

16. エネルギーサービスの需給バランスを考慮した 家庭部門のエネルギー消費量推計について

金森有子^{1*}・松岡 譲²

¹正会員 (独) 国立環境研究所 (〒305-8506) 茨城県つくば市小野川 16-2

²正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市環境工学専攻

* E-mail: kanamori@nies.go.jp

アジア諸国をはじめとする発展途上国の発展は、地球温暖化問題、エネルギー・資源の問題に大きな影響を与える。特に家庭部門では、経済発展レベルや地域性(気候やエネルギー資源の入手しやすさ)に応じて、エネルギー消費構造が大きく変化するという特徴をもつため、エネルギー種だけでなく用途も考慮したエネルギー消費構造を把握することが、問題を理解し、克服するために重要となる。本研究では、公的に利用可能なデータを利用し、エネルギー需要の発生と消費構造を考慮して、限られた情報からエネルギー消費量を把握する手法を開発した。そして本手法を世界 35 地域に適用し、2005 年の家庭部門におけるエネルギーサービスの需給構造を明らかにした。

Key words: energy service, energy consumption, residential sector, demand-and-supply balance

1. 序論

地球温暖化問題やエネルギー・資源問題を理解し、克服するには、エネルギー種別、サービス種別のエネルギー消費量を把握することが重要である。特に家庭部門では、最低レベルの生活にもエネルギーが必需であるが、そのエネルギー消費構造はその地域の経済状況、地域特性等の理由により複雑であり、全容を把握するのは困難である。例えば調理は、いかなる発展レベルの地域でも必要とするエネルギーサービスの一つである。発展途上地域では、伝統的バイオマスをエネルギー源として用いるが、発展している地域では、ガスや電気調理を行っている。このような、家庭部門のエネルギー消費構造の複雑性を WEO¹⁾では所得レベルの違いに応じて整理している。

1)低所得: 伝統的バイオマスとろうそく、電池で全ての用途を賄う。この場合の用途は、照明や調理、暖房。

2)中所得: 化石燃料系のエネルギーを消費する機器が徐々に導入されていく。石炭、石油製品(灯油、ガス)、さらには電気も導入される。エネルギー消費サービスも増え、冷蔵庫等の基本的な電気機器や暖房などにも使用される。

3)高所得: 電力の使用が進み、サービスもさらに増え、冷房や情報通信機器、その他の電気機器が使用される。

このように、エネルギーの利用にはその地域の所得(発

展)レベルに応じた変化があり、さらにエネルギー消費サービスも利用可能なエネルギー種に応じて変化していく。

特に、発展著しいアジア諸国をはじめとする発展途上国では、人口の増加や経済の発展に伴い、エネルギー消費量の大幅な増加、またエネルギー消費構造の急激な変化が予想され、今後の地球温暖化問題、エネルギー・資源問題を考えていくうえで、エネルギーサービス需給構造を把握することは非常に重要になると考えられる。

そこで本研究では、家庭部門におけるエネルギー消費の詳細な動向を全世界的に把握・解析するために、利用可能な資料を用いてサービス種別、エネルギー種別エネルギー消費を把握する手法を提案し、その手法を 2005 年の世界 35 地域に適用した結果を示す。

2. 家庭部門におけるエネルギー消費に関する既往の研究

世界のエネルギー消費量を示すエネルギーの基本的な統計が、IEA の Energy balances^{2),3)}(以下、エネルギーバランス表と呼ぶ)である。最新のエネルギーバランス表では世界を約 140 の地域に分類し、1971 年から 2005 年までの部門別エネルギー種別のエネルギー消費量データが掲載されている。家庭部門のエネルギー種別エネルギー

表-1 サービス種別エネルギー消費量に関する主要な調査

地域	調査/推計	年
日本 ⁸⁾	実態調査と推計	1965-2005
日本 ⁹⁾	実態調査と推計	1975, 1980-2005
アメリカ ¹⁰⁾	4年おきに大規模調査	1993, 1997, 2001, 2005
カナダ ¹¹⁾	独自のモデルで推計	1990-2004
オーストラリア ¹²⁾	独自のモデルで推計	1990-2010(将来推計を含む)
ヨーロッパ ¹³⁾	Odyssee等の情報を整備	1990年代
中国 ¹⁴⁾	特別研究委員会による推計	1981, 1990, 2000

一消費量はOther sectorの中のResidentialのデータから把握できる。

これ以外にも、エネルギー消費量については各国で調査がなされており、例えば日本では日本版エネルギーバランス表⁴⁾が作成されており、この日本版エネルギーバランス表を作成するための資料として使用される電気や石油製品といったエネルギー種別の統計^{5), 6), 7)}からもエネルギー消費の動向を把握することができる。このように、エネルギー種別のエネルギー消費量データは、エネルギーの供給側の情報提供により、比較的情報が入手しやすい。

家庭部門のエネルギー消費に関しては、エネルギー種だけでなくエネルギーを消費することで提供されるサービスの観点から情報を把握することも重要である。サービス種別エネルギー消費量については、実態調査やサービス種別エネルギー消費に関するデータを利用した推計、詳細な積み上げ計算でしか把握できないため、世界を網羅したデータは作成されておらず、一部の国が自国の調査結果や推計結果を示しているのみである。サービス種別エネルギー消費に関する時系列データを提供している主要な調査結果を表-1にまとめる。

サービス種別エネルギー消費量に関して比較的整備されたデータは表-1に示されている程度しかなく、他のデータは、調査年もしくは地域や種類といった調査対象が限定されたものが多い。実態調査については日本国内においては日本エネルギー経済研究所の調査¹⁵⁾や住宅用エネルギー消費を検討する委員会¹⁶⁾が設置されるなど多くの研究が行われてきた。海外においてもアジアや欧米の実態調査を行った岩船ら研究^{17), 18)}や中国の実態調査¹⁹⁾、インドの様々なエネルギー消費に関する調査を報告したもの^{20), 21)}やベトナムの調査結果²²⁾などがある。このような調査は、データを入手するために、莫大な費用と時間を要するため、全世界的に把握することは困難である。次に積み上げ計算の例としては、森川ら²⁴⁾などの例がある。このような積み上げ計算には、生活スタイルに関する詳細なデータ設定が重要になるため、生活スタイルに関する多様なデータが入手できる国においては有効かつ説得力のある推計が可能であるが、先進国においても詳細な調査は限られており^{25), 26)}、ましてや途上国で研究の適用は現時点では困難である。

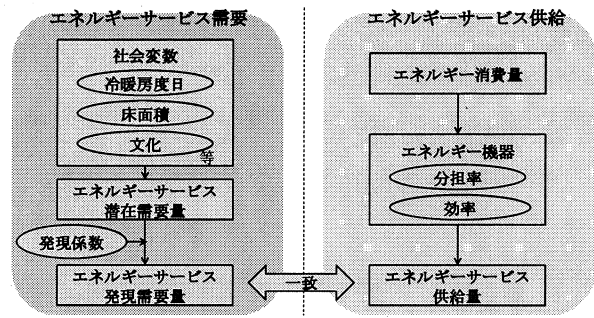


図-1 エネルギーサービス需給バランス

このように現時点では、家庭部門のエネルギー消費量に関していくつかの調査がなされているが、それらは直接エネルギー消費量を把握できないものや、把握できた場合でも分類や対象が様々であり、世界全体の家庭部門のエネルギー消費量を詳細に把握することは困難である。そこで本研究では、エネルギー消費量に影響を与える社会・経済指標と、エネルギー消費に関する統計を利用して、全世界を網羅的にエネルギー消費の詳細を推計する手法を提案する。エネルギーサービスの需給バランスに基づき、エネルギー消費量とエネルギーサービス需要量、エネルギー機器に関する変数間に成立すべき整合性を確認することにより、現時点では未知なエネルギー消費量に関する詳細なデータを推計することが可能になる。

3. エネルギーサービスの需給バランス

(1) 概要

エネルギーサービスの需給バランスは、図-1に示した関係が成り立っている。エネルギーサービスの潜在需要は、エネルギーサービスの増減に影響を与える複数の社会要因（気候・社会環境・文化等）によって決定される。しかし、現実にはその地域の経済発展の状況に応じた所得制約や物理的制約（インフラの不整備等）により、発現する需要は潜在的な需要を下回ることがある。本研究では、この潜在需要量と発現需要量の比を発現係数とした。一方、エネルギーサービスの供給は、エネルギーサービスを提供する機器と機器を動かすためのエネルギーによって決定される。エネルギーサービスの需給バランスは、発現需要量と供給量が一致するような関係を意味する。

(2) 定式化

3. (1)で説明したエネルギーサービスの需給バランスに基づいて、エネルギー消費量とエネルギーサービス発現需要量、エネルギー機器の関係を定式化する。使用変数一覧を表-2に示す。

表-2 使用変数一覧

記号	説明
s	サービス種
l	エネルギー種
r	地域
k	機器種
SK	サービス s を行う機器 k の集合
E_r^l	地域 r ,エネルギー l のエネルギー消費量
RE_r^l	地域 r ,エネルギー l のエネルギー消費量がエネルギー消費量全体に占める割合
$E_r^{k,l}$	地域 r ,機器 k ,エネルギー l のエネルギー消費量
ES_r^s	地域 r ,サービス s のエネルギー消費量
RES_r^s	地域 r ,サービス s のエネルギー消費量がエネルギー消費量全体に占める割合
D_r^s	地域 r ,サービス s のサービス需要量
$D_r^{s,k}$	地域 r ,機器 k でまかなわれるサービス需要量
$cmv_r^{s,k}$	地域 r ,サービス s を供給する機器 k のシェア
$ef_r^{k,l}$	地域 r ,エネルギー l でサービスを行う機器 k のエネルギー強度
w_1	E_r^l に対する重みづけ
w_2	ES_r^s に対する重みづけ
w_3	D_r^s に対する重みづけ
HDD_r	地域 r における暖房度日
CDD_r	地域 r における冷房度日
ARH_r	地域 r における1人あたり暖房面積
ARC_r	地域 r における1人あたり冷房面積
Q_r	地域 r における熱損失係数
UCK_r	地域 r における調理強度
REH_r	地域 r における内食率
PHW_r	地域 r における1人あたり給湯需要量
GDP_r	地域 r における1人あたりGDP

エネルギー種別エネルギー消費量と、サービス種別エネルギー消費量はエネルギーサービス発現需要量とエネルギー機器との間に式(1)、式(2)のような関係がある。すなわち、機器の分担率と機器のエネルギー強度を乗じ機器の種類に関して合計すると、サービス種別機器の平均エネルギー強度が求まる。それとサービス発現需要量から、エネルギー種別、あるいはサービス種別エネルギー消費量が求まる。

$$E_r^l = \sum_k E_r^{k,l} = \sum_s \left(D_r^s \cdot \sum_{k \in SK(s)} cmv_r^{s,k} \cdot ef_r^{k,l} \right) \quad (1)$$

$$ES_r^s = D_r^s \cdot \sum_{k \in SK(s)} (cmv_r^{s,k} \cdot ef_r^{k,l}) \quad (2)$$

ここで機器の分担率とは、あるサービスを提供する機器グループ $SK(s)$ のうち機器 k が分担する割合であり、式(3)で定義される関係を有する。

$$\sum_{k \in SK(s)} cmv_r^{s,k} = 1 \quad (3)$$

また、エネルギー強度とは、エネルギー効率の逆数であり、単位サービスを提供するのに必要とするエネルギー消費量とした。本研究では式(4)で定義される。

$$ef_r^{k,l} = E_r^{k,l} / D_r^s \quad (4)$$

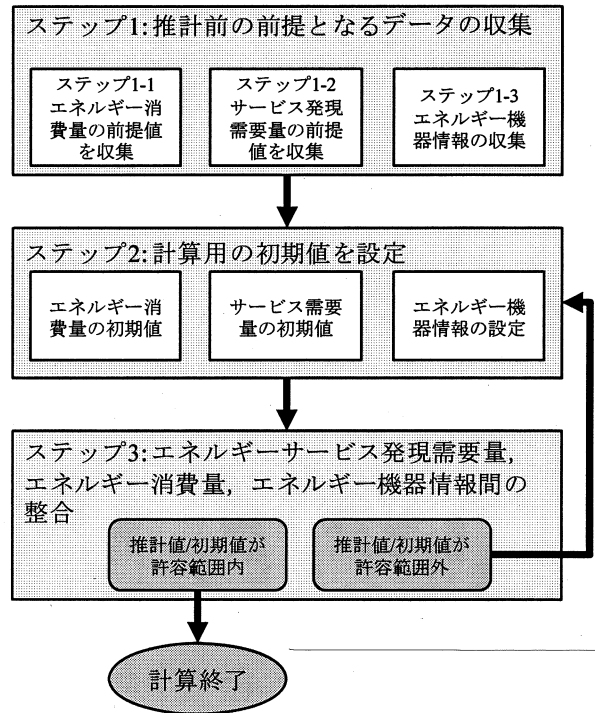


図-2 推計の流れ

4. 推計手法

(1) 推計手法の概要

3.で説明したエネルギーサービスの需給バランスに基づいて、公的に利用可能なデータを利用して様々な情報と整合性のあるエネルギー消費量やエネルギーサービス量を推計する手法を開発した。図-2に推計の流れを示す。

初めに、本研究で使用する用語について定義する。本研究で取り扱うデータは、推計時の取り扱いにより前提値、初期値、推計値の3種類に分類する。前提値とは本推計を行う前に得られる値を意味する。統計書等から得られる値や本推計の前に何らかの手法により設定した値も前提値と呼ぶ。初期値とは、本推計に計算開始時に設定する値を指す。推計値とは本手法を適用した結果得られた値を指す。

本推計手法は、大きく3つのステップからなる。以下、推計の流れをステップ別に説明する。

ステップ1: 計算前の前提となるデータの収集

- ・ステップ1-1: エネルギー消費量の前提値の収集
エネルギー消費量の前提値となるようなデータを報告書や統計から収集する。(図-3の(9),(15))
- ・ステップ1-2: サービス発現需要量の前提値を推計
サービス発現需要を決定する社会変数を利用して、サービス発現需要量の前提とする値を推計する(図-3の(1))。
- ・ステップ1-3: エネルギー機器に関する情報の収集
エネルギー機器の分担率とエネルギー強度に関する情

サービス種	(1) \overline{D}_r	(2) \overline{D}_r	(3) D_r	(4) $\frac{1}{\text{conv}_k}$	(5) ES_r^i	(6) RES_r^a	(7) \overline{RES}_r	(8) \overline{ES}_r	(9) \overline{ES}_r
	社会変数から推計したサービス発現需要量前提値	サービス発現需要量初期値	サービス発現需要量推計値	エネルギー機器kの分担率 機器1 ... 機器k	サービス種別エネルギー消費量推計値	サービス種別エネルギー消費量推計値の割合	サービス種別エネルギー消費量初期値の割合	サービス種別エネルギー消費量初期値	サービス種別エネルギー消費量前提値
暖房									
冷房									
給湯									
厨房									
その他									
合計						1.0	1.0		

: 前提値
 : 推計値
 : 初期値

エネルギー種	(10) $e_r^{(k)}$	(11) E_r^i	(12) RE_r^i	(13) \overline{RE}_r	(14) \overline{E}_r	(15) \overline{E}_r
	エネルギー機器kのエネルギー強度 機器1 ... 機器k	エネルギー種別エネルギー消費量推計値	サービス種別エネルギー消費量推計値の割合	サービス種別エネルギー消費量初期値の割合	エネルギー種別エネルギー消費量初期値	エネルギー種別エネルギー消費量前提値
バイオマス						
石炭						
灯油						
LPG						
天然ガス						
電気						
熱						
太陽熱						
合計			1.0	1.0		

図-3 推計作業シートの模式図

報を収集する。機器の分担率については、式(3)の関係を満たすようにする。また、エネルギー機器の効率の情報から、機器のエネルギー強度を設定する。

ステップ2: 計算用の初期値を設定

ステップ1で収集、もしくは設定したエネルギー消費量やサービス発現需要量前提値を基に、計算で用いる初期値を設定する。初めは、前提値を初期値とする(図-3の(2),(4),(8),(10),(14))。

ステップ3: エネルギーサービス発現量, エネルギー消費量, エネルギー機器情報間の整合

エネルギーサービス発現量とエネルギー消費量, エネルギー機器情報間に整合が取れるように, エネルギーサービス発現量とエネルギー消費量を推計する。(図-3の(2),(3),(6),(7),(12),(13))。

- 推計値と初期値を比較して, 推計値と初期値の誤差が許容範囲内の場合, 計算終了。

- 推計値が初期値から大きくはずれる場合, ステップ2に戻り, 初期値, または機器の分担率の設定を修正し, 再度計算を行う。推計値と初期値の誤差が許容範囲内になるまで繰り返す(図-3の(2),(4),(8),(14))。

図-3に推計作業シートの模式図を示す。推計に要するデータは大きく2種類に分けられる。エネルギー種別に整備されるデータとサービス種別に整備されるデータである。図-3の上段には, サービス種別の情報について記録する。左3列はエネルギーサービス発現需要量に関する

情報, その右隣がエネルギー機器の分担率, 右の5列はサービス種別エネルギー消費量に関するデータである。下段には, エネルギー種別に情報が記録され, 最左列が機器のエネルギー強度, 右5列がエネルギー消費量に関するデータである。図-3中の情報と作業ステップとの関係は, 既に作業ステップの説明の部分に示した通りである。以下, 具体的に推計に関わる変数設定や手法について説明する。

(2) 変数分類の設定について

本推計では, 2005年のエネルギーサービス需給構造を推計した。世界を35地域に分類し, エネルギー種を8種類, サービス種を5種類設定した。各設定の内容を表-3から表-5に示す。エネルギー種のバイオマスとは, 伝統的なバイオマスを指す。

(3) エネルギー種別エネルギー消費量の収集 (ステップ1-1)

エネルギー消費量の前提値は, 藤森ら²⁰⁾の手法によりエネルギーバランス表^{2), 3)}の値を調整したものを利用した。

藤森ら²⁰⁾は, IEAのデータにおけるi) 政変やオイルショックといったエネルギー消費量に劇的な変化が起こり得る地点以外におけるデータの不連続性や, ii) 情報不足により適切に分類できなかったエネルギー消費量が計上

表-3 地域分類

アジア15地域		その他20地域	
JPN	日本	XME	中東
CHN	中国	TUR	トルコ
IND	インド	AUS	オーストラリア
IDN	インドネシア	NZL	ニュージーランド
KOR	韓国	CAN	カナダ
THA	タイ	USA	アメリカ
TWN	台湾	XE15	西ヨーロッパ(EU加盟国)
VNM	ベトナム	XE10	東ヨーロッパ(EU加盟国)
MYS	マレーシア	XE2	ブルガリア・ルーマニア
PHL	フィリピン	RUS	ロシア
SGP	シンガポール	XCS	中央アジア(スタン)
XSE	その他東南アジア	XEWI	その他西ヨーロッパ(Annex)
XSA	その他南アジア	XEEI	その他東ヨーロッパ(Annex)
XEA	その他東アジア	XENI	その他ヨーロッパ
XOC	その他オセアニア	BRA	ブラジル
		ARG	アルゼンチン
		MEX	メキシコ
		XLM	その他ラテンアメリカ
		ZAF	南アフリカ
		XAF	その他アフリカ

表-4 エネルギー分類

バイオマス (BM)	天然ガス (NG)
石炭 (CL)	電気 (EL)
灯油 (OK)	熱 (HT)
LPG (OL)	太陽熱 (ST)

表-5 サービス分類

サービス種	定義
暖房	暖をとること。建物全体や部屋全体を暖めるものから、ヒーターなどで暖をとるものまで含まれる。
冷房	涼しく過ごすこと。本研究ではエアコンを利用して部屋全体を冷やすことのみを対象とする。
給湯	お湯を沸かし利用すること。
厨房	食物を料理すること。
その他	上に含まれないエネルギーサービス。代表的なものとしては照明、冷蔵庫、テレビの使用が挙げられる。

される Non-specified に対処するため、各部門のエネルギー消費量に影響を与える社会・経済変数を利用した調整計算を行った。その結果、データの不連続性や Non-specified の問題が改善されたエネルギー消費量が推計されている。調整手法の詳細については、藤森ら²⁰⁾を参考にされたい。

(4) サービス種別エネルギー消費量の収集

(ステップ1-1)

サービス種別エネルギー消費量の前提値は、各地域に関する調査結果や統計などがある場合はそれを利用し、ない場合は SAGE²⁷⁾のデータを利用した。利用したデータの一覧を表-6 に示す。

サービス種別エネルギー消費量に関する報告は、表-6

表-6 サービス種別エネルギー消費量一覧

地域	参考資料
日本	エネルギー・経済統計要覧 ⁸⁾
中国	中国の住宅におけるエネルギー消費と居住環境問題特別研究委員会 報告書 ¹⁴⁾
アメリカ	Residential energy consumption survey ¹⁰⁾
カナダ	Energy use data handbook ¹¹⁾
オーストラリア	Australian residential building sector greenhouse gas emissions 1990-2010 ¹²⁾
インド	Teri energy data directory & yearbook ¹⁵⁾
西ヨーロッパ (EU加盟国)	Odyssee online database ¹³⁾
その他の地域	Model documentation report: system for the analysis of global energy markets (SAGE) ²⁷⁾

表-7 サービス潜在需要量推計に用いた変数一覧

サービス種	潜在需要量を決定する変数
暖房	暖房度日, 暖房面積, 熱損失係数
冷房	冷房度日, 冷房面積, 熱損失係数
給湯	1人あたり給湯使用量
厨房	内食率, 調理強度
その他	1人あたりGDP

に示した以外にもあることは、既に2.でも説明した。本論文では、データの整備しやすさの観点から、地域別に詳細にサービス種別エネルギー消費量を設定したのは7地域とし、その他の地域については SAGE²⁷⁾の値を用いることにした。今回前提値として設定できなかった地域別の報告書データをいかに設定するかについては、今後の課題とする。

(5) エネルギーサービス発現需要量の前提値の推計

(ステップ1-2)

既に3.でも説明したが、エネルギーサービス需要量は潜在需要量と発現需要量の2種類を区別している。潜在需要量は社会的、文化的条件から決まるものであり、決定する変数の一覧を表-7に示す。これらの変数の設定方法を表-8に示す。

サービス潜在需要量は各社会変数との間に式(5)から式(9)に示す関係をもっている。本研究では、日本の一人あたりサービス発現需要量を1とした時の、各地域における一人あたりサービス発現需要量を設定する。

暖房は、暖房面積、暖房度日、熱損失係数によって需要が決まることとした。

$$\overline{D}_r^{HM} = ARH_r \cdot HDD_r \cdot Q_r / (ARH_{JPN} \cdot HDD_{JPN} \cdot Q_{JPN}) \quad (5)$$

冷房は、冷房面積、冷房度日、熱損失係数により決定され、潜在需要量は式(6)のように表わされる。

表-8 変数の設定方法

変数	設定方法
暖房度日	Mitchell, T. D., and P. D. Jones ²⁸⁾ に基づいて、暖房度日(基準温度:18度)を地域別に集約した。集約の際には人口データで重みづけした。
1人あたり暖房面積	Encyclopedia Britannica ²⁹⁾ の床面積データを基に、地域別に設定。全館暖房中心の地域は、一人あたり住宅床面積を暖房面積とし、部屋暖房中心の地域は、一部屋あたりの平均床面積を世帯人数で除したものを暖房面積とした。
1人あたり冷房面積	Encyclopedia Britannica ²⁹⁾ の床面積データを基に地域別に設定。一部屋あたりの平均床面積を世帯人数で除したものを冷房面積とした。
熱損失係数	日本、アメリカ、カナダ、イギリス、フランス、ドイツ、北欧などの基準値を参考に、地域の気候別に設定。
冷房度日	暖房度日と同様の手法に基づいて、地域別に冷房度日(基準温度:18度)を作成した。
1人あたり給湯使用量	各地域の給湯の主な利用目的を風呂とし、風呂の種類や入浴回数などから地域別に設定。
内食率	Euromonitor international ³⁰⁾ の消費支出データを利用して、食費に占める外食費(=外食率)の割合を求め、その後1-外食率によって設定。
調理強度	日本を1として、地域別に設定。
1人あたりGDP	藤森ら ³¹⁾ で推計された名目一人あたりGDPをUN ³²⁾ のデフレーターを使用して実質一人あたりGDPにした(PPP換算値)。

表-9 発現係数の設定

サービス	発現係数の設定方法
暖房	比較的安価に入手できるバイオマスによって暖房を供給できるので、発現係数は1とした。
冷房	発現係数はエアコン普及率に依存すると考えた。
給湯	発現係数は水使用可能量に依存すると考えた。
厨房	比較的安価に入手できるバイオマスによって暖房を供給できるので、発現係数は1とした。
その他	潜在需要量と発現需要量の区別することが現実的でないため、発現係数は1とした。

$$\overline{D}_r^{CL*} = ARC_r \cdot CDD_r \cdot Q_r / (ARC_{JPN*} \cdot CDD_{JPN*} \cdot Q_{JPN*}) \quad (6)$$

式(7)は厨房需要と、調理強度と内食率との間の関係である。

$$D_r^{CK*} = UCK_r \cdot REH_r / (UCK_{JPN*} \cdot REH_{JPN*}) \quad (7)$$

給湯需要については、1人あたりサービス需要量の間次式(8)を想定する。

$$\overline{D}_r^{HW*} = PHW_r / PHW_{JPN*} \quad (8)$$

その他需要には、照明、テレビ、冷蔵庫、その他家電製品といった様々なサービスが含まれる。その他需要では、可処分所得の増加に伴い、今までに想定していない需要を生み出すために、潜在需要量と発現需要量を区別することは現実的ではない。本研究では一人あたりGDPがその他需要を説明するとした(式(9))。

$$D_r^{OT*} = GDP_r / GDP_{JPN*} \quad (9)$$

次に、発現需要量の前提値を設定するために、表-9に示す発現係数を設定した。

(6) エネルギー機器に関する変数の収集(ステップ1-3)

本研究では、エネルギー機器を41種類設定した。原則、機器はサービス種、エネルギー種別にエネルギー強度により2種類設定している。エネルギー強度の小さい機器は先進国で利用されているものとし、エネルギー強度の大きい製品は発展途上国で利用されているものとした。以下、機器の分担率とエネルギー強度のデータ収集につ

いて説明する。

a) エネルギー機器の分担率の設定

エネルギー機器の分担率については、各国のサービス別の分担率が得られる場合はそれを利用し^{20), 24), 29), 33), 34)}得られない場合は、機器普及率のデータ³⁰⁾や社会・経済的状況を考慮し、近隣地域の値を利用して設定した。

b) エネルギー機器のエネルギー強度

エネルギー強度に関する情報としては、日本については省エネルギーセンター³⁵⁾から得られる。しかし、これは最新の販売機器に関するエネルギー強度(直接得られる情報はエネルギー効率)であるため、実際に利用されているエネルギー機器の平均エネルギー強度より小さいことが予想される。本研究では、日本では機器の平均的な寿命を考慮して2000年時点の販売機器のエネルギー強度を2005年に利用されている機器のエネルギー強度の平均値とした。日本の機器は一般的に性能が優れており他国と比較するとエネルギー強度が小さいため、海外に関しては以下のルールで機器のエネルギー強度を設定した。

・先進国の場合

先進国では、一般的に機器性能が優れており、基本的に日本と同じエネルギー強度の機器を使用しているものとした。ただし、電気機器に関して日本よりも若干エネルギー強度が大きいことが報告されている³⁶⁾ため、電気機器に関しては10%程度エネルギー強度が大きくなるように設定した。

・発展途上国の場合

発展途上国では、化石燃料系機器に関しても日本よりエネルギー強度の大きいものが利用されていると考え、先進国が利用している機器よりもエネルギー強度が10%程度大きいと設定した。また、電気製品に関しては、エアコンに関しては30%程度大きく³⁶⁾、その他サービスを供給する機器に関しては、逆に30%程度エネルギー強度を小さく設定した。これは既に述べた通り、その他需要は地域の発展レベルに応じて、照明から冷蔵庫やテレビ、その他の電気製品が導入されていく。その他サービスを供給する機器に関しては、照明だけのエネルギー強

度はその他の雑多な電気機器の平均的なエネルギー強度よりも小さいため上述のように設定した。

(7) 推計用初期値の設定 (ステップ2)

初めに、4. (3) から (6) で説明したエネルギー消費量、エネルギーサービス発現需要量、エネルギー機器に関する情報を初期値として設定した。4. (8) で説明する計算の結果により初期値の設定が適切でないと判断した場合は、適宜初期値の修正を行った。

(8) エネルギーサービス発現需要量とエネルギー消費量、エネルギー機器情報間の整合 (ステップ3)

ステップ2 で設定したエネルギー消費量、エネルギーサービス発現需要量の初期値には誤差が含まれるため、式(1)から式(4)に示した各変数間の関係を満たしていない可能性が高い。そこでステップ3 では式(1)から式(4)を同時に満たす値を推計する。その際に、以下のルールを設けた。

- 1) エネルギー種別エネルギー消費量割合、サービス種別エネルギー消費量割合、エネルギーサービス発現需要量の3変数のみ動かす。
- 2) エネルギー消費量合計値($= \sum_i E_r^i = \sum_s ES_s^i$)は固定する。
- 3) 式(1)から式(4)を同時に満たす解が複数ある場合、式(10)に示す推計値と初期値の誤差の加重和を最小にする値を最終解とする。

$$w1 \cdot (RE_r^i - \widetilde{RE}_r^i)^2 + w2 \cdot (RES_s^i - \widetilde{RES}_s^i)^2 + w3 \cdot (D_r^i - \widetilde{D}_r^i)^2 \quad (10)$$

$$RE_r^i = E_r^i / \sum_i E_r^i \quad (11)$$

$$RES_s^i = ES_s^i / \sum_s ES_s^i \quad (12)$$

ステップ3 における求解には、GAMS22.6, ソルバー CONOPT を利用した。

ここで、w1 から w3 は各変数に対する重みづけであり、今回は、w1=5, w2=2, w3=1 として推計した。3つの変数のうちエネルギー種別エネルギー消費量に関するデータが一番多くあり、初期値の精度も一番高いものと考えた。サービス別エネルギー消費量に関するデータも複数見受けられるが、初期値の精度はエネルギー種別エネルギー消費量より低いと考えた。一方、サービス発現需要量に関しては、各サービスと関係の深い変数を利用して初期値を設定しているが、サービス発現需要量が直接観測されるものではないので、初期値の精度が一番低いと考えた。そのため、エネルギー種別エネルギー消費量に関して重みづけを大きく、サービス発現需要量に関して重み

づけを小さくした。

推計結果が得られた後、次の推計値に関する3つの条件を全て満たした場合、計算を終了した。ここで、誤差とは推計値と初期値の差を意味する。

- ・エネルギー種別エネルギー消費割合の初期値が5%以上あるエネルギー種に対して、誤差が±2%以内。
- ・サービス種別エネルギー消費割合の初期値が5%以上あるエネルギー種に対して、誤差が±5%以内。
- ・サービス需要発現量の初期値が0.5以上の場合、推計値と初期値の比が0.67以上1.5以下になること。初期値が0.2以上0.5未満の場合、推計値と初期値の比が0.5以上2.0以下になること。

これらの条件を満たさない推計値があった場合は、ステップ2に戻り、サービス種別エネルギー消費量割合、もしくはサービス発現需要量、エネルギー機器の分担率の初期値を設定し直すこととし、上の3条件を満たすまで、ステップ2とステップ3を繰り返した。

5. 結果及び考察

(1) エネルギー種別エネルギー消費割合

はじめに、エネルギー種別エネルギー消費割合の推計結果を図-4に示す。本推計では、エネルギー種別エネルギー消費量の初期値に重みを置いたため、初期値とほとんど差がない結果となった。利用されるエネルギーは各地域のエネルギーの入手しやすさに依存するため、発展レベルが同程度であっても同じようなエネルギーを利用しているとは限らない。全体的には、先進国や新興工業国では電力の使用割合が高く、アジアやアフリカの発展途上国ではエネルギーの大部分をバイオマスに依存していることが分かる。灯油は主に暖房に利用されるため、全館暖房が盛んな欧米ではほとんど利用されず、その代わりに熱の消費割合が大きい。

(2) サービス種別エネルギー消費割合

サービス種別エネルギー消費割合の推計結果を図-5に示す。サービス種別のエネルギー消費量を見てみると、カナダや北欧、ロシアなどでは全エネルギー消費量のうち約6割が暖房に使用されている。暖房期間が長いこと、全館暖房が利用されること、エアコンなどが利用されずエネルギー強度の高い機器が利用されるためである。一方、冷房は電気を利用することで供給されるため、機器のエネルギー強度が小さいことと機器普及の制約の理由により、ほとんどの地域で多くてもエネルギー消費量のうちの1割程度しか利用されていない。その中で、シンガポールや台湾ではエネルギー消費量のうち3割近くが冷房に利用されていることが特徴的である。厨房や給湯は全ての地域で必要なサービスであるため、厨房・給湯

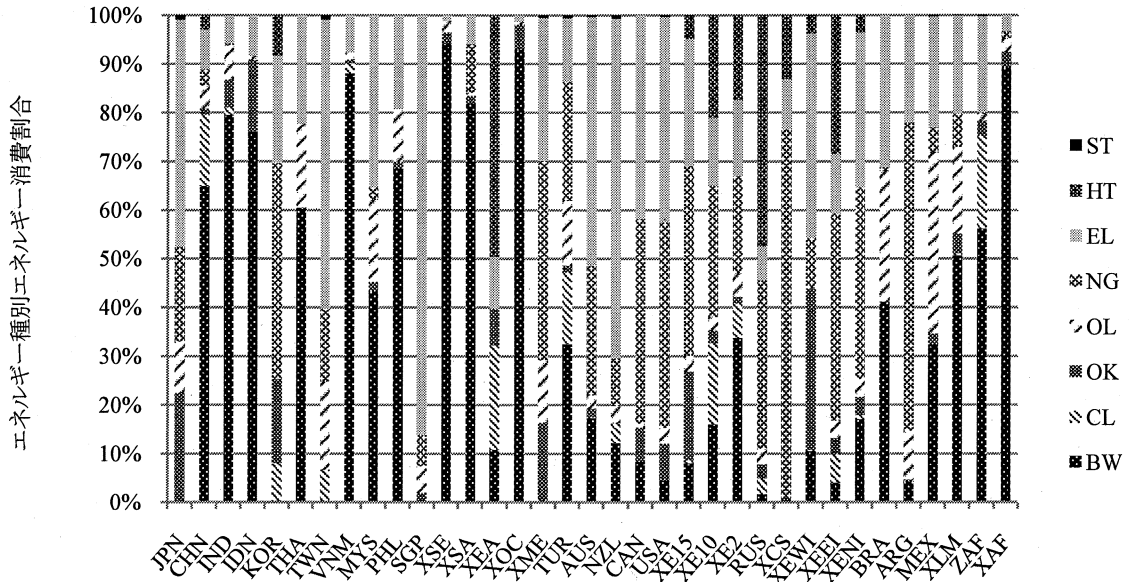


図-4 エネルギー種別エネルギー消費割合

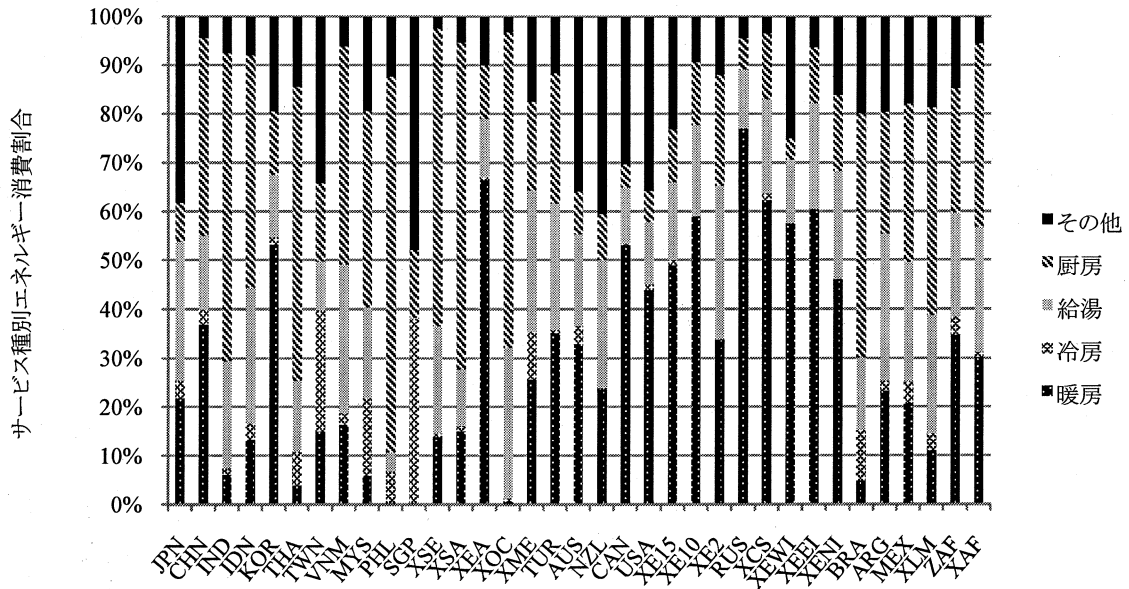


図-5 サービス種別エネルギー消費割合

のエネルギー消費割合が小さい地域でも全体に対して2割程度のエネルギーが消費されており、発展途上国では最大8割近いエネルギーが消費されることがわかる。先進国や新興工業国ではその他サービスのために20%から35%程度のエネルギーが消費されている。特にシンガポールではその他サービスに5割近いエネルギーが利用されている。

(3) サービス発現需要量

サービス発現需要量の推計結果について図-6 から図-10 に示す。これらは、日本の一人あたりサービス発現需要量を1としたときの値である。

暖房サービス発現需要量は、地域によって大きく異なることが明らかになった。カナダやロシア、北欧では、

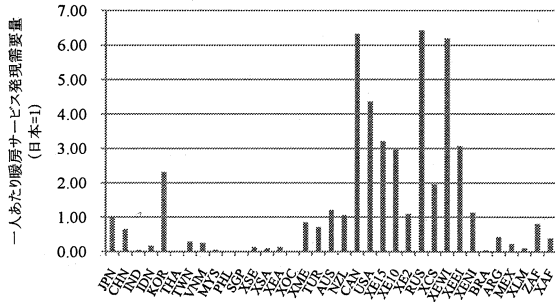


図-6 一人あたり暖房サービス発現需要量

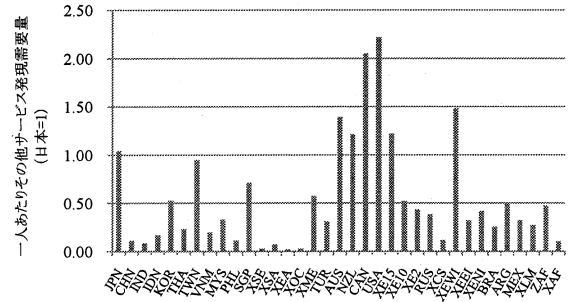


図-10 一人あたりその他サービス発現需要量

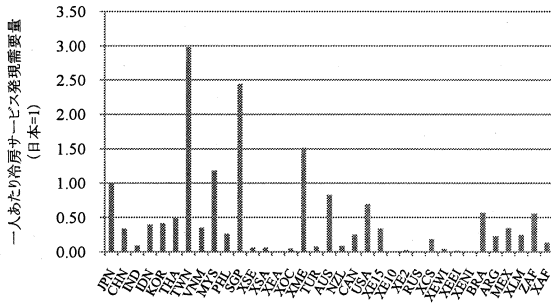


図-7 一人あたり冷房サービス発現需要量

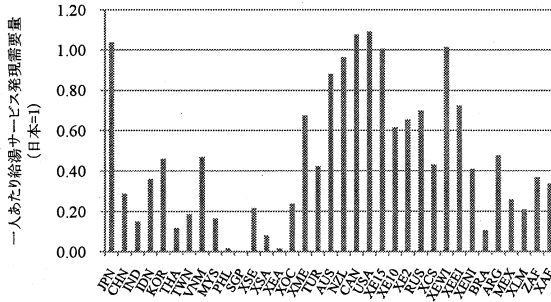


図-8 一人あたり給湯サービス発現需要量

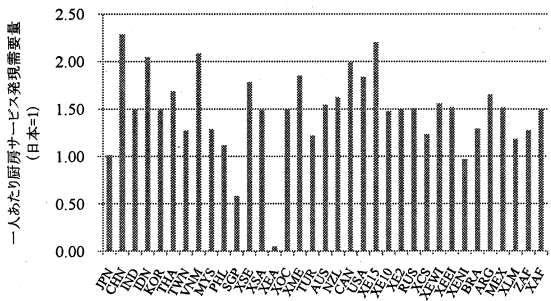


図-9 一人あたり厨房サービス発現需要量

一人あたりのサービス発現需要量が日本の6倍程度になることが明らかになった。他にもアメリカで4倍、ヨーロッパで3倍近い需要がある。また、韓国でも日本の2倍近い需要がある。日本の同程度の需要がある地域は、オーストラリアやニュージーランド、ブルガリアやルーマニア、日本とはほぼ同緯度地域にある其他ヨーロッパとなった。

冷房の潜在サービス量はアジアやアフリカ、中南米で必要とされるが、一方で、これら地域の多くは発展途上であり、エアコン普及率の制約により発現サービス需要量は、日本の5割程度にとどまっている。一方、比較的発展しているシンガポールや台湾では日本の2.5倍から3倍近く一人あたりサービス発現需要があることが示された。日本よりも発現需要量が多い地域はほとんどなく、アメリカやオーストラリアでも日本の75%程度の需要量しかないことがわかる。尚、本論文では冷暖房の潜在サービス需要量を決定するための仮定値として、表-8に示した冷暖房度日を利用した。このデータは基準温度がいずれも18度であり、実際の冷暖房設定温度と比較すると、特に冷房に関して基準温度が低い印象を受ける。推計の際に発現サービス需要量の仮定値は調整されるが、仮定値との誤差を最小化するように計算しているため、推計結果が過大推計されている可能性がある。

給湯サービスについては、先進国で多くのサービス発現需要があり、先進国が世界でも最も給湯の発現需要がある地域であることが分かる。次に先進国の7割程度のサービス発現需要があるのが東ヨーロッパや中東などである。先進国の半分以下のサービス発現需要量しかない地域は、i) 給湯サービスの主な目的である風呂での湯の使い方が文化的に少ないことと、ii) 暑い地域であるために風呂で湯を利用しないといった文化的理由と社会的理由による影響が考えられる。

厨房サービスはほとんどの地域で日本より多くのサービス発現需要があることが分かる。日本において外食率が高いことや、電子レンジなどでの簡易調理製品の利用が増えていることを考慮すれば、アジア等の発展途上国

想される。一方、先進国においても日本の1.5倍から2倍近いサービス発現需要があることは、過大推計である可能性が高く、適切なサービス発現需要の初期値の設定

表-10 報告値一覧

地域	報告値一覧
日本	報告値1:エネルギー経済統計要覧 ⁸⁾ 報告値2:家庭用エネルギー統計年報 ⁹⁾
中国	中国の住宅におけるエネルギー消費と 居住環境問題特別委員会報告書 ¹⁴⁾
韓国	家庭用エネルギー統計年報 ⁹⁾

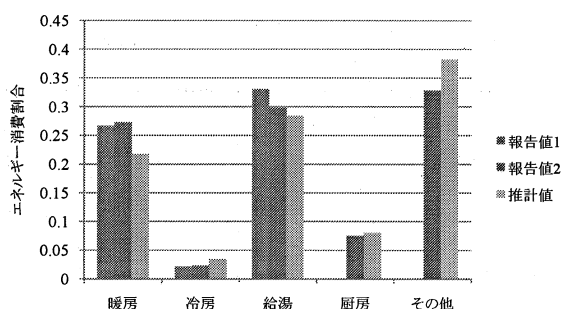


図-11 日本の推計結果の比較

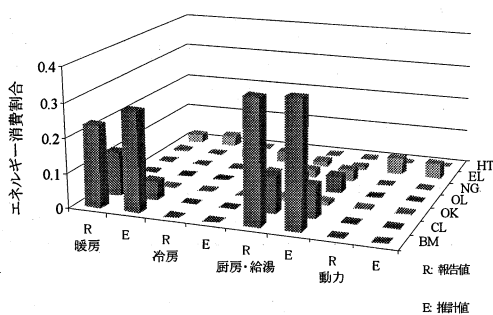


図-12 中国の推計結果の比較

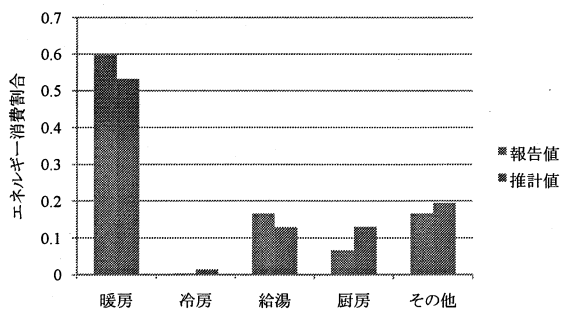


図-13 韓国の推計結果の比較

方法については、今後の検討課題としたい。

その他サービスに関しては、アメリカやカナダで日本の2倍近いサービス発現需要があることが示された。その他サービスは雑多なサービスが含まれており、エネルギー機器の平均的なエネルギー強度の設定が非常に難しかった部分でもあり、日本よりもサービス発現需要が大きい可能性と、エネルギー強度が日本よりもかなり大きい可能性について検討する必要があるだろう。

また、全サービス種について北朝鮮・モンゴル(XEA)のエネルギーサービス発現量が極端に小さいことがわかる。冷房やその他サービスについてはサービス発現量がかなり小さいことは十分予想されるが、厨房や暖房に関して日本のレベルの1割程度しかサービス発現需要量がないという結果は、人が生きるための最低条件を大きく下回っている。北朝鮮・モンゴル(XEA)については、サービス発現量の最終的な初期値が、最初に設定した初期値よりもかなり小さくしないと推計結果に関する条件を満たすことができなかった。これは本手法におけるエネルギー消費量合計値を固定する、とした設定によるものであり、つまりエネルギー消費量の合計値が明らかに間違っていることを意味する。

(4) 推計値と報告値の比較

最後に、推計値を報告値と比較する。図-11から図-13に日本、中国、韓国の推計値と報告値の比較結果を示した。それぞれ報告値の一覧を表-10に示す。いずれの結果も各種報告値と大きく外れていないことが示された。これは手法論上、推計値は必ず4.(8)に示した条件を満たすためである。ただし、エネルギー消費割合が小さいサービス種エネルギー消費量やエネルギー種別サービス種別エネルギー消費量の結果の一部は、推計値と報告値の比が大きい。現時点での推計値と初期値の誤差に関する推計結果の判断基準からすれば起こり得る結果であるが、エネルギー消費割合の小さいサービス種についても、説得力のある結果を推計する手法については、今後の課題としたい。

6. まとめ

本研究では、家庭部門におけるエネルギー需給構造を限定的な情報から把握するための手法を開発し、2005年において世界35地域に適用した。本研究の特徴をまとめると、以下の3点があげられる。

- ・本手法は限定された情報から、エネルギーサービスの需給バランスに関して整合のとれた未知の情報が把握できるという点で有用である。
- ・本研究の結果は、エネルギーサービスの需給バランスに関する整合が取れているという点で、既報告値と比較

して精度が同程度、もしくは、向上したといえる。
・ただし、情報間に成立すべき関係の整合性を確認する方法のみで現在把握できない未知情報を推計しているため、現時点では比較対象がない推計結果の信頼性を確認できない。

推計結果からは以下のことが分かった。

・途上国では、厨房用のエネルギー消費割合が高く、6割近いエネルギーが消費される地域もある。

・先進国では、北米やヨーロッパの比較的高緯度地域にある国では暖房用のエネルギー消費割合が非常に高く、日本やオーストラリア、ニュージーランドではその他、暖房、給湯などのエネルギー消費量が比較的大きい。

・暖房や冷房といったサービス発現需要は、サービス供給形態が地域により異なることや、社会的・経済的制約により発現需要の規模が地域により大きく異なる。

今後の課題としては、以下の4点を挙げる。

・本手法は、初期値の設定により、結果が大きく変化する可能性があるため、初期値の設定には注意が必要である。

・現時点で入手したデータは、先進国や一部の途上国のデータばかりであり、今後も随時データを収集し、推計結果を更新し続ける必要がある。

・本手法を2005年以前に遡って適用し、家庭部門における詳細なエネルギー消費構造について時系列のデータを作成し、構造の変遷を解析する。

・エネルギーサービス潜在需要量の将来推計とエネルギー機器情報に関する将来シナリオを設定し、将来の家庭部門におけるエネルギーサービス需給構造を明らかにする。

謝辞：本研究は環境省の環境研究総合推進費(A-0808, S-6-1)の支援を受けている。ここに感謝の意を記す。

参考文献

- 1) International Energy Agency: World Energy Outlook 2002, OECD/IEA, 2002.
- 2) International Energy Agency: Energy Balances of OECD countries 1960-2005, OECD, 2007.
- 3) International Energy Agency: Energy Balances of Non-OECD countries 1971-2005, OECD, 2007.
- 4) 資源エネルギー庁: 総合エネルギー統計, 通商産業研究者, 2008.
- 5) 経済産業省資源エネルギー庁: 電力需給の概要, 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部編, 2007.
- 6) 社団法人日本ガス協会: ガス事業便覧, 2008.
- 7) 経済産業省: 石油等消費動態統計年報, 2007.
- 8) 日本エネルギー・経済研究所: エネルギー経済統計要覧, (財)省エネルギーセンター, 2009.

- 9) 住環境計画研究所: 家庭用エネルギー統計年報 2005年版, 2007.
- 10) Energy Information Administration: Residential Energy consumption survey, 2001.
- 11) Natural Resource Canada: Energy use data handbook tables, 2006.
- 12) Australian greenhouse office: Australian residential building sector for greenhouse gas emissions 1990-2010, 1999.
- 13) Odyssee Project: Energy efficiency indicators in Europe. <http://www.odyssee-indicators.org/>
- 14) 中国の住宅におけるエネルギー消費と居住環境問題特別委員会: 中国の住宅におけるエネルギー消費と居住環境に関する研究報告書, 日本建築学会, 2005.
- 15) 財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット: 平成20年度エネルギー消費状況調査(民生部門エネルギー消費実態調査)-経済産業省資源エネルギー庁委託調査, 財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット 2009.
- 16) 住宅用エネルギー消費と温暖化対策検討委員会ホームページ: <http://kkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/index.htm>
- 17) 岩船由美子, 横尾美雪, 中上英俊, 會田光男: 世界各国における家庭用エネルギー消費に関する調査(第1報 欧米編), 第22回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, 2006.
- 18) 岩船由美子, 中上英俊, 會田光男: 世界各国における家庭用エネルギー消費に関する調査(第2報 アジア編), 第23回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, 2007.
- 19) 近藤康彦, 村田晃伸, 周緯生: 実態調査に基づく中国都市部における電力需要分析に関する研究, 第18回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 476-477, 2009.
- 20) Tata Energy Research Institute: Teri Energy Data Directory & Yearbook 2000/2001, Tata Energy Research Institute, 2000.
- 21) Pachauri, S.: An Energy Analysis of Household Consumption Changing Patterns of Direct and Indirect Use in India, Springer, 2007.
- 22) Tuan, N. A. and Lefevre, T.: Analysis of household energy demand in Vietnam, Energy policy, 24(12), 1089-1099, 1996.
- 23) 森川貴夫, 下田吉之, 水野稔: 住宅や機器の性能分布を考慮した大阪市住宅エネルギー需要の推計 世帯詳細区分型都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発と応用(2), 日本建築学会環境系論文集, No. 595, 97-104, 2005.
- 24) Natural Resource Canada: 2003 Survey of household energy use (SHEU) detailed statistical report, 2006.
- 25) U. S. department of housing and urban development and U. S. census bureau: American housing survey for the United States: 2005, 2006.
- 26) 藤森真一郎, 松岡謙: エネルギー転換効率を考慮したエネ

- ルギー算出投入表の推計手法の開発とその適用, 地球環境研究論文集, Vol. 17, pp163-174, 2009.
- 27) U.S. Department of Energy: Model Documentation Report: System for the Analysis of Global Energy Markets (SAGE), 2003.
- 28) Mitchell, T. D., and P. D. Jones: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids, *Int. J. Climatol.*, 25(6), 693–712, doi:10.1002/joc.1181, 2005.
- 29) Encyclopedia Britannica: Britannica book of the year 2000, Events of 2007, Encyclopedia Britannica Inc., 2000.
- 30) Euromonitor international: Global market information database. <http://www.euromonitor.com/>
- 31) 藤森真一郎, 松岡謙: エネルギー統計・経済統計の統合と一消費量と二酸化炭素排出量の推計に関する研究, 環境シ
(2010.3.5 受付)
(2010.6.4 受理)
- それをを用いた世界全域における化石燃料起源のエネルギーシステム研究論文集, Vol. 36, pp37-48, 2008.
- 32) UN (United Nations): National Accounts Main Aggregates Database, New York, USA, 2008.
- 33) 住環境計画研究所: 2004年度世界の暮らしとエネルギーに関する調査報告書, 2005.
- 34) 都市生活研究所: 世界の暖房事情 1 ヨーロッパ・韓国編, 都市生活レポート, No.28, 1993.
- 35) 省エネルギーセンターHP: URL: <http://www.eccj.or.jp/>
- 36) (財) 省エネルギーセンター: 海外と日本における機器のエネルギー消費効率分布および実測による効率比較に関する調査, 2004.

Estimation of Residential Energy Consumption Considering Energy Service Demand and Supply Structure

Yuko KANAMORI¹ and Yuzuru MATSUOKA²

¹National Institute for Environmental Studies

²Graduate School of Engineering, Kyoto University

To overcome the global warming and energy issues, it is very important to grasp energy consumption by energy end-use devices. Focusing on the residential sector, energy consumption structure is very complex, because the structure depends on regional development level, climate characteristics and energy accessibility. Therefore, we can partly know the structure in detail using survey and statistics. In this study, we proposed a method to estimate energy consumption and energy service supply using available statistics and references. We applied this method to residential sector in world the regions, and estimated energy consumption by energy end-use devices and fuel type in 2005. The results show that this method could estimate valid energy consumption comparing with Japanese statistics which were not used in the method.