果、都市内旅客交通は乗用車利用が少なく、CO₂排出量も少なくなった。一方で、名古屋は都心の道路整備水準が非常に高く、鉄道整備率は東京ほど高くなかった。結果として、鉄道利用率が小さく乗用車利用の高い状態である。

このような施策の影響は、経済水準が低く乗用車利用率が低い段階と、経済成長によってモータリゼーションが進んだ段階とでは異なるものと考えられる。それは、

モータリゼーション進展自体が土地利用とライフスタイルの変化を伴う不可逆的な現象のためである。本研究では、輸送機関の整備や都市空間構造の変更といった低炭素施策が、将来の都市空間構造や各輸送機関の旅客需要に与える不可逆的な影響を内生化する動学モデルを構築し、途上国都市における低炭素化戦略の導出に組み込む。

(2) モータリゼーション進展予測モデル

モータリゼーション進展は、a)非都市部から都市部への移転による都市化、b)都心部から郊外部への移転による都市のスプロール、c)自動車需要増加の3段階でとらえる。各段階を、経済発展とモータリゼーション進展を経験した日本の都市(東京、大阪、名古屋)、現在進行中のアジア途上国都市(北京、上海、バンコク)のパネルデータを用いて、回帰モデルによって表現する。

入力変数は、人口と経済水準(社会経済)、鉄道の整備水準(交通インフラ)、市街地面積(都市構造)とする。乗用車保有率の推計に当たっては、社会経済と交通インフラの指標について将来変化シナリオを与える。

a) 都市化度モデル

都市化度を、都市の全人口に対する市街地居住人口の割合と定義し、式(3-1)の形でモデル化する。これによって、可住地人口密度の増加が都市化度を高めることが表現される。

$$U = \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot \exp(-\beta_2 \cdot D_h)} \quad (3-1)$$

ここで、

U : 都市化度[市街地人口/全人口]

D_h : 可住地人口密度[人/km²]

β : パラメータ。

表-1にパラメータ推定結果を示す。

表-1 都市化度モデルのパラメータ推計結果

パラメータ	β_1	β_2
数値	6.06×10^4	2.34
t値	11.2	-1.66

b) 都市域拡大モデル

都市域(面積)の拡大は、人口増加と経済成長による促進圧力と、鉄道整備による抑制圧力により決まるものと考え、その変化率を式(3-2)の形でモデル化する。鉄道整備水準が都市域の変化率を変えることを表現し、その整備水準に加えて整備時期が都市域拡大に及ぼす影響を表現可能となる。

$$\Delta_u = \alpha_1 \Delta_{pop} + \alpha_2 r + \alpha_3 \quad (3-2)$$

ここで、

Δ_u : 市街地面積変化率

Δ_{pp} : 市街地人口変化率

r : 人口あたり鉄道延長(km/人)

α : パラメータ.

変化率はいずれも5年毎値を使用している. 表-3にパラメータ推計結果を示す. 人口変化率の係数が1を超えており, 都市化による市街地人口増加がそれ以上の都市域拡大を招くことがわかる.

表-2 都市域拡大モデルのパラメータ推計結果

パラメータ	α_1	α_2	α_3
数値	1.30	-714	0.0582
t値	15.6	-1.67	1.77

c) 乗用車保有率モデル

乗用車保有率モデルは, 都市のインフラや人口に起因する乗用車の潜在市場規模と, 経済水準による保有制約の両面を考慮した加藤ら²⁾によるモデルを適用する. このモデルは, 所得上昇と都市低密化の同時進行が予想される途上国大都市の乗用車保有水準の推計に適する. 乗用車保有率は, 式(3-3)の通り定式化される. 乗用車保有率は経済成長を変数とするロジスティック曲線で表現している.

$$C = \frac{K}{1 + \gamma_1 \cdot \exp(-\gamma_2 \cdot GDP / P_{car})} \quad (3-3)$$

ここで,

C : 乗用車保有率 [台/1000人]

GDP : 人口あたり名目GDP [USD/人]

P_{car} : 乗用車価格[USD]

γ : パラメータ

K : 潜在的自動車市場規模

式(3-3)の分母は経済水準による乗用車保有の制約を表す. 分子の K は経済的制約が限りなく小さい場合の乗用車保有率に相当する. 経済水準が上昇した際, 乗用車保有率は K に漸近する. K として加藤らは道路整備水準と人口密度を説明変数とするコブダグラス型関数を用いている. 本研究では, 変数として道路整備水準を加えた場合, 統計的な有意性を確保することができなかったため, 人口密度のみを変数として採用し, 式(3-4)で定式化する.

$$K = \delta_1 D_u^{-\delta_2} \quad (3-4)$$

ここで,

D_u : 市街地人口密度

δ : パラメータ.

表-3に乗用車保有率モデルのパラメータ推計結果を示す.

表-3 乗用車保有率モデルのパラメータ推計結果

パラメータ	γ_1	γ_2	δ_1	δ_2
数値	7.81	4.49	15.5	1.18
t値	2.48	10.0	12.0	14.2

4. ケーススタディ

構築した手法を, モータリゼーションが進展した日本, 及び, 現在モータリゼーションが進展しつつあるアジア途上国の都市に適用する.

(1) 日本の都市圏

図-3に, 2000年時点で鉄道を導入可能な都市における必要路線延長を推計した結果を示す. この値は, 削減すべきCO₂排出量と人口密度に左右される. 結果より, 大都市圏において重点的に鉄軌道系の輸送機関を整備する必要性が示唆される. 新規路線は輸送密度の高い状態を維持する必要があるため, 既存路線網が充実している地域においては, 沿線への人口誘導策を合わせて実施し, 路線網が貧弱な地方都市では, 新たな交通軸として路線を整備することが必要である.

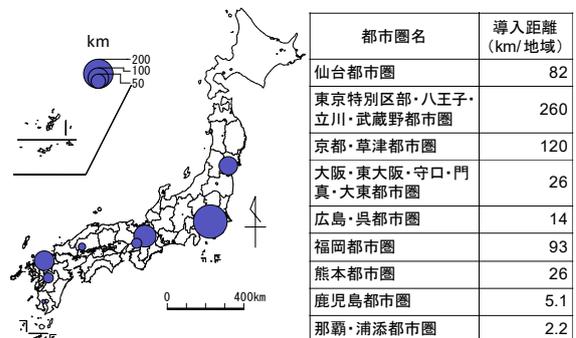


図-3 鉄道の導入必要延長(2000年, 可住地面積あたり)

Shift 施策, Improve 施策による日本の都市内旅客交通起源CO₂排出量の削減量を図4に示す. 2050年に2000年比80%削減という目標をとった際, 各戦略による削減割合の割合になるか示される.

日本では, 低炭素化施策をとらない場合でも, 人口減少に伴う排出総量の減少があり, これが24%となる. さらに, 鉄道整備に伴う旅客の転換については15%程度となる. 技術革新によるImprove戦略による効果は41%であり最も大きい効果となっている. Shift施策については, 計算上, 需要のすべてを乗用車からの転換とみなした結果であるため, 効果としては過大に算出されていると考えられる.

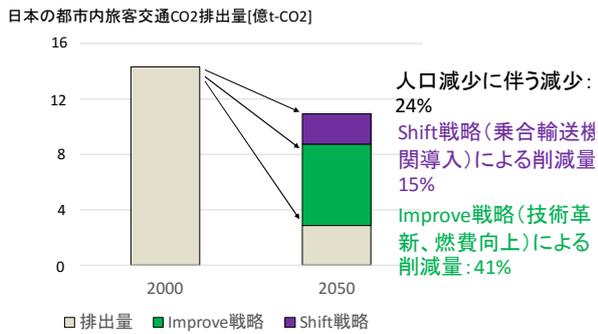


図4 Shift施策, Improve 施策による

日本の都市内旅客交通起源 CO₂排出量の削減

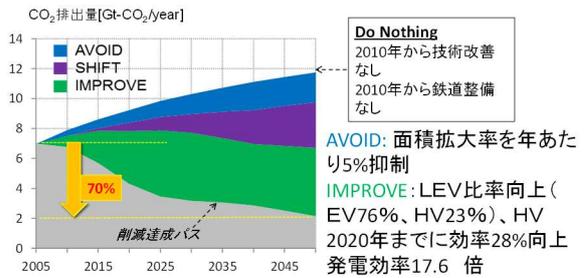
(2) アジア途上国都市

タイの都市を対象として、都市内旅客交通起源 CO₂排出量の削減パスを図 5 に示す。Avoid 戦略は、面積拡大率を年あたり 5%抑制した場合を、Improve 戦略は低環境負荷者の比率が向上するシナリオ（車両の割合：EV76%、HV23%。HV について 2020 年までに効率 28%向上、発電効率 17.6 倍）を用いたものである。2005 年から 2050 年までに 70%削減するという目標を立て計算している。初期段階では、技術向上による削減効果が比較的大きく、2025 年まで急速に減少している。しかしその後の削減効果は鈍化する。一方、鉄道整備による削減効果は、初期段階では小さい割合であるが、時間経過に伴って確実にその効果を増加させていく。これによって、都市内交通の行動様式を変化させ、乗用車依存からの脱却が確実に進むことが期待できる。また、鉄道整備について、発展の初期段階で実施することが長期的により有効であることが示された。

アジア途上国としてタイの乗用車保有率を将来推計した結果、人口の減少局面で、鉄道整備が進んだ都市によって自動車利用が抑制されることが示された。また、鉄道整備を早期に行うことで、同時整備水準であっても乗用車保有率を 5~30%程度押し下げることが可能であることが示された。このことは、より早期の対策がモータリゼーションの抑制を進めることにつながることを示し、低炭素交通システムの実現方策を検討するうえで重要であることを示唆する。

5. 結論

低炭素戦略として、初期段階では技術向上による削減

図5 タイにおける都市内旅客交通起源 CO₂排出量の削減

効果が比較的大きく発生するものの、削減効果は次第に鈍化する。一方、Shift 戦略は逆に都市内交通の行動様式を漸次変化させ、乗用車依存からの脱却が確実に進むことが期待できる。鉄道整備に関して、初期段階で実施することが長期的に有効であることが示された。

本研究の課題のうち主なものをまとめる。まず、モータリゼーション進展モデルを大都市データのみによって構築しており、アジアの中小都市への適用が困難である。乗合輸送機関整備によって、乗用車利用がそれらの輸送機関の利用に移転する変化については強い仮定を置いている。鉄道整備による徒歩や自転車からの利用転換は表現できていない。

また、アジア途上国では現在、オートバイなど二輪車利用が都市内交通の大きな割合を占めているところが多いが、将来における二輪車利用の変化を考慮していない。所得上昇に伴い、二輪車利用は自動車へと変化することが予想される。以上をはじめとした諸課題の解決が必要である。

参考文献

- 1) 環境省：環境的に持続可能な交通（EST），http://www.env.go.jp/air/traffic_env/，2016.1.20閲覧
- 2) World Conference on Transport Research Society (WCTRS)：PUTTING TRANSPORT INTO CLIMATE POLICY AGENDA - Recommendations from WCTRS to COP16 -, 2010.
- 3) 加藤博和,林良嗣（1997）：経済成長レベルと都市構造要因を考慮した乗用車保有水準の分析とモデル化, 交通工学, Vol.32 No.5, 41-50.

Backcasting method for the Transition Path to Achieve Urban Passenger Transport Systems Supporting Low Carbon Society

Kei ITO and Hirokazu KATO
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University