九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

都市環境負荷予測シミュレータの開発 ： グラフ関数同定プログラムの開発とモデルの検証

上野，貴広
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 ： 修士課程

住吉，大輔
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 ： 准教授

赤司，泰義
東京大学大学院工学系研究科建築学専攻

高口，洋人
早稲田大学大学院理工学術院

https://doi.org/10.15017/1809203

出版情報：都市・建築学研究. 31, pp.19-28, 2017-01-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University
バージョン：
権利関係：

都市・建築学研究　九州大学大学院人間環境学研究院紀要　第31号，2017年1月
J. of Architecture and Urban Design, Kyushu University, No.31, pp.19～28, January. 2017

都市環境負荷予測シミュレータの開発
—グラフ関数同定プログラムの開発とモデルの検証—

Development of a Simulator for Prediction of Urban Environmental Loads
—Parameter Identification Method in Multiplier and Verification of Model—

上野貴広*1，住吉大輔*2，赤司泰義*3，高口洋人*4
Takahiro UENO, Daisuke SUMIYOSHI, Yasunori AKASHI and Hiroto TAKAGUCHI

We made a long-term prediction simulator of CO_2 emissions from 1975 to 2050 for Fukuoka City with system dynamics. In this simulator, CO_2 emissions are calculated by multiplying CO_2 emission units with amounts of activities. In our past research, it took many hours to make the model because we manually adjust multiplying functions of the model. Therefore we develop a program to adjust every multiplying function of the model for reducing the simulator making hours. Moreover, we compared actual values and calculated values of the simulator by using multiplying functions that were identified by the program, and did accuracy verification of the program.

***Keywords: Urban**, Environmental load, Long-term prediction, System dynamics, Genetic algorithm*
都市，環境負荷，長期予測，システムダイナミクス，遺伝的アルゴリズム

1.　はじめに

温室効果ガス排出量の大幅削減のためには，都市の環境負荷を大きく削減することが不可欠である．本研究の目的は様々な環境負荷削減政策によるCO_2排出量といった環境負荷の変化を長期予測するシミュレータ(都市モデル)を開発し，実効的な政策の立案を支援することである．これまでの研究[1)]で，福岡市の都市モデル(福岡市モデル)を開発し，福岡市に適したシナリオの検討を行ってきた．

システムダイナミクス手法を用いた本シミュレータは，民生（家庭・業務），産業（製造業・建設業），運輸（旅客・運輸）の各部門を，それぞれ複数のセクタとして表現し，それらの活動量(例えばオフィスの延床面積がどの程度あるか，等)に CO_2 排出原単位(例えばオフィスの延床面積 $1m^2$ あたりどれだけの CO_2 を排出するか，等)を乗じて，それぞれの部門のCO_2排出量を求めるものである．

都市モデルを汎用化させ福岡市以外の都市モデルを簡易に作成可能とするためには，都市モデルへの入力が煩雑なことによる手間の多さ，および再現性の低さといった問題を解決しなければならない．

そこで本報では都市モデルの作成時間を短縮するため，都市モデル内に設定するグラフ関数の自動同定手法を開発する．また開発した手法を用いて都市モデルを作成し，実績値との精度検証により開発したグラフ関数同定手法の妥当性を明らかにする．

*1 空間システム専攻修士課程
*2 都市・建築学部門
*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
*4 早稲田大学大学院理工学術院

2.　都市モデル概要

これまでに開発してきた都市モデルはシステムダイナミクス手法を用いて都市内の要素間の関係を変数で表すものである．都市モデルは全国規模で統計情報が揃っている 1990 年を初年度とし，そこから 2050 年までの活動量を推計する．統計から各年の CO_2 排出原単位を算出し(2011 年以降は 2010 年の値を使用)，各年の活動量と対応する CO_2 排出原単位を乗じることで各年の CO_2 排出量を算出する．

都市モデル内の変数の計算フローを図 1 に示す．計算対象の変数(以下，目的変数)の計算値は，それぞれの目的変数に影響を与える他の変数(以下，説明変数)が持つ魅力乗数から算出する．図 1 の変数 C を目的変数とすると，この基準年比を説明変数である変数 A と変数 B の魅力乗数を掛け合わせて求める．求めた基準年比と変数 C の基準年値(初年値)から各年の変数 C の計算値を算出する．

魅力乗数は多様な種類のグラフ関数によって表される．図 1 内に変数 A の変数 C への魅力乗数に設定されているグラフ関数を示している．グラフ関数には初年値を(x,y)=(1,1)とした増減率を設定する．

グラフ関数は実積値と計算値が合うように調整する．従来はこれを手動で行っており，モデル全体のグラフ関数の設定に数ヶ月の時間を要していた．

都市モデルでは各部門において環境負荷への影響が大きい項目の活動量を計算している．表 1 に都市モデルを構築する目的変数とその説明変数を示す．相関の項目では説明変数が増加したときに目的変数も増加する場合を[+]，減少する場合を[-]と示している．例えば C.従業者セクタの総従業者比率は生産人口比率や農林水産業生産額等から表され，生産人口比率が上昇すれば総従業者比率も増加するようにグラフ関数を設定する．各説明変数とその相関は既往研究やアンケート調査を基に設定した．

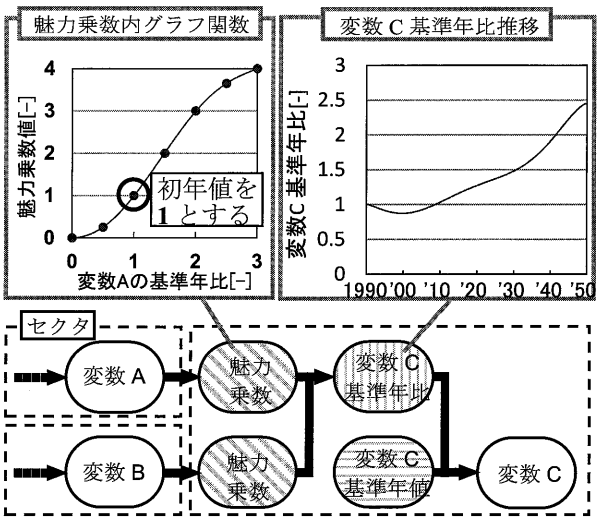

図 1　変数の計算フロー

表 1　各セクタの変数一覧

セクタ	目的変数	変数定義	単位	説明変数	想定相関
A人口	出生比率	出生数/15～44歳女性人口	-	外部入力	
	死亡比率	死亡数/総人口	-	外部入力	
	移動による人口変化率	人口移動後の人口/移動前の人口	-	一人当たり市民所得	[+]
				人口密度	[+]
				一人当たりサービス業面積	[+]
				総従業者率	[+]
				学生一人あたり学校面	[+]
B世帯数	若年単独世帯主率	若年単独世帯数/若年人口	-	人口密度	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				一人当たり民生業務面	[+]
				第三次従業者数	[+]
				第一次従業者数	[-]
	若年夫婦世帯主率	若年夫婦世帯数/若年人口	-	人口密度	[+]
				一人当たり市民所得	[-]
				一人当たり民生業務面	[-]
				第三次従業者数	[-]
				第一次従業者数	[+]
	高齢単独世帯主率	高齢単独世帯数/高齢人口	-	人口密度	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				一人当たり民生	[+]
				第三次従業者数	[+]
				第一次従業者数	[-]
	高齢夫婦世帯主率	高齢夫婦世帯数/高齢人口	-	人口密度	[+]
				一人当たり市民所得	[-]
				一人当たり民生業務面	[-]
				第三次従業者数	[+]
				第一次従業者数	[-]
	その他世帯主率	その他世帯数/総人口	-	出生数	[+]
				一人当たり市民所得	[-]
				一人当たり民生業務面	[-]
				第三次従業者数	[-]
				第一次従業者数	[+]
	若年単独戸建居住比率	若年単独戸建居住世帯数/若年単独世帯数	-	第3次従業者数	[-]
				住宅総戸数	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				住宅地面積	[+]
	若年夫婦戸建居住比率	若年夫婦戸建居住世帯数/若年夫婦世帯数	-	第3次従業者数	[-]
				住宅総戸数	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				住宅地面積	[+]
	高齢単独戸建居住比率	高齢単独戸建居住世帯数/高齢単独世帯数	-	一人当たりサービス業面積	[-]
				住宅総戸数	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				住宅地面積	[+]
				高齢人口数	[-]
	高齢夫婦戸建居住比率	高齢夫婦戸建居住世帯数/高齢夫婦世帯数	-	一人当たりサービス業面積	[-]
				住宅総戸数	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				住宅地面積	[+]
				高齢人口数	[-]
	その他戸建居住比率	その他戸建居住世帯数/その他世帯数	-	第3次従業者数	[-]
				住宅総戸数	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				住宅地面積	[+]
C従業者	総従業者率	総従業者数/総人口	-	生産人口比率	[+]
				農林水産業生産額	[+]
				製造業延床面積	[+]
				市内総生産	[+]
	第1次産業従業者率	第1次産業従業者数/総従業者数	-	人口密度	[-]
				学生一人当たり学校面積	[-]
				農林水産業生産額	[+]
	第2次産業従業者率	第2次産業従業者数/総従業者数	-	人口密度	[-]
				学生一人当たり学校面積	[-]
				製造品出荷額	[+]
	第3次産業従業者率	第3次産業従業者数/総従業者数	-	人口密度	[+]
				学生一人当たり学校面積	[+]
				民生業務延床面積	[+]
D土地	住宅地面	住宅地面積	㎡	外部入力	
	商業地面積	商業地面積	㎡	外部入力	
	道路地面積	道路地面積	㎡	外部入力	
	農業地面積	農業地面積	㎡	外部入力	
	林業地面積	林業地面積	㎡	外部入力	
	工業地面積	工業地面積	㎡	外部入力	
E財政	市内総生産	市内総生産	百万円	農林水産業生産額	[+]
				製造品出荷額	[+]
				民生事務所延べ床面積	[+]
	一人当たり市民所得	一人当たり市民所得	百万円	市内総生産前年度比	[+]
				生産年齢人口比率	[+]
				学生一人あたり学校面積	[+]
				総授業者率	[+]

セクタ	目的変数	変数定義	単位	説明変数	想定相関
F製造業	製造品出荷額	製造品出荷額	百万円	第二次産業従業者数	[+]
				市内総生産	[-]
				道路面積	[+]
				製造業延床面積	[+]
	着工率	製造業着工面積/製造業延床面積	-	総人口数	[+]
				市内総生産	[+]
				道路面積	[+]
				第二次従業者数	[+]
				製造品出荷額	[+]
				製造業延床面積	[-]
	解体率	製造業解体面積/製造業延床面積	-	総人口数	[-]
				市内総生産	[+]
				工業地面積	[+]
				第二次産業従業者数	[+]
				製造品出荷額	[+]
				製造業延床面積	[-]
G建設業	業務建築着工・解体面積	各セクタの合計	㎡		
	住宅着工・解体戸数	各セクタの合計	㎡		
H戸建住宅	着工率	戸建住宅着工戸数/戸建住宅戸数	-	戸建稼働率	[+]
				第二次産業従業者数	[+]
				一人当たり市民所得	[+]
				初等教育面積	[+]
				住宅地面積	[+]
				総住宅数	[-]
	解体率	戸建住宅解体戸数/戸建住宅戸数	-	戸建稼働率	[-]
				第二次産業従業者数	[+]
				一人当たり市民所得	[-]
				初等教育面積	[-]
I集合住宅	着工率	集合住宅着工戸数/集合住宅戸数	-	集合住宅稼働率	[+]
				第二次産業従業者数	[+]
				単独世帯数	[+]
				市内総生産	[+]
				住宅地面積	[+]
				総住宅数	[-]
	解体率	集合住宅解体戸数/集合住宅戸数	-	集合住宅稼働率	[-]
				第二次産業従業者数	[+]
				単独世帯数	[-]
				市内総生産	[+]
J事務所・店舗・百貨店	着工率	事務所着工面積/事務所延床面積	-	市内総生産	[+]
				第二次従業者数	[+]
				第三次産業従業者数	[+]
				事務所・銀行・店舗面積	[-]
				総人口数	[+]
				民生業務面積	[-]
				商業地面積	[+]
	解体率	事務所解体面積/事務所延床面積	-	市内総生産	[+]
				第二次産業従業者数	[+]
				第三次産業従業者数	[-]
				事務所・銀行・店舗面積	[-]
				総人口数	[-]
K病院・ホテル	着工率	病院着工面積/病院延床面積	-	市内総生産	[+]
				第三次産業従業者数	[+]
				総人口数	[+]
				病院・ホテル延べ床面積	[-]
				第二次従業者数	[+]
				民生業務面積	[-]
				商業地面積	[+]
	解体率	病院解体面積/病院延床面積	-	市内総生産	[+]
				第三次産業従業者数	[-]
				総人口数	[-]
				病院・ホテル延べ床面積	[-]
				第二次産業従業者数	[+]
Lその他	着工率	その他着工面積/その他延床面積	-	その他延べ床面積	[-]
				市内総生産	[+]
				第三次産業従業者数	[+]
				第二次従業者数	[+]
				総人口数	[+]
				民生業務面積	[-]
				商業地面積	[+]
	解体率	その他解体面積/その他延床面積	-	その他延べ床面積	[-]
				市内総生産	[+]
				第三次産業従業者数	[+]
				第二次従業者数	[+]
				総人口数	[-]

セクタ	目的変数	変数定義	単位	説明変数	想定相関
M木造業務	着工率	木造業務着工面積/木造業務延床面積	-	市内総生産	[+]
				第二次従業者数	[+]
				木造業務延べ床面積	[-]
				総人口数	[+]
				林業地面積	[+]
				民生業務面積	[-]
				商業地面積	[+]
	解体率	木造業務解体面積/木造業務延床面積	-	市内総生産	[+]
				第二次従業者数	[+]
				木造業務延べ床面積	[-]
				総人口数	[-]
N学校(幼稚園-高校)	着工率	学校着工面積/学校延床面積	-	3-18歳人口	[+]
				初等教育延べ床面積	[-]
				一人当たり市民所得	[+]
				第二次従業者数	[+]
	解体率	学校解体面積/学校延床面積	-	3-18歳人口	[-]
				初等教育延べ床面積	[-]
				一人当たり市民所得	[-]
				第二次従業者数	[+]
				住宅地面積	[-]
O高等学校(大学)	着工率	大学着工面積/大学延床面積	-	第三次従業者数	[+]
				第二次従業者数	[+]
				高等学校延べ床面積	[-]
				市内総生産	[+]
	解体率	大学解体面積/大学延床面積	-	第三次従業者数	[-]
				第二次従業者数	[+]
				高等学校延べ床面積	[-]
				市内総生産	[+]
P旅客人Km	総輸送人Km	総輸送人Km	十万人km	一人当たり市民所得	[+]
				3-22歳人口比率	[+]
				道路面積	[+]
				高齢人口比率	[-]
				総従業者数	[+]
	旅客鉄道分担率	旅客鉄道人Km/総輸送人Km	-	一人当たり市民所得	[-]
				3-22歳人口比率	[+]
				一人当たり乗用車保有台数	[-]
				第三次産業従業者数	[+]
				人口密度	[+]
	乗用車分担率	乗用車人Km/総輸送人Km	-	一人当たり市民所得	[+]
				高齢人口比率	[+]
				一人当たり乗用車保有台数	[+]
				道路面積	[+]
	バス分担率	バス人Km/総輸送人Km	-	一人当たり市民所得	[-]
				高齢人口比率	[-]
				一人当たり乗用車保有台数	[-]
				道路面積	[+]
	航空分担率	航空人Km/総輸送人Km	-	3-22歳人口比率	[+]
				一人当たり市民所得	[+]
				第三次産業従業者数	[+]
				19-22歳人口	[+]
Q貨物トンKm	総輸送トンKm	総輸送トンKm	十万トンkm	製造業延床面積	[+]
				民生業務延床面積	[+]
				総人口数	[+]
				道路面積	[+]
				農林水産業生産額	[+]
	営業用貨物車分担率	営業用貨物車トンKm/総輸送トンKm	-	製造業延床面積	[+]
				民生業務延床面積	[+]
				市内総生産	[+]
				道路面積	[+]
				農業生産額	[+]
	自家用貨物車分担率	自家用貨物車トンKm/総輸送トンKm	-	製造業延床面積	[+]
				民生業務延床面積	[+]
				市内総生産	[+]
				道路面積	[+]
				農業生産額	[+]
				総人口数	[+]
	船舶分担率	船舶トンKm/総輸送トンKm	-	製造業延床面積	[+]
				漁業生産額	[+]
				市内総生産	[-]
	貨物鉄道分担率	貨物鉄道トンKm/総輸送トンKm	-	製造業延床面積	[+]
				林業生産額	[+]
				市内総生産	[-]
R農林水産業	農業生産額	農業生産額	百万円	第一次従業者数	[+]
				市内総生産	[-]
				農業地面積	[+]
	林業生産額	林業生産額	百万円	第一次従業者数	[+]
				市内総生産	[-]
				林業地面積	[+]
	漁業生産額	漁業生産額	百万円	第一次従業者数	[+]
				市内総生産	[-]
				総住宅数	[-]

3. グラフ関数同定プログラム

前述のとおり，本報ではグラフ関数のパラメータ同定プログラムの開発を行った．本章では開発したプログラムについて説明する．

3.1 算出する関数

魅力乗数のグラフ関数に使われているすべての関数は範囲を定めれば 3 次の多項式関数で近似できると考え，本報ではグラフ関数を 3 次の多項式関数で同定するものとした．

シミュレータの初年度における魅力乗数の入力値と出力値はすべて 1 としている．よって，プログラムで算出する魅力乗数のグラフ関数はすべて(x,y)=(1,1)を通らなければならない．またグラフ関数は 0 以下の値をとらないことや，関数の傾向と現実の関連性とが乖離しないことといった条件も満たさなければならない．そこで 3 次の多項式関数の導出には，プログラムで算出した極大点と極小点の変曲点 2 点と(1,1)点による 3 次関数の連立方程式を採用し，関数のとる値を変曲点 2 点の範囲に限定した．また座標の範囲設定によってグラフ関数に増大関数，減少関数の設定を行う手法をとった(図 2)．

3.2 遺伝的アルゴリズム

本報ではグラフ関数のパラメータ同定を遺伝的アルゴリズム(以下，GA)により求めた．GA は最適化・探索アルゴリズムの一種で，生物が自然環境に適合していくため世代を重ねながら進化していった過程をモデルにしている．GA の計算フローを図 3 に示す．最初にある課題や条件に対する解の情報(以下，遺伝子)を内包した個体を設定した数だけ用意し(以下，初期個体群の生成)，課題や条件と照合することで各個体の優劣を決める評価値(以下，適応度)を評価する(以下，適応度の評価)．次に，適応度の高い優れた遺伝子を持つ個体は複製し，適応度の低い個体は減らす(以下，次世代の選択)．最後に，それぞれの個体の遺伝子を変化させることで個体群内にバリエーションをもたせる(以下，遺伝子の書き換え)．上記の適応度の評価，次世代の選択，遺伝子の書き換えの 3 つの作業を 1 世代とし，それを繰り返しながら最適解を探索していく．

GA は単純な計算手法ながら応用が効き，解を求めるのに複雑な手法を用いる問題や，長い時間を必要とする問題に適している．シミュレータの汎用化のためには，1 つのプログラムの設定値を多少変更するだけですべてのグラフ関数を同定できることが望ましい．そこで本報では同定プログラムの計算アルゴリズムに GA を採用した．

3.3 初期個体群の生成，個体の優劣の評価

図 3 に初期個体群の生成，及び個体の優劣の評価の概略図を示す．2 章で述べたように目的変数の値は複数の魅力乗数の値をかけ合わせて計算しているため，効率化には目的変数にかかるすべての魅力乗数のグラフ関数を 1 度の計算で求める必要がある．そこで 1 つの個体が目的変数にかかるすべてのグラフ関数を表現するよう設定する．

個体の遺伝子には対象の目的変数にかかる魅力乗数と同数の関数情報を持たせる．具体的にはそれぞれのグラフ関数における変曲点の(x, y)座標を設

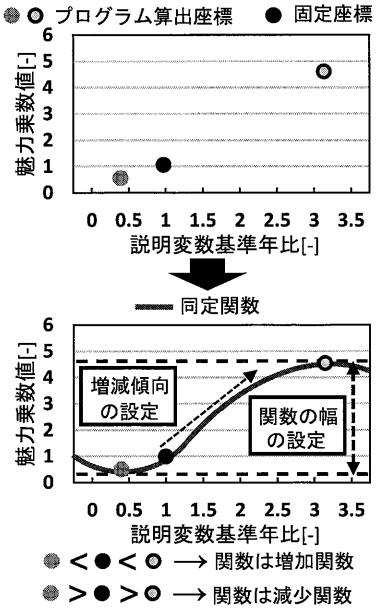

図 2 関数導出方法

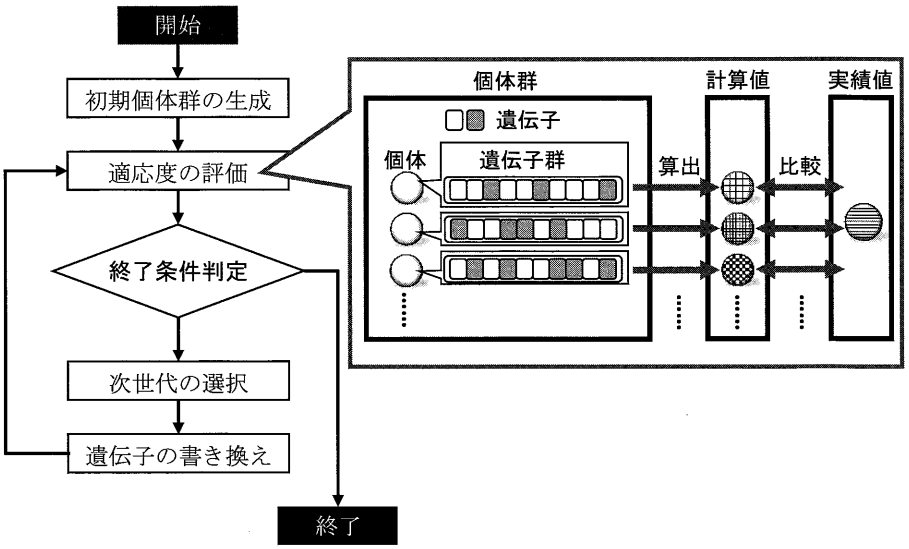

図 3 GA の計算フロー及び初期個体群の生成・個体の優劣評価

定する．座標の設定範囲はy軸については相関に応じて任意に設定し，x軸については説明変数の基準年比の実績値の範囲からプログラムが設定する．

本研究のGAでは，適応度は目的変数の基準年比の1990年～2010年までの実績値と，同期間の計算値を乗じた値との二乗平均誤差から求めている．計算値の算出に必要な説明変数の基準年比には年ごとの実績値を用いている．二乗平均誤差が小さい固体ほど適応度が高くなり次世代に多く残る．

3.4 次世代の選択

GAでは適応度の評価に応じて様々な方法で次世代に残す個体を選ぶ．本研究では次世代の選択にランキング選択，ルーレット選択，エリート選択の3つの操作を用いた．

図4にランキング選択，ルーレット選択の概略図を示す．ランキング選択は個体の適応度の順位に応じた次世代への選択数をあらかじめ設定しておき，それに応じて各個体を次世代に選択する手法である．固体の選択は順位のみで決まり，順位が低い個体は次世代に選ばれない．

ルーレット選択では個体の適応度に応じて確率が設定され，確率からランダムに個体が選択される．そのためどの個体にも次世代に残る可能性がある．

エリート選択では今までの全世代で最も適応度が高い個体が次世代に選ばれる．これにより世代を重ねても個体群内の最小適応度を維持できる．

本研究のGAでは，ランキング選択により今世代の適応度が1位の個体を3つ，2位を2つ，3位を1つ次世代に選び．さらにエリート選択で1つ選ぶことで世代交代による個体群の退化を防ぐ．残りの個体はすべてルーレット選択によって選ぶことで個体群が局所解に収束する危険性を下げる．

3.5 遺伝子の書き換え

遺伝子の書き換えでは次世代に残した個体の中から設定した確率により個体を選びその遺伝子を変化させ，その世代の個体群内にバリエーションをもたせる．本研究では遺伝子の書き換えに交叉，突然変異の2つの操作を用いた．

図5に交叉・突然変異の概略図を示す．交叉は設定した確率によって個体を2つ選び，それぞれの遺伝子を任意の箇所で切断し，遺伝子を交換する．本研究では交叉確率を60%，切断箇所を1つとした．

突然変異は設定した確率により個体を選び，その個体の遺伝子を1つ設定範囲内で変化させる．本研究では突然変異の確率を5%とした．

3.6 グラフ関数の同定

プログラムの終了条件として規定の世代数を設定し，プログラムの最適な世代数の検証を行った．魅力乗数の数が異なる目的変数をいくつか選び，それぞれ世代ごとに最良の適応度の平均を集計した．

結果を100倍した値を表2に示す．適応度は魅力乗数の数や目的変数の変化の大きさに影響を受けるが，だいたい5000～10000世代で適応度の向上が収束している．その後も適応度は向上しているため20000世代以降も向上は続くと考えられるが，シミュレータ内の多数の目的変数すべてに複数の魅力乗数が存在する．よって同定した関数の更なる精度の向上よりも同定作業の作業効率を優先し，プログラムの終了条件は20000世代とした．

関数の同定においてはプログラムが局所解に陥ることも考えられる．そのため同じ設定条件で10個のプログラムを並列計算し，得られた10個の計算結果から最も二乗平均誤差が小さくなる関数をその魅力乗数のグラフ関数として採用した．

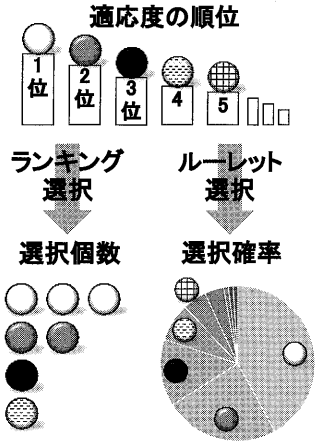

図4 ランキング選択・ルーレット選択

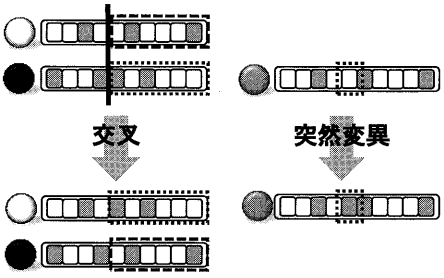

図5 交叉・突然変異

表2 適応度の推移

	魅力乗数の数			
	2	3	4	5
1[世代目]	103.60	540.11	127.26	45.18
10	53.63	199.88	65.06	12.17
100	50.64	170.75	53.03	7.71
1000	48.68	161.71	39.01	5.14
5000	48.65	160.09	36.81	4.97
10000	48.65	159.88	36.45	4.81
20000	48.64	159.81	35.88	4.75

4. 精度検証

4.1 概要

同定プログラムの精度を確認するため，同定プログラムを用いた福岡市モデルの再作成に加え，福岡県春日市の都市モデルを新しく作成し，各都市モデルの計算値と実績値とを比較した．

精度検証のフローを図 6 に示す．まず都市モデルごとに必要な実績値を対応する統計データから収集した．そのデータを基に同定プログラムにより各モデルのグラフ関数を同定し，グラフ関数と各変数の初年度値をそれぞれのモデルに入力することで両都市モデルを作成した．モデルを用いて計算を行い，得られた計算結果と実績値を比較することで同定プログラムの計算精度を確認した．

収集元の統計資料一覧を表 3 に示す．全国の市区町村の統計値が記載されている資料を採用した．統計値がない場合の実績値は県や地方の統計値を人口比等で案分して算出した．

精度は平均絶対百分率誤差(MAPE, Mean Absolute Percent Error)を用いて評価した（式(1)）．

$$\mathrm{MAPE} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}\frac{|A_t - F_t|}{A_t} \times 100 \qquad \text{式(1)}$$

At：実績値，Ft：計算値，n：データ数（= 21）

表 4 に MAPE 値による予測精度判断の基準を示す．既往研究[2)]の予測精度確保の判断基準(MAPE 50%未満)を用いて以降の検討を行った．

4.2 対象都市概要・同定プログラム対象変数個数

表 5 に福岡市と春日市の概要及び同定プログラ

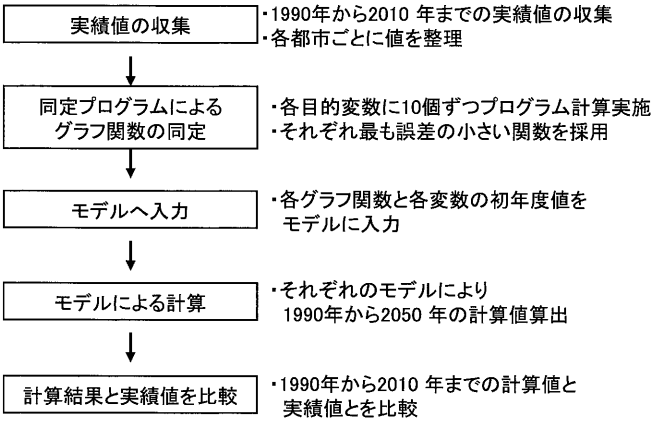

図 6 精度検証のフロー

表 4 MAPE 値による予測精度判断の基準

MAPE 値	予測精度
10%未満	非常に正確
10%以上20%未満	正確
20%以上50%未満	普通
50%以上	不正確

表 5 対象都市の概要・プログラム対象変数個数

	福岡市	春日市
人口[万人]	155.0	11.1
面積[㎢]	343.4	14.2
人口密度[人/㎢]	4513.3	7817.1
同定プログラム対象目的変数個数[個]	68	65

表 3 各変数収集元の統計データ一覧

セクタ	実測値名	算出方法	統計
A人口	総人口	統計から直接引用	国勢調査
	年少人口	統計から直接引用	国勢調査
	生産年齢人口	統計から直接引用	国勢調査
	高齢人口	統計から直接引用	国勢調査
	総出生数	統計から直接引用	国勢調査
	総死亡数	統計から直接引用	国勢調査
	総移動数	統計から直接引用	国勢調査
B世帯数	若年単独世帯数(世帯率)	統計から算出	国勢調査
	高齢単独世帯数(世帯率)	統計から算出	国勢調査
	若年夫婦世帯数(世帯率)	統計から算出	国勢調査
	高齢夫婦世帯数(世帯率)	統計から算出	国勢調査
	その他世帯数	総世帯数-ほか全世帯数合計	国勢調査
	総世帯数	統計から直接引用	国勢調査
	若年単独戸建居住比率	統計から算出	国勢調査
	若年夫婦戸建居住比率	統計から算出	国勢調査
	高齢単独戸建居住比率	統計から算出	国勢調査
	高齢夫婦戸建居住比率	統計から算出	国勢調査
	その他戸建居住比率	統計から算出	国勢調査
C従業者	第1次産業従業者数	総従業者-(2次+3次)	国勢調査
	第2次産業従業者数	統計から直接引用	国勢調査
	第3次産業従業者数	統計から直接引用	国勢調査
	総従業者数	統計から直接引用	国勢調査
D土地	住宅用地	統計から直接引用	固定資産概要調書
	商業用地	統計から直接引用	固定資産概要調書
	道路面積	統計から直接引用	公共施設状況調
	農業地面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
	林業地面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
E財政	市内総生産	統計から直接引用	市町村民経済計算
	一人当たり市民所得	統計から直接引用	市町村民経済計算
F製造業	製造品出荷額	統計から直接引用	工業統計調査+福岡県統計年鑑
	製造業延床面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
	製造業着工床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	製造業解体床面積	延床—着工	
H戸建住宅	戸建住宅着工	統計から算出	住宅・土地統計調査
	戸建住宅総戸数	統計から直接引用	住宅・土地統計調査
	戸建住宅解体	統計から算出	住宅・土地統計調査
I集合住宅	集合住宅着工	統計から算出	住宅・土地統計調査
	集合住宅総戸数	統計から直接引用	住宅・土地統計調査
	集合住宅解体	統計から算出	住宅・土地統計調査

セクタ	実測値名	算出方法	統計
J事務所・店舗・百貨店	事務所・店舗延床面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
	事務所・店舗着工床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	事務所・店舗解体床面積	延床面積—着工面積	
K病院・ホテル	病院・ホテル着工床面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
	病院・ホテル延床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	病院・ホテル解体床面積	延床面積—着工面積	
Lその他	その他着工床面積	統計から直接引用	固定資産概要調書 ＋公共施設状況調
	その他延床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	その他解体床面積	延床面積—着工面積	
M木造業務	木造業務延床面積	統計から直接引用	固定資産概要調書
	木造業務着工床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	木造業務解体床面積	延床面積—着工面積	
N学校（幼稚園-高校）	初等教育延床面積	統計から直接引用	学校基本調査 ＋文部統計要覧
	初等教育着工床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	初等教育解体床面積	延床面積—着工面積	
O高等学校（大学）	高等教育延床面積	統計から直接引用	学校基本調査 ＋文部統計要覧
	高等教育着工床面積	統計から直接引用	建築着工統計年報
	高等教育解体床面積	延床面積—着工面積	
P旅客人Km	乗用車	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋自動車輸送年報+国勢調査
	バス	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋自動車輸送年報+国勢調査
	鉄道	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋鉄道輸送年報+国勢調査
	航空	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋航空輸送年報+国勢調査
Q貨物トンKm	自家用貨物車	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋自動車輸送年報+国勢調査
	営業用貨物車	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋自動車輸送年報+国勢調査
	鉄道	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋鉄道輸送年報+国勢調査
	船舶	統計から算出	エネルギー・経済統計要覧 ＋港湾統計+国勢調査
R農林水産業	農業生産額	統計から算出	生産農業所得統計
	林業生産額	統計から算出	生産林業所得統計
	漁業生産額	統計から算出	海面漁業生産統計調査

ムの対象変数の個数を示す．これまでの研究で福岡市のモデルを作成してきたが，大規模都市のため各変数の変化が緩やかでグラフ関数を合わせやすいという特徴があった．そこで変数の変化が大きい規模の異なる都市として春日市のモデルを作成し，同定プログラムの検証を行った．春日市は空港がなく海に面していないため，航空旅客輸送量・船舶貨物輸送量・漁業生産額はモデルに含めていない．

4.3 CO_2排出量

両モデルのCO_2排出量のMAPEを計算する．前述の様に本研究のCO_2排出量の算出はモデルで計算した活動量にCO_2排出原単位を掛け合わせて行っている．そのため原単位の値が大きければ活動量の誤差がCO_2排出量の誤差となって現れる．

まずは，部門別CO_2排出量の誤差を検証し，同定プログラムを用いて作成したモデルによるCO_2排出量の計算精度を確認する．

福岡市・春日市それぞれの部門ごとのCO_2排出量のMAPEを図7に示す．ここでは民生部門を家庭部門と業務部門に分け計4部門のCO_2排出量のMAPEを計算した．春日市の産業部門CO_2排出量を除きMAPEは10%未満と高い精度を示している．

春日市の産業部門CO_2排出量のMAPEはやや大きい．産業部門に含まれている業務建築の着工・解体時のCO_2排出量の誤差が大きいことが原因である．しかし春日市の総CO_2排出量に占める産業部門の割合は小さい．そのため春日市の総CO_2排出量のMAPEは3.0%と非常に高い精度を示している．

続いて両都市の部門別CO_2排出量の推移について計算精度を検証する．ここではCO_2排出量の長期的な推移をモデルが捉えられているかを検証する．

図8に福岡市の1990年から2010年までの部門別CO_2排出量の計算値と実績値との比較を示す．民生家庭・民生業務・産業部門のCO_2排出量はどの年においても計算値が実績値をよく捉えている．運輸部門のCO_2排出量の計算値は1995年以降実績値より少し小さいが全体の傾向は捉えている．計算値が小さい主な原因はモデル内の旅客航空輸送量の計算値が実績値より小さいためである．

図9に福岡市の1990年から2010年までの部門別CO_2排出量の計算値と実績値との比較を示す．産業部門の2000年付近のCO_2排出量の計算値が実績値より少し小さいが，全体ではどの部門のCO_2排出量の計算値も実績値をよく捉えている．

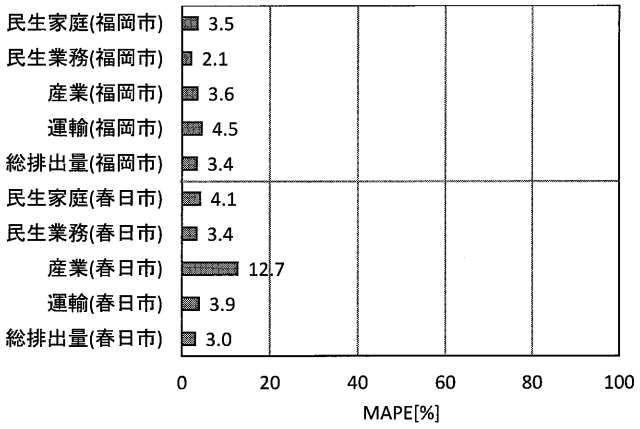

図7 MAPE一覧(CO_2排出量)

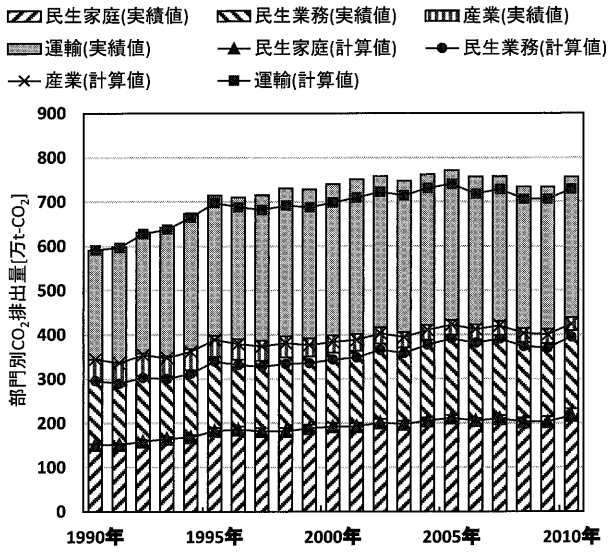

図8 部門別CO_2排出量の比較結果(福岡市)

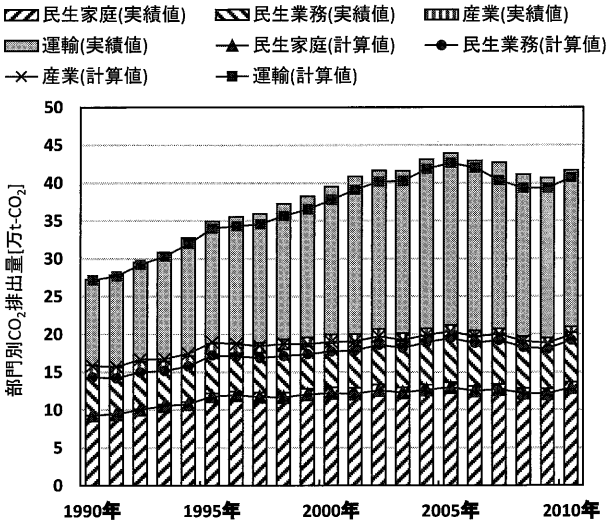

図9 部門別CO_2排出量の比較結果(春日市)

4.4 活動量(福岡市モデル)

前節で CO_2 排出量の精度は確認した．本節では，両モデルにおける活動量の精度検証を行う．福岡市・春日市モデルそれぞれの全活動量について計算値の MAPE, および主要活動量計算値と実績値との年ごとの比較から精度を検証する．

福岡市モデルの各目的変数の MAPE を図 10 に示す．モデルのすべての変数で MAPE50%未満を満たしているため，予測精度判断の基準に照らせば本モデルの計算値は有効である．よって福岡市モデルにおいては作成した同定プログラムによるグラフ関数の精度を確認できた．

全体的には着工床面積や解体戸数等，モデル内の各フロー値の MAPE が大きい．これはフローの場合，値の増減が激しいため，プログラムでは推移を平準化したものをたどるようにグラフ関数が同定されることが理由である．特に集合住宅解体戸数は MAPE が 48.8 と大きいが，これは解体戸数の実績値が 1990 年の 6953 戸から 2010 年の 769 戸(1990 年比 11.1%)へと指数関数的に減少しているため，その大きな変化をプログラムが捉えられていないことが理由である．フロー値におけるグラフ関数の同定においては長期スパンでの推移を捉えるようになるため，長期スパンで見ればストック値の計算精度は保たれている．現に，住宅戸数や延床面積といったストック値はすべての変数の MAPE が 10%以下と非常に高い精度を示している．

続いて福岡市における主要変数の推移について計算精度を検証する．本報では CO_2 排出量算出に直接関係する 6 つの活動量(総人口，総世帯数，業務建築延床面積，旅客輸送量，貨物輸送量，第一次・二次産業生産額)についてモデル計算値と実績値の 1990～2010 年間の比較，及び 2010 年以降の将来推計値を記載する．

総人口の比較及び将来推計値を図 11 に示す．総人口は計算値が各年の実績値をよく捉えており，将来推計においても計算値が安定している．総世帯数の比較及び将来推計値を図 12 に示す．計算値は実績値より多少小さくなっているが，傾向は捉えており，将来推計においても計算値が安定している．民生業務部門の延床面積の比較及び将来推計値を図 13 に示す．前述のとおり，ストック値はどの業種

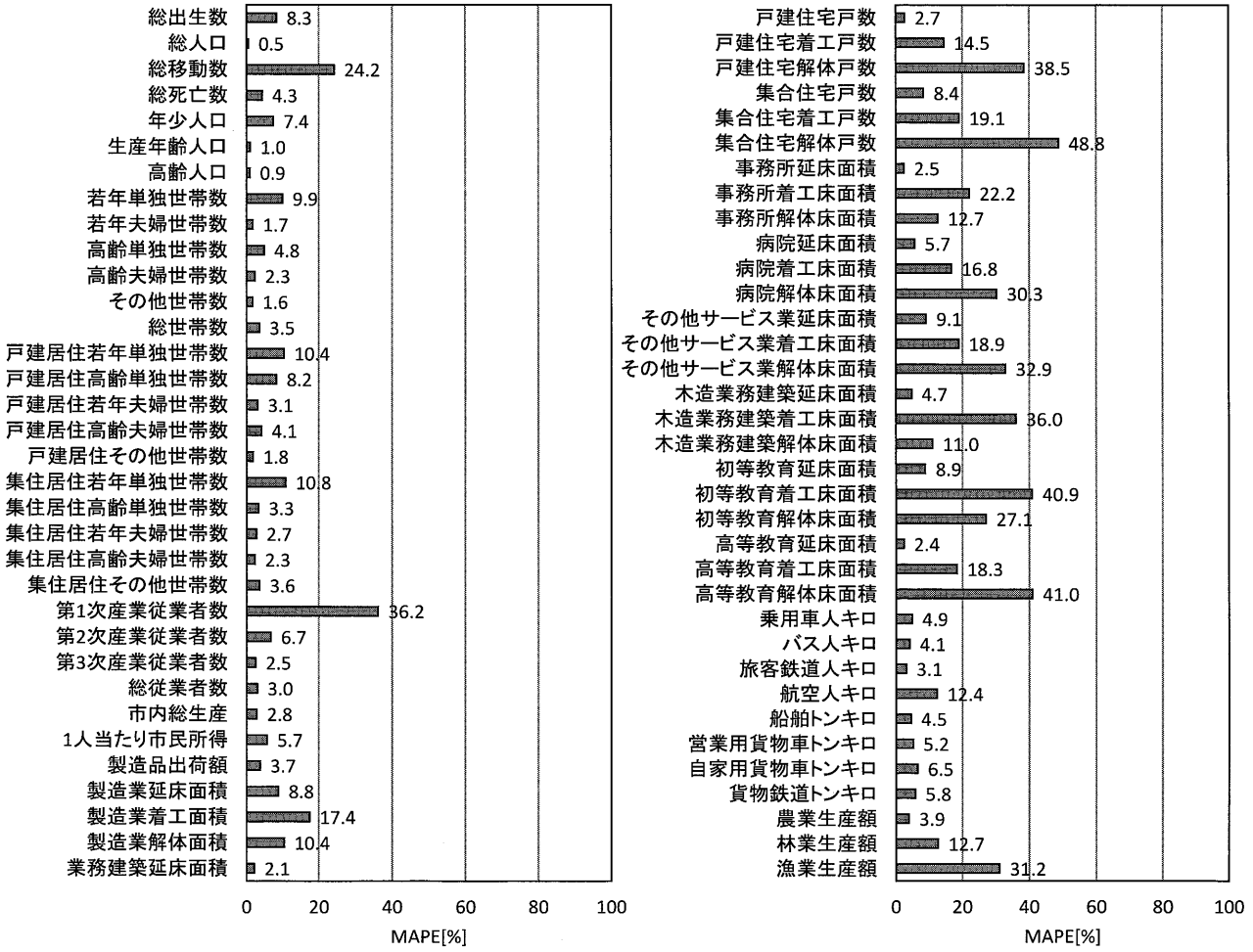

図 10 MAPE 一覧(福岡市モデル)

もよく実績値を捉えており，業務建築延床面積においても同様である．旅客部門と貨物部門の輸送量の比較及び将来推計値をそれぞれ図 14, 図 15 に示す．どちらも実績値よりも計算値が小さい年があり，特に旅客輸送量は計算値のずれが大きいが実績値の傾向は捉えている．旅客輸送量の 2000 年付近における計算値が小さい主な原因は，相関が正の説明変数の値が実績値よりも小さいことである．グラフ関数の同定時には実績値を入力しているが，モデル全体の精度検証では各説明変数が別のセクタで目的変数として計算されるため，1 つのセクタでの誤差が別のセクタに波及する．福岡市モデルにおける旅客輸送量の説明変数のうち正の相関があるものは一人当たり市民所得と総従業者数であるが，一人当たり市民所得の 1995 年以降における計算値が実績値より小さいため，旅客輸送量が小さく計算されている．将来推計値は両部門とも計算値が安定している．第 1 次・2 次産業合計生産額の比較及び将来推計値を図 16 に示す．計算値はいくつかの年で実績値とズレがあるものの，実績値の傾向を捉えている．

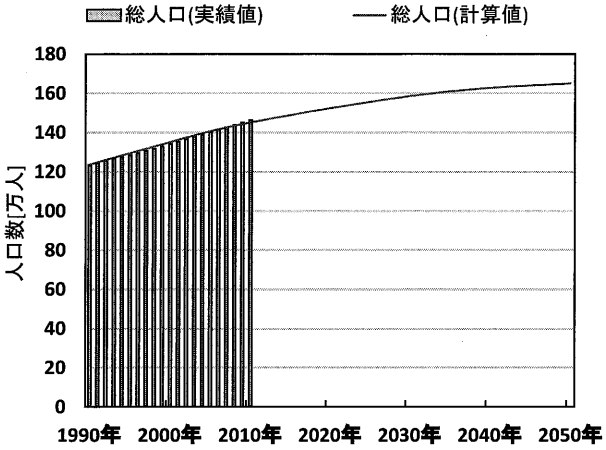

図 11　総人口の比較結果(福岡市)

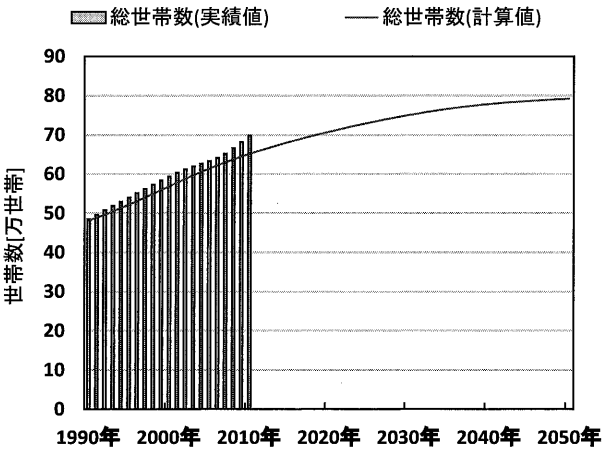

図 12　総世帯数の比較結果(福岡市)

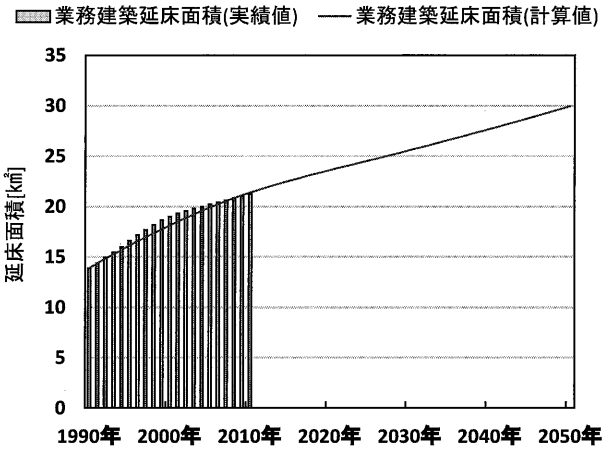

図 13　業務建築延床面積の比較結果(福岡市)

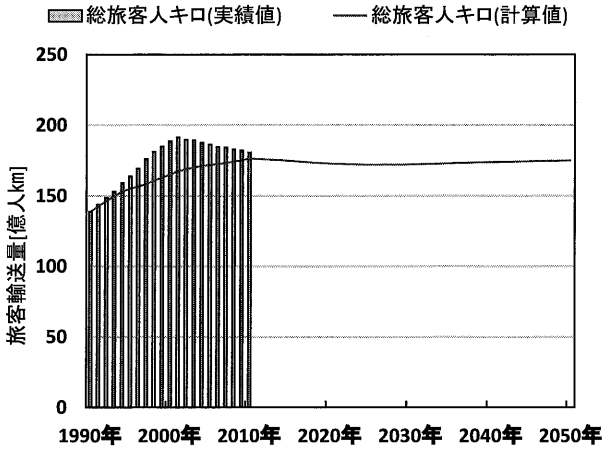

図 14　旅客輸送量の比較結果(福岡市)

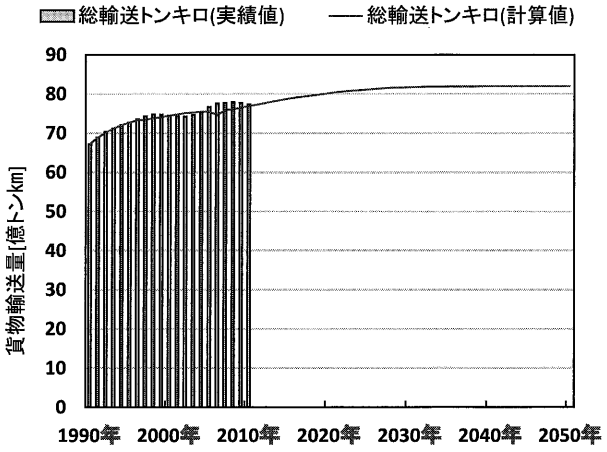

図 15　貨物輸送量の比較結果(福岡市)

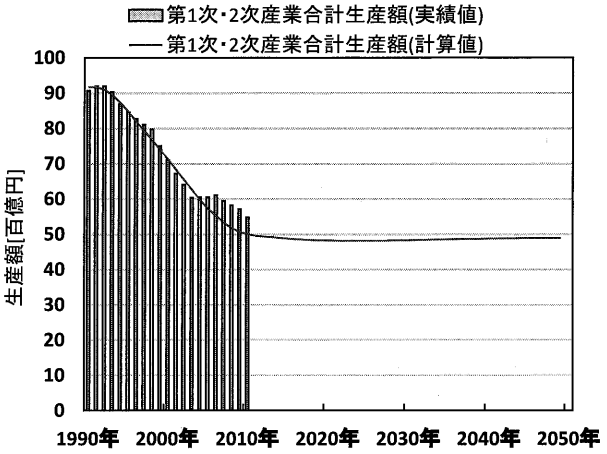

図 16　第 1 次・2 次産業合計生産額の比較結果(福岡市)

4.5 活動量(春日市モデル)

春日市モデルの各目的変数の MAPE を図 17 に示す．総移動数・製造業着工面積といったフロー変数の MAPE は 50%以上と大きいが，それらのストック変数(総人口・製造業延床面積等)の MAPE はすべて 10%以下と高い精度を示している．

フロー変数の MAPE が大きいにも関わらず，そのストック変数の MAPE が小さい理由は 2 つある．

1 つは，ストック変数に対するフロー変数の割合が小さいことである．特に春日市ではほとんどのフロー変数が 1990 年から 2010 年にかけて大きく減少しており，ストック変数に与える影響が年々小さくなっている．例として高等教育建築を挙げると，この解体床面積の MAPE は 2818.1%と極めて大きいが，延床面積の MAPE は 4.1%と小さい．解体床面積の実績値が 1990 年の 4556.5 ㎡(延床面積との比:6.6%)から 2010 年の 0.2 ㎡(延床面積との比:3.0×10^{-4}%)と大きく減少している．

もう 1 つは，春日市のフロー変数値は年ごとに激しく増減しているが，プログラムでは推移の増減の中間をたどるようにグラフ関数が同定されることである．数年単位で見ればフロー変数の誤差が相殺されストック値は実績値と一致する．

続いて春日市モデルの主要変数の推移について計算精度を検証する．福岡市モデルと同様に，CO_2 排出量算出に直接関係する活動量の都市モデルによる計算値と実績値の比較，及び将来推計値を示す．

総人口の比較及び将来推計値を図 18 に示す．総人口は計算値が各年の実績値をよく捉えており，将来推計においても計算値が安定している．総世帯数の比較及び将来推計値を図 19 に示す．計算値は実績値より小さくなっているが傾向は捉えており，将来推計においても計算値が安定している．民生業務部門の延床面積の比較及び将来推計値を図 20 に示す．どの業種の延床面積も計算値が実績値を捉えているため，業務建築延床面積の計算値は実績値を捉えている．旅客部門と貨物部門の輸送量の比較及び将来推計値をそれぞれ図 21，図 22 に示す．旅客輸送量は計算値が実績値の傾向を捉えている．貨物輸送量の計算値は 2010 年付近の急激な減少には対応しきれていないが全体的な傾向は捉えている．第 1 次・2 次産業合計生産額の比較及び将来推計値を図

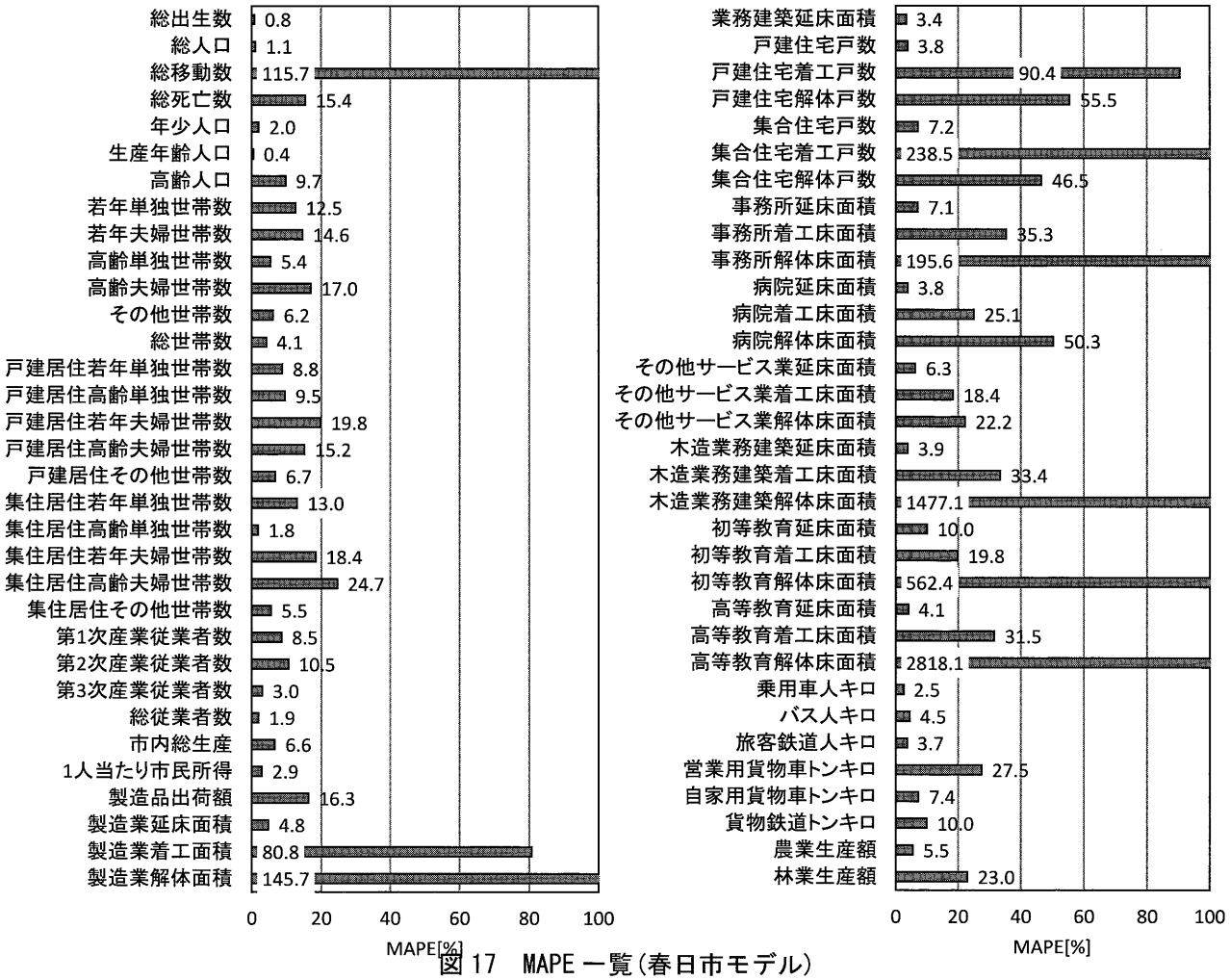

図 17 MAPE 一覧(春日市モデル)

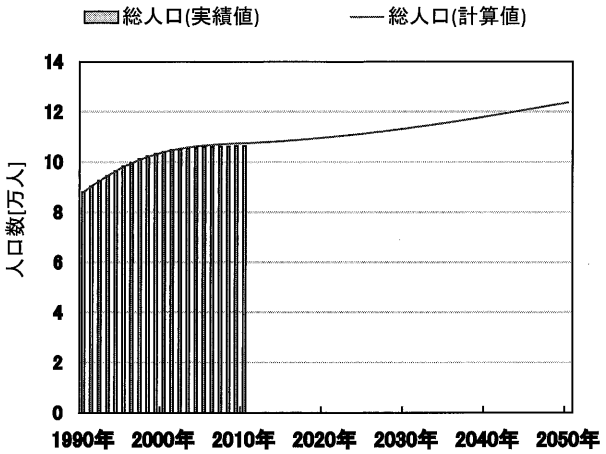

図 18　総人口の比較結果(春日市)

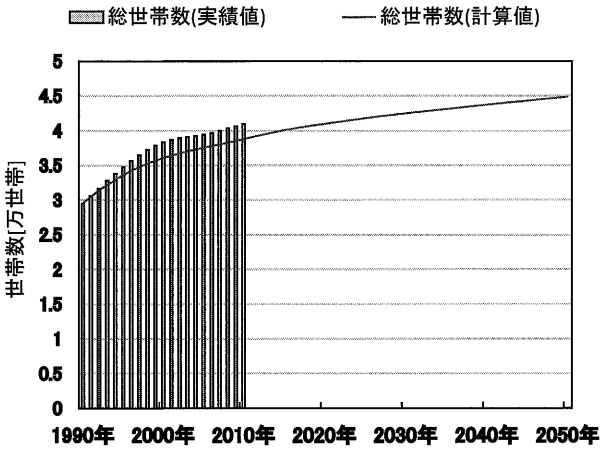

図 19　総世帯数の比較結果(春日市)

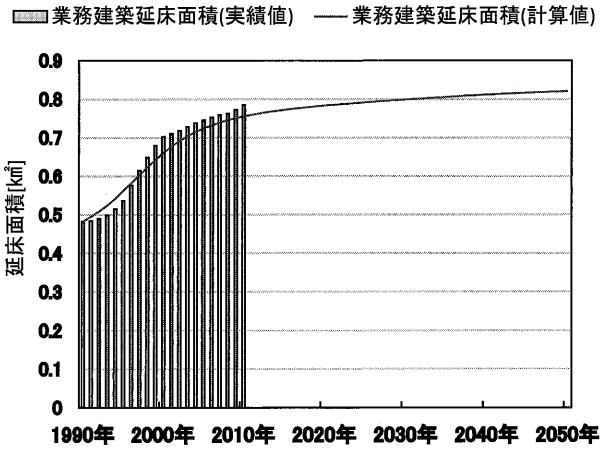

図 20　業務建築延床面積の比較結果(春日市)

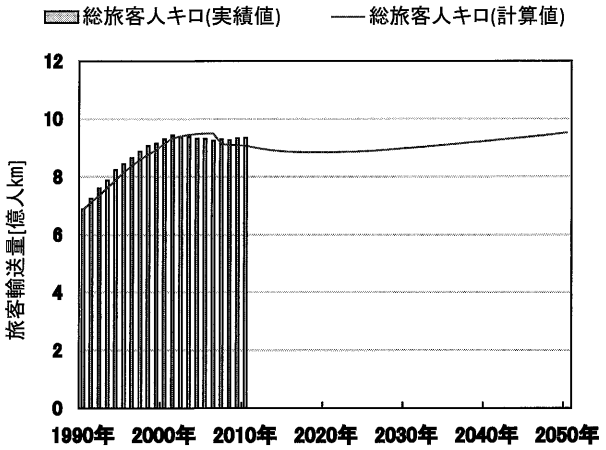

図 21　旅客輸送量の比較結果(春日市)

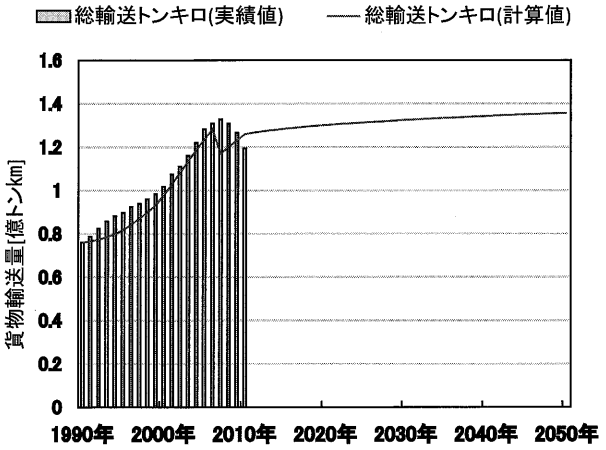

図 22　貨物輸送量の比較結果(春日市)

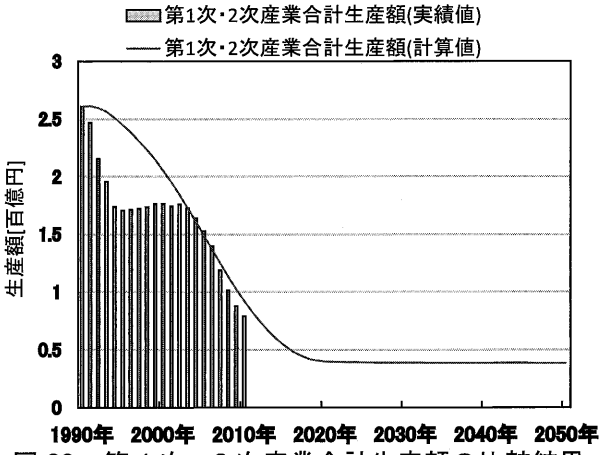

図 23　第 1 次・2 次産業合計生産額の比較結果(春日市)

23 に示す．1990 年～1995 年の急激な落ち込みは捕捉できていないが，全体的な推移は捉えている．

5.　おわりに

本報では，都市モデル内のグラフ関数のパラメータ同定プログラムの開発を行い，モデル作成作業の簡略化を図った．また開発したプログラムを用いて福岡市・春日市モデルを作成し，その計算値と実績値との比較から同定プログラムの精度検証を行った．

その結果，実績値の変動が大きい期間においては誤差が生じていたが，実績値と比べるとある程度傾向は捉えており，プログラムの精度は確認された．更なる精度確認にはより大規模，あるいは小規模の都市モデル作成による検証が必要である．

謝辞　本研究は JSPS　科研費 26289201　の助成を受けたものです．記して謝意を表します．

【参考文献】

1)　上野貴広，仁科裕貴，住吉大輔，赤司泰義，高口洋人：都市環境負荷予測シミュレータの開発―CO2 排出原単位モデルの構築とモデルの汎用化に向けた改良―，都市・建築学研究(九州大学大学院人間環境学研究院紀要)，第 28 号，pp.47-56，2015 年 7 月

2)　Lewis D.D：Industrial and Business Forecasting Method, Butterworths, London, p.42, 1982 年.

（受理：平成28年11月10日）