

〈特集〉

持続可能社会のための大気汚染削減のビジョン

倉田 学 児

京都大学大学院 都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 E-mail: gkurata@athehost.env.kyoto-u.ac.jp)

概 要

持続可能社会と大気汚染削減ビジョンとを関連付けた議論が重要となるのは、将来の目標到達点としての持続可能な社会像を描く場合よりも、そのような社会に移行するための遷移プロセスを設計する場面においてである。途上国の多くの都市において、急激に増加する自動車交通や低品質の燃料の使用に起因する都市大気汚染と室内大気汚染が深刻な健康影響をもたらしているが、持続可能な低炭素社会に向けた化石燃料の使用削減対策は、大気汚染削減対策と重複する部分が非常に大きいためである。また一方で、大気汚染物質が温暖化を抑制している効果の大きさも最近の研究で明らかにされつつあり、大気汚染削減対策が温暖化を加速する側面にも注意が必要である。本稿では、温暖化対策と大気汚染対策のコベネフィット（共便益）の定量化に注目して、持続可能社会のための大気汚染削減ビジョンについて論ずる。

キーワード：持続可能社会，低炭素社会，大気汚染制御，副次的効果，排出量推計

原稿受付 2010.1.26

EICA: 14(4) 51-55

1. はじめに

一般に大気汚染物質は、化石燃料やバイオマスなどをエネルギー源として燃焼させる際に発生するものが大部分であり、経済発展によるエネルギー消費量の増加につれて大気汚染問題も深刻化してきた。経済成長が進むと、燃料のクリーン化や排煙処理装置の導入などによって、エネルギー使用量に関わらず大気汚染物質の排出量は減少傾向を示すようになるが、途上国では、依然としてその前段階であり、エネルギー消費量の急激な増加の中で、いかに大気汚染問題の深刻化を防ぎ、改善していくのが課題となっている。そのため、大気汚染削減のビジョンを考える場合には、(1)化石燃料の消費自体を削減するための方策、(2)化石燃料の消費量あたりの汚染物質の排出を削減する技術の開発・普及、の二つの視点から検討する必要がある。

持続可能社会あるいは低炭素社会との関連では、化石燃料からのエネルギー消費量を低減するための様々な方策が、同時に大気汚染物質の排出量削減にも直結するコベネフィット（共便益）の視点が注目されている。特に、新興国・途上国において、現世代の自国民に対するベネフィットを明確に示せる大気汚染対策などと連動させる事で、温室効果ガス（GHG）の排出削減のための実効的な取り組みを加速できる可能性がある。過去の推計では、途上国においては、GHG削減のための対策費用を上回る副次的な便益が期待できると見積もられている¹⁾。

本稿では、2章でコベネフィットを考慮した大気汚

染削減ビジョンについて、これまでの研究や推計の動向について概観する。3章では、大気汚染削減のコベネフィットを定量化するためのフレームワークとして、排出量インベントリ、大気拡散シミュレーション、影響評価モデルについて説明する。

2. 持続可能社会の実現のための大気汚染削減ビジョン

地球温暖化の影響は全球規模で生じ、かつ二酸化炭素などのGHGが長寿命であるために影響が生じるまでにタイムラグがあり長期間にわたる対策が求められる。一方、大気汚染物質は短寿命であるため、排出源付近の高濃度の場所で影響が生じ、排出対策はすぐに効果を発揮する。そのため、一般にそれぞれの対策は独立して検討されてきた経緯がある。しかし、いずれも人間活動によるエネルギー源としての化石燃料などの燃焼によって発生するものの寄与が大部分であるため、同じ枠組みの中での評価を試みる研究が進展している²⁻⁵⁾。これらのフレームワークを図示すると **Fig. 1** のようになる。現状に関しては、サービス需要や機器・技術のシェア、さらには燃料別のエネルギー消費量などが統計値として入手できれば、それらを積み上げることで排出量が推計できる。将来に関しては、目標年（例えば2020年や2030年）の人口、GDP、産業構成、都市構造などを社会・経済シナリオとして設定して、その社会に必要なエネルギー、交通や財（鉄・セメントなど）のサービス需要を推計する。次

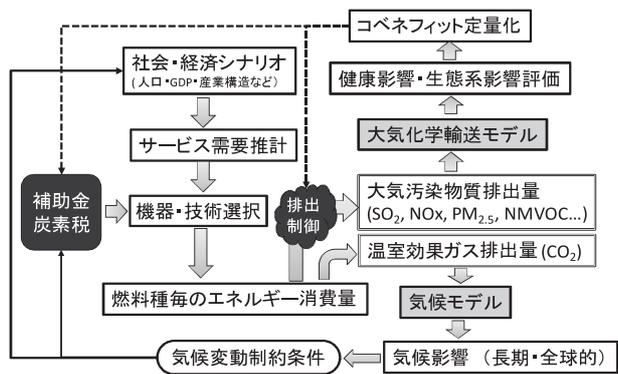


Fig. 1 Analysis Framework for Co-benefit of Greenhouse Gas mitigation and air pollution abatement

に、補助金や炭素税などを考慮した上で、最も経済性の高い機器・技術がサービスの提供に利用されるとして、燃料種毎のエネルギー消費量や大気汚染物質の排出量などが見積もられる。コベネフィットを考慮した場合には、大気汚染対策だけを実施した場合に比べて節約できた対策費用を考慮に入れて機器・技術選択を行う。これによって、総合的に最も便益の高い技術が選択される。

ただし、大気汚染物質の排出量の削減と気候変動との関係で注意すべき点は、大気中に存在する燃焼起源の微粒子（特に硫酸塩）が、GHGによる全球規模の気温上昇を大幅に抑制している可能性があるという事実である。現在のGHG濃度での平衡時の温室効果は、産業革命前の気温に対して2.4℃と見積もられている⁶⁾が、その50%程度がエアロゾルの冷却効果によって打ち消されていると推計されている⁷⁾。特に硫酸塩粒子が冷却に強く働いており、逆に対流圏オゾンやブラックカーボン（スス）は温暖化を強める方向に働いているとされる。硫酸塩の元となるSO₂の排出は、硫黄分を含んだ石油・石炭を燃料とする発電所などの大規模発生源が中心であるが、SO₂排出量は、燃料のクリーン化や排煙脱硫装置の設置などの対策で削減が可能であり、GHGの排出量削減対策よりも技術的には早く普及が進むものと考えられており、その場合には、温暖化が現在想定されているよりも加速する可能性がある。自然生態系が気候変動に適応するためには、気温の上昇速度が重要であるため、GHGの排出削減を伴わない大気汚染対策は、気候変動に対する悪影響が大きいとされる。最終的には、化石燃料起源の大気汚染物質の排出量をゼロにする事が理想であるが、気候変動の速度を抑えるためには、ブラックカーボンや対流圏オゾンの前駆物質である窒素酸化物（NO_x）と非メタン炭化水素（NMHC）などを優先的に削減するような政策的誘導を検討する必要がある。

3. 大気汚染削減のコベネフィットの定量化フレームワーク

3.1 排出量インベントリ

大気汚染物質は大気中での寿命が短く、輸送・拡散の過程で急速に濃度が小さくなる。そのため、様々な影響を正確に評価するためには、正確な排出量マップが不可欠である。ここではアジア地域を対象とした大気汚染物質排出量メッシュマップの作成手順について説明する⁸⁾。対象国は東アジア、南アジア、東南アジア、中央アジアの計28カ国である。また、対象とした部門は、Table 1に示した9部門である。

ここでは、IEAなどのエネルギー統計からの国別・部門別のエネルギー消費量に部門別・汚染物質別の排出係数を乗じることで、各汚染物質について国別の排出量を求めた。

3.2 ダウンスケーリング

次に、国別に推計された排出量を詳細なメッシュデータに落とすダウンスケーリングを行う（Fig. 2）。ここでは国別・部門別に推計された排出量を、大規模排出源（LPS）情報や各国の地方行政区における人口や産業別付加価値額など、各部門の特性が最も反映されるデータを用いて段階的にダウンスケールし、最終

Table 1 Aggregated sector for emission inventory

部門	副部門
エネルギー転換部門	発電部門
	石油精製部門
工業部門	鉄鋼部門
	セメント部門
	その他の工業部門
家庭部門	家庭部門
業務部門	業務部門
運輸部門	道路輸送（運輸・貨物）部門
	鉄道部門

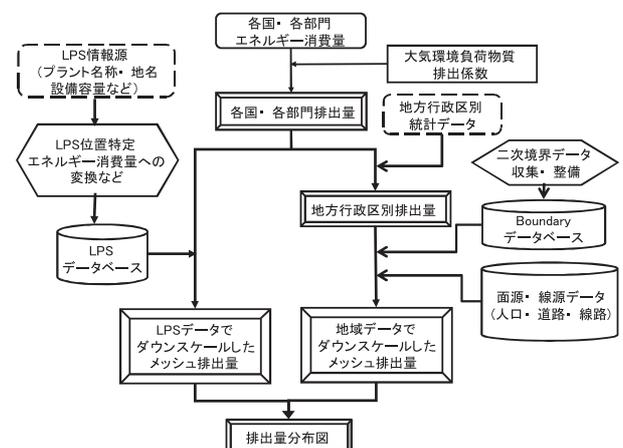


Fig. 2 Diagram of Downscaling method from Country-by-country Emission to mesh data

Table 2 Estimated Emission of selected species in 2000⁸⁾

国名	CO ₂ (Tg/year)	NO _x (Gg/year)	SO ₂ (Gg/year)	CO (Gg/year)
アフガニスタン	2	5	3	83
バングラデシュ	51	99	75	1,715
ブータン	5	4	3	209
ブルネイ	3	15	9	71
カンボジア	16	25	22	717
中国	3,445	9,204	20,820	62,006
香港	40	204	172	298
インド	1,537	3,919	4,428	31,846
インドネシア	419	1,171	1,211	12,798
日本	1,111	4,267	1,797	17,469
韓国	337	1,243	1,776	3,465
朝鮮	56	188	447	154
キルギスタン	1	7	21	59
ラオス	0.2	1	2	9
マレーシア	102	477	175	2,662
モンゴル	2	11	32	102
ミャンマー	45	83	40	2,011
ネパール	32	43	36	1,483
パキスタン	190	526	876	5,319
フィリピン	90	343	487	2,096
シンガポール	35	140	266	298
スリランカ	27	80	98	908
台湾	206	796	1,236	2,725
タジキスタン	2	18	1	241
タイ	181	744	1,388	3,753
トルクメニスタン	3	21	1	230
ウズベキスタン	79	182	115	623
ベトナム	134	275	236	5,261
アジア合計	8,152	24,090	35,770	158,612

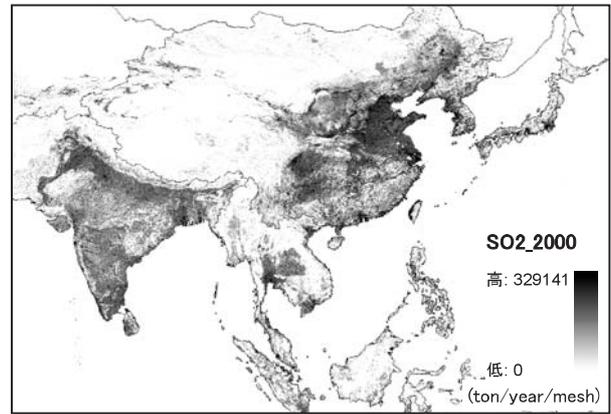


Fig. 3 Emission map of SO₂ annual total for 2000

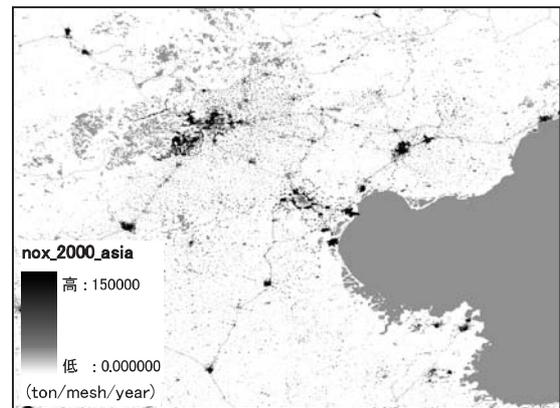


Fig. 4 Detail emission pattern of NO_x at Beijing and Tianjin

的には、人口分布、土地利用、鉄道、道路などのGISデータを利用してメッシュに配分する。アジア全域の排出量マップについては、都市部での詳細な計算が可能なように1 km×1 kmで作成した。LPSデータは、発電所、製鉄所、セメント工場の3種類について、各プラントの名前や住所などの文字情報から複数の地名データベースなどを利用して位置を特定する。また、LPSデータには、実際の稼働量ではなく、最大発電容量や最大生産能力が記載されているため、その値をそのまま利用することができない。そのため、各施設の容量に比例して国全体の排出量を配分するようにした。

Table 2にCO₂、NO_x、SO₂、COの国別の排出量の推計値を示した。同様にPM₁₀、PM_{2.5}、NMHCの推計も行っている。また、1 km×1 kmのメッシュにダウンスケールしたアジア全域のSO₂の排出量マップを**Fig. 3**に示した。中国の重工業地域での排出量が多い事がわかる。また、北京・天津市周辺のNO_xの排出量分布を拡大したものを**Fig. 4**に示した。NO_xでは発電所や工場などの大規模な排出源に加えて、自動車からの排出の割合が高いため、道路に沿って排出量が大きくなっている事がわかる。

3.2 大気拡散シミュレーションモデル

排出量分布マップを作成することができれば、次に

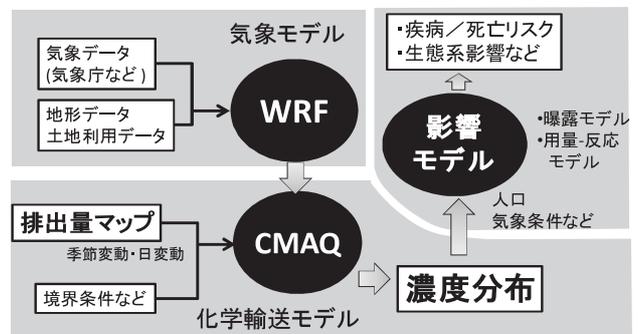


Fig. 5 Air Quality and its Impact Model

排出量マップを入力として大気拡散シミュレーションを実行して濃度場を計算する。

Fig. 5にモデルの構成を示した。気象モデルには、米国の研究機関が中心になって開発が進んでいるWRF-ARWモデルを利用して、4段階にネスティングを行った。最も大きな領域では、格子長80 kmで東アジア域をカバーし、最も詳細な領域では、格子長1kmで注目する都市圏をカバーする。気象モデルを動かすためには、境界条件となる気象データが必要となるが、過去の計算を行うためには、全球の客観解析データを用いる。将来の計算を行うためには、気候モ

デルからの出力を同様に利用する。気候モデルには、同じモデルによる計算であっても、GHGの排出パターンの想定によって計算結果が異なるため、適切な気候モデルの出力を用いる必要がある。

次に大気化学輸送モデルによって、大気汚染物質の輸送・拡散過程を計算して、濃度場を得る。これには、米国EPAで開発されている3次元オイラー型のモデルであるCMAQを利用した。計算領域は前述のWRFの領域と一致しており、WRFからの風速、気温、相対湿度、雲量、降水量などを入力として利用して、輸送過程と化学反応を計算する。CMAQでは大気中の物理過程、気相化学反応、粒子化モデルなどに多様な選択肢が用意されているが、ここで用いたCB05-AERO4では気相51化学種、気相反応156本に加えて、無機・有機の二次粒子生成、湿性・乾性沈着、粒子平衡過程などを扱うことができる。気象モデルと同様に一番外の領域については、境界条件が必要となるが、全球化学輸送モデルの実行結果を入力として利用する場合と、観測やモデル計算から得られた平均的な緯度・高度別の濃度を境界条件として利用する場合がある。

排出量は上述した方法で求めた排出量マップに季節変動・日変動を考慮して入力として利用する。人為起源以外にも植物起源の炭化水素、農地や土壌起源の窒素酸化物、火山からの硫黄酸化物、海洋からの海塩粒子、森林火災起源の汚染物質、雷による窒素酸化物などを考慮する。

Fig. 6に計算結果の例として、地表面オゾン濃度の月平均の分布を示した。オゾンは光化学オキシダントの主たる成分であり、光化学オキシダントの日本の環境基準は0.06 ppmであるが、この図より、春季の日本付近の平均濃度は既に0.06 ppmに迫っており、これは、大陸での前駆物質(NO_xおよびNMHC)の排出に起因する長距離輸送が原因であると考えられている。また、オゾンによる農作物への影響は0.04~0.06

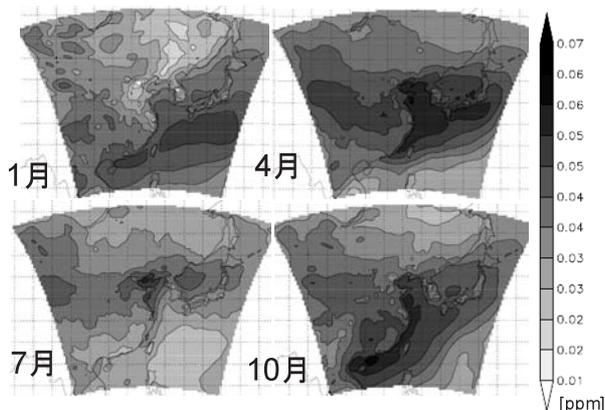


Fig. 6 Calculated Monthly Average of Surface Ozone concentration [ppm]

ppmから生じるという研究があるため、今後のオゾン濃度の推移が懸念されている。PM_{2.5}や他の化学種についても同様に計算を行っている。

3.3 影響評価モデル

濃度場が得られれば、最後に影響の評価を行う。健康影響の場合には、疫学調査で得られた関係式を利用する事になるが、その際に、その地域の平均濃度と疾病との関係式である濃度-反応(C-R)関係式を用いる場合と、さらに個人の生活パターンや生活環境(室内、車内など)毎の濃度分布も考慮して大気汚染物質への曝露量を考慮する用量-反応(D-R)関係式を用いる場合とがある。C-Rの場合には、適切な空間解像度で計算した拡散モデルの出力を利用する事ができるが、D-Rの場合には、室内の発生源を考慮した室内濃度の計算やコホート毎の生活時間パターンの適用などが必要となる。

また、農産物への影響としては、オゾンによる穀物生産への影響が懸念されており、40 ppbを超えた時間値の累積であるAOT40(ppb・h)や、光合成を行う昼間7時間の平均濃度などにより評価される。東アジア地域でも収穫量を大きく減少させる可能性が指摘されている。

4. ま と め

本稿では、東アジア地域を対象として、持続可能社会における大気汚染削減ビジョンの考え方と、温暖化対策と大気汚染対策のコベネフィットの定量化のための統合モデルのフレームワークについて論じた。

ポスト京都議定書の議論で途上国への削減目標の導入について、先進国と途上国の間で激しい駆け引きが続いているが、途上国が十分なベネフィットを得られる事が、この議論を前進させるために不可欠であると考え。今後、これらのモデルにより途上国にベネフィットを明確に示す事ができるようにさらにモデルの開発を進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) J. Bollen, B. van der Zwaan, C. Brink and H. Eerens: Local air pollution and global climate change: A combined cost-benefit analysis, Resource and Energy Economics, Vol. 31, No. 3, pp. 161-181 (2009)
- 2) 島田幸司, 溝口真吾, 松岡 謙: 地球温暖化対策が地域大気環境に及ぼす副次的効果に関する研究, 土木学会論文集, No. 685/VII-20, pp. 135-146 (2001)
- 3) D. Burtraw, A. Krupnick, K. Palmer, A. Paul, M. Toman and C. Bloyd: Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector, Journal of Environmental Economics and

- Management, Vol. 45, No. 3, pp. 650-673 (2003)
- 4) 環境省：東アジアにおける広域大気汚染の解明と温暖化対策との共便益を考慮した大気環境管理の推進に関する総合的研究, 平成21年度地球環境研究総合推進費研究課題, S-7
<http://www.env.go.jp/earth/suishinhi/>.
 - 5) K. R. Smith and E. Haigler: Co-Benefits of Climate Mitigation and Health Protection in Energy Systems: Scoping Methods, Annual Review of Public Health, Vol. 29, No. 1, pp. 11-25 (2008)
 - 6) V. Ramanathan and Y. Feng: On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: Formidable challenges ahead, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 105, No. 38, pp. 14245-14250 (2008)
 - 7) Kloster, S, F. Dentener, J. Feichter, F. Raes, U. Lohmann, E. Roeckner, and I. Fischer-Bruns: A GCM study of future climate response to aerosol pollution reductions, Climate Dynamics, doi.10.1007/s00382-009-0573-0 (2009)
 - 8) 長山友祐：アジア地域の大气環境負荷物質排出量推計に関する研究, 京都大学工学研究科修士論文 (2009)