

GPSが拓く突風・大雨の予測・監視への道

○小司禎教・山内洋・佐藤英一・足立アホロ(気象衛星・観測システム研究部)、益子渉(予報研究部)

1. はじめに

GPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)に代表される人工衛星を用いた測位システム(GNSS: Global Navigation Satellite System)は、カーナビゲーションやスマートフォンの位置情報アプリケーションとして日常生活に浸透している。この技術を、水蒸気センサーとして利用し、豪雨や突風等の監視に応用する研究を紹介する。

発達した積乱雲は、しばしば豪雨や突風など激しい気象現象を引き起こす。発達・衰弱の状況を監視することができれば、気象災害の軽減に有効な情報を提供できる。

防災業務に資するため、気象庁では、全国で約1,300箇所にわたる稠密な地上観測網(AMeDAS・第1図)により、気温・風向風速・雨などの観測データを取得している。大気中、特に下層の稠密な水蒸気分布がさらに得られれば、豪雨や突風など激しい気象現象の監視・予測に役立つと期待される。

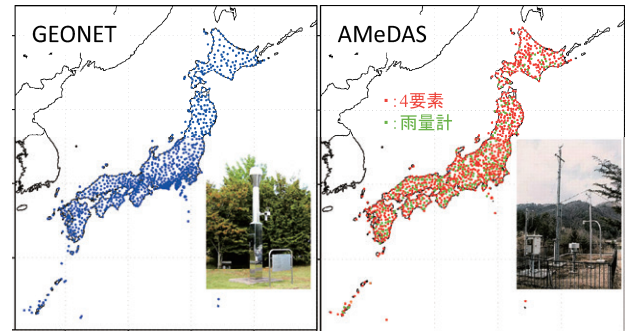
国土地理院は1,200箇所以上(平均17km間隔)からなるGNSS観測網(GEONET: GNSS Earth Observation Network System)を展開し、日本列島の地殻変動を監視している(第1図)。ここでは、気象庁のAMeDAS網に匹敵する空間密度のGEONETで水蒸気量を解析し、積乱雲の発達に関する情報を抽出することを目的とした研究の成果について報告する。

2. 人工衛星を用いた精密測位、水蒸気解析の原理

GNSSによる位置計測(測位)では、原子時計を搭載し、高度約2万kmを周回する衛星群から発射される電波が、受信機に到達するまでの時間を利用してGNSS衛星と受信機間の距離を計測する(第2図)。GNSS衛星の位置が既知で時計が正確であれば、3つ以上の衛星からの距離を計測することで受信機の三次元的な位置が求められる。

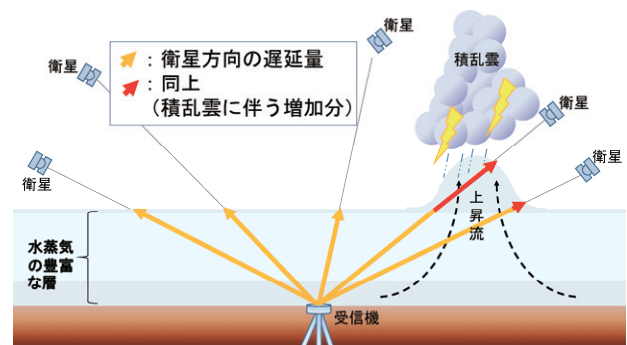
電波は真空中では光速で伝播するが、大気中では速度が遅くなる。遅れの量は経路上の気圧・気温・水蒸気によって決まる。気圧や気温に比べ、水蒸気は時・空間変動が大きく、GNSSによる位置測定(測位)に誤差をもたらすノイズである。一方、衛星と受信機の位置を予め求めておけば、衛星から発射された電波が、地上の受信機に到達するまでに経過した時間から、電波の遅れの量(遅延量)がわかる。気圧や気温の寄与を差し引くことで水蒸気による寄与のみを抽出することができ、さらには水蒸気量を求めることができる。測位解析にと

ってはノイズとなる水蒸気量を、大気変動のシグナルとして利用することができる。



第1図: 観測点分布。

(左)GEONET(国土地理院)、(右)AMeDAS(気象庁)



第2図: GNSS観測と、GNSS観測への積乱雲の影響を説明する模式図。高度2万キロの衛星から発射される電波は大気によって遅れが生じ、測位誤差をもたらす。特に上昇気流等により、積乱雲近傍では周囲より水蒸気量の変動が大きくなる。衛星方向の遅延量を解析することで、受信機周囲の水蒸気の変動を把握できる。

3. 水蒸気変動を用いた積乱雲の監視

大気中の水蒸気は、平均的には最下層で最も多く、高度とともに指数関数的に減少する。しかし、対流活動の活発な、積乱雲周辺では強い上昇流・下降流の影響により、水蒸気は時・空間的に激しく変動する。

GNSSは受信機を頂点とした上下を逆転させた円錐形の空間に存在する衛星からの電波を観測するため、個々の衛星から解析された水蒸気量の違いは、上記逆円錐空間内の水蒸気の空間変動を反映している。当研究では水蒸気量のばらつきから、積乱雲の発達の度合いを推定する指標を提案し

(Shoji 2013)、また受信機周囲数キロメートルの範囲の水蒸気分布を詳細に解析する手法の開発(Shoji et al. 2014)を行ってきた。

4. つくば竜巻(2012/5/6)の親雲による水蒸気変動

2012年5月6日、国内の記録では最強クラスである藤田スケールF3の竜巻が発生し、つくば市に大きな被害をもたらした。第3図には竜巻の発生した12時35分の、気象研究所レーダーで捕らえたレーダー反射強度分布を示す。竜巻発生時にしばしば観測される鉤(フック)状に降水域が連なり、その南端で竜巻が発生した。竜巻はその後北東方向に時速約60kmで移動し、北条地区に甚大な被害をもたらした。

第4図には、竜巻周辺のGNSS観測点で解析された水蒸気変動の度合いの時間変化を示す。WVI(Water Vapor Inhomogeneity: 水蒸気非一様性)指標と名づけたこの指標は、各衛星からの電波の遅れから算出した鉛直積算水蒸気量(可降水量)の標準偏差として定義されている。茨城県石下町に設置されたGNSS観測点では12時20分過ぎからこの指標が急増し、竜巻発生直後に約7mmという大きな値を示している。12時36分に同観測点で解析された可降水量は32mmである。個々の衛星方向に見ると、その2割以上という大きな標準偏差があったことになる。国土地理院のGNSS観測点でも12時30分過ぎからWVIが増加し、竜巻の最も近づいた45-48分頃に最大値(3mm)を記録している。竜巻から17km以上離れた館野の高層気象台観測点では、この期間中ほとんどWVIが1mm未満で経過しており、目立った時間変動は見られない。

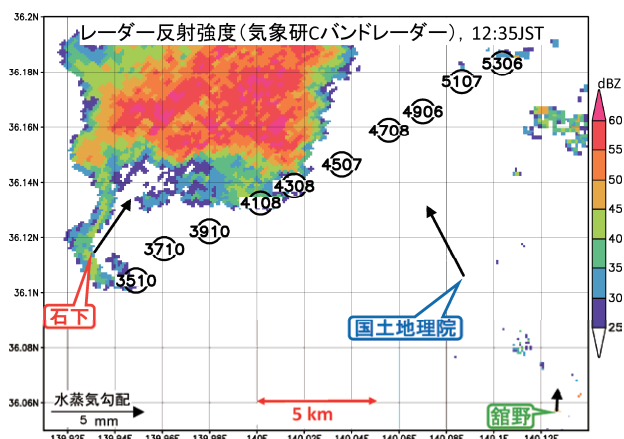
さらに視線遅延量を利用し、可降水量分布を解析したところ、従来のGNSS観測点における平均の可降水量解析では表現されなかった竜巻の親雲前面の水蒸気増加と後面での減少という数キロメートルスケールの強い変動を解析できた(図省略)。

5. まとめと今後に向けて

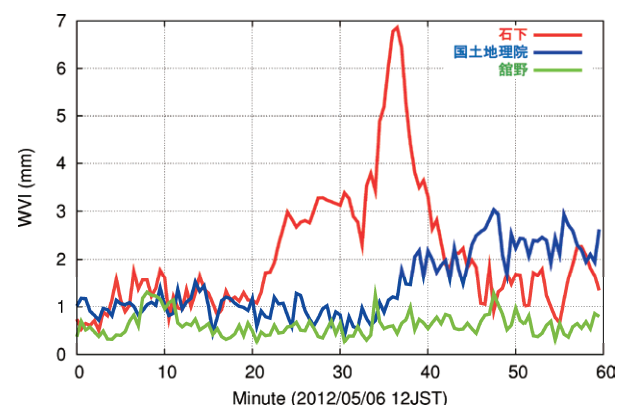
国土地理院のGEONETは、国全体をカバーするGNSS連続観測網としては世界最高密度の観測網であり、そこから得られる高い時・空間分解能の水蒸気情報は気象学研究や天気予報業務に重要な役割を果たす。気象庁では2009年より数値天気予報にGEONETから解析された可降水量を利用している。当報告ではさらに豪雨や突風等をもたらす積乱雲の監視への利用に向けた取り組みを紹介した。

GPSは米国の衛星測位システムだが、GNSSの分野では米国以外の衛星の利用拡大が進んでいる。国土地理院もGEONETの複数GNSS衛星対応を進め、2013年5月より、ロシアのGlonassと日本の準天頂衛星の観測データを公開してい

る。上記の測位衛星のデータを加えることで、水蒸気変動の解析精度向上が期待できる。今後、こうした研究とともに処理の高速化を図り、実用化をめざしたい。



第3図: 2012年5月6日12時35分のつくば市周辺のレーダー反射強度(モザイク)。4桁数字付の円は、レーダー解析による竜巻の経路。4桁数字の上2桁が時刻、下2桁が分を表す。黒矢印はGNSS解析による水蒸気の多い方向(矢印の基点がGNSS観測点の位置)。石下は竜巻発生位置から約2km北西、国土地理院と館野は最接近時の45分に竜巻から各々約7km、および約17km離れている。



第4図: 水蒸気量のばらつきを示す指数の時間変動(2012年5月6日12~13時)。(赤線)茨城県石下町にある国土地理院のGNSS観測点(0583)、(青線)国土地理院構内のGNSS観測点(0627)、および(緑線)高層気象台の観測点(TATN)。

参考文献

- Shoji, Y., 2013: Retrieval of Water Vapor Anisotropy using the Japanese Nationwide GPS Array and its Potential for Prediction of Convective Precipitation, *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 43–62.
- Shoji, Y., H. Yamauchi, W. Mashiko, and E. Sato, 2014: Estimation of Local-scale Precipitable Water Vapor Distribution Around Each GNSS Station using Slant Path Delay. *SOLA*, **10**, 29-33.