

平成 22 年度国土政策関係研究支援事業 研究成果報告書

国土情報を活用した都市・交通戦略の
クロスアセスメント手法に関する研究

香川大学工学部安全システム建設工学科准教授

紀伊 雅敦

目 次

I. 研究目的・意義	1
II. 研究手法	3
III. 成果内容	5
○ 要旨	5
○ キーワード	8
○ 本編	9
1. 四国の交通課題へのクロスアセスメント手法の応用	9
2. クロスアセスメント手法の構築	11
2-1. 分析フレーム	11
2-2. 交通需給モデル	13
(1) 交通需要モデル	
① 都市内交通需要モデル	
② 都市間交通需要モデル	
③ リンク交通量	
(2) 交通LOSの算定方法	
(3) 交通事業収入と支出	
2-3. 評価指標と交通戦略の定式化	17
(1) 交通事業収支	
(2) 利用者便益	
(3) CO ₂ 排出量	
(4) 交通戦略の定式化	
3. モデル推計とシナリオ設定	19
3-1. 対象地域	19
3-2. 使用データ	20
(1) 交通需要データ	
(2) 交通サービスデータ	
3-3. モデル推計	22
(1) 交通需要モデルの推計	
① 市町村内の移動距離と徒歩率の推計	
② 都市内交通モデル	
③ 都市間交通モデル	

(2) 交通事業費用モデルの推計	
(3) CO ₂ 排出原単位	
3-4. シナリオ設定	33
(1) 人口分布シナリオ	
① 趨勢シナリオ	
② コンパクトシナリオ	
③ シナリオ比較	
(2) 鉄道的高速化	
4. 交通戦略分析	38
4-1. 基準シナリオの設定	38
4-2. 交通戦略効果の分析	41
(1) 公共交通事業収支	
(2) 利用者便益	
(3) CO ₂ 排出量	
(4) 交通戦略のクロスアセスメント	
(5) 都市のコンパクト化と鉄道的高速化	
4-3. 四国の交通戦略	50
5. 結論	51

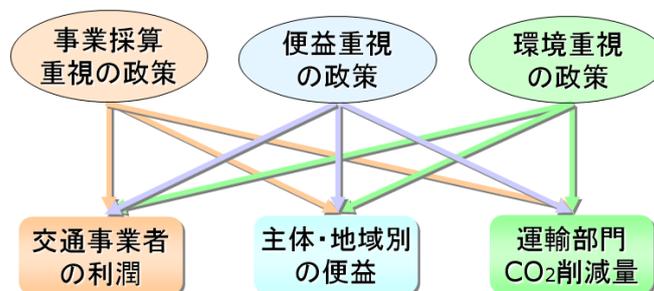
I. 研究目的・意義

(1) 研究の背景と目的

持続可能な都市交通の目指すべき目標は、多様な活動機会へのアクセシビリティの保障、安全かつ低環境負荷なモビリティスタイルの選択、さらに財政制約下での費用対効果の確保など多岐にわたる。これらは相乗的に効果を持つ場合もあれば、トレードオフの関係が存在する場合もある。更に、どの目標を重視すべきかは人々の価値規範により異なる。

意志決定アプローチとして、計画主導型では人々の平均的な価値規範を計測し、その下での社会的な最適化問題として定式化しており（上田、福本：2001）、また合意形成主導型ではフレーミング効果による説得の重要性を指摘している（藤井：2003）。一方、May（2005）はこれらに加えて、価値規範の異なるさまざまなアクターが望ましい将来像や戦略のアウトカムを共有する、ビジョン主導型のアプローチを示している。政策間の相互補完や相乗効果を生み出すための統合アプローチには、これら3つを柔軟に組み合わせることが必要であり、欧州ではその模索が続けられている。ただし、ビジョン主導型のアプローチでは、計画主導型、合意形成主導型に見られるような方法論が確立しておらず、首長等のリーダーシップに依存しているのが現状である。

申請者らは、持続可能な都市交通を実現するための統合アプローチとして公共交通政策と都市のコンパクト化との組み合わせを考え、代替的な価値規範に基づく各戦略のアウトカムを俯瞰的視点から相互比較し、政策統合の方向性を検討するためのヴィジョンングモデルを提示した（紀伊他、2009）。具体的には、経済・社会・環境に関わる各々の価値規範の追求が、他の規範の達成に及ぼす影響をクロスアセスメントし（図表1）、それらの相乗・背反関係を分析することで、異なる価値規範の調和の可能性を検討するものである。それを全国269都市圏の2030年時点の戦略評価に適用し、アウトカムの地域間比較を試みている。



図表1 価値規範に基づく交通戦略のクロスアセスメント

ただし、先行研究では、分析の簡便さのため人口配置や交通条件等は独自の仮説に基づき設定しているが、近年の GIS 等を用いた国土情報の蓄積により、これら条件設定の合理化や内生性が可能になりつつあると考えられる。

本研究では、国土情報を活用することで上記方法論を精緻化し、実用的な都市・交通戦略の広域的評価・分析手法を構築することが目的である。本手法では、要素概念として土地利用交通モデル（Wegener：2003、紀伊：2010）を参照しているが、従来モデルは個別具体の計画レベルの分析を可能とする一方、交通条件や立地行動に関する様々な詳細データが必要であり、適用例はこうしたデータを利用可能な都市圏に限られる。本研究では各種条件を簡略化しつつも、全国で利用可能な国土情報に基づき広域的な都市活動を整合的に分析する手法を構築する。

具体的には、四国 4 県を対象として、3 つの価値規範に基づく広域交通戦略のクロスアセスメントを行う。その際、都市間鉄道の高速度化と都市のコンパクト化を戦略要素として取り上げ、それらのインパクトも併せて分析する。従来のクロスアセスメント手法の適用範囲は、都市内の交通戦略分析に限られていたが、本研究では都市間交通も対象とするため、国土情報を活用し分析モデルを拡張する。

（2）本研究の意義

道州制など広域行政の導入を見据えた場合、複数の県にまたがる地域戦略の中で都市・交通戦略も位置づける必要がある。このとき、政策間の相互補完や相乗効果を生み出しうることが広域化の意義であるが、こうした効果・影響について関係者間の共通理解を促進することがヴィジョニングの目的である。本研究で開発する手法は、従来のマクロな地域政策分析とミクロな交通行動分析を補完し、都市・交通戦略のアウトカムを俯瞰的に示すことで、ビジョン主導型の意志決定の支援ツールとなるものであり、広域地域の主体的な取り組みが求められる今後の国土政策の形成に貢献すると考える。

II. 研究手法

本研究における分析の基礎概念は申請者自身の先行研究（紀伊他、2009）に基づくが、その方法論を、国土情報を活用して、広域交通戦略の評価手法に拡張することが目的である。ここでは、四国4県（徳島県、香川県、愛媛県、高知県、ただし島嶼部を除く）を対象地域に設定し、2000年から2035年にかけての都市・交通戦略の代替案を経済・社会・環境の観点から分析する。

ここでは、戦略として、交通サービス水準（Level of service: LOS）の誘導、都市のコンパクト化、および都市間鉄道的高速化を想定する。交通LOSの誘導は追求する価値規範により対策の内容が異なる。例えば、公共交通の事業収支の改善と利用者便益の向上の2つの戦略目標は必ずしも両立するものではなく、人口や施設配置など各地域の条件によっても戦略のアウトカムは異なる。このため、交通LOSの誘導は、事業の経済性、社会的便益、環境の3つの価値規範に基づく戦略目的を追求する場合をそれぞれ分析し、それらアウトカムを比較する。

都市のコンパクト化は移動距離の縮減やインフラ利用の効率化など正の効果を持つと考えられる。その一方、混雑悪化や住宅面積減少など負の影響も予想され、コンパクト化には世帯、企業の立地行動を検討することが必要となる。本研究では、立地行動やコンパクト化の負の側面は考慮せず、都市居住者の地理分布をシナリオとして与え、その影響を評価する。

また、都市鉄道的高速化は、高松ー松山間と高松ー徳島間の2路線を検討する。四国の鉄道は道路と比較して速達性に劣っており、その結果、自動車依存の進展、利用者数の減少が続いており、鉄道ネットワークの維持が困難となりつつある。こうした状況の下、一部路線的高速化により収益力を高めネットワークを維持することが検討されているが、本研究では、その効果・影響を経済・社会・環境の観点から分析することを試みる。

ただし、これらの方策がもたらす影響は地域により大きく異なると考えられ、その影響を四国圏で集計した評価指標では戦略検討には不十分である。本研究では、圏内の市町村毎に各戦略がもたらす利用者便益を評価し、また交通ネットワークを構成するリンク毎に交通事業収支を求める。これにより、各種戦略がもたらしうる効果・影響の地域間の差を検討することが可能となる。

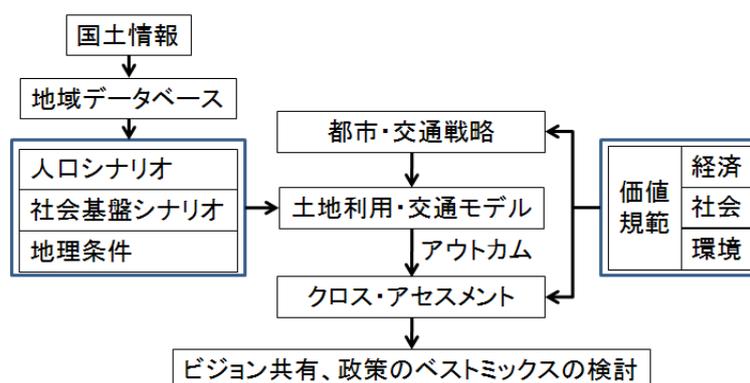
以上の分析を行うために、本研究では1) 地域データベース整備、2) 広域交通モデルの構築、3) 都市・交通戦略シナリオの設定を行った上で、4) 都市・交通戦略のクロスアセスメントを行う。研究のフローを図表2に示す。まず、地域データは、地域メッシュ統計、国土数値情報等のGISデータを整備し、これと国勢調査の居住地・従業地集計、および道路交通センサス、鉄道時刻表、総合交通分析システムNITAS等のLOSデータを連係させ、グリッドベースの都市・交通データベースを作成する。グ

リッドサイズは3次メッシュ（約1km×1km）とする。このデータベースに基づき、四国圏内の市町村内および市町村間の交通LOSデータを作成する。

次に、交通に関する便益、環境負荷、経済性を評価するために、旅客純流動調査、国勢調査、全国パーソントリップ調査、運輸事業統計等に基づき、市町村間の発着地分布、交通機関分担、交通事業収支をモデル化する。

都市・交通戦略シナリオは、人口配置と都市間鉄道高速化を設定する。人口配置については、人口問題研究所の市町村別将来人口の中位推計と整合するように、3次メッシュ毎の人口を推計する。その際、現状の3次メッシュ人口が一様に変化する趨勢ケースと、若年人口が生産年齢人口に移る際に鉄道駅周辺に立地する確率を高めたコンパクトケースの2ケースを設定する。これらの都市構造の相違は、公共交通へのアクセシビリティの違いとして反映される。

以上の地域データベース、交通モデル、および戦略シナリオを用いて、経済・社会・環境といった3つの価値規範に基づく都市交通戦略のクロスアセスメントを行う。その結果から都市・交通戦略による効果とその地域差を明らかにし、四国圏の交通戦略のあり方を検討する。



図表2 本研究のフロー

Ⅲ. 成果内容

○要旨

本研究は、少子高齢化、人口減少が進む広域地方圏における持続可能な都市交通戦略を検討する手法として、戦略代替案を俯瞰的に分析し政策統合の方向性を検討するクロスアセスメント手法を構築し、四国圏を対象に、中長期的視点から 2035 年までの期間における公共交通戦略と都市のコンパクト化のアウトカム評価と、その地域間比較を行った。

本研究で開発したクロスアセスメント手法とは、経済・社会・環境に関わる各々の価値規範の追求が、他の規範の達成に及ぼす影響を相互比較し、それらの相乗・背反関係を分析することで、異なる価値規範の調和の可能性を検討するものである。ここでは、国土情報等を活用することにより従来手法を拡張し、都市間交通を含む分析フレームを構築した。この分析フレームで必要とされるデータは、国土情報や国勢調査など全国で入手可能なものであり、国内の任意の地域で応用することが可能である。

この手法を四国圏に適用し、2035 年までの交通戦略分析を行った。その結果、現況のサービス水準を維持するためには公的な負担が大幅に増加すること、特定の価値規範に基づく交通戦略では地域公共交通の持続的な供給が困難なことを明らかにし、持続可能な交通システムの構築には、異なる価値規範の調和、交通戦略検討における広域連携、および土地利用と交通に関わる政策統合が必要となることが示唆された。

1. クロスアセスメント手法の構築

クロスアセスメントでは、経済・社会・環境の 3 つの観点から交通戦略を生成し評価する。ここで、経済については公共交通事業の収支、社会については利用者便益、環境については CO₂ 排出量を評価指標とし、各シナリオと戦略を、これらの指標により評価する。

このため、土地利用シナリオと交通戦略による LOS 変化、それに伴う交通行動変化と交通量変化、交通事業収入変化と費用変化を整合的に表現可能なモデルが必要であり、またそれらは、利用者便益、CO₂ 排出量についても計量可能である必要がある。

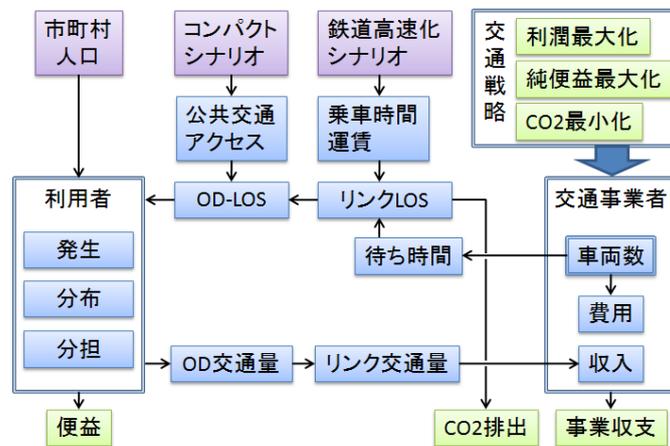
そこで、本研究では下図に示す分析フレームを設定した。交通機関は乗用車、バス、鉄道の 3 機関とし、分布交通は市町村単位で表す。乗用車の LOS とルートは OD に対して固定し、リンクは考慮しないが、公共交通の LOS はシナリオ・戦略で変化するため、市町村間を結ぶ集約的なリンクを設定した。ただし、市町村内の移動および交通機関までのアクセスは別途リンクを設定した。

公共交通リンクの車両数を設定すると、各ノードの期待待ち時間が算定され、これと表定速度に基づき、リンク LOS を算定する。また、立地分布シナリオの下で公共交通へのアクセス距離が算定され、リンク LOS と併せて OD-LOS を算定する。OD-LOS と市町村人口に基づき、発生、分布、分担交通量が算定され、OD 交通量が求められる。

これをリンク交通量で集計し、運賃を乗ずることで交通事業収入を算定する。各リンクの投入車両数、路線長等の条件により事業費用が算定され、事業収支を求める。

このフレームでは、利用者の交通行動を効用ベースのモデルで表し、交通戦略による利用者便益を算定する。また、リンク毎の車両走行キロに基づき公共交通からのCO₂排出量を求める。乗用車については、台あたりCO₂排出量をOD毎に固定し、交通量に比例して増加させる。

交通事業者は戦略目標に基づき各リンクの投入車両数を決定する。すなわち、戦略目標は供給側のコントロールにより実現することを想定しており、課金や規制等による需要側の直接コントロールは分析の対象外である。



図表3 クロスアセスメントの分析フレーム

本システムの構築に必要とされるデータは、市町村ごとの交通サービス水準、利用者の交通行動、及び交通サービスの供給費用に関わるデータである。交通サービス水準は総合交通分析システム NITAS、鉄道時刻表、道路交通センサス、地域メッシュ統計、国土数値情報を用い設定した。

また、交通行動に関するデータとして、都市内移動については平成12年国勢調査の「従業地・通学地集計」、都市間移動については2005年の第4回全国幹線旅客純流動調査を用いた。また、都市内移動に関わる原単位として平成11年全国パーソントリップ調査データを用い、また、都市内移動に関わる事前情報として平成10年度東京都市圏パーソントリップ調査データを用いた。国勢調査データは出発地および到着地で集計されたデータであり、また幹線旅客流動調査データは市町村よりも粗い単位となっているが、本研究では、これらのデータから市町村単位の交通行動モデルを推計するための方法を提示している。

交通サービスの供給費用は、鉄道については鉄道統計年報、バスについては運輸局統計を用いた。なお、鉄道の資本費用はインフラ部分と車両部分に分割する必要がある。

るが、鉄道統計年報に基づく推計方法も提示している。

以上のデータは、全国で整備されており、本分析手法を国内の任意の地域を対象として構築することが可能である。

2. 四国圏の交通戦略分析

上述のクロスアセスメント手法を四国圏の交通戦略分析に適用し、交通戦略が交通事業収支、社会的便益、CO₂排出量に及ぼす影響を分析した。その結果、四国圏においては、1)現在の公共交通サービス水準を将来にわたり維持するためには公的な負担が大幅に増加すること、2)特定の価値規範に基づく交通戦略を一律に当てはめると利用者便益に地域格差が生じること、3)交通事業収支の改善とCO₂削減は両立しうるが、便益向上と収支改善はトレードオフの関係にあること、4)都市のコンパクト化と鉄道高速化は便益向上と事業収支改善に効果があり、それらの間には相乗的な効果が見られること、などが明らかとなった。

現時点で、四国圏内の公共交通事業は大幅な赤字であり、その損失は実質的に公的な負担により賄われている。本分析結果では、現在のLOSを維持する場合、2000年から2035年にかけて、赤字幅は鉄道が120億円から180億円、バスでは80億から110億に拡大することとなる。国、地方の財政状況から、今後、交通事業に対する公的負担を大幅に増加させることは困難であると予想される。このため、地域公共交通の維持には、事業収支の改善が不可避である。

交通事業の利潤を最大化する戦略をとる場合、2000年の事業収支は、バスと鉄道を合わせて190億円程度の黒字になると推計されたが、その戦略を継続したとしても2035年には黒字幅は46億円程度まで縮小する。また、その場合、需要が見込まれる路線ではLOSが改善するが、需要密度の低い赤字路線は大幅に廃止される。圏域で集計すると、収支が改善するにもかかわらず、500億円程度の利用者便益が生じる。ただし、廃止地域は県域内に広く分布しており、それらの地域では多大な不便が生じる。

利用者便益と事業収支を合算した純便益を最大化する戦略をとる場合、四国圏の利用者便益は2000年には2000億円と推計されるが、人口減少により2035年には1300億円まで縮小する。この戦略では、現況のほとんどの公共交通路線が維持され、多くの路線でサービス水準が向上する。このため、多くの地域では正の便益を享受するが、路線廃止による便益低下を費用節約額が上回る地域では、路線は廃止され便益が低下する。一方、この戦略による事業収支は、鉄道では分析期間を通じて250億円程度の赤字となり、バスでは2000年には50億円程度の黒字だが、経年的に収支は悪化し2035年には40億円程度の赤字となる。両者を併せると、概ねLOSを固定した基準ケースと同程度の赤字幅となる。

CO₂を最小化する戦略では、都市間リンクを廃止することで移動効用を低下させ、都

市間交通需要を減少させることになり、その結果、分析期間を通じて5%程度CO₂排出量が削減される。ただし、鉄道、バスを合わせた事業収支は2000年には270億円の赤字、2035年には360億円の赤字と3つの戦略の中で最大の赤字幅となる。また、圏域全体の利用者便益は、2000年には200億円の正の便益となっているが、2035年には6億円まで縮小する。この戦略で利用者便益が正となる市町村はごく一部であり、ほとんどの市町村で利用者便益は負となる。

なお、利潤最大化戦略においても、基準ケースと比較して4%程度CO₂排出量は削減される。一方、純便益最大化戦略では、基準ケースと比較して1%程度CO₂排出量は増加する。

以上のことから、地域交通戦略目標においてCO₂削減を優先することは適切ではなく、他の価値規範とも両立しうる戦略目標の検討が必要である。その際、利潤最大化戦略はCO₂最小化戦略と同程度のCO₂削減効果があり、事業収支を改善することから、事業の経済性と環境に関する価値を両立しうる戦略といえる。

利潤最大化戦略は、集計的には正の便益をもたらすが、域内の多くの市町村の便益は負となる。一方、純便益最大化戦略は多くの市町村に正の便益をもたらすが、事業収支を悪化させる。このため、集計的に見ると事業収支と利用者便益の間にはトレードオフの関係が見られる。しかし、リンク別の事業収支、市町村別の便益の分析結果を見ると、利潤最大化戦略でも正の便益をもたらされる市町村があり、また純便益最大化戦略の下でも黒字となるリンクも存在しており、両者の関係は必ずしも一様ではない。

従って、戦略検討に際しては、価値規範の間の単なる重み付けではなく、両者を調和させた戦略の可能性が見いだされる。調和のさせ方には様々な方法があると考えられるが、例えば、利潤最大化戦略で正の便益をもたらされる地域では、積極的な交通事業投資により利益を最大化し、それ以外の地域で、純便益最大化戦略により正の便益を得られる地域に対して、その利益を原資としてサービスを維持する戦略などが考えられる。

都市のコンパクト化と鉄道の高速化は、対象地域において便益向上と交通事業収支改善に寄与し、両者は相乗的な効果を有することが示された。鉄道の高速化ではインフラへの投資が大きくなるが、建設費を含めた社会的な費用対効果でも、正の純便益をもたらすと推計された。ただし、公共交通サービスの維持のためには、鉄道の高速化のみでは不十分であり、都市のコンパクト化などの土地利用政策との連携、および上述の便益と事業収支の調和戦略との統合が不可欠である。

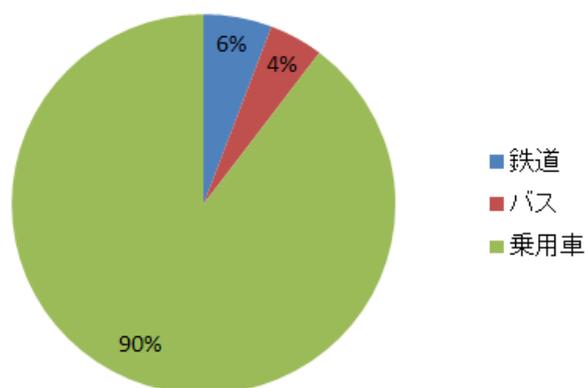
○キーワード

都市・交通戦略、公共交通、クロスアセスメント、国土情報、人口減少、コンパクトシティ、ヴィジョンング

○本編

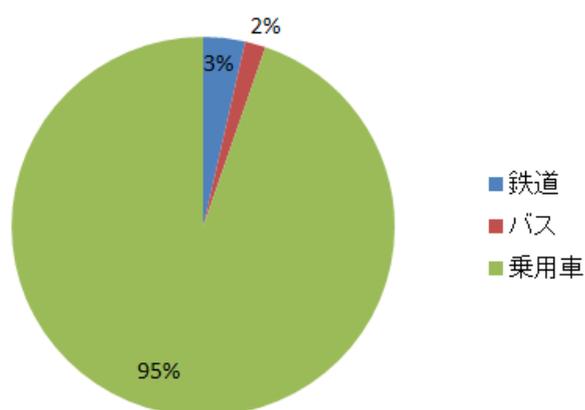
1. 四国の交通課題へのクロスアセスメント手法の応用

四国の交通は自動車依存型である。機関分担率を見ると（図表4）、9割が乗用車であり、公共交通機関の分担率は1割にすぎない。県間流動の分担率を見ると更に顕著であり、長距離トリップも自動車に依存している（図表5）。



出典) 鉄道輸送量：四国運輸局、鉄道の輸送実績の推移
自動車・バス輸送量：自動車輸送統計年報

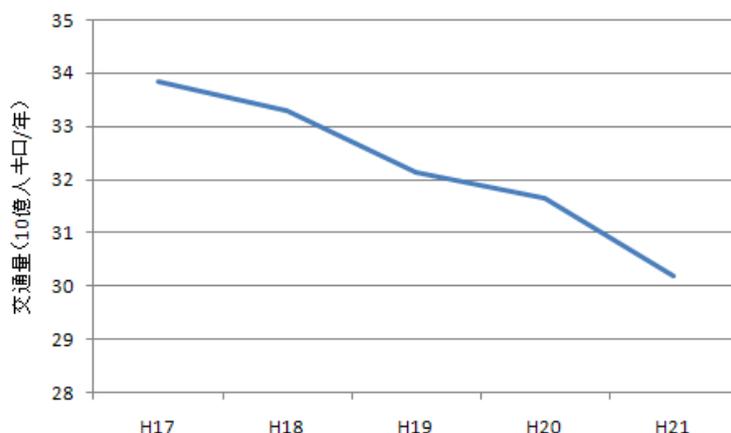
図表4 四国の機関分担率（平成21年度、輸送人キロベース）



出典) 第4回（平成17年）全国幹線旅客純流動調査に基づき作成

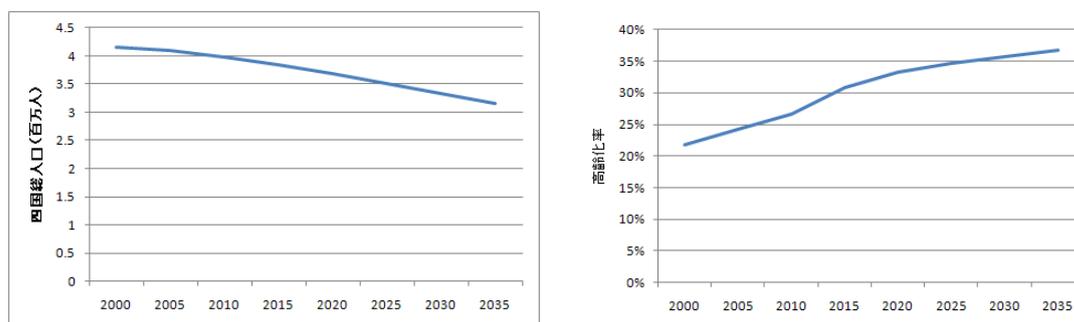
図表5 四国の県間機関分担率（四国圏内発着トリップのみ）

また、少子高齢化に伴い四国内の交通量は減少傾向にある（図表6）。2000年の四国の人口は415万人であり、高齢化率は22%であるが、2035年には人口は315万人、高齢化率は37%になると推計されている（図表7）。



出典) 四国運輸局資料、自動車輸送統計年報に基づき作成

図表6 四国の旅客交通量



出典) 平成12年国勢調査、国立社会保障・人口問題研究所

「日本の市区町村別将来推計人口」に基づき作成

図表7 四国圏の総人口・高齢化率の将来推計

こうした状況の下、四国の公共交通事業の収支は悪化を続けており、今後、現在の交通サービス水準を維持することは困難となりつつある。公共交通サービスが撤退した高齢社会では移動権を保証することが困難であり、こうした状況が全国で生じつつあることが、交通基本法の最も根幹的な提案理由となっている。しかし、保障されるべき移動権の範囲や、その実現に必要とされる財政規模等について、現在のところ具体的な検討はなされていない。

また、公共交通サービスの供給、特に鉄道サービスの供給可能性を検討するには広域的な観点が必要である。広域ネットワークを有する鉄道事業では、都市部および

幹線の収益により輸送密度の低いローカル線を維持している。しかし、四国には拠点都市が存在せず、また都市間路線の競争力も高速道路に劣るため、ネットワーク維持には収益力のある路線の創出や事業に対する公助等が必要となる。この場合、県や市町村といった自治体単位で見ると、受益と負担は必ずしも地理的に閉じていないことになるため、広域的な対策評価が必要となる。

本研究で提案するクロスアセスメント手法は、こうした課題を検討するための問題分析手段の一つとなりうる。本手法では、経済・社会・環境の3つの観点から交通戦略を生成し評価する。通常、費用便益分析では、それらの統合指標を用い代替案を評価するが、権利間の優先順位を一意に定めることは困難であり、しばしば状況に応じ政治的に解決を図ることが求められる。その際、複数の価値規範に基づくアウトカム評価は、代替案の得失を複眼的に評価し、合意形成・意志決定における論点を明確化する上で有用であると考えられる。

また、本手法では、広域交通戦略が各地域に与える影響を統合的に評価することが可能であり、受益の地理的な波及状況の検討に活用しうる。これは、県をまたがる政策課題についての共通認識を提供し、広域戦略の形成に寄与しうると考える。

以上より、本研究の目的である実用的なクロスアセスメント手法を構築する上で、四国圏の広域交通戦略評価は適切な課題といえる。

2. クロスアセスメント手法の構築

本章では、クロスアセスメント手法の詳細を説明する。まず、分析のフレームを示した上で、交通需給をモデル化し、交通戦略と評価指標の定式化を行う。

2-1. 分析フレーム

前述のように、クロスアセスメントでは、経済・社会・環境の3つの観点から交通戦略を生成し評価する。ここで、経済については公共交通事業の収支、社会については利用者便益、環境についてはCO₂排出量を評価指標とし、各シナリオと戦略を、これらの指標により評価できることが要件となる。

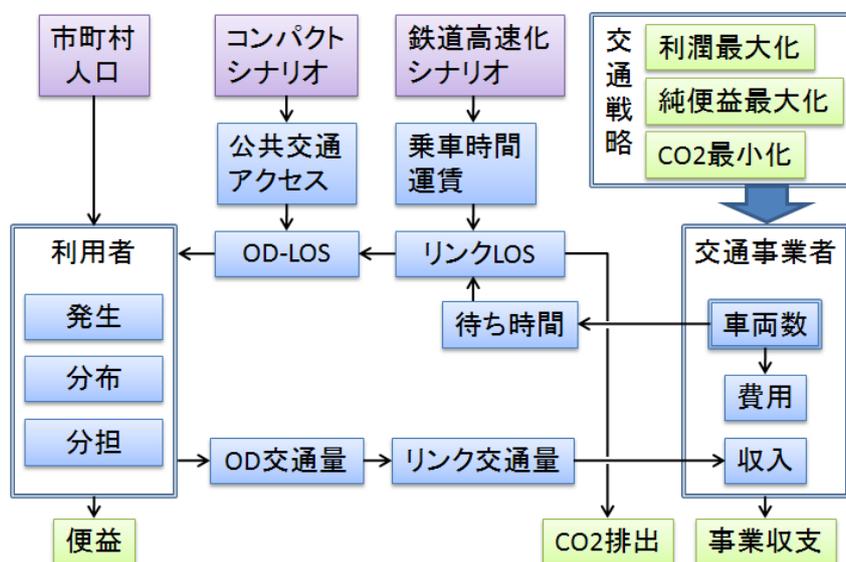
このため、交通戦略等によるLOS変化、それに伴う交通行動変化と交通量変化、交通事業収入変化と費用変化を統合的に表現可能なモデルが必要であり、またそれらは、利用者便益、CO₂排出量についても計量可能である必要がある。

そこで、本研究では図表3に示す分析フレームを設定した。ここで、交通機関は乗用車、バス、鉄道の3機関とし、分布交通は市町村単位で表す。乗用車のLOSおよびルートはODに対して固定的と想定し、リンクは明示的に考慮しないが、公共交通のLOSはシナリオ・戦略で変化するため、市町村間を結ぶ集約的なリンクを想定する。ただし、市町村内の移動およびアクセスについては別途リンクを設定する。

公共交通について、リンク別の車両数を設定すると、各ノードにおける期待待ち時間が算定され、これと鉄道高速化シナリオの下での表定速度に基づき、リンク LOS が算定される。また、立地分布を定めるコンパクトシナリオの下で公共交通へのアクセス距離が算定され、リンク LOS と併せて OD-LOS が算定される。OD-LOS と市町村人口に基づき、発生交通量、分布交通量、分担交通量が算定され、OD 交通量が求められる。これをリンク交通量で集計し、賃率を乗ずることにより公共交通事業の収入が算定される。また、各リンクの投入車両数、路線長等の条件により事業費用が算定され、事業収支が求められる。

このフレームにおいて、利用者の交通行動を効用ベースのモデルで表せば交通戦略による利用者便益を算定することが出来る。また、リンク毎の車両走行キロに基づき公共交通からの CO₂ 排出量を求めることが出来る。なお、乗用車については、1 台あたりの CO₂ 排出量を OD 毎に固定的に設定しており、交通量に比例して増加すると仮定する。

交通事業者は戦略目標に基づき各リンクの投入車両数を決定すると想定する。すなわち、本研究では、戦略目標は供給側のコントロールにより実現することを想定しており、課金や規制等により需要側を直接コントロールする方策は分析の対象外としている。



図表 3 クロスアセスメントの分析フレーム (再掲)

以下では、これらの算定方法を定式化する。

2-2. 交通需給モデル

(1) 交通需要モデル

本モデルは交通需要統合型ネットワーク均衡モデル（円山ら、2002）を参考に、発生・分布・分担までをネステッドロジットモデルを用いて表現する。このモデルでは、需要推計フローは従来の4段階推定と同様だが、下位のサービス水準を上位の選択要因として用いることで、交通戦略によるLOS変化が交通発生にまで与える影響を反映することが出来る。

本研究では交通需要は都市内交通と都市間交通に分けて分析する。都市内交通とは、都市圏内での交通であり、都市間交通とは県をまたがる移動を表す。なお、都市圏は概ね通勤圏を表している。ここでは、都市圏内の移動は、都市圏間の移動と比較して必需的な移動が多いと考えられるため、交通発生原単位は固定的に与えるが、都市間の移動では発生源単位そのものが移動性や目的地の魅力等の影響を受けると考えられるため、集約的な交通LOSの関数として求める。以下、都市内交通需要モデルと都市間交通需要モデルを説明する。

① 都市内交通需要モデル

まず、需要モデルでは、OD間の費用と所要時間が交通機関ごとに与えられていると想定する。OD- ij における交通機関 k の所要時間を t_{ijk} 、費用を c_{ijk} とし、時間価値を ω とする。このとき、交通機関 k の選択確率をロジットモデルを用いて以下のように表す。

$$\text{Pr}_{ijk} = \frac{\exp(\theta_c \cdot (\omega \cdot t_{ijk} + c_{ijk}) + \theta_k)}{\sum_{k'} \exp(\theta_c \cdot (\omega \cdot t_{ijk'} + c_{ijk'}) + \theta_{k'})} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 θ_c は分散パラメータであり、 θ_k は交通機関 k のダミーパラメータである。このとき、OD- ij の期待最小一般化費用は次式で表される。

$$C_{gij} = \frac{1}{\theta_c} \log \left\{ \sum_k \exp(\theta_c \cdot (\omega \cdot t_{ijk} + c_{ijk}) + \theta_k) \right\} \dots\dots\dots(2)$$

次に、目的地選択確率を同様にロジットモデルを用いて以下のように表す。

$$\Pr_{ij} = \frac{\exp(\theta_p \cdot \log(N_j) + \theta_g \cdot C_{gij})}{\sum_{j'} \exp(\theta_p \cdot \log(N_{j'}) + \theta_g \cdot C_{gj'})} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 N_j は目的地 j の人口、 θ_p 、 θ_g はパラメータである。ここで、一人あたりの交通発生原単位を q とすると、OD- ij の交通量 Q_{ij} および機関別交通量 Q_{ijk} は次式となる。

$$Q_{ij} = q \cdot N_i \cdot \Pr_{ij} \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_{ijk} = Q_{ij} \cdot \Pr_{ijk} \dots\dots\dots(5)$$

ただし、発生源単位 q は徒歩・自転車等による発生量を除いたものとする。徒歩自転車の発生源単位は 3-3 節における式(27)で定義する。結局、機関別 OD 交通量は OD 間の所要時間、費用、および発着地の人口の関数となる。

②都市間交通需要モデル

都市間交通需要モデルにおいても、式(1)～(3)で表される機関選択確率、目的地選択確率は全く同様に定式化される。ただし、都市間移動では、出発地と同一圏内への移動は対象外とし、目的地集合を Ω_i と表す。ここで、都市間交通では需要はLOSに関して弾力的であると想定し、発生源単位を出発地の期待費用の関数として表す。式(3)より、出発地 i における都市間移動の期待最小一般化費用を次のように表す。

$$C_{gi} = \frac{1}{\theta_g} \log \left\{ \sum_{j' \in \Omega_i} \exp(\theta_p \cdot \log(N_{j'}) + \theta_g \cdot C_{gj'}) \right\} \dots\dots\dots(6)$$

この費用を用いて、出発地 i の都市間交通発生量 Q_i を次式で表す。

$$Q_i = \frac{\theta_{g2} \cdot N_i}{1 + \exp(\theta_{g0} + \theta_{g1} \cdot C_{gi})} \dots\dots\dots(7)$$

式(4)の $q \cdot N_i$ の代わりに Q_i を用いることで、OD 交通量が求められ、式(5)により都市間の機関別 OD 交通量を求められる。

③リンク交通量

交通機関 k について、都市内の OD 交通量を Q_{ijk}^U 、都市間の OD 交通量を Q_{ijk}^I とし、両者の和を Q_{ijk} とする。このとき、交通機関 k 、リンク a の交通量 Q_a^k は次のように表される。

$$Q_a^k = \sum_{ij \in \Omega_a} Q_{ijk} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Ω_a は経路上にリンク a を含む OD の集合を表す。

(2)交通 LOS の算定方法

本研究では、乗用車の LOS は OD で固定的に与える。一方、公共交通の LOS は各リンクに投入する車両数により変化すると仮定する。交通機関 k 、リンク a の車両数を n_a^k 、路線長を l_a^k 、速度を v_a^k 、ターミナルでの停車時間を t_a^{tk} とすると、当該リンクの期待待ち時間 t_{ak}^w は次式で表される。

$$t_{ak}^w = (l_a^k / v_a^k + t_a^{tk}) / n_a^k \dots\dots\dots (9)$$

出発地 i 、目的地 j の OD を結ぶ交通機関 k のルートはただ一つとして、そのルートに含まれるリンク集合を Ω_{ijk} とする。このとき、OD- ij の乗車時間 t_{ijk}^r 、期待待ち時間 t_{ijk}^w をそれぞれ次式で定義する。

$$t_{ijk}^r = \sum_{a \in \Omega_{ijk}} \frac{l_a^k}{v_a^k} \dots\dots\dots (10)$$

$$t_{ijk}^w = \left\{ \frac{1}{|\Omega_{ijk}|} \cdot \sum_{a \in \Omega_{ijk}} (t_{ak}^w)^\gamma \right\}^{1/\gamma} \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $|\Omega_{ijk}|$ はリンク集合の要素数である。ここで、期待待ち時間はルート上のリンク待ち時間の一般化平均で表しており、 γ が十分大きければ、リンク待ち時間の最大値となる。また、鉄道駅、バス停までのアクセス時間を t_{ik}^a と表す。すると OD- ij 間の総所要時間 t_{ijk} は次式となる。

$$t_{ijk} = t_{ijk}^r + t_{ijk}^w + t_{ijk}^a \dots\dots\dots(12)$$

次に、交通機関 k の初乗り運賃を c_{0k} 、人キロあたりの賃率を c_{1k} とすると、OD- ij の交通コスト c_{ijk} は次式となる。

$$c_{ijk} = c_{0k} + c_{1k} \sum_{a \in \Omega_{ijk}} l_a^k \dots\dots\dots(13)$$

これらの時間と費用は、交通需要モデルの入力条件となる。

(3) 交通事業収入と支出

OD- ij における交通機関 k の運賃収入 I_{ij}^k は、式(8)の Q_{ijk} と式(13)の c_{ijk} を用いて次のように表される。

$$I_{ij}^k = c_{ijk} \cdot Q_{ijk} \dots\dots\dots(14)$$

これを全ての OD について合算したものが対象地域の運輸収入となる。ただし、リンク別の採算性を評価するために、リンク a の運賃収入を次式で定義する。

$$I_a^k = \sum_{ij \in \Omega_a} I_{ij}^k \cdot \frac{l_a}{\sum_{a' \in \Omega_{ijk}} l_{a'}} \dots\dots\dots(15)$$

これは、OD 間の運賃を乗車距離に応じて案分していることを意味する。一方、年間運行時間を H とすると、当該リンクの年間運行距離 L_a^k は次のようになる。

$$L_a^k = H \cdot v_a^k \cdot n_a^k \dots\dots\dots(16)$$

バスについては運行距離あたりの費用のみ考慮するが、鉄道ではインフラコストを無視できないため、線路維持費、車両維持費、輸送費に分けて推計する。路線長あたり費用を c_L^k 、列車数あたりの費用を c_N^k 、運行距離あたり費用を c_D^k とすると、リンク a の年間費用は次式となる。

$$C_a^k = c_L^k \cdot l_a^k + c_N^k \cdot n_a^k + c_D^k \cdot L_a^k \dots\dots\dots(17)$$

2-3. 評価指標と交通戦略の定式化

本研究での評価指標は、交通事業収支、利用者便益、および CO₂ 排出量である。また、これらの指標に基づき交通戦略を生成する。以下では、まず各評価指標を与えた上で、それらに基づく交通戦略を定式化する。

(1)交通事業収支

式(15)、(17)を用い、リンク a の事業収支 FB_a^k を次式で定義する。

$$FB_a^k = I_a^k - C_a^k \dots\dots\dots(18)$$

これを全てのリンクについて合算したものが、対象地域の事業収支となる。

(2)利用者便益

利用者便益は対策有無毎の余剰の差として定義される。ここでは台形公式を用い、式(6)の出発地別の期待最小費用 C_{gi} と式(7)の発生交通量 Q_i 用いて、出発地 i における便益 UB_i を次のように定義する。

$$UB_i = \frac{1}{2} \cdot \sum_{I,U} (Q_i^w + Q_i^o) \cdot (C_{gi}^o - C_{gi}^w) \dots\dots\dots(19)$$

ただし、 w 、 o はそれぞれ対策有り無しを表すサフィックスであり、また、 I 、 U は都市間交通、都市内交通に関して和を取ることを意味している。なお、式(6)、(7)は都市間交通についてのみ定義しているが、式(6)については都市内交通についても同様に計算することが可能である。一方、式(7)の発生交通量は、都市内については原単位を固定的に与えているため、対策の有無によって値は変わらない。

(3)CO₂排出量

CO₂ 排出量 E_a^k は排出原単位を e_a^k として次のように表される。

$$E_a^k = e_a^k \cdot L_a^k \dots\dots\dots(20)$$

(4)交通戦略の定式化

本研究では交通戦略における操作変数を各リンクにおけるバスの車両数および鉄道の列車数に限定する。このとき、事業者の利潤最大化戦略、純便益最大化戦略、CO₂排出最小化戦略はそれぞれ次のように定式化される。

①利潤最大化戦略

$$\{n_a^k\} = \arg \max_{\{n_a^k\}} \sum_{a,k} FB_a^k \dots\dots\dots(21)$$

②純便益最大化戦略

$$\{n_a^k\} = \arg \max_{\{n_a^k\}} \left[\sum_{a,k} FB_a^k + \sum_{i \in \Omega} UB_i \right] \dots\dots\dots(22)$$

③CO₂排出最小化戦略

$$\{n_a^k\} = \arg \min_{\{n_a^k\}} \left[\sum_{a,k} E_a^k + Q_{ijc} \cdot E_{ijc} \right] \dots\dots\dots(23)$$

まず、利潤最大化について、利潤は式(18)より事業収入と支出の差で定義されており、事業収入は式(14)、(15)より交通量に比例し、支出は車両数と運行距離に比例する。交通量は、式(1)～(7)に示すように待ち時間について減少し、待ち時間は車両数の減少するため、交通量は車両数に関し増加する。ただし、その増加率は車両数に関し逡減する。一方、運行距離は車両数に関し比例するため総利潤は最大値を持つ。

次に、純便益は、ここでは事業者利潤と利用者便益の和で与える。また、利用者便益は現状のLOSを基準として計測する。その際、全てのリンクにおける車両台数がゼロの時、事業者利潤、利用者便益ともに有限の負の値であるが、車両台数が無限となるとき、利用者便益は有限の正の値となるが、事業者利潤は無限の負の値となる。従って、純便益は車両台数が $(-\infty, 0]$ の間で最大値を持つ。

CO₂排出量は公共交通の運行に伴うCO₂排出量と乗用車の利用に伴うCO₂排出量の和で表す。 E_a^k は式(20)で定義した公共交通のCO₂排出量であり、 Q_{ijc} はOD- ij 間の乗用車交通量、 E_{ijc} は交通量あたりのCO₂排出量を表す。ここで、 E_{ijc} は固定的に与えるが、車両数に関し E_a^k は増加し、 Q_{ijc} は減少する。車両数がゼロの時、 E_a^k はゼロであり、 Q_{ijc} は有限の正の値である。一方、車両数が無限の時、 E_a^k は無限となり、 Q_{ijc} はゼロもしくは有限の正の値であることから、CO₂排出量を最小化する車両台数が存在する。

これらの戦略に加えて、本研究では都市構造シナリオと鉄道高速化シナリオがもたらす影響についても分析する。まず、都市構造シナリオは、趨勢ケースとコンパクトケースを設定するが、それらは公共交通へのアクセスに違いをもたらす。これは式(12)

の t_{ijk}^a に反映される。次に、鉄道高速化については、特定の鉄道リンクにおける速度向上により表現する。これは式(9)、(10)の v_a^k に反映される。

3. モデル推計とシナリオ設定

以上のモデルを用い、具体的な分析を行うために、本章では対象地域、使用データを説明し、モデルパラメータの推計とシナリオの設定を行う。

3-1. 対象地域

対象地域は四国4県とし、分析の空間単位は市町村とする。また移動手段は徒歩、バス、鉄道、乗用車の4手段とし、徒歩は市町村内移動のみ選択され、その選択比率は他の手段のLOSによらず市町村内の平均移動距離と人口密度の関数として与える。その具体的な定式化は3-3で行う。

なお、市町村間の移動に海上交通を利用する必要がある4市町村を除いた、91市町村を分析対象とした。図表8は対象とする市町村を示しており、灰色で表している島嶼部は対象外とする。市町村のCBDは昼間人口重心で表し、市町村間の移動はCBD間の移動として表す。また市町村内の移動は、メッシュ人口に基づきメッシュ間の平均移動距離を求め、CBDからその平均距離だけ離れた代表地点を設定し、その地点間の移動として表現する。ただし、公共交通については、鉄道駅、バス停留所の座標とメッシュ人口より、市町村内の平均アクセス距離をそれぞれ求めている。その詳細は3-4で説明する。



図表8 対象地域

3-2. 使用データ

(1) 交通需要データ

本研究では、都市内移動に関する交通需要データとして平成12年国勢調査の「従業地・通学地集計」を用い、都市間移動については2005年の第4回全国幹線旅客純流動調査を用いた。また、都市内移動に関わる原単位として平成11年全国パーソントリップ調査データを用い、また、都市内移動に関わる事前情報として平成10年度東京都市圏パーソントリップ調査データを用いた。

まず、平成12年国勢調査「従業地・通学地集計」では常住地または従業地・通学地による利用交通手段別の15才以上の就業者数・通学者数が掲載されている（平成17年調査では利用交通手段別の調査は行われていない）。その際、トリップは自市内、県内他市、他県で区分されており、その区分毎の交通手段別の就業者数・通学者数が得られる。なお、この交通手段には徒歩も含まれている。

幹線旅客純流動調査では、四国については14の生活圏が設定されており、県内移動を除く、生活圏間の代表交通手段別年間交通量を取得可能である。また、四国外との交通流動についても機関別に交通量を取得可能である。

平成11年全国パーソントリップ調査では、四国圏内では9市が対象とされており、各市の年齢階層別交通発生原単位等を取得可能である。

これらのデータより、市町村毎、生活圏毎の機関分担を把握することは出来るが、都市内の移動状況を十分把握することは困難である。このため、都市内移動については目的地選択型のモデルを想定し、その事前情報として平成10年度東京都市圏パーソントリップ調査データを用いた。その詳細は3-3に示す。

以上に加え、自動車輸送統計調査および四国運輸局統計より四国圏全域での交通機関別の輸送人キロをコントロールトータルとして用いた。

(2) 交通サービスデータ

交通サービス水準は市町村ごとに設定し、総合交通分析システム NITAS、鉄道時刻表、道路交通センサス、地域メッシュ統計、国土数値情報を用い設定した。まず鉄道、バスの頻度をそれぞれ鉄道時刻表、平成11年道路交通センサスに基づき設定した。鉄道については各駅の発本数を時刻表より求めた上で、駅勢圏をボロノイ分割により求め、駅勢圏人口による重み付き平均として各市町村の平均頻度を設定した。またバスについては道路センサスデータのうち、平日平均バス便数が1便以上であり、かつ調査地点住所の存在するものを抽出し、その地点にバス停があるものと仮定した。アドレスマッチングより調査地点座標を求め、鉄道と同様ボロノイ分割によりバス停の圏域を求め、圏域人口による重み付き平均として頻度を設定した。なお、データとして用いた鉄道駅数は437駅、バス便数が1便以上の道路センサスデータは739地点である。

求めた平均便数 f_{ik} より、次式を用いて市町村内リンクの期待待ち時間を設定した。

$$t_{ik}^w = \frac{H}{2f_{ik}} \dots\dots\dots(24)$$

ここで、1日の運行時間をバス、鉄道ともに18時間と仮定し、現状の頻度より期待待ち時間を設定した。なお、市町村間リンクについては、接続する市町村の頻度の最小値を設定する。

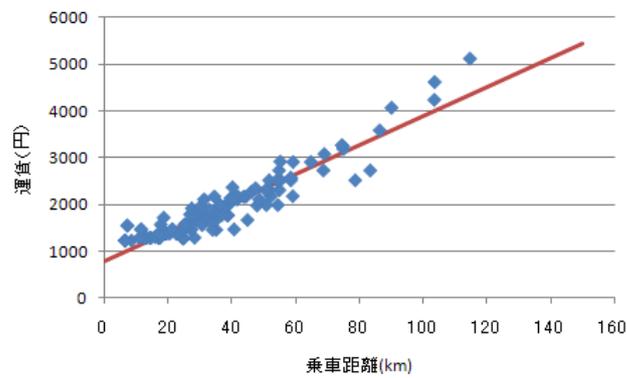
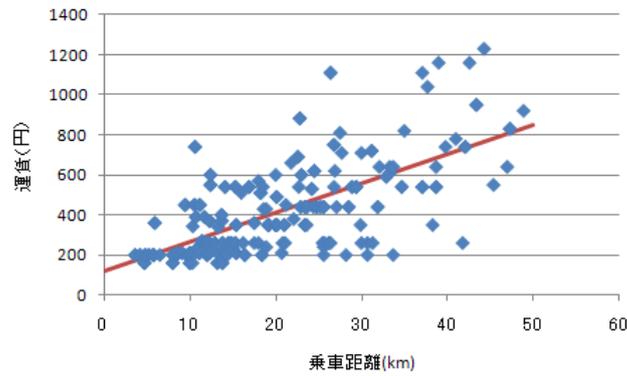
次に、鉄道の路線長は国土数値情報より得られた鉄道路線データを市町村ポリゴンで分割し計測された長さを市町村内リンクの路線長とし、NITAS より得られる市町村間の移動距離を市町村間リンクの路線長とした。バスについては、道路交通センサスのうち、バス便数が1日1便以上の路線長を市町村毎に集計したものを市町村内リンクの路線長とし、鉄道と同様にNITAS より得られる市町村間の移動距離を市町村間リンクの路線長とした。ただし、鉄道の場合には、国土数値情報の鉄道路線が接続している隣接市町村間のみリンクが存在すると仮定し、バスの場合は全ての隣接市町村間についてリンクが存在すると仮定した。

鉄道の走行速度は、市町村間リンクについては、NITAS より得られる隣接市町村間の乗車時間と距離に基づき設定した。また市町村内リンクの平均速度は、当該市町村に接続する全ての市町村間リンクの速度の平均値とした。なお、鉄道については、急行と鈍行を別リンクで設定しており、急行の速度については別途時刻表より表定速度を与えている。バスについては、走行速度を道路交通センサスの混雑時速度を市町村内の平均走行速度と仮定し、バス停間隔が500mであり、バス停で30秒停車すると想定し平均速度を求めた。また市町村間リンクについては接続する市町村の速度の平均を用いた。

以上求めた期待待ち時間、路線長、平均速度より式(9)を用いて都市内リンクの車両数 n_a をターミナル停車時間の関数として設定し、車両数の合計が運輸統計と合致するようターミナル停車時間を設定した。ここでは、鉄道の停車時間は11分であり、バスの停車時間は32分と求められた。

運賃については、バスは距離あたりの賃率を設定し、乗車距離を乗ずることで26円/人 km と求めた。鉄道については、急行、鈍行の運賃をそれぞれ乗車距離に対する回帰分析により求めた。図表9は乗車距離に対する運賃と回帰直線を示している。また、図表10は推計された係数、t-値、および実績値と推計値の相関係数を示す。これより、鈍行については、やや再現性が低いものの、距離に関して有意性ある推計式が得られている。また、急行については再現性、およびパラメータの有意性も高く推計されている。

以上のサービス水準データを用い、需要モデルを推計する。



図表 9 乗車距離に対する運賃（上：鈍行、下：急行）

図表 10 運賃モデルの推計結果（上：鈍行、下：急行）

	鈍行		急行	
		t-値		t-値
定数項	123	5.3	799	20.3
距離あたり運賃	0.0145	14.0	0.0309	32.5
相関係数	0.67		0.94	

3-3. モデル推計

(1) 交通需要モデルの推計

本項では、市町村内の移動距離と徒歩率、都市内交通モデル、および都市間交通モデルを推計する。

徒歩については、サービス水準データを十分詳細に把握することが困難であることから、他の交通手段と同時に推計すると十分な再現性を得られない。このため、徒歩率については、移動距離と人口密度に基づき、交通機関分担モデルとは別に推計する。

都市内交通は通勤圏内の交通を表すが、利用可能な機関分担データは国勢調査であり、市町村内々トリップについては機関分担率が与えられるものの、市町村間トリップについては出発地もしくは到着地で集計された機関分担率のみが与えられる。このため、パラメータの推計においては工夫が必要である。

都市間交通については、旅客純流動データは生活圏間の OD として与えられているため、市町村間モデルは生活圏で集計された尤度を用い推計する必要がある。

①市町村内の移動距離と徒歩率の推計

市町村内の移動距離を把握するためにはパーソントリップ調査が必要だが、四国圏全域について利用可能なデータは存在しない。ここでは、平成 11 年東京都市圏パーソントリップ（以下、東京 PT）調査データに基づき目的地選択モデルを作成し、これを四国圏内の各市町村に適用することで都市圏内の移動距離を推計する。

都市内の目的地選択モデルを以下のように想定する。

$$\text{Pr}_{ji} = \frac{N_j^{d_{ij}} \exp(\theta_1 \cdot d_{ij})}{\sum_{j'} N_{j'}^{d_{ij'}} \exp(\theta_1 \cdot d_{ij'})} \dots\dots\dots(25)$$

ただし、 N_j^d は目的地 j の昼間人口、 d_{ij} は ij 間の距離、 θ_1 、 θ_2 はパラメータを表す。東京 PT に基づき、高齢者、非高齢者別にキャリブレーションでパラメータを求めた。得られたパラメータと目的地選択確率の統計値と推計値の相関係数を図表 11 に示す。

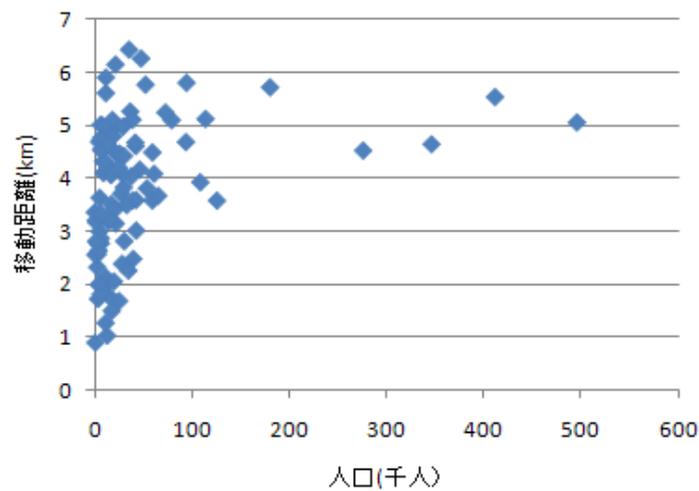
図表 11 都市内目的地選択モデル

	非高齢者	高齢者
θ_1	-0.169	-0.217
θ_2	0.457	0.448
相関係数	0.929	0.943

このモデルは、距離が近く昼間人口の多い目的地ほど選択確率が高まることを表している。従って、人口の地理分布がコンパクトな市町村ほど、移動距離は短くなる。このモデルを四国の市町村内の 3 次メッシュでの目的地選択に適用し、各市町村の平均移動距離を求めた。

$$d = \frac{\sum_i q_i \cdot \sum_j d_{ij} \cdot \text{Pr}_{ji}}{\sum_i q_i} \dots\dots\dots(26)$$

市町村人口に対する平均移動距離を図表 12 に示す。これを見ると、必ずしも人口が多い都市の移動距離が短いわけではなく、市町村内の人口の地理的分布により移動距離が大きくばらついて推計されていることが分かる。無論、この推計結果は他の地域で推計されたモデルに基づくものであり、移動距離の推計結果の信頼性は検証されていない。おそらく、大都市部と比較して地方部では混雑が少ないことから、距離抵抗を示す θ_1 の絶対値はより小さい値を取るものと考えられる一方、大都市と比較して都市圏の空間的広がり小さいことから、マクロに見ると距離抵抗パラメータは大きく推計される可能性もある。このため、モデル適用のバイアス計測には新たな調査が必要である。ただし、本研究では推計された移動距離を直接評価するのではなく、徒歩率の推計や交通需要推計の指標として用いられ、それらはコントロールトータルと一致するようモデル上で調整されることから分析結果に大きな偏りをもたらすものではないと考えられる。



図表 12 市町村人口と市町村内移動距離の推計値

次に、都市 i における徒歩率を次式により推計する。

$$\text{Pr}_i^w = \frac{1}{1 + \exp(\theta_3 + \theta_4 \cdot d_i^{\theta_6} + \theta_5 \cdot (N_i/A_i)^{\theta_7})} \dots\dots\dots(27)$$

ただし、都市内の移動距離は高齢者と非高齢者の人口比率で重み付けした平均値を用い、徒歩率の推計においては高齢者と非高齢者を区別しない。キャリブレーションにより推計されたパラメータと徒歩率の統計値と推計値の相関係数を図表 13 に示す。

図表 13 徒歩率推計モデルパラメータ

θ_3	6.23
θ_4	1.87
θ_5	-7.75
θ_6	0.0936
θ_7	0.0240
相関係数	0.54

パラメータより、移動距離が短く、人口密度が高いほど徒歩率が高いモデルとなっている。なお、このモデルパラメータに加え、現況の徒歩率と一致するよう、市町村毎にダミーパラメータを設定する。

②都市内交通モデル

上述のように国勢調査の市町村間トリップについては出発地もしくは到着地で集計された機関分担率のみが与えられているため、パラメータ推計のために集計的な尤度関数を設定する必要がある。本研究では以下の手順で尤度関数を設定し、パラメータ推計を行った。

まず、市町村内々トリップにおける機関選択確率をパラメータベクトル θ の関数とみなして $\text{Pr}_{ik}(\theta)$ と表し、機関分担率の統計値を q_{ik} として対数尤度を次のように定義する。

$$LL_1 = \sum_i \sum_k q_{ik} \cdot \ln(\text{Pr}_{ik}(\theta)) \dots\dots\dots (28)$$

次に、出発市町村 i について、 i を除く同一県内他市町村の集合を Ω_i とし、出発地 i における同一県内他市町村への機関 k による分担率を $q_{i \cdot k}$ とする。このとき、出発地の機関分担率に関する対数尤度を次のように定義する。

$$LL_2 = \sum_{i,k} q_{i \cdot k} \sum_{j \in \Omega_i} \ln(\text{Pr}_{ijk}(\theta)) \dots\dots\dots (29)$$

同様に、到着地 j について、 j を除く同一県内他市町村の集合を Ω_j とし、到着地 j における同一県内他市町村からの機関 k による分担率を $q_{\bullet jk}$ とする。このとき、到着地の機関分担率に関する対数尤度を次のように定義する。

$$LL_3 = \sum_{j,k} q_{\bullet jk} \sum_{i \in \Omega_j} \ln(\text{Pr}_{ijk}(\boldsymbol{\theta})) \dots\dots\dots (30)$$

県外についても同様に、出発地 i について県外市町村の集合を Ω_{pi} 、出発地 i における県外市町村への機関 k による分担率を $q_{pi\bullet k}$ 、到着地 j について、県外市町村の集合を Ω_{pj} 、到着地 j における県外市町村からの機関 k による分担率を $q_{p\bullet jk}$ とする。このとき、県外 OD について、出発地、到着地の機関分担率に関する対数尤度を、それぞれ次のように定義する。

$$LL_4 = \sum_{i,k} q_{pi\bullet k} \sum_{j \in \Omega_{pi}} \ln(\text{Pr}_{ijk}(\boldsymbol{\theta})) \dots\dots\dots (31)$$

$$LL_5 = \sum_{j,k} q_{p\bullet jk} \sum_{i \in \Omega_{pj}} \ln(\text{Pr}_{ijk}(\boldsymbol{\theta})) \dots\dots\dots (32)$$

また、式(3)で定義される目的地選択確率も $\boldsymbol{\theta}$ の関数とみなして $\text{Pr}_{ii}(\boldsymbol{\theta})$ と表し、目的地選択確率の統計値を q_{ij} として対数尤度を次のように定義する。

$$LL_6 = \sum_{i,j} q_{ij} \cdot \ln(\text{Pr}_{ij}(\boldsymbol{\theta})) \dots\dots\dots (33)$$

結局、パラメータベクトル $\boldsymbol{\theta}$ は次の対数尤度関数を最大化するよう求めればよいことになる。

$$LL = LL_1 + LL_2 + LL_3 + LL_4 + LL_5 + LL_6 \dots\dots\dots (34)$$

推計された都市内機関分担モデルのパラメータを図表 14 に示す。これより、機関選択における一般化費用、目的地選択におけるログサムおよび昼間人口のパラメータは符号条件を満たしており有意である。鉄道、バスのダミーパラメータは正の値を取っている。本研究では期待待ち時間を発車時間間隔の $1/2$ に設定していることから、所要時間が経験的な時間間隔よりも過大に評価されている可能性があり、これが、公共交通ダミーが正と推計される原因の一つと考えられる。

図表 14 都市内機関分担モデルパラメータ

	パラメータ	t-値
一般化費用(円)	-0.000727	-1363
鉄道ダミー	0.115	66
バスダミー	0.374	94
目的地選択ログサム	0.998	427
目的地選択昼間人口	0.774	424

また、モデルによる推計輸送量を統計と出来るだけ合致させるため、機関選択、目的地選択モデルに以下のようなダミーパラメータを設定した。

まず、式(1)の機関選択モデルの効用部分をダミーパラメータを用いて以下のように表す。

$$\theta_c \cdot (\omega \cdot t_{ijk} + c_{ijk}) + \theta_k + \theta_{ik} + \theta_{ik}^o + \theta_{jk}^d \dots\dots\dots(35)$$

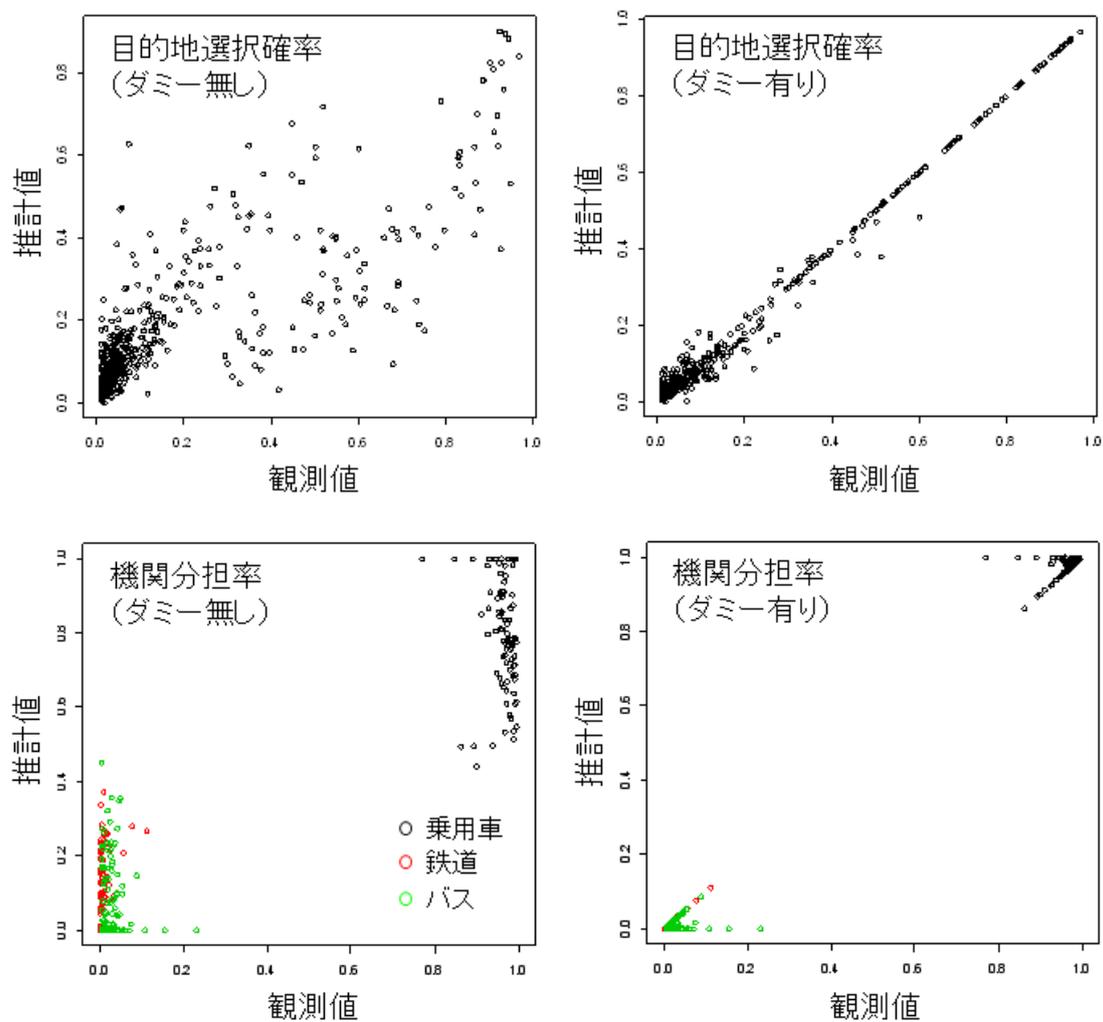
ここで、 θ_c 、 θ_k は式(1)と同じく一般化費用の分散パラメータと交通機関 k のダミーパラメータである。 θ_{ik} は市町村 i 、交通機関 k の内々トリップに関するダミーパラメータであり、バスと鉄道について市町村毎に与える。 θ_{ik}^o は出発地 i 、交通機関 k のダミーパラメータであり、 θ_{jk}^d は到着地 j 、交通機関 k のダミーパラメータである。また、目的地選択モデルの効用部分をダミーパラメータを用いて以下のように表す。

$$\theta_p \cdot \log(N_j) + \theta_g \cdot C_{gij} + \theta_{ii} + \theta_j^d \dots\dots\dots(36)$$

ここで、 θ_p 、 θ_g は式(3)と同じく目的地人口と期待最小費用のパラメータである。 θ_{ii} は自市町村を目的地とする場合のダミーパラメータであり、市町村毎に与える。 θ_j^d は自市町村以外の目的地のダミーパラメータであり、目的地毎に与える。以上のパラメータを式(34)の尤度関数が最大となるよう共益勾配法により求めた。ただし、 θ_{ik} については、前述のように公共交通の所要時間を過大に設定している可能性があることから、推計においてはゼロ以下とする制約をおいた。

ダミーパラメータ有無別の目的地選択確率および市町村内の機関選択確率の再現性を図表 15 に示す。これより、目的地選択に関してはダミーパラメータ無しでも選択の傾向を表現できているが、機関分担率については、ダミーパラメータなしでは公共交通の分担率が過大推計となる市町村が多いことが分かる。本モデルでは公共交通への

アクセスを集約的に表し、費用と時間のみを説明変数としているが、機関選択行動には他の要因が無視できない影響を与えていることが示唆される。なお、このダミーパラメータの導入により公共交通分担率の過大推計は修正されている。



図表 15 都市内交通における目的地選択モデル、機関分担モデルの再現性

最後に、発生源単位は平成 11 年全国パーソントリップ調査データに基づき、年齢区分毎に以下のように設定した。

図表 16 交通発生原単位

年齢階層	発生源単位 (トリップ/日)
1～14才	2.52
15～64才	2.41
65才～	1.96

③都市間交通モデル

幹線旅客純流動データは県をまたぐ生活圏間のOD交通を与えている。このため、モデル推計では市町村単位で推計される分担率を生活圏で集計したうえで、尤度関数を設定する必要がある。

まず、市町村 i における目的地 j の選択確率、および ij 間における交通機関 k の選択確率をそれぞれパラメータベクトル θ の関数と見なして、 $\Pr_{ij}(\theta)$ 、 $\Pr_{ijk}(\theta)$ と表す。このとき、生活圏 I における生活圏 J を目的地とする確率 \Pr_{IJ} 、および IJ 間で交通機関 k を選択する確率 \Pr_{Ijk} はそれぞれ次のように表される。

$$\Pr_{IJ}(\theta) = \frac{\sum_{j \in \Omega_J} \sum_{i \in \Omega_I} Q_i \cdot \Pr_{ij}(\theta)}{\sum_{i \in \Omega_I} Q_i} \dots\dots\dots (37)$$

$$\Pr_{Ijk}(\theta) = \frac{\sum_{j \in \Omega_J} \sum_{i \in \Omega_I} Q_i \cdot \Pr_{ij}(\theta) \cdot \Pr_{ijk}(\theta)}{\sum_{j \in \Omega_J} \sum_{i \in \Omega_I} Q_i \cdot \Pr_{ij}(\theta)} \dots\dots\dots (38)$$

ここで、 Q_i は市町村 i における交通発生量、 Ω_I は生活圏 I に含まれる市町村の集合である。生活圏 I において生活圏 J を目的地とする比率を q_{IJ} 、 IJ 間における交通機関 k の分担率を q_{Ijk} とすると、都市間交通モデルのパラメータは以下の尤度関数を最大化する点として求められる。

$$LL = \sum_{I,J} q_{IJ} \cdot \ln(\Pr_{IJ}(\theta)) + \sum_{I,J,k} q_{Ijk} \cdot \ln(\Pr_{Ijk}(\theta)) \dots\dots\dots (39)$$

推計されたパラメータを図表 17 に示す。機関選択における一般化費用、目的地選択におけるログサムおよび人口のパラメータは符号条件を満たしており有意である。

図表 17 交通発生原単位

	パラメータ	t-値
一般化費用	-9.76×10^{-5}	-727
鉄道ダミー	-3.16	-103
バスダミー	-2.95	-74
目的地選択ログサム	3.28	634
目的地選択人口	0.992	129

また、都市間モデルでも出来るだけ推計値を現況と合致させるため、機関選択モデル、目的地選択モデルに於いてダミーパラメータを導入した。まず、式(1)の機関選択効用に以下のダミーパラメータを追加する。

$$\theta_c \cdot (\omega \cdot t_{ijk} + c_{ijk}) + \theta_k + \theta_{ik}^o + \theta_{jk}^d \dots\dots\dots(40)$$

ここで、 θ_{ik}^o は出発地*i*、交通機関*k*のダミーパラメータであり、 θ_{jk}^d は到着地*j*、交通機関*k*のダミーパラメータである。ただし、同じ生活圏に含まれる市町村について θ_{ik}^o 、 θ_{jk}^d は同じ値を取る。また、目的地選択モデルの効用部分をダミーパラメータを用いて以下のように表す。

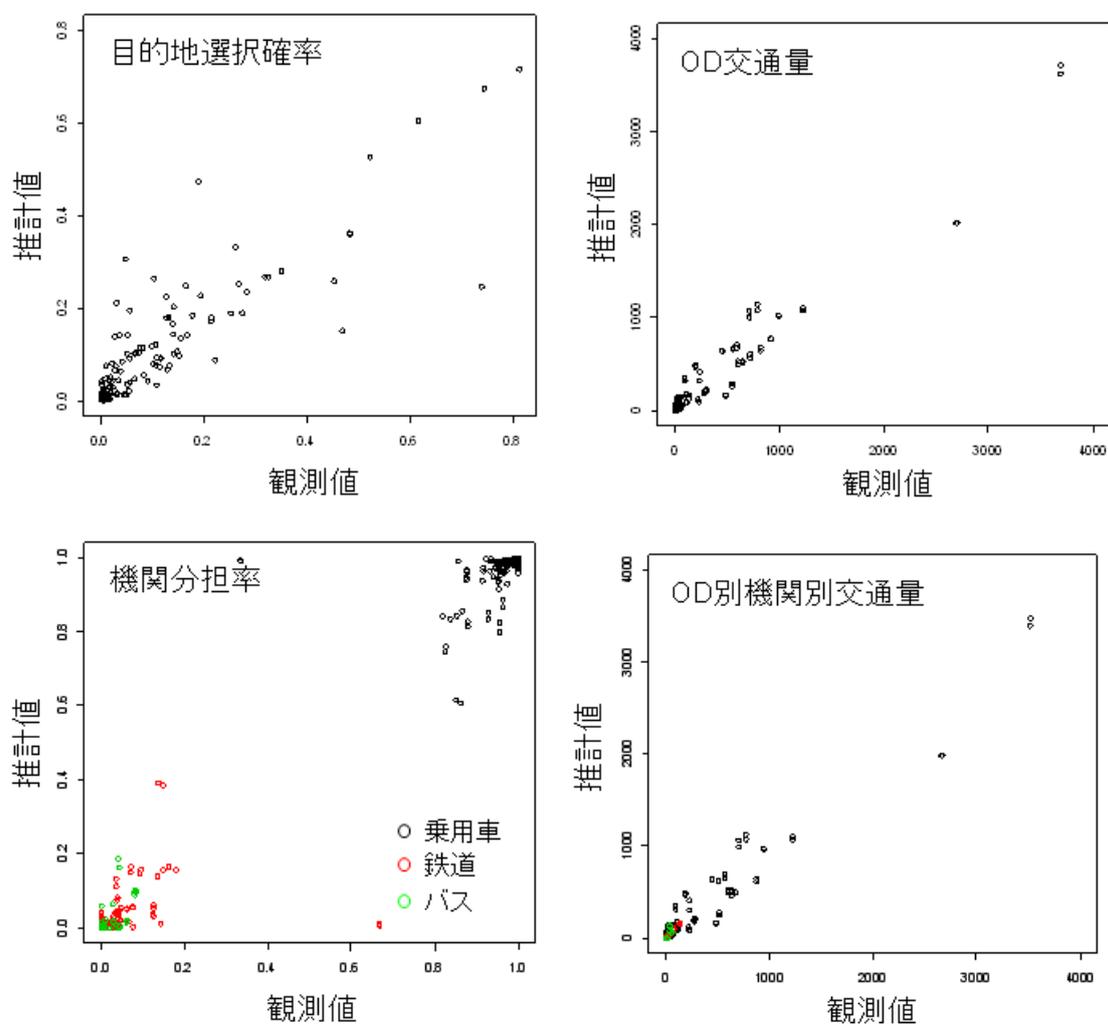
$$\theta_p \cdot \log(N_j) + \theta_g \cdot C_{gj} + \theta_j^d \dots\dots\dots(41)$$

θ_j^d は自市町村以外の目的地のダミーパラメータであり目的地毎に与える。なお、都市間交通モデルでは県間交通のみを対象としているため、内々ダミーを設定しない。

推計されたモデルの目的地選択確率、機関分担率、OD交通量、機関別交通量の再現性を図表18に示す。これより、目的地選択確率、機関分担率にはややばらつきが見られるが、交通量で見ると大きく外れているサンプルは無いことが分かる。つまり、交通量の小さい一部のODについては再現性が十分ではないが、交通量の大きいODについては概ね再現出来ていることが読み取れる。

公共交通の交通量は自動車と比較するとごくわずかとなっているが、ここに示したOD交通量は発着地ともに四国圏内のものであり、四国圏外との交通は含んでいない。純流動データを見ると、特に鉄道は圏内発着の交通量よりも圏外発着の交通量のほうが4倍ほど多いため、無視することは出来ないが、そのモデル化には分析の範囲を大幅に拡張する必要がある。このため、四国圏外との交通については、鉄道のみ考慮し、

その四国内での移動は全て、瀬戸大橋で接続されている坂出発着とし、OD交通量は将来にわたって固定的に与える。ただし、4章のシミュレーションにおいて、OD上のリンクが廃止される場合には、その交通量もゼロとする。



図表 18 都市間交通における目的地選択モデル、機関分担モデルの再現性

最後に、式(7)の都市間交通発生量モデルのパラメータを、最尤法を用いて推計した。その結果を図表 19 に示す。

図表 19 都市間交通発生量モデルのパラメータ推計結果

	パラメータ	t-値
定数項 θ_{g0}	14.45	9.48
ログサム θ_{g1}	-0.82	-21.28
人口 θ_{g2}	1.57	0.66

これより、人口パラメータの有意性が低くなっているが、符号条件は満たしている。またログサムパラメータは符号条件を満たし有意である。交通発生量についても、人口のみならず地域の個別性が存在すると考えられるため、統計値と合致するようダミーパラメータ θ_{g3i} を生活圏毎に設定し、固定的に与える。このダミーパラメータを用いた発生交通量の推計式は次のように与える。

$$Q_i = \frac{\theta_{g2} \cdot N_i + \theta_{g3i}}{1 + \exp(\theta_{g0} + \theta_{g1} \cdot C_{gi})} \dots\dots\dots(42)$$

(2) 交通事業費用モデルの推計

本項では、バスと鉄道の事業費用を推計する。バスについては、国土交通省「平成21年度乗合バス事業の収支状況について」に基づき、四国ブロックの実車走行キロあたり原価を集計し、305 円/台 km と設定した。

一方、鉄道については式(17)に示すように、線路維持費、車両維持費、輸送費に分けて推計するため、それぞれの費用原単位を求める必要がある。ここでは鉄道統計年報に基づき、四国圏内の鉄道事業者7社の営業費用を用いて推計した。まず、線路維持費には、線路保存費、電路保存費、運輸費、保守管理費、一般管理費を含めた。次に車両維持費については、車両保存費を含めた。また輸送費には運転費、輸送管理費を含めた。なお、減価償却費は車両数と路線長で回帰分析し、路線長あたり420万円、列車あたり400万円と推計した。線路維持費を路線長で割ることで路線長あたりの費用 c_L^k を、車両維持費を列車数で割ることで列車数あたりの費用 c_N^k を、輸送費を運行距離で割ることで運行距離あたりの費用 c_D^k を求めた。この結果、各費用は以下のよう

- 路線長あたり費用 c_L^k : 22,087 千円/km
- 列車数あたりの費用 c_N^k : 23,934 千円/列車
- 運行距離あたり費用 c_D^k : 501 円/km

(3)CO₂排出原単位

CO₂は利用する車両の移動距離に応じて排出されると想定する。ただし、電車については走行段階ではエネルギー消費に伴うCO₂が排出されない。このため、電力消費量に対し電源平均のCO₂排出量を乗ずることで排出量を求める。他の交通機関についても、同様の観点から、燃料製造段階のCO₂排出量を加えた排出量を用いる。

まず、乗用車とバスのCO₂原単位（走行kmあたりのCO₂排出量）は細井（1998）に基づき、車両重量と速度の関数として推計する。OD間の平均速度はNITASより得られる走行距離と所要時間に基づき設定し、乗用車の車両重量は1.27トン、バスは6.6トンとした。また使用燃料は、乗用車はガソリン、バスは軽油としている。また、燃料製造段階のCO₂排出量はエネルギー経済研究所資料に基づき設定した。

鉄道については、電車とディーゼル車に区分し、車両キロメートルあたりのエネルギー消費量を伊藤ら（2010）に基づき設定した。ディーゼル車は軽油を用い、電車は電力を用いる。また、1列車あたりの車両数は2.8両と設定した。路線別の電化、非電化の別により、各リンクの区分を設定している。

以上の方法に基づき設定したCO₂排出原単位を図表20に示す。ただし、バス、乗用車については、各リンク、ODで速度が異なるため、モデルを用い推計される排出総量を総走行距離で除した平均値を示している。

図表20 CO₂排出原単位

		原単位 gCO ₂ /台 km
鉄道	電車	4,458
	ディーゼル車	4,830
バス		554
乗用車		210

3-4. シナリオ設定

本分析システムでは、車両数を交通戦略目標に応じて内生的に推計するが、前提となる人口分布や交通速度は外生的に与える必要がある。本節では、将来人口分布シナリオと鉄道高速化シナリオを設定する。

(1)人口分布シナリオ

本研究では、市町村別の将来人口シナリオを国立社会保障・人口問題研究所「日本の市区町村別将来推計人口」に基づき与えるが、市町村内の人口の地理的配置について趨勢とコンパクトの2つのシナリオを設定する。人口は地域メッシュ統計で人口が

与えられている3次メッシュについて設定する。四国圏内の対象メッシュは9367個である。また、人口は14才以下の若年人口、15才から64才の生産年齢人口、65才以上の高齢人口に3区分し、区分毎の人口をシナリオで与える。

① 趨勢シナリオ

まず、 t 期における若年人口、生産年齢人口、高齢人口をそれぞれ N_Y^t 、 N_P^t 、 N_A^t と表し、 t 期から $t+1$ 期の人口動態を以下の簡便なモデルで表す。

$$N_Y^{t+1} = (1 - \alpha^t) \cdot N_Y^t + \delta^t \cdot N_P^t \dots\dots\dots(43)$$

$$N_P^{t+1} = (1 - \beta^t) \cdot N_P^t + \alpha^t \cdot N_Y^t \dots\dots\dots(44)$$

$$N_A^{t+1} = (1 - \gamma^t) \cdot N_A^t + \beta^t \cdot N_P^t \dots\dots\dots(45)$$

ここで、 α は t 期から $t+1$ 期にかけて生産年齢人口に移る若年人口比率、 β は同期間に高齢人口に移る生産年齢人口比率、 γ は高齢者の死亡率、 δ は生産年齢人口あたりの出生率を表す。ここでは、簡単のため、 $\alpha \equiv \alpha \equiv 1/3$ と仮定し、市町村別将来推計人口に基づき、各期間の市町村毎の β 、 γ 、 δ を次式を用いて求めた。

$$\beta = 1 - \frac{N_P^{t+1} - \alpha \cdot N_Y^t}{N_P^t} \dots\dots\dots(46)$$

$$\gamma = 1 - \frac{N_A^{t+1} - \beta \cdot N_P^t}{N_A^t} \dots\dots\dots(47)$$

$$\delta = \frac{N_Y^{t+1} - (1 - \alpha) \cdot N_Y^t}{N_P^t} \dots\dots\dots(48)$$

得られた α 、 β 、 γ 、 δ を用い、式(43)～(45)の N をメッシュ人口として推計される将来のメッシュ人口を趨勢シナリオと設定した。これは、市町村毎の人口動態を各メッシュに当てはめたものである。

② コンパクトシナリオ

ここでは、若年人口と高齢人口は趨勢シナリオと同じ方法で算定する。生産年齢人口については、若年人口から移る際、市町村内のグリッドを移動すると想定し、鉄道駅に近く、なおかつ人口の多いグリッドほど移動先としての選択確率が高いと想定する。 N_{Pg}^t を t 期のメッシュ g の生産年齢人口、 N_{Ym}^t を t 期の市町村 m の若年人口、 Pr_g^t をメッシュ g の選択確率として、 $t+1$ 期のメッシュ g の生産年齢人口を次式で求める。

$$N_{Pg}^{t+1} = (1 - \beta_m^t) \cdot N_{Pg}^t + \alpha \cdot N_{Ym}^t \cdot Pr_g^t \dots\dots\dots(49)$$

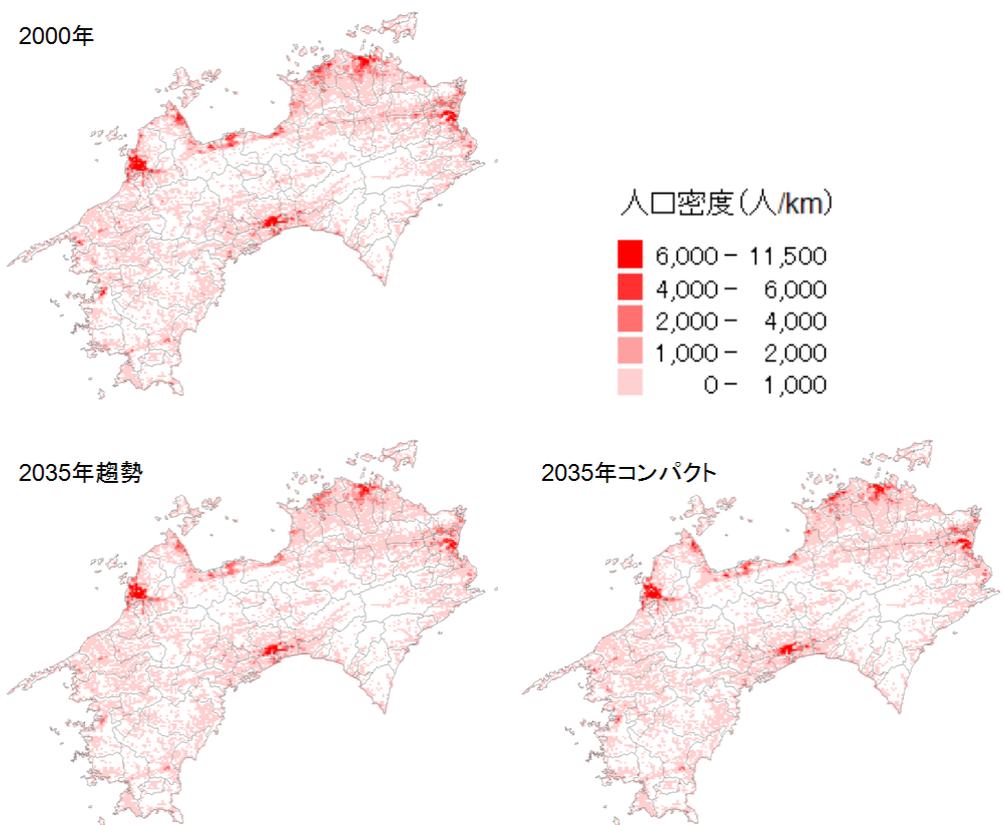
ただし、メッシュ g の選択確率は次式で与える。

$$\Pr_g^t = \frac{N_g^t \cdot \exp(\theta \cdot d_g)}{\sum_{g' \in \Omega_m} N_{g'}^t \cdot \exp(\theta \cdot d_{g'})} \dots\dots\dots(50)$$

ここで、 N_g^t はメッシュ g の総人口、 d_g はメッシュ g の中心から最寄り駅までの距離 (m)、 θ はパラメータである。ここでは、 $\theta = -0.01$ としてシナリオを設定した。

③シナリオ比較

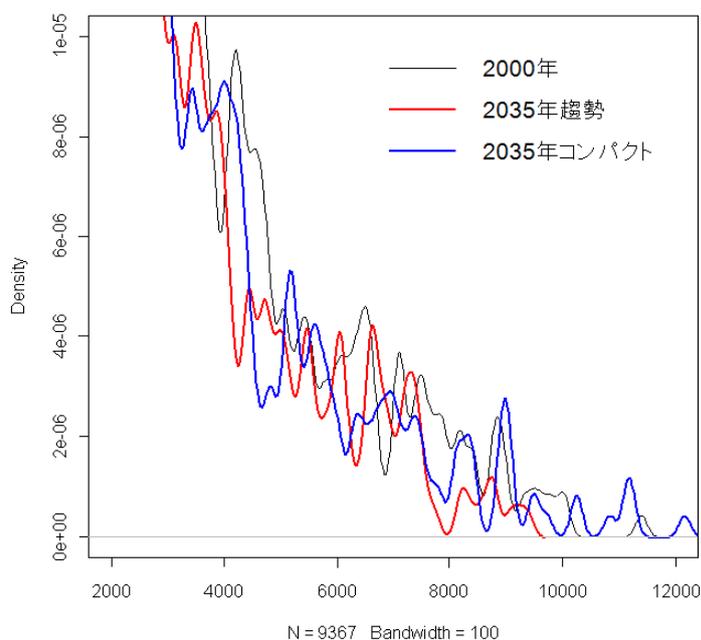
以上の方法で求めた人口分布シナリオを比較する。図表 21 は 2000 年、および 2035 年の趨勢、コンパクトシナリオのメッシュ人口密度を示している。これより、2000 年と比較すると、いずれのシナリオでも 2035 年では全体的に密度が低下している様子が読み取れる。趨勢ケースとコンパクトケースを比較すると、坂出周辺では趨勢ケースと比較してコンパクトケースの密度が高くなっている。



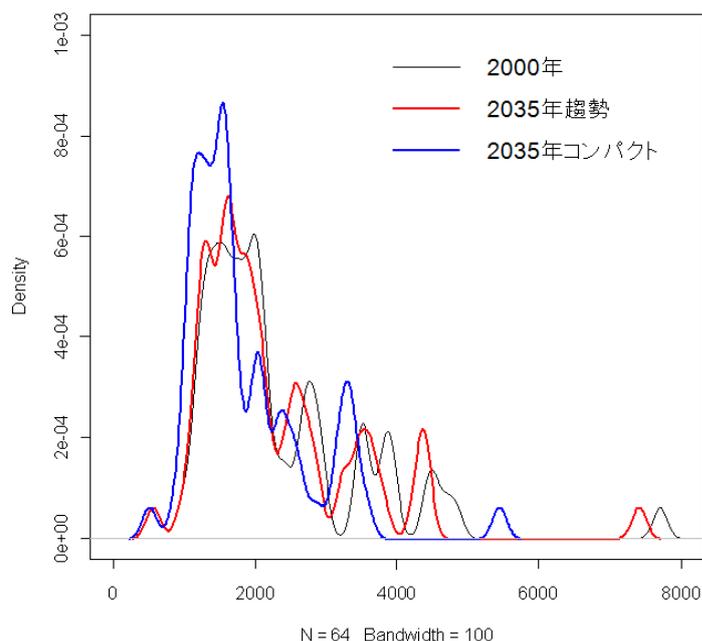
図表 21 人口分布シナリオ

図表 22 は人口密度のカーネル密度分布を示している。これより、いずれのシナリオも 2000 年と比較して人口密度が 4 千人/km²程度のメッシュが減少し、より低密なメッシュが増加していることが分かるが、趨勢ケースでは 8 千人以上のメッシュが大きく減少しているのに対して、コンパクトケースでは相当程度、維持されていることが分かる。

その結果、最寄り駅までの距離もシナリオにより異なる。図表 23 は最寄り駅までの距離のカーネル密度分布を示しているが、2000 年と比較して 2035 年の趨勢ケースでは、平均距離がやや短くなっているが、コンパクトシナリオではより短い距離に分布がシフトしている様子が分かる。このように、人口分布シナリオは、駅までのアクセスの変化として交通機関分担等に影響を及ぼす。



図表 22 人口密度分布



図表 23 最寄り駅までの距離分布 (m)

(2) 鉄道的高速化

鉄道の速度については、1) 現況固定ケース、2) 高松-徳島間高速化(表定速度 150km)、3) 高松-松山間高速化(表定速度 150km)を設定する。高速化については、特急リンクの速度に反映するが、高松-松山間高速化ケースでは松山市-西条市間(直線で 35km)に新たな路線を設定する。

新設路線については路線長に応じた費用を追加するが、それに加えて、新幹線の財源スキームに準じた高速化費用を考慮する。その際、事業者負担分と、公的支出を含む社会的負担分を評価する。ただし、その他の経費増加分については考慮せず、また料金も現行の特急料金と同一額に固定する。

高速化対応に関わる建設費は、九州新幹線の新八代・鹿児島中央間の事後評価報告書に基づき設定した。対象区間は 126km であり、建設事業費は 6290 億円である。事業期間を 50 年間として、年間費用を 1 億円/km と設定した。これは社会的費用として評価する。

一方、整備新幹線では JR は受益に応じた貸付料を支払うこととされており、九州新幹線の上記区間については年間 20.4 億円とされている。これより路線長あたりでは年間約 1700 万円/km の費用増加となる。

高松-徳島間の路線長は 100km、高松-松山間は 150km であるから、整備新幹線のスキームを適用すると、事業者の費用増加額はそれぞれ年間 17 億円、25 億円となるが、社会的費用は 100 億円、150 億円となる。

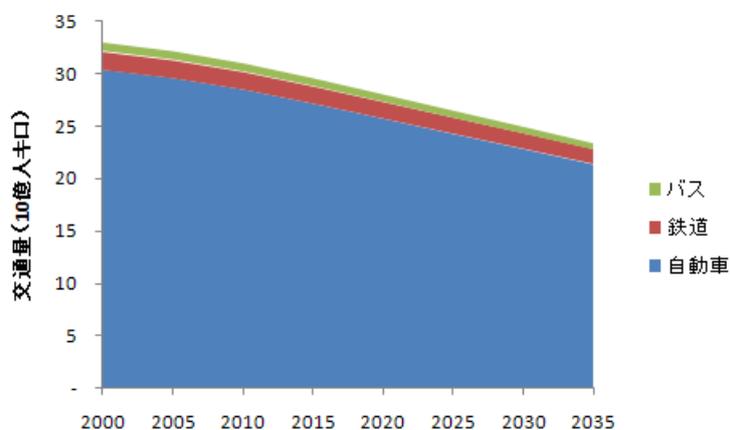
4. 交通戦略分析

以上で構築した分析システムとシナリオを用い、本章では交通戦略が交通事業収支、社会的便益、CO₂排出量に及ぼす影響を分析する。以下では、まず、比較対象として公共交通のLOSを固定した基準シナリオの設定について説明し、次に各種交通戦略効果を分析する。その上で、分析結果に基づき今後の四国の交通戦略について議論する。

4-1. 基準シナリオの設定

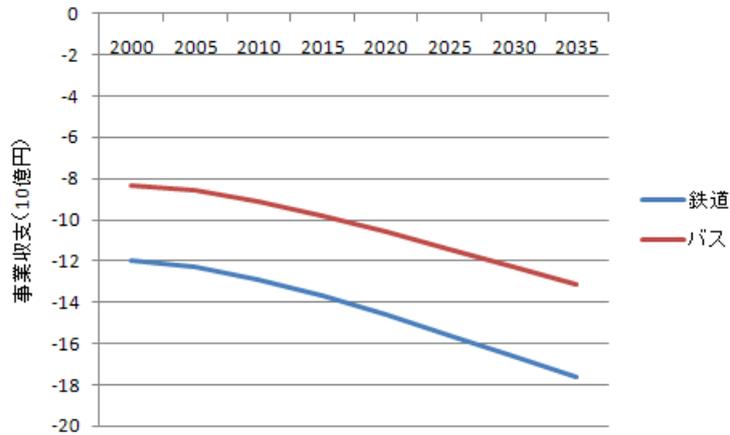
便益の評価は2つの状態を比較するため、比較対象として基準とするシナリオが必要である。本研究では、基準シナリオとして、公共交通のLOSを固定した場合を設定する。具体的には、鉄道、バスのリンク車両台数は固定し、人口構成および配置のみ変化させる。その際、鉄道の高速度化は行わず、また都市構造は趨勢シナリオを用いる。

推計された交通量の推移を図表24に示す。これより、人口減少、少子高齢化に伴い今後交通量は大きく減少し、2000年と比較すると2035年には30%程の減少幅となる。ただし、公共交通は現時点で分担率が低いことから、減少率は相対的に小さく推計されており、同期間で鉄道は17%、バスは25%の減少と推計される。



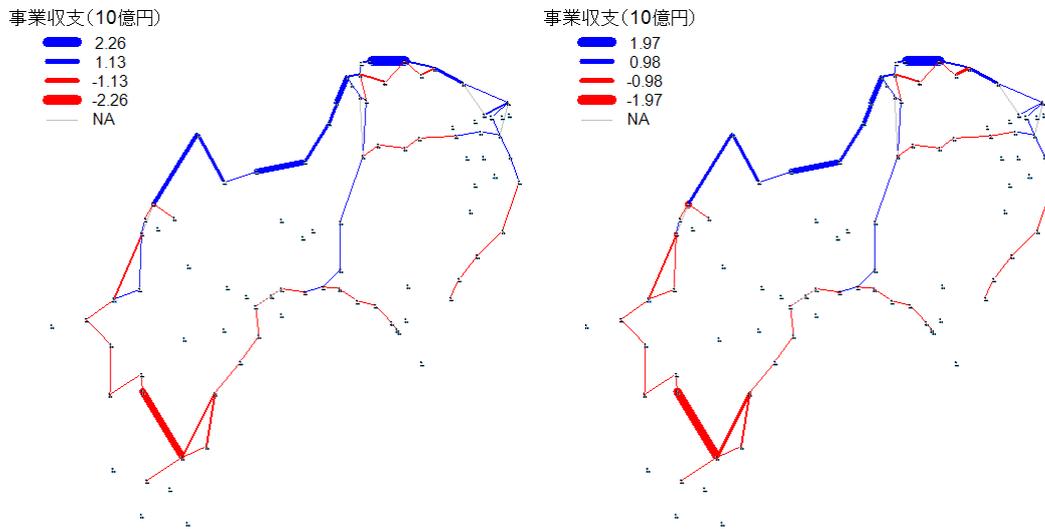
図表24 交通量の推移（基準シナリオ）

これに伴い、交通事業収支も悪化する。図表25は鉄道、バスの事業収支の推計結果を示している。鉄道は現状で120億円程度、バスは80億円程度の赤字と推計されているが、現状のサービス水準を維持するならば、2035年にはそれぞれ180億円、110億円の赤字になると見込まれる。



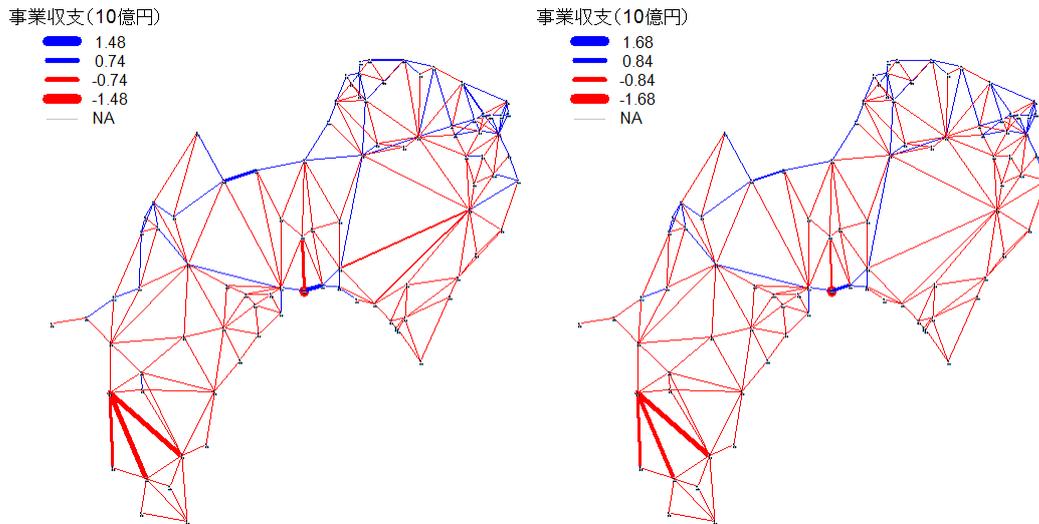
図表 25 事業収支の推移 (基準シナリオ)

図表 26、27 は、これを路線別に示している。鉄道を見ると、予讃線、高徳線、土讃線に相当するリンクは黒字となっているが、他のリンクは赤字である。この傾向は 2035 年でも変わらないが、黒字路線の収益力が低下するのに対して、赤字路線の赤字幅が変わらないことにより、四国全体で事業収支が悪化することが読み取れる。



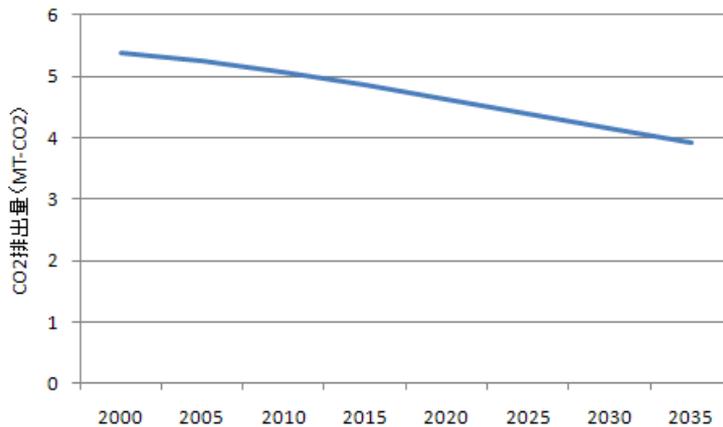
図表 26 路線別の鉄道事業収支 (基準シナリオ、左: 2000年、右: 2035年)

一方、バス路線は、大部分のリンクで赤字となっており、黒字と推計されるリンクはわずかである。2035 年にかけては黒字から赤字に変化するリンクもあり、また赤字リンクの赤字幅は拡大している。バスの場合、収益力のある路線が少ない中で、多くの路線の赤字幅が拡大することが収支を悪化させると推計される。

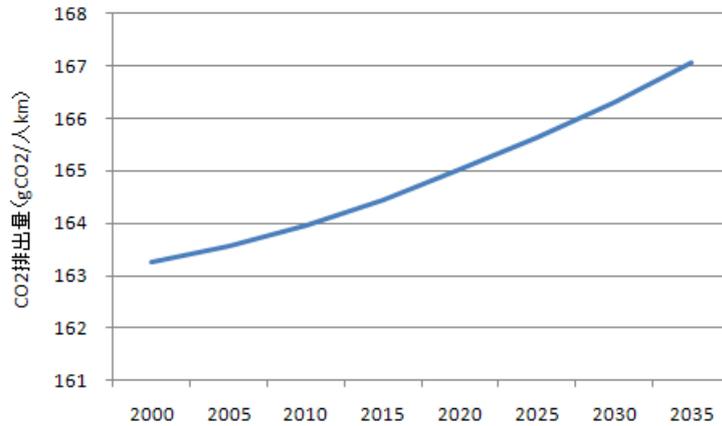


図表 27 路線別のバス事業収支（基準シナリオ、左：2000年、右：2035年）

交通からのCO₂の排出量は、交通量の減少を反映して大幅に低下する（図表 28）。2000年の推計排出量は540万トンだが、2035年には390万トンと27%の減少となる。ただし、これを図表 24 に示した交通量で除した人キロあたりのCO₂排出量で見ると（図表 29）、排出原単位は増加することが分かる。自動車交通量が減少することにより、人キロあたりの排出原単位も減少すると期待されるが、公共交通のLOSを維持する場合には、その運行に伴う排出量は削減されないことになるため、必ずしも原単位は改善しない。



図表 28 CO₂ 排出量の推移（基準シナリオ）



図表 29 CO₂ 排出原単位の推移 (基準シナリオ)

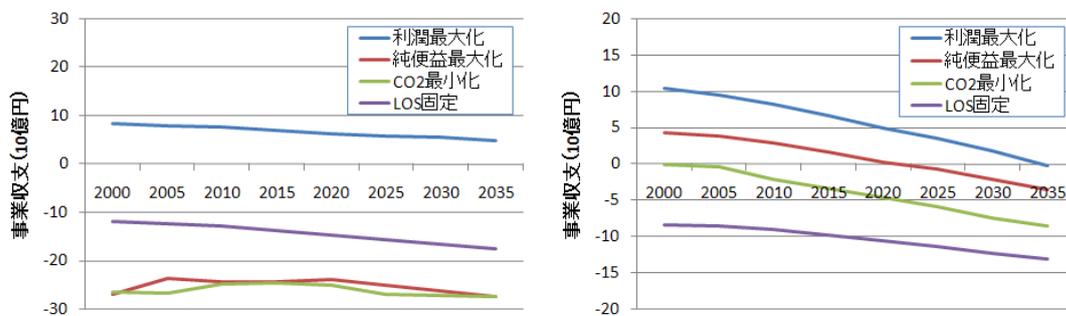
以上まとめると、四国圏では 2035 年にかけて、人口減少に伴い交通量が大きく減少する。このため、LOS を維持するならば公共交通の事業収支は大きく悪化する。鉄道は黒字路線の収益低下が赤字拡大の要因だが、バスは赤字路線の赤字幅拡大が要因となる。また、CO₂ 排出総量は自動車交通の減少に伴い大幅に減少するが、公共交通 LOS を維持すると運行に伴う CO₂ は削減されないことから、人キロあたりの排出原単位は増加することになる。

4-2. 交通戦略効果の分析

本節では、2-3(4) で定めた交通戦略が事業収支、便益、CO₂ 排出量に与える影響を分析する。

(1) 公共交通事業収支

図表 30 は各戦略の下での鉄道、バスの事業収支を示している。また、参考として前節の基準シナリオの収支も表示している。

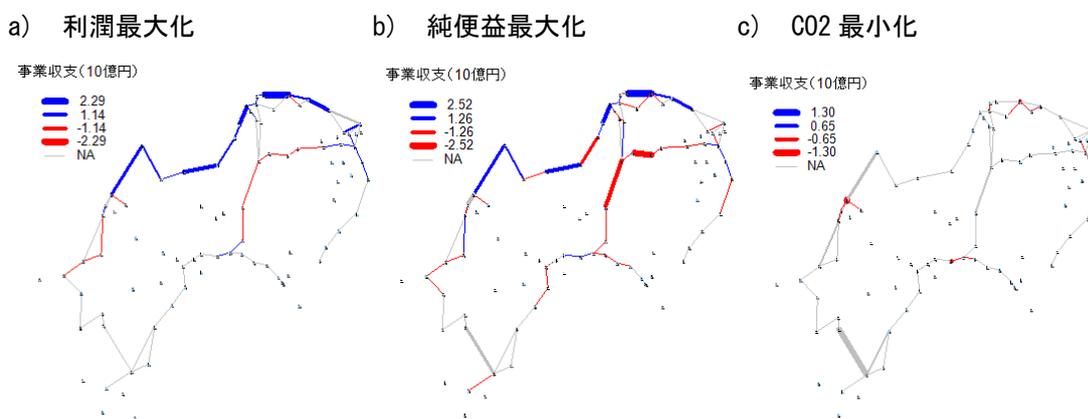


図表 30 事業収支 (左: 鉄道、右: バス)

まず鉄道を見ると、利潤最大化戦略の下では、対象期間を通じて事業収支は黒字だが、その幅は経年的に低下している。純便益最大化、CO₂最小化戦略の下では基準シナリオよりも赤字幅が大きく、対象期間を通じて250億円程度で推移している。

バスを見ると、利潤最大化の下では2030年までは黒字となっているが、2035年には赤字となっている。純便益最大化の下では2020年までは黒字だが、その後赤字となる。CO₂最小化では常に赤字となっているが、基準シナリオよりは赤字幅が小さい。

この結果を解釈するために、リンク別の鉄道事業収支を図表31に示す。利潤最大化では図表26で赤字となっている太平洋側の多くのリンクが廃止されている。一方、純便益最大化では土讃線、徳島線の赤字が拡大し、また予讃線の一部も赤字となっているが、予土線に対応するリンクは廃止されている。CO₂最小化戦略ではほとんどのリンクが廃止となっている。



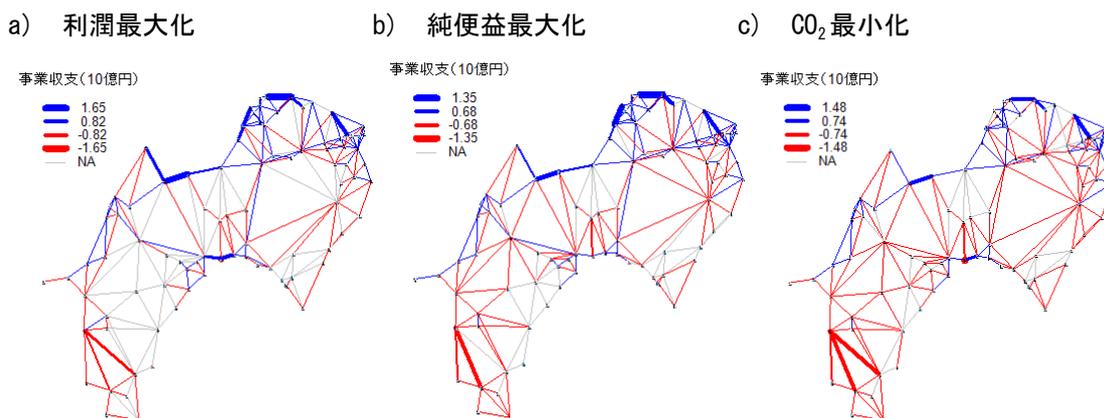
図表31 2000年のリンク別鉄道事業収支

利潤最大化において赤字リンクが残っているのは、ネットワーク上、当該リンクを残した方が他のリンクの収益を高め、全体の収益が高まるためである。一方、純便益最大化で赤字が拡大する路線は、LOS改善により便益が向上するが、需要増加による収入増よりも運行費用の増加が大きくなっていると解釈される。一方、純便益の定義は、便益から費用増加を除いたものなので、運行休止による便益低下よりも費用減少額の高いリンクは廃止されることになる。

CO₂最小化では、都市間リンクの廃止により、移動効用が低下し、都市間交通需要を減少させることで、排出量を削減することになる。また、一部路線では、需要密度が低いため、鉄道よりもバスを利用の方がCO₂排出削減の観点からは望ましいことが示唆される。

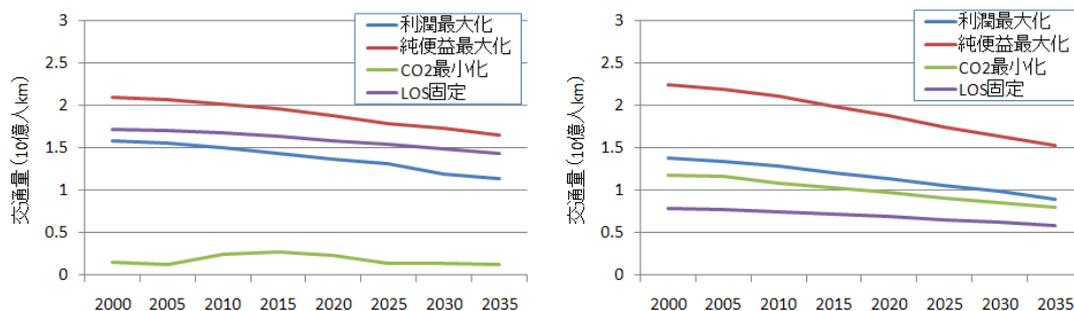
リンク別のバス事業の収支を見ると(図表32)、利潤最大化では、やはり多くの赤字路線が廃止されているが、一方で、需要が見込まれる路線ではLOS向上により収支が改善する可能性が示されている。純便益最大化では、利潤最大化と比較して赤字線

が多く残っている一方、瀬戸内海側では基準ケースと比較して黒字幅が拡大しており、便益改善と収支改善が両立しうるリンクが存在することが示唆される。CO₂最小化では、鉄道と異なり都市間リンクが比較的多く残されているが、これは鉄道の撤退した地域にバスサービスを供給し、完全な自動車依存を防ぐことでCO₂削減に寄与していると考えられる。



図表 32 2000年のリンク別バス事業収支

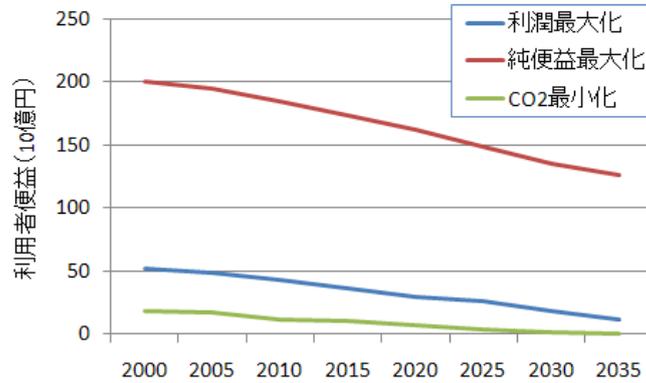
なお、CO₂削減戦略では基準シナリオよりも赤字幅が大幅に少なくなっているが、これは鉄道の撤退により、反射的にバスの需要が増加したためである。図表 33 はシナリオ別の交通量の推移を示しているが、CO₂最小化戦略では鉄道の需要が大幅に少なくなっていることが分かる。



図表 33 シナリオ別交通量の推移 (左：鉄道、右：バス)

(2)利用者便益

各戦略が利用者便益に与える影響を図表 34 に示す。なお、便益は対策がもたらす効用水準変化を貨幣単位で表したものであり、ここでは基準シナリオからの変化として示している。

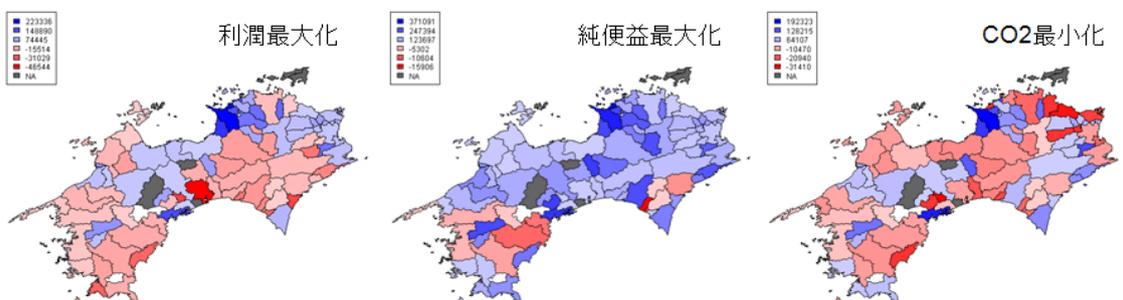


図表 34 シナリオ別利用者便益の推移

この図より、純便益最大化のみならず、利潤最大化、CO₂最小化戦略においても便益が正となっている。これは、集計的に見ると、いずれの戦略でも現状よりサービス水準が改善し、利用者にメリットがあることになる。ただし、その程度は戦略によって大きく異なり、また地域によっても差があると考えられる。

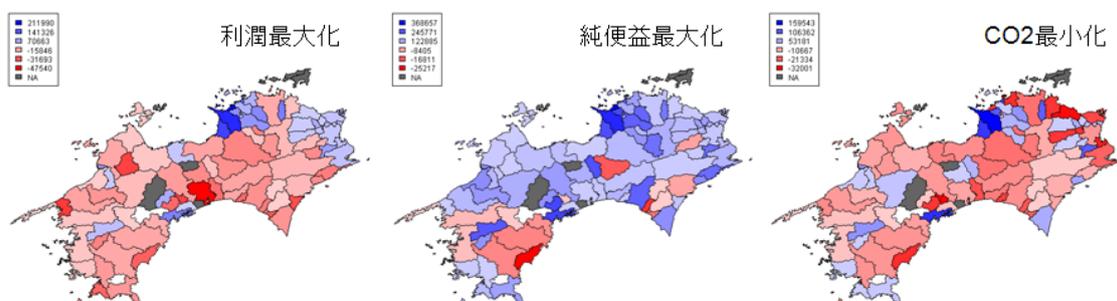
図表 35 は利用者便益の地域分布を示している。これより、純便益最大化では多くの地域で正の便益となっているが、利潤最大化、CO₂最小化では便益が正となる地域は限定されており、便益額も低くなっている。また、利潤最大化で東予地域と徳島北東部の便益が正となっているが、CO₂最小化ではこれらの地域の便益は負であり、徳島南部および高知県の一部が正となっている。CO₂最小化ではほとんどの鉄道リンクが廃止となるため、便益はバス LOS の改善によるものである。

なお、純便益最大化においても高知西部の便益は負となっているが、これは予土線に相当するリンクが廃止されるためである。この戦略目標は便益と事業者利潤の和の最大化だが、この結果は、当該地域における鉄道廃止による便益低下をコスト節約が上回ることを意味している。このため、功利主義的観点からは一部赤字ローカル線の廃止が正当化されることになる。



図表 35 利用者便益の地域分布 (2000年)

また、2035年の利用者便益の地域分布を図表36に示す。これより、純便益最大化では、多くの市町村で正の便益を維持しているが、利潤最大化、CO₂最小化戦略では便益が正となる市町村は大幅に減少することを読み取ることができる。

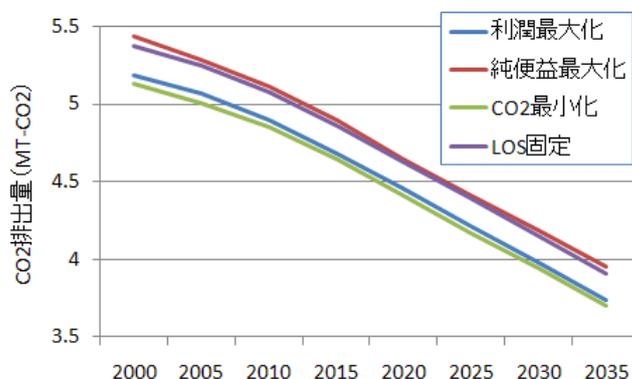


図表 36 利用者便益の地域分布 (2035年)

(3)CO₂排出量

各シナリオの下でのCO₂排出量を図表37に示す。これより、CO₂最小化戦略の排出量が最も小さいことが分かるが、利潤最大化戦略においても基準シナリオと比較して18万トンほどCO₂排出量が少なくなっている。これは、比較的需密度の高い地域でLOSを向上することで乗用車からのモーダルシフトを図る一方、需密度の低い路線を廃止することが、事業収支改善とCO₂排出削減の両立に寄与することを示している。一方で、CO₂最小化戦略では、都市間の移動性を犠牲にすることで、交通発生量を抑制し、CO₂排出量を大きく削減しているが、これは交通事業の収支を大幅に悪化させ、また多くの地域で負の利用者便益をもたらすことになる。

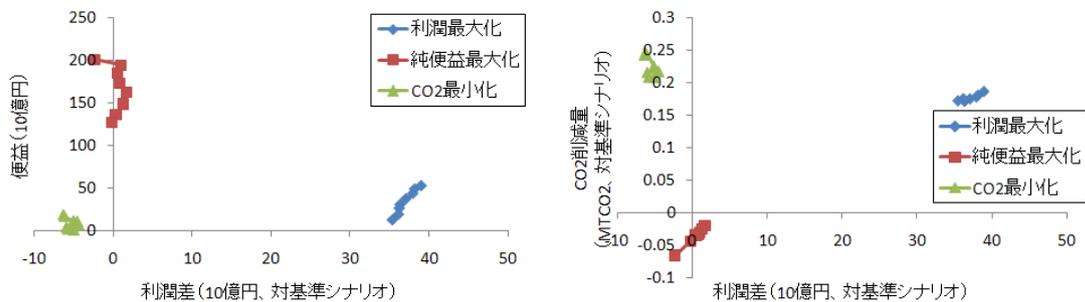
純便益最大化戦略の下では、CO₂排出量はLOSを固定した基準シナリオよりも多くなる。これは、純便益が改善する場合でも、自動車からの利用転換による排出削減効果よりも、LOS改善に伴う排出増加が大きい地域が存在することを示唆している。



図表 37 CO₂排出量の推移

(4) 交通戦略のクロスアセスメント

ここで、各戦略の位置づけを把握するために、横軸に基準シナリオとの利潤の差をとり、縦軸に便益、基準シナリオからのCO₂削減量をそれぞれ取ったものを図表 38 に示す。なお、図では 2000 年から 2035 年までの 5 年おきの評価値を載せている。これより、利潤最大化戦略ではCO₂最小化戦略と同程度のCO₂削減量と便益が得られており、かつ利潤も正である。一方、純便益最大化戦略は、高い利用者便益が得られるが、交通事業収支は基準ケースと同程度であり、また、CO₂排出量は増加している。このことから、集計的に見ると事業収支とCO₂排出削減の2つの価値規範は両立しうるが、事業収支と利用者便益はトレードオフの関係にあることが読み取れる。

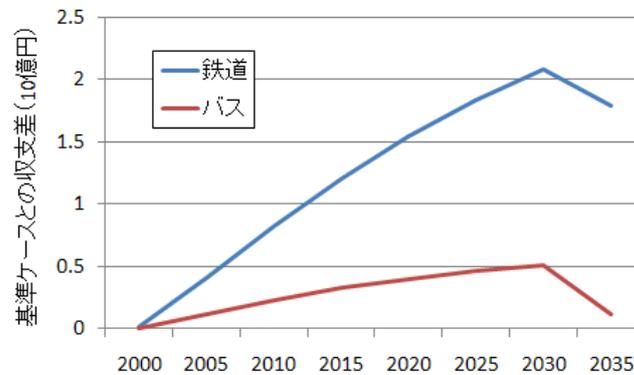


図表 38 各交通戦略の利潤、便益、CO₂削減量（対基準シナリオ）

(5) 都市のコンパクト化と鉄道的高速化

本項では、まず、コンパクト化、鉄道的高速化の効果のみを評価するため、LOS 固定シナリオの下でコンパクト化、および高速化する場合の利潤、便益、CO₂排出量の基準シナリオとの差を算定する。

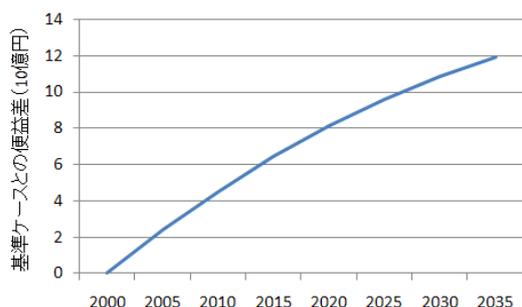
まず、コンパクトシナリオと基準シナリオの交通事業収支の差を見ると（図表 39）、コンパクト化により鉄道、バスともに収支が改善することが読み取れる。



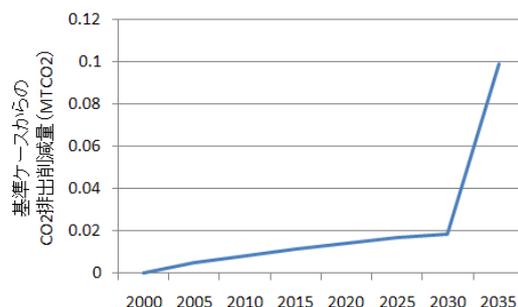
図表 39 基準ケースとの収支差（コンパクトシナリオ）

ただし、コンパクト化は、若年人口が生産年齢人口に移行する際に徐々に進むシナリオとしているため、2000年時点では基準ケースとの差は無い。

便益差を見ると、鉄道へのアクセスが改善することにより便益も徐々に高まること分かる。ただし、ここでは交通利用に関わる便益のみ考慮しており、人口密度の上昇に伴う居住コストの増加等は考慮していない。また、CO₂排出量は基準ケースと比べて減少している。

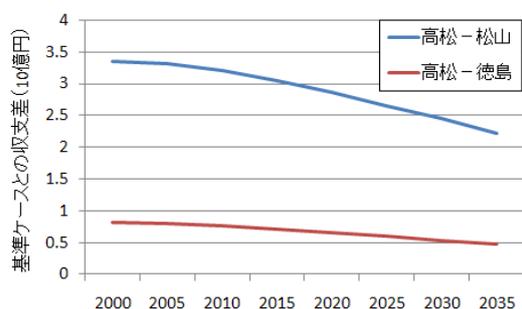


図表 40 基準ケースとの便益差
(コンパクトシナリオ)

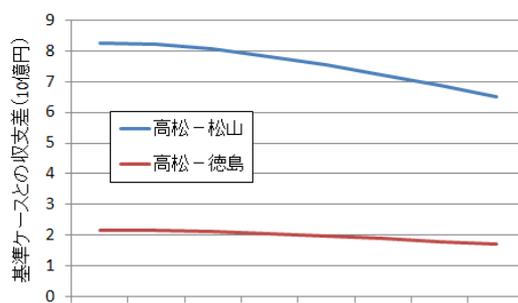


図表 41 基準ケースからの CO₂ 排出削減量
(コンパクトシナリオ)

次に、鉄道高速化の収支差を図表 42 に示す。但し、バスの収支はほとんど変わらないため、鉄道のみ示している。これより、基準ケースと比較して高松-松山の高速化では 2000 年時点で 35 億円弱の収支改善が図られるが、人口減少に伴い将来にかけてその改善幅は低下する。一方、高松-徳島の高速化では 2000 年時点で 10 億円弱の収支改善と推計される。また便益差を見ると高松-松山間では 2000 年時点で 80 億円程度の利用者便益が発生し、高松-徳島間では 20 億円程度の便益が生じると推計される。

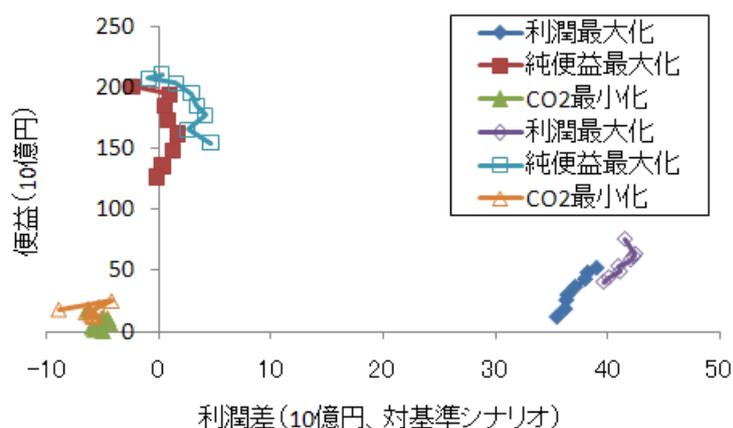


図表 42 基準ケースとの収支差
(鉄道高速化シナリオ)

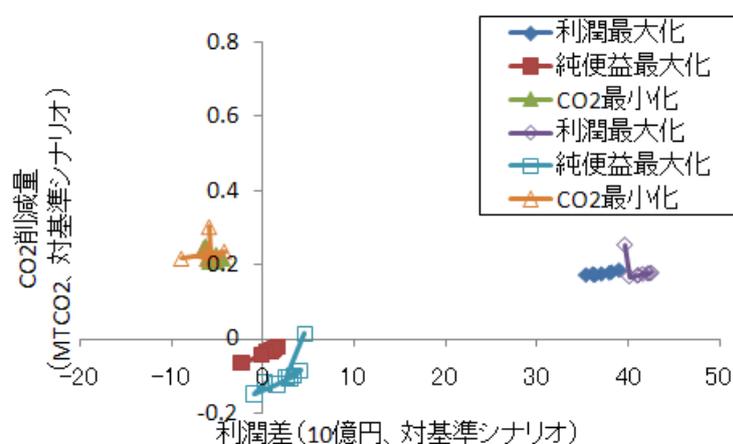


図表 43 基準ケースとの便益差
(鉄道高速化シナリオ)

都市のコンパクト化と高松愛媛間の鉄道高速化の複合シナリオが、各交通戦略のアウトカムに与える影響を図表 44、45 に示す。これは、図表 38 に複合シナリオ下でのアウトカムを追記したものである。図で中塗りのマーカは図表 38 のアウトカム指標であり、中抜きのマーカは複合シナリオ下での指標である。



図表 44 各交通戦略の利潤と便益（対基準シナリオ）

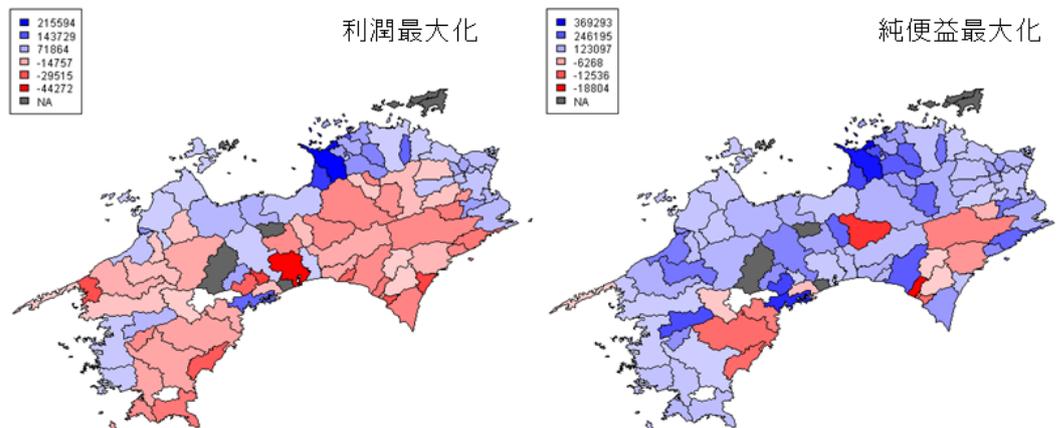


図表 45 各交通戦略の利潤、CO₂削減量（対基準シナリオ）

図表 44 を見ると、鉄道高速化とコンパクト化の下では、利潤最大化、純便益最大化の両戦略ともに、便益、事業収支が改善していることが分かる。一方、CO₂最小化戦略では、便益がわずかに向上し、利潤は悪化している。図表 45 を見ると、利潤最大化戦略、CO₂最小化戦略とも CO₂削減量は大きく変わらないが、純便益最大化戦略では CO₂排出量が増加する傾向が読み取れる。

図表 46 は複合シナリオ下での利潤最大化戦略と純便益最大化戦略による 2035 年の利用者便益の地域分布を示している。図表 36 と比較すると、高速化した高松一松山間

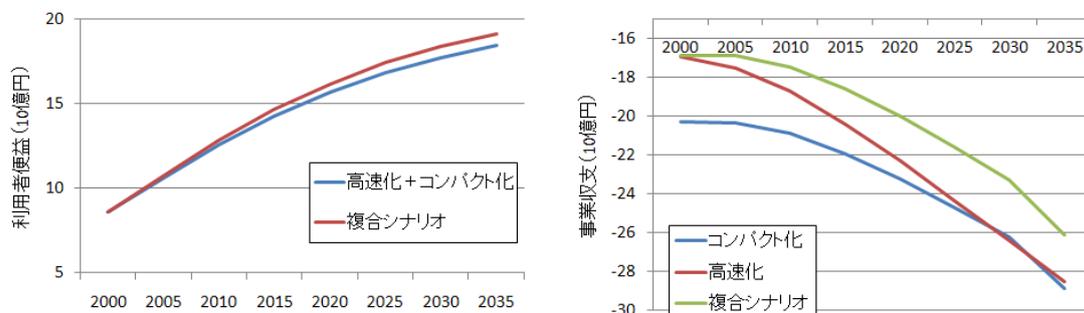
の市町村で、負の便益だったものが正に変化している。また、純便益最大化戦略では南予地方の便益が負から正に変化しており、全体の便益の分布も上方にシフトしている。



図表 46 利用者便益の地域分布（2035 年、複合シナリオ）

最後に、高速化とコンパクト化の複合効果を検証する。図表 47 は、高速化を除く LOS 現況固定シナリオの下で、高速化とコンパクト化を単独で行った場合の利用者便益の和、ならびに各シナリオ下での事業収支を示している。利用者便益を見ると、高速化とコンパクト化を個別に行う場合の和よりも複合シナリオの方が高くなっており、相乗的な効果があることが読み取れる。また、事業収支を見ると、複合シナリオではコンパクト化単独と比較して 30 億円ほど収支が改善されている。一方、鉄道高速化単独シナリオを見ると、2000 年時点では複合シナリオと同程度の収支だが、収支の悪化率が複合シナリオと比較して高くなっている。

これらの結果は、地域公共交通の便益向上と収支改善という 2 つの観点からも、交通と土地利用の政策統合が効果的であることを示唆している。



図表 47 高速化とコンパクト化の複合効果（左：利用者便益、右：事業収支）

4-3. 四国の交通戦略

以上の分析より、四国圏においては、1)現在の公共交通サービス水準を将来にわたり維持するためには公的な負担が大幅に増加すること、2)特定の価値規範に基づく交通戦略を一律に当てはめると利用者便益に地域格差が生じること、3)交通事業収支の改善とCO₂削減は両立しうるが、便益向上と収支改善はトレードオフの関係にあること、4)都市のコンパクト化と鉄道高速化は便益向上と事業収支改善に効果があり、それらの間には相乗的な効果が見られること、などが明らかとなった。

現時点で、圏内の公共交通事業は大幅な赤字であり、その損失は実質的に公的な負担により賄われている。地方バスについては国、自治体の補助制度があり、鉄道については、JRでは経営安定基金の運用収入で損失を賄っている。本分析結果では、現在のLOSを維持する場合、2000年から2035年にかけて、赤字幅は鉄道が120億円から180億円、バスでは80億から110億に拡大することとなった。国、地方の財政は逼迫の度を高めており、また基金の運用環境も悪化していることから、今後、公的負担を大幅に増加させることは困難であると予想される。このことは、地域公共交通の維持には、事業収支の改善が不可避なことを意味する。

交通事業の利潤を最大化する戦略をとる場合、2000年の事業収支は、バスと鉄道を合わせて190億円程度の黒字になると推計されたが、その戦略を継続したとしても2035年には黒字幅は46億円程度まで縮小する。また、その場合、需要が見込まれる路線ではLOSが改善するが、需要密度の低い赤字路線は大幅に廃止される。収支が改善するにもかかわらず、圏域で集計すると500億円程度の利用者便益が生じる。ただし、廃止地域は広く分布しており、それらの地域では多大な不便が生じることとなる。

利用者便益と事業収支を合算した純便益を最大化する戦略をとる場合、四国圏の利用者便益は2000年には2000億円と推計されるが、人口減少により2035年には1300億円まで縮小する。この戦略では、現況のほとんどの公共交通路線が維持され、多くの路線でサービス水準が向上する。このため、多くの地域では正の便益を享受するが、路線廃止による便益低下を費用節約額が上回る地域では、路線は廃止され便益が低下する。一方、この戦略による事業収支は、鉄道では分析期間を通じて250億円程度の赤字となり、バスでは2000年には50億円程度の黒字となるが、経年的に収支は悪化し2035年には40億円程度の赤字となる。両者を併せると、概ねLOSを固定した基準ケースと同程度の赤字幅となる。

CO₂を最小化する戦略では、都市間リンクを廃止することで移動効用を低下させ、都市間交通需要を減少させることで、排出量を削減するとの結果が得られた。その結果、分析期間を通じて基準シナリオよりも5%程度CO₂排出量が削減されるが、鉄道、バスを合わせた事業収支は2000年には270億円の赤字、2035年には360億円の赤字と3つの戦略の中で最大の赤字幅となる。また、圏域全体の利用者便益は、2000年には200

億円の正の便益となっているが、2035年には6億円まで縮小する。この戦略で利用者便益が正となる市町村はごく一部であり、ほとんどの市町村では便益は負となる。

なお、利潤最大化戦略においても、基準ケースと比較して4%程度CO₂排出量は削減される。一方、純便益最大化戦略では、基準ケースと比較して1%程度CO₂排出量は増加する。

以上のことから、地域交通戦略目標においてCO₂削減を優先することは適切ではなく、他の価値規範とも両立しうる戦略目標の検討が必要である。その際、利潤最大化戦略はCO₂最小化戦略と同程度のCO₂削減効果があり、事業収支を改善することから、事業の経済性と環境に関する価値を両立しうる戦略といえる。

利潤最大化戦略は、集計的には正の便益をもたらすが、域内の多くの市町村の便益は負となる。一方、純便益最大化戦略は多くの市町村に正の便益をもたらすが、事業収支を悪化させる。このため、集計的に見ると事業収支と利用者便益の間にはトレードオフの関係があり、意志決定は両者の重み付けの問題のようにも思われる。しかしながら、リンク別の事業収支、市町村別の便益の分析結果を見ると、利潤最大化戦略でも正の便益がもたらされる市町村があり、また純便益最大化戦略の下でも黒字となるリンクも存在しており、両者の関係は必ずしも一様ではないことが分かる。

これより、単なる重み付けではなく、両者の価値規範を調和させた戦略の可能性が見いだされる。調和のさせ方には様々な方法があると考えられるが、例えば、利潤最大化戦略で正の便益がもたらされる地域では、積極的な交通事業投資により利益を最大化し、それ以外の地域で、純便益最大化戦略により正の便益を得られる地域に対して、その利益を原資としてサービスを維持する戦略などが考えられる。一方、純便益最大化戦略においても便益が負となる地域については、マストラ供給以外の手段による地域モビリティの維持方策との比較検討などが必要であろう。

また、都市のコンパクト化と鉄道の高速度化は、対象地域において便益向上と交通事業収支改善に寄与し、両者は相乗的な効果を有することが示された。高速度化の評価においては、建設費用、事業費用は九州新幹線の情報を参照したが、建設費を含めた社会的な費用対効果でも、正の純便益をもたらすことが導かれている。ただし、持続可能な公共交通サービス供給のためには、高速度化のみでは不十分であり、都市のコンパクト化などの土地利用政策との連携、および上述の便益と事業収支の調和戦略との統合が不可欠である。

5. 結論

本研究では、少子高齢化、人口減少が進む広域地方圏における持続可能な都市交通戦略を検討する手法として、戦略代替案を俯瞰的に分析し政策統合の方向性を検討するクロスアセスメント手法を構築し、四国圏を対象に、中長期的視点から2035年まで

の期間における公共交通戦略と都市のコンパクト化のアウトカム評価と、その地域間比較を行った。

本研究で開発したクロスアセスメント手法とは、経済・社会・環境に関わる各々の価値規範の追求が、他の規範の達成に及ぼす影響を相互比較し、それらの相乗・背反関係を分析することで、異なる価値規範の調和の可能性を検討するものである。ここでは、国土情報等を活用することにより従来手法を拡張し、都市間交通を含む分析フレームを構築した。この分析フレームで必要とされるデータは、国土情報や国勢調査など全国で入手可能なものであり、国内の任意の地域で応用することが可能である。

この手法を四国圏に適用し、2035年までの交通戦略分析を行った。その結果、1)現在の公共交通サービス水準を将来にわたり維持するためには公的な負担が大幅に増加すること、2)特定の価値規範に基づく交通戦略を一律に当てはめると利用者便益に地域格差が生じること、3)交通事業収支の改善とCO₂削減は両立しうるが、便益向上と収支改善はトレードオフの関係にあること、4)都市のコンパクト化と鉄道高速化は便益向上と事業収支改善に効果があり、それらの間には相乗的な効果が見られること、などが明らかとなった。以上の分析結果から、持続可能な交通システムの構築には、異なる価値規範の調和、交通戦略検討における広域連携、および土地利用と交通に関わる政策統合が必要となることが示唆された。

道州制など広域行政の導入を見据えた場合、複数の県にまたがる地域戦略の中で都市・交通戦略も位置づける必要がある。このとき、政策間の相互補完や相乗効果を生み出しうるものが広域化の意義であるが、こうした効果・影響について関係者間の共通理解を促進することがヴィジョニングの目的である。本研究で開発した手法は、従来のマクロな地域政策分析とミクロな交通計画分析を補完し、都市・交通戦略のアウトカムを俯瞰的に示すことで、ビジョン主導型の意志決定の支援ツールとなるものであり、本研究の成果は、広域地域の主体的な取り組みが求められる今後の国土政策の形成に貢献すると考える。

ただし、本研究で提示したクロスアセスメント手法には、改善の余地が多分に残されている。まず、本手法の操作変数は交通ネットワークリンク上の車両数に限定されているが、料金の弾力化など操作変数の拡張により、より多様な戦略分析が可能となる。また、公共交通ネットワークは簡単のため市町村間の集約ネットワークとして表現しているが、このため、一部のネットワーク形状が現実のネットワークとは異なっており、これが局所的にバイアスをもたらしている可能性がある。鉄道ネットワークについては国土数値情報で取得可能であり、実ネットワークで表現することにより、より現実に近い状況を表現することが可能となる。同様に、市町村内の移動についても単一のリンクを用い集約的に表しているが、より現実に即した分析を行うためには、実際の立地状況に基づく都市内の交通流動の表現が必要である。昼夜間人口分布は、本研究でも用いた地域メッシュ統計から取得可能であり、都市内鉄道ネットワーク、

道路ネットワーク等の国土情報により、都市内の交通流動を表現しうると考えられる。また、本研究では移動に関わる属性として、発生源単位についてのみ年齢階層を考慮し、他の分析では同質な利用者を想定したが、高齢化の影響を明確にするためには、利用者属性による交通行動の相違を考慮することが必要である。ただし、多くの地方圏では、利用者属性の付与された広域的な交通流動データは存在しないため、その対応には新たな調査が必要となる。

こうした改善の余地に加え、本研究の分析結果は様々な仮定に基づいている。例えば、鉄道高速化においては、新幹線の整備コストを参照データとして用いたが、在来特急とする場合には、よりコストが低くなる。また、コンパクトシナリオでは人口密度増加に伴う居住コストの増加などは考慮しておらず、それらを便益評価に含めるならば、異なる結果が得られる可能性がある。こうした仮定の見直しにより、分析結果が変わりうることに留意されたい。

参考文献

- 伊藤友佳・柴原尚希・加藤博和・森本涼子（2010），交通カーボンフットプリントのための鉄道 CO₂ 排出量原単位の整備、第 42 回土木計画学研究発表会講演集。
- 上田孝行，福本潤也（2001），観測・被観測関係と行動モデル，土木学会論文集，No. 688/IV-53，pp. 49-62.
- 紀伊雅敦，秋元圭吾（2010），都市政策による CO₂ 削減効果と持続可能性評価のための土地利用交通モデル，エネルギー資源，第 31 巻，第 1 号，pp. 16-22.
- 紀伊雅敦，鈴木徹也，谷下雅義，土井 健司（2009），人口減少下での持続可能な都市交通に関するヴィジヨニングモデルの試み，土木学会論文集D，Vol. 65，No. 3，pp. 303-31.
- 藤井 聡（2003），合意形成問題に関する一考察：フレーミング効果と社会的最適化の限界，オペレーションズ・リサーチ，48（11），pp. 3-8.
- 細井賢三（1998），CO₂ 排出量の算出に必要な走行モードと排出係数について，自動車研究，Vol. 20，No. 9，pp. 395-399.
- 円山琢也，原田昇，太田勝敏，大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用，土木計画学研究・論文集，Vol. 9，No. 3，pp. 551-560，2002.
- May, A. D. (2005), A Decision Makers' Guidebook - Developing Sustainable Urban Land Use and Transport Strategies, PROSPECTS European Commission Deliverable, N. 15.
- Wegener, M. (2003), Overview of land-use transportation models, The 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, pp. 20-40.