

第 2 章

2

酸性物質の広域輸送

第2章 酸性物質の広域輸送 目次

粕江研究所大気科学部長 上席研究員 藤田 慎一
粕江研究所大気科学部 上席研究員 市川 陽一
粕江研究所大気科学部 主任研究員 速水 洋

2 - 1 東アジアの酸性雨の実態	21
2 - 2 長距離輸送モデル研究の現状	26
2 - 3 広域輸送の将来予測	28
コラム1：ミックス・アジア	31

藤田 慎一（8ページに掲載）



市川 陽一（1977年入所）
大気汚染物質の輸送に関する研究に従事している。酸性雨の研究では、広域輸送評価を担当した。これまで、発電所の環境影響評価のために、排ガス拡散予測手法や石炭粉じんの飛散量予測手法を開発した。



速水 洋（1990年入所）
気象学と環境化学の学際分野に携わってきた。現在は、窒素化合物を対象に、野外觀測と長距離輸送モデル開発に取り組んでいる。

2-1 東アジアの酸性雨の実態

2-1-1 はじめに

東アジア各国は1980年代に酸性雨のモニタリングを開始した。その結果、国ごとの状況はかなり判明したが、東アジア全域にわたる酸性雨の実態を把握するためには、統一手法によるモニタリングとデータ解析が不可欠である。こうした背景のもとに設立されたEANETは、2001年1月に活動を開始したばかりであり、現在のところ系統的な解析結果を報告するには至っていない。

ここでは数少ない統一手法によるモニタリングの一例として、1990年代の初頭に当研究所が中国、韓国、台湾の研究機関の協力を得て計18地点で行った結果に基づき、東アジアの降水化学の概要を紹介する。

2-1-2 降水組成の地理分布

降水がさまざまな溶存成分を含み、その濃度が地理的・時間的に大きく変動することはよく知られている。こうした溶存成分は、ふつう海塩起源と非海塩起源の二つに分けられる。海塩起源のなかで当量的に大きな割合を占めるのは、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- の各成分である。これに対して非海塩起源のなかで当量的に大きな割合を占めるのは、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- の各成分である。

溶存成分に占める海塩起源と非海塩起源の割合は、地域によって大きく異なる。たとえば北京や済南のような大陸の地点では、溶存成分の約85%が非海塩起源である。これに対して八丈島や奄美のような洋上の地点では、溶存成分の約85%が海塩起源である。濃度に降水量を乗じてフラックス（湿性沈着量）の形でみると、海塩成分の地理的な変動はきわめて大きい。これに対して、非海塩成分の地理的な変動は意外なほど小さい。

非海塩成分の発生源はさまざまであり、物質の種類に応じて、広域的なものや局地的なものが複雑に重

畳している。その全貌の解明は今後の課題であるが、広域的なものを大雑把に括ると、塩基性のカルシウム（粒子）の発生源はおもに大陸の乾燥地帯にある。アンモニア（ガス）の発生源は、おもに大陸の農業・畜産地域にある。 SO_2 （ガス）の発生源は、おもに黄海から渤海湾にいたる沿岸地域（人為起源）と日本列島の南西部（火山起源）とにある。 NO_x の発生源は、広域的な発生源は SO_2 とほぼ一致するが、局地的な発生源は大都市圏に集中する傾向がある⁽¹⁾。

前駆物質の発生源が中国大陸と人間活動とに類型化されることから、降水組成の質的な特徴を検討するとき $[\text{nss-SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-]$ と $[\text{nss-Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+]$ の値は、その起源や履歴を評価するうえでよい指標になる。農業環境技術研究所の鶴田治雄⁽²⁾は、前者を酸性化ポテンシャルAP、後者を中和ポテンシャルNPと定義して、日本、中国、北アメリカの降水の質的な違いを論じた。また国立公衆衛生院の原 宏⁽³⁾は $-\log[\text{AP}]$ を pAi と定義して、潜在的な酸性度の違いを論じている。

図2-1-1は、東アジアの各地点におけるAPとNPの年平均値の関係を示す。図中の実線は $-\log[\text{AP} - \text{NP}]$ の当値線であり、降水の酸性度を示す指標となる。こ

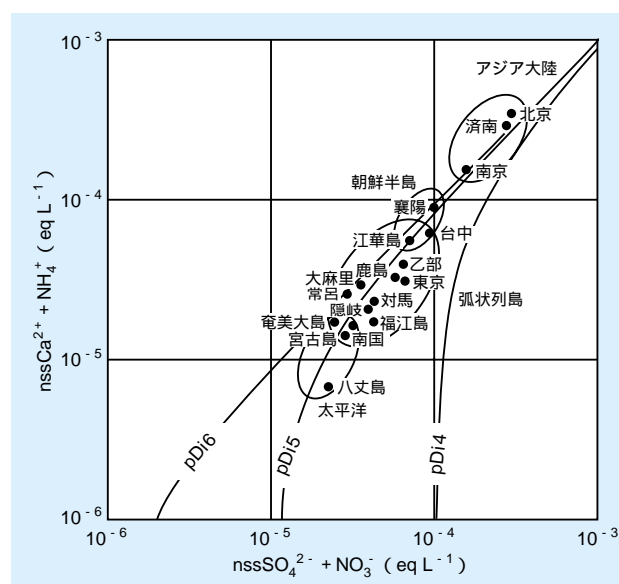


図2-1-1 東アジアにおける酸性化ポテンシャルAPと中和ポテンシャルNPの関係

の図から明らかなように、大陸北部にある北京や済南では、成分濃度の間に $NP > AP$ の関係が成立する。すなわち AP の値は高いが NP の値は相対的にさらに高い。これは人為起源の硫酸や硝酸を中和するのに十分な量のカルシウムやアンモニアが定常的に大気中に供給されており、雲内あるいは雲より下層で降水粒子に取り込まれていることを意味する。このため、アジア最大の SO_2 発生域の一つである山東半島の後背に位置するにもかかわらず、年間を通して酸性度の強い雨は降ってない。

一方、太平洋上にある八丈島や奄美では、成分濃度の間に $NP < AP$ の関係が成立する。すなわち AP の値は低いと NP の値は相対的にさらに低い。このため、主要な発生域から数百 km 以上離れているにもかかわらず、年間を通して相対的に酸性度の強い雨が降るようになる。

地理的にみて中国大陆と太平洋の間に位置する朝鮮半島では $NP > AP$ の関係が成立し、二つの値の大小関係は交互する。発生源からの距離に対する濃度の減衰率は、AP よりも NP の方が大きく、 NP/AP の値は中国大陆から北太平洋に東南に下るにしたがって次第に小さくなる。つまり、水循環を介した酸性化物質と中和物質の除去過程には時間的な差異がある。

図 2-1-2 は各地点における降水の pH の出現頻度分布

を示す。全 18 地点の年平均値は約 4.9 であり、最大値は済南 (pH 6.1) に、最低値は東京 (pH 4.5) に見出される。pH の出現頻度は、大部分の地点で単峰型の分布を示すが、中央値は中国北部で pH 6.0 ~ 6.5、日本で pH 4.5 ~ 5.5 にあるなど、分布パターンは地域的に異なる。ほぼ同じ経度上にある北京、済南、南京、台中の 4 地点の頻度分布をみると、緯度的に済南と台中の中間にあたる南京の頻度分布は、両地点の分布を重ねた双峰型のパターンを示す。これと類似した裾の広い頻度分布は朝鮮半島の西海岸にある江華島でもみられ、中国大陆の中部から朝鮮半島の西部の降水は、気象条件によって大陸性気塊と海洋性気塊の双方の影響を受けることが分かる。

東アジアの年降水量は、日本海の沿岸を特異点にして、東アジアの南東側で多く北西側で少ない分布を示す。台湾や日本の東海岸の降水量は 3000 mm yr^{-1} を越えるが、中国北西部の降水量は 200 mm yr^{-1} を下まわる。海域の降水量はよく分からない。東アジアの降水の成因はきわめて複雑であるが、溶存成分の湿性沈着量は、基本的に降水量と濃度の積で規定されるフラックスである。このため降水量 (海域で多い) と濃度 (大陸で高い) とが相殺される非海塩成分の湿性沈着量は、変動率が相対的に小さくなる。これに対して降水量 (海域で多い) と濃

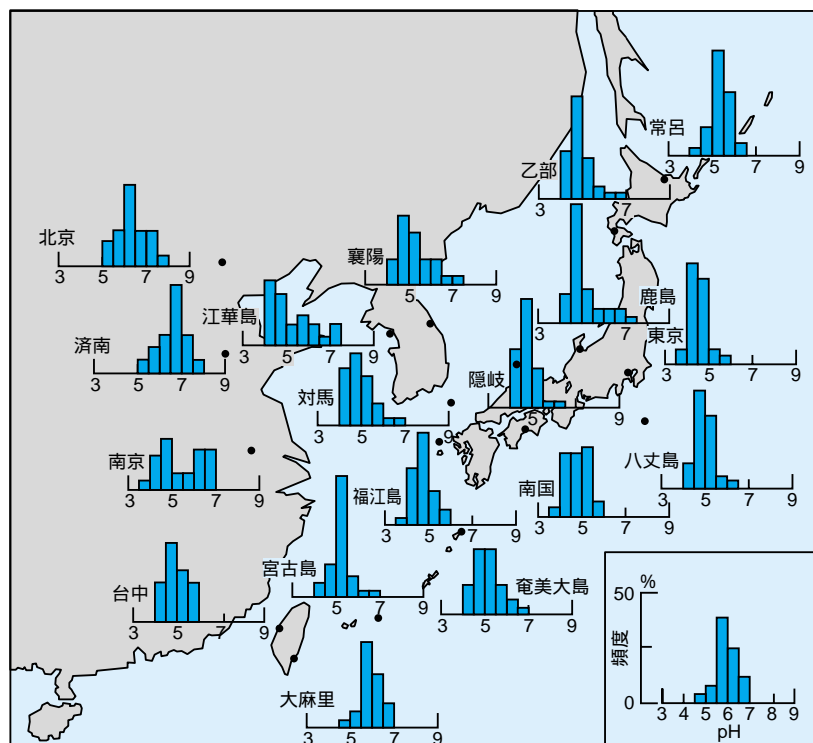


図 2-1-2 東アジアにおける降水の pH 出現頻度

度（海域で高い）とが重畳する海塩成分の湿性沈着量は、変動率が相対的に大きくなる。溶存成分の濃度のバランスでできる水素イオンの湿性沈着量も、結果的に変動率の大きな分布パターンを示す。このように非海塩成分の物質循環は、東アジア規模の水循環と密接に関係しており、これが当該地域における降水化学の特徴を形作っている。

2-1-3 降水組成の経年変化

1980年代の中ごろになると、国内の混乱が収束した中国でエネルギー消費量の増大が始まり、SO₂やNO_xの発生量は急激に増加するようになった。前駆物質の発生量の増加は、わが国の大気や降水に何らかの質的な変化を

もたらすのか？ 1990年代になるとこうした議論が活発に行われるようになった。

図2-1-3は西日本地域の6地点における1987～1996年の成分濃度（最大値、平均値、最小値）の経年変化を示す。降水の酸性度を支配するnss-Ca²⁺、NH₄⁺、nss-SO₄²⁻およびNO₃⁻の各濃度は、いずれも寒候季（10～3月）に高く、暖候季（4～9月）に低くなるのが分かる。過去10年間の変化をみると、観測事実としてNO₃⁻とNH₄⁺の濃度の増加は顕在化しており、この間の増加率は約45%に達する。これに対してnss-Ca²⁺濃度とnss-SO₄²⁻濃度は、経年的に横ばいであり、窒素化合物のような明瞭な変化は認められない⁽⁴⁾。

図2-1-4は西日本地域におけるAPとNPの月平均値

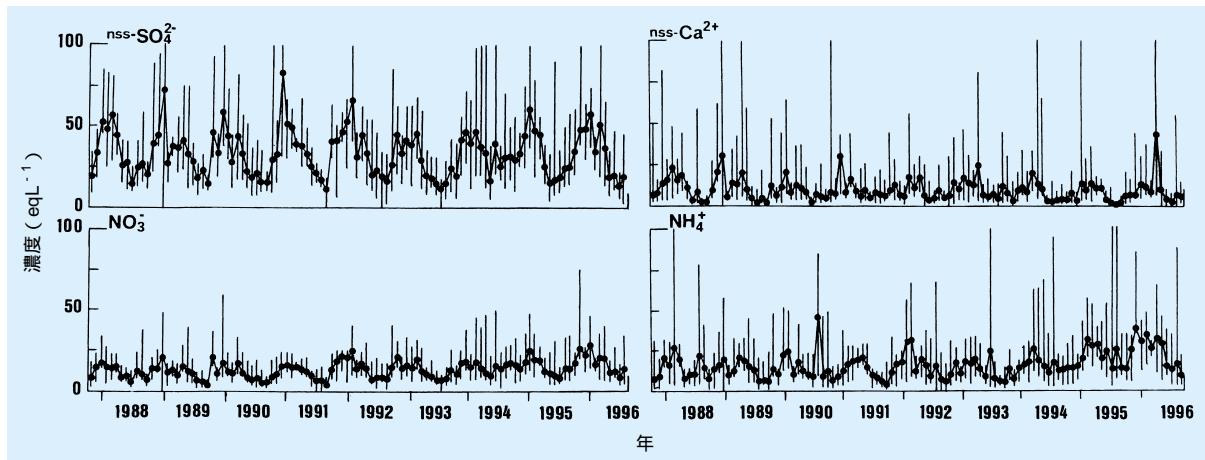


図2-1-3 西日本地域における降水中のnss-SO₄²⁻、nss-Ca²⁺、NO₃⁻、NH₄⁺の経年変化

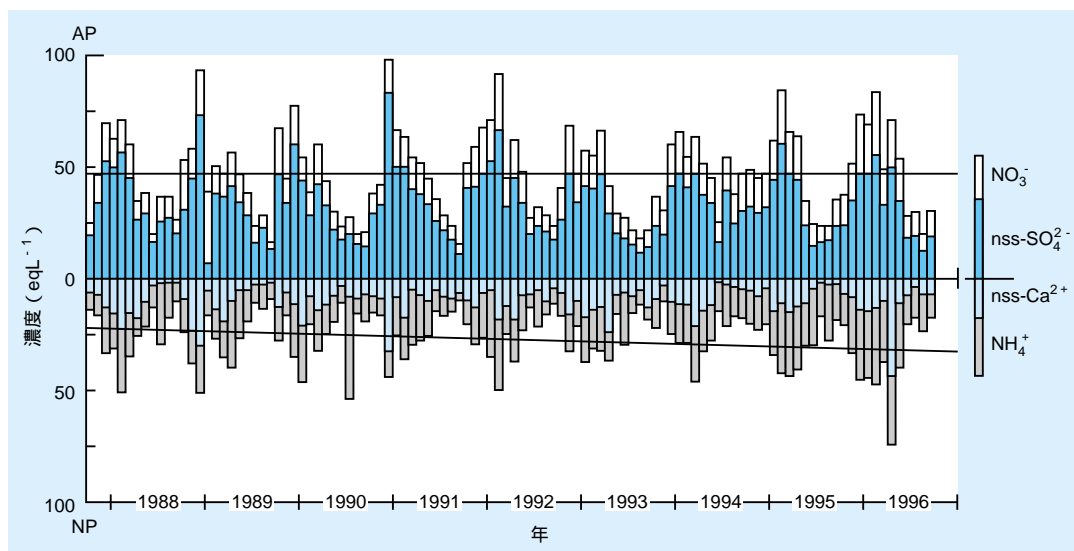


図2-1-4 西日本地域における酸性化ポテンシャルAPと中和ポテンシャルNPの経年変化

(降水量で荷重した6地点での平均値)の経年変化を示す。APとNPの値は、いずれも寒候期に大きく暖候期に小さくなることが分かる。APの値は季節間の差異が大きく経年的に横ばいである。これに対してNPの値は季節間の差異が小さく、経年的にやや増加している。その結果、西日本地域のNP/APの値は経年的にやや増加してきた。すなわちこの地域の降水の質は、NP/APの値が小さな海洋型から大きな大陸型へと漸進してきた。期間中の気象条件に大きな変化がなかったとすれば、こうした経年変化には、先駆物質の発生源の変化が関係している可能性が高い。

東アジア地域の生産活動は、近年、増大しており降水中の NO_3^- 濃度も増加している。にもかかわらずnss- SO_4^{2-} 濃度は横ばいで推移しており、明瞭な増加は認められない。その結果、西日本地域における $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 濃度比は、過去約10年間に27～51%の増加を示した。上記の6地点を包絡する三角形の領域のなかには活動中の7火山がある。当研究所の計算によれば、わが国の陸域におけるnss- SO_4^{2-} の湿性沈着量の20～30%は火山起源である。年間の SO_2 発生量が約360 GgS yr⁻¹と人為起源に匹敵する桜島の活動は、近年やや静穏化している。だが火山からの SO_2 の発生量が減少したことを裏付ける明確なデータは現在のところない。 $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$ 濃度比の単調な増加は、間欠的な火山活動の変動のみで説明することは困難であり、東アジアにおける NO_x 発生量の増加が深く関係しているものと推察される⁽⁶⁾。

降水の $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 濃度比は、一定の季節変化を示すものの、経年的にみればかなり一様である。つまり見かけ上、 NO_3^- の増加に見合うだけの NH_4^+ がほぼ定常的に降水中に存在している。これは、硝酸の中和に働くおもな物質がアンモニアであること、その発生量は経年的に増加していること、硝酸とアンモニアは類似した履歴をへて降水要素に取り込まれものであることを示唆する。つまり他の成分と同様に、海を越えたアンモニアの輸送はすでに顕在化していると考えてよい。

一般に降水中のアンモニアは、地表面に沈着した後、土壤微生物により硝酸に変換され、結果的には生態系の酸性化に寄与する。したがって東アジアで酸性雨の環境影響を考えるときには、大気系だけではなく、土壌・生態系も含めた総合的な評価が必要である。

2-1-4 日本列島における硫黄化合物の収支

観測データの蓄積が進むにつれて明らかになった重要な結論の一つは、冬季の日本海沿岸に多量の SO_4^{2-} が湿性沈着していることである。

硫黄化合物の起源や履歴を明らかにする方法はいくつかある。第1は観測データの解析である。たとえば、高濃度が観察されたときの気塊の履歴を分類して発生源の方向を推定する。第2は発生源に固有な物質の分析である。たとえば、硫黄や鉛の同位体比を大陸と日本の化石燃料中のそれと比較して発生源を推定する。第3は大気下層での物質収支の解析である。比較的広い地域で流入、流出、発生、沈着の各量を計算し、それらの加減により圏外からの流入を評価する。第4は長距離輸送モデルの解析である。輸送中に起こる物理・化学現象を計算機のなかで再現し、発生源の寄与を定量的に見積もる。本項ではこのうち第3の収支解析の結果を紹介したい。

いま日本列島に大きな仮定のボックスを重ねたとする。このボックスの中での硫黄化合物の濃度の時間的な変化率は、発生量、沈着量、流入量、流出量の和で与えられる。定常状態を仮定したとき、以上4つの和はゼロになる。ボックスの床面積は約720,000 km²であり、その約50%が海域、残りの約50%が陸域である。陸域の約70%が森林、約20%が水田や畑地であり、都市域の占める割合は5%以下にすぎない。

図2-1-5は収支解析の結果であり、1980年代後半の人為発生量、湿性沈着量、乾性沈着量、人為発生量に対する総(湿性+乾性)沈着量の比が114のメッシュと15の気候区別に集計してある⁽⁷⁾。

人為起源の SO_2 の発生量は、生産活動の指標などをもとに見積もる。推計された発生量は約435 GgS yr⁻¹で

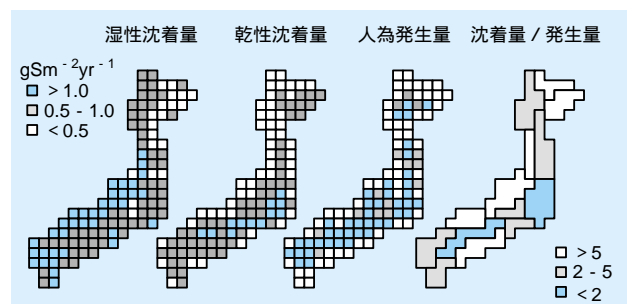


図2-1-5 日本列島における硫黄化合物の収支

あり、全量に占める固定源と移動源の割合はおおむね 80 : 20 である。発生源の分布をみると中央の山脈の南側、つまり首都圏から北九州にいたる沿岸地域に帯状に分布している。東アジア全域の発生量 (11.5 TgS yr^{-1}) に占めるわが国の割合は約 4 % である。

SO_4^{2-} の湿性沈着量は、降水濃度と降水量の観測データをもとに見積もる。推計された沈着量は約 620 GgS yr^{-1} である。日本海側の気候区では、寒候期の沈着量が年間の 2/3 を占め、また中央山脈の南側の気候区では暖候期の沈着量が年間の 2/3 を占める。全域を通年でみると暖候期と寒候期の沈着量の割合はほぼ半々である。

SO_2 (ガス) と SO_4^{2-} (粒子) の乾性沈着量は、大気濃度と沈着速度をもとに見積もる。地表面に近いある高さでは、乾性沈着フラックスはその高さでの濃度に比例すると考え、速度の次元をもつ比例定数を沈着速度で定義する。沈着速度には地表面の状態や微気象的な条件が含まれており、土地利用や風速分布など入手可能な情報を加工して計算する。推計された乾性沈着量は約 430 GgS yr^{-1} であり、全量に占めるガスと粒子割合はおおむね 90 : 10 である。

沈着量 / 発生量の比率は地域的に異なるが、この値が 4 以上の気候区は、みかけ上明らかに沈着量が過剰な領域である。こうした領域は沿岸地域への集中が著しい。これに対してこの値が 2 以下の気候区は、発生にほぼ見合う量の硫黄分が沈着している領域である。こうした領域は中央山脈の南側に集中している。日本全体をみると、沈着量 / 発生量の比率は約 2.4 となり、これは日本列島に沈着する硫黄化合物の全量はみかけ上、この地域からの発生量を 2 倍以上上まわることを意味する。

もちろんこうして推計には誤差を伴う。だが以上の計算から得られる重要な結論は、日本列島の全体をみれば沈着量は発生量を大きく上まわること、日本海側と太平洋側とでは収支の構造がかなり異なることである。定常状態を仮定すれば、日本海側でみられる過剰な硫黄化合物の起源は、天然起源の硫黄化合物、あるいは圏外からの流入のいずれかに求めなければならない。

天然起源の硫黄化合物として重要なのは、海塩起源の硫酸塩、火山起源のガス状硫黄、生物起源の還元態硫黄

の三つである。日本列島は世界有数の火山地域であり、活火山の総数は 83 を数える。1980 年代後半に噴煙活動がみられた火山には桜島、阿蘇山、諏訪之瀬島など 12 がある。火山起源の硫黄の発生量は約 500 GgS yr^{-1} と推計され、これは人為起源の SO_2 発生量に匹敵する⁽⁸⁾。中国大陸や朝鮮半島に活動中の火山はない。これらのなかで、1980 年代に最大量の SO_2 を放出した火山は、九州の南に位置する桜島である。生物起源の硫黄の発生量は明確でない。だが既往の海洋観測データなどから大胆に推計すると約 70 GgS yr^{-1} となり、火山起源や人為起源よりも相対的に小さいとみられる。

以上の推計から明らかなことは、天然起源の硫黄化合物のなかで、日本列島の硫黄の収支に最も大きく関係するのは火山活動だということである。現に火山の影響を考慮すると、発生量に対する沈着量の比率は 1 に近い値になる。だが、火山の分布は地理的に偏在しており、また噴煙の流出経路は季節的に大きく変化する。たとえば桜島をみると、暖候期には日本列島の上層へ向かう流れが優勢であるが、寒候期には太平洋上に流出する割合がきわめて高い。このため寒候期の日本海側でみられる高濃度の原因を、火山活動のみで説明することは風系的にみて困難である。

では、冬季の高濃度はどのように説明されるのだろうか。シベリア高気圧が優勢な寒候期に北西風によって日本海に押し出された乾燥気塊は、日本海を吹走する間に水蒸気の供給を受け対流不安定となる。この湿潤気塊は、日本列島の背骨をなす山脈に当たって強制上昇し、日本海側の北斜面に特異的に大雪をもたらす。卓越風によって海上に輸送された硫黄分はこの過程で降雪雲に取込まれ沿岸地域に湿性沈着する。海塩粒子の発生量は、海域の風速に直接関係するから、日本海域で発生した海塩起源の硫酸塩も、この過程で雲内あるいは雲より下層で降水粒子に取込まれ沿岸地域に湿性沈着する。硫黄分の一部を消失した乾燥気塊は、中央山脈を越えて太平洋側に流出する。沿岸地域でみられる沈着量と発生量の差は、定常モデルでもある程度の説明は可能である。だが、硫黄化合物の起源や履歴を定量的に評価するためには、長距離輸送モデルによる解析が不可欠である。

2 - 2 長距離輸送モデル研究の現状

2-2-1 はじめに

大気中の主要な酸性物質は硫酸と硝酸である。このうち硫酸とその前駆物質（以下、硫黄化合物）は、モデル化を行う上で扱いが比較的容易である。このため輸送モデルの研究は硫黄化合物を中心に進展してきた。一時期のモデル開発ラッシュはひと段落つき、発生源寄与評価などの解析結果もほぼ出揃った。現在はモデルの相互比較や長期トレンドの予測といった応用的な段階に入っている（2-3参照）。

当研究所はこれまで、アメリカのアイオワ大学、台湾電力公司／台湾大学と共同研究の体制を組み、モデルの相互比較を進めてきた。アイオワ大学との共同研究の成果はすでに報告済みである⁽⁹⁾。2-2-2では台湾電力公司／台湾大学とのモデル比較研究を紹介する。この共同研究は、より総合的なモデル比較研究であるミックス・アジア（コラム1参照）に引き継がれており、モデルの現状認識と性能向上が期待されている。

硝酸とその前駆物質（以下、アンモニアを含め窒素化合物と呼ぶ）を対象としたモデル開発は発展途上にある。窒素化合物は粒子化することで長距離輸送されるため、大気中の窒素化合物の形態（ガス、粒子）を予測することが不可欠である。2-2-3では当研究所における取り組みのなかから、硝酸・硝酸塩のガスと粒子相間の分配に関する研究を紹介する。

2-2-2 硫黄化合物の長距離輸送モデルの比較研究

当研究所と台湾電力公司／台湾大学は、それぞれのモデルを用いて硫黄化合物の輸送計算を行い、結果を相互比較する共同研究を実施した⁽⁹⁾。両機関のモデルの概要を表2-2-1⁽¹⁰⁾に示す。大きな違いはモデルの型と物理・化学過程の扱い方である。輸送計算は冬期（1993年1月中旬）と台湾の梅雨期（1993年5月下旬）を対象に行った。入力条件のうち発生源データは共通とした。気象データは、当研究所のモデルにはアメダス、高層気象などの観測データを数学的に補間したものを、時間・空間的に高解像度で多要素の気象データを必要とする台湾側のモデルには、地域気象モデルで計算した予測値を用いた。

対象期間に当研究所の酸性雨モニタリング地点で得られた観測値に対する計算結果を図2-2-1と図2-2-2に示す。硫黄化合物の大気中濃度（図2-2-1左・中央）については、両モデルともほぼ妥当な予測性能を持つことがわかった。台湾側のモデルは当研究所のモデルよりも予測濃度が若干低いものの、両モデルとも高濃度側で過小予測するなど予測傾向は類似した。この過小予測は、発生源データが60 km四方の平均値であるため、局所的な発生源の影響を考慮できなかったことが原因と考えられる。硫黄化合物の変質割合（= 粒子状硫酸塩 / 全硫黄化合物；図2-2-1左）については、変質過程を非常に簡略

表2-2-1 電中研と台湾電力／台湾大学の長距離輸送モデル⁽¹⁰⁾

名称	電中研 トラジェクトリー型長距離輸送モデル (TRJ)	台湾電力公司／台湾大学 Taiwan Air Quality Model (TAQM)
基本構造	トラジェクトリー型 風に沿って流れる気塊の濃度を計算	オイラー型 空間を三次元格子に区切って濃度を計算
対象物質	硫黄化合物	硫黄化合物、窒素化合物、他
気象場	観測データの単純内挿 上空の風、降水量	地域気象モデルMM5の出力 風、降水量、気温、水蒸気量、他
輸送拡散	二次元	三次元
湿性沈着	パラメタ化した雲内・雲下洗淨	液相化学、パラメタ化した雲内・雲下洗淨
乾性沈着	設定した乾性沈着速度	抵抗式による乾性沈着速度
気相化学	2化学種 (SO ₂ , 粒子状硫酸塩), 1反応式	63化学種, 157反応式

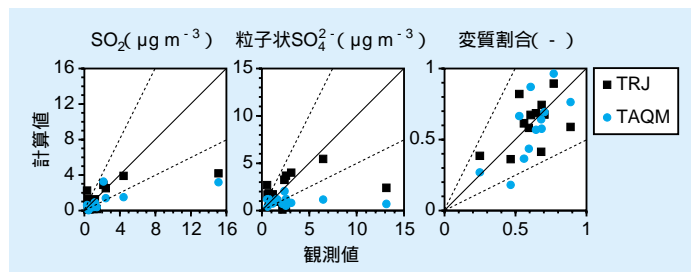


図2-2-1 観測値（1993年1月）と計算結果の比較

TRJは電中研モデル、TAQMは台湾側のモデルを示す。

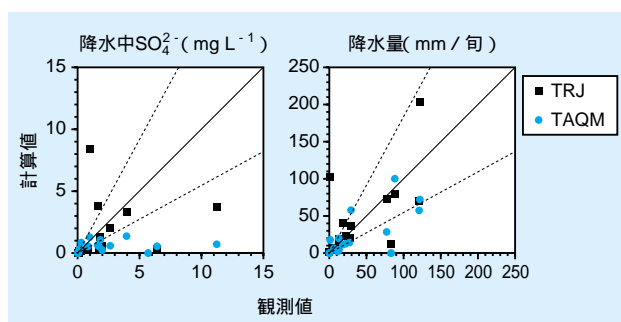


図2-2-2 観測値（1993年5月）と計算結果の比較

化した当研究所のモデル、および詳細に扱った台湾側のモデルともに観測値を良好に再現した。

これらの結果に比べて、降水中の硫酸イオン濃度（図2-2-2左）は予測精度が劣り、極端に予測が外れる地点も見られた。降水量（図2-2-2右）についても同様であった。降水中の硫酸イオン濃度は降水量の影響を大きく受けるため、その予測精度も降水量の予測精度に依存する形となった。

この共同研究ではほかにも計算を行い、硫黄化合物の旬平均濃度と旬間沈着量の予測値はモデルのタイプ（トラジェクトリー型とオイラー型）による違いが少ないこと、予測精度はむしろ空間解像度と降水量予測に影響されること、変質過程は簡略型でも十分に表現できることなどが明らかになった。

2-2-3 硝酸・硝酸塩のガス・粒子相間分配

硝酸・硝酸塩はガスあるいは粒子の形態をとる。両者の沈着特性は大きく異なるため、沈着量を予測・評価するには両者を分けて扱う必要がある。さらに粒子は粒径2.5 µmを境に、微小粒子と粗大粒子とで化学組成も大きく異なることが知られている。そこで当研究所は、3

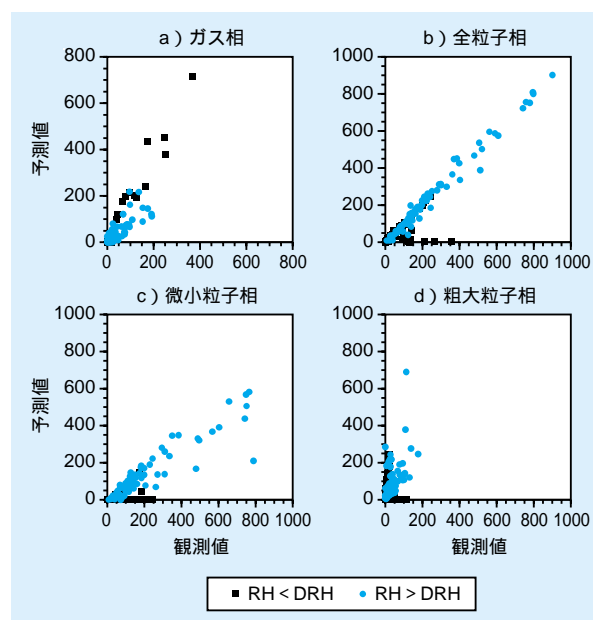


図2-2-3 微小・粗大粒子相がガス相と同時に平衡状態にあると仮定して予測した相別硝酸・硝酸塩濃度と観測濃度 (nmol m⁻³)

RHは湿度、DRHは硝酸アンモニウムの潮解点を示す。

相（ガス、微小粒子、粗大粒子）の硝酸・硝酸塩濃度を把握すべく、日単位の観測を通年で行っている。この観測では、上流側からインパクト、デニューダ、フィルターバックを組み合わせて、1ラインで3相を同時捕集できるサンプラーを用いている¹¹⁾。ここでは、時間解像度を日単位から3あるいは6時間に上げて東京都狛江市（当研究所の構内）で行った特別観測の解析結果を紹介する。

この特別観測は1998年2月と8月に行い、計150のサンプルを得た。このサンプルを対象に、微小・粗大の粒子相がいずれもガス相と平衡にあると仮定して解析した。平衡反応の計算にはEQUISOLV II¹²⁾を用いた。図2-2-3は相別に観測値と予測値を比較したものである。湿度が硝酸アンモニウムの潮解点以上の場合についてみると、

微小粒子相と粗大粒子相を足し合わせた全粒子相の予測濃度は、観測濃度とほぼ1:1の対応を示した。したがって、ガス相と全粒子相間の分配は良好に再現されたと考えてよい。その一方で、微小粒子相は高濃度側で過小予測し、粗大粒子相は全体的に過大予測した。粒子相全体では観測値をほぼ再現したのだから、微小粒子相の過小予測分が粗大粒子相として予測されたことになる。

実大気においては、ガス相と粒子相は必ずしも平衡状態にはない。だが、ガス状の硝酸が微小粒子表面へ到達する時間は通常秒から分のオーダーであり、ほぼ平衡状態にあるとみてよい。一方、粗大粒子は平衡までに数日を要する場合がある⁽¹³⁾。このため微小・粗大の粒子相がいずれもガス相と平衡あると仮定したのでは、硝酸が粗大エアロゾル相に速く移動してしまい、過大予測をもたらすことになる。

そこで、粗大粒子相はガス相と平衡に達していないと仮定してこれを系から除外し、ガス相と微小粒子相間の平衡計算を行った。結果を図2-2-4に示す。微小粒子相

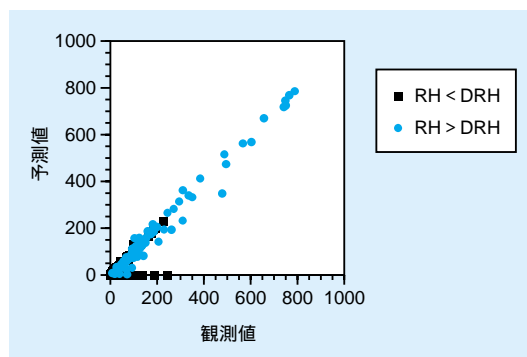


図2-2-4 微小粒子相のみがガス相と平衡状態にあると仮定して予測した微小粒子相の硝酸塩濃度と、観測濃度 (nmol m^{-3})
RHは湿度、DRHは硝酸アンモニウムの潮解点を示す。

への分配が良好に再現されるようになり、仮定の妥当性が確認された。この仮定は、先の仮定では適用範囲外であった湿度が硝酸アンモニウムの潮解点よりも低い場合にも適用できる。

2 - 3 広域輸送の将来予測

2-3-1 はじめに

アジアにおける越境大気汚染の解析結果が1992年にはじめて紹介されたとき⁽¹⁴⁾、そうした問題を議論する環境は整っていないという批判の声が一部にあった。しかしその後、多くの研究者が解析結果を報告するようになり(たとえば市川⁽¹⁵⁾)、最近では世界銀行の「RAINS-Asia プロジェクト」、国連開発計画・国連経済社会部の「北東アジアの越境大気汚染のモデリングに関する専門家会議」、オーストリアの国際応用システム分析研究所が主催した「アジアの大気汚染物質の輸送に関するワークショップ」(コラム1参照)のように、アジアでも国際的な議論の場が設けられるようになってきた⁽¹⁶⁾。

越境大気汚染の解析は、適切で効率のよい環境対策を考えるうえで必要不可欠である。高価な排煙処理施設を東アジア全域にすぐに導入することは不可能であり、大

気汚染が効果的に低減される地域を優先せざるを得ない。その場合、将来のエネルギー需要と排出抑制のシナリオのもと、酸性物質の沈着量がどのように増減するのかを容易に解析するツールが役に立つ。

本節では、当研究所が行った越境大気汚染の解析結果と将来予測の解析ツールを紹介する。

2-3-2 越境大気汚染の解析

当研究所では硫黄化合物の長距離輸送モデルとして、トラジェクトリー型⁽¹⁷⁾、⁽¹⁸⁾およびトラジェクトリーとオイラーのハイブリッド型⁽⁵⁾、⁽¹⁹⁾のモデルを開発した。これらのモデルの妥当性は、当研究所がわが国の21地点で取得した通年観測データとの比較により検証した。ハイブリッド型モデルで予測したわが国の硫黄沈着量は、観測値の80%強であり、多くの地点で両者はファクター2(1/2~2倍)以内で一致した。このようにモデルの予測

精度は高い。トラジェクトリー型モデルについては、乾性沈着量の予測結果はハイブリッド型モデルよりも多少低かったが、湿性沈着量については大差がなかった。

妥当性が確認されたハイブリッド型モデルを用いて、わが国に沈着した硫黄がどの国・地域から輸送されてきたのかを推定した。結果を図2-3-1に示す。ロシア、モンゴル、台湾の影響は、合計しても1%程度と小さく、この図には現れていない。日本全域で見ると、わが国の人間活動による影響が40%、火山の影響が20%、大陸の影響が40%を占める。寒候期は季節風の影響により日本海側で大陸の影響が80%を超える。

当研究所の予測結果は大阪府立大学²⁰⁾の予測結果と近いが、世界銀行²¹⁾とは火山と大陸の影響の点で、中国科学院²²⁾とは全体的に大きな差が見られた²³⁾。これらの相違の原因を探るため、長距離輸送モデルの比較計算プロジェクト「ミックス・アジア」が実施された(コラム1参照)。

2-3-3 酸性物質沈着量の将来予測解析ツール

当研究所は国際応用システム分析研究所と共同で、わが国における酸性物質沈着量の将来予測解析ツールTRAJEC(Trans-sea of Japan and East China sea system)を開発した。特徴は以下の通りである。

- ・将来の沈着量は、現状の発生 - 沈着関係(ある地域で発生した大気汚染物質がどこにどれだけ沈着するかを表す行列)と将来の排出量伸び率から計算する。
- ・対象物質は、現在のところ硫黄化合物であるが、窒素化合物についても近々組み込む予定である。
- ・対象期間は1990年～2030年である。排出量と沈着量の基準年は1995年である。
- ・Windows 95/98上で沈着量の計算、排出量・沈着量のマップ表示、排出・沈着データファイルの編集ができる。
- ・マップ上である地点を指示することにより、その地点の排出量、沈着量、影響を及ぼす地域などの数値情報が得られる。

硫黄の発生・沈着関係は、当研究所のトラジェクトリー型モデルで計算した。人為起源の排出量は現在得られる最新(1995年)の1度格子データを用いた。火山から

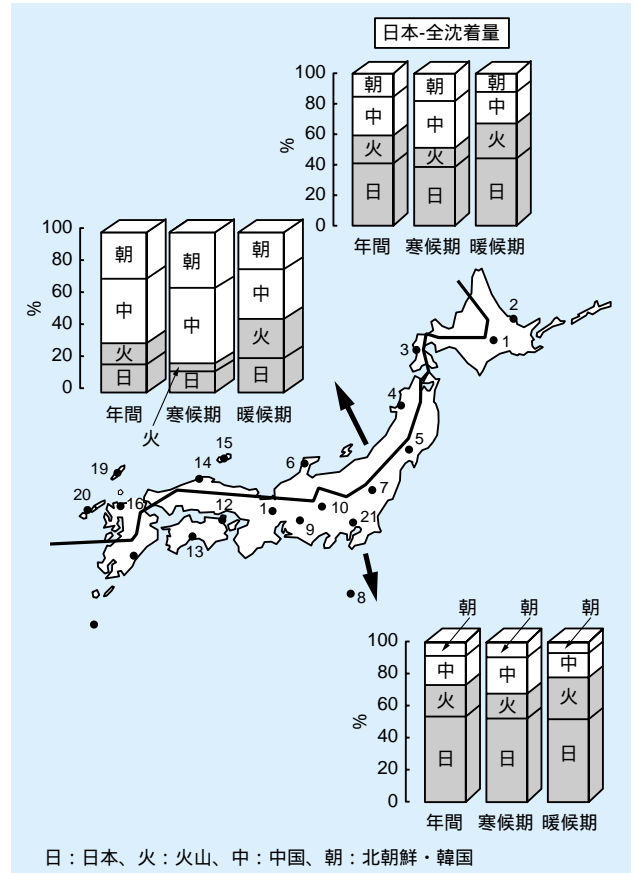


図2-3-1 わが国に沈着する硫黄化合物の発生源

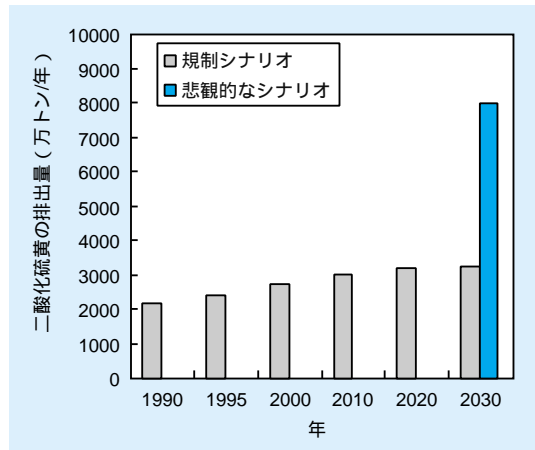


図2-3-2 東アジアの二酸化硫黄排出量の経年変化予測

の排出量も考慮した。列として与える発生源は東アジアの51小領域と火山から成り、行として与える沈着点は日本を1度間隔で区切った88格子点から成る。

図2-3-2は東アジアの二酸化硫黄排出量の経年変化を示す。この図の規制シナリオには、東アジア各国・地域の現状の規制が反映されている。つまり、日本にはすべ

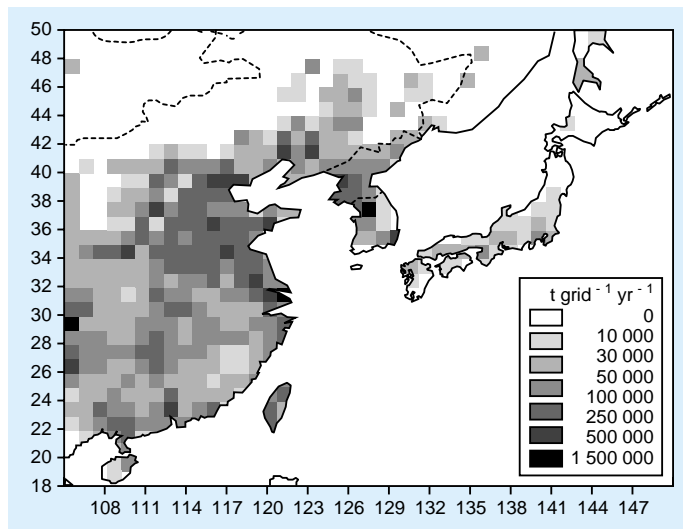


図2-3-3 2030年における東アジアの二酸化硫黄排出分布の予測

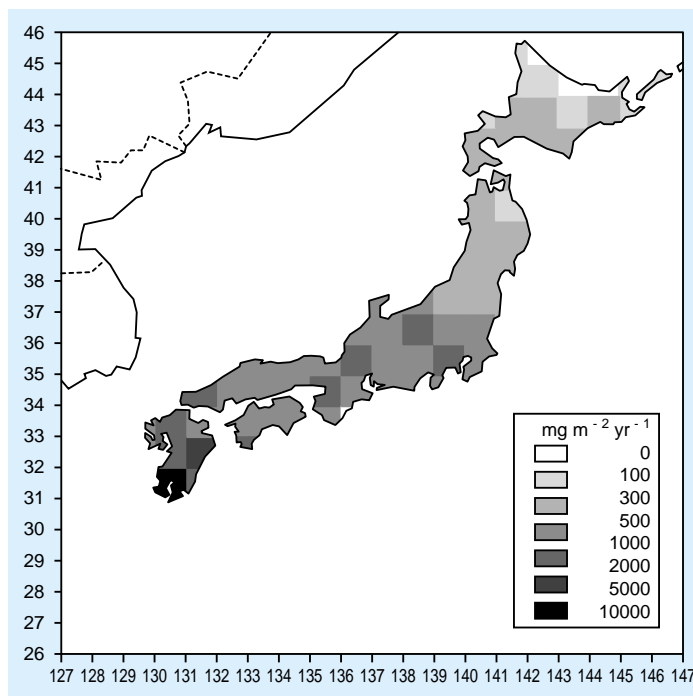


図2-3-4 2030年におけるわが国の硫黄沈着量分布の予測

ての産業部門で既設、新設を問わず高効率の湿式脱硫装置の導入と燃料の低硫黄分化を課し、韓国・台湾・香港にはすべての新設の燃焼プラントに高効率湿式あるいは同等の脱硫装置の導入と燃料の低硫黄分化を課し、中国には新設の発電所に対して地域の事情に応じて燃料転換や簡易脱硫装置の導入を課している。

現状規制シナリオにおける2030年の東アジアの二酸化硫黄排出量分布とわが国の硫黄沈着量分布をそれぞれ

図2-3-3、図2-3-4に示す。このシナリオでは、わが国の2030年の硫黄沈着量は1995年に比べて約20%増加した。中国の2030年のエネルギー消費量が1995年の2.7倍に、二酸化硫黄排出量が3.5倍になるといふかなり悲観的なシナリオ²⁴⁾では、日本海側で硫黄の沈着量が2倍になる地域が生じた。こうした硫黄沈着量の増加は、主に朝鮮半島の西にある渤海湾と黄海を囲む領域の排出量が増加することによる。

コラム1 ミックス・アジア

モデルによって異なる発生・沈着関係

1990年代はアジアを対象とした長距離輸送モデルの開発と越境大気汚染の解析が進んだ時代であった。日本、韓国、中国、台湾のみならず、欧米の研究者からもアジアの大気汚染物質の輸送に関する研究成果が多数発表された。しかし、発生・沈着関係に着目すると、結果に違いが見られる。長距離輸送モデルの妥当性は観測データをもとに検証される。ところが、妥当性を確認したモデルを用いて発生・沈着関係の評価しても、モデルによって結果が異なるという奇妙なことが起こる。この原因を探るため、研究者が一堂に会して計算結果の相違について議論する必要があった。国際応用システム分析研究所（IIASA^(注1)）と当研究所は、広域輸送評価の整合性をとることの重要性を認識し、「アジアの大気汚染物質の輸送に関するワークショップ」を開催した。

欧米亜から20を超える機関が参加

1998年7月、99年7月、2000年9月にIIASAで開催された。第1回会議では長距離輸送モデルの比較計算プロジェクト「ミックス・アジア」^(注2)の提案、第2回会議では比較計算結果の紹介^(注3)、第3回会議では比較計算の総括が行われた。会議参加機関のリストを表1に、第3回会議の参加者を写真1に示す。

モデルの整合性評価の大きな第一歩

当研究所は1995～1998年に台湾電力/台湾大学

表1 「アジアの大気汚染物質の輸送に関するワークショップ」の参加機関

国・地域	機関名
日本	電中研, 京都大, 山梨大, 東京大, 九州大, 気象研, 大阪府大, 酸性雨研究センター
韓国	科学技術研, 延世大
中国	科学院大気物理研, 同済大, 清華大
台湾	雲林技術科学大
米国	アイオワ大, プリンストン大, アルゴンヌ国立研, ジョージア工科大
欧州	イアサ, スウェーデン気象水文研, イタリア大気物理研

はミックス・アジアの参加機関



写真1 ワークショップの参加者

と共同研究を実施し、両機関の長距離輸送モデルによる比較計算を行った。ここで得られた成果^(注4)がミックス・アジアの下地になった。これをベースに、当研究所、アメリカ・アイオワ大学、九州大学が必要なデータを用意し、比較計算の始まりとなった。ミックス・アジアに対して、解析の事例数が十分でない、評価地点が日本に偏っているなどの指摘はあったが、参加した8つのモデルの計算結果から、「個々の結果には当然違いが見られるが、発生・沈着関係を含めて予測結果の大まかな特徴は一致している。例えば、二酸化硫黄の濃度分布のパターンやある地点の沈着量に影響を与える主発生源地域などは各モデルで似ている。また、モデルパラメータを極端な値にしなければ、予測結果の違いは、鉛直輸送の扱いなどモデルの構造に起因するのではないか。」ということが明らかになるいは示唆された。このような結果が得られたことは、モデル間の相違とその原因を明らかにするための大きな第一歩といえる。今後、ミックス・アジアが発展的に継続していくことを期待する。

注1：イアサ（IIASA: International Institute for Applied Systems Analysis）と呼ばれる非政府、非営利の国際研究機関。所在地はオーストリアのラクセンブルグ。エネルギーと技術、人口と社会、環境と資源などの問題が得意である。

注2：MICS-ASIA（Model InterComparison Study of Long Range Transport and Sulfur Deposition in East Asia）