

気温上昇で急激に増加する水蒸気量 —降水がより激しくなる可能性を指摘—

1. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 平 朝彦、以下「JAMSTEC」という。）シームレス環境予測研究分野の藤田実季子技術研究員、北海道大学大学院地球環境科学研究院の佐藤友徳准教授らは、GPS 衛星電波の大気中の水蒸気による遅れから推定した日本各地における過去 15 年間の大気全体の水蒸気量（可降水量、※1）と日平均地上気温（以下「地上気温」という。）との関係を解析したところ、これまでに予想されていたよりも大きい変化率で気温上昇に対して可降水量が増加していることを明らかにしました。

一般的に大気中の水蒸気量は、気温上昇とともに特定の変化率で増加する性質を持っています。ところが、現実の大気では地上気温が上昇すると、上空の気温と水蒸気の分布も変化するため（図 1）、地上観測のデータから上空の水蒸気量（※2）を含めた増加率を正確に見積もることは困難です。特に、豪雨の原因となる極端に湿った大気状態を調べるにはデータ量が不十分なため、統計的な解析が難しい状況でした。

そこで本研究では、多数の GPS 衛星の電波データから大気中の水蒸気による遅れを抽出したのちに可降水量を推定し、気温上昇に対する増加率を求めました。理論的な手法も取り入れ上空の水蒸気量の変化を考慮した結果、地上気温 1℃上昇に対する可降水量の増加率は、従来考えられていた 7%よりも大きい場合があり、11~14%にのぼることがわかりました。この値は上空の水蒸気量および気温変動の重要性を示すものです。

上空の水蒸気量と地上で観測される降水量は密接な関係にあり、地球温暖化に伴う地上気温の上昇により大気中の水蒸気量が増加することで、一定時間内に観測される降水量（降水強度）が増す可能性が指摘されています。今回の結果は水蒸気量の観測結果ですが、降水についても想定より強くなる可能性を示しており、将来の降水強度の変化を理解する上で大いに役立てられます。

なお、本研究は環境省環境研究総合推進費（研究代表者：いずれも藤田実季子、課題番号 RFa11-01、2RF-1304）、JSPS 科研費の若手研究 B（研究代表者：藤田実季子、課題番号 15K16316）、若手研究 A（研究代表者：佐藤友徳、課題番号 15H05464）、文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラムの支援を受けて行われました。

本成果は、英科学誌「Scientific Reports」に 7 月 6 日付け（日本時間）で掲載されました。

in response to upper air profiles estimated from surface air temperature

著者：藤田実季子¹、佐藤友徳²

1. JAMSTEC シームレス環境予測研究分野、2. 北海道大学大学院地球環境科学研究院

2. 背景

大気中の水蒸気量の変動は雲や雨の変動と密接な関係にあります。極端な大雨は甚大な被害をもたらす可能性があるため、短期的な予測だけでなく温暖化に代表される長期的な時間スケールにおける変動やそのメカニズムの解明が求められています。私たちの研究グループにおいても現場観測や数値実験を行い、このような雲・降水現象の詳細把握と予測のための研究を行なっています。

これまでの研究で、地上気温の上昇に伴う極端な降水強度の増加率は、大気の飽和水蒸気量が気温の関数であること（気温が 1°C 上昇すると飽和水蒸気量は 7% 増加する：クラウジウス・クラペイロンの定理）を考慮するとおおよそ説明できることがわかってきました。ところが降水の源となる上空の水蒸気量の変動については、従来の観測データでは観測時間の間隔や観測点数が少なくデータ量が不十分のため、統計的な解析をすることが難しい状況でした。

そこで私たちは、主に地殻変動の監視を目的として全国各地に設置されている GPS 観測網（国土地理院 GEONET）で受信された衛星電波データから可降水量を推定し、地上気温との関連性について調べることを試みました。GPS 電波は、人工衛星から発出された後、大気中を伝搬し地上の受信局に到達するまでの間に、電離層や水蒸気などによる遅れを生じます。この電波遅延のうち水蒸気による遅延量を抽出することで、水蒸気の鉛直積算量、すなわち可降水量を推定することができます。この観測網では日本全域で 1000 点を超える観測点で連続的な観測が行われていることから、統計的な解析に十分な稠密で高頻度の水蒸気データが得られました（図 1）。

3. 成果

推定された可降水量と地上気温の関係を解析した結果、地上気温がおおよそ 16°C より低い場合、可降水量は地上気温上昇とともに、過去の研究で示されていた増加率（7%）よりも大きい増加率、11~14% 程度で変化していることがわかりました。（図 2）。

しかし、今回使用した可降水量という値は水蒸気量の鉛直積算量であるため、上空の水蒸気分布が地上気温の変動によってどのように変化したのか調べることができません。そこで、さらに本研究では、気温と水蒸気の鉛直構造を理論的に推定し、次に述べる 2 つの効果で地上気温に対する可降水量の変化率が增大することを示しました。

1) 大気の水蒸気が飽和（相対湿度 100%）であると仮定した場合、気温と高度の関係を表す気温減率（※3）は一般的に乾燥大気の場合に比べて小さくなります。これにより地上気温から

推定された上空の気温は、未飽和の乾燥大気に比べ高いため、大気に含まれる水蒸気も多くなると考えられます（図3左）。

2) さらに、地上気温の上昇に伴い雲などの対流活動が活発化します。このような対流システムに伴う循環によって、水蒸気を含む空気が力学的に上空へ運ばれる効果が考えられます。この効果による湿潤な大気層の厚さの変化が重要であることがわかりました（図1）。

この結果は、地上付近の平均的な気温上昇によって上空の気温と水蒸気量が敏感に応答することを示しており、水蒸気量・降水の変動傾向を知る上で従来の知見を補う不可欠な指標となると言えます。また、降水強度の将来変化を正確に予測するために、地表面から対流圏上部にかけての気温・水蒸気量の鉛直分布観測の重要性が改めて示されたと考えています。

4. 今後の展望

本研究では GPS 衛星電波の水蒸気による遅れから、地上気温と可降水量の関係を明らかにし、地上気温の上昇に伴う大気鉛直構造の変化が、可降水量の変化率を増大させていることを示しました。得られた結果は、地球温暖化に伴い頻発が懸念される極端な大雨のメカニズムの解明に繋がるものと考えられます。一方で、日本以外の乾燥域では地上気温の上昇に伴い乾燥化が一層進むことも知られており、今回対象とした空間スケールよりも大きな大気の流れの影響が指摘されています。正確な理解のためには各地域の降水・水蒸気量の変動特性と、気温上昇に伴う大気循環場の変動との関連性をさらに検証していく必要があります。今後は、新たな衛星観測データの活用や JAMSTEC のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を用いた数値実験を行い、引き続き研究を進めていきます。

※1 可降水量：大気中の水蒸気量の地表面から大気上端までの鉛直積算値。降水量と同様に mm の単位で表す。

※2 上空の水蒸気量：本研究では、GPS 観測から算出した可降水量のうち、飽和を仮定した場合の大気境界層内の水蒸気量を差し引いた値を、上空の水蒸気量として定義している。大気境界層とは、地表面の影響を強く受ける大気下部の層のこと。本研究では、大気境界層内の積算水蒸気量は、地上における気温と水蒸気量によって決定される値であると仮定している。

※3 気温減率：ある空気塊が断熱的に上昇するとき、その空気塊の気温が高度とともに変化する量。大気中の水蒸気が飽和の場合は湿潤断熱減率と呼ばれ、雲が生成される際の凝結熱による大気の加熱の影響で、乾燥大気に比べ気温減率は小さくなる。

※4 パーセンタイル値：百分位数。本研究ではデータセットを昇順に並べ替え全体を 100 とした場合の相対順位の数値。

お問い合わせ先：

(本研究について)

国立研究開発法人海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野

技術研究員 藤田 実季子

電話：045-778-5548 E-mail：fmiki@jamstec.go.jp

国立大学法人北海道大学大学院地球環境科学研究院

准教授 佐藤 友徳

電話：011-706-2288 E-mail：t_sato@ees.hokudai.ac.jp

(報道担当)

国立研究開発法人海洋研究開発機構

広報部 報道課長 野口 剛 電話：046-867-9198

国立大学法人北海道大学

総務企画部 広報課 広報・渉外担当 電話：011-706-2610

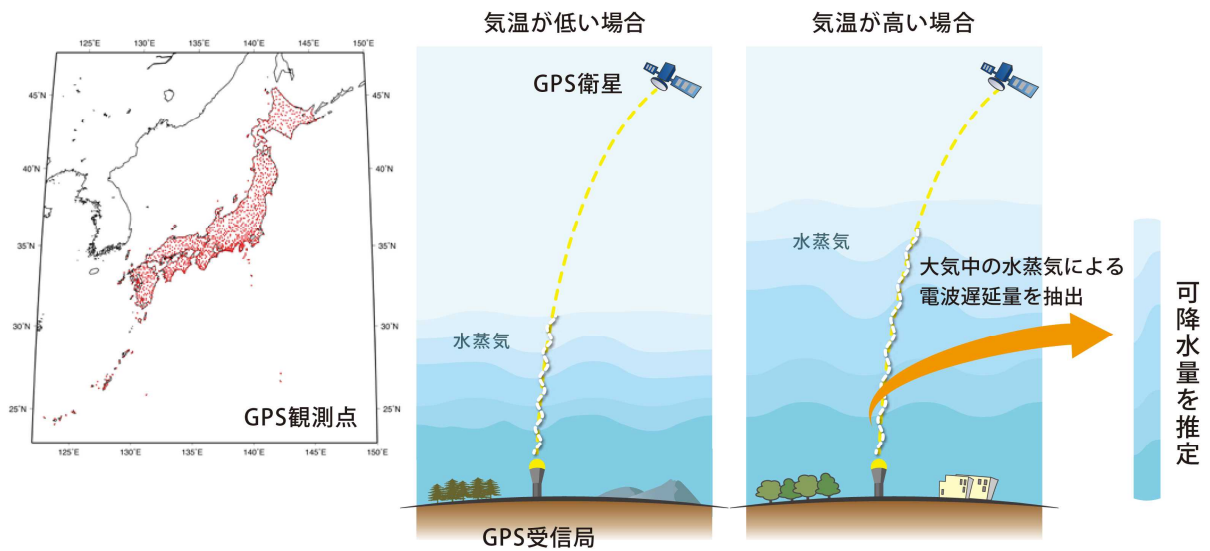


図1 本研究で使用した GPS 観測点の分布と GPS 可降水量の模式図。気温が低い場合より高い場合の方が、水蒸気を多く含む湿潤大気層が厚くなる。

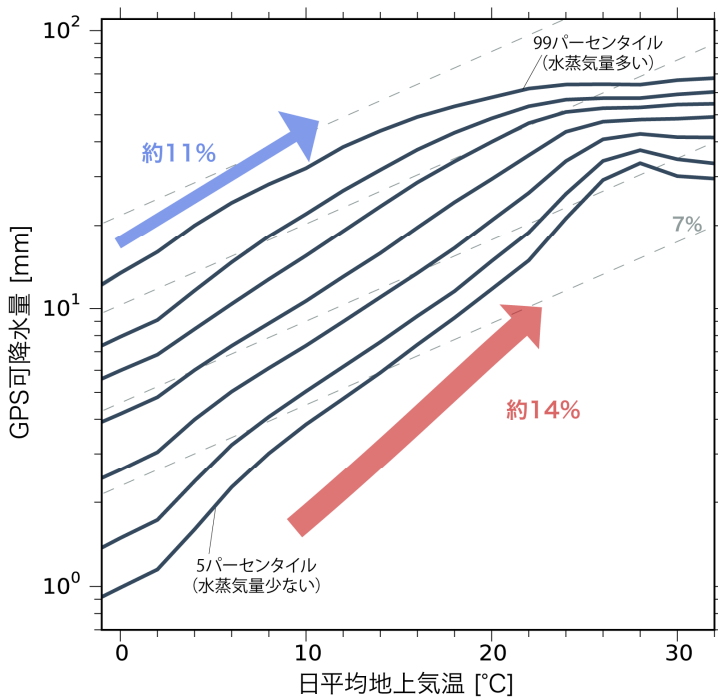


図2 日平均地上気温と GPS 観測から算出された可降水量 1 時間値の関係。同じ日平均地上気温の場合でも可降水量にばらつきがあるため、日平均地上気温 2°C 毎に算出した 5, 10, 25, 50, 75, 90, 99 パーセンタイル (※4) 値を示す。一番上の実線は、横軸の日平均地上気温に対して可降水量が極端に多い場合を示し、一番下の実線は極端に少ない場合を表す。日平均地上気温がおおよそ 16°C 以下の場合、GPS 可降水量の増加率はこれまで予想されていた 7% (灰色破線) よりも大きく、11-14% 前後の変化率で気温とともに増加する。

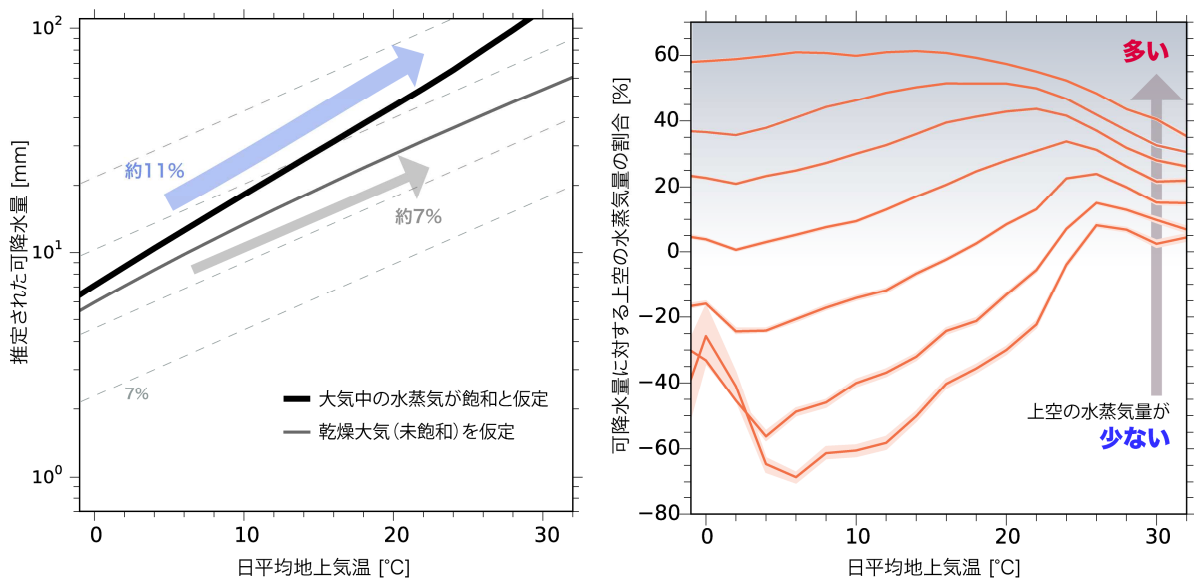


図 3

左図：気温減率を用いて推定された可降水量理論値の増加率の違い。乾燥大気を仮定した場合は、これまで予想されていた7%に近い変化率で増加するが、飽和大気を仮定した（湿潤断熱減率を使用して気温を推定した）場合の可降水量は、乾燥大気の場合よりも地上気温に対する増加率が大きくおよそ11%で変動する。この変動率は図2の上位の値（可降水量が極端に多い場合）とおおよそ一致する。

右図：GPS衛星による可降水量に対する上空の水蒸気量の仮想的な割合。各実線は上から順に図2と同じパーセンタイル値に対応する。上空への水蒸気輸送は地上気温が上昇するにつれて活発になるため、上空の水蒸気量の割合が増加する。