

34. 森林への黒色炭素粒子の乾性沈着に関するモデル評価

永田 大樹^{1*}・村尾 直人¹・山形 定¹

¹ 北海道大学工学院衛生環境工学コース（〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目）

* E-mail: hirogori@ec.hokudai.ac.jp

大気中の黒色炭素粒子が樹木の葉に沈着して光合成機能障害が起こることが懸念されている。本研究では、東南アジア地域を対象として、黒色炭素粒子が植物に及ぼす影響を評価するために、3つの沈着モデルSlinnモデル、Zhangモデル、堅田モデルを使用した輸送モデル計算を行いそれらの比較・評価を行った。

BC濃度は12月を通して堅田モデルが最も高く（月平均濃度 $1.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）、次にSlinn(0.76)、Zhang(0.62)の順となった。堅田モデルの使用により観測濃度の $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に近づくが、いずれも過小評価になっている。堅田モデルを使用した沈着量分布では、森林地域での沈着量は、光合成障害が起こるとされる $1000\text{g}/\text{km}^2$ を超える沈着になっており、これらの地域では、さらに詳細な評価を行うことが必要であると考えられる。

Key Words : BC, WRF, CAMx, 乾性沈着, 沈着量

1. 背景と目的

20 世紀後半から中国、インドや東南アジアは急速な経済発展を続け、各種産業から多くの大気汚染物質を排出している。また東南アジアでは乾季の焼畑や森林火災といったバイオマス燃焼からも大気汚染物質の排出がある。地理的に東南アジアの中央に位置し、北東貿易風により中国からの風もみられるタイでは、その両者による大気汚染が懸念されてきた。

筆者らは、産業活動とバイオマス燃焼の両者から多量に排出され気候影響、人体への影響が大きい黒色炭素エアロゾルに着目し、その測定やモデル研究を行っていたが、本研究では、筆者らが観測を行っているタイの森林への乾性沈着に着目し、化学輸送モデルにおける乾性沈着の取り扱いがモデル計算値にどのように影響するかを評価することを目的として研究を行った。黒色炭素エアロゾルの葉面沈着の影響については、最近、光合成活性の低下についての実験結果が得られているが、乾性沈着は、粒子状物質や微量気体が降水によらず沈着面に輸送される過程で、特にタイのように乾季がある地域においては、大気汚染物質を地表にもたらす重要な過程であると考えられる。

2. 研究方法

2.1 化学輸送モデル CAMx

化学輸送モデル CAMx(Comprehensive Air quality Model with extensions)を用いて、黒色炭素エアロゾルの排出・移流・拡散・沈着を計算を行った。CAMx は以下の式に基づき計算を行っている。

$$\frac{\partial c_l}{\partial t} = -\nabla_H \cdot V_H c_l + \left[\frac{\partial(c_l \eta)}{\partial z} - c_l \frac{\partial(\eta)}{\partial z} \right] + \nabla \cdot \rho K \nabla(c_l / \rho) + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Emission}} + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Chemistry}} + \left. \frac{\partial c_l}{\partial t} \right|_{\text{Removal}}$$

ここで、右辺第一項は水平方向の移流、第二項は鉛直方向の移流と希釈、第三項は鉛直方向の乱流拡散を表し、第四項、第五項、第六項はそれぞれ排出、化学反応、沈着である。計算の対象期間は、予備計算で中国からの長距離輸送が卓越することが示され、乾性沈着モデルの違いが最も明確になると考えられた乾季前半(2009 年 12 月)とした。他の解析条件は以下の通りである。

対象領域：アジア南東部 (N-10~40°、E70~130°)

空間分解能：56km×56km (約 0.5° 四方)

時間分解能：5 分

排出量：REAS¹⁾

気象データ：WRF モデルにより計算

2.2 エアロゾルの乾性沈着モデル²⁾

乾性沈着を計算するモデルでは、電気回路アナロジーを導入して、大気における輸送過程を空気力学的抵抗 r_a 、沈着面近傍における輸送過程を表面抵抗 r_b 、沈着面における相互作用過程を移動抵抗 r_c とする直列抵抗モデル(図 1)で表し、沈着速度をこれらの全抵抗の逆数として用いることが多い。以下では本研究で使用した三つの乾性沈着モデルについて簡単にふれる。

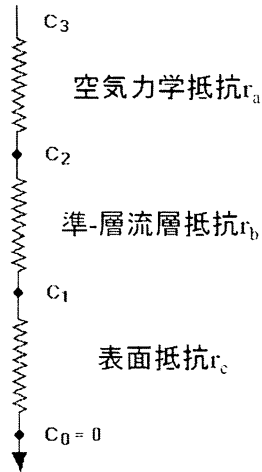


図 1 乾性沈着過程における抵抗モデル

2.2.1 Slinn モデル

粒子の地表面への沈着は、拡散、衝突、重力沈降により起こり、粒径はこれらのプロセスを制御する支配的な変数である。Slinn and Slinn³⁾ の抵抗法では、エアロゾルの粒子沈着速度を次式で求める。

$$v_d = v_{sed} + \frac{1}{r_a + r_b + r_a r_b v_{sed}}$$

ここで v_{sed} は重力沈降速度で、エアロゾルの粒径と密度に依存する。

$$v_{sed} = \frac{D^2 g C \rho_p}{18 \nu}$$

ここで D は与えられた粒径区間の対数平均粒子直径(m)、 ρ_p は粒子密度 (g m^{-3})、 g は重力加速度、 ν は空気粘性、 C は小粒子に対する Cunningham の修正係数である。空気力学抵抗 r_a は、モデルの最下層での乱流拡散によるバルク輸送を表し、その大きさは、乱流強度、したがって、日射、風速、地表面粗度と地表面近くの温度減率に依存する。CAMx ではそれを次のように計算する。

$$r_a = \frac{1}{k u_* \left[\ln \left(\frac{1}{z_0} \right) - \phi_h \right]}$$

ここで、 u_* は摩擦速度 (m/s)、 k は Karman 定数、 z はモ

デルの最下層の中間高度(m)、 z_0 は地表面粗度(m)、 ϕ_h は安定修正項である。摩擦速度と安定度修正は、地表近くの気象条件と粗度長の関数として与える。一般に、空気力学抵抗は、地表面加熱と機械的乱流による強い混合がある暖かく快晴の日に最小になり、乱流混合が抑えられる気温が低く風が弱い夜に最大になる。

境界抵抗 r_b はエアロゾルのブラウン拡散と慣性衝突に依存する。

$$r_b = \frac{1}{u_* (S_i^{-2/3} + 10^{-3} S_i)}$$

S_i はストークス数で

$$S_i = \frac{v_{sed} u_*^2}{\nu g}$$

2.2.2 Zhang モデル⁴⁾

これまでに提案された粒子の乾性沈着モデルの多くは、風洞測定に対して評価されたものであったが、フィールドでの測定との不一致がしばしば報告されている。Zhang ら³⁾ は、粒子の乾性沈着に対して、粒径と土地利用の関数としての簡単なパラメタリゼーションを構築し、それは特に植物が生育する粗度の大きい地表面上でサブミクロン・エアロゾルの高い沈着速度を予測するものである。エアロゾルの沈着は、詳細なキャノピー情報を簡略化した経験的パラメタリゼーションを用いて置き換える以外は Slinn³⁾ のモデルに基づく。エアロゾル沈着速度は、以下のように定義される：

$$v_d = v_{sed} + \frac{1}{r_a + r_s}$$

ここで、 v_{sed} と r_a は Slinn と Slinn³⁾ の定義と同じであるが、この場合、仮定の直列抵抗 $r_a r_s v_{sed}$ が除かれ、より高い沈着速度になる。地表面抵抗 r_s は以下で与えられる

$$r_s = \frac{1}{\epsilon_0 u_*^* (E_B + E_{IM} + E_{IN}) R_f}$$

ここで、変数 E はブラウン拡散、密着とさえぎり作用の捕集効率で、 R_f は、表面に付着する粒子の割合、 ϵ_0 は経験的な定数である。ブラウン運動の捕集効率は Schmidt 数に依存し、衝突効率と R_f はストークス数に依存する。また、毛を持つ葉の近くを大きな粒子が通過するときのように、粒子がその径より短い距離にある障害物を通過する場合にはさえぎりによる捕集も存在する。Zhang ら³⁾ は、この項に粒径と土地利用、季節に対してデフォルト値が与えられる特性半径の関数として簡単な式を採用した。

2.2.3 堅田モデル

CAMx では Slinn モデル、Zhang モデルが選択できるようになっている。Zhang モデルが追加されたことによって、森林に対する沈着速度は改善されたと考えられるが、このモデルでは土地利用ごとの沈着速度の違いがなく、あらゆる土地利用において沈着速度が大きくなっており、過大評価となる地点も考えられる。そこで本研究では、新しいモデルとして堅田モデルを導入した。堅田モデルでは、最近の論文⁶⁽¹⁷⁾に基づいてZhangモデルのブラウン拡散とさえぎりの捕集係数を修正しており、次節に示すように、土地利用による違いが明らかとなり、針葉樹・広葉樹を除いて全体的に沈着速度が小さくなっている。

4. 結果

(1) 沈着速度分布

図 2～4 に Slinn モデル、Zhang モデル、堅田モデルの乾性沈着速度を示す。森林への沈着速度を除くと、Zhang モデルは、Slinn モデル、堅田モデルと比較しておよそ 1 オーダー大きいことがわかる。また、Zhang モデル、Slinn モデルはともに、土地利用の違いによる沈着速度の違いがなく、沈着速度分布がはっきりしていない。一方、堅田モデルは土地利用の違いによる沈着速度の違いがはっきりしている。例えば、海での沈着速度はほぼ 0 になっていること、他の土地利用と比較して森林への沈着速度が大きくなっていることなどである。

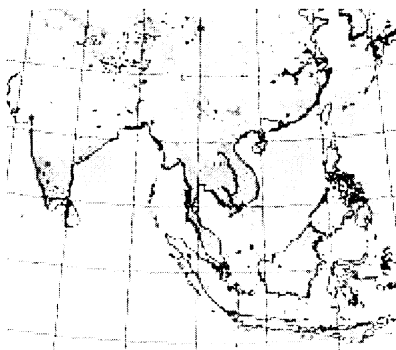


図 2 Slinn モデルによる乾性沈着速度 (cm/sec)

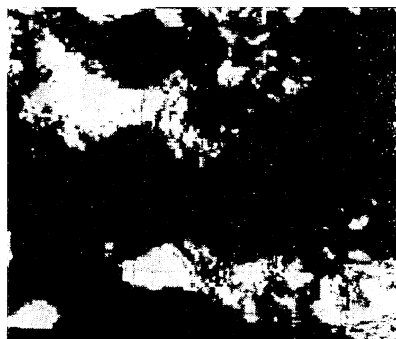


図 3 Zhang モデルによる乾性沈着速度 (cm/sec)

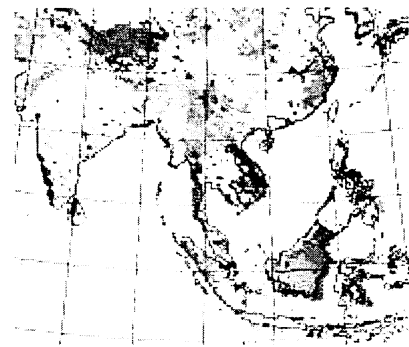
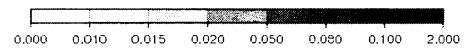


図 4 堅田モデルによる乾性沈着速度 (cm/sec)



(2) 沈着量分布

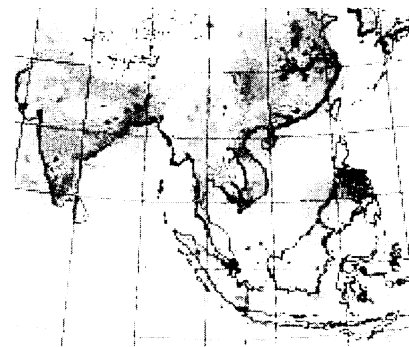


図 5 Slinn モデルによる乾性沈着量 (g/km²/month)

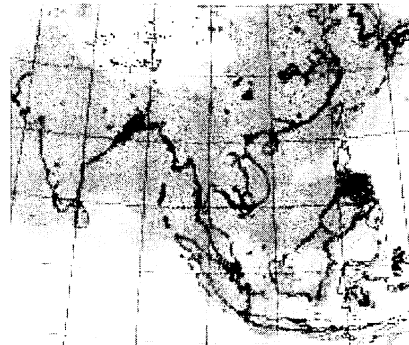


図 6 Zhang モデルによる乾性沈着量 (g/km²/month)

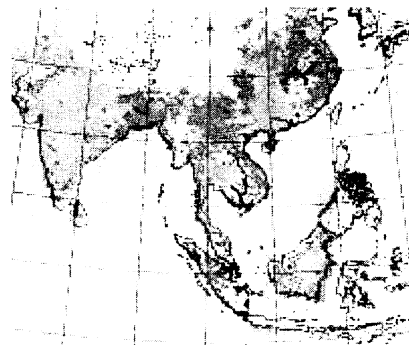


図 7 堅田モデルによる乾性沈着量 (g/km²/month)

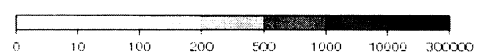


図5～7に各モデルの乾性沈着量を示す。Slinnモデルと堅田モデル沈着量分布は森林域を除いて類似しているが、堅田モデルの森林域の沈着量はSlinnモデルの約10倍となっており、多くの地域で光合成機能障害が起こるとされる $1000\text{g}/\text{km}^2$ 以上の沈着になっている。また堅田モ

デルでは、フィリピン周辺で特に沈着量が大きくなっているが、沈着速度分布から、フィリピン周辺では顕著な沈着速度はないため、沈着量は発生源の影響が大きいといえる。またベトナムとミャンマーでは、沈着量分布は沈着速度分布にほぼ従っていることがわかる。

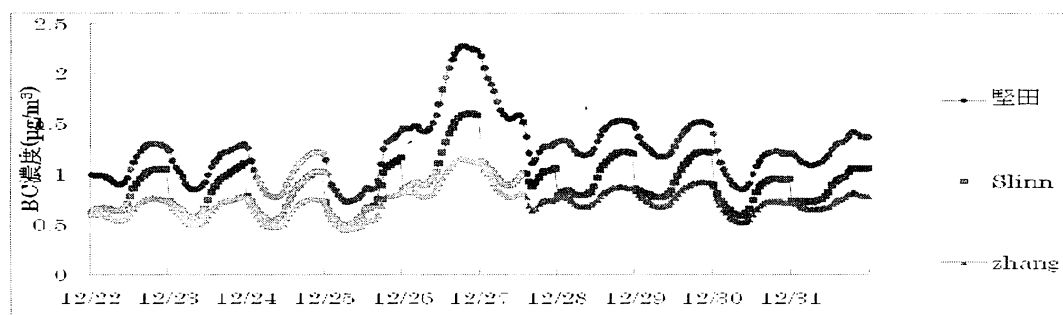


図8 各沈着モデルを使用したBC濃度計算値($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、日付は0時

(3) BC濃度計算値

BC濃度は1月を通して堅田モデルが最も高く(月平均濃度 $1.06\mu\text{g}/\text{m}^3$)、次にSlinn(0.76)、Zhang(0.62)の順となった(図8)。しかし、観測濃度は $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度なのでいずれも過小評価になっている。BC濃度は日中低く、夜間高くなっている。これは拡散によるものと考えられる。すなわち、日中は対流による混合でBC濃度が下がり、夜間は混合が抑制されるためBC濃度は高くなる。石崎⁹⁾によると、12月27日の高濃度は、中国から長距離輸送されたBCがタイに流入することが原因であるが、三種類の沈着モデルによるBC濃度の違いが最も大きい。これは、乾性沈着速度の違いが長距離輸送時に最も明確に現れることを表すものである。

5. 結論

本研究では、三種類の沈着モデルを用いて、それらがもたらす沈着量分布の違いを明らかにした。従来のSlinnモデルと比較して、新規にCAMxモデルに取り入れられたZhangモデルは全ての場所の沈着量を大きく増加させた。また、堅田モデルは森林域だけの沈着量を増加させ、BC濃度計算値は3つのモデルで最も観測値に近い値になった。

堅田モデルを使用すると、東南アジアの多くの森林地域の沈着量が、光合成機能障害が起こるとされる $1000\text{g}/\text{km}^2$ 以上の沈着量になることがわかった。この地域では、乾季が半年間続くことやモデルの濃度過小評価から、さらに詳細な評価を行うことが必要である。

謝辞：

本研究を進めるにあたり協力いただいた堅田元喜先生

に心から感謝いたします。本研究は、科研費新学術領域研究(20120012)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., and Hayasaka, T. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 4419-4444, 2007
- 2) Slinn, S.A. and W.G.N. Slinn. Predictions for particle deposition on natural waters. *Atmos. Environ.*, 24, 1013-1016, 1980.
- 3) Zhang, L., S. Gong, J. Padro, L. Barrie, A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module. *Atmos. Environ.*, 35, 549-560, 2001.
- 4) Slinn, W.G.N., Predictions for particle deposition to vegetative surfaces. *Atmos. Environ.*, 16, 1785-1794, 1982.
- 5) Katata, G., Nagai, H., Wyrzesinsky, T., Klemm, O., Eugster, W., Burkard, R., Development of a land surface model including cloud water deposition on vegetation, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47, 2129-2146, 2008.
- 6) Katata, G., Nagai, H., Zhang, L., Held, A., Serca, D., Klemm, O., Development of an atmosphere-soil-vegetation model for investigation of radioactive materials transport in the terrestrial biosphere, *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, 2, 530-537, 2011.
- 7) Petroff, A., Zhang, L., Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models, *Geosci. Model Dev.*, 3, 753-769, 2010.
- 8) 石崎匡晃、タイにおける黒色炭素エアロゾルの観測とモデリングによる評価、北海道大学大学院修士論文、2010.