

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 19 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350515

研究課題名(和文) インドネシア海大陸における都市型雷雨の気候学とメソスケール動態の複合レーダー観測

研究課題名(英文) Urban thunderstorms over the Indonesian maritime continent: Their climatology and mesoscale dynamics observed with multiple radars

研究代表者

森 修一 (MORI, Shuichi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・大気海洋相互作用研究分野・分野長代理

研究者番号：00344309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：落雷被害の社会的影響が大きいインドネシアのジャカルタ首都圏の雷雨を対象とし、長期現業地上観測データに基づく気候学的解析を行うと共に、レーダー等による特別観測を実施した。その結果、雷雨は対流季節内振動(MJO)の東進と共に大きく変動し、MJO活発域の到来直前(Phase 3)に最も激しくなる。また、雷雨の季節進行は多くの地点で雨季直前(4月、11月)に活発となるが、赤道越え北風モンスーンサージ(CENS)が影響し、ジャワ海沿岸のみ2月が最盛期となるなど地理的差異も大きい。さらに、雷雨はジャワ島南部の山岳域で発生し、北部沿岸のジャカルタ都市部へ移動する日周期移動が顕著であること等が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We studied both climatology and mesoscale behavior of urban thunderstorm around Jakarta, Indonesia, where is suffered serious social damages from severe lightning. We found frequency of thunderstorm varies much with phases of eastward moving convective intraseasonal oscillation (MJO) and shows its maximum just before when the MJO active region comes over Jakarta based on long-term operational surface observation. Seasonal march of thunderstorm has much spatial variability: It shows two maxima (April and November) just before rainy seasons at most stations around Jakarta, whereas it has a peak on February only at coastal stations nearby the Jawa Sea due to intrusion of cross equatorial northerly monsoon surge (CENS). Radar observations showed that most thunderstorms have remarkable diurnal variation: they were generated in mountainous region of southern Jawa Island in the early afternoon and migrated northward by the late evening which brought lightning over Jakarta city nearby the sea.

研究分野：熱帯気象学

キーワード：雷雨 メソ気象学 レーダー気象学 熱帯気象学 日変化対流 海大陸気候

1. 研究開始当初の背景

雷は雲頂温度が-15~-20 に達する背の高い積乱雲内における霰や氷晶の電荷分離により生成され、雷活動は深い対流雲として降水システムを特徴付ける良い指標となる。高温多湿の熱帯海洋性気候を有し、活発な積乱雲が多数発生するインドネシア海大陸域は、雷雨の発生頻度が高く雷発生日が年間 100~200 日に達し、落雷密度も年 10 回/km² 以上と極めて大きい。雷を内包する発達した背の高い積乱雲とその集団(メソ対流系)は、地表付近に強い降水と突風など顕著なメソスケール現象を伴うことも多い。実際、インドネシア国内の山間部では落雷が原因となる森林火災もあり、一方の都市部では落雷起因の大規模停電や雷サージ等による電子機器の不具合、あるいは雷雨に伴う強風による倒木等が原因となる高架高压電線の断線なども多く、多種多様な社会的影響を被っている。

気象レーダーや落雷位置標点システムなど地上観測が十分でない当該地域では、視野分解能や観測頻度に制限のある衛星観測では必ずしも捉えきれない雷活動の詳細な時空間分布やその動態など、その気候学的特徴やメソスケール構造に関する観測的研究は全く行われておらず、そのリアルタイム監視はもちろん、短時間予測は極めて困難であり、その改善が期待されている。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究ではインドネシア海大陸域の中でも落雷など雷雨による社会的影響の大きいジャカルタ拡大首都圏(JABODETABEK)における雷活動を主な対象として、

- (1) 長期の衛星観測および現業地上観測データに基づく雷雨発生の統計解析
- (2) 既設の雨量計やレーダーなど取得済み観測データによる雷雨発生環境の解析
- (3) MPレーダーなど複合レーダー特別観測によるジャカルタ雷雨の実態把握

を実施し、メソスケール気象学および降水システム気候学の両視点からインドネシア海大陸域、特にジャカルタ拡大首都圏における雷雨の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) TRMM LIS/PR による長期(1998-2012)観測および BMKG (インドネシア気象気候地球物理庁) 現業観測データから、ジャカルタ雷雨を時空間分解可能な雷雨統計(3 時間毎、約 10km スケール)を作成し、公開する。本応募者らによる先行研究成果に基づき、ジャカルタ雷雨に特徴的な日周期の南北/東西振動、MJO など季節内振動、およびモンスーン北風サージなど季節進行に伴う活動度変化を明らかにする。

(2) ジャカルタ拡大首都圏内に VLF 帯雷放電計測装置(3ヶ所)を展開し、雷雨(落雷)の同定と位置決定、および放電強度(C-km)

の観測/監視を行う。当該観測結果をデータベース化すると共に、ジャカルタ南部で常時連続観測中のジャカルタ C バンドドップラーレーダー(CDR)およびウインドプロファイラ(WPR)さらに以下の MP レーダー観測等の各結果と共に雷観測データセットとして整備し、公開する。

(3) 雷発生に重要な積乱雲内の霰など氷相降水粒子を同定可能な MP レーダーを用い、ジャカルタ雷雨の観測事例を多数取得する。同時に CDR によるジャワ島西部の広域雷雨活動、WPR の局地風系など環境場、雷放電観測網の放電位置と強度、等の観測結果を統合し、ジャカルタ雷雨活動のメソスケール構造や動態を明らかに、短時間予測の可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 使用データ

熱帯降雨観測衛星(TRMM)降雨レーダー(PR)および雷観測装置(LIS)による長期同時観測データ(1997年12月~2012年12月)、インドネシア気象気候地球物理庁(BMKG)による現業気象観測データである地上実況気象通報式(SYNOP)を利用し、インドネシア海大陸域のうち特にジャワ島ジャカルタ拡大首都圏(JABODETABEK)を対象とした統計解析を行い、雷雨の日周期から MJO など季節内変動、モンスーン(北風サージ)、ENSO/IOD 等の短期気候変動について解析を進めた。

インドネシア国内には約 140 地点の SYNOP 観測点があるが、ジャカルタ近郊を対象とする本解析では図 1 に示す 8 地点を利用する。また、解析期間は 2000-2012 年の 13 年間とする。同時に GSMaP MVK(v5.222.1) 日降水量プロダクト(空間分解能: 0.1° x 0.1°)が、こちらは 2001 - 2009 年の 9 年間に限られる。なお、本解析では、SYNOP 天気記号のうち、現在天気(13(雷光), 17, 29(雷電), 91-99(雷雨))、および過去天気(9(雷電))を含む場合を抽出し、その出現回数を 1 日(あるいは月間)の観測回数で除した雷出現頻度(%)を指標として用いる。

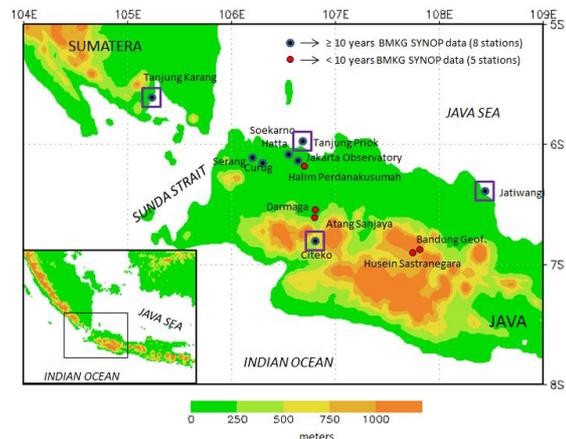


図 1 ジャカルタ近郊の BMKG SYNOP 観測点(青丸,赤丸),および周辺地形を示す。

(2) 雷雨の季節変動

まず、全観測点における雷出現頻度および GSMaP 降水量の月別季節進行 (図 2) を見ると、多くの観測点で 11 月および 4 月に雷発現頻度のピークを見ることができる。一方、GSMaP 月降水量は 2 月にピークを持つため、雷は雨季のピークに少なく、その前後に多く発現しており、雨季ピークには層状性降水が卓越していることを示している。しかしながら、一部は不明瞭ながら明らかに 2 月にピークを持つ観測点もある。これら観測点を標高別に類別 (図 3) すると、標高 50m 以上 (2 地点) では図 2 同様に明瞭な雨季前後の 2 ピークが示されているが、標高 10-50m (3 地点) では降水量最大である 2 月に雷発現頻度の減少が緩やかとなり、さらに標高 10m 以下 (3 地点) では逆に 2 月になだらかなピークを持つ季節変化を持つことが分かる。

一方、SYNOB 観測点を海岸線からの距離で区分すると、50km 以上内陸に入った地点 (2 地点) では明瞭な雨季前後の 2 ピークを示すが、海岸線近くではその 2 ピークがほとんど見えなくなる (距離 10-50km)、あるいは逆に 2 月に緩やかなピークを持つ (距離 10km 以下) 変化を示す (図略)。



図 2 ジャカルタ周辺 SYNOB 観測地点 (8 地点) における雷発現頻度および GSMaP 降水量の月別季節変化。GSMaP 降水量は右上矩形領域内の平均を示す。

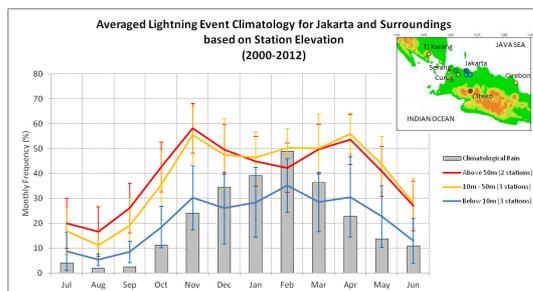


図 3 図 2 に同じ。ただし、SYNOB 観測地点 (8 地点) を標高別に 50m 以上 (2 地点)、10-50m (3 地点)、および 10m 以下 (3 地点) に区分した。エラーバーは標準偏差を示す。

ジャワ島は中央から南西部に掛けて山岳地形となる (図 1) ため、海岸線から離れた内陸で標高の高い地点ほど雷発現頻度は雨季前後の 2 ピーク特性を良く表し、海岸線から近く標高の低い観測地点ほど 2 月の雨季ピークに同期して雷発現頻度が高くなるこ

とを示している。これは、ジャワ島西部内陸部雨季 11-4 月の間ほぼ一定した降水量を示すことに対して、ジャカルタが位置するジャワ島北西沿岸だけは 1-2 月に突出した降水量を持つことに対応 (図 4) しており、これは 2 月をピークとする赤道越えモンスーン北風サージ (CENS) のジャワ海侵入による影響が大きい (Hattori et al. 2012)。ジャワ海に侵入した CENS は地表面近くの非常に下層に限られており、かつジャワ島内陸にある観測点は標高が高いため、CENS が侵入することは難しい。このため、内陸部の標高の高い観測点では 2 月に雷活動をもたらす発達した積乱雲が形成されにくく、雷発現頻度は明瞭な雨季前後の 2 ピークを示すものと考えられる。

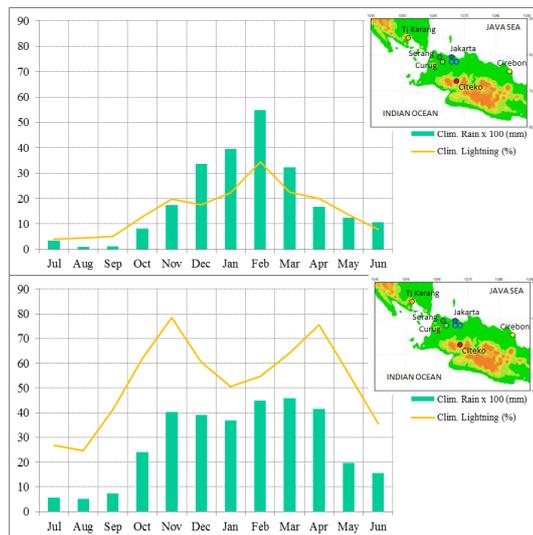


図 4 Jakarta Tj. Priok (標高 2 m) (上図)、および Bogor-Citeko (標高 300m) (下図) における雷発現頻度 (線グラフ) および GSMaP 月降水量 (棒グラフ)。

(3) 雷雨の季節内変動

熱帯における雷活動は、MJO 活動度により大きく影響を受けることが知られている (Morita et al. 2006)。Real Time Multivariate MJO Index (M.I) を基準とする雷発現頻度および GSMaP 降水量 (図 5) によると、ジャカルタ周辺では、MJO 中心が東インド洋 (M.I = 3) に位置する時に最大の雷発現頻度および降水量を示す。両者は MJO が海大陸を通過する間 (M.I = 4~5) は減少し続け、西太平洋に抜け (M.I = 6) てから再び増加する。この傾向はジャカルタ周辺 8 観測地点で大きな違いはない Morita et al. (2006) によると赤道熱帯域の雷活動は MJO 対流域の先端部および後端で活発であることが知られており、本解析結果と整合的である。一方、彼らの結果では降水量ピークが MJO 活発域の中心にあるが、本解析結果では雷発現頻度と同様に MJO 先端部に降水量ピークが現れている。これは彼らの解析が赤道熱帯域全てを対象としており、その大部分が海洋上の雷および降水であることに対し、

本解析がジャワ島北西部の陸上域に限られているための差異であると考えられる。

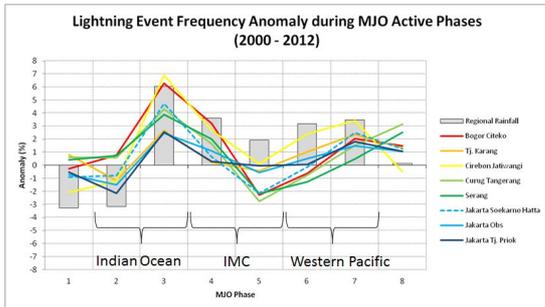


図5 Real Time Multivariate MJO Index (M.I)を基準とした雷発現頻度(線グラフ)および GSMaP 降水量。両データは、各 M.I における値から期間平均値を引いた偏差で示している。

さらに、インドネシア全域に解析を拡大し、M.I を基準とした位相別の雷観測頻度分布(偏差)を図6に示す。位相1-2ではスマトラ島西部からカリマンタン島南部、スラウェシ島北部、およびパプア島北部のみに雷観測頻度は高く、ジャワ島から多島海に掛けての雷観測頻度は低い。これが位相3(MJO 東インド洋)になるとインドネシアほぼ全域が頻度最大となり、その後、位相4(MJO 海大陸西部上陸)で全体的に弱体化し、位相6(MJO 海大陸東部通過)ではインドネシア東域(西域)のみで正(負)偏差となる。その後、MJO 位相進行と共に活発化し、位相7(MJO 太平洋東部)でインドネシアほぼ全域で極大となる。

この結果は、ジャカルタ首都圏における MJO 位相に伴う雷観測頻度変化と同様(図5)であり、MJO 最盛期の直前(あるいは MJO 擾乱の前縁部)および MJO 衰退期(あるいは MJO 擾乱の後縁部)で雷活動最大となることを示している。一方、緯度平均された MJO 位相別の雷観測頻度(図略)を見

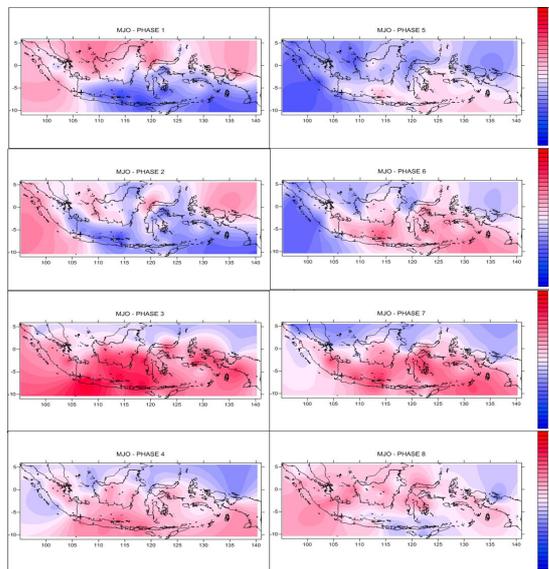


図6 MJO 位相進行に伴うインドネシア全域に対する雷観測頻度分布の変化(偏差)。

ると、インドネシア全域に対して東西方向に位相のずれ(遅延)がほぼない(雷観測頻度極大が MJO 位相3および7で固定)これは、インドネシア中央部や東部において MJO 活動と雷活動の位置関係が上記説明とは異なることを示しており、その原因については今後の検討課題である。

(4) 雷雨の日変化

2015年2月05日~18日、ジャカルタ拡大首都圏南部に位置するボゴールにおいて、ジャカルタ雷雨を対象とした集中観測を実施した(図7)。可搬型 X バンド二重偏波レーダーをジャカルタ拡大首都圏南部の Bogor に設置し、BMKG Citeko 観測所にて多種類の地上気象観測装置を展開すると共に4回/日の高層ゾンデ観測、ならびに計4回の雲粒子ビデオゾンデ(HYVIS)観測を実施した。また、独自展開している雷探知用 VLF 受信装置網および GLD360 雷観測データの収集を行った。特別観測期間中の2月08-09日にはジャカルタ域に激しい雷雨が継続し、10日には都心部全域に渡り大規模洪水が発生し、交通機関など社会インフラが麻痺する程の被害が発生するなど、同地域雨季における降水の特徴が良く示されていた。

集中観測期間における Citeko(山麓部)および Tanjung Priok(沿岸部)における日降水量および雷観測回数の日々変化を図8に示す。ジャカルタ市街地に洪水をもたらした豪雨は、沿岸域のみ日雨量約140mmが記録されていたが、山麓部では日降水量30mm以下

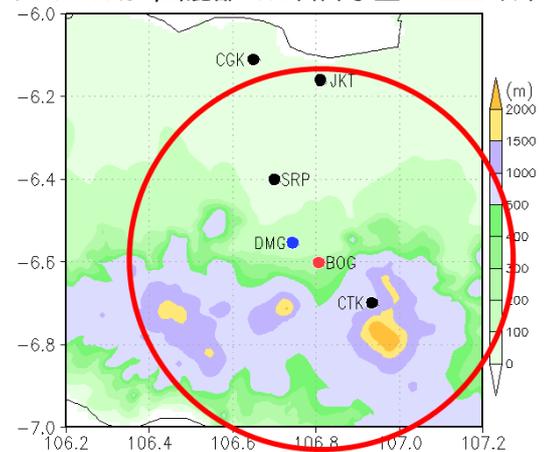


図7 ジャカルタ雷雨気候特別観測(2015年2月05-18日)機材配置図と周辺地形(左図)、BOG: Bogor レーダー観測点

- ・可搬型 X バンド二重偏波レーダー (Furuno WR-2100, 観測半径 [赤円] 50km)
- DMG: BMKG Darmaga 観測所
- ・自動気象ステーション (Vaisala MAWS201)
- CTK: BMKG Citeko 観測所
- ・高層ゾンデ (Vaisala RS-92SGPD): 4回/日
- ・ビデオゾンデ (Meisei HYVIS WUA-11): 4回
- ・自動気象ステーション (Vaisala MAWS201)
- ・光学式ディストロメータ (Thies LPM, Parsivel M300)
- ・マイクロレインレーダー (METEK MRR2)

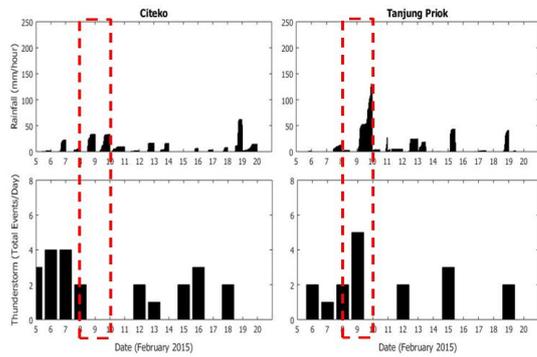


図8 集中観測期間における Citeko(山麓部, 左図)および Tanjung Priok(沿岸部, 右図)の日降水量(上図)と雷観測回数(下図)の日々変化.

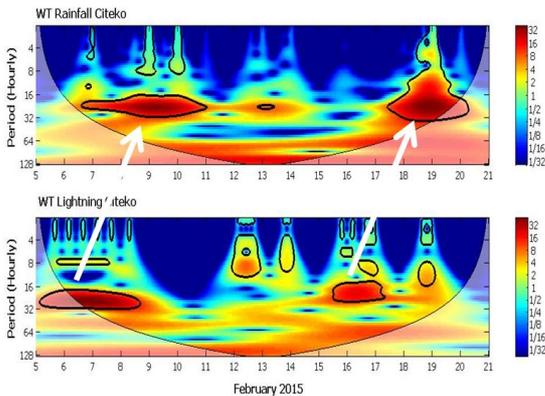


図9 Citeko 観測所における時間降水量(上図)および雷観測頻度(下図)のウェーブレット解析結果. 各図における黒太線域は日変化周期が卓越していることを示す.

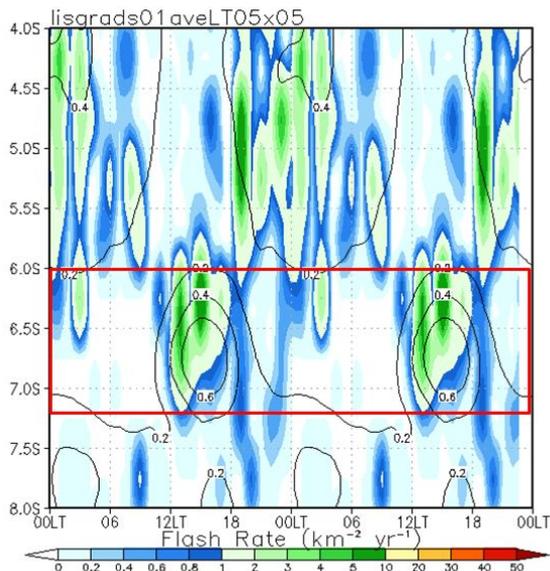


図10 ジャカルタ拡大首都圏(左下図赤線矩形域)における TRMM LIS 観測 Flash Rate(右図段彩)および GSMaP 降水量(黒線コンター)の日変化(2000-2010年).

なお, 上図内の赤線矩形は陸域範囲を示す.

であった. 一方, 雷観測回数は沿岸域および山麓域共に豪雨発生の1日前~数日前に増加していることが分かる. また, 同期間におけるウェーブレット解析結果(図9)によると, 降水日変化が顕著となる2月9-10日や2月18-20日に対して, 雷日変化が各々数日先行して活発になることが示されており, この雷日周期活発化数日先行の成因については今後の検討課題である.

なお, TRMM LIS 観測による同地域の雷 Flash Rate および GSMaP 降水量の平均日周期(図10)を見ると, 12-18LTの午後にはジャワ島南西山岳域を中心とした内陸部に雷発生が多く, 日没後の18LTから早朝06LTまではジャワ海上に発雷ピークがある. これに対して, 降水ピーク時刻は内陸部でほぼ同時もしくは数時間の遅れを持ち, 沿岸海上では夜間に長く降水が継続するものの, そのピーク時刻は大よそ3-6時間の遅れを持つ.

(5) まとめと今後の展望

インドネシア海大陸域における雷雨の気候学について, 現業地上雷観測および GSMaP 降水データによる統計解析は, ほぼ当初計画通り達成された. 一方, TRMM LIS については観測データセットの構築は予定通り終了したものの, GSMaP マッチアップデータの作成が遅れ, 引き続き今後の課題となる. また, 上述の「降水日変化ピーク時刻に対する地上観測雷観測頻度ピークの遅れ」および「降水(日変化)ピーク日に対する雷(日変化)ピーク日の先行」について, 衛星観測雷データとの相互比較やその気候学的特性についても引き続き解析を進める.

さらに, 並行してジャカルタ雷雨気候特別観測で得られたXバンド二重偏波レーダー観測データ等の解析も進め, 特に雷生成の鍵となる積乱雲内における霰や氷晶など固体降水粒子の時空間分布とその動態に注目し, ジャカルタ都市機能に対する社会的影響度の大きな都市雷雨の構造とその動態(発生, 発達, 消滅, および移動)について, 本共同研究終了後に置いても2017-2019年実施計画中の国際共同研究プロジェクト YMC(海大陸研究強化年: Years of the Maritime Continent)を通じて解析を進めたい.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

Ogino, S.-Y., M. D. Yamanaka, S. Mori, and J. Matsumoto, 2016: How much is the precipitation amount over the tropical coastal region? *J. Climate*, **29**, 1231-1236, 査読有, doi:10.1175/JCLI-D-15-0484.1.

Lestari, S., J.-I. Hamada, F. Syamsudin, Sunaryo, J. Matsumoto, M. D. Yamanaka, 2016: ENSO influences on rainfall extremes around Sulawesi and Maluku Islands in the eastern Indonesian

maritime continent. *SOLA*, **12**, 37-41, 査読有, doi:10.2151/sola.2016-008.

Sulistiyowati, R., I. Hapsari, F. Syamsudin, S. Mori, S. T. Oishi, and M. D. Yamanaka, 2014: Rainfall-driven diurnal variations of water level in the Ciliwung River, West Jawa, Indonesia. *SOLA*, **10**, 141-144, 査読有, doi:10.2151/sola.2014-029.

Marzuki, H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, S. Mori, and M. D. Yamanaka, 2013: Regional variability of raindrop size distribution over Indonesia. *Ann. Geophys.*, **31**, 1941-1948, 査読有, doi:10.5194/angeo-31-1941-2013.

Marzuki, H. Hashiguchi, M. K. Yamamoto, M. Yamamoto, S. Mori, M. D. Yamanaka, R. E. Carbone, and J. D. Tuttle, 2013: Cloud episode propagation over the Indonesian maritime continent from 10 years of infrared brightness temperature observations. *Atmos. Res.*, **120-121**, 268-286, 査読有, doi:10.1016/j.atmosres.2012.09.004.

Suwarman, R., K. Ichyanagi, M. Tanoue, K. Yoshimura, S. Mori, M. D. Yamanaka, N. Kurita, and F. Syamsudin, 2013: The variability of stable isotope and water origin of precipitation over maritime continent. *SOLA*, **9**, 74-78, 査読有, doi:10.2151/sola.2013-017.

Wu, P., A. A. Arbain, S. Mori, J.-I. Hamada, M. Hattori, F. Syamsudin, and M. D. Yamanaka, 2013: The effects of an active phase of the Madden-Julian oscillation on the extreme precipitation event over western Java Island in January 2013. *SOLA*, **9**, 79-83, 査読有, doi:10.2151/sola.2013-018.

[学会発表](計 25 件)

Mori, S., P. Wu, M. Hattori, M. D. Yamanaka, J.-I. Hamada, A. A. Arbain, S. Lestari, R. Sulistyowati, and F. Syamsudin, 2016: Lightning climatology over Jakarta, Indonesia, based on surface operational, satellite, and campaign observations. International Science Conference on MAHASRI, 2016/3/31, Tokyo Metropolitan University (東京都・八王子市).

Arbain, A. A., R. Sulistyowati, S. Mori, and F. Syamsudin, 2016: Thunderstorm climatology over Indonesian maritime continent based on 13-years SYNOP observation and it's relation to MJO phases. The 5th Global Precipitation Measurement (GPM) Asia Workshop on Precipitation Data Application Technique, 2016/1/25, TKP Tokyo Station

Nihonbashi Conference Center (東京都・中央区).

Sulistiyowati, R., A.A. Arbain, S. Lestari, F. Syamsudin, and S. Mori, 2016: Diurnal variation of lightning event in Bogor, west Jawa and surrounding regions based on surface, weather radar and satellite meteorology data during IOP2015. The 5th Global Precipitation Measurement (GPM) Asia Workshop on Precipitation Data Application Technique, 2016/1/25, TKP Tokyo Station Nihonbashi Conference Center (東京都・中央区).

Mori, S., J.-I. Hamada, P. Wu, K. Ichyanagi, M. Hattori, H. Kamimera, A. A. Arbain, S. Lestari, R. Sulistyowati, F. Syamsudin, H. Hashiguchi, J. Matsumoto, and M. D. Yamanaka, 2014: Local circulations and diurnal convections formed along coastal zones over the Indonesian maritime continent -Key to understanding the IMC weather and climate. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th Annual Meeting, 2014/7/31, Royton Sapporo Hotel (北海道・札幌市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 修一 (MORI, Shuichi)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・大気海洋相互作用研究分野・分野長代理
研究者番号：00344309

(2) 研究分担者

服部 美紀 (HATTORI, Miki)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術研究員
研究者番号：50533519

山中 大学 (YAMANAKA, Manabu)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・大気海洋相互作用研究分野・上席研究員
研究者番号：30183982

(3) 連携研究者

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

高橋 幸弘 (TAKAHASHI, Yukihiro)
北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号：50236329

濱田 純一 (HAMADA, Jun-ichi)
首都大学東京・都市環境科学研究科・特任准教授
研究者番号：50359212