

# 「高精度衛星測位データを用いた気象予測システムの構築」の成果について

研究開発体制  
主管研究機関  
共同研究機関

京都大学

気象研究所、国立極地研究所

研究開発期間

平成22年度～  
平成24年度  
(3年間)

研究開発規模

予算総額(契約額) 8.1百万円

1年目

2.8百万円

2年目

2.4百万円

3年目

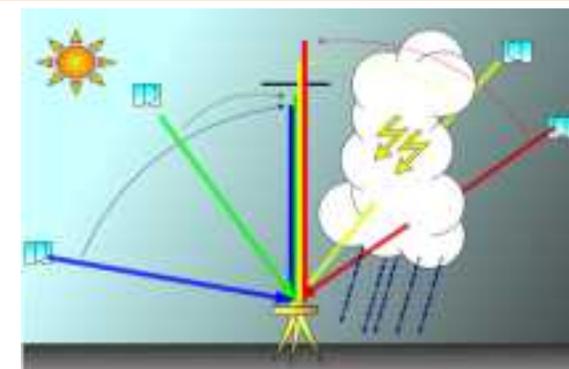
2.9百万円

## 研究開発の背景・全体目標

「GPS気象学」は、衛星測位電波が大気中を伝搬する際に被る遅延と屈折による「測位誤差」から水蒸気量等の「大気情報」を得る逆転の発想の大気計測法である。その原理を図示する。1990年代に始まった地上型GPS気象学は急速に発展し、国内外で多くの研究成果が生まれている。特に、GPS測位データを気象数値予報モデルに同化すれば、予報精度が格段に向上することが実証され、GPS測位データに含まれる水蒸気量の情報が大変有効であることが分かった。

急激に時間変化する集中豪雨等の場合、前兆現象として現れる水蒸気量の増加ならびに水平分布の変動をリアルタイムで把握することが重要である。しかし、現状の天気予報におけるデータ同化手法ではGPS測位データを3時間ごとに初期値として用いるため、数分後に起こる現象のリアルタイム予報は難しい。本課題では地上型GPS気象学の手法により水蒸気量(可降水量:PWV、Precipitable Water Vapor)を優れた時間分解能(1分以下)で連続的に求め、それらを迅速にデータ収集・解析し(データ同化を経ずに)数分以内に水蒸気変動特性を解析する。大気現象の現状監視・予測(now-cast)に活用するシステムを開発することを主目的とする。

GPS気象学のもう一方の応用であるGPS電波掩蔽法では、データ科学利用と天気予報改善、ならびに航空機や小型衛星を用いた独自のミッション設計について検討する。(GPS掩蔽の原理は後述する)



衛星測位電波が大気中を通過する際に、水蒸気の効果により伝搬遅延が起こる。これから経路に沿った水蒸気の積分量が推定できる。これを天頂方向に投影し、受信機上空における可降水量(PWV: Precipitable Water Vapor)を求める。

## 研究開発の全体概要と期待される効果

- 高分解能水蒸気水平分布監視システムの開発を行う。集中豪雨のもととなる水平スケールが10km程度のメソガンマ大気現象にともなう可降水量の面的分布を得るために、多数のGNSS受信機を1-2kmの間隔で2次元に配置した稠密観測ネットワークを構築する。大量の衛星測位データをリアルタイムで通信・収集するシステムを構築し、可降水量水平分布の時間変動を解析し可視化する。特に、準天頂衛星(QZSS: Quasi Zenith Satellite System)による高仰角の測位電波を用いてPWV水平分解能の向上を図る。
- 将来的に、廉価な1周波受信機を用いてコストの抑制を図るため、電離層補正モデルを開発する。
- アジアにおけるGPS気象学の展開を進める。特にメソガンマスケールの激しい水蒸気変動が多発する熱帯域(インド、インドネシア等)でGPS気象学の観測を実施し、地域特性を研究し、将来的に気象災害の早期監視システムへの活用を目指す。
- 低軌道衛星によるGPS掩蔽データを併用し、水蒸気の立体分布の解析を模擬実験する。GPS掩蔽データは時間・空間的に不規則に分布するため、データ取得率を高めるため、航空機搭載の衛星測位システムを活用したGPS掩蔽観測に関して数値モデルによる研究を行い、有用性を検討する。
- 「高精度衛星測位データを用いた気象予測システム」を提案し、都市域で問題となっている集中豪雨による気象災害の未然防止に貢献する。

# 「高精度衛星測位データを用いた気象予測システムの構築」の成果について

## 達成目標と実施内容

本研究は3課題で構成される。

- ①水蒸気水平分布の高分解能監視システムの開発： GPSおよび準天頂衛星等の測位データを活用して可降水量の微細な水平分布をリアルタイムでモニターするシステムの開発であり、この計画全体の中心課題である。
- ②水蒸気立体分布解析システムの開発： ①で得られる水蒸気の水平分布に加え、高度変化を知るためにGPS電波掩蔽法の活用を検討する。
- ③衛星測位データを用いた気象予測システムの開発と応用： ①の成果を国内およびアジア域に展開するための具体的な検討を行う。

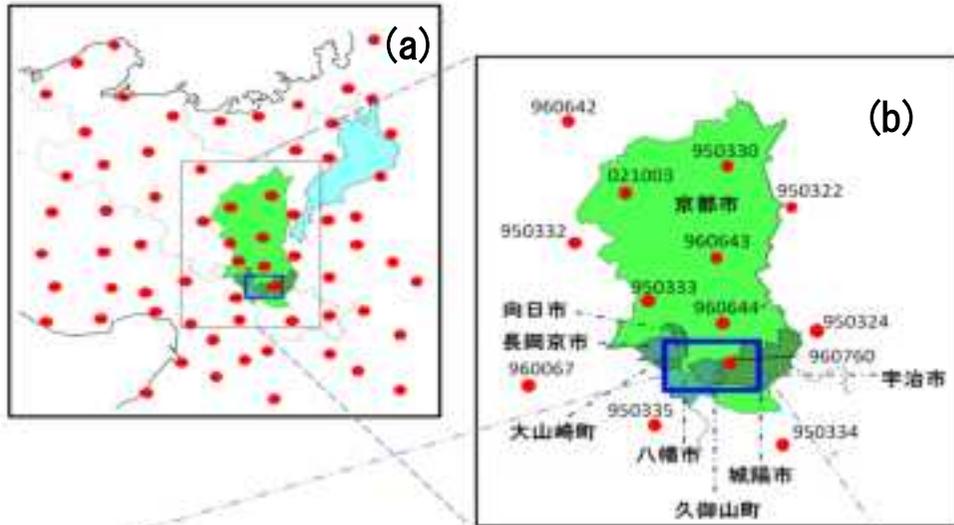


高分解能気象予測システムを提案

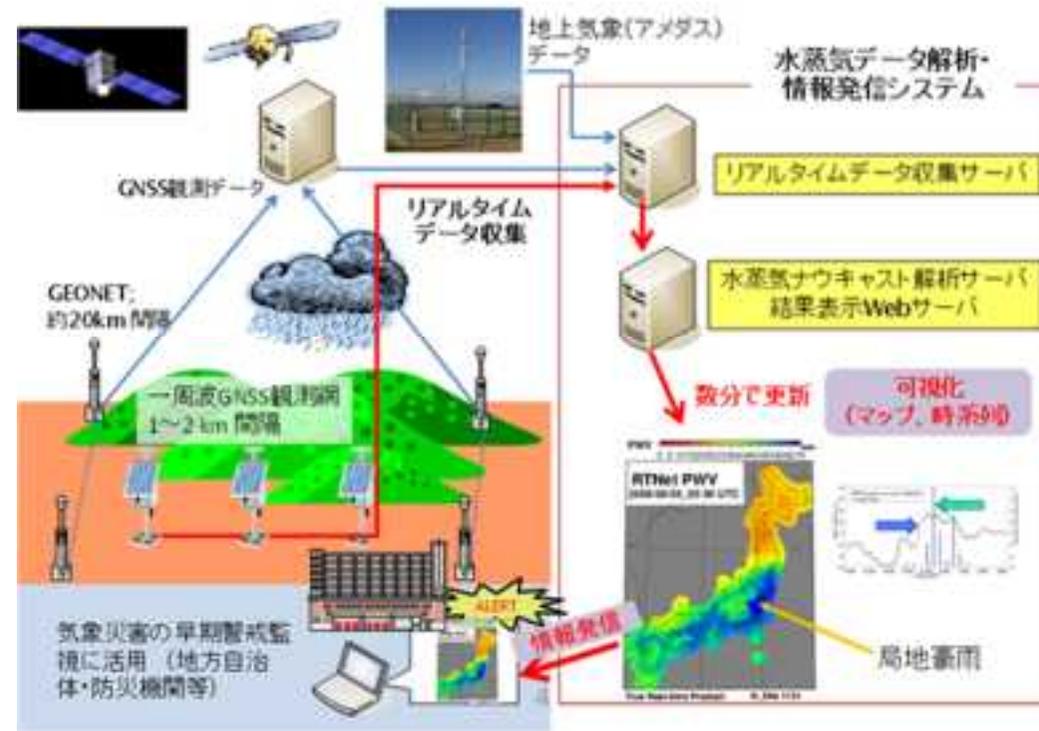
- ① 水蒸気水平分布の高分解能監視システムの開発
  - a. 準天頂衛星を用いた水蒸気推定精度検証実験  
独自に1~2km間隔で2次元に稠密GNSS受信ネットワークを京大宇治キャンパス西方の京都府南部地域に展開し、既存の測位衛星(GPS)に加えて準天頂衛星(QZSS)の測位信号を用いて、可降水量(PWV)の空間・時間変動を解析する。PWVの推定精度を検証すべく、気球(ラジオゾンデ)やラマンライダー等による比較観測を実施する。準天頂衛星による高仰角からの測位電波を用いることにより、PWVの水平分解能が約1 kmに改善されることを実証する。
  - b. 熱帯地域データによる精度検証  
GPS気象学の観測をインドネシアで実施する。日本に比べて高仰角で測位衛星を捕捉する頻度が高くかつ激しい水蒸気変動が頻発する熱帯地域における適用を検討する。
- ② 水蒸気立体分布解析システムの開発  
GPS-PWVの地上稠密観測とGPS掩蔽データを併用した水蒸気立体分布について、メソ気象予報モデルを利用した模擬実験を行う。航空機によるGPS掩蔽観測に関してデータ分布をモデル計算し、水蒸気プロファイル測定頻度と水平分布を調べる。これらをもとに将来ミッションを提案する。
- ③ 衛星測位データを用いた気象予測システムの開発と応用  
GPS気象学手法を活用して、急激な変動を含む水蒸気分布のリアルタイム観測システムを設計し、気象災害を引き起こす集中豪雨等の早期監視への活用を提案する。研究成果を定常気象観測が空疎なインドネシアを中心としたアジア熱帯地域に適用するための調査・実験を実施し、地域性に合わせた改良点を検討する。また、海外研究者を交えて研究成果ならびに国内外の動向に関する情報交換を行い、将来的に熱帯地域で頻発する洪水・干ばつの予測等の災害リスクマネジメントへの国際貢献を図る。

# GNSS稠密観測システムおよびデータ収集・解析システムの構築

- 京大宇治キャンパス西方の約10km四方の平坦地（下図 bの四角域）に1-2kmの間隔で17台の受信機を設置し、GNSS稠密観測網（下図 c）を構築した。
- 国土地理院が運用する全国GPS観測網(GEONET、下図 aの赤印)では水平間隔が平均で20kmであるが、本システムの配置はそれに比べておよそ1/10である。



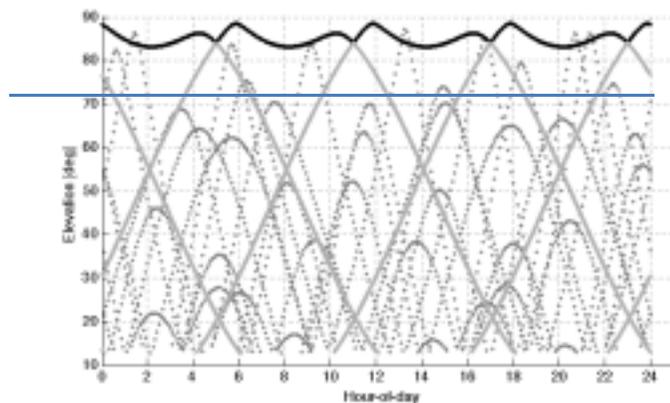
- : GEONET観測点
- : 独自観測点(準リアルタイム通信対応)
- : JAXA貸与機材を用いて設置した観測点(2011年9月~11月に設置)



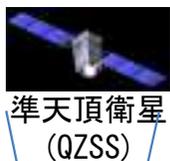
- 夏期湿潤期にPWVは40-80mmで時間変動するが、水平距離10 km以内でPWVが3-10mmの範囲で空間変動することを初めて観測で明らかにした。
- 各種大気計測機器との同時比較から、GPS-PWVの測定精度は1-2mmで、PWVの空間的非一様性および急激な時間増減を検出できた。
- GPSに加え準天頂衛星(QZSS)による高仰角からの測位電波を用いることで、可降水量(PWV)の水平分解能を格段に(およそ1/10)向上させた。
- 廉価な1周波GNSS受信機の使用を見据えて、電離層効果をモデルで内装するソフトウェアを導入したところ、1周波のみでも2周波受信機と同等のPWV測定精度を達成できた。
- 近年増加傾向にある水平スケールが10km程度のメソ・ガンマ大気現象による集中豪雨をピンポイントで予報するには、本課題の成果を基礎にした実況監視システム(now-casting)が有効であると考えられる。これを活用すれば、集中豪雨の開始に先だって警報を発することができ、気象災害の未然予防に役立てられると期待される。

# 準天頂衛星 (QZSS) によるGPS-PWV測定 of 水平分解能向上

測位衛星の仰角の時間変化： GPS衛星 (点線) は次々に入れ替わるが、QZSS「実線」は安定して仰角80度以上に滞在する。

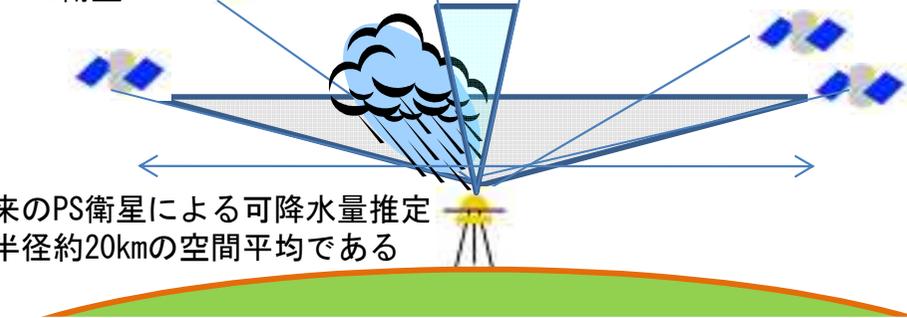


GPS衛星は天頂付近 (仰角70度以上) を1-2時間で通過する。一方、準天頂衛星は80度以上の高仰角に8時間程度連続的に滞在する。



準天頂衛星 (QZSS)

GPS衛星



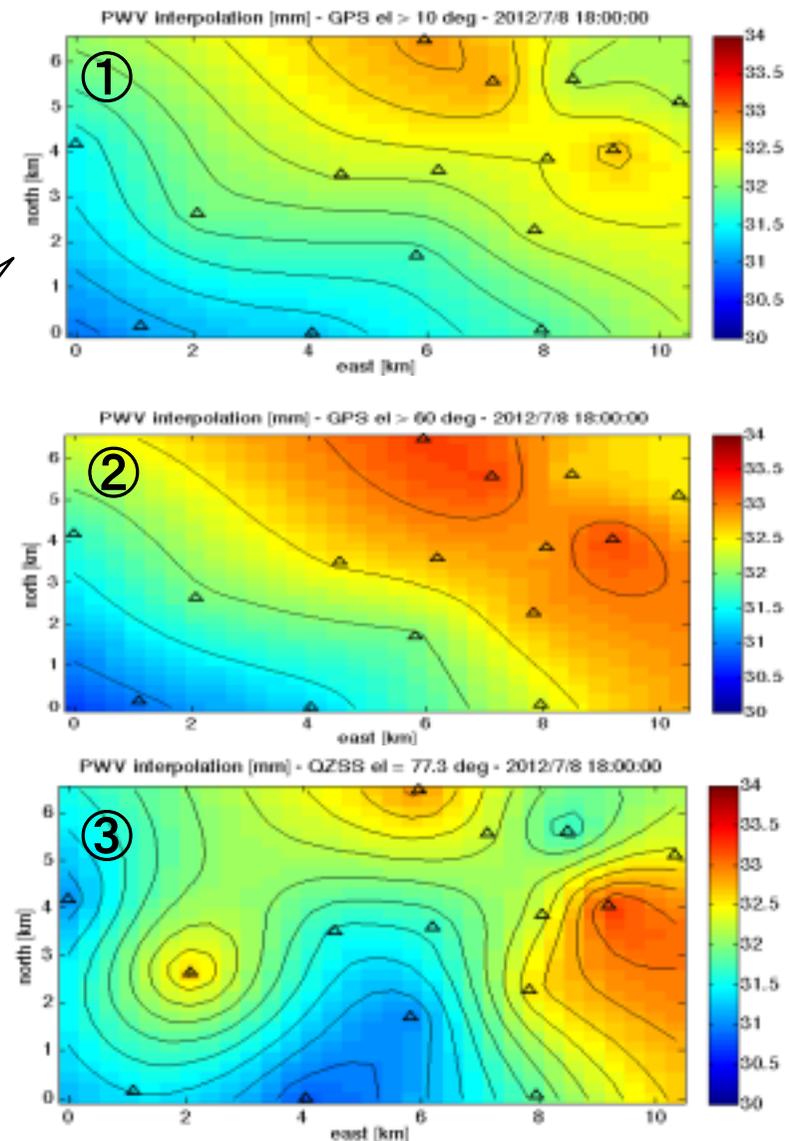
従来のPS衛星による可降水量推定は半径約20kmの空間平均である

高仰角 (70度以上) に滞在する準天頂衛星の測位データを用いれば、可降水量を水平分解能約1 kmで推定できる。

稠密観測網での仰角10° と仰角70° の視野範囲の違い



GNSS稠密観測網で捉えたPWV分布 [mm]



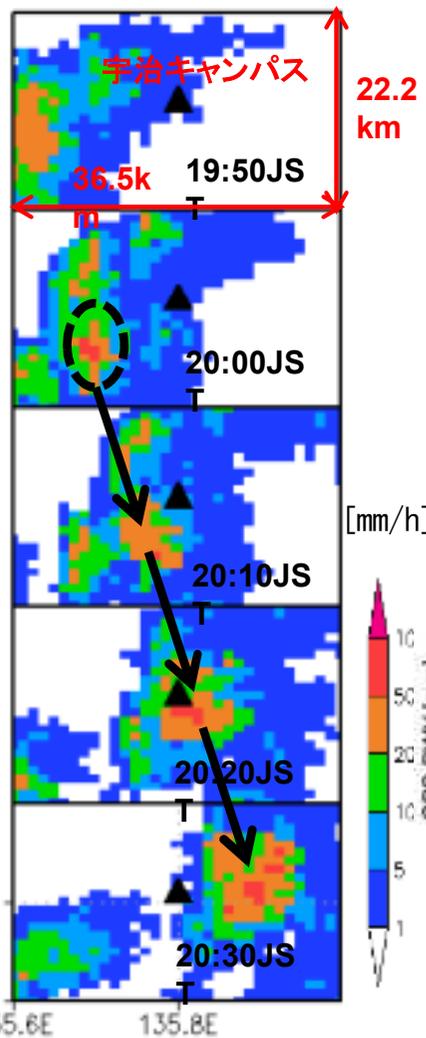
- ① 仰角10°以上のGPS衛星を使用して求めたPWV分布。ラジオゾンデとの比較で1-2 mmの精度を検証。水平距離10 km以内での3-10 mmの空間変動を観測した。
- ② 仰角60°以上のGPS衛星を使用して求めたPWV分布。高仰角に絞ることでPWVの空間差異が鮮明になった。
- ③ 高仰角のQZSS (仰角77.3°) から求めたPWV分布。PWVの水平分解能が向上するため、さらに微細なPWV分布を安定して解析できる。

# GPS-PWV測定とメソ数値予報モデルの比較による水蒸気変動と降水の特性解明

・ GPS-PWV測定 (図②) とメソ数値予報モデル (図④) を用いたPWV変動と地上降水特性についての解析結果を比較したところ、双方において、降水雲が発生・通過する際に、地上で降水が始まる約10分前からPWVが急増 (5 mm) する事が分かった。メソ数値予報モデルデータの解析から、PWVの急増は対流発生に伴う上昇流と水平風の収束に起因していたことが分かった。

・ GPS-PWV観測データ (図①) と数値予報モデルデータ (図③) の解析結果から、PWV変動が降雨発生の前駆現象となる事が示唆された。このような予兆を活用すれば、集中豪雨の早期警戒システムが開発できると期待される。

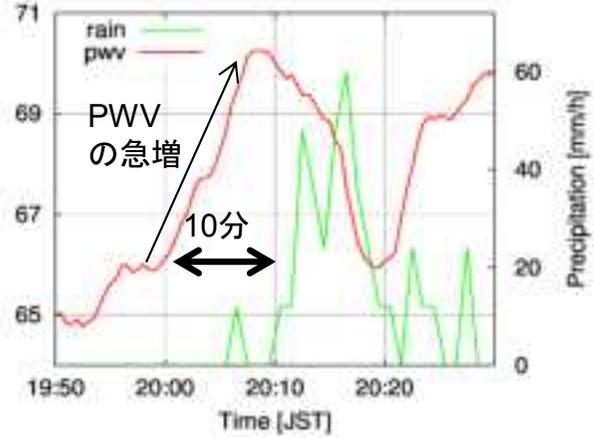
① 降水強度 (実況) の時間変化



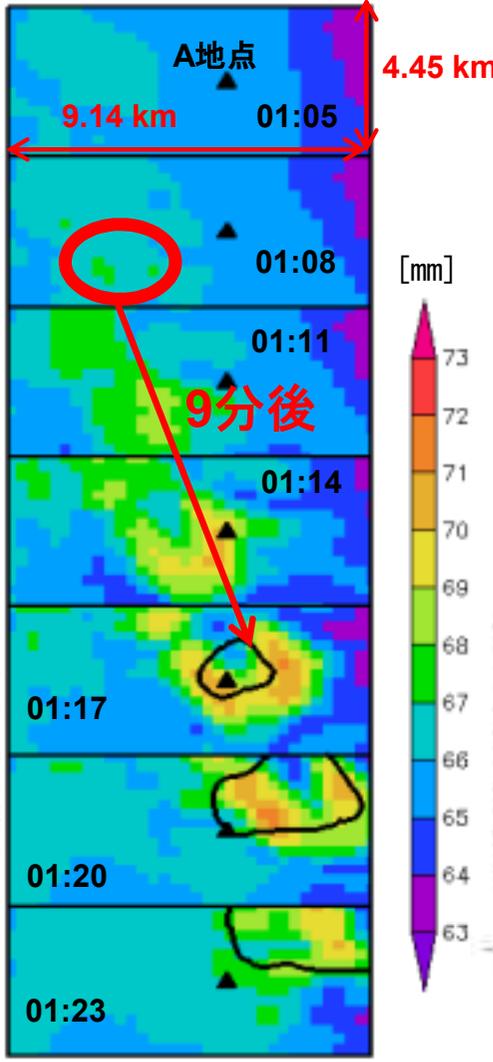
**観測結果**

- ・ 宇治キャンパスに設置したGPS受信機と雨量計を用いて、降水雲の通過に伴うPWV変動と地上雨量の変動を観測した。図①に気象レーダーで観測した降水雲の時間変動を示す。
- ・ 観測データの解析により、降水雲の通過に伴い、地上で降雨が強まるおよそ10分前からGPS-PWV値が急増していた事が分かった (図②)。

② 宇治キャンパスでのGPS-PWVと地上降水の時間変化



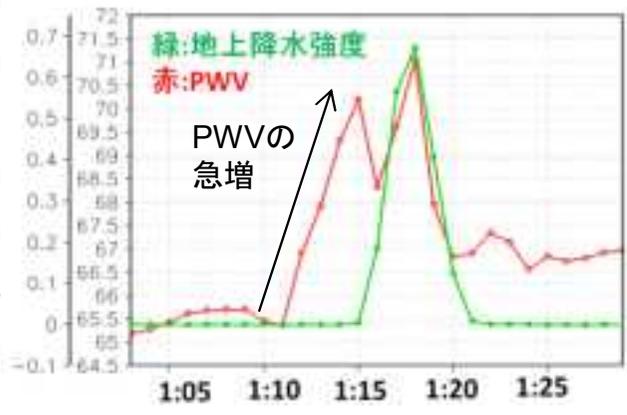
③ モデル内 (A地点) のPWVと雨量 (等値線) の時間変化



**数値モデル結果**

- ・ 図①の降水雲と類似した降水雲が気象庁の現業メソ数値天気予報モデルにより再現された。
- ・ モデル内では、地上で降雨が見られる9分前から水平2-3 kmのスケールの領域でPWVが急増していた。
- ・ モデルデータの解析結果により、PWVの急増は、対流発生に伴う上昇流と水平風の収束に起因していることが分かった。

④ モデル内のPWVと雨量 (等値線) の時間変化

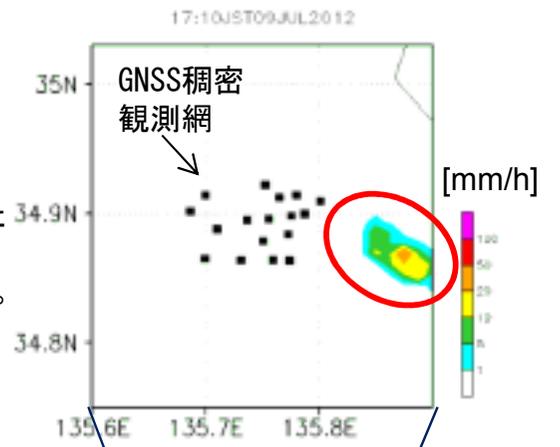


# GNSS稠密観測網によるPWVの時間変動および水平非一様性と降水の関係

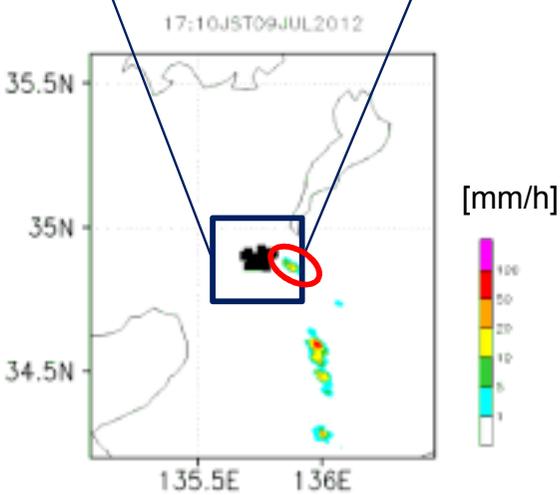
- 2012年7月9日のGNSS稠密観測データの解析結果により、局所的な対流性降雨発生のおよそ45分前からPWVが上昇し、さらに25分前からPWVの水平非均一性(稠密観測点の間でのPWVの差の分散)が増大していた。なお、水平分解能約20 kmのGEONETでは捉えられていない。(なお、この例ではGNSS観測網の領域では降雨は発生しなかった。)
- PWVの時間変化とその水平非均一性を同時に解析することで、高精度で局地豪雨発生の実況監視(Now cast)が可能になると考えられる。

降水強度分布 (17:10)

17:10LT にGNSS稠密観測網域近傍で強い対流性降水域(赤丸)が発生したことが気象レーダーで観測された。



気象レーダーによる、広範囲での降水分布図では、稠密観測網周辺に他に降雨域は見当たらず、局所的に孤立した降雨現象であった。

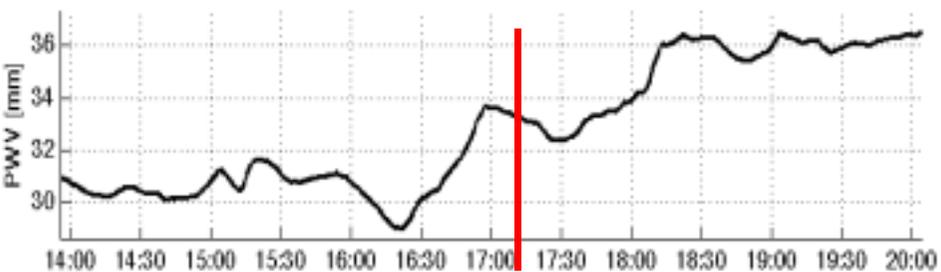


稠密観測網の15点の平均のPWVの時間変化を示す。降雨が発生した時刻(17:10LT)の約45分前からPWVが急増していた。

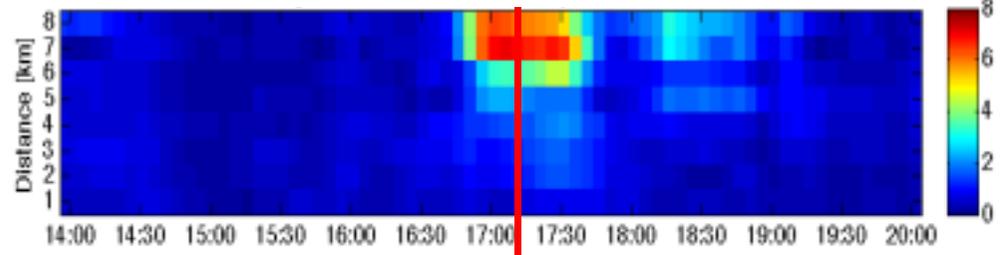
降雨発生の約25分前からのPWVの空間偏差の分散が大きくなり(赤)、PWVの空間非均一性が増大したことが明らかになった。

一方、観測点の水平間隔が10-20kmのGEONETではPWVの空間非均一性の変化(増大)は見られなかった。

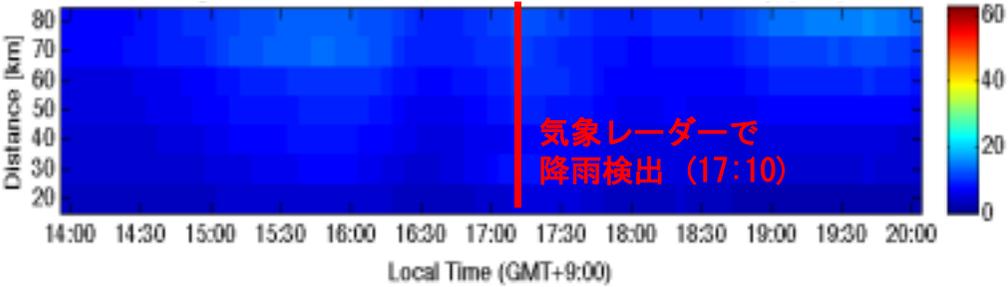
平均PWVの時間変化(稠密観測網)



PWV水平一様性の指標(GNSS稠密観測網) [mm<sup>2</sup>]の時間変化



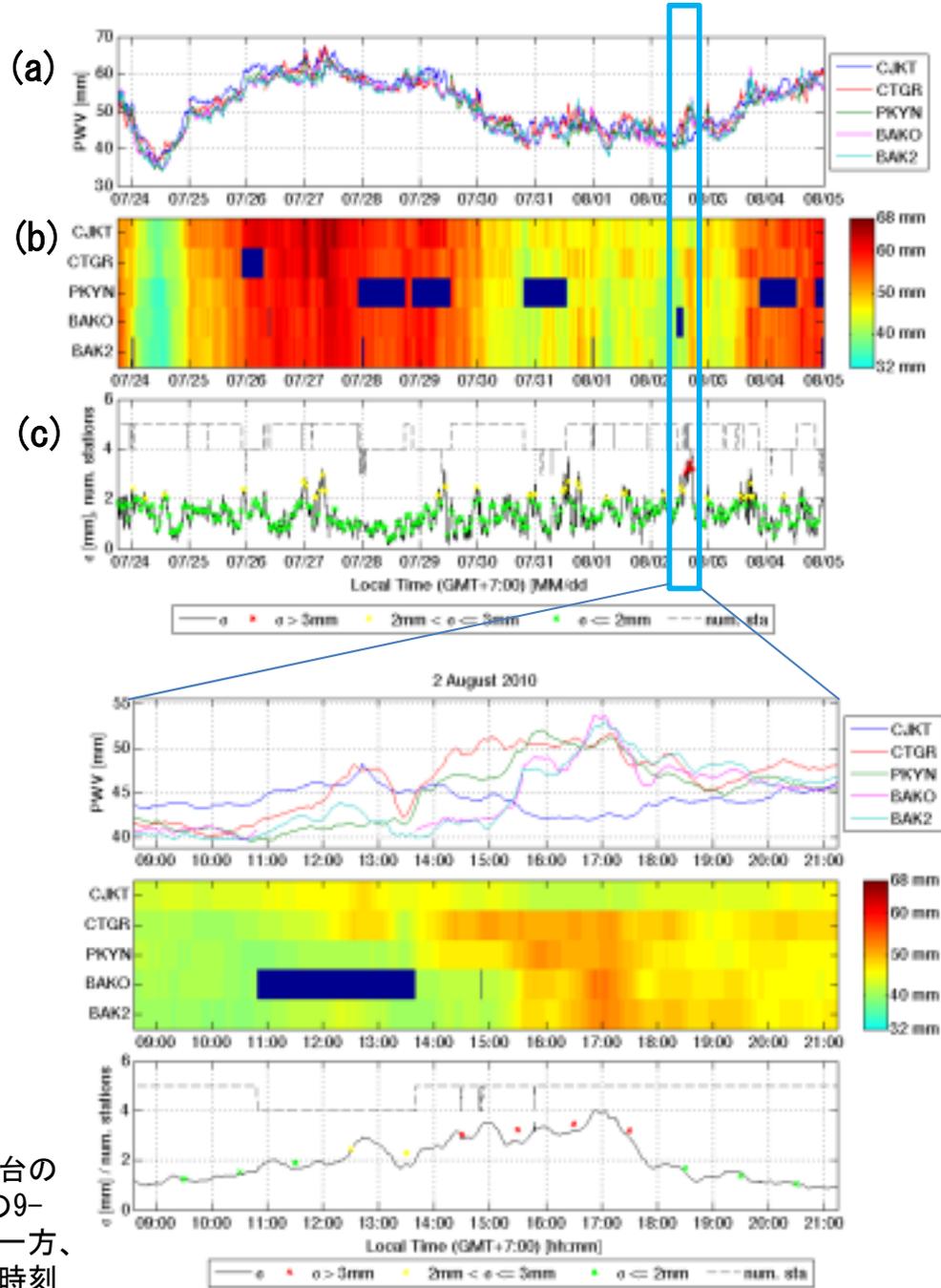
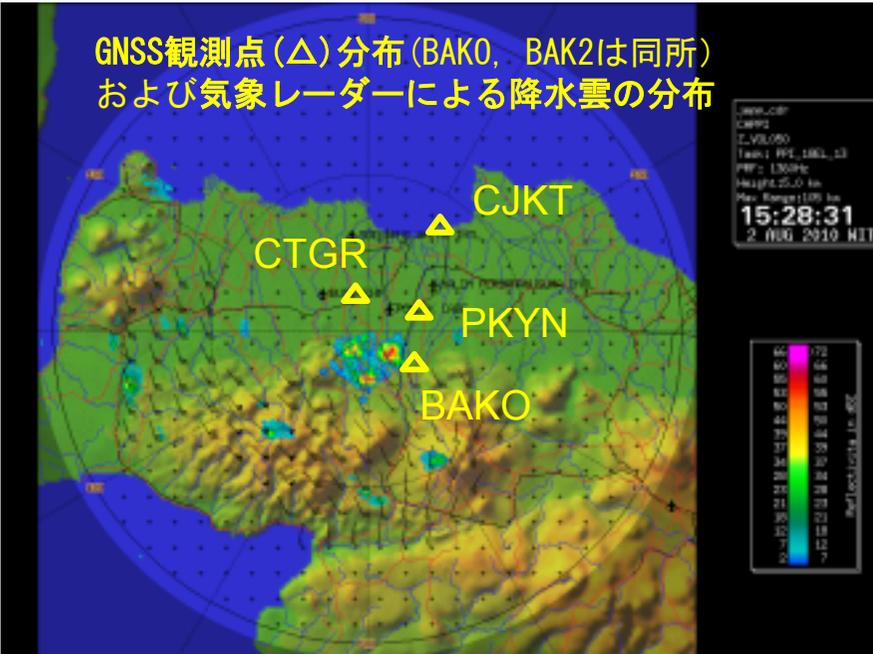
PWV水平一様性の指標(GEONET) [mm<sup>2</sup>]の時間変化



気象レーダーで降雨検出 (17:10)

# インドネシアにおけるGPS気象学：PWV水平分布の変動と降水現象の関係

- GPS気象学の観測をインドネシアのジャカルタおよびバンドンで2010年と2013年に、インドネシア航空宇宙庁(LAPAN)、地理院(BIG)、バンドン工大(ITB)等と共同で実施した。2013年には準天頂衛星対応のGNSS受信機を持ち込んだ。
- GPS-PWV解析に必要な加重平均気温の推定が夜間の気温逆転層より悪化すること、また、低緯度域で特徴的な気圧の半日周期変動がPWVに影響することが分かり、GPS観測点で特に気圧を連続計測する必要があることを示した。
- 2010年の観測結果の解析から、気象レーダーで検出した局所的積乱雲(下図)と、GPS-PWVの増加と空間非一様性(右図)が良く相関していた。熱帯での集中豪雨の直前予想にGPS-PWVが活用できると期待される。
- GNSS稠密観測システムはメソ・ガンマ豪雨が頻発している東南アジアやインド等で有効である。特に、準天頂衛星計画に含まれる静止軌道上の測位衛星を用いれば、低緯度域では随時高仰角でPWVを観測できる利点を活かせる。



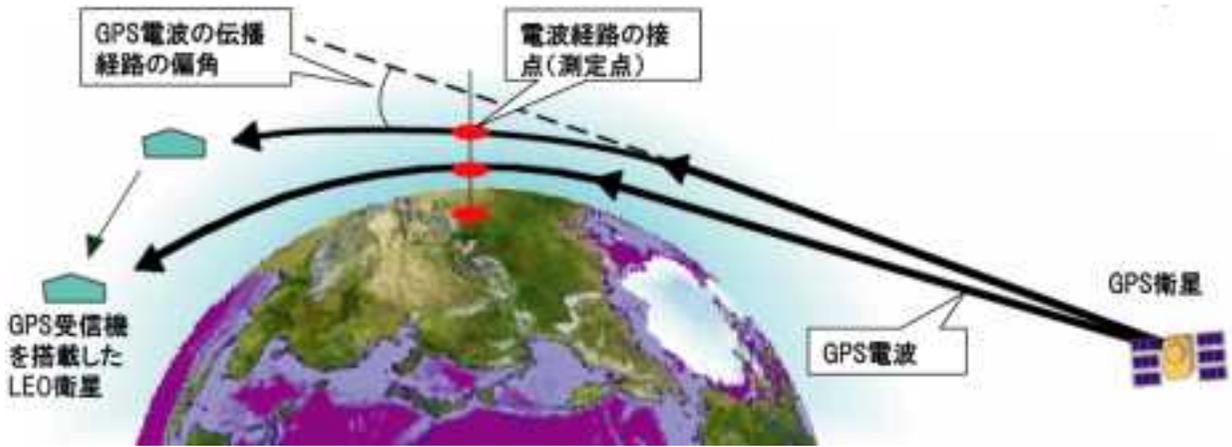
左図は、2010年7月24日から8月5日に観測された(a) PWVの時間変動、(b) 5台のGNSS受信点の間のPWVの差、および(c)その標準偏差であり、下段は8月2日の9-21LTでの拡大図である。PWVが増加した7月26-28日に広域で降雨があった。一方、8月2日はPWVが短期間に急増し、かつその空間非一様性が認められた。該当時刻に気象レーダー(上図)では強い降水雲がGPS受信点周辺に散発的に発生していた。

# 航空機によるGPS電波掩蔽ミッションの提案

衛星測位を活用した斬新な地球大気計測法として「GPS電波掩蔽：GPS Radio Occultation (RO)」が1990年代後半に開発された。下図にその原理を示す。

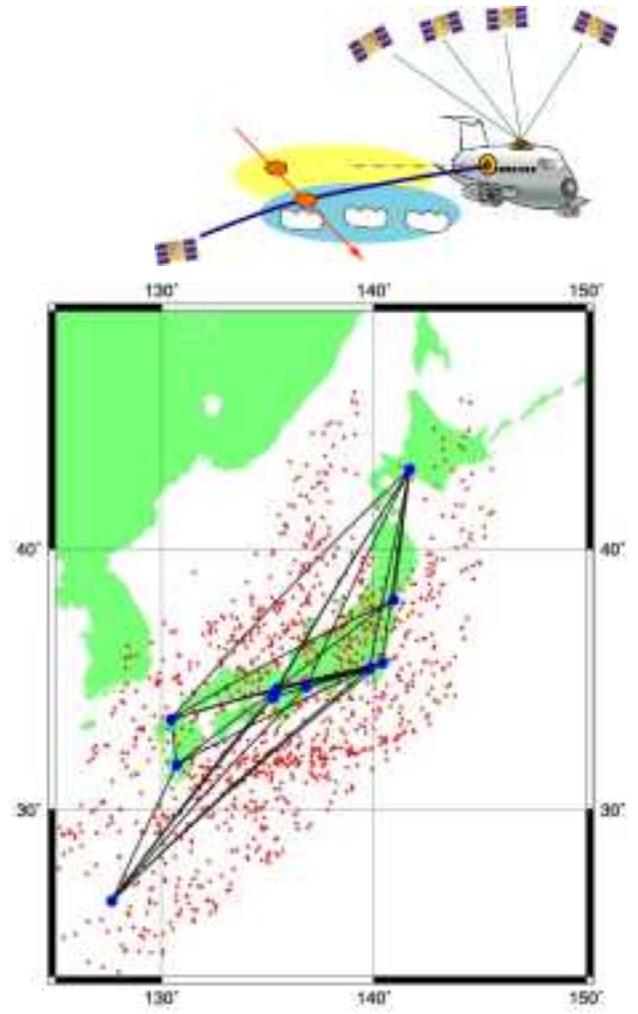
本課題では、国内衛星による実験実施を目指し、数値モデルによりデータ分布等を検討した。我々は従来からJAXA宇宙科学研究所の小型衛星WGIに小型衛星によるGPS掩蔽観測および円偏波SARを提案してきた。これを基礎に平成25年度に千葉大・環境リモートセンシングセンターが中心となって小型衛星 (GAIA-1)によるGPS掩蔽ミッションを実施する計画が予算化された。一方、民間航空機あるいは高所(富士山等の高山、スカイツリー)にGPS受信機を搭載して、GPS掩蔽観測を行い、日本周辺で高密度の大気観測を行うことを提案した。航空機観測には米国NSFも興味を示しており、また、山岳でのGPS掩蔽は中国でも試験観測を開始した模様である。

LEO衛星によるGPSS掩蔽データは、時間・空間的に不規則な分布を示し、特定の地点(たとえば、稠密GNSSネットワーク設置場所)において衛星によるGPS掩蔽データが得られる頻度は極めて少ない。GPS掩蔽データの取得率を高め、水蒸気トモグラフィ解析を安定して実現する方法として、航空機に搭載される衛星測位システムを活用したGPS掩蔽観測を検討した(右図)。



## GPS電波掩蔽の原理と特長

- 小型低軌道 (Low Earth Orbit; LEO) 衛星から見てGPS衛星が地平線に没する際に、大気層を通過してくるGPS電波をLEO衛星で受信する。精密な衛星軌道要素をもとに、GPS電波の伝播遅延長を求め、その経路の偏角を計算する。偏角は電波経路の接点 (測定点) における大気屈折率の高度プロファイルに変換され、さらに気温と水蒸気 (および電子密度) の高度変化が求められる。
- とりわけ、気温 (高度40km以下) および水蒸気 (高度約10km以下) のプロファイルが、気球観測と同等の優れた精度および高度分解能で測定できる特長がある。
- GPS掩蔽は精密時計による電波伝搬距離測定に依拠するため、衛星の世代交代等に影響されず、長期安定で精度校正不要である。地球温暖化や水循環等の環境変化の長期監視に適する。



GPS電波掩蔽を航空機に適用した場合、受信機 (航空機) から水平方向に約300-500km離れた点における大気状態が測定できる。民間航空機でGPS電波掩蔽を実施した場合のデータ分布を数値モデルで検討した。日本周辺で一日に数千点という大量のデータが得られる。海洋上の大気状態を観測でき、特に、風上に当たる日本海、東シナ海上空のデータが加われば、天気予報の精度が向上すると期待される。

# その他の研究開発成果

これまで得られた成果 (特許出願や論文発表数等)	出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	受賞等
	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 7	国内 : 13 国際 : 21	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0	国内 : 0 国際 : 0

## 研究開発成果発表会等の開催について

- ・ シンガポールで2012年に開かれた”Asia Oceania Geoscience Union (AOGS)”においてGPS気象学に関するセッションを開催した。
- ・ 地学分野では国内最大の日本地球惑星科学連合(JpGU)の2011年大会においてGPS気象学に関する国際セッションを開催した。
- ・ 京大・生存研の「生存圏シンポジウム」の一環として、GPS気象学に関する研究集会を独自開催した。特に2012年3月にはインドネシアのバンドン工大で開催し、GPS気象学を同国で推進する具体的な施策を検討した。また、インドネシア航空宇宙庁(LAPAN)で関連のセミナーを実施した。
- ・ アジア域を中心にGNSSの活用を議論する“Asia Oceania Regional Workshop on GNSS”について、2011年に韓国、および2012年にマレーシアで開催された国際会議において、準天頂衛星を活用したGNSS稠密観測のシステム開発および観測結果に関する研究発表を行った。
- ・ GPS電波掩蔽ミッションについて、米国と台湾の共同であるCOSMICおよび欧州のOPACに関する国際会議で基調講演、招待講演を行った。
- ・ 京都市が2010年に開いた「第7回STSフォーラム」、および総務省が2011年に主催した「災害危機管理ICTフォーラム」等の公開シンポジウムで、衛星測位情報の天気予報への活用に関する招待講演を行い、行政や一般に対する広報に努めた。
- ・ GPS掩蔽ミッションを搭載する小型衛星(GAIA-I)に関する国際ワークショップが2013年8月に千葉大で開かれた。

## 今後の研究開発計画

- ・ GNSS稠密観測システムの実用化： 廉価な1周波GNSS受信機（20-50万円）を多数(数百台)用いた稠密観測システムを構築する。GNSS受信機を小中学校等に配置し、地方自治体等による独自の降水早期警戒システム運用を検討する。
- ・ GPS気象学手法のアジア展開： GNSS稠密観測システムを、積雲対流が活発な熱帯アジアに展開する。特に、インドネシアは静止軌道上の準天頂衛星を活用できるので、国内での成果を直接に応用できる利点がある。
- ・ 小型衛星によるGPS電波掩蔽ミッションの実現： 小型低軌道衛星によりGPS電波掩蔽ミッションを国内で実現する。気象庁における定常気球観測と同等の精度・分解能で水蒸気・気温プロファイルを得て、気象予報へ精度改善に向けた観測データの活用を図る。
- ・ 民間航空機によるGPS掩蔽観測の実用化に向けた研究調査： 航空機によるGPS掩蔽観測では、受信機（航空機）から水平方向に約300-500km離れた点における大気状態が測定でき、定常気球観測で得られない海洋上のデータが得られる。民間航空機による測定実施により大量の大気情報が得られるが、特に風上に当たる日本海、東シナ海上空のデータが加われば、天気予報の精度が向上すると期待される。
- ・ 局所的集中豪雨メカニズムの解明： 本課題で得られた観測データを活用し、集中豪雨をもたらす大気現象の詳細メカニズムを解明する。降水特性の地形等による地域性を分析し、降水予報に役立てる。

# 事後評価票

(平成25年3月現在)

1. 課題名 高精度衛星測位データを用いた気象予測システムの構築

2. 主管研究機関 国立大学法人京都大学

3. 事後評価結果

## (1) 課題の達成状況

### 「所期の目標に対する達成度」

本課題が対象とする「GPS 気象学」は、衛星測位電波の大気遅延による「測位誤差」から水蒸気等の「大気情報」を得る大気計測法である。本研究では以下の3課題を実施された。

課題①水蒸気水平分布の高分解能監視システムの開発：測位衛星（GPS、GLONASS、準天頂衛星等、GNSSと総称される）の電波を地上で受信し、水蒸気高度積分量(PWV: Precipitable Water Vapor)を推定する実験を国内（京大・宇治キャンパス周辺）およびインドネシアで行う。国内では、水平間隔1-2kmのGNSS稠密観測網を構築し、GPS-PWVの測定精度検証のうえ、降水現象を観測する。

課題②水蒸気立体分布解析システムの開発：GPS電波掩蔽による水蒸気高度分布測定を検討する。

課題③衛星測位データを用いた気象予測システムの開発と応用：課題①の成果を活用した水蒸気(PWV)分布のリアルタイム観測システムを提案する。熱帯アジア域に適用するための調査を行う。

以下に課題の達成状況を評価する。まず、課題①と③の成果を示す。

1990年代後半から国土地理院の全国GPS観測網(GEONET、平均約20km間隔で配置)を用いた「GPS気象学」が行われてきた。本課題では京大宇治キャンパス西方に広がる平地（およそ10km四方）に1-2kmの間隔で17台の受信機を設置しGNSS稠密観測網を構築した。GPSに加え、2010年に打ち上げられた準天頂衛星(QZSS)による高仰角からの測位電波を用いることで、可降水量(PWV)の水平分解能をおよそ1/10に向上させた。夏期湿潤期のPWVは40-80mmで変動するが、水平距離10km以内でその10-15%程度(PWVで3-10mm)の空間変動が現れることを観測で明らかにした。本課題で達成したGPS-PWVの測定精度は1-2mm以下であり、PWVの空間的非一様性および急激な時間増減を解析した。

2012年に宇治市周辺で起こった集中豪雨について、GPS-PWV観測結果、ならびにメソ気象数値予報モデルによる現象再現を併用して、局地的降水現象とPWVの関係を調べた。その結果、降水開始の約10分前に降水点付近のPWVが急増していたことが分かった。また、GNSS稠密観測網の多点で測定したPWVの空間差の分散値も増大していた。このように、PWV自体の時間変動およびPWVの空間的非一様性（ムラ）が、局所的な降水現象の予兆として捉えた。

近年、増加傾向にある水平スケールが10km程度のメソ・ガンマ大気現象による集中豪雨をピンポイントで予報することは、現業システムでは精確な予報が難しいが、本課題の成果を基礎にした実況監視システム(now-casting)が実装されれば、降水開始の前に警報を発することが期待でき、気象災害の未

然予防に役立てられる。

GNSS 稠密観測システムは、定常気象観測が未整備で、かつ熱帯性のメソ・ガンマ豪雨が頻発している東南アジアやインド等で有効である。特に、準天頂衛星プロジェクトの将来計画に含まれている静止軌道上の測位衛星を用いれば、低緯度域では随時高仰角で PWV を観測できる利点を活かせる。本課題の一環として、インドネシア航空宇宙庁 (LAPAN)、地理院 (BIG)、バンドン工大 (ITB) 等と共同で、首都ジャカルタおよびバンドン市で GPS 気象学の基礎実験を 2010 年と 2013 年に行った。2013 年の実験には準天頂衛星に対応した GNSS 受信システムを持参し、実際に準天頂衛星からの測位電波を受信した。2010 年の観測結果の解析から、気象レーダーで調べた直径 10km 程度の局所的積乱雲の発生と、GPS-PWV の空間非一様性とが良く相関することが分かった。熱帯での地域性のある集中豪雨についても、その特性解明に GPS-PWV が活用できることが示された。

つぎに課題②の成果を示す。

衛星測位電波を用いた GPS 気象学のもう一方の手法に、GPS 電波掩蔽法がある。これは、小型低軌道衛星により大気をかすめて到達する GPS 電波を受信し、電波経路の屈折から大気情報を得る斬新な地球観測手法である。本課題では、国内衛星による実験実施を目指し、数値モデルによりデータ分布等を検討した。主管研究機関は従来から JAXA 宇宙科学研究所の小型衛星 WG に小型衛星による GPS 掩蔽観測および円偏波 SAR を提案してきた。これを基礎に平成 25 年度に千葉大・環境リモートセンシングセンターが中心となって小型衛星 (GAIA-1) による GPS 掩蔽ミッションを実施する計画が予算化された。一方、民間航空機あるいは高所 (富士山等の高山、スカイツリー) に GPS 受信機を搭載して、GPS 掩蔽観測を行い、日本周辺で高密度の大気観測を行うことを提案した。航空機観測には米国 NSF も興味を示しており、また、山岳での GPS 掩蔽は中国でも試験観測を開始した模様である。

以上、提案時に設定した研究課題は十分に実施できていると判断する、さらに将来の研究課題にも取り組んでいる。

#### 「必要性」

従来の天気予報 (数値予報モデル) は分解能が不十分で、局所的集中豪雨の発生予報が困難である。また、気象レーダーは雨滴が発生した後に初めて降雨分布を知ることができる。本課題が扱う GPS 気象学手法では降水雲ができる前に水蒸気の変動を検出できることから、降水の早期警戒に応用できると期待される。また、集中豪雨の駆動メカニズムにおいて重要である水蒸気の収束過程を測定できる。

空間スケールが 10km 程度の積雲対流を把握するには、1-2km の空間分解能で PWV を測定することが重要である。従来の GPS 気象学手法では、仰角約 10 度以上の衛星を全て使用するため水平分解能が約 20km となり、局所積雲対流の動態把握には不十分であったが、今回、頭上方向に絞った PWV 測定を行って水平分解能を向上させた。高仰角に位置する GPS のみを用いる方法もあるが、GPS 衛星が 1-2 時間毎に順次入れ替わるために測定結果に不連続が生じうる。一方、準天頂衛星は 8 時間程度連続して仰角 70 度以上に滞在するので、この目的に最適である。本課題の実施時期に準天頂衛星の打上および運用が進んだ結果、準天頂衛星による PWV 測定の有効性を実証できている。今後、PWV の稠密測定を活用して、都市災害で問題にされている局所的集中豪雨の早期警戒システムの実現を図ることが重要である。

## 「有効性」

衛星測位は位置（座標値）と時刻を精確に決定することが主目的であるが、その際に生じる電波の大気伝搬遅延による「誤差」を大気中の水蒸気積分量(PWV)という「情報」として扱うことで、斬新な大気計測法が実現された。既に、国土地理院が運用する全国 GPS 観測網(GEONET)のデータは気象庁において数値予報モデルに同化され、天気予報の改善に大きく貢献している。本課題では GEONET における平均約 20km の水平間隔を一桁小さくし、1-2km の分解能でも水蒸気情報を得ることに成功した。この場合、衛星測位の定量的な精度検証が鍵であるが、本研究グループが従来から開発・活用してきた各種の大気計測装置との比較観測により有効性を実証した。さらに我が国独自の準天頂衛星による、高仰角から到来する測位電波の利用が効果的であることを示した。

PWV 水平分布の時間変化を可視化することで、降水雲発生の前兆となる水蒸気の動態を知ることができ、集中豪雨の早期警戒システムに発展すると期待される。GNSS 受信網を、例えば 30km 四方に 1km 間隔で配置するならば、約 1 千台の受信機が必要になる。その実用化のためには、廉価な 1 周波 GNSS 受信機を用いる必要があるが、電離層における測位電波の遅延効果を補正モデルにより空間補間することで、2 周波受信機に遜色ない精度で PWV を決定できることを示した。なお、このシステムを都市域に展開する場合に、高層ビルの谷間等に設置した GNSS 受信機に対して準天頂衛星が有効であることも実用化に向けて重要な要素である。

今後、局所的集中豪雨に深く関係する空間スケール約 10km のメソ・ガンマ大気現象の発生・発達メカニズムにおける水蒸気の収束・発散の影響を、観測結果と数値モデルを併用してさらに詳しく解明することが重要である。その成果を経験則としてシステムに組み込めば、降雨発生の直前予想(now casting)が可能となると期待できる。

本課題の成果は今後実用化につながれば、社会の安心・安全に貢献すると期待されることから、研究の有効性は十分にあったと考えられる。

## 「効率性」

研究実施期間は実質 2 年半であったが、その間 GNSS 稠密観測網を構築し、約 2 年間にわたり連続観測を実施しており、研究計画は妥当であった。GNSS 受信機の設置場所として宇治市を中心に小中学校や警察施設等の公共施設の利用を検討し、地方自治体の協力を得て、研究推進が効率的に進められた。

主管研究機関は 1990 年代より「GPS 気象学」の先駆的研究ならびに天気予報への実用化推進を続けてきており、気象研究所をはじめとする多くの研究機関等との協力関係を基礎に本課題に取り組んだ。特に、気象研究所との協力により数値モデルを用いた研究が実施でき、大気現象の解釈も含め観測結果の解析が順調に進められた。

経費の多くは準天頂衛星に対応した GNSS 受信機の購入と設置に費やされたが、購入した台数が限られた。しかし、JAXA との共同研究として準天頂対応の GNSS 受信機を借用できたため、より稠密な GNSS 観測ネットワークが実現された。

GPS-PWV の測定結果を検証するために、既存の観測装置との比較を行った。主管研究機関は、従来からライダーやレーダー等のリモートセンシング機器の開発を行っており、また、気球観測システム（ラジオゾンデ）も保有している。さらに、他機関から借用した水蒸気マイクロ波放射計も利用した。

衛星測位データの解析を専門とした研究員を雇用したが、当研究員はイタリア国籍でドイツをはじめ欧州の衛星測位研究グループとも人脈から、新たなデータ解析手法の開発および電離層補正モデルの検討を国際協力で進めた。また、廉価な1周波受信機を開発している大学・企業グループとの情報交換も十分に行われた。

主管研究機関は、インドネシア航空宇宙庁(LAPAN)をはじめとする研究機関・大学と約30年に亘って、赤道大気に関する共同研究を継続しており、その関係を核に研究機関や大学との協力のもとで、インドネシアにおけるGPS気象学の観測を実施した。

以上のことがらにより、研究は効率よく実施された。

## (2) 成果

### 「アウトプット」

本課題の研究成果について、以下に示す。

#### 課題① 水蒸気水平分布の高分解能監視システムの開発

##### (a) GNSS 稠密観測ネットワークの構築

- (ア) 観測システムおよびデータ収集・解析システムの構築： 水平スケールがおよそ10 kmのメソ・ガンマ大気現象である集中豪雨に伴う可降水量の分布を観測するために、京大宇治キャンパス西方の10 km四方の平地に17台の受信機を約1-2 km間隔で設置し、GNSS稠密受信機網を構築した。
- (イ) GPS-PWV 測定の精度評価： ラジオゾンデ等との比較検証により、GPS-PWVの測定精度が1-2 mm以下であることを検証した。GNSS稠密観測により、水平距離10 km以内でPWVが3-10mmの空間変動を示し、降雨に先立つ局所的なPWVの空間的非均一性が解析できた。
- (ウ) 準天頂衛星(QZSS)を用いたPWV水平分布の分解能向上： GNSS稠密観測網で得られた測位データを用い、高仰角に限定してPWVを解析することで、優れた水平分解能でメソ・ガンマスケールのPWVの水平分布を求めた。なお、GPS衛星では衛星の動きにより測定結果に不連続が生じうるが、QZSSを利用すれば安定してPWV測定が行える事を実証した。

##### (b) インドネシアにおけるGPS気象学に関する実験

- (ア) 赤道域における気温逆転層および半日周期気圧変動の影響： GPS気象学を熱帯性のメソ・ガンマ豪雨に適用すべく、インドネシアで実験を2010年と2013年に行った。GPS-PWV解析に使用する加重平均気温の近似式の精度が、夜間の気温逆転層より悪化する事が明らかになった。また、低緯度域で特徴的な気圧の半日周期変動がPWVに与える影響を調べた。GNSS観測点で気圧を連続計測する必要がある事を示した。
- (イ) 降雨現象とGPS-PWVの水平分布変動の関係： 2010年の観測結果の解析から、気象レーダーで調べた直径10km程度の局所的積乱雲の発生と、GPS-PWVの時間増加および空間非一様性とが良く相関することが分かった。

#### 課題② 水蒸気立体分布解析システムの開発

##### (a) GPS電波掩蔽の航空機・高山等への応用

水蒸気の高度分布を精度良く測定できる GPS 電波掩蔽観測を、航空機に適用した場合のデータ分布を数値モデルにより検討した。全ての民間航空機で GPS 電波掩蔽を実現すれば、日本周辺の海洋上を含めて、一日に数千点という大量の大気情報を得られることを示した。また、高山やスカイツリーなどの固定点 GNSS 受信機を設置すれば、その周辺で一日に約 100 回の測定ができ、時間的にも連続的な大気計測が行えることを示した。

(b) 小型衛星ミッション

従来から行われている、小型低軌道衛星による GPS 電波掩蔽観測について、GLONASS、GALILEO、BEIDOU 等の多くの測位衛星を電波源とすれば、全球で大量の気温・水蒸気プロファイルが得られることを示した。また、新しいデータ解析手法を用いることで、気球観測（ラジオゾンデ）と同等の高度分解能が達成できることを明らかにした。これらの成果を基礎に、国内で初の GPS 電波掩蔽ミッションの実現に向けた共同研究を推進した。

課題③ 衛星測位データを用いた気象予測システムの開発と応用

(a) GPS-PWV の観測およびメソ数値予報モデルとの比較

(ア) メソ数値予報モデルによる集中豪雨時の PWV 変動特性の解明： 気象庁の現業メソ数値予報モデルを用いて 2012 年 8 月 14 日の宇治市の集中豪雨（6 時間雨量で約 260 mm）の再現を行い、PWV 変動と地上降水との関係を調べた。モデル内では、地上降水の約 10 分前から PWV が 2-3 km のスケールで急増（約 5 mm）していた。PWV の急増は、対流発生に伴う下層湿潤空気の持ち上げに起因していることが分かった。このような局所的な PWV 変動の観測には、従来の GPS 気象学の解析手法で得られる PWV の分解能では十分ではなく、QZSS 等の高仰角衛星の利用が重要であることがシミュレーションでも確認された。

(イ) GPS-PWV と降水の時間変化の比較： モデル内で見られたものと類似した降水雲が宇治キャンパス観測点上空を通過する際にも、地上降水の約 10 分前から GPS-PWV の急増（約 5 mm）が見られた。以上のモデルと観測結果の比較により、メソ・ガンマスケールの PWV 変動が局地的豪雨の予兆となる事が示唆された。

(b) 電離層補正モデルを用いた 1 周波受信機による PWV 測定精度の検証

降水雲発生の前兆となる水蒸気変動の可視化によって、集中豪雨の早期警戒が行えると期待されるが、その実用化のためには、廉価な 1 周波 GNSS 受信機を用いる必要がある。電離層補正モデルによる空間補間を行い、1 周波受信機による PWV の測定精度を検証した結果、2 周波受信機に遜色ない精度で PWV を決定できることが分かった。

(c) GPS-PWV および GPS 掩蔽観測結果のデータ同化による予報精度向上

GPS 観測から得られる水蒸気データと GPS 掩蔽観測データの同化による局地豪雨の予報精度向上への寄与を調べるため、観測システムシミュレーション実験（OSSE）を行った。その結果、視線方向水蒸気量が予報結果の改善に大きなインパクトを持っていることが分かった。GPS 掩蔽データの同化については、タンジェント点の高度が低いほど降水分布の改善に有効であることが示された。

研究成果の論文発表として、GNSS 稠密観測のシステム開発および観測結果に関する論文を 3 件、データ利用について 3 件、さらに GPS 掩蔽に関して 1 件の論文、計 7 編を公表している。さらに、GPS 気象

学の解説を含んだ教科書「最先端の気象観測」（東京堂）を刊行している。また、国内学会・研究会で13件、国際会議で21件の口頭発表を行った他、一般向けの公開講演会で招待講演を3件行った。インドネシアにおいてもワークショップと集中講義（TV会議を含む）を計3回実施した。

以上、本課題で目標とした計画内容は十分に実施でき、成果も公表された。「課題② 水蒸気立体分布解析システムの開発」においては、GPS電波掩蔽の航空機・高山・高所等への応用性を示したことや、小型衛星ミッションの推進では共同研究を推進したことに留まっているが、「課題③ 衛星測位データを用いた気象予測システムの開発と応用」については、1周波受信機によるPWVの測定精度を検証した結果、2周波受信機に遜色ない精度でPWVを決定できることが分かった点は大いに評価できる。また、準天頂衛星の測位情報を天気予報にも活用できることを示したことやGPS-PWVを用いた集中豪雨早期警戒システムが実用化を示唆したことは宇宙利用を促進する成果と評価したい。

#### 「アウトカム」

1. 本課題により、電離層効果を高精度で補間するモデルの有効性を示したことにより、1周波のGNSS受信機の活用範囲が広がった。今後、GPS-PWVを用いた集中豪雨早期警戒システムが実用化されると期待される。
2. 準天頂衛星の測位情報を天気予報にも活用できることを示したことは準天頂衛星計画の推進に有効であったと考えられる。
3. GPS電波掩蔽が気象力学研究および天気予報精度改善に有効であることを示したことは、千葉大における小型衛星計画の推進に貢献したと考えられる。
4. インドネシアで「GPS気象学」に関する啓発活動（研究会、講義）を繰り返したことで、同国でもGPS気象学に関する取組みが活発化してきた。

### （3）今後の展望

#### 1. GNSS稠密観測システムの実用化

本研究により廉価な1周波GNSS受信機（20-50万円）を多数（数百台）用いた稠密観測システムを構築できる見通しがたった。例えば、GNSS受信機を全ての小中学校に配置し、既設のインフラ（電源、インターネット等）を活用すれば、地方自治体等が独自に降水早期警戒システムを運用できる。これは、副次的に、衛星測位や大気現象に関する教育的効果もある。なお、降水特性には地形等による地域性があるので、試験観測結果の分析をもとに、PWV変動特性から降水雲発生を予測する経験則を研究することが重要である。これらのハード、ソフト面の開発を実施しうる企業の候補が国内にある。

#### 2. GPS気象学手法のアジア展開

上記のGNSS稠密観測システムが実用化されれば、積雲対流が活発な熱帯アジアに展開しうる。特に、インドネシアは静止軌道上の準天頂衛星を活用できるので、国内での成果を直接的に応用できる。また、地震多発地域であり、GNSSによる測位情報自体も防災に役立つ。

#### 3. 小型衛星によるGPS電波掩蔽ミッションの実現

千葉大で進行中の小型衛星により、GPS (GNSS) 電波掩蔽ミッションを国内で初めて実現する。水蒸気・気温の精密な高度変化は気球によって定常観測されているが、それと同等のデータが GPS 電波掩蔽で得られる（これは従来の放射計による衛星観測では達成できない）。観測データの科学利用および気象予報への実用を図る。

#### 4. 民間航空機による GPS 掩蔽観測の実用化に向けた研究調査

航空機による GPS 掩蔽観測では、受信機（航空機）から水平方向に約 300-500km 離れた点における大気状態が測定できる。定常気球観測は当然陸上に限定されるが、航空機による GPS 掩蔽観測では海洋上の大気状態を観測できる。全ての民間航空機においてこの測定が実施されれば、莫大な量の気象情報が得られる。特に、風上に当たる日本海、東シナ海上空のデータが加われば、天気予報の精度が向上すると期待される。航空機による GPS 電波掩蔽の試験観測は既に実施され、有意な結果が得られている。

#### 5. 局所的集中豪雨メカニズムの解明

本課題により平成 22 年度末までに構築した GNSS 稠密観測網を平成 24 年度末まで約 2 年間にわたり連続運用した。その間の平成 23 年および 24 年の夏期に宇治市を中心に京都府南部で集中豪雨が 발생し気象災害を引き起こした。本課題期間中には、PWV と降水現象を記述する分析を行い有効な結果を得たが、今後、大気現象の詳細メカニズムを気象学的に解明することが求められる。その結果は、上記 1 で述べた経験則を検討するうえで重要である。

#### 6. 他機関との情報交換

古野電気株式会社が主管研究機関となっている研究課題「海上での高精度測位応用に向けた QZS-PPP 評価」との関連性から、当該機関との意見交換等を行うことで双方の研究に資するものと考えられる。

### 評価点

S	<p>評価を以下の 5 段階評価とする。</p> <p>S) 優れた成果を挙げ、宇宙利用の促進に著しく貢献した。</p> <p>A) 相応の成果を挙げ、宇宙利用の促進に貢献した。</p> <p>B) 相応の成果を挙げ、宇宙利用の促進に貢献しているが、一部の成果は得られておらず、その合理的な理由が説明されていない。</p> <p>C) 一部の成果を挙げているが、宇宙利用の明確な促進につながっていない。</p> <p>D) 成果はほとんど得られていない。</p>
---	---