

# 20 アジア地域におけるエネルギー・産業統計と統合的な大気汚染物質排出量推計手法の開発

A development of an estimating method of atmospheric pollutant emissions

consistent with energy and industrial statistics in Asia

京都大学 森本壮一 安福一樹 倉田学児 松岡謙

Kyoto Univ. Soichi MORIMOTO, Kazuki YASUFUKU, Gakuzi KURATA, Yuzuru MATSUOKA

## 1. はじめに

近年、中国やインドをはじめとする新興国の発展によりアジア地域の経済活動は活発であり、これに伴ってエネルギー消費量も増加している。Energy Balances non-OECD Countries (International Energy Agency (IEA), 2009<sup>1)</sup>)によると中国では一次エネルギー消費量が2000年から2005年にかけて、1092Mtoeから1690Mtoeへと約1.5倍増加している。主要なエネルギー源である化石燃料の燃焼はSO<sub>2</sub>やPM、NO<sub>x</sub>などの大気汚染物質の排出を引き起こし、呼吸器系疾患などの人体への健康影響が問題となっている。これらの問題の対策に向けて、アジア地域における大気汚染物質の詳細な排出量インベントリの構築が求められている。

本研究では排出量の推計手法として統計情報を最大限に利用した調整計算手法を開発し、2005年におけるアジア地域に適用した。これにより、既往の研究と比べてより詳細かつ信頼性が高いと考えられる排出量インベントリを作成した。本研究の結果は、現在すでに構築されている大気化学輸送モデルのインプットとして提供可能である。

## 2. 研究の方法

### 2.1 概要

本研究の全体像を図1に示す。研究方法は排出量の推計と排出量メッシュデータの作成の2つに大別される。まず国別統計、国内地域別統計、プラント統計などの各種統計情報とエネルギー機器データを用いて、大規模点排出源(Large Point Source: LPS)、面排出源(Area Source: AS)ごとに排出量を推計した。次に、各国の地方行政区地図<sup>2)</sup>などと、プラント統計<sup>3)</sup>などより得られるプラントの緯度・経度の情報をもとに地図を整備した。最後に、推計した排出量を人口などのメ

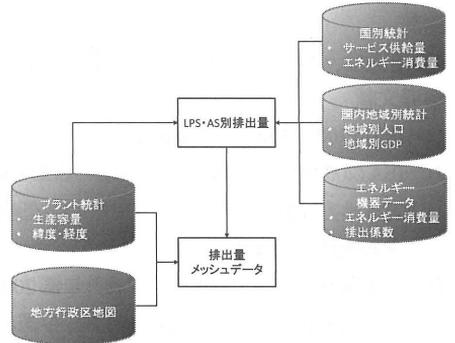


図1 研究の全体像

表1 対象国

地域	国
東アジア	日本、韓国、台湾、中国、モンゴル、北朝鮮
東南アジア	ブルネイ、インドネシア、カンボジア、ラオス、ミャンマー、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム、パプアニューギニア
南アジア	バングラデシュ、ブータン、インド、スリランカ、ネパール、パキスタン、モルディブ

表2 対象部門

部門	
エネルギー転換部門	発電部門 石油精製部門
工業部門	鉄鋼部門 セメント部門 石油化学部門 紙・パルプ部門 其他工業部門
民生部門	家庭部門 業務部門
交通部門	道路輸送部門 鉄道輸送部門

ッシュ配分指標を用いて 30秒×30秒の地図上のメッシュへと配分し、排出量メッシュデータを得た。

本研究の対象年は2005年とし、対象国は表1に示すアジア24カ国・地域とした。また、対象物質はエネルギー消費起源のCO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>の4種とした。ただし、CO<sub>2</sub>についてはバイオマスおよび廃棄物の燃焼による排出は除いた。対象部門は表2に示す11部門とした。

### 2.2 排出量推計手法

本研究では、国内二次・三次領域の民生部門といったASあるいは発電プラントといったLPSを活動単位と定義し、排出量推計の最小単位とした。排出量を推計するにあたって、まずはサービス供給量、次にエネルギー消費量の推計を行い、最後に排出量を推計した。表3に式中で使用する添え字の一

表3 添え字一覧

添え字	定義
<i>i</i>	活動単位
<i>j</i>	サービス種
<i>k</i>	エネルギー種
<i>l</i>	機器種
<i>r</i>	基準地域
<i>kind</i>	排出源種 (AS, LPS)
<i>m</i>	ガス種

覧を、表 4 に式中で使用する記号の一覧をそれぞれ示す。また、統計などから得た前提値を符号(  $\overline{\quad}$  )で、推計を行う際の仮定値を(  $\widetilde{\quad}$  )で、推計値は符号なしでそれぞれ表した。

表 4 記号一覧

記号	定義
$D_i$	活動単位 <i>i</i> のサービス供給量
$M_{i,m}$	活動単位 <i>i</i> のガス種 <i>m</i> の排出量
$AD_j$	国のサービス種 <i>j</i> のサービス供給量
$AE_{j,k}$	国におけるサービス種 <i>j</i> の供給によるエネルギー種 <i>k</i> のエネルギー消費量
$AM_m$	国のガス種 <i>m</i> の排出量
$elx_{i,k}$	エネルギー機器 <i>l</i> が1単位のサービスを供給する時のエネルギー種 <i>k</i> のエネルギー消費量(以下、エネルギー強度)
$emf_{l,k,m}$	エネルギー機器 <i>l</i> が1単位のエネルギー種 <i>k</i> を消費するときのガス種 <i>m</i> の排出量
$Aelx_j$	国におけるサービス種 <i>j</i> のエネルギー強度
$id_{j,i}$	活動単位 <i>i</i> による国内、排出源種内でのサービス種 <i>j</i> のサービス供給量割合
$rk_{kind,j}$	排出源種 <i>kind</i> による国内でのサービス種 <i>j</i> のサービス供給量割合
$rx_{i,l}$	活動単位 <i>i</i> におけるエネルギー機器 <i>l</i> のサービス供給量割合
$\Delta^E_{l,k}$	エネルギー機器 <i>l</i> のエネルギー強度の調整係数
$w_{l,k}$	エネルギー機器 <i>l</i> によるエネルギー種 <i>k</i> のエネルギー消費量
$\delta^J(i,j)$	活動単位 <i>i</i> とサービス種 <i>j</i> の対応を表わすフラグ。対応する場合は1、それ以外は0となる。
$\delta^K(i,kind)$	活動単位 <i>i</i> と排出カテゴリ <i>kind</i> の対応を表わすフラグ。対応する場合は1、それ以外は0となる。
$\delta^R(i,r)$	活動単位 <i>i</i> と基準地域 <i>r</i> の対応を表わすフラグ。対応する場合は1、それ以外は0となる。

活動単位におけるサービス供給量は、国別のサービス供給量を統計<sup>4)</sup>などから得て、それらを地域別人口、GDP、あるいはLPS生産容量などの活動単位の配分指標<sup>5)</sup>などを用いてダウンスケーリングすることで求めた。

$$D_i = \sum_j AD_j \cdot rd_{j,i} \tag{1}$$

$$rd_{j,i} = \sum_{kind} \left( \overline{rk_{kind,j}} \cdot \widetilde{id_{j,i}} \cdot \delta^K(i, kind) \right) \tag{2}$$

エネルギー消費量の推計については、エネルギー機器のエネルギー強度と、統計<sup>1)</sup>などから得たエネルギー消費量の間で整合を保つように調整計算を行った。まず、次式で定義するサービス種別エネルギー強度を、エネルギー機器のエネルギー強度、エネルギーバランス表などの統計情報、類似地域の情報の3通りから求め、それらを比較してサービス種別エネルギー強度の仮定値を決定した。

$$Aelx_j = \frac{\sum_k AE_{j,k}}{AD_j} \tag{3}$$

次に、サービス種別エネルギー強度の仮定値からエネルギー消費量を次のように求めた。

$$AE_{j,k} = \overline{Aelx_j} \cdot AD_j \cdot \frac{\sum_l \left\{ \widetilde{elx_{l,k}} \cdot \sum_i (rx_{i,l} \cdot rd_{j,i} \cdot \delta^J(i,j)) \right\}}{\sum_l \sum_k \left\{ \widetilde{elx_{l,k}} \cdot \sum_i (rx_{i,l} \cdot rd_{j,i} \cdot \delta^J(i,j)) \right\}} \tag{4}$$

求めた  $AE_{j,k}$  を改めて  $\overline{AE_{j,k}}$  とし、以下の式を計算した。

$$\Delta^E_{l,k} = \frac{w_{l,k} \cdot \left\{ \sum_j \overline{AE_{j,k}} - \sum_l w_{l,k} \right\}}{\sum_l (w_{l,k})^2} \tag{5}$$

$$w_{l,k} = \widetilde{elx_{l,k}} \cdot \sum_i \sum_j \left( AD_j \cdot rx_{i,l} \cdot rd_{j,i} \cdot \delta^J(i,j) \right) \tag{6}$$

求めた調整係数を用いて、次式を計算した。

$$elx_{i,k} = \widehat{elx_{i,k}} \cdot \left[ 1 + \max \left\{ \min(\varepsilon, \Delta_{i,k}^E), \frac{1}{1+\varepsilon} - 1 \right\} \right] \quad \text{式(7)}$$

推計した  $elx_{i,k}$  を改めて  $\widehat{elx_{i,k}}$  とし、式(4)から式(7)を、 $\Delta_{i,k}^E$  が  $(1/1.1) - 1$  以上 0.1 以下の範囲に入るまで繰り返した。なお、本研究では  $\varepsilon$  を 0.2 に設定した。このようにして求めた  $elx_{i,k}$  と前提値  $\widehat{elx_{i,k}}$  を比較し、両者の比が 0.5 以上 2 以下に入らない場合は仮定値  $\widehat{elx_{i,k}}$  を再設定し、式(4)以降の推計作業をやり直した。以後同様の操作を繰り返し、 $elx_{i,k}$  を確定した。

最後に活動単位の排出量を次式により求めた。

$$M_{i,m} = D_i \cdot \sum_l (rx_{i,l} \cdot \sum_k (emf_{i,k,m} \cdot elx_{i,k})) \quad \text{式(8)}$$

### 2.3 排出量メッシュデータ作成手法

推計した活動単位別排出量から30秒×30秒の排出量メッシュデータを得るために、まず各国の地図を整備した。地図は各国ごとに複数の文献を比較しつつ決定し、各国の境界にずれがある場合は修正した。また、LPSは緯度・経度をもとに地図を整備した。ただし、緯度・経度は不明である場合がほとんどであり、本研究ではプラント名、住所などの位置に関する情報から緯度・経度を割り出すツールを開発し、それを用いてLPSの緯度・経度を推計した。

排出量メッシュデータはLPSとASで別々に推計した。まず、LPSについては、LPSによる排出量をLPSがあるメッシュに配分することで求めた。次に、ASについては、ASによる排出量をメッシュ配分指標により配分することで求めた。メッシュ配分指標には、道路・鉄道輸送部門以外は人口分布<sup>6)</sup>を用い、道路・鉄道輸送部門は人口分布に加えて道路分布<sup>7)</sup>、鉄道分布<sup>8)</sup>をそれぞれ用いた。最後にLPSとASの排出量メッシュデータを重ね合わせることで、最終的な排出量メッシュデータを得た。

### 3. 結果

表 5 2005年における国別排出量推計結果

表 5に、2005年のアジア各国におけるエネルギー起源の大気汚染物質の排出量推計結果を示す。2005年のアジアにおける大気汚染物質の排出量は、CO<sub>2</sub>が7.6Pg/year、SO<sub>2</sub>が45Tg/year、NO<sub>x</sub>が24Tg/year、PM<sub>2.5</sub>が17Tg/yearとなった。いずれの物質においても、中国、インドにおける排出が65%以上を占めることが分かった。また、日本、韓国といった先進国においてはCO<sub>2</sub>の排出寄与に比べてSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>の排出寄与が小さいことが分

国名	CO <sub>2</sub> (Gg-CO <sub>2</sub> /year)	SO <sub>2</sub> (Gg-SO <sub>2</sub> /year)	NO <sub>x</sub> (Gg-NO <sub>x</sub> /year)	PM <sub>2.5</sub> (Gg/year)	
バングラデシュ	29575		208	117	252
ブルネイ	3864		12	9	0.373
ブータン	161		1	0.274	0.148
中国	4011019	29298		12372	8109
インドネシア	269924	1673		1314	1371
インド	940541	5569		3692	3994
日本	1003531		1427	2315	151
カンボジア	2199		18	16	89
韓国	441935	2030		1158	108
ラオス	361		3	1	0.330
スリランカ	13715		134	91	95
モルディブ	135		3	0.396	0.024
ミャンマー	5834		41	49	279
モンゴル	5890		43	28	4
マレーシア	137084		407	468	96
ネパール	1942		28	22	160
パキスタン	106708		950	506	729
フィリピン	73234		566	266	153
バブアニューギニア	2002		33	9	36
北朝鮮	14606		92	56	6
シンガポール	47484		229	139	14
タイ	184469		1058	719	275
台湾	216493		991	486	69
ベトナム	59614		276	274	584
アジア合計	7572320	45088		24108	16575

かった。これは脱硫装置、集塵装置といった大気汚染物質の除去機器が普及していることや、石炭中の硫黄含有量が少ないことが原因であると考えられる。アジア全域のSO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>の排出量分布図を図 2、図 3にそれぞれ示す。中国の上海、香港あるいはタイのバンコク、インドネシアのジャカルタなどの主要大都市で排出量が顕著であることが分かった。



図 3 SO<sub>2</sub>の排出量分布図



図 4 PM<sub>2.5</sub>の排出量分布図

図 4に、中国統計年鑑(中国統計出版社、2006)<sup>9)</sup>に記載されている2005年における中国の省別SO<sub>2</sub>排出量と、本研究の排出量推計結果を比較した散布図を示す。中国統計年鑑(2006)には香港とマカオの排出量が含まれていないため、香港とマカオを除いた31省について比較した。排出量が多い山東省で、本研究の推計結果が過大評価であるなど、ばらつきが確認できる。これは、本研究では燃料の硫黄含有量を省別ではなく国別に設定しているため、省別の硫黄含有量の差を表現できなかったためであると考えられる。

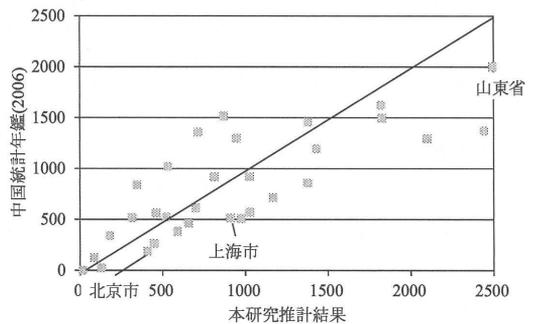


図 2 中国省別排出量の比較(単位: GgNO<sub>2</sub>)

#### 4. 結論

本研究では 2005 年におけるアジア 24 地域を対象とし、エネルギー起源の CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> の排出量インベントリを作成した。排出量推計に際しては各種統計を最大限に使用した手法を開発し、詳細かつ各種統計と整合のとれた排出量を得た。今後の展望について述べる。本研究で得られた排出量メッシュデータをインプットとして、大気化学輸送モデルにより大気汚染物質の拡散計算を行い、健康影響を評価する。さらに、エネルギーエンドユースモデルなどを用いて将来年についても排出量インベントリを作成し、大気汚染に対する今後の対策の評価を行う。

**謝辞** 本研究は、A-1103、科研費 21360254 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) International Energy Agency (IEA) (2009): Energy Balances non-OECD Countries.
- 2) GADM database (2010): Global Administrative Areas.
- 3) Platts (2009): World Electric Power Plants Database.
- 4) CEMBUREAU (2007): World Statistical Review.
- 5) 中国統計出版社 (2006): 中国統計年鑑2006.
- 6) Oak Ridge National Laboratory (2005): LandScan Global Population Database.
- 7) Cloud Made (2011): Open Street Maps.
- 8) National Geospatial Intelligence Agency (1995): VMAP0.

**キーワード** : 大気汚染物質、排出量インベントリ、アジア、統計との整合

**Key Words** : atmospheric pollutant, emission inventory, Asia, consistency with statistics