都市における住宅の消費エネルギー推計のための世帯推計モデル およびエネルギーマップに関する基礎的研究

A STUDY ON HOUSEHOLD ESTIMATION MODEL FOR PREDICTING ENERGY CONSUMPTION OF DWELLINGS AND ENERGY MAP IN AN URBAN AREA

木村 竜士*, 松本 博**

Ryushi KIMURA and Hiroshi MATSUMOTO

For estimating the energy consumption of a city that consists of numerous different sizes and types of building, it is necessary to estimate the distribution of the energy consumption of buildings in the urban area. The objective of this study is to estimate the household number and household composition of 22 patterns of household life cycle matrix using the co-hort factor method based on the population and regional econometric models. The case study was done for Toyohashi city, Japan. The energy consumption in the residential area was expected to be decreased for 50 years due to the decrease of population and high efficient energy supply system. The estimated household number was determined by the regional econometric model. The population would have decreased by approximately 20% compared with the present population in the central area around Toyohashi station and the population in suburb area would have slightly increased by 1.2%. The total energy consumption of the energy efficient house was expected to be decreased by 17.5% compared with the present level.

Keywords: *Energy consumption, Household estimation model, Co-hort factor Method, Regional econometric model, Energy map*
エネルギー消費, 世帯推計モデル, コーホート要因法, 地域計量経済モデル, エネルギーマップ

1. はじめに

未来の持続可能な社会に向けて生活の質を低下させることなくエネルギー、天然資源および環境負荷を低減するためのシナリオを提示するためには、都市・建築における現在のエネルギーフローを調査・分析し、将来の動向を予測・評価することが極めて重要である。建物単体や建築材料のライフサイクル・アセスメント (Life Cycle Assessment、LCA) に関しては、既に様々な評価ツールやそれを利用したケーススタディが数多くなされている。予測に関しては、人口的、経済・社会的、環境的および地理的な様々な要因が個々の分野で詳細な予測シミュレーションが行われている。しかし、実際のエネルギー消費動向は、それら全ての要因が複雑に相互に影響し合い変動しているため、それらを包括的に扱う予測システムを構築しなければならない。そのモデルにより予測を行い、その結果を元に総合的な評価をする必要がある。

特に住宅は、業務ビル、大規模商業建築や工場建築と比べ、人口動向、経済動向や立地条件に影響を受け空間的な変動が大きい。そのため、その因果関係を説明する方程式を立て、推計された世帯エネルギー分布を空間的に把握することにより、住宅の集中立地型お

よび分散立地型などの立地条件に適した省エネルギー対策が行え、地域冷暖房システム導入の検討など改善案をより具体的に提案することが出来る。

経済モデルによる環境負荷予測を行った研究事例として、藤野ら¹⁾は、多様なアジア地域における、将来の各国レベルの経済活動量、エネルギー需給・水需給・環境汚染物質排出量等を予測するため、一般均衡分析による過去のトレンド分析に主眼をおいたAIM-Trendモデルを開発した。しかし、一般均衡分析は、設定された各産業の財の価格への影響度を評価する場合には優れているが、出生率などの価格による代替が難しい変数を設定し、地域固有の経済動向と関連する方程式を立てることは難しい。

そこで、地域の統計データによる経済動向が反映される経済モデルとして、地域計量経済モデルがある。地域計量経済モデルによる研究事例として、山口ら^{2), 3)}は、多地域連動型計量経済モデルにより都市システムの構築や自動車交通による環境負荷や経済に与える影響を評価した。これらの地域計量経済モデルは、対象地域の経済データのみならず、人口や土地面積などの地域の固有統計データを基に地域固有の構造方程式を構築・分析している。

* 豊橋技術科学大学大学院環境生命工学専攻
博士課程・修士(工学)

** 豊橋技術科学大学建設工学 教授・工博

Graduate Student, Life and Environmental Engineering, Graduate School of Toyohashi
University of Technology, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi University of Technology,
Dr. Eng.

エネルギーマップ作成に関する研究事例として、酒井ら⁴⁾、草刈ら⁵⁾がそれぞれ地理情報システム（GIS）により、500m角メッシュ、250m角メッシュにより対象地域をメッシュ化し、地域エネルギー消費量の空間的分布を提示し分析を行った。しかし、その精度のメッシュ角の場合、メッシュ内に存在する建物の推計を正確に行うことができないため、さらに細かいメッシュにより都市を再現する必要がある。

筆者ら⁶⁾は、都市のエネルギーフローモデルの開発にあたり、システムダイナミクス法を用いて、ローレンスラインマクロ経済モデル、コーホート変化率法を用いた人口推計モデルを開発し、それらのモデルから世帯推計を行い、生活スケジュール⁷⁾およびライフサイクルマトリクス⁸⁾を考慮した4パターンの家族構成別世帯消費エネルギー量を世帯数に掛けることで豊橋市全域の住宅部門における消費エネルギー量を算出し、さらに豊橋市のオフィス建築における消費エネルギー量を、産業連関表を用いて、物量表をエネルギー原単位に変換することで算出した⁹⁾。

本研究は、人口動向、経済動向や地図データを包括的に扱う都市におけるエネルギーフローの新しい予測システムを提案し、世帯構成員の変化を考慮したコーホート要因法による人口推計モデルと地域計量経済モデルから世帯消費エネルギー量の長期予測を行い、そのエネルギー量を空間的に把握するために10m角グリッドというこれまでの関連研究にない詳細なエネルギーマップモデルに反映させることで世帯の変動に伴うエネルギー分布の長期変動を把握することが出来るシステムモデルの開発を目的としている。

2. システムモデルの概要

住宅エネルギー消費量予測のためのシステムモデルの概要を図1に示す。都市の住宅部門におけるエネルギーマップを最終的に出力するために、住宅の世帯構成別エネルギー消費量22パターンを算出し、地域計量経済モデルにより新築される世帯数を、人口推計モデルにより既存世帯数の増減をそれぞれ算出し、対象地域内の世帯総数を得る。また、計量経済モデルと人口推計モデル間のインターフェースとして、

図1 システムモデル概要

地域計量経済モデルで推計された合計特殊出生率^{注1)}、転入・転出入人口が人口推計モデルへフィードバックされ、人口推計モデルで推計された人口や世帯数が計量経済モデルの変数としてフィードバックされる。それをExcel（Microsoft社製）で作成した10m角メッシュの詳細な地理データに消費エネルギー量別にプロットすることで、推計年度毎の消費エネルギー量の動向を平面的に把握できる。特に住宅地は、集中立地型もしくは分散立地型の違いによる消費エネルギー分布があるため、それをエネルギーマップにより把握することが出来る。

図2 コーホート要因法による世帯推計

対象地域は、愛知県豊橋市の豊橋駅周辺地域(24,077 人(9160 戸))とした。選定理由として、地域計量経済モデルを作成するに当り、必要な一次統計データが比較的得やすい最小限の都市規模であるため、それ以上の都市規模に対しても適用可能と考えられる。

3. コーホート要因法を用いた世帯推計

3.1 モデルの概要

コーホート要因法のフローチャートを図2に示す。本来、コーホート要因法は、人口増減を決定する要因である出生、死亡、社会移動を

表1 人口推計に用いる計算条件

男性	年齢(5歳階級)	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29
	未婚率(%)	100.0	100.0	100.0	99.2	91.3	64.7
	有配偶率(%)	0.0	0.0	0.0	0.8	8.5	34.0
	死別率(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	離別率(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.3
	死亡率(%)	0.1	0.1	0.3	0.4	3.4	0.4
	大学進学率(%)	-	-	-	78.7	-	-
	年齢(5歳階級)	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59
	未婚率(%)	39.2	23.8	17.9	14.2	10.2	5.6
	有配偶率(%)	58.5	71.7	80.0	80.0	82.9	86.7
	死別率(%)	0.1	0.1	0.3	0.6	1.2	2.0
	離別率(%)	2.2	3.1	3.6	4.1	4.9	4.6
	死亡率(%)	0.5	0.7	1.2	2.0	3.4	5.3
	大学進学率(%)	-	-	-	-	-	-
	年齢(5歳階級)	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-89
	未婚率(%)	3.3	2.2	1.5	1.0	0.7	0.6
	有配偶率(%)	88.7	88.4	86.9	82.5	77.7	59.7
	死別率(%)	3.3	5.2	8.6	13.9	18.9	37.2
	離別率(%)	4.0	3.5	2.2	1.5	1.6	1.3
	死亡率(%)	8.8	13.7	21.2	34.2	50.9	100.0
	大学進学率(%)	-	-	-	-	-	-
女性	年齢(5歳階級)	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29
	未婚率(%)	100.0	100.0	100.0	98.2	84.2	46.4
	有配偶率(%)	0.0	0.0	0.0	1.7	14.9	50.8
	死別率(%)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	離別率(%)	0.0	0.0	0.0	0.1	0.8	2.6
	死亡率(%)	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2
	大学進学率(%)	-	-	-	69.1	-	-
	合計特殊出生率	-	-	-	2.8	18.9	44.9
	年齢(5歳階級)	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59
	未婚率(%)	20.8	10.1	6.6	4.8	4.0	3.8
	有配偶率(%)	74.6	83.5	85.9	85.3	84.5	81.5
	死別率(%)	0.3	0.5	1.0	2.2	4.2	7.5
	離別率(%)	4.2	5.5	6.0	7.3	6.8	6.7
	死亡率(%)	0.3	0.4	0.7	1.2	1.6	2.4
	大学進学率(%)	-	-	-	-	-	-
	合計特殊出生率	43.3	16.8	2.3	0.1	-	-
	年齢(5歳階級)	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-89
	未婚率(%)	3.4	3.8	4.0	3.9	2.8	1.4
	有配偶率(%)	77.2	68.5	56.0	35.9	20.5	8.2
	死別率(%)	13.5	22.1	34.4	54.2	71.4	86.5
	離別率(%)	5.4	4.8	4.7	4.7	3.3	2.1
	死亡率(%)	4.1	6.4	11.7	21.3	36.3	100.0
	大学進学率(%)	-	-	-	-	-	-
	合計特殊出生率	-	-	-	-	-	-

平成12年度愛知統計年鑑参照

図3 コーホート要因法による人口推計結果

それぞれ個別に推計し、その結果を合成して将来における人口を推計する方法である。しかし、5 年齢層毎の人口をひとまとまりとして扱うため、世帯個々のライフサイクルを考慮した世帯構成人員の推計を行うことが出来ない。そこで本研究では、コーホート要因法の手法を応用し、一世帯毎に世帯人員が5 期毎に成長し、自然増の要因における世帯構成が推移するように年齢層別性別にそれぞれ生存率、死亡率、結婚率、離婚率および出生率を掛けることで、次期の既存の住宅における世帯人員構成が推計できるようにした。計算条件を表1 に示す。

(t+5) 期での出生数を推計するため、合計特殊出生率に15-49 歳までの出産可能女性人口を掛けて算出する。なお、合計特殊出生率は、計量経済モデルより推計される変数である。(t+5) 期の総人口は、t 期での生存者数と(t+5) 期の出生数の合計で算出される。結婚による転出・転入数は、世帯内で兄弟が結婚した場合、残りの未婚の兄弟は、転出すると仮定した。その場合、転出先は、重みにより決定するが、対象地域である駅周辺では、ドーナツ化現象を仮定し、全て他地域へ転出すると仮定している。また、生活スケジュールが変化するとエネルギー消費量も変化するため、15-19 歳層で進学率を考慮し、65 歳以上は、高齢者の生活スケジュールになるようにした。

3.2 人口推計結果

人口推計結果を図3 に示す。初期値では、24,077 人であったが、50 年後では13,286 人と約45%減少している。また、少子高齢化を示す結果として、65 歳以上の年齢層の人口が50 年後では全体の約40%を占めている。その理由の一つとして、駅周辺の人口増減は、近年減少傾向にあるため、初期設定として、他地域からの世帯の転入を考慮していないため、他地域より高齢者が居住する割合が高くなった。

4. 計量経済モデル

4.1 モデル概要

モデルは、今期既存世帯数の推移、転入世帯数の推移および新着工床面積の推移を推計することが出来る。新築住宅供給棟数は、人口・世帯部門の変数である新着工床面積推計により推計される。なお、豊橋市の1 世帯当りの平均床面積は、約100 ㎡であるため、新着工床面積100 ㎡あたりで新築住宅が一棟供給されたものと仮定する。モデルに使用したサンプル期間は、1989-2002 年の14 年間である。推定法は直接最小2 乗法推定(OLS)を用いた。

推定式の有意性を判別するため、t 値を1.0 以上、決定係数及び自由度修正後決定係数を0.75 以上、DW(ダービンワトソン)比を1-3 以内、自由度(D F)を9 以上の式を採用した。豊橋市計量経済モデルで使用した推計式を表2 に示す。変数20 個(内生変数12 個、加工変数3 個、外生変数5 個)を使用し、世帯ブロック、人口ブロック、財政ブロック、地価ブロックに分類して、モデルを構築した。構造方程式の因果序列図を図4 に変数記号表を表3 に示す。

人口ブロックは、社会動態(転入人口関数、転出人口関数)、自然

動態(合計特殊出生率関数)に関する5変数である。世帯ブロックは、市内全世帯(市全体世帯関数)、対象地域内世帯(駅周辺世帯関数)、住宅供給(新着工床面積関数)に関する3変数である。財政ブロックは、歳入関連4変数(純家計所得関数、歳入関数、税収関数、豊橋市内総生産関数)、歳出関連1変数(歳出関数)である。地価ブロックは、地価(駅周辺地価関数)に関する1変数である。また、構造方程式内の外生変数は、コーホート要因法により推計される豊橋市人口、愛知県人口、全国市街地化指数、愛知県民所得、タイムトレンドの5

表2 計量経済モデルによる推計式

世帯ブロック			
駅周辺世帯関数 NF1	推計式	(NF1) = 7736.6081* const.+8.366D-02* (NF) +.20710103* (NRt1) -1527.9125* (LP1r) ₋₁	
	t 値 判別値	< 6.063> < 7.688> < 1.689> < -3.237> RR=0.9390 RRB=0.9187 SD= 225.20305 DW=1.389 DF= 9 MAPE= 0.91	
市全体世帯関数 NF	推計式	(NF) = -3493375.4* const. +6.491D-03* (YTt) ₋₁ +1804.8384* (T)	
	t 値 判別値	< -17.692> < 2.302> < 17.951> RR=0.9968 RRB=0.9962 SD= 489.12616 DW=1.441 DF= 10 MAPE= 0.32	
新着工床面積関数 NFna	推計式	(NFna) = 162976.52* const. +12.387611* (DNRq) +151030.83* (LPr)	
	t 値 判別値	< 3.914> < 1.426> < 3.060> RR=0.7879 RRB=0.7455 SD= 21952.372 DW=1.401 DF= 10 MAPE= 4.03	
人口ブロック			
転入人口関数 NI	推計式	(NI) = -79591.240* const. +8.864D-04* (YT) ₋₁ +3.695D-02* (NR) ₋₁ -.51470452* (NRt) ₋₁	
	t 値 判別値	< -3.030> < 5.366> < 3.143> < -3.128> RR=0.8755 RRB=0.8340 SD= 299.94154 DW=1.765 DF= 9 MAPE= 1.43	
転出人口関数 NO	推計式	(NO) = 2278.6423* const. +.95137882* (NO) ₋₁ -1.391D-02* (GE) ₋₁	
	t 値 判別値	< 4.436> < 9.160> < -1.124> RR=0.9764 RRB=0.9717 SD= 187.62305 DW=1.418 DF= 10 MAPE= 1.04	
合計特殊出生率関数 NBr	推計式	(NBr) = 26.510538* const. -1.396D-08* (YT) ₋₁ -1.239D-02* (T)	
	t 値 判別値	< 5.291> < -1.862> < -4.822> RR=0.8795 RRB=0.8554 SD= 2.534D-02 DW=2.594 DF= 10 MAPE= 1.19	
財政ブロック			
家計収入関数 RETA (歳入-税収)	推計式	(RETA) = -1490901.5* const. +9.438D-02* (RETA) ₋₁ +1543252.8* (DNR)	
	t 値 判別値	< -3.909> < 1.075> < 3.994> RR=0.7695 RRB=0.7234 SD= 3432.4878 DW=1.535 DF= 10 MAPE= 6.16	
歳出関数 GE	推計式	(GE) = 18418.359* const. +.99243666* (REE) -5.960D-02* (NRt)	
	t 値 判別値	< 1.952> < 23.791> < -1.681> RR=0.9931 RRB=0.9917 SD= 709.72486 DW=1.807 DF= 10 MAPE= 0.51	
税収関数 TA	推計式	(TA) = 10572.560* const. +12988.038* (LPr) ₋₁ +.02864136* (YTt) ₋₁	
	t 値 判別値	< 1.081> < 3.158> < 6.045> RR=0.7999 RRB=0.7599 SD= 1553.8992 DW=1.615 DF= 10 MAPE= 1.87	
豊橋市民所得関数 YT t	推計式	(YTt) = -2561232.8* const. +9.5587599* (NRt) +1.766D-02* (YT)	
	t 値 判別値	< -6.182> < 6.734> < 1.152> RR=0.8950 RRB=0.8740 SD= 38791.836 DW=0.995 DF=10 MAPE= 2.479	
地価ブロック			
駅周辺地価関数 LP1r	推計式	(LP1r) = -.47426918* const. +.18757828* (LP1r) ₋₁ +.88603835* (LPr) ₋₁ +4.794D-07* (YTt) ₋₁	
	t 値 判別値	< -1.688> < 1.486> < 5.585> < 2.514> RR=0.9353 RRB=0.9138 SD= 3.676D-02 DW=1.923 DF= 9 MAPE= 1.71	
加工式		(DNRq) = (NRt) - (NRt) ₋₁	
		(DNR) = (NRt) ₋₁ / (NRt)	
		歳入 (REE) = (RETA) + (TA)	

※constは定数を表す。変数の添え字-lは、変数の一期ラグを表す。

RR: 決定係数 = 1 - (誤差変動/全変動)、RRB: 自由度修正後決定係数 = $\frac{1-(n-1)}{(n-k-1)}(1-RR)$ 、SD: 方程式の標準誤差 = $\frac{SSE}{(n-k-1)}$

DF: 自由度 = n - k - 1、DW: ダービンワトソン比 = $\frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$ 、MAPE: 絶対平均誤差率、t値 = $\frac{|X-m|}{\sqrt{\frac{U}{n}}}$

n: サンプル数、k: 説明変数の個数、X: 標本平均、m: 母平均、U: 不偏分散

変数である。なお、タイムトレンドは、初期値が1で、每期1だけ増分される線形成長トレンドを想定した変数として与えられる。豊橋市人口は、コーホート要因法より推計された値を用いる。愛知県人口は、人口問題研究所が行っているコーホート変化率法により簡易的に50年後の人口を行った。全国市街地化指数および愛知県民所得は、愛知県人口の変化率に連動する値とした。

4.2 構造方程式の説明

世帯ブロックの世帯数を表す基本式は以下の通りである。
$$世帯数 = f(社会要因, 経済要因, 周辺環境要因) \dots (1)$$

駅周辺世帯関数 NF1 は、豊橋市の人口 NF のシェア関数として説明できる。今後の豊橋市の地域計量経済モデルを拡張するにあたり、豊橋市内での他地域連動型モデルを作成する上で、NF1 は、豊橋市全体での人口推移に連動し、人口が決定されるため、これが周辺環境要因であるとみなすことが出来る。社会要因の一つである住宅環境効用は、地価を代理変数として用いることが出来る。そのため、駅周辺地価伸び率 LP1r は、社会要因とみなすことができる。経済要因としては、豊橋市民家計所得 YTt を代理変数として用いた。

コーホート要因法で推計された世帯数を基本的には採用するが、世帯の増減を補正する場合に用いる。駅周辺世帯関数は、地価が増加するにつれ、世帯数が減少する。これは、地価 LP1r が上昇した場合、駅周辺の地価価値が、商業ベースに転化することを意味している。
新着工床面積関数 NFna は、全国市街地地価指数を組み込むことで全国の社会動向を反映させた住宅供給がなされることを意味する。人口ブロックの基本的な式は以下の通りである。

$$今期人口(t+5) = 前期人口(t) + 自然人口動態 + 社会人口動態 \dots (2)$$

前期人口は、コーホート要因法より推計された人口を採用する。自然人口動態では、出生数を推計するために必要な合計特殊出生率をタイムトレンドと愛知県民所得より説明している。いずれも、負の要因として方程式に影響している。社会人口動態を表す式は以下の通りである。

$$社会流入 = f(人口規模, 経済要因) \dots (3)$$
$$社会流出 = f(経済要因, 定着傾向) \dots (4)$$

社会流入は、愛知県および豊橋市の人口動態と愛知県民所得により説明される。今期の豊橋市の転入人口は、前期の愛知県人口(NR)₋₁の増加に伴い増加にすが、前期の豊橋市人口(NR)₋₁が増加する場合は転入人口増加率が減少する方程式となった。これは、豊橋市が人口増加傾向にある場合、転入人口に制限がかかることを意味している。しかし、社会流入の方程式のt値から判断すると、愛知県の人口規模要因のほうが、豊橋市の人口規模要因より若干説明力を持っているため、結果的に愛知県の人口増加に伴い、転入人口が決定される。社会流出での定着傾向は、流出の一期ラグにより説明した。

財政ブロックは、歳入と歳出の両方から検討できるようになっている。全体的に制度式を用いて検討した。

$$個別歳入 = f(税源, 財源規模) \dots (5)$$
$$個別歳出 = f(行政需要, 財源規模) \dots (6)$$

歳入 REE は、家計所得と総税収入との合計であり、家計所得は、財源規模として、人口関連の変数を使用し、家計所得の1期ラグにより説明した。税収は、本来、市民税、不動産税やタバコ税などのその他税徴収金から成り立っているが、主として、市民税と不動産税から成り立っているため、市民税の代理変数として、市民所得 YTt、不動産税の代理変数として、地価変数 LP1r により推定した。

歳出関数は、行政需要を歳入 REE、財源規模の代理変数として人口変数を使用し、推定させた。

地価ブロックでの地価の付値の要因として式は、以下の通りである。
$$地価 = f(周辺地価, 社会要因) \dots (7)$$

対象地域の地価である駅周辺地価 LP1r は、前期の対象地価と全体の動向を表す全国市街地地価指数変数 LP1r と社会的要因の代理変数として、市民所得 YTt の動向により説明した。

図4 計量経済モデル因果序列図

表3 変数記号表

内生	内容	内生	内容	外生	内容
NI	転入 (人)	YTt	豊橋市民所得 (百万円)	NR	愛知県人口 (人)
NO	転出 (人)	GE	歳出総額 (百万円)	NRt	豊橋市人口 (人)
NBr	合計特殊出生率 (-)	REE	歳入総額 (百万円)	NF	豊橋市世帯総数 (戸)
NRt1	駅周辺人口 (人)	TA	税収総額 (百万円)	YT	愛知県民所得 (百万円)
NF1	駅周辺世帯数 (戸)	LP1r	駅周辺地価伸び率 (-)	LP1r	全国市街地地価指数伸び率 (-)
NFna	住宅新着工床面積 (㎡)			T	タイムトレンド (西暦年)

4.3 内挿シミュレーションによる検証

豊橋市計量経済モデル全体の適合結果を確認するため、推定期間の1989－2002年の全期間にわたって内挿シミュレーションを行った。検証の結果一覧を表4、表5に示す。

内挿シミュレーションの結果、全構造方程式の実現値とファイナルテスト値の相関係数Rは、0.87以上の値をとり、平均絶対誤差率MAPEは、全て10%以下であった。家計収入RETAのMAPEが、8.23%と他と比べて高い値を示しているが、決定係数が0.8以上確保されているため、問題は無い。全体的には、変数の符号も正しい説明がつき、豊橋市の社会構造を表現できていると判断した。

5. エネルギーマップの作成 エネルギーマップ作成のフローチャートを図5に示す。地図データをMicrosoft Excel上で10m角メッシュとしてVisual Basicにより作成し、地域計量経済モデル及びコーホート要因法を用いた人口推計モデルをエクセルマップに組み込むことにより、住宅のエネルギー推計の将来的な動向の把握を試みた。地域計量経済モデルは、統計量を基に、同時方程式により推計式を算出するため、得たい構造方程式の統計量がある場合、部分的な経済システムを再現することで推計式を得ることが容易である。また、コーホート要因法は、人口の社会増と自然増を切り離して推計できるため、各要因が計量経済モデルの構造方程式に組み込みやすい。エネルギーマップをExcelで作成することで、より汎用性のあるソフトの開発が可能である。

5.1 対象地域

対象地域は、豊橋市のJR豊橋駅周辺(北緯34°45'－34°46'、東経137°23'－137°24')の1.55km×1.85kmの範囲である。メッシュ

表4 ファイナルテスト結果の要約表

R/MAPE	1%以下	1-3%	3-5%	5-10%	計
0.97以上	4				4
0.95-0.97		1			1
0.90-0.95		3			3
0.9以下		2		1	3
合計	4	6		1	11

R: 実現値とファイナルテスト値の相関係数
MAPE: 平均絶対誤差率、誤差率(誤差/実現値)の絶対値の平均

表5 ファイナルテスト結果のまとめ

Name	R	Mean(Y)	Mean(YH)	RMS(e)	MAPE	MAPE(3)
NF1	0.9967	18321.54	18321.538	61.506	0.27	0.15
NF	0.9984	117053.1	117053.077	428.992	0.32	0.17
NFna	0.8876	363664.3	363664.308	19253.504	4.03	1.97
NI	0.9357	13908.54	13908.538	249.566	1.43	1.17
NO	0.9881	12477	12477.000	164.556	1.04	0.65
NBr	0.9378	1.443077	1.443	0.222	1.19	2.32
RETA	0.8772	44487.23	44487.231	3010.491	6.16	8.23
GE	0.9965	101446.9	101446.923	622.470	0.51	0.61
TA	0.8944	60509.62	60509.615	1362.860	1.87	1.27
LP1r	0.9671	1.378385	1.378	0.306	1.71	1.76
Ytt	0.9461	1258632	1258632.307	34022.692	2.47	2.7

(ファイナルテスト結果まとめの見方)
Name : 変数記号
R : 実現値とファイナルテスト値の相関係数
Mean(Y) : 実現値の平均
Mean(YH) : 理論(ファイナルテスト)値の平均
RMS(e) : 誤差の平方和平均の平方根
MAPE : 平均絶対誤差率、誤差率(誤差/実現値)の絶対値の平均
MAPE(3) : 最終3カ年平均絶対値誤差率

マップデータでは、1セルは、10m角の100㎡とし、豊橋市の1世帯当たり延べ面積98.0㎡(参照：平成12年度豊橋統計書)と対応させた(図6)。総計算セル数は、28,675セルである。

図5 エネルギーマッピングフローチャート

図6 世帯毎のライフサイクルマトリクス計算

5.2 初期値マップの設定

初期設定として、Excelで計算マップを作るために対象地域の画像データ（JPEG形式やGIF形式）をレンダリングし、ビットマップ形式（155×185 ピクセル）に変換する。そして、各ピクセルのビット数からRGBの数値を読み取り、Excelのセルに与えることでカラーリング処理を行う。世帯カラーセル（青）に、豊橋市統計書¹⁰⁾を基に作成した世帯データベースを乱数により、ナンバリングする。その与えられた番号により、世帯構成人員として小学生、中学生、勤め人、主婦、高齢者を組み合わせた世帯構成 22 パターンが割り振られる。

表 5 世帯人員構成別一次消費エネルギー量

世帯パターン		世帯数 全体	世帯数 駅周辺	従来 システム	省エネルギー システム [従来システム *0.58]
		127669 [戸]	9160 [戸]	[ton-oil /世帯・年]	[ton-oil /世帯・年]
老	👴	6528	533	1855	1076
大	👤	26208	2030	1720	998
大(親子)	👤👶	1564	0	1855	1076
子大	👶👤	1199	169	1904	1104
大老	👤👴	1284	295	2453	1423
老老	👴👴	9080	528	2168	1257
大(夫婦)	👤👤	14303	1743	2049	1189
子子大	👶👶👤	1625	166	2248	1304
大大老	👤👤👴	4970	214	2527	1466
大大大	👤👤👤	4136	723	2320	1345
子大大	👶👶👤	8073	463	2251	1306
子大大老	👶👶👤👴	429	16	2648	1536
大大老老	👤👤👴👴	3762	175	2485	1441
大大大老	👤👤👤👴	360	142	2485	1441
大大大大	👤👤👤👤	10644	578	2454	1423
子子大大	👶👶👤👤	20776	827	2628	1524
子子大大老	👶👶👤👤👴	721	151	2992	1735
大大大大老	👤👤👤👤👴	2957	159	2679	1554
子子大大大	👶👶👤👤👤	2854	46	2878	1669
大大大大老老	👤👤👤👤👴👴	1112	43	2842	1649
子子大大大大	👶👶👤👤👤👤	3924	23	2892	1677
子子大大老老	👶👶👤👤👴👴	1158	136	3010	1746

- 👶
- :0 歳-19 歳及び 20-25 歳までの就学者
- 👤
- : 20-65 歳（20-25 歳までの就業者を含む）
- 👴
- :65 歳以上

5.3 推計マップ

（t +5）期における世帯セル毎の世帯構成は、コーホート要因法および計量経済モデルよりライフサイクルの概念を基に成長し、決定される。各世帯セルは、世帯構成員別消費エネルギー（表 5）22 パターンを消費エネルギー量別のカラーインデックスに置き換え、エネルギーマップを作成する。世帯人員別一次エネルギー消費量算出するにあたり、年齢別生活スケジュール（小学生、中学生以上の学生、勤め人、主婦、高齢者）をNHK国民生活時間調査により作成し、それを基に使用家電消費電力・給湯使用量・冷暖房負荷から建物の運用段階でのエネルギー消費量を算出した。熱負荷計算ソフトSMASHにより冷暖房負荷を算出している。省エネルギーシステムを導入した住宅（全電化システム、自然冷媒ヒートポンプ式電気給湯機（COP=3）、屋上緑化の導入、ソーラーパネルの使用、トップランナー家電の使用）は、従来システムより 42%消費エネルギー削減効果がある^{注2)}と仮定し、計量経済モデルにより推計される新着工床面積は、新たに供給される住宅とみなし、省エネルギーシステムを導入した住宅として配置される。なお、豊橋市におけるケーススタディの前提条件として、豊橋市

図 7 世帯人員構成別消費エネルギー推計結果

図 8 エネルギーマップによる世帯の推移

の約 12 万世帯中 9 万 7 千世帯という全体の約 80%が、2 階以下の低層住居であるため、全てを戸建住宅として想定し、世帯セルはすべて日本建築学会標準住宅と仮定しているため、高層アパートは考慮していない。

6 エネルギー推計結果

50 年後のエネルギー推計結果とエネルギーマップを図 7、図 8 に示す。駅周辺の地域における一次消費エネルギー石油換算^{注3)}で初期値 $1.96 \times 10^7 \text{ton/年}$ から、5 年後に $1.97 \times 10^7 \text{ton/年}$ とピークに達し、2050 年に $1.12 \times 10^7 \text{ton/年}$ と約 43%減少している。世帯人員構成から検討を行うと、老人単身世帯、老夫婦世帯及び夫婦+高齢者片親世帯の 3 パターンの人員構成世帯の占める割合が 2000 年では 14.7%であったが、2050 年では 46.3%となった。

エネルギーマップから、駅周辺では空洞化が著しく表れ、少子高齢化社会を反映するような結果となった。

7 まとめ

5 年度毎の住宅の消費エネルギーの推移を地図上で把握するために、コーホート要因法や計量経済モデルを用いてエネルギーマップに関する基礎的モデルの開発を行い、以下の知見を得た。

- 1) ライフサイクルを考慮したコーホート要因法で発生しうる家族構成パターンを生活スケジュールに基づき、22 パターンに整理した。
- 2) 1 世帯ごとにコーホート要因法を応用した生存・結婚・出産の確率モデルを適用することで人口を推計した。2000 年度を初期値とする 50 年後の推計結果では、少子高齢化社会が導き出され、高齢者世帯が全世帯数の約 46%を占める結果となった。
- 3) 豊橋市の社会動向を取り入れるため、計量経済モデルの開発を行い、新着工戸数の推計およびコーホート要因法に必要な変数の推計を行った。
- 4) Excel をベースに画像変換することにより、画像データを計算領域とするマップモデルを開発した。

今後の課題として、市全体のモデルを完成させ、交通便益による住宅供給量の検討を行うため、交通モデルの構築、階高方向への消費エネルギー集約を把握するために高層住居建築を考慮し、かつ住宅の開発地域を誘導するマップモデルの開発を行う必要がある。エネルギー原単位を 2000 年度のものを使用したが、将来のエネルギー原単位の変化を考慮すべく、省エネルギー技術革新に関するパラメータを取り入れたモデルを考慮する必要がある。また、住宅のみならず民生部門全体でのエネルギー推計をするにあたり、業務ビルエネルギー推計モデルを構築する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、豊橋技術科学大学 21 世紀 COE 拠点形成プログラム「未来社会の生態恒常性工学」によるものである。また、地域計量経済モデルを構築するに当たり、本学人文・社会工学系 山口誠教授のご指導に対し、感謝の意を表します。

注

- 注 1) 女性が出産可能な年齢を 15 歳から 49 歳までと規定し、それぞれの出生率を出し、足し合わせることで、人口構成の偏りを排除し、一人の女性が一生に産む子供の数の平均のことである。
- 注 2) 従来システムは、電力のエネルギー消費効率 35%、ガスのエネルギー消費効率 78%とし、断熱材厚さ 50mm、暖房設定温度 20℃、冷房設定温度 26℃、給湯出口温度を入浴で 42℃、シャワー・キッチンで 38℃、照明は蛍光灯 72W、白熱灯 60Wと仮定した。一方、省エネルギーシステムは、エネルギー消費量削減に重点をおいた設定をしており、断熱材厚さ 200mm、暖房設定温度 17℃、冷房設定温度 29℃、給湯出口温度を入浴で 40℃、シャワー・キッチンで 36℃、照明は白熱灯型蛍光灯 12Wと仮定した。給湯システムは、自然冷媒ヒートポンプ式電気給湯機とし、成績係数 3 とした (COP=3)。屋上緑化の導入として、計算に用いた芝の等価的熱抵抗値は、冬期 $0.88 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 、夏期 $0.33 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ とした。ソーラーパネルは定格出力 4.16 kW 、インバータ効率 0.92 とした。
- 注 3) 石油の一次エネルギー換算係数は、 $1\text{TOE}(\text{Ton-Oil-Equivalent})=41.868 \text{ GJ}$ とした。

参考文献

- 1) 藤野純一，甲斐沼美紀子，松岡譲，松井重和： AIM-Trend モデルを用いたアジア各国別エネルギー需給予測シナリオの開発，エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集，657-662，2002
- 2) 山口誠：北関東自動車道整備効果の計量経済学的分析 栃木県地域の分割モデルによる地域経済への影響把握，地域学研究(つくば) Vol.27, No.1, 37-50, 1997
- 3) 山口誠，鯉江康正，石川隆司：自動車交通による環境変化が地域社会経済に与えるインパクトの計量経済学分析，日本地域学会地域学研究，第 22 巻，1-15，1992
- 4) 酒井潤，佐藤仁美，奥宮正哉，田中英紀： GIS を用いた地域エネルギー利用計画に関する研究 その 1 大垣市における未利用エネルギー活用可能性検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 505-506, 2005
- 5) 草刈洋行，須藤諭，川村広則： 東北 6 県の各駅周辺地域における地域エネルギー消費特性の評価に関する研究 地理情報システムを用いた地域エネルギー消費特性の評価 その 3，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 733-734, 2006
- 6) 木村竜士，松本博： 都市におけるエネルギーフローのシステムモデルに関する研究 その 2 SD 法による人口変動に伴うエネルギー損失動向の予測 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 617-618, 2004
- 7) 木村竜士，松本博： 都市におけるエネルギーフローのシステムモデルに関する研究 その 5 豊橋市の住宅地を対象とした世帯主推計連動型簡易モデルによるエネルギーフロー，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，2185-2188, 2006
- 8) 福井浩喜，三宅醇，谷武： 世帯主年齢，世帯収入，住宅所有関係別からみた最低居住水準の分析愛知県におけるケーススタディー，日本建築学会大会学術講演梗概集 F-1, 1213-1214, 2003
- 9) Hiroshi Matsumoto, Ryushi Kimura, Yoshinori Fujita and Yu Fat Lun : Embodied energy consumption of buildings based on the input-output analysis, IBPSA Australasia, 2006
- 10) 豊橋市，豊橋統計書 平成元年版(1990)～平成 14 年版(2003)

(2007 年 5 月 10 日原稿受理，2007 年 12 月 18 日採用決定)