

博士論文

都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの開発

李 知殷

論文の内容の要旨

論文題目 都市CO₂削減施策立案支援システムの開発

氏 名 李 知殷

CO₂削減は全世界的な課題であり、日本のCO₂排出量を大幅に削減するためには、各都市の状況に合わせた施策の検討が重要である。この問題意識の下に、多くの研究者が、都市においてエネルギーを消費する民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、運輸部門のそれぞれに対して、CO₂排出量を長期予測し、CO₂削減施策のエネルギー削減効果を検討してきた。しかし一方で、CO₂削減施策の導入を行うことが、都市人口や世帯などの産業や社会の状況を変化させる、活動量が変化する効果を与えることも知られている。従って、施策の導入に伴うCO₂削減効果の実態を検討するためには、施策を適用した部門だけではなく、都市全体を網羅した総合的な検討が必要である。

この総合的な検討を行うためには、まず、活動量間の波及効果を検討可能な活動量の予測モデルが必要である。ただし、このモデルの構築においては、活動量が互いに影響を与えながら変化することを考慮することや、都市ごとにモデルの構築に利用可能なデータの種類や量が異なるために個別のモデル構築に多くの時間が必要であること、一方で都市間の影響の波及効果を検討するためには各都市モデルのシステムや変数を共通にしておく必要があること、などの困難がある。これらの問題を解決するには、各都市の独自性を反映可能であると同時に、複数都市での連携への拡張を視野に入れた一般性を持つシステム構造を構築する必要がある。

さらに、一般にCO₂削減施策として低炭素技術の普及が有効であることが知られており、具体的には導入のインセンティブとして環境補助金を利用した普及促進施策が行われており、これを対象とした施策検討も進められている。しかし従来の研究では、環境補助金の予算の上限が考慮されておらず、削減効果が過大評価されている可能性がある。実効性の高い施策検討を行うには、予算の上限を考慮した手法の構築が必須である。

他方で、上記の環境補助金の予算は、自治体が都市を運営するための財政事業の一部であることは言うまでもない。すなわち、今後の施策として環境補助金予算を確保する

ためには、財政の収入を増やすか、他の事業の支出を減らす行動が必要である。さらに財政の変化は社会・産業構造に影響し、具体的には都市の人口、世帯などの活動量が変化を受ける。

以上より、低炭素技術の導入に伴う活動量の変化効果と財政状況の制約に伴う効果を反映しつつ、都市の各部分の波及効果を考慮可能な施策の検討システムの開発が必要である。

このような背景を踏まえ、本研究では、CO₂削減施策導入に伴うエネルギー削減効果と活動量の変化効果が検討可能な都市CO₂削減施策立案支援システムを開発することを目的とした。さらに、開発したシステムの有効性を確認するために、一つの都市を選び、低炭素技術の普及に伴うCO₂削減可能量の予測を行った。

章の構成は以下のとおりである。

第1章. 序論

本章では、研究の背景を述べるとともに、既往研究の整理を行い、本研究の位置づけを述べている。また、研究の目的と構成について説明している。

第2章. 都市活動量予測モデルの構築と汎用性の検討

本章では、都市活動量予測モデルを構築し、モデルの汎用性を検討した。モデルの汎用性を検討するために、都市の人口規模と産業特徴が異なる福岡市、柏市、熊野市を選定し、活動量と部門別CO₂排出量の精度検証を行った。その結果、全ての都市で高い精度での実績値との対応が得られた。これにより、都市モデルのシステム構造と変数を共通のもののみとして、都市ごとに特殊な変数を設定せずとも、活動量間の関係を表す関数に都市の特徴を反映することで、都市の様々な活動量が精度良く計算可能であり、すなわちモデルの汎用化が可能なことを確認した。

第3章. 都市活動量予測モデルの適用性と計算精度の向上の検討

本章では、第2章で残された課題である都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を行った。具体的には、活動量間の関係を表す関数の同定手法の改良を行った。関数同定手法を改良した結果、1つの都市の関数の同定時間は、約147時間から約8時間に短縮された。さらに、改良した関数同定手法の計算有効性を確認するために、上記の3都市を対象として活動量とCO₂排出量の精度検証を行い、高い計算精度が得られた。すなわち、関数同定手法の改良によるモデルの適用性の向上が確認された。

次に、改良した関数同定手法を用いて、関数同定における初期条件である関数の傾きの設定の変更と計算精度の関係を検証した。変更した設定方法を用いて活動量を計算した結果、一部の活動量では計算精度が低くなることが確認され、計算精度を維持するためには、第2章までに提示した設定方法が妥当であることが示された。

また、改良した関数同定手法を用いて、関数同定の設定による計算精度の検討を行った。関数同定に利用する実績値の数や関数同定手法の解の探索範囲を変化させて計算した結果、実績値の数を減らして関数を同定しても、関数を探索する条件を変化させることで長期予測の計算を行う判断基準を満たす関数が得られた。しかし、本研究で利用可能な実績値の数は限られているため、本論文では暫定的に、利用可能な実績値を全て利用して関数を同定することとした。

第4章. 低炭素技術普及予測モデルの構築

本章では、低炭素技術普及予測モデルを構築し、モデルの精度検証と長期予測を行った。対象地域と対象技術は、過去の実績が多い柏市の戸建住宅用PV(太陽光発電)とした。モデル構築後の精度検証の結果、PV普及率の計算値が実績値とほぼ一致することを確認した。さらにPV普及率の長期予測を、普及率に影響を与えると想定される環境補助金を3種類に変化させ、各ケースに対して解析を行った。その結果、一件当たりの環境補助金が増加するほど、普及率が上がることが示された。これにより、CO₂削減施策としてPV普及促進を検討する場合、1件当たりの環境補助金の増額が有効であり、それに伴う環境補助金予算の増額が必要であることを確認した。

第5章. 財政予測モデルの構築

本章では、財政予測モデルを構築し、柏市を事例として財政予測モデルの精度検証と長期予測を行った。モデル構築後の精度検証の結果、各項目の計算値は実績値の傾向を良く捉え、高い精度の計算結果が得られた。さらに財政の長期予測を行った結果、歳出部門は2050年まで増加を続ける見込みであること、またその原因は、扶助費と投資的経費にあることが分かった。また歳入部門では、増加する歳出を賄うために、一人当たり市税の増加が必要であるという結果となった。これらの結果から、現在から推定した将来の財政状況の下で新しい補助事業を行うためには、一人当たり市税をさらに増加するなどの財政利用の変化の検討が必要であることが示された。

第6章. 太陽光発電パネルを用いた都市CO₂削減可能量の予測

本章では、前章までで開発した複数のモデルを連結し、一例として柏市のPV普及施策を対象として、都市CO₂削減施策立案支援システムの有用性を検討した。具体的には、柏市の戸建住宅へのPV普及促進施策における環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市CO₂削減可能量の計算を行った。

第7章. 結論

本論文の内容をまとめ、今後の展望と課題についても記した。

<目次>

第 1 章. 序論

| | |
|-------------------|----|
| 1.1 研究の背景 | 9 |
| 1.2 既往研究の検討 | 11 |
| 1.3 研究の目的 | 14 |
| 1.4 研究の構成 | 15 |
| 1.5 用語の定義 | 18 |
| 参考文献 | 19 |

第 2 章. 都市活動量予測モデルの構築と汎用性の検討

| | |
|--|-----|
| 2.1 モデルの概要 | 22 |
| 2.1.1 モデルの計算対象 | 22 |
| 2.1.2 モデルの構築手法 | 23 |
| 2.1.3 モデルの全体構成 | 24 |
| 2.1.4 モデルの計算原理 | 28 |
| 2.2 個別セクタのモデル化 | 33 |
| 2.2.1 都市基盤部門 | 33 |
| 2.2.2 民生家庭部門 | 52 |
| 2.2.3 民生業務部門 | 66 |
| 2.2.4 産業部門 | 87 |
| 2.2.5 運輸部門 | 96 |
| 2.3 モデルの汎用性の検討 | 109 |
| 2.3.1 検討対象都市の概要と都市別都市活動量予測モデルの生成 | 109 |
| 2.3.2 都市別モデルの計算精度の結果 | 110 |
| 2.3.2.1 活動量 | 111 |
| 2.3.2.2 部門別 CO ₂ 排出量 | 112 |
| 2.4 考察 | 114 |
| 2.5 本章のまとめ | 116 |
| 参考文献 | 118 |

第3章. 都市活動量予測モデルの適用性と計算精度の向上の検討

| | |
|---|-----|
| 3.1 関数同定手法の改良の必要性 | 121 |
| 3.2 関数同定手法の改良 | 123 |
| 3.2.1 逐次最小二乗法の概要 | 123 |
| 3.2.2 改良した関数同定手法の設定条件 | 123 |
| 3.3 都市活動量予測モデルの適用性の向上の検討..... | 126 |
| 3.3.1 従来手法と改良手法の関数同定の時間と関数同定の計算精度の比較..... | 126 |
| 3.3.2 従来手法と改良手法の活動量の計算精度の比較..... | 130 |
| 3.3.3 従来手法と改良手法の部門別 CO ₂ 排出量の計算精度の比較 | 131 |
| 3.4 都市活動量予測モデルの計算精度の向上の検討..... | 134 |
| 3.4.1 因果関係の設定方法による関数同定の計算精度の比較..... | 134 |
| 3.4.2 因果関係の設定方法による活動量の計算精度の比較..... | 135 |
| 3.5 関数同定の設定による計算精度の検討 | 138 |
| 3.5.1 関数同定における実績値の利用方法による計算精度の比較..... | 138 |
| 3.5.2 関数同定における解の探索範囲の設定による計算精度の比較..... | 142 |
| 3.6 本章のまとめ | 147 |
| 参考文献..... | 150 |

第4章. 低炭素技術普及予測モデルの構築

| | |
|------------------------------------|-----|
| 4.1 太陽光発電パネルの普及に関連する社会条件..... | 152 |
| 4.2 低炭素技術普及予測モデルの構築 | 154 |
| 4.2.1 低炭素技術普及予測モデルの構成 | 154 |
| 4.2.2 太陽光発電パネル（PV）導入率計算式の推定 | 155 |
| 4.2.3 年間予想発電量の計算 | 158 |
| 4.3 モデルの連結のための都市活動量予測モデルの変更..... | 159 |
| 4.3.1 従業者セクタ | 159 |
| 4.3.2 戸建住宅セクタ | 160 |
| 4.4 太陽光発電パネル普及率の長期予測 | 162 |
| 4.4.1 低炭素技術普及予測モデルの精度検証結果..... | 162 |
| 4.4.2 太陽光発電パネル普及の長期予測のための設定条件..... | 162 |
| 4.4.3 太陽光発電パネル普及率の長期予測結果 | 163 |

| | |
|------------------|-----|
| 4.5 本章のまとめ | 165 |
| 参考文献 | 166 |

第 5 章. 財政予測モデルの構築

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 5.1 財政予測モデルの構築 | 169 |
| 5.1.1 財政予測モデルの構成 | 169 |
| 5.1.2 歳出部門のモデル化 | 170 |
| 5.1.3 歳入部門のモデル化 | 174 |
| 5.2 モデルの連結のための都市活動量予測モデルの変更 | 177 |
| 5.2.1 都市基盤部門 | 177 |
| 5.2.2 民生家庭部門 | 180 |
| 5.2.3 民生業務部門 | 184 |
| 5.2.4 産業部門 | 188 |
| 5.3 財政の長期予測 | 190 |
| 5.3.1 財政予測モデルの精度検証結果 | 190 |
| 5.3.2 財政の長期予測のための設定条件 | 191 |
| 5.3.3 財政の長期予測結果 | 192 |
| 5.4 本章のまとめ | 195 |
| 参考文献 | 197 |

第 6 章. 太陽光発電パネルを用いた都市 CO₂ 削減可能量の予測

| | |
|--|-----|
| 6.1 低炭素技術普及予測モデルと財政予測モデルの連結 | 199 |
| 6.2 太陽光発電パネルを用いた都市 CO ₂ 削減可能量 | 204 |
| 6.2.1 太陽光発電パネル (PV) 導入に伴う CO ₂ 削減量の計算 | 204 |
| 6.2.2 検討ケースの概要 | 204 |
| 6.2.3 ケースの検討結果 | 207 |
| 6.3 CO ₂ 削減施策検討における活動量の変化効果の考慮の影響 | 215 |
| 6.4 本章のまとめ | 218 |
| 参考文献 | 221 |

第 7 章. 結論

| | | |
|-----|----------------|-----|
| 7.1 | まとめ | 223 |
| 7.2 | 今後の展望と課題 | 226 |

付録

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 付録 A. | 統計資料出典 | 229 |
| 付録 B. | 関数同定手法のコード(改良手法) | 232 |
| 付録 C. | 部門別単位活動量当たり CO ₂ 排出量 | 240 |

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

温室効果ガス排出の主要国の一つである日本は、2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減目標を発表した¹⁾。この削減目標を達成するために、日本は1997年から「地球温暖化対策推進法」を制定し、都道府県及び市町村が、その区域の自然的社会条件に応じた、温室効果ガス排出の抑制のための総合的かつ計画的な施策を策定及び実施するように法律で求めている²⁾。そのために、近年多くの研究者らが都道府県及び市を対象として、都市の民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、運輸部門のそれぞれに対して、温室効果の主な原因であるCO₂排出量を長期予測し、削減施策の効果を検討してきた^{3)~6)}。

CO₂削減施策において環境補助金を用いた低炭素技術の普及が有効であると知られており、環境補助金を利用した普及促進施策が検討されている^{7),8)}。しかし、従来の研究では、環境補助金の予算の上限が考慮されておらず、削減効果が過大評価されている可能性がある。

しかし、CO₂削減施策の導入は、CO₂を削減するエネルギー削減効果だけでなく、従業者・可処分所得などのエネルギー以外のところへの変化をもたらすことが知られている^{9),10)}。例えば、家庭用太陽光発電パネルの導入は、導入量が増えるほど、新たな雇用機会が創出される。また、住宅への高効率断熱材の導入は、光熱費及び医療費の削減効果があり、可処分所得の増加をもたらす。このような効果は、都市社会の活動を表す人口、世帯、建物の延床面積などの活動量の変化に該当する。そして、活動量は他の活動量と互いに影響を及ぼしあいながら変化している。すなわち、施策の導入は都市社会のほかの部門にも変化をもたらすため、導入に伴う実際のCO₂削減効果を検討するためには、施策を適用した部門だけでなく、都市全体を網羅した総合的な検討が必要となる。

総合的な検討を行うためには、まず、活動量間の波及効果が検討可能な活動量予測モデルが必要である。しかし、都市を構成する活動量は、互いに影響を及ぼしながら変化していくため、予測モデルを構築することは容易ではない。そのため、活動量予測モデルの構築に関する研究は極めて少ない。また、都市の人口規模や産業の特徴などによって活動量予測モデルの構築に利用可能な統計データが異なるため、都市別活動量モデルを構築する時には、莫大な時間と手間がかかる。加えて、ある都市への施策の影響が隣接する都市に波及することも考えられるが、両者の都市モデルのシステム構造や変数が異なるとモデル間の連結が困難になり、そのような波及効果を検討することができない。これらの問題を解決するには、都市の独自性や複数都市間の関係性などを反映できる形で都市モデルのシステム構造を一般化し、多様な都市への適用性を高めることが必要である。

また、環境補助金予算の上限の考慮の前提として、環境補助金は都市を運営するための財政事業の一部である。すなわち、新しい事業として環境補助金事業の予算を確保するためには、財政の収入を増やすか、他の事業の支出を減らす行動が必要である。このような財政の変化は、都市に住んでいる市民の生活に直接的または間接的に影響を与えると考えられる。すなわち、都市の財政計画はCO₂削減と都市社会の持続可能性に重要な影響を与えるため、CO₂削減施策の検討においては、将来財政状況の考慮が欠かせない要素である。

従って、低炭素技術の普及による実際の CO₂ 削減効果を把握するためには、低炭素技術の導入に伴う都市の各部分の波及効果と財政状況の制約に伴う効果が考慮可能な CO₂ 削減施策の検討システムの開発が必要である。また、CO₂削減施策の検討は、全ての都市が直面している課題である。そのため、CO₂削減施策支援システムは、全ての都市に適用できるような汎用性と利便性を持つ必要がある。

1.2 既往研究の検討

本研究は、低炭素技術普及を伴う施策の導入時の都市 CO₂ 排出量を予測するシステムの開発を主眼としている。主要な既往研究としては、①都市 CO₂ 排出量の将来予測に関する研究、②低炭素技術の普及予測に関する研究、また③地方自治体の財政の予測を行う研究、が挙げられる。以下に、各項目の主要な関連研究をまとめた。

<① 都市 CO₂ 排出量の予測に関する研究>

Phdungsilp(2010)¹¹⁾は、計量経済モデルである Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system model を用いて、タイ・バンコク市における民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、輸送部門、発電部門の低炭素技術の普及やモーダルシフトなどの施策による 2000 年から 2020 年までのエネルギー消費量と CO₂ 排出の変化量を検討した。そして、CO₂ 削減効果が最も良いところはモーダルシフトを適用した輸送部門であると述べている。

Lind and Espegren (2017)¹²⁾は、ノルウェー・オスロ市を対象として、エネルギー最適化システムモデルである MARKet Allocation (MARKAL)/TIMES を利用して、民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、輸送部門に適用する低炭素技術の組み合わせによって 2050 年までに CO₂ 排出量を最も削減可能なシナリオを検討した。これによりオスロ市は、低炭素技術を活用することで、2010 年対比で 2030 年には約 50%の CO₂ 排出量の削減を可能とするシナリオを見出すことができた。ただし、2050 年までに化石燃料の使用をなくすためには、低炭素技術の他にも新しい施策の検討が必要であることも示された。

これまでの研究は、CO₂ 排出量の計算に必要な活動量、エネルギー原単位、CO₂ 排出係数のうち、エネルギー原単位に焦点が当てられ、線形計画法や回帰分析法を用いて経済指標とエネルギー原単位の関係による将来エネルギー消費量やCO₂排出量の変化を明らかにした。しかし、一方の重要な指標である活動量については、互いに影響を及ぼしながら変化していくため、予測モデルを構築することは容易ではない。そして、活動量を予測するモデルを構築するためには、線形計画法や回帰分析法のような静的計算手法ではなく、動的計算手法が必要である。

そのため、活動量予測の重要性を認識した一部の研究者は、非線形モデリング手法である System Dynamics(以下、SD)を用いて活動量予測モデルを構築してきた。例えば Feng et al. (2013)¹³⁾は、中国・北京市を対象に SD を用いて経済部門、人口部門、世帯部門、工業部門、農業部門、サービス業部門、輸送部門の活動量とエネルギー原別使用量と CO₂ 排出量を予測するモデルを構築し、2005 年から 2030 年までの予測を行った。そして、北京市の最大 CO₂ 排出量は、工業部門からサービス業部門に転換されると述べている。

しかし、上記の研究も特定の都市の CO₂ 排出特性や検討目的に合わせて活動量予測モデ

ルを構築するという段階に留まっており、モデルの汎用化についてはこれまで研究されてこなかった。

<② 低炭素技術の普及予測に関する研究>

出口ら(2011)¹⁰⁾は、ロジスティック回帰モデルにコンジョイント分析を加えて普及率予測モデルを構築した。普及率予測モデルは、環境意識、情報接触度、補助金の有無のなどのような質的・量的説明変数による購入者の低炭素技術の導入希望の変化を調査したアンケートから推定された。さらに、戸建住宅に導入される代表的な4つの低炭素技術を対象に施策を検討した結果、補助金などの補助制度の効果が大きくなるほど、普及率が大きくなると述べている。

Yamaguchi et al. (2013)¹⁴⁾は、住宅部門に適用する太陽光発電パネルと太陽熱温水器を対象として、BASSモデルに効用関数を加えて技術普及モデルを構築した。BASSモデルによる太陽光発電パネルと太陽熱温水器の将来の普及曲線は、実績値からの普及係数の値によって決定し、効用関数は、普及曲線の傾きを変化させたものである。効用関数は、補助金、電力買取制度などのような補助制度による購入者の低炭素技術の導入希望の変化を調査したアンケートから推定された。さらに、太陽光発電パネルと太陽熱温水器の普及は、補助制度の価格が上昇するほど、促進されていると述べている。

これまでの研究では共通して、技術普及モデルに環境補助金をパラメーターに加えて、環境補助金の変化に伴う普及率やCO₂削減可能量を定量的に評価しているが、上述のようにこれは予算上限を考慮していないために、過大評価となっている可能性が高い。すなわち、より実効的な検討を行うためには、これまで考慮されてこなかった環境補助金の予算の上限をモデルに組み込む必要がある。

また、既往の研究で利用されている研究手法は、固定された条件で将来の普及率を計算するため、制度の毎年の変化に伴う普及率の変化の可能性は考慮できない。従って、環境補助金の予算の上限が毎年変化することを考慮するためには、普及予測モデルには、毎年の導入率を計算して普及率を計算する手法を組み込むことが必要である。

<③ 自治体の財政予測に関する研究>

低炭素技術の普及などの施策の影響の将来予測を行うためには、対象とする自治体の財政の予想を合わせて行う必要がある。既往研究の現状と課題を以下に示す。

西川(2000)¹⁵⁾は原子力発電所を誘致した市町村の過去財政データをもとに、原子力発電所

の誘致ダミー変数として入れた歳入の回帰モデルを構築し、柏崎市を対象に原子力発電所の誘致に伴う歳入の増加効果を分析した。原子力発電所の誘致は、国からの補助金や固定資産税によって一時的な歳入の上昇効果があるが、長期的には原子力発電所の価値減少による税収減少の恐れがあると述べている。

武者(2010)¹⁶⁾は、企業誘致政策が亀山市の歳入と歳出に与える影響を定量的に評価するために、亀山市の歳入、歳出に該当する財政要素や従業者、企業所得などの説明変数の関係からマクロモデルを構築した。亀山市への企業誘致政策は、企業誘致のために利用する奨励金によって歳出が増加するが、それより企業から徴収する税収がより大きいため、最終的に歳入増加効果が大きいと述べている。

森本(2011)¹⁷⁾は、財政面と環境面に着目して都市のコンパクト化の評価指標を作成し、宇都宮市を対象に都市のコンパクト化による市税収入、施設維持管理費支出、都市 CO₂ 削減量の変化を推計した。各指標は、都市のコンパクト化によって変化する人口密度によって推計され、都市をコンパクト化することで、現在の都市の形を維持するよりも市税収入が増加、施設維持管理費支出が減少し、都市 CO₂ 削減量が増加するという結果を得た。

既往の研究では、市の歳入と歳出の計算対象である人口、従業者などの活動量の変化に伴う歳入と歳出の変化を計算することに焦点が当てられてきた。しかし、歳入計画と歳出利用のような財政計画の変化が市の活動量に与える影響についての研究は見られない。また、これまでの研究手法では、静的解析を利用しているが、活動量と財政計画の相互作用による結果を得るためには、動的解析が可能な手法を適用する必要がある。

以上に示すように、従来から都市の CO₂ 削減施策立案を支援する手法に関する研究は数多く行われているが、都市の活動量の長期予測に基づいて、低炭素技術の導入による活動量の変化や財政計画の変化による変化を定量的に評価する方法論は存在していない。そのため、CO₂ 削減施策の効果検討において、活動量の変化に伴う CO₂ 排出量の変化が考慮できないという問題点が残っていた。

1.3 研究の目的

このような背景を踏まえて本研究は、CO₂ 削減施策導入に伴うエネルギー削減効果と活動量の変化効果が検討可能な都市 CO₂ 削減施策立案支援システムを開発することを目的とする。

さらに、開発したシステムの有効性を確認するために、一つの都市を選び、低炭素技術の普及に伴う CO₂ 削減可能量の予測を行う。

都市 CO₂ 削減施策立案支援システム¹は、都市活動量予測モデル、低炭素技術普及予測モデル、財政予測モデルで構成される。以下に既往研究を踏まえた各モデルの考え方を示す。

都市活動量予測モデルは、都市システム構造と変数の共通化に着目することで汎用的な予測モデルを構築し、これにより施策導入に伴う活動量の変化効果の影響について考慮を可能とする。モデルの構築には、活動量間の相互作用が再現できる SD を利用する。

低炭素技術普及予測モデルは、毎年変化する施策や周辺の状況による低炭素技術の導入率の変化を評価する式を算出し、その蓄積によって普及率が計算されるモデルを構築する。また、低炭素技術の導入を計算する式に、市の財政予算に占める環境補助金の上限を組み込むことで、施策検討におけるモデルの有効性を高めている。

財政予測モデルは、歳入計画と歳出利用の変化が活動量に与える影響を、歳入の収入増加と歳出の予算再編という観点から考慮し、モデルに組み込むことを試みている。また、モデルの構築には、財政の項目と活動量の相互作用が再現できる SD を利用する。

本研究では、CO₂ 削減施策の検討において、都市を構成する各部門の CO₂ 削減効果と都市全体の CO₂ 削減効果をともに考慮した、実効的な検討を可能とするところに重点がある。なお、本研究で開発した施策検討システムは、汎用性を持つため、今後、多くの都市で CO₂ 削減施策立案の効果的な支援が可能になることも見込まれるという点で、社会的な意義を持つものである。

¹ 本研究での都市の区分は、行政区分に従っている。

1.4 研究の構成

本研究の構成を図 1.1 に示す。本研究の流れは、まず都市 CO₂ 削減施策立案支援システムを構成する都市活動量予測モデル(第 2 章と第 3 章)、低炭素技術普及予測モデル(第 4 章)、財政予測モデル(第 5 章)を構築する。その後、事例に対する解析を行い都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの有用性を検討した(第 6 章)。以下に本研究を構成する各章の詳細について説明する。

第 1 章では、研究の背景、既往研究の検討と本研究の位置づけ、本研究の目的と研究の構成を示す。

第 2 章では、施策導入によって発生する活動量間の波及効果を考慮するために、都市活動量予測モデルを構築し、モデルの汎用性を検討することを目的とする。モデルの構築には、活動量間の関係把握が容易な非線形モデリング手法を利用する。また、多様な都市へのモデルの適用性を高めるために、入力に使用する統計データを全ての都市で入手可能または加工して利用可能なものにする。さらに、モデルの汎用性を検討するために、都市の規模や特徴が異なる 3 つの都市を対象にモデル精度検証を行う。

第 3 章では、都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を目的とし、関数同定手法の改良を行う。具体的には、活動量間の関係を表す関数を同定する手法の計算方法を遺伝的アルゴリズムから逐次最小二乗法に変更して計算時間を短縮する。なお、同定する関数は 3 次関数からロジスティック関数に変更し、入力条件を減らすことで関数同定手法の利便性を高める。さらに、従来手法と改良手法それぞれの関数同定時間、関数同定計算精度、活動量計算精度、部門別 CO₂ 計算精度を比較することで、都市活動量予測モデルの適用性の向上を検討する。また、改良手法を用いて関数同定の設定変更による計算精度の向上を検討する。最後に、関数同定の設定による活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較して、関数の妥当性を評価する。

第 4 章では、活動量と環境補助金の変化に応じた低炭素技術の普及率を予測するために、低炭素技術普及予測モデルを構築することを目的とする。本章のモデルは、戸建住宅に適用する太陽光発電パネル(以下、PV)を事例として構築する。PV 普及率は全体戸建住宅のうち、PV を導入した戸建住宅の割合である。すなわち、毎年 PV を導入する戸建住宅を計算するためには、PV 導入選択率を算出する必要がある。将来の PV 導入選択率は、PV 導入選択率と PV 初期費用回収期間の実績値から計算式を推定し、これを用いる。また、活動量の変化効果は、PV 発電量当たり従業者雇用係数(既往研究による)を、PV 発電量に適用することで

考慮される。なお、PV 発電量は、低炭素技術普及予測モデルで算出されたものであり、これを都市活動量予測モデルに加えて解析を行う。さらに、柏市の戸建住宅への PV 普及を対象に低炭素技術普及予測モデルの精度検証を行い、環境補助金の変化に伴う PV 普及率を長期予測する。

第 5 章では、財政計画の変化に応じた活動量の変化と低炭素技術の普及の変化を反映するために、財政予測モデルを構築することを目的とする。そのために、活動量と財政項目の関係を用いて市の歳入と歳出の各項目を計算する財政予測モデルを構築し、都市活動量予測モデルに加える。さらに、柏市を対象に財政予測モデルの精度検証を行い、柏市の財政状況を長期予測する。

第 6 章では、本研究で開発された都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの有効性の検討を目的とし、前章までに開発したモデルを連結し、柏市の戸建住宅への PV 普及を一例として、環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能量を計算する。そのために、低炭素技術普及予測モデルと財政予測モデルを連結して PV 普及における環境補助金予算の上限の効果が反映できるようにする。さらに、開発したシステムを用いて検討事例として柏市の戸建住宅への PV 普及を対象に環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能量を予測する。最後に、PV 普及計算における活動量変化効果を考慮した計算結果と、それを排除した計算結果を比較することで、都市 CO₂ 削減施策検討における活動量の変化効果を考慮する重要性を検討する。

第 7 章では、本研究で得られた成果のまとめと今後の展望と課題について整理する。



図 1.1 本研究の構成

1.5 用語の定義

本研究で使用する用語については本文中初出時に説明を加えたが、全体を通して重要な用語について、別途に定義の整理を行った。各用語の定義は以下の通りである。

- ・ 活動量：活動量は、都市で行われる様々な活動の量を表す。例えば、人口、世帯、建物の延床面積、産業の生産額などである。本研究で利用する活動量は、計算に利用される目的によって下記の通りに分類できる。
 - 1) CO₂ 計算に利用される活動量：都市の CO₂ 排出量の計算に利用される活動量である。
 - 2) 説明変数として利用される活動量：CO₂ 計算には利用されないが、他の活動量を推計するために説明変数として利用される活動量である。
- ・ 波及効果：ある活動量が変化した場合に、他の活動量の変化が誘発される効果を意味する。
- ・ 都市構造システム：都市における様々な活動の関係を一連の相互影響によって成立する仕組みとしてとらえたもの。本研究では特に、相互に影響を及ぼしあう要素(活動量)によって構成されるシステムを指す。
- ・ 関数同定手法：都市の活動量間の相互関係を表す関数を同定するための手法である。具体的には、実績値に基づいて変数間の関数を算出する数学的手法を指す。
- ・ 従来手法：遺伝的アルゴリズムを適用した関数同定手法を意味する。
- ・ 改良手法：逐次最小二乗法を適用した関数同定手法を意味する。
- ・ 環境補助金：自治体が環境関連事業に交付する補助金である。本研究では特に、PV 普及に利用される補助金を対象とする。
- ・ 環境補助金予算：自治体の年度予算のうち、環境補助金に使用する総金額を意味する。
- ・ PV 普及率：毎年の戸建住宅のうち、今まで PV が導入された戸建住宅の比率を意味する。
- ・ PV 導入選択率：毎年 PV が未導入された戸建住宅のうち、毎年新しく PV が導入される戸建住宅の比率を意味する。

参考文献

- 1) 環境省：「地球温暖化対策計画」の閣議決定について, <https://www.env.go.jp/press/102512.html>
(アクセス日：2018.09)
- 2) 環境省：地球温暖化対策推進法と地球温暖化対策計画,
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/domestic.html> (アクセス日：2018.09)
- 3) 木本 慶介, 伊香賀 俊治, 花木 啓祐：住宅の建設・改修・解体起因 CO₂ 排出量の 2050 年までの都道府県別推計, 学術講演梗概集. D-1, 環境工学 I, pp.1181-1182, 2009.07
- 4) 川久保 俊, 新谷 圭右, 伊香賀 俊治, 村上 周三, 花木 啓祐, 津田 公平：建築・都市のサステナビリティに関する研究(その 2)：事務所ビル起因 CO₂ 排出量の 2050 年までの都道府県別予測, 学術講演梗概集. D-1, 環境工学 I, pp. 1013-1014, 2007.07
- 5) 三谷 卓摩, 北垣 亮馬, 長井 宏憲, 野口 貴文：複数輸送手段を考慮した資源循環シミュレータ ecoMA の拡張によるコンクリート産業の CO₂ 排出量評価, 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, p.117, 2010
- 6) 松橋啓介, 工藤祐揮, 上岡直見, 森口祐一：市区町村の運輸部門 CO₂ 排出量の推計手法に関する比較研究, 環境システム研究論文集, Vol.32, 2004.10
- 7) 関 知道, 田中 秀雄, 秋澤 淳：情報伝達効果による都道府県別の戸建住宅に対する太陽熱温水器と太陽光発電の普及分析, エネルギー・資源学会論文集, 35(3), pp.1-9, 2014
- 8) 出口 満, 伊香賀 俊治, 川久保 俊, 奥村 公美：戸建住宅主の意思決定構造を考慮した低炭素技術普及率予測モデルの開発, 日本建築学会技術報告集 Vol.17, No.37, pp.949-954, 2011.10
- 9) 伊香賀 俊治, 江口 里佳, 村上 周三, 岩前 篤, 星 旦二, 水石 仁, 川久保 俊, 奥村 公美：健康維持がもたらす間接的便益(NEB)を考慮した住宅断熱の投資評価, 日本建築学会環境系論文集 76(666), pp.735-740, 2011
- 10) 松本直也, 本藤 祐樹：拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析, 日本エネルギー学会誌, Vol.9, No.3, pp.258-267, 2011
- 11) Phdungsilp, A., 2010. Integrated energy and carbon modeling with a decision support system: Policy scenarios for low-carbon city development in Bangkok. Energy Policy 38, 4808–4817.
- 12) Lind, A., Espegren, K., 2017. The use of energy system models for analysing the transition to low-carbon cities – The case of Oslo. Energy Strateg. Rev. 15, 44–56.
- 13) Feng, Y.Y., Chen, S.Q., Zhang, L.X., 2013. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China. Ecol. Modell. 252, 44–52.
- 14) Yamaguchi, Yohei., Akai, Kenju., Shen, Junyi., Fujimura, Naoki., Shimoda, Yoshiyuki., Saijo, Tatsuyoshi, Prediction of photovoltaic and solar water heater diffusion and evaluation of promotion policies on the basis of consumers' choices, Applied Energy 102 (2013) 1148–1159
- 15) 西川 雅史：原子力発電所の建設と地方財政, 公共選択の研究, Vol.34, pp.72-83, 2000
- 16) 武者 加苗：企業誘致政策の地域経済へ与えた影響-三重県亀山市の事例から-, 経済学研究,

Vol.41, pp.107-128, 2010

- 17) 森本 章倫：都市のコンパクト化が財政及び環境に与える影響に関する研究, 都市計画論文集, Vol.46, pp. 739-744, 2011

第 2 章

都市活動量予測モデルの構築と 汎用性の検討

2.1 モデルの概要

本章では、施策導入によって発生する活動量間の波及効果を考慮するために、都市活動量予測モデルを構築し、モデルの汎用性を検討することを目的とする。

モデルの構築には、活動量間の関係の把握が容易な非線形モデリング手法を使用する。また、多様な都市へのモデルの適用性を高めるために、入力に使用する統計データは全ての都市で入手可能または加工して利用可能なものにする。さらに、モデルの汎用性を検討するために、都市の規模や特徴が異なる福岡市、柏市、熊野市を対象として活動量や部門別 CO₂ 排出量を算出し、モデルの計算精度の検討を行う。

また、本章では、先行研究¹である福岡市を対象とした活動量モデルをベースに汎用性を持つ活動量モデルの構築を行った。活動量モデルの汎用化は、早稲田大学の高口研究室と九州大学の住吉研究室との共同研究²である。モデルの計算対象(2.1.1 項)、構築手法(2.1.2 項)、計算原理(2.1.4 項)や先行研究で採択した内容と同様である。2.2 節の個別セクタのモデル化は、先行研究のモデルから全ての市町村で利用できるようにセクタの改良または追加を行った。2.3 節では、都市活動量モデルの汎用性の検討を行った。そこで、著者は、下記の研究内容を実施した。

- ・ 先行研究のモデルから統計資料に従うセクタ構成の再分類
- ・ 農林水産業セクタの追加
- ・ 全てのセクタにおける説明変数の再検討
- ・ モデルの汎用性検証：中規模都市である柏市を担当

2.1.1 モデルの計算対象

本研究では、都市の多様な活動を表す人口、世帯、建物の延床面積などの「活動量」を予測するモデルを構築した。そして、計算した活動量のうち、一部の活動量を式 2.1 の CO₂ 排出量の計算に利用した。式 2.1 の計算に利用された活動量については、2.2 節を参照されたい。

そのほか、単位活動量当たりエネルギー消費量や CO₂ 排出係数は、エネルギー価格、技術の普及や変遷などに応じて変化するが、これには国内外の経済的な要因も含まれるため、都市よりスケールが大きな変化を考慮するより複雑なモデルが必要となる。そのため、単

¹ 先行研究は、JSPS 科研費 21360277 の助成を受けたものである。(研究代表者：赤司 泰義、研究課題名：ハビタットシステムの未来シナリオと環境負荷削減可能性に関する研究)

² 共同研究は、JSPS 科研費 26289201 の助成を受けたものである。(研究代表者：赤司 泰義、研究課題名：都市環境負荷削減の施策立案支援に向けたハビタットシステム汎用モデルの構築)

位活動量当たりエネルギー消費量と CO₂ 排出係数は、実績値を利用した。利用した実績値は、付録 C に示す。

$$\text{CO}_2 \text{ 排出量} = \Sigma (\text{単位活動量当たりエネルギー消費量} \times \text{CO}_2 \text{ 排出係数} \times \text{CO}_2 \text{ 計算に利用する活動量}) \quad \dots \text{式 2.1}$$

2.1.2 モデルの構築手法

System Dynamics(以下、SD)は、Jay Forrester によって提案され¹⁾、その後、複雑なシステムを持つ経営、経済、社会科学の分野などに広く適用されている²⁾⁻⁵⁾。SD とは、与えられた問題に直接・間接的に関連する変数で構成されるシステムを定義し、変数間の因果関係から問題の本質を把握することで、解決に導く手法である。SD の特徴としては、時間経過に応じて変化するシステムの内部構造をモデル化することが可能であること、そのため変数間の関係が把握しやすく、通常は広域的な検討が難しい社会システムなどの予測に適していることなどが挙げられる⁶⁾。

図 2.1 に SD を用いた予測モデルの構築過程のフローを示す。本研究においては、都市を構成する活動量を予測する汎用的なモデルを構築すること、がここでの問題の定義である。また、モデルの変数(活動量)は、どのような都市でも入手可能な種類の統計資料を参照して決定した。さらに、変数間の因果関係の設定については、社会現象を扱った既往研究(社会学、経済学など)と社会通念に基づいて仮定し設定した(図 2.2)。その後、検討した変数間の因果関係を元にソフトウェアを用いて計算モデルを構築し(図 2.3)、幾つかの都市を対象にモデルの汎用性を検討した。

本研究では、都市活動量予測モデルの構築にソフトウェア STELLA (ver.10.0.6)を使用した。STELLA は、多次元連立常微分方程式で表されたシステムの動態挙動をオイラー法やルンゲ・クッタ法による数値解法を用いて求解する。

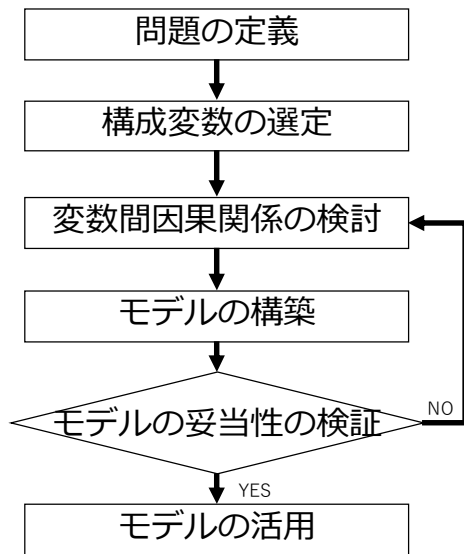
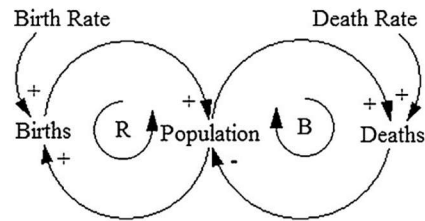
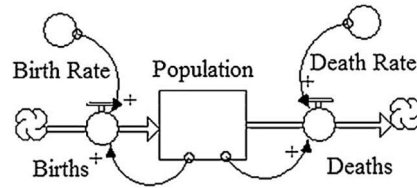


図 2.1 SD を用いた予測モデルの構築過程のフロー

図 2.2 変数間因果関係の検討の例⁷⁾図 2.3 SD を用いたモデルの構築の例⁷⁾

2.1.3 モデルの全体構成

図 2.4 に都市活動量予測モデルの全体像を示す。都市活動量予測モデルは、都市基盤部門、民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、輸送部門という 5 つの部門により構成される(部門は、図 2.4 中ではフレームの色によって区別されている：都市基盤部門は黒色、民生家庭部門はオレンジ色、民生業務部門は緑色、産業部門は紫色、輸送部門は赤色)。また、各部門内には複数のセクタを設定している。都市基盤部門は、統計資料の調査項目を参考に、人口、世帯、経済等の 5 つのセクタに分類した。民生家庭部門、民生業務部門、産業部門、輸送部門では、政府の統計資料の調査項目に加え、単位活動量当たりエネルギー消費量の分類項目(付録 C)を参考に、13 個のセクタに分類した。

よって、都市活動量予測モデルは、5 つの「部門」とその内部の計 18 個のセクタによって構成されている。各セクタの内部には、モデルの計算の基本となる様々な活動量が設定されている。各活動量(変数)はそれぞれの性質によって、ストック、フロー、コンバーターと呼ばれる 3 つのブロックで表現される。ストックはフローによって変化し、フローはストックを蓄積または消耗させる。コンバーターは定数の値を保持したり、モデルへの外部入力を定義したり、代数的関係を計算することができる⁸⁾。図 2.4 では、各セクタに属している変数は黒色、他のセクタから来た変数は青色としてセクタ間の関係を簡略に示している。この一部を取り出した詳細を図 2.5 に示す。各セクタの活動量がそれぞれの相互関係に応じて矢印で繋がっていることがわかる。すなわち、多様な説明変数から計算される活動量は、さらに他のセクタに説明変数として入力される。このように、様々な要素を結び

つけることで、都市における社会動態の予測を可能にしている。

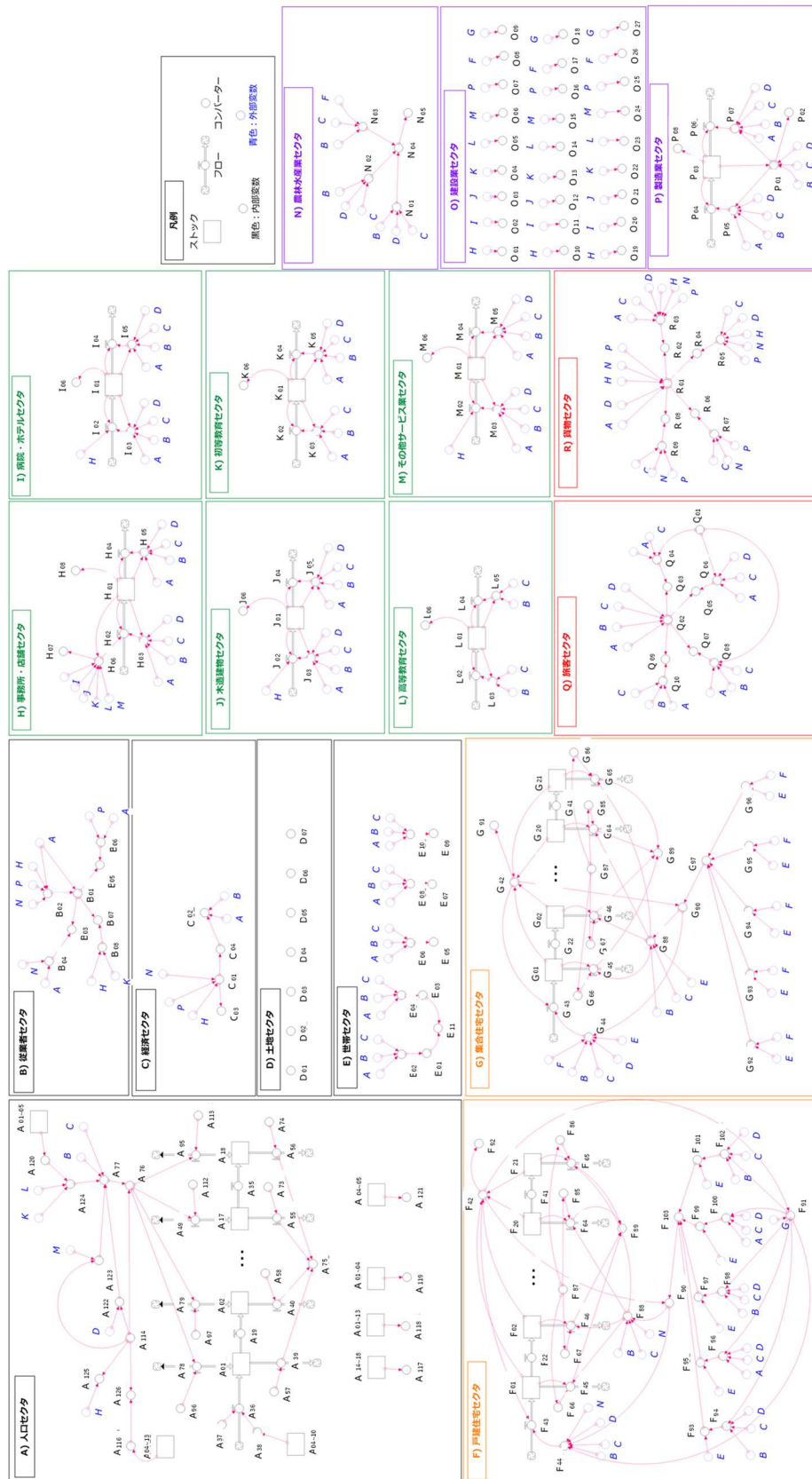


図 2.4 都市活動量予測モデルの全体像

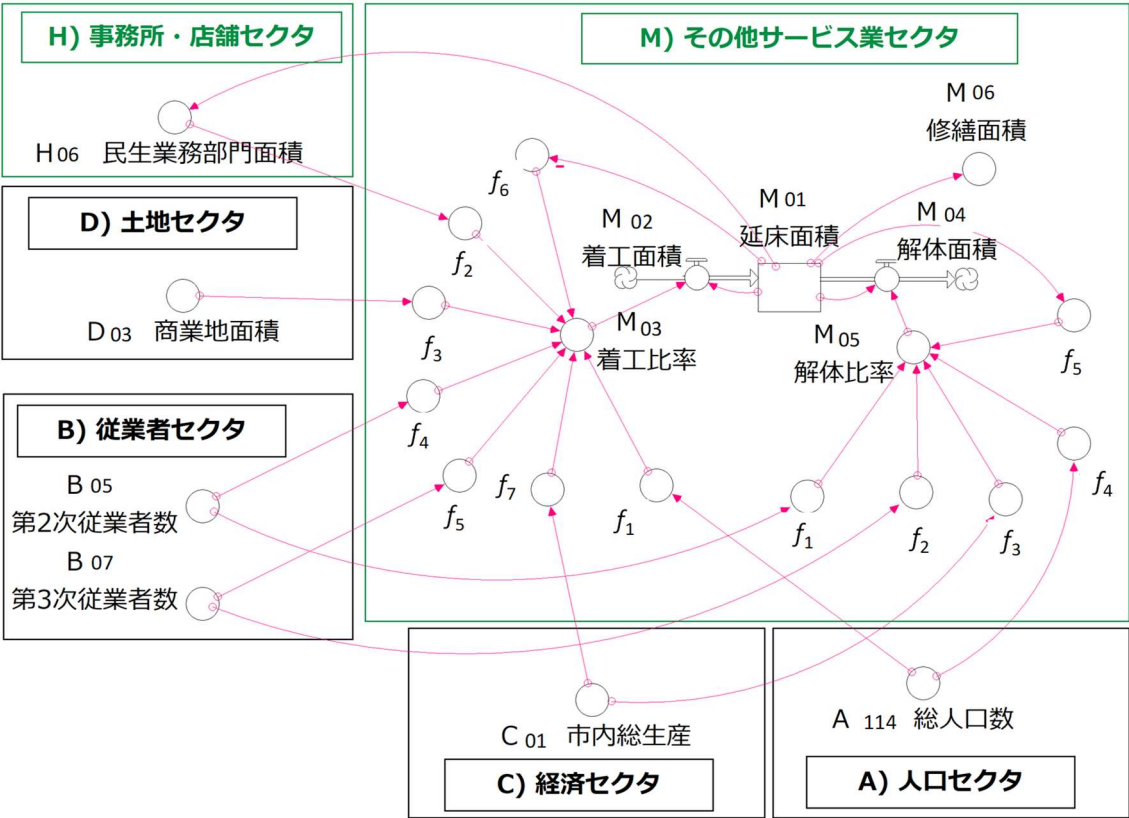


図 2.5 都市活動量予測モデルの部分詳細図

2.1.4 モデルの計算原理

図 2. 6 に都市活動量予測モデル活動量の計算原理を示す。例えば、毎年の活動量 A の値は、活動量 A の基準年値と活動量 A の基準年比の乗算で計算される。ここで、基準年値は、計算を始める年の活動量の値である。基準年比は、計算を始める年の値を 1 とし、その後の時間的変化を比例量で示している。活動量 A の基準年比は、いくつかの関数の結果を乗算して求められる。活動量の計算に利用される関数は、関数同定手法によって求められる。

図 2. 7 に都市活動量予測モデルの関数同定の原理を示す。なお、活動量ごとに単位や桁数が異なることから、全ての活動量は基準年比として扱っている(図 2. 8)。

活動量の計算原理を以下に述べる（以下に示す変数は全て各活動量の基準年比を示す）。例えば、目的変数 y が、他セクタを含む 3 つの説明変数 x_1, x_2, x_3 によって説明される場合、説明変数を入力とした各関数（図中 f_1, f_2, f_3 ）の出力値の乗算により計算値 \hat{y} が求められる。

各関数の意味については図 2. 8 に示した。関数は、説明変数と目的変数の関係を表し、説明変数の変化が目的変数の変化に与える影響を意味する。例えばこの場合では、 x_1 が 1.5 倍に変化すると、 \hat{y} は 1.75 倍変化する。このような関数の同定は目的変数と説明変数の実績値をもとに別途検討を行っており、実績値 y と計算値 \hat{y} の差を最小とするように各関数のパラメータを決定している。

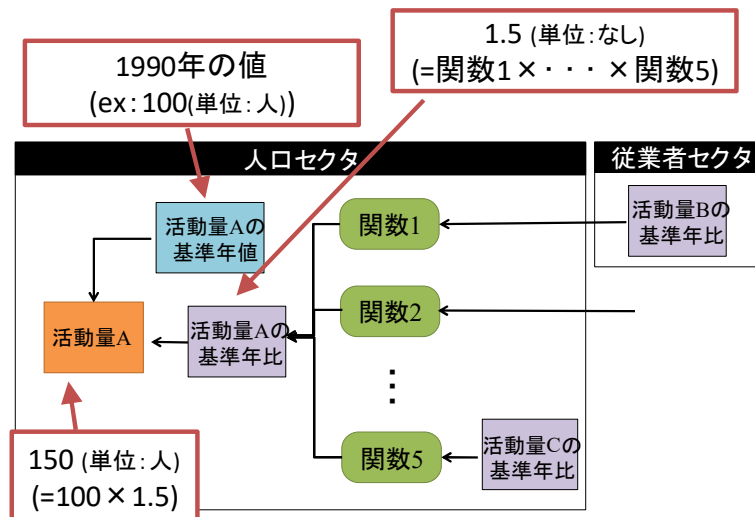


図 2. 6 都市活動量予測モデルの活動量の計算原理

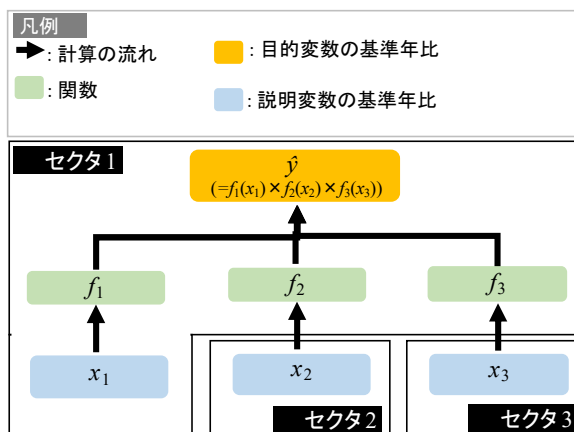


図 2.7 都市活動量予測モデルの関数同定の原理

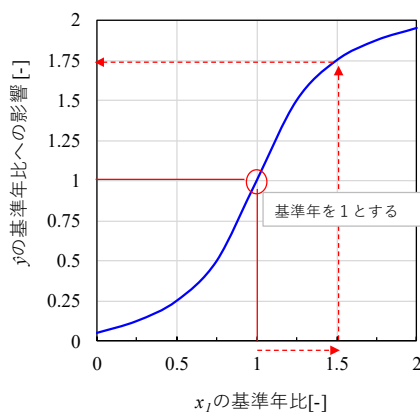


図 2.8 関数の意味

本研究における関数の同定手法に関して、以下に述べる。

誤差を最小とする関数の検討は、一般に最適化手法に適することが知られている Genetic Algorithm (GA)⁹⁾を採用した関数同定手法を作成して行った。GA を用いた関数同定手法の概要は表 2.1 に示す。関数同定は、目的変数である活動量の実績値 y と計算値 \hat{y} の誤差が最小となるような組み合わせを見つけることが目的である。ただし、用いる関数の数は、目的変数である活動量ごとに異なる。プログラムを動作させるための初期条件としては、目的変数と説明変数の基準年比の実績値を与えるものとし、さらに各関数の増減方向、関数が同定される y 軸の幅、を設定する(図 2.9)。この設定が完了したら、与えた条件に適する解を持つ初期の世代の個体を 80 個作成する。次に、各個体の計算値 \hat{y} と実績値 y の誤差を比較して遺伝子の適合度を評価する。なお、本研究では、20000 世代の計算を終了条件として採用した。これまでの計算では 5000 から 10000 世代で遺伝子の適応度が収束する傾向が見

られたが、遺伝子の適応度をより高めるために 20000 世代までの計算を実施した。これでも終了条件が満たされない場合は、その次の世代に優れた遺伝子を残すためのランキングの選択、エリート主義、ルーレットホイール選択を利用して、遺伝子を選択した。ランキング選択とは、遺伝子の適応度が 1 位の個体を 3 つ、2 位を 2 つ、3 位の個体 1 つを次の世代に残す方法である。エリート選択では前の世代での適応度が最も高い個体の 1 つが選択される。ルーレットホイール選択では、個体の遺伝子の適応度に応じて次世代に遺伝子が残る確率が設定され、この確率からランダムに残される個体を選択される。優れた遺伝子を次世代に残す 3 つの方法によって選択された遺伝子を複製し、遺伝子の適応度が低い遺伝子は除去した。その後に、遺伝子を更新には、次世代に残した個体から設定した確率に基づいて個体を選択し、遺伝子を変化するようにした。遺伝子の更新するためには、交叉と突然変異を使用した。交叉の設定は 60%とし、設定した確率に基づいて二つの個体を選択し、遺伝子の任意の場所をカットし、遺伝子を交叉する。切断部位は、1 ヶ所としている。突然変異の割合は 5%に設定し、設定した割合に基づいて個体を選択されその個体の遺伝子の一つを変化させる。これまでの操作を 1 世代とし、20000 世代になるまで計算を繰り返した(図 2. 10)。ただし、局所解に収束することを防止するために、プログラム 10 個の並列計算を行い、その計算結果のうち実績値 y と最も誤差が小さい解を活動量計算に使用した。

最後に、都市活動量モデルの計算概要を、図 2. 11 に示す。都市活動量モデルの計算は、活動量の基準年値と上記で求められた関数を入力すると、1 年目の活動量が計算される。次に、1 年目の活動量の値から 2 年目の活動量が計算される。このように、活動量が経年的に変化しながら計算は行われる。

表 2.1 GA を用いた関数同定手法の概要

| 計算方法 | GA |
|--------|---|
| 目的関数 | $\min \sum_{t=1990}^{2010} (y_t - \hat{y}_t)^2$ <p>ここで $\hat{y}_i = \prod_{n=1}^N (a_{n,1}x_{n(t)}^3 + a_{n,2}x_{n(t)}^2 + a_{n,3}x_{n(t)} + a_{n,4})$ $(n \text{ は説明変数の数})$</p> |
| 入力データ | $y_t, x_{n(t)}$ |
| 入力条件 | <ul style="list-style-type: none"> 関数の増減方向(変数間の因果関係)の設定 関数が同定される y 軸の幅の設定 |
| GA の設定 | 個体数 |
| | 80 |
| | 遺伝子 |
| | 2 点の座標(x,y)情報 |
| | 終了条件 |
| | 20,000 世代 |
| | 適合度評価 |
| | $\min (y - \hat{y})^2$ |
| | 遺伝子の取捨選択 |
| | エリート主義、ランキング選択、ルーレット選択の併用 |
| | 交叉率 |
| | 60% |
| | 突然変異率 |
| | 5% |
| 関数導出式 | 遺伝子の座標 2 つを頂点とする、(1,1)座標を通る 3 次関数の連立方程式 |
| 出力データ | $a_{n,1}, a_{n,2}, a_{n,3}, a_{n,4}$ |

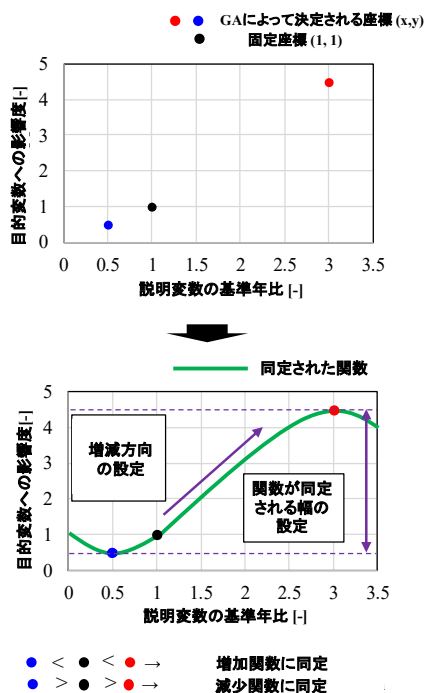


図 2.9 方程式の導出方法

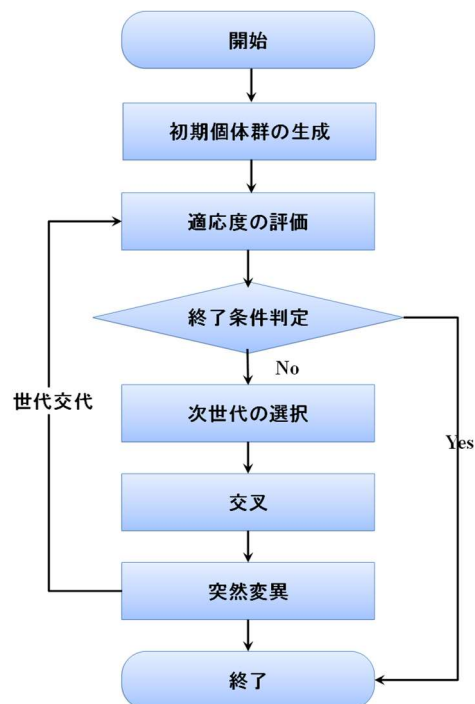


図 2.10 GA を用いた関数同定手法の計算フロー

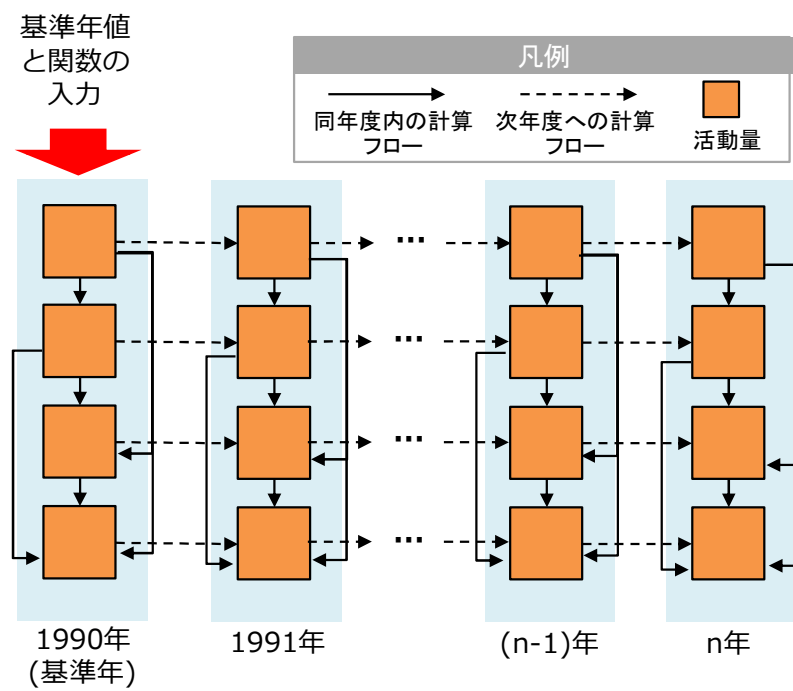


図 2.11 都市活動量モデルの計算概要

2.2 個別セクタのモデル化

本節では、5 つの部門を構成する各セクタの概要と各セクタに属している活動量(目的変数)の計算に利用される説明変数の選定理由やその変数間の因果関係の設定について説明する。

セクタの概要では、セクタを構成する変数について説明し、各変数の計算式と計算フローの図を示す。

また、目的変数の推定に利用される説明変数の選定理由と因果関係の設定について説明する。説明変数と因果関係の設定については、社会現象を解明した既往研究などを参考にして設定しているが、社会的通念に基づいて設定している変数もある。

本研究で開発した都市活動量予測モデルでは、各都市に共通して存在する変数間の因果関係は同様と見なし、本節で提示した各セクタの変数と変数間の因果関係を同様に設定すれば、どのような都市でも利用可能であると仮定した。なお、各セクタで利用した変数の統計資料の出典は、付録 A に示した。

2.2.1 都市基盤部門

都市基盤部門は CO₂ 排出に直接的には関係しないが、都市を構成するための基本的な活動量を計算するものであり、これらは CO₂ 排出に直接関係する部門の活動量を変化させる重要な説明変数の役割を果たしている。都市基盤部門は、A) 人口セクタ、B) 従業者セクタ、C) 経済セクタ、D) 土地セクタ、E) 世帯セクタの 5 セクタで構成されている。

A) 人口セクタ

A-1) 人口セクタの概要

人口は都市を構成する基本要素であり、都市システムの動的变化を規定する中心的な役割を果たす。本研究では、年少人口 (0~14 歳)、生産人口 (15~64 歳)、老人人口 (65 歳以上) などの年齢別人口の特性を説明変数として考慮するために、コーホート要因法による 5 歳階級別人口数を計算する構造を作成した。コーホート要因法とは、年齢階級ごとの人口数を出生と死亡による自然増減と、転入と転出による社会増減によって捉える方法である。一般的に、社会増減の計算は、転入と転出に分けて計算されるが、市町村レベルでは転入数、転出数に関する統計資料が十分ではない。そのため、社会増減を表す変数は、転入と転出が同時に表現される総移動数とし、総移動数は、総人口数、総出生数、総死亡数の実績値から逆算した値を利用した。総移動数は、プラス値であれば転入が多いことを意味し、

マイナス値であれば転出が多いことを意味する。しかし、本研究で利用する活動量の推計方法では、プラス値とマイナス値を同時に計算できない。そのため、総移動数は、毎年の自然要因による人口増減数を除いた総人口数(社会要因による総人口の変化)から毎年の総人口数を引いて求めた(A_{76})。また、コーホート要因法による人口計算では、年齢階級ごとの移動数を算出する必要がある。従って、本研究では、総移動数を算出した後、その値に年齢階級別配分率を乗じることで年齢階級別の移動数を計算した。なお、出生率と5歳階級別死亡率は実績値を利用した。

人口セクタには126個の変数があり、変数名と変数の計算式は表2.2に示す。人口セクタの計算フローを図2.12に示す。

表 2.2 人口セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-------------|---|---|
| A. 人口セクタ | A01. 0 歳~4 歳人口数 | $A_{01}(t-1) - A_{19}(t) + A_{36}(t) - A_{39}(t) + A_{78}(t)$ |
| | A02~17. 5n 歳~(5n+4) 歳人口数 (ここで、n=1~16) | $A_m(t-1) + A_{(m+17)}(t) - A_{(m+18)}(t) - A_{(m+38)}(t) + A_{(m+77)}(t)$ (ここで、m=02~17) |
| | A18. 85 歳以上人口数 | $A_{18}(t-1) + A_{35}(t) - A_{56}(t) + A_{95}(t)$ |
| | A19~35. 5n 歳~(5n+4)歳の人口グループの移動数 (ここで、n=0~16) | $A_m(t) \times (1/5)$ (ここで、m=01~17) |
| | A36. 総出生数 | $A_{37}(t) \times A_{38}(t)$ |
| | A37. 出生率 | なし(実績値入力) |
| | A38. 出産可能な女性数 | $\left(\sum_{i=04}^{10} A_i(t)\right) / 2$ |
| | A39~56. 5n 歳~(5n+4)歳死亡数 (ここで、n=0~17) | $A_{m1}(t) \times A_{m2}(t)$ (ここで、m1=01~18, m2=57~74) |
| | A57~74. 5n 歳~(5n+4)歳死亡率 (ここで、n=0~17) | なし(実績値入力) |
| | A75. 総死亡数 | $\sum_{i=39}^{56} A_i(t)$ |
| | A76. 総移動数 | $A_{114}(t) \times ((A_{114}(b) + A_{76}(b)) / A_{114}(b)) \times A_{77}(t) - A_{114}(t)$ |
| | A77. 社会要因による総人口変化比率 | $f_1(A_{122}(t), +, -) \times f_2(A_{123}(t), +) \times f_3(A_{124}(t), +) \times f_4(B_{02}(t), +) \times f_5(C_{02}(t), +)$ |
| | A78~95. 5n 歳~(5n+4)歳の移動数 (ここで、n=0~17) | $A_{76}(t) \times A_m(t)$ (ここで、m=96~113) |
| | A96~113. 5n 歳~(5n+4)歳の移動配分率 (ここで、n=0~17) | なし(実績値入力) |
| | A114. 総人口数 | $\sum_{i=01}^{18} A_i(t)$ |
| | A115. 0 歳~14 歳人口数 | $\sum_{i=01}^{03} A_i(t)$ |
| | A116. 15 歳~64 歳人口数 | $\sum_{i=04}^{13} A_i(t)$ |
| | A117. 65 歳以上人口数 | $\sum_{i=14}^{18} A_i(t)$ |
| | A118. 0 歳~64 歳人口数 | $\sum_{i=01}^{13} A_i(t)$ |
| | A119. 3 歳~18 歳人口数 | $A_{01}(t) \times (2/5) + A_{02}(t) + A_{03}(t) + A_{04}(t) \times (4/5)$ |
| | A120. 3 歳~22 歳人口数 | $A_{01}(t) \times (2/5) + A_{02}(t) + A_{03}(t) + A_{04}(t) + A_{05}(t) \times (3/5)$ |
| | A121. 19 歳~22 歳人口数 | $A_{04}(t) \times (1/5) + A_{05}(t) \times (3/5)$ |
| | A122. 人口密度 | $A_{114}(t) / D_{01}(t)$ |
| | A123. 一人当たりその他サービス業の面積 | $M_{01}(t) / A_{114}(t) \setminus$ |
| | A124. 学生当たり学校の面積 | $(K_{01}(t) + L_{01}(t)) / A_{120}(t)$ |
| | A125. 一人当たり民生業務部門の面積 | $H_{06}(t) / A_{114}(t)$ |
| | A126. 15 歳~64 歳人口の比率 | $A_{116}(t) / A_{114}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

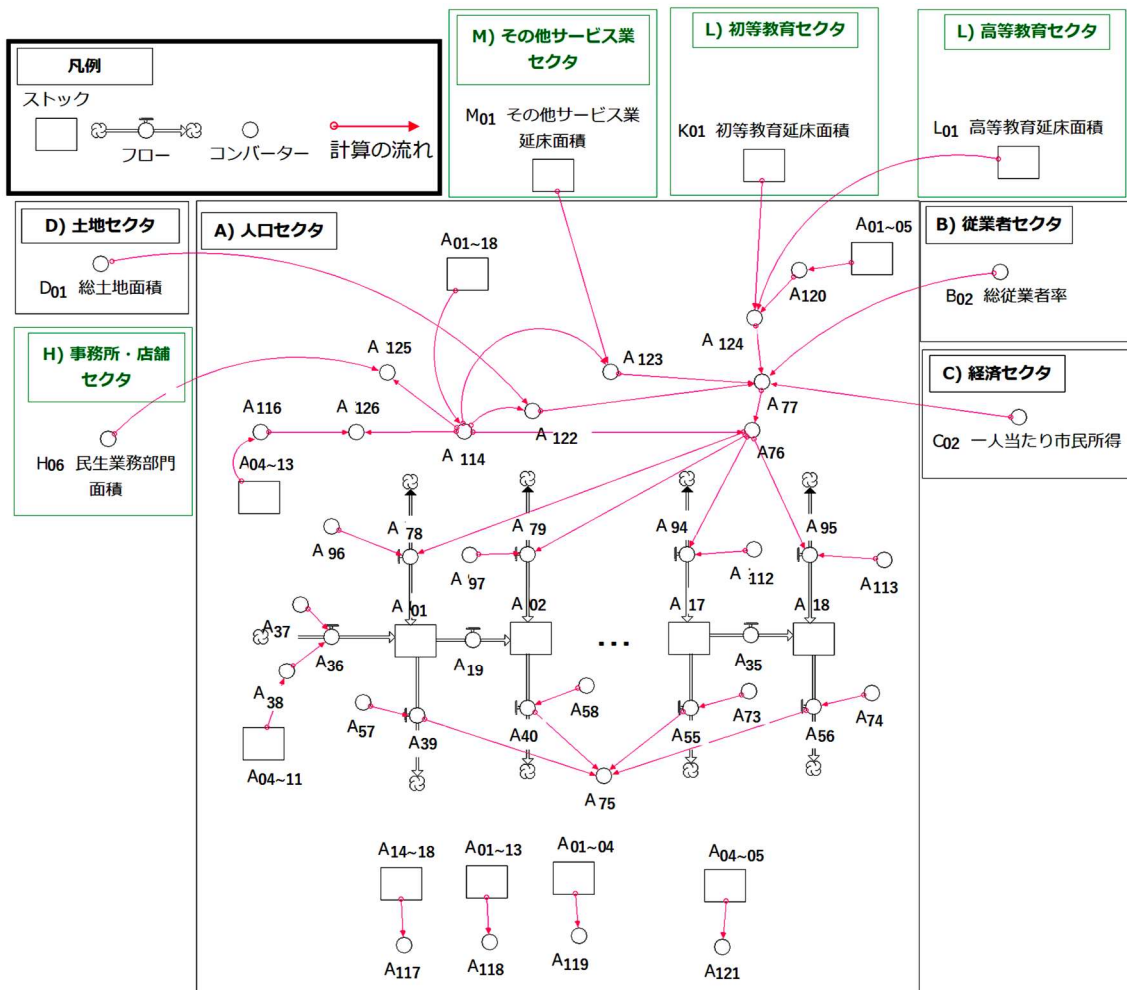


図 2. 12 人口セクタの計算フロー

A-2) 人口セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 社会要因による総人口変化比率

社会要因による総人口変化比率の説明変数と因果関係を表 2. 3 に示す。社会要因による総人口変化比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下のように定めた。

・人口密度

人口密度が低い都市に人が集まると、都市の交通インフラや集積が発展して転入が増加するが、人口密度が高い年に人が集まる場合にはインフラや集積の供給より需要が大きくなり、利便性が落ちるため転入が減少すると考えられる。そこで、人口密度が日本の全国平均より低い都市で人口密度が増加すると、社会要因による総人口変化比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。逆に、人口密度が日本平均より高い都市は減少関数に設定

した。

- ・一人当たりその他サービス業の面積

レジャー施設及び老人ホームなどの施設が増えると生活が便利になり、人口が移動して来ることが知られている¹⁰⁾。そこで、一人当たりのその他サービス業面積が増加すると、社会要因による総人口変化比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・学生当たり学校の面積、総従業者率

人口の移動には若年人口が大きい割合を占め、学校への進学と卒業後の就職などが大きな原因になっていることが知られている¹⁰⁾。そこで、学生当たり学校の面積と総従業者率が増加すると、社会要因による総人口変化比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

一般に所得が高い地域に人口は移動すると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、社会要因による総人口変化比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2.3 社会要因による人口変化比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-------------------------------|------------------------|----------------------|----------|
| A. 人口 セクタ | A77. 社会要因 による人口 変化比率 | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [+], [-] |
| | | A123. 一人当たりその他サービス業の面積 | [m ² /人] | [+] |
| | | A124. 学生当たり学校の面積 | [m ² /人] | [+] |
| | | B02. 総従業者比率 | [-] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |

B) 従業者セクタ

B-1) 従業者セクタの概要

従業者セクタは、産業構造の変化を把握するために、産業別(第1次産業、第2次産業、第3次産業)の従業者数を計算するように構築した(表 2.4)。従業者セクタの計算構造は、 t 年の総従業者数は、 t 年の人口に t 年の総従業者比率を乗じて算出し、 t 年の産業別従業者数は、 t 年の総従業者数に t 年の産業別従業者比率を乗じて算出する。 t 年の総従業者比率と産業別従業者比率は他のセクタにある活動量から計算される。従業者セクタの変数構成と計算式を表 2.4 に示す。従業者セクタの計算フローを図 2.13 に示す。

表 2.4 本研究における統計資料による産業区分

| 統計資料における産業区分 | 本研究における産業区分 |
|-------------------|-------------|
| 農業 | 第1次産業 |
| 林業 | |
| 漁業 | |
| 鉱業 | 第2次産業 |
| 建設業 | |
| 製造業 | |
| 電気・ガス・熱供給・水道業 | 第3次産業 |
| 情報通信業 | |
| 運輸業 | |
| 卸売・小売業 | |
| 金融・保険業 | |
| 不動産業 | |
| 飲食店、宿泊業 | |
| 医療、福祉 | |
| 教育、学習支援業 | |
| 複合サービス事業 | |
| サービス業（他に分類されないもの） | |

表 2.5 従業者セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|------------------|------------------|---|
| B. 従業者 セクタ | B01. 総従業者数 | $A_{114}(t) \times (B_{01}(b)/A_{114}(b)) \times B_{02}(t)$ |
| | B02. 総従業者比率 | $f_1(A_{126}(t,+) \times f_2(H_{07}(t,+) \times f_3(N_{05}(t,+) \times f_4(P_{02}(t,+) \times B_{01}(t))$ |
| | B03. 第1次産業の従業者数 | $B_{01}(t) \times (B_{03}(b)/B_{01}(b)) \times B_{04}(t)$ |
| | B04. 第1次産業の従業者比率 | $f_1(A_{122}(t,-) \times f_2(A_{124}(t,-) \times f_3(N_{05}(t,+) \times B_{01}(t))$ |
| | B05. 第2次産業の従業者数 | $B_{01}(t) \times (B_{05}(b)/B_{01}(b)) \times B_{06}(t)$ |
| | B06. 第2次産業の従業者比率 | $f_1(A_{122}(t,-) \times f_2(A_{124}(t,-) \times f_3(P_{02}(t,+) \times B_{01}(t))$ |
| | B07. 第3次産業の従業者数 | $B_{01}(t) \times (B_{07}(b)/B_{01}(b)) \times B_{08}(t)$ |
| | B08. 第3次産業の従業者比率 | $f_1(A_{122}(t,+) \times f_2(A_{124}(t,+) \times f_3(H_{07}(t,+) \times B_{01}(t))$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

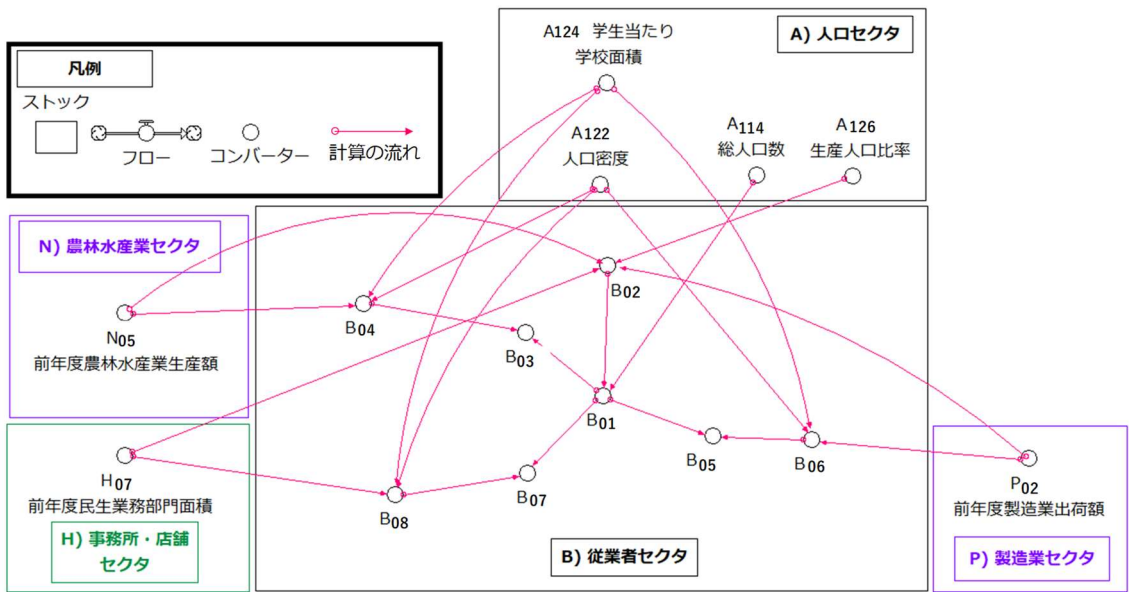


図 2.13 従業者セクタの計算フロー

B-2) 従業者セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 総従業者比率

総従業者比率の説明変数と因果関係を表 2.6 に示す。総従業者比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・生産人口比率

生産人口は従業者の大部分を占めるため、人口に占める生産人口の割合が増加すれば従業者は増加することが知られている¹¹⁾。そこで、生産人口比率が増加すると、総従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・前年度の民生業務部門の延床面積、前年度の農林水産業生産額、前年度の製造業出荷額

景気が良くなると賃金などの労働条件が良くなり労働需要が増加するため従業者が増加することが分かっている¹²⁾。そこで、この 3 つの変数が増加する(すなわち、景気が良くなる)と、総従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2.6 総従業者比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|------------------|--------------------|----------------------|-------|------|
| B. 従業者 セクタ | B02. 総 従業者比率 | A126. 生産人口比率 | [-] | [+] |
| | | H07. 前年度の民生業務部門の延床面積 | [㎡] | [+] |
| | | N05. 前年度の農林水産業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P02. 前年度の製造業出荷額 | [百万円] | [+] |

● 第1次産業の従業者比率

第1次産業の従業者比率の説明変数と因果関係を表2.7に示す。第1次産業の従業者比率を変化させる説明変数は3つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・人口密度

人口密度が高くなると農地面積が少なくなり第1次従業者数が減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、第1次産業の従業者比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・学生当たり学校の面積

高学歴化が進行すると、第1次産業と第2次産業から第3次産業に従業者数が移動すると考えられる。そこで、学生当たり学校の面積が増加すると、第1次産業の従業者比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・前年度の農林水産業生産額

第1次産業が増加するほど第1次産業従業者数の割合は高まることが分かっている¹⁴⁾。そこで、前年度の農林水産業生産額が増加すると、第1次産業の従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表2.7 第1次産業の従業者比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------|
| B. 従業者 セクタ | B ₀₄ . 第1次産業の 従業者比率 | A ₁₂₂ . 人口密度 | [人/km ²] | [-] |
| | | A ₁₂₄ . 学生当たり学校の面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | N ₀₅ . 前年度の農林水産業生産額 | [百万円] | [+] |

● 第2次産業の従業者比率

第2次産業の従業者比率の説明変数と因果関係を表2.8に示す。第2次産業の従業者比率を変化させる説明変数は3つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・人口密度

人口密度が増えると工業地面積が小さくなり第2次産業の従業者数が減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、第2次産業の従業者比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・学生当たり学校の面積

高学歴化が進行すると、第 1 次産業と第 2 次産業から第 3 次産業に従業者数が移動すると考えられる。そこで、学生当たり学校の面積が増加すると、第 2 次産業の従業者比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・前年度の製造業出荷額

第 2 次産業が増加するほど、第 2 次産業の従業者数の割合は高まることが知られている¹⁴⁾。そこで、前年度の製造業出荷額が増加すると、第 2 次産業の従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2.8 第 2 次産業の従業者比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----|----------|------------------|----------------------|------|
| B. | B06. | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [-] |
| 従業者 | 第 2 次産業の | A124. 学生当たり学校の面積 | [m ² /人] | [-] |
| セクタ | 従業者比率 | P02. 前年度の製造業出荷額 | [百万円] | [+] |

- 第 3 次産業の従業者比率

第 3 次産業の従業者比率の説明変数と因果関係を表 2.9 に示す。第 3 次産業の従業者比率を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・人口密度

人口密度が増えると集積のため第 3 次産業の従業者数が増加すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、第 3 次産業の従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・学生当たり学校の面積

高学歴化が進行すると、第 3 次産業の割合が高い女性の従業者が増加することが知られている¹³⁾。そこで、学生当たり学校の面積が増加すると、第 3 次産業の従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・前年度の民生業務部門の延床面積

第 3 次産業が増加するほど、第 3 次産業の従業者数の割合が高まることが知られている¹⁴⁾。そこで、前年度の民生業務部門の延床面積が増加すると、第 3 次産業の従業者比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 9 第3次産業の従業者比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----|--------|----------------------|----------------------|------|
| B. | B08. | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [+] |
| 従業者 | 第3次産業の | A124. 学生当たり学校の面積 | [m ² /人] | [+] |
| セクタ | 従業者比率 | H07. 前年度の民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [+] |

C) 経済セクタ

C-1) 経済セクタの概要

経済セクタは、市内総生産(1年間に市内で行われた各経済活動部門の生産活動によって新たに生み出された付加価値の貨幣評価額を意味する)と一人当たり市民所得(市内に居住している者に配分される所得)で構成される。 t 年の市内総生産は、市内総生産の基準年値に t 年の市内総生産の変化比率を乗じて算出する。また、 t 年の一人当たり市民所得は、一人当たり市民所得の基準年値に t 年の一人当たり市民所得の変化比率を乗じて算出する。 t 年の市内総生産の変化比率と一人当たり市民所得の変化比率は、他のセクタにある活動量から計算される。経済セクタの変数構成と計算式を表 2. 10 に示す。経済セクタの計算フローを図 2. 14 に示す。

表 2. 10 経済セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-----------------|----------------|---|
| C. 経済 セクタ | C01. 市内総生産 | $C_{01}(b) \times f_1(H_{06}(t,+) \times f_2(N_{04}(t,+) \times f_3(P_{01}(t,+) \times f_4(C_{04}(t,+) \times f_5(A_{124}(t,+) \times f_6(A_{126}(t,+) \times f_7(B_{02}(t,+) \times f_8(C_{03}(t,+) \times f_9(C_{01}(t-1))$ |
| | C02. 一人当たり市民所得 | $C_{02}(b) \times f_1(A_{124}(t,+) \times f_2(A_{126}(t,+) \times f_3(B_{02}(t,+) \times f_4(C_{04}(t,+) \times f_5(C_{01}(t-1))$ |
| | C03. 前年度の市内総生産 | $C_{01}(t-1)$ |
| | C04. 市内総生産成長率 | $C_{01}(t)/C_{03}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

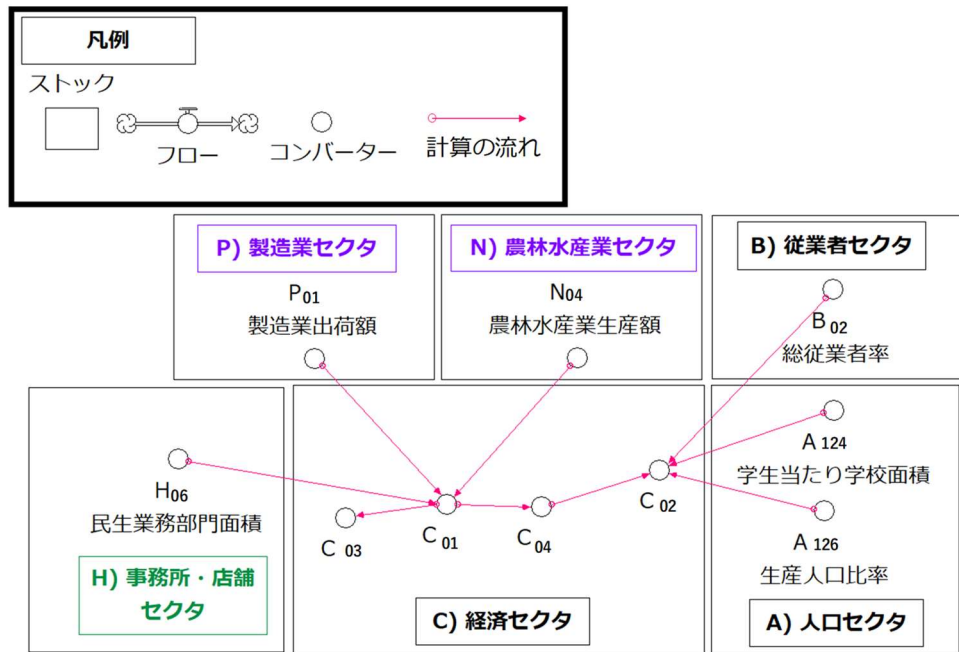


図 2.14 経済セクタの計算フロー

C-2) 経済セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 市内総生産

市内総生産の説明変数と因果関係を表 2.11 に示す。市内総生産を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・ 民生業務部門延床面積、農林水産業生産額、製造業出荷額

市内総生産は、農林水産業、製造業、卸売・小売業、金融・保険業など生産が活発になると増加することが知られている¹⁵⁾。そこで、民生業務部門延床面積、農林水産業生産額、製造業出荷額が増加すると、市内総生産が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2.11 市内総生産の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------|------|
| C. 経済 セクタ | C ₀₁ . 市内総生産 | H ₀₆ . 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [+] |
| | | N ₀₄ . 農林業産業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P ₀₁ . 製造業出荷額 | [百万円] | [+] |

● 一人当たり市民所得

一人当たり市民所得の説明変数と因果関係を表 2.12 に示す。一人当たり市民所得を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・学生あたり学校面積

学歴が高くなるほど基本給料が増加するので所得が増加すると考えられる。そこで、学生あたり学校面積が増加すると、一人当たり市民所得が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・生産人口比率

働くポテンシャルが高い世代の割合が大きくなれば、市民所得が増えると考えられる。そこで、生産人口比率が増加すると、一人当たり市民所得が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総従業者率

働く人口が増えると平均所得が上がると考えられる。そこで、総従業者率が増加すると、一人当たり市民所得が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・市内総生産成長率

経済成長を表す一つの指標である市内総生産成長率が上がると、市民に配分される利益も増えると考えられる。そこで、市内総生産成長率が増加すると、一人当たり市民所得が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 12 一人当たり市民所得の説明変数と因果関係

| セクタ分類 | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|--------------|-----------------------|------------------|---------------------|------|
| C. 経済 セクタ | C02. 一人当たり 市民所得 | A124. 学生あたり学校の面積 | [m ² /人] | [+] |
| | | A126. 生産人口比率 | [-] | [+] |
| | | B02. 総従業者比率 | [-] | [+] |
| | | C04. 市内総生産成長率 | [-] | [+] |

D) 土地セクタ

D-1) 土地セクタの概要

都市の土地は、用途によって分類されている。統計資料に基づく本研究の土地用途区分を表 2. 13 に示す。ただし、本研究では、説明変数として利用される性格によって土地の用途を再区分した。なお、本研究での土地面積は、他の活動量による変化より都市計画などの法的な規制による変化が大きいと判断したため、実績値を入力して利用した(表 2. 14)。

表 2. 13 統計資料に基づく本研究の土地用途区分

| 統計資料における土地用途区分 | | 本研究における土地用途区分 |
|----------------|------|---------------|
| 固定資産概要調書 | 住宅地区 | 住宅地面積 |
| | 商業地区 | 商業地面積 |
| | 田 | 農業地面積 |
| | 畑 | |
| | 山林 | 林業地面積 |
| | 工業地区 | 工業地面積 |
| | 塩田 | 雑種地面積 |
| | 鉱泉地 | |
| | 雑種地 | |
| | 村落地区 | |
| | 池沼 | |
| | 原野 | |
| 公共施設概要調書 | 道路面積 | 道路面積 |

表 2. 14 土地セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-----------------|-------------------------|-----------|
| D. 土地 セクタ | D ₀₁ . 総土地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₂ . 住宅地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₃ . 商業地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₄ . 工業地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₅ . 農業地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₆ . 林業地面積 | なし（実績値入力） |
| | D ₀₇ . 道路面積 | なし（実績値入力） |

E) 世帯セクタ

E-1) 世帯セクタの概要

世帯セクタは晩婚化、少子高齢化などによる若年単独世帯や高齢者世帯の増加などの世帯構造の変化を表現するために、5 類型の世帯を計算する構造として構築した(表 2. 15)。本研究では、若年とは 0 歳から 64 歳までの人口を指す。世帯セクタの活動量の計算は、世帯主率法を利用した。世帯主率法とは、世帯数が世帯主数に等しいことを利用して、人口に世帯主率(人口に占める世帯主数の割合)を乗じて世帯数を計算する方法である。それぞれの世帯主率は、他のセクタにある活動量から計算される。世帯セクタの変数構成と計算式を

表 2. 16 に示す。世帯セクタの計算フローを図 2. 15 に示す。

表 2. 15 本研究における世帯類型区分

| 国勢調査における一般世帯の世帯類型区分 | | 本研究における世帯類型区分 | | 備考 |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------|-------------|-------------|
| 親 族 世 帯 | 核 家 族 世 帯 | 夫婦のみの世帯 | 類型 3 若年夫婦世帯 | 64 歳未満の世帯 |
| | | 夫婦と子供からなる世帯 | 類型 4 高齢夫婦世帯 | 65 歳以上の世帯 |
| | | 男親と子供からなる世帯 | | |
| | | 女親と子供からなる世帯 | | |
| | | 夫婦と両親からなる世帯 | | |
| | そ の 他 の 親 族 世 帯 | 夫婦と一人親からなる世帯 | 類型 5 その他世帯 | |
| | | 夫婦、子供と両親からなる世帯 | | |
| | | 夫婦、子供と一人親からなる世帯 | | |
| | | 夫婦と他の親族からなる世帯 | | |
| | | 夫婦、子供と他の親族からなる世帯 | | |
| | | 夫婦、親と他の親族からなる世帯 | | |
| | | 夫婦、子供、親と他の親族からなる世帯 | | |
| | | 兄弟姉妹のみからなる世帯 | | |
| | | 他に分類されない世帯 | | |
| 非親族世帯 | | | | |
| 単独世帯 | | 類型 1 若年単独世帯 | | 64 歳未満の単独世帯 |
| | | 類型 2 高齢単独世帯 | | 65 歳以上の単独世帯 |

表 2. 16 世帯セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-----------------|---------------|---|
| E. 世帯 セクタ | E01. 若年単独世帯数 | $A_{118}(t) \times (E_{01}(b)/A_{118}(b)) \times E_{02}(t)$ |
| | E02. 若年単独世帯主率 | $f_1(A_{122}(t), -) \times f_2(A_{125}(t), +) \times f_3(B_{03}(t), -) \times f_4(B_{07}(t), +) \times f_5(C_{02}(t), +)$ |
| | E03. 高齢単独世帯数 | $A_{117}(t) \times (E_{03}(b)/A_{117}(b)) \times E_{04}(t)$ |
| | E04. 高齢単独世帯主率 | $f_1(A_{122}(t), -) \times f_2(A_{125}(t), +) \times f_3(B_{03}(t), -) \times f_4(B_{07}(t), +) \times f_5(C_{02}(t), +)$ |
| | E05. 若年夫婦世帯数 | $A_{118}(t) \times (E_{05}(b)/A_{118}(b)) \times E_{06}(t)$ |
| | E06. 若年夫婦世帯主率 | $f_1(A_{122}(t), +) \times f_2(A_{125}(t), -) \times f_3(B_{03}(t), +) \times f_4(B_{07}(t), -) \times f_5(C_{02}(t), -)$ |
| | E07. 高齢夫婦世帯数 | $A_{117}(t) \times (E_{07}(b)/A_{117}(b)) \times E_{08}(t)$ |
| | E08. 高齢夫婦世帯主率 | $f_1(A_{122}(t), +) \times f_2(A_{125}(t), -) \times f_3(B_{03}(t), +) \times f_4(B_{07}(t), -) \times f_5(C_{02}(t), -)$ |
| | E09. その他世帯数 | $A_{114}(t) \times (E_{09}(b)/A_{114}(b)) \times E_{10}(t)$ |
| | E10. その他世帯主率 | $f_1(A_{36}(t), +) \times f_2(A_{125}(t), -) \times f_3(B_{03}(t), +) \times f_4(B_{07}(t), -) \times f_5(C_{02}(t), -)$ |
| | E11. 単独世帯数 | $E_{01}(t) + E_{03}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

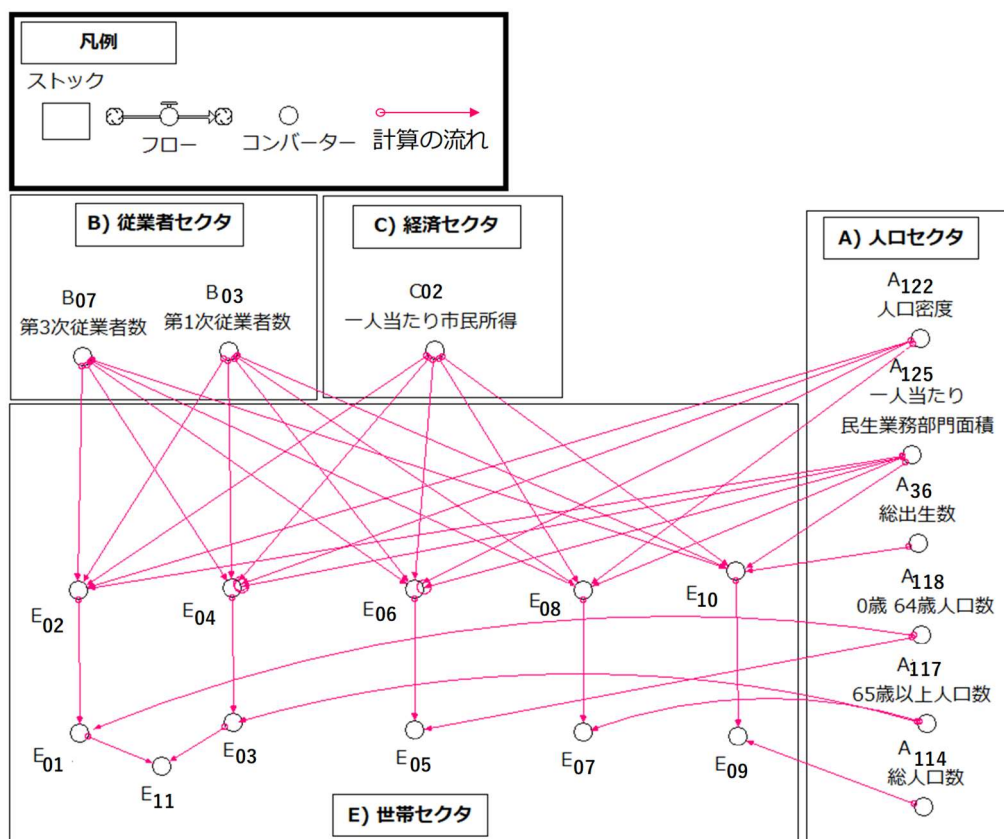


図 2.15 世帯セクタの計算フロー

E-2) 世帯セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 若年単独世帯主率

若年単独世帯主率の説明変数と因果関係を表 2.17 に示す。若年単独世帯主率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・人口密度

人口密度の増加に伴う需要過剰によって家賃が高くなり、その他世帯から独立する一人暮らしが減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、若年単独世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・一人当たり民生業務部門の面積

都市化によって晩婚化や晩産化が進み、世帯の小規模化が進行すると考えられる。そこで、一人当たり民生業務部門の面積が増加すると、若年単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・第 1 次産業の従業者、第 3 次産業の従業者数

第 1 次産業から第 2 次産業を経て第 3 次産業までの産業転換により大家族の労働力の必

要性が減少し核家族化が進むと考えられる。そこで、第1次産業の従業者数が増加すると、若年単独世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。また、第3次産業の従業者数が増加すると、若年単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、ライフスタイルが多様になり、世帯の小規模化が進行することが知られている¹⁶⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、若年単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 17 若年単独世帯主率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| E. 世帯 セクタ | E02. 若年単独 世帯主率 | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [-] |
| | | A125. 一人当たり民生業務部門の面積 | [m ² /人] | [+] |
| | | B03. 第1次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |

● 高齢単独世帯主率

高齢単独世帯主率への説明変数と因果関係を表 2. 18 に示す。高齢単独世帯主率を変化させる説明変数は5つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・人口密度

人口密度の増加に伴う需要過剰によって家賃が高くなり、その他世帯から独立する一人暮らしが減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、高齢単独世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり民生業務部門の面積

都市化によって晩婚化や晩産化が進み、世帯の小規模化が進行すると考えられる。そこで、一人当たり民生業務部門の面積が増加すると、高齢単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・第1次産業の従業者数、第3次産業の従業者数

第1次産業から第2次産業を経て第3次産業までの産業転換により大家族の労働力の必要性が減少し核家族化が進むと考えられる。そこで、第1次産業の従業者数が増加すると、高齢単独世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。また、第3次産業の従業者数が増加すると、高齢単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、ライフスタイルが多様になり、世帯の小規模化が進行することが知られている¹⁶⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、高齢単独世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 18 高齢単独世帯主率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| E. 世帯 セクタ | E04. 高齢単独 世帯主率 | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [-] |
| | | A125. 一人当たり民生業務部門の面積 | [m ² /人] | [+] |
| | | B03. 第 1 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |

● 若年夫婦世帯主率

若年夫婦世帯主率の説明変数と因果関係を表 2. 19 に示す。若年夫婦世帯主率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・人口密度

人口密度の増加に伴う需要過剰によって家賃が高くなり、その他世帯から独立する一人暮らしが減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、若年夫婦世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・一人当たり民生業務部門の面積

都市化によって晩婚化や晩産化が進み、世帯の小規模化が進行すると考えられる。そこで、一人当たり民生業務部門の面積が増加すると、若年夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・第 1 次産業の従業者数、第 3 次産業の従業者数

第 1 次産業から第 2 次産業を経て第 3 次産業までの産業転換により大家族の労働力の必要性が減少し核家族化が進むと考えられる。そこで、第 1 次産業の従業者数が増加すると、若年夫婦世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。また、第 3 次産業の従業者数が増加すると、若年夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、ライフスタイルが多様になり、世帯の小規模化が進行することが知られている¹⁶⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、若年夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 19 若年夫婦世帯主率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| E. 世帯 セクタ | E06. 若年夫婦 世帯主率 | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [+] |
| | | A125. 一人当たり民生業務部門の面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | B03. 第1次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |

● 高齢夫婦世帯主率

高齢夫婦世帯主率の説明変数と因果関係を表 2. 20 に示す。高齢夫婦世帯主率を変化させる説明変数は5つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・人口密度

人口密度の増加に伴う需要過剰によって家賃が高くなり、その他世帯から独立する一人暮らしが減少すると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、高齢夫婦世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・一人当たり民生業務部門の面積

都市化によって晩婚化や晩産化が進み、世帯の小規模化が進行する。そこで、一人当たり民生業務部門の面積が増加すると、高齢夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・第1次産業の従業者数、第3次産業の従業者数

第1次産業から第2次産業を経て第3次産業までの産業転換により大家族の労働力の必要性が減少し核家族化が進むと考えられる。そこで、第1次産業の従業者数が増加すると、高齢夫婦世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。また、第3次産業の従業者数が増加すると、高齢夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、ライフスタイルが多様になり、世帯の小規模化が進行することが知られている¹⁶⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、高齢夫婦世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 20 高齢夫婦世帯主率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| E. 世帯 セクタ | E08. 高齢夫婦 世帯主率 | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [+] |
| | | A125. 一人当たり民生業務部門の面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | B03. 第 1 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |

● その他世帯主率

その他世帯主率の説明変数と因果関係を表 2. 21 に示す。その他世帯主率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総出生数

出生数が多ければその他世帯数も増加すると考えられる。そこで、出生数が増加すると、その他世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり民生業務部門の面積

都市化によって晩婚化や晩産化が進み、世帯の小規模化が進行する。そこで、一人当たり民生業務部門の面積が増加すると、その他世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 第 1 次産業の従業者数、第 3 次産業の従業者数

第 1 次産業から第 2 次産業を経て第 3 次産業までの産業転換により大家族の労働力の必要性が減少し核家族化が進むと考えられる。そこで、第 1 次産業の従業者数が増加すると、その他世帯主率が増加すると仮定して増加関数に設定した。また、第 3 次産業の従業者数が増加すると、その他世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、ライフスタイルが多様になり、世帯の小規模化が進行することが知られている¹⁶⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、その他世帯主率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2.21 その他世帯主率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|---------------------|-------------------|---------------------|------|
| E. 世帯 セクタ | E10. その他 世帯主率 | A36. 総出生数 | [人] | [+] |
| | | A125. 一人当たり民生業務面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | B03. 第1次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |

2.3.2 民生家庭部門

民生家庭部門は、統計調査の住宅の建て方の分類を考慮して、F) 戸建住宅セクタと G) 集合住宅セクタに区別した(表 2.22)。表 2.22 の長屋建は、一棟の中に二つ以上の住戸があるため、集合住宅と合わせて計算した。また、各セクタでは、住宅の戸数を計算するとともに、エネルギー消費量を計算するために該当する住宅に居住する世帯数を計算した。

表 2.22 本研究における統計資料に基づく住宅の区分

| 住宅・土地統計調査の住宅の建て方の分類 | 本研究における住宅の建て方の分類 |
|---------------------|------------------|
| 一戸建 | 戸建住宅 |
| 長屋建 | 集合住宅 |
| 共同住宅 | |
| その他 | |

F) 戸建住宅セクタ

F-1) 戸建住宅セクタの概要

戸建住宅セクタの戸建住宅戸数は、今後、住宅の時間経過による断熱性能変化を考慮可能とするために、築5年別住宅戸数を計算するようにした。この計算構造では、築年階級ごとの住宅増減を、新築戸数または経年変化による住宅戸数の移動と解体戸数によって捉えている。その際に、経年変化による住宅戸数の移動は、毎年1/5ずつ移動すると仮定した。 t 年の新築戸数は t 年の戸建住宅戸数に t 年の新築着工比率を乗じて計算される。 t 年の新築着工比率は他のセクタの活動量から計算される。一方で、 t 年の築5年別住宅解体戸数については統計資料が存在しないが、 t 年の戸建住宅解体戸数は t 年の戸建住宅戸数と t 年の新築戸数から推計可能である。 t 年の戸建住宅の修繕戸数については、建物の修繕周期は長期修繕計画標準様式¹⁷⁾を参考にして12年で設定した。また住宅土地統計年報によれば、築5年別住宅戸数の中で、修繕時期になる建物の割合は約6%であった。従って、本研究では、

戸建住宅戸数の中で毎年 6%の戸建住宅が修繕すると仮定した。 t 年の解体戸数については、毎年の解体総戸数のデータは存在するが、築 5 年別解体戸数はデータが存在しない。従って、物の故障率計算に広く使用されている Weibull distribution を用いて築 5 年別解体戸数を推計した。その後、Weibull distribution によって計算された解体総戸数と実際の解体総戸数を一致させるために、築 5 年別住宅戸数に Weibull distribution による結果と社会要因による解体比率(実際の解体総戸数/ Weibull distribution による解体総戸数)を乗じて築 5 年別解体戸数を計算した。社会要因による解体比率は他のセクタにある活動量から計算される。

戸建住宅に居住する世帯数は、世帯セクタの世帯類型別世帯数に世帯類型別戸建住宅居住比率を乗じて計算する。世帯類型別戸建住宅居住比率は他のセクタにある活動量から計算される。

戸建住宅セクタの変数構成と計算式を表 2. 23 に示す。戸建住宅セクタの計算フローを図 2. 16 に示す。

表 2. 23 戸建住宅セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-------------------|---|--|
| | F01. 0 年~4 年の戸建住宅戸数 | $F_{01}(t-1)-F_{22}(t)+F_{43}(t)-F_{45}(t)$ |
| | F02~20. 5n 年~(5n+4)年の戸建住宅戸数 (ここで、n=1~19) | $F_m(t-1)+F_{(m+20)}(t)-F_{(m+21)}(t)-F_{(m+44)}(t)$ (ここで、m=02~20) |
| | F21. 100 年以上の戸建住宅戸数 | $F_{21}(t-1)+F_{41}(t)-F_{65}(t)$ |
| | F22~41. 5n 年~(5n+4)年の住宅グループの移動戸数 (ここで、n=0~19) | $F_m(t) \times (1/5)$ (ここで、m=01~20) |
| | F42. 総戸建住宅戸数 | $\sum_{i=01}^{21} F_i(t)$ |
| | F43. 戸建住宅の着工戸数 | $F_{42}(t) \times (F_{43}(b)/F_{42}(b)) \times F_{44}(t)$ |
| | F44. 戸建住宅の着工比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(C_{02}(t,+)) \times f_3(D_{02}(t,+)) \times f_4(F_{90}(t,+))$ $\times f_5(F_{91}(t,-)) \times f_6(K_{01}(t,+))$ |
| | F45~65. 5n 年~(5n+4)年の戸建住宅の解体戸数 (ここで、n=0~20) | $F_m(t) \times F_{(m+65)}(t) \times F_{88}(t)$ $\times \{ \sum_{i=45}^{65} F_i(b) / \sum_{i=01}^{21} (F_i(b) \times F_{(i+65)}(b)) \}$ (ここで、m=01~21) |
| | F66~86. 5n 年~(5n+4)年の Weibull distribution による解体比率 (ここで、n=0~20) | $1 - \left(e^{\left(\left(\frac{5n+4}{F_{87}} \right)^2 \right)} / e^{\left(\left(\frac{5n}{F_{87}} \right)^2 \right)} \right)^{1/5}$ (ここで、n=0~20) |
| F. 戸建住宅 セクタ | F87. 戸建住宅の平均寿命 | なし(Weibull distribution による推定値入力) |
| | F88. 戸建住宅の社会要因による解体比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(C_{02}(t,+)) \times f_3(F_{90}(t,-)) \times f_4(K_{01}(t,-))$ |
| | F89. 戸建住宅の解体戸数 | $\sum_{i=45}^{65} F_i(t)$ |
| | F90. 戸建住宅稼働率 | $F_{103}(t)/F_{42}(t)$ |
| | F91. 総住宅戸数 | $F_{42}(t)+G_{42}(t)$ |
| | F92. 戸建住宅修繕戸数 | $0.06 \times F_{42}(t)$ |
| | F93. 若年単独世帯戸建住宅居住数 | $E_{01}(t) \times (F_{93}(b)/E_{01}(b)) \times F_{94}(t)$ |
| | F94. 若年単独世帯戸建住宅居住比率 | $f_1(B_{07}(t,-)) \times f_2(C_{02}(t,+)) \times f_3(D_{02}(t,+)) \times f_4(F_{91}(t,-))$ |
| | F95. 高齢単独世帯戸建住宅居住数 | $E_{03}(t) \times (F_{95}(b)/E_{03}(b)) \times F_{96}(t)$ |
| | F96. 高齢単独世帯戸建住宅居住比率 | $f_1(A_{117}(t,-)) \times f_2(A_{123}(t,-)) \times f_3(C_{02}(t,+))$ $\times f_4(D_{02}(t,+)) \times f_5(F_{91}(t,-))$ |
| | F97. 若年夫婦世帯戸建住宅居住数 | $E_{05}(t) \times (F_{97}(b)/E_{05}(b)) \times F_{98}(t)$ |
| | F98. 若年夫婦世帯戸建住宅居住比率 | $f_1(B_{07}(t,-)) \times f_2(C_{02}(t,+)) \times f_3(D_{02}(t,+)) \times f_4(F_{91}(t,-))$ |
| | F99. 高齢夫婦世帯戸建住宅居住数 | $E_{07}(t) \times (F_{99}(b)/E_{07}(b)) \times F_{100}(t)$ |
| | F100. 高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率 | $f_1(A_{117}(t,-)) \times f_2(A_{123}(t,-)) \times f_3(C_{02}(t,+))$ $\times f_4(D_{02}(t,+)) \times f_5(F_{91}(t,-))$ |
| | F101. その他世帯戸建住宅居住数 | $E_{09}(t) \times (F_{101}(b)/E_{09}(b)) \times F_{102}(t)$ |
| | F102. その他世帯戸建住宅居住比率 | $f_1(B_{07}(t,-)) \times f_2(C_{02}(t,+)) \times f_3(D_{02}(t,+)) \times f_4(F_{91}(t,-))$ |
| | *F103. 戸建住宅居住世帯数 | $F_{93}(t)+F_{95}(t)+F_{97}(t)+F_{99}(t)+F_{101}(t)$ |

ここで、t は計算年度、b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

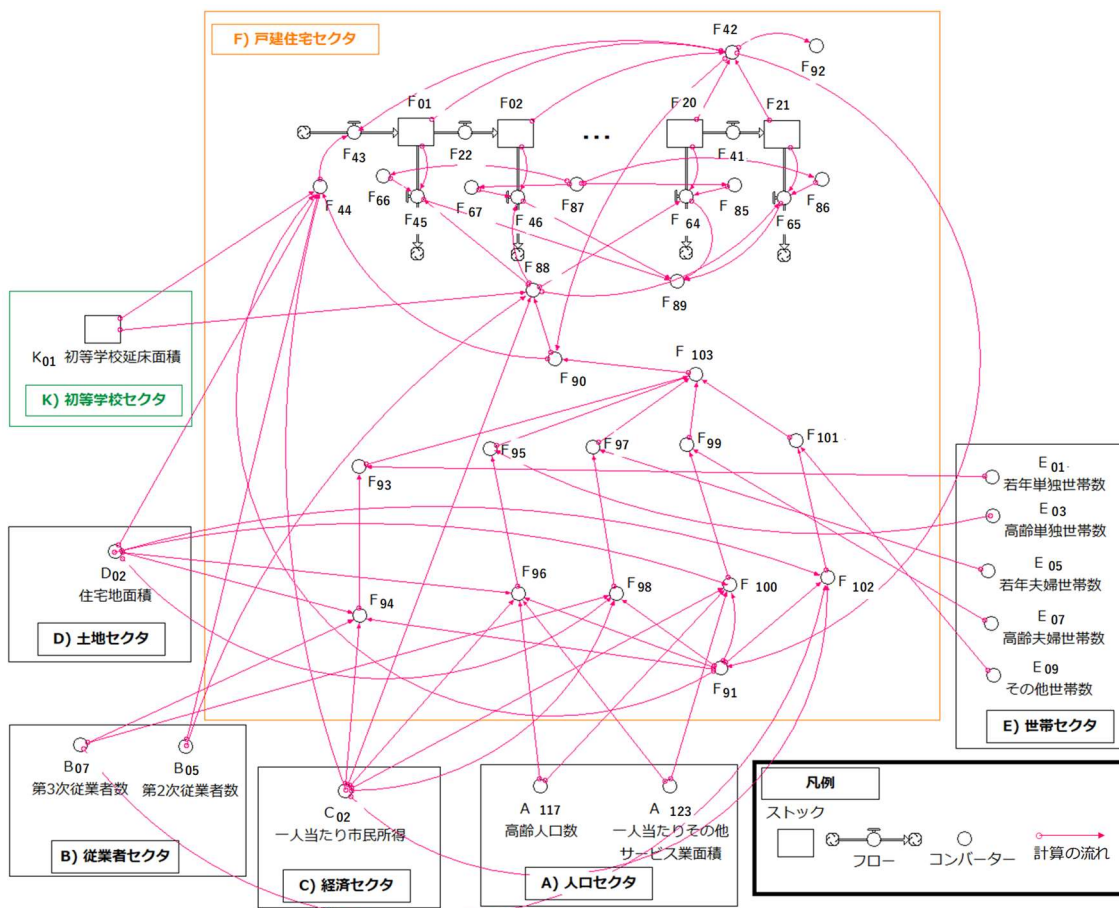


図 2.16 戸建住宅セクタの計算フロー

F-2) 戸建住宅セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 戸建住宅の着工比率

戸建住宅の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.24 に示す。戸建住宅の着工比率を変化させる説明変数は 6 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・第 2 次産業の従業者数

建設業従事者が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、戸建住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・一人当たり市民所得

所得水準が高ければ、住宅を購入する余裕があり、着工が増加すると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると戸建住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅は住宅建設が可能な土地が多ければ、土地価格が安いと、住宅を着工しやすくなると考えられる。そこで、住宅地面積が増加すると、戸建住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・戸建住宅稼働率

戸建住宅戸数に対して戸建住宅に居住する世帯数が多ければ、さらに戸建住宅を建てる必要があると考えられる。そこで、戸建住宅稼働率が増加すると、戸建住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、戸建住宅の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・初等教育延床面積

子供を持つ世帯は主に戸建住宅に居住し、子供の小学校への通学を考慮して初等教育施設の周辺にある戸建住宅の需要が増えると考えられる。そこで、初等教育延床面積が増加すると、戸建住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 24 戸建住宅着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F44. 戸建住宅の 着工比率 | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | | D02. 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | | F90. 戸建住宅稼働率 | [-] | [+] |
| | | F91. 総住宅戸数 | [戸] | [-] |
| | | K01. 初等教育延床面積 | [m ²] | [+] |

- 戸建住宅の社会要因による解体比率

戸建住宅の社会要因による解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 25 に示す。戸建住宅の社会要因による解体比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・第2次産業の従業者数

建設業従事者が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第2次産業の従業者数が増加すると、戸建住宅の社会要因による解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

景気が良くなると、より質の高い居住水準を求めて世帯の住み替えが発生し、その需要に応じて建替が増加することが知られている¹⁸⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、戸建住宅の社会要因による解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・戸建住宅稼働率

戸建住宅戸数に対して戸建住宅に居住する世帯数が多ければ、戸建住宅に関する需要が増えると考えられる。そこで、戸建住宅稼働率が増加すると、戸建住宅の社会要因による解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・初等教育延床面積

子供を持つ世帯は主に戸建住宅に居住し、子供の小学校への通学を考慮して初等教育施設の周辺にある戸建住宅の需要が増えると考えられる。そこで、初等教育延床面積が増加すると、戸建住宅の社会要因による解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 25 戸建住宅の社会要因による解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ分類 | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F88. | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | 戸建住宅の社会要因による 解体比率 | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | | F90. 戸建住宅稼働率 | [-] | [-] |
| | | K01. 初等教育延床面積 | [m ²] | [-] |

- 若年単独世帯戸建住宅居住比率

若年単独世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係を表 2. 26 に示す。若年単独世帯戸建住宅居住比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・第 3 次産業の従業者数

サービス業の増加により転勤または就職のための移動が増え、自宅所有より集合住宅に住む世帯が増加すると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、若年単独世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、戸建住宅に引越しすると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、若年単独世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅地面積に空き面積が多ければ、土地価格が安くなり、戸建住宅が多く建てられるため、戸建住宅に居住する世帯が増えると考えられる。住宅地面積が増加すると、若年単独世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

限られた住宅地に総住宅戸数が増えると、戸建住宅は立てにくくなるため、戸建住宅に住める世帯数は減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、若年単独世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 26 若年単独世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F ₉₄ . | B ₀₇ . 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | 若年単独世帯 | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | 戸建住宅 | D ₀₂ . 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | 居住比率 | F ₉₁ . 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

- 高齢単独世帯戸建住宅居住比率

高齢単独世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係を表 2. 27 に示す。高齢単独世帯戸建住宅居住比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・65 歳以上の人口数

高齢者は戸建住宅の維持管理が難しくなるため、より管理し易い集合住宅への引越しが増えることが知られている¹⁹⁾。そこで、65 歳以上の人口数が増加すると、高齢単独世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たりその他サービス業の面積

高齢者は移動が不便であるため、居住施設を選択する際に、その他サービス業の集積施設との接近性が重要視していることが知られている¹⁹⁾。そして、集積施設の開発は多くの住宅が集まっている集合住宅を中心に行われると考えられる。そこで、一人当たりその他サービス業の面積が増加すると、高齢単独世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準が上がると生活の質が向上し、戸建住宅に引越す人も増えると考えられる。そ

ここで、一人当たり市民所得が増加すると、高齢単独世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅地面積に空き面積が多ければ、土地価格が安くなり、戸建住宅が多く建てられるため、戸建住宅に居住する世帯が増えると考えられる。住宅地面積が増加すると、高齢単独世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

限られた住宅地に総住宅戸数が増えると、戸建住宅は立てにくくなるため、戸建住宅に住める世帯数は減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、高齢単独世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 27 高齢単独世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|---|-------------------------------------|---------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F ₉₆ . 高齢単独世帯 戸建住宅 居住比率 | A ₁₁₇ . 65 歳以上人口数 | [人] | [-] |
| | | A ₁₂₃ . 一人当たりその他サービス業の面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | | D ₀₂ . 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | | F ₉₁ . 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

- 若年夫婦世帯戸建住宅居住比率

若年夫婦世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係を表 2. 28 に示す。若年夫婦世帯戸建住宅居住比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・第 3 次産業の従業者数

サービス産業の拡大により転勤または就職のための移動が増え、自宅所有より集合住宅に住む世帯が増加すると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、若年夫婦世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準が上がると生活の質が向上し、戸建住宅に引越す人も増えると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、若年夫婦世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅地面積に空き面積が多ければ、土地価格が安くなり、戸建住宅が多く建てられるた

め、戸建住宅に居住する世帯が増えると考えられる。住宅地面積が増加すると、若年夫婦世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

限られた住宅地に総住宅戸数が増えると、戸建住宅は立てにくくなるため、戸建住宅に住める世帯数は減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、若年夫婦世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 28 若年夫婦世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F ₉₈ . | B ₀₇ . 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | 若年夫婦世帯 | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | 戸建住宅 | D ₀₂ . 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | 居住比率 | F ₉₁ . 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

- 高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率

高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係を表 2. 29 に示す。高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・65 歳以上人口数

高齢者は戸建住宅の維持管理が難しくなるため、より管理し易い集合住宅への引越しへの要求が増えることが知られている¹⁹⁾。そこで、65 歳以上の人口数が増加すると、高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たりその他サービス業の面積

高齢者は移動が不便であるため、居住施設を選択する際に、その他サービス業の集積施設との接近性を重要視していることが知られている¹⁹⁾。そして、集積施設の開発は多くの住宅が集まっている集合住宅を中心に行われると考えられる。そこで、一人当たりその他サービス業の面積が増加すると、高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準が上がると生活の質が向上し、戸建住宅に引越す人も増えると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅地面積に空き面積が多ければ、土地価格が安くなり、戸建住宅が多く建てられるため、戸建住宅に居住する世帯が増えると考えられる。住宅地面積が増加すると、高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

限られた住宅地に総住宅戸数が増えると、戸建住宅は立てにくくなるため、戸建住宅に住める世帯数は減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 29 高齢夫婦世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|--|-------------------------------------|---------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F ₁₀₀ . 高齢夫婦世帯 戸建住宅 居住比率 | A ₁₁₇ . 65 歳以上人口数 | [人] | [-] |
| | | A ₁₂₃ . 一人当たりその他サービス業の面積 | [m ² /人] | [-] |
| | | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | | D ₀₂ . 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | | F ₉₁ . 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

- その他世帯戸建住宅居住比率

その他世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係を表 2. 30 に示す。その他世帯戸建住宅居住比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・第 3 次産業の従業者数

サービス業の増加により転勤または就職のための移動が増え、自宅所有より集合住宅に住む世帯が増加すると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、その他世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得水準の向上により生活の質が向上し、戸建住宅に引越しすると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、その他世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅地面積に空き面積が多ければ、土地価格が安くなり、戸建住宅が多く建てられるため、戸建住宅に居住する世帯が増えると考えられる。住宅地面積が増加すると、その他世帯戸建住宅居住比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・総住宅戸数

限られた住宅地に総住宅戸数が増えると、戸建住宅は立てにくくなるため、戸建住宅に住める世帯数は減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、その他世帯戸建住宅居住比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 30 その他世帯戸建住宅居住比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|------|
| F. 戸建住宅 セクタ | F ₁₀₂ . | B ₀₇ . 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | その他世帯 | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | 戸建住宅 | D ₀₂ . 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | 居住比率 | F ₉₁ . 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

G) 集合住宅セクタ

G-1) 集合住宅セクタの概要

集合住宅セクタの集合住宅の計算過程は、戸建住宅セクタと同様であるため、説明は省略する。ただし、世帯類型別集合住宅居住数の計算は、世帯セクタの世帯類型別世帯数から戸建住宅セクタの世帯類型別戸建住宅居住数を引くことで計算される。集合住宅セクタの変数構成と計算式を表 2. 31 に示す。集合住宅セクタの計算フローを図 2. 17 に示す。

表 2. 31 集合住宅セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|------------|--|--|
| | G01. 0 年~4 年の集合住宅戸数 | $G_{01}(t-1)-G_{22}(t)+G_{43}(t)-G_{45}(t)$ |
| | G02~20. 5n 年~(5n+4)年の集合住宅戸数 (ここで、n=1~19) | $G_m(t-1)+G_{(m+20)}(t)-G_{(m+21)}(t)-G_{(m+44)}(t)$ (ここで、m=02~20) |
| | G21. 100 年以上の集合住宅戸数 | $G_{21}(t-1)+G_{41}(t)-G_{65}(t)$ |
| | G22~41. 5n 年~(5n+4)年の住宅グループの移動戸数 (ここで、n=0~19) | $G_m(t) \times (1/5)$ (ここで、m=01~20) |
| | G42. 総集合住宅戸数 | $\sum_{i=01}^{21} G_i(t)$ |
| | G43. 総着工戸数 | $G_{42}(t) \times (G_{43}(b)/G_{42}(b)) \times G_{44}(t)$ |
| | G44. 集合住宅着工比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(C_{01}(t,+)) \times f_3(D_{02}(t,+)) \times f_4(E_{11}(t,+))$ $\times f_5(F_{91}(t,-)) \times f_6(G_{90}(t,+))$ |
| | G45~65. 5n 年~(5n+4)年の集合住宅の解体戸数 (ここで、n=0~20) | $G_m(t) \times G_{(m+65)}(t) \times G_{88}(t) \times$ $\{\sum_{i=45}^{65} G_i(b) / \sum_{i=01}^{21} (G_i(b) \times G_{(i+65)}(b))\}$ (ここで、m=01~21) |
| G. 集合住宅セクタ | G66~86. 5n 年~(5n+4)年の Weibull distribution による 解体比率 (ここで、n=0~20) | $1 - \left(e^{\left(\left(\frac{5n+4}{G_{87}} \right)^2 \right)} / e^{\left(\left(\frac{5n}{G_{87}} \right)^2 \right)} \right)^{1/5}$ (ここで、n=0~20) |
| | G87. 集合住宅の平均寿命 | なし(Weibull distribution による推定値入力) |
| | G88. 集合住宅の社会要因による解体比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(C_{01}(t,+)) \times f_3(E_{11}(t,-)) \times f_4(G_{90}(t,-))$ |
| | G89. 総解体戸数 | $\sum_{i=45}^{65} G_i(t)$ |
| | G90. 集合住宅稼働率 | $G_{97}(t)/G_{42}(t)$ |
| | G91. 集合住宅修繕戸数 | $0.06 \times G_{42}(t)$ |
| | G92. 若年単独世帯集合住宅居住数 | $E_{01}(t)-F_{93}(t)$ |
| | G93. 高齢単独世帯集合住宅居住数 | $E_{03}(t)-F_{95}(t)$ |
| | G94. 若年夫婦世帯集合住宅居住数 | $E_{05}(t)-F_{97}(t)$ |
| | G95. 高齢夫婦世帯集合住宅居住数 | $E_{07}(t)-F_{99}(t)$ |
| | G96. その他世帯集合住宅居住数 | $E_{09}(t)-F_{101}(t)$ |
| | *G97. 集合住宅居住世帯数 | $G_{92}(t)+G_{93}(t)+G_{94}(t)+G_{95}(t)+G_{96}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

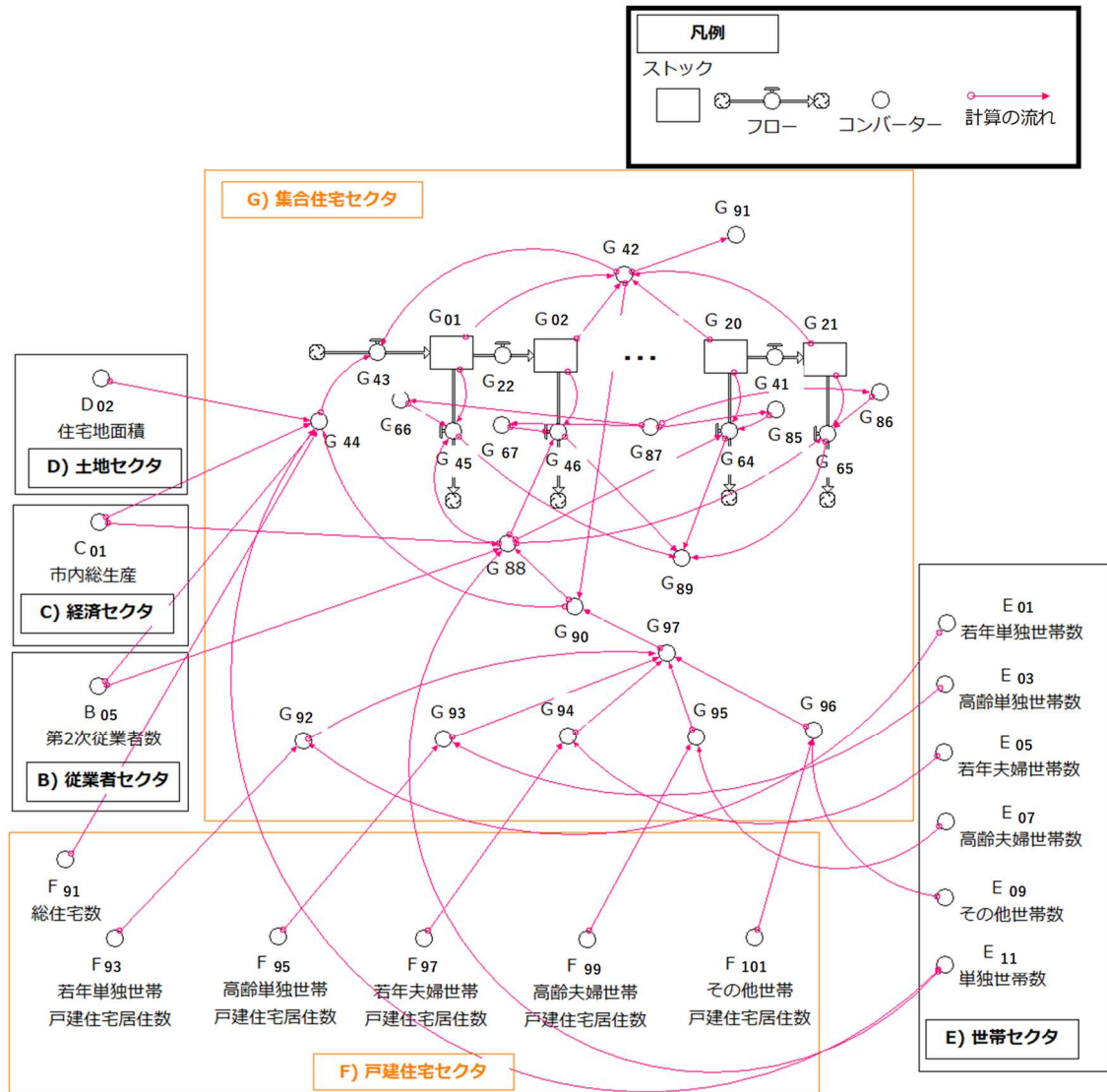


図 2.17 集合住宅セクタの計算フロー

G-2) 集合住宅セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 集合住宅の着工比率

集合住宅の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.32 に示す。集合住宅の着工比率を変化させる説明変数は 6 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要によって着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、集合住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良くなると、大手建設会社による集合住宅の新築工事が増えると考えられる。そこで、市内総生産が増加すると集合住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・住宅地面積

住宅は住宅建設が可能な土地が広ければ、土地価格が安くなるため、住宅を着工しやすくなると考えられる。そこで、住宅地面積が増加すると、集合住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・単独世帯数

住宅の維持管理の便利さによって集合住宅への需要が多くなると考えられる。そこで、単独世帯数が増加すると集合住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・総住宅戸数

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、集合住宅の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・集合住宅稼働率

集合住宅戸数に対して集合住宅に居住する世帯数が多ければ、集合住宅に関する需要が増えると考えられる。そこで、集合住宅稼働率が増加すると、集合住宅の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 32 集合住宅着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------|
| G. 集合住宅 セクタ | G44. 集合住宅の 着工比率 | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D02. 住宅地面積 | [m ²] | [+] |
| | | E11. 単独世帯数 | [世帯] | [+] |
| | | F91. 総住宅数 | [戸] | [-] |
| | | G90. 集合住宅稼働率 | [-] | [+] |

- 集合住宅の社会要因による解体比率

集合住宅の社会要因による解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 33 に示す。集合住宅の社会要因による解体比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建て替えまたは解体事業が増加すると考えられる。そこ

で、第2次従業者数が増加すると、集合住宅の社会要因による解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・市内総生産

景気が良くなると、建替に使える資金が多くなるため、建替が増えることが知られている¹⁸⁾。そこで、市内総生産が増加すると集合住宅の社会要因による解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・単独世帯数

一人暮らしが増加すると、集合住宅への需要が増加するため、集合住宅の解体が減少すると考えられる。そこで、単独世帯数が増加すると集合住宅の社会要因による解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・集合住宅稼働率

集合住宅戸数に対して集合住宅に居住する世帯数が多ければ、集合住宅の需要が増え、解体の必要性が減少すると考えられる。そこで、集合住宅稼働率が増加すると、集合住宅の社会要因による解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 33 集合住宅の社会要因による解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|--------------------------|-----------------|-------|------|
| G. 集合住宅 セクタ | G88. | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | 集合住宅の 社会要因によ る解体比率 | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | E11. 単独世帯数 | [世帯] | [-] |
| | | G90. 集合住宅稼働率 | [-] | [-] |

2.3.3 民生業務部門

民生業務部門のエネルギー消費傾向は建物用途による違いが大きい。本研究では、市町村レベルでも利用可能な統計資料に基づいて建物用途の分類を行った。本研究における、統計に基づく民生業務のセクタ分類を表 2. 34 に示す。本研究の民生業務部門は、H) 事務所・店舗セクタ、I) 病院・ホテルセクタ、J) 木造建物セクタ、K) 初等教育セクタ、L) 高等教育セクタ、M) その他サービス業セクタで構成される。

なお、民生業務部門の各セクタは、延床面積が着工面積と解体面積により変化する計算構造で作成した。 t 年の延床面積は、 $(t-1)$ 年の延床面積に $(t-1)$ 年の着工床面積を加え、 $(t-1)$ 年の解体面積を減じて計算する。 t 年の着工面積と解体面積は t 年の延床面積に t 年の着工比率と解体比率を乗じて計算する。 t 年の着工比率と解体比率は他のセクタの活動量に

より計算される。また、毎年、の修繕面積については利用可能なデータが存在しない。従って、修繕面積は、戸建住宅で仮定した内容をそのまま適用して、毎年全体のストックの中で6%が修繕されると仮定した。民生業務部門の全てのセクタにおける計算過程は同様であるため、以下のセクタ概要において計算過程の説明は省略する。

表 2. 34 統計資料に基づく民生業務部門のセクタ分類

| 統計資料 | 項目 | 民生業務部門 | | | | | |
|--------------|-----------------------------|--------|--------|------|------|------|----------|
| | | 事務所・店舗 | 病院・ホテル | 木造建物 | 初等教育 | 高等教育 | その他サービス業 |
| 固定資産 概要調査 | 木造家屋 | | | | | | |
| | 事務所・店舗・百貨店・銀行 | | | | | | |
| | ホテル・病院 | | | | | | |
| | その他 | | | | | | |
| 公共施設 状況調査 | 児童福祉施設・保育所 | | | | | | |
| | 児童福祉施設・母子生活支援施設 | | | | | | |
| | 児童福祉施設・助産施設 | | | | | | |
| | 保護施設・授産施設 | | | | | | |
| | 保護施設・更生施設 | | | | | | |
| | その他の社会福祉施設・老人憩の家 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・本庁舎 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・支所・出張所 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・職員公舎 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・児童館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・隣保館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・公会堂市民会館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・公民館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・図書館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・博物館・総合博物館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・博物館・科学博物館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・博物館・歴史博物館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・博物館・美術博物館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・博物館・その他 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・博物館等・その他の博物館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・体育施設・体育館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・保健センター | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・青年の家自然の家 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立施設・勤労青少年ホーム | | | | | | |
| | その他施設・市町村立以外の施設・隣保館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立以外の施設・公民館 | | | | | | |
| | その他施設・市町村立以外の施設・体育施設・体育館 | | | | | | |
| | 集会施設 | | | | | | |
| | 老人福祉施設・養護老人ホーム | | | | | | |
| | 老人福祉施設・特別養護老人ホーム | | | | | | |
| | 老人福祉施設・軽費老人ホーム | | | | | | |
| | 老人福祉施設・老人デイサービスセンター | | | | | | |
| | 老人福祉施設・老人福祉センター | | | | | | |
| | 老人福祉施設・老人短期入所施設 | | | | | | |
| | 身体障害者更生支援施設・在宅障害者デイ・サービス施設 | | | | | | |
| 文部科学 統計要覧 | 幼稚園 | | | | | | |
| | 小学校 | | | | | | |
| | 中学校 | | | | | | |
| | 高等学校 | | | | | | |
| | 盲学校 | | | | | | |
| | 聾学校 | | | | | | |
| | 養護学校 | | | | | | |
| | 高等専門学校 | | | | | | |
| | 大学 | | | | | | |
| | 専修学校 | | | | | | |
| | 各種学校 | | | | | | |

H) 事務所・店舗セクタ

H-1) 事務所セクタの概要

事務所・店舗セクタの変数構成と計算式を表 2.35 に示す。事務所・店舗セクタの計算フローを図 2.18 に示す。

表 2.35 事務所・店舗セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|---------------------|----------------------|--|
| H. 事務所・店舗 セクタ | *H01. 事務所・店舗の延床面積 | $H_{01}(t-1)+H_{02}(t)-H_{04}(t)$ |
| | H02. 事務所・店舗の着工面積 | $H_{01}(t) \times (H_{02}(b)/H_{01}(b)) \times H_{03}(t)$ |
| | H03. 事務所・店舗の着工比率 | $f_1(A_{114}(t,+)) \times f_2(B_{05}(t,+)) \times f_3(B_{07}(t,+)) \times f_4(C_{01}(t,+))$ $\times f_5(D_{03}(t,+)) \times f_6(H_{01}(t,-)) \times f_7(H_{06}(t,-))$ |
| | H04. 事務所・店舗の解体面積 | $H_{01}(t) \times (H_{04}(b)/H_{01}(b)) \times H_{05}(t)$ |
| | H05. 事務所・店舗の解体比率 | $f_1(A_{114}(t,-)) \times f_2(B_{05}(t,+)) \times f_3(B_{07}(t,-))$ $\times f_4(C_{01}(t,+)) \times f_5(H_{01}(t,-))$ |
| | H06. 民生業務部門の延床面積 | $H_{01}(t)+I_{01}(t)+J_{01}(t)+K_{01}(t)+L_{01}(t)+M_{01}(t)$ |
| | H07. 前年度の民生業務部門の延床面積 | $H_{06}(t-1)$ |
| | H08. 事務所・店舗の修繕面積 | $0.06 \times H_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

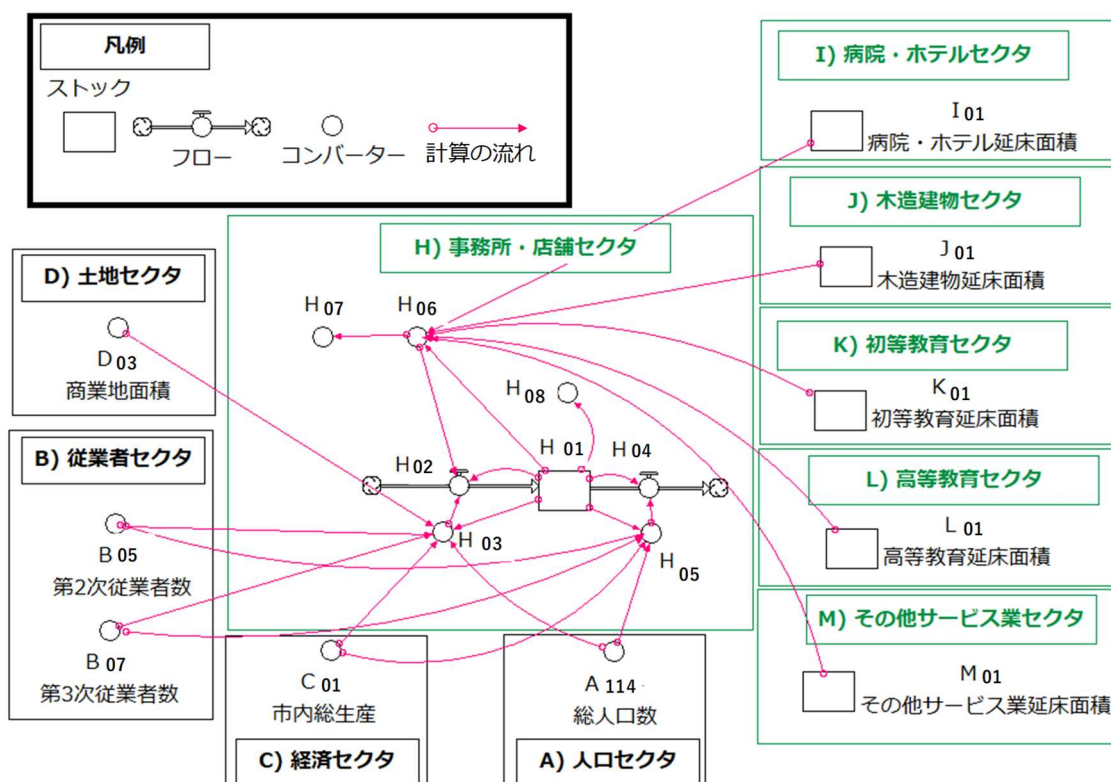


図 2.18 事務所・店舗セクタの計算フロー

H-2) 事務所・店舗セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 事務所・店舗の着工比率

事務所・店舗の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.36 に示す。事務所・店舗の着工比率を変化させる説明変数は 7 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

需要を表す総人口数が増加すると事務所・店舗の開発が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると、事務所・店舗の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、事務所・店舗の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になる

と考えられる。そこで、第3次産業の従業者数が増加すると、事務所・店舗の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて開業が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産額が増加すると事務所・店舗の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・商業地面積

建物は建設の可能な土地があれば、土地価格が安いと、建物を着工しやすくなると考えられる。そこで、商業地面積が増加すると事務所・店舗の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・事務所・店舗の延床面積、民生業務部門の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、事務所・店舗の延床面積と民生業務部門の延床面積が増加すると、事務所・店舗の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2.36 事務所・店舗の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------|-------------------------|------------------|-------------------|------|
| H. 事務所・店舗 セクタ | H03. 事務所・店舗の 着工比率 | A114. 総人口数 | [人] | [+] |
| | | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D03. 商業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | H01. 事務所・店舗の延床面積 | [m ²] | [-] |
| | | H06. 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [-] |

- 事務所・店舗の解体比率

事務所・店舗の解体比率の説明変数と因果関係を表 2.37 に示す。事務所・店舗の解体比率を変化させる説明変数は5つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・総人口数

総人口数が増加すると需要が多くなるため、解体が抑制されることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると事務所・店舗の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、事務所・店舗の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になるため、解体が抑制されると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、事務所・店舗の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて建替が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産が増加すると、事務所・店舗の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・事務所・店舗の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、事務所・店舗の延床面積が増加すると事務所・店舗の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 37 事務所・店舗の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|------|
| H. 事務所・店舗 セクタ | H05. 事務所・店舗の 解体比率 | A114. 総人口数 | [人] | [-] |
| | | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | H01. 事務所・店舗の延床面積 | [m ²] | [-] |

I) 病院・ホテルセクタ

I-1) 病院・ホテルセクタの概要

病院・ホテルセクタの変数構成と計算式を表 2. 28 に示す。病院・ホテルセクタの計算フローを図 2. 19 に示す。

表 2. 38 病院・ホテルセクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|---------------------|--------------------------------|---|
| I. 病院・ホテル セクタ | *I ₀₁ . 病院・ホテルの延床面積 | $I_{01}(t-1)+I_{02}(t)-I_{04}(t)$ |
| | I ₀₂ . 病院・ホテルの着工面積 | $I_{01}(t) \times (I_{02}(b)/I_{01}(b)) \times I_{03}(t)$ |
| | I ₀₃ . 病院・ホテルの着工比率 | $f_1(A_{114}(t),+) \times f_2(B_{05}(t),+) \times f_3(B_{07}(t),+) \times f_4(C_{01}(t),+) \times f_5(D_{03}(t),+) \times f_6(H_{06}(t),-) \times f_7(I_{01}(t),-)$ |
| | I ₀₄ . 病院・ホテルの解体面積 | $I_{01}(t) \times (I_{04}(b)/I_{01}(b)) \times I_{05}(t)$ |
| | I ₀₅ . 病院・ホテルの解体比率 | $f_1(A_{114}(t),-) \times f_2(B_{05}(t),+) \times f_3(B_{07}(t),-) \times f_4(C_{01}(t),+) \times f_5(I_{01}(t),-)$ |
| | I ₀₆ . 病院・ホテルの修繕面積 | $0.06 \times I_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*はCO₂排出量計算に利用される活動量

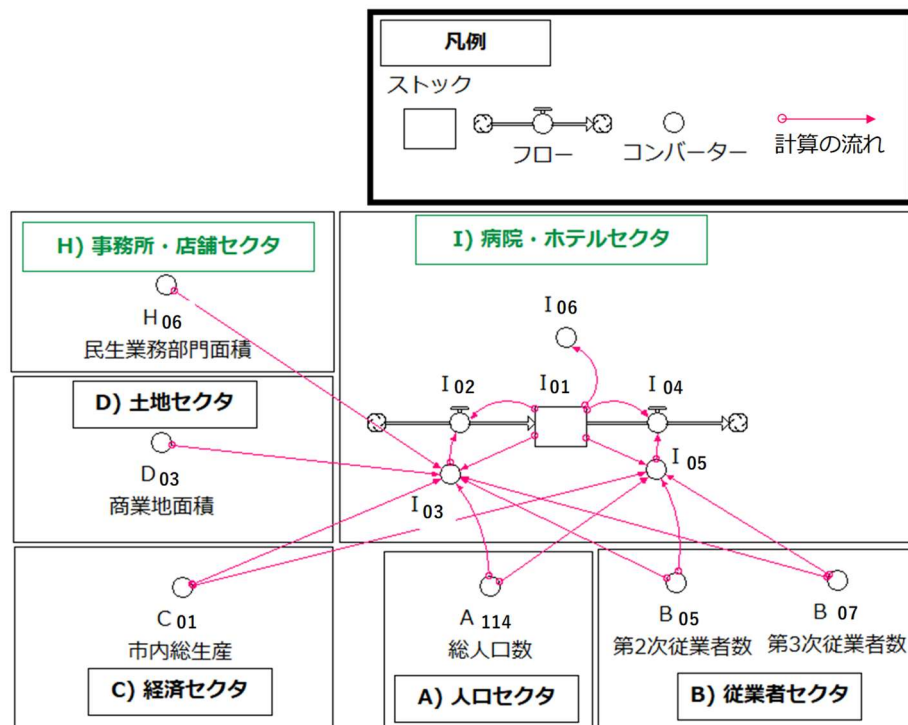


図 2. 19 病院・ホテルセクタの計算フロー

I-2) 病院・ホテルセクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 病院・ホテルの着工比率

病院・ホテルの着工比率の説明変数と因果関係を表 2. 39 に示す。病院・ホテルの着工比率を変化させる説明変数は 7 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・ 総人口数

需要を表す総人口数が増加すると病院・ホテルの開発が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると、病院・ホテルの着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、病院・ホテルの着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、病院・ホテルの着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて開業が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産額が増加すると病院・ホテルの着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 商業地面積

建物は建設の可能な土地があれば、土地価格が安いと、建物を着工しやすくなると考えられる。そこで、商業地面積が増加すると病院・ホテルの着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 民生業務部門の延床面積、病院・ホテルの延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、民生業務部門の延床面積と病院・ホテルの延床面積が増加すると、病院・ホテルの着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 39 病院・ホテルの着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------|------|
| I. 病院・ホテル セクタ | I ₀₃ . 病院・ホテルの 着工比率 | A ₁₁₄ . 総人口数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₅ . 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₇ . 第3次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₁ . 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D ₀₃ . 商業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | H ₀₆ . 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [-] |
| | | I ₀₁ . 病院・ホテルの延床面積 | [m ²] | [-] |

● 病院・ホテルの解体比率

病院・ホテルの解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 40 に示す。病院・ホテルの解体比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

総人口数が増加すると需要が多くなるため、解体が抑制されることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると病院・ホテルの解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 第2次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第2次産業の従業者数が増加すると、病院・ホテルの解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第3次産業の従業者数

第3次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になるため、解体が抑制されると考えられる。そこで、第3次従業者数が増加すると、病院・ホテルの解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて建替が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産が増加すると、病院・ホテルの解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 病院・ホテルの延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、病院・ホテルの延床面積が増加すると病院・ホテルの解体比率が減少すると仮定して減少関数に設

定した。

表 2. 40 病院・ホテルの解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| I. 病院・ホテル セクタ | I ₀₅ . 病院・ホテルの 解体比率 | A ₁₁₄ . 総人口数 | [人] | [-] |
| | | B ₀₅ . 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₇ . 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C ₀₁ . 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | I ₀₁ . 病院・ホテルの延床面積 | [m ²] | [-] |

J) 木造建物セクタ

J-1) 木造建物セクタの概要

木造建物セクタの変数構成と計算式を表 2. 41 に示す。木造建物セクタの計算フローを図 2. 20 に示す。

表 2. 41 木造建物セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-------------------|------------------------------|--|
| J. 木造建物 セクタ | *J ₀₁ . 木造建物の延床面積 | $J_{01}(t-1) + J_{02}(t) - J_{04}(t)$ |
| | J ₀₂ . 木造建物の着工面積 | $J_{01}(t) \times (J_{02}(b)/J_{01}(b)) \times J_{03}(t)$ |
| | J ₀₃ . 木造建物の着工比率 | $f_1(A_{114}(t,+) \times f_2(B_{05}(t,+) \times f_3(C_{01}(t,+) \times f_4(D_{03}(t,+) \times f_5(D_{06}(t,+) \times f_6(H_{06}(t,-) \times f_7(J_{01}(t,-)$ |
| | J ₀₄ . 木造建物の解体面積 | $J_{01}(t) \times (J_{04}(b)/J_{01}(b)) \times J_{05}(t)$ |
| | J ₀₅ . 木造建物の解体比率 | $f_1(A_{114}(t,-) \times f_2(B_{05}(t,+) \times f_3(C_{01}(t,+) \times f_4(J_{01}(t,-)$ |
| | J ₀₆ . 木造建物の修繕面積 | $0.06 \times J_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

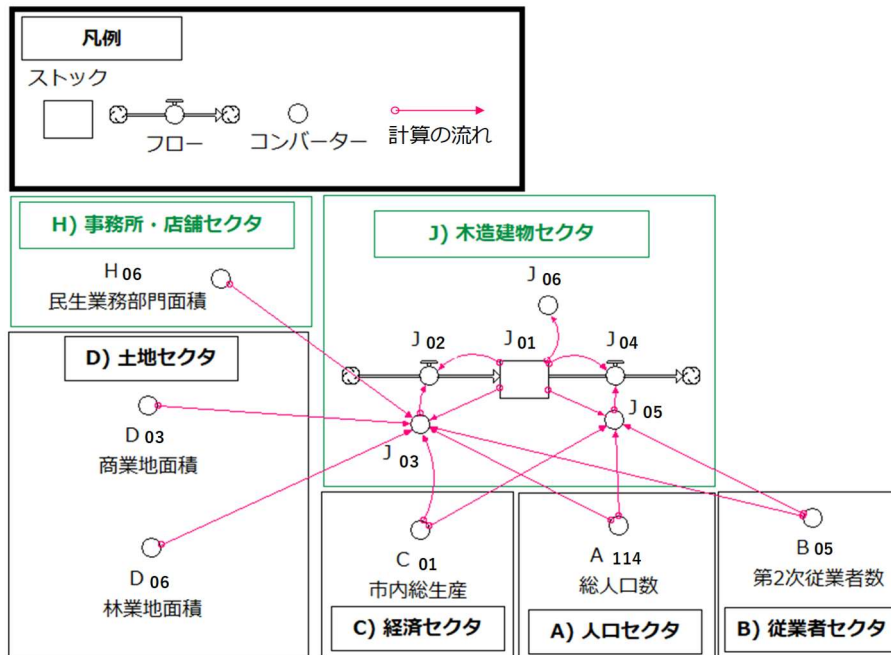


図 2.20 木造建物セクタの計算フロー

J-2) 木造建物セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 木造建物の着工比率

木造建物の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.42 に示す。木造建物の着工比率を変化させる説明変数は 7 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

需要を表す総人口数が増加すると民生業務部門の開発が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると、木造建物の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、木造建物の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて開業が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産額が増加すると木造建物の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 商業地面積

建物は建設の可能な土地があれば、土地価格が安くなるため、建物を着工しやすくなる

と考えられる。そこで、商業地面積が増加すると木造建物の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・林業地面積

木材産業が発展すると、木材を用いた建設産業が活発になると考えられる。そこで、林業地面積が増加すると木造建物の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・民生業務部門の延床面積、木造建物の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、民生業務部門の延床面積と木造建物の延床面積が増加すると、木造建物の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 42 木造建物の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| J. 木造建物 セクタ | J ₀₃ . 木造建物の 着工比率 | A ₁₁₄ . 総人口数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₅ . 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₁ . 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D ₀₃ . 商業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | D ₀₆ . 林業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | H ₀₆ . 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [-] |
| | | J ₀₁ . 木造建物の延床面積 | [m ²] | [-] |

- 木造建物の解体比率

木造建物の解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 43 に示す。木造建物の解体比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・総人口数

総人口数が増加すると需要が多くなるため、解体が抑制されることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると木造建物の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、木造建物の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて建替が増えることが知ら

れている²⁰⁾。そこで、市内総生産が増加すると、木造建物の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・木造建物の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、木造建物の延床面積が増加すると木造建物の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 43 木造建物の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------|------|
| J. 木造建物 セクタ | J05. 木造建物の 解体比率 | A114. 総人口数 | [人] | [-] |
| | | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | J01. 木造建物の延床面積 | [m ²] | [-] |

K) 初等教育セクタ

K-1) 初等教育セクタの概要

初等教育セクタでは、幼稚園から高等学校までの施設が含まれている。初等教育セクタの変数構成と計算式を表 2. 44 に示す。初等教育セクタの計算フローを図 2. 21 に示す。

表 2. 44 初等教育セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-------------------|-----------------|--|
| K. 初等教育 セクタ | *K01. 初等教育の延床面積 | $K_{01}(t-1) + K_{02}(t) - K_{04}(t)$ |
| | K02. 初等教育の着工面積 | $K_{01}(t) \times (K_{02}(b) / K_{01}(b)) \times K_{03}(t)$ |
| | K03. 初等教育の着工比率 | $f_1(A_{119}(t,+) \times f_2(B_{05}(t,+) \times f_3(C_{02}(t,+) \times f_4(K_{01}(t,-)$ |
| | K04. 初等教育の解体面積 | $K_{01}(t) \times (K_{04}(b) / K_{01}(b)) \times K_{05}(t)$ |
| | K05. 初等教育の解体比率 | $f_1(A_{119}(t,-) \times f_2(B_{05}(t,+) \times f_3(C_{02}(t,-) \times f_4(D_{02}(t,-) \times f_5(K_{01}(t,-)$ |
| | K06. 初等教育の修繕面積 | $0.06 \times K_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

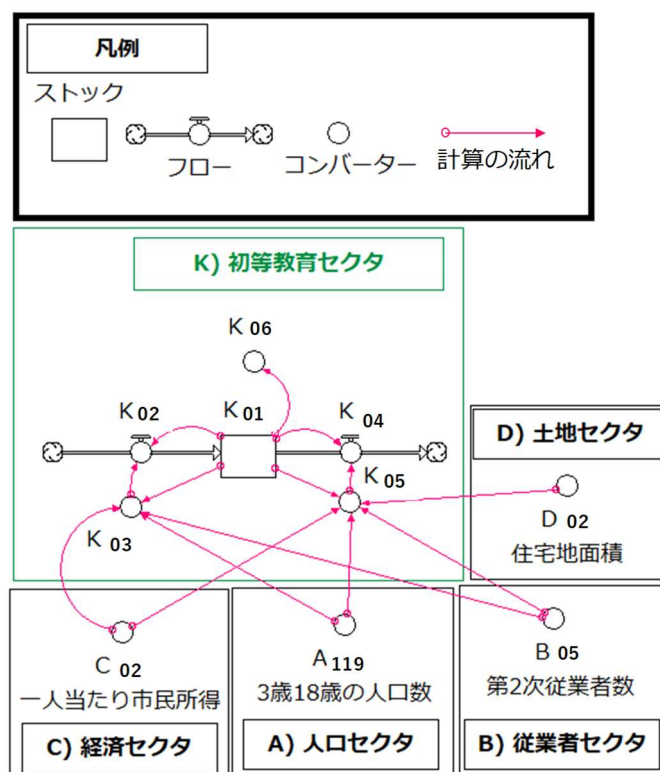


図 2.21 初等教育セクタの計算フロー

K-2) 初等教育セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 初等教育の着工比率

初等教育の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.45 に示す。初等教育の着工比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 3 歳~18 歳の人口数

初等教育施設の対象年齢の人口数が増加すると需要に応じて着工が増加することが知られている²¹⁾。そこで、3 歳~18 歳の人口数が増加すると、初等教育の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、初等教育の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

所得水準が向上すると、私立学校への進学要求が増え、需要に応じた学校施設の着工が増えると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると初等教育の着工比率が増

加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・初等教育の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、初等教育の延床面積が増加すると、初等教育の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 45 初等教育の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------|------|
| K. 初等教育 セクタ | K ₀₃ . 初等教育の 着工比率 | A ₁₁₉ . 3 歳~18 歳の人口数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₅ . 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | | K ₀₁ . 初等教育の延床面積 | [m ²] | [-] |

- 初等教育の解体比率

初等教育の解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 46 に示す。初等教育の解体比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・ 3 歳~18 歳の人口数

初等教育施設の対象年齢の人口数が増加すると需要が増加するため、解体が減ることが知られている²¹⁾。そこで、3 歳~18 歳の人口数が増加すると、初等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、初等教育の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 一人当たり市民所得

所得水準が向上すると、私立学校への進学要求が増え、需要が多くなるため、解体が減ると考えられる。そこで、一人当たり市民所得が増加すると初等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・ 住宅地面積

近隣に住宅地が多ければ、子供を持つ世帯の定着が増え、学校施設の利用が継続するため、廃校が減少すると考えられる。そこで、住宅地面積が増加すると、初等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・ 初等教育の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、初等教育の延床面積が増加すると、初等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 46 初等教育の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|------|
| K. 初等教育 セクタ | K05. 初等教育の 解体比率 | A119. 3 歳~18 歳の人口数 | [人] | [-] |
| | | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |
| | | D02. 住宅地面積 | [m ²] | [-] |
| | | K01. 初等教育の延床面積 | [m ²] | [-] |

L) 高等教育セクタ

L-1) 高等教育セクタの概要

高等教育セクタには大学とその他の高等教育機関が含まれる。高等教育セクタの変数構成と計算式を表 2. 47 に示す。高等教育セクタの計算フローを図 2. 22 に示す。

表 2. 47 高等教育セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-------------------|-----------------|--|
| L. 高等教育 セクタ | *L01. 高等教育の延床面積 | $L_{01}(t-1)+L_{02}(t)-L_{04}(t)$ |
| | L02. 高等教育の着工面積 | $L_{01}(t) \times (L_{02}(b)/L_{01}(b)) \times L_{03}(t)$ |
| | L03. 高等教育の着工比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(B_{07}(t,+)) \times f_3(C_{01}(t,+)) \times f_4(L_{01}(t,-))$ |
| | L04. 高等教育の解体面積 | $L_{01}(t) \times (L_{04}(b)/L_{01}(b)) \times L_{05}(t)$ |
| | L05. 高等教育の解体比率 | $f_1(B_{05}(t,+)) \times f_2(B_{07}(t,-)) \times f_3(C_{01}(t,+)) \times f_4(L_{01}(t,-))$ |
| | L06. 高等教育の修繕面積 | $0.06 \times L_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

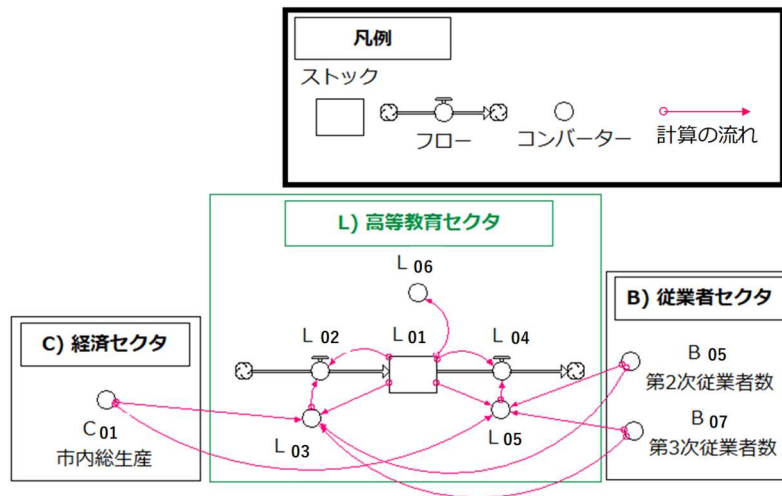


図 2.22 高等教育セクタの計算フロー

L-2) 高等教育セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 高等教育の着工比率

高等教育の着工比率の説明変数と因果関係を表 2.48 に示す。高等教育の着工比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、高等教育の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業に従事するためには、高等教育機関への進学が要求されるため、第 3 次従業者数が増えるほど高等教育機関の需要が増えると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると高等教育の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良ければ、学生の大学への進学が可能になるため、需要に応じた施設の確保が必要になると考えられる。そこで、市内総生産が増加すると、高等教育の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 高等教育の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、高等教育の延床面積が増加すると、高等教育の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 48 高等教育の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------|
| L. 高等教育 セクタ | L03. 高等教育の 着工比率 | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | L01. 高等教育の延床面積 | [m ²] | [-] |

● 高等教育の解体比率

高等教育の解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 49 に示す。高等教育の解体比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、高等教育の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業に従事するためには、高等教育機関への進学が要求されるため、第 3 次従業者数が増えるほど高等教育機関の需要が増えて解体が抑制されと考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると高等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・市内総生産

景気が良ければ、大学が良いサービスを提供するための建替えが増加すると考えられる。そこで、市内総生産が増加すると、高等教育の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・高等教育の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、高等教育の延床面積が増加すると、高等教育の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 49 高等教育の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------|
| L. 高等教育 セクタ | L05. 高等教育の 解体比率 | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | L01. 高等教育の延床面積 | [m ²] | [-] |

M) その他サービス業セクタ

M-1) その他サービス業セクタの概要

その他サービス業セクタには、他のセクタの分類に該当しない種類の建物が全て含まれる。その他サービス業セクタの変数構成と計算式を表 2. 50 に示す。その他サービス業セクタの計算フローを図 2. 23 に示す。

表 2. 50 その他サービス業セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|---------------------------|----------------------------------|--|
| M. その他 サービス業 セクタ | *M ₀₁ . その他サービス業の延床面積 | $M_{01}(t-1) + M_{02}(t) - M_{04}(t)$ |
| | M ₀₂ . その他サービス業の着工面積 | $M_{01}(t) \times (M_{02}(b) / M_{01}(b)) \times M_{03}(t)$ |
| | M ₀₃ . その他サービス業の着工比率 | $f_1(A_{114}(t), +) \times f_2(B_{05}(t), +) \times f_3(B_{07}(t), +) \times f_4(C_{01}(t), +) \times f_5(D_{03}(t), +) \times f_6(H_{06}(t), -) \times f_7(M_{01}(t), -)$ |
| | M ₀₄ . その他サービス業の解体面積 | $M_{01}(t) \times (M_{04}(b) / M_{01}(b)) \times M_{05}(t)$ |
| | M ₀₅ . その他サービス業の解体比率 | $f_1(A_{114}(t), -) \times f_2(B_{05}(t), +) \times f_3(B_{07}(t), -) \times f_4(C_{01}(t), +) \times f_5(M_{01}(t), -)$ |
| | M ₀₆ . その他サービス業の修繕面積 | $0.06 \times M_{01}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

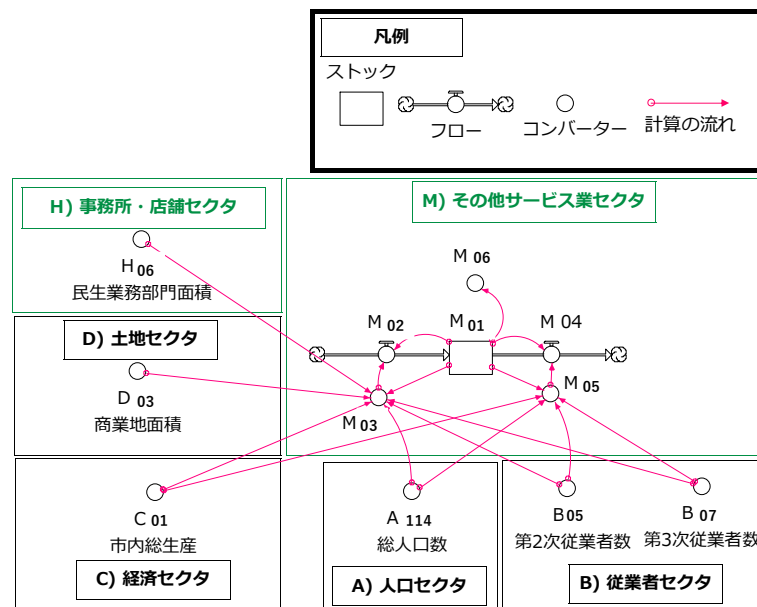


図 2. 23 その他サービス業セクタの計算フロー

M-2) その他サービス業セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● その他サービス業の着工比率

その他サービス業の着工比率の説明変数と因果関係を表 2. 51 に示す。その他サービス業の着工比率を変化させる説明変数は 7 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

需要を表す総人口数が増加するとその他サービス業の開発が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加すると、その他サービス業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、その他サービス業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、その他サービス業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて開業が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産額が増加するとその他サービス業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 商業地面積

建物は建設の可能な土地があれば、土地価格が安くなるため、建物を着工しやすくなると考えられる。そこで、商業地面積が増加するとその他サービス業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 民生業務部門の延床面積、その他サービス業の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、民生業務部門の延床面積とその他サービス業の延床面積が増加すると、その他サービス業の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 51 その他サービス業の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------|
| M. その他 サービス業 セクタ | M03. その他 サービス業の 着工比率 | A114. 総人口数 | [人] | [+] |
| | | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D03. 商業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | H06. 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [-] |
| | | M01. その他サービス業の延床面積 | [m ²] | [-] |

● その他サービス業の解体比率

その他サービス業の解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 52 に示す。その他サービス業の解体比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

総人口数が増加すると需要が多くなるため、解体が抑制されることが知られている²⁰⁾。そこで、総人口数が増加するとその他サービス業の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 第2次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第2次産業の従業者数が増加すると、その他サービス業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第3次産業の従業者数

第3次産業であるサービス業で働く人が増えると、利用できる面積の増加が必要になるため、解体が抑制されると考えられる。そこで、第3次産業の従業者数が増加すると、その他サービス業の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 市内総生産

景気が良ければ、投資と消費が活発になるため、需要に応じて建替が増えることが知られている²⁰⁾。そこで、市内総生産が増加すると、その他サービス業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ その他サービス業の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、その他サービス業の延床面積が増加すると、その他サービス業の解体比率が減少すると仮定して減

少関数に設定した。

表 2. 52 その他サービス業の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|------|
| M. その他 サービス業 セクタ | M05. その他 サービス業の 解体比率 | A114. 総人口数 | [人] | [-] |
| | | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | M01. その他サービス業の延床面積 | [m ²] | [-] |

2.3.4 産業部門

産業は大きく、第 1 次産業の農業、林業、漁業と第 2 次産業の建設業、製造業、鉱業と第 3 次産業のサービス業に分類できる。その中で、第 2 次産業の鉱業は、日本ではほぼ行われていないため、省略した。また、第 3 次産業は、民生業務部門で計算が行われている。従って、本モデルの産業部門は、N)農林水産業セクタ、O)建設業セクタ、P)製造業セクタによって構成される。

N) 農林水産業セクタ

N-1) 農林水産業セクタの概要

セクタを構成する変数は、エネルギー消費原単位と統計分類によって農業生産額、林業生産額、漁業生産額に区別した。そこで、 t 年の各生産額は、各生産額の基準年値に各生産額の変化比率を乗じて算出した。 t 年の生産額の変化比率は、他のセクタの活動量によって計算される。農林水産業セクタの変数構成と計算式を表 2. 53 に示す。農林水産業セクタの計算フローを図 2. 24 に示す。

表 2. 53 農林水産業セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|--------------------|-------------------|---|
| N. 農林水産業 セクタ | *N01. 農業生産額 | $N_{01}(b) \times f_1(B_{03}(t),+) \times f_2(C_{03}(t),-) \times f_3(D_{05}(t),+)$ |
| | *N02. 林業生産額 | $N_{02}(b) \times f_1(B_{03}(t),+) \times f_2(C_{03}(t),-) \times f_3(D_{06}(t),+)$ |
| | *N03. 漁業生産額 | $N_{03}(b) \times f_1(B_{03}(t),+) \times f_2(C_{03}(t),-) \times f_3(F_{91}(t),-)$ |
| | N04. 農林水産業生産額 | $N_{01}(t) + N_{02}(t) + N_{03}(t)$ |
| | N05. 前年度の農林水産業生産額 | $N_{04}(t-1)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

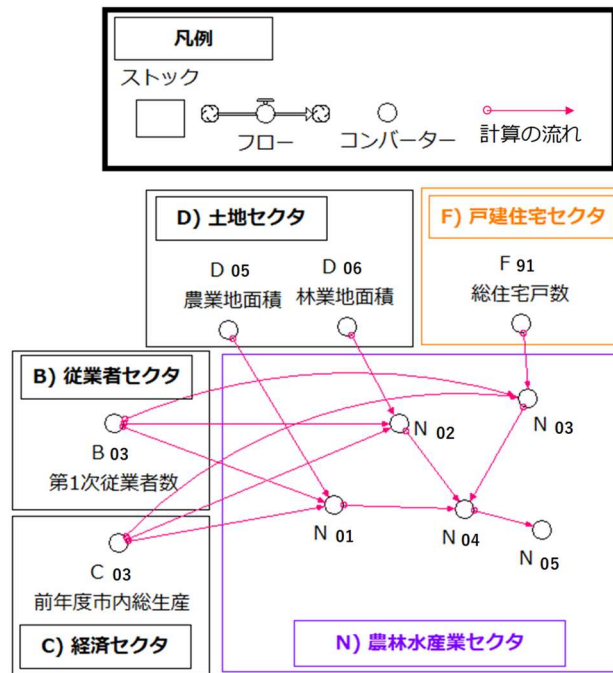


図 2.24 農林水産業セクタの計算フロー

N-2) 農林水産業セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 農業生産額

農業生産額の説明変数と因果関係を表 2.54 に示す。農業生産額を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・第 1 次産業の従業者数

従業者数が減ると農業地が 100%は機能せず、生産額が減少することが知られている²²⁾。そこで、第 1 次産業の従業者数が増加すると、農業生産額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・前年度の市内総生産

前年度の市内総生産が増加すると、生産物の価格が低くなり、収入が低下して他の産業への移動を促進することが知られている²²⁾。そこで、前年度の市内総生産が増加すると、農業生産額が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・農業地面積

農業の生産額は、価格要因と生産要因によって決定されることが知られており²²⁾、農業地面積は生産量を左右する要因である。そこで、農業地面積が増加すると、農業生産額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 54 農業生産額の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| N. 農林水産業 セクタ | N ₀₁ . 農業生産額 | B ₀₃ . 第 1 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₃ . 前年度の市内総生産 | [百万円] | [-] |
| | | D ₀₅ . 農業地面積 | [m ²] | [+] |

● 林業生産額

林業生産額の説明変数と因果関係を表 2. 55 に示す。林業生産額を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 第 1 次産業の従業者数

従業者数が減ると林業地が 100%は機能せず、生産額が減少することが知られている²²⁾。そこで、第 1 次産業の従業者数が増加すると、林業生産額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 前年度の市内総生産

前年度の市内総生産が増加すると、生産物の価格が低くなり、収入が低下して他の産業への移動を促進することが知られている²²⁾。そこで、前年度の市内総生産が増加すると、林業生産額が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 林業地面積

林業の生産額は、価格要因と生産要因によって決定されることが知られており²²⁾、林業地面積は生産量を左右する要因である。そこで、林業地面積が増加すると、林業生産額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 55 林業生産額の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|--------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| N. 農林水産業 セクタ | N ₀₂ . 林業生産額 | B ₀₃ . 第 1 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₃ . 前年度の市内総生産 | [百万円] | [-] |
| | | D ₀₆ . 林業地面積 | [m ²] | [+] |

● 漁業生産額

漁業生産額の説明変数と因果関係を表 2. 56 に示す。漁業生産額を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 第 1 次産業の従業者数

従業者数が減ると漁業活動が 100%は機能せず、生産額が減少することが知られている²²⁾。

そこで、第1次産業の従業者数が増加すると、漁業生産額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・前年度の市内総生産

前年度の市内総生産が増加すると、生産物の価格が低くなり、収入が低下して他の産業への移動を促進することが知られている²²⁾。そこで、前年度の市内総生産が増加すると、漁業生産額が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・総住宅戸数

民生部門の発展に従い周辺環境への汚染の影響、特に生活排水の最終地である沿海付近での漁が制限されると考えられる。そこで、総住宅戸数が増加すると、漁業生産額が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 56 漁業生産額の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|--------------------|---------------|-----------------|-------|------|
| N. 農林水産業 セクタ | N03. 漁業生産額 | B03. 第1次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C03. 前年度の市内総生産 | [百万円] | [-] |
| | | F91. 総住宅戸数 | [戸] | [-] |

O) 建設業セクタ

O-1) 建設業セクタの概要

建設業は建物の着工、解体、修繕という活動と関連する。これらの活動には、建物の建設が行われる民生家庭部門、民生業務部門、産業部門の製造業セクタが関係する。建設業セクタの変数構成と計算式を表 2. 57 に示す。建設業セクタの計算フローを図 2. 25 に示す。

表 2. 57 建設業セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|------------------|----------------------------------|-------------|
| O. 建設業 セクタ | *O ₀₁ . 事務所・店舗の着工面積 | $H_{02}(t)$ |
| | *O ₀₂ . 病院・ホテルの着工面積 | $I_{02}(t)$ |
| | *O ₀₃ . 木造建物の着工面積 | $J_{02}(t)$ |
| | *O ₀₄ . 初等教育の着工面積 | $K_{02}(t)$ |
| | *O ₀₅ . 高等教育の着工面積 | $L_{02}(t)$ |
| | *O ₀₆ . その他サービス業の着工面積 | $M_{02}(t)$ |
| | *O ₀₇ . 製造業の着工面積 | $P_{04}(t)$ |
| | *O ₀₈ . 戸建住宅の着工戸数 | $F_{43}(t)$ |
| | *O ₀₉ . 集合住宅の着工戸数 | $G_{43}(t)$ |
| | *O ₁₀ . 事務所・店舗の解体面積 | $H_{04}(t)$ |
| | *O ₁₁ . 病院・ホテルの解体面積 | $I_{04}(t)$ |
| | *O ₁₂ . 木造建物の解体面積 | $J_{04}(t)$ |
| | *O ₁₃ . 初等教育の解体面積 | $K_{04}(t)$ |
| | *O ₁₄ . 高等教育の解体面積 | $L_{04}(t)$ |
| | *O ₁₅ . その他サービス業の解体面積 | $M_{04}(t)$ |
| | *O ₁₆ . 製造業の解体面積 | $P_{06}(t)$ |
| | *O ₁₇ . 戸建住宅の解体戸数 | $F_{89}(t)$ |
| | *O ₁₈ . 集合住宅の解体戸数 | $G_{89}(t)$ |
| | *O ₁₉ . 事務所・店舗の修繕面積 | $H_{08}(t)$ |
| | *O ₂₀ . 病院・ホテルの修繕面積 | $I_{06}(t)$ |
| | *O ₂₁ . 木造建物の修繕面積 | $J_{06}(t)$ |
| | *O ₂₂ . 初等教育の修繕面積 | $K_{06}(t)$ |
| | *O ₂₃ . 高等教育の修繕面積 | $L_{06}(t)$ |
| | *O ₂₄ . その他サービス業の修繕面積 | $M_{06}(t)$ |
| | *O ₂₅ . 製造業の修繕面積 | $P_{08}(t)$ |
| | *O ₂₆ . 戸建住宅の修繕戸数 | $F_{92}(t)$ |
| | *O ₂₇ . 集合住宅の修繕戸数 | $G_{91}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、*は CO₂ 排出量計算に利用される活動量

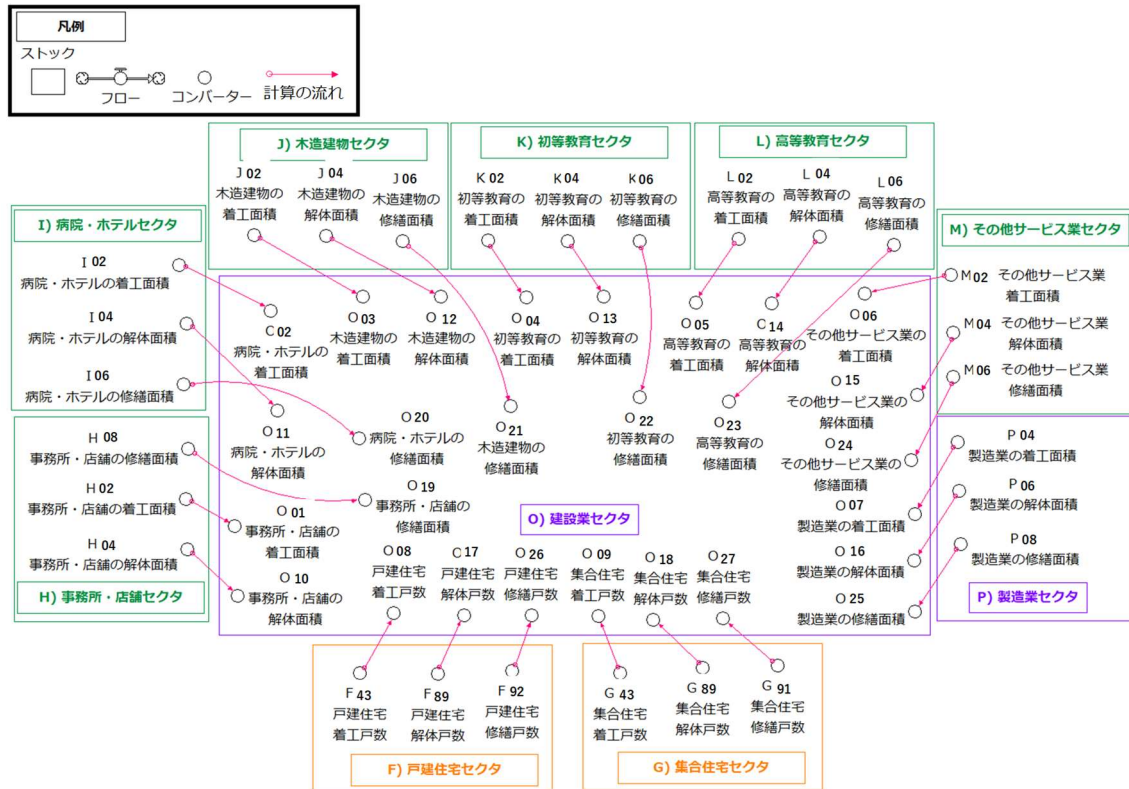


図 2.25 建設業セクタの計算フロー

P) 製造業セクタ

P-1) 製造業セクタの概要

製造業セクタは、製造業出荷額と延床面積、着工面積、解体面積が計算される構造として構築した。 t 年の延床面積は、 $(t-1)$ 年の延床面積に $(t-1)$ 年の着工面積を加え、 $(t-1)$ 年の解体面積を減じて計算する。 t 年の着工面積と解体面積は、 t 年の延床面積に t 年の着工比率と解体比率を乗じて計算する。 t 年の着工比率と解体比率の変化は、他のセクタの活動量により計算される。 t 年の製造業出荷額は、製造業出荷額基準年値に製造業出荷額の変化比率を乗じて算出する。製造業出荷額の変化比率は、他のセクタの活動量により計算される。製造業セクタの変数構成と計算式を表 2.58 に示す。製造業セクタの計算フローを図 2.26 に示す。

表 2. 58 製造業セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|------------------|-----------------|---|
| P. 製造業 セクタ | *P01. 製造業出荷額 | $P_{01}(b) \times f_1(B_{05}(t),+) \times f_2(C_{03}(t),-) \times f_3(D_{07}(t),+) \times f_4(P_{03}(t),+)$ |
| | P02. 前年度の製造業出荷額 | $P_{01}(t-1)$ |
| | P03. 製造業の延床面積 | $P_{03}(t-1) + P_{04}(t) - P_{06}(t)$ |
| | P04. 製造業の着工面積 | $P_{03}(t) \times (P_{04}(b)/P_{03}(b)) \times P_{05}(t)$ |
| | P05. 製造業の着工比率 | $f_1(A_{114}(t),+) \times f_2(B_{05}(t),+) \times f_3(C_{01}(t),+) \times f_4(D_{07}(t),+) \times f_5(P_{01}(t),+) \times f_6(P_{03}(t),-)$ |
| | P06. 製造業の解体面積 | $P_{03}(t) \times (P_{06}(b)/P_{03}(b)) \times P_{07}(t)$ |
| | P07. 製造業の解体比率 | $f_1(A_{114}(t),-) \times f_2(B_{05}(t),+) \times f_3(C_{01}(t),+) \times f_4(D_{04}(t),+) \times f_5(P_{01}(t),+) \times f_6(P_{03}(t),-)$ |
| | P08. 製造業の修繕面積 | $0.06 \times P_{03}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、*は CO₂排出量計算に利用される活動量

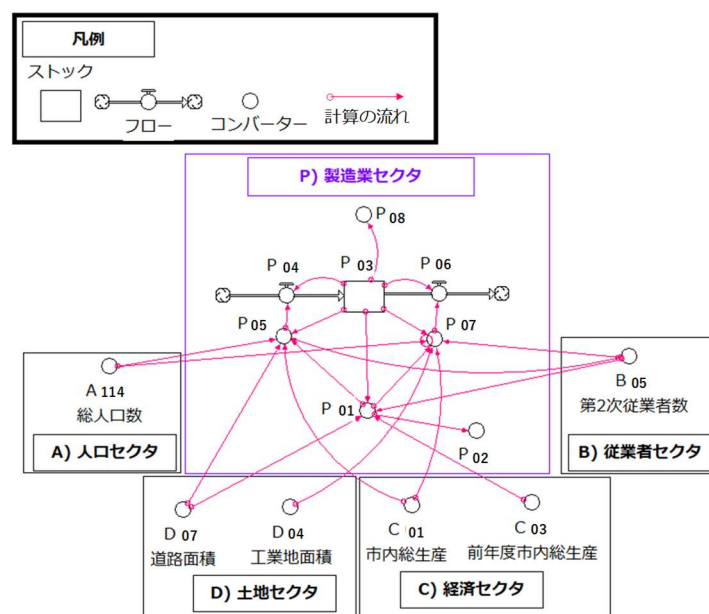


図 2. 26 製造業セクタの計算フロー

P-2) 製造業セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 製造業出荷額

製造業出荷額の説明変数と因果関係を表 2. 59 に示す。製造業出荷額を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 第 2 次産業の従業者数

従業者数が減ると工場が 100%は機能せず、生産額が減少すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、製造業出荷額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 前年度の市内総生産

前年度の市内総生産が増加すると、生産物の価格が低くなり、収入が低下して他の産業への移動を促進することが分かっている。そこで、前年度の市内総生産が増加すると、製造業出荷額が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・道路面積

道路面積が整備されると、荷物の運搬が便利になるため、製造品の生産量が増加すると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、製造業出荷額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・製造業の延床面積

工場が大きくなると機械の導入や製造品の保管が容易になり、需要に応じた生産が容易になると考えられる。そこで、製造業の延床面積が増加すると、製造業出荷額が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 59 製造業出荷額の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|------------------|--------------------|-----------------|-------------------|------|
| P. 製造業 セクタ | P01. 製造業 出荷額 | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C03. 前年度の市内総生産 | [百万円] | [-] |
| | | D07. 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

- 製造業の着工比率

製造業の着工比率の説明変数と因果関係を表 2. 60 に示す。製造業の着工比率を変化させる説明変数は6つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・総人口数

商品を消費する需要である人口が増えたと、それに応じて供給先も増加すると考えられる。そこで、総人口数が増加すると、製造業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・第2次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると開発に対する需要が増加し着工が増加すると考えられる。そこで、第2次産業の従業者数が増加すると、製造業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・市内総生産額

景気が良ければ、消費活動が活発になり、製造品への需要が多くなる考えられる。そこ

で、市内総生産が増加すると、製造業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・道路面積

製造業は原料の導入と製造品の出荷が頻繁に行われる業種であるため、道路整備は工場の立地設定において重要な要因だと考えられる。そこで、道路面積が増加すると、製造業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・製造業出荷額

製造品の生産需要の増加が続くと、需要に対応するために新しい生産機器の設置や製造品の保管場所が必要になる考えられる。そこで、製造業出荷額が増加すると、製造業の着工比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・製造業の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、製造業の着工比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 60 製造業の着工比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------|
| P. 製造業 セクタ | P05. 製造業の 着工比率 | A114. 総人口数 | [人] | [+] |
| | | B05. 第 2 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D07. 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | P01. 製造品出荷額 | [百万円] | [+] |
| | | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [-] |

- 製造業の解体比率

製造業の解体比率の説明変数と因果関係を表 2. 61 に示す。製造業の解体比率を変化させる説明変数は 6 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・総人口数

商品消費する需要である人口が増えると、それに応じて供給先も増加すると考えられる。そこで、総人口数が増加すると、製造業の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・第 2 次産業の従業者数

建設業に勤める人が増加すると建替または解体事業が増加すると考えられる。そこで、第 2 次産業の従業者数が増加すると、製造業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に

設定した。

- ・市内総生産額

景気が良ければ、施設に求める要求事項が増えるため、需要に応じて建替えが増加すると考えられる。そこで、市内総生産額が増加すると、製造業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・工業地面積

工場地面積が増加すると建替えのために解体が増加すると考えられる。そこで、工業地面積が増加すると、製造業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・製造業出荷額

製造品の生産需要の増加が続くと、需要に対応するために新しい生産機器の設置や製造品の保管場所の増加への建替が必要になると考えられる。そこで、製造業出荷額が増加すると、製造業の解体比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・製造業の延床面積

都市の開発は一定水準に至ると着工と解体が減少すると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、製造業の解体比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 61 製造業の解体比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|------------------|----------------------|-----------------|-------------------|------|
| P. 製造業 セクタ | P07. 製造業の 解体比率 | A114. 総人口数 | [人] | [-] |
| | | B05. 第2次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D04. 工業地面積 | [m ²] | [+] |
| | | P01. 製造品出荷額 | [百万円] | [+] |
| | | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [-] |

2.3.5 輸送部門

輸送部門は運搬する対象によって Q)旅客セクタと R)貨物セクタに分類した。

Q) 旅客セクタ

Q-1) 旅客セクタの概要

旅客セクタは総旅客輸送量から輸送手段別の輸送量を計算する。輸送手段はエネルギー消費原単位と統計分類によって、乗用車、バス、旅客鉄道、旅客航空に分類した。 t 年の総旅客輸送量は、総旅客輸送量の基準年値に総旅客輸送量の変化比率を乗じて算出した。総

旅客輸送量の変化比率は、他のセクタの活動量によって計算される。 t 年の乗用車、バス、旅客鉄道、旅客航空の輸送量は t 年の総旅客輸送量に各輸送手段の分担比率の基準年値と各輸送手段の t 年の分担比率を乗じて算出した。輸送手段別の t 年の分担比率は他のセクタの活動量によって計算される。旅客セクタの変数構成と計算式を表 2.62 に示す。旅客セクタの計算フローを図 2.27 に示す。

表 2. 62 旅客セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-----------------|-------------------|--|
| Q. 旅客 セクタ | Q01. 一人当たり乗用車保有台数 | なし(実績値入力) |
| | Q02. 総旅客輸送量 | $Q_{02}(b) \times f_1(A_{117}(t), +) \times f_2(A_{120}(t), +) \times f_3(B_{01}(t), +) \times f_4(C_{02}(t), +) \times f_5(D_{07}(t), +)$ |
| | *Q03. 乗用車の輸送量 | $Q_{02}(t) \times (Q_{03}(b) / Q_{02}(b)) \times Q_{04}(t)$ |
| | Q04. 乗用車の分担比率 | $f_1(A_{117}(t), +) \times f_2(C_{02}(t), +) \times f_3(D_{07}(t), +) \times f_4(Q_{01}(t), +)$ |
| | *Q05. バスの輸送量 | $Q_{02}(t) \times (Q_{05}(b) / Q_{02}(b)) \times Q_{06}(t)$ |
| | Q06. バスの分担比率 | $f_1(A_{117}(t), -) \times f_2(A_{120}(t), +) \times f_3(C_{02}(t), -) \times f_4(D_{07}(t), +) \times f_5(Q_{01}(t), -)$ |
| | *Q07. 旅客鉄道の輸送量 | $Q_{02}(t) \times (Q_{07}(b) / Q_{02}(b)) \times Q_{08}(t)$ |
| | Q08. 旅客鉄道の分担比率 | $f_1(A_{120}(t), +) \times f_2(A_{122}(t), +) \times f_3(B_{07}(t), +) \times f_4(C_{02}(t), -) \times f_5(Q_{01}(t), -)$ |
| | *Q09. 旅客航空の輸送量 | $Q_{02}(t) \times (Q_{09}(b) / Q_{02}(b)) \times Q_{10}(t)$ |
| | Q10. 旅客航空の分担比率 | $f_1(A_{121}(t), +) \times f_2(B_{07}(t), +) \times f_3(C_{02}(t), +)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、 $*$ はCO₂排出量計算に利用される活動量

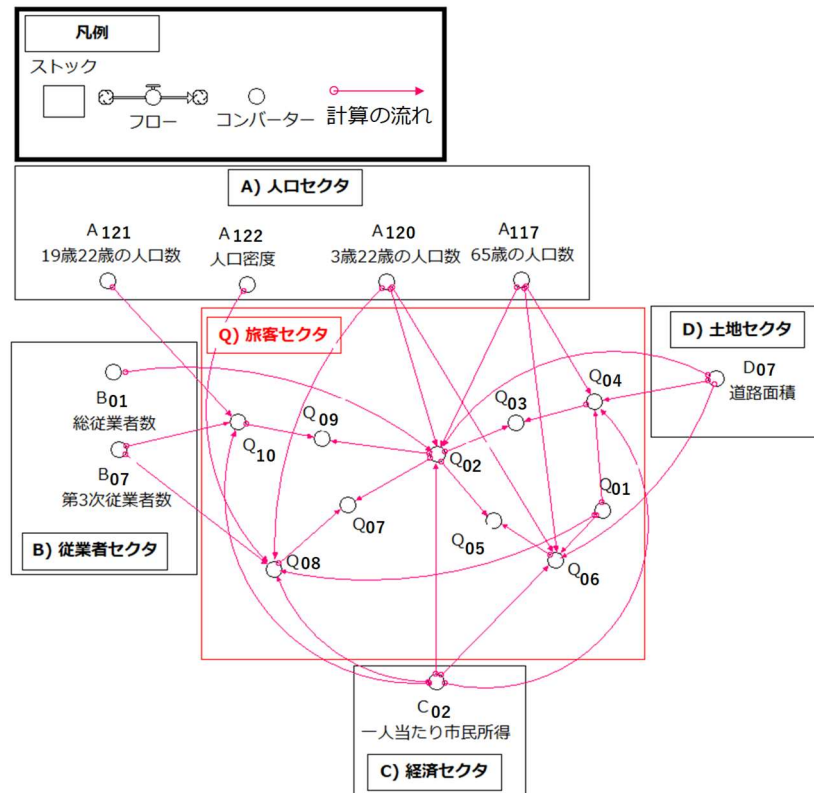


図 2.27 旅客セクタの計算フロー

Q-2) 旅客セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 総旅客輸送量

総旅客輸送量の説明変数と因果関係を表 2.63 に示す。総旅客輸送量を変化させる説明変数は5つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 65 歳以上人口数

高齢者の増加は旅客輸送量の増加に寄与することが知られている²³⁾。そこで、65 歳以上の人口数が増加すると、総旅客輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 3 歳~22 歳人口数

通学する人が増えると、旅客輸送量が増えると考えられる。そこで、3 歳~22 歳の人口数が増加すると、総旅客輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 総従業者数

総従業者数が増えると通勤するための移動が増えると考えられる。そこで、総従業者数が増加すると、総旅客輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

所得水準が向上すると、余暇生活のための移動が増加すると考えられる。そこで、一人

当たり市民所得が増加すると、総旅客輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・道路面積

道路インフラが整備されると輸送しやすくなり、輸送量が増加すると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、総旅客輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 63 総旅客輸送量の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| Q. 旅客 セクタ | Q ₀₂ . 総旅客輸送量 | A ₁₁₇ . 65 歳以上人口数 | [人] | [+] |
| | | A ₁₂₀ . 3 歳~22 歳人口数 | [人] | [+] |
| | | B ₀₁ . 総従業者数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円] | [+] |
| | | D ₀₇ . 道路面積 | [m ²] | [+] |

- 乗用車の分担比率

乗用車の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 64 に示す。乗用車の分担比率を変化させる説明変数は 4 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・ 65 歳以上人口数

高齢者は自動車で移動する比率が増加することが知られている²³⁾。そこで、65 歳以上の人口数が増加すると、乗用車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 一人当たり市民所得

旅客輸送を構成する共通手段は代替関係を持っており、所得水準の向上に伴って、鉄道、自動車、航空機と変化・交替することが知られている²⁴⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、乗用車の分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・道路面積

交通渋滞を防ぐため道路用地を開発すると自動車が動きやすくなると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、乗用車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・ 一人当たり乗用車保有台数

乗用車を保有する人が増えれば、交通手段として乗用車を利用する人の割合が増加すると考えられる。そこで、一人当たり乗用車保有台数が増加すると、乗用車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 64 乗用車の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------|-------------------|-------------------|------|
| Q. 旅客 セクタ | Q04. 乗用車の 分担比率 | A117. 65 歳以上人口数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |
| | | D07. 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | Q01. 一人当たり乗用車保有台数 | [台/人] | [+] |

● バスの分担比率

バスの分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 65 に示す。バスの分担比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 65 歳以上人口数

高齢者は自動車で移動する比率が増加することが知られている²³⁾。そのため、高齢者が多くなると他の輸送手段の利用は減少すると考えられる。そこで、65 歳以上の人口数が増加すると、バスの分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 3 歳~22 歳人口数

学生は通学のため、主に公共交通機関を利用すると考えられる。そこで、3 歳~22 歳の人口数が増加すると、バスの分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

旅客輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、所得水準の向上に伴って、鉄道、自動車、航空機と変化・交替してゆくことが知られている²⁴⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、バスの分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 道路面積

交通渋滞を防ぐため道路用地を開発すると自動車が動きやすくなると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、バスの分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり乗用車保有台数

乗用車を保有する人が増えれば、交通手段として乗用車を利用する人の割合が増加すると考えられる。そこで、一人当たり乗用車保有台数が増加すると、バスの分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 65 バスの分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|------|
| Q. 旅客 セクタ | Q ₀₆ . バスの 分担比率 | A ₁₁₇ . 65 歳以上人口数 | [人] | [－] |
| | | A ₁₂₀ . 3 歳~22 歳人口数 | [人] | [＋] |
| | | C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [－] |
| | | D ₀₇ . 道路面積 | [m ²] | [＋] |
| | | Q ₀₁ . 一人当たり乗用車保有台数 | [台/人] | [－] |

● 旅客鉄道の分担比率

旅客鉄道の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 66 に示す。旅客鉄道の分担比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 3 歳~22 歳人口数

学生は通学のため、主に公共交通機関を利用すると考えられる。そこで、3 歳~22 歳の人口数が増加すると、旅客鉄道の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 人口密度

人口密度が高くなると人の移動も増え、交通渋滞を防ぐために旅客鉄道のインフラ整備が行われると考えられる。そこで、人口密度が増加すると、旅客鉄道の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業は駅を中心に開発されるため、第 3 次産業の従業者数の通勤や移動のための旅客鉄道の利用が多いと考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、旅客鉄道の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

旅客輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、所得水準の向上に伴って、鉄道、自動車、航空機と変化・交替することが知られている²⁴⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、旅客鉄道の分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 一人当たり乗用車保有台数

乗用車を保有する人が増えれば、交通手段として乗用車を利用する人の割合が増えると考えられる。そこで、一人当たり乗用車保有台数が増加すると、旅客鉄道の分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

表 2. 66 旅客鉄道の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-----------------------|-------------------|----------------------|------|
| Q. 旅客 セクタ | Q08. 旅客鉄道の 分担比率 | A120. 3 歳~22 歳人口数 | [人] | [+] |
| | | A122. 人口密度 | [人/km ²] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [-] |
| | | Q01. 一人当たり乗用車保有台数 | [台/人] | [-] |

● 旅客航空の分担比率

旅客航空の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 67 に示す。旅客航空の分担比率を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 19 歳~22 歳の人口数

格安航空会社の増加によって大学生の飛行機を利用した旅行機会が増えていると考えられる。そこで、19-22 歳人口数が増加すると、旅客航空の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 第 3 次産業の従業者数

第 3 次産業の従業者数は長距離出張が多く、長距離出張には主に飛行機が使われると考えられる。そこで、第 3 次産業の従業者数が増加すると、旅客航空の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 一人当たり市民所得

旅客輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、所得水準の向上に伴って、鉄道、自動車、航空機と変化・交替することが知られている²⁴⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、旅客航空の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 67 旅客航空の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-----------------------|---------------------|--------|------|
| Q. 旅客 セクタ | Q10. 旅客航空の 分担比率 | A121. 19 歳~22 歳の人口数 | [人] | [+] |
| | | B07. 第 3 次産業の産業従業者数 | [人] | [+] |
| | | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |

R) 貨物セクタ

R-1) 貨物セクタの概要

貨物セクタでは、総貨物輸送量から輸送手段別の輸送量を計算する。輸送手段はエネルギー

ギー消費原単位と統計分類によって、自家用貨物車、営業用貨物車、貨物鉄道、貨物船舶に分類した。 t 年の総貨物輸送量は、総貨物輸送量の基準年値に総貨物輸送量の変化比率を乗じて算出した。総貨物輸送量の変化比率は、他のセクタの活動量によって計算される。 t 年の自家用貨物車、営業用貨物車、貨物鉄道、貨物船舶の輸送量は t 年の総貨物輸送量に各輸送手段の分担比率の基準年値と各輸送手段の t 年の分担比率を乗じて算出した。輸送手段別の t 年の分担比率は他のセクタの活動量によって計算される。貨物セクタの変数構成と計算式を表 2.68 に示す。貨物セクタの計算フローを図 2.28 に示す。

表 2.68 貨物セクタの変数構成と計算式

| セクタ | 変数 | 計算式 |
|-----------------|------------------|--|
| R. 貨物 セクタ | R01. 総貨物輸送量 | $R_{01}(b) \times f_1(A_{114}(t), +) \times f_2(D_{07}(t), +) \times f_3(H_{06}(t), +)$ $\times f_4(N_{04}(t), +) \times f_5(P_{03}(t), +)$ |
| | *R02. 自家用貨物車の輸送量 | $R_{01}(t) \times (R_{02}(b)/R_{01}(b)) \times R_{03}(t)$ |
| | R03. 自家用貨物車の分担比率 | $f_1(A_{114}(t), +) \times f_2(C_{01}(t), +) \times f_3(D_{07}(t), +) \times f_4(H_{06}(t), +)$ $\times f_5(N_{01}(t), +) \times f_6(P_{03}(t), +)$ |
| | *R04. 営業用貨物車の輸送量 | $R_{01}(t) \times (R_{04}(b)/R_{01}(b)) \times R_{05}(t)$ |
| | R05. 営業用貨物車の分担比率 | $f_1(C_{01}(t), +) \times f_2(D_{07}(t), +) \times f_3(H_{06}(t), +) \times f_4(N_{01}(t), +) \times f_5(P_{03}(t), +)$ |
| | *R06. 貨物鉄道の輸送量 | $R_{01}(t) \times (R_{06}(b)/R_{01}(b)) \times R_{07}(t)$ |
| | R07. 貨物鉄道の分担比率 | $f_1(C_{01}(t), -) \times f_2(N_{02}(t), +) \times f_3(P_{03}(t), +)$ |
| | *R08. 貨物船舶の輸送量 | $R_{01}(t) \times (R_{08}(b)/R_{01}(b)) \times R_{09}(t)$ |
| | R09. 貨物船舶の分担比率 | $f_1(C_{01}(t), -) \times f_2(N_{03}(t), +) \times f_3(P_{03}(t), +)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、 $*$ はCO₂排出量計算に利用される活動量

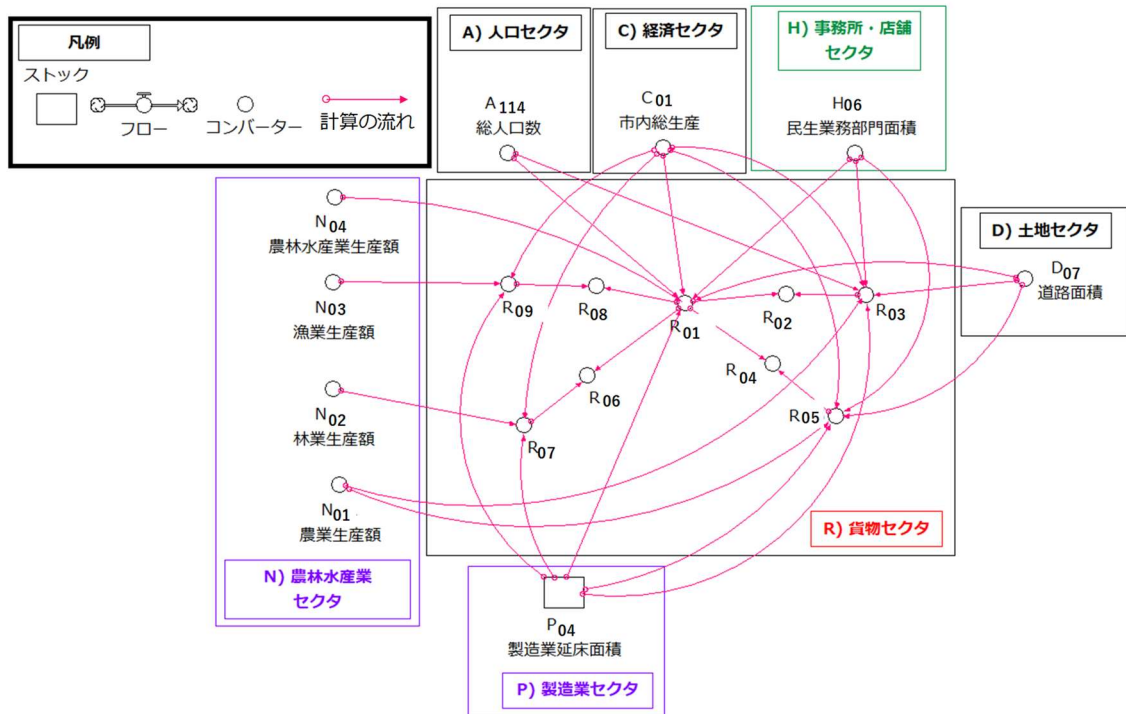


図 2. 28 貨物セクタの計算フロー

R-2) 貨物セクタでの説明変数の選定理由と因果関係の設定

● 総貨物輸送量

総貨物輸送量の説明変数と因果関係を表 2. 69 に示す。総貨物輸送量を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

人口が増加すると宅配や荷物の取引量が多くなると考えられる。そこで、総人口数が増加すると、総貨物輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 道路面積

道路インフラが整備されると輸送しやすくなり、輸送量が増加すると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、総貨物輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 民生業務部門の延床面積、農林水産業生産額、製造業の延床面積

各産業の規模を代表する民生業務部門延床面積、農林水産業生産額、製造業延床面積が多くなると、荷物を取引する量が多くなると考えられる。そこで、民生業務部門延床面積、農林水産業生産額、製造業延床面積が増加すると、総貨物輸送量が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 69 総貨物輸送量の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------|------|
| R. 貨物 セクタ | R ₀₁ . 総貨物輸送量 | A ₁₁₄ . 総人口数 | [人] | [+] |
| | | D ₀₇ . 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | H ₀₆ . 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [+] |
| | | N ₀₄ . 農林水産業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P ₀₃ . 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

● 自家用貨物車の分担比率

自家用貨物車の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 70 に示す。自家用貨物車の分担比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 総人口数

個人は小規模の取引量が多いと考えられる。そこで、総人口数が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 市内総生産額

貨物輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、市内総生産の向上に伴い変化する。船舶、鉄道から自動車へ交替してゆくことが分かっている²⁵⁾。そこで、市内総生産額が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 道路面積

交通渋滞を防ぐため道路用地を開発すると自動車が動きやすくなると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 民生業務部門の延床面積

第 3 次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、民生業務部門延床面積が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 農業生産額

農業生産物は主に車で運ばれ、生産が増えると、取引量も増えると考えられる。そこで、農業生産額が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 製造業の延床面積

第2次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、自家用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 70 自家用貨物車の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------|------|
| R. 貨物 セクタ | R ₀₃ . 自家用貨物車 の分担比率 | A ₁₁₄ . 総人口数 | [人] | [+] |
| | | C ₀₁ . 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D ₀₇ . 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | H ₀₆ . 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [+] |
| | | N ₀₁ . 農業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P ₀₃ . 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

● 営業用貨物車の分担比率

営業用貨物車の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 71 に示す。営業用貨物車の分担比率を変化させる説明変数は 5 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・市内総生産額

貨物輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、市内総生産の向上に伴い変化する。船舶、鉄道から自動車へ変化・交替することが知られている²⁵⁾。そこで、市内総生産額が増加すると、営業用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・道路面積

交通渋滞を防ぐため道路用地を開発すると自動車が動きやすくなると考えられる。そこで、道路面積が増加すると、営業用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・民生業務部門の延床面積

第3次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、民生業務部門延床面積が増加すると、営業用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・農業生産額

農業生産物は主に車で運ばれ、生産が増えると、取引量も増えると考えられる。そこで、農業生産額が増加すると、営業用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・製造業の延床面積

第 2 次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、営業用貨物車の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 71 営業用貨物車の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-------------------------|------------------|-------------------|------|
| R. 貨物 セクタ | R05. 営業用貨物車 の分担比率 | C01. 市内総生産 | [百万円] | [+] |
| | | D07. 道路面積 | [m ²] | [+] |
| | | H06. 民生業務部門の延床面積 | [m ²] | [+] |
| | | N01. 農業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

● 貨物鉄道の分担比率

貨物鉄道の分担比率の説明変数と因果関係を表 2. 72 に示す。貨物鉄道の分担比率を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・ 市内総生産額

貨物輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、市内総生産の向上に伴い変化する。船舶、鉄道から自動車へ変化・交替されることが知られている²⁵⁾。そこで、市内総生産額が増加すると、貨物鉄道の分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・ 林業生産額

林業生産物は主に鉄道で運ばれ、生産が増えると、取引量も増えると考えられる。そこで、林業生産額が増加すると、貨物鉄道の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・ 製造業の延床面積

第 2 次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、貨物鉄道の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2. 72 貨物鉄道の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----------------|-----------------------|---------------|-------------------|------|
| R. 貨物 セクタ | R07. 貨物鉄道の 分担比率 | C01. 市内総生産 | [百万円] | [-] |
| | | N02. 林業生産額 | [百万円] | [+] |
| | | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

● 貨物船舶の分担比率

貨物船舶の分担比率の説明変数と因果関係を表 2.73 に示す。貨物鉄道の分担比率を変化させる説明変数は3つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

・市内総生産額

貨物輸送を構成する共通手段は代替関係を持ち、市内総生産の向上に伴い変化することが知られており、船舶、鉄道から自動車へ変化・交替していくとされる²⁵⁾。そこで、市内総生産額が増加すると、貨物船舶の分担比率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

・漁業生産額

漁業生産物は主に船舶で運ばれ、生産が増えると、取引量も増えると考えられる。そこで、漁業生産額が増加すると、貨物船舶の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

・製造業の延床面積

第2次産業の規模が大きくなると、取引量が増えると考えられる。そこで、製造業延床面積が増加すると、貨物船舶の分担比率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 2.73 貨物船舶の分担比率の説明変数と因果関係

| セクタ | 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|-----|-------|---------------|-------------------|------|
| R. | R09. | C01. 市内総生産 | [百万円] | [-] |
| 貨物 | 貨物船舶の | N03. 漁業生産額 | [百万円] | [+] |
| セクタ | 分担比率 | P03. 製造業の延床面積 | [m ²] | [+] |

2.3 モデルの汎用性の検討

2.3.1 検討対象都市の概要と都市別都市活動量予測モデルの生成

● 検討対象都市の概要

本研究で開発した都市活動量予測モデルの多様な都市への適用可能性を検討するために、異なる人口規模と産業特徴を持つ 3 つの都市を選定し、実績値と計算値の比較による計算精度の検討を行った。選定した各都市の所在地を図 2.29 に、各都市に関連する基本情報を表 2.74 に示す。

福岡市は総人口数が約 155 万人で、日本で人口数が 8 番目に多い大規模な都市である。そのため、港湾、空港などの都市インフラが良く整備されており、集中的な都市開発によって行政、経済、交通の中心地となっているため、周辺都市間の移動が多い。

柏市は総人口数が約 42 万人で日本では中規模都市に分類されている。生活圏内に東京都が位置しており、周辺都市との接近性が良いため人口数と世帯数が継続して増加している。そのため、柏駅を中心に業務施設と商店施設、住居地域の発展が続いている。一方で、柏市郊外には工場や農業地域があり、第 1 次、第 2 次産業が盛んである。

熊野市は総人口数が約 2 万人で小規模都市に分類されている。熊野市は全体面積の約 87% が山林となっており、実際に人の利用可能な土地は狭いため、他の都市に比べて人口密度が低い。環境の面では山と海に囲まれており、第 1 次産業に特化している。なお、周辺地方を管轄する官公庁が多く存在している。しかし、他の都市に比べて都市インフラとアメニティが貧弱であるため、転出人口が転入人口より多く、人口減少が続いている。

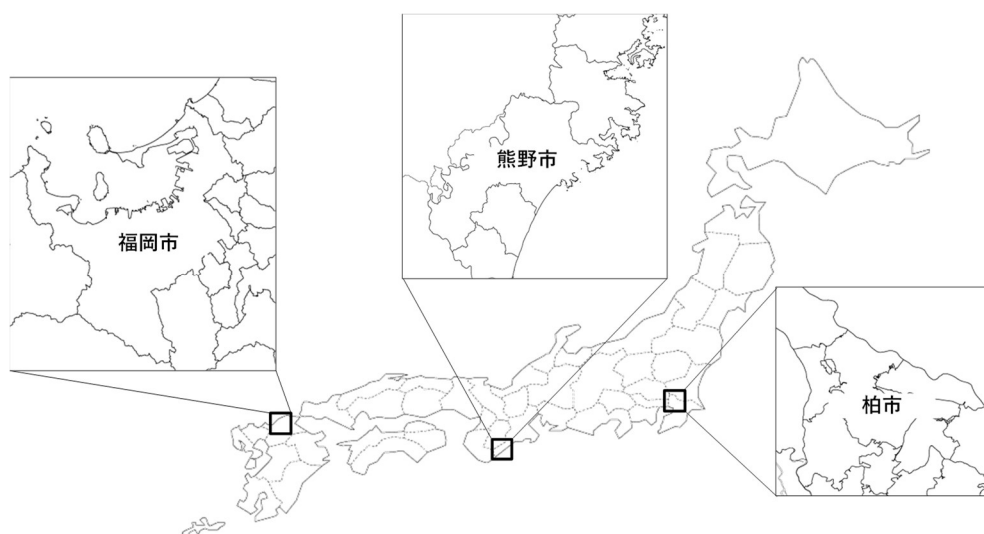


図 2.29 検討対象都市の所在地

表 2. 74 検討対象都市の概要

| | 福岡市 | 柏市 | 熊野市 |
|---------------------------|-----------|---------|--------|
| 人口数 (人) | 1,556,137 | 417,692 | 17,675 |
| 面積 (km ²) | 343.39 | 114.74 | 373.35 |
| 人口密度 (人/km ²) | 4,532 | 3,640 | 47 |

● 都市別活動量予測モデルの生成

福岡市、柏市、熊野市の都市活動量予測モデルの構築を行った。モデルを構築するためには、大きく3段階の過程が必要である。各段階の内容を下に説明する。

【Step1】2.2節で説明した変数を対象に、1990年から2010年までの統計値を収集する。

【Step2】収集した統計値と2.2節で設定した因果関係を用いて関数を同定する。

【Step3】Step1で収集した統計値の初期値(1990年の値)およびStep2で得られた関数を都市活動量予測モデルに入力する。

上記のStep1に関しては、一般に都市規模が小さい場合には、統計データが収集されていない項目がある。その場合は、対象都市が属する県のデータを按分して代替データを取得するものとする。例えば、農林水産業セクタの農業生産額(N_{01})の場合、三重県の農業生産額のデータは得られるが、熊野市(三重県内)の農業生産額のデータは得られない。従って、熊野市の農業従事者数を三重県の農業従事者数で除した割合を三重県の農業生産額に乘じて得られる値を熊野市の農業生産額とした。このようにデータの按分に利用する変数は、資源エネルギー庁の市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン(2006)²⁶⁾を参考して利用した。

なお、上記に示したStepに従って作業を実施すると、約7日程度(Step1とStep3は合わせて約1日、Step2は約6日の時間を要する)で1都市のモデルの生成が可能である。

2.3.2 都市別モデルの計算精度の結果

都市活動量予測モデルの汎用性を検討するために、CO₂排出量の計算に利用される活動量と部門別CO₂排出量の精度検証を行った。計算期間は1990年から2010年までである。計算精度を検討するために、誤差の計算は式2.2を用いた。式2.2はMean Absolute Percent Error(以下、MAPE)²⁷⁾を修正したものである。従来の式2.2の分母は A_t である。しかし、計算期間中のある時期の A_t が急激に変化する場合、MAPEの結果がその値に偏る。その影響を除くために、本研究では分母の A_t を計算期間の実績値を平均した値に変えて利用した。

計算精度の評価には、一般的な MAPE 値の解析基準と提示されている表 2.75 を参考とした。活動量は、建物の着工と解体のような活動量が時間経過による変化が大きいため、Revised MAPE 値が 50%未満になると CO₂ 排出量の計算が可能だと判断した。また、部門別 CO₂ 排出量は、過去の誤差が蓄積され将来予測の誤差が大きくなることを考慮して、21 年間の Revised MAPE 値が 10%未満になると将来予測が可能だと判断した。

$$\text{revised MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|A_t - S_t|}{|\sum_{t=1}^n A_t / n|} \quad \dots \text{式 2.2}$$

ここで、 A_t : 実績値, S_t : 計算値, n : データの数 (ここでは、 $n=21$, 1990 年から 2010 年まで)

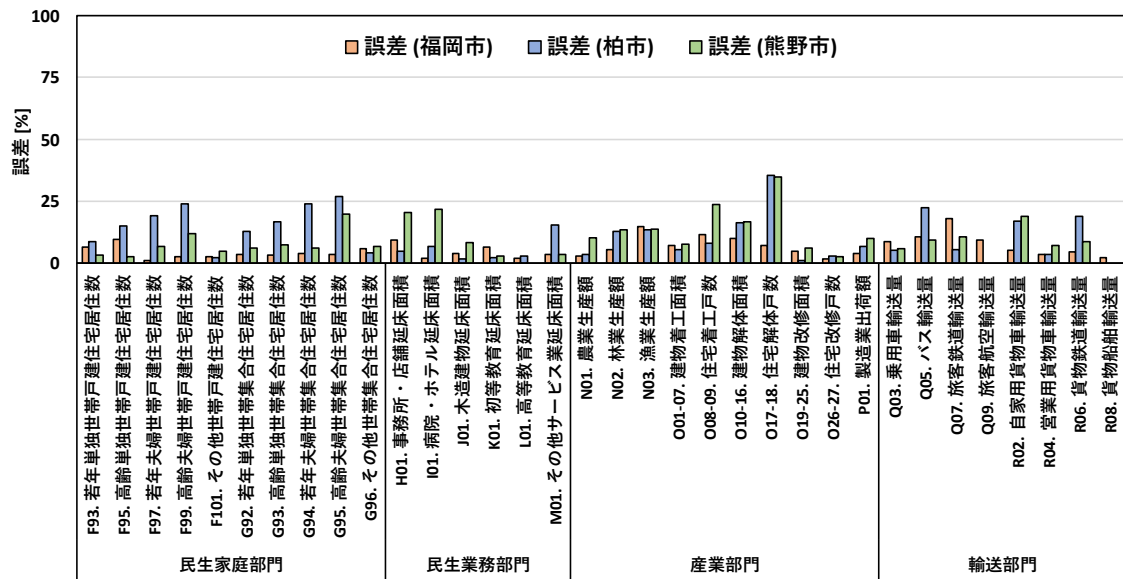
表 2.75 Interpretation of typical MAPE values²⁷⁾

| MAPE(%) | Interpretation |
|--------------|---------------------------|
| MAPE<10% | High Accuracy Forecasting |
| 10%≤MAPE<20% | Good Forecasting |
| 20%≤MAPE<50% | Reasonable Forecasting |
| MAPE>50% | Inaccurate Forecasting |

2.3.2.1 活動量

福岡市、柏市、熊野市の活動量間の関係を表す関数を同定し、都市活動量予測モデルに入力し、活動量の計算を行った。活動量は、計算された基準年比の値を、基準年値に乘じて算出した。なお、ここでは CO₂ 排出量の計算に直接関係がある活動量を中心に、活動量の計算精度の検討を行った。

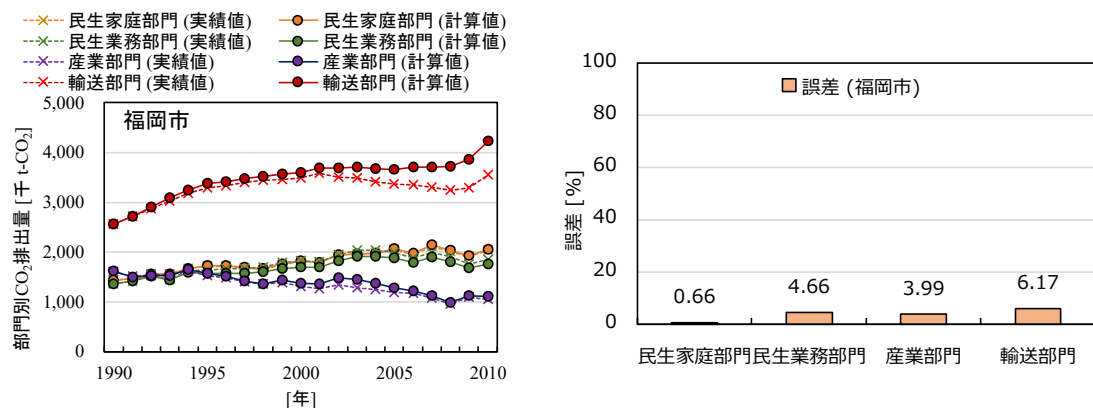
図 2.30 に都市別 CO₂ 排出に関する活動量の計算値と実績値の誤差(%)を示す。また、産業部門の建設業セクタに関連する活動量は、数が多いため、活動量の単位や建設の段階に従って建物着工面積、住宅着工戸数、建物解体面積、住宅解体面積、建物修繕面積、住宅修繕面積に分類して図 2.30 に示す。その結果、全ての都市の活動量で誤差が約 35%以下となり、全体的に高い計算精度が得られた。従って、続いてこれらの活動量を用いて各都市の部門別 CO₂ 排出量の計算を行った。なお、柏市では旅客航空輸送量(Q₀₉)と貨物船舶輸送量(R₀₈)が、熊野市では高等教育延床面積 (L₀₁)と旅客航空輸送量(Q₀₉)と貨物船舶輸送量(R₀₈)の資料が存在しなかったため、これらの活動量は計算していない。

図 2.30 都市別 CO₂ 排出に関係する活動量計算結果の誤差

2.3.2.2 部門別 CO₂ 排出量

活動量、エネルギー消費原単位、CO₂ 排出係数の実績値を用いて各都市の部門別 CO₂ 排出量を計算し、活動量を計算地とした場合との誤差を算出した。計算期間は1990年から2010年までである。それぞれの結果に関しては、図 2.31～図 2.33 に示す。全ての都市で部門別 CO₂ 排出量の誤差は 10%未満であり、高い計算精度が得られた。

このような結果は、各都市に存在する特殊な変数を用いずとも、都市モデルのシステム構造と変数を一般化し、活動量間の関係を表す関数に都市の特徴を反映することで、多様な都市で活動量が精度良く計算できることを示している。その意味で、本研究で開発した都市活動量予測モデルは汎用性を持つと考えられる。

図 2.31 部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (福岡市)

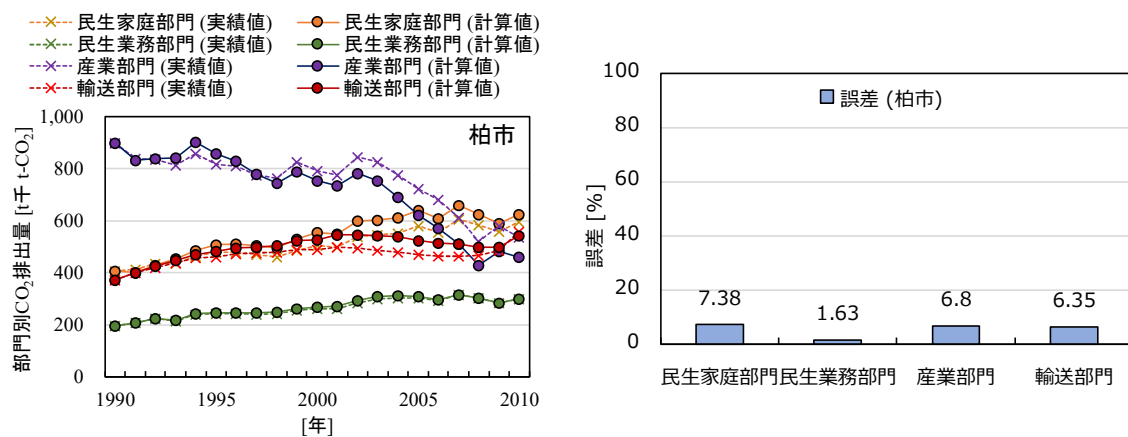


図 2.32 部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (柏市)

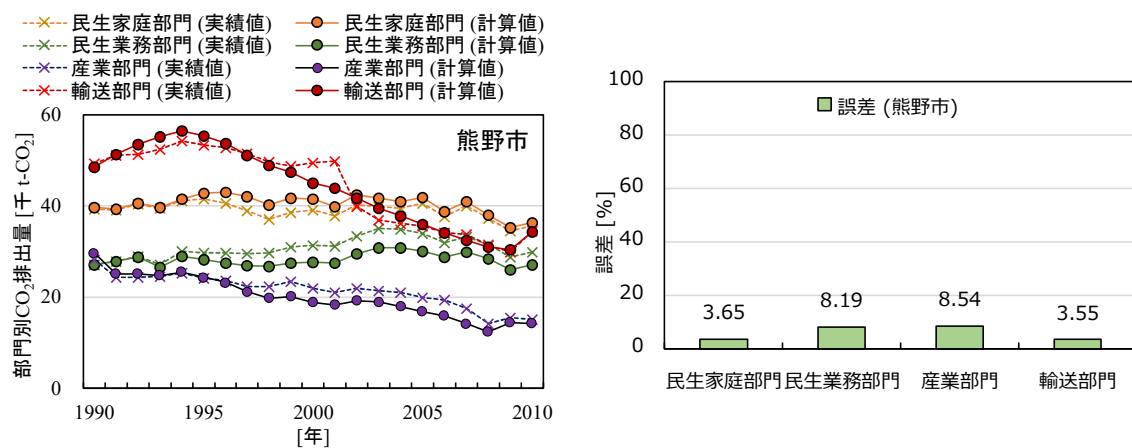


図 2.33 部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (熊野市)

2.4 考察

2.3 節では、都市活動量予測モデルが汎用性を持つことが示された。しかし、本研究で開発したモデルが持つ汎用性には、限界も存在している。

本研究で開発した都市活動量予測モデルは、これまで考慮されてこなかった「活動量」の計算が、多くの都市に効率良く支援できる可能性が提示されたことに一定の意味を持つと考えられる。この可能性は、都市の分類に広く使われている指標である、「都市規模」と「産業特徴」が全く異なる 3 つの都市を対象にモデルが精度良く計算されれば、他の都市でも適用可能だと仮定している。しかし当然、本研究で選んだ 3 つの都市が日本で存在する全ての市町村の特徴を反映しているわけではない。そのため、今後、都市活動量予測モデルを適用する都市が増えることによって、活動量間の因果関係の再検討などの補完が必要となる可能性がある。

また、本研究では、都市モデルのシステム構造と変数の一般化による、モデルの汎用化を中心的な課題としており、隣接都市からの影響は考慮しなかった。しかし、実際には、活動量の変化位においては隣接都市からの影響もあると考えられるため、今後は周辺都市モデルまで連結した活動量の検討が必要だと考えられる。

また、現段階では、この都市活動量予測モデルを用いた将来予測を行う上では、都市構造が大きく変化しないことが前提となっている。具体的には、10 年から 20 年程度の期間における結果が有意であると想定される。より将来の予測を可能にするためには、一定期間の経過後、関数同定に利用する実績値の利用期間を増やして、変化している都市構造を関数に反映する必要がある。

最後に、本研究の目的は、効率良く都市 CO₂ 削減施策を支援できるシステムを開発することである。そのため、高い適用性を満たすモデルを構築することを目指して検討を行い、一定の汎用性を持つモデルを提示しえた。

本研究におけるモデルの「適用性」とは、モデルの汎用性とモデルの構築時間を考慮した利用しやすさを指している。モデルの汎用性は、多様な都市で利用できるように必要であり、モデルの構築時間は、短くなるほど刻々と変化する周辺状況や多様な施策に対応可能となる。

しかし、本章の手法では 1 つの都市モデルを構築する際に、関数同定に莫大な時間を要するため、約一週間の時間が必要となっている。また、関数同定手法自体の設定が複雑であるために、施策立案者などの非専門家が利用するには利便性が落ちると考えられる。そのため、都市活動量予測モデルの適用性はまだ十分高いとは言えないと考えられる。加え

て、活動量間の関係を表す関数の傾きの設定は、因果関係の事前設定を使わずに、最適化計算に任せることで計算精度が向上する可能性があると考えられる。最後に、今までは、1990 年から 2010 年までの実績値を全部利用して関数を同定し、その関数を活動量の計算に利用してきた。しかし、全ての実績値を用いて関数を同定した場合にはその関数の妥当性を検証することが難しい。そのため、一部の実績値から関数を同定し、その他の実績値について、関数による計算値と実績値と比較することで、関数の妥当性をより適切に評価することが可能となると考えられる。

以上より、第 3 章では、本章で残された課題である都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を目的とし、関数同定手法の改良を行う。

2.5 本章のまとめ

本章では、都市 CO₂ 削減施策の検討における、活動量の重要性に着目した。都市活動量予測モデルは、変数間の相互作用の把握が容易な SD を利用して構築され、どのような都市でも入手可能な統計データを利用して都市モデルのシステム構造と変数を共通化している。そして、活動量間の関係を表す関数を対象都市の統計から同定することによって対象都市の特徴が反映できるようにした。さらに、モデルの汎用性を検討するために、都市の規模と特徴が異なる福岡市、柏市、熊野市を対象に活動量と部門別 CO₂ 排出量を計算し、計算精度の検討を行った。主な結論は以下の通りである。

<モデルの汎用性検討の結果>

- ・ 各都市の活動量計算結果の誤差と部門別 CO₂ 排出量計算結果の誤差は、高い計算精度が得られた。この結果から、各都市に存在する特殊な変数を使わずとも、都市モデルのシステム構造と変数を一般化し、活動量間の関係を表す関数に都市の特徴を反映することで、多様な都市で活動量がよい精度で計算可能であり、モデルが汎用性を持つことが示された。

<考察-本章の限界と今後の課題>

- ・ 本研究では、都市の分類に広く使われている「都市規模」と「産業特徴」が異なる都市を対象としてモデルを構築することで、モデルの汎用性が担保されることを企図した。ただし、今回の3都市ですべての特徴が網羅できているとは言えない。そのため、今後適用する都市を増加する際には、活動量間の因果関係などを再検討する必要がある。ただし、一定の汎用性を持ち、様々な都市に適用可能なシステムを構築した点には意義がある。
- ・ 本研究は、一都市のモデルを作成する汎用的なシステムの構築を眼目とした。隣接都市間の相互影響を考慮することについては、今後の課題である。
- ・ 都市構造が激変しないことが本論文のモデルによる将来予測が成立する条件であるため、適用範囲は現実の状況を勘案する必要があるが、おおむね 10~20 年程度であると想定される。そのため、適度な感覚でモデル、データを更新する必要がある。

＜モデルの適用性と精度の向上に関する検討項目＞

- モデル作成において、特に活動量間の関係を表す関数の同定に多大な時間を要している。また、設定が煩雑であり、施策検討者などが使う上では利便性、すなわち適用性が低い。また、精度に関しても関数の傾きの設定を事前に施すか、全て最適化計算によるかを比較検討する必要がある。最後に、一部の実績値から関数を同定し、その他の実績値について、関数による計算値と実績値と比較することで、関数同定に使う実績値の利用方法の妥当性を評価する必要がある。

以上をうけて、第3章では、本章で残された課題である都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を目的とし、関数同定手法の改良を行う。

参考文献

- 1) Forrester, J.W., "Industrial Dynamics--A Major Breakthrough for Decision Makers.", in: Harvard Business Review, Vol. 36, No. 4, pp. 37–66.
- 2) Loutfi, M., Moscardini, 2000. Using System Dynamics to analyse the Economic Impact of Tourism Multipliers. Proc. 18th Int. Conf. Syst. Dyn. Soc. 2000, Bergen, Norway. 1989.
- 3) Winz, I., Brierley, G., Trowsdale, S., 2008. The Use of System Dynamics Simulation in Water Resources Management, in: Water Resources Management. pp. 1301–1323.
- 4) Wei, S., Yang, H., Song, J., Abbaspour, K.C., Xu, Z., 2012. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. Eur. J. Oper. Res. 221, pp.248–262.
- 5) Jin, X., Xu, X., Xiang, X., Bai, Q., Zhou, Y., 2016. System-dynamic analysis on socio-economic impacts of land consolidation in China. Habitat Int. 56, pp.166–175.
- 6) Sterman, J.D., 2000. Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Irwin/McGraw-Hill. Boston, Mass 928.
- 7) Jeffrey P.Walters, David W.Archer, Gretchen F.Sassenrath, John R.Hendrickson, Jon D.Hanson, John M.Halloran, PeterVadas, Vladimir J.Alarcon, 2016. Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling, Ecological Modelling. 333, pp.51-65
- 8) Isee systems, https://www.iseesystems.com/resources/help/v10/isee_Help.htm
(アクセス日 : 2018.07)
- 9) John Holland, 1975, Adaptation on Natural and Artificial Systems
- 10) 永井保男 : 国内移住の人口学, 中央大学経済研究所年報 第 45 号, pp.653-687, 2014
- 11) 丸山桂 : 女性労働者の活用と出産時の就業継続の要因分析-現代日本の家族に関する意識と実態 (その 1) -, 人口問題研究, 第 57 巻, 第 2 号, pp.3-18, 2001
- 12) (独) 労働政策研究・研修機構 : 労働力需給の推計- 労働力需給モデル (2007 年版) による将来推計-, JILPT 資料シリーズ, No.34, pp.1-54, 2008
- 13) 荒井一博 : 女子の大学進学率の時系列分析, 一橋論叢, 119 巻 6 号, pp.656-670, 1998
- 14) 間々田孝夫 : 産業間社会移動分析, 金沢大学文学部論集, 第 2 号, pp.59-74, 1982
- 15) 松戸市ホームページ : 市民所得統計における用語等の解説 ,
<https://www.city.matsuyama.chime.jp/shisei/tokei/data/shiminshotoku.files/kaisetsu4.pdf> (アクセス日 : 2018.09)
- 16) 福田節也 : 所得変動と若者の離家に関する実証分析-若者の世帯形成におけるマクロ所得効果の推定-, 経済学研究論集, 第 20 号, pp.57-76, 2004
- 17) 国土交通省 : 建物の改善周期は長期修繕計画標準様式, 2008, p.102

- 18) 堤洋樹, 小松幸夫: 居住者の改善行為から見た戸建住宅の立て替え要因に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp.289-295, 2002
- 19) 特定非営利活動法人シニアライフ情報センター: 高齢者の住まいに関する意識調査, <http://www.mlit.go.jp/common/000122788.pdf> (アクセス日: 2018.09)
- 20) 小林伸生: 地域における開業率規定要因に関する一考察, 関西学院大学経済学部研究会経済学論研究, 第57巻, 第1号, pp.59-86, 2003
- 21) 蟹江 好弘, 小林 禎, 三田 和利: 広領域における教育施設整備の比較研究1: 学校教育施設の変動を形成する基礎的要因: 農村計画, 学術講演梗概集. 計画系 59(計画系), pp.1827-1828, 1984
- 22) 農林水産省: http://www.maff.go.jp/j/wpaper/w_maff/h21_h/summary/p1_c3_01.html (アクセス日: 2018.09)
- 23) 橋本渉一: 高齢化社会における公共交通の有効性と利用に関する研究, 神戸高専研究紀要, 第50号, pp.137-140, 2012
- 24) 張風波: 旅客輸送の時系列分析, 経済論叢, 136 巻 2 号, pp.64-81, 1985
- 25) 石田信博: 日本の国内貨物輸送構造, 同志社商学, 57 巻 6 号, pp.250-263, 2006
- 26) 資源エネルギー庁: 参考資料 3 市町村別エネルギー消費統計作成のためのガイドライン https://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref3.pdf (アクセス日: 2018.12)
- 27) Lewis C.D: Industrial and Business Forecasting Method, Butterworths, London, p.40, 1982

第 3 章

都市活動量予測モデルの適用性と 計算精度の向上の検討

3.1 関数同定手法の改良の必要性

第 2 章では、都市活動量予測モデルを構築し、都市の人口規模と産業特徴が異なる福岡市、柏市、熊野市を対象として活動量と部門別 CO₂ 排出量の精度検証を行い、都市活動量予測モデルが汎用性を持つことを確認した。しかし一方で、以下のような課題が残された。

(1) 都市活動量予測モデルの適用性の向上に関する課題

本研究では、効率良く CO₂ 削減施策立案を支援するために、多様な都市に適用性が高い都市活動量予測モデルを構築することを目指している。本研究におけるモデルの「適用性」とは、モデルの汎用性とモデルの構築時間を考慮した利用しやすさを指している。モデルの汎用性は、多様な都市で利用できるために必要であり、モデルの構築時間は、短くなるほど刻々と変化する周辺状況や多様な施策に対応可能となる。

上記の目標の下に、第 2 章では、都市活動量予測モデルが汎用性を持つことを確認した。ただし、1 つの都市を対象にモデルを構築する際には、統計資料の収集から計算まで約 1 週間の期間が必要であった。その 1 週間のうち最も時間を要したのは、活動量間の関係を表す関数の同定であった。また、前章までの関数同定手法では、関数を同定するための設定が複雑であるため、施策立案者などの非専門家が利用するには利便性に課題を残している。

(2) 都市活動量予測モデルの計算精度の向上可能性に関する課題

活動量の計算において、活動量間の関係を表す関数の[+]または[-]の因果関係の設定（実績値に基づく活動量間の相関関係の正負の設定）は、すべて最適化計算によって設定することで計算精度が向上する可能性があると推定される。しかし、第 2 章で利用した関数同定手法は、計算時間が長いため、新しい設定による計算精度の検証が困難であった。

(3) 関数同定の設定による計算精度の検討

今までは、1990 年から 2010 年までの実績値を全部利用して関数を同定し、その関数を活動量の計算に利用してきた。しかし、全ての実績値を用いて関数を同定した場合にはその関数の妥当性を検証することが難しい。そのため、一部の実績値から関数を同定し、その他の実績値について、関数による計算値と実績値と比較することで、関数の妥当性をより適切に評価することが可能となると考えられる。

従って、本章では、都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を目的

として、関数同定手法の改良を行う。具体的には、活動量間の関係を表す関数を同定する手法の計算方法を、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm 以下、GA)から逐次最小二乗法(Sequential Least Squares Programming 以下、SLSQP)に変更し、関数を同定する前の入力条件を簡略化する。さらに、GA を適用した関数同定手法(以下、従来手法)と SLSQP を適用した関数同定手法(以下、改良手法)の関数同定に要する時間や関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較することで、都市活動量予測モデルの適用性の向上を検討する。また、改良手法を用いて関数同定の設定変更による計算精度の向上を検討し、関数同定の設定による活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較して、関数の妥当性を評価する。

ただし、本章で行う関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算期間は、全て 1990 年から 2010 年までである。誤差の計算には第 2 章で説明した Revised MAPE を利用する。Revised MAPE を用いて示された誤差は、1990 年から 2010 年までの各年の誤差を平均した値である。

3.2 関数同定手法の改良

3.2.1 逐次最小二乗法の概要

SLSQP は、1980 年代に Dieter Kraft によって書かれた連続二次計画最適化アルゴリズムを基盤として、準ニュートン法を適用した最適化アルゴリズムである¹⁾²⁾。SLSQP は、制約条件がある非線形最適化問題を解決するために使われている。また、SLSQP は gradient 最適化手法であり、gradient 最適化手法は初期値とステップサイズの設定値によって収束結果が左右される。

GA と SLSQP の比較を表 3.1 に示す。GA と SLSQP は、両方とも非線形最適化問題を解決することが可能である。GA は 1 回の計算で初期値を多数発生させて複数領域を探索することが可能であるため、全域に近い探索が可能である。しかし、計算速度が遅くなる短所がある。一方で、SLSQP は 1 回の計算で 1 つの初期値を利用するため、計算速度が速いが、局所的最適解に陥る可能性が高い。しかし、SLSQP の探索範囲の問題は初期値を複数回変化させ計算することで、全域に近い探索が可能だと考えられる。従って、改良する関数同定手法の計算方法には、計算速度が速い SLSQP を採用した。

表 3.1 GA と SLSQP の比較

| 比較項目 | GA | SLSQP |
|---------|------------|-------|
| 非線形的な問題 | 可能 | 可能 |
| 解の探索範囲 | 全域に近い探索が可能 | 局所探索 |
| 計算速度 | 遅い | 早い |

3.2.2 改良した関数同定手法の設定条件

改良した関数同定手法の概要を表 3.2 に示す。目的変数と各説明変数との関係は、都市社会の様々な現象の説明に利用されているロジスティック関数を参考にして³⁾、目的関数を作成した。そして、目的関数のパラメータ($a_{n,1} \sim a_{n,5}$, n は説明変数の数)を実績値と計算値の差の二乗和が最小になるように SLSQP を用いて求めた。関数同定で使用した実績値は、1990 年から 2010 年までの統計データを 1990 年の値に対する比に変換した値である。ステップサイズ、終了許容値、最大反復回数は表 3.2 の通りに設定した。なお、効率的な関数同定のために、解の探索過程の中に(1)から(6)までの制約条件を設けた。

- ・制約条件 (1): $(x,y)=(1,1)$ を通る

- ・制約条件 (2): x 値 0~3 の範囲で y 値の上限値が実績最大値の 1.2 倍
(表 3.2 の A_{77} は x 値 0~3 の範囲で y 値の上限値は実績最大値の 1.020 倍)
- ・制約条件 (3): x 値 0~3 の範囲で y 値の下限値が実績最小値の 0.8 倍
(表 3.2 の A_{77} は x 値 0~3 の範囲で y 値の下限値は実績最大値の 0.985 倍)
- ・制約条件 (4): $a_2 > 0$
- ・制約条件 (5): [+]関係, $a_1 \times a_3 < 0$
- ・制約条件 (6): [-]関係, $a_1 \times a_3 > 0$

本研究では全ての活動量を基準年比で扱っているため、初年度の計算が 1 から始まるように制約条件(1)を設定した。制約条件(2)と(3)の x 値の変化範囲は、福岡市、柏市、熊野市の全ての説明変数の実際の基準年比における最小値と最大値を参考にし、将来の変化範囲を考慮して決定した。制約条件(2)と(3)の倍率は計算の発散具合や予測精度などを考慮して設定した。制約条件(4) はロジスティック関数の形を維持するための条件である。また、都市活動量予測モデルは都市モデルのシステム構造を共通化するために、事前に説明変数と目的変数の因果関係を[+]または[-]に指定した。その条件を反映したのが制約条件(5)と(6)である。そのほかに、局所解に陥ることを防ぐために、同じ条件で初期値を 20 回変えて関数を導出した。その結果の中で誤差がもっとも小さい結果を都市活動量予測モデルに入力した。

表 3.2 改良した関数同定手法の概要

| | | | | | |
|--|--|--------|-------|--|---|
| 計算方法 | SLSQP | | | | |
| 目的関数 | $\min \sum_{t=1990}^{2010} (y_t - \hat{y}_t)^2$ <p>ここで $\hat{y}_t = \prod_{n=1}^N (\frac{a_{n,1}}{a_{n,2} + e^{\frac{a_{n,3} x_{n(t)}}{a_{n,4}}} + a_{n,5})$ (n は説明変数の数)</p> | | | | |
| 入力データ | $y_t, x_{n(t)}$ | | | | |
| 入力条件 | ・ 関数の増減方向(変数間の因果関係)の設定 | | | | |
| 出力データ | $a_{n,1}, a_{n,2}, a_{n,3}, a_{n,4}, a_{n,5}$ | | | | |
| ステップサイズ | 1×10^{-8} | | | | |
| x の終了許容値 | 1×10^{-12} | | | | |
| 目的関数の終了許容値 | 1×10^{-12} | | | | |
| 最大反復回数 | 300,000 | | | | |
| 制約条件 | <p>1) $(x, y) = (1, 1)$ x 値 0～3 の範囲で 2) y 値の上限値: $y_{max} \times 1.2$ 3) y 値の下限値: $y_{min} \times 0.8$ ここで、人口セクタの変数 A_{77} は $y_{max} \times 1.020$ と $y_{min} \times 0.985$ 4) $a_2 > 0$ 5) [＋]関係: $a_1 \times a_3 < 0$ 6) [－]関係: $a_1 \times a_3 > 0$</p> | | | | |
| 初期値 | <table><tr><td>[＋]関係:</td><td>[－]関係</td></tr><tr><td>$a_1 = -0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$</td><td>$a_1 = 0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$</td></tr></table> <p>ここで、a_1 と a_2 は以下のように数値を変えて計算を繰り返す (変化範囲：100 間隔で 100 から 1000 まで、 1000 間隔で 2000 から 10000 まで)</p> | [＋]関係: | [－]関係 | $a_1 = -0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$ | $a_1 = 0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$ |
| [＋]関係: | [－]関係 | | | | |
| $a_1 = -0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$ | $a_1 = 0.001, a_2 = 1, a_3 = 1, a_4 = 1, a_5 = 1$ | | | | |

3.3 都市活動量予測モデルの適用性の向上の検討

都市活動量予測モデルの適用性の向上には、関数同定に要する時間の短縮が重要である。しかし、関数を同定する時間が短縮されても計算精度が維持できなければ、改良した関数同定手法は利用できない。従って、従来手法と改良手法の関数同定に要した時間と各手法を用いて計算した関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較して、改良手法を用いた都市活動量予測モデルの適用性の向上を検討した。

3.3.1 従来手法と改良手法の関数同定の時間と関数同定の計算精度の比較

- 関数同定に要する時間の比較

都市活動量予測モデルには、関数同定が必要な活動量が 49 個ある。そのリストを表 3.3 に示す。都市によっては特定活動量が存在しない場合があり、その場合は計算を省略した。従来手法と改良手法の主要特徴の比較を表 3.4 に示す。改良手法は、計算方法と同定関数を SLSQP とロジスティックス形の関数に変化しながら、利便性を高めるために必要な入力条件も簡略化した。その結果、1 つの都市の関数同定に要した総時間は約 147 時間から約 8 時間(約 1/18 倍)に短縮された¹。

¹ 従来手法と改良手法の計算に利用したパソコンの仕様は、Core i7-7500U CPU@2.70GHz, RAM 8GB である。

表 3.3 目的変数のリスト

| NO | 目的変数 | 福岡市 | 柏市 | 熊野市 | NO | 目的変数 | 福岡市 | 柏市 | 熊野市 |
|----|--------------|-----|----|-----|-----------------|--------------|-----|----|-----|
| 1 | 社会要因による人口変化率 | ○ | ○ | ○ | 26 | 集合住宅着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 2 | 総従業者比率 | ○ | ○ | ○ | 27 | 集合住宅解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 3 | 第一次産業従業者比率 | ○ | ○ | ○ | 28 | 事務所着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 4 | 第二次産業従業者比率 | ○ | ○ | ○ | 29 | 事務所解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 5 | 第三次産業従業者比率 | ○ | ○ | ○ | 30 | 病院着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 6 | 市内総生産 | ○ | ○ | ○ | 31 | 病院解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 7 | 一人当たり市民所得 | ○ | ○ | ○ | 32 | 木造建築着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 8 | 農業生産額 | ○ | ○ | ○ | 33 | 木造建築解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 9 | 林業生産額 | ○ | ○ | ○ | 34 | 初等教育着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 10 | 漁業生産額 | ○ | ○ | ○ | 35 | 初等教育解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 11 | 若年単独世帯主率 | ○ | ○ | ○ | 36 | 高等教育着工比率 | ○ | ○ | × |
| 12 | 高齢単独世帯主率 | ○ | ○ | ○ | 37 | 高等教育解体比率 | ○ | ○ | × |
| 13 | 若年夫婦世帯主率 | ○ | ○ | ○ | 38 | その他サービス業着工比率 | ○ | ○ | ○ |
| 14 | 高齢夫婦世帯主率 | ○ | ○ | ○ | 39 | その他サービス業解体比率 | ○ | ○ | ○ |
| 15 | その他世帯主率 | ○ | ○ | ○ | 40 | 総旅客人キロ | ○ | ○ | ○ |
| 16 | 戸建居住若年単独世帯比率 | ○ | ○ | ○ | 41 | 旅客鉄道分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 17 | 戸建居住高齢単独世帯比率 | ○ | ○ | ○ | 42 | 乗用車分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 18 | 戸建居住若年夫婦世帯比率 | ○ | ○ | ○ | 43 | バス分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 19 | 戸建居住高齢夫婦世帯比率 | ○ | ○ | ○ | 44 | 航空分担比率 | ○ | × | × |
| 20 | 戸建居住その他世帯比率 | ○ | ○ | ○ | 45 | 総輸送トンキロ | ○ | ○ | ○ |
| 21 | 製造品出荷額 | ○ | ○ | ○ | 46 | 営業用貨物車分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 22 | 製造業着工比率 | ○ | ○ | ○ | 47 | 自家用貨物車分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 23 | 製造業解体比率 | ○ | ○ | ○ | 48 | 貨物鉄道分担比率 | ○ | ○ | ○ |
| 24 | 戸建住宅着工比率 | ○ | ○ | ○ | 49 | 船舶分担比率 | ○ | × | × |
| 25 | 戸建住宅解体比率 | ○ | ○ | ○ | ○：活動量あり、×：活動量なし | | | | |

表 3.4 従来手法と改良手法の主要特徴の比較

| 比較項目 | 従来手法 | 改良手法 |
|--------------|---|--|
| 計算方法 | GA | SLSQP |
| 同定関数 | 3 次多項式 | ロジスティックス形の関数 |
| 入力条件 | <ul style="list-style-type: none"> 関数の増減方向(因果関係)の設定 関数が同定される y 軸の幅の設定 | <ul style="list-style-type: none"> 関数の増減方向(因果関係)の設定 |
| 1 つの都市モデルの関数 | | |
| 同定に要する総時間 | 約 147 時間 | 約 8 時間 |

● 関数同定の計算精度

関数同定の計算精度の比較は、都市活動量予測モデルを用いて活動量を計算する前に、関数同定手法の計算方法に従う計算精度を確認するために行った。各都市における従来手法と改良手法による関数同定の計算結果の誤差の比較を図 3.1～図 3.3 に示す。図 3.1～図 3.3 の横軸の番号は、表 3.3 の目的変数に対応する。

関数同定の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、多数の目的変数において、改良手法を用いた計算結果の誤差は従来手法を用いた計算結果の誤差より小さかった。特に、柏市の23番、熊野市の29番などで誤差が大きく減少されたことを確認した。改良手法を用いた関数同定の計算精度が高い理由は以下の2つが考えられる。

改良手法を用いた関数同定の計算精度が高い理由 ①：改良手法は、最適解の探索範囲が広い(図3.4)。

従来手法には、同定した関数の計算結果がマイナスになることを防ぐための設定条件が存在する。しかし、このような設定条件によって解の探索範囲は改良手法より狭かった。解の探索範囲が広くなると、より良い最適解が存在する可能性が高くなり、改良手法の計算精度が従来手法より高くなったと考えられる。

改良手法を用いた関数同定の計算精度が高い理由 ②：改良手法は、同定する関数のパラメータ数が多い(図3.5)。

従来手法は、極大値、(1,1)座標、極小値によって3次多項式が決まり、関数の傾きは自動で決定される。しかし、改良手法では、関数の傾きが一つのパラメータとして推定される。従って、改良手法は、従来手法より同定の自由度が高く、より多くの最適解の探索が可能になったと考えられる。

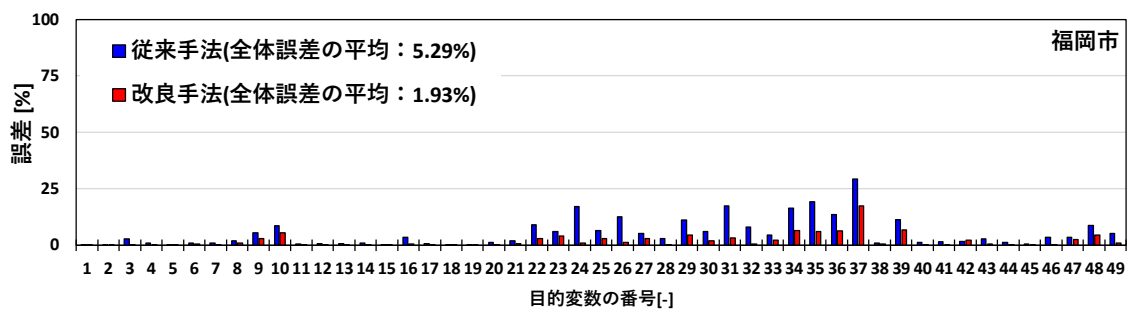


図 3. 1 従来手法と改良手法による関数同定の計算結果の誤差の比較 (福岡市)

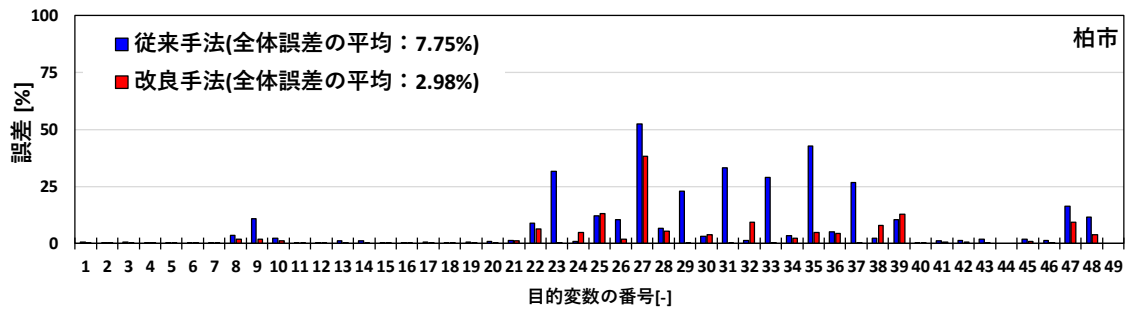


図 3. 2 従来手法と改良手法による関数同定の計算結果の誤差の比較 (柏市)

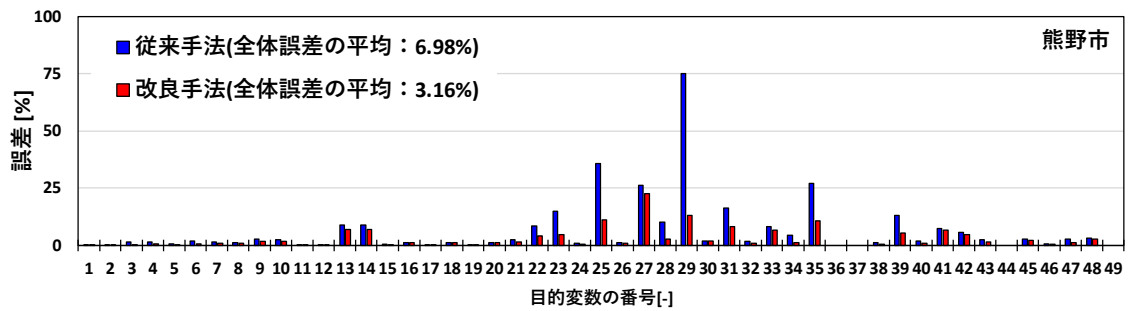


図 3. 3 従来手法と改良手法による関数同定の計算結果の誤差の比較 (熊野市)

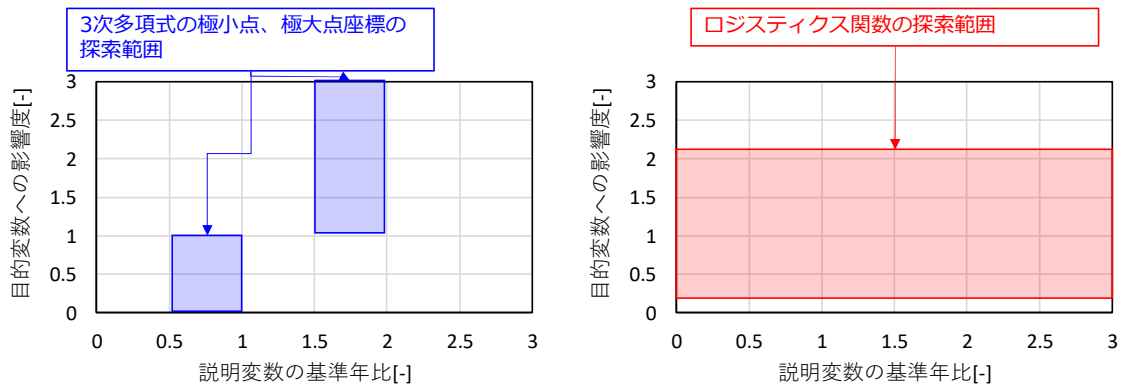
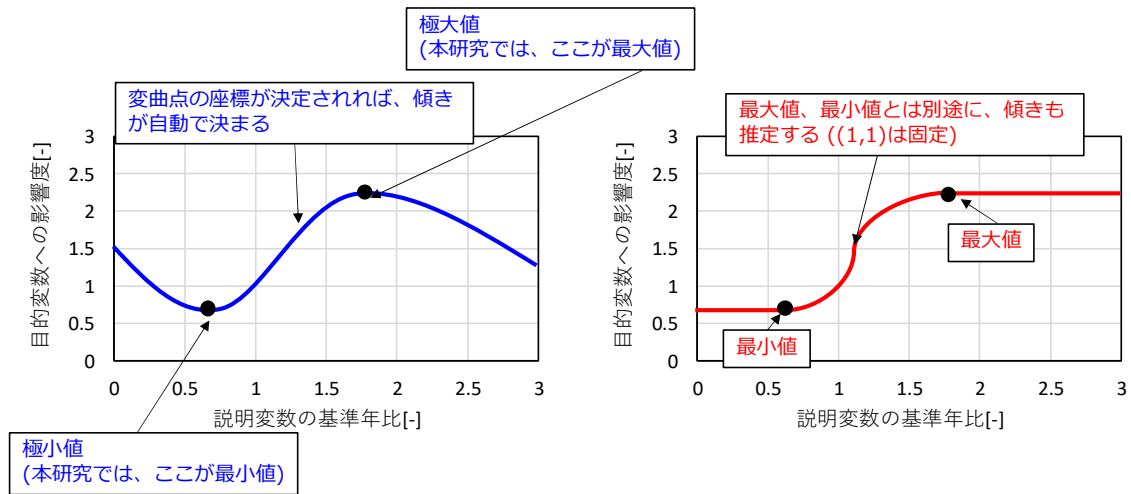


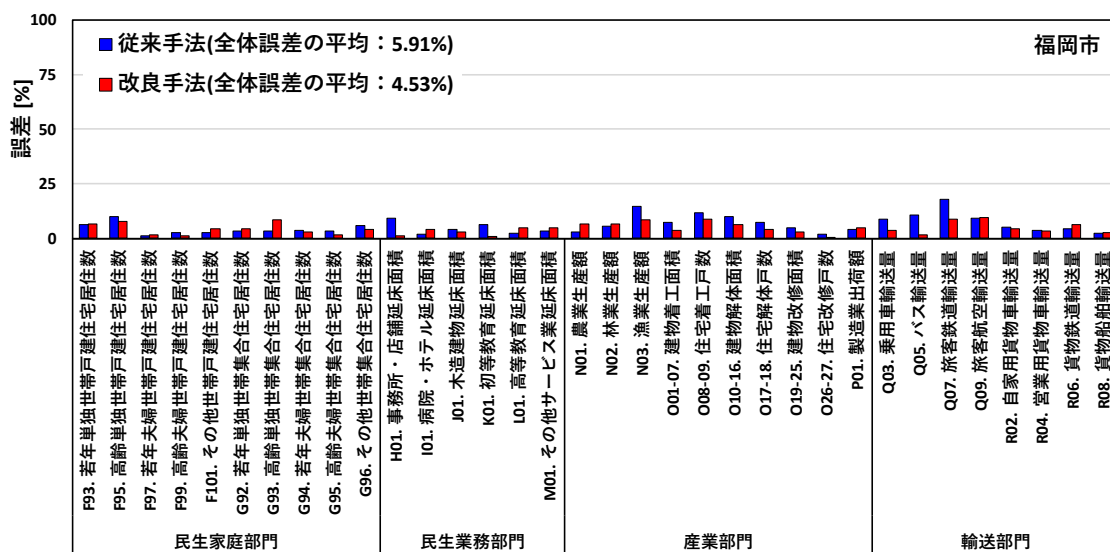
図 3. 4 各関数同定手法の設定に従って計算した関数の探索範囲 (福岡市のデータ 31 番を例として)
(従来手法(左)、改良手法(右))



3.3.2 従来手法と改良手法の活動量の計算精度の比較

3.3.1 で従来手法と改良手法で同定した関数を各都市の都市活動量予測モデルに入力し、活動量の計算を行った。各都市における従来手法と改良手法による活動量の計算結果の誤差の比較を図 3.6～図 3.8 に示す。

活動量の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、多数の活動量において改良手法を用いた計算結果の誤差は従来手法の誤差より小さかった。これは改良手法の関数同定の計算精度が従来手法より高かったことが、活動量の計算精度にも影響したものと考えられる。



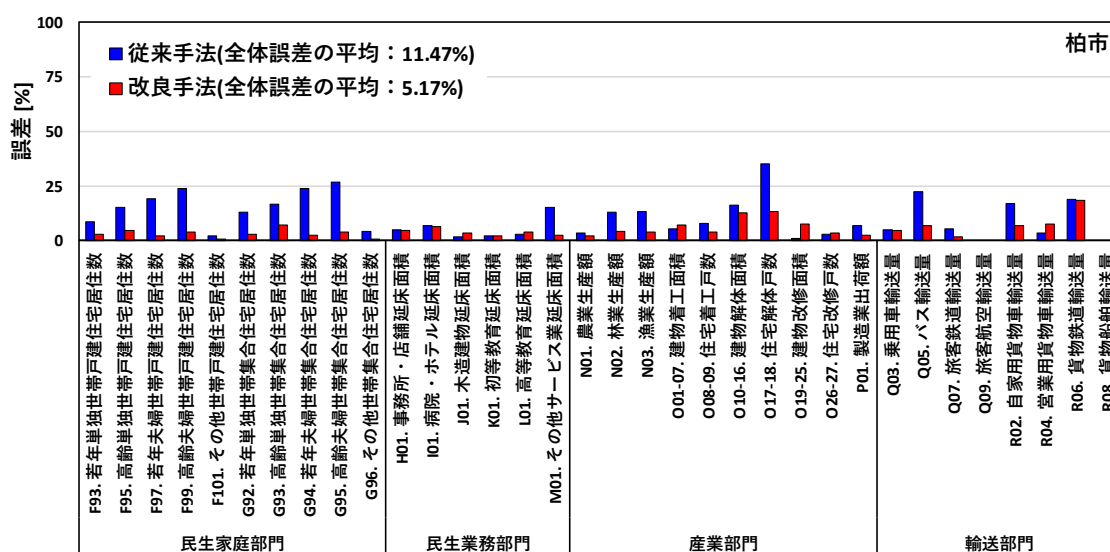


図 3.7 従来手法と改良手法による活動量計算結果の誤差の比較 (柏市)

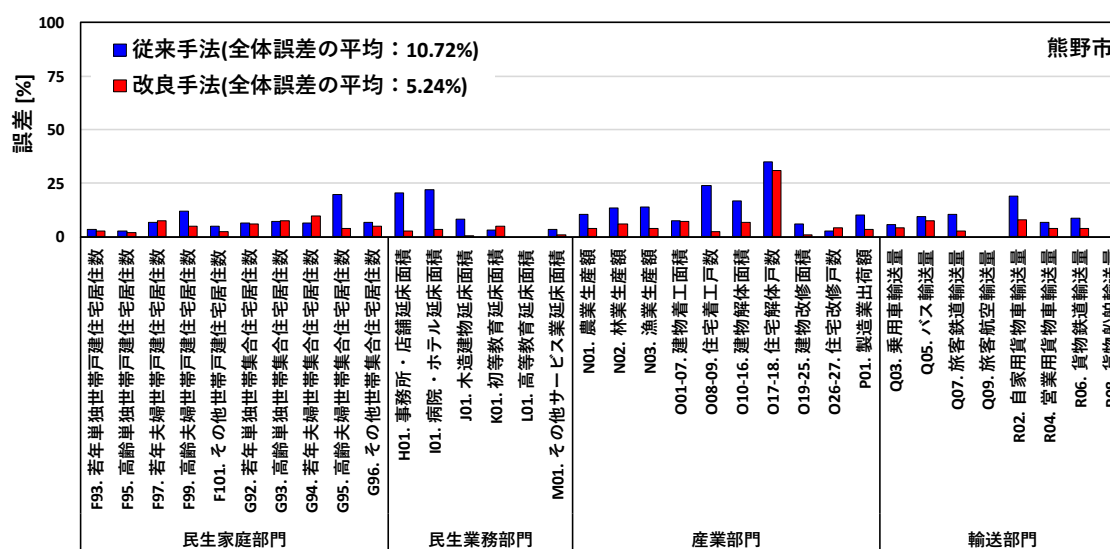


図 3.8 従来手法と改良手法による活動量計算結果の誤差の比較 (熊野市)

3.3.3 従来手法と改良手法の部門別 CO₂ 排出量の計算精度の比較

3.3.2 で計算された活動量を用いて、各都市の部門別 CO₂ 排出量の計算を行った。従来手法と改良手法による、部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向と誤差の比較を図 3.9～図 3.11 に示す(図 3.9～図 3.11 の左図で、×：実績値、△：従来手法を用いた計算結果、○：改良手法を用いた計算結果を示す)。

結果としては、従来手法、改良手法ともにすべての場合で誤差は 10%未満となり、どちらの手法でも高い計算精度が得られた(図 3.9～図 3.11 の右図)。ただし、改良手法を用いた

計算結果の誤差は一部を除いて5%未満であり、従来手法の誤差より小さくなることが確認された。

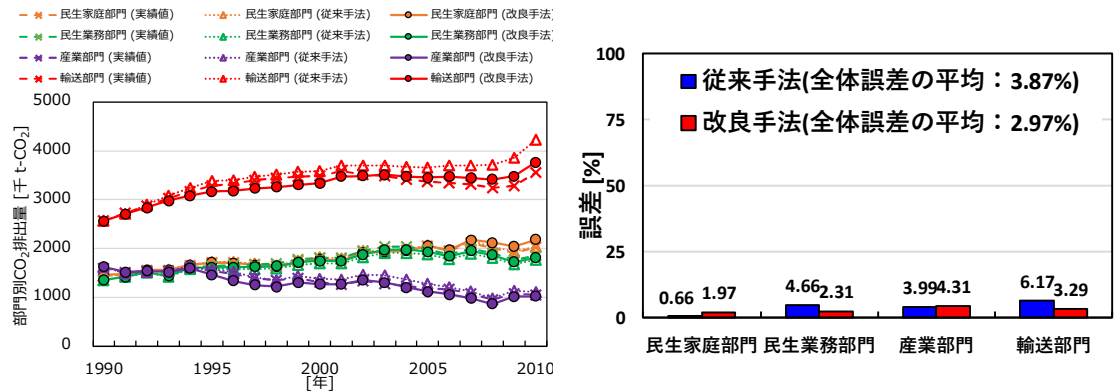


図 3. 9 従来手法と改良手法による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (福岡市)

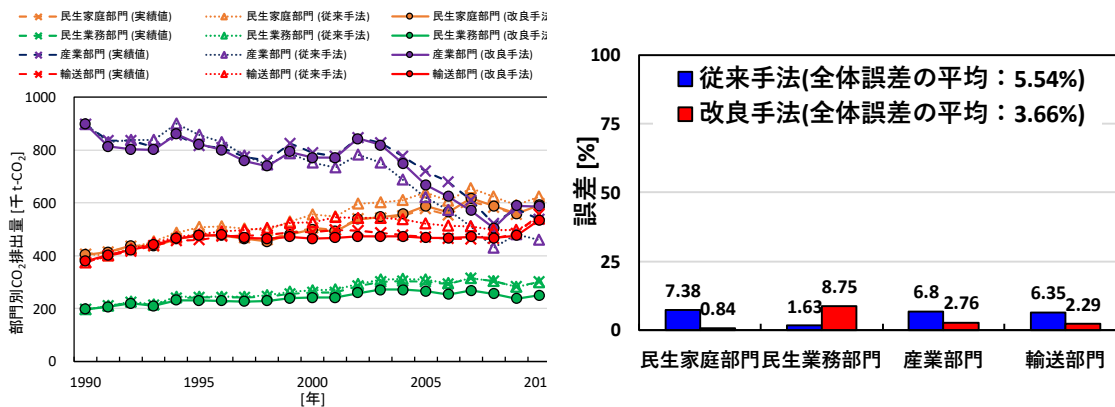


図 3. 10 従来手法と改良手法による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (柏市)

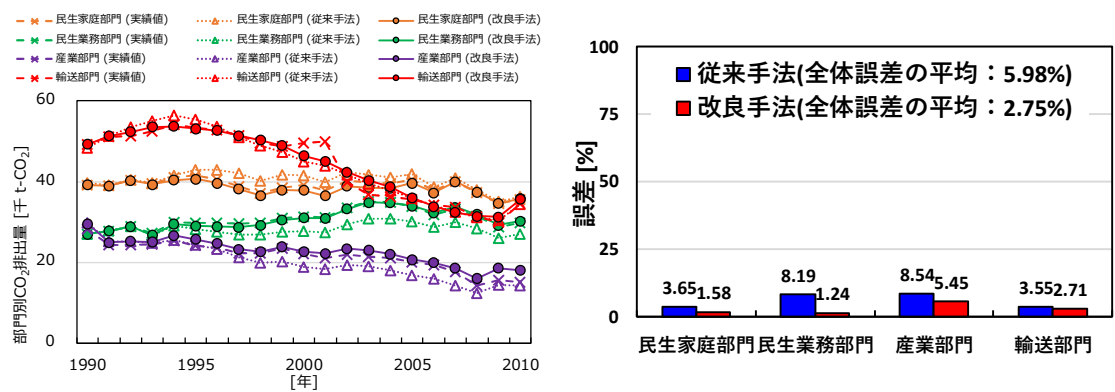


図 3. 11 従来手法と改良手法による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (熊野市)

以上の結果を総合すると、改良手法によって、1つの都市モデルの関数同定に要する総時間を約 147 時間から約 8 時間(約 1/18 倍)に短縮し、また全体的に従来手法より高い計算精度が得られた。従って、関数同定手法を改良することによって都市活動量予測モデルの適用性が向上できることが確認された。

3.4 都市活動量予測モデルの計算精度の向上の検討

本節では、改良手法を用いて、活動量間の関係を表す関数の因果関係の設定方法の変化による計算精度の向上を検討する。ケースの分類は、以下の通りである。

- ・因果関係事前設定なしケース：最適化計算によって変数間の因果関係を設定する。
- ・因果関係事前設定ありケース：最適化計算を行う前に変数間の因果関係を設定する(因果関係の指定は、第2章と同様)。

各ケースを検討するための関数同定手法の設定の違いを表3.5に示す。因果関係事前設定ありケースは、因果関係を設定できるように関数同定手法に制約条件が付けられている。因果関係事前設定なしケースは、最適化計算に因果関係の設定を任せるため、制約条件が付けられてない。

表 3.5 各ケースを検討するための関数同定手法の設定の違い

| ケース | 因果関係事前設定なし | 因果関係事前設定あり |
|-------------|------------|--|
| 関数同定手法の制約条件 | なし | [+]関係: $a_1 \times a_3 < 0$ [-]関係: $a_1 \times a_3 > 0$ |

3.4.1 因果関係の設定方法による関数同定の計算精度の比較

関数同定の計算精度の比較は、都市活動量予測モデルを用いて活動量を計算する前に、関数同定手法の設定変更に従う計算精度の変化を確認するために行った。各都市における因果関係の設定方法の違いによる、関数同定の計算結果の誤差の比較を図3.12～図3.14に示す。図3.12～図3.14の横軸の番号は、表3.3の目的変数のリストに対応する。

結果として、福岡市と熊野市ではほぼ全ての目的変数において、因果関係事前設定なしケースの計算結果の誤差が、因果関係事前設定ありケースの計算結果の誤差より小さくなった。その理由は、因果関係事前設定なしケースは因果関係を指定する制約条件がないため、関数を同定する自由度が高いためであると推定される。一方柏市では、概ね因果関係設定なしの方が誤差が少ない結果となったが、31番のように因果関係事前設定なしケースの誤差が増加する場合もあった。これは、関数同定計算の初期値が因果関係設定ありケースに合わせて設定されているため、因果関係設定なしケースの一部の目的変数においては最適解の探索に適切な初期値設定ではなかった可能性があると考えられる。しかし、柏市で誤差が増

加した目的変数は、全体の 49 個のうち、5 個にとどまっており、誤差も活動量の計算に問題のない範囲内だと考えられる。

従って、関数同定において、因果関係を事前に設定しないほうが計算精度が向上することが明らかになった。

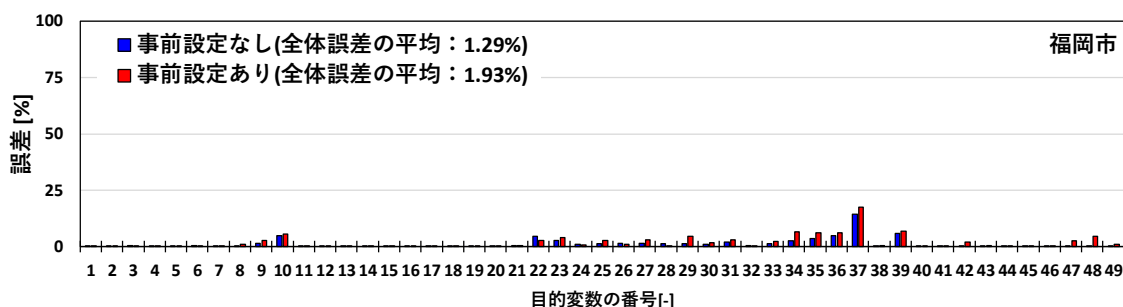


図 3. 12 因果関係の設定方法による関数同定計算結果の誤差の比較 (福岡市)

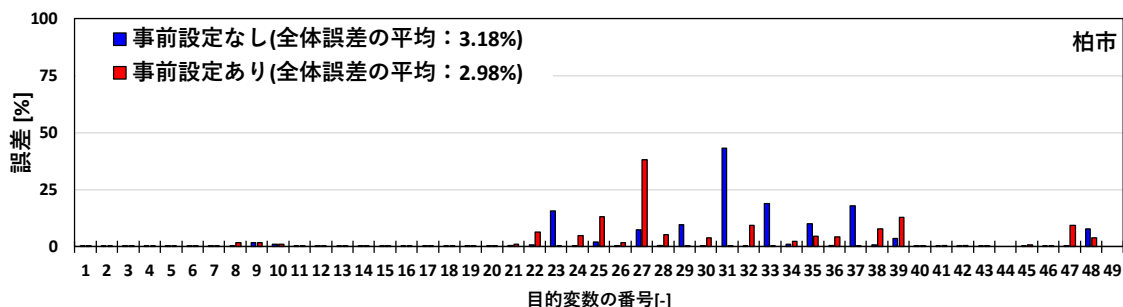


図 3. 13 因果関係の設定方法による関数同定の計算結果の誤差の比較 (柏市)

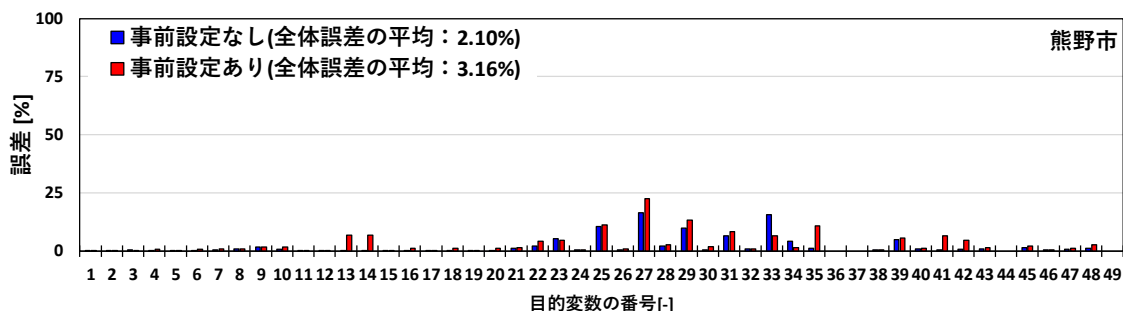


図 3. 14 因果関係の設定方法による関数同定の計算結果の誤差の比較 (熊野市)

3.4.2 因果関係の設定方法による活動量の計算精度の比較

3.4.1 で同定した関数を各都市の都市活動量予測モデルに入力し、活動量の計算を行った。因果関係の設定方法の違いによる活動量の計算結果の誤差の比較を、都市ごとに図 3. 15～

図 3. 17 に示す。

結果として、福岡市と柏市での活動量の計算精度は、因果関係設定なしケースと因果関係設定ありケースの誤差は同程度であるが、概ね因果関係設定ありの場合の方が誤差は小さかった。

一方、熊野市での活動量の計算精度については、因果関係設定の有無に対して概ね大差は見られなかったものの、因果関係設定なしケースの病院・ホテル延床面積（I₀₁）の誤差は50%以上となった。すなわち、この項目の実績値は時間経過とともに増加しているにも関わらず、計算値は減少している(図 3. 18)。延床面積は、着工面積と解体面積によって決定されるが、図 3. 18 の病院・ホテルの着工面積と解体面積の傾向を見ると、着工面積の計算値が実績値を下回っている。一方で、病院・ホテル着工比率の関数同定の計算精度はともに高かった(図 3. 14、目的変数 30 番)。

都市活動量予測モデルは変数間の関係を連結して計算する構造であるため、関数同定の計算精度が高い場合でも、都市活動量予測モデルに関数を入力した後、システムバランスが維持できなければ、活動量の計算精度は低下する。しかし、因果関係事前設定なしケースでは、都市の全体システムを考慮せずに各目的変数の関数が同定されているため、熊野市の病院・ホテル着工面積と病院・ホテル延床面積のように活動量の計算精度が大きく低下する項目が生じたと考えられる。

以上より、結論としては因果関係事前設定ありケースの場合に、活動量においてのより高い計算精度が得られることを確認した。

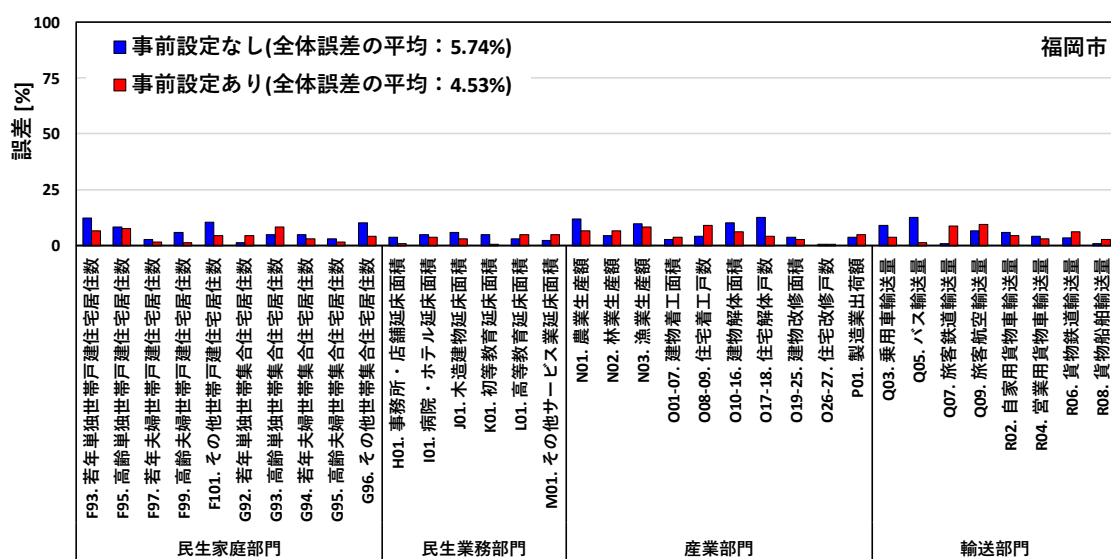


図 3. 15 因果関係の設定方法による活動量の計算結果の誤差の比較 (福岡市)

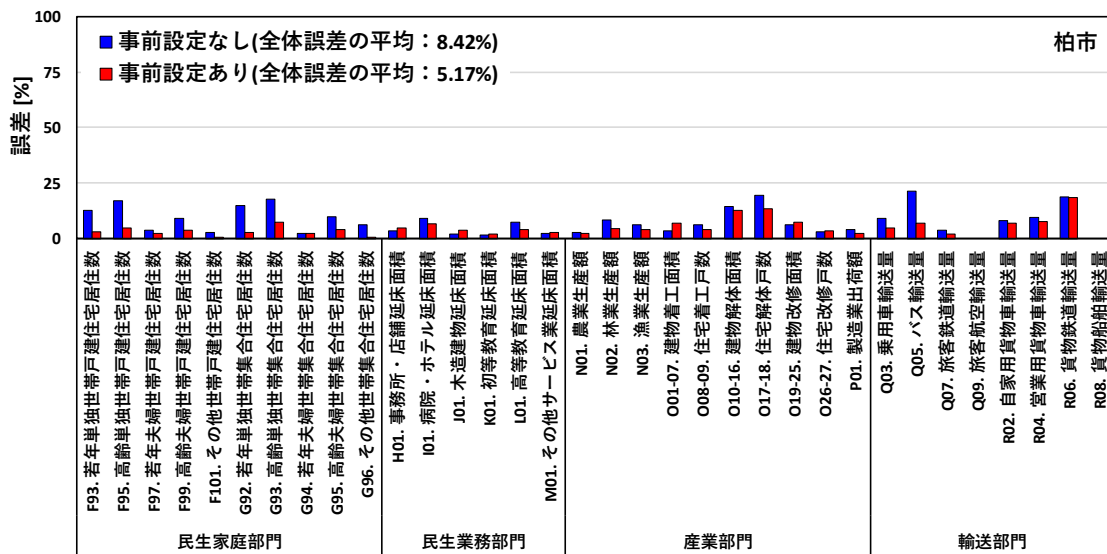


図 3.16 因果関係の設定方法による活動量の計算結果の誤差の比較 (柏市)

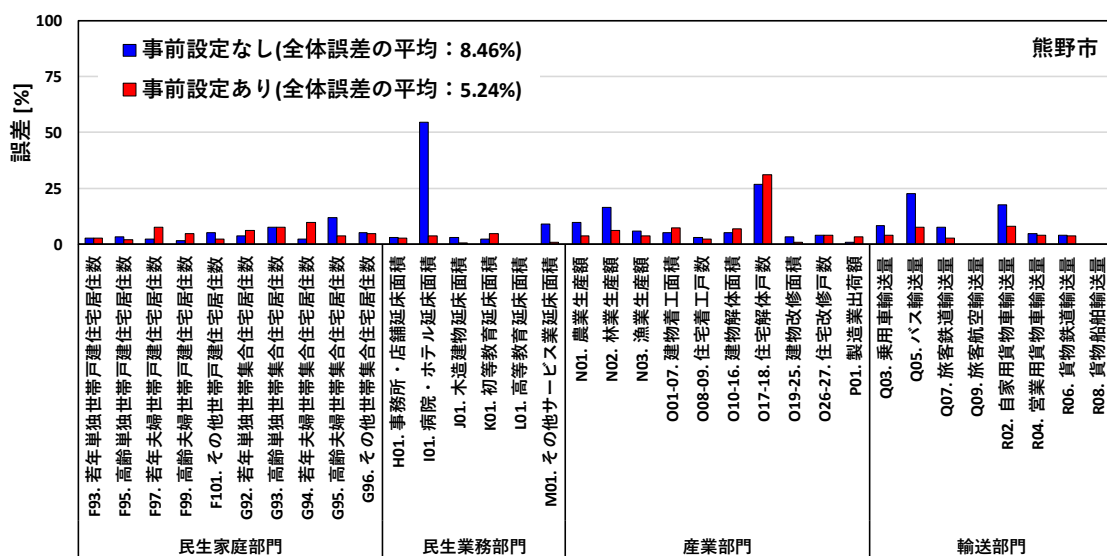
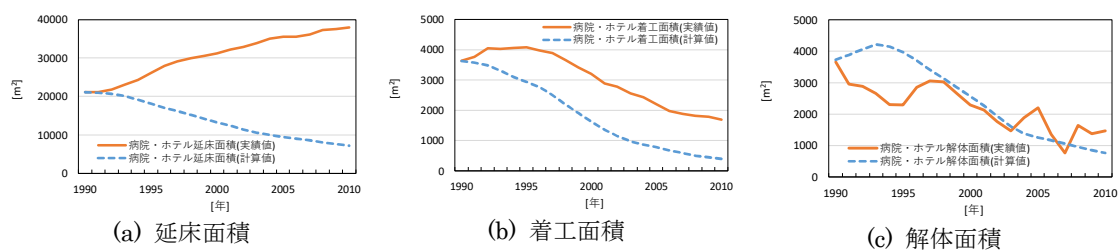


図 3.17 因果関係の設定方法による活動量の計算結果の誤差の比較 (熊野市)

図 3.18 熊野市の因果関係事前設定なしケースの病院・ホテルセクタの実績値と計算値の傾向
(実線：実績値、点線：計算値)

3.5 関数同定の設定による計算精度の検討

本節では、改良手法を用いて、関数同定の設定による計算精度を検討する。本節では、関数同定の設定に応じて得られた関数が将来 CO₂ 排出量の計算に適切であるかを判断することが目的である。従って、ここでは、関数同定の設定による活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較して、関数の妥当性を評価する。

3.5.1 関数同定における実績値の利用方法による計算精度の比較

関数同定における実績値の利用方法による活動量と部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較して、関数の妥当性を評価する。関数同定に使う実績値の利用方法に伴うケースの分類は、以下の通りである。

- ・ ケース(a) : 1990 年から 2010 年までの実績値を利用して関数を同定
(現在の利用方法、実績値の数 : 21 個)
- ・ ケース(b) : 1990 年から 2000 年までの実績値を利用して関数を同定
(実績値の数 : 11 個)

さらに、ケース(a)とケース(b)で同定した関数を各都市の都市活動量予測モデルに入力し、活動量の計算を行った。活動量の計算は、同定した関数と各活動量の 1990 年の値を活動量予測モデルに入力し、2010 年まで行った。誤差の計算には第2章で説明した Revised MAPE を利用する。Revised MAPE を用いて示された誤差は、1990 年から 2010 年までの各年の誤差を平均した値である。

各都市におけるケース(a)とケース(b)による活動量の計算結果の誤差の比較を図 3.19～図 3.21 に示す。活動量の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、多数の活動量においてケース(a)を用いた計算結果の誤差がケース(b)の誤差より小さかった。これは、ケース(a)の関数が 2001 年から 2010 年までの実績値の変化を含めて同定されたため、ケース(b)より活動量の実績値に近い計算値が出されたためだと考えられる。福岡市・柏市・熊野市で、ケース(a)とケース(b)による活動量の計算値は、全て 50%以下になったため、部門別 CO₂ 排出量の計算を行った。

各都市におけるケース(a)とケース(b)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の比較を図 3.22～図 3.24 に示す。その結果、すべての都市のケース(b)による計算では、誤差が 10%を超える部門が存在した。本論文では、CO₂ 排出量の将来予測を実施するために Revised MAPE 値

が 10%未満になることを基準にしている。そのため、図 3.22～図 3.24 の結果によりケース (b)で関数を同定する方法は、長期予測で適切ではないと判断した。

ケース(b)の誤差がケース(a)の誤差より大きくなった原因は、2000 年以降の活動量の実績値を適切に再現できなかったところにある。例えば、図 3.25 の集合住宅解体戸数の実績値と計算値の比較 (福岡市)を見ると、ケース(a)の計算値は実績値通りに再現されている一方で、ケース(b)の計算値は 2000 年以降からは減少せずに 2000 年の値が横ばいになっていた。図 3.25 のケース(b)の結果のようにケース(b)の関数を用いた活動量の計算は、2000 年以降の実績値の推移を良く計算できない場合があり、図 3.19～図 3.21 のように、ケース(b)の活動量の計算値がケース(a)の活動量の計算値より誤差が大きくなった。そして、各部門に存在する活動量の誤差が蓄積されてケース(b)による CO₂ 排出量の計算の誤差も 10%を超えた。

しかし一方で、図 3.26 の製造業解体面積の実績値と計算値の比較 (熊野市)を見ると、ケース(b)の活動量の計算値は、2000 年以降にケース(a)の活動量の計算値と類似した推移を見せた。実際に各都市には、図 3.25 のようなケース(b)の計算結果だけではなく、ケース(b)の活動量の計算値でも、2000 年以降の値が実績値を良く再現している活動量が存在した。これは、関数同定手法の計算条件がケース(a)の実績値の推移に合わせて設定されているため、ケース(b)の一部の活動量(目的変数)においては最適解の探索に適切な設定ではなかった可能性があると考えられる。従って、3.5.2 項にケース(b)の条件に関数同定手法の解の探索範囲を変更した条件を追加して再び計算精度を検討した。

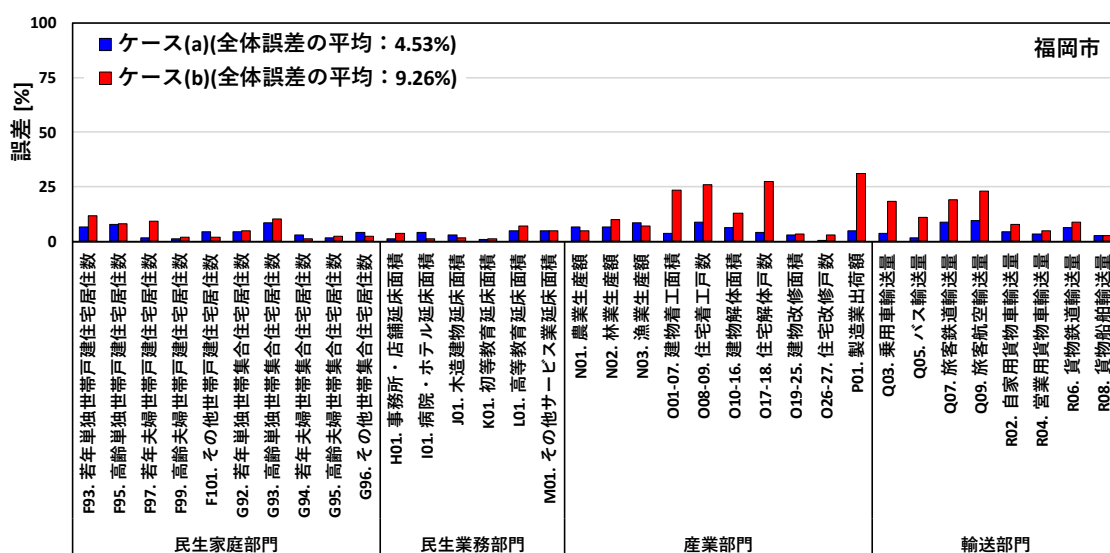


図 3.19 ケース(a)とケース(b)による活動量の計算結果の誤差の比較 (福岡市)

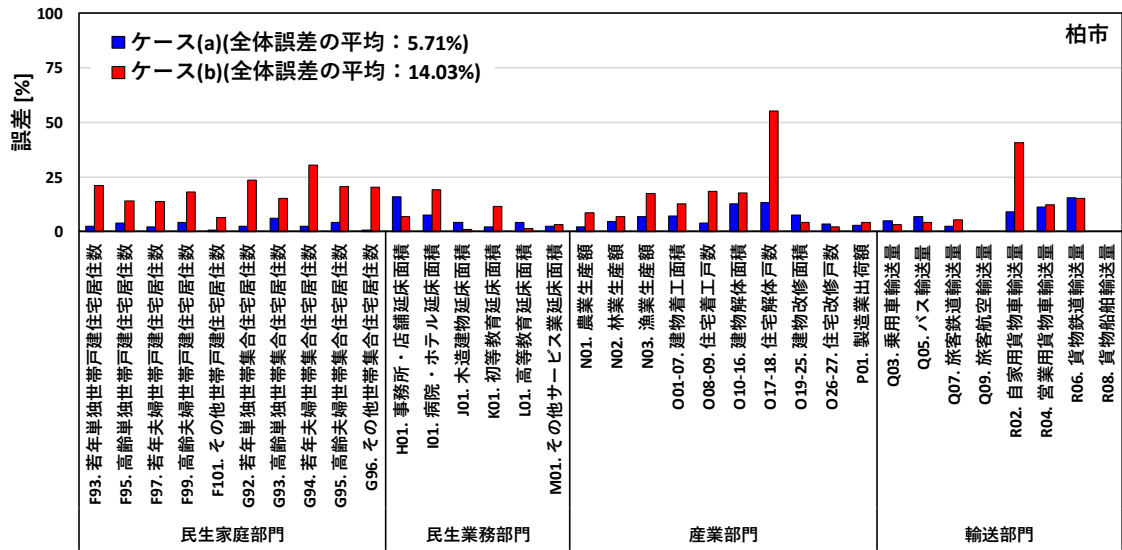


図 3.20 ケース(a)とケース(b)による活動量の計算結果の誤差の比較 (柏市)

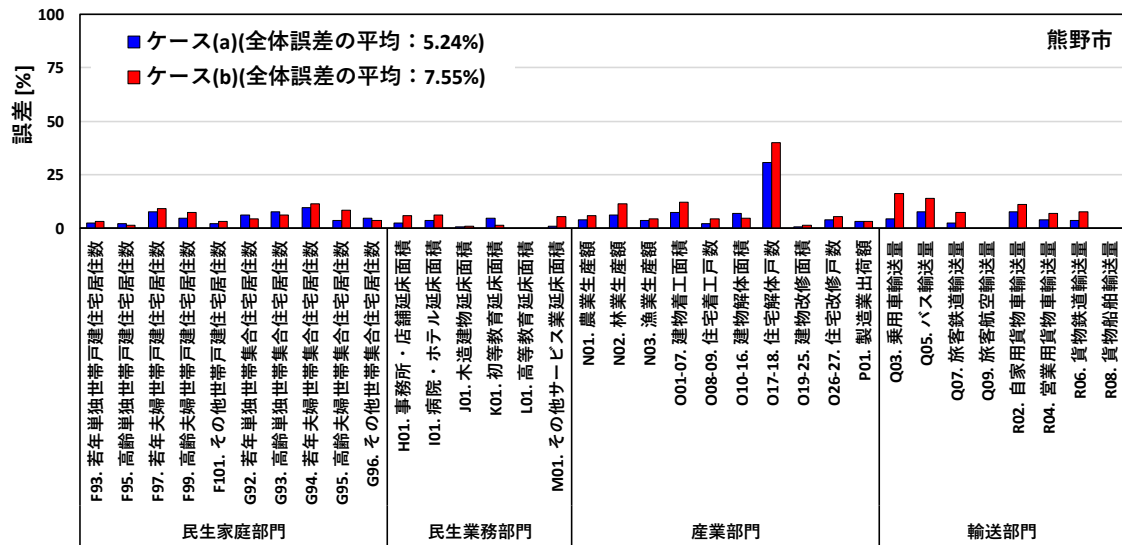


図 3.21 ケース(a)とケース(b)による活動量の計算結果の誤差の比較 (熊野市)

都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの開発

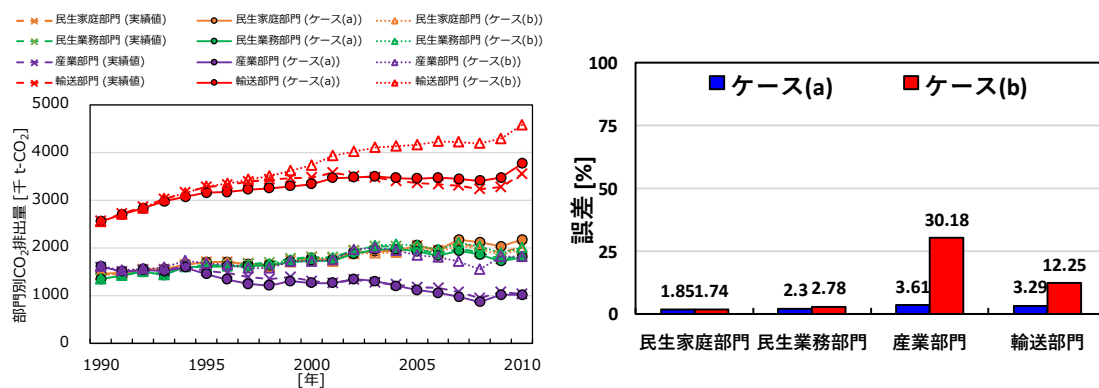


図 3.22 ケース(a)とケース(b)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (福岡市)

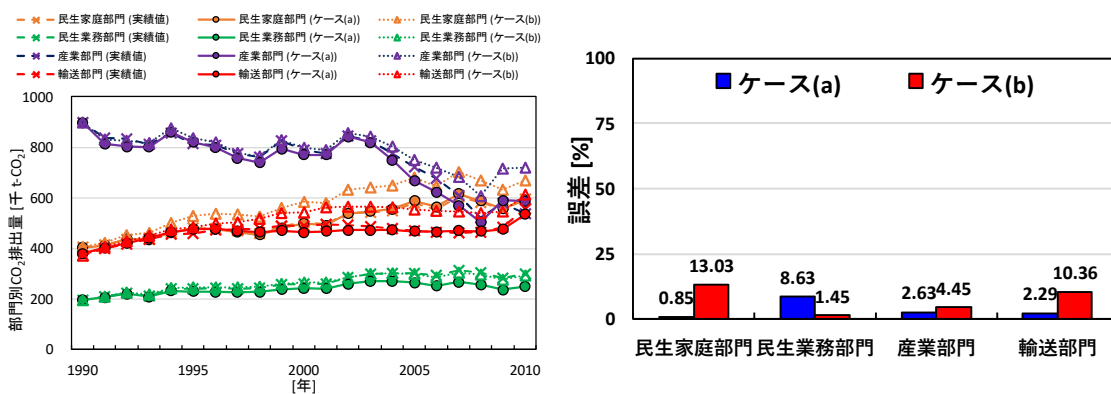


図 3.23 ケース(a)とケース(b)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (柏市)

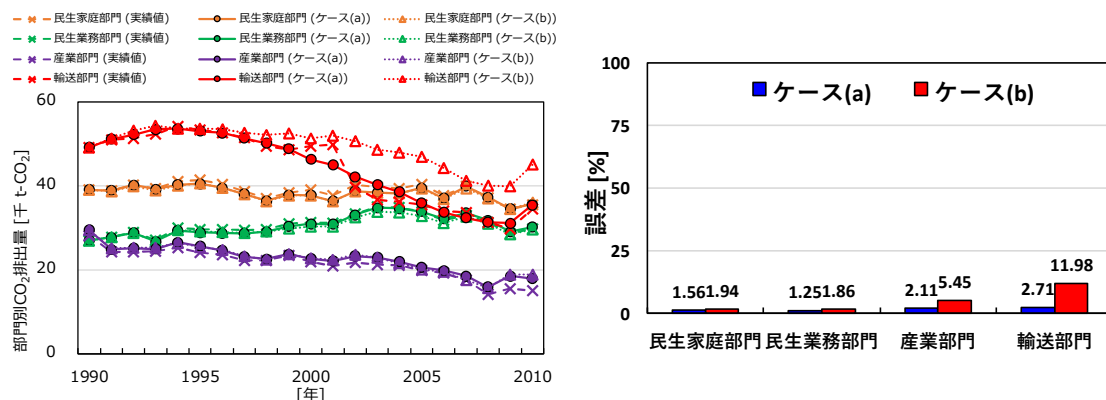


図 3.24 ケース(a)とケース(b)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較 (熊野市)

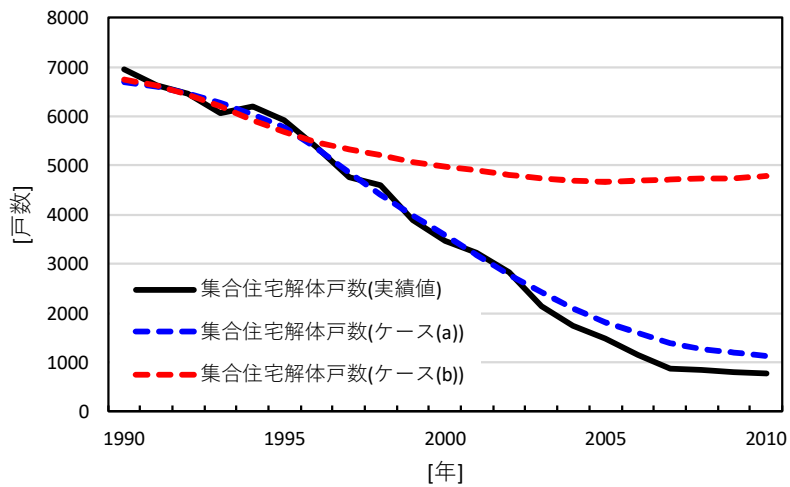


図 3.25 集合住宅解体戸数の実績値と計算値の比較 (福岡市)

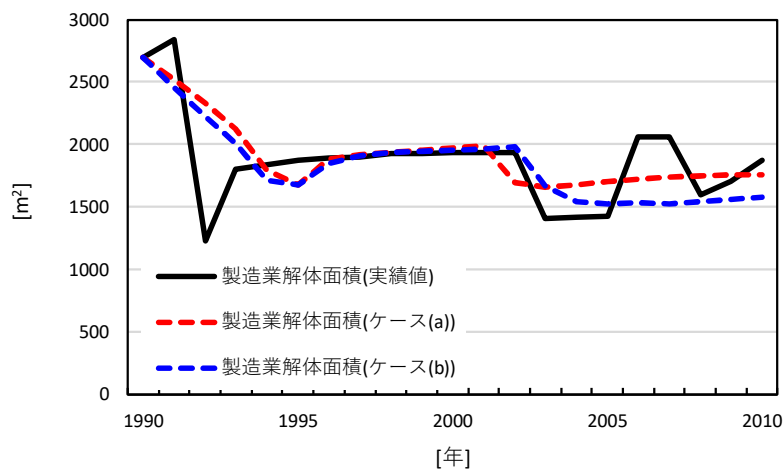


図 3.26 製造業解体面積の実績値と計算値の比較 (熊野市)

3.5.2 関数同定における解の探索範囲の設定による計算精度の比較

最適解の探索に関連する初期値や探索範囲などの様々な条件の中で(3.1 節)、ケース(a)に合わせて設定した最適解の探索範囲が問題であったと判断し、以下の通りにケース(b)の探索範囲の制約条件を修正した。

- ・ 制約条件 (2): x 値 0~3 の範囲で y 値の上限値が実績最大値の 1.2 倍→1.8 倍
- ・ 制約条件 (3): x 値 0~3 の範囲で y 値の下限値が実績最小値の 0.8 倍→0.2 倍

既存の探索範囲の設定理由は、21 年間(1990 年~2010 年)の実績値が急激に増減している

場合があり、将来予測結果の急激な発散や収束を防ぐために実績最大値と実績最小値から 1.2 倍と 0.8 倍に設定した。しかし、ケース(b)では、関数の同定に 11 年間(1990 年～2000 年)の実績値を利用しているため、既存の探索範囲をそのまま利用すると、2000 年以降から 2010 年まで急激に変化した活動量が良く計算できなかったと考えられる。この仮説を確認するため、下記のようにケース(c)を追加した。

- ・ケース(c): 1990 年から 2000 年までの実績値を利用して関数を同定(実績値の数:11 個)し、関数同定手法の探索範囲を修正

各都市におけるケース(a)とケース(b)とケース(c)による活動量の計算結果の誤差の比較を図 3.27～図 3.29 に示す。活動量の計算精度は、福岡市では、ケース(c)の産業部門と輸送部門での活動量の計算結果の誤差がケース(b)より小さくなり、全体誤差の平均も小さくなった。柏市では、ケース(c)の全体誤差の平均がケース(b)の結果と同様であるが、輸送部門の自家用貨物車輸送量(R₀₂)の計算誤差が大きく減少した。熊野市では、ケース(c)の民生業務部門のその他サービス業延床面積(M₀₁)や産業部門の建物着工面積(O₀₁)の誤差がケース(b)より増加することによってケース(c)の全体誤差の平均がケース(b)の結果よりやや大きくなった。福岡市・柏市・熊野市で、ケース(a)とケース(b)による活動量の計算値は、全て 50%以下になったため、部門別 CO₂ 排出量の計算を行った。

各都市におけるケース(b)とケース(c)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と各ケースの誤差(右)の比較を図 3.30～図 3.32 に示す。その結果、すべての都市のケース(c)による計算では、誤差が 10%未満になった。特に、福岡市では、ケース(c)の関数で計算することでケース(a)の関数で計算した結果と同様な計算精度が得られた。柏市と熊野市でも、ケース(c)の部門別 CO₂ 排出量の計算誤差は、活動量の計算結果によってケース(b)より誤差が大きくなった部門も存在するが、すべての部門で誤差が 10%未満という誤差許容基準を満たす結果が得られた。従って、ケース(c)で同定した関数は、長期予測に利用できると考えられる。

ケース(c)の検討結果により関数は、同定する際に利用する実績値の数を変化しても、適切な解の探索範囲を設定すれば、長期予測の計算を行う判断基準を満たす関数が得られることを確認した。

しかし、将来予測に影響を与える関数の形は実績値の数に左右される。本来は、関数同定に適切な実績値の数を検討する必要があるが、本研究で利用可能な実績値の数は限られて

いるため、この事項に対しては今後の課題にせざるを得ないと考えられる。

以上より、結論として、本論文では、暫定的にケース(a)(1990年から2010年までの実績値を利用)で関数を決定した。

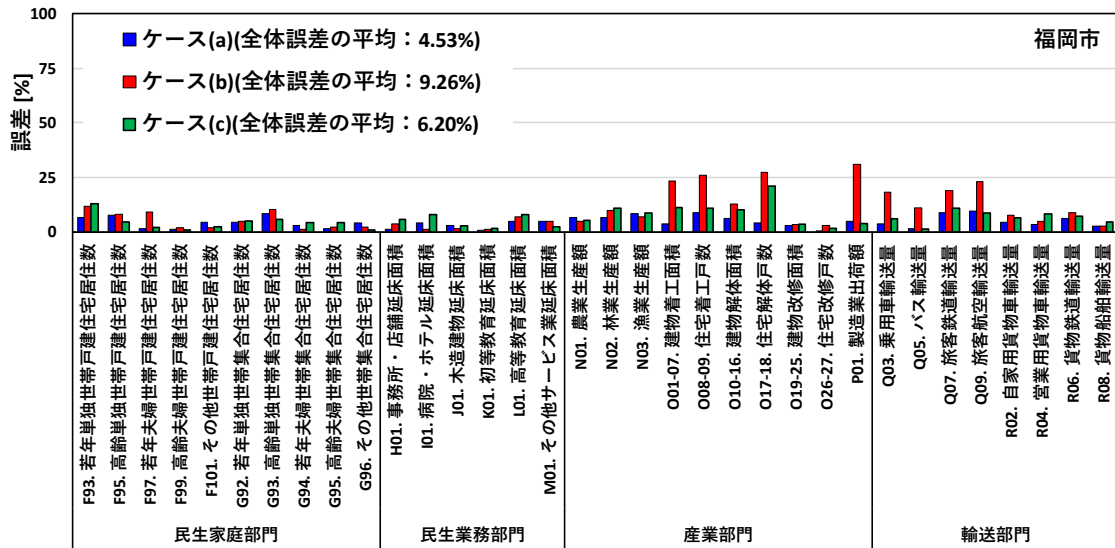


図 3.27 ケース(a)とケース(b)とケース(c)による活動量の計算結果の誤差の比較 (福岡市)

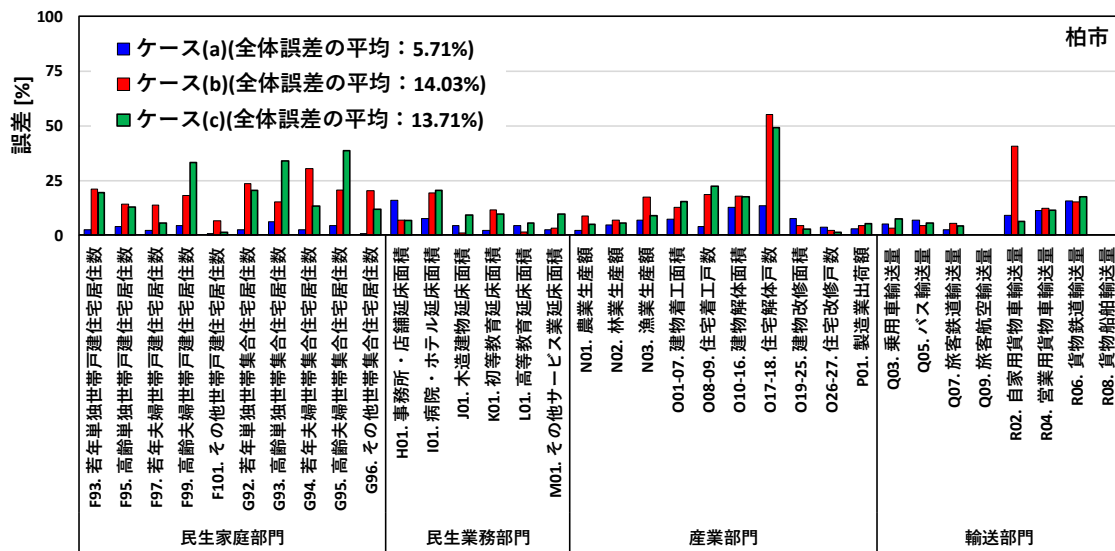


図 3.28 ケース(a)とケース(b)とケース(c)による活動量の計算結果の誤差の比較 (柏市)

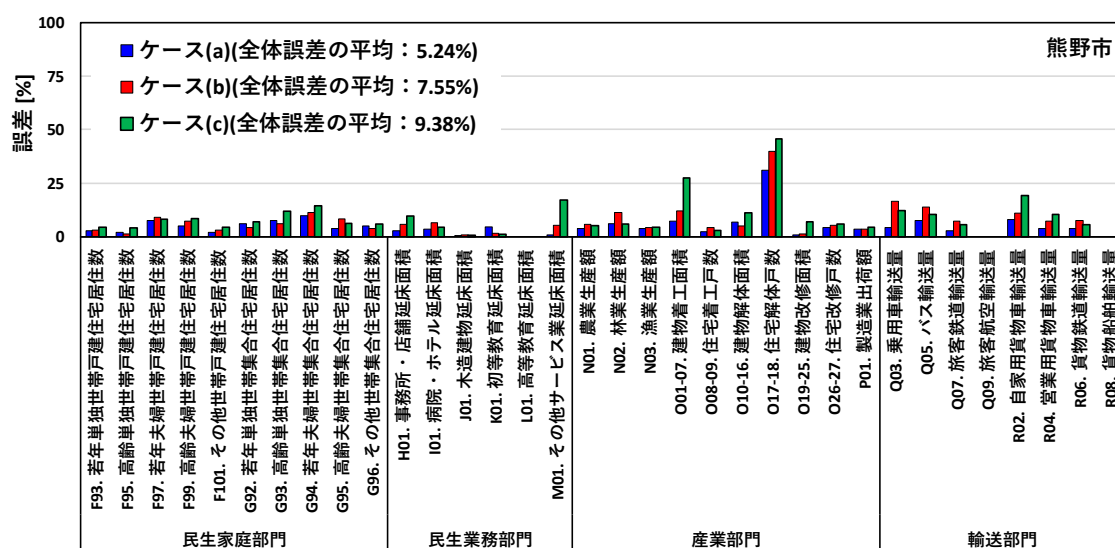


図 3.29 ケース(a)とケース(b)とケース(c)による活動量の計算結果の誤差の比較 (熊野市)

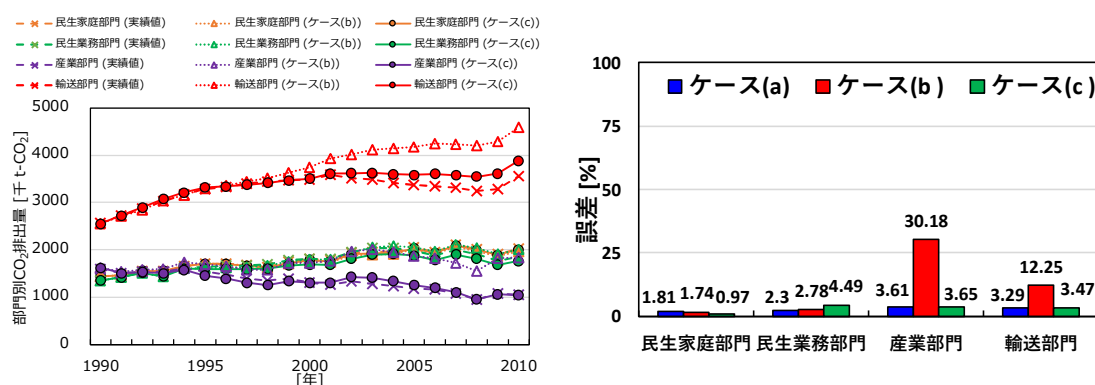


図 3.30 ケース(b)とケース(c)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と各ケースの誤差(右)の比較 (福岡市)

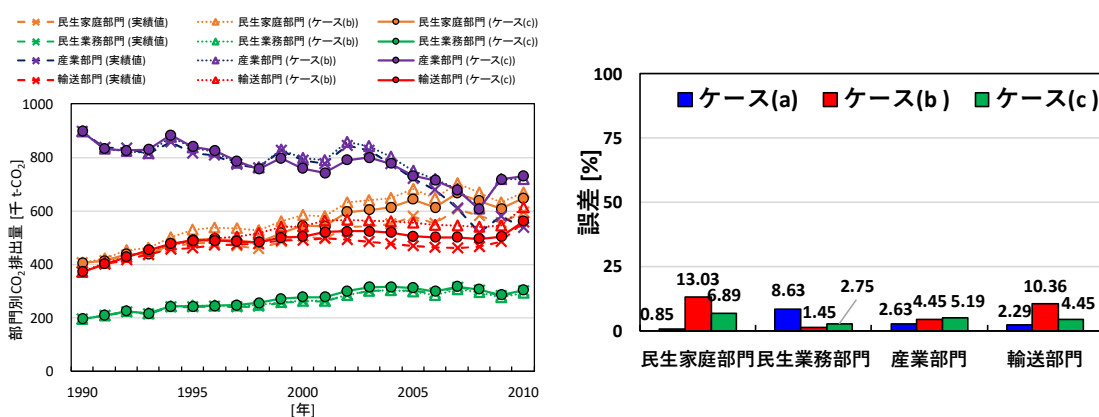


図 3.31 ケース(b)とケース(c)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と各ケース誤差(右)の比較 (柏市)

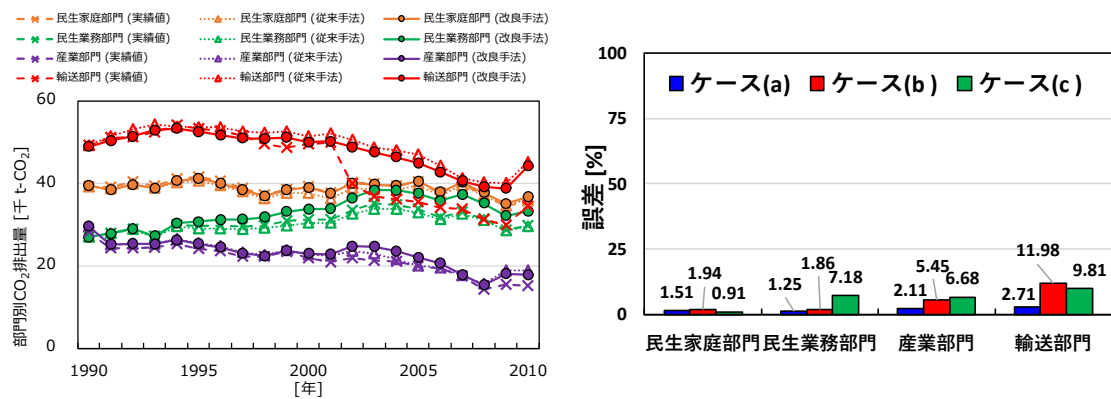


図 3.32 ケース(b)とケース(c)による部門別 CO₂ 排出量の計算結果の傾向(左)と各ケース誤差(右)の比較
(熊野市)

3.6 本章のまとめ

本章では、都市活動量予測モデルの適用性の向上と計算精度の向上の検討を目的とし、関数同定手法の改良を行った。さらに、従来手法と改良手法について、関数同定に要する時間や関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度を比較することで、改良手法を用いた都市活動量予測モデルの適用性の向上を検討した。また、改良手法を用いて関数同定の設定変更による計算精度の向上を検討し、関数同定に使う実績値の利用方法の検討を行った。

主な結論は以下の通りである。

<都市活動量予測モデルの適用性の向上の検討>

1) 従来手法と改良手法の関数同定に要する時間の比較

- ・ 改良手法では、計算方法を **SLSQP** に、同定する関数をロジスティックス形に変更し、また利便性を高めるために必要な入力情報も簡略化した。その結果、1つの都市の関数同定に要した総時間は約 147 時間から約 8 時間(約 1/18 倍)に短縮された。

2) 従来手法と改良手法の関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の計算精度の比較

- ・ 関数同定の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、多数の目的変数において、改良手法を用いることで誤差が減少した。特に一部の目的変数では、誤差が大きく減少した。その理由は以下の2つが考えられる。
 - ① 各手法の設定条件に伴う最適解の探索範囲の違いに起因しており、改良手法の探索範囲は従来手法より広く、これによって最適解に収束する可能性が高くなったと考えられる。
 - ② 改良手法は、同定する関数のパラメータ数が従来手法より多いため、関数同定の自由度が高く、より多くの最適解の探索が可能になったと考えられる。
- ・ 活動量の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、多数の活動量において、改良手法を用いることで誤差が減少した。その理由は、従来手法より改良手法を用いた関数同定のほうが計算精度が高いためである。
- ・ 部門別 CO₂ 排出量の計算精度は、福岡市・柏市・熊野市で、概ね改良手法を用いることで誤差が減少した。

これらの結果を総合すると、改良手法は、1つの都市モデルの関数同定に要する時間を短縮しながら、関数同定、活動量、部門別 CO₂ 排出量の各項目に於て、従来手法より高い計算

精度が得られることが分かった。従って、改良手法を用いることで都市活動量予測モデルの適用性の向上ができた結論付けた。

＜都市活動量予測モデルの計算精度の向上の検討＞

1) 関数同定の計算精度の結果

- ・ 一部の目的変数の計算結果を除いて、福岡市・柏市・熊野市で、因果関係事前設定なしケースのほうが、因果関係事前設定ありケースより計算精度が高かった。その理由は、因果関係事前設定なしケースでは、因果関係を指定するための制約条件がないため、関数を同定する自由度が因果関係事前設定ありケースより高いためである。

2) 活動量の計算精度の結果

- ・ 因果関係設定なしケースの活動量の計算については、福岡市・柏市で概ね良い計算精度が得られた(最大誤差 25%未満)。しかし、熊野市については、誤差が 50%以上となる項目(病院・ホテルの延床面)が確認された。
- ・ 因果関係事前設定なしケースは、都市の全体システムを考慮せずに各目的変数の関数を同定するため、熊野市の病院・ホテルの着工面積と延床面積のように活動量の計算精度が大きく低下する項目が生じたと考えられる。
- ・ 一方、因果関係設定ありケースの活動量の計算誤差は、福岡市・柏市・熊野市で、概ね良い計算精度が得られた(最大誤差 30%未満)。

これらの結果を総合して、活動量の計算については、因果関係を事前に設定する場合の方が高い計算精度が得られることが確認された。

＜関数同定の設定による計算精度の検討＞

- ・ 福岡市・柏市・熊野市における部門別 CO₂ 排出量の計算誤差の結果、ケース(a)は全ての部門の計算値の誤差が 10%未満となり、将来予測に利用可能だと判断した。しかし、ケース(b)はすべての都市で計算値の誤差が 10%を超える部門が存在し、将来予測の計算に適切ではないと判断した。
- ・ ケース(b)に関数同定手法の探索範囲の設定を修正したものをケース(c)とし、福岡市・柏市・熊野市の部門別 CO₂ 排出量を計算した結果、すべての都市でケース(c)の

部門別誤差は、10%未満となり、ケース(c)から得られた関数は、長期予測に利用可能だと判断した。この結果により、実績値の数を減らして関数を同定しても、関数を探索する条件を変化させることで長期予測の計算を行う判断基準を満たす関数が得られた。

- ・ しかし、ケース(a)とケース(c)で同じ計算精度を得られたが、将来予測に影響を与える関数の形は実績値の数に左右される。本来は、関数同定に適切な実績値の数を検討する必要があるが、本研究で利用可能な実績値の数は限られているため、この事項に対しては今後の課題にせざるを得ないと考えられる。

以上より、結論として、本研究では、暫定的にケース(a)(1990年から2010年までの実績値を利用)で関数を決定した。

参考文献

- 1) Dieter Kraft, “A Software Package for Sequential Quadratic Programming“, DFVLR-FB pp.88-28, 1988.
- 2) Andrew D. Wendor, Emilio Boteroy, and Juan J. Alonso., Comparing Dierent Off-the-Shelf Optimizers' Performance in Conceptual Aircraft Design, 17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 13-17 June 2016, Washington, D.C.
- 3) Chen, Y., 2014. An allometric scaling relation based on logistic growth of cities. Chaos, Solitons & Fractals 65, pp.65–77.

第4章

低炭素技術普及予測モデルの構築

4.1 太陽光発電パネルの普及に関連する社会条件

本章では、活動量と環境補助金の変化に応じた低炭素技術の普及率を予測するために、低炭素技術普及予測モデルを構築することを目的とする。低炭素技術普及予測モデルの構築にあたって、対象地域と対象技術は過去の実績値が多い柏市の戸建住宅用太陽光発電パネル(Photovoltaics 以下、PV)とした。さらに、柏市の戸建住宅への PV 普及を対象として普及率計算の精度検証と長期予測を行った。

PV 普及率を計算するモデルを構築する前提として、PV 普及に係わる補助制度を把握する必要がある。従って、まず本節では、戸建住宅への PV 普及に係わる補助制度について説明する。PV 普及に係わる補助制度は、PV 普及率の計算に利用される(4.2 節)。

● 固定価格買取制度¹⁾

固定価格買取制度(Feed-in tariff 以下、FIT) とは、再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で一定期間買い取る制度である。FIT は、地球温暖化防止対策として再生可能エネルギーの導入を促進させる目的で導入される。日本では、2009 年の太陽光発電をはじめとして、2012 年以降は風力、水力、地熱、バイオマスの FIT が実施されている。買取期間と買取価格は、エネルギー種類別、発電容量別に異なる。本研究の対象である PV の買取期間は契約開始から 10 年間であり、買取価格は表 4.1 の通りである。表 4.1 の値は、4.2 節の PV 導入選択率の計算に利用される。

表 4.1 太陽光発電パネルの発電容量 10kW 未満の買取価格の経年変化*

| 年 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 (予定) |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|
| 買取 価格 (円/kWh) | 48 | 48 | 42 | 42 | 38 | 37 | 33 | 31 | 28 | 26 | 24 |

* 2017 年からは、地域によって買取価格が異なる

● 環境補助金

補助金とは、地方自治体から個人や団体に対して、特定の目的のためになされる金銭的給付である²⁾。本研究では、他の用途の補助金と区別するために、PV 普及に利用される補助金を環境補助金と定義した。住宅用 PV に関する国からの補助金制度は 1994 年から開始さ

れ、2013 年まで行われた。ただし、2006 年から 2008 年まで交付が中断された時期がある^{3),4)}。

近年は、地球温暖化対策の一環として、低炭素技術の普及を促進させるために補助金を利用する自治体が増えている。例えば、柏市は 2014 年から「柏市エコハウス促進総合補助制度」を実施し、住宅用 PV などの様々な低炭素技術の導入に補助金を支援している⁵⁾。

本研究で利用する環境補助金を表 4.2 と表 4.3 に示す。各表の値は、4kW の PV を設置すると仮定して環境補助金の交付条件に応じて計算した値である。ただし、本研究では、柏市の戸建住宅への PV 普及件数は 2003 年から確認できるため、2003 年の普及件数は初期値として入力し、2004 年から毎年の PV 導入件数を計算している。そのため、表 4.2 の国からの補助金は 2004 年から 2013 年までを適用した(2005 年から 2008 年までは国からの環境補助金の交付が中断)。表 4.2 と表 4.3 の値は、4.2 節の PV 導入選択率の計算に利用される。

表 4.2 国の環境補助金 (交付基準に従って著者が計算、4kW 基準)

| 年 | 2004 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|
| 環境補助金 (万円/戸) | 18 | 28 | 28 | 19.2 | 12 | 6 |

表 4.3 柏市の環境補助金 (交付基準に従って著者が計算、4kW 基準)

| 年 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|--------------|------|------|------|------|------|
| 環境補助金 (万円/戸) | 6 | 12 | 9 | 7 | 7 |

4.2 低炭素技術普及予測モデルの構築

4.2.1 低炭素技術普及予測モデルの構成

低炭素技術普及予測モデルの全体像を図 4.1 に示す。低炭素技術の普及予測モデルに属する全ての変数はアルファベット S の記号で始まり、変数間の関係は矢印で繋がれている。各変数は性質によってストック、フロー、コンバーターと呼ばれるブロックで表されている。低炭素技術の普及予測モデルの変数構成と計算式を表 4.4 に示す。

毎年の PV 普及率(S_{01})計算は、 t 年までの PV 普及件数を t 年の実質稼働戸建住宅戸数で除することで求められる。 t 年の実質稼働戸建住宅戸数は、空き家を除いた戸建住宅戸数を意味し、この変数は都市活動量予測モデルから計算される。他方で、 t 年までの PV 普及件数(S_{02})は、PV 普及開始年から t 年までの戸建住宅への PV 導入件数を合算した値である。 t 年の PV 導入件数(S_{04})は、 t 年の PV を未導入した戸建住宅戸数に t 年の PV 導入選択率を掛けて計算される。 t 年の PV 導入選択率(S_{06})は、実際の PV 導入選択率データと実際の PV 初期コスト回収期間の関係から推定した計算式によって計算される。 t 年の PV 初期コスト回収期間は、PV 導入に必要な初期コストを 1 年間で得られる利益で除することで計算される。

PV 導入選択率計算式の推定方法は 4.4.2 項で説明する。

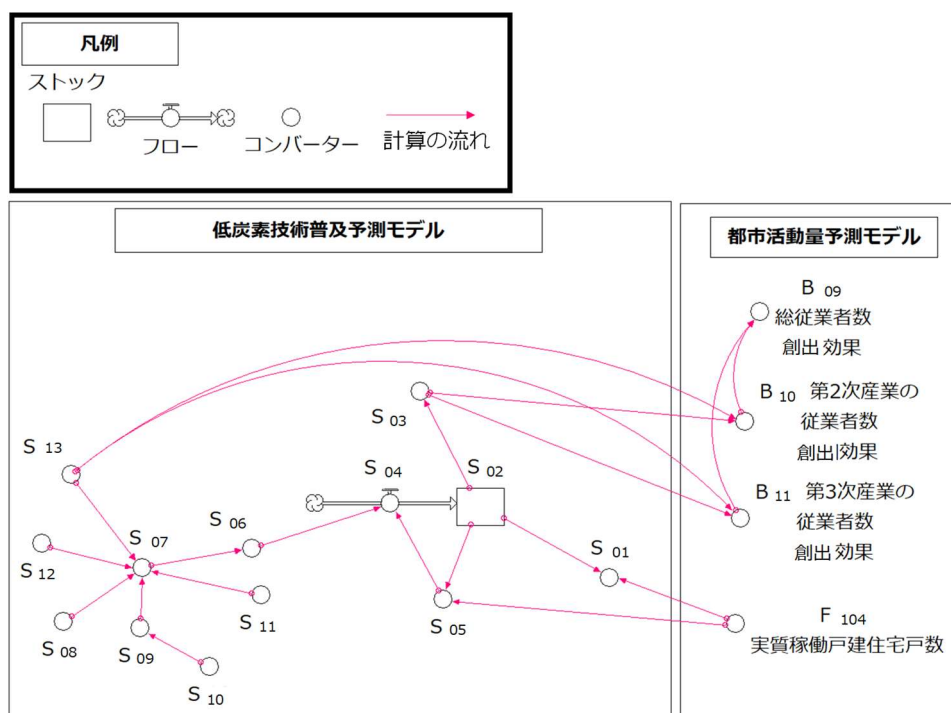


図 4.1 低炭素技術普及予測モデルの全体像

表 4.4 低炭素技術普及予測モデルの変数構成と計算式

| 変数 [略語] | 計算式 |
|---------------------------|---|
| S01. PV 普及率 | $\frac{S_{02}(t)}{F_{104}(t)}$ |
| S02. t 年までの PV 普及件数 | $\sum_{b=2003}^t S_{04}(t)$ |
| S03. $(t-1)$ 年までの PV 普及件数 | $S_{02}(t-1)$ |
| S04. t 年の PV 導入件数 | $S_{05}(t) \times IR(t)$ |
| S05. PV を未導入した戸建住宅戸数 | $F_{104}(t) - S_{03}(t)$ |
| S06. PV 導入選択率 [IR] | $0.612e^{-0.183 \times PP(t)}$ |
| S07. PV 初期コスト回収期間 [PP] | $\frac{IC(t) \times 4 + C - S(t)}{EP \times (B(t) \times SC + FIT(t) \times ES)}$ |
| S08. PV モジュール価格 [IC] | $3011773.960x^{-0.574}$ |
| S09. 家庭用電気料金 [B] | $9.456 \times TPR + 14.999$ |
| S10. 火力発電比率 [TPR] | なし(実績値入力) |
| S11. 買取価格 [FIT] | なし(実績値入力) |
| S12. 環境補助金 | なし(実績値入力) |
| S13. 年間予想発電量 [EP] | なし(実績値入力) |

ここで、 t は計算年度、 x は基準年からの経過年数

4.2.2 太陽光発電パネル（PV）導入選択率計算式の推定

実際に戸建住宅に PV を導入する際には、多様な周辺条件と考慮事項が存在する。しかし、個々の家庭の状況を全て反映するには限界がある。従って、本研究では、いくつかの制限条件を設定した上で、戸建住宅を対象とした PV 導入選択率の計算式の推定を行った。設定した条件を以下に記す。

- ・制限条件(1)：PV の仕様、発電条件、売電に関する条件は、全て同一
- ・制限条件(2)：導入選択率の計算において新築住宅と既築住宅は区別しない

制限条件(1)は、毎年の PV 初期費用回収期間を推定するための条件である。制限条件(2)については、環境補助金の交付対象は既築住宅だけであるため、新築住宅と既築住宅の PV 導入選択率計算式を区別しなかった。

PV 導入選択率の推計式を図 4.2 に示す。この式は柏市の 2004 年から 2013 年までの実際

の PV 導入選択率⁶⁾と実際の PV 初期コスト回収期間のデータから推定したものである。ただし、回収期間が短くなる時の PV 導入選択率に関する既存の情報は存在しないため、伊藤ら⁷⁾の研究を参照し仮定した。それによれば、日射気候区分別の PV 導入関心の有無という調査において、柏市が属している地域では、回答者の 61%が PV 導入に関心があるという結果が示されている。この結果から、PV 導入に関心がある人は、回収年数が 0 になると未導入世帯のうち 61%の世帯が PV を導入すると仮定した。また、同研究では、初期費用が 200 万円前後の場合、回収期間が 5 年で PV 導入選択率が 25%になるとの知見も得られている。よって、本研究でもその成果を参照し、図 4.2 にその情報を反映したうえで、PV 導入選択率の計算式を推定した。

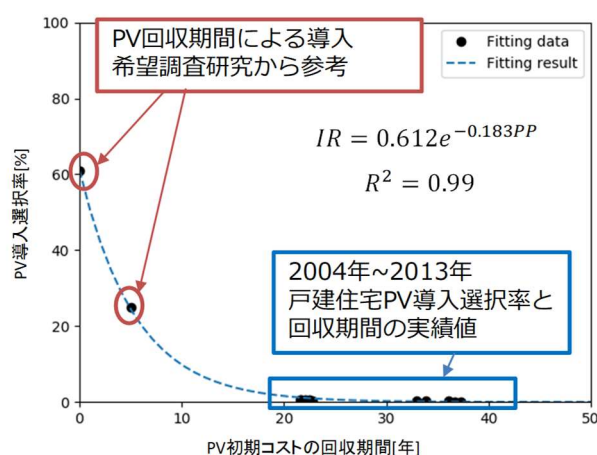


図 4.2 戸建住宅用 PV における PV 初期コストの回収期間と PV 導入選択率の関係

PV 導入選択率を求めるための回収期間は、式 4.1 によって算出される。回収期間は、初期コストを毎年の利益で除して求められる。初期コストには PV モジュール費用、工事費、環境補助金に関わる。なお、1kW 当たり PV モジュールの価格は時間の経過によって減少するため、1993 年から 2011 年までの実際の 1kW 当たり PV モジュールの価格データを使って近似式を求めた(図 4.3)³⁾。そして、本研究では、PV を 4kW 設置すると設定しているため、式 4.1 の 1kW 当たり PV モジュールの価格(IC)に 4 を掛けた。工事費(C)に関しては、調査報告書から 78,859 円/kW に固定した⁸⁾。環境補助金(S)が交付されれば初期投資額が減少して回収期間が短くなる。利益については、PV で発電した電力を使用するほど、電気代を節約できる。家庭用電気料金(B)は、電気の発電に使われる発電所の燃料費、人件費などによって決定されることが知られており、そのうち燃料費は約 40%を占めると知られている(2012 年、東京電力の例)⁹⁾。そして、化石燃料を利用する発電所は、他の発電方法に比べて燃料費の単価が高い。従って、電源構成のうち化石燃料を利用する発電が増加すると、電気料金も上昇することが知られている¹⁰⁾。本研究では、このような関係に着目して、2003 年

から 2016 年までの家庭用電気料金と電源構成のうち火力発電の比率との関係から家庭用電気料金を線形補完することで求めた(図 4.4)¹¹⁾。また、電源構成の変化は 2030 年までは経済産業省の需給計画¹²⁾を用いた。2030 年以降は 2030 年の値で固定した。また、買取価格(*FIT*)は、2009 年から 2019 年までは経済産業省の改正 FIT 資料の値を利用した(表 4. 1)。買取価格の目標に関して、経済産業省は、2019 年には家庭用電気料金並み、2020 年以降の早期に電力市場価格(一般企業が発電事業者から購入する電力の価格)並みにする計画を発表している¹³⁾。しかし現在のところ、目標達成の具体的な計画はまだ発表されていない。そのため、本研究では、経済産業省の 2019 年の計画に従い、2020 年以降の買取価格についても図 4.4 に示すように家庭用電気料金の算定式に従うと仮定した。自家消費比率(*SC*)、売電比率(*ES*)は経済産業省の資料からそれぞれ 49%、51%に固定した¹⁴⁾。年間予想発電量(*EP*)は、4.2.3 項で計算を行った。

$$PP(t) = \frac{(IC(t) \times 4) + C - S(t)}{EP \times (B(t) \times SC + FIT(t) \times ES)} \quad \dots \text{式 4.1}$$

ここで、*PP* : 回収期間 [year]、*IC* : PV モジュール価格 [円]、*C* : 工事費[円]、*S* : 環境補助金 [円]、*EP* : 年間予想発電量 [kWh/年]、*B* : 家庭用電気料金 [円/kWh]、*FIT* : 買取価格 [円/kWh]、*SC* : 自家消費比率 [-]、*ES* : 売電比率 [-]、*t* : 年度 [年]

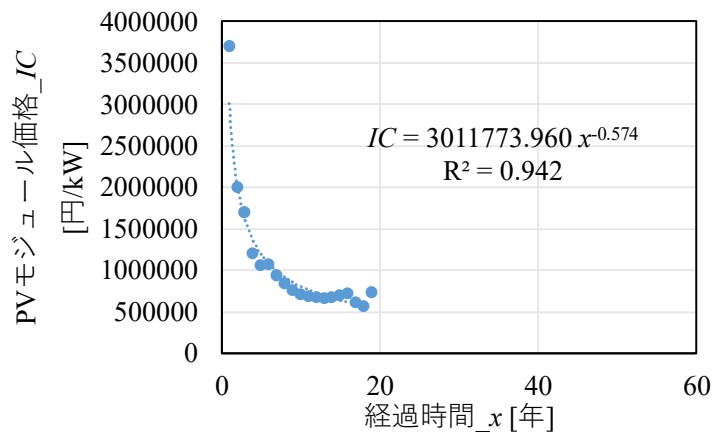


図 4.3 時間経過による PV モジュール価格の変化推移

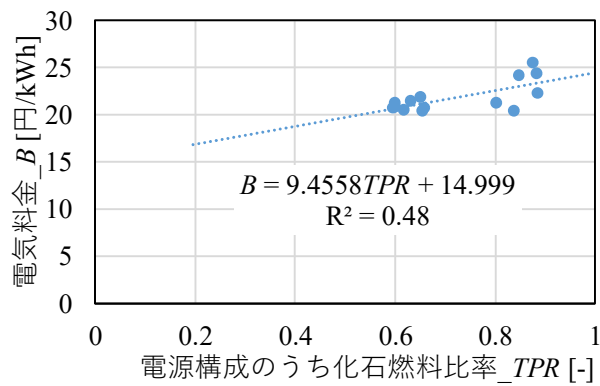


図 4.4 電源構成のうち化石燃料比率と家庭用電気料金の関係

4.2.3 年間予想発電量の計算

戸建住宅に設置する PV の発電容量は 4kW と仮定し、年間予想発電量は式 4.2 を用いて算出した。また、式 4.2 の K と Q は、太陽光発電協会の資料を参考にして、それぞれ 0.73 と 4kWh/m²/day (千葉県、真南で傾斜角 30 度の平均日射量)に設定した¹⁵⁾。計算した PV1 件の年間予想発電量を表 4.5 に示す。

$$EP=Q\times K\times P\times 365/I$$
 ... 式 4.2

ここで、EP：年間予想発電量 [kWh/年]、Q：システム設置面積当たり日積算日射量の年平均 [kWh/m²/日]、K：損失係数 [-]、P：導入システムの発電容量 [kW]、I：標準状態における日射強度 (=1)[kW/m²]

表 4.5 PV1 件の年間予想発電量

| 年間予想発電量 [kWh/年] |
|-----------------|
| 4263.20 |

4.3 モデルの連結のための都市活動量予測モデルの変更

低炭素技術普及予測モデルは、PV 普及率の計算のために、都市活動量予測モデルにおける従業者セクタと戸建住宅セクタとの連結を行う必要がある。以下に各セクタの変更内容を説明する。

4.3.1 従業者セクタ

再生可能エネルギーの導入は、CO₂を削減する直接的な効果があるだけでなく、他の産業に対しても影響すると知られている^{16),17)}。なかでも、PV については、普及によって従業者創出効果が発生することが知られている¹⁸⁾。そのため、本研究では、松本¹⁹⁾らが日本を対象に算定した、普及した PV の年間発電量当たり従業者創出効果を考慮した。考慮する効果の内容は表 4.6 に示す。表 4.6 の値は、低炭素技術普及予測モデルから計算された年間 PV 発電量により都市活動量予測モデルの従業者セクタで新しい従業者を計算することに利用される。

表 4.6 PV 導入による従業者創出効果¹⁹⁾

| 従業者の創出分野 | 人・年/GWh |
|--------------|---------|
| 製造（第2次産業） | 0.93 |
| 建設（第2次産業） | 0.35 |
| 保守・運用（第3次産業） | 0.69 |

変更した従業者セクタの計算フローを図 4.5 に示す。図 4.5 の青い矢印は低炭素技術の普及予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって従業者セクタに新しく追加された計算の流れである。従業者セクタの変数の変更内容を表 4.7 に示す。表 4.7 には、計算式が変更された既存変数や追加された変数が示されている。本研究では、普及した PV の年間発電量によって従業者数が増加する間接的な効果を考慮する。そのため、都市活動量予測モデルの従業者セクタに新しい変数(表 4.7 の B₀₉、B₁₀、B₁₁)を追加し、低炭素技術普及予測モデルの PV 普及戸数と年間発電量の変数を連結し、PV 普及によって新しい従業者雇用効果が発生するようにした。

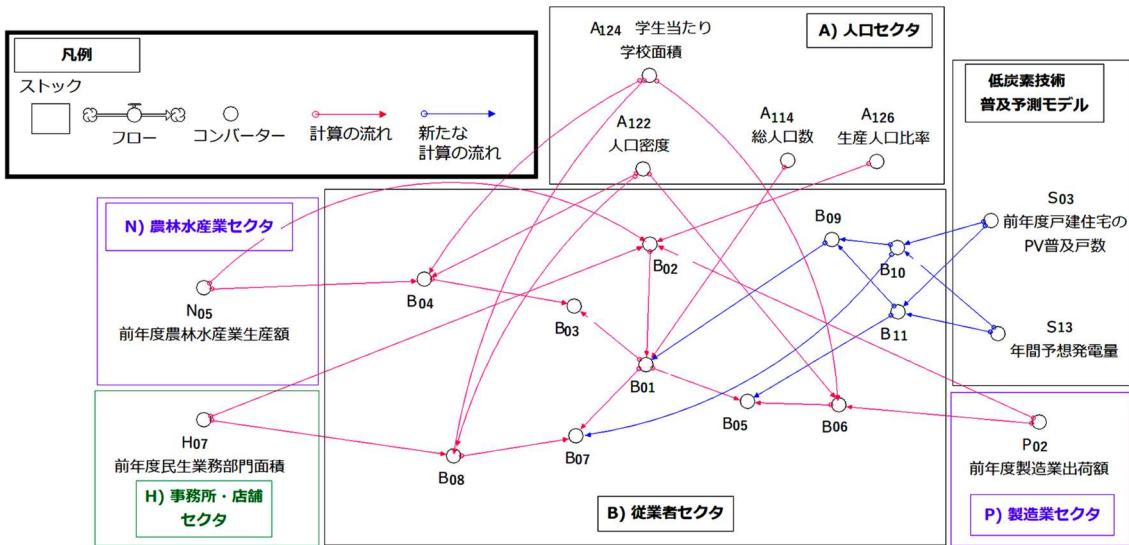


図 4.5 変更した従業者セクタの計算フロー

表 4.7 従業者セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|----------------------|---|---|
| B01. 総従業者数 | $A_{114}(t) \times (B_{01}(b) / A_{114}(b)) \times B_{02}(t)$ | $(A_{114}(t) \times (B_{01}(b) / A_{114}(b)) \times B_{02}(t)) + B_{09}(t)$ |
| B05. 第 2 次産業の従業者数 | $B_{01}(t) \times (B_{05}(b) / B_{01}(b)) \times B_{06}(t)$ | $(B_{01}(t) \times (B_{05}(b) / B_{01}(b)) \times B_{06}(t)) + B_{10}(t)$ |
| B07. 第 3 次産業の従業者数 | $B_{01}(t) \times (B_{07}(b) / B_{01}(b)) \times B_{08}(t)$ | $(B_{01}(t) \times (B_{07}(b) / B_{01}(b)) \times B_{08}(t)) + B_{11}(t)$ |
| B09. 総従業者数の雇用効果 | 既存変数なし | $B_{10}(t) + B_{11}(t)$ |
| B10. 第 2 次産業の従業者雇用効果 | 既存変数なし | $EP \times S_{03}(t) \times 0.0000128$ |
| B11. 第 3 次産業の従業者雇用効果 | 既存変数なし | $EP \times S_{03}(t) \times 0.0000069$ |

ここで、 t は計算年度、 b は初年度値

4.3.2 戸建住宅セクタ

変更した戸建住宅セクタの計算フローを図 4.6 に示す。図 4.6 の青い矢印は低炭素技術の普及予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって戸建住宅セクタに新しく追加された計算の流れである。戸建住宅セクタの変数の変更内容を表 4.8 に示す。表 4.8 には、新しく追加された変数が示されている。低炭素技術の普及予測モデルの PV 普及率を計算するためには、空き家を除く実際に PV を導入可能な戸建住宅戸数を計算する必要がある。そのため、戸建住宅セクタに PV を導入可能な戸建住宅戸数を計算する新しい変数を追加した(表 4.8)。この変数は、論理式を用いて戸建住宅稼働率(F_{90})が 1 より大きいと、総戸建住宅戸数(F_{42})を返す。逆の場合は、総戸建住宅戸数に戸建住宅稼働率を乗算し、稼働している戸建住宅戸数を返す。

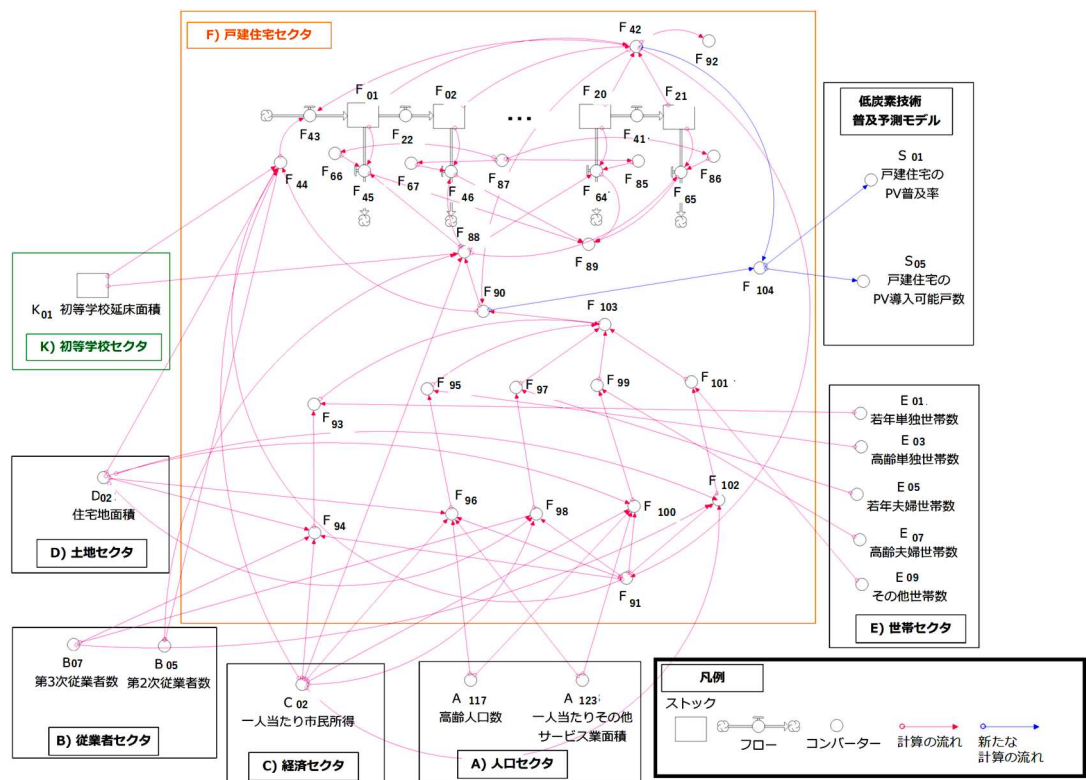


図 4.6 変更した戸建住宅セクタの計算フロー

表 4.8 戸建住宅セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|-------------------------------|---------|---|
| F ₁₀₄ . 実質稼働戸建住宅戸数 | 既変数なし | IF(F ₉₀ (<i>t</i>)>1)THEN(F ₄₂ (<i>t</i>))ELSE(F ₉₀ (<i>t</i>)×F ₄₂ (<i>t</i>)) |

ここで、*t* は計算年度

4.4 太陽光発電パネル普及率の長期予測

4.4.1 低炭素技術普及予測モデルの精度検証結果

低炭素技術普及予測モデルの精度検証を行うために、柏市の PV を事例として計算を行った(図 4.7)。誤差の計算には第 2 章で説明した Revised MAPE を利用した。

PV 普及率の精度検証期間は、実績値が存在する 2003 年から 2013 年までである。PV 普及率を計算した結果、計算値は実績値の増加傾向を捉えていた。なお、2011 年から 2012 年間の PV 普及率について、計算値は急激に増加する結果となったが、これは 2011 年に PV 導入コストの減少や、運営コストの増加が相次いで起こったため、PV 回収期間が短くなったことが原因である。Revised MAPE 値は、20%未満で高い計算精度が得られた。従って、本研究で構築した低炭素技術普及予測モデルを用いて PV 普及率の将来予測が可能だと判断した。

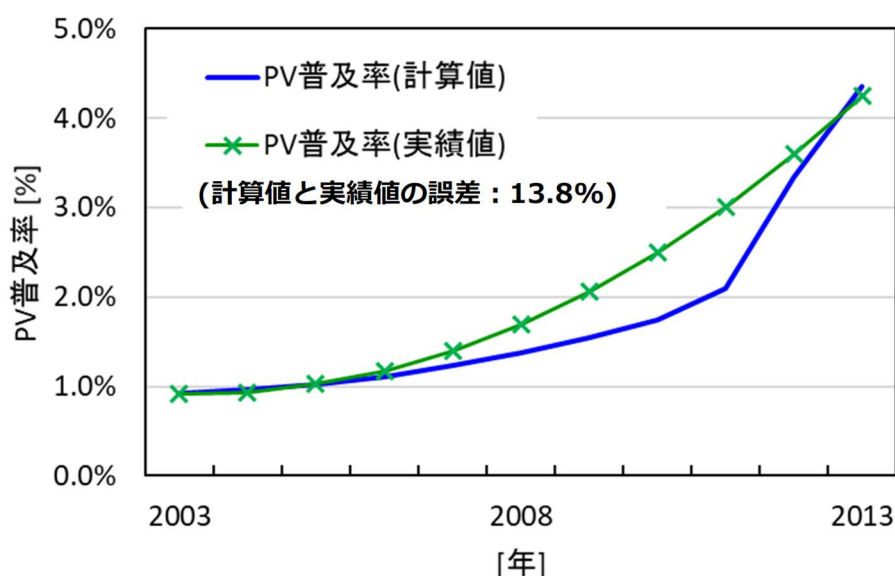


図 4.7 戸建住宅への PV 普及率の計算値の実績値の比較

4.4.2 太陽光発電パネル普及の長期予測のための設定条件

低炭素技術の普及予測モデルと都市活動量予測モデルを用いて、柏市の戸建住宅セクタを対象として、環境補助金の変化に伴う PV 普及率の長期予測を行う。PV 普及率予測のための設定条件を表 4.9 に示す。ケースは 1 から 3 までであり、各ケースは、2019 年からの一件当たりの環境補助金額によって分類した。ケース 1 の環境補助金は、2018 年の制度をそのまま維持すると仮定した。ケース 2 の環境補助金は、過去の柏市の環境補助金の実績値の

中で、最も高かった環境補助金に設定した。ケース3の環境補助金は、PVの普及を促進させるため、1kW当たり5万円(計20万円/4kW)の環境補助金を仮定した。そのほか、全てのケースでPV導入開始時とFIT制度開始時については、実際のデータを参照してそれぞれ2003年と2009年に設定した。また2004年から2018年までの環境補助金は、実績値を適用した。

表 4.9 PV 普及率予測のための設定条件

| ケース名 | 環境補助金の変化 | 共通条件 |
|-------|--|---|
| ケース 1 | ・ 2019 年から：7 万円/件 (2018 年の環境補助金を固定) | ・ PV 適用対象：柏市、戸建住宅 |
| ケース 2 | ・ 2019 年から：12 万円/件 | ・ PV 導入開始：2003 年 ・ 環境補助金：2018 年まで表 4.2 と表 4.3 参照 |
| ケース 3 | ・ 2019 年から：20 万円/件 | ・ FIT 制度開始：2019 年まで表 4.1 参照 |

4.4.3 太陽光発電パネル普及率の長期予測結果

本研究では、日本の長期CO₂削減目標年度を参考とし、長期予測期間を2050年までに設定し、長期予測を実施した。長期予測結果は、全てのケースで、時間経過とともにPV普及率が大きく増加する見込みであるとの結果が得られた。2018年の環境補助金をそのまま維持するケース1のPV普及率は、2050年の時点で39.6%になる見込みである。2019年から環境補助金を増加させるケース2とケース3のPV普及率は、2050年の時それぞれ42.4%と47.2%になる見込みである。この結果より、一件当たりの環境補助金が増加するほど、普及率が増加することが明らかになった。これは、環境補助金が増加すると、普及率が増加するという既往研究²⁰⁾の知見と同様である。

従って、CO₂削減施策としてPV普及促進を検討する場合、一件当たりの環境補助金の増加は効果的であると考えられ、それに合わせて環境補助金全体の予算の増加も必要だと考えられる。

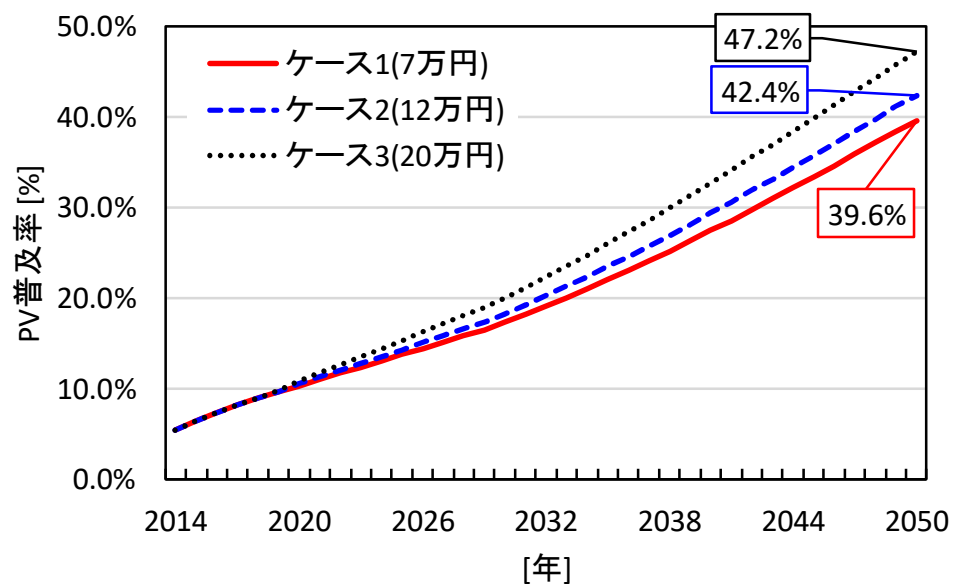


図 4.8 ケース別戸建住宅への PV 普及率の長期予測の結果

4.5 本章のまとめ

本章では、活動量と環境補助金の変化に応じた低炭素技術の普及率の変化を予測するために、低炭素技術の普及予測モデルを構築した。対象地域と対象技術は、過去の実績値が多い柏市の戸建住宅用 PV とした。さらに、柏市の戸建住宅への PV 普及を対象として、普及率計算の精度検証と長期予測を行った。主な結果は以下の通りである。

<モデルの精度検証の結果>

- ・ PV 普及率の精度検証の結果、計算値は、2003 年から 2013 年までの実績値の増加傾向を捉えていることを確認した。

<太陽光発電パネル普及率の長期予測の結果>

- ・ PV 普及率の長期予測結果、ケース 1(7 万円)の普及率は、2050 年の時 39.6%になる見込みである。ケース 2(12 万円)とケース 3(20 万円)の PV 普及率は、2050 年の時それぞれ 42.4%と 47.2%になる見込みである。環境補助金が増加するほど、普及率が増加することが分かった。
- ・ CO₂削減施策として PV 普及促進を検討する場合、環境補助金の増加が効果的であると考えられ、それに合わせて環境補助金の予算の増加も必要だと考えられる。

<本章の限界>

- ・ 本章の PV 普及率の計算は、PV 普及率の全体傾向の把握に注目しており、個々人の PV 導入条件は考慮していない。実際の戸建住宅への PV 導入においては、世帯の収入や人員によって PV の仕様や導入選択率が変化する可能性があるが、これに関する既往の知見はないため、今後大規模アンケート等によって定量的データが得られた場合に考慮するものと想定し、今後の課題とした。

参考文献

- 1) 経済産業省, 資源エネルギー庁: 再生可能エネルギーの固定価格買取制度,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/index.html (アクセス日 : 2018.10)
- 2) 今井良幸: 補助金の意味と支出についての法的な根拠について,
<http://www.city.kaizu.lg.jp/docs/sankou.pdf> (アクセス日 : 2018.10)
- 3) 経済産業省: 資料 3 再生可能エネルギーを巡る現状と課題, p.46, 2014
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/shin_ene/pdf/001_03_00.pdf (アクセス日 : 2018.10)
- 4) 太陽光発電総合情報: <http://standard-project.net/solar/hojokin.html> (アクセス日 : 2018.10)
- 5) 柏市: 平成 30 年度柏市エコハウス促進総合補助制度,
<http://www.city.kashiwa.lg.jp/ecosite/ondanka/shimin/p045418.html> (アクセス日 : 2018.10)
- 6) 総務省統計局: 住宅・土地統計調査 H15, H20, H25
- 7) 伊藤雅一, 小田 拓也, 宮崎 隆彦, 川崎 憲広, 田口 晋也, 杉原 弘恭, 秋澤 淳, 黒川 浩助:
全国アンケート調査による太陽光発電システムに関する導入意識とコンジョイント分析, エネルギー・資源, Vol.33, Vo.6, pp.1-8, 2012
- 8) 経済産業省: 平成 27 年度エネルギー消費状況調査, p.13, 2016
- 9) 経済産業省: (資料 4-2)電気料金の水準, p.2, 2015,
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/kihonseisaku/pdf/002_04_02.pdf (アクセス日 : 2018.10)
- 10) 経済産業省: エネルギー白書 2015, 第 1 部, 第 3 章, 第 1 節, 2. 電気料金の状況,
<http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/1-3-1.html> (アクセス日 : 2018.10)
- 11) 経済産業省, 資源エネルギー庁: 平成 29 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2018), <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/2-1-4.html> (アクセス日 : 2018.10)
- 12) 経済産業省: 長期エネルギー需給見通し関連資料, p.65, 2015
- 13) 経済産業省: 改正 FIT 法に関する直前説明会, p.20, 2017
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/kaisei/fit_2017setsumei.pdf
(アクセス日 : 2018.10)
- 14) 国土交通省: 太陽光発電設備の一次エネルギー消費量削減効果について,
<http://www.mlit.go.jp/common/000222326.pdf> (アクセス日 : 2018.10)
- 15) 一般社団法人太陽光発電協会: 公共・産業用太陽光発電システム手引書, pp.96-97, 2012

- 16) 環境省：低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言, p.272, 2010
- 17) みずほ総合研究所：低炭素まちづくりを通じた地域の自律的发展~再生可能エネルギー導入事例に学ぶ成功要因~, pp.20-21, 2010
- 18) 環境省：第2章.CO₂削減効果算定の手順と留意点, p.28, https://www.env.go.jp/earth/report/h24-05/02_chpt2.pdf (アクセス日：2018.10)
- 19) 松本直也, 本藤 祐樹：拡張産業連関表を利用した再生可能エネルギー導入の雇用効果分析, 日本エネルギー学会誌, Vol.9, pp.258-267, 2011
- 20) 関 知道, 田中 秀雄, 秋澤 淳：情報伝達効果による都道府県別の戸建住宅に対する太陽熱温水器と太陽光発電の普及分析, エネルギー・資源学会論文集, 35(3), pp.1-9, 2014

第 5 章

財政予測モデルの構築

5.1 財政予測モデルの構築

本章では、財政計画の変化に応じた活動量の変化と低炭素技術の普及の変化を反映するために、財政予測モデルを構築することを目的とする。具体的には、活動量と財政項目の関係をを用いて、市の歳入と歳出の各項目を計算する財政予測モデルを構築し、都市活動量予測モデルに加える。さらに、柏市を事例として財政予測モデルの精度検証を行い、柏市の財政を長期予測する。

5.1.1 財政予測モデルの構成

● モデル構築のためのポイント

今後、環境補助金の予算を増加させるためには、財政計画の変化が必要である。具体的には、歳出の予算内訳を再編成するか、または歳入を増加させることが想定される。各自治体では、財政を健全化するための歳出と歳入の利用方法が良く検討されている^{1),2)}。これらの財政健全化方法として、歳出については公共施設の利用計画の変化が、歳入については市税の変化が共通的に検討されていた。従って、本研究では、今後環境補助金の予算を増加させるための財政計画の変化として以下の 2 つの方法を設定し、これらの変化の都市活動量予測モデルへの影響を反映しうる、財政予測モデルを構築した。

- ・ 方法 (1) : 公共建物の長期利用に伴う建替と修繕の工事費差額の利用 (歳出の減少)
- ・ 方法 (2) : 一人当たり市税の増加に伴う新しい収入の利用 (歳入の増加)

● モデルの構成

図 5.1 に財政予測モデルの全体像を示す。財政予測モデルは、費用の流れによって歳出部門と歳入部門に分けられる。各部門の中の変数は、支出目的や収入目的によって分類されている。各変数は、属している部門によってアルファベット記号 T(歳出部門)と U(歳入部門)で区別され、変数間の関係は矢印で繋がっている。財政予測モデルの構築に必要な統計資料の出典は付録 A に示す。各部門のモデル化の詳細については、以下に説明する。

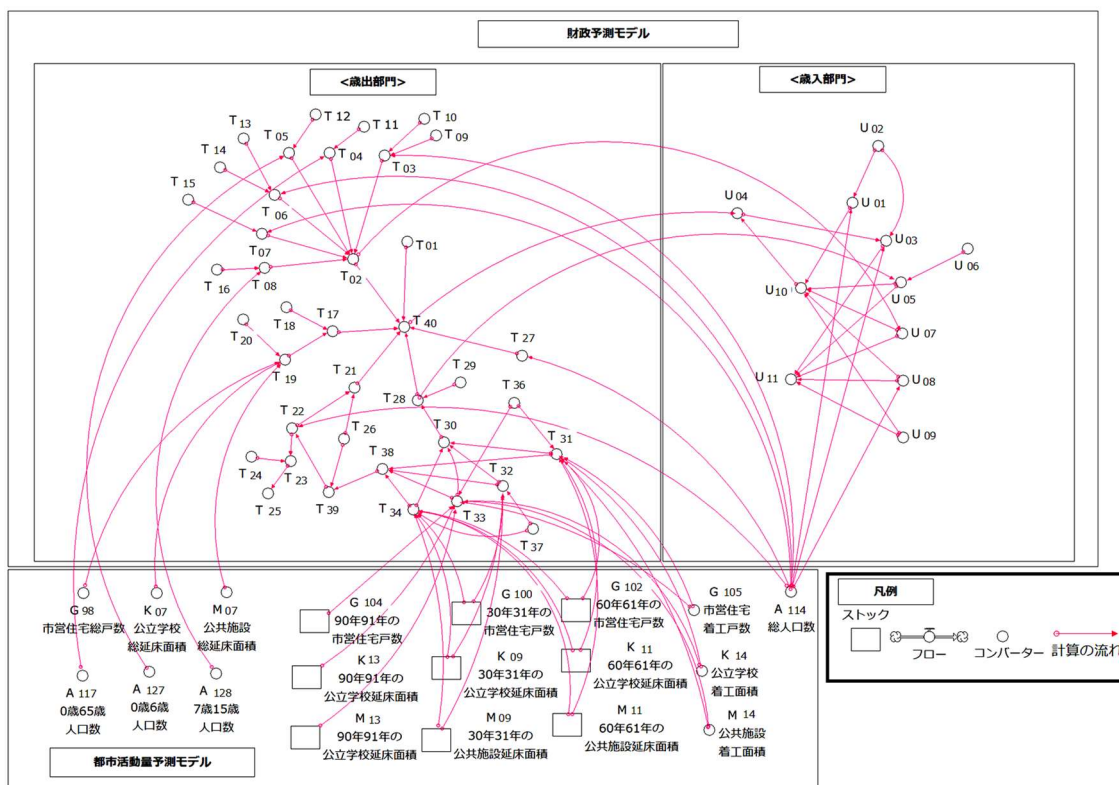


図 5.1 財政予測モデルの全体像

5.1.2 歳出部門のモデル化

本研究では、各歳出項目の性質と都市活動量予測モデルの活動量の関係を考慮して本研究で利用する歳出項目への再分類を行った(表 5. 1)。再分類した歳出項目を元に構築した歳出部門の変数構成と計算式を表 5. 2 に示す。以下に各歳出項目を再定義した理由と計算方法について説明する。

その他歳出(表 5.2 の T_{01})は、都市活動量予測モデルの活動量からは特定されない人件費、公債費、物件費、積立金、投資・出資金・貸付金を合わせた項目であり、計算には実績値を利用した。

扶助費(表 5.2 の T_{02})は、社会保障制度によって社会福祉、老人福祉、児童福祉、生活保護、衛生、教育に使われている³⁾。各扶助項目を受ける対象は、都市活動量予測モデルの人口セクタから特定することが可能である。そのため、各扶助項目は、扶助を受ける対象に対象当たり扶助額を乗じて算出した。例えば、社会福祉費(表 5.2 の T_{03})は、先に都市活動量予測モデルの人口セクタの総人口数に社会福祉対象比率(表 5.2 の T_{09})を乗じて社会福祉対象人員を計算し、この値に社会福祉対象当たり福祉費(表 5.2 の T_{10})を掛けて計算する。老人福祉費(表 5.2 の T_{04})、児童福祉費(表 5.2 の T_{05})、生活保護費(表 5.2 の T_{06})、衛生費(表 5.

2のT₀₇)、教育費(表5.2のT₀₈)も社会福祉費と同様に算出する。

維持補修費(表5.2のT₁₇)は、市のインフラの維持管理と公共建物の光熱費などに使われる費用である³⁾。そこで、橋や水道のようなインフラは都市活動量予測モデルに対応する活動量がないため、実績値を利用した(表5.2のT₁₈)。一方で、公共建物は都市活動量予測モデルの活動量から推計できるため、公共建物に面積当たり維持補修費(表5.2のT₁₉)を掛け算して計算した。なお、都市活動量予測モデルで公共建物が考慮できるようにするために、既存活動量の一部を、市が所有する建物に関する活動量に分離した(表5.3)。活動量を分離したセクタは、集合住宅セクタ、初等教育セクタ、その他サービス業セクタであり、市が所有する全ての建物は用途別に分類すると表5.3の3つのセクタに包含される。

総補助金予算(表5.2のT₂₁)は、その他補助金の予算と環境補助金の予算に区別される。その他補助金の予算(表5.2のT₂₂)は、個人や各種団体への補助などに使われる費用である³⁾。その他補助金の予算は市民のために使われていることは明確であるが、補助金項目別に受給対象を特定することは困難である。そのため、その他補助金は、第2章の都市活動量予測モデルの計算原理と同様に説明変数との関係によって推計されるものとし、総人口数がその説明変数であると設定した。総人口は、都市に住む人が増えると、団体の種類や規模が大きくなり、各種補助金への要求も増える結果、その他補助金が増加すると考えられる。そこで、総人口数が増加すると、その他補助金の予算が増加すると仮定して、変数間の関係を表す関数を増加関数に設定した。また、児童補助金予算(表5.2のT₂₃)は、その他補助金予算の一部であるため、その他補助金予算に児童補助金予算比率(表5.2のT₂₄)を掛けて計算する。一方で、環境補助金予算(表5.2のT₂₆)は、今後、予算を増加させるシナリオに利用されるため、外部入力をする形とした。

繰出金(表5.2のT₂₇)は、国民健康保険や駐車場事業などに使われる費用である³⁾。繰出金は市民のために使われていることは明確であるが、事業ごとの予算の決定要因が把握できない。そのため、繰出金は、第2章の都市活動量予測モデルの計算原理と同様に説明変数との関係によって推計されるようにした。そして、繰出金の説明変数は総人口数に設定した。総人口数は、国民健康保険を受ける対象であり、国民健康保険が適用される人が増加すると繰出金も増加すると考えられる。そこで、総人口数が増加すると、繰出金が増加すると仮定して、変数間の関係を表す関数を増加関数に設定した。

投資的経費(表5.2のT₂₈)は、市のインフラと公共建物の新築・建替工事、修繕工事に使われる費用である³⁾。そこで、インフラ系の投資的経費(表5.2のT₂₉)は都市活動量予測モデルに活動量がないため、実績値を利用した。一方で、公共建物の新築・解体面積と修繕面

積は、都市活動量予測モデルの活動量から推計できる。そのため、建物系の投資的経費(表 5.2 の T₃₀)は、工事の種類(新築・建替または修繕)によって工事面積に面積当たり工事費を掛け算して計算した。そのほか、建物系の投資的経費は、環境補助金の予算を増加させる財政計画方法の中で、「方法 (1): 公共建物の長期利用に伴う工事費差額の利用」に関係する。修繕費用は、新築・建替費用より約 40%低いことが知られており⁴⁾、従来に新築・建替する予定だった公共建物を修繕して利用することで、削減された工事費用を環境補助金予算の増加に利用できると考えられる。そのため、歳出部門において公共建物の長期利用計画の実施によって新築・建替面積や修繕面積が変化するように設定した。公共建物の長期利用計画の考え方では、一般的に建物は建築後 30 年を経過すると、修繕工事が必要であり、建築後 60 年を経過すると、建替が必要だと判断されている⁴⁾⁵⁾。従って、本研究では、建築後 30 年目ごとに修繕または新築・建替が行われると仮定し、今後、公共建物の長期利用計画を考慮可能にするために、公共建物の建築後 90 年目まで計算できるようにした。公共施設の具体的な計算方法に関しては 5.2 節で説明する。

表 5.1 歳出項目の再分類

| 行政の分類 ⁶⁾ | | 本研究の分類 | |
|---------------------|-------|--------|-------|
| 人件費 | | その他歳出 | |
| 公債費 | | | |
| 物件費 | | | |
| 積立金 | | | |
| 投資・出資金・貸付金 | | | |
| 扶助費 | 扶助費 | | 社会福祉費 |
| | | | 老人福祉費 |
| | | | 児童福祉費 |
| | | | 生活保護費 |
| | | | 衛生費 |
| | | | 教育費 |
| 維持補修費 | 維持補修費 | インフラ系 | |
| | | 建物系 | |
| 補助費等 | 補助金全体 | 環境補助金 | |
| | | その他補助金 | |
| 繰出金 | | 繰出金 | |
| 投資的経費 | 投資的経費 | インフラ系 | |
| | | 建物系 | 新築・建替 |
| | | | 修繕 |

表 5.2 歳出部門の変数構成と計算式

| 部門 | 変数 | 計算式 |
|------------|--------------------|--|
| T. 歳出部門 | T01. その他歳出 | なし(実績値入力) |
| | T02. 扶助費 | $\sum_{i=3}^8 T_i(t)$ |
| | T03. 社会福祉費 | $A_{114}(t) \times T_{09}(t) \times T_{10}(t)$ |
| | T04. 老人福祉費 | $A_{117}(t) \times T_{11}(t)$ |
| | T05. 児童福祉費 | $A_{127}(t) \times T_{12}(t)$ |
| | T06. 生活保護費 | $A_{114}(t) \times T_{13}(t) \times T_{14}(t)$ |
| | T07. 衛生費 | $A_{114}(t) \times T_{15}(t)$ |
| | T08. 教育費 | $A_{128}(t) \times T_{16}(t)$ |
| | T09. 社会福祉対象比率 | なし(実績値入力) |
| | T10. 社会福祉対象当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T11. 老人当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T12. 児童当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T13. 生活保護対象比率 | なし(実績値入力) |
| | T14. 生活保護対象当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T15. 人口当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T16. 学生当たり福祉費 | なし(実績値入力) |
| | T17. 維持補修費 | $T_{18}(t) + T_{19}(t)$ |
| | T18. インフラ系維持補修費 | なし(実績値入力) |
| | T19. 建物系維持補修費 | $(G_{98}(t) \times 57.4 + K_{07}(t) + M_{07}(t)) \times T_{20}(t)$ |
| | T20. 面積当たり維持補修費 | なし(実績値入力) |
| | T21. 総補助金予算 | $T_{22}(t) + T_{26}(t)$ |
| | T22. その他補助金予算 | $(T_{22}(b) \times f(A_{114}(t), +)) + (IF(T_{39}(t) > 0) THEN (T_{39}(t)) ELSE (0))$ |
| | T23. 児童補助金予算 | $T_{22}(t) \times T_{24}(t)$ |
| | T24. 児童補助金予算比率 | なし(実績値入力) |
| | T25. 児童当たり児童補助金 | $T_{23}(t) / A_{127}(t)$ |
| | T26. 環境補助金予算 | なし(実績値入力) |
| | T27. 繰出金 | $T_{27}(b) \times f(A_{114}(t), +)$ |
| | T28. 投資的経費 | $T_{29}(t) + T_{30}(t)$ |
| | T29. インフラ系投資的経費 | なし(実績値入力) |
| | T30. 建物系投資的経費 | $IF(T_{35}=0) THEN (T_{31}(t) + T_{32}(t)) ELSE (T_{33}(t) + T_{34}(t))$ |
| | T31. 新築・建替経費(基本) | $((G_{102}(t) + G_{105}(t)) \times 57.4 + K_{11}(t) + K_{14}(t) + M_{11}(t) + M_{14}(t)) \times T_{36}(t)$ |
| | T32. 修繕経費(基本) | $((G_{100}(t) \times 57.4) + K_{09}(t) + M_{09}(t)) \times T_{37}(t)$ |
| | T33. 新築・建替経費(長期利用) | $((G_{104}(t) + G_{105}(t)) \times 57.4 + K_{13}(t) + K_{14}(t) + M_{13}(t) + M_{14}(t)) \times T_{36}(t)$ |
| | T34. 修繕経費(長期利用) | $((G_{100}(t) + G_{102}(t)) \times 57.4 + K_{09}(t) + K_{11}(t) + M_{09}(t) + M_{11}(t)) \times T_{37}(t)$ |
| | T35. 長期利用計画の実施 | 0 または 1 (ここで、0 は基本計画、1 は長期利用計画) |
| | T36. 面積当たり新築・建替費 | なし(実績値入力) |
| | T37. 面積当たり修繕費 | なし(実績値入力) |
| | T38. 長期利用による予算差額 | $(T_{31}(t) + T_{32}(t)) - (T_{33}(t) + T_{34}(t))$ |
| | T39. 環境補助金利用後余った予算 | $T_{38}(t) - T_{26}(t)$ |
| | T40. 歳出総額 | $T_{01}(t) + T_{02}(t) + T_{17}(t) + T_{21}(t) + T_{27}(t) + T_{28}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値、57.4 は柏市公共施設等総合管理計画基本方針編(2017)にある市営住宅戸数や延床面積を除算して得られた一戸当たりの平均面積

表 5.3 財政予測モデルと都市活動量予測モデルの連結のための都市活動量予測モデルの活動量の再分類

| 既存の活動量の分類 | 活動量の再分類 |
|------------|------------|
| 集合住宅 | 集合住宅 |
| | 市営住宅 |
| 初等教育施設 | 初等教育施設 |
| | 公立学校施設 |
| その他サービス業施設 | その他サービス業施設 |
| | 公共施設 |

5.1.3 歳入部門のモデル化

1) 歳入部門の概要

本研究では、各歳入項目の性質と都市活動量予測モデルの活動量の関係を考慮して本研究で利用する歳入項目への再分類を行った(表 5.4)。再分類した歳入項目を元に構築した歳入部門の変数構成と計算式を表 5.5 に示す。以下に各歳入項目を再定義した理由と計算方法について説明する。

市税(表 5.5 の U_{01} と U_{03})は、市に居住する市民が納付した税金であり³⁾、総人口数に一人当たり市税を乗じることで算出できる。そのほか、市税は、環境補助金の予算を増加させる財政計画方法の中で、「方法 (2): 一人当たり市税の増加に伴う新しい収入の利用」に関係する。市税の増加が必要になる場合は、歳出より歳入が少なくなる場合である。実際の財政予算は、歳出予定と歳入予定を事前に予想して、歳出と歳入が同一になるように調整されるため、歳出より歳入が少なくなならない構造である。そのため、本研究では、市税の計算を既存市税と将来市税に分けて、既存市税(表 5.5 の U_{01})を用いて計算した既存歳入と歳出を比較した際に、計算結果がマイナスになると、不足な歳入を補充するために一人当たり市税が増加されるように設定した(表 5.5 の U_{04})。また、一人当たり市税増加額を計算する際に、増加が必要な金額は、既存歳入と歳出の差額に歳出の 5%を足して算出される。歳出の事業の中では、次年度に移動される場合があり、その時予算も次年度に移動される。そのため、財政の実績値は常に歳入が歳出より多くなり、歳入が歳出を超える比率は平均 5%であった(柏市の歳入と歳出の 1990 年から 2010 年までの平均値)。従って、歳入が歳出より少ない年度は、歳出より歳入が 5%大きくなるように一人当たり市税を増加するものとした。これにより、環境補助金予算増加シナリオでは、環境補助金予算が増加すると、歳出が増加し、一人当たり市税が増加されることで財政の変化が考慮可能になる。

市債(表 5.5 の U_{05})は、市が建設事業に必要な財源を調達するために行う借金である³⁾。

これは、主に歳出部門の投資的経費に必要な財源を確保するために発行される。従って、市債は、毎年の投資的経費に市債発行比率(表 5.5 の U_{06})を乗じて算出した。

国・県支出金(表 5.5 の U_{07})は、国や県が必要だと認めた事業に対して配分された費用である³⁾。歳出部門の扶助費は、国や県が認めた事業であるため、必要な扶助費に対しては国・県支出金が補助されると知られている⁷⁾。しかし、扶助項目別支出金の補助比率を特定することはできない。そのため、第 2 章の都市活動量予測モデルの計算原理と同様に説明変数との関係によって推計されるようにした。従って、扶助費が増加すると、国・県支出金が増加すると仮定して、変数間の関係を表す関数を増加関数に設定した。

その他収入(表 5.5 の U_{08})は、分担金・負担金、使用料、手数料、財産収入、寄附金、諸収入を合わせた項目である。これらは、その市に居住する人が市の施設や制度を利用したり、または市の復興のために支出する費用であり³⁾、人口が増えると収入も増加すると考えられる。しかし、収入と寄付にかかわる対象と金額を特定することはできない。そのため、その他収入は、第 2 章の都市活動量予測モデルの計算原理と同様に説明変数との関係によって推計されるようにした。従って、総人口数が増加すると、その他収入が増加すると仮定して、変数間の関係を表す関数を増加関数に設定した。

その他歳入(表 5.5 の U_{09})は、繰越金、地方特例交付金、地方交付税、地方譲与税、その他の交付金、繰入金を合わせた項目である。これらの項目は都市活動量予測モデルにある活動量や歳出部門にある変数から特定できないため、実績値を入力した。

表 5.4 歳入項目の再分類

| 行政の分類 ⁶⁾ | 本研究の分類 |
|---------------------|--------|
| 市税 | 市税 |
| 市債 | 市債 |
| 国庫支出金 | 国・県支出金 |
| 都道府県支出金 | |
| 分担金・負担金 | その他収入 |
| 使用料 | |
| 手数料 | |
| 財産収入 | |
| 寄附金 | |
| 諸収入 | |
| 繰越金 | その他歳入 |
| 地方特例交付金 | |
| 地方交付税 | |
| 地方譲与税 | |
| その他の交付金(11 種類) | |
| 繰入金 | |

表 5.5 歳入部門の変数構成と計算式

| 部門 | 変数 | 計算式 |
|------------|------------------------------|--|
| U. 歳入部門 | U ₀₁ . 既存市税 | $A_{114}(t) \times U_{02}(t)$ |
| | U ₀₂ . 一人当たり市税 | なし(実績値入力) |
| | U ₀₃ . 将来市税 | $A_{114}(t) \times (U_{02}(t) + U_{04}(t))$ |
| | U ₀₄ . 一人当たり市税増加額 | $IF(U_{10}(t) - T_{40}(t) > 0) THEN(0)$ $ELSE((ABS(U_{10}(t) - T_{40}(t)) + T_{40}(t) \times 0.05) / A_{114}(t))$ |
| | U ₀₅ . 市債 | $T_{28}(t) \times U_{06}(t)$ |
| | U ₀₆ . 市債発行比率 | なし(実績値入力) |
| | U ₀₇ . 国・県支出金 | $U_{07}(b) \times f(T_{02}(t), +)$ |
| | U ₀₈ . その他収入 | $U_{08}(b) \times f(A_{114}(t), +)$ |
| | U ₀₉ . その他歳入 | なし(実績値入力) |
| | U ₁₀ . 既存歳入総額 | $U_{01}(t) + U_{05}(t) + U_{07}(t) + U_{08}(t) + U_{09}(t) + U_{10}(t)$ |
| | U ₁₁ . 将来歳入総額 | $U_{03}(t) + U_{05}(t) + U_{07}(t) + U_{08}(t) + U_{09}(t) + U_{10}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

5.2 モデルの連結のための都市活動量予測モデルの変更

財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結するためには、都市活動量予測モデルの活動量のうち、市が所有する活動量を再分類する必要がある(表 5.3)。そのほかにも、財政予測モデルの推計のために都市活動量予測モデルに新しい変数を追加する必要がある。また、新しい変数が追加されることによって既存変数に新しい計算過程が必要となり、多くのセクタで活動量の変更が生じる。従って、本節では、都市活動量予測モデルの部門別にセクタの変更内容を説明する。なお、輸送部門は変更した内容がないため、本節では除外している。

5.2.1 都市基盤部門

1) 人口セクタ

1.1) 人口セクタの変更内容の説明

変更した人口セクタの計算フローを図 5.2 に示す。図 5.2 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって人口セクタに新しく追加された計算の流れである。人口セクタの変数の変更内容を表 5.6 に示す。表 5.6 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。出生率は、児童補助金の増加に伴う出生率の変化を考慮するために、実績値を利用した計算から、説明変数によって推計されるように計算過程を変更した。出生率の変化に関する説明変数と因果関係の設定は下に説明する。そのほか、一人当たりその他サービス業の面積と学生当たり学校の面積は、それぞれの計算過程に公共施設総延床面積と公立学校総延床面積を追加した。また、歳出部門の児童福祉費と教育費を計算するために、各費用の支出対象になる 0 歳~6 歳の人口数と 7 歳~15 歳の人口数を計算する変数を新しく追加した。

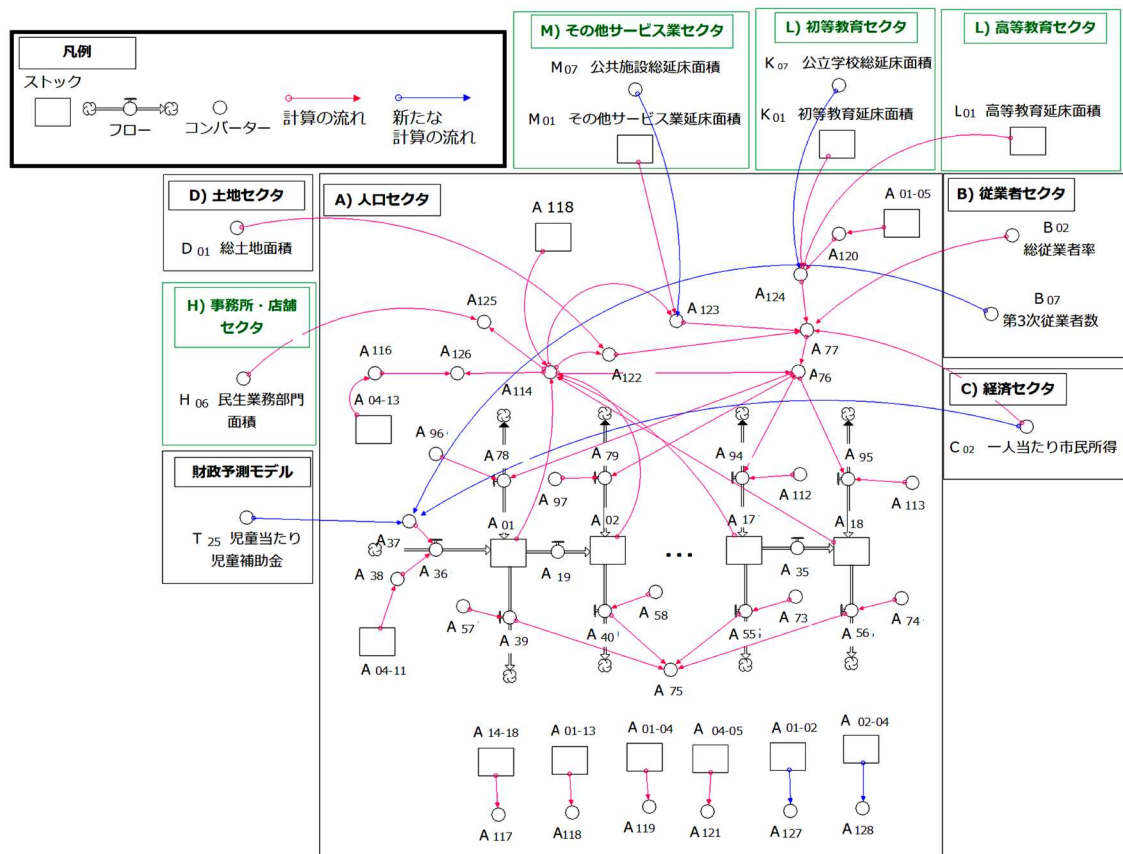


図 5.2 変更した人口セクタの計算フロー

表 5.6 人口セクタの変数の変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|-------------------------------------|--|--|
| A ₃₇ . 出生率 | なし(実績値入力) | $A_{37}(b) \times f_1(B_{07}(t), -) \times f_2(C_{02}(t), +) \times f_3(T_{25}(t), +)$ |
| A ₁₂₃ . 一人当たりその他サービス業の面積 | $M_{01}(t) / A_{114}(t)$ | $(M_{01}(t) + M_{07}(t)) / A_{114}(t)$ |
| A ₁₂₄ . 学生当たり学校の面積 | $(K_{01}(t) + L_{01}(t)) / A_{120}(t)$ | $(K_{01}(t) + L_{01}(t) + K_{07}(t)) / A_{120}(t)$ |
| A ₁₂₇ . 0 歳~6 歳人口数 | 既存変数なし | $A_{01}(t) + (A_{02}(t) \times (2/5))$ |
| A ₁₂₈ . 7 歳~15 歳人口数 | 既存変数なし | $(A_{02}(t) \times (3/5)) + A_{03}(t) + (A_{04}(t) \times (1/5))$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

1.2) 人口セクタの出生率の説明変数の選定理由と因果関係の設定

出生率の説明変数と因果関係を表 5.7 に示す。出生率を変化させる説明変数は 3 つであり、説明変数の選定理由と因果関係の設定は以下の通りである。

- ・ 第 3 次産業の従業者数

都市化は都市の産業構造や住居様式を変え、非婚化・晩婚化をもたらし、出生率が下がる原因であることが知られている⁸⁾。そこで、第 3 次従業者数を都市化の指標と見なし、第 3

次産業の従業者数が増加すると、出生率が減少すると仮定して減少関数に設定した。

- ・一人当たり市民所得

所得が増えると子育てにかかる負担が少なくなることが知られている⁹⁾。そこで、一人当たり市民所得が増加すると、出生率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

- ・児童当たり児童補助金

児童補助金が交付されると、子育ての金銭的な負担が少なくなり、出生数が増加することが知られている⁹⁾。そこで、児童当たり児童補助金が増加すると、出生率が増加すると仮定して増加関数に設定した。

表 5.7 出生率の説明変数と因果関係

| 目的変数 | 説明変数 | 単位 | 因果関係 |
|----------|-----------------|--------|------|
| A37. 出生率 | B07. 第3次産業の従業者数 | [人] | [-] |
| | C02. 一人当たり市民所得 | [万円/人] | [+] |
| | T25. 児童当たり児童補助金 | [万円/人] | [+] |

2) 経済セクタ

変更した経済セクタの計算フローを図 5.3 に示す。図 5.3 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって経済セクタに新しく追加された計算の流れである。経済セクタの変数の変更内容を表 5.8 に示す。表 5.8 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。一人当たり市税増加が他の活動量に及ぼす影響を考慮するために、一人当たり市民所得の計算式は、一人当たり所得配分から一人当たり市税を引いて算出するように変更した。なお、一人当たり所得配分は、従来の一人当たり市民所得の計算式を適用して計算した。

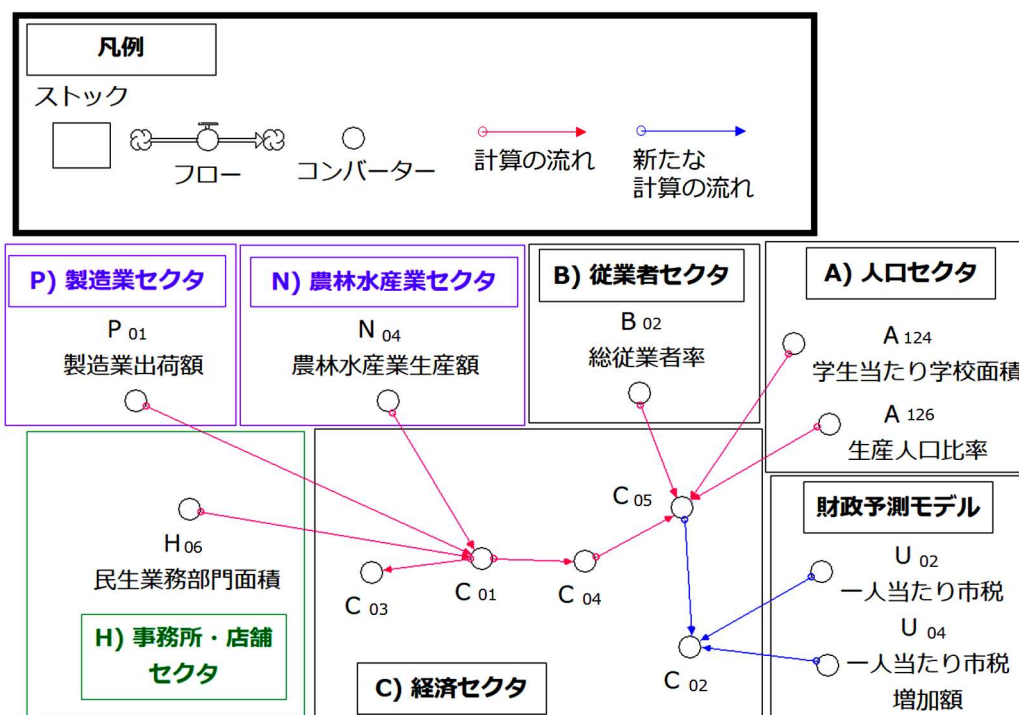


図 5.3 変更した経済セクタの計算フロー

表 5.8 経済セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|-----------------------------|---|---|
| C ₀₂ . 一人当たり市民所得 | $C_{02}(b) \times f_1(A_{124}(t,+) \times f_2(A_{126}(t,+) \times f_3(B_{02}(t,+) \times f_4(C_{04}(t,+))$ | $C_{05}(t) - (U_{02}(t) + U_{04}(t))$ |
| C ₀₅ . 一人当たり所得配分 | 既存変数なし | $C_{02}(b) \times f_1(A_{124}(t,+) \times f_2(A_{126}(t,+) \times f_3(B_{02}(t,+) \times f_4(C_{04}(t,+))$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

5.2.2 民生家庭部門

1) 戸建住宅セクタ

変更した戸建住宅セクタの計算フローを図 5.4 に示す。図 5.4 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって戸建住宅セクタに新しく追加された計算の流れである。戸建住宅セクタの変数の変更内容を表 5.9 に示す。表 5.9 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。総住宅戸数は、既存計算式に市営住宅総戸数を足すことで算出される。

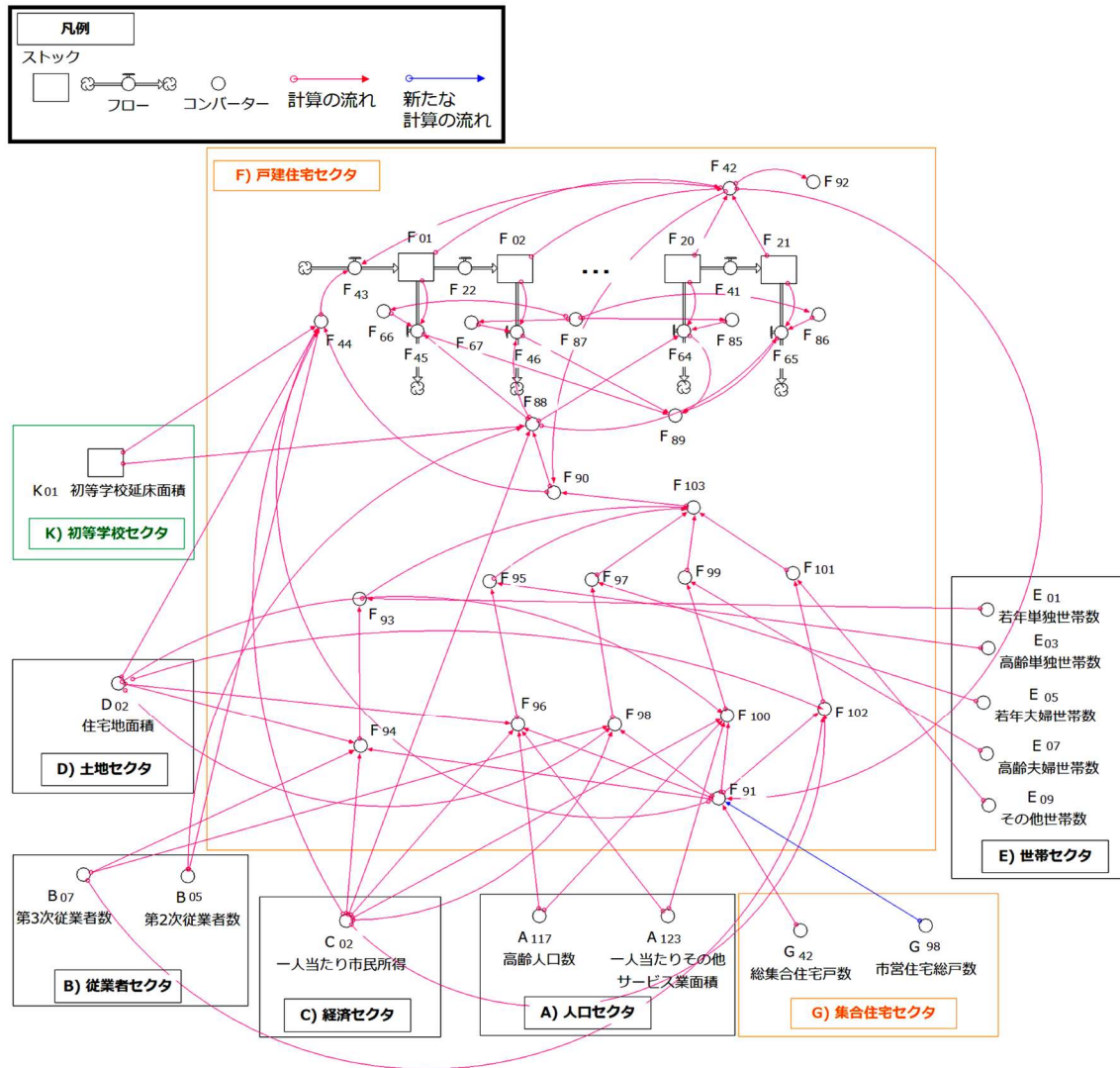


図 5.4 変更した戸建住宅セクタの計算フロー

表 5.9 戸建住宅セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|------------|-------------------------|-------------------------------------|
| F91. 総住宅戸数 | $F_{42}(t) + G_{42}(t)$ | $F_{42}(t) + G_{42}(t) + G_{98}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

2) 集合住宅セクタ

変更した集合住宅セクタの計算フローを図 5.5 に示す。図 5.5 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって集合住宅セクタに新しく追加された計算の流れである。集合住宅セクタの変数の変更内容を表 5.10 に示す。表 5.10 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。集合住宅には、市が所有

する住宅が存在するため、既存の集合住宅ストックから集合住宅と市営住宅に区別した(表 5.3)。市営住宅は、建築後 30 年目ごとに修繕または新築・建替が行われると仮定し、今後、公共建物の長期利用計画を考慮可能にするために、市営住宅の建築後 90 年目まで計算できるようにした。また、公共施設の修繕及び建替費用は、数年間にわたって歳出に計算される。そのため、本研究では、公共施設更新費用試算ソフト仕様書を参照して、修繕期間は 2 年、建替期間が 3 年間で行われるようにモデルを構築した⁴⁾。なお、市営住宅着工戸数は、市が作成する公共施設等総合管理計画施設白書編¹⁰⁾を参照して、1990 年から 2014 年までは実績値を入力し、2014 年以降は建築後 60 年目の建物が建て替えられると設定した。地方自治体では、人口減少時代に合わせて公共施設の維持または縮小する方針を立てているが^{10),11)}、縮小規模に関する明確な基準はなかった。そのため、本研究では、公共施設の規模はそのまま維持されると仮定し、現在存在する建物は耐久年数が終わったらまた建て替えられると設定した。

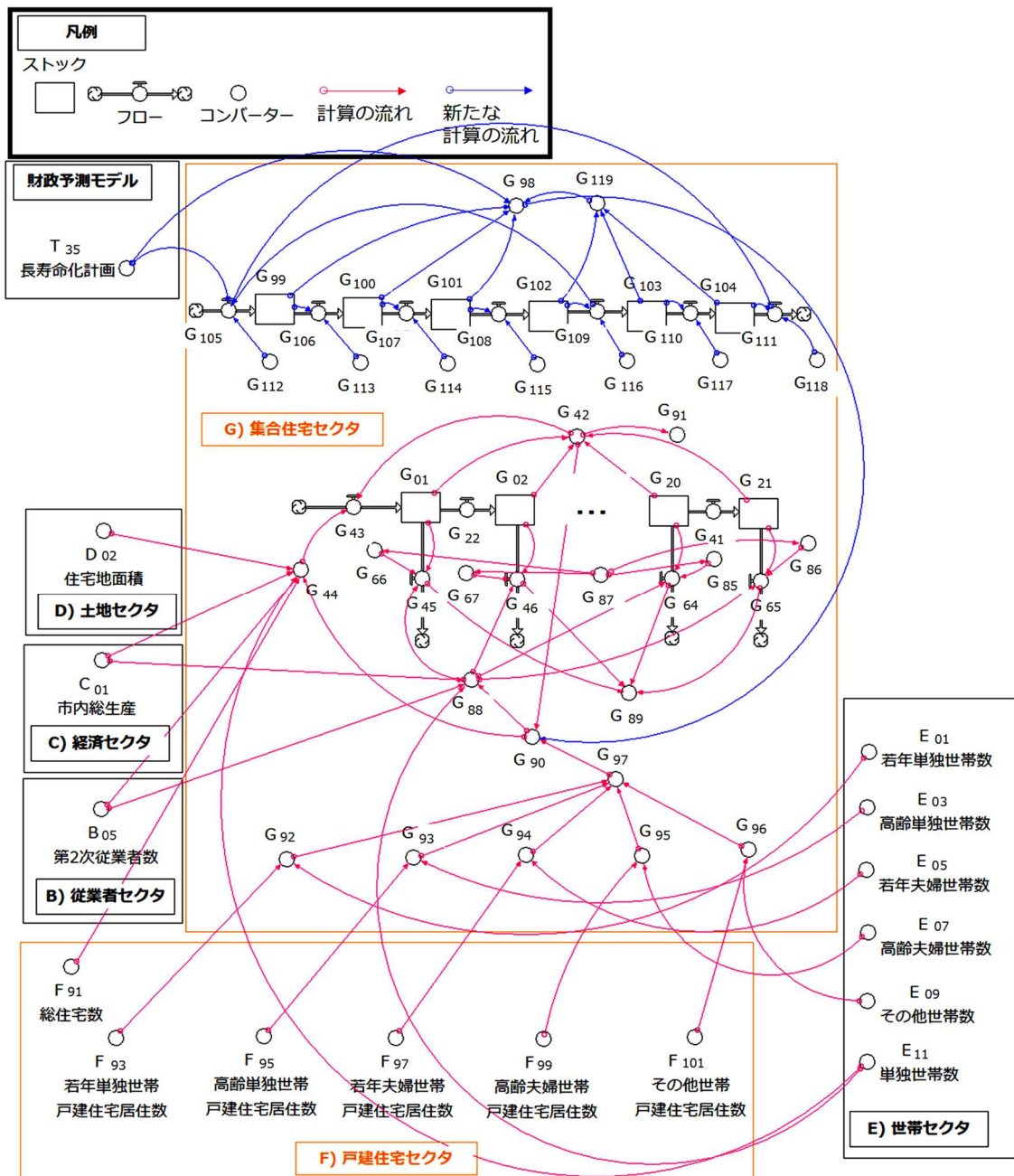


図 5.5 変更した集合住宅セクタの計算フロー

表 5. 10 集合住宅セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|------------------------------------|-----------------------|--|
| G ₉₀ . 集合住宅稼働率 | $G_{97}(t)/G_{42}(t)$ | $G_{97}(t)/(G_{42}(t)+G_{98}(t))$ |
| G ₉₈ . 総市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{99}(t)+G_{100}(t)+G_{101}(t)+(IF(T_{35}=1)$ THEN($G_{119}(t)$))ELSE(0)) |
| G ₉₉ . 0 年~28 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{99}(t-1)+G_{105}(t)-G_{106}(t)$ |
| G ₁₀₀ . 30 年~31 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{100}(t-1)+G_{106}(t)-G_{107}(t)$ |
| G ₁₀₁ . 33 年~58 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{101}(t-1)+G_{107}(t)-G_{108}(t)$ |
| G ₁₀₂ . 60 年~61 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{102}(t-1)+G_{108}(t)-G_{109}(t)$ |
| G ₁₀₃ . 63 年~88 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{103}(t-1)+G_{109}(t)-G_{110}(t)$ |
| G ₁₀₄ . 90 年~91 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | $G_{104}(t-1)+G_{110}(t)-G_{111}(t)$ |
| G ₁₀₅ . 市営住宅の着工戸数 | 既存変数なし | $G_{112}(t)+(IF(T_{35}=0)$ THEN($G_{116}(t)$))ELSE($G_{118}(t)$)) |
| G ₁₀₆ ~111. 市営住宅移動戸数 | 既存変数なし | $G_{m+98}(t)-(G_{m+98}(t)-G_{m+112}(t))$ (ここで、 $m=01\sim06$) |
| G ₁₁₂ . 0 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₃ . 29 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₄ . 32 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₅ . 59 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₆ . 62 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₇ . 89 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₈ . 92 年市営住宅戸数 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| G ₁₁₉ . 市営住宅の長期利用戸数 | 既存変数なし | $G_{102}(t)+G_{103}(t)+G_{104}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

5.2.3 民生業務部門

1) 事務所・店舗セクタ

変更した事務所・店舗セクタの計算フローを図 5. 6 に示す。図 5. 6 の青い矢印は財政予測モデルと事務所・店舗セクタを連結することによって新しく追加された計算の流れである。事務所・店舗セクタの変数の変更内容を表 5. 11 に示す。表 5. 11 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。民生業務部門延床面積は、既存計算式に公立学校総延床面積、公共施設総延床面積を足して算出される。

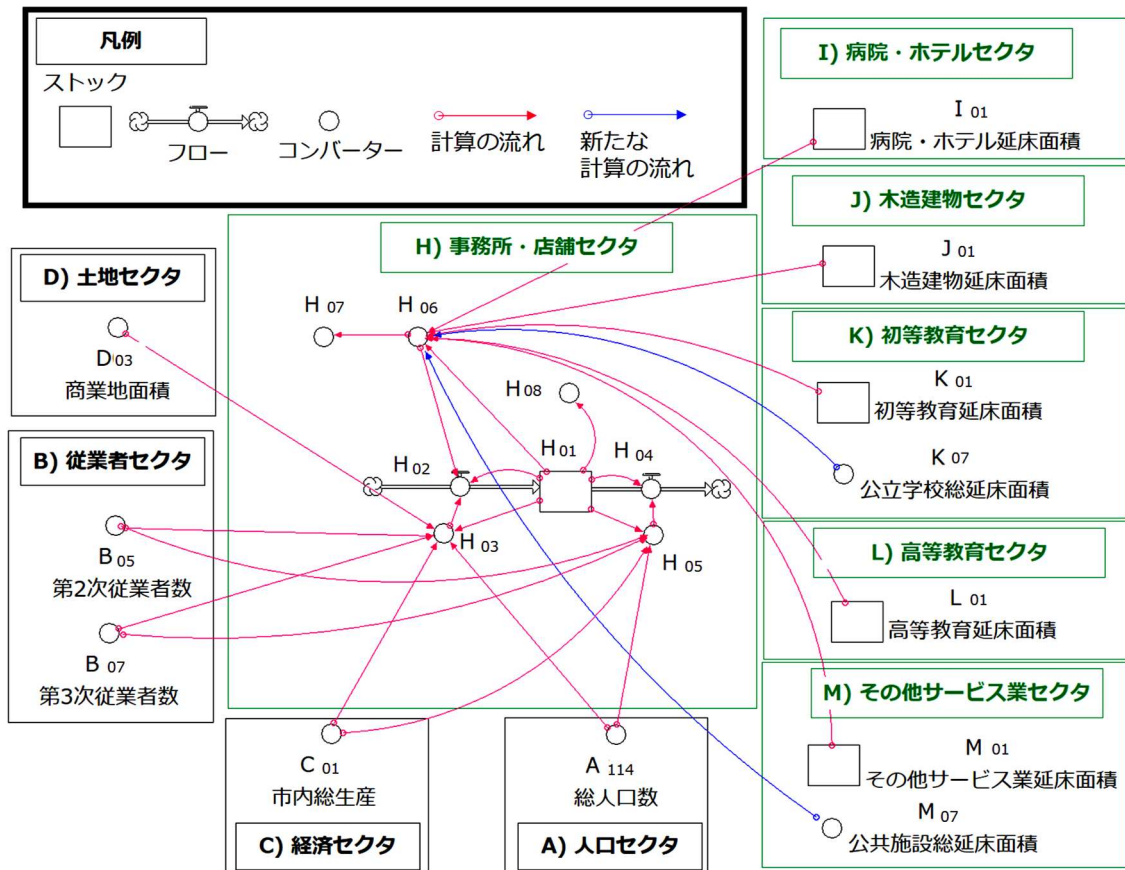


図 5.6 変更した事務所・店舗セクタの計算フロー

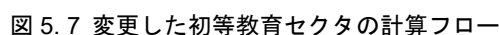
表 5.11 事務所・店舗セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|------------------|---|---|
| H06. 民生業務部門の延床面積 | $H_{01}(t) + I_{01}(t) + J_{01}(t) + K_{01}(t) + L_{01}(t) + M_{01}(t)$ | $H_{01}(t) + I_{01}(t) + J_{01}(t) + K_{01}(t) + L_{01}(t) + M_{01}(t) + K_{07}(t) + M_{07}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

2) 初等教育セクタ

変更した初等教育セクタの計算フローを図 5.7 に示す。図 5.7 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによって初等教育セクタに新しく追加された計算の流れである。初等教育セクタの変数の変更内容を表 5.12 に示す。表 5.12 には、計算式が変更された既存変数と、新しく追加された変数が示されている。初等教育には、市が所有する学校が存在するため、既存の初等教育ストックから初等教育と公立学校に区別した(表 5.3)。公立学校のモデル化に関する考え方や設定値に関しては集合住宅セクタの市営住宅の内容を参照されたい。



| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|--------------------------------------|---------|---|
| K ₀₇ . 公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{08}(t)+K_{09}(t)+K_{10}(t)+(IF(T_{35}=1)THEN(K_{28}(t))$ $ELSE(0))$ |
| K ₀₈ . 0 年~28 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{08}(t-1)+K_{21}(t)-K_{15}(t)$ |
| K ₀₉ . 30 年~31 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{09}(t-1)+K_{15}(t)-K_{16}(t)$ |
| K ₁₀ . 33 年~58 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{10}(t-1)+K_{16}(t)-K_{17}(t)$ |
| K ₁₁ . 60 年~61 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{11}(t-1)+K_{17}(t)-K_{18}(t)$ |
| K ₁₂ . 63 年~88 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{12}(t-1)+K_{18}(t)-K_{19}(t)$ |
| K ₁₃ . 90 年~91 年公立学校の延床面積 | 既存変数なし | $K_{13}(t-1)+K_{19}(t)-K_{20}(t)$ |
| K ₁₄ . 公立学校の着工面積 | 既存変数なし | $K_{21}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(K_{25}(t))ELSE(K_{27}(t)))$ $K_{m+07}(t)-(K_{m+07}(t)-K_{m+21}(t))$ (ここで、 $m=01\sim06$) |
| K _{15~20} . 公立学校の移動面積 | 既存変数なし | |
| K ₂₁ . 0 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₂ . 29 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₃ . 32 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₄ . 59 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₅ . 62 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₆ . 89 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₇ . 92 年公立学校の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| K ₂₈ . 公立学校の長期利用延床面積 | 既存変数なし | $K_{11}(t)+K_{12}(t)+K_{13}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

3) その他サービス業セクタ

変更したその他サービス業セクタの計算フローを図 5.8 に示す。図 5.8 の青い矢印は財政予測モデルと都市活動量予測モデルを連結することによってその他サービス業セクタに新しく追加された計算の流れである。その他サービス業セクタの変数の変更内容を表 5.13 に示す。表 5.13 には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。その他サービス業施設には、市が所有する公共施設が存在するため、既存のその他サービス業ストックからその他サービス業施設と公共施設に区別した(表 5.3)。公共施設のモデル化に関する考え方や設定値に関しては集合住宅セクタの市営住宅の内容を参照されたい。

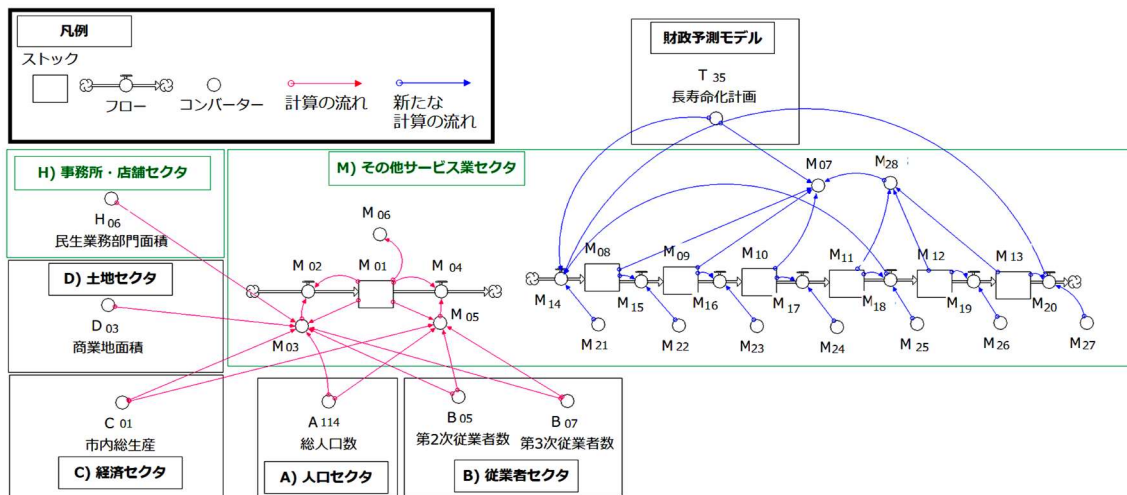


図 5.8 変更したその他サービス業セクタの計算フロー

表 5. 13 その他サービス業セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|-------------------------|---------|--|
| M07. 公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{08}(t)+M_{09}(t)+M_{10}(t)+(IF(T_{35}=1)THEN(M_{28}(t))ELSE(0))$ |
| M08. 0 年~28 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{08}(t-1)+M_{21}(t)-M_{15}(t)$ |
| M09. 30 年~31 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{09}(t-1)+M_{15}(t)-M_{16}(t)$ |
| M10. 33 年~58 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{10}(t-1)+M_{16}(t)-M_{17}(t)$ |
| M11. 60 年~61 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{11}(t-1)+M_{17}(t)-M_{18}(t)$ |
| M12. 63 年~88 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{12}(t-1)+M_{18}(t)-M_{19}(t)$ |
| M13. 90 年~91 年公共施設の延床面積 | 既存変数なし | $M_{13}(t-1)+M_{19}(t)-M_{20}(t)$ |
| M14. 公共施設の着工面積 | 既存変数なし | $M_{21}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(M_{25}(t))ELSE(M_{27}(t)))$ |
| M15~20. 公共施設の移動面積 | 既存変数なし | $M_{m+07}(t)-(M_{m+07}(t)-M_{m+21}(t))$ (ここで、 $m=01\sim06$) |
| M21. 0 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M22. 29 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M23. 32 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M24. 59 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M25. 62 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M26. 89 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M27. 92 年公共施設の移動面積 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| M28. 公共施設長期利用の延床面積 | 既存変数なし | $M_{11}(t)+M_{12}(t)+M_{13}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

5.2.4 産業部門

1) 建設業セクタ

集合住宅セクタ、初等教育セクタ、その他サービス業セクタにおいて、建物のストック(総戸数、総延床面積)とフロー(着工、解体)から公共施設の分を分離した。そのため、建設業セクタには、公共施設の着工、解体、修繕の活動を新しく追加する必要がある。ただし、公共施設の解体と修繕の戸数と面積は、公共建物の長期利用計画によって変わるため、論理式を組込むことでこのような変化が反映されるようにした。変更した建設業セクタの計算フローを図 5. 9 に示す。建設業セクタの変更内容を表 5. 14 に示す。

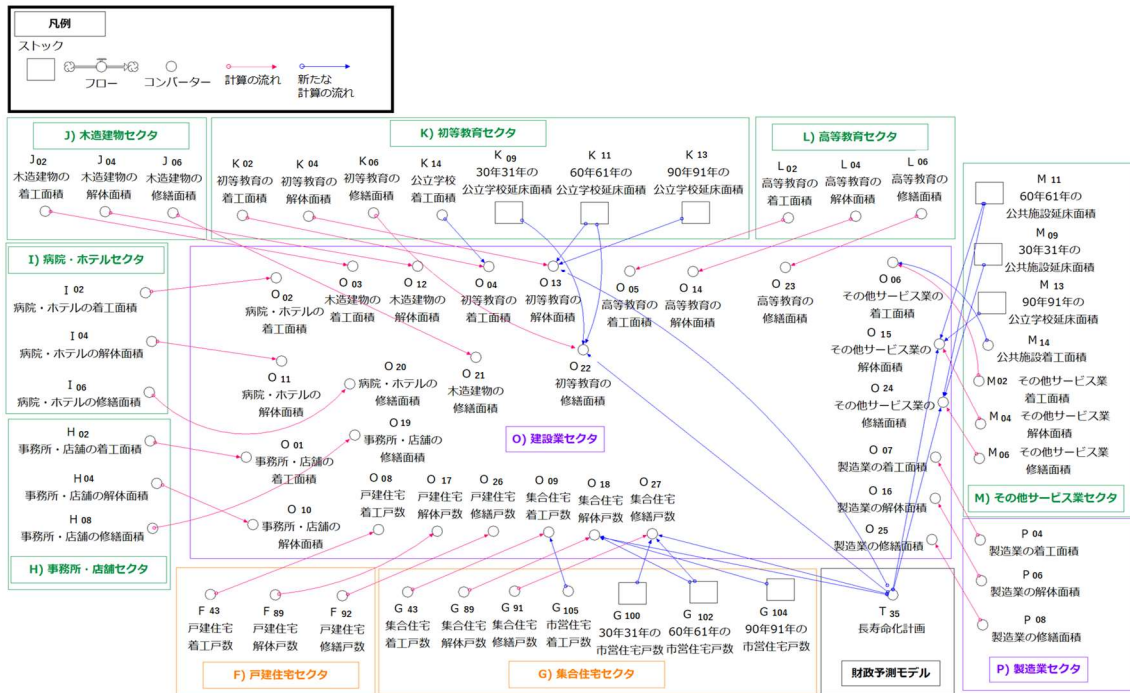


図 5.9 変更した建設業セクタの計算フロー

表 5.14 建設業セクタの変更内容

| 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|--------------------|-------------|---|
| O04. 初等教育の着工面積 | $K_{02}(t)$ | $K_{02}(t)+K_{14}(t)$ |
| O06. その他サービス業の着工面積 | $M_{02}(t)$ | $M_{02}(t)+M_{14}(t)$ |
| O09. 集合住宅の着工戸数 | $G_{43}(t)$ | $G_{43}(t)+G_{105}(t)$ |
| O13. 初等教育の解体面積 | $K_{04}(t)$ | $K_{04}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(K_{11}(t))ELSE(K_{13}(t)))$ |
| O15. その他サービス業の解体面積 | $M_{04}(t)$ | $M_{04}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(M_{11}(t))ELSE(M_{13}(t)))$ |
| O18. 集合住宅の解体戸数 | $G_{89}(t)$ | $G_{89}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(G_{102}(t))ELSE(G_{104}(t)))$ |
| O22. 初等教育の修繕面積 | $K_{06}(t)$ | $K_{06}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(K_{09}(t))ELSE(K_{09}(t)+K_{11}(t)))$ |
| O24. その他サービス業の修繕面積 | $M_{06}(t)$ | $M_{06}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(M_{09}(t))ELSE(M_{09}(t)+M_{11}(t)))$ |
| O27. 集合住宅の修繕戸数 | $G_{91}(t)$ | $G_{91}(t)+(IF(T_{35}=0)THEN(G_{100}(t))ELSE(G_{100}(t)+G_{102}(t)))$ |

ここで、 t は計算年度、 b は基準年値

5.3 財政の長期予測

5.3.1 財政予測モデルの精度検証

財政予測モデルの精度検証を行うために、柏市を事例として計算を行った。計算期間は1990年から2010年までである。誤差の計算には第2章で説明した Revised MAPE を利用した。

財政の部門別計算結果の傾向と誤差の比較を図5.10に示す。歳出と歳入の計算値は増減する実績値の傾向を良く捉えており(図5.10(左))、誤差も1%未満にとどまり(図5.10(右))、精度が高い計算結果が得られた。図5.11と図5.12には、各部門の項目別計算結果の傾向と誤差の比較を示した。ただし、各部門において、実績値をそのまま入力するその他歳出とその他歳入はグラフから除外した。歳出部門と歳入部門の各項目の計算値は、実績値の傾向を良く捉えており(図5.11(左)、図5.12(左))、全ての項目の誤差は8%未満にとどまっている(図5.11(右)、図5.12(右))。

財政予測モデルを構成する各項目の計算値は、実績値の傾向を良く捉えており、高い精度の計算結果も得られたため、本研究で開発した財政予測モデルを用いて柏市財政の長期予測が可能だと判断した。

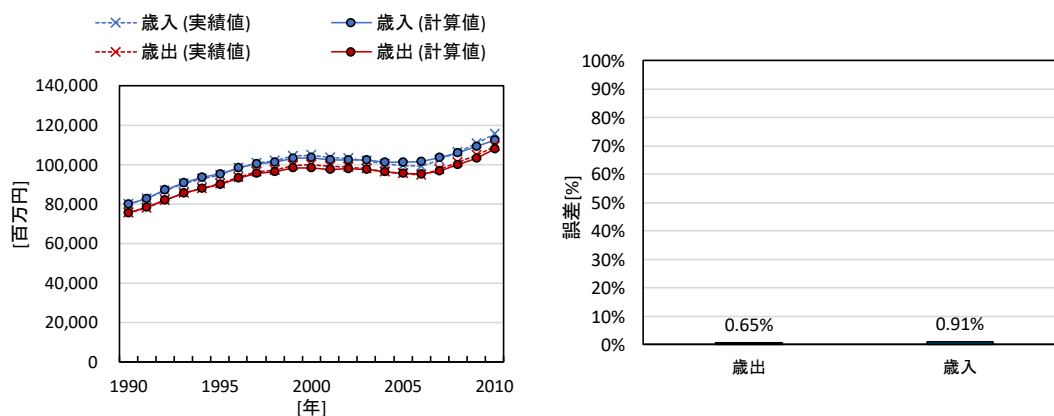


図 5.10 部門別計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較

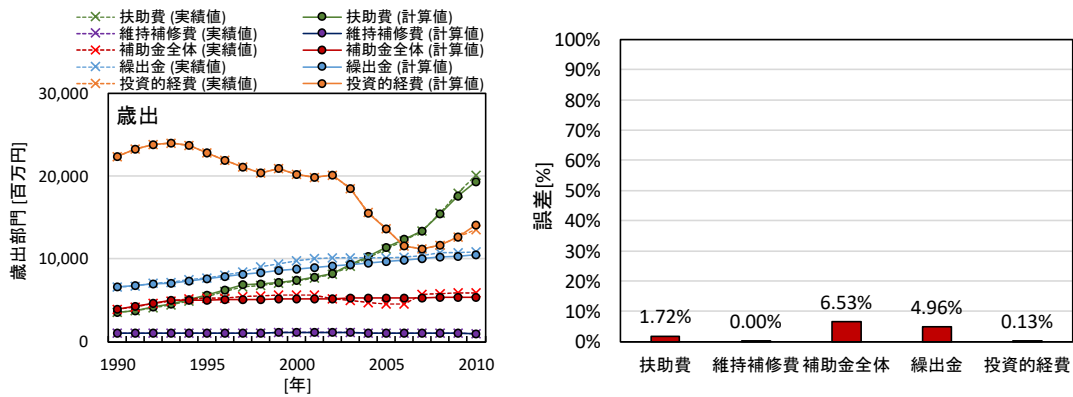


図 5.11 歳出部門の項目別計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較

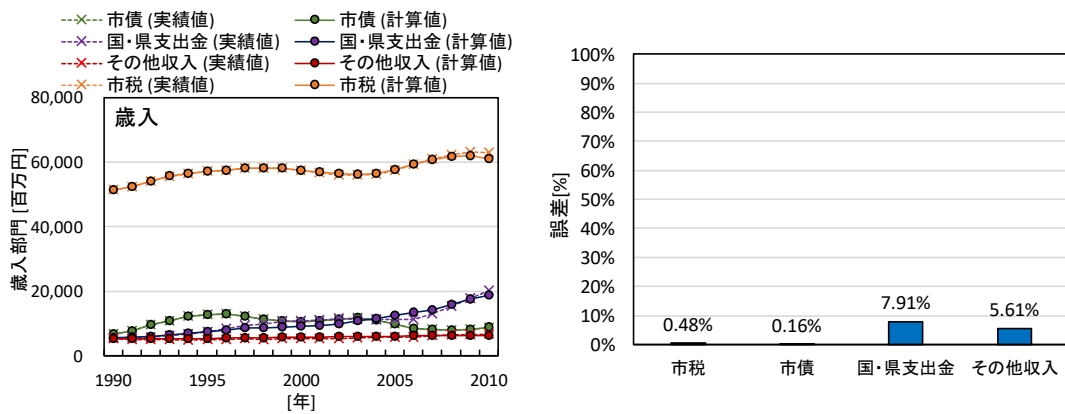


図 5.12 歳入部門の項目別計算結果の傾向(左)と誤差(右)の比較

5.3.2 財政の長期予測のための設定条件

財政予測モデルの変数の中で、その変数を決定する要因が明確ではない場合は、実績値を入力して計算している。また、これらの変数を用いて長期予測をする際には、2010 年値を固定して利用している。しかし、歳出部門の扶助費は、扶助対象当たり扶助費用が増加する見込みだと知られているが¹²⁾、具体的な増加計画はまだ発表されていない。そのため、本研究では、扶助費用の実績値を参考して将来の増加率を仮定した。仮定した対象になる項目は表 5.15 に示す。表 5.15 に示した変数は、1990 年から 2010 年までは実績値をそのまま入力する。2010 年以降は、2010 年から 2011 年への全国の一人当たり社会保障給付費の伸び率¹³⁾を参考して毎年前年度値の 2.9%ずつ増加するように設定した。しかし、生活保護対象当たり福祉費(T_{14})は毎月の最低生計費であり、毎年 2.9%ずつ増加することは現実と乖離があると考えられる。そのため、生活保護対象当たり福祉費(T_{14})は増加率を設定せずに、2010 年以降は 2010 年の値を固定して利用した。

表 5.15 財政の長期予測のための設定条件

| 対象変数 | 1990 年から 2010 年まで設定 | 2010 年以降の設定 |
|--------------------------------|---------------------|------------------------|
| T ₁₀ . 社会福祉対象当たり福祉費 | | |
| T ₁₁ . 老人当たり福祉費 | 実績値 | 2010 年値から毎年 2.9%ずつ増 |
| T ₁₂ . 児童当たり福祉費 | | |
| T ₁₅ . 人口当たり衛生福祉費 | | |
| T ₁₆ . 学生当たり教育福祉費 | | |

5.3.3 財政の長期予測結果

財政予測モデルは都市活動量予測モデルと連結して計算される。都市活動量予測モデルを用いた長期予測は、都市構造が大きく変化しない約 10 年から 20 年までの結果が有意であると考えられる。しかし、今後、公共建物の長期利用による活動量への波及効果を見るためには、より長い時間の長期予測が必要である。従って、長期予測期間は 2010 年から 2050 年までとした。

図 5.13 に財政の部門別長期予測の結果を示す。歳出と歳入は全体的に 2050 年まで増加する傾向であり、2041 年と 2049 年に歳出と歳入の増加がピークになる見込みである。

一方、歳出の項目別長期予測の結果を見ると、扶助費は 2010 年から 2050 年まで増加を続ける見込みであり、歳出増加の最も大きい原因になることが分かった(図 5.14)。特に、柏市の総人口数は 2020 年を起点に減少するにもかかわらず、扶助費は増加している。これは、多くの都市で予想されている、人口減少と扶助費増加に伴う歳出増加という将来現象^{14),15)}を裏付ける結果である。これに次ぐ歳出増加の原因は、公共建物の工事費が含まれている投資的経費である(図 5.14)。投資的経費は、2050 年までに 4 つの山(2011 年、2019 年、2041 年、2049 年)を持ち、その山の頂点を基準に増減が繰り返されている。特に、2023 年から 2041 年までは増加を続けており、2041 年に投資的経費がピークになる見込みである。このようなピークが現れた理由は、柏市の公共施設等総合管理計画施設白書編¹⁰⁾に見られるように、1950 年以降 4 つの時期に公共建築が集中して建てられており、これらが建て替え時期を迎えることが反映されたためである。そのほか、繰出金は減少する見込みであり、補助金全体と維持補修費は横ばい状態を続けている(図 5.14)。

歳入の項目別長期予測の結果は、市税は 2010 年から 2026 年まで横ばい状態であるが、2027 年からは増加する見込みである(図 5.15(左))。これは、2027 年から歳入が歳出より少なくなり、不足な歳入を埋めるために一人当たり市税が増加されたためである(図 5.15(右))。

そのため、2027 年以降にも一人当たり市税は増加を続けている。その理由は、歳出の扶助費と投資的経費(図 5. 14)が増加を続けているにもかかわらず、総人口は減少し続けているためである(図 5. 15(右))。そのほか、国・県支出金とその他収入は、横ばい状態を続けており、市債は投資的経費から影響を受けるため、投資的経費と同じ傾向で変化する見込みである。

結論としては、柏市財政の歳出は扶助費と投資的経費の増加によって 2050 年まで増加を続ける見込みである。一方で、総人口が 2020 年を起点に減少傾向に転じるため、既存の歳入方針であれば、2027 年以降は歳入が歳出より少なくなり、2027 年以降一人当たり市税は増加する結果となる。従って、今の将来財政状況に基いて新しい補助事業を行うためには、一人当たり市税をさらに増加するなどの財政計画の変化の検討が不可欠だと考えられる。

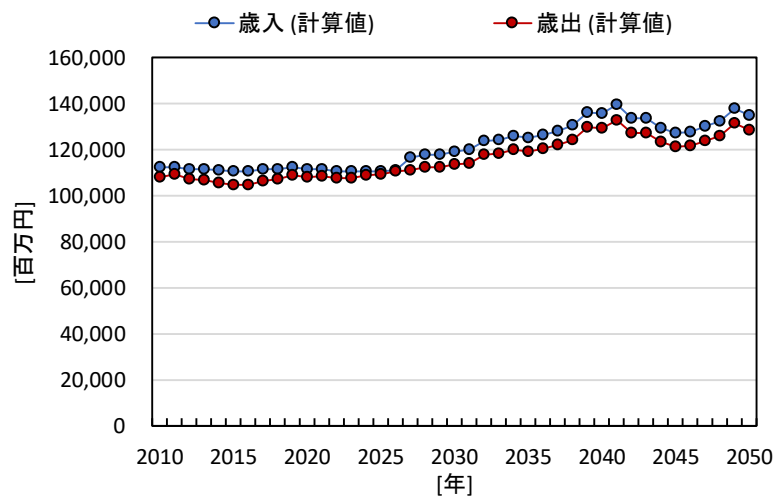


図 5. 13 財政の部門別長期予測の結果

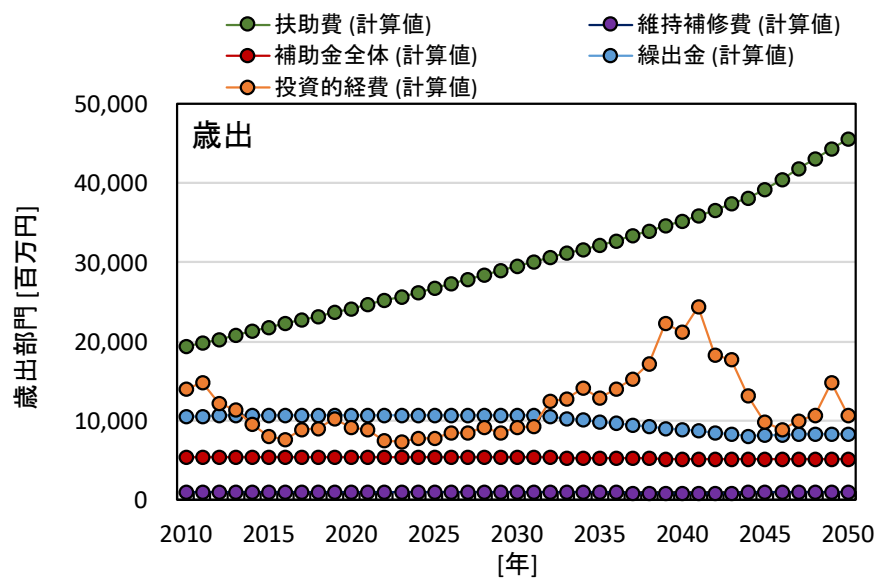


図 5.14 歳出部門の項目別長期予測の結果

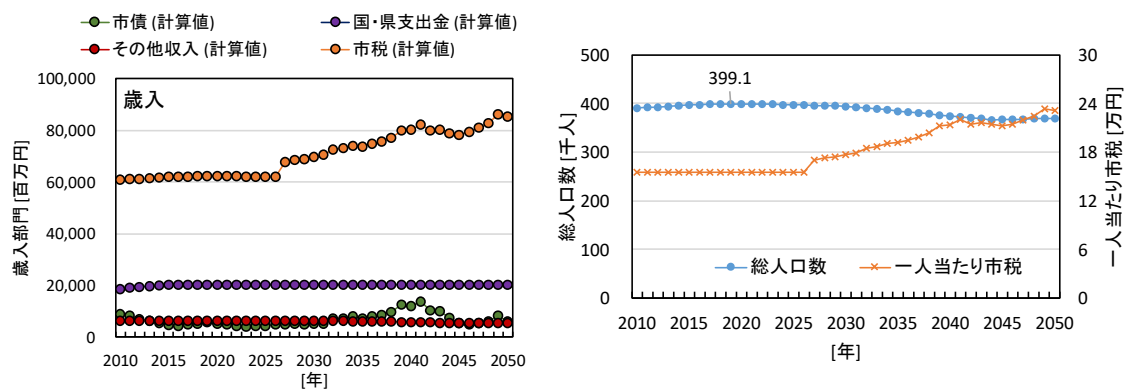


図 5.15 歳入部門の項目別長期予測の結果(左)と市税関連変数の計算結果(右)

5.4 本章のまとめ

本章では、財政計画の変化に応じた活動量の変化と低炭素技術の普及の変化を反映するために、財政予測モデルを構築した。さらに、柏市を事例として財政予測モデルの精度検証を行い、柏市財政の長期予測を行った。主な結論は以下の通りである。

<モデルの精度検証の結果>

- ・ 精度検証のための計算期間は1990年から2010年までであり、誤差の計算には Revised MAPE を利用した。計算の結果、歳出部門総額、歳入部門総額、各部門を構成する項目の計算値は、実績値の傾向を良く捉えた。また、全ての項目で誤差は8%未満となり、高い精度の結果が得られた。従って、本研究で開発した財政予測モデルを用いて財政の長期予測が可能だと考えられる。

<財政の長期予測の結果>

- ・ 財政の長期予測は2010年から2050年までの期間を対象として行った。歳出部門総額と歳入部門総額は、全体的に2050年まで増加する傾向である。
- ・ 歳出部門の項目別長期予測の結果は、扶助費が2010年から2050年まで増加を続ける見込みであり、歳出増加の最も大きい原因であることが分かった。これに次ぐ歳出増加の原因は、投資的経費である。投資的経費は、2023年から2041年まで増加を続け、2041年に投資的経費がピークになる見込みである。そのほか、繰出金は減少する見込みであり、補助金全体と維持補修費は横ばい状態を続けているという結果となった。
- ・ 歳入の項目別長期予測の結果は、市税は2010年から2026年まで横ばい状態であるが、2027年から増加する見込みである。これは、2027年から歳入が歳出より少なくなり、不足した歳入を埋めるために一人当たり市税が増加されるためである。そして、2027年以降にも一人当たり市税は増加を続ける。そのほか、国・県支出金とその他収入は、横ばい状態を続け、市債は投資的経費から影響を受けるため、投資的経費と同じ傾向で変化する見込みである。
- ・ 結論として、柏市財政の歳出は扶助費と投資的経費の増加によって2050年まで増加を続ける見込みである。一方で、総人口が2020年を起点に減少傾向に転じるため、現状の歳入方針であれば、2027年以降は歳入が歳出より少なくなる。そのため、2027年以降は、一人当たり市税が増加し続けることになる。従って、現在の将来財政状況に基いて新しい補助事業を行うためには、一人当たり市税をさらに増加するなどの財

政計画の変化の検討が不可欠だと考えられる。

<本章の限界>

- ・ 本章の財政予測モデルの構築は、一人当たり市税と公共施設の長期利用に伴う建替面積と児童補助金の変化が都市の活動量に与える影響に着目しており、ほかの財政項目の変化が活動量に与える影響は考慮していない。その理由は、本研究で考慮した以外の財政項目は、予算の変化によって誘発される活動量の変化が解明されてないためである。従って本研究では、これらについては今後の課題とした。

参考文献

- 1) 鎌ヶ谷市：鎌ヶ谷市財政健全化計画, 2015,
https://www.city.kamagaya.chiba.jp/sesakumidashi/sesaku_zaisei/keikaku.files/zaiseikenzen.pdf (アクセス日：2018.10)
- 2) 伊那市：第 2 次伊那市財政健全化プログラム, 2016,
<https://www.inacity.jp/shisei/zaiseishiryoko/zaiseijokyo/zaiseikenzenka.files/zaiseikenzenkaprogram27.pdf> (アクセス日：2018.10)
- 3) 調布市：代表的な財政用語の解説,
<http://www.city.chofu.tokyo.jp/www/contents/1522717079725/files/gaiyou16.pdf> (アクセス日：2018.10)
- 4) 一般社団法人 地球総合整備財団：公共施設更新費用試算ソフト仕様書 Ver.2.10, p.7, 2016
- 5) 柏市：公共施設等総合管理計画基本方針編第 1 期 H28-H37, 2017
- 6) 柏市：わかりやすい予算, 2018,
http://www.city.kashiwa.lg.jp/soshiki/040100/p008640_d/fil/H30.pdf (アクセス日：2018.10)
- 7) 肥沼 位昌：図解よくわかる自治体財政のしくみ, pp.100-108, 2015, 学陽書房
- 8) 石塚 優：出生率低下を文化変容から見る試みー高度経済成長期においてー, 北九州産業社会研究所紀要, Vol.46, pp. 79-95, 2005
- 9) 宮本 由紀, 荒渡 良：所得補助と非所得補助が出生率に与える効果の比較ー市別データを用いた分析, 日本経済研究, No.68, pp.70-87, 2013
- 10) 柏市：柏市公共施設等総合管理計画施設白書編, 2017
- 11) 松戸市：松戸市公共施設等総合管理計画, 2017
- 12) 柏市：柏市第五次総合計画, pp.34-35
- 13) 国立社会保障・人口問題研究所：社会保障費用統計, p.5, 2011
- 14) 一條 義治：人口減少・少子高齢化時代における持続可能な都市経営と自治体政策の課題, 国際文化研修, vol. 70, pp.34-41, 2011
- 15) 尾崎 剛：高齢化の進行がもたらす市町村財政への影響, 自治大阪, pp.40-47, 2007
- 16) 柏市：公共施設等総合管理計画基本方針編第 1 期 H28-H37, p.19, 2017

第 6 章

太陽光発電パネルを用いた都市 CO₂ 削減可能量の予測

6.1 低炭素技術普及予測モデルと財政予測モデルの連結

本章では、本研究における都市 CO₂ 削減施策支援立案システムの有効性の検討を目的とし、前章までに開発したモデルを連結し、柏市の戸建住宅への PV 普及を一例として、環境補助金予算や一件あたりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能量を計算する。

そのため、本章では、各節において以下のような内容を実施した。

6.1 節では、環境補助金予算の上限に伴う交付件数制限の影響を考慮するために、低炭素技術普及モデルと財政予測モデルを連結した。

6.2 節では、柏市の戸建住宅への環境補助金を用いた PV 普及促進に伴う都市 CO₂ 削減可能量を計算した。環境補助金の利用に伴う CO₂ 削減可能量を比較するために、PV 普及促進施策なしケース(PV 普及に補助制度が利用されない)と PV 普及促進施策ありケース(PV 普及に補助制度が利用される)を設定して、PV 普及促進施策なしケースの CO₂ 排出量の計算結果を基準に PV 普及促進施策ありケースの CO₂ 削減量を検討した。ここで、PV 普及促進施策ありケースには、環境補助金予算や一件あたりの環境補助金の変化に伴って総 12 個のケースを作成して計算した。さらに、PV 普及に伴う CO₂ 削減量は、PV によって直接的にエネルギーが削減される戸建住宅セクタや活動量の変化の影響を受ける都市全体から分析した。

6.3 節では、6.2 節にも考慮した活動量の変化効果の影響について再検証した。都市 CO₂ 削減施策検討における活動量の変化効果を検討する意義を確認するために、①PV 普及なしケース、②-1PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果なし)、②-2 PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果あり)、を設定し、①PV 普及なしケースの結果を基準として②PV 普及促進施策なしケースの活動量の変化効果による影響を比較した。

環境補助金予算の上限による交付件数制限の影響を考慮するためには、低炭素技術普及モデルと財政予測モデルの連結が必要である(図 6. 1)。図 6. 1 の青い矢印はこれらを連結することによって新しく追加された計算の流れである。各モデル中の変数の変更内容を表 6. 1 と表 6. 2 に示す。各表には、計算式が変更された既存変数と新しく追加された変数が示されている。

● 低炭素技術普及予測モデルの変更内容

モデルの連結において重要な点は、環境補助金の交付件数制限の効果を再現することであり、これが直接的に反映された変数は、PV 導入件数(S₀₄)である。連結に伴う変数の変更

前の PV 導入件数は、PV を未導入した戸建住宅に PV 導入選択率を乗じて算出していた(表 6. 1)。変更後の計算内容を図 6. 2 に示した。図 6. 2 の PV 導入件数の計算は、PV を未導入した戸建住宅に「環境補助金がない場合の PV 導入選択率」を乗じた値に「追加 PV 導入件数」を加えて算出される。ここで、追加 PV 導入件数とは、環境補助金による PV 導入検討件数の差(S_{18})と環境補助金の交付可能件数(S_{20})のそれぞれの計算結果を比較し、このうちより値が小さい方であるとした(S_{04} 、変更後の計算式)。これは、環境補助金による PV 導入検討件数の差(S_{18})は環境補助金が導入された場合に増加する件数であり、環境補助金が交付されない場合には導入を諦めるとの仮定に基づいている。なお、環境補助金による PV 導入検討件数の差(S_{18})は、環境補助金がある場合の PV 導入件数(S_{14})から、環境補助金がない場合の PV 導入件数(S_{17})を減算することで求められる。また、環境補助金がある場合の PV 導入件数(S_{14})と環境補助金がない場合の PV 導入件数(S_{17})の PV 導入件数は、PV を未導入した戸建住宅に対する環境補助金の入力に伴いそれぞれ計算された PV 導入選択率によって計算される。一方、環境補助金の交付可能件数(S_{20})は、財政予測モデルに基づく環境補助金予算を、低炭素技術普及予測モデルにおける環境補助金で除算することで算出される。

● 財政予測モデルの変更内容

財政予測モデルの変更内容を表 6. 2 に示す。財政予測モデルの歳出部門では、6.2 節のケース検討のために、環境補助金予算(T_{26})を入力可能にしている。また、入力した環境補助金予算(T_{26})に合わせて、歳出または歳入が変化するように構築されている。ただし、公共建物の長期利用に伴う工事費差額を環境補助金予算に利用する歳出の設定については、建替対象建物がない年が存在するため、工事費差額が発生しない場合もある(図 6. 3)。その年は、環境補助金予算の増額ができないため、従来の予算を反映する必要がある。そのため、財政予測モデルの歳出部門では、環境補助金の既存予算(T_{41})を追加し、公共建物の長期利用による工事費差額(T_{39})によって他の変数の計算に環境補助金予算(T_{26})または環境補助金既存予算(T_{41})が反映されるように設定した。そのほか、低炭素技術普及予測モデルで利用した後に残った環境補助金予算(S_{25})は歳入部門のその他収入に組み込むものとした。

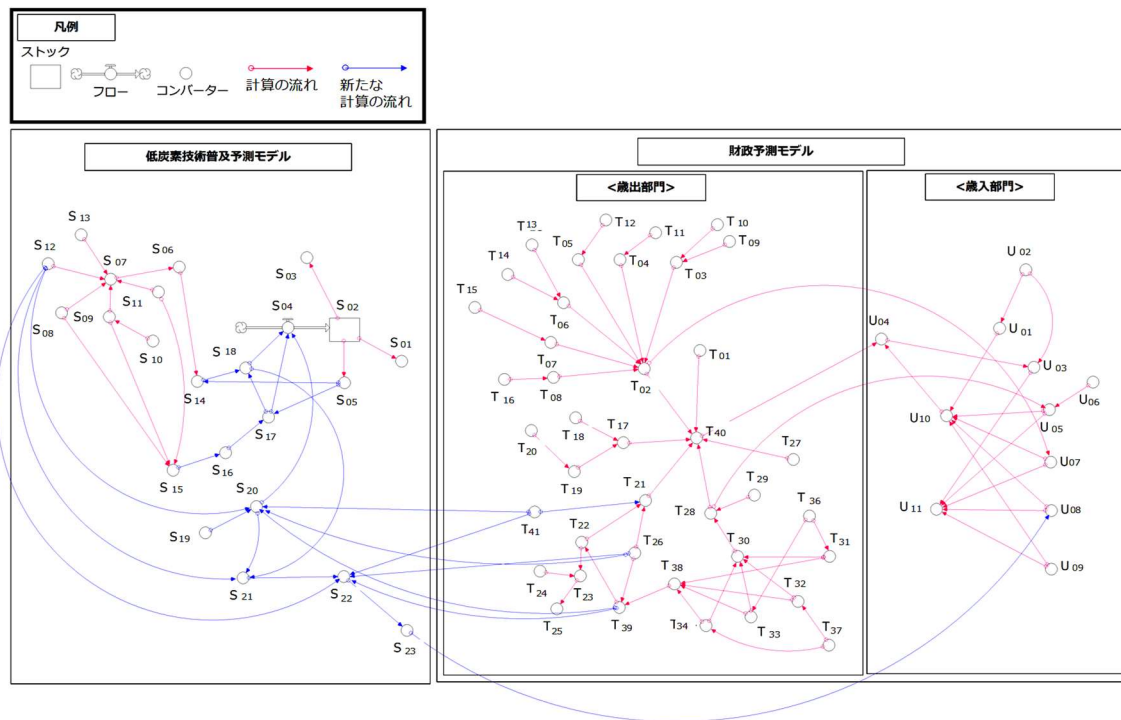


図 6.1 低炭素技術普及予測モデルと財政予測モデルを連結した際の計算フロー

表 6.1 低炭素技術普及予測モデルの変数の変更内容

| 変数 [略語] | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|---|--------------------------|--|
| S04. PV 導入件数 | $S_{05}(t) \times IR(t)$ | $S_{17}(t) + (\text{IF}(S_{19}(t)=0) \text{ THEN } (S_{18}(t))$ $\text{ELSE}((\text{IF}(S_{18}(t) > S_{20}(t))$ $\text{THEN}(S_{20}(t)) \text{ ELSE } (S_{18}(t))))))$ |
| S14. 環境補助金ある場合の PV 導入検討件数 | 既存変数なし | $S_{05}(t) \times IR(t)$ |
| S15. 環境補助金がない場合の PV 初期コスト回収期間 [PP ₂] | 既存変数なし | $\frac{IC(t) \times 4 + C}{EP \times (B(t) \times SC + FIT(t) \times ES)}$ |
| S16. 環境補助金がない場合の PV 導入選択率 [IR ₂] | 既存変数なし | $0.612e^{-0.183 \times PP_2(t)}$ |
| S17. 環境補助金がない場合の PV 導入検討件数 | 既存変数なし | $S_{05}(t) \times IR_2(t)$ |
| S18. 環境補助金による PV 導入検討件数の差 | 既存変数なし | $S_{14}(t) - S_{17}(t)$ |
| S19. 環境補助金開始年度 | 既存変数なし | 1990 年～2013 年 : 0 2014 年以降 : 1 |
| S20. 環境補助金の交付可能件数 | 既存変数なし | $\text{IF}(T_{39}(t) < 0) \text{ THEN } ((T_{41}(t)/S_{12}(t)) \times S_{19}(t))$ $\text{ELSE}((T_{26}(t)/S_{12}(t)) \times S_{19}(t))$ |
| S21. 利用した環境補助金予算 | 既存変数なし | $(\text{IF}(S_{18}(t) > S_{20}(t)) \text{ THEN } (S_{20}(t)) \text{ ELSE } (S_{18}(t))) \times S_{12}(t)$ |
| S22. 残った環境補助金予算 | 既存変数なし | $(\text{IF}(T_{39}(t) < 0) \text{ THEN } (T_{41}(t) \times S_{12}(t))$ $\text{ELSE} (T_{26}(t) \times S_{12}(t))) - S_{21}(t)$ |
| S23. 前年度の残った環境補助金予算 | 既存変数なし | $S_{22}(t-1)$ |

ここで、 t は計算年度、 x は基準年からの経過年数

表 6.2 財政予測モデルの変数の変更内容

| 部門 | 変数 | 変更前の計算式 | 変更後の計算式 |
|---------|--------------------|-------------------------------------|--|
| T. 歳出部門 | T21. 補助金全体 | $T_{22}(t) + T_{26}(t)$ | $T_{22}(t) + (\text{IF}(T_{39}(t) < 0) \text{ THEN } (T_{41}(t)) \text{ ELSE } (T_{26}(t)))$ |
| | T41. 環境補助金 既存予算 | 既存変数なし | なし(実績値入力) |
| U. 歳入部門 | U08. その他収入 | $U_{08}(b) \times f(A_{114}(t), +)$ | $U_{08}(b) \times f(A_{114}(t), +) + S_{25}(t)$ |

ここで、 t は計算年度、 b は初年度値

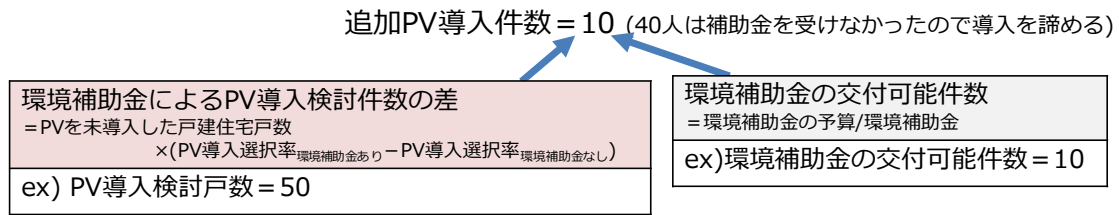


図 6. 2 PV 導入件数(S₀₄)の環境補助金の交付件数制限の効果の概念図

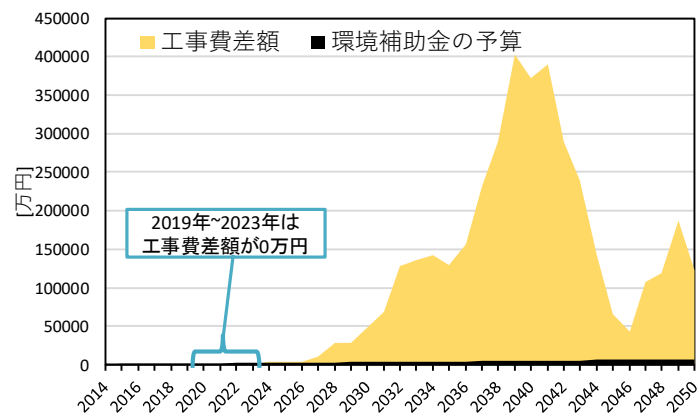


図 6. 3 公共建物の長期利用に伴う工事費差額(柏市)

6.2 太陽光発電パネルを用いた都市 CO₂ 削減可能性

6.2.1 太陽光発電パネル（PV）導入に伴う CO₂ 削減量の計算

PV 導入に伴う世帯当たり CO₂ 削減量は、式 6.1 により算定される。また、CO₂ 削減量の計算に用いた各変数の値を表 6. 3 に示す。年間自家消費電力量は、第 4 章で計算した年間予想発電量に、国土交通省の資料¹⁾に提示されている家庭用 PV4kW の自家消費比率 49% を乗じて算出した。電気 CO₂ 排出係数は、1990 年から 2017 年まで日本の平均の実績値²⁾を利用し、2018 年から 2029 年までの CO₂ 排出係数は、2017 年の CO₂ 排出係数の実績値と 2030 年の環境省の CO₂ 排出係数の目標値³⁾を線形補間して利用した。2030 年以降の CO₂ 排出係数は、2030 年の環境省の CO₂ 排出係数をそのまま利用した。また、PV を運用する間には CO₂ が排出されないが、PV 製造過程では CO₂ が排出されているため、これも計算上考慮している。PV 製造時の CO₂ 排出係数は、一般社団法人太陽光発電協会が公表している結晶シリコン型 PV の CO₂ 排出係数⁴⁾を適用した。

上記に仮定した内容を用いて計算した結果、PV を導入した世帯では、年間 686.22 kg の CO₂ を削減できることが分かった。なお、PV を導入した世帯の世帯当たり CO₂ 排出原単位は付録 C を参照のこと。

ただし、実際には PV の普及は電気の CO₂ 排出係数の変化に影響を及ぼすが、その変化を予測するためには、都市より広域の地域規模の需要予測が必要である。そのため、本研究では将来の PV 普及に伴う電気の CO₂ 排出係数の変化については考慮していない。

$$\begin{aligned} \text{世帯当たり年間 CO}_2 \text{ 削減量} & \qquad \qquad \qquad \dots \text{式 6.1} \\ & = \text{年間自家消費電力量} \times (\text{電気の CO}_2 \text{ 排出係数} - \text{PV の CO}_2 \text{ 排出係数}) \end{aligned}$$

表 6. 3 式 6.1 に利用した値と PV 導入に伴う年間 CO₂ 削減量

| 年間自家消費電力量 | PV(結晶シリコン型)の CO ₂ 排出係数 | 年間 CO ₂ 削減量 |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------|
| [kWh/年] | [kg-CO ₂ /kWh] | [kg-CO ₂ /年] |
| 2088.97 | 0.0455 | 686.22 |

6.2.2 検討ケースの概要

環境補助金予算や一件あたりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能性を計算するためには、結果を比較する基準値が必要である。そのため、本研究では、施策導入の様々な場合(ケース)を想定し、各ケースの結果を比較することで実効的な都市 CO₂ 削減量を把握した。本研究で実施したケースは計 13 ケースであり、各ケースの説明は以下に示す。

- ・ PV 普及促進施策なしケース：FIT 制度や環境補助金制度などの PV 普及施策が実施されなかったケース

- ・ PV 普及促進施策ありケース：FIT 制度や環境補助金制度が実施されたケース

(PV 普及促進施策ありケースは、環境補助金予算の増加計画と一件あたりの環境補助金を変化させ、計 12 個のケースから構成される)

PV 普及促進施策なしケースは、PV を普及させるための施策が実施されない場合の想定であり、このケースの結果を基準として、PV 普及促進施策ありケースの 12 種類のケースの結果を比較した。PV 普及促進施策ありケースで想定した 12 種類のケースの概要を表 6. 4 に示す。これらのケースは、環境補助金予算の増加計画と、一件あたりの環境補助金額を変化させて作成したものである。

柏市ではすでに 2014 年から、戸建住宅用 PV への環境補助金交付が実施されているため、2014 年から 2018 年までの環境補助金予算や一件当たりの環境補助金は実績値を用いた。すなわち表 6. 4 は 2019 年以降の環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化の設定であり、また長期予測は 2050 年まで行うものとした。予算増加計画 A は表 6. 5 に示した 2016 年から 2018 年の環境補助金予算の実績値の増加が横ばいであることを参考に、2018 年の環境補助金予算がそのまま維持されると設定した。予算増加計画 B と C と D では、PV 普及を促進するために、環境補助金予算の実績値が 2014 年から 2018 年までの 5 年間で約 5 倍になっていることを参考に、2050 年までに 2018 年予算の 5 倍まで増加すると設定した。そのうえで、2018 年から 2050 年の間の予算は線形補間によって算出した(図 6. 4)。加えて、予算増加計画 B と C では、予算増加方法として、公共建物の長期利用に伴う工事費差額を利用した(方法(1))。なお、予算増加計画 C では、その差額の約 20%を児童補助金に利用すると設定した。児童補助金を設定した理由は、柏市は将来人口を増やすために様々な計画を立てており、都市の持続可能性や生産性を増加させるために児童補助金を導入し、出生率を高めることにより都市の持続可能性や生産性を増加させることが検討されているためである。一方で、予算増加計画 C では、一人当たり市税を増加させることで得られる新しい収入の一部を環境補助金に利用するとした(方法(2))。

- ・ 方法(1)：歳出の予算を再編する

公共建物の長期利用に伴う工事費差額の利用

→ 公共建物の耐用年数：60 年→90 年

(60 年目の建物を建替工事対象から修繕工事対象にする)

・方法(2)：歳入を増加させる

一人当たり市税の増加に伴う新しい収入の利用

→ 必要な金額に合わせて一人当たり市税を増加させる

方法(1)は、公共建物の長期利用に伴って発生する工事費の差額を環境補助金に利用することを想定している。修繕工事単価は建替工事単価の 60%であることが知られており⁶⁾、建替工事対象が修繕工事対象になることで、予定した工事費から建物工事費の予算が余る。この差額の一部を環境補助金に利用し、20%は児童補助金に利用すると設定した(図 6. 3)。20%という数値は、柏市の補助金予算における児童補助金の割合である⁷⁾。

方法(2)は、必要な予算額に合わせて一人当たり市税を増加させるように設定する。

その他の一件当たりの環境補助金の変化は、第 4 章の長期予測の設定と同一である(7 万円、12 万円、20 万円)。一件当たりの環境補助金の設定理由は以下に通りである。

- ・ 7 万円：2018 年の柏市の環境補助金をそのまま維持すると仮定して設定
- ・ 12 万円：過去の柏市の環境補助金の実績値の中で、最も高かった環境補助金に設定
- ・ 20 万円：PV の普及を促進させるため、1kW 当たり 5 万円(計 20 万円/4kW)

の環境補助金を設定

以上の仮定の下に、1 つの予算増加計画について環境補助金を 3 種類変化させ、合計 12 種類のケースの検討を行った。

表 6. 4 検討ケースの概要(計 12 ケース)

| 環境補助金予算増加計画(2019 年から 2050 年まで) | 一件当たり環境補助金 |
|--|------------|
| A) 予算増加計画：2018 年の予算固定 予算増加方法：なし | 7 万円 |
| B) 予算増加計画：2050 年まで 2018 年予算の 5 倍増 予算増加方法：方法(1) 公共建物の長期利用に伴う工事費差額の利用 (工事費差額の一部は児童補助金に利用しない) | 12 万円 |
| C) 予算増加計画：2050 年まで 2018 年予算の 5 倍増 予算増加方法：方法(1) 公共建物の長期利用に伴う工事費差額の利用 (工事費差額の 20%は児童補助金に利用) | |
| D) 予算増加計画：2050 年まで 2018 年予算の 5 倍増 予算増加方法：方法(2) 一人当たり市税の増加に伴う新しい収入の利用 | 20 万円 |

表 6.5 2014 年から 2018 年までの環境補助金予算推移 ^{7),8)}(柏市のホームページから著者が加工)

| 年 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
|--------------|------|------|-------|-------|-------|
| 環境補助金予算 (万円) | 312 | 807 | 1,383 | 1,380 | 1,380 |

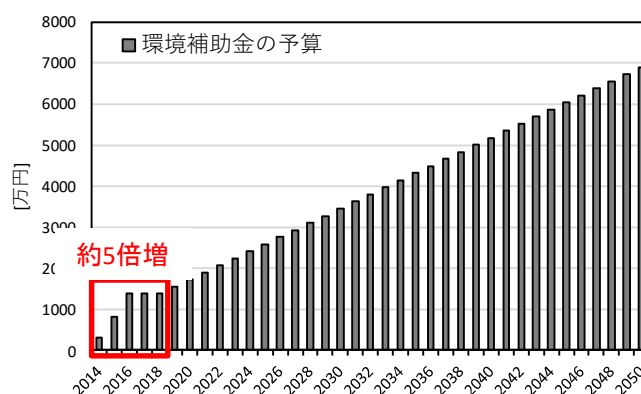


図 6.4 環境補助金予算の将来推移

6.2.3 ケースの検討結果

1) 戸建住宅セクタの CO₂ 削減可能性

まず、各ケースにおける戸建住宅セクタの CO₂ 排出量の推移について説明する(図 6.5)。各ケースの結果は、PV 普及促進施策なしケースの結果を基準として比較を行った。

ケース A と D における CO₂ 排出量の推移は、PV 普及促進施策なしケースより減少する見込みである。しかし、ケース B と C では、環境補助金を導入しているにもかかわらず、PV 普及促進施策なしケースより CO₂ 排出量が大きくなるという結果となった。この結果の直接的な原因は、総人口数の増加であった(図 6.6)。すなわち、総人口数の増加は戸建住宅に住む世帯数を増加させるとした設定の影響が現れたものと推定される。一方で、ケース C は、児童補助金を利用しているにもかかわらず、ケース B の総人口数と大きい変化が見られなかった。従って、ケース B と C の総人口数の変化の要因は、環境補助金予算増加計画にあると推定される。

本研究では、PV 普及促進施策なしケースと PV 普及促進施策ありケースの 12 個のケースの CO₂ 排出量を計算して 2050 年値と 2010 年値を求め、その差を CO₂ 排出量の変化量と設定した。その後、PV 普及促進施策なしケースの計算結果を基準に 12 個のケースの CO₂ 削減量を比較した。

環境補助金の変化に伴う CO₂ 削減量 (図 6.7)は、ケース B と C を除いて大きな違いはな

いが、PV 普及促進施策なしケースと比較すると、環境補助金予算を増加したケース D がより CO₂ 削減量が大きかった。ただし、一般的に一件当たり環境補助金が増加すると CO₂ 削減量が増加することが知られているが、今回は予算の上限を設定しているため、これによって各ケースで CO₂ 削減量が最大になる一件当たりの環境補助金は異なった。ケース A では 7 万円、ケース B と C と D では 12 万円で CO₂ 削減量が最大となった。そして、各ケースで CO₂ 削減量が最大となる一件当たりの環境補助金は、2050 年時点での PV 普及率が最大であった(図 6. 8)。

結果の中では一件当たりの環境補助金が増加しても PV 普及率と CO₂ 削減量が低いケースが見られる(例えば、図 6. 7 と図 6. 8 のケース A(7 万円)とケース A(20 万円)の結果)。その理由は、環境補助金が増加すれば PV 導入を検討する人も多くなるが、一方で環境補助金予算の上限によって交付可能件数が限られるため、一件当たり環境補助金が 20 万円の場合よりも環境補助金が少ない場合が PV を導入する戸数は多なるためである。従って、環境補助金予算が少ないケース A では、一件当たりの環境補助金が最も小さい 7 万円で PV 普及率と CO₂ 削減効果が最大となった。他方、環境補助金予算を増加させたケース B と C と D では、一件当たり環境補助金 12 万円で PV 普及率と CO₂ 削減効果が最大となった。従って、CO₂ 削減量を増加させるためには、一件当たり環境補助金の増加に合わせて環境補助金予算を増加させることが有効である。ただし環境補助金予算増加ができない場合は、一件当たりの環境補助金を適切な金額に設定することが重要だと考えられる。

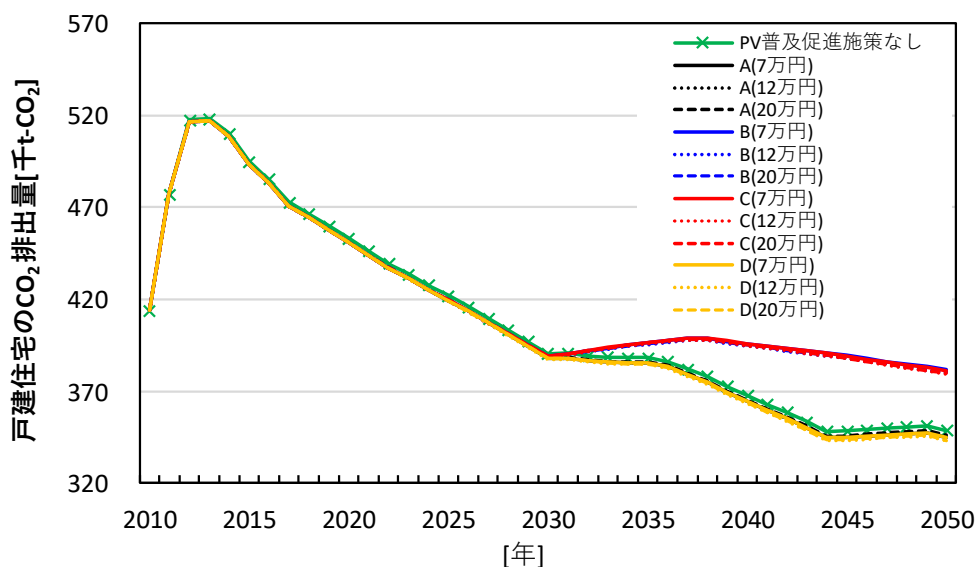


図 6. 5 ケース別戸建住宅セクタの CO₂ 排出量の推移

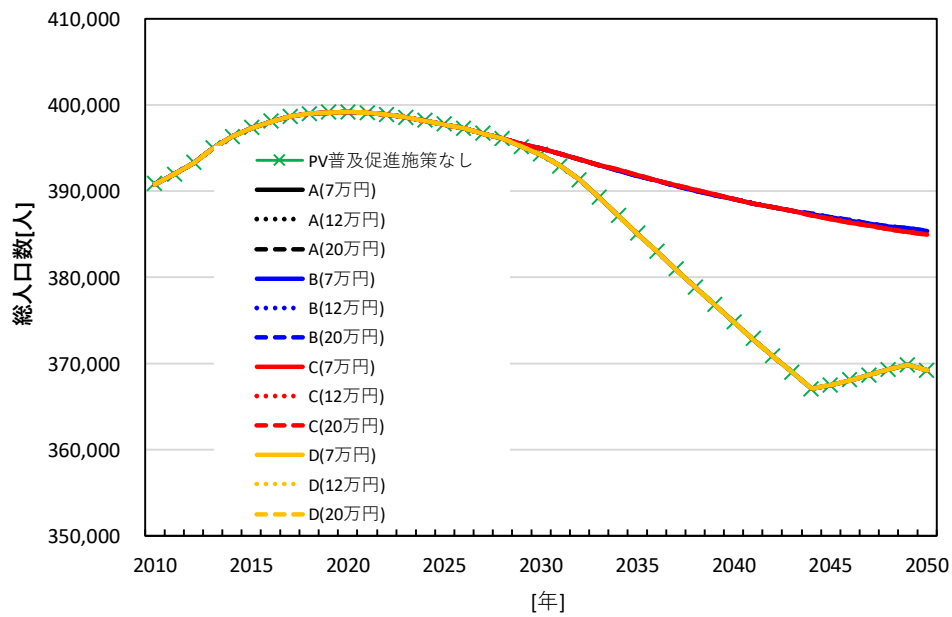


図 6.6 ケース別総人口数の傾向

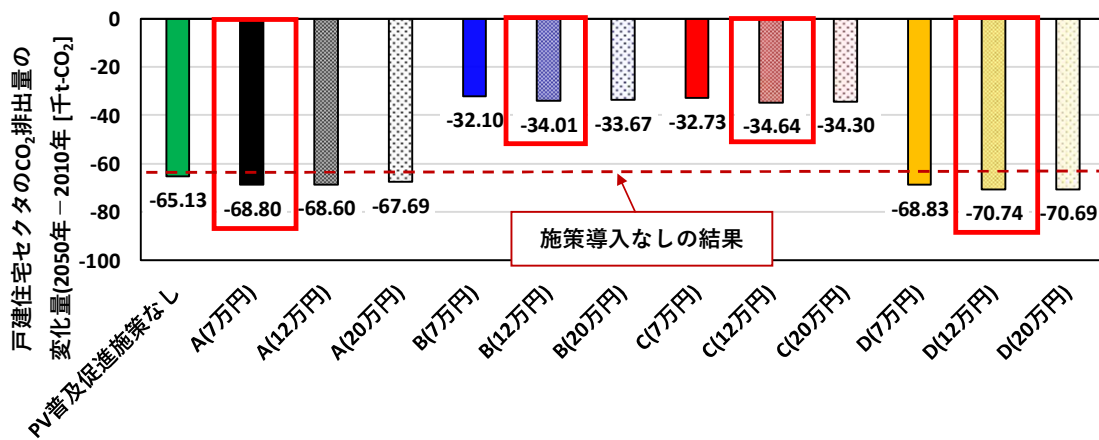


図 6.7 ケース別戸建住宅セクタの CO₂ 排出量の比較(2050 年値と 2010 年値の差)

(PV 普及促進施策なしケースを基準としてその差が戸建住宅 CO₂ 排出量の削減量を示す。

赤実線はケース別最大 CO₂ 削減量)

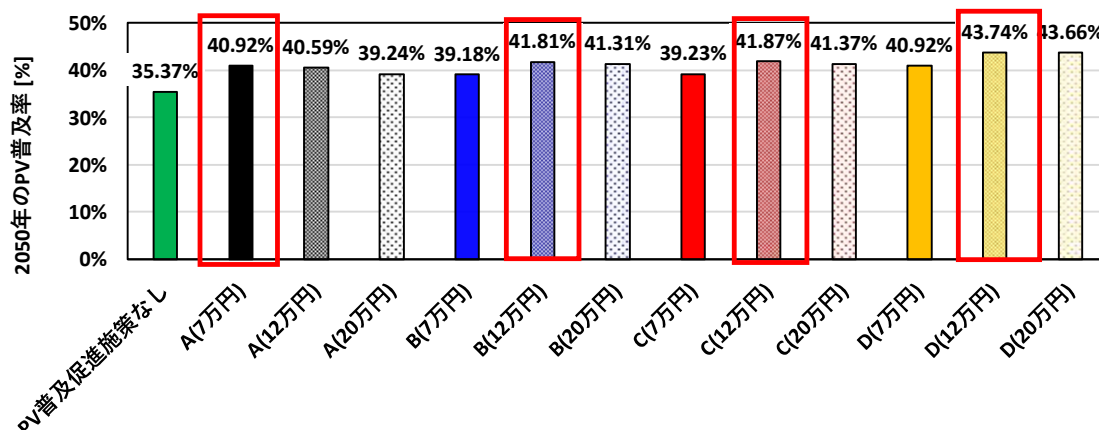


図 6.8 ケース別戸建住宅セクタの 2050 年の PV 普及率

(赤実線はケース別最大 PV 普及率)

2) 都市の総 CO₂ 排出量の削減可能量

本研究では、PV 普及促進施策なしケースや PV 普及促進施策ありケースの 12 個のケースの CO₂ 排出量の計算結果を 2050 年値と 2010 年値の差にして CO₂ 排出量の変化量にした後、PV 普及促進施策なしケースの計算結果を基準として 12 個のケースによる都市の総 CO₂ 削減量を比較した。

その結果、都市の総 CO₂ 排出量の削減量はケース B と C で最大であった(図 6.9)。

次に、一人当たり CO₂ 排出量の比較を行った(ケース B と C では人口が増加するため、この方が比較条件がそろっている)。その結果、一人当たり CO₂ 排出量の削減量もケース B と C で最大であった(図 6.10)。一方で、ケース A と D の都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり CO₂ 排出量は、PV 普及促進施策なしケースの結果より微増する結果となった。戸建住宅での CO₂ 削減量はケース A と D で大きかったが、都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり CO₂ 排出量の削減量は、ケース B と C で大きい結果が得られた。そして、環境補助金予算増加計画(ケース A、B、C、D)の中では、PV 普及率が最も小さかったケースで CO₂ 削減量が最大であった(ケース A(20 万円)、ケース B(7 万円)、ケース C(7 万円)、ケース D(7 万円))。

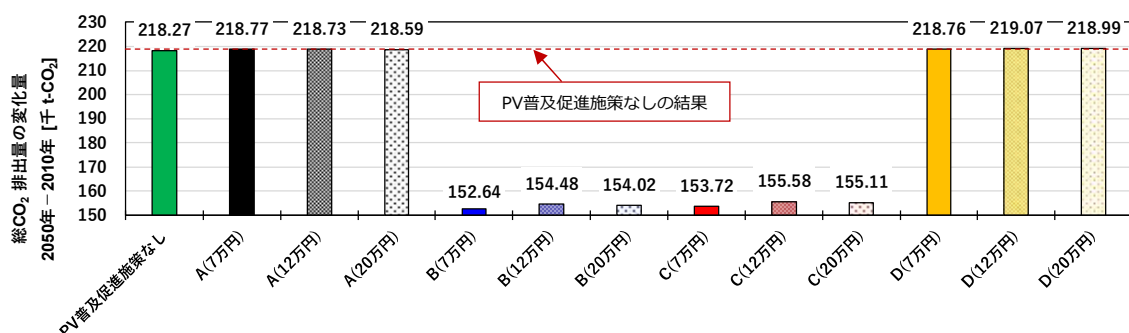


図 6.9 ケース別総 CO₂ 排出量の比較(2050 年値と 2010 年値の差)
(PV 普及促進施策なしを基準としてその差が総 CO₂ 排出量の削減量を示す。)

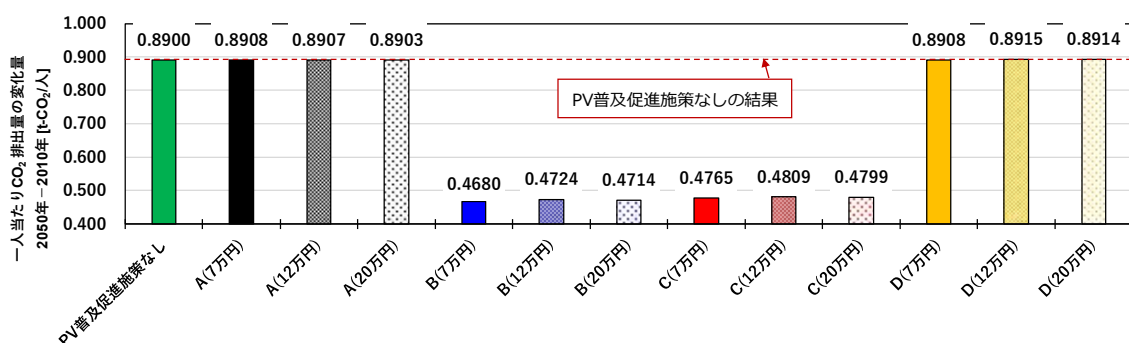


図 6.10 ケース別一人当たり CO₂ 排出量の比較(2050 年値と 2010 年値の差)
(PV 普及促進施策なしを基準としてその差が一人当たり CO₂ 排出量の削減量を示す。)

以上の結果の理由を把握するために、CO₂ 排出量の変化様子が異なる PV 普及促進施策なしケースとケース B の結果のなかでも PV 普及率が最も大きい 12 万円の補助金の場合の、総人口数と都市の総 CO₂ 排出量の推移を比較した(図 6.11)。その結果、PV 普及促進施策なしケースの結果を基準として、ケース B の人口は増加するが、総 CO₂ 排出量は減少した。そのため、都市の総 CO₂ 排出量の削減量と一人当たり CO₂ 排出量の削減量は、ケース B で最も小さい結果となった。

更に、PV 普及促進施策なしケースとケース B(12 万円)における部門別 CO₂ 排出量の推移を比較すると、ケース B(12 万円)は PV 普及促進施策なしケースに比べて民生家庭部門の排出量が多いが、輸送部門と産業部門の増加は小さかった(図 6.12)。ケース B(12 万円)の部門別 CO₂ 排出量の推移が PV 普及促進施策なしケースの部門別 CO₂ 排出量から変化した理由を図 6.13 に示す。PV 普及促進施策なしケースの部門別 CO₂ 排出量とケース B(12 万円)の部門別 CO₂ 排出量が異なる理由は、環境補助金予算の増加に利用した予算増加方法にあ

った。予算増加方法の利用による変化は、その他サービス業セクタと初等教育セクタの着工面積と解体面積から始まる。従って、変化がスタートする活動量には、赤星を付けた(図 6. 13)。PV 普及促進施策なしケースの部門別 CO₂ 排出量を基準としたケース B(12 万円)各部門の変化理由は、下記の通りである(下には、様々な変化理由の中で影響が最も強い理由のみを記した。)。

- ① 民生家庭部門：公共建物の着工・解体面積の減少による延床面積の増加(民生業務部門)→総移動数の増加による総人口数の増加(人口セクタ)→総世帯数の増加(世帯セクタ)→戸建住宅と集合住宅に居住する若年単独世帯数の増加(民生家庭部門)
- ② 民生業務部門：公共建物の着工・解体面積の減少による延床面積の増加(民生業務部門)
- ③ 産業部門：公共建物の着工・解体面積の減少による延床面積の増加(民生業務部門)→建設業の着工・解体面積の減少(産業部門)
- ④ 輸送部門：公共建物の着工・解体面積の減少による延床面積の増加(民生業務部門)→総移動数の増加による総人口数の増加(人口セクタ)→人口密度の増加による第 1 次の従業者数の減少(従業者セクタ)→農業生産額の減少(農林水産業セクタ)→自家用貨物車輸送量の減少(輸送部門)

PV 普及促進施策なしケースは、産業部門の CO₂ 排出量が占める割合が最も大きく、PV 導入による第 2 次の従業者数の増加によって産業部門の CO₂ 排出量も増加する見込みである。一方で、ケース B(12 万円)は、PV 普及促進施策なしケースより民生家庭部門の CO₂ 排出量が増加するにもかかわらず、都市の総 CO₂ 排出量の中で最も大きい割合を占めている産業部門の CO₂ 排出量は PV 普及促進施策なしケースより減少した。そのため、ケース B(12 万円)の都市の総 CO₂ 排出量は、PV 普及促進施策なしケースの結果より減少する結果となった。また、ケース A と D の都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり CO₂ 排出量が PV 普及促進施策なしケースより微増した理由は、環境補助金により PV の普及が促進されると、第 2 次の従業者数が増加し、それによって製造業出荷額が増加して、最終的に産業部門の CO₂ 排出量が増加するためであった。同じ理由により、PV 普及率が低いほど産業部門の CO₂ 排出量が小さくなり、都市の総 CO₂ 排出量が小さくなった。

特に、ケース B と C では、ケース A と D より生産人口数が増加することが確認でき(図 6. 14)、将来の都市の持続可能性や生産性が向上される可能性があると考えられる。

従って、本節の結果からは、CO₂ 削減施策は、都市全体の CO₂ 排出構造を変化させるた

め、実効的な CO₂ 削減施策を選択するためには、CO₂ 削減施策が直接的に適用される部門だけではなく、都市全体の CO₂ 排出量の変化を考慮した適切な判断指標の設定が重要だと考えられる。

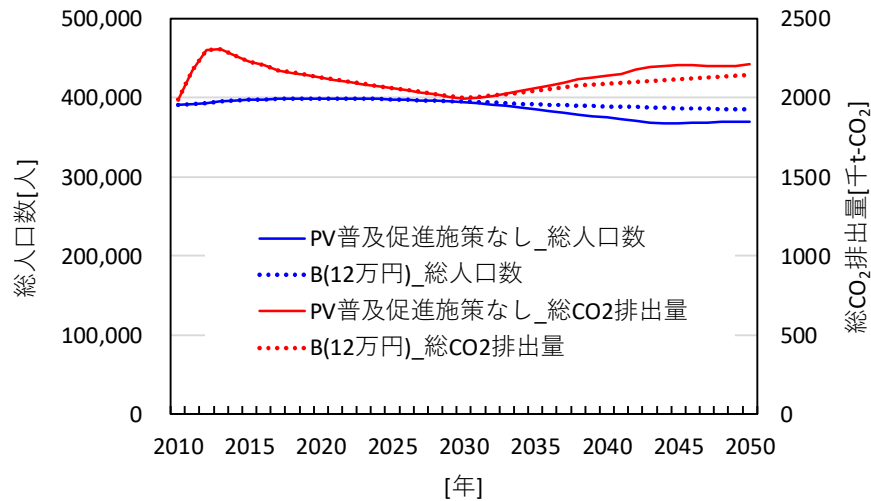


図 6. 11 PV 普及促進施策なしとケース B(12 万円)の総人口数と総 CO₂ 排出量の推移

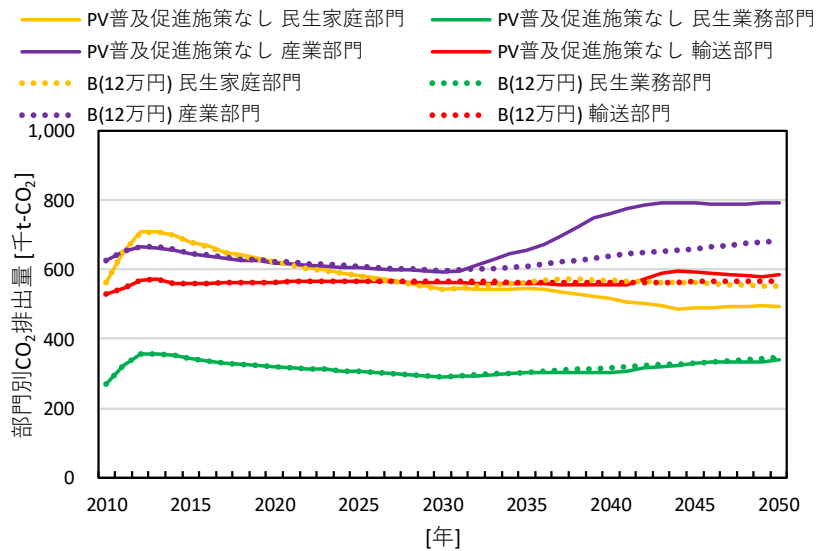


図 6. 12 PV 普及促進施策なしケースとケース B(12 万円)の部門別 CO₂ 排出量の推移

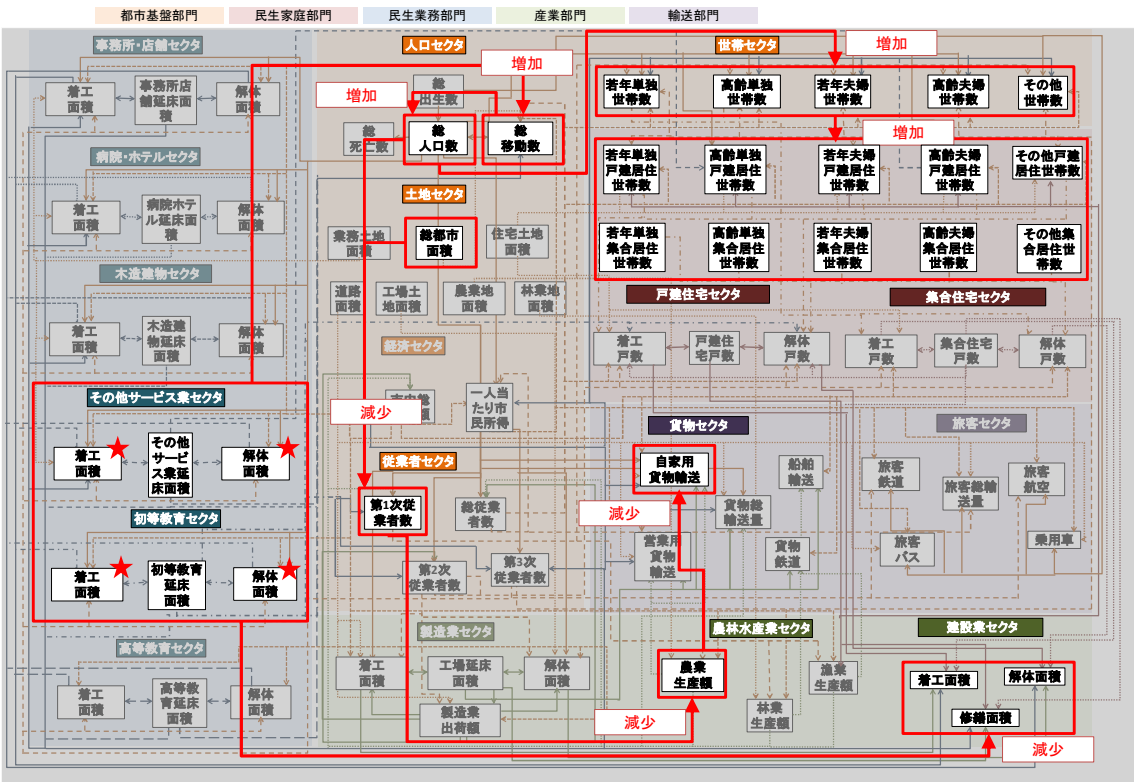


図 6. 13 方法(1)の利用が他の部門に与える影響

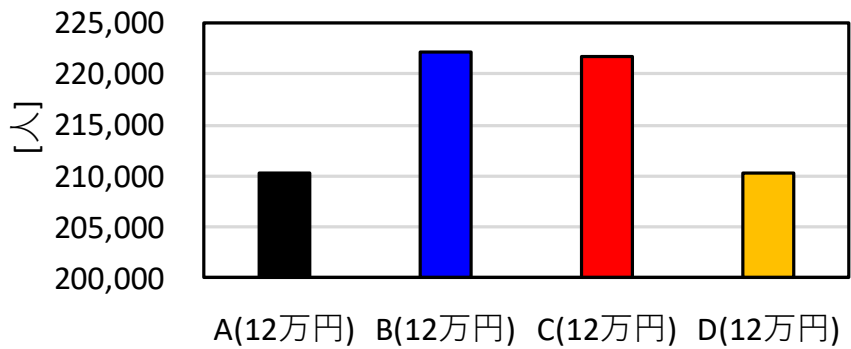


図 6. 14 ケース別 2050 年の生産人口数(15 歳～64 歳人口)

6.3 CO₂削減施策検討における活動量の変化効果の考慮の影響

6.3 節では、6.2 節にも考慮した活動量の変化効果の考慮の影響について再検証した。都市 CO₂削減施策検討における間接的な効果を検討する意義を確認するために、以下の3つのケースを設定して計算結果を比較した。ここでは、活動量の変化効果そのものを検討することを目的とするため、どのケースにおいても、環境補助金施策は導入しない。代わりにここでは、PV 普及自体が全くない場合(PV 普及なしケース)を想定し、施策導入はないが実績値を参考にした割合で PV が普及すると仮定した場合(PV 普及促進施策なしケース)に活動量の変化効果の有無を加えて、これらを比較した。計算結果の比較は、PV 普及なしケースを基準に行った。PV 普及促進施策なしケースの PV 普及率の計算条件は、6.2 節の PV 普及促進施策なしケースと同じである。本節では、PV 普及施策を行うケースの中でさらに、それに伴う従業者雇用効果を考慮する「活動量の変化効果あり」と、考慮しない「活動量変化の効果なし」に分けて計算を行った。

① PV 普及なしケース

PV が普及されないケース

②-1 PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果なし)：

FIT 制度や環境補助金制度なしで PV が普及されたケース、PV 普及に伴う従業者雇用効果なし

②-2 PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果あり)：

FIT 制度や環境補助金制度なしで PV が普及されたケース、PV 普及に伴う従業者雇用効果あり

活動量変化効果に伴う波及効果が他部門に与える影響を把握するために、計算結果は、①の部門別 CO₂排出量の結果から②の結果を引き、2010 年から 2050 年までの値を累積して表した(図 6.15)。

結果として、②-1 では、エネルギー削減効果だけが考慮されたため、民生家庭部門の累積 CO₂削減量と都市全体の累積 CO₂削減量が同じ値となった。一方、②-2 では、エネルギー削減効果に伴う民生家庭部門の CO₂削減とともに、活動量変化効果による他の部門の増加の影響から、結果的に都市全体の累積 CO₂排出量が増加した。②-2 の結果となった原因を把握するために、従業者数の変化が他の部門に与える影響を図 6.16 に示す。変化がスタートする活動量には、星を付けた(図 6.16)。第2次の従業者数の変化による他の部門への

影響は赤色で示し、第 3 次の従業者数の変化による他の部門への影響は青色で示した。PV 普及なしケースの結果を基準とし、PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果あり)の変化理由は、下記の通りである。

- ① 民生家庭部門：第 3 次の従業者数の増加(従業者セクタ)→若年単独世帯数の増加(世帯セクタ)→戸建住宅と集合住宅に居住する若年単独世帯数の増加(民生家庭部門)
- ② 民生業務部門：第 3 次の従業者数の増加(従業者セクタ)→民生業務部門の着工面積の増加→民生業務部門の延床面積の増加
- ③ 産業部門：第 2 次の従業者数の増加(従業者セクタ)→製造業出荷額の増加(産業部門)
- ④ 輸送部門：第 2 次の従業者数の増加(従業者セクタ)→製造業出荷額の増加(製造業セクタ)→貨物総輸送量の増加(輸送部門)

このような各部門の活動量の変化は、民生家庭部門の活動量も変化させるため、民生家庭部門での累積 CO₂ 削減量も②-1 とは異なる結果が得られた。②-2 では民生家庭部門の以外の部門で CO₂ 排出量が増加するため、最終的に、②-2 の都市全体の累積 CO₂ 削減量は、PV 普及なしケースより増加する結果となった。

以上に示したように、活動量の波及効果を考慮することで、施策を導入しなかった部門への影響が検討可能となり、より実効的な都市全体の CO₂ 排出量の変化が把握できる。従って、都市の CO₂ 削減施策の検討には、施策導入に応じたエネルギー削減効果と活動量変化効果を同時に考慮して計算することが重要である。

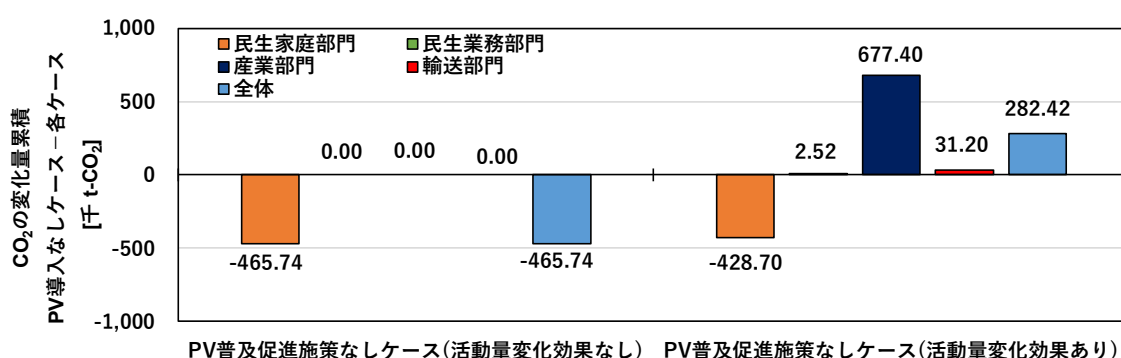


図 6.15 部門別 CO₂ 変化量の累積量(2010 年から 2050 年まで)

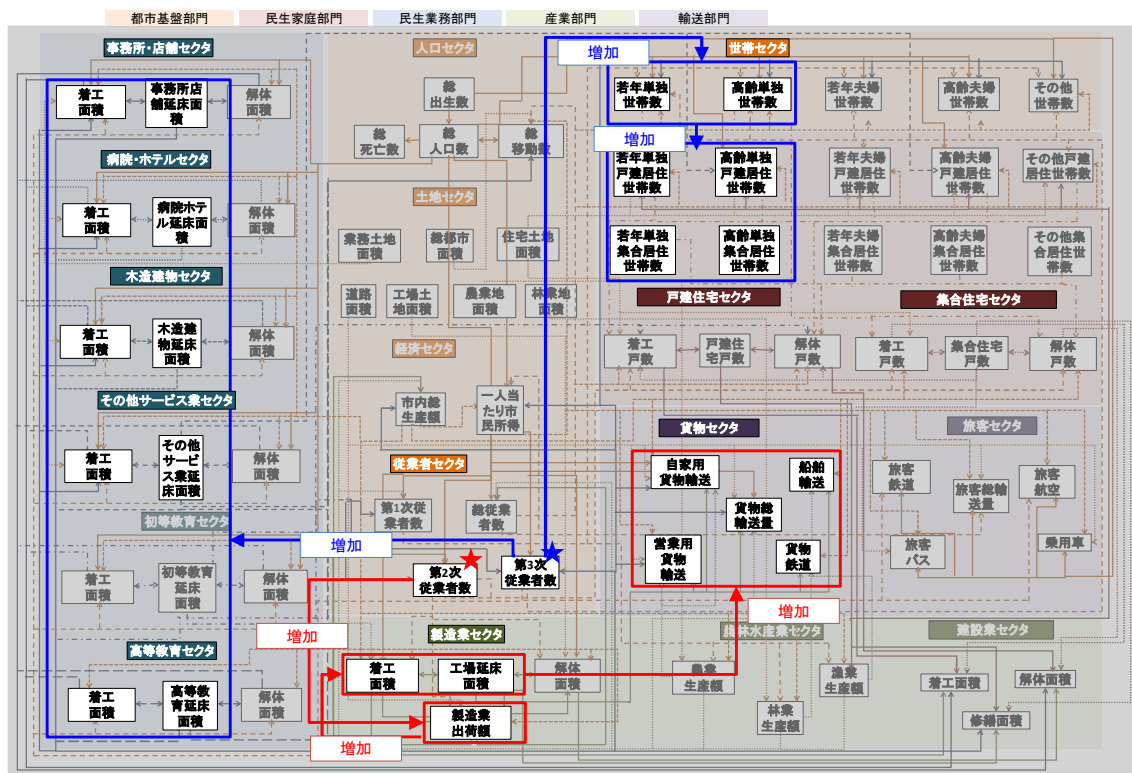


図 6. 16 従業者数の変化が他の部門に与える影響

6.4 本章のまとめ

本章では、本研究による都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの有効性の検討を目的として、前章までに開発したモデルを連結して、柏市の戸建住宅への PV 普及を一例として、環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能量の計算を行った。主な結論は以下の通りである。

＜太陽光発電パネルを用いた都市 CO₂ 削減可能量＞

1) 戸建住宅セクタの CO₂ 削減可能量

- ・ PV 普及促進施策なしケースの結果を基準として比較した戸建住宅セクタの CO₂ 削減効果は、環境補助金予算が大きいケース D(一人当たり市税を増加して環境補助金予算を増加したケース群)で最大となった。
- ・ 環境補助金予算の増加方法と一件当たりの環境補助金(7 万円、12 万円、20 万円)を変化させた 12 種類のケースの中で、戸建住宅セクタの CO₂ 削減可能量が最大となる一件当たりの環境補助金は、

ケース A(2018 年の環境補助金予算が 2050 年まで固定)では一件当たり環境補助金が 7 万円で PV 普及率と CO₂ 削減量が最大となり、

これより一件当たりの環境補助金予算を増加させたケース B、C、D(2018 年の環境補助金予算が 2050 年まで 5 倍増加)では、一件当たりの環境補助金が 12 万円で PV 普及率と CO₂ 削減量が最大となった。

上記のケース A、B、C、D で環境補助金が小さくても CO₂ 削減量が大きい理由は、一件当たりの環境補助金が増加するほど PV 導入を検討する人が多くなるが、他方で環境補助金予算の上限の影響で交付可能件数は少なくなり、結果的に追加で PV を導入する戸数が少なくなるためである。

- ・ CO₂ 削減量を増加させるためには、一件当たりの環境補助金の増加と共に、環境補助金予算を増加させることが重要であり、環境補助金予算増加ができない場合は、一件当たりの環境補助金を適切な金額に設定するのが重要である。

2) 都市の総 CO₂ 排出量の削減可能量

- ・ 都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり総 CO₂ 排出量の削減量は、ケース B と C で最大であり、戸建住宅での CO₂ 削減量が大きかったケース A と D では、PV 普及促進施策なしケースの都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり総 CO₂ 排出量の結果より微増した。

- ・ PV 普及促進施策なしケースの結果を基準に各ケースの結果が上記のようになった主な理由は下記の通りである。
 - ケース B と C で都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり総 CO₂ 排出量の削減量が最大となった理由：公共建物の着工・解体面積の減少による延床面積の増加(民生業務部門)→建設業の着工・解体面積の減少(産業部門)
 - ケース A と D で都市の総 CO₂ 排出量と一人当たり総 CO₂ 排出量が微増となった理由：第2次の従業者数の増加(従業者セクタ)→製造業出荷額の増加(産業部門)
- ・ 結論として、CO₂ 削減施策は、都市全体の CO₂ 排出構造を変化させるため、実効的な CO₂ 削減施策を選択するためには、CO₂ 削減施策が直接的に適用される部門だけではなく、活動量間の波及効果の影響を受ける都市全体の CO₂ 排出量の変化を考慮した適切な判断指標の設定が重要だと考えられる。

<CO₂削減施策検討における活動量の変化効果の考慮の重要性>

- ・ PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果なし)は、エネルギー削減効果だけが考慮されたため、民生家庭部門の累積 CO₂ 削減量と都市全体の累積 CO₂ 削減量が同じ値となった。
- ・ PV 普及促進施策なしケース(活動量の変化効果あり)は、エネルギー削減効果に伴う民生家庭部門の CO₂ 削減とともに、活動量の変化効果に伴う他の部門への影響によって CO₂ 排出量が増加した。また、このような他部門の活動量の変化は、民生家庭部門の活動量も変化させるため、民生家庭部門の累積 CO₂ 削減量も、PV 普及促進施策なしケース(活動量変化効果なし)とは異なった。②-2 では民生家庭部門の以外の部門で CO₂ 排出量が増加するため、最終的に、②-2 の都市全体の累積 CO₂ 削減量は、PV 普及なしケースより増加する結果となった。
- ・ 活動量の波及効果を考慮することで、施策を導入しなかった部門に発生しうる影響が検討可能となり、それに伴う実効的な都市の総 CO₂ 排出量の変化も把握できる。従って、都市の CO₂ 削減施策の検討には、施策導入に応じたエネルギー削減効果と活動量の変化効果を共に考慮したモデル化と計算を行うことが重要だと考えられる。

<本章の限界>

- ・ 本章における将来の CO₂ 排出量予測においては、活動量の変化に着目しており、エネルギー消費原単位や CO₂ 排出係数の変化は考慮していない。その理由は、エネ

ギー消費原単位や CO₂ 排出係数は、世界のエネルギー供給価格や地域エネルギー需要などによって決定されるため、都市より大きいスケールでの予測が必要となるためである。従って本研究では、これらについては今後の課題とした。

参考文献

- 1) 国土交通省：太陽光発電設備の一次エネルギー消費量削減効果について,
<http://www.mlit.go.jp/common/000222326.pdf> (アクセス日：2018.10)
- 2) 国立研究開発法人国立環境研究所：2017 年度（平成 29 年度）の温室効果ガス排出量（速報値）について, p.16, <http://www.nies.go.jp/whatsnew/jqjm1000000ezs99-att/jqjm1000000ezsut.pdf>
(アクセス日：2018.12)
- 3) 環境省：2050 年を見据えた温室効果ガスの大幅削減に向けて, p.38
- 4) 太陽光発電協会：表示に関する業界自主ルール（平成 24 年度）,
http://www.jpca.gr.jp/pdf/rules_expression_h24.pdf (アクセス日：2018.10)
- 5) 柏市：柏市第五次総合計画,
http://www.city.kashiwa.lg.jp/soshiki/020100/p034547_d/fil/daigojisougoukeikakuall.pdf (アクセス日：2018.12)
- 6) 一般社団法人 地球総合整備財団：公共施設更新費用試算ソフト仕様書 Ver.2.10, p.7, 2016
- 7) 柏市：補助金交付状況の公表
<http://www.city.kashiwa.lg.jp/soshiki/040100/p005486.html> (アクセス日：2018.10)
- 8) 柏市：平成 30 年度柏市エコハウス促進総合補助制度,
<http://www.city.kashiwa.lg.jp/ecosite/ondanka/shimin/p045418.html> (アクセス日：2018.10)

第 7 章

結論

7.1 まとめ

本論文は、都市 CO₂ 削減施策の検討における低炭素技術の普及施策による CO₂ 削減可能性を把握することを目指し、都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの開発に向けて行われたモデルの構築や検討の結果を述べたものである。それぞれの章で得られた主な結果を以下にまとめる。

第1章では、研究の背景、既往研究の検討と本研究の位置づけ、本研究の目的と研究の構成を示した。研究背景として、低炭素技術の普及による実際の CO₂ 削減効果を把握するためには、低炭素技術の導入に伴う活動量の変化効果や財政状況の制約の影響を考慮し、都市の各部分の波及効果を考慮可能な CO₂ 削減施策の検討システムの開発が必要であることを述べた。次に、関連研究を整理し、本研究の背景で言及した問題がまだ研究上の課題であることを確認した。それにより、本研究では、低炭素技術の普及施策による CO₂ 削減可能性を把握するために、都市 CO₂ 削減施策立案支援システムを開発し、事例として柏市の戸建住宅への PV 普及に伴う都市 CO₂ 削減可能性を予測することを目的とすることを述べた。研究の構成として、まず都市 CO₂ 削減施策立案支援システムを構成する都市活動量予測モデル(第2章と第3章)、低炭素技術普及予測モデル(第4章)、財政予測モデル(第5章)を構築すること、その後、全てのモデルを連結し、開発したシステムを用いて検討事例として柏市の戸建住宅への PV 普及を対象に環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市 CO₂ 削減可能性を予測する(第6章)ことを行うことを述べた。

第2章では、都市活動量予測モデルを構築し、モデルの汎用性を検討した。モデルの汎用性の検討のために、都市の規模と特徴が異なる福岡市、柏市、熊野市に適用し、活動量と部門別 CO₂ 排出量の精度検証を行った。その結果、全ての都市で高い計算精度が得られた。従って、各都市に存在する特殊な変数を使わない場合でも、都市モデルのシステム構造と変数を一般化し、活動量間の関係を表す関数に都市の特徴を反映することで、多様な都市の活動量が精度よく計算できること、すなわちモデルの汎用化が可能であることを確認した。

第3章では、第2章で残された課題を検討するために、活動量間の関係を表す関数を同定する手法の改良を行った。まず、都市活動量予測モデルの適用性を向上するために、関数同定手法の計算方法を遺伝的アルゴリズムから、計算速度が速い逐次最小二乗法に改良

した。その結果、計算時間は従来の関数同定手法の約 1/18(約 147 時間から約 8 時間)に短縮された。その後、福岡市、柏市、熊野市を対象に改良した関数同定手法を用いて活動量と CO₂ 排出量の精度検証を行った。その結果、高い計算精度が得られ、改良した関数同定手法を用いて都市活動量予測モデルの適用性が向上できることが確認された。

次に、改良した関数同定手法を用いて、都市活動量予測モデルの計算精度の向上を検討した。検討は、関数同定の際の関数の傾きを設定する方法に対して行った。従来の設定方法では、関数の傾きを既往研究や社会通念から事前に設定していたが、これに対して傾きを事前に設定せず、最適化計算の結果を与える方法を試みた。それぞれの設定方法を用いて活動量を計算した結果、従来の設定方法では、福岡市、柏市、熊野市で高い計算精度が得られた。しかし、変更した設定方法では、熊野市の一部の活動量で計算精度が低くなることが確認された。この結果より、都市活動量予測モデルの高い計算精度を維持するためには、前章までの設定方法を利用することが妥当であると結論付けた。

最後に、改良した関数同定手法を用いて、関数同定の設定による計算精度を検討した。関数同定に使用する実績値の利用方法に伴うケースの分類は、実績値の数によってケース(a)(実績値の数：21 個)とケース(b)(実績値の数：11 個)に分けた。福岡市・柏市・熊野市における部門別 CO₂ 排出量の計算誤差の結果、ケース(a)は将来予測に利用可能な計算精度が得られたが、ケース(b)の計算精度は将来予測に適切ではなかった。しかし、ケース(b)に関数同定手法の探索範囲の設定を修正し、ケース(c)にして、各都市の部門別 CO₂ 排出量を計算した結果、長期予測に利用可能な計算精度が得られた。この結果により、実績値の数を減らして関数を同定しても、関数が探索される条件によって長期予測の計算を行う判断基準を満たす関数が得られることを確認した。しかし、将来予測に影響を与える関数の形は実績値の数に左右される。本来は、関数同定に適切な実績値の数を検討する必要があるが、本研究で利用可能な実績値の数は限られているため、この事項に対しては今後の課題にせざるを得ないと考えられる。従って、本論文では、暫定的にケース(a)で関数を決定した。

第 4 章では、低炭素技術普及予測モデルを構築し、モデルの精度検証や長期予測を行った。低炭素技術の普及予測モデルの構築のための対象地域と対象技術は、過去の実績値が多い柏市の戸建住宅用 PV とした。モデルの精度検証の結果から、PV 普及率の計算値が実績値とほぼ一致することを確認した。一方、PV 普及率の長期予測では、一件当たりの環境補助金を変化させた 3 つのケースを設定し、その影響について検討した。その結果、一件当たりの環境補助金を増加させるほど、普及率が高くなることが示された。これにより、

CO₂削減施策としてPV普及促進を検討する場合には、一件当たりの環境補助金の増加が有効であることから、それに合わせて環境補助金全体の予算を検討すべきであることが確認された。

第5章では、財政予測モデルを構築し、柏市を事例として財政予測モデルの精度検証や長期予測を行った。モデルの精度検証の結果、モデルを構成する項目の計算値は、実績値の傾向を良く捉え、高い精度が得られた。一方、財政の長期予測の結果、歳出部門は、2050年まで増加を続ける見込みであり、その原因は、扶助費と投資的経費にあることが分かった。また歳入部門では、増加する歳出に歳入を合わせるために一人当たり市税の増加が必要であるという結果となった。従って、将来の財政状況において新しい補助事業を行うためには、一人当たり市税をさらに増加するなどの財政計画の変化の検討が必須であることを確認した。

第6章では、前章までに開発したモデルを連結し、柏市の戸建住宅へのPV普及を施策事例として、環境補助金予算や一件当たりの環境補助金の変化に伴う都市CO₂削減可能量の計算を行った。その結果、一件当たりの環境補助金の増加に伴って、PVが導入される戸建住宅のCO₂削減量は増加することが分かったが、同時に補助金予算の上限の影響を受けるため、一件当たりの環境補助金を増大させることで必ずしもCO₂削減量が最大にはならないことが示された。一方で、都市全体のCO₂削減量の結果は、戸建住宅でのCO₂削減量が大きいほど、小さくなることが分かった。それは、環境補助金の予算を増加するために行った財政計画によって都市のCO₂排出量構造が変わるためであることを確認した。これにより、都市規模での実効的なCO₂削減施策を選択するためには、CO₂削減施策が直接的に適用される部門だけではなく、間接的効果の影響を受ける都市全体のCO₂排出量の変化を考慮した適切な判断指標の設定が重要であることが明らかにした。最後に、PVを導入しないケースを基準として、施策検討に活動量の変化効果を考慮しないケースと考慮したケースの結果を比較して、活動量の変化効果を考慮した施策検討の重要性を示した。

7.2 今後の展望と課題

本研究は、都市のある部門に適用した CO₂ 削減施策が都市内の他の部門と隣接都市に影響を与えると考え、今後、都市の部門別の CO₂ 削減施策導入による都市全体の CO₂ 削減効果と隣接都市への CO₂ 排出量の変化の影響の検討の可能とすることを目指している。

上記の目標を達成するためには、先に都市の独自性や複数都市間の関係性などを反映できる形で都市モデルを構築する必要がある。そのため、本論文では、都市 CO₂ 削減施策立案支援システムを開発した。

本論文の中心的な意義は、低炭素技術を利用した都市 CO₂ 削減施策の効果検討において、エネルギー削減効果と活動量の変化効果を共に考慮した実効的な CO₂ 削減量の予測を行うことが可能となった点にある。

具体的には、エネルギー削減効果に関しては、低炭素技術の普及に環境補助金の予算の上限を考慮可能にすることで、低炭素技術の普及が最大になる一件当たりの環境補助金の検討が可能となった。活動量の変化効果に関しては、これまで定量的に評価できなかった活動量の効果による CO₂ 排出量の変化が、都市活動量の計算を考慮することで評価可能となった。また、都市内の諸部門の施策検討による他部門への影響の検討が可能となった。さらに、財政計画の変更に伴う活動量の変化を定量的に計算可能としたことで、CO₂ 排出量を最小とする財政計画を検討することが可能となった。

上記のように、本研究で行った都市 CO₂ 削減施策立案支援システムの開発は、都市 CO₂ 削減施策の検討における重要な意義を持つが、それらにもまだ検討すべき課題が残されている。

1. 都市活動量予測モデルに関して

- ・ 現代においては、都市間の移動は容易であるため、施策導入の影響は隣接都市への居住地移動や企業移動などの形で現れると考えられる。従って、今後、都市活動量を考慮した施策の検討には、隣接都市への影響の考慮が必要である。
- ・ 人口と建物などの活動量は、定着する区域によって CO₂ 排出量の計算結果が変化すると考えられる。従って、今後、都市の活動量を考慮した施策の検討には、地理的な情報の考慮が必要である。
- ・ 今後、都市活動量予測モデルの汎用性を補完するためには、都市活動量予測モデルを適用する都市が増えることによって、活動量や活動量間の因果関係の設定の再検討が必要である。

- ・ 将来予測の結果の信頼性をより向上させるためには、関数同定に使用する適切な実績値の数を検討する必要がある。
2. 低炭素技術普及予測モデルに関して
 - ・ 実際に低炭素技術の導入は、世帯の収入や人のライフスタイルや商品が販売されるマーケット状況などによって変化すると考えられる。また、低炭素技術は寿命によって更新が必要となる。この際、低炭素技術の再導入の希望は最初の低炭素技術の導入の希望と異なると考えられる。従って、より正確な CO₂ 削減効果を計算するためには、このような条件を反映した設定が必要である。
 3. 財政予測モデルに関して
 - ・ 本研究では、活動量の変化に影響を与える財政の構成要素として児童補助金、一人当たり市税、投資的経費のみを考慮した。しかし、財政を構成する全ての要素は、多様な都市の活動量と直接的・間接的な関係を形成している。従って、様々な財政計画の変化を考慮するためには、財政項目の追加や活動量の関係の連結が必要である。
 - ・ 財政予測モデルにおいて粗く扱っている項目(市税計算)と細かく扱っている項目(児童補助金)があり、粗く扱った項目に関しては今後詳細を反映できるように修正が必要である。
 4. その他
 - ・ 本研究では、エネルギー消費原単位や CO₂ 排出係数の予測については、都市よりも大きなスケールでの検討が必要であるため、将来 CO₂ 排出量の計算において考慮しないものとしている。しかし、より正確な施策効果を検討するためには、エネルギー消費原単位や CO₂ 排出係数の将来予測についても考慮する必要がある。

付録

付録 A. 統計資料出典

付録 A1. 都市活動量予測モデルの構築に必要な変数の統計資料の出典

都市活動量予測モデルの構築に必要な活動量の統計資料の出典を表 A-1 に示す。表 A-1 に示した統計資料は、どのような市町村でも利用可能なものを示している。そのため、活動量によっては、市町村レベルの統計資料が存在せず、都道府県レベルまでの統計資料しか存在しない場合がある。その時は、活動量を案分して利用する(式 A-1)。式 A-1 に市内総生産を例として案分方法を示す。活動量を案分する際に利用する変数は、案分対象になる活動量と相関が強い変数を選択する。なお、表 A-1 に示した統計資料は、都市活動量予測モデルの構築に利用可能な最低限の基準である。従って、各活動量に対して本研究で提示した表 A-1 よりも適切な統計資料が存在する場合は、ほかの統計資料を利用しても良い。

$$\text{A 市の市内総生産} = \text{A 県の市内総生産} \times (\text{A 市の総人口数} / \text{A 県の総人口数}) \quad \cdots \text{式 A-1}$$

表 A- 1 都市活動量予測モデルの構築に必要な活動量の統計資料の出典

| セクタ分類 | 活動量 | 統計資料(入手可能レベル) |
|------------------|--------------|---|
| 人口 | 5歳階級別人口数 | 国勢調査(都道府県市区町村) |
| | 5歳階級別死亡数 | 人口動態統計(都道府県12大都市) |
| | 出生数 | 人口動態統計(都道府県12大都市) |
| | 社会要因による人口変化数 | n年の社会要因による人口変化数=(n+1)年の総人口数-n年の出生数+n年の総死亡数 |
| 世帯数 | 若年単独世帯数 | ・世帯数:国勢調査(都道府県市区町村) ・建て方別居住世帯:住宅土地統計年報(都道府県人口5万以上都市) |
| | 若年夫婦世帯数 | |
| | 高齢単独世帯数 | |
| | 高齢夫婦世帯数 | |
| | その他世帯数 | |
| | 若年単独戸建居住世帯数 | |
| | 若年単独集合居住世帯数 | |
| | 若年夫婦戸建居住世帯数 | |
| | 若年夫婦集合居住世帯数 | |
| | 高齢単独戸建居住世帯数 | |
| | 高齢単独集合居住世帯数 | |
| | 高齢夫婦戸建居住世帯数 | |
| | 高齢夫婦集合居住世帯数 | |
| | その他戸建居住世帯数 | |
| その他集合居住世帯数 | | |
| 従業者 | 総従業者数 | 国勢調査(都道府県市区町村) |
| | 第1次従業者数 | |
| | 第2次従業者数 | |
| | 第3次従業者数 | |
| 土地 | 住宅地面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町村) |
| | 商業地面積 | |
| | 林業地面積 | |
| | 農業地面積 | |
| | 道路面積 | |
| 財政 | 市内総生産 | 公共施設状況調(都道府県市区町村) |
| | 一人当たり市民所得 | 県内総生産:名目(都道府県) 県民所得(都道府県) |
| 建設業 | 民生業務着工・解体面積 | 他のセクタの内容参照 |
| | 民生家庭着工・解体戸数 | |
| 農林水産業 | 農業生産額 | 生産農業所得統計(都道府県) |
| | 林業生産額 | 生産林業所得統計(都道府県) |
| | 漁業生産額 | 漁業生産額(都道府県) |
| 製造業 | 製造品出荷額 | 工業統計(都道府県市区町村) |
| | 延床面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町村) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 戸建住宅 | 総戸数 | 住宅・土地統計調査(都道府県市区) |
| | 着工戸数 | 住宅・土地統計調査(都道府県市区) |
| | 解体戸数 | n年の解体戸数=n年の住宅戸数+n年の着工戸数-(n+1)年の住宅戸数 |
| 集合住宅 | 総戸数 | 住宅・土地統計調査(都道府県市区) |
| | 着工戸数 | 住宅・土地統計調査(都道府県市区) |
| | 解体戸数 | n年の解体戸数=n年の住宅戸数+n年の着工戸数-(n+1)年の住宅戸数 |
| 事務所・店舗 | 延床面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町) 公共施設状況調書(都道府県市区町) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 病院・ホテル | 延床面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| その他サービス業 | 延床面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町) 公共施設状況調書(都道府県市区町) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 木造建物 | 延床面積 | 固定資産概要調書(都道府県市区町) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 初等教育 (幼稚園-高校) | 延床面積 | 文部科学統計要覧・文部統計要覧(全国) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 高等教育 (大学など) | 延床面積 | 文部科学統計要覧・文部統計要覧(全国) |
| | 着工面積 | 建築統計年報(都道府県市) |
| | 解体面積 | n年の解体面積=n年の延床面積+n年の着工面積-(n+1)年の延床面積 |
| 旅客 | 総輸送人Km | 各輸送量の合計 |
| | 旅客鉄道人Km | 鉄道輸送統計年報(都道府県) |
| | 乗用車人Km | 自動車輸送統計年報(都道府県) |
| | バス人Km | 陸運統計要覧(都道府県) |
| | 航空人Km | エネルギー-経済統計要覧(全国) |
| 貨物 | 乗用車台数 | 自動車保有車両数統計(市区町村) |
| | 総輸送トンKm | 各輸送量の合計 |
| | 営業用貨物車トンKm | 自動車輸送統計年報(都道府県) |
| | 自家用貨物車トンKm | 陸運統計要覧(都道府県) |
| | 船舶トンKm | エネルギー-経済統計要覧(全国) |
| | 貨物鉄道トンKm | 鉄道輸送統計年報(都道府県) |

付録 A2. 財政予測モデルの構築に必要な変数の統計資料の出典

表 A-2 財政予測モデルの構築に必要な活動量の統計資料の出典

| 変数 | 統計資料（入手可能レベル） |
|---------------|--------------------|
| 歳出の各項目の執行金額 | 地方財政状況調査（都道府県市町村） |
| 歳入の各項目の執行金額 | |
| 築年数別公共建物の延床面積 | 公共施設等総合管理計画（都道府県市） |

付録 B. 関数同定手法のコード(改良手法)

```

#!/usr/bin/env python3
#-*- coding: utf-8 -*-
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize
import matplotlib.pyplot as plt
import glob
import os
import pandas as pd
import math

all_files = glob.glob(os.path.join("data_*"))

all_data_frames = []
all_mape = []
all_rmape = []
count = 0
for file in all_files:
    data_frame = pd.read_csv(file, skiprows=3, index_col=None, header=None)
    def input():
        data = np.array(data_frame)
        input_data = {"c": data[0, :7],
                      "x1": data[1:22, 0],
                      "x2": data[1:22, 1],
                      "x3": data[1:22, 2],
                      "x4": data[1:22, 3],
                      "x5": data[1:22, 4],
                      "x6": data[1:22, 5],
                      "x7": data[1:22, 6],
                      "y": data[1:22, 7]}
        return input_data
    data = input()
    ci = data["c"]
    c1 = ci[0]
    c2 = ci[1]
    c3 = ci[2]
    c4 = ci[3]
    c5 = ci[4]
    c6 = ci[5]
    c7 = ci[6]
    y1 = data["x1"]
    y2 = data["x2"]
    y3 = data["x3"]
    y4 = data["x4"]
    y5 = data["x5"]
    y6 = data["x6"]
    y7 = data["x7"]
    yi = data["y"]

    def z(x):
        x11 = x[0]
        x12 = x[1]
        x13 = x[2]

```

```

x14 = x[3]
x15 = x[4]
x21 = x[5]
x22 = x[6]
x23 = x[7]
x24 = x[8]
x25 = x[9]
x31 = x[10]
x32 = x[11]
x33 = x[12]
x34 = x[13]
x35 = x[14]
x41 = x[15]
x42 = x[16]
x43 = x[17]
x44 = x[18]
x45 = x[19]
x51 = x[20]
x52 = x[21]
x53 = x[22]
x54 = x[23]
x55 = x[24]
x61 = x[25]
x62 = x[26]
x63 = x[27]
x64 = x[28]
x65 = x[29]
x71 = x[30]
x72 = x[31]
x73 = x[32]
x74 = x[33]
x75 = x[34]
return sum((yi-(((x11/(x12+np.exp(x13*y1-x14)))+x15)*((x21/(x22+np.exp(x23*y2-x24)))+x25)*¥
            ((x31/(x32+np.exp(x33*y3-x34)))+x35)*((x41/(x42+np.exp(x43*y4-x44)))+x45)*¥
            ((x51/(x52+np.exp(x53*y5-x54)))+x55)*((x61/(x62+np.exp(x63*y6-x64)))+x65)*¥
            ((x71/(x72+np.exp(x73*y7-x74)))+x75))))**2)

def cons1(x):
    return ((x[0]/(x[1]+np.exp(x[2]*1-x[3])))+x[4])-1.0
def cons2(x):
    return ((x[5]/(x[6]+np.exp(x[7]*1-x[8])))+x[9])-1.0
def cons3(x):
    return ((x[10]/(x[11]+np.exp(x[12]*1-x[13])))+x[14])-1.0
def cons4(x):
    return ((x[15]/(x[16]+np.exp(x[17]*1-x[18])))+x[19])-1.0
def cons5(x):
    return ((x[20]/(x[21]+np.exp(x[22]*1-x[23])))+x[24])-1.0
def cons6(x):
    return ((x[25]/(x[26]+np.exp(x[27]*1-x[28])))+x[29])-1.0
def cons7(x):
    return ((x[30]/(x[31]+np.exp(x[32]*1-x[33])))+x[34])-1.0
def cons8(x):
    if c1 == 0.0:
        return -(x[0] * x[2]) - 0.0
    elif c1 == 1.0:

```

```

        return x[0] * x[2] - 0.0
def cons9(x):
    if c2 == 0.0:
        return -(x[5] * x[7]) - 0.0
    elif c2 == 1.0:
        return x[5] * x[7] - 0.0
def cons10(x):
    if c3 == 0.0:
        return -(x[10] * x[12]) - 0.0
    elif c3 == 1.0:
        return x[10] * x[12] - 0.0
def cons11(x):
    if c4 == 0.0:
        return -(x[15] * x[17]) - 0.0
    elif c4 == 1.0:
        return x[15] * x[17] - 0.0
def cons12(x):
    if c5 == 0.0:
        return -(x[20] * x[22]) - 0.0
    elif c5 == 1.0:
        return x[20] * x[22] - 0.0
def cons13(x):
    if c6 == 0.0:
        return -(x[25] * x[27]) - 0.0
    elif c6 == 1.0:
        return x[25] * x[27] - 0.0
def cons14(x):
    if c7 == 0.0:
        return -(x[30] * x[32]) - 0.0
    elif c7 == 1.0:
        return x[30] * x[32] - 0.0

n = np.linspace(0, 3, 30)
def cons15(x):
    return ((x[0] / (x[1] + np.exp(x[2] * n - x[3]))) + x[4]) - (min(yi)*0.8)
def cons16(x):
    return -((x[0] / (x[1] + np.exp(x[2] * n - x[3]))) + x[4]) + (max(yi) * 1.2)
def cons17(x):
    return ((x[5] / (x[6] + np.exp(x[7] * n - x[8]))) + x[9]) - (min(yi)*0.8)
def cons18(x):
    return -((x[5] / (x[6] + np.exp(x[7] * n - x[8]))) + x[9]) + (max(yi) * 1.2)
def cons19(x):
    return ((x[10] / (x[11] + np.exp(x[12] * n - x[13]))) + x[14]) - (min(yi)*0.8)
def cons20(x):
    return -((x[10] / (x[11] + np.exp(x[12] * n - x[13]))) + x[14]) + (max(yi) * 1.2)
def cons21(x):
    return ((x[15]/(x[16]+np.exp(x[17]*n-x[18])))+x[19])-(min(yi)*0.8)
def cons22(x):
    return -((x[15]/(x[16]+np.exp(x[17]*n-x[18])))+x[19])+(max(yi) * 1.2)
def cons23(x):
    return ((x[20]/(x[21]+np.exp(x[22]*n-x[23])))+x[24])-(min(yi)*0.8)
def cons24(x):
    return -((x[20]/(x[21]+np.exp(x[22]*n-x[23])))+x[24])+(max(yi) * 1.2)
def cons25(x):
    return ((x[25]/(x[26]+np.exp(x[27]*n-x[28])))+x[29])-(min(yi)*0.8)

```

```

def cons26(x):
    return -((x[25]/(x[26]+np.exp(x[27]*n-x[28]))) + x[29]) + (max(yi) * 1.2)
def cons27(x):
    return ((x[30]/(x[31]+np.exp(x[32]*n-x[33]))) + x[34]) - (min(yi)*0.8)
def cons28(x):
    return -((x[30]/(x[31]+np.exp(x[32]*n-x[33]))) + x[34]) + (max(yi) * 1.2)

con1 = {'type':'eq', 'fun':cons1}
con2 = {'type':'eq', 'fun':cons2}
con3 = {'type':'eq', 'fun':cons3}
con4 = {'type':'eq', 'fun':cons4}
con5 = {'type':'eq', 'fun':cons5}
con6 = {'type':'eq', 'fun':cons6}
con7 = {'type':'eq', 'fun':cons7}
con8 = {'type':'ineq', 'fun':cons8}
con9 = {'type':'ineq', 'fun':cons9}
con10 = {'type':'ineq', 'fun':cons10}
con11 = {'type':'ineq', 'fun':cons11}
con12 = {'type':'ineq', 'fun':cons12}
con13 = {'type':'ineq', 'fun':cons13}
con14 = {'type':'ineq', 'fun':cons14}
con15 = {'type':'ineq', 'fun':cons15}
con16 = {'type':'ineq', 'fun':cons16}
con17 = {'type':'ineq', 'fun':cons17}
con18 = {'type':'ineq', 'fun':cons18}
con19 = {'type':'ineq', 'fun':cons19}
con20 = {'type':'ineq', 'fun':cons20}
con21 = {'type':'ineq', 'fun':cons21}
con22 = {'type':'ineq', 'fun':cons22}
con23 = {'type':'ineq', 'fun':cons23}
con24 = {'type':'ineq', 'fun':cons24}
con25 = {'type':'ineq', 'fun':cons25}
con26 = {'type':'ineq', 'fun':cons26}
con27 = {'type':'ineq', 'fun':cons27}
con28 = {'type':'ineq', 'fun':cons28}

con =
[con1,con2,con3,con4,con5,con6,con7,con8,con9,con10,con11,con12,con13,con14,con15,con16,con17,con18,con19,
con20,con21,con22,con23,con24,con25,con26,con27,con28]

xinis = []
for c in ci:
    if c == 0.0:
        ini1 = [-0.001]
        ini2 = [1]
        ini3 = [1]
        ini4 = [1]
        ini5 = [1]
    elif c == 1.0:
        ini1 = [0.001]
        ini2 = [1]
        ini3 = [1]
        ini4 = [1]
        ini5 = [1]
    xinis.append(ini1)

```

```

        xinis.append(ini2)
        xinis.append(ini3)
        xinis.append(ini4)
        xinis.append(ini5)
    x0 = xinis

    bnds = []
    for c in ci:
        if c == 0.0:
            b1 = (None, None)
            b2 = (0, None)
            b3 = (None, None)
            b4 = (None, None)
            b5 = (None, None)
        elif c == 1.0:
            b1 = (None, None)
            b2 = (0, None)
            b3 = (None, None)
            b4 = (None, None)
            b5 = (None, None)
        bnds.append(b1)
        bnds.append(b2)
        bnds.append(b3)
        bnds.append(b4)
        bnds.append(b5)
    all_bnds = bnds

    sol=minimize(z, x0, method='slsqp', bounds=all_bnds, constraints=con, tol=1e-12, options={'iprint':2, 'eps':
1e-8, 'maxiter': 300000, 'ftol': 1e-12})
    print(sol)

    x11 = sol.x[0]
    x12 = sol.x[1]
    x13 = sol.x[2]
    x14 = sol.x[3]
    x15 = sol.x[4]
    x21 = sol.x[5]
    x22 = sol.x[6]
    x23 = sol.x[7]
    x24 = sol.x[8]
    x25 = sol.x[9]
    x31 = sol.x[10]
    x32 = sol.x[11]
    x33 = sol.x[12]
    x34 = sol.x[13]
    x35 = sol.x[14]
    x41 = sol.x[15]
    x42 = sol.x[16]
    x43 = sol.x[17]
    x44 = sol.x[18]
    x45 = sol.x[19]
    x51 = sol.x[20]
    x52 = sol.x[21]
    x53 = sol.x[22]
    x54 = sol.x[23]

```

```

x55 = sol.x[24]
x61 = sol.x[25]
x62 = sol.x[26]
x63 = sol.x[27]
x64 = sol.x[28]
x65 = sol.x[29]
x71 = sol.x[30]
x72 = sol.x[31]
x73 = sol.x[32]
x74 = sol.x[33]
x75 = sol.x[34]

g1 = [x11, x12, x13, x14, x15]
g2 = [x21, x22, x23, x24, x25]
g3 = [x31, x32, x33, x34, x35]
g4 = [x41, x42, x43, x44, x45]
g5 = [x51, x52, x53, x54, x55]
g6 = [x61, x62, x63, x64, x65]
g7 = [x71, x72, x73, x74, x75]
g_all = [g1, g2, g3, g4, g5, g6, g7]
np_g_all = np.array(g_all)
np_g_all = np_g_all.reshape(7, 5)
np_g_allpd = pd.DataFrame(np_g_all)

y_hat = ((x11/(x12+np.exp(x13*y1-x14)))+x15)*((x21/(x22+np.exp(x23*y2-x24)))+x25)*¥
          ((x31/(x32+np.exp(x33*y3-x34)))+x35)*((x41/(x42+np.exp(x43*y4-x44)))+x45)*¥
          ((x51/(x52+np.exp(x53*y5-x54)))+x55)*((x61/(x62+np.exp(x63*y6-x64)))+x65)*¥
          ((x71/(x72+np.exp(x73*y7-x74)))+x75)
mape = (((sum(abs(yi-y_hat)/yi)))/21)*100
r_mape = (((sum(abs(yi-y_hat)/(sum(yi)/21)))/21)*100
print(mape)
print(r_mape)
n=np.linspace(0,3,30)
yy1 = ((x11/(x12+np.exp(x13*n-x14)))+x15)
yy2 = ((x21/(x22+np.exp(x23*n-x24)))+x25)
yy3 = ((x31/(x32+np.exp(x33*n-x34)))+x35)
yy4 = ((x41/(x42+np.exp(x43*n-x44)))+x45)
yy5 = ((x51/(x52+np.exp(x53*n-x54)))+x55)
yy6 = ((x61/(x62+np.exp(x63*n-x64)))+x65)
yy7 = ((x71/(x72+np.exp(x73*n-x74)))+x75)

listt = [n, yy1, n, yy2, n, yy3, n, yy4, n, yy5, n, yy6, n, yy7]
np_listt = np.array(listt)
t_listt = np_listt.T
listtt = pd.DataFrame(t_listt)
error = [mape, r_mape]
errorr = pd.DataFrame(error)

index = pd.DataFrame(n)
input_1 = pd.DataFrame(yy1)
input_2 = pd.DataFrame(yy2)
input_3 = pd.DataFrame(yy3)
input_4 = pd.DataFrame(yy4)
input_5 = pd.DataFrame(yy5)
input_6 = pd.DataFrame(yy6)

```

```

input_7 = pd.DataFrame(yy7)

result_mape = pd.Series(mape)
result_rmape = pd.Series(r_mape)

all_data_frames.append(index)
all_data_frames.append(input_1)
all_data_frames.append(input_2)
all_data_frames.append(input_3)
all_data_frames.append(input_4)
all_data_frames.append(input_5)
all_data_frames.append(input_6)
all_data_frames.append(input_7)
all_mape.append(result_mape)
all_rmape.append(result_rmape)

yy11 = ((x11/(x12+np.exp(x13*y1-x14)))+x15)
yy22 = ((x21/(x22+np.exp(x23*y2-x24)))+x25)
yy33 = ((x31/(x32+np.exp(x33*y3-x34)))+x35)
yy44 = ((x41/(x42+np.exp(x43*y4-x44)))+x45)
yy55 = ((x51/(x52+np.exp(x53*y5-x54)))+x55)
yy66 = ((x61/(x62+np.exp(x63*y6-x64)))+x65)
yy77 = ((x71/(x72+np.exp(x73*y7-x74)))+x75)
examine = [yy11, yy22, yy33, yy44, yy55, yy66, yy77]
np_examine = np.array(examine)
t_examine = np_examine.T
examinee = pd.DataFrame(t_examine)

years=range(1990,2011)
plt.figure(1)
plt.title(str(count))
plt.plot(years, yi, ls="--", label="yi")
plt.plot(years, y_hat, ls=":", label="y_hat")
plt.legend(loc='best')
plt.savefig('fig%d.png' % count)
plt.close()

plt.figure(2)
plt.title(str(count))
plt.plot(n, yy1, label='g1')
plt.plot(n, yy2, label='g2')
plt.plot(n, yy3, label='g3')
plt.plot(n, yy4, label='g4')
plt.plot(n, yy5, label='g5')
plt.plot(n, yy6, label='g6')
plt.plot(n, yy7, label='g7')
plt.legend(loc='best')
plt.savefig('graph%d.png' % count)
plt.close()

plt.show()

writer = pd.ExcelWriter('output_%d.xlsx' % count)
listtt.to_excel(writer, sheet_name="graph", index=False)
errorr.to_excel(writer, sheet_name="error", index=False)

```

```
examinee.to_excel(writer, sheet_name="examine", index=False)
np_g_allpd.to_excel(writer, sheet_name="factor", index=False)
writer.save()
count = count + 1
filtered_mape = pd.concat(all_mape, axis=1, ignore_index=True)
filtered_rmape = pd.concat(all_rmape, axis=1, ignore_index=True)
writer = pd.ExcelWriter('output_all.xlsx')
filtered_mape.to_excel(writer, sheet_name="mape", index=False)
filtered_rmape.to_excel(writer, sheet_name="rmape", index=False)
writer.save()
```

付録 C. 部門別単位活動量当たり CO₂ 排出量

本研究では、CO₂ 排出量を計算するために都市活動量予測モデルに単位活動量当たり CO₂ 排出量(単位活動量当たりエネルギー消費量とエネルギー源別 CO₂ 排出係数の乗算)を入力し、それを活動量に乗算した。ここで、単位活動量当たりエネルギー消費量の入力期間は、実績値が存在する 1990 年から 2010 年までであり、2010 年以降の将来予測の計算は、2010 年の値を固定して利用した。CO₂ 排出係数は、エネルギー源によって利用期間が異なる。電気の場合は、1990 年から 2017 年まで実績値を利用し、2018 年から 2029 年までは、2017 年の実績値と 2030 年の環境省の目標値を線形補間して利用した。2030 年以降は、2030 年の環境省の目標値をそのまま固定して利用した。そのほかの CO₂ 排出係数は、時系列データが存在しないため、2010 年の値を利用した。

以下に、部門別単位活動量当たり CO₂ 排出量の値やその出典を示す。

付録 C1. 民生家庭部門

【出典】単位活動量当たりエネルギー源別消費量とエネルギー源別 CO₂ 排出係数

- ・世帯当たりエネルギー源別消費量(1990 年~2010 年) : EDMC エネルギー・経済統計要覧 2013
- ・CO₂ 排出係数 : EDMC エネルギー・経済統計要覧 2013、環境省
- ・電気 CO₂ 排出係数の実績値(1990 年~2017 年) : 2017 年度(平成 29 年度)の温室効果ガス排出量(速報値)について、国立研究開発法人国立環境研究所, p.16, 2018
- ・電気 CO₂ 排出係数の目標値(2030 年) : 2050 年を見据えた温室効果ガスの大幅削減に向けて、環境省, p.38, 2015
- ・参考資料 : 外岡 豊, 深澤 大樹, 村橋 喜満, 三浦 秀一, 都道府県別・建て方別住宅エネルギー消費量と CO₂ 排出実態の詳細推計, 日本建築学会環境系論文集, Vol.70(592), pp. 89-96, 2005

一般的に世帯当たり CO₂ 排出量は、世帯当たりエネルギー消費量にエネルギー源別 CO₂ 排出係数を乗算して求められる。そして、エネルギー・経済統計要覧の民生家庭部門の世帯当たりエネルギー消費量は、住宅形式や地理的要因を考量しない全国レベルの値しか存在しない。しかし、参考資料のように民生家庭部門のエネルギー消費量は、住宅の建て方によって値が変化する。そのため、参考資料の全国、戸建住宅、集合住宅の世帯当たりエネルギー消費量の結果を用いて、全国を基準とした戸建住宅と集合住宅の世帯当たりエネルギー消費量の変化比率を計算した結果、それぞれ 1.22 倍と 0.69 倍の値が得られた。従って、本研究では、世帯当たり CO₂ 排出量を計算する式にそれぞれ 1.22 と 0.69 を掛けて(式 C-1 と式 C-3)、戸建住宅の世帯当たり CO₂ 排出量(PV 未導入)と集合住宅の世帯当たり CO₂ 排出量を計算した(表 C-1)。

戸建住宅の世帯当たり CO₂ 排出量(PV 導入)は、戸建住宅の世帯当たり CO₂ 排出量(PV 未導入)に第 6 章で計算した PV 導入による CO₂ 削減量を引き算して求めた(式 C-2)。

戸建住宅の世帯当たり CO₂ 排出量(PV 未導入)

$$= \Sigma(\text{世帯当たりエネルギー源別消費量} \times \text{エネルギー源別 CO}_2 \text{ 排出係数}) \times 1.22$$

…式 C-1

戸建住宅の世帯当たり CO₂ 排出量(PV 導入)

$$= \text{戸建住宅の世帯当たり CO}_2 \text{ 排出量(PV 未導入)} - \text{PV 導入による CO}_2 \text{ 削減量}$$

…式 C-2

集合住宅の世帯当たり CO₂ 排出量

$$= \Sigma(\text{世帯当たりエネルギー源別消費量} \times \text{エネルギー源別 CO}_2 \text{ 排出係数}) \times 0.69$$

…式 C-3

表 C-1 民生家庭部門の単位活動量当たり CO₂ 排出量の推移 (単位 : t-CO₂/世帯)

| 年度 | 戸建住宅居住世帯 (PV未導入) | 戸建住宅居住世帯 (PV導入) | 集合住宅居住世帯 |
|------|---------------------|--------------------|----------|
| 1990 | 4.205 | 4.205 | 2.369 |
| 1991 | 4.207 | 4.207 | 2.370 |
| 1992 | 4.369 | 4.369 | 2.461 |
| 1993 | 4.287 | 4.287 | 2.415 |
| 1994 | 4.485 | 4.485 | 2.526 |
| 1995 | 4.560 | 4.560 | 2.569 |
| 1996 | 4.475 | 4.475 | 2.521 |
| 1997 | 4.313 | 4.313 | 2.429 |
| 1998 | 4.155 | 4.155 | 2.340 |
| 1999 | 4.343 | 4.343 | 2.446 |
| 2000 | 4.450 | 4.450 | 2.507 |
| 2001 | 4.324 | 4.324 | 2.436 |
| 2002 | 4.646 | 4.646 | 2.617 |
| 2003 | 4.636 | 3.732 | 2.611 |
| 2004 | 4.633 | 3.760 | 2.610 |
| 2005 | 4.799 | 3.915 | 2.703 |
| 2006 | 4.515 | 3.659 | 2.543 |
| 2007 | 4.841 | 3.895 | 2.727 |
| 2008 | 4.560 | 3.632 | 2.568 |
| 2009 | 4.279 | 3.418 | 2.410 |
| 2010 | 4.489 | 3.626 | 2.528 |
| 2011 | 5.164 | 4.099 | 2.909 |
| 2012 | 5.588 | 4.396 | 3.148 |
| 2013 | 5.581 | 4.391 | 3.144 |
| 2014 | 5.484 | 4.323 | 3.089 |
| 2015 | 5.310 | 4.201 | 2.991 |
| 2016 | 5.205 | 4.128 | 2.932 |
| 2017 | 5.066 | 4.030 | 2.854 |
| 2018 | 4.999 | 3.983 | 2.816 |
| 2019 | 4.931 | 3.936 | 2.778 |
| 2020 | 4.864 | 3.889 | 2.740 |
| 2021 | 4.796 | 3.841 | 2.702 |
| 2022 | 4.729 | 3.794 | 2.664 |
| 2023 | 4.661 | 3.747 | 2.626 |
| 2024 | 4.594 | 3.700 | 2.588 |
| 2025 | 4.527 | 3.653 | 2.550 |
| 2026 | 4.459 | 3.605 | 2.512 |
| 2027 | 4.392 | 3.558 | 2.474 |
| 2028 | 4.324 | 3.511 | 2.436 |
| 2029 | 4.257 | 3.464 | 2.398 |
| 2030 | 4.189 | 3.417 | 2.360 |

付録 C2. 民生業務部門

【出典】単位活動量当たりエネルギー源別消費量とエネルギー源別 CO₂ 排出係数

- ・世帯当たりエネルギー源別消費量(1990 年~2010 年) : EDMC エネルギー・経済統計要覧 2013
- ・CO₂ 排出係数 : EDMC エネルギー・経済統計要覧 2013、環境省
- ・電気 CO₂ 排出係数の実績値(1990 年~2017 年) : 2017 年度（平成 29 年度）の温室効果ガス排出量（速報値）について, 国立研究開発法人国立環境研究所, p.16, 2018
- ・電気 CO₂ 排出係数の目標値(2030 年) : 2050 年を見据えた温室効果ガスの大幅削減に向けて, 環境省, p.38, 2015

出典の資料と式 C-4 を用いて面積当たり CO₂ 排出量を求めた。しかし、エネルギー・経済統計要覧の民生業務部門の用途分類と都市活動量予測モデルの民生業務部門の用途分類が異なる。そのため、エネルギー・経済統計要覧から計算した結果を利用するためには、計算された結果を都市活動量予測モデルの民生業務部門の用途分類に合わせる必要がある。エネルギー・経済統計要覧と都市活動量予測モデルの民生業務部門の用途分類を表 C- 2 に示す。例えば、事務所・店舗セクタには、エネルギー・経済統計要覧の事務所と卸小売が属する。この場合は、事務所と卸小売の結果を平均して事務所・店舗セクタの面積当たり CO₂ 排出量に利用した。本研究で利用した民生業務部門の単位活動量当たり CO₂ 排出量を表 C- 3 に示す。

面積当たり CO₂ 排出量

…式 C-4

$$= \Sigma (\text{面積当たりエネルギー源別消費量} \times \text{エネルギー源別 CO}_2 \text{ 排出係数})$$

表 C- 2 エネルギー・経済統計要覧と都市活動量予測モデルの民生業務部門の用途分類

| エネルギー・経済統計要覧の分類 | 都市活動量予測モデルの分類 |
|-----------------|-----------------|
| 事務所 | 事務所・店舗セクタ |
| 卸小売 | |
| 飲食業 | 病院・ホテルセクタ |
| 宿泊業 | |
| 病院 | |
| 学校 | 初等教育セクタと高等教育セクタ |
| その他サービス業 | その他サービス業セクタ |
| | 木造建物セクタ |

表 C-3 民生業務部門の単位活動量当たり CO₂ 排出量の推移 (単位 : t-CO₂/m²)

| 年度 | 事務所・店舗 | 病院・ホテル | 木造建物 | 初等教育、 高等教育 | その他サービス業 |
|------|--------|--------|-------|---------------|----------|
| 1990 | 0.082 | 0.231 | 0.148 | 0.041 | 0.140 |
| 1991 | 0.082 | 0.239 | 0.152 | 0.042 | 0.143 |
| 1992 | 0.084 | 0.241 | 0.155 | 0.043 | 0.151 |
| 1993 | 0.078 | 0.217 | 0.141 | 0.039 | 0.140 |
| 1994 | 0.084 | 0.234 | 0.152 | 0.041 | 0.155 |
| 1995 | 0.081 | 0.223 | 0.146 | 0.040 | 0.152 |
| 1996 | 0.079 | 0.220 | 0.144 | 0.038 | 0.148 |
| 1997 | 0.077 | 0.216 | 0.140 | 0.037 | 0.143 |
| 1998 | 0.076 | 0.212 | 0.138 | 0.036 | 0.144 |
| 1999 | 0.078 | 0.217 | 0.141 | 0.037 | 0.146 |
| 2000 | 0.078 | 0.216 | 0.141 | 0.037 | 0.145 |
| 2001 | 0.076 | 0.213 | 0.138 | 0.036 | 0.143 |
| 2002 | 0.081 | 0.220 | 0.145 | 0.038 | 0.154 |
| 2003 | 0.083 | 0.235 | 0.152 | 0.039 | 0.157 |
| 2004 | 0.083 | 0.228 | 0.149 | 0.038 | 0.156 |
| 2005 | 0.080 | 0.220 | 0.144 | 0.037 | 0.152 |
| 2006 | 0.075 | 0.208 | 0.136 | 0.035 | 0.143 |
| 2007 | 0.080 | 0.214 | 0.141 | 0.037 | 0.146 |
| 2008 | 0.076 | 0.203 | 0.133 | 0.036 | 0.135 |
| 2009 | 0.070 | 0.185 | 0.122 | 0.033 | 0.122 |
| 2010 | 0.073 | 0.188 | 0.124 | 0.035 | 0.126 |
| 2011 | 0.086 | 0.220 | 0.146 | 0.041 | 0.148 |
| 2012 | 0.094 | 0.240 | 0.159 | 0.045 | 0.161 |
| 2013 | 0.094 | 0.240 | 0.159 | 0.045 | 0.161 |
| 2014 | 0.092 | 0.235 | 0.156 | 0.044 | 0.158 |
| 2015 | 0.089 | 0.227 | 0.150 | 0.042 | 0.152 |
| 2016 | 0.087 | 0.222 | 0.147 | 0.041 | 0.149 |
| 2017 | 0.084 | 0.215 | 0.143 | 0.040 | 0.144 |
| 2018 | 0.083 | 0.212 | 0.140 | 0.039 | 0.142 |
| 2019 | 0.082 | 0.209 | 0.138 | 0.039 | 0.140 |
| 2020 | 0.080 | 0.206 | 0.136 | 0.038 | 0.138 |
| 2021 | 0.079 | 0.202 | 0.134 | 0.038 | 0.136 |
| 2022 | 0.078 | 0.199 | 0.132 | 0.037 | 0.134 |
| 2023 | 0.077 | 0.196 | 0.130 | 0.036 | 0.131 |
| 2024 | 0.075 | 0.193 | 0.128 | 0.036 | 0.129 |
| 2025 | 0.074 | 0.189 | 0.125 | 0.035 | 0.127 |
| 2026 | 0.073 | 0.186 | 0.123 | 0.035 | 0.125 |
| 2027 | 0.072 | 0.183 | 0.121 | 0.034 | 0.123 |
| 2028 | 0.070 | 0.180 | 0.119 | 0.033 | 0.121 |
| 2029 | 0.069 | 0.176 | 0.117 | 0.033 | 0.118 |
| 2030 | 0.068 | 0.173 | 0.115 | 0.032 | 0.116 |

付録 C3. 産業部門

＜農林水産業セクタと製造業セクタ＞

【出典】単位活動量当たりエネルギー源別消費量とエネルギー源別 CO₂ 排出係数

- ・活動量(全国)(1990 年~2010 年)：生産農業所得統計、生産林業所得統計、漁業生産額、工業統計
- ・エネルギー源別消費量(全国)(1990 年~2010 年)：総合エネルギー統計
- ・CO₂ 排出係数：EDMC エネルギー・経済統計要覧 2013、環境省
- ・電気 CO₂ 排出係数の実績値(1990 年~2017 年)：2017 年度（平成 29 年度）の温室効果ガス排出量（速報値）について、国立研究開発法人国立環境研究所, p.16, 2018
- ・電気 CO₂ 排出係数の目標値(2030 年)：2050 年を見据えた温室効果ガスの大幅削減に向けて、環境省, p.38, 2015

生産額(出荷額)当たり CO₂ 排出量は、出典の資料から式 C-5 を用いて計算した。本研究で利用した農林水産業セクタと製造業セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量を表 C-4 に示す。

生産額(出荷額)当たり CO₂ 排出量

= Σ (生産額(出荷額)当たりエネルギー源別消費量×エネルギー源別 CO₂ 排出係数)

…式 C-5

表 C-4 農林水産業セクタと製造業セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量の推移

(単位 : t-CO₂/百万円)

| 年度 | 農業 | 林業 | 漁業 | 製造業 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 1990 | 0.030 | 0.420 | 4.269 | 1.674 |
| 1991 | 0.030 | 0.301 | 2.031 | 1.564 |
| 1992 | 0.031 | 0.309 | 1.900 | 1.598 |
| 1993 | 0.033 | 0.296 | 1.776 | 1.628 |
| 1994 | 0.031 | 0.289 | 1.629 | 1.788 |
| 1995 | 0.035 | 0.293 | 1.543 | 1.736 |
| 1996 | 0.035 | 0.275 | 1.446 | 1.719 |
| 1997 | 0.037 | 0.288 | 1.312 | 1.642 |
| 1998 | 0.038 | 0.327 | 1.405 | 1.615 |
| 1999 | 0.039 | 0.338 | 1.375 | 1.769 |
| 2000 | 0.040 | 0.358 | 1.340 | 1.748 |
| 2001 | 0.042 | 0.401 | 1.389 | 1.778 |
| 2002 | 0.042 | 0.414 | 1.413 | 1.989 |
| 2003 | 0.042 | 0.411 | 1.434 | 2.009 |
| 2004 | 0.041 | 0.425 | 1.399 | 1.941 |
| 2005 | 0.041 | 0.434 | 1.318 | 1.844 |
| 2006 | 0.044 | 0.549 | 1.341 | 1.793 |
| 2007 | 0.041 | 0.286 | 1.272 | 1.695 |
| 2008 | 0.048 | 0.157 | 0.911 | 1.505 |
| 2009 | 0.056 | 0.812 | 1.203 | 1.784 |
| 2010 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.788 |
| 2011 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.902 |
| 2012 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.974 |
| 2013 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.973 |
| 2014 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.956 |
| 2015 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.927 |
| 2016 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.909 |
| 2017 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.886 |
| 2018 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.874 |
| 2019 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.863 |
| 2020 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.851 |
| 2021 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.840 |
| 2022 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.828 |
| 2023 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.817 |
| 2024 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.805 |
| 2025 | 0.057 | 0.804 | 1.253 | 1.794 |
| 2026 | 0.057 | 0.804 | 1.252 | 1.783 |
| 2027 | 0.057 | 0.804 | 1.252 | 1.771 |
| 2028 | 0.057 | 0.803 | 1.252 | 1.760 |
| 2029 | 0.057 | 0.803 | 1.252 | 1.748 |
| 2030 | 0.057 | 0.803 | 1.252 | 1.737 |

<建設業セクタ>

【出典】単位活動量当たり CO₂ 排出量

：木本 慶介, 伊香賀 俊治, 村上 周三, 津田 公平, 新谷 圭右, CASBEE による住宅の温暖化対策に伴う環境性能の将来予測, 日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.154-155, 2008

建設業セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量は、時系列データがないため、既往研究において算出されている結果をそのまま利用した。

表 C-5 建設業セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量

| 都市活動量予測 モデルの活動量 | 出典の 分類 | 単位:kg-CO ₂ /m ² ・年 | | 単位:t-CO ₂ /m ² ・年 | | 単位:m ² | 単位:t-CO ₂ /戸・年 | |
|--------------------|-----------|--|-------|---|---------|-------------------|---------------------------|-----------|
| | | 建設 | 修繕・解体 | 建設 | 修繕・解体 | 1戸面積 | 建設 | 修繕・解体 |
| 戸建住宅 | 戸建住宅 | 4.46 | 6.72 | 0.00446 | 0.00672 | 125.86 | 0.561336 | 0.8457792 |
| 集合住宅 | 集合住宅 | 11.07 | 15.09 | 0.01107 | 0.01509 | 47.92 | 0.530474 | 0.7231128 |
| 事務所・店舗 | 事務所 | 13.85 | 20.67 | 0.01385 | 0.02067 | | | |
| 病院・ホテル | 病院 | 13.24 | 20.89 | 0.01324 | 0.02089 | | | |
| 初等教育、 高等教育 | 学校 | 12.66 | 17.14 | 0.01266 | 0.01714 | | | |
| 木造建物 | 物販店 | 24.24 | 13.19 | 0.02424 | 0.01319 | | | |
| その他サービス業 | 集会所 | 13.47 | 18.04 | 0.01347 | 0.01804 | | | |
| 製造業 | 工場 | 22.71 | 14.27 | 0.02271 | 0.01427 | | | |

付録 C4. 輸送部門

【出典】単位活動量当たり CO₂ 排出量

：国土交通省総合政策局環境政策課から直接データを頂いた (1990 年から 2015 年まで)
(輸送部門のデータは、エネルギー消費量のデータがない)

<旅客セクタ>

表 C-6 旅客セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量の推移 (単位 : t-CO₂/人 km)

| 年度 | 自家用乗用車 | バス | 鉄 道 | 航 空 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1990 | 0.0001368 | 0.0000462 | 0.0000175 | 0.0001150 |
| 1991 | 0.0001439 | 0.0000463 | 0.0000169 | 0.0001173 |
| 1992 | 0.0001483 | 0.0000473 | 0.0000173 | 0.0001230 |
| 1993 | 0.0001512 | 0.0000495 | 0.0000163 | 0.0001277 |
| 1994 | 0.0001556 | 0.0000513 | 0.0000179 | 0.0001255 |
| 1995 | 0.0001586 | 0.0000525 | 0.0000170 | 0.0001329 |
| 1996 | 0.0001621 | 0.0000535 | 0.0000165 | 0.0001232 |
| 1997 | 0.0001613 | 0.0000543 | 0.0000163 | 0.0001244 |
| 1998 | 0.0001600 | 0.0000551 | 0.0000163 | 0.0001202 |
| 1999 | 0.0001646 | 0.0000566 | 0.0000171 | 0.0001130 |
| 2000 | 0.0001629 | 0.0000565 | 0.0000172 | 0.0001135 |
| 2001 | 0.0001671 | 0.0000573 | 0.0000171 | 0.0001132 |
| 2002 | 0.0001651 | 0.0000560 | 0.0000185 | 0.0001125 |
| 2003 | 0.0001625 | 0.0000560 | 0.0000193 | 0.0001140 |
| 2004 | 0.0001582 | 0.0000550 | 0.0000189 | 0.0001112 |
| 2005 | 0.0001546 | 0.0000532 | 0.0000193 | 0.0001107 |
| 2006 | 0.0001531 | 0.0000647 | 0.0000179 | 0.0001114 |
| 2007 | 0.0001525 | 0.0000659 | 0.0000194 | 0.0001092 |
| 2008 | 0.0001499 | 0.0000622 | 0.0000187 | 0.0001078 |
| 2009 | 0.0001534 | 0.0000619 | 0.0000182 | 0.0001097 |
| 2010 | 0.0001545 | 0.0000635 | 0.0000182 | 0.0001050 |
| 2011 | 0.0001542 | 0.0000653 | 0.0000207 | 0.0001066 |
| 2012 | 0.0001550 | 0.0000634 | 0.0000223 | 0.0001041 |
| 2013 | 0.0001550 | 0.0000655 | 0.0000221 | 0.0001027 |
| 2014 | 0.0001456 | 0.0000670 | 0.0000214 | 0.0000999 |
| 2015 | 0.0001445 | 0.0000663 | 0.0000203 | 0.0000959 |

＜貨物セクタ＞

表 C-7 貨物セクタの単位活動量当たり CO₂ 排出量の推移 (単位 : t-CO₂/トン km)

| 年度 | 自家用貨物車 | 営業用貨物車 | 船 舶 | 鉄 道 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1990 | 0.0006835 | 0.0001898 | 0.0000356 | 0.0000214 |
| 1991 | 0.0007021 | 0.0001963 | 0.0000355 | 0.0000209 |
| 1992 | 0.0007245 | 0.0001976 | 0.0000349 | 0.0000221 |
| 1993 | 0.0007718 | 0.0002025 | 0.0000355 | 0.0000210 |
| 1994 | 0.0007775 | 0.0002126 | 0.0000363 | 0.0000220 |
| 1995 | 0.0007739 | 0.0002050 | 0.0000371 | 0.0000210 |
| 1996 | 0.0007543 | 0.0002014 | 0.0000381 | 0.0000203 |
| 1997 | 0.0007465 | 0.0001962 | 0.0000382 | 0.0000198 |
| 1998 | 0.0007762 | 0.0001941 | 0.0000387 | 0.0000199 |
| 1999 | 0.0007998 | 0.0001881 | 0.0000387 | 0.0000207 |
| 2000 | 0.0008307 | 0.0001801 | 0.0000376 | 0.0000205 |
| 2001 | 0.0008802 | 0.0001788 | 0.0000378 | 0.0000210 |
| 2002 | 0.0008937 | 0.0001723 | 0.0000375 | 0.0000221 |
| 2003 | 0.0009035 | 0.0001641 | 0.0000385 | 0.0000222 |
| 2004 | 0.0009251 | 0.0001626 | 0.0000354 | 0.0000216 |
| 2005 | 0.0009283 | 0.0001571 | 0.0000366 | 0.0000219 |
| 2006 | 0.0009081 | 0.0001540 | 0.0000377 | 0.0000202 |
| 2007 | 0.0008782 | 0.0001482 | 0.0000373 | 0.0000199 |
| 2008 | 0.0008748 | 0.0001445 | 0.0000377 | 0.0000214 |
| 2009 | 0.0008804 | 0.0001409 | 0.0000386 | 0.0000212 |
| 2010 | 0.0011222 | 0.0001960 | 0.0000385 | 0.0000209 |
| 2011 | 0.0011529 | 0.0002026 | 0.0000383 | 0.0000236 |
| 2012 | 0.0011764 | 0.0002264 | 0.0000384 | 0.0000252 |
| 2013 | 0.0012033 | 0.0002172 | 0.0000386 | 0.0000250 |
| 2014 | 0.0012147 | 0.0002257 | 0.0000390 | 0.0000240 |
| 2015 | 0.0012094 | 0.0002270 | 0.0000388 | 0.0000230 |