

3. アジア地域の人々を対象とした PM_{2.5}曝露濃度の推定

柳 千絵¹・島田 洋子²・倉田 学児^{1*}・松岡 譲¹

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 クラスター)

²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)

* E-mail: gkurata@athehost.env.kyoto-u.ac.jp

大気汚染は人間の健康に対する主要な環境リスクであり、先進国、発展途上国両方の多くの都市で PM(Particulate Matter: 粒子状物質)やオゾン, SO_x, NO_xの曝露による深刻な健康被害が生じている。本研究では、微環境の概念を用い、時間平均アプローチによる大気汚染物質曝露濃度評価モデルを作成し、アジア地域の人々の屋外屋内両方でのPM_{2.5}曝露濃度を推定した。

この結果、屋内発生源(調理・給湯・暖房)のある微環境における曝露が曝露全体の大部分を占めることがわかった。また、曝露濃度と人口密度との関係より、PM_{2.5}への曝露が深刻な地域は、中国東部、ベトナム北部、ジャワ島、インド北部であることがわかった。

Key Words : PM_{2.5}, Exposure model, WRF, CMAQ, Indoor air pollution

1. 序論

大気汚染は人間の健康に対する主要な環境リスクであり、近年、大気汚染物質の中でも PM、特に空気力学径が 2.5μm 以下(50%カットオフ)の PM_{2.5}(微小粒子状物質)の健康影響が国際的に注目されている。PM_{2.5}は呼吸器系の奥深くまで入りやすく、粒子表面に様々な有害成分が吸着しているので、呼吸器系疾患、循環器系疾患、肺がんなどの病気や死亡の原因となる¹⁾。

大気汚染物質の個人曝露濃度は、主として自動車などの屋外発生源の影響を受けている屋外濃度と、主として喫煙や調理などの屋内発生源の影響を受けている屋内濃度の、両方に依存する。個人曝露濃度を調査した研究は多く実施されてきた。Dockery and Spengler²⁾はアメリカの 2 都市で粉じんと硫酸塩の個人曝露濃度を測定し、個人曝露濃度と屋外濃度に関連があることを示した。また、Spengler *et al.*³⁾はハーバード 6 都市研究において粉じんの個人曝露濃度、屋外濃度、屋内濃度を測定し、個人曝露濃度と屋外濃度の相関は小さく、個人曝露濃度と屋内濃度の相関は非常に大きいことを示した。アジア地域における研究例としては、Andresen *et al.*⁴⁾が挙げられる。この研究では、インドにおいて主要調理燃料に LPG を使う女性グループと灯油を使う女性グループそれぞれの

PM_{2.5}個人曝露濃度を測定した。また日本では、7 地域における小学生の子どもを持つ主婦の PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ 個人曝露濃度、屋外濃度、屋内濃度を測定した研究例⁵⁾がある。この研究では、個人曝露濃度は屋内濃度と強い相関を持ち、また平均濃度においては屋内濃度と屋外濃度はほぼ同じとみなせたことから、平均濃度の場合、地域で生活する個人の曝露評価を地域を代表する環境濃度で行うことは妥当であると結論付けた。

このように個人への曝露濃度を直接測定することは、大気汚染物質曝露による人体への健康影響を研究する上で非常に重要な知見を与えるが、多くの人々のデータを集める調査を頻繁に行うことは難しい。そこで、微環境の濃度と個人の行動データを組み合わせることにより大気汚染物質への曝露量を推定する曝露モデルが大気汚染物質の個人への曝露濃度を理解する助けとなる。微環境とは、一様な大気汚染物質濃度で満たされていると仮定できる、人が一時的に滞在する空間のことを指す。曝露モデルには、微環境の曝露を経時的に評価する時系列アプローチと、微環境の 24 時間の平均濃度と各微環境の滞在時間から推定する時間平均アプローチがある¹⁾。このような曝露モデルは多く開発されてきており、EPA の NEM, SHAPE, SHEDS, APEX や RIVM の AirPEX などが挙げられる。

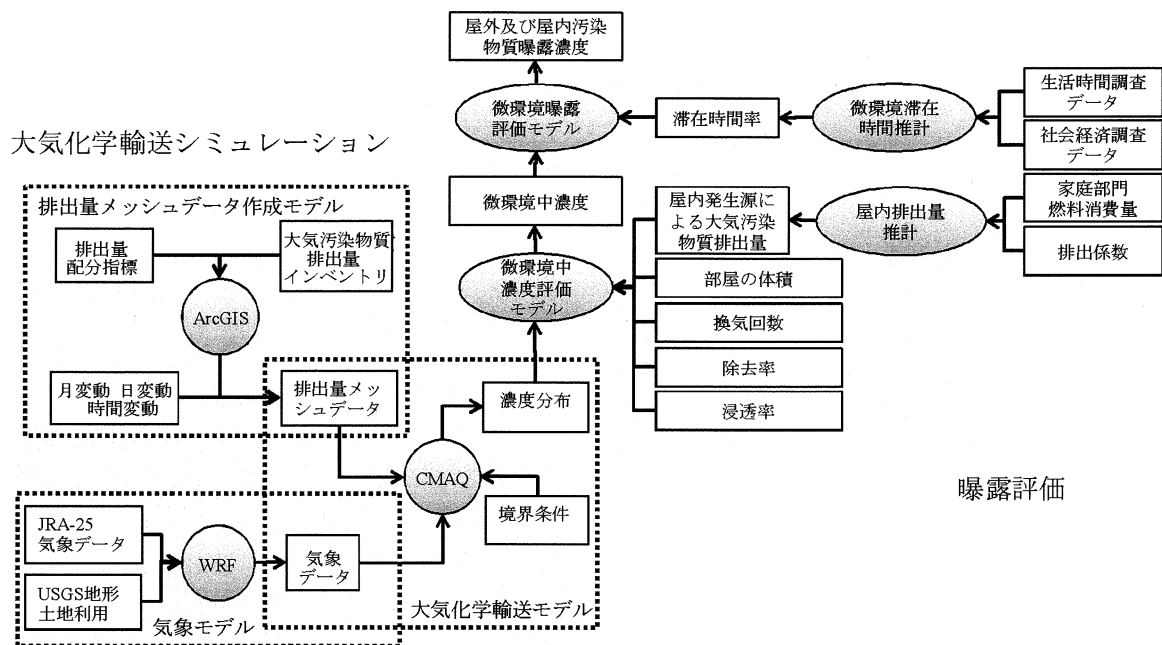


図-1 モデルの構成

本研究では、発展途上国を含むアジア各国の不均質な生活時間調査を用いるという観点から、時間平均アプローチによる大気汚染物質曝露濃度評価モデルを作成した。図-1に本研究で開発したモデルの構成を示す。このモデルは、屋外濃度及び屋内空気汚染における屋外からの寄与を推定する大気化学輸送シミュレーションを行うモデルと、微環境の汚染物質濃度と曝露濃度を推定する曝露評価を行うモデルから構成される。大気化学輸送シミュレーションは排出量メッシュデータ作成モデル、気象モデル、大気化学輸送モデルに分かれており、大気汚染物質排出量インベントリなどを用いて汚染物質の空間濃度分布を計算する。曝露評価は微環境中濃度評価モデルと微環境曝露評価モデルからなり、対象国の屋内排出量推計や微環境滞在時間推計によって、コホート別微環境別屋外及び屋内汚染物質曝露濃度を推定する。

本論文では、アジア24カ国を対象として、2001年におけるPM_{2.5}一日平均曝露濃度を推定した結果を報告する。

2. 大気化学輸送シミュレーション

気象モデルと大気化学輸送モデルの設定領域を図-2に示す。東経112度北緯21度を中心としたLambert等角円錐座標系(標準線緯度10°、30°)上に設定した。格子幅は80kmである。格子数はWRFが120×105(東西方向×南北方向)、CMAQが117×102(東西方向×南北方向)である。

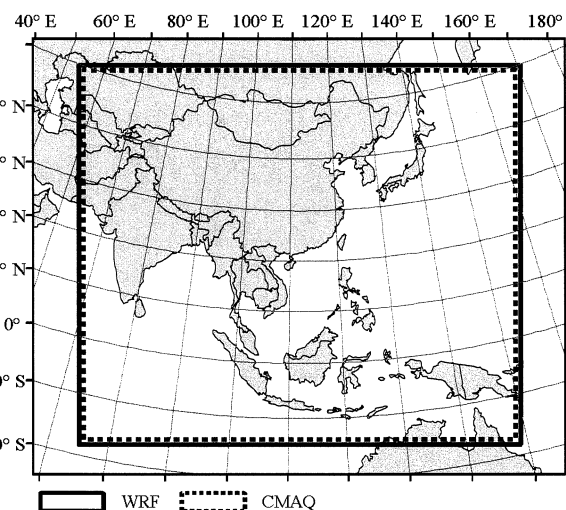


図-2 設定領域

(1) 排出量メッシュデータ作成モデル

人為起源の大気汚染物質排出量には主に Zhang *et al.*(2009)⁹⁾の国別部門別データを使用した。これは2006年を対象としたデータであるので、各国エネルギー消費量の2006年と2000年の比を乗じた値へと変換した。各国エネルギー消費量には、IEA⁷⁾の値を用いた。これを長山(2009)⁹⁾の手法で30°×30°のメッシュデータへと変換した。

自然起源の排出量には、GEIA(Global Emissions Inventory Activity)¹⁰⁾が提供している1990年の1°×1°のメッシュデータを使用した。三宅島からのSO₂放出量には、気象庁の発表している三宅島の2001年のSO₂放出量日量測定

値¹¹⁾より、月別に放出量を設定した。三宅島を除く火山からの SO₂ 放出量には、Streets *et al.*(2003)¹²⁾のデータとともにアイオワ大学が提供する電力中央研究所と GEIA による推計値(1970年代~1997年の間の平均値)を用いた。

バイオマス燃焼による大気汚染物質排出量には、GICC biomass burning inventory¹³⁾の2001年の1°×1°月別メッシュデータを使用した。

(2) 気象モデル

気象モデルには、NCAR (National Center for Atmospheric Research: 米国大気研究センター)が中心となって開発したメソスケール気象モデルのWRF (Weather Research and Forecasting Model) Ver. 3.1.1を使用した。入力用気象データには気象庁と電力中央研究所によって実施されたJRA-25 (Japanese Re-Analysis 25 years)プロジェクトの再解析データセット¹⁴⁾を用いた。このデータの解像度は1.125°×1.125°である。WRFのオプション設定を表-1に示す。気象モデルの妥当性の検証には高層気象観測データ¹⁵⁾を用い、日本国内の高層気象観測官署における高度、気温、相対湿度、風速について、大気化学輸送モデルの計算に必要な精度での再現性が認められた。

(3) 大気化学輸送モデル

大気化学輸送モデルにはEPAが開発した3次元オイラー型化学反応・輸送モデルのCMAQ (Community Multiscale Air Quality Model) Ver.4.7を使用した。境界における物質濃度には、MOZART (Model of Ozone and Related Chemical Tracers) Ver. 2.1の標準実行の結果¹⁶⁾を利用した。CMAQのオプション設定は表-2に示す通りである。

3. 曝露評価

本研究では、性別、年齢および就業状態などによって特徴づけられる個人の多様性を曝露評価に反映させるために、表-3のようにコホートの分類を設定し、コホートごとに曝露濃度を算定した。ここで、コホートとは性別や年齢、就業状態などの性質が一致する個人からなる集団を指す。年齢は乳児、幼児、児童、青少年(学生または労働者)、子育て世代、中年および老人として区分し、就業状態は有職か無職かの2区分とし、表-4に示す各国の生活時間調査のクロス集計表(年齢、就業状態)を参考に設定した。このような設定を行ったのは、後述するように、コホートごとの曝露濃度の算定に用いる滞在時間率を、各国の生活時間調査データを基に設定したためである。

微環境は表-5の通りに設定した。なお、微環境A-Dは

同時に起こる場合があるが、その場合にはそれぞれに滞在時間が計上されるため、曝露濃度を足し合わせる事で正しく反映されている。

表-1 WRFのオプション設定

過程	使用モデル
雲物理	WSM 6-class graupel scheme
地表面	Noah land-surface model
境界層	YSU scheme
積雪	New Grell scheme(G3)
長波放射	RRTM
短波放射	Dudhia

表-2 CMAQのオプション設定

過程	使用モデル
水平および鉛直移流	Global mass-conserving scheme
鉛直拡散	Asymmetric Convective Model version 2
雲混合	ACM
気相化学反応	CB05
エアロゾル	AERO5

表-3 コホート分類表

属性番号	性別	年齢	就業状態
1	男	0	-
2	男	1-4	-
3	男	5-14	-
4	男	15-24	有職
5	男	15-24	無職
6	男	25-34	有職
7	男	25-34	無職
8	男	35-64	有職
9	男	35-64	無職
10	男	65+	有職
11	男	65+	無職
12	女	0	-
13	女	1-4	-
14	女	5-14	-
15	女	15-24	有職
16	女	15-24	無職
17	女	25-34	有職
18	女	25-34	無職
19	女	35-64	有職
20	女	35-64	無職
21	女	65+	有職
22	女	65+	無職

表-4 生活時間調査一覧表

国	調査年	入手した生活時間情報 クロス集計表	出典
日本	2005	男女×年齢×就業	17)
中国	2008	男女×地域 男女×年齢 男女×就業	18)
インド	1998/1999	男女×地域	19)
台湾	2004	男女×年齢	20)
インドネシア	1998/1999	男女×地域	21)
マレーシア	2003	男女	22)
フィリピン	-	-	-
韓国	2000/2005	男女×地域	23),24)
シンガポール	-	-	-
タイ	2001	男女×年齢 男女×地域	25)
ベトナム	-	-	-
北朝鮮	-	-	-
モンゴル	2000	男女×地域 男女×年齢	26),27)
ラオス	1997/1998	男女×地域 男女×年齢	28)
ミャンマー	-	-	-
ブルネイ	-	-	-
カンボジア	2003/2004	男女	29)
東ティモール	-	-	-
バングラデシュ	1975	男女×地域	30)
ブータン	2006	男女×地域 男女×就業	31)
ネパール	1998	男女×地域	32)
パキスタン	2007	男女×年齢×地域	33)
モルディブ	-	-	-
スリランカ	-	-	-

表-5 微環境

微環境	場所	室内発生源	滞在時間の定義
A	住宅	調理	調理時間
B	住宅	給湯	調理時間
C	住宅	暖房	睡眠時間を除く住宅滞在時間
D	住宅	照明	睡眠時間を除く住宅滞在時間
E	屋内	なし	屋内滞在時間
F	屋外	-	屋外滞在時間

(1) 微環境中濃度評価モデル

式(1)に示すSingle-Compartment Mass Balance Model³⁴⁾を用いた。

$$\frac{dC_m}{dt} = F_p v C_o - v C_m - F_d C_m + \frac{S_m e_m}{V_m} \quad (1)$$

ここで、

C_m : 格子点ごとの各微環境のPM_{2.5}濃度(μg/m³)

C_o : 格子点ごとの屋外PM_{2.5}濃度(μg/m³)

F_p : 浸透率(-)

v : 換気回数(1/hr)

F_d : 除去率(1/hr)

S_m : 一時間当たり燃料消費量(KJ/hr)

e_m : 排出係数(μg/KJ)

V_m : 部屋の体積(m³)

m : 微環境

本研究では、格子点ごとの微環境中PM_{2.5}濃度の計算に、屋内濃度が平衡状態にあるという仮定のもとで導出した式(2)を用いた。

$$C_m = \frac{1}{v + F_d} \left(F_p v C_o + \frac{S_m e_m}{V_m} \right) \quad (2)$$

ここで、各微環境のPM_{2.5}濃度の計算方法と使用データについて説明する。

a) 微環境A, 微環境B, 微環境C, 微環境D

微環境A~Dは屋内発生源から発生するPM_{2.5}によって空間が満たされる場合を想定するので、式(2)において $C_o = 0$ とした式(3)を用いてPM_{2.5}濃度を計算した。

$$C_m = \frac{S_m e_m}{(v + F_d) V_m} \quad (3)$$

微環境A・B・Dにおける燃料消費量は季節による変化はないとした。微環境Cの燃料消費量は10℃と日平均気温との差(日平均気温が10℃を超える日は0)とHeating degree-dayを用いて一日ごとに变化させた。Heating degree-dayとは、日平均気温が10℃を超える日は0、10℃以下の日は10℃と日平均気温の差を一年間足し合わせることにより得られる値のことである。

b) 微環境E

微環境Eは屋内発生源がない場合の屋内を指すので、式(1)において $S_m = 0$ とした式(4)を用いて求めた。

$$C_m = \frac{F_p v}{v + F_d} C_o \quad (4)$$

屋外PM_{2.5}濃度 C_o にはCMAQの計算結果を用いた。

c) 微環境F

微環境Fは屋外なので $C_m = C_o$ とし、CMAQの計算結果を用いた。

d) 使用データ

燃料消費量(S_m)

燃料消費量は格子点ごとに設定すべきであるが、ここでは各格子の属する国ごとの燃料種別の平均値³⁵⁾を用いた。対象部門は家庭部門で、対象燃料種はバイオマス、

石炭、灯油、LPG、天然ガスである。

排出係数(e_m)

Zhang *et al.*(2000)³⁹⁾などのアジア地域で使用されている燃料、燃焼器具を用いて測定されたデータから各燃料種のPM_{2.5}排出係数を表-6の通りに設定した。バイオマスの排出係数はバイオマスの種類によって大きく異なるので、各国の薪、木炭、作物残渣、動物の糞使用割合から国ごとに設定した。

部屋の体積(V_m)

部屋の面積は各国の一戸当たり延べ床面積を一戸当たり部屋数で割ることにより算出した。各国の一戸当たり延べ床面積と部屋数は主に2000 Britannica Book of the Year⁴²⁾の値を使用した。部屋の高さは2(m)と仮定した。

換気回数(ν)

Heating degree-dayと屋内における燃焼の有無から換気回数を表-7のように設定した。Heating degree-dayが0の場合は暑い地域なので換気回数を多く、0以上の場合は換気回数を少なく設定した。また、屋内で燃焼がある場合は換気回数が多くなるように設定した。

除去率(F_d)、浸透率(F_p)

除去率は既往の文献値を参考に0.4(1/hr)⁴³⁾に設定した。浸透率については、建物の気密性や窓の開閉などにより大きく変化するが、本研究で対象とする各国における適切なデータが無いため、ここでは最大値の1.0とした。

(2) 微環境曝露評価モデル

各コホートの曝露評価については、本モデルで日々の屋外大気汚染濃度の変化を反映できることから、一日平均曝露濃度を求めた。長期曝露はこれを年間平均することで評価を行う。

PM_{2.5}一日平均曝露濃度の計算は、格子ごとに(1)で計算された各微環境のPM_{2.5}濃度と滞在時間率の積を、すべての微環境について足し合わせるにより行った。これを式(5)に示す。

$$\overline{E^a} = \sum_m C_m \cdot T_m^a \quad (5)$$

ここで、

$\overline{E^a}$: コホート a の PM_{2.5} 一日平均曝露濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

T_m^a : コホート a の微環境 m の滞在時間率(-)

a : コホート

滞在時間率には、島田ら⁴⁴⁾が表-4に示す既存の生活時間調査の情報を整備して設定した各微環境におけるコホート別の滞在時間を使用した。情報を収集できなかった国については、地理的文化的に差が少ないと思われる国の情報が適用されている。また、ほとんどの国で生活

表-6 排出係数

燃料種	排出係数($\mu\text{g}/\text{KJ}$)	出典
薪	180	37)
木炭	300	38)
バイオマス 作物残渣	274	37)
動物の糞	429	39)
石炭	524	40)
灯油(調理・給湯)	119	36)
灯油(暖房)	0	41)
灯油(照明)	110	41)
LPG	2.37	36)
天然ガス	3.07	36)

表-7 換気回数

Heating degree-day	微環境	
	A,B,C	D,E
0以上	10	5
0以下	20	15

時間調査の対象者は15歳以上であるので、子供の生活時間の情報は別途収集されている。島田らは、これらの生活時間調査の行動分類を微環境の滞在時間へ対応づけて、コホートの一部の属性によるクロス集計表データしか公表されていない各国の調査データと、全属性についてデータが存在し信頼性が高い日本の生活時間調査データ¹⁷⁾を基にCross Entropy法⁴⁵⁾を用いて推計した。

4. 結果と考察

(1) 大気化学輸送シミュレーションの結果

CMAQの計算値をEANET(Acid Deposition Monitoring Network in East Asia: 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク)の観測値と比較した。図-3、図-4に利尻と隠岐におけるPM_{2.5}の一日ごとの計算値と観測値を示す。

年平均値を比較すると、利尻の計算値は3.83($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、観測値は9.02($\mu\text{g}/\text{m}^3$)で、隠岐の計算値は8.83($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、観測値は12.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)であり、計算値は全体的に過小評価である。利尻の過小評価の原因は、排出源データにロシアのデータが入っていないと考えられる。一方ロシアの影響の少ない隠岐でも約30%の過小評価である。これは、使用した排出源データのPM_{2.5}の一次粒子や二次生成の前駆物質の排出量が過小評価であったことが原因と考えられる。また、大気化学輸送シミュレーションの空間解像度が80kmであったために局所的な高濃度気塊の輸送を再現できていない可能性や、都市部での道路付近などの濃度変化が十分に反映されていない可能性がある。ピークの濃度が過小評価であるのは、この理由によると考

えられる。したがって、この結果を用いて曝露評価を行うと、屋外大気汚染起源の曝露濃度が過小評価になる。空間解像度と曝露濃度評価の関係については今後の検討課題としたい。

(2) 曝露評価の結果

微小粒子状物質曝露影響調査報告書⁹⁾より、日本の7地域における小学生の子供を持つ主婦のPM_{2.5}個人曝露濃

度の平均値は22($\mu\text{g}/\text{m}^3$)である。本研究の該当するコホートの平均曝露濃度は15($\mu\text{g}/\text{m}^3$)であり、本研究の値は過小評価である。これは、CMAQの結果を用いた屋外濃度が過小評価であることと、喫煙による曝露を考慮していないことなどが影響していると考えられる。

a) コホート比較

図-5にアジア全域におけるコホート別PM_{2.5}一日平均曝露濃度と微環境の内訳を示す。曝露濃度が最も高いコホ

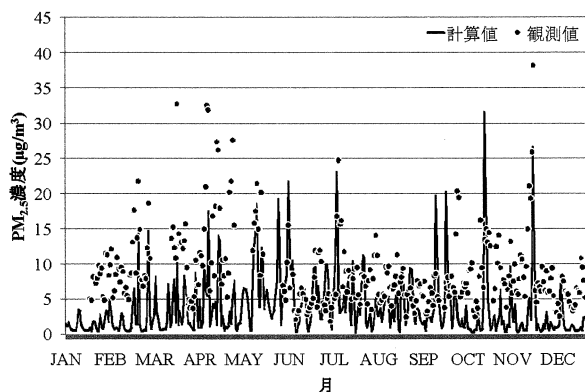


図-3 利尻におけるPM_{2.5}日平均濃度の観測値と計算値

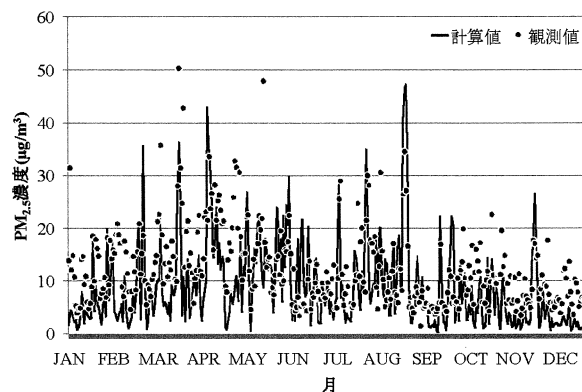


図-4 隠岐におけるPM_{2.5}日平均濃度の観測値と計算値

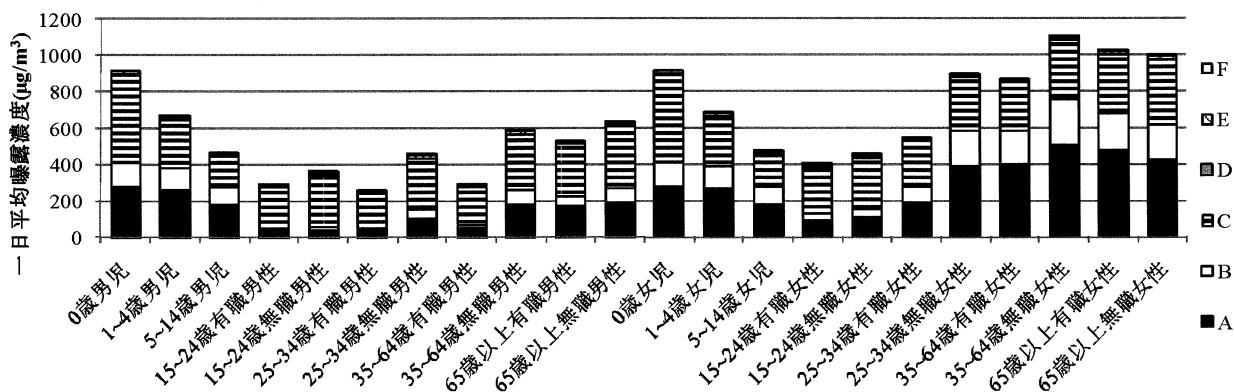


図-5 コホート別PM_{2.5}一日平均曝露濃度と微環境の内訳

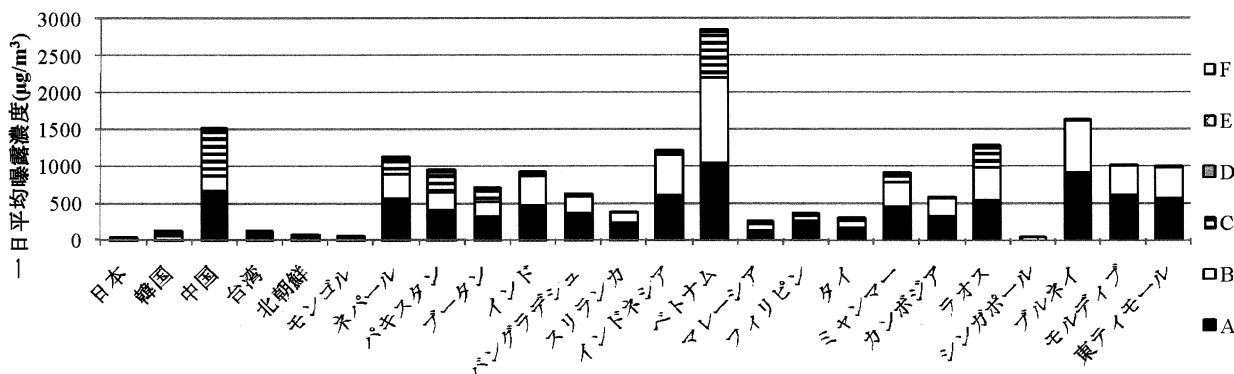


図-6 35~64歳無職女性の国別PM_{2.5}一日平均曝露濃度と微環境の内訳

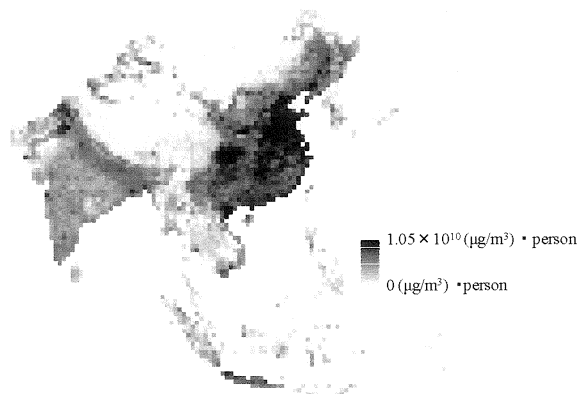


図-7 PM_{2.5}一日平均曝露濃度と人口密度の積

ートは、35-64歳無職女性であり1101(μg/m³)である。性別で比較すると、男性よりも女性の曝露濃度のほうが高い。これは、微環境A・Bにおける曝露が特に男性よりも女性において大きいことから、女性のほうが男性よりも調理時間が長いためであると考えられる。また年齢別で比較すると、0-4歳の乳児・幼児と25歳以上の女性の曝露濃度が高い。25歳以上の女性の曝露濃度が高いのは、調理時間が長いと考えられる。0-4歳の乳児・幼児において曝露濃度が高いのは、調理時間を母親が炊事をする間背中におわれている(母親のそばにいる)時間と仮定しているからである。また就業状態で比較すると、無職のグループのほうが有職のグループよりも曝露濃度が高い。これは、無職のグループのほうが屋内滞在時間が長いと考えられる。

微環境の内訳に注目すると、すべてのコホートにおいて、微環境A-Cにおける曝露が曝露全体の大部分を占める。これより、PM_{2.5}への曝露は屋外よりも屋内のほうが大きいことがわかった。

b) 国比較

図-6にPM_{2.5}一日平均曝露濃度が最も高いコホートの35-64歳無職女性の国別PM_{2.5}一日平均曝露濃度と微環境の内訳を示す。これより最も曝露濃度が高いのはベトナムであり、微環境A・Bの寄与が特に大きいことがわかった。これは、ベトナムでは排出係数の大きいバイオマスの消費量が最も多いからであると考えられる。

c) 曝露濃度と人口密度

図-7に、各格子点でPM_{2.5}一日平均曝露濃度と人口密度の積を全コホートについて足し合わせた値を示す。人口データにはLandscan Global Population Database 2005⁴⁶⁾やWorld Population Prospects⁴⁷⁾などを使用した。各格子点におけるコホートの分布は国ごとに一律とした。これより、中国東部、ベトナム北部、ジャワ島、インド北部においてPM_{2.5}曝露の影響が大きいことがわかった。

5. 結論と今後の課題

本研究ではアジア地域を対象として、微環境ごとにコホート別のPM_{2.5}一日平均曝露濃度を推定した。その結果、曝露濃度が最も高いのは35-64歳無職女性であること、その中でもベトナムにおける曝露濃度が最も高いこと、屋内での曝露が曝露全体の大部分を占めること、PM_{2.5}への曝露影響が大きい地域は、中国東部、ベトナム北部、ジャワ島、インド北部であることがわかった。

本研究では、CMAQの空間解像度を粗く設定したので、都市部や道路沿道でのPM_{2.5}の高濃度が再現できなかった。このため、曝露濃度計算において屋外大気汚染の寄与が小さく計算されてしまったと考えられる。この問題を解決するために、より小さい格子幅でのシミュレーションや、沿道モデルが必要である。

また、さらに詳細な曝露濃度を求めるために、都市部と農村部における燃料消費量や微環境滞在時間の違いを反映した曝露濃度評価モデルを開発していく必要がある。

謝辞：本研究は、環境省地球環境総合研究推進費BC-088「統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析」、科研費(21360254)及び科研費(21510052)による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) 微小粒子状物質健康影響評価検討会 (2008): 微小粒子状物質健康影響評価検討会 報告書.
- 2) Dockery, D. W. and J. D. Spengler(1981): Personal Exposure to Respirable Particulates and Sulfates, *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **31**(2), 153-159.
- 3) Spengler, J. D., R. D. Trelman *et al.*(1985): Personal Exposures to Respirable Particulates and Implications for Air Pollution Epidemiology, *Environ. Sci. Technol.*, **19**, 700-707.
- 4) Andresen, P. R., G. Ramachandran *et al.*(2005): Women's personal and indoor exposures to PM_{2.5} in Mysore, India: Impact of domestic fuel usage, *Atmos. Environ.*, **39**, 5500-5508.
- 5) 環境省(2007): 微小粒子状物質曝露影響調査報告書.
- 6) Zhang, Q., D. G. Streets *et al.*(2009): Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 5131-5153.
- 7) IEA(2009a): Energy Balances of OECD Countries.
- 8) IEA(2009b): Energy Balances of Non-OECD Countries.
- 9) 長山友祐(2009): アジア地域の気候環境負荷物質排出量推計に関する研究. 京都大学工学研究科修士論文.
- 10) GEIA ホームページ: <http://www.geiacenter.org/>.
- 11) 気象庁HP: 三宅島のSO₂放出量, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/320_Miyakejima/so2_2000_2002.htm.
- 12) Streets, D. G., K. F. Yarber *et al.*(2003): Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Glob. Biogeo.*

- Cyc., 17(4), 1099.
- 13) Mieville, A., C. Granier *et al* : Biomass burning emissions of gases and particles during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction, in preparation.
 - 14) Onogi, K., J. Tsutsui *et al*(2007) : The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**(3), 369-432.
 - 15) 気象庁(2002): 高層気象観測年報2001年(CD-ROM).
 - 16) Horowitz, L.W., S. Walters *et al*(2003): A Global Simulation of Tropospheric Ozone and Related Tracers: Description and Evaluation of MOZART, Ver. 2, *J. Geophys. Res.*, **108**(D24), 4784.
 - 17) 総務省: H18社会生活基本調査 調査票B 集計表.
 - 18) 国家統計局社科司(2009): 2008年時間利用調査資料集編, 中国統計出版社.
 - 19) Rajiva, A. K.(1999): POLICY IMPLICATIONS FOR GENDER EQUITY: The India Time Use Survey, 1998-1999, Proceedings of the International Seminar on Time Use Surveys, 7-10, Center for Development Alternatives, Ahmedabad, India.
 - 20) Directorate General of Budget, Accounting and Statistics (DGBAS), Taiwan (ROC) initiated "Social Development Trends Survey" Time Use Survey 2004.
 - 21) Pilot Study on Time Use Survey, 1998/1999, BPS-Statistics Indonesia, the Centre for Time Use Research (CTUR).
 - 22) Time Use Survey Malaysia 2003.
 - 23) 韓国放送(KBS)(2006): 2005年国民生活時間調査.
 - 24) Lee, Y.S., K. Y. Lee *et al*(2006): Time Use Patterns of Korean Farm Couples with a Focus on Gender Equity, IATUR2006.
 - 25) National Statistical Office Thailand: Time Use Survey 2001, <http://www.nso.go.th>.
 - 26) NSO, UNDP(2000): A PILOT TIME USE SURVEY.
 - 27) Jian, R. and Bell, M.L. (2008): A Comparison of Particulate Matter from Biomass-Burning Rural and Non-Biomass-Burning Urban Households in Northeastern China, *Environ Health Perspect.*, **116**(7), 907-914.
 - 28) State Planning Committee, National Statistics Centre(1999): THE HOUSEHOLDS OF LAO PDR Social and economic indicators Lao Expenditure and Consumption Survey 1997/98 (LECS 2).
 - 29) 中山節子ら(2005): タイ・カンボジア・日本の行動者平均生活時間のジェンダー比較—新4大生活時間行動分類による考察—, 日本家政学会誌, **56**(12), 843-855.
 - 30) Binswanger, H. P., R. E. Evenson *et al*(1980): Rural household studies in Asia, Singapore University Press, 169-187.
 - 31) Karma G.(2007): Patterns of Time Use and Happiness in Bhutan: Is there a relationship between the two?, Visiting Research Fellow Monograph Series No.432, 日本貿易振興機構 アジア経済研究所.
 - 32) National Planning Commission Secretariat, His Majesty 's Government Nepal(1998): NEPAL LBBOR FORCE SURVEY (NLFS).
 - 33) Government of Pakistan Statistics Division: TIME USE SURVEY 2007.
 - 34) EPA(2008): Total Risk Integrated Methodology(TRIM)Air Pollutants Exposure Model Documentation (TRIMExpo/APEX, Ver. 4.3). Vol. II: Technical Support Document, EPA-452/B-08-001b.
 - 35) 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(投稿中).
 - 36) Zhang, J., K. R. Smith *et al*(2000): Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors, *Atmos. Environ.*, **34**, 4537-4549.
 - 37) Li, X., L. Duan *et al*(2007): Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China, *Energy Fuels*, **21**(2), 845-851.
 - 38) Andreae, M. and P. Merlet(2001): Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Glob. Biogeo. Cyc.*, **15**(4), 955-966.
 - 39) Reddy, M. and C. Venkataraman(2002): Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II biomass combustion, *Atmos. Environ.*, **36**(4), 699-712.
 - 40) Ge, S., X. Xu *et al*(2004): Emissions of air pollutants from household stoves: honeycomb coal versus coal cake, *Environ. Sci. Technol.*, **38**(17), 4612-4618.
 - 41) Fan, C. and J. Zhang(2001): Characterization of emissions from portable household combustion devices: particle size distributions, emission rates and factors, and potential exposures, *Atmos. Environ.*, **35**(7), 1281-1290.
 - 42) Britannica(2000): 2000 Britannica Book of the Year.
 - 43) Ozkaynak, H., J. Hue *et al*(1996): Personal exposure to airborne particles and metals: results from the Particle TEAM study in Riverside, California, *J. Exp. Anal. Env. Epid.*, **6**(1), 57-78.
 - 44) 島田洋子ら(2010): 生活時間調査を利用したアジア各国の室内空気汚染による曝露濃度の評価(投稿中).
 - 45) Golan, A., Judge, G. and Miller, D.(1996): Maximum entropy econometrics—Robust estimation with limited data—, Series in financial economics and quantitative analysis, WILEY.
 - 46) Oak Ridge National Laboratory(2005): LandScan Global Population Database 2005, Oak Ridge National Laboratory.
 - 47) UN, Dept. of Economic and Social Affairs, Population Division(2009): World Population Prospects: The 2008 Revision, CD-ROM Edition.
- (2010. 3. 19 受付)
(2010. 6. 21 受理)

Estimation of Human Exposure to PM_{2.5} in Asia

Chie YANAGI¹, Yoko SHIMADA², Gakuji KURATA¹ and Yuzuru MATSUOKA¹

¹Dept. of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University

²Dept. of Industrial & Systems Engineering Faculty of Engineering, Setsunan University

Air pollution, both indoors and outdoors, is a major environmental health risk affecting everyone in

developed and developing countries. This study developed the Exposure Model using the microenvironmental approach and estimated the human exposure to PM_{2.5} in 24 Asian countries. Ambient air pollution, which is used by the exposure model, was calculated by using WRF (Weather Research and Forecasting Model) and CMAQ (Community Multiscale Air Quality Model). Emission factors are selected from previous studies conducted mainly in Asia. Time activity data was constructed from a huge amount of Time Use Surveys of each country. The result shows that the indoor emission sources such as cooking, hot water and heating contribute mainly to daily total PM_{2.5} exposures. Daily total PM_{2.5} exposure for the unemployed 35-64 years-old women is the highest among all cohorts. Product of daily total PM_{2.5} exposures and population density shows that there are large potential risks from air pollution in Eastern China, Northern Vietnam, Java and Northern India.