

タイ・Khon KaenにおけるGPS可降水量について

堀川真由美^{1,2}・里村幹夫¹・島田誠一³・Sununtha Kingpaiboon⁴・
仲江川敏之⁵・加藤照之⁶・沖 大幹⁷

Precipitable water vapor obtained by means of GPS at Khon Kaen, Thailand

Mayumi HORIKAWA^{1,2}, Mikio SATOMURA¹, Seiichi SHIMADA³,
Sununtha KINGPAIBOON⁴, Tosiyuki NAKAEGAWA⁵, Teruyuki KATO⁶
and Taikan OKI⁷

Abstract In order to investigate the mechanism of the Asian Monsoon system and to improve the accuracy for the prediction of the global climate, it is important to study water vapor change in the atmosphere of the Monsoon region. We can estimate precipitable water vapor (PWV) from GPS data with higher time resolution than that obtained by other instruments.

We performed GPS measurements at 4 stations in Thailand during the period between 1998 and 2001 and investigated their PWV changes. GPS observation at Khon Kaen in the north-eastern Thailand started in 2001. The new data at Khon Kaen were processed to obtain the PWV in order to understand the characteristics of its seasonal and diurnal changes.

The results show that the obtained PWV periodically changes widely in the range of 20 mm to 60 mm, with 1 or 2 weeks duration in the dry season, and we can note that the PWV increases before rainfall and decreases after rainfall. On the other hand, it is almost constant at about 60 mm or 70 mm without any changes even when it rains in the wet season. In the monsoon break of the middle of July 2002, the PWV obtained decreased by about 10 mm.

We compared the PWV obtained with that of NCEP/NCAR reanalysis data, and the results show that our data are usually larger by about 10 mm than NCEP/NCAR data.

The PWV diurnal changes for pre-monsoon and monsoon periods were also discussed. The difference of diurnal changes of the two periods was small and they showed that PWV had the minimum value at 4 - 7 o'clock in the morning, it increased in the afternoon and it had the maximum value in the evening or the midnight irrespective of the season.

Key words: Global Positioning System (GPS), precipitable water vapor (PWV), Asia Monsoon region, seasonal change, diurnal change, NCEP/NCAR reanalysis data

¹静岡大学理学部地球科学教室, 422-8529 静岡市大谷836

Institute of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka 422-8529, Japan

E-mail: semsato@ipc.shizuoka.ac.jp (M. S.)

²現所属：名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻, 464-8601 名古屋市千種区不老町

Present Address : Division of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan

³防災科学技術研究所, 305-0006 茨城県つくば市天王台3-1

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

⁴Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang District, Khon Kaen 40002, Thailand

⁵気象庁気象研究所, 305-0052 茨城県つくば市長峰1-1

Meteorological Research Institute, JMA, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan

⁶東京大学地震研究所, 113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

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

⁷東京大学生産技術研究所, 153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

はじめに

GPS (Global Positioning System) は高度2万kmを周回する衛星群からのマイクロ波を受信することにより、観測点の位置を知ることができる位置決定システムである。衛星からのマイクロ波は大気を通過すると真空中よりわずかに伝播遅延を生じる。この遅れは気圧・気温・湿度の関数で表される大気屈折率の関数である。この性質を利用して伝播遅延から大気中の水蒸気量を推定する研究がGPS気象学として行われている (Businger *et al.*, 1996)。

本論文の研究対象であるタイは、アジアモンスーンの影響を強く受けている地域である。アジアモンスーン地域は人口が密集しており、アジアモンスーンの気候変動による洪水や干ばつは、周辺地域の人々に大きな影響を与えており。また、アジアモンスーンの気候変動は地球規模での気候システムの変動に影響を与えることもわかってきており。このためアジアモンスーンの実態を解明し、アジアモンスーン地域における水循環・水資源予測の精度を向上させることは重要な課題であり、この研究のためにGAME-T (Gewex Asian Monsoon Experiment-Tropics) プロジェクトが計画され、実施されてきた (松本, 2002)。

大気中の水蒸気は潜熱輸送や降水過程に大きな影響を与えており、アジアモンスーンにおける水蒸気の変動のメカニズムを解明することは水循環の理解のうえで重要である。上空の水蒸気の観測は、ラジオゾンデ等による観測も実施されているが、GPS衛星からの伝播遅延量から得られるGPS可降水量は、全天候型で、ラジオゾンデ

観測に比べ高い時間分解能で水蒸気情報を得られる利点を持っている。

これまでに、タイではGAME-Tの一環として1998～2001年に図1に示す6点でGPS観測が行われており、可降水量の変動が捉えられている (Takiguchi *et al.*, 2000; Satomura *et al.*, 2001)。これらの観測の一部 (Bangkok, Chiang Mai, and Phuket) は地球観測フロンティアグループに引き継がれ、また一部 (Nong Khai, and Ubon Ratchatani) は観測が中止されたが、代わって2001年8月から中止された2点と同じタイ東北部にあるKhon Kaenにおいて新たな観測を開始した。本研究では、アジアモンスーンに伴うGPS可降水量のデータから季節変化や日変化などの特徴を明らかにすることを目的として、このKhon KaenにおけるGPSデータから可降水量の変動を求めた。

観測

GPS観測点は、タイ北東部に位置するKhon Kaenである。観測点の位置を図1に示す。この図に示す観測点のうち、Nong KhaiとUbon Ratcataniは現在観測が行われていないが、Bangkok, Chiang Mai, Phuketは地球観測フロンティアにより、Sri SamrongはタイのChulalongkorn大学により、現在も観測が継続されている。

Khon Kaenでの観測システムはGPS受信機 (Trimble 4000SSi), GPSアンテナ (Trimble microcentered L1/L2 ANTENNA) とデータ収録用パソコンで構成されている。アンテナはKhon Kaen大学構内の工学部農業工学科の建物屋上、地上3.84mに三脚を用いて固定されている。データは毎日24時間、30秒サンプリングで受信機に収録され、1日1回定時にパソコンのハードディスクに転送され保存されている。保存されたデータは年に1～2回現地で回収し、日本に持ち帰っている。

観測は2001年8月25日から現在まで継続して行われているが、今回の解析は、気象データが入手できた2001年8月25日から2002年12月31日までのデータについて行った。

解析方法

GPS観測データの解析には、MIT (Massachusetts Institute of Technology) とSIO (Scripps Institution of Oceanography) が共同で開発したGPS解析ソフトウェアであるGAMIT (GPS Analysis of MIT) version 10.07を用いた。

GPS解析を行うにあたり、まずKhon Kaen観測点の座標値を求めた。この際、座標基準点として、観測点を取り囲むようにIGS (International GPS Service for Geodynamics) 観測点である臼田 (日本), Wuhan (中国), Lhasa (中国・チベット), Guam (USA), Singapore, Cocos島 (オーストラリア), Darwin (オーストラリア) の7点を選び、これらのITRF2000の座標値を用いた。

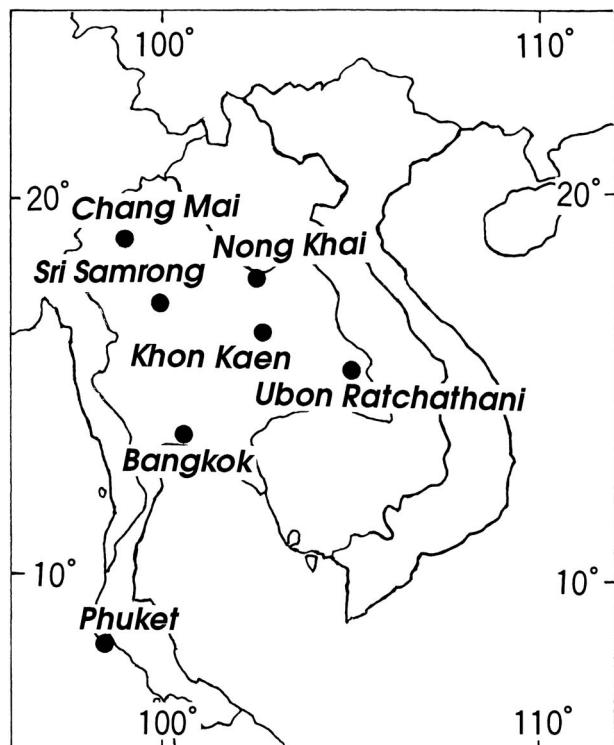


図1 タイ観測点配置図。

Fig. 1 GPS observation sites in Thailand.

座標値の決定にあたっては、2002年3月～2003年11月から約30日おきに21日分を選んだデータを用いた。衛星軌道暦にはIGS精密暦を用い、UTC(協定世界時)0時～24時を1回の解析として天頂遅延量、大気水平勾配、衛星軌道を推定パラメータに加えて解析した。そして、この解析で1日ごとに求められた座標値の平均値を解析期間のKhon Kaenの座標値とした。その値は次のとおりである。

$$X = -1357833.2221$$

$$Y = 5965573.0191$$

$$Z = 1797008.9572$$

この値をWGS84座標系に変換すると次のような値になる。

北緯 $16^{\circ} 28' 22.06540''$

東経 $102^{\circ} 49' 21.80433''$

楕円体高 168.1495 m

また、この地点でのジオイド高は、EGM96モデル(Lemoine *et al.*, 1996)によると -30.04 m である。したがって標高は 198.19 m となる。なお、今回は観測点の変位速度は求めていない。

GAMITを用いて天頂遅延量を求めるには、比較となるべき周辺のGPSデータが必要であるので、座標値を求める際に用いた7点のIGS点のデータを用い、以上的方法で決定したKhon Kaen観測点の初期座標値を水平成分5mm、上下成分10mmの条件で拘束し、衛星軌道パラメータを固定して、UTC 0時～24時のデータを1セットとし、セット毎に1時間おきの天頂遅延量を求めた。

天頂遅延量から可降水量へ変換するために、まず天頂遅延量(ZTD)を乾燥大気によって生じる静水圧遅延量(ZHD)と、水蒸気によって生じる湿潤遅延量(ZWD)に分けた。このとき、静水圧遅延量は以下の式(Elgered *et al.*, 1991)により求めた。

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

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

ここで、 ZHD は静水圧遅延量(m), P_{GPS} はGPS観測点の地上気圧(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。 $f(\phi, H)$ は観測点の緯度、楕円体高による重力加速度の違いの効果を表している。GPS観測点の緯度、楕円体高は、上記に述べたGPS解析で求められた値を用いた。気圧については、TMD(Thai Meteorological Division, タイ気象局)から入手したKhon Kaenの3時間毎の海面気圧値を、上述のGPS観測点の標高を用いて現地気圧に換算した値を用いた。

湿潤遅延量(ZWD)は、求めた静水圧遅延量(ZHD)を天頂遅延量(ZTD)から差し引いて求めた。

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

可降水量(PWV)は、得られた湿潤遅延量(ZWD)から以下の式(Askne & Nordius, 1987)を用いて求めた。

$$PWV = II \cdot ZWD \quad (3)$$

ただし、

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

ここで、 k_1 , k_2 , k_3 は実験的に求められた定数で、ここでは、 $k_1 = 77.60 \pm 0.08$ (K/hPa), $k_2 = 71.98 \pm 10.82$ (K/hPa), $k_3 = (3.754 \pm 0.036) \times 10^5$ (K²/hPa) (Boudouris, 1963) を用いた。 R_v は水蒸気の気体定数(461.518), M_v は水蒸気の分子量(18.0152 kg/kmol), M_d は乾燥大気の分子量(28.9644 kg/kmol), T_m は加重平均気温(K)である。加重平均気温は、地表気温 T を用いて以下の式(Bevis *et al.*, 1992)から求めた。

$$T_m \approx 70.2 + 0.72 T \quad (4)$$

以上 の方法を用いて、GPS解析で求められた天頂遅延量を、TMDから入手したKhon Kaen気象台での3時間毎の気温・気圧データを使い、3時間毎の可降水量に変換した。

結 果

求められたKhon Kaenにおける2001年と2002年の可降水量と降水量の時系列変動を図2に示す。可降水量は3時間毎の値をプロットし、降水量は3時間積算量を示している。可降水量、降水量とともにモンスーンの活動に伴う季節変動が見られ、その変動から5月初めにモンスーンのオンセットが起こり、10月下旬に雨季から乾季に移行したと判断される。

降水は雨季の5月から10月に集中しているが、プレモンスーン期の3月～4月においても1～2週間周期で降水が起こっている。2002年は、5～6月と8月～10月に激しい降水活動の日が続く「活発期」が見られ、7月には降水のない「モンスーンブレイク」が見られる。一方2001年は、7月頃に降水量は少なくなるがモンスーンブレイクは明瞭には見られない。

Khon KaenのGPS可降水量は、乾季では20～60 mmの間を1～2週間周期で大きく変動しており、可降水量が増加して最大に達したときに降水が起こり、その後可降水量が減少するという関係が見られる。一方雨季では、可降水量は常に60～70 mmと高く、降水による増減の変化が小さい。このような可降水量の季節変動は、Satohura *et al.*(2001)で観測されたタイ国内の他の4点(Bangkok, Chiang Mai, Nong Khai, Ubon Ratchathani)のGPS可降水量の季節変動と一致している。またKhon Kaenでは、2002年7月に見られたモンスーンブレイク期に可降水量が10 mm程度低くなった。

2002年10月の7～14日にかけてGPS可降水量の大きな減少が見られた。この時期は雨季の終わりにあたるが、この期間の前後では降水量が多く、可降水量も50～60 mmと高く雨季の特徴を見せている。それにもかかわらず、この時期は2002年においてもっとも急激な可降水量の減少を示した。

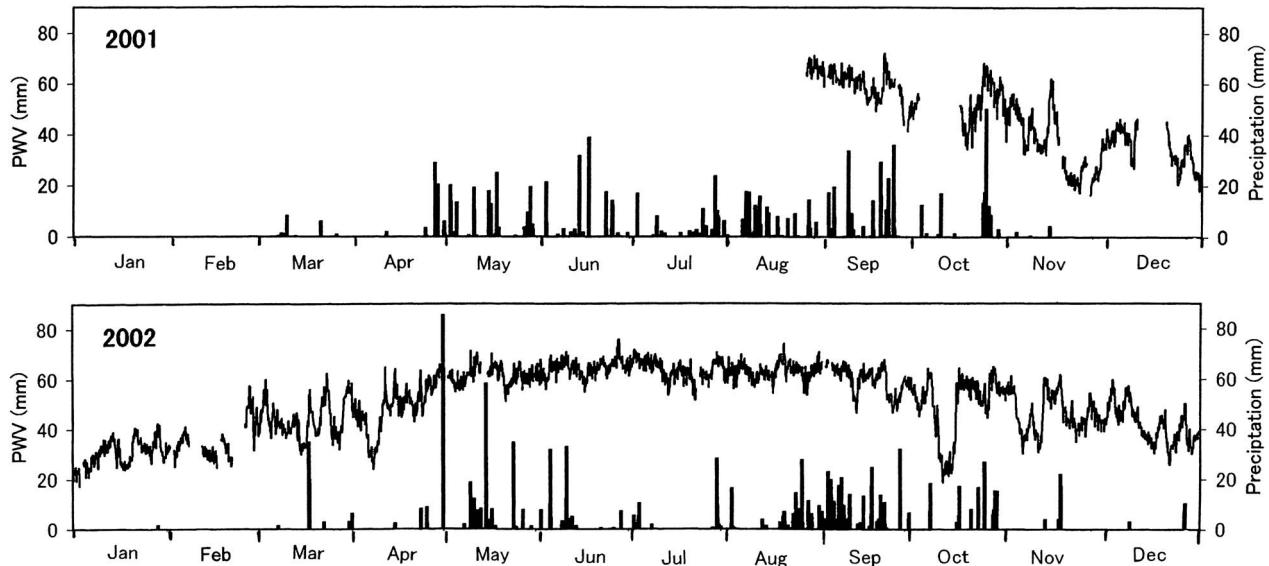


図2 Khon Kaen における可降水量 (PWV) と降水量の3時間毎時系列変動 (2001年, 2002年). 可降水量を実線で, 降水量を棒グラフで示す.

Fig. 2 3 hourly change of PWV and precipitation at Khon Kaen in 2001 and 2002. PWV is shown in a line and precipitation is in a bar graph.

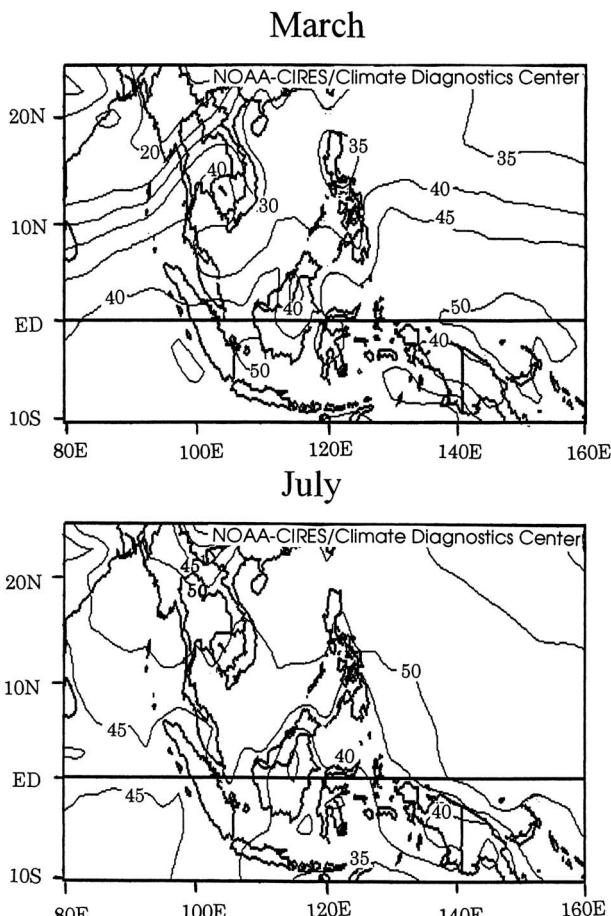


図3 NCEP/NCAR再解析データの2002年3月と7月の月平均可降水量値の分布. 可降水量の等値線の間隔は5 mmで, 単位はmmである.

Fig. 3 Distribution of monthly mean PWV obtained by NCEP/NCAR reanalysis in 2002. Contour intervals are 5 mm and the value unit is in mm.

議論

NCEP/NCAR再解析データとの比較

求められたGPS可降水量を評価するために, 2002年において, 月平均値で, NCEP/NCAR (米国国立環境予測センター/国立大気研究センター) 再解析データから得られる可降水量との比較を行った.

NCEP/NCAR再解析データは, NOAA-CIRES Climate Diagnostics CenterのWebサイト (<http://www.cdc.noaa.gov/>) 上のデータを使用し, サイト上のプログラムを用いて図を作成した. 図に使用した可降水量データは, 地表面における日平均値で, 平均解像度は $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ である. 図化した領域は, タイを中心とした緯度 $10^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{N}$, 経度 $80^{\circ}\text{E} - 160^{\circ}\text{E}$ の範囲である. 2002年の各月における, NCEP/NCAR再解析データの地表面での月平均可降水量の分布図のうち, ここでは3月と7月の例を図3に示す. この図の等値線の間隔は5 mmで, 可降水量の単位はmmである. 可降水量は高緯度になるほど低く, 赤道付近に帶状のピークを持つ. このピークの帶はプレモンスーン期の3~4月に北上し始め, 7~8月に 20°N 付近に達し, その後南下して乾季には赤道付近に戻

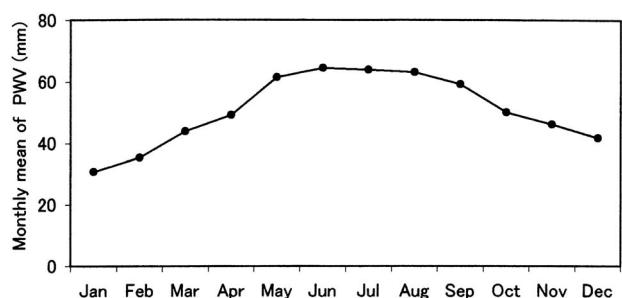


図4 GPS可降水量の2002年の月平均値の変動.

Fig. 4 Change of monthly mean PWV in 2002.

る(図3)。この可降水量のピークの帶の季節変動に伴い、Khon Kaenの可降水量もプレモンスーン期から雨季にかけて増加し、7月に最大となり、その後減少している。この可降水量のピークの帶は熱帯収束帯に対応していると考えられる。

NCEP/NCAR再解析データの可降水量とGPS可降水量との比較を行うために、2002年についてGPS可降水量の3時間毎値から月平均値を求めた。その結果を図4に示す。Khon KaenのGPS可降水量は、再解析データの可降水量より全体的に10 mm程度高く、1998年のタイ国内のGPS可降水量をGAME再解析データと比較した仲江川ほか(2002)と同じ傾向を示す。さらに5月～6月にかけてはGPS可降水量の再解析データとの差は20 mmに達した。

次に、モンスーンにおける風系の季節変動とGPS可降水量の季節変動を比較した。風系の季節変動を見るために、NCEP/NCAR再解析データの地表面でのベクトル平均風(日平均)のデータを使用して、可降水量の場合と同じ条件で、2002年の各月におけるNCEP/NCAR再解析データの地表面での月平均ベクトル風の分布を図にした。その結果、乾季には東南アジアの20°N以南で、広く北東モンスーンに伴う北東風が見られた。乾季の終りの暑気と呼ばれる3～4月になると、北東風は弱まり、雨季の5月に入ると南西風が卓越する。雨季の初めにおけるGPS可降水量の増加は、南西モンスーンの開始に対応しており、ベンガル湾からの暖湿な空気の供給が雨季の可降水量の高い値を維持していると考えられる。雨季の後半の9月には南西風が弱まり、10月には北東風が見られ始め、乾季の北東モンスーンへ移行している。このように風系では、南西モンスーンの終焉は9月に見られ、降水量

の季節変化とは一致していない。GPS可降水量は9月に若干減少するものの、乾季への移り変わりは10月下旬に見られるので、可降水量の季節変化は降水量の方とよく一致している。

10月の事例解析—コールドサージ

2002年10月の可降水量と降水量の時系列変動と、気圧と気温の時系列変動を図5に示す。気圧と気温は、日変化の影響を取り除いて関係を見やすくするために、1日の移動平均で示した。図5から、可降水量の大きな減少は気圧が高く、気温が低くなっている時期に対応していることが分かる。そこで10月を、減少期前(10月1～5日)、減少期(10月7～14日)、減少期後(10月16～20日)に分けて、NCEP/NCAR再解析データを用いて解析した。

使用したNCEP/NCAR再解析データは、地表面での海面気圧・気温・ベクトル平均風・可降水量の日平均値である。各期間における平均値を、タイを中心とした緯度方向に10°S～50°N、経度方向に60°E～160°Eの範囲について図化した。その結果、Khon KaenでのGPS可降水量の減少期にNCEP/NCAR再解析データでも可降水量の減少が見られた。地表面での海面気圧・気温・ベクトル平均風の再解析データから、減少期において中国大陸上の乾燥した高気圧が南に張り出し、寒気がタイ上空に南下しているのが見てとれ、同時に北東モンスーンがタイ平野部にまで及んでいた。

のことから、10月7～14日のGPS可降水量の大きな減少は、東アジアからの北東モンスーンに伴い大陸上の乾燥した高気圧の張り出しで寒気が移流したコールドサージを表していると考えられる。

GPS可降水量の日変化

Khon KaenにおけるGPS可降水量の日変化について調べた。日変化の特徴と季節による日変化の違いを見るために、2002年のデータを毎月分けて、同じ時刻の可降水量を月平均して、その月の可降水量の日変化を求めた。ただし、降水の有無で日変化が異なることを考慮して、降水の有る日と無い日を分け、各々で月平均を取った。2002年1～12月の各月の平均の日変化を、1時からの差として図6に示す。図は横軸に現地時間をとり、降水のなかった日の可降水量の日変化を実線で、降水のあった日の日変化を点線で示した。さらに、棒グラフでその3時間の1ヶ月の降水積算量を表した。

降水のない日には、季節によらず、早朝4～7時に可降水量が最小となり、午前中に増加し、午後から深夜にかけて可降水量が多くなる傾向を示す。一方降水のある日には、可降水量は降水活動の日変化に対応して、降水の多い時間帯に多くなる傾向が見られる。

降水の日変化については、季節によって変化が見られた。Khon Kaenの降水はプレモンスーン期から雨季の初期にかけては、早朝から午前中に極小となり、深夜に極大となっている。しかし、7月頃から深夜の極大が夕方へと早まり、9～10月には深夜以外に午前中にも極大を持つようになっている。乾季に入ると降水の極大は午前中になる。

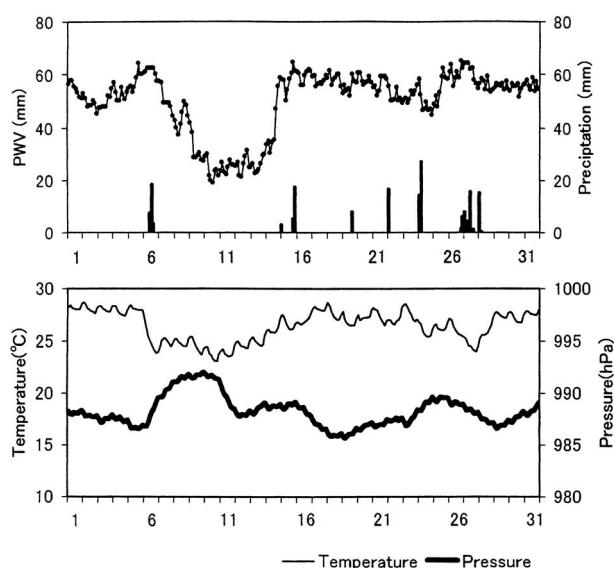


図5 2002年10月の可降水量と気象データ(気温・気圧・降水量)の変動。上図の実線は可降水量を、棒グラフは降水量(3時間)を示し、下図の細い実線は気温、太い実線は気圧を示している。

Fig. 5 Change of PWV, air temperature, air pressure and precipitation in October, 2002. (upper) PWV is shown in a line graph and precipitation (3 hour) is in a bar graph. (lower) Temperature is shown in a thin line and pressure is in a thick line.

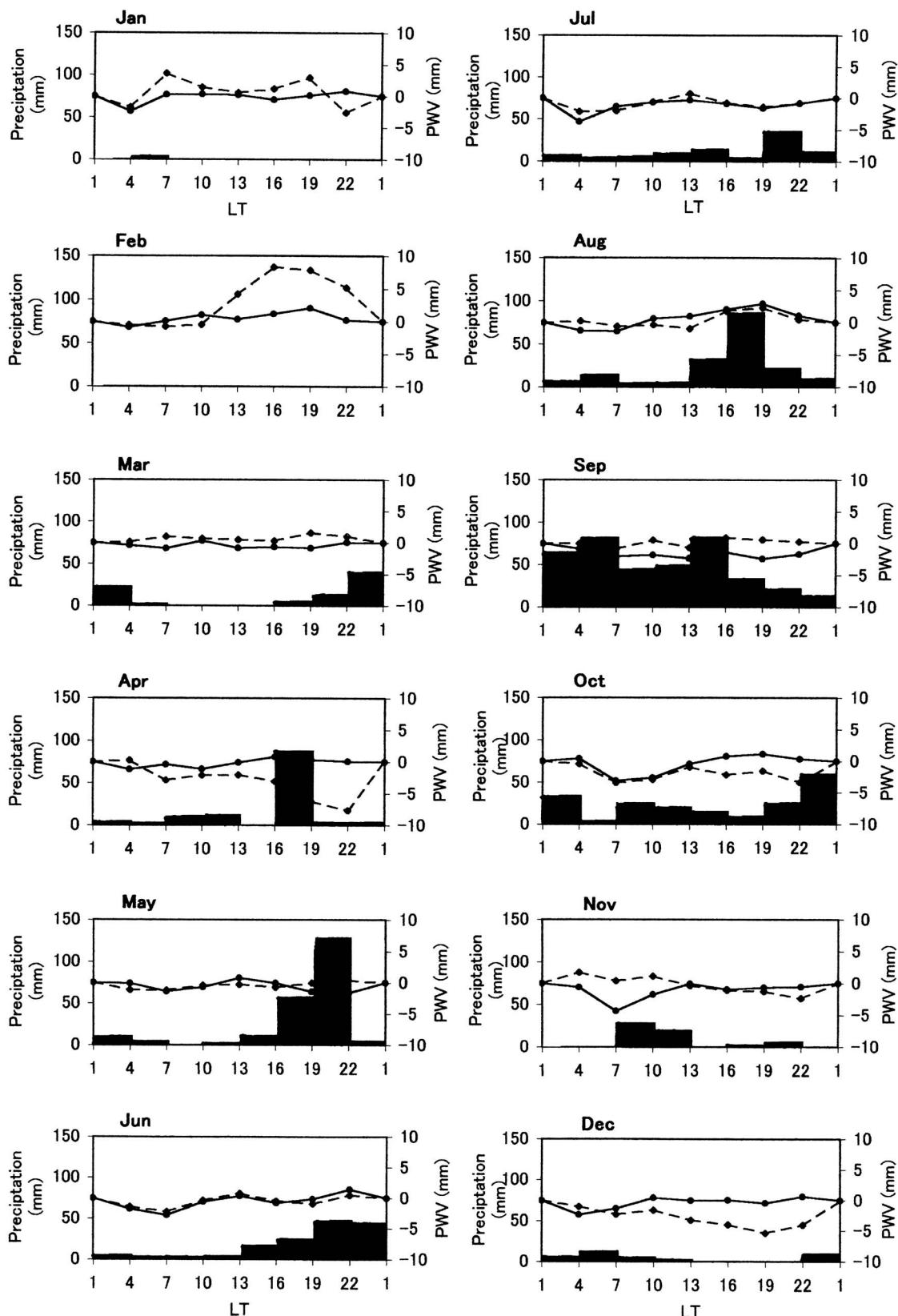


図6 Khon Kaenでの2000年の各月の平均可降水量(1LTからの偏差)と降水量の日変化。時刻はタイ標準時。可降水量は降雨のある日とない日に分けて平均し、降雨のある日の日変化を破線で、降雨のない日の日変化を実線で示した。また、降水の1ヶ月積算量をヒストグラムで示す。

Fig. 6 Monthly mean of the diurnal changes of PWV and precipitation at Khon Kaen in 2002. PWV is shown with a difference from 1LT. Time is shown in a local time. Two diurnal change of PWV is obtained by separating the day with rain and without rain. Solid line shows the PWV change of the days without rain and broken line shows that with rain. A histogram shows the 1-month precipitation.

まとめ

Khon KaenのGPSから得られた可降水量は、タイ国内のこれまでの研究と同様な、アジアモンスーンに伴う季節変動が見られた。その変動は、雨季では常に60～70 mmと高い値を示し小さいが、乾季では20～60 mmの間を1～2週間周期で変動しており、可降水量の増加のピークに降水が起り、その後減少するという関係が顕著に見られる。また7月に見られるモンスーンブレイクには、可降水量が10 mm程度低くなる現象が見られた。

NCEP / NCAR再解析データの可降水量月平均値とGPS可降水量月平均値を比較すると、GPS可降水量の方が10 mm程度高く推定される。特に、GPS可降水量は雨季に入る5月に急増し、その値を維持する傾向がある。また、地表面のベクトル月平均風と比較すると、雨季の終わりは風系が先に終焉し、GPS可降水量は降水の季節変化の方によく一致している。

Khon Kaenの可降水量の日変化は、降水のない日は季節によらず早朝4～7時に最小となり、午前中に増加し、午後から深夜にかけて可降水量が多くなる変化を示す。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、タイ気象局のKhon Kaen気象台から観測データを頂いた。また、資金面をはじめ多くの面で、GAME-Tグループのご協力をいただいた。静岡大学理学部の新妻信明教授と生形貴男博士には、原稿を読んでいただき、本論の改稿に役立つコメントをいただいた。心より感謝し御礼申し上げる。なお、この研究の一部は、総合地球環境学研究所の共同研究「地球規模の水循環ならびに世界の水問題の実態と将来展望」、および独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「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」で実施した。

引用文献

Askne J. & Nordius H. (1987), Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, **22**, 379-386.

- Boudouris G. (1963), On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, **67D**, 631-684.
- Businger S., Chiswell S. R., Bevis M., Duan J., Anthes R. A., Rocken C., Ware R. H., Exner M., VanHove T. & Solheim F. S. (1996), The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 5-18.
- Elegd 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., Williamson 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 NIMA Joint Geopotential Model. In: Segawa J., Fujimoto H. & Okubo S. (eds.) *Gravity, Geoid and Marin Geodesy*, Springer-Verlag, Berlin, 461-469.
- 松本 淳 (2002), 東南アジアのモンスーン気候概説. 気象研究ノート第202号, 東南アジアのモンスーン気候学 (松本淳編), 日本気象学会, 東京, 57-84.
- 仲江川敏之・加藤照之・里村幹夫 (2002), 可降水量からみたタイ国内の季節進行と日変化. 気象研究ノート第202号, 東南アジアのモンスーン気候学 (松本淳編), 日本気象学会, 東京, 131-142.
- Satomura M., Fujita M., Kato T., Nakaegawa T., Iwakuni M., Nishikori M. & Nishimura M. (2001), Seasonal change of precipitable water vapor estimated from GPS data in Thailand. *Proceedings of 2001 Workshop on GAME-Tropics in Thailand during 5th-7th March 2001 at the Royal Paradise Hotel Patong Beach, Phuket, Thailand*, 165-167.
- Takiguchi H., Kato T., Kobayashi H. & Nakaegawa T., (2000), GPS observations in Thailand for hydrological applications. *Earth, Planets and Space*, **52**, 913-919.