

## 日本におけるGPS可降水量の季節変化の特徴

糟 谷 司\*・川 村 隆 一\*\*

### 要 旨

1997年から2009年までの期間について全国規模でGPS可降水量を算出し、その季節変化の気候学的な特徴について調べた。冬期から春期への季節進行と共に可降水量は全国的に増加していくが、西日本では5月末の少雨期の直前に可降水量の増加が停滞し、その後約20mm程度の可降水量の急増に伴って6月中旬に梅雨入り（オンセット）を迎える。オンセット時の最大増加率は1mm/dayを超え、増加率の極大後約10日後に降水量が最大値を示す。また、盛夏期の可降水量の上限値は50mm程度である。秋期に可降水量が急激に減少する時期は西日本では2回、東日本では1回で、特に9月中旬の減少傾向は全国規模である。可降水量の夏期前後の季節変化にみられる非対称性は西日本で特徴的であるが、北海道では8月初めを極大とする対称性が際立っており、可降水量の季節変化に地域的な特徴が見出された。

### 1. はじめに

南アジア、東南アジア、東アジア地域は夏季モンスーン期に可降水量が増加し、全球的にみて可降水量の季節変動が極端に大きい地域となっている（Amenu and Kumar 2005; Jin and Luo 2009）。たとえば、1998年のタイのモンスーン期における可降水量変動を調べた仲江川ほか（2002）は、可降水量は第21半旬（4月11-15日）から増加し始め、第28半旬（5月16-20日）以降は55mm前後の値を示し、可降水量が55mmに達した頃に多くの地点でモンスーンがオンセットしていると述べている。ユーラシア大陸東岸に位置する日本では、梅雨期に南シナ海・華南からの南西気流および、北太平洋高気圧の西縁を巡る南東気流によって多量の水蒸気が梅雨前線へ輸送され、日本に

降水をもたらしている。Hiraoka *et al.* (2011) は、中部、南日本の梅雨の開始時に南シナ海、インド洋起源の水蒸気が急増し、梅雨明け後はインド洋起源の水蒸気は減少する一方、太平洋起源の水蒸気が可降水量の大部分を占めるようになることを指摘している。日本国内のローカルな現象に伴う水蒸気変動を高時空間分解能を有するGPS可降水量で調べている研究は数多い（小司ほか（2009）に詳しい）、いずれも、地域や時期を限定したものであり、全国規模でGPS可降水量の詳細な季節変化を調べた研究はない。

降水量の季節変化については数多くの先行研究があるが、たとえば、藤部（2006）は44年間の気象官署データを用いて、本州～九州で5月末ごろを中心に存在する少雨期について調べており、少雨期は近畿～九州では5月24日ごろで、降水量はその期間の前後に比べて20～30%少なく、その後の梅雨期のオンセットを際立たせていることを示している。このような降水量の季節変化にみられる特異性が可降水量の季節変化にも同様にみられるのかどうか、また両者の季節変化がどのように地域的に異なっているのか必ずしも明らかではない。以上のことから、本研究では日本における①GPS可降水量の季節変動の動態を明らか

\* 富山大学大学院理工学教育部（現：中部日本電気ソフトウェア株式会社）。

\*\* 富山大学大学院理工学研究部（現：九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門）。

—2012年1月30日受領—

—2012年7月17日受理—

© 2012 日本気象学会

にすること、②GPS 可降水量の季節変化の特徴とその地域的差異を明らかにすることを研究目的とする。

## 2. 使用データおよび解析手法

### 2.1 使用データ

GPS 可降水量算出には、国土地理院提供の対流圏遅延量推定値 (F3 解) と共に、気象官署の現地気圧、AMeDAS の気温を使用した。対流圏遅延量推定値は 3 時間毎の瞬間値となっているため、可降水量は 3 時間値として算出し、解析に用いた。GPS 可降水量の精度検証および可降水量の鉛直プロファイルを調べるために、高層気象官署におけるラジオゾンデの気温、相対湿度、気圧を用いた。また、地上の水蒸気変動を考察するために気象官署の相対湿度と気温を使用し、地上混合比を算出した。さらに、GPS 可降水量と降水量の変動を比較するために気象官署の降水量も使用した。

### 2.2 解析手法

本研究では日本の GPS 可降水量変動を調べるために、北海道から南西諸島に至る日本全国を解析対象領域とし、解析期間は 1997 年 1 月 1 日から 2009 年 12 月 31 日とした。GPS 可降水量は次の手順で算出した。まず、国土地理院提供の対流圏遅延量推定値から GPS 観測点の近傍に位置する気象官署の現地気圧を基に算出した天頂静水圧遅延量を差し引いて天頂湿潤

大気遅延量を求め、次に GPS 観測点近傍の AMeDAS の気温データを用いて可降水量を算出した。前に述べたように、対流圏遅延量推定値は 3 時間毎の瞬間値であるため、気象官署の現地気圧、AMeDAS の気温も同時刻の観測値を使用し、3 時間毎の可降水量を算出した。GPS 観測点と気象官署の海拔の違いは気圧については測高公式、気温については気温減率 ( $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) で補正している。可降水量の算出方法は糟谷・川村 (2011) と同じである。

本研究で算出した GPS 可降水量の精度を確認するために、高層気象観測データに基づいてゾンデ可降水量を求め、高層気象観測点近傍 (水平距離 20km 以内) の GPS 観測点における GPS 可降水量と比較した。比較に用いた高層気象観測点と GPS 観測点、および両者の相関分析の結果を第 1 表に示す。相関係数は稚内の 0.98、那覇の 0.97 を除くと全て 0.99 となっている。r.m.s. 誤差は那覇が 3.49mm と比較的大きいが、それ以外の地点では 1.86mm~2.54mm を示し、先行研究 (新村ほか 2000; 大橋・川村 2006) と同程度の精度が得られていると考えられる。2002 年から 2003 年にかけて、GPS 受信アンテナの更新があり、その前後で対流圏遅延量推定値に系統的誤差が生じている地点が多く見受けられるが、GPS 可降水量の季節変化の一般的な特徴を明らかにするために統計期間を長くとる必要があることから、全期間 (1997 年

第 1 表 ラジオゾンデ観測点と近傍の GPS 観測点の情報。ラジオゾンデ観測点の標高は気象官署の標高で、( ) 内は観測データ開始高度。標高差は GPS 観測点とラジオゾンデ観測データ開始高度の差の絶対値。r.m.s. 誤差と相関係数 ( $R$ ) は、仙台と那覇は 1997 年から 2007 年までの 11 年間の観測データ、その他の観測点は 1997 年から 2009 年までの 13 年間の観測データの内、09 時と 21 時のゾンデ可降水量と GPS 可降水量双方が欠測でなかった観測値から算出した。

ラジオゾンデ観測点		GPS 観測点		標高差 (m)	水平距離 (km)	r.m.s.	$R$	サンプル数
観測点名	標高 (m)	観測点名	標高 (m)					
稚内	2.8 (11.7)	稚内	47.6	35.9	5.4	2.54	0.98	9380
札幌	17.2 (26.3)	江別	23.4	2.9	17.0	2.32	0.99	9295
根室	25.2 (39.0)	根室 1	20.0	19.0	7.6	2.19	0.99	9410
秋田	6.3 (6.5)	河辺	35.9	29.4	12.9	1.86	0.99	9412
仙台	38.9 (43.3)	利府	31.9	11.4	8.1	2.53	0.99	7987
輪島	5.2 (14.7)	輪島	13.9	0.8	1.2	2.49	0.99	9442
館野	25.2 (31.0)	つくば 1	30.2	0.8	14.2	2.14	0.99	9468
米子	6.4 (8.5)	米子	11.6	3.1	0.5	2.42	0.99	9266
潮岬	73.0 (68.8)	串本	13.2	55.6	3.9	2.43	0.99	9394
福岡	2.5 (14.5)	前原	45.5	31.0	12.6	2.21	0.99	9433
鹿児島	3.9 (31.7)	鹿児島 3	48.8	17.1	8.1	2.51	0.99	9275
那覇	28.1 (26.9)	玉城	96.7	69.8	10.3	3.49	0.97	7819

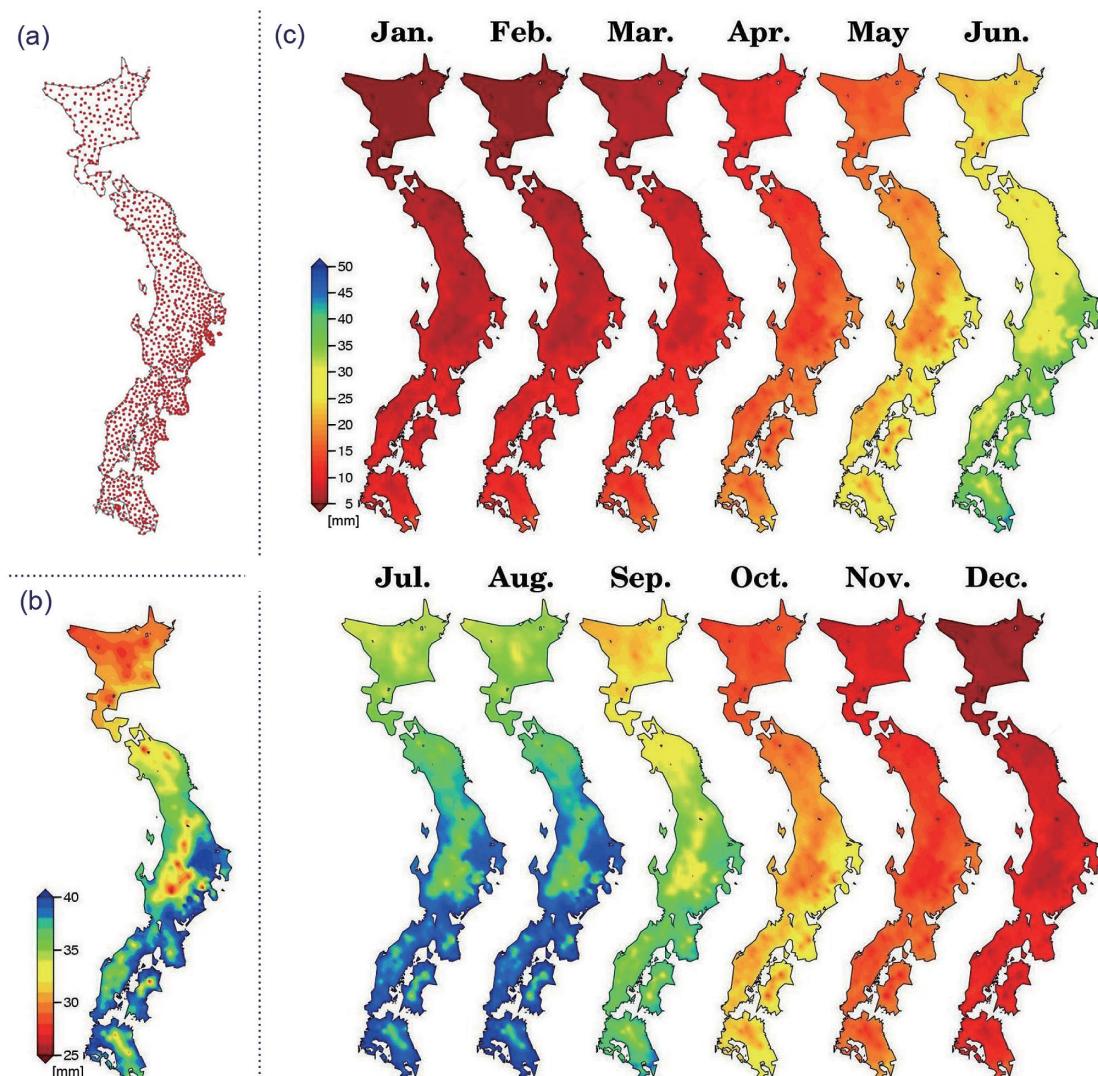
～2009年)のデータを使用した。経年変動を調べる際には特に注意が必要である。

### 3. GPS可降水量の季節変化

#### 3.1 GPS可降水量の月平均気候値

第1図はGPS観測点(1245地点)のGPS可降水量から求めた各月の月平均気候値と年較差である。可降水量は1月、2月に全国的に10mm以下となっており、季節進行と共に増加する。7月、8月には40mm

以上の領域が西日本から東日本に拡がっており、特にそれらの地域の沿岸部では約50mmに達している。各月においても、南北方向および標高の高い山岳部から沿岸部にかけて可降水量分布に大きな差がみられる。具体的には、北海道地方では九州地方に比べて冬期に7、8mm程度、夏期には約20mm低くなっている。山岳域では沿岸部に比べて数mm～20mm程度可降水量が低い。月平均気候値の年較差は北海道や中部山岳等の標高の高い地点では30mm以下の値を示している



第1図 a:本研究で利用したGPS観測点の分布。b:GPS可降水量の年較差。c:GPS可降水量の月平均気候分布。上段が1月～6月の月平均分布、下段が7月～12月の月平均分布。陰影で値を示し、間隔は1mm。南西諸島と一部の離島は表示していない。

のに対して、沿岸部では35mm を超えている。特に太平洋側の沿岸部では年較差が大きく、関東平野や濃尾平野は40mm を超える領域が拡がっている。

南西諸島（図略）の気候値はほぼすべての月で本州より15mm 程度の高い値を示し、6月から9月は約50mm となっている。しかし、本州で極大となる7月、8月では本州との差はあまりない。1年を通して可降水量が多いため、年較差は約30mm で北海道や標高の高い山岳部の値と同程度の低い値となっている。

Amenu and Kumar (2005) は NASA の水蒸気プロジェクト (NVAP) データと NCEP-NCAR 再解析データの相互比較を行っており、夏期 (JJA) と冬期 (DJF) の可降水量の差を示しているが、日本周辺では20mm~35mm の値が得られており、本研究の年較差と矛盾はない。

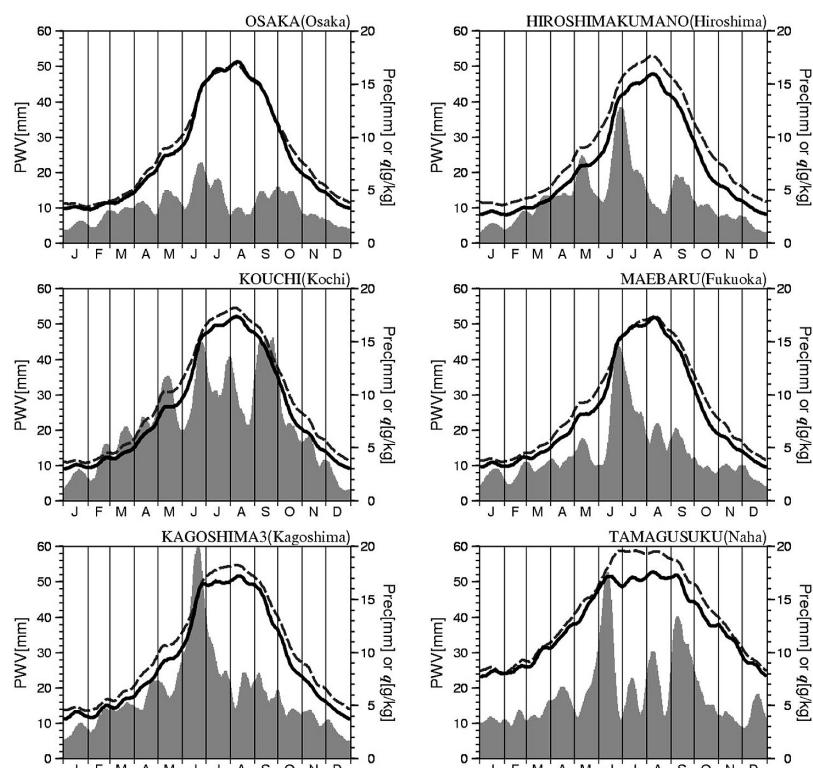
### 3.2 各観測点における GPS 可降水量変動

GPS 可降水量の季節変化の地域性を調べるためにあたり、藤部 (2006) の解析手法を踏襲して、可降水量の13年間の日別単純平均値に11日移動平均を2回施し平滑化を行った。可降水量を気温、地上混合比や降水量と比較するために、気象官署146地点に対して最寄りの GPS 観測点を140地点選出した（残りの6地点は欠測が多かったために除外した）。

第2図は西日本と南西諸島の主な観測点における GPS 可降水量の季節変化を示したものである。併せて同様に平滑化した地上混合比と降水量も示す。全ての地点で可降水量は冬期から夏期に増加、夏期から冬期にかけて減少傾向を示し、8月初めに極大、1月、2月に極小となっている。極大値はどの観測点でも約50mm を示しており、那覇や鹿児島でみられるようにほぼ50mm が上限値とな

なっている。一方、極小値は西日本の観測点では約10mm、那覇では約23mm である。可降水量と地上混合比の変動傾向はよく対応している。

西日本の観測点の5月の可降水量に注目すると、冬期から春期にかけて増加していた可降水量は5月上旬から中旬にかけて一定値を保つ傾向を示しており、藤部 (2006) が指摘している少雨期の直前に GPS 可降水量にも特徴的な変動傾向が現れていることは興味深い。その後、梅雨のオンセットに伴い可降水量は急激に増加しており、梅雨の降水量が極大を示す時期までに20mm 以上増加している。梅雨明け後も可降水量は高い値を保ち続ける。もし GPS 可降水量変動から夏期を定義するならば、梅雨のオンセットから可降水量が減少し始めるまでの高い値（最大値が約50mm）を示す約2ヶ月間と言えるだろう。那覇は他の地点に比べて1年中高い値をとっているが、梅雨期の降水量が極大となる6月上旬に可降水量は約50mm に達し、その



第2図 西日本と南西諸島の代表観測点における GPS 可降水量（実線）と地上混合比（破線）、降水量（陰影）の季節変化（平滑値）。観測点は気象官署大阪、広島、高知、福岡、鹿児島、那覇とそれぞれの近傍の GPS 観測点大阪、広島熊野、高知、前原、鹿児島3、玉城。

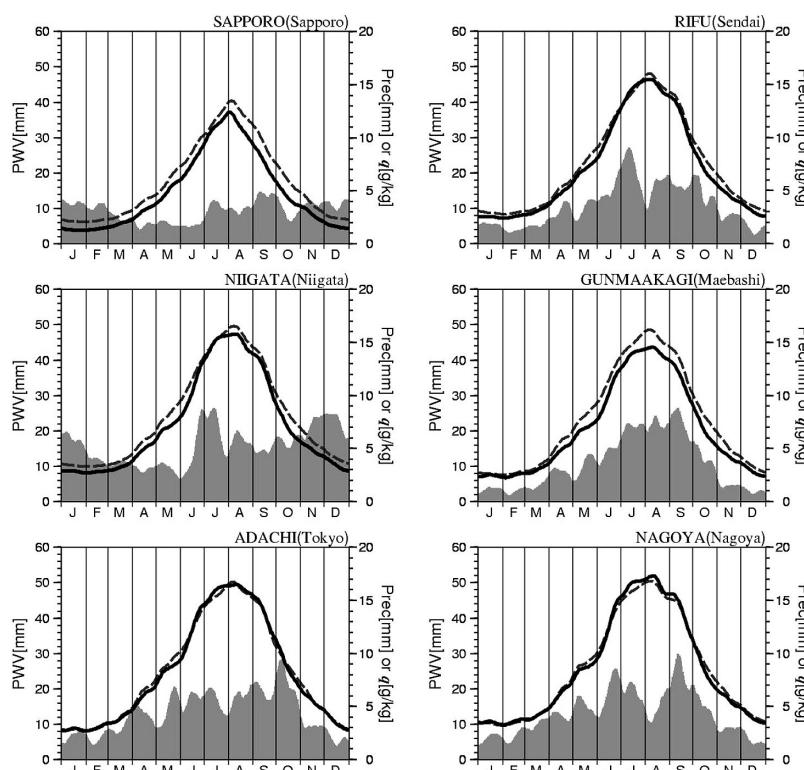
後 9 月上旬まで維持されている。可降水量から定義する夏期は那覇では約 3 ヶ月間と言える。那覇では 5 月初めに降水量の極小期がみられるが、これは南西諸島の梅雨入り（5 月上旬）に先立つ少雨期である（藤部 2006）。しかし、西日本の観測点でみられていた可降水量変化の停滞期は不明瞭である。

第 3 図は北日本、東日本の代表観測点における GPS 可降水量と地上混合比、降水量の季節変化を示したものである。西日本で顕著であった 5 月末の少雨期や梅雨期の降水量の極大は共にいずれの地点においても不明瞭になっている。西日本の 5 月にみられていた可降水量の停滞傾向は関東や名古屋の観測点では不明瞭ながらもみられるが、北に位置する観測点ほど不明瞭になり、札幌では全く見られない。一方、札幌や仙台の観測点では梅雨期に可降水量が急増する様子も見られず、札幌では 8 月初めの極大までほぼ単調に増加し、極大後は単調に減少するという極大期を境にした対称的な季節変化をしている。他の特徴としては、

仙台や東日本の観測点で 9 月中旬頃に可降水量が急減している。また、降水量の季節変化にも顕著な地域性がみられる。東京や前橋は梅雨期間を容易に判別できない。特に前橋は梅雨明け後の 7 月末から 8 月初めの降水量の減少が全く見られず、盛夏期の熱雷による降雨など地域的な要因が関係していると思われる。

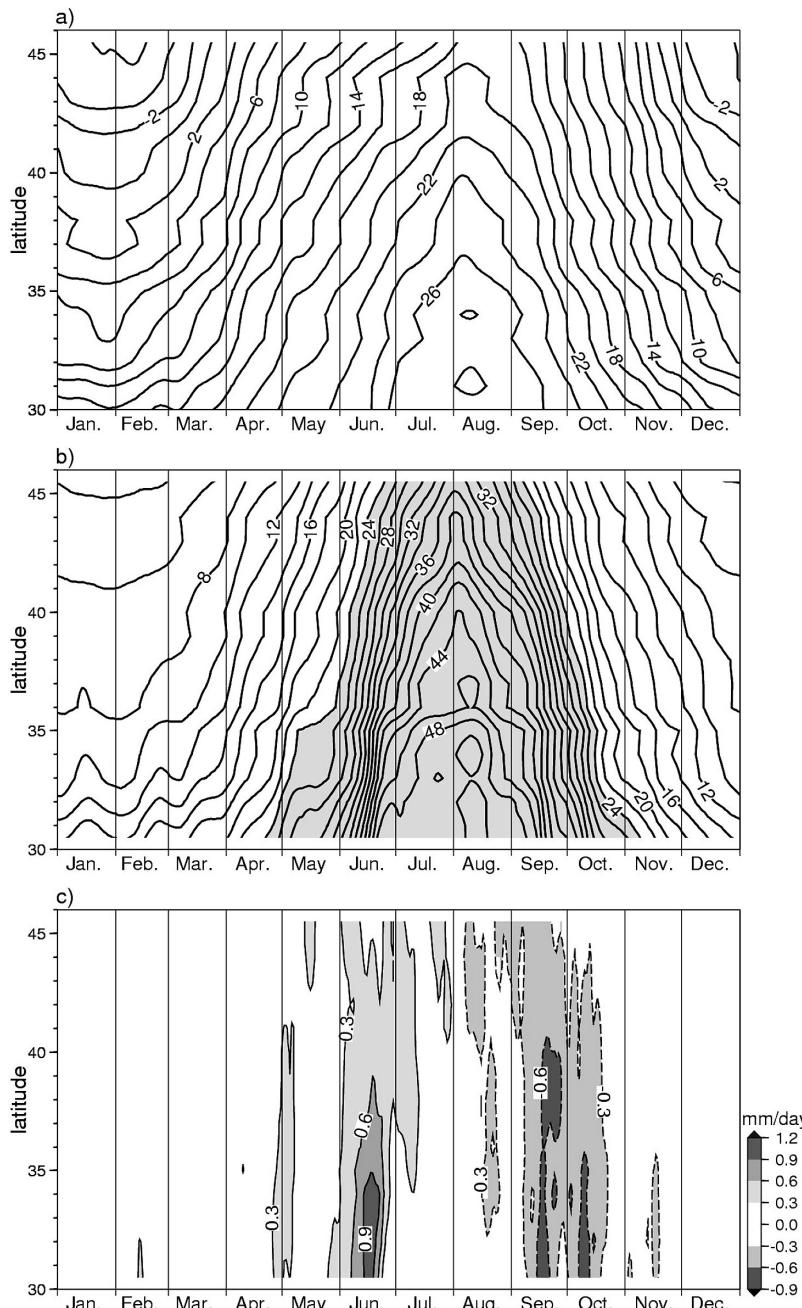
### 3.3 GPS 可降水量の季節変動の南北差

3.1 節で述べたように、GPS 観測地点の標高の違いによる可降水量の差異などが見受けられるが、可降水量の季節変化は南北で大きく異なる特徴がみられていることから、緯度-時間断面図でその差異を比較する。第 4 図 b は GPS 可降水量（140 地点）の緯度-時間断面図である。月平均気候分布（第 1 図）と同様に、北日本に比べて南西日本が夏期に 15mm、冬期に 10mm 程度可降水量が高い。また、夏期と冬期は可降水量の変動は小さく、春期、秋期にそれぞれ増加・減少を示していることが緯度-時間断面図からも確認できる。5 月の可降水量の停滞期は北緯 36 度以南の地域



第 3 図 第 2 図と同様。ただし、北日本、東日本の観測点で、気象官署札幌、仙台、新潟、前橋、東京、名古屋とそれぞれの近傍の GPS 観測点札幌、利府、新潟、群馬赤城、足立、名古屋。

で明瞭で、24mm~30mm 前後の値となっている。6 月は等値線が密で、梅雨オノセッタ期に可降水量が急増している様子がみられる。梅雨明け後の 7 月、8 月の盛夏期には、北緯 40 度以南の地域で 40mm 以上の領域が広がっており、北緯 35 度以南では 8 月上旬、中旬に 50mm 程度の極大値を示している。北緯 41 度以北の北海道の緯度帯では 8 月初めを極大（約 34mm~40mm）として、可降水量の増加期と減少期に二分されており、対称的な季節変化をしている。一方、気象官署（146 地点）の地上気温の緯度-時間断面図（第 4 図 a）をみると、可降水量と同様に 8 月上旬に極大、1 月、2 月に極小を示しているが、6 月の急激な可降水量の急増に対応するような変化はみられず、むし



第4図 a:気象官署における地上気温の緯度-時間断面図。等值線は $2^{\circ}\text{C}$ 間隔。b:GPS観測点におけるGPS可降水量の緯度-時間断面図。等值線は $2\text{ mm}$ 間隔で、 $24\text{ mm}$ 以上の領域を陰影で示す。c:b図と同様。ただし、GPS可降水量の日別変化率。陰影と等值線は $0.3\text{ mm/day}$ 間隔で、等值線は正値が実線で、負値は破線。

ろ、4月上旬や秋期に等值線が密になっている。可降水量とは対照的に冬期に気温の南北差が大きくなっている。

第4図cはGPS可降水量の日別変化率( $\text{mm/day}$ )の緯度-時間断面図である。ここで、ある日の可降水量の変化率は、前後の日の可降水量の差をとつて2で除して求めている。

6月にみられる変化率の極大は梅雨オンセット時の可降水量の急増を説明しており、北緯 $35^{\circ}$ 度以南の西日本では $0.9\text{ mm/day}$ を超える領域が拡がっている。秋期の可降水量の減少期には $-0.6\text{ mm/day}$ 以下の領域が2回出現しており、9月中旬のそれは北緯 $40^{\circ}$ 度以南の地域、10月上旬は北緯 $35^{\circ}$ 度以南に広がっている。

#### 4. 梅雨期と秋期のGPS可降水量変動

##### 4.1 梅雨期のGPS可降水量変動

西日本で梅雨オンセット期に急激な可降水量の増加がみられたことから、その原因を明らかにするために、代表観測点として福岡の5月～7月のGPS可降水量とゾンデ可降水量の時系列を第5図に示す。第5図aをみると、九州北部の平年の梅雨入りは気象庁によると6月5日頃となっているが、降水量は少し遅れて増加し始め、6月26日に最大となっている。GPS可降水量は5月10日

～5月17日の停滞期以降、次第に増加し始めており、降水量増加の開始と比べて20日ほど早い。一方、可降水量変化率は急激に大きくなり、6月17日に極大（約1.2mm/day）に達し、降水量の極大日に比べて10日ほど先行している。これらの特徴は他の西日本の観測点でも同様にみられている。大気循環の観点から梅雨の気候学的特徴を調べた Kawamura and Murakami (1998) によれば、梅雨のオンセットは第33半旬（6月10日～14日）と定義されており、西日本の可降水量の急増の開始とほぼ対応する。また、この時期はフィリピン海周辺の対流活動の活発化に伴う日本南方海上における局所的な高気圧の強化によって、太平洋高気圧の西縁に沿って多量の水蒸気が西日本に向かって輸送されている。第5図aはその現象の一端を捉えているとも言える。

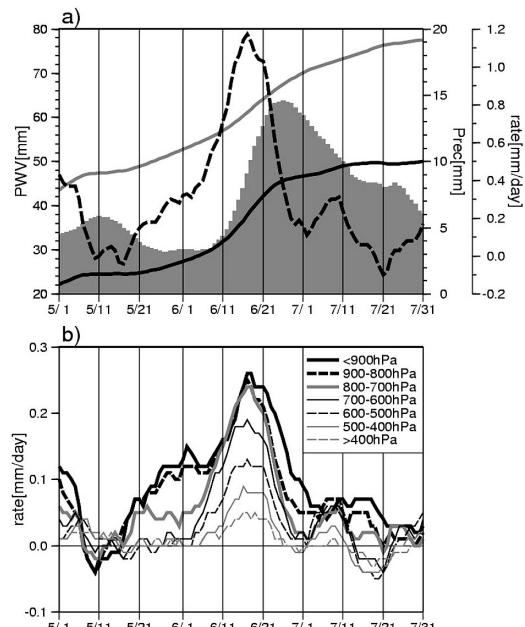
ラジオゾンデデータから計算したゾンデ可降水量でも GPS 可降水量と同様の変動傾向がみられている。一方、この期間で飽和可降水量（各高度の飽和比湿の鉛直積分で定義）は比較的単調に増加していることから（第5図a）、梅雨のオンセットと共に相対可降水量（飽和可降水量に対する可降水量の割合；新村ほか 2000）は大きくなり、オンセット前と比べて湿潤な状態になっていることが伺える。各層のゾンデ可降水量の日別変化率（第5図b）は GPS 可降水量のそれと同様に6月17日に極大となっている。しかし、5月18日頃からオンセット直前までの期間において、700hPa～800hPa高度以下の下層では可降水量の増加が既に始まっているのに対して、700hPa～800hPa高度以上では変化率はほぼ0mm/dayとなっており、GPS 可降水量でみられていたオンセット前の漸増傾向は下層の水蒸気量の増加を捉えていることが示唆される。

藤部（2006）は、5月後半に相当温位の南北傾度が八丈島～父島間で強まるのに対して、本州付近では弱まる事を示している。地上天気図から気圧配置型の季節推移を統計的に調べている吉野・福岡（1967）や山川（1988）は第28半旬（5月16日～20日）に、吉野・甲斐（1977）では5月27日に日本の南方に梅雨前線が現れる気圧配置型が卓越しており、いわゆる走り梅雨となりやすいことを述べている。地上天気図を用いて前線分布から日本の季節進行を調べている高橋（2009）でも、第29～32半旬（5月21日～6月9日）に日本の南で前線の出現率が高い型が卓越することを示している。5月18日頃から梅雨オンセット前までの

GPS 可降水量の漸増は下層に限定されるが、この現象は日本の南方に梅雨前線が形成されることによって、南方からの水蒸気移流が西日本におよんでいることを示していると思われる。

梅雨前線の北上に伴い梅雨入りすると、梅雨前線帶上の対流活動によって下層の水蒸気が持ち上げられ、対流圈中層の水蒸気量が増加し始める（加藤 2007ほか）。対流圈下層では太平洋高気圧西縁に沿う水蒸気輸送と南アジアやインド洋起源の水蒸気輸送（Hirakawa *et al.* 2011）により常に水蒸気が供給されている。これらの様子はゾンデ可降水量の変動に現れており（第5図b），GPS 可降水量の増加が極大に達するのは全層の水蒸気量の増加が極大となる時である。そして、相対可降水量が大きくなり、降水量の極大日に近づくにつれて凝結過程が進行することで、逆に可降水量の増加率は抑制されると考えられる。

一方、梅雨明け頃は GPS 可降水量にもゾンデ可降



第5図 a: 5月から7月のGPS観測点前原のGPS可降水量（黒実線）とその日別変化率（破線）、および気象官署福岡の降水量（陰影）と高層気象観測点福岡のラジオゾンデデータから計算した飽和可降水量（灰色実線）。b:a図と同期間の高層気象観測点福岡のラジオゾンデデータから求めた各層のゾンデ可降水量の日別変化率。

水量にも特徴的な変化は見られず、梅雨オンセット時とは対照的である。

#### 4.2 秋期の GPS 可降水量変動

梅雨期には西日本の可降水量の急増が特徴的に現れていたが、対照的に、盛夏期以降の可降水量減少期には西日本では2回、東日本では1回の急激な減少が生じておらず、季節変化の非対称性がみられていた（第4図b）。全国規模でみられた9月中旬の可降水量の減少の実態を詳しく見るために、第6図に仙台における8月から10月までのGPS可降水量とゾンデ可降水量の時系列を示す。第6図aをみるとGPS可降水量変化率の極小値は9月21日前後の数日間持続しており、可降水量が急減している様子がわかる。このような特徴は他の東北地方の観測点でもみられる。各層のゾンデ可降水量の日別変化率（第6図b）をみると9月中旬の可降水量の減少は対流圏下層を中心として生じておらず、700hPa～500hPa間の気層でも前後の期間と比べて比較的減少量が大きいことが伺える。

山川（1988）は第53半旬（9月18日～22日）に移動性高気圧型の気圧配置型が急増していることを見出

ており、吉野・甲斐（1977）でも、9月20日、10月3日に移動性高気圧型の出現が多いことを指摘している。本研究の解析期間内の9月21日前後の地上天気図を確認してみると、移動性高気圧が日本を横断する様子がたびたび見られており、大陸起源の寒冷かつ乾燥な移動性高気圧の通過に伴って可降水量が全国規模で急減していることが示唆される。

#### 5.まとめ

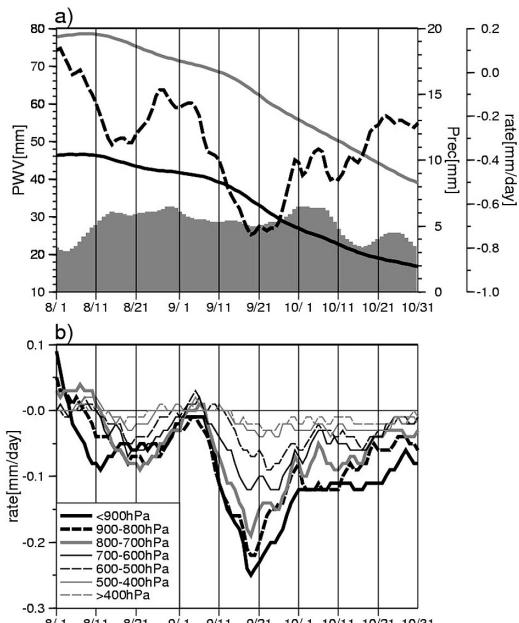
1997年から2009年までの期間についてGPS可降水量を算出し、日本国内の可降水量の季節変化と地域的差異について調べた。

西日本の観測点では、GPS可降水量は冬期から春期にかけて増加するが、5月末の少雨期の直前に停滞する傾向を示し、その後梅雨オンセットと共に約20mm増加し、盛夏期にかけて約50mmの高い値を示していた。オンセット前に既に700hPa～800hPa高度以下の対流圏下層で水蒸気量が漸増し始めており、オンセットと同時に、下層に限定されていた豊富な水蒸気が対流圏中層に輸送され、全層で水蒸気が増加し始めた結果、可降水量が急増することが見出された。東日本の観測点ではこのような傾向が不明瞭になり、北日本では可降水量は単調に増加する傾向となっていた。一方、9月中旬のGPS可降水量の減少期は梅雨のオンセット時のように西日本に顕在化することなく、東日本や北日本を含め、広い範囲で可降水量の減少が生じておらず、この時期に大陸起源の寒冷かつ乾燥した移動性高気圧が頻繁に日本付近を通過することによって可降水量が急減していたことが示唆された。

本研究では、可降水量の夏期前後の季節変化は西日本で非対称性が強く、対照的に、北海道では8月初めを極大とする対称性が強いことも見出された。また、GPS可降水量変動による夏期の定義やGPS可降水量の増加率で梅雨オンセットを定義できる可能性も示された。しかしながら、本研究の解析対象期間は13年に過ぎないため、今後統計期間を延ばして梅雨期や秋期の可降水量の変化を検証していく必要がある。梅雨等の経年変動の評価にも応用が期待されるが、GPS受信アンテナの更新に伴う対流圏遅延量推定値の系統的誤差を正確に見積もることが今後の課題の一つである。

#### 謝 辞

本稿の改訂にあたり、編集委員の小司禎教氏ならび



第6図 a: 第5図aと同様。ただし、期間が8月から10月で、GPS観測点利府と気象官署仙台。b: 第5図bと同様。ただし、期間が8月から10月で、高層気象観測点仙台。

に査読者の方から貴重なコメントとご助言を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- Amenu, G.G. and P. Kumar, 2005: NVAP and reanalysis-2 global precipitable water products: Intercomparison and variability studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **86**, 245–256.
- 藤部文昭, 2006: 本州～九州の梅雨入りに先立つ5月末ごろの少雨期. *天気*, **53**, 785–790.
- Hiraoka, A., R. Kawamura, K. Ichiyanagi, M. Tanoue and K. Yoshimura, 2011: Water origins over central and southern Japan during the early summer rainy season as simulated with an isotope circulation model. *SOLA*, **7**, 141–144.
- Jin, S.G. and O.F. Luo, 2009: Variability and climatology of PWV from global 13-year GPS observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47**, 1918–1924.
- 糟谷 司, 川村隆一, 2011: 中国・四国地方と瀬戸内海の夏季静穏日における GPS 可降水量の日変化と熱的局地循環. *天気*, **58**, 291–303.
- 加藤輝之, 2007: 梅雨前線帶と集中豪雨—積乱雲が発達するための条件—. *天気*, **54**, 395–398.
- Kawamura, R. and T. Murakami, 1998: Baiu near Japan and its relation to summer monsoons over Southeast Asia and the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 619–639.
- 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*, (202), 131–142.
- 新村典子, 佐々木太一, 木村富士男, 2000: 首都圏における GPS 可降水量と降水の統計的関係. *天気*, **47**, 635–642.
- 大橋喜隆, 川村隆一, 2006: 中部日本の夏季静穏日における GPS 可降水量の日変化. *天気*, **53**, 277–291.
- 小司禎教, 岩淵哲也, 畑中雄樹, 瀬古 弘, 市川隆一, 大谷 竜, 萬納寺信崇, 2009: GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究. *測地学会誌*, **55**, 17–38.
- 高橋信人, 2009: 前線分布でみた日本の季節進行とその近年における傾向. *天気*, **56**, 713–726.
- 山川修治, 1988: 東アジアにおける卓越気圧配置型の季節推移からみた近年の気候変動. *地理学評論*, **61**, 381–403.
- 吉野正敏, 福岡義隆, 1967: 半旬別の気圧配置ごよみ. *天気*, **14**, 250–255.
- 吉野正敏, 甲斐啓子, 1977: 日本の季節区分と各季節の特徴. *地理学評論*, **50**, 635–651.

## Characteristics in Seasonal Variations of GPS Precipitable Water in Japan

Tsukasa KASUYA\* and Ryuichi KAWAMURA\*\*

\* Graduate School of Science and Engineering for Education, University of Toyama (Present affiliation: NEC Software Chubu, Ltd., 500-20, Minamiyama, Komenoki-cho, Nisshin-shi, Aichi 470-0111, Japan).

\*\* (Corresponding author) Graduate School of Science and Engineering for Research, University of Toyama (Present affiliation: Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, 6-10-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka 812-8581, Japan).

(Received 30 January 2012; Accepted 17 July 2012)