

# アジア開発途上国における 地域ごとの低炭素旅客輸送機関選定手法

伊藤 圭<sup>1</sup>・中村 一樹<sup>2</sup>・加藤 博和<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 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))

<sup>2</sup>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

アジア開発途上国における都市内旅客交通の低炭素化にむけた乗合型大量輸送機関の整備を効果的に行うために、都市圏別にCO<sub>2</sub>削減の最も大きい輸送機関を選定する。地域特性による乗合型大量輸送機関の需要の違いを特定するため、人口密度と旅客鉄道需要との関係を分析する。これと交通インフラ水準を考慮して各輸送機関の輸送需要を推計する。一方で、ライフサイクルアセスメントの考え方をを用いて、各輸送機関のCO<sub>2</sub>排出量をインフラ建設、車両製造起源の排出量も含めて算出する。以上より、乗合大量輸送機関の地域特性の違いを考慮した人kmあたりCO<sub>2</sub>排出原単位算定モデルを構築する。パラメータ推計にあたっては、アジア途上国における都市内旅客交通が日本と同様の経過をたどると想定し、日本国内の交通統計を用いる。タイ国にモデルを適用した結果、各都市圏においてライフサイクルでCO<sub>2</sub>排出量が最小となる輸送機関が選定される。

**Key Words :** low carbon transport, life cycle assessment, mass transit, Asian developing countries

## 1. はじめに

IEA (International Energy Association) は、世界のエネルギー消費の増加により、2050年までに世界のCO<sub>2</sub>排出量を半減させ平均気温上昇を2℃以内に抑えることは困難になりつつあると指摘している<sup>1)</sup>。なかでも、中国・インドを含むアジア開発途上国におけるエネルギー消費量の増加は世界全体の増加分のうち50%以上を占めるとされ、排出量抑制策が急がれる。

CO<sub>2</sub>排出量のうち運輸部門を起源とする排出量は約2割を占め、その抑制は重要な課題となる。また、アジアの開発途上国ではモータリゼーションが進みつつあり、都市部において、乗用車の増加と渋滞の発生によるCO<sub>2</sub>排出量の急増が懸念される。アジア途上国の交通起源CO<sub>2</sub>排出量を増加させないために、都市内交通の低炭素化方策を示す必要がある。

低炭素交通システムを設計する場合、利用者を乗用車よりもCO<sub>2</sub>排出の小さい乗合型の大量輸送機関に誘導し、乗用車利用を削減させることが有効な手段の一つである。しかし、アジア途上国では、公共交通機関がインフラ量・サービス量ともに十分ではなく、都市部の渋滞解消のために道路建設を進めるといった対処療法的な施策を取り続けている。これは長期的に乗用車利用を促進し、CO<sub>2</sub>排出量を増加させると考えられる。このような点を踏まえ、中長期的な将来を見越して、交通網の幹線部分

にCO<sub>2</sub>排出量の小さい輸送機関として公共交通を整備することは、アジア途上国都市における交通システム設計の柱となりえる。ここで、導入すべき公共交通機関は都市の特性によって異なると考えられるため、あらかじめ将来的に整備が必要となる輸送機関を知っておくことは、今後のアジア途上国都市部の交通システム整備のため有用であるといえる。

ただし、鉄道やバスといった乗合型の公共交通 (以下、乗合輸送機関とする。) は一般にCO<sub>2</sub>排出が少ないと言われるが、その導入が必ずしも低炭素化につながるとは限らない。これは、乗合輸送機関のCO<sub>2</sub>排出量が輸送人kmあたりで乗用車より小さくなるためには、一定以上の利用者が乗り合う必要があるからである。さらに、今後起こりうる技術革新は乗合型輸送機関の導入が有する排出量削減効果を低下させると考えられる。なぜなら熱機関を動力とする乗用車は、現状のエネルギー効率が1割程度と低く、電気モータの利用を組み合わせたハイブリッド方式によって大幅な排出削減が可能となる一方、電気モータを動力として用いる鉄軌道系の輸送システムは、走行時のエネルギー効率が現状でも9割程度あり、今後の技術革新を頼ったとしても大幅な削減はありえないからである。

著者らは先行研究<sup>2)</sup>において、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment; LCA)を用いて日本における

低炭素旅客交通機関の地域別導出を行ってきた。本稿では、これまで日本を対象に構築してきた低炭素輸送機関選択手法に、輸送機関を整備することで変化する旅客需要量を推計するシステムを組み込み、2050年時点の、アジア途上国都市部における低炭素旅客輸送機関選定を試みる。なお、技術の向上については、途上国大都市における輸送機関の技術が、将来、日本で想定されるレベルと同等に向上すると仮定する。

## 2. 低炭素旅客交通機関選定手法

### (1) 対象とする輸送機関

都市内交通の幹線部を担う輸送機関として、近年、アジア途上国都市部のいくつかの都市で計画・整備が進められている電気鉄道(高架)、Light Rail Transit (LRT)、Bus Rapid Transit (BRT) を扱う。これらの乗合輸送機関に乗用車を加えて、CO<sub>2</sub>排出量を比較する。乗用車については、ガソリン車・ハイブリッド車・電気自動車が混在する状態を想定する。

### (2) 各輸送機関のCO<sub>2</sub>排出量推計

低炭素交通システムは構築に長期間を要するとともに、利用も長期に渡ることから、輸送機関導入の評価にあたっては、排出量は長期間に渡って把握されるべきである。ここでは、乗合輸送機関の新規整備を扱うため、LCAを適用し、インフラ建設や車両製造によるCO<sub>2</sub>排出を加味した分析を行う。そのため、先行研究<sup>2)</sup>の方法を用いて各輸送機関のCO<sub>2</sub>排出量を算出する。具体的には、インフラ建設・維持、車両製造、および運行の各段階からのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の合計値(これをSystem Life Cycle CO<sub>2</sub><SyLC-CO<sub>2</sub>>と呼ぶ)とする。

乗合輸送機関のCO<sub>2</sub>排出量を輸送人kmあたりに換算するにあたっては、輸送密度を利用者数として用いる。図1に、日本の都市内輸送機関について、2000年と2050年における各輸送機関の輸送密度とSyLC-CO<sub>2</sub>の関係を示す<sup>2)</sup>。乗合型の輸送機関は輸送密度が増加するにつれて輸送人kmに割りあてられるCO<sub>2</sub>が小さくなるため、輸送人kmあたりSyLC-CO<sub>2</sub>は減少していく。

### (3) 地域特性と交通インフラ整備量を考慮した輸送密度の推計

本稿では、都市内に新たに導入される輸送機関の需要を規定する地域特性の代表指標として人口密度を用いる。交通網の幹線区間における輸送機関に関して、郷ら<sup>3)</sup>は、日本の各都市における乗合輸送機関の輸送密度、表定速度などの実績値と地域特性との関係を分析し、輸送密度とDID人口密度の間に比較的強い相関があることを示し

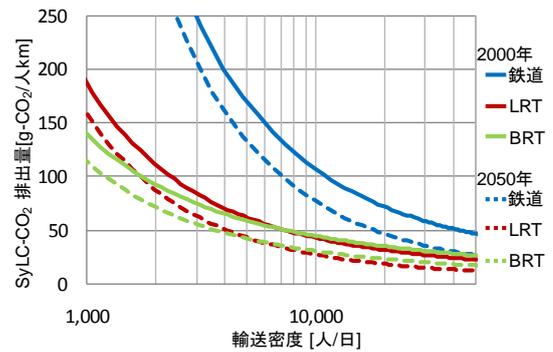


図1 需要量に伴う各輸送機関 SyLC-CO<sub>2</sub>の変化

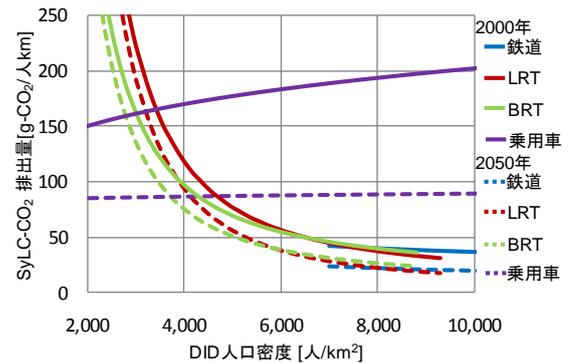


図2 DID人口密度と SyLC-CO<sub>2</sub>排出量との関係

表1 各輸送機関が SyLC-CO<sub>2</sub>最小となるときの DID人口密度の範囲

輸送機関	2000年	2050年
高架鉄道	7000[人/km <sup>2</sup> ]以上	7000[人/km <sup>2</sup> ]以上
LRT	6,400[人/km <sup>2</sup> ] ~7,000[人/km <sup>2</sup> ]	5,900[人/km <sup>2</sup> ] ~7,000[人/km <sup>2</sup> ]
BRT	3,100[人/km <sup>2</sup> ] ~6,400[人/km <sup>2</sup> ]	4,200[人/km <sup>2</sup> ] ~5,900[人/km <sup>2</sup> ]
乗用車	3,100[人/km <sup>2</sup> ]以下	4,200[人/km <sup>2</sup> ]以下

ている。郷らの結果と図1の結果を組み合わせ得られる、DID人口密度と輸送機関のSyLC-CO<sub>2</sub>の関係を図2に示す。また、各輸送機関がSyLC-CO<sub>2</sub>最小となるときのDID人口密度の範囲を表1に示す。

この関係を将来のアジア途上国都市における分析に使用するためには、乗合輸送機関の整備による、人口密度(土地利用)の変化と交通需要の変化を組み込む必要がある。中村ら<sup>4)</sup>は、鉄道整備水準が高い都市では、都市域拡大が抑制されるとし、所得水準、鉄道・道路の整備水準、人口密度、乗用車保有率、についての日本のモータリゼーション期のパネルデータを用いて、この関係をモデル化している。本稿では、鉄道整備水準によるDID面積増加の抑制量をモデル化し、さらに、郷らの鉄道輸送密度の推計方法を組み合わせ図1を適用することで、アジア途上国都市を対象に都市別にSyLC-CO<sub>2</sub>最小輸送機関が選定される。手法の全体構成を図3に示す。詳細は

中村ら<sup>4)</sup>を参照されたい。

### 3. アジア途上国への適用

本稿ではケーススタディとして、上記のモデルに適用可能な統計資料が比較的入手しやすいタイ国における都市を対象に低炭素旅客交通機関の選定を行う。

まず、これまで開発してきた日本の乗合輸送機関選定手法はDID人口密度を指標としてきたが、これは日本固有の定義であり、他国ではそのまま使用できないことに注意が必要である。

タイでは都市域を定義する行政単位としてThesabanが存在する。さらにThesabanの中でも一定以上の人口密度を有する市街地域がThesaban nakhonである。Thesaban nakhonの具体的な定義は更新が繰り返されているが、人口が5万人以上であり、かつ人口密度が3,000人/km<sup>2</sup>以上存在する地域が基本となっている。表2にThesaban nakhonと、同様の市街地を有するBangkok、Pattayaを加えた地域について、人口・面積を示す<sup>5)</sup>。本稿では、これらの市街地をDIDとみなし、タイにおける地域旅客交通起源CO<sub>2</sub>排出量最小輸送機関の選定に日本で構築した手法をそのまま適用する。将来の人口密度の推計については、計算の起点を2005年とし、以降5年おきに2050年まで人口密度を計算する。

### 4. CO<sub>2</sub>最小輸送機関選定結果

#### (1) バンコクにおける選定

タイの首都であるバンコクでは、経済成長に伴い二輪車や乗用車の保有台数が急速に増加し、乗用車保有台数は1980年に約22万台であったのが、2000年には約154万台と7倍に増加した。加えて乗用車走行距離も約2倍に増加している。しかし、この急速な増加に道路インフラの建設が間に合わず、世界でも有数の大渋滞都市となっている。乗合輸送機関としては、バスの路線数が多く、バンコク都内を網羅しているが、渋滞の影響を直接受けてしまうという欠点がある。このことから、鉄道整備が近年進み、1999年にスカイトレイン、2004年に地下鉄、2010年にエアポートリンクが開通し、2010年末時点で77.3kmの路線網を持つ。タイ国内で唯一都市鉄道を有するとともに、BRTも運行されている。鉄道については、2029年までにさらに6路線の整備が計画されている。

図4に分析フローに従い算出した、バンコクにおける人口密度(DID人口密度)の推移について、a) 現行の鉄道整備計画を所与とした場合、b) 2050年における可住地面積あたり駅数が現在の東京と同数になるように整備を強化した場合の2ケースについて示す。現行計画では、2029年まで鉄道の整備が続けられるが、その間にも人口

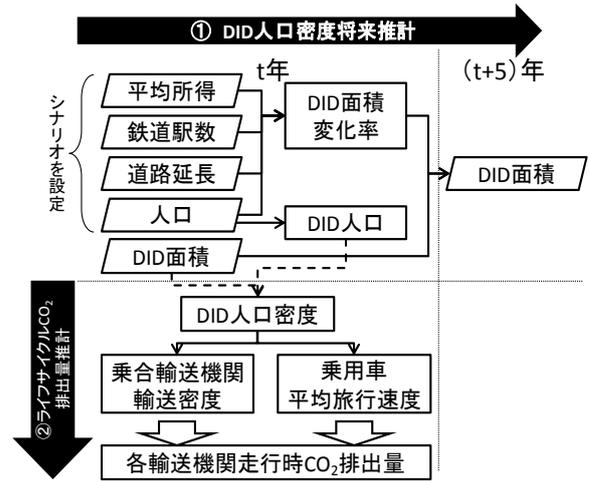


図3 分析フロー

表2 タイ国各都市の人口・面積 (人口順)

Thesaban nakhon	人口[人]	面積[km <sup>2</sup> ]
Bangkok	5,701,394	431
Nonthaburi	261,474	38.9
Pakkret	178,907	36.0
Hat Yai	158,122	21.0
Nakhon Ratchasima	141,714	37.5
Chaing Mai	141,361	40.2
Udon Thani	137,948	47.7
Surat Thani	125,730	69.0
Khon Kaen	113,754	46.0
Nakhon Si Thammarat	108,907	22.6
Pattaya	107,944	20.8
Nakhon Sawan	89,682	27.9
Ubon Ratchathani	83,173	29.0
Nakhon Pathom	81,204	19.9
Rangsit	77,969	20.8
Phuket	75,720	12.0
Phitsanulok	74,848	18.3
Song Khla	71,272	9.27
Laem Chabang	70,770	10.9
Chaing Rai	70,040	60.9
Yala	64,370	19.0
Trang	61,019	14.8
Rayong	60,332	19.4
Lampang	57,558	22.2
Phra Nakhon Si Ayutthaya	54,190	14.8
Samut Sakhon	54,090	10.3
Samut Prakan	53,759	19.1
Om Noi	52,314	30.4
Mae Sot	35,365	27.2

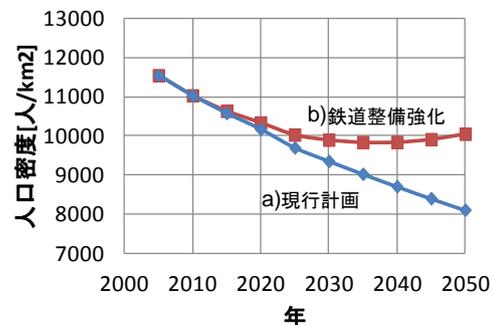


図4 バンコクにおける人口密度変化

密度が減少するという結果が得られた。これは、経済成長による移動需要の増加に対して、鉄道整備が十分な

いために、移動需要を乗用車利用が支え、道路整備の拡大と都市域面積の増加が生じるためと考えられる。一方で、鉄道整備を強化した場合には、人口密度の減少幅は小さく、一旦減少した後に増加に転じ、2050年時点では約10,000[人/km<sup>2</sup>]となる。鉄道整備が持つ人口密度の維持効果が十分に発揮されるといえる。

SyLC-CO<sub>2</sub>最小輸送機関については、現在の人口密度そのものが高く、鉄道が選択される範囲の下限値である7,000[人/km<sup>2</sup>]を下回ることはないため、鉄道を排出量最小輸送機関として選択可能である。ただし、人口密度が低くなれば、乗合輸送機関の輸送人kmあたりCO<sub>2</sub>排出量が増加し、乗用車に対する優位性が低くなる点に注意が必要である。

## (2) タイ都市別選定結果

同様に、バンコク以外の都市に対してSyLC-CO<sub>2</sub>最小輸送機関の選定を行う。バンコク以外の都市においては、現状で都市鉄道が存在しない。そこで、2020年までに各都市で10kmの乗合輸送機関を整備すると仮定する。表3に都市ごとに選定された輸送機関を都市数で示す。中心部の人口密度が7,000[人/km<sup>2</sup>]を超える都市が多数存在しており、乗合輸送機関の中では、高架鉄道の整備がSyLC-CO<sub>2</sub>最小となる都市が10箇所と最も多くなることが分かった。その一方で、同じ10の都市で乗用車がSyLC-CO<sub>2</sub>最小となり、乗合輸送機関整備が排出削減につながらない。また、2050年における比較では、2020年において乗合輸送機関が選択されていた地域が減少した。乗合輸送機関の整備が人口密度の上昇に十分な効果を発揮せず都市部でのスプロールが進み、乗合輸送機関の輸送密度が十分高まらないことが原因として考えられ、早期の乗合輸送機関整備の必要性が示唆される。

## 5 結論

本稿では、タイのThesaban nakhonを対象に、低炭素交通システムの幹線部を担当しうる輸送機関の選定を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) バンコクにおける鉄道整備の現行計画を実施するだけでは、人口密度の低下が続き、鉄道の乗用車に対するCO<sub>2</sub>排出量での優位性が低下する。

表3 SyLC-CO<sub>2</sub>最小輸送機関と Thesaban nakhon 数

SyLC-CO <sub>2</sub> 最小輸送機関	2020年	2050年
高架鉄道	10	9
LRT	2	1
BRT	7	6
自動車	10	13

- (2) Thesaban nakhon は、人口密度が高く高架鉄道が最も低炭素な交通機関となる都市と、人口密度が低く乗合輸送機関の整備が排出削減につながらない都市に二極化される。そのいずれになるかによって、低炭素交通システムの整備指針が大きく変わる。

本稿では、輸送機関の輸送密度と地域特性の関係を表現する際に日本のDID人口密度を基にしたモデルを援用している。そのため、他の先進国都市におけるデータも参考に、途上国都市の将来シナリオを多様化した分析が必要である。

謝辞：本稿は、環境省・環境研究総合推進費(S-6-5)「アジアにおける低炭素交通システム実現方策に関する研究」(代表：林良嗣)の支援により実施されたここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) IEA, World Energy Outlook 2011 Executive Summary, pp1-3, 2011.
- 2) 伊藤圭, 加藤博和, 柴原尚希: 日本における地域内旅客交通CO<sub>2</sub>大幅削減のための乗合輸送機関導入必要量の算定, 土木計画学研究・講演集, Vol.42, CD-ROM, 2010.
- 3) 郷智哉, 加藤博和, 谷田一: 脱温暖化社会を目指した地域類型別交通施策パッケージ提案手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.36, CD-ROM, 2007.
- 4) 中村一樹, 加藤博和, 林良嗣: アジア途上国大都市における鉄道整備時期を考慮したモータリゼーション進展の将来予測, 土木計画学研究・講演集, Vol.43, CD-ROM, 2011.
- 5) National statistical office Thailand  
<<http://web.nso.go.th/index.htm>>

## A Method to Identify Low-Carbon Passenger Transport Modes for Each Region in Asian Developing Countries

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