

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340142

研究課題名(和文) インドネシア海洋大陸における雨滴粒径分布の地上ネットワーク観測

研究課題名(英文) Network observations of raindrop size distribution over Indonesian maritime continent

研究代表者

橋口 浩之 (Hashiguchi, Hiroyuki)

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：90293943

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円、(間接経費) 4,710,000円

研究成果の概要(和文)：降水メカニズムの解明には、降水量だけでなく、雨滴粒径分布(DSD)の計測による降水物理量の定量的把握が重要である。東西5000kmにわたり多様な地形を持つインドネシア海洋大陸では、インドネシア全体に跨る観測網が不可欠である。本研究では、コトタバ(スマトラ島)・ポンティアナ(カリマンタン島)・マナド(スラウェシ島)・ビアク(ニューギニア島近傍の小島)にディストロメータを整備し、DSDの連続観測を実施した。経度・降水雲タイプ・MJO・雷活動などとDSD特性との関連について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is important to measure not only rain amount but also raindrop size distribution (DSD) to understand a rain mechanism. The network observations of DSD over Indonesian maritime continent is indispensable. Disdrometers were installed at Kototabang (Sumatra), Pontianak, (Kalimantan), Manado (Sulawesi) and Biak (New Guinea), and the continuous observations of DSD were carried out. It clarified about the relation of longitude, a precipitating cloud type, MJO, thunder activity, etc. and the DSD characteristics.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学

キーワード：ウィンドプロファイラー 国際共同観測 熱帯域インドネシア 降水特性 発雷 雨滴粒径分布 DSD 海洋大陸

1. 研究開始当初の背景

インドネシア周辺の島嶼領域は、海と陸が共存するユニークな地理的特徴から、“インドネシア海洋大陸”と呼ばれる。インドネシア海洋大陸は、海水面からの豊富な水蒸気の供給により、地球上で最も積雲対流活動が活発な地域の一つであり、地球規模の大気循環・水循環に大きな影響を与える。この地域の積雲対流活動は、数年スケールのエルニーニョ・南方振動(ENSO)・数10日スケールのマッデン・ジュリアン振動(MJO)、1日スケールの海陸風・山谷風など様々な時間・空間スケールで変動する。しかし、この地域での観測データは乏しく、インドネシア海洋大陸での気象現象の理解は進んでいない。

我々は、現地研究機関(航空宇宙庁(LAPAN)、科学技術評価応用庁(BPPT)、気象地理物理庁(BMKG)等)との密接な協力のもと、インドネシアにおける地上観測拠点を構築し、インドネシアにおける大気観測を実施してきた。1992年に西ジャワ州スルボンに、1998年に西スマトラ州コトタバンに1.3GHz帯ウィンドプロファイラーを設置し、大気境界層や降水に関する研究を行った。2001年には大型の50MHz帯レーダーである赤道大気レーダー(EAR)を建設し、科研費特定領域研究「赤道大気上下結合」などにより連続観測を継続し、対流圏下層から電離圏に至る大気の上層結合を解明するとともに、雲・降水システムにおける鉛直分布や積雲対流発達機構に関する貴重な知見を得た。EARのような50MHz帯大気レーダーは、鉛直流の影響のない高精度の雨滴粒径分布(Drop Size Distribution; DSD)推定が可能であるが、最低観測高度は1km程度に限定される。

東西5,000kmにわたり多様な地形を持つインドネシアでは、インドネシア全体に跨る観測網が、降水特性の定量的解明に不可欠である。我々は、2005～2009年度に、地球観測システム構築推進プラン「海大陸レーダーネットワーク構築」により、スマトラ島・カリマントタン島・スラウェシ島・ニューギニア島近傍に赤道上を東西に貫くウィンドプロファイラー(WPR)観測ネットワークを構築した。WPRは、高時間・高度分解能で風速3成分や降雨特性を連続観測可能である。これまでに、WPR観測網の長期連続データを用いて、積雲対流の発達における陸地のスケール依存性や、全球再解析の風速の再現精度を解明した。

同じ降水強度でも、大きな少数の雨滴が降水強度を決定する背の高い層状性降雨と、多数の小さな雨滴が降水強度を決定する背の低い対流性降雨では、降水の発生・維持メカニズムが大きく異なる。そのため、多様性を持つ降水メカニズムの解明には、従来用いられている雨滴体積の積分量(降水量)計測では

なく、DSDの計測による降水物理量の定量的把握が重要である。ENSO・MJOは、積雲対流が活発なインドネシア海洋大陸における降水特性を大きく変調する。ENSO・MJOに伴う降水特性の経度時間変動を直接観測できるDSD観測網の整備は、降水の発生・維持メカニズムの本質解明に重要である。

数100kmの範囲の降水分布を連続観測可能な気象レーダーは、降水過程の定量的理解に不可欠である。近年、インドネシアにおいてBMKGにより気象レーダー観測網の整備が進められている。気象レーダーでは、観測量(レーダー反射因子Z)と降水強度(R)を関連付ける経験式(Z-R関係)を用いて降水強度を推定する。DSDを計測するディストロメータ(雨滴粒径分布測定器)は、降水量のみを計測する雨量計と異なり、ZとRを同時に求めることが可能である。そのため、DSD観測に基づく気象レーダーデータ処理アルゴリズムの改善は、気象レーダーの降水量推定精度の向上に直結する。インドネシアにおける地上DSD観測網を整備し、気象レーダー雨量プロダクトの精度向上につなげることが、学術的観点だけでなく実利用の面からも求められている。正確な雨量データは、農林水産業・工業・防災などの人間活動に不可欠な情報である。本研究で整備するDSD観測網を用いたインドネシア海洋大陸における降水特性の定量的理解は、地球環境変動解明の面だけでなく、人間生活・産業活動の面からも重要な意義を持つ。

2. 研究の目的

本研究では、既存のウィンドプロファイラー観測網の各サイト(コトタバン・ポンティアナ・マナド・ピアク)にディストロメータを設置することで、インドネシアの西端から東端をカバーする地上DSD観測網を整備する。ディストロメータに加えてウィンドプロファイラー・雷放電観測網の観測データを用いて、降水タイプ(対流性・層状性)・雷活動度・降水量を指標に加えたDSD観測データベースを構築する。

構築されたDSD観測データベースを活用し、DSDの地域特性や日変動・季節内変動特性、さらにはそれらの雲活動・雷活動との関連を明らかにする。気象レーダーの観測精度向上のため、ディストロメータで得られるDSDとZから、Z-R関係を検討する。これらの基礎検討で得られた成果を、将来のインドネシアの気象レーダー観測網における雨量観測精度の向上達成や、さらには衛星搭載降雨センサーの実運用時における観測精度改善達成につなげる。

3. 研究の方法

DSD 地上観測網の整備:

図 1 に示すウィンドプロファイラー観測網の各サイト(スマトラ島コトタバン(100.32°E, 0.20°S)・カリマンタン島ポンティアナ(109:37°E, 0:00°S)・スラウェシ島マナド(124:92°E, 1:55°N)・ニューギニア島近傍ビアク(136:10°E, 1:18°S))にディストロメータを整備する。観測データを衛星回線により京都大学に準リアルタイムで転送する。

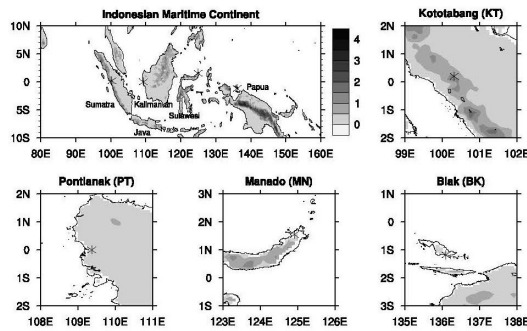


図 1. インドネシア海洋大陸及びコトタバン・ポンティアナ・マナド・ビアク周辺の地形。

DSD 観測データセットの作成:

ディストロメータで得られた雨滴粒径分布の生データを直接解析するとともに、DSD の定量化に一般的に用いられる修正ガンマ分布を想定したフィッティングを行う。修正ガンマ分布のパラメータから雨量・median volume diameter・mass-weighted diameter などの降水物理量、さらにレーダー反射因子(Z)の観測量を得る。

対流性降雨・層状性降雨の類別は、重要な降水特性の基礎データの一つである。ウィンドプロファイラーによる降水粒子落下速度観測データから、高精度で対流性降雨・層状性降雨の判別を行う手法を用いたデータセット作成を行う。

雷活動強度は、積雲対流活動を示す指標となるため、積雲対流活動と DSD との関連を定量化するための優れた指標である。雷放電のネットワーク観測装置を活用して、雷活動強度を指標とした DSD 観測データセットを作成する。

DSD 観測データの解析:

日周期～MJO～季節変化を対象に、DSD 特性の地域や時間による変動を解析する。また、対流性降水・層状性降水のそれぞれにおける DSD の代表値を決定し、Z-R 関係を導出することで、気象レーダーによる降水強度推定について検討する。

4. 研究成果

まず雲活動の全体的な特徴を概観するため、Calbone et al.[J. Atmos. Sci., 2002]に従い、PHD₂₃₀(Percent High Cloudiness)のホフメラーダイアグラムにおける雲システムの伝搬速度、持続時間、水平距離を求めた。ここでは、それぞれ 2.5m/s 以上、3 時間以上、100km 以上の雲群を解析対象とした。対象領域は海洋大陸域の南緯 10 度～北緯 10 度、東経 80～160 度であり、毎時の輝度温度データを使用した。ホフメラーダイアグラムは次元を 3 次元から 2 次元に縮退する効果があるので、雲伝搬のより詳細な統計的特徴を推定するため、TREC(Tracking Radar Echo by Correlation)法も試みた。

図 2 に伝搬方向毎の持続時間と水平距離の関係を示す。西向きと東向きの比は 3 対 1 であり、西向き伝搬の方が一般に伝搬速度が速く、持続時間・距離ともに長い傾向がある。すなわち、西向き伝搬が平均的に持続時間 9.5 時間、距離 519km であったのに対して、東向き伝搬は 7.5 時間、378km であった。1000km 以上・20 時間以上の事例について、西向き・東向き伝搬速度の中央値はそれぞれ 14.2m/s・13.5m/s であった。緯度・季節特性は ITCZ(熱帯収束帯)の年周期に強く依存していた。西向き伝搬がほとんど季節依存性がないのに対して、東向き伝搬は季節や緯度によって大きく変動していた。これらの特徴は、単純に風による雲の移流では説明できないが、下層風に大きく依存しているようであった。

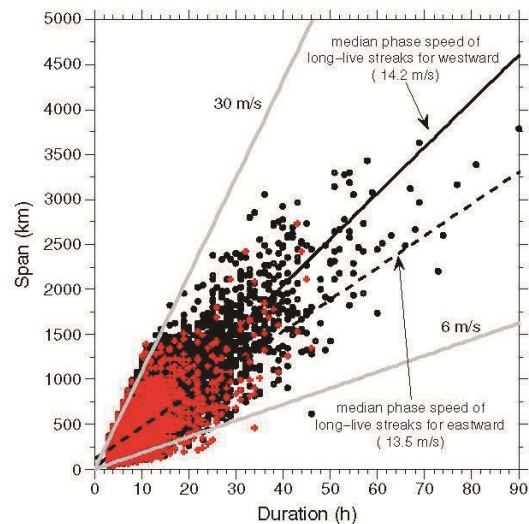


図 2. 雲システムの持続時間と水平距離のスクアープロット。黒丸印は西向き伝搬、赤+印は東向き伝搬を示す。

地球観測システム構築推進プラン「海大陸レーダーネットワーク構築」により、スマトラ島・カリマンタン島・スラウェシ島・ニューギニア島近傍に赤道上を東西に貫くウィン

ドプロファイラー（WPR）観測ネットワークが構築された[Yamanaka et al., J. Disaster Res., 2008]。平成23年度までにこれらの各サイト（コトタバン(100.32°E, 0.20°S)・ポンティアナ(109:37°E, 0:00°S)・マナド(124:92°E, 1:55°N)・ピアク(136:10°E, 1:18°S))にディストロメータを整備し、連続観測を開始した。観測データを収集、整理し、DSD観測データベースを作成した。

ディストロメータ・ウィンドプロファイラー観測データに加えて、World-Wide Lighthouse Missions (WWLM)による発雷データも利用し、地域特性について調べた。ポンティアナにおける発雷率は、コトタバンやマナドに比べて圧倒的に高かった。図3に示すように、発雷と降水の間には強い相関があり、日周期変化を示していた。季節内変動については後に詳述するが、MJO活発期には発雷の割合が減り、降水期間が長くなる傾向があった。一方、不活発期には降水はあまり組織化されないものの、午後の背の高い対流が頻繁な発雷を伴う特徴があった。

図4に各地点における降水雲タイプ別の降水頻度の日周期特性を示す。降水雲タイプはウィンドプロファイラー観測データから判別した。雲システムの伝搬の日周期特性が、発雷特性を決定していた。ポンティアナにおける大粒径が卓越するDSD特性と発雷特性とは整合的な結果を示していた。各地点のDSD特性は海洋性が卓越していたが、ポンティアナとコトタバンでは大陸的な特性も示していた。客観解析データからスマトラやカリマンタンでは年間を通じて対流圏がマナドやピアクより湿っており、これが大粒径が発達する原因であると考えられる。海陸間の雲システムの伝搬がDSD特性を決めていた。すなわち、降水雲システムが陸上で発達し海上に移動する場合には大陸的な特性を示し、海上で発達した降水雲システムが陸上に移動する場合には海洋性の特性を示していた。

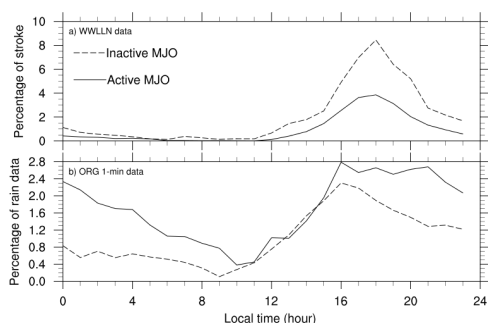


図3. コトタバンの MJO活発・不活発期における発雷率と地上降水率の日周変化。

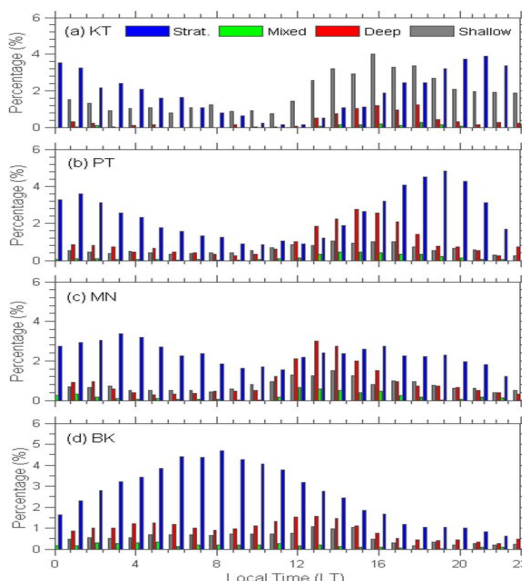


図4. コトタバン(KT)・ポンティアナ(PT)・マナド(MN)・ピアク(BK)における、ウィンドプロファイラーで判別された降水雲タイプ(層状・混合・深い対流・浅い対流)別降水頻度の日周変化。

上記の降水微細構造の地域特性は、日変動、季節内変動、季節変動などに影響を受けていると考えられる。そこで、長期間のDSD観測が行われているコトタバンにおけるデータを用いて、これらについて調べた。図は省略するが、日周期の対流性降水・層状性降水に応じて、降水強度とともにDSDはそれぞれ広く・狭くなる特徴があった。すなわち、10mm/h以下の降水に対しては層状性の方が対流性よりもDSDは広がったが、強い降水では対流性で大粒径が見られた。朝方のDSDは夕方よりも狭い特徴があった。

DSD特性の季節変化はほとんど見られなかった。季節内変動に関して、観測データが必ずしも十分でなく、統計エラーを減らすため、MJOフェーズを活発・不活発の2種類のみで分類して解析した。図5にMJO活発期・不活発期における降水雲タイプ・降水強度別のDSD特性を示す。弱い降水においては、DSDの差はわずかで、大粒径の割合が不活発期の方が活発期より若干多い傾向がある。MJOによるDSDの違いは強い降水の時の方が顕著である。MJO不活発期の方が活発期より分布が広い傾向がある。MJO活発期には直線で示すMarshall-Palmer分布よりも狭くなっている。MJO活発期は発達したメソ対流系、高い降雨頂高度、長い降雨持続時間、低い発雷率で特徴付けられた。一方、MJO不活発期には降水雲はあまり組織化されないが、午後の対流は背が高く、発雷も頻繁であった。強い上昇流が衝突併合過程を通して大粒径を増やし、DSD特性をコントロールしていると考えられ

る。赤道大気レーダーによる、MJO不活発期の方が上昇流が強い観測結果と整合的である。

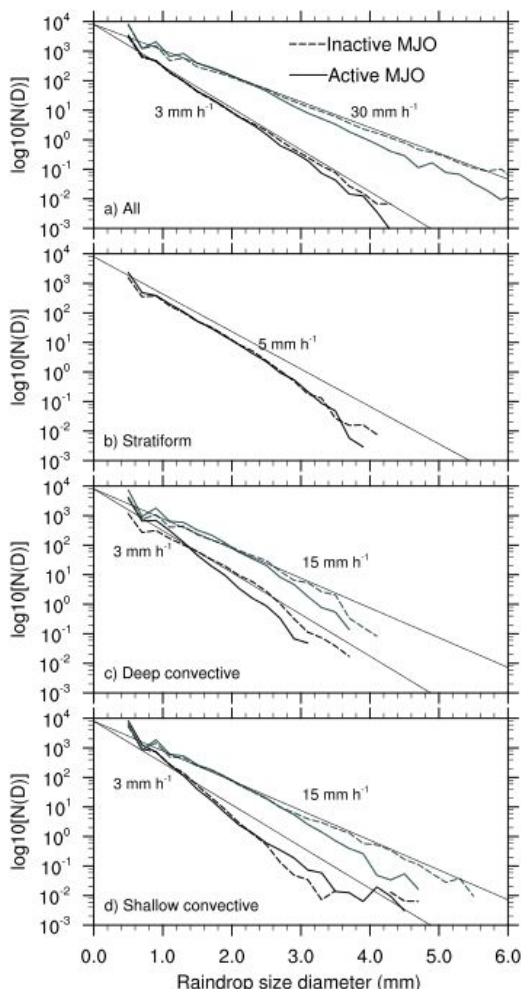


図5. MJO活発期(実線)・不活発期(破線)における降水強度3(5)mm/h・30(15)mm/h時の降水雲タイプ別(全平均・層状・深い対流・浅い対流)の雨滴粒径分布。

降水タイプによる DSD 特性の違いは、気象レーダーの Z-R 変換の精度に重要な影響を与えると考えられる。図6に降水雲タイプ別のレーダー反射因子(Z)と降水強度(R)の関係を示す。DSD 特性の季節変化はほとんど見られなかったが、日周期や季節内変動、地域により特性に違いが見られた。WPR によるエコー強度の地域特性も DSD 特性と整合的であり、地域によって Z-R 関係が異なることを示しており、気象レーダー観測によるレーダー反射因子から降水強度を推定する際には注意が必要である。

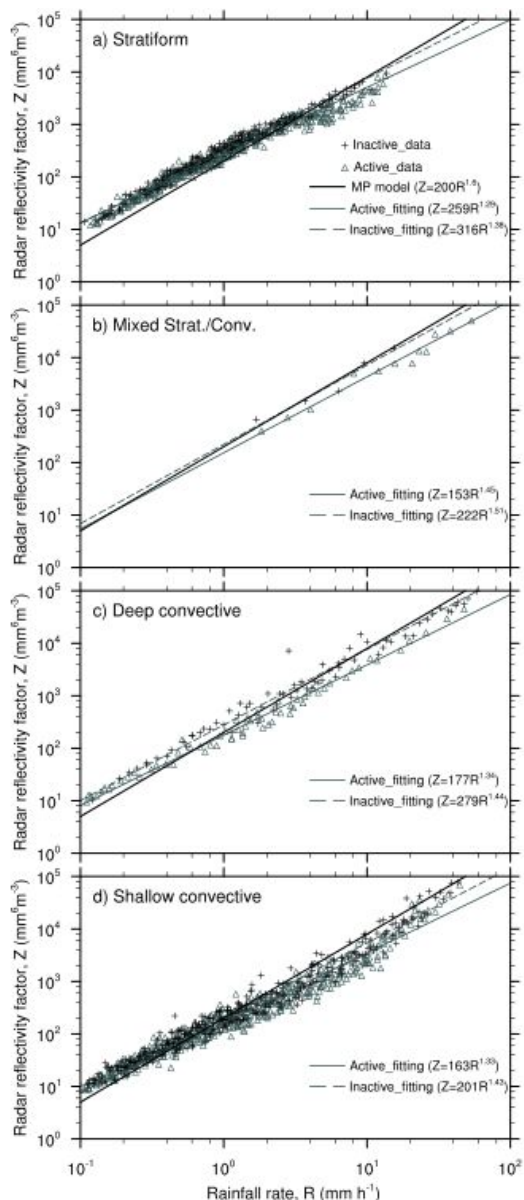


図6. 降水雲タイプ(層状・混合・深い対流・浅い対流)別のZ-R関係。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 35 件)

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, S. Mori, and M.D. Yamanaka, Regional Variability of Raindrop Size Distribution over Indonesia, *Annales Geophysicae*, 31, doi:10.5194/angeo-31-1941-2013, 2013. 査読有。

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, M. Yamamoto, S. Mori, M.D. Yamanaka, R.E. Carbone, and J.D. Tuttle, Cloud Episode Propagation over the Indonesian Maritime Continent from 10 Years of Infrared Brightness Temperature Observations, *Atmospheric Research*, 120-121,

doi:10.1016/j.atmosres.2012.09.004, 2013. 査読有.

Marzuki, Walter L. Randeu, T. Kozu, T. Shimomai, M. Schonhuber, and H. Hashiguchi, Estimation of raindrop size distribution parameters by maximum likelihood and L-moment methods: Effect of discretization, Atmospheric Research, 112, doi:10.1016/j.atmosres.2012.04.003, 2012. 査読有.

[学会発表](計 83 件)

H. Hashiguchi, Marzuki, M.K. Yamamoto, T. Kozu, and T. Shimomai, Microstructure of Precipitation in Different MJO Phases over Sumatra, GCOE-ARS Final Symposium 2013, 京都大学宇治キャンパス, 宇治, 2013年12月1~3日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, S. Mori, M.D. Yamanaka, and Y. Takahashi, Relationships among Lightning, Precipitation, and Hydrometeor Characteristics in Equatorial Indonesia, 日本地球惑星科学連合2013年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2013年5月19~24日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, M.D. Yamanaka, and S. Mori, Raindrop Size Distribution Measurements Along Equatorial Indonesian Maritime Continent, 日本気象学会 2012 年度秋期大会, 北海道大学, 札幌, 2012 年 10 月 3~5 日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, T. Kozu, and T. Shimomai, Raindrop Size Distribution Measurements in Different MJO Phases, 第 6 回 MU レーダー・赤道大気レーダーシンポジウム, 京都大学宇治キャンパス, 宇治, 2012 年 8 月 30~31 日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, M.D. Yamanaka, and S. Mori, Large scale influence on precipitation propagation over Indonesia, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2012 年 5 月 20~25 日.

橋口浩之・田畑悦和・山本真之・山本衛・山中大学・森修一・柴垣佳明・下舞豊志・Fadli Syamsudin・Timbul Manik・Wahid Heryanto・Moch Ichsan・Ahmad Mudjahidin, 1.3-GHz ウィンドプロファイラネットワーク観測に基づくインドネシア海洋大陸における降水日変化の特徴, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2012年5月20~25日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, T. Kozu, T. Shimomai, M.D. Yamanaka, and S. Mori, Raindrop size distribution observations with Parsivel and Micro Rain Radar (MRR) over Sumatra, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ, 幕張, 2012年5月20~25日.

Marzuki, H. Hashiguchi, M.K. Yamamoto, M.D. Yamanaka, and S. Mori, Variability of Precipitation Propagation over Indonesia Based on MTSAT-1R, TRMM and Wind Profile Network Observations, 日本気象学会 2011 年度秋期大会, 名古屋大学, 名古屋, 2011 年 11 月 16 日.

[図書](計 2 件)

M.K. Yamamoto 他, New observations by wind profiling radars, in Doppler Radar, INTECHOPEN.COM, pp.470, 2012.

[その他]

<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~hasiguti/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋口 浩之 (HIROYUKI HASHIGUCHI)
京都大学・生存圏研究所・准教授
研究者番号: 90293943

(2) 研究分担者

山本 真之 (MASAYUKI YAMAMOTO)
京都大学・生存圏研究所・助教
研究者番号: 90346073

森 修一 (SHUICHI MORI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境
変動領域・チームリーダー
研究者番号: 00344309

高橋 幸弘 (YUKIHIRO TAKAHASHI)

北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号: 50236329

(3) 連携研究者

なし