

(21) 人為起源の硫黄酸化物による地球規模的な環境影響について

Future Projection of Global Anthropogenic Sulfur Emission and its Environmental Effect

松岡 譲[†]

Yuzuru MATSUOKA[†]

Abstract — On global environment impact by acid precipitation, this paper projected anthropogenic sulfur dioxide emission by the end of next century, and discussed on its environmental effects. Comprehensive global environmental model, now we are developing, was applied in order to give quantitative aspects of the analysis. The amount of anthropogenic sulfur emission is ranged from 59TgS/y to 800TgS/y by the end of next century, corresponding to the prescribed social and economical scenarios. Land area where 22% ~ 40% of total world people live is influenced from the view point of soil alkalinity depression. Population and economic growth variations, degree of eagerness of energy efficiency improvement as well as the direct effort on emission reduction greatly influence on the future global environment.

Keywords: Global Environment, Acid Precipitation, Energy Problem

1. はじめに

現在、地球温暖化、オゾン層の破壊、酸性雨等の地球環境問題が大きくクローズアップされ、政治・経済上の大きな課題となっている。なかでも、酸性雨問題は、局所的なスケールから地球的なスケールの幅広い問題を含んでおり、他の地球環境問題に比べ、異なった様相を示す。影響の空間的スケールは、徐々に広域化しつつある。いままでも、ヨーロッパや北米では、森林、湖沼、建造物および遺跡などへの被害が報告され、それに対する国際的な取り組みが行われつつある。アジアにおいても、中国からの酸性雨原因物質のわが国への影響が懸念されているが、同様の現象が、東南アジア諸国、アフリカあるいは中南米のように、今後、著しい経済発展が見込まれる地域において、いつ顕在するか、また、その程度と対策との関連性はどうかを理解しておくことは、きわめて重要な課題である。

この論文では、人為起源の酸性降下物、特に、硫黄酸化物の地球的なスケールでの環境影響を長期的な立場から検討する。検討の方法としては、数理モデルによる既往の情報、知見の集約化とそのプロジェクションである。同様の試みとしては、欧州では、Alcamoら(1990)によるRAINSモデルが著名であり、世界銀行及びアジア開発銀行(1991)によりアジアへの適用の試みも提案されている。しかるに、これらの試みは、それなりのモデルリアリティーを保持するものの、地域的な適用に限定されている。地球規模的な観点からは、大つかみではあるが、より長期・広域的な視野に立った見通しを得る必要があると考える。

ここで取り扱う対象物質・プロセスは、人為起源の硫黄酸化物であり、その発生、大気中での輸送・変換、降下および土壌中塩基成分の溶脱を考慮する。対象地域は、全世界であり、来世紀末までを検討期間とする。取り扱い範囲を、このように限定することにより、実際の現象に良く添ったものではなくなるが、その範囲内においても、酸性雨問題に関する上に述べたような見通しを、ある程度は、推定できると考えている。

2. 検討のフレームと支援データ群

本論文で対象とする期間は、1960年~2100年である。そのうち、1985年までをモデルパラメーター等の検定にあてる。それ以降は、あらかじめ設定した社会・経済シナリオに基づき、汚染物質排出活動が行われるものとする。対象領域は世界全域であり、作業領域単位としては、データに応じ、緯度1度経度1度メッシュから世界19領域までを使い分ける。

図-1に本論文で使用了検討フレームを示す。硫黄酸化物排出プロセス、大気輸送プロセス、土壌プロセスのサブモジュール及び各プロセスの情報管理を支援するモジュールから構成されている。以下に、各プロセスの解説を行う。

3. 硫黄酸化物排出プロセス

硫黄酸化物の排出源は、天然排出源と人為排出源に分けられる。人為排出源としては、硫黄分を含有した化石燃料の燃焼、非鉄金属の精錬などがある。天然排出源としては、火山の噴火、有機物の腐食、海洋からのDMSなどが挙げられる。IPCC(1992)による最近

[†] 京都大学工学部 Faculty of Engineering, Kyoto University

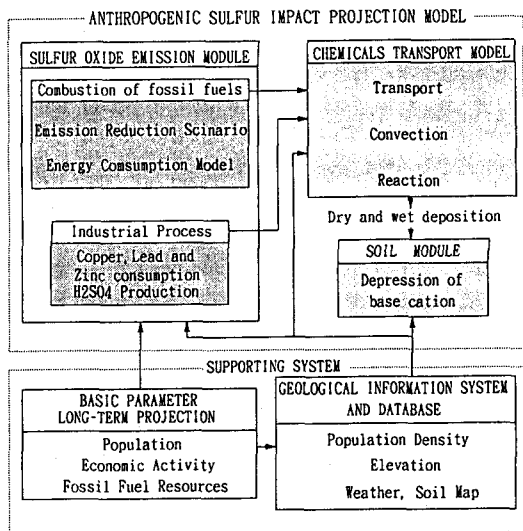


図-1 本論文で使したモデルの検討フレーム
Framework of this study

の推定では、人為起源と天然起源の硫酸化物排出量を、それぞれ70TgS/y及び30.5TgS/yとしており、人為起源の割合がかなり多い。また、この論文では、主たる関心事を、人為起源排出量の変化による環境への影響にあてており、対象排出量をとりあえず人為起源に限定する。人為排出源には、燃料燃焼によるものと、硫化鉱物の精錬、硫酸の生産などの工業活動の2つがあり、各々について考慮する必要がある。燃料燃焼では、石油及び石炭の燃焼が重要であり、天然ガス燃焼はこれに比べると無視して良い。燃料消費量から積算することとし、1985年以前の排出原単位としては、各種資料から、石油には0.176TgS/EJ、石炭には0.512TgS/EJを採用することとした。図-2は、この方法で算定した1960年～1985年付近のOECD各国の排出量と各国の報告値の比較であり、1970年以降の日本、米国及び西ドイツを除き、ほぼ一致した。適合が悪かった3国については、1970～1985年の期間について、0.12～1の排出削減係数を乗じて国報告値とほぼ合致する排出量を得るようにし、それ以外の国に関しては上記の排出原単位による発生量が排出されるものとした。エネルギー消費量は、世界をほぼ220国・地域に分割し、1960～1985年の各年について、国連エネルギーデータベース(U.N., 1991)をもとに、各地域毎の固体、液体燃料燃焼量を算定した。1985年以降のエネルギー消費量、エネルギーミックス及び排出原単位については、社会・経済的シナリオを定め、それに基づいてモデル計算を行った。シナリオを左右する基本量としては、人口変化、経済成長率、化石燃料資源量、エネルギー効率改善努力及び排出抑制対策を取り上げた。これらの量をもとに、これを世界エネルギー需給に関

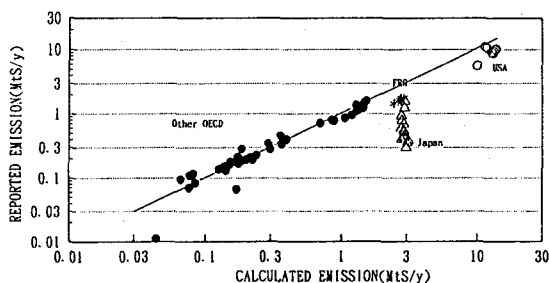


図-2 化石燃料からの硫酸化物排出量算定方法の検討
Verification of calculating method of sulfur
emission from fossil fuel

する部分均衡モデルであるエドモンズ・ライリーモデル(ERM, Edmondsら, 1985)を修正したモデルにより、1985年～2100年の硫酸化物排出量を算出した。従来のERM(Vr.2.5)に比べ、本検討で使用したモデルの主な変更点は、次のとおりである。

- 1) 需給均衡計算年として、1985年から2025年までは5年毎に、それ以降は25年毎とした。
- 2) 領域区分を19領域(日本、米国、西OECD、東欧・旧ソ連、中国、その他計画経済アジア、中東、アフリカ、中南米、インド、パキスタン、バングラデシュ、その他南アジア、インドネシア、タイ、フィリピン、その他東南アジア、その他東アジア、オセアニアOECD)とした。
- 3) エネルギー消費部門を、各領域とも、民生/商業、工業、輸送の3部門とした。
- 4) エネルギー効率を、燃焼技術に左右されるものとそれ以外の因子に分離し、燃焼技術としては消費、転換部門にわたり既存技術60程度を取り上げ、各技術について、燃焼エネルギー効率を設定した(松岡, 1991)。
- 5) エネルギー効率の改善は、燃焼技術転換に対応する燃焼エネルギー効率値の差し替えで表現されるもの、これらの設定パラメーターでは表現されない燃焼技術改良に伴うもの、および、エネルギーサービス効率改善に伴うものが考えられる。モデルでは後2者を集約化し、各領域、各部門、各期間毎に、年あたりのエネルギー効率改善度(%/年)として1つのパラメーターで表現する。また、燃焼技術更新は、各燃焼機器量をストックとして取り扱い、5～40年程度の置換期間をもったモデルで置き換え量を算定する。
- 6) 抑制対策を行わない場合についての硫酸化物排出原単位は、上記の消費エネルギーあたりの原単位を使用するが、抑制対策を行う場合には、燃焼技術に応じ、低硫黄燃料原単位への差し替え及び各種削減技術に対応する原単位削減等を適宜行った。

などである。修正ERMでの排出量算定は、上記の世界19領域で行っているが、これから、空間的により狭

スケール(緯度1度経度1度メッシュ)の排出量分布を得るために、以下の作業仮定と操作を行った。

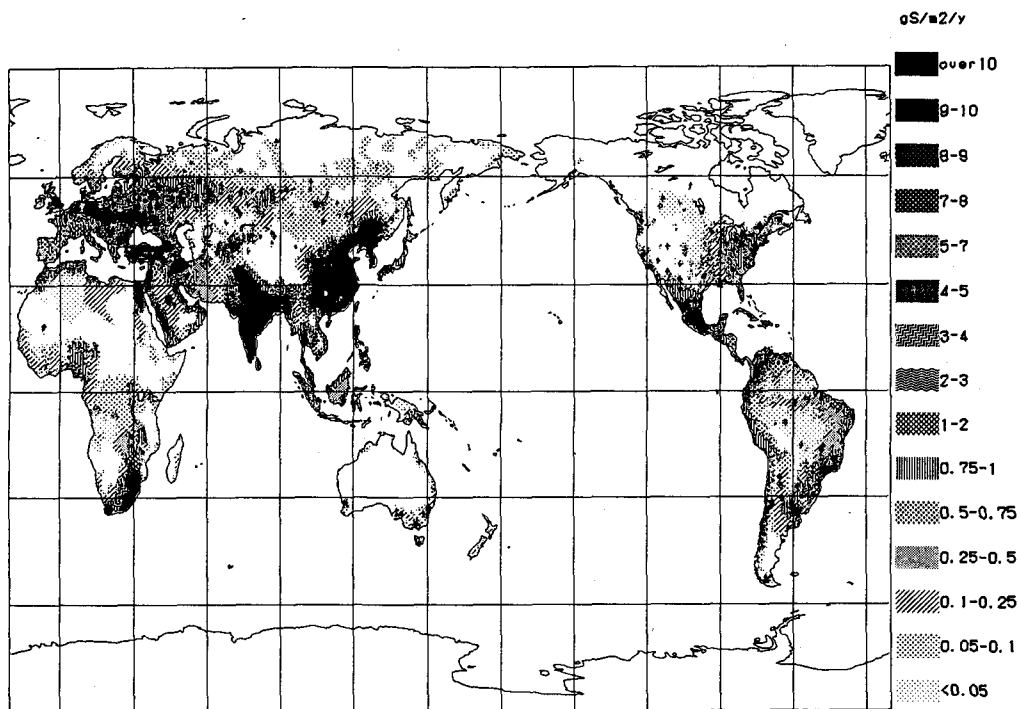
- 1)各領域内での国・地域別の将来排出量割合は、1985年時点と同一と仮定する。
- 2)各国・地域内での将来排出量分布は、1985年前後の各国・地域内人口分布に比例するものと想定する。
- 3)1),2)の前提をもとにして、修正ERMでの硫黄酸化物排出量を、各国・地域毎の1度メッシュに振り分け、さらにそれらを重ね合わせ、世界1度メッシュの排出量分布を算出する。

各国・地域内人口分布は、各国人口分布図のスクランナー読み込みをもとに、リージョン、プロビンス、郡、市単位の人口統計等を参照して作成した。図-3に、後に示す標準シナリオ下での2100年での化石燃料起源の硫黄酸化物排出量分布の例を示す。現在時点での硫黄酸化物排出量分布に関しては、Semb(1985), Fujitaら(1991) 及びSpiroら(1992)の検討があり、国内分布の推定を人口のみをもととする、本論文で行っている方法に比べ、より根拠ある方法と考えられるが、ここで問題としているような超長期にわたる見通しを

得る場合には、上に述べた程度の仮定と詳細さで十分であると判断した。

社会・経済シナリオの基本変数である人口などは、各領域毎に、以下のように設定した。

- 1)人口：標準的な中位シナリオとして、Bulataoらが1990年に公表したものを採用する。これは将来の合計特殊出生率(TFR)が人口置き換え水準である2.1人で安定化すると想定するもので、2050年人口100.4億人、2100年人口113.3億人、定常人口115.14億人のシナリオであり、2100年での先進国 (more developed) 人口を13.1億人、途上国(less developed)人口を100.2億人としている。これらの値は、国連(U.N.,1992)が、最近、算出した中位推定値 (2050年100.2億人、2100年111.9億人) とほぼ等しい。高位及び低位シナリオには、国連による高位及び低位推定値を採用する。これらのシナリオでは、TFRの安定値を2.5人及び1.7人と想定しており、2050年人口をそれぞれ125.1億人、78.1億人、2100年人口をそれぞれ191.6億人、60.1億人と算定している。
- 2)経済成長率：一人あたりのGDP成長率を基本変数



S02 emission, year 2100, Med. pop, Med. GDP

図-3 化石燃料起源の硫黄酸化物排出量分布, 2100年
Distribution of sulfur oxide emission, year 2100.

として、1985年～2025年及び2025～2100年の2期間について各領域毎に設定した。前半の期間に関しては、最近の各国調査(IPCC, 1991)をもとに設定されたIPCCシナリオ(IRS91, IPCC, 1992)での、一人あたりGDP成長率設定値に準拠し、後半期間は前半期間の1%減と設定した。中位、高位、低位の3シナリオを設定しているが、高位シナリオでは1950年～1990年間程度の成長が今後35年にわたって続くと仮定し、中位シナリオでは、これより0.5～1%減、低位シナリオではさらに0.5～0.8%減とする。但し、0.5%/年を下回る場合は、この値まで切り上げた。また、中位、高位シナリオでの中国、アフリカ、東欧、旧ソ連等領域では、今後の経済構造改革による従来以上の成長を見込む。経済成長率と人口変化率の間には相互依存がみられるが、本検討の範囲では独立変量として取り扱うものとした。

3)化石燃料資源量：石油、天然ガスに関しては、米国地質調査局(Mastersら, 1990)が最近の世界50余の地域について取りまとめた値を使用し、石炭については世界エネルギー会議(WEC, 1980)による推定値を使用する。石油、天然ガスに関しては、高位、中位、低位埋蔵量として、それぞれ、上側90%予想埋蔵量を参照にして作成した資源コスト曲線、平均予想埋蔵量を参照した資源コスト曲線、下側10%予想埋蔵量を参照したコスト資源曲線の3シナリオを準備した。石炭等に関しては、平均予想埋蔵量による1種のコスト資源曲線とした。

4)エネルギー効率改善度：3種のシナリオを準備した。高位シナリオでは、全領域、全部門にて一律1.5%/年とし、低位シナリオでは0.5%/年とする。また、中位シナリオではU.S.EPA(1990)を参照して、領域、部門に応じ1～2.7%/年(松岡, 1991)とする。このさい、計画経済国領域の民生、産業部門等に高い改善度を、途上国輸送部門等に低い改善度を割り付ける。

5)硫黄酸化物排出量削減度：これも3種のシナリオを準備した。現状シナリオは、現在OECD諸国を中心に策定されているヘルシンキ議定書、米国大気浄化法などが想定する規制のみが行われる場合である。緩削減シナリオでは、それ以外の国でも、2005年から、現状シナリオでの先進国と同程度の削減努力を実施すると想定するものである。急削減シナリオでは、現在、実施可能な防除施設を先進国ですぐに、その他の国でも2005年から導入する。具体的には、低硫黄含有燃料への転換、産業、エネルギー転換、輸送部門等を中心とした90%～99%程度の排出量削減対策を想定している。

その他、各シナリオに一致して、ソーラー、バイオマス等の新エネルギーあるいは原子力発電の積極的

表-1 検討シナリオの一覧
Summary of assumptions in the alternative scenarios

Scenario	Population	GDP/Capita	Energy Resource	Energy Efficiency Improvement	Counter Measure
Standard	medium	medium	medium	medium	BaU
High Pop. High GDP	high	high	medium	medium	BaU
Low Pop. Low GDP	low	low	medium	medium	BaU
High Effic.	medium	medium	medium	high	BaU
Low Effic.	medium	medium	medium	low	BaU
High Res.	medium	medium	high	medium	BaU
Low Res.	medium	medium	low	medium	BaU
Mild Red.	medium	medium	medium	medium	mild
Strict Red.	medium	medium	medium	medium	strict

Overview of basic parameters assumption

Population, Million			Note
year	2025	2100	
low	7591	8009	low projection, UN1991
medium	8415	11330	World Bank projection, WB1991
high	9444	19156	high projection, UN1991

GDP/Capita Growth, %/y, 1985-2100			Note
year	1985-2025	2025-2100	
low	0.5-3.5	0.5-2.5	cf. IPCC scenario IRS91a, b
medium	1.2-4.3	0.5-3.3	cf. IPCC scenario IRS91c
high	2.0-5.1	1.0-4.1	cf. IPCC scenario IRS91e

Fossil Fuel Resources, economic reserves at 1985, EJ				Note
	Oil	Gas	Coal	
low	7730	8503	197000	based on mean resources, DOE1990
medium	9397	11100	197000	based on lower 90% confidence undis. res., DOE1990
high	11837	14580	197000	based on upper 90% confidence undis. res., DOE1990

BaU: Business as usual
UN1991: United Nations(1992), WB1991: Bulatao, R.A. et al(1990),
IRS91a, b, c, e: Intergovernmental Panel on Climate Change(1992),
DOE1990: Masters et al. (1991)

な導入政策は図らないなどの仮定を行っている。表-1に、本論文で取り上げた上記基本変数の組み合わせにより作成した対象シナリオの一覧を示し、図-4、5に1次エネルギー消費量及び硫黄酸化物排出量の計算値を示す。エネルギー消費量では、高位人口、高位経済成長の組み合わせでもっとも高く、低位人口、低位経済成長の組み合わせでもっとも低くなり、1985年に292EJ/yのものが、2100年時点にてそれぞれ4400EJ/y、550EJ/y程度となる。また、硫黄酸化物排

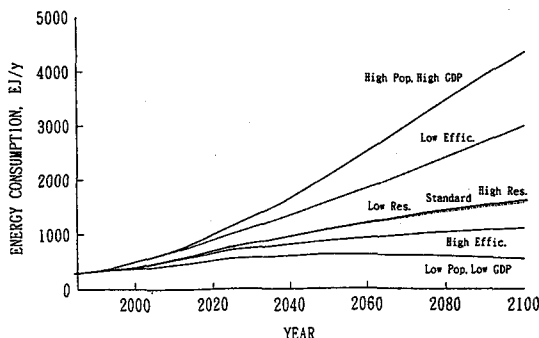


図-4 一次エネルギー消費量の見通し
Projection of primary energy consumption

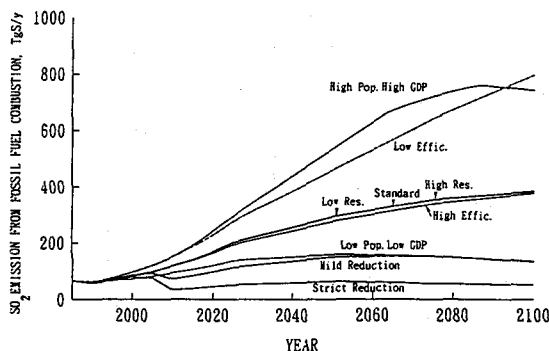


図-5 化石燃料起源の硫黄酸化物排出量の見通し
Projection of sulfur oxide emission

出量は、高位人口、高位経済成長の組み合わせあるいは低エネルギー効率改善度シナリオでもっとも高く、急削減シナリオでもっとも低くなり、1985年にて66.4TgS/yのものが、800TgS/y及び52TgS/y程度となる結果を得た。一般的に、排出量がエネルギーの伸び以上にのびているのは、将来、排出原単位が高い石炭及び途上国の比重が高まるからである。シナリオ間での、エネルギー消費量と硫黄酸化物排出量の増大の順位は、ほぼ平行的であるが、エネルギー効率改善度を全領域・部門に一律と設定すると、エネルギー消費量あたりの硫黄酸化物排出量が時と共に増加する傾向がみられる。これは、改善度一定の設定では、排出原単位が大きく、効率改善度の余地も大きいと考えられる東欧、旧ソ連等の産業、民生部門などの省エネの可能性が表現されないためである。また、石油、ガス資源量の多寡の影響は、ほとんど表れなかった。これは、価格上の理由から、将来エネルギーの大部分が石炭によってまかなわれるためと考えられる。

産業からの排出には、銅、亜鉛、鉛及び硫酸の生産工程からのものがある。排出原単位としてはVarhely, Moellerらの値を使用し、これに、Moeller(1984)による削減率を考慮した。ただし、近年のわが国の削減率は99%程度とされており、わが国に関しては、1985年にてこの値に漸近する削減率の変化を想定した。生産量に関しては、過去のものについては、国連工業統計、マクミラン歴史統計などから収集し、将来に関しては、資源エネルギー庁(1990)が行っているGNP弾性値から推定する方法を2000年まで採用し、以後は、そのまま横ばいになると仮定した。この時の全排出量は6.54TgS/yとなっており、さらにSpiroら(1992)の作業を参照して、地域的な分布を求めた。

4. 大気輸送・変換プロセス

このプロセスでは、排出した硫黄酸化物の大気中

での移動・反応を算定する。大気流動モデルは、松岡・辻本(1991)による3次元差分モデルを一部改良し使用した。本論文で示した計算では、全球を水平方向5度メッシュに区分し、鉛直区分は2層(σ 座標、上層上境界は500hPa、上下層境界は $\sigma=0.6$ とした)として地形の影響を考慮した。また、南北両極に近いメッシュでは東西方向の寸法が小さくなるため、東西方向に隣合う2つ以上の格子を統合し、格子内面積の均等化を図った。移流計算は、Russellら(1981)が用いたモーメント法を使用した。鉛直方向の運動に関しては、全層の水平方向の空気量収支を算定し、それから算出される垂直方向の移動空気量を下層から順に配分した。1時間ステップ Δt での層 k の空気質量変化量 ΔM を、東面への流出フラックス U_k^+ および北面への流出フラックス V_k^+ 、西面からの流入フラックス U_k^- および南面からの流入フラックス V_k^- で表し、全層 N にわたって空気量収支をとれば、

$$\Delta M + \sum_{k=1}^N (U_k^+ - U_k^- + V_k^+ - V_k^-) \Delta t = 0$$

となる。したがって、上層側への流出フラックスを W_k^+ 、下層側からの流入フラックスを W_k^- として表せば、

$$W_k^- = W_k^+ - U_k^- + U_k^+ - V_k^- + V_k^+ + (\sigma_{k-1} - \sigma_k) \frac{\Delta M}{\Delta t}$$

となる。これと地表面、最上層上面を出入りする空気はないとの仮定から算出している。対流混合の計算は、Heimannら(1989)の手法に準じ、GISS・GCMの計算結果から推定した混合能(Heimannら, 1989)を模試できるように設定した。地形については、米国地球物理センター(NGDC)が作成した5分メッシュ高度データ(ETOPO5)を使用する。風系に関しては世界気象機構ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF/WMO)による1988年の毎日0時の風速、ジオポテンシャル高度、温度データを用い、この年パターンが1960~2100年の各年について同一であると仮定した。輸送中に発生する反応、沈着等に関しては池田ら(1990)を参考とし下のモデルを使用した。

$$\begin{aligned} \frac{dC_1}{dt} &= -(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \cdot C_1, \\ \frac{dC_2}{dt} &= k_1 \cdot C_1 - (k'_2 + k'_3 + k'_4) \cdot C_2, \\ \frac{dC_3}{dt} &= k_4 \cdot C_1 + k'_4 \cdot C_2 - k_5 \cdot C_3 \end{aligned}$$

ここに、 C_1 : 大気中 SO_2 濃度(mol/m³)、 C_2 : 大気中 SO_4^{2-} 濃度(mol/m³)、 C_3 : 雲中に取り込まれた SO_4^{2-} の大気換算濃度(mol/m³)、 t : 時間(h)、 k_1 : SO_2 から SO_4^{2-} への反応定数(0.02/h)、 k_2, k_2' : SO_2 と SO_4^{2-} の湿性沈着速度定数($0.1 \times I, I$: 降水強度mm/h)、

k_3, k_3' : SO_2 と SO_4^{2-} の乾性沈着速度定数(0.027/h, 0.0027/h), k_4, k_4' : SO_2 と SO_4^{2-} の雲による取り込み速度定数(0.01/h), k_5 : 雲中の SO_4^{2-} の除去速度定数($0.1 \times I/I_0$ 降水強度mm/h)である。降水強度は、米国大気研究センター(U.S.NCAR)が収集した世界地表気象データ(TD9645), 飛行場気象データ(TD9647)等から、1961年～1980年観測値を抜き出し、月平均降水量を内挿計算し使用した。 k_4, k_4', k_5 などは雲種、雲量に依存すると考えられるが、本計算では一定とした。また、池田のモデル及びパラメータ値は北米、東アジアを対象に、850mb等圧面でのトラジェクトリーモデル用に開発されたものであり、本モデルの上層にこれを適用することには問題が多いが、山岳地帯を除いては循環場の中心は下層であると想定されること、上層に関する挙動等を忠実に取り込む方向でモデル化するならば、モデル化労力及び入力情報整備負担が膨大になることなどの理由により、そのまま採用している。実際計算にあたっては、時間的に一定の排出強度下での年沈着量を、2025年までについては5年毎に、それ以降については25年毎に算出した。各年沈着量の算定は、初期濃度を0、時間ステップ1時間として開始し、6カ月の助走期間後の一年間の沈降量を算出した。使用スキームが保存型であることに対応し、年間の硫黄に関する発生量と沈降量は計算機誤差内で一致した。計算

対象年以外の沈着量は、線形内挿により算定している。本モデルは、水平方向区分が5度であり、地球スケールとしてはある程度の分解能をもつが、局所的な表現力には問題点がある。従って、計算状況の妥当性をチェックするにあたっては、点レベルでの比較は適当ではなく、ある程度の広がりをもった地域平均量としての比較が必要である。図-6は本計算の結果と欧州監視評価プログラム(UNECE/EMEP)で算定されたUNEC E諸国の1980年時点の国レベルの硫黄沈着量算定値(Hightonら, 1982, Iversonら, 1990)の比較である。

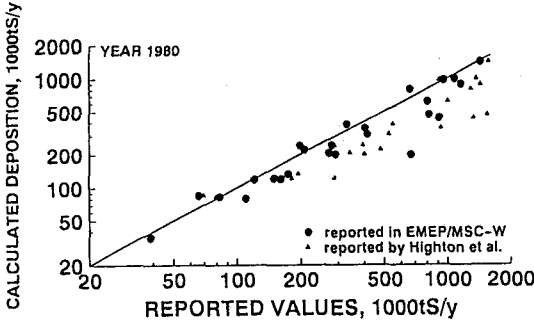


図-6 本計算とEMEPモデルでの国硫黄沈降量の比較
Comparison of sulfur deposition between this study and EMEP model

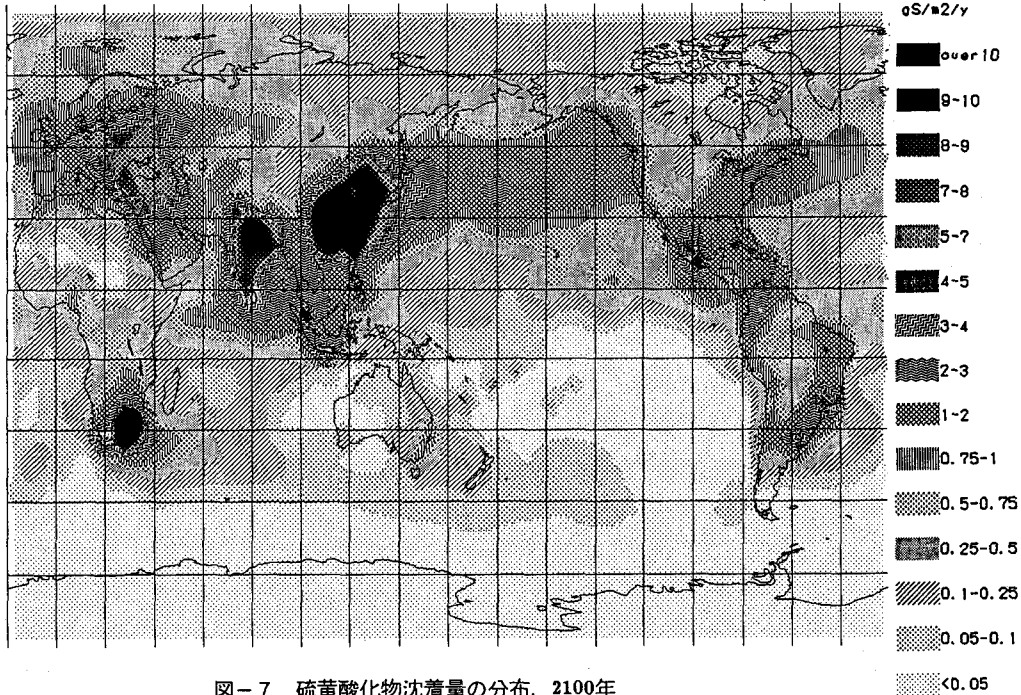


図-7 硫黄酸化物沈着量の分布, 2100年
Distribution of sulfur oxide deposition, year 2100.

本計算の方が若干小さめに算定されているが、比較的良い対応をなすと判断できる。また、図-7は、2100年時点の中位人口、中位経済成長シナリオ（標準シナリオ）下での年沈着量の分布を示したものである。

5. 土壌影響プロセス

硫酸酸化物の沈着がもたらす影響には、さまざまなものが考えられるが、本計算では土壌の緩衝能低下を中心に評価する。評価指標として、降下硫酸酸化物による表層土壌中の石灰分及び交換性塩基の低下を取り上げ、これがある設定限界に達する時期を算定する。算定のベースとなる土壌種分布は、FAO及びUNESCOがISSS(国際土壌学会)に委託し1961年から1978年にかけて作成した500万分の1世界土壌図(FAO-UNESCO, 1971-1978)を、ESRI Corp.が約3.7km毎にデジタル化したものを使用し、1度メッシュ毎の卓越土壌種を算出した。各土壌種の石灰分及び交換性塩基量は、Kauppiら(1986)、世界土壌図に添付された土壌分析値及びDuchaufour(1976)らを参照して定めた。この値を使用し、表層30cmに含まれる量を1度メッシュ毎に求め、計算開始年である1960年値とした。さらに、沈着は、解析地域単位である1度メッシュ内では土地、植生形態にかかわらず、均等に、かつ、全て2価のアニオンとして作用すると想定した。実際には、より複雑な機構が推測されるが、研究目的から考えてこの程度の近似はやむを得ないものと判断した。

計算した降下酸負荷と、実際に報告されている森林全樹種落葉率の関係(計算値は1960~1988年累積、観測値は1988年、ECE/FAO)をヨーロッパ各国についてプロットしたものを図-8に示す。横軸は、降下酸負荷を計算開始時の CaCO_3 及び交換性塩基量で除したものである。チェコスロバキア、イギリス等とオランダ、ポーランド、西ドイツなどの2群に分けられるが、各群内でのある程度の対応関係が見られる。現段階にて、こうした関係を因果的に断ずることは出来ないが、

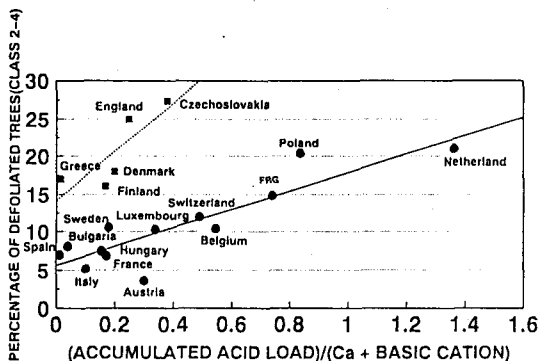


図-8 累積酸負荷と落葉率の相関
Defoliation and acid stress

ここでは、一つの作業仮定として、累積の酸負荷が、計算開始時の CaCO_3 +交換性塩基の50%に到達した場合を、土壌への影響程度のメルクマールと設定してみる。さらに、本研究のように時間スケールが超長期となる場合には、風化等による緩衝速度による、酸負荷の控除が必要となる。土壌母岩環境などにより大きく変化するが、Ulrich(1983)は、ヨーロッパ表層土壌にてその値を $2\sim 20\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y} \cdot \text{cm})$ と推定しており、以下に示す計算においても、これのある程度変動させ、その効果の把握に努めている。

6. 人間活動による土壌酸性化の見通し

以上述べてきたシナリオとモデルを使い、影響土壌の面積割合及びそこに居住する人口の全人口に対する割合を表-2上段に示す。この計算値は、緩衝速度を一律に $10\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y} \cdot \text{cm})$ とした場合である。また、緩衝速度を $0\sim 100\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y} \cdot \text{cm})$ の範囲で変化させた場合の計算結果を下段に示す。来世紀末までに、面積では7~19%の、人口では20~40%の地域に影響が表れるとの計算結果となっている。影響範囲の変動幅は、排出負荷量の変動幅に比べ小さくなっている。言い替えるならば、排出量削減を行っても影響範囲が同じ割合に小さくなることはなく、削減努力に対する効果は逓減する。この傾向は、面積よりも人口で評価した方が著しい。図-9は、緩衝速度を $10\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y} \cdot \text{cm})$ としたときの、標準シナリオ(中位人口、中位経済成長)での影響発現時期の分布である。濃いトーンが塗られている地域は、早い時期に CaCO_3 +交換性塩基が当初の50%に達すると想定され、薄い地域はこれが遅いと算定された地域である。Rodheら(1988)は、現時点での酸性雨被害の顕在化地域として北米西海岸地域、西欧・東欧地域及び中国南部を挙げ、潜在化地域とし

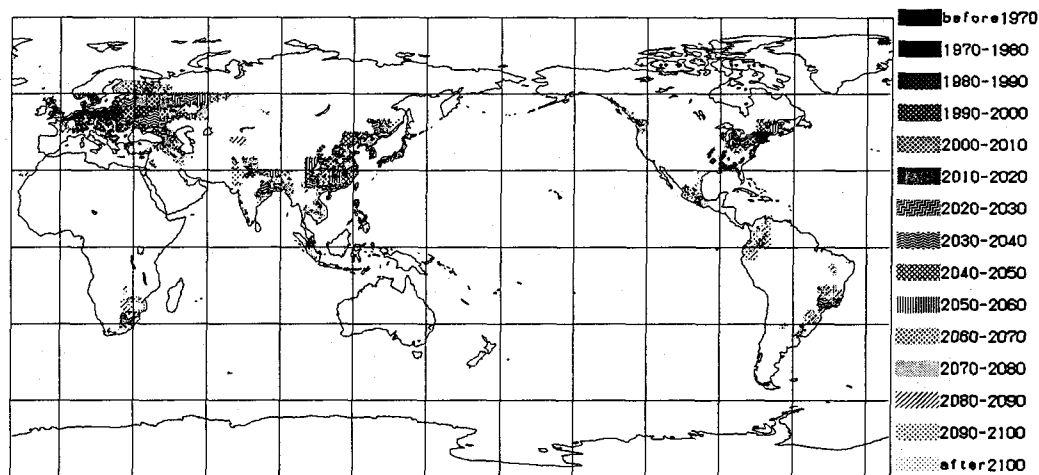
表-2 各シナリオ下での影響面積と影響人口
Percentage affected under different scenario and buffer rate

year	land area			population		
	2000	2050	2100	2000	2050	2100
Scenario						
Med. Pop. Med. GDP	0.87	6.94	12.39	2.65	21.28	32.33
High. Pop. High. GDP	1.00	10.24	18.77	2.80	27.49	39.08
Low. Pop. Low. GDP	0.80	4.84	7.04	2.45	16.15	21.79
High. Effic.	0.85	6.70	12.22	2.63	21.20	31.45
Low. Effic.	0.92	9.50	18.27	2.75	26.20	38.81
High. Res.	0.87	6.81	12.42	2.65	21.24	32.42
Low. Res.	0.87	6.94	12.36	2.65	21.28	31.55
Mild. Reduction	0.79	4.73	7.73	2.35	14.35	22.73
Strict. Reduction	0.76	4.13	4.90	2.05	12.84	15.04
Buffer Rate mol/(ha.cm.y)						
0	1.46	13.84	23.29	4.18	28.97	40.63
10	0.87	6.94	12.39	2.65	21.28	32.33
33	0.34	2.90	6.04	1.06	11.50	22.18
67	0.06	1.04	3.25	0.07	5.23	15.42
100	0.05	0.31	1.71	0.02	1.32	8.69

て南米カリブ海岸地域、ブラジル南部からアルゼンチン主部地域、アフリカギニア湾岸地域、インドマラバル海岸、インドシナ、マレー、スマトラ、ジャワなどの東南アジア地域を挙げているが、これに対応した地域分布は、図-9と同じ設定条件であるが、緩衝速度を0とした図-10に観測される。また、図-11は、急削減政策を行った場合の結果である。図-9、10に見られた現途上国地域の影響発現が抑えられていることがわかる。現在の中所得途上国地域が、今後の影

響顕在化地域の主体となるとの結果は既に報告しているが(松岡・数野, 1991), 抑制施策の早期の実行によりその程度をかなり軽減できる可能性を示している。

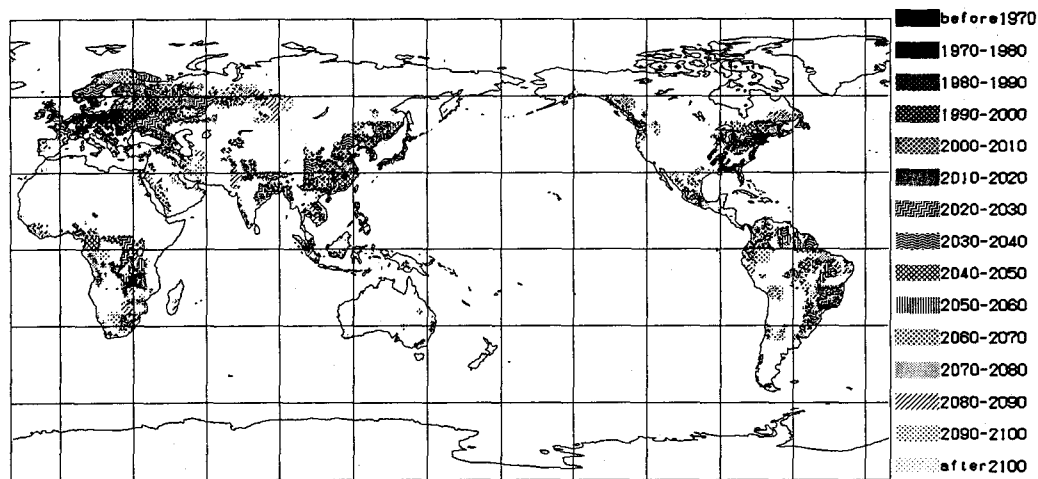
以上に示した結果及びそれにいたる情報総合化手段としてのモデル構築のプロセスには、現象面から見て乱暴な仮定が多々ある。例えば、土壌への影響評価算定プロセスでの風化速度の仮定はその一例である。現段階においても、局所的により精細・忠実なモデルを構築することは十分可能であると考えられるが、そ



Year of soil acidification, Med. pop, Med. GDP

図-9 土壌影響発現の時期, 標準シナリオ, 緩衝速度 10mol/(ha・y)

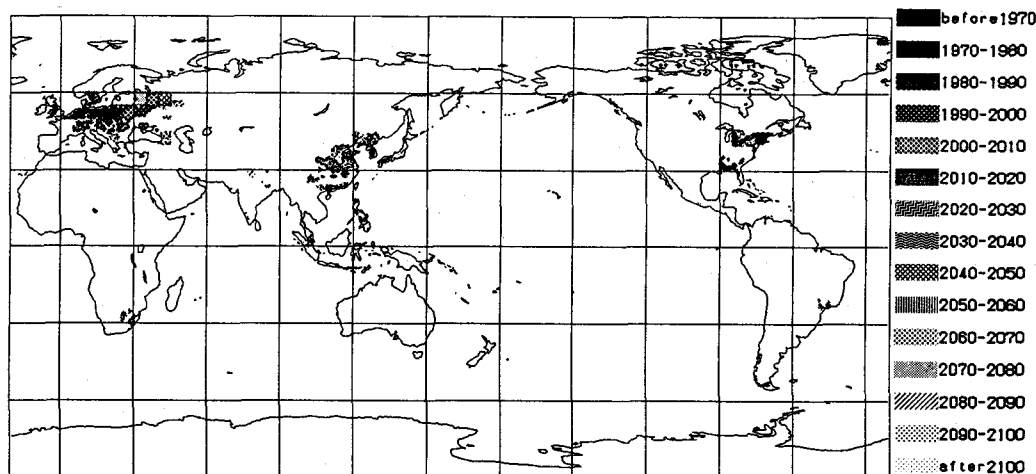
Year of soil acidification, standard reduction, buffer rate:10mol/(ha・y)



Year of soil acidification, Med. pop, Med. GDP

図-10 土壌影響発現の時期, 標準シナリオ, 緩衝速度 0

Year of soil acidification, standard reduction, buffer rate: 0mol/(ha・y)



Year of soil acidification, strict reduction

図-11 土壌影響発現の時期, 急削減シナリオ, 緩衝速度 $10\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y})$

Year of soil acidification, strict reduction, buffer rate: $10\text{mol}/(\text{ha} \cdot \text{y})$

れを世界全域に適用することは困難である。今後の研究及び情報集積に待つところが大きい。

7. おわりに

本論文では、人為起源の硫黄酸化物排出の今後の見通しとそれによる環境影響を、超長期かつ地球規模的な立場から推定した。社会、経済シナリオの設定によりかなり異なった将来像を描くことが示された。言い替えるならば、本問題に関する今後の取り組み方によって、見通しの明暗は大きく変化することになる。今後の知見如何によっては、本モデルで得た結果を大きく変える因子もある。これらの点は、それらの取得を待って、逐次、改良していかなければならない。

本研究で用いたモデルについては、現在、三つの方向で改良を進めている。一つは、アジア太平洋地域からの排出量と対応策を検討することを目的とし、エネルギー消費を中心とした国別モデルを開発しており、現在、世界モデルとリンク作業を行っている。第二は、大気に加え海洋からの物質発生、循環を取り込んだ地球規模物質循環モデルとのリンクである。海洋大循環モデルとしては、現在、米国 NOAA/GFDLのPacanowskiらが開発したMOM(GFDL modular ocean model)を出発点とし、各種塩類・生物動態部分等の開発を試みている。地球規模硫黄酸化物の発生と循環に関し、より広い視野に立った総合化が期待できる。第三は、温暖化総合モデル(松岡ら, 1992)との連結である。気候変動など他の環境ストレスとの複合効果などの検討を目指すものである。

最後に、本論文の査読過程にて寄せられた意見に関連し、ここで対象としている将来見通しの性格とその不確定性について言及しておく。まず、本論文で提示した将来像は決して将来の予想ではない、現在までに得られている種々雑多な情報を整理・体系化し、それらの論理的帰結を提示したものである。地球温暖化に関し、著者ら(松岡ら, 1992)が示したように、例えば、社会、経済的な前提シナリオの幅を考慮することによって、排出量が、1~2オーダー変化することは十分考えられる。さらに自然機構上での不確かさがその幅を押し広げる。関与する変化、循環メカニズムが入れ替わってしまう場合もある。こうした状況において、将来見通しに対する不確定性について、その程度、幅等をいたずらに論議することは益あることではない。確度が高いと考えられる将来への前提シナリオについて、それに対応した環境への影響と予防対策の重要性を納得性と具体性をもって見定めることが重要となっているのである。さらに、その作業は、決してKKD(勘と経験と度胸)であってはならない。広い範囲からの重要な因子をあまねく取り入れた前提シナリオと、その演えきとしての将来見通しが組み合わせとして重要になるのである。前提シナリオは、必ずしも社会、経済的因子のみではない。自然科学的なメカニズムに関する知見の多寡と確度の程度も重要な因子である。これらの点は、時とともに大きく変化する。その都度、そうした進歩と変化を取り入れ総合化することによって、その時々での環境政策への基本的な情報を抽出することは、環境システム研究にとって、大変重要な課

題であると考えており、本論文が目標としているところでもある。

なお、本研究の遂行にあたっては、京都大学大学院工学研究科 数野裕史、辻本 涉両氏の助力を得た。また、使用データに関し多くの関連諸機関から提供を受けた。特に、環境庁地球環境研究センター原沢英夫研究管理官（GRIDつくば）、U.S.NCAR Dr. R. Jenne には、多大の助力を得た。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Alcamo, J., R. Shaw and L. Hordijk eds., 1990, The Rains model of acidification: Science and Strategies in Europe. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bulatao, R.A., E. Bos, P.W. Stephens and M.T. Vu, 1990: World Population Projections, 1989-90 Edition, Short-and Long-Term Estimates, The World Bank, The John Hopkins University Press.
- Duchauffour, P., 1976, Atlas Ecologique des Sols du Monde, Masson, Paris.
- ECE/FAO, 1989, International co-operative programme on assessment and monitoring of air pollution effects of forests.
- ECMWF/WMO (European Center for Medium Range Weather Forecasts), 1989, The description of the ECMWF/WMO global analysis data sets.
- Edmonds, J. and J.M. Reilly, 1985, Global Energy, Assessing the Future, Oxford University Press.
- FAO-UNESCO: Soil map of the world 1:5,000,000, Unesco-Paris, Vol.1(1974), Vol.2(1975), Vol.3(1975), Vol.4(1971), Vol.5(1981), Vol.6(1977), Vol.7(1977), Vol.8(1978), Vol.9(1979), Vol.10(1978).
- Fujita, S., Y. Ichikawa, R. Kawaratani and Y. Tonooka, 1991, Preliminary inventory of sulfur dioxide emissions in East Asia, *Atmos. Environ.*, 25A, 1409-1411.
- Heimann, M. and C.D. Keeling, 1989, A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: 2. Model description and simulated tracer experiments, in Aspects of Climate Variability in the Pacific and Western Americas, (ed.) D.H. Peterson, 237-275, American Geophysical Union.
- Highton, N.H. and M.J. Chadwick, 1982, The effects of changing patterns of energy use on sulfur emissions and depositions in Europe, *Ambio*, 11, 324-329.
- 池田有光, 岡田直樹, 平岡正勝ら, 1989: 硫酸酸化物の長距離輸送, 京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム論文集, 11, 77-82.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climatic Change), 1991: Energy and Industry Subgroup Report, U.S.EPA, Washington, D.C.
- IPCC(Intergovernmental Panel on Climatic Change), 1992: Full Scientific Report, Scientific Assessment of Climatic Change, WMO/UNEP.
- Iverson, T., N.E. Halvorsen, J. Saltbones and H. Sandnes, 1990, Calculated budgets for airborne sulphur and nitrogen in Europe, EMEP/MS-CW Report 2/90, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo.
- Kauppi, P., J. Kaumaeri, M. Posch and L. Kauppi, 1986, Acidification of forest soils: Model development and application for analyzing impacts of acidic deposition in Europe, *Ecological Modelling*, 33, 231-253.
- Masters, C.D. D.H. Root and E.D. Attanasi, 1990: World oil and gas resources -Future production realities, *Annu. Rev. Energy*, 15, 23-51.
- 松岡 謙, 1991, エドモンズ・ライリーモデル及び温暖化影響モデルによる検討, 第2回地球環境研究者交流会, 地球環境研究センター, 環境庁国立環境研究所.
- 松岡 謙・数野裕史, 1991, 酸性降下物による地球規模的な環境影響について, 京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム論文集, 13, 175-180.
- 松岡 謙・辻本 涉, 1991, 地球規模の大気汚染物質循環のシミュレーション, 京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム論文集, 13, 341-346.
- 松岡 謙・森田恒幸・甲斐沼美紀子, 1992, 地球温暖化に関するシナリオとモデル解析, 土木学会論文集, 449/IV-17, 1-17.
- Moeller, D., 1984: Estimation of the global man-made sulphur emission, *Atom. Env.*, 18(1), 19-27.
- Rodhe, H., E. Cowling, I. Galbally, J. Galloway and R. Herrera, 1988, Acidification and regional air pollution in the tropics, in "Acidification in Tropical Countries", eds. H. Rodhe and R. Herrera, 3-39, John Wiley.
- Russell, G.L. and J.A. Lerner, 1981, A new finite-differencing scheme for the tracer transport equation, *J. Applied Meteorology*, 20, 1483-1498.
- Semb, A., 1985, Circumpolar SO₂ emission survey, Norwegian Institute for Air Research, NILU OR 69/85, Lillstroem, Norway.
- 資源エネルギー庁, 1990: 2000年の資源ビジョン—2000年の資源産業と資源政策 (財)通商産業調査会.
- Spiro, P.A., D.J. Jacob and J.A. Logan, 1992: Global inventory of sulfur emissions with 1° x 1° resolution, submitted to *Journal of Geophysical Research*, August, 1991.
- The World Bank and the Asian Development Bank, 1991, Proposal for an International collaborative project on acid rain and emissions reduction in Asia, Asia Technical Department, The World Bank, Washington, D.C.
- Ulrich, B., 1983, Soil acidity and its relation to acid deposition, in Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystem, eds. B. Ulrich and J. Pankrath, Reidel, Dordrecht, Netherlands.
- United Nations, 1991, United Nations Energy Statistics, Energy Tape, Tape description and documentation as of 14 June 1991, United Nations Statistical Office.
- United Nations, 1992: Long-range world population projections: Two centuries of population growth, 1950-2150, United Nations publication.
- U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency), 1990, Policy options for stabilizing global climate, Report to Congress, eds. D.A. Lashof and A.A. Tirpak, Office of Policy, Planning and Evaluation, United States Environmental Protection Agency.
- WEC(World Energy Conference), 1980, Survey of Energy Resources 1980, World Energy Conference, London.