



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	エアロゾルによる雲と降雨への影響の検出
Author(s)	河本, 和明
Description	IV. リモートセンシングで観るエアロゾル・雲相互作用
Citation	低温科学, 72, 187-193
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55032
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_021.pdf



エアロゾルによる雲と降雨への影響の検出

河本 和明

現在の気候システムにおいて最も不確かな過程の一つとして認識されているエアロゾルによる雲と降雨への影響について、観測的研究、特に人工衛星からの観測事例を中心に紹介する。雲の光学的厚さと雲粒サイズへの影響は概ね Twomey 効果を支持する結果となっており、また雲量への影響は、エアロゾルの吸収性の有無とその雲層との相対的な位置で変わることが示された。降雨への影響については、エアロゾルの増加につれて増加する例と減少する例が報告されており、現時点では明確な結論は得られていない。これらの現象は主に相関関係によって調べられているが、エアロゾル以外の他の原因についても検討されている。

Detection of the effect of aerosols on clouds and precipitation

Kazuaki Kawamoto

On the effect of aerosols on clouds and precipitation, which is recognized as one of the most uncertain processes in the current climate system, observational examples, in particular, from satellites, are introduced. The effect on the cloud optical depth and cloud droplet size is generally consistent with the Twomey effect. The effect on the cloud fraction is shown to be variable depending on the aerosol absorptivity and the relative height to the cloud layer. As for the effect on the precipitation, both increase and decrease cases are reported and no clear conclusion has been given at this moment. Although these phenomena are investigated mainly through the correlation, other reasons than aerosols are also examined.

1. はじめに

大気中の浮遊微粒子であるエアロゾルをはじめ、雲や降雨は、地球のエネルギー収支や気候の維持および変動、また水循環に大きく影響することが知られている。特にエアロゾルがもたらす雲と降雨への影響は、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) においても、気候への自然および人為影響を定量化する上で最も不確かな過程の一つとして認識されてきた (IPCC, 2007)。また Stevens and Feingold (2009) は buffered-system という概念を提唱し、エアロゾルと雲が形成する場合は微視的にも巨視的にも緩衝されているので、評価するのが非常に難しいと指摘している。本稿ではエアロゾルがもたらす雲と降雨への影響について、観測的研究、とりわけ人工衛星観測の事例を中心に最近の研究の進展について紹介する。

人工衛星は、広域あるいは全球規模の領域を定常的に観測できる唯一の手段であり、センサーの形態をはじめ、感度向上や観測波長帯の増加などの技術的進歩に伴って衛星観測のあり方は発展している。一般に受動型センサーは雲層の上下にある、あるいは雲の中にあるエアロゾルを見分けられないが、能動型センサーの登場により、この問題に取り組む準備ができ始めた。また下記で具体例を紹介するように、北米西岸のカリフォルニア沖、南米のペルー沖、南部アフリカ西岸のナミビア沖は低層の層状雲域として知られており、エアロゾルと雲の相互作用を研究する場所として頻繁に選ばれている。また対流雲の事例としては低緯度大西洋もよく解析されている。

2. これまでの背景

Twomey らは 1950 年代から航空機観測を通して雲の観測を行い (e.g., Twomey and Squires, 1959)、海上よりも陸上の方が雲の粒径が小さいことを報告していたが、Twomey (1977) において以下の考えをまとめた。エアロゾルの増加は雲凝結核 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) の増加につながり、雲粒子数が増えることになる。その時に雲水の量が一定であれば、雲粒径が

連絡先

河本 和明

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科

Graduate School of Fisheries Science and Environmental Studies, Nagasaki University

e-mail: kazukawa@nagasaki-u.ac.jp

縮小し、雲粒全体の断面積は増加するので雲の反射率は増えることになる。エアロゾルが光吸収性であれば、逆に雲の反射率は下がることになる。これは永らくエアロゾルの第1種間接効果として知られてきた。Twomey効果という呼び名でもよく知られている。

また Albrecht (1989) は数値モデルを用いて、エアロゾルが増加すると雲粒径が小さくなることによって雨滴のサイズまでの成長が遅れることから降雨効率が下がり、より長く雲の状態で存在するという雲の長寿命化の提案を行った。これは Albrecht 効果またはエアロゾルの第2種間接効果と呼ばれており、エアロゾルによる雲量と降雨への影響に注目を集めた論文として良く知られている。1990年代以降、これら2つの「効果」をベースに、地上・航空機・人工衛星観測の技術的・アルゴリズム的進展とともに、エアロゾルによる雲と降雨への影響の研究が進展してきている。

3. エアロゾルによる雲の光学的厚さと雲粒径への影響

Nakajima et al. (2001) は、NOAA 衛星に搭載されている Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) の可視・近赤外チャンネルを用いた Higurashi and Nakajima (1999) によるエアロゾル特性（光学的厚さとオングストローム指数）と可視・中間赤外・赤外チャンネルを用いた Kawamoto et al. (2001) による雲特性（光学的厚さと雲粒有効半径）を比較することで、雲とエアロゾルの相互作用について海洋上での全球規模動態を明らかにした。光学的厚さとオングストローム指数からエアロゾルの鉛直積算の数密度を求め、エアロゾル数が増えるに従って雲粒有効半径が小さくなること、また雲の光学的厚さが増加していく様子を示した。この種の研究では草分けと言えるだろう。その直後に Bréon et al. (2002) は、POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances (POLDER) から偏光情報を用いて海陸両方での雲およびエアロゾル特性を求めて両者を比較し、海陸差について Twomey の説を支持する結果を得ている。

また Kawamoto et al. (2006) は、人為起源のエアロゾルが卓越する東アジアを対象にして季節別に、数値モデルによって計算されたエアロゾル濃度を、衛星観測から得られた雲の光学的厚さおよび雲粒有効半径と比較して、雲特性に対するエアロゾルによる効果と対流など力学的な効果の重要性について指摘した。

Costantino and Bréon (2011) は、ナミビア沖を対象にバイオマスバーニングから発生する小粒子エアロゾルと雲の相互作用について調べた。Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar (PARASOL)

データから偏光の情報を用いて雲頂付近の雲粒径を求める一方、Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) データを使って雲とエアロゾルの鉛直分布から雲層とエアロゾル層の距離を求め、両者が混合している場合としていない場合でのエアロゾルインデックスと雲粒径の相関を取ったところ、混合していない時の相関は有意ではないが、混合している時はより有意な負の相関を示し、Twomey 効果を支持する結果を得た。

2006年にCloudSatやCALIPSOが打ち上がる前は、Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) に搭載されている Precipitation Radar (PR) は稼働していたものの、エアロゾルと雲と降雨の関係性を調べるためには受動型センサーの利用が大半であった。受動型センサーは能動型センサーとは違い、雲層内の鉛直情報を得ることは困難であるため、この Costantino and Bréon (2011) の研究は衛星搭載の能動型センサーの利点を使った解析の好例と言えるであろう。

4. エアロゾルによる雲量への影響

Albrecht (1989) はエアロゾルによる雲粒径の縮小から雲量が増えることを提唱したが、エアロゾルが光を吸収する性質を持つ場合は、光吸収による加熱のために雲粒子の蒸発に寄与し、雲量を減らす効果が指摘され、Hansen et al. (1997) によって準直接効果と名付けられた。吸収性エアロゾルによる雲量への影響は、両者の相対的な位置関係に依存して異なって応答することが知られており、図1にまとめられている (Koch and Del Genio, 2010)。

Koren et al. (2005) は、北部大西洋を対象に Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) データを解析することで、エアロゾルの光学的厚さ (Aerosol Optical Depth, 以降は AOD と記する) と対流雲の特性について相関解析を行った。どの気圧面でも、エアロゾル量が増えるに従って、雲粒径は小さくなり、雲量は増え、水雲の光学的厚さは増加し、氷雲の光学的厚さは減少することがわかった。それ故、水と氷を合わせた雲のトータルの光学的厚さはほぼ一定となる。論文では以下のメカニズムを提案している。エアロゾルが多いと雲粒径が小さくなり、衝突併合が有効にはたらくにくくなるため、大粒子の形成が遅くなることから暖かい雨の形成が遅れ、雲粒子の落下速度は低下する。結果として凝結の潜熱の解放もあって上昇気流が強くなり、その上昇気流によって、雲はより背が高くなる。強い上昇気流によってさらに持ち上げられた小さな粒子はより高い高度で凍り、より低温な領域で潜熱を発する。そのため対流がより強められることに繋がるのである。例えば汚染された雲は小さな粒径を持つので、より高い

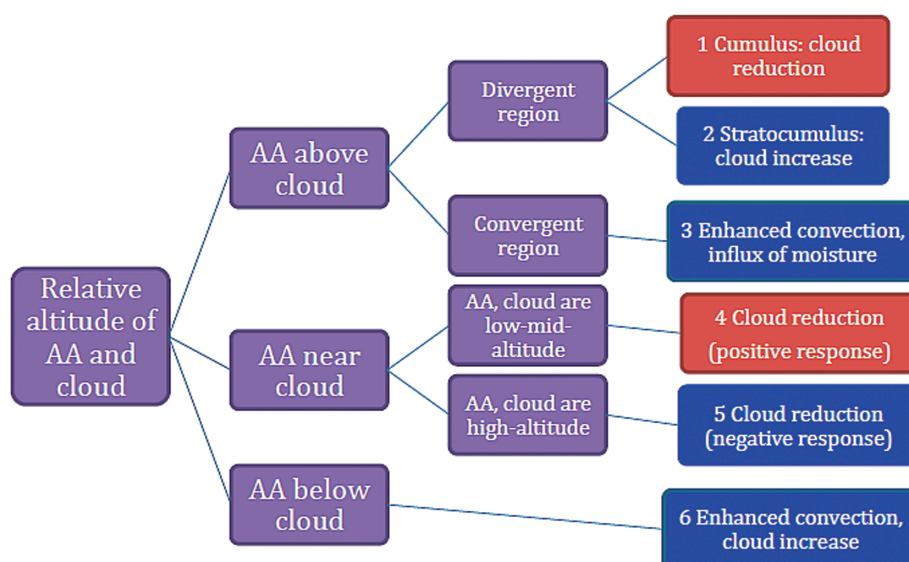


図1: Koch and Del Genio (2010) が提示した吸収性エアロゾル (absorbing aerosols, AA と表記) による雲量への影響の模式図。赤と青のボックスはそれぞれ正と負の準直接効果を意味する。

高度で凍結するこの効果のために、清澄な大気と雲と同じ気圧面と比較すると、氷粒子の割合が少ないことがわかった。

また氷を含んだ対流雲には、対流セルの中心にある光学的に厚い背の高い部分（タワーと呼ぶ）とタワーの近くに作られるアンビル（鉄床雲）の2つの部分があるが、アンビルはタワーから離れると光学的にかなり薄くなることがわかった。対流の活性化により、タワーが主に鉛直方向に伸び、アンビルが水平方向に広がる。そのため氷雲の雲量は増えるが、空間的に広がるために光学的厚さは減少することとなる。

さらに Koren et al. (2008) は、アマゾン域を対象に MODIS データを解析したところ、AOD が小さい時（～約0.2から0.4まで）は微物理の影響でエアロゾルの増加とともに雲頂高度は高くなり、また雲量は増えるが、それよりもエアロゾルが多い時には、吸収の効果によって雲頂高度は下がり、また雲量は減るという変動を見いだした。この状況をエアロゾルの光学的厚さを横軸に、雲頂気圧と雲量を縦軸にプロットすると、上に凸のブーメランのような形になる。このことは、エアロゾルは雲の鉛直方向の発達に対して異なるはたらきをすることを意味する。

また Brioude et al. (2009) はカリフォルニア沖を対象に、バイオマスバーニング起源の吸収性エアロゾルによる海洋性層積雲への影響を調べた。その結果、海岸近くの雲では雲量が約14%増え、アルベドが約4%増加したことがわかった。この場合では多くのエアロゾルは逆転層の上に存在し、その影響で安定度が増していた。それにより乾燥した空気やエアロゾルが雲内に流入する鉛直方向のエントレインメントを減少させ、雲を維持することにつながった。一方、海岸から離れたところで

は、エアロゾル量は境界層の中で最大となり、雲量は約2%、アルベドは0.6%減少していた。この領域では逆に雲量を減らすこととなり、吸収性エアロゾル量の高度分布の違いによって反対の効果をもたらすことを支持する結果となっている。

Koren et al. (2010) では、図2に示すように衛星データから観測された熱帯大西洋での深い対流雲の活性化、つまり AOD の増加とともに雲頂高度が上がり、雲量が増加する相関関係をもたらす原因について詳細に検討をしている。すなわち相関があることは因果関係の存在を必ずしも意味しないので、エアロゾルの影響なのか、気象場の影響（エアロゾルをトレーサーとして気象場の影響を見ているのか）なのか、あるいは推定時に生じるアーティファクトなのかというリモートセンシング解析にまつわる根本的な問題を論じている。

まず (1)雲量が20%以下のデータのみを選んだ場合と(2)雲量に制限をつけない全てのデータの場合に対して、雲頂気圧の関数として AOD の値別に頻度分布を描くと、図3のaとcのように(1)と(2)のグラフの分布はほぼ同じ形であった。また同様に雲量の関数として頻度分布を描いても、図3のbとdのように(1)と(2)のグラフの分布はほぼ同じであった。これらの結果は、雲の混入によってエアロゾル量と雲特性（雲頂高度や雲量）の相関が影響されたものでないことを強く示唆している。

次に気象場の影響についての問題について考える。数値モデルから出力される多くの気象変数の中で、雲頂高度と雲量と相関の高い変数としてそれぞれ550 hPaでの上昇流と350 hPaでの相対湿度がある。一方で AOD は、これら2つの変数ではなく、別の変数と高く相関していた。このような事実は、エアロゾルと雲特性の間の因果関係を否定するものではないとした。

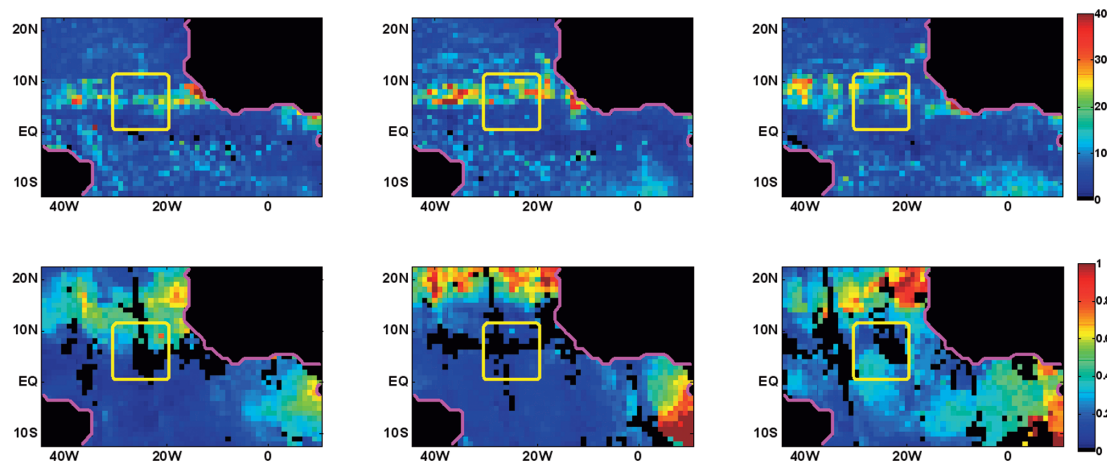


図2：熱帯大西洋域における3日平均の雲の光学的厚さ（上）とエアロゾルの光学的厚さ（下）。黄色い枠は Koren et al. (2010) の解析領域を示す。左（2007年7月1日から3日）はダストが北から解析領域に入ってきている状況，中（2007年7月31日から8月2日）はエアロゾルの少ない状況，右（2007年8月12日から14日）はバイオマスバーニング起源のエアロゾルが解析領域に南や東から近づいて来ている状況を示す。

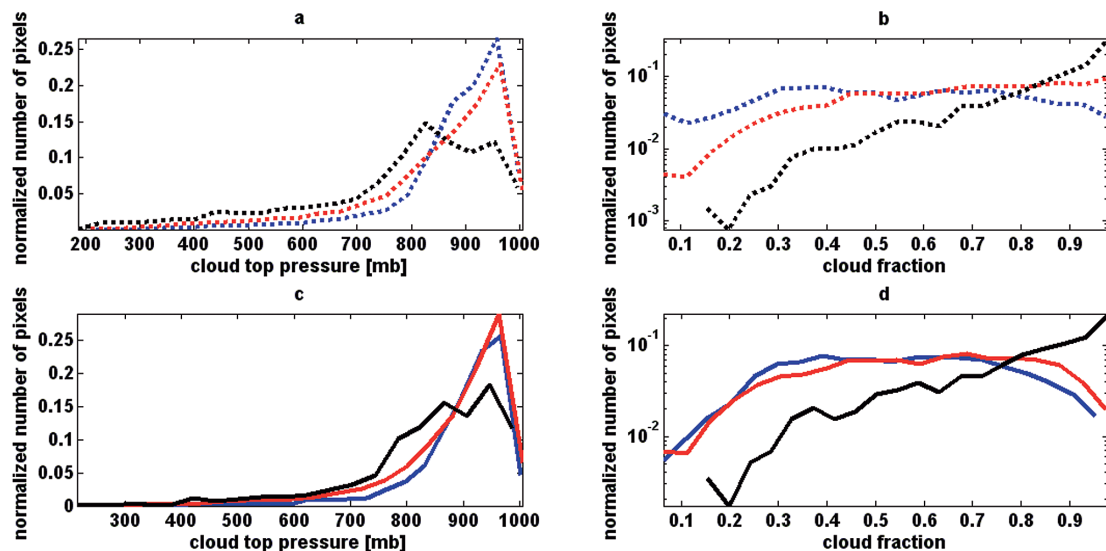


図3：AODの3つのレンジ別の雲特性の頻度を表す。青は $0 < \text{AOD} < 0.15$ ，赤は $0.15 < \text{AOD} < 0.35$ ，黒は $0.35 < \text{AOD} < 1$ を意味する。a, b は全てのデータ，c, d は雲量が20%以下のデータに対して，a と c は雲頂気圧，b と d は雲量を横軸に取っている。

また Loeb and Schuster (2008) も、AODと雲量の正相関についての気象場の影響を調べている。可降水量、風向・風速、風の収束、750 hPaと1000 hPaの温位の差、海面水温は、低いAODと高いAODの間で有意な差異を示さなかったが、雲量や雲水総量、大気上端での放射フラックスは顕著に異なっていた。このことから、AODと雲量の正相関が気象場の影響を受けているとは考えにくいと主張している。

しかし Painemal and Zuidema (2010) は、ペルー沖において船舶観測、MODISデータ、CloudSatデータの解析を通して、総観規模の気象場の変動が原因で雲粒子数を変えることを示し、気象場の重要性を訴えている。

さてエアロゾル特性のリトリバルにおいては太陽反射光の正確な見積もりが重要であるが、雲の近くの晴天

領域では反射率が高まることが知られている。その理由としては1) 雲の近くは湿っているためエアロゾルが膨張する。2) 近くの雲のためにエアロゾル生成プロセスがはたらき、エアロゾルの数が増える。3) デトレインメントによって検出されにくい雲粒子や薄い小さな雲が発生している。4) 測器の技術的制約、5) 雲と周囲の晴天領域の3次元の放射相互作用、などが挙げられている。例えば Varnai and Marshak (2009) は、雲の3次元の効果を詳しく調べ、3次元効果は15 km程度離れたところまでの観測された反射の増加の大部分を説明すること、またより光学的に厚い雲の照射された側面で、より短い波長においてこの効果が大きいことを示した。この結果は、晴天領域でも雲の近くでは、反射光の観測の際は3次元効果を考慮する必要があることを示唆している。この例のように放射伝達の観点からも精力的な研

究が続けられている。

5. エアロゾルによる降雨への影響

エアロゾルによる降雨への影響については、下記にいくつかの研究結果を示す通り、現時点では明確な結論は出ていないように思われる。過去に遡ると、サトウキビの燃焼による煙がCCNを増やし、そのため雲粒径が小さくなり降雨量を減少させる可能性がWarnerによって既に1960年代に報告されていた(Warner 1968)。先述したAlbrecht (1989)は、数値モデルの結果から縮小した粒径による降雨効率の低下を指摘したが、Rosenfeld (2000)は衛星データを用いてこの現象を調査した。VIRS (Visible Infrared Scanner) データから雲粒有効半径と雲温度を推定し、雲粒有効半径が14ミクロンを超えるとドリズルが存在するとして、降雨が発生したと判断する。雲粒有効半径と雲の温度の関係をプロットしたところ、清澄な大気では雲粒有効半径が雲の温度の低下(つまり高度の上昇)とともに徐々に大きくなって降雨が開始するが、エアロゾルが多い汚染された中ではエアロゾルとの相互作用によって雲粒有効半径は小さいまま成長せず、降雨が抑制されていると示した。

またBerg et al. (2006)は、TRMMに搭載されているマイクロ波放射計TRMM Microwave Imager (TMI)によって冬期の東シナ海で検出される降雨頻度が、PRデータのそれよりも多いことを発見した。この現象の解釈として、この領域で卓越する硫酸エアロゾルのために雲粒子サイズが小さくなり、降雨粒子まで成長する前に雲水としてより長く存在すること、そのような高い雲水総量を持つ雲は、雲水や弱いドリズルに感度が弱いPRでは検出されにくいことから、エアロゾルによって降雨が抑制されている例であると仮説を立てた。

さらにBennartz et al. (2011)は同じく冬期の東シナ海を対象に、中国の経済発展が始まった1980年代初頭から約30年弱の期間について、衛星データから求めた雲粒数密度と船舶観測を基にした降雨頻度について長期解析を行った。その結果、雲粒数密度は1980年代初頭の約 200 cm^{-3} から2000年代後半には約 300 cm^{-3} を超えるまで増加した。また降雨頻度は1982年から1986年までの約30%から2004年から2009年までの約20%に減っていた。特に弱い雨と中程度の強さの雨の頻度の減少の仕方は両方とも統計的に有意であった。

Givati and Rosenfeld (2004)は、カリフォルニアの大都市域やイスラエルでの100年単位の長期間の降雨量を対象に、風下での山岳雲の降雨量は都市汚染の影響を受けて長期的に減少しているという解析結果を発表した。そのメカニズムとして、人為起源のエアロゾルが山岳雲の中に取り込まれることで、雲粒子の併合や氷粒子へのライミングが遅れ、結果として雲水の降雨への変換

に時間がかかると解釈されたが、Levin and Cotton (2009)ではそのような傾向は報告されず、データをどのように解析するかによって結果は変わりうることを指摘している。実際、Halfon et al. (2009)もイスラエルでの1950年代から50年程度の降雨量を解析した結果、有意なトレンドは見つけていない。

一方Lin et al. (2006)はアマゾン域を対象に、TMI, PR, MODIS データを使ってエアロゾルと雲特性および降雨量について解析を行い、AODの増加に対して降雨量の増加、強い降雨イベントの増加、雲量の増加、雲頂高度の上昇、雲内の水総量の増加、より多くの氷の形成を観測している。

さてKoren et al. (2012)によると、PR データやMODIS データを使用し、全球規模でAOD (0.3以下に限っている)と降雨量の相関を取ったところ、熱帯から亜熱帯、中緯度に亘る広い範囲において両者は正の相関を示したことがわかった。以下でこの相関をもたらし原因について考察する。降雨によるエアロゾルの湿性除去は逆に両者に負の相関をもたらし、可能性としては除外できる。そのため候補としてはエアロゾルによる影響の他に、エアロゾル推定時のアーティファクトと気象場による影響が考えられた。エアロゾル推定時のアーティファクト(雲ピクセルの混入の問題も含む)については先述したKoren et al. (2008)での議論やAODを0.3以下に制限したことからの可能性は低い。気象場による影響については以下のように論を進めている。数値モデルが出力した286種の気象変数の中で、TRMMが推定した降雨量と最も相関が高い気象変数である上層(500から350 hPa)の鉛直流 ω について、 ω と降雨量の関係をAODのレンジ別にプロットしたところ、 ω のほぼ全域でAODが高い方が降雨量も多いことがわかった。この結果を基に、気象場の影響ではなくエアロゾルによる雲の活性化の効果によって、雲頂高度が高くなること、また降雨量が増えるとの見解を示した。

しかしBoucher and Quaas (2013)は、気候モデルによるシミュレーションから得られたエアロゾル特性を用いてKoren et al. (2012)と同様な解析を行った結果、中緯度ではKoren et al. (2012)と同じくエアロゾルが多くなるほど降雨量は増えていたが、熱帯の対流域では逆に汚れている大気の方が降雨量は少なかった。他方、エアロゾルの吸湿効果を考慮しない場合について同様な解析を行ったところ、熱帯域のみならず、中緯度の多くの領域でも汚れている大気の方が降雨量は少ない結果となった。この結果を受け、Boucher and Quaas (2013)は、水蒸気はAODと降雨量の両方に影響を与え、エアロゾルの吸湿効果の重要性を指摘している。

以上から、現時点では地上での降雨がエアロゾルによって抑制されていると示した確固たる研究例は不足し

ており (Levin and Cotton, 2009), エアロゾルと雲の相互作用によって個々の降雨雲に影響を与えるかどうかははっきりしていない。Tao et al. (2007) は、雲解像モデルのシミュレーション結果から、降雨過程に関して対流圏下部の雲粒の蒸発による冷却が CCN による降雨量の影響を左右すると論じている。

ここでエアロゾルと雲と雨の関係性を考える上で 1 つの指標を挙げておきたい。Twomey (1991) は cloud susceptibility (雲の変化しやすさ) という指標を導入した。これは雲粒子が 1 個増えた場合に雲のアルベドがどれほど変化するかを定量的に扱った指標である。そのアナロジーから雲粒子が 1 個増えた場合に降雨量がどれほど変化するかを定義する Precipitation susceptibility (Sorooshian et al. 2009) という量が提案されている。その特徴として、(1)低い LWP の雲は一般に降雨があまり起こらず、エアロゾルの変化に対してあまり敏感ではない。(2)中程度の LWP を持つ雲は最も効率的に降雨を抑制する。(3)高い LWP を持つ雲は、豊富な雲水のため効率的に降雨が発生し、susceptibility は下がり始めるといった結果が得られている。このような値を全球規模で明らかにすることによって、降雨が susceptible な場所や時期を明らかにでき、数値モデル出力の検証にも有用であろう。

6. 最後に

これまで見てきたように、エアロゾルによる影響は、特に雲量や降雨についてはまだ明らかになっていないことが多い。全球気候モデルや全球雲解像モデルなどの様々な数値モデルを使って、人工衛星や航空機、地上からの受動型および能動型測器から得られた結果を再現あるいは解釈しようとする研究も活発に行われており (e. g., Quaas et al. 2010), このような観測とモデルの相互作用を通して、大気中の粒子の振る舞いについてのさらなる理解の深化が望まれる。

References

- Albrecht, B. A. (1989) Aerosols, cloud microphysics and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227–1230.
- Bennartz, R., J. Fan, J. Rausch, L. R. Leung, and A. K. Heidinger (2011) Pollution from China increases cloud droplet number, suppresses rain over the East China Sea. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L09704, doi:10.1029/2011GL047235.
- Bréon, F.-M., D. Tanre, and S. Generoso (2002) Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, **295**, 834–838.
- Berg, W., T. L'Ecuyer, and C. Kummerow (2006) Rainfall climate regimes: The relationship of regional TRMM rainfall biases to the environment. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **45**, 434–454.
- Boucher, O., and J. Quaas (2013) Water vapour affects both rain and aerosol optical depth. *Nature Geosci.*, **6**, 4–5.
- Brioude, J., et al., (2009) Effect of biomass burning on marine stratocumulus clouds off the California coast. *Atmos. Chem. Phys.*, **9**, 8841–8856.
- Costantino, L., and F.-M. Bréon (2010) Analysis of aerosol-cloud interaction from multi-sensor satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L11801, doi:10.1029/2009GL041828.
- Halfon, N., Z. Levin, and P. Alpert (2009) Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environ. Res. Lett.*, **4**, 025001.
- Hansen, J., Sato, M., and Ruedy, R. (1997) Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.*, **102**, 6831–6864.
- Higurashi, A., and T. Nakajima (1999) Development of a two-channel aerosol retrieval algorithm on a global scale using NOAA/AVHRR. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 924–941.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) Summary for policymakers, in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., pp.1–18, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Kawamoto, K., T. Nakajima, and T. Y. Nakajima (2001) A global determination of cloud microphysics with AVHRR remote sensing. *J. Clim.*, **14**, 2054–2068.
- Kawamoto, K., T. Hayasaka, I. Uno, and T. Ohara (2006) A correlative study on the relationship between modeled anthropogenic aerosol concentration and satellite-observed cloud properties over east Asia. *J. Geophys. Res.*, **111**, D19201, doi:10.1029/2005JD006919.
- Koch, D., and A. D. Del Genio (2010) Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 7685–7696.
- Koren, I., Y. J. Kaufman, D. Rosenfeld, L. A. Remer, and Y. Rudich, (2005) Aerosol invigoration and restructuring of Atlantic convective clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14828.
- Koren, I., J. V. Martins, L. A. Remer, and H. Afargan (2008) Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the Amazon. *Science*, **321**, 946–949.
- Koren, I., G. Feingold, and L. A. Remer (2010) The invigoration of deep convective clouds over the Atlantic: aerosol effect, meteorology or retrieval artifact? *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 8855–8872.
- Koren, I., Altaratz, O., Remer, L. A., Feingold, G., Martins, J. V., and Heiblum, R. H. (2012) Aerosol-induced intensification of rain from the tropics to the mid-latitudes. *Nature Geosci.*, **5**, 118–122.
- Levin, Z., and W. R. Cotton (2009) Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A Scientific Review. Springer Verlag, 386pp.
- Lin, J. C., T. Matsui, R. A. Pielke Sr., and C. Kummerow

- (2006) Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: a satellite-based empirical study. *J. Geophys. Res.*, **111**, D19204, doi:10.1029/2005JD006884.
- Loeb, N. G. and Schuster, G. L. (2008) An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low-level cloud conditions. *J. Geophys. Res.* **113**, D14214
- 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.
- Painemal, D., and P. Zuidema (2010) Microphysical variability in southeast Pacific Stratocumulus clouds: synoptic conditions and radiative response. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 6255–6269.
- Quaas, J., B. Stevens, P. Stier, and U. Lohmann (2010) Interpreting the cloud cover — aerosol optical depth relationship found in satellite data using a general circulation model. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 6129–6135.
- Ramanathan, V., Crutzen, P., Kiehl, J. and Rosenfeld, D. (2001) Aerosols, climate and the hydrological cycle. *Science* **294**, 2119–2124.
- Rosenfeld, D. (2000) Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, **287**, 1793–1796.
- Quaas, J., B. Stevens, P. Stier, and U. Lohmann (2010) Interpreting the cloud cover — aerosol optical depth relationship found in satellite data using a general circulation model. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 6129–6135.
- Sorooshian, A., G. Feingold, M. D. Lebsock, H. Jiang, and G. L. Stephens (2009) On the precipitation susceptibility of clouds to aerosol perturbations. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L13803, doi:10.1029/2009GL038993.
- Stevens, B., and G. Feingold (2009) Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system. *Nature*, **461**, 607–613.
- Tao, W.-K., X. Li, A. Khain, T. Matsui, S. Lang, and J. Simpson (2007) Role of atmospheric aerosol concentration on deep convective precipitation: Cloud-resolving model simulations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S18, doi:10.1029/2007JD008728.
- Twomey, S., and P. Squires (1959) The influence of cloud nucleus population on the microstructure and stability of convective clouds. *Tellus*, **11**, 408–411.
- Twomey, S. (1977) The influence of pollution on the short-wave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1149–1152.
- Twomey, S. (1991) Aerosols, clouds and radiation. *Atmos. Environ.*, **25A**, 2435–2442.
- Varnai, T., and Marshak, A. (2009) MODIS observations of enhanced clear sky reflectance near clouds. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L06807.
- Warner, J. (1968) A reduction in rainfall associated with smoke from sugarcane fires—An inadvertent weather modification? *J. Appl. Meteorol.*, **7**, 247–251.