

アジア域のエアロゾルが大気放射に及ぼすインパクトの数値的解析

佐竹, 晋輔
九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

鵜野, 伊津志
九州大学応用力学研究所海洋大気力学部門

竹村, 俊彦
九州大学応用力学研究所海洋大気力学部門

<https://doi.org/10.15017/16739>

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 26 (3), pp.341-349, 2004-12. 九州大学大学院総合理工学府
バージョン：
権利関係：

アジア域のエアロゾルが大気放射に及ぼす インパクトの数値的解析

佐竹 晋輔^{*1}・鵜野 伊津志^{*2}・竹村 俊彦^{*2}

(平成16年10月28日 受理)

Numerical Study for the Radiative Impacts of Asian Tropospheric Aerosols

Shinsuke SATAKE, Itsushi UNO and Toshihiko TAKEMURA

[†]E-mail of corresponding author: satake@riam.kyushu-u.ac.jp

Transport and radiative impacts of Asian tropospheric aerosols (dust, sulfate, black carbon (BC), organic carbon (OC), and sea salt) during springtime 2001 were simulated using a regional-scale chemical transport-radiation model. Model results are intensively examined with the optical observation at the surface monitoring stations. It was shown that modeled aerosol optical thickness (AOT) and Ångström exponent accurately captured many of the observed characteristics. Analyses for the modeled AOT also showed that Asian aerosol outflows are most dominant at a region between 25°N and 45°N. The aerosol direct radiative forcings at tropopause (ARF) under the clear and all sky conditions were evaluated. It was shown that sulfate has significantly negative forcing, especially under the clear sky, and clear-sky total ARF always indicates negative values due to its negative forcing. We also found that Asian dust is remarkable aerosol under the overcast condition because it has so large positive forcing as to offset negative impacts of other aerosols due to the absorption of the radiation enhanced by the cloud layer. Finally, springtime Asian-scale averaged ARFs under the clear and all sky conditions were evaluated. The clear-sky ARF were -1.45Wm^{-2} for sulfate, -0.99Wm^{-2} for OC, -0.39Wm^{-2} for dust, -0.24Wm^{-2} for sea salt and $+0.19\text{Wm}^{-2}$ for BC, respectively. For the all-sky ARF, it was evaluated as to be -0.74Wm^{-2} for sulfate, -0.51Wm^{-2} for OC, -0.16Wm^{-2} for dust, -0.13Wm^{-2} for sea salt and $+0.26\text{Wm}^{-2}$ for BC, respectively. These individual negative impacts are very large and a positive forcing of BC is small relatively to the annual global mean ARF reported by past study, respectively. Therefore, we conclude that the Asian aerosol outflow causes a regional cooling effect, and its magnitude is very large compared with their annual global effect.

Key words: *chemical transport model, aerosol, optical thickness, radiative forcing, Asia, regional model*

1. はじめに

大気中に浮遊して存在する微粒子(エアロゾル)は二酸化炭素等の温室効果気体と同様に、重要な気候変動因子の一つとして認識されている(IPCC 第2次報告書, 1996)¹⁾。エアロゾルは太陽・地球からの放射を散乱・吸収する直接効果と、雲核として作用し、雲場に変化をもたらす間接効果を通じて、地球大気放射収支に作用する。IPCCの第3次報告書²⁾では、世界中の各研究グループの全球規模でのエアロゾルの直接効果と間接効果による大気放射収支の変化量(放射強制力)を報告しているが、それらの値には研究者間で大きな差が見られ、エアロゾルの放射強制力の見積もりには高い不確実性が含まれている。

このような放射強制力の不確実性の原因の一つは、エアロゾルの物理・化学・光学的特性が非常に複雑で、それ

らの輸送が各地域の気候・気象変化に伴う大気運動によって大きく支配されているため、その空間分布、輸送構造が詳細に理解されていない点が挙げられる。また、これまでに報告されている放射強制力の多くが全球モデルに基づく結果であり、その時間・空間的な解像度の大きさのため、地域的なエアロゾルの影響が不明瞭であった点も主な原因の一つである。そのため、エアロゾルの大気中での動態や地域的なエアロゾルの影響を明瞭に把握するためにも、エアロゾルの発生・輸送が頻繁に起こる地域を対象に集中的な野外観測を行い、高解像度の空間分解能を持つ領域型モデルを用いた総合的かつ地域的なエアロゾル研究を行う事が現在必要とされている。

地域的なエアロゾル研究を行う上で、現在特に重要視されている地域がアジア域である。アジア域は年々増加を続ける人為起源エアロゾルの多量の排出に加えて、自然起源エアロゾルの発生源である巨大な砂漠や海洋を含み、また焼畑活動も盛んで、多種多様なエアロゾルが複雑に

*1 大気海洋環境システム学専攻博士課程

*2 応用力学研究所 海洋大気力学部門

混在している地域である。さらに、アジア域での人為起源エアロゾルの多量の排出は、今後さらに大きく発展することが予測され(IPCC 第3次報告書, 2001²⁾)、また *Ramanathan et al.* (2001)³⁾は同地域で排出された多量のエアロゾルが地域・全球スケールでの水循環や気候変動に多大な影響を及ぼしていることを指摘している。そのため、アジア域は現在、エアロゾルによる環境への影響を緊急に解明しなければならない必要性を持つ地域として認識されている。

2001年春季にはエアロゾルの物理・化学・光学的特性やその気候影響をより明瞭に理解する事を目的として、大規模な国際共同の集中観測 ACE-Asia(Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment)[*Huebert et al.* (2003)⁴⁾]が、春季のアジア域を対象に、地上観測に加え、船舶、航空機などを駆使して実施され、多くのエアロゾルに関する有用な情報が得られた。しかし、観測の時間・空間的制限のため、アジア域のエアロゾル放射強制力の地域的な特徴や空間的な分布を得る事は難しい。

以上の背景をふまえて、本研究では、アジア域のエアロゾルの大気放射への地域的な影響を捉える事を目的として、これまでに開発が行われてきた領域型化学物質輸送モデル RAMS/CFORS にエアロゾル・気体の大気放射過程を考慮した *Nakajima et al.* (2000)⁵⁾の大気放射モデルを組み込み、2001年春季のアジア域を対象にエアロゾル輸送シミュレーションを行った。以下では国際共同の集中観測 ACE-Asia や地上光学観測網 AERONET から得られたデータとの比較を基に、アジア域のエアロゾル輸送やそれらの大気放射への影響について得られた知見を述べる。

2. 領域型化学物質輸送・大気放射モデル (RAMS/CFORS)の概要

本研究で用いた領域型化学物質輸送・大気放射モデル(RAMS/CFORS)は、米国 Colorado 州立大学で開発された圧縮性非静力学方程式系からなる領域型気象モデル RAMS[*Pielke et al.* (1992)⁶⁾]をベースとし、そのスカラー輸送オプションを利用してエアロゾル・気体の物質輸送シミュレーションを行っている。本研究では、RAMS の物理過程に対して、大気放射過程に *Nakajima et al.* (2000)⁵⁾の大気放射モデルを、雲・降水過程に *Le Treut and Li* (1991)⁷⁾を基にした大規模凝結モデルを、積雲対流スキームに *Arakawa-Schubert* タイプの積雲対流スキーム (*Arakawa and Schubert*, 1974⁸⁾)を、陸面過程に LEAF-2(*Walko et al.*, 2000)⁹⁾を使用した。

RAMS/CFORS のエアロゾル輸送過程には移流、乱流拡散、発生、化学反応、乾性・湿性沈着、重力沈降が考慮され、エアロゾルの大気放射過程は *Nakajima et al.* (2000)⁵⁾の大気放射モデル内で扱われている。この大気放射モデルは、種類毎のエアロゾルの吸湿成長・粒径分布・波長依存の複素屈折率を考慮し、CFORS によって

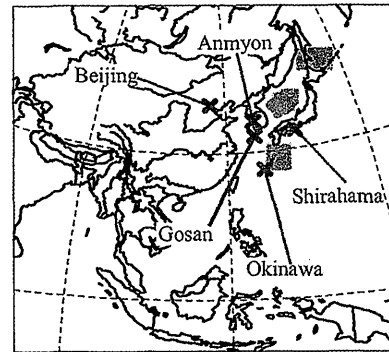


Fig. 1 Simulation domain. Crosses indicate observation sites in Fig. 2, and three gray colored regions are used in Figs. 4 and 5.

得られた個々のエアロゾル成分濃度に基づき、エアロゾルの散乱・吸収過程や気象場へのフィードバックの計算を行っている。また、本研究ではエアロゾルの光学的パラメータである光学的厚さ、単散乱アルベド、オングストローム指数も *Takemura et al.* (2001)¹⁰⁾に従い、算出している。

RAMS/CFORSは領域型モデルであるため、境界条件が必要である。そのため、気象の初期・境界条件には、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)の6時間間隔、緯度経度1.0度分解能の全球再解析データを用い、濃度の初期値はゼロとし、流出境界条件はゼロ勾配で与えている。RAMS/CFORSの計算領域はFig. 1に示した東西8000km、南北7200km (80km格子)の範囲で構成されるアジア域で、鉛直方向には対流圏をすべて含む上空23 kmまでを鉛直23層で分割している。より詳細なCFORSに関する記述は *Uno et al.* (2003)¹¹⁾を参照されたい。

3. 結果と議論

2001年春季には黄砂現象を含む多くの大規模なエアロゾル輸送が発生し、それらの地表面濃度や光学的厚さ、鉛直分布、粒径分布等を含む多くの物理・化学・光学的特性が、国際共同の集中観測 ACE-Asia や地上光学的観測網 AERONET(*Holben et al.*, 2001)¹²⁾によって捉えられた。これらの野外観測から得られたデータはモデル結果の妥当性を検証するだけでなく、エアロゾル輸送に対する貴重な情報を提供している。その中でも特に、中国の北京、韓国の Anmyon や Gosan、日本の白浜や沖縄において観測されたエアロゾル光学的厚さやオングストローム指数は、大陸から流出する直前・直後のエアロゾル輸送や大気放射への影響の特徴を詳細に反映していると考えられる。そこで、本節では、これらの観測サイトから得られた光学的厚さやオングストローム指数とモデル結果との比較を基に、エアロゾルの越境輸送が及ぼす大気放射への影響についての解析を行った。より広範囲な RAMS/CFORS 結果と観測結果との比較は *Uno et al.* (2003)¹¹⁾や *Satake et al.* (2004)¹³⁾によって報告されている。

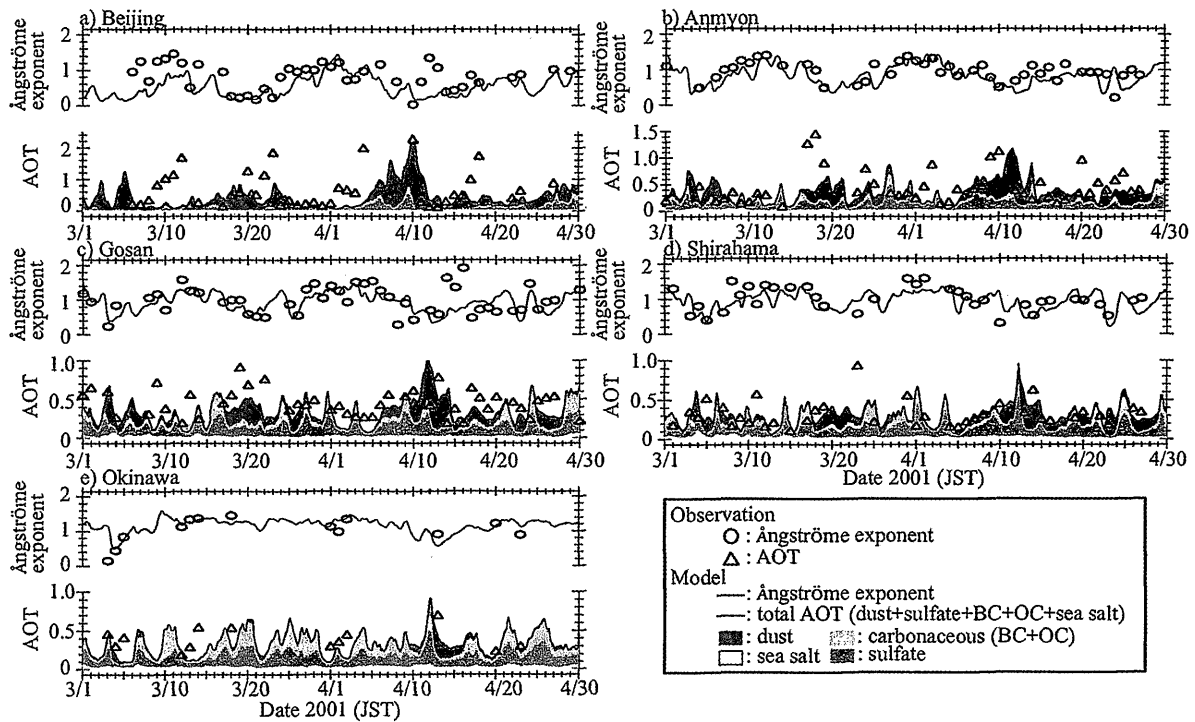


Fig. 2 Time variation of observed and simulated AOT (Aerosol Optical Thickness) and Ångström exponent at a) Beijing, b) Anmyon, c) Gosan, d) Shirahama and e) Okinawa. Circles and triangles indicate observed Ångström exponent and AOT, respectively. Black lines indicate simulated Ångström exponent and AOT, respectively.

3.1 AERONET, ACE-Asia 観測とモデル結果から示されたエアロゾル輸送の光学的厚さへの影響

Fig. 2 に、観測とモデルによる a) 北京(中国)、b) Anmyon(韓国)、c) Gosan(韓国)、d) 白浜(日本)、e) 沖縄(日本)におけるエアロゾル光学的厚さ (AOT; Aerosol Optical Thickness)とオングストローム指数の春季の時間変化を示した。図中の上段の丸印は観測されたオングストローム指数を示し、下段の三角は観測された AOT を示している。一方、モデル結果によるオングストローム指数と AOT は実線を用いて、そして個々のエアロゾル成分(ダスト、硫酸塩、炭素性エアロゾル、海塩粒子)の AOT への相対的寄与は、グレースケールの濃淡を用いて表現している。また、Table 1 には、各サイトにおける観測とモデルの AOT とオングストローム指数の春季における平均値を示した。ただし、沖縄の観測値に対しては、欠損値が多く見られたため、モデル結果のみを示している。ここで、AOT とはエアロゾルによる放射強度の減衰の程度を表す指標であり、図では観測に対して波長 500nm の値を、モデル結果

に対しては波長 550nm の値を示している。一方オングストローム指数とはエアロゾルの粒径の指標となる光学的パラメータであり、2 波長の光学的厚さの比を用いて定義され、粒径の小さな粒子が卓越している場合、その値は大きく、大きな粒子が卓越している場合、小さな値を示す。ここでは観測に対して波長 500nm と 870nm の光学的厚さを用いて、モデルに対しては波長 550nm と 860nm の光学的厚さを用いて算出したオングストローム指数を使用している。

Fig. 2 から、モデルが観測された AOT やオングストローム指数の時間変化の特徴を正確に捉えている事がわかる。例えば、オングストローム指数や AOT の急激な増加・減少をモデル結果は正確に表現していた。また、Table 1 からは、観測が最も高い AOT を北京で示し、次いで、韓国の Gosan や Anmyon、そして最も低い値を白浜で示す一方、モデルも、その絶対量はやや低めであるが、順に、北京、韓国、白浜という結果を示し、モデルが観測された AOT の地域的な分布の特徴を概ね捉えている事がわかる。オングストローム指数に対しても、観測、モデル共に、最も小さな値が北京で見られ、次に Anmyon、そして Gosan や白浜という結果を示し、モデルは観測されたオングストローム指数の地域分布の特徴を概ね捉えていた。

Fig. 2 から、観測が沖縄を除いた全てのサイトで、3月20日や4月10日付近に、オングストローム指数の急激な減少と共に比較的高レベルの AOT を捉えている事がわかる。オングストローム指数が小さいという事は、比較的粒径の大きな粒子が卓越している事を意味する。加えて、モデル

Table 1 Observed and simulated averaged AOT and Ångström exponent during springtime 2001

Site/item	Observation		Model	
	AOT	Ångström exponent	AOT	Ångström exponent
Beijing	0.79	0.82	0.45	0.53
Anmyon	0.48	0.96	0.37	0.83
Gosan	0.50	1.00	0.35	0.94
Shirahama	0.32	1.00	0.31	0.93
Okinawa	-	-	0.33	1.12

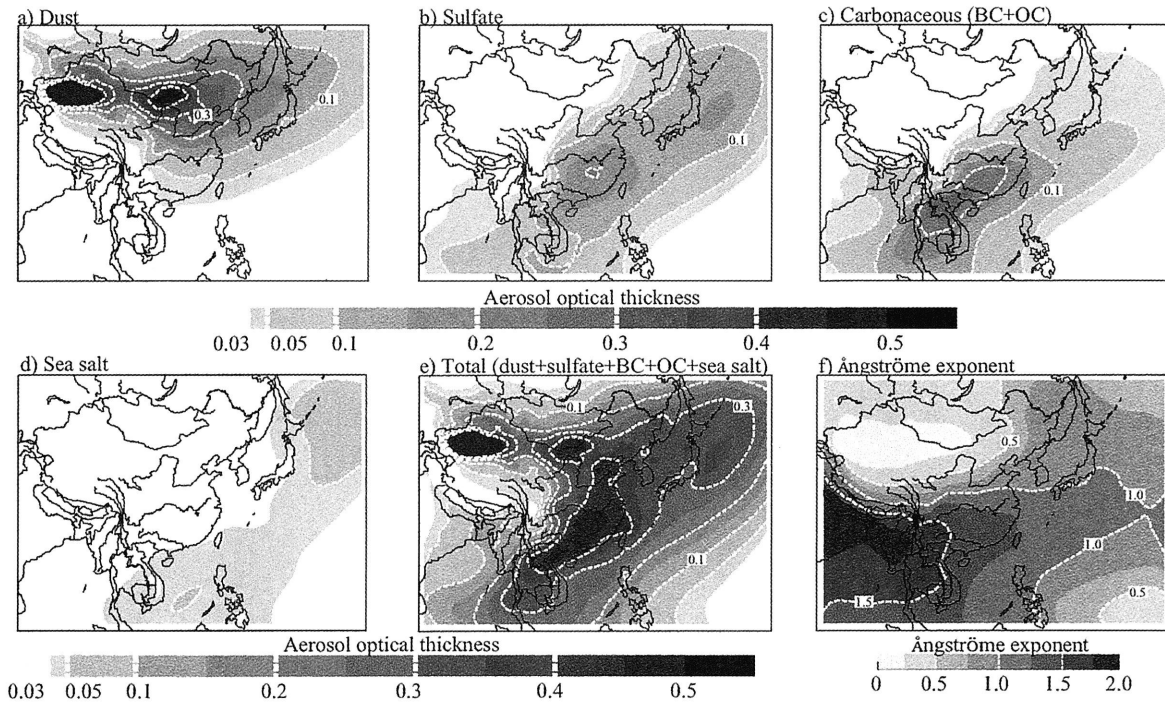


Fig. 3 Averaged AOT field for a) dust, b) sulfate, c) carbonaceous, d) sea salt and e) total and f) simulated Ångström exponent field.

結果はこの時、北京や韓国、日本において、非常に多くのダストによる AOT への寄与があった事を示していた。そのため、これらの急激なオングストローム指数の減少や高レベル AOT の原因として、主にダストによる影響である事が挙げられ、ダスト輸送が非常に大きな光学的影響を持つ事がわかる。

このようなダスト輸送の影響に加えて、モデル結果はまた、硫酸塩や炭素性エアロゾルによる光学的厚さへの大きな寄与が全サイトで頻繁にあった事を示していた。この時、観測されたオングストローム指数は比較的大きな値を示し、これから硫酸塩や炭素性エアロゾルのような粒径の小さな粒子の輸送があった事が観測の面から確認できる。重要な特徴は硫酸塩や炭素性エアロゾルの輸送が、ダストのように間欠的なものではなく、ほとんど日常的に起こっている事であり、時にはダスト、硫酸塩、炭素性エアロゾルが同時期に輸送され大きな光学的厚さを韓国や日本で形成している事である。

これらのエアロゾルの光学的厚さへの影響をより明確に把握するために Fig. 3 に個々のエアロゾル成分の AOT とそれらの合計である total AOT、そしてオングストローム指数の春季における平均水平面分布を示した。図から、ダストが中国内陸部の砂漠域から、計算領域の北側までを中心に大きな AOT を持つ事がわかる。一方、硫酸塩は中国の南部から日本の北側までを、そして炭素性エアロゾルは東南アジアから日本の南側までを中心に高い AOT を示し、個々のエアロゾル成分が、それぞれ特有の AOT の分布を持つ事が示された。重要な特徴は、total AOT が、北緯 25 度から 45 度までにおいて、0.3 を超える高い値をアジア

域の広い範囲で示している事である。そのため、この結果は、大陸からのダスト、硫酸塩、炭素性エアロゾルの流出によって、日本や韓国を含む風下の地域上空の大気放射収支が、春季を通して大きく変動している事を示唆している。

3.2 日本近海における晴天・全天大気エアロゾル直接放射強制力

Figs. 4, 5 はそれぞれ、モデルによって示された晴天大気、全天大気における a) 北日本 (NJ: Northern side of Japan)、b) 日本海 (JS: Japan Sea)、c) 南日本 (SJ: Southern side of Japan) 領域上空の対流圏界面エアロゾル直接放射強制力 (ARF: Aerosol Radiative Forcing) の春季の日変化を示したものである。ただし、個々のエアロゾル成分による ARF は全て、Fig. 1 に示した海上における灰色領域の空間的な平均値で、対流圏界面高度は海拔 12km と仮定した。また、図では、個々のエアロゾル成分の ARF をグレースケールの濃淡を用いて表現し、ARF のスケールが正と負で異なる事に注意されたい。ここで、晴天大気とは雲のない状態を仮定した場合であり、一方全天大気とは、雲の効果を含めた場合である。

これらの図から、NJ、JS、SJ 領域上空の大気放射収支が、春季の間に、エアロゾル輸送の影響によって日々、大きく変化していた事がわかる。

晴天大気の場合 (Fig. 4)、黒色炭素を除いた全てのエアロゾル成分による負の ARF が、全領域で見られた。これは、黒色炭素が放射吸収特性を持つ事に対して、海塩粒子や有機炭素、硫酸塩が吸収特性を持たないもしくは、ほと

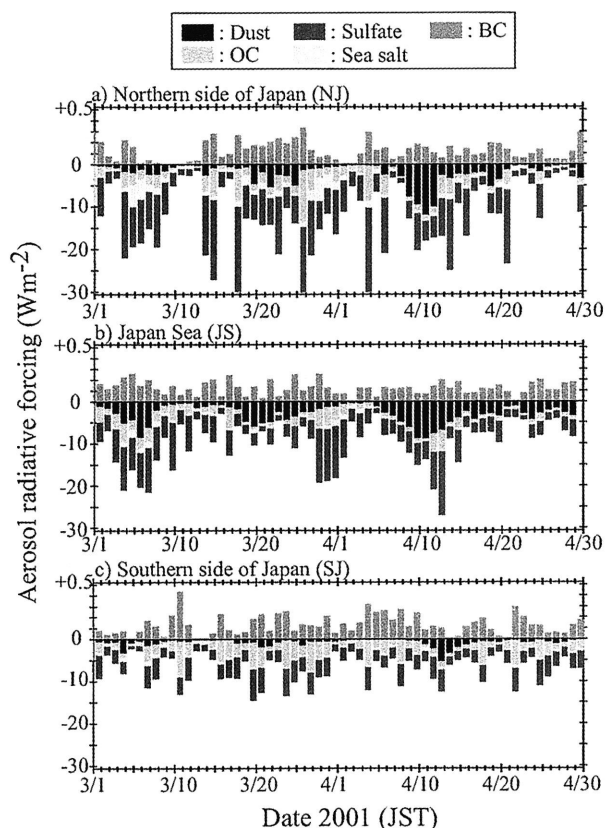


Fig. 4 Time variations of modeled daily averaged direct aerosol radiative forcing (ARF) at tropopause under the clear sky condition over the a) Northern side of Japan (northern gray region in Fig. 1), b) Japan Sea (central gray region in Fig. 1) and c) Southern side of Japan (southern gray region in Fig. 1). In figure, all ARF values are spatially averaged over the gray color regions in Fig. 1.

んど持たないためである。また、ダストに対しては、放射吸収特性を持つものの、アルベドの低い海上では、ダストの可視光に対する散乱の効果が勝るため、負の値を示している。地域的な特徴としては、比較的ダストや硫酸塩による大きな負の効果が NJ や JS 領域で見られ、また、有機炭素に対しては NJ や SJ 領域で見られた。硫酸塩や有機炭素による輸送が NJ 領域において大きな影響を及ぼすという結果を除いて、これらの特徴は、Fig. 3 の結果と整合的である。重要な特徴は NJ 領域で、比較的大きな ARF の日変化が見られる事である。NJ 領域が、ダストや人為起源由来の硫酸塩や炭素性エアロゾルの輸送の影響を頻繁に受けている事は前節の AOT の分布によって既に示されている。これに加えて、モデル解析は、中国北東部からのバイオマス燃焼由来の黒色炭素や有機炭素、三宅島からの火山性硫酸塩の NJ 領域への輸送が春季を通して間欠的にあった事を示した。従って、この領域での個々のエアロゾル成分の高レベル ARF の主な原因として、NJ 領域が春季の間に、様々な起源のエアロゾル輸送の影響を大きく受けていた事が挙げられる。

Fig. 4 から得られるほかの重要な特徴は、硫酸塩エアロ

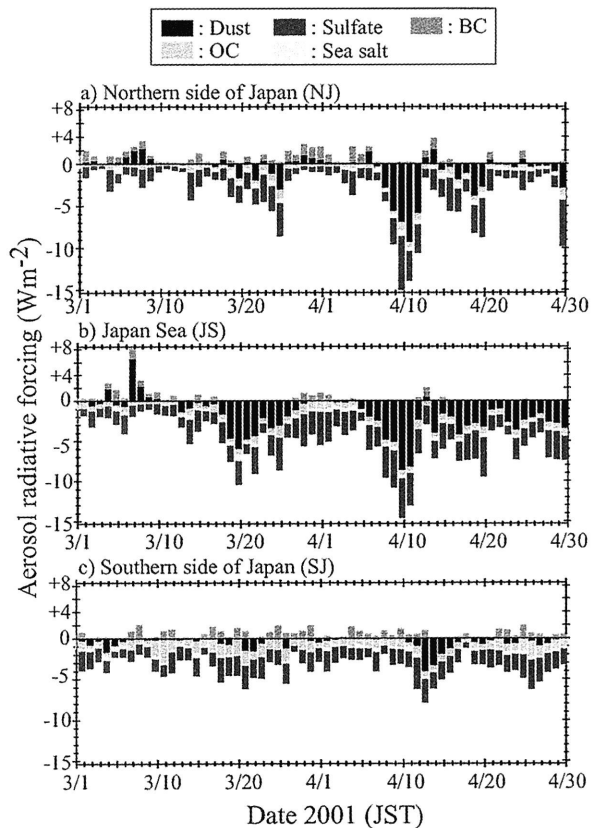


Fig. 5 Same as Fig. 4 but for the all sky

ゾルの影響が非常に大きい事である。硫酸塩エアロゾルが、NJ や JS 領域で大きい負の効果を持つ事は既に先に示した。その負の効果の絶対値は他のエアロゾル成分の効果をはるかに上回り、時には -10Wm^{-2} を超える日も見られる (Fig. 4a や 4b)。これに加えて、硫酸塩の負の効果は SJ 領域に対しても有機炭素の負の効果に匹敵する程大きい。そのため、この結果は、晴天大気の下で、日本上空の大気放射収支に対して、硫酸塩エアロゾルの輸送が特に重要である事を示している。

雲の分布を導入した全天大気の場合 (Fig. 5) では、全体的に、散乱性エアロゾル (硫酸塩や海塩粒子、有機炭素) による負の効果が大きく弱まる結果となった。例えば、NJ、JS 領域の硫酸塩や、NJ、SJ 領域における有機炭素による負の効果の絶対量は、晴天大気の場合と比較して、およそ 5 から 10Wm^{-2} もの減少が見られている。これは、主にエアロゾル層の上空に存在する雲が、日傘のような役割を果たし、太陽からの直達光を大きく遮っているためである。しかし、こういった散乱効果の減少にも関わらず、全天大気の場合においても、硫酸塩エアロゾルの負の効果は、晴天大気と同様に、全ての領域で顕著であった。

Fig. 5 は、雲の導入による影響が、黒色炭素やダストのような放射吸収特性を持つエアロゾルの ARF に対しても及ぶ事を示している。例えば、黒色炭素の正の ARF は、晴天大気の場合と比較して、およそ 0.1 から 1.0Wm^{-2} 程度の増加が見られ、また、ダストに対しては、正の ARF を持つケー

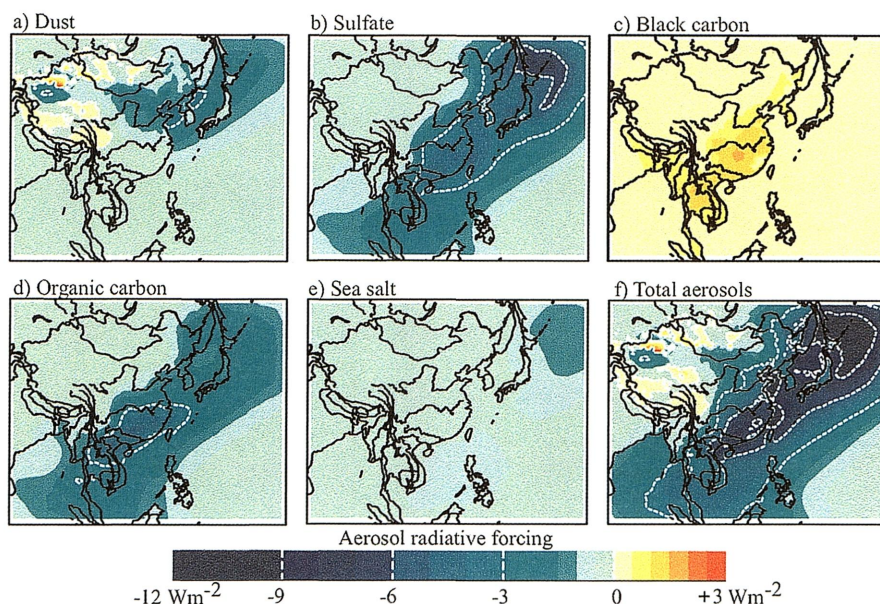


Fig. 6 Springtime averaged aerosol direct radiative forcings at tropopause under the clear sky condition for a) dust, b) sulfate, c) black carbon, d) organic carbon, e) sea salt and f) total aerosols

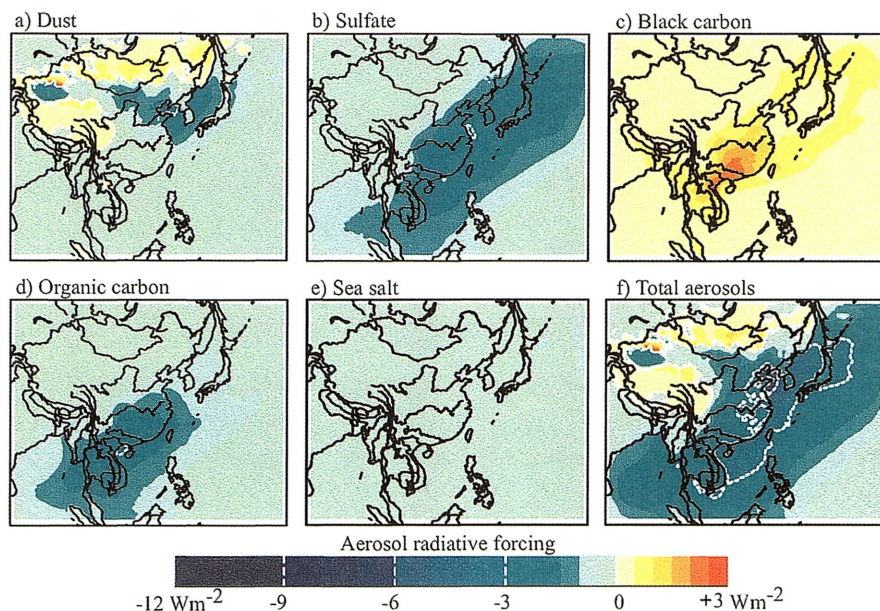


Fig. 7 Same as Fig. 6 but for the all sky

スが見られた。これは、黒色炭素やダストが比較的雲層の近くに位置し、直達光と同時に、雲層によって多重散乱された放射を吸収するためである。一方、これらのエアロゾル層と雲層との距離が離れている場合、散乱性エアロゾルのケースと同様に、直達光が雲層の存在によって減少するため、黒色炭素のARFは減少し、また、ダストのARFは負の値を示す。重要な特徴は、ダストによる正のARFが散乱性エアロゾルの負の効果を相殺する程、もしくはそれ以上に大きな値を示す日がNJやJSで見られる点である。従って、この結果は曇天大気の下でのダスト輸送が、時には風下の地域の放射収支を決定する重要な要因の一つとなる事がわかる。

3.3 アジア域におけるエアロゾル直接放射強制力

Fig. 6, 7 はそれぞれ、モデルによって示された晴天大気、全天大気の下での個々のエアロゾル成分と全エアロゾル (ダスト、硫酸塩、炭素性エアロゾル、海塩粒子が混じりあった状態の大気) の ARF の春季における平均水平面分布を示したものである。また、Table 2 は各起源から発生した個々のエアロゾル成分の大陸上、海上、アジア域全体の春季における、晴天、全天大気時での、ARF の平均値であり、Table 3 は本研究で示された春季アジア域の ARF の平均値と Takemura et al. (2002)¹⁴⁾によって示された ARF の全球・年平均値を比較したものである。ただし、Table 3

Table 2: Springtime Asian averaged aerosol radiative forcing (Wm^{-2})

Aerosol types	Clear sky			All sky		
	Land	Ocean	Asia	Land	Ocean	Asia
Dust	-0.37	-0.40	-0.39	-0.12	-0.21	-0.16
Sulfate	-1.05	-1.85	-1.45	-0.52	-0.96	-0.74
Anthropogenic	-0.98	-1.45	-1.21	-0.49	-0.77	-0.63
Volcanic	-0.08	-0.42	-0.25	-0.03	-0.19	-0.11
Black Carbon	+0.34	+0.04	+0.19	+0.36	+0.17	+0.26
Anthropogenic	+0.20	+0.02	+0.11	+0.21	+0.09	+0.15
Biomass	+0.14	+0.02	+0.08	+0.16	+0.07	+0.11
Organic Carbon	-0.86	-1.13	-0.99	-0.44	-0.58	-0.51
Anthropogenic	-0.34	-0.42	-0.38	-0.16	-0.20	-0.18
Biomass	-0.53	-0.72	-0.63	-0.28	-0.38	-0.33
Sea salt	-0.07	-0.41	-0.24	-0.04	-0.23	-0.13
Total	-1.85	-3.58	-2.71	-0.68	-1.69	-1.18

の中で、ダストの全球・年平均 ARF に対してはより最新の竹村ら(2001)¹⁵⁾の結果を使用している。

晴天大気の場合(Fig. 6)、全体として、個々のエアロゾル成分の ARF は、それらの AOT と非常に似通った分布を示していた。また、散乱性エアロゾル(硫酸塩、有機炭素、海塩粒子)は、全領域で負の値を示し、一方、黒色炭素は全領域で正の ARF を示していた。ダストに関しては、比較的高い積雪域で、正の ARF が見られ、それ以外では負の値が見られている。最も大きな負の値は、ダストに対して黄海上空で、硫酸塩に対して日本の北側の海上で、有機炭素に対してはラオスとタイの国境付近で見られた。一方、全エアロゾルの平均水平面分布に対しては、積雪の多い地域で正の ARF が見られた以外は、全領域で負の値が見られている。積雪域で正の値が見られる理由としては、高い地表アルベドを持つ積雪面上空にダストが輸送されたためである。全エアロゾルの ARF の最も大きな負の値は、日本の北側の海上で見られ、これは、前節で述べたように、ダストや人為起源硫酸塩、人為起源有機炭素の輸送に加えて、バイオマス燃焼由来の有機炭素や火山性の硫酸塩の輸送があったためである。重要な特徴は日本の北側を中心として、ラオスやベトナムから計算領域の北側までにかけて、 $-6Wm^{-2}$ を超える大きな負の効果が見られる事であり、晴天大気時において、大陸からのエアロゾル流出が、風下の地域の広い範囲に非常に大きな冷却効果を及ぼしている事がわかる。

一方、全天大気(Fig. 7)に対しても、個々のエアロゾルの ARF の平均水平面分布はそれらの AOT と似た分布を示していた。しかし、先に示した晴天大気の ARF の分布(Fig. 6)と比較して、幾つかの大きな差が見られる。最も大きな差の一つは、雲の存在による直達光減少のため、各エアロゾル成分の負の値が全体的に弱まっている事である。加えて、雲の多重散乱の影響を受け、比較的雲の多い中国北部やモンゴル、東南アジア、オホーツク海から日本沿岸の太平洋側で、晴天大気時とは異なり、ダストの ARF の負から正への変化や、ダストや黒色炭素の正の ARF の増加が見られている。個々のエアロゾル成分の最も大きな負の値は、それぞれ、ダストや硫酸塩に対しては、黄海上空で、有機炭素に対しては東南アジアのトンキン湾で、また、全

Table 3: Comparisons of the springtime Asian-scale mean aerosol radiative forcing (ARF) (Wm^{-2}) simulated by RAMS/CFORS with the annual global mean ARF (Wm^{-2}) simulated by other Global model

Aerosol types	Springtime Asian scale-mean ARF (RAMS/CFORS)		Annual global mean ARF (Global model)	
	Clear sky	All sky	Clear sky	All sky
Dust	-0.39	-0.17	-0.07	0.00
Sulfate	-1.45	-0.74	-0.72	-0.4
Black Carbon	+0.19	+0.26	+0.21	+0.36
Organic Carbon	-0.99	-0.51	-0.45	-0.24
Sea salt	-0.24	-0.13	-0.59	-0.31

エアロゾルに対しては、黄海上空で見られた。全エアロゾルの ARF の平均水平面分布に対しては、黄海を中心として、南シナ海から日本の北東側までにかけて $-3Wm^{-2}$ を超える負の値が見られている。晴天大気でも同様に、この領域において顕著な負の値が見られる事から、この領域がアジア域でも特にエアロゾルの影響を受ける重要な領域である事がわかる。

春季における平均値(Table 2)としては、晴天、全天大気共に、散乱性エアロゾルやダストに対して陸上よりも海上で大きな負の効果が見られ、黒色炭素に対しては海上よりも陸上で大きな正の値が見られた。これは、海上のアルベドが、平均的に陸上のアルベドよりも低いためである。また、晴天、全天大気の場合、硫酸塩に対しては、火山起源のものよりも人為起源の硫酸塩による、より大きな負の効果が見られ、黒色炭素に対しては、バイオマス燃焼由来のものよりも、人為起源の黒色炭素による大きな正の効果が見られた。一方、有機炭素に対しては、人為起源のものよりもバイオマス燃焼由来の有機炭素による、より大きな負の効果が見られている。アジア域全体としては、負の効果に対して、晴天、全天大気共に、硫酸塩や有機炭素の効果が顕著で、次にダスト、海塩粒子という結果をモデルは示していた。さらに Table 3 から、個々のエアロゾル成分の負の効果は全球・年平均値と比較しても大きく、また黒色炭素による正の効果は全球・年平均値と比較して小さい事がわかる。従って、春季アジア域のエアロゾルによる気候影響としては、硫酸塩や有機炭素の影響を中心とした大気冷却化が起こり、その冷却効果の規模は全球・年平均

値と比較して非常に大きい事がわかる。

4. 結 論

本研究では、領域型化学物質輸送モデルに、エアロゾル・気体の大気放射過程を考慮した大気放射モデルを組み込み、2001年春季のアジア域を対象にエアロゾル輸送シミュレーションを行い、ACE-Asia集中観測やAERONET地上光学観測網から得られたデータとモデル結果との比較を基に、アジア域におけるエアロゾルの大気放射への影響について解析した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ACE-Asia や AERONET において観測された光学的厚さやオングストローム指数とモデル結果との比較から、モデルは観測された光学的厚さやオングストローム指数の時間変化や地域分布の特徴を適切に捉えている事がわかった。この比較の中で、モデルはダスト輸送の影響が間欠的であるが、非常に大きな光学的影響を持つ事、硫酸塩や炭素性エアロゾルの輸送が春季を通して連続的に起こり、各観測サイトの光学的厚さに大きな影響を及ぼしている事を示し、時にはそれらが同時期に輸送される事によって、非常に大きな光学的厚さを各サイトで形成している事がわかった。
- 2) 個々のエアロゾル成分の平均水平面分布の解析から、ダストや硫酸塩、炭素性エアロゾルがそれぞれ、特有の光学的厚さの分布を持ち、これらの大陸からの流出によって、北緯25度から45度までの広い範囲にかけて、非常に大きな光学的厚さを持つ領域を形成している事がわかった。
- 3) エアロゾル直接放射強制力の日本近海における日変化の解析から、硫酸塩による負の影響が、晴天・全天大気の場合で非常に強く、日本付近の大気放射収支に対して、硫酸塩の輸送が特に重要である事がわかった。全天大気放射強制力の日変化の解析からは、ダストが雲の多重散乱の影響を受け、散乱性エアロゾルの負の効果を相殺する程大きな正の放射強制力を持つ事が示され、曇天大気の下でのダスト輸送が、大気放射収支を決定する重要な要因の一つとなる事がわかった。
- 4) エアロゾル直接放射強制力の春季における平均水平面分布の解析からは、大陸からのエアロゾル流出の影響や南からの火山性エアロゾル輸送の影響のために、晴天大気の下で、オホーツク海で、非常に大きな負の効果が見られるという地域的な特徴が示された。また、晴天、全天大気ともに、北緯25度から45度ま

での広い範囲にかけて顕著な負の値が見られ、アジア域では、この領域を中心に、エアロゾルが大きく大気を冷却している事がわかった。

- 5) アジア域全体の春季の放射強制力の平均値を求めた。晴天大気の下で、硫酸塩に対して -1.45Wm^{-2} 、有機炭素に対して -0.99Wm^{-2} 、ダストに対して -0.39Wm^{-2} 、海塩粒子に対して -0.24Wm^{-2} 、黒色炭素に対して $+0.19\text{Wm}^{-2}$ 、一方全天大気の下では、硫酸塩に対して -0.74Wm^{-2} 、有機炭素に対して -0.51Wm^{-2} 、ダストに対して -0.16Wm^{-2} 、海塩粒子に対して -0.13Wm^{-2} 、黒色炭素に対して $+0.26\text{Wm}^{-2}$ という結果をモデル解析は示していた。また、全球・年平均値と比較して、個々のエアロゾル成分の負の効果は大きく、黒色炭素の正の効果は小さい事から、春季アジア域のエアロゾルによる気候影響としては、硫酸塩や有機炭素の影響を主とした大気冷却化が起こり、その規模は全球・年平均値と比較して非常に大きい事がわかった。

謝 辞

論文中で使用した北京、Anmyon、白浜、沖縄での光学的厚さは NASA Goddard Space Flight Center の Dr. B. N. Holben に、また Gosan での光学的厚さは韓国 Meteorological Research Institute の Dr. B.-C. Choi と Dr. J. Kim に提供して頂きました。ここに記して深謝します。

参 考 文 献

- 1) IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, J. T. Houghton, L. G. Meira. Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (Eds.), 572 pp., Cambridge Univ. Press, New York, 1996.
- 2) IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu, K. Maskell, and C. A. Johnson (Eds.), 896pp., Cambridge Univ. Press, New York, 2001.
- 3) Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosenfeld, Aerosols, climate, and the hydrological cycle, *Science*, **294**, 2119-2124, 2001.
- 4) Huebert, B., T. Bates, and P. Russell, et al., An overview of ACE-Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *J. Geophys. Res.*, **108**, 8633, doi:10.1029/2003JD003550 2003.
- 5) Nakajima, T., et al., Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model, *Appl. Opt.* **39**, 4869-4878, 2000.
- 6) Pielke, R. A., et al., A comprehensive meteorological modeling system-RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.*, **49**, 69-91, 1992.
- 7) Le Treut, H. and Z.-X. Li, Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: feedback effects associated with the simulation of cloud

- optical properties. *Clim. Dyn.*, **5**, 175-187, 1991.
- 8) Arakawa, A. and W. H. Schubert, Interactions of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Soc.*, **31**, 671-701, 1974.
- 9) Walko R. L., et al., Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling, *J. Appl. Meteor.*, **39**, 931-944, 2000.
- 10) Takemura, T., A study on aerosol distributions and optical properties with a global climate model. *Ph.D. dissertation, Center for Climate System Research. Report No. 16*, Tokyo University, 2001
- 11) Uno, I., et al., Regional chemical weather forecasting system CFORS: Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during ACE-Asia experiment, *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8668 doi:10.1029/2002JD002845, 2003.
- 12) Holben, B. N. et al., An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *J. Geophys. Res.*, **106**, 1551-1568, 2001.
- 13) Satake, S., et al., Characteristics of Asian Aerosols Transport simulated with a Regional Scale Chemical Transport Model during the ACE-Asia observation, *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD003997, 2004.
- 14) Takemura T., T., Nakajima, O., Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, *J. Clim.*, 15333-15352, 2002.
- 15) 竹村俊彦, 中島映至, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, **80**, 242pp, 2001.