

第2回 GPS 気象学ワークショップ報告*

青 梨 和 正*¹・吉 崎 正 憲*²・島 田 誠 一*³
斎 藤 隆*⁴・内 藤 勲 夫*⁵

1. はじめに

昨年気象庁で開かれた第1回ワークショップでスタートした我が国のGPS (Global Positioning System) 気象学は、その後、日本型GPS気象学として科学技術庁に提案され平成8年度のFS (総合研究の課題設定のための調査) 課題となった。同時に、研究内容も、それまでの国土地理院と気象庁との2機関の枠を越えて、水にかかわる様々な課題を取り込んだ学際色豊かなものに発展した。それを一言で言えば日本列島の「水を測る」と言うことになるだろう。

そこで、平成8年7月17日~18日表題のワークショップがGPS合同シンポジウムの一環として国土地理院で開催された。ワークショップでは、科学技術庁FS報告書の作成のための作業部会を兼ねて、以下の4つのセッションに分かれて議論がなされた。ここではそれらの要旨と全体の印象などを順を追って紹介する。(内藤勲夫)

2. GPS 気象学の現状

最初に京都大学防災研究所の田中寅夫氏がGPSによる水蒸気遅延観測の重要性を指摘しワークショップの趣旨説明を行った。次に東京大学海洋研究所の大谷氏がGPS観測から可降水量を算出する原理、米国のGPS可降水量実験観測計画(STORM計画)の結果

の紹介に続いて、国土地理院のGPS観測網に基づく可降水量と気象庁の高層ゾンデ及び日本域予報モデル(JSM)の可降水量の比較結果について発表した。このなかで、a)米国の比較結果ではGPSによる可降水量推定の誤差の標準偏差は1.2~1.8 kg/m²程度でゾンデとほぼ同等の精度があること、b)日本の比較結果では誤差の大きさは冬期で約3.5 kg/m²、春~夏期6 kg/m²程度であったこと、が指摘された。この原因として、1)日本付近では水蒸気量の絶対値及び変動が大ききこと、2)水蒸気変動の空間スケールが米国に比べ非常に小さいこと(数km~10km²)、3)地形が米国よりもずっと複雑であり、GPS観測点の標高の違いが可降水量の推定に影響していること、などが議論で指摘された。

続いて、気象庁の野村氏が、EU(欧州共同体)でもGPS可降水量の観測計画(WAVE FRONT)が準備中であるとの報告を行った。通信総合研究所の市川氏と東京都立大学の松山氏は、全球的なGPS観測網であるIGS(International GPS Service)を用いた全球規模の可降水量の推定計画について発表し、1)リアルタイムデータではないIGSの可降水量データはルーチンの予報と別個の再解析によって客観解析に取り込まれる必要があること、2)IGSの可降水量データと風速データが水収支の研究のために有効であること、などを指摘した。この場合、海上を含めた全球の水蒸気量推定の精度向上のためには、衛星搭載のマイクロ波放射計及び赤外放射計等からの可降水量の推定がより重要であり、アジア大陸などのゾンデデータの少ない陸上の水蒸気量の推定には、特にGPSと上記リモートセンシングの組み合わせが不可欠であることは言うまでもない。

次に京都大学の津田氏は、GPSと低高度GPS受信衛星(LEO)間の大気による掩蔽現象の観測から、大

* Report of the Second Workshop on the GPS Meteorology of Japan, Tsukuba.

*¹ Kazumasa Aonashi, 気象研究所予報研究部.

*² Masanori Yoshizaki, 気象研究所予報研究部.

*³ Seiichi Shimada, 防災科学技術研究所地圏地球科学研究部.

*⁴ Takashi Saito, 国土地理院測地観測センター.

*⁵ Isao Naito, 国立天文台地球回転研究系.

© 1997 日本気象学会

気屈折率を推定する手法の原理とそれを用いた成層圏気温プロファイル推定についての米国の研究計画の結果を紹介した。

気象庁の野村氏はこの大気屈折率をメソスケールの数値予報モデルへデータ同化するための Zou *et al.* (1995) による疑似データを用いたシミュレーションの結果を紹介し、1) GPS の大気屈折率は湿度場の解析に有効であること、2) 大気屈折率を数値予報モデルへ直接的に同化することが各レベルの温度のリトリブ値に直してから使うより有効であること、3) モデルに入力する大気屈折率のデータの空間分解能に、解析された湿度場の精度が敏感であること、を述べた。

最後に、国土地理院の畑中氏が平成8年度の科学技術庁の特別研究である日本の GPS 気象学の概要について説明した。その中で、国土地理院の高密度 GPS 観測網から得られる水蒸気情報をもとに、数値予報モデルと GPS の大気遅延量解析を結合させることによって、測地学と気象学の双方にとって有用な物理量(基線解析値及び可降水量)の精度向上を目指すことが述べられた。(青梨和正)

3. 水蒸気の動態学

GPS 気象学のキーワードである可降水量(鉛直積算水蒸気量)に対して、気象学サイドはどのような期待を持っているか、このセッションでは6題の話題提供と1題の集録参加が行われた。予想されたように、細かい水平・時間間隔で得られる GPS の可降水量に対して大きな期待がよせられた。また、可降水量の積分量だけでなく鉛直分布までほしいというニーズが強く出され、今後の3次元トモグラフィの研究の必要性が強調された。各講演の要旨は以下の通りである。

早坂氏(東北大学理学部)は水蒸気量の衛星観測に関して、赤外放射とマイクロ波放射を用いる方法を中心に、長所・短所および観測の現状をレビューした。これらはデータが少ない海上で使え、水蒸気のおおまかな鉛直分布を推定できるが時空間の解像度が粗いという欠点がある。それに対して、GPSの方は細かい解像度で求めることはできるが陸上だけに限られる。お互いの短所を補うような方法の検討が必要である。

岩崎氏(群馬大学教育学部)は夏期のユーラシア大陸東部での地上比湿(水蒸気量)の日変化、夏期の関東地方北部での可降水量の日変化、赤外2波長データを用いた陸域の可降水量の評価の3つの話題を紹介し

た。2番目の話題では、前橋のマイクロ波放射計の観測から、可降水量は11~13時に極小になり、19~22時に極大に達し、その振幅は1.5~2 cm と大きくなった。山岳域と関東平野の熱的局地循環(山谷風)がこうした変動を作り出すと考えられるが、GPSの水蒸気情報により細かい構造が明らかになるだろう。

上田氏(北海道大学大学院理学系)は、短時間の下層の水蒸気移流が重要である現象として、京都大学 MU レーダーで観測した梅雨前線帯の大雨、海風前線やガストフロントとそれに伴って発達する対流について紹介した。20~30 km 四方の水蒸気量分布の連続観測は気象学の理解や気象擾乱の予測にとって重要であり、GPSを用いた水蒸気観測および将来の鉛直プロフィールの測定に期待したい。

加藤氏(名古屋大学大気水圏科学研究所:集録参加)は、梅雨期の東アジアにおける水蒸気の動きを見る上で、梅雨前線帯全体の降水量分布だけでなく、まわりの亜熱帯高気圧域や熱帯収束帯の水蒸気の動きまで見る必要があること、また、前線帯に現れる各種メソスケールのシステムは多重構造であり、特に、マクロスケールの過程で流入した水蒸気がメソ~総観規模スケールの雲・降水システムの過程でどの様に再分配されるかは、前線帯全体の水収支を理解するためにも必要であること、GPSはこうしたものの解明に有力な手段となることなどを論じた。

吉崎(気象研究所)は関東地方で行っている「つくば域降雨観測実験」の活動についてレビューを行い、3つのメソ擾乱の具体例をあげて、関東平野の中に擾乱に伴っていくつかのミニ気団があることを示した。そうしたミニ気団と GPS で測られる数十 km の水平スケールの可降水量分布が比較できるようになれば、GPS データはメソ気象の解析に大いに役に立つだろう。また、7月中旬に行われた可降水量から水蒸気の3次元分布を求めるための100 m スケールの GPS 集中観測(京都大学防災研究所・気象研究所・高層气象台)についても紹介した。

坪木氏(東京大学海洋研究所)は、わが国の気象災害の歴史からそのほとんどが台風と豪雨によってもたらされたことを示し、後者をもたらすメソ降水系の解明の重要性を強調した。メソ降水系の研究において、レーダーおよびミリ波レーダーにより降水(雨や雪)や雲は観測できるようになったが、これらのもととなる水蒸気の観測はまだ不十分である。そうした現状の breakthrough として、GPSを用いた水蒸気量の測定

は大いに期待できる。

平原氏(名古屋大学大学院理学部)はGPS観測による3次元(時間的変化を含めば4次元)水蒸気トモグラフィーの可能性とその問題点について考察を行った。大気中の水蒸気のスケールハイトは3km弱と非常に薄い。この薄い空間を適当な間隔で三次元的なセルに分割して各セル内での水蒸気遅延量を推定しようとする、狭い領域で高密度にGPS観測点を配置する必要がある。その場合、3次元セルのサイズは、水平方向には平均的な観測点間隔、高さ方向にはその2分の1程度になる。さらに、時間的に細かい観測データを加えることによって、時間変化する水蒸気の3次元分布を得ることができるだろう。(吉崎正憲)

4. 宇宙測地に及ぼす大気海洋の影響

宇宙測地とは、人工衛星・天文観測など広い意味での宇宙技術を用いて測地学的な計測を行うもので、最近の測地学的な観測は大半が宇宙技術を用いたものになっている。このなか、深宇宙にあるキューサーなどの電波源を観測するVLBI(Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉計)を除くすべての技術が、人工衛星を利用した宇宙技術観測である。今回のワークショップでは、宇宙測地の中から、GPS、干渉SAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar: 干渉合成開口レーダー)、VLBIに及ぼす水蒸気の影響が報告された。また、水蒸気の影響が懸念される南鳥島でのGPS観測の現状、宇宙測地の鉛直成分の観測精度に関する理論的考察、及び宇宙測地に及ぼす大気海洋質量荷重による固体地球変形の影響に関する報告も行われた。

GPS、干渉SAR、VLBIはすべてLバンドからKバンドにかけての電波を用いており、大気中の水蒸気の影響を受ける。しかし、それぞれの技術の特徴と進歩の程度によって、現在の課題は異なっている。VLBIはもっとも早くから開発された宇宙技術で、コストパフォーマンスは悪いが、現在でももっとも高精度の宇宙技術を実現している。しかし、VLBIでは各観測点の時刻情報もパラメータとして精密に推定しなければならないという技術的な制約から、水蒸気量の決定精度はGPSに比べて向上しにくい。GPS観測では、発達した温帯低気圧などのメソスケール現象による水蒸気量の変動が観測されはじめている。干渉SARは一番最近開発されはじめての技術で、水蒸気の影響例が集まり始めた段階である。このなかで、GPS観測は定点

による連続観測、干渉SARは10~100mの分解能をもつ面的に連続で時間的にはスポット観測という特徴を持つ。従って、両者は時間・空間軸の相補的な観測技術であり、干渉SARにおける水蒸気観測の事例が集まってくると、GPS観測とは全く異なった知見が得られる可能性がある。

宇宙観測の鉛直成分の観測精度に関して理論的に考察すると、鉛直位置と大気遅延は必ず相関をもつ。従って、両者のうち一方を無視して片方だけを推定すると系統誤差が生じる。また、現在GPSやVLBIの観測で行われているように両者を同時に推定すると、系統誤差は生じないがランダム誤差が増大して、観測点位置を推定する誤差楕円は上下に大きく伸長した形になる。ところで、海洋潮汐や大気圧の変動は、荷重による固体地球の変形をもたらす。この影響は最大で数cmに達するが、100km以下の短い基線では一桁程度小さくなる。GPS気象学の発展により、大気中の水蒸気の分布と観測点の上下変動が現在より高精度に求められるようになれば、こうした影響は当然考慮しなければならなくなる。(島田誠一)

5. 日本のGPS気象学案の討議

このセッションでは、本年度の科学技術庁特別研究費でFS調査が行われている「日本のGPS気象学」案の現状の報告と推進上の問題点の討議が関係研究者によって行われ、GPS気象学研究への期待が示された。

まず国土地理院の畑中氏が、研究の基本となるGPSデータを作成・提供していく立場から、GPSデータの受信から解析結果を得るまでの時間的な遅れの解消について報告した。気象予測や地殻変動の予測に必要な迅速な解析の実施と、精度の高い解析に必要な精度の高い軌道情報の取得を両立させるものとして、IGSが計画している予報暦の使用が期待できることが示された。

次に気象庁の萬納寺氏が、GPS可降水量データを気象予測に取り込む立場から、その取り込み手法と解決すべき課題について報告した。ある時期の観測量によって第一推定値を補正する手法や、連続的な観測データを用いて観測値とモデルとの差が最小になるようにモデルのパラメータを変更していく手法等が紹介され、計算機資源等を考慮して段階的な導入の必要性が述べられた。また、現在のモデルで用いられている地形データと実際との差が及ぼす影響についても論じ

られた。

さらに、GPS 測位における大気遅延誤差の数値予報データに基づく評価手法について、通信総合研究所の市川氏が報告した。ここでは、天頂遅延量のみ利用し、異方性を考慮しないと、水平で 1 cm、鉛直で 2 cm 程度の精度であるのに対し、大気勾配により異方性を導入すればそれぞれ 2 mm、5 mm 程度の精度を達成できることが示された。さらに水蒸気トモグラフィについても紹介されたが、膨大な計算が必要であり、将来の課題と考えられる。

大気遅延量を推定するためのソフトウェアの現状と改良手法について、防災科学研究所の島田氏が、現在の主要な解析ソフトウェアである Bernese, GAMIT, GIPSY を対比しながら、その改良の可能性や改良の進め方を報告した。この中では、ソフトウェアのメンテナンスの面から、標準的な処理としてソフトウェアに取り込めるような改良を進めることの必要性和、特殊な処理については外部ユーティリティとして整備することが示された。

GPS 気象学の推進にあたって最も重要な課題となる GPS 水蒸気情報データベースについて、国土地理院の宮崎氏が報告した。測地データベースと測地環境データベースを核とする国土地理院、気象庁、研究者間のデータフローについてのイメージを紹介し、広く関係者の意見を求めた。

海上保安庁水路部の矢吹氏は、海洋域の観測・調査での GPS の役割と大気補正精度の向上への期待を報告した。この中で、海中の音響測定と海上で行う GPS 観測とを結合した高精度の海洋調査手法が示され、基準となる GPS 観測の精度向上への期待が述べられた。

最後に、GAME の紹介と、GAME におけるグローバルな可降水量情報の重要性について、東京都立大学の松山氏が報告した。

これらの報告について、活発な議論が行われ、今まで必ずしも相互の交流が深いとはいえなかった気象研究者と地殻変動研究者との間の情報交換が行われた。この後、国立天文台の内藤氏が本ワークショップのまとめ(次節参照)と GPS 観測網の整備が契機となってスタートした GPS 気象学の発展への期待を述べて、ワークショップを終了した。(斎藤 隆)

6. 全体のまとめと印象

国土地理院の GPS 連続観測網に基づく日本型 GPS 気象学は、日本列島上の水蒸気情報の利用を目指すことから、メソスケール気象学はもとより、地形に拘束された気象現象を論じるローカル気象学とも密接な関係にある。あのアメダスとほぼ同じ時空間分解能で日本列島の水蒸気の動態が描かれる日もそう速くはないだろう。

一方、米国の GPS 気象学のねらいは最大の温室効果気体である水蒸気のグローバルな分布の精密な把握にある。たとえ炭酸ガスが 2 倍に増加しても、その温室効果は水蒸気全体のその 60% 程度に過ぎず、しかも温暖化は水蒸気を通じて自動的に加速されることを思うと、水蒸気のグローバルな見積りでの地球温暖化の予測研究における重要性の度合いが理解されよう。

その意味で日本型 GPS 気象学は米国が目指すグローバル・スケールの GPS 気象学と相補的な関係にある。しかし、さらに広い学際科学の立場に立つと、日本型 GPS 気象学から得られる水蒸気情報は植生環境科学にとっての第 1 級の情報となろう。国土地理院には国土数値情報と言うもうひとつの環境情報が蓄積されている。これらが結びついたとき、一体どんなサイエンスが生まれるのだろうか。最後に筆者の印象を述べておこう。特筆すべきことはたった 1 日半の短い期間に何と約 150 名の参加者を迎えたことである。それほど水蒸気に寄せる期待が大きいと言うことであろう。加えて、これまで気象学分野や環境科学分野では縁もゆかりもなかった測地学の本拠である国土地理院で水蒸気に関するワークショップを開くと言う意外性も参加者の強い興味を引いたのかもしれない。いずれにせよ、本ワークショップが水蒸気に関する歴史的な研究会であることはほぼ間違いないだろう。

なお、ワークショップでの講演内容や討議内容のほぼ全体は本年度末に科学技術庁から出版される報告書に結実される予定である。

報告を終わるにあたり、様々なご支援をいただいた国土地理院測地観測センター衛星測地課の皆様、科学技術庁海洋地球課の堤真治氏及び地球科学技術推進機構の佐々木保徳氏および細野益男氏、京都大学防災研究所の田中寅夫教授に感謝申し上げます。(内藤 勲夫)