

1.3-GHz ウィンドプロファイラ及び TRMM 降雨レーダー観測 による海洋大陸における地域的降水日変化

田畑悦和¹, 橋口浩之¹, 山本真之¹, 山本衛¹, 山中大学², 森修一²,
Fadli Syamsudin³, Timbul Manik⁴

1: 京大生存研, 2: 海洋研究開発機構, 3: BPPT, Indonesia, 4: LAPAN, Indonesia

1 研究背景

降水は潜熱加熱を通して対流圏を加熱・冷却させる役割を持つ。特に海洋大陸は世界有数の多雨地域で大気大循環の駆動源の役割を果たしている (Ramage, 1968)。その海洋大陸では降水日変化が卓越しており、陸域では夕方に、陸の周辺の海域では未明から朝方にかけて対流活動がピークに達する (Nitta and Sekine, 1994)。熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載降雨レーダーは赤道域における降水を誤差を小さくモニタリングすることを目指している。TRMM 衛星は降水日変化の水平分布を調べるのに優れているが、サンプル数により統計解析の制限がある (Negri et al., 2001)。統計的に降水日変化を調べるには地上における長期連続観測のデータを用いることがより適している。1990 年代よりこれまで観測が疎であったインドネシアにおいて WPR を用いた観測的研究が始まった。Renggono et al. (2001) はスマトラ島のブキティンギおよびジャワ島スルボンにおけるウィンドプロファイラ (WPR) データより降水日変化の特徴を調べ、2 地点とも午後に対流性降水が卓越した後に層状性降水が卓越することを示した。この特徴はメソスケール対流システムのライフサイクルと一致する。しかし、海洋大陸は東西 5000 km におよび、降水日変化は海洋大陸の複雑な地形により多種多様であることが指摘されているが、カリマンタン島より以東の赤道域では統計的な降水日変化の研究はされてこなかった。2005 年から始まったプロジェクトである「地球観測システム構築推進プラン」の「海洋大陸レーダーネットワーク構築」(Yamanaka et al., 2008) では海洋大陸上において既存の赤道大気レーダー (100.32°E, 0.20°S) に加えて西からカリマンタン島のポンティアナ (0.00°S, 109.37°E)、スラウェシ島のマナド (124.92°E, 1.55°N)、パプア島の北にある島であるピアク (136.10°E, 1.18°S) と赤道上におよそ 1000km おきに WPR の観測ネットワークを構築した (Fig. 1)。本研究ではこの WPR 観測ネットワークのデータを用いてそれぞれの地点の降水日変化を調べた。さらに、その結果を TRMM による観測結果と比較した。

2 使用データ及び解析手法

2.1 ウィンドプロファイラおよび雨量計

ポンティアナ・マナド・ピアクの WPR は 1357.5 MHz で運用されており、それぞれ 2007 年 2 月 22 日、2008 年 9 月 18 日、2007 年 3 月 11 日に設置完了して以来、連続観測を行っている。時間空間分解能はそれぞれ 1 分、100m である。WPR は通常は大気の 3 次元風速を観測するが、雨天時に降雨エコーを受信し、降水粒子の落下速度の鉛直プロファイルを得る。本研究ではその鉛直プロファイルを用いて。また、それぞれの地点においてそれ

ぞれ 2008 年 4 月 24 日、2008 年 3 月 3 日、2009 年 1 月 16 日より雨量計による観測を行っている。本研究では 2009 年 6 月までに雨量計と WPR の同時観測が行われている時間帯のデータを用いた。雨量計データは 30 分間毎に合計したデータを用い、WPR データは 30 分間平均した値を用いた。雨量計により雨量が観測された時間帯について、Williams et al.(1995) が提唱したアルゴリズムを用いて Deep convective、Shallow convective type、Mix stratiform/convective、Stratiform の 4 種類に降水雲タイプの分類を行った。そして、それぞれの降水雲タイプ別に 1 時間毎の降水量日変化および降水頻度の日変化を求めた。また、降水量ピークが有意であるかを判別するためにサンプリングエラーとして、 $\sigma/\sqrt{n}$ を算出した。ただし、サンプリング数を n 、標準偏差を σ とする。

2.2 TRMM

まず 1998-2008 年の 11 年間分の TRMM3G68 データを用いて 1 時間毎の降水日変化を求めた。3G68 データは時間分解能 1 時間、水平分解能 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ のグリッドデータである。サンプリングエラーとして $\sigma/\sqrt{n}$ を算出した。降水日変化のより詳細な水平分布の情報を得るために同期間の 2A25 データを用いた。2A25 データは軌道データでそれぞれのフットプリントごとに時間と降水量の情報が含まれ、2A23 により降水雲タイプの情報が得られる。本研究では適当な水平グリッドを設定し、グリッドごとに 1 時間毎の降水日変化を調べた。グリッドのサイズは $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ とした。このサイズは Hirose et al.(2008) に習い、フットプリントサンプル数が最小のグリッドで統計的に 1 回の降雨が平均降水量を決めないように設定した。さらに降水量日変化として求められた 1 時間毎の 24 データの合計を 1 日平均降水量とし、雨量計による観測結果と WPR による観測結果を比較した。

3 解析結果

3.1 WPR および雨量計観測による降水日変化

図 2(a) にポンティアナにおける WPR と雨量計による降水雲別降水量日変化を示す。降水量ピークは 14-15 LT で深い対流性の降水からなる。図 2(b) にポンティアナにおける WPR と雨量計による降水雲別降水頻度日変化を示す。12LT 頃から深い対流性降雨の頻度が増加し始める。降水量がピークとほぼ同じ 15-16LT に降水頻度がピークに達し、深い対流性降雨の寄与が大きい。その頃から層状性降水の頻度が増加し、19-20LT にピークに達するが降水量としては多くない。15LT から 20LT にかけて深い対流性降水から層状性降水への移行が明瞭であり、その特徴は Renggono et al. (2001) によって述べられているスマトラ島・ジャワ島における特徴と同じである。このようにポンティアナは海洋大陸をはじめとする熱帯の陸域で見られる典型的な降水日変化の特徴を持っていた。

図 2(c) にマナドにおける雨量計と WPR による降水雲別降水量日変化を示す。12-23LT の降水が多く、全体の 68 パーセントを占める。さらに降水量ピークが 13-14LT にあり、深い対流性・および対流/層状混合の寄与が大きい。この時間の降水量ピークは縦線で示したエラーバーから有意であると言える。ここまでの点ではポンティアナと似ているが、その後の降水の傾向に違いがある。図 2(d) に降水雲別降水頻度日変化を示す。層状性降水

の頻度が15-19LTにピークを持つが、0.02程度とポンティアナのピークに比べて1/3の頻度である。このことから13-14LTの後の対流性降雨から層状性降雨への移行の頻度が少なく、短時間で降り終わる傾向があると言える。未明に降水量のピークが見られ、対流性降水量のピークの後に層状性降水の頻度のピークが見られる。未明の小さな降水量ピーク、日中の降水量の大きなピークを持つという点でGray and Jacobson (1977) で述べられている "Large Island" (水平スケール数十 km) とほぼ同様の降水日変化であると言える。このように、マナドは熱帯における水平スケール数十 km の島に近い降水日変化の特徴を持っていた。

図 2(e) にビアクにおける雨量計と WPR による降水雲別降水量日変化を示す。13-14LT 頃に降水量のピークがあり、深い対流性降雨による寄与が大きい。図 2(f) にビアクにおける雨量計と WPR による降水雲別降水頻度日変化を示す。この降水量ピークの後には層状性降水の頻度のピークは見られず、マナドと同じように短時間で降り終わる傾向があると言える。これは熱帯における水平スケール数十 km の島の特徴である (Gray and Jacobson 1977)。さらに午前中に降水の頻度が高く、層状性降雨の頻度が大きい。ビアク周辺では深夜から朝にかけてパプア島の北沿岸海域から沖数百キロにかけて雲システムが北上する (See Fig. 7 in Liberti et al. 2001)。ビアクの午前中の降水はこの雲システムの影響によるものであり、この点でマナドとの違いがある。このように、Biak の降水日変化は熱帯における水平スケール十～数十 km の島の特徴とパプア島の北沿岸海域の2つの特徴を併せ持っていた。

3.2 TRMM 観測による降水日変化

図 3 は 11 年分 (1998–2008 年) の TRMM3G68 データによる平均降水日変化を示す。(a) にポンティアナの、(b) にマナドの、(c) にビアクの結果を示す。3G68 データの水平分解能は 0.5 度であり、それぞれの地点で用いた領域は図 1(b)・(c)・(d) でそれぞれ示している。ポンティアナでは午後になってから対流性降水量が増加し、2-3 時間後に層状性降雨が増加する点で、WPR と雨量計による降水日変化に似ているといえる。しかし、マナドとビアクでは両地点とも午後の降水量ピークが表わされていない。ビアクでの午前中の降水ピークは表れている。

図 4 はビアク周辺における 11 年間分 (1997-2008) の TRMM2A25 'Estimated surface rain' による 1 時間毎の降水量コンポジットを示す。日中の降水量ピークはビアク島、およびその南にある島が持つ特徴であることが分かり、17LT 以後には陸域での降水という特徴が明瞭でなくなる。

マナドにおいてもビアクとほぼ同様の結果が得られた (図省略)。半島の陸域のみ日中の降水量ピークが見られ、夕方には陸域における降水の特徴が明瞭でなくなる。これは水平スケール数十 km の日中の降水ピークの特徴が 3G68 データでは表れなかったが 11 年間分の TRMM2A25 データにより定性的に表れていることを意味する。

3G68 を用いて午後の降水量ピークが表れなかったのは WPR サイトを含むグリッドボックスのうち海洋が大きな割合を占めるためと考えられる。その特徴をとらえるには 2A25 データが必要である。熱帯における降水日変化は一般に昼間の陸面加熱により、陸域で昼すぎから夕方にかけての降水ピークがあると言われている。ポンティアナはその典型例で

あった。しかし、数十 km となる半島の先端や島では真昼に降水量のピークがあり夕方には降水量が少なくなる。

3.3 TRMM 観測と雨量計観測の比較

表 1 に雨量計による一日平均の層状/対流性降水量と TRMM2A25 データによる一日平均の層状/対流性降水量を表す。また、2A23 により対流/層状の分類を行った。雨量計による降水量については WPR による降水雲タイプ分類のうち、Deep convective と Shallow convective を対流性、Stratiform と Mix Stratiform/convective を層状性として計算した。特に雨量計の対流性降水量が TRMM 観測の 2 – 3 倍である。TRMM が陸域で降水を過小評価していること（岡本・重, 2008）が最も有力な原因として挙げられる。現在そのことは TRMM が直面している最大の課題の一つである。TRMM の陸域のデータを用いるときには対流性降水が過小評価されていることについての注意が必要である。

表 1: 対流性、層状性降雨それぞれについて、雨量計観測と TRMM 降雨レーダー観測 (2A25) による 1 日あたりの降水量 (mm/day) の比較

	Pontianak		Manado		Biak	
Type	STR	CNV	STR	CNV	STR	CNV
Rain gauge	2.90	6.73	2.70	5.86	3.34	7.20
TRMM 2A25	1.97	2.20	1.92	3.13	3.36	2.52

4 まとめ

ポンティアナ・マナド・ビアクの WPR と雨量計を用いてそれぞれの地点における降水日変化を調べた。ポンティアナは海洋大陸における典型的な陸域の降水日変化の特徴を持っていた。すなわち昼すぎから夕方にかけて降水が卓越し、対流性降雨から層状性降雨への移行が明瞭であった。一方でビアクとマナドはポンティアナとは違い、真昼に対流性降水による降水ピークが表れて夕方まで続かない。対流性から層状性降水への移行は明瞭ではない。この特徴は熱帯において水平スケール数十キロメートルの島に良く見られる特徴である。1998–2008 年の 11 年間の TRMM データを用いて WPR サイトにおける降水日変化を調べた。まず 3G68 データを用いて調べたが、ポンティアナにおいては WPR と雨量計観測による結果と定性的に合致していた。しかし、マナドとビアクにおいては午後の降水ピークが表れておらず、3G68 データが降水日変化を定性的に表しているとは言えない。3G68 データがマナドとビアクにおいて降水日変化を定量的に表さなかったのは水平分解能が低いためであった。より水平分解能が高い降雨レーダー (2A25) データを用いて降水日変化を調べたところマナド・ビアクともに日中の降水量ピークが明瞭に表れた。この結果は 11 年間分の 2A25 データを用いることにより熱帯における降水を細かい特徴まで定性的に俯瞰できることを意味する。しかし、TRMM 観測は統計的に雨量計観測よりも対流性降雨に関しては 2 分の 1 から 3 分の 1 程度であるなど、TRMM 観測と雨量計観測

の間には定量的な差が存在する。現在の TRMM 降雨レーダーによる降水強度推定アルゴリズム (Version 6) では降水量を過小評価することが現在直面している課題であり、それを解決すべく現在開発中の降雨強度推定アルゴリズム (Version 7) の完成が望まれる。

参考文献

- Gray, W. M., and R. W. Jacobson Jr., 1977, Diurnal variation of deep cumulus convection. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 1171–1188.
- Hirose, M, R. Oki, S. Shimizu, M. Kachi, and T. Higashiuwatoko, 2008: Finescale diurnal rainfall statistics refined from eight years of TRMM PR data, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 544–461.
- Liberti, G. L., F. Cheruy, and M. Desbois, 2001, Land effect on the diurnal cycle of clouds over the TOGA COARE area, as observed from GMS IR data. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 1500–1517.
- Negri, A. J., T. L. Bell, and L. Xu, 2002, Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 1333–1344.
- Nitta, Ts., and S. Sekine, Diurnal variation of convective activity over the tropical western Pacific, *J. Meteor. Soc. Japan*, 72, 627–641, 1994.
- Ramage, C. S., 1968, Role of a tropical "maritime continent" in the atmospheric circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 96, 365–370.
- Renggono, F., H. Hashiguchi, S. Fukao, M. D. Yamanaka, S.-Y. Ogino, N. Okamoto, F. Murata, S. W. B. Harijono, M. Kudsy, M. Kartasasmita, and G. Ibrahim: 2001, Precipitating clouds observed by 1.3-GHz L-band boundary layer radars in equatorial Indonesia, *Ann. Geophys.*, 19, pp. 889–897.
- Williams, C. R., W. L. Ecklund, and K. S. Gage, 1995, Classification of precipitating clouds in the Tropics using 915-MHz wind profilers. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 12, 996–1012.
- Yamanaka, M.D., H. Hashiguchi, S. Mori, P. Wu, F. Syamsudin, T. Manik, Hamada J.-I., M.K. Yamamoto, M. Kawashima, Y. Fujiyoshi, N. Sakurai, M. Ohi, R. Shirooma, M. Katsumata, Y. Shibagaki, T. Shimomai, Erlansyah, W. Setiawan, B. Tejasukmana, Y.S. Djajadihardja, and J.T. Anggadiredja, 2008, HARIMAU radar-profiler network over the Indonesian maritime continent: A GEOSS early achievement for hydrological cycle and disaster prevention. *J. Disaster Res.*, 3, 78–88.
- 岡本謙一, 重尚一, 2008, 熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダの研究開発とその観測成果, 電子情報通信学会論文誌

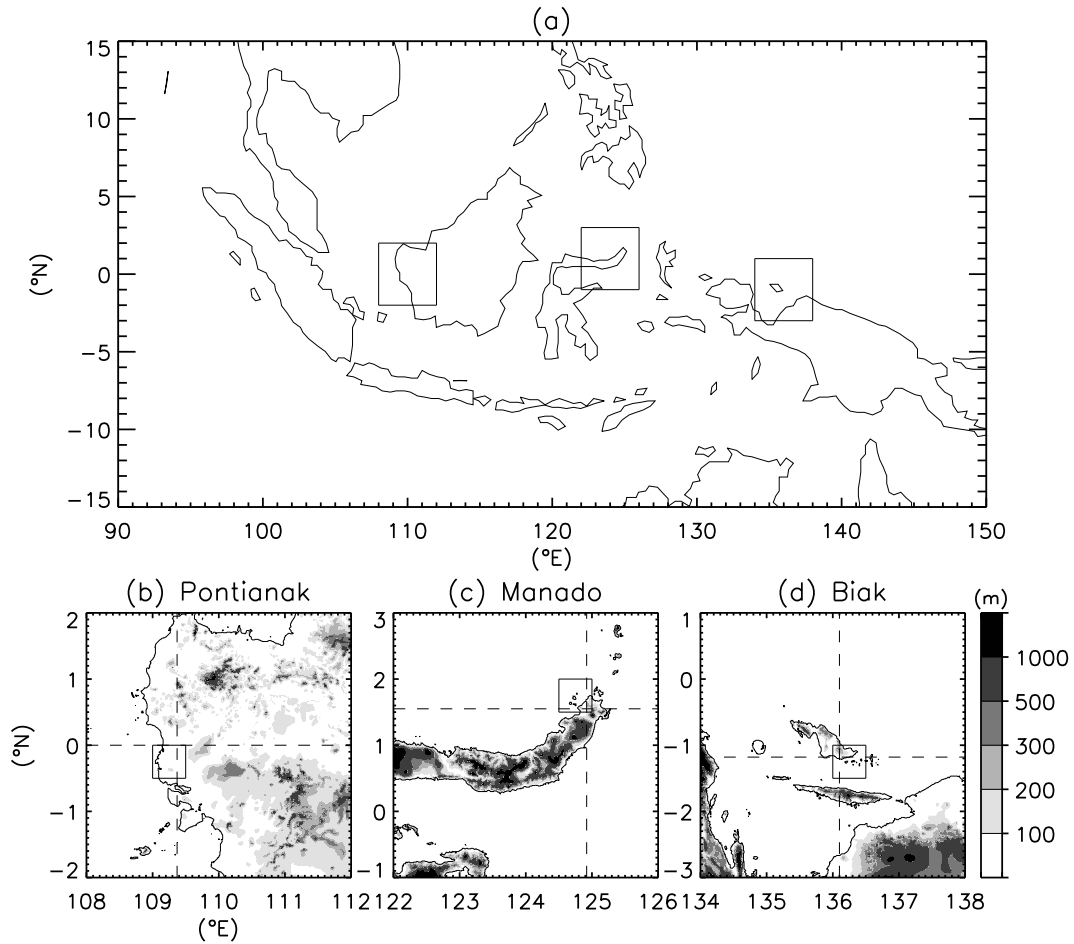


図 1: (a) 海洋大陸の地図。(b)・(c)・(d)「海大陸レーダーネットワーク構築」によって新たに設置されたポンティアナ・マナド・ビアクの WPR 周辺の地形。(a) の正方形は左からそれぞれ (b)・(c)・(d) に表される領域を示す。(b)・(c)・(d) の正方形は TRMM3G68 データの WPR サイトを含むグリッドを示す。

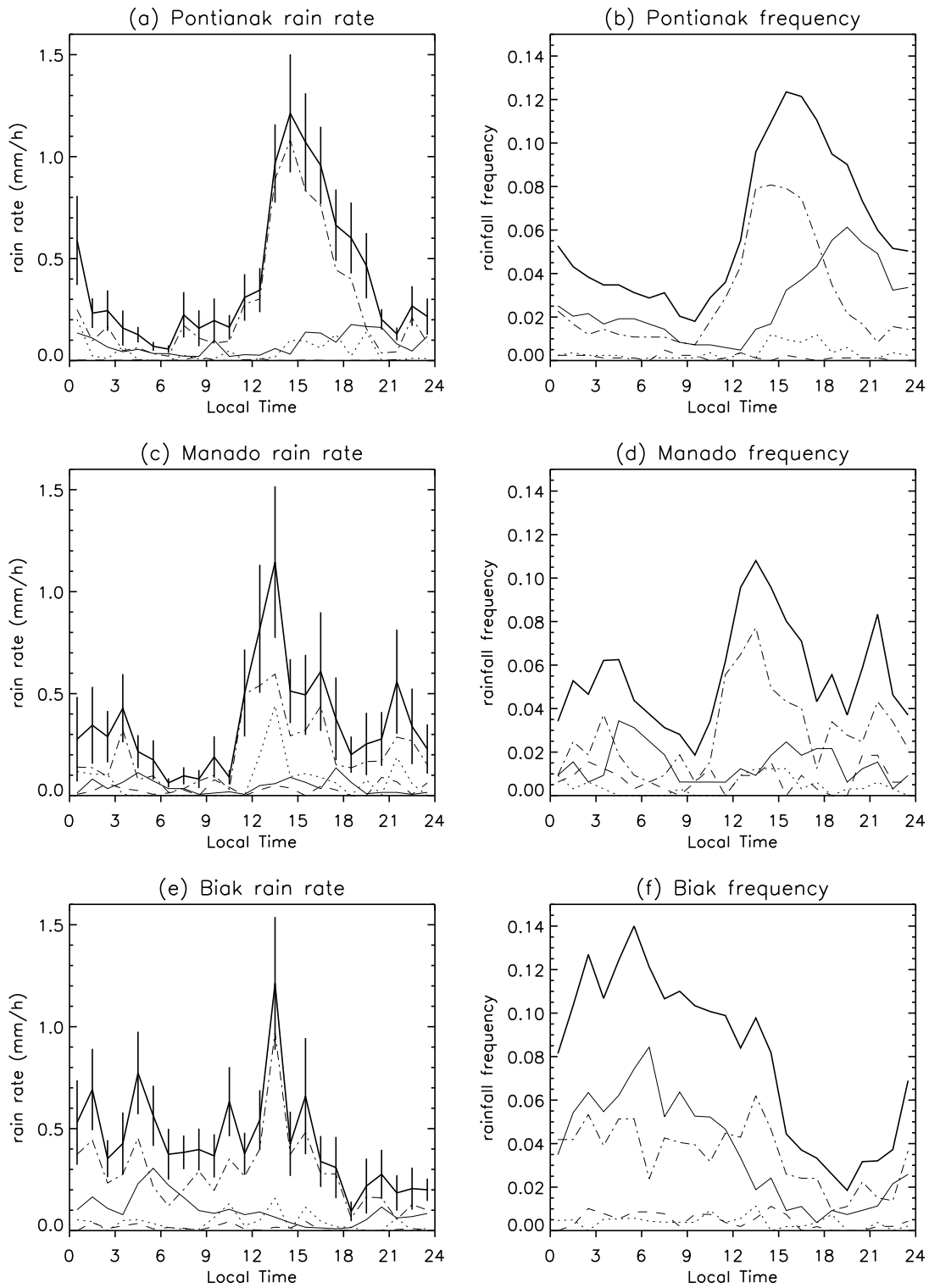


図 2: ポンティアナ・マナド・およびビアクにおいて WPR と雨量計による降水量日変化及び降水頻度の日変化。太い実線が総降水量、細い実線が Stratiform、点線が mixed stratiform/convective、破線が shallow convective、一点破線は deep convective を表す。縦線は総降水量に対して $\sigma/\sqrt{n}$ で定義したサンプリングエラーである。

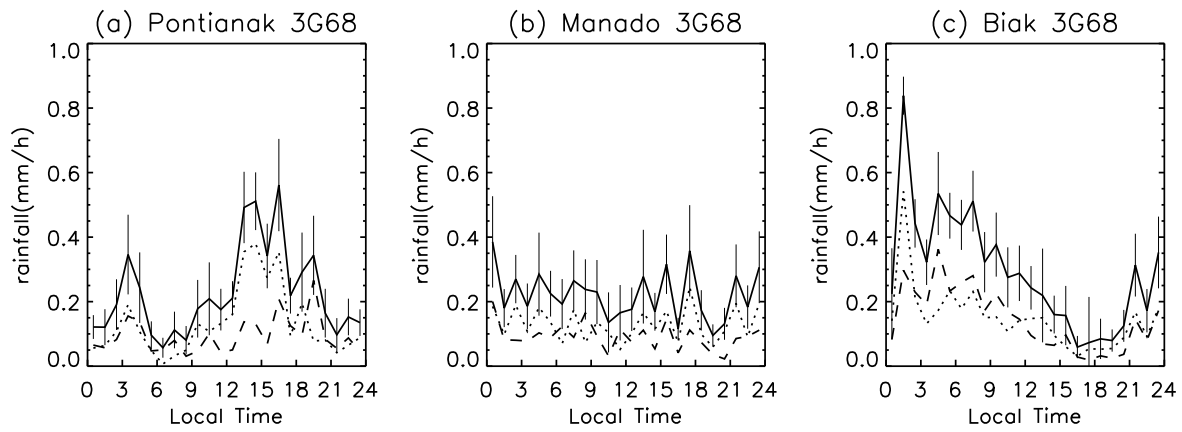


図 3: (a) ポンティアナ、(b) マナド、および (c) ビアクにおける TRMM3G68 による降水量日変化。実線が総降水量、点線が対流性降雨、破線が対流性降雨を表す。縦線は総降水量に対して $\sigma/\sqrt{n}$ で定義したサンプリングエラーである。

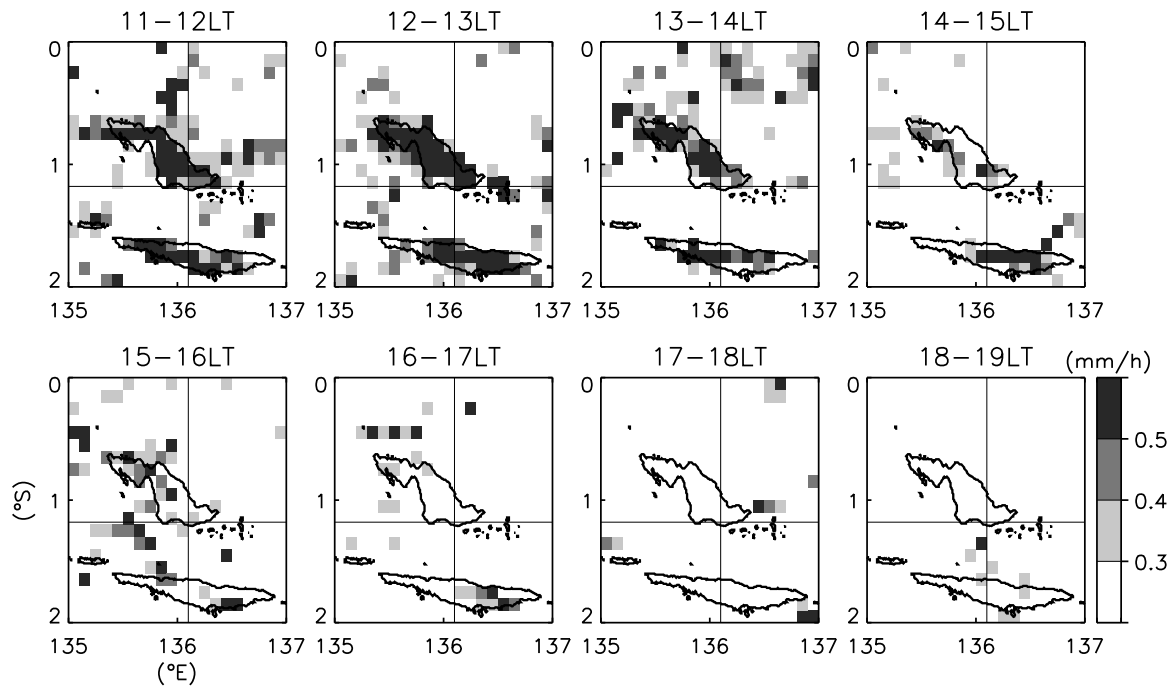


図 4: ビアク周辺における TRMM2A25 データによる 11 時から 19 時まで 1 時間毎の降水量のコンポジット。