

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24253006

研究課題名(和文) 台風の初期渦を発生させる降水雲群の構造と形成過程の解明

研究課題名(英文) Structure and development processes of mesoscale convective systems accompanied initial vortices of a tropical cyclone

研究代表者

上田 博 (Uyeda, Hiroshi)

名古屋大学・地球水循環研究センター・教授

研究者番号：80184935

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,300,000円

研究成果の概要(和文)：西太平洋熱帯域に位置するパラオ共和国に偏波レーダとドップラーレーダを設置し、雲粒子ゾンデとの同期観測を行うことで、パラオ周辺における台風の初期渦を形成する降水システムの発生・発達過程と渦の生成過程を観測的に理解することを目的とした。観測結果より、(1) 対流性降水域においてライミング成長は活発ではなく霰粒子がほとんど見られない、(2) 層状性降水域における雪片の存在領域は、対流域後方50 km付近から後方の幅20 km程度、厚さは融解層から上層1.5 km程度である、(3) 針状結晶や樹枝状結晶がほとんど観測されなかったなど、熱帯の降水システムについての新しい知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In the western equatorial Pacific, precipitation systems with positive vorticity in the lower and middle troposphere sometimes develop to tropical cyclones. To reveal the structure of precipitation systems involving vortices and mechanisms to intensify their vorticity, a field experiment was conducted in Republic of Palau in June 2013 (PALAU2013). An X-band polarimetric Doppler radar, and X-band Doppoler radar, and a direct observation system for cloud and precipitation particles (hydrometeor videosonde: HYVIS) were installed in Palau.

We make new findings for a precipitation system using HYVISs and a polarimetric radar: (1) densely rimed ice crystals and graupels were not identified in the convective region, (2) Aggregates formed by column crystals exist from 50 to 70 km behind the convective region between the melting level and a height of 6.5 km, and (3) Needle and dendrite crystals were not identified under relatively low supersaturation for ice above the melting level.

研究分野：気象学

キーワード：台風の初期渦 積乱雲内の強い渦 偏波レーダ ドップラーレーダ 雲粒子ゾンデ 雲微物理過程 降水雲群の形成過程 パラオ

1. 研究開始当初の背景

近年、気候変動による非常に強い台風の発生数の増加が懸念されている。台風は、海面水温の高い西太平洋の北半球低緯度帯で発生する。海面から多量の水蒸気供給を受けて積乱雲が発達し、組織化されて降水システムに成長する。一部の降水システムは、中心付近での暖気核の形成による気圧の低下と水蒸気の集積により、積乱雲が継続して発達することで、降水システム内部の渦が強化されて台風へと発達する。しかしながら、台風が発生する西太平洋上では、気象レーダ等の地上（海上）観測機器を用いて長期間にわたって稠密な観測を実施することが困難であり、台風の初期渦を発生させる降水システムの発生・発達過程と渦の成長過程については理解が進んでいない。このことは、台風の本質的な理解にとって課題となっている。

最近、航空機によるハリケーン観測 (Houze et al. 2009) や数値実験 (Montgomery et al. 2006) により、台風の発生時に強い渦をもつ背の高い積乱雲 (Vortical Hot Tower: VHT) と上空の層状性降水域に渦を持つ水平スケール 200 km 程度のメソ降水系 (Mesoscale Convective Vortex: MCV) の存在が指摘され、種々の発達段階の VHT と MCV の集合体が降水システム内部の渦度を強化して台風へ発達する可能性が、一つの有力な作業仮説として提唱されている (図 1, Houze 2010)。

図 2 は、上記の作業仮説を実証するための観測手法の概念図である。この作業仮説を実証するためには、VHT や MCV の個々の渦の水平スケール・鉛直スケール・渦度・持続時間や、VHT 内に存在すると考えら得る強い上昇流による渦度の上方伝搬や伸長 (stretching) 過程、そして、VHT や MCV の集積による降水系全体の渦度の強化過程を、降水システム内の気流の連続観測により明らかにする必要がある。また、MCV の形成過程として、層状性降水域内の氷晶粒子や雪片の生成に伴う昇華凝結加熱と暖気核の形成および渦度の強化過程を理解するために、氷晶粒子や雪片の種類と数密度を観測する必要がある。同時に雲解像モデルによる台風の発生に関する数値実験と解析が必要で

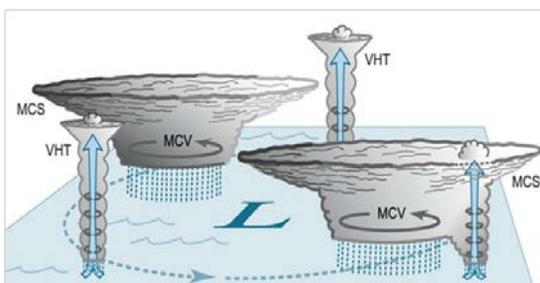


図 1. VHT と MCV の集積による台風の発生過程の概念図。台風の初期渦形成過程における降水システムと渦の形態を示す。Houze (2010)より引用。

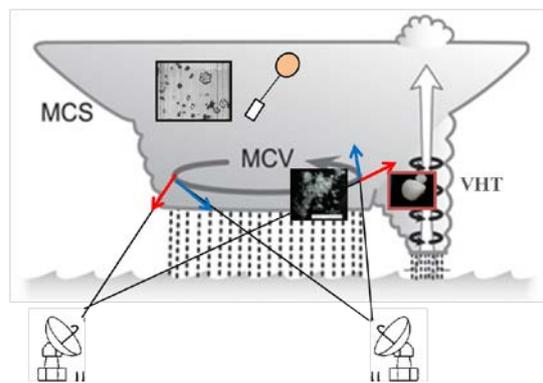


図 2. 偏波レーダ（ドップラーレーダ）と雲粒子ゾンデを用いた降水システム内部の気流場・渦構造と雲・降水粒子観測の概念図。

ある。このような観測を西太平洋上で行うことができる唯一の場所がパラオ共和国である。パラオ共和国では、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) によって 2004 年からドップラーレーダを用いた観測が行われている。本研究課題では、JAMSTEC のドップラーレーダに加えて、名古屋大学の偏波レーダをパラオ共和国に持ち込み、両者の同時観測によって台風の初期渦の形成に寄与すると考えられる降水システム内部の 3 次元気流構造と降水粒子の同時観測を行うことにより、台風の発生機構の解明を目指す。

2. 研究の目的

本研究は、台風の初期渦を伴う降水システムが頻繁に発生・通過するパラオ共和国に名古屋大学の偏波レーダ 1 台を持ち込み、既に設置してある JAMSTEC のドップラーレーダとの同期観測を実施することで、降水システム内部の 3 次元気流場の連続観測を行う。偏波レーダおよびドップラーレーダの観測範囲内の VHT および MCV の 3 次元気流構造の連続観測により、VHT の渦の特徴 (渦度・水平スケール・鉛直スケール・持続時間) と渦の強化過程及び MCV の渦の構造を明らかにすることを目的とする。

また、偏波レーダの観測範囲内で雲粒子ゾンデ (Hydrometeor Videosonde: HYVIS) を降水システム内に放球し、気温・湿度の鉛直プロファイルと融解層よりも上層における凝結物 (過冷却水滴・氷晶粒子・雪片) の形状・粒径・個数などを観測することで、降水システム内部の雲微物理学的な構造を示すことも目的とする。特に、層状性降水域上部における凝結物の分布と氷に対する過飽和度を同時に観測することで、昇華凝結領域の分布を示すことを目的とする。

VHT や MCV の特徴や集積過程については、デュアルドップラー解析を用いた 3 次元気流場の観測結果と、雲解像モデル Cloud Resolving Storm Simulator (CRSS: Tsuboki 2008) を用いた毎日のシミュレーション

ョン実験の結果との比較により、台風の形成に大きな寄与をすると想定される降水システム内部の渦の形成過程を解明し、台風の発生機構に関する研究を進展させる。

3. 研究の方法

パラオ共和国における観測体制を図3に示す。名古屋大学の偏波レーダ1台をパラオ共和国ガラロング州に設置し、JAMSTECがパラオ共和国アイメリック州に設置しているドップラーレーダとネットワークを組んで同時観測を行うことで、VHTやMCVの観測を行う。また、降水システム内にHYVISを放球し、気温・湿度プロファイルと氷晶粒子や雪片の形状・大きさ・数濃度と粒径分布を取得する。これらの観測結果を用いて、
 (1) VHTの構造とその併合過程、
 (2) MCVの構造、
 (3) 降水システム内部の雲微物理学的構造を解析対象として研究を実施する。

本研究課題では、2013年5月30日から7月1日までを集中観測期間として、教員・研究員・大学院生がパラオ共和国に渡航し、レーダとHYVISを用いた観測を実施した。この間に、後に台風の発生に寄与したと考えられる降水システムを3ケース観測することができたため、以後の集中観測を行わないこととした。集中観測期間には、名古屋大学地球水循環研究センターにおいて、CReSSを用いて、パラオを中心とした領域における毎日のシミュレーション実験を実施し、その結果を総観規模の渦度場や収束域の解析に役立てた。

個々のVHTやMCVの内部構造の観測は、JAMSTECのドップラーレーダ観測の範囲内で可能である。しかしながら、層状性降水域が広く発達した降水システム全体の構造

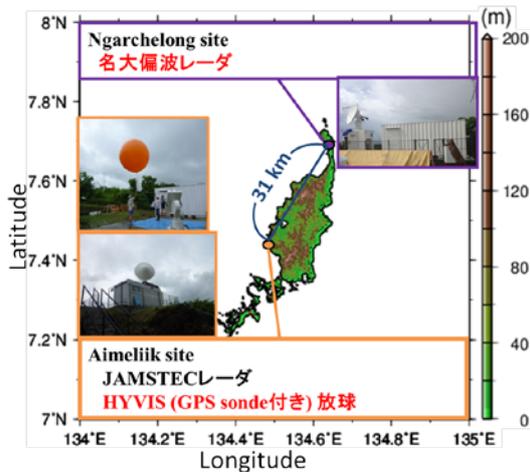


図3. PALAU2013における観測測器の配置図。アイメリックにJAMSTECのドップラーレーダと雲粒子ゾンデの放球地点を、ガラロングに名古屋大学の偏波レーダを設置した。

はレーダ観測範囲外に広がり、同一時刻の観測結果だけでは十分な解析を行うことができない。このため、観測範囲内の観測データを時空間変換した解析とCReSSを用いた再現実験との比較によって行っていく。

4. 研究成果

2台のレーダとHYVISを用いた集中観測を2013年5月30日から7月1日までパラオ共和国に滞在して実施した。図4に、名古屋大学の偏波レーダで観測された集中観測期間中の高度2 km・5 km・8 kmにおける15 dBZ以上の反射強度の面積の時間変化を示す。6月5日(DOY=156)から6日には後に台風3号の形成に寄与したと考えられる降水システムが、6月15日(DOY=166)には台風4号の形成に寄与したと考えられる降水システムが、6月26日(DOY=177)には台風6号の形成に寄与したと考えられる降水システムが通過している。これらの日には、対流性降水域と層状性降水域からなる降水システムが偏波レーダの観測範囲内に広く分布しており、エコー面積が大きくなっていることが特徴的である。台風の形成に寄与したと考えられるこれらの降水システムがパラオ周辺を通過した際に、これらの観測に成功した。

6月5日から6日に観測されたケースでは、降水システム内部の水平スケールが数キロメートル程度(降水セルに相当する)のVHTと思われる渦を複数確認することができた(図5)。これらの渦のいくつかは高度1~4 kmの範囲で観測されていた。現在、デュアルドップラー解析で精度の高い鉛直流の値を算出できていないために、これらの渦の成長過程を推定することはできていないものの、今後、これらの渦についての水平スケール・鉛直スケール・渦度・継続時間についての統計的な特徴を示すとともに、発生した大気環境場と関連付けることで、渦度の生成・集積過程の研究を行っていく必要があると考えている。

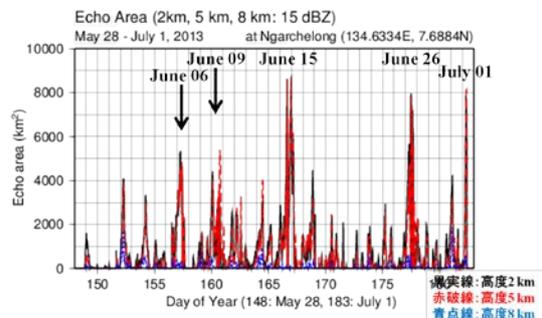


図4. 名大偏波レーダで観測された集中観測期間中の高度2 km(黒実線)、5 km(赤破線)、8 km(青点線)の各高度における15 dBZ以上の反射強度の時間変化。

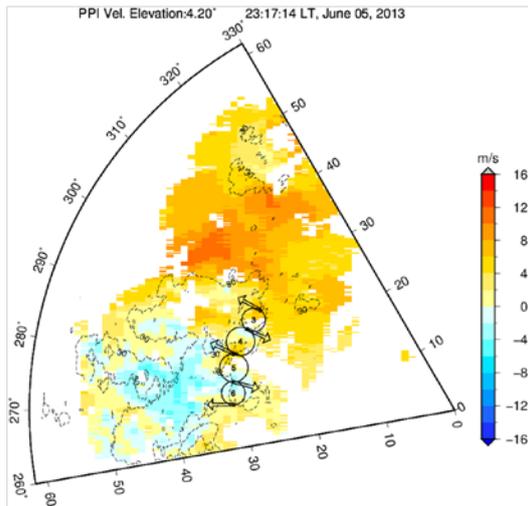


図 5. 2013 年 6 月 5 日 23 時 17 分に名大レーダで観測された仰角 4.2 度の PPI 観測におけるドップラー速度場。暖色系はレーダから遠ざかる成分、寒色系はレーダに近づく成分のドップラー速度を示す。明瞭な渦を○で示している。

6 月 15 日には、進行方向前面に南北に連なる対流性降水域、後面に層状性降水域を伴う南北 200 km、東西 150 km 程度の降水システムが、観測範囲内を東から西に通過した。この降水システムに対して、HYVIS4 基を連続して放球した。図 6 に降水システム内で偏波レーダにより取得された反射強度 (Z_h) の水平・鉛直断面図と、 Z_h 、反射因子差 (Z_{DR})、偏波間位相差変化率 (K_{DP}) の鉛直断面図を示す。

この降水システム内の氷晶粒子や雪片の分布を、偏波パラメータの 3 次元分布 (図 6) と HYVIS より得られた画像 (図 7) との比較により調べた。その結果、得られた特徴は以下の通りであった。

- (1) HYVIS で取得された氷晶粒子の形状と氷晶の発生・成長を示す小林ダイヤグラム (Kobayashi 1961) の比較から、氷晶粒子が対流性降水域上層で形成されていると考えられる。
- (2) 対流性降水域においてライミング成長は活発ではなく霰粒子はほとんど見られない。
- (3) 対流性降水域で形成された氷晶粒子は層状性降水域に流されながら沈降していると考えられる。
- (4) 層状性降水域において柱状粒子の凝集成長により雪片が形成されていると考えられる。
- (5) HYVIS と偏波パラメータの値の解析から、層状性降水域において、雪片が存在していた領域は対流域の後方約 50 km 付近から後方の幅 20 km 程度、厚さは融解層から上層 1.5 km 程度である (図 6 の青四角で囲まれた領域)。

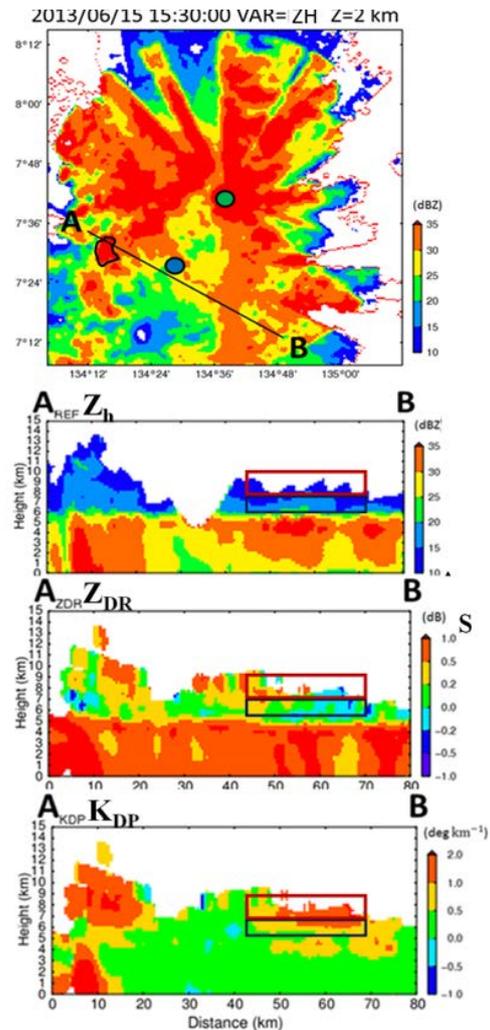


図 6. 2013 年 6 月 15 日 15 時 30 分の高度 2 km における反射強度の水平断面図 (上図)。青丸は JAMSTEC ドップラーレーダ、緑丸は名大偏波レーダの位置を示す。線分 AB に沿った反射強度 (中上図)、反射因子差 (中下図)、偏波間位相差変化率 (下図) の鉛直断面図を示す。HYVIS と偏波パラメータの値から、板状もしくは柱状の氷晶粒子が存在する領域を赤四角、雪片が存在する領域を青四角で示す。

- (6) 雪片が存在すると考えられる領域の上層には、板状もしくは柱状の氷晶粒子が存在している領域 (図 6 の赤四角で囲まれた領域) がある。 Z_h の値の鉛直傾度から、この領域では昇華凝結成長が卓越していると推定できる。
- (7) 針状結晶や樹枝状結晶は HYVIS 画像では全く観測されなかった。

これらの観測結果は、熱帯域における非常に発達したスコールラインの構造を示した先行研究 (Houze 1989) と一致するところが多い (例えば(1)や(3)のもの、(2)や(7)などは本研究で得られた新しい知見であり、降水シ



図 7. 2013年6月15日14時30分にアイメリークサイトから放球されたHYVISにより、高度7.1 kmにおいて取得された氷晶粒子（柱状粒子）の画像。画像の横軸は1.2 mm、縦軸は0.9 mmである。

システム発生の地域や大気環境場により、降水システムの雲物理学的な構造が異なる特徴を示していると考えられる。

6月26日に放球されたHYVISでは、発達した降水セルの上部において、過冷却水滴と推定される粒子を多数観測することができた。HYVISで取得された動画から0.3秒毎に画像を切り出し、連続して画像解析を行った際に、粒子がフィルム面上で移動するものを凍結水滴、移動しないものを面上で凍結した過冷却水滴であるとした。この形で分類した場合、図8で示されるような非常に大粒径の過冷却水滴が見られた。また、高度9 km以上（気温 -23°C 以下）において、粒径が $50\ \mu\text{m}$ を超えるような大粒径の過冷却水滴と推定される粒子を多数取得することができた。これらの過冷却水滴は、アメリカ合衆国テキサス州で発達した降水セルの上部で観測された結果（Rosenfeld and Woodley 2000）と比較すると数濃度が数桁小さく、平均粒径は大きかった。これらの相違点は、大陸性と海洋性の降水機構の違いを示していると考えられ、今後、更なる解析を行っていく必要があると考えられる。

PALAU2013で取得された観測結果については、ようやく初期の解析を行うことができたという段階である。

特に、デュアルドップラー解析による降水システム内の気流構造（雲力学場）の解析で上昇気流・下降気流の風速がきちんと算出できないという問題が生じており、VHTの特性を示すことができていない。デュアルドップラー解析における問題点の解決を図るための可能性をようやく特定できたことから、改めて解析を行っていくつもりである。

一方、偏波パラメータとHYVISの比較を行うことで、降水システム内部の雲微物理学的な3次元構造を示すことができたことは、本研究における大きな成果である。熱帯域の降水システムの融解層よりも上層において、針状結晶や樹枝状結晶がほとんど見られず、冬季の日本海側の北陸地方とは降雪粒子の

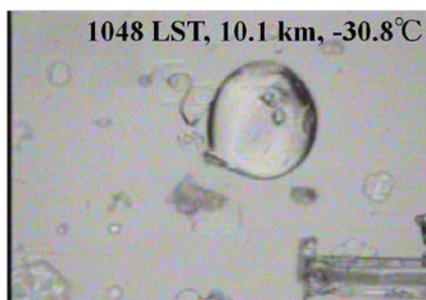


図 8. 2013年6月26日10時13分にアイメリークサイトから放球されたHYVISにより、高度10.1 kmにおいて取得された粒子（過冷却水滴が雲粒子ゾンデのフィルム上で凍結したもの）の画像。画像の大きさは図7と同様である。

形成・成長環境が大きく異なることが示唆された。融解層よりも上層での水蒸気量（過飽和度）が小さいことが原因と思われるが、このような状況をもたらす可能性として、対流性降水域における上昇流が弱く、凝結物が融解層よりも上層に輸送される量が少なかった可能性がある。デュアルドップラー解析の結果から降水システム内の上層気流の速度を算出して、降水機構の特徴をまとめていく必要があると考えている。

さらに、降水システム内の凝結物の分布をCRESSを用いた数値モデルの結果と比較していくことで、降水システム内部の加熱量や水蒸気の鉛直フラックスの値を推定するとともに、渦の集積過程について詳しく解析していく必要があると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計7件）

- ① Tsuboki, K., M. K. Yoshioka, T. Shinoda, M. Kato, S. Kanada, and A. Kitoh: Future increase of supertyphoon intensity associated with climate change. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 646-652, 2015, doi:10.1002/2014GL061793.
- ② Oue, M., K. Inagaki, T. Shinoda, T. Ohigashi, T. Kouketsu, M. Kato, K. Tsuboki and H. Uveda: Polarimetric Doppler radar analysis of organization of a stationary rainband with changing orientations in July 2010. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 457-481, 2014, DOI:10.2151/jmsj.2014-503.
- ③ Morotomi, K., T. Shinoda, Y. Shusse, T. Kouketsu, T. Ohigashi, K. Tsuboki, H. Uveda and I. Tamagawa: Maintenance mechanisms of a precipitation band formed along the Ibuki-Suzuka Mountains on September 2-3, 2008. *J.*

[学会発表] (計 18 件)

- ① 大脇良夫・篠田太郎・一瀬明良・牛田祐貴・瀬瀬丈晴・廣瀬駿・大東忠保・民田晴也・増永浩彦・耿驃・城岡竜一・坪木和久・上田博: 2013年6月15日にパラオ共和国で観測された降水システム内の凝結物と偏波パラメータ対応関係. 日本気象学会2014年度秋季大会, 福岡国際会議場, 福岡, 2014年10月21日.
- ② Ohwaki, Y., T. Shinoda, A. Ichinose, S. Hirose, T. Kouketsu, T. Ohigashi, H. Minda, H. Masunaga, B. Geng, R. Shirooka, K. Tsuboki, and H. Uveda: Distribution of supercooled water droplets and ice particles in a mesoscale convective system observed by hydrometeor videosondes (HYVISs) in Palau in June 15, 2013. 10th International Conference on Mesoscale Meteorology and Tropical Cyclones (ICMCS-X), National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado, USA, Sep. 18, 2014.
- ③ Uveda, H., T. Shinoda, Y. Ohwaki, Y. Ushita, A. Ichinose, S. Hirose, T. Kouketsu, T. Ohigashi, H. Minda, H. Masunaga, B. Geng, R. Shirooka and K. Tsuboki: Microphysical structure in a mesoscale convective system observed by Hydrometeor Videosondes (HYVISs) in Palau in June 2013. Asia Oceania Geosciences Society 2014 Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan, July 31, 2014.
- ④ 篠田太郎・一瀬明良・大脇良夫・牛田祐貴・酒井貴紘・瀬瀬丈晴・小林哲也・李根玉・角ゆかり・廣瀬駿・藤間弘敬・大東忠保・民田晴也・増永浩彦・山田広幸・坪木和久・耿驃・城岡竜一・上田博: PALAU2013において観測された降水システムの構造: 初期解析結果. 日本気象学会2013年度秋季大会, 仙台国際センター, 仙台, 2013年11月18日.

[図書] (計 1 件)

- ① 気候変動研究の最前線, 地球気候環境研究の連携に関する大学附置研究センター協議会 (著者に上田博・坪木和久・大東忠保を含む), 2015年3月刊行, 258pp.

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

- (1) 修士論文: 3 件
- ① 牛田祐貴: PALAU2013 期間中に観測された降水セル上部における雲・降水粒子の粒

径分布特性. 名古屋大学大学院環境学研究科修士論文, 2014年3月.

- ② 大脇良夫: PALAU2013で観測された降水システム内の雲微物理学的構造, 名古屋大学大学院環境学研究科修士論文, 2014年3月.
 - ③ 酒井貴紘: 西太平洋夏季モンスーン期に観測されたシア一場における降水形成過程. 名古屋大学大学院環境学研究科修士論文, 2014年3月.
- (2) 新聞掲載: 篠田太郎, 2013年夏のパラオにおける雲粒子ゾンデ観測について. 日本経済新聞 (朝刊), 2014年9月7日.
 - (3) ホームページ: PALAU2013 期間中の CReSS を用いたシミュレーション実験の結果は <http://www.rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp/~kato/result/> より「RESULT (2 SCREENs, 4 SCREENs のどちらでも良い)」→ 次のページの左上のプルダウンメニューより「2013PALAU25」→ 初期時刻の日付を指定することで、CReSS を用いた毎日のシミュレーション結果の大気環境場、降水システムの構造を閲覧することが可能である。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 博 (UYEDA HIROSHI)
名古屋大学地球水循環研究センター・教授
研究者番号: 80184935

(2) 研究分担者

城岡竜一 (SHIROOKA RYUICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・大気海洋相互作用研究分野・研究員
研究者番号: 20222432

篠田太郎 (SHINODA TARO)
名古屋大学・地球水循環研究センター・准教授
研究者番号: 50335022

大東忠保 (OHIGASHI TADAYASU)
名古屋大学・地球水循環研究センター・助教
研究者番号: 80464155

坪木和久 (TSUBOKI KAZUHISA)
名古屋大学・地球水循環研究センター・教授
研究者番号: 90222140

(3) 連携研究者 なし