

[研究報告]

熱帯地域における乾性沈着フラックス観測手法の開発

Development of a methodology for dry deposition flux measurement

松田和秀*, 渡辺一朗**

Kazuhide Matsuda and Ichro Watanabe

【要約】東南アジアの熱帯林における乾性沈着の実態を明らかにするためのフラックス観測手法の開発を行い、オゾンフラックスに関して有効な観測結果を得ることができた。調査地点の選定には、主風向の風上 500m 程度の広い範囲で平坦かつ一様な森林であり、観測対象物質の環境濃度が十分な精度で測れる程度に高いという条件のもと、タイ北部ランパン地方のメモ地区にあるチーク林が選ばれた。フラックスの測定は、超音波風速計と濃度計の組み合わせによる勾配法を用い、調査地点に 24m の鉄塔を建て、観測システムを構築した。さらに、フラックス観測で得られた沈着速度データの解析に関し、複数の機器の組み合わせに起因するランダムな誤差や勾配法の理論的限界外の環境条件に起因する系統的な誤差を軽減する方法を考案した。これらの方法を適用して、オゾンに対する当該チーク林の表面抵抗値を得ることができた。

キーワード：酸性雨、熱帯林、EANET、オゾン、勾配法

1. はじめに

東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) の本格稼働により、東アジアの広域における湿性沈着の実態が明らかになりつつある。しかしながら、乾性沈着に関しては、その実測すなわち乾性沈着フラックス観測が、比較的高性能な観測設備や高度な技術を必要とされるため、当該地域において未だ十分な調査は行われていない。

他方、近年の東アジア地域の経済発展に基づく硫黄・窒素酸化物及び VOC 等の排出量の増加が地域規模での大気汚染に与える影響を解析するため、酸性物質やオゾン等の濃度を計算可能とする長距離輸送モデルが開発されてきている^{1,2)}。このようなモデルの乾性沈着計算過程には、欧米での観測経験に基づく沈着速度の値やパラメタリゼーションがそのまま適用されているため、東アジア地域における実測に基づく検証が望まれている。ここ数年、北東アジアにおいては、乾性沈着フラックス観測が実施され^{3,4)}、沈着速度のパラメタリゼーションの検証が進められつつあるが、東南アジアでは未着手であった。

EANET の乾性沈着分野においては、酸性物質及びオゾン等の大気中濃度モニタリングを実施することと共に、東アジア地域の特徴的な沈着表面に対する酸性・酸化性物質の沈着速度に関わる調査研究が奨励されている⁵⁾。このような背景のもと、EANET のネットワークセンター (酸性雨研究センター) とタイ国内センター (Pollution Control Department) は、2000 年から東南アジアの熱帯林で乾性沈着フラックス観測を行う共同調査を立ち上げる準備を開始し、調査地点の選定、観測施設の整備を経て、2002 年から観測を開始した。ここでは、本共同調査において開発を進めている乾性沈着フラックス観測手法を紹介し、主にオゾンフラックスに関する観測結果について報告する。

2. 調査地点の選定

勾配法、渦相関法等の微気象観測技術に基づくフラックスの測定を行う際、対象表面は十分に平坦かつ一様でなくてはならない⁵⁾。主風向の風上 500m 程度の広い範囲で平坦かつ一様な森林という条件で、調査地点を選定した。また、調査地点は、観測対象物質の環境濃度が十分な精度で測れる程度に高い必要があることにも留意した。これらの条件のもと、バンコクの北方約 650km、ランパン地方のメモ地区

* (財)日本環境衛生センター・酸性雨研究センター
Acid Deposition and Oxidant Research Center, JESC** (財)日本環境衛生センター東日本支局環境科学部
Dept. of Environmental Science, East Branch, JESC

(北緯 18.28°, 東経 99.72°) にあるチーク林が選ばれた。選定されたチーク林の写真 (写真 1, 写真 2) から、当該森林が、広い範囲で平坦かつ一様であることが分かる。また、調査地点はメモ発電所 (写真 1 参照) の近くにあり、都市域から離れた広い森林であるにもかかわらず汚染物質濃度は高い。

調査地点は、Köppen の気候区分において熱帯のサバンナ気候に分類され、1 年間は乾季と雨季に分けられる。この地域は、亜熱帯落葉樹林の分布する地域であり、チークはその代表的な樹木の一つである。調査地点のチーク林の密度は、約 625 本/ha で、樹高は約 12m であった。



写真 1 調査地点付近のチーク林の外観



写真 2 調査地点付近のチーク林
キャノピー内の様子

3. フラックス観測・計算方法

本研究では、Baldocchi et al.⁶⁾ に基づく勾配法を基本として、物質と熱の輸送が同様であると仮定してフラックスを求める方法⁷⁾ を用いた。この方法は、基本的に、超音波風速計と、大気汚染監視等で用いられている濃度計の組み合わせによりフラックスを観測することができるため、今後、東アジアにおいて普及する可能性が大きい手法である。

本研究では、酸性物質として二酸化硫黄、酸化性物質としてオゾンのフラックスを対象とした。チーク林内の観測地点に、周辺の樹木を伐採せず、なるべく元の森林の状態を維持したまま、24m の鉄塔を建て、観測システムを構築した (写真 3)。システムの中心となる装置には、超音波風速計 (Gill Instrument LTD., Research HS)、紫外線吸収法式オゾン計 (サーモエレクトロン, Model 49C)、紫外線蛍光法式二酸化硫黄計 (サーモエレクトロン, Model 43TL) を用いた。この超音波風速計は、 100s^{-1} のサンプリング頻度で超音波測定を行い風速ベクトル及び音波温度を求め、これらのパラメータから、摩擦速度及びモニンオブコフ長を計算し出力することができる。濃度勾配は、サンプリング切替器を用いて、キャノピーの上、鉛直 2 高度 (地上 15m, 23m) の濃度を交互に測定することにより求めた。フラックス観測で得られた沈着速度を評価するための基礎データを得るため、他に、日射計、放射収支計、湿球乾球温度差計、地熱流計、感雨計、雨量計を設置した。

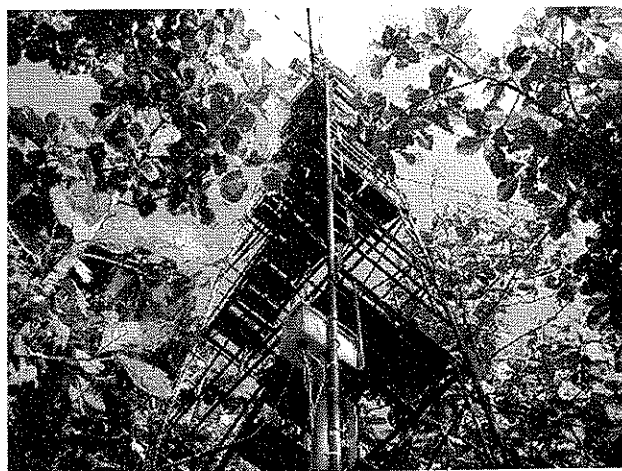


写真 3 観測鉄塔

観測された変数は、30分毎に平均化し、フラックス及び沈着速度を計算した、空気力学的勾配法によりオゾンフラックスを計算する基本式⁷⁾を以下に示す。

$$F = -u^*c^* \quad (1)$$

ここで、 u^* : 摩擦速度、 c^* : 渦濃度である。また、渦濃度は以下の式⁸⁾により求めた。

$$c^* = k \Delta c / [\ln((z_2-d)/(z_1-d)) - \Psi_h((z_2-d)/L) + \Psi_h((z_1-d)/L)] \quad (2)$$

ここで、 Δc : z_2 と z_1 の2高度間のオゾン濃度差、 d : 置換高度、 k : カルマン定数、 L : モニンオブコフ長、 Ψ_h : 熱安定度補正項⁷⁾である。沈着速度 (V_d) は、Wesely and Hicks⁹⁾に基づき以下の式により求めた。

$$V_d = -F/C \quad (3)$$

空気力学的抵抗 (R_a) 及び準薄層抵抗 (R_b) は、Buldocchi and Mayers¹⁰⁾に基づき、Lamaud et al.¹¹⁾がオゾンに適用した以下の式を用いた。

$$R_a + R_b = u/u^{*2} + (2/k u^*) (Sc/Pr)^{2/3} \quad (4)$$

ここで、 u : 風速、 Sc : Schmidt number、 Pr : Prandtl number である。さらに、抵抗モデルの基本式⁹⁾より、表面抵抗 (r_s) を求めた。

$$R_s = 1/V_d - (R_a + R_b) \quad (5)$$

4. 観測データの解析

式(1), (2), (3)から分かるように、沈着速度は、複数の機器の出力から算出される要素 (c , Δc , u^* , L) から決定されることになるため、ランダムな誤差を伴うことは避けられないと考えられる。このような問題を解決するため、フラックス観測データの集計には、ある程度の期間で平均化し、時刻毎の中央値を用いる方法がよく用いられている^{8,12)}。図1に2002年1月~4月のオゾンの沈着速度日内変動(中央値)を示す。期間中の中央値を用いることで、ランダム誤差の影響が軽減され、日内変動の傾向が見てとれる。

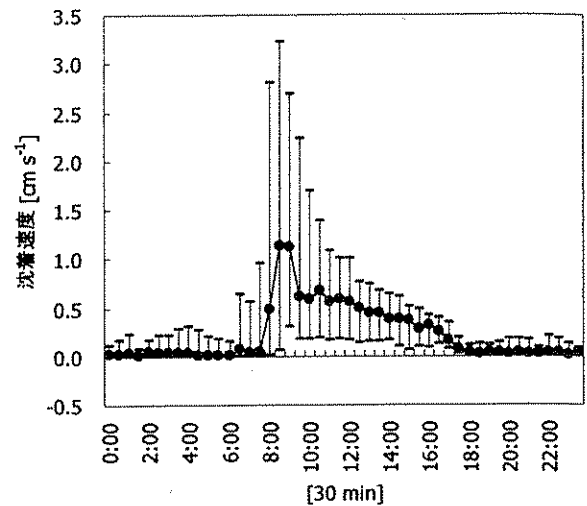


図1 2002年1月~4月のオゾン沈着速度の日内変動(データスクリーニング前)

上端、下端及び中央は、それぞれ、75、25パーセント値及び中央値を示す。

また、調査対象表面が平坦で一様であっても、自然環境が勾配法等の微気象測定法の理論に従うような理想的な状態にあることは稀であるため⁹⁾、ランダムではない系統的な誤差が生じている可能性がある。ここでは、同じ勾配法を用いて観測を行っている Feliciano et al.⁹⁾らが設定した有効データを得るための条件の中から、本調査地域に適した以下の二つの条件を選び、データスクリーニングを行った。

(1) $u \geq 1 \text{ m/s}$

(2) $|V_d| < 1.5 V_{d, \max}$ ($V_{d, \max} = 1 / (r_a + r_b)$)

これらの条件によるデータスクリーニングを行った後の沈着速度日内変動(中央値)を図2に示す。

図1で見られた午前中の8:00~9:00頃のピークが、図2ではなくなっている。これまでの知見^{12,13)}と比較すると沈着速度の日内変動パターンはスクリーニングした後(図2)の形に近い。同期間中の風速及び日射量を図3に示す。風速は、8:00~9:00頃に最も小さくなっているため、この間の空気力学的抵抗は大きく、すなわち沈着速度を小さくする傾向にあったと考えられる。森林キャノピー内の植物活性や対流等に影響を及ぼす日射量は正午にピークを持っており、午前中に表面抵抗を小さくする(沈着速度を大きくする)要因にはならない。また、湿度影響に関しては、オゾンは二酸化硫黄等に比べ水に溶けにくく影響を受けにくいと考えられ、また、対象期間が乾季であることから、当該時刻での沈着速度

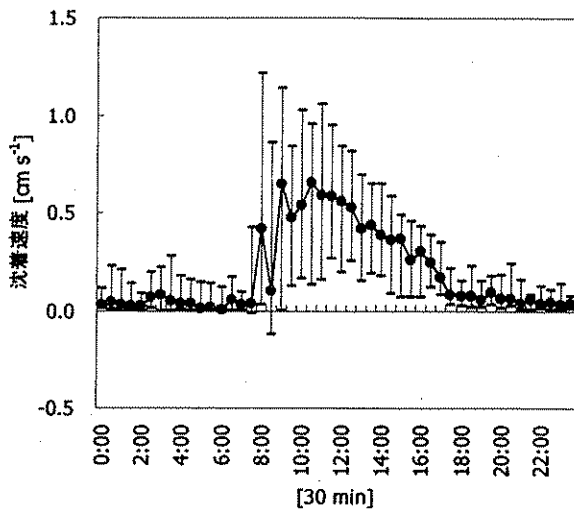


図2 2002年1月～4月のオゾン沈着速度の
日内変動（データスクリーニング後）
上端、下端及び中央は、それぞれ、75、25パーセン
タイル値及び中央値を示す。

を大きくする要因は見あたらない。よって、図1の午前中のピークは、風速が小さく接地境界層が十分に発達していない、勾配法の理論的限界外のデータによるもので、解析からは除くことが望ましいと考えられる。

スクリーニング後、式(4)、(5)により、同期間の表面抵抗 (r_s) を算出したところ中央値で、日中(6:00～17:00) 126s/m、夜間(18:00～5:00) 792s/m と

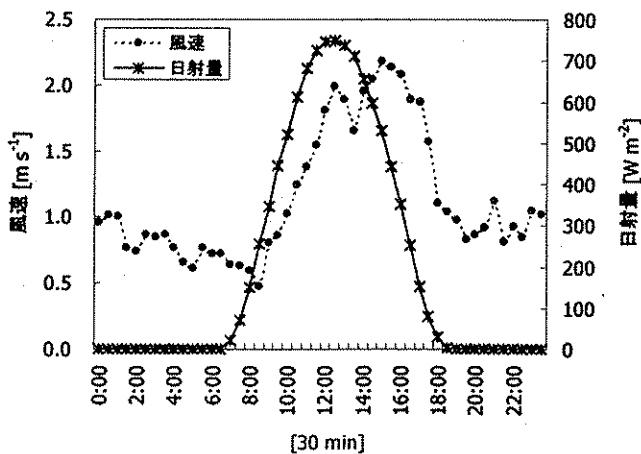


図3 2002年1月～4月の風速と日射量の
日内変動（中央値）

いう結果を得ることができた。

以上に述べた方法は、オゾンだけでなく、他の成分にも同様に成り立つものである。ただし、二酸化硫黄等のオゾンに比べて濃度の低い成分に応用する場合、低濃度時のランダム誤差が大きくなると考えられるため³⁾、濃度条件によるスクリーニングに注意を払う必要がある。参考までに、Feliciano et al.⁸⁾らは、二酸化硫黄フラックスのスクリーニング条件に濃度計の検出下限値よりも高い濃度を設定している。

5. まとめ

東南アジアの熱帯林における乾性沈着の実態を明らかにするためのフラックス観測手法の開発を行い、オゾンフラックスに関して有効な観測結果を得ることができた。構築された観測システム、観測条件の設定及び観測データの解析法を用いることにより、有効な沈着速度及び表面抵抗値を得ることが可能である。また、この手法は他の成分に適用する際に基本となるものである。

次の課題としては、データを蓄積し、観測により得られた表面抵抗値を、気温、日射量等の通常観測されている気象要素や、比較的簡単に計れるその他の要素でパラメタライズすることが挙げられる。これにより、濃度勾配を測定せずに沈着速度を推定することが可能になり、ネットワークに適用可能な乾性沈着モニタリング手法の確立に資すると考えられる。さらには、窒素化合物やエアロゾル等の対象物質の拡大及び熱帯雨林や農地等の東南アジア地域を代表する他の沈着表面に対する同様な調査が望まれる。

6. 参考文献

- 1) An J., Ueda H., Wang Z., Matsuda K., Kajino M., Cheng X. (2002): Simulations of monthly mean nitrate concentrations in precipitation. *Atmospheric Environment*, 36, pp4159-4171
- 2) Carmichael G.R., Uno I., Phadnis M.J., Zhang Y., Sunwoo Y., (1998): Tropospheric ozone production and transport in the springtime in east Asia, *Journal of Geophysical Research*, 103, pp10649-10671
- 3) Matsuda K., Aoki M., Zhang S., Kominami T., Fukuyama T., Fukuzaki N., Totsuka T.

- (2002): Dry Deposition Velocity of Sulfur Dioxides on a red pine forest in Nagano, Japan. *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 37, pp387-392
- 4) 高橋章, 佐藤一男, 若松孝志, 吉川邦夫(2002): インフレンシヤル法による森林への硫黄化合物の乾性沈着量の推定—SO₂の乾性沈着に及ぼす葉面のぬれの影響—. *大気環境学会誌*, 37 (3), pp192-205
- 5) EANET (1999): Strategy paper for Future Direction of Dry Deposition Monitoring of EANET
- 6) Baldocchi D.D., Hicks B.B., Meyers T.P. (1988): Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69, pp1331-1340
- 7) Erisman J.W., Draaijers G.P.J. (1995): Atmospheric Deposition in Relation to Acidification and Eutrophication, *Studies in Environmental Science* 63, ELSEVIER
- 8) Feliciano M.S., Pio C.A., Vermeulen A.T. (2001): Evaluation of SO₂ dry deposition over short vegetation in Portugal. *Atmospheric Environment*, 35, pp3633-3643
- 9) Wesely M.L., Hicks B. B. (1977): Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 27, pp1110-1116
- 10) Baldocchi D.D., Meyers T.P. (1991): Trace Gas Exchange Above the Floor of a Deciduous Forest 1. Evaporation and CO₂ Efflux. *Journal of Geophysical Research*, 96, pp7271-7285
- 11) Lamaud E., Carrara A., Brunet Y., Lopez A., Druilhet A. (2002): Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. *Atmospheric Environment* 36, pp77-88
- 12) Pio C.A., Feliciano M.S., Vermeulen A.T., Sousa E.C. (2000): Sousa Seasonal variability of ozone dry deposition under southern European climate conditions, in Portugal. *Atmospheric Environment*, 34, pp195-205
- 13) Padro J., Neumann H.H., Hartog G.D. (1992): Modelled and observed dry deposition velocity of O₃ above a deciduous forest in the winter. *Atmospheric Environment* 26A, pp775-784

Summary

A methodology for dry deposition flux measurements in the tropical forests of Southeast Asia has been developed to research dry deposition in the area. An experimental field was chosen in a teak forest in the Mae Moh area of northern Thailand's Lampang district, taking into account criteria such as a flat and uniform forest as far as 500 m in main upwind directions and measurable concentrations of target species around the sites. Fluxes were obtained by coupling gas monitors of ozone and sulfur dioxide with an ultrasonic anemometer on the basis of the gradient method. The measurement system was established with a 24m height tower. Observed flux data exhibited random errors caused by a combination among different instruments; and systematic errors caused by environmental conditions outside of the theoretical limit of the gradient. Data analysis methods were used to reduce these errors. Surface resistance values for ozone in this teak forest were successfully obtained with these methods.