

204:306 (ダスト; 輸送過程; 気候影響)

## 2. 東アジアにおけるダスト-大気・気候系の解明

三 上 正 男\*

### 1. はじめに

大陸の砂漠乾燥域でダストストームに伴い発生し、大気中を長距離輸送されるダスト（鉱物性エアロゾル）は、日本では「黄砂」として古くから知られた現象である。ダストストームは、砂漠乾燥域の社会に重大な損害を与える気象現象であり、ダストが通過する地域では浮遊粒子状物質の大気環境基準値を大幅に上回る深刻な大気環境問題として認識されている。

いっぽう、1990年代以降、ダストが様々な形で地球の気候系と密接に関係している事実が明らかとなりつつある（Mikami *et al.* 2005 a）。大気中ダストは日射・赤外放射の散乱・吸収による直接効果の放射強制力に加え、雲降水過程（間接効果）を通じて気候系と結びついている（IPCC 2007）。また、直接間接の放射

強制力によって影響される地表面の熱収支や大気成層への熱的效果を通じた降水やモンスーン循環などの大気系への効果が議論されるようになってきた。

日本では、古くから黄砂の研究として、主に黄砂の氷晶核機能に焦点を当てたダスト粒子の物理・化学・雲物理特性に関する研究が進められてきた。1959年当時すでに Isono *et al.* (1959) は、黄砂の雲の凝結核としての効果について言及している。しかし当時は、気候モデルそのものが未完成であったため、黄砂の物理・化学及び雲物理的プロセス解明が、全球スケールでの黄砂の気候影響の解明へと結びつく事はなかった。近年の観測・測定技術の飛躍的な進歩や気候モデルの精緻化に伴い、1990年代後半より、ダストが地球の大気・気候系に与える影響に関し、定量的な議論が行えるようになってきた。現在、東アジアを対象とするダストの研究は、従来の黄砂研究コミュニティに加え、大気境界層、大気化学、大気放射、気候モデ

---

\* 気象庁気象研究所。  
© 2011 日本気象学会

ル、古気候学、医学など様々な分野の研究コミュニティの参加・連携により、学際的な拡がりを持った研究として、急速に拡大発展してきている（くわしくは岩坂ほか（2009）参照）。

本稿では、最近注目されているダストの大気・気候系への影響評価を議論した後、東アジアを対象としたダスト研究の現在について概観を試みる。なお、著者の能力不足により見落とした重要な研究や、スペースと時間の制約でここに紹介しきれなかった研究も多いと思われるが、どうかご容赦願いたい。

## 2. ダストの大気・気候へのインパクト

ダストの気候への影響について、定量的な議論がなされたのは1990年代後半以降である（Sokolik and Toon 1996；Tegen *et al.* 1996）。当初は、大気中に浮遊するダストの日射及び赤外放射の散乱吸収による直接効果が問題視され、その頃から各地に整備されはじめたライダーや衛星観測解析技術の進歩とも相まって全球ダストモデルによる定量的議論が可能となってきた。その結果、2001年に出された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第三次評価報告書からダストの直接効果による放射強制力評価が記述されるようになった。しかしながら、2007年のIPCC第四次評価報告書でも、エアロゾルの直接効果（大気放射の散乱・吸収）と第一種間接効果（雲アルベド効果）ならびに第二種間接効果（雲寿命効果）については、依然不確定性は大きいとされている。

エアロゾル全体の大気上端の放射強制力は、温室効果ガスの正の強制力の半分程度の負の強制力を持つと見積もられているが、大気下端では、エアロゾルの放射強制力はむしろ温室効果ガスよりも大きく、種々の気温変動要因の中で最大であると考えられている。後述するように、大気下端の放射強制力や、それに伴う地表面温度への影響は、気候のみならずモンスーン循環や擾乱に与える影響も無視できないと最近では考えられており、ダストを含む各種エアロゾルの直接、間接の放射強制力の理解は重要である。

各種エアロゾルの中で、ダストは大きく重く、大気中の滞留時間が他のエアロゾル種に比べ短いため、発生域は別として、全球の気候に与える影響は少ないと考えられてきたが、TOMSなど地球観測衛星情報の進歩やライダーのネットワーク展開に伴うダストの空間的分布の実態把握が進むにつれ、ダストは全球的な拡がりを持つエアロゾル種であることが理解されるよ

うになった。Uno *et al.* (2009) は、全球エアロゾルモデル SPRINTARS と CALIPSO 衛星ライダー情報を用いて、タクラマカン砂漠起源のダストが自由大気上層まで運ばれ13日間で地球を1周する実態を見事に描き出している。また、直接、間接の放射強制力以外にも、ダストと地球の大気・気候系の間には、様々なプロセスがあり得ると考えられており、その多くは実態把握も定量化もなされてはいない。東アジアの大気・気候系を考える前に、この章では、現在研究が進められつつあるいくつかのプロセスについて概観する事にしたい。

### 2.1 直接効果と間接効果

IPCC で言うエアロゾルの放射強制力は、1750年の産業革命以降の人為起源エアロゾルによるものをさす。ダストの場合、産業革命以降、過放牧や耕地の不適切管理に伴う砂漠化や耕作地拡大による土地利用変化などに伴うダスト発生量が、自然起源のダスト発生量に比べてどの程度の割合なのかを知る必要があるが、ダストの発生量に関する観測はこれまででなく、間接的な証拠からの類推に頼らざるを得ないため、その評価には大きな幅がある。IPCC 第四次報告書では全体のダスト発生量の0～20%としているが、気候の長期変動に伴う自然起源ダストそのものの変動と分離出来ないため、その信頼性は極めて低い。

そのためモデルの評価は、今のところ自然起源と人為起源を足し合わせたダスト総量に対する放射強制力（DRE：Direct Radiative Effect）に基づいている。全球ダストモデルによる直接効果による放射強制力は、2000年頃より各国のモデルで評価されてきたが、これまでのところ、大気上端で $-0.4 \text{ Wm}^{-2}$ から $+0.1 \text{ Wm}^{-2}$ の間に収まっている（IPCC 2007）。しかし、例えばTanaka *et al.* (2007) が示したように、大気上端と大気下端の放射強制力は、ダストの光学特性で大きく異なる結果を与える（第1表）。このダストの光学特性は、発生域の鉱物組成によっても異なるが、東アジアのように、長距離輸送に伴う内部混合による吸収特性の変化によっても大きく影響される。また、モデルによる発生域のダストフラックスの再現性に関して、東アジアを試験領域として実施されたダストモデルの相互比較実験 DMIP では、モデル相互間のバラツキは依然として非常に大きいことが示され（Uno *et al.* 2006）、サブグリッド効果も考慮したより正確な気象場の再現・予測と発生過程のモデル再現性に関しても、現状は満足できる水準にない事が分か

第1表 ダスト粒子の吸収特性を表す複素屈折率の虚数部 ( $n_i$ ) とダスト粒子の各光学モデル (ADEC1, ADEC2, OPAC-MD, Dust-Like) に基づいて計算された年平均全球の大気上端 (TOA) および地表面 (Surface) における直接効果による放射強制力 (SW=日射, LW=赤外放射, Total=全波長)。括弧内の数字は、晴天時の強制力を示す。Tanaka *et al.* (2007) より引用。

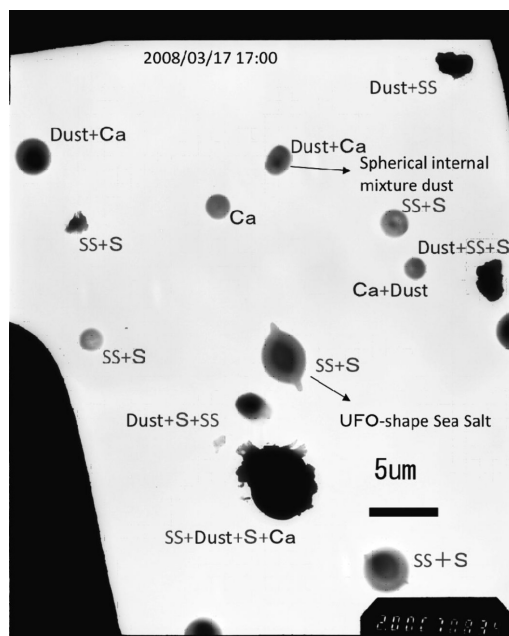
	$n_i$ at 0.55 $\mu\text{m}$	$n_i$ at 10 $\mu\text{m}$	TOA			Surface		
			SW	LW	Total	SW	LW	Total
ADEC-1	0.0004	0.5	-0.68 (-0.92)	+0.16 (+0.20)	-0.52 (-0.72)	-0.84 (-1.07)	+0.57 (+0.71)	-0.27 (-0.37)
ADEC-2	0.0030	0.5	-0.38 (-0.65)	+0.16 (+0.20)	-0.22 (-0.45)	-1.22 (-1.49)	+0.57 (+0.71)	-0.65 (-0.79)
OPAC-MD	0.0056	0.5	-0.17 (-0.47)	+0.16 (+0.20)	-0.01 (-0.27)	-1.49 (-1.81)	+0.57 (+0.71)	-0.92 (-1.10)
Dust-Like	0.0080	0.16	+0.03 (-0.25)	+0.08 (+0.09)	+0.11 (-0.16)	-1.54 (-1.86)	+0.29 (+0.36)	-1.25 (-1.50)

る。このように、ダストの直接効果による放射強制力評価の不確定性は、依然として大きいものがある。

いっぽう間接効果に関しては、一般に疎水性を持つダスト粒子単独では、雲過程には関係しないが、親水性の人為起源エアロゾルや前駆体との内部混合に伴う変質過程 (aging) を経る事によりダストが間接効果に関係するため、ダスト粒子単独ではなく人為起源エアロゾルを含むエアロゾル全体として間接効果を評価する必要がある。第1図は、2008年3月のダストイベント時に福岡でサンプルした内部混合を起こした黄砂粒子の電子顕微鏡写真である (財前祐二博士提供)。このように、東アジアのダスト発生域風下で、ダストは人為起源エアロゾルや前駆体さらには海塩など多様な内部混合を起こしていることが分かる。しかし、東アジアの大気中でダストがどのような変質を受け、雲降水過程にどの程度の影響を与えうのかの実態把握のためのプロセス研究は、まだ断片的段階であるため、間接効果によるダストの放射強制力は、まだよく分かっていないのが現状かと思われる。いっぽう、後でも述べるように、実験室レベルでは氷晶核実験装置などを用いた室内実験が行われており、自由大気上層でのダスト粒子の凝結核化過程に関する研究進展が期待される。

## 2.2 ダストと氷晶核化

自由大気上層のダスト粒子が、氷晶核化し、巻雲を生成する可能性については、すでに1950年代後半に、日本のグループが地上で採集した氷晶核に、黄砂と思われる粘土鉱物が多く含まれることを確認し、議論を行っている (Isono *et al.* 1959)。近年のライダー観測により、ダストの氷晶核化に関する多くの観測例が報



第1図 福岡大学屋上で採取されたダストを含む各種エアロゾルの電子顕微鏡写真 (2008年3月17日)。SSは海塩。(気象研財前博士より提供)

告されるようになってきた。日本では、対流圏中上部のダスト層内に氷雲が分布する観測例 (Murayama 2001; Sakai *et al.* 2004) が報告されている。また、サハラを対象とした CRYSTAL-FACE の観測キャンペーンでは、サハラダストが存在する気層から1000個  $\text{L}^{-1}$  の高濃度の氷晶数濃度が観測されており ( $-36.5^\circ\text{C}$ , 相対湿度123%, 2 kmの層厚) (DeMott

*et al.* 2003), 長距離輸送されたサハラダストが輸送途上で吸湿性を獲得し, ヨーロッパ上空で氷雲(高層雲)の氷晶核となった観測例(Ansmann *et al.* 2005)なども報告されている。さらに, サハラ起源のダストがフロリダ上空で $-37^{\circ}\text{C}$ 以上の温度で氷晶核化している観測(DeMott *et al.* 2003; Sassen *et al.* 2003)なども報告されている。

Sassen (2005) は, 2004年春に発生したアジア起源のダストがアラスカまで長距離輸送され, 高さ4.5~6.5 kmのダスト層の中に氷晶雲が見いだされること, そして気温と相対湿度から得られる過飽和度を考慮すると, ダスト粒子を前提としなければ氷晶が存在し得ない事をライダーの観測によって示した。これは, 長距離輸送されるダストが発生域から遠隔な場所でも氷晶雲を発生させ気候へ影響する可能性を指摘している。しかし, Hoose and Lohmann (2008) が指摘したように, ダストの aging (長距離輸送途上の人為起源物質との内部混合)に伴い様々な雲凝結核粒子(CCN)形成過程や混合雲での氷晶核形成過程があり, またダストの鉱物組成によってもそれらは左右される。ダストの氷晶核化(およびCCN化)については, どのような条件下でどのような過程が重要かについて実験や観測が不足しており, それが気候モデルにおける間接効果の定量化の壁となっている。

これらを解明するため, 欧米ではPACEDEXなどの大規模な観測が行われ, 日本でも, 気象研のグループが気球を用いた観測を行い, 対流圏上部で氷晶とダストを検出し, 観測された領域の相対湿度から黄砂が氷晶化した可能性を議論している(酒井ほか 2007)。最近では, 全球気候モデルにもダストなどのエアロゾルを考慮した不均質氷晶核形成過程を導入した氷晶雲のパラメタリゼーションが行われているが(例えばKärcher *et al.* 2006), ダストをはじめとする各種エアロゾルの氷晶核の活性化能力のパラメータ依存性など, 氷晶および氷晶核に関する観測・実験データが依然として不足しており, パラメタリゼーションの定量的妥当性に問題があるのが現状である。

しかし, 2006年に打ち上げられたCALIPSO衛星に搭載された偏光ライダーによって, 自由大気上層のダストの動態がこれまで以上により鮮明に捉えられるようになり(Uno *et al.* 2008), 従来からのチャンパー実験や気球・航空機観測に加えて, こうした情報とモデルとを有機的に組み合わせることにより, これまで空白域が多かったダスト巻雲過程に関する新しい

研究展開が期待される。

### 2.3 ダスト-積雪アルベド効果

エアロゾルが積雪に不純物として混入すると, 積雪面のアルベドが低下し(加熱効果), 融雪の加速が起こり, その結果積雪面が減少しさらにアルベドが低下する, という正のフィードバック効果が考えられる。この効果は放射吸収性の強いエアロゾルにより強く働くため, 対象とする不純物としてこれまでは, 黒色炭素(BC)が主として考えられてきた。また, 有機炭素(OC)の効果も考えられるが, BCに比べてOCの光吸収特性は不明の点が多く, これまでいくつかの先行研究で, BC単独(Hansen and Nazarenko 2004; Hansen *et al.* 2005; Flanner *et al.* 2007)ないしBC+OC(Jacobson 2004)の積雪不純物による放射強制力の見積がなされている。いずれの研究も, 強制力は正の値( $+0.08\sim+0.16\text{ Wm}^{-2}$ )を示し, 気温を上昇させる方向に働く結果を示している。しかし, 雪氷面上にはBCやOCに加え, ダストも多く沈着することが知られている。ダストはBCに比べ吸収特性は弱い, 沈着量はBCに比べはるかに多いため, その効果を見捨てることは出来ない。しかし, BCに加えダストについて, その積雪アルベド効果の重要性が指摘されたのは, ごく最近になってからである(Aoki *et al.* 2006; Painter *et al.* 2007; 青木・田中 2008)。

さらに, 田中ほか(2006)は, ダストとBCを考慮した積雪アルベドモデルを全球エアロゾルモデルMASINGARに組み込み, 全球での積雪アルベド効果の定量的評価を試みた。このモデルでは, 積雪面アルベドは, 積雪有効粒径と不純物量(Snow Impurity Factor: SIF)の関数として表現され, agingの効果を表すため, 積雪有効粒径と不純物濃度には履歴を持たせている。この結果によると, エアロゾル沈着の影響の有無での放射収支量の差の全球平均(全天大気)は, BCだけでは $+0.22\text{ Wm}^{-2}$ , ダストが $+0.20\text{ Wm}^{-2}$ となるが, 両者を併せた効果では非線形効果により両者の和よりも大きな $+0.7\text{ Wm}^{-2}$ と, 大気エアロゾル全体の直接・間接効果に匹敵する大きさとなった。また, 地表面気温差は, 年平均全球平均で $+0.2^{\circ}\text{C}$ の加熱効果を示し, 北半球夏に大きな影響(雪の解け残りの有無の影響が大きく, また夏期は短波放射が強い)を示し, 冬季は影響が弱い(雪のある北半球高緯度での短波放射が弱くなる)という結果を得ている。このように, エアロゾル積雪アル

ベド効果は、気候インパクトとして非常に大きい可能性があるが、IPCCの報告書に記載されたのは第四次評価報告書からであり、気候モデルへの実装もようやく始まったばかりである(青木・田中 2008)。このエアロゾル雪氷面アルベド効果には、OCの吸収特性や、ダストが雪氷面上の微生物に栄養塩として働き、雪氷面微生物の成長が雪面のアルベドをさらに低下させるダスト生物効果等、未だにプロセスがよく分かっていない問題も多く(気象研究所・青木 personal communication)、積雪アルベドの物理モデル構築のためにはさらなるプロセスの理解と実態解明が必要である。

#### 2.4 ダストと気象擾乱

これまで、ダストが気候系に与える影響や相互作用を見てきたが、最近の研究によれば、ダストがモンスーンや熱帯性低気圧など大気循環や擾乱、降水という大気現象に及ぼす影響に関する研究がなされるようになってきた。

ダストが大気中に多く滞留していると、地表面の正味放射量を減少させ、蒸発量を抑制し、降水量を減少させる事は、すでに指摘されてきたところである(Ramanathan *et al.* 2001; Yoshioka *et al.* 2007)。これはダストから蒸発量・降水への影響であるが、最近ではその逆向きの効果も含めて、ダストと擾乱や降水との相互作用についての研究が多く見られるようになった。

たとえば、Miller *et al.* (2004 a) は、ダストの放射強制力により地表面の日射量が減少し、それによる乱流顕熱輸送フラックスの減少が大気境界層の乱流混合を弱め、その結果、地上風の減少とそれに伴うダスト量の発生抑制が引き起こされる、という負のフィードバック効果について言及している。逆に、地表面温度の低下は、蒸発量の抑制ももたらすが、これに伴う降水量の減少と湿性沈着量の減少は、ダスト発生に対して正のフィードバックを与える。

また、蒸発量および降水量は、地表面の強制力( $RF_{sur}$ )だけではなく、大気上端(TOA)の強制力( $RF_{TOA}$ )とのバランスにも大きく影響される。Xian and Miller (2008) は、熱帯循環の南北非対称モデルを用いて、ダストによる強制力を大気上端( $RF_{TOA}$ )で $0 \text{ Wm}^{-2}$ 、地表面( $RF_{sur}$ )で $-6.7 \text{ Wm}^{-2}$ とした時に潜熱が $-2.9 \text{ Wm}^{-2}$ 抑制され、一方大気上端と地表面の強制力を同じ $-4.7 \text{ Wm}^{-2}$ とすると、潜熱は $-7.4 \text{ Wm}^{-2}$ の減少となることを示した。つまり、大

気上端の強制力は地表面の強制力よりも強い効果を水循環系に与えることを示した。ただしダストの吸収特性が比較的強い場合は、 $RF_{sur}$ が $RF_{TOA}$ よりかなり大きくなってしまい、この場合蒸発抑制の効果は地表面の強制力によってほぼ決まるので、結局のところダストの光学・放射特性が重要である事が分かる。

また、温室効果ガスと異なり、ダストの大気中分布には大きな地理的偏在性と季節変動があるため、季節と地域により直接効果に伴う影響は大きく異なる。このため、地域ごとのダストの擾乱や降水に与える影響を評価するために、領域モデルを用いた数値実験や地域別の研究もいくつか行われている。例えば Grini *et al.* (2006) は、西アフリカの3日間におよぶ停滞したダスト分布が陸面の正味放射と蒸発量を抑止する事を示しているし、Pérez *et al.* (2006) は、ダスト層による正味放射の減少が、海面よりもより強い効果を陸面にもたらし、結果として冷たい高圧帯を陸面上に形成し、海陸風の強制力を弱めダストを海岸線にとどめる作用を及ぼす事などを示している。

サハラを起源とするダストに関しては、強制力を媒介としたサハラ大気境界層の成層安定化と周辺地域の傾圧性の弱体化に伴う強風の減少によるダストフラックスの減少という大気循環からダストへの負のフィードバック効果や(Heinold *et al.* 2008)、サハラダストの放射強制力に伴い、北半球夏のハドレー循環の赤道よりへの変位と、ITCZの南半球への移動時期の早期化が引き起こされ、結果としてサヘルの降水を減少させるという数値実験結果も示されている(Xian 2008; Miller 2008)。

また大西洋では、ハリケーンの活発年と非活発年の違いをサハラダストの大西洋上空への流入による海面温度(SST)の影響と関連づける研究が行われている。これは、サハラ起源のダストが暖かく乾燥したサハラ大気層(SAL)に伴い大西洋に流れ出すと、大西洋上空の大気成層を安定化させ深い対流を抑制するため、ハリケーンの活動を弱める働きをするというメカニズム仮説に基づくが、これを裏付けるいくつかの解析も行われている(たとえば、Lau and Kim 2007; Sun *et al.* 2008など)。

以上のように、ダストによる擾乱や蒸発・降水への影響は、大循環スケールから個々の擾乱スケールまでの幅広い空間レンジと、数年に及ぶ大気循環系への影響(たとえば米国1930年代のdust bowl: Cook *et al.* 2008; Brönnimann *et al.* 2009)から、年々変動、季

第2表 これまで文献で取り上げられた主なダスト-大気・気候系プロセスの概要。

プロセス	影響	インパクト
大気中ダストの日射・赤外放射の吸収散乱による放射強制力直接効果	グローバル	地表面アルベドに依存, 全球では $-0.1 \pm 0.2 \text{ Wm}^{-2}$
第一種・第二種間接効果へのダストの寄与	グローバル	$-0.7 \text{ Wm}^{-2}$ (エアロゾル全体・第一種), 第二種不明
自由大気上層のダストの氷晶核活性化による巻雲生成	グローバル	不明
雪氷面に沈着したダストのアルベド効果	ローカル	全球で $+0.2^\circ\text{C}$ (試算), ダスト-雪氷-生物過程は不明
ダストによる地上風速・潜熱フラックス・降水量の減少	ローカル	$-8\%$ (風速), $-2 \sim -5\%$ (降水量)
ダストの直接・間接効果による熱帯擾乱の減少	ローカル	不明
海洋表面に沈着したダストの栄養塩-生物効果による $\text{CO}_2$ 吸収	グローバル	不明
海洋表面に沈着したダストの栄養塩-生物効果によるDMS-CCN生成	グローバル	不明
ダストの氷河への沈着による内陸閉鎖水系への影響	ローカル	不明
過放牧・農地の不適切管理に伴うダスト発生量の増加	ローカル	人為起源が全体の $0 \sim 20\%$
砂漠化に伴うダスト発生量の増加	ローカル	不明
植生の減少によるダスト発生量の増加	ローカル	不明
土壌水分の減少によるダスト発生量の増加	ローカル	不明
気候場 (気候インデックス) の変化に伴うダスト発生量の変化	グローバル	不明
氷期の気候変化に伴うダスト発生量・分布の変化	グローバル	現在の $1.9 \sim 2.3$ 倍の発生 (モデル), $2 \sim 20$ 倍の沈着 (解析・モデル)
氷期のダスト発生量・分布変化による気候インパクト	グローバル	$-0.02 \text{ Wm}^{-2}$ (大気上端), $-0.43 \text{ Wm}^{-2}$ (地表面)

節変動, 並びに数日に及ぶ大気境界層成層状態への影響におよぶ幅広い時間レンジの双方に関わる問題である。これまでのところ, ダストを含むエアロゾルの大気系への影響について, 気候モデルではそれをインタラクティブなプロセスとしてモデルに組み込む事が行われているが, これまで見てきたように, ダストはモンスーン循環やよりスケールの小さい擾乱系にも少なからずの影響を与えていると思われる。こうした問題を定量的に議論できるためには, ダストの光学・放射特性や, 未だ充分には解明されていない雲粒核化プロセスを通じた雲・降水への影響評価のための基礎的な知見が求められるところである。

第2表に, これまで文献等で取り上げられたダストと大気・気候系の相互作用に関するプロセスの例をまとめた。今回取り上げたのはこの中の一部のプロセスであるが, このように, ダストと大気・気候系は様々な形で相互に関連していると考えられ, この10年ほどで我々の知識は飛躍的に増えたとはいえ, まだ不明の点が多いのもこれまで見てきたとおりである。さて, 以下の章では, 東アジアにおけるダストと大気・気候

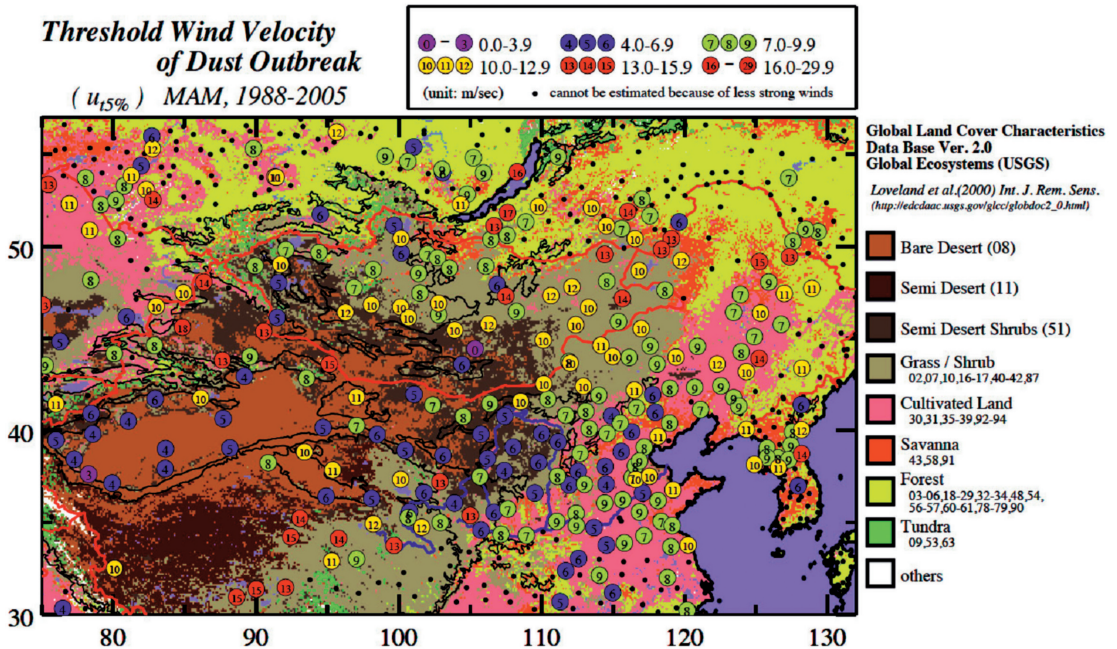
系の相互作用の実態解明とプロセス理解は何処まで進んでいるのかについて, 概観を試みる。

### 3. 東アジアを対象としたダスト研究

#### 3.1 はじめに

これまで, 主として欧米の北アフリカや全球を対象とする研究を見てきたが, それでは東アジアを対象とした研究はどうであろうか? 研究を概観する前に, まず東アジアがサハラや中東のダスト発生地帯とは地理的条件がかなり異なる点にふれておきたい。

東アジアがサハラと異なる最大の相違点は, 東アジアではダストの発生域が広域に分散している事である (第2図)。これは, 東アジアに広がる乾燥・半乾燥地帯が複雑な地形と多様な地表面条件 (植生) を持っている事に起因している。また, 東アジアの乾燥地帯は冬季～春季にかけて積雪の影響を受けるとともに, 春季～夏季にかけては広範囲に植生がみられ, そのためサハラや中東のダスト発生地帯とは異なり, 強風とダストの関係には季節変動や地域差が顕著に見られる事も大きな特徴であり (Kurosaki and Mikami 2005),



第2図 1988年～2005年のSYNOPデータから求めたダスト臨界風速分布(括弧内の数字, 単位は $\text{ms}^{-1}$ )。カラーは, USGS Global Land Cover Characteristics Data Baseによる地表面被覆分布図, Kurosaki and Mikami (2007) より引用。

これらのことが東アジアでのダストの発生プロセスを複雑にしている。また, ダスト発生域の風下には, 人為起源エアロゾルの発生域である大陸東岸の都市部と工業地帯が広がっており, 日本に飛来するダストは, しばしば大陸東岸で人為起源エアロゾルの気塊と混合し, さらに東シナ海上空で変質を受けるといった複雑な変化を受けている。このような東アジアダストの特色は, サハラダストとは際だって異なるものであり, 発生量はサハラより少ないとは言え, ダスト-大気・気候系を考える上で, 東アジアダストは重要な地域だと考えられる。

東アジアでのダスト研究は, これまで見てきたような欧米のダスト研究とは多少異なり, ダストの物理化学・光学特性の研究と共に, 防災としてのダストストームの予測, 黄砂現象の予報という点にも力が注がれてきた印象がある。これは, 東アジアは自国内ないしは隣国にダストの発生域を抱えているという条件にも起因すると思われる。このため, 欧米各国に先駆け, 中国, 韓国, 日本ではダストモデルを用いた黄砂予報業務が2000年頃より開始されている。

また, 東アジアでは, 人為起源エアロゾルの発生域と自然起源のエアロゾルであるダストや海塩粒子の発

生域が地理的に隣接し, 複雑な大気環境を作っていることもあり, これまで国際共同による大規模なエアロゾル関連のプロジェクトが精力的に進められてきた(ACE-Asia 関連研究, 笠原特定領域研究, 畠山新学術領域研究, 日中共同研究 ADEC など)。また, 研究者のボランティアな努力により, 定点観測拠点をベースとした長期モニタリング観測やライダーネットワーク観測も大きな成果を挙げており(たとえば, Takami et al. 2007; Sugimoto et al. 2005, 2008 など), エアロゾルとしてのダストの物理化学・光学特性に関しては豊富な研究蓄積がある。

いっぽう, 後で見るように, ダストと大気・気候系の相互作用に関する研究に関して, サハラや, インド, 南アジアの研究に比べ, 東アジア域の研究は未だ不十分である。言うまでもなく, 世界でも最も複雑な大気環境を持つ東アジアでのこの種の研究は, 極めて重要であり, 今後さらなる研究推進が期待されるところである。

以下の章では, 東アジアを主な対象としたダストの各プロセス研究, 大気・気候系相互作用に関する研究を概観してゆく。

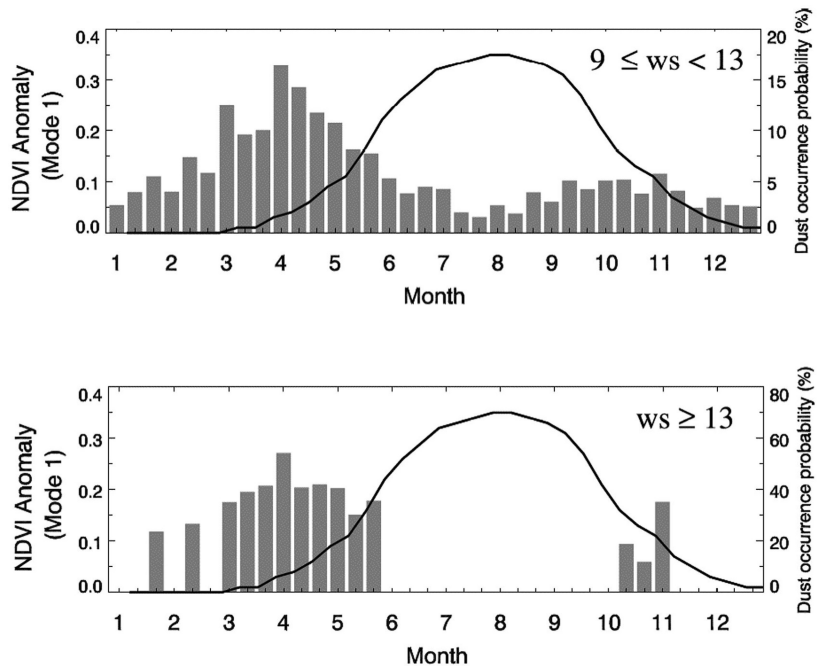
### 3.2 物理過程（発生、輸送と沈着）

ダストの物理過程は、発生、輸送、沈着過程に大別できる。発生過程に関しては、発生域の精密観測による素過程の研究（たとえば Mikami *et al.* 2005 b）に加え、東アジア広域の発生について地上気象観測（SYNOP）報を用いて統計的にダスト発生と強風発生頻度、積雪被覆面積との関係を論じた Kurosaki and Mikami (2003, 2004, 2005) の一連の研究がある。彼らは、SYNOP 報から得られるダストストーム発生頻度と風速情報を用いて、東アジア域のダスト臨界風速マップを作成している (Kurosaki and Mikami 2007)。これによると、臨界風速値は地域ごとに大きな多様性を持っており、しかもそれは季節や植生、積雪などの地表面条件にも左右され、東アジアダストの発生が極めて複雑なメカニズムを内包している事を示している。Lee and Sohn (2009) は、SYNOP 報の風速、ダスト発生情報と SPOT4衛星の正規化植生係数 (NDVI) データの解析から、東アジアのダストストーム発生地域は、大きく3つの領域、すなわちタクラマカン砂漠、中国北部とモンゴル南部域、その周縁に広がる東アジア北東部の草地に分けられる事を明らかにし、草地では、地上風速が強くても植生がダスト発生をコントロールするため夏季から秋季にかけては発生が著しく制限される事を統計的に明らかにした (第3図)。彼らの研究によれば、モンゴル域が最も地表面条件に対する感度が高い地域だと考えられるが、この地域では、前年の植生が枯れ草として翌年も地表面に残り、ダストの発生を抑制するという現象も見られる。現在鳥取大 GCOE グループを中心として、モンゴルを対象とした降水量や植生メモリーをも考慮した黄砂発生の生物物理学モデルの構築を目標とした研究 (DUVEX) が進められつつある

(Shinoda *et al.* 2010)。

東アジア起源のダストの長距離輸送については、1980年頃より研究が進められてきたが、近年の衛星観測技術の進歩により、その全容がしだいに明らかになりつつある。例えば Uno *et al.* のグループは、領域化学輸送モデル CFORS や全球エアロゾルモデル SPRINTARS と衛星搭載ライダー-CALIPSO/CALIPSO を用いて、東アジア起源ダストの時空間的な輸送構造をモデルで再現することに成功しており (Uno *et al.* 2008, 2009; Eguchi *et al.* 2009)、いまや CALIPSO と全球ダストモデルを用いて、東アジアで発生する大規模なダスト現象の長距離輸送過程の再現と予測がかなりの精度で行えるようになりつつある。

いっぽうダストの沈着量の実態については、東アジアに限らず世界でも体系的なデータは、Prospero (1999) によるマイアミでの観測などごくわずかしき報告されておらず、我が国でも冬季積雪期の立山での長期観測 ( $7.7 \text{ gm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ : Osada *et al.* 2004)、日本近海の海洋中への堆積率 ( $0.7\sim 4.3 \text{ gm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ : 鈴木・角皆 1987) や、つくばでの湿性・乾性沈着観測



第3図 地上風速レンジ毎 ( $9 \text{ ms}^{-1}\sim 13 \text{ ms}^{-1}$ および $13 \text{ ms}^{-1}$ 以上) のダスト発生頻度 (縦軸棒グラフ) と正規化植生指数アノマリ (NDVI anomaly of EOF model) の月別変化。対象領域は東アジア北東部の半乾燥草地。統計は1998年4月から2006年12月のデータによる。Lee and Sohn (2009) より引用。



(Inomata *et al.* 2009 a, b, 第4図) などが報告されてはきたが, モデル検証にも利用可能な広域にわたるまとまった湿性・乾性沈着量データは不足していた。現在, 科研費基盤研究 A (研究代表三上正男) により, 2008年秋季より日本各地の8カ所でダストの湿性・乾性沈着量のモニタリング観測 (DRAEMON) が開始された。こうしたデータが整備される事により, 今後東アジアにおけるダスト沈着過程の実態解明が進む事が期待される。

### 3.3 東アジアダストの特性

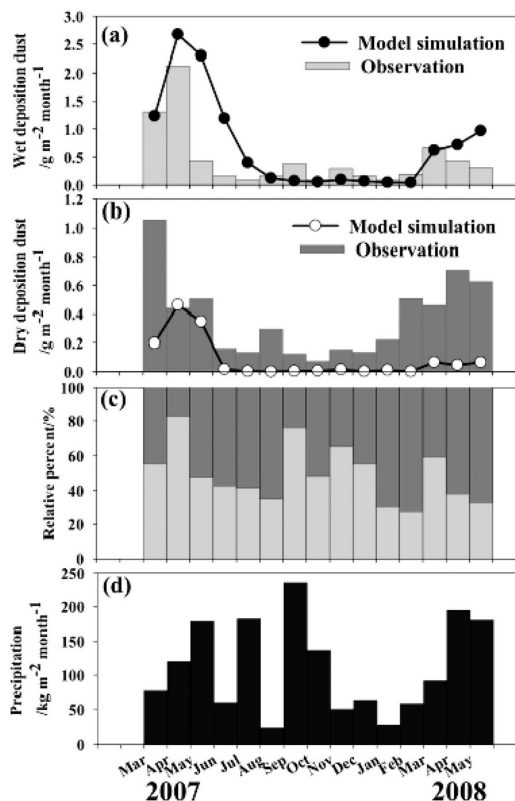
東アジアダストの物理的特性 (粒径, 形状等), 化学的特性 (鉱物組成, 化学成分等) ならびに光学・放射特性 (光学的厚さ, 複素屈折率, 単一散乱アルベド

(SSA) 等) については, 主たる発生域の中国から, 輸送途上の韓国, 日本における数多くの研究例がある (例えば岩坂ほか 2009)。東アジアダスト粒子が他の地域と異なる特徴は, すでに述べたように, 長距離輸送途上での変質が見られるという事である。中国国内の長距離輸送途上のアルミニウム (Al) 相対濃度比で見た化学分析結果によれば (Mori *et al.* 2003), 土壌粒子の主要成分では Al 相対濃度比は変化しないが, 人為起源物質の硫酸イオンや硝酸イオンは, 大陸沿岸部の Zhangjiakou (張家口) や Beijing (北京) ではその比は大きくなっており, 大陸沿岸部でダストと人為起源物質との混合が起こっている事が示唆される (第5図)。

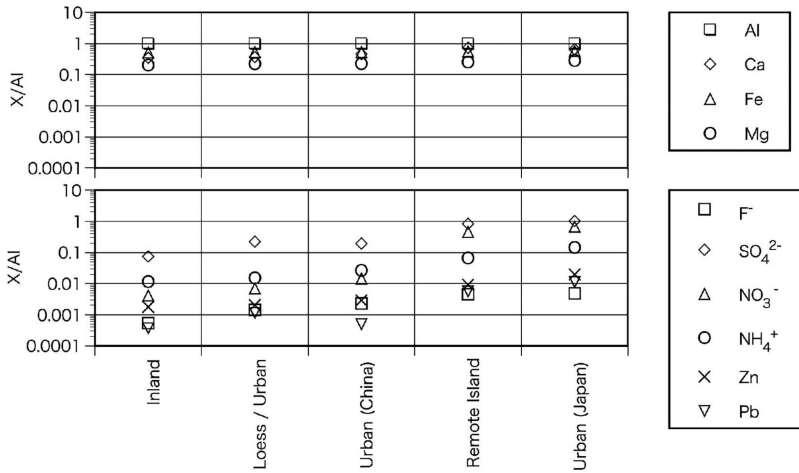
こうしたダストの長距離輸送途上での変質 (aging) に伴い, ダストの光学的特性にも, 発生域から沿岸部への輸送経路に沿った変化が見られる。Uchiyama *et al.* (2005) は, ADEC 期間中に行われた放射計 (PSAP) の中国ダスト発生域 (Qira), 輸送途上 (Beijing) とつくばでの観測により, 発生域では大きな吸収特性を示さず (SSAは0.91~0.93), 北京とつくばでは長距離輸送過程での aging に伴うと思われる SSA の変化 (0.80~0.90) を観測している。ダストは弱い吸収特性を持つが, aging により, 日射をより強く吸収する特性を持つ事になる。Kim *et al.* (2005) は, この東アジアダストの輸送経路に沿った SSA の変化は, 中国の工業・都市域上空でのススとの混合によるものである事を示唆している。Arimoto *et al.* (2006) による ACE-Asia 期間中の東アジアダストの研究のレビューによれば, 東アジアの高度 2 km 以下の大気中には, 大気汚染物質と混合したダストが普遍的に見られ, 放射過程を通じて, あるいは雲水過程を通じて, アジアの大気に大きな影響を与えているとしている。このように, 東アジアダストの放射強制力を通じた大気・気候系との相互作用は, サハラと比較してかなり複雑であると考えられる。

### 3.4 モデル開発・実験 (モデル開発, 長期変動, 輸送過程, データ同化)

東アジアでは, 砂塵嵐の防災情報提供と温暖化に関わるダストの気候への影響評価という社会的要請の下, 2000年頃よりダストモデル開発が行われて来た。現在, 中国, 韓国そして日本の3カ国でモデルを用いた黄砂予報が提供されている。中国は2004年から CUACE/Dust と呼ばれる領域ダストモデルを現業化し (Gong *et al.* 2003), 韓国は MM5ベースの領域モ



第4図 2007年3月から2008年5月にかけてつくばで観測されたダストの月別の湿性および乾性沈着量 (棒グラフ)。図中 (a) は湿性沈着, (b) は乾性沈着, (c) は月別の湿性, 乾性沈着量の割合, (d) は月降水量を示す。全球エアロゾルモデル MASINGAR で計算された湿性, 乾性それぞれの沈着量を実線で示す。Inomata *et al.* (2009 b) より引用。



第5図 2001年3月のダストイベント中に中国と日本の各地で採取されたエアロゾルのアルミニウム (Al) に対する各化学成分の濃度比。左から右へダストの輸送距離が長くなる。Ca, Fe, Mgなどのダストの鉱物組成にもともと存在していた成分は、輸送に伴う比率に変化はないが、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>イオンや、ZnやPb等人為起源と思われる成分は輸送に伴い急激にその比が増加している。Mori *et al.* (2003) を元に国立環境研究所森博士が作成。

デルにダスト過程を組み込んだ ADAM を予報モデルとして用いており (Park and Lee 2004), 日本では全球エアロゾルモデル MASINGAR をベースとしたダスト予測モデルを現業化している (Tanaka and Chiba 2005)。この他にも、日本では、東アジア大気環境の研究を目的とした東アジア領域化学天気予報モデル CFORS (Uno *et al.* 2003) やエアロゾルの気候影響評価のための全球エアロゾルモデル SPRINTARS (Takemura *et al.* 2003) もダストの数値実験に利用されている。

モデルにおけるダストの物理過程の取り扱いに関する詳細な説明は、Shao の教科書 (Shao 2008) や日本語の解説 (田中ほか 2005; 三上 2009) に譲るが、ダストの場合、人為起源エアロゾルと大きく異なる点は、発生過程が力学的な固体粒子の舞い上がりによる点である。このダストの発生過程は、様々な地表面条件にコントロールされているため複雑であり、非線形性も強いので、気候影響評価に必要な粒径分布を含む詳細なプロセス再現はなかなか難しいのが現状である。先にも述べたように、Uno *et al.* (2006) は、ダストモデル相互比較実験 (DMIP) を行い、世界の8つのダストモデルについて、そのダスト発生フラックス分布の再現性を比較したが、その結果は非常に大きく分散している。この実験の場合、大気場がそれ

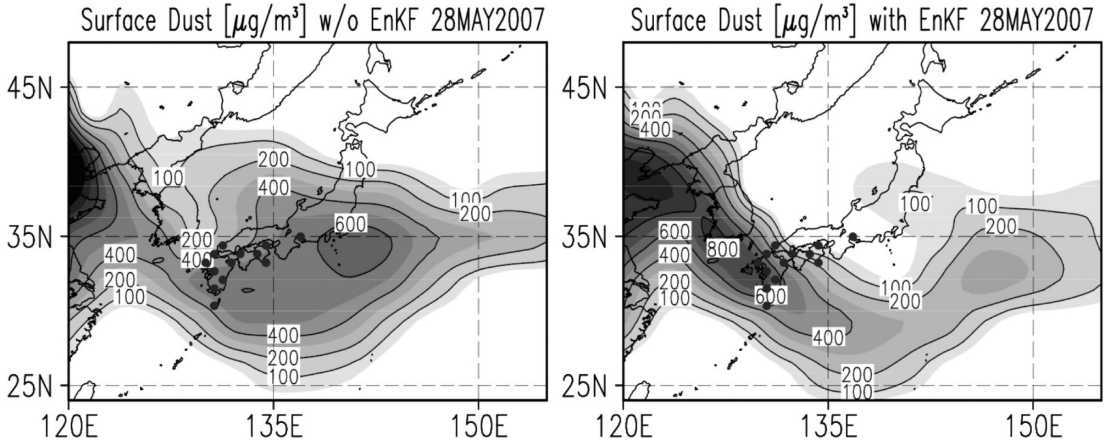
ぞれ異なるものである事も理由の1つではあるが、何よりもダスト発生フラックスが風速に強く依存 (摩擦速度の3~4乗に比例) する上、地表面条件に大きく依存する事もモデルでのダスト発生量の再現を難しくしている。

多くのモデルでは、ダストの発生は100 μm前後の粒径の飛砂が空气中に飛散し、それが地表面に衝突する際の衝撃により直径20 μm以下の微細なダスト粒子が大気中に舞い上がるという過程を組み込んでいる。現在、飛砂飛散過程については、観測例は存在するが (Mikami *et al.* 2005

b; Ishizuka *et al.* 2008), ダストの鉛直フラックスについては、モデルの検証に必要な観測データは存在しないのが現状である。また、モデルの実行に必要な地表面の土壌粒径分布などの境界条件に関するデータは全球スケールでは存在しない事もモデル再現性の足かせとなっている。

いっぽう、近年東アジアでは、国立環境研の杉本らの努力によりライダネットワークが長期運用され (Sugimoto *et al.* 2005), また2006年よりNASAのCALIPSO衛星に搭載されたライダ-CALIOPが観測を開始した事により、東アジアのダストの立体的な分布に関する豊富なデータが入手できるようになった。このため、こうしたデータを用いてデータ同化手法をダストモデルに適用する研究が進められつつある。

すでに中国では、静止気象衛星 FY-3C データを用いて気象局のダスト予報モデル CUACE/Dust に三次元変分法によるデータ同化を行い、予報を改善させている (Niu *et al.* 2008)。さらに日本では、弓本らが4次元変分法による同化システムをダストモデルに適用し、随伴モデリングによる東アジア域のダスト発生・輸送過程の逆推定を行い、発生域のより正確な推定とダストイベントのモデル再現性を向上させる事に成功している (Yumimoto *et al.* 2007, 2008)。彼ら



第6図 2007年5月28日のダストストームイベントについて、EnKF法によるデータ同化を行った場合(右)と同化を行わなかった場合(左)の全球エアロゾルモデルMASINGARの予測結果(グレイスケール)および気象台の黄砂観測地点(黒点)。Sekiyama *et al.* (2010) より引用。

は国立環境研のライダーネットワークデータを用いて同化を行ったが、発生域周辺のライダーデータを使わずとも、日本国内のライダーデータのみを用いても良好なモデル再現性が得られることを示した。また、Sekiyama *et al.* (2010) は、アンサンブルカルマンフィルターを用いたダストのデータ同化手法を開発し、国立環境研のライダーネットワークデータを用いて、2007年5月のダストイベントの予測実験を行い、予測精度の改善に成功している(第6図)。このように、現時点でダストのデータ同化については、東アジア特に日本は世界でも最も進んだ研究を行っており、データ同化により得られる発生域の誤差情報、より現実的なダストイベントの時空間分布の再現、さらにはよりよい予測技術などは、今後のダストの研究推進に大きな力となるものと期待されている。

### 3.5 ダスト気候インパクト、間接効果など

#### 3.5.1 直接・間接効果

Chuang *et al.* (2003) のACE-Asia時の観測によれば、東アジアのダストイベント時にダストと元素状炭素(EC)との内部混合が明らかとなっており、同様の結果は、Kim *et al.* (2005) がまとめた東アジア放射計ネットワーク(SKYNET, <http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)によるSSAの観測でも示されている。彼らは先に示したADEC集中観測結果と同様に、SSAが発生域(敦煌0.89)から次第に沿岸域に輸送されるに従ってAnmyonでは0.86, Gosanで0.84, 奄美大島では0.80へと小さくなる、すなわち吸収性が

強くなってゆく事を示し、これが輸送途上でのスとの内部混合によるものと示唆している。彼らの計算によれば、エアロゾル単位光学的厚さあたりの放射強制力効果は65から94  $\text{Wm}^{-2}$ にまで達し、東アジアではこうした吸収性の強い人為起源物質との内部混合過程を通じたダストの吸収特性の変化は、直接効果に大きな影響を与えるため重要である。

全球ダストモデルを用いた現時点での直接効果の評価は、全球平均ではTOAで $+0.1 \text{ Wm}^{-2}$ から $-0.3 \text{ Wm}^{-2}$ 程度とされている(IPCC 2007)。またダストの直接効果による放射強制力の定量的評価をめざして実施されたADECでは、全球ダストモデルMASINGARによる直接効果の評価を行い、雲を考慮した場合のダストの有無による放射強制力の差が大気上端の全球平均で $-0.22 \text{ Wm}^{-2}$ (1998年から2002年の5年平均)という弱い冷却効果を得ている(Tanaka *et al.* 2007)。しかし、Tanaka *et al.* (2007) が示すように、ダストの光学特性によってもこの結果は大きく左右される。彼らの結果によれば、MASINGARに4種類のダスト光学モデル(ADEC1, ADEC2, OPAC-MD, and Dust-Like)を適用した場合、TOAで $-0.52$ から $+0.11 \text{ Wm}^{-2}$ 、地表面で $-1.25$ から $-0.27 \text{ Wm}^{-2}$ もの結果の開きが見られる。また、先にも述べたように、東アジアの大気系への影響評価を考えると、地表面での強制力評価に加えてダストの偏在性を踏まえた時空間的にもよりきめ細かい評価が今後求められる。

いっぽう間接効果に関しては、ダストは疎水性であるため通常凝結核化能力は低いが、これまで見てきたように輸送途上で人為起源物質との内部混合により親水性を獲得すると考えられる。特に東アジアではダストの人為起源物質との内部混合は一般的に見られる現象であり、同地域での雲降水過程を通じた間接効果にダストの影響は無視できないと考えられる。また、タクラマカン起源のダストはしばしば自由大気上層(6~8 km)で輸送される場合があり、こうした自由大気中~上層のダスト粒子が氷雲の氷晶核(IN)として働くという例は、すでに紹介したように東アジアのライダー観測でも報告されている(Murayama 2001; Sakai *et al.* 2004)。また、氷晶核測定装置などを用いた室内実験により、ダスト粒子の氷晶核化能力についても実験が進められているが(たとえば齋藤・村上 2008)、2009年の冬季からは、同装置を航空機に搭載し、実際の自由大気中で氷晶・エアロゾル粒子の直接観測を行い、氷晶核数濃度と氷晶発生メカニズムを明らかにする試みが進んでおり(科研費、代表村上正隆)、その成果が目される(齋藤・村上 2009)。

### 3.5.2 モンスーン循環など大気系への影響

ダストがサハラ大気成層や大西洋の熱帯擾乱に及ぼす影響評価の研究と並んで、モンスーン循環に及ぼす影響に関する研究も主として欧米の研究者によって行われてきた。Miller *et al.* (2004 b) は、北半球の夏季モンスーン期間中、アラビア半島から発生したダストの直接効果によるダスト層内の加熱がモンスーンを強化し、それがさらなる潜熱フラックスの強化をもたらすというメカニズムを数値実験により明らかにしている。南アジアの夏季モンスーン活動とダストについては、Bollasina *et al.* (2008) が、インドゴラン高原上の春季後半の吸収性エアロゾルの増加が、間接効果により雲量および降水量の減少を招き、それが5月期の地表面日射量の増大による地表面加熱を結果するというメカニズムをTOMSのAerosol IndexデータとECMWFの再解析データの解析から明らかにしている。いっぽう、直接効果によるモンスーンの影響については、Lau *et al.* (2006) による全球モデル実験を用いた研究がある。彼らは、プレモンスーン期(3~4月)に中東および中国西部を起源とするダストがチベット高原上に滞留し、日射によるダスト層の加熱に伴ってチベット高原上の中上層の自由大気に正の気温偏差をもたらす、南アジアの夏季モンスーンのオンセットと雨期を早めるというメカニズムを示し、エア

ロゾルによる大規模な海面気圧のアノマリーに伴うインド域の降水の強化が、東アジアの梅雨前線帯を北西に変位させ、東アジアおよび付近の海洋の降水を抑制するとしている。また、チベット高原では、冬季の積雪にダストが沈着することによる積雪アルベド効果により、チベット域の融雪を加速すると共に、モンスーン循環の熱源としてのチベット高原の加熱を早め、結果としてモンスーンオンセットを早める効果も指摘されている(Qian *et al.* 2009)。このような、エアロゾルの直接、間接効果や積雪アルベド効果によるモンスーン循環への影響は、ABC計画推進の科学的背景ともなっている(Ramanathan *et al.* 2005)。

いっぽう、東アジア域では、ダストストームの年々変動や、より長期(最終氷期以降および過去数十年)の変動メカニズム解明を目的とした研究も多くなされている。例えば、東アジアの主要なダスト発生域であるモンゴルについては、過去40~50年間についてダストストーム発生頻度の減少傾向が見られるが、それが砂漠化に伴う植生の後退によるものではなく、大規模な寒気の流入が減少したためであり(Zhao *et al.* 2004)、モンゴルに隣接する中国北部では、過去50年間のダストストーム発生頻度の減少傾向が、モンゴル域の低気圧活動と正の相関があり、モンゴル域と中国北部における傾圧性の弱体化がバイカル湖周辺域の温暖化トレンドにより引き起こされるとした研究がなされている(Zhu *et al.* 2008)。これらはいずれも過去の気象データを用いた解析であるが、領域ダストモデルによる数値実験も試みられており、領域ダストモデルNARCMを用いた実験では、東アジアダストとアジア域での極渦の強さとの相関が高く、東アジアのモンスーンインデックスとは発生量に関して相関は見られないが、輸送経路との関連が見られる事等が明らかになっている(Gong *et al.* 2006)。彼らは、また南方振動指数(SOI)が中国東部と北東アジアのダスト滞留量と強い正の相関が見られる事も指摘している。同じく領域モデルのCFORSを用いてHara *et al.* (2006) は1972年から2004年の長期にわたる東アジアのダストの数値実験を行い、多発年と不発年の統計解析を行い、気候インデックスとの関連を調べている。それによると、3月は極からの寒気の吹き出しとダストの発生との相関が強いが、4月になるとゴビ領域の南北気圧傾度とダストの正の相関が強くなる。いっぽうSOIは、地表面ダスト濃度との相関が強く、エルニーニョ南方振動はダストの輸送経路に関係しているとしてい

る。

このように、気候因子が東アジアのダストの発生にどのようなインパクトを与えているかについて研究が進められつつあるが、両者の相互作用については、まだ十分には解明されていないと思われる。例えば、冬季モンスーンの活動とダストストームの発生頻度は、相互に関連していると思われるが、実際にどのようなメカニズムが両者の間を媒介しているのかについては不明である。東アジアのダストストームは、サハラなどとは異なり、冬季～春季の積雪や、融雪に伴う土壌水分の変化、降水や土壌水分条件に伴う植生の変化などの地表面条件に敏感である。いっぽう、北東アジアの地表面条件は、北極振動や冬季モンスーンの変動によっても左右される。このような相互作用の解明は、東アジアダストの年々変動の理解と予測に寄与するのみならず、アジアモンスーンの理解の一助ともなるはずである。

さらに、東アジアの大気環境は、ダストに加えて地球上でも最大の人為起源エアロゾルの発生源の影響を受けている。ブラックカーボン、硫酸塩、硝酸塩など人為起源エアロゾルと自然起源のダストや海塩粒子などが複雑に混合した東アジア特有の大気環境が、モンスーンや擾乱などの東アジアの大気系あるいはグローバルな気候系とどのような相互作用を取り結んでいるのかを明らかにするために、さらなる研究推進が求められている。

#### 4. おわりに

このように、ダストは地球の大気・気候系と様々な形で関係を取り結んでいる。その多くは、最近になって実態やメカニズムが明らかになり始めたものであり、今後も我々の知らない興味深いプロセスが見いだされるのかも知れない。また、ダストは時空間的にも幅広いスペクトルレンジを持っている事が特徴でもある。ダストストームの発生域では $10000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (日本での浮遊粒子状物質の環境基準は1時間値 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) を優に超える高濃度を示し、生命に直接の危険を及ぼす場合があるかと思えば、ダストは長距離輸送され、雲や降水の形成に関わると共に、自らの放射強制力により大気にフォーシングを与えている。いっぽう、雪氷圏や海洋に沈着したダストは、より長い時間スケールで熱的あるいは水循環や生物圏との相互作用を通じて気候に影響を与えている。しかし、現時点で我々が持ちうる知識は余りに少なく、地道なプロ

セス解明、実態把握と果敢なモデル精度向上への挑戦が求められている。

また、これまで見てきたように、ダストは地球システムの中で独立に存在しているわけではなく、地球システムの中で個性的なパイプレーヤーとして他の重要な気候因子と共に過去・現在・未来の地球の環境を形作る因子となっている。したがって、ダスト研究も関連する分野と共同することなしには、ダストの全体像を理解する事はできないし、いわんや地球の理解に貢献する事も難しいであろう。しかし、いわばこうした既存の世界像の破壊と創造こそが地球科学の醍醐味であるはずであり、多くの研究者にダストの研究への興味を持って頂きたいゆえんでもある。

#### 略語一覧

ABC : Atmospheric Brown Cloud

ADAM : Asian Dust Aerosol Model

ADEC : Aeolian Dust Experiment on Climate Impact

CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>)

CCN : cloud condensation nuclei 雲凝結核

CFORS : Chemical Weather Forecasting System (<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/taikai/lab/cfors-j.html>)

CRYSTAL-FACE : Cirrus Regional Study of Tropical Anvils and Cirrus Layers - Florida Area Cirrus Experiment (<http://www.espo.nasa.gov/crystal-face/>)

CUACE/Dust : Chinese Unified Atmospheric Chemistry Environment for Dust

DMIP : Dust Model Intercomparison Project

DMS : dimethyl sulfide 硫化ジメチル

DRAEMON : Dry and Wet Deposition Monitoring Network

DUVEX : Dust-Vegetation Interaction Experiment

EnKF : ensemble Kalman filter

MASINGAR : Model of Aerosol Species in the Global Atmosphere

MM5 : Pennsylvania State University / National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>)

NARCM : Northern Aerosol Regional Climate Model

PACDEX : Pacific Dust Experiment (<http://www.eol.ucar.edu/projects/pacdex/>)

PSAP : Particle Soot Absorption Photometer

SPOT4 : Satellite Probatoire d'Observation de la Terre

4 (<http://spot4.cnes.fr/>)

SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (<http://sprintars.net/>)

TOMS : Total Ozone Mapping Spectrometer (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>)

### 参 考 文 献

- Ansmann, A., I. Mattis, D. Müller, U. Wandinger, M. Radlach, D. Althausen and R. Damoah, 2005 : Ice formation in Saharan dust over central Europe observed with temperature/humidity/aerosol Raman lidar. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18S12, doi : 10.1029/2004JD005000.
- 青木輝夫, 田中泰宙, 2008 : 大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響. *天気*, **55**, 538-547.
- Aoki, T., H. Motoyoshi, Y. Kodama, T. J. Yasunari, K. Sugiura and H. Kobayashi, 2006 : Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo. *SOLA*, **2**, 13-16.
- Arimoto, R., Y. J. Kim, Y. P. Kim, P. K. Quinn, T. S. Bates, T. L. Anderson, S. Gong, I. Uno, M. Chin, B. J. Huebert, A. D. Clarke, Y. Shinozuka, R. J. Weber, J. R. Anderson, S. A. Guazzotti, R. C. Sullivan, D. A. Sodeman, K. A. Prather and I. N. Sokolik, 2006 : Characterization of Asian Dust during ACE-Asia. *Global Planet. Change*, **52**, 23-56.
- Bollasina, M., S. Nigam and K.-M. Lau, 2008 : Absorbing aerosols and summer monsoon evolution over South Asia : An observational portrayal. *J. Climate*, **21**, 3221-3239.
- Brönnimann, S., A. Stickler, T. Griesser, T. Ewen, A. N. Grant, A. M. Fischer, M. Schraner, T. Peter, E. Rozanov and T. Ross, 2009 : Exceptional atmospheric circulation during the "Dust Bowl". *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08802, doi : 10.1029/2009GL037612.
- Chuang, P. Y., R. M. Duvall, M. S. Bae, A. Jefferson, J. J. Schauer, H. Yang, J. Z. Yu and J. Kim, 2003 : Observations of elemental carbon and absorption during ACE-Asia and implications for aerosol radiative properties and climate forcing. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8634, doi : 10.1029/2002JD003254.
- Cook, B. I., R. L. Miller and R. Seager, 2008 : Dust and sea surface temperature forcing of the 1930 s "Dust Bowl" drought. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08710, doi : 10.1029/2008GL033486.
- DeMott, P. J., K. Sassen, M. R. Poellot, D. Baumgardner, D. C. Rogers, S. D. Brooks, A. J. Prenni and S. M. Kreidenweis, 2003 : African dust aerosols as atmospheric ice nuclei. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1732, doi : 10.1029/2003GL017410.
- Eguchi, K., I. Uno, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, N. Sugimoto and Z. Liu, 2009 : Trans-Pacific dust transport : integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 3137-3145.
- Flanner, M. G., C. S. Zender, J. T. Randerson and P. J. Rasch, 2007 : Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *J. Geophys. Res.*, **112**, D11202, doi : 10.1029/2006JD008003.
- Gong, S. L., L. A. Barrie, J.-P. Blanchet, K. von Salzen, U. Lohmann, G. Lesins, L. Spacek, L. M. Zhang, E. Girard, H. Lin, R. Leitch, H. Leighton, P. Chylek and P. Huang, 2003 : Canadian Aerosol Module : A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1. Module development. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4007, doi : 10.1029/2001JD002002.
- Gong, S. L., X. Y. Zhang, T. L. Zhao, X. B. Zhang, L. A. Barrie, I. G. McKendry and C. S. Zhao, 2006 : A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part II : Interannual variability and climate connections. *J. Climate*, **19**, 104-122.
- Griini, A., P. Tulet and L. Gomes, 2006 : Dusty weather forecasts using the MesoNH mesoscale atmospheric model. *J. Geophys. Res.*, **111**, D19205, doi : 10.1029/2005JD007007.
- Hansen, J. and L. Nazarenko, 2004 : Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **101**, 423-428.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, L. Nazarenko, A. Lacis, G. A. Schmidt, G. Russell, I. Aleinov, M. Bauer, S. Bauer, N. Bell, B. Cairns, V. Canuto, M. Chandler, Y. Cheng, A. Del Genio, G. Faluvegi, E. Fleming, A. Friend, T. Hall, C. Jackman, M. Kelley, N. Kiang, D. Koch, J. Lean, J. Lerner, K. Lo, S. Menon, R. Miller, P. Minnis, T. Novakov, V. Oinas, Ja. Perlwitz, Ju. Perlwitz, D. Rind, A. Romanou, D. Shindell, P. Stone, S. Sun, N. Tausnev, D. Thresher, B. Wielicki, T. Wong, M. Yao and S. Zhang, 2005 : Efficacy of climate forcings. *J. Geophys. Res.*, **110**, D18104, doi : 10.1029/2005JD005776.
- Hara, Y., I. Uno and Z. Wang, 2006 : Long-term variation of Asian dust and related climate factors. *Atmos. Environ.*, **40**, 6730-6740.
- Heinold, B., I. Tegen, K. Schepanski and O. Hellmuth, 2008 : Dust radiative feedback on Saharan boundary layer dynamics and dust mobilization. *J. Geophys.*

- Res., 35, L20817, doi : 10.1029/2008GL035319.
- Hoose, C. and U. Lohmann, 2008 : Dust impacts on warm and cold clouds : Insights from global models. Third International Workshop on Mineral Dust, Leipzig, Germany, September 15-17.
- Inomata, Y., Y. Igarashi, M. Chiba, Y. Shinoda and H. Takahashi, 2009 a : Dry and wet deposition of water-insoluble dust and water-soluble chemical species during spring 2007 in Tsukuba, Japan. Atmos. Environ., 43, 4503-4512.
- Inomata, Y., Y. Igarashi, M. Mikami, T. Y. Tanaka and M. Chiba, 2009 b : Seasonal and yearly variations of dust deposition in Tsukuba : Possible linkage with variations of dust emission over the Asian continent. SOLA, 5, 153-156.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007 : Climate Change 2007. The Scientific Basis. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- Ishizuka, M., M. Mikami, J. Leys, Y. Yamada, S. Heidenreich, Y. Shao and G. H. McTainsh, 2008 : Effects of soil moisture and dried raindrop crust on saltation and dust emission. J. Geophys. Res., 113, D24212, doi : 10.1029/2008JD009955.
- Isono, K., M. Komabayashi and A. Ono, 1959 : The nature and the origin of ice nuclei in the atmosphere. J. Meteor. Soc. Japan, 37, 211-233.
- 岩坂泰信, 西川雅高, 山田 丸, 洪 天祥, 2009 : 黄砂. 古今書院, 342pp.
- Jacobson, M. Z., 2004 : Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity. J. Geophys. Res., 109, D21201, doi : 10.1029/2004JD004945.
- Kärcher, B., J. Hendricks and U. Lohmann, 2006 : Physically based parameterization of cirrus cloud formation for use in global atmospheric models. J. Geophys. Res., 111, D01205, doi : 10.1029/2005JD006219.
- Kim, D.-H., B. J. Sohn, T. Nakajima and T. Takamura, 2005 : Aerosol radiative forcing over east Asia determined from ground-based solar radiation measurements. J. Geophys. Res., 110, D10S22, doi : 10.1029/2004JD004678.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2003 : Recent frequent dust events and their relation to surface wind in east Asia. Geophys. Res. Lett., 30, 1736, doi : 10.1029/2003GL017261.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2004 : Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak. Geophys. Res. Lett., 31, L03106, doi : 10.1029/2003GL018632.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2005 : Regional difference in the characteristic of dust event in East Asia : Relationship among dust outbreak, surface wind, and land surface condition. J. Meteor. Soc. Japan, 83 A, 1-18.
- Kurosaki, Y. and M. Mikami, 2007 : Threshold wind speed for dust emission in east Asia and its seasonal variations. J. Geophys. Res., 112, D17202, doi : 10.1029/2006JD007988.
- Lau, K. M. and K. M. Kim, 2007 : Cooling of the Atlantic by Saharan dust. Geophys. Res. Lett., 34, L23811, doi : 10.1029/2007GL031538.
- Lau, K. M., M. K. Kim and K. M. Kim, 2006 : Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing : the role of the Tibetan Plateau. Clim. Dyn., 26, 855-864.
- Lee, E.-H. and B.-J. Sohn, 2009 : Examining the impact of wind and surface vegetation on the Asian dust occurrence over three classified source regions. J. Geophys. Res., 114, D06205, doi : 10.1029/2008JD010687.
- 三上正男, 2009 : ウィンドエロージョン研究の変遷と現状. 雪氷, 71, 91-103.
- Mikami, M., G.-Y. Shi, I. Uno, S. Yabuki, Y. Iwasaka, M. Yasui, T. Aoki, T. Y. Tanaka, Y. Kurosaki, K. Masuda, A. Uchiyama, A. Matsuki, T. Sakai, T. Takemi, M. Nakawo, N. Seino, M. Ishizuka, S. Satake, K. Fujita, Y. Hara, K. Kai, S. Kanayama, M. Hayashi, M. Du, Y. Kanai, Y. Yamada, X.-Y. Zhang, Z. Shen, H. Zhou, O. Abe, T. Nagai, Y. Tsutsumi, M. Chiba and J. Suzuki, 2005 a : Aeolian dust experiment on climate impact : An overview of Japan-China joint project ADEC. Global Planet. Change, 52, 142-172.
- Mikami, M., Y. Yamada, M. Ishizuka, T. Ishimaru, W. Gao and F. Zeng, 2005 b : Measurement of saltation process over gobi and sand dunes in the Taklimakan desert, China, with newly developed sand particle counter. J. Geophys. Res., 110, D18 S02, doi : 10.1029/2004JD004688.
- Miller, R. L., 2008 : Dust impact on atmospheric dynamics and precipitation. Third International Workshop on Mineral Dust, Leipzig, Germany, September 15-17.
- Miller, R. L., J. Perlwitz and I. Tegen, 2004 a : Feedback upon dust emission by dust radiative forcing through

- the planetary boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **109**, D24209, doi : 10.1029/2004JD004912.
- Miller, R. L., J. Perlwitz and I. Tegen, 2004 b : Modeling Arabian dust mobilization during the Asian summer monsoon : The effect of prescribed versus calculated SST. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22214, doi : 10.1029/2004GL020669.
- Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura and H. Quan, 2003 : Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport. *Atmos. Environ.*, **37**, 4253-4263.
- Murayama, T., 2001 : Formation of ice cloud from Asian-dust particles in the upper troposphere. *Proc. SPIE*, **4153**, 218-225.
- Niu, T., S. L. Gong, G. F. Zhu, H. L. Liu, X. Q. Hu, C. H. Zhou and Y. Q. Wang, 2008 : Data assimilation of dust aerosol observations for the CUACE/dust forecasting system. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 3473-3482.
- Osada, K., H. Iida, M. Kido, K. Matsunaga and Y. Iwasaka, 2004 : Mineral dust layers in snow at Mount Tateyama, central Japan : formation processes and characteristics. *Tellus*, **56 B**, 382-392.
- Painter, T. H., A. P. Barrett, C. C. Landry, J. C. Neff, M. P. Cassidy, C. R. Lawrence, K. E. McBride and G. L. Farmer, 2007 : Impact of disturbed desert soils on duration of mountain snow cover. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L12502, doi : 10.1029/2007GL030284.
- Park, S.-U. and E.-H. Lee, 2004 : Parameterization of Asian dust (Hwangsa) particle-size distributions for use in dust emission models. *Atmos. Environ.*, **38**, 2155-2162.
- Pérez, C., S. Nickovic, G. Pejanovic, J. M. Baldasano and E. Özsoy, 2006 : Interactive dust radiation modeling : A step to improve weather forecasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, D16206, doi : 10.1029/2005JD006717.
- Prospero, J. M., 1999 : Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States : Implications for regional air quality. *J. Geophys. Res.*, **104**, 15917-15927.
- Qian, Y., W. I. Gustafson Jr., L. R. Leung, S. J. Ghan and W. Wang, 2009 : Aerosols pollute snow and change hydrological cycle in western U.S. and eastern Asia. *Proc. International Workshop on Mineral Aerosol and Its Impacts on Climate and Environment*, 40-41.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl and D. Rosenfeld, 2001 : Aerosols, climate, and the hydrologic cycle. *Science*, **294**, 2119-2124.
- Ramanathan, V., C. Chung, D. Kim, T. Bettge, L. Buja, J. T. Kiehl, W. M. Washington, Q. Fu, D. R. Sikka and M. Wild, 2005 : Atmospheric brown clouds : Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **102**, 5326-5333.
- 斎藤篤思, 村上正隆, 2008 : 氷晶核測定装置を用いた氷晶核数濃度の測定 (その3). 日本気象学会2008年度春季大会予稿集, 406.
- 斎藤篤思, 村上正隆, 2009 : 航空機搭載用氷晶核測定装置の開発. 日本気象学会2009年度秋季大会予稿集, 356.
- Sakai, T., T. Nagai, M. Nakazato and T. Matsumura, 2004 : Raman lidar measurement of water vapor and ice clouds associated with Asian dust layer over Tsukuba, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06128, doi : 10.1029/2003GL019332.
- 酒井 哲, 折笠成宏, 永井智広, 村上正隆, 田尻拓也, 斎藤篤思, 山下克也, 高層気象台観測第二課, 2007 : 気球を用いた黄砂エアロゾルと上層雲の観測—エアロゾルゾンデデータから得られた特徴—. 日本気象学会2007年度秋季大会予稿集, 297.
- Sassen, K., 2005 : Dusty ice clouds over Alaska. *Nature*, **434**, 456.
- Sassen, K., P. J. DeMott, J. M. Prospero and M. R. Poellot, 2003 : Saharan dust storms and indirect aerosol effects on clouds : CRYSTAL-FACE results. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1633, doi : 10.1029/2003GL017371.
- Sekiyama, T. T., T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi, 2010 : Data assimilation of CALIPSO aerosol observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 39-49.
- Shao, Y., 2008 : Physics and Modeling of Wind Erosion —Second Edition—. Springer, 452pp.
- Shinoda, M., R. Kimura, M. Mikami, M. Tsubo, E. Nishihara, M. Ishizuka, Y. Yamada, E. Munkhtsetseg, D. Jugder and Y. Kurosaki, 2010 : Characteristics of dust emission in the Mongolian steppe during the 2008 DUVEX intensive observational period. *SOLA*, **6**, 9-12.
- Sokolik, I. and O. B. Toon, 1996 : Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature*, **381**, 681-683.
- Sugimoto, N., A. Shimizu, I. Matsui, I. Uno, K. Arai, X. Dong, S. Zhao, J. Zhou and C.-H. Lee, 2005 : Study of Asian dust phenomena in 2001-2003 using a network of continuously operated polarization lidars. *Water Air Soil Pollut. Focus*, **5**, 145-157.
- Sugimoto, N., I. Matsui, A. Shimizu, T. Nishizawa, Y. Hara, C. Xie, I. Uno, K. Yumimoto, Z. Wang and S.-C. Yoon, 2008 : Lidar network observations of tropospheric aerosols. *Proc. SPIE*, **7153**, doi : 10.1117/12.806540.
- Sun, D., K. M. Lau and M. Kafatos, 2008 : Contrasting



- the 2007 and 2005 hurricane seasons : Evidence of possible impacts of Saharan dry air and dust on tropical cyclone activity in the Atlantic basin. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L15405, doi : 10.1029/2008GL034529.
- 鈴木利孝, 角皆静男, 1987 : 大気圏を経由する陸から海洋への化学物質の輸送. *海洋科学*, **19**, 657-662.
- Takami, A., T. Miyoshi, A. Shimono, N. Kaneyasu, S. Kato, Y. Kajii and S. Hatakeyama, 2007 : Transport of anthropogenic aerosols from Asia and subsequent chemical transformation. *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S31, doi : 10.1029/2006JD008120.
- Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta and N. Sugimoto, 2003 : Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *J. Geophys. Res.*, **108**, 8659, doi : 10.1029/2002JD003210.
- Tanaka, T. Y. and M. Chiba, 2005 : Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83 A**, 255-278.
- 田中泰宙, 眞木貴史, 石水尊久, 海老田綾貴, 千葉 長, 2005 : 全球鉱物ダスト輸送モデルの開発と黄砂現象予測への応用. *エアロゾル研究*, **20**, 297-305.
- 田中泰宙, 青木輝夫, 保坂征宏, 2006 : エアロゾル沈着による雪氷面アルベド変化の感度実験. *日本気象学会2006年度秋季大会予稿集*, 212.
- Tanaka, T. Y., T. Aoki, H. Takahashi, K. Shibata, A. Uchiyama and M. Mikami, 2007 : Study of the sensitivity of the optical properties of mineral dust to the direct aerosol radiative perturbation using a global aerosol transport model. *SOLA*, **3**, 33-36.
- Tegen, I., A. A. Lacis and I. Fung, 1996 : The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils. *Nature*, **380**, 419-422.
- Uchiyama, A., A. Yamazaki, H. Togawa, J. Asano and G. Shi, 2005 : Single scattering albedo of aeolian dust as inferred from sky-radiometer and in situ ground-based measurement. *SOLA*, **1**, 209-212.
- Uno, I., G. R. Carmichael, D. G. Streets, Y. Tang, J. J. Yienger, S. Satake, Z. Wang, J.-H. Woo, S. Guttikunda, M. Uematsu, K. Matsumoto, H. Tanimoto, K. Yoshioka and T. Iida, 2003 : Regional chemical weather forecasting system CFORS : Model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8668, doi : 10.1029/2002JD002845.
- Uno, I., Z. Wang, M. Chiba, Y.-S. Chun, S. L. Gong, Y. Hara, E. Jung, S.-S. Lee, M. Liu, M. Mikami, S. Music, S. Nickovic, S. Satake, Y. Shao, Z. Song, N. Sugimoto, T. Tanaka and D. L. Westphal, 2006 : Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia : Overview. *J. Geophys. Res.*, **111**, D12213, doi : 10.1029/2005JD006575.
- Uno, I., K. Yumimoto, A. Shimizu, Y. Hara, N. Sugimoto, Z. Wang, Z. Liu and D. M. Winker, 2008 : 3D structure of Asian dust transport revealed by CALIPSO lidar and a 4DVAR dust model. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06803, doi : 10.1029/2007GL032329.
- Uno, I., K. Eguchi, K. Yumimoto, T. Takemura, A. Shimizu, M. Uematsu, Z. Liu, Z. Wang, Y. Hara and N. Sugimoto, 2009 : Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geosci.*, **2**, 557-560.
- Xian, P., 2008 : Seasonal migration of the ITCZ and implications for aerosol radiative impact. Ph.D. thesis, Colombia University, USA.
- Xian, P. and R. L. Miller, 2008 : Aerosol radiative forcing of an axisymmetric tropical circulation. Third International Workshop on Mineral Dust, Leipzig, Germany, September 15-17.
- Yoshioka, M., N. M. Mahowald, A. J. Conley, W. D. Collins, D. W. Fillmore, C. S. Zender and D. B. Coleman, 2007 : Impact of desert dust radiative forcing on Sahel precipitation : Relative importance of dust compared to sea surface temperature variations, vegetation changes, and greenhouse gas warming. *J. Climate*, **20**, 1445-1467.
- Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu and S. Satake, 2007 : Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08806, doi : 10.1029/2006GL028551.
- Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu and D. M. Winker, 2008 : Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2869-2884.
- Zhao, C., X. Dabu and Y. Li, 2004 : Relationship between climatic factors and dust storm frequency in Inner Mongolia of China. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L01103, doi : 10.1029/2003GL018351.
- Zhu, C., B. Wang and W. Qian, 2008 : Why do dust storms decrease in northern China concurrently with the recent global warming? *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L18702, doi : 10.1029/2008GL034886.