

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02132

研究課題名(和文) Atmospheric Riverを介した中緯度熱帯結合と日本域豪雨に関する研究

研究課題名(英文) A study on the torrential rainfall over the Japan region through Atmospheric River connecting tropics and midlatitudes

研究代表者

高藪 縁 (Takayabu, Yukari)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：10197212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,200,000円

研究成果の概要(和文)：対流圏上層の循環が暖候期日本域の豪雨に果たす役割について、新たな知見を得た。対流圏を多湿の空気が流れるAtmospheric River (AR)と上層切離低気圧との相乗効果が局所的豪雨を起す仕組みを2014年広島豪雨の解析、数値実験、長期統計解析で示した。衛星搭載降雨レーダ立体観測からは、まず降雨特性の大規模環境(ジェットと不安定)への依存性を定量化した。次に夏の日本域の「極端降雨」と「極端対流」を統計的に抽出し、降雨特性と環境場を比較した。2018年7月豪雨では停滞した上層トラフが前面に高湿なAR場を作る仕組みを示し、「極端降水」に対応する比較的背が低い広い雨域を発生させた状況を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、降水の激甚化が社会問題となっている。現在の防災の面でも、将来の気候変動に対する適応策のためにも、豪雨の特性、大規模場環境場、発生の仕組みを精確に把握する必要がある。本研究は、日本域暖候期の豪雨について、特に過去に見過ごされてきた上部対流圏の大規模循環とそれに伴うAtmospheric River (AR)と呼ばれる対流圏の湿った空気の流れの役割を明らかにした。高機能衛星観測による降雨特性の統計や数値実験を通じた新しい知見は、学術的に高い価値を持つと共に、広島豪雨や2018年7月豪雨の理解に結び付き、豪雨に対する防災対策、および、将来への社会の備えに対して社会的な貢献が期待される。

研究成果の概要(英文)：We renewed understandings of roles of upper tropospheric large-scale circulation upon heavy rainfalls over Japan in warm seasons. First, we clarified effects of interplay between an Atmospheric River and an upper-level cut-off-low upon localized heavy rainfalls, with data analyses and numerical experiments of the Hiroshima Rainfall Event in 2014, and confirmed it statistically with a long-term data. Next, we used 3D precipitation radar data from TRMM and GPM satellites, to quantitatively relate rainfall characteristics to large-scale conditions; jet streams and stability. We also statistically extracted 'extreme rainfalls (ER)' and 'extreme convections' with the TRMM data, and compared their rainfall characteristics and their environments. A torrential rainfall event in July 2018 was studied in this context. The event was an extreme of the ER, with moderate storm heights and a wide area, occurred in a very wet and relatively stable AR-like condition in front of a stagnated trough.

研究分野：数物系科学

キーワード：極端降水 Atmospheric River 切離低気圧 亜熱帯ジェット 広島豪雨 2018年7月豪雨 TRMM降雨レーダ 雲解像モデル実験

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、日本において記録的降水の被害が多発している。日本域の豪雨をもたらす大循環場についてのメカニズム理解は不十分で、近頃の豪雨が全球規模の気候変動に起因するものか否かについても、学術的な調査に基づく科学的な理解が必要である。Atmospheric River (AR) とは、湿潤な熱帯域から、高い鉛直積算水蒸気量 (IWV) の領域が亜熱帯域を越して細長く伸びる現象であり、米西海岸の豪雨をもたらすことが知られている。日本の梅雨・秋雨期の集中豪雨の際も、熱帯の対流域から中緯度にかけて数千 km におよぶ顕著な雲域がしばしば観測され、AR によって多量の水蒸気が供給されていると考えられる。2014 年 8 月の広島豪雨の際も、インドシナ半島から延びる AR が観察された。しかしながら日本の豪雨に対する AR の効果は、先行研究も殆ど無く学問的に十分に認識されていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、観測と数値モデルを有機的に組み合わせ、中緯度力学と熱帯対流結合の観点から、日本域に流れ込む AR の形成過程を理解し、AR が日本域の豪雨に果たす役割について解明する。さらに AR を伴う中緯度熱帯結合の季節変化や経年変動の解析を通して、気候変動に伴う日本域降水特性の変化に及ぼす効果も議論する。

### 3. 研究の方法

中緯度熱帯相互作用としての AR を抽出して日本域の豪雨との関係を解明するため、AR を比較的細い (数 100 km の) 帯として熱帯から中緯度に水蒸気を輸送する流れと定義する。本研究では、まず、これまでに蓄積された衛星 (SSM/I) および気象解析データ (ERA-I, JRA55) 等を利用して AR を抽出し、AR の構造と豪雨への効果を研究した。次に、2014 年 8 月の広島豪雨について前研究により指摘した AR と上空の切離低気圧 (COL) の相乗効果について確認するため、雲解像領域モデル (CReSS) による再現実験・感度実験を行った。さらに、AR と COL の相乗効果の存在を統計的に確認するために、高頻度な降雨データの得られる 14 年間の気象 (JRA-55) データから、日本付近の AR と COL を抽出し、双方の距離による降水強度の違いを調査した。一方、全球降水観測 (GPM) 衛星搭載の降雨レーダによる雨の立体観測データを用い、日本域夏季の「極端降水」と「極端対流」を統計的に特定し、長期再解析 JRA55 の気象場から、それらの環境場の違いを解析した。また、成層圏を陽に表現した気候モデルを構築し、成層圏の循環の再現が降水帯の形成の様子にいかに関与するかについて調べた。水同位体比情報を利用して降水の水蒸気起源の議論を行い、遠方からの水蒸気輸送が実際にどの程度日本域の豪雨に貢献しているかを調べた。また、研究期間に発生した 2018 年 7 月豪雨について、GPM レーダデータからその降雨の特徴を調べ、気象場データを用い、豪雨の際の特徴的な大規模循環が強い雨を持続させたメカニズムを解析した。

### 4. 研究成果

(1) 2014 年 8 月 20 日未明に 77 名の犠牲者を出した 3 時間に 200mm を超える広島豪雨について、Atmospheric River (AR) と切離低気圧 (COL) の役割について数値実験を用いて確認した。これまで我々は、AR が自由大気の水蒸気量を増加させたところに南東から COL が接近して相互作用し、豪雨が発生したことを指摘していた。本研究では、この豪雨について雲解像モデルを用いた感度実験を行ったところ、AR の大規模水蒸気輸送と COL に伴う力学的強制を表現した実験でのみ豪雨が再現され、いずれかが働かないときには豪雨は発生しなかった。また、地形も広島に降水を集中させることにある程度貢献した。豪雨については、従来から下層水蒸気輸送や地形の効果が注目されているが、それに加え、自由大気の水蒸気や大気上層の擾乱も重要な原因になることを示した点が重要である (図 1. Hirota et al. 2016, J. Clim.)。

(2) 6 時間ごとの客観解析データ (ERA-I) を用いて AR を自動検出するアルゴリズムを作成し、1980-2014 年の 34 年間の AR を検出した。

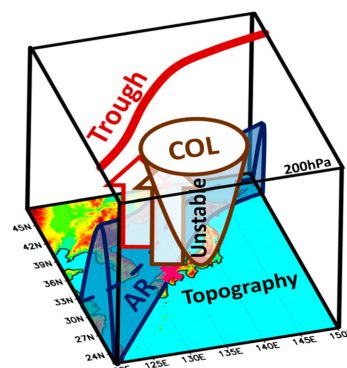


図 1: 2014 年 8 月の広島豪雨と大規模大気場の関係。AR の深く湿った水蒸気を青色、蛇行するジェット気流を赤色、切離低気圧を茶色で示す。

(3) 高頻度な衛星観測降雨データの存在する 14 年間のデータから暖候期日本域の AR と COL の相乗効果が広島豪雨と同様に雨を強める仕組みを統計的に確認し、そのメカニズムを解析した。COL が AR の近くにある場合、AR から離れている場合に比べ、降水が有意に強化される領域が確認され、その位置関係は、広島事例と一致していた(図2)。比湿や気温偏差、上昇流といった力学的・熱力学的状況や、準地衡上昇流強制の分布においても類似性が示され、AR と COL の相乗効果は降水強化の一般的なメカニズムであり、広島豪雨はその極端な事例であったことを示した(Tsuiji and Takayabu, 2019, MWR)。

(4) 頻繁に AR を伴う亜熱帯ジェット(STJ)と対流圏下層の大気下層対流不安定度(LCI)に着目し、大規模環境場がいかに梅雨期の降水特性を決めるか調査した。熱帯降雨観測計画衛星搭載降水レーダが観測した3次元降水イベントを、統計的に3タイプに分類(小面積タイプ・熱帯組織化タイプ・温帯低気圧タイプ)し、STJ 強度と LCI へのタイプ別降水量依存性を定量化した。梅雨期の STJ は、上昇流強制により AR の様に対流圏中層を加湿し、積雲対流の組織化に好都合な環境場を提供する一方、LCI は浅い積雲を発生させる役割を持ち、下層が非常に対流不安定な場では組織化せずに深い積雲対流が発達することが分かった(Yokoyama et al. 2017, J. Clim.)。この結果を全球降雨観測(GPM)に適用し(図3)大規模場と降水特性とを結び付け将来の降水特性を推定した(Yokoyama et al., 2019)。

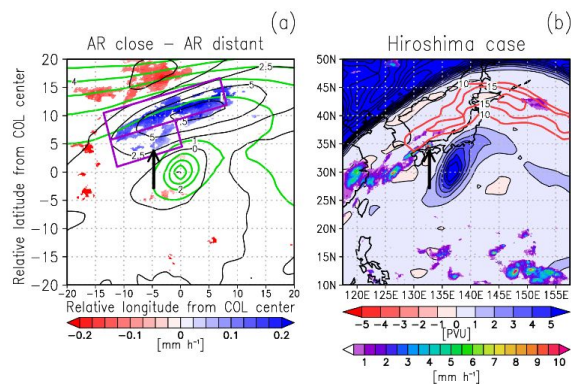


図2：(a)COL が AR の近くにある事例と無い事例の降水のコンポジットの差(カラー、差が 95% 有意な領域のみ表示)。緑線と黒線は各々 AR の近くにある事例における 350 K 面渦位(PVU)と可降水量偏差(mm)のコンポジット。矢印は COL 中心に相対的な広島的位置を示す。(b)広島での大雨事例時(2014 年 8 月 19 日 18UTC)の降水(虹色、 $\text{mm h}^{-1}$ )、350 K 面渦位(赤青色、PVU)、可降水量偏差(mm)。矢印は(a)と同じ。

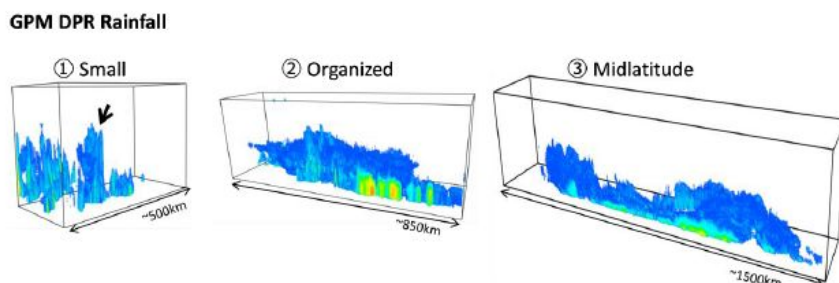


図3：GPM 降水レーダにより分類された 小面積タイプ、熱帯組織化タイプ、温帯低気圧タイプの降水イベントの例。

(5) 衛星搭載降水レーダデータを用いて、日本域とアメリカ西岸域における AR に伴う降水特性の違いを調べた。両領域共に AR 内で降水発生頻度の割合ならびに降水に占める強い雨の割合が増加していた。一方、強い降水を伴う対流性降水の鉛直構造は、アメリカ西岸域では AR 内では比較的背が低く、輸送された多量の水蒸気が沿岸山岳によって強制上昇されることによって暖かい雨の過程が活発化していることを示すのに対し、日本域では強い降水を伴う対流性降水の鉛直構造に AR 内外で大きな違いはみられなかった。日本域の AR 内外の違いは層状性の鉛直構造に見られ、AR 内では、融解層以下のレーダ反射強度の地表に向かう減少傾向が小さかった。東アジア域は他の地域に比べて、層状性プライトバンド下層でレーダ反射強度が地表に向かって増加する傾向が見られており(Kobayashi et al. 2018)、AR の降雨増幅は主に層状性降水域で行われていることが示唆された。このことは、日本近傍で自由対流圏の湿度に伴って組織化する降水が増えるという(3)の結果と整合的である。

(6) CMIP5 データベース(IPCC 第 5 次評価報告書作成に使われた気候モデルデータベース)に収められた大気海洋結合モデル出力における、亜熱帯・中緯度の上部対流圏から下部成層圏にかけての力学擾乱とそれによる降水への影響、そして両者の将来変化予測に関する研究を行った。その結果、梅雨降水帯の位置の将来変化予測についてのモデル間のばらつきが、AR 形成に関わる、気象学的なジェットと降水の関係の延長で理解できることが明らかになった(Horinouchi et al., 2019)。

(7) 気候モデル(MIROC-AGCM)を用いて、同一の物理過程・パラメータ、水平解像度に設定

し、モデルトップの高度や成層圏解像度を変えた4種類の実験を行った。地表面気圧と降水分布において、成層圏を含むモデル(L34, L72, L168)が含まないモデル(L34)より現実の再現性が良くなっていた。これらのスコアはモデルで用いられている各種パラメタリゼーションのチューニングにより改善される可能性があるものの、成層圏の有無の影響を受ける地表面気圧の分布や関連する降水分布を物理的に正しく再現する為には、成層圏を含むことが重要であることが強く示唆された。さらに成層圏解像度の違い(L42 - L72)及び中間圏の有無(L72 - L168)も、対流圏循環場に有意な差をもたらすことが示された(Kawatani et al. 2019)。

(8) 13年間のTRMM衛星搭載降雨レーダデータから盛夏期日本周辺の「極端降水イベント」と「極端対流イベント」を抽出し、それぞれが起こった大気の状態を統計的に調査した。極端降水をもたらす雨雲は相対的に低く、雷を殆ど伴わなかった。また、極端降水発生時の大気状態は比較的安定であることが特徴的である。一方、極端対流イベントは頻繁な発雷を伴い、大気が不安定な状態で多く観測された。極端降水イベントの大規模環境場は、自由対流圏への潤沢な水蒸気供給が明瞭であった。下図は極端降水イベント発生時の鉛直積算水蒸気量とその水平フラックスの気候値からの偏差であるが、自由対流圏(図4左)では中国南部から日本域上空にかけてARのような帯状の湿潤偏差が見られるが、下層(図4右)では南西からの水蒸気供給があるものの、有意な偏差は発生域付近に限定されている。事例別には多くの事例で、蛇行した亜熱帯ジェット気流に沿ったいわゆるARに似た構造が認められた。

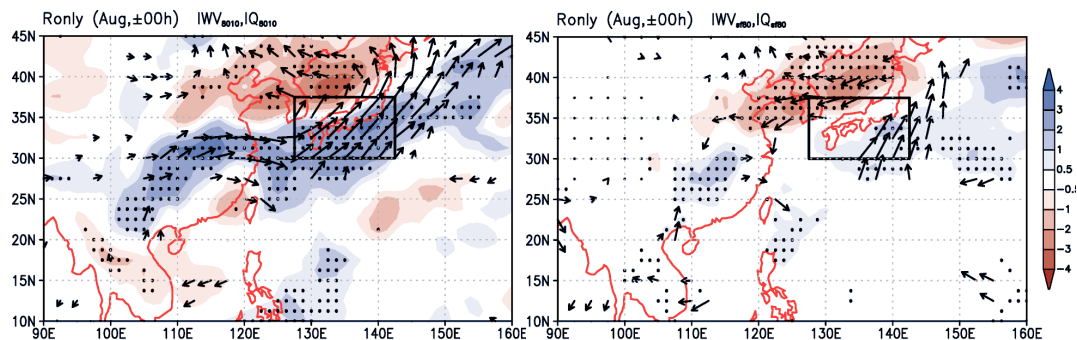


図4：極端降水イベントに対する、800-100 hPa (左図) および地表-800 hPa (右図) で積算した水蒸気量 (陰影, 単位 mm, 黒点は Student-*t* 検定で 95% 有意な領域) およびその水平フラックス (単位  $\text{mm m s}^{-1}$ ) の偏差合成図。イベント発生直前の JRA-55 データから作成。

(9) 2018年7月5-8日にかけて西日本の広域で豪雨が発生し、甚大な被害をもたらされた。同期間には、朝鮮半島から日本海にかけて細く折れ曲がった対流圏上層のトラフが停滞した。

この事象は本科学研究費に深く関連していたため、急遽データを収集し、7月豪雨の仕組みについての解析を行った。豪雨をもたらした南西-北東方向に細長く伸びた降水システムは、このトラフの前面に分布し、南西からトラフ前面にかけて伸びる可降水量の大きな領域と対応していた(図5)。本研究では、対流圏上層トラフに着目し、2018年7月豪雨における降水システムの特徴と大規模環境場を調査した。解析の結果、豪雨をもたらした降水システムは、比較的背が低く、広大な層状性降水域を伴う非常に良く組織化した降水システムであることが示された。このシステムは、比較的安定かつ対流圏が深く湿った大規模環境場で生じていた。対流圏下層では南西寄り及び南寄りの水蒸気フラックス収束が顕著であった。一方、対流圏中層は、トラフに伴ってその前面で力学的に強制された上昇流により持続的に加湿されていた。このような Atmospheric river 的な大規模環境場が、西日本上空を深く湿潤化し、豪雨をもたらした組織化降水システムを維持したと考えられる。(Sinpo et al. 2019, Yokoyama et al., submitted)

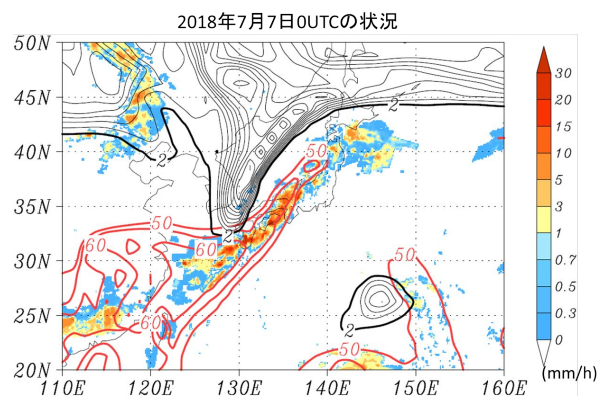


図5：2018年7月7日OUTCにおける降水強度 ( $\text{mm h}^{-1}$ ; 色)、可降水量 (mm; 赤色コンター)、350 K 等温位面上における渦位 (PVU; 黒色等値線)。

対流圏下層では南西寄り及び南寄りの水蒸気フラックス収束が顕著であった。一方、対流圏中層は、トラフに伴ってその前面で力学的に強制された上昇流により持続的に加湿されていた。この様な Atmospheric river 的な大規模環境場が、西日本上空を深く湿潤化し、豪雨をもたらした組織化降水システムを維持したと考えられる。(Sinpo et al. 2019, Yokoyama et al., submitted)

(10) 上記(9)の2018年7月豪雨事例について、さらに雨の特性と環境場とについて、2017年九州北部豪雨と比較解析を行った。その結果、2018年7月豪雨は、降雨システムの背が比較的低く(7)の結果のAR状の「極端降水」に対応する場だったのに対し、多数の発雷が報告された九州北部豪雨は大気が不安定な環境で「極端対流」の場であったことが示された(Tsuji et al., 気象学会)。

( 1 1 )平成 27 年関東・東北豪雨時に茨城県つくば市真瀬で観測された降水及び水蒸気の同位体比データを用いることで、豪雨時の水蒸気輸送及び降水過程について解析した。結果として、短期間に異なる海域からの水蒸気が到達したことが明らかになり、水蒸気同位体比( 180 )が 9 月 8 日から 10 日にかけて増減するという挙動が、水蒸気の起源の違いによって引き起こされたということがわかった。水蒸気起源の特定への水の安定同位体比観測の有効性が示された(野本・芳村 2017)。

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 18 件 )

Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, O. Arakawa, and T. Ose, 2019: A study on future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments. *J. Climate*, DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0656.1. 査読有

Horinouchi, T., S. Matsumura, T. Ose, and Y. N. Takayabu, 2019: Jet-precipitation relation and future change of mei-yu/ baiu rainband and subtropical jet in CMIP5 coupled GCM simulations, *J. Climate*, 32, 2247-2259, /doi/pdf/10.1175/JCLI-D-18-0426.1. 査読有

Sinpo, A., 23 名 Y. N. Takayabu ( 24 番目 ), 6 名, 2019: Primary factors behind the Heavy Rain Event of July 2018 and the subsequent heat wave in Japan in boreal summer 2018., *SOLA*, 15A DOI:10.2151/sola,15A-003. 査読有

Kawatani, Y., K. Hamilton, 他 4 名, 2019: The effects of a well-resolved stratosphere on the simulated boreal winter circulation in a climate model. *J. Atmos. Sci.*, <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JAS-D-18-0206.1> 査読有

Wei, Z., X. Lee, 24 名 and K. Yoshimura, 2019: A global database on high-frequency isotopic compositions of water vapour measured with infrared isotopic spectroscopy near the Earth surface, *Scientific Data*. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.302> 2019. 査読有

Tsuji, H. and Y. N. Takayabu, 2019: Precipitation enhancement via the interplay between atmospheric rivers and cut-off lows. *Mon. Wea. Rev.*, DOI: 10.1175/MWR-D-18-0358.1 査読有

Hirota, N., M. Ohta, Y. Yamashita, and M. Takahashi, 2018: Roles of intraseasonal disturbances and diabatic heating in the East Asian jet stream variabilities associated with the East Asian winter monsoon. *J. Climate*, 31, 2871-2887, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0390.1>, 2018. 査読有

Gray, L. J., Anstey, J. A., Kawatani, 他 3 名, 2018: Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8227-8247, <https://doi.org/10.5194/acp-18-8227-2018> 査読有

Hamada, A., and Y. N. Takayabu, 2018: Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events around Japan in the TRMM region. *J. Climate*, 31, 6933-6945, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0632.1>. 査読有

Kobayashi, K., S. Shige, and M. K. Yamamoto, 2018: Vertical gradient of stratiform radar reflectivity below the bright band from the tropics to the extratropical latitudes seen by GPM. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 144(Suppl.1), 165-175, doi:10.1002/qj.3271 査読有

Yamamoto, M. K., S. Shige, C.-K. Yu, and L.-W. Chen, 2017: Further improvement of the heavy orographic rainfall retrievals in the GSMaP algorithm for microwave radiometers. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 56, 2607-2619, doi:10.1175/JAMC-D-16-0332.1. 査読有

Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, and T. Horinouchi, 2017: Precipitation Characteristics over East Asia in Early Summer: Effects of the Subtropical Jet and Lower-Tropospheric Convective Instability, *J. Climate*, 30, 8127-8147, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0724.1> 査読有

野本大輔, 芳村圭, 2016: 平成 27 年関東・東北豪雨時のつくば市真瀬における水蒸気同位体比間変動の決定要因に関する研究. 2016 土木学会論文集 G ( 環境 ), 地球環境研究論文集, doi:10.2208/jscej.73.I\_275, 査読有

Hirota N., Y. N. Takayabu, M. Kato, and S. Arakane, 2016: Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 1145-1160. <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-15-0299.1> 査読有

[ 学会発表 ] ( 計 96 件 )

N. Hirota, Y. N. Takayabu, M. Kato, S. Arakane: Role of an Atmospheric River and

an Upper Cold Low in the Extreme Precipitation at Hiroshima on August 19th 2014. AOGS2015, Singapore, 2015.

A. Hamada, Y. N. Takayabu, C. Liu and E. Zipser : Weak Linkage between the Heaviest Rainfall and Tallest Storms, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015.

C. Yokoyama and Y. N. Takayabu: Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric instability on precipitation characteristics in East Asia in early summer, AOGS2016, Beijing, 2016.

Y. N. Takayabu: Precipitation observed from space and its extremes, Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-6), Singapore, 2017.

H. Tsuji and Y. N. Takayabu: A statistical study on synergetic effects of atmospheric rivers and cut-off lows upon precipitation, AGU Fall Meeting, New Orleans, 2017.

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕なし

〔その他〕

ホームページ等東京大学 大気海洋研究所 気候システム研究系 高数研究室  
<http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~takayabu/index-j.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：廣田渚郎

ローマ字氏名：HIROTA, Nagio

所属研究機関名：大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所(1年目)

部局名：北極観測センター

職名：特任研究員

研究者番号 ( 30750616 ):

研究分担者氏名：重 尚一

ローマ字氏名：SHIGE, Shoichi

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学系研究科

職名：准教授

研究者番号 ( 60344264 ):

研究分担者氏名：河谷芳雄

ローマ字氏名：KAWATANI, Yoshio

所属研究機関名：独立行政法人 海洋研究開発機構

部局名：地球環境部門環境変動予測研究センター

職名：主任研究員

研究者番号 ( 00392960 ):

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：堀之内 武

ローマ字氏名：HORINOUCI, Takeshi

研究協力者氏名：横山 千恵

ローマ字氏名：YOKOYAMA, Chie

研究協力者氏名：芳村 圭

ローマ字氏名：YOSHIMURA, Kei

研究協力者氏名：廣田渚郎 (2年目以降)

ローマ字氏名：HIROTA, Nagio

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。