

第32回ハリケーンと熱帯気象会議参加報告*

辻 宏 樹**

1. はじめに

ハリケーンと熱帯気象会議 (Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology) は、米国気象学会が開催している学術会議である。初回は1958年に Technical Conference on Hurricanes としてフロリダ州マイアミビーチで開催された。おおよそ2年に1度開催されており、32回目となる今回はプエルトリコ自治連邦区のサン・ファンで2016年4月17日から22日まで開催された。プエルトリコでこの会議が開催されるのは初めてである。

会議には米国を中心に世界各地の国や地域から熱帯低気圧や熱帯気象の専門家が集まり、約700件の発表が行われた。発表の大部分は熱帯低気圧に関するものである。日本からも著者を含めて10名ほどが参加した。発表のうち、約100件は学生による発表であった。

一般の口頭発表は、4つのセッションが並行して行われ、1つのセッションあたり持ち時間15分の発表が6件から10件行われた。セッションは熱帯低気圧の強度だけで6つ (観測, 急発達 (Rapid Intensification), 力学, シアーの効果, 外的要因の寄与, 強度予報), 熱帯低気圧の構造で5つ (境界層過程, 降水過程, 地表風の構造, 外側壁雲の形成 (Secondary Eyewall Formation) と多重壁雲の置き換わり (Eyewall Replacement Cycle), 3次元構造) など、細かく分けられている。このほかにも数値モデル, 大気海洋相互作用, リモートセンシング, 気候変動, 対流などといった、熱帯低気圧や熱帯気象に関わる様々な

テーマのセッションが期間内で合計64開催された。発表の様子は第1図に示されている。なお、ほとんどの発表は録音され、web上で公開されている (URL: <https://ams.confex.com/ams/32Hurr/webprogram/>)。

ポスターセッションは、19日と21日の午後に開催され、それぞれの日で100件程度ずつの発表が行われた。セッションには1時間45分が割り当てられ、軽食と飲み物も提供されており (アルコールは有料)、議論に十分な時間をかけることができた (第2図)。

本稿はこの会議の報告であるが、会議のすべての内容に関して記述することは困難である。そのため、会議の内容のうち、著者が興味を持ったセッションを中心に報告する。本稿では、発表者名や発表者の所属は要旨における第一著者のものを表記する。そのため、実際の発表者が本稿と異なる場合や所属が変更になっている場合がある。



第1図 口頭発表の様子。

* Report on the 32nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology

** Hiroki TSUJI, 九州大学大学院
h-tsuji@kyudai.jp

© 2017 日本気象学会



第2図 ポスターセッションの様子。

2. 熱帯低気圧の強度 I : 熱帯低気圧の強度の観測

このセッションでは、衛星観測データや航空機観測データを用いた熱帯低気圧の強度に関する研究成果の発表が行われた。

R. G. Henning (米国海洋大気庁) は、ハリケーン Patricia (2015年) に対して行ったドロップゾンデ観測で得られた、最低気圧の新記録などを含むデータを紹介した。

B. C. Trabling (オクラホマ大学, 米国) は、熱帯低気圧中で生じる雷が熱帯低気圧の強度変化の予報に与える影響を理解するために、長期間の雷探知ネットワークデータセットを用いて5つの熱帯低気圧の事例解析を行った結果を発表した。解析の結果から、雷は鉛直シアアの弱い環境下における深い対流や強い上昇流と関係すること、鉛直シアアの弱い期間に起こる急発達では急発達の開始前と終了前にアイウォール領域において雷の群発 (burst of lightning) が生じること、アイウォール領域における雷の群発は眼の形成に先行して観測されることを示した。

S. N. Stevenson (ニューヨーク州立大学オールバニ校, 米国) も、雷の発生と熱帯低気圧の強度変化の関係に関する発表を行った。彼女はインナーコアにおける雷の群発 (inner core burst) に着目し、多くの熱帯低気圧で inner core burst の24時間後に強度が増すこと、インナーコアにおける深い対流の outbreak と強度変化の関係を理解するうえで対流が最大風速半径の内側にあるか外側にあるかが重要な要素となることを示した。

J. B. Wadler (オクラホマ大学, 米国) は、熱帯低気圧の対流バーストの動径・方位角方向の構造変化を

航空機搭載のドップラーレーダーデータを用いて調査し、強化過程にある熱帯低気圧と定常状態の熱帯低気圧では、最大風速半径の1から1.5倍の動径位置において、対流バーストの構造が異なることを示した。

J. Martinez (ハワイ大学, 米国) は、ハリケーンと強いハリケーンのそれぞれについて、強度変化時のハリケーンの構造の違いを1999年から2012年までの航空機観測データを用いて調査した結果を発表した。強化する時は接線風速の勾配が急で、渦度の最大値が中心にない構造 (リング状の構造) を持つこと、弱化する時も渦度がリング状の構造を持つこと、定常時には最大風速半径の内側で渦度分布が平坦であること、強いハリケーンでは眼の近傍で運動学的な構造の違いがみられることを示した。

Y. Wang (ハワイ大学, 米国) は、熱帯低気圧の強化率を決める要因と、理想的な状況下の最大強化率を明らかにするために、simple energetic model を用いた考察を行った結果を発表した。発表では、熱帯低気圧の強化率は熱帯低気圧の発達に有効なポテンシャルエネルギーで主に決まる強化ポテンシャルと地表摩擦による弱化率に支配されることを示し、その結果が観測データとも整合的であることを報告した。

E. A. Ritchie (ニューサウスウェールズ大学, オーストラリア) は、HURSAT データセット (Hurricane Satellite dataset, Knapp and Kossin 2007) に含まれる赤外衛星画像とマイクロ波観測データを Deviation Angle Variance (DAV) 法を用いて解析した結果を示し、DAV 法を用いることでどの程度熱帯低気圧の強度や構造の推定精度を改善できるかを議論した。

S.-N. Wu (マイアミ大学, 米国) は、熱帯低気圧の強度変化に対する ice water content (IWC) の分布の違いを CloudSat 衛星のデータを用いて調査し、IWCが多い領域は Nolan *et al.* (2007) において力学エネルギー効率 (Kinetic Energy Efficiency) が最大となる領域に位置すること、IWCを多く含む TC は強化する傾向にあり、このシグナルは24時間後の発達に対しても有効であることを示した。

3. 熱帯低気圧の強度 II : 急発達

このセッションでは、台風の強度に関する発表のうち、急発達に関する発表が行われた。

C. Tao (フロリダ国際大学, 米国) は、Tropical Rainfall Measuring Mission Microwave Imager

(TRMM/TMI) のデータを用いて急発達中の熱帯低気圧の降水と対流の分布の時間発展を調査し、急発達開始時には upshear-left (熱帯低気圧の中心を始点とする鉛直シアベクトルの上流側でシアベクトルに対して左側) において降水の空間被覆率が増えること、急発達中には upshear 半円における降水が増加すること、急発達終了時には降水の空間被覆率が急減することを報告した。

M. A. Bender (米国海洋大気庁) は、衛星データから得た熱帯低気圧の大きさや、海洋の構造の情報をモデルに組み込むことで、急発達の予測精度が向上することを発表した。

S. M. Hristova-Veleva (ジェット推進研究所, 米国) は、急発達時の降水と風の二次元構造の関係を明らかにするためにほぼ同時刻に行われた風と降水の衛星観測データを用いて波数解析を実施し、降水分布の対称性や降水強度、降水と風の動径分布を評価した。その結果、発表で示した衛星データの波数解析が熱帯低気圧の発展に対する予測可能性を持つことを明らかにした。

H. Hu (中国気象科学研究院) は、南シナ海における熱帯低気圧の急発達の予測精度を向上させるために、急発達の開始と関係する大気と海洋の変数のモデル内における閾値を新しい手法で評価した。その結果、新手法を用いることで南シナ海における熱帯低気圧の強度予測を改善できることを示した。

K. Peng (南京大學, 中国) は、北西太平洋の熱帯低気圧において、急発達時に最大風速変化と最低気圧変化が同期していない事例が存在することを示し、その原因がインナーコアにおける対流の構造と、初期の渦の強さであることを示した。

N. Qin (南京信息工程大学, 中国) は、急発達時に最大風速半径が変化しない事例について統計解析を行い、全体の約53%の事例が急発達時に最大風速半径が変化せず、特に強い熱帯低気圧においてこの傾向が顕著であることを示した。

Z. Xinghai (中国気象科学研究院) は、Typhoon Regional Assimilation and Prediction System (TRAPS) を用いた高解像度数値シミュレーションによって再現したスーパータイフーン Rammasun (2014年) の南シナ海における急発達過程を解析し、急発達前後のインナーコアの構造の違いや対流バーストの位置の違いを議論した。また、simple energetic model を用いた考察も行った。

4. 熱帯低気圧の強度III: 熱帯低気圧の強化の力学

このセッションでは、台風の強度に関する発表のうち、強化過程の力学に関する発表が行われた。

R. Rotunno (米国大気研究センター) は、理想化された熱帯低気圧の高解像度ラージエディシミュレーション中に現れる 110 m s^{-1} を超える地表風ガストに関連する渦の構造を解析し、この渦が竜巻のような構造を持つことを示した。また、乱流運動エネルギー収支解析から、境界層における接線風の鉛直シアによるシア生成項がガストの生成に対して重要であることを示した。

S. F. Abarca (米国海洋大気庁) は、熱帯低気圧の強化を運動学的構造の観点から解析するために、接線方向の運動方程式におけるメトリック項 (境界層において、接線風の加速に実質的に寄与する項) を接線風の減速に寄与する項である地表面摩擦項で割ったものを Hurricane Intensification (HIT) Ratio として定義し、GPS ドロップゾンデデータと数値モデルを用いて有用性を検証した。発表では、HIT Ratio は強化の解析や concentric eye wall の予報、モデルの初期化における運動学的制限として用いることができることを報告した。

J. E. Molinari (ニューヨーク州立大学オールバニ校, 米国) は、熱帯低気圧の強化において浅い対流が重要であるとする先行研究と、対流の outbreak と熱帯低気圧の強化に関係があるとする先行研究の矛盾点について議論した。

G. Paull (マギル大学, カナダ) は、慣性安定度が高い領域における加熱が熱帯低気圧を強化するメカニズムとして提唱されている2つのメカニズム, efficiency (Schubert and Hack 1982) と dynamic (e.g., Persing *et al.* 2013) のどちらの寄与が大きいかを明らかにするために、アイウォールの加熱を模した円環状の強制を慣性安定度の異なる初期渦に与えた数値実験の結果を報告した。バランスモデル (Sawyer-Eliassen 方程式) を用いて実験結果の解析を行い、接線風加速の説明には dynamic メカニズムが適していることを明らかにした。

C. J. Slocum (コロラド州立大学, 米国) は、wave-vortex approximation (Salmon 2014) に基づいた1層軸対称の浅水波モデル中のいくつかの領域 (2ヶ所, 3ヶ所, 複数箇所) に非断熱加熱に相当する mass sink を設定し、急発達までの潜伏期間の長さ、窪んだ渦位分布の形成、角運動量面と最大風速半

径の関係について議論した。

F. Zhang (ペンシルベニア州立大学, 米国) は, wind-induced surface heat exchange (WISHE) メカニズムの重要性を再度確かめるために Weather Research and Forecasting (WRF) モデルを用いた数値実験を行い, WISHE は熱帯低気圧の強化に必要な循環と地表面熱フラックスの間の正のフィードバックであること, WISHE なしではハリケーン Katrina (2005年) や Edouard (2014年) は存在できないこと, WISHE の仮定は弱い風による地表面熱フラックスを制限した実験における熱帯低気圧の強化の説明にも拡張できること, 熱帯低気圧の発達率は WISHE に依存することを示した。また, WISHE では表現されていない三次元の非対称性, 大気不安定性, 湿潤対流も熱帯低気圧の発達に寄与していることも示した。

R. K. Smith (ルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘン, ドイツ) は, f 面の静止した環境場における軸対称な渦を用いた熱帯低気圧の強化に関する研究のレビューを行った。

M. T. Montgomery (米国海軍大学院) は, 近年の研究で提唱されている, 境界層 inflow による角運動量輸送と境界層からの鉛直移流によってアイウォール付近が加速するというメカニズムが, 鉛直シアの存在する熱帯低気圧でも用いることができるかを明らかにするために, ハリケーン Earl (2010年) のシミュレーションを行い, 解析した結果を報告した。シアが存在すると, シアによって生じる eddy processes が低気圧を収縮させ, 循環の強化に寄与することが示された。

5. 熱帯低気圧のレインバンドと降水 I

このセッションでは, レインバンドの構造やレインバンドに伴う降水に関する発表が行われた。

Y. Wang (南京信息工程大学, 中国) は, WRF モデルで再現した台風 Chanchu (2006年) における4種類のレインバンド (principal, secondary, inner, outer) の構造の違いや熱力学的な違いを解析した。

Q. Li (南京信息工程大学, 中国) は, アウターレインバンドが鉛直シアの存在する環境場でどのように形成されるかを調査した。その結果, アウターレインバンドは, 変形 (deformation) によって誘起される単一のレインバンドから形成される場合, 変形が誘起するインナーレインバンドと混合することで組織化したインナーレインバンドから形成される場合, 渦ロ

スピー波と関係するインナーレインバンドから形成される場合の3通りのシナリオで形成されていることを示した。

A. A. Alford (オクラホマ大学, 米国) は, 上陸した3つの熱帯低気圧における渦ロスピー波を可搬型のレーダーで観測した結果と, 観測に基づいた渦ロスピー波が誘起するインナーコア領域のレインバンドの概念モデルを示した。また, 渦ロスピー波が誘起するレインバンドがインナーコア領域における降水に与える影響を議論した。

D. S. Nolan (マイアミ大学, 米国) は, 熱帯低気圧中で励起・伝播する重力波がシミュレーションや観測で確認できたことを報告し, 重力波の観測結果が熱帯低気圧の位置や強度のリモートモニタリングに用いることが可能かを議論した。

M. Wang (南京大學, 中国) は, タイフーン Matmo (2014年) におけるレインバンドの微物理過程の特徴の発展を偏波レーダーとドップラーレーダーを用いて調査し, レインバンド中では粒子径分布が小から中程度の粒子 (平均粒子径 1.41 mm) が多く存在することを明らかにした。加えて, 雨滴による雲水の付着に伴う雲水から雨水への変換が, 強い降水を支配していることも明らかにした。

B. R. Brown (ハワイ大学, 米国) は, WRF モデルで再現された熱帯低気圧におけるパラメタリゼーションの正確さを評価するために, ハリケーン Arthur (2014年) とハリケーン Ana (2014年) のシミュレーションを行い, レーダー観測から得た粒子径分布と比較した結果を報告した。比較の結果, Thompson aerosol-aware double-moment bulk scheme と spectral bin microphysics が最も再現性が良いことが明らかになった。

C. J. Matyas (フロリダ大学, 米国) は, shape metric を用いてハリケーン Isabel (2003年) の上陸時における観測と, WRF モデルで行った2種類の積雲パラメタリゼーションと3種類の微物理パラメタリゼーションを組み合わせた6種類のシミュレーションの比較を行った結果を報告した。

6. 熱帯低気圧の構造 III: 地表風の構造

このセッションでは, 熱帯低気圧の構造に関する発表のうち, 台風の水平スケールなど, 地表風の構造に関する発表が行われた。

M. Powell (Risk Management Solutions, 米国)

は、ハリケーンのリアルタイム解析システムである HWind の、この二十数年間における発展を報告した。

J. Knaff (米国海洋大気庁) は、風速半径と最低気圧を推定するための統計的、力学的手法を進展させるため、衛星赤外画像を基にした熱帯低気圧の大きさの指標と、熱帯低気圧の強度の気候値で規格化した指標と Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS) から得た強度の指標を用いて計算された熱帯低気圧の大きさの予報結果を比較し、新しい手法の有用性を議論した。

V. Misra (フロリダ州立大学, 米国) は、北大西洋の熱帯低気圧の Integrated Kinetic Energy (IKE) を環境場のパラメータから予測するための新しい統計予測スキームについて議論した。

F. Judt (フロリダ大学, 米国) は、ハリケーンの大きさと構造に関するアンサンブル予報の予報スキルを調査し、ハリケーンの大きさの予報に関する不確実性はモデルの物理過程に起因するもののほうが確率論的な不確実性に起因するものよりも大きく、物理スキームの改良が必要であることを示した。

S. Wang (インペリアルカレッジロンドン, 英国) は、ハリケーンによる被害の観点から考えた際にハリケーンの大きさに寄与する要素である鉛直シアとハリケーンの強度に寄与する要素である SST のどちらの寄与が大きいかを、 λ モデル (Wang *et al.* 2015) で求めた風速分布をもとに議論した。

D. R. Stovorn (アリゾナ大学, 米国) は、大西洋における熱帯低気圧の大きさの変化と関係する環境場を主成分解析を用いて調査し、熱帯と中高緯度それぞれにおける熱帯低気圧の大型化に好ましい環境場と、熱帯低気圧が縮小する際の環境場を示した。

D. R. Chavas (パデュー大学, 米国) は、熱帯低気圧の地表風速の動径分布をモデル化し、観測データとの整合性を議論した。

7. 熱帯低気圧の構造Ⅳ：外側壁雲の形成と多重壁雲の置き換わり

このセッションでは、熱帯低気圧の構造に関する発表のうち、外側壁雲の形成 (Secondary Eyewall Formation, SEF) や多重壁雲の置き換わり (Eyewall Replacement Cycle, ERC) に関する発表が行われた。

J. Guo (ハーバード大学, 米国) は、SEF の研究

の新たな枠組みとして、軸対称の dry circulation model で鉛直流や温位移流を計算し、これらの応答をもとに雲解像モデルで加熱を計算するシステムを構築し、得られた結果について議論した。

C.-C. Wu (国立台湾大学) は、SEF における非対称過程の寄与と、バランス力学、非バランス力学それぞれによる SEF への寄与を理解するために、理想化数値実験を行った結果を示した。実験結果の解析から、SEF が生じる領域における接線風加速の説明にはアウターレインバンドと関連する境界層における角運動量輸送の eddy 成分が必要であることと、SEF が生じる領域の動径風はほぼバランス力学によって説明できることを示した。

B. P. Tyner (フロリダ国際大学, 米国) は、Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) モデルを用いて SEF に対する微物理パラメタリゼーションの感度を調べる実験を行い、理想化実験とハリケーン Edouard (2014年) の再現実験のどちらでも雪の終端速度を $1/4$ にすると SEF や ERC が起こることを示した。加えて、SEF や ERC の発生が雪の終端速度に感度をもつ理由について議論した。

H. Jin (米国海軍研究所) は、熱帯低気圧の急発達過程、SEF 過程、ERC 過程の理解のために、ハリケーン Wilma (2005年) の高解像度数値シミュレーションを行った。シミュレーションでは、従来から報告されている SEF 過程の他に、上陸時の弱まった熱帯低気圧において既存のアイウォールの内側に第二のアイウォールが形成されることによる SEF も確認されたので、これに関する議論も行った。

F. Zhang (ペンシルベニア州立大学, 米国) は、雲解像アンサンブルモデルを用いて環境場に鉛直シアが存在する場合の SEF の力学と強度変化の予測可能性を調査し、シアの効果と関係する非対称な構造や氷の微物理過程に伴う moat (2つの壁雲間の雲のない領域) の形成などについて議論した。

Y.-T. Yang (国立台湾大学) は、長時間持続する concentric eyewall (CE) を持つ熱帯低気圧について受動型マイクロ波衛星画像を解析した結果を報告し、長時間持続する CE を持つ熱帯低気圧は大きな moat と広い外側のアイウォールを持つこと、外側のアイウォールの広さと moat の広さは良い相関があること、大きな外側のアイウォールは多くの雲水量を保持していることを示した。また、外側と内側のアイウォールにおける加熱の力学的効率についても議論し

た。

J. M. García-Rivera (ノースカロライナ A&T 州立大学, 米国) は, Advanced Research WRF (ARW) モデルを用いてハリケーン Katrina (2005 年) の上陸直前の SEF をシミュレートし, SEF 過程について Huang *et al.* (2012) が提唱したメカニズムとの整合性や相違点を議論した。

K. Zhao (南京大學, 中国) は, ドップラーレーダーで観測された台風 Usagi (2013 年) の 3 重のアイウォールについて, その構造や形成過程を調査した結果を報告した。

8. ポスターセッション

著者 (辻 宏樹, 九州大学) は 19 日のポスターセッションにおいて, TRMM/TMI で得られた降水分布と風速 15 m s^{-1} 以上の領域の半径 (R15) で定義した台風の大きさの変化の関係を調査した結果を発表した。台風が大型化する時は R15 の内側から外側にかけて降水が分布する一方で, 大きさが変化しない時は降水が中心近傍に集中して分布することを示した。

9. おわりに

この会議では, 日本ではほとんど聞くことができない研究内容に関する発表を聞くことができ, 海外における台風研究の活発さを肌で感じる事ができた。特に, 衛星や航空機を用いた観測的研究, 観測から得られた知見をもとに台風の強度や構造に関する数値的研究などは日本よりも進んでいると感じた。現状では日本における台風の強度や構造に関する研究は他国より遅れているようだ。しかし, 日本においても 2016 年度から名古屋大学, 琉球大学, 気象研究所と台湾の研究機関による台風に対する航空機観測のプロジェクトが始まるので, これをきっかけに日本における台風研究が一段と進むことが期待される。

また, この会議は米国気象学会の会議であるので, 米国の研究者は当然多いが, 米国を除くと台湾や中国の研究者が多いように感じた。一方で日本の研究者は

少数であったが, これは会議の時期が日本の年度切り替わりの時期であるうえに, 開催地のプエルトリコに行くのが大変 (著者の場合, 乗り継ぎの都合もあり片道 30 時間ほどかかった) であることが原因のようである。次回 (2018 年) は 4 月 16 日から 20 日にフロリダ州ポンテ・ヴェドラでの開催予定である。熱帯低気圧を研究されている方はぜひ参加の検討をされてはと思う。

謝辞

本会議への参加に際し, 日本気象学会国際学術交流委員会より渡航費用の支援を受けました。この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- Huang, Y.-H., M. T. Montgomery and C.-C. Wu, 2012: Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku (2008). Part II: Axisymmetric dynamical processes. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 662-674.
- Knapp, K. R. and J. P. Kossin, 2007: New global tropical cyclone data set from ISCCP B1 geostationary satellite observations. *J. Appl. Remote Sens.*, **1**, 013505, doi:10.1117/1.2712816.
- Nolan, D. S., Y. Moon and D. P. Stern, 2007: Tropical cyclone intensification from asymmetric convection: Energetics and efficiency. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3377-3405.
- Persing, J., M. T. Montgomery, J. C. McWilliams and R. K. Smith, 2013: Asymmetric and axisymmetric dynamics of tropical cyclones. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 12299-12341.
- Salmon, R., 2014: Analogous formulation of electro-dynamics and two-dimensional fluid dynamics. *J. Fluid Mech.*, **761**, R2, doi:10.1017/jfm.2014.642.
- Schubert, W. H. and J. J. Hack, 1982: Inertial stability and tropical cyclone development. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1687-1697.
- Wang, S., R. Toumi, A. Czaja and A. Van Kan, 2015: An analytic model of tropical cyclone wind profiles. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **141**, 3018-3029.