

4-9 アジアにおけるLバンドウィンドプロファイラの長期観測

4-9 Long-term Observations Using L-Band Wind Profiler in Asia

大野裕一 ニファ・リーラルジ アトマ R. ジェイン 古津年章 増田悦久
OHNO Yuichi, Nipha Leelaruji, Atma R. Jain, KOZU Toshiaki, and MASUDA Yoshihisa

要旨

ウィンドプロファイラは大気乱流エコーをとらえて、上空の風を地上から観測できるレーダである。通信総合研究所はLバンドのウィンドプロファイラを開発して、1993年以来、東京小金井において連続観測を行ってきた。また、郵政省（現総務省）と通信総合研究所はタイのモンクット王工科大学ラカバン校、インドの国立MSTレーダ観測所と協力して、タイ国バンコク、インド国ガダンキにLバンドウィンドプロファイラを設置して観測を続けてきた。ここでは、上記のウィンドプロファイラのデータを用いた風の季節変化、日変化、降雨タイプの分類などの解析結果を示す。

Wind profiler is a Doppler radar that can observe upper winds from the ground by receiving atmospheric turbulence echo. The Communications Research Laboratory (CRL) developed an L-band wind profiler and has been carrying out continuous wind observations at Koganei, Tokyo since 1993. Ministry of Posts and Telecommunications (presently, Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications) and CRL also installed L-band wind profilers at Bangkok, Thailand and Gadanki, India, and has been making wind observations in cooperation with the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand and the National MST Radar Facility(NMRF), India. Seasonal and diurnal variation of winds and classification of rain type using those wind profiler data are shown in this paper.

【キーワード】

ウィンドプロファイラ, 大気境界層, アジアモンスーン, 風の日変化, 降雨タイプ分類

Wind profiler, Atmospheric boundary layer, Asia monsoon, Diurnal variation of winds, Rain type classification

1 はじめに

ウィンドプロファイラは上方に電波を発射して、上空の風を測定できるレーダである。従来の気球を用いた高層観測に比べて、時間分解能が良く、また自動運用ができ労力もかからないことから、近年、有用な測器として注目されてきている。通信総合研究所(CRL)では1991年にLバンドのウィンドプロファイラを開発して、その性能を実証してきた[1]。1993年にはアジア域

において環境計測技術を共同開発する郵政省（現在の総務省）のプロジェクトに協力して、ウィンドプロファイラをタイ国バンコク市にあるモンクット王工科大学ラカバン校(KMITL)に設置して観測を開始した。また、1997年には同プロジェクトの下で、インド南部内陸部のガダンキにある国立MSTレーダ観測所(NMRF)にウィンドプロファイラを設置して観測を開始した(図1)。

アジア諸国は現在、急速な都市化、工業化が進みつつあり、工場や車からの大気汚染も深刻

日本、タイ、インドのLバンドウィンドプロファイラ

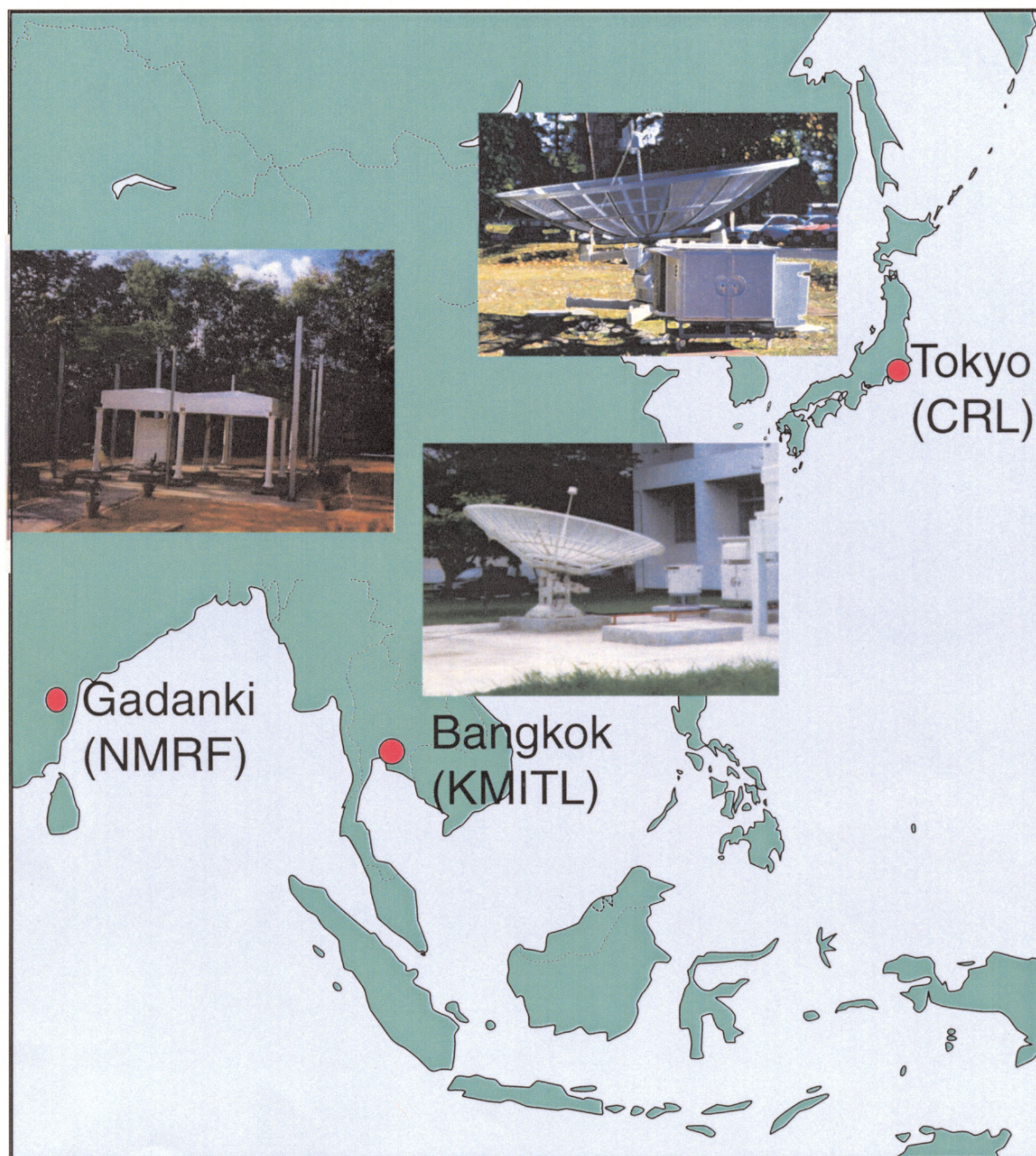


図1 Lバンドウィンドプロファイラの観測点

になりつつある。汚染物質は風によって輸送、拡散されるため大気境界層の風を観測して把握することが重要であり、短時間で連続して境界層の風が観測できるウィンドプロファイラはこうした地域の大気環境対策に適している。また、アジアモンスーン（季節風）の影響を大きく受けるタイやインドなどでは、風向の変化が雨季、

乾季という降水量の季節変化に対応しており、雨量の年々変動もモンスーンの影響が大きい。世界的な気候研究プログラムである全球エネルギー・水循環研究計画（GEWEX）では1995年からアジアモンスーンを対象にしたGAME（GEWEX Asia Monsoon Experiment）を開始した。GAMEでは1998年、アジア地域において集

中観測を実施したが、我々もこのプロジェクトに参画してタイ及びインドのウィンドプロファイラで測定された風データを多くの気象・気候の研究者に提供している[2]。

本論では、東京やタイやインドのLバンドウィンドプロファイラで得られた長期観測データを用いた風や降雨などの解析結果を示す。

2 Lバンドウィンドプロファイラシステム

気象レーダでは雨や雪などの降水粒子が主な散乱体となるが、ウィンドプロファイラでは大気そのものが散乱体となる。大気散乱は、乱流などにより電波の屈折率が変動することで生じ、電波の半波長スケールの屈折率変動が散乱に寄与する(ブラッグ散乱)[3]。大気からの散乱はVHFからUHFまで広い周波数帯域で観測できるが、Lバンドウィンドプロファイラは周波数が比較的高いので、数メートル四方の小さなアンテナで実現できる。ただし、この周波数帯では上空の散乱強度がやや小さいので、高度数kmまでの境界層観測を主とする。大気の状態(温度、湿度、乱流)により散乱強度は変動し、観測可能な高度も一定ではないが、一般にタイやインドなど高温多湿の場所の方が高くまで観測できる。なお、この周波数帯では降水粒子からの散乱強度も大きいので、降水粒子が存在すれば高い高度(8-10km)まで観測できる。

ウィンドプロファイラは大気エコーのドップラ周波数を測定することでレーダビーム方向の

風の速度成分を観測する。異なる三つ以上の方向にビームを向け、風の水平一様性を仮定し、速度を合成することで鉛直を含む風ベクトルを測定できる。

表1にCRL(小金井)、KMITL(バンコク)、NMRF(ガダンキ)で運用されているウィンドプロファイラの諸元を示す。

送信周波数はいずれも1357MHzでピーク送信出力は1kWである。CRL、KMITLのウィンドプロファイラでは、パラボラアンテナを機械的に駆動することでビーム方向を変えているが、NMRFのウィンドプロファイラはフェイズドアレイアンテナで電子的にビーム方向を変えることができる。三地点とも鉛直、東向き、北向きの3ビーム方向を観測しているが、東と北に傾ける角度(天頂角)はCRLで8度、KMITL、NMRFでは15度としている。通常、CRL、KMITLでは5分間隔で、NMRFでは2種類のパルス幅の観測を交互に11分間隔で繰り返し、24時間連続運用をしている。停電や機器のトラブルなどで自動観測が停止して、手動で復旧させたり、故障によって長期に観測できなかったこともあるが、各3地点ではこれまで数万時間にわたる観測を実施し、データを取得してきた。

3 ウィンドプロファイラで測定された風の季節変化、日変化

上記のウィンドプロファイラの長期観測データを用いて、各地点の風の季節変化、日変化について示す。図2、3、4は小金井、バンコク、ガ

表1 Lバンドウィンドプロファイラの主な諸元

	CRL	KMITL	NMRF
観測地	小金井(東京)	バンコク(タイ)	ガダンキ(インド)
送信周波数	1357.5 MHz	1357.5 MHz	1357.5 MHz
ピーク送信出力	1 kW	1 kW	1 kW
パルス幅	1 マイクロ秒	1 マイクロ秒	1 及び 2 マイクロ秒
アンテナ形式	パラボラ	パラボラ	フェイズドアレイ
アンテナ径	4.2 m ϕ	4 m ϕ	3.8×3.8
アンテナ利得	33.5 dBi	32 dBi	29 dBi
ビーム制御	架台駆動	架台駆動	電子走査
ビーム方向 (天頂角)	鉛直, 東(8度), 北(8度)	鉛直, 東(15度), 北(15度)	鉛直, 東(15度), 北(15度)

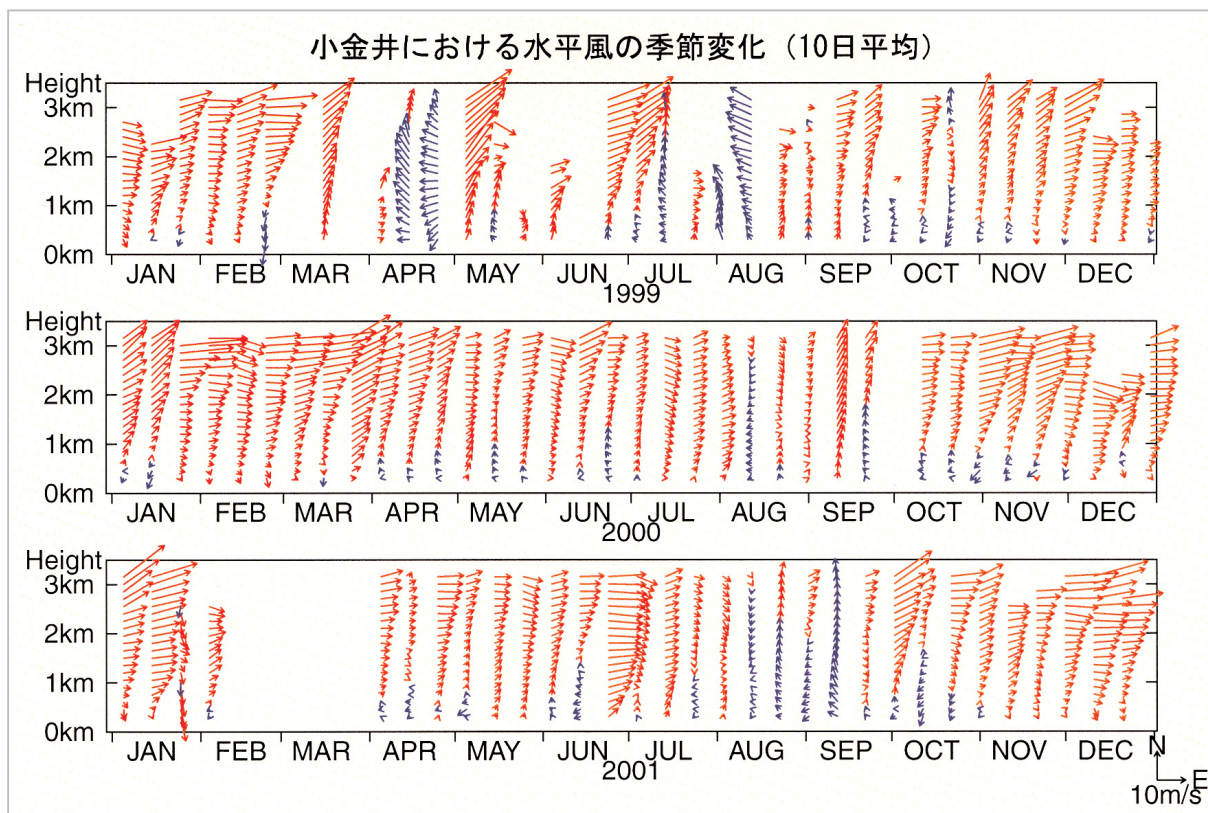


図2 小金井のウィンドプロファイラで観測された水平風の季節変化

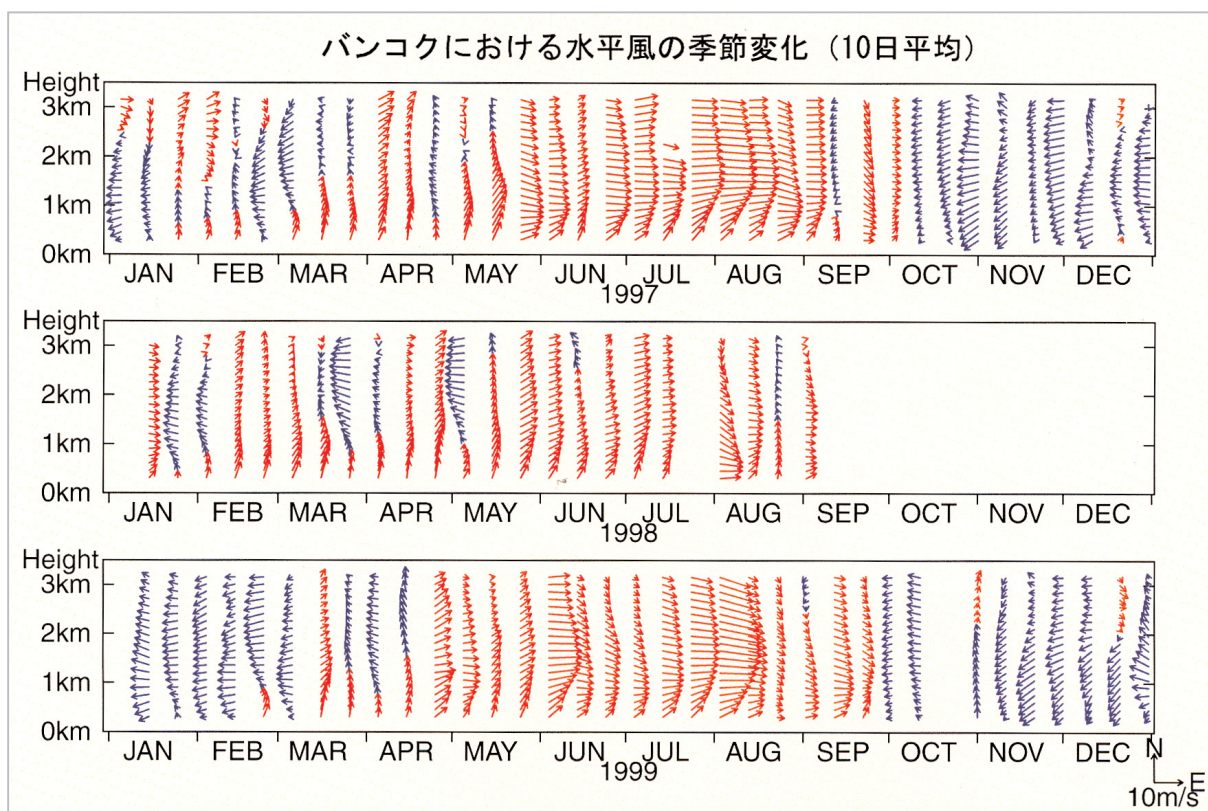


図3 バンコクのウィンドプロファイラで観測された水平風の季節変化

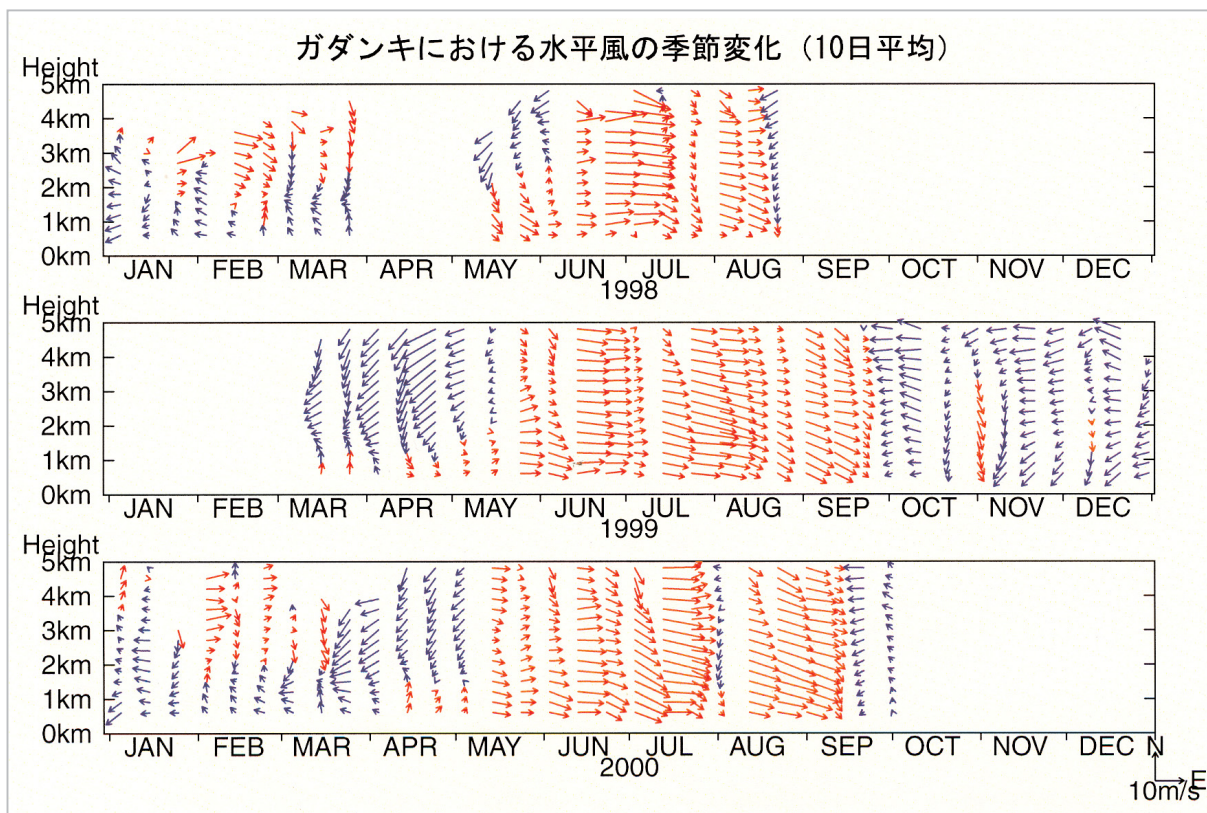


図4 ガダンキのウィンドプロファイラで観測された水平風の季節変化

ダンキの水平風の季節変化を示したもので、ウィンドプロファイラで観測された3年分の風データを10日ごとに平均している。

矢印の方向は風向で上向きが北向き（南風）、右向きが東向き（西風）を示し、矢印の長さは風速に比例して描いている（右下の凡例を参照）。縦軸は地上からの高さで小金井、バンコクについては150m おきに3.5km まで、ガダンキについては300m おきに5km まで示した。季節風の変化を見やすくするために西よりの風を赤で、東よりの風を青と色分けしている。機器の故障で欠測したり、大気からのエコーが弱く、有効な観測数がほとんどない場合は矢印が描かれていない。小金井では、冬季に西風が強く、8月から9月にかけて西風が弱まって東風も現れるが、季節変化はそれほど明瞭でない。一方、バンコク、ガダンキでは年々で多少変動はあるが、5月から9月まで西風、10月から4月まで東風という明瞭な季節変化を示している。タイやインドでは西風の卓越する期間が雨季で雨量が増し、東風の卓越する期間が乾季となり雨量は減るが、これは両地域がアジアモンスーン気候にあることを

示している。

ウィンドプロファイラは細かな時間分解能で観測できるので、風の日変化についても容易にとらえることができる。図5は9年分の小金井の観測データを時刻ごとに平均して求めた水平風の日変化である。

データを長期に平均することで、前線や低気圧の通過による風の変動は時刻にランダムなので消えて、代わりに時刻と共に変動する成分が抽出される。図を見ると高度1km以下で午前

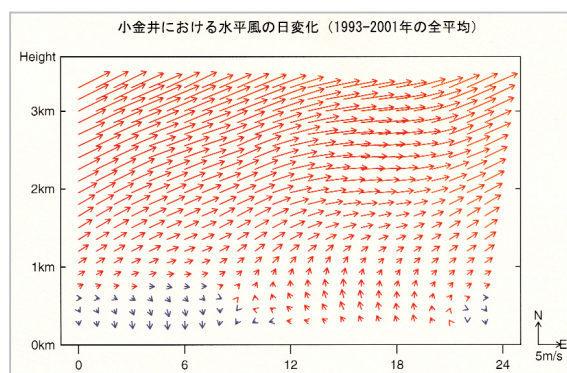


図5 小金井のウィンドプロファイラで観測された平均的な水平風の日変化

北風、午後に南風という明瞭な日変化が表れているが、これは陸と海の熱容量の違いで生じる海陸風によって生じたものである。夜間は海が暖かく、関東北部から南の相模湾に向かって陸風(北風)が吹き、日の出後、徐々に陸が温まり、海から陸へと海風(南風)が吹き、その後は陸が冷えて、また陸風に戻る。この図では分かりにくいですが、1km以上では海陸風の補償流として午前中に南風、午後に北風と逆向きの風の流れも得られている[4]。図6は同様な手法でバンコクの雨季の観測データを平均して求めた水平風の日変化である。

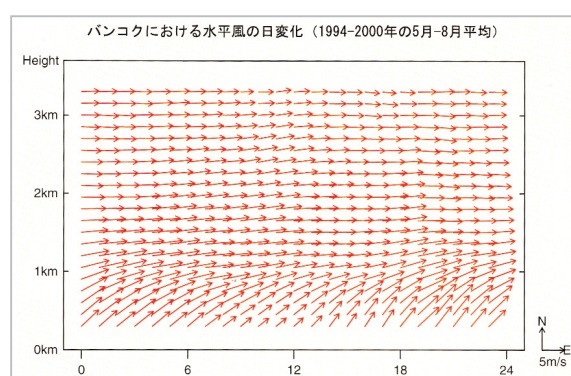


図6 バンコクのウィンドプロファイラで観測された平均的な雨季における水平風の日変化

小金井のデータほど変動は明瞭でなく、1km以下で日中に南西風がやや弱まるという日変化が見られる。この日変化は海陸風による変動ではなく、日中に大気乱流が強い大気境界層が上方へ発達して、地表摩擦の効果が上空に運ばれて、500m近辺で風が弱まったものと推測している[5]。気球を使った一般の高層風観測では、上記のような日変化をとらえることはなかなか難しいが、時間分解能の高いウィンドプロファイラ観測では上記のような解析が容易にできる。バンコク付近は自動車の排ガスなどによる大気汚染が深刻だが、風の日変化の情報は汚染地域の予測などに有用である。

4 降雨タイプの分類

Lバンドのウィンドプロファイラは雨や雪などの降水粒子にも感度が良く、降雨降雪の観測にも適している。Williamsらはウィンドプロファイ

ラの鉛直観測データを用いて、対流性の雨と層状性の雨との分類を行った[6]。層状性の雨は、上空で氷や雪が静かに落下しており、途中で融解して雨となって地上に達する。気温0度付近の融解高度はブライトバンドと呼ばれる強い散乱が観測される。層状性の雨は時間的な変化が小さく、長期に降り続くことが多い。一方、対流性の雨では、激しい対流の中で降水粒子がぶつかり合って成長する。明瞭なブライトバンドは現れず、時間変化が激しく、短時間しか持続しない。層状性、対流性の降雨タイプの分類は、雲の発達過程など気象学的に重要であるだけでなく、降雨粒形分布が異なることからレーダによる降水量推定の面でも重要である。

Williamsらの方法に習って、バンコクで観測されたウィンドプロファイラのデータから層状性降雨、対流性降雨を分類して統計を取った。降雨タイプの分類は、鉛直方向の散乱強度と鉛直速度からブライトバンド、雪、雨の層を識別し、明確なブライトバンドの特徴を持つものを層状性、それ以外は対流性に分類した。低緯度では高度4-5kmで気温0度となりブライトバンドが現れるが、バンコクのウィンドプロファイラではブライトバンドの高さまでデータ取得していない場合があり、この統計では多少、層状性が少なく見積もられている。

図7は降雨タイプ別の統計を各月ごとに取ったもので、その時間的割合を百分率で示している。

棒グラフの下部が層状性で上部が対流性を示し、データ数が少ない月は欠測扱いとしてNのマークをつけてある。前述したように、バンコクはモンスーンの影響下にあり降雨の季節変化が明瞭で、乾季の降雨時間率は1%かそれ以下であるが、雨季には10%から15%ぐらいまで増している。対流性降雨は層状性に比べてやや少なく、全データの割合では、層状性が3%、対流性が2%程度である。エルニーニョが発生した1997年から1998年にかけては雨季でも降雨時間率が10%を超えることなく、雨が少なくなっている。この時、特に層状性の雨が少なくなっている。対流性、層状性の降雨の分類は雨量計など地上測器では困難なので、ウィンドプロファイラのようなレーダ観測が重要となる。熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載の降雨レーダ(PR)でも降雨タ

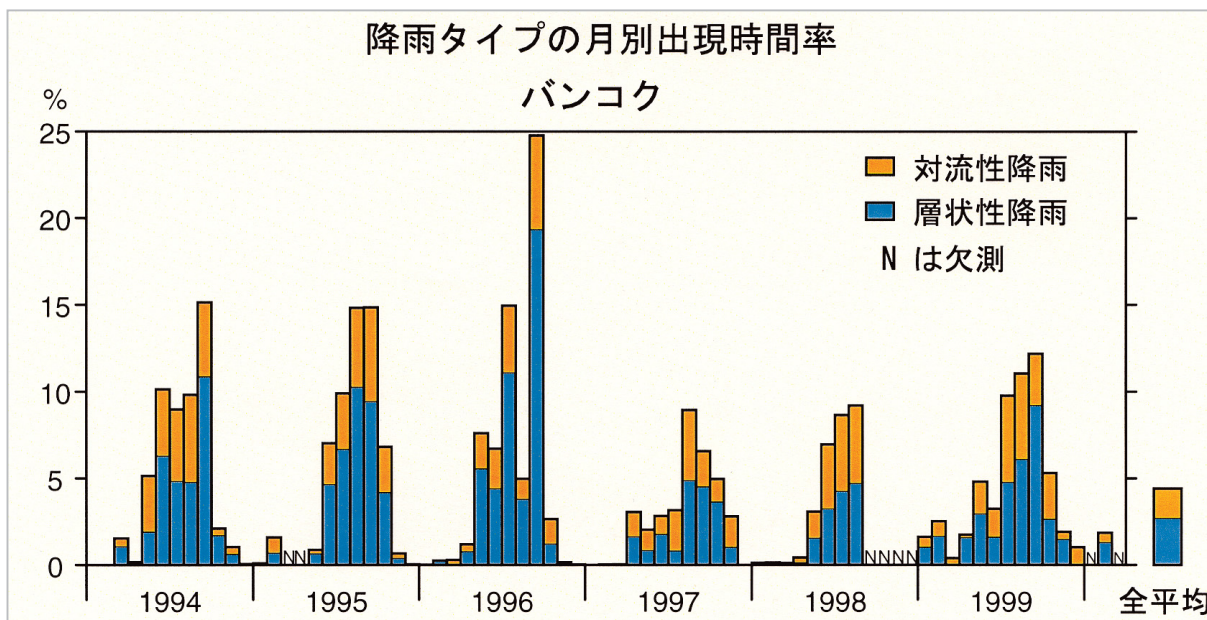


図7 バンコクにおける降雨タイプごとの出現時間率（月別）

イプを分類しており、その地上検証にもウィンドプロファイラによる降雨タイプ分類を応用していく予定である。

5 むすび

本稿では、小金井、バンコク、ガダンキのLバンドウィンドプロファイラで得られた長期観測データを用いて水平風の季節変化や日変化、降雨タイプの分類を解析した例を示した。東南アジアをはじめとしたアジアモンスーン域では、

経済的な問題などで気象観測データが不足しているが、一方で雨量の季節変動や年々変動が大きいため水資源の予測が重要な課題であり、様々な気象観測の充実が必要である。モンスーンの予測という観点から上空の風観測も欠かすことのできない情報であり、今後ウィンドプロファイラなどの観測手法がアジア域にも広がり、観測網が充実していくことが期待される。通信総合研究所もこれまでのデータの蓄積や経験を生かし、アジアモンスーン域の遠隔観測技術の発展に貢献していく。

参考文献

- 1 増田悦久, 岡本謙一, 中村健治, 井原俊夫, 大西勉, “低層大気観測用レーダの開発”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.12, pp.43-56, 1992.
- 2 山崎信雄, 釜堀弘隆, 谷田貝亜紀代, 高橋清利, 植田宏昭, 青梨和正, 隈健一, 竹内義明, 多田英夫, 福富慶樹, 五十嵐弘道, 藤波初木, 梶川義幸, “GAME再解析データの公開”, 天気, Vol.47, pp.659-663, 2000.
- 3 加藤進, 深尾昌一郎, 福山薫, 若杉耕一郎, 佐藤亨, “大型レーダによる中層大気の観測”, 気象研究ノート, Vol.144, pp.1-55, 1982.
- 4 大野裕一, “通信総研ウィンドプロファイラで観測された小金井における風変動”, 気象研究ノート, Vol.193, pp.227-234, 1999.
- 5 近藤純正, “大気境界層の気象”, 天気, Vol.46, pp.585-594, 1999.
- 6 Williams, C. R., W. L. Ecklund, and K. S. Gage, "Classification of precipitating clouds in the tropics using 915-MHz wind profilers", J. Atmos. Oceanic Technol., Vol.12, pp.996-1012, 1995.

おお の ゆう いち
大野裕一

電磁波計測部門雲レーダグループ主任
研究員
気象学、レーダーリモートセンシング

Nipha Leelaruji

モンクット王工科大学ラカバン校通信
工学科助教授

Atma R. Jain, Ph. D.

インド国立 MST レーダ観測所長

こ づ とし あき
古津年章

島根大学総合理工学部教授 工学博士

ます だ よし ひさ
増田悦久

元通信総合研究所 工学博士