# 中国起源の酸性物質に関する移流拡散 シミュレーションとその我が国への影響

STUDY ON THE IMPACT OF ACIDIC OXIDE FROM CHINA ON JAPAN USING AN ADVECTION AND DISPERSION MODEL

渡邊 宗一郎<sup>1</sup>· 鈴木 善晴<sup>2</sup>· 長谷部 正彦<sup>3</sup>· 松田 慎介<sup>4</sup>

Souichirou WATANABE, Yoshiharu SUZUKI, Masahiko HASEBE and Shinsuke MATSUDA

# <sup>1</sup>学生会員 宇都宮大学大学院 博士前期課程1年 工学研究科地球環境デザイン学専攻 <sup>2</sup>正会員 工博 宇都宮大学大学院 助教 工学研究科地球環境デザイン学専攻 <sup>3</sup>正会員 工博 宇都宮大学大学院 教授 工学研究科地球環境デザイン学専攻 <sup>4</sup>正会員 前田建設工業(株)

It decreaces in quantity of released acidic oxide in Europe and America, but in Asia, that amount develop atendency to increase. In particular, the amount of released acidic oxide in China increases with the advance of technology. It is considered that acidic oxide in the East Japan is mainly brought by advection from the East-Asia continent in winter. In this study, transportation process of the acidic oxide in the East Japan was investigated by an advection and dispersion model (HYSPLIT4). The advection process of acidic oxide also was investigated through numerical transport simulations. And I presume future influence of acidic oxide released from China using data of the prospective amount of released acidic oxide in China. The results of simulations shows that the source area of sulfur dioxide transported to the East Japan in winter is likely to be the northern part of China.

Key Words : acidic oxide, acid rain, sulfur dioxide, advection process, trajectory analysis, advection dispersion model

#### 1. はじめに

1980年代以降の欧米における酸性雨による被害は極めて深刻である.ヨーロッパの多くの国々や北米で森林や湖沼が大きな被害を受けた.スウェーデンやノルウェーといった北欧の国々では,酸性物質等の大気汚染が問題化していないにもかかわらず,他国からの大気汚染物質が輸送されて大きな被害を被った.北米では,大工業地帯として有名な五大湖周辺において1960年代から被害が目立ち始め,各地で森林の枯死,湖沼の酸性化による魚の死滅などの被害が報告されている.

我が国でも,現在全国各地で酸性雨が観測されており, 地域によっては pH4 程度の非常に高い酸性度を持つ降 水が観測されている<sup>1)</sup>.表-1 は,Grobal Environment Outlook の SO<sub>2</sub> 排出量の推移と予測の表である.これ を見ると近年では,問題意識が高まってきたため,ア メリカやヨーロッパでは SO<sub>2</sub> 排出量が沈静化に向かっ てきている.ところが,アジアでは増加傾向が見られ る.これは,アジアにおいて経済発展が著しい国が多 いためであると考えられる.

特に,急速な工業化が進む中国では,毎年大量の硫 黄化合物が排出されており,それらが大気の移流・拡 散とともに日本へ長距離輸送されていると考えられる.

表-1	SO <sub>2</sub> 放出量の推移と将来予測のデータ	(100万t/年)
-----	---------------------------------	-----------

	1980年	1990年	1995年	2000年	2010年
ヨーロッパ	59	42	31	26	18
アメリカ	24	20	16	15	14
アジア	15	34	40	53	79

中国では今なお大気汚染に対する対策が十分に行われ ていない状況を考えると,今後我が国において,酸性 雨あるいは酸性降下物の影響が顕在化し,深刻な社会 問題となることが懸念される.

硫黄酸化物については,複数の研究機関において,数 値モデルをベースとした輸送プロセスの解析や,沈着 量の定量的評価などが試みられている.たとえば,市川 ら<sup>2)</sup>は,八イブリッド型輸送モデルを用いて,東アジア における硫黄酸化物の沈着量評価を行っている.同モ デルは,気塊を追跡して濃度を計算するトラジェクト リー型の長距離輸送モデルで,沈着量の長期的評価に 用いられている.また,久保田ら<sup>3)</sup>は,3次元オイラー 型モデルを用いて,地球規模で酸性物質の沈着量分布 を計算するとともに,土壌酸性化による影響が顕著な 地域を明らかにするための環境影響評価を行っている.

越境大気汚染の影響を評価するためには,長距離輸 送モデルによってどの地域からどれだけ酸性物質が輸 送されているか(越境輸送量)を明らかにすることが 必要である.越境輸送量を求めるモデルは,発生源イ ンベントリー,気象場(気象条件),輸送を規定する 方程式,化学物質の変換を支配する化学反応モジュー ル,大気中から除去されたりあるいは直接的に被害地に 降り注ぐ量を決める沈着モジュールなどで構成される. 1990年代以降,各研究機関によって酸性物質に関する 様々な長距離輸送モデルが開発され,大陸から日本への 酸性物質輸送メカニズムに関する研究が行われてきた. 例えば,井上ら<sup>4)</sup>は地域気象モデルである「RAMS」や 「HYPACT」と物質輸送モデルである「CMAQ」を用 いて硫黄酸化物の動向を解析し, 鵜野ら<sup>5)</sup>は HNO<sub>3</sub>の 粒子化の反応を含まれている STEM を用いて,長距離 輸送モデルへの不均一反応の重要性を示している. 各 研究機関により,実測値に占めるモデル計算値の割合, すなわち発生源寄与率の算定を通して, 各モデルの精 度比較が行われてるが,それらの結果にはモデルごと に大きなバラツキがあり<sup>6)</sup>, 今後はその計算精度を向上 させることが必要である.それに加え、今日の温暖化 や経済発展等の環境や経済の変化を考慮して解析を行っ ている文献はほとんどない.

本研究では、中国における急速な近代化の進展など の今日の状況を考慮した環境影響評価を目指して、酸 性降下物の輸送過程についてシミュレーション解析を 行う.また、この解析により将来の日本への影響を検討 する.具体的には、移流拡散モデルである HYSPLIT4 を用いた物質輸送シミュレーションにより、冬季に中 国から排出された二酸化硫黄が東日本へ到達するまで の酸性物質の放出・移流・拡散・沈着の一連の輸送過程 について検討する(同モデルの詳細は後述).さらに、 将来の SO<sub>2</sub> 排出量予測データ(科学技術研究所により 公表されている資料)を用いたシミュレーションを通 して、シナリオ別に東日本における今後の越境汚染の 影響について考察する.

著者ら<sup>7),8)</sup>はこれまでに, HYSPLIT4を用いた東日 本を対象とした解析により, 我が国おいて高い酸性度 を持つ降水が観測されるメカニズムを明らかにしてき た.現在は、地球温暖化等の影響を考慮した将来の大 気環境に関する予測システムの構築、およびその高精 度化を目指して解析を進めており、本稿はそのために 必要な基礎的知見を得ることを目的としたものである.

### 2. HYSPLIT4 を用いた輸送過程の解析

HYSPLIT4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Ver.4)は,1982年から2004年にか けて,Draxerら<sup>9),10),11)</sup>により開発された移流拡散モデ ルで,パフあるいは粒子(または,両者の混在したもの) をラグランジュ的に追跡しながら,移流(advection), 拡散(dispersion),沈着(deposition)の各プロセスが 順次計算される. 酸性雨に含まれる代表的な酸性物質として,主に二酸化硫黄及び窒素酸化物があげられる.二酸化硫黄は, 輸送過程でオゾンなどによって酸化されることで徐々 に硫酸に変わり,長距離輸送される.硫酸は非常に揮 発性が低いため,大気中で生成するとすぐに細かい粒 子となる.この粒子が雲核となり雲を形成して雨を降 らせたり,あるいは降雨に溶け込んだりすることで酸 性雨となる.一方,窒素酸化物は輸送過程で徐々に反 応するわけではなく,発生源近くで酸化されることで 硝酸となる.揮発性が高いため,かなりの量がガスと しても存在し,水にも溶けやすく雲や雨に溶け込んで 地上に沈着する.そのため,硝酸は細かい粒子に溶け 込んだ場合を除いて長距離輸送されないことが多い.

本研究では,前者の二酸化硫黄を対象として,その 輸送過程のシミュレーションを行う.計算に用いる二 酸化硫黄のパラメータは,拡散比 1.9,モル重量 64.00 (g/mol)を使用した.

モデルの初期条件に用いる気象データは,NOAA に よる 2.5° × 2.5°の再解析データを使用した.再解析 データとは数値予報モデルとデータ同化手法を用いて, 過去の観測データから現在または将来の大気循環場や 境界条件(地表面フラックス,放射フラックスなど)を 計算したものである.水平風,気温,ジオポテンシャ ル高度,相対湿度などのデータが,中緯度において約 100kmの水平格子間隔で3次元的に配列されている.

放出高度は 150m,放出時間は,計算開始時間である 2000年2月15日12:00から12時間放出し,濃度および 沈着量の計算結果は,放出開始から240時間後の2000 年2月25日12:00まで,6時間間隔で算出した.計 算領域は,宇都宮の緯度・経度を中心に30°×70°に 設定し,モデルの水平解像度は0.15°×0.15°とした. 鉛直層は地表面(0m),0m - 500m層,500 - 1000m 層,1000m - 2000m層,2000m - 3000m層の5層に 分類した.ここで,沈着速度に関しては,市川らの研 究報告および Andreas Stohl *et al.*の粒子拡散モデル FLEXPART を参考に0.002m/sとした<sup>12)</sup>.

本研究では解析1として,まず中国大陸で二酸化硫 黄の放出量が大きい5地域を選択し,それらの地域を 放出源とするシミュレーションを行った.その後,特に



図-1 解析1の放出地点



図-2 解析 1 の 0-500m 層における濃度分布 (ppb)

表-2 2000 年の各省の SOx 排出量

行政区	SOx 排出量 (t/h)
河北	120.21
遼寧	124.89
上海	129.79
江蘇	256.86
山東	221.69

日本への影響が大きいと判断された地域を放出源として再度シミュレーション(解析2)を行うことで,我が 国に対する越境汚染の影響評価を行った.

#### 3. 解析1の結果と考察

放出地点は,図-1に示した河北,遼寧,上海,江蘇, 山東の5地点である.SO2の放出量は,科学技術政策研 究所が将来エネルギー需要予測をし,経済動向やエネ ルギー消費量等をシミュレートする FUGI モデルを用 いて算定したアジア地域のSO2排出量の将来予測デー タ<sup>13)</sup>の2000年のデータを用いた.各地点における放出 量を表-2に示す.

図-2に放出から6,12,24,36,48,72時間後の二酸化硫黄の濃度分布を示す.図-3から,遼寧から放出 された気塊aと、その他の地点から放出された気塊bと が異なる移流・拡散過程を経て日本へ到達することが わかる.図-2より、気塊aは、ほとんど拡散されずに 高い濃度を保ったまま南東方向へと移流し、24時間後 には日本の中国地方へ到達する.そして、96時間後には 日本をほぼ完全に通過する形で太平洋側へぬけること が推定された.それに対し、気塊bは、南東へと移流



図-3 48 時間後の 0-500m 層における濃度分布 (ppb)

し沖縄に到達する.その後,徐々に拡散した気塊が,前 者に比べ時間的な遅れを伴って九州地方へと到達して いる.

このことから,解析2として,東日本に大きな影響 があると推定された遼寧省とその北部の黒龍江,拡散 の影響を考えるために河北周辺の3地点の計5地点を 発生地点として選ぶとともに,科学技術政策研究所か ら公表されているアジア地域のSO2排出量の将来予測 データを用いて,現状の影響を検証するとともに将来 の影響を検討する.

#### 4. 解析2の結果と考察

#### (1) 放出地点と放出量

放出時間や計算時間は,解析1と同じ条件とした.ア ジア地域の SO<sub>2</sub> 排出量の将来予測データに基づき,冬



図-4 解析2の放出地点

表-3	3 ケースの	シナリオ

ケース	想定したシナリオ
現状	2000 年 2 月のシミュレーション
悲観的シナリオ	環境対策は進展しない
楽観的シナリオ	環境対策が日本並みに進展

季の SO<sub>2</sub> の長距離輸送に関して, 3 ケースのシナリオ を基に解析を行う(表-3).

ここで,楽観的シナリオの「日本並みに進展」とは, エネルギー消費に係る新たな技術革新がとられること による省エネルギー及び環境負荷の小さいエネルギー 開発・普及が図られ,日本で行われている環境対策が アジア全体で実施されたと想定したものである.特に, 中国では,発電所が重油を燃料として用いる場合,SO2 の低減を図り,硫黄分の割合に応じて低減率を決め,予 測をしたものである.

放出地点は,遼寧省周辺の5地点である北京,河北, 山西,遼寧,黒龍江(図-4)を選択し,放出量に関して は,科学技術政策研究所から公表されているSO2排出 量の将来予測データを基に,表-4に示す値を用いた.

しかし,気象データとしては全てのシナリオにおいて,2000年2月のデータを用いているため,温暖化等の気候変化は考慮していない.

#### (2) 解析 2 の考察

図-5 に現状における放出から 6,36,96 時間後の二酸化硫黄の濃度分布を示す.解析 1 と同様に,遼寧と 黒龍江から放出された気塊 a と,その他から放出され た気塊 b の 2 つに分かれていることが確認できる.気 塊 b は解析 1 と同様に南東に移流し,沖縄を通過する. その後,気塊 a より遅れをもって,九州に拡散してい く.それに対し気塊 a は,解析 1 と同様に,あまり拡 散されず本州に到達し,中国地方,関東地方,南東北 と解析 1 よりも広範囲にわたり影響を与えることがわ かる.

また,図-6,図-7に,悲観的シナリオ,楽観的シナ リオにおける放出から6,36,96時間後の二酸化硫黄 の濃度分布を示す.現状,悲観的シナリオ,楽観的シナ

表-4 各ケースの放出率 (t/h)

	北京	河北	山西	遼寧	黒龍江
現状	52.04	120.21	88.58	124.89	61.76
悲観的	59.29	137.10	101.03	140.89	70.21
楽観的	18.04	43.26	32.65	40.75	30.71

リオと全てにおいて,同じ気象データを用いているため,移流・拡散に大きな違いは見られない.だが,悲 観的シナリオでは現状よりも高い濃度分布が確認でき, 楽観的シナリオでは,現状よりも低い濃度分布が確認 できる.

現状,悲観的シナリオ,楽観的シナリオにおける新潟 での二酸化硫黄濃度と沈着量の時系列変動を図-8 に示 す.中国から放出された二酸化硫黄は,約24時間後に 新潟に到達し,42時間後に0-500m,500-1000mにお ける濃度が,ピークを迎えることがわかる.96時間後 以降も到達しているが,ピーク値に比べて1/10以下で あることから,河北,北京,山西の3地点から放出さ れた二酸化硫黄は,遼寧と黒龍江から放出された二酸 化硫黄に比べ,東日本において,はるかに小さいこと がわかる.

次に,各シナリオを比較してみると,濃度のピークを 迎える時刻に変化はない.ただ,悲観的シナリオでは, 現状よりも0-500mの濃度において,ピーク値で1.13 倍と増加し,楽観的シナリオでは,0.33倍と大きく減 少すると推定された.また,沈着量においても同様の 傾向が見られた.放出量の割合とほぼ同様な結果が得 られたが,これは同じ気象条件下で解析したためと考 えられる.図-9につくばにおける二酸化硫黄濃度と沈 着量の時系列変動を示す.こちらも,時間的なずれは あるが,傾向としては新潟と同様の傾向が見られる.

### 5. 発生源寄与率の算定と将来の越境汚染の 影響

新潟において観測データと解析結果の比較を行う.ま ず,図-8から,現状における新潟の0-500 m層での二 酸化硫黄の平均濃度が約0.217 ppbと算定される.一 方,科学技術政策研究所によれば,2000年に中国5省か ら排出される人為起源の二酸化硫黄が392.3万t,同年 の中国全土からの排出量が2208.6万tと見積もられて おり,後者は前者の約5.63(=2208.6/392.3)倍となっ ている.したがって,この比率から推定すると,上記 の0.217 ppbを5.63倍した値1.222 ppbが,中国全土 から新潟へ輸送される二酸化硫黄の推定濃度となる.

さらに,国立環境研究所の「環境数値データベース」 によれば,図-5と同時期に新潟で観測された二酸化硫黄 の濃度は2ppb程度であることから,中国全土から新潟 へ輸送される二酸化硫黄の寄与率は,1.222/2.0=0.611 より,約 61.1%と推定される.中国全域からの影響を 知るために比率から推定したが,市川らの解析によれ ば,新潟の二酸化硫黄濃度における中国大陸からの輸 送量の寄与率は,冬季(11月)が約 60%~65%となっ





図-7 楽観的シナリオの 0-500m 層における濃度分布 (ppb)

表-5 中国からの冬期の寄与率

	解析 1		解析 2	
	新潟	つくば	新潟	つくば
現状	2.7%	1.9%	61.1%	20.4%

ており,解析手法の違いを考慮すれば,上記の推定結 果はほぼ妥当なものとなっている.

同様に,表-5に現状におけるつくばと新潟の寄与率 を解析1,2ごとに示している.まず,新潟とつくばを 比較すると,新潟の方が高い寄与率を示していること がわかる.また,放出地点の違いがある解析1(河北, 遼寧,上海,江蘇,山東)と解析2(北京,河北,山西, 遼寧,黒龍江)の比較では,解析2のほうが,高い寄 与率を示していることがわかる.このことから,太平 洋側より日本海側のほうが影響が大きく,放出される 地点によって寄与率に大きな影響を与えることが推定 された.また,表-6 にそれぞれのシナリオにおける新 潟とつくばの寄与率と沈着量の増加・減少割合を示す. 現状と悲観的シナリオを比較すると,中国からの沈着 量の増加は,現在の1.1~1.2 倍となり,楽観的シナリ オと比較すると,0.3~0.4 倍に減少すると推定された.

## 6. まとめ

本稿では,HYSPLIT4を用いた輸送シミュレーショ ンにより,中国からの酸性物質の放出・移流・拡散・沈 着の一連の輸送過程について検討した.冬季における 中国からの長距離輸送ついて,3ケースのシナリオのシ ミュレーションを行い,発生源寄与率の算定を通して モデルの妥当性を検証した.そして,解析1,2の結果か ら,冬季の本州での寄与率では遼寧省より北部の影響 が大きいと推定された.また解析2から,今後中国にお







図-9 つくばにおける SO2 濃度・沈着量の時系列変動

表-6 中国からの寄与率とケースごとの沈着量増加・減少率

	発生源寄与率		沈着量増加・減少割合		
	新潟	つくば	新潟	つくば	
現状	61.1%	20.4%	1.0	1.0	
悲観的	69.3%	23.1%	1.156	1.134	
楽観的	15.4%	5.2%	0.372	0.344	

いて環境対策が進展しなかった場合,中国からの沈着 量の増加は,現在の1.1~1.2倍と推定され,逆に環境 対策が日本並みに進展した場合,0.3~0.4倍に減少す ると推定された.

今後の課題としては,不確実性の高いパラメーター である放出量や放出時間等の検討や,温暖化等による 気象条件の変化に対する検討,そして,今回のシミュ レーションでは,10日程度の短期のシミュレーション であったことから,季節や年単位でのシミュレーション を行い,寄与率を算定することなどが挙げられる.

#### 参考文献

- 太田雅人,長谷部正彦,鈴木善晴:関東地方における酸性 降下物の分布特性の解析,水文・水資源学会2004年研究発 表会要旨集,pp.220-221,2004.
- 2)市川陽一,速水洋:東アジアを対象とした硫黄酸化物の長距離輸送モデルの評価,電力中央研究所研究報告T96044, 電力中央研究所,1997.
- 3) 久保田馨,松岡謙,藤原健史:酸性降下物による地球的規 模の環境影響に関する研究,第 59 回年次学術講演会講演 概要集,2004.
- 4) 井上雅路,大原利眞,村野健太郎:RAMS/HYPACT を用

いた東アジア域における硫黄酸化物の年間解析,大気環境 学会年会講演要旨集 No.44,2003.

- 5) 鵜野伊津志,大原利眞,森淳子,宇都宮彬,若松伸司,村 野健太郎:東アジアスケールの長距離輸送・変質過程の数 値解析,大気環境学会誌 Vol.32 pp. 267-285,1997.
- 6)市川陽一:酸性物質の長距離輸送,大気環境学会誌 第 33<</li>
  巻第2号,1998.
- 7) 宮本浩樹,佐藤正人,鈴木善晴,長谷部正彦:東日本にお ける移流拡散モデルを用いた酸性降下物の輸送メカニズム に関する研究,第62回年次学術講演会概要集,2007.
- 8) 宮本浩樹,鈴木善晴,長谷部正彦,松田慎介:移流拡散モ デルを用いた東日本における酸性降下物の輸送過程に関す る研究,水工学論文集第52巻,2008.
- Draxler, R. R. and A. D. Taylor : Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling, J. Appl. Meteorol., 21, 367-372, 1982.
- Draxler, R. R. : Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HY-SPLIT) Version3.0 User's guide and model description, NOAA Tech. Memo. ERL ARL-195, 1992.
- 11) Draxler, R. R. and G. D. Hess: Description of the HYSPLIT4 MODELING SYSTEM, NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 2004.
- 12) Andreas Stohl *et al.* : The FLEXPART Particle Dispersion Model, 2002.
- 13) 科学技術庁科学技術政策研究所 編:アジア地域のエネル ギー利用と環境予測,1993.

(2008.9.30受付)