

〈論文〉

中国での家庭部門のエネルギー消費量と燃料使用に伴う室内PM_{2.5}曝露量推計郭 敏 娜¹⁾, 倉 田 学 児²⁾, 松 岡 讓³⁾¹⁾ 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C E-mail: guo.minna.66e@st.kyoto-u.ac.jp)²⁾ 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C E-mail: kurata.gakuji.5a@kyoto-u.ac.jp)³⁾ 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C E-mail: matsuoaka@env.kyoto-u.ac.jp)

概 要

WHOによると、中国の室内空気汚染による早死者数は約54万人と推計されており、大部分は調理、暖房での低品質な固形燃料の利用が原因である。これらの問題の現状を把握し改善策を検討するためには、現状の家庭でのエネルギー使用量の適切な把握と、それらによって個人がどの程度の曝露を受けているのかを定量的に推計する事が必要である。本研究は、中国の30地域（チベットを除く）の都市・農村を対象として、室内での燃料種別・機器別・用途別のエネルギー消費量を推計し、微環境個人曝露モデルを利用して、屋内・屋外でのPM_{2.5}平均曝露量を推計した。その結果、農村における年齢・属性別PM_{2.5}一日平均曝露濃度については、女性が男性より大きい値となる事や、その主たる原因が調理における固形燃料にあることが明らかとなった。また、制御策として、固形燃料を天然ガスへ転換したケースを考えた場合に、曝露量が最大で10分の1に減少することが分かった。

キーワード：PM_{2.5}、室内空気汚染、家庭エネルギー消費量、個人曝露モデル、中国
原稿受付 2014.7.11 原稿受理 2014.8.27

EICA: 19(2・3) 166-175

1. はじめに

世界の人口の50%以上は固形燃料を住居内で調理や暖房のために使用しており、これらが燃焼する際に生じる汚染物質に曝露されている¹⁾。WHOの報告によると、中国だけで室内汚染による早死者数は年間約54万人と推計されており、室内汚染は環境リスクの大きな原因となっている²⁾。

Zhangの研究では2001年の中国全土の家庭部門の石炭とバイオマスを燃焼して発生したPM_{2.5}は0.77 Tgと3.08 Tgと推計している。また、省別の家庭部門のPM_{2.5}排出量を比較した結果、最もPM_{2.5}排出量が多い地域は山東省、河北省、広東省、河南省と江苏省であったことを明らかにしている³⁾。

中国での家庭燃料使用量は地域間の差が大きく、また都市と農村でも違いが大きい。農村地域の家庭用燃料の使用量はその地域の資源賦存量の状況や、経済状況とインフラ整備状況に深く関わっている。例えば、チベットでは化石燃料資源が少ないため、主にバイオマスを燃料として使用しており、燃料としての動物糞、農業残渣と電気の消費割合は52.9%, 46.8%, 0.3%となっている⁴⁾。

Mestlらは、中国を南部と北部に分けて、都市・農

村別の固形燃料起源の室内のPM₁₀の曝露濃度を推計した⁵⁾。また、島田らは、Mestlらの研究の燃料消費量、微環境滞在時間など情報を統計資料に基づいて詳細なものに置き換えて、中国の10地域での年齢属性別、都市・農村別の室内PM_{2.5}一日平均曝露濃度を推計した⁶⁾。しかし、中国の家庭部門のエネルギー消費実態は各地域固有の需要特性とエネルギー供給条件によって形成されているため、これらの多様性を考慮しないと、正確な推計は難しい。そのため、これまでに中国地域別、都市・農村別のエネルギー構造を詳細に検討した研究は少ないのが現状である。

本研究では調理・給湯、暖房機器などの効率を考慮し、統計資料を最大限に利用して、家庭部門のエネルギー消費量を都市・農村別、用途別、機器別に推計するとともに、時間平均アプローチによる微環境個人曝露モデルを用いて、チベットを除くで中国の30の省・直轄市（Fig. 1）の屋内・屋外の両方を考慮したPM_{2.5}の年齢属性別の一日平均曝露濃度を推計した。

Zhangらによると、中国全土のバイオガスの消費量は1996年の1.5 Gm³から2003年には4.6 Gm³に増加している⁷⁾。バイオガスは、持続可能なエネルギー源として中国では重点項目のひとつとなっている⁸⁾ことから、本研究では薪、農業残渣以外にバイオガスの



Fig. 1 Target area of the Study

使用量もバイオマス消費量に加えた。

2. 研究の方法

2.1 本研究の概要

Fig. 2 に本研究の全体像を示す。本研究の中心は、家庭部門のエネルギー消費量を推計した右上の部分と、その結果を利用した微環境個人曝露モデルである。微環境滞在時間と、各微環境における汚染物質濃度に基づいて式(1)によって年齢・属性別の一日平均曝露濃度を求める。

$$\bar{E}_a = \sum_m C_m \cdot T_m^a \quad (1)$$

ここで、

\bar{E}_a : 年齢・属性集団 a の $PM_{2.5}$ 一日平均曝露濃度 ($\mu g/m^3$)

C_m : 微環境 m 中の汚染物質濃度 ($\mu g/m^3$)

T_m^a : 年齢・属性集団 a の微環境 m の滞在時間率 (-)

計算の対象年は2007年、対象物質は $PM_{2.5}$ のみとした。室内汚染に関しては、各地域の都市・農村別の

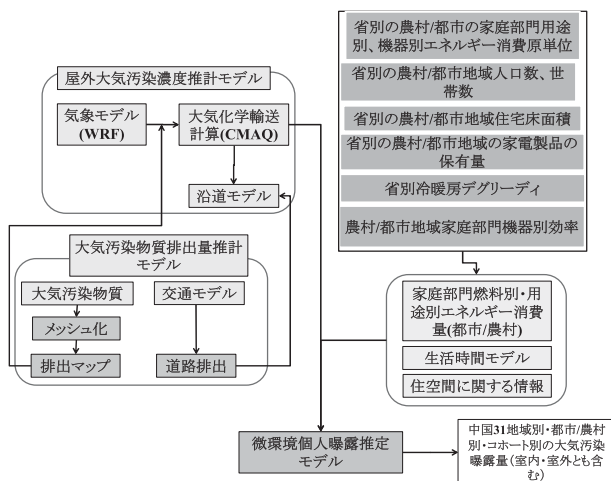


Fig. 2 Outline of the Study

Table 1 Category of micro-environment in this study

微環境	場所	使用用途	PM2.5の室内発生原因	対応する滞在時間
A	室内	調理 給湯	調理用コンロ・ 電の使用	調理時間
B	室内	暖房	暖炉・ストーブ 等の使用	睡眠時間を除く室内滞在時間 (屋外気温が10℃以下のとき)
C	室内	照明	灯油	就寝時を除く夜間に照明を使用し ていると仮定し、12時間(平均の 要照明時間)-睡眠時間 ※ただし、室内滞在時間が12時 間未満の場合は、「室内滞在時 間-睡眠時間」とした
D	室内	-	なし	室内滞在時間-微環境 A, B, C の 滞在時間
E (高)	屋外	-	-	屋外滞在時間(沿道:高)
E (中)	屋外	-	-	屋外滞在時間(沿道:中)
E (低)	屋外	-	-	屋外滞在時間(沿道:低)

用途別の家庭内燃料(バイオマス, バイオガス, 石炭, 灯油, LPG, 天然ガス, 電気, 熱)使用量と燃料種別の室内へ排出する $PM_{2.5}$ の排出係数から汚染物質発生量を推計した。考慮した用途は、調理・給湯, 暖房および照明である。屋外に関しては、人為起源, 自然起源, バイオマス燃焼起源の $PM_{2.5}$ の一次粒子および NO_x , SO_x , 非メタン炭化水素からの二次生成粒子を対象とし、気象モデル WRF と大気化学輸送モデル CMAQ を用いて、広域スケールの大気汚染物質濃度を計算した⁹⁾。

式(1)の T_m^a の設定には、中国の2008年の生活時間利用調査データ¹⁰⁾を用いて、年齢・属性区分にて0歳, 1歳~74歳を5歳間隔として、性別及び職業の有無で計54に分類した。本研究では、微環境を Table 1 のように設定した。微環境 A はキッチンにおける調理・給湯, 微環境 B, C は居間や寝室などの室内で、それぞれ暖房, 照明(石油ランプなど)の汚染物質発生源が存在する。微環境 D は室内に発生源のない場合を想定している。微環境 E は屋外で、活動の種類によって道路からの距離が異なると考え、道路交通起源の寄与の程度により高・中・低に3区分した。

2.2 各微環境の平均濃度の計算方法

室内の各微環境の平均濃度は、微環境での汚染物質の収支式である式(2)に対して、濃度が定常状態であるという仮定により導出した式(3)を使用した。微環境 B において暖房期の日数は、気象モデルの気温のデータを用いて、日平均気温が $10^\circ C$ 以下の日数を使用した。微環境 D については、同様に式(3)を用いるが、室内に発生源が無いために、屋外からの寄与のみとなり、大気汚染モデルで計算される屋外 $PM_{2.5}$ が流入してことで濃度が決まる。

$$\frac{dC_m}{dt} = F_p v C_o - v C_m - F_a C_m + \frac{S_e}{V} \quad (2)$$

$$C_m = \frac{I}{\nu + F_d} \left(F_p \nu C_o + \frac{Se}{V} \right) \quad (3)$$

ここで、

C_m : 微環境 m における室内 PM_{2.5} 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_o : 屋外 PM_{2.5} 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ν : 換気回数 (1/hr)

F_d : 除去率 (1/hr)

F_p : 貫入率 (-)

S : 微環境 m における時間当たり燃料消費量 (kJ/hr)

e : PM_{2.5} の排出係数 ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)

V : 微環境 m の容積 (m^3)

2.3 省別・用途別・燃料種別エネルギー消費量の推計方法

中国 30 省の都市・農村地域別の生活用エネルギー消費量は、中国統計年鑑 2008¹¹⁾ のエネルギーバランス表に記載されているが、用途別には分類されていない。そこで、まず用途別・燃料種別のエネルギー消費量を推計する方法を検討した。中国の都市と農村の家庭部門のエネルギー需要は、調理・給湯、暖房、照明、冷房と家電製品に分類される。エネルギー種としては、都市では、石炭、LPG、都市ガス、熱および電力である。農村においては、石炭、LPG、灯油、バイオガス、バイオマス(農業残渣、薪)および電力である。

以下に都市および農村での用途別・燃料種別のエネルギー消費量の推計手法の概要を示す。推計式については、Table 2 に都市・農村別に整理した。

2.4 都市の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量

都市の家庭部門での用途・機器・燃料種の関係は、Fig. 3(a) に示した通りである。中国建築節能年度発展研究報告書 2009¹²⁾ によれば、都市では約 460 万トンの石炭を調理・給湯に消費している¹²⁾。これと中国統計年鑑 2007¹³⁾ に基づいて、家庭部門の全石炭消費量に占める調理・給湯用の石炭割合を 14% と推計した。中国統計年鑑 2008¹¹⁾ に記載されている都市の省別石炭の総消費量から省別の調理・給湯の消費量を推計した。都市ガスと LPG は調理・給湯のみに使用していると推定した。調理・給湯用の電力消費量は都市の省別の電気炊飯器、換気扇と給湯器の保有量と機器別原単位から推計した。

Fig. 3(a) に示したように、家庭部門の石炭は調理・給湯以外には暖房に使われている。暖房用の石炭は統計の総量から調理・給湯分を引いたものとして推計した。暖房用の電気消費は都市の省別のエアコンの保有

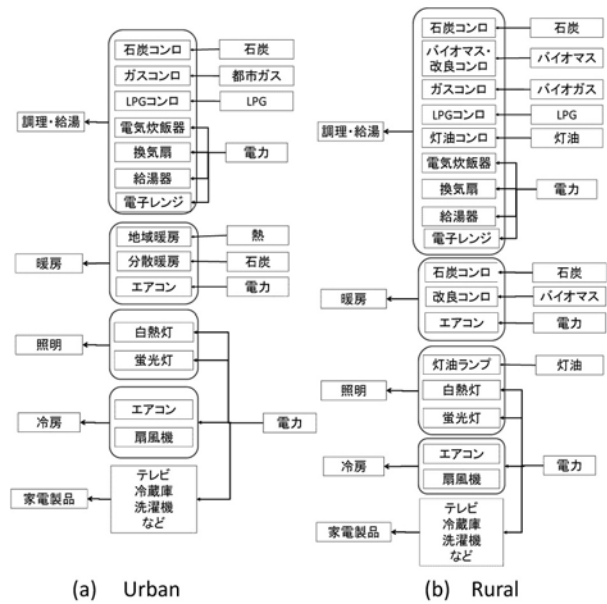


Fig. 3 Relationship of Purpose, Equipment and Fuel type in Rural and Urban area of China

量、機器別原単位¹⁴⁾と暖房デGREEデー²²⁾から推計した。照明用の電気消費量は白熱灯、蛍光灯の単位床面積あたりエネルギー消費量、省別の利用戸数と省別の都市の平均世帯床面積から推計した。家庭用電化製品と冷房に使用した電気消費量はエアコン、扇風機、テレビ、冷蔵庫、洗濯機及びその他の家電機器の保有量と機器別の消費原単位から推計した。なお、冷房については、冷房デGREEデー²²⁾を考慮した。

2.5 農村地域の家庭部門の用途別・燃料種別エネルギー消費量

農村の家庭部門での用途・機器・燃料種の関係は、Fig. 3(b) に示した通りである。石炭、バイオマス(薪、農業残渣)に占める調理・給湯と暖房の消費量の割合は、胡ら¹⁵⁾と中国建築節能年度報告書 2012¹⁶⁾ に掲載されている比率を用いて算出した。農村では、バイオガスは全量が調理・給湯に使用されている。調理・給湯用の電力消費量は、農村の電気炊飯器、換気扇と給湯器の保有量と農村の機器別の消費原単位から推計した。暖房用の石炭とバイオマスの消費量は、エネルギー統計の家庭用の総石炭、バイオマス消費量から調理・給湯用に推計した量を減じて求めた。また、照明、家庭用電化製品と冷房に使用した電気消費量は都市地域と同じ方法で推計した。中国では、ほとんどの世帯で電気による照明が普及しているため、照明用途の灯油消費量は 0 と仮定した。

2.6 統計データの整備

燃料種別、都市・農村別の家庭部門エネルギー消費量は、中国能源統計年鑑 2008¹⁷⁾ に掲載されているエ

Table 2 Equation system to estimate Residential Fuel consumption in Rural/Urban of Chinese Provinces

	都 市	農 村
調理 給湯	$E_{i,C}^C = \alpha \cdot E_{i,C}$ $E_{i,L}^C = E_{i,L}$ $E_{i,G}^C = E_{i,G}$	$E_{i,C}^C + E_{i,B}^C + E_{i,O}^C = e_C \cdot P_i \cdot \left(\frac{d_{i,B}}{\eta_B^C} + \frac{d_{i,C}}{\eta_C^C} + \frac{d_{i,O}}{\eta_O^C} \right) \quad (\star)$ $E_{i,G}^C = E_{i,G} \quad , \quad E_{i,L}^C = E_{i,L}$
	<p>α : 家庭用石炭に占める調理用途の割合 (-)</p>	<p>e_C : バイオマス・石炭・灯油による一人あたり調理・給湯の有効エネルギー消費量 (GJ/(人・年))</p> <p>$d_{i,B}, d_{i,C}, d_{i,O}$: i 省の調理・給湯用のバイオマスコンロ, 石炭コンロ, 灯油コンロの使用割合 (%)</p> <p>$\eta_B^C, \eta_C^C, \eta_O^C$: 調理・給湯用のバイオマスコンロ, 石炭コンロ, 灯油コンロの熱効率 (%)</p>
暖房	$E_{i,C}^H = E_{i,C} - E_{i,C}^C$ $E_{i,H}^H = E_{i,H}$	$E_{i,C}^H = E_{i,C} - E_{i,C}^C$ $E_{i,B}^H = E_{i,B} - E_{i,B}^C$
	<p>$E_{i,B}^C, E_{i,C}^C, E_{i,G}^C, E_{i,L}^C, E_{i,O}^C, E_{i,E}^C$: i 省の調理・給湯用のバイオマス (薪, 農業残渣), 石炭, 灯油, LPG, バイオガスまたは都市ガス, 電力のエネルギー消費量 (GJ/年)</p> $E_{i,E}^C = (e_R \cdot n_{i,R} + e_V \cdot n_{i,V} + e_W \cdot n_{i,W} + e_M \cdot n_{i,M} + e_O \cdot n_{i,O}) \cdot m_i$ <p>$e_{i,R}, e_{i,V}, e_{i,W}, e_{i,M}$: 電気炊飯器, 換気扇, 給湯器, 電子レンジの年平均電力消費原単位 (GJ/(台・年))</p> <p>$n_{i,R}, n_{i,V}, n_{i,W}, n_{i,M}$: 省別の電気炊飯器, 換気扇, 給湯器, 電子レンジの保有率 (台/(戸・年))</p>	<p>$E_{i,C}^H, E_{i,H}^H, E_{i,B}^H, E_{i,E}^H$: i 省の暖房用の石炭, 熱供給, バイオマスと電力のエネルギー消費量 (GJ/年)</p> $E_{i,E}^H = e_A \cdot n_{i,A} \cdot m_i \cdot \frac{DD_{H,i}}{DD_{H,c}}$ <p>e_A : 農村でのエアコン1台あたりのエネルギー消費量 (GJ/(台・年))</p> <p>$n_{i,A}$: i 省のエアコン保有率 (台/(戸・年))</p> <p>$DD_{H,c}, DD_{H,i}$: i 省と中国の平均暖房デグリー・デイ (度・日)</p>
照明	$E_i^L = (e_F \cdot n_{i,F} + e_S \cdot n_{i,S}) \cdot S_i$	$E_i^L = E_{i,E}^L + E_{i,O}^L = (e_F \cdot n_{i,F} + e_S \cdot n_{i,S} + e_O \cdot n_{i,O}) \cdot S_i \quad (\star)$
	<p>e_F, e_S : 蛍光灯, 白熱灯の単位面積あたりエネルギー消費量 (GJ/m²)</p> <p>$n_{i,F}, n_{i,S}$: i 省の蛍光灯, 白熱灯の利用戸数 (戸)</p>	<p>$E_{i,E}^L, E_{i,O}^L$: i 省における照明用電力, 灯油の消費量 (GJ/年)</p> <p>e_F, e_S, e_O : 都市地域の蛍光灯, 白熱灯, 灯油ランプの単位床面積あたりのエネルギー消費量 (GJ/m²)</p> <p>$n_{i,F}, n_{i,S}, n_{i,O}$: i 省の蛍光灯, 白熱灯, 灯油ランプの利用戸数 (戸)</p> <p>E_i^L : i 省農村地域家庭の照明用エネルギー消費量 (GJ/年)</p> <p>S_i : i 省の都市/農村での世帯床面積 (m²/戸)</p>
冷房	$E_i^S = \left(e_{AS} \cdot n_{i,AS} + e_F \cdot n_{i,F} \right) \cdot \frac{DD_{Si}}{DD_{SC}} \cdot m_i$	
電化 製品	$E_i^P = (e_{i,T} \cdot n_{i,T} + e_{i,W} \cdot n_{i,W} + e_{i,R} \cdot n_{i,R} + e_{i,C} \cdot n_{i,C}) \cdot m_i$	
共通 記号	<p>E_i^P : i 省の家庭用電化製品エネルギー消費量 (GJ/年)</p> <p>$e_{i,T}, e_{i,W}, e_{i,R}, e_{i,C}$: テレビ, 洗濯機, 冷蔵庫, パソコンとその他の電化製品の年平均エネルギー消費量 (GJ/(台・年))</p> <p>$n_{i,T}, n_{i,W}, n_{i,R}, n_{i,C}$: i 省のテレビ, 洗濯機, 冷蔵庫, パソコンとその他の電化製品の保有率 (台/(戸・年))</p>	<p>$E_{i,B}^H, E_{i,C}^H, E_{i,O}^H, E_{i,L}^H, E_{i,G}^H, E_{i,E}^H, E_{i,H}^H$: i 省での家庭用の全用途のバイオマス (薪, 農業残渣), 石炭, 灯油, LPG, バイオガスまたは都市ガス, 電力, 熱供給のエネルギー消費量 (GJ/年)</p> <p>m_i, P_i : 省別の都市・農村別の世帯数 (戸) および人口 (人)</p>

☆の式は制約式として扱う

エネルギーバランス表に記載されている都市・農村別の家庭部門エネルギー消費量の値を利用した。また、同統計年鑑には農村での家庭部門のバイオマス (薪, 農業残渣) とバイオガスの消費量も掲載されており、本研究ではこの値を利用して、30省・直轄市の農業残渣, 薪, バイオガス, 石炭, 灯油, LPG, 天然ガスと電気の家庭用エネルギー消費量とした。

能源統計年鑑には、それぞれの燃料毎の消費量が記載されており、これを **Table 3** に示した単位発熱量の値を用いて発熱量に換算した。

使用した省別の都市・農村人口, 世帯戸数, 家庭部門エネルギー消費機器別効率などは **Table 4** に示したデータを使用した。一台当たり炊飯器, 換気扇, 電気給湯器, 電子レンジ及び他の家電設備のエネルギー消費量原単位については、寧¹⁴⁾の2003年の値を参照した。

2.7 燃料種別の家庭部門のPM_{2.5}の排出係数

本研究では既往研究から室内燃料燃焼機器の汚染物質の排出係数の測定値を収集して、それらの平均値を

Table 3 Lower heating value of major fuel in China

燃料	値	単位
作物残渣	14636	kJ/kg
薪	16726	kJ/kg
バイオガス	20908	kJ/m ³
原炭	20908	kJ/kg
清洗炭	26344	kJ/kg
ブリケット	8363	kJ/kg
灯油	43070	kJ/kg
LPG	50179	kJ/kg
天然ガス	38931	kJ/m ³
電気	3596	kJ/kW・h

出所：「中国能源統計年鑑」2008¹⁷⁾より作成**Table 4** Data source and reference

項目	都市	農村
人口	中国統計年鑑 2008 ¹⁷⁾	
世帯数	中国人口と職業統計年鑑 2008 ¹⁸⁾ 中国都市生活と価額年鑑 2009 ¹⁹⁾	中国統計年鑑 2008 ¹⁷⁾ 中国農村住民調査年鑑 2008 ²⁰⁾
家庭部門機器効率	寧 (2006) ¹⁴⁾	
家電製品の電力消費原単位	寧 (2006) ¹⁴⁾	
白熱灯、蛍光灯の利用戸数	中国建築節能年度發展研究報告 2012 ¹⁶⁾ 外岡 (2009) ²¹⁾	
冷房・暖房のデグリーデイ	李 (2013) ²²⁾	
炊飯器、扇風機の保有量	中国統計年鑑 2007 ¹³⁾	
換気扇、給湯器、 電子レンジ保有量	中国統計年鑑 2008 ¹¹⁾	中国農村住民調査年鑑 2008 ²⁰⁾
エアコン、テレビ、冷蔵庫、 洗濯機など家電製品の保有量	中国統計年鑑 2008 ¹¹⁾	中国農村住民調査年鑑 2008 ²⁰⁾
家庭部門エネルギー消費量	中国能源統計年鑑 2008 ¹⁷⁾ 中国建築節能年度發展研究報告 2009 ¹²⁾ , 2012 ¹⁶⁾	

利用した。収集した排出係数を **Table 5** に示す。測定された汚染物質の排出係数には、広域の大気汚染を評価するために構築された屋外へ排出される量を対象としたものと、室内汚染の影響を評価することを目的として、実際に屋内環境に排出される量を対象としたものがある。一般に煙突や換気口から直接屋外へ排出されるものがあるために、屋外の広域汚染を評価する

Table 5 Emission Factors

燃料種	屋外大気シミュレーション用		室内用	
	排出係数 ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)	出典	排出係数 ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)	出典
薪	430.5	23)	180	27)
	334.8	24)		
作物残渣	271.8	23)	274	27)
	482.9	25)		
石炭	NA		52.4	28)
無煙炭	50.2±21.5	26)	NA	
煙炭	352.5±127.7	26)	NA	
ブリケット	250.6±22.5	26)	NA	
灯油 (調理・給湯)	NA		119	25)
灯油 (暖房)	NA		0	29)
灯油 (照明)	NA		110	29)
LPG	NA		2.37	25)
天然ガス	NA		3.07	25)
バイオガス	NA		3.07	天然ガスと同じ値を設定

ための排出係数の方が2倍程度大きい事が分かる。本研究では、室内への排出を基準にした排出係数をそのまま利用した。また、バイオガスの排出係数については天然ガスと同じ値を使用した。

2.8 制御対策技術の導入による改善効果の推計方法

ここでは、特に曝露の影響が大きい原因となる石炭およびバイオマスの固形燃料を、天然ガスに転換した場合に各省でどの程度の曝露濃度の改善効果が見られるのかを計算した。

計算を行ったケースは、(1)都市と農村のそれぞれで、石炭をすべて天然ガスに転換するケース、(2)農村においてバイオマスをすべて天然ガスに転換するケース、の二つである。バイオマス自体はカーボンニュートラルな燃料であり、天然ガスへの移行は温室効果ガスの排出量を増やして、地球温暖化対策としてはマイナスの効果であるため、技術的にはバイオガス化や高効率バイオマスコンロの導入などの対策が必要であるが、ここではバイオマス燃料起源のPM_{2.5}の発生を減らす効果を推計するという観点でケースを設定した。

3. 結果と考察

3.1 家庭部門都市・農村別用途別エネルギー消費量

a) 調理・給湯用エネルギー消費量

2007年の省別の都市と農村の一人当たりの調理・給湯用エネルギー消費量を **Fig. 4** に示す。**Fig. 4(a)** によると、都市部地域では一人当たりの調理・給湯用エネルギー消費量は地域によって差があり、最大は青海省の約6 GJ/(人・年)、最小は甘粛省の約1 GJ/(人・年)である。この差は地域間の食生活習慣の違いによるものと考えられるが、それ以上の分析は行っていない。北京市、天津市、上海市、江蘇省、広東省などLPGと天然ガスの普及率が高い地域では、石炭の消費量が小さくなっているが、一般にガスの価格の方が高く、またインフラの普及率とも関連するために、沿岸部の経済状況の進んでいる地域で石炭消費量が少ない傾向がある。

都市地域について、都市ガスと熱供給インフラの普及率を考慮したことで調理・給湯用の石炭消費量は全国平均で一人当たり0.25 GJ/(人・年)となった。以前の推計値⁹⁾の0.82 GJ/(人・年)から約1/3となった。

Fig. 4(b) によると、農村地域では遼寧・吉林・黒竜江省など東北地方や広東・広西・海南省など南部沿岸地域でバイオマスの比率が高く、北京・山西・内モンゴル・貴州などで石炭の比率が高くなっている。また、上海市、浙江省においては、調理・給湯用にLPGを消費する割合が67%と52%と他の地域より多

くなっている。

また、農村では、バイオガスが持続可能エネルギーとして導入が進んでいる。バイオガスについては、気候条件の面から、南部の湖北省、湖南省、広西省と内陸部の地域で消費量が大きくなっている傾向が分かる。

本研究では広東、広西、海南省は年間を通して温暖なため暖房を使わないとして、石炭とバイオマスは全量が調理・給湯に使用されると仮定した。Fig. 4(b)によると、一人当たり調理・給湯用エネルギーが一番高いのは広西で、約22 GJ/(人・年)となった。調理・給湯用のバイオマス消費量が一番多いのも広西省で、次いで広東省と海南省であった。上海ではバイオマスはほとんど使用されず、主に調理・給湯用のエネルギー源はLPGであった。

b) 暖房用エネルギー消費量

2007年の省別の都市と農村の一人当たり暖房用エネルギー消費量はFig. 5の通りとなった。都市と農村のいずれも、北京市、天津市、遼寧省、吉林省、黒龍江省と内モンゴルなど北部の寒冷地域で暖房用のエネルギー消費量が大きくなった。都市では、一人当たり暖房用エネルギー消費量の全国平均は2.8 GJ/(人・年)であった。北部の寒冷地域では、地域集中暖房のための熱供給の割合が高いのに対して、河南省、湖北省、湖南省、四川省と貴州省などでは個別暖房が中心で、主に石炭が使用されている。農村地域では一人当たり暖房用エネルギー消費量の全国平均は8.2 GJ/(人・年)となった。最も多いのが天津市で、約18 GJ/(人・年)となっている。次いで黒龍江省、内モンゴ

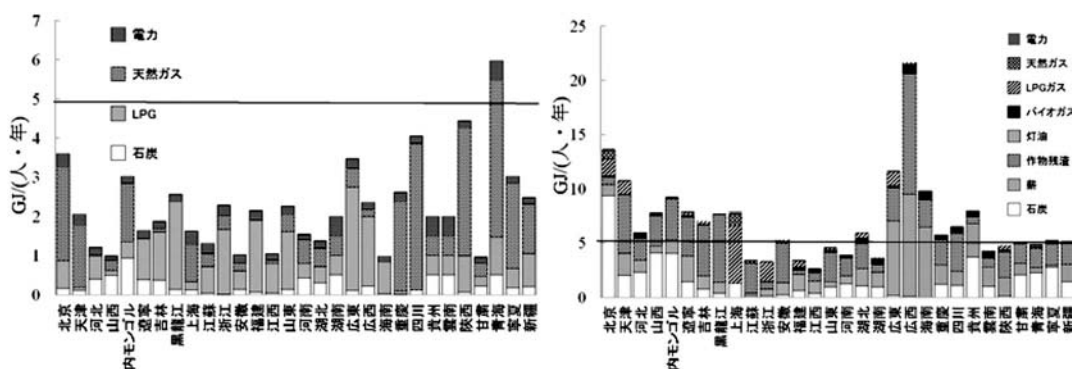


Fig. 4 Residential energy consumption per capita for cooking in 2007 (a) Urban (b) Rural

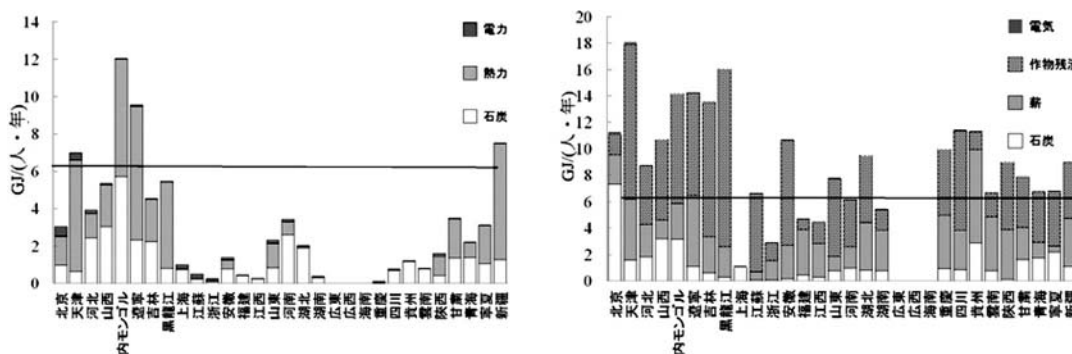


Fig. 5 Residential energy consumption per capita for heating in 2007 (a) Urban (b) Rural

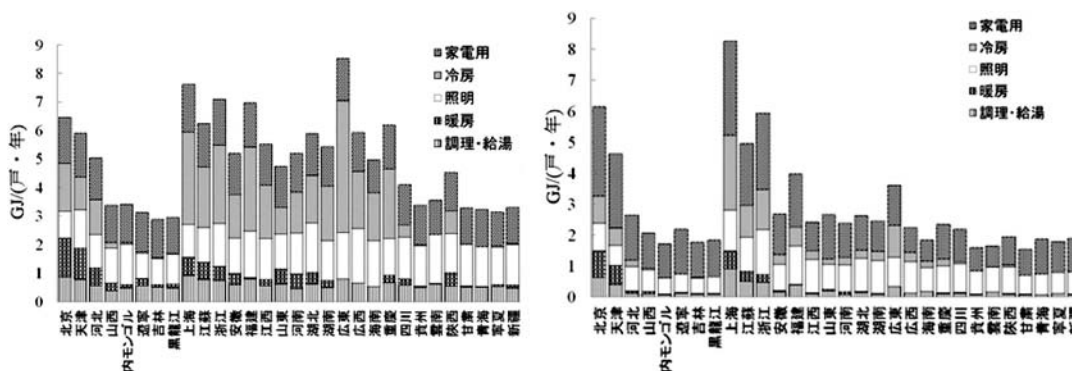


Fig. 6 Residential Electric power consumption per household by purpose in 2007 (a) Urban (b) Rural

ルと遼寧省が 16, 14, 14 GJ/(人・年) であった。暖房用のバイオマス使用量は黒龍江省が一番多く、約 15.7 GJ/(人・年) であった。

c) 用途別の電力消費量

2007年の省別の都市・農村の用途別世帯当たり電力消費量の内訳を Fig. 6 に示す。世帯当たり電力消費量が一番高い地域は広東省と上海であり、約 8 GJ/(戸・年) であった。上海市と広東省においては冷房と家電でほぼ6割を占めている。暖房用の電力は、北京市、天津市、上海など経済が発展している地域で高い傾向が見られる。

3.2 微環境個人曝露モデルによる曝露濃度の推計結果

a) 全年齢・属性区分平均の一日平均曝露濃度の地域比較

地域別の全年齢・属性区分平均のPM_{2.5}の一日平均曝露濃度と各微環境の寄与の内訳を Fig. 7 に示す。都市では農村に比べて曝露濃度が1/10程度となっている。これは、室内での使用燃料の違いが原因である。本研究では都市と農村地域において用途別の燃料機器別のエネルギー消費量を考慮した。都市においては、都市ガスの普及率が高く調理・給湯と暖房には主にLPG、天然ガスと地域熱供給を使用しているため、排出係数が大きい石炭・バイオマスの使用量が少ないためである。また、Fig. 7(a)の結果から見ると、大都市以外の北部地域の内モンゴル、山西省、遼寧省と吉林省では暖房からの寄与が多いが、南部の浙江省、福建省と江蘇省など地域では室内の発生源の寄与が小さく、微環境Dに分類される屋外から室内への流入の寄与が大きい事が分かった。また北京、天津、上海な

ど大都市では屋外起源の寄与が80%以上を占めている。

Fig. 7(b)の農村では、平均曝露濃度が高いのは黒龍江省で約1500 μg/m³であった。南部の温暖な地域である広東省、広西省と海南省は暖房を使用しないため暖房による寄与はない。他の地域では、微環境Bに分類される暖房での曝露濃度が微環境Aに分類される調理・給湯での曝露濃度より高くなっており、暖房に使用するバイオマスや石炭の燃焼によるPM_{2.5}の影響が大きいことがわかる。

b) 年齢・属性別の一日平均曝露濃度

Fig. 8 に都市と農村における年齢属性集団別のPM_{2.5}一日平均曝露濃度の全国平均の推定結果を示す。乳幼児の曝露濃度が高いのは、家庭の滞在時間が長く、母親が調理中も一緒に微環境に滞在すると想定しているためである。学校・職場の汚染濃度は屋外大気汚染の影響を受けるだけで室内に汚染源が無いと仮定しているため、就学年齢に達すると曝露濃度が減少する。都市では、屋外大気汚染物質の流入による室内での曝露が主たる要因であるため、男女間の差が少なく、むしろ暖房された環境への滞在時間が長い男性の曝露濃度が高くなる傾向が見られた。

農村においては、女性ほどの年齢層でも男性に比べて曝露濃度が高くなっている。微環境の内訳を見ると、暖房からの曝露濃度は男性と女性はあまり大きな差がないが、調理・給湯からの曝露は男性より女性のほうが2倍程度大きな寄与を示している。農村地域においては女性が調理・給湯の微環境に滞在する時間が長く、その際に、バイオマスと石炭を使用して調理・給湯を

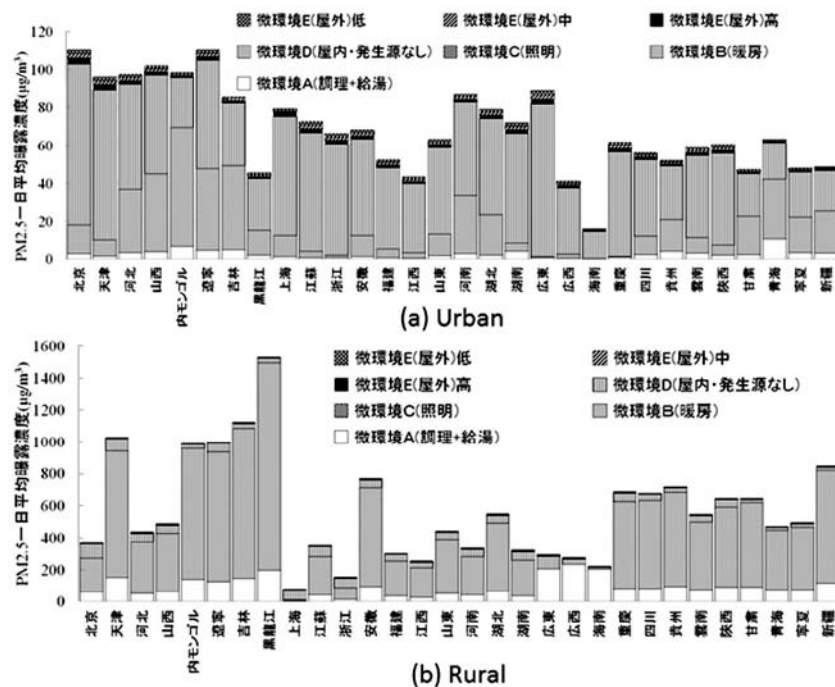


Fig. 7 Average personal exposure on PM_{2.5} for Urban and Rural area of each provinces (a) Urban (b) Rural

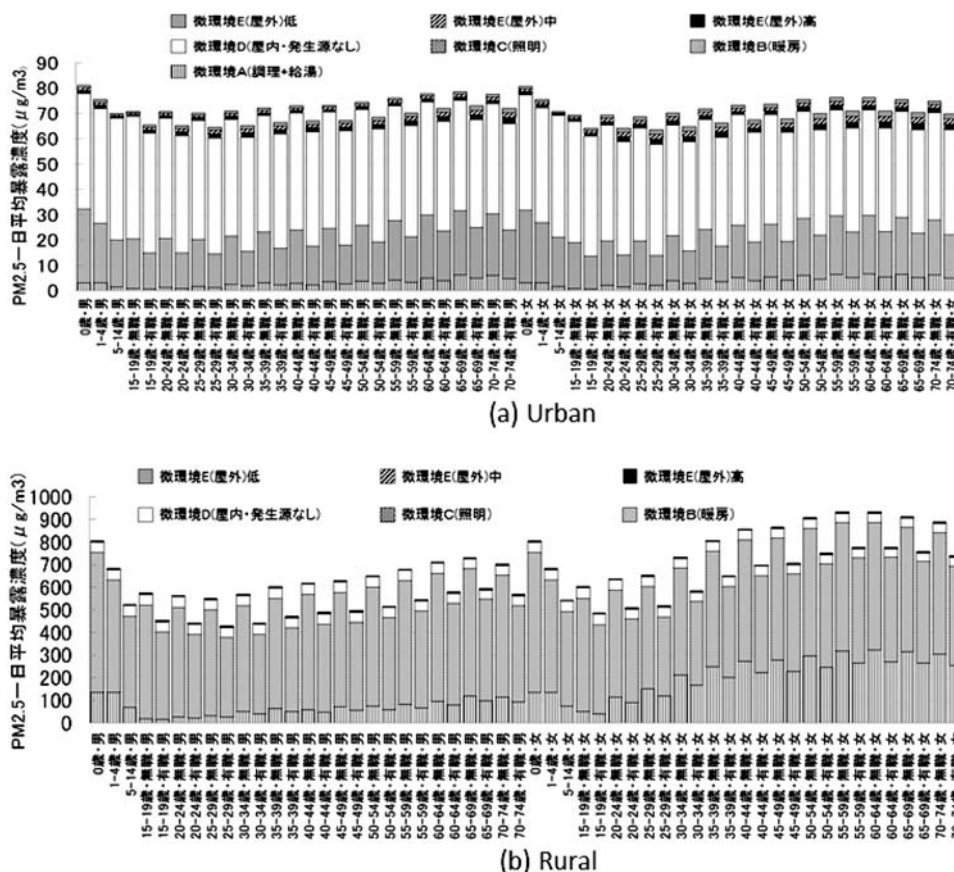


Fig. 8 National average of personal exposure to PM2.5 for each sex and age group. (a) Urban (b) Rural

行うための曝露濃度が高くなる。また、男性・女性ともに、無職の方が室内滞在時間が長くなるために、曝露濃度も高くなった。

3.3 制御対策技術の導入による改善効果の推計結果

a) 都市と農村の石炭を天然ガスに転換するケース

都市と農村の石炭の全量を最終的なサービス需要を満たしつつ天然ガスに転換した場合のエネルギー消費量を計算して、それに基づいてPM_{2.5}の曝露濃度を計算した。全国平均の結果をTable 6にまとめた。石炭は、都市・農村の両方で使用されており、双方で15~20 µg/m³程度の低減効果が見られたが、低減率では農村の場合3%程度に過ぎない結果となった。

b) 農村のバイオマス天然ガスに転換するケース

バイオマスは、本研究で用いた統計資料では農村でしか使用されていないことになっており、都市での低減効果は0%である。一方で、農村では調理・給湯および暖房に大量に使用されており、かつ現状の燃焼機器はPM_{2.5}の屋内への排出係数が極めて大きいために、

バイオマスを天然ガスに転換すると87%の低減効果が見られることが分かった。

4. 結論

本研究では、省別に都市と農村の家庭部門の用途別、機器別・燃料種別のエネルギー消費量を推計し、これに屋外大気汚染モデル、微環境個人曝露モデルを組み合わせ、中国30地域の人々を対象として、微環境毎に年齢・属性別、都市・農村別のPM_{2.5}一日平均曝露濃度を推定した。

本研究では、都市地域の調理・給湯用の石炭消費量を推計する際に都市ガスと熱供給インフラの普及率を考慮したことで、調理・給湯用の石炭消費量が以前の推計⁹⁾よりも少なくなった。

また、都市における全国平均の年齢・属性別集団別PM_{2.5}一日平均曝露濃度については、女性が男性よりも小さい値となった。これは、暖房された微環境への滞在時間が男性より短いことが原因である。すなわち暖房からの寄与は男性の方が大きく推計されている。

農村においては、家庭の燃料種別のエネルギー使用量を新たに推計し直したことで、従来⁹⁾よりも調理・給湯からの寄与が90 µg/m³を小さくなった。それでもバイオマスを大量に使用しているために、曝露濃度は都市の10倍以上となっている。

Table 6 Summary of the reduction by Countermeasures

	現状ケース	石炭→天然ガス 転換ケース		バイオマス→天然ガス 転換ケース		
		曝露濃度 (µg/m ³)	曝露濃度 (µg/m ³)	低減率 (%)	曝露濃度 (µg/m ³)	低減率 (%)
全国平均	都市	73	56	23	73	0
	農村	529	512	3	69	87

石炭およびバイオマスをそれぞれ天然ガスに転換した場合の都市・農村での曝露濃度の低減効果を推計したところ、石炭を転換した場合には、都市・農村のそれぞれで低減効果が期待できるが、農村の高濃度の状況を大幅に改善する効果はなかった。バイオマスを転換することで、80%を上回る大幅な改善効果を期待できることがわかった。今後は、より具体的かつバイオマス燃料を有効活用できる対策の導入シナリオを考慮した計算を行うとともに、計算結果の妥当性の検証も行う必要がある。

また、本研究では、暖房用途のエネルギー消費量を、全エネルギーから調理・給湯用のエネルギーを差し引くことで推計したが、この妥当性についても検証を行う必要がある。

謝辞

本研究は、地球環境研究総合推進費(S-12)の支援より実施され、科研費(2336023)による研究結果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- Bruce, N., Perez-Padilla, R., Albalak, R.: Indoor air pollution in developing countries: a major environmental and public health challenge. *Bull. WHO* 78, 1078-1092, 2000
- WHO: Global health risk: mortality and burden of disease attributable to selected major risks, 2009.
- Q. Zhang, D. G. Streets, et al.: Major components of China's anthropogenic primary particulate emission, *Environmental research letters*, 2,045027, 7pp, doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045027, 2007
- X. Wen, Y. Tu.: 西藏生物質エネルギー利用及展望, 西藏科技, vol. 11, 27-28, 2011 (中国語)
- Mestl. H. E. S., Aunan. K. and Seip. H. M. et al.: Urban and rural exposure to indoor air pollution from domestic biomass and coal burning across China, *Science of the Total Environment*. 377, pp. 12-26, 2007.
- 島田洋子, 柳千絵, 松岡 謙: アジア各国の生活時間情報を用いた室内空気汚染曝露評価——PM_{2.5}について——, 環境システム研究論文集, Vol. 38, pp. 93-100, 2010.
- P. Zhang, G. Wang.: Contribution to reduction of CO₂ and SO₂ emission by household biogas construction in rural China: Analysis and prediction, *Transactions of CSAE*, 21 (12), 147-151, 2005 (in Chinese)
- M. Wang, X. Xia, Y. Chai, et al.: Life cycle energy conservation and emission reduction benefits of rural household biogas project. *Transactions of CSAE*, 26 (11), 250-250, 2010. (In Chinese)
- 郭敏娜, 倉田学児, 松岡 謙: 中国での室内汚染および交通起源の沿道大気汚染を考慮したPM_{2.5}曝露量推計, 土木学会論文集G(環境) 68(5): I_193-I_204, 2013.
- 国家统计局社科司: 2008年時間利用調査資料彙編, 中国統計出版社, 2009. (中国語)
- 中華人民共和国国家统计局: 中国統計年鑑, 中国統計出版社, 2008 (中国語).
- 清華大学建築節能研究中心: 中国建築節能年度發展研究報告書 2009, 2009. (中国語)
- 中華人民共和国国家统计局: 中国統計年鑑, 中国統計出版社, 2007 (中国語).
- 寧 亜東: 中国の家庭部門エネルギー・環境問題に関する現況分析と対策効果の予測, 埼玉大学博士論文, 2006.
- 胡 秀蓮, 姜 克隽: 中国温室気体減出技術選択及対策評価 (Evaluation of technology and countermeasure for greenhouse gas mitigation in China), 中国環境科学出版社, 1995 (中国語).
- 清華大学建築節能研究中心: 中国建築節能年度發展研究報告書 2012, 2012. (中国語)
- 中国国家统计局能源統計局・国家统计局能源綜合局: 中国能源統計年鑑, 2008 (中国語)
- 国家统计局城市社会经济調查司: 2008 中国人口和就業統計年鑑, 中国統計出版社, 2008.
- 国家统计局城市社会经济調查司: 2009 中国城市(鎮)生活与价格年鑑, 中国統計出版社, 2009.
- 国家统计局城市社会经济調查司: 2008 中国農村住戶調查年鑑, 中国統計出版社, 2008.
- 外岡 豊, 寧 亜東: 中国住宅におけるエネルギー消費実態と諸対策に関する調査研究, 住宅総合研究財団研究論文集, vol 35, pp 367-368, 2008
- 李 延慶: 中国農村家庭原消費構造研究, 大連理工大学原与環境工程修士論文, 2013
- 曹 国良, 郑 方成, 王 亚强: 中国大陆生物質燃焼排放的TSP, PM₁₀, PM_{2.5}清單, 过程工程学报 (The Chinese Journal of process Engineering), Vol. 4, pp 700-704, 2004. (中国語)
- 張 強, Z. Klimont, D G, Street, et al.: 中国人為源顆粒物排放模型及 2001 年排放清單估算, 自然科学進展, Vol 16, pp 223-231, 2006. (中国語)
- J. Zhang, K. R. Smith, Y. Ma, et al.: Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a data base for emission factors, *Atmospheric Environment*, Vol 34, pp 4537-4549, 2000
- Y. X, Zhang, J. J, Schauer, Y. H, Zhang, et al: Characteristics of Particulate carbon emissions from real-world Chinese coal combustion, *Environ. Sci. Technol*, Vol 42, pp 5068-5073, 2008
- Li X., Duan L., Wang S. et al.: Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China, *Energy & Fuels*, Vol. 21, No. 2, pp. 845-851, 2007.
- Ge. S., X Xu. et al.: Emissions of air pollutants from household stoves: honeycomb coal versus coal cake, *Environmental science & technology*, Vol. 38, No. 17, pp. 4612-4618, 2004.
- Fan. C. W., and Zhang J.: Characterization of emissions from portable household combustion devices: particle size distribution emission rates and factors and potential exposures, *Atmospheric Environment*, Vol. 35, No. 7, pp. 1281-1290, 2001.

Estimation of Personal Exposure of PM_{2.5} from the Use of Domestic Fuels in China

Minna Guo¹⁾, Gakuji Kurata^{1)†} and Yuzuru Matsuoka¹⁾

¹⁾ Dept. of Environmental Engineering, Kyoto University

† Correspondence should be addressed to Gakuji Kurata :

(Dept. of Environmental Engineering, Kyoto University

E-mail : kurata.gakuji.5a@kyoto-u.ac.jp)

Abstract

According to WHO reports, premature death due to indoor air pollution in China is reported to be around 540 thousand people in 2009. The main reason is because of the solid fuels used in the household for heating and cooking, such as coal and biomass. In order to grasp the current situation of these problems, it is necessary to find out the appropriate way to estimate the total consumption of indoor domestic energy and to evaluate how much the exposure concentration for human.

In this study, targeting both the urban and rural areas in 31 provinces in China, domestic energy consumption by fuel type, devices and purpose for use is calculated, and the micro-environmental exposure model was further adopted to estimate the PM_{2.5} exposure concentration. Results show that the PM_{2.5} concentration of male is bigger than of female in urban area because female have to do housework which reduce their time staying indoor with heating. In rural area, the PM_{2.5} exposure concentration of female were twice larger than male attributed to more cooking and water heating.

Key words : PM_{2.5}, indoor air pollution, residential fuel consumption, exposure model, China