

統合モビリティサービスの概念と 体系的分析手法の提案

藤垣 洋平¹・Giancarlo TRONCOSO PARADY²・高見 淳史³・原田 昇⁴

¹学生会員 東京大学大学院博士課程 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: fujigaki@ut.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院助教 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: gtroncoso@ut.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院准教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: takami@ut.t.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail: nhara@ut.t.u-tokyo.ac.jp

本稿では、鉄道、バス、タクシー、DRTやカーシェアリング等の交通サービスを、月額制などにより統一的に決済される料金プランと単一の検索・予約システムを通して利用者に提供する「統合モビリティサービス」(IMS)の概念を整理するとともに、その分析のための枠組みを提案することを目的とする。IMSの一種と位置付けられる”Mobility as a Service (MaaS)”は、フィンランドなどで2016年度中にサービス提供が開始される予定であり、世界の多くの都市へ導入が進む可能性がある。IMSは、自家用車保有に代わる包括的な移動サービスとなり、交通行動や各交通手段の利用状況に大きな影響を与えうるが、サービス供給者と利用者の相互作用を体系的に分析する手法については十分に議論がなされていない。そこで本稿では、IMSの分析の枠組みとしてMulti-Cycle Modelを提案し、計算例を提示する。

Key Words : *Mobility as a Service, MaaS, Public Transportation, DRT, sharing*

1. はじめに

人々に移動手段を提供するモビリティサービスは、技術革新により近年急速な変化を遂げており、旧来の枠組みを超えた新しいサービスが次々に登場している。公共交通サービスとしては、ドア・ツー・ドア輸送と乗合を両立させるDRT(Demand Responsive Transport)型のサービスを公共交通不便地域だけでなく都市部にも導入する動きが先進国の諸都市で進んでおり、既存の道路上の公共交通の関係性に影響を与えている。フィンランドでは都市型DRTであるKutsuplus¹⁾の暫定運用が2012年から2015年まで実施され、Uber Pool²⁾は北米の複数の都市で乗合のドア・ツー・ドア輸送サービスを提供している。カーシェアリングサービスも国内外で急速に普及しており³⁾、自家用車を保有せず使いたい時に借りるという選択肢を提供している。

一方で利用者側でも、自家用車の保有と運転に頼らないライフスタイルのニーズは高まっている。日本をはじめ多くの国で高齢化が進んでおり、自家用車の運転が困

難になる高齢者が増加することが予想される。また、運転免許証や自家用車を保有しない若年層も増加してきている⁴⁾。DRTやカーシェアリング等のサービスが安価に提供されるようになれば、自家用車に代わる中長期的な移動手段確保の方法として、それらのサービスが利用される可能性も考えられる。

自家用車や二輪車等の私有手段に頼らずに移動する場合には、何らかのモビリティサービスを利用者自身で選択し、必要に応じて手配や支払いを行う必要がある。鉄道、定時定路線バス、タクシー、DRTやカーシェアリング等の各モビリティサービスを対象に、特定の時刻、発着地での利用可能性の確認や予約・手配等を行うには、通常は個別のウェブページやアプリケーション、電話窓口等に問い合わせる必要がある。また、各サービスを使用した際の料金や所要時間、待ち時間等は、利用するサービスによって、また発着地や時間帯によって大きく異なるため、移動する際にそれらの全条件を精査して望ましい選択をすることは容易ではない。各サービスが適し

ている時空間的な条件は異なるため、組み合わせることにより効率的に移動できる可能性があるが、各サービスが独立している場合、組み合わせ方は全て個人で考える必要がある。

以上のような背景のもとで、個別に提供されていた交通サービスを、月額制などにより統一的に決済される料金プランと検索・予約システムのもとで統合的に利用者に提供するようなサービスが登場している。本稿では、これらのサービスを「統合モビリティサービス (Integrated Mobility Service, 略称“IMS”）」として定義する。

IMSでは、移動希望時刻や発着地を入力することで、利用できる交通サービスの提案を受けることができ、予約や手配、料金管理等も全て一つのアプリケーションで処理することができる。また、定額部分を含む料金体系を取り得ることも特徴である。このようなサービスは、個別に提供されていた交通サービスを統合して提供することにより、自家用車保有に代わる移動手段確保の形態として認知される可能性がある。そのため、IMSの導入は交通行動や個別サービスの状態に大きな影響を与え、その設計次第で交通環境の改善や交通まちづくりに積極的に活用できる可能性を持っている。しかしながら、IMSの設計や影響評価のための分析手法については、体系的な議論がなされてきているとは言えない状況にある。

そこで本稿は、IMSの概念を整理した上で、分析の枠組みとしての“Multi-Cycle Model”を提案する。

まず2章では、上述のIMSの概念や実際のサービス例について、詳細な整理を行う。その上で、3章ではIMSの分析の枠組みとしての“Multi-Cycle Model”を提案し、4章においてその計算例を示す。最後に5章において、今後の課題を整理する。

2. 統合モビリティサービスの概念

(1) IMSの定義

本稿における「統合モビリティサービス (以下、IMS とする)」とは、「鉄道、バス、タクシー、DRTやカーシェアリング等の個別に提供されていた交通サービスを、統一的に決済される料金プランと、単一の検索・予約システムを通して利用者に提供するサービス」を指すものとする。この定義は、著者らが本稿において独自に定義したものであり、本稿では「統合モビリティサービス」または「IMS」という名称を、上記の定義に当てはまる既存のサービスや今後登場するサービスを総称するために用いる。

(2) IMSの諸要素と類型

前項の定義に合致するIMSは以前より存在していたが、

近年のIT技術の進歩によりIMSによって統合される交通サービスの対象が急拡大してきている。

IMSを規定する主要な要素としては、料金、時刻・経路検索方式、予約手配方式、統合対象サービスの4点が挙げられる。料金については、一つのアカウントや窓口で決済と管理が可能であることが定義上の要件であり、バリエーションとしては、完全な定額制、定額制と従量課金を組み合わせたハイブリッド型、完全従量課金等が考えられる。時刻・経路検索方式および予約手配方式については、全て一つのアプリケーションや窓口で実行できることが定義上の要件であり、アプリの検索機能やスケジュール管理アプリとの連携等の面で多様なバリエーションが考えられる。統合対象サービスについては、対象範囲により表1に示す3段階に類型化することができる。また、各段階のサービスの包括性を図1に示す。

表1 IMSの類型化

| 類型 | 実サービス例 | 特徴 |
|---------|----------------------------|--|
| 定路線型 | バス・鉄道の 共通定期券+ 共通乗換案内 | 定時定路線の鉄道・ バスでの統一的な 案内・料金制度 |
| 乗合サービス型 | SAVS FMOD Kutsuplus | 道路上の 乗合交通の統合 |
| 総合型 | MaaS | カーシェア等の交通 具共有サービスと、 固定路線の公共交通 を含む形態 |



図1 IMSの各類型の対象範囲

まず、最も基本的な形態で古くから存在したIMSの形態は、定時定路線の鉄道とバスの共通乗車券、ならびに共通ウェブサイトまたは窓口、電話番号等での乗換案内サービスである。運行主体が同じか、相互に協力関係にある鉄道とバスの事業者間で、共通の乗車券や案内サービスを提供する形態は以前より多く見られた。この場合、利用者は一つの窓口で鉄道・バスの双方の利用権が一体となった乗車券や定期券を購入することができ、一つのウェブサービスや有人窓口で経路や運行時刻について問い合わせることができるため、このサービスは前項の定

義によるIMSの一形態と捉えることができる。しかし、定時定路線のみでは、駅やバス停から遠い地点を発着する移動や、運行時間外の移動には対応できず、また運行頻度が低い場合には移動時刻選択の自由度が大きく下がるという短所を持っているため、共通定期券があったとしても、自家用車保有に代わる包括的な選択肢にはなりえない場合が多いと考えられる。

第2段階のIMSである「乗合サービス型」は、定時定路線のバスや鉄道には無い柔軟性を持った公共交通サービスを提供し、「バス」と「タクシー」として分離されて提供されている道路上の公共交通サービスの統一を試みるものである。これらのサービスは、ドア・ツー・ドア輸送と乗合を両立させるような都市型DRTの配車システムを基盤としている。移動の希望を一つの窓口となるアプリケーションで受け付け、需要に合わせて乗合タクシーや一人乗りのタクシー、また場合によっては定路線に近いバスに乘客を割り当てるといった特徴である。

第3段階の「総合型」は、「乗合サービス型」が対象としていた範囲に加え、鉄道や完全な定時定路線バスと、カーシェアリングや自転車シェアリング等の交通具共有サービスも含めた統合を目指すものである。

次節以降では、ここまでに紹介した各段階のサービスの中でも特に代表的な概念およびシステムとして、「乗合サービス型」に該当するSmart Access Vehicle System (SAVS)とFlexible Mobility On Demand (FMOD)、「総合型」に該当するMobility as a Service (MaaS)について紹介する。

(3) Smart Access Vehicle System (SAVS)

Smart Access Vehicle System (略称はSAVS、個々の車両を示す場合はSAV、SAVの運行を意味する場合はSAVサービスと呼ばれる)は、中島ら⁹⁾が提案し、開発および実運用の開始に向けて取り組みが進められている交通システムである。SAVSはドア・ツー・ドアの移動サービスを利用者に提供しつつ、乗合を可能にする配車ルートを実算できるシステムであり、完全に自動で制御できる点が特徴である。また、人口の多い都市での高密度な需要にも対応可能である。

SAVSは既に函館市で複数回の運行実験を実施している。2015年の運行実験時には利用者アンケートを実施しており、その結果をもとにした藤垣ら⁹⁾の発表において、自家用車保有に代わるような移動サービスとなる可能性が既に示されている。また運行実験により、オペレータを介すことなく完全に自動で予約を受け付けて運転手の端末に指示を出せることが確認できている。一方で配車リクエストに対して車両が多い時間帯には、乗合が発生せずに実質的にタクシーと同様の運行になってしまう場合もある。そのため需要予測と運行パフォーマンス評価をもとにした、適切な料金設定と車両数の設定を実現す

ることが課題と考えられる。

なお、SAVSは都市の市街地内を対象としたサービスであり、SAVSが導入された段階でも都市間は鉄道や航空機など他の交通手段で結ばれることが想定されている。

(4) Flexible Mobility On Demand (FMOD)

Flexible Mobility On Demand (FMOD)は、富士通研究所の池田らがMITのBen-Akivaらと共同で開発した柔軟な交通サービスを提供するシステムである⁷⁾。FMODでは、まず利用者が希望の発着地と到着時刻を入力すると、単独乗車のタクシー、乗合タクシー、ミニバスの3種類の交通手段それぞれについて、料金及び出発時刻が提示され、利用者が選択することで予約が確定する。利用者に複数の選択肢が提示される点、およびその選択肢が事業者側の利益の期待値が最大になるよう生成される点がFMODの特徴である。

なお、利益最大化の計算は個別トリップでの手段選択モデルを用いて計算しており、中長期的な経験の積み重ねによる自家用車保有状況の変化などは考慮されていない。また、料金も定額制ではなく1乗車毎に徴収する形のサービスになっている。

(5) Mobility as a Service (MaaS)

Mobility as a Service (MaaS)は、欧州で実導入に向けた取り組みが急速に進んでいるサービスの概念である。表2にHietanen⁸⁾が示しているMaaSのパッケージの例を示す。MaaSの利用者は、MaaSのサービスを一体的に提供する主体である”Mobility Operator”が用意したサービスパッケージから任意のものを選択し、そのパッケージに示された範囲内でのサービスを受けることができる。利用者は一つのスマートフォンアプリケーションで、移動手段の選択肢の検索、予約手配、料金管理を実施できる。「乗合サービス型」とは異なり、鉄道や定時定路線バスなどの公共交通と、カーシェアリング等の交通具共有サービスも対象に含まれ、また定額制部分を含む月額のパッケージ料金設定が想定されている。供給側の組織体制としては、Heikkilä⁹⁾によると、Mobility Operatorは民間企業として運営されることが想定されている。また、Mobility Operatorは直接各サービスを運行するのではなく、複数の個別サービスの運営事業者”Service Provider”と契約してサービス利用権を買い取り、独自の判断で組み合わせて利用者に販売する役割を担うことになる。

世界初のMaaSの概念に則ったMobility Operatorとして設立されたMaaS Global社は、2016年中にフィンランドのヘルシンキで実際のサービスを開始する予定である。さらに、欧州の他都市でも2016年～2017年中のサービス開始に向けた検討が既に開始されている。

表2 MaaSパッケージとして想定される内容例

(Hietanen[®]より引用, 日本語訳: 著者)

| | |
|------------------------------|---|
| 都市部通勤者 向けパッケージ (95€/月) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地元の市内公共交通が無料 ・ 100kmまでのタクシー使用 ・ 500kmまでのレンタカー ・ 1500kmまでの国内公共交通 |
| 15分パッケージ (135€/月) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 待ち時間15分以内の乗合タクシー ・ EU内は0.5€/kmで乗合タクシー利用可能 ・ 地元の市内公共交通が無料 ・ 1500kmまでの国内公共交通 |

3. 分析の枠組みMulti-Cycle Modelの提案

(1) 枠組みを提案する目的

IMSのサービス設計や、規制・誘導等の政策検討にあたっては、そのサービスが市民の交通行動や日常の活動に与える影響や、個別サービスの混雑や事業者収支等に与える影響に関する分析結果が有益な参考情報となり得る。分析としては、利用意向調査や実際のサービス利用データを用いたIMS利用者の短期・長期の行動モデル構築や、個別サービスのパフォーマンス評価シミュレーションと組み合わせたサービス全体の挙動の分析などが想定される。

IMSの分析においては、サービス設計が個別の活動・移動時の選択に影響を与えるだけではなく、長期的な自家用車の保有選択やサービスパッケージ選択にも影響を与えることや、特性の異なる多様な事業者が参画することを考慮する必要がある。分析者の興味や対象とするサービスや、対象とするサービス変数により、多様な分析が可能になり、それらの多様な分析がIMSの特性に関する理解を深めることや、サービスの可能性を評価することに繋がると思われる。しかしながら、多様な分析が独立して存在するだけでは、IMSの分析の体系を構築することはできず、また個々の分析の間の相互関係を記述するために煩雑な作業が必要になる恐れがある。

そこで、IMSの新規分析者の分析方針構築を手助けするとともに、各分析の位置づけを議論する際の参考情報として活用できる枠組みとなることを目的として、本稿ではMulti-Cycle Modelという枠組みを提案する。この枠組みでは、個人や事業者の個別の意思決定モデルと、個別サービスごとのパフォーマンス評価モデルを組み合わせる方法を示すものであり、分析の特徴や利用可能データなどに応じて、個別の意思決定モデルおよびパフォーマンス評価モデルとして採用する具体的なモデルは分析者が判断することを想定している。

また、この枠組みは利用者及び供給者の意思決定の相互作用として考えられる関係性を整理した仮説の体系であり、その関係性の有無や強さを本稿で証明するもので

はない点に留意されたい。そのような関係性の実証は、実際のサービス提供時に得られる実測データを用いて実施する必要がある。ただし、サービス開始前の状態であっても、「もし〇〇円以下ならば利用したい」「もし〇〇円以上の粗利が出るならば運営できる」といった各主体の意思の整合性を確認するための体系として活用することは十分可能だと考えられる。

(2) Multi-Cycle Modelの全体像

Multi-Cycle Modelの全体像を図2に示す。この枠組みは、以下に示す複数の循環からなる(本稿での「循環」という表記は、枠組みの説明で用いる「Cycle」という表記と同義として用いている)。ここでの循環は均衡点を持ちうるものである。この枠組みでは、各循環の結果として各市場において均衡状態が成立することが考えられるが、単一の均衡点を持つことは仮定していない。複数の均衡点を持つ場合や、均衡点自体が他の循環の動きや外的変数の影響により移動する可能性を考慮するために、均衡という表現を枠組みの中に用いずに、循環(Cycle)という表現を使用している。

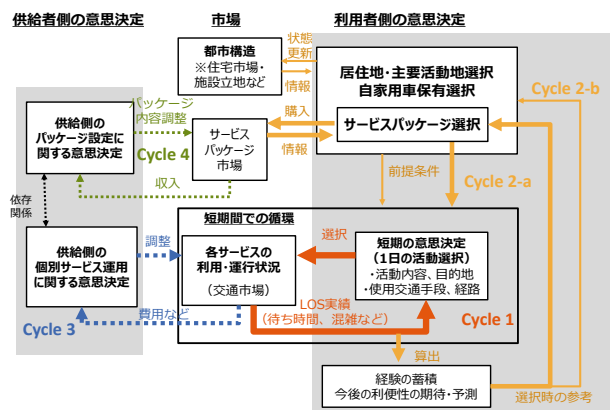


図2 Multi-Cycle Modelの全体像

各循環の位置づけは以下の通りである。

- Cycle 1: 利用者の短期的な選択と各個別サービスのパフォーマンスから導出されるサービス水準の相互循環
- Cycle 2-a: 利用者のサービスパッケージ選択と短期的な経験の相互循環
- Cycle 2-b: 利用者の居住地・主要活動施設の選択や自家用車保有選択、サービスパッケージ選択と短期的な経験の相互循環
- Cycle 3: 供給側の個別サービス運用に関する意思決定とそれに伴う経費変化の相互循環
- Cycle 4: 供給側のサービスパッケージ内容および料金調整に関する意思決定とそれに伴う収入変化の相互循環

なお、Cycle 1,2は利用者側の行動が発端となって生じる循環であり、Cycle 3,4は供給者側の行動や意思決定が発端となって生じるものである。そのため、各循環が一巡する速度は各個人や各事業者ごとに本来は異なるが、分析上その速度を集団ごとに固定値になるよう仮定した上で分析を行うことも可能である。ただし、各循環の間での速度差に関する仮定により、循環同士の相互作用の計算方法が大きく異なる可能性がある。

以下では、利用者側の行動が発端となるCycle 1,2と、供給者側が発端となるCycle 3,4に分けて、それぞれの詳細について述べる。

(3) 利用者側の循環

Cycle 1 は、各サービスの利用を含む利用者の1日の活動に関する選択と、各サービスのパフォーマンスの相互関係を扱う部分である。IMSを対象とした分析での特筆すべき点は、鉄道や定時定路線バスだけでなく、タクシー、DRT、カーシェアリング等の複数のモビリティサービスの待ち時間や所要時間等のパフォーマンスが分析対象となる点である。これらのサービスのパフォーマンスは、面的なサービス対象区域全域での需要が相互にパフォーマンスに影響しあうという点が特徴であり、詳細な時空間情報を持つ需要を入力とし、各サービスの車両と人の移動をシミュレーションして計測する方法が、一つの手法として考えられる。ただし、Cycle 1は最も短期的な循環であるため、他の循環を含めた一体的な分析のためには、Cycle 1の計算回数が非常に多くなる可能性がある。シミュレーションを随時実行する場合の計算時間が許容できない場合には、分析上許容できる範囲で時間帯と空間を区分して集計した合計利用者数と、待ち時間や乗車時間等のパフォーマンス変数の関係式を、シミュレーション結果や実運用状況から推定し、その式をパフォーマンス関数として用いるという手法が代替策として想定される。なお、この循環の速度は、1周当たり数時間～1日単位だと考えられる。

Cycle 2は、IMSの会員になるか否か、なる場合はどのサービスパッケージを選ぶか、という選択と、居住地・主要活動施設の選択や自家用車保有選択等の長期的な選択を、短期的な経験の蓄積や将来の経験の予想に基づいて実行する循環である。中長期的な選択の結果に基づいたCycle 1での経験やそれらを踏まえた将来のサービスへの期待をもとにして、再び中長期的な意思決定の見直し等の選択を実施するために、この部分が循環になっている。循環の時間的なスケールの違いから、サービスパッケージの購入選択を行うCycle 2-aと、さらに周期の長い自動車保有選択や居住地選択を伴うCycle 2-bに分けている。またCycle 2-bの長期的な選択は、Cycle 2-aでも考慮

しているサービスパッケージの購入選択を伴うものである。Cycle 2-aの循環の速度はサービスパッケージの契約期間と個人がパッケージを見直す時間間隔に依存するが、一般的には概ね1周当たり1週間～数か月単位だと考えられる。Cycle 2-bの循環の速度は、概ね1周当たり数か月～数年単位だと考えられる。

(4) 供給側の循環

Cycle 3は、需要に応じて車両増減を実施するなどの、供給側の個別サービス運用に関する意思決定が発端となるものである。そのような操作によりパフォーマンスが変化し、その結果として必要経費などが変化することで再度供給側の意思決定モデルの変数が変化するという循環である。この循環は、あくまで供給側が必要と判断して実行する場合にのみ生じるもので、循環速度も供給側に依存する。この循環速度はパフォーマンス調整の容易さにより大きく異なると考えられ、特に実運用上は車両や運転者との契約形態が調整の容易さに大きく影響を与えると考えられる。車両を保有し、運転者も専属の社員として雇用している場合には、それらの増減は容易ではなく、1年から数年に1回の循環になると考えられる。一方で、自家用車を利用したライドシェアのマッチングサービスのように、車両の保有と雇用契約を伴わない形態の場合には、需要に合わせて柔軟に車両数を管理することも可能になる。この場合は、Cycle 1と同様の数時間～1日単位での循環になることも考えられる。

Cycle 4は、IMSの供給側が、サービスパッケージの構成や料金を変化させるという意思決定が発端となるものである。そのような操作により市場で販売されているサービスパッケージの構成が変化するために利用者の選択が変化し、その結果として収入を中心とした供給側の状況が変化することで、再び供給側の意思決定モデルの変数が変化するという循環である。

なお、供給側のサービスパッケージ設定に関する意思決定と、個別サービスの運用に関する意思決定は、双方の意思決定を同一事業者が実施する場合と、別事業者がそれぞれの意思決定を担当する場合があると考えられる。MaaSの供給側の枠組みでは、サービスパッケージに関する意思決定をMobility Operatorが担い、個別サービスの運用に関する意思決定をService Providerが担当する形態を取っている。いずれの場合でも、供給側の2種類の意思決定には相互依存関係が生じる場合が多いと考えられる。

(5) Multi-Cycle Modelの実装方法の比較

Multi-Cycle Modelの枠組みの主要な実装方法としては、「一体型シミュレーション方式」と、「独立モデル連結方式」の2つが考えられる。一体的シミュレーション方式は、全体を一体的なマルチエージェントシミュレーシ

ョンとして実装するものであり、全ての主体の意思決定モデルをシミュレータに含んだうえで、車両の運行と人の意思決定を全てシミュレートするものである。一方、「独立モデル連結方式」は、各主体の選択モデルや相互作用を記述するためのパフォーマンス関数などを、個別のデータやシミュレーションから推定し、個別の数式を連結させる形で分析を実施する方法である。特に各サービスのパフォーマンス評価において、(3)でも述べたように、「分析上許容できる範囲で時間帯と空間を区分して集計した合計利用者数と、待ち時間や乗車時間等のパフォーマンス変数の関係性を、シミュレーション結果や実運用状況から推定し、その式をパフォーマンス関数として用いる」ものを、ここでは指すものとする。独立モデル連結方式を個別のモビリティサービスに適用した例としては、乗合タクシーのパフォーマンス関数をシミュレーションから導出して分析に用いている、藤垣ら¹⁰が挙げられる。

分析においては、両手法のメリット、デメリットを考慮し、分析の目的に合わせて選択することが望ましい。表3に、両手法のメリットとデメリットを示す。

表3 一体型シミュレーション方式と独立モデル連結方式のメリットとデメリット

| | 一体型シミュレーション方式 | 独立モデル連結方式 |
|----|-------------------------------------|---------------------------|
| 利点 | ・時空間的に詳細に分析可能 | ・計算負荷が小さい ・多主体での連携が容易 |
| 欠点 | ・計算負荷が大きい ・多主体での連携に労力を要する(権利調整等) | ・時空間的な集計が必要で、精度に注意する必要がある |

まず、時間的・空間的な詳細さを保った分析ができることが一体型シミュレーション方式の大きなメリットである。独立モデル連結方式の場合には、サービスパフォーマンスを関数化する部分において、時間的・空間的な集計を行う必要が生じてしまう。独立モデル連結方式の場合でも、複数の時間帯やゾーン区分等を用いることで、時空間的な多様性を考慮することは可能ではあるものの、何らかの単位での集計を施す場合には、その集計による精度の変化に十分注意する必要がある。

一方で、計算負荷が低い点、技術的にも社会的にも構築が容易である点が、独立モデル連結の場合のメリットである。構築の容易さについては、シミュレータ構築の技術的な難易度だけでなく、シミュレータ構築に際して生じる社会的な組織間連携の課題にも留意する必要がある。特に、DRTのシミュレータは配車システムそのもののアルゴリズムを用いるため、システム開発主体が個別に作成することが一般的である。そのため、多様な個別サービスを含むIMSの分析では、DRT単体のシミュレータの移植や連結が必要になる。移植の実施には、技術的

な問題だけでなく、知的財産等に関連した社会的、経済的な問題が生じ得る。また、協力関係にある機関同士が協力してシミュレーションを構築することも可能ではあるものの、そのパーツとなるモデルを取り換えての計算や再現実験をシミュレータ保持者しかできないため、全てのコードを公開しない限り、再現性確認が難しくなるという課題もある。

(6) 既往研究との関係性

個別サービスを対象とした既往研究の多くは、Multi-Cycle Modelの枠組みの一部として捉えることができる。Cycle 1に相当するサービスのパフォーマンスと利用者行動の相互作用に関する分析としては、FMODを対象にした池田ら⁷や、オンデマンドバスやLRTを含む選択を対象とした坪内ら¹⁰が挙げられる。これらは複数のサービスの存在を考慮してCycle 1を分析しているが、Cycle 2にあたる中長期の選択を考慮していない。また、Cycle 2にあたる定額制サービスへの加入選択を対象とした研究としては藤垣ら¹⁰があるが、乗合タクシーのみを対象としている。事業者行動を含めたBar-Yosefら¹²やZhangら¹³は、Cycle 1だけでなくCycle 3、Cycle 4を含めた分析であると捉えることができるが、単一の公共交通サービスを対象としたものになっており、定額制を想定したCycle 2の分析は含まれていない。

以上の研究は、Multi-Cycle Modelの中で仮定されている、図2の中の矢印にあたる個別の関係性を対象としているものである。しかしながら、IMSのサービス設計においては、2章で述べたようなサービスの特性のために、「複数サービスの存在」「中長期の選択と短期的な選択の連動」「事業者行動の調整行動」の3点を同時に考慮することが望ましいと考えられる。

また、Ben-Akivaら¹⁴は、世帯の選択行動と、都市開発、交通システムパフォーマンスの相互作用を整理し、各選択行動に対応したモデルを構築・推定している。世帯の選択としては、居住地や自動車保有等の中長期の選択と、毎日の活動・移動の選択の双方を考慮しており、パフォーマンスモデルの構成によっては、「複数サービスの存在」「中長期の選択と短期的な選択の連動」の2点を同時に考慮することができる。しかしながら、供給者側の車両数等のパフォーマンスに関する変数の調整や、料金体系の調整に関する意思決定を含めた枠組みにはなっていない。

本研究で提案する枠組みでは、これをベースに、さらにIMSの供給者との相互作用と、利用者のIMSのパッケージ選択行動を追加している点が新たな特徴である。

4. 分析手法Multi-Cycle Modelの計算例

Multi-Cycle Modelの流れに沿った分析の例を、簡易的な空間構成及びサービスパフォーマンスと利用者行動の仮定を用いて例示する。

(1) 空間の仮定

計算例で対象とする仮想空間の構成を図3に示す。都心から延びる幹線道路の終端に、団地が3か所存在している。各団地内には、一本の主要道路沿いに人口が均一に分布しており、主要道路から各街区に入る区画道路がある。3か所の団地の総人口は P とし、団地以外の人口は考えないものとする。

なお、この設定は特定の地域を模したものではないが、以下のような現実国内の郊外団地でも生じ得るような仮想的な状況を想定した、空間およびサービスの設定である。

「丘陵地に作られた急勾配の多い郊外ニュータウンで、バスが団地の入口まで走っていたが、バス停から遠く離れた住民からはバス停まで歩くのも大変だという声が上がっていた。そのような中で、バスが廃止になった。行政の支援のもとで定時定路線のバスを復活させるか、乗合タクシーに刷新すべきという議論の中で、バスと乗合タクシーの双方を走らせ、どちらも乗車できる定期券を既存バス定期券と同程度で販売する完全定額制のIMSサービスが提案された。」

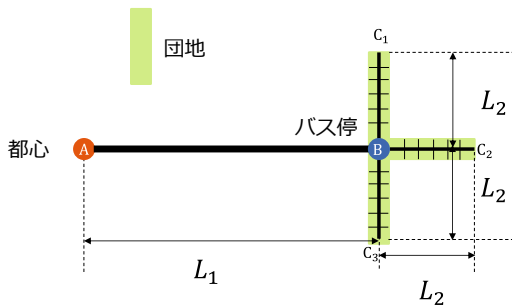


図3 計算例における空間の仮定

(2) 利用者行動の仮定

短期的な行動と、長期的な行動をそれぞれ以下のように仮定する。

Cycle 1にあたる短期的な行動としては、ここでは自宅のある団地から出発して都心に向かう10Dのトリップの利便性のみを考慮する。この際のIMS会員の手段選択は、バスと乗合タクシー以外の手段（自家用車や自転車など）は選択肢として考えず、「バスと乗合タクシーのうち待ち時間も含めた所要時間が短い方を利用する」という基準で選択をすると仮定する。

Cycle 2-a に当たるサービスパッケージ選択行動として

は、全利用者が定期的に完全定額制IMSの会員になるか否かの選択を行うものとする。会員・非会員ともに、平均的なタクシーの待ち時間および料金に関する正確な情報を持ったうえで選択を行うものとする。この選択行動は、藤垣ら¹¹⁾が実施した定額制乗合タクシーの利用意向調査を基にして推定した、乗合タクシー待ち時間と料金を変数とした定額制加入有無を説明する2項ロジットモデルで説明されるものとし、そのパラメータを料金を月当たり換算して使用する。また、Cycle 2-bは、本計算例では扱わない。

(3) サービスパフォーマンスの仮定

バスおよび乗合タクシーの運行区間は、バスと乗合タクシーで異なるものとする。バスは幹線道路を走行できるが団地内街路は走行できず、図3のAB間を往復するものとする。乗合タクシーは団地内街路・幹線道路の双方を走行でき、図3のAC₁間、AC₂間、AC₃間を往復する3系統で運行されるものとする。また、乗合タクシーの台数は3の倍数とし、各団地の担当車両数は等しいものとする。この仮定のような状況は、団地が丘陵部にあり、道路幅や勾配の関係でバスの運行が難しくなっている場合などに、現実生じ得る状況だと考えられる。

バスの乗車後の所要時間・待ち時間は、利用者数に依存しないものとする。乗合タクシーは利用者数の多寡に関わらず、都心から団地の先端までを往復する経路で運行するものとし、さらに乗合タクシーの乗車後の所要時間・待ち時間は、利用者数に依存するものと仮定する。ここでは単純化のため、1つの団地内向け路線の全利用者が一人増えるごとに、都心から団地の先端までを単純に往復する場合（乗降客が存在しない場合）に比べて所要時間が α_1 、待ち時間が α_2 増加し、利用者は等しくこの増加を経験すると仮定する。また、バスと乗合タクシーは運行区間を平均速度に従って運行するものとする。また、道路混雑の影響は考えないものとする。また、ここでは単純化のためバスおよび乗合タクシーの平均速度は等しいものとする。

なお、ここではバスおよび乗合タクシーの運行とサービスパッケージの販売は、全て一つの事業者が行うものとする。以下で収益について論じる場合は、全てこの単独の事業者の収益を考えるものとする。

乗合タクシーおよびバスの速度は、停車時間を含めた平均速度であるため、待ち時間は、表4にて示している表記を用いて以下の(1),(2)式で表すことができる。

$$W_t = \frac{3(L_1+L_2)}{N_t V_t} + \alpha_2 U_t \quad (1)$$

$$W_b = \frac{L_1}{N_b V_b} \quad (2)$$

表4 計算例で用いる文字

| |
|-------------------------------|
| W_t : 乗合タクシー平均待ち時間 |
| W_b : バス平均待ち時間 |
| N_t : 乗合タクシー台数 |
| N_b : バス台数 |
| V_t : 乗合タクシー速度 (= V_b) ※ |
| V_b : バス速度 (= V_t) ※ |
| V_w : 徒歩速度 |
| L_1 : 幹線道路距離 (図 3参照) |
| L_2 : 団地内主要道路距離 (図 3参照) |
| U_t : 1団地あたり乗合タクシー利用者数 |
| M : 会員数 |
| P : 総人口 |

※速度は乗降時や信号停止等の停車時間も含む表定速度とする (乗合タクシーは団地内乗降客が居ない場合)

(4) Cycle 1 の分析

利用者は、乗合タクシー、バスの双方が利用できる場合には、先述の通り待ち時間と乗車時間を合わせた所要時間が短い方の手段を利用する。この場合、幹線道路の近くに住む利用者ほどバス停まで歩く距離が短くなり、バスが有利になりやすく、遠い箇所ほどタクシーの方が有利になりやすいために、バスとタクシーの双方が1人以上の利用者に利用される状況では、バス利用とタクシー利用の閾値になる距離 (L_E とおく) が存在する。

団地の入口にあるバス停からの距離が L_E の地点の利用者が都心まで乗合タクシー、バスで到達するための時間 T_t, T_b は、それぞれ(3), (4)式で表せる。

$$T_t = W_t + \frac{L_1 + L_E}{V_t} + \alpha_1 U_t \quad (3)$$

$$T_b = W_b + \frac{L_E}{V_w} + \frac{L_1}{V_b} \quad (4)$$

この所要時間 T_t, T_b が等しくなることから、(5)式が成立する。また、1団地あたり乗合タクシー利用者 U_t は L_E を用いて(6)式のように表現できる。さらに、待ち時間は(1), (2)式で表せることから、(5)式に(1), (2), (6)式を代入して L_E について解くことにより、Cycle 1の均衡点となるような距離の閾値は、(7)式で表すことができる。

$$W_t - W_b = \frac{L_E}{V_w} - \frac{L_E}{V_t} - \alpha_1 U_t \quad (5)$$

$$U_t = \frac{M(L_2 - L_E)}{3L_2} \quad (6)$$

$$L_E = \frac{\frac{3(L_1 + L_2)}{N_t V_t} - \frac{L_1}{N_b V_b} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)M}{3}}{\frac{1}{V_w} - \frac{1}{V_t} + \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)M}{3L_2}} \quad (7)$$

(5) Cycle 2-a の分析

ここでは、Cycle 3とCycle 4はCycle 2-aよりも十分に遅く、Cycle 4の1循環の間に (つまりサービスパフォーマンスの特性と料金が固定されている状態で) Cycle 2-aは均衡に達すると仮定する。Cycle 2-aで用いる利用者の選択モデルの変数は、先述の通り平均待ち時間と料金の二つであるが、料金はCycle 4が動かない限りCycle 2-aの中では固定値であるため、Cycle 2-aは平均待ち時間のみを介した循環となる。そのため、Cycle 4が動かない、つまり料金を f に固定した場合のCycle 2-aの均衡会員数は、以下の(8),(9)式と先述の(6),(7)式を同時に満たす会員数となる。ただし、 $C(W_t, f)$ は先述の定額制サービス加入選択モデルにより算出される加入割合を示す。

$$M = P * C(W_t, f) \quad (8)$$

$$W_t = \frac{3(L_1 + L_2)}{N_t V_t} + \alpha_2 U_t \quad (9)$$

この条件を満たす会員数は以下のようにして求めることができる。まず、「ある待ち時間の時に得られる会員数」を表した利用者反応関数と、「ある会員数の時に達成可能な待ち時間」を表したパフォーマンス関数を求め、それらを会員数—待ち時間平面に引く。その両者の交点が均衡会員数となる。このとき、利用者関数は(8)式、パフォーマンス関数は、(9)式に(6), (7)式を代入したものである。図4に、バス1台、乗合タクシー3台の場合の例を示す。また、これ以降は表5に示す数値を代入した場合の計算結果を、分析例として示す。

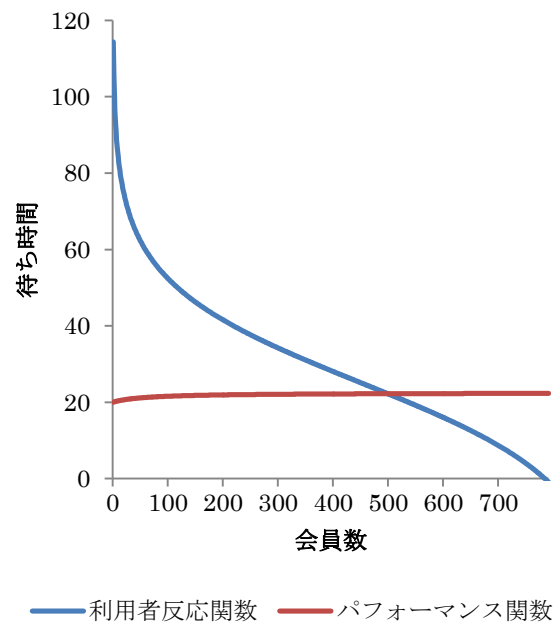


図4 Cycle 2の均衡点導出に用いるパフォーマンス関数および利用者反応関数の例

表5 計算例で用いる数値

| 以降の計算例での数値 | |
|-------------------------------------|------------------|
| P (総人口) | 900人 |
| V_t (タクシー速度) | 12km/h |
| V_b (バス速度) | 12km/h |
| V_w (徒歩速度) | 4km/h |
| α_1, α_2 (待ち時間・所要時間増加率) | 15 second/person |
| L_1 | 3km |
| L_2 | 1km |

以上のようにしてサービスパフォーマンスの特性と料金を固定した際の均衡会員数を導出できるが、料金ごとに均衡時の会員数は異なる。供給側の立場として分析をする場合、料金を変更した場合の利益の動きが興味の対象の1つとなる。料金ごとの利益は、料金ごとの均衡時の会員数に料金を乗じた収入から経費を差し引くことにより、算出することができる。図5に、料金ごとおよび車両投入パターンごとの利益の数値計算結果を示す。なお、ここでは簡易的に乗合タクシーの運行経費は50万円/月・台、バスは150万円/月・台とし、IMSの場合は、バスとタクシーの双方が使用される、 $0 < L_w < 1$ となるような場合のみを対象として計算している。また図中の凡例では、バスn台、乗合タクシーm台数の場合の結果をBnTmと表記している。バスが0台で全ての会員が乗合タクシーを利用する場合についても算出している。

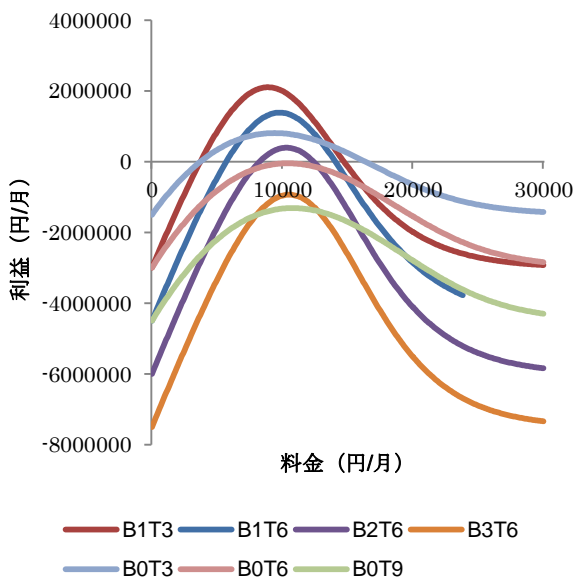


図5 料金および車両パターンごとの利益

一般的にこの計算方法では、料金がゼロに近い場合は、利用者が多くても収入がゼロに近い値になり、料金を無限大に近づけた場合も利用者がゼロに近づくため同様に収入がゼロに近い値となり、いずれの場合も経費に応じた赤字が発生すると考えられる。また、ある特定の

料金で、料金を微小量増加させると利用者減少による減収効果が料金増加による増収効果よりも上回り、また微小量減少させると利用者増加による増収効果が料金減少による減収効果を下回るような、収益を極大化する料金が存在する可能性がある。図6に示した数値計算例は、0円や3万円程度では各サービスの経費相当の赤字(3万円はそれに近い値)になっており、1万円前後で利益が最大となっている。これは、上記の性質を満たすものとなっており、妥当な結果が得られていると言える。

(6) Cycle 3および4の分析

本節ではまず、Cycle 4において近視眼的事業者を対象にした分析例を紹介する。ここでは、t期末の会員数で運行経費の総額を割った額を、t+1期の料金として料金改定する事業者を仮定する。この時、t期末の会員数 $X(t)$ と、t+1期末の会員数 $X(t+1)$ は、料金 f の時の均衡利用者数を $E(f)$ とし、対象サービスの経費の合計額を TC とすると、以下の関係式を満たす。

$$X(t + 1) = E \left(\frac{TC}{X(t)} \right) \tag{10}$$

t期末の会員数 $X(t)$ と、t+1期末の会員数 $X(t+1)$ の関係を数値計算した結果を図6に示す。なお、ここでの表記方法としては、Granovetter¹⁵⁾が提唱した社会的相互作用の表現方法であり、藤垣ら¹⁶⁾でも乗合タクシーの好循環・悪循環分析において用いている手法を用いている。グラフ上にある45度線(直線 $X(t+1) = X(t)$)よりも上にある区間では $X(t)$ が増加する循環となり、下にある区間では減少する循環となる。

続いて、Cycle 3と4を連動させる方策検討への適用可能性について述べる。今回の例では、乗合タクシーのみの方が少ない人数で好循環に入ることが分かる。これは、タクシーのみの方が経費が安いいため、少人数でも割安な金額で採算が取れるためだと考えられる。そのため、もしリスクを取ることを極力避けたい事業者がこの分析結果を用いてサービスを設計する場合、まず乗合タクシーだけで開始し、需要が喚起されてきたらバスを投入するという段階的なサービス向上策を取ることが可能になる。まずは100人程度の利用者を想定した価格設定で乗合タクシーのみでのサービスを開始し、サービスの浸透とともに徐々に値下げを行うことで、値下げと利用者増加の好循環に入ることができる。これは、分析の枠組みの中ではCycle 4による料金調整とCycle 3による台数調整の連動と捉えることもできる。値下げを複数回繰り返した後に、300人程度の利用者数になった際にバスを投入することにより、乗合タクシーのみでのサービスを続けた場合よりもさらに人数の多い均衡点まで好循環で進むこと

ができる。

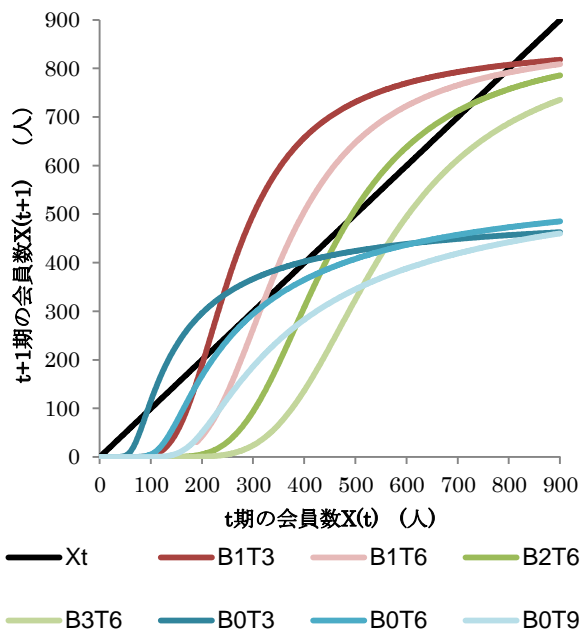


図6 近視眼的事業者を仮定したCycle 4の構造

(7) 計算例における留意点の整理

今回の計算例においては、実際の分析では重要な影響をもたらす以下のような点を考慮していないことに留意する必要がある。需要側は、移動時間帯の分布と多様性、移動先や活動目的の多様性、各種選択における個人差、サービスパッケージ選択に待ち時間・料金以外の要素が与える影響を考慮していない。また、長期的な選択であるCycle 2-bを考慮していない。供給側では、詳細な運行ルートの設定方法、車両キャパシティの多様性、乗務員の雇用形態、労働可能時間帯や、運行方式とコストの関係を考慮していない。また、本章での議論は全て個別の行動モデルおよびパフォーマンスモデルの信頼性の限界を無視して進めており、実際の導入に当たってはその信頼性や不確実性に対する対応策が重要になると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、IMSの概念を整理するとともに、その分析手法を提案した。

今後の課題としては、実データを利用した分析と、実サービスの国内での導入検討、および法や規制誘導策のあり方の検討と、都市構造との関係の分析が挙げられる。

また、分析の枠組みそのものにおいても、個人の中長期的な選択構造や、供給側の関係性整理において、更なる発展の余地があると考えられる。特に供給側の体制の

在り方については、海外でのMaaSサービス運用時の状況なども踏まえつつ、より詳細化して考える必要があると思われる。さらに、実際の分析にあたっては、3章(5)で論じたMulti-Cycle Modelの実装方法についても、独立モデル選択方式と一体型シミュレーション方式の比較などを通じた適用可能性の確認が必要である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費16K06531の助成を受けて実施したものです。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Helsinki Regional Transportation Authority: Kutsuplus – Final Report, HSL Publications, 2016
- 2) Uber Technologies Inc.: Uber Pool,
URL: <https://www.uber.com/ride/uberpool/>
(2016年7月14日閲覧)
- 3) 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団：わが国のカーシェアリング車両台数と会員数の推移,
http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_graph2013.2.html (2016年7月14日閲覧)
- 4) 国土交通省：平成 24 年度国土交通白書 第 2 章第 3 節「動き方の変化」, pp. 769-774, 2013.
- 5) 中島秀之, 野田五十樹, 松原仁, 平田圭二, 田柳恵美子, 白石陽, 佐野渉二, 小柴等, 金森亮：バスとタクシーを融合した新しい公共交通サービスの概念とシステムの実装, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, 2015
- 6) 藤垣洋平, 金森亮, 野田五十樹, 中島秀之：SAVS 運行実験時の調査データを用いた都市部での DRT サービス利用意向の分析, 第 52 回土木計画学研究・講演集(CD-ROM), 2015
- 7) 池田拓郎, 藤田卓志, Moshe E. Ben-Akiva : Flexibility On Demand:複数の交通サービスへの動的な車両割り当てを特徴とするオンデマンド交通システムの設計と評価, 第 49 回土木計画学研究・講演集(CD-ROM), 2014
- 8) Sampo Hietanen: ‘Mobility as a Service’ – the new transport model?, Eurotransport , volume12, issue2, 2014
- 9) Heikkilä, Sonja : Mobility as a Service - A Proposal for Action for the Public Administration, Case Helsinki, Master Thesis in Aalto University, 2014
- 10) 藤垣洋平, 高見淳史, 大森宣暁, 原田昇：高利便性乗合タクシーサービスの均衡分析と収益最大化手法, 交通工学論文集 (特集号), 1(2) pp.A_133-A_141, 2015
- 11) 坪内孝太, 大和裕幸, 稗方和夫：オンデマンドバス

- のログデータを用いた交通分担シミュレータの開発,
土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.1, 2011
- 12) Asaf Bar-Yosef, Karel Martens, Itzhak Benenson: A model of the vicious cycle of a bus line, *Transportation Research Part B*, vol.54, pp37-50, 2013.
- 13) Fangni Zhang, Hai Yang, Wei Liu: The Downs-Thomson Paradox with responsive transit service, *Transportation Research Part A*, 70, pp244-263, 2014
- 14) Moshe Ben-Akiva, John L. Bowman, Dinesh Gopinath: Travel demand model system for the information era., *Transportation* 23: 241, 1996
- 15) Mark Granovetter: Threshold Models of Collective Behavior, *The American Journal of Sociology*, Vol83, No.6, pp1420-1443, 1978.
- 16) 藤垣洋平, 高見淳史, 大森宣暁, 原田昇: 柔軟な公共交通を対象とした利用者数とサービス水準の循環構造モデル, 第 50 回土木計画学研究・講演集(CD-ROM), 2014
- (2016. 7.31 受付)

A CONCEPTUAL PROPOSAL FOR A SYSTEMATIC ANALYSIS METHOD OF INTEGRATED MOBILITY SERVICES

Yohei FUJIGAKI, Giancarlos TRONCOSO PARADY, Kiyoshi TAKAMI,
and Noboru HARATA

Integrated Mobility Services (IMS) provide route search, booking, and payment services of different travel modes such as train, bus, taxi, Demand Responsive Transit (DRT), and car-sharing in one application and under one pricing system. Pioneer among IMS, Mobility as a Service (MaaS) will be launched in Finland in 2016, and is expected to be expanded to cities around the world. IMS provide a comprehensive service that can covers all trips of individuals in the target area; as such, it can be an alternative to owning and driving a car. As a result, travel behavior, performance and business condition of independent modes can be affected by the existence of such service. However, adequate methods to analyze interactions between users and service providers under IMS schemes has not been substantially discussed. Based on this background, an analysis method for IMS named “Multi-Cycle Model” is proposed in this paper, and the calculation of a simplified example is presented.