

chestnut forest in southern Switzerland, Catena, 48, 201-215, 2002.

## 6. 森林火災とエアロゾル

中島 映至\*・鶴田 治雄\*

### 6.1 森林火災起源のエアロゾル

森林火災や一般の植生燃焼からは、一次エアロゾルとともにガス状成分から生成される二次エアロゾルが発生する。また、気候変動研究の観点から言えば、その発生原因から自然起源と人為起源に分類することが重要である。図 6-1 はマレーシアにおける粒子状物質の重量濃度の時系列である (Tsuruta et al., 2003)。顕著な特徴はエルニーニョの年に発生する重量濃度の大きな増加である。すなわち、植生火災に伴うエアロゾルの発生はその気象条件に強く依存し、主に乾期に自然起源と人為起源のエアロゾルの発生が増加する。全球における植生燃焼起源中の人為起源エアロゾルの寄与率は約 45 % であるとされているが、その主な発生要因は、サバンナおよび草原での植生燃焼、

焼き畑によるもの、開発による森林火災によるもの、農作物残渣の燃焼、燃料用木材の燃焼などである。図 6-2 に CCSR-RIAM/SPRINTARS エアロゾル化学輸送モデル (Takemura et al., 2002) でモデル化された植生燃焼起源エアロゾル中の黒色炭素の排出量を示す。図によるとアマゾン、アフリカ、東南アジアにおける排出量が大きく、これらの地域から発生するエアロゾルが当該地域のみならず全球の気候に顕著な影響を及ぼしている。Ohara et al. (2003) によると東アジア域の 2001 年春季における有機炭素性および黒色炭素性エアロゾルに占める植生燃焼起源物質の割合はそれぞれ 38 % と 20 % であった。

### 6.2 その特性

これらのエアロゾルはひとくちに有機炭素性エアロゾルと呼ばれるが、その化学構造は複雑で 6 割程度の生成メカニズムは明らかになっていない。これらのエアロゾルが引き起こす気候影響を評価するには、さらにエアロゾルの物理特性と放射特性を知る必要がある。太陽放射との相互作用を評

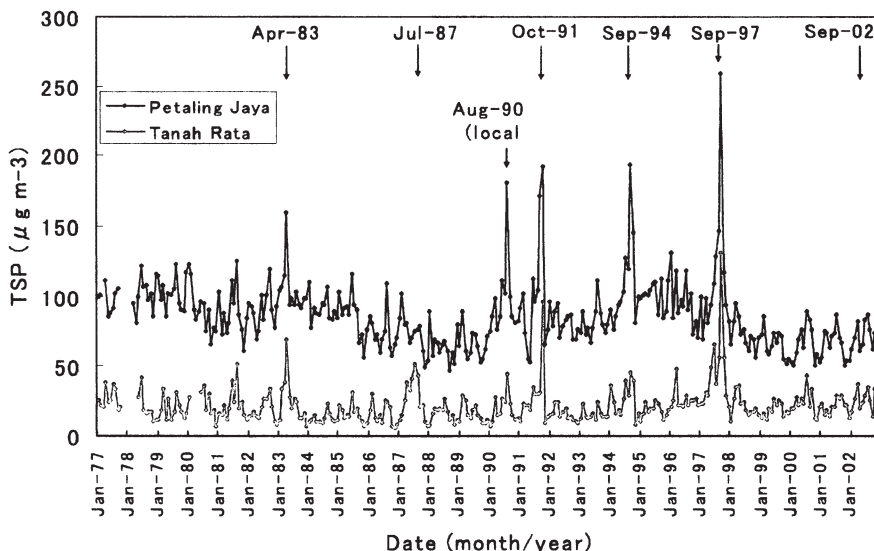


図 6-1 マレーシアにおける粒子状物質の月平均重量濃度の時系列。(Tsuruta et al., 2003)

\* 東大気候システム研究センター

価するためには、粒子系の粒径分布と代表的な複素屈折率が重要である。さらにこれらのエアロゾルがある相対湿度の状況でどの程度、水分を吸収するかも雲との相互作用を知る上で重要な情報である。現在のところ、これらの全球的な描像は工業起源の硫酸塩エアロゾルに比べて明らかではなく、エアロゾル化学輸送モデルや数値気候モデルにおいては有機炭素モデルとしてひとくくりに仮定されることが多い。全球の特性を把握するには

現在のところ人工衛星による多波長観測やアメリカ航空宇宙局による AERONET (Aerosol Robotic Network) による太陽放射観測による結果が広く利用されている。図 6-3 にそのような観測によって得られるアマゾン域の植生火災エアロゾルの粒径分布と一次散乱アルベドを示す (Dubovik et al., 2002)。このような事例に見られるように、蓄積モードの代表的な粒径である半径 0.15 ミクロン程度にモードがあることがわか

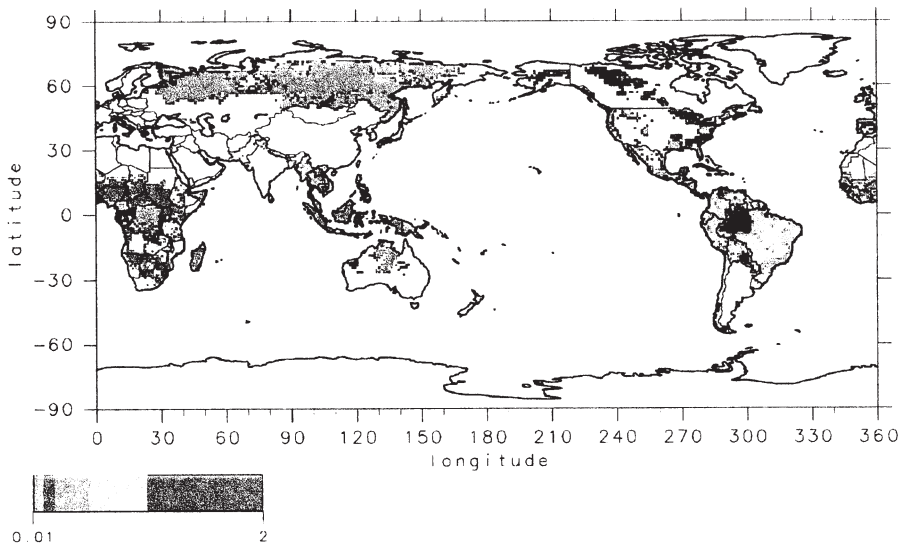


図 6-2 SPRINTARS モデルにおける植生燃焼起源の黒色炭素の排出量 (Gg yr<sup>-1</sup> (0.5度×0.5度))。

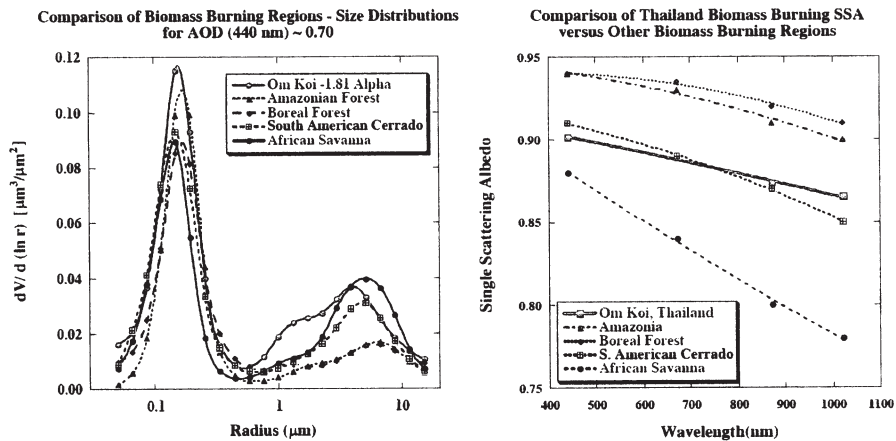


表 6-3 植生燃焼起源のエアロゾルの粒径分布 (左) と一次散乱アルベドの波長依存性 (右)。(Dubovik et al., 2002)

る。一次散乱アルベドは、波長に対して増加する傾向があり波長 0.5 ミクロンで 0.9 程度である。このような顕著な光吸収は温度の高い燃焼によって生じる黒色炭素によって引き起こされる。エアロゾル中の黒色炭素の割合は燃焼温度や、輸送距離によって変化し 10% から数 10% に及ぶ。燃焼温度は植生の種類によって変化するので、必然的に顕著な地域依存性がある。

このような情報は近年急速に発達した人工衛星によるリモートセンシング・アルゴリズムにも活かされている。植生火災起源のエアロゾルは土壌起源エアロゾルと同様に紫外域の太陽放射を顕著に吸収するので、もともとオゾンの光吸収量を測定するための TOMS による植生火災起源エアロゾルの観測が可能である。このような有機炭素エアロゾルと土壌粒子を比較するとすでに述べたように前者がサブミクロンサイズである一方、後者は数ミクロンから 10 ミクロン程度と粒径が顕著

に異なる。このようなエアロゾルの粒径の違いは近赤外波長域の 2 波長を使ったオングストローム指数によって衛星観測が可能であるので、紫外および近赤外波長域の 3 波長から 4 波長を使った 4 種類のエアロゾルを分類するアルゴリズムなどがある (Higurashi and Nakajima, 2002; Hsu et al., 2003)。図 6-4 に 2003 年 5 月に発生したロシア域の森林火災からのエアロゾル・プリュームについてのこれらのアルゴリズムによる解析事例を示す。このように植生火災起源エアロゾルは土壌起源粒子と同じ程度で東アジアと言った大陸スケールの大気の混濁を大きく左右している。大西洋域におけるエアロゾルの緯度依存性も、サハラ砂漠からの土壌起源エアロゾルのみでは説明できず、説明できない大きなエアロゾルの寄与を Tegen and Fung (1995) は人為起源の砂漠化による効果で説明しているが、植生域からの燃焼起源エアロゾルによる寄与であるという説明もある

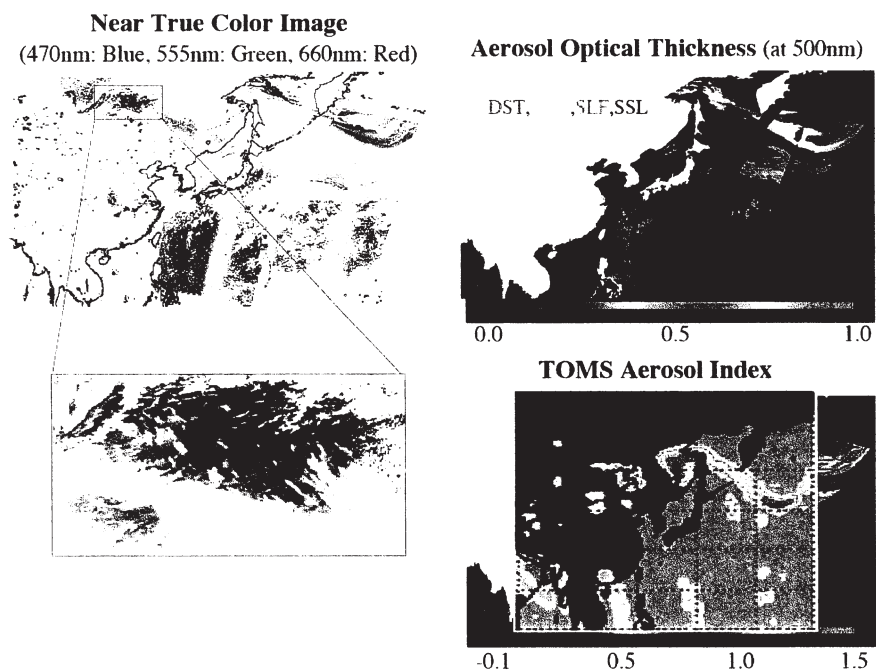


表 6-4 2003 年 5 月 5 日の衛星画像解析。TERRA/MODIS 衛星センサーによる RGB コンポジット合成画像 (左上), その拡大図 (左下), 4 チャンネル法によるエアロゾル種別光学的厚さ (赤: 土壌性, 黄: 炭素性, 緑: 硫酸塩, 青: 海塩起源) (右上), TOMS センサーによるエアロゾルインデックス (右下)。(国立環境研究所 日暮明子氏提供)

(Takemura et al., 2000)。このように植生燃焼起源のエアロゾルの全球分布を詳細に把握することは全エアロゾルの寄与の理解にとっても重要であるが、いまだに未解決の問題も多い。

### 6.3 気候影響

前節で述べたように植生起源の炭素性エアロゾルの大気混濁度への寄与は大きく、従って、その気候影響も著しい。このような気候系への負荷を定量化するためにはエアロゾルの放射強制力と言う量が使われる。これは、当該の気候変動要因（今の場合はエアロゾル）のみが変化して、他の大気構造が変化しないとした場合に起こる放射エネルギー収支の変化を  $W/m^2$  の単位で示したものである。植生起源のエアロゾルは粒径が小さいので、赤外放射の変化（例えば温室効果）はあまり重要ではない。一方、太陽放射は植生燃焼起源のエアロゾルによって晴天域で散乱と吸収が同時に起こる。このような気候影響を直接効果と呼ぶ。大気上端で見るとこれらの光散乱と吸収は微妙にバランスしておりほぼ放射強制力は  $0 W/m^2$  であるが、地表面では全球平均で  $-1 W/m^2$ 、地域によっては  $-10 W/m^2$  程度の値を示す。煙の濃いところではもちろん  $-100 W/m^2$  の大きさになる。値が負であることは、植生起源エアロゾルによって地表面にふりそそぐ日射量が減少する日傘効果が起こっていることを示しており、地表面を冷却する効果を作り出している。また減少した太陽放射はほぼ大気を加熱するのに使われる。一方、人為起源の二酸化炭素等の温室効果ガスは、主に地表面から宇宙に散逸する熱赤外線を遮断して温室効果を引き起こすが、その大きさは  $-2.5 W/m^2$  程度である。従って、植生燃焼起源を含む人為起源エアロゾルが地表面を冷やし、大気を暖める効果は無視できない。このような放射収支の変化の結果、さらに対流や2次的な大循環が生み出され、広域にわたって雲量や降雨量なども変化する。

植生起源のエアロゾルは雲の中にも取り込まれることによって雲場を変化させることが知られているが、そのメカニズムは複雑で未だに全球的な変化の描像は明らかになっていない。このような変化に

は、雲層に取り込まれたエアロゾルが太陽放射を効率良く吸収して雲を加熱するために雲量が増加する準直接効果と、エアロゾルが雲核になるために雲粒子数密度が増加して雲の寿命や降雨能率を変化させる間接効果がある。IPCC の第3次報告書 (IPCC, 2001) の評価では間接効果の大きさは大気上端の全球平均では0から数  $W/m^2$  程度とほとんどわかっていなかったが、最近の人工衛星とモデルによる研究 (Nakajima et al., 2001; Takemura et al., 2004) では  $-1 W/m^2$  程度の値が提案されている。これは温室効果を1/3程度相殺する大きさであり、地球を冷却していると考えられている。植生起源エアロゾルの寄与はそのうち20~30%程度であると思われる。特に、亜熱帯陸域での寄与は大きい。そのためにアマゾン域や南アフリカ域での航空機観測を含む局地観測が最近盛んに行われている (J. Geophys. Res., 1998; J. Geophys. Res., 2003)。最近の研究によると、植生火災の煙が太陽放射を強く吸収して雲形成が抑制される準直接効果や、間接効果のために降雨が減少して地表面を冷やす効果が抑制されて、対流雲の背が高くなる現象が見いだされている (Koren, 2004)。

このような植生燃焼起源を含む人為起源エアロゾルの気候影響はまだ明らかになっていないことが多く、IPCCの第4次報告書でもひとつの重要な論点になると思われる。また、国連環境計画 (UNEP) が推進する Atmospheric Brown Cloud (ABC) プロジェクト (Ramanathan and Crutzen, 2003) の中でも植生火災によって発生するエアロゾルは重要な観測対象になっている。このような研究の中で、地表面と人工衛星による観測システムやエアロゾルの効果を詳細に取り込んだモデルの開発などが急務となっている。

### 参考文献

- Dubovik, O., B. N. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanre, and I. Slutsker (2002): Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, 59, 590-608.
- Higurashi, A., and T. Nakajima (2002): Detection of

aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data, *Geophys. Res. Lett.*, 29(17), 1836, doi: 10.1029/2002 GL015357.

Hsu, N. C., J. R. Herman, and S. Tsay (2003): Radiative impacts from biomass burning in the presence of clouds during boreal spring in southeast Asia, *Geophys. Res. Lett.*, 30 (5), 1 224, doi: 10.1029/2002 GL016485.

IPCC (2001): *Climate Change 2001 – The Scientific Basis*, J. T. Houghton, Ed., Cambridge Univ. Press.

*J. Geophys. Res.*, 1998: SCAR-B Special Issue, *J. Geophys. Res.*, 103, 31,781.

*J. Geophys. Res.*, 2003: Special Issue, SAFARI 2000-Southern African Regional Science Initiative. *J. Geophys. Res.*, 108 (D13).

Koren, I., Y. J. Kaufman, L. A. Remer, and J. V. Martins (2004): Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation, *Science*, 303, 1342-1345.

Nakajima, T., A. Higurashi, K. Kawamoto, and J. E. Penner (2001): A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1171-1174.

Ohara, T., N. Tanimoto, and I. Uno (2003): A three dimensional model analysis of carbonaceous aerosol dynamics in East Asia during spring 2001. Nakajima, T., and APEX Science Team, 2003 Eds. *Findings and Current Problems in the Asian Particle Environmental Change Studies: 2003*, Center for Climate System Research, 240 pp, ISBN 4-9901912-0-X.

Ramanathan, V., and P.J. Crutzen (2003): New directions: Atmospheric Brown Clouds, *Atmos. Environ.*, 37, 4033-4035.

Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima (2000): Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins, *J. Geophys. Res.*, 105, 17853-17873.

Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne (2002): Single scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model.

*J. Climate*, 15, 333-352.

Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T.Y. Nakajima, and T. Nakajima (2004): Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *J. Geophys. Res.*, in press.

Tegen, I., and I. Fung (1995): Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification, *J. Geophys. Res.*, 100, 18707-18726.

Tsuruta, H., Leong. C.P., K.N. Ibrahim, I.E.S. Neo, S. Urban, and S. Sudo (2003): The effect of biomass burning on atmospheric aerosols measured at Tanah Rata station in Cameron Highland, Peninsular Malaysia, during Jul-Dec. 2002, ABC Workshop, RCAST, University of Tokyo, November 17-18, 2003 (in CD-R).

## 7. 大規模森林火災の早期検出と対策

中右 浩二\*

### 7.1 はじめに

北方地域の開発，人間活動の拡大や気候変動などの影響で，近年，北方地域での森林火災が急速に増大している。例として，ロシア・ヤクーチア地方における5年毎の森林火災件数と火災発生件数の推移を図7-1に示す。森林火災の件数は大きく変動していないにもかかわらず，消失面積が大幅に増加している事が分かる。

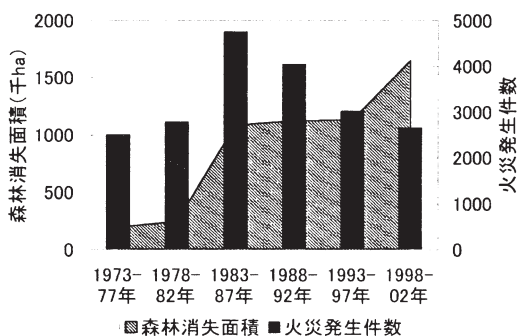


図7-1 ロシア・ヤクーチア地方における森林火災の件数と焼失面積（5年毎の集計）

\* 北海道大学北ユーラシア・北太平洋地域研究センター