

東アジア地域における人為起源硫黄酸化物排出量地図の作成

山 本 浩 平・星 野 順 至・吉 田 知 央・笠 原 三紀夫

Estimate of Anthropogenic Sulfur Dioxide Emission in East Asia

Kouhei YAMAMOTO, Masashi HOSHINO,
Tomohiro YOSHIDA and Mikio KASAHARA

硫黄酸化物の長距離輸送モデルの入力データ整備を目的として、東アジア地域における人為起源硫黄酸化物の排出量の推計を行った。従来の研究を参考に輸送・生活部門からの排出量推定手法について検討し、また新しいデータを用いることによって1995年における二酸化硫黄(SO_2)の排出量地図を作成した。推計結果は $60\text{ km} \times 60\text{ km}$ グリッド上で整理している。日本や韓国では石油からの排出が石炭からのものを上回っているが、中国では石炭由来のものが大きな割合を占める結果となった。中国は東アジア地域における総排出量の約88%を占めており、これが地域全体の大気汚染の特性を支配している。また利用部門別では各国で異なった特性を示し、日本においては輸送・生活部門からの排出が比較的大きく、中国、台湾などは工業部門からの排出が大きな割合を占めることが分かった。また従来の推計結果と比較し経年変化を調べたところ、特に中国、台湾では SO_2 排出量の増加傾向が認められた。これは石炭消費量の経年変化から予想される結果と同じであり、石炭消費量がアジア地域における硫黄酸化物排出量に大きく影響を及ぼすことがわかった。

1. はじめに

広域大気環境問題の一つとして酸性物質の長距離輸送と沈着が注目されており、酸性の雨や霧による森林の衰退、湖沼の酸性化と水棲生物の死滅、金属の腐敗や大理石の建造物、彫刻などの崩壊、人体への悪影響などが予想されている。欧州、北米などでは早くよりこの問題が顕在化しており、その現象解析と影響評価を目的とした長距離輸送モデルの開発が進んでいる。近年、東アジア地域を対象とした解析も進んできているが、その入力データとなる酸性物質排出量の推計についてはまだ少ない。

東アジア地域を対象として大気汚染物質排出量の地域分布をグリッドベースで推計したものとして、Fujita *et al.*¹⁾、Akimoto *et al.*²⁾、東野ら³⁾等がある。Fujita *et al.*の研究はこの地域を対象とした最初の研究例であり、これは1986年における日本、中国、韓国、台湾、北朝鮮から排出される SO_2 排出量を $80 \times$

80 km グリッド上で整理している。Akimoto *et al.*の推計はかなり広域を対象としたものであり、1970、1980、1987年について SO_2 、 NO_x 、 CO_2 を北緯10度から北緯55度、東経60度から東経150度を $1^\circ \times 1^\circ$ 単位で推計したものである。東野らの推計は1990年を対象としたものであり、中国を省別、都市別に推計し、その結果は $80 \times 80\text{ km}$ 正方グリッド、および $1^\circ \times 1^\circ$ グリッドごとのデータとして整理されている。

1990年以降、東アジア地域、特に中国の経済的急成長に伴って長距離輸送を含む広域環境問題に注目が集まっており、この現象解明、影響評価手法の確立が迫られている。このためには長距離輸送モデルの開発のみでなく、その基礎資料としての排出量データの整備が継続的に行われていく必要がある。そこで本研究では、これらの手法を参考にしながら新しい資料を用い、また日本、中国における輸送部門・生活に伴う排出の排出量推定においては、自動車台数、貨物・貨客量などの生活に直接関わる統計資料まで遡って反映さ

せる手法を用いることにより、東アジア地域における人為起源 SO_2 排出量のより実態に即した推計を行った。更に、この推計結果を長距離輸送モデルへの適用することを考慮に入れ、直交格子系で整理を行って東アジア地域における硫黄酸化物の排出量地図を作成した。

2. 推計手法の概要

本研究での対象領域を Fig. 1 に示す。ほぼ東経 100 度～150 度、北緯 20 度～50 度の範囲であり、日本、朝鮮半島、中国の東半分、その他モンゴル、ベトナムなどの諸国が含まれる。また、1995 年の資料を用いて推計を行っており、その値を 60 km×60 km の直交格子上で整理している。この直交格子系はほぼ領域の中心となる東経 125 度、北緯 35 度の点を基準とした地図投影法⁴⁾を用いて生成したものであり、対象領域内の任意の地点について、以下の式により格子平面へ投影される。

ある地点 (経度 θ 、緯度 ϕ) の地図上における位置 (x, y) は、

$$\begin{aligned} x &= x_0 + D \sin(\theta - \theta_0) \\ y &= y_0 + \{D_0 - D \cos(\theta - \theta_0)\} \end{aligned} \quad (1)$$

と表される。ここで (x_0, y_0) は基準点の地図上の位置、 D, D_0 はそれぞれ地図上の北極からその対象地点、原点までの距離であり、

$$D = \left(\frac{a_1 \sin z_s}{\tan \frac{z_s}{2}} \right) \tan \left(\frac{90 - \phi}{2} \right) \quad (2)$$

$$D_0 = \left(\frac{a_1 \sin z_s}{\tan \frac{z_s}{2}} \right) \tan \left(\frac{90 - \phi_0}{2} \right) \quad (3)$$

と表すことができる。 ϕ_0 は基準点の緯度、 z_s はその基準点の余緯度である。

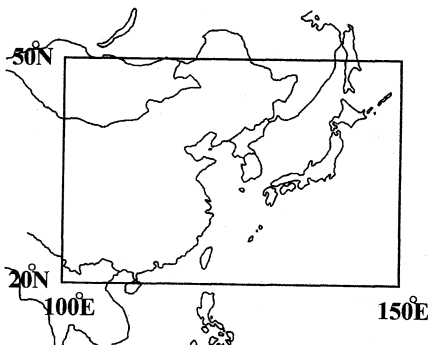


Fig. 1. Map of the area subjected to this work.

SO_2 の排出源として、燃焼施設からの排出、硫酸生産施設からの排出、非鉄金属精錬施設からの排出、輸送部門・生活に伴う排出 (以後非生産部門とする) からの排出を考慮し、燃焼施設、および非生産部門からの排出については、消費部門別、および燃料種別の燃料消費量に排出係数表⁵⁾ (Emission Factor (EF)) を掛けることにより、 SO_2 の排出量を求めた。この排出係数表は、石炭、ガス、石油、植物燃料の 4 エネルギー区分、計 27 燃料種別ごとに排出係数が算出されており、転換部門が 7 種、工業部門が 4 種、輸送部門が 4 種、その他 2 種類に分類されているため、燃料使用量の算出に当たっては、この区分に従って整理した。発電に伴う排出はエネルギー転換部門の中に含まれている。ただし本研究では、輸送部門の内、発生源位置の特定が難しいため航空機については考慮せず、また、植物燃料については推計を行っていない。

また、硫酸生産施設からの排出については、硫酸生産量に製造過程で硫酸とならずに SO_2 となる割合を掛けることにより、また非鉄金属精錬施設からの排出については、銅、亜鉛、鉛、錫の生産量に各生産量単位量当たりの SO_2 排出量を掛けることにより、それぞれの SO_2 排出量を算出した。

3. 排出量推計手法

3.1 燃焼施設・非生産部門からの排出

3.1.1 日本におけるエネルギー使用量

工業部門：IEA⁶⁾ による国別総燃料使用量を前述の排出係数表中の消費部門、燃料種別の分類に従って再整理した。本推計ではこの排出係数表中にある工業部門の内、鉄鋼業、化学・石油化学工業、非鉄金属工業以外をすべてその他の工業として取り扱っている。次に、この値を人口 10 万人以上の都市⁷⁾を対象都市として、通産省の工業統計表⁸⁾の 1995 年のデータを参考に、各都市の工業生産額に比例して各都市に配分した。対象都市人口の合計が日本全人口に占める割合は約 63% であるが、主要な都市を含んでおり、グリッドの大きさが 60 km×60 km でもあるので、ほぼ地域分布を再現できるものと考えている。

発電・エネルギー転換部門：発電部門に関しては、発電施設の地域分布を考慮するために、火力発電所の位置とその設備容量を海外電気事業統計⁹⁾から得た。更に日本における発電部門燃料使用量について IEA 資料⁶⁾を用い、これを各発電所が位置する格子にその設備容量の比で配分した。その他のエネルギー転換部門に関しては、工業部門と同様に国別総燃料使用量のデータを排出係数表中で分類されている部門ごとの値

に整理して用いた。

非生産部門：輸送部門として自動車、鉄道、船舶の3項目に分類して推計した。自動車については総務庁発行の統計資料¹⁰⁾を参考に、自動車保有台数による重み付けを行って県単位の燃料消費量を求め、その後、都市別人口の値を用いて各都市ごとの消費量を求めた。鉄道、船舶については運輸省による1997年の貨物・旅客調査データ¹¹⁾を参考にして、貨物・貨客量に比例して各県に配分し、その後、人口比により各都市への配分を行った。またその他の部門として住居・商業からの排出を考慮し、人口データを用いて各都市に配分した。

3.1.2 中国・台湾における燃料使用量

工業部門：総燃料使用量はIEAによる1995年のNon-OECD諸国に関するエネルギー統計資料¹²⁾を用いた。これに中国における産業連関表中¹³⁾の燃料消費割合を掛け合わせ、消費部門別、燃料種別の燃料消費量を求めた。更に、総燃料使用量の内の揮発油の消費割合¹⁴⁾も考慮した。その後、日本の場合と同様に省ごとの工業生産額に応じて各省の消費量を求め、人口10万人以上の都市の存在する格子にその人口比で配分した。中国に関しては、都市の規模が大きいこともあり対象都市人口の合計が中国全人口の約90%を占める。

発電・エネルギー転換部門：発電部門に関しても、総燃料使用量はIEA資料¹²⁾を用い、日本の場合と同様に発電所の位置と設備容量を海外電気事業統計⁹⁾から得て、発電所が位置する格子にその設備容量の比で配分した。その他のエネルギー転換部門に関しては、工業部門と同様の手法を用いている。

非生産部門：中国・台湾に関しても、輸送部門として、自動車、鉄道、船舶の3つについて考慮した。省ごとの車保有台数、貨物・貨客量のデータ¹⁵⁾を用いて各省ごとの燃料消費量を求め、更に人口比で各都市に配分した。また、住居・商業からの排出については人口比で配分した。

3.1.3 その他の諸国

本推計で対象とした領域には、韓国、北朝鮮、モンゴル、ベトナム、ロシア沿海州なども含まれる。これらの諸国に関しても、IEAによるNon-OECD諸国に関するエネルギー統計資料¹²⁾を用い、日本、中国と同様に工業部門、発電・エネルギー転換部門、非生産部門のエネルギー使用量から国全体の排出量を得た。消費部門の分類は、長距離輸送モデルへ適用する際の利便性を考慮して、排出源高度が異なると考えられる工業、発電とその他の3つに分類して整理することに

し、総燃料使用量を10万人以上の都市を対象とした人口比によって各都市へ配分した。これらの諸国については、燃料使用量についての分類が、本研究で用いた排出係数表の分類と異なっているため、日本、あるいは中国の燃料使用特性と同じであると仮定して、各部門燃料種別の使用量を求めた。以下に国ごとの詳細な推計手法について述べる。

韓国、北朝鮮：韓国は近年急激な発展を遂げてきた工業国であることもあり、その燃料消費特性について日本と同じ消費燃料種比をもつと考えて排出係数表中の各部門、燃料種ごとの燃料使用量を求めた。発電部門に関しては、発電所の位置とその設備容量のデータを得たので発電部門を単独で考慮し、これを発電所の存在する格子へ配分した。非生産部門として自動車、鉄道、船舶、住居・商業の4つについて燃料消費量が得られている。船舶に関しては日本、中国、台湾と同様に自国の港でそれらが消費されていると考えているが、貨物・貨客量の資料が得られなかったため、人口比で各格子へ配分した。北朝鮮に関しては燃料消費特性は中国のものを適用して各部門、燃料種ごとの燃料使用量を求めているが、非生産部門に関して自動車、住居・商業部門からの燃料消費量のみが得られている。

ロシア、その他：ロシアは広い国土を持ち、そのエネルギー利用特性に関しては地域により異なることも考えられるが、本研究では対象領域内で消費される燃料使用量をロシア総人口に対する対象領域内人口の比と等しいとして求めた。更に、各燃料種の使用比について日本、中国とは異なると考えたため、その比について国連統計資料¹⁴⁾を参照して燃料使用量を求めた。ロシアに関しても非生産部門として自動車、鉄道、船舶、住居・商業部門すべてについて考慮しており、その格子への配分方法は人口比を用いている。また、本研究で用いた排出係数表はアジア地域に適用することを目的としたものであるが、ロシアに関してもこの排出係数表を使用することとし、この表の区分に従って燃料使用量を求めている。ベトナムに関しても同様の手法を用いて燃料使用量を求めたが、非生産部門に関しては自動車部門と生活部門における燃料使用量のみが得られている。モンゴルに関してはその国総燃料使用量を資料¹⁴⁾から得ているが、この資料では各燃料の消費部門についての資料が得られないため、中国の燃料使用特性により各消費部門へ振り分けた。

これらの手法についてはまだ荒い点が多く今後検討の必要があるが、必要な資料の入手が困難であり、また対象面積が小さく該当格子数が少ないことにより、東アジア地域全体としては大きな影響を及ぼさないと

Table 1. Energy consumption in each country.

Emission source category	Coals (1000t)	Gases (TJ)	Petroleum products (1000t)
Japan			
Transformation sector	1.23E+05	2.00E+06	2.77E+05
Industrial sector	4.44E+04	6.38E+05	6.54E+04
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	7.15E+04
Other sector	1.54E+03	5.58E+05	5.60E+05
Total	1.69E+05	3.20E+06	9.74E+05
China			
Transformation sector	3.92E+05	5.21E+04	1.76E+05
Industrial sector	6.38E+05	3.04E+05	3.04E+05
Transport sector	9.83E+03	2.51E+03	4.46E+04
Other sector	1.40E+05	1.14E+05	2.73E+04
Total	1.18E+06	4.73E+05	5.52E+05
Taiwan			
Transformation sector	1.33E+04	5.79E+04	3.45E+04
Industrial sector	1.25E+04	2.79E+04	1.62E+04
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	9.45E+03
Other sector	0.00E+00	3.22E+04	2.55E+03
Total	2.58E+04	1.18E+05	6.27E+04
South Korea			
Transformation sector	1.78E+04	1.99E+05	1.02E+05
Industrial sector	1.92E+04	3.61E+04	3.11E+04
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	2.37E+04
Other sector	2.36E+03	1.93E+05	2.05E+04
Total	3.93E+04	4.28E+05	1.77E+05
North Korea			
Transformation sector	7.03E+03	0.00E+00	1.12E+03
Industrial sector	2.23E+04	0.00E+00	2.33E+02
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	1.16E+03
Other sector	0.00E+00	0.00E+00	1.39E+02
Total	2.94E+04	0.00E+00	2.65E+03

考えた。

3.1.4 燃焼，非生産部門からのSO₂排出量

以上の手法で各格子あたりの燃料使用量を算出した。Table 1に各国毎の燃料種別使用量をまとめた。こうして得られた硫黄消費量に，科学技術庁の排出係数⁵⁾を掛けて燃焼施設と非生産部門からのSO₂排出量を算出した。この排出係数表は排煙脱硫装置がない場合を想定して作成されたものであり，日本についてはこれを用いてSO₂排出量を求めた後，排煙脱硫率⁵⁾を掛けて脱硫による効果を考慮した。東野ら³⁾は中国についても脱硫の効果を取り入れているが，本格的な脱硫装置の導入はほとんど進んでいないと考えられること¹⁶⁾，また用いた排出係数が脱硫対策がないと仮定したときに設定された値であること，削減率に関するデータが得られなかったことなどを考慮して，本研究ではこの効果を取り入れている。今後は，中国などアジア諸国においても，より簡便でコストの低い脱硫技

術の開発，導入がされていくと思われるが，それらが導入されていくことにより，この排煙脱硫による削減率を推計に反映させていくことが必要であろう。

またSO₂排出量を求めるに当たり，各国燃料中の硫黄含有率を決める必要がある。硫黄含有率については地域による差が大きいため，国ごとに含有率を定め，また中国で使用する石炭中の硫黄含有率に関しては更に省別に与えた。この値については科学技術庁資料⁵⁾の値をそのまま使用している。

3.2 硫酸製造に伴う排出

硫酸製造プラントではSO₂の95～98%程度は硫酸になるが，残りの2～5%は硫酸にならずに大気中へ放出される。日本では二重接触—二重吸収プロセス（ダブルコンタクト法）と呼ばれる，新たに生成される三酸化硫黄を除去し，触媒の性能を向上させる手法が多く用いられ，一部で排煙脱硫も行われるので，硫

Table 2. SO₂ emission from each country with various types of fuels.

Emission source category	Coals (kg/y)	Gases (kg/y)	Petroleum products (kg/y)	Total (kg/y)	Sulfur controlled (kg/y)
Japan					
Transportation sector	6.87E+08	5.74E+07	9.85E+08	1.73E+09	3.29E+08
Industrial sector	2.27E+08	9.47E+07	3.16E+08	6.37E+08	3.27E+08
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	2.93E+08	2.93E+08	2.93E+08
Other sector	1.81E+07	1.33E+05	1.56E+08	1.74E+08	1.40E+08
Total	9.32E+08	1.52E+08	1.75E+09	2.83E+09	1.09E+09
China					
Transportation sector	1.03E+10	1.67E+08	6.15E+08	1.11E+10	
Industrial sector	1.21E+10	2.18E+08	7.44E+08	1.30E+10	
Transport sector	1.78E+08	1.14E+03	2.96E+08	4.74E+08	
Other sector	2.49E+09	3.47E+07	1.46E+08	2.67E+09	
Total	2.51E+10	4.20E+08	1.80E+09	2.73E+10	
Taiwan					
Transportation sector	2.65E+08	3.11E+07	7.55E+07	3.72E+08	
Industrial sector	1.33E+08	7.44E+06	3.56E+08	4.97E+08	
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	1.15E+08	1.15E+08	
Other sector	0.00E+00	2.17E+06	2.51E+07	2.73E+07	
Total	3.99E+08	4.08E+07	5.72E+08	1.01E+09	
South Korea					
Transportation sector	2.06E+08	5.88E+06	5.05E+08	7.18E+08	
Industrial sector	1.20E+08	7.78E+05	2.10E+08	3.30E+08	
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	1.83E+08	1.83E+08	
Other sector	2.35E+07	4.62E+04	2.92E+07	5.27E+07	
Total	3.49E+08	6.70E+06	9.27E+08	1.28E+09	
North Korea					
Transportation sector	4.36E+07	0.00E+00	5.14E+05	4.41E+07	
Industrial sector	9.41E+07	0.00E+00	2.82E+06	9.69E+07	
Transport sector	0.00E+00	0.00E+00	6.63E+06	6.63E+06	
Other sector	0.00E+00	0.00E+00	4.67E+04	4.67E+04	
Total	1.38E+08	0.00E+00	1.00E+07	1.48E+08	

酸製造量 100 t 当たりの SO₂ の排出量は 1.2 t となっている。韓国でもダブルコンタクト法が若干用いられているため 2.0 t とし、中国については 3.3 t とした⁵⁾。他の国については考慮していない。各国の最新の硫酸製造量は国連統計資料¹⁷⁾より求め、硫酸製造に伴う SO₂ の排出量を推計した。

3.3 非鉄金属精練施設からの排出

国連統計資料¹⁷⁾中の銅、鉛、亜鉛、錫の生産量データを用いた。

銅、亜鉛等の非鉄金属精練の際に、SO₂ が放出される。近年、日本では排ガスをほとんどすべて回収し硫酸製造に用いているが、以前よりかなりの放出があったと考えられる。これに伴う SO₂ の排出量は Akimoto *et al.*²⁾と同様の手法で求めた。硫酸製造に伴うものと同様に、日本、中国と韓国のみについて考慮した。

更に国ごとの SO₂ 発生量から、硫酸製造の為に回

収される SO₂ の量を差し引いて SO₂ 排出量を求めた。硫酸製造のために回収される割合は科学技術庁資料⁵⁾を用いている。

4. 結果と検討

4.1 推計結果

Table 2 は日本、中国、台湾、韓国、北朝鮮について SO₂ 排出量を燃料種別に示したものである。日本に関しては石油からの排出が約 62% で一番大きくついで石炭からのものが 33% となっている。一方中国においては石炭からの排出が圧倒的に大きく、約 92% をしめる。韓国は日本と同様の傾向を示し、石油、石炭の占める割合がそれぞれ 72%、27% であり、ガスからの排出はほとんどない。北朝鮮に関しては中国と同様に石炭によるものがほとんど (93%)、台湾については石油から 57%、石炭から 40% となっている。対象地域の多くを占める中国のエネルギー消費がかな

Table 3. SO₂ emission from each country with various types of source categories.

Emission source category	Japan (kg/y)	China (kg/y)	Taiwan (kg/y)	South Korea (kg/y)	North Korea (kg/y)	Total (kg/y)
Transformation sector						
Patent fuel and BKB plants	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Coke ovens	2.80E+07	1.32E+07	0.00E+00	3.84E+06	0.00E+00	4.50E+07
Gas works	1.03E+07	2.04E+07	1.65E+07	1.34E+04	0.00E+00	4.72E+07
Oil refineries	5.48E+07	6.33E+07	1.56E+07	4.04E+07	5.14E+05	1.75E+08
Electricity generation	2.35E+08	9.03E+09	3.15E+08	6.21E+08	4.36E+07	1.02E+10
Non-specified transformation	1.46E+05	8.58E+08	0.00E+00	1.47E+06	0.00E+00	8.59E+08
Own use	2.01E+05	1.12E+09	2.54E+07	5.10E+07	0.00E+00	1.19E+09
Industrial sector						
Iron and steel	9.32E+07	5.55E+08	4.27E+07	5.87E+07	2.14E+06	7.52E+08
Chemical and petrochemical	3.56E+07	2.78E+09	2.36E+08	5.96E+07	0.00E+00	3.11E+09
Non-metallic minerals	7.96E+07	2.47E+09	5.96E+07	1.16E+08	0.00E+00	2.73E+09
Other industries	1.18E+08	7.24E+09	1.59E+08	9.57E+07	9.48E+07	7.71E+09
Transport sector						
Road	2.31E+08	2.07E+08	1.08E+08	6.92E+07	6.63E+06	6.23E+08
Railway	3.93E+06	2.33E+08	7.16E+05	2.46E+06	0.00E+00	2.40E+08
Internal navigation	5.86E+07	3.30E+07	6.04E+06	1.11E+08	0.00E+00	2.09E+08
Other sector						
Residential	1.52E+06	1.87E+09	2.91E+06	2.63E+07	4.67E+04	1.90E+09
Agriculture, commerce, etc	1.38E+08	7.97E+08	2.44E+07	2.64E+07	0.00E+00	9.87E+08
Total	1.09E+09	2.73E+10	1.01E+09	1.28E+09	1.48E+08	3.08E+10

り石炭に依存していること、石炭は他の燃料と比較して硫黄含有率が大きいため、東アジア地域全体として石炭による SO₂ 汚染への寄与は非常に大きいといえる。

Table 3 は各国の SO₂ 排出量を燃料消費部門別に示したものである。各国とも発電部門からの排出が大きく、特に中国で約 33%、韓国では約 49% を占める結果となっている。この数字に関しては、韓国における発電部門からの排出割合が高いなど、外岡¹⁸⁾ の推計結果と異なっている。本推計では、外岡の結果と比較して発電部門からの排出量が 2 倍以上であるのに対し、工業部門からの排出量が約 60% 程度と見積もられている。この原因として、資料による燃料消費量の差以外に排出係数による影響が大きいと考えられる。

発電部門と、工業部門の主たる消費部門である化学・石油化学工業部門における燃料消費量の比が約 1:25 であるのに、発電部門の主消費燃料種である重油の排出係数と石油化学工業の主燃料消費種であるナフサ¹⁷⁾ の排出係数の比が 20:1 であることにより生じた結果である。今後、この排出係数の見積もり誤差による推計排出量の評価を行っていく必要があると思われる。更にこれを工業、発電、非生産部門（輸送・生活）の 3 つに再整理した結果が Table 4 である。国によりその寄与の割合が異なっており、日本に関しては工業以外に非生産部門による排出が比較的大きく、また中国・台湾は工業と発電部門による寄与が大きいことが分かる。特に中国においては脱硫対策がまだ進んでおらず、また火力発電の内石炭火力が占める割合が非常

Table 4. SO₂ emission from each country with various types of sectors.

	Industries (kg/y)	Electricity generation (kg/y)	Transport domestic (kg/y)
Japan	5.11E+08	2.35E+08	4.33E+08
China	1.60E+10	9.03E+09	3.14E+09
Taiwan	5.55E+08	3.15E+08	1.43E+08
South Korea	4.75E+08	6.21E+08	2.36E+08
North Korea		1.41E+08	6.68E+06
Other countries		8.73E+07	2.54E+07

Table 5. SO₂ emission from non-ferrous metal smelting and sulfuric acid production.

Emission source category	Emission of SO ₂ (kg/y)		
	Japan	China	South Korea
Non-ferrous metal smelting	5.04E+06	4.03E+08	7.66E+06
Sulfuric acid production	8.57E+07	4.64E+08	4.08E+07
Total	9.08E+07	8.67E+08	4.85E+07

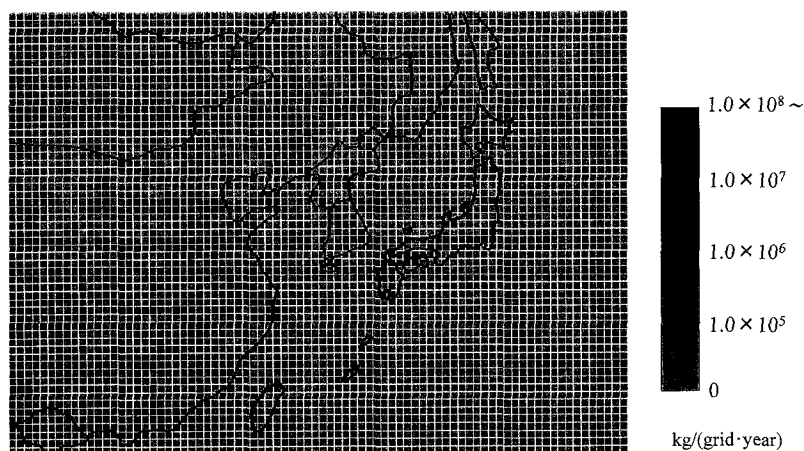


Fig. 2. Sulfur dioxide emission with 60 km×60 km grid resolution (1995).

に高い (約 95%) ことが原因であると思われる。また、韓国に関しては発電部門の寄与が一番大きい点の特徴である。

また日本、中国、韓国について硫酸生産施設と非鉄金属精錬施設からの排出量をまとめたものを Table 5 に示す。中国に関してはこれら 2 つの排出源からの排出量はほぼ同程度であるのに対し、韓国では 5.3 倍、日本においては 17 倍硫酸製造に伴う排出が大きくなっている。

これらを加えたものが総 SO₂ 排出量であり、更に整理して排出量の地域分布を見るために 60 km×60 km メッシュのトーンマップにしたものを Fig. 2 に示す。これによると中国中南部四川省の中心付近と中国東部に排出量の大きい地域が集中している結果になっている。この理由としては、四川省は石炭中の硫黄含有分の値が最も大きく (3.19%)、更に人口が多い省 (中国全土の約 1 割をしめる) であること、山東、江蘇省は東シナ海沿岸地域に位置し、産業活動が盛んな地域であること、人口が多いこと、また沿岸地域に位置する省の中では石炭中の硫黄含有分が比較的高いことなどが考えられる。また、火力発電所の存在位置か

らの SO₂ 排出量が大きく、SO₂ 排出の地域分布に大きく影響を与えている。

4.2 従来の推計結果との比較

次に従来の推計結果と比較検討を行った。ただし、Akimoto *et al.* の推計についてはこれを国別の排出量に整理した Kato *et al.*¹⁹⁾ を参照した。Kato *et al.* の推計では 1987 年の日本、中国、台湾、韓国、北朝鮮の SO₂ 排出量がそれぞれ 1.14, 20.0, 0.61, 1.29, 0.33 (Tg/y) となっている。また東野らの推計³⁾ では中国の 1990 年における年間の SO₂ 排出量は 21 (Tg/y) となっている。本推計結果から日本、中国、台湾、韓国、北朝鮮での年間排出量はそれぞれ 1.18, 28.2, 1.01, 1.33, 0.15 (Tg/y) となっており、対象領域全排出量の内中国の占める割合は 88% である。

以上より、特に中国、台湾においては、脱硫対策がわずかにではあるが行われていることを考慮していないとはいえ、排出量の増加傾向にあることが分かる。ここで、東アジア地域における硫黄化合物排出量に大きく影響を及ぼすと思われる各国の石炭消費量^{6,13)} の推移を Fig. 3 に示す。1992 年以降中国、台湾、韓国

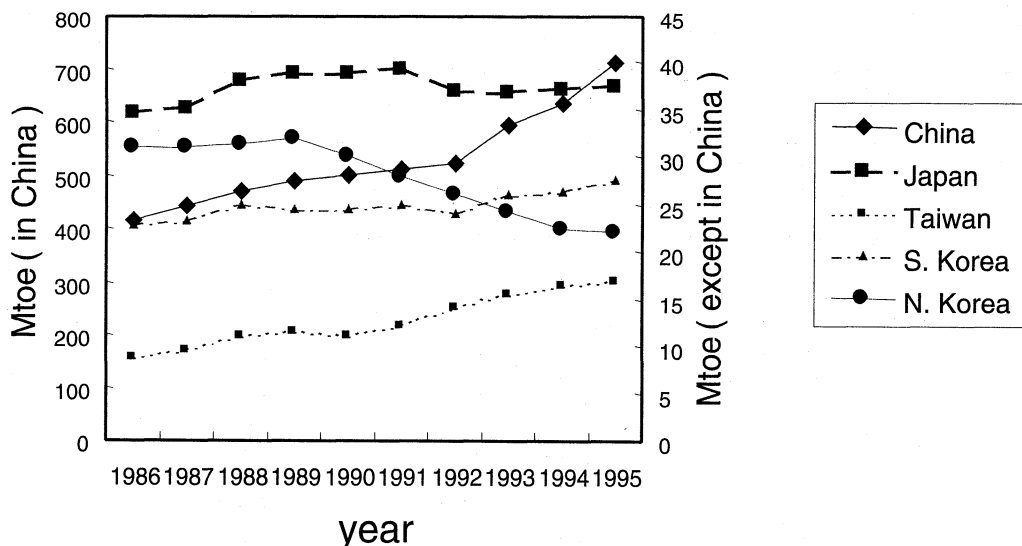


Fig. 3. Total coal consumption from 1986 to 1995 in Japan, China, Taiwan, South Korea, and North Korea.

においては石炭消費量の増加が示されており、特に中国においては急激に増加していることが明らかである。過去の研究における推計結果よりも排出量が増加していることは、これからも説明できる。また本研究では、北朝鮮における排出量が減っているが、未考慮の発生源が存在する可能性もあるとはいえ、石炭使用量の減少にも原因があると思われる。したがって、東アジア地域の硫黄酸化物排出量は、石炭消費量である程度説明できるといえる。

中国における排出量の地域分布についての定性的な傾向については Akimoto *et al.* の推計とも東野らの推計とも大きな違いがなく、特に中国四川省付近と中国東部沿岸地域に大きな排出量が見られる結果を示した。

5. 結 論

本研究では、硫黄化合物の長距離輸送モデルによる解析の際の入力データとして使用されることを目的として、東アジア地域における 60 km×60 km グリッド上で SO₂ の新しい排出量推計を行い、地域的な排出特性について検討するとともに、従来の研究との比較、燃料消費量の変化を調べることで、硫黄酸化物排出量の経年変化についても検討した。以下にその成果をまとめる。

- ・日本、韓国では石油による SO₂ 排出量が多いのに対し、中国では石炭からの排出が圧倒的に多く、これが東アジア地域における SO₂ 排出量を支配して

いる。

- ・燃料消費部門別の排出量について検討したところ、日本においては工業部門以外に非生産部門からの排出が大きな割合を占めるのに対し、中国、台湾などでは発電部門の寄与が大きいこと、韓国では発電部門が最も大きな排出源となっていることが明らかになった。
- ・過去の推計結果と比較検討した結果、東アジア地域、特に中国、台湾での SO₂ 排出量は年々増大していると考えられる。これは、燃料消費量、特に石炭消費量の経年変化と同じ傾向を示している。

現在の推計手法においては、利用できる資料が限られていることもあり、その得られた数値に誤差が含まれている可能性は否定できない。今後、エネルギー統計資料の整備とともに、それを補うヒアリング調査などによりこのインベントリーが高精度化されていくものと思われる。また、本研究では、植物燃料、航空機からの排出などを考慮に入れていないが、今後これらを含めた推計を行っていくとともに、推計結果の誤差評価についても検討していくことを考えている。本研究は、更に発展させ、得られた推計結果を長距離輸送モデルに取り込んだ、東アジア地域の硫黄酸化物の動態解析・影響評価の研究へ進めていく予定であるが、この定量性評価に関して評価する際には、この誤差の評価も重要な意義を持つと考えられる。

本研究の結果より、東アジア地域では大気汚染物質排出量は今後も増加していくことが予想される。地域

全体の大气環境問題の解明・影響評価および対策の策定のために、今後の排出量推計を継続して行い東アジア地域における大気汚染物質排出量データベースとして整備していく必要があると思われる。

謝 辞

本研究の一部は、平成9年度財団法人三菱財団および日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「環境負荷低減を目的とした自律分散型都市エネルギーシステム」プロジェクト (JSPS-RFTF97P01002) の研究費によって実施された。ここに感謝の意を記します。

(受稿 1999.4.26)

文 献

- 1) Fujita S., Ichikawa Y., Kawaratani R. K. and Tonooka Y.: Preliminary inventory of sulfur dioxide emission in East Asia, *Atmos. Environ.*, **25A**, 1409-1411 (1991).
- 2) Akimoto H. and Narita H.: Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emission from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, *ibid.*, **28**, 213-225 (1994).
- 3) 東野晴行, 外岡 豊, 柳沢幸雄, 池田有光: 東アジア地域を対象とした大気汚染物質の排出量推計—中国における硫黄酸化物の人為起源排出量推計—, 大気環境学会誌, **30**, 374-390 (1995).
- 4) 財団法人気象協会: 大気中の浮遊物質の広域輸送に関する研究報告書 (関西地域), pp. 40-45 (1988).
- 5) 科学技術庁科学技術政策研究所編: アジアのエネルギー利用と地球環境, 大蔵省印刷局, pp. 109-130 (1995).
- 6) IEA (International Energy Agency): IEA statistics, Energy Statistics of OECD countries 1994-1995 OECD/IEA, Paris, pp. 125-127 (1997).
- 7) UN (United Nations): Demographic Yearbook (1995) Statistical Office, UN, New York., pp. 276-291 (1997).
- 8) 通商産業大臣官房調査統計部編: 平成7年工業統計表 市町村編, 通商産業調査会, pp. 26-356 (1997).
- 9) 海外電力調査会編: 海外電気事業統計, pp. 16-143 (1997).
- 10) 総理府統計局編: 日本の統計 1998, p. 161 (1998).
- 11) 運輸省運輸政策局編: 平成7年度 貨物・旅客地域流動調査・解析資料編, pp. 11-126 (1997).
- 12) IEA (International Energy Agency): IEA statistics, Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1994-1995 OECD/IEA, Paris, 464-634 (1997).
- 13) 通商産業調査会: 日中共通 エネルギー消費・大気汚染分析用産業関連表 (フロッピーディスク版), 経済統計情報センター (1994).
- 14) UN (United Nations): 1994 Emergency Statistics Yearbook, Statistical Office, UN, New York., pp. 126-349 (1996).
- 15) 中国国家统计局編: 中国富力, 綜研, pp. 376-495 (1997).
- 16) 安成哲三, 米本昌平編: 地球環境とアジア, 岩波書店, p. 124 (1999).
- 17) UN (United Nations): Statistical Yearbook for Asia and the Pacific 1996, Statistical Office, UN, New York., pp. 110-460 (1997).
- 18) 外岡 豊: 地球環境の行方—酸性雨, 中央法規, pp. 29-38 (1997).
- 19) Kato N. and Akimoto H.: Anthropogenic emissions of SO₂, NO_x in Asia: emission inventories, *Atmos. Environ.*, **26A**, 2997-3017 (1992).

Estimate of Anthropogenic Sulfur Dioxide Emission in East Asia

Kouhei YAMAMOTO, Masashi HOSHINO, Tomohiro YOSHIDA and Mikio KASAHARA

Graduate School of Energy Science, Kyoto University, Gokanosho, Uji 611-0011, JAPAN

An emission inventory model for sulfur dioxide (SO₂) is employed for long-range transport of sulfur compounds in East Asia. Emissions from industrial plants, acid productive facilities, electric power plants, and transportation and domestic households are known sources of SO₂ emission. Emissions from China account for 88% of all the SO₂ emission in East Asia, so the characteristics of SO₂ emission strongly depend on energy utilization in China. In Japan and South Korea emissions from transportation and domestic

households are comparably large, but in China industrial facilities and electric power plants are the main sources of SO_2 . Especially in China and Taiwan the total amount of SO_2 emission has been increasing over the last decade. This trend is attributed to the increase of coal consumption in East Asia.

Key words: emission inventory, sulfur dioxide, energy consumption, East Asia