# 第15回雲・降水国際学会参加報告*

藤　吉　康　志*1・久　芳　奈遠美*2・橋　本　明　弘*3・三　隅　良　平*4
河　本　和　明*5・三　井　達　也*6・井　口　享　道*7・村　上　正　隆*8
斎　藤　篤　思*9・田　尻　拓　也*10・山　下　克　也*11・折　笠　成　宏*12
竹　見　哲　也*13・尾　上　万里子*14・吉　原　經太郎*15

## 1．会議の概要

2008年7月7日から11日にかけて，メキシコのカンクンで標記の学会が開催された．メキシコで開催することは，4年前のイタリアのボローニャでの大会の際に投票で決定されたが，治安の問題のためか，ユカタン半島の先端という隔離されたリゾート地での開催となった．ホテルと会場へのアクセスが便利な半面，メキシコの地理と歴史を楽しむにはやや不満が残った．2012年に開催される第16回の候補地として，イギリスのマンチェスターとドイツのライプチッヒが開催を希望し，各国の代表委員による投票の結果，ライプチッヒに決まった．

組織委員会の委員は2期（8年）で交代するため，全委員の約3分の1が，研究内容や国に偏りが無いように，研究内容や業績を考慮して新たに決定された．私の任期も終わったので，次期委員として三隅良平（防災科学研究所）会員を推薦し，委員会で了承された．執行部三役も委員会で議論して投票し，会長Levin（イスラエル），副会長Flossman（フランス），幹事長Starr（アメリカ）が再任された．

投稿論文数は392件（前回は538件）が受理され，国別ではアメリカが131件，中国が46件，ドイツが36件，カナダが19件，日本は5番目で18件（前回45件）であった．口頭発表は一人1件を条件とし，参加者全員が聞けるように1会場で行ったため，受理された論文のうち3分の1が口頭発表で，残りがポスター発表であった．本国際学会の目的は，文字通り，雲と降水に関する研究についての発表と討議であるが，以下の参加者からの感想にもあるように，エアロゾルの間接効果が今回の会議では中心的なトピックであった．故Hobbsが会長であった20年前に比べて，いわゆる降水システムに関する研究発表件数の激減が，投稿論文数の減少をもたらしている．

セッションは「雲物理素過程」で始まり，以下順番

* Report on 15th International Conference on Clouds and Precipitation（ICCP）.

*1 Yasushi FUJIYOSHI，北海道大学低温科学研究所（ICCP 組織委員会委員）.
*2 Naomi KUBA，海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター．
*3 Akihiro HASHIMOTO，気象研究所予報研究部．
*4 Ryohei MISUMI，防災科学技術研究所水・土砂防災研究部．
*5 Kazuaki KAWAMOTO，長崎大学環境科学部．
*6 Tatsuya MITSUI，東京大学気候システム研究センター．
*7 Takamichi IGUCHI，東京大学気候システム研究センター．
*8 Masataka MURAKAMI，気象研究所物理気象研究部．
*9 Atsushi SAITO，気象研究所物理気象研究部．
*10 Takuya TAJIRI，気象研究所物理気象研究部．
*11 Katsuya YAMASHITA，気象研究所物理気象研究部．
*12 Narihiro ORIKASA，気象研究所物理気象研究部．
*13 Tetsuya TAKEMI，京都大学防災研究所．
*14 Mariko OUE，名古屋大学大学院環境学研究科．
*15 Keitaro YOSHIHARA，豊田理化学研究所．

© 2009　日本気象学会

に「層雲」,「対流雲」,「境界層雲」,「巻雲」,「混相雲」,「シビアーストーム」,「雲と気候」,「大気汚染と雲」,「雲の放射特性」,「チャンバー実験」,「氷晶核と雲凝結核」と続き，最後の13番目は「新しい観測手法」であった．

各セッションの内容を紹介した前回の報告（藤吉ほか 2005）とは異なり，今回の報告は参加者の感想をとりまとめるという形式をとった．その理由は，単なる羅列的な報告よりも，発表の合間に行った外国の研究者との交流で得た生きた感想を，気象学会会員に伝えた方が良いと考えたからである．なお，ICCP に関する情報は，次のサイトに書かれている（http://iccp-iamas.org）．

ちなみに，私は「最大雨滴の気候学」と「ドップラーライダーを用いた大気の成層と乱流構造の観測」について，前者はポスターで後者は口頭による発表を行った．詳細は省くが，前者では「雨滴の粒径分布にどれだけの物理的意味があるか？」，後者では「雲の多層構造の成因」という何れも古くて未解決な問題について考察を進めている．

本学会常連である大竹　武（アラスカ大学），福田矩彦（ユタ大学），高橋　劭（ハワイ大学）諸先輩は，今回も参加されておられ，相変わらずの活発かつ筋の通った議論に圧倒された．また，バスと船を乗り継いだ小島で行われたレセプションでは，延々と続くカリビアンの熱い踊りに圧倒された．（藤吉康志）

## 2．“人工”降雨の話題

最初にICCP 2008 のホームページを見たときから，妙なマークだと気になった（第１図）．変な帽子を被った人が立て膝で座っているようなシルエットで意味不明だし，おしゃれでもない．しかし，滞在中に読んだガイドブックの記事と，現地の人に聞いた話を合わせるとこれが面白い象徴であることが分かる．これはカンクン郊外のチ・チェン・イッツァというマヤ文明の遺跡の中にある，チャックモールという，雨乞いのために生贄の心臓を乗せる台なのだ．マークを良く見ると雲と雨も描かれているので，めでたく雨が降ったという構図になっている．つまり，これは気象の人工調節の試みの起源でもあり，マークにするにはちゃんと意味があるということになる．現代の私たちは人工降雨実験のためにヨウ化銀，ドライアイス，塩粒子など，心臓に比べればはるかに安価なものを用いて，効果を期待しているのである．

第１図　レセプションが行われた小島の上陸地点に，砂絵で描かれたICCP08のシンボルマーク．（斎藤篤思撮影）

今回の発表では，エアロゾルもしくは雲凝結核が何々に与える効果というタイトルや内容が多かった．そしてそれは複雑で，一筋縄ではいかないとう共通の認識ができあがりつつあるという印象を受けた．これまでの観測や統計的なデータ解析では結果がまちまちであったことの理由が，モデル計算でも説明がつくようになってきたように感じた．すなわち，雲凝結核の降水形成に与える効果は，雲底・雲頂・凍結高度の関係で異なり，雲凝結核の増加は降水量を増やすことも減らすこともあるということである．例えば，凍結高度以下の雲の場合では，雲凝結核が多いほど雲粒の数が増え雲粒も小さくなるので雨の降り始めが遅れ，降水量も少なくなる．一方，雨粒になりにくい多数の小さな雲粒が凍結高度以上に運ばれ，そこに雹（ひょう）が存在する場合には，雹がそれらを捕捉して成長するために降水量が増えるということも起こる．これに雪や霰（あられ）も絡んでくると結果はさらに複雑になる．

筆者は数値実験で人工降雨の評価を試みているが，実験の条件設定に特段の注意が必要であることと，いくつもの過程が複雑に絡んでいることを常に意識して計算結果を解釈することの必要性をあらためて痛感した．（久芳奈遠美）

## 3．雲の種蒔き効果

講演内容で印象的だったのは，４年前の同会議ではエアロゾル―雲・降水相互作用に関するモデリングが，高々雲核の予報までしか取り扱っていなかったが，今回はこのテーマに関する講演のほとんどで氷晶核の予報まで行っていた点である．さらに，雲・降水

によるエアロゾル粒子の洗浄から蒸発に伴う再生成までをモデル化したものもスタンダードになりつつある印象を受け，モデリング分野のスピードを感じさせられた．

私がポスターで発表した研究は，航空機からのドライアイスシーディングによる人工降雪を再現できる3次元雲シーディングモデルを用いて，最適シーディング法の開発，シーディング有効性評価，1冬季間にわたる増雪効果の評価についてまとめたものである．雲シーディングに関連したこれらのトピックスについてはいくつかの先行研究があるが，本研究のように総合的なモデリング・解析技術に立脚して，不特定多数の雲を対象に1シーズンを通した評価を行った例はなく，モデルを用いたシーディング効果の評価では世界をリードしている．会場では，Rasmussen（NCAR）や Curic（ベオグラード大学），Yum（延世大学）とその学生など，各国で気象改変に取り組んでいる研究者と議論でき，高い評価を受けた．

モデルを使ってエアロゾルと降水の関係を論ずる講演がいくつもあったが，その中でも Chen（国立台湾大学）が，混相雲ではエアロゾル粒子の増加によって氷粒子の数が増え，雲粒から氷粒子への質量変換が促進されることで（Bergeron-Findeisen 効果），降水が強化されることもあり得ることを示していたのが印象に残った．Beheng（カールスルーエ大学）は，水滴と大気の力学的相互作用を数値的に解く手法を用いて，水滴の衝突分裂に関する研究を行っている．大水滴と小水滴の離心率を用いて整理することで，水滴の衝突分裂後の粒径分布をパラメータ化することに成功していた．前回の会議では同じテーマで予備的な結果を示していたが，その後の4年間で実用的なレベルにまで仕上げたようだ．（橋本明弘）

## 4．雲物理過程のパラメタリゼーション

この会議に参加するのは4回目になる．今回は Cotton（コロラド州立大学）の 基調講演「エアロゾルが深い対流に及ぼす影響」を初めとして，エアロゾルが雲・降水に及ぼす効果について数多くの講演があった．2モーメントの雲粒スキームが一般的になり，この問題にアプローチする道具立てができてきたということであろう．ただし「プロセスを単純化しすぎているのではないか」という批判意見もあった．一方，4年前の会議の主要な話題の1つ「乱流が雲粒の併合に及ぼす影響」については今回発表が少なく，このプロセスの定式化がある程度進んできたという印象を受けた．

他に新しい雲物理パラメタリゼーションとして，Morrison（NCAR）らは氷のカテゴリー分けを廃し，雲氷―雪―霰の遷移を連続的に表現する『斬新な手法』を発表し，多くの質問を受けた．その逆の極端なスキームとして，雲・降水粒子を22種類のカテゴリーに細分化するという Gilmore ら（イリノイ大学）の発表もあった．また会議の4日目には，ドイツが開発した大型の雲チャンバーAIDA についてスペシャル・セッションが行われ，国際的な共同研究の成果が紹介された．田尻ら（気象研究所）による，温度と気圧を同時制御できる雲チャンバーの紹介に対しては，Congratulations！の声がかかり，大きな期待が寄せられていた．（三隅良平）

## 5．第2種間接効果と雲物理観測

Zhang（マイアミ大学）は，TRMM の降水プロダクトと TOMS のエアロゾルデータを用いて解析した結果，エアロゾルが多い場所では降雨が減少していると報告した．この結果は，Rosenfeld（ヘブライ大学）の説と同様の傾向である．発表後に本人に聞いたところ，この仕事は論文としては不採択とされたそうで，データ解析のみではなかなか厳しいとのことであった．

雲過程に関するフィードバックを考慮し，これまでよく引用されてきた Albrecht 効果（エアロゾルの増加により雲粒径が減少し，そのため降水効率が下がり雲量が増加する）と異なる応答を示す発表もいくつかあった．例えば Hill（NOAA）は，エアロゾルが増えると，エントレインメントと混合のフィードバックによって非降水雲では雲水総量が減ることを，LES を用いた計算によって示した．これらエアロゾルの第2種間接効果の観測的および数値モデルを用いた研究が多くなされる中で，ICCP 前会長の Isaac（Environment Canada）は，「観測的研究はモデリング結果と適切に比較されなくてはならないし，数値モデルは時空間スケールを観測のそれと合わせるべきだ」と厳しく指摘していた．

Levin（テルアビブ大学）は，「エアロゾルによる降雨への影響」についてのレビューを行った．この中で特に混相雲と氷雲の研究の重要性を指摘し，エアロゾルの影響と他の気象要素の影響を分離するためには，モデルを有効に使わなければならないことを強調した．これらのレビューは Aerosol Pollution Impact

on Precipitation：A Scientific Review というタイトルの本にまとめられ，2008年秋に出版された．雲凝結核観測の第一人者である Hudson（Desert Research Institute）は，雲粒への成りやすさとして粒子のサイズが最も重要なパラメータであるとしたサイエンス誌に掲載された論文（Dusek *et al*. 2006）に対し，自身が行ったホノルル沖での観測結果を基に，サイズ測定結果のみを用いて雲凝結核のスペクトルを決定するのは困難であると反論した．

Chuang（カリフォルニア大学）は Shaw（ミシガン工科大学）と共同で，航空機観測用の雲微物理測器である PDI を開発し，それを用いた測定結果を示した．この PDI は，雲の粒径分布や落下速度の計測において従来の光学式測器よりも多くの利点があるとのことであり，今後の発展が期待される．（河本和明）

## 6．雲粒の質量密度と数密度予報の精緻化

今回の会議は雲微物理が主なテーマというだけあり，ビン法雲微物理モデルの利用者は多く，簡易的な表現をとるバルク法でも数密度と質量密度を予報する２モーメント法が当然のように利用されていた．以下では，雲の放射強制力に対して特に影響の大きい，雲粒の質量密度と数密度予報のモデリングに関する話題を紹介する．両者の予報を正確に行うアプローチとして，エアロゾル，力学そして雲微物理の精緻化の３通りが考えられる．初めの２つは雲の成長を支える環境場を良く再現する為のアプローチであり，これらが整って初めて観測結果と雲微物理モデリングの結果を比較した議論が可能になるだろう．

エアロゾルモデリングに関しては今回の会議ではあまり取り上げられておらず，初期条件としてエアロゾルスペクトルを与えているシミュレーションが多かった．特に巨大雲凝結核の有無は，初期の降水形成のタイミングや氷粒子の出来方に感度を示す為に着目されつつあるが，おしなべて感度実験の報告をして重要性を確認するにとどまっている．Engström（ストックホルム大学）ほかは，エアロゾルを雲粒に溶けているものといないものに分けて予報する雲解像モデルを用い，INDOEX の観測結果と比較した．その結果，黒色炭素の有無が雲側面での蒸発と空気混合の強さを決める鍵となり，観測で見られる高度８km 付近のエアロゾル数密度の極大値を説明し得ることを示した．そして，巨大雲凝結核の生成源として，対流雲の蒸発-再放出過程のモデリングの重要性を示唆した．この結果は大気大循環モデルにおいても，積雲とエアロゾルの結合の必要性を考えさせるものである．

力学の精緻化は，雲水成長の基である熱力学場と水蒸気場の再現性を改善するためのアプローチである．雲微物理は線形現象ではない為に，格子内平均値で評価するのではなく非均一性を考慮する必要があり，特に解像度依存の強い現象である．今回の会議では，均一混合と非均一混合の表現がよく取り上げられていた．そこでは主に凝結・蒸発過程を扱っており，過飽和度が変化するタイムスケールを，乱流による寄与と拡散過程による寄与を用いて表現する．例えば Jeffery（ロスアラモス研究所）ほかは，理論的な解釈によってモデル化を試み，乱流の部分凝結による雲水量予報をより矛盾なく解く方法を示した．しかし，雲の質量密度と数密度の非均一性を合わせて予報する方法は難しく，いまだ提案されていない．特に雲凝結核の非均一性は，Lohmann（チューリッヒ工科大学）に代表されるように全球で同じ鉛直流確率密度関数を用いる方法が主流であり，任意パラメータの普遍性に関して疑問が残る．なお，観測による雲の均一・不均一混合の研究も Lehmann（ライプチッヒ対流圏研究所）ほかなど多数が発表していた．雲内の混合のほとんどが不均一混合であるが，積雲対流コアなど一部では均一混合が強く見られることを示していた．つまり，均一・不均一混合の割合は現象に依存するものであり，これからも質量密度と数密度共に，時空間的に変動する確率密度を用いて議論する方法の模索が必要とされる．

混合による雲の質量密度と数密度の不均一性は，凝結・蒸発過程のみならず衝突過程にも影響を及ぼす．雲粒の衝突過程を精緻化した Seifert（ドイツ気象局）の衝突・併合スキームは，方程式系に内在する雲水量（LWC）の相似性を取り入れており，雲水から雨水への変換のタイムスケールが LWC に比例する定式化になっている．その為に，格子内の非均一性を考慮しない場合には衝突併合過程を過小評価する事になる．

以上の議論は格子幅が数 km 以下の雲解像モデルに対して有効な議論であり，全球モデルを用いた気候研究との隔たりはいまだ大きい．Joos（チューリッヒ工科大学）ほかは，大気大循環モデルの解像度では表現出来ない地形に起因する重力波の鉛直流成分も含めたモデル化を提案し，衛星観測と整合的な氷晶核数密度を再現していた．このように等方乱流に起因する非均一性のみならず，スケール内の物理現象に起因する

成分のモデル化も必要であることが示された．これらの発表から，同様の雲微物理スキームを用いた場合でも，雲粒やエアロゾルの周囲の熱力学場や水蒸気場の表現の違いによって，シミュレーション結果が大きく異なる事が示された．

雲の放射強制力（CRF）に影響する雲微物理過程の計算手法に関しては，エアロゾルの活性化スキームを変更したものが見られた．著者らは，ボックスモデルを用いて衝突併合実験を行い，雲粒数予報の中でもエアロゾルの活性化だけを含めた１モーメントバルク法で計算された CRF は，２モーメントバルク法の計算結果を良く再現出来る事を示した．また，全球雲解像モデル NICAM を用いてエアロゾルの活性化に対する対照実験を行った結果，解像度を変更した場合よりも活性化スキームを変更した場合の方が CRF への影響が強いことがわかった．CRF の評価に関しては，Storelvmo（チューリッヒ工科大学）ほかが大気大循環モデルを用いて行っていた．彼女らの結果も，活性化スキームを変更した場合の CRF への影響は同様に大きく，IPCC 第４次報告書で報告されているエアロゾル間接効果による CRF の不確定性（$1.5\,Wm^{-2}$）と同程度の不確定性（$1.38\,Wm^{-2}$）を示した．これらの発表では全球雲解像モデルや大気大循環モデルを用いて CRF の不確定性を減らし，定量的な検証をする事の難しさを示すに留まっている．活性化スキームを開発する上で，用いている仮定や前提に関する議論が今後必要となってくるだろう．

以上，３通りのアプローチに注目して，筆者は ICCP の発表を聴講した．最終的に CRF を評価する為には全球モデルへの適用が必要なので，適用の可能性が特に重要である．雲微物理とエアロゾルのモデリングに関しては素過程の精緻化を進める事で解決を迎える事が出来るが，力学の精緻化はモデリングの仮定の中に解像度依存性を内在しており，円満な解決方法は難しいように思える．（三井達也）

## ７．雲物理モデルの動向

現在の雲物理モデルの動向として，理想実験レベルでは１モーメントビン法，数値予報実験レベルでは２モーメントバルク法が広く使われているようである．領域モデルのフレームワークとしては，WRF モデルが多くのユーザーに使われているように思う．IUGG2007でも同様の印象を受けた．現在の計算機の水準で３次元のグリッドモデルを動作させることを考えた場合，２モーメントバルク法はその計算コストと，モデルで表現可能な変数・過程のバランスが最も優れているためかと考えられる．ビン法は，現状の並列計算機環境でも未だ計算コストがかかり過ぎる．現在，地球シミュレータに代表される超高速な計算環境が利用可能になりつつあり，ビン法の高計算コストに耐えうる環境も整ってきた．しかしながら，高性能であっても利用上の制約が多く，またジョブ投入から実行までの待ちが発生するような大型の計算環境よりも，制約の少ない安価で個人利用が可能な計算システムの方が望ましいというジレンマがある．その理由は，雲微物理過程の研究を行う上で，パラメータをインタラクティブに変えた感度実験を数多く実施しなければならないからである．一つ象徴的であったのが，過去の論文で２モーメントビン法のモデル開発を示した Chen（国際台湾大学）のグループも，今回の発表では WRF モデルにエアロゾルの影響を考慮した２モーメントバルク法を組み込み，このモデルを使って台湾での豪雨頻度の増加傾向について考察を行っていたことである．現実の現象解析の目的では，モデル全体としての計算コストのバランスを考慮して，バルク法が利用されるということの一つの例であると思う．

Levin（テルアビブ大学）のレビューに代表されるように，エアロゾルの濃度増加が降水量を減少，もしくは増加をさせるかという問題は気象調節，また人間活動の気象への影響の研究の両面から，今回の会議でも重要な命題となっていた．エアロゾルが雲・降水の特性に及ぼす影響についての研究は，単純な水雲だけを対象としたものから，混相雲（mixed phase cloud）へと対象が移ってきている．例えば，Rosenfeld（ヘブライ大学）などで報告された ANTISTORM プロジェクトでは，Hail storm 強度へのエアロゾルの影響を主要テーマにしている．近年，大気汚染が対流を強めることにより降水量を増加させる効果が提唱されているが，数値モデルによる研究が先行しすぎている感があり，観測による証拠固めも必要であるように思う．例えば Bell *et al*.（2008）では，衛星観測データからアメリカにおける降雨やストーム強度の曜日依存性を調べ，人間活動による大気汚染の曜日依存との関連性を見ている．こういった観測事例の数値モデルによる再現を元として，そこから数値モデルによるプロセスの解明と感度の評価に繋げていくことが，これからの研究の狙いどころのひとつではないだろうか．

（井口享道）

## 8．氷晶核

前回の会議から，雲凝結核・氷晶核の活性化，雲形成に対する影響に関する研究発表が増え始め，エアロゾルの雲・降水形成への影響に関する実験・観測・モデリングに関する発表が数え切れないほどあった．しかし，これらの問題を全て解決するまでには至っておらず，今後しばらくはこの分野の研究が活発に行われるものと思われる．

雲凝結核計は数年前に商品化され誰でも気軽に測定を行うことが出来るようになったので，近い将来，雲凝結核の全球分布やその季節変動，それと雲の内部構造との関連などが解明されると思われる．しかし，氷晶核計は商品化されたものはなく，氷晶核の活性化に関する研究は，アメリカのコロラド州立大学の研究者が開発した連続流熱拡散型氷晶核計や雲生成チャンバーを用いた実験に限定されている．最近，米国以外でも上記氷晶核計を製作し，氷晶核に関する研究を行う機運が高まっており，雲物理分野で長い間，最も重要で未解決の問題とされてきた氷晶発生過程の解明もそう遠くないかもしれない．

期間中後半の「チャンバー実験」と「氷晶核と雲凝結核」のセッションでは，前年ドイツのカールスルーエで開催された「氷晶核測定システムに関する国際比較ワークショップ」（ICIS2007）に関する多数の発表が行われた．氷晶核に関する理解とその測定技術が大きく変化してきたなかで，氷晶核測定を対象とした国際比較ワークショップが開催されるのは1975年以来32年ぶりとのことだった．同研究所には，AIDA と呼ばれるエアロゾル雲生成チャンバー実験施設があり，AIDA チャンバーにエアロゾルを導入するために用いるエアロゾルチャンバーとともに，近年エアロゾルと雲生成過程に関する様々な研究がなされている．氷晶核測定に関する発表は上記２つのセッションにまたがっており，主に AIDA で行った ICIS2007のみの成果に関する発表を行った前者と，他の観測成果を含めて発表を行った後者という分類となっていた．コロラド州立大学は航空機観測で国内の研究者と，ドイツのカールスルーエのグループは AIDA を用いた実験でヨーロッパ各国の研究者と共同研究の形式を取り，色々な計測機器を用いて実験・観測を実施していた．

いずれの発表でも，長い間をおいて開催された氷晶核測定システムに関する国際比較ワークショップを受けての成果発表の場であることから，その実験成果とともに今後の改良点・方針についての議論が活発になされ，この分野での重要で様々な情報を得ることができた．気象研究所の雲物理グループからは，氷晶核計・雲生成チャンバーを用いた実験的研究，特殊ゾンデ・航空機を用いた観測的研究，数値モデルを用いた研究の成果を発表したが，今後世界中の研究者を相手にこの分野の研究で成果を上げていくためには，国内外の研究者との共同研究も視野に入れて，更に戦略的・組織的に研究を推進していく必要性を実感した．

（村上正隆，斎藤篤思）

## 9．混相雲

ここ数年取り組んでいる，気象研究所の雲生成チャンバーによる氷晶発生過程に関する室内実験の進捗状況を，「混相雲」のセッションで口頭発表する機会を得た．発表では，外気を試料空気とするチャンバー実験の手順，および混相雲の条件下での氷晶発生のタイミング，粒子数濃度について実験解析結果をまとめて報告した．前回の ICCP の際には整備中であったため，今回の発表では雲生成チャンバーの構成，基本性能（制御精度，断熱膨張過程の再現性など）についても紹介した．

同セッションでは，雲物理プローブや氷晶核計，W-バンドレーダー，ライダーなどを搭載した航空機による山岳性波状雲観測プロジェクトに関する発表，雲解像モデル（WRF）を用いたエアロゾルの間接効果に関する研究の前段階として，イギリスやスイスでの航空機観測データとエアロゾルを陽に扱った雲微物理モデル（ADDEM）の計算結果を比較した報告があった．他にも，北東大西洋上におけるヘリコプターの安全運行に関わる機体着氷の状態を雲物理量の鉛直プロファイルから議論した発表や，タスマニアと南極海域で行った航空機観測から，過冷却雲水量および雲頂温度の観測値を WRF の予報結果と比較した発表があった．また，混相雲を対象として，熱力学環境場・上昇速度と水の相変化および変換率の関係を，理論的に考察した研究があった．

村上（気象研究所）は，山岳性降雪雲の微物理構造におけるアジアダストストームの影響を，航空機観測データに基づいて報告した．航空機による雲微物理構造の直接観測が，欧米を中心に一般的な研究手法として実施されており，複合センサーにより良好な観測データセットを提供するとともに，精緻化された数値モデルによる雲物理量予測の比較検証データとしても有効活用されていた．

この他，海洋性の雲における過冷却雲粒生成について，半径0.01 μmより小さなエアロゾルが関与することを2次元混相雲微物理モデルにより議論した報告があった．雲凝結核数濃度が低く，暖かい雲過程が効果的に働き，雷活動が比較的少ないとされる海洋上で，ハリケーンの目の壁付近など深い対流雲において極軌道衛星観測などから頻繁に放電が検知されている．そこでは雲底付近での海塩粒子による雲粒形成だけではなく，活性化できないまま雲内にとりこまれた微小エアロゾルが強い上昇流による局所的な高過飽和域を通じて活性化し，過冷却雲粒形成および氷相過程に寄与しているとの数値実験結果が示された．そのような微小エアロゾルの直接観測は難しいが，雲底とは異なる高度における雲粒数濃度ピークがその存在を示唆するとしている．

全般に，詳細数値モデルおよび航空機等観測によるプロジェクト研究は，報告数や成果が多く圧倒される感はあったが，雲物理素過程の解明や数値モデル予測精度の改善を図る上では，特定の過程に焦点を据え理想化した環境において再現性のある室内実験を行うことの有義性を感じた．また，研究目的は異なっても，計測装置や測定方法，解析手法については参考とすべき点があり，情報収集の場として貴重であった．

（田尻拓也）

## 10. 雲凝結核や氷晶核の直接測定

このような大きな国際会議に初めて参加したが，口頭発表のほとんどが1つの会場で行われた上に，ポスターは開催期間中ずっと掲示されていたので，初心者である筆者でも世界の研究動向を把握することができ，非常に有意義であった．

筆者自身は，「氷晶核と雲凝結核」のセッションで，雲生成チャンバーとビン法ボックスモデルを用いて行った暖かい雲のシミュレーション結果の比較について発表を行った．雲生成チャンバーは断熱膨張変化をシミュレーションできる世界でも数少ない装置であるため，多くの方から興味を持って頂いた．海外研究者の発表は，モデル，実験，観測からの研究成果がほぼ均等にあったように思われる．その中で特に興味を持った内容について以下に紹介する．ただし，筆者のバックグランドがエアロゾルであり，雲や降水に関しての知識が浅いため偏った興味となっているので，ご容赦いただきたい．

Borrmann（マインツ大学）およびCziczo（チューリッヒ工科大学）は，標高3580 mの観測サイトで混相雲発生時に，3種類のインレットを用いて混相雲雰囲気中の雲粒および氷晶の残渣エアロゾルを含む全てのエアロゾル，氷晶の残渣エアロゾルおよび雲に取り込まれていないエアロゾルを分け，それらの粒径分布や組成情報を計測していた．初期的な結果しか提示されていなかったが，このような観測は，雲―エアロゾル相互作用を考える上で重要な観測であると思われる．Nenes（ジョージア工科大学）は，メキシコシティ（汚染大気）近郊の地上観測サイトでDMA，雲凝結核計，凝結核計を用いて雲凝結核の組成や混合状態の変化を調べていた．雲凝結核の混合状態には，昼夜で大きな違いがあり，その違いは，日射による光化学反応で不水溶性の粒子に水溶性成分が凝結したためではないかということを主張していた．現在，筆者らは「人工降雨・降雪」プロジェクトでバックグランド雲凝結核に巨大凝結核を付加して増雨へと導く人工降雨手法の可能性評価を行っており，巨大凝結核を散布する場所のバックグランド雲凝結核の組成や混合状態を把握する必要があるが，その際のデータ解析や解釈の仕方など，今後の参考となった．

Lawson（SPEC Incorporated, ボルダー）は，いくつかの観測キャンペーンの中で行われた中緯度海上および陸上での巻雲を対象とした航空機観測の結果から，陸上や海上での氷晶粒子の形状の特徴や粒径分布を整理していた．巻雲が発生する場所，及び発生してからの時間によって氷晶の形状が異なるという結果が提示されており，放射収支の精確な計算には重要な情報であるという点で興味を持った．Twohy（オレゴン州立大学）は，サハラ砂漠上空の航空機観測から得られた雲粒残渣粒子の組成分析を行い，鉱物粒子の凝結核能について示していた．日本上空に飛来する黄砂粒子の場合はどのような凝結核能を持つのかという興味を抱かされた．

筆者が興味を持った発表は，全て雲粒や氷晶自体を直接測定および採集したものを分析した結果を用いた研究である．欧米では，モデルやリモートセンシングはもちろんであるが，日本ではあまり行われていない航空機観測や測器開発が非常に充実しており，雲及び降水に関する研究のバランスのよさに感心した．

（山下克也）

## 11. 航空機観測

今回の会議では，「雲とエアロゾルの相互作用」と

いう研究テーマが,「混相雲」,「大気汚染と雲」,「氷晶核と雲凝結核」など複数のセッションに分かれて議論され,この分野が現在最もホットな研究領域であることを実感した．その研究手法として，最近，観測や実験が目立って多くなってきた．以下では，特に印象に残った航空機による観測的研究を紹介する．

Stith（NCAR）は，大陸を横断できるくらい脚の長い新しい航空機ガルフストリームⅤを用いて行った，PACDEX の初期解析結果を報告した．これは，太平洋上のストームを追跡しながら，アジア起源のダストや汚染気塊が雲システムに与える効果を調べるのが目的である．Heymsfield（NCAR）は，航空機 C130を用いて行った，ICE-L で観測した波状雲内の氷晶発生過程について報告した．氷晶発生過程を観測から調べるためには，ミリ波レーダやライダーなどのリモートセンサーを用いた観測も直接観測と同時に行う必要があること，また，現今の航空機搭載測器のサンプリング体積は，発生初期の低濃度の氷晶数を検出するには不十分であるという問題点も指摘した．

DeMott（コロラド大学）は，PACDEX と ICE-L の観測結果のうち，氷晶核数とエアロゾル数の関係を中心に報告した．エアロゾルの詳細な分析結果等も含めて考える必要はあるが，汚染が氷晶核数に与える影響は小さいという初期解析を紹介した．Field（イギリス気象局）は，ICE-L の観測中，類似した温度・上昇流にもかかわらず氷晶数濃度が大きく異なる２事例について解析した．その結果，エアロゾルの性質の違いというよりも，比較的簡単な力学的構造を持つ波状雲でさえ，異なったメカニズムによって発生した氷晶が混在する可能性が示唆された．

航空機搭載用測器の大きな問題点の１つとして，比較的大きい氷粒子がサンプリングインレット等で破砕することによる数濃度の過大評価が認識されつつある．McFarquhar（イリノイ大学）は，CAS や FSSP が実際にどの程度過大に測定しているかを，別の測器データと比較して評価した． （折笠成宏）

### 12．メソ対流系と雲物理過程

ICCP に出席するのは前回に引き続き２回目である.「雲・降水」に関連する多彩な分野の研究発表がなされるため，自分の興味を持つ分野が広い意味での「雲・降水」科学においてどこに位置づけられるのか，そして他分野とどう関連づけられるのかということを知る絶好の機会と思い，会議に出席した．

私は，メソ対流系における降水の特性や強度に及ぼす環境場の影響について多様な条件設定で数値シミュレーションした結果について発表した．今回の会議ではこのようなメソ現象のダイナミクスに関する発表は少なかったように思うが，発表後に何人かの方々から質問やコメントをいただき，また「いい発表だった」と声をかけてくださった方もおられたので，発表としては良かったと思っている．今後は乱流や微物理といった微細過程をより深く議論できればと考えている．

今回の会議で私が最も印象を受けたのは，雲微物理とエアロゾルとの相互作用を可能な限り詳細にモデル化し，高分解能シミュレーションによって解析するという研究スタイルである．もちろん，計算機資源の許す範囲での高精度化・高分解能化であるのは確かであるが，目指す方向性は多くの研究者に共通していると感じた．この点は，激しい対流現象に及ぼすエアロゾルの影響についてのレビューをした Cotton の基調講演に象徴されていたように思う．彼は，雲凝結核が増大すると大きな雨粒子が形成されることで冷気プールの温度があまり下がらなくなり，冷気プールの移動速度がより遅くなることで，ガストフロントで形成される渦がメソサイクロンと結合しやすい状況となり，結果としてトルネードが発生しやすくなる，といったように，極端現象に関与するエアロゾルの影響について論じた．ただし，深い対流は雲凝結核以外の他の環境条件にも依存するため，対流とエアロゾルの関係は非線形であることも指摘していた．

深い対流による物質輸送については，Barth（NCAR）が，スコールライン・寒冷前線・孤立積乱雲のそれぞれの場合における CO 輸送の違いを，化学過程を結合させた WRF-Chem モデルで調べた結果を発表した．各場合で CAPE などの環境条件が異なるため対流強度が異なり，結果として鉛直輸送のプロファイルにも影響し，スコールラインの場合が「煙突型」と称して最も効率良く輸送することを示した．浅い積雲による物質混合という点では，Shaw（ライプニッツ対流圏研究所）が，乱流混合や微物理過程で規定される時間スケールの違いにより積雲による混合の形態が異なることを考察し，航空機観測によるデータを解析した結果について発表した．微細な過程を実現象から調べるという点で大変興味深かった．

乱流過程のモデル化については，Jarecka（ワルシャワ大学）のポスター発表が興味深かった．積雲と

周囲の空気との混合に伴う雲水の蒸発を乱流の効果を加味して表現できるような乱流モデルの提案に関する発表であった．雲の境界でのフィラメント状の構造のスケールを導入するというモデルを構築し，それを用いて積雲の LES を行い，雲頂高度付近の逆転層におけるデトレインメントがより顕著に再現することが可能となったことを示した．良い発表だと思っていたら，ベストポスター賞を受賞するほどのものであった．降水予報という点では，Seifert が，乱流の長さスケールを変化させるなどして境界層スキームが降水の量的予報に大きく影響することを示し，格子幅 1～4 km での境界層スキームの改良が必要であることを強調した．

他にも，鉱物性ダストの氷晶形成に果たす役割を様々な砂漠のサンプルを用いて実験により調べるなど，室内実験による雲微物理過程やエアロゾルとの相互作用に関する研究発表も数多くなされた．雲・降水の素過程を重視した地道な努力も継続的になされていることも知り，大規模野外観測や大規模数値計算が流行とも言える時勢において，素過程の研究の大事さも再認識した．

本国際会議の出席にあたって，日本学術振興会国際学会等派遣事業の支援を受けました． （竹見哲也）

## 13．雲の偏波レーダ観測

私は，大会第 2 日目「対流雲」のセッションでポスター発表を行った．偏波レーダとディスドロメータデータの解析を行い，梅雨期の沖縄では，同じ降水システム内に，エコー頂（30 dBZ）高度が 6 km 以下と低く同じような反射強度の構造を持つ対流セルでも，大粒の雨滴で構成されるものと小粒の雨滴で構成されるものが存在することを示した．雨滴粒径分布に違いが生じる原因として，エアロゾルの効果を挙げる意見が多い一方，対流内ではエアロゾルの違いが粒径分布に与える影響は少ないという意見もあった．背の低い対流雲内で，力学的効果とエアロゾルの効果が雨滴粒径分布にどれほど影響をあたえるのかは興味深い課題である．

偏波レーダは降水雲内の微物理的特徴を捉えるのに有効な測器であり，私以外にも，偏波レーダを用いた研究発表があった．NCAR では，偏波レーダデータからの降水粒子のカテゴリー分けのアルゴリズムが確立している．Deierling（NCAR）らは，S バンドと C バンドの偏波レーダデータを用いて，ストーム内を雨の領域，氷の領域（雹，霰，non precipitation ice）に分けて雨水量と氷水量を算出し，それぞれの反射強度と質量の関係（Z–M 関係）や質量と発雷数の関係を示した．Dufournet（デルフト工科大学）らは，混相域における氷粒子の微物理特性のリトリーバル法として，粒径分布パラメータを用いて，降水粒子のカテゴリーごとに偏波パラメータを表すモデルを紹介した．また，Zhong（南京大学）らは，雲の氷化過程を捉えることが可能な35 GHz の二重偏波レーダを開発し，そのシステムを紹介した．

今後，偏波レーダを用いた観測によって雲・降水システムの微物理構造の解明が進展し，更に，数値モデルに偏波レーダデータを同化することでモデルの微物理過程の改良が進むことが期待できる．

今回の参加にあたって，名古屋大学（地球水循環センターの支援を受けて）から旅費の援助を受けました．上田　博教授をはじめ関係者の皆様に深く感謝いたします． （尾上万里子）

## 14．異分野からの初参加

私はこれまで長年にわたって分子の超高速化学反応を研究してきた化学者です．大学等での勤めを終えて，これまでの研究手法を捨てて，新たな研究を始めました．幸いにして「遠紫外光を空気に照射すると凝結核が生成する」ことを発見しました（Yoshihara *et al*. 2007）．この現象が気象とどのような関連を持つか知りたくて，本学会に参加しました．この一文は気象学のことをほとんど知らない素人の感想です．見当違いのこともあると思いますがお許しください．

私自身はこれまでこのテーマについては研究の相談相手もなくて，独学で勉強していました．分野が違うと研究者の態度や学会の雰囲気も違うかと今回恐る恐る出席しましたが，この点は全くの杞憂でした．内外の専門研究者から興味をもってもらい，いろいろな意見を聞くことができ，また個人的な関係も出来ました．科学者は専門の問題を通じてすぐに親しくなれるのは，どの分野も全く変わらないようです．これをきっかけに今後国際共同研究などを行って，本学会に出席した成果を十分に生かして行きたいと思っています．

ICCP2008に出席して，これまでの実験室での研究との新鮮な違いを感じました．対象が広く（地球，大気，極地，森林地帯，海洋など），また，2 度と同じことが起こらない現象を，さまざまな方法で研究する

ことのご苦労を感じました．基本物理の理解の進展，観測装置やシミュレーションの進歩，重要地点の集中観測の実施や広い分野の学際研究などに助けられて，学問が急速に進歩していることも感じました．例えば，飛行機などを用いた豊富なデータに対して大規模シミュレーションが直ちに追従するダイナミックな研究の面白さも理解できました．ただし，個々の問題に関しては，なお研究者間の意見の相違も大きく，むしろ問題の困難さも感じました．同時に画期的なブレークスルーも求められているように思えます．例えば，森林上空のエアロゾルの粒子分布測定結果がシミュレーションではどうしても説明しきれないという問題などは印象に残りました．

ヨーロッパ諸国と北アメリカなどは，入り乱れる形で密接に国際観測体制を組んで協力研究を行っていることにも強い印象を持ちました．私の感じでは，現在の日本の研究レベルは大変高いものの比較的孤立しているように感じました．特別セッションのあった２つの国際観測体制への日本からの参加がないのも気になりました．その一方で，アメリカに渡って一家をなし，本学会でも活発な議論を交わしておられる大先輩達の存在を知り，大変心強く思いました．

言うまでもなく，今や全地球的な課題となっている気候変動など，気象学の重要性が一段と増しています．わが国の気象研究での専用飛行機などの研究設備，研究協力体制への取り組みが不十分なのではないのかと感じました．最近，研究費の減少などを嘆く人が多いですが，日本も完全に硬直化しているわけではありません．やはり気象研究は水の制御など人類の生存がかかっている大きな将来問題です．この辺でもう一度大きな研究体制の確立と，これを通した研究で世界の問題解決のため皆様で努力されることを期待します．（吉原經太郎）

**略語一覧**

ADDEM：Aerosol Diameter Dependent Equilibrium Model
AIDA：Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere
ANTISTORM：Anthropogenic Aerosols Triggering and Invigorating Severe Storms
CAPE：Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
CAS：Cloud and Aerosol Spectrometer
CRF：Cloud Radiative Forcing 雲の放射強制力
DMA：Differential Mobility Analyzer 微分型電気移動度測定装置
FSSP：Forward Scattering Spectrometer Probe
ICE-L：Ice in Clouds Experiment – Layer clouds
INDOEX：Indian Ocean Experiment
IUGG：International Union of Geodesy and Geophysics 国際測地学・地球物理学連合
LES：Large Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション
NCAR：National Center for Atmospheric Research 米国大気科学センター
NICAM： Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 正二十面体格子モデル
PACDEX：Pacific Dust Experiment
PDI：Phase Doppler Interferometry
WRF：Weather Research and Forecasting
TRMM：Tropical Rainfall Measuring Mission 熱帯降雨観測衛星
TOMS：Total Ozone Mapping Spectrometer オゾン全量分光計

## 参 考 文 献

Bell, T. L., D. Rosenfeld, K.-M. Kim, J.-M. Yoo, M.-I. Lee and M. Hahnenberger, 2008：Midweek increase in U. S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. J. Geophys. Res., **113**, D02209, doi：10.1029/2007JD008623.

Dusek, U., G. P. Frank, L. Hildebrandt, J. Curtius, J. Schneider, S. Walter, D. Chand, F. Drewnick, S. Hings, D. Jung, S. Borrmann and M. O. Andreae, 2006： Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. Science, **312**, 1375-1378, doi：10.1126/science.1125261

藤吉康志，竹見哲也，那須野智江，久芳奈遠美，山田広幸，勝俣昌己，上田　博，坪木和久，高橋千陽，大東忠保，出世ゆかり，野村光春，清水慎吾，茂木耕作，三隅良平，中井専人，石坂雅昭，岩本勉之，和田　誠，村上正隆，折笠成宏，楠　研一，永戸久喜，橋本明弘，金田幸恵，渡邊　明，2005：第14回雲・降水国際学会参加報告．天気，**52**，41-44.

Yoshihara, K., Y. Takatori, K. Miyazaki and Y. Kajii, 2007：Ultraviolet light-induced water-droplet formation from wet ambient air. Proc. Japan Acad., Ser. B, **83**, 320-325.