

15. 将来のアジア地域における酸性酸化物の化学反応と輸送過程の解析

Analysis of transport and chemical transformation processes of acid oxide in Asia in the future

大木 望^{*}、藤原 健史[†]、松岡 譲^{*}

Nozomu OHKI^{*}, Takeshi FUJIWARA[†] and Yuzuru MATSUOKA^{*}

Abstract: In this study, we applied energy end-use model to estimate air pollution emissions by considering the use of energy devices which are decided from energy demand. In the second, the total emission with time variation that was emitted from sectors was disaggregated into the regions of target area, and finally, by using the meso-scale meteorology model (MM5) and the chemical transfer model (CMAQ), the chemical transformation and transportation at the present and in the future were computed in the three different spatial scales. Accuracy in long range transportation of the developed model was validated through comparison between the estimated value and the observation by the East Asian Monitoring Networks.

From the result of finest domain, the background concentration of NO₂ was 2 ~ 4 ppb in the year average concentration and about 19 ppb in the maximum of day average concentration, and the possibility was clarified that NO₂ concentration in Beijing sometimes is pushed up over Chinese standard of air quality by the NO₂ transported from the outside. Moreover, SO₂ and NO_x emissions in 2020 were estimated by the end-use model, and the concentration of the each gas in Beijing was calculated and analyzed. As a result, the concentration in 2020 was over three times higher than that in 2001, and it was specially pointed that SO₂ in winter and NO₂ in summer are remarkably high.

Keywords: future air pollution, sulfur oxide, nitrogen oxide, chemical transport model, background concentration

1. はじめに

発展途上にあるアジア諸国においては、今後数年間で急激に増加するエネルギー消費に伴い大気汚染物質の排出量も増大すると考えられる。大気汚染物質は発生源周辺のみならず、他の地域や近隣国の大気環境に影響を及ぼすことは明らかであり、それを予防するための大気汚染対策を検討することは重要である。将来の大気汚染を予測するためには、大気汚染物質発生量の将来の分布を推計し、移流・拡散シミュレーションを行って汚染物質の濃度や沈着量を求めることが必要と考えられるが、これまでの研究では過去や現在を対象とした濃度や沈着量の計算と解析が中心であり、将来の推計はほとんど研究されていない。

大気汚染物質発生量の将来推計は、中国やインドのような急速に増大するエネルギー需要とエネルギー利用機器の技術進歩による大気汚染物質の排出量抑制などを考慮して行うことが望ましい。そこで本研究では、第一にエネルギーEnduseモデル（以降、Enduseモデルと呼ぶ）を用いて、エネルギーの需要と供給の関係から使用されるエネルギー利用機器をもとに大気汚染物質発生量を求めた。第二に、得られた排出総量を適切な分配ファクターをもとに対象地域に分配し、アジア全域にわたる領域から小規模な領域までの複数の空間的スケールにおいて、大気汚染物質の化学反応と輸送を統一された枠組みにより計算した。そして、将来（2020年）の汚染物質の化学変化・輸送の過程を解析し、汚染物質の輸送や沈着の季節及び地域変動を考察した。

^{*} 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻, Department of Urban Environmental Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

[†] 岡山大学大学院環境学研究科資源循環学専攻, Division of Sustainability of Resources, Graduate School of Environmental Science, Okayama University

2. 方法

2.1. 気象モデル・化学輸送モデル

気象場の再現には PSU/NCAR のメソスケール気象モデル MM5 Version 3.7、化学輸送モデルには、米国環境保護庁の Models-3/CMAQ Version 4.5 を利用した。CMAQ の実行領域を図 1 に示す。実行領域は経度 107°、緯度 22°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。以降、図 1 に示した記号を用いて、3 つの実行領域を D1、D2、D3 と呼ぶ。領域 D1 はアジア地域のほぼ全体を収めるように設定し、領域 D2 は主要な汚染物質発生源のある中国の内陸、沿岸部を含むように設定した。領域 D3 は北京を中心に設定した。格子サイズは D1 を 80km、D2 を 20km とし、D3 を 5km とした。CMAQ の実行領域の格子数は領域 D1 で 97×79、領域 D2 で 102×110、領域 D3 が 42×42 (いずれも東西×南北)とした。鉛直方向には、全ての領域において最上層の気圧を 50hPa に設定し、下の 10 層を MM5 の鉛直グリッドと一致させ 14 層のグリッドを設定して計算した。

領域 D1 の気象場の初期条件と境界条件は 2001 年の ECMWF 客観解析データ、NOAA による海表面温度解析データ Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2 (OISST2) (Reynolds ら, 2002)を利用した。

将来 (2020 年) の汚染物質の移動・拡散については現在 (2001) の気象条件を用いて計算した。

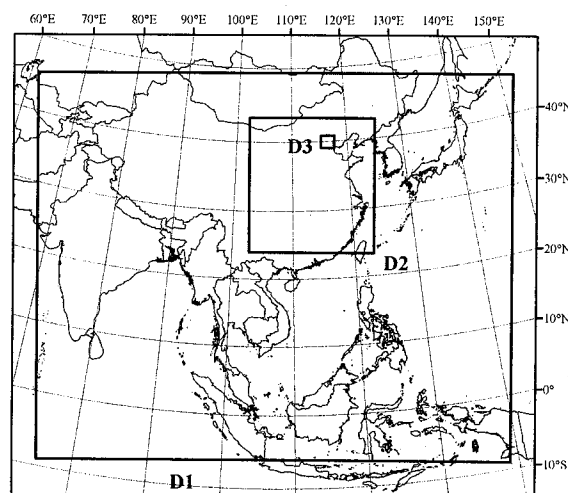


図 1 実行領域

2.2. 排出量インベントリ

将来の大気汚染の解析においては、経済発展に伴うエネルギー消費の増加等により大気汚染物質の排出条件が大きく変化すること考えて、エネルギーのエンドユースを考慮して中国の排出量を求めた。そして、部門ごとに月変動係数、日変動係数、時間変動係数を設定した。中国以外は、(1)神成ら(2005)、(2) Streets *et al.* (2003)、(3)Olivier *et al.* (2005)の年間排出量グリッドデータを用いた。さらに、物質ごとに月変動係数、時間変動係数を設定した。

図 2 に Enduse モデルの全体像を示す。

Enduse モデルを用いた大気汚染物質の排出量推計では以下の手順を踏む：①経済成長率や人口統計、人口推計などの社会経済的推計、統計を外生的に与えて、計量経済モデルによりサービス需要量を推計する。②線形計画法により、エネルギー供給などの制約条件下で総費用が最小となる最適なエネルギー機器の選択を行う。③エネルギー消費量、温暖化効果ガス、大気汚染物質の排出量などを求める。

この Enduse モデルによって推計された 2001、2010、2020、2030 年の中国部門別 SO₂、NO_x 排出量と比較する他のグリッドデータベースの排出量を表 1、表 2 に示す。既存の 3 つのデータベースの排出量にはばらつきがあるが、SO₂ 排出量は低めの見積もりである Streets(2000)に近く、NO_x 排出量は 3 つのデータ

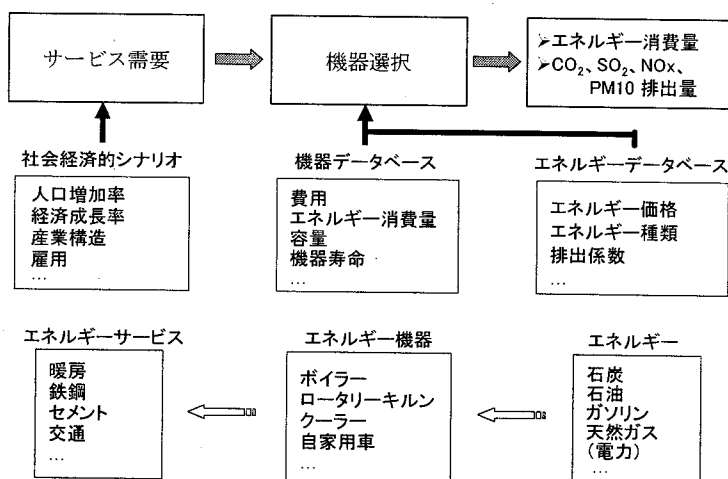


図 2 Enduse モデルの全体像

ベースと近い値となった。Enduse モデルの将来推計では運輸部門、エネルギー部門、工業部門の排出量増大が著しく、2001 年を基準として 2020 年では 2.1~2.9 倍、2030 年では 3.3~4.4 倍に増大することがわかった。

表 2 中国における人為起源 SO₂ 源排出量の部門別比較(GgS)

		EAGrid2000	EDGAR	Streets	AIM/Enduse			
	推計年	2000	2000	2000	2001	2010	2020	2030
部門	農業+バイオマス	590	501	83	-	-	-	-
	商業+民生	2,470	2,889	2,512	3,437	2,897	3,737	4,839
	エネルギー	11,509	15,422	1,029	7,844	16,161	20,043	32,534
	工業	11,551	14,593	7,353	5,172	8,556	11,377	17,194
	運輸	558	797	409	197	352	570	860
	その他	283	3	-	-	-	-	-
合計		26,961	34,204	11,385	16,650	27,966	35,726	55,427

表 2 中国における人為起源 NO_x 排出量の部門別比較(GgN)

		EAGrid2000	EDGAR	Streets	AIM/Enduse			
推計年		2000	2000	2000	2001	2010	2020	2030
部門	農業+バイオマス	656	1,602	816	-	-	-	-
	商業+民生	1,122	327	702	497	449	563	714
	エネルギー	4,228	5,427	4,407	5,853	10,435	12,476	19,750
	工業	3,566	4,234	2,790	2,233	3,692	4,917	7,447
	運輸	1,997	2,309	2,632	1,404	2,432	3,529	4,584
	その他	279	11	-	-	-	-	-
合計		11,848	13,911	11,347	9,987	17,008	21,484	32,495

面源データに関しては、Enduse モデルから出力される省単位の推計排出量を、まず人口および GDP を用いて県単位に分配し、さらに県単位の排出量を 30 秒×30 秒グリッドに表 3 のデータを用いてエネルギー部門ごとに分配した。

表 3 排出量の空間的分配に使用したデータ

エネルギー部門		使用データ
工業部門	中国全土土地利用図の土地利用ラスターデータの工業地区比率	(中国科学院資源環境数据中心)
民生部門	Landscan2003による人口ラスターデータ	(米国オークリッジ国立研究所)
商業部門	Landscan2003の土地利用・人口ラスターデータの商業地区比率	(米国オークリッジ国立研究所)
運輸部門	VMAP0道路データ、および人口データ	(米国画像地図庁)

Enduse モデルから求めた中国の年間排出量に関しては、エネルギー消費部門ごとの月変動係数、日変動係数、時間変動係数を考慮して、排出量の時刻分配を行ない、中国以外における人為起源排出量データに関しては、神成ら(2005) の日本における排出量の月別日周変動状況を参考に月変動係数、時間変動係数を設定し、時間変動を考慮した。また、グリッドデータの緯度をもとに、UTC 基準から 1 時間単位でのローカルタイムの時差を組み入れた。図 3 に SO₂、NO_x の月変動、時間変動を示す。

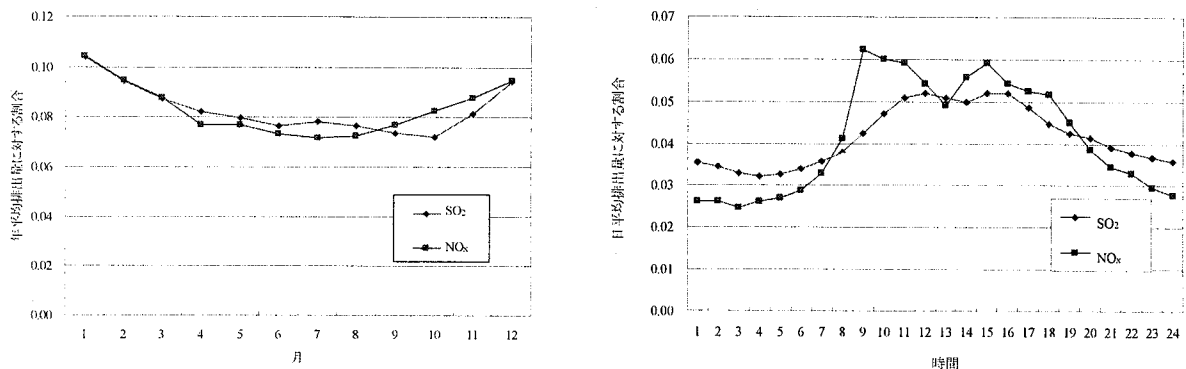


図 3 SO₂、NO_x の月変動、時間変動

火山からの SO_2 放出量には、気象庁の発表している三宅島の SO_2 放出量日量測定値より、月別に放出量を設定した。三宅島を除く火山からの SO_2 放出量には、Streets らのグリッドデータとともにアイオワ大学が提供する推計値を用いた。その他の自然起源の排出量には、GEIA の取りまとめたインベントリを使用した。

3. 結果と考察

D1 の計算結果は、EANET の観測データと比較し、計算結果の検討を行った。また、領域 D3 では、領域内の NO_2 排出量が完全に除去された条件でも計算を行った。領域内での NO_2 排出量を完全に除去した条件により計算される NO_2 濃度を領域外からの NO_2 の輸送により流入したバックグラウンド濃度と解釈し、別の都市から流入した NO_2 の都市周辺領域への影響を考察した。また、領域 D3 においては、Enduse モデルによる 2020 年における排出量インベントリを用いた計算を行った。この際、領域 D1、D2 からネスティングを行い、境界条件も考慮して 2020 年における領域 D3 内での計算を行った。

3.1. 観測データとの比較

図 4 に隠岐の観測点における SO_2 、 NO_2 の日平均値の時系列を表し、図 5 に SO_2 、 NO_2 の観測値と計算値の月平均の関係を表す。なお、図中には、観測値と計算値の 1:1、1:2、2:1 の比率を表す直線を示している。

SO_2 は、隠岐では計算値は観測値の変化を良く捉えているが、計算値のピーク値の高さは観測値のそれに比べて高い。伊自良では観測値の 2 倍を超えて過大評価されているが、この理由として伊自良が他の観測点よりも排出源に近く、排出源と観測点が同じ D1 領域のセルの中に含まれたためと考えられる。

NO_2 は、隠岐ではピーク値を除いて計算値と観測値の傾向が良く合っている。

以上の結果から、計算値は観測値の定常～低周波で比較的一致するが、ピーク値は高く推計される傾向がある。なお、使用した排出インベントリと実際の排出量のミスマッチについても考慮する必要がある。

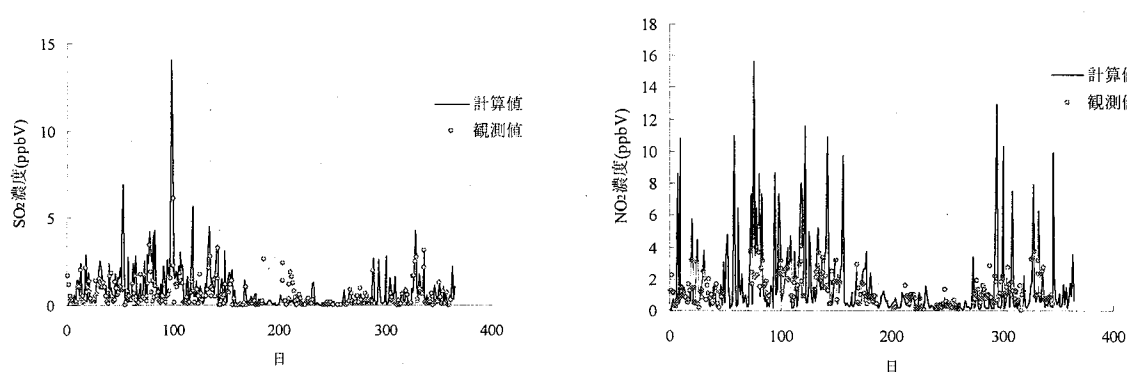


図 4 隠岐観測点における SO_2 (左)、 NO_2 (右)濃度日平均値の時系列

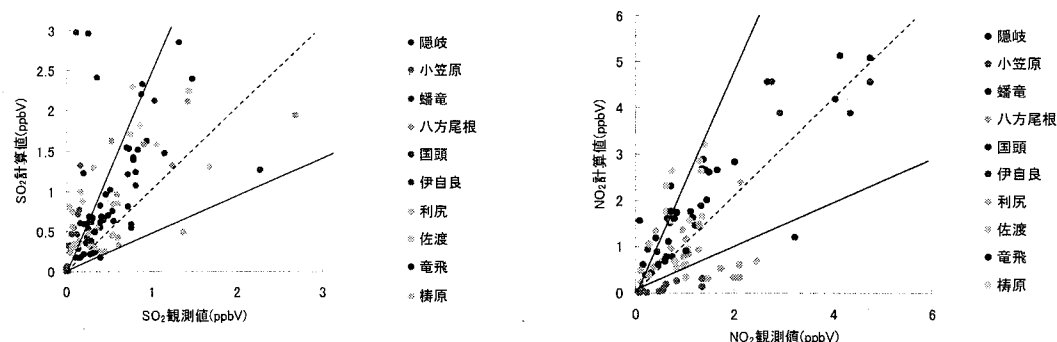


図 5 EANET 自動計測観測点における月平均 SO_2 (左)、 NO_2 (右) 濃度についての観測値および計算値の比較

3.2. 北京周辺領域における濃度解析

考察の対象とする地域の比較点と人口分布(Landscan2003)を図6に示す。

領域 D3 内のバックグラウンド NO₂ 濃度は、比較点において年平均値が 2~4ppb、日平均値の最大値は約 19ppb となった。

全比較点でのバックグラウンドの年平均寄与率を表 4 に示す。バックグラウンドの寄与は北京においては 23% であるが、高碑店では 51% である。境界に近い高碑店の比較点では領域中央の北京に比べてバックグラウンド濃度が高く、境界からの距離が影響していると考えられる。高碑店においては、バックグラウンド NO₂ 濃度は年平均 2ppb、日平均値の最大は 15ppb となった。

表 4 領域 D3 比較点における NO₂ 濃度への

バックグラウンドの年平均寄与率

比較点	バックグラウンド
北京	23%
天津	35%
廊坊	49%
高碑店	51%

また、図 7 に、北京の比較点での NO₂ 日平均濃度およびバックグラウンドの寄与を示す。図中の緑色の部分はバックグラウンドを、青色の部分はトータルの濃度を表す。北京、廊坊ともにバックグラウンドの年平均濃度は 2ppb 程度と大きくないものの、領域内からの NO₂ 排出量にバックグラウンド濃度が加わり高濃度となったピークが冬季において何度か見られる。したがって、日平均値により都市の濃度変動を考察する際には、バックグラウンド濃度を十分考慮することが必要と考えられる。

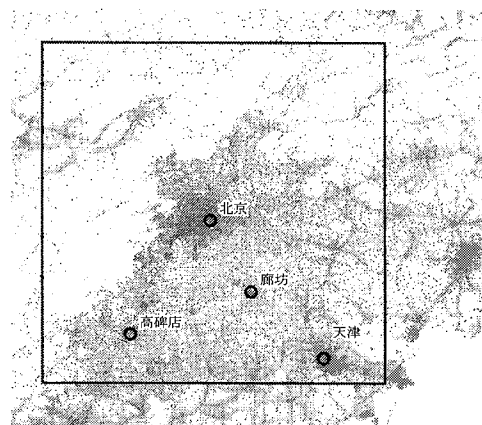


図 6 対象とする比較点と人口分布

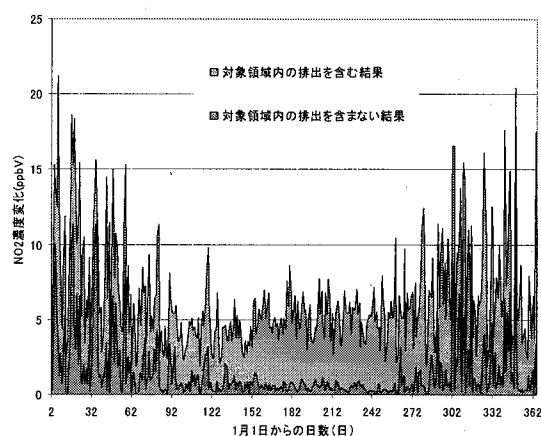


図 7 北京での NO₂ 日平均濃度およびバックグラウンドの寄与

3.3. 北京周辺領域における将来予測

2020 年と 2001 年の SO₂、NO₂ 濃度の違いを考察する。比較点での 2020 年と 2001 年の SO₂、NO₂ 濃度の変化を表 5、表 6 に示す。

2020 年における SO₂ 濃度の年平均値は 16~57ppb で、2001 年と比べて 3 倍以上になった。日平均値の最大値は 148ppb であった。北京と天津の年平均値は 57ppb (約 151 μg/m³)、35ppb (約 92 μg/m³) であり、中国の 2 級環境基準値 150 μg/m³ のそれぞれ 100%、61% に相当

する。2020 年における NO₂ 濃度の年平均値は 13~36ppb で、2001 年と比べて 3 倍以上となった。日平均値の最大値は 79ppb である。北京と天津の年平均値は SO₂ 同様に高く、28ppb (約 74 μg/m³)、37ppb (約 98 μg/m³) であり、中国の 2 級環境基準値 120 μg/m³ のそれぞれ 62%、81% に相当した。

表 5 2020 年と 2001 年の SO₂ 濃度(ppb)

比較点	2001年		2020年	
	年平均値	日平均値の最大値	年平均値	日平均の最大値
北京	7.42	23.41	56.99	148.16
天津	8.56	32.36	35.14	90.25
廊坊	2.77	15.31	16.57	50.72
高碑店	3.06	24.23	21.36	118.42

表 6 2020 年と 2001 年の NO₂ 濃度(ppb)

比較点	2001年		2020年	
	年平均値	日平均値の最大値	年平均値	日平均の最大値
北京	6.36	21.19	27.77	52.36
天津	11.65	34.82	36.37	79.35
廊坊	4.12	20.81	13.27	38.89
高碑店	4.88	27.89	15.42	40.41

2020 年における北京周辺での SO_2 、 NO_2 日平均値はともに、現在の中国の大気環境基準に近い値となり、将来中国の大気環境汚染が深刻化することが懸念される。

北京における SO_2 日平均濃度および NO_2 日平均濃度を図 8 に示す。図中青色部分は 2001 年値、紫色部分は 2020 年値を表す。北京における 2020 年の濃度は SO_2 、 NO_2 ともに年間を通して濃度は高くなっているが、特に SO_2 は冬季においての増加が大きく、 NO_2 は夏季においての増加が大きい。

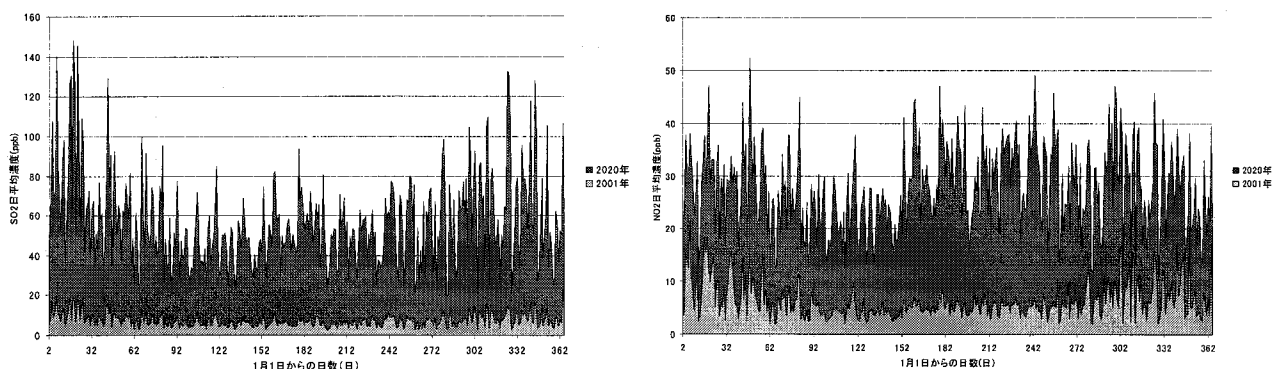


図 8 北京における 2001 年と 2020 年の SO_2 (左)、 NO_2 (右) 濃度の変化

4. 結論

本研究では、エネルギーエンドユースを考慮し、時間変動を考慮した詳細な排出量インベントリを作成すると共にメソスケール気象モデル MM5 と化学輸送モデル CMAQ を用い、3 段階の空間的スケールにおいて現在・将来における大気汚染物質の化学輸送計算を行った。以下に結果のまとめを示す。

- 北京において、都市およびその周辺への他の都市から流入した NO_2 のバックグラウンド濃度は、年平均値で 2~4ppb、最大日平均値で約 19ppb となり、日平均値により都市の濃度変動を考察する際には、バックグラウンド濃度を十分考慮する必要があることがわかった。
- 北京周辺部では、Enduse モデルにより 2020 年の排出量を推計し、2020 年における硫黄、窒素酸化物の濃度を解析した。硫黄、窒素酸化物ともに年間を通じて 3 倍以上濃度が増加し、特に北京では冬季に SO_2 、夏季に NO_2 濃度が増大することが示唆された。

参考文献

神成 陽容, 外岡 豊, 村野 健太郎 (2005): EAGrid2000 (東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース)の概要.

気象庁: 三宅島の二酸化硫黄放出量,

http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/320_Miyakejima/so2_2000_2002.htm.

Network Center for EANET: EANET Data Sets on the Acid Deposition in the East Asian Region.

Olivier, J.G.J., J.A. vanAardenne, F. Dentener, L. Ganzeveld and J.A.H.W. Peters (2005): Recent Trends in Global Greenhouse Gas Emissions: Regional Trends and Spatial Distribution of key Sources, Non- CO_2 Greenhouse Gases NCGG-4, Millpress, 325–330.

Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes and W. Wang (2002): An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate, *Journal of Climate*, **15**(13), 1609–1625.

Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo and K.F. Yarber (2003): An Inventory of Gaseous and Primary Aerosol Emissions in Asia in the Year 2000, *Journal of Geophysical Research*, **108**(D21), 8809.