

都市空間における MaaS の経済分析

都市空間における MaaS の経済分析研究プロジェクト

2025 年 6 月

公益社団法人 日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究
成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印
刷に付して順次刊行するものである。
2. シリーズはAよりEに至る5つの系列に分かれる。
シリーズAは、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。
シリーズBは、シリーズAに対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、
折にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によっ
てとりまとめたものを収める。
シリーズCは、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。
シリーズDは、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査
活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。
シリーズEは、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和2年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事 山 内 弘 隆
同 原 田 昇

令和2年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番号
を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-6

守住ビル 4階

公益社団法人日本交通政策研究会

電 話 (03) 3263-1945 (代表)

F a x (03) 3234-4593

E-Mail:office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-916

2024 年度自主研究プロジェクト

「都市空間における MaaS の経済分析」

刊行：2025 年 6 月

都市空間における MaaS の経済分析
Economic Analysis of MaaS in Urban Space

主査 文 世一（同志社大学教授）
Se-il Mun

要 旨

本研究では、都市空間における交通需要の発生と公共交通手段の選択を内生化したモデルを構築し、MaaS（Mobility as a Service）の運賃体系の代替的設計案について分析を行う。交通機関としては、鉄道とバスの2種類があり、それぞれ異なった交通事業者によって運行されている状況を想定する。MaaS 運営者は、各交通事業者から一定の料金でサービスを購入し、出発地から目的地までのモビリティサービスを統合運賃で販売する。また、MaaS 運営者はいずれの交通機関も一定期間にわたって無制限に利用できる定額利用サービス（サブスクリプション）も利用者に提供する。このモデルは、交通事業者が MaaS に参加するか否かの選択をモデルに内包する。モデルに基づいて都市居住者の交通行動の空間的パターンを分析するとともに、京都市のデータを用いて設定したパラメータに基づく数値計算により、MaaS 導入に関するさまざまなシナリオごとの経済厚生を評価している。

主な結果は次の通り：

- ・個別運賃制度を統合運賃制度に置き換えることによる社会的総余剰の改善は大きい。
- ・サブスクリプションの導入は必ずしも経済厚生を改善するとは限らない。交通事業者が個別運賃で交通サービスを提供している状況で、サブスクリプションを導入すると社会的総余剰が減少する。
- ・一方、個別運賃を廃止し統合運賃に置き換えた場合には、サブスクリプションの導入が社会的余剰を大きく改善する。

キーワード：MaaS、統合運賃、サブスクリプション、都市空間

Keywords：Mobility as a Service, Integrated fare, Subscription, Urban Space

目 次

1 章 はじめに	1
2 章 モデル	4
2.1 基本設定	4
2.2 MaaS 導入の代替的シナリオ	6
2.3 利用者	7
2.4 交通事業者	9
2.5 MaaS の設計	10
2.5.1 公営 MaaS	10
2.5.2 規制を伴う民営 MaaS	11
2.6 社会的最適	12
3 章 MaaS 導入シナリオと交通オプション選択の空間パターン	14
4 章 MaaS 導入の経済厚生効果	23
4.1 全般的な厚生効果	24
4.2 効用変化の空間パターン	31
5 章 おわりに	35
参考文献	35

メンバーおよび執筆者（敬称略・順不同、役職はプロジェクト当時）

主査

文 世一（同志社大学）

メンバー

森知也（京都大学）

町北朋洋（京都大学）

大澤実（京都大学）

喜多秀行（神戸大学）

宇都宮浄人（関西大学）

内藤徹（同志社大学）

山本和博（同志社大学）

安達晃史（同志社大学）

伊藤亮（東北大学）

荒木大恵（帝塚山大学）

森本裕（甲南大学）

執筆者

文 世一

山本悠太（ORIX）

1 章 はじめに

近年、Mobility as a Service (MaaS) に対する関心が高まっている。MaaS とは、複数の交通機関を統合し、利用者に向けて一体化したモビリティサービスを提供するものである。MaaS 運営者は、鉄道・バス・タクシーなど MaaS に参加する各交通事業者から交通サービスを購入（仕入れ）し、発地から目的地までの交通についてモビリティサービスを利用者に販売する。MaaS 運営者は交通事業者から料金（卸売価格）を支払い、利用者から運賃を徴収するが、これらの料金や運賃体系は、MaaS 運営者が設計する。その際、料金については交通事業者との交渉、運賃については交通需要を考慮して決定される。

本研究では、都市空間における交通流動を記述するモデルを構築し、運賃・料金体系に関する代替的設計案の厚生効果を評価する。モデルは正方形の都市空間を想定し、各地点から発生するトリップはすべて都心部（CBD）を目的地とする。交通機関は鉄道とバスの2種類であり、鉄道とバスはそれぞれ異なる交通事業者によって運営されている。MaaS 運営者は出発地から目的地まで必要なモビリティサービスを統合運賃で提供する。また、MaaS 運営者は一定期間、すべての交通機関を無制限に使えるサブスクリプションも提供する。MaaS 運営者は、交通事業者に対して、MaaS を通じてモビリティサービスを購入した利用者の輸送量に応じて料金（卸売価格）を支払う。このモデルでは、交通事業者が MaaS に参加するか否かを選択する状況を定式化する。MaaS 運営者は交通事業者が MaaS に参加しても利潤が減少しないという条件を制約としつつ、運賃および料金を設定すると仮定する。

本研究では、MaaS 導入に関する以下の代替的なシナリオを検討する：

[P] 現状：鉄道会社とバス会社が個別に運賃を設定

[PS] P に加え、MaaS によるサブスクリプションの選択肢を導入

[PI] P に加え、MaaS による統合運賃の選択肢を導入

[PIS] P に加え、サブスクリプションと統合運賃の両方の選択肢を導入

[I] MaaS による統合運賃のみ

[IS] I に加え、サブスクリプションの選択肢を導入

シナリオ P は「現状維持」を表し、ベンチマークとして扱われる。シナリオ PS、PI、PIS では、利用者は従来の個別運賃と、MaaS を通じたモビリティサービス（統合運賃またはサブスクリプション）のいずれかを選択できる。一方、シナリオ I および IS では、欧州の多くの都市のように、運賃は完全に統合されている。

本研究では、各シナリオのもとで利用者の交通オプション選択の空間的な分布を分析する。ここで交通オプションとは、後述するように、出発地から目的地までのトリップのための交

通機関と支払い方法（個別運賃、統合運賃、サブスクリプション）の組み合わせを意味する。そして京都市の実態に即したパラメータを用いて数値シミュレーションを行い、各シナリオにおける運賃・料金体系を導出する。

主な結果は以下のとおりである：

- 交通オプションの選択は都市内の居住地によって異なる。鉄道沿線に近い住民は統合運賃を選ぶ傾向があり、鉄道から離れた住民は個別運賃を選び、その中間の地域ではサブスクリプションを選ぶ傾向がある。
- 統合運賃のもとでの社会的総余剰（厚生）は、個別運賃よりもはるかに大きい。
- サブスクリプション導入が厚生を改善するとは限らない。
- 個別運賃が存在する状況でサブスクリプション価格を引き下げると、社会的総余剰はむしろ減少する。一方で、個別運賃を統合運賃に置き換えた場合は、サブスクリプションを推進することが効率的である。
- MaaS の導入により、都心から離れていて鉄道路線に近い地域では住民の効用が増加する一方で、都心部では効用が減少する。

MaaS (Mobility as a Service) という概念は比較的新しいものであり (Heikkila, 2014)、経済モデルによる分析はまだ発展途上にある。近年では、以下のような重要な先行研究が登場している。Hörcher and Graham (2020) は、ミクロ経済理論に基づいて MaaS の効果を初めて検討した論文である。当論文では、複数の交通機関を内包するサブスクリプション (MaaS) を組み込んだ離散選択モデルを構築した。van den Berg et.al (2022) は、MaaS のビジネスモデル (統合型、プラットフォーム型、仲介型) のパフォーマンスを Economides-Salop 型ネットワーク (補完関係・代替関係のリンク構造) を用いて評価している。ただし、彼らの分析には MaaS の重要な要素であるサブスクリプションが含まれていない。MaaS の効果をさまざまなネットワーク構造で検討することには、大きな意義があると考えられる。

本研究は、空間的側面に焦点を当てており、その点で、都市空間における公共交通システムの設計に関する以下の文献と関連が深い：Newell (1979)、Kocur and Hendrickson (1982)、Daganzo (2010)、Fielbaum et.al (2016)。これらの研究は主に運行間隔、停留所の間隔、ネットワーク構造といったハードなシステムの設計に焦点を当てているのに対し、本研究は運賃や料金といったソフトなシステムの設計に着目している点が特徴である。

異なるタイプの研究として、Becker et.al (2020) は、スイス・チューリッヒ市の現実の交通ネットワークに MATSim (注：輸送計画をシミュレーションするオープンソフトウェア) を適用し、MaaS におけるシェアモビリティ導入による影響を評価している。本研究では、現実都市の詳細な分析ではなく、都市空間を単純化した理論モデルを通じて一般的な洞察を得ることを目的としている。

本研究には、これまでの先行研究とは異なるいくつかの特徴がある。第一に、都市空間モデルに基づいて MaaS の効果を分析しており、これにより都市内の各地点における交通オプションの選択パターンや厚生効果の空間的な分布を捉えることができる。第二に、サブスクリプションの価格設定を扱っている点である。そのために、本モデルでは個人ごとのトリップ頻度の異質性（トリップ性向の分布）を考慮している。第三に、交通事業者の MaaS への参加意思決定を明示的にモデルに組み込んでいる。これは MaaS の実現可能性を左右する重要な要因である。

本報告書の構成は次の通りである：2 章では、MaaS の存在を考慮した交通市場の基本モデルを提示する。3 章では、MaaS の導入に関するさまざまなシナリオにおける交通オプション選択の空間パターンを分析する。4 章では、数値シミュレーションを通じて各 MaaS シナリオの厚生効果を評価する。5 章では結論を述べる。

2 章 モデル

2.1 基本設定

図 1 に示すように、都市は一辺の長さが r である正方形の平面上に形成されていると仮定する。都市内の各地点は座標 (x, y) で表され、座標の原点は南西端にある。都心部（CBD）はこの座標系の原点に位置し、都市内の経済活動が全て集中している。居住者は人口密度関数 $N(x, y)$ に従って CBD の周囲に分布しており、それぞれが通勤・買い物などで CBD を訪れる。これが交通需要の源である。移動はすべて南北または東西方向のみで行われるため、移動距離はマンハッタン距離で測られる。この都市には鉄道およびバスという 2 種類の交通機関が存在する。バスは高密度なネットワークが整備されていて、都市内に存在する任意の地点から直接バスに乗って CBD まで行くことができると仮定する¹。一方、鉄道は都市の西端を南北に貫く 1 本の路線のみで、鉄道はバスよりも速く移動できると仮定する。都市内の任意の地点 (x, y) に住む住民は、CBD へのトリップのために次の 2 通りのルートを選べる：

- (i) 自宅から CBD まで直行のバスを利用するルート
 - (ii) 最寄りの鉄道駅 $(0, y)$ までバスで移動し、そこから鉄道で CBD へ向かうルート
- ルート(ii)の方が所要時間は短い一方で、乗り換えが必要である点で利便性は劣る。一方、ルー

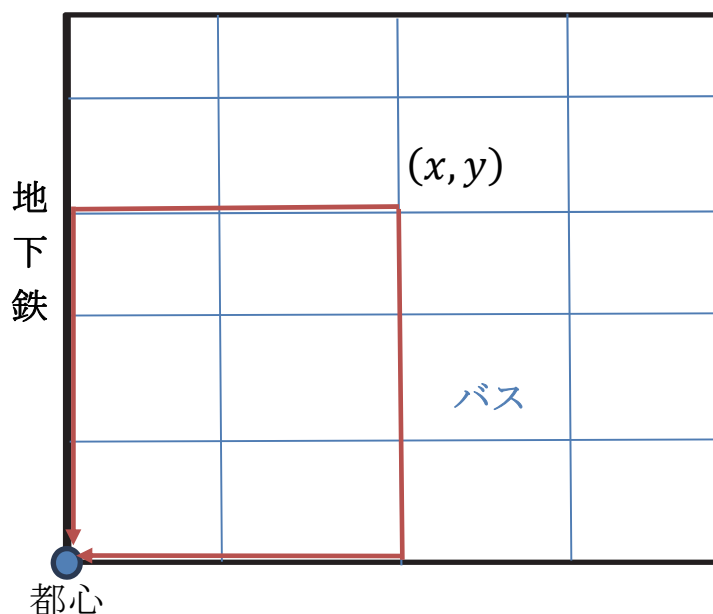


図 1 モデルで想定する都市空間

¹ この都市内にはバスが走行可能な格子状の道路網が張り巡らされていると暗黙に仮定されている。

ト(i)は乗り換え不要。したがって、バスと鉄道は、ルート(i)と(ii)の間では互いに代替関係にあり、ルート(ii)の中ではバスと鉄道が補完関係にある。

図 2 には、都市における交通市場の構造を示している。交通事業者 X が市内のすべてのバス輸送を担い、交通事業者 Y が鉄道輸送を担う。バス運賃は乗車距離に関係なく一律で f_X 、鉄道運賃は基本運賃 f_Y に距離比例部分 $v_Y y$ を加えた $f_Y + v_Y y$ (y は鉄道の乗車距離) になる。

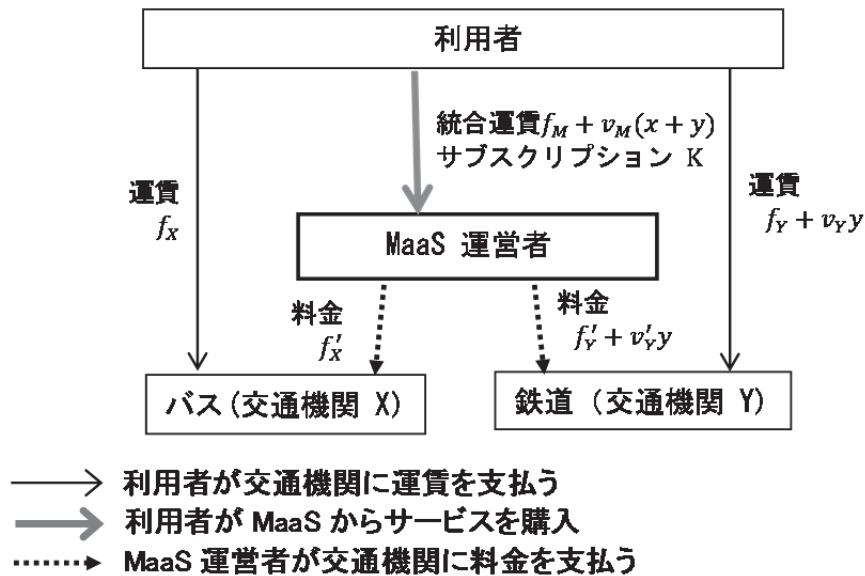


図 2 MaaS が導入された場合の交通市場の構造

MaaS 運営者は、事業者 X と Y からそれぞれバスおよび鉄道サービスを購入し、利用者に統合されたモビリティサービスを販売する。また、一定期間あらゆる交通機関を無制限に使えるサブスクリプションサービスも提供する。MaaS 利用者に対して課される統合運賃は $f_M + v_M(x+y)$ 、サブスクリプション価格は K である。

MaaS 運営者が事業者 X と Y に支払う料金（卸売価格）は次の通り

バス： f'_X

鉄道： $f'_Y + v'_Y y$

所要時間、運行費用については、以下のように定義する

バスの所要時間（1km あたり）： t_X

鉄道の所要時間（1km あたり）： t_Y

運行コスト（1人1km あたり）：バス c_X 、鉄道 c_Y

鉄道はバスよりも速く（ $t_Y < t_X$ ）、運行費用も鉄道はバスよりも低い。 $c_Y < c_X$ 。現実の事例でも見られるように、MaaS 運営者は公営も民営もあり得る。

MaaS が存在する場合、各個人には以下の 3 つの支払い手段がある：

- ・バス・鉄道をそれぞれ個別運賃で利用する場合
- ・MaaS による統合運賃で利用する場合
- ・MaaS のサブスクリプションで利用する場合

さらに、それぞれの支払い手段について以下の 2 つの経路選択肢がある：

- ・バスで CBD に直行するルート
- ・バスで鉄道駅まで行き、鉄道で CBD へ向かう乗り継ぎルート

よって、全体で (3×2) 6 つの交通オプションが存在する (表 1 参照)：

表 1 交通オプション

支払い方法	経路	トリップ当たり一般化費用
1 個別運賃	バス直行	$P_1(x, y) = f_X + \alpha t_X(x + y)$
2 個別運賃	バス + 鉄道乗継	$P_2(x, y) = f_X + f_Y + v_Y y + \alpha(t_X x + t_Y y + C)$
3 統合運賃	バス直行	$P_3(x, y) = f_M + v_M(x + y) + \alpha t_X(x + y)$
4 個別運賃	バス + 鉄道乗継	$P_4(x, y) = f_M + v_M(x + y) + \alpha(t_X x + t_Y y + C)$
5 サブスクリプション	バス直行	$P_5(x, y) = \alpha t_X(x + y)$
6 サブスクリプション	バス + 鉄道乗継	$P_6(x, y) = \alpha(t_X x + t_Y y + C)$

2.2 MaaS 導入の代替的シナリオ

MaaS が導入されていない場合、利用者はバスと鉄道の運賃をそれぞれ個別に支払う。この状況をシナリオ P と呼ぶ。このとき、選択可能な交通オプションは以下の 2 つである：

- ・バスによる直行ルート (オプション 1)
- ・バスと鉄道による乗り継ぎルート (オプション 2)

ヨーロッパの多くの都市では、交通機関や乗り換え回数に関係なく、発地と着地に基づいて運賃が決まる「統合運賃制」が導入されている。一方日本では、多くの都市で個別運賃制が採用されている。既存の交通事業者が運賃統合による収益減少を懸念しているためである。日本のように個別運賃制を採用している地域における MaaS 導入は運賃統合の採用を促す契機となり得る。

上記のように、国ごとまたは地域ごとに運賃制度の在り方が異なることを考慮して、MaaS 導入に関する代替的シナリオを以下のように設定した：

- **[PS]**
シナリオ P にサブスクリプションの選択肢を追加したもの
→ 選択可能なオプション：1, 2, 5, 6
- **[PI]**
シナリオ P に統合運賃の選択肢を追加したもの
→ 選択可能なオプション：1, 2, 3, 4
- **[PIS]**
シナリオ P にサブスクリプションと統合運賃の両方の選択肢を追加したもの
→ 選択可能なオプション：1, 2, 3, 4, 5, 6
- **[I]**
統合運賃のみ（個別運賃は廃止）
→ 選択可能なオプション：3, 4
- **[IS]**
統合運賃ベースのシナリオ I にサブスクリプションの選択肢を追加したもの
→ 選択可能なオプション：3, 4, 5, 6

シナリオ PS、PI、PIS は、初期において個別運賃制度を採用する都市が段階的に MaaS を導入する場合を想定している。これらのシナリオでは、交通事業者は MaaS 運営者に対して卸売価格でサービスを提供しつつ、従来通りの個別運賃でも利用者に販売する。つまり、利用者は事業者から直接購入するか、MaaS を通じて購入するかを選択できる。一方、シナリオ I は、ヨーロッパのようにもともと統合運賃が導入されている都市、あるいは MaaS 導入により完全な運賃統合が実現するケースを想定している。シナリオ IS は、そのうえでさらにサブスクリプションの選択肢が追加されたケースである。

2.3 利用者

都市住民の効用関数は、トリップを伴う経済活動の水準 q 、財の消費量 z_I 、および余暇時間 z_T によって決定される。効用関数を次のように特定化する。：

$$u(q, z_I, z_T) = -\frac{q^2}{2b} + \frac{n}{b}q + z_I + \alpha z_T \quad (1)$$

ここで、 n, b, α はパラメータである。特に n はトリップ性向に関する個人間異質性を表し、範囲 $[n, \bar{n}]$ で一様に分布していると仮定する。

利用者の行動は選択した交通オプション*i*に応じて、以下の 2 つの制約条件を満たす必要がある：(2a) は所得に関する予算制約、(2b)は時間に関する予算制約である。

$$y_I = F_i q + z_I + \varphi_i K, \quad (2a)$$

$$y_T = T_i q + z_T \quad (2b)$$

ここで

y_I は所得、 y_T はトリップと余暇に使える総時間

F_i はオプション*i*における金銭コスト（運賃）

T_i はオプション*i*におけるトリップ所要時間

K はサブスクリプションの価格

φ_i は二値変数で、オプション*i*がサブスクリプションを含むときは 1、含まないときは 0²

本モデルでは、効用最大化問題を 2 段階で解く：第 1 段階では各オプション*i*に対して、制約条件(2a)(2b)のもとで(1)式を最大化することにより、次のようなトリップ需要関数と間接効用関数を得る³：

$$\text{トリップ需要関数（トリップ数）： } q_i(n, x, y) = n - bP_i \quad (3)$$

$$\text{間接効用関数： } V_i(n, x, y) = \frac{1}{2b} (n - bP_i)^2 + y_I + \alpha y_T - \varphi_i K \quad (4)$$

ここで、 $P_i = F_i + \alpha T_i$ はオプション*i*に対する一般化費用である。パラメータ α は時間価値を表す。表 1 には、各交通オプションに対する一般化費用を示している。なお、鉄道とバスの乗継を含むオプションでは、乗継時間 C も所要時間に含まれる。

第 2 段階では、すべての選択肢の中から最も効用が高いオプションを選ぶ、すなわち間接効用関数の値を最大化する交通オプション*i*^{*}(n, x, y)を探す

$$i^*(n, x, y) = \underset{i}{\operatorname{argmax}} V_i(n, x, y) \quad (5)$$

そして最大化された効用水準とトリップ需要が次のように得られる。

$$V^*(n, x, y) = \max_i V_i(n, x, y) \quad (6)$$

$$q^*(n, x, y) = q_i(n, x, y), \text{ for } i = i^*(n, x, y) \quad (7)$$

以上により、個人の属性（トリップ性向 n ）と立地 (x, y) が与えられれば、どの交通オプションを選び、何回トリップするかが決定される。

² この場合、 $F_i = 0$ となる。

³ より厳密には、 $q_i(n, x, y) = \max\{n - bP_i, 0\}$ である。

2.4 交通事業者

まず、次のような集合 S_{ij} を定義する：

$$S_{ij} = \{(n, x, y) | i^*(n, x, y) = i, \text{ under scenario } j\}$$

これは、シナリオ j において、オプション i を選択する住民の集合を表す。

シナリオ j において、交通事業者 X （バス）の利潤 Π_j^X は

$$\begin{aligned} \Pi_j^X = & \iiint_{S_{1j}} (f_X - c_X(x+y)) q_1(\cdot) N(\cdot) dndxdy + \iiint_{S_{2j}} (f_X - c_X x) q_2(\cdot) N(\cdot) dndxdy \\ & + \iiint_{S_{3j}} (f'_X - c_X(x+y)) q_3(\cdot) N(\cdot) dndxdy + \iiint_{S_{4j}} (f'_X - c_X x) q_4(\cdot) N(\cdot) dndxdy \\ & + \iiint_{S_{5j}} (f'_X - c_X(x+y)) q_5(\cdot) N(\cdot) dndxdy + \iiint_{S_{6j}} (f'_X - c_X x) q_6(\cdot) N(\cdot) dndxdy \quad (8) \end{aligned}$$

最初の2項は従来の個別運賃で利用者に直接サービスを提供した場合の利潤、残りの4項はMaaS運営者に卸売価格でサービスを提供した場合の利潤をそれぞれ表す。

交通事業者（鉄道） Y の利潤（シナリオ j ） Π_j^Y は

$$\begin{aligned} \Pi_j^Y = & \iiint_{S_{2j}} (f_Y + v_Y y - c_Y y) q_2(\cdot) N(\cdot) dndxdy \\ & + \iiint_{S_{4j}} (f'_Y + v'_Y y - c_Y y) q_4(\cdot) N(\cdot) dndxdy + \iiint_{S_{6j}} (f'_Y + v'_Y y - c_Y y) q_6(\cdot) N(\cdot) dndxdy \quad (9) \end{aligned}$$

第1項は個別運賃で直接利用者にサービスを提供した場合の利潤、残り2項はMaaS運営者に卸売価格で提供した場合の利潤

■ MaaS 参加の意思決定

交通事業者は、MaaSに参加するか否か、すなわち料金 (f'_X, f'_Y, v'_Y) でサービスをMaaSに提供するかかどうかという選択に直面する。各交通事業者にとっては、現状に対応するシナリオ P （個別運賃のみ）よりも、MaaSに参加した場合の利潤が大きくなるのなら参加する。その条件は、以下のように表される：

$$\Pi_j^X \geq \Pi_P^X, \quad \Pi_j^Y \geq \Pi_P^Y \quad (10)$$

本モデルにおいて個別運賃 f_X , f_Y , v_Y は外生的に与えられる。すなわち、シナリオ P の利潤はアウトサイド・オプションとして取り扱う。

2.5 MaaS の設計

本研究では、都市内に MaaS 運営者が 1 つ存在するものと仮定する。MaaS の設計は、次の変数の組み合わせとして表される：

$$(f_M, v_M, K, f'_X, f'_Y, v'_Y).$$

つまり、統合運賃（定額部分と距離比例部分）、サブスクリプション価格、各交通事業者（X：バス、Y：鉄道）に支払う料金（卸売価格）である。本研究では、ほかの設計変数（たとえば運行頻度やネットワーク構造など）は扱わないものとする。MaaS 運営者は、公営であっても民間企業であってもよい。ただし、民間運営の場合でも、公共部門による規制が課されていると仮定する。したがって過度な利潤追求は許されず、政府の社会的目標に合致するように設計され则认为。実際、MaaS 運営者が利潤最大化のみを目的として運賃を設定することは現実的でない。とくにシナリオ I や IS のように運営者が強い市場支配力を持つ場合、自由に価格設定を行うと運賃が過度に高くなる恐れがある。例えば、ヘルシンキやベルリンのように、MaaS の多くの事例においては政府が主導的役割を果たしている。

本研究では、MaaS の運営形態として次のように 2 通り検討する：

1. 公営
2. 規制をともなう民営（MaaS 運営者の収支均衡を条件とする）

いずれの場合も、交通事業者にとって MaaS への参加が誘因整合的となるよう設計する必要がある。具体的にはシナリオ P と比べて交通事業者の利潤が減少しないという制約条件を課することとする。

2.5.1 公営MaaS

政府または公営企業は、社会的総余剰（住民の余剰、交通事業者 X と Y の利潤、MaaS 運営者の利潤の和）の最大化を図る。

シナリオ j における目的関数は次のように書ける：

$$W_j = CS_j + \Pi_j^X + \Pi_j^Y + \Pi_j^M \quad (11)$$

ここで

CS_j : 住民の余剰

Π_j^X, Π_j^Y : バス、鉄道事業者の利潤

Π_j^M : MaaS 運営者の利潤

$$CS_j = \sum_{i=1}^6 \iiint_{S_{ij}} V_i(n, x, y) N(x, y) dndxdy \quad (12)$$

$$\Pi_j^M = \iiint_{S_{3j}} (f_M + v_M(x + y) - f_X') q_3(\cdot) N(\cdot) dndxdy$$

$$+ \iiint_{S_{4j}} (f_M + v_M(x + y) - f_X' - f_Y' - v_Y') q_4(\cdot) N(\cdot) dndxdy$$

$$+ \iiint_{S_{5j}} (K - f_X') q_5(\cdot) N(\cdot) dndxdy + \iiint_{S_{6j}} (K - (f_X' + f_Y' + v_Y')) q_6(\cdot) N(\cdot) dndxdy \quad (13)$$

各シナリオについて、下記のような 2 段階で問題を解く。

1. シナリオ j について社会的総余剰 W_j を最大化するような (f_M, v_M, K) を見つける

2. 交通事業者の利潤が現状 (シナリオ P) と等しくなるように、 $\Pi_j^X = \Pi_P^X$ を解いて f_X' , $\Pi_j^Y = \Pi_P^Y$ を解いて (f_Y', v_Y') をそれぞれ得る。

なお、上記のように得られる最適設計 (統合運賃とサブスクリプション価格) は、2.6 節で後述するように、社会的最適 (first-best) を達成しない。

2.5.2 規制を伴う民営MaaS

民間の MaaS 運営者は、赤字にならない (利潤が非負である) ような運賃体系と事業計画を提示する。その際、交通事業者の参加インセンティブも確保する必要がある。

政府は、提示された運賃体系が社会的総余剰を最大化するのであれば、それを承認する。

解くべき問題は次のように定式化される：

$$\max_{f_M, v_M, K} W_j$$

$$\text{s.t. } \Pi_j^X \geq \Pi_P^X, \Pi_j^Y \geq \Pi_P^Y, \Pi_j^M \geq 0$$

これら 3 つの制約は次のようにまとめて書き換えることができる：

$$PS_j - PS_P \geq 0 \quad (14)$$

ここで、

$PS_j = \Pi_j^X + \Pi_j^Y + \Pi_j^M$: シナリオ j のもとでの交通事業者(X および Y)と MaaS 運営者の利潤の和、

PS_p : 現状（シナリオ P）における利潤和

$\pi_j^X = \pi_p^X$ および $\pi_j^Y = \pi_p^Y$ を満たすように料金が設定されていれば、(14)の左辺は MaaS 運営者による利潤そのものとなる。

2.6 社会的最適

社会的最適を実現するための条件は以下の 2 つである：

- (a) 各地点におけるトリップ数は、社会的限界便益と社会的限界費用が一致するように決定されること。
- (b) 各トリップは、社会的限界費用が最も小さい経路に配分されること。

選択可能な経路は以下の 2 通り：

経路 1：バスで CBD へ直行

経路 2：バスで鉄道駅まで移動し、鉄道で CBD へ向かう乗継ルート

各経路における社会的限界費用は、「運行コスト＋時間コスト」の合計であり、次のように定義される：

$$MC_1(n, x, y) = (c_X + \alpha t_X)(x + y)$$

$$MC_2(n, x, y) = (c_X + \alpha t_X)x + (c_Y + \alpha t_Y)y + \alpha C$$

したがって条件(b)については、次のように書ける。

$$MC_1(n, x, y) < MC_2(n, x, y) \Leftrightarrow y < \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)}$$

すなわち、都市の北側（y が大きい地域）の住民は鉄道とバスを乗り継ぐ方が効率的であり、それ以外の地域ではバス直行の方が望ましい。

地点 (x, y) における最適ルートの社会的限界費用を次のように $MC_0(n, x, y)$ と定義しよう。：

$$\begin{aligned} MC_0(n, x, y) &= MC_1(n, x, y) \text{ if } y \leq \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)} \\ &= MC_2(n, x, y) \text{ if } y > \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)} \end{aligned}$$

社会的限界便益は、限界的な 1 回のトリップに対する支払意思額であり、これは需要関数(3)の逆関数により次のように表される：

$$MB_O(n, x, y) = \frac{n - q(n, x, y)}{b}$$

$MB_O(n, x, y) = MC_O(n, x, y)$ を解くことにより、最適なトリップ数が次のように求められる：

$$q_O(n, x, y) = n - b(c_X + \alpha t_X)(x + y), \quad \text{if } y \leq \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)}$$

$$q_O(n, x, y) = n - b((c_X + \alpha t_X)x + (c_Y + \alpha t_Y)y + \alpha C), \quad \text{if } y > \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)}$$

上記の社会的最適を分権的に達成するには、バス・鉄道それぞれの運賃を限界費用と一致させる必要がある：

バスの距離別運賃 = c_X

鉄道の距離別運賃 = c_Y

しかしながら、2.5 節で定式化した、公営 MaaS の統合運賃制度では、バスと鉄道の距離単価が同一であり、限界費用の違いが反映されない。このため、公営 MaaS であっても社会的最適は達成されない。

3 章 MaaS 導入シナリオと交通オプション選択の空間パターン

交通オプションの選択は、(5)式で定義された $i^*(n, x, y)$ によって表される。本章では、さまざまなシナリオにおける $i^*(n, x, y)$ の空間パターンと、それらが MaaS の設計変数(f_M, v_M, K)の変化によってどのように影響を受けるかを調べる。

与えられた (n, x, y) に対して、交通オプション i が選択される条件は次のように表される：

$$V_i(n, x, y) > V_{i'}(n, x, y), \text{ for all } i' \neq i \quad (15)$$

ここで、 i' は i 以外のオプションすべてを指す。すなわち、 i を選択した際の間接効用が他の選択肢 i' によるものよりも上回っているとき、交通オプション i は選択される。

全オプションの中から、起こりうるすべての組み合わせについて一対比較を行い、選択条件を導出する。

交通オプションは、以下の 2 つのカテゴリーに分類できる：

サブスクリプションを含む選択：{5,6}

サブスクリプションを含まない選択：{1,2,3,4}

■ 同じカテゴリー内の比較

2 つのオプション i と i' が同一カテゴリー内にある場合（両方サブスクなし、または両方サブスクあり）、 $V_i(n, x, y) \geq V_{i'}(n, x, y)$ は、 $P_i(n, x, y) \leq P_{i'}(n, x, y)$ と同値である。すなわち、一般化費用が小さいオプションを選択することになる。

■ 異なるカテゴリー間の比較

一方、オプション i がサブスクリプションを含み、オプション i' が含まない場合（またはその逆）の比較では、単純な費用比較ではなく効用水準そのものを比較する必要がある。この場合、条件は以下のように表される：

$$P_i(n, x, y) + \frac{2K}{q_i + q_{i'}} \leq P_{i'}(n, x, y) \quad (16)$$

ここで、式(16)左辺は、第 2 項と合わせて、サブスクリプションを利用した場合の 1 トリップあたり実効一般化費用と解釈できる。

以下では、社会的最適、そして各シナリオ（P、PS、PI、PIS、I、IS）のもとで、どのような空間パターンが現れるかを具体的に記述していく。

社会的最適

2.6 節でも示したように、社会的最適のもとで交通オプションの選択は次のようになる：

$$i^*(n, x, y) = 1 \quad \text{if } y \leq \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)}$$

$$= 2 \quad \text{if } y > \frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)}$$

シナリオ P:

このシナリオでは、利用可能な交通オプションは2つ、すなわち

- ・バスのみを利用して CBD へ向かう場合：バス直行（オプション 1）
- ・バスで近隣の鉄道駅に向かい、鉄道に乗り継いで CBD へ向かう場合：バス+鉄道（オプション 2）

である。この場合 $P_1(n, x, y)$ と $P_2(n, x, y)$ を比較して、次の関係式を得る：

$$i^*(n, x, y) = 1, \quad \text{if } y \leq y_{12}, \quad (17a)$$

$$i^*(n, x, y) = 2, \quad \text{if } y > y_{12}, \quad (17b)$$

ここで $y_{12} = \frac{f_Y + \alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) - v_Y}$ である。

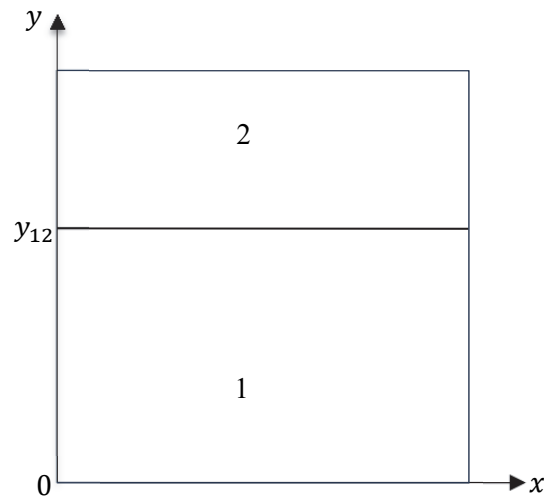
図 3 は、シナリオ P のもとでの交通オプション選択の空間パターンを示している。この図で、数字 1 と 2 は、それぞれオプション 1（バス直行）とオプション 2（バス+鉄道乗継）を選択する住民の居住する地理的範囲を表しており、今後、それぞれを「エリア 1」「エリア 2」と呼ぶことにする。図を見ると、都市の北側に住む住民はオプション 2（バス+鉄道乗継）を選択している。これは、南北方向の移動距離が長くなるため、乗り継ぎの手間や追加料金があったとしても、鉄道を使うことで大きく移動時間を節約できるためである。

社会的最適のもとでの結果と比較すると、次の関係が成立する：

$$\frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)} < y_{12}$$

$\frac{\alpha C}{\alpha(t_X - t_Y) + (c_X - c_Y)} < y < y_{12}$ に住む住民は、バスと鉄道を乗り継いで乗継を選ぶ方（オプション

- 2) が効率的であるにもかかわらず、シナリオ P においてはバスで直行する方（オプション 1)）を選択する。つまり、現状（シナリオ P）ではルート選択が歪んでいることを示している。



オプション 1: 個別運賃、バス直行
 オプション 2: 個別運賃、バス＋鉄道乗継

図 3 シナリオ P のもとでの交通オプション選択の空間パターン

シナリオ PS 個別運賃+MaaS サブスクリプションが導入された場合

このシナリオは、MaaS 運営者がサブスクリプションを価格 K で販売することを想定している。利用者は、従来の個別運賃で支払うか、または、サブスクリプション価格を支払うかを選択できる。選択可能な交通オプションは $\{1, 2, 5, 6\}$ である。なお、サブスクリプション価格 K が十分高い場合、誰もサブスクリプションを購入せず、このときの交通オプション選択の空間パターンはシナリオ P と同一になる。一方で、 K がある水準より低くなると、北側 ($y > y_{12}$) に住む住民は、オプション 2 (バス＋鉄道乗継) とオプション 6 (サブスクリプションかつバス＋鉄道乗継) の間で選択を行うことになる。

図 4 のパネル(a)における $y_{26}(x)$ は、次の等式を満たす点を結んだ線である：

$$P_2(n, x, y) = P_6(n, x, y) + \frac{2K}{q_2 + q_6}$$

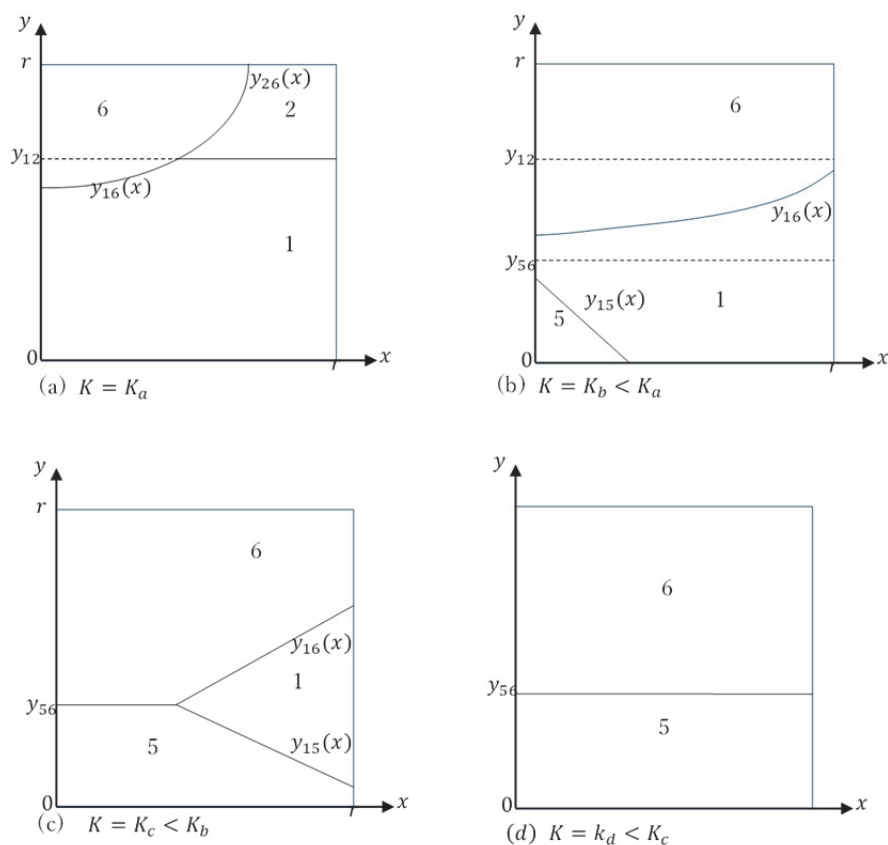
これは、(オプション 2 を選択する) エリア 2 と (オプション 6 を選択する) エリア 6 の分界線である。

図より、次のことがわかる。まず、鉄道路線に近い (x が小さい) 住民ほどオプション 6 (サブスクリプションかつバス＋鉄道乗継) を選択する。鉄道に近いほど CBD までの移動時間が短くなるため、トリップ数が増え、右辺第 2 項が小さくなる。これにより、サブスクリプションが相対的に有利になる。同様に、 $y < y_{12}$ に立地する住民も、オプション 1 (バス直行) とオプション 5 (サブスクリプションかつバス直行) の間の選択に直面するが、ここでも鉄道に近い住民ほどオプション 5 を選びやすい。

サブスクリプション価格がさらに低下すると、図4のパネル(b)で都市の南側、 $y < y_{56}$ の住民もサブスクリプション（オプション5）を選ぶようになる⁴。理由は上記と同様。

さらにKが低下すると、交通オプション選択の空間パターンは図4 パネル(c)のように変化する。

最終的には、都市の全住民がサブスクリプションを選択する（図4 パネル(d)⁵）。トリップ性向パラメータ n もオプション選択に影響を及ぼす。 n が大きい住民（トリップ性向が高い住民）はトリップ回数が多く、そのためサブスクリプションを選択する可能性が高い。したがって、同じ場所に立地していても、 n が大きい住民ほどサブスクリプションを選ぶ傾向がある。



オプション 1: 個別運賃、バス直行
 オプション 2: 個別運賃、バス＋鉄道乗継
 オプション 5: サブスクリプション、バス直行
 オプション 6: サブスクリプション、バス＋鉄道乗継

図4 シナリオ PS のもとでの交通オプション選択の空間パターン

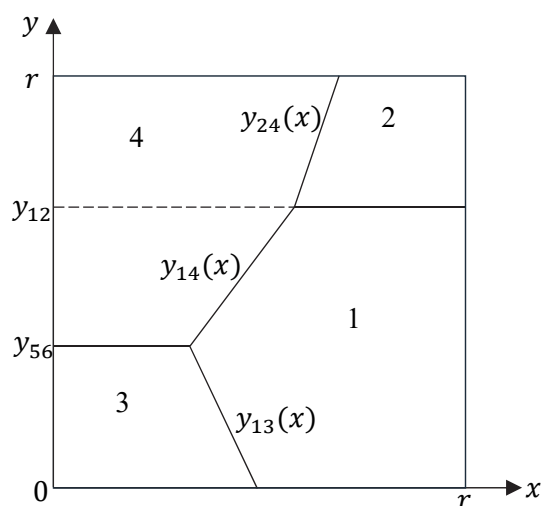
⁴ $P_5(n, x, y) = P_6(n, x, y)$ を解くと $y_{56} = \frac{c}{t_x - t_y}$ が得られる。ただし $y_{56} < y_{12}$

⁵ これらの図においても、 $y_{15}(x)$ および $y_{16}(x)$ は上記と同じ方法で導出される

シナリオ PI：統合運賃を導入する場合

このシナリオでは、MaaS 運営者が統合運賃でモビリティサービスを提供し、同時に交通事業者 X（バス）と Y（鉄道）が各々個別に運賃を課す制度も維持することを想定している。利用者は、従来の個別運賃を支払うか、MaaS を通じた統合運賃を支払うかを選択できる。選択可能な交通オプションは $\{1,2,3,4\}$ である。

図 5 は、このシナリオにおける交通オプション選択の空間パターンを示している。分界線（各エリアの境界線）は、これまでと同様に各オプションの一般化費用を比較して導出している。観察されるパターンとして、鉄道路線に近い地区の住民ほど MaaS を通じた統合運賃を選択する傾向がある。



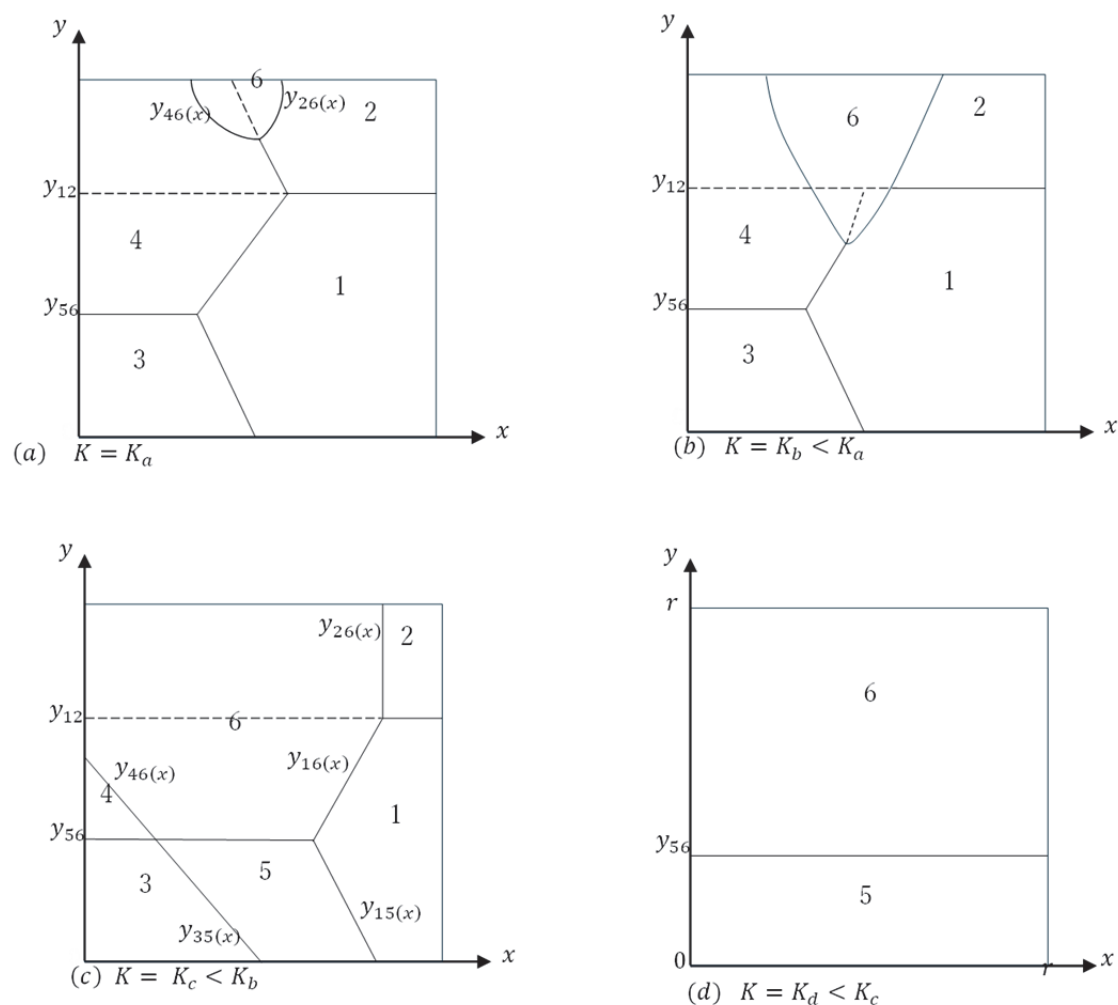
- オプション 1: 個別運賃、バス直行
- オプション 2: 個別運賃、バス+鉄道乗継
- オプション 3: 統合運賃、バス直行
- オプション 4: 統合運賃、バス+鉄道乗継

図 5 シナリオ PI のもとでの交通オプション選択の空間パターン

シナリオ PIS：統合運賃とサブスクリプションが併用される場合

このシナリオでは、MaaS 運営者が統合運賃とサブスクリプションという 2 種類のモビリティサービスを提供する。一方で、交通事業者 X（バス）および交通事業者 Y（鉄道）がそれぞれ個別運賃を課す制度も継続する。したがって、住民は 6 つすべての交通オプション ($\{1,2,3,4,5,6\}$) のの中から選択する。K が十分高い場合、誰もサブスクリプションを購入せず、交通オプション選択の空間パターンはシナリオ PI（図 5）と同一になる。一方、K がある水準より低くなると、エリア 2（個別運賃+乗継）とエリア 4（統合運賃+乗継）の中間に立地する住民がサブスクリプション（オプション 6）を利用し始める。この結果、図 6 パネル(a) に

示されるように、エリア 6（サブスクリプション+乗継）が新たに出現する。



- オプション 1: 個別運賃、バス直行
- オプション 2: 個別運賃、バス+鉄道乗継
- オプション 3: 統合運賃、バス直行
- オプション 4: 統合運賃、バス+鉄道乗継
- オプション 5: サブスクリプション、バス直行
- オプション 6: サブスクリプション、バス+鉄道乗継 transfer

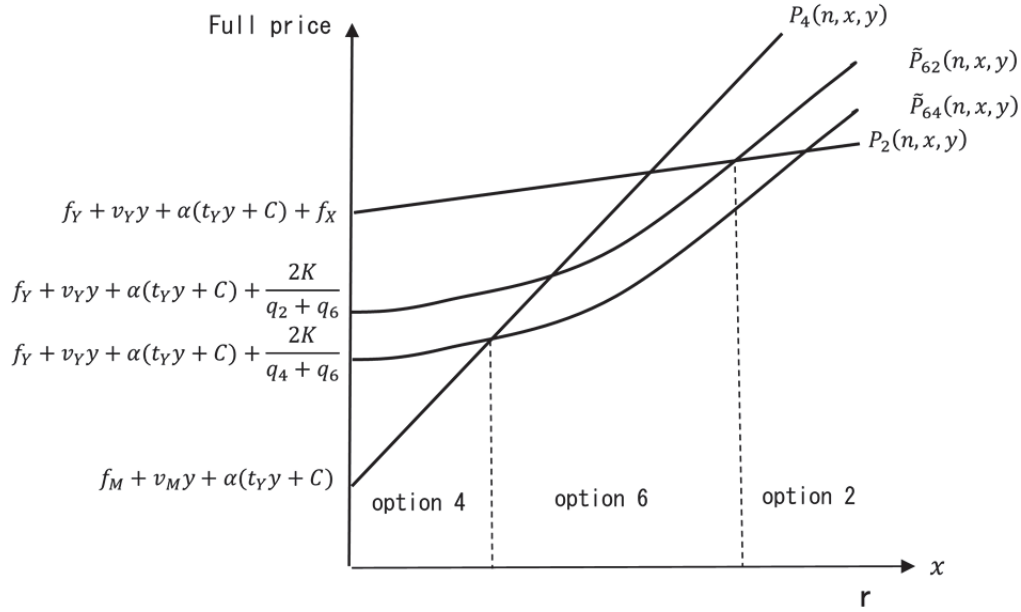
図 6 シナリオ PIS のもとでの交通オプション選択の空間パターン

ここで、サブスクリプション価格が交通オプション選択にどのように影響するかをさらに詳しく見ていく。図 7 は、 $y > y_{12}$ におけるオプション 2（個別運賃かつバス+鉄道乗継）、オプション 4（統合運賃かつバス+鉄道乗継）、オプション 6（サブスクリプションかつバス+鉄道乗継）の一般化費用をプロットしている。オプション 6 については、(16)式で定義したように、1 回あたりの実効一般化費用をプロットしている点に注意されたい。ここで注意すべきは、オプション 6 の実効一般化費用は比較対象となるオプションに依存するということ

ある。

そこで、オプション*i'*（比較対象）に対してオプション 6 の実効総費用を次のように定義する：

$$\tilde{P}_{6i'}(n, x, y) = P_6(n, x, y) + \frac{2K}{q_{i'} + q_6}, \quad i' = 2 \text{ or } 4$$



注： $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ はオプション i' に対する実効一般化費用

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial x} &= \alpha t_X \\ \frac{\partial P_4}{\partial x} &= \alpha t_X + v_M \\ \frac{\partial \tilde{P}_{6i'}}{\partial x} &= \alpha t_X \left(1 + \frac{4bK}{(q_{i'} + q_6)^2} \right) \end{aligned}$$

図 7 実効一般化費用と各オプションの関係

図 7 からわかるように、オプション 6 の実効一般化費用 $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ の傾きは、オプション 2 の総費用 $P_2(n, x, y)$ よりも急であり、オプション 4 の総費用 $P_4(n, x, y)$ よりも緩やかである。サブスクリプション価格 K が十分高い場合、 $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ は $P_2(n, x, y)$ よりも上方に位置し、誰もオプション 6（サブスクリプション）を選ばない。しかし、 K が低下すると $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ が下方にシフトし、図 7 に示されるように、ある領域では $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ が最も低くなる。さらに K が低下すると $\tilde{P}_{6i'}(n, x, y)$ がすべての地域で最も低くなり、都市内のすべての住民がサブスクリプションを購入することになる。

他のエリア（ $y_{56} < y < y_{12}$ および $y < y_{56}$ ）についても同様の分析を行い、図 6(a) を作成した。 K が更に低下すると、空間パターンはパネル(b)からパネル(c)へと変化し、最終的にすべ

ての住民はパネル(d)に示されているようにサブスクリプションを選択する。

シナリオ I 統合運賃のみ

このシナリオでは、すべてのトリップに統合運賃が適用される。都市北部の住民はバスと鉄道を乗り継ぐルート（オプション 4）を選択し、都市南部の住民はバスで直行するルート（オプション 3）を選択する。この空間パターンは図 8 に示されている。なお、エリア 3（オプション 3 選択地域）とエリア 4（オプション 4 選択地域）の分界線は、（シナリオ PS について求めた）エリア 5 とエリア 6 の分界線と一致している。

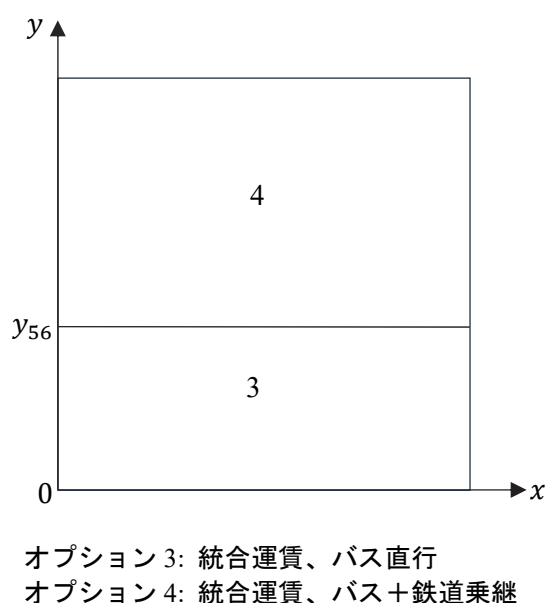
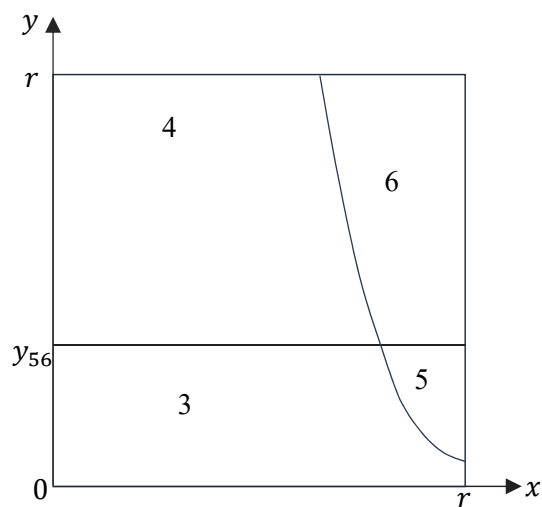


図 8 シナリオ I のもとでの交通オプション選択の空間パターン

シナリオ IS 統合運賃またはサブスクリプションを選択できる場合

このシナリオでは、住民は統合運賃またはサブスクリプションのいずれかを選択できる。サブスクリプション価格 K が高い場合、交通オプション選択の空間パターンはシナリオ I と同様になる。 K がある水準より低下すると、鉄道線路に近い住民は統合運賃（オプション 3 または 4）を選択するようになる（図 9 参照）。図 7 を用いてすでに議論したように、統合運賃による一般化費用は、鉄道からの距離 x が大きくなるほど急速に増加する。一方、サブスクリプションの実効一般化費用はそれほど急激には増加しないため、距離が離れるとサブスクリプションの方が有利になる。



オプション 3: 統合運賃、バス直行
 オプション 4: 統合運賃、バス＋鉄道乗継
 オプション 5: サブスクリプション、バス直行
 オプション 6: サブスクリプション、バス＋鉄道乗継

図 9 シナリオ IS のもとでの交通オプション選択の空間パターン

交通オプション選択の空間パターンは次のようにまとめられる：

- (i) 都市北部の住民は、バスで直行する経路よりもバスと鉄道を乗り継ぐ経路を選択する。
- (ii) 鉄道路線に近い地域の住民は、個別運賃（バス・鉄道事業者）による利用よりも、MaaSを通じた統合運賃を選択する。
- (iii) 鉄道路線からの距離が中間的な地域では、サブスクリプションが選択されやすい。

4 章 MaaS 導入の経済厚生効果

本章では、MaaS 導入に関する代替シナリオの厚生効果を数値シミュレーションによって評価する。

具体的には、以下の設定でシミュレーションを行った：

- 一辺の長さ $r=10\text{km}$ の正方形の都市を想定する
- すべての移動は南北または東西（マンハッタン距離に基づく）
- 人口密度は各地点から CBD へのマンハッタン距離とともに減少すると仮定し、次のような関数で与えられる。： $N(x,y) = D_0 \exp(-\gamma(x+y))$

ここで、 D_0 ：CBD（都心部）における人口密度、

γ ：人口密度の減衰率（パラメータ）

モデルパラメータは、京都市の現実に合わせて設定する。数値解析に使用したパラメータの値は表 2 に示されている。

表 2 数値解析に使用したパラメータ

パラメータ	概要	用いた数値
r	都市規模	10(km)
D_0	CBD における人口密度	24
γ	人口密度の減衰率	0.25
b	トリップ需要関数のパラメータ	0.01
A	時間価値	40 (JPY/min)
$\underline{n}, \bar{n}$	トリップ性向の下限および上限	50, 100
f_X	バス運賃（一律料金）	230 (JPY)
f_Y	鉄道運賃（初乗り）	200 (JPY)
v_Y	鉄道運賃（距離変動）	10 (JPY/km)
t_X	バス移動時間（分/km）	5 (min/km)
t_Y	鉄道移動時間（分/km）	2 (min/km)
c_X	バス運行費用（人キロ当たり）	12 (JPY/passenger・km)
c_Y	バス運行費用（人キロ当たり）	6.3 (JPY/passenger・km)

都市全体の人口は約 40 万人としたが、これは京都市の人口のおよそ 4 分の 1 に相当する。また、中位の立地、トリップ性向を持つ住民、 $(n, x, y) = (75, 5, 5)$ について、一般化費用に対するトリップ需要の弾力性はおよそ 0.4 になる。

4.1 全般的な厚生効果

表 3 は、MaaS 導入の代替シナリオによってもたらされる厚生効果をまとめたものである。公営については、MaaS 運営者の収支制約なしに統合運賃とサブスクリプション価格を最適化できるので、シナリオは 1 通りである。そのほかのシナリオは、規制を伴う民営についての結果である。

この表には、バス事業者および鉄道事業者に支払う料金（卸売価格）も示している。

f'_x および (f'_y, v'_y) は、それぞれ次の条件を満たすように決定されている：

$$\Pi_j^x = \Pi_P^x, \text{ および } \Pi_j^y = \Pi_P^y.^6$$

全シナリオについて、 (f'_x, f'_y, v'_y) は現行の個別運賃 $(f_x, f_y, v_y) = (230, 200, 10)$ よりも低い。すなわち卸売価格が現行の個別運賃より低くても、交通事業者は MaaS への参加を選ぶ。これは、すべてのシナリオにおいて乗客数がシナリオ P（現状）よりも増加するからである。以下、各シナリオに関する結果について詳述する。

表 3 MaaS 導入シナリオごとの厚生効果

シナリオ	f_M	v_M	K	社会的総余剰 ¹	MaaSの収益	f'_x	f'_y	v'_y
社会的最適 ²				6.395 (1.000) ³				
公営	0	10	>17500	6.377 (0.997)	-49.943	218	105	5
PS	N/A	N/A	43500	0.0004 (0.000)	0	224	190	10
PI	200	25	N/A	3.301 (0.516)	0	221	142	7
PIS	200	25	>42500	3.301 (0.516)	0	221	142	7
I	250	5	N/A	5.457 (0.853)	0	224	108	5
IS	>360	>48	17500	6.280 (0.982)	0	217	104	5
1. 各余剰はシナリオP（現状維持）と比較したときの変分（単位：億円）								
2. 社会的最適においては $v_x = 12, v_y = 6.3$ (JPY/km) かつ、交通事業者には損失が49億9850万円生じる								
3. かつこの数値は社会的最適と比較した際の相対的な増分								

6 方程式が一つ、 $\Pi_j^y = \Pi_P^y$ だけでは f'_y および v'_y を決定できないため、京都市営地下鉄の運賃体系から $\frac{f'_y}{v'_y} = \frac{f_y}{v_y} = 20$ ，という条件を付加して求めた。

社会的最適

シナリオ P (現状) と比較すると、社会的最適では社会的総余剰が 6 億 3950 万円 (6.395×10^8 円) 増加する一方で、交通事業者には 49 億 9850 万円 (49.985×10^8 円) の赤字が生じる。

社会最適による厚生改善は、次の二つの要因によるものである。

- ・トリップ数が社会的限界費用に基づいて適切に決定されること
- ・経路選択における非効率性が解消されること

シナリオ P では、本来バスと鉄道の乗継ルートを利用する方が効率的な地域の住民が、直行バスルートを選択しているため、非効率が発生している⁷。

公営 MaaS : 収支制約なしで社会的余剰最大化

社会的最適とは異なり、公営 MaaS が導入される場合、基準運賃（初乗りの固定部分）が設定され、かつ距離比例運賃がすべての交通機関で同額になる。このような違いがあるにもかかわらず、公営 MaaS 導入によって得られる社会的総余剰は社会的最適にきわめて近い（社会的最適による厚生効果の 99.6% を達成している）。統合運賃の体系は (0,10) で示される。すなわち、基準運賃はゼロ、距離比例運賃は鉄道とバスの限界費用の中間の値となっている。ここで注意すべき点は、社会的総余剰を最大化するためにはサブスクリプション価格 K を十分高く設定し、誰もサブスクリプションを選択しないようにすることである。サブスクリプションが導入されると、利用者は時間コストしか負担しないため、総費用が社会的限界費用より小さくなり、トリップ回数が過大になる。この場合、巨額の赤字が生じるが、これは MaaS 運営者（公営企業など公的な団体または政府）が負担することになる。その理由は、交通事業者 X および Y が MaaS に参加しても損失を被らないように、卸売価格が設定されるからである。

シナリオ PS : 個別運賃+MaaS サブスクリプション

このシナリオでは、MaaS 運営者はサブスクリプションサービスのみを提供し、交通事業者 X および Y は従来通り個別運賃で交通サービスを提供する。

図 10 は、サブスクリプション価格 K に対して、社会的総余剰の変分と MaaS 運営者の利潤をプロットしたものである。

図から、社会的総余剰の増加額は K の上昇とともに減少していき、 K が 44480 円を超えるとゼロになることがわかる。この水準では、誰もサブスクリプションを選択しない。また、

⁷ 本稿では $c_Y < c_X$ 、すなわちバスの運行費用は鉄道の運行費用よりも高いと仮定している。この場合、2.6 および 3 章で示されているように、シナリオ P においては $\frac{\alpha c}{(c_X + \alpha t_X) - (c_Y + \alpha t_Y)} < y < \frac{f_Y + \alpha c}{\alpha(t_X - t_Y) - v_Y}$ の範囲に住む居住者はバスによる直行ルートを選ぶ（(14) 式も参照のこと）。

MaaS 運営事業者はごく狭い範囲、すなわち K が 43500 円から 44480 円の間でのみ、正の利潤を得ることができる。このことから、シナリオ PS における最適なサブスクリプション価格は 43500 円となる。しかし、このように高額なサブスクリプション価格では、サブスクリプションを選択する住民はごくわずかしか存在せず、結果として社会的総余剰の増加もきわめて小さいものにとどまる（表 3 参照）。

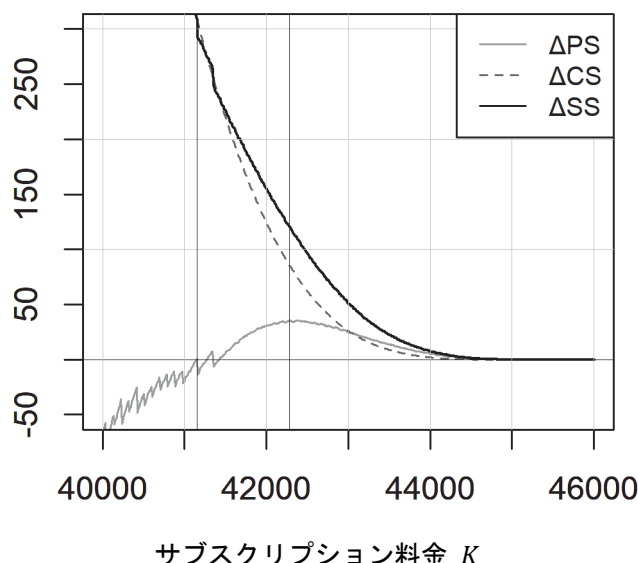


図 10 シナリオ PS における厚生効果

シナリオ PI: 個別運賃+MaaS による統合運賃

このシナリオでは、MaaS 運営者が出発地から目的地までのモビリティサービスを統合運賃で提供し、交通事業者 X および Y は引き続き各々が個別運賃で交通サービスを提供する。各住民は、MaaS を通じた統合モビリティサービスを利用するか、従来の個別運賃で交通機関を利用するかを選択できる。

図 11 パネル(a)、(b)、(c)はそれぞれ、統合運賃座標(f_M, v_M)上において住民の余剰、MaaS 運営者の利潤、社会的総余剰の等高線を示している⁸。 f_M および v_M が増加すると、住民の余剰は減少し、MaaS 運営者の利潤は増加する。 f_M および v_M が高い水準に達すると、誰も MaaS の統合サービスを選ばなくなり、そのため、図の右上領域では住民の余剰、MaaS 運営者の利潤、社会的総余剰はいずれもゼロになる。

パネル(c)に示される右下がりの青い曲線は、MaaS 運営者の利潤がゼロとなる点の軌跡を

⁸ シナリオ PI における居住者の余剰、MaaS 運営者の利益、ならびに、社会総余剰はシナリオ P と比較して表示されている。パネル (a), (b), (c) では $CS_{PI} - CS_P$, $PS_{PI} - PS_P$, $SS_{PI} - SS_P$ がそれぞれ示されている。

示している。 (f_M, v_M) に対応する点がこの曲線より上の領域に位置すれば、MaaS 事業は財政的に成立する。この曲線を本稿では「**実行可能境界 (feasibility boundary)**」と呼ぶこととする。

実行可能境界上で社会的総余剰を最大化する統合運賃は、 $(f_M, v_M) = (200, 25)$ である。これは、基準運賃が 200 円、距離比例運賃が 25 円ということを意味する。なお、統合運賃における基準運賃 200 円は、シナリオ P におけるバスと鉄道の乗継の場合（430 円）よりも大幅に安価である。この安価な運賃設定により、トリップ需要が増加し、たとえ交通事業者が現行運賃より低い卸売価格を受け入れたとしても、収益が減少しないのである。したがって、交通事業者は MaaS への参加を選ぶ。表 3 に示すように、このシナリオにおける社会的総余剰は、シナリオ PS の場合よりもはるかに大きい。

シナリオ PIS : 個別運賃 + MaaS による統合運賃 + サブスクリプション

このシナリオでは、MaaS 運営者が統合運賃およびサブスクリプションによりモビリティサービスを提供する。したがって、住民は 6 つの交通オプションすべて（{1,2,3,4,5,6}）を選択可能である。表 3 によれば、最適なサブスクリプション価格は 42500 円より高い水準に設定すべきとなっているが、この価格では誰もサブスクリプションを購入しない。このため、結果はシナリオ PI と同じになる。サブスクリプション価格を 42500 円より下げると、一部の住民がサブスクリプションを購入するようになり、その結果、社会的総余剰は減少する。

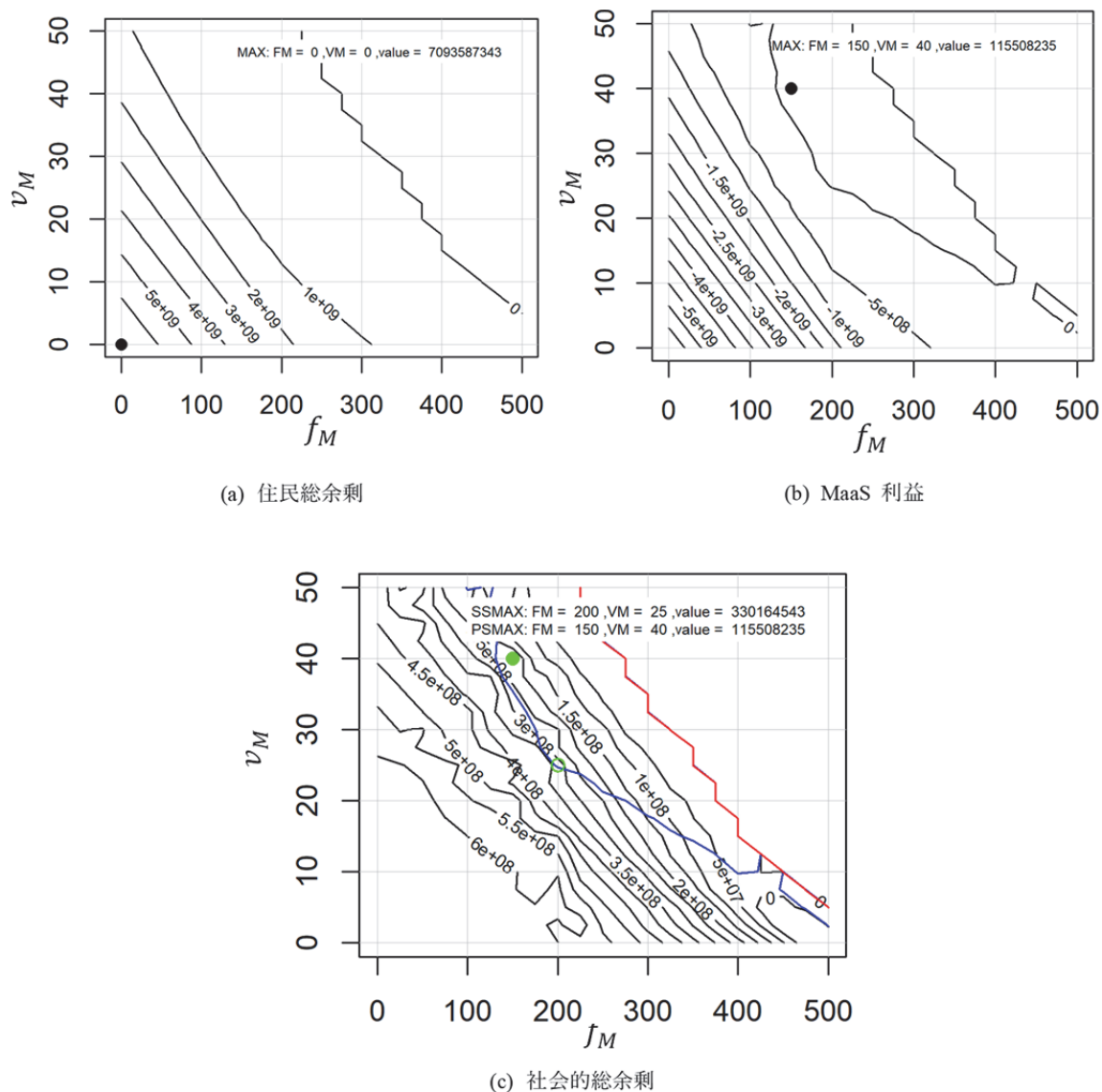


図 11 シナリオ PI における余剰の等高線

図 12 は、サブスクリプション価格 $K=35000$ 円の場合の等高線を示している。図 11 と比較すると、サブスクリプション価格を下げることによって、実行可能境界 (feasibility boundary) が右上方向にシフトし、それに伴い統合運賃体系 (f_M, v_M) もより高い水準で決定されることがわかる。サブスクリプションを利用する住民にとっては K が低いほど利得が大きい一方で、統合運賃を利用する住民にとっては (f_M, v_M) が高くなることで不利益を受ける。結果は、後者による負の効果が前者による正の効果を上回ることを示唆している。言い換えると、サブスクリプションを促進することは社会的総余剰を減少させる。表 3 によると、このシナリオにおける社会的総余剰の増加は、社会的最適による増加分と対比して 51.5%にとどまる。なお、MaaS 運営者は、交通事業者 X および Y が個別運賃で交通サービスを独自に提供してい

るため、交通事業者との競争に直面している。この状況下では、 (f_M, v_M, K) を高く設定すると MaaS 利用者が減少するので、MaaS による厚生効果が限定的になる。

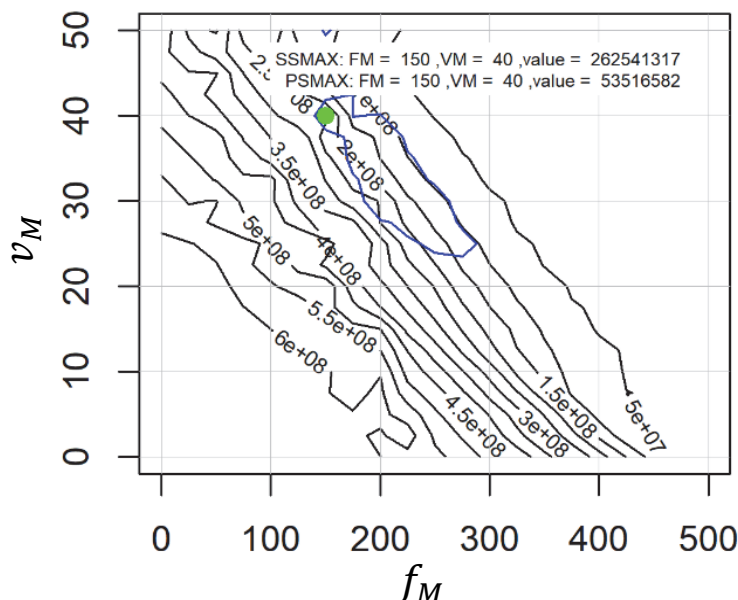


図 12 シナリオ PIS における社会的余剰の等高線 ($K = 35000$)

シナリオ I : MaaS による統合運賃のみ

このシナリオでは、すべての住民が MaaS を通じて統合運賃でモビリティサービスを利用する。サブスクリプションは利用できない。

図 13 は、統合運賃パネル $f_M - v_M$ 上における社会的総余剰の等高線を示している。図中、青い右下がりの曲線は実行可能境界集合 (feasibility boundary)、赤い曲線はシナリオ I のもとでの住民余剰 CS_I がシナリオ P の住民余剰 CS_P と等しくなる点の軌跡を表している。実行可能境界上において、社会的総余剰は $(f_M, v_M) = (250, 5)$ で最大化される。シナリオ P と比較すると、バス直行ルートにおいて基準運賃は高くなっている一方で、バスと鉄道を乗り継ぐルートにおいて基準運賃は低くなっている。バスの距離比例運賃はシナリオ P よりも高いものの、鉄道に比べれば低い水準となっている。表 3 が示すように、当シナリオにおける社会的総余剰の増加は、社会的最適による増加分の 85.5% となっている。

統合運賃制度は、バスと鉄道の乗継利用による二重マージンがもたらす非効率と、バスによる長距離移動に対する過小運賃がもたらす非効率の双方を軽減する効果がある。

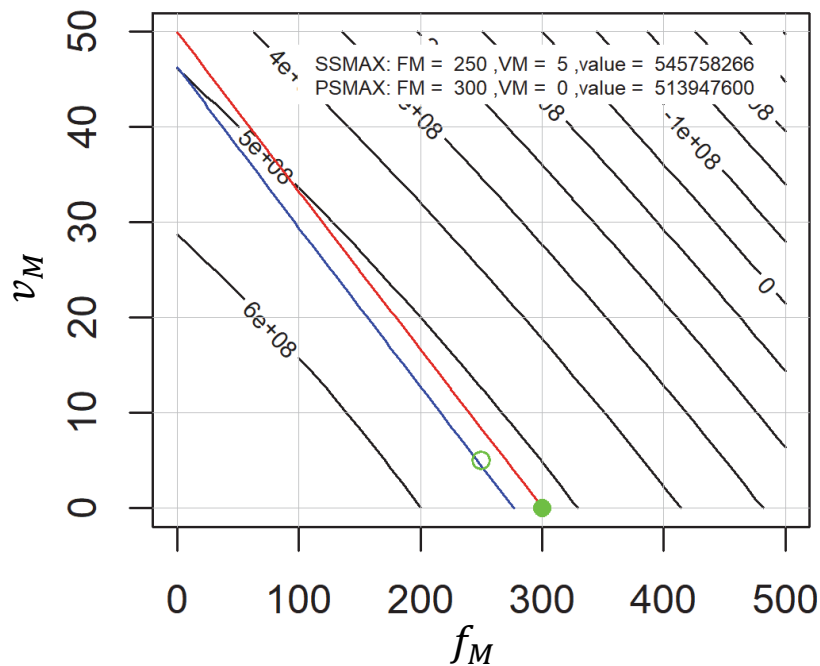


図 13 シナリオ I における社会的総余剰の等高線

シナリオ IS : MaaS による統合運賃+サブスクリプション

図 14 は、サブスクリプション価格 $K=17500$ 円における社会的総余剰の等高線と実行可能境界 (feasibility boundary) を示している。社会的総余剰は、統合運賃が中間的な水準、 $(f_M, v_M) = (175, 22.5)$ の場合最小となり、 (f_M, v_M) が右上または左下に移動するにつれて増加する。左下方向では、社会的総余剰が $(0, 10)$ で最大に達し、これは公共運営の解と一致する。この場合、誰もサブスクリプションを利用しない。右上方向では、 (f_M, v_M) が十分高くなると、すべての住民がサブスクリプションを選択するようになって、社会的総余剰は一定となる。社会的総余剰は、左下の場合の方が大きい、このケースでは採算割れするため実行不可能である⁹。このシナリオにおける解は (f_M, v_M) を十分高い水準に設定したうえ、 $K=17500$ 円として、すべての住民がサブスクリプションを選択するようにすることである。

同様の結果は、 K をさらに高い水準に設定しても得られるが、その場合は (f_M, v_M) もさらに高い水準に設定する必要がある。一方、このシナリオで採算割れしないための条件は、 K が 17500 円より低くならないことである。このシナリオでは、統合運賃を選ぶ利用者とサブスクリプションを選ぶ利用者が共存することはない。これは、シナリオ PIS の結果とは対照的である。シナリオ PIS では、サブスクリプションの利用を抑制することが最適であった。シナリオ PIS では、住民が個別運賃を選択できるため、バスによる長距離移動を行う住民は、

⁹ 表 3 で表示されているように、社会的総余剰は図の左下端に近い $(0, 10)$ において約 6 億 3770 万円、 (f_M, v_M) が十分に高い場所においては約 6 億 2800 万円である。

統合運賃やサブスクリプションよりも個別運賃を選ぶ。このことで MaaS は採算を確保することが難しくなるのである。表 3 によれば、シナリオ IS における社会的総余剰は、シナリオ PIS における社会的総余剰よりもはるかに大きい。サブスクリプションを利用する住民は、社会的限界費用よりも低い一般化費用でトリップするため、一定の歪みは生じるが、その歪みは、個別運賃利用による歪みよりも小さい。

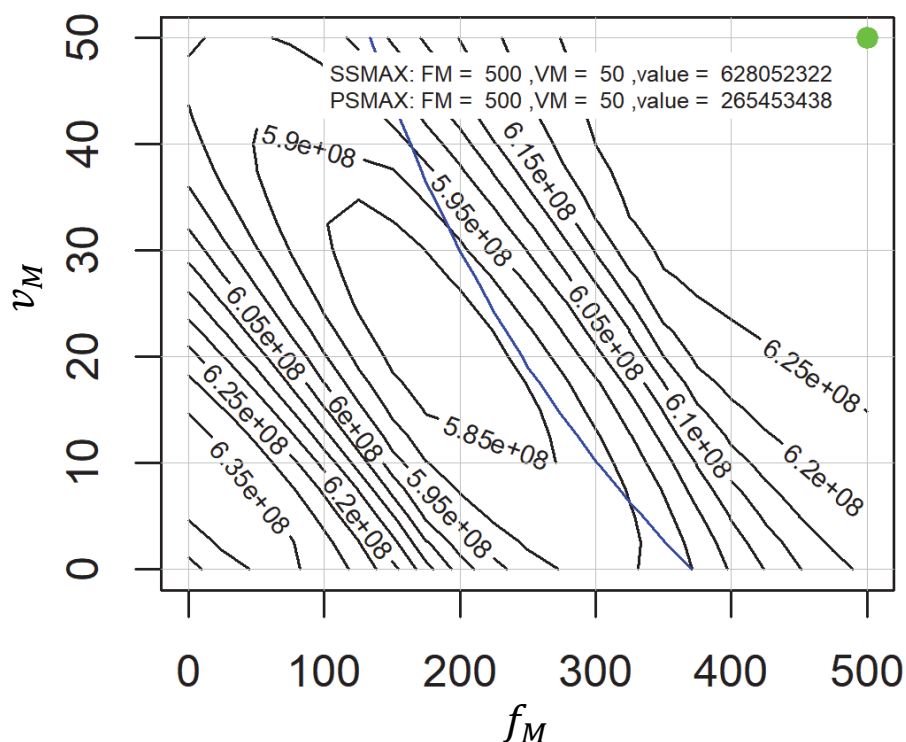


図 14 シナリオ IS における社会的総余剰を描いた等高線($K = 17500$)

4.2 効用変化の空間パターン

シナリオ j における各住民の効用水準を $V_j^*(n, x, y)$ で表す。MaaS 導入による効用水準の変化は、現状（シナリオ P）との差分、 $V_j^*(n, x, y) - V_P^*(n, x, y)$ として計算する¹⁰。図 15～図 18 は、それぞれシナリオ PS、PI (=PIS)、I、IS における効用水準の空間パターンを示している。シナリオ PS では、非常に高い n を持つ住民のみがサブスクリプションを購入するので、 $n=100$ の場合の結果を図 15 に示している。この場合でも、効用水準の増加は、鉄道路線に近く中心部から離れたごく限られた地区にとどまっていることがわかる。図 16 は、シナリオ PI（お

¹⁰ 表 3 に報告されたシナリオ j における解 (f_M, v_M, K) を用いて、 $V_j^*(n, x, y)$ の値を計算する。

よび PIS) の結果を示している。第 3 章で説明した通り、効用水準は、鉄道路線に近い北部および南部の地域で増加している。これらの地域では、住民は MaaS を通じて統合サービスを選択している。それ以外の地域で住民は個別運賃を選択しており、そのため効用水準はシナリオ P と等しくなる。このように、個別運賃が許容されているシナリオにおいては、どの住民も効用が低下することはない。図 17 および図 18 は、それぞれシナリオ I とシナリオ IS における結果を示している。これらのシナリオでも、効用変化は鉄道路線に近く、中心部から離れた地域でより大きくなっている。シナリオ I では、バス直行ルートを利用する南部地域において効用水準が低下している。これは、シナリオ P におけるバス一律運賃に比べて、統合運賃が高くなっているためである。シナリオ IS では、中央値の n ($n=75$) を持つ住民すべてが正の効用変化を享受している。ただし、 n が小さい住民（トリップ頻度が少ない住民）にとっては、サブスクリプションの便益が小さいため、効用水準が低下する場合もある。

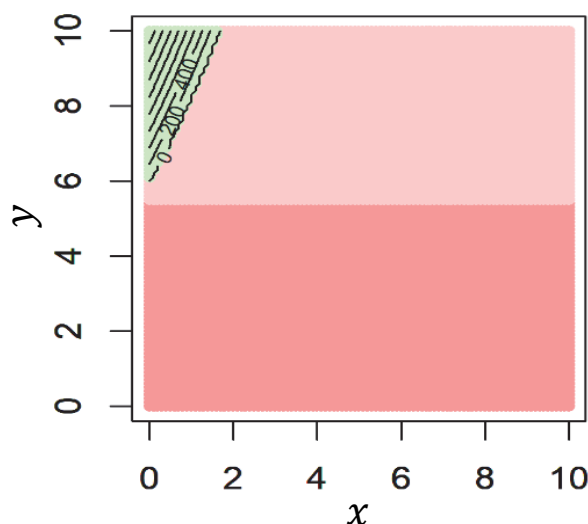


図 15 シナリオ PS における効用変化 ($n = 100, K = 43500$)

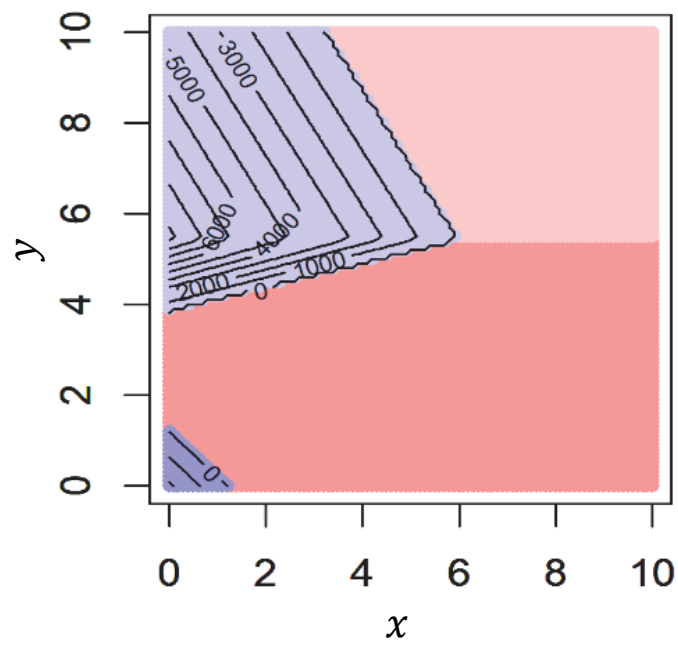


図 16 シナリオ PI における効用変化 ($n = 75, f_M = 200, v_M = 25$)

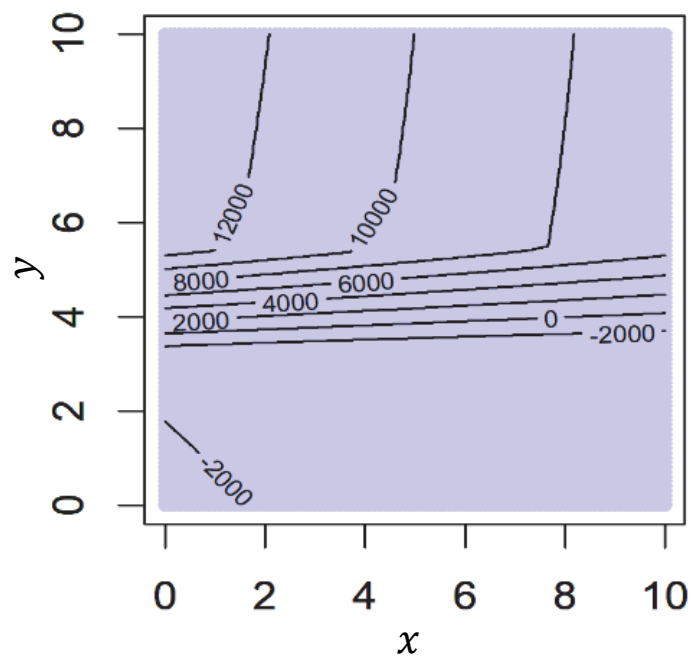


図 17 シナリオ I における効用変化 ($n = 75, f_M = 250, v_M = 5$)

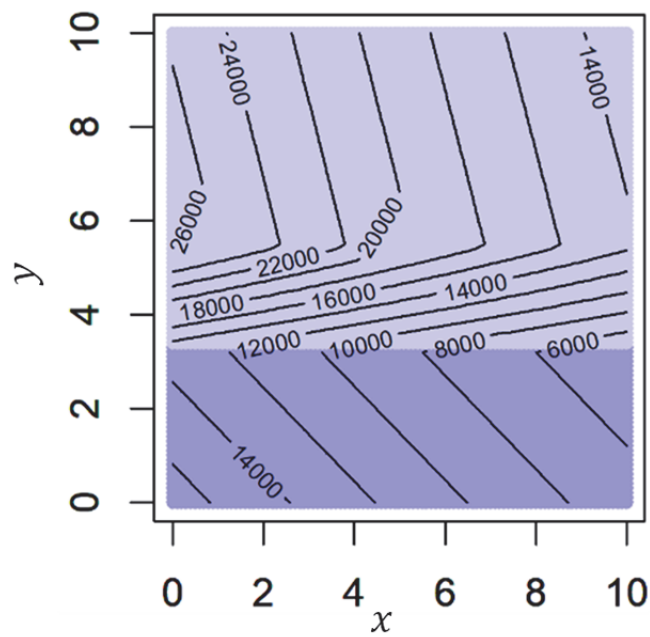


図 18 シナリオ IS における効用変化 ($n=75, f_M=400, v_M=50, K=17500$)

効用水準が地域ごとに増加または減少することにより、住民の移動が引き起こされ、結果として都市内の人口密度の空間パターンが変化することになる。効用水準が上昇する地域では人口密度が高まり、逆に効用水準が低下する地域では人口密度が低下する。これまでの結果は、MaaS の導入により、鉄道路線に近く、中心部から離れた地域で人口密度が増加することを示唆している。

5 章 おわりに

本研究では、二次元の都市空間における公共交通システムの経済モデルを構築し、MaaS 導入による代替的な運賃・料金体系を検討した。具体的には、鉄道およびバス輸送に対して、個別運賃、統合運賃、サブスクリプションという選択肢を考慮した。また、MaaS 運営者の利潤が非負であり、かつ、交通事業者の参加条件が満たされる運賃・料金体系が存在するかどうかを確認することで、MaaS 導入の実現可能性を確認することとした。本研究では、個別運賃制度を統合運賃制度に置き換えることによる社会的総余剰の改善が定量的に見ても大きいことを示した。さらに、サブスクリプション導入の効果について新たな結果を得た。サブスクリプションの導入は必ずしも経済厚生を改善するとは限らない。交通事業者が個別運賃で交通サービスを提供している場合、サブスクリプション価格を引き下げると社会的総余剰が減少する。一方、個別運賃が統合運賃に置き換えられた場合には、サブスクリプションの導入は効果的である。また、MaaS の導入により、中心業務地区（CBD）から離れた鉄道路線近くの地域では効用水準が上昇し、都市中心部では効用水準が低下することが示された。

本研究は、日本の現行の公共交通システム（個別運賃制度およびバスの一律運賃制度）をもとに MaaS の効果を議論したが、世界諸国のさまざまな文脈で MaaS の効果を分析することも今後の課題である。また、自動車と公共交通の手段選択もモデルに取り入れるべきである。MaaS の主たる目的の一つは自動車によるトリップを公共交通によって置き換えることにあることを考慮すれば、きわめて重要な研究課題といえる。van den Berg *et.al* (2022) による分類に従えば、本論文で想定しているビジネスモデルは仲介者（intermediary）モデルに対応している。ただし、彼らのモデルでは交通事業者がリーダーとして価格を先に設定する点に違いがある。今後の研究として、都市空間におけるインテグレーター型やプラットフォーム型など、他のビジネスモデルを検討することも有益であると考えられる。

参考文献

- Adams, William James, and Janet L. Yellen. [1976], "Commodity Bundling and the Burden of Monopoly." *The Quarterly Journal of Economics* 90, 475–98.
- Becker, Henrik & Balac, Milos & Ciari, Francesco & Axhausen, Kay W., 2020. "Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS)," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 131, 228-243.
- Caballini, C.; Olivari, E.; Gasparini, C.; Dalla Chiara, B. The Spread of MaaS Initiatives in Europe: The Leading Role of Public Governance Emerging from an Italian Regional Application. *Sustainability*, 2023,

- 15, 13413.
- Cachon, Gérard P., and Pnina Feldman. [2011] "Pricing services subject to congestion: Charge per-use fees or sell subscriptions?" *Manufacturing & Service Operations Management* 13.2, pp. 244-260.
- Clark, Colin. [1951] "Urban population densities." *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)* 114.4, pp. 490-496.
- Daganzo, Carlos F., 2010. "Structure of competitive transit networks," *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, vol. 44(4), pages 434-446
- Fielbaum, Andrés, Sergio Jara-Diaz, Antonio Gschwender, 2016, Optimal public transport networks for a general urban structure, *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 298-313,
- Fishburn, Peter C., and Andrew M. Odlyzko. [1999] "Competitive pricing of information goods: Subscription pricing versus pay-per-use." *Economic Theory* 13, pp. 447-470.
- Heikkilä, Sonja.[2014] "Mobility as a service - a proposal for action for the public administration, case helsinki.", Master thesis, Aalto University, Finland.
- Becker, Henrik, Milos Balac, Francesco Ciari, Kay W. Axhausen, [2020], Assessing the welfare impacts of Shared Mobility and Mobility as a Service (MaaS), *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 131, 228-243.
- Hörcher, Daniel, and Daniel J. Graham. [2020] "MaaS economics: Should we fight car ownership with subscriptions to alternative modes?" *Economics of Transportation* 22: 100167.
- Hörcher, Daniel, and Alejandro Tirachini. [2021] "A review of public transport economics." *Economics of transportation* 25: 100196.
- König, David, et al. [2016] "Deliverable 3: Business and operator models for MaaS. MAASiFiE project funded by CEDR."
- Lewbel, Arthur. [1985] "Bundling of substitutes or complements." *International Journal of Industrial Organization* 3.1, pp. 101-107.
- Small, Kenneth, and Erik T. Verhoef. [2007] *The Economics of Urban Transportation*. Routledge.
- van den Berg, Vincent AC, Henk Meurs, and Erik T. Verhoef. [2022] "Business models for Mobility as an Service (MaaS)." *Transportation Research Part B: Methodological* 157, 203-229.

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ
http://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください

A-916 「都市空間における MaaS の経済分析」

都市空間における MaaS の経済分析研究プロジェクト

2025 年 6 月 発行

公益社団法人日本交通政策研究会