

ドイツの雲・降水研究プロジェクト HD(CP)²の 最終成果報告会 UCP2016の参加報告

清木 達也*¹・小玉 知央*²・野田 暁*³・Chen Ying-Wen*⁴

1. はじめに

全球の雲・降水に対する理解を深めることは、気候の形成を議論する上で欠かすことができない。特に気候感度の不確実性や気候モデルのバイアスを低減する観点から、WCRPでは今後10年で取り組むべき5つのグランドチャレンジの1つとして「雲・循環・気候感度 (Clouds, Circulation and Climate Sensitivity)」を掲げている。これと密接に関連する気候モデルコミュニティとしてはCFMIPがあり、毎年国際会議が開催されている(小倉ほか2016; 釜江ほか2014など)。

このような背景のもと、著者らは2016年2月15日から19日にかけてベルリンのハルナックハウス (Harnack-Haus) において行われたUCP2016 (Understanding Clouds and Precipitation 2016) に参加した。この会議はドイツ連邦教育研究省のファンドによる雲・降水モデリング研究プロジェクトHD(CP)² (High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction) の最終成果報告会という位置づけである。HD(CP)²は3年間のプロジェクトであり、2016年4月から2期目の3年間が開始された。ドイツ国内プロジェクトの会議ではあるものの、主催者が幅広い声かけを行ったことでヨーロッパ各国やアメリカ、日本、オーストラリアなどからCFMIP関係者が多数参加した。翌週ハンブルクにおいてNICAM (Satoh *et al.* 2014) とICON (Zängl *et al.* 2015) の関係者によるワークショップを控えて

いたこともあり、日本からはNICAMの開発・解析関係者ら5名が参加した。会議の中盤までは物理過程スキームの開発や高解像度シミュレーションなどモデル関連のセッションが続き、後半で観測のセッションが設定された。口頭発表75件、ポスター発表124件と大変盛況であった。本稿では、我々参加者の専門に基づいて幾つかのトピックに分けて会議の様子を報告したい。(小玉知央)

2. 各国の高解像度全球モデルの動向

本節では会議中に発表された高解像度全球モデルの動向について、会議以外で得た情報も交えながら報告する。

著者らが所属するNICAMグループでは、スーパーコンピュータ「京」や地球シミュレータといった豊富な計算機資源を生かして、高解像度化、大アンサンブル化、長期積分化、物理プロセスの追加と精緻化を推進している。特に水平高解像度化は世界最高解像度である全球870 mランを達成するなどお家芸であるが、今回の会議で清木は鉛直解像度に注目した発表を行った。巻雲による放射影響を見積もるためには鉛直解像度400 mが必要であるというメッセージは参加者の強い興味を引いていた (Seiki *et al.* 2015b)。小玉は水平解像度14 kmを用いた気候実験の再現性を議論するとともに、高解像度モデル比較プロジェクト (High Res MIP) で行う気候実験の計画を示した (Kodama *et al.* 2015)。佐藤正樹 (東京大学) は水平解像度14 kmの温暖化実験における台風の数の減少について対流質量フラックスを用いて議論した。台風の将来予測は高解像度モデルで気候実験を行う重要な目的の1つである。

ICONはドイツのDWDおよびMPI-Mが中心となって開発している次世代モデルである。ICONは研

*¹ (連絡責任著者) Tatsuya SEIKI, 海洋研究開発機構, tseiki@jamstec.go.jp

*² Chihiro KODAMA, 海洋研究開発機構,

*³ Akira T. NODA, 海洋研究開発機構,

*⁴ Ying-Wen CHEN, 海洋研究開発機構,

© 2017 日本気象学会

究用途に応じて物理パッケージを入れ替えており、詳細なプロセス研究を目的とした ICON-LES, DWD において現業の気象予報に利用されている ICON-NWP, そして全球の気候実験を目的とした Global-ICON の3通りのフレームワークを保有している。B. Stevens (MPI-M, ドイツ) は HD(CP)²のグランドチャレンジ実験である全ドイツ100 m LES 実験の初期結果を示した (Dipankar *et al.* 2015)。プレゼンテーションで特に目を引いたのは、ドイツの DKRZ が作成した全ドイツ LES 実験の雲成長のアニメーションである (第1図)。YouTube にて公開中: <https://youtu.be/HhwHuZR2uKo> (2016.12.5閲覧)。動画の可視化処理に1ヶ月以上の時間を要しており、ICON グループが可視化に力を入れていることが伺える。解析ではエネルギースペクトルや他の LES モデル・地点観測データとの比較を行い、ICON-LES と参照値との良い一致を示していた。第2期 HD(CP)²では LES の領域を広げる予定とのことである。Global-ICON については、水平解像度20 km の水惑星実験の動画を紹介した。MPI-M ではこれまでの ECHAM6 を ICON へ置き換えた MPI-ESM2 の開発が行われており、ICON の統一モデル化が推進されている。

SP-CAM は2次元の雲解像モデルを全球モデルである CAM の格子に埋め込んだ MMF である。D. Randall (コロラド州立大学, 米国) は複数の雲解像モデルを GCM の格子に埋め込むことで対流の確率的な過程を表現する「MP-CAM」のアイデアを示した。格子に埋め込まれた各雲解像モデルは1つの GCM から強制を受け、逆に GCM は雲解像モデルの

アンサンブル平均をフィードバックとして受け取る。シミュレーションを行った結果、MP-CAM では SP-CAM に比べて降水の頻度は高まるが全降水量は減少した。前者 (MP-CAM) の結果は雲解像モデルをアンサンブル化したことで必然的に GCM 格子内に存在する降水確率が高まることを反映している。高解像度の観点から、W. Grabowski (NCAR, 米国) はメソスケールまで解像可能な水平解像度20 km 程度の全球モデルを用意し、その各格子に3D LES を埋め込むことで全球 LES を構築するアイデアを示した。水平スケールが親モデルの格子サイズ (ここでは20 km) 以下の細かい現象が対象であれば LES の領域間でデータ通信を行う必要がないため、この手法は非常に高い並列化性能を実現することができる。熱帯海洋上を想定した実験を行ったところ、海表面近傍を LES で覆うことにより気候研究で重要な浅い積雲を陽に計算できることを示した。しかしながら、この手法は研究目的によっては制約が有ることも考えられる。例えば LES のみで解像された大気重力波は親モデルの格子では水平伝搬できない。水平もしくは鉛直方向へ広く伝播する擾乱の研究にはこの手法は不向きであろう。

以上のようにアプローチは異なるものの、全球モデルの高解像度化、LES モデル化を目指すという方向性は3モデルで一致している。B. Stevens は「全球モデルの解像度競争で先頭を走る NICAM を誰が追いかけるのか」と聴衆を挑発したかと思うと、W. Grabowski は NICAM と ICON を名指しに「全球 LES へ向けた競争は始まった」と宣言するなど今後の激しい競争が予想される。いずれにせよ、100 m 格子クラスの全球 LES シミュレーションが次の5年から10年で実現し、新しい研究の扉が開かれるであろう。

計算効率の観点からは、P. Düben (オックスフォード大学, 英国) はモデル変数の精度を落とすことで計算効率を高める試みを紹介した。ECMWF の IFS を用いて単精度化実験を行った結果、予報の精度を落とすことなく40%程度の速度向上が得られることを示した。電力問題などでスーパーコンピュータの性能の頭打ちが指摘される中、同様の単精度化の試みは NICAM や SP-CAM グループでも行われている。

(小玉知央)



第1図 ICON を用いた全ドイツ LES シミュレーション結果を可視化した雲成長動画のサンプル写真。YouTube より引用 <https://youtu.be/HhwHuZR2uKo> (2016.12.5閲覧)。

3. 雲微物理モデリング

本ワークショップでは雲微物理の基礎研究に関する発表が多くなされていた。特に、個々の雲粒の流れを

直接計算する LPM に関する研究報告が 3 件もあったことが興味深かったので、ここで詳しく報告したい。DWD では MPI-M と協力し、ICON-LES での利用を念頭に置いた複雑な雲微物理モデルの開発を進めていた。A. Naumann (MPI-M, ドイツ) らは 2 モーメントバルク法の雨モードのみを LPM に置き換えることで計算コストを大幅に節約しつつ様々な降雨システムを表現できるハイブリッドモデルを提案した。浅い積雲の事例で雨滴粒形分布の成長を検証した結果、2 モーメントバルク法や 3 モーメントバルク法では粒形分布の歪みの表現が不十分であり、降水のタイミングや降水量の不確実性が大きいことを示した。S. Unterstrasser (DLR, ドイツ) は巻雲シミュレーションにおける 2 モーメントバルク法と LPM の比較を行った。LPM を用いた実験では巻雲内部のストリーク構造がよく表現されており、これは物質輸送をラグランジュ的に解く LPM ならではとのことであった。彼によると、バルク法だけでなくビン法雲微物理モデルも物質輸送をオイラー法で解くので拡散的になってしまい、ストリークのような微細構造の表現は難しいとのことである。粒形分布のモードをある関数で近似するバルク法が拡散的になってしまうことは事実である。しかし、彼の発表では LPM とビン法との比較結果が無かったために、LPM の良好な結果が主にラグランジュ法とオイラー法の違いに起因するということには議論の余地が残っている、と筆者は考えている。M. Baumgartner (マインツ大学, ドイツ) は LPM を用い、ある雲粒子が昇華成長している最中に、周囲の水蒸気場・熱環境場がどの程度他の雲粒子から影響を受けているのかを検証していた。非常に緻密な計算を行った結果、近傍の粒子の影響は数%程度であったことを示していた。これを受けて B. Stevens が「その程度の影響にどれ位の労力を割いているのか? もっと簡単に近似的に見積もられるのではないか?」と疑問を投げかけ、それに対して A. Seifert (DWD, ドイツ) が「熱を伴う昇華成長を厳密に解くことは、他の現象にも波及し得るので数%でも非常に大事だ。この結果を受けて精度の良い補正方法を考案することができる!」と議論を交わしていた。このやりとりに限らずワークショップ全体を通じて筆者が感じたことは、気になることは基礎に立ち返ってとことん調べようというドイツらしい気風である。

具体的にどの雲微物理を改良すると気候モデルの再現性が改善されるか、という発表は多くなく、全体で

2 件程度しかなかった。R. Forbes (ECMWF, 英国) は積雲対流パラメタリゼーションを改良することで IFS が抱える南大洋の下層雲の過小評価を軽減させることに成功した。これまでは積雲対流内の液相と固相の相判別を気温の関数で決めていたが、新しい方法では積雲内で持ち上げた過冷却水滴を雲微物理で凍結させる方法に変更した。これにより、雲粒子の成長が遅くなり大気中に残りやすくなったため、下層雲量が増加したとのことだった。清木は NICAM の雲微物理モデルを 2 モーメントバルク法雲微物理に置き換えることで大気の高湿バイアスが大幅に(対流圏内部で平均 4 K 程度)低減できることを示した (Seiki *et al.* 2015a)。清木の解析により、従来の雲微物理モデルで用いられていた雲氷から雪への成長項 (auto-conversion) の定式化に問題があることが分かった。この定式化を衝突成長の理論式に置き換えることで問題が解決されることが示された。

これら雲微物理モデルを用いた研究と並行し、既存の雲微物理モデルをライブラリ化して、そのパッケージを広く公開しようという試みも始まっている。H. Pawlowska (ワルシャワ大学, ポーランド) は取り掛かりとして、シンプルな 1 モーメントバルク法雲微物理モデルの Kessler (1995)、NCAR で開発された 2 モーメントバルク法雲微物理モデルの Morrison and Grabowski (2007)、そして JAMSTEC で開発された LPM である Shima *et al.* (2009) を C++ の言語でライブラリ化し (libcloudph++)、スーパーコンピュータ上で効率良く大規模並列計算できるように最適化を施したうえで無償公開をしている <http://libcloudphxx.igf.fuw.edu.pl/> (2016.12.5 閲覧)。類似した試みとして、UKMO で公開されている Kid-A project http://appconv.metoffice.com/kid_a_intercomparison/kid_a/home.html (2016.12.5 閲覧) や RIKEN AICS で公開されている SCALE <http://scale.aics.riken.jp/> (2016.12.5 閲覧) がある。これらの活動により、誰もが簡便に詳細な雲微物理モデルを利用して気象・気候の研究を行う環境が整ってきている。(清木達也)

4. 乱流モデリング

境界層乱流やその対流への影響について、数値シミュレーションや観測を用いた研究の紹介も複数行われた。K. Hanley (UKMO, 英国) は水平解像度を 1.5 km から 100 m まで変化させた時の対流の振舞い

の変化を調べた結果、解像度を500 m以下にすると乱流輸送の役割がより大きくなることで対流の振舞いが顕著に変化することを示した。しかしレーダー観測と比較すると、100 mまで高めても対流の組織化の度合いは依然として過小評価されていることを示した。R. Heinze (MPI-M, ドイツ) は領域モデルで計算された環境場を外力とした長期 LES を行い、LES モデルの性能を評価した。ドイツ西部の陸上大気集中観測 (HOPE) と比較した結果、大気境界層の日変化はレーダー観測結果と良く整合していることを示した。J.-P. Chaboureau (トゥールーズ大学, フランス) はブラジルで発生した線状降水帯を対象としてサブグリッドスケールの乱流モデルの違いが深い対流系に与える影響を調べた。1次元的な鉛直混合だけを考慮したモデルでは対流雲の鉛直流が強すぎることを指摘し、3次元的な混合モデルを用いた場合、この過大が改善されることを示した。S. Dal Gesso (ケルン大学, ドイツ) は GCM の雲フィードバックの理解向上を目的とし、観測地点を含む GCM の計算格子点の結果と GCM から得られた外部強制を与えた SCM の実験の結果を比較した。現在気候における雲の鉛直分布は両者ともに定性的には再現しているものの、将来気候における雲フィードバックの大きさとその符号は GCM と SCM の間で観測地点毎に異なっていた。彼女は主に地表面熱収支の解析を行い、その要因を分析した。

境界層乱流の野外観測で得られた観測データも複数紹介されていた。D. Turner (NOAA, 米国) はグレートプレーンズ南部で1996年から継続して行われているドップラーライダー観測から得られた境界層の乱流統計量を LES 結果と比較し、LES は対流混合層の深まりを過小評価していたと述べた。P. Di Girolamo (バジリカータ大学, イタリア) は、近年ドイツ国内で展開された陸域雲乱流観測 (HOPE) におけるラマンライダーを用いた対流混合層の観測に基づき、水蒸気や温度変動成分を計測してそれらの4次乱流統計量を解析し、更に、V. Maurer (カールスルーエ工科大学, ドイツ) は雲を伴う場合と伴わない場合の大気境界層の観測結果を示した。これらは今後もドイツ域の LES データの検証に有効に活用されると思われる。

(野田 暁)

5. 気候感度

本ワークショップには気候感度のセッションが設け

てあり、ヨーロッパにおける気候感度への関心の高さが伺える。S. Klein (LLNL, 米国) は emergent constraint についてのレビューを発表した。emergent constraint とは、気候モデル間の気候感度の不確定性を、気候感度と関連が強いと思われる観測可能な物理量で制約しようという試みである (吉森ほか 2012)。彼は熱帯の低層雲の変化、中高緯度の低層雲の変化、及び水循環の変化についての emergent constraint を紹介した。発表の最後に、気候モデル間のバラツキは確率的な気候の不確かさに起因するものではないということを強調し、現在の気候モデルが表現し切れていない物理現象を取り込むことで、今後はモデル間のバラツキは小さくなっていくであろうという展望を示した。S. Sherwood (ニューサウスウェールズ大学, オーストラリア) は風速と温度に依存する指標を用いた emergent constraint を提案した (Sherwood *et al.* 2014)。

雲フィードバックに関連した発表も幾つか紹介したい。C. Hoose (カールスルーエ工科大学, ドイツ) は雲を層状性と対流性のものに分類し、モデルの対流雲内の雲水と雲氷の相判別を衛星観測データ (MODIS, AVHRR, SEVIRI センサー) に基づいて評価する手法について紹介した。野田は上層雲の雲頂温度の温暖化応答に関する仮説「Fixed Anvil Temperature Hypothesis」がどの程度成立するのか、NICAM の全球雲解像実験の結果を用いて解析した。その結果、上層雲の雲頂温度の変化の度合いが雲サイズに依存しており、上層雲の長波フィードバックを見積もる際には小さい雲と大きい雲では役割が変わってくることを指摘した (Noda *et al.* 2016)。Chen は放射カーネル (Zelinka *et al.* 2012) を用いて NICAM の雲フィードバックを見積もり、CMIP3/5 の GCM と比べて NICAM の雲長波フィードバックが特に大きいことを示した。その理由として、NICAM は小さい雲を解像しているため、薄い巻雲の放射特性の温暖化応答の違いがあるのではないかと、という考察を示した (Chen *et al.* 2016)。

今回のワークショップは気候変動という大きなテーマを軸に、高解像度シミュレーション、基礎物理の理解、新しいモデリング手法や観測手法の開発といった様々な研究が展開しており、今後の気候研究の大いなる発展を感じさせるものであった。

(Chen Ying-Wen)

略語一覧

AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer
改良型高分解能放射計

CAM : NCAR Community Atmosphere Model

CFMIP : Cloud Feedback Model Intercomparison Project
雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト

CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project
Phase6 第6期結合モデル相互比較プロジェクト

DKRZ : Deutsches Klimarechenzentrum (German Climate Computation Center) ドイツ気候計算センター

DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ドイツ航空宇宙センター

DWD : Deutscher Wetterdienst ドイツ気象局

ECHAM : MPI-M で開発されている大気大循環モデル

ECMWF : European Centre for Medium-Range
Weather Forecasts ヨーロッパ中期予報センター

ESM : Earth System Model 大気海洋大循環モデルと化学・炭素循環・植生・生態系モデルが結合した地球システム全体の数値モデル

GCM : General Circulation Model 大循環モデル

HD(CP)² : High Definition Clouds and Precipitation for
advancing Climate Prediction

HighResMIP : High Resolution Model Intercomparison
Project 高解像度モデル相互比較プロジェクト

HOPE : HD(CP)² Observational Prototype Experiment

ICON : Icosahedral non-hydrostatic MPI-M と DWD
が共同で開発している正二十面体格子の非静力学モデル

IFS : Integrated Forecasting System ECMWF が開発
している大気大循環モデルとそのデータ同化システムの
総称

JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science
and Technology 海洋研究開発機構

LES : Large Eddy Simulation 渦解像シミュレーション

LLNL : Lawrence Livermore National Laboratory
ローレンス・リバモア国立研究所 (アメリカ)

LPM : Lagrangian Particle Tracking Method 多数の
雲粒子をラグランジュ的に追跡して解く雲微物理モデ
リング手法

MMF : Multi-scale Modeling Framework 全球モデル
のフレームワークの1つで、積雲対流パラメタリゼー
ションの代わりに雲解像モデルを全球モデルの各格子に
埋め込んだものを指す (Super-Parameterization とも
言う)

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectro-
radiometer 中分解能撮像分光放射計

MPI-M : Max Planck Institute for Meteorology マッ
クスプランク気象研究所 (ドイツ)

NCAR : National Center for Atmospheric Research 米

国大気研究センター

NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric
Model 東京大学大気海洋研究所・海洋研究開発機構・
理化学研究所計算科学研究機構が開発された正二十面体
格子を用いた全球非静力学大気モデル

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Adminis-
tration 米国海洋大気庁

NWP : Numerical Weather Prediction Model 数値予
報モデル

RIKEN AICS : RIKEN Advanced Institute for
Computational Science 理化学研究所 計算科学研究
機構

SCALE : Scalable Computing for Advanced Library
and Environment RIKEN AICS を中心に開発が進め
られている次世代気象気候科学における基盤ライブラ
リー

SCM : Single Column Model 鉛直1次元の物理パッ
ケージモデルのこと。主に GCM から流体力学の計算部
分を取り去り、外部からの強制力で動くようにしたもの
を指す。

SEVIRI : Spinning Enhanced Visible and Infrared
Imager 回転式高度可視赤外イメージャー

SP-CAM : Superparameterized CAM

UCP : Understanding Clouds and Precipitation

UKMO : United Kingdom Met Office 英国気象局

WCRP : World Climate Research Programme 世界気
候研究計画

参考文献

Chen, Y.-W., T. Seiki, C. Kodama, M. Satoh, A. T.
Noda and Y. Yamada, 2016: High cloud responses to
global warming simulated by two different cloud
microphysics schemes implemented in the Nonhydro-
static Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). *J.
Climate*, **29**, 5949-5964.

Dipankar, A., B. Stevens, R. Heinze, C. Moseley, G.
Zängl, M. Giorgetta and S. Brdar, 2015: Large eddy
simulation using the general circulation model ICON.
J. Adv. Model. Earth Syst., **7**, 963-986.

釜江陽一ほか, 2014: 雲フィードバックに関するモデル相
互比較プロジェクト (CFMIP) 会議2014参加報告. *天
気*, **61**, 997-1004.

Kessler, E., 1995: On the continuity and distribution of
water substance in atmospheric circulations. *Atmos.
Res.*, **38**, 109-145.

Kodama, C., Y. Yamada, A. T. Noda, K. Kikuchi, Y.
Kajikawa, T. Nasuno, T. Tomita, T. Yamaura, H. G.
Takahashi, M. Hara, Y. Kawatani, M. Satoh and M.
Sugi, 2015: A 20-year climatology of a NICAM

- AMIP-type simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 393-424.
- Morrison, H. and W. Grabowski, 2007: Comparison of bulk and bin warm-rain microphysics models using a kinematic framework. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2839-2861.
- Noda, A. T., T. Seiki, M. Satoh and Y. Yamada: 2016, High cloud size dependency in the applicability of the fixed anvil temperature hypothesis using global non-hydrostatic simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 2307-2314.
- 小倉知夫ほか, 2016: 雲フィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト (CFMIP) 会議2015参加報告. *天気*, **63**, 105-112.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A. T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, Y. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- Seiki, T., C. Kodama, A.T. Noda and M. Satoh, 2015a: Improvement in global cloud-system-resolving simulations by using a double-moment bulk cloud microphysics scheme. *J. Climate*, **28**, 2405-2419.
- Seiki, T., C. Kodama, M. Satoh, T. Hashino, Y. Hagi-hara and H. Okamoto, 2015b: Vertical grid spacing necessary for simulating tropical cirrus clouds with a high-resolution atmospheric general circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 4150-4157.
- Sherwood, S. C., S. Bony and J.-L. Dufresne, 2014: Spread in model climate sensitivity traced to atmospheric convective mixing. *Nature*, **505**, 37-42.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama and S. Kawahara, 2009: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **135**, 1307-1320.
- 吉森正和ほか, 2012: 気候感度 Part2: 不確実性の低減への努力. *天気*, **59**, 91-109.
- Zängl, G., D. Reinert, P. Ripodas and M. Baldauf, 2015: The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modeling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 563-579.
- Zelinka, M. D., S. A. Klein and D. L. Hartmann, 2012: Computing and partitioning cloud feedbacks using cloud property histograms. Part I: Cloud radiative kernels. *J. Climate*, **25**, 3715-3735.