

6. アジア巨大都市における民生部門エネルギー需要の将来予測

Analysis on Future Trend of Energy Demand in Residential Sector of Asian Mega-cities

松本 亨* ・ 左 健* ・ 韋 新東* ・ 石崎 美代子**
Toru MATSUMOTO*, Jian ZUO*, Xindong WEI*, Miyoko ISHIZAKI**

ABSTRACT; With the further scale expansion and residential income increase, energy consumption of residential and commercial sectors in Asian mega-cities will become one of the key factors affecting global warming. This study aimed to predict future energy consumption of residential sector in Asian mega-cities based on construction of energy demand model. After reviewing the trends in energy consumption of residential sector in Tokyo, Seoul, Beijing and Shanghai, this paper attempted to develop the energy demand model of residential sector for Tokyo by energy use and for Seoul, Beijing and Shanghai by energy type based on consideration of data availability. Then, energy demands of residential sector for 4 Asian mega-cities were estimated until 2020.

KEYWORDS; energy demand model, residential sector, Asian mega-cities

1. はじめに

2001年の国連の推計¹⁾によると、2000年に約61億人であった世界人口は2030年に約83億人になると予測されているが、その増加分のほとんどは途上国の都市人口である。全世界の都市人口比率は47.7%（2001年）であるが、アジアに限ると38.0%である。これが2030年には、全世界の都市化率が60.2%、アジアが54.1%になるとされる。

特に、アジアの都市化は大都市を形成することが特徴的である。例えば、人口100万人を超える都市を見ると、1955年に全世界に93都市あった100万人以上の都市のうち、アジアは33都市と約4割であった。それが2000年には195都市（全世界387都市）と半数以上を占めるに至った。さらに、人口1,000万人を超える巨大都市（Mega-city）に着目すると、国連の推計（2001年）¹⁾によると、2015年には全世界で21の巨大都市が存在すると予測されているが、そのうちの13都市がアジアの都市である。

このようなアジア・メガシティのさらなる拡大と、居住者の所得向上というトレンドによって、家庭部門におけるエネルギー消費量の増大が予想される。そこで本研究では、アジア・メガシティの家庭用エネルギー消費量の将来予測モデルを構築する。対象都市は、東京、ソウル、北京、上海の4都市とし、2020年までの予測を行う。

2. 家庭用エネルギー消費への影響因子のトレンド

ここで、家庭用エネルギー消費に影響を与えるいくつかの因子について、そのトレンドを見る。

図1は、世帯あたり床面積、図2は、世帯あたり人員数である。4都市ともに、世帯あたり床面積は増加、世帯あたり人員数は減少傾向にある。一般的に、両トレンドとも1人あたりエネルギー消費量の増加要因である。

図3、4は、東京、上海、北京における家電の世帯保有率を示したものである。冷蔵庫を見ると、北京、上海の都市部ではほぼ100%、農村部でも約80%の保有率となっていることがわかる。次にエアコンを見ると、東京で160%、上海の都市部では約90%、北京の都市部でも約60%の保有率に達している。カラーテレビ、電子レンジを見ても、上海、北京の都市部は、東京の水準にかなり近づいている。

図5、6は、4都市の家庭用エネルギー消費量及び世帯あたりエネルギー消費量の推移を示したものである。双方ともに一番大きい値は、ソウルである。東京はエネルギー消費量の伸びが鈍化しており、世帯あたりで見るとほぼ横ばいである。一方、北京、上海は、世帯あたりエネルギー消費量が微増で、エネルギー消費量全体が大きくなっているのがわかる。

* 北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科

Department of Environment Space Design, Faculty of Environmental Engineering, The University of Kitakyushu

** 株式会社国内貨物

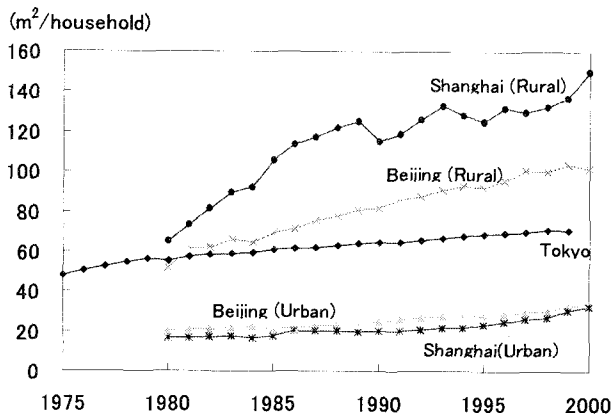


図1 世帯あたり床面積の推移

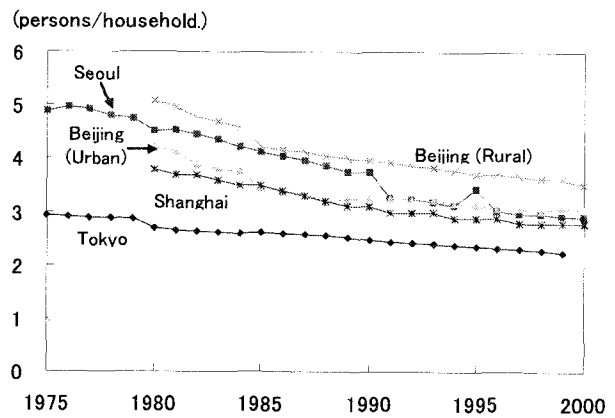


図2 世帯人員の推移

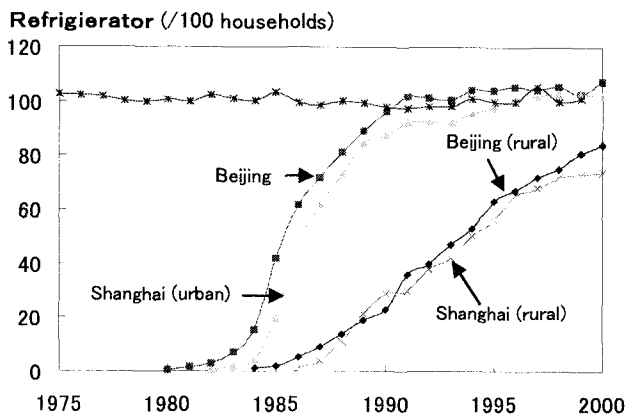


図3 100世帯あたり冷蔵庫保有台数

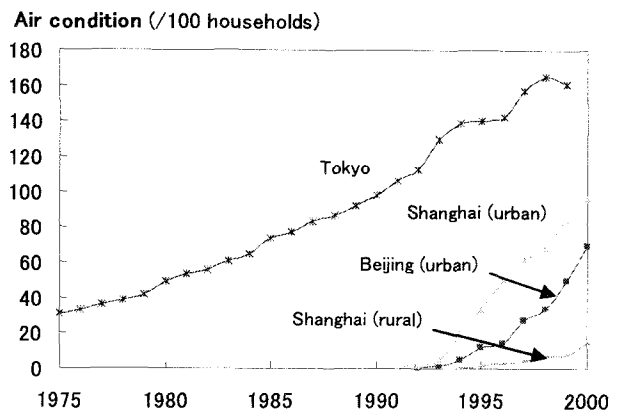


図4 100世帯あたリエアコン保有台数

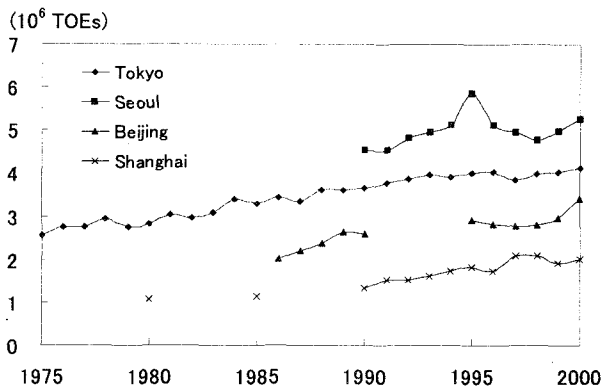


図5 家庭用エネルギー消費量の推移

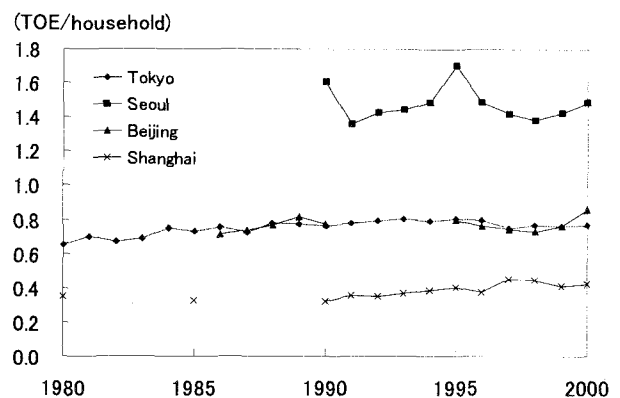


図6 世帯あたり家庭用エネルギー消費量の推移

3. モデル構築のコンセプトと構造

3. 1 モデルの基本的コンセプト

アジアの都市を対象とする場合、2つの考慮すべきポイントがある。1つ目はデータの入手可能性である。このことを考慮すると、モデル構造の細分化には限界があるといえる。日本のデータ入手可能性を前提にモデルを構築すると他の都市に適用できない。もう1つのポイントが、変化のスピードへの対応である。つまり、経済成長とそれに伴う生活水準の変化、また技術水準の向上により、固定的に扱えるパラメータは少ない。そのために、モデルの構造パラメータの可変性を確保しておく必要があることがわかる。

そこで本研究では、アンケート調査など新たな調査を必要としない範囲で、可能な限り詳細なモデルの構築を目指す。なお、なるべく多くのデータを都市レベルでそろえることを考えると、日本の場合は都道府県、韓国の場合は特別市または広域市、中国の場合は都市部（市区）と農村部を含む「地区」にならざるをえない。なお、東京都、ソウル特別市、北京市（地区）の都市規模を比較すると、面積では北京市は突出しているが、人口ではほぼ同規模である。

3. 2 モデルの構造

データ利用可能性と各都市のエネルギー利用特性から、東京都とそれ以外の都市の家庭用エネルギー需要予測モデル推計フローを設定する。東京都については、用途別燃料種別エネルギー消費量に関するデータが利用可能なことから、用途別に床面積あたりあるいは世帯あたりのエネルギー消費量を推計し、その後用途別エネルギー消費量の推計値を燃料種別に分解する手順とした（図7）。用途別エネルギー消費量の推計には、エネルギー消費に関係してくる説明変数を用いた重回帰分析を用いた。

それ以外の都市については、用途別燃料種別エネルギー消費量が得られなかったため、燃料種別に推計する（図8）。また、北京市は集中供熱システム（DHS: District Heating System）が普及していることから、熱を別途推計する。

まず、東京を例に説明する。部門におけるエネルギー使用用途を、①暖房、②冷房、③給湯、④照明・動力・その他の4分類とした。その上で、用途別エネルギー需要を下記のような中間項を用いた恒等式として表す。

$$ENE.D = HS \times \frac{FL}{HS} \times \frac{ENE.D}{FL} \quad (1)$$

ここで、 $ENE.D$ ：用途別エネルギー消費量、 HS ：世帯数、 FL ：床面積である。第2中間項は世帯あたり床面積、第3中間項は床面積あたりエネルギー需要を意味する。

なお、床面積に依存しない給湯用エネルギー需要については下記の式を用いる。また、床面積のデータが得られない東京以外の都市の場合も下記の式を利用する。

$$ENE.D = HS \times \frac{ENE.D}{HS} \quad (2)$$

第2中間項は世帯あたりエネルギー需要を意味する。

式（1）の第2及び第3中間項を推計するため、それぞれ重回帰分析によりその変動要因を分析する。その結果を用いて、世帯あたり床面積と、床面積あたりエネルギー需要を予測するための推計式を定式化する。なお、必要に応じて、床面積あたりエネルギー需要の説明変数の合成化を行う。具体的にはエネルギー価格、機器保有率、機器のエネルギー効率である。これらは、機器もしくはエネルギー種に固有な値であり、用途別床面積あたりエネルギー需要の説明変数として用いるには、その用途平均の値に合成する必要がある。

4. 都市別のモデル構造及びシナリオ設定

東京に関しては既発表論文²⁾に詳述したので、ここではソウル、北京、上海について述べる。

4. 1 ソウル

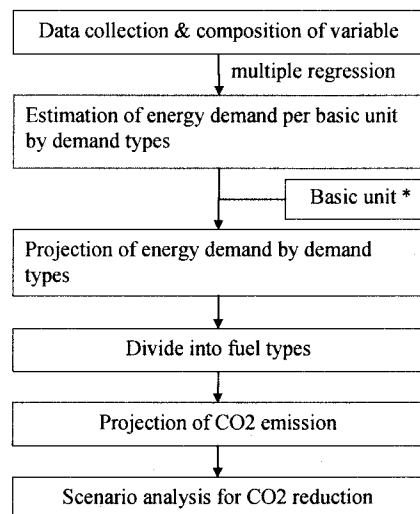
(1) 概要

家庭用エネルギー使用用途を、①暖房・給湯、②厨房、③照明・動力・冷房・その他の3分類としてモデルを構築した。なお、各説明変数の将来値については、表1のような方法により設定する。

(2) 暖房・給湯用途

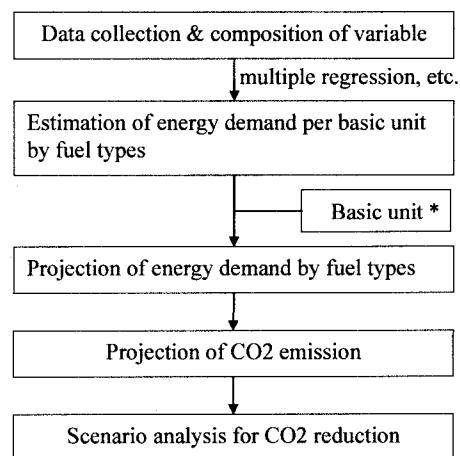
図9は暖房・給湯用途のエネルギー消費量の推計フローである。世帯当たり住宅面積は世帯当たり人員と世帯当たり所得によって推計した。暖房用エネルギー消費量は、1990年の床面積当たり暖房用エネルギー消費量の推計値、 $38 \text{ kWh} / \text{m}^2 \cdot \text{year}$ を用いた³⁾。給湯用エネルギー消費量については、東京の床面積当たり給湯用エネルギー消費量は 60.9 （集合住宅）～ 62.3 （民間戸建住宅） $\text{Mcal} / \text{m}^2 \cdot \text{year}$ という報告⁴⁾があるが、その平均値 $61.6 \text{ Mcal} / \text{m}^2 \cdot \text{year}$ をソウルに適用することとした。

(3) 厨房用途



* Basic unit = floor space or household

図7 推計フロー（東京）



* Basic unit = household

図8 推計フロー（東京以外）

表1 外生変数の将来シナリオの設定

	外生変数	外生変数の将来シナリオ
ソウル	人口、世帯数、世帯人員数、GRP、世帯あたり所得・家計消費	Proceedings of IGES/APN Mega-City Project Workshop (February 4-5, 2003) 1人あたりGRPとの回帰により1人あたり所得(家計消費)を求め、世帯人員数を乗じた。
	エネルギー価格	1991-1998年の平均値を用いた。
北京(都市部)	人口、世帯数、世帯人員数、GRP、世帯あたり床面積	Proceedings of IGES/APN Mega-City Project Workshop (February 4-5, 2003) 1980-2000年のデータより、世帯あたり所得との線形回帰により将来値を推計した。
	世帯数	1988-2000年のデータを回帰させて求めた。
	DHS普及率	2010年までの北京市のDHS普及計画をもとに推計した。
	暖房面積への換算係数	1995-2000年の平均値を用いた。
	個別暖房の延べ床面積	全世帯数からDHS普及世帯の床面積を引いて求めた。
北京(農村部)	人口、世帯数、世帯人員数、GRP、世帯数	Proceedings of IGES/APN Mega-City Project Workshop (February 4-5, 2003) 全世帯数から都市部世帯数を引いて求めた。
	ガス普及率	将来値は100%とした。
上海	人口	1980-2000年のデータをもとにロジスティック曲線を用いて推計した。
	世帯人員数	東京の過去のデータを参考にして推計した。
	GRP	北京市と成長率が同じになるよう推計した。
	世帯あたり所得	GRPとの相関をとり推計した。

図10は厨房用途のエネルギー消費量の推計フローである。重回帰分析により、世帯あたりエネルギー消費原単位の説明変数として、世帯当たり消費支出、世帯当たり所得、世帯当たり人員が採用された。

(4) 照明・動力・冷房・その他用途

図11が照明・動力・冷房・その他用途のエネルギー消費量の推計フローである。世帯あたりエネルギー消費原単位の説明変数として、照明・動力・冷房・その他用エネルギー価格、世帯当たり消費支出、世帯当たり所得が採用された。

(5) 燃料種別エネルギー消費割合の予測

図12は家庭用エネルギー消費量・CO2排出量の予測フローである。まず、前節まで推計した用途別家庭用エネルギー消費量を合計することにより、家庭用エネルギー消費量を求める。次に、この値を燃料種別に分割する。まず、ガス消費量の割合について、9年間(1991～1998)のガス消費量の割合に関する時系列トレンドをロジスティック曲線によって予測する。石炭消費量の割合に関しては、過去のガス消費量との関係から相関式を作成し、将来値を予測する。残りを、石油消費とする。電力消費については、照明・動力・冷房・その他用途エネルギー消費の予測結果とする。さらに、過去のトレンドを用いて、ガスを都市ガスとLPG消費量に、石油を灯油、重油とディーゼルに分割した。

4. 2 北京

(1) 概要

北京市における用途別エネルギー消費量データが利用できないため、燃料種別に推計する。そのため、まず用途と燃料種の組み合わせを考え、それに即した説明変数を考える。北京市の都市部の場合、暖房は集中供熱(DHS)か石炭による個別暖房と考える。電気、ガスによるものもあるが少量であるためここでは無視する。給湯・調理に用いるガスは、ガス総量を推計した後、LPG、天然ガス、コークスガスに分割する。電気は、世帯あたり収入から推計する。農村部については商業エネルギーのみ考慮することとし、石炭と電力消費量を推計する。なお、北京のモデル構造の詳細に関しては既発表論文²⁾に記述しているので、ここでは省略する。

(2) 都市部の集中供熱と個別暖房用石炭

いずれも都市部である。単位床面積あたり熱消費量を下記の式(3)⁵⁾により求め、それにDHSによる熱供給床面積を乗じることでDHSによる熱消費量を推計する。

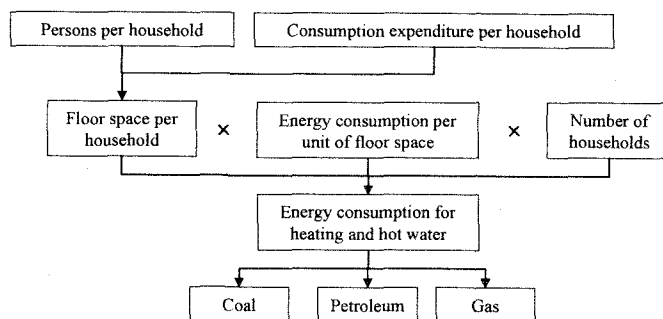


図9 暖房・給湯用エネルギー推計フロー(ソウル)

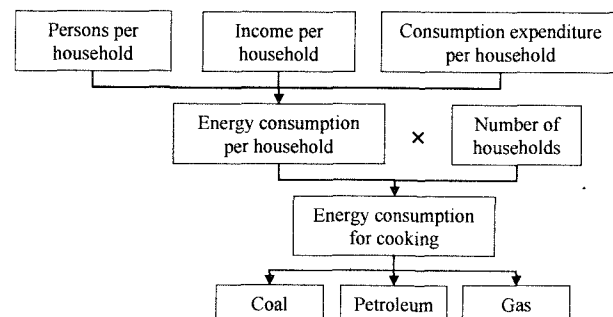


図10 厨房用エネルギー推計フロー(ソウル)

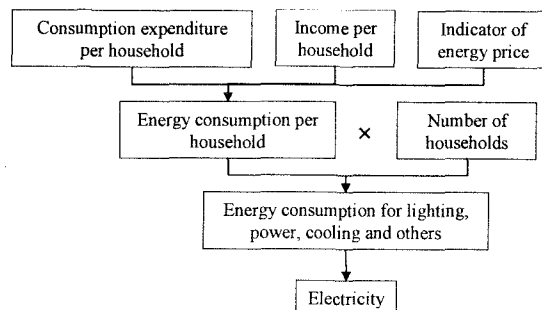


図11 動力・照明・冷房・その他用エネルギー推計フロー(ソウル)

$$Q = Z \times 24 \times 3600 \times q \times \left[\frac{t - t_p}{t_i - t_w} \right] \times 2.39 \times 10^{-11} \quad (3)$$

ここで、 Q ：暖房年間エネルギー消費原単位、 Z ：暖房供給日数、 q ：設計暖房負荷原単位⁶⁾、 t_i ：室内設計用温度、 t_p ：暖房期間外気平均温度、 t_w ：暖房外気設計用温度である。

DHS による熱供給床面積は、都市部の世帯数、DHS 世帯普及率、世帯あたり床面積、暖房面積への換算係数から算出する。説明変数の将来値については、表 1 のような方法により設定する。

一方、個別暖房用石炭については、上記 (3) と同様に式を用い、床面積あたり熱消費量と、配管の輸送効率、ボイラーの機器効率を用いて、下記の式⁵⁾ から単位床面積あたり石炭消費量を求め、それに暖房床面積を乗じる (図 2)。

$$D = \frac{Q}{\eta_1 \times \eta_2} \quad (4)$$

ここで、 D ：床面積あたり石炭消費量、 η_1 ：ボイラー効率、 η_2 ：配管の輸送効率である。

(3) 石炭：都市部の暖房用途以外及び農村部

都市部において個別暖房以外にも、流動人口の調理・給湯、集中給湯・共同浴場のために石炭が消費されていると考えられる。1995-2000 年におけるその値は、都市部の石炭消費量から個別暖房用及び調理用の石炭消費量を引いて推計すると、1995 年の 79 万 T0E から 2000 年の 35 万 T0E に減少したことがわかる。将来予測を行う場合には、2000 年の値に基づいて、一定の減少率で予測する。なお、減少する部分はガスに代替されるものとする。

農村部の世帯あたり石炭消費量については、95-2000 年の平均値を採用する。これらの世帯あたりエネルギー消費量に農村部の世帯数を乗じることで、エネルギー消費量を推計する。

(4) ガス

現在、都市部のみで使用されている。世帯あたりガス消費原単位の推計のために重回帰分析を行い、変動要因を分析した。その結果、電気調理器の保有率が採用された。

(5) 電気

世帯あたり電力消費原単位の推計のために重回帰分析を行い、変動要因を分析した。その結果、都市部については世帯あたり収入が、農村部についてはカラーテレビの保有台数と世帯あたり収入が採用された。

4. 3 上海

(1) 概要

上海の都市人口比率は 2000 年に 99 % であるため、都市と農村を分けずに分析する。エネルギー消費用途を大きく①調理・給湯用途、②照明・動力・冷暖房等用途の 2 分類とする。なお、説明変数の将来値については、表 1 のような方法により設定する。

(2) 調理・給湯用途

図 1 は調理・給湯用途のエネルギー消費量の推計フローである。1980-2000 年間のコークスガス・LPG・石炭消費量と世帯数により世帯あたり調理・給湯用エネルギー消費量を推計した。過去 20 年間ほとんど値に変わらないので、最近 5 年間の平均値を将来の世帯あたり消費原単位として採用した。

1980 から 2000 年においては、石炭の割合は 87 % から 43 % に激減したが、コークスガスの割合は 12 % から 37 % に増加し、LPG の割合は 1 % 以下から 1995 年の 13 % に増加した後、15 % のレベルに維持した。将来的には、東シナ海の天然ガス開発及び“西気東輸”計画の実現で天然ガスの普及率は最も高くなると考えられる。石炭は、流動人口と一部の農村人口の生活用エネルギー、集中給湯、共同浴場の燃料として依然使用されている。

(3) 照明・動力・冷暖房等用途

図 2 が照明・動力・冷暖房など用途のエネルギー消費量の推計フローである。

重回帰分析により、世帯あたり電気消費量はエアコン・カラーテレビ・電子レンジの保有台数を説明変数

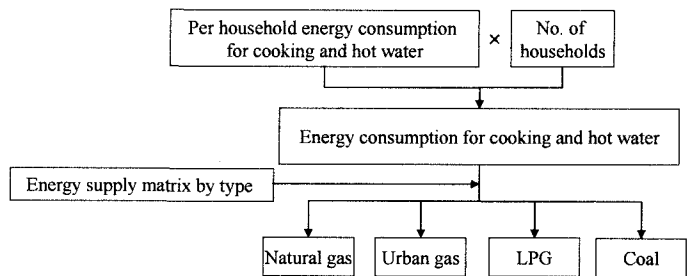


図 12 調理・給湯用エネルギー推計フロー (上海)

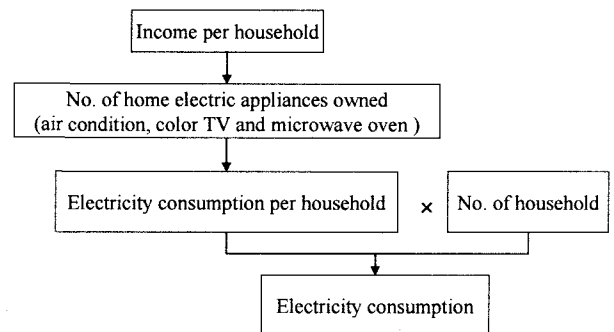


図 13 電力消費推計フロー (上海)

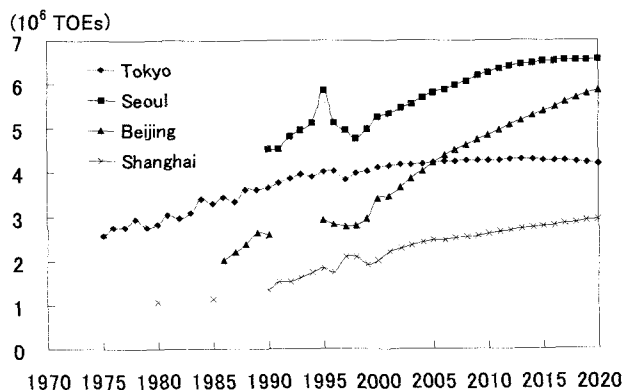


図14 家庭用エネルギー消費量予測結果

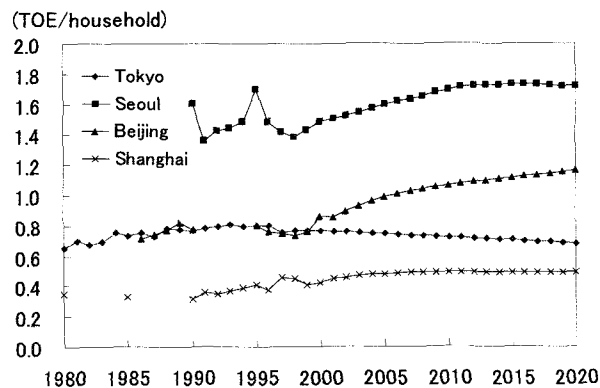


図15 世帯あたり家庭用エネルギー消費量

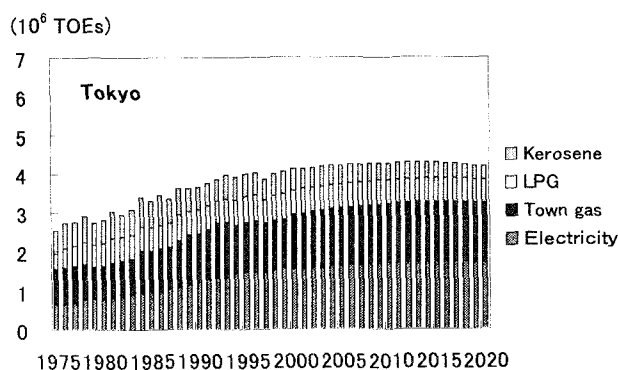


図16 燃料種別家庭用エネルギー消費量（東京）

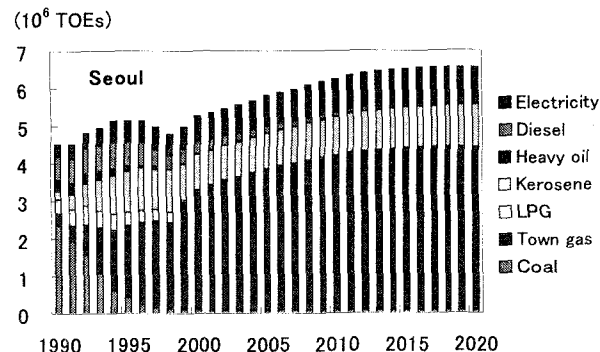


図17 燃料種別家庭用エネルギー消費量（ソウル）

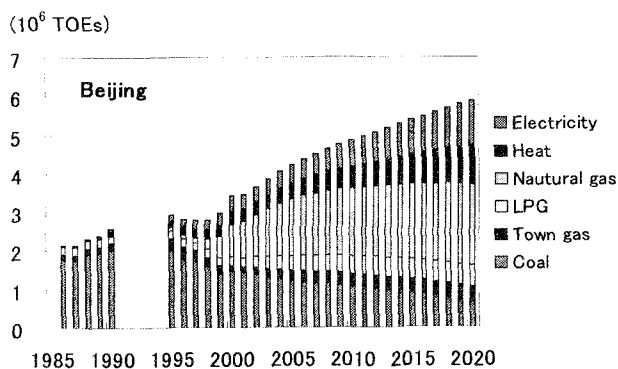


図18 燃料種別家庭用エネルギー消費量（北京）

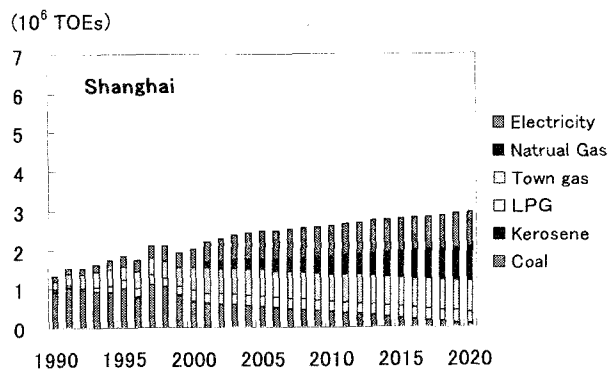


図19 燃料種別家庭用エネルギー消費量（上海）

として採用した。

5. モデルによる将来予測結果

以上により求めた家庭用エネルギー消費量の予測結果を図14～19に示す。

燃料種別エネルギー消費量を都市別に概観すると（図14），ソウル，北京，上海は一貫して増加すると推測された。一方，東京は増加から減少に転じると予測された。その理由としては，ソウル，北京，上海の場合，人口増加，世帯人員数減少，所得増加といった増加要因が優勢にあるのに対して，東京ではこの期間中人口が減少に転じていることが影響している。

世帯あたりエネルギー消費量を見ると（図15），東京は2000年以降一貫して減少傾向，ソウルが2015年以降横ばいから減少傾向であるが，北京，上海は増加傾向にある。4都市すべて世帯人員数は減少しており世帯エネルギー消費の減少要因となっているが，北京，上海に関しては，家電の普及，床面積の増加という増加要因の方が凌駕した結果である。北京は特に，調理・給湯用ガス消費量の増加が大きい。

次に，燃料種別エネルギー消費構造の変化を見る（図16～19）。4都市にはいずれも電気と天然ガスの消

費量増大が予測される。また、北京、上海の石炭消費量は減少すると予測されるが、その割合は、北京で2000年43%から2020年11%、上海で2000年35%から2020年3%である。

6. 今後の課題

アジア・メガシティへの適用を前提に、家庭用エネルギー需要予測モデルを開発した。本モデルは、中間項によるエネルギー消費構造の分解と、各項の回帰分析を基本としているので、データの入手可能性によってモデル構造は弾力的に扱える。これによって、BaU ケースの将来予測が可能となった。これを用いて、各種対策の効果推計や、社会トレンドの変化による影響を推計することが次のステップとなる。対策については、①世帯属性及びライフスタイル要因、②住宅要因、③エネルギー機器要因に分けて、シナリオを作成しそれぞれの影響について試算を行うことになる。

今後、モデル構造の改善には2つの方向性があると認識している。その1つは、モデル変数をより政策オプションに近づけるための、モデルの詳細化である。統計書から得られるデータ以外について、アンケート調査等の手法を用いてより細かなデータ収集をすることが必要となる。もう1つの方向が、モデルの簡略化である。今回の統計解析から得られた情報を考慮の上、重要かつ各都市共通に整備可能な変数に限定したモデルを構築する方向である。政策決定者の利用を考慮すると後者のモデルへのニーズも高いと考えられる。

謝辞

本研究は、財団法人地球環境戦略研究機関 (IGES) 及びAsia-Pacific Network for Global Change Research (APN) のプロジェクト, "Policy Integration for Energy Related Issues in Asian Mega-Cities" (代表: 井村秀文 名古屋大学大学院教授) の補助を受けて行った成果の一部である。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) United Nations Secretariat: World Urbanization Prospects: The 2001 Revision, 2002
- 2) 松本 亨・石崎美代子・左 健・中山裕文: アジア都市への適用を想定した民生部門エネルギー需要予測モデルの開発, 環境システム研究論文発表会講演集, pp. 25-33, 2002
- 3) Ralf Ulseth: Future district heating and cooling systems, Website of NEDO, <http://www.nedo.go.jp/nedo-info/caddet/newsletter-ee/2001/01-1/3.pdf>, 2003
- 4) 尾島俊雄研究室: 建築の光熱水原単位 [東京版], 早稲田大学出版部, 213 pp., 1995
- 5) 宋小華・森山成和: 北京市における暖房による二酸化硫黄の排出量に関する研究, 環境科学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 183-188, 2002
- 6) 李先端・支志: 居住区供熱システム省エネルギー可能性に関する研究 (中国語), 中国城鎮供熱協会 website, <http://www.china-heating.org.cn/jsh19.htm>, 2002

主な利用データ

- [1] 総務省統計局: 全国消費実態調査報告, 1974, 1979, 1984, 1989, 1994
- [2] 東京都環境保全局環境管理部環境計画室: 都におけるエネルギー需給構造調査報告書, 1999
- [3] (株)住環境研計画研究所編: 家庭用エネルギーハンドブック, (財)省エネルギーセンター, 1999
- [4] 東京都総務局統計部統計調整課編: 東京都統計年鑑, 東京都統計協会
- [5] (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: エネルギー・経済統計要覧, (財)省エネルギーセンター
- [6] (株)住環境計画研究所編: 家庭用エネルギー統計年報, 1985, 1995, 1999
- [7] 総務省統計局: 国勢調査報告, 1970, 1975, 1980, 1985, 1990, 1995
- [8] 東京都総務局統計部経済統計課: 都民のくらしむきー東京都生計分析調査一, 1975 ~ 1999
- [9] 総務省統計局: 小売物価統計調査年報, 1975 ~ 1999
- [10] 内閣府経済社会総合研究所: 県民経済計算年報
- [11] 国立社会保障・人口問題研究所, (財)厚生統計協会: 日本の世帯数の将来推計 全国推計/都道府県別推計
- [12] 韓国国家統計局: 韓国統計年鑑, 1996, 2001
- [13] ソウル特別市: ソウル統計年鑑, 1992, 1998, 2000
- [14] 韓国国家統計局: 都市家計年報, 1995
- [15] 国家統計局工業交通統計司: 中国エネルギー統計年鑑1989, 中国統計出版社, 1990
- [16] 国家統計局工業交通統計司: 中国エネルギー統計年鑑1991, 中国統計出版社, 1991
- [17] 国家統計局工業交通統計司: 中国エネルギー統計年鑑1991-1996, 中国統計出版社, 1998
- [18] 国家統計局工業交通統計司: 中国エネルギー統計年鑑1997-1999, 中国統計出版社, 2001
- [19] 北京市統計局: 北京統計年鑑, 中国統計出版社, 1990-2001
- [20] 北京市統計局: 北京改革開放20年, 中国統計出版社, 1998
- [21] 北京市統計局: 北京50年, 中国統計出版社, 1999
- [22] 上海市統計局: 上海統計年鑑, 中国統計出版社, 1990-2001