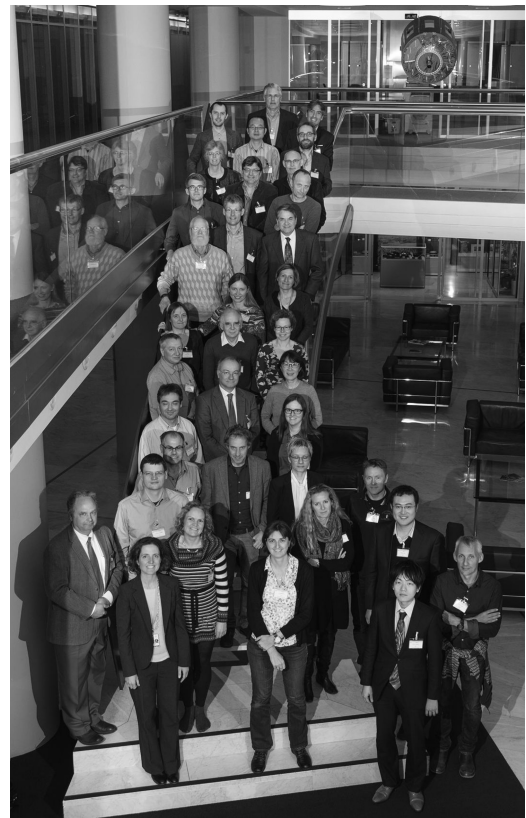


全球全大気降水物の観測・モデル統合 (MMF-TAD) に関する ワークショップへの出席報告

板橋 秀一*

世界気象機関 (WMO) では、全球大気監視 (GAW) 計画のもと、地球環境の長期的な監視や気候・気象・大気環境に関する予測能力の向上等に取り組んでいる。GAW 計画の対象は、エアロゾル、温室効果気体、反応性気体、オゾン、紫外線、降水化学、都市気象環境、数値モデルの8つで構成され、項目毎に科学諮問部会 (SAG) が組織されている。このうち降水化学というのは、歴史的に見れば酸性雨として着目された湿性降水物等を対象としたものであった。しかしながら、Vet *et al.* (2014) による指摘の通り、湿性降水物のほか乱流拡散や重力沈降による乾性降水物も湿性降水物に匹敵するほどの降水量となりうる。従って、大気から地表面への降水量の動態を究明していくにあたり、降水物としては湿性降水物と乾性降水物を合わせた全大気降水物 (TAD) を対象とするように提唱された。現在、TAD の SAG は Ariel Stein 氏 (米国海洋大気庁 (NOAA)) を座長として全6名で構成されている。この SAG の大きな目的の1つに、種々の大気汚染物質、特に硫黄酸化物と酸化態・還元態窒素化合物について TAD の全球マップを作成するということがある。そのためには、観測網の充実はもちろん、数値モデルによる時空間的に密な情報も不可欠と考えられる。このような背景のもと、TAD の観測・モデル統合 (MMF、以下 MMF-TAD) に関するワークショップが2017年2月28日 (火) ~ 3月2日 (木) の3日間、スイス・ジュネーブにある WMO 本部で開催された。参加者は招待講演者とオブザーバに

限定され、米国と欧州を中心に11カ国と WMO 関係者を合わせ延べ約40名の参加者であった (第1図)。日本からは本報告者である私のほか、アジア大気汚染研究センター (ACAP) より Mingqun Huo 氏、また、中国からは清華大学の Lei Duan 氏、中国気象局の Yang Li 氏が参加し、アジア圏からの参加者は4名であった。報告者は、アジア域におけるモデル相互



第1図 ワークショップ初日に撮られた集合写真。

* Syuichi ITAHASHI, 電力中央研究所環境科学研究所大気・海洋環境領域。
千葉県我孫子市我孫子1646
isyuichi@criepi.denken.or.jp

© 2017 日本気象学会

比較プロジェクト (MICS-Asia) において降下物の解析を担当しており、幸いにも本ワークショップへの参加の機会をいただいたので、ここに出席報告を行いたい。

本ワークショップの報告の前に上述の MICS-Asia について簡単に触れておく。個々の数値モデルの有する不確実性のため、数値モデルの計算結果には有意な差が生じることがあり、それは気象モデルのみならず、気候モデルや大気質モデルについても起こりうる。その差の要因をつきとめ、モデルの改良・精緻化に資するには、観測との比較・検証のほか、種々のモデル間の計算結果について比較・検証することも重要となる (鬼頭 2013)。ここでは、モデルの優劣をつけることが目的では決してない。アジア域を対象とした大気質モデルについてのこのプロジェクトは1998年に始まり、現在はその第三期にあたる。第一期、第二期までの成果、および第三期の枠組みについては、佐藤ほか (2016) に詳しいのでそちらを参照していただきたい。第三期では、2015年8月を締め切りとしてモデル計算結果が提出され、オゾン・PM_{2.5}の大気中濃度、および降下物の計3つの解析グループに分かれて解析が進行中である。降下物については、米国のテネシー大学、わが国からは国立環境研究所、気象庁気象研究所、電力中央研究所、神戸大学、中国からは中国大気物理研究所、中山大学、香港城市大学から合計で10個のモデル計算結果が提出された。本ワークショップにおいては、モデル計算結果を東アジア酸性雨モニタリングネットワーク (EANET) によるアジア域の全54地点の湿性降下物の観測データと比較・検証した内容について報告を行った。

さて、3日間にわたって行われた MMF-TAD に関するワークショップは以下の7つのセッションで構成された。

1. Keynote Talks: Science and Policy Drivers for Global Measurement — Model Fusion Maps of Atmospheric Concentrations and Deposition
2. Current Projects on Measurement-Model Fusion for Total Atmospheric Deposition and Ambient Concentrations of Gases and Aerosol Species
3. Surface- and Satellite-Based Measurements for Use in MMF-TAD
4. Chemical Transport and Deposition Modeling for Application to MMF-TAD: Global, Hemispheric and Regional Modeling, Evaluation and

Comparability

5. Plenary on Measurement-Model Fusion: Approaches, Objective Analysis Methods, Mapping and Management
6. Final Combined Plenary: Recommendations and the Path Forward
7. Final Comments and Close

セッション1から4までは1名あたり発表15分と質疑5分の形式で、合計23名からの発表があり、これを2日目午前中までに終え、セッション5から7までが議論の時間であった。ワークショップ全体の実に半分が議論の時間に割かれた。なお、セッション2から4についても、各セッションの最後には発表者が前に並び40~50分程度のパネルディスカッションの時間が設けられ、質疑を十分に行えるように構成されていた。以下ではまずセッション1から4までを順を追って紹介していく。

キーノートとして3名からの発表があったセッション1では、Kevin Hicks 氏 (ヨーク大学, 英国) より降下物が及ぼしうる生態系への影響、Rognvald Smith 氏 (英国生態・水文研究所 (CEH)) より国際窒素管理システム (INMS) の取り組みの紹介、そして Adair Rohani 氏 (世界保健機構 (WHO)) から大気汚染物質の人間への健康影響についての総括的な内容の紹介がなされた。TADのグローバルマップを目指す上で、観測あるいはモデルの研究者が中心となったキーノートかと私は最初想定していたが、そもそもなぜ MMF-TAD の取り組みが必要であるのか? という根本的な問いに答えるべく影響評価の3名の専門家の方々がキーノートとして位置付けられていた。Rohani 氏 (WHO) は健康影響を考える上で TAD のグローバルマップは大変重要な取り組みであるが、最終的な空間解像度としてはグローバルスケールで0.1度以下ということを目指していた。

セッション2では MMF-TAD を目指して実際に現在進行中のプロジェクト等が紹介された。Donna Schwede 氏 (米国環境保護庁 (EPA)) からは米国全降下物プロジェクト (TDEP)、Amanda Cole 氏 (カナダ環境・気候変動省 (ECCC)) からはカナダにおける最適内挿法による降下物解析プロジェクト (ADAGIO)、また、Camilla Andersson 氏 (スウェーデン気象・水文研究所 (SMHI)) からは同研究所で開発されている MATCH モデルを用いた2次元変分法によるスウェーデンの降下物マップ作成の事

例等が紹介された。ほかにも、Rognvald Smith氏 (CEH) からはクリギング法を用いた英国の降水物マップ作成の研究等も紹介された。1日目の午後には、Jefferey Geddes氏 (ボストン大学, 米国) より、乾性沈着量の正確な推計に向けて、衛星観測データを拘束条件として地表濃度を最適化する手法の紹介、Gregory Carmichael氏 (アイオワ大学, 米国) からは観測とモデルの融合手法としてカルマンフィルタや変分法等のデータ同化手法の包括的な話がなされた。このようにすでに降水物の把握を目指したプロジェクトがいくつかあるが、ここではTDEPについて述べておく。これは全米スケールのTADの動態解明に向けて、2011年10月より全米大気降水物研究支援計画 (NADP) 下に組織されたプロジェクトである。空間解像度は全米12 kmである。湿性降水物については、米国オレゴン州立大学で開発されたPRISMモデルにより観測値をモデル格子点上に空間補間する。一方、乾性降水物については直接観測が困難なため、逆距離加重法により観測値をモデル格子点上に補間した大気中濃度と、モデル格子点上の計算値を利用した降水速度の積より乾性降水量を算出し、さらに観測地点上では大気中濃度のモデル計算結果のバイアス補正を行う。また、観測されていない物質 (NO, NO₂, N₂O₅, HONO, PAN, 有機硝酸) も窒素化合物としての動態を捉える上で重要であるから、これらはモデル計算結果を利用する。ただし、アンモニアについては地表面からの揮散も考慮した大気との双方向フラックスモデルにより沈着量を算出する。以上により乾性降水物を推定し、湿性降水物との和をとり全降水物とする。そのマップや経年変化等は2000年から解析され、グリッドデータとしても公開されている (<http://nadp.sws.uiuc.edu/committees/tdep/>)。このプロジェクトは、MMF-TADを目指す上で大変参考になると考えられる。

セッション3では、MMF-TADに対し、地上あるいは衛星の観測分野からの研究が紹介された。ガス成分の観測についてはGAW反応性気体のSAGを務めるKjetil Tørseth氏 (ノルウェー大気研究所 (NILU)) より、エーロゾルの観測についてはGAWエーロゾルのSAGの座長を務めるPaolo Laj氏 (ヘルシンキ大学, フィンランド) よりそれぞれのSAGの紹介も兼ねた概要が紹介された。また、GAW, TADのSAGの座長を務めるStein氏 (NOAA) からは全球の降水物に係る観測網についての具体的な紹

介があった。衛星データについてはMian Chin氏 (米国航空宇宙局 (NASA)) より2015年2月に打ち上げられた最新の太陽周回軌道衛星 (DSCOVR) 等が紹介された。また、Andreas Becker氏 (ドイツ気象局 (DWD)) より全球降水気候計画 (GPCP) のプロダクトや全球降水気候センター (GPCC) の詳細な総括がなされた。湿性沈着量の正確な推計のためには、数値モデルにおいて降水量そのものがまず正確に再現される必要がある。衛星観測による全球スケールの降水量データは、数値モデルの降水量の再現性を検証する上で有用である。

セッション4では、MMF-TADに対し、全球あるいは領域スケールのモデル分野からの研究が紹介された。セッションのはじめは、まずFrank Dentener氏 (欧州共同研究センター (JRC)) からモデル研究のオーバービューについて、主に半球規模大気汚染物質輸送 (HTAP) プロジェクトをもとに紹介された。発表が“Modeling of deposition had not greatly progressed…”から始まったのはモデル研究者としては幾分か残念な言葉であった。従来の研究に新規性をもたらず点として、衛星データを活用した地表濃度の最適化等の視点が必要であると述べられていた。また、生態系影響等の評価に適用していくにあたっては、現状として±30%の誤差がモデル再現性の水準に求められていた。欧米のモデル相互比較プロジェクト (AQMEII) についてはChristian Hogrefe氏 (EPA) から、また欧州のEMEPプロジェクトについてはDavid Simpson氏 (ノルウェー気象局)、そしてMICS-Asiaについては私から報告を行った。ほかにもコミュニティモデルとして世界各国で応用実績の多くあるCMAQの開発現状についてSchwede氏 (EPA) が報告を行った。Schwede氏はTDEPの中心人物でもあるが、コミュニティモデル開発者としての感覚として、生態系影響評価を目的としたユーザー等、分野間での交流が進んできているようだと言われていた。

2日目のお昼を挟んでからは、議論の時間に移された。ここからの進行は本ワークショップの統括者であるRobert Vet氏 (ECCC) とSilvina Carou氏 (WMO) が主であった。まずはセッション5として、参加者全員により課題等が話し合われた。具体的には、全球スケールでのTADのマップの作成を目指すにあたって何が必要となるのか、何が求められているのか、MMFの短所と長所は何なのか、観測あるいは

モデルのデータ取り扱いについてどのように進める必要があるか、等である。全体での議論は1時間ほどで、引き続いて観測、モデルの研究者に分かれて別々の会議室でそれぞれの議論の場がもたれた。人数はほぼ半数ずつである。私はモデル側に分類されたので、ここではモデル側の内容を報告する。モデル側の議論は Dentener 氏 (JRC) により仕切られた。モデル側の議題としては、排出量や土地利用等のどのようなモデルインプットデータが使われるべきか、どのモデルが有用か、あるいはモデルアンサンブルが有用か、領域モデルと全球モデルをどう仕切り分けるのか、モデル計算結果の取り扱いはどうするのか、そしてモデル計算結果の配布はどうするのか、という6つの項目が挙がっており、まずは議題を整理しましょう、ということから始まった。しかし、上述の6つの項目に対して、どのモデルが有用か否かを判断する上でどのようなデータがあればそれを評価できるのか、モデル計算結果の取り扱いや配布については利用者各人の目的に沿ったものとなるよう予め議論が必要ではないか、といった問題点が挙げられ、結局6つあった項目は8つに増えて2日目は終わってしまった。3日目午前中の前半も引き続き観測とモデルとで分かれた議論から開始された。後半の取りまとめに向けて、駆け足でモデル側の知見を集約することとなった。ここでの取りまとめ結果については、以下、セッション6の全体取りまとめにおいて合わせて述べる。

3日目午前中の後半からセッション6に移り、いよいよ本ワークショップの総括である。再び参加者全員での議論となった。まずは観測側とモデル側で議論されたことをそれぞれの代表者が報告し、それを Vet 氏 (ECCC) らが取りまとめた。具体的には MMF-TAD に向けて以下のことがまとめられた。まず TAD の全球マップの対象となる期間の設定である。Vet *et al.* (2014) では観測について2000~2002年および2005~2007年、HTAP のモデルアンサンブルでは2001年を対象としており、まずはこれを更新する必要があった。モデル側でさまざまなプロジェクトをまとめたところ、HTAP、AQMEII、MICS-Asia、ほかにも CCM1、AeroCom、ICAP 等も2010年を対象としたモデル相互比較実験が実施済み、あるいは進行中であった。従って、2010年を対象とすることとなった。ただし、Rohani 氏 (WHO) からは2015年が持続可能な開発目標2030アジェンダ (<http://www.un.org/sustainabledevelopment/>) の起点年であるこ

とから、次の視点としては2015年を対象として欲しいという強い要望があった。これに対しては Vet 氏 (ECCC) より2010年を MMF-TAD のベンチマークの年とし、2015年に随時展開していくと回答された。続いて具体的な計画として、短期・中期・長期別に計画が建てられた。まず、短期計画としては北米、欧州、アジアの領域別に MMF を目指した手法を検討することで一致した。アジアについては MICS-Asia の統括者の一人である Carmichael 氏 (アイオワ大学、米国) がコンタクト先となった。また、モデル計算結果については、いずれのモデルも様々な不確実性を有していることからモデルアンサンブルをとることを最初のアプローチとすることとなった。なお、モデル側の議論の場では、アンサンブル平均をとる際に何らかのスクリーニングを設けてモデルを選定すべきか、という点も議題となったが、結論には至らなかった。また、MMF という点では、TDEP は非常に重要なイニシアティブをもっていると思うが、EANET では観測網がおそらく不十分であり、アジア域でいかに確立していくかは MICS-Asia の活動を通じて検討していく必要があるように感じた。次に、中期計画として、北米、欧州、アジアで確立した手法を全球スケールで適用することとなった。ここでは、領域モデルと全球モデルのそれぞれの役割についても意識する必要があると思うが、具体的な部分については決まらなかった。話題となったのは、モデル計算結果の配布の方法である。観測データ、特に観測ネットワークについては、基本的には各 Web ページ等からダウンロードすることで利用できる。2010年の全球観測網については Aas Wenche 氏 (NILU) が取りまとめを行うこととなった。モデル計算結果についても、様々な分野での活用のため、公開されるべきということになった。その手段として欧州の Copernicus データアクセスシステム (<http://www.copernicus.eu/>) を利用できることとなった。最後に長期目標である。TAD のより正確な全球マップに向けて、衛星データを拘束条件とした地表濃度の最適化、あるいは高次元データ同化手法による降水量の推計が目標とされた。ただし、同化手法等の具体的な内容については決まらなかった。これらの詳細は、短期計画下の領域別での手法の検討の結果によると考えられる。短期計画については2017年5月末を目処として一度集約を行うこととなり、中期・長期計画の具体性も増していくことと思われる。以上の3期にわたる計画のもと、2010

年を対象に TAD の全球マップの作成を目指すことで全会一致した。3日にわたったワークショップの最後となるセッション7では、Vet氏 (ECCC) の MMF-TAD を成功させるという強い意気込みが感じられた。そして、ワークショップ開始と同じく、米国天文学者 Carl Sagan 氏の “With insufficient data it is easy to go wrong” の引用で締められた。

謝 辞

本ワークショップ参加のための費用の支弁をいただいた WMO に心より感謝申し上げます。

略語一覧

ACAP : Asia Center for Air Pollution Research アジア大気汚染研究センター
 ADAGIO : Atmospheric Deposition Analysis Generated by Optimal Interpolation of Observations カナダにおける最適内挿法による降水物解析プログラム
 AeroCom : Aerosol Comparisons between Observations and Models エーロゾルモデル相互比較プロジェクト
 AQMEII : Air Quality Model Evaluation International Initiative 欧米大気質モデル相互比較プロジェクト
 CCMi : Chemistry-Climate Model Initiative 化学・気候モデル相互比較プロジェクト
 CEH : Center for Ecology and Hydrology 英国生態・水文研究所
 CMAQ : Community Multi-scale Air Quality EPA により開発されているマルチスケールモデル
 DSCOVR : Deep Space Climate Observatory NOAA が運用する太陽周回軌道衛星
 DWD : Deutscher Wetter Dienst ドイツ気象局
 EANET : Acid Monitoring Network in East Asia 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク
 ECCC : Environmental and Climate Change Canada カナダ環境・気候変動省
 EMEP : European Monitoring and Evaluation Programme 欧州モニタリング評価プログラム
 EPA : Environmental Protection Agency 米国環境保護庁
 GAW : Global Atmosphere Watch 全球大気監視
 GPCC : Global Precipitation Climatology Center 全球降水気候センター
 GPCP : Global Precipitation Climatology Product 全球降水気候計画

HTAP : Hemispheric Transport of Air Pollution 半球規模大気汚染物質輸送
 ICAP : International Cooperative for Aerosol Prediction エーロゾル予測のための国際協力
 INMS : International Nitrogen Management System 国際窒素管理システム
 JRC : Joint Research Center 欧州共同研究センター
 MATCH : Multi-scale Atmospheric Transport and Chemistry スウェーデン気象・水文研究所により開発されているマルチスケールモデル
 MICS-Asia : Model Intercomparison Study for Asia アジア域モデル相互比較研究
 MMF : Measurement Model Fusion 観測・モデル統合
 NADP : National Atmospheric Deposition Program 全米大気降水物研究支援計画
 NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局
 NILU : Norwegian Institute for Air Research ノルウェー大気研究所
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
 PRISM : Parameter-elevation Regression on Independent Slopes Model オレゴン州立大学で開発されている全米高解像度空間補間モデル
 SAG : Scientific Advisory Group 科学諮問部会
 SMHI : Swedish Meteorological and Hydrological Institute スウェーデン気象・水文研究所
 TAD : Total Atmospheric Deposition 全大気降水物
 TDEP : United States Total Deposition Project 米国全降水物プロジェクト
 WHO : World Health Organization 世界保健機関
 WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関

参 考 文 献

鬼頭昭雄, 2013 : Model Intercomparison Projects. 天気, 60, 197-198.
 佐藤啓市, 黒川純一, 猪俣弥生, 箕浦宏明, 2016. 日中共同による東アジアにおける長距離輸送モデルの比較研究プロジェクト. 大気環境学会誌, 51, 17-24.
 Vet, R. *et al.*, 2014: A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. Atmos. Environ., 93, 3-100.