

## 第100回米国気象学会年会参加報告

柳 瀬 友 朗\*

### 1. はじめに

第100回米国気象学会年会 (100th AMS Annual Meeting) が米国マサチューセッツ州ボストン市のボストン会議場・展示場 (Boston Convention & Exhibition Center) にて2020年1月12日から16日にかけて開催された。年一度開催される本会は、気象・水象・気候研究コミュニティのための世界最大級の集会であり、数々の会議・シンポジウムや関連行事から構成される。規模を数字で見ると、セッション数は755件、口頭発表数は2,792件、ポスター発表数は1,562件、また展示は面積にして21,000平方フィート (約2,000m<sup>2</sup>) 超と公表されている。参考に日本気象学会2019年度秋季大会 (口頭発表数は262件、ポスター発表数は180件) と比較すると、その10倍近い規模感であることがわかる。また、今回は第100回大会であることを記念する催しも開かれた。本会において筆者は Wayne Schubert シンポジウムで発表した。このシンポジウムはその名の通り、米国気象学会が認めた優れた業績を持つ研究者の名を冠するシンポジウムの一つである。本会では他には Robert Dickinson シンポジウムと Susan Solomon シンポジウムが設けられた。

本稿では、筆者が大会中に聴講した、「第8回マッデン・ジュリアン振動・季節内変動シンポジウム」、「Wayne Schubert シンポジウム」、「熱帯気象・熱帯低気圧シンポジウム」、および「第18回歴史シンポジウム」の一部を紹介することで、本会への参加報告としたい。なお、読者の皆様には様々な興味をお持ちかと思うが、様々な分野に網羅的に触れることはできないことを予め承知いただきたい。その上で本稿を、先

輩方には (現在大学院生の筆者にとって本会がそうであるように) かつての初めての海外国際学会発表の思い出などを懐古しながら大目に読んでいただき、また同年輩や後輩の読者には近い視点から見た海外学会の様子の参考にさせていただき、今後の情報交換・交流のきっかけとしていただければと思う。

### 2. 講演紹介

#### 2.1 第8回マッデン・ジュリアン振動・季節内変動シンポジウム (Eighth Symposium on the Madden-Julian Oscillation and Sub-Seasonal Monsoon Variability)

本シンポジウムのテーマは、「MJOの力学」、「熱帯の季節内変動と極端気象のエネルギー気象に及ぼす影響」、「モンスーンとその季節内変動」、「海大陸・インド洋における大気-陸面-海洋過程の観測・予測・理論」、「季節内から季節変動と熱帯低気圧の予測」、「熱帯対流」、「熱帯波動」、および「熱帯-温帯相互作用; 季節内から季節時間スケールにおける気候の変動性と予測可能性」である。

Kuniaki Inoue (NASAゴダード宇宙科学研究所・米国) は、対流と結合した赤道波とMJOに関する、波数一周波数空間における鉛直速度の新たな診断方法として、鉛直速度を特徴付ける要素である「傾斜 (tilt)」と「上方への重み (top-heaviness)」に着目した解析結果を示した。ERA-interimを用いた解析によると、傾斜に関しては、ケルビン波・西進慣性重力波・東進慣性重力波・混合ロスビー重力波では大きい一方、赤道ロスビー波・MJOでは小さい。これは、速い重力波は傾斜が大きい一方、ゆっくりとした湿潤モード (moisture mode) に伴うものは傾斜が小さい、という理論的な既往研究の結果と整合的であると言及した。次に上方への重みに関しては、まず一般には、

\* Tomoro YANASE, 京都大学防災研究所.

yanase\_t@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

© 2020 日本気象学会

鉛直速度が下方に重みがある (bottom-heavy な) 分布を持つ場合には大気カラムに正味の MSE 流入が起こる一方、上方に重みがある分布を持つ場合には正味の MSE 流出が起きるため、前者は MJO に好ましく、後者は好ましくないと考えられる。ところが、今回の解析結果では、赤道ロスビー波・MJO は上方に重みがある鉛直速度を持ち、一見好ましくない状態にあることが示された。そこで彼らは、別の指標として、Gross Moist Stability (GMS; 「鉛直積算した乾燥静的エネルギーの鉛直移流」に対する「鉛直積算した湿潤静的エネルギーの鉛直移流」の比) と、雲放射フィードバック (「鉛直積算した乾燥静的エネルギーの鉛直移流」に対する「鉛直積算放射加熱」の比) を調べたところ、確かに MJO は上方への重みと整合的に大きな GMS を持つが、それを打ち消すのに十分な大きな雲放射フィードバックを持っており、実効的には負の GMS を持つことを示した。

B. Wolding (NOAA 地球システム研究所・米国) は、GCM における熱帯の湿潤対流と循環場との相互作用の表現について、特に水蒸気と対流の相互作用について発表した。まず大気のカラム相対湿度の増加に伴い、降水強度が大きくなることや、対流性降水に対する層状性降水の比が大きくなること、また加熱の鉛直分布及びそれに伴う循環による水蒸気収束が変化することが知られている。これらの特徴の再現性は GCM の評価指標にも用いられるが、彼らは特にカラム相対湿度と降水強度の位相空間における大気状態の時間発展に注目した解析を行った。観測データによると、乾いた大気においては浅い対流とともに湿潤化傾向を持ち、湿った大気においては深い対流とともに乾燥化傾向を持つようになる、という対流と水蒸気の相互作用の時間発展が読み取れる。GCM においてもスーパーパラメタリゼーションを用いた場合はこの特徴がよく再現されている。一方で、他の積雲パラメタリゼーションを用いた場合、浅い対流から深い対流への遷移がうまく表現されていないことが示された。その説明として、対流による加熱が上方に重みのある (top-heavy な加熱分布を持つ; あるいは GMS が高い) ことで、降水によって除去された水蒸気を補給するための水蒸気収束が十分に得られず、大気の湿潤化傾向を表現できていない、という仮説を提示した。

## 2.2 Wayne Schubert シンポジウム (Wayne Schubert Symposium)

本シンポジウムは、これまで大気力学、特に熱帯域

での大気現象において大きな業績を残し、2016年には AMS の最も榮譽ある賞の一つである Jule G. Charney Medal を授与された Wayne H. Schubert 博士 (コロラド州立大学名誉教授) にちなんだテーマとして、「熱帯低気圧」、「層積雲から深い対流にわたる湿潤過程」、「熱帯循環システム」、「雲に覆われた境界層過程」、「地球流体力学における数値解法」、および「大気力学」が挙げられた。

D. Randall (コロラド州立大学・米国) は、Arakawa and Schubert (1974; AS74) で提唱された準平衡 (Quasi-Equilibrium; QE) 仮説について、その思想を振り返り、現在に至るまでの変遷および課題について発表した。QE は大規模場による「強制」とそれに対する積雲対流の「応答」の釣り合いとして概念化されており、前者は雲層強制と混合層強制に分けられる。AS74 とその元となっている Schubert 博士の学位論文によると、強制は主に雲層によるものと考えられている。一方、Raymond (1995) や Emanuel (1995) のように混合層強制に重きを置く境界層準平衡 (Boundary Layer Quasi-Equilibrium; BLQE) という考え方があるが、最近でも Emanuel (2019) のように単純モデルでは用いられるものの、その物理的根拠の不明瞭さを指摘した。また他方で、Zhang (2002) が採用しているような、雲層強制に対して積雲対流が応答すると仮定する自由対流圏準平衡 (Free Tropospheric Quasi-Equilibrium; FTQE) は、BLQE とは対照的な枠組みで、GCM での利用において高い性能を誇ることを提示したが、FTQE がなぜうまくいくのかについては理解が不十分であると指摘した。さらに、DYNAMO 観測期間を対象とした雲解像モデルによる数値シミュレーションの結果から、深い対流が起きている時は混合層強制が不明瞭であることを示した。最後に、強制と応答という必ずしも分けることができるとは限らない概念体系から離れるために、予報型クロージャーやスーパーパラメタリゼーションが有効であることを指摘した。

P. Webster (ジョージア州立大学・米国) は、変化する気候における熱帯の対流と降水の制約条件について発表した。まず SST は約  $1^{\circ}\text{C}/100$  年の割合で上昇しており、それに伴い SST が  $28^{\circ}\text{C}$  を超えるような暖水プール (Oceanic Warm Pool; OWP) の面積も拡大している。一方で、熱帯における活発で降水をもたらす対流域の面積はほとんど変わっていない。これは、変化する気候において対流活動に対する SST の閾値は

変化するため、SSTの絶対値以外の指標が必要であることを意味する。そこで彼らは、大気加熱が正である領域の面積がほぼ一定に保たれていることを指摘し、これを力学的暖水プール (Dynamic Warm Pool; DWP) と呼んだ。これに基づき、現在気候と将来気候における熱力学的・力学的な制約条件についての議論を行った。

T. Guinn (エンブリー・リドル航空大学・米国) は、Schubert 博士が行ってきた熱帯低気圧研究を数値天気予報の学部生向け講義の題材として利用している例を紹介した。そこでは MATLAB や Python といったプログラミング (スクリプト) 言語を用いて順圧渦度方程式に基づくモデルの構築から実装までを学ぶという。

筆者 (柳瀬友朗, 京都大学) は、雲解像モデルを用いた放射対流平衡 (Radiative-Convective Equilibrium; RCE) 実験における積雲アンサンブルの統計的性質とその水平解像度依存性について発表した。既往研究で報告されていた水蒸気場の水平不均一性や大気安定度に対する解像度依存性の検証を行い、さらに3次元的な雲抽出手法を用いた解析によって積雲個々の雲内特性や積雲集団の鉛直発達特性などの統計的性質を定量化した。特に、高解像度化に伴い、積雲の数は増加する一方、様々な雲頂高度を持つあらゆる積雲においてその水平スケールは小さくなる。積雲サイズに反比例するように積雲内の MSE の鉛直方向の減衰は大きくなり、エントレインメントによる周囲の空気を取り込みの寄与が大きくなっていると理解できる。それと整合的に、対流圏上部まで到達する積雲の割合が減少することも示された。逆に低解像度化に伴い、数は少ないが強い浮力を持つ深い積乱雲が支配的となり、それと同時に自由大気は乾燥化する。低解像度化に伴う積雲の数の減少と自由大気の乾燥化は、近年盛んに研究されている RCE における対流の自己集合化 (Convective Self-Aggregation; CSA) の発生の解像度依存性の説明となる可能性がある。本研究の一部は Yanase and Takemi (2018) に既に発表されているので参照していただきたい。

本シンポジウム全体を通して、Schubert 博士と縁の深い教授陣が講演する際には、思い出話が発表中に交えられることが多々あり、Schubert 博士の温厚で愛される人柄を垣間見ることができた。また講演とは別に、シンポジウム当日の昼に Schubert 博士の祝賀会を兼ねた昼食会が開催されたが、学生だという理由で

幸運なことに無料招待していただいた。昼食会では Schubert 博士の経歴を振り返るスライド等が用意されたが、その中で Schubert 博士の指導教官であった荒川昭夫博士 (カリフォルニア大学ロサンゼルス校・米国) をはじめとする数多くの日本人研究者が紹介されたことが誇らしかった。なお、スライドや本シンポジウムの資料にご興味がある読者は筆者に照会していただきたい。

### 2.3 熱帯気象・熱帯低気圧シンポジウム (Tropical Meteorology and Tropical Cyclones Symposium)

本シンポジウムのテーマは、「海大陸・インド洋における大気―陸面―海洋過程の観測・予測・理論」, 「熱帯低気圧予測のための物理パラメタリゼーション」, 「熱帯対流」, 「熱帯低気圧の降雨: 物理・影響・防災」, 「熱帯低気圧研究と予報: 過去・現在・未来」, および「熱帯における女性研究者」である。なお、本シンポジウムのいくつかのセッションは「第8回マッデン・ジュリアン振動・季節内変動シンポジウム」と連携している。

J. Ruppert (ペンシルベニア州立大・米国) は、インド洋からスマトラやボルネオといった海大陸を含むような領域における、DYNAMO 観測期間を対象とした、WRF モデルによる数値シミュレーションの結果を示した。特に、海大陸の下層風が東風レジェームにあるときの対流システムの西方伝播、およびその日変化に着目した。また、対流システムの伝播速度 (17m/s) で1日の間に伝播できる距離が、スマトラとボルネオの距離 (1,500km) に相当しており、その波長を持つ重力波は日的に位相が固定されている (diurnally phase locked) と説明した。さらに、個々の島を除去するなど準理想実験の結果を示しながら、日的な位相固定による共鳴相互作用により重力波が増幅されているという仮説に根拠づけをした。

K. Emanuel (マサチューセッツ工科大学・米国) は、熱帯における数週間オーダーの時間スケールを持つゆっくりとした対流と結合した擾乱に関して、概念的な理解を深めるための単純モデルを提案した。このモデルは大まかには、境界層と自由大気間の質量と MSE の交換過程を通じた対流と循環の相互作用が、熱帯の力学に則して記述されている。主な概念的な枠組みとしては、BLQE、自由大気における湿潤・乾燥エネルギーの保存、弱温度勾配 (Weak Temperature Gradient; WTG)、および対流質量フラックスと降水

効率の関連付けなどが適用されている。それを用いて、熱帯大気における標準的な問題である、RCEにおける大気の水蒸気量と降水効率の関係、鉛直積算水蒸気量と降水量の関係、ウォーカー循環、CSA、またMJOといった題材に関して考察を行い、概念的・定性的な理解が深められることを示した。

T. Beucler (カリフォルニア大学アーバイン校・米国) は、雲解像モデルを用いた理想的な RCE 実験における CSA と、赤道付近に観測される MSE の変動性との比較を行った。MSE 変化率のスペクトル解析によると、その符号やスケール選択律に関して理想実験データと再解析データには次の類似性があることを示した。①放射は1,000km以上の波長の変動を増幅させる効果を持つこと、②移流は全ての波長の変動を減衰させる効果を持つこと、および③地表エンタルピーフラックスは主に1,000kmから10,000kmの間の波長の変動を減衰させること。

T. Cronin (マサチューセッツ工科大学) は、熱帯域の平坦な島において周囲の海洋よりも降水が増幅されるという観測・シミュレーションによる結果について、より定性的な理解を図る単純モデルを提案した。このモデルは、海風及び島の上での初期の降水による冷気プールの影響を含む、島の内向きに伝播する重力流が、日周的に島上の境界層の気塊を掃き出し (sweeping)、持ち上げる (lifting)、というものである。このモデルが示すところによると、島が大きいほど降水のピークは遅れ、日平均降水量は境界層内の積算水蒸気量に比例し、また時間平均的な降水量の増加に最適な島のサイズは重力流による風の流れが島上の気塊の浮力と同位相となるという条件によって決まる。シミュレーションによって得られた結果である、島のサイズが20kmという中程度のサイズで降水が最も増加することや、SSTに対して3~5%/Kの割合で降水が増加することが、この単純モデルによって説明可能であると指摘した。

Z. Kuang (ハーバード大学・米国) は、GCMにおける湿潤対流の効果の表現方法の問題について、近年の機械学習の手法を用いた研究に触れたのち、線形応答関数を用いた自身の手法について発表した。従来の定式化がQE、つまり瞬時の強制・応答関係を仮定する形であったのに対し、より現実的な定式化として、対流が持つ有限の時間スケールでの応答を許容する表現方法を導入した。

S. Powell (米国海軍大学院) は、熱帯の深い対流の

発生に対して水蒸気量は必要条件ではあるが十分条件ではない、つまり、大気が相対湿度80%を超えるような湿潤な環境下でも降雨強度がほぼ0から50mm/dayにわたる幅広い分布をもつ、ということに注目し、複数の地上観測地点におけるレーダーデータとゾンデデータを用いた解析を行った。そこで、降水強度が強い時には900hPa高度から700hPa高度における気温減率が約0.25K/km程度大きいことが示された。さらに理想実験においてもこの高度の気温減率に対して降雨強度が大きな感度を持つことを紹介した。

#### 2.4 第18回歴史シンポジウム (18th History Symposium)

本シンポジウムのテーマは、「AMSとNSFの相互作用：過去・未来」、「AMS100周年モノグラフ：100年間の進展」、「大気及び関連分野の歴史」、「AMSの歴史」、「気象現業と観測の歴史」、および「米国国立気象局・海軍気象局・空軍気象局などを含む100年間の気象学の発展」である。特に「AMS100周年モノグラフ：100年間の進展」(AMS Centennial Monograph - 100 Years of Progress) は、AMSが出版している雑誌「Meteorological Monographs」に順次掲載されている、基本的な研究領域における過去100年間の進展、および今後数十年にわたるグランドチャレンジをレビューする27の論文によって構成されるものである。

K. Emanuel は、熱帯低気圧に関する100年間の進展について、気象測器・観測プラットフォーム・モデル・基本的理解・予報の観点からまとめた。熱帯低気圧研究は、その気候学についての経験的な研究は古くからあったものの、本格的な科学研究が始まったのは1940年代であるとした。また、熱帯低気圧研究は様々な側面において満足いく進展を遂げているが、発生 (genesis) やスパイラルバンドといった興味深い問題が依然として残っていると。観測の面においては1940年代の航空機やレーダーに始まり衛星やドップラーレーダーといった目覚ましい発展があったのに対し、数値予報の面においては統計的手法よりもよくなったのは1990年代に入ってからであるとした。これらの発展と並行して予報精度は向上しているが、従来の進路・強度指標から地点ごとの確率的な指標へとより迅速に移行すべきであると指摘した。また質疑の中で熱帯低気圧の発生の理解が不十分である点に関して、彼の意見としては、雲放射相互作用の観点について、その重要性は知られていなかったもの、十分に注目されてこなかったと言及した。

D. Randallは、地球システムモデルに関する100年間の進展についてまとめる中で、1960年代のモデル研究初期から現在にかけての変化として以下を挙げた。①モデル化対象が「対流圏」から「対流圏・成層圏・海水を含む海洋・陸面・生態系や化学系・陸上の氷床」に広がったこと、②用途が「主に気候シミュレーションを目的とした好奇心駆動の学術研究」から「数値気象予報・気候変化シミュレーション及び（政府）機関の重点課題に適合するような学術研究」となったこと、③モデル研究の場が「米国内」から「世界中のモデリングコミュニティ」へと広がり多様な人々に関わるようになったこと、④モデルの捉え方が「理解をもたらすための道具」から「シミュレーションを行うための道具」となったこと、⑤モデル研究に携わる人が「利用者＝開発者」から「利用者>>開発者」となったこと、⑥研究グループが「小規模で非形式的に組織化したモデリンググループたち」から「大企業化された (corporatized) コミュニティ」となったこと、および⑦グループ間の関係として大部分が「クローズドショップなモデリング」から「多くの国際的な相互比較プロジェクトを伴うオープンショップなモデリング」となったこと。

ほかにも I. Held (プリンストン大学・米国) ら著名な研究者が次々に行う講演にはえもいわれぬ迫力があつた。

### 3. おわりに

はじめに述べたように本会は第100回記念大会ということもあり（筆者は本会へは初参加なので他の会と比較することはできないが）、ある種のお祭りムードを感じることができた。また、それにちなんだレビュー的な発表を第一線の研究者から聞いたのは貴重な体験だったと思う。また、筆者はもともと Schubert 博士の様々な実績を幅広く知っていたわけではなかったが、Wayne Schubert シンポジウムで発表したのは大正解だったと思う。というのも、シンポジウムでの発表の多くは Schubert 博士のこれまでの研究に関連するものであったので、その当時のエピソードを交えた発表がとても印象的だったのと同時に、現在も興味深い研究テーマであり続けているものが多く、その温度感を肌身で感じる事ができたからである。また、シンポジウム中には多くの講演があるため、Schubert 博士ご本人がそれらをどのくらい聴講されるのだろうか、と疑問に思っていたが、筆者が見た限り、

Schubert 博士は全ての講演に熱心に耳を傾けられていた。また、ポスターセッションにおいても、可能な限り全ての発表に立ち寄りということ、コアタイム終了時刻になってもポスター会場で議論されていたことが印象に残っている。筆者の発表にも Schubert 博士からのご助言をいただき、とても励みになった。また個人的ではあるが、シンポジウムの休憩時間に、こんな機会二度とない、と Schubert 博士ご本人に挨拶し一緒に突撃してくれた末松 環博士（東京大学）に感謝する。

以上のように、筆者にとって本会は非常に充実したものであつた。本稿を通じて少しでも今の海外コミュニティの動向や雰囲気が国内コミュニティに伝わり、良い効果をもたらすことを願う。また、本渡航に際し、日本気象学会国際学術交流委員会からの補助を受けた。本稿に目を通された若手研究者が、これをきっかけに本制度をさらに活用していただけたらと思う。また一方で、もちろん、筆者自身がこの経験を糧に研究をより前へと進めていくことが、自身にとってもコミュニティにとっても重要であると認識し、日々研究に励もうと思う。

### 謝 辞

本会への参加に際して、日本気象学会国際学術交流委員会より旅費の援助を受けました。深く感謝いたします。また、JSPS 科研費16H01846の助成を受けました。

### 略語一覧

AMS : American Meteorological Society 米国気象学会  
 DYNAMO : Dynamics of the Madden-Julian Oscillation  
 ERA-Interim : European Interim Reanalysis  
 GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル  
 MJO : Madden-Julian Oscillation マッデン-ジュリアン振動  
 MSE : Moist Static Energy 湿潤静的エネルギー  
 NASA : National Aeronautics and Space Administration 米国航空宇宙局  
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁  
 NSF : National Science Foundation 全米科学財団  
 SST : Sea Surface Temperature 海面温度  
 WRF モデル : Weather Research and Forecasting Model

## 参 考 文 献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Emanuel, K. A., 1995: The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3960-3968.
- Emanuel, K. A., 2019: Inferences from simple models of slow, convectively coupled processes. *J. Atmos. Sci.*, **76**, 195-208.
- Raymond, D. J., 1995: Regulation of moist convection over the west Pacific warm pool. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3945-3959.
- Yanase, T. and T. Takemi, 2018: Diurnal variation of simulated cumulus convection in radiative-convective equilibrium. *SOLA*, **14**, 116-120.
- Zhang, G. J., 2002: Convective quasi-equilibrium in midlatitude continental environment and its effect on convective parameterization. *J. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JD001005.
-