

39. 東アジアの森林を対象とした 黒色炭素エアロゾルの葉面沈着量の評価

山田哲郎、村尾直人*、山形 定

北海道大学大学院工学研究院（〒060-8628 札幌市北区北13条西 8 丁目）

* E-mail: murao@eng.hokudai.ac.jp

東アジア、東南アジアの森林生態系における大気エアロゾルの森林影響の広域評価を目的として、2010年を対象に化学輸送モデルを用いたシミュレーションを行った。モデル計算では、最近の観測結果を元に、乾性沈着計算法を検討し、適切と考えられる計算法に変更するとともに、LAIを用いて葉面沈着量を求める方法について検討を行った。比較できる観測結果は少ないが、モデルは概ね、タイの森林地域での観測結果を再現していた。東南アジア地域では、東アジアと異なり、総沈着量の多くを乾性沈着が占める結果となった。東アジア、東南アジアの森林域での乾性沈着量は、光合成機能に障害を生じると考えられるレベルを超える地域がみられた。

Key Words : Atmospheric aerosols, Black carbon, Dry deposition on Forest ,LAI

1. 背景・目的

今年1月に北京市を中心に中国の諸都市で大規模かつ深刻な大気汚染が発生し、それが大きく報じられることで、微小粒子状物質（PM2.5）による汚染への懸念が高まっている。以下では濃度が高く森林影響が著しいと考えられる東南アジアの結果を中心に、大気中の黒色炭素（Black Carbon, BC）エアロゾルの葉面沈着量に関する計算方法および計算結果を述べる。

2. 研究方法

(1) CAMxモデルによる濃度・沈着量計算

広域評価に使用した化学輸送モデルCAMx (Comprehensive Air quality Model with extension) は、ガス状・粒子状大気汚染物質の排出・輸送・反応・沈着の計算を行うモデルである。CAMx v5.4¹⁾を用いて、各種エアロゾルの月平均濃度分布、乾性沈着・湿性沈着の月間および年間分布を求めた。計算条件を表1に示す。

計算に使用した入力データは以下の通りである。

- (a) 気象データ：地域気象モデルWRF²⁾を使用して、計算領域の気象データを1～2時間間隔で出力し、CAMxへの入力データとした。
- (b) 排出量データ：人為起源排出量としてIntex-B（年間値、2006年）³⁾、バイオマス燃焼起源排出量として

FINN（日別値）⁴⁾を使用し、計算対象領域に割り当てた。人為起源排出量の季節・日内変動、バイオマス燃焼起源排出量の日内変動は考慮していない。

- (c) 初期条件、境界条件：全球化学輸送モデルMOZART-4をGEOS-5モデルによる気象データで実行して得た出力結果⁵⁾（6時間間隔、1.9×2.5度の距離分解能、鉛直レベル）を用いて初期条件、境界条件を作成した。
- (d) 反応機構、光解離定数：CAMxで使用できる反応機構の中からSAPRC⁶⁾を使用した。光解離定数は、オゾンカラム量の衛星観測データを用いて作成した。
- (e) 粒径分布：黒色炭素、硫酸塩など、微小粒子の代表粒径は、札幌での観測結果⁷⁾から0.9 μmとした。

表1 CAMxモデル計算条件

解析期間	2010年通年
計算領域 (中心座標)	東南アジア：15N, 130E 東アジア：35N, 125E
空間分解能	0.5° × 0.5°
鉛直層	対流圏 14層
時間ステップ	15分

(2) 乾性沈着計算法の変更

最近の観測結果⁸⁾から、黒色炭素や硫酸塩など、微小粒子の森林への沈着速度がこれまでの推定値とかなり異

なることが示されたため、最近の観測に基づき提案された沈着モデル⁹⁾を参考として、粒子の沈着をもたらす慣性衝突、さえぎり、拡散について、CAMx で採用されているZhang法¹⁰⁾の修正を行った。図1に常緑広葉樹について、乾性沈着計算法の違いを示す。サブミクロン粒子に対する沈着速度を比較すると、化学輸送モデルで従来使用されてきたSlinn and Slinn¹¹⁾法やZhang法による計算値が粒径とともに沈着速度が小さくなるのに対して、Zhang修正法では逆に大きくなっている。また1 μm 付近の沈着速度はZhang修正法が最も大きくなり、観測結果に近い値になっている。図2にZhang修正法を用いて求めた2010年12月の乾性沈着速度分布を示す。森林域以外は0.05 cm/sec以下、森林域では0.15 cm/sec以上の値となっており、これまでの計算法よりも土地利用による違いが明確になっている。

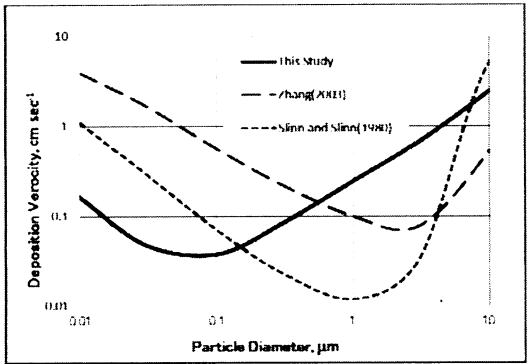


図1 常緑広葉樹へのエアロゾルの乾性沈着速度の比較
(参照高度25m、安定度:中立、粗度長:1m、 $u^*=0.54\text{ m/s}$ 、粒子密度=1g/cm³)

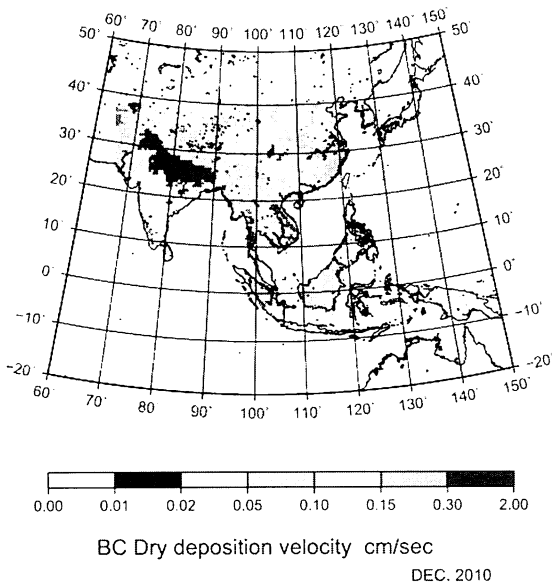


図2 Zhang修正スキームによる沈着速度分布図
(cm/s、2010年12月平均値)

(3) LAIデータの作成

GEOLAND2¹²⁾によるLAIデータ (2週間の時間分解能、約1kmの空間分解能) より、モデル対象地域のLAI分布を月別に作成した。作成に当たっては、まず土地利用データから森林を含む計算格子を得た。そして、その計算格子に対応する3000個程度のデータについて頻度分布を求め、その最頻値を計算格子の代表値とした。

(4) 葉面沈着量の計算

地域気象モデルWRFに初期条件・境界条件を与え、期間や領域を指定することで計算に使用する気象データを得た。気象データとともに、濃度場の初期条件・境界条件をCAMxに与え、大気中の濃度や乾性・湿性沈着量を算出した。得られたBCの乾性・湿性沈着量を(3)で得たLAIの2倍値で割って葉面沈着量とした。LAIの2倍値を使用したのは葉の両面を考慮するためである。

3. 結果・考察

(1) 乾性沈着計算法の検討

図3に各沈着計算法を使用した2009年12月、タイの森林地帯 (サケラート付近) のBC濃度計算値を示す。BC濃度は12月を通してSlinn and Slinn法が最も高く、次にZhang修正法、Zhang法の順となった。計算法による違いは、近隣の発生源の影響が大きい期間でより小さく、中国からの長距離輸送が卓越する期間でより大きくなっている。従来使用されてきたSlinn and Slinn法では粒子の乾性沈着速度が小さいため、その結果は乾性沈着を考慮しない結果と変わらない期間も見られる。Zhang法ではすべての土地利用に対して乾性沈着速度が大きくなるため、濃度は最も低くなる。森林への乾性沈着速度が妥当な値になったと考えられるZhang修正法では、濃度計算値についてもSlinn and Slinn法よりは低いものの、観測結果に近い結果となった。

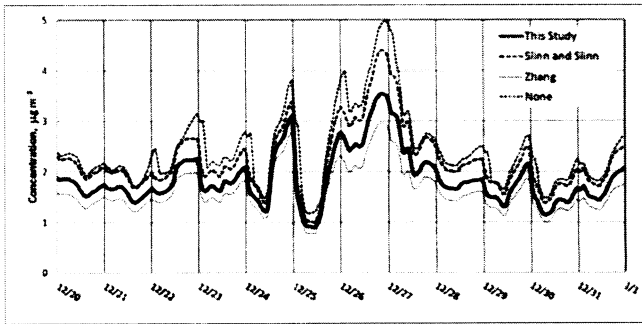


図3 各沈着計算法を使用したBC濃度計算値 (μg/m³)

(2) LAIデータの作成

図4にLAI分布の例として東アジア地域の2010年5月のLAI分布を示す。計算格子が大きいので、代表値の設定に難しさがあるが、概ね妥当な分布を得ることができたと考えられる。

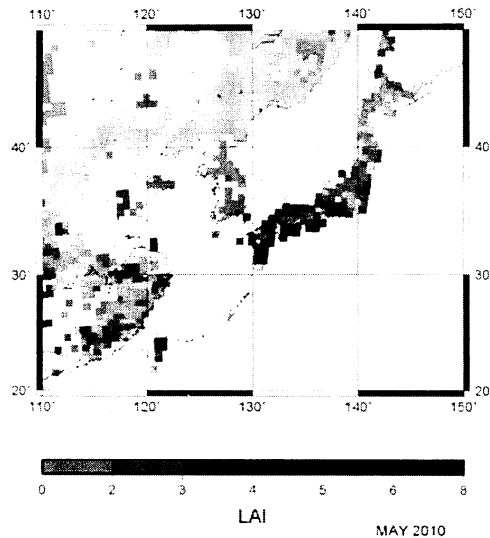


図4 LAI分布 (2010年5月)

(3) CAMxモデルによる濃度計算

以上の検討をもとに、2010年を対象としてZhang修正法を使用したCAMxモデルシミュレーションを行った。図5に、サケラート付近の森林地域における2010年の硫酸塩エアロゾルと黒色炭素エアロゾルのモデル計算濃度を観測結果とともに示す。モデル計算値は年間を通じて観測値を概ね良好に再現しており、サケラートでの乾季後半の黒色炭素濃度の最大、乾季前半の硫酸塩濃度の最大、雨期の濃度低下などの季節変動を示した。図にはバイオマス燃焼の指標であるカリウム濃度の変動も示したが、BC濃度と同様に乾季後半に高くなっており、同時期におけるBC濃度変動へのバイオマス燃焼の支配的な寄与が示唆される。

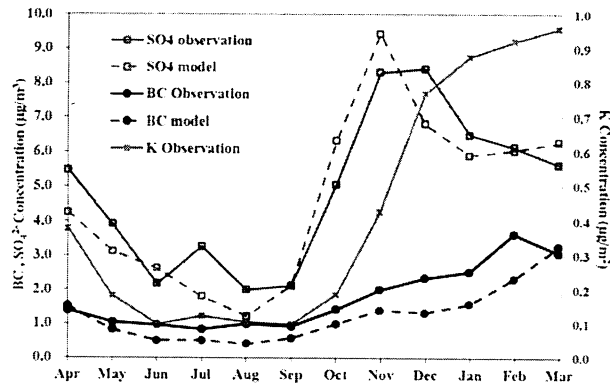


図5 硫酸塩エアロゾルとBCエアロゾルとK+の濃度変動 (実線は観測値、破線は計算値)

(4) CAMxモデルによるBC沈着量

図6に、タイの森林地帯（サケラート）における硫酸塩エアロゾルと黒色炭素エアロゾルの乾性・湿性沈着量計算値の月別変動を示す。硫酸塩も黒色炭素も乾季に乾性沈着量が増加するが、硫酸塩が乾季前半の11月に最大の沈着量を示すのに対して、黒色炭素エアロゾルは乾季後半の3月に最大になった。また年間沈着量に関して、硫酸塩は乾性・湿性沈着量が同程度であったが、黒色炭素は沈着量の70%以上が乾性沈着によるものとなった。

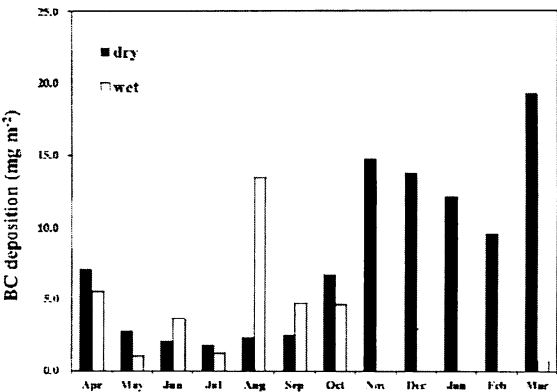


図6 黒色炭素エアロゾルの乾性・湿性沈着量 計算値の月別変動

(5) 葉面沈着量の季節変動

東アジアの葉面沈着量は、いずれの月も中国東部で高く、日本で低い分布となった。これらの地域による沈着量の違いは主に大気中濃度の違いが原因と考えられる。中国東部の森林地域における葉面乾性沈着量は、夏季は0.5mg/m²以下、冬季は1.0mg/m²以上になっており、気象条件の季節変動の影響が大きいように見える。これに対して日本では0.5mg/m²以下の沈着が通年にわたって続いていた。中国東部では年間を通してBCの大気中濃度が高く、季節風等の影響で日本までBCが長距離輸送されている。BCの大気中濃度と合わせて見ると、西日本に沈着したBCの多くは中国東部で発生したものであると考えられる。また、葉面湿性沈着量には一定の季節変化はなく、降水に伴う変化が見られた。

(6) 年間葉面沈着量

東アジア、東南アジアでの森林域における年間葉面乾性沈着量と年間葉面湿性沈着量をそれぞれ図7、図8に示す。光合成機能障害が生じる葉面1m²当たりのBC沈着量の目安を、広葉樹で数mg以上、針葉樹で10mg以上とすると、中国東部では、森林域の半分以上の地域において10mg/m²以上のBCが沈着しており、針葉樹、広葉樹ともに影響が考えられる量になっている。日本では多い所で3.0～5.0mg/m²、ほとんどの森林地域で1.0～3.0mg/m²にな

っており、広葉樹では影響が出ている可能性が考えられる。一方、東南アジアでは、タイ北部～ラオスの森林で 50mg/m^2 以上の乾性沈着量が計算されるほか、ベトナムの森林でも 10mg/m^2 以上の乾性沈着量になっており、この地域の森林の多くが広葉樹林であることを考えると、光合成機能障害が実際に生じていることが懸念される。

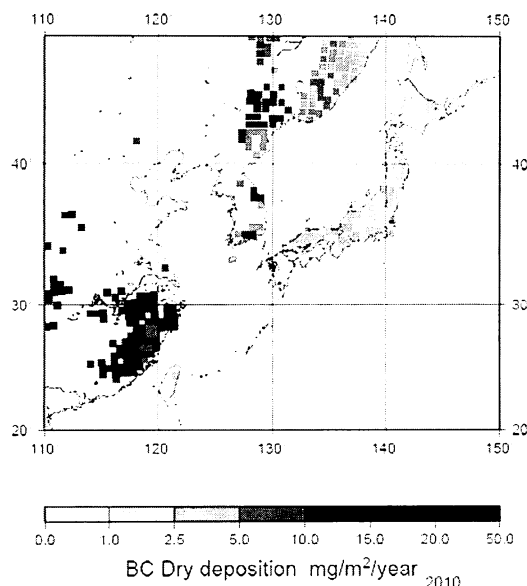


図7 東アジアの森林域における葉面沈着量(2010年)

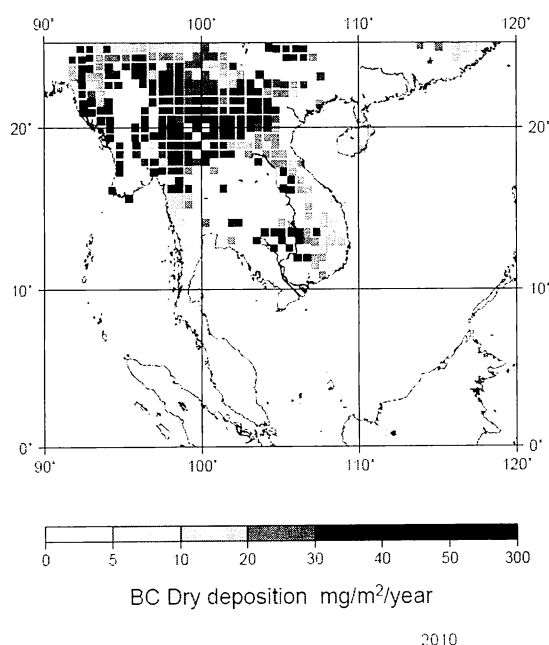


図8 東南アジアの森林域における葉面沈着量(2010年)

謝辞：乾性沈着計算法については、日本原子力研究開発機構 堅田元喜先生にご協力いただきました。また、タイでの観測に協力いただいた関係者各位に感謝いたします。本論文をまとめるにあたり、科研費新学術領域研究(20120012)の助成を受けました。

参考文献

- 1) ENVIRON, User's guide: comprehensive air quality model with extensions (CAMx), Version 5.4. Prepared by ENVIRON International Corporation, Novato, CA, 2012. Available at: www.camx.com.
- 2) Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G., A description of the advanced research WRF Version 3. National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, CO (NCAR/TN-475+STR, June 2008). Available at: http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf.
- 3) Zhang, Q., Streets, D. G., Carmichael, G. R., He, K. B., Huo, H., Kanari, A., Klimont, Z., Park, I. S., Reddy, S., Fu, J. S., Chen, D., Duan, L., Lei, Y., Wang, L. T., and Yao, Z. L., Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153, 2009. Available at: http://www.cgcr.uiowa.edu/EMISSION_DATA_new/index_16.html
- 4) Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Emmons, L. K., Al-Saadi, J. A., Orlando, J. J., Soja, A. J., The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning, *Geoscientific Model Development Discussions*, 3: 2439-2476, 2010. Available at: <http://baa.acd.ucar.edu/Data/fire/>.
- 5) Emmons, L. K.; Walters, S.; Hess, P. G.; Lamarque, J.-F.; Pfister, G. G.; Fillmore, D.; Granier, C.; Guenther, A.; Kinnison, D.; Laepple, T.; Orlando, J.; Tie, X.; Tyndall, G.; Wiedinmyer, C.; Baughcum, S. L.; Kloster, S., Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4), *Geoscientific Model Development*, 3, 43-67, 2010. Available at: <http://www.acd.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>
- 6) Carter, W.P.L., Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment. Air Pollution Research Center and College of Engineering, Center for Environmental Research and Technology, University of California, Riverside, Ca., 2000. Available at: <http://www.engr.ucr.edu/~carter/reactdat.htm>
- 7) 林正幸、大気エアロゾル化学成分の粒径分布測定、平成11年度北海道大学工学部卒業論文、2000。
- 8) Matsuda, K., Sase, H., Murao, N., Fukazawa, T., Khoomsub, K., Chanonmuang, P., Visaratana, T. and Khummongkol, P.: Dry and wet deposition of elemental carbon on a tropical forest in Thailand, *Atmospheric Environment*, 54, 282-287, 2012
- 9) Katata, G., Nagai, H., Zhang, L., Held, A., Serca, D., and 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.
- 10) Zhang, L., J. R. Brook, and R. Vet, A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models. *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 2067-2082, 2004
- 11) Slim, S.A. and W.G.N. Slinn, Predictions for particle deposition on natural waters. *Atmos. Environ.*, 24, 1013-1016, 1980.
- 12) <http://www.geoland2.eu/index.jsp>