

Archives of Atmospheric Chemistry Research

第 41 号

日本大気化学会

Japan Society of Atmospheric Chemistry

総説

ートピックス:エアロゾルと雲の相互作用―	Article No.
全球モデルによるエアロゾル雲相互作用に関する研究佐藤陽祐	041A01
混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割當房豊	041A02
降水雲の過飽和度を観測から制約する:エアロゾル空間分布の予測のために	
茂木信宏, 森樹大, 松井仁志, 大畑祥	041A03

会員からのお知らせ

ブルーヘイズについて横内陽子	041N01
書評『詳解 大気放射学 - 基礎と気象・気候学への応用 -』	041N02

学会からのお知らせ

第24回大気化学討論会開催のお知らせ 角皆潤,長田和雄,須藤健悟,	
中川書子,永尾一平,松井仁志,神沢博,柴田隆,持田陸宏,大畑祥,水野亮,長濱智生	041N03
JpGU2019「大気化学セッション」開催報告日本大気化学会 運営委員会	041N04
2019 年度日本大気化学会奨励賞の候補者募集日本大気化学会 運営委員会	041N05
第 43·44 回日本大気化学会運営委員会議事録 ·······日本大気化学会 運営委員会	041N06
日本大気化学会会員集会プログラム日本大気化学会 運営委員会	041N07
第11期日本大気化学会役員選挙の結果について日本大気化学会 選挙管理委員会	041N08

記事のご投稿について

論文や記事のご投稿をご検討されている方は,事前に本誌編集委員または日本大気化学会運営委員まで ご相談下さい。

大気化学研究編集委員:森本真司(共同編集長),山地一代(共同編集長),竹谷文一,宮崎雄三

日本大気化学会運営委員(第11期,2019年7月1日から):

谷本浩志(国立環境研究所),金谷有剛(海洋研究開発機構),内田里沙(日本自動車研究所), 江口菜穂(九州大学),齋藤尚子(千葉大学),関山剛(気象研究所),竹川暢之(首都大学東京), 豊田栄(東京工業大学),永島達也(国立環境研究所),中山智喜(長崎大学),廣川淳(北海道大学), 森本真司(東北大学),山地一代(神戸大学)

全球モデルによるエアロゾル雲相互作用に関する研究

Research of Aerosol Cloud Interaction using Global Scale Models

佐藤陽祐^{1,2*}

エアロゾルと雲の相互作用(エアロゾル雲相互作用)は,1990年代に初めて提唱されて以来,多くの 観測的研究や数値シミュレーションによる数値的研究によって議論がされてきたが,提唱されてから 30年が過ぎようとしている現在においても,気候予測の最大の不確定性要因の一つである。このエア ロゾル雲相互作用の影響を評価するために気候モデル(大循環モデル)や全球雲解像モデルといっ た全球スケールの数値モデルが用いられてきた。本稿では全球スケールの数値モデルでのエアロゾ ル雲相互作用の表現方法と,これまでの全球スケールの数値モデルについて解説する。

1. エアロゾルの気候影響

大気中に存在する微粒子はエアロゾルと呼ばれる。 エアロゾルは、例えば、砂漠から風によって巻き上げ られる砂粒,海面の水しぶきで発生する粒子,森林 火災や農業活動の結果放出される有機物,工場排 出物に含まれる粒子,大気中で気体が化学反応する ことによって生じる粒子など様々な放出源を持ち、そ れぞれに異なる物理・化学特性を持つ。このエアロゾ ルは、それ自身が太陽放射を反射・吸収することによ り地球の放射特性を変化させ,地球の放射エネルギ ー収支に大きな影響を持つ。このように放射過程を 介して直接的に地球の放射エネルギー収支に与え る効果をエアロゾルの直接効果と呼ぶ。この直接効 果に加え,主に黒色のエアロゾル(ブラックカーボン など)が太陽放射を吸収する結果、それらのエアロゾ ルが主に存在する大気下層を温め,大気の温度構 造が変化する効果を準直接効果と呼ぶ。

一方,エアロゾルは雲粒や氷粒の核として働くこと が知られており(前者を Cloud Condensation Nuclei (CCN),後者を Ice Nuclei (IN)と呼ぶ),エアロゾルの 数が変化することによって,雲粒のサイズが変化し, 雲の放射特性,微物理特性,降水特性,寿命などが 変化する。このような雲の特性が変化することによって、雲を介して地球の放射収支が変化する効果は間接効果と呼ばれ、雲の放射特性が変化する効果は第1種間接効果[Twomey, 1977]、雲の寿命が変化する効果は第2種間接効果と呼ばれる[Albrecht, 1989]。

これらの効果による地球の放射エネルギー収支への影響は気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel for Climate Change, IPCC) 第5次報告書 (AR5) [*Stocker et al.*, 2013]にまとめら れている。IPCC では様々な要因が気候に与える影



図 1 IPCC AR5 で見積もられた気候変動を引き起こすさまざまな要素の有効放射強制力。IPCC AR5 第1作業部会報告書技術要約の翻訳文(気象庁ホームページより)より抜粋。

響を,放射強制力という量を用いて見積もっている。 放射強制力とは,なんらかの要因(例えば,二酸化炭 素の増加など)によって地球気候系に変化が起こっ た際に,その要因によって引き起こされる放射エネル ギー収支の変化量である[中島・竹村,2009]。

IPCC AR5 では, 直接効果は Aerosol-Radiation Interaction (エアロゾル・放射相互作用: ARI), 間接 効果は Aerosol-Cloud Interaction (エアロゾル・雲相 互作用:ACI)という言葉で表現され、ARIとACIの有 効放射強制力[中島・竹村, 2009]は, それぞれ-0.45 W m⁻², -0.45 W m⁻² であるとされている(図 1 または IPCC AR5 の図 8.15)。温室効果ガスとしてよく知られ ている二酸化炭素の放射強制力は 2.83 W m⁻²で、エ アロゾルの放射強制力とは逆符号であるためエアロ ゾルの効果は温室効果ガスによる地球を温める効果 を抑制すると考えられてきた。しかしながら、ARI、 ACI の不確実性(図 1 ではエラーバーに相当する) は大きく、ACIの科学的な確信度は「低い」とされて おり、今後更なる研究が必要なことがうかがわれる。 放射強制力の見積もりには地球全体を覆った大循環 モデル(General Circulation Model: GCM, 近年は気 候モデル・Global Climate Modelと表記されることも多 い)と呼ばれる全球数値モデルが用いられる。本稿で は数値モデルを用いてACIを見積もる上での問題や、 それを解決する取り組み,それらの取り組みにより得 られた近年の成果を紹介する。

なお, ACI による雲への影響は, エアロゾルが CCN または IN として働くことで生じるが, IN による影 響に関しては未解明な部分が多い。そのため, 数値 モデルによっては IN による影響を考慮していないも のもある。そこで, 本稿では主にエアロゾルが CCN と して働く効果に関して ACI のモデル内での表現方法 について解説する。

2. 数値モデルによるエアロゾル雲相互作用の表 現

ACI も含めた、様々な気候変動要因を議論する際

には、全球スケールでの観測や数値実験が必要であ る。エアロゾルの直接効果による気候影響はGCMに よって見積もりがはじまった[Mitchell et al., 1995]。 2000 年代前半になると、全球を網羅的に観測できる 極軌道衛星を用いて,直接効果のみならず間接効 果の見積もりが盛んに行われるようになる(例えば, Nakajima et al., 2001; Sekiguchi et al., 2003; Quaas et al., 2004; Kaufman et al., 2005; Matsui et al., 2006 な ど)。2000年代中頃~後半に入ると、エアロゾル輸送 モデルを結合した GCM(例えば Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species: SPRINTARS: Takemura et al., 2005, Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transportation: GOCART Chin et al., 2000a; Chin et al., 2000b)によって間接効果の見積も りが行われるようになる[Suzuki et al., 2004; Quaas et al., 2004; Matsui et al., 2006]。それ以降 GCM をは じめとする数値モデルは、衛星観測と並んで、気候 予測や気候影響評価に大きな貢献をしてきた。

これらの数値モデルには様々な手法が存在するが, 格子法と呼ばれる数値モデルについて解説する(他 にはスペクトル法などがある)。格子法では地球を図 2のように格子に分割して表現する(図2は地表面付 近のみの格子を描いているが実際には鉛直方向にも 格子が重なっていることに注意)。これらの格子の中



図 2 地球を格子で分割して表現した一例。この例では地 球を六角形または五角形の格子で分割して表現する(東京 大学三浦准教授提供)

で、気温、風速・風向、気圧などを定義し、大気の流 れを流体力学に基づいて計算する(具体的にはナビ エ・ストークスの式,連続の式、気体の状態方程式な どの式を解く)。

ACI や ARI を表現するためには, エアロゾルと雲 を扱う必要があるため, 各格子で流体力学の変数に 加えて, エアロゾルや雲粒の数密度や質量, 水蒸気 の質量(混合比や比湿で表現されることが多い)を定 義し, 大気(流体)の流れに従ってエアロゾルや雲が 輸送されるように計算を行う。加えて, エアゾロルの発 生・消滅や雲粒の成長過程といった物理過程を各格 子で計算することで雲やエアロゾルが数値モデルの 中で表現される。

エアロゾルの発生は風速に基づいて海面から発生 する海塩粒子のように[Monahan et al., 1986]モデル 内の物理量から診断的に計算されるものもあれば, モデル外部から与えられるものもある。これらの外部 から与えられるエアロゾルのエミッションインベントリは 様々なものが存在している[e.g., Janssens-Maenhout et al., 2012; Janssens-Maenhout et al., 2015; Myhre et al., 2013]。

では ACI はどのように表現されるかといえば, 各格 子におけるエアロゾルと雲粒の数濃度に基づいて表 現される。なお数濃度を直接予報しないモデルでは 混合比などから経験的な仮定に基づいて診断的に 求められた数濃度が用いられる。エアロゾルの増加 に伴って, 雲粒のサイズが小さくなることによって雲の アルベドが増加し[Twomey, 1977], 寿命が長くなる [Albrecht, 1989]ことが ACI であるため, エアロゾルの 増加によって雲粒が小さくなる効果がエアロゾルと雲 粒の量に基づいて表現される。

具体的には数値モデルの中の雲微物理過程の一 つである雲粒(半径が数十 µm の雲粒子)から雨粒 (半径が数百 µm~数 mm の雲粒子)への成長 (Autoconversion と呼ばれる)の中でエアロゾルの効 果が表現される。例えば、日本を代表する GCM で IPCC の報告書にも結果を提供している Model for

AVHRR retrieval (4mon mean)



図 3 (a)衛星観測と(b)MIROC-SPRINTARS により得られた暖か い雲の雲頂付近の有効半径の全球分布(単位はµm)。MIROC-SPRINTARS によって、エアロゾルが多いとされる陸上と、東アジア は有効半径が小さく、エアロゾルの少ない海上は有効半径が大き いという特徴が表現されている。[Suzuki et al., 2004] より抜粋 (© American Metrological Society, used with permission)

Interdisciplinary Research on Climate [MIROC: *Watanabe et al.*, 2010]の Autoconversion による雲粒 から雨粒への変換率(P)の式は,

$$P = -l/\tau_{auto},\tag{1}$$

$$\tau_{auto} = \frac{\beta + \gamma N_c / \rho l}{\alpha \rho l} \quad , \tag{2}$$

と表現される[Berry, 1968]。ここで α , β , γ は定数, ρ は 大気密度, lは雲水量(雲粒の質量), N_c は雲粒の数 密度である。各格子でのエアロゾル数密度が増えた 場合, CCN として働くエアロゾルが増え, 雲粒の形成 プロセス(雲核形成)を介して, N_c が増加する。する と, 式(1)の τ_{auto} の分子, すなわち P の分母が増加す るため, Pが小さくなる(成長が遅くなる)。これによっ てサイズの大きな雨粒の生成が抑制され, サイズの 小さな雲粒が相対的に増加し, 雲粒のサイズが小さく なる効果が表現される。また同時に, 降水が抑制され る結果, 雲の寿命が延びる効果も表現される。

モデルによって式(1), (2)の定式化は異なるものの, 多くの GCM このような方法で ACI を表現している。 このような方法でエアロゾルの効果を取り入れること で, GCM は ACI の観測事例を再現している。例え ば, Suzuki et al. [2004]では MIROC-SPRINTARS を 用いてエアロゾルの効果を考慮した数値実験を行い、 人工衛星から得られる(雲頂温度が0°C以上の)暖か い雲の雲粒有効半径の全球分布を再現している(図 3)。

3. 雲解像モデル

2 章で示したように、GCM によってエアロゾルが雲 粒に与える効果を再現した ACI の気候影響の見積も りが 2000 年代から盛んに行われてきた。しかしながら それから 20 年近くが経った現在でも、ACI の見積も りの不確実性は依然として大きい。その理由は様々 あるが、大きな要因の一つは、GCM が雲を解像して いないことにある。本章ではその問題について解説 する。

図 2 で示したように、数値モデルでは地球を格子 で分割して表現する。その際、格子内はよくかき混ぜ られていると仮定しているため、格子で定義される物 理量は格子の平均値である。そのため、格子の幅よ り小さい空間スケールを持つ現象は数値モデルでは 直接表現できない(解像できないという)。この格子の 幅を解像度と呼び、この解像度以下の空間スケール を持つ現象はサブグリッドスケールの現象と呼ばれ、 直接表現できないため、様々な方法によって間接的 に表現される。

GCM の解像度は 2010 年代では数十 km から数 百 km に取ることが一般的であるが,代表的な雲一つ のスケールは数十 m ~ 数 km であるため[cf. *Mölders and Kramm*, 2014], 雲を解像することができ ない。そのため, 雲の効果は積雲パラメタリゼーショ ンという半経験的な手法で取り入れられる。半経験的 な手法を用いることで, 雲の表現方法に不確実性が 伴い, その結果, 雲の表現や雲を介する ACI の見積 もりにも不確実性が生じる。

この問題を解決するために,格子幅を数 km 程度 に設定して,雲を直接解像した解像度で計算が行わ れている。このような雲を直接解像するモデルを雲解 像モデルと呼ぶ。この雲解像モデルでは,半経験的



図 4 雲微物理モデルでの雲の表現方法の模式図。雲の中の四 角がモデルの格子を表す。

な積雲パラメタリゼーションの代わりに, 雲微物理モ デルと呼ばれる雲粒の成長を計算する物理モジュー ルを用いる。この雲解像モデルによって雲を直接表 現し, ACI の見積もりの不確実性を減らす試みが 2000 年代後半から行われている。

雲微物理モデルでは各格子の雲粒の粒径分布 (Size Distribution Function: SDF)を計算することで雲 を表現する(図4)。SDFをいくつかのモードで簡易的 に表現するモデルをバルク法モデルと呼び, 雲粒の 質量(数密度 SDFの3次のモーメント)のみで表現す るモデルを 1-moment バルク, 質量と雲粒の数密度 (数密度 SDF の 0 次のモーメント)で表現するモデル を 2-moment バルクモデルと言う(同様に 3-moment バルク法なども存在するが、現在では2-momentバル ク法が広く用いられている)。また SDF を直接表現す るモデルのことをビン法モデルと呼ぶ。質量のみで雲 を表現する 1-moment バルク法よりも質量と数密度の 2変数で雲を表現する2-momentバルク法の方が、モ デルの精緻度(計算結果の正しさではないことに注 意)という点では高く、またバルク法よりも SDF を直接 表現するビン法の方が精緻度は高い。

1-moment バルク法でも ACI は式(1), (2)のように 表現されることが多いが, GCM とは異なり, 雲を直接 解像しているため, 個々の雲微物理プロセスに与え る効果を陽に計算することが可能である。2-moment バルク法では、エアロゾルの増加による雲粒数密度 の変化を直接計算できるため、質量と数密度の関係 から間接的にではあるが(しかし 1-moment バルク法 より精緻に)、ACIを表現できる。さらに、ビン法では、 SDF を直接計算するので、エアロゾルの増加による 粒子サイズの変化を陽に計算できる。

しかしながら,各格子で SDF を精緻に表現すれば するほど計算コストが高くなる。そこで質量と数密度 の2 変数を使って表現し,数密度と質量の関係から 雲粒のサイズを間接的に表現できる 2-moment バル ク法が広く用いられている。

これらの雲解像モデルでは,雲を直接計算できる ため,エアロゾルが雲に与える影響を直接計算でき, 雲解像モデルを用いることで,ACIの見積もり不確実 性を小さくできることが期待されている。

4. 全球雲解像モデル

雲解像モデルは雲を直接解像できる解像度で数 値実験を行うが, 雲解像モデルの格子幅は GCM の それに比べて 1 桁から 2 桁小さい。そのため, 雲解 像モデルを用いる場合は, 同じ領域を対象とした計 算を行うために必要な格子数が GCM に比べて多く, 必要な計算資源も GCM に比べはるかに多い(計算 コストが高いという). この高い計算コストのために雲 解像モデルの利用は, 2000 年代前半までは, 一部 の領域のみを対象とした実験(領域モデルでの実験) でのみに限られていた。ACI の気候影響を議論する ために, 全球スケールの雲解像モデル(全球雲解像 モデル)が待ち望まれていたが,計算資源が足らず 困難であった。近年の大型計算機の計算能力の目 覚ましい向上によって初めて全球雲解像実験が可能 になり,世界に先駆けて日本で全球雲解像モデル Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model [NICAM: *Tomita and Satoh* 2004; *Satoh et al.*, 2008; *Satoh et al.*, 2014]の開発が行われた。

Tomita et al. [2005]は当時世界最速を誇った地球 シミュレータを用いて,陸地などを考慮しない水惑星 実験で世界で初めて全球雲解像実験を行なった。ま た Miura et al. [2007]は陸地などを考慮した実地球を 対象として,全球 3.5 kmの格子幅で数値実験を行い, 数値モデルを用いた実験によって世界で初めてマッ デン・ジュリアン振動 (Madden-Julian Oscillation: MJO)とよばれるインド洋西部で発生する数千 km ス ケールの積乱雲群が赤道上を東進する現象 [Madden and Julian, 1971; 1972]の再現に成功してい る。

本稿で対象としているエアロゾルや ACI を考慮し た全球雲解像実験は, *Suzuki et al.* [2008]によって初 めて行われ,衛星観測から得られた雲粒有効半径の 鉛直分布にエアロゾルが与える影響[*Rosenfeld*, 2000; *Rosenfeld et al.*, 2002]や,エアロゾルと鉛直積 算雲水量(Liquid Water Path: LWP)の関係[*Nakajima et al.*, 2001; *Sekiguchi et al.*, 2003]を再現した。

しかしながらこれらの全球雲解像実験は,膨大な 計算資源が必要となるため数日の計算をすることが 限界であり,気候変動の議論を行うためには積分時



図 5 (a)衛星観測, (b)全球雲解像モデル, (c)GCM によって計算された Cloud susceptibility。 Sato et al. [2018] より抜粋。

間が不足していた。

Sato et al., [2018]らは, 2011 年に運用を開始した 「京」を用いて, エアロゾルを結合した全球雲解像モ デルを用いて, 1 年間の積分をおこない, 全球雲解 像モデルを用いて初めて ACI の気候影響に関する 議論を行った。具体的には, 雲頂温度が 0℃ 以上の 暖かい雲を対象として, エアロゾルの変動に関する 雲水量の変動(Cloud Susceptibility: λと呼ばれる):

$$\lambda = \frac{d[Log_{10}(LWP)]}{d[Log_{10}(N_a)]},\tag{3}$$

の見積もりを行なった。ここで Na はエアロゾルの数密 度である。従来のACIの知見からは、エアロゾルが増 加した時、降水が抑制されて雲の寿命が延びる結果、 雲水量は増加すると考えられていた。すなわち、Aは、 正になると考えられてきた。しかしながら近年の衛星 観測によれば、λは必ずしも正ではなく、正にも負に もなりうることが報告されている[Chen et al. 2014; Michibata et al., 2016]。Sato et al. [2018]は衛星観測 で報告されている正と負のλを世界で初めて再現した (図 5a, 5b)。彼らはその結果を解析し、このようなλの 場所による違いは、雲の蒸発の効果である可能性が 高いと報告している。すなわち ACI によって、雲粒の サイズが減少する。その結果、雲頂付近では蒸発が 促進されるため、雲水量が減る。この雲水量が減少 する効果と、従来から言われてきた雲粒のサイズの 減少によって降水が抑制されて雲水量が増加する効 果のうち、前者の方が大きい領域ではエアロゾルが 増えた時に雲水が減る(すなわちλ<0)。一方後者の 効果が大きな領域ではエアロゾル増加時に雲水は増 える(すなわちλ>0)ということを示した。



図 6 全球雲粒サイズ解像実験によって得られた(a)鉛直積算雲水量の全球分布,(b)北緯 29 度,東経 120 度,(c) 北緯 45 度,西 経 60 度,(d)赤道上,東経 180 度の粒径分布関数の鉛直分布(佐藤 [2019]より抜粋)。赤線は液相の水,青線は固相の水の SDF を表す。

従来の GCM では式(1),(2)で定式化された効果に よって Autoconversion が抑制され, 雲水の増加する 効果が表現されているものの, 雲を直接解像してい ないため, エアロゾルの変化による雲の微物理過程 の応答(ここでは蒸発過程の応答)を表現できず, 全 球一様でλ>0となっていた(図 5c)。

このように雲を直接解像することで,計算コストは 高いものの,ACIを精緻に表現することが可能になる。 近年の計算機能力の向上とともにようやく気候に関 する議論が可能になったと言えるが,今後ポスト京や それに続く後継機など大型計算機の発展とともに, 雲解像モデルでの計算を積み重ねることで,ACIの 不確実性が小さくなっていくことが期待される。

5. まとめと今後の課題

本稿ではこれまで気候予測に用いられてきた GCM での ACI の表現方法と問題点, それを解決す るための一つの手段である雲解像モデルと, その中 での ACI の表現, さらには雲解像モデルを用いた結 果について解説した。全球雲解像モデルは雲の微 物理過程を直接表現できるため, ACI に関する不確 実性を減らすための一つの有効な手段である。

しかしながら,現在のところ全球雲解像実験では 計算資源の制約から,バルク法雲モデルが用いられ ており,ACIによる雲粒のサイズの変化を直接的に表 現することはできない。そのため,更なる精緻な計算 を行うには、ビン法雲モデルを適用した全球雲粒サ イズ解像実験も必要となるであろう。著者は「京」を用 いて、世界に先駆けて全球雲粒サイズ解像実験を行 い、全球で SDF を計算し、エアロゾルによる SDF の 変化を再現した(図 6)が、積分期間は1日にとどまっ ており、気候の議論は不可能である。

計算機能力の更なる発展とともに、今後このような 全球雲粒サイズ解像実験による長時間積分も可能に なり、ACIの不確実性の減少に資する知見が得られ ていくであろう。

加えて、本項で解説した ACI の表現はエアロゾル

がCCNとして働く効果の表現と、エアロゾルの暖かい 雲(氷粒を含まない雲)への影響であった。冒頭で述 べた通りエアロゾルの氷を含んだ雲への影響は、未 解明な部分が多い。現在、エアロゾルが氷雲に与え る影響と、その気候影響が盛んに議論されているが、 今後氷雲に関する理解も不可欠であろう。

6. 謝辞

本稿に掲載されている結果の一部は,理化学研究 所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られた (課題番号:hp150156, hp160004, hp160005)。また 図 2 を東京大学三浦准教授よりご提供いただいた。

7. 参考文献

- Albrecht, B. A. (1989), Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245, 1227–1230, doi:10.1126/science.245.4923.1227.
- Berry, E. X. (1968), Modification of the warm rain process. Proceeding of First Conference on Weather Modification, 81–85.
- Chen, Y.-C., M. W. Christensen, G. L. Stephens, and J. H. Seinfeld (2014), Satellite-based estimate of global aerosol–cloud radiative forcing by marine warm clouds. *Nat. Geosci.*, 7, 643–646, doi:10.1038/ngeo2214.
- Chin, M. et al. (2000a), Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Comparison with field observations and regional budgets. J. Geophys. Res. Atmos., 105, 24689–24712, doi:10.1029/2000JD900385.
- Chin, M., R. B. Rood, S.-J. Lin, J.-F. Müller, and A. M. Thompson (2000b), Atmospheric sulfur cycle simulated in the global model GOCART: Model description and global properties. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 105, 24671– 24687, doi:10.1029/2000JD900384.
- Janssens-Maenhout, G., et al. (2012), *EDGAR-HTAP: a* harmonized gridded air pollution emission dataset based on national inventories. http://www.jrc.ec.europa.eu/ %5Cnftp://139.191.1.85/pu

b/maenhout/HTAP/EDGAR-

HTAP_report/LBNA25229ENN.pdf.

- Janssens-Maenhout, et al. (2015), HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411–11432, doi:10.5194/acp-15-11411-2015.
- Kaufman, Y. J., I. Koren, L. A Remer, D. Rosenfeld, and Y. Rudich (2005), The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 102, 11207–11212, doi:10.1073/pnas.0505191102.
- Madden, R. A., and P. R. Julian (1971), Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28, 702–708, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.
- Madden, R. A., and P. R. Julian (1972) Description of globalscale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. J. Atmos. Sci., 29, 1109–1123, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<1109:DOGSCC>2.0.CO;2.
- Matsui, T., et al. (2006), Satellite-based assessment of marine low cloud variability associated with aerosol, atmospheric stability, and the diurnal cycle. *J. Geophys. Res.*, 111, D17204, doi:10.1029/2005JD006097.
- Michibata, T., K. Suzuki, Y. Sato, and T. Takemura (2016), The source of discrepancies in aerosol–cloud–precipitation interactions between GCM and A-Train retrievals. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 15413–15424, doi:10.5194/acp-16-15413-2016.
- Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory, and S. F. B. Tett, (1995), Climate response to increasing levels of greenhouse gases and sulfate aerosols. *Nature*, 376, 501– 504, doi:10.1038/376501a0.
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi (2007), A Madden-Julian oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, 318, 1763–1765, doi:10.1126/science.1148443.

- Mölders, N., and G. Kramm (2014), *Lectures in Meteorology*. Springer International Publishing, Cham, 287–447 pp.
- Monahan, E. C., D. E. Spiel, and K. L. Davidson (1986), A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption., in Oceanic Whitecaps, edited by: Monahan, E. and Niocaill, G. M., D. Reidel, Norwell, Mass. 167–174
- Myhre, G., et al. (2013), Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1853–1877, doi:10.5194/acp-13-1853-2013.
- 中島映至, 竹村俊彦 (2009), 放射強制力. 天気, 56, 29-31.
- 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, doi:10.1029/2000GL012186.
- Quaas, J., O. Boucher, and F.-M. Breon (2004), Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and the Laboratoire de Météorologie Dynamique–Zoom (LMDZ) general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 109, D08205, doi:10.1029/2003JD004317.
- Rosenfeld, D. (2000), Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287, 1793–1796, doi:10.1126/science.287.5459.1793.
- Rosenfeld, D., R. Lahav, A. Khain, and M. Pinsky (2002), The role of sea spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes. *Science*, 297, 1667–1670, doi:10.1126/science.1073869.
- Sato, Y. et al. (2018), Aerosol effects on cloud water amounts were successfully simulated by a global cloud-system resolving model. *Nat. Commun.*, 9, 985, doi:10.1038/s41467-018-03379-6.
- 佐藤陽祐 (2019), 全球モデルを用いた粒子サイズを直接 取り扱った数値実験, *HPCI Res. Rep.*, submitted on Dec. 15, 2018.
- Satoh, M., et al. (2008), Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations.
 J. Comput. Phys., 227, 3486–3514,

doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.

- Satoh, M., et al. (2014). The non-hydrostatic icosahedral atmospheric model: Description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1(18), doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Sekiguchi, M. et al. (2003), A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosol and cloud parameters. J. Geophys. Res., 108, 4699, doi:10.1029/2002JD003359.
- Stocker, T. F., et al. (2013) IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Suzuki, K., et al. (2004), A study of the aerosol effect on a cloud field with simultaneous use of GCM modeling and satellite observation. J. Atmos. Sci., 61, 179–194, doi:10.1175/1520-

0469(2004)061<0179:ASOTAE>2.0.CO;2.

- Suzuki, K., et al. (2008), Global cloud-system-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima (2005), Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transportradiation model. *J. Geophys. Res.*, 110, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Tomita, H., and M. Satoh (2004), A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357–400, doi:10.1016/j.fluiddyn.2004.03.003.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno, and M. Satoh (2005), A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 1–4, doi:10.1029/2005GL022459.
- Twomey, S. (1977), The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1149–1152, doi:10.1175/1520-

0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2.

Watanabe, M., et al. (2010), Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Clim.*, 23, 6312–6335, doi:10.1175/2010JCLI3679.1.

> 原稿受領日: 2019年5月16日 掲載受理日: 2019年7月7日

著者所属:

- 1. 北海道大学 理学研究院
- 2. 理化学研究所 計算科学研究センター
- * 責任著者:

Yousuke Sato <yousuke.sato@sci.hokudai.ac.jp>

混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割

Roles of aerosols as ice nucleating particles in mixed-phase clouds

當房 豊 1,2*

エアロゾル粒子が雲凝結核あるいは氷晶核として働くことによって, 雲微物理過程に影響を及ぼすこと は、よく知られてきている。しかしながら、氷晶核に関する科学的な知見は, 雲凝結核に比べ, 非常に 乏しいとされている。そのような中, 特にここ約 10 年のうちに, 氷晶核の計測手法の開発や改良など の動きがあったことで, 世界的には氷晶核に関する研究が盛んに行われるようになってきた。本稿で は、混相雲(過冷却水滴と氷晶が混在する雲)が形成される温度・湿度条件の下で氷晶核として働く エアロゾル粒子に焦点を絞り, その科学的知見について解説する。さらに、極域混相雲内での氷晶の 形成にかかわる氷晶核の研究についての最近の動向などを紹介する。

1. はじめに

通常,周囲の気温が 0℃以下になっても,異物質 を含んでいない雲粒程度のサイズの小さな水滴は, なかなか凍結せず,-40℃~-35℃にまで下がって ようやく凍結する。しかし,氷晶核としての働きを有す る異物質の微粒子の助けがあれば,約-35℃以上 の温度条件下であっても,氷晶(氷の微小な結晶)が 形成される。つまり,-35℃~0℃の間では,過冷却 水滴(液体の雲粒)と氷晶の両方が存在することが熱 力学的には可能である。過冷却水滴と氷晶が混在し ている雲は,2 つの異なる相(液相と固相)の雲粒で 構成されていることから,「混相雲」あるいは「混合層 雲」と呼ばれている。

エアロゾル粒子のうち,氷晶核としての働きを有す るものは、ごく一部の固形の微粒子に限定され、大気 中では、ごく微量にしか存在していない。それでも、 氷晶核として働くエアロゾル粒子は、雲内での氷晶 の形成過程では欠かせない存在であり、雲の光学的 特性や寿命などに非常に大きな影響を及ぼしている。

現状では,雲凝結核に比べて,氷晶核に関する科 学的な知見は非常に乏しいと言われている。その主 な理由の1つは、これまでに様々な氷晶核の計測手 法が提案されてきたものの、その計測精度の評価が 十分に行われてこなかったことが挙げられる。また、 氷晶核として機能する微粒子は、どのようなもので、 またそれらはなぜ氷晶核として機能するのかという基 本的な部分についても、未だによくわかっていない。

そのような中,ここ約 10 年のうちに,世界的には氷 晶核に関する研究が盛んに行われるようになってき た。その間,氷晶核の計測手法の開発や改良,様々 な標準試料を用いた比較実験などが実施されてきて おり,計測手法ごとの計測値のバラつきについて,定 量的な評価がなされるようになってきた。その結果, 計測手法ごとの計測値のバラつきは,以前に比べる と小さくなってきているように思える。また,実際の大 気中での氷晶核の計測も世界各地で実施されるよう になってきた。これまでに氷晶核研究に関する数々 の総説論文が発表されているが[Hoose and Möhler, 2012; Murray et al., 2012; Kanji et al., 2017],今日の 氷晶核研究の進展は非常に早く,これらの総説論文 に書かれている内容も日々更新されているような状 況である。 本稿では, 混相雲内で氷晶が形成される際に氷 晶核として働くエアロゾル粒子に焦点を絞って, どの ような研究が行われてきているのかを端的に解説す る。2 章では, 「氷晶核」のことを指していた英語表記 が, ここ数年で見直されたことによって, 今では使わ れなくなってきていることを解説する。3 章では, 氷晶 核として働くエアロゾル粒子の混相雲の中での役割 について述べる。4 章では, 年間を通して, 混相雲が 頻繁に発生している極域の下層大気にて進められて きている氷晶核の研究について, 最近の科学的知見 や動向を紹介する。

2.「氷晶核」は死語になる?

気象学の分野では、氷晶核の英語表記として、こ れまで数十年に渡って、Ice Nuclei(略して IN)という 言葉が使われていた。しかし、ここ数年、国際的な学 術誌では、Ice Nucleiという言葉は全くといってもよい ほど使われなくなった。ここでは、なぜ Ice Nucleiとい う言葉が使われなくなったのかを解説する。

気象学の分野で Ice Nuclei と言えば、「氷晶が形 成される際に核として働く微粒子」のことを指している 場合が多い。ただし、そのような微粒子の固体表面 の構造は不均質であることから、粒子の固体表面上 の特定の箇所を核として氷晶の形成がおきていると 考えられている。そうなると Ice Nuclei という言葉は、 「微粒子の表面のうち、氷晶形成に適した特定の箇 所」のみを指しているという解釈もできそうである。ま た、気象学以外の分野(例えば、生物学や植物学の 分野)では、Ice Nuclei という言葉が、「凍結の際に核 となる物質(氷核活性タンパク質など)」のことを指し ていたりもする。

上記のような理由から、Ice Nuclei という言葉は、曖 味で、混乱を招く恐れもあるため、他の言葉を用いる べきだという議論がなされた。そこで、氷晶核の研究 に長年に渡って携わってきている Gabor Vali 博士(ワ イオミング大学)、Paul DeMott 博士(コロラド州立大 学)、Ottmar Möhler 博士(カールスルーエ工科大学) らが 2015 年に発表した論文の中で,今後の気象学 の分野では,「氷晶が形成される際に核として働く微 粒子(つまり,氷晶形成に適した特定の箇所を含ん でいる微粒子)」自体を指している場合には,Ice Nucleiではなく,Ice Nucleating Particles(略して INPs) という言葉を使いましょうという提案がなされた[Vali et al., 2015]。この Ice Nucleating Particles という新たな 造語はあっという間に浸透し,現在,Ice Nuclei という 言葉が使われることは,ほぼなくなった。

一方、日本の気象学の分野では、Ice Nucleating Particles に対応する日本語はまだ確立されていない。 例えば、「氷晶核形成粒子」「氷形成粒子」「氷晶核 能粒子」「氷核活性粒子」などが候補として考えられ るのかもしれないが、基本的には、未だに「氷晶核」 のままである。著者自身の経験としては、氷晶核とい う言葉に不便さを感じてきており、氷晶核のことを知ら ない人には、「氷晶(氷の結晶)」のことを指していると 勘違いされることが何度もあった。その際には、「氷晶 核として働く微粒子」というような言い回しを使ってき ているが、Ice Nucleating Particles に対応する日本語 があると便利だとは思う。

ちなみに、「液体の雲粒が形成される際に核として 働く微粒子(つまり, 雲凝結核)」の英訳は, Cloud Condensation Nuclei(略して CCN)のままである。現 時点では, Cloud Condensation Nucleating Particles (略して CCNPs)という言葉にはなっていない。

3. 混相雲内での氷晶の形成プロセス

混相雲は,温度が約-35℃~0℃の間で,過冷却 水に対する相対湿度が 100%以上(つまり,水蒸気の 量が過冷却水に対する飽和水蒸気圧を上回ってい る状態)の大気条件下で形成される。温度が-40℃ ~-35℃を下回ると,氷晶核の助けを借りなくても, 過冷却水滴は均質凍結(Homogeneous Freezing)に よって自発的に凍結してしまうため,雲粒は過冷却の 状態を保つことができなくなり,氷晶のみで構成され ることになる。



図 1 約-35℃~0℃の温度条件下において,氷晶核として働く微粒子(鉱物、非水溶性の有機物や微生物など)が,雲内 での氷晶の形成に及ぼす影響についての概念図。氷晶が存在することで,雲の光学的特性や寿命は大きく変化することが 予測される。Vergara-Temprado et al. [2018] をもとに作図。

0℃以下では、「過冷却水に対する飽和水蒸気圧」 と「氷面に対する飽和水蒸気圧」の 2 つの飽和水蒸 気圧が存在する。これらの飽和水蒸気圧については, 0℃付近ではほぼ同じであるが、それ以下の温度に なると,前者の方が後者よりも必ず高くなる。大気中 の水蒸気量が, 過冷却水に対する飽和水蒸気圧と 氷面に対する飽和水蒸気の間にある場合は、水蒸 気の昇華 (Deposition Nucleation) によって, 氷晶の みの雲(過冷却水滴を含まない雲)の形成されること が,熱力学的には可能だと考えられる。しかし,実際 には約-30℃以上だと、氷晶が観測される時には、 同じ雲の中から過冷却水滴も見つかることが多く,氷 晶のみで構成される雲はほとんど観測されてきてい ない[de Boer et al., 2011; Westbrook and Illingworth, 2011]。これらの観測結果は少なくとも約-30℃~ 0℃の間では、水蒸気の昇華による氷晶の形成はほ とんど起きていないことを示唆しており、これまでの雲 生成チャンバーなどを使った室内実験でも,この温 度下では、過冷却水に対する相対湿度が100%付近 あるいはそれ以上(つまり,液体の雲粒も形成される

湿度)にまで達しないと氷晶の形成は起きにくいという結果が得られてきている。

以上のことから、約-35℃~0℃の間での氷晶の 形成は、混相雲の中で起きていると考えられている。 混相雲の中では,何らかの過程(例えば,水溶性の 物質による被覆過程や雲凝結核として機能する過程 など)を経験することで、水滴内に取り込まれた状態 にある異物質の微粒子(氷晶核)を核とする氷晶の形 成 (Immersion Freezing や Condensation Freezing) が 重要性だと言われている[Hoose and Möhler, 2012; Murray et al., 2012; Kanji et al., 2017]。 過冷却水に 対する相対湿度が 100%以上を超える条件下では, Immersion Freezing の方が Condensation Freezing よ りも支配的だと考えられているが, Immersion Freezing と Condensation Freezing の違いを厳密に説 明することは難しく,室内実験や大気観測によって違 いを示すことも困難なため, Immersion/condensation Freezing とまとめて表記されることもある。また, 混相 雲内では, 過冷却水滴と氷晶核としての働きをもつ 微粒子との衝突による氷晶の形成(Contact Freezing)

も起こりうる[Hoose and Möhler, 2012; Murray et al., 2012; Kanji et al., 2017]。さらに, 混相雲内の氷晶が 分裂して飛び散ると, そのかけらも氷晶核として有効 に機能すると考えられている[Field et al., 2017]。

氷晶核として働く微粒子が雲内に全く存在しない 場合は、約-35℃~0℃の間では、氷晶を含まない 過冷却水滴のみを含んだ雲が形成されることになる (図 1a)。このような雲は、数多くの雲粒(過冷却水滴) によって構成されているため、光学的には厚い雲に なる。しかし、氷晶核として働く微粒子がごく少量でも 存在する場合は、雲内に氷晶も形成される(図 1b)。

混相雲の中では、氷晶の方が過冷却水滴よりも熱 力学的には安定した状態にある。0℃以下では、「氷 面に対する飽和水蒸気圧」の方が「過冷却水に対す る飽和水蒸気圧」よりも低いことから、混相雲内での 「氷面に対する相対湿度」は「過冷却水に対する相 対湿度」よりも高くなるからである。よって、氷晶は周 囲から水分を奪うことで、より大きな結晶へと成長し、 逆に過冷却水滴は消費されていく。このような過程は、 Bergeron-Findeisen(あるいは Wegener-Bergeron-Findeisen)プロセスと呼ばれている[Korolev, 2007; Korolev and Field, 2008]。その結果、混相雲は光学 的には薄くなり、大きくなりすぎた氷晶は、大気中から 降雪や降雨の形で除去されることから、雲の寿命も 短くなると考えられる(図 1c)。

通常, 雲凝結核として働く微粒子は, 大気中に約 10~1,000 個 cm⁻³(10,000~1,000,000 個 L⁻¹)の濃度 で存在すると言われている。一方, 氷晶核として働く 微粒子の濃度は, 場所や温度などによっても異なる が, 雲凝結核として働く微粒子に比べると何桁も低い (図 2)。したがって, 約-35℃~0℃の温度では, 氷 晶のみで構成される光学的に厚い雲が作られること は現実的には考えにくい。しかし, 混相雲の微物理 は, 氷晶核として働く微粒子の量によって大きく変動 し, ある一定の量を上回ると, Bergeron-Findeisen プロ セスが強力に働くことで, 氷晶を多く含んだ雲(図 1c) へと急速に変換されることが示されてきている[*Prenni*



図 2 大気中における雲凝結核(CCN)や氷晶核(INPs) として働く微粒子の濃度分布。INPs の濃度は,世界の各 地(主に北米とヨーロッパ)で報告されてきている観測値 の範囲をまとめたもの[Petters and Wright, 2015]。

et al., 2007; *Vergara-Temprado et al.*, 2018]。よって, 氷晶核として働く微粒子の存在は, ごく微量であって も, 混相雲の雲の光学的特性や寿命などに非常に 大きな影響を及ぼすことになる。

4. 極域混相雲で氷晶核として働くエアロゾル

混相雲は,地球上のあらゆるところで形成されてい る。例えば,日本国内で降る雨であっても,氷点下で 形成された氷晶が落下中に溶けて雨になっているも のがほとんどである。しかし,これまでの氷晶核として 働くエアロゾル粒子に関する科学的知見は,室内実 験や数値実験,北米やヨーロッパの一部の地域での 大気観測等に基づいたものが中心であるため,それ 以外の地域でも,様々なアプローチによって氷晶核 の研究が推進されることは非常に重要である。

極域の下層大気(上空数百メートル〜数キロメート ル)では、年間を通して低温であることから、混相雲 が頻繁に発生しており、極域の気候に非常に大きな 影響を及ぼしている。しかしながら、熱力学的に不安 定である混相雲が、どのようなプロセスにより、極域の 下層大気中での発生〜消失を繰り返すのかは、未だ によくわかっていない[Morrison et al., 2012]。 氷晶の存在は,極域混相雲の発生から消失まで の微物理過程を考える上で,重要な役割を果たして いる。極域混相雲内の氷晶は,氷晶核として働くエア ロゾル粒子の影響を受けて作られているはずだが, それらの濃度や発生源などについてはまだわかって いないことが多い。極域での氷晶核に関する調査研 究は,その重要性が認識されている一方で,あまり進 んでいなかった。それが近年になり,氷晶核の計測 手法の開発や改良が進んだこともあり,多くの研究者 が極域での氷晶核研究を推進するようになってきつ つある。ここでは,極域下層大気における氷晶核研 究の最近の動向を紹介する。

氷晶核として働くエアロゾル粒子の正体は,氷晶 の形成に適した表面構造を有する固形の物質だとさ れている。極域の大気環境中でみられる固形の物質 として、着目されているものの1つに、海洋起源の非 水溶性の有機粒子がある。海洋表面には,海面ミク ロ層 (Sea Surface Microlaver) などと呼ばれる有機物 を豊富に含んだ薄い膜(厚さが数ミクロン~数百ミク ロンの膜)があることが知られている。この海面ミクロ 層からは、海塩粒子や水溶性の有機粒子以外にも、 海洋微生物の死骸や分泌物などに由来する非水溶 性の有機粒子が大気中へと放出されている「O'Dowd et al., 2004; Leck and Bigg, 2005]。それらはある程度 の氷晶核としての能力を有していることから, 極域に おける氷晶核として働くエアロゾル粒子の供給源の1 っだと考えられている[Wilson et al., 2015; DeMott et al., 2016; McCluskey et al., 2017]。また, 低~中緯度 の乾燥地帯から極域へと長距離輸送される鉱物粒子 も、氷晶核として働くエアロゾル粒子の供給源になっ ていることが示唆されている[Wilson et al., 2015; *Vergara-Temprado et al.*, 2018].

このように、極域の大気環境中でみられる氷晶核と して働くエアロゾル粒子の供給源としては、「海面ミク ロ層から放出される有機粒子」と「低~中緯度起源の 鉱物粒子」の2つを中心に考えられてきていた。しか し、ごく最近になり、北米、スヴァールバル諸島、グリ



図 3 人工衛星に搭載された MODIS により撮影された アラスカのアウトウォッシュ・プレーンから発生するダスト (https://earthobservatory.nasa.gov/images/40973/glacia I-dust-off-alaska)。

ーンランドなどの北極圏の陸域で実施された調査では、大気中の氷晶核の濃度が、夏季には上記の2つの供給源のみでは説明がつかないほど大幅に上昇することが明らかになってきた[Creamean et al., 2018; Irish et al., 2019; Tobo et al., 2019; Wex et al., 2019]。

夏季に積雪が融解して地面が露出すると,北極圏 の陸域からはダスト粒子(主に鉱物で構成される土壌 などに由来する固体微粒子)が発生することが報告さ れてきている(図 3)。特に,アウトウォッシュ・プレーン (氷河末端から流れだす網状の流路をもつ水流によ り、氷河の前面に形成される扇状地状の堆積平野地 形)には,植生がほとんどなく,氷河の浸食作用によ って細粒化された微粒子を多く含んでいることから, 北極陸域から発生するダスト粒子の主な供給源にな っていると言われている[Bullard et al., 2016]。

そこで筆者らが、スヴァールバル諸島のアウトウォ ッシュ・プレーンから発生するダスト粒子を対象とした 調査をしたところ、低~中緯度の乾燥地帯から発生 する鉱物粒子と比較して、氷晶核としての能力がか なり高いことが明らかになった[Tobo et al., 2019]。ま た、アウトウォッシュ・プレーン起源のダスト粒子の鉱 物組成は、低~中緯度で発生する鉱物粒子の組成 と大きな違いはなかったが、それ以外にもごく微量な がら、氷晶核としての能力が極めて高い有機物を含 んでいることがわかった。さらに、夏季のスヴァールバ ル諸島で実施した大気観測では、スヴァールバル諸 島内で発生したダスト粒子の影響により、氷晶核とし て働くエアロゾル粒子の濃度が、冬季に比べて約 1 桁も増加していたことが確認された[Tobo et al., 2019]。

上記の知見は、スヴァールバル諸島での調査研究 に基づくものであるが、それ以外の北極陸域や南米 のパタゴニアなどからも夏季にはダスト粒子が発生し ていることを考慮すると[Bullard et al., 2016]、これま ではさほど着目されていなかった「北極陸域から発生 するダスト粒子」も、氷晶核として働くエアロゾル粒子 の重要な供給源となっていることが推測される。

5. おわりに

本稿では, 混相雲が形成される大気条件下(温度 が約-35℃~0℃, 過冷却水に対する相対湿度が 100%以上)において氷晶核として働くエアロゾル粒 子について解説してきた。研究事例としては, 極域で の氷晶核の研究についての最近の動向を中心に紹 介してきた。現状の極域における氷晶核に関する研 究事例は, まだ限られている状況だが, 今後数年以 内に MOSAiC(https://www.mosaic-expedition.org/) などの大型の国際共同観測研究プロジェクトが極域 ではいくつも計画されていることから, 氷晶核に関し ても数多くの知見が得られることが期待される。

例えば、今後、温暖化が進行し、積雪の融解や氷 河の後退が進むと、北極陸域では地面が露出する面 積と期間が増えて、北極陸域からの氷晶核として働く エアロゾル粒子の発生量も増えることが予測される。 現在、北極圏で急速に進行しているとされる温暖化 の影響によって、大気中の氷晶がどのように変動し、 さらに北極圏上空の雲の放射特性や寿命などにどの ような影響があらわれるのかを詳しく理解することは、 今後の重要な課題になるかもしれない。

6. 参考文献

- Bullard, J. E., et al. (2016), High-latitude dust in the Earth system, *Rev. Geophys.*, 54, 447-485.
- Creamean, J. M., et al. (2018), Marine and terrestrial influences on ice nucleating particles during continuous springtime measurements in an Arctic oilfield location, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 18023-18042.
- de Boer, G., H. Morrison, M. D. Shupe, and R. Hildner (2011), Evidence of liquid dependent ice nucleation in high-latitude stratiform clouds from surface remote sensors, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01803.
- DeMott, P. J., et al. (2016), Sea spray aerosol as a unique source of ice nucleating particles, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 113, 5797-5803.
- Field, P. R., et al. (2017), Secondary ice production: Current state of the science and recommendations for the future, *Meteorol. Mono.*, 58, 7.1-7.20.
- Hoose, C., and O. Möhler (2012), Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: A review of results from laboratory experiments, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 9817-9854.
- Irish, V. E., et al. (2019), Ice nucleating particles in the marine boundary layer in the Canadian Arctic during summer 2014, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 1027-1039.
- Kanji, Z. A., et al. (2017), Overview of ice nucleating particles, *Meteorol. Mono.*, 58, 1.1-1.33.
- Korolev, A. (2007), Limitations of the Wegener–Bergeron– Findeisen mechanism in the evolution of mixed-phase clouds, J. Atmos. Sci., 64, 3372-3375.
- Korolev, A., and P. R. Field (2008), The effect of dynamics on mixed-phase clouds: Theoretical considerations, J. Atmos. Sci., 65, 66-86.
- Leck, C., and E. K. Bigg (2005), Source and evolution of the marine aerosol—A new perspective, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19803.
- McCluskey, C. S., et al. (2017), A dynamic link between ice nucleating particles released in nascent sea spray aerosol

and oceanic biological activity during two mesocosm experiments, *J. Atmos. Sci.*, 74, 151-166.

- Morrison, H., et al. (2012), Resilience of persistent Arctic mixed-phase clouds, *Nat. Geosci.*, 5, 11-17.
- Murray, B. J., D. O'Sullivan, J. D. Atkinson, and M. E. Web (2012), Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets, *Chem. Soc. Rev.*, 41, 6519-6554.
- O'Dowd, C. D., et al. (2004), Biogenically driven organic contribution to marine aerosol, *Nature*, 431, 676-680.
- Petters, M. D., and T. P. Wright (2015), Revisiting ice nucleation from precipitation samples, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 8758-8766.
- Prenni, A. J., et al. (2007), Can ice-nucleating aerosols affect Arctic seasonal climate?, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 541-550.
- Tobo, Y., et al. (2019), Glacially sourced dust as a potentially significant source of ice nucleating particles, *Nat. Geosci.*, 12, 253-258.
- Vali, G., P. J. DeMott, O. Möhler, and T. F. Whale (2015), Technical Note: A proposal for ice nucleation terminology, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 10263-10270.
- Vergara-Temprado, J., et al. (2018), Strong control of Southern Ocean cloud reflectivity by ice-nucleating particles, *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 115, 2687-2692 (2018).
- Westbrook, C. D., and A. J. Illingworth (2011), Evidence that ice forms primarily in supercooled liquid clouds at temperatures >-27 °C, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L14808.
- Wex, H., et al. (2019), Annual variability of ice-nucleating particle concentrations at different Arctic locations, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 5293-5311.
- Wilson, T. W., et al. (2015), A marine biogenic source of atmospheric ice-nucleating particles, *Nature*, 525, 234-238.

原稿受領日: 2019 年 6 月 10 日 掲載受理日: 2019 年 7 月 4 日

著者所属:

- 1. 国立極地研究所
- 2. 総合研究大学院大学 複合科学研究科
- * 責任著者:
- Yutaka Tobo <tobo.yutaka@nipr.ac.jp>

降水雲の過飽和度を観測から制約する:エアロゾル 空間分布の予測のために

Importance of observational constraint of in-cloud supersaturation for

simulations of atmospheric aerosols

茂木信宏¹*, 森樹大², 松井仁志³, 大畑祥^{4,5}

地球大気エアロゾルの中でも、直接効果と間接効果の両者で主要な影響をもつ粒径範囲の微粒子は、 主に、湿潤対流において雲粒化を介し降水に取り込まれることで大気から除去されています。そのた め、エアロゾル濃度の空間分布と放射強制力を数値シミュレーションで正しく算出するためには、少な くとも、その大気からの除去率を大局的に決めている、「湿潤対流に伴う凝結水生成率」および、「エア ロゾル粒子の臨界過飽和度」、「降水雲の過飽和度」という3つの物理量を、全球大気モデルの中で正 しく算出または仮定できるようにすることが必要です。本稿では、これら3つの物理量の中でも先行研 究がほとんどない、「降水雲の過飽和度」を観測的に推定する新たな手法を紹介し、東アジア域の降 水雲への適用結果を示します。また、エアロゾルの空間分布の正確な予測には降水雲の過飽和度の 観測的制約が重要であることを、数値シミュレーション結果にもとづいて述べます。

1. はじめに

雨上がりに大気が澄みわたることからも感じとれるように,降水雲は,大気のエアロゾルを捕捉して除去している自然界の空気清浄機です。

ところで,室内用の空気清浄機によるエアロゾル除 去率(単位時間当たりの除去個数)は,

(1)除塵フィルターを通過する空気流量

(2)除塵フィルターの粒子捕捉効率

に比例します。ただし粒子捕捉効率は,

(2-1)除塵フィルターを通過する粒子の大きさ

(2-2)除塵フィルターの目の細かさ

で決まります。フィルターの目よりもサイズが大きな粒 子が捕捉されるのです。

これに対して、降水雲によるエアロゾル除去率は、

(1)湿潤対流における凝結水生成率

(2)凝結水によるエアロゾル粒子の補足効率

に比例します。ここで凝結水による粒子の捕捉は,主 に,過飽和状態の水蒸気が粒子へ凝結する雲粒活 性化を介して起こり,その活性化が起こるか否かは,

(2-1)エアロゾル粒子の臨界過飽和度

(2-2) 雲の過飽和度

という2つのパラメータの大小関係で決まります。 雲の 過飽和度よりも臨界過飽和度が小さな粒子が凝結水 に捕捉されるのです。

本稿では、大気が備えている除塵フィルターの目 の細かさに相当するパラメータである「降水雲の過飽 和度」を測る方法について私たちの研究成果を紹介 します。さらに、降水雲の過飽和度の観測データの 重要性を全球エアロゾルモデルを用いた感度実験に より示唆します。

本記事は,主に拙著 Moteki et al. [2019]の内容を 日本語で抜粋・加筆したものです。

2. 背景

地球大気エアロゾルのうち,放射の直接効果および間接効果に影響をもつのは主に累積モードと呼ばれる粒径範囲 0.1~2µm の微粒子です。対流圏中の人為起源あるいはバイオマス燃焼起源のエアロゾルの質量の大部分は累積モードの粒径範囲に属しています。累積モード粒子は重力沈降速度や雲粒・雨粒との衝突併合効率が小さいため,対流圏中の主要な除去過程は,水蒸気の過飽和環境での雲粒化を介する降水粒子への取り込みです[Croft et al., 2010; Flossmann and Wobrock, 2010]。本稿では,エアロゾルとして累積モード粒子にのみ言及します。

ある気柱におけるエアロゾル除去率は,凝結水生 成率(すなわち降水量)と,エアロゾルが凝結水に取 り込まれる割合という,2つの因子の積に比例します。

気柱の凝結水生成率は,気柱境界を通したエネ ルギー・水蒸気収支から直ちに推算でき,また雨量 計や降雨レーダーで観測可能です。

エアロゾルが凝結水に取り込まれる割合は,エアロ ゾル粒子の臨界過飽和度と, 雲の過飽和度で決まり ます。エアロゾルの臨界過飽和度は観測可能であり, 粒径や組成からも推算可能です[Petters and Kreidenweis, 2007]。全球大気モデルの中でエアロゾ ルの臨界過飽和度の予測計算も現実的になりつつ あります。一方,雲の過飽和度は,流体と粒子の相互 作用下で一過的・局所的に生じる非平衡状態の度合 いであり,実大気の降水雲について正確な理論計算 を実行することは極めて困難と考えられます [Hammer et al., 2015; Planche et al., 2010]。これまで 降水している雲の中の過飽和度を観測する手段はな く,海洋上の層積雲といった比較的単純な非降水性 の雲の観測[Martin et al., 1994 など]にもとづく経験 的目安として 0.1~1%という範囲の値が(モデルの感 度実験などで)想定されてきました[Oshima and Koike, 2013; Riemer et al., 2010]。しかし, 0.1%という下限値 に強い根拠はなく、それよりも小さなほぼゼロの過飽 和度も雲の中では生じているはずです。0~1%という

過飽和度の範囲で累積モードのエアロゾルが凝結水 に取り込まれる割合はほぼ 0%からほぼ 100%まで変 わってしまうため、この不確実幅はエアロゾル除去率 の予測において深刻な問題です。これを解決するよ い方法がないため、現在の大気モデルの多くでは、 雲の中でエアロゾルが凝結水へ取り込まれる割合を、 物理法則にもとづいて予測するのではなく、調節パラ メータとして扱っています[Lund et al., 2018 など]。

このように、大気からのエアロゾル除去率を本質的 に決めている因子のなかでも降水雲の過飽和度は、 これまでその困難さゆえに手に負えなかった研究課 題であるといえます。

3. 過飽和度を記録したトレーサー

物理学者の中谷宇吉郎(1900-1962)は、雪の結 晶に上空の気象情報が記録されていることを「雪 は天からの手紙」という言葉で表しました。実は, 雲から雨滴に含まれて落ちてくる小さな黒色炭 素(すす)粒子もまた天から送られた手紙の一つ であり、その手紙からはまさに私たちが知りたい 「降水雲の過飽和度」を解読できるのです。一般 に,自然科学研究において,何か有用な情報をど こかで記録し輸送中でもその情報を保存してい る観測可能な記憶媒体のことを「トレーサー」と 呼びます。雪の結晶は、上空の気象情報を記録し それを保存したまま地表に届き、光学顕微鏡で観 測できることからトレーサーといえます。私たち は,大気中および降水中に含まれる黒色炭素粒子 の測定技術を開発し[Mori et al., 2016], さらに黒色 炭素粒子が水中で安定であり過飽和度を記録し ていることの発見を経て[Ohata et al., 2016], 黒色 炭素粒子をトレーサーとする雲中過飽和度の推 定法を開発しました [Moteki et al., 2019]。トレー サーに必要な観測可能性,保存性,記録情報の復 元可能性,という3条件を全て肯定的に実証する のに約7年を費やしています。



図1 黒色炭素粒子をトレーサーとした,降水雲の中の水蒸気凝結領域(Localized Supersaturated Domain)の過飽和度 SS_{lsd} の推定法の説明図。地上空気中の初期トレーサーと地上で採取した降水に含まれる除去されたトレーサーを同時に観測し て両者を比較することで,除去されたトレーサーが LSD の中で雲粒化時に経験した過飽和度 SS_{lsd}を推定する。実際の降水 雲は連続的に分布した LSDを含むが,本説明図では簡単のため,離散的に分布したn個の LSD として描いている。各降水 イベントについて,降水採集時間(数分~数十分)の間に観測場所上空を通過した複数の水蒸気凝結領域 LSD^k (k = 1, ...,n)にわたり,検出された除去トレーサーの個数で重み付けされた過飽和度 SS_{lsd}の平均値が得られる。すなわち,降水雲 で除去されたエアロゾル粒子が実際に経験した過飽和度(除塵フィルタの目の細かさ)について,現在の全球・領域大気モデ ルの時空間刻み幅と同じ程度に大きい時空間領域での代表値が推定される [*Moteki et al.*, 2019 の Fig.1 を改訂]。

過飽和度の推定法を図1に示します。降水開 始前に地上付近の大気に存在する黒色炭素粒子 (初期トレーサー)と、降水に含まれて雨雲から 除去された黒色炭素粒子(除去トレーサー)の粒 径分布を比較することで、トレーサー粒径ごとの 相対除去効率を求めます。同時に、降水開始直前 の大気に存在したトレーサー含有粒子の臨界過 飽和度分布を微物理・化学的なパラメータの観測 から推算しておきます。トレーサー粒径ごとに, 相対除去効率と臨界過飽和度分布を比較するこ とで,各トレーサー粒径をもつエアロゾル粒子が 雲粒化したときの過飽和度 SS_{lsd} を推定すること ができます。実際、私たちが観測した多くの降水 イベントでのトレーサー除去効率の粒径依存性 は,地上空気中のトレーサー含有粒子がある特定 の SS_{lsd} 値を経験した場合の雲粒化割合の粒径依 存性とよく一致していました[Ohata et al., 2016; Moteki et al., 2019]。降水雲は大きく分けて,対流

圈下層の水蒸気収束に伴う対流性のものと,対流 圏中層の水蒸気収束に伴う層状性のものがあり ます[Houze, 1997]。本研究で開発した過飽和度推 定法はその前提条件から対流性の降水雲にのみ 適用可能です。

4. 観測結果

本研究では、東京(夏季)と沖縄(春季)にお ける計 37回の降水イベントについて、地上での 大気中の黒色炭素粒子と、地上で採取された降水 中の黒色炭素粒子の同時観測を実施し、そのうち 相対的に対流性の強い 23回のイベントも抽出し て過飽和度推定を実施しました(図2)。全イベン トの結果(a)に比べて、対流性の降水イベント の結果(b)では、トレーサー粒径に依存した SS_{lsd} 推定値の系統差が小さく、より信頼性の高い推定 ができていることが示唆されます。上記 23回の 対流性の降水イベントの結果から、降水雲の過飽 和度の平均±標準偏差は 0.08±0.03%と導出され ました。今回の観測結果から,大気の除塵フィル ターの目の細かさに相当するパラメータである 降水雲の過飽和度の自然変動幅は,これまでに信 じられていた不確実幅 0~1%よりもずっと小さい ことが示唆されました。

5. 過飽和度制約の重要性

さらに, エアロゾルの粒径・混合状態・臨界過 飽和度の分布を予測計算できる全球大気モデル (CAM5-ATRAS2) [Matsui, 2017]を用いて, 黒色炭 素濃度の全球分布が「雲の過飽和度の仮定値」に どの程度影響されるのか調べる感度実験を行い ました。その結果、今回の観測データの平均±標 準偏差(0.08±0.03%)の範囲内の過飽和度の変化 により,発生源から離れた場所(たとえば北極圏) の黒色炭素の質量濃度は2~3倍も変わりうること が分かりました[Moteki et al., 2019]。これはエイジ ングがあまり進んでいない(臨界過飽和度が比較 的大きい)黒色炭素粒子が高濃度で存在する発生 源近傍(例えば東アジア域など)において、湿潤 対流に伴うそれらの粒子の鉛直輸送効率(除去効 率)が、雲の過飽和度の仮定値(0.05~0.11%)に 依存して顕著に変わることによります。この感度 実験から,黒色炭素のように発生時に疎水性のエ アロゾルの長距離輸送の正確な予測のためには, 発生源近傍における降水雲の過飽和度を正確に 決めることが重要であることが示唆されました。

6. 今後の方向性

大気モデルによるエアロゾル濃度の空間分布 の予測性能を向上させるためには,降水雲でのエ アロゾル除去率を支配している凝結水生成率,エ アロゾル粒子の臨界過飽和度,降水雲の過飽和度 という3つの因子それぞれについて,より正確な 予測計算をするか,より現実的な仮定値を与える 必要があります。

凝結水生成率については,大気力学モデルの高 解像度化および検証に用いる降水観測データの 充実に伴い,その時空間分布の予測性能は今後も 向上していくことが見込まれます。

エアロゾル粒子の臨界過飽和度スペクトルの 時空間分布については,エアロゾルの化学的特性 の理解の精密化と,その知見を反映したエアロゾ ルモデルの進展に伴い,今後も向上していくこと が期待されます。

一方で,降水雲の過飽和度については,正確な 予報計算ができるようになる見込みはほとんど



図 2 各降水イベントにおける,降水雲の過飽和度 SS_{lsd}(横軸)と空気塊中のトレーサーの除去割合の推定値(O:東京, Δ:沖縄)。(a), (b)はそれぞれ全降水イベント(37 回),対流性の降水イベント(23 回)の結果。中塗り丸印とエラーバーは中央 値と±25 パーセンタイル範囲 [Moteki et al., 2019 の Fig.3 を改訂]。

ないため、私たちができることは、より現実的な 仮定値を断片的な観測的証拠から導き出すこと だけです。本研究で開発した降水雲の過飽和度の 推定法は、この方向の研究を推進していくために 有効な道具の一つです。

本研究の次の段階として,降水雲の特性を把握 するためのレーダー観測と組み合わせ,様々な季 節や場所で過飽和度の観測データを取得するこ とが必要と考えています。

6. 謝辞

本研究の推進に継続的に助力いただきました東京 大学の小池真准教授に感謝いたします。観測で助 力頂きました国立環境研究所の高見昭憲博士に感 謝いたします。また議論していただいた東京大学の 鈴木健太郎准教授,三浦裕亮准教授,気象庁気象 研究所の大島長博士に感謝いたします。

7. 参考文献

- Croft, B. et al. (2010). Influences of in-cloud aerosol scavenging parameterizations on aerosol concentrations and wet deposition in ECHAM5-HAM. *Atmos. Chem. Phys.*, 10(4), 1511-1543.
- Flossmann, A. I., and W. Wobrock (2010). A review of our understanding of the aerosol-cloud interaction from the perspective of a bin resolved cloud scale modelling. Atmospheric Research, 97(4), 478-497.
- Hammer, E. et al. (2015). Sensitivity estimations for cloud droplet formation in the vicinity of the high-alpine research station Jungfraujoch (3580 m asl). *Atmos. Chem. Phys.*,15(18), 10309-10323.
- Houze Jr, R. A. (1997). Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox?. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78(10), 2179-2196.
- Lund, M. T. et al. (2018). Short Black Carbon lifetime inferred from a global set of aircraft observations. *npj Climate Atmos. Sci.*, 1(1), 31.

- Martin, G. M., D. W. Johnson, and A. Spice (1994). The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 51(13), 1823-1842.
- Matsui, H. (2017). Development of a global aerosol model using a two - dimensional sectional method: 1. Model design. J. Adv. Model. Earth Sy., 9(4), 1921-1947.
- Mori, T., et al. (2016). Improved technique for measuring the size distribution of black carbon particles in liquid water. *Aerosol Sci. Technol.*, 50(3), 242-254.
- Moteki, N., T. Mori, H. Matsui, and S Ohata (2019), Observational constraint of in-cloud supersaturation for simulations of aerosol rainout in atmospheric models, *npj Climate Atmos. Sci.*, 2(6), doi: 10.1038/s41612-019-0063-y.
- Ohata, S., N. Moteki, T. Mori, M. Koike and Y. Kondo (2016). A key process controlling the wet removal of aerosols: new observational evidence. *Sci. Rep.*, 6, 34113.
- Oshima, N., and M. Koike (2013). Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models. *Geosci. Model Dev.*, 6(2), 263-282.
- Petters, M. D., and S. M. Kreidenweis (2007). A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, 7(8), 1961-1971.
- Planche, C. et al. (2010). The influence of aerosol particle number and hygroscopicity on the evolution of convective cloud systems and their precipitation: A numerical study based on the COPS observations on 12 August 2007. *Atmos. Res.*, 98(1), 40-56.
- Riemer, N., M. West, R. Zaveri, and R. Easte (2010). Estimating black carbon aging time-scales with a particle-resolved aerosol model. *J. Aerosol Sci.*, 41(1), 143-158.

原稿受領日: 2019年5月23日 掲載受理日: 2019年6月17日

著者所属

1. 東京大学 大学院理学系研究科

- 2. 東京理科大学 理学部
- 3. 名古屋大学 大学院環境学研究科
- 4. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所
- 5. 名古屋大学 高等研究院

* 責任著者:

Nobuhiro Moteki <moteki@eps.s.u-tokyo.jp>

ブルーヘイズについて

横内陽子1*

「ブルーヘイズ(blue haze)」は森の中の青い靄とし て知られている。今から約60年前にアメリカ合衆国の F. W. Went博士が「植物が放出するテルペン類が大 気中で光化学反応を受け、微細な粒子を生成して青 い光を散乱するのがブルーヘイズである」と報告した [Went, 1960]。風のない晴れた夏の日の田園地帯に 広がる靄(もや)や遠くの山々が青く見える現象がこ れであるとした。しかし、山の青さは見る人との距離に よって変わり、間にある空気中の分子や微小粒子に よる散乱で説明されてしまう。筆者は長い間、この青 い靄を間近に見たいものだと思っていたが、森を歩 いてブルーヘイズに会うことはなかった。最近、関西 在住のある人から気象条件によっては針葉樹の林で 青い靄が見えることがあると教わった。現地に行って みると、斜面で上方から陽が射しこむ位置にあった。 その日はあいにく見られなかったが、確かに、微弱な 青い光を観るためには背景が暗くなくてはならないと この時気づいた。

そして、昨年春、早朝のミツマタと光芒の撮影に出 かけたとき、青みがかった光芒を目にした。これが下 の写真である。テルペン類を多量に放出する杉林、 暗い背景の手前に射しこむ光、無風、まさに「ブルー ヘイズ」が現れる条件が整っていたのだ。

この時,ブルーを散乱した微小粒子の正体は,テ



森に射す青い光芒(栃木県焼森山, 2018年3月)。

ルペン類の光化学反応ではなく、オゾンとの反応に よってできたものであろう。時刻は午前8時前,陽は 昇ったばかりで光化学反応は進んでいない。それよ り夜も 30ppb 程度の濃度で存在するオゾンとテルペ ンの反応による生成物が静かな夜の間に,森の中に 溜まっていたのだろう。昼になればそれに光化学反 応が加わるが,太陽が高くなり,もはや弱々しい青は 明るい光に隠れてしまう。

参考文献

Went, F. W. (1960), Blue hazes in the atmosphere, *Nature*, No. 4738, 641-643.

著者所属:

- 1. 国立環境研究所(名誉研究員)
- * 責任著者:

Yoko Yokouchi <yoko99@maple.ocn.ne.jp>

書評『詳解 大気放射学 - 基礎と気象・気候学への応用 -』

竹川 暢之¹*

【書籍名】

詳解 大気放射学 - 基礎と気象・気候学への応用 -

Grant W. Petty 著, 近藤 豊, 茂木 信宏 訳 ISBN978-4-13-062729-0 東京大学出版会 (定価 8,800 円)

大気化学の研究者であれば,大気成分と気候の 関わりについて,論文や総説等の冒頭部分で触れる ことがあると思われる。例えば,「二酸化炭素やメタン は温室効果気体として重要である」や「エアロゾルは 太陽光を散乱・吸収し日射に影響を与える」等の文 章である。これらの事象について,大気の放射伝達 がその核心部分であることは言うまでもない。しかしな がら,数学的な難しさもあり,放射伝達の本質的な理 解は容易ではない。上述の平易な例文でさえ,その 意味を正しく解釈するには相当の知識を要する。

大気の放射伝達を専門的に扱った日本語の教科 書は意外に限られており、学部生や大学院生にとっ て大きなハードルになっているように感じられる。私 自身は大学で大気化学関連の講義を担当している が、教科書が充実していることは体系的な講義を行う 上で大変重要なことである。本書は、付録を含めて 400 ページ程の大変ボリュームのある教科書であり、 日本語ではあるが完全に読破するには相応の覚悟 がいるかもしれない。一方で、大気の放射伝達に関 する重要な事項が論理的かつ明確に記されており、 数式の展開も丁寧に書かれているので、当該分野を 系統的に勉強するには大変有用であろう。本書は概 ね以下の内容で構成されている。

第 1~6 章: 序論, 電磁波の基礎, 熱放射 第 7~10章: 大気の放射伝達, 気体による吸収

第11~13章: 粒子による散乱・吸収

本書のねらいは、大気放射伝達の物理・化学メカニ ズムについて、できるだけ原理・原則に遡って解説す ることであると理解している。それぞれの章は、一般 原理に関する説明と、気象・気候・リモートセンシング における応用が対になって構成されている。このため、 大気の諸現象や計測技術の仕組みについて、最終 的に「なるほど」と感じる工夫がなされている。この「腑 に落ちる」感覚は、学生はもちろん研究者にとっても 非常に重要なものである。

まえがきによれば、本書はウィスコンシン大学にお ける半年分の講義を想定して書かれているようである。 ただし、演習問題等を含めてこれを半年でこなすの はやや大変かもしれない。仮に私が本書の内容に沿 って講義を行うとすれば、学部生向けと大学院生向 けに分けて教えるのがよいのではないかと思う。特に、 第11~13章は学部生にはやや難しいと推察される。 あるいは、大気物質科学全体を俯瞰したような講義 において、必要に応じて辞書的に使う活用方法も考 えられる。余談ではあるが、本書を含め最近の教科 書は重要事項が太字や枠などでハイライトされるなど、 大変分かりやすい表記になっているものが多い。これ も時代の流れだろうか。

大気化学者にとって大気放射学との関わり方は人 それぞれであるが、多様な大気成分が気候に及ぼす 影響の解明は、大気化学分野が目指す重要な目的 の一つである。学生の皆さんにとってはやや高額か もしれないが、それだけの価値はあると思われるので、 一度手にとって眺めてみることをお薦めする。

- 1. 首都大学東京 大学院理学研究科
- * Nobuyuki Takegawa <takegawa@tmu.ac.jp>

第24回大気化学討論会開催のお知らせ

角皆 潤¹*,長田和雄¹,須藤健悟¹,中川書子¹,永尾一平¹,松井仁志¹, 神沢 博¹,柴田 隆¹,持田陸宏²,大畑 祥²,水野 亮²,長濱智生²

第24回大気化学討論会を、愛知県蒲郡市の三谷 温泉「ホテル明山荘」にて開催いたします。2018年は iCACGP-IGAC が国内開催となったため、大気化学 討論会は、2年ぶりの開催となります。2013年11月 に石川県七尾市の和倉温泉で開催された第19回以 来、久しぶりに合宿形式による大気化学討論会を企 画いたしましたので、是非ともご参加下さい。

本討論会は、学生からシニアまで大気化学に関連 する研究者が一堂に会して自由な雰囲気の中で活 発な学術交流を行い、また相互の親睦も深めることを 目的として 1995 年から開催されています。歯に衣着 せない議論の応酬は、本討論会の伝統です。さらに 今後の研究計画立案や、海外の研究動向に関する 情報交換なども行われます。

発表形式は口頭発表(20 分程度)およびポスター 発表となります。口頭発表の講演時間等,詳細は決 まり次第,下記の第 24 回大気化学討論会ホームペ ージに掲載するとともに,日本大気化学会のメーリン グリストにてご連絡します。

主催:日本大気化学会,名大宇宙地球環境研究所 会場・宿泊:三谷温泉「ホテル明山荘」(愛知県蒲郡 市三谷町鳶欠 14-1,東海道本線「三河三谷駅」より シャトルバス運行予定)

日程: 2019年11月5日(火)午後~7日(木)午前 懇親会: 2019年11月6日(水)夕食時

発表・参加・宿泊申込: 下記 URL (第 24 回大気化学 討論会 Web サイト) 上で,発表申込・参加登録・予稿 提出・宿泊申込をしてください。

https://jpsac.org/symposium/24th-touronkai_2019/



三河湾に沈む夕陽と三谷温泉街。写真中央の建物が討論会の会場(ホテル明山荘)となります。

発表・参加申込受付開始: 2019 年 7 月 25 日 発表申込 / 切: 2019 年 9 月 25 日 発表予稿提出 / 切: 2019 年 9 月 25 日 事前参加・宿泊申込 / 切: 2019 年 9 月 25 日※1 プログラム公開: 2019 年 10 月 10 日 振込期限: 2019 年 10 月 17 日※2※3

※1 ×切日以降の参加・宿泊申込は当日扱いとなり, 宿泊費は申込日に依って変わります。また,宿泊の ご希望に添えない場合もございます。

※2 振込期限日以降は、振込まないで下さい。現金 払いを希望される方の受付けを当日設置いたします ので、そちらでお支払い下さい。

※3 学会の会員会費とは振込先が異なりますので、 ご注意下さい。

<u>全参加·宿泊費 (会員料金)</u> ※4 事前: 学生 25,000 円, 一般 32,000 円 (参加費 +2 泊5 食 + 懇親会費) ※5※6

参加費のみ (会員料金) ※4

事前: 学生 2,000 円, 一般 4,000 円

当日: 学生 3,000 円, 一般 5,000 円

(食費・懇親会費を含みません)

※4 大気化学会々員の方は参加登録の際に,必ず 会員番号をご記入ください。非学会員の方,あるいは 会員番号の記載がない方は、学生・一般ともに 1,000 円増となってしまいますので、ご注意下さい。なお、 会員資格について不明点がある方は、日本大気化 学会事務局 (jpsac-post@bunken.co.jp) にお問い合 わせください。討論会事務局にお問合せ頂いても対 応できません。

※5 部分参加も可能です。料金等の詳細は第 24 回 大気化学討論会 Web サイトを御覧下さい。

※6 各室 4 名程度の相部屋を予定しております。部 屋割りに関しては,事務局で決めさせて頂くことをあ らかじめご了承ください。なお,個室を希望される方 は別料金にて受け付けますので,御希望の方はお 早めにご連絡ください。

問い合せ先:〒464-8601 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院環境学研究科 物質循環科学講座角皆・中川研究室 第 24 回大気化学討論会事務局 E-mail: urumu@1

(@1は,@nagoya-u.jp に変えて下さい) 大会実行委員:角皆 潤 (委員長),長田和雄,須藤 健悟,中川書子,永尾一平,松井仁志,神沢 博, 柴田 隆 (以上,名古屋大学大学院環境学研究 科),持田陸宏,大畑 祥,水野 亮,長濱智生 (以 上,名古屋大学宇宙地球環境研究所)

プログラム委員:豊田栄(東京工業大、主担当),齋 藤尚子(千葉大),内田里沙(自動車研),中山智 喜(長崎大)

著者所属:

- 1. 名古屋大学 大学院環境学研究科
- 2. 名古屋大学 宇宙地球環境研究所

* 責任著者:

Urumu Tsunogai <urumu@1>

(@1 は, @nagoya-u.jp に変えて下さい)

JpGU2019「大気化学セッション」開催報告

中山智喜1*, 岩本洋子2, 豊田栄3, 江口菜穂4, 入江仁士5

日本地球惑星科学連合(JpGU)2019 年大会にお いて,5月29~30日の日程で「大気化学セッション」 を開催しました。昨年の59件を上回る67件(うち、招 待・受賞講演を含む)の講演申込みがあり、特に、海 外の研究機関所属の研究者による投稿が 12 件に増 加しました。その結果、口頭セッションのコマ数が、 昨年の5コマから6コマに増えました。発表者の希望 とセッション全体のバランスを考慮し、32件の口頭発 表と33件のポスター発表に編成しました。発表使用 言語の区分の改訂に伴い、大気化学セッションの 発表使用言語は「J」(スライド・ポスター表記お よび口頭発表の言語は,英語または日本語を発表 者が選択可)としましたが、多様な参加者が発表 内容を理解できるように、 スライドおよびポスタ ーの作成言語は英語として頂けるように呼びか けました。海外から参加者を含め、口頭セッショ ン・ポスターセッションともに多くの方に参加い ただき、活発な議論や交流が行われました。また、 学生優秀発表賞への応募も5件ありました。

今年も昨年に引き続き、講演時間 30 分の招待 講演枠を設け、飯塚芳徳さん(北海道大学)には 「アイスコアによる過去の大気エアロゾルの復 元とその変動要因」,平田竜一さん(国立環境研 究所)には「Effect of land use change on GHG fluxes of tropical peat forests in Borneo island」,野田響さん

(国立環境研究所)には「地球観測衛星による陸 域生態系炭素固定機能のリモートセンシング」, 前澤裕之さん(大阪府立大学)には「惑星大気 - 火 星・金星 -」について,導入から最新の研究成果, 今後の展望まで,丁寧に紹介いただきました。隣 接・周辺領域からの新しい視点での大気化学研究 に関するこれらの講演が,皆様の新しい研究の展 開につながれば嬉しく思います。また,昨年,日本で大気化学の国際会議が開催されたことに伴い,大気化学討論会がなかったため,岩本洋子さん(広島大学)および坂本陽介さん(京都大学)による 2018 年度日本大気化学会奨励賞の受賞記 念講演も行われました。

今年は初めての試みとして, 大気化学分野の大 学院進学者の増加を期待して、日本大気化学会の 紹介パンフレットを配布するとともに, 大気化学 分野の大学院への進学希望者を招待する企画を 実施しました。5名の学部4年生から応募があり、 全員が採択されました。本セッションを聴講する だけでなく、昼食会や懇親会で大気化学研究者と 交流することで,進路の選択に役立ててもらいま した。また、5月30日に開催された日本大気化学 会の会員集会において,今回の企画に参加して感 じたことや将来の目標について発表してもらい ました。企画に参加いただいた学生・研究者のい ずれにも好評であったことから, 来年も同様の企 画を実施する予定です。是非,お近くの学生に参 加を薦めて頂いたり,掲示板等にチラシを掲示頂 くなど、企画の周知にご協力頂けると幸いです。

大気化学セッションの締め括りに,昨年・一昨 年に引き続き懇親会が開催されました。30名以上 の方々にご参加いただき,和気あいあいとした雰 囲気のもと,交流を深めました。今年も,学生の 参加者が多く,研究者や他大学の学生と積極的に 交流する姿がみられました。

最後になりましたが、大気化学セッションにご参加 頂いた皆様に、深く御礼申し上げます。来年の大気 化学セッションにも、奮って投稿頂けますよう、 よろしくお願いいたします。



写真1 口頭発表会場の様子



写真4 懇親会の参加者の皆さん



写真 2 学部生招待企画の参加者と大気化学研究者の交 流昼食会

著者所属:

- 1. 長崎大学 大学院水産·環境科学総合研究科
- 2. 広島大学 大学院統合生命科学研究科
- 3. 東京工業大学 物質理工学院
- 4. 九州大学 応用力学研究所
- 5. 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター
- * 責任著者:

Tomoki Nakayama <t-nakayama@nagasaki-u.ac.jp>



写真 3 会員集会で感想や将来の抱負について発表する 学部生招待企画の参加者

2019 年度日本大気化学会奨励賞の候補者募集

日本大気化学会では下記の通り第15回(2019年度) 奨励賞の募集を行います。皆様からの推薦(自薦, 他薦を問いません)をお願い致します。日本大気化 学会事務局までメール(jpsac-post@bunken.co.jp)ま たは郵便でお送り願います。

募集要項

- 選考対象は大気化学の分野で優れた研究を行った本会会員(学生会員を含む)で、2019年4月1日現在で37歳以下の者。(※応募回数に制限はありません。過去の業績ばかりでなく将来性も含めて選考を行いますので、学生を含めた若い世代からの応募も歓迎いたします。)
- 2. 推薦資料は下記の事務局宛にメールまたは郵便で提出。

〒162-0801

東京都新宿区山吹町 358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局宛

e-mail: jpsac-post@bunken.co.jp

- 4 項目を含んだもので、A4 で 1 ページ程度の本文と、A4 で 3 ページ以内の業績 リスト(メールの場合は pdf ファイルにて添付)。
 - (1) 会員番号
 - (2) 略歴(年齢や推薦対象研究の実施との対応 が分かる程度の学歴・職歴など)
 - (3) 推薦対象とする研究課題名
 - (4) 推薦理由
- 4. 推薦資料提出の締め切りは 2019 年 7 月 31 日。

注)

- ・ 選考の段階で, 選考委員会から追加資料の提出を 求められた場合には, その指示に従って下さい。
- ・提出された資料は返却致しません。
- ・資料は奨励賞の選考以外には使用致しません。

受賞者は2019年11月の大気化学討論会の会員集 会において表彰する予定です。また、過去の受賞者 および大気化学会奨励賞に関する細則については、 日本大気化学会 HP 内の記事 https://jpsac.org/news/post2959/をご参照ください。

> 日本大気化学会 表彰委員長 豊田 栄

第 43•44 回日本大気化学会運営委員会議事録

第43回日本大気化学会運営委員会

日時:2019年2月19日(火)13:35~16:30 場所:ビデオ会議による開催 出席者(敬称略):谷本浩志、持田陸宏、入江仁士、 岩本洋子、江口菜穂、江波進一、金谷有剛、豊田栄、 中山智喜、永島達也、廣川淳、町田敏暢、森本真司、 笠井康子(オブザーバー)、関山剛(オブザーバー)

報告·審議事項

1) マスタープラン 2020 への研究計画の提案について

笠井康子会員より、「衛星を用いた全球地球観測シ ステムの構築」の研究提案の紹介が行われ、今後の 方針について議論がなされた。また、小池真会員に 代わって町田委員より「航空機観測による気候・地球 システム科学研究の推進」の研究提案の紹介があっ た。本研究提案に対する日本大気化学会の関与の 形などについて議論が行われた。

2) 会計·会員報告

町田委員から会員数や収支についての説明があった。

3) 将来計画ワーキングループの活動状況

学会ウェブサイトの更新や JpGU2019 に合わせた若 手とシニアの交流会の企画、ワークライフバランスの アンケート結果の取りまとめについての報告があった。 若手ショートコースの企画等の所管についての提案 や、大気化学討論会における保育支援の提案があり、 継続審議となった。また、討論会において女性研究 者の意見交換の場を企画するため、実行委員会と相 談したい旨の説明があった。

4) 学会誌「大気化学研究」の編集状況

関山会員より、iCACGP-IGAC2018 特集号の現状に ついて報告があった。江波委員より、第 40 号の発行 と、第 41 号の準備の予定について説明があった。

5) 2018 年度奨励賞の選考について

廣川委員より、2 名の受賞者が決定されたこと、 iCACGP-IGAC2018 国際会議のバンケットで受賞式 が行われたこと、受賞記念講演を JpGU 大気化学セ ッションの招待講演として実施予定であることなどに ついて説明があった。選考の体制などについて議論 がなされた。

6) 選挙制度改革について

金谷委員より選挙制度に関する会員向けウェブアン ケートの実施について提案が行われた。出席した委 員から、アンケート実施の方法や、運営委員の選出 方法に関して意見が出された。

7) JpGU 大気化学セッションの準備状況 中山委員より現状の報告が行われた。

8) 2019年開催の大気化学討論会について 豊田委員より現状の説明が行われた。大学院生の旅 費の支援について議論がなされた。

9) 学部生の大気化学討論会参加に対する支援に ついて

中山委員より趣旨の説明が行われ、対象とする学部 生などについて議論がなされた。そして、学生が参加 できる大気化学会の企画について議論を継続するこ ととした。学生への働きかけに関しては、JpGU に学 会としてブースを出すことについての議論も行われ た。 10) 大気化学若手ショートコースの開催について 谷本会長より説明が行われた。大学院生の旅費の支 援について議論がなされた。

11) 日本学術会議関連学協会への登録申請 登録の要件を満たしていることを確認し申請を進める こととなった。

12) その他

次回の運営委員会および会員集会、JpGU に合わせ て開催する懇親会の予定を決めた。

第44回日本大気化学会運営委員会

日時:2019 年 5 月 29 日(水) 18:30~21:00 (JpGU2019 大気化学セッション1日目)

場所:TKPガーデンシティ幕張 ヴィクトリー(アパホテ ル&リゾート東京ベイ幕張 48F)

出席者(敬称略):

(第10期運営委員)谷本浩志、持田陸宏、入江仁士、 岩本洋子、江波進一、金谷有剛、豊田栄、永島達也、 中山智喜、廣川淳(リモート)、町田敏暢、森本真司 (第11期運営委員)谷本浩志、内田里沙、金谷有剛、 齋藤尚子、関山剛、豊田栄、永島達也、中山智喜、 廣川淳(リモート)、森本真司、山地一代(リモート) 欠席者:(第10,11期)江口菜穂、(第11期)竹川暢 之

報告·審議事項

役員選挙について

1) 入江委員より、第 11 期役員選挙の実施内容に ついて報告があった。

2) 会長による運営委員の指名、副会長の選出について

会長指名の次期委員として齋藤委員・内田委員が承認された。また、次期の副会長に金谷委員が選出された。

3) 会計·会員報告

町田委員より、平成 30 年度の会員数および会費納入の状況、同年度の会計について報告があった。また、会計監査について代読により報告が行われた。

4) JpGU 学協会長会議について

谷本会長より、会議の内容について報告があった。

5) JpGU の学術誌 PEPS について PEPS 誌の編集委員を務める金谷委員より、同誌の 方針などについて説明があった。

6) JpGU 大気化学セッションの開催状況

中山委員より、67 件の申し込みがあり(うち海外から 12 件)、口頭発表の枠として 6 コマを確保したとの報 告があった。発表言語区分の選択肢が変更となった ことに伴い、大気化学セッションの区分が EJ(スライ ド・ポスター:英語/口頭発表:英語または日本語)か らJ(スライド・ポスター、口頭発表のいずれも英語また は日本語)となったが、スコープ欄への記載やメール により、スライド・ポスターの英語による作製を依頼し た旨の説明があった。

7) 学部生の JpGU 参加に対する支援

中山委員より、学部4年生をJpGUに招待する企画と したとの説明があった。参加支援は、今後のJpGU大 気化学セッションにおいても継続することにした。

8) 人材育成ワーキンググループの活動状況

入江委員より、JpGU に合わせて懇親会を開催し、学 会ウェブサイト上に大気化学分野の研究室の情報を リスト化するなどの、若手とシニアの交流を促進する ための取り組みについて説明がなされた。若手主導 の活動や、学会員相互の研究交流に対する支援に ついて意見があった。 9) 編集委員会の活動状況

担 当 委 員 より、大 気 化 学 研 究 誌 の iCACGP-IGAC2018 国際会議特集号および第 41 号 の発行予定について説明があった。日本大気化学 会の出版物における、著作権の取り扱いについて議 論がなされた。

10) 奨励賞について

金谷委員より、今後の選考の体制について原案が示 され、議論を行った。選考委員 3 名の人数規定を細 則から削除することとし、これを会員集会で周知する こととした。

11) 選挙制度ワーキンググループによるアンケート 金谷委員より、選挙制度に関する会員向けのアンケ ートの状況について説明があった。

12) ウェブワーキンググループの活動、今後のウェ ブサイトの維持について

永島委員より、日本大気化学会ウェブサイトの更新に ついて説明があり、今後のウェブサイトの運営の方針 について議論がなされた。

13)機関リポジトリ登録の要求への対応 学会出版物の機関リポジトリ登録の要求に対する回 答について方針を定めた。

14) 今年度の大気化学討論会について 持田副会長より、開催に向けた状況について説明が あった。

15) 大気化学討論会に合わせた Early Career Short Course の開催

谷本会長より、2020年に開催される IGAC 国際会議 に向けた若手ショートコースの開催について説明が あった。 16) 女性活躍推進ワーキンググループの取り組み 谷本会長より、今年度の大気化学討論会における女 性会員の集いの企画について代理説明がなされた。 討論会では、保育支援を実施することとした。

17) 学術会議協力学術研究団体の申込について 谷本会長より、登録申請に関する説明があった。

18) 次期運営委員会について

運委委員会内の委員会・ワーキングループの体制、 幹事会の担当委員について議論がなされた。JpGU・ 大気化学討論会に合わせた年2回の運営委員会開 催に加えて、テレビ会議での実施も検討することとし た。

19) 会員集会の議題について 持田副会長より、翌日に開催される会員集会の議題 について確認があった。

20) 2020 年以降の大気化学討論会について 実行委員会の担当を依頼する機関の候補について 議論がなされた。

(日本大気化学会 運営委員会)

日本大気化学会会員集会プログラム

日時:2019年5月30日(木)12:30-13:30 場所:幕張メッセ国際会議場1F102会場

- 1) 谷本会長より挨拶
- 2) 役員選挙について
- 3) 新会長より挨拶
- 4) 会員報告、会計報告
- 5) JpGU 大気化学セッションの開催状況
- 6) 学部生の JpGU 参加支援企画
- 7) 発行誌「大気化学研究」について
- 8) 奨励賞の募集について
- 9) 細則の改訂について
- 10) 「役員選挙」に関する会員ウェブアンケート
- 11) 2019年開催の大気化学討論会について
- 12) 第2回女性会員の集いの案内

(日本大気化学会 運営委員会)

第11期日本大気化学会役員選挙の結果について

1. 役員選挙について

日本大気化学会の選挙細則に基づき第11期(大 気化学研究会からの期)運営委員会役員選挙を実 施した。

2019年1月18日(金) 公示 2019年2月22日(金) 投票締め切り

2. 開票

日時:2019年2月27日(水) 13:30-17:30 場所:千葉大学環境リモートセンシング研究センタ

1階 会議室
 有権者数:日本大気化学会正会員 214 名
 投票総数:106 通
 白票·無効票:12 票

3. 当選者

会長 谷本浩志(国立環境研究所)

運営委員(10名,50音順) 江口菜穂(九州大学) 金谷有剛(海洋研究開発機構) 関山剛(気象庁気象研究所) 竹川暢之(首都大学東京) 豊田栄(東京工業大学) 永島達也(国立環境研究所) 中山智喜(長崎大学) 廣川淳(北海道大学) 森本真司(東北大学) 山地一代(神戸大学) 投票結果を受け、日本大気化学会事務局から当 選者の役員就任意思確認を実施した。

4. 結果報告

2019年3月15日(金) 電子メールにて報告 2019年5月30日(木) 会員集会にて報告

> (日本大気化学会 選挙管理委員会 (入江仁士(委員長), 江波進一, 豊田 栄))

編集後記

今号では「エアロゾルと雲の相互作用」をテーマに、佐藤様、當房様、茂木様らにトピックスをご寄稿いただきました。IPCC で報告されている放射強制力の効果を示す表では、エアロゾルと雲の相互作用による効果の不確かさが最も大きくなってお り、まさに気候変動を理解する上でカギとなる重要な研究テーマです。各総説では、研究の背景や最新の研究成果、今後の 課題等について、非常にわかりやすく解説されており、大変興味深い内容になっております。また横内様にはブルーヘイズに 関する美しい写真つきの記事をご寄稿いただきました。また竹川様には大気放射学に関する最新の翻訳本の書評をご寄稿 いただきました。お忙しい合間を縫って、貴重な原稿をご執筆下さった皆様方にあらためてお礼を申し上げます。

私事ですが、運営委員の任期満了に伴い、今号が私の最後の編集になります。歴代編集委員のスピリッツを損なわないように、各分野を網羅しつつ、可能な限り「おもろい」記事を集めようと編集作業を進めてきたつもりですが、至らない点が多々あったかと存じます。どうかお許し頂けましたら幸いです。お忙しい合間を縫って貴重な原稿をご執筆下さった皆様方にはあらためてお礼を申し上げます。次号より、新しい編集委員会にて編集作業を進めて頂くことになっております。引き続き、本学会の重要な柱となりますよう、本誌へのご支援をお願い申し上げます。(江波)

大気化学研究 第41号 (2019年7月11日 発行)

編集兼発行: 日本大気化学会 編集委員: 江波進一(共同編集長), 森本真司(共同編集長), 関山剛, 山地一代 連絡先: 〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局 電話: 03-5389-6237 FAX: 03-3368-2822 電子メール: jpsac-post@bunken.co.jp ホームページ: https://jpsac.org/publications/aacr/

《本誌掲載著作物の転載を希望される方へ》 本誌に掲載された著作物を転載される場合は,上記までご連絡ください。無断での二次使用や勝手 な加工はお控えください。