

タイ国内におけるGPS可降水量変化について (2001年-2006年)

里村幹夫¹・下中恵理¹・請井和之¹・島田誠一²・加藤照之³
伍 培明⁴・橋本 学⁵・Sununtha KINGPAIBOON⁶・Boossarasri THANA⁷

On the Precipitable Water Vapor Obtained by Using GPS Observations in Thailand (2001-2006)

Mikio SATOMURA¹, Eri SHIMONAKA¹, Kazuyuki UKEI¹, Seiichi SHIMADA²,
Teruyuki KATO³, Peilian WU⁴, Manabu HASHIMOTO⁵,
Sununtha KINGPAIBOON⁶ and Boossarasri THANA⁷

Abstract Thailand is located in the Asia monsoon region. It has been thought that the climate change in Thailand has an impact over the global climate change, and the research on its change is very important to understand the global climate change. GPS observations have been performed at some stations to investigate the progress of monsoon in Thailand. GPS data were processed to obtain the precipitable water vapor (PWV) at Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMa and Phuket between 2001 and 2006.

The obtained PWVs show high values in the wet season and low ones in the dry season except for Phuket. There were some rainfalls in November and December in the dry season in 2002 and 2005, during which PWV values were also higher than those in other years. When compared with air pressure and temperature at the observation stations, positive relation between PWV and temperature was obtained for all stations except for Phuket.

Onset and offset times of the monsoon were estimated from obtained PWV values. These dates were comparatively better than those obtained from rainfall data.

Key words: GPS, Precipitable water vapor, Asia Monsoon region, Thailand

¹ 静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市駿河区大谷836

¹ Department of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Oya, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan
E-mail: semsato@ipc.shizuoka.ac.jp (M.S.)

² 防災科学技術研究所, 305-0006 茨城県つくば市天王台3-1

² National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

³ 東京大学地震研究所, 113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

³ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

⁴ 海洋研究開発機構, 237-0001 神奈川県横須賀市夏島町2-15

⁴ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, Kanagawa 237-0001, Japan

⁵ 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター, 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

⁵ Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

⁶ Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand

⁷ Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Bangkok 10330, Thailand

はじめに

アジアモンスーン地域は人口が密集しており、アジアモンスーン気候の変動による洪水や干ばつは人々の生活に大きな影響を与える。また、アジアモンスーンは地球規模の気候変動にも影響があると考えられ(新田・立平, 2000), 特に東南アジアの熱帯モンスーン地域のモンスーン変動を調査することは、地球規模の気候変動を理解するうえで重要である。そこで、1990年代には、グローバルなエネルギー・水循環におけるアジアモンスーンの役割について研究するプロジェクトとしてGEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME) が実施され、1998年からは、タイを中心とした東南アジア熱帯域の気象と水循環を研究するGEWEX Asian Monsoon Experiment-Tropic (GAME-T) プロジェクトが実施された。

このプロジェクトの中で、時間的に高分解能な可降水量が得られるGPS観測が、1998年3月から東京大学生産研究所と東京大学地震研究所により、タイ気象局の協力を得て、Bangkok, Chiang Mai, Ubon Ratchatani, Sri Samrong, Phuketで開始された(Takiguchi *et al.*, 2000)。

その後、Phuketの観測点はタイ東北部の観測強化のため、Nongkhaiに移された。また、2000年3月からはGPS観測の維持に静岡大学理学部が加わるようになった。

2002年3月でGAME-T観測第1シリーズが終わることになり、2002年度以降は、Bangkok, Chiang Mai, Phuket (2001年3月に観測再開) は、海洋科学技術センター(現在の海洋研究開発機構)の地球環境観測研究センターが実施することになった。また、Sri Samrongの観測はタイ・チュラロンコン大学に引き継がれた。

Ubon RathataniとNongkhaiの観測は2002年3月で終了したが、代わってタイ東北部のKhon Kaenにおいて2001年9月から新たな観測が開始された。また、2002年10月からは、科学技術振興機構の戦略的創造事業の一テーマとして「熱帯モンスーンアジアにおける降水変動が水循環・生態系に与える影響」が始まることになり、静岡大学が「モンスーン季節変化に伴う水蒸気の変化」を担当することになった。そこで、2003年2月にChiang Mai郊外にあるカセサート大学のKogMa流域管理事務所で、新たなGPS観測を開始した。

今回、2001年8月以降2006年12月末までの、入手したGPSデータについて、そのデータ解析を行ったので、その結果を報告する。

GPS観測

今回可降水量を求めたGPS観測地点は、タイのBangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMa, Phuketの5地点である。観測点の位置を図1に示す。

各点はタイ国内各地に散らばっているが、Chiang MaiとKogMaはともにタイの北西部に位置し、2点の水平距離は8.4kmと近い。ただし、Chiang Maiは空港近くの平地、KogMaは山岳地帯であり、標高差は約1,050mある。

なお、Khon Kaenでは2005年9月と2005年11月にアンテナを移動したが、他の地点では今回の解析期間中に

アンテナを移動することはなかった。

GPS解析の方法

本研究で使用したGPS解析ソフトウェアはGAMIT version 10.33である。解析にあたっては、座標基準として、本研究の観測地点5点を取り囲むように、日本の臼田(usud)、中国のWuhan(wuhn)、中国のLhasa(lhas)、アメリカ合衆国のGuam(guam)、オーストラリアのDarwin(darw)、シンガポールのNanyang工科大学(ntus)、オーストラリアのCocos島(coco)の7点のInternational GNSS Service(IGS)観測点のITRF2005座標系の座標値を使用した。

観測地点については、まずGPS観測から求めた単独測位の座標を初期値とし、南北、東西、上下各成分の拘束値を100mとして解析を行った。この際、Bangkok, Chiang Mai, KogMa, Phuketのアンテナの最低仰角は7°、Khon Kaenのアンテナの最低仰角は10°に設定した。その結果、各観測地点の座標値の誤差が1m以内であったため、次にこの解析で得られた座標値を初期値とし、各成分の拘束値を1mとして解析を行った。この際、全観測地点で2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震による座標値の変化を考慮するため、地震発生前と発生後の2期間に分けて座標値を決定した。また、Khon Kaenについては、2005年9月14日の三脚の破損、2005年9月25日の三脚の立て直し、2005年11月3日のGPSアンテナの設置

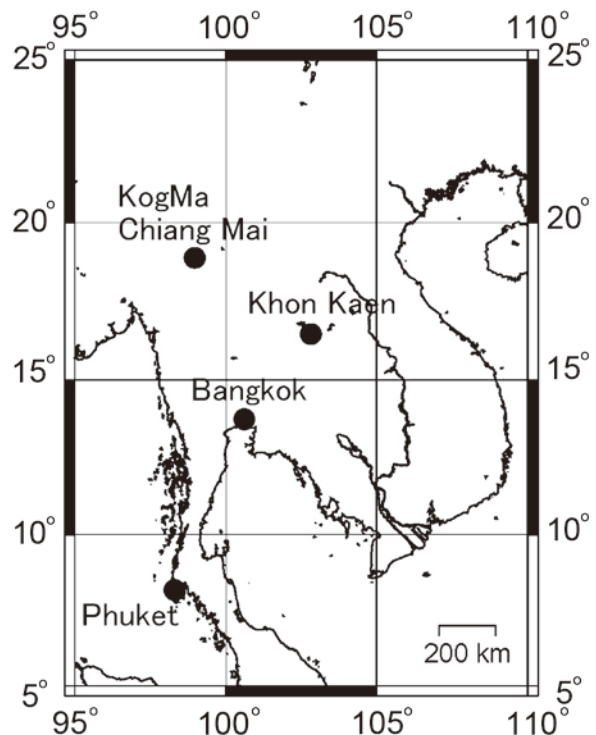


図1 可降水量を求めたGPS観測点。

Fig. 1 GPS observation stations where precipitable water vapor data were obtained.

場所の変更による座標値の変化も考慮し、5期間に分けて座標値を決定した。この解析で得られた座標値をもとに、各期間における観測地点の座標値の変化と移動速度をGLOBKプログラムで求めた。

この座標値と移動速度の値を用い、東西、南北方向の拘束値を5mm、上下方向の拘束値を10mmとして再度解析を行った。この解析において、大気勾配をChen and Herring (1997)の方法を用いて2時間毎に推定するとともに、天頂遅延量をBoehm *et al.* (2006)の方法を用いて1時間毎に推定した。

可降水量の算出

天頂遅延量から可降水量を算出するためには、気圧と気温のデータが必要である。3時間ごとのBangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, Phuketの気温と気圧および降水量のデータはTMD (タイ気象庁) から入手した。なお、入手した気圧データは海面気圧である。また、KogMaについては、GPSアンテナ設置地点で観測された現地気圧と、少し離れた場所の気象観測タワーで観測された気圧と気温のデータを入手した。しかし、KogMaは解析期間内で気象データが入手できない期間があったため、この期間についてはChiang Maiの気象データから以下の換算式を用いて推定した。

KogMaの現地気圧が入手できず、タワーの気圧が入手できた期間は以下の式を用いた。

$$P_K = P_T - 6.42$$

ここで、 P_K はKogMaの現地気圧[hPa]、 P_T はタワーの気圧[hPa]である。また、タワーの気圧と現地気圧がともに入手できなかった期間は以下の式を用いた。

$$P_K = 0.7194P_C + 164.47$$

ここで、 P_C はChiang Maiの現地気圧[hPa]である。これらの関係式は、両者のデータがそろっている時のデータから求めた経験式である。

また、KogMa観測点の気温データが入手できなかった期間がある。この期間のKogMaの気温を求めるために、まずデータがChiang MaiとKogMa両地点で揃っている期間で、2点間の1日平均気温の差の月平均を求めた。この月ごとの気温差をもとに、KogMaの気温データがない期間では以下の式を用いてKogMaの日平均気温を求めた。

$$T_K = T_C - T_{C-K}$$

ここで、 T_K はKogMaの1日平均気温[°C]、 T_C はChiang Maiの1日平均気温[°C]、 T_{C-K} はChiang MaiとKogMaの月ごとの気温差[°C]である。Chiang MaiとKogMaの気温の時間変化は年間通して似ているため、2点の日較差の振幅の比を月ごとに求め、この比率をもとに、以下の式を用いてKogMaの3時間ごとの気温を算出した。

$$t_K = T_K + \{(T_C - t_C) \div R\}$$

ここで、 t_K はある時刻におけるKogMaの3時間平均気温

[°C]、 t_C はある時刻におけるChiang Maiの3時間平均気温[°C]、 R はChiang MaiとKogMaの月ごとの日較差の振幅比である。

GPSデータを解析して求められた天頂遅延量は、乾燥大気に起因する天頂静水圧遅延量と湿潤大気に起因する天頂湿潤遅延量の和である。今回は、天頂静水圧遅延量ZHD [m]を以下の式(Elgered *et al.*, 1991)から求めた。

$$ZHD = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_{GPS}}{f(\phi, H)} \quad (1)$$

$$f(\phi, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028H)$$

ここで、 P_{GPS} はGPS観測点の現地気圧[hPa]、 ϕ はGPS観測点の緯度[rad]、 H はGPS観測点の楕円体高[km]である。緯度はGPSデータを解析して得られた座標値を用いた。楕円体高にはGPSデータの解析で得られた座標値をWGS84座標系に変換した値を用いた。

また、TMDから入手した海面気圧から現地気圧への換算は以下の式を用いた。

$$P_{GPS} = P_{TMD} \left(\frac{T_{TMD} - 0.0065(Z_{GPS} - Z_{TMD})}{T_{TMD} + 0.0065Z_{TMD}} \right)^{\frac{gM_d}{0.0065R}} \quad (2)$$

ここで、 P_{GPS} はGPS観測点での現地気圧[hPa]、 P_{TMD} はTMDから入手した海面気圧[hPa]、 T_{TMD} はTMDから入手した気温[K]、 Z_{TMD} はTMDの標高[m]、 g は重力加速度(9.8m/s²)、 M_d は乾燥大気分子量(28.9644kg/kmol)、 R は理想大気気体定数(8314.34J/kmol K)である。

TMDの標高は、GAME-T2 Data CenterのTMD Routine Observationのホームページで示されている値を用いた(<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/GAME-T/GAIN-T/routine/tmd/index.html>)。また、GPS観測点の標高はGPSデータの解析によって求められた楕円体高とEGM96ジオイドモデル(Lemoine *et al.*, 1996)によるジオイド高を用いて求めた。その計算にはNational Imagery and Mapping Agency (NIMA)のホームページ上の変換プログラムであるEGM96 Geoid Calculator(<http://164.214.2.53/GandG/wgs84/gravitymod/egm96/intpt.html>)を使用した。

天頂湿潤遅延量ZWD [m]は天頂遅延量ZTD [m]から以上のようにして求めた天頂静水圧遅延量ZHD [m]を差し引くことで求めた。

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (3)$$

また、天頂湿潤遅延量ZWDから可降水量PWVへの変換は、Askne and Nordius (1987)の方法により次に示す式を用いた。

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (4)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v \left(k_2 - k_1 \frac{M_v}{M_d} + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (5)$$

ここで、 R_v は水蒸気の気体定数(461.51J kmol⁻¹K⁻¹)、 k_1 、 k_2 、 k_3 は実験的に求められた定数で $k_1=77.60 \pm 0.08$ K hPa⁻¹、 $k_2=71.98 \pm 10.82$ K hPa⁻¹、 $k_3=(3.754 \pm 0.036) \times 10^5$ K²hPa⁻¹である。また、 M_v は水蒸気の分子量(18.0152kg kmol⁻¹)、

M_d は乾燥大気分子量 ($28.9644 \text{ kg kmol}^{-1}$), T_m は加重平均気温 [K] である. k_1, k_2, k_3 は, Boudouris (1963) によって, マイクロ波領域で実験的に求められた値を使用した. また, 加重平均気温 T_m は, 現地気温 T から Bevis *et al.* (1992) による次式で求めた,

$$T_m \approx 70.2 + 0.72 T \quad (6)$$

結果

Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMa, Phuket における可降水量と降水量の時系列を1年ごとに求め, これを図2~6に示す. 図中で示している降水量はTMDから入手した1日の積算降水量である. ただし, KogMaにおいては降水量のデータを入手できなかったため, 図中にはKogMaと距離に近いChiang Maiの1日積算降水量を使用した. Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMaの4地点においては, どの年も降水が多い時期に可降水量が継続して大きく, 降水が少ない時期に可降水量が小さくなっており, 可降水量はアジアモンスーンの影響を強く受けていることが分かった. しかし, Phuketでは季節による可降水量の違いがほとんど見られず, 年間を通して大きな値になっている.

議論

可降水量の地域・年・季節による特徴

以下に, 時系列データから各地点の可降水量の年・季節による特徴について述べる.

タイ中北部では, 通常4月下旬から5月上旬に雨季に入り, 10月下旬から11月上旬に雨季が終了する (松本, 1997). この地域の Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMaでは, 5月から10月の雨季とそれ以外の乾季で明らかな可降水量の違いが見られた. Bangkok (図2)では, 雨季の可降水量が約60mm, 乾季の可降水量が約30mmであった. Chiang Mai (図3)とKhon Kaen (図4)の雨季の可降水量はBangkokと同じくらいであったが, 乾季の可降水量は約20mmと, Bangkokより約10mm小さくなっていった. これは, Chiang MaiとKhon Kaenが内陸に位置するのに対して, Bangkokは海沿いに位置するため, 海からの水蒸気の供給があることから可降水量が高くなっていったと考えられる. また, KogMa (図5)では, 雨季の可降水量が約40mm, 乾季の可降水量が約10mmと, 他の地点に比べて値が小さくなっている. これは, 他の地点の標高が15~300mくらいに位置するのに対し, KogMaは標高1365mと高い位置にあるため, 上空に存在する水蒸気の総量が他の地点に比べて少ないからであると考えられる. Phuket (図6)は他の地点と異なり, 可降水量の季節による違いがあまり見られない.

Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaenでは, 2002年と2005年に乾季である11, 12月に降水が見られ, それに伴い可降水量も他の年より高くなっている. また, KogMa

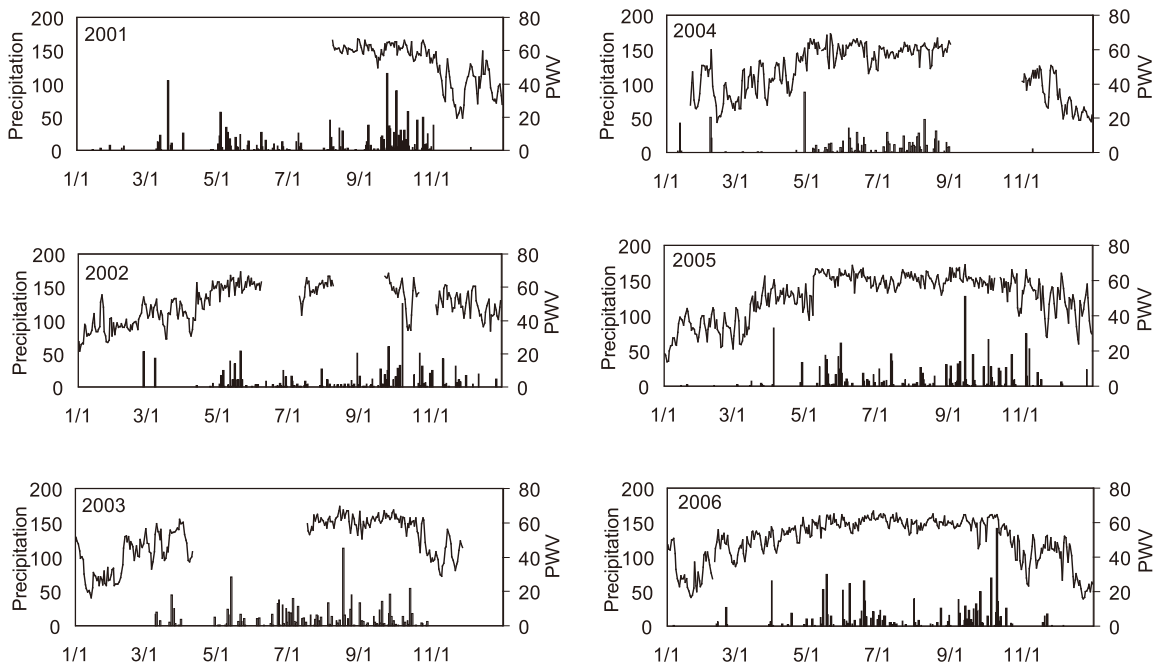


図2 Bangkokの可降水量と日降水量の変動. 折れ線グラフが可降水量を棒グラフが降水量を示す. (単位: mm)

Fig. 2 Temporal variations of PWV and daily precipitation at Bangkok. Line charts show PWV and bar charts show precipitation. (units: mm)

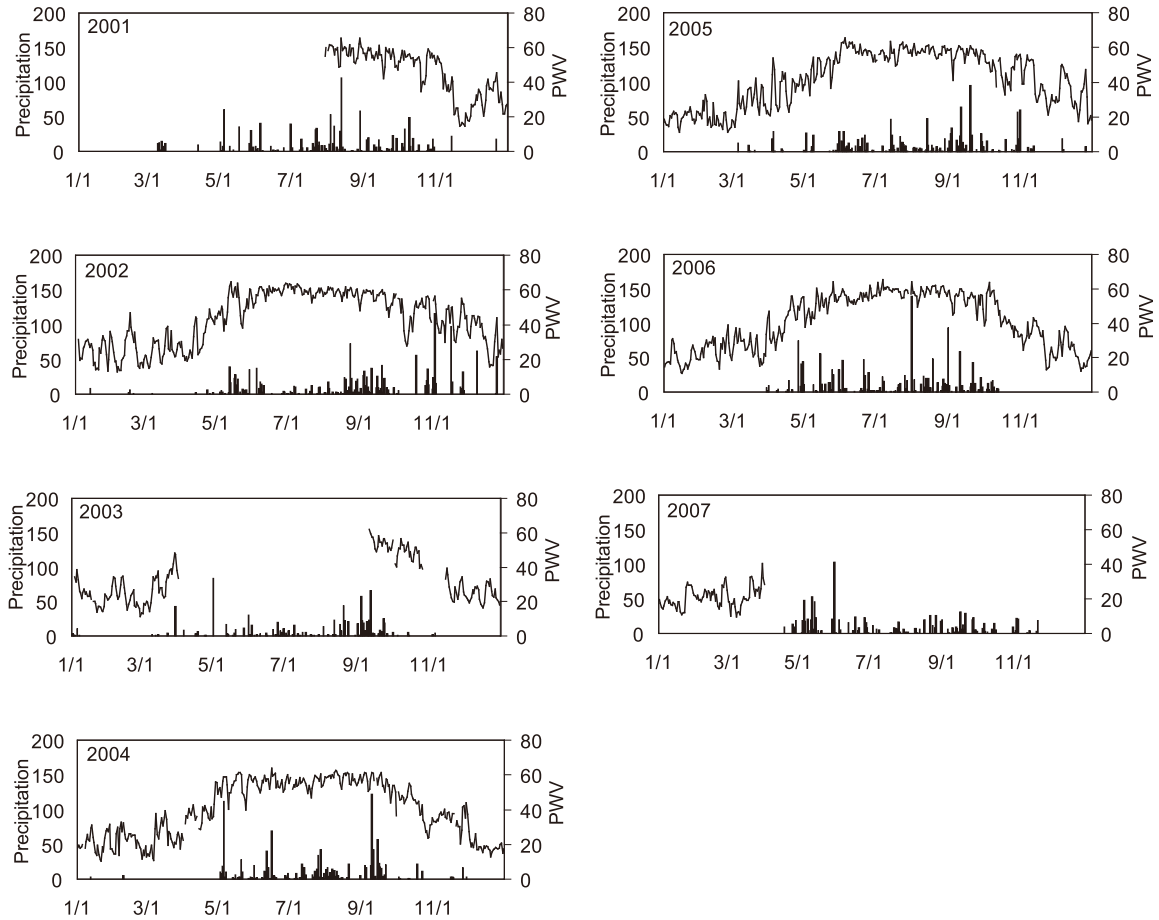


図3 Chiang Maiの可降水量と日降水量の変動。折れ線グラフが可降水量を棒グラフが降水量を示す。(単位：mm)

Fig. 3 Temporal variations of PWV and daily precipitation at Chiang Mai. Line charts show PWV and bar charts show precipitation. (units: mm)

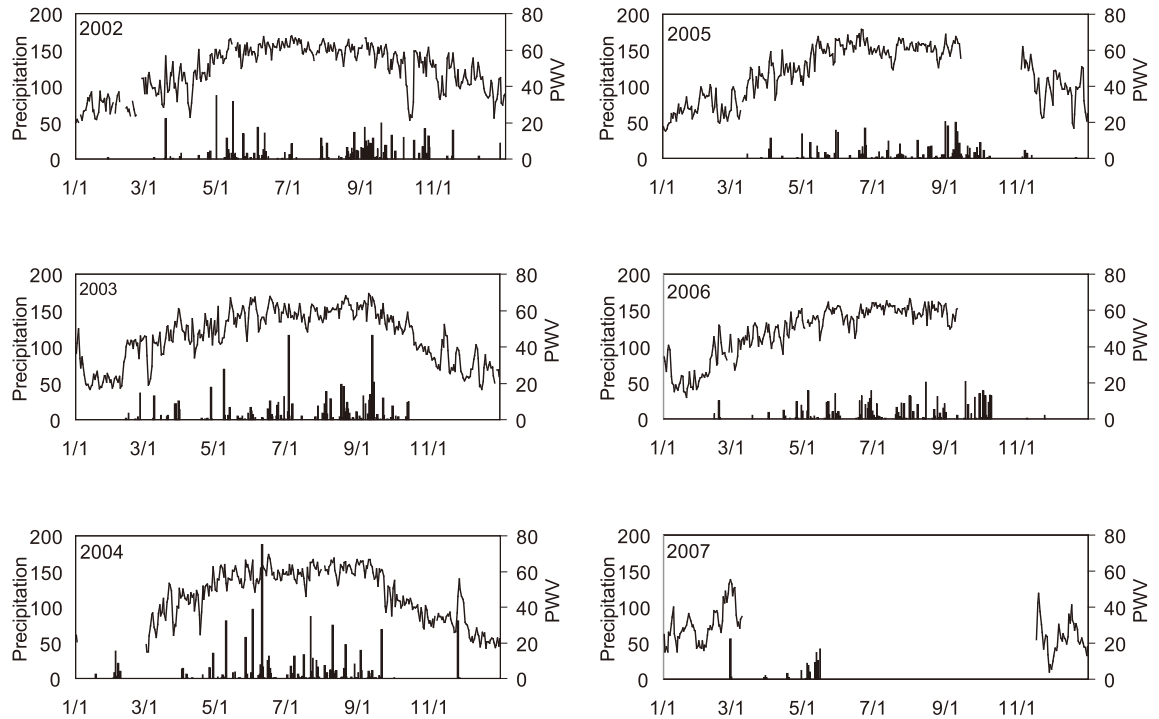


図4 Khon Kaenの可降水量と日降水量の変動。折れ線グラフが可降水量を棒グラフが降水量を示す。(単位：mm)

Fig. 4 Temporal variations of PWV and daily precipitation at Khon Kaen. Line charts show PWV and bar charts show precipitation. (units: mm)

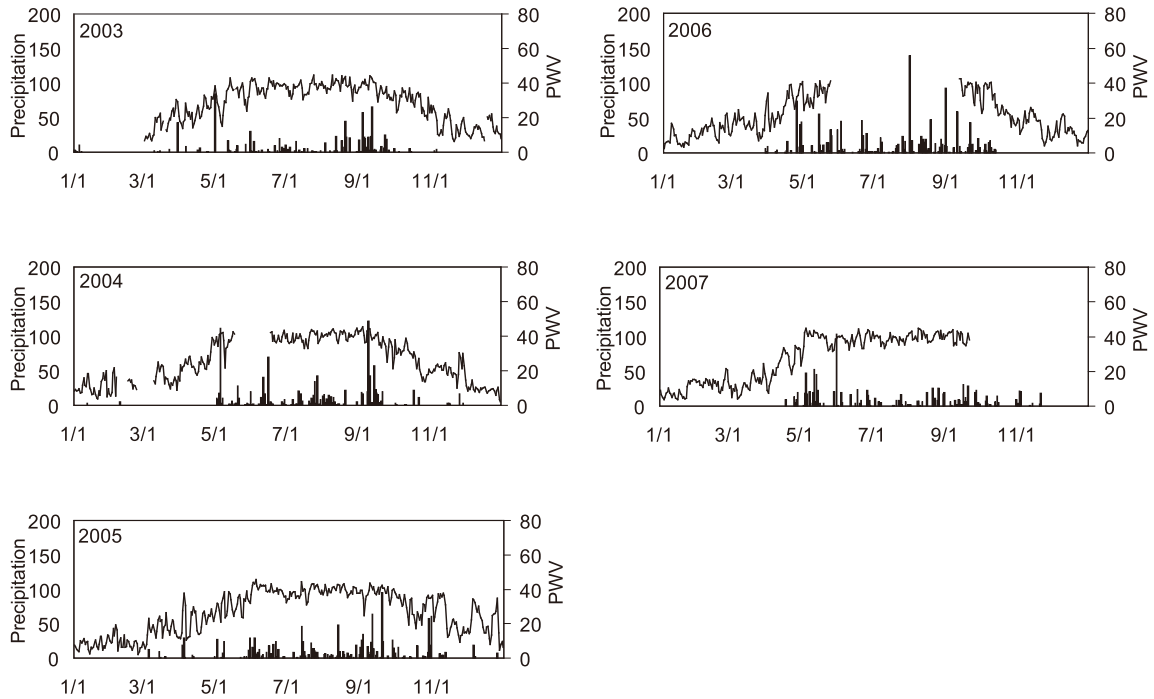


図5 KogMaの可降水量と日降水量の変動。折れ線グラフが可降水量を棒グラフが降水量を示す。(単位：mm)

Fig. 5 Temporal variations of PWV and daily precipitation at KogMa. Line charts show PWV and bar charts show precipitation. (units: mm)

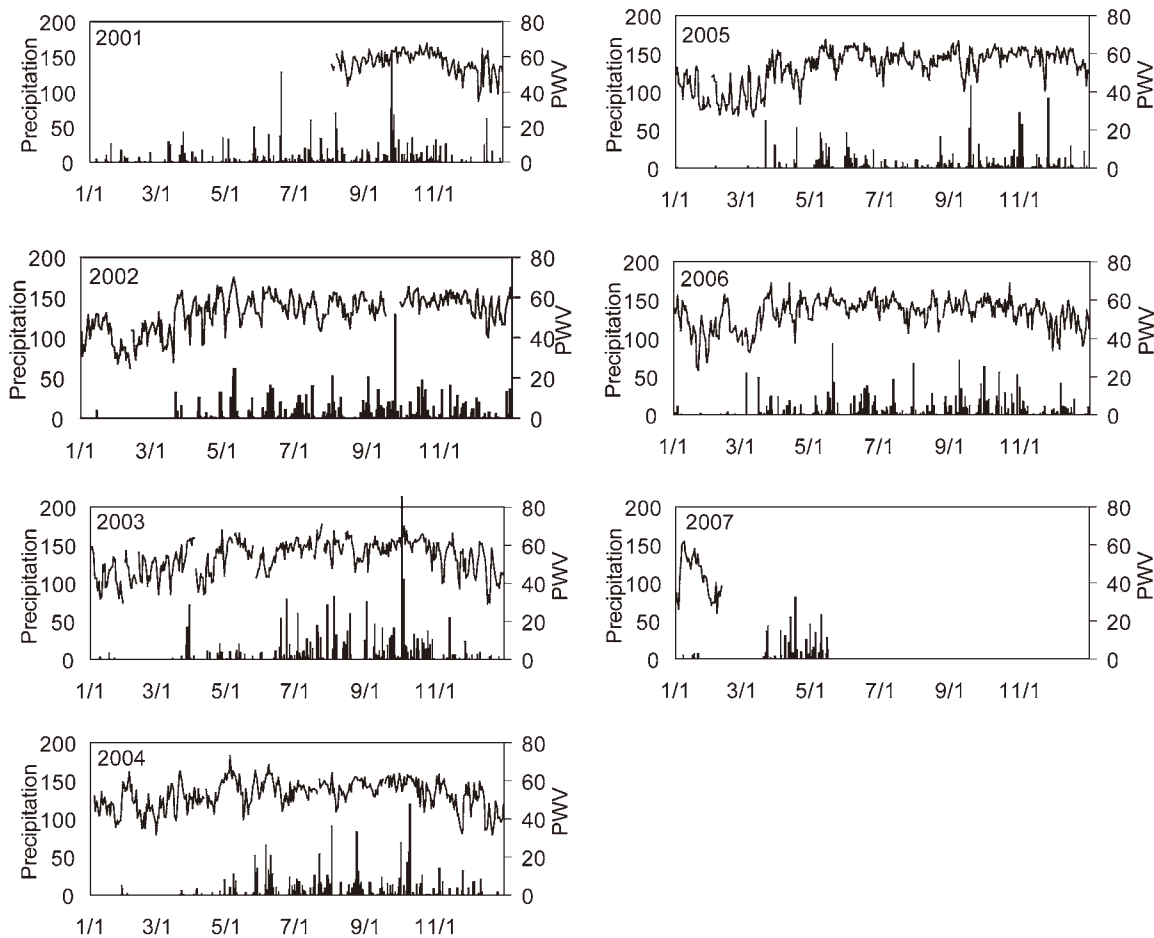


図6 Phuketの可降水量と日降水量の変動。折れ線グラフが可降水量を棒グラフが降水量を示す。(単位：mm)

Fig. 6 Temporal variations of PWV and daily precipitation at Phuket. Line charts show PWV and bar charts show precipitation. (units: mm)

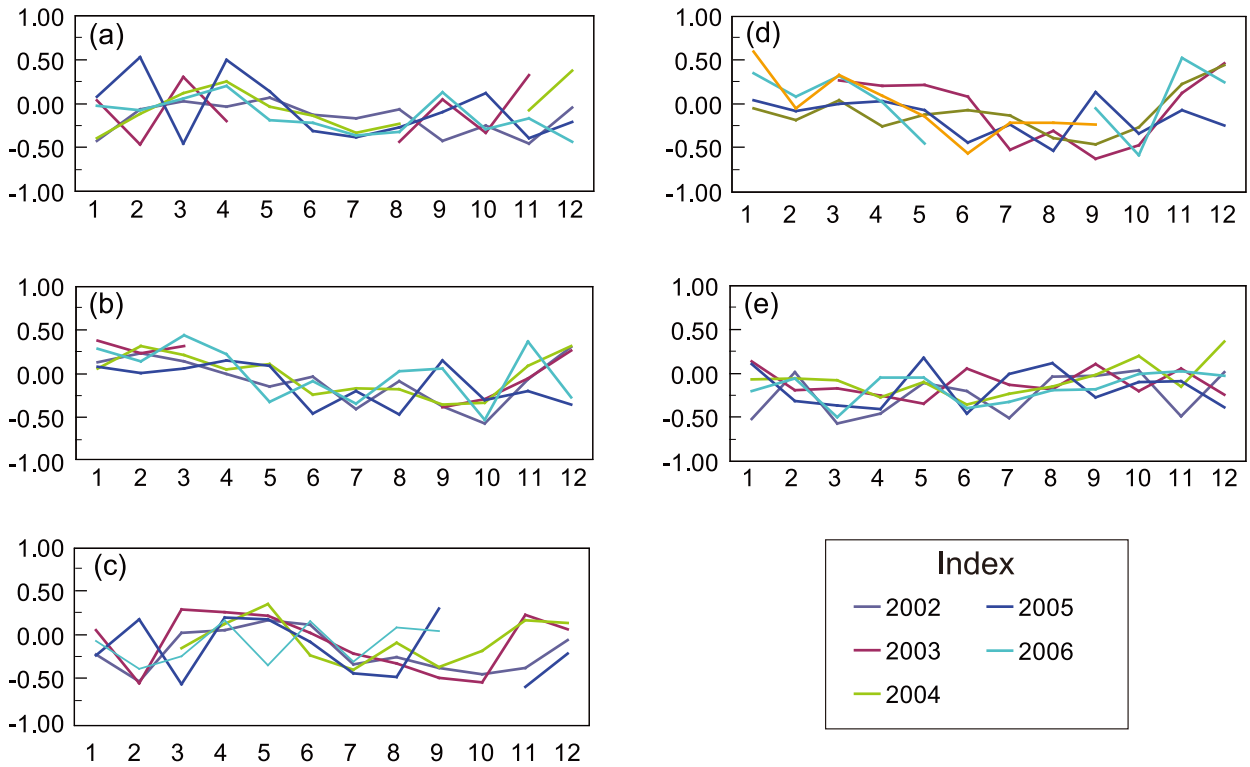


図7 可降水量と気圧の相関係数の年周変化。(a) Bangkok, (b) Chiang Mai, (c) Khon Kaen, (d) KogMa, (e) Phuket.
 Fig. 7 Annual variations of the relative coefficients between PWV and air pressure. (a) Bangkok, (b) Chiang Mai, (c) Khon Kaen, (d) KogMa, (e) Phuket.

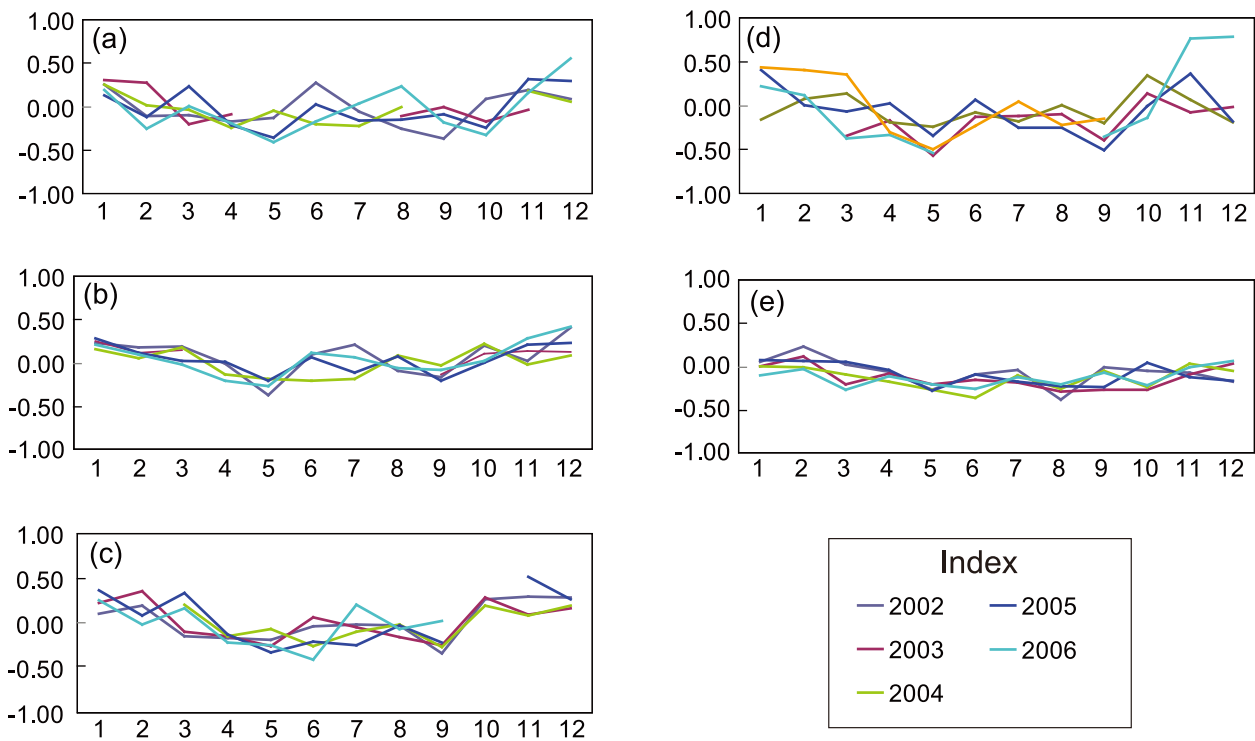


図8 可降水量と気温の相関係数の年周変化。(a) Bangkok, (b) Chiang Mai, (c) Khon Kaen, (d) KogMa, (e) Phuket.
 Fig. 8 Annual variations of the relative coefficients between PWV and air temperature. (a) Bangkok, (b) Chiang Mai, (c) Khon Kaen, (d) KogMa, (e) Phuket.

は2002年のデータがないが、2005年は他の地点と同様、年末に降水が見られ、それに伴い可降水量も高くなっている。Phuketも、2002年と2005年の11、12月で他の年に比べて可降水量が高くなっている。

可降水量と気圧・気温の関係

Satomura *et al.* (2001) は、1998～2000年のタイ国内のGPS観測から、可降水量と気圧の間には、乾季の初期には負の相関があり、プレモンスーン期には正の相関があることを指摘した。そこで今回は、Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMa, Phuketにおける可降水量と気圧の相関、さらに可降水量と気温の相関をそれぞれ1か月ごとに取り、季節や地域による違いが見られるのか調べた。相関を取った期間は、Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, Phuketでは2002年1月から2006年12月、KogMaでは2003年3月から2007年9月であり、可降水量データが15日以上ない月については求めなかった。

まず、可降水量と気圧の相関関係を調べた。各地点で1か月ごとに求めた可降水量と気圧の相関係数を図7に示す。今回得られた結果では、Chiang MaiとKogMaは乾季では正の相関、雨季では負の相関が見られた。

つづいて、可降水量と気温の相関関係を調べた。気圧の場合と同様、各地点で1か月ごとに求めた可降水量と気温の相関係数を図8に示す。その結果、Phuketでは1年通して相関がほとんどないが、他の地点では乾季に正の相関があり、雨季は相関がないことが分かった。乾季の可降水量と気温の間に正の相関がみられるということは、大陸上の冷たく乾燥した空気がタイ上空に張り出した時に可降水量が低くなり、海上の暖かく湿った空気が張り出した時に可降水量が高くなると考えられる。

雨季のオンセット・オフセットの決定

冒頭でも述べた通り、タイでのアジアモンスーンの変動を調査することは、地球規模の気候変動を理解するうえで重要である。タイでのアジアモンスーンの変動を見るには、雨季の長さの変化を見るのが一番良いと考えられ、そのためには雨季のオンセットとオフセット、つまり雨季の始まりの日と終わりの日を決定できる手法を見出す必要がある。

雨季のオンセットとオフセットは一般的に降水量から判断されている。しかし、降水がなくても大気中の水蒸気量は多いということは十分に考えられる。藤間ほか(2006)では、2002年から2004年のKhon Kaenにおいて雨季のオンセットとオフセットを可降水量で定めることを試みており、可降水量を用いて決定したオンセットとオフセットの日を、降水量を用いて決定した日から1週間以内のずれで決定することができた。そこで、本研究では、2001年から2007年のBangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMaの4地点において、藤間ほか(2006)と同様の手法を用いて雨季のオンセットとオフセットを決定できるかどうか試みた。

まず降水量からモンスーンのオンセット、オフセットを決めるために、インドの南西部においてモンスーンのオンセット、オフセットを定義したAnanthakrishnan and Soman (1987)の方法を用いた。この定義では、連続した5日平均降雨強度が10mmを越える期間の最初の日をモンスーンの始まりの日としている。また、モンスーンの終わりの日については逆に5日平均降雨強度が10mmを越える期間の最後の日とした。

この定義を用いて決定したオンセットの日を表1に、オフセットの日を表2に示す。なお、KogMaにおける降水量のデータが入手できなかったため、KogMaのオンセットとオフセットの日はChiang Maiと同じとした。今回得られた結果から、降水量の定義で決定したオンセットとオフセットは地域や年によるばらつきが大きく、特に2004年のBangkokのオンセットが2月3日、2002年のChiang MaiとKogMaのオフセットが12月30日と、例年ならば乾季の最中の時期に決まっている。

今回使用した定義がインドにおける定義だったこともあるが、タイにおいては、この定義ではオンセットとオフセットがうまく決定できなかった。一方、可降水量は時系列を見ると雨季と乾季の違いがはっきりしているため、次に可降水量のデータでオンセットとオフセットを決定した。

可降水量を用いた雨季のオンセットとオフセットの定義は降水量の定義と同様、5日間の平均可降水量を用い、ある任意の閾値を決め、その閾値を1週間以上連続して越えた期間の最初の日をオンセット、逆に、閾値を最後

表1 降水量から決定したオンセットの日付。

Table 1 Onset dates determined from precipitation data.

Year	Bangkok	ChiangMai and KogMa	Khon Kaen
2001	March 8	April 30	April 24
2002	February 22	May 9	April 26
2003	March 19	April 27	May 4
2004	February 3	May 1	April 24
2005	March 31	May 28	May 27
2006	March 27	April 21	May 1
2007	N/A	May 1	February 23

表2 降水量から決定したオフセットの日付。

Table 2 Offset dates determined from precipitation data.

Year	Bangkok	ChiangMai and KogMa	Khon Kaen
2001	October 28	October 13	October 28
2002	November 26	December 30	October 30
2003	October 17	September 26	October 16
2004	N/A	September 19	September 24
2005	November 12	November 4	September 14
2006	October 15	September 25	October 12
2007	N/A	September 30	N/A

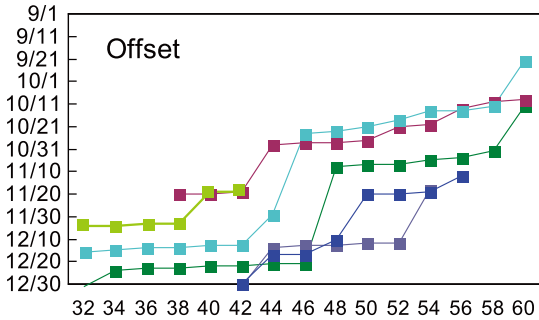
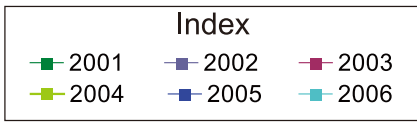
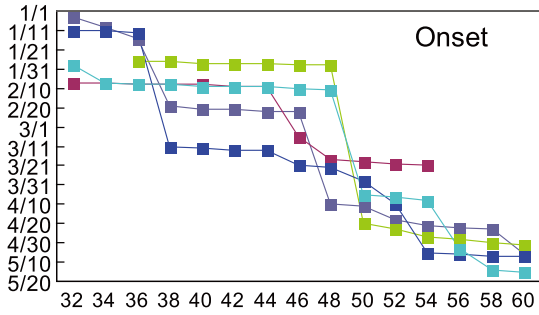


図9 Bangkokにおける閾値を変えた時のオンセットとオフセットの日付。(横軸単位: mm)

Fig. 9 Onset and offset dates when the boundary values were changed at Bangkok. (units: mm)

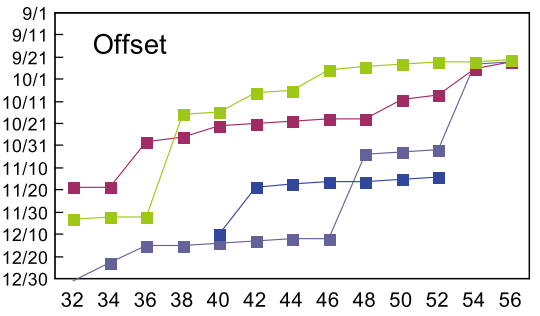
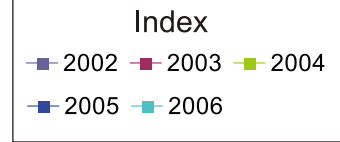
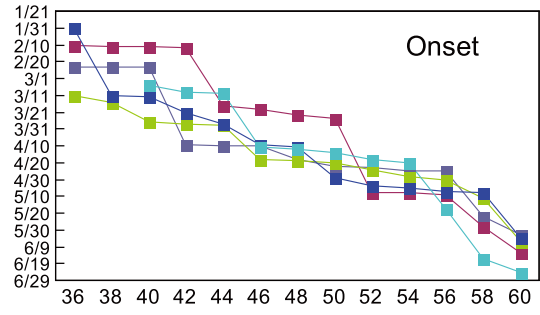


図11 Khon Kaenにおける閾値を変えた時のオンセットとオフセットの日付。(横軸単位: mm)

Fig. 11 Onset and offset dates when the boundary values were changed at Khon Kaen. (units: mm)

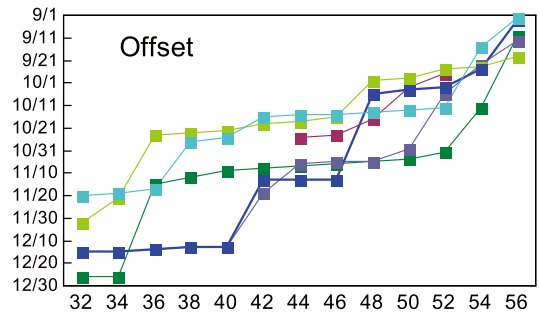
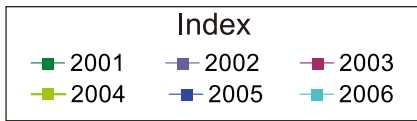
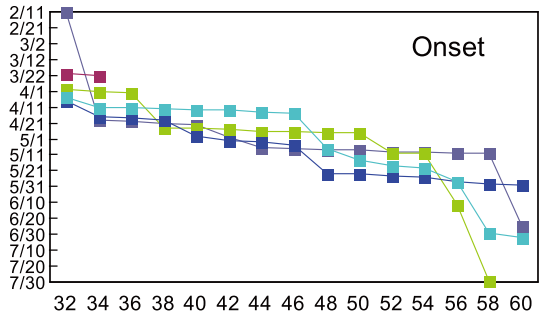


図10 Chiang Maiにおける閾値を変えた時のオンセットとオフセットの日付。(横軸単位: mm)

Fig. 10 Onset and offset dates when the boundary values were changed at Chiang Mai. (units: mm)

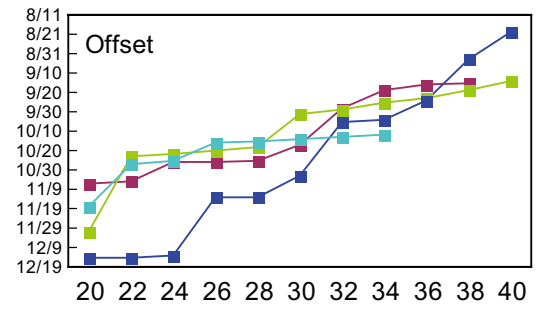
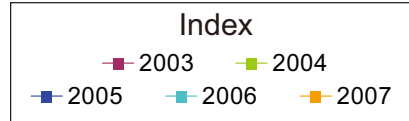
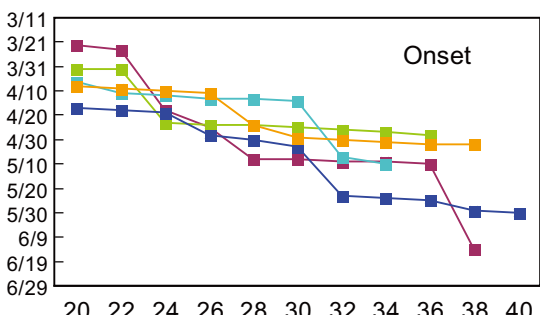


図12 KogMaにおける閾値を変えた時のオンセットとオフセットの日付。(横軸単位: mm)

Fig. 12 Onset and offset dates when the boundary values were changed at KogMa. (units: mm)

表3 可降水量から決定したオンセットの日付.

Table 3 Onset dates determined from precipitable water vapor data.

Year	Bangkok	ChiangMai	Khon Kaen	KogMa
2001	N/A	N/A	N/A	N/A
2002	April 22	May 9	April 9	N/A
2003	N/A	N/A	March 25	May 9
2004	April 28	May 10	April 20	April 26
2005	May 6	May 24	April 29	May 23
2006	May 3	May 18	April 14	May 7
2007	N/A	N/A	N/A	April 30

表4 可降水量から決定したオフセットの日付.

Table 4 Offset dates determined from precipitable water vapor data.

Year	Bangkok	ChiangMai	Khon Kaen	KogMa
2001	November 4	November 12	N/A	N/A
2002	N/A	October 6	November 3	N/A
2003	October 13	September 27	October 10	September 28
2004	N/A	September 25	September 24	September 29
2005	November 12	October 3	November 15	October 14
2006	October 14	October 12	N/A	October 13
2007	N/A	N/A	N/A	N/A

に1週間以上連続して超えた期間の最後の日をオフセットとした。また、閾値を決定するに当たっては、5日間平均可降水量が急増加しているところ、つまり閾値を多少変えてもオンセットやオフセットの日にちが変わらないところが閾値としてふさわしいと考えた。

まず、各地点で閾値を2mm間隔で与え、その閾値をもとにオンセットとオフセットを決定した。その結果を図9～12に示す。これらの図から、閾値をBangkokは56mm、Chiang Maiは52mm、Khon kaenは50mm、KogMaは32mmとした。そして、これらの閾値から求めた各地点のオンセットの日を表3に、オフセットの日を表4に示す。可降水量の定義で決定したオンセットとオフセットの方が、降水量の定義で決定した日より年によるばらつきが小さく、よりもっともらしい日に決まった。また、可降水量で決めたオンセットとオフセットから、2001年ではBangkokとChiang Maiでオフセットが遅くなっており、2005年ではすべての地点でオンセットが遅れ、BangkokとKhon Kaenの2か所ではオフセットも遅れていた。2005年のBangkokとKhon Kaenについては、オンセットとオフセットがともに遅れていたため、雨季自体が例年よりも遅れたと考えられる。

まとめ

可降水量の地域・年・季節による特徴

Bangkok, Chiang Mai, Khon Kaen, KogMaでは、雨

季と乾季で可降水量の違いが見られたが、Phuketでは雨季と乾季で可降水量の違いがあまり見られなかった。また、今回観測したすべての地点で、2002年と2005年は11月や12月になっても降水が見られ、それに伴い可降水量も他の年に比べて大きな値になっていた。この事象はすべての観測地点で見られたことから、タイ全域、もしくはタイを含むより広い地域で何らかの異常気象が起きたのではないかと考えられる。

可降水量と気圧・気温の関係

可降水量と気圧の相関を調べたところ、Chiang MaiとKogMaでは乾季で正の相関、雨季で負の相関が見られたが、他の地点では年による違いの方が季節による違いよりも大きかった。

また、可降水量と気温の相関について調べたところ、Phuket以外の地点で、乾季で正の相関が見られた。このことから、大陸の冷たく乾燥した空気がタイの上空に張り出した時に可降水量が低くなり、海上の暖かく湿った空気が張り出した時に可降水量が高くなると考えられる。

雨季のオンセット・オフセットの決定

可降水量から決定した雨季のオンセット・オフセットは、降水量の定義で決定した日より年によるばらつきが小さく、日にちももっともらしい結果が得られた。また、可降水量で決めたオンセットとオフセットから、2001年はBangkokとChiang Maiでオフセットが遅くなってい

ることがわかった。また、2005年は全ての地点でオンセットが遅れており、BangkokとKhon Kaenではオフセットも遅れていた。このことから、2005年のBangkokとKhon Kaenでは雨季自体が遅れたと考えられる。

今後の課題

今回は可降水量と気圧・気温との比較を行ったが、モンスーンは風向の変化であることから、可降水量の変動のメカニズムをより詳しく理解するためにも、今後は可降水量と風向を比較する必要がある。その際、可降水量と同等の時間分解能の高層の風向データと比較するのが望ましい。

また、雨季のオンセットとオフセットを可降水量のデータだけで決めるのは確実性に欠けるため、より精度よく決定するために、ここでも風向のデータと比較する必要がある。

謝辞

この研究は、主として平成15年～20年度の科学技術振興機構戦略的創造推進事業の「熱帯モンスーンアジアにおける降水変動が熱帯林の水循環・生態系に与える影響」の中の「モンスーン季節変化に伴う水蒸気への変化」、および平成15年4月から19年3月までの総合地球環境学研究所共同研究員としての仕事として行った。KogMaの気象データについては東京大学大学院の田中延亮博士と日本大学生物資源科学部の瀧澤英紀博士の未公開のデータを使わせていただいた。また、KogMaのGPS観測にあたっては、カセサート大学のChatchai氏とAyeさん、Chiang MaiのGPSデータについてはチュラロンコン大学の橋爪道郎博士、Chiang Maiの気象データ入手についてはタマサート大学のBoonsap博士にお世話になった。

また、静岡大学理学部地球科学科の生田領野博士と宗林留美博士には草稿を改訂するのにとても有益な指摘をいただいた。図の作成にあたっては、同学科の生形貴男博士とSatish Kumar博士にお世話になった。以上の方々に謝意を表す。

引用文献

- Ananthakrishnan R. & Soman M. K. (1987), The onset of the southwest monsoon over Kerala 1901–1980. *Journal of Climatology*, **22**, 379–386.
- Askne J. & Nordius H. (1987), Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, **22**, 379–386.
- Bevis M., Businger S., Herring T. A., Rocken C., Anthes R. A. & Ware R. H. (1992), GPS meteorology. Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 15787–15801.
- Boehm J., Niell A., Tregoning P. & Schuh H. (2006), Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical Research Letters*, **33**, L07304, doi: 10.1029/2005/GL025546.
- Boudouris G. (1963), On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gasses. *Journal of Research of the National Bureau of Standards, Section 67D*, 631–684.
- Chen G. & Herring T. A. (1997), Effects of atmospheric azimuth asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 20489–20502.
- Elgered G., Davis J. L., Herring T. A. & Shapiro I. I. (1991), Geodesy by radio interferometry, water vapor radiometry for estimation of the wet delay. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 6541–6555.
- Lemoine F. G., Smith D. E., Kunz L., Smith R., Pavlis E. C., Pavlis N. K., Klosko S. M., Chinn D. S., Torrence M. H., Williamamson R. G., Cox C. M., Rachlin K. E., Wang Y. M., Kenyon S. C., Salman R., Trimmer R., Rapp R. H. & Nerem R. S. (1996), The Development of NASA GSFC and Joint Geopotential Model. In: Segawa J. et al. (eds.) *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, Springer-Verlag, Berlin, 461–469.
- 松本 淳 (1997), 気候. 事典東南アジア (京都大学東南アジア研究センター編), 弘文堂, 東京, 22–29.
- 新田 尚・立平良三 (2000), モンスーン, 天気予報の技術 (天気予報技術研究会編), 東京堂出版, 東京, 52–53.
- Satomura M., Fujita M., Kato T., Nakaegawa T. & Terada M. (2001), Seasonal Change of Precipitable Water Vapor Obtained from GPS Data in Thailand. *Proceeding The Fifth International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME*, 3–5 October, 2001, Nagoya, Japan, **1**, 235–239.
- Takiguchi H., Kato T., Kobayashi H. & Nakaegawa T. (2000), GPS observations in Thailand for hydrological applications. *Earth Planet Space*, **52**, 913–919.
- 藤間 俊・里村幹夫・島田誠一・Sununtha Kingpaiboon (2006), タイ・コンケンにおけるGPS可降水量の変動. 日本地球惑星科学連合2006年大会講演予稿集.