



インドネシア海洋大陸域における日変化特性の研究

A Study on Characteristics of Diurnal Variations over Indonesian Maritime Continent

田畑 悦和 Yoshikazu Tabata

Kyoto Working Papers on Area Studies No.24
(G-COE Series 22)

February 2009

このグローバル COE ワーキングペーパーシリーズは、下記 G-COE ウェブサイトで閲覧する事が出来ます
(Japanese webpage)

http://www.humanosphere.cseas.kyoto-u.ac.jp/staticpages/index.php/working_papers

(English webpage)

http://www.humanosphere.cseas.kyoto-u.ac.jp/en/staticpages/index.php/working_papers_en

©2009

〒606-8501

京都市左京区吉田下阿達町 46

京都大学東南アジア研究所

無断複写・複製・転載を禁ず

論文の中で示された内容や意見は、著者個人のものであり、
東南アジア研究所の見解を示すものではありません。

このワーキングペーパーは、JSPS グローバル COE プログラム (E-4) :
生存基盤持続型の発展を目指す地域研究拠点 の援助によって出版されたものです。

インドネシア海洋大陸域における日変化特性の研究

田畑 悦和

Kyoto Working Papers on Area Studies No.24
JSPS Global COE Program Series 22
In Search of Sustainable Humanosphere in Asia and Africa
February 2009

インドネシア海洋大陸域における日変化特性の研究*

田畑 悦和**

A Study on Characteristics of Diurnal Variations over Indonesian Maritime Continent*

Yoshikazu Tabata**

Diurnal Variations of atmospheric water vapor at Pontianak, west Kalimantan, Indonesia are studied by using radiosonde data, 1.3-GHz wind profiler radar (WPR), and surface meteorological observation data. Radiosonde observations were conducted from 03 UT (10 LT) 21 August 2008 to 00 UT (07 LT) 27 August every 3 hours. Water vapor mixing ratio on the surface has a clear semidiurnal variation with the first peak of around 9 LT and the second peak of around 16 LT. On 21 August 2008, The ascending phase of the first peak is formed by evaporating of surface water because of solar radiation heating after sunrise. Descending phase of the first peak is formed by mixing to upper layer which has lower mixing ratio through the development of mixing layer. The second peak is formed by rainfall.

WPR wind is compared with radiosonde data to examine its accuracy. WPR meridional wind is about 20% larger than radiosonde wind, while zonal wind is consistent. The zenith angle of meridional beam turns out to be mistaken.

1. 研究背景

インドネシア海洋大陸は、強い太陽放射加熱により、海水面からの水蒸気供給が豊富で、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

*この論文は 2008 年 9 月 25 日に開催された第 2 回赤道大気レーダーシンポジウムでの発表におけるプロシーディングに加筆したものである。

** 京大大学生存圏研究所・理学研究科 博士後期過程 (tabata@rish.kyoto-u.ac.jp)

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過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タバパンにおいて、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ている。また、水蒸気量の増加は主に高度 3km 程度までの範囲で起こることを述べている。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 まで増加が起き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。スマトラ島やジャ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ピ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、ピアク、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、ポンティアナとピアクでは 2008 年 3 月から自動気象観測装置（AWS）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、ポンティアナとピ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、データの検証はきわめて重要である。

第 2 節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 節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 節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 6 月から 7 月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 1357.5MHz (UHF 帯) で運用されており、ピーク送信出力は 2800W である。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風速のビーム方向成分を測定する。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 ビーム観測により風速三成分の情報を得ることができる。今回のラジオゾンデとの比較観測で南北ビームの設定角度に誤りがあることが判明したが、それについては第 4 節で述べる。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も出来る。

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 (AWS) を設置して 2008 年 3 月 17 日より気圧・気温・湿度・日射・雨量・水平風速を連続観測している。ただし、雨量は 4 月 23 日までシステムの初期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。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検討課題である。

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) で述べられている階層構造をしていた。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(図略)。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。マナドおよびピ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、ピ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(図略)。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。ポンティアナでは南北ビームが正常に動作するようになったことを示している。現在、修正前の南北ビームのデータの補正方法を検討中である。

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 月に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、今後はそれを含めて統計的な解析を行う予定である。

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.

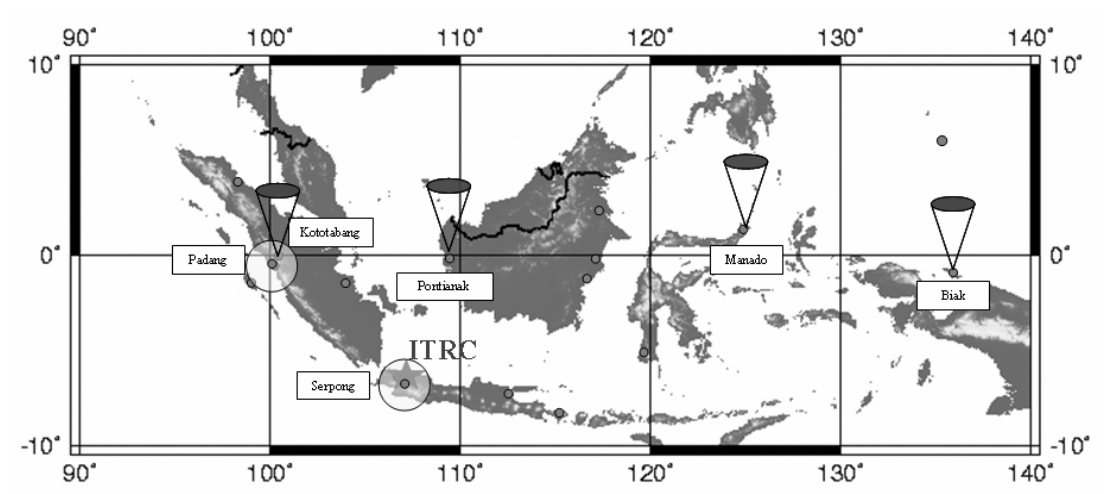


図 1： 京都大学の赤道大気レーダー(Kototabang)と HARIMAU によって整備されたレーダーの配置図。ITRC はジャカルタに設立予定の国際熱帯研究センター (International Tropical Research Center) を示す。

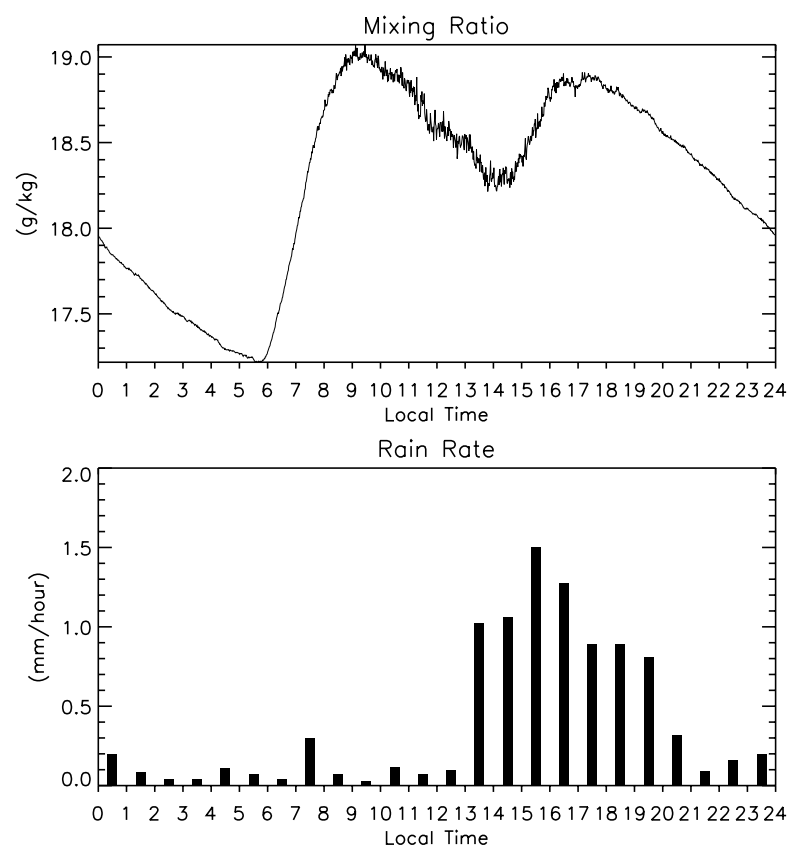


図 2： ポンティアナにおける地表混合比(上)と降水強度（下）の日変化コンボジット。

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。

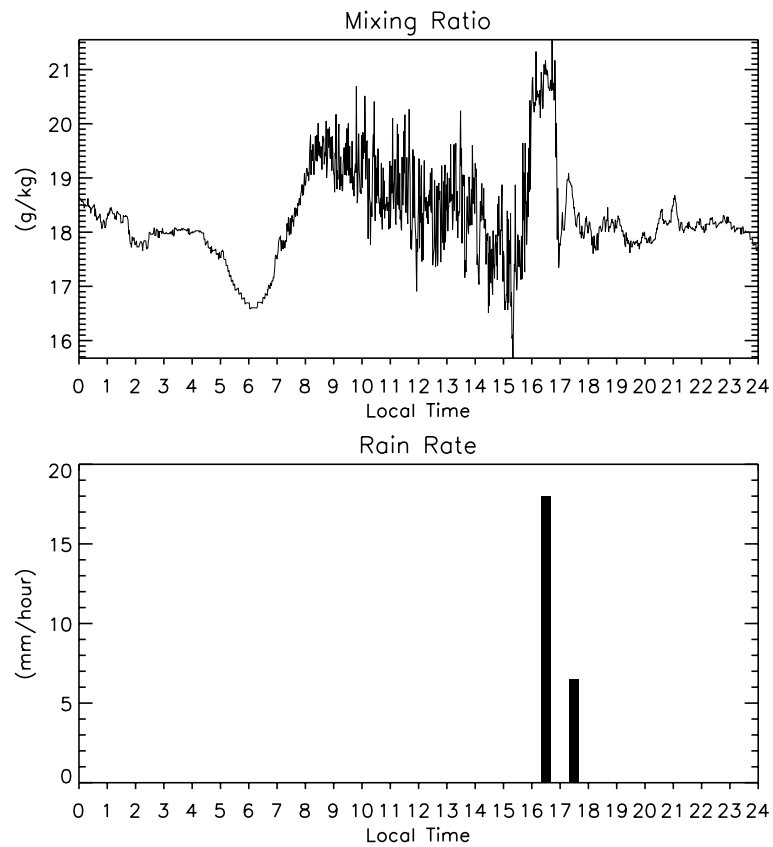


図 3：地上気象観測による 2008 年 8 月 21 日の水蒸気混合比（上）と降水強度（下）

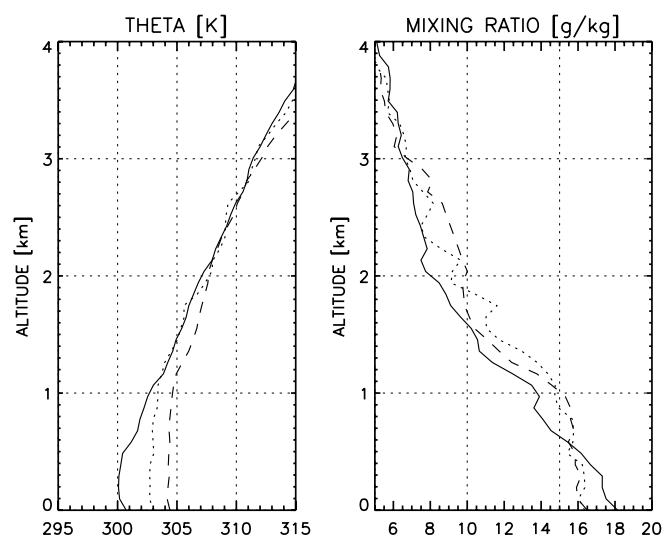


図 4：2008 年 8 月 21 日のポンティアナにおけるラジオゾンデ観測による温位(左)と水蒸気混合比（右）の高度プロファイル。実線、点線、破線はそれぞれ 9:30、12:30、15:30 LT のデータを表す。

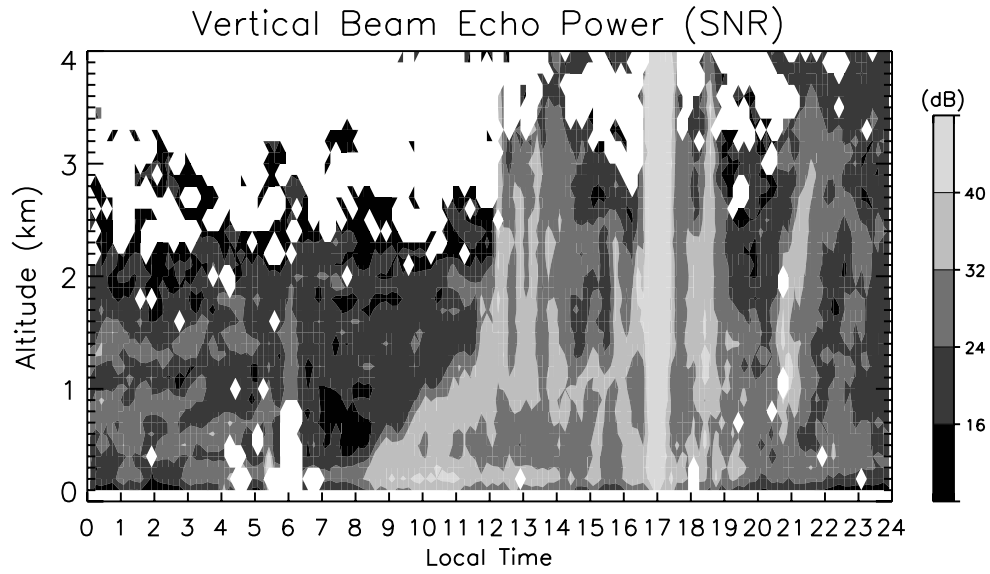


図 5：2008 年 8 月 21 日ポンティアナにおけるウィンドプロファイラーによるエコー強度 (SN 比)。17 LT 付近の強いエコーは降水エコーである。

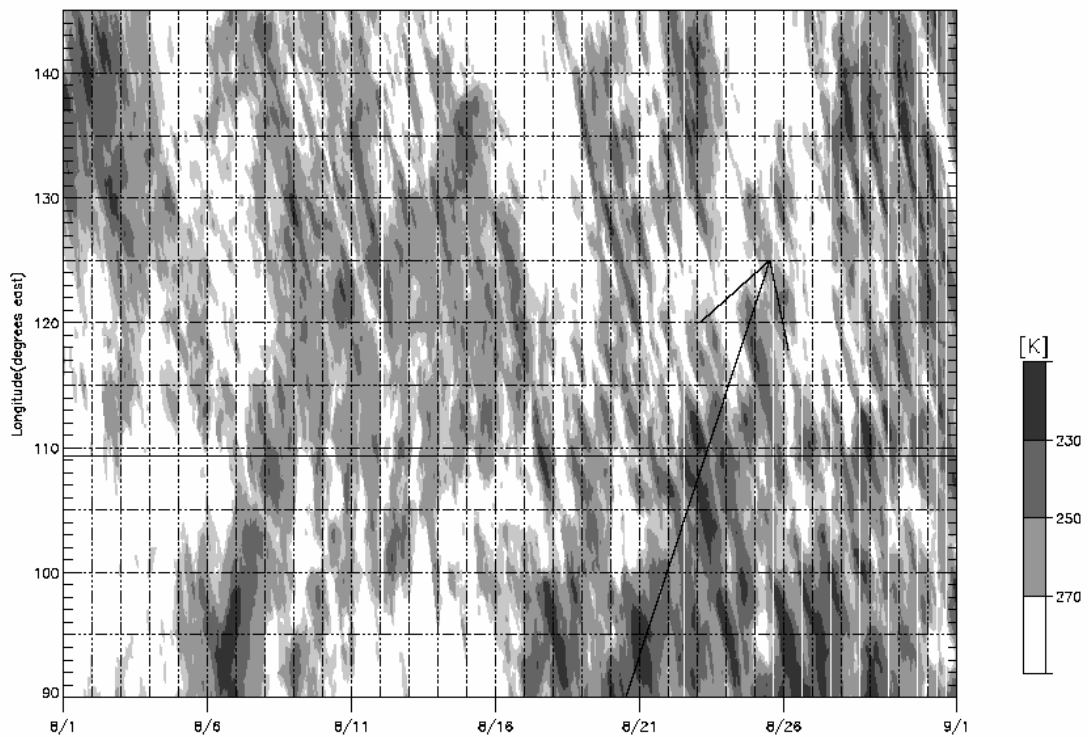


図 6：2008 年 8 月の気象衛星による雲頂温度時間経度断面図。南緯 2.5 度から北緯 2.5 度まで平均した。横軸の日付はその日の 00UT を示す。

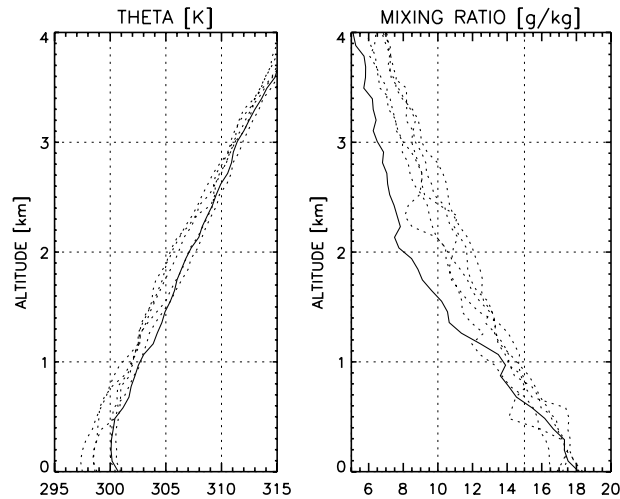


図 7：2008 年 8 月 21 から 26 日の 9:30 LT (24 日のみ 10:08 LT) のポンティアナにおけるラジオゾンデ観測データによる水蒸気混合比(左)と降水強度 (右) の高度プロファイル。
 実線は 21 日のデータ、点線は 22 日から 26 日のデータ。

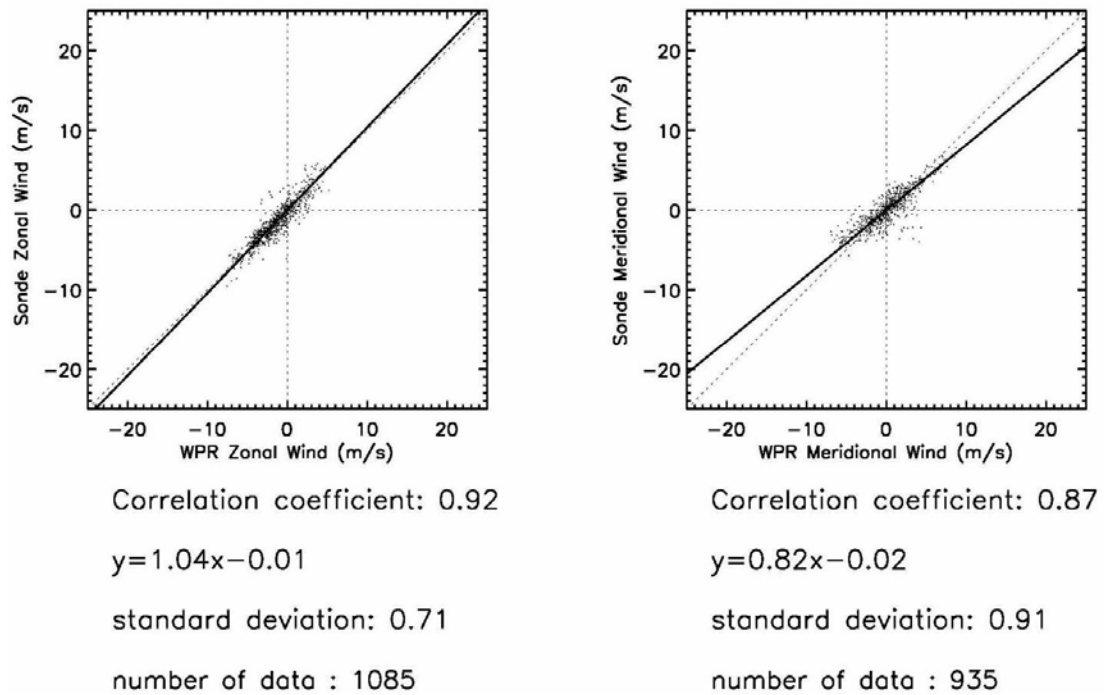
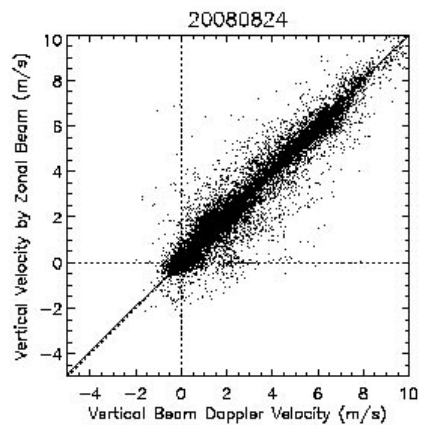


図 8：ウィンドプロファイラー風速データ (横軸) とラジオゾンデ風速データ (縦軸) の散布図と回帰直線。標準偏差は回帰直線と点の距離の標準偏差を表す。全てのラジオゾンデデータが含まれる。

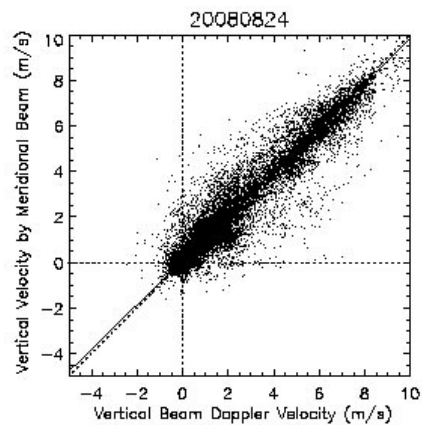


Correlation coefficient: 0.97

$$y=0.994x+0.03$$

standard deviation: 0.44

number of data : 22398



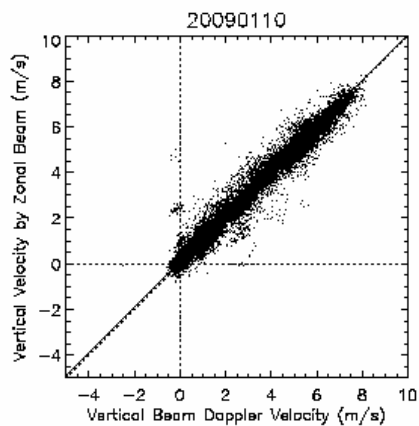
Correlation coefficient: 0.95

$$y=0.975x+0.07$$

standard deviation: 0.51

number of data : 20889

図 9 : 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。
データは 2008 年 8 月 24 日。

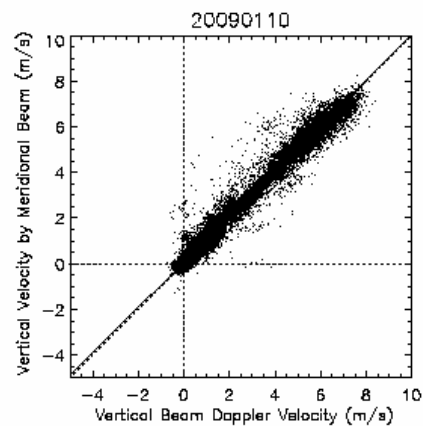


Correlation coefficient: 0.99

$$y=0.993x+0.05$$

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