

都市圏における人口配分と 二酸化炭素排出構造の関係

奥岡桂次郎¹・大西暁生²・白川博章³・東修⁴・谷川寛樹⁵・井村秀文⁶

¹学生会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町)
E-mail:okuoka.keijirou@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町)

³正会員 同上

⁴正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山一丁目)

⁵正会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町)

⁶正会員 同上。

本研究では、都市圏における温暖化対策を考慮するための都市圏全体の二酸化炭素排出量を推計するモデルを構築した。まず、日本全国の市町村を対象に都市間において、その大小による都市間の結びつきから都市圏を決定した。次に、都市圏をコアと周辺の二つに分け、すべての都市圏をサンプルに仮想都市圏モデルを構築した。このモデルにより、都市圏におけるコアと周辺の人口と世帯の分布を推計し、地域ダミーに応じた原単位を利用して民生部門と交通部門の二酸化炭素排出量を推計した。異なる人口配置を仮定した仮想都市において、人口移動や技術導入などの温暖化対策した場合の、二酸化炭素排出量の削減効果を推計し、人口配置に応じた効果的な温暖化対策を検討した。このモデルにより、人口、面積、昼間人口比、周辺の数、地域ダミーという、少ない入力データによって都市圏の二酸化炭素排出構造を簡便に明らかにする方法を提示した。

Key Words : *Climate Change, Low-Carbon Cities, Residential and commercial sectors, Spatial distribution, saving energy technology*

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量の増加に伴う地球温暖化の問題が指摘されている。この問題に対して世界的な取り組みがなされており、その一つが京都議定書による約束期間における削減義務の決定である。しかし、このような取り組みが十分であるとはいえず、今後も排出量削減は容易ではないと考えられている。特に、民生部門と運輸部門の増加が著しく、個々の人々による活動量の増加が主な原因であると考えられる。これまで、日本の温暖化対策は国主導によるトップダウン型の方法がなされてきた。その結果として、製造業部門などの企業の活動による二酸化炭素排出量は技術進歩等も含めて削減されている。しかし、民生部門や運輸部門は個々の人間活動の結果であり、トップダウン型ではコントロールしきれず、また、市町村の枠を超えて活動があることから、対策の効果が十分発揮されないと考えられる。よって、これからの温暖化対策として、個々の人間活動をコントロールすることによるトータルな削減対策で低炭素化を図っていく、ボトムアップ型が求められる。特に、国という大きなスケールではなく、また、一

方で市町村ほど小さなスケールでもなく、都市圏という適当なスケールで、地域ごとにその特徴に応じた対策を講じることが重要であると考えられる。¹⁾

また、温暖化対策を行ううえで、どの部門の二酸化炭素排出量に働きかけると効果が高いかを検討することも重要である。そのためには、その地域がどのような二酸化炭素排出の構造であるかを把握することが必要である。しかし、二酸化炭素排出量の推計はたいへん複雑であり、ある地域の温暖化対策を考える際に、その地域の排出量をすぐに推計することは容易ではない。地域の温暖化対策を考える上で、この情報不足は足かせになる。そのため、人口や面積など少ない情報で簡単に二酸化炭素排出量を推計するシステムが求められる。このようなシステムにより地域の二酸化炭素排出量が定量化されれば、ある温暖化対策による削減量も同様に定量化することができ、結果として施策ごとの削減効果の比較ができるようになる。これにより、効果的な温暖化施策を具体的に検討することが可能になる。

このような現状から、温暖化対策を行ううえで、以下の3点が重要であると考えた。1点目は温暖化対策の対象地域についてである。現在、特例市以上の基礎自治体は温暖化抑制計画の策定を求められて

いるが、人間活動、とりわけ交通行動は行政境界を超えて行われており、単体の市町村ではなく都市圏を対象とすべきである。2 点目は温暖化対策が地域特性によって異なることであり、気候や人口分布に応じた温暖化対策を考えるべきであるということ。3 点目は簡易的に二酸化炭素の排出量を推計することであり、少ないインプットで二酸化炭素の排出構造を明らかにすることである。

以上の3点をふまえ、本研究では、都市圏における人口配分と二酸化炭素の排出構造の関係を明らかにすることを目的とする。そのために、現在の日本の都市をもとに仮想都市圏モデルを構築し、仮想的な都市における人口の分布を決定する。これにより都市圏内の民生部門・運輸部門の活動量を推計し、気候特性により異なる地域別原単位を利用して二酸化炭素の排出量を推計する。また、その仮想都市において温暖化対策を行ったときの削減量の比較を行い、人口密度などに応じた効果的な温暖化施策を検討する。

2. 都市圏の決定

本研究では、地域の二酸化炭素排出構造を分析するうえで、地域特性としての人口分布等に着目する。その上で、地域を正確に把握するために、「都市圏」を単位として分析の対象とする。よって、分析の対象の単位として、都市圏を明確に理解し、決定することが重要である^{註1)}。本章では、都市圏を決定するための方法を述べる。

2.1 都市圏の定義

現在、日本の都市の活動は活発化・複雑化しており、都市圏という定義が明確ではない。例えば、以前の移動における主要な交通機関は鉄道であったが、現在は自動車の利用が増加しており、都市圏、特に生活圏の範囲が広がっている。そのような状況から、平成の大合併といわれる広域合併が繰り返されたが、現在の行政境界が、実際の都市圏や生活圏と

マッチしているかという点、必ずしもそうではない。特に都市圏の定義に関しては、交通の流動の最も主要な要素として、通勤者数を利用した指標を扱うことが多い。表-1に、行政や先行研究による都市圏の定義をまとめる。^{2), 3), 4)}

また、通勤以外の指標によって都市圏を決定しようとする試みもある。吉村・山根(2003)⁵⁾は都市の「規模」と「距離」に着目し、都市の空間的配置の規則性について、都市規模と都市間距離を明示的な変数として実証を試みている。

以上から、都市圏の定義は対象となる地域や分析の手法によって様々であり、理論的基礎が定まっていない。しかし、都市間の関係により定義されることは確かであるので、次節において、都市間の関係つまり都市間の結びつきについて検討する。

2.2 都市間の結びつき

都市圏の定義から、都市間の関係が強い都市の集合が都市圏だとするのはどの定義においても共通の認識であると考えられる。すると、都市間の結びつきの強さを定義しなければならない。先行研究においては、都市間の通勤者の割合が大きいほど結びつきが強いとしており、それにより中心地と郊外の関係を決定している。また、人口規模によるランクが都市間の距離に応じて決定されている。これらを参考に、通勤・人口・距離を利用して、都市間の関係を示すことを考えた。

ここで、都市間の結びつきを「都市間力」と呼称し、その定義について物理的な解釈を行う。ある二つの都市があるとしたとき、その二都市をそれぞれ質点だと仮定する。質点とは質量を持った点がある空間に配置されていることを示す。二つの都市、つまり質点は、持ちうる性質により相互に作用するはずである。式(1)に示すように、それは力学における引力であり、質量の大きさに比例し、質点間の距離に反比例する。

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1)$$

表-1 都市圏の定義

	都市圏の枠組み	設定条件
総務省 統計局	「中心地」	東京特別区または政令指定都市を大都市圏、あるいは大都市圏に含まれない50万人以上の都市
	「周辺市町村」	中心市への15歳以上通勤・通学者数の割合が当該市町村の常住人口の1.5%以上であり、かつ中心市と接続している市町村
国土交通省 都市・地域 整備局	「核都市」	人口10万人以上で昼夜間人口比率が1以上の都市
	「周辺都市」	核都市への通勤通学者が全通勤通学者の5%以上または500人以上の市町村
金本・徳岡 2002 (都市雇用圏)	「中心都市」	(1)DID人口が1万人以上の市町村で他都市の郊外ではない (2)郊外市町村の条件を満たすが、 (a)従業常住人口比が1以上である (b)DID人口が中心市町村の3分の1以上か、10万以上である
	「郊外」	(1)中心都市への通勤率が10%以上のものを(1次)郊外市町村とする (2)郊外市町村への通勤率が10%を超え、通勤率がそれ以上の他の市町村が存在しない場合には、その市町村を2次以下の郊外市町村とする

式(1)を参考にすることで、都市における質量とは都市規模であり、質点間の距離とは都市間の距離であると仮定する。つまり、都市間力は都市規模に比例し都市間の距離に反比例すると考えられる。また、前述したように、都市圏の定義に多く利用されている指標は通勤者数である。これを利用して、係数 G を通勤者数と仮定することとする。また、すべての変数について正規化を行うために対数変換を用いることとする。以上から、都市間力を式(2)のように定義する。ここで、通勤者数は変数であり、定数 G の置き換えとしては違和感があるが、通勤者数は都市間の流動性を示す指標であることと、モデルへの適合性を考慮したうえで、今回はこのような形を採用した。

$$F_{ij} = \ln(C_{ij}) \frac{\ln(P_i) \ln(P_j)}{\ln(D_{ij})} \quad (2)$$

F_{ij} : 都市 i の都市 j に対する都市間力

C_{ij} : 都市 i から都市 j への通勤者数[人]

P_i : 都市 i の人口[人]

P_j : 都市 j の人口[人]

D_{ij} : 都市 ij 間の距離[km]

この都市間力を、日本を対象として全国市町村間について算出する。なお、都市間距離は都市の役所間の距離であるとした。また、人口、通勤者数は2005年の国勢調査を利用しており、市町村数は1805である。

都市間力により、都市間の関係の大きさが示された。この値が大きいほど都市間の結びつきが強いとすると、ある都市 i の都市 j に対する都市間力の中で、最大のものを取り上げることに都市の階層性を見ることができる。ただし、ランク付けを行うために、 $P_i < P_j$ についてのみ取り上げるものとする。つまり、都市 i からみて人口規模の大きい都市に対して結びついている、というイメージである。よって、以下の式により都市 i の上層にある都市 k を決定する。

$$F_{ik} = \max_j (F_{ij}) \quad (P_i < P_j) \quad (3)$$

式(3)により都市 i はただひとつの都市 k に対して従属している（ただし、人口規模が最大の都市はどの都市にも従属していない）と仮定する。すると、都市の階層性が都市間力によって決定できる。

前述したデータを利用して都市間力を算出し、都市の従属による階層のランクを決定した。その結果を図-1に示す。ここでは、紙面の都合上すべてを示すのは困難であるため、代表的な三大都市を抜粋した。

2.3 都市の階層性

都市の階層性は、上層から順に大都市から中都市、そして下層においては小都市というような構造である。図-1では分析結果のなかで、代表的な都市を抽

1	2	3	4	5	6
特別区部	...	川崎市			
	横浜市	鎌倉市	鎌倉市		
			茅ヶ崎市	...	
		藤沢市	平塚市	小田原市	...
	...				
	京都市	金沢市	富山市	...	
			福井市	...	
			新潟市	長岡市	...
			大津市	草津市	...
		大阪市	松江市	米子市	...
			広島市	宇和島市	...
		堺市	岸和田市	...	
			奈良市	...	
		和歌山市	...		
			...		
	...				
	名古屋市	岐阜市			
		四日市市	桑名市	いなべ市	...
			津市	松阪市	...
		浜松市	静岡市	富士市	...
		豊田市	岡崎市	...	
	...				

図-1 都市の階層性

出した例である。都市の階層性を都市の分布と重ねてみることににより、都市圏の形が見えてくる。第1層は日本における最大規模の都市、つまり東京特別区のみが分布している。第2層には政令指定都市や県庁所在地、また、周辺にそれがない都市などが分布している。ここで注意したいのは、都市の階層性により都市の結びつきをランクによって示しているが、都市圏の区切り目を示してはいないので、都市の階層性の中から、都市圏を単位とするように、区切る必要がある。都市圏の境界は都市間力が小さい都市間であると推測できるが、都市間力は規模に応じて大きくなるため、都市間力が小さい順に都市圏の境界であるとする、小都市間の関係はほとんどが切断されてしまう。そこで、都市間力について多少の改善を施し、都市圏の境界を判別するのに適した以下の式を定義する。

$$F'_{ij} = \ln(C_{ij}) \frac{\ln(P_j) / \ln(P_i)}{\ln(D_{ij})} \quad (4)$$

式(2)と式(4)の違いは、人口の積と人口比の部分だけである。これにより、都市間が対等であると、 F' は小さくなり、都市間の従属が大きいと F' が大きい

きくなる。よって、都市の階層性の中で F' が小さい都市間から都市圏の境界としていけばよい。なお、この F' を利用する利点はインデックス j で最大値を見たときに、 F のときと最大値をとる j が共通であることである。つまり、 F で計算しても F' で計算しても、都市の階層性は共通であり、都市圏の境界を決定するうえでは F' の方を利用するということになる。

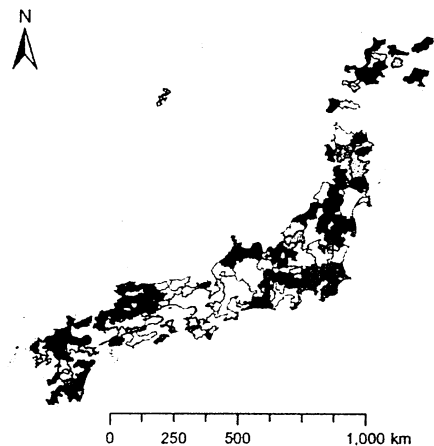
中央値以下である $F' < 1$ において、都市圏の境界として階層を区切った結果、181 の都市圏候補が得られた。ただし、コア人口比率のばらつきが大きすぎるため、4 以下の都市の集合は次章以降に示す仮想都市モデルに適合しなかった。従って、都市「圏」を対象としていることも考慮し、これらを省き 5 つ以上の都市の集合で構成される 121 を都市圏とした。都市圏の中で最上位の層にある都市はこの都市圏の中心地であり、表-2 に中心地の人口別に都市圏の数をまとめる。ここでは小さな都市圏も分析の対象として見なしている点に特徴がある。これは、人口規模が大きい場合のみを都市圏と見なした先行研究の「都市雇用圏」などとの違いである。

図-2 上の都市圏の全国分布からは、横浜市や京都市のように 100 万人以上の都市であってもさらに大きな都市の近隣に位置していれば中心地とはならないことや、東北地方や九州地方は小規模な都市圏が多いこと等の特徴が伺える。

また、図-2 下の都市の階層性の例からは、大都市圏であれば中心地の周辺に 3 つの中核都市があり、さらにその下層に多くの都市がある、という特徴が伺える。この大都市の周辺に 3 つのかたまりがあるという特徴は、次章以降に示す仮想都市モデルにおける重要な仮定であると共に、奥岡(2009)が示した日本の大都市圏の都市類型別市町村分布にも符合する興味深い結果である。

表-2 中心地の人口ごとの都市圏の数

人口規模	都市圏の数	代表的な都市
100 万人～	7	東京特別区 名古屋市 など
50 万人～ 100 万人	10	新潟市 鹿児島市 など
10 万人～ 50 万人	42	長崎市 那覇市 など
5 万人～ 10 万人	28	米沢市 日南市 など
1 万人～ 5 万人	29	富良野市 熊野市 など
～1 万人	5	草津町 など
合計	121	



1	2	3	4	5	6
特別区部	さいたま市	上尾市	伊奈町	北本市	
			横川市		
			鴻巣市		
			蓮田市		
			白岡町		
	横浜市	横浜新市	三浦市	鎌倉市	
			川崎市		
			鎌倉市		
			逗子市		葉山町
			藤沢市		茅ヶ崎市
	千葉市	成田市	香取市	神崎町	
			八街市		
			東金市		九十九里町
			茂原市		いすみ市
			西浦市		御宿町

東京特別区の都市圏

1	2	3	4	5	6
大阪市	宇治市	城陽市		近江八幡市	彦根市
	岸和田市	泉佐野市	泉南市	阪南市	高石市
			和泉市		
			羽曳野市		
			柏原市		
			河内長野市		
	松原市	富田林市	河原町	橿本市	
	三木市	小野市	加西市	西脇市	
			加東市		
	姫路市	加古川市	播磨町	福美町	
	明石市				

大阪市の都市圏

1	2	3	4	5	6
名古屋市	岐阜市	大垣市	揖斐川町	池田町	神戸町
			養老町		
			北方町		
	四日市市	津市	弥富市	飛鳥村	志摩市
			松阪市		
			伊勢市		
	豊田市	岡崎市	安城市	刈谷市	大府市
				西尾市	豊南市

名古屋市の都市圏

図-2 都市圏モデルにおける分析結果(上：全国分布 下：都市圏の例と階層性)

3. 仮想都市モデル

本研究では、都市圏における人口配分と二酸化炭素排出構造の関係を検討する。既往研究としては、高島ら(2009)⁹⁾がある。高島らは、昼間人口を基準として仮想都市における集約性を定義し、集約性的変化に応じて、省エネルギー技術導入の効果を推計した。また、高平ら(2009)⁷⁾は、名古屋市の建物の空間配置を将来にわたって変化したときに二酸化炭素排出量がどのように変化するかを分析している。以上のように、対象区域のスケールは都市圏・都市など様々であるが、多くの入力データが必要である分析が多い。また、長谷川(2006)⁸⁾は、産業連関表から二酸化炭素排出に関する地域構造の要因分析を行っている。しかし、産業連関表は限られたデータであり、ミクロに見るほどに推計データが含まれるので正確な分析はできない。

このように分析の手法には様々なタイプのものがあり、その対象スケールも様々である。しかし、モデルが複雑すぎると汎用性に欠けるので、そのために都市の空間配置をどのように簡略化しつつ重要な要素を欠かすことなくモデルを構築できるかが鍵となる。地域の違いなどを考慮しつつ、仮想都市をどのような形でとらえるのかが大変重要である。以上のことから、本章では仮想都市モデルの構築と分析について述べる。

3.1 仮想都市の骨格

2章における都市圏モデルにより決定された都市圏を仮想都市モデルのサンプルとして利用する。その際に、都市圏内の最上層に位置する都市を都市圏における中心として「コア」と定義する。また、それ以外の都市を都市圏における郊外として「周辺」と定義することにする。以下、「コア」、「周辺」はこの定義に基づくものとする。

仮想都市モデルにおいては単純化を行うために、都市圏においてはコアが1つと仮定した。また、複数あるすべての周辺都市を扱うと本モデルに適合しない結果となったため、前章で示した大都市の周辺に3つのかたまりがあるという特徴を踏まえ、周辺の最大値が3となるように周辺都市をまとめた上で、

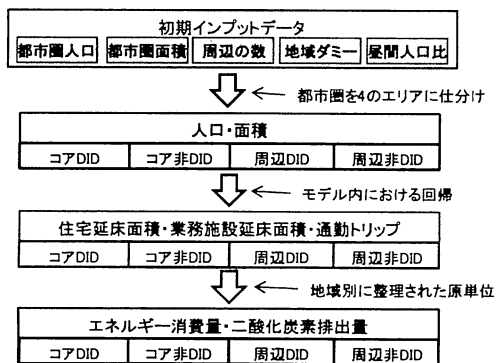


図-3 モデルのフロー

周辺に含まれる市町村数に応じて、20以上であれば3、10以上であれば2、10未満であれば1であると仮定した^{注2)}。さらに、DID地区をコアと周辺内でそれぞれ設定した。以上から、仮想都市モデルにおいては、都市圏をコアDID、コア非DID、周辺DID、周辺非DIDの4つのエリアに分割した。

仮想都市モデルにおいては、都市圏を形成するものとして、人口、面積、昼間人口比、周辺の数、地域ダミーを設定する。なお、周辺の数とは都市域における周辺の個数であり都市域の規模を示す指標となり、地域ダミーは地域における違いを表現するコードであり、北海道地方、東北地方、関東地方、北陸地方、中部地方、関西地方、中国地方、四国地方、九州地方、沖縄地方の10がある。この5つのデータを初期設定として、以下、仮想都市モデルのフローを考える。全体の大まかな流れをとらえたのが、図-3に示すフローチャートである。フレームとしては、人口・面積などの分布を示した後、住宅延床面積・業務施設延床面積・通勤トリップなどの活動量をモデル内において推計し、地域別の原単位によりエネルギー消費量、さらに二酸化炭素排出係数を乗じることで二酸化炭素排出量を推計する。また、地域別の原単位はエネルギー計量分析センター民生部門エネルギー消費実態調査(No13～No14)⁹⁾の巻末資料をもとに作成した。地域別・建て方別・延床面積別にエネルギー消費量を整理し、その値を原単位として利用した。

図-3のフローチャートにより、簡潔に人口配分に応じた二酸化炭素排出量を推計する過程が示されている。

3.2 都市圏内の人口・面積の分割

本節では都市圏を4つのエリアに仕分けする過程を示す。図-4には、その過程を示した。

まず、都市圏におけるコアの人口比率と面積比率を決定することで、コアと周辺に人口・面積を分割する。コア人口は都市圏人口によって単回帰すると、その傾きがコア人口比率である。しかし、コア人口比率とは都市圏人口をコアに振り分ける比率であり、反対に述べるとコアにどれだけの周辺人口が引きつけられているかの指標でもある。よって、周辺の数により場合分けを行い、それぞれでコア人口を都市圏人口で単回帰した傾きをコア人口比率とする。コア人口比率は以下の式に示される。また、それぞれ括弧内はt値である。

$$R_{POP} = \begin{cases} 0.2489 & (t = 40.28) & (N \geq 20) \\ 0.4238 & (t = 14.99) & (10 \leq N < 20) \\ 0.6613 & (t = 27.06) & (5 \leq N < 10) \\ 0.6633 & (t = 29.94) & (N < 5) \end{cases} \quad (5)$$

R_{POP} : コア人口比率
 N : 周辺の数

(5)式により、周辺の数が多いほど、コア人口比率は小さいことが示された。これは、2章で示した都市間力がコアと周辺との間に作用することから、

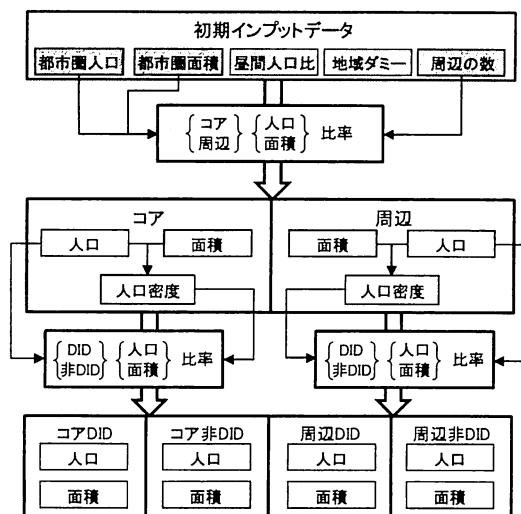


図-4 人口・面積の分割フローチャート

大都市圏であるほど多くの周辺都市を持ち通勤者を引きつけているためである。

同様に、コア面積を都市圏面積で回帰することを試みるが、ばらつきが多く推計は困難である。これは、中心地として機能する面積には限りがあるため、都市圏域が大きくなってもコア面積はあまり大きくならないためであると考えられる。また、周辺の数が大きくなると周辺の面積が大きくなり、相対的にコア面積比率は小さくなると考えられる。以上のことから、コア面積比を以下の式で推計することとする。この式はロジスティック関数の形をとっている。ロジスティック関数とは成長曲線とも呼び、0 から1 の値をとるコア面積比を推計するのに適していると考えられる。また、回帰分析による式(6)の推計結果を表-3に載せる。

$$R_{AREA} = \frac{1}{1 + \exp(\alpha \ln(N) + \beta \ln(A) + \gamma)} \quad (6)$$

R_{AREA} : コア面積比率

N : 周辺の数

A : 都市圏面積

α, β, γ : 係数

表-3 より、周辺の数が大きいほどコア面積比が小さくなり、都市圏面積が大きいほどコア面積比が大きくなることが結果として示された。つまり、都市圏面積が大きいほどコア面積も大きくなるが、周辺がどれだけであるかによって、コア面積は影響を受けるということである。

以上により、コア人口比とコア面積比が決まるので、コアと周辺に人口と面積を分けることができる。また、都市圏内で人の移動が完結していると仮定すれば、コアの昼間人口比を設定することにより、コアと周辺の昼間人口が決定する。

表-3 コア面積比率の推計結果

	係数	t 値
周辺の数	0.967	8.265
都市圏面積	-0.378	-2.767
定数項	1.645	1.990
重相関決定係数	0.687	
サンプル数	121	

次に、コア・周辺のそれぞれ内部で DID 地区と非 DID 地区に分ける部分を考える。基本的には都市圏の人口と面積をコアと周辺に分配したのと同様に、人口比率と面積比率を内生的に決定し、それにより DID 地区と非 DID 地区に分配する。比率は人口の集中度によって異なると考えられるので、人口密度により決定するものとし、回帰分析によって推計する。

コアの DID 人口は、都市圏において人口が最も集中している地区に居住する人口であるので、そのエリアに居住する人の比率は市域の人口密度だけでなく、コア人口にも影響を受けていると考えられる。よって、人口密度と人口規模に応じて、実際の配分に適合するように場合分けをすることとした(表-4)。ただし、このようなカテゴリを考える際には、様々な要因が考えられるが、今回の分析では、少ないデータ入力の特徴から、人口と人口密度という限られた要素のみ取り上げて場合分けを行った。

表-4 人口密度と人口規模によるカテゴリ分け

人口密度 \ 人口	1500 人/km ² 以上	500 人/km ² 以上	500 人/km ² 以下
100 万人以上	A		
10 万人以上			
10 万人以下	B		C

カテゴリ別に DID 人口を全域人口で回帰した傾きが DID 人口比率を示すものとし、以下の式で示す。なお、括弧内は t 値である。

$$R_{core, DIDPOP} = \begin{cases} 0.9899 & (t = 117.0) \quad (A) \\ 0.6826 & (t = 40.24) \quad (B) \\ 0.3278 & (t = 15.68) \quad (C) \end{cases} \quad (7)$$

$R_{core, DIDPOP}$: コア DID 人口比率

A, B, C : カテゴリ

DID 面積は市域における人口の集中している地区の面積であるので、市域の人口密度が増加するほどに大きくなると考えられる。都市圏面積をコアと周辺に分配したときと同様に、DID 面積比率をロジスティック関数の形で、人口密度を説明変数として、以下の式により回帰する。人口密度を対数変換しているのはばらつきを標準化するためである。また、回帰結果は表-5に示すとおりである。

$$R_{core, DIDAREA} = \frac{1}{1 + \exp(\alpha \ln(D_{core}) + \beta)} \quad (8)$$

$R_{core, DIDAREA}$: コア DID 面積比

D_{core} : コア全域の人口密度

α, β : 係数

表-5 コア DID 面積比率の推計結果

	係数	t 値
コア全域の人口密度	10.495	41.973
定数項	-1.258	-30.407
重相関決定係数	0.9077	
サンプル数	96	

周辺の DID 人口比率, DID 面積比率は, 線形回帰モデルによって推計する. 式を以下に示す. また, 回帰結果は表-6, 表-7 に示す.

$$P_{aroundDID} = EXP(\alpha \ln(D_{around}) + \beta \ln(P_{around}) + \gamma) \quad (9a)$$

$$A_{aroundDID} = EXP(\alpha \ln(D_{around}) + \beta \ln(P_{around}) + \gamma) \quad (9b)$$

$P_{aroundDID}$: 周辺における DID 人口
 $A_{aroundDID}$: 周辺における DID 面積
 D_{around} : 周辺全域の人口密度
 P_{around} : 周辺全域の人口
 α, β, γ : 係数

表-6 周辺 DID 人口の推計結果

	係数	t 値
周辺全域の人口密度	0.340	2.458
周辺全域の人口	1.013	13.024
定数項	-3.212	-5.035
重相関決定係数	0.879	
サンプル数	71	

表-7 周辺 DID 面積の推計結果

	係数	t 値
周辺全域の人口密度	0.242	1.795
周辺全域の人口	0.962	12.721
定数項	-10.345	-16.679
重相関決定係数	0.866	
サンプル数	71	

以上から, コア, 周辺ともに, 全域の人口と面積から DID 地区と非 DID 地区に人口を振り分けることが可能となった.

このように, 初期インプットである都市圏の人口と面積, また周辺の数から, コア DID 地区, コア非 DID 地区, 周辺 DID 地区, 周辺非 DID 地区の 4 つのエリアに, 人口, 面積を仕分けする過程を示した. なお, 今回のモデルでは各推計式の形は, 実際の都市への適合が高いように推計式を選択して分析を行った.

3.3 住宅利用面積の推計

人間が生活していく中でエネルギー消費を行う主となるのは家庭である. またエネルギー消費は住まい方によっても変化する. よって本節では, 4 つのエリアそれぞれにおいて, 人口から世帯構成人数により世帯数を決定し, 建て方別の延床面積を推計する. また, 建物階数や建蔽率などから住宅利用敷地

面積を推計する. 図-5 にその過程のフローチャートを示す.

人口は図-4 下部に示した人口であり, 人口密度は同図下部の人口と面積から算出した人口密度である. 八角形のデータについては, 4 つのエリアごとに, 異なる推計値を利用した. 世帯構成人数は, 人口を世帯数で原点を通るように回帰し, その傾きとした. 世帯あたり延べ床面積は, エリア内総延べ床面積をエリア内総世帯数で原点を通るように回帰し, その傾きとした. 例えば, コア DID の場合は, 世帯構成人数は 2.22[人/世帯]であり, 世帯あたり延べ床面積は戸建ては 101.6[m²], 共同住宅は 46.6[m²]である. その他, 回帰分析に関する詳細な結果は紙面の制約上, ここでは省略した. 戸建て世帯割合の推計は, 人口密度を説明変数として回帰分析により行った.

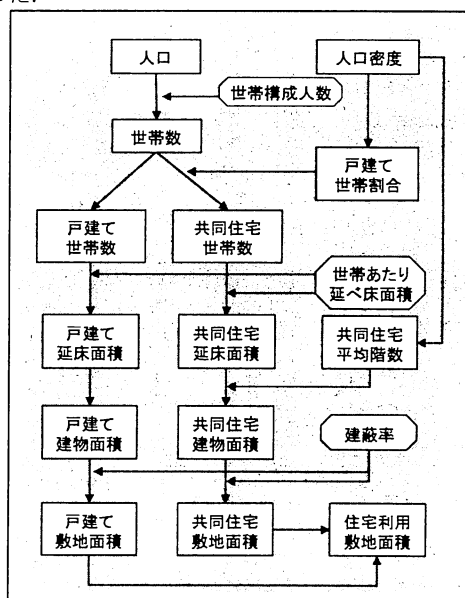


図-5 住宅利用面積推計のフローチャート

3.4 業務施設延床面積の推計

本節で, 4 つのエリアにおいて, 昼間人口から用途別の業務施設が必要になる面積を推計する. 図-6 に推計過程のフローチャートを示す. 業務施設は, 通常, 日中の経済活動が行われている時間において利用される施設であるので, 昼間人口 1 人당に必要となる面積を推計することで, その値を昼間人口に乘じて推計する.

また, 用途別の業務施設とは事務所, 卸小売店舗, 飲食店, ホテル・旅館, 学校・研究機関, 病院, その他の 7 種類である. 業務施設の面積のサンプルデータは国土交通省による法人建物調査¹⁰⁾で, 都道府県と政令指定都市に限られている. また, 面積で除することによって標準化を行い, 用途別 1 人あたり業務施設の延床面積を用途別に推計した.

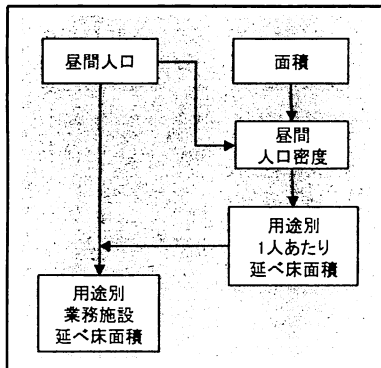


図-6 業務施設延床面積推計のフローチャート

3.5 通勤量の推計

都市圏における交通量のうち、人口配分によって最も影響を受けるのは通勤であることから、本節では、通勤量を推計する。図-7 に推計過程のフローチャートを示す。

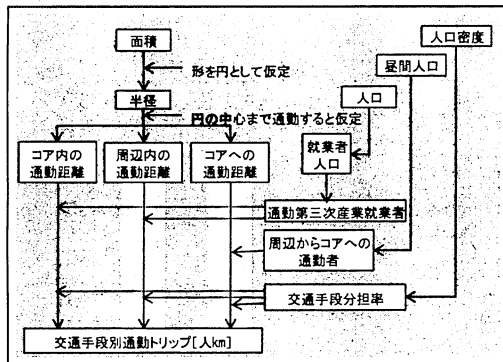


図-7 通勤量推計フローチャート

まず、推計するにあたって、都市圏内に簡易的な仮定をおく。一つ目の仮定は、各地域を円とすることである。つまりコアと周辺の形を円と仮定することで、都市の形を簡略化する。また、周辺は初期インプットの「周辺の数」に応じて1~3に分けて考える。すると、コアと周辺の面積から円の面積の公式を用いて逆算することで半径が算出される。また、DID 地区は地域の中心に分布し、円であると仮定すれば、DID 地区も同様に半径が算出される。各円が接しているとすれば、中心間の距離が半径から算出され、これを地域間の距離とできる。

二つ目の仮定は、移動を通勤者に限定したことである。これにより、就業人口から第三次産業に就業している人だけを通勤者の対象として簡易化を行ったものである。また、非 DID の第三次産業就業者の通勤地は DID の円の中心とし、その通勤距離に関して、DID 円の半径と非 DID 円の半径の平均をとることで平均的な距離とすると仮定する。なお、DID の第三次産業就業者については、通勤距離の仮定が困難であったため、今回は計算に含めていない。

最後の仮定は、通勤者を昼間人口に応じて決定したことである。今回の分析モデル内で扱った変数から、周辺の通勤者がどれだけコアに通勤しているかを推計することは困難であった。モデルの初期設定をごく少数にしたため、推計に利用できるパラメータが少ないためである。そこで、今回は簡易的に、コアの昼間人口比の1以上の割合を周辺からコアへの通勤者を示すとした。例えば、100万人のコアが昼間人口比1.1であったならば、0.1が通勤者を示す。よって通勤者数は $1,000,000 \times 0.1 = 100,000$ となり、十万人であると推計するものとする。これにより、モデル上は昼間人口比を満たすように周辺からコアへ通勤者数を発生させる流出割合を決定する。また、それぞれの非 DID 地域の第三次産業就業者は DID の中心に通勤していると仮定する。このように地域間の交通量を推計する。

仮定により、以下の式でコア内の通勤、周辺内の通勤、周辺からコアへの通勤における通勤距離を推計する。また、図-8 に通勤距離の概念図を示す。 r は円の半径、 A は円の面積を示す。添え字はコア、周辺、ないしはそのうちの DID エリアを示す。

$$L_{core} = \frac{r_{core} + r_{core,DID}}{2} \quad (10a)$$

$$L_{around} = \frac{r_{around} + r_{around,DID}}{2} \quad (10b)$$

$$L_{core,around} = r_{core} + r_{around} \quad (10c)$$

L_{core} : コア内の通勤距離

L_{around} : 周辺内の通勤距離

$L_{core,around}$: 周辺からコアへの通勤距離

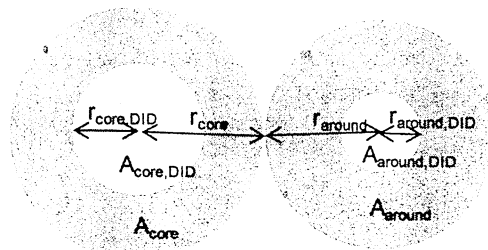


図-8 通勤距離の概念図

次に、人口から就業人口を推計し、就業人口から、第三次就業人口を推計する。エリア別に、人口を説明変数として就業人口を単回帰する。第三次就業人口も同様に単回帰分析によって推計する。被説明変数は就業人口である。

次に、交通手段分担率を推計する。交通手段については、鉄道、バス、自動車の3種類であるとする。この中で、鉄道と自動車の分担率を、ロジットモデルを利用して、人口密度を説明変数とすることで回帰分析により推計する。バスの分担率は残りの割合

とする。以下に鉄道分担率，自動車分担率，バス分担率の式を示す。

$$R_{rail} = \frac{1}{1 + EXP(\alpha \ln(D_i) + \beta \ln(D_j) + \gamma)} \quad (11a)$$

$$R_{vehicle} = \frac{1}{1 + EXP(\alpha \ln(D_i) + \beta \ln(D_j) + \gamma)} \quad (11b)$$

$$R_{bus} = 1 - (R_{rail} + R_{vehicle}) \quad (11c)$$

R_{rail} : 鉄道分担率
 $R_{vehicle}$: 自動車分担率
 R_{bus} : バス分担率
 D_i : 常住地人口密度
 D_j : 通勤地人口密度
 α, β, γ : 係数

回帰分析の結果を表-8に示す。

表-8 交通機関別分担率の回帰分析結果

	鉄道		自動車	
	係数	t	係数	t
常住地人口密度	-0.16	-5.14	0.25	9.48
通勤地人口密度	-0.62	-21.26	0.65	25.72
切片	6.29		-6.38	
	重回帰係数 0.589		重回帰係数 0.709	

以上の過程から，通勤距離，通勤者数，分担率を推計したことにより，交通手段別通勤トリップ[km]を推計する。

3.6 エネルギー消費量と二酸化炭素排出量推計

推計された都市圏における住宅利用延床面積，業務建物延床面積，通勤トリップ量は，都市圏における人間活動の結果としての活動量であり，それに伴いエネルギーを消費している。これらのエネルギー消費を推計するためには大変複雑な計算が必要であり，個票データなど特殊なデータを分析しないと正確に把握することは困難である。しかし，前述したように，その手法は複雑であるうえに，出力結果も大都市優先であるなど地域的な偏りが見られるので，情報が不足する場合が少なくない。そのため，限られたデータから如何にエネルギー消費量を推計するかと言うことは大変重要である。ここでは，そのための部門別にエネルギー消費量を推計し，最終的なアウトプットとして部門別二酸化炭素排出量に変換することで，地域の二酸化炭素排出量構造について把握する。家庭部門・業務部門・交通部門の部門別二酸化炭素排出量推計のフローチャートを図-9，図-10，図-11に示す。

3.7 仮想都市モデル

本節では，前節まで構築してきた仮想都市モデルについてまとめた。

①モデルの最初に，初期設定を5つ決定しただけで，仮想都市が構築されるモデルである。

②都市圏をコアと周辺に分配することによって都市

の人口配分を簡易的に表現している。

③主に，人口密度によってエリア内の活動量の原単位が決まる。

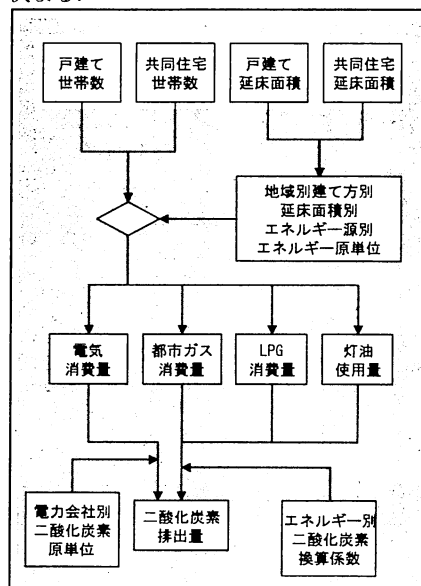


図-9 家庭部門推計フローチャート

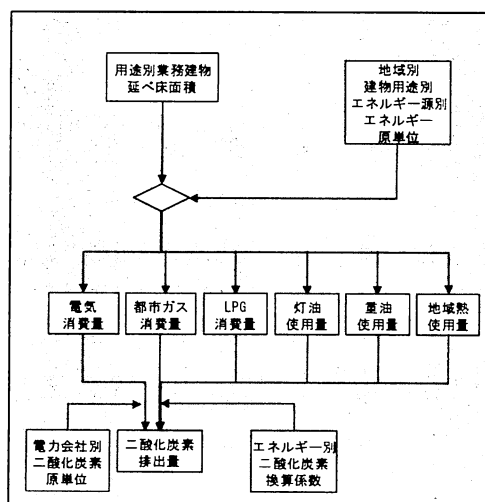


図-10 業務部門推計フローチャート

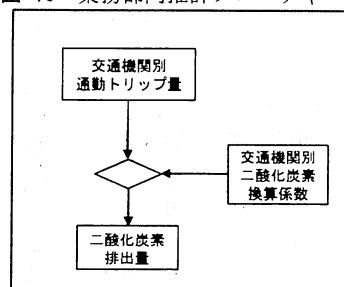


図-11 交通部門推計フローチャート

4. モデルの利用

本章では、前章において構築した仮想都市モデルを用いて、都市圏の初期設定の違いに応じた二酸化炭素排出構造を検討する。

4.1 既存の推計結果との比較

仮想都市モデルを用いた結果と、環境自治体会議(2007)¹¹⁾が推計した二酸化炭素排出量を比較する。環境自治体会議は個票データを元に推計しており、比較的精度の高い推計結果であると考えられる。また、日本全国市町村すべての二酸化炭素排出量推計結果を公表しているのはこれだけであるので、今回の都市圏という範囲であわせるには最適であった。

ここでは大都市圏について比較することで、より考察しやすいものとした。なお、交通部門に関しては通勤のみであったため、比較からは外した。表-9に比較結果を示す。

表-9 代表的な都市圏における
二酸化炭素排出量の比較

	コア			
	民生家庭		民生業務	
	A	B	A	B
札幌市圏	3.24	3.77	2.47	3.73
特別区部圏	11.45	15.62	18.19	7.32
名古屋市圏	2.77	5.27	3.66	3.56
大阪市圏	3.52	7.28	6.29	4.40
福岡市圏	2.00	1.92	1.95	2.04

	周辺			
	民生家庭		民生業務	
	A	B	A	B
札幌市圏	1.12	1.29	0.45	2.25
特別区部圏	31.60	32.09	23.52	17.17
名古屋市圏	9.69	10.81	7.17	7.51
大阪市圏	20.89	15.62	16.04	9.94
福岡市圏	4.67	4.00	3.52	4.37

注 A：環境自治体会議による推計値
B：仮想都市モデルによる推計値

コアで最も目立つのは特別区部の業務部門における違いである。環境自治体会議の推計値に比べて、仮想都市モデルの推計値はとても小さい。しかし、その他の地域ではおよそ近い値を出していることから、特別区部の業務部門が例外過ぎるほどに多すぎると考えられる。また、家庭部門は仮想都市モデルにおける推計値が全体的に過大評価をしていることがわかる。周辺の家庭部門に関しては、およそ同じ程度の推計値となっており、都市圏モデルによる周辺の決定が機能していると考えられる。業務部門に関しては、特別区部周辺や大阪市周辺のように大都市周辺の業務施設の多さを表現できていないところがある。

既存の推計結果との比較から、例えば、活動量の推計については原単位の精査が必要である等の課題

が示唆されるが、本モデルの推計値の妥当性がある程度示された。先行研究ではかなり多くの初期入力データを必要としたのに対して、人口、面積、昼間人口比、地域ダミー、周辺の数という、わずか5つの初期設定だけで推計結果を出力したことは本研究の重要な特徴であると考えられる。

4.2 転居シナリオ

周辺からコアへ転居させるシナリオを考える。周辺の戸建てからコアの共同住宅に集住させる仮定をおく。コアの人口に対して転居させる人口の割合を転居割合とする。ここでは、初期インプットを、名古屋市都市圏相当の人口 1000 万人、都市域 10000 km²の都市圏 A と、札幌市都市圏相当の人口 400 万人、面積 5000 km²の都市圏 B の二種類のものについて扱う。転居に伴う、コアと周辺の人口密度の変化を図-12 に示す。

都市圏 A では都市圏の規模が大きいため、コアの人口に対して周辺の人口が大きい。よって転居は100%までも可能であり、コアの人口密度は大きな傾きで変化するが、周辺の人口密度はあまり影響を受けずほとんど変化しない。一方で、都市圏 B では都市圏の規模がそれほど大きくはないので、20%転居させたところ、周辺の人口は大きく減少し、人口密度は激しく低下した。

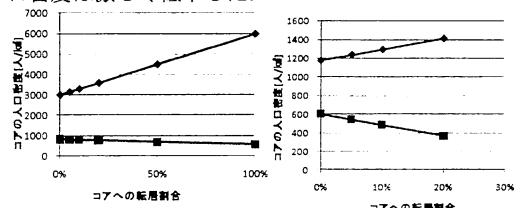


図-12 転居シナリオにおける人口密度の変化
(左：都市圏 A 右：都市圏 B)

次に、人口密度の変化に対して、二酸化炭素排出量の変化を部門ごとに検証する。同様に都市圏 A、都市圏 B を対象とし、その関係を図-13 に示す。

図-13 から、都市圏 B における削減量は、都市圏 A と比較して大きいことがわかる。特に交通量の削減が大きい。これには、人口密度が低いために、自動車の分担率が大きいことから、転居による通勤者数の削減が大きいことが理由として考えられる。

4.3 技術導入シナリオ

次に、ここでは、技術導入による二酸化炭素排出量削減ポテンシャルを推計する。導入する技術は高島(2009)¹²⁾を参考に選択し、CGS（吸式冷凍機あり）、CGS（吸式冷凍機なし）、ヒートポンプ給湯器、太陽光パネルの4種類がある。図-14 に CGS（吸式冷凍機あり）を導入したときの削減ポテンシャルを示す。CGS（吸式冷凍機あり）は業務施設に導入するとし、コアだけに導入した場合と周辺にも導入した場合について、導入割合を変化させて削減効果の変化を調べる。

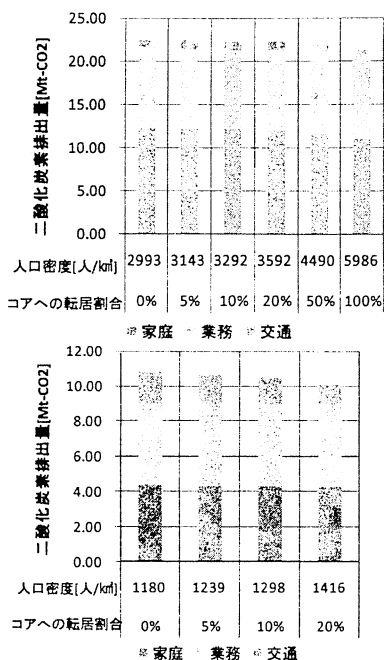


図-13 人口密度の変化と二酸化炭素排出量の関係
(上：都市圏 A 下：都市圏 B)

対象とした都市は都市圏 A である。100%導入したときの削減効果は、コアのみの場合 9.3%、コア・周辺ともに導入した場合の削減効果は 27.4%である。ただし、それほどの導入は見込めないで、実際はそれほどの削減効果はないと考えられる。

転居シナリオと技術導入シナリオを比較すると、大都市圏においては技術導入が進むことによる二酸化炭素排出削減の効果は大きいと考えられる。しかし、転居による影響もある程度あるため、併用して導入すると効率が良いと考えられる。一方で、中規模から大規模にかけての都市圏は、転居による効果がかなり大きかった。このような都市圏は集約化を進めることによってエネルギー効率が増大し、二酸化炭素排出削減が期待できることがわかる。これらの結果から、技術導入と人口配分の変化を同時に進めることが必要であり、現状の人口密度により技術導入の程度と人口配分の変化の程度の組み合わせが異なることが示唆された。また、都市の集約化と CGS 導入を比較して考察しているが、例えば費用に対する二酸化炭素排出量の削減効果といった、統一的な指標による比較ができなかった点は今後の課題である。

5. 終わりに

本研究では、都市圏における温暖化対策を考慮するための都市圏全体の二酸化炭素排出量推計モデルを構築した。このモデルの最大の特徴は、人口、

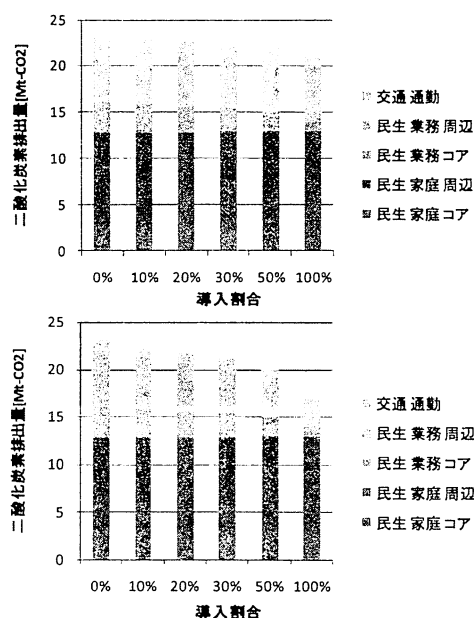


図-14 CGS (吸式冷凍機あり) 導入時の排出量
(上：コアのみ 下：コア、周辺ともに)

面積、昼間人口比、周辺の数、地域ダミーという、5つという少ない初期設定により簡易的に都市圏の二酸化炭素排出構造を明らかにすることである。

また、このモデルを利用して、異なる人口配置をした仮想都市において、人口移動や技術導入などの温暖化対策をした場合の、二酸化炭素排出削減効果を比較し、人口配置に応じた効果的な温暖化対策を検討した。結果としては、周辺からコアに人口を転居させることで、効率的な技術導入が可能になり、二酸化炭素排出量を削減できることが分かった。

さらに、このモデルをパッケージングすることで、地域の温暖化対策に役立てることができる。このパッケージは少ない初期設定で分析できるので、データの不足している地方都市においても簡単に二酸化炭素の排出構造を推計できるからである。

今後の課題としては、以下の4点が上げられる。

- (1) 技術導入のシナリオについて組み合わせや場合分けなどにより削減効果を詳細に検討する必要がある。
- (2) 都市圏モデルにおいて、人口や面積をエリアに振り分ける手法について、経済活動の指標も加えて、都市圏と経済圏の定義の違いについて改善が望まれる。
- (3) エネルギー消費量等の原単位については、さらなる詳細な検討が必要である。
- (4) 削減ポテンシャルの比較について、費用対効果などの統一的な指標が必要である。
- (5) 少ないデータによるモデル分析を利用して、データの少ないアジア地域へ適応する。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、日本学術振興会から特別研究員PDとして支援を受けている。また、本研究は環境省の地球環境研究総合推進費（研究課題番号E-0806）「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」（代表：井村秀文）の一環として行われたものである。記して深謝する。

補注

- 1) 都市圏という大きなフレームを採用することで、地域内の差異が大きくなる可能性があるが、その違いを示すのは人間活動としての延床面積を示す原単位である。本文中の仮想都市モデルで示すように、コア・周辺、DID・非DIDのそれぞれにおいて、現状の都市のデータにより都市圏の傾向を回帰分析することで異なる世帯当たりの延べ床面積を作成しており、それにより地域内の差異はある程度回避できると考える。また、例えば名古屋都市圏と札幌都市圏といった、都市圏間の差異であれば、地域別の原単位を作成することによって表現できていると考える。ただし、さらに細かい部分の地域内の差異については今回のモデルでは考慮することができておらず、今後の課題である。
- 2) 周辺の数が多い場合も想定されるが、図-2に示すような都市圏モデルの分析から、中心地の一つ下の階層の都市で、さらに下層に多くの都市を持っている都市はあまり多くない結果がでた。これは、都市圏を階層としてとらえた結果、周辺の小さな都市が直接中心地に結びついていないことを示している。例えば、大都市圏であれば、東京都都区部都市圏の周辺には横浜市、さいたま市、千葉市が、名古屋市都市圏の周辺であれば、岐阜市、四日市市、豊田市などがあることは、図-2から示されている。そのため、今後さらなる検討が必要であるとは考えられるが、本研究では、本文に示した仮定を採用した。

参考文献

- 1) 奥岡桂次郎, 白川博章, 大西暁生, 東修, 谷川寛樹, 井村秀文(2009): 地域特性に適した温暖化対策に関する研究—環境モデル都市を例として—, 環境システム研究論文発表会, 第37回
- 2) 総務省統計局ホームページ 平成17年度国勢調査
- 3) 都市再生ビジョン(2003): 社会資本整備審議会
- 4) 金本良嗣・徳岡一幸(2002): 日本の都市圏設定基準, 応用地域学研究, No.7, 1-15
- 5) 吉村 弘, 山根 薫: 日本における都市の階層性と空間構造——「規模」と「距離」による都市間構造分析——, 地域経済研究, 第15号, 2004.
- 6) 高島健志・平野勇二郎(2008): 都市の高度化と各種省エネルギー技術導入によるCO₂排出削減ポテンシャル, 群馬大学卒業論文
- 7) 大西暁生, 高平洋祐, 谷川寛樹, 井村秀文(2009): 低炭素都市実現に向けたシミュレータの開発—名古屋市の民生部門を対象として—, 都市計画報告集, No. 8-2, pp. 84-87.
- 8) 長谷川良二(2006): CO₂排出に関する日本47都道府県の地域構造要因分析, 会計検査研究, No33
- 9) (財)日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター: 民生部門エネルギー消費実態調査 No13, No14
- 10) 国土交通省ホームページ: 平成15年度版 法人建物調査
- 11) 環境自治体会議ホームページ 全国市区町村別CO₂排出量推計
- 12) 高島健志(2009): 都市の集約化と各種省エネルギー技術導入によるCO₂排出量の施策評価ツールの開発, 環境省地球環境研究総合推進費研究成果報告書「低炭素型都市づくり施策の効果とその評価に関する研究」平成20年度, pp. II-12 II-21

STUDY ON ESTIMATION OF CO₂ EMISSION BY DIFFERENT URBAN SPATIAL STRUCTURES

Keijiro OKUOKA, Akio ONISHI, Hiroaki SHIRAKAWA,
Osamu HIGASHI, Hiroki TANIKAWA, and Hidehumi IMURA

In this study, we built CO₂ emission model to consider measures of Global warming targeted to cities. Firstly, we defined urban area by using a new model modified gravity model for cities, towns and villages in Japan. Secondary, we divided the urban area into cores and around areas, and built a virtual urban area model. By using this model, the distribution of population and household in core area and around area were estimated. From the results, CO₂ emissions of household and commercial sectors and a traffic sector were estimated. Finally, paying attention to virtual cities where a different distribution of population, We examined the effective measures for the global warming corresponding to distribution of different spatial distribution of population and technical measures. By this model, CO₂ emission urban area can be clarified simply by using few input data such as population, area, daytime population ratio, number of around areas, and regional dummy.