

インドにおける室内環境中PM2.5暴露濃度の推定

島田 洋子^{1*}・松岡 譲²

¹摂南大学理工学部住環境デザイン学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

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)

* E-mail: *shimada@led.setsunan.ac.jp*

発展途上国において室内での固形燃料の燃焼により発生するPM2.5による健康影響が懸念されている。本研究では、インド29州の都市域と農村域を対象に、家庭内での燃料の燃焼によって排出されるPM2.5による室内空間滞在中の個人暴露濃度を、家庭内の燃料消費量の用途別の燃料種使用割合、世帯や住居に関する統計情報の地域別の詳細なデータを用いて推計した。その結果、調理に薪を使用する割合の多い農村域の台所滞在中の個人暴露濃度が都市域に比べて大きく、また、35～64歳の無職女性の台所滞在中の個人暴露濃度が他の個人属性集団よりも高く、Rajasthan州農村域での35～64歳の無職女性の暴露濃度が最も高く1033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ との結果を得た。男性は女性より低い65歳以上の無職男性の室内滞在中の個人暴露濃度は25～34歳の有職女性より高かった。

Key Words : PM2.5, indoor air pollution, exposure model, time use survey, energy use, India

1. 序論

発展途上国において、家庭で使用される燃料の大部分は石炭やバイオマス（薪、作物残渣、動物の糞）などの固形燃料である。これらの燃料を室内で調理や暖房のために燃焼することにより発生する室内空気汚染物質（粒子状物質、CO、NO_x、SO_x）が人々の健康に悪影響を及ぼす。UNDPとWHOによる報告¹⁾によると、年間200万人が換気されていない台所での固形燃料の燃焼に起因する健康影響により死亡し、死亡者の40%は子供で、大人の死亡者のうち60%が女性である。固形燃料の燃焼により発生する室内大気汚染物質のうち、特に、空気力学径が2.5 μm 以下の微小粒子状物質（PM2.5）は肺に奥深くまで入り呼吸器系疾患や循環器系疾患などを引き起こすことから、WHOは2005年に、大気汚染ガイドラインを改定しPM2.5の指針値を年平均10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と設定した²⁾。われわれは、このPM2.5に注目し、世界各国の家庭内での燃料の燃焼によって排出されるPM2.5による人々への室内暴露量を性別や年齢によって分類される個人の多様性を反映したライフスタイルを考慮して定量的に評価し、各国におけるライフスタイルや社会の変化、電化によるエネルギー消費構造の変化などの将来の変化に対する予測が可能なモデルの構築を目指している。こ

のモデルによって、地域や個人属性集団別の詳細なPM2.5の室内暴露による健康リスクの把握が可能になり、リスク低減のための施策(居住環境の改善や家庭用燃料の転換等)を実行する際の有用な知見を提供することができる。その第一段階として、われわれは既に、アジア15カ国を対象に、各国の生活時間調査情報を用いて、性別、年齢および就業状況によって分類した個人属性集団別の家庭内での燃料燃焼による滞在空間におけるPM2.5の個人暴露濃度を国ごとに推計するモデルを構築し、各国の室内PM2.5暴露評価を行った。その結果、中国では調理による燃焼に起因する台所滞在中のPM2.5の個人暴露濃度は大変高く(427.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、男女・年齢別では35～64歳の無職女性の台所での暴露濃度が最も高いことなどが明らかになった³⁾。この先行研究³⁾では、各国内の地域的な違いや都市域と農村域の違いを考慮しなかったが、発展途上国の人々の生活は、地域による違いや都市域と農村域による違いが大きいことから、これらの違いを考慮した暴露評価を行う必要がある。そこで、次の段階として、人々の滞在空間滞在中のPM2.5の個人暴露濃度を都市域と農村域とを区別して推計することを目的に、先行研究³⁾において台所滞在中における個人暴露濃度推計値が最も高かった中国を対象に、中国の10省の都市域と農村域における生活時間、家庭内燃料消費量および人口

や住居についての統計情報を収集し、家庭内での燃料燃焼によって発生するPM2.5の個人属性集団別の室内空間滞在中の個人暴露濃度を、各省の都市域と都市域別に推計することを試みた⁴⁾。その結果、個人暴露濃度は地域による違いが大きく、地域内では農村域の方が高く、固形燃料の消費量、個人属性集団別の調理時間や自宅滞在時間、住居の床面積に影響されることが明らかになった。黒龍江省農村域の60～64歳の無職女性の台所滞在中の個人暴露濃度が最も高く3027 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。このモデルによって、性別・年齢・就業状態によって分類される個人属性集団の生活時間の使い方、家庭での燃料の使い方と消費量および世帯の人員や住居の広さの地域による違いを考慮した詳細な室内空気汚染物質による暴露評価を地域別に都市・農村を区別して行うことが可能となった。しかしながら、室内でのPM2.5濃度の測定値の報告が少なく、ばらつきが大きいことによってモデルの妥当性の検証が十分ではないことと、モデルに各燃料の用途別の使用割合を都市域と農村域に区別して設定したものの地域差を考慮しなかったなど推計値の信頼性の面からは課題が残された。

以上の2つの先行研究の結果を踏まえて、本研究では、室内各空間中PM2.5濃度の測定値と各空間滞在中の個人暴露濃度推定結果の報告が比較的多く、かつ、家庭内の燃料消費量の用途別の燃料種使用割合の地域別の詳細なデータを入手できたインドを対象に、インド29州 (Andhra Pradesh, Arunachal Pradesh, Assam, Bihar, Chhattisgarh, Delhi, Goa, Gujarat, Haryana, Himachal Pradesh, Jammu & Kashmir, Jharkhand, Karnataka, Kerala, Madhya Pradesh, Maharashtra, Manipur, Meghalaya, Mizoram, Nagaland, Orissa, Punjab, Rajasthan, Sikkim, Tamil Nadu, Tripura, Uttarakhand, Uttar Pradesh, West Bengal) の都市域と農村域それぞれの個人属性集団別の室内各空間滞在中のPM2.5個人暴露濃度を推計する。本研究では、インドにおける統計資料の”Urban”と”Rural”の区分を、「都市域」と「農村域」と訳している。

2. 室内のPM2.5暴露評価モデル

(1) モデルの概要

本研究では、先行研究^{3,4)}と同様に、Duan⁵⁾によって提案された微環境中の大気汚染物質の人への暴露量の評価式（次式(1)）を用いる。ここで、“微環境 (Microenvironment)”とは、人が一時的に滞在する空間で、その中で汚染物質濃度が様である空間のことをいう。このモデルでは、室内空間を有限個の微環境で構成されているとみなす。

$$E_m^a = C_m \cdot T_m^a \quad (1)$$

ここで、

E_m^a : 個人属性集団 a が微環境 m に滞在中の PM2.5 個人暴露濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C_m : 個人属性集団 a の滞在時間中の微環境 m 中 PM2.5 平均濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hour}$)

T_m^a : 個人属性集団 a の微環境 m における滞在時間 (hour)

式(1)における T_m^a の設定には、既存のインドにおける生活時間調査データ⁶⁾を用いて設定する。本研究では、表-1に示すアジア15カ国を対象にした先行研究³⁾と同様に22種の個人属性集団を設定した。この個人属性集団別に各微環境中での燃料消費によって発生する室内空気汚染物質による個人の暴露量をインドの各州の都市域と農村域別に推定する。その際、住居内空間が表-2に示す3つの微環境で構成されるとして各微環境の用途や滞在時間を定義する。

住居内の各微環境中において燃料消費により発生するPM2.5が室内に様に充満すると仮定し、定常状態を考えると各微環境中の室内濃度は、式(2)によって算定できる。本研究では室内における燃料燃焼により発生する

表-1 個人属性集団分類

性別	年齢	就業状態
男	0	-
男	1-4	-
男	5-14	-
男	15-24	有職
男	15-24	無職
男	25-34	有職
男	25-34	無職
男	35-64	有職
男	35-64	無職
男	65歳以上	有職
男	65歳以上	無職
女	0	-
女	1-4	-
女	5-14	-
女	15-24	有職
女	15-24	無職
女	25-34	有職
女	25-34	無職
女	35-64	有職
女	35-64	無職
女	65歳以上	有職
女	65歳以上	無職

表-2 住居内微環境

微環境	使用用途	PM2.5の住宅内発生要因	対応する滞在時間
A	調理給湯	調理用コンロ・かまどの使用	調理時間
B	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	照明	灯油ランプの使用	室内滞在時間 > 夜の時間 (12時間) の場合 夜の時間 (12時間) - 睡眠時間 室内滞在時間 < 夜の時間 (12時間) の場合 室内滞在時間 - 睡眠時間

PM2.5 による影響のみを分析することを目的としていることから、ここでは、屋外から屋内への PM2.5 の流入はないと仮定する。

$$C_m = \frac{S_m e_m}{(\nu + F_d) V_m} \quad (2)$$

ここで、

C_m : 微環境 m における一日平均 PM2.5 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ν : 換気回数 (1/day)

F_d : 除去率 (1/day)

S_m : 微環境 m における一日当たりの燃料消費量 (KJ/day)

e_m : 排出係数 ($\mu\text{g}/\text{KJ}$)

V_m : 微環境 m の体積 (m^3)

(2) 個人属性集団別微環境滞在時間

a) 大人 (15歳以上)

インドの生活時間調査として入手できたのは、15歳以上の全国平均の男女別、都市域・農村域別の行動別生活時間クロス集計データ⁶⁾で、このデータから微環境滞在時間データを作成するために、各行動別のデータを、睡眠時間、調理時間、食事(家庭内)、その他の室内滞在時間、家庭外の屋内滞在時間、屋外滞在時間の5つのカテゴリーに分類した。アジア15か国を対象に評価した先行研究³⁾においては、調理時間は家庭内の台所に滞在する時間であると仮定していたが、インドにおいては、屋外で調理をする世帯の割合が、都市域で5.5%、農村域で14.2%であるという調査結果⁷⁾を考慮し、調査データの調理時間を屋内と屋外に分割させた。

入手できたインドの生活時間データ⁶⁾からは年齢別、就業状態別の情報は得られなかったが、式(1)の T_m^a を設定するためには、表1に示す個人属性集団別の生活時間情報が必要である。そこで、先行研究³⁾と同様にCross Entropy法⁸⁾を用いて個人属性集団別の微環境滞在時間を作成した。Cross Entropy法は、情報の一部しかわからないデータについて、過去のデータや他の情報などを利用して詳細を推定する手法の1つである。この手法を用いて、個人属性集団分類による微環境滞在時間データを入手できる日本の生活時間調査データ⁹⁾を元に個人属性集団の一部の属性によるクロス集計表のデータを詳細な個人属性集団別に推計した。ここでは、年齢・就業状態による生活時間の違いは日本と同じであるとみなしている。この手法を用いて、都市域と農村域の個人属性集団別微環境滞在時間を作成し、都市域と農村域それぞれのデータが各州で同じであると仮定して合計58地域について個人属性集団別微環境滞在時間データを作成した。

b) 子ども

子どもの個人属性集団 (0歳, 1~4歳, 5~14歳の男女) 別の微環境滞在時間データを作成するために、先行研究³⁾の方法に従って、子どもの1日の生活行動を分類し微環境滞在時間と対応させた。子どもの睡眠時間は、Delhi州における乳児の睡眠時間に関する調査結果¹⁰⁾から乳児の場合は10時間、1~4歳児と5~14歳児の睡眠時間は、インドにおける調査データがなく東アジア5カ国における幼児の生活のアンケート調査結果¹¹⁾から設定した。0歳児の1日の行動は、住居内で「睡眠」と「食事等の自宅内での行動」の2分類のみで男女とも同じであると仮定した。子どもは調理中の母親のそばにいたことが多く調理時の燃料燃焼で発生するPM2.5による暴露を受けると考えられるので¹²⁾¹³⁾、0歳児と1~4歳児の「台所滞在」の時間は、母親世代として25~34歳女性の調理時間の全部を0歳児と1~4歳児の台所滞在時間、2/3を5~14歳児の台所滞在時間と仮定し設定した。労働時間は、0歳児と1~4歳児はゼロとし、5~14歳の子どものについては、ILO, UNICEF, World Bankの合同プログラムUCW(Understanding Children's Work)によるインドでの児童労働に関する労働時間(経済活動従事時間および家庭内労働従事時間)と産業部門別就業率のデータ¹⁴⁾と各州都市農村別の就学率データ文献¹⁵⁾を基に設定した。

以上より作成したインドの都市域と農村域の個人属性集団別の各行動時間の内、図-1に睡眠時間を除いた室内滞在時間を示す。

(3) 家庭内燃料消費量

室内での燃焼によりPM2.5が発生する燃料種はバイオマス、石炭、灯油、LPG、天然ガスであるが、インドにおいて調理と照明に用いられる燃料種のほとんどがバイオマス、灯油、LPGであるので、調理と照明について、これら3種類の燃料の各州の家庭内一人当たりの消費量を、2005年の都市域と農村域の燃料種別部門別インド全国平均家庭内燃料消費量データ¹⁶⁾と都市域と農村域の人口¹⁵⁾、および2004年の各州の都市域と農村域の調理と照明における各燃料種使用世帯割合データ¹⁷⁾を用いて設定した。インドにおいて調理用の燃料種として主に薪、灯油およびLPGの3種類が使用されているが、それ以外に石炭、動物の糞なども割合は少ないが使用されている。

表-3には、都市域と農村域における各州の調理用の主な3種類の燃料種別使用割合を示す。暖房については各州における燃料種別消費量データを入手できなかったため、金森ら¹⁸⁾によるインドの国平均の一人当たりの暖房用のバイオマス、石炭、灯油、LPG、天然ガスの燃料消費量推計値(2005年)を用いて設定した。

表-3 インド各州における都市域・農村域の調理用燃料種別使用割合(一)

州	都市域			農村域		
	薪	灯油	LPG	薪	灯油	LPG
Andhra Pradesh	0.30	0.07	0.57	0.80	0.01	0.14
Arunachal Pradesh	0.25	0.02	0.73	0.83	0.00	0.15
Assam	0.27	0.05	0.61	0.92	0.00	0.07
Bihar	0.19	0.03	0.54	0.50	0.00	0.02
Chhattisgarh	0.38	0.03	0.50	0.92	0.00	0.02
Delhi	0.01	0.15	0.77	0.01	0.05	0.88
Goa	0.09	0.05	0.83	0.24	0.00	0.76
Gujarat	0.14	0.14	0.62	0.73	0.10	0.11
Haryana	0.14	0.07	0.73	0.56	0.04	0.19
Himachal Pradesh	0.07	0.27	0.58	0.76	0.03	0.21
Jammu & Kashmir	0.16	0.08	0.68	0.72	0.01	0.15
Jharkhand	0.12	0.01	0.43	0.83	0.00	0.01
Karnataka	0.24	0.14	0.53	0.90	0.01	0.07
Kerala	0.48	0.01	0.44	0.79	0.00	0.18
Madhya Pradesh	0.38	0.03	0.55	0.91	0.01	0.04
Maharashtra	0.14	0.16	0.63	0.75	0.02	0.15
Manipur	0.31	0.01	0.64	0.80	0.00	0.20
Meghalaya	0.15	0.12	0.55	0.96	0.01	0.02
Mizoram	0.11	0.00	0.88	0.70	0.00	0.29
Nagaland	0.12	0.03	0.83	0.65	0.00	0.34
Orissa	0.37	0.07	0.36	0.80	0.00	0.03
Punjab	0.08	0.13	0.70	0.31	0.04	0.24
Rajasthan	0.39	0.04	0.51	0.99	0.00	0.00
Sikkim	0.00	0.14	0.70	0.57	0.05	0.34
Tamil Nadu	0.22	0.18	0.53	0.81	0.03	0.13
Tripura	0.39	0.05	0.54	0.92	0.01	0.07
Uttarakhand	0.21	0.05	0.68	0.77	0.01	0.18
Uttar Pradesh	0.26	0.05	0.56	0.67	0.00	0.05
West Bengal	0.13	0.11	0.46	0.73	0.00	0.04

表-4 インド各州都市域・農村域の平均世帯人員数と一戸一人当たり延床面積

州	平均世帯人員数		一戸一人当たり当たり床面積(m ²)	
	都市域	農村域	都市域	農村域
Andhra Pradesh	3.6	3.9	8.4	6.8
Arunachal Pradesh	4.4	4.7	7.6	8.6
Assam	4.2	5.5	13.7	10.9
Bihar	5.2	5.7	8.4	8.3
Chhattisgarh	4.5	5.2	5.1	9.2
Delhi	4.4	4.8	9.4	11.7
Goa	3.8	4.7	12.6	12.6
Gujarat	4.3	5.1	10.3	8.8
Haryana	4.8	5.2	9.9	9.8
Himachal Pradesh	3.0	4.2	12.8	11.9
Jammu & Kashmir	4.9	6.0	11.2	10.9
Jharkhand	4.8	5.7	8.3	7.7
Karnataka	4.0	4.8	10.4	7.8
Kerala	3.9	4.1	15.0	14.3
Madhya Pradesh	4.7	5.2	9.7	9.3
Maharashtra	4.3	4.6	7.4	7.9
Manipur	5.0	5.4	13.6	12.1
Meghalaya	4.8	5.6	9.7	7.9
Mizoram	5.0	5.0	10.4	8.6
Nagaland	4.6	5.5	9.2	8.7
Orissa	4.2	4.8	8.5	7.1
Punjab	4.2	4.9	11.0	11.5
Rajasthan	4.6	5.4	12.0	8.6
Sikkim	3.8	4.7	12.1	10.2
Tamil Nadu	3.4	3.9	10.1	7.9
Tripura	3.7	4.3	10.2	8.5
Uttarakhand	4.4	4.8	9.8	8.8
Uttar Pradesh	5.2	5.8	8.5	7.8
West Bengal	4.0	4.7	9.0	6.8

3. 推計結果と考察

インド29州の都市域と農村域の合計58地域の個人属性集団別の室内各微環境滞在中のPM_{2.5}個人暴露濃度を推計した。なお、微環境B滞在中の個人暴露濃度は、暖房を必要とする寒冷地域である7州(Delhi首都圏, Haryana州, Himachal Pradesh, 州, Jammu & Kashmir, 州, Punjab州, Rajasthan州, Uttaranchal州)についてのみ推計した。

(1) パラメータの設定

式(2)を用いて各微環境滞在中のPM_{2.5}個人暴露濃度を計算するために必要なパラメータを設定する。

各微環境における燃料使用量は、2. で作成した薪、石炭、灯油、LPG、天然ガスの一人当たり燃料使用量データと、各州の平均世帯人員数データ¹⁹⁾を用いて設定した。表-4に各州の都市域と農村域の平均世帯人員数と一人当たり延べ床面積データ²⁰⁾を示す。各燃料種のPM_{2.5}排出係数を表-5に示すように設定した。表-5において報告値に幅がある場合は平均値を用いた。ここでは、調理用の灯油の報告値がTSP、暖房用および照明用の灯油の報告値がPM₁₀についてのみしか得られなかったため、表-6に示すTSPとPM_{2.5}とPM₁₀とPM_{2.5}の濃度換算比の軽油についての報告値を用いてPM_{2.5}/TSPを0.42、PM_{2.5}/PM₁₀を

表-5 PM_{2.5}燃料種別排出係数

燃料種	排出係数 ($\mu\text{g}/\text{KJ}$) 括弧内は平均値	出典
薪	127~246 (186.5)	21)
石炭	18.1~52.4 (35.25)	22)
灯油 (調理)	1.7~3.6 (2.65)	23), 25)
灯油 (暖房)	0~302 (151)	24)
灯油 (照明)	54.2~150 (102.1)	24)
LPG	0.2	25)
天然ガス	0.2	26)

表-6 TSPおよびPM₁₀からPM_{2.5}への換算比

家庭用 燃料種	換算比		
	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{2.5} /TSP	PM ₁₀ /TSP
WHOの設定 ²⁾	0.5	-	-
Mestlらの設定 ²⁷⁾	0.6	-	0.7
Klimontらの設定 ²³⁾ (Size fractionからの算定)	石炭	0.14	0.13
	バイオマス	0.97	0.93
	薪	0.89~0.96	0.84~0.96
	軽油	0.6~0.94	0.42
			0.946~0.997
			0.55

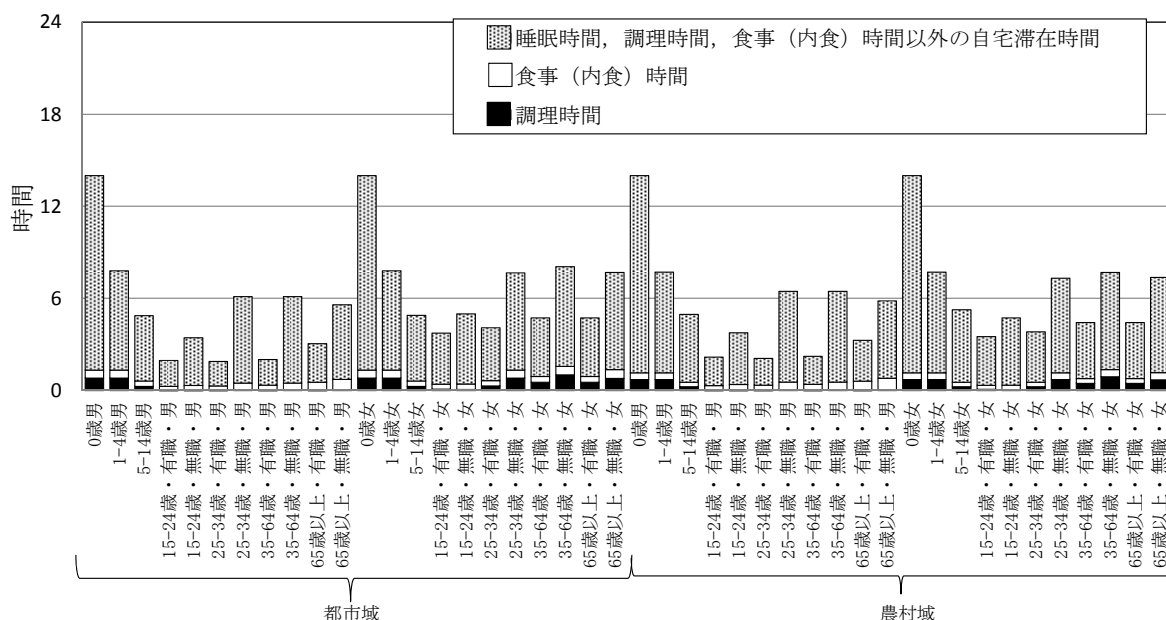


図-1 インド都市域と農村域の個人属性集団別室内滞在時間(睡眠時間を除く)推定結果

0.77(報告値の平均値)として算出している。各微環境の体積については、各地域の台所や居間などの部屋別の床面積に関する情報を入手できなかったため、各微環境の体積はすべて1戸あたりの平均的な部屋の体積であると仮定して、各州の都市域および農村域の一人当たり延べ床面積データ²⁰⁾と各地域の世帯数データ¹⁹⁾を用いて、部屋の高さをインドの建築基準である2.75 mとして算出した。換気回数²⁸⁾は、Dabidsonら²⁸⁾による測定値としてヒマラヤ地域のKumjungの村で4 h⁻¹, 6 h⁻¹, インドの農村域で20 h⁻¹という報告, Zangら²⁹⁾による発展途上国農村域では20 h⁻¹, 寒冷地域や高地では5 h⁻¹であるという報告およびChaoら³⁰⁾のHong Kongにおける測定結果(1.8~8.7 h⁻¹)を参考に、各州の都市域では5 h⁻¹, 農村域では寒冷地域であるDelhi首都圏, Haryana州, Himachal Pradesh, 州, Jammu & Kashmir, 州, Punjab州, Rajasthan州, Uttaranchal州の7州については10 h⁻¹, それ以外の州については20 h⁻¹と仮定して設定した。除去率はÖzkaynakらの研究³¹⁾を参考に0.4 h⁻¹と設定した。

(2) 推計結果

各州の個人属性集団別の各微環境滞在中のPM2.5個人暴露濃度を推計した。暖房を必要とする州の都市域ではすべての個人属性集団で暖房期間の微環境Bに滞在中の個人暴露濃度が調理にかかわる微環境Aに滞在中よりも高く、特に、一日を屋内で過ごす0歳児の微環境B滞在中の個人暴露濃度が最も高い。農村域では、微環境Bより微環境A滞在中の個人暴露濃度が大きくなっている。照明にかかわる微環境C滞在中の個人暴露濃度は都市域農村域ともに他の微環境より1~2オーダー低い。調理にかかわる微環境A滞在中では都市域、農村域ともに35~64歳の無職女性の暴露濃度が他の個人属性集団より

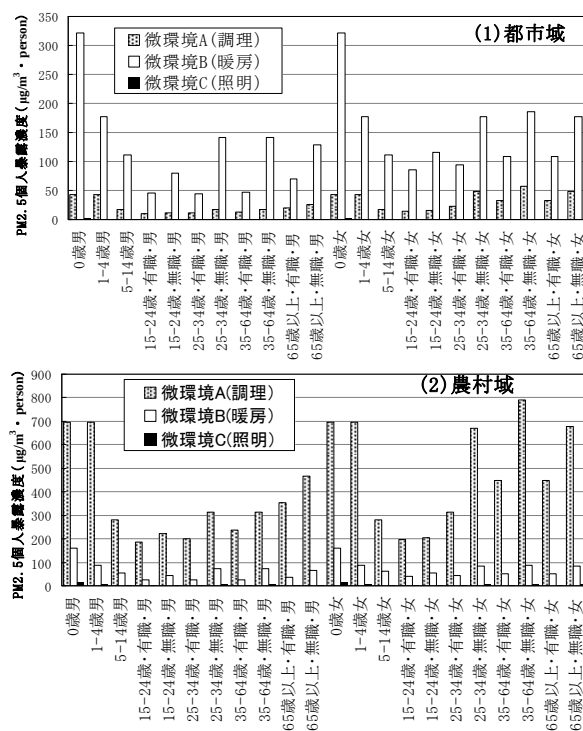


図-2 Uttarakhand州の都市域と農村域の個人属性集団別各微環境滞在中のPM2.5個人暴露濃度推計結果

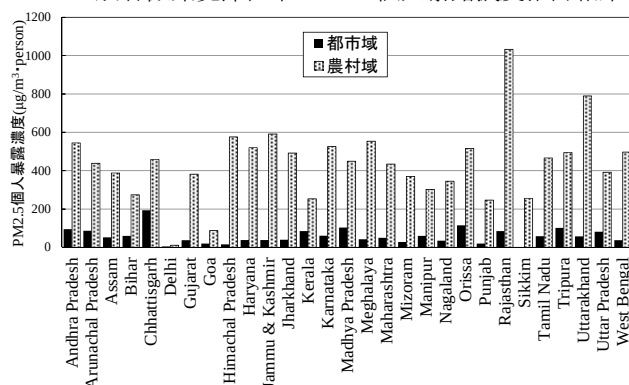


図-3 各州の都市域と農村域における35~64歳無職女性の台所滞在中のPM2.5個人暴露濃度推計結果

も高く、Rajasthan州農村域での35～64歳の無職女性の暴露濃度が最も高く1033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と推計された。男性は都市域、農村域ともに女性より低いが、65歳以上の無職男性の暴露濃度は25～34歳の有職女性より高い。図-2(1)、(2)に北部Uttarakhand州の都市域と農村域の個人属性集団別の各微環境滞在中のPM2.5個人暴露濃度推計結果を示す。図-1と比較すると、個人属性集団別の微環境A滞在中の個人暴露濃度は個人属性集団別調理時間に、微環境BとCでは個人属性集団別の睡眠時間を除いた室内滞在時間全体に影響を受けていることがわかる。

図-3に個人属性集団の中で調理にかかわる微環境A滞在中の個人暴露濃度が最も高い35～64歳の無職女性の各州の都市域と農村域での推計値を示す。

(3) 既報告値との比較

本研究での調理にかかわる微環境Aについての7地域における既往測定値と推定結果との比較を行った(表-7)。表-7に示す(a)～(g)の地域の既報告値は調理に従事する女性の調理中の個人暴露濃度を台所における濃度の測定値と調査対象の女性の調理時間のアンケート

調査から推計したものである。本研究で微環境A滞在中の個人暴露濃度推計値が最も高かった35～64歳の無職女性の個人暴露濃度推計値と比較する。その際、本研究で使用した各燃料種別のPM2.5排出係数の報告値の幅に起因する推計値のばらつきを計算したものを括弧内に示す。また、報告値がPM10やTSPの濃度である場合は、表-6に示した燃焼燃料別のPM10とPM2.5の濃度比(PM2.5/PM10)とTSPとPM2.5の濃度比(PM2.5/TSP)を用いてPM2.5の濃度に換算した。

(a) Andhra Pradeshの農村部での台所でのほう報告値の約28%で、測定対象の世帯では薪の使用割合が81%であり、この地域の平均的な薪使用割合が80%(表-3)であることから、本研究の推計値が過大評価となっている可能性がある。(b) Karnataka州の都市域での報告値は推計値より小さいが、灯油のみを使用する世帯とLPGのみを使用する世帯での調査データであり、この地域での調理用燃料使用割合は薪42%、灯油14%、LPG53%であること(表-3)と薪の排出係数が他の燃料より高い(表-5)ことから、実際には推計値に近い値になる可能性がある。(c) Maharashtra州の農村域における推計値は

表-7 インドにおける室内微環境滞在中のPM2.5個人暴露濃度推計の既報告値と本研究での推計値との比較

州		場所	測定年	測定対象	測定時期 測定時間	測定 物質	使用燃料 使用場所 など	室内濃度測定値 から推計された台 所滞在中の個人 曝露濃度推計値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{person}$)	本研究における35- 64歳無職女性の調 理時間(都市域1時 間,農村域0.9時間) に換算した場合の 台所滞在中の PM2.5個人曝露濃 度推計値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{person}$)	本研究での35-64 歳無職女性の微 環境A滞在中の PM2.5個人曝露 濃度推計値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{person}$)	出典
(a)	Andhra Pradesh	Rural	2001	412世帯 16～60歳女 性	夏季調理時 2.4 hours/day	PM10	薪81%, 灯油・LPG12% 台所	442	153 (薪のPM2.5/PM10 換算比で計算)	544 (371～718)	32)
(b)	Karnataka	Mysore (Urban)	2002	女性15人 (平均30歳)	調理時(2.64 hours/day)	PM2.5	台所 灯油	夏111, 冬177	夏33.0, 冬52.7	60.5 (41～80)	33)
				女性15人 (平均37歳)	調理時(3.36 hours/day)		LPG	夏71, 冬71	夏21, 冬21		
(c)	Maharashtra	Rural near Pune	2007	バイオマスを 燃焼する伝統 的かまどを使 用の87世帯	48-hr mean	PM2.5	バイオ マス 伝統的かまど使用 (台所)	1250	625	434 (295～572)	34)
							改善されたかまど に変更後(台所)	940	470		
(d)	Maharashtra	Pune (Urban)	1993	貧困地域に おける非喫煙 38世帯	室内滞在時 (14 hours/day)	PM10	台所 バイオマス	17000～26000	1178～1801 (平均1490)	農村域 434(295～572) 都市域 50(34～66)	35)
							灯油	2400～3600	132～198 (平均165)		
							LPG	400	17.1		
(e)	Tamil Nadu	rural	1999	5028世帯 (96%がバイオ マスのみを使 用)	調理時 2 hours/day	PM10	薪 他の部屋と区切ら れていない台所	1498	624	466 (318～615)	36)
							他の部屋から独立 した台所	1506	627		
(f)	Uttarakhand	Garhwal Himalaya (Rural)	1989- 1990	19歳以上の 女性	台所滞在時 3.3 hours/day	TSP	薪 台所	17000	4173	789 (538～1041)	37)
(g)	Uttar Pradesh Madhya Pradesh	Rural Bundelkhan d region	2007	バイオマスを 燃焼する伝統 的調理窯を使 用する世帯	室内調理時 間48-hr mean (夏(4か月)は 外で調理。室 内で調理する のはモン スーン期間と 冬季(8か月))	PM2.5	バイオ マス 伝統的かまど使用 (台所)	520	260	Uttar Pradesh 391 (267～516)	38)
							改善されたかまど に変更後(台所)	330	165	Madhya Pradesh 449 (306～592)	

燃焼効率や換気の改善がなされたかまどに使用を変更した後の報告値に近い値となっている。(d) 貧困世帯の燃料使用割合は薪61%, 灯油22%, LPG10%との報告¹⁶⁾からこの州の農村域の燃料使用割合に近いと考えられることから, Maharashtra州の都市域の貧困地域における報告値を, 同州の農村域での推計値と比較すると, 報告値は推計値より約20倍大きく, 本研究の推計値が過小評価となっている可能性がある。(e) Tamil Nadu州の農村域における報告値は推計値より大きい, 報告値の対象世帯は96%がバイオマスを使用している世帯で, 推計ではこの州の農村域での薪の使用率が81% (表-3) であることから, 本研究の推計値は妥当であると考えられる。(f) Uttarakhand州の農村域における報告値は推計値の約5倍になっている。報告値(1989-1990)では薪のみの使用で, 推計の時点(2005年)では薪の使用は77%でLPGの使用が18%となっていることから, 推計時点では台所滞在中の個人曝露濃度は減少している可能性があることから推計値が過小評価になっているとは判断できない。(g) Uttar Pradesh州とMadhya Pradesh州にまたがるBundelkhand地域における報告値は推計値より小さい。この地域がモンスーン期間と冬季以外は屋外で調理をすることを推計では考慮していないことから推計が過大評価になっている可能性がある。

以上より, 本研究の推計値の妥当性はおおむね示されているが, 一部, 推計値が過大評価あるいは過小評価になっている。その原因としては, ①調理で使われる薪を使うかまど(cooking stove)の熱効率(伝統的なものか新しいものか)の違いを考慮していない(排出係数を一律にしている), ②微環境Aの体積として台所の体積ではなく, 1戸あたりの平均的な部屋の体積としている, ③台所が分離されているか, 居間と合体しているかによる換気回数の違いを考慮していない, ④都市域の中の貧困地域の状況を考慮せず, 一律に都市域として推計している, ⑤推計値の妥当性を検討する際に比較した報告値には推計対象年(2005年)より過去のものが多く, それぞれの地域における家庭での燃料使用の変化を考慮する必要がある, ことが挙げられる。

4. おわりに

本研究では, インド29州の都市域と農村域における家庭内の燃料消費量の用途別の燃料種使用割合, 世帯や住居に関する統計情報の地域別の詳細なデータを用いて, 調理, 暖房, 照明のための燃料燃焼によって発生するPM_{2.5}の個人属性集団別の室内各微環境滞在中のPM_{2.5}個人曝露濃度を推計した。先行研究で明らかになった家庭内燃料に使用状況や世帯や住居に関する地域

別の詳細な情報を使用したことによって, 推計の信頼性を上昇させることができたが, 3.(3)で示したように, 推計値の信頼性をさらに向上させるには多くの課題が残されている。これらは, 本研究の個人属性集団分類で考慮していない所得による違いにかかわるものであり, 今後, アジア各国を対象に地域別個人属性集団別の室内各空間滞在中のPM_{2.5}個人曝露濃度の推計を行っている上で無視できないファクターであると考えられる。さらに, 表-7で示しているように, 排出係数の報告値の不確実性が推計値の信頼性に大きく影響することから, 推計モデルを構成する他のパラメータ(換気回数, 各微環境の体積)に関する情報の不足による不確実性が暴露評価におよぼす影響も分析し, 大きな影響を及ぼすパラメータに関してはさらなる情報の入手が必要となる。また, 本研究では考慮できなかった各微環境の体積の違い, 台所の構造および調理の場所(屋外か屋内か)について都市域と農村域の違いや地域による違いを暴露評価の際に考慮すべきであるし, 2.(2)で個人属性集団の地域別年齢別の各微環境滞在時間の設定においては日本の場合と同じと仮定していることから, 本研究における推計がインドの人々の生活時間配分を正確に反映していない可能性がある。本研究の最終的な目的が, 各国での今後のライフスタイルや社会の変化, 電化によるエネルギー消費構造の変化などの将来の変化に対して人々の暴露による健康リスクがどのように変化するかを予測することにあることから, 人々の暮らし方や所得などの貧困にかかわるファクターを評価にどのように考慮してモデルを改善していくかが今後の課題である。また, 先行研究と本研究では評価手法は同じであるものの, それぞれ対象とした国について入手したデータに合わせて別々の個人属性分類や燃料種等の設定を行ったことにより推計結果の比較を行うのが難しい。そこで, 今後は, 各国の暴露推計結果を比較できるように, 個人属性集団の分類を統一するなどモデルの汎用性を考えていく必要がある。

謝辞: 本研究は科研費(21510052)の研究成果の一部である。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) WHO/UNDP: The Energy Access Situation in developing countries, A Review Focusing on the Least Developed Countries and Sub-Saharan Africa. UNDP/WHO, 2009.
- 2) WHO: Air Quality Guidelines Global Update 2005, WHO Regional Office for Europe, 2006.
- 3) Shimada, Y. and Matuoka, Y.: Analysis of indoor PM_{2.5} exposure in Asian countries using time use survey, *Science*

- of the Total Environment, Vol.409, pp.5243-5252, 2011.
- 4) 島田洋子, 郭敏娜, 倉田学児, 松岡 譲: 中国各地域の都市と農村の生活時間調査情報を用いた室内環境中 PM_{2.5} 暴露評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 67, No. 6 (環境システム論文集, 第 39 卷), II_307-II_314, 2011.
 - 5) Duan, N.: Models for human exposure to air pollution, *Environment International*, Vol.8, pp.305-309, 1982.
 - 6) Rajiva, A. K.: Policy Implications For Gender Equality: The India Time Use Survey, 1998-1999, Proceedings of the International Seminar on Time Use Surveys, 7-10, Center for Development Alternatives, Ahmedabad, India, 1999.
 - 7) Indian government: Census of India 2001.
 - 8) Golan, A., Judge, G. and Miller, D.: Maximum entropy econometrics -Robust estimation with limited data-, Series in financial economics and quantitative analysis, Wiley, 1996.
 - 9) 総務省統計局: H18 社会生活基本調査 調査票 B 集計表
 - 10) Malhotra, P., Saksena, S., Joshi, V.: Time budget of infants for exposure assessment: a methodological study, *J. Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol.10, pp. 267-284, 2000.
 - 11) ベネッセ: 幼児の生活アンケート 東アジア 5 都市調査, 2010. http://www.benesse.co.jp/jisedaiken/research/pdf/research16_report.pdf
 - 12) Smith, K. R., Samet, J. M., Romieu, I. et al.: Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children, *THORAX*, Vol.55, pp. 518-532, 2000.
 - 13) Bruce, N., Perez-Padilla, R., Albalak, R.: The health effects of indoor air pollution exposure in developing countries, WHO/02.05, 2002.
 - 14) UCW (Understanding Children's Work) (2011). Child labor survey database. <http://www.ucw-project.org/Pages/ChildLabIndicator.aspx>.
 - 15) India Demographic and Health Survey 2005: Chap.2 Household Population and Housing Characteristics.
 - 16) de la Rue du Can, S., McNeil, M. and Sathaye, J.: India Energy Outlook: End Use Demand in India to 2020, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.
 - 17) National Sample Survey Organization: Energy Sources of Indian Households for Cooking and Lighting, 2004-05, Report No. 511(61/1.0/4), Ministry of Statistics and Programme Implementation, Government of India 2007.
 - 18) 金森有子, 松岡譲: 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, 地球環境研究論文集, Vol.18, pp.131-142, 2010.
 - 19) Labour Bureau: Report on Employment & Unemployment Survey (2009-10), Ministry of Labour & Employment, Government of India, 2010.
 - 20) National Sample Survey Office: Housing Condition and Amenities in India 2008-09, Report No. 535 (65/1.2/1), Ministry of Statistics and Programme Implementation, Government of India, 2010.
 - 21) Li, X., Duan, L. et al.: Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China, *Energy Fuels*, 21(2), pp.845-851, 2007.
 - 22) Ge, S., Xu, X. et al.: Emissions of air pollutants from household stoves: honeycomb coal versus coal cake, *Environ. Sci. Technol.*, 38(17), pp.4612-4618, 2004.
 - 23) Zhang, J., Smith, K. R. et al.: Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors, *Atmos. Environ.*, 34, pp.4537-4549, 2000.
 - 24) Fan, C. and Zhang, J.: Characterization of emissions from portable household combustion devices: particle size distributions, emission rates and factors, and potential exposures, *Atmos. Environ.*, 35(7), pp.1281-1290, 2001.
 - 25) Klimont, Z., Cofala, J., Bertok, I., Amann, M.: Modeling Particulate Emission in Europe. IIASA Interim Report, IR-02-076, 2002. <http://www.iiasa.ac.at/rains/reports/ir-02-076.pdf>
 - 26) Visschedijk, A., Pacyna, J., Pulles, T., Zandveld, P., van der Gon, H. D.: Coordinated European particulate matter emission inventory program (CEPMEIP), in: Dilara, P. et al. (eds), Proceedings of the PM emission inventories scientific workshop, Lago Maggiore, Italy, 18 October 2004, EUR 21302 EN, JRC 2004, pp.163-174, 2004.
 - 27) Mestl, H. E. S., Aunan, K., Seip, H. M.: Potential health benefit of reducing household solid fuel use in Shanxi province, China, *Science of the Total Environment*, Vol.372, pp.120-132, 2006.
 - 28) Davidson, C. I., S. J. Lin, J. F. Osborn, M. R. Pandey, R. A. Rasmussen, M. A. K. Khalil: Indoor and outdoor air pollution in the Himalayas, *Environmental science & technology*, 20(6), 561-567, 1986.
 - 29) Zhang, J., K. R. Smith, R. Uma, Y. Ma, V. V. N. Kishore, K. Lata, M. A. K. Khalil, R. A. Rasmussen and S. T. Thorneloe: Carbon monoxide from cookstoves in developing countries: 2. Exposure potentials, *Chemosphere-Global Change Science*, 1(1-3), 367-375, 1999.
 - 30) Chao, C. Y., and Wong, K. K.: Residential indoor PM₁₀ and PM_{2.5} in Hong Kong and the elemental composition. *Atmos. Environ.*, 36, pp.265-277, 2002.
 - 31) Özkaynak, H., Hue, J. et al.: Personal exposure to

- airborne particles and metals: results from the Particle TEAM study in Riverside, California, *J. Exp. Anal. Env. Epid.*, 6(1), pp.57-78, 1996.
- 32) Balakrishnan, K., Sambandam, S., Ramaswamy, S., Mehta, S., Smith, K. R.: Exposure assessment for respirable particulates associated with household fuel use in rural districts of Andhra Pradesh, India, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, Vol.14, pp.S14-S25, 2004.
- 33) Andresen PR, Ramachandran G, Pai P, Maynard A.: Women's personal and indoor exposure to PM_{2.5} in Mysore, India: Impact of domestic fuel usage, *Atmospheric Environment*, Vol.39, pp.5500-5508, 2005.
- 34) Dutta, K., Shields, K. N., Edwards, R., Smith, K. R.: Impact of improved biomass cookstoves on indoor air quality near Pune, India, *Energy for Sustainable Development*, Vol.XI, No. 2, pp.19-32, 2007.
- 35) Smith, K.R., Apte, M.G., Ma, Y., Wongsekiarttirat, W. Kulkarni,A.: Air pollution and the energy ladder in Asian cities, *Energy*, Vol,19, pp.587-600, 1994.
- 36) Prikh J, Balakrishnan K, Laxmi V, Biswas H.: Exposure from cooking with biofuels: pollution monitoring and anlysis for rural Tamil Nadu, India, *Energy*, Vol.26, pp.949-962, 2001.
- 37) Saksena S, Prasad R, Pal RC, Joshi V. Patterns of daily exposure to TSP and CO in the Garhwal Himalaya, *Atmospheric Environment*, Vol.26A, No.11, pp.2125-2134, 1992.
- 38) Chengappa, C., Edwards, R., Rajesh Bajpai, R., Kyra Naumoff Shields, K. N., Smith, K. R.: Impact of improved cookstoves on indoor air quality in the Bundelkhand region in India, *Energy for Sustainable Development*, Vol.XI, No. 2, pp.33-44, 2007.

(2012. 4. 20受付)

(2012. 6. 9受理)

A Cross-province Analysis of Urban and Rural Human Exposure of Indoor PM_{2.5} in India

Yoko SHIMADA¹ and Yuzuru MATSUOKA²

¹Faculty of Science and Engineering , Setsunan University

²Garuate School of Engineering, Kyoto University

In developing countries, most households use solid fuels (coal or biomass as wood, crop residues and animal dung). Particulate matter 2.5 (PM_{2.5}) produced through indoor combustion of these fuels for cooking, heating and lighting has an adverse impact on people's health. We estimated PM_{2.5} personal exposure concentration in each indoor microenvironment for each personal group of urban and rural area in 29 states of India, using detailed statistical data on time use, domestic energy consumption, household and housing condition. The study found that, unemployed women between the ages of 35 and 64 using fire wood for cooking had higher estimate for PM_{2.5} personal exposure concentration during cooking than the other personal groups. The highest personal exposure concentration is 1033 µg/m³ for unemployed women in rural Rajasthan. Men are less affected by indoor PM_{2.5} than women, however, unemployed elderly men are more affected by indoor PM_{2.5} than employed women between the ages of 35 and 64.