

境界層内水蒸気がGPS大気遅延量に与える 影響に関する研究

大石哲・扇田尚紀*・中北英一・池淵周一・島田誠一**

* 京都大学大学院工学研究科

** 科学技術庁防災科学技術研究所

要 旨

大気と陸面の相互作用観測実験である琵琶湖プロジェクト'98で得られた、ドップラースーダとGPSのデータを用いて境界層内水蒸気変動がGPS大気遅延量に与える影響を、主としてフーリエスペクトルを用いた現象の時間スケール解析を通して考察した。その結果として、(1)ドップラースーダの鉛直風のフーリエスペクトルを用いることで、境界層内対流セルの発達を検出される可能性があること、(2)境界層内対流セルの発達に伴う水蒸気変動がGPS大気遅延量に与える影響は大きくなく、それよりも大きな時間スケールの水蒸気変動の影響を大きく受けていること、が示された。

キーワード：GPS, 大気遅延量, 大気境界層, 対流セル, 局地循環

1. 序論

近年、GPSを用いた測地誤差の主要因である水蒸気がGPSに与える影響を観測・解明することを通して、GPSから水蒸気情報を取り出して気象学・水文学に応用しようとするGPS気象学が発達してきている。日本型GPS気象学は測地学、気象学、水文学の強力な連携のもとに1年間の科学技術庁科学技術振興調整費フイービリティースタディー「GPS気象学による水蒸気情報システムの構築と天気予報・地震予知研究・陸水研究への応用に関する調査」(平成8年度)の後、3年間の科学技術庁科学技術振興調整費「GPS気象学: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」(平成9年度～平成11年度)へと移行して着実に成果を上げてきている。

水資源に関わる防災学にあつては、特にGPS気象学の応用として局地で生起するゲリラ的降雨の予

測精度向上に役立てる試みが最も興味深いところである。この研究は日本全域で1000点近い国土地理院のGPS観測ネットワークを有している利点を活かし、急峻な山岳地が連続することに起因する局地降雨の予測の困難さを克服するものとして、注目を集めている。

日本におけるGPSを用いた降雨予測精度向上を目指す研究として、Mannoji and Tada (1998) は20kmグリッドを持つ領域モデルに対し、GPS可降水量をデータ同化して用いた結果、予報結果が良くなったとはいえないがGPS可降水量が降雨量予測に影響を与えていると述べている。また、変分法を用いた4次元同化手法に應用して、降雨予測精度を上げる研究も行っている。この研究成果をルーチンの数値予報に適用するためには、データ収集時間の問題の他に、軌道決定が困難な形状をしているGPS衛星について、その軌道を短時間で正確に決定した上で、GPS天頂大気遅延量を求めて領域数値モデル

の計算開始に間に合わせなくては行けない。

そこで、畑中(1998)は領域数値モデルの4次元同化に間に合うGPS可降水量データを供給するために、予測軌道情報を使って190点のデータを用いたGPS準リアルタイム解析を行おうとしている。

また、GPS可降水量を用いて降雨を解析した事例として、中村ら(1997)は、梅雨前線帯の降雨についてメソ α スケールの視点で調査し、GPS可降水量は降雨の移流に対して3時間程度の先行時間をもって増加していることを示した。神田ら(1999)は東京湾周辺の集中豪雨に対して、GPS可降水量の変動について調査し、GPS可降水量が豪雨の移流に関する先行指標として有効であることを述べている。これらの研究は天頂方向水蒸気量の積分値である可降水量に着目しており、メソ α ~ β スケールの降雨の生起・発達と可降水量の間の物理的関係がGPSでよく観測できることを示している。

中村ら(1997)、神田ら(1999)の研究はGPS可降水量が狭域の降雨の先行指標として用いられることを示唆しているが、降雨に対する可降水量の増加の先行時間がメソ α スケールで3時間程度、メソ β スケールで1時間程度であるのであればGPS可降水量を用いた短時間降雨予測の実現は12時間に1度計算を行う領域数値モデルにGPS可降水量を用いる際の問題よりもさらに困難になる。したがって、GPSを直接短時間降雨予測に用いようとするれば、軌道情報の精度がGPS可降水量の降雨の先行指標としての能力にどの程度影響しているのかを調査すべきである。

そのために、水蒸気の変動スケールを把握した上で、それがGPSの大気遅延やモデル大気にどのような影響を与えているかを調査すべきである。その方法として、中村ら(1997)や神田ら(1999)は降雨バンドや積雲の発達に伴う可降水量変動がGPS可降水量に与える影響を調査するというアプローチを採っていると考えた方がよい。

その他にGPS気象学のアプローチとして、降雨時の水蒸気の異方性と異なる角度からの衛星情報を同時に受信するGPSの特性を活かして、水蒸気の鉛直構造を含めたメソ γ スケールの積雲の発達過程を調査する方法がある。

平原ら(1997)は4次元水蒸気トモグラフィ(断層撮影法)構想によって3kmより下の水蒸気について鉛直方向の構造を分析する計画を提案している。この手法は、大気を格子に分割し、様々な衛星からの電波を超高密度に展開した受信機にて受信し、それぞれの受信機で観測された大気遅延量の2重位相残差を、格子点に割り振ることにより各セルの屈折

率を求める方法である。また、島田ら(1998)は活発な前線下で見られたGPSデータの位相平均値からのずれのピークが、レーダーエコーや風向から推測される水蒸気のピークの移動と矛盾していないことを示している。同様の視点から大石ら(1998)はGPSの位相平均値からのずれを用いて降雨の影響による水蒸気擾乱を抽出する方法を開発し、数値実験とMUレーダーサイトでの観測結果を用いてその検証を行っている。

GPSでは水蒸気の経路積分量を求めることができ、その鉛直構造がわからないことがGPSを用いた水蒸気動態の解析にとっての問題点である。したがって、降雨予測のためにも、降雨時の水蒸気構造を探るためにも、相対的に大量の水蒸気が含まれており、さらに短い時間周期で変動していると考えられている大気境界層内について、それがGPSに与える影響をあらかじめ推定しておく必要がある。

そこで、本研究では降雨時の水蒸気構造解明を大きな目標とした上で、そこで必要になる高度2000m~6000mにおける水蒸気擾乱をGPSで抽出する可能性の調査のための基礎的検討として、大気境界層内の水蒸気変動がGPSに与える影響を調査する。具体的には、琵琶湖プロジェクト'98で観測された、ラジオゾンデ、ドップラーソーダ、GPSのデータを用いて、夏の大気境界層の水蒸気変動がGPS大気遅延量に与える影響を調査する。

2. 観測データおよび琵琶湖プロジェクトの概要

2.1 琵琶湖プロジェクト'98の概要

琵琶湖プロジェクトは全国の各分野からの水文研究者が一堂に会して議論し、衛星リモートセンシングやGISなどの最新の技術を駆使した共同観測・解析を行うことにより、水文学の新たな方向や飛躍をもたらすことを最も基本の目的として発足したプロジェクトである。その議論の中心とは、大気との相互作用という視点と言うまでもなく、洪水や水資源に関わる諸問題という視点をも考慮しながら、100kmスケールまでの流域水・熱循環のアップスケリングをはかることである。

琵琶湖プロジェクトが掲げている具体的な目的は、(1)衛星リモートセンシングデータの地上検証、(2)衛星データを用いた水文学抽出アルゴリズムおよびモデルの開発、(3)地表面-大気系の水文循環過程の相互作用の解明、(4)水文循環過程の時空間スケール効果の解明、(5)琵琶湖流域における水文循環モデルの作成、(6)種々の時間、空間スケールで得られる水文情報の水資源に関わる諸問題への活

用手法の開発, である。(中北・砂田, 1998)

本研究ではこの具体的目的のうち, (1)および(2)に相当するものとして, GPSによる大気中の水蒸気情報抽出を考察対象として琵琶湖プロジェクトに参加したものである。

琵琶湖プロジェクト'98は, 滋賀県北東部に日本全国から32名の研究者および学生を集めて7月26日から31日の日程で行われた。具体的には, 千葉大学, 埼玉大学, 広島大学, 財団法人日本気象協会関西本部, 愛媛大学, 名古屋大学, 徳島大学, 愛知工業大学, 山梨大学, 九州大学および京都大学が参加し, 滋賀県伊香郡木之本町および高月町, 同東浅井郡びわ町にて, リモートセンシングによる稲の活性度の抽出, 都市における熱・水フラックス観測, 水田における熱・水フラックス観測, GPSによる水蒸気情報抽出および山地林におけるフラックス観測装置設置を行った。

観測期間中の総観規模の大気の状態をFig. 1に示す。7月27日から28日前半までは琵琶湖域は低気圧に覆われており, 日照時間もほとんどなかった。7月28日後半から7月29日にかけては太平洋高気圧が徐々に張り出してきて天候も回復し, 日射量も増えて夏型の天気になった。また, 7月29日午後には琵琶湖北東部で, にわか雨を観測した。

2.2 観測データの概要

本研究では, 降雨時の高層水蒸気擾乱をGPSで抽出する可能性を調査するという目的に立脚して, 大気下層から高層までの気温・気圧・湿度プロファイルを測定するラジオゾンデ, 大気下層内の風の変動を測定するドップラーソーダおよびGPSによる観測を行った。それぞれの設置場所, 仕様等をTable 1に示した。

2.3 大気遅延量とGPS可降水量算出の基礎式

ここでは, GPSで観測できる電波の大気遅延量から可降水量に変換する式の説明を通して, GPSで水蒸気の観測が可能であることを説明する。大気が電波の伝搬に与える影響は, 大気屈折によって伝搬経路が曲率をもつ効果と, 伝搬経路上での電波の減速による効果に分けられる。前者は後者に対して3桁程度小さなオーダーの値となることから本研究では無視した。後者による遅延効果は, 電波が真空中を進む伝搬速度を用いるGPS解析では伝搬経路が伸びたことと解釈される。その経路増分は式(1)で表される。

$$\Delta L = \int_L (n(s) - 1) ds, \quad (1)$$

ここで, L は伝搬経路, $n(s)$ は L 上の点 s における大気の屈折率である。湿潤大気の屈折率はThayer(1951)によって式(2)として与えられる。

$$(n-1) \times 10^6 = K_1(P_a/T)Z_a^{-1} + K_2(e/T)Z_w^{-1} + K_3(e/T^2)Z_w^{-1}, \quad (2)$$

ここで, P_a は乾燥大気の気圧, e は水蒸気分圧, T は絶対温度, Z_a , Z_w はそれぞれ乾燥大気, 水蒸気の圧縮因子である。 K_1 , K_2 , K_3 はOwens(1967)よりそれぞれ, 77.6, 64.79, 3.754×10^5 とした。これらの係数の誤差による影響は大気の屈折率に対し4桁程度小さな値であったので本研究では無視している。

式(2)の右辺第2, 第3項は水蒸気の影響で生じる湿潤遅延である。また, 式(2)の右辺第1項で表される乾燥大気の影響による遅延は静水圧遅延と呼ばれる。

GPSから得られた天頂大気遅延量から, 式(3)によって地上気圧から求められる天頂静水圧遅延量を引いた差である天頂湿潤遅延量を, 式(4)に当てはめることによって天頂可降水量が計算される。

$$ZHD = \frac{k_1 \cdot R_d}{g} \cdot P_0 \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$PWV = ZWD \times \frac{10^5}{R_v(k_2 + \frac{k_3}{T_m})} \quad (4)$$

ここで, k_1 , k_2 , k_3 はそれぞれ, 77.604 [K/hpa], 64.79 [K/hpa], 3.776×10^5 [K^2 /hPa]の値を持つ定数, R_d は乾燥空気の気体定数, R_v は水蒸気の気体定数, g は重力加速度, P_0 は地上気圧である。 T_m は大気の鉛直方向の加重平均気温であり, 地上気温 T_s を用いた式(5)で代用することが多く, 本研究でも式(5)を用いる。

$$T_m = 70.2 + 0.72T_s \quad (5)$$

2.4 GPS可降水量算出方法

本研究ではMITとスクリプス海洋研究所が開発したGPS解析ソフトGAMITを用いてGPSデータの解析を行った。GPSの解析手順は主として島田(1998)を参考にしている。すなわち, まず日本を囲む5点のIGS観測点のデータとともに本研究で取得したデータの測地解を求めた。測地解算出の際には, 位置に関する拘束条件を少しずつ厳しくしていった最終的にPostfit Normal値で0.215のところまでそれを最終測地解とした。一般的にPostfit Normal値は0.4以下であれば問題ないとされている。次に, 最終測地解で固定したまま大気遅延量を算出した。

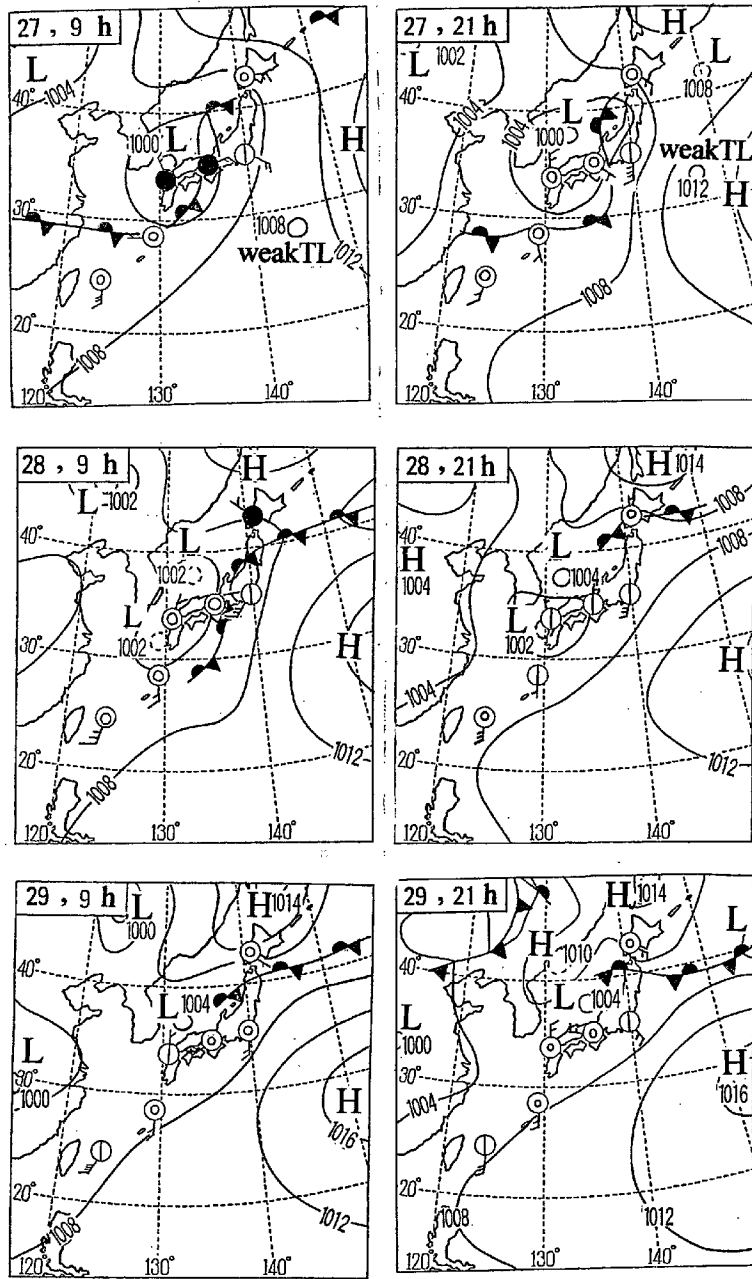


Fig. 1 Weather map on July 27-29, 1998.

本研究では天頂大気遅延量は30min毎に値を求めている。Fig. 2に示すように、天頂大気遅延量は観測されている全ての衛星についての大気遅延量を考慮して30min毎に算出されるモデルの出力である。一方、観測では最低4つの衛星からの電波を受信しているので、それぞれの衛星からの大気遅延量が存在する。これを視線方向大気遅延量と呼ぶ。GAMITは、それぞれの衛星からの大気遅延量を出力することができ、それは衛星の視線方向大気遅延量から天頂遅延量をひいた差という意味で残差

データと呼ばれる。本研究では、理論上電離層の影響を受けていないLC波の残差データを用いた。残差データの単位はサイクルであり、本研究では衛星の仰角の正弦を乗じて正規化している。残差データからおおよその水蒸気量の経路積分値を求めるには、まずLC波の波長(0.484m)を乗じて長さの単位とした上で、さらに式(4)に地上気温300K、地上気圧1000hPaを与えて得られる0.15を乗ずればよい。

Table 1 Phenomena collected by the Biwako project '98 which is used in this study,

Phenomena	Observation Location	Maker of Device
Observation Period	Observation Interval	Name of Device
Vertical Profile of Temperature, Relative Humidity and Pressure (upto 200hPa)	Sports' Forest at Biwa-cho	VISALA
July 27, 0hr - July 29, 21hr	3hr	Radio Zonde RS-80
Vertical Profile of Temperature, Relative Humidity and Pressure (upto 600hPa)	Senda Farm at Kinomoto-cho	KAIJO
July 27, 0hr-July 29, 15hr	3hr	Radio Zonde JWA-89W
Atmospheric Delay of GPS	Senda Farm at Kinomoto-cho	ASHTECH
July 27, 0hr - July 30, 0hr	30sec	Chokering Antenna and Z-12 (1E93)
Vertical Profile of Vertical Wind	Senda Farm at Kinomoto-cho	KAIJO
July 27, 0hr - July 29, 15hr	50-60 sec	Phased Array Dopplar Sordar
Temperature, Relative Humidity and Pressure	Senda Farm at Kinomoto-cho	
July 27 - July 29, 15hr	1min	

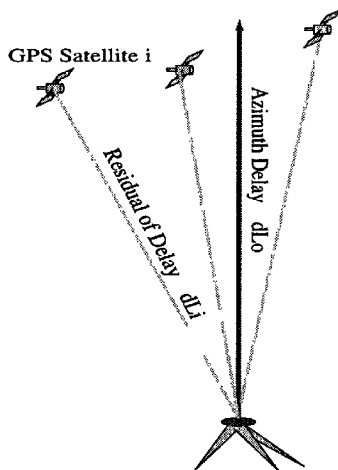


Fig. 2 Schematic figure of zenith delay and satellite view delay of GPS.

3. GPS 大気遅延量に与える大気境界層内水蒸気変動

3.1 ラジオゾンデから得られた水蒸気可降水量と GPS 可降水量の比較

琵琶湖は周囲を山に囲まれた盆地地形の盆底に存在するので, Kuwagata and Kimura (1995) によれ

ば局地循環の影響で Fig. 3 に示すような可降水量の日変化を示す。琵琶湖プロジェクト'98 で取得された 200hPa までのラジオゾンデデータによる水蒸気可降水量を Fig. 4 に示す。2.1 で述べたように琵琶湖プロジェクト'98 では静穏な夏日になったのは 7 月 29 日だけであったので, 局地循環の影響による可降水量の日変化はその日だけに見える現象であった。一方, 静穏な夏日に観測を行った琵琶湖プロジェクト'96 で取得された 600hPa までのラジオゾンデデータによる水蒸気可降水量を Fig. 5 に示した。ここで, 600hPa までのデータを用いた理由は, 琵琶湖プロジェクト'96 では低層ゾンデを用いていたので, 600-200hPa のデータは存在しないためである。琵琶湖プロジェクト'96 の可降水量変動からは局地循環の影響による日中の可降水量減少を見ることができる。したがって, 本研究の観測地点は静穏な夏日であれば盆地底部特有の局地循環の影響を受ける場所であるといえる。

ラジオゾンデで観測された水蒸気量を, 下層対流セルが発達する混合層 (920hPa), 周囲の山岳の高さを考慮して局地循環が生起している境界層 (770hPa) およびそれより上空の 600hPa までと 200hPa に分けて鉛直積分量を求めたものを Fig. 6 に示した。1996 年全データおよび 1998 年 7 月 29 日のデータに見ら

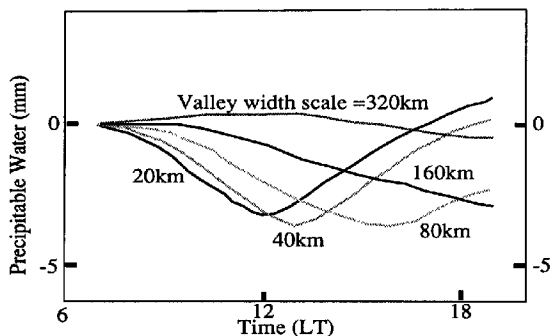


Fig. 3 Time series variation of the precipitable water at the valley bottom.

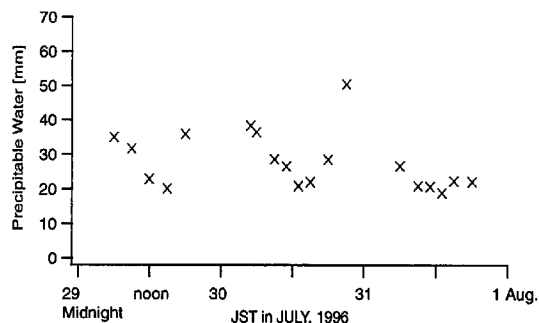


Fig. 5 Precipitable water observed by radio sonde in Biwako Project '96.

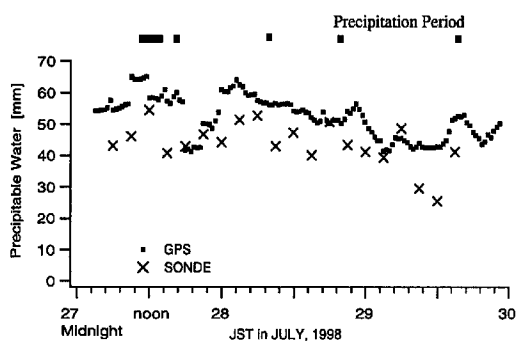


Fig. 4 Precipitation period (marked in the upper part) and precipitable water observed by GPS, Radio sonde in Biwako Project '98.

れるように、静穏な夏日であれば対流セルの影響を受ける920hPa以下(細実線)と局地循環の影響を受ける920-770hPa(太実線)における水蒸気量の日内変動が大きく、それより上層の770hPa-600hPa(細波線)や600-200hPa(太波線)などの上層の水蒸気量の日内変動はそれほど大きくない。一方、1998年7月27日および28日のデータに見られるように雨がちな日には下層はほぼ飽和に近い状態で推移するため、水蒸気量の日内変動は大きくないが、上層の水蒸気は大きく変化する。したがって大気境界層における水蒸気動態を調査するためには静穏な夏日で調査する必要がある。

また、Fig. 4にはラジオゾンデから得られた水蒸気可降水量とGPS可降水量の比較も示している。ここではOhtani and Naito (1998)が示すラジオゾンデとの比較がRMSで3mm以内になるような良い結果は得られなかった。その原因としては、日本時間で9:00~12:00の間の約40分間にGPS衛星から良い状態で電波を受けていないことがあげられる。

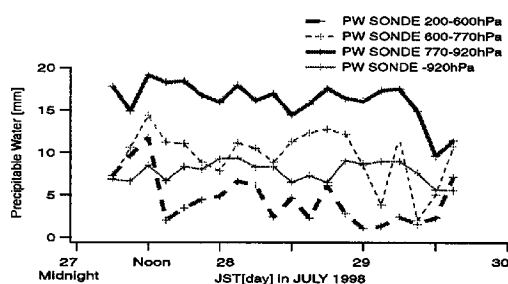
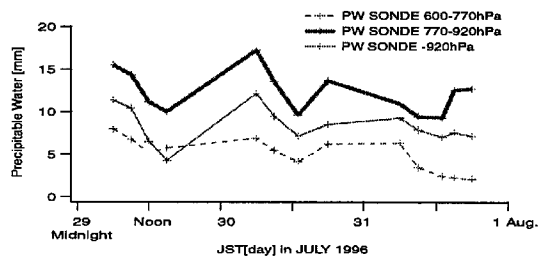


Fig. 6 Precipitable water of each atmospheric layer observed by radio sonde.

3.2 大気境界層における対流セルの形成がGPS大気遅延量に与える影響

本節ではドップラーソーダで観測された鉛直風速、およびGPS大気遅延量残差に仰角の正弦を乗じて正規化したデータに対して、フーリエスペクトルを算出して、観測されている現象の時間スケールに対する考察を行うことにより、大気境界層内水蒸気変動がGPS大気遅延量に与える影響を考察した。

ここではまず、高度100mにおけるドップラーソーダの鉛直風速の3時間ごとのフーリエスペクトルより、静穏な夏日の境界層内対流セルの生起について論じる。境界層内対流セルとはFig. 7に示したように、日射による地表面温度の上昇を主要因として、高度1000m(この時には約920hPa)程度まで発達す

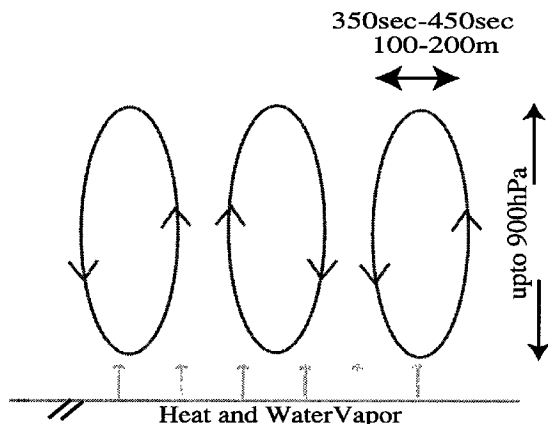


Fig. 7 Schematic figure of convective cells in boundary layer.

る対流セルのことである。対流セルの時空間スケールは岩田(1997)が琵琶湖プロジェクト'96において、ドップラーソーダを用いて観測したものを参照している。続いて、GPS残差データのフーリエスペクトルから、GPS残差データを用いることで観測可能な水蒸気擾乱の時間スケールについて考察する。

高度100mにおけるドップラーソーダの鉛直風速のフーリエスペクトルをFig. 8に示す。この図より、03-06hrでは大気境界層の乱れが少なく、06-09hrで乱れが現れてくる。09-12hrになると境界層の乱れは最大になっていることがわかる。注目すべきは、09-12hrでは8-10mHz(125-100secの周期)を持つ乱れが2-4mHz程度(500-250sec程度の周期)を持つ乱れと同様の大きさを持つことである。このことは境界層内の対流セルが生起し、それが成長していく状態を示していると考えられる。12-15hrになると8-10mHz(125-100secの周期)を持つ乱れは振幅を小さくして、2-3mHz(500-300secの周期)の乱れの振幅だけが大きいまま残っていることである。このことは、すでに境界層内に十分成長したセルだけが存在していることを示していると考えられる。

ドップラーソーダで観測される鉛直風速のフーリエスペクトルを用いることによって、境界層内対流セルの生起・発達を観測することの可能性を示すことができた。この方法は風向ベクトルの矢印表示による対流セルの観測と比べて、計算機を用いた応用し易さの点で優れている。

次に、GPS大気遅延量残差に仰角の正弦を乗じて正規化したデータのフーリエスペクトルをFig. 9, Fig. 10, Fig. 11に示す。ここで観測期間中の全期間において9-12hrでは十分な精度のGPS大気遅延

延データを算出することができなかった。24時間程度の周期をもって観測精度が低下しているため、衛星位置と観測場所の関係によるものと考えられる。

Fig. 9~Fig. 11から、GPSでは3mHz(300sec程度の周期)よりも大きな周波数を持つ擾乱に対しては、ほとんど感度がないことがわかる。したがって、GPS大気遅延量の残差データのフーリエスペクトルからは、ドップラーソーダで見たような周波数が日変化する乱れを見ることは出来ない。同時に、GPS大気遅延量残差データからは3mHz(300sec程度の周期)よりも小さな周波数をもつ水蒸気擾乱を抽出することが十分に可能である。積雲のような対流性の雲からの降雨は約15-20min程度続くので、それによる水蒸気擾乱の時間スケールはGPS大気遅延量残差データで見ることが出来る周波数帯に入ってくる。したがって、本結果は降雨時の2000m~6000mにおける水蒸気擾乱抽出を目指す大石ら(1997)の手法の実現可能性を支持するものである。

一方、GPSの残差データのフーリエスペクトルを見ると1-2mHz程度(1000-500sec程度の周期)を持つ擾乱が卓越していることがある。また、GPS残差データのフーリエスペクトルを比較すると1-2mHz程度の成分が大きい日とそうでない日がある。JUL27,15-18hr, JUL28,15-18hrでは値は大きいのにJUL29,15-18hrはそうではない一方で、JUL27,06-09hrでは小さいがJUL29,06-09hrでは大きな値をとっている。この値の変化は何かの指標であると考えられるので、降雨をもたらず雲の進入などと絡めて、激しい降雨があった場合と全く降雨がない夏日で比較して考察を行う計画である。

4. 結論

大気と陸面の相互作用観測実験である琵琶湖プロジェクト'98で得られた、ドップラーソーダとGPSのデータを用いて境界層内水蒸気変動がGPS大気遅延量に与える影響を、主としてフーリエスペクトルを用いた現象の時間スケール解析を通して考察した。

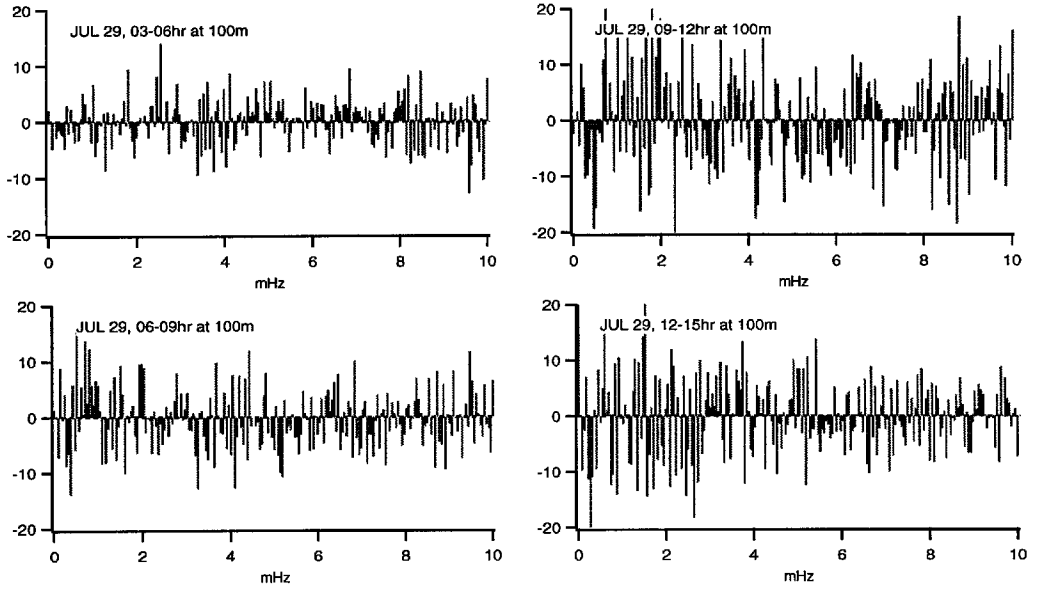


Fig. 8 Spectrum of vertical wind at 100m height observed by doppler sodar.

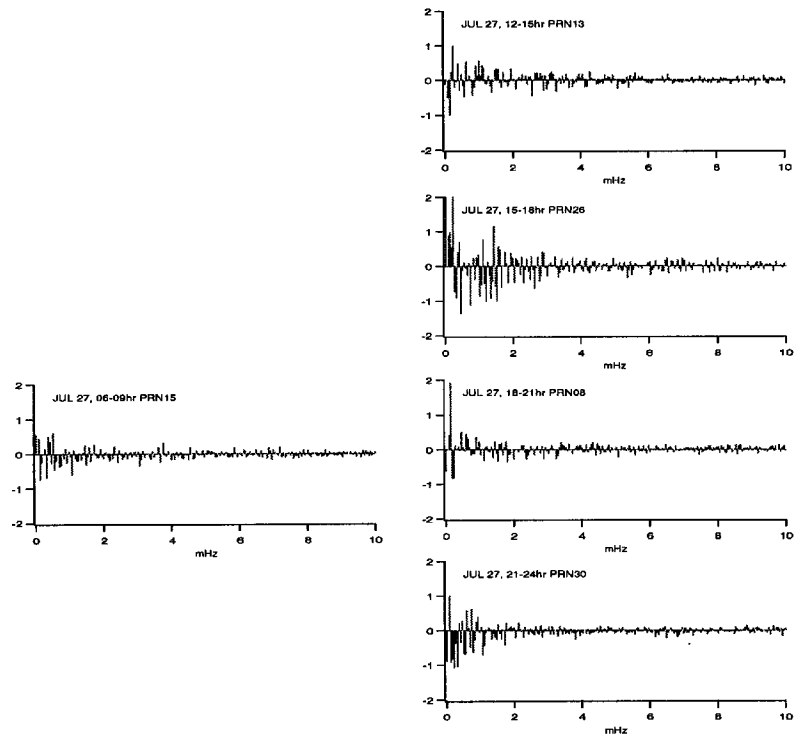


Fig. 9 Spectrum of GPS residuals. The PRN number means one of the GPS satellite. (July 27, 1998 JST)

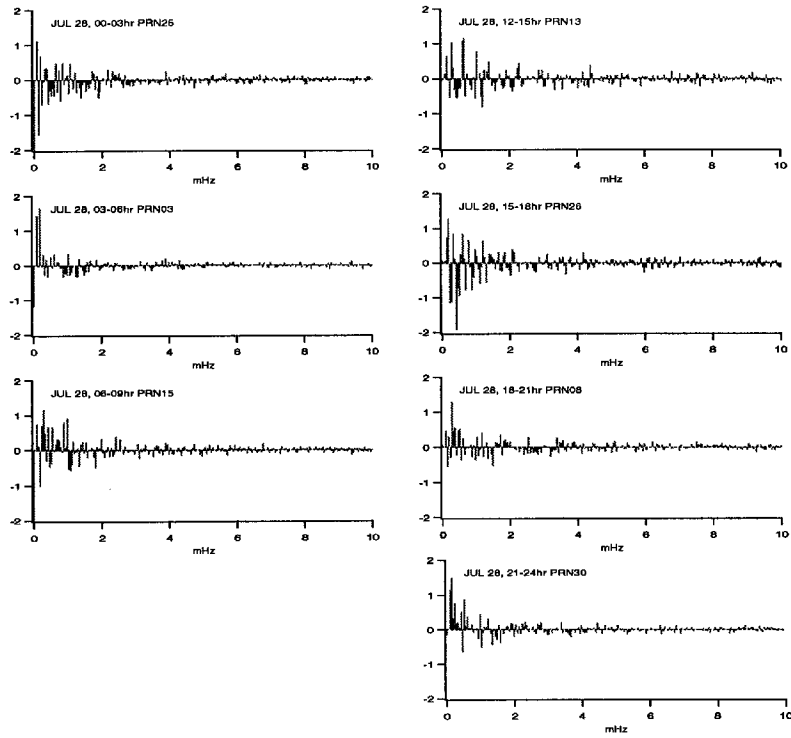


Fig. 10 Spectrum of GPS residuals. The PRN number means one of the GPS satellite. (July 28, 1998 JST)

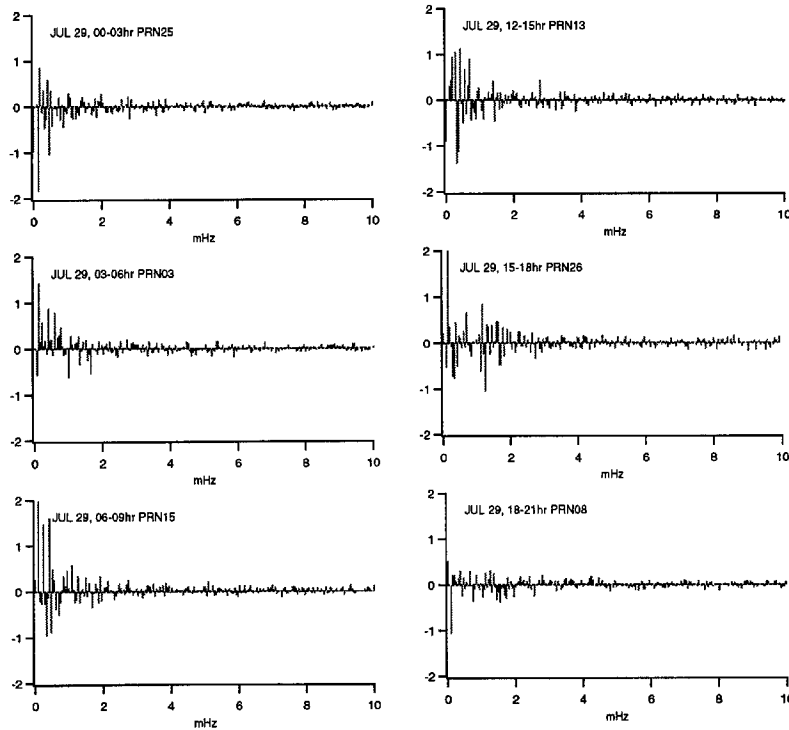


Fig. 11 Spectrum of GPS residuals. The PRN number means one of the GPS satellite. (July 29, 1998 JST)

まず、GPSでは水蒸気の経路積分量を求めることができ、その鉛直構造がわからないことがGPSを用いた水蒸気動態の解析にとっての問題点であることを指摘した。したがって、降雨予測のためにも、降雨時の水蒸気構造を探るためにも、相対的に大量の水蒸気が含まれており、さらにそれが短い時間周期で変動していると考えられている大気境界層内について、それがGPSに与える影響をあらかじめ推定しておく必要があることを論じ、本研究の位置づけを述べた。

続いて、ラジオゾンデから得られる層毎の可降水量の時系列から、静穏な夏日であれば下層水蒸気分布の日変化が卓越しており、雨がちになると上層水蒸気分布の変化が卓越することを確認した。

最後に、ドップラーソーダで観測される鉛直風速のフーリエスペクトルを用いることによって、境界層内対流セルの生起・発達を観測することの可能性を示した。この方法は風向ベクトルの矢印表示による対流セルの観測と比べて、計算機を用いた応用し易さの点で優れている。また、GPS大気遅延量残差に仰角の正弦を乗じて正規化したデータのフーリエスペクトルから、GPSでは3mHzよりも大きな周波数を持つ擾乱に対しては、ほとんど感度がないことを示した。したがって、GPS大気遅延量残差データからは3 mHzよりも小さな周波数をもつ水蒸気擾乱を抽出することは十分に可能であり、降雨時の水蒸気擾乱抽出の可能性があることを示した。

以上で本論文の結論とする。

謝辞

本研究は科学技術庁科学技術振興調整費「GPS気象学：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」、科学研究費補助金基盤研究「衛星同期集中／常時共同観測による水・熱循環過程のスケール効果解明に関する総合研究 - 琵琶湖プロジェクト第2ステージ -」（代表 中北英一）より援助を受けて研究を行ったものです。また、ドップラーソーダのデータは中央大学工学部山田研究室にいただきました。ラジオゾンデ観測にあたって、財団法人日本気象協会関西本部と共同で観測をさせていただきました。ここに記して、感謝いたします。

参考文献

- 岩田徹(1997)：ドップラーソーダで測定した境界層低層の大気構造の研究，京都大学大学院理学研究科修士論文。
- 大石哲・中北英一・池淵周一(1997)：GPSを用いた積雲スケールの水蒸気擾乱抽出手法に関する研究，土木学会水工学論文集，pp.13-18。
- 神田学・石田知礼・大石哲(1999)：首都圏における雷雨性集中豪雨とGPS可降水量の時空間変動—1997年8月23日の集中豪雨の事例解析—，天気（投稿中）。
- 島田誠一・青梨和正・T.A.Herring・R.W.King(1998)：GPSデータのone-way残差による水蒸気の時空間分布，GPS合同シンポジウム講演会概要集，p.88。
- 島田誠一(1998)：GAMITソフトウェア，気象研究ノート第192号GPS気象学，pp.78-88。
- 中北英一・砂田憲吾(1998)：琵琶湖プロジェクトについて，水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ，pp.1-12。
- 中村一・青梨和正・藤部文昭・瀬古弘・小司偵教(1997)：GPS大気遅延量推定に及ぼすローカルな水蒸気量変動の評価に関する研究，GPSによる日本列島の水蒸気可降水量情報のデータベース化と気象学，環境科学，水文学などへの利用に関する研究会，pp.7-10。
- 畑中雄樹(1998)：GPS高速解析システムの開発—レビューと我々の取り組みの現状—，GPS合同シンポジウム講演会。
- 平原和朗・津田敏隆・宮崎真一・畑中雄樹(1997)：国土地理院全国GPS観測網を用いた大気トモグラフィ構想，GPSによる日本列島の水蒸気可降水量情報のデータベース化と気象学，環境科学，水文学への利用に関する研究会要旨集，pp.57-59。
- Kuwagata, T. and F. Kimura (1995)：Horizontal heat fluxes over complex terrain computed using a simple mixed-layer model and a numerical model, *Journal of Applied Meteorology*, pp 1082-1091.
- Mannoji, N and H. Tada (1998)：An Impact of Precipitable water Estimated from GSI-GPS data on NWP, *Proceedings of the Workshop 'GPS/MET Japan Has Come!'*, pp.48-53.
- Ohtani, R. and I. Naito (1998)：Evaluation of GPS retrieved precipitable water vapors with radiosonde observations over Japan, *Journal of Meteorological Society Japan*, (submitted)
- Owens, J. S. (1967)：Optical Refractive Index of Air - Dependence on Pressure, *Temperature and Composition*, *Appl. Opt.*, 6, pp.51-58.
- Thayer, G. D. (1951)：An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air, *Radio Science*, Volume 9, Number 10, pp.803-807.

**Experimental Study on the Effect of Water Vapor
in Boundary Layer on the Atmospheric Delay of GPS.**

Satoru OISHI, Naoki OHGITA*, Eiichi NAKAKITA, Shuichi IKEBUCHI
and Seiichi SHIMADA**

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** National Research Institute for Earth Science Disaster Prevention

Synopsis

The effect of the water vapor variation in boundary layer on GPS atmospheric delay is investigated by using the data observed in the Biwako Project '98 which was the observation experiment held in July 1998. The time scale of the variation of water vapor is mainly considered by using Fourier spectrum of the data observed by doppler sodar and GPS. The following things are presented in this paper; (1) the Fourier spectrum of vertical wind of doppler sodar will be an index of growth of convective cells in boundary layers; (2) the effect of variation of water vapor, which is caused by growth of the convective cells in boundary layers, are not so much.

Keywords : GPS, Atmospheric Delay, Convective Cell, Local Circulation