

2008 年度グローバル COE プログラム
「生存基盤持続型の発展を目指す地域研究拠点」
次世代研究イニシアティブ 成果報告書

課題：インドネシア海洋大陸域における日変化特性の研究

氏名：田畑 悦和（生存圏研究所・理学研究科 博士後期課程）

1、研究背景

インドネシア海洋大陸は、世界最高の海水面温度により水蒸気供給が豊富で、さらに強い太陽放射加熱により世界で最も対流活動の活発な地域の一つであり、大気大循環の駆動源の役割を果たしている。海洋大陸では日周期の対流活動が最も卓越し、とりわけ大きな島とその周辺の海域で活発である (Nitta and Sekine 1994)。海洋大陸は東西 5000 km にも及び、日周期の対流活動が地域によって多種多様であることが指摘されている。スマトラ島では山岳部に 15--20LT 頃に発生した雲システムが分断されて東北方向と南西方向に移動することが知られている (Mori et al. 2004, Sakurai et al. 2005)。また、対流活動の理解のために水蒸気の輸送課程の理解が重要である。Wu et al. (2002) は GPS とラジオゾンデデータを用いてスマトラ島の山岳部にあるコトタバンにおいて日中に混合層の発達に伴い水蒸気が上方に輸送されることにより可降水量が増大して 17LT 頃にピークに達することを述べられている。また、水蒸気量の増加は主に高度 3km ほどまでの範囲で起こることを述べている。また、Sasaki et al. (2004) は混合層の発達は高度 2km までであるのに対してそれより上の高度 3km まで増加が起こっていることを指摘し、地形に起因する風の収束が水蒸気鉛直輸送に重要な役割を果たしていることを示した。

海洋大陸の対流活動に大きな影響を与える要因として周期 30–60 日の季節内変動(ISV)が挙げられる。季節内変動活発期に通過するインド洋から東進してきた超雲団は、海洋大陸の複雑な地形やそれに起因する日周期の対流活動によって変調される。スマトラ島やジ

ヤワ島では赤道大気レーダーをはじめとする観測機器が整備されており、CPEA-I キャンペーンなどにより超雲団変調の様子等が研究されてきた (Fukao 2006)。一方、スマトラ島以東の赤道域においては観測データの不足により研究は進んでいない。

「地球観測システム構築推進プラン」の「海大陸レーダーネットワーク構築 (Hydrometeorological Array for ISV-Monsoon Automonitoring: HARIMAU)」では、赤道上に西からカリマンタン島のポンティアナ、スラウェシ島のマナド、ニューギニア島の北の島であるビアクにウィンドプロファイラー網を展開して、これまでの観測の空白域を補完して季節内変動の解明と全球気候予測精度の向上に貢献する事を目指している (図 1)。ポンティアナ、ビアク、マナドの順にそれぞれ 2007 年 2 月、2007 年 3 月、2008 年 9 月にウィンドプロファイラーの設置を完了して、連続観測を開始している。また、ポンティアナとビアクでは 2008 年 3 月から MAWS による連続観測を行っている。設置したウィンドプロファイラーは時間高度分解能がそれぞれ 1 分と 100 m で、高度 4 km まで概ね連続したデータが取得できる。降雨時には降雨からのエコーを受け、高度 4 km 以上のデータも取得可能である。

設置したウィンドプロファイラーデータや気象衛星データを用いたこれまでの研究により、ポンティアナとビアクでの雲システム・降水・風速変動に関する日変化の様相が明らかになってきた (e.g. 田畑他、2007)。ウィンドプロファイラーでは測定できない気温・水蒸気の日変化の様相を調べるためにポンティアナでラジオゾンデ観測を実施した。また、新たに設置したウィンドプロファイラーデータは他の観測手段による検証がなされていないため、今回のラジオゾンデ観測のデータとウィンドプロファイラーの風速データを比較することによりウィンドプロファイラーデータの検証も併せて行った。ウィンドプロファイラーデータは将来 GTS (全球通信システム) により気象数値予報に用いる予定であり、データの正確性の検証はきわめて重要である。

第 2 章では解析に用いたデータや解析手法について述べる。第 3 章ではラジオゾンデ観測期間中に見られた水蒸気の日変化特性について述べる。第 4 章ではラジオゾンデデータ

によりウィンドプロファイラーデータの検証を行った結果について述べる。

2、使用データ

□ラジオゾンデデータ

ポンティアナにおいて 2008 年 8 月 21 日 3 UT (10 LT) から同月 27 日 0 UT (7 LT) まで 3 時間間隔でラジオゾンデ観測を実施した。気圧・気温・湿度・水平風速の高度プロファイルが得られる。

□ウィンドプロファイラーデータ

ポンティアナのウィンドプロファイラーは 2007 年 2 月 22 日に設置されて以来、システムのトラブルにより 2007 年 7 月から 9 月の間に一度観測が止まった以外は連続観測が行われている。ウィンドプロファイラーは電波を上空に向けて放射し、上空の大気擾乱によって散乱されたエコーを受信してそのドップラーシフトから対象大気のビーム方向の風速を推定する。ポンティアナでは 1357.5MHz (UHF 帯) で運用されており、ピーク送信出力は 2800W である。鉛直ビームと東西南北 4 方向にそれぞれ 14°傾けたビームの 5 ビーム観測により三次元の風速を推定している。今回の観測で南北ビームの傾きに誤りがあることが分かり、それについては第 4 章で述べる。時間高度分解能はそれぞれ 1 分、100m である。また、受信信号のエコー強度やスペクトル幅から対象大気の乱流強度を推定することが出来る。UHF 帯ウィンドプロファイラーは降雨時には強い降水エコーを受信する。通常は高度ほぼ 4km まで連続したデータが取れるが、降水エコーは 4km より上でもデータ取得可能である。

□地上気象観測データ

ポンティアナでは自動地上気象観測装置 (MAWS) を設置して 2008 年 3 月より気圧・気温・湿度・日射・雨量・水平風速を連続観測している。なお、雨量は 4 月 23 日までシステムのトラブルのために観測できていない。

□気象衛星雲データ

MTSAT-1R (Multifunctional Transport Satellite) IR1 チャンネルでは雲頂から放射される 11.5

μm の赤外線を受信してその強度から雲頂温度を計算している。雲頂温度が低いほど雲頂高度が高いことを表しており、対流活動が活発な傾向がある。データは高知大学を通じて日本の気象庁から提供されている。時間分解能は1時間で水平分解能は緯度経度それぞれ 0.05° である。

3、日変化特性

Wu et al. (2003) は可降水量が17 LT ごろに最大となり、地上気象観測により算出した地表水蒸気混合比（以下、混合比）のピークもほぼその時間帯になることを述べているが、ポンティアナにおける様相はそれとは違ったものであった。2008年3月—8月における地表混合比および降水強度の日変化コンポジットを図2に示す。混合比の第1ピークが8—9 LTで、第2ピークが16—17 LT頃である。降水強度のピークは15—16 LTであり、第2ピークは降水がもたらすものと考えられる。

観測期間中に同じような地表混合比の日変化を示した日は8月21日である。その日の地表混合比及び降水強度を図3に示す。地表混合比は8—9 LTにピークを持った後に短周期変動しながら16 LTにかけて徐々に減少し、その後16 LTからの降水により増加している様子が分かる。8—9 LTまでの地表混合比の増加は日射による地表の水分が蒸発したためと考えられる。この日の9:30、12:30、15:30 LTのラジオゾンデ観測による温位、水蒸気混合比を図4に示す。9:30 LTでは高度約500 m、12:30・15:30 LTでは高度1 km 強より下で温位がほぼ一定に保たれており、混合層に対応すると考えられる。ウィンドプロファイラーによるエコー強度（SN比）のデータを図5に示す。エコー強度のピークから推定される混合層の上端高度はラジオゾンデ観測による温位の高度プロファイルから推定されるそれとほぼ一致している。また、12:30・15:30 LT放球の観測データによる水蒸気混合比の高度プロファイルは温位プロファイルと同様に混合層中ではほぼ一定になっており、9:30 LTのデータに比べて地表付近では低く、高度1 km 付近では高くなっている。このことは混合層により地表付近の水蒸気混合比の高い層が水蒸気混合比の低い上層と混じり合うために、地表混合比が低下することを示唆する。また、この過程を通じて水蒸気が上方へ輸送されているが、

Sasaki et al. (2004) が指摘しているように水蒸気量は混合層よりも上の高度 3 km 付近まで増加を示している。ポンティアナはスマトラ島コトタバンとは違った地形条件であり、何が水蒸気量の増加をもたらしているかは今後の研究課題である。

8—9 LT ごろに地表混合比のピークを持つのはラジオゾンデ観測期間中では 21 日のみであった。他の日の水蒸気のふるまいについて調べた。2008 年 8 月の気象衛星 MTSAT-1R による雲頂温度時間経度断面図を図 6 に示す。観測期間中には東進擾乱の通過があり、23 日頃にポンティアナを通過している。この東進擾乱は個々の雲クラスターは西進するが全体としては東進するという Nakazawa (1988) で述べられている構造をしていた。21 日から 26 日まで、9:30 LT のラジオゾンデ観測データによる水蒸気混合比を図 7 に示す。22 日以降は混合層の上層で水蒸気混合比が増大している様子が分かるが、これは東進擾乱の影響と考えられる。このために 22 日以降は混合層の発達による地表水蒸気混合比の減少が抑制されたと考えられる。

4、ラジオゾンデ風速データによるウィンドプロファイラー風速データの検証結果

ラジオゾンデ水平風をウィンドプロファイラー水平風と比較した。東西風・南北風それぞれに対してラジオゾンデデータはウィンドプロファイラーの高度分解能に合うように平均し、ウィンドプロファイラーはラジオゾンデ放球の前後 30 分で平均した。回帰直線と相関係数・さらには標準偏差を求めた結果を図 8 に示す。南北風の回帰直線の傾きが 0.82 であることから南北風はウィンドプロファイラーの風速がゾンデより約 2 割大きいことが分かった。このため、ビームの天頂角を検証するために鉛直ビームのドップラー速度と南北ビームのドップラー速度の関係を調べた。対照として東西ビームと鉛直ビームのドップラー速度の関係も調べた。南北（東西）ビームのドップラー速度を v_1 、 v_2 、ビーム天頂角を θ として鉛直ドップラー速度 v は以下のような関係がある。

$$v = (v_1 + v_2) / 2 \cos\theta$$

$\theta=14^\circ$ として南北（東西）ビームのドップラー速度から推定した鉛直ビームドップラー速度を横軸とし、鉛直ビームドップラー速度を縦軸とした散布図から求めた回帰直線を図 9

に併せて示す。データはラジオゾンデ観測期間中で降雨エコーの割合が多い8月24日を使用した。図9より南北ビームの回帰直線の傾きが0.975と東西ビームに比べて悪い。他の日についてもほぼ同様の結果が得られ、いずれも南北ビームの回帰直線の傾きは東西ビームのそれに比べて0.015—0.020ほど小さい。(図なし) このことから南北ビームの天頂角は東西ビームのそれに比べて3—4°程大きいと推定され、南北風がおよそ2割過大推定されていることになる。これによって図の南北風の回帰直線の傾きの説明が出来る。マナドおよびビアクのウィンドプロファイラーについても同様の解析を行い、ビーム天頂角の検証を行った。その結果、ビアクでもポンティアナと同様に南北ビーム天頂角が大きく推定されたのに対してマナドのそれは正常であると推定された。(図なし) この結果を受けて製造メーカーが調査を行い、ポンティアナでは2009年1月7日にビーム天頂角の修正を行った。ポンティアナで修正後に南北ビームの角度の検証を行った結果を図10に示す。回帰直線の傾きがほぼ1であり、ポンティアナでは南北ビームが正常に作動するようになったことを示している。製造メーカーによりビーム角度修正前の南北ビームの天頂角を調査したところ、17.36度という推定結果を得た。

5、まとめ

カリマンタン島ポンティアナにおいて8月21日から27日までラジオゾンデを放球し、ウィンドプロファイラーとの同時観測を行った。ポンティアナのこれまでの地上気象観測より地表混合比は8—9 LTと16—17 LTにピークを持つことが分かった。16—17 LTのピークは降水によると考えられる。8—9 LTのピークは日射による地表水分の蒸発と、その後混合層の発達により上層の水蒸気混合比の低い層と混じり合うことが原因と考えられる。8月21日の観測データはそのことを示唆するものであった。また、混合層の発達を通じて水蒸気が上方へ輸送されていることが確認されたが、混合層よりも上方でも高度3 kmくらいまで水蒸気量の増加が見られた。水蒸気量の増加の要因は今後の研究課題である。22—26日は東進擾乱の影響で上層が湿り、混合による地表混合比減少が抑制されたと考えられる。

これらの解析は統計を取るにはまだ事例が少ないために更なる観測が必要である。2009

年 1 月から 2 月にかけて再びポンティアナにおいてラジオゾンデ観測が実施されており、さらに同年 8 月にも行う予定にしている。今後はそれを含めて統計的な解析が課題であり、さらにウィンドプロファイラーの西 20km で行っている GPS 水蒸気観測との比較も行う。

今回の観測によって得られた風速データを用いてウィンドプロファイラーの風速推定の検証を行った。南北風の WPR が 20%ほど過大評価されており、その原因として南北ビームの天頂角に誤りがあることが判明した。南北ビームは 14 度に修正されたが、修正前の南北ビームの天頂角は 17.36 度であったと推定されている。

参考文献

Fukao, S., Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere (CPEA) : A Project Overview, 2006, J. Meteor. Soc. Japan, 84A, 1-18.

Mori, S., J.-I. Hamada, Y.I. Tauhid, M.D. Yamanaka, N. Okamoto, F. Murata, N. Sakurai and T. Sribimawati, Diurnal land-sea rainfall peak migration over Sumatera Island, Indonesia Maritime Continent observed by TRMM satellite and intensive rawinsonde soundings, 2004, Mon. Wea. Rev., 132, 2021-2039

Nakazawa, T., Tropical super cluster within intraseasonal variations over the western Pacific, 1988, J. Meteor. Soc. Japan, 66, 23-839.

Nitta, Ts., and S. Sekine, Diurnal variation of convective activity over the tropical western Pacific, 1994, J. Meteor. Soc. Japan, 72, 627-641.

Sakurai, N., F. Murata, M.D. Yamanaka, S. Mori, J.-I. Hamada, H. Hashiguchi Y.I. Tauhid, T. Sribimawati, and B. Suhardi, Diurnal cycle of cloud system migration over Sumatera Island, 2005, J. Meteor. Soc. Japan, 81, 835-850.

Sasaki, T., P. Wu, S. Mori, J.-I. Hamada, Y.I. Tauhid, and M.D. Yamanaka, Vertical moisture transport above the mixed layer around the mountains in western Sumatra, 2004, Geophys. Res. Lett., 31, L08106, doi:10.1029/2004GL019730.

田畑悦和・橋口浩之・山本真之・山本衛・柴垣佳明・下舞豊志・山中大学・森修一・Fadli Syamsdin・Timbul Manik, 2007, HARIMAU によるウィンドプロファイラーによる観測結果, 第 1 回赤道大気レーダーシンポジウムプロシーディング, 59-64.

Wu, P., J.-I. Hamada, S. Mori, Y.I. Tauhid, M.D. Yamanaka, and F. Kimura, 2003, Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatera Island. J. Appl. Meteor., 42, 1107-1115

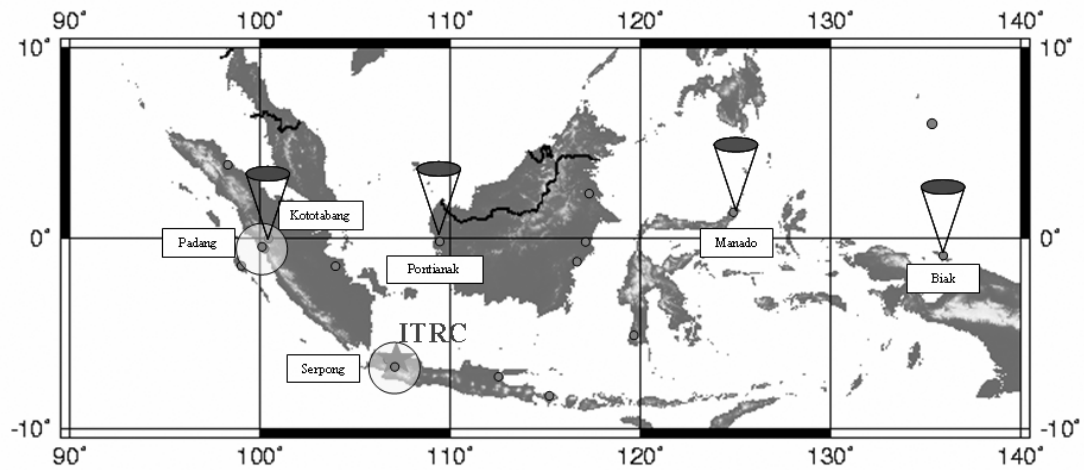


図 1： 京都大学の赤道大気レーダー(Kototabang)と HARIMAU によって整備されたレーダーの配置図。ITRC はジャカルタに設立予定の国際熱帯研究センター (International Tropical Research Center) を示す。

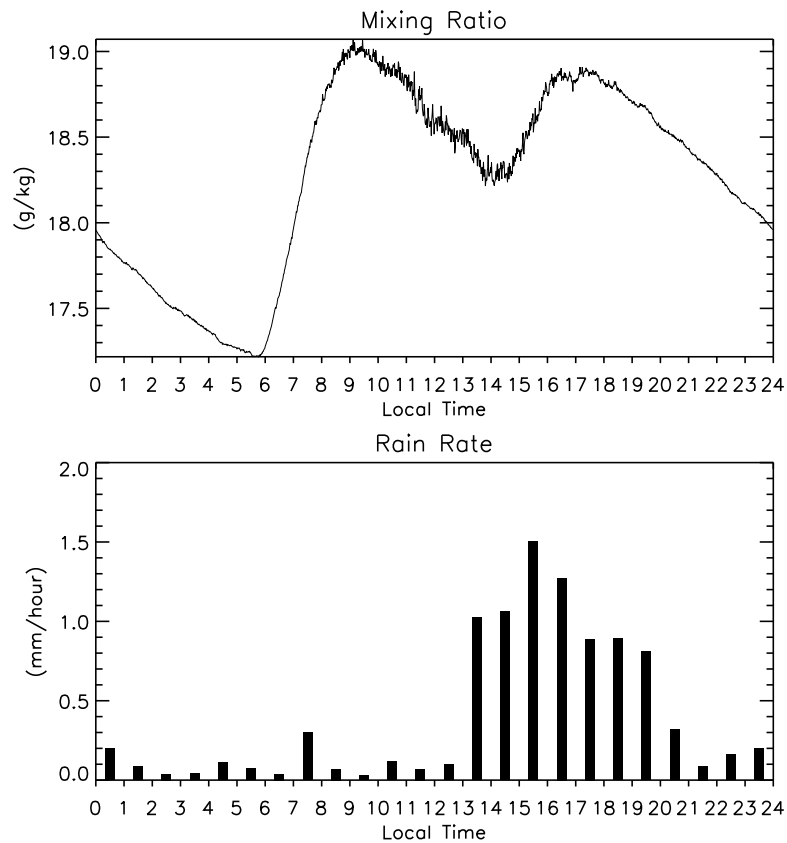


図 2： ポンティアナにおける地表混合比(上)と降水強度 (下) の日変化コンポジット。

データ期間は 2008 年 3 月 17 日 (降水強度は 4 月 24 日) から 8 月 31 日。

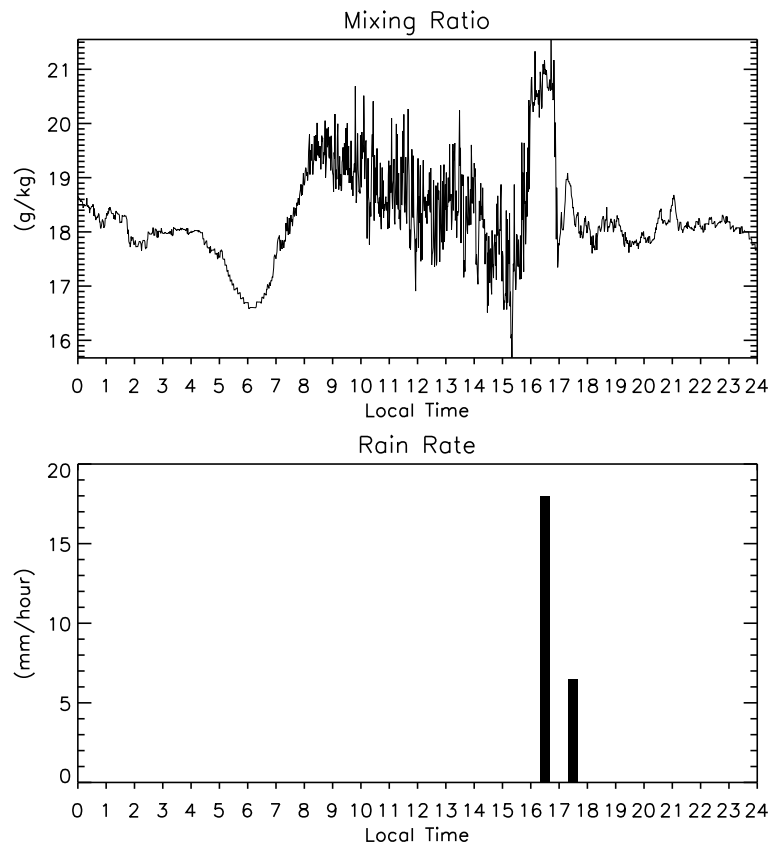


図 3 : 地上気象観測による 2008 年 8 月 21 日の水蒸気混合比 (上) と降水強度 (下)

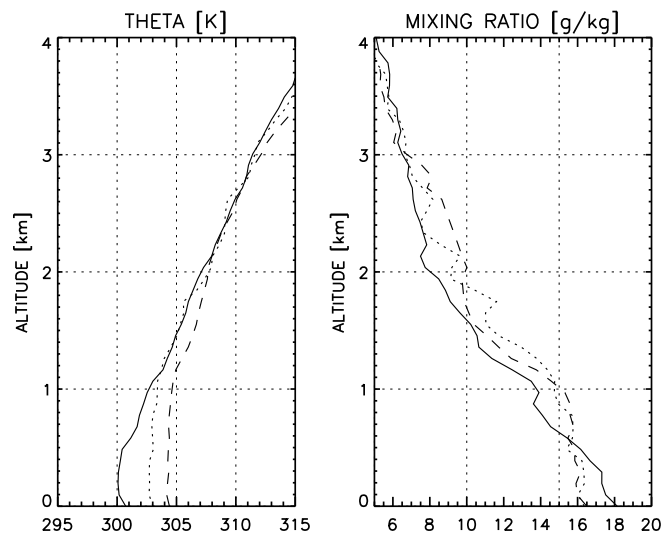


図 4 : 2008 年 8 月 21 日のポンティアナにおけるラジオゾンデ観測による温位(左)と水蒸気混合比 (右) の高度プロファイル。実線、点線、破線はそれぞれ 9:30、12:30、15:30 LT のデータを表す。

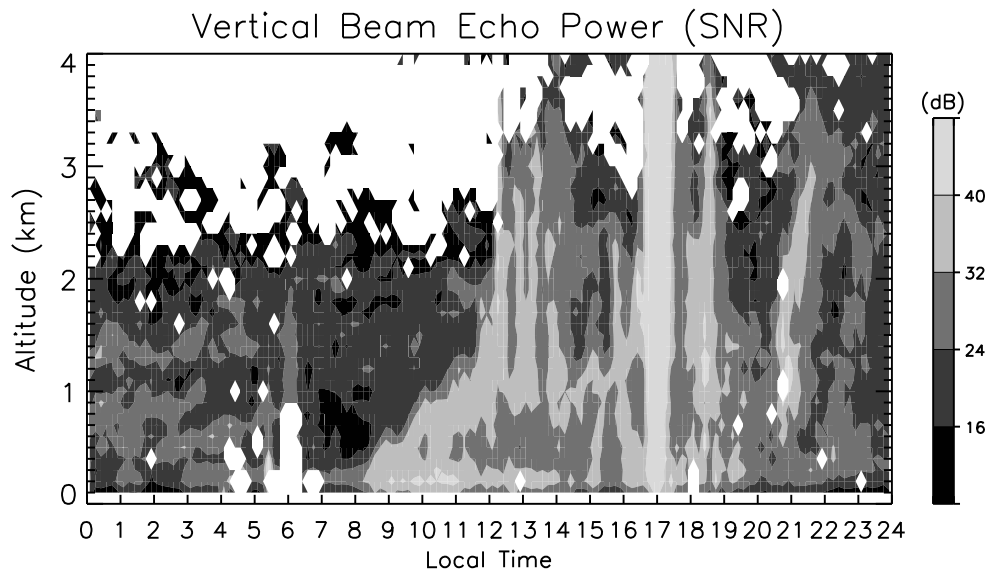


図 5 : 2008 年 8 月 21 日ポンティアナにおけるウィンドプロファイラーによるエコー強度 (SN 比)。17 LT 付近の強いエコーは降水エコーである。

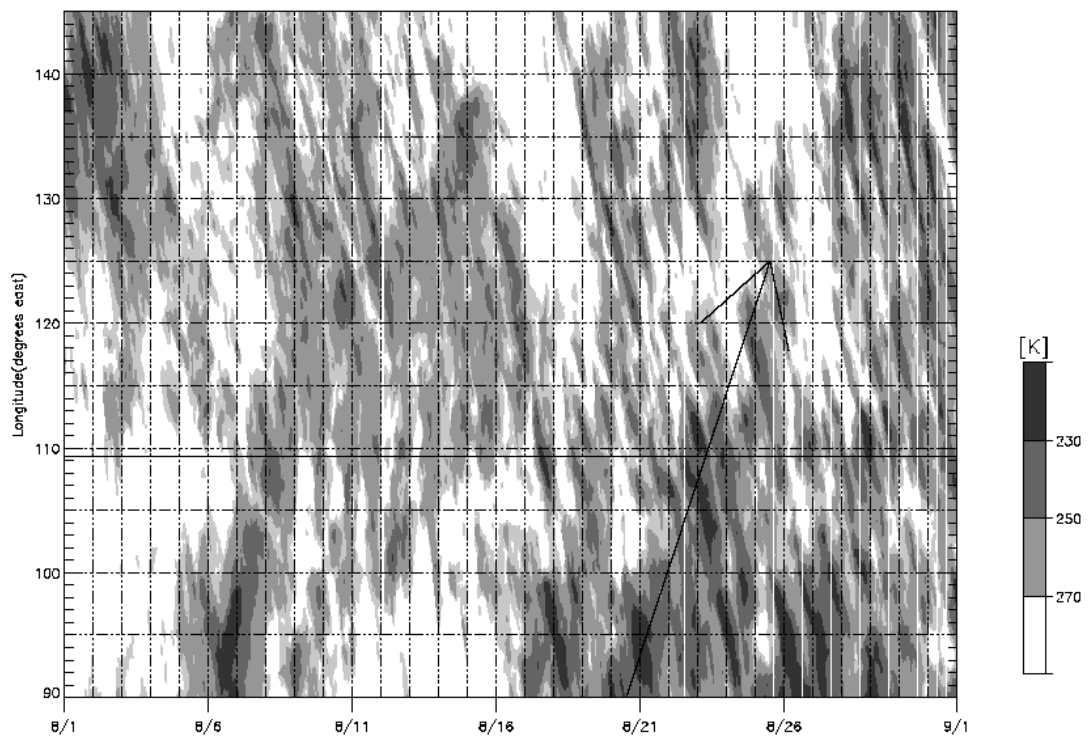


図 6 : 2008 年 8 月の気象衛星による雲頂温度時間経度断面図。南緯 2.5 度から北緯 2.5 度まで平均した。横軸の日付はその日の 00UT を示す。

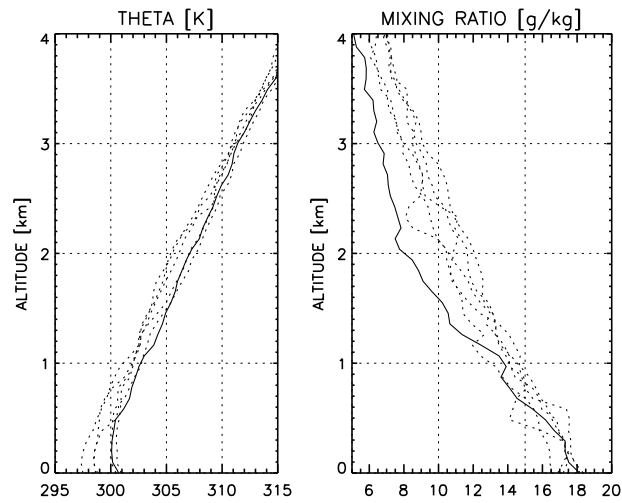


図 7: 2008 年 8 月 21 から 26 日の 9:30 LT (24 日のみ 10:08 LT) のポンティアナにおけるラジオゾンデ観測データによる水蒸気混合比(左)と降水強度 (右) の高度プロファイル。実線は 21 日のデータ、点線は 22 日から 26 日のデータ。

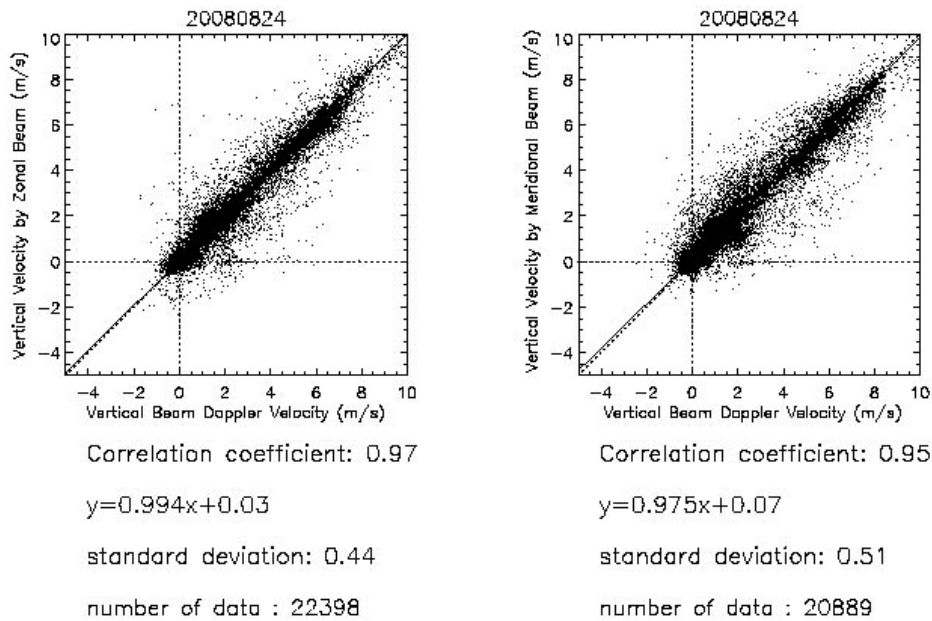
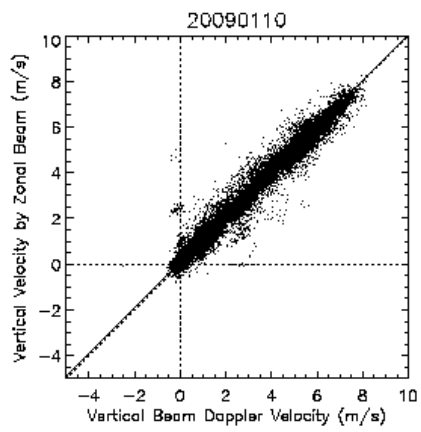


図 8: ビームの天頂角を 14 度として東西 (左)・南北 (右) 2 ビームから見積もった鉛直ビームドップラー速度 (横軸) と鉛直ビームドップラー速度 (縦軸) の散布図と回帰直線。標準偏差は回帰直線と点の距離の標準偏差を表す。データは 2008 年 8 月 24 日。

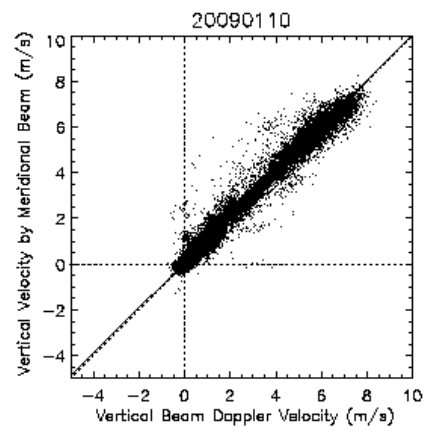


Correlation coefficient: 0.99

$$y=0.993x+0.05$$

standard deviation: 0.19

number of data : 59297



Correlation coefficient: 0.99

$$y=0.997x+0.05$$

standard deviation: 0.20

number of data : 61009

図 9 : 2009 年 1 月 10 日のデータであることを除いて図 8 と同じ。