

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 2020-2

研究テーマ

公共交通ターミナル整備の
空間経済分析に関する研究開発

研究代表者：金沢大学准教授	高山 雄貴
共同研究者：北海道大学准教授	杉浦 聡志
金沢大学准助教	中西 航
金沢大学特任助教	壇辻 貴生
金沢大学教授	中山 晶一郎
統計数理研究所助教	村上 大輔
京都大学助教	大澤 実
八千代エンジニアリング	高森 秀司
八千代エンジニアリング	杉本 達哉
八千代エンジニアリング	内田 瑞生

令和5年3月

新道路技術会議

目次

研究概要（様式 3 を挿入）	1
第 1 章 はじめに	3
1. 1 背景と目的	3
1. 2 関連研究	6
第 2 章 交通・立地統合モデルに基づく政策効果分析手法	8
2. 1 モデル	8
2. 2 均衡状態の解析手法	10
2. 3 反実仮想実験のための準備反実仮想実験のための準備	12
2. 4 実都市を対象とした反実仮想実験	14
第 3 章 交通・立地統合モデルによるターミナル整備効果の計測	17
3. 1 金沢でのターミナル整備効果	17
3. 2 札幌でのターミナル整備効果	26
第 4 章 空間的応用一般均衡モデルに基づく政策効果分析手法	31
4. 1 モデル	31
4. 2 パラメータの設定方法	33
4. 2 輸送アクセス改善の影響分析	34
第 5 章 ターミナル整備の空間的応用一般均衡分析	40
5. 1 パラメータ推定結果	40
5. 2 金沢でのターミナル整備の経済波及効果	43
5. 3 札幌でのターミナル整備の経済波及効果	46
第 6 章 おわりに	50
5. 1 成果のまとめ	50
5. 2 今後の課題と展望	51

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和2年度採択)
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
2020-2	公共交通ターミナル整備の 空間経済分析に関する研究開発	金沢大学 准教授 高山雄貴

本研究では、公共交通ターミナル整備がもたらす長期的・広域的な効果の空間分布を計量化するための空間経済分析手法を開発する。具体的には、公共交通ターミナル整備が都市内交通・土地利用に与える影響を評価する手法と、高速バス網の拡充による周辺地域への波及効果を評価する手法を開発する。そして、これらの手法により、札幌、金沢でのターミナル整備により発現する効果を計測する。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

バスタプロジェクトに代表される公共交通ターミナル整備の効果は、長期間・広範囲に渡って発現する。それゆえ、その整備を効果的・効率的に実施するためには、その効果を適切に把握することが重要となる。そこで、本研究では公共交通ターミナル整備がもたらす長期的・広域的な効果の空間分布 (i.e., どこに、どの程度の効果が生じるのか) を計量化することのできる、空間経済分析手法を開発する。そして、札幌・金沢を対象に公共交通ターミナル整備により発現すると期待される効果を計測する。

2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

本研究では、3種類の研究開発課題[A, B, C]を設定し、それらを順に実施することで目的を達成した。その内容は、以下に示す通りである：

[A] 交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法の開発

課題[A]では、交通・立地統合モデルを用いた(都市内スケールの)分析枠組を構築する。その予備解析を通じて、我が国で観測された都市空間構造の長期的変化との整合性を検証する。

[B] 空間的応用一般均衡(SCGE)モデルを用いた地域経済分析手法の開発

課題[B]では、SCGEモデルを用いた(都市間スケールの)分析枠組を構築する。そして、SCGEモデルを用いた予備解析を実施し、重要な経済集積現象を表現できるか否かを確認する。

[C] 実都市における公共交通ターミナル整備の長期的・広域的効果の計測

課題[C]では、[A, B]で開発した分析枠組を用いて、札幌・金沢でのバスタ整備がもたらす長期的・広域的効果を計測する。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

研究開発課題[A, B, C]において得られた知見・成果は以下に示す通りである。

[A] 交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法の開発

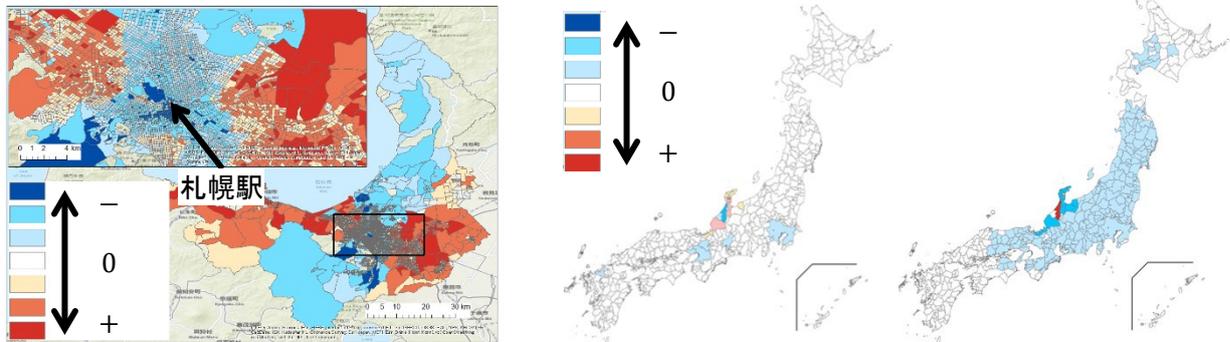
都市経済理論に基づく交通・立地統合モデルを構築するとともに、機械学習・進化ゲーム理論の手法を応用することで、数値解析の大幅な効率化を実現した。さらに、入手が比較的容易なデータのみを用いてパラメータを推定・キャリブレートする方法を整備した。その上で、金沢を対象とした予備解析により、大規模・高解像度の都市・交通システムを対象とした解析でも問題なく計算可能であること、一律に交通費用が低下することによる土地利用への影響を分析した結果は、我が国の都市で共通して観測された人口分布変化と整合していることを明らかにした。

[B] 空間的応用一般均衡(SCGE)モデルを用いた地域経済分析手法の開発

定量的空間経済モデルを基盤としたSCGEモデルを構築した上で、入手が比較的容易な交通・経済データ(国土数値情報、産業連関表など)を利用したパラメータ推定手法、日本全国を対象とした分析を実施するための数値解析手法を開発した。そして、日本全国を対象とした予備解析として、交通基盤整備・技術進展に伴う都市間輸送改善の影響評価を実施し、ストロー現象を表現できる分析枠組であること、一般的な計算機でも1時間程度で計算可能であることを確認した。

[C] 実都市における公共交通ターミナル整備の長期的・広域的効果の計測

課題[A, B]で開発した分析枠組を用いて、札幌・金沢を対象に公共交通ターミナルの整備効果を調べた。下図に示す結果からも確認できるように、都市内の土地利用や、周辺都市の人口・域内総生産に与える影響を計測・可視化できた。さらに、ターミナルの整備箇所に応じて効果が質的に異なるうえ、整備地区にとってマイナスの影響を生じさせる可能性があることなどが明らかにされた。これらの結果は、ターミナル整備に加えて、周辺の特徴的な産業の振興・地域間連携促進などの、相乗効果が期待できる施策も重要であることを示唆している。



札幌駅前に整備した場合の居住人口変化 金沢に整備した場合の人口(左)・域内総生産(右)変化

図：ターミナル整備の影響分析結果の一例

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

本研究課題を通して得られた研究成果や理論的知見は、積極的に論文としてまとめる方針をとった。それらの成果の一部は、以下に例示するように、著名な国際誌・国内誌に掲載された。

- Dantsuji, T., Takayama, Y., Fukuda, D. (in press) “Perimeter control in a mixed bimodal bathtub model,” *Transportation Research Part B: Methodological*.
- 杉本達哉, 高田観月, 高山雄貴, 高木朗義 (2023) “空間経済学に基づく地域間輸送改善の長期的影響評価手法の開発,” 土木学会論文集, Vol.79, No.4, 22-00115.
- Murakami, D., Griffith, D.A. (2023) “Balancing spatial and non-spatial variation in varying coefficient modeling: A remedy for spurious correlation,” *Geographical Analysis*, Vol.55, pp.31-55
- 小林秀佑, 中西航, 堀越光, 高山雄貴 (2022) “ベイズ推定アプローチによる土地利用モデルのパラメータ推定,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.77, No.5, pp.469-481.

5. 今後の展望 (研究成果の活用や発展性、今後の課題等)

本研究課題で実施した分析の過程で明確となった課題や今後の展望は以下の通りである。

多様な政策効果検証の蓄積：本研究課題で開発した空間経済分析枠組は、既存手法の課題 (e.g., ストロー現象を表現できない, 分析の空間解像度が低い) の解決に成功しており、今後は多様な政策の長期的・広域的効果 (ストック効果) の空間分布予測の基盤になりうるものである。ただし、本手法の信頼性を高めるために、ケーススタディーの蓄積と分析枠組の改良が求められる。

データ収集・整備のためのコスト削減：空間経済分析を実施するには、地理・経済・交通等のデータを適切に収集・整備する必要があるが、それらを準備するためのコストが極めて大きい。空間経済分析枠組を用いた分析事例の蓄積のためにも、この課題解決 (e.g., API連携可能なアプリケーション開発) を通じて、社会実装を容易にする仕組みの整備が期待される。

6. 道路政策の質の向上への寄与 (研究成果の実務への反映見込み等)

本研究では、政策の長期的・広域的効果を計測できる空間経済分析枠組の開発に成功しており、これが道路政策の質の向上への貢献となると考えられる。実際、この分析枠組は、道路行政の技術開発ニーズにも記載されている“バスタプロジェクトの整備効果計測・評価”を可能にするだけでなく、“多様なストック効果計測”や“ワイダー・エコノミック・インパクトの計測”の基盤にもなり得るものである。

7. ホームページ等 (関連ウェブサイト等) なし

第1章 はじめに

1.1 背景と目的

バスタプロジェクトに代表される公共交通ターミナル整備の効果は、長期間・広範囲に渡って発現する。そのため、その整備を効果的・効率的に実施するためには、長期的・広域的な効果を把握することが重要となる。空間経済分析は、都市・地区といった空間単位毎、企業や労働者といった経済主体毎に政策の長期的効果を計量化できる (i.e., どこに、誰に、どの程度の効果が生じるのかを計測できる) 手法であり、都市経済学・土木計画学分野で関連する研究が膨大に蓄積されてきた (詳細は1.2節参照)。

これらの研究蓄積により、交通施策による混雑緩和が土地利用に与える影響を、交通と土地利用の間に働く相互作用 (図-1.1) を考慮した上で評価するための枠組 (e.g., 応用都市経済 [Computable Urban Economic: CUE] モデル, 定量的都市経済 [Quantitative Urban Economic: QUE] モデル) や、都市間交通網の整備が地域経済に与える影響を評価するための枠組 (e.g., 空間応用一般均衡 [Spatial Computable General Equilibrium: SCGE] モデル, 定量的空間経済 [Quantitative Spatial Economic: QSE] モデル) が発展している。しかし、基本的な分析枠組は完成の域に達してきているものの、以下に挙げる問題が政策評価への

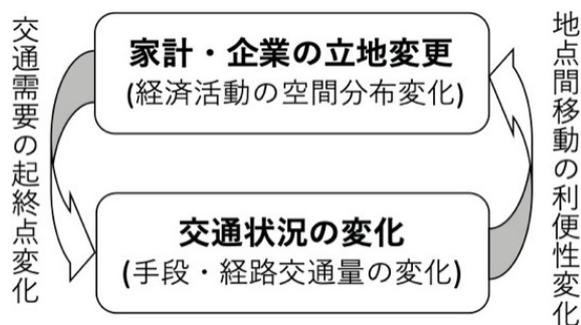


図-1.1 交通と土地利用の相互作用

応用上の障害になっている：

【問題1】 大規模なモデルの効率的な数値解析手法の欠如

既存の空間経済分析では、広大な空間を分析対象とする場合、計算負荷の軽減を目的に、「空間分割数を少なくする (e.g., 市区町村単位で空間を分割して土地利用変化を分析)」, もしくは「分析枠組を大幅に簡略化する (e.g., 交通混雑の影響を無視)」といった対応が一般的に行われている。それゆえ、広範囲に渡って政策効果が発現する交通施策の評価への空間経済分析の適用は限定的なものに留まっていた。

【問題 2】 経済・交通データを利用した計量モデルのパラメータ設定手法の欠如

政策分析に用いられる計量モデルのパラメータの多くは、統計的な手法を用いることなく設定されるか、推定されているとしても統計学的な問題が指摘されている (e.g., 空間的自己相関への対処をしない) 手法が採用されている。したがって、分析結果の信頼性に疑問が残るものとなっていた。

本研究開発の目的は、[問題 1,2] を解決することで、広域・詳細な空間を対象とすることが可能であり、かつ信頼性の高い空間経済分析手法を開発することである。そして、公共交通ターミナル整備による効果のうち、特に“公共交通の利便性 (アクセシビリティ) の向上”・“鉄道駅周辺の道路混雑の緩和”・“鉄道駅周辺の利用可能な土地の増加”に焦点を当て、それらの長期的・広域的な効果の空間分布を開発した手法により計測する。より具体的には、札幌・金沢のターミナル整備を対象に、都市内部の土地利用変化・周辺地域への経済波及効果を評価する。

この目的を達成するために、3種類の研究開発課題 [A,B,C] を設定し、それらを順に実施していくことで研究目的を達成する (図-1.2)。その各々

[A] 交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法の開発

交通施策が交通・土地利用に与える長期的な影響を評価する基礎技術の開発

1. 土地利用と交通の相互作用を考慮した計量モデル構築・数値解析手法の開発
2. 実都市を対象とした予備実験

[B] 空間的応用一般均衡モデルを用いた地域経済分析手法の開発

ターミナル整備が周辺地域にもたらす経済波及効果を評価する基礎技術の開発

1. ターミナル整備効果を評価するための空間的応用一般均衡モデルの構築
2. 実都市を対象とした予備実験

[C] 実都市における公共交通ターミナル整備の長期的・広域的効果の計測

1. ターミナルを整備した都市の土地利用・交通状況変化を計測 ⇒ [A]の成果の応用
2. 周辺地域への経済波及効果の空間分布を計測 ⇒ [B]の成果の応用

図-1.2 研究開発課題[A, B, C]の内容

の内容・手順は、以下の通り:

[A] 交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法の開発

内容:“交通と土地利用の相互作用 (図-1.1)”を表現できる交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法を開発する。そのために、広域・詳細な都市内空間を対象とした分析を可能にする枠組を構築するとともに、効率的な数値解析手法・空間統計学に基づくパラメータの推定手法を確立する。

手順:研究課題 [A] は、次の 3 つの項目を順に進める:(A1) 交通・立地統合モデルの構築, (A2) 交通・立地データの整備, (A3) 構築した統合モデルの基本特性を解明するための予備解析。より具体的な手順は、以下に示す。

(A1) 交通・立地統合モデルの構築

統合モデルの基礎となる“交通サブモデル”・“立地サブモデル”を構築する。それと同時に、広域・詳細な都市内空間の分析に不可欠な、効率的な数値解析手法の開発、入手可能なデータを利用したパラメータ推定手法を整備する。そして、構築した 2 種類のサブモデルを組み合わせることで、本研究課題の基礎となる分析枠組を完成させる。

(A2) 交通・立地データの整備

構築した交通・立地統合モデルの基本特性を確認するために利用する立地・交通関係の基礎データを整備する。具体的には、金沢を対象とした予備解析(パラメータ推定, 数値シミュレーション)で利用するデータを、国勢調査・道路交通センサス等を用いて整備する。さらに、予備解析で得られたパラメータ推定結果・数値解析結果の信頼性・妥当性の検証に利用するために、基礎集計等

に基づく分析により、それらのデータの基本的な特徴を整理する。

(A3) 構築した統合モデルの予備解析

金沢を対象とした予備解析により、構築した統合モデルの基本特性を示す。具体的には、パラメータ推定結果と (A2) で実施した基礎的な分析結果との整合性の確認、通勤時間価値を変化させた場合の影響を評価する予定である。

[B] 空間的応用一般均衡 (SCGE) モデルを用いた地域経済分析手法の開発

内容:公共交通ターミナルの整備が周辺地域にもたらす経済波及効果を計測できる地域経済分析手法を開発する。そのために、地域間交易を表現できる SCGE モデルを構築する。そして、日本全国を対象とした分析を可能にする数値解析手法・パラメータ推定手法を提案する。

手順:研究課題 [B] は、次の3つの項目を順に進める:(B1) 都市間交通網のモデル化, (B2) 空間的一般均衡 (SCGE) モデルの構築, (B3) 都市間交通・地域経済データの整備, (B4)構築した SCGE モデルの基本特性を解明するための予備解析。より具体的な手順は、以下に示す。

(B1) 都市間交通網のモデル化

都市間交通網の整備に伴う人流・物流の円滑化・効率化の影響を評価するために、都市間交通網をモデル化する。その際、本研究課題を達成するために、道路・鉄道・航空に加え、長距離バスの存在も明示的に考慮した上で、(B3) で整備する都市間交通データを利用して、モデルを構築する。

(B2) SCGE モデルの構築

土木計画学分野で研究が蓄積されてきた標準的な SCGE モデル (e.g., 上田ら¹⁾), 空間経済学分野で急速に研究が蓄積されている定量的空間

総括 + 交通・立地サブモデルの統合：高山雄貴

		[A] 交通・立地統合モデルの開発	[B] 空間的応用一般均衡モデルの開発	[C] ターミナル整備効果の計測	
専門・研究手法	交通	杉浦聡志 中山晶一郎 高森秀司	交通サブモデル開発 + 数値解析の効率化	都市間交通網のモデル化	ターミナル整備による交通面の影響評価
	立地	高山雄貴 大澤実 杉本達哉	立地サブモデル開発 + 数値解析の効率化 + 予備実験	SCGEモデルの構築 + 数値解析の効率化 + 予備実験	ターミナル整備による土地利用・経済面の影響評価
	統計	中西航 村上大輔(*) 内田瑞生	データ整備 + パラメータ推定	データ整備 + パラメータ推定	データ整備 + 実都市適用時のパラメータ推定

(*) 統計数理研究所 村上大輔助教は2年目から参加

図-1.3 研究体制・役割分担

経済モデル (Redding and Rossi-Hansberg²⁾) を基盤としたモデルを開発する。そして、(B1) で開発した都市間交通網モデルと組み合わせることで、本研究課題の基礎となる分析枠組を完成させる。その上で、入手可能な交通・経済データを利用したパラメータ推定手法、日本全国を対象とした分析を実施するための数値解析手法を整備する。

(B3) 都市間交通・地域経済データの整備

構築した都市間交通網モデル・SCGE モデルの基本特性を確認するために利用する都市間交通・地域経済データを整備する。具体的には、日本全国を対象とした予備解析 (パラメータ推定, 数値シミュレーション) で利用するデータを、国土数値情報・産業連関表等を用いて整備する。

(B4) 構築した SCGE モデルの予備解析

日本全国を対象とした予備解析により、構築したモデルの基本特性を確認する。具体的には、過去の交通基盤整備・技術進展に伴う都市間輸送の効率化が地域経済に与える影響を評価するとともに、実現象との整合性を検証する予定である。

[C] 実都市における公共交通ターミナル整備の長期的・広域的効果の計測

内容: 研究課題 [A, B] で開発した分析手法を用いて、金沢・札幌を対象に公共交通ターミナル整備の長期的・広域的な効果を計測する。具体的には、都市内部の土地利用変化、周辺地域への経済波及効果を定量的に明らかにする。

手順: 研究課題 [C] は、次の 3 つの項目を順に進める: (C1) 交通・立地・経済データの整備, (C2) 公共交通ターミナル整備効果の計測。より具体的な手順は、以下に示す。

(C1) 交通・立地・経済データの整備

札幌・金沢を対象とした公共交通ターミナル整備効果分析に利用する基礎データをまとめる。具体的には、研究課題 [A,B] で整備したデータを基盤に、多様な分析に応用可能な形式にデータを整備する。

(C2) 公共交通ターミナル整備効果の計測

研究課題 [A,B] で開発した 2 種類の分析手法により、札幌・金沢の公共交通ターミナル整備効果を評価する。その結果から、公共交通ターミナル整備がもたらすと考えられる土地利用変化・周辺地域への経済波及効果を計測するとともに、ターミナル整備との相乗効果が期待される地域政策 (e.g., 公共交通利用の促進策, 地域経済の発展策) を提案する。

本研究開発は、上記の研究課題 [A,B,C] を、図-1.3 に記載の体制・役割分担で進める。本研究開発の特徴の一つに、各自が独立して研究課題に取り組みのではなく、複数の研究手法を融合させる点がある。より具体的には、代表者 (高山) を中心に、交通 (杉浦・中山・壇辻・高森), 立地 (高山・大澤・杉本), 統計 (中西・村上・内田) 分野の専門家が、各々の知識・技術を基盤に議論を重ねることで、各研究課題の達成を目指す。

本研究開発の担当者らは、2016 年度から定期的実施してきた研究会での議論により、[問題 1,2] を根本的に解決できる見通しを得ている。具体的には、[問題 1] は、ポテンシャル関数・変分不等式問題の性質を利用した数値計算アルゴリズム (e.g., 高山³⁾; Osawa and Akamatsu⁴⁾; Akamatsu et al.⁵⁾) を用いることで解消される。さらに、[問題

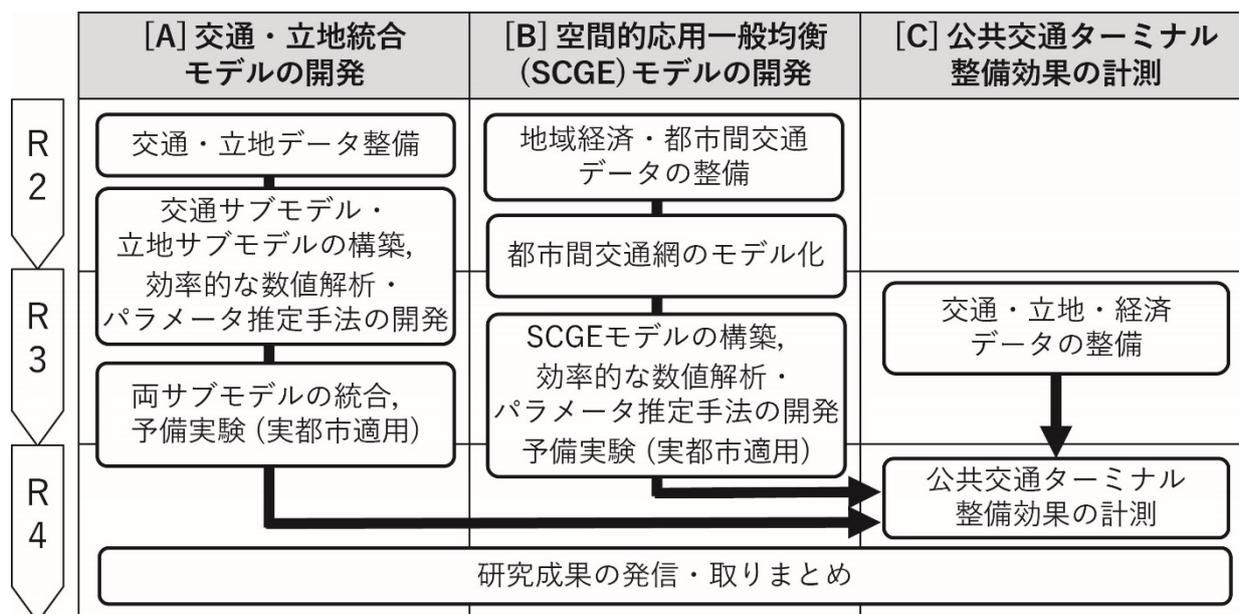


図-1.4 スケジュール

2] は空間統計学分野で近年発達してきた推定手法 (e.g., Griffith⁶⁾; Tiefelsdorf and Griffith⁷⁾; 瀬谷・堤⁸⁾)の適用により解決できる。

本研究開発の特色に、実都市における交通施策の長期的・広域的効果の空間分布を計量化する手法を開発する点がある。この分析手法開発の際に、既存研究の課題を分野横断的なアプローチで根本的に解決していること、分析手法の適用先が公共交通ターミナル整備に限られないことから、その発展性が非常に高い点も大きな特徴である。それゆえ、本研究課題の成果は、実務家との密接な議論により実用性を高めるための改善を重ねれば、政策評価手法を大きく発展させる可能性がある。

本研究課題は、図-1.4 に記載している通り、最初の2年間で、研究課題 [A, B] を概ね完了させた上で、最終年度に研究課題 [C] に取り組む予定である。より具体的には、次のスケジュールで進めるよう計画している：初年度は、研究課題 [A, B] で使用する予定のデータ整備・分析枠組の基礎となる数理モデル開発 (交通・立地サブモデル、都市間交通網のモデル) を進める。そして、2年度目に研究課題 [A, B] の分析枠組の完成・研究課題 [C] で用いるデータの整備、最終年度に研究課題 [A, B, C] を完了させ、その成果の発信・取りまとめを行う。

本報告書の構成は、以下のとおりである。第2章では、交通・立地統合モデルを用いた政策評価手法の開発に関する成果をまとめる。そして、第3章において、開発した手法を用いたターミナル整備が都市内部の交通混雑・土地利用に与える影響を計測する。第4章は、SCGEモデルを用いた地

域経済分析手法を示す。開発した手法を用いて、ターミナル整備に伴う経済波及効果を計測した結果は、第5章で示す。最後に、本研究課題の成果と今後の課題を第6章で整理する。

1.2 関連研究

土木計画学・都市経済学分野では、実空間を対象とした空間経済分析に関する研究が長年にわたり蓄積されてきた。上田ら¹⁾、堤ら⁹⁾、小池¹⁰⁾などでまとめられているように、これらの研究蓄積により、現在では、ミクロ経済学的基礎をもつ空間経済分析のための基本技術が確立するまでになっている。我が国では、完全競争の枠組みに依拠した、空間的応用一般均衡 (SCGE) モデルや、応用都市経済 (CUE) モデルに関する研究が主に蓄積されている。現在は、政策的意思決定上の判断材料を提供するために、既存技術の更なる精緻化および普及のための研究開発が進められている。

これらの方向とは別に、近年、新都市経済学・新経済地理学分野における経済集積理論の研究蓄積 (詳細は、例えば Fujita et al.¹¹⁾, Fujita and Thisse¹²⁾, 大澤¹³⁾, Proost and Thisse¹⁴⁾ 参照), 詳細な空間データが利用可能になったことを背景に、空間経済分析を拡張するための研究が急速に増加している。それらの成果は、Redding and Rossi-Hansberg²⁾ にまとめられるまでになっており、その進展は著しい (e.g., Allen and Arkolakis^{15, 16)}). しかし、これらの研究進展があつたにもかかわらず、本章 1.1 節に記載した [問題 1,2] を根本的に解決する手法は存在しない (具体的な議論は、例えば、堤ら⁹⁾ 参照)。

参考文献

- 1) 上田孝行・石川良文・小池淳司・石倉智樹・小林優輔・山崎清・武藤慎一 (2010) Excel で学ぶ地域・都市経済分析, コロナ社.
- 2) Redding, S. J. and Rossi-Hansberg, E. (2017) “Quantitative spatial economics,” *Annual Review of Economics*, Vol. 9, pp. 21–58.
- 3) 高山雄貴 (2019) “始業時刻分布を内生化した住宅立地均衡モデル,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 75, No.2, pp.59–69.
- 4) Osawa, M. and Akamatsu, T. (2020) “Equilibrium refinement for a model of non-monocentric internal structures of cities: A potential game approach,” *Journal of Economic Theory*, Vol.187, 105025.
- 5) Akamatsu, T., Mori, T., Osawa, M., and Takayama, Y. (2021) “Coordination of industrial location and the spatial fractal structure of city systems,” mimeograph.
- 6) Griffith, D. A. (2003) *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering: Gaining Understanding Through Theory and Scientific Visualization*, Springer.
- 7) Tiefelsdorf, M. and Griffith, D. A. (2007) “Semiparametric filtering of spatial autocorrelation: The eigenvector approach,” *Environment and Planning A*, Vol. 39, No. 5, pp. 1193–1221.
- 8) 瀬谷創・堤盛人 (2014) 空間統計学, 朝倉書店.
- 9) 堤盛人・山崎清・小池淳司・瀬谷創 (2012) “応用都市経済モデルの課題と展望,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 68, No.4, pp.344–357.
- 10) 小池淳司 (2019) 社会資本整備の空間経済分析: 汎用型空間的応用一般均衡モデル (RAEM-Light) による実証方法, コロナ社.
- 11) Fujita, M., Krugman, P. R., and Venables, A. J. (1999) *The Spatial Economy: Cities, Regions and International Trade*, MIT Press.
- 12) Fujita, M. and Thisse, J.-F. (2013) *Economics of Agglomeration: Cities, Industrial Location, and Globalization*, Cambridge University Press.
- 13) 大澤実 (2018) “集積経済モデルの数理解析とその周辺,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.19–36.
- 14) Proost, S. and Thisse, J.-F. (2019) “What can be learned from spatial economics?,” *Journal of Economic Literature*, Vol. 57, No. 3, pp. 575–643.
- 15) Allen, T. and Arkolakis, C. (2022) “The welfare effects of transportation infrastructure improvements,” *The Review of Economic Studies*, Vol. 89, No. 6, pp. 2911–2957.
- 16) Allen, T. and Arkolakis, C. (2014) “Trade and the topography of the spatial economy,” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 129, No. 3, pp. 1085–1140.

第2章 交通・立地統合モデルに基づく政策効果分析手法

2.1 モデル

本節では、Fujita and Ogawa¹⁾ モデルに基づいた、企業と家計の立地選択に関する相互作用を考慮したモデルを構築する。そのために、都市・交通条件と家計・企業・デベロッパー行動に関する設定を示す。そして、均衡条件を定式化する。

(1) 都市と交通条件の設定

本モデルでは、離散的な A 箇所の立地点が存在する都市を考える。この都市には、立地主体である家計と企業に加えて、それらに床面積を供給するデベロッパーが存在する。立地点の集合は \mathcal{A} とし、立地点 $a \in \mathcal{A}$ の面積は K_a 、立地点 a, b 間の距離は d_{ab} であると仮定する。

任意の立地点間は道路ネットワークにより接続されている。道路ネットワークは、 N 箇所のノードと、それらを結ぶ L 個のリンクから構成される。本稿では、ノード i と j を結ぶリンクをリンク ij と呼び、そのノード集合を \mathcal{N} 、リンク集を \mathcal{L} と表す。各立地点にセントロイドとなるノードを1つ設定し、そのノードが移動の起点・終点になると考える。立地点 a のセントロイドをノード i_a と表す。立地点 a を起点、 b を終点とする経路 p の集合 \mathcal{P}_{ab} を、その経路 p に含まれるリンク集を \mathcal{L}_{ab}^p とする。立地点とノードの関係を図-2.1に示す。

家計は均質であり、都市全体に固定的に H 存在する。各家計は、居住地 $a \in \mathcal{A}$ 、就業地 $b \in \mathcal{A}$ に加えて、通勤時の経路 $p \in \mathcal{P}_{ab}$ を選択する。居住地・就業地・経路別の家計数 (i.e., 立地点 a に居住し、就業地 b に経路 p を利用して通勤する家計数) を h_{ab}^p で表す。このとき、居住地が立地点 a の総家計数 n_a 、就業地が立地点 b の総家計数 m_b は以下で与えられる：

$$n_a = \sum_{b \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^p, \quad m_b = \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^p. \quad (1)$$

道路リンク $ij \in \mathcal{L}$ を通過する際にかかる交通費用は、標準的な交通ネットワークモデルと同様、

当該リンクを利用する家計数 (交通量) x_{ij} のみに依存する。より具体的には、交通費用 $t_{ij}(x_{ij})$ は、非負、 x_{ij} の単調増加、かつ凸関数で与えられると仮定する。ここで、リンク ij を通過する家計数 x_{ij} は、次のとおり表される：

$$x_{ij} = \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{b \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} \delta_{ab,ij}^p h_{ab}^p, \quad (2)$$

$$\delta_{ab,ij}^p = \begin{cases} 1 & \text{if } ij \in \mathcal{L}_{ab}^p, \\ 0 & \text{if } ij \notin \mathcal{L}_{ab}^p \end{cases}$$

このとき、居住地 $a \in \mathcal{A}$ から就業地 $b \in \mathcal{A}$ に経路 $p \in \mathcal{P}_{ab}$ を使う場合の通勤費用 $c_{ab}^p(\mathbf{x})$ は、以下で与えられる：

$$c_{ab}^p(\mathbf{x}) = \sum_{ij \in \mathcal{L}_{ab}^p} t_{ij}(x_{ij}). \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x_{ij})_{ij \in \mathcal{L}}$ である。

(2) 主体行動

a) 家計の行動

家計は合成財・床面積の消費量と居住地のアメニティ水準に応じた効用を得る。ただし、Fujita and Ogawa¹⁾と同様、家計が消費する床面積は固定的に s^H である。したがって、居住地 $a \in \mathcal{A}$ 、就業地 $b \in \mathcal{A}$ 、経路 $p \in \mathcal{P}_{ab}$ の家計の効用水準 u_{ab}^p は、合成財消費量 z_{ab}^p と立地点 a のアメニティ水準 B_a に

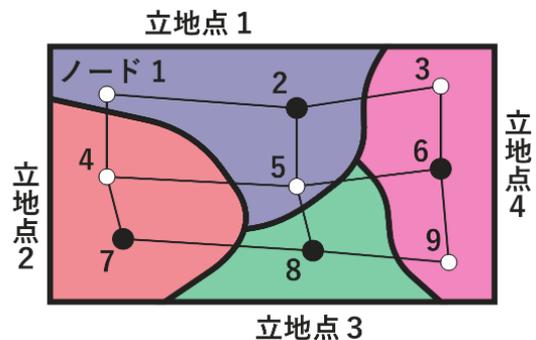


図-2.1 立地点とノードの関係 (黒点のノードが各立地点のセントロイド)

応じて定まる．具体的には，家計の効用 u_{ab}^p は以下で与えられると仮定する：

$$u_{ab}^p = z_{ab}^p + B_a. \quad (4)$$

また，合成財の価格を1に基準化するため，予算制約は以下で与えられる：

$$w_b = z_{ab}^p + r_a s^H + \tau c_{ab}^p(\mathbf{x}). \quad (5)$$

ここで， w_b は勤務地 b の賃金率， r_a は立地点 a の単位床面積の価格， c_{ab}^p は経路 p の通勤費用， τ は正のパラメータである．以上より， u_{ab}^p は次のように表される：

$$u_{ab}^p = w_b - r_a s^H - \tau c_{ab}^p(\mathbf{x}) + B_a. \quad (6)$$

b) 企業の行動

企業は，参入や撤退が自由であり，完全競争下で財を生産する．財の生産には， s^F 単位の床面積と1単位の労働を投入する必要がある．また，その生産額は立地点固有の生産性 D_b に応じて定まると仮定する．このとき，立地点 b の企業の利潤 π_b には次のように与えられる：

$$\pi_b = D_b - r_b s^F - w_b. \quad (7)$$

したがって，企業の利潤ゼロ条件より，立地点 b の企業の賃金 w_b は次のように表される：

$$w_b = D_b - r_b s^F. \quad (9)$$

c) デベロッパーの行動

デベロッパーは，各立地点で不在地主から借りた単位面積の土地と資本を開発し，完全競争のもとで床面積を家計と企業に供給する．Ahlfeldt et al.²⁾と同様，生産関数は Cobb-Douglas 型であると仮定することから，立地点 a の土地を開発するデベロッパーの利潤最大化行動は次のように表される：

$$\max_{Q_a} \Pi_a = r_a S_a - P Q_a - R_a - C, \quad (10a)$$

$$\text{s.t. } S_a = Q_a^\mu. \quad (10b)$$

ここで， $\mu \in (0,1)$ は資本の投入割合， S_a は床面積の供給量， Q_a は資本投入量， R_a はデベロッパーが不在地主に支払う立地点 a の単位面積あたりの土地に対する地代， C は固定費用である．また， P は資本の価格であり，立地点によらず同一の水準である．本稿では， $P = 1$ となるように資本の単位を基準化する．

利潤最大化問題の1階条件および利潤ゼロ条件から， Q_a ， r_a は，各々，以下で与えられる：

$$Q_a = (\mu r_a)^{\frac{1}{1-\mu}}, \quad (11a)$$

$$r_a = \frac{(R_a + C)^{1-\mu}}{\mu^\mu (1-\mu)^{1-\mu}}. \quad (11b)$$

立地点 a の床面積需要量は $s^H n_a + s^F m_a$ ，供給量は $S_a K_a$ であることから，供給均衡条件(i.e.， $S_a K_a = s^H n_a + s^F m_a$)より， r_a ， R_a が n_a ， m_a の関数として次のように表される：

$$r_a(n_a, m_a) = \frac{1}{\mu} \left(\frac{s^H n_a + s^F m_a}{K_a} \right)^{\frac{1-\mu}{\mu}}, \quad (12)$$

$$R_a(n_a, m_a) = \frac{1-\mu}{\mu} \left(\frac{s^H n_a + s^F m_a}{K_a} \right)^{\frac{1}{\mu}} - C. \quad (13)$$

式(9)，式(12)を式(6)に代入することにより，居住地 a ，就業地 b ，経路 p を選択する家計の効用 u_{ab}^p が以下で与えられる：

$$u_{ab}^p(\mathbf{h}) = \alpha F_b(\mathbf{m}) + D_b - s^F r_b(n_b, m_b) - s^H r_a(n_a, m_a) - \tau c_{ab}^p(\mathbf{x}) + B_a. \quad (14)$$

ここで， $\mathbf{h} = (h_{ab}^p)_{p \in \mathcal{P}_{ab}, a, b \in \mathcal{A}}$ である．

(3) 均衡条件

家計は効用 $u_{ab}^p(\mathbf{h})$ が最大となる居住地 a ，就業地 b ，経路 p を選択する．その結果として定まる均衡状態が満たす均衡条件は，以下で与えられる：

$$\begin{cases} u^* = u_{ab}^p(\mathbf{h}^*) & \text{if } h_{ab}^{p^*} > 0, \\ u^* \geq u_{ab}^p(\mathbf{h}^*) & \text{if } h_{ab}^{p^*} = 0. \end{cases} \quad (15a)$$

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{b \in \mathcal{A}} \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^{p^*} = H. \quad (15b)$$

ここで， u^* は均衡状態における効用水準を表す．

均衡条件式(15a)は，居住地・就業地・経路選択の無裁定条件を表している．すなわち，この条件は，均衡状態ではどの家計も自らの選択を変更するインセンティブを持たないことを意味している．条件式(15b)は家計数保存則である．

均衡条件式(15)は，比較的短い期間で変更が行われる経路選択に関する条件式(16a)，(16b)と，長期的な選択と考えられる居住地・就業地に関する条件式(16c)，(16d)に分けた，次の表現と等価である：

$$\begin{cases} c_{ab}^* = c_{ab}^p(\mathbf{x}^*) & \text{if } h_{ab}^{p^*} > 0, \\ c_{ab}^* \leq c_{ab}^p(\mathbf{x}^*) & \text{if } h_{ab}^{p^*} = 0. \end{cases} \quad (16a)$$

$$\sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^{p^*} = H_{ab}. \quad (16b)$$

$$\begin{cases} u^* = v_{ab} & \text{if } H_{ab} > 0, \\ u^* \geq v_{ab} & \text{if } H_{ab} = 0. \end{cases} \quad (16c)$$

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{b \in \mathcal{A}} H_{ab} = H. \quad (16d)$$

ここで， c_{ab}^* は均衡状態における居住地 a から就業地 b への通勤費用， H_{ab} は居住地 a ・就業地 b の家計数， v_{ab} は以下で与えられる効用水準を表す：

$$v_{ab} = D_b - s^F r_b(n_b^*, m_b^*) - s^H r_a(n_a^*, m_a^*) - \tau c_{ab}^* + B_a. \quad (17)$$

2.2 均衡状態の解析手法

本節では，構築したモデルの均衡状態の特性を調べるための手法を提示する．そのために，構築したモデルにポテンシャル関数が存在することを明らかにする．その性質を利用すれば，特定の

初期状態から創発する安定均衡状態が得られることを示す。そして、この安定均衡状態を効率的に導出するための数値解析方法を提示する。

(1) ポテンシャル関数

本節では、均衡状態の特性を調べるために、均衡条件を満たす居住地・就業地・経路分布 \mathbf{h}^* が（プレイヤーが家計の）ポテンシャルゲームの Nash 均衡状態とみなすことができることを示す。均衡状態は、均衡条件(15)より、利得関数が $\mathbf{u}(\mathbf{h}) = (u_{ab}^p(\mathbf{h}))_{p \in \mathcal{P}_{ab}, a, b \in \mathcal{A}}$ で与えられる population game の Nash 均衡状態と捉えることができる。なお、以降では、この population game をゲーム \mathbf{u} と表記する。

このゲーム \mathbf{u} は、Sandholm^{3, 4)}により示されているように、任意の $\mathbf{h} \in \Delta \equiv \{\mathbf{h} | \mathbf{h} \cdot \mathbf{1} = H, \mathbf{h} \geq \mathbf{0}\}$ に対して、次の条件を満たす関数 $f(\mathbf{h})$ が存在すれば、ポテンシャルゲームである：

$$\frac{\partial f(\mathbf{h})}{\partial h_{ab}^p} = u_{ab}^p(\mathbf{h}) \quad \forall p \in \mathcal{P}_{ab}, \forall a, b \in \mathcal{A}. \quad (18)$$

本稿で構築したモデルには、この条件を満足する次の関数 $f(\mathbf{h})$ が存在する：

$$f(\mathbf{h}) = f_1(\mathbf{m}) - f_2(\mathbf{n}, \mathbf{m}) - f_3(\mathbf{x}) + f_4(\mathbf{n}), \quad (19a)$$

$$f_1(\mathbf{m}) = \sum_{b \in \mathcal{A}} \left\{ \frac{1}{2} \alpha F_b(\mathbf{m}) + D_b \right\} m_b, \quad (19b)$$

$$f_2(\mathbf{n}, \mathbf{m}) = \sum_{b \in \mathcal{A}} (s^H n_b + s^F m_b)^\mu K_b^{-\frac{1-\mu}{\mu}}, \quad (19c)$$

$$f_3(\mathbf{x}) = \tau \sum_{ij \in \mathcal{L}} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(x) dx, \quad (19d)$$

$$f_4(\mathbf{n}) = \sum_{a \in \mathcal{A}} B_a n_a. \quad (19e)$$

ここで、 $f_1(\mathbf{m})$, $f_2(\mathbf{n}, \mathbf{m})$, $f_3(\mathbf{x})$, $f_4(\mathbf{n})$ は、各々、生産性効果、土地・床面積消費、通勤混雑、アメニティに関する影響を表す関数であり、 $\mathbf{n} = (n_a)_{a \in \mathcal{A}}$ である。以上より、次の命題が得られる：

命題 1 ゲーム \mathbf{u} は、ポテンシャル関数が式(19)で与えられるポテンシャルゲームである。

ゲーム \mathbf{u} がポテンシャルゲームであることから、その均衡状態は、次の最適化問題の Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件を満たす \mathbf{h}^* の集合と一致する：

$$\max_{\mathbf{h} \in \Delta} f(\mathbf{h}). \quad (20)$$

この事実は、上記の問題の KKT 条件が均衡条件式(15)と一致することから容易に確認できる。

(2) ポテンシャル関数と安定均衡状態

本稿で構築したモデルには正の外部性が考慮されているため、均衡状態が一意に定まるとは限

らない。この均衡状態の非一意性は、式(20)より、ポテンシャル関数 $f(\mathbf{h})$ の形状により確認できる。これは、 $f(\mathbf{h})$ が単峰であれば KKT point が唯一に定まる (i.e., ゲーム \mathbf{u} の均衡状態が一意) 一方で、そうでなければ KKT point が複数存在する (i.e., 均衡状態が一意に定まらない) ためである。この事実と $f_1(\mathbf{m})$ の凸性より、次の命題が得られる：

命題 2 ゲーム \mathbf{u} の均衡状態は、必ずしも一意ではない。

証明 $f_1(\mathbf{m})$ が凸関数であるため、 $f(\mathbf{h})$ は必ずしも凹関数ではなく、凸関数にもなりうる。したがって、 $f(\mathbf{h})$ は必ずしも単峰ではない。

命題 2 より、均衡状態が複数存在し得ることが示された。そこで、均衡選択のために、ゲーム \mathbf{u} の均衡状態の局所的な漸近安定性を調べる。この均衡状態の安定性を調べるには、均衡状態への調整ダイナミクス $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{V}(\mathbf{h})$ を定義する必要がある。ここで、 $\dot{\mathbf{h}}$ は状態 \mathbf{h} の変化速度を表す。本稿では、そのダイナミクスとして、次の2つの条件を満たす admissible dynamics を考える：

[PC] $\mathbf{V}(\mathbf{h}) \neq \mathbf{0}$ のときは常に $\mathbf{V}(\mathbf{h}) \cdot \mathbf{u}(\mathbf{h}) > 0$.

[NS] $\mathbf{V}(\mathbf{h}) = \mathbf{0}$ であれば、 \mathbf{h} はゲーム \mathbf{u} の均衡状態。条件[PC]は、positive correlation と呼ばれ、調整ダイナミクスと利得（効用）関数が正の相関を持つことを要求している。また、[NS]は、Nash stationarity と呼ばれる条件であり、調整ダイナミクスの定常状態がゲーム \mathbf{u} の均衡状態と一致することを要求している。なお、この admissible dynamics は、best response dynamics, Brown-von Neumann-Nash dynamics, projection dynamics を特殊ケースに含んでいる⁵⁾。

ポテンシャルゲーム \mathbf{u} の均衡状態の安定性は、Sandholm³⁾で示されているように、次の特性を持つ：

ポテンシャルゲーム \mathbf{u} において、ポテンシャル関数 $f(\mathbf{h})$ を局所的に最大化する均衡状態 \mathbf{h}^s は、admissible dynamics の下で（局所的に）安定である。それ以外の均衡状態 \mathbf{h}^u は、不安定である。

したがって、ゲーム \mathbf{u} の均衡状態の安定性は、ポテンシャル関数の形状のみから確認できることが分かる。

ポテンシャル関数が有する性質と admissible dynamics の性質[PC]より、状態 \mathbf{h}^0 を初期状態とした際に実現する安定均衡状態 \mathbf{h}^s は、ポテンシャル関数を局所的に最大化する \mathbf{h} を \mathbf{h}^0 から探査することで得られる。すなわち、最適化問題の式(20)を局所的に解くだけで容易に安定均衡状態を得ることができる。そこで、次節以降では、その性

質を利用した安定均衡状態の数値解析手法を提案する。

(3) 安定均衡状態の数値解析手法

a) ポテンシャル最大化問題の解法

本節では、ポテンシャル最大化問題の式(20)を用いて、初期状態 \mathbf{h}^0 から創発する安定均衡状態を導出する方法を提案する。素朴には、このポテンシャル最大化問題を局所的に解くことが考えられる。しかし、2.1 (3)節で示したとおり、本モデルには日々、変更することが容易な“通勤経路選択”と、それが困難な“居住地・就業地選択”の両方が考えられている。すなわち、状態の調整に必要な期間が異なる選択行動が存在する。そこで、本稿では、状態の調整に要する期間の違いを反映した、数値解析アルゴリズムを提案する。

本研究で提案する数値解析アルゴリズムは、以下に示すとおりである：

step1: 初期状態 $\mathbf{h}^{(0)}$ を与えて、繰り返し計算回数を $n = 1$ とする。

- $\mathbf{h}^{(0)}$ から、居住地・就業地別の家計数 $\mathbf{H}^{(0)} = (H_{ab}^{(0)})$ を求める。

$$H_{ab}^{(0)} = \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^{p(0)}. \quad (21)$$

step2: 条件式(16a), (16b)を満たす状態における通勤費用 $\mathbf{c}^{*(n)} = (c_{ab}^{p*(n)})_{a,b \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P}_{ab}}$ を導出する。

- $\mathbf{H}^{(n-1)}$ を与件として、以下の最適化問題を解く。

$$\min_{\mathbf{h}} f_3(\mathbf{x}) \quad \text{s.t.} \quad \text{式(16b)}, \mathbf{h} \geq 0. \quad (22)$$

- 得られた $\mathbf{h}^{(n)}$ から $\mathbf{c}^{*(n)}$ を導出する。

step3: 通勤費用 $\mathbf{c}^{*(n)}$ を与件として、 $\mathbf{h}^{(n-1)}$ の改訂方向 $\delta \mathbf{h}^{(n)}$ を求める：

$$\delta \mathbf{h}^{(n)} = \text{proj}_{\Delta} (v(\mathbf{h}^{(n)}, \mathbf{c}^{*(n)}) + \mathbf{h}^{(n)}) - \mathbf{h}^{(n)}, \quad (23a)$$

$$v(\mathbf{h}, \mathbf{c}^*) = (v_{ab}^p(\mathbf{h}, \mathbf{c}^*))_{a,b \in \mathcal{A}, p \in \mathcal{P}_{ab}}, \quad (23b)$$

$$v_{ab}^p(\mathbf{h}, \mathbf{c}^*) = \alpha F_b(\mathbf{m}) + D_b - s^F r_b(n_b, m_b) - s^H r_a(n_a, m_a) - \tau c_{ab}^{p*} + B_a. \quad (23c)$$

ここで、 proj_{Δ} は Δ への射影を表す。

step4: 次の最適化問題からステップサイズ α を求める。

$$\max_{\alpha \in [0,1]} f(\mathbf{h}^{(n-1)} + \alpha \delta \mathbf{h}^{(n)}). \quad (24)$$

step5: 解を改訂 ($\mathbf{h}^{(n)} = \mathbf{h}^{(n-1)} + \alpha \delta \mathbf{h}^{(n)}$) して、収束判定を行う。

- ϵ を外生的に与え、 $\|\mathbf{h}^{(n-1)} - \mathbf{h}^{(n)}\| < \epsilon$ であれば計算終了。
- そうでなければ、 $n = n + 1$, $H_{ab}^{(n-1)} = \sum_{p \in \mathcal{P}_{ab}} h_{ab}^{p(n-1)}$ として step2 に戻る。

このアルゴリズムの各 step は、次の計算を実施

していることと対応する：

step1: 初期状態を与える。

step2: 居住地・就業地を与件として、経路選択に関する均衡条件式(16a), (16b)を満たす通勤費用 \mathbf{c}^* を求める。

step3: 通勤費用 \mathbf{c}^* を与件として、居住地・就業地・経路別の家計数の変化方向を求める。

step4: ポテンシャル関数を用いて、居住地・就業地・経路別の家計数の変化量を決める。

step5: 収束判定。

この計算手順に従えば、初期状態 $\mathbf{h}^{(0)}$ からポテンシャル関数を局所的に最大化する状態を求めることができる。したがって、この数値計算アルゴリズムを採用すれば、(admissible dynamics の下で) 初期状態から創発する安定均衡状態を得ることができる。

b) 複雑な交通ネットワークに対応するための数値計算アルゴリズムの改良

前項で示した数値計算アルゴリズムでは、 \mathbf{h} を変数として解析を行う。これは、安定均衡状態における \mathbf{h}^* を導出できる一方で、全ての立地点 a, b 間の経路集合 \mathcal{P}_{ab} を列挙する必要が生じることを意味する。しかし、全ての立地点間の経路を列挙することは、一次元空間などの極端に単純化された空間を考えない限り、ほぼ不可能である。したがって、前項のアルゴリズムは、実都市を対象とした解析には利用できない。

そこで、本項では、複雑な交通ネットワークを対象とした場合においても、安定的な均衡状態における居住地・就業地別の家計数 \mathbf{H}^* とリンク交通量 \mathbf{x}^* を得るためのアルゴリズムを提案する。より具体的には、 \mathbf{h} を \mathbf{H} と \mathbf{x} に分解して、安定均衡状態を導出することを考える。ここで注目するのは、“解析に経路集合 \mathcal{P}_{ab} が必要となるのは、アルゴリズムの step2 のみ”であり、“step2 は標準的な利用者均衡配分（経路選択に関する均衡問題）と捉えられる”という点である。標準的な交通均衡配分は、経路列挙が不要となる形に問題を変換可能であり、複雑な交通ネットワークへの対応方法が確立している⁶⁾。この性質を利用すると、前項のアルゴリズムを修正した以下の手順で初期状態から創発する安定均衡状態の $\mathbf{H}^*, \mathbf{x}^*$ を導出することができる：

step1: 初期状態 $\mathbf{H}^{(0)}$, $\mathbf{x}^{(0)}$ を与えて、繰り返し計算回数を $n = 1$ とする。

step2: $\mathbf{H}^{(n-1)}$ を与件として、式(22)と等価な

以下の問題を解くことで、立地点 a, b 間の最短経路の通勤費用 $\hat{c}^{*(n)} = (\hat{c}_{ab}^{*(n)})_{a,b \in \mathcal{A}}$, $\mathbf{x}^{*(n)}$ を導出する.

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}} f_3(\mathbf{x}), & (25a) \\ \text{s. t. } & \sum_j x_{ji}^a - \sum_j x_{ij}^a \\ & = \begin{cases} -n_a = -\sum_b h_{ab} & \text{if } i = i_a, \\ h_{ab} & \text{if } i = i_b | b \in \mathcal{A}, \\ 0 & \text{if otherwise,} \end{cases} \\ & \forall a \in \mathcal{A}, \forall i \in \mathcal{N}. & (25b) \end{aligned}$$

step3: 最短経路の通勤費用 $\hat{c}^{*(n)}$ を与件として、 $\mathbf{H}^{(n-1)}$ の改訂方向 $\delta\mathbf{H}^{(n)}$ を求める:

$$\delta\mathbf{H}^{(n)} = \text{proj}_{\Delta}(\hat{v}(\mathbf{H}^{(n)}, \hat{c}^{*(n)}) + \mathbf{H}^{(n)}) - \mathbf{H}^{(n)}, \quad (26a)$$

$$\hat{v}(\mathbf{H}, \hat{c}^*) = (\hat{v}_{ab}(\mathbf{H}, \hat{c}^*))_{a,b \in \mathcal{A}}, \quad (26b)$$

$$\hat{v}_{ab}(\mathbf{H}, \hat{c}^*) = D_b - s^F r_b(n_b, m_b) - s^H r_a(n_a, m_a) - \tau \hat{c}_{ab}^* + B_a. \quad (26c)$$

ここで、 $\hat{\Delta} \equiv \{\mathbf{H} | \mathbf{H} \cdot \mathbf{1} = \mathbf{H}, \mathbf{H} \geq \mathbf{0}\}$ である.

step4: 次の最適化問題からステップサイズ α を求める.

$$\max_{\alpha \in [0,1]} \hat{f}((1-\alpha)\mathbf{H}^{(n-1)} + \alpha\hat{\mathbf{H}}^{(n)}, (1-\alpha)\mathbf{x}^{(n-1)} + \alpha\hat{\mathbf{x}}^{(n)}) \quad (27)$$

ここで、 $\hat{f}(\mathbf{H}, \mathbf{x}) = f_1(\mathbf{m}) - f_2(\mathbf{n}, \mathbf{m}) - f_3(\mathbf{x}) + f_4(\mathbf{n})$, $\hat{\mathbf{H}}^{(n)} = (\hat{H}_{ab}^{(n)})_{a,b \in \mathcal{A}} = \mathbf{H}^{(n-1)} + \delta\mathbf{H}^{(n)}$ である. また、 $\hat{\mathbf{x}}^{(n)}$ は、 $\mathbf{x}^{(n)}$ を与件としたときの立地点間の最短経路の1つに交通需要 $\hat{H}_{ab}^{(n)}$ の全てを利用させる場合のリンク交通量である.

step5: 解を改訂 ($\mathbf{H}^{(n)} = \mathbf{H}^{(n-1)} + \alpha\delta\mathbf{H}^{(n)}$) して、収束判定を行う.

- ϵ を外生的に与え、 $\|\mathbf{H}^{(n-1)} - \mathbf{H}^{(n)}\| + \|\mathbf{x}^{(n-1)} - \mathbf{x}^{(n)}\| < \epsilon$ であれば計算終了.
- そうでなければ、 $n = n + 1$ として step2に戻る.

なお、このアルゴリズムは、経路選択に関する均衡条件の式(16a), 式(16b)を step2で、居住地・就業地に関する均衡条件の式(16c), 式(16d)を step3, step4で解いていることに対応している. 以降で実施する数値計算では、step2の解析に機械学習でも使用される Coordinate Descent 法を適用した. その具体的なアルゴリズムは、杉浦⁷⁾参照.

2.3 反実仮想実験のための準備

本節では、実都市を対象とした反実仮想実験を実施するための準備を行う. そのために、まず、

Ahlfeldt et al.²⁾, Monte et al.⁸⁾, Allen and Arkolakis⁹⁾などと同様、家計の居住地・就業地選択に関する異質性を導入する. これにより、モデルの本質的な特徴を失うことなく、反実仮想実験を行いやすくする. これは、2.1節で示したモデルには、データを用いたパラメータ推定が困難であることなどの、反実仮想実験を行ううえでの課題があるためである. そして、異質性の導入下で、モデルのパラメータを設定するための方法を提示する.

(1) 家計の異質性の導入

本節では、反実仮想実験を容易にするために、家計の居住地・就業地選択に異質性を導入する^{注5)}. 具体的には、居住地 $a \in \mathcal{A}$, 就業地 $b \in \mathcal{A}$, 経路 $p \in \mathcal{P}_{ab}$ の家計 k の効用 $u_{ab}^p(k)$ を以下で与える:

$$u_{ab}^p(k) = u_{ab}^p + \varepsilon_{ab}(k). \quad (28)$$

ここで、 $\varepsilon_{ab}(k)$ は家計 $k \in [0, H_{ab}]$ 固有の効用であり、任意の $a, b \in \mathcal{A}$ に対して独立で同一の Gumbel 分布からの標本とみなせると仮定する.

このとき、均衡条件は、経路選択に関する条件の式(16a), 式(16b)と居住地・就業地に関する以下の条件で表される:

$$H_{ab} = \frac{\exp[\theta v_{ab}]}{\sum_{c \in \mathcal{A}} \sum_{d \in \mathcal{A}} \exp[\theta v_{cd}]} H \quad \forall a, b \in \mathcal{A}. \quad (29)$$

ここで、 θ は家計の異質性の大きさを表すスケールパラメータである.

異質性を導入した場合においても、前節で示した数値解析手法はほとんどそのまま適用できる. 相違点は、ポテンシャル関数 $f(\mathbf{h})$, $\hat{f}(\mathbf{H}, \mathbf{x})$ にエントロピー項 $-\frac{1}{\theta} \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{b \in \mathcal{A}} H_{ab} \ln H_{ab}$ を加える点のみである^{注6)}. そこで、以降の解析は、家計に異質性を導入したモデルを採用する.

(2) パラメータ設定方法

本節では本モデルの均衡状態を実データと整合させるために、Ahlfeldt et al.²⁾に倣ったパラメータ設定方法を提示する. このパラメータは、家計に対する企業(就業者一人当たり)の土地使用比率 s^F/s^H , 各立地点の家計数 n_a ・企業数 m_a ・土地面積 K_a ・土地の地代 R_a ・賃金 w_a , 居住地・就業地別の家計数 H_{ab} ・最短経路の交通費用 c_{ab}^* に関するデータが得られているという前提で設定する. その手順は以下の Step1-6 に示すとおりである.

a) STEP1: デベロッパの土地投入割合 $1 - \mu$, 外部性の距離減衰パラメータ ρ

床面積の建設費用のうち土地に必要な費用の割合 $1 - \mu$ は、Ahlfeldt et al.²⁾と同様に、既往研究で推定された値 0.25 とする.

b) STEP2 : 床面積消費量 s^H, s^F

家計の単位あたり床面積 s^H および企業の単位あたり床面積 s^F の設定を行う。そのために、式(13)が以下のように書き換えられることを利用して、 $(s^H)^{1/\mu}$ を単回帰分析により推定する:

$$R_a = \frac{1-\mu}{\mu} (s^H)^{\frac{1}{\mu}} \left\{ \frac{n_a + (s^F/s^H)m_a}{K_a} \right\}^{\frac{1}{\mu}} - C. \quad (32)$$

そして、推定された $(s^H)^{1/\mu}$ に加えて、 μ 、 s^F/s^H から s^H 、 s^F を求める。

c) STEP3 : 交通費用に関するパラメータ $\theta\tau$

交通費用に関するパラメータ $\theta\tau$ を推定するために、均衡条件式(29)を利用する。具体的には、式(29)の両辺に自然対数を取り、居住地に関する変数と就業地に関する変数をそれぞれダミー変数に置き換える:

$$\ln[H_{ab}] = -\theta\tau c_{ab}^* + F_a + F_b + \text{const}. \quad (33)$$

ここで、 F_a は居住地 a に関するダミー変数、 F_b は就業地 b に関するダミー変数、 const は定数項を表す。そして、重回帰分析により $\theta\tau$ を推定する。

d) STEP4 : アメニティ水準に関する項 $\theta(B_a - r_a s^H)$ 、賃金項 θw_b

アメニティ水準に関する項 $\theta(B_a - r_a s^H)$ および賃金項 θw_b を算出するために、均衡条件式(29)を以下のように変形する:

$$n_a = \sum_{b \in \mathcal{A}} \frac{\exp[\theta(B_a - r_a s^H) - \theta\tau c_{ab}^*]}{\sum_{d \in \mathcal{A}} \exp[\theta(B_d - r_d s^H) - \theta\tau c_{db}^*]} m_b. \quad (34a)$$

$$m_b = \sum_{a \in \mathcal{A}} \frac{\exp[\theta w_b - \theta\tau c_{ab}^*]}{\sum_{d \in \mathcal{A}} \exp[\theta w_d - \theta\tau c_{ad}^*]} n_a. \quad (34b)$$

この非線形方程式を解くことで、 $\theta(B_a - r_a s^H)$ 、 θw_b を得ることができる。ただし、この非線形連立方程式は、自由度が1足りないため解が一意的に定まらない。そのため、何らかの基準化を行う必要がある点に注意が必要である。

e) STEP5 : スケールパラメータ θ

スケールパラメータ θ は、モデルの w_b の分散がデータと一致するように設定する。具体的には、STEP4で得られる θw_b の分散 σ_{model}^2 とデータから得られる w_b の分散 σ_{data}^2 を外生値として、 θ を以下で与える:

$$\theta = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{model}}^2}{\sigma_{\text{data}}^2}}. \quad (35)$$

f) STEP6 : アメニティ水準 B_a 、生産性 Prod_b

居住地のアメニティ水準 B_a と生産性 D_b は、これまでに得られた変数・パラメータから求める。具体的には次の関係を利用する:

$$B_a = \frac{\theta(B_a - r_a s^H)}{\theta} + r_a s^H, \quad (36a)$$

$$D_b = \frac{\theta w_b}{\theta} + r_b s^F. \quad (36b)$$

ここで、 r_a の値は式(12)から得られる。

次に、得られた B_a 、 D_b を用いて、アメニティ水準および生産性効果に関する変数選択とパラメータ推定を行う。ここでは、空間的自己相関に対処するために、固有ベクトル空間フィルタリング¹¹⁾を採用する。このアプローチは、地点間距離の逆数を要素に持つ空間重み行列の固有ベクトル \mathbf{Z} を説明変数に導入するだけで空間的自己相関に対処できる。それゆえ、詳細・広域な都市内空間を対象とした分析であっても、容易にパラメータ推定を実施できるという利点を持つ。

なお、本稿では B_a 、 D_b を次で与えて、 κ^{AME} 、 κ^{PRO} を推定する:

$$B_a = \kappa^{\text{AME}} \mathbf{X}_a^{\text{AME}} + \mathbf{v}_a^{\text{AME}} \mathbf{Z}_a + \text{const}^{\text{AME}} + \delta_a^{\text{AME}}, \quad (37a)$$

$$D_b = \kappa^{\text{PRO}} \cdot \mathbf{X}_b^{\text{PRO}} + \mathbf{v}_b^{\text{PRO}} \mathbf{Z}_b + \text{const}^{\text{PRO}} + \delta_b^{\text{PRO}}. \quad (37b)$$

ここで、 $\mathbf{X}_a^{\text{AME}}$ は立地点 a のアメニティ水準に関する変数 (e.g., 地理的条件, 土地利用規制), κ^{AME} はそのパラメータ, $\mathbf{X}_b^{\text{PRO}}$ は立地点 b の生産性効果に関する変数, κ^{PRO} はそのパラメータ, $\text{const}^{\text{AME}}$, $\text{const}^{\text{PRO}}$ は定数項, δ_a^{AME} , δ_b^{PRO} は残差である。また、説明変数に加える空間重み行列の固有ベクトル \mathbf{Z} は、Tiefelsdorf and Griffith¹²⁾に基づき、正の固有値に対応した固有ベクトルのみを用いる。これは、これらの固有ベクトルが正の空間相関を捉えることが知られているためである。用意した説明変数では観測されない効果 δ_a^{AME} , δ_b^{PRO} は、パラメータ推定結果と式(37)で計算される値との差 (i.e., 残差) を与える。この観測されない効果を明示的に考えて B_a 、 D_b を設定することで、モデルの初期均衡状態がデータと完全に整合することが保証される。

2.4 実都市を対象とした反実仮想実験

(1) 分析対象圏域および使用データ

本稿では、金沢都市雇用圏を分析対象とする。具体的には、図-2.2に示す金沢都市雇用圏を国勢調査の調査区である小地域に分割した空間を扱う。そして、ネットワークはDRMの全道路リンクデータに基づき、金沢都市雇用圏では全道路種別、その隣接市町村では高速道路自動車道・都市高速道路・一般国道・主要地方道のみを扱う。この場合、立地点数は1,656・道路リンク数は117,175である。ここでは、各リンクの交通費用 $t_{ij}(x)$ を以下で与える:

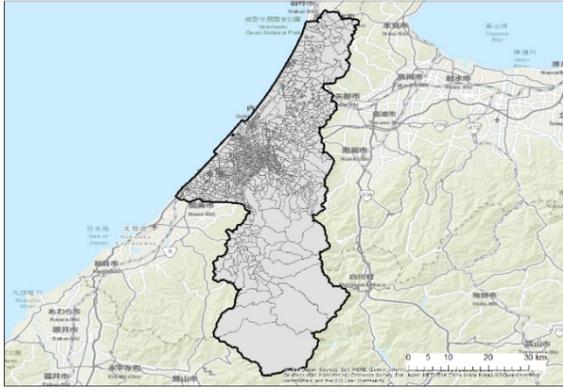


図-2.2 対象圏域

$$t_{ij}(x) = 1 + t_0 \left(\frac{x}{s_{ij}} \right)^\beta \quad (38)$$

ここで、 s_{ij} はリンク ij の容量、 t_0 、 β はパラメータであり、前節と同様、土木学会¹³⁾の標準値を採用する。

2.3 (3)節で説明したパラメータ設定方法に使用するデータの出典は次に示すとおりである：

立地点・就業地別の家計数 H_{ab} ： 道路交通センサス OD 交通量 (2015 年)，国勢調査就業者数 (2015 年)，経済センサス従業者数 (2014 年)

居住地別家計数 n_a ： 国勢調査就業者数 (2015 年)

就業地別家計数 m_b ： 経済センサス従業者数 (2014 年)

地代 R_a ： 公示地価 (2015 年)，10 年国債利回り (2015 年)

家計に対する企業の土地使用比率 s^F/s^H ： 建築物ストック統計床面積 (2013 年)

土地面積 K_a ： 国勢調査土地面積 (2015 年)

地域間の距離 d_{ab} ，道路容量 s_{ij} ： DRM (2019 年)，国勢調査境界データ (2015 年)

賃金 w_a ： 賃金構造基本統計調査 所得等

アメニティ水準・生産性効果に関する変数 X_a^{AME} ， X_b^{PRO} ： 国土数値情報道路密度メッシュデータ (2010 年)，鉄道時系列 (2015 年)，高速道路時系列 (2015 年)，用途地域 (2019 年)，上水道関連施設 (2010 年)，国勢調査境界データ (2015 年)

なお、データは 2015 年を基準として収集できるデータのうち最も近い時点のものを使用した。

居住地・就業地毎の家計数 H_{ab} は、該当するデータを得ることが困難であったため、道路交通センサスの B ゾーン単位の OD 交通量を、国勢調査の就業者数および経済センサスの従業者数により設定した按分値を用いて按分することで設定した。地代は、公示地価に 10 年国債利回りを乗じた値を用いた。家計に対する企業の土地使用比率 s^F/s^H は、単位あたりの就業者数に対する延床面積と、単位当たりの従業者に対する延床面積の比で算出した。データは、建築物ストック統計から得

られる住宅用・法人用の延床面積と国勢調査・経済センサスで得られる就業者・従業者数を用いた。アメニティ水準・生産性に関する変数候補は、次の 8 種類とした：道路密度 (km/km^2)・最寄り駅までの距離 (km)・最寄り IC までの距離 (km)・給水区域ダミー・地区面積 (km^2)・住宅系用途地域面積 (km^2)・商業系用途地域面積 (km^2)・工業系用途地域面積 (km^2)。

(2) パラメータ設定の結果

アメニティ水準，生産性効果に関する変数は、R 言語 MASS パッケージの stepAIC 関数を用いて、ステップワイズ法により AIC 基準で変数選択を行った。パラメータの設定値は表-2.1 に示すとおりである。

パラメータ設定の際に実施した Step2, Step3 の回帰分析では、いずれの変数も有意に推定された。アメニティ水準に関する変数選択では、道路密度・給水区域ダミー・地区面積・住宅系用途地域面積・商業系用途地域面積が採用された。これら全ての変数において、符号が直観と一致することが確認された。生産性に関する変数選択では、最寄り駅までの距離・給水区域ダミー・地区面積・住居系用途地域面積・商業系用途地域面積・工業系用途地域面積が採用された。

表-2.1 パラメータ設定値

項目	設定値	t 値
s^H	3.312×10^1	—
s^F	1.422×10^1	—
θ	8.081×10^{-3}	—
τ	5.043×10^0	—
κ^{AME} (道路密度)	1.818×10^7	6.3925
κ^{AME} (給水区域ダミー)	7.821×10^2	14.379
κ^{AME} (地区面積)	5.636×10^{-6}	2.4492
κ^{AME} (住居系用途地域面積)	5.709×10^{-4}	4.0968
κ^{AME} (商業系用途地域面積)	2.962×10^{-3}	4.3911
κ^{UNI} (最寄り駅までの距離)	-1.913×10^1	-8.3013
κ^{UNI} (給水区域ダミー)	2.510×10^2	11.082
κ^{UNI} (地区面積)	9.909×10^{-6}	8.7322
κ^{UNI} (住居系用途地域面積)	5.272×10^{-4}	9.1496
κ^{UNI} (商業系用途地域面積)	1.693×10^{-3}	5.7255
κ^{UNI} (工業系用途地域面積)	7.654×10^{-4}	12.464
α	4.260×10^{-2}	9.0725

系用途地域面積が採用された。ここで、用途地域面積が全て選択されていることから、生産性には用途地域（市街化区域）であることが影響していることが分かる。また、こちらもアメニティ水準と同様、全ての変数において、符号が直観と一致していた。

本稿で示したパラメータ設定の手順では、初期均衡状態が安定になることを保証できない。初期均衡状態の安定性を保証するためのパラメータ設定手法は、未だ確立した手法が存在しないことから、今後の重要な研究課題である。なお、次節で実施した数値解析を通じて、本節で設定したパラメータの下では、初期均衡状態は安定均衡状態であることは確認済みである。

(3) 反実仮想実験

本節(1)で示したように、反実仮想実験の対象は、立地点数 $A = 1,656$ 、リンク数 $L = 117,175$ の地域である。このため、金沢都市雇用圏($H = 371,405$)を対象とした場合でも、比較的大規模なモデルの解析が必要となる。そこで、本節は、2.2節で示した数値解析手法により、現実的な計算時間で解析ができるかを確認することを主な目的とする。

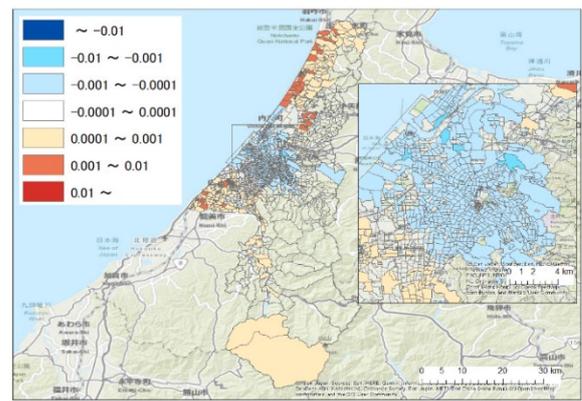
数値解析では、交通容量 s_{ij} を一律5%増加させた場合(e.g., 自動運転車の普及)の影響を調べるために実施した。Pythonを利用した数値計算にかかった時間は10分程度であり、2.2節で提案した(素朴な)アルゴリズムであっても、十分な計算速度であることが確認できた。また、 s_{ij} の変化前後の安定均衡状態における居住地別の家計数 n 、就業地別の家計数 m 、リンク交通量 x の変化は図-2.3に示すとおりである。ここで、各立地点の家計数 n_a 、 m_a の変化 δn_a 、 δm_a は、以下の値を用いた:

$$\delta n_a = \frac{n_a^B - n_a^A}{H} \times 100, \quad (39)$$

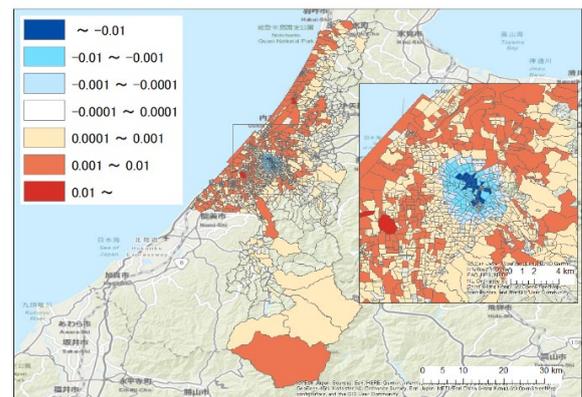
$$\delta m_a = \frac{m_a^B - m_a^A}{H} \times 100. \quad (40)$$

ここで、上付き添え字 A, B は、パラメータ変化前後の安定均衡状態であることを表す。また、リンク交通量 x の変化は、その割合 $(x_{ij}^B - x_{ij}^A)/x_{ij}^A$ を图示した。その結果から、 s_{ij} の増加に伴い、居住地・就業地・リンク交通量が大きく変化していることから、“均衡状態の変化が小さいために計算時間が短縮された”という訳ではないことも確認できた。

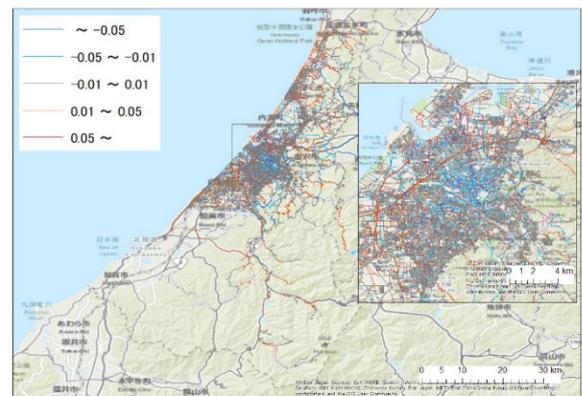
図-2.3から確認できる人口分布変化は、日本の都市内部の人口分布の長期的変化に関する実証的知見¹⁴⁾と整合している。具体的には、中心部付近の人口密度低下、郊外部の人口密度上昇が見られた。これは、交通容量が増加することで交通費用の影響が低下し、より遠方からの移動に対する抵抗が弱まったため、混雑を避けて経済活動が分散化したためであると考えられる。



(a) n の変化



(b) m の変化



(c) x の変化

図-2.3 反実仮想実験の結果：
 s_{ij} を一律5%増加させた際の変化

参考文献

- 1) Fujita, M. and Ogawa, H. (1982) “Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations,” *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 12, No. 2, pp. 161–196.
- 2) Ahlfeldt, G. M., Redding, S. J., Sturm, D. M., and Wolf, N. (2015) “The Economics of density: Evidence from the Berlin wall,” *Econometrica*, Vol. 83, No. 6, pp. 2127–2189.
- 3) Sandholm, W. H. (2001) “Potential games with continuous player sets,” *Journal of Economic Theory*, Vol. 97, No. 1,

- pp. 81–108.
- 4) Sandholm, W. H. (2010) *Population Games and Evolutionary Dynamics*, MIT Press.
 - 5) Sandholm, W. H. (2005) “Negative externalities and evolutionary implementation,” *The Review of Economic Studies*, Vol. 72, No. 3, pp. 885–915.
 - 6) 土木学会（編）（1998）交通ネットワークの均衡分析：最新の理論と解法，丸善。
 - 7) 杉浦聡志（2020）“起点別リンク交通量の部分的更新による利用者均衡配分の効率的求解アルゴリズムの提案，” 土木計画学研究・講演集, Vol. 62, 46-08.
 - 8) Monte, F., Redding, S. J., and Rossi-Hansberg, E. (2018) “Commuting, migration, and local employment elasticities,” *American Economic Review*, Vol. 108, No. 12, pp. 3855–3890.
 - 9) Allen, T. and Arkolakis, C. (2022) “The welfare effects of transportation infrastructure improvements,” *The Review of Economic Studies*, Vol. 89, No. 6, pp. 2911–2957.
 - 10) Arzaghi, M. and Henderson, J. V. (2008) “Networking off Madison Avenue,” *Review of Economic Studies*, Vol. 75, No. 4, pp. 1011–1038.
 - 11) Griffith, D. A. (2003) *Spatial Autocorrelation and Spatial Filtering: Gaining Understanding Through Theory and Scientific Visualization*, Springer, pp.247.
 - 12) Tiefelsdorf, M. and Griffith, D. A. (2007) “Semiparametric filtering of spatial autocorrelation: The eigenvector approach,” *Environment and Planning A*, Vol. 39, No. 5, pp. 1193–1221.
 - 13) 土木学会（編）（2003）道路交通需要予測の理論と適用：第 I 編利用者均衡配分の適用に向けて，丸善。
 - 14) Mori, T. and Osawa, M. (2021) “Cities in a world of diminishing transport costs,” arXiv, 2012.12503.

第3章 交通・立地統合モデルによるターミナル整備効果の計測

本章では、表-3.1に示すバスタ整備効果のうち、「周辺道路の混雑解消効果」、「歩行者の利便性向上」、「地域経済活性化」の効果を実測する。具体的には、それぞれの項目での家計・企業の立地変化およびリンク交通量の変化を実測する。なお、「交通機能の向上」の効果は第5章にて計測する。

3.1 金沢でのターミナル整備効果

(1) パラメータ設定

本項では、金沢でのターミナル整備効果を計測するために必要なパラメータを設定する。そのために、分析対象圏域と使用データを明らかにしたうえで、前章で提示したパラメータ推定法に従ってパラメータを設定する。

a) 分析対象圏域および使用データ

金沢でのターミナル整備効果は、金沢都市雇用圏を対象に計測する。具体的には、図-3.1に示す金沢都市雇用圏を国勢調査の調査区である小地域に分割した空間を扱う。つまり、地区数が1,656地区の詳細・広域な実空間を分析対象とする。

対象市町村：金沢都市雇用圏8市町（2005年時点市町村区分：金沢市、かほく市、白山市、野々市町、川北町、津幡町、内灘町、宝達志水町）モデル

前章で説明したパラメータ設定に使用するデータの出典を表-3.2に示す。分析対象圏域におけるこれらのデータを整備し、パラメータ設定に用いる。なお、データは、2015年を基準として収集可

表-3.1 計測対象とするバスタ整備効果および効果シナリオの設定概要

バスタ整備効果	効果項目	参考数値 (事例より)	モデル上の設定			内容
			対象とするモデル			
			交通 モデル	立地 モデル	SCGE モデル	
1.交通機能の向上	①既存路線の運行頻度増加 ②新規路線の開通	①36%増 ②-			○	①運行頻度の増加：3割増 ②乗継→直通
2.周辺道路の混雑解消効果	・前面道路の混雑解消 ・バス停撤去による混雑解消	・-	○			・交通容量の増加
3.歩行者の利便性向上	・乗り換え移動時間短縮 ・待ち時間短縮	・8.5分 ・-		○		・時間短縮をアクセシビリティに反映
4.待合室の機能・快適性向上	(対象外)					
5.防災機能向上	(対象外)					
6.地域経済活性化	・土地の高度利用	・敷地面積に対して5倍			○	・利用可能な土地面積を増加
7.新たな交通サービスの適用	(対象外)					

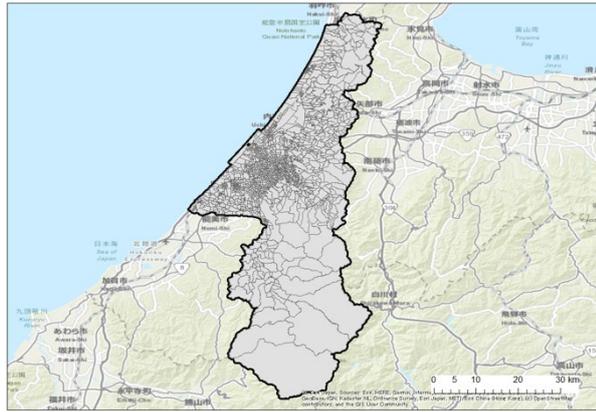


図-3.1 金沢での対象圏域と地域分割

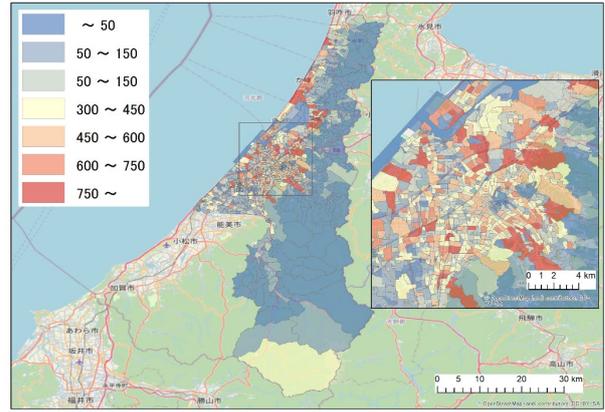


図-3.2 金沢での居住地別家計数

能なデータのうち最も近い時点のものを使用した。

地点 a から地点 i へのOD交通量 trip_{ai} は、道路交通センサスのBゾーン単位のOD交通量を、国勢調査の就業者数および経済センサスの従業者数により設定した按分値を用いて按分することで設定した。

居住地別家計数 n_a は、国勢調査の就業者数とした。立地分布を図-3.2に示す。

就業地別家計数 m_i （企業数）は、経済センサスから設定した対象圏域内の全従業者数に対する当該町丁目の従業者数の比率に総家計数 $\sum_a n_a$ を乗じた値とした。立地分布を図-3.3に示す。

地代は、公示地価に10年国債利回りを乗じた値を用いた。

地域間の移動距離 τ_{ai} は、DRMの基本道路によ

る町丁目間の最短経路の道路延長を用いた。ただし、地区内の移動距離 τ_{aa} は $2/3\sqrt{K_a/\pi}$ とした。また、コミュニケーション外部性における移動距離は、自身が取引先へ移動するコストと取引相手が自社まで移動するコストを考慮するため、次のように設定した。

$$\tau_{ai} = \frac{\tau_{ai} + \tau_{ia}}{2} \quad (3.1)$$

賃金 w は、賃金構造基本統計調査の一般労働者のデータを用いた。

アメニティ水準・立地点固有の効果に関する変数のデータは、国土数値情報のデータを用いた。変数候補としてデータ整備した変数を以下に列挙する。

表-3.2 使用データ

項目	出典
OD交通量 trip_{ai} [人]	道路交通センサス OD交通量 (2015年) 国勢調査 就業者数 (2015年) 経済センサス 従業者数 (2014年)
居住地別家計数 n_a [人]	国勢調査 就業者数 (2015年)
就業地別家計数 m_i [人]	国勢調査 就業者数 (2015年) 経済センサス 従業者数 (2014年)
地代 R_i [万円/ $\text{m}^2 \cdot \text{年}$]	公示地価 (2015年) 10年国債利回り (2015年)
家計に対する企業の土地 使用比率 s^F/s^H	建築物ストック統計 延床面積 (2013年) 国勢調査 就業者数 (2015年) 経済センサス 従業者数 (2014年)
土地面積 K_a [m^2]	国勢調査 土地面積 (2015年)
地域間の距離 τ_{ai} [km]	DRM (2019年) 国勢調査 境界データ (2015年)
賃金 w [万円/年]	賃金構造基本統計調査 所得等 (2015年)
アメニティ水準・立地点固有の 効果に関する変数 $[m^2, km]$	国土数値情報 道路延長メッシュデータ (2010年) 同 鉄道時系列 (2015年) 同 用途地域 (2019年) 同 各種施設位置 (2014年等)

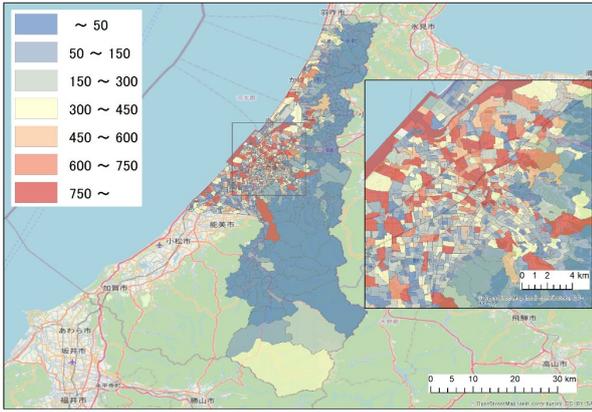


図-3.3 金沢での就業地別家計数

- 道路延長
- 最寄り駅までの距離
- 用途地域面積：住居系
- 用途地域面積：商業系
- 用途地域面積：工業系
- 医療施設アクセシビリティ
- 福祉施設アクセシビリティ
- 小中学校アクセシビリティ
- 公園アクセシビリティ
- 役所アクセシビリティ

ここでのアクセシビリティ ACC_a は, Hansen¹⁾によって提案されている指標を参考に, 次のように定義する:

$$ACC_a = \sum_{r \in L} \text{num}_r \times d_{ar}^{-2.35}. \quad (3.2)$$

ここで, num_r は立地点 r に立地している施設数, d_{ar} は立地点 a から立地点 r までのバス利用での所要時間である. d_{ar} は次のように算出する:

$$d_{ar} = \frac{\text{dist}_{ar}^{\text{walk}}}{\text{speed}^{\text{walk}}} + \frac{\text{dist}_{ar}^{\text{bus}}}{\text{speed}^{\text{bus}}} + \text{time} \times \text{count}_{ar}. \quad (3.3)$$

ここで, $\text{dist}_{ar}^{\text{walk}}$ は起点 a から終点 r までの総歩行距離, $\text{speed}^{\text{walk}}$ は歩行速度 72m/min (日本建築学会²⁾), $\text{dist}_{ar}^{\text{bus}}$ は利用するバスルートの総延長, $\text{speed}^{\text{bus}}$ はバスの走行速度 250m/min (Vunchic³⁾), time は待ち時間 8 分 (Hansen¹⁾), count_{ar} は乗換回数である. このアクセシビリティを用いることで, 公共交通の利便性 (アクセシビリティ) の向上による効果を計測することができる.

b) パラメータ設定の結果

パラメータ設定の与条件

アメニティ水準, 生産性に関する項の変数 $\mathbf{x}_a^{\text{AME}}, \mathbf{x}_i^{\text{UNI}}$ は, R 言語の MASS パッケージの stepAIC 関数を用いて, ステップワイズ法により AIC 基準で変数選択を行った.

表-3.3 金沢でのパラメータ設定値

項目	設定値	t 値
$-C$	6.188.E-03	2.504
$(s^H)^{1/\mu}$	1.064.E+02	14.95
s^F	1.422.E+01	—
s^H	3.312.E+01	—
const	1.821.E+00	74.04
$-\theta t$	-4.070.E-02	-640.2
θ	8.083.E-03	—
t	5.036.E+00	—
κ^{AME} (道路延長)	2.580.E-01	6.504
κ^{AME} (住居系面積)	3.269.E-02	5.831
κ^{AME} (商業系面積)	1.386.E-02	2.045
κ^{AME} (工業系面積)	-1.263.E-02	-2.423
κ^{AME} (医療施設 ACC)	9.238.E-02	2.877
κ^{AME} (公園 ACC)	9.874.E-02	3.271
κ^{UNI} (道路延長)	1.290.E-01	10.307
κ^{UNI} (最寄り駅距離)	-2.595.E-02	-2.887
κ^{UNI} (工業系面積)	2.902.E-03	1.679
κ^{UNI} (医療施設 ACC)	3.033.E-02	5.036
κ^{UNI} (役所 ACC)	3.090.E-02	3.627

パラメータ設定の結果

パラメータの設定値は表-3.3 に示すとおりである.

地代パラメータ $(s^H)^{1/\mu}$, C はともに有意に推定された. このうち, C は負の符号で推定された. よって, C は土地開発に伴う単位面積当たりの機会収入と解釈できる.

通勤費用項 θt は, 有意に推定され, 符号条件に合った結果を得た.

アメニティ水準に関する変数のパラメータ κ^{AME} では, 道路延長, 住宅系用途地域面積, 商業系用途地域面積, 工業系用途地域面積, 医療施設までのアクセシビリティ, 公園までのアクセシビリティが採用された. これら全ての変数において, 符号が直観と一致する結果を得た.

生産性に関する変数のパラメータ κ^{UNI} では, 道路延長, 最寄り駅までの距離, 工業系用途地域面積, 医療施設までのアクセシビリティ, 役所までのアクセシビリティが採用された. こちらもアメニティ水準と同様に, 全ての変数において, 符号が直観と一致する結果を得た.

以上より, 提示した設定方法と整備したデータを用いて, 次項の金沢でのターミナル整備効果の計測に必要なパラメータを設定した.

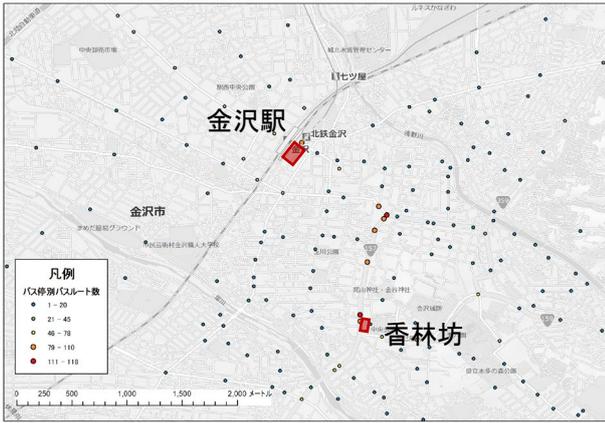


図-3.4 金沢都市雇用圏での想定する公共交通ターミナルの位置

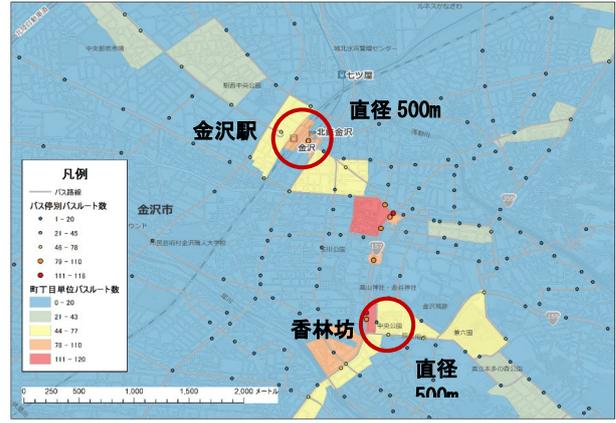


図-3.7 香林坊での乗り換え可能なバス停の設定

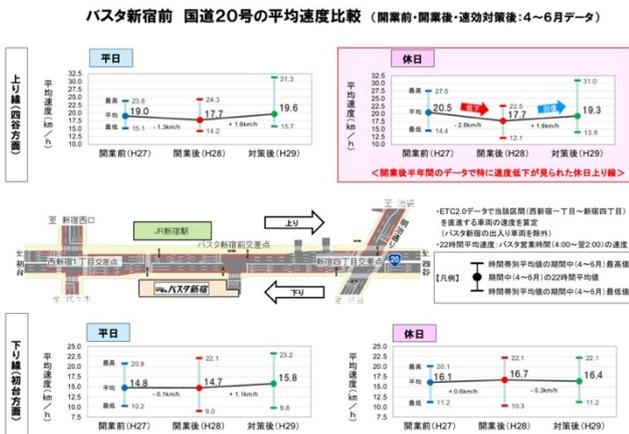


図-3.5 金沢での交通容量増加の対象となる道路

前述の「周辺道路の混雑解消効果」、「歩行者の利便性向上」、「地域経済活性化」の3項目での各立地点における家計数および企業数のシェア変化とリンク交通量の変化率を計測する。家計数のシェア変化は $(n_a^\omega - n_a^*)/N \times 100$ で表し、企業数のシェア変化は $(m_i^\omega - m_i^*)/N \times 100$ で表す。ここで、上付き添字*は基準均衡状態、 ω は通勤費用変化後の均衡状態である。また、リンク交通量 x の変化は、その割合 $(x_{ij}^\omega - x_{ij}^*)/x_{ij}^*$ を図示した。

a) 周辺道路の混雑解消効果

ここでは、公共交通ターミナルが整備されることにより、ターミナルの前面道路や集約されるバス停が存在する周辺道路で、交通混雑が解消することを想定し、その効果を計測する。



※前面道路の混雑状況を西新宿1丁目交差点～新宿4丁目交差点間（およそ500m）で確認している。

図-3.6 バスタ新宿での前面道路（国道20号）の影響把握

(2) 整備効果の計測

整備効果を計測するにあたり、公共交通ターミナルの位置は、図-3.4のとおり金沢駅周辺と香林坊周辺の2ケースを想定する。各ケースについて、

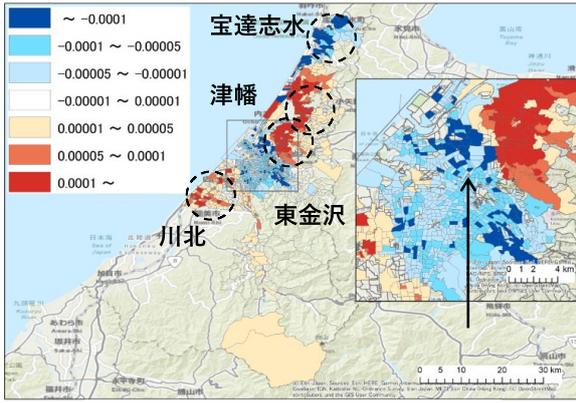
計測の前提条件

図-3.5に示す道路の混雑が解消すると仮定して交通容量を増加させる。具体的には、道路交通センサスの修正係数のうち、バス停やタクシー乗り場による影響の修正係数0.65を用いて、該当する道路の交通容量に1/0.65を乗じることで設定する。ここで、対象とする道路の範囲は図3.5に示すとおりとした。範囲は、事例を参考（例えば、図-3.6）に、ターミナル整備位置に隣接する道路の約500mの範囲を対象とした。加えて、香林坊では、データ整備時に設定した乗り換え可能な範囲に含まれるバス停（図3.7）が、バスターミナル整備により集約されると仮定し、そのバス停に隣接する道路も交通容量を増加させる対象とした。

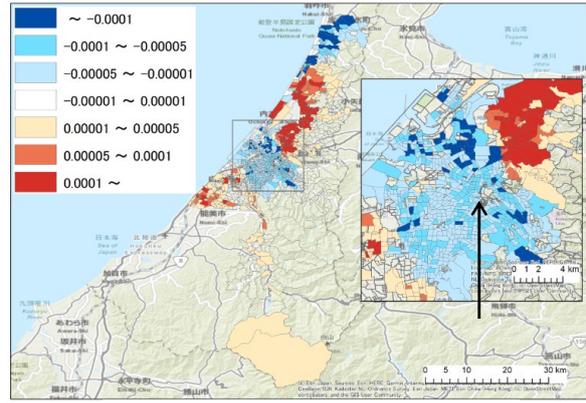
計測結果

計測結果を図-3.8, 図-3.9, 図-3.10に示す。

金沢駅周辺でのターミナル整備を想定した場合、家計は金沢駅周辺の中心市街地や宝達志水町で減少する一方で、東金沢駅周辺・津幡町・川北町

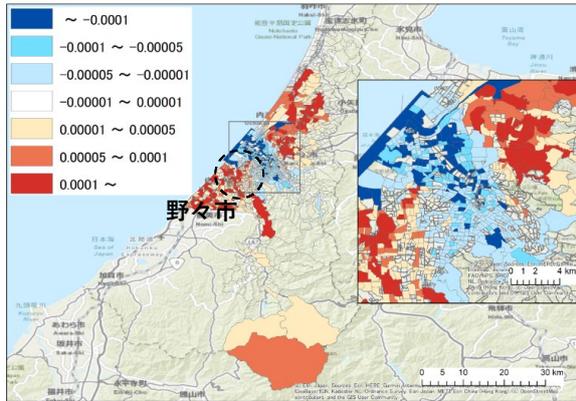


a) 金沢駅周辺を想定した場合

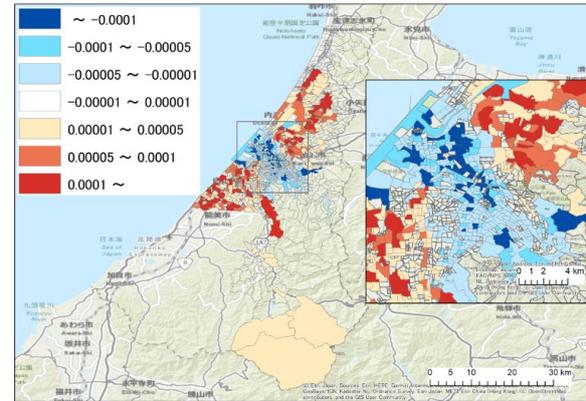


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.8 金沢での周辺道路の混雑解消効果：就業地別家計数のシェア変化

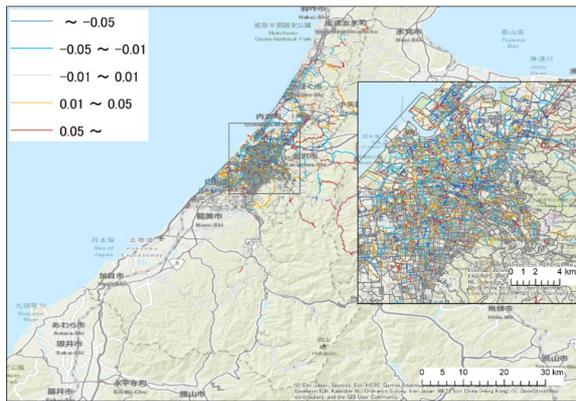


a) 金沢駅周辺を想定した場合

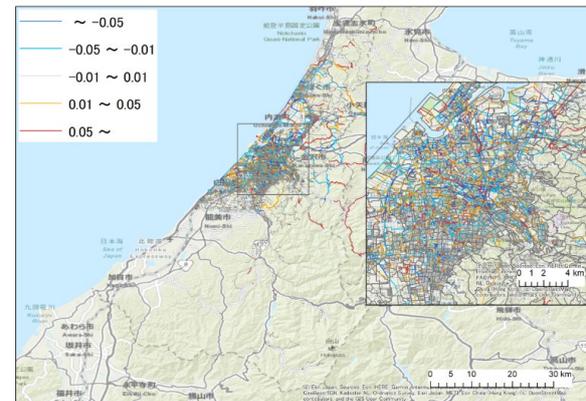


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.9 金沢での周辺道路の混雑解消効果：就業地別家計数（企業数）のシェア変化



a) 金沢駅周辺を想定した場合



b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.10 金沢での周辺道路の混雑解消効果：各リンクの交通量変化

で増加した。企業は、家計と共通の傾向に加えて、野々市市で増加傾向となっており、家計と比べて、やや市街地寄りの地区で増加が見られた。リンク交通量の変化では、交通容量増の対象道路に着目すると、リンク交通量の変化率は増加（平均：0.038，最大：0.053，最小：0.021）した。

上記の結果のうち、家計や企業の立地が中心市街地で減少し、津幡町や川北町といった郊外で増加したのは、交通混雑が解消されることで、長距離移動に対する抵抗が下がり、郊外へ立地することのインセンティブが高まったためと考えられる。また、交通容量増の道路でリンク交通量が増

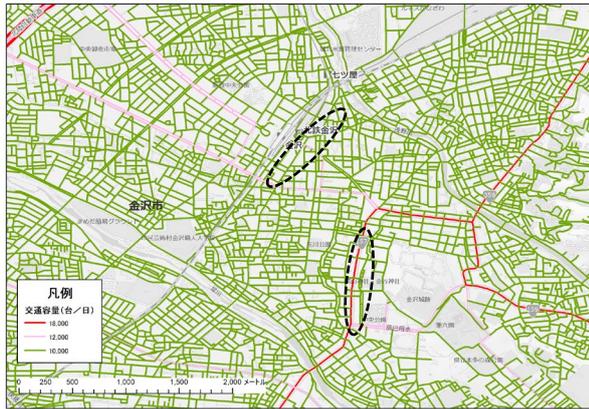


図-3.11 現状の交通容量

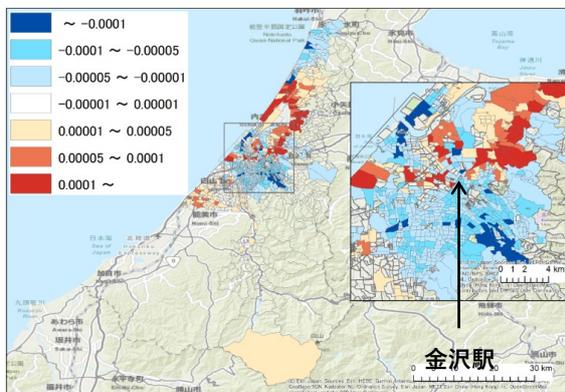
加したの、より多くの交通が処理できるようになったためと考えられる。

香林坊周辺でのターミナル整備を想定した場合のシェア変化の傾向は、金沢駅周辺整備での想定した場合と同様となり、大きな違いは見られなかった。ただし、東金沢駅周辺の増加程度や金沢駅北側の減少程度など、変化の幅はやや金沢駅周辺整備を想定した場合の方が大きくなった。また、リンク交通量の変化については、交通容量増の対象道路におけるリンク交通量の変化率は平均で増加した(平均:0.054, 最大:0.417, 最小:-0.080)。

香林坊のケースで、変化の程度に違いが見られた(i.e., 金沢駅のケースの方が変化の程度が大きい)のは、交通容量増加の対象となる道路の現状の交通容量(図-3.11)が、金沢駅のケースの方が小さいためと考える。つまり、金沢駅のケースの方が交通容量増加によるボトルネック解消の効果が大きかったために影響が大きくなったと考える。

b) 歩行者の利便性向上

ここでは、公共交通ターミナルが整備されるこ



a) 金沢駅周辺を想定した場合

とにより、バス停間の移動時間と待ち時間が短縮されることを想定し、その効果を計測する。

計測の前提条件

図-3.7に示す、金沢駅周辺と香林坊周辺の乗り換え可能な範囲に含まれるバス停間の移動時間と待ち時間を以下のとおりに仮定して、アクセシビリティ(式(3.2), 式(3.3))を向上させる。このとき、移動時間ゼロは、バス停が集約化されることにより、これまで必要であった移動が不要になることを表現している。待ち時間の短縮は、乗継が便利になることで、これまで乗り損なっていたバスに乗車できるといった、機会損失が解消されることを表現している。

- 移動時間：現状⇒ゼロ
- 待ち時間：8分※⇒5分

なお、バス停が集約化されたとしても、実際にはバス乗り場間の移動があり、移動時間はゼロでは無いが、簡便化の観点からゼロと設定した。

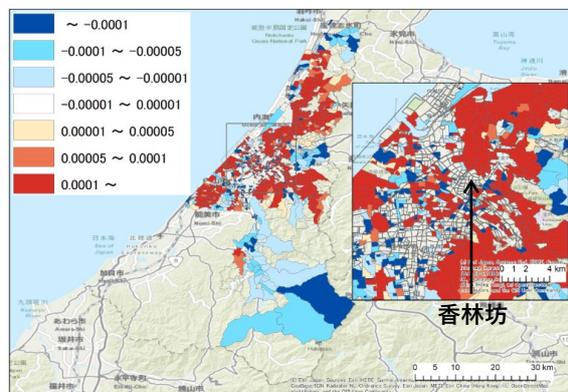
※参考：Hansen, W. G.: How Accessibility Shapes Land Use, *Journal of the American Institute of Planners*, Vol.25, No.2, pp.73-76, 1959.

計測結果

計測結果を図-3.12, 図-3.13, 図-3.14に示す。

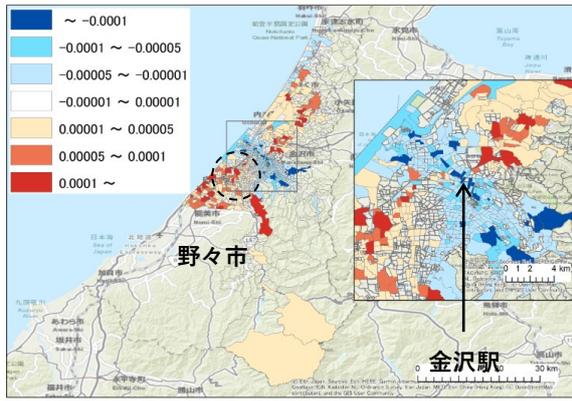
金沢駅周辺でのターミナル整備を想定した場合、家計は、金沢駅周辺の中心市街地では金沢駅南側が減少し北側が増加する結果となった。企業は、中心市街地では金沢駅北側および南側がおおむね減少し金沢駅西側から野々市にかけて増加する結果となった。

本結果のうち、前述の周辺道路の混雑解消効果と比較すると、中心市街地の一部で増加(家計では金沢駅北側が増加、企業では金沢駅西側が増加)

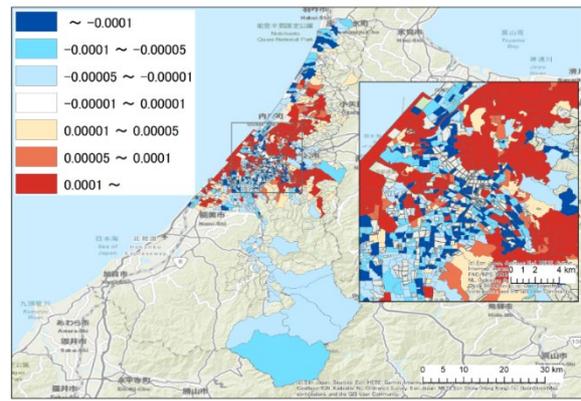


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.12 金沢での歩行者の利便性向上：就業地別家計数のシェア変化

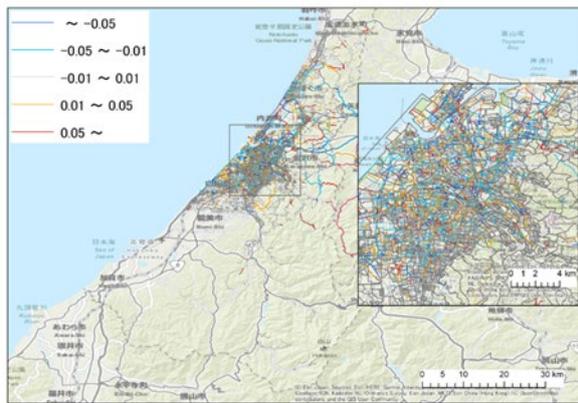


a) 金沢駅周辺を想定した場合

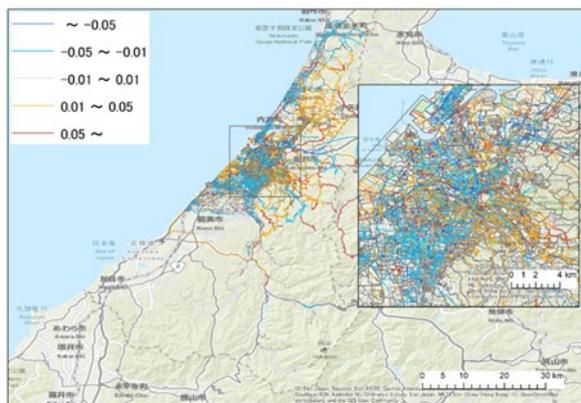


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.13 金沢での歩行者の利便性向上：就業地別家計数（企業数）のシェア変化



a) 金沢駅周辺を想定した場合



b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.14 金沢での歩行者の利便性向上：各リンクの交通量変化

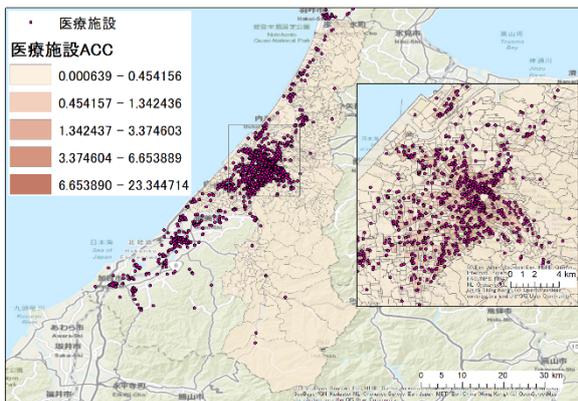


図-3.15 金沢での医療施設の立地およびアクセシビリティ

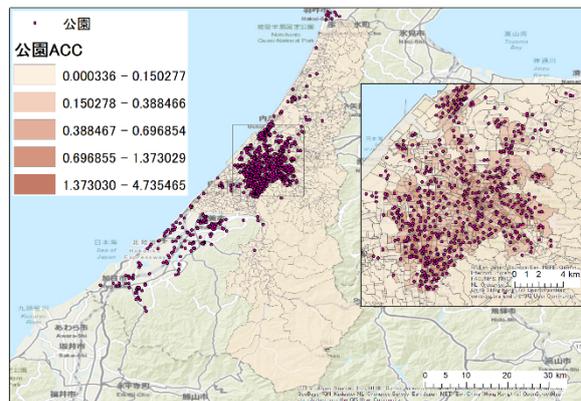


図-3.16 金沢での公園の立地およびアクセシビリティ

する点が異なった。これは、向上させるアクセシビリティの対象となる施設の立地が中心市街地の南東側に集中(図-3.15, 図-3.16, 図-3.17)し、かつ、今回の条件では、金沢駅を東西に跨ぐようなODの場合、最短経路に金沢駅での乗換が含まれる傾向にあり、移動時間と待ち時間の短縮対象

になったためだと考える。一方で、金沢駅の南東側で家計や企業が減少したのは、式(3.2), (3.3)のとおり、アクセシビリティ指標は、対象施設までの距離が近いほど改善効果が低いため、対象施設の立地が多い中心市街地の南東側では効果が低くなり、当該エリアでの家計・企業の立地数の減

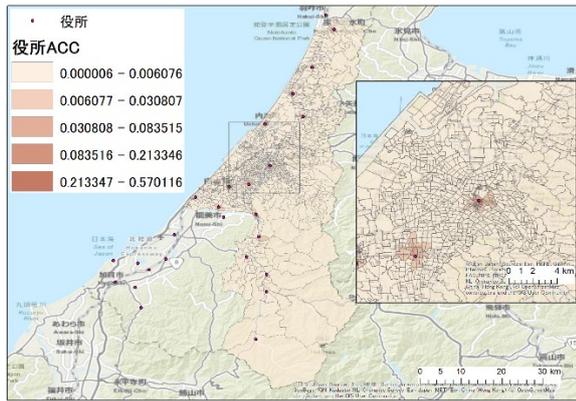


図-3.17 金沢での役所の立地およびアクセシビリティ

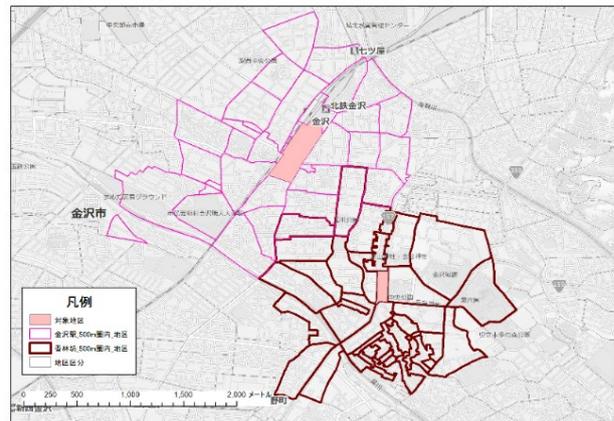


図-3.18 金沢での対象地区と周辺地区

表-3.4 対象となる OD の所要時間

	金沢都市雇用圏	
	金沢駅	香林坊
対象となる OD 数	199,406	595,950
所要時間平均	121	141
所要時間最大	753	640
所要時間最小	19	18

表-3.5 金沢での対象地区の公共用地の増加(m²)

	金沢都市雇用圏	
	金沢駅	香林坊
地区面積	102,272	22,054
公共用地の面積(増加分)	50,000	10,000
土地利用種別の集計値		
公共施設等用地	54,997	12,952
(参考) 空地	46,422	8,084
(参考) 公園・緑地	69,997	320,683

少につながったと考えられる。

香林坊周辺でのターミナル整備を想定した場合、金沢駅周辺での整備と比べて、家計・企業ともに、中心市街地における増加傾向がより顕著になった。

これは、香林坊周辺での想定の方が影響の受ける OD が多いため(表-3.4)と考えられる。また、中心市街地の南東側は対象施設の立地が多く、施設までの距離が近いにも関わらず、金沢駅周辺での整備と比べて増加傾向となったのは、所要時間短縮の程度(表-3.4)が金沢駅のケースよりも大きいことから、それに伴って改善効果が高まったためと考える。

c) 地域経済活性化

ここでは、公共交通ターミナルが整備されることにより、土地の高度利用が図られることを想定し、その効果を計測する。

計測の前提条件

土地の高度利用は、当該地区の土地面積を公共用地分増加させることで設定した。具体的には、想定したターミナル整備位置のある地区の境界から 500m 圏内にかかる地区を周辺地区と位置づけて(図-3.18)、周辺地区に存在する公

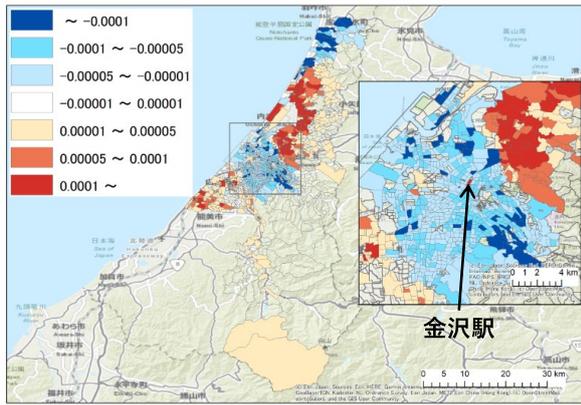
共用地を集約化してターミナルを整備すると仮定した。集計した公共施設等用地を目安に、土地面積の増加分は表-3.5 のとおり設定した。

計測結果

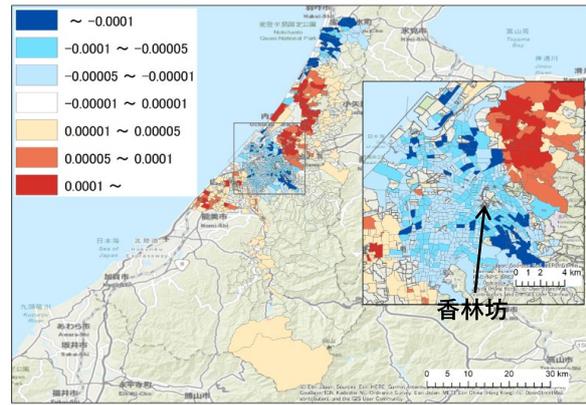
計測結果を図-3.19、図-3.20、図-3.21 に示す。

金沢駅周辺でのターミナル整備を想定した場合、前述の周辺道路の混雑解消効果と比べると、シェア変化はほぼ同様の傾向となった。ただし、土地の高度利用の対象となった地区では家計・企業の立地が増加するといった特徴的な違いが見られた。加えて、リンク交通量の変化率では、周辺道路の混雑解消効果で交通容量増の対象とした道路に着目すると、増加程度(平均:0.012, 最大:0.036, 最小:-0.001)が小さくなった。このようないくつかの違いも見られた。

香林坊周辺でのターミナル整備を想定した場合も同様に、家計・企業ともに、前述の周辺道路の混雑解消効果と同様の傾向となった。一方で、リンク交通量の変化率を見ると、周辺道路の混雑解消効果で交通容量増の対象とした道路は平均で減少(平均:-0.002, 最大 0.013, 最小-0.062)し、結果に違いが見られた。また、金沢駅周辺整備を想定した場合と比較すると、シェア変化の幅は同

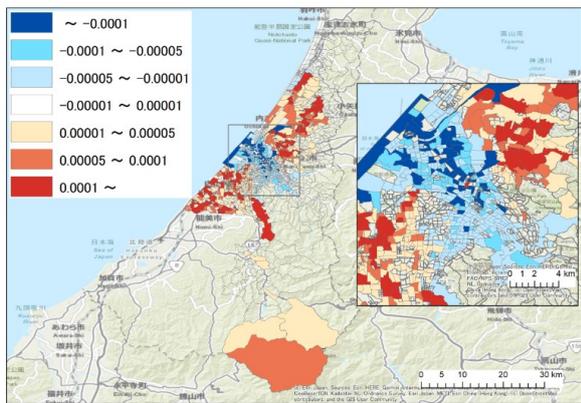


a) 金沢駅周辺を想定した場合

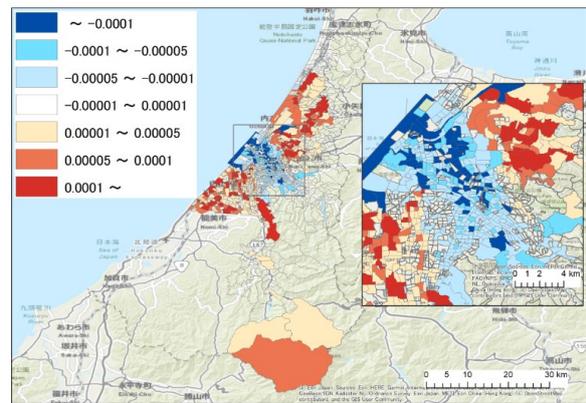


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.19 金沢での地域経済活性化：居住地別家計数のシェア変化

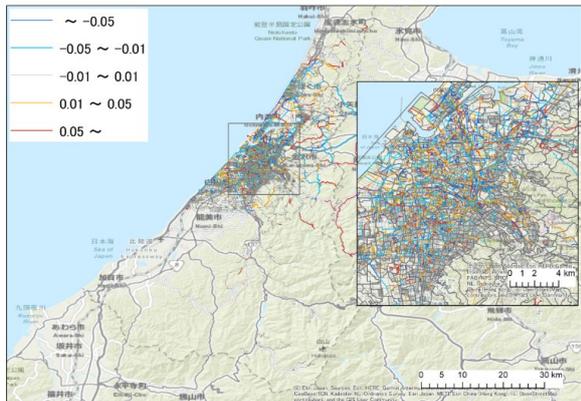


a) 金沢駅周辺を想定した場合

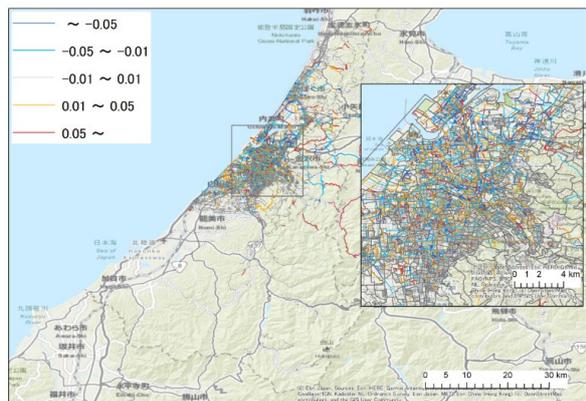


b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.20 金沢での地域経済活性化：就業地別家計数（企業数）のシェア変化



a) 金沢駅周辺を想定した場合



b) 香林坊周辺を想定した場合

図-3.21 金沢での地域経済活性化：各リンクの交通量変化

程度となった。これは、土地面積の増加の割合が金沢駅のケースと香林坊のケースどちらも約5割と同程度であるためと考えられる。

3.2 札幌でのターミナル整備効果

(1) パラメータ設定

本項では、札幌におけるターミナル整備効果を計測するために必要なパラメータを設定する。そのために、分析対象圏域と使用データを明らかにしたうえで、前章で提示したパラメータ推定法に従ってパラメータを設定する。

a) 分析対象圏域および使用データ

札幌でのターミナル整備効果は、札幌都市雇用圏を対象に計測する。具体的には、図 3.22 に示す札幌都市雇用圏を国勢調査の調査区である小地域に分割した空間を扱う。つまり、地区数が6,653地区の詳細・広域な実空間（金沢都市雇用圏の約4倍の地区数）を分析対象とする。

パラメータ設定に使用するデータの出典は、金沢都市雇用圏と同様であり、表-3.2のとおりである。

対象市町村：札幌都市雇用圏10市町（2005年時点市町村区分：札幌市，小樽市，江別市，北広島市，石狩市，当別町，新篠津村，余市町，赤井川村，南幌町）

各データの設定方法も金沢都市雇用圏と同様である。居住地別家計数 n_a および就業地別家計数 m_i （企業数）の立地分布は図-3.23、図-3.24のとおりである。また、家計に対する企業の土地使用比率 s^F/s^H は、北海道の各データから $s^F/s^H = 0.402$ が得られた。

b) パラメータ設定の結果

パラメータ設定の与条件

金沢都市雇用圏と同様に、アメニティ水準、生産性に関する項の変数 κ^{AME} 、 κ^{UNI} は、R言語のMASSパッケージのstepAIC関数を用いて、ステップワイズ法によりAIC基準で変数選択を行った。ただし、全説明変数候補を対象とした推定結果に

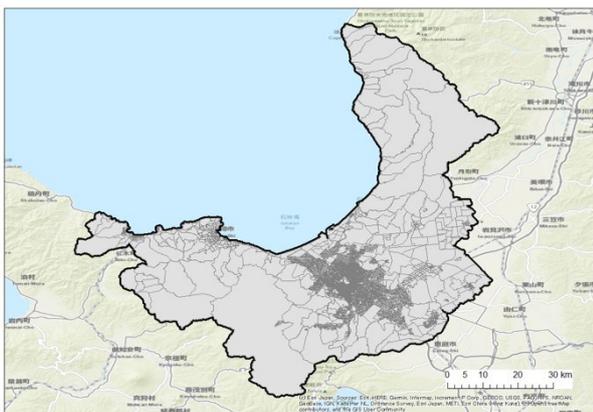


図-3.22 札幌での対象圏域と地域分割

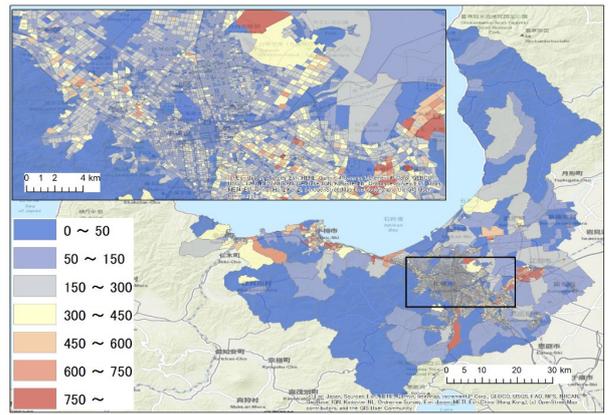


図-3.23 札幌での居住地別家計数

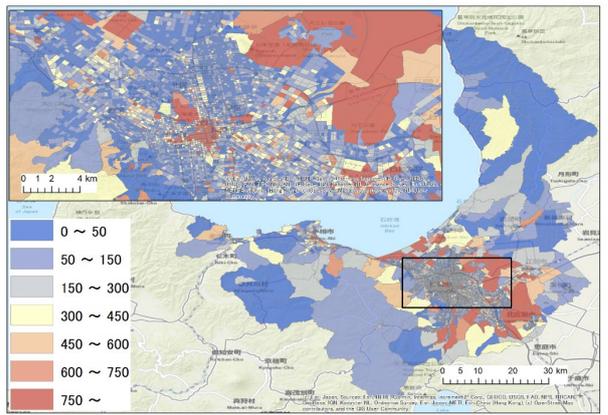


図-3.24 札幌での就業地別家計数

符号条件が妥当でない（ACCのパラメータ推定値が負となる等）ものが含まれる場合、それを除いて再度推定を実施するといった工程を繰り返し実施した。また、説明変数候補のうち固有ベクトル \mathbf{Z} は、正の固有値で大きさが上位500のものに対応する固有ベクトルを扱った。

パラメータ設定の結果

パラメータの設定値は表-3.6に示すとおりである。

地代パラメータ $(s^H)^{1/\mu}$ 、 C はともに有意に推定された。このうち、 C は負の符号で推定された。よって、 C は土地開発に伴う単位面積当たりの機会収入と解釈できる。

通勤費用項 θt は、有意に推定され、符号条件に合った結果を得た。

アメニティ水準に関する変数のパラメータ κ^{AME} では、道路延長、住宅系用途地域面積、商業系用途地域面積、工業系用途地域面積、医療施設までのアクセシビリティ、公園までのアクセシビリティが採用された。これら全ての変数において、符号が直観と一致する結果を得た。

生産性に関する変数のパラメータ κ^{UNI} では、道路延長、住宅系用途地域面積、商業系用途地域面積、工業系用途地域面積、医療施設までのアクセ

表-3.6 札幌でのパラメータ設定値

項目	設定値	t 値
$-C$	4.214.E-03	2.157
$(s^H)^{1/\mu}$	6.341.E+01	31.69
s^F	9.039.E+00	—
s^H	2.247.E+01	—
const	2.121.E+00	12.99
$-\theta t$	-3.352.E-02	-161.4
θ	1.191.E-02	—
t	2.815.E+00	—
κ^{AME} (道路延長)	9.135.E-02	3.188
κ^{AME} (住居系面積)	7.235.E-02	3.319
κ^{AME} (商業系面積)	1.599.E-02	5.029
κ^{AME} (工業系面積)	-3.114.E-02	-7.616
κ^{AME} (医療施設 ACC)	6.126.E-02	3.319
κ^{AME} (公園 ACC)	5.518.E-02	3.139
κ^{UNI} (道路延長)	1.070.E-01	24.25
κ^{UNI} (住居系面積)	-1.657.E-03	-2.548
κ^{UNI} (商業系面積)	5.560.E-03	11.23
κ^{UNI} (工業系面積)	4.840.E-03	7.808
κ^{UNI} (医療施設 ACC)	3.375.E-02	11.07
κ^{UNI} (福祉施設 ACC)	1.326.E-02	4.767
κ^{UNI} (小中学校 ACC)	8.588.E-03	3.205

シビリティ、福祉施設までのアクセシビリティ、小中学校施設までのアクセシビリティが採用された。こちらにもアメニティ水準と同様に、全ての変数において、符号が直観と一致する結果を得た。

以上より、提示した設定方法と整備したデータを用いて、次項の札幌でのターミナル整備効果の計測に必要なパラメータを設定した。

(2) 整備効果の計測

整備効果を計測するにあたり、公共交通ターミナルの位置は図-3.25 を想定する。金沢と同様、前述の「周辺道路の混雑解消効果」、「歩行者の利便性向上」、「地域経済活性化」の3項目での各立地点における家計数および企業数のシェア変化とリンク交通量の変化を計測する。

a) 周辺道路の混雑解消効果

ここでは、公共交通ターミナルが整備されることにより、ターミナルの前面道路や集約されるバス停が存在する周辺道路で混雑が解消することを想定し、その効果を計測する。



図-3.25 札幌都市雇用圏での想定する公共交通ターミナルの位置



図-3.26 札幌での交通容量増加の対象となる道路



図-3.27 札幌駅で乗り換え可能なバス停の設定

計測の前提条件

図-3.26 に示す道路の混雑が解消すると仮定して交通容量を増加させる。具体的には、金沢と同様、道路交通センサスの修正係数のうち、バス停やタクシー乗り場による影響の修正係数 0.65 を用いて、該当する道路の交通容量に 1/0.65 を乗じることで設定する。

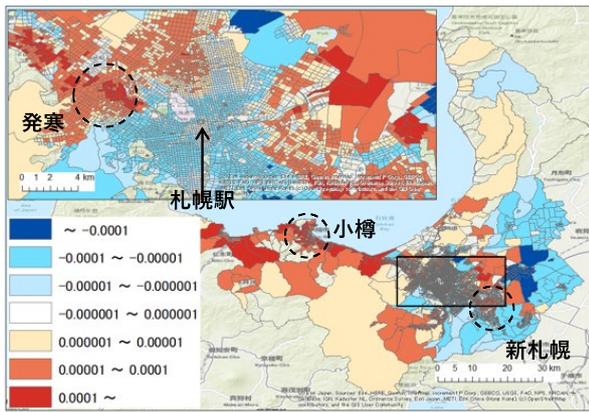


図-3.28 札幌での周辺道路の混雑解消効果：
居住地別家計数のシェア変化

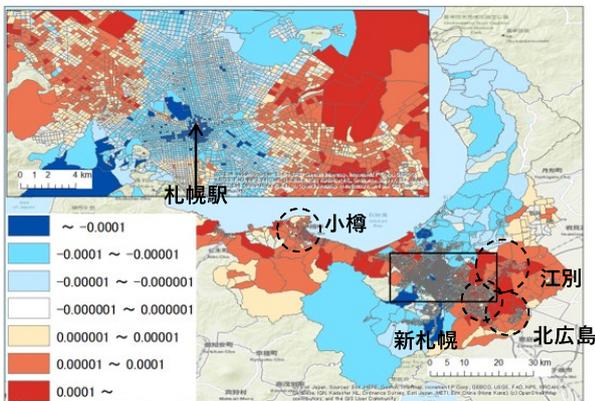


図-3.29 札幌での周辺道路の混雑解消効果：
就業地別家計数（企業数）のシェア変化

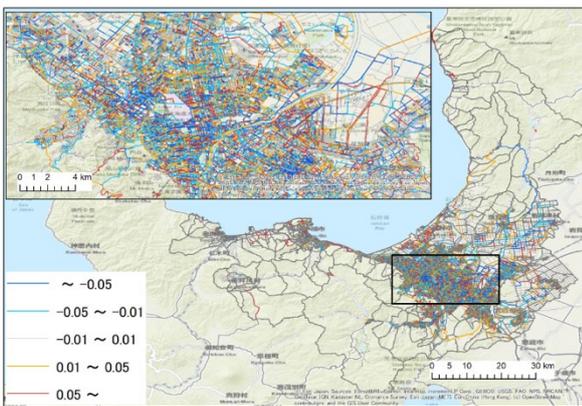


図-3.30 札幌での周辺道路の混雑解消効果：
各リンクの交通量変化

計測結果

計測結果を図-3.28, 図-3.29, 図-3.30 に示す。

家計は、都市雇用圏の中心である札幌駅周辺で減少する一方で、発寒駅周辺・新札幌駅周辺・小樽市などで増加となった。企業は、江別市・新札幌駅周辺・北広島市などの都市圏東側全般や小樽市などの西側全般が増加となった。また、札幌駅周辺は概ね減少した。リンク交通量の変化では、

交通容量増の対象道路に着目すると、リンク交通量の変化率は平均で増加（平均：0.124，最大：0.350，最小：-0.028）した。

結果のうち、都市雇用圏の中心が減少して郊外が増加する傾向は、金沢と同様であった。これは金沢と同様、交通混雑が解消されることで、長距離移動に対する抵抗が下がり、郊外へ立地することのインセンティブが高まったためと考えられる。また、リンク交通量の変化率の増加に関しても、金沢と同様、交通容量の増加によって、より多くの交通が処理できるようになったためと考えられる。

b) 歩行者の利便性向上

ここでは、公共交通ターミナルが整備されることにより、バス停間の移動時間と待ち時間が短縮されることを想定し、その効果を計測する。

計測の前提条件

図 3.27 に示す、札幌駅周辺の乗り換え可能な範囲に含まれるバス停間の移動時間と待ち時間を、金沢と同様に以下のとおり仮定して、アクセシビリティ（式(3.2), 式(3.3)）を向上させる。

- 移動時間：現状⇒ゼロ
- 待ち時間：8分※⇒5分

計測結果

計測結果を図-3.31, 図-3.32, 図-3.33 に示す。

家計は、周辺道路の混雑解消効果と同様に、札幌駅南側での減少および発寒駅周辺・新札幌駅周辺・小樽市などでの増加が見られた。一方、札幌駅北側の中心市街地で増加しており、周辺道路の混雑解消効果とは異なる結果となった。これは家計の変数として採用された施設のアクセシビリティのうち（図-3.34, 図-3.35）、医療施設の立地が比較的札幌駅南側に集積しており、金沢での結果と同様の理由から生じたものと考えられる。

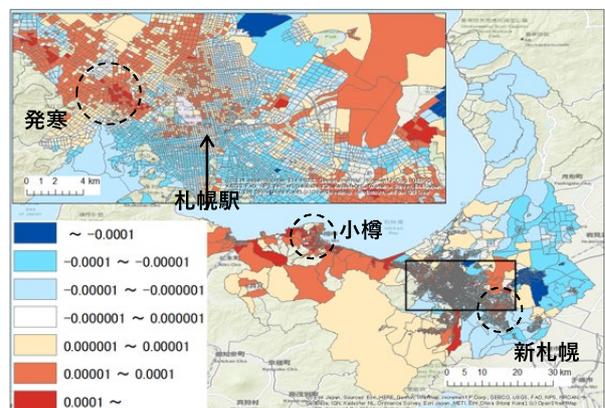


図-3.31 札幌での歩行者の利便性向上：
居住地別家計数のシェア変化

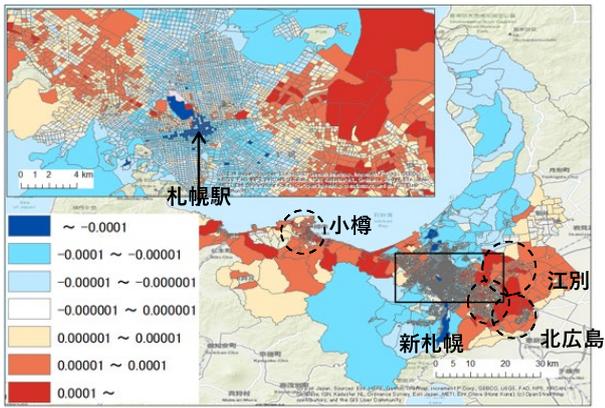


図-3.32 札幌での歩行者の利便性向上：
就業地別家計数（企業数）のシェア変化

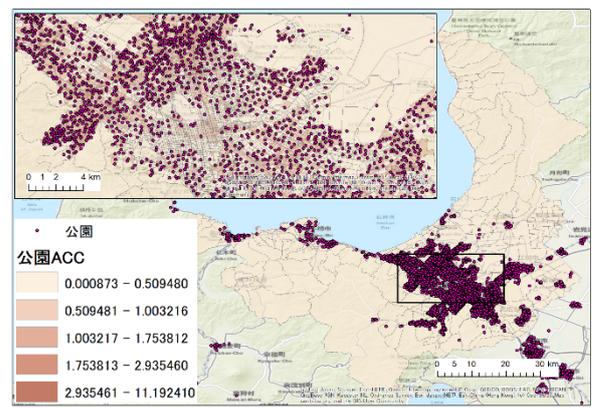


図-3.35 札幌での公園の立地および
アクセシビリティ

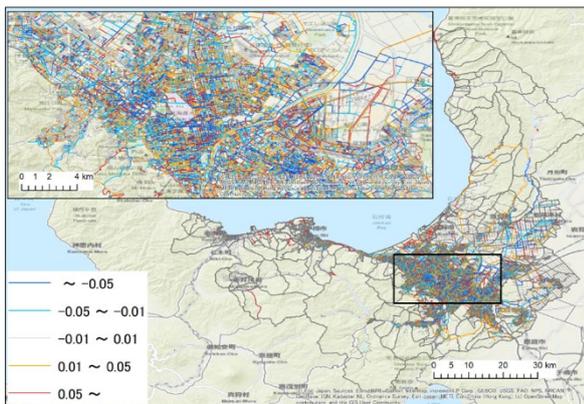


図-3.33 札幌での歩行者の利便性向上：
各リンクの交通量変化

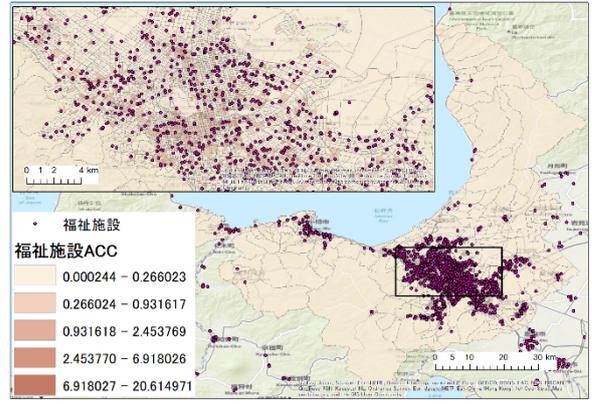


図-3.36 札幌での福祉施設の立地および
アクセシビリティ

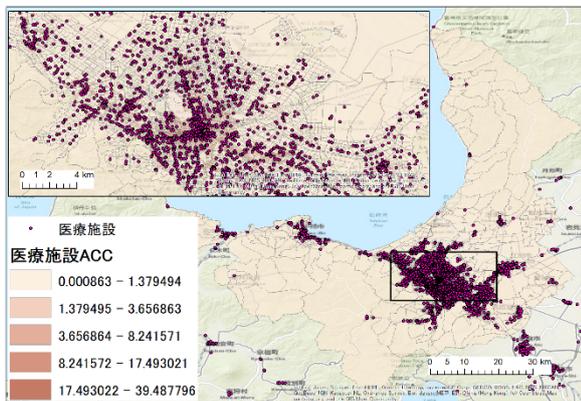


図-3.34 札幌での医療施設の立地および
アクセシビリティ

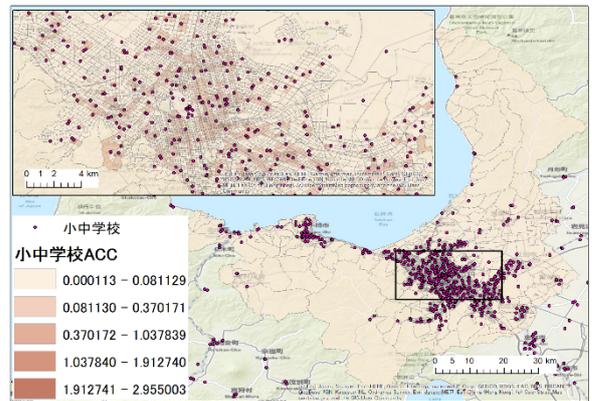


図-3.37 札幌での小中学校の立地および
アクセシビリティ

企業も、周辺道路の混雑解消効果と同様に、江別市・新札幌駅周辺・北広島市などの都市圏東側全般や小樽市などの西側全般で増加が見られた。一方で、周辺道路の混雑解消の効果と比較した場合、家計と同様に、札幌駅北側の中心市街地で増加となる地区が見られた。こちら、企業の変数として採用された施設のアクセシビリティのう

ち（図-3.34、図-3.36、図-3.37）、医療施設の立地が影響しているものと考えられる。

c) 地域経済活性化

ここでは、公共交通ターミナルが整備されることにより、土地の高度利用が図られることを想定し、その効果を計測する。

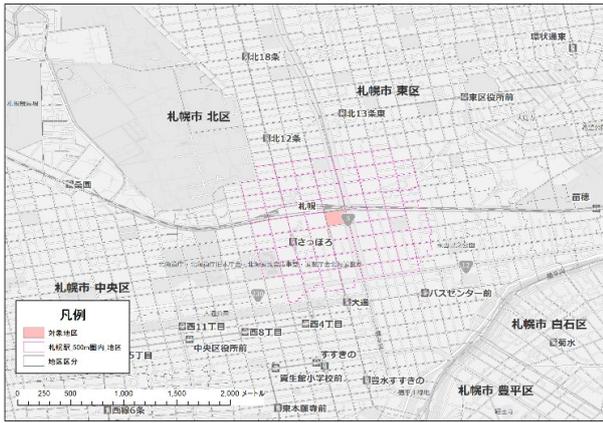


図-3.38 札幌での対象地区と周辺地区

表-3.7 札幌での対象地区の公共用地の増加(m²)

	札幌都市雇用圏	
	札幌駅	
地区面積	19,450	
公共用地の面積(増加分)	19,450	
土地利用種別での集計値		
公共施設等用地	38,006	
(参考) 空地	4,925	
(参考) 公園・緑地	6,335	

計測の前提条件

土地の高度利用は、金沢と同様に、想定した位置周辺の地区(地区境界から500m圏内にかかる地区(図-3.38))に存在する公共用地を集約化して整備すると仮定し、集計した公共施設等用地を目安に表-3.7のとおり設定した。ただし、金沢のケースと異なり、公共施設等用地の集計値が地区面積を超過したため、公共用地は地区面積と同値に設定した。

計測結果

計測結果を図-3.39, 図-3.40, 図-3.41に示す。

家計は、周辺道路の混雑解消効果とほとんど同様の結果となった。具体的には、都市雇用圏の中心である札幌駅周辺で減少する一方で、発寒駅周辺・新札幌駅周辺・小樽市などで増加となった。

企業も、周辺道路の混雑解消効果とほとんど同様の結果となった。具体的には、江別市・新札幌駅周辺・北広島市などの都市圏東側全般や小樽市などの西側全般が増加となった。また、札幌駅周辺は概ね減少した。

リンク交通量の変化では、交通容量増の対象道路に着目すると、リンク交通量の変化率は平均で減少(平均:-0.031, 最大:0.026, 最小:-0.091)した。この点は、金沢のケースと同様、周辺道路の混雑解消効果と異なる傾向である。

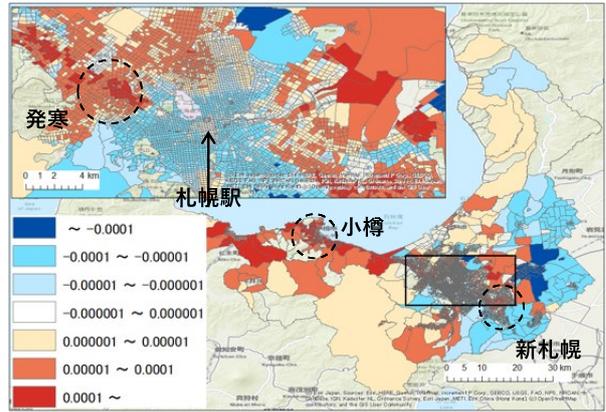


図-3.39 札幌での地域経済活性化：居住地別家計数のシェア変化

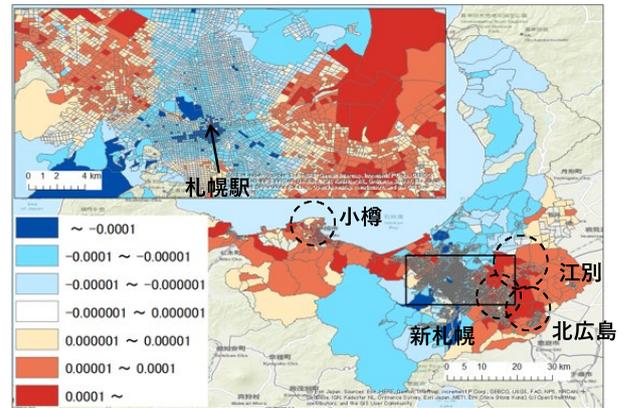


図-3.40 札幌での地域経済活性化：就業地別家計数(企業数)のシェア変化

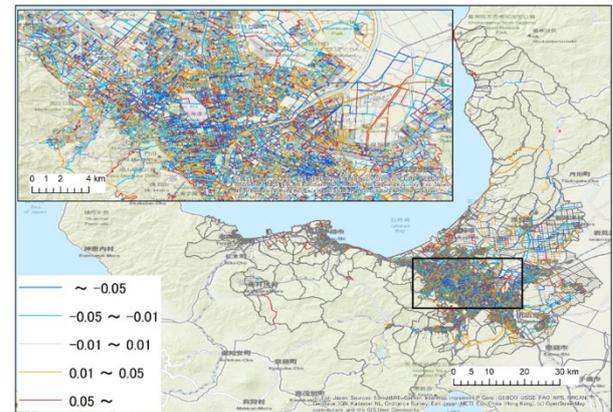


図-3.41 札幌での地域経済活性化：各リンクの交通量変化

参考文献

- 1) Hansen, W. G. (1959) "How Accessibility Shapes Land Use," *Journal of the American Institute of Planners*, Vol.25, No.2, pp.73-76.
- 2) 日本建築学会 (2003) 建築設計資料集成【人間】、丸善出版。
- 3) Vunchic, V. R. (1990) 都市の公共旅客輸送 そのシステムとテクノロジー、技報堂出版。

第4章 空間的応用一般均衡モデルに基づく 政策効果分析手法

4.1 モデル

本節では、Pflüger and Tabuch¹⁾に基づくモデルを示す。

(1) 地域・経済環境の設定

地域は離散的に K 箇所存在し、地域の集合を $\mathcal{K} \equiv \{1, 2, \dots, K\}$ と表現する。地域 $i \in \mathcal{K}$ の面積は A_i とする。次に、この経済には消費者と企業が存在する。消費者は、地域全体に H 存在し、居住する地域 i を選択できる。各地域 i に立地する消費者の数を $h_i \geq 0$ と表現する。消費者は自地域の企業に労働を非弾力的に1単位供給する。企業は、収穫逓増の技術により、労働と土地を生産要素として、差別化された財を生産する。

(2) 主体の行動

a) 消費者行動

消費者が居住することによる効用を Cobb-Douglas 型の効用関数により表現する：

$$U_i = \bar{u}_i \left(\frac{a_i}{\alpha}\right)^\alpha \left(\frac{Q_i}{1-\alpha}\right)^{1-\alpha}, \quad (1a)$$

$$Q_i = \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_j} q_{ji}(k)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} dk \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}. \quad (1b)$$

ここで、 $\alpha \in (0, 1)$ は土地への支出割合を表すパラメータ、 \bar{u}_i は地域 i のアメニティ水準 (e.g., 気候, 地形条件) を表す所与の定数、 a_i は土地の消費量、 Q_i は差別化財の消費により得られる部分効用を表す。 n_j は地域 j で生産される差別化財のバラエティ (種類) 数、 $q_{ji}(k)$ は地域 j で生産され地域 i で消費される財バラエティ k の消費量である。 $\sigma > 1$ はこれらの財バラエティ間の代替の弾力性である。

消費者の予算制約は次のとおりである：

$$y_i = r_i a_i + \sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_j} p_{ji}(k) q_{ji}(k) dk. \quad (2)$$

ここで、 r_i は地代、 $p_{ji}(k)$ は地域 j で生産されて地域 i で消費される財バラエティ k の価格を表す。

消費者の所得 y_i は賃金 w_i と地代収入 \bar{w}^R からなる：

$$y_i = w_i + \bar{w}^R. \quad (3)$$

ここで、全ての土地が全消費者により均等に所有されていると仮定し、消費者の地代収入は以下で与えられる：

$$\bar{w}^R = \frac{\sum_{i \in \mathcal{K}} r_i (a_i h_i + a_i^F n_i)}{H}. \quad (4)$$

効用最大化問題から、土地、財の消費量 $a_i, q_{ji}(k)$ と財消費の部分効用 Q_i が得られる：

$$a_i = \alpha \frac{y_i}{r_i}, \quad (5a)$$

$$q_{ji}(k) = \left(\frac{p_{ji}(k)}{P_i}\right)^{-\sigma} Q_i, \quad (5b)$$

$$Q_i = (1-\alpha) \frac{y_i}{P_i}. \quad (5c)$$

ここで、 P_i は財の価格指数であり、以下で定義される：

$$P_i = \left[\sum_{j \in \mathcal{K}} \int_0^{n_j} p_{ji}(k)^{1-\sigma} dk \right]^{\frac{1}{1-\sigma}}. \quad (6)$$

式(1a)に式(5a)、式(5c)を代入すると、地域 i に居住する消費者の間接効用 v_i は次のように表される：

$$v_i = \bar{u}_i r_i^{-\alpha} P_i^{-(1-\alpha)} y_i. \quad (7)$$

b) 企業行動

企業は、独占的競争市場下で土地・労働を投入して財を生産する。規模の経済、消費者の多様性選好、ならびに供給できる財のバラエティ数に制限が無いことから、どの企業も必ず他企業とは異なるバラエティの財を生産する。このため、地域 i で生産を行う企業数は、供給する財のバラエティ数 n_i と等しくなる。以降では、地域 i でバラエティ k を生産する企業を地域 i の企業 k と呼ぶ。

地域 i の企業 k が財バラエティ k を生産するには、1単位の固定的な投入と生産量 $s_i(k)$ に応じた $\psi s_i(k)$ の限界的な投入が必要となる。Cobb-

Douglas 型の生産技術を仮定するため、土地・労働の投入量との関係は以下となる：

$$1 + \psi s_i(k) = \left(\frac{a_i^F(k)}{\beta} \right)^\beta \left(\frac{l_i(k)}{1-\beta} \right)^{1-\beta}. \quad (8)$$

ここで、 $\beta \in (0,1)$ は土地の投入割合を表すパラメータ、 $a_i^F(k)$ 、 $l_i(k)$ は、各々、地域の企業が投入する土地、労働量である。

財の地域間輸送には氷塊型の輸送費用がかかると仮定する。このため、地域 i で生産された財バラエティ k の地域 j における需要量 $q_{ij}(k)$ と供給量 $s_i(k)$ との間に、次の関係が成立する：

$$s_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(k) h_j. \quad (9)$$

地域 i の企業 k は、独占的競争を仮定していることから、地域 j の消費者の需要関数 $q_{ij}(k)$ を所与として、生産する財バラエティ k の価格 $p_i(k) = (p_{ij}(k))_{j \in \mathcal{K}}$ と土地・労働の投入量 $a_i^F(k)$ 、 $l_i(k)$ を設定する。その利潤最大化行動は、次のように定式化できる：

$$\max_{p_i(k), a_i^F(k), l_i(k)} \pi_i(k), \quad (10a)$$

$$\text{s.t. (5b), (8), (9).} \quad (10b)$$

ここで、 $\pi_i(k)$ は利潤であり、収入から土地・労働の費用を引いた、以下の形で与えられる：

$$\pi_i(k) = \sum_{j \in \mathcal{K}} p_{ij}(k) q_{ij}(k) h_j - r_i a_i^F(k) - w_i l_i(k). \quad (11)$$

この利潤最大化問題を解くと、財バラエティの価格 $p_{ij}(k)$ 、土地・労働の投入量 $a_i^F(k)$ 、 $l_i(k)$ が得られる：

$$p_{ij}(k) = \frac{\sigma}{\sigma-1} \psi \tau_{ij} m_i, \quad (12a)$$

$$a_i^F(k) = \frac{\beta}{r_i} \left\{ 1 + \psi \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(k) h_j \right\} m_i, \quad (12b)$$

$$l_i(k) = \frac{1-\beta}{w_i} \left\{ 1 + \psi \sum_{j \in \mathcal{K}} \tau_{ij} q_{ij}(k) h_j \right\} m_i, \quad (12c)$$

$$m_i = r_i^\beta w_i^{1-\beta}. \quad (12d)$$

ここで、 m_i は生産要素の価格を表す。利潤ゼロ条件より、財バラエティの供給量は次のとおり得られる：

$$s_i = \frac{\sigma-1}{\psi}. \quad (13)$$

(3) 均衡条件

均衡条件として短期均衡と長期均衡を扱う。短期均衡では、消費者が居住地を変更できないほどの短期に、土地・財・労働市場が均衡すると仮定する。長期均衡では、消費者が効用を最大化する居住地を選択することができると仮定する。各々の条件について順に示す。

a) 短期均衡条件

短期的には、消費者が地域間を移動できないという条件下で、土地・財・労働市場が均衡する。この短期均衡状態を満たす条件は、各市場の清算条件から与えられる。土地市場の清算条件は以下で与えられる：

$$\begin{cases} a_i h_i + a_i^F n_i = A_i & \text{if } r_i > 0, \\ a_i h_i + a_i^F n_i \leq A_i & \text{if } r_i = 0. \end{cases} \quad (14)$$

財市場の清算条件は、式(9)に式(5b)、式(13)を代入することで、以下で表される：

$$n_i m_i = \frac{1-\alpha}{\sigma} \sum_{j \in \mathcal{K}} \frac{n_i m_i^{1-\sigma} \tau_{ij}^{1-\sigma}}{\sum_{k \in \mathcal{K}} n_k m_k^{1-\sigma} \tau_{kj}^{1-\sigma}} y_j h_j. \quad (15)$$

労働市場の清算条件を示す。地域 i における労働供給量は消費者数 h_i で与えられ、労働需要量は $l_i n_i$ となる。したがって、この条件は以下で表される：

$$w_i h_i = (1-\beta) \sigma m_i n_i. \quad (16)$$

式(15)、式(16)より、 w_i は以下の賃金方程式を満たす：

$$\begin{aligned} w_i h_i &= (1-\beta)(1-\alpha) \\ &\times \sum_{j \in \mathcal{K}} \frac{w_i h_i m_i^{-\sigma} \tau_{ij}^{1-\sigma}}{\sum_{k \in \mathcal{K}} w_k h_k m_k^{-\sigma} \tau_{kj}^{1-\sigma}} y_j h_j. \end{aligned} \quad (17)$$

以上の条件を用いることで、間接効用 v_i が人口分布 \mathbf{h} の関数で与えられる：

$$v_i(\mathbf{h}) = \bar{u}_i A_i^\alpha P_i^{-(1-\alpha)} \left(\alpha y_i h_i + \frac{\beta}{1-\beta} w_i h_i \right)^{-\alpha} y_i. \quad (18)$$

b) 長期均衡条件

長期的には、消費者は効用の高い地域に移動することができ、その居住地選択行動が定まる状態を長期均衡状態とする。この長期均衡状態は、以下の非線形相補性条件を満たす状態 \mathbf{h}^* である：

$$\begin{cases} v^* = v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i > 0, \\ v^* \geq v_i(\mathbf{h}) & \text{if } h_i = 0, \end{cases} \quad \sum_{i \in \mathcal{K}} h_i = H. \quad (19)$$

ここで、 v^* は均衡効用水準を表す。

Pflüger and Tabuchi³⁾でも示されているとおり、長期均衡状態には安定・不安定な状態が複数存在する。安定的な均衡状態を得るために、長期均衡の安定性を次の replicator dynamic によって判定する：

$$\dot{h}_i = F_i(\mathbf{h}) \equiv h_i \{v_i(\mathbf{h}) - \bar{v}(\mathbf{h})\}, \quad (20a)$$

$$\bar{v}(\mathbf{h}) = \sum_{i \in \mathcal{K}} v_i(\mathbf{h}) \frac{h_i}{H}. \quad (20b)$$

このダイナミクスの下での均衡状態 \mathbf{h}^* の安定性は、 $F(\mathbf{h}^*) = (F_i(\mathbf{h}^*))_{i \in \mathcal{K}}$ の Jacobi 行列 $\nabla F(\mathbf{h}^*)$ の固有値により判定できる（固有値の実部が全て負の場合に安定）。

c) 均衡状態の解析手順

本研究で用いるモデルには、安定・不安定な複数種類の均衡状態が存在し得る。このため、本節ではパラメータを変化させた場合に創発する安定的な均衡状態を導出する手順を示す。

短期均衡状態の地代 r_i 、賃金 w_i 、価格指数 P_i 、生産要素の価格 m_i は、短期均衡条件による非線形連立方程式を解くことで得られる。ただし、ワルラス法則の存在により、これらの条件式は $4K-1$ の独立な方程式にしかならず、 r_i, w_i, P_i, m_i は一意に定まらない。これらが定まるように、総賃金を W として外生的に与えて基準化する条件を式(21)のとおり与える：

$$\sum_{i \in \mathcal{K}} w_i h_i = W. \quad (21)$$

パラメータの変化に伴い創発する安定的な均衡状態は、前述の式(20)の微分方程式により得られる。しかし、式(20)を直接解くことは不可能であるため、高山・杉山¹⁾と同様に、ダイナミクス方向に徐々に人口分布 \mathbf{h} を更新することで、安定均衡状態を調べる。具体的には、 n 回目の更新で得られた人口分布を $\mathbf{h}^{(n)} = (h_i^{(n)})_{i \in \mathcal{K}}$ と表記すると、人口分布の更新は以下の形で表される：

$$h_i^{(n+1)} = h_i^{(n)} + \zeta F_i(\mathbf{h}^{(n)}). \quad (22)$$

ここで、 ζ はダイナミクス方向への人口分布の変化の度合いを表す正のパラメータである。

4.2 パラメータの設定方法

本節では計量分析の実施に必要なパラメータ $\alpha, \beta, \sigma, \tau_{ij}^{1-\sigma}, \bar{u}_i$ のうち、輸送費用に関するパラメータ $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ およびアメニティ水準 \bar{u}_i の設定方法を説明する。

(1) 輸送費用に関するパラメータ

輸送費用に関するパラメータ $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ は、実データから直接設定することができないため、Redding and Venables²⁾の方法を参考に、パラメータ設定を行う。具体的には第一段階で輸送モードの選択に関する推定を行い、第二段階で輸送費用の推定を行う。 $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ は、これらから得られる推定値を用いて設定する。

a) 第一段階：輸送モード選択に関する推定

第一段階として、各輸送モードでの選択確率から、各々の選択効用に関するパラメータを推定する。ここでの輸送モードは代表交通機関を扱う。選択効用は地域内 (i.e., $i = j$)、地域間 (i.e., $i \neq j$) 別に以下のように定義する：

$$V_{t,ij}^L = \begin{cases} \mu_t^L \text{dist}_{ij}^L + \phi \text{dum}_{ij} & \text{if } i = j, \\ \mu_t^L \text{dist}_{t,ij}^L + \phi \text{dum}_{ij} + \xi_t^L & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (23a)$$

$$V_{t,ij}^P = \begin{cases} \mu_t^P \text{time}_{ij}^P & \text{if } i = j, \\ \mu_t^P \text{time}_{t,ij}^P + v_t^P \text{freq}_{t,ij}^P + \xi_t^P & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (23b)$$

ここで、 t は輸送モードの種類であり、 L, P は各々、物流・人流を表す。 μ, ϕ, v, ξ はパラメータ、 dist_{ij} は地域 i, j 間の距離、 time_{ij} は地域 i, j 間の所要時間、 freq_{ij} は地域 i, j 間の運行頻度である (ただし、運行本数が存在しない輸送モードは除く)。なお、地域内では主要な輸送モード1種類のみを想定し (i.e., 乗用車、貨物車)、輸送モードの選択は無いものとする。 dum_{ij} は主要な輸送モード (i.e., 乗用車、貨物車) の地域 i, j に対する同一県間ダミーである。

この選択効用を用いて、地域間における輸送モードの選択確率および尤度関数は以下で表せる：

$$\theta_{t,ij}^L = \frac{\exp(V_{t,ij}^L)}{\sum_{k \in T} \exp(V_{k,ij}^L)}, \quad (24a)$$

$$\theta_{t,ij}^P = \frac{\exp(V_{t,ij}^P)}{\sum_{k \in T} \exp(V_{k,ij}^P)}, \quad (24b)$$

$$\lambda^L = \prod_{M \in \mathcal{I}} \prod_{k \in T} \{\theta_{k,M}^L\}^{N_{k,M}^L}, \quad (25a)$$

$$\lambda^P = \prod_{M \in \mathcal{I}} \prod_{k \in T} \{\theta_{k,M}^P\}^{N_{k,M}^P}. \quad (25b)$$

ここで、 θ は選択確率、 T は選択モードの集合、 λ は尤度関数、 N_M は経路および交易が存在するサンプル M の地域 i, j 間の交易シェアである。

輸送モードの選択効用パラメータ $\mu_t^L, \mu_t^P, \phi, v_t^P, \xi_t^L, \xi_t^P$ は、式(25)を用いて最尤推定法により推定する。

b) 第二段階：輸送費用の推定

第二段階として、地域 i, j 間の交易额 X_{ij} と地理的な輸送費用の関係から輸送費用の推計式を構築する。

前節で示したモデルでは、地域 i, j 間の交易额 X_{ij} と $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ の関係が次のように表されることを利用する：

$$\ln[X_{ij}] = FX_i + (1 - \sigma) \ln[\tau_{ij}] + FM_j + \text{const}. \quad (26)$$

ここで、 FX_i は生産地 i に関する項、 FM_j は需要地 j に関する項、 const は定数項を表す。次に、交易额 X_{ij} を第一段階で推定した選択効用のログサム変数で表現するために、 $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ は以下で与えられると考える：

$$\tau_{ij}^{1-\sigma} = \begin{cases} \kappa [\exp(V_{1,ij}^L)]^{\theta^L} [\exp(V_{1,ij}^P)]^{\theta^P} & \text{if } i = j, \\ \kappa \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^L) \right]^{\theta^L} \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^P) \right]^{\theta^P} & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (27)$$

ここで、 V_1^L, V_1^P は乗用車および貨物車の選択効用、

$\theta^L, \theta^P, \kappa$ はパラメータである。ただし、 κ に無関係に均衡状態は定まるため、 κ の推定の必要はない。この定式化は、輸送費用最小化行動から得られる選択効用を用いて輸送費用を推計する、Allen and Arkolakis³⁾と同様の考えである。式(27)により、式(26)は次のように表される：

$$\ln[X_{ij}] = \begin{cases} \begin{aligned} &FX_i + \theta^L V_{1,ij}^L + \theta^P V_{1,ij}^P + FM_j \\ &+ \text{const} \end{aligned} & \text{if } i = j, \\ \begin{aligned} &FX_i + \theta^L \ln \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^L) \right] \\ &+ \theta^P \ln \left[\sum_k \exp(V_{k,ij}^P) \right] + FM_j \\ &+ \text{const} \end{aligned} & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (28)$$

ただし、ここでのconstは $\ln(\kappa)$ を含む。

式(28)の重回帰分析から θ^L, θ^P を推定する。

以上、第一段階、第二段階のパラメータ推定結果および式(27)より、 $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ を設定する。

(2) アメニティ水準

アメニティ水準 \bar{u}_i の設定は、データにより与えられる h_i が基準均衡状態 (i.e., 政策を実施していない状況下での均衡状態) となるように設定する。この方法は、QSE 研究が採用しているものと同様のアプローチである。具体的には、 $\alpha, \beta, A_i, h_i, W$ が与えられた下で式(17)、式(21)を満たすように賃金 w_i を設定する。アメニティ水準 \bar{u}_i は、これまでに得られた w_i と h_i から、式(19)の長期均衡条件を満たすように設定する。ただし、この条件のみでは $(\bar{u}_i)_{i \in \mathcal{X}}$ が一意に定まらないため、 $\bar{u}_1 = 1$ と基準化する。

4.3. 輸送アクセス改善の影響分析

本節では 4.1 節で説明したモデルにより、異なる輸送モードの輸送アクセス改善が人口分布へ与える影響を分析する。そのためにまず、対象とする地域区分とネットワークを説明する。次に、4.2 節で説明したパラメータ推定に必要な都市・地域間輸送網データの整備内容およびパラメータ推定結果を示す。最後に、反実仮想実験により輸送アクセス改善の影響を分析する。

(1) 対象とする地域区分とネットワーク

対象とする地域区分は、高山・杉山¹⁾と同様に、日本国内を対象に都市雇用圏を基準として分割した 432 地域区分 (図-4.1) を用いた。ネットワークは、道路網、鉄道網、航空網、航路網を対象とした。ただし、航路網は道路網と一体と捉えて、道路網による輸送が不可能な地域間のみを航路

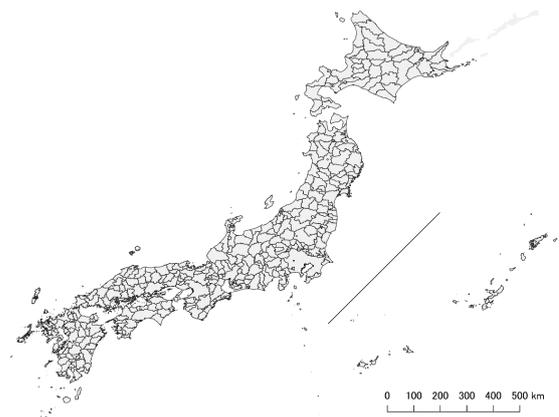


図-4.1 地域区分

表-4.1 使用データ

項目	出典
消費者数 h_i	国勢調査 (2005 年)
面積 A_i	国土数値情報 土地利用 3 次メッシュ (2005 年)
距離 $dist_{ij}$	デジタル道路地図 (DRM) (2005 年)
所要時間 $time_{ij}$	ナビタイムジャパン提供の経路データ (2019 年)
	国土数値情報 海上経路 (2011 年), 定期旅客航路 (2012 年)
運行頻度 $freq_{ij}$	ナビタイムジャパン提供の経路データ (同上)
	国土数値情報 港湾間流通量・海上経路 (同上), 定期旅客航路 (同上)
交易シェア N_{ij}	全国貨物純流動調査 (2005 年)
	全国幹線旅客純流動調査 (2005 年)
交易额 X_{ij}	全国貨物純流動調査 (同上)

網利用の対象とした。

(2) パラメータの推定・キャリブレーション結果

a) 使用データ

モデルによる実空間を対象とした分析を可能とするために、2005 年を基準年として公的データ・民間データを収集・加工することでデータを整備した。使用したデータを表-4.1 に示す。

消費者数 h_i は、国勢調査の就業者数を使用して、都市雇用圏で集計した値とした。

面積 A_i は、国土数値情報の土地利用 3 次メッシュを使用して、このうち、経済活動に利用可能な土地利用用途 (i.e., 田, その他の農用地, 建物用途) の面積を都市雇用圏で集計した値とした。

距離・所要時間は、デジタル道路地図 (DRM) および国土数値情報の海上経路・定期旅客経路、総合ナビゲーションアプリ『NAVITIME』を運営

するナビタイムジャパン提供の代表地点間経路データを用いて設定した。

具体的には、輸送モードのうち、自動車（船舶含む）については、DRMの高速道路・一般国道および海上経路・定期旅客航路を対象に、都市雇用圏の代表地点間で所要時間が最短となる経路をダイクストラ法で探索し、当該経路の距離・所要時間を用いた。このとき、各都市雇用圏の代表地点は、都市雇用圏内の最も人口が多い市区町村の役所とした。ただし、地域内の距離は、Redding and Venables²⁾と同様、地域*i*の総面積 $area_i$ に応じた、 $(2/3)\sqrt{area_i/\pi}$ と設定した。地域内の所要時間は、地域内距離を道路交通センサスにより設定する速度で除して設定した。輸送モードのうち、高速バス・鉄道・航空の距離・所要時間は、ナビタイムジャパン提供の経路データに基づき設定した。具体的には、代表地点間における所要時間を優先した最適経路の値を用いた。データ上、地域間の経路が無く、上記方法により距離・所要時間が設定できない場合は、地域間の経路無しと判断した。

運行頻度は、高速バス・鉄道・航空を対象に、ナビタイムジャパン提供の経路データのうち、最適経路における平日の一日当たりの運行本数を用いた。

交易シェア N_{ij} は、全国貨物純流動調査（物流センサス）、全国幹線旅客純流動調査を用いて設定した。具体的には、物流の交易シェアは物流センサスの輸送機関別の輸送量のシェア、人流の交易シェアは全国幹線旅客純流動調査の移動人数の輸送機関別のシェアとした。ただし、輸送モード選択に関するパラメータが主な交易の傾向を捉えた推定値となるよう、輸送量や移動人数が微小な場合はゼロと見なしてシェアを算定した。

交易额 X_{ij} は、432都市雇用圏間の交易额のデータが存在しないことから、物流センサスの輸送量を代用した。交易额と輸送量の関係性として、地域間産業連関表の9ブロック間ではあるものの、地域間産業連関表の金額シェアと物流センサスの重量シェアは相関係数0.94と高い相関が存在する¹⁰⁾。これより、交易额を輸送量で代用する妥当性は一定程度あると判断し使用した。

b) パラメータの設定値： $\alpha, \beta, \sigma, \tau_{ij}^{1-\sigma}, \bar{u}_i$ の設定

α, σ は、Allen and Arkolakis³⁾でも使用される、実証研究の知見と整合する値に設定した。具体的には、土地の支出割合 α は家計の住宅への支出割合を基礎に0.3とした。代替弾力性 σ はEaton and Kortum¹¹⁾と整合するように9.0と設定した。土地の供給割合である β は、先行研究¹⁾で明らかにされた、ストロー現象を表現できる0.6とした。

輸送費用に関するパラメータ $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ は、前節の方

表-4.2 第一段階の推定結果（物流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
距離	道路+航路	μ_1^L	-3.79.E-03	-8.76
	鉄道	μ_3^L	-1.95.E-03	-5.17
	航空	μ_4^L	-2.91.E-03	-5.69
同一 県間	道路	ϕ	3.17	3.89
定数 項	鉄道	ξ_3^L	-4.53	-79.87
	航空	ξ_4^L	-4.19	-35.42
Sample size			52,587	
Null log likelihood			-4.31.E+04	
Final log likelihood			-7.98.E+03	
ρ^2			0.8148	

表-4.3 第一段階の推定結果（人流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
所要 時間	道路+航路	μ_1^P	-2.61.E-02	-51.29
	高速バス	μ_2^P	-9.41.E-03	-17.35
	鉄道	μ_3^P	-2.65.E-02	-32.42
	航空	μ_4^P	-2.09.E-02	-13.84
運行 頻度	高速バス	v_2^P	1.30.E-02	2.740
	鉄道	v_3^P	6.30.E-03	12.82
	航空	v_4^P	1.18.E-02	4.010
定数 項	高速バス	ξ_2^P	-4.09	-31.90
	鉄道	ξ_3^P	-1.84	-32.32
	航空	ξ_4^P	-1.51	-9.433
Sample size			23,117	
Null log likelihood			-2.52.E+04	
Final log likelihood			-1.20.E+04	
ρ^2			0.5233	

法により推定を行った。第一段階では、前項のデータを使用した集計ロジットのパラメータを、R言語のoptim関数を用いて、最適化手法の一つであるBFGSにより推定した。ただし、地域内(i.e., $i=j$)のパラメータは地域間(i.e., $i \neq j$)の推定値を用いた。第二段階では、説明変数に関するデータは最小値で正規化したものを使用した。なお、推定にはR言語のlm関数を用いた。式(27)のうち、 κ の値は推定の必要がないため、 $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ の設定には式(27)から κ を除いた式を用いた。

第一段階の推定結果である選択効用パラメータを表-2.3に示す。表より、距離・所要時間に関するパラメータは負の値、運行頻度に関するパラメータは正の値であることが確認できる。これは、距離・所要時間の増加により効用が低下すること、運行頻度の増加により効用が増加することを意味しており、妥当な結果と言える。また、物流・人流ともに ρ^2 が十分に大きく、本モデルで交通手段選択割合を十分に表現できていることが確認できる。

表-4.4 第二段階の推定結果

変数	パラメータ	推定値	t 値
物流の選択効用	Θ^L	0.651	47.35
人流の選択効用	Θ^P	0.723	38.94
R^2		0.5632	

表-4.2 の物流に関する結果より，距離の推定値は $|\mu_1^L| > |\mu_4^L| > |\mu_3^L|$ であり，かつ，鉄道と航空の定数項が負であることが確認できる．これは，距離が短い OD では道路が利用されて，距離が長くなるにつれて航空や鉄道を利用する傾向にあることを表しており，直観と合った違和感の無い推定結果を得た．

表-4.3 の人流に関する結果では，所要時間の推定値は $|\mu_3^P| > |\mu_1^P| > |\mu_4^P| > |\mu_2^P|$ であり，定数項の推定値も踏まえると，所要時間の短い OD は，物流と同様に，道路が利用され，所要時間が長くなるにつれて，高速バス，航空，鉄道の利用が増加する傾向にあることを表している．次いで，運行頻度の推定値は，鉄道に比べて高速バス・航空が大きい．これは運行本数の増加に対する効用の増加分が大きいことを表しており，鉄道と比べて高速バス・航空は運行頻度が相対的に少なく運行頻度の重要度が高いことを踏まえると，直観に合った結果と言える．

第二段階の推定結果である物流・人流の選択効用に関するパラメータを表-4.4 に示す．表より，物流・人流ともに推定値は正の値となった．これは選択効用が増加するにつれて交易が増加することを示しており，妥当な結果であると言える．

アメニティ水準 \bar{u}_i も同様に，前述のパラメータ設定方法によりキャリブレーションを行った．紙面の都合上，結果を示すことは割愛する．

(3) シミュレーション

前述のパラメータ設定値を用いて，輸送アクセスが改善した際の人口分布への影響を分析する．具体的には，次の3種類の輸送アクセス改善について分析する．

- a) 輸送費用が一律に低下する影響
- b) 高速道路・一般国道区間の輸送費用低下の影響
- c) 運行頻度が増加する影響

まず，既存の分析と同様¹⁾，一律に輸送費用が低下した場合の影響を分析し，既存分析との共通点および本枠組みの特長を明らかにする．次に，本枠組みを生かしたシミュレーションとして，B),C)を実施する．

a) 輸送費用が一律に低下する影響

式(23)における選択効用のうち，距離・所要時間を次のように減衰させて，各地域の人口シェア

変化を調べた：

$$V_{t,ij}^L = \begin{cases} \mu_1^L(1 - \delta_t^L)\text{dist}_{ij}^L + \phi\text{dum}_{ij} & \text{if } i = j, \\ \mu_t^L(1 - \delta_t^L)\text{dist}_{t,ij}^L + \phi\text{dum}_{ij} + \xi_t^L & \text{if } i \neq j, \end{cases} \quad (29a)$$

$$V_{t,ij}^P = \begin{cases} \mu_1^P(1 - \delta_t^P)\text{time}_{ij}^P & \text{if } i = j, \\ \mu_t^P(1 - \delta_t^P)\text{time}_{t,ij}^P + v_t^P\text{freq}_{t,ij}^P + \xi_t^P & \text{if } i \neq j. \end{cases} \quad (29b)$$

ここで， δ_t^L, δ_t^P は対象とする輸送モード $t \in t$ における輸送費用の減衰程度を示す．また，各地域の人口シェア変化は $(h_i^\omega - h_i^*)/H \times 100$ で表す．ただし，上付き添字*は基準均衡状態， ω は輸送費用変化後の均衡状態を表す．

$\delta = 0.2$ のうち，物流 (i.e., $\delta_1^L, \delta_3^L, \delta_4^L = 0.2$)，人流 (i.e., $\delta_1^P, \delta_2^P, \delta_3^P, \delta_4^P = 0.2$)，道路 (i.e., $\delta_1^L, \delta_1^P = 0.2$)，高速バス (i.e., $\delta_2^P = 0.2$)，鉄道 (i.e., $\delta_3^L, \delta_3^P = 0.2$)，航空 (i.e., $\delta_4^L, \delta_4^P = 0.2$) の結果を図-4.2 に示す．

図-4.2(a),(b)から，物流・人流ともに，輸送費用の低下は，東京・大阪といった大都市への人口集積をもたらす影響 (i.e., ストロー現象) があることが分かる．これは高山・杉山¹⁾で示された同種の分析 (i.e., $\beta = 0.6, \alpha = 0.3, \delta = 0.2$) 結果と整合している．これに加えて，本結果から，物流よりも人流の方がより広範に人口増加の地域が分布 (e.g., 紀伊半島) していること，地域のうち岡山や那覇のように，物流と人流で人口シェアの増減傾向が異なる地域が存在し得ることを知ることができる．この点は，高山・杉山¹⁾の分析枠組みでは把握できない結果である．

図 2(c)~(f)から，道路の影響が最も大きいことが確認できる．また，道路・鉄道・航空では，北海道・東北・九州などの都市から三大都市圏といった大都市への人口流出 (i.e., ストロー現象) が生じていることが分かる．一方，高速バスでは東京で人口減少，札幌で人口増加するといった，道路・鉄道・航空とは傾向が異なる人口分布変化となった．さらに，鉄道と航空の比較から，航空よりも鉄道の方が人口増減の幅が小さい結果となった．

道路が最も大きい影響となったのは，地域間のリンク接続が最も多く，かつ，距離・所要時間のパラメータの絶対値が他の輸送モードと比べて相対的に大きいことで， δ による選択効用への影響が大きくなったためと考えられる．また，道路・鉄道・航空でストロー現象が生じる一方で，高速バスで変化の傾向が異なったのは，高速バスの交通網が末端交通であるためと考える．具体的には，輸送費用低下が当該地域の消費者の効用増に寄

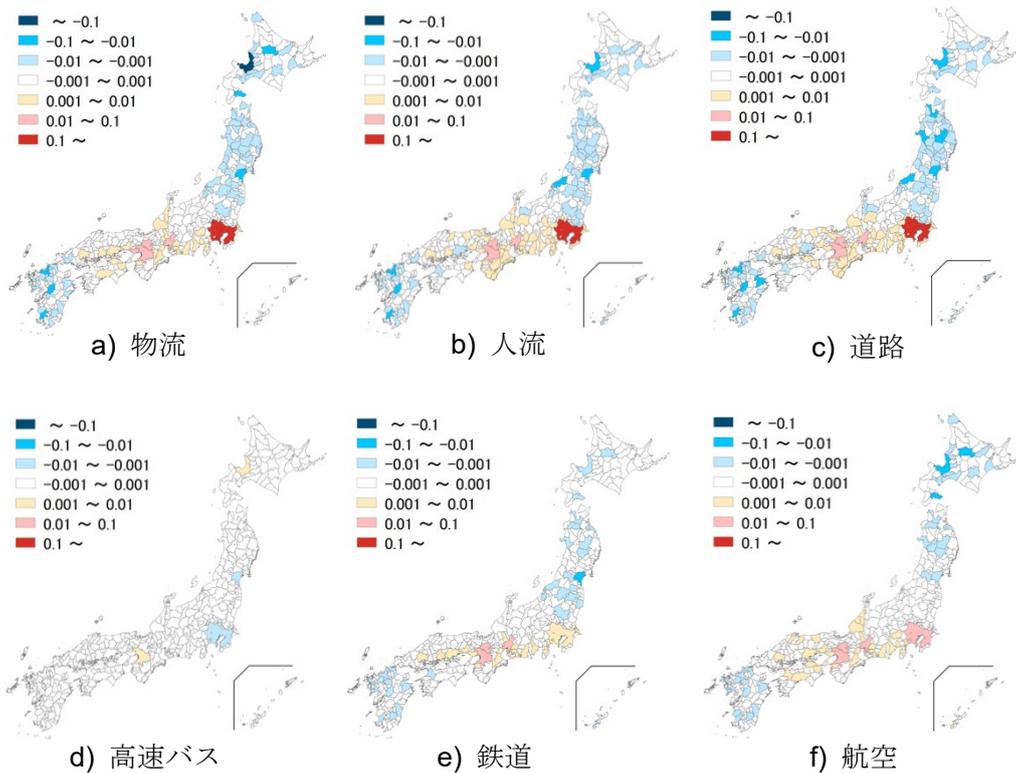


図-4.2 輸送費用が一律低下した場合の人口シェア変化

与する一方で、末端交通であるために、企業の生産活動に対する影響が小さく、集積の経済が働くほどの影響力が無かったと考えられる。よって、集積の経済が優位に働く大都市での大きな人口増加とはならなかったと考えられる。

鉄道と航空の違いは、鉄道が在来線といったローカルな交通網も有しているためと考えられる。この存在により、地方からの人口流出の程度が緩和され、人口増減の幅が小さくなったと考えられる。

以上の結果の違いは輸送網の特性が異なるため生じたものであるが、この違いは複数の輸送モードを考慮した本枠組みだからこそ捉えることのできる結果である。

b) 高速道路・一般国道区間の輸送費用低下の影響
道路の物流・人流を対象に、次のように対象区間の輸送費用を減衰させて各地域の人口シェア変化を調べた：

$$V_{1,ij}^L = \mu_1^L [\text{dist}_{1,ij}^L - \text{dist}_{1,ij}^{TL} + (1 - \delta_1^L) \text{dist}_{1,ij}^{TL}] + \phi \text{dum}_{ij} + \xi_1^L \quad \text{if } i \neq j, \quad (30a)$$

$$V_{1,ij}^P = \mu_1^P [\text{time}_{1,ij}^P - \text{time}_{1,ij}^{TP} + (1 - \delta_1^P) \text{time}_{1,ij}^{TP}] + \xi_1^P \quad \text{if } i \neq j. \quad (30b)$$

ここで、 $\text{dist}_{1,ij}^L$ および $\text{time}_{1,ij}^P$ は、地域 i, j 間の最短経路のうち輸送費用低下の対象区間における距離および所要時間を示す。このケースは、車線増設・視環境の改善・ETCの整備などといった交

通基盤整備や、トラックの隊列走行などの車両の自動運転技術の普及があった場合の輸送アクセス改善効果を分析していると解釈できる。

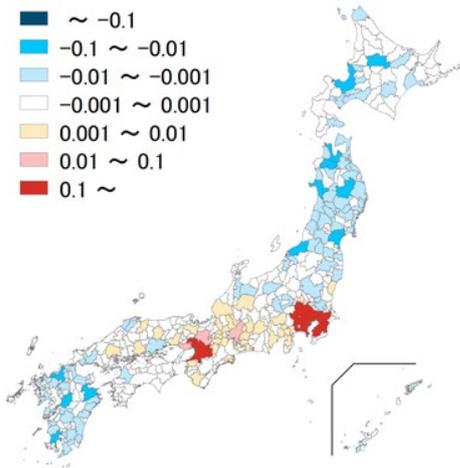
$\delta_1^L, \delta_1^P = 0.2$ とした場合の結果を図-4.3に示す。図より、高速道路区間を対象とした場合、地方都市から三大都市圏への人口集中が進行する結果となった。一方で、一般国道区間を対象とした場合、三大都市圏から地方都市への人口分散が進行する結果となった。

一般国道整備で人口分散となったのは、一般国道が高速道路と比べてローカルな交通網であるからと考える。具体的には、図-4.2(d)の高速バスと同様、ローカルな交通網であることから集積の経済が働くほどの影響力が無く、人口分散が生じたと考える。一方で、三大都市圏の全てが減少となった点が図-4.2(d)と異なる。これは、一般国道・高速バスともにローカルな交通網であるものの、ネットワークの稠密さが異なるためと考える。具体的には、一般国道の方が稠密であることで、輸送費用低下による恩恵が、より地方都市へ分散したためと考える。

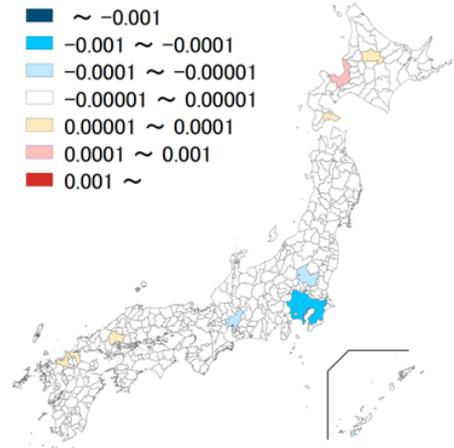
以上より、高速道路整備によって大都市への人口集積が進行すること (i.e., ストロー現象)、また、一般国道の整備によって三大都市圏への人口集中が是正されることが分かった。

c) 運行頻度が増加する影響

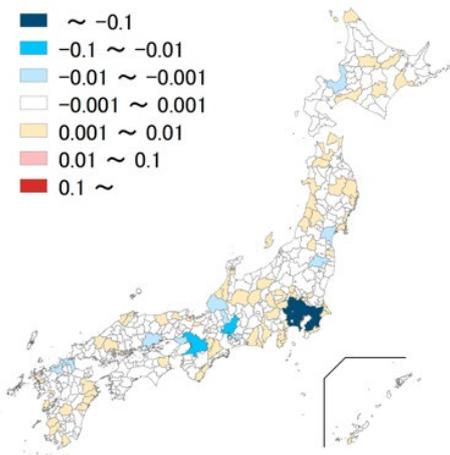
高速バス・鉄道・航空の人流を対象に、次のよ



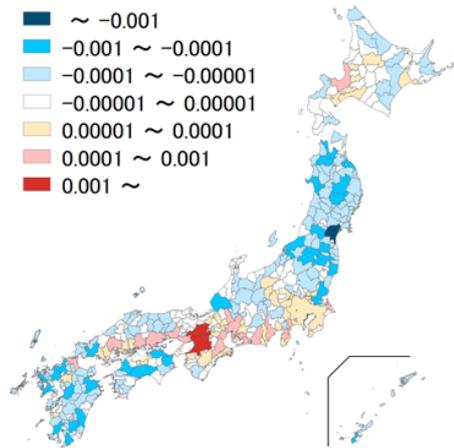
a) 高速道路



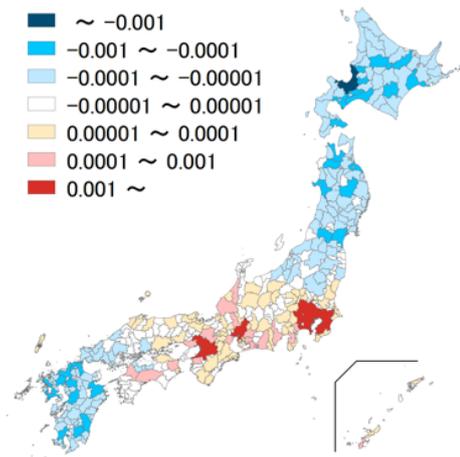
a) 高速バス



b) 一般道路



b) 鉄道



c) 航空

図-4.3 対象道路での輸送費用低下による人口シェア変化

うに経路の存在する OD の運行頻度を増加させて、各地域の人口シェア変化を調べた:

$$V_{t,ij}^P = \mu_t^P \text{time}_{t,ij}^P + v_t^P (\text{freq}_{t,ij}^P + \delta_t^P) + \xi_t^P \quad \text{if } i \neq j. \quad (31)$$

ここで、 δ_t^P は運行頻度の増加数で、使用データ上の各輸送モードの運行頻度の平均値の 2 割増を目安に設定した。高速バス (i.e., $\delta_2^P = 1$)、鉄道 (i.e., $\delta_3^P = 8$)、航空 (i.e., $\delta_4^P = 3$) の結果を図-4.4 に示す。図より、運行頻度を増加させた場合においても、輸送費用を一律低下させた場合と類似の結果となることが分かった。具体的には、高速バスでは大都市の人口が減少し、地方都市の人口が増加する結果となった。鉄道・航空では、東北・九州などの都市から三大都市圏といった大都市へ人口流出する結果となった。

一方で、輸送費用を一律低下させた場合と比較して、高速バスや鉄道では地方都市 (e.g., 札幌, 北九州) で人口増加が生じている。これは、運行頻度 1 本増あたりの影響が、三大都市圏といった

図-4.4 運行頻度が増加した場合の人口シェア変化

大都市と比べて地方都市の方が大きいためと考えられる。また、航空で同様の現象が生じなかった理由としては、三大都市圏を経由する航空の運行頻度が圧倒的に多いことが考えられる。圧倒的に輸送アクセスの利便性が高い地域は、式(27)よ

り、輸送アクセス改善に伴う輸送費用低下の程度が大きく (i.e., 選択効用 V の増加に伴う $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ の増加程度が大きい), 相対的に高い効果が得られる。これに該当する三大都市圏で優位性が保持されたため、高速バス・鉄道のように地方都市での人口増加が生じなかったと考えられる。

以上(1)~(3)の結果から、輸送アクセスを改善させる輸送モードなどの違いによって、人口分布へ与える影響が異なることを把握できた。すなわち、現実的な地域政策評価が可能な手法を構築したと言える。また、(2)でトラックの隊列走行を挙げたように、本枠組みを用いることで技術革新の影響分析に適用することするも可能である。この他にも例えば、鉄道物流に着目すれば新幹線の貨物輸送も想定できる。このように基盤整備に限定されない幅広い分析が可能な手法を構築できたと

考える。

参考文献

- 1) Pflüger, M. and Tabuchi, T. (2010) "The size of regions with land use for production," *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 40, No. 6, pp. 481–489.
- 2) Redding, S. J. and Venables, A. J. (2004) "Economic geography and international inequality," *Journal of International Economics*, Vol. 62, No. 1, pp.53–82.
- 3) Allen, T. and Arkolakis, C. (2014) "Trade and the topography of the spatial economy," *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 129, No. 3, pp. 1085-1140.

第5章 ターミナル整備の空間的応用一般均衡分析

本章では、表-5.1に示す過年度報告書で整理したバス整備効果のうち、「交通機能の向上」の効果を計測する。具体的には、人口分布変化および域内総生産の変化を計測する。

5.1 パラメータ推定結果

本節では、交通機能の向上に関するターミナル整備効果を計測するために必要なパラメータを設定する。そのために、分析対象空間と使用データを明らかにしたうえで、前章で提示したパラメータ推定法に従ってパラメータを設定する。

(1) 分析対象空間および使用データ

a) 地域区分・ネットワーク

対象とする地域区分は、高山・杉山¹⁾と同様に、日本国内を対象に都市雇用圏を基準として分割した432地域区分(図-5.1)を用いた。ネットワークは、表-5.2で扱う、道路網、鉄道網、航空網、航路網を対象とした。ただし、航路網は道路網と一体と捉えて、道路網による輸送が不可能な地域間のみを航路網利用の対象とした。

b) 使用データ

モデルによる実空間を対象とした分析を可能とするため、2005年を基準年として公的データ・

表-5.1 計測対象とするバス整備効果および効果シナリオの設定概要

バス整備効果	効果項目	参考数値 (事例より)	モデル上の設定			
			対象とするモデル			内容
			交通 モデル	立地 モデル	SCGE モデル	
1. 交通機能の向上	①既存路線の運行頻度増加 ②新規路線の開通	①36%増 ②-			○	①運行頻度の増加：3割増 ②乗継→直通
2. 周辺道路の混雑解消効果	前面道路の混雑解消 バス停撤去による混雑解消	-	○			交通容量の増加
3. 歩行者の利便性向上	乗り換え移動時間短縮 待ち時間短縮	8.5分 -		○		時間短縮をアクセシビリティに反映
4. 待合室の機能・快適性向上	(対象外)					
5. 防災機能向上	(対象外)					
6. 地域経済活性化	土地の高度利用	敷地面積に対して5倍		○		利用可能な土地面積を増加
7. 新たな交通サービスの適用	(対象外)					



図-5.1 地域区分

民間データを収集・加工することでデータを整備した。使用データを表-5.2に示す。

消費者数 h_i は、国勢調査の就業者数を使用して、都市雇用圏で集計した値とした。

面積 A_i は、国土数値情報の土地利用3次メッシュを使用して、このうち、経済活動に利用可能な土地利用用途（i.e., 田, その他の農用地, 建物用途）の面積を都市雇用圏で集計した値とした。

距離・所要時間は、デジタル道路地図（DRM）および国土数値情報の海上経路・定期旅客経路、総合ナビゲーションアプリ『NAVITIME』を運営するナビタイムジャパン提供の代表地点間経路

データを用いて設定した。

具体的には、輸送モードのうち、自動車（船舶含む）については、DRMの高速道路・一般国道および海上経路・定期旅客航路を対象に、都市雇用圏の代表地点間で所要時間が最短となる経路をダイクストラ法で探索し、当該経路の距離・所要時間を用いた。このとき、各都市雇用圏の代表地点は、都市雇用圏内の最も人口が多い市区町村の役所とした。ただし、地域内の距離は、Redding and Venables²⁾と同様、地域 i の総面積 $area_i$ に応じた、 $(2/3)\sqrt{area_i/\pi}$ と設定した。地域内の所要時間は、地域内距離を道路交通センサスにより設定する速度 v で除して設定した。輸送モードのうち、高速バス・鉄道・航空の距離・所要時間は、ナビタイムジャパン提供の経路データに基づき設定した³。具体的には、代表地点間における所要時間を優先した最適経路の値を用いた³。データ上、地域間の経路が無いものは定期的な物流・人流が存在しないことを意味するため、この場合は地域間の経路無しとした。

運行頻度は、高速バス・鉄道・航空を対象に、ナビタイムジャパン提供の経路データのうち、最適経路における平日の一日当たりの運行本数を用いた。

交易シェア N_{ij} は、全国貨物純流動調査（物流センサス）、全国幹線旅客純流動調査⁴を用いて設定

表-5.2 計測対象とするバスタ整備効果および効果シナリオの設定概要

項目	出典
消費者数 h_i	国勢調査（2005年）
面積 A_i	国土数値情報 土地利用3次メッシュ（2005年）
距離 $dist_{ij}$ 所要時間 $time_{ij}$	デジタル道路地図（DRM）（2005年）
	ナビタイムジャパン提供の経路データ（2019年）
運行頻度 $freq_{ij}$	国土数値情報 海上経路（2011年）
	定期旅客航路（2012年）
	ナビタイムジャパン提供の経路データ（同上）
交易シェア N_{ij}	国土数値情報 港湾間流通量・海上経路（同上）
	定期旅客航路（同上）
交易额 X_{ij}	全国貨物純流動調査（2005年）
	全国幹線旅客純流動調査（2005年）
	全国貨物純流動調査（同上）

¹ 道路交通センサスの都道府県別旅行速度を用いて、属する都道府県の値を各地域の値として設定した。

² 当データは人流を対象としたものであるが、距離は人流に限らず適用できると判断して使用した。

³ 経路は、所要時間、到着時間、乗換回数、運賃コストなど複数のコストの合計が最適となるように決定される。今回はこのうち、所要時間を優先したコスト計算を行っている。

⁴ 本モデルでは全産業を対象としているため、観光など

を区別せず全目的のデータを使用している。経済の基幹データである産業連関表では、観光業の人流は、交易にあたり財・サービスが移動するという意味において、通常の産業の物流と同様に扱っているため（i.e., 観光業は財・サービスの需要のために消費者が消費地・生産地間を往来し、通常の産業では財・サービスが生産地から消費地へ移動する）、本対応で問題は無い。なお、空間経済モデルであるSCGEモデルで観光業を扱った小池・佐藤⁶⁾においても観光業を区別せずに扱っている。

した。具体的には、物流の交易シェアは物流センサスの輸送機関別の輸送量のシェア、人流の交易シェアは全国幹線旅客純流動調査（元データ⁵）の移動人数の輸送機関別のシェアとした⁶。ただし、輸送モード選択に関するパラメータが主な交易の傾向を捉えた推定値となるよう、輸送量や移動人数が微小な場合はゼロと見なしてシェアを算定した⁷。

交易额 X_{ij} は、432都市雇用圏間の交易额のデータが存在しないことから、物流センサスの輸送量を代用した。交易额と輸送量の関係性として、地域間産業連関表の9ブロック間ではあるものの、地域間産業連関表の金額シェアと物流センサスの重量シェアは相関係数0.94と高い相関が存在する（佐藤ほか⁴）。これより、交易额を輸送量で代用する妥当性は一定程度あると判断し使用した。

(2) パラメータ設定の結果

α, σ は、Allen and Arkolakis³)でも使用される、実証研究の知見と整合する値に設定した。具体的には、土地の支出割合 α は家計の住宅への支出割合を基に0.3とした。代替弾力性 σ はEaton and Kortum⁵)と整合するように9.0と設定した。土地の供給割合である β は、先行研究（高山・杉山¹¹）で明らかにされた、ストロー現象を表現できる0.6とした。

輸送費用に関するパラメータ $\tau_{ij}^{1-\sigma}$ は、前章の方法により推定を行った。第一段階では、前項のデータを使用した集計ロジット⁸のパラメータを、R言語のoptim関数を用いて、最適化手法の一つであるBFGSにより推定した。ただし、地域内（i.e., $i = j$ ）のパラメータは地域間（i.e., $i \neq j$ ）の推定値を用いた。第二段階では、説明変数に関するデータは最小値で正規化したものを使用した。なお、推定にはR言語のlm関数を用いた。

第一段階の推定結果である選択効用パラメータを表-5.3、表-5.4に示す。表より、距離・所要時間に関するパラメータは負の値、運行頻度に関するパラメータは正の値であることが確認できる。これは、距離・所要時間の増加により効用が低下すること、運行頻度の増加により効用が増加することを意味しており、妥当な結果と言える。また、物流・人流ともに ρ^2 が十分に大きく、本モデルで交通手段選択割合を十分に表現できていること

⁵ 元データは市町村単位のデータであるものの、全国旅客純流動調査では都道府県内で完結する移動は対象としておらず、元データにも存在しないことから、第一段階の人流に関するパラメータ推定では、同一都道府県内の地域間は除外して推定した。

⁶ 日本全国の全般的な分担率を再現するために、輸送量ではなく輸送シェアを使用した。輸送量の場合、大都市を起終点とするODの影響を大きく受けるため、それを回

表-5.3 第一段階の推定結果（物流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
距離	道路+航路	μ_1^l	-3.79.E-03	-8.76
	鉄道	μ_3^l	-1.95.E-03	-5.17
	航空	μ_4^l	-2.91.E-03	-5.69
同一県間	道路	ϕ	3.17	3.89
定数項	鉄道	ξ_3^l	-4.53	-79.87
	航空	ξ_4^l	-4.19	-35.42
Sample size			52,587	
Null log likelihood			-4.31.E+04	
Final log likelihood			-7.98.E+03	
ρ^2			0.8148	

表-5.4 第一段階の推定結果（人流）

変数	輸送モード	パラメータ	推定値	t 値
所要時間	道路+航路	μ_1^p	-2.61.E-02	-51.29
	高速バス	μ_2^p	-9.41.E-03	-17.35
	鉄道	μ_3^p	-2.65.E-02	-32.42
	航空	μ_4^p	-2.09.E-02	-13.84
運行頻度	高速バス	v_2^p	1.30.E-02	2.740
	鉄道	v_3^p	6.30.E-03	12.82
	航空	v_4^p	1.18.E-02	4.010
定数項	高速バス	ξ_2^p	-4.09	-31.90
	鉄道	ξ_3^p	-1.84	-32.32
	航空	ξ_4^p	-1.51	-9.433
Sample size			23,117	
Null log likelihood			-2.52.E+04	
Final log likelihood			-1.20.E+04	
ρ^2			0.5233	

が確認できる。

表-5.3の物流に関する結果より、距離の推定値は $|\mu_1^l| > |\mu_4^l| > |\mu_3^l|$ であり、かつ、鉄道と航空の定数項が負であることが確認できる。これは、距離が短いODでは道路が利用されて、距離が長くなるにつれて航空や鉄道を利用する傾向にあることを表しており、直観と合った違和感の無い推定結果を得た。

表-5.4の人流に関する結果では、所要時間の推定値は、 $|\mu_3^p| > |\mu_1^p| > |\mu_4^p| > |\mu_2^p|$ となり、道路、鉄道、航空の推定値のオーダーは同程度となった。各モードの速度はおおむね、航空>鉄道（幹線鉄道）>道路となることから、距離ベースで考えた場合、利用の傾向はこの大小関係となり（i.e., 距離が長いほど航空、鉄道が選択される）、直観に合った結果と言える。次いで、運行頻度の推定値は、鉄道に比べて高速バス・航空が大きい。これは運行本数の増加に対する効用の増加分が大きいこ

避するために輸送シェアを採用した。

⁷ 輸送量は1トン未満、移動人数は0.01人未満を微小な値とした。なお、微小な値をゼロとせずにパラメータ推定を実施した場合も、本結果と同様の符号条件および統計的有意性を持つ推定結果が得られた。

⁸ 非集計ロジットによるモデル化も考えられるが、単純化のために集計ロジットモデルを採用した。

表-5.5 第二段階の推定結果

変数	パラメータ	推定値	t 値
物流の 選択効用	θ^L	0.651	47.35
人流の 選択効用	θ^P	0.723	38.94
R^2		0.5632	

とを表している。鉄道と比べて高速バス・航空は運行頻度が相対的に少なく運行頻度の重要度が高いことを踏まえると、直観に合った結果と言える。

第二段階の推定結果である物流・人流の選択効用に関するパラメータを表-5.5に示す⁹。表より、物流・人流ともに推定値は正の値となった。これは選択効用が増加するにつれて交易が増加することを示しており、妥当な結果であると言える。

アメニティ水準 u_i も同様に、前述のパラメータ設定方法によりキャリブレーションを行った。

5.2 金沢でのターミナル整備の経済波及効果

(1) 整備効果の計測

ターミナル整備による交通機能の向上の効果として、運行頻度の増加と新規路線の開通の2つに着目し、人口シェア変化と域内総生産シェア変化、域内総生産成長率、域内総生産の総額変化率を計測する。各指標は表-5.6のとおりを表す。

a) 運行頻度一律増加

計測の前提条件

運行頻度の増加により交通機能が向上するとして、事例の参考数値を踏まえて現状の運行頻度を3割増加させる。具体的には、金沢都市雇用圏を発地とするODを対象に、以下の3ケースについての効果計測を行う。運行頻度分布を図-5.2に示す。

- 一律ケース：対象の全路線の運行頻度が3割増加したケース
- 強化ケース：運行頻度が上位半数の路線を

表-5.6 各指標の定義式

項目	定義式
人口シェア変化	$(h_i^\omega - h_i^*)/H \times 100$
域内総生産シェア変化	$\left(\sum_{j \in K} p_{ij}^\omega q_{ij}^\omega h_j^\omega - \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \right) / \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \times 100$
域内総生産成長率	$\left(\sum_{j \in K} p_{ij}^\omega q_{ij}^\omega h_j^\omega - \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \right) / \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \times 100$
域内総生産の総額変化率	$\left(\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} p_{ij}^\omega q_{ij}^\omega h_j^\omega - \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \right) / \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} p_{ij}^* q_{ij}^* h_j^* \times 100$

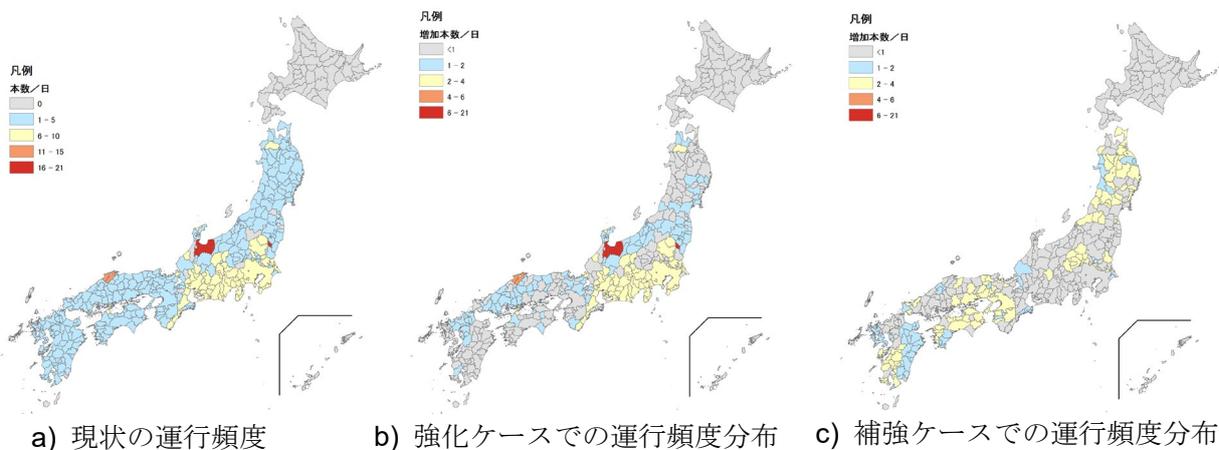


図-5.2 金沢発の運行頻度の分布

⁹ 物流項と人流項には一定程度の相関がある。しかしな

がら、多重共線性を示すVIFは2.7程度であり、基準となる10には満たないため、問題は無いと判断した。

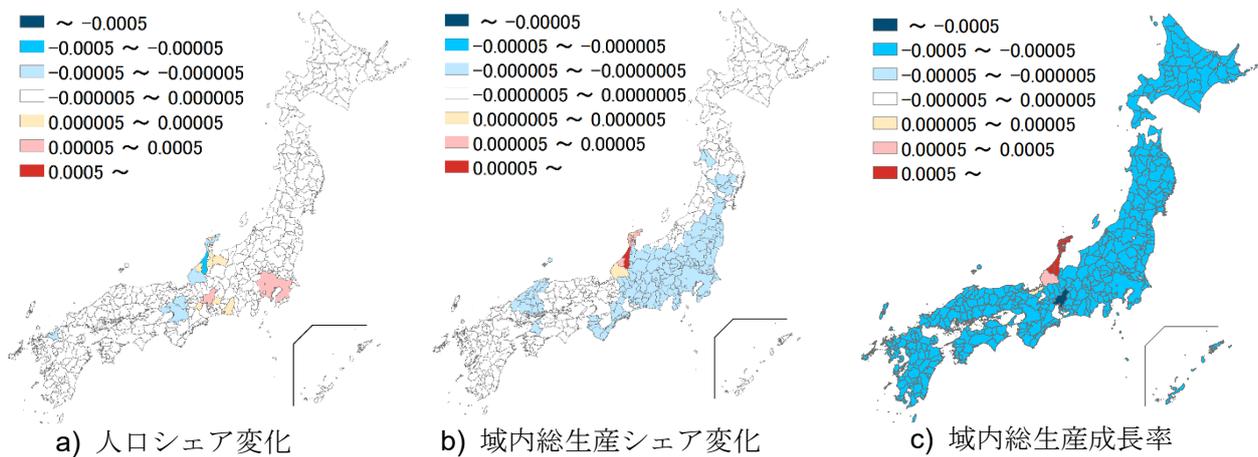


図-5.3 金沢での運行頻度増加：一律ケース

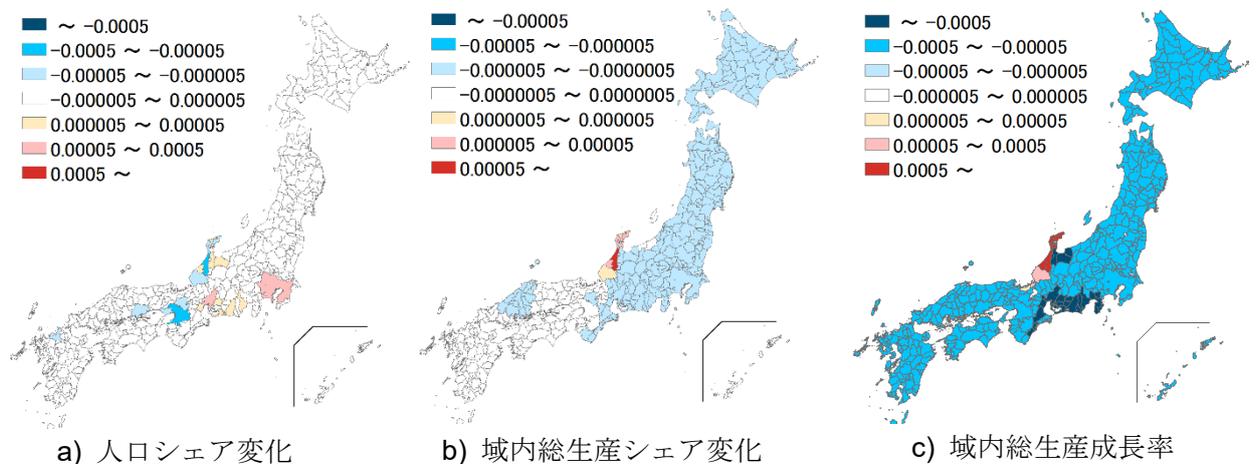


図-5.4 金沢での運行頻度増加：強化ケース

対象に、上記と同本数増加となるよう、一律に増加させたケース

- 補強ケース：運行頻度が下位半数の路線を対象に、上記と同本数増加となるよう、一律に増加させたケース

計測結果：一律ケース

一律ケースの計測結果を図-5.3に示す。

人口シェア変化では、現状の運行頻度分布（図5.2 a）と類似した傾向となった。具体的には、運行本数が多い地域は人口シェアが増加する結果となった。ただし、東京や名古屋といった大都市圏では、運行本数が同程度でも人口シェア増加が相対的に大きくなるといった、異なる傾向も見られた。これは、経済集積のメカニズムにより大都市圏が優位となったためと考えられる。

域内総生産シェア変化では、対象である金沢都市雇用圏における増加が最も大きく、加えて周辺の地域も増加する結果となった。域内総生産成長率では、金沢都市雇用圏を含む石川県や福井県での増加が大きく、その他の地域は減少した。域内

総生産の総額変化率は、日本全国では -9.459×10^{-5} と若干の減少となったが、北陸3県では0.0043と増加した。

以上から、北陸3県といった限定的な範囲において、地域経済に正の効果があることが分かった。

計測結果：強化ケース

強化ケースの計測結果を図-5.4に示す。

人口シェア変化では、一律ケースと同様の傾向となった。ここから、対象路線を全路線から上位半数に絞ることは、人口シェアに対しては影響が小さいことが分かった。

域内総生産シェア変化でも、一律ケースと同様に、対象である金沢都市雇用圏の増加が最も大きく、加えて周辺地域も増加する結果となった。一方で、北海道や東北などで減少傾向となるといった違いが見られた。域内総生産成長率では、一律ケースと同様、金沢都市雇用圏を含む石川県や福井県で大きく増加した一方で、名古屋を含む、太平洋に隣接する中部地方の地域で減少程度が強まった。域内総生産の総額変化率は、日本全国で

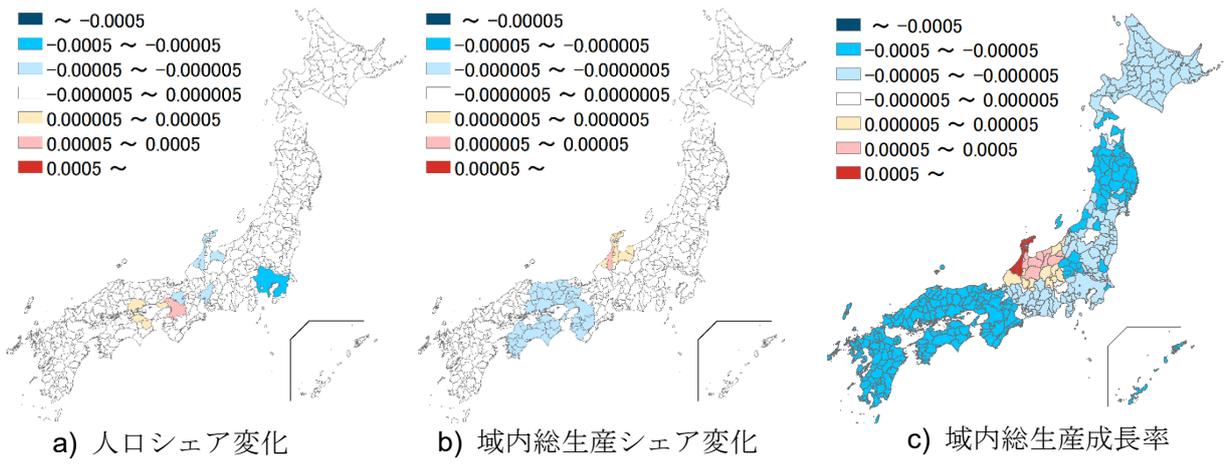


図-5.5 金沢での運行頻度増加：補強ケース

は -1.130×10^{-4} と若干の減少となったが、北陸3県では0.0049と増加した。

以上より、一律ケースと同様、強化ケースにおいても北陸3県の地域経済に正の効果が見られた。

計測結果：補強ケース

補強ケースの計測結果を図-5.5に示す。

人口シェア変化では、補強ケースでの運行頻度増加分布（図-5.2 c)）と類似した傾向となった。具体的には、運行本数が多い大阪や神戸、愛媛といった地域で人口シェアが増加する結果となった。一方で、東北や四国、九州といった、ある程度運行頻度が増加している地域でも、人口シェアが増加していない地域があることが確認できる。これは、金沢都市雇用圏との地域間所要時間が長いために生じたと考えられる。具体的には、金沢都市雇用圏との地域間所要時間が長いODでは、選択効用のうち、運行頻度よりも所要時間が選択効用に与える影響が大きいために、運行頻度増加の恩恵を受けづらくなっていると考えられる。

域内総生産シェア変化では、一律ケースや強化ケースと同様に、対象である金沢都市雇用圏での増加が最も大きく、加えて周辺地域も増加する結果となった。一律ケースや強化ケースと異なる点としては、減少する地域が限定的で、関西や四国のみで減少が見られた。域内総生産成長率では、一律ケース・強化ケースと比べて、長野県の一部を含むような広い範囲で増加した。域内総生産の総額変化率は、日本全国では -3.866×10^{-5} と若干減少したが、北陸3県では0.0022で増加した。一律ケースや強化ケースと比較すると、日本全国での若干減少は共通の傾向であり、一方で、北陸3県での増加の程度は小さい結果となった。

b) 新規路線の開通

計測の前提条件

新規路線の開通により交通機能が向上すると

して、乗継路線が直通路線となることを想定し、所要時間を改善させる。具体的には、金沢都市雇用圏が発地であり北陸3県内を着地とする路線を対象に効果計測を行う。設定した所要時間変化を図-5.6に示す。

計測結果

新規路線開通ケースの計測結果は、図-5.7に示すとおりである。

人口シェア変化では、新規路線開通による所要時間変化と同様の傾向となった。具体的には、所要時間が短縮する地域の人口シェアが増加する結果となった。一方で、所要時間短縮が大きい場合でも、それに比例して人口シェア増加が生じない地域があることも確認できた。これは、基準時点での地域間所要時間が長いことが影響していると考えられる。

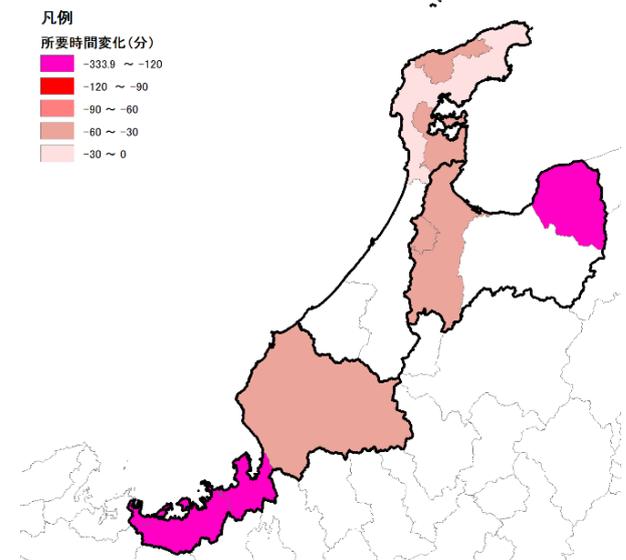


図-5.6 金沢での新規路線開通による所要時間変化

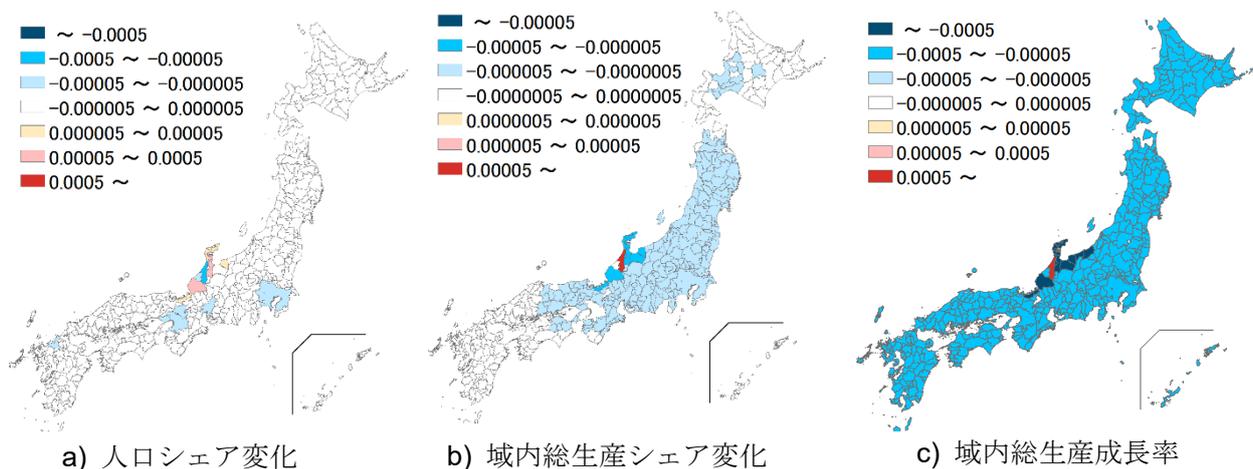


図-5.7 金沢での新規路線開通

域内総生産シェア変化では、対象である金沢都市雇用圏のみ増加する結果となった。域内総生産成長率においても同様に、金沢都市雇用圏のみの増加となった。域内総生産の総額変化率は、日本全国では -2.146×10^{-4} と若干の減少であったが、北陸3県では0.0004で増加した。ただし、増加の程度は運行頻度増加の各ケースと比べると小さくなった。

このことから、北陸3県での地域経済効果を考えた場合、新規路線開通よりも運行頻度増加の方が正の効果が大きく、望ましいと言える。

5.3 札幌でのターミナル整備の経済波及効果

(1) 整備効果の計測

金沢と同様に、ターミナル整備による交通機能の向上の効果として、運行頻度の増加と新規路線の開通の2つに着目し、人口シェア変化、域内総生産シェア変化、域内総生産成長率、域内総生産の総額変化率を計測する。

a) 運行頻度一律増加 計測の前提条件

札幌都市雇用圏を発地とするODを対象に、金沢と同様、以下の3ケースについての効果計測を行う。運行頻度分布を図-5.8に示す。

- 一律ケース：対象の全路線の運行頻度が3割増加したケース
- 強化ケース：運行頻度が上位半数の路線を対象に、上記と同本数増加となるよう、一律に増加させたケース
- 補強ケース：運行頻度が下位半数の路線を対象に、上記と同本数増加となるよう、一律に増加させたケース

計測結果：一律ケース

一律ケースの計測結果を図-5.9に示す。

人口シェア変化では、現状の運行頻度分布（図-5.8 a)）と類似した傾向となった。具体的には、運行本数が多い地域は人口シェアが増加する結果となった。

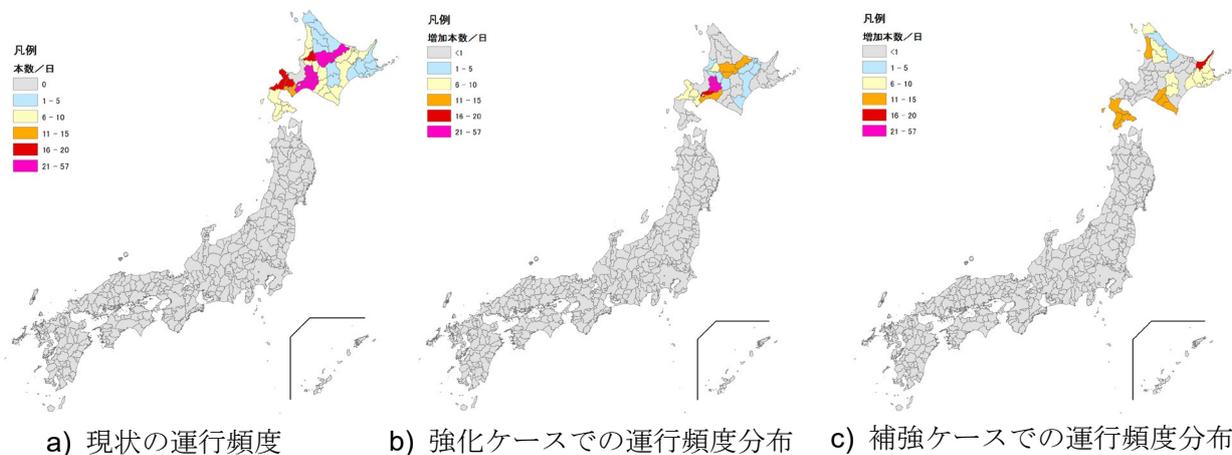


図-5.8 札幌発の運行頻度の分布

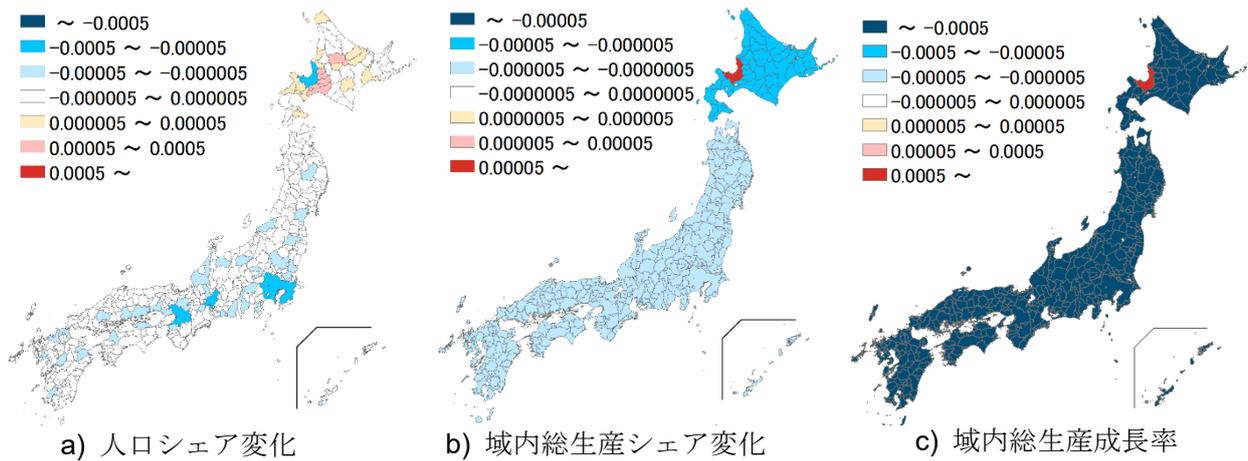


図-5.9 札幌での運行頻度増加：一律ケース

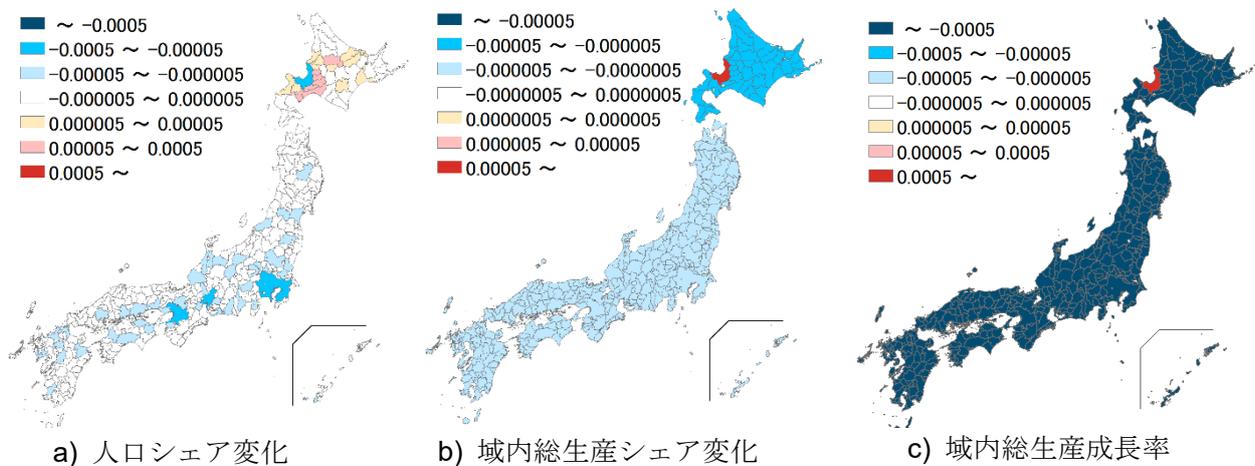


図-5.10 札幌での運行頻度増加：強化ケース

域内総生産シェア変化では、対象である札幌都市雇用圏のみ増加する結果となった。金沢での結果と比べて、正の効果がより限定的となったのは、運行頻度の増加対象である北海道内での経済規模の差が大きいためと考えられる。具体的には、大都市圏である札幌都市雇用圏の経済集積の影響が影響し、効果が札幌都市雇用圏に集中したと考える。域内総生産成長率においても、同様の傾向が見られた。域内総生産の総額変化率では、日本全国で減少 (-1.414×10^{-3}) となり、札幌都市雇用圏周辺（表-5.7に示す札幌都市雇用圏含め隣接

する都市雇用圏での合計)においても -0.0026 と減少となった。

計測結果：強化ケース

強化ケースの計測結果を図-5.10に示す。

人口シェア変化では、金沢のケースと同じように、一律ケースと同様の傾向となった。これより、金沢と同様、札幌においても、対象を全路線でなく上位半数の路線に絞り込むことは、人口に対しては影響が小さいことが分かった。

域内総生産シェア変化では、一律ケースと同様、対象圏域である札幌都市雇用圏のみ増加する結果となった。域内総生産成長率でも同様の結果となった。域内総生産の総額変化率は、一律ケースと同様、日本全国で減少し (-1.599×10^{-3})、札幌都市雇用圏含む隣接都市雇用圏でも減少 (-0.0035) した。

計測結果：補強ケース

補強ケースの計測結果を図-5.11に示す。

人口シェア変化では、補強ケースでの運行頻度

表-5.7 札幌都市雇用圏および札幌都市雇用圏に隣接する都市雇用圏

番号	地域区分	番号	地域区分
1	札幌	13	岩内町
7	室蘭市	15	夕張・栗山
8	千歳市	20	美唄市
10	岩見沢市	27	留萌市
11	滝川市	29	倶知安町

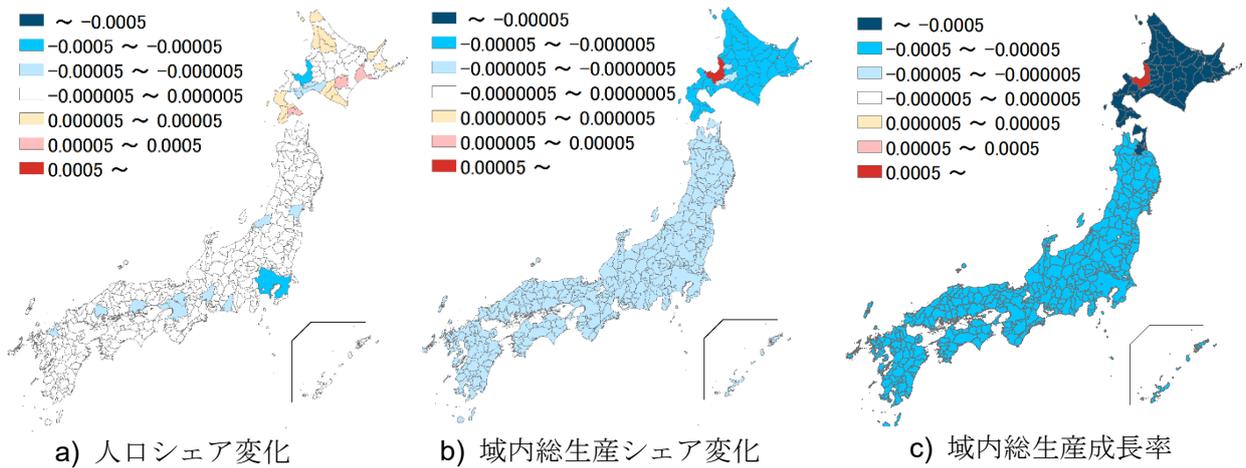


図-5.11 札幌での運行頻度増加：補強ケース

増加分布（図-5.8 c）と類似した傾向となった。具体的には、運行本数が多い地域で人口シェアが増加する結果となった。

域内総生産シェア変化では、一律ケースや強化ケースと同様、対象である札幌都市雇用圏のみ増加する結果となった。一方、札幌都市雇用圏の隣接する一部の地域で若干減少程度が小さくなるという違いも見られた。域内総生産成長率でも札幌都市雇用圏のみが増加するといった同様の結果となった。域内総生産の総額変化率は、日本全国では減少したものの（ -7.020×10^{-4} ）、一律ケース・強化ケースと異なり、札幌都市雇用圏含む隣接都市雇用圏では0.0012と増加した。

b) 新規路線の開通

計測の前提条件

新規路線の開通により交通機能が向上するとして、乗継路線が直通路線となることを想定し、所要時間を改善させる。具体的には、札幌都市雇用圏が発地であり北海道内を着地とする路線を対象に効果計測を行う。設定した所要時間変化を図-5.12に示す。

計測結果

新規路線開通ケースの計測結果を図-5.13に示す。

人口シェア変化では、新規路線開通による所要時間変化と同様の傾向となった。具体的には、所要時間が短縮する地域の人口シェアが増加する結果となった。一方で、金沢と同様、所要時間短縮が大きい場合でも、それに比例して人口シェア増加が生じないことも確認できた。

域内総生産シェア変化では、運行頻度の増加の各ケースと同様、対象である札幌都市雇用圏のみ増加する結果となった。域内総生産成長率でも同様の結果となった。域内総生産の総額変化率は、日本全国では減少したものの（ -9.238×10^{-4} ）、札幌

都市雇用圏含む隣接都市雇用圏では0.0011と増加した。

参考文献

- 1) 高山雄貴・杉山雅也 (2020) “新経済地理学に基づく交通基盤整備の影響評価：モデル構造と人口分布変化の関係,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.2, pp.100-113.
- 2) Redding, S. J. and Venables, A. J. (2004) “Economic geography and international inequality,” *Journal of International Economics*, Vol. 62, No. 1, pp.53-82.
- 3) Allen, T. and Arkolakis, C. (2014) “Trade and the topography of the spatial economy,” *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 129, No. 3, pp. 1085-1140.
- 4) 佐藤啓輔・菊川康彬・小池淳司 (2016) “交易・物資流動に関する既往統計と企業間取引データの特性比較,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_201-I_211.
- 5) Eaton, J. and Kortum, S. (2002) “Technology, geography, and trade,” *Econometrica*, Vol.70, No.5, pp. 1741-1779.
- 6) 小池淳司・佐藤啓輔 (2012) “交通ネットワーク整備

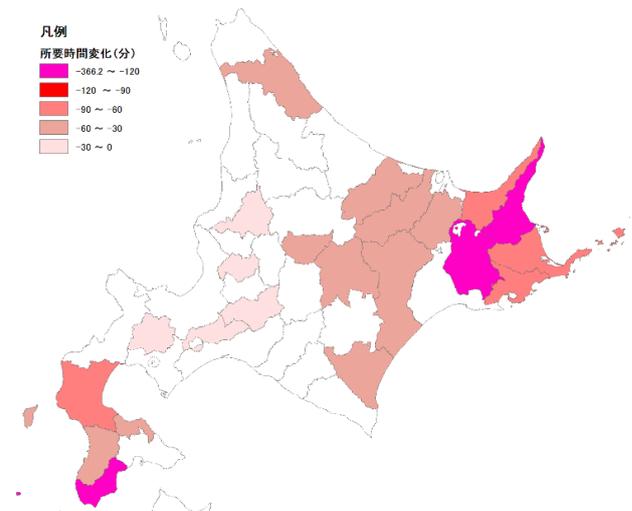


図-5.12 札幌での新規路線開通による所要時間変化

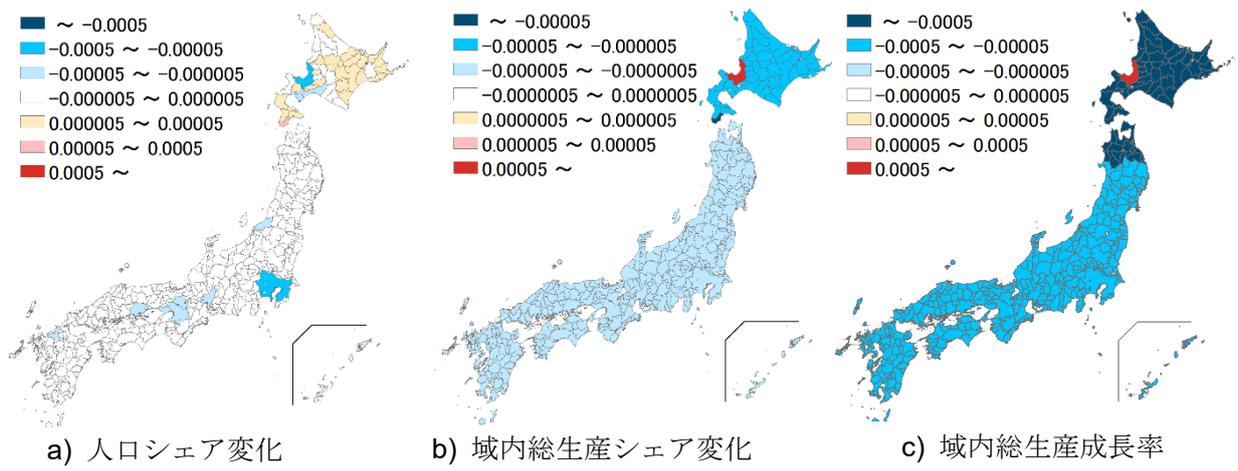


図-5.13 札幌での新規路線開通

が観光産業の生産活動へ与える空間的影響の把握～鳥取・兵庫県の日本海地域における基礎自治体レベルの観光産業の付加価値推計を踏まえた検討～,” 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.68, No.5, pp.I_349-I_361.

第6章 おわりに

6.1 成果のまとめ

本研究では、第1章にて設定した研究開発課題[A,B,C]を実施した。その過程で得られた知見・成果は以下に示す通りである。

[A] 交通・立地統合モデルを用いた政策効果分析手法の開発

課題[A]は、次の2つの項目を順に進めた：(A1)交通・立地統合モデルを用いた分析枠組の構築、(A2)構築した統合モデルの基本特性を解明するための予備解析。これらの項目毎の成果を以下に示す。

(A1) 交通・立地統合モデルを用いた分析枠組の構築

統合モデルの基礎となる“交通サブモデル”と“立地サブモデル”を構築した。そして、機械学習・進化ゲーム理論で採用される手法を応用することで、各々のサブモデルの数値解析の大幅な効率化を実現した。さらに、国勢調査・道路交通センサ等の入手が比較的容易なデータのみを用いてパラメータを推定・キャリブレートする方法を提案した。その上で、構築した2種類のサブモデルを適切に組み合わせることで、次のような特徴を持つ交通・立地統合モデルを用いた分析枠組を完成させた：[特徴1] 大字単位の立地空間・全道路ネットワークを対象とした分析が可能；[特徴2] 初期状態（基準均衡状態）における居住地・就業地別の労働者人口が入力データと完全に一致する；[特徴3] 各サブモデルの手法を応用した、効率的な数値解析手法を備える。以上の分析枠組の開発に関する成果の一部は、査読付き論文[5,8]として公開した。

(A2) 構築した統合モデルの予備解析

金沢都市雇用圏を対象とした予備解析により、構築した分析枠組の基本特性を確認した。具体的には、地点間の交通費用が一律に低下する状況を

想定した反実仮想実験を行った。その結果、立地点数が1,656、道路リンク数が117,175の（約2億の変数が存在する）都市・交通システムを対象とした解析でも問題なく計算可能であることが確認できた（次の計算機環境で2時間未満。プロセッサ：12th Gen Intel(R) Core(TM) i9-12900KF、実装RAM：64GB）。さらに、一律に交通費用が低下することによる土地利用への影響を分析した結果（図4）は、我が国の都市で共通して観測された人口分布変化と整合していることも明らかとなった。より具体的には、居住地・就業地別の人口分布とともに、中心部の人口減少と郊外部の人口増加という実証分析結果（論文[15,16]）と整合する変化が見られた。このことから、開発した分析枠組が少なくとも定性的には実現象と整合することが確認できた。

[B] 空間的応用一般均衡（SCGE）モデルを用いた地域経済分析手法の開発

課題[B]は、次の2つの項目を順に進めた：(B1)空間的一般均衡（SCGE）モデルを用いた分析枠組の構築、(B2)構築したSCGEモデルの基本特性を解明するための予備解析。これらの項目毎の成果は、以下に示す通りである。

(B1) SCGEモデルを用いた分析枠組の構築

土木計画学分野で研究が蓄積されてきたSCGEモデル、空間経済学分野で急速に研究が蓄積されている定量的空間経済モデルを基盤としたモデルを開発した。その際、人流・物流の円滑化・効率化がもたらす長期的影響を適切に評価するために、（少なくとも仮想的で対称性の高いシンプルな都市システム空間において）“ストロー現象”を適切に表現できる数理構造を採用した。その上で、入手が比較的容易な交通・経済データ（国土数値情報、産業連関表など）を利用したパラメータ推定手法、日本全国を対象とした分析を実施するための数値解析手法を提案した。以上により、

次のような特徴を有する分析枠組を完成させた：
[特徴1] 都市間輸送網の整備に伴うストロー現象が生じ得る数理構造を持つ；[特徴2] 初期状態（基準均衡状態）における都市人口が入力データと完全に一致する；[特徴3] 進化ゲーム理論に基づく調整過程により実現する均衡状態を導出できる。以上の分析枠組の開発に関する成果の一部は、査読付き論文[6]として公開した。

(B2) 構築したSCGEモデルの予備解析

日本全国を対象とした予備解析により、構築したモデルの基本特性を確認した。具体的には、交通基盤整備・技術進展に伴う都市間輸送の効率化が地域経済に与える影響の分析を通じて、分析枠組が有する特徴を調べた。この分析では、輸送効率が改善される交通機関に応じて分析結果がどのように変化するか、(SCGEモデルを用いた既存の分析枠組では不可能であった)ストロー現象を表現できるか否かに特に注目した。この分析結果は、図5に示す通りである。この結果から、分析枠組が持つ次の特徴が明らかとなった：[特徴1] 数値解析は一般的なパソコンを用いても1時間以内で実施可能；[特徴2] 現実的な都市システムを対象とした場合でもストロー現象が生じる；[特徴3] 輸送効率が改善する交通機関に応じて分析結果が質的に異なる。以上の成果は、論文[14,15]でも指摘した“現実的な都市システム空間で重要な経済集積現象を再現できない”という既存の定量的空間経済学分野の課題を解決したことを意味している。

[C] 実都市における公共交通ターミナル整備の長期的・広域的効果の計測

課題[C]は、次の2項目を実施した：(C1)交通・立地統合モデルを用いたターミナル整備効果の計測、(C2)公共交通ターミナル整備のSCGE分析。これらは共通してバスタプロジェクトの長期的・広域的効果を計測するものである。その具体的な成果は以下に示す通り。

(C1) 交通・立地統合モデルを用いたターミナル整備効果の計測

課題[A]で開発した分析枠組を用いて、札幌・金沢を対象に公共交通ターミナルの整備効果を調べた。この分析では、札幌は札幌駅前、金沢は金沢駅前と香林坊の2ヶ所を整備地区の候補とした上で、ターミナル整備がもたらす3種類の効果を個別に計測した：周辺道路の混雑解消（バス停の集約に伴う道路容量の増加）効果、乗換利便性の向上効果、ターミナル整備箇所の土地の高度利用効果。

これらの分析により得られた結果の一部は、図6に示す通りである。この図からも確認できるよ

うに、ターミナル整備がもたらす3種類の効果を個別に計測・可視化できた上に、以下に示す成果が得られた：ターミナルの整備箇所に応じて効果が質的に異なる；ターミナル整備がもたらす3種類の効果は個別には決して大きいものではないものの、交通・土地利用の両方とも広範囲にわたって波及する。さらに、これらの結果を踏まえた上で、いくつかの別の分析事例を蓄積させることができたため、その成果の一部を査読付き論文[3]として公表した。

(C2) 公共交通ターミナル整備のSCGE分析

課題[B]で開発した分析枠組を用いて、札幌・金沢を対象にターミナル整備がもたらす波及効果を計測した。ここでは、ターミナル整備の効果として、高速バスの運行頻度増加（既存路線の運行頻度変化）・新規路線（札幌と北海道内の都市・地域を発着地とする現存しない路線、金沢と北陸3県内の都市・地域を発着地とする現存しない路線）開通の2種類に注目し、個別の影響を分析した。

分析の結果の一例は図7に示す通りである。一連の分析結果から、ターミナル整備は整備都市の人口減少・周辺地域の人口増加をもたらす一方で、域内総生産は逆の影響が生じることが確認された。また、整備都市を含む地域全体で見ると（北海道、北陸3県）、新規路線を開通する場合は人口・域内総生産ともに増加する一方で、既存路線の運行頻度を増やす場合は域内総生産が減少してしまうケースが存在することが示された。なお、既存路線の頻度増加、新規路線開通ともに、総運行本数が3割増加する形で設定したにも関わらず、その影響は決して大きいと言えるものではないことも明らかとなった。これらの結果は、ターミナル整備に加えて、周辺の特徴的な産業の振興・地域間連携促進などの、相乗効果が期待できる施策も重要であることを示唆している。

上記に加え、本研究では、政策の長期的・広域的効果を計測できる空間経済分析枠組の開発に成功しており、これが道路政策の質の向上への貢献となると考えられる。実際、この分析枠組は、道路行政の技術開発ニーズにも記載されている“バスタプロジェクトの整備効果計測・評価”を可能にするだけでなく、“多様なストック効果計測”や“ワイド・エコノミック・インパクトの計測”の基盤にもなり得るものである。

6.2 今後の課題と展望

前節までに示した今年度の成果は、本研究開発の目的達成とともに、ターミナル整備やバスタプロジェクトの長期的・広域的効果の空間分布を整理することに繋がったと考えられる。特に、整備

する都市・地区に応じて、その効果が質的に異なりうることが示されたことは、今後のターミナル整備の在り方を考える際に有用であろう。ただし、これらの結果の信頼性をより高めるためには、更なるケーススタディーの蓄積が不可欠である。そのための研究の継続的発展は、今後の重要な課題である。

本研究で開発した空間経済分析手法は、公共交通ターミナル整備の効果検証以外にも、容易に適用できるという特徴を持つ。それゆえ、共有型モビリティなどの次世代交通システムがもたらす影響の検証や、将来を見越した公共交通ターミナルの在り方を考えるために、本手法を用いることは有益であると考えられる。この方向の分析を、関係する専門家・実務家と連携しつつ実現させることも、今後の重要な課題である。