

28. 長距離輸送解析ツール TRAJEC による酸性沈着量の将来予測

FORECAST OF FUTURE ACIDIC DEPOSITIONS USING AN ANALYSIS TOOL OF LONG-RANGE TRANSPORT (TRAJEC)

市川陽一*, 速水 洋*

Yoichi ICHIKAWA, Hiroshi HAYAMI

ABSTRACT; A tool for forecasting future acidic depositions in Japan was developed. This tool (the TRAJEC: TRAns-sea of Japan and East China sea system) projects the future regional energy supply, calculates the emission levels of sulfur dioxides (SO₂) and nitrogen compounds, and estimates the geographical pattern of acidic deposition resulting from these emissions. Future acidic depositions in Japan were forecast using the TRAJEC. Sulfur deposition through 2030 was calculated from the source-receptor matrix for 1995 and the growth rate of emissions for the source subregion. In the case of the current legislation (CLE) scenario, anthropogenic SO₂ emissions in East Asia would grow by 34% and sulfur deposition in Japan would increase 16% between 1995 and 2030. This increase of sulfur deposition over these 35 years is slightly less than the contribution of volcanic emissions to overall sulfur deposition in Japan. In the case of the hypothetical worst-case scenario for China, sulfur deposition in several site, facing the Sea of Japan would double by 2030. In the case of the CLE scenario, nitrogen oxides emissions in East Asia would grow approximately 50% and nitrogen deposition in Japan would increase approximately 30%.

KEYWORDS; acidic deposition, transboundary air pollution, East Asia, emission control, forecast

1. はじめに

酸性雨問題に関連して、東アジアを対象にした大気汚染物質の長距離輸送モデルの開発と越境大気汚染の現況解析は、20 世紀最後の 10 年間に飛躍的に進んだ。越境大気汚染の解析は、当該地域における適切で効率のよい環境対策を考えるために不可欠である。高価な排煙処理施設を、東アジア全域に短期間で導入することは不可能である。大気汚染の改善が効果的に現れる地域や生態系が脆弱な地域に影響を与える発生源から、優先的に環境対策を施さなければならない。このような環境政策を科学的に裏付けるベースとして、大気汚染物質排出対策の将来シナリオに対して、越境大気汚染の解析を行うことは有益である。本報告では、2030 年までの大気汚染物質の排出量予測結果と長距離輸送モデルにもとづき、越境大気汚染を容易に解析できるツールを開発し、設定したシナリオに対して将来の酸性物質の沈着量を予測した。

2. 長距離輸送解析ツール

わが国における酸性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。TRAJEC は、(1) WINDOWS (ハードディスク 26MB) 上で動き、2030 年までのわが国の硫黄と窒素の沈着量を予測する、(2) 沈着量予測のベースとなる発生・沈着マトリクスは、予測精度を確認した電力中

* (財) 電力中央研究所大気科学部

Atmospheric Science Department, Central Research Institute of Electric Power Industry

中央研究所（電中研）の長距離輸送モデルを用いて作成している、(3) 大気汚染物質の排出対策シナリオを選定したり、排出量やその地域分布を自由に变化させることにより、環境対策効果を把握できる、(4) 排出量と沈着量のマップや越境大気汚染の割合をスクリーン上で表示できるなどの特長をもつ。

図1にTRAJECの表示画面の例を示す。この画面は「現計画規制シナリオ」（3章で説明）のもとで予測した2030年における硫黄の沈着量分布を示している。上側の窓には、東経131度、北緯34度の硫黄沈着量が1094.7mg/m²・年であることが表示されている。画面の右中央には、二酸化硫黄排出のシナリオが表示され、現計画規制シナリオ(CLE)が選択されている。

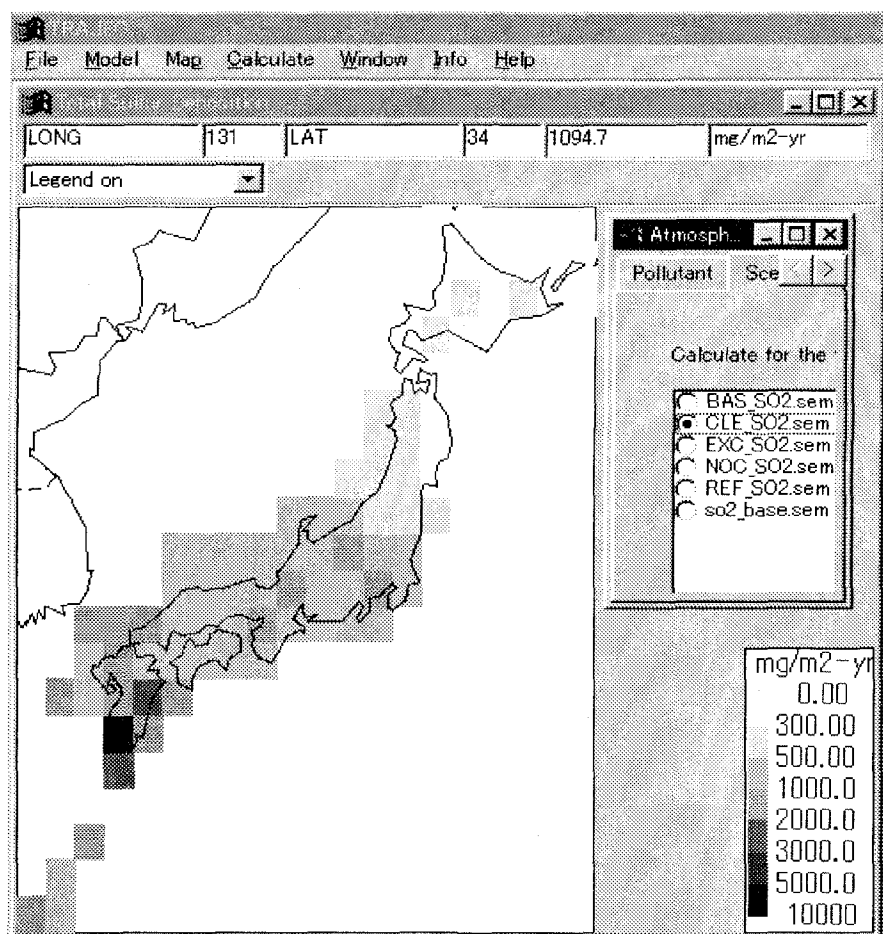


図1 TRAJEC の表示画面例（2030 年における硫黄沈着量分布）

3. 硫黄酸化物の沈着量の将来予測

3. 1 発生・沈着マトリクスの計算

長距離輸送モデルの計算領域および発生源領域は、北緯7度～50度、東経106度～157度である。発生源領域は、日本が6、中国が34（省あるいは大都市単位）、台湾、モンゴル、北朝鮮が各1、韓国が4、ロシア極東地域が5の小領域に分割された。これらに火山を加えた53が発生・沈着マトリクスの列の数になる。沈着量を求めた領域は日本に限り、全国を88の1度格子で分割した。これが発生・沈着マトリクスの行を構成する。

発生・沈着マトリクスは、電中研のトラジェクトリーモデル（市川ら，1994；Ichikawa et al., 1998）を用いて計算した。本モデルは、鉛直方向一層のバックトラジェクトリー型で、大気中の二酸化硫黄と大気、雲、降水中の硫酸イオンを扱う。気象場は、850hPaの高層風が気象庁提供のアジア域客観解析値から、降水量が気象庁提供のワールドデータから与えられた。人為起源の排出量は、Klimont et al. (2001)の1度格子値を用いた。火山起源の排出量は、藤田ら(1992)が見積もった1980年代の排出量を火山プルームの規模をもとに補正した。対象年は気象、排出量ともに1995年である。これまでの知見によると、本モデルは予測精度がよく、わが国の観測された硫黄沈着量の約80%を評価できる。

3. 2 大気汚染物質排出量の将来予測

まず、52の人為発生源小領域における二酸化硫黄排出量の2030年までの伸び率を推定した。TRAJECには5つのシナリオ（悲観的BAS、追加規制なしNOC、現計画規制CLE、経済改革REF、楽観的EXC、図1参照）が予め設定されているが、ここでは現計画規制シナリオと悲観的シナリオについて示す。

現計画規制シナリオCLE（Current Legislation）は、国際応用システム分析研究所が電中研とのプロジェクト

で提案したもので、本研究で対象とした全ての国と地域でエネルギー需要が継続的に伸びると考えている。1995年から2030年のエネルギー需要の伸び率は、年平均2%である。この間の年平均国内総生産の伸び率は、最も高い中国で6.3%、日本が3.1%、最も低い北朝鮮で2.0%である。東アジア（括弧内は中国）における2030年のエネルギー需要の見通しは、石炭の使用が高く41%（47%）、石油の割合は27%（20%）、天然ガスは12%（12%）、残りが水力、原子力他である。大気汚染物質の排出量制御については、現時点で計画されている規制は保証されるとする。日本では、発電部門、産業部門の全ての既存、新規燃焼プラントに、高効率の排煙脱硫装置が導入される。韓国、台湾、香港では、全ての新規の大規模燃焼プラントに、高効率の排煙脱硫装置あるいは同等の設備の導入が要求される。中国の発電部門については、低硫黄分地域では洗炭や簡単な炉内脱硫、高硫黄分地域では湿式石灰洗浄が必要である。表1に各国・地域の二酸化硫黄排出量、図2(a)に2030年の二酸化硫黄排出量分布を示す。

中国からの二酸化硫黄排出量については議論が多い。中国の二酸化硫黄排出量はかつて予想されたほど増加していないのは事実のようだが、今後、削減の方向で進んでいくという中国国家環境保護局の報告がある一方、実態に不確かなところが多く、減少傾向が継続するかどうかは疑問という意見がある。そこで、近年の中国の経済減速が回復に転じ、環境政策がうまくいかない場合を想定して、現時点では仮想的な「悲観的シナリオ」を設定した。これは、電中研の中国省別エネルギー・大気汚染物質排出モデル（杉山，2000）で想定した多数のシナリオの一つである。悲観的シナリオは、経済も二酸化硫黄汚染も現在の趨勢のまま際限なく増大し続ける仮想的な「なりゆき」シナリオであり、分析の出発点となることから、BAS (Base) と命名された。

悲観的シナリオBASは、想定できる範囲で、二酸化硫黄の排出量が意図的に高くなるように設定された。経済成長率は年8%を超え、各省のエネルギー需要構造は、過去に日本がたどった道を概ね踏襲する。これは、全ての産業部門で石炭から石油への転換、特に、重工業における高硫黄重油への転換が進むことを意味する。2030年における中国のエネルギー消費の構成は、石炭24%、石油46%、天然ガス19%、残りは水力、原子力他である。硫黄排出削減政策は全くなく、海岸地域と内陸地域の経済的格差が続く。ひかえめな人口増加と経済成長にともなう大きなエネルギー効率の改善はあるが、これらだけで大気汚染物質の排出が抑制されるものではない。このような仮定のもとでは、石炭に加え、硫黄分が3%という高硫黄重油から、対策のないまま二酸化硫黄が大量に排出される。悲観的シナリオは、中国政府が環境保護政策を積極的に進めれば起こり得ないが、それが失敗したときの影響を警告の意味でみるために必要である。本シナリオで推定した中国の二酸化硫黄の排出量が表1に記載されている。図2(b)は2030年の排出量分布である。なお、中国以外の排出量は現計画規制シナリオと同じである。

表1 1995年と2030年の二酸化硫黄の排出量（単位：1000 t/年）

	日本	モンゴル*	ロシア*	北朝鮮	韓国	中国*	台湾	小計	火山**
1995年	957	38	230	256	1085	21061	494	24121	
現計画規制 2030年	823	94	276	1467	2035	26841	797	32333	1000～1500
悲観的 2030年						74434		79926	

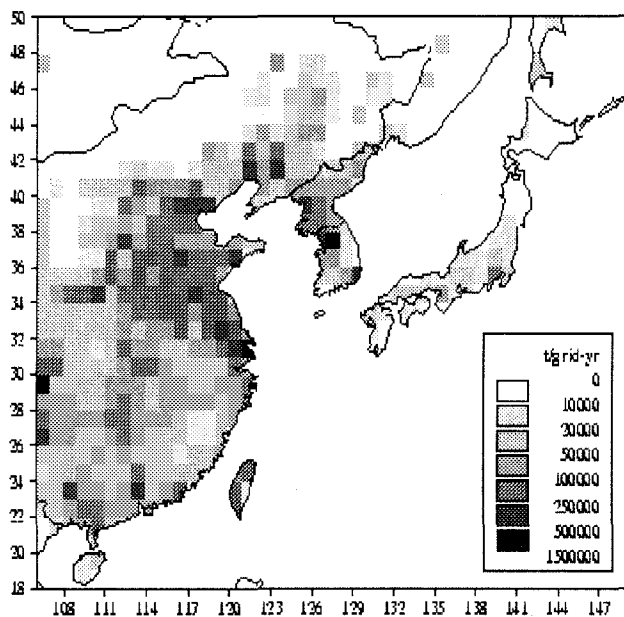
*：本研究で対象とした領域分，**：1990年代の幅（1995年の推定値は1281×1000 t）

3. 3 沈着量の将来予測結果

2030年におけるわが国の硫黄の沈着量を1995年の発生・沈着マトリクスと排出量の伸び率をもとに、TRAJECを用いて計算した。図3は現計画規制シナリオと悲観的シナリオの硫黄沈着量を1995年から2030年への増加率で示している。

現計画規制シナリオについて、日本全域で見ると、1995年と2030年の間に16%、0.10g/m²・年の硫黄沈着量の増加がある。この値は、火山起源の沈着量0.15～0.22 g/m²・年（90年代の火山からの排出量100万～150万tの幅に対応、2000年8月末以降は三宅島の影響で排出量はかなり高い）より少し小さい。格子レベルで見ると、

(a) 現計画規制シナリオ



(b) 悲観的シナリオ

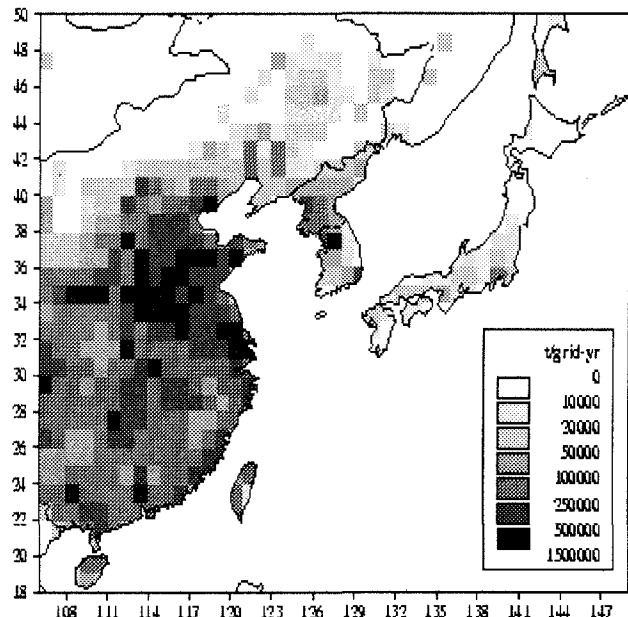
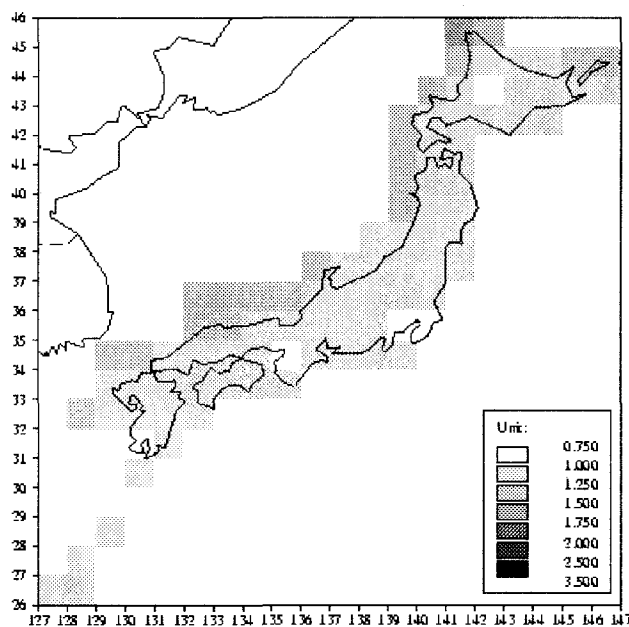


図2 2030年における人為起源の二酸化硫黄排出量分布(トン/1度格子・年)

(a) 現計画規制シナリオ



(b) 悲観的シナリオ

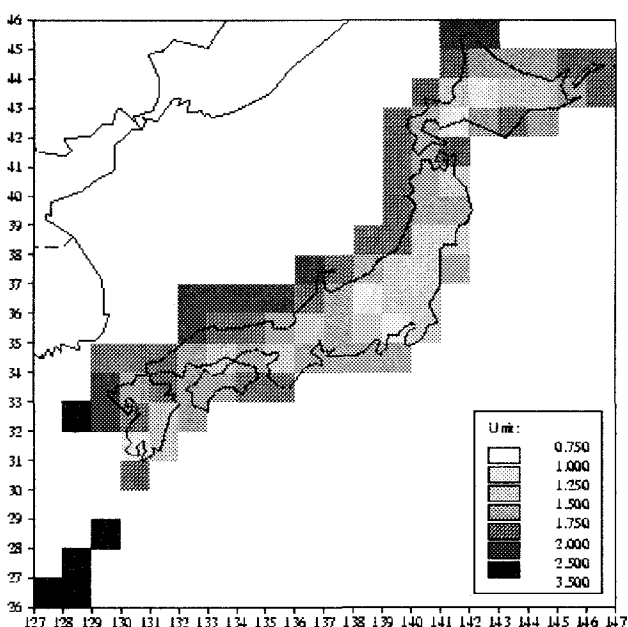


図3 2030年と1995年の硫黄沈着量の比

日本海側の地域で増加率が高く、最大で1.5倍である。悲観的シナリオでは、日本全域で見ると、1995年と2030年の間に73%、 $0.48\text{g/m}^2\cdot\text{年}$ の硫黄沈着量の増加が生じる。日本海や東シナ海に面する地域では、2倍を超える増加率になっている。日本海に面する地域の硫黄沈着の増加は、朝鮮半島の西の海域(渤海, 黄海)を囲む地域の二酸化硫黄排出量の増加によるものである。この地域の影響に比べれば、経済発展と排出量の増加が予想される中国東部海岸地域の影響は小さい。なお、中国で所得水準に応じた排出対策が実施され、脱石炭が加速

されて天然ガス、原子力、再生可能エネルギーの導入などが進んだ結果、二酸化硫黄の排出量が20%以下になるというかなり楽観的なシナリオを想定すると、2030年の日本の沈着量は20%減少する。

4. 窒素化合物の沈着量の将来予測

TRAJECは窒素化合物も扱うことができる。しかし、硫黄酸化物と比べて、一般的に排出量の推定や長距離輸送モデルの開発が遅れていること、排出量と沈着量の間に線形性を仮定することが困難なことから、改善の余地が残っている。しかし、本報告では、現計画規制シナリオについて将来予測を行った。

窒素化合物（窒素酸化物、揮発性有機化合物、アンモニア）の排出量はKlimont et al.(2001)によった。彼らは将来の排出制御として以下の対策を考慮している。まず、窒素酸化物について、全ての国・地域で、新規の大型ボイラーに対して、燃焼改善策をとる。既設備の改装スケジュールは国・地域と環境規制の厳しさによる。例えば、日本では排出基準に適合するため、新設、既設を問わず選択接触還元法が必要となる。車からの排出については、日本、韓国、香港、台湾では、少なくとも欧州共同体の1996年規制と同じくらい厳しい。そのため、ガソリン車は最新の触媒コンバータ、ディーゼルエンジンはより進んだ燃焼改善が要求される。中国でも、最近、新しい排出基準が提案され、2010年までに徐々に発効していく。

日本、香港、台湾、韓国における2030年の揮発性有機化合物の排出制御として以下を考慮した。2サイクルガソリンエンジンの全ての車種に触媒装置の導入と蒸発制御がなされる。乗用車には蒸発損出を減少させるために厳しい基準が設定され、ガソリン販売網への対策が行われる。日本以外の国でも、新規の精油所はフレアリングに加えて、漏洩監視・維持計画や油液分離器の密閉化によって、蒸発損出と工程損出を抑制する厳しい基準に対応させる。中国、北朝鮮、モンゴルについては、揮発性有機化合物排出対策は想定しない。アンモニアの排出制御については、規制の情報がないため、全ての国で対策なしとした。現計画規制シナリオのもとでは、東アジア地域の窒素酸化物、揮発性有機化合物、アンモニアの排出量は、1995年～2030年の35年間で順に1.5倍、3.1倍、1.7倍になる。

わが国の窒素沈着量は速水(2001)の輸送モデルにより求めた。窒素化合物の輸送モデルは、硫黄酸化物と同じバックトラジェクトリー型であるが、2000mの鉛直層を地上から50、300、1000mを境に4層に分けた。気象データは、アメリカ海洋大気局の環境予測センター(NCEP)の再解析データを使用した。ただし、わが国の降水量は、アメダスの時間値データに置き換えた。使用した気象データは1995年のものである。気相化学反応系は、窒素酸化物-オゾンの光定常反応系、PANの生成・解離反応、硝酸の明・暗反応からなる。二酸化硫黄から硫酸塩の生成過程は、硫黄酸化物のモデルと同様に扱っている。エアロゾル化学は、硫酸アンモニウムの生成反応、硝酸アンモニウムと塩化アンモニウムのガス・エアロゾル平衡反応、硝酸と海塩の脱塩素反応を考慮している。計算には窒素化合物の人為発生源以外に、火山からの二酸化硫黄、自然起源のアンモニア、人為起源の塩化水素を考慮している。硝酸塩について本モデルの結果と観測値を比較すると、大気中濃度は観測値と1対1に対応する割合が高く、降水中濃度は半分未満に過小予測する傾向があった。

図4は2030年と1995年の硝酸塩沈着量の比を2月について求めた結果である。8月についても同様の結果が得られている。日本全体で見ると、35年間に沈着量は2月に36%、8月に30%増加した。地域的には日本海側で増加の割合が高く、最大50%の増加を示す地点（格子）があった。

5. まとめ

わが国の酸性沈着量の将来予測を行う解析ツールTRAJECを開発した。TRAJECの結果によると、現計画規制シナリオでは、東アジアの人為起源の二酸化硫黄排出量は、1995年から2030年の間に34%増加し、わが国の硫黄の沈着量は16%増加する。この沈着量の増加分は火山からの寄与より少し小さい。増加率の高い地域は日本海側の地域で、35年間に最大1.5倍になる。仮想的な悲観的シナリオでは、日本全域の沈着量は73%増加する。

窒素化合物の将来予測は、硫黄酸化物と比べて、発生量の推定や変質、除去過程のモデル化が難しいが、現計画規制シナリオについて将来予測を行った。本シナリオでは、東アジア地域の窒素酸化物の排出量は、1995年～2030年の35年間で約50%増加し、日本全域の沈着量は約30%増加した。中国における自動車台数の伸びや遅れ気味の窒素酸化物の排出源対策によって、窒素沈着は硫黄沈着に増して重要な問題である。電中研のデータによると、1987年～1996年の間に、降水中の硫酸イオンに対する硝酸イオンの濃度比、降水中の硝酸イオン濃度とアンモニウムイオン濃度の和が増加した。今後、発生源データや輸送モデルを一層向上させて、窒素沈着の将来予測を行うことが肝要である。

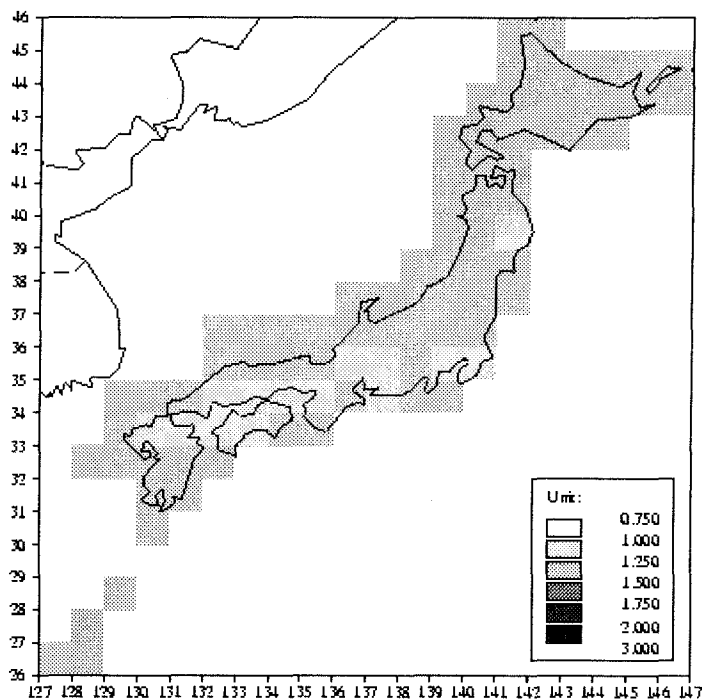


図4 2030年と1995年の硝酸塩沈着量の比
(2月、現計画規制シナリオ)

わが国の森林土壌に対して、電中研の試算では、現状の倍程度の酸沈着は許容される。

また、わが国における酸性雨による生態系影響

について、環境庁(2000)は「現在のような酸性雨が今後も降り続けるとすれば、将来酸性雨による影響が顕在化する可能性がある。」と述べている。現計画規制シナリオの結果は、硫黄や窒素の沈着量が50%近く増加する地点があることを示している。悲観的シナリオでは、酸性物質の沈着量が2倍を超える地域がある。生態系影響については本報告の範囲を超えるが、酸性沈着の将来予測結果をもとに議論を進めることが重要である。TRAJECは排出量やその地域分布を変化させて酸性沈着量を求めるためのツールで、発生源の対策効果の検討などに有効に活用できる。

本研究は電中研と国際応用システム分析研究所(IIASA)のプロジェクト「東アジアの広域環境問題に関する総合評価」の一環として実施した。IIASAのMarkus Amann, Zbigniew Klimont, Wolfgang Schöpp, 電中研の藤田慎一、杉山大志の各氏には多大な尽力を頂いた。心よりお礼申しあげる。

参考文献

- 市川陽一、藤田慎一、池田有光：東アジア地域を対象としたトラジェクトリー型モデルによる硫酸イオンの湿性沈着の解析，土木学会論文集，No. 497/II-28, pp.127-136, 1994
- 環境庁編集：環境白書平成12年版総説，p226, 2000
- 杉山大志：中国の長期エネルギー環境戦略—CPEモデルによる「経済改革シナリオ」の分析—，電中研研究報告書 Y99015，電力中央研究所，2000
- 速水洋：わが国における窒素化合物の沈着量評価手法の開発，電中研研究報告書 T00046，電力中央研究所，2001
- 藤田慎一，外岡豊，太田一也：わが国における火山起源の二酸化硫黄の放出量の推計，大気汚染学会誌，Vol. 27, pp.336-343, 1992
- Ichikawa, Y., Hayami, H. and Fujita, S: A long-range transport model for East Asia to estimate sulfur deposition in Japan, J. Appl. Meteor., Vol. 37, pp.1364-1374, 1998.
- Klimont, Z., Cofala, J., Schöpp, W., Amann, M., Streets, D. G., Ichikawa, Y. and S. Fujita: Projections of SO₂, NO_x, NH₃ and VOC emissions in East Asia up to 2030, Water, Air and Soil Pollution, 2001 (in press).