

氏 名	よし はら たか ゆき 吉 原 貴 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2404 号
学位授与の日付	平 成 13 年 11 月 26 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	GPS 衛星電波を用いた水蒸気量の時空間分布推定に関する研究

(主 査)
論文調査委員 教 授 津 田 敏 隆 教 授 木 田 秀 次 助教授 里 村 雄 彦

論 文 内 容 の 要 旨

大気中の水蒸気は相変化による潜熱の授受を通じて気象擾乱を駆動する重要な役割を果たしている。従来の水蒸気観測はラジオゾンデ観測に代表される直接観測が主流であったが、近年では光・電波等を用いたりリモートセンシング技術も開発されつつある。衛星測位技術として広く活用されている GPS 電波を地上に設置した受信機で検出し、GPS 電波が大気中を伝播する際の遅延量から水蒸気量を推定する測定法が大気現象を観測する手法として新開発された。これを基本指針とした新しい学問分野である「GPS 気象学」が急速に進展してきている。

これまでの GPS 観測では一般に、複数の GPS 衛星から受信される電波から視線方向の伝播遅延をもとめ、これらを天頂方向に投影して空間的に平均化された可降水量(単位面積上の空気柱内に含まれる水蒸気の積分値)を求めていた。これらの観測の時間・水平距離分解能はそれぞれ数時間と約 20km であり、総観規模(列島スケール)の大気現象を研究対象としてきた。しかし、本論文では水平スケールが1つの積雲程度である 10km 以下(ローカル・スケール)の領域の水蒸気の立体的な分布を GPS を用いて短い時間分解能で精密観測することを目指し、そのための基礎計測技術と解析手法の開発を行った。この研究ではまず観測データを用いて可降水量推定の時間分解能の限界を検討し、さらに個々の GPS 衛星の視線方向での伝播遅延を精密に推定する方法を研究した。これらを基礎として水蒸気量の空間分布を推定するトモグラフィ解析の方法を提案し、その妥当性をモデル計算により検証した。以下に本論文の主な成果をまとめる。

(1)従来の研究ではローカル・スケールでの気象擾乱による GPS 伝播遅延はシステム誤差と区別することができないと考えられていたためほとんど注目されなかった。本研究では GPS 伝播遅延を数分の時間分解能で抽出できることを、観測データをもとに検証した。最初に、時間分解能を飛躍的に向上させて可降水量を推定するのに適したデータ解析パラメータを検討し、さらに推定値をラジオゾンデ、シーロメータ等の同時観測結果と比較して、最終的に推定時間間隔 1 分で水蒸気変動を検出できることを示した。

(2)次に水蒸気量推定の空間分解能を向上させるために、個々の GPS 衛星についての視線方向遅延量を推定する手法を開発し、その結果優れた空間分解能で水蒸気遅延量が得られることを検証した。その際、受信アンテナの位相特性および多重散乱(マルチパス)は、受信機近傍の空間的な水蒸気変動量と同程度の見かけ遅延を生み出すため、その除去方法を詳細に検討し、その補正を衛星視線方向の搬送波位相残差に施した。観測結果には前線通過時の気象擾乱を反映した水蒸気空間分布が認められた。また、数 m 離して設置した 2 台の受信機による測定結果を比較した結果、アンテナ形式が異なる受信機間でも搬送波位相残差に良い整合性が見られた。衛星視線方向の遅延量の推定誤差は最終的に数 mm 程度と見積もられたが、これはトモグラフィ解析を行う際の入力値として利用可能であることが分った。

(3)衛星視線方向の遅延量をもとに、ローカルスケールの水蒸気空間分布をトモグラフィ解析する手法について数値モデルを用いて考察した。多数の GPS 受信機を数百 m から数 km の間隔で設置した稠密観測を想定し、それぞれの受信機による GPS 衛星視線方向遅延量のデータセットのモデルを作成した。さらに、推定領域を細かい領域(セル)に区切り、トモグ

ラフィ解析でセル内の屈折率を推定した。この際、GPS 衛星の見かけ上の動きが遅いため、伝播パスが推定領域全体を通過するには数時間を要し、これが推定時間分解能を制限している。この問題を解決するために、境界層レーダー等で得られる背景風の同時観測結果を利用し、各高度でセルを風系と共に移動させ（ムービングセル）、推定時間間隔を数分に短縮した。このムービングセル法は既に列島スケールのトモグラフィ解析に導入されているが、ローカルスケールのトモグラフィ解析に適用させる場合の問題点を検討した。水平・鉛直 2 次元の水蒸気分布の数値モデルに想定される観測誤差を重畳させ、これをトモグラフィ解析した結果、十分な精度で水蒸気空間分布が再現されていることが確かめられた。これにより、10 分程度の短時間で水蒸気空間分布推定の可能性が示された。

以上述べたように、本論文は GPS 受信データを用いて、従来の観測手法に比べて優れた時間・空間分解能でローカル・スケールでの水蒸気の時空間分布を推定する解析手法を研究した。最終的に、この成果を利用したトモグラフィ解析により、ローカルスケールの水蒸気時空間分布推定の可能性を強く示唆した。

論文審査の結果の要旨

本論文では GPS 電波の大気伝播特性を用いて、大気現象を理解する上で重要である水蒸気量の時空間分布を優れた分解能で観測する新しい計測法について研究している。既に GPS 受信データから数時間毎に空間分解能 20km 程度で可降水量を求める観測手法は確立されつつあり、総観規模の大気現象の解明に活用されている。しかし、空間スケールが 10km 程度の狭い領域内（ローカルスケール）の詳細な水蒸気の立体的な分布を観測する手段として GPS を適用した研究は稀である。本研究ではローカルスケールの水蒸気観測法に GPS を適用する際の問題点を綿密に検討し、これを基礎にトモグラフィ手法を水蒸気の時空間分布の解明に適用する提案を行っており、いくつかの興味深い結果を得ている。

一般に GPS 受信データを用いた総観規模での水蒸気観測では天頂方向に投影された可降水量を数時間毎に求めているが、これに現れる微細な時間変動は従来は誤差として扱われていた。本論文では数分の時間分解能で可降水量を求め、他の機器との同時観測結果と比較したところ、両者が定量的にはほぼ一致したことを報告し、GPS 観測をローカルスケールの大気現象に適用可能であることを示したことは高く評価できる。この研究成果を基礎に、GPS 観測をメソ大気現象にも活用する研究が盛んとなった。本論文ではさらに水蒸気の空間分布についても議論を進め、精密な GPS 解析において主要な測位誤差原因となっているアンテナ位相特性やマルチパスの影響について詳細に検討し、その除去方法を考案した。これらの効果を補正した上で、個々の GPS 衛星に対する視線方向の伝播遅延を求め、最終的に水蒸気の空間分布を推定し、気象擾乱との対応を議論している。この研究により、GPS 解析により数 km の空間スケール内での水蒸気の不均一性を明らかにすることが示され、トモグラフィ解析をはじめ、GPS データをローカルスケールの大気現象へ適用する道を開いた。GPS 電波を用いたトモグラフィ解析では、一般に GPS 衛星の見かけ上の動きが遅いため推定に数時間を要するという問題がある。これを解決するために、既に列島スケールでのトモグラフィでは解析する領域（セル）を背景風に従って移動させる方法が開発されている。本研究では、この手法をローカルスケールのトモグラフィ解析にも適用することを目指し、2 次元の数値モデルにより基礎的な解析技術の検討を行い、提案した解析法が妥当であることを示した。しかし、最終的な推定精度や分解能については、今後、観測データを用いた研究を待たざるを得ない。

以上、本論文では総観規模で用いられている GPS による水蒸気観測をローカルスケールでの水蒸気観測に適用する際の様々な問題点を詳細に検討し、細かい時空間分解能で水蒸気分布を GPS 観測する方法の基礎的な開発を行った。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心に、これに関連した分野について試問を行った結果、合格と認めた。