

課題名 2RF-1304 水蒸気量変動の気候変化に関する研究

課題代表者名 藤田 実季子（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分野）

研究実施期間 平成25～27年度

累計予算額 18,440千円（うち平成27年度：6,348千円）  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 水蒸気量（可降水量）、リモートセンシング、気候変動、極端現象

#### 研究体制

- (1)GPS可降水量を用いたアジア域の水蒸気変動の把握（国立研究開発法人海洋研究開発機構）
- (2)温暖化予測モデルにおける水蒸気量再現性と気候再現性の評価（首都大学東京）

## 研究概要

### 1. はじめに（研究背景等）

大気中の水蒸気は氷粒・水滴・水蒸気と相転移を介し、その変化は気候感度における最大のフィードバックである（IPCC第4次報告書）。これらの変動は地球全体の水／エネルギー循環に大きく影響を及ぼすため、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動の観測は大変重要であると考えられる。水蒸気量の観測は、現業のラジオゾンデやマイクロ波センサーを搭載した衛星によるものが主流であり、Ross and Elliott (2001)はラジオゾンデデータを用い、対流圏の水蒸気量の長期トレンドを調査した。Trenberth et al. (2005)では、Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) によって観測された可降水量を用いて、1988年から2003年にかけての海上の可降水量の変化量を示した。

一方で、Global Positioning System (GPS)の衛星電波が大気中を通過時の遅れを計測して得られる積算水蒸気量（可降水量）は、高精度・高時間分解能が利点として挙げられる。環境省環境研究総合推進費革新型研究開発領域課題、RFa11-01「温暖化影響評価のための高精度水蒸気量データセットの作成」では、GPS衛星データから可降水量を算出し、データセットとして公開した（GPS pRecipitable wAter reSearch Project (GRASP) 可降水量データ）。

RFa11-01課題では次の成果が得られている。可降水量の過去10年程度の水蒸気変化量が算出され、日本の筑波では1年あたり+0.02mmの変化量が見積もられた（Fujita et al., 2012）。また、水蒸気量データの相互比較では、再解析データには水蒸気量そのものに大きなばらつきが存在し、領域の降水量のみならず、全球規模の気温にまで大きく影響することが明らかとなった（Takahashi et al., 2012）。

しかし、水蒸気変動の詳細な把握にはいくつかの解析不十分な点が挙げられる。特に日本域の稠密で高時間分解能なGPS可降水量データについて、この特性を生かした、地域スケールの水蒸気変動の気候変化は、地域の降水量にも影響するため調査が必要と考えられる。また最新のCMIP5を用いた水蒸気変動の再現性の評価は、未だ行われていない。

以上のことから、水蒸気は、最大の温室効果気体であり、同時に最大の不確実性を伴っているとも言える。GRASP可降水量データを利用した、地域スケールの水蒸気変動の把握や、CMIP5モデル内での再現性の評価は気候変化を知る上で、重要な情報となると考えられる。

### 2. 研究開発目的

研究背景をふまえ、以下の通り目的を設定する。

GRASP可降水量データを元に地域スケールの水蒸気変動の気候変化の把握を行う。特に、日本域における詳細スケールの水蒸気変動・極値についての長期変動を調査する。また、気候変動に伴う気温変化によって可降水量がどの程度変動するのか、地上気温と可降水量の関係性の調査を行う。さらに近年運用が本格化している複数のナビゲーション衛星を用い、可降水量を算出し精度を評価する。

最大の温暖化気体である水蒸気の絶対量及び時空間分布変動についてCMIP5モデルでの再現性を比較検

証する。さらに、水蒸気量変動が、日本を含むアジアモンスーン域などの気候変動とどのような関係があるのかを調査する。その際に、空間解像度の細かいGRASP可降水量と空間解像度の粗いCMIP5の温暖化モデルの直接的な比較は難しいため、領域気候モデルを用いて、空間解像度のギャップをつなぐ。さらに、領域規模の気候変動における、水蒸気量変動の影響について、日本を含むアジアモンスーン域を対象に評価する。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) GPS可降水量を用いたアジア域の水蒸気変動の把握

GRASP可降水量を中心とした、水蒸気量変動把握のための解析を実施した。まず、水蒸気量の解析に関連する観測データの収集・整備した上で、季節毎の頻度分布を考慮し、夏季と冬季の極端値の出現特性をとその年々変動や長期変動傾向を解析した。さらに、水蒸気量(飽和水蒸気量)は気温のみに依存する物理量であることから、地上気温と可降水量の関係をクラウドジウス・クラペイロンの関係に準ずるかに注目し調査した。

また、GPS衛星のみで解析していたGRASP可降水量データについて、複数のナビゲーション衛星を用いる方式へシステムを更新し、現バージョンとの比較を実施し、可降水量推定における精度向上への効果を調査した。追加対象とする衛星はGLONASS(ロシア)とQZSS(日本、愛称:みちびき)とした。

#### (2) 温暖化予測モデルにおける水蒸気量再現性と気候再現性の評価

温暖化予測モデルにおける水蒸気量の空間分布及び季節変化、経年変化の把握のための、温暖化予測モデルの出力データを収集する。水蒸気量に関するモデル出力データのみならず、降水量や気温等の気候変動に関連する物理要素についても収集・整備を行う。そこで、まずは、全球の水蒸気量が使用できる大気の再解析データを用いて、それらのばらつきを調べ、観測データが同化された再解析データでどの程度の再現性があるのかを調べる。

また、近年世界各地で、地上気温の上昇が報告されているが、同時に海面水温も上昇しており、特に黒潮域の海面水温の上昇が世界の海洋の平均よりも大きいことが指摘されている。また、夏季の地上気温の上昇は、熱中症リスクの増大や電力の需要逼迫など、私たちの健康や生活に大きな影響を及ぼす。地域スケールの気温変動には、地球温暖化に伴う広域的な気温上昇に加えて、近傍の海面水温による地域スケールの気温上昇が含まれているため、両者を区別して評価することで、その地域の気温変動の原因解明につながることを期待される。夏の関東地方の気候変動に着目し、海面水温変動が気温に及ぼす影響を、高解像度の長期間の数値シミュレーションから定量的に明らかにした。

### 4. 結果及び考察

#### (1) GPS可降水量を用いたアジア域の水蒸気変動の把握

GRASP可降水量データの解析により、日本域では極端に湿潤な可降水量を観測する頻度が、最近10年において緩やかに増えているということが明らかになった。この傾向は夏季だけでなく冬季でも見られた。すなわち近年の湿潤化傾向が観測データから明らかとなった。これまでの現地観測では湿度センサーのシステムティックなバイアスのために長期変動を示すのが難しい状況であることから、このような観測結果は貴重であると言える。

可降水量の地上気温に対する変化率についても解析した。(飽和)水蒸気量は気温により決定される(クラウドジウス・クラペイロンの定理)が、高温時に大気はより深い水蒸気収束を形成する傾向があるため、地上気温による変化率は、クラウドジウス・クラペイロンの関係を超えることが分かった。この変化率の上昇傾向は降水過程と関係していることも観測データの解析により明らかとなった。さらにCMIP5による降水量と、GPS遅延量による水蒸気量変動の傾向についても明らかになった。

マルチGNSSによる可降水量はGPS衛星のみから算出された値よりも精度が向上する結果が得られた。精度の向上は可降水量のみならず、観測点の座標値にもその効果が見られた。この成果は2014年の米国航法学会でBest Presentation Awardsを受賞した。

#### (2) 温暖化予測モデルにおける水蒸気量再現性と気候再現性の評価(首都大学東京)

CMIP5モデルでの水蒸気の再現性を調べるために、CMIP5の過去再現実験のデータと、CMIP3の過去再現実験とも比較し、CMIP5モデルがCMIP3モデルに比べて可降水量の空間分布が良くなったことが分かった。一方で、空間標準偏差は、依然としてばらついているため、可降水量の空間的な凹凸の再現性の改善の必要性があることがわかった。

アジアモンスーン域である日本付近において、水蒸気量変動による領域規模の温室効果についても調査した。

シミュレーション結果から、海面水温変動のみに起因する気温などの変動を取り出し、海面水温の年々の変動が、関東地方の気温変動を増幅していることが分かり、関東地方の気温変動のうちの約3割が海面水温の変動によって説明されることが分かった。これは、領域規模の温室効果の強化を示唆していると考えられる。海面水温が平均よりも高い年は、地上気温だけではなく、水蒸気量も大きくなることが分かった。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

GRASP可降水量の極値の年々変動を調査することで、近年、日本の広い範囲で極端な湿潤が増加、乾燥が減少している傾向が明らかとなった。これまでの現地観測では湿度センサーのシステムティックなバイアスのために長期変動を示すのが難しいことから、貴重な観測結果であると言える。

可降水量と気温によるスケージングが、水蒸気のスケールハイトの概念を導入することで、クラウドウス・クラペイロンの定理との関係性が明らかになった。強雨による先行研究と同様に、気温が上昇するに従い水蒸気量は急激に増加する傾向が水蒸気の観測データから初めて得られた。

複数のナビゲーション衛星(マルチGNSS)を用いることで、可降水量算出の元となる大気遅延量の推定誤差に顕著な改善が見られた。CMIP5モデルの将来予測実験の不確実性に関連するモデル間のばらつきについて評価し、水蒸気量は、全球平均した年平均1.5 mmから2 mm程度であることがわかった。この成果は2014年の米国航法学会でBest Presentation Awardsを受賞した。また、GNSSを用いた視線方向の解析で通常観測では捉えられない小規模の水蒸気収束を伴う乱流が観測された。大気海洋相互作用を理解する上で重要な証拠と言える。

地域規模の水蒸気量変動は、地域規模の温室効果の強化をもたらす可能性が示唆された。具体的な現象として、日本近海の海面水温が高い場合に、その近傍で、水蒸気量変動を通して高温多湿環境が形成されることがわかった。暖候期の海面水温が水蒸気量変動を通して、地域規模の気候に影響を及ぼしていることは、領域気候変動の視点と健康影響の視点から重要な結果である。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事柄はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

準天頂衛星「みちびき」を有効的に使用できる。高精度・高時間分解能の可降水量データが気象予報へ導入されれば、より正確な防災情報を提供可能になる。さらには気温上昇に伴う定量的な水蒸気量の変化を考慮した、降水現象の予測や防災予測情報の予測が実施可能になる。

日本域において、領域規模の水蒸気量変動が領域スケールにおいて温室効果を強化している可能性がある。熱中症などの健康被害の観点からも、水蒸気量の監視が重要である。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Fujita M., H. G. Takahashi, N. N. Ishizaki, and F. Kimura: Atmos. Sci. Lett., 15: 275–281. (2014), “Long-term variation of winter precipitation linked to sea surface heat fluxes around the Japan/East Sea”
- 2) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, C. Rocken, Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 1085–1089. (2014), “Tropospheric Monitoring Over the Ocean using Shipborne GNSS Receiver”

- 3) Takahashi, H. G., S. A. Adachi, T. Sato, M. Hara, X. Ma, and F. Kimura (2015): An Oceanic Impact of the Kuroshio on Surface Air Temperature on the Pacific Coast of Japan in Summer: Regional H<sub>2</sub>O Greenhouse Gas Effect. *Journal of Climate*, 28, 18, 7128–7144.

## (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Fujita, M., H. G. Takahashi, N. N. Ishizaki and F. Kimura: Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly 2013 (Vienna, Austria) “Winter precipitation in the Sea of Japan side associated with the sea surface flux”
- 2) 藤田実季子、高橋洋、原政之: 2013年度日本気象学会秋季大会(仙台「インド洋ダイポールモード現象とスマトラ島降水日変化」)
- 3) 高橋洋、足立幸穂、原政之、馬夔銚、木村富士男: 2013年度日本気象学会秋季大会(仙台)「東京および名古屋都市域での地上気温の年々変動に対する海面水温(SST)の影響」
- 4) 町田駿一、高橋洋: 2013年度日本気象学会秋季大会(仙台)「夏季晴天日における名古屋市周辺の雲分布とその時間変化」
- 5) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, C. Rocken, the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, 2014. “Tropospheric Monitoring Over the Ocean using Shipborne GNSS Receiver”
- 6) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: International Conference on Regional Climate – CORDEX 2013 (Brussels, Belgium) “Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different IOD phases”
- 7) Fujita, M., et al.: Issues in downscaling of climate change projection, Tsukuba, Japan, 2015  
“Climatological characteristics of precipitation over Japan in NICAM AMIP-type 25-year simulation “
- 8) 藤田実季子、川合義美、永野憲、谷口京子: 日本海洋学会2016年度春季大会(2016)「黒潮続流域における水蒸気不均一性」

## 7. 研究者略歴

課題代表者: 藤田 実季子

筑波大学大学院修了、博士(理学)、現在 独立行政法人海洋研究開発機構 技術研究員

研究分担者: 高橋 洋

名古屋大学環境学研究科博士課程修了、博士(理学)、現在 首都大学東京都市環境学部 助教

## 2RF-1304 水蒸気量変動の気候変化に関する研究

## (1) GPS可降水量を用いたアジア域の水蒸気変動の把握

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分野

藤田実季子

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：10,220千円（うち平成27年度：4,174千円）

予算額は、間接経費を含む。

## [要旨]

大気中の水蒸気の変動は地球全体のエネルギー循環に大きく影響を及ぼすため、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動の観測は大変重要である。Global Positioning System (GPS)の衛星電波が大気中を通過時の遅れを計測して得られる積算水蒸気量（可降水量）は、高精度・高時間分解能が利点として挙げられる。本サブテーマでは、このGPSによる可降水量データセット（GPS pRecipitable wAter reSearch Project (GRASP) 可降水量データ）を解析し気候変動に伴う地域スケールの水蒸気変動の特性を調査した。さらに、GPS衛星のみで解析していたGRASP可降水量データについて、複数のナビゲーション衛星（マルチGNSS）を用いる方式へ更新し現バージョンとの比較から可降水量推定における精度向上への効果を調査した。

GRASP可降水量データの解析により、日本域では極端に湿潤な可降水量を観測する頻度が、最近10年において緩やかに増えているということが明らかになった。この傾向は夏季だけでなく冬季でも見られた。すなわち近年の湿潤化傾向が観測データから明らかとなった。これまでの現地観測では湿度センサーのシステムティックなバイアスのために長期変動を示すのが難しい状況であることから、このような観測結果は貴重であると言える。

可降水量の地上気温に対する変化率についても解析した。（飽和）水蒸気量は気温により決定される（クラウジウス・クラペイロンの定理）が、高温時に大気はより深い水蒸気収束を形成する傾向があるため、地上気温による変化率は、クラウジウス・クラペイロンの関係を超えることが分かった。この変化率の上昇傾向は降水過程と関係していることも観測データの解析により明らかとなった。さらにCMIP5による降水量と、GPS遅延量による水蒸気量変動の傾向についても明らかになった。

マルチGNSSによる可降水量はGPS衛星のみから算出された値よりも精度が向上する結果が得られた。精度の向上は可降水量のみならず、観測点の座標値にもその効果が見られた。この成果は2014年の米国航法学会でBest Presentation Awardsを受賞した。

## [キーワード]

水蒸気量（可降水量）、リモートセンシング、気候変動、極端現象

## 1. はじめに

大気中の水蒸気の変化は気候感度における最大のフィードバックであり（IPCC第4次報告書）、氷粒・水滴・水蒸気と相転移を介し、その変動は地球全体の水／エネルギー循環に大きく影響を及ぼすため、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動の観測は大変重要であると考えられる。水蒸気量の観測は、現業のラジオゾンデやマイクロ波センサーを搭載した衛星によるものが主流であり、Ross and Elliott (2001)<sup>1)</sup>はラジオゾンデデータを用い、対流圏の水蒸気量の長期トレンドを調査した。Trenberth et al. (2005)<sup>2)</sup>では、Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) によって観測された可降水量を用いて、1988年から2003年にかけての海上の可降水量の変化量を示した。

一方で、Global Positioning System (GPS) の衛星電波が大気中を通過時の遅れを計測して得られる積算水蒸気量（可降水量）は、高精度・高時間分解能が利点として挙げられる。環境省環境研究総合推進費革新型研究開発領域課題、RFa11-01「温暖化影響評価のための高精度水蒸気量データセットの作成」では、GPS衛星データから可降水量を算出し、データセットとして公開した。RFa11-01課題では可降水量の比較的長期の水蒸気量の変化が算出され、日本の筑波では1年あたり+0.02mmの変化量が見積もられた（Fujita et al., 2012<sup>3)</sup>）。しかしながら、類似した変化量は先述の衛星データでも確認されており、GPSデータの利点である高時間分解能を生かした解析は行われていない。降水現象は急速な水蒸気量変動を伴うことを考慮すると、1時間値以上の高時間分解能な水蒸気量変動、またその長期変動の把握は急務である。

さらに近年、米国GPS衛星に続く複数のナビゲーション衛星の運用が日本を含む各国始まっており、衛星軌道情報を含め安定したデータ提供がされつつある。衛星数の増加は、大気を通過するデータの増加することであるから、より稠密で正確な水蒸気データを算出可能になると期待されるが、これまで定量的な検定は行われていないため調査が必要である。

## 2. 研究開発目的

以上をふまえ以下の目的を設定した。

### (1) GRASP可降水量の変動特性の調査

GRASP可降水量データを利用した、地域スケールの水蒸気変動の気候変化の把握を行う。特に、アジア・日本域における詳細スケールの水蒸気変動・極値についての長期変動を調査する。

### (2) 地上気温と可降水量の関係性の調査

気候変動に伴う気温変化によって可降水量がどの程度変動するのか、関係性の調査を行う。

### (3) マルチGNSSの効果の調査

複数のナビゲーション衛星を用いて算出された可降水量の精度を評価する。

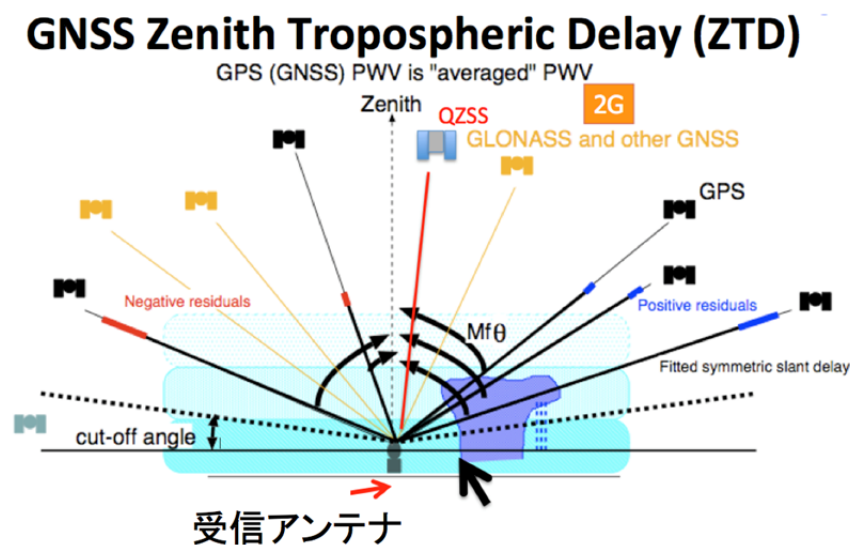
### 3. 研究開発方法

まず、水蒸気量の解析に関連する観測データの収集・整備した。収集したデータは地上観測の気象要素（気温・気圧・降水量・混合比・風向風速・日射量）、台風経路データ、気象再解析データ等である。

GRASP可降水量の変動特性の調査において、日本域の季節毎の頻度分布を考慮し、夏季と冬季の可降水量の出現頻度の把握を行った。出現特性をふまえ気候学的な極端値を算出し、その基準値をもとに、極端な高（低）値の頻度の年々変動や長期変動傾向を解析した。

水蒸気量（飽和水蒸気量）は気温のみに依存する物理量であることから、地上気温と可降水量の関係をクラウジウス・クラペイロンの関係に準ずるか調査した。さらに世界的な地上気温と可降水量の関係性を示すために、乾燥大気に対する湿潤大気の割合をGRASP可降水量算出の元である、大気遅延量から算出（大気遅延量比）し、気候帯との関連性を議論した。

また、GPS衛星のみで解析していたGRASP可降水量データについて、複数のナビゲーション衛星を用いる方式へシステムを更新し、現バージョンとの比較を実施し、可降水量推定における精度向上への効果を調査した。追加対象とする衛星はGLONASS（ロシア）とQZSS（日本、愛称：みちびき）とする。衛星観測のイメージを図(1)-1に示す。

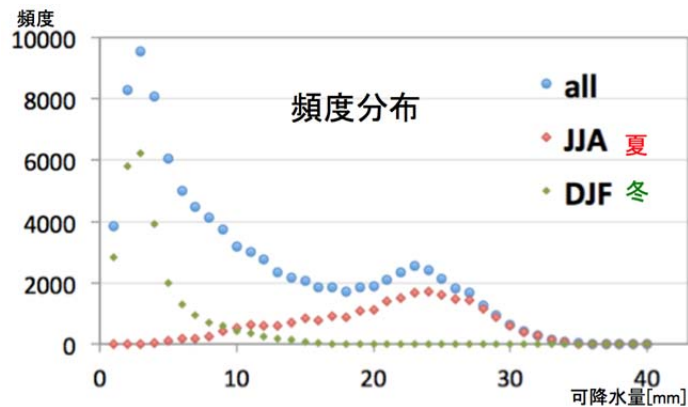


図(1)-1 マルチ衛星観測のイメージ (Iwabuchi et al. 2011<sup>4)</sup>)

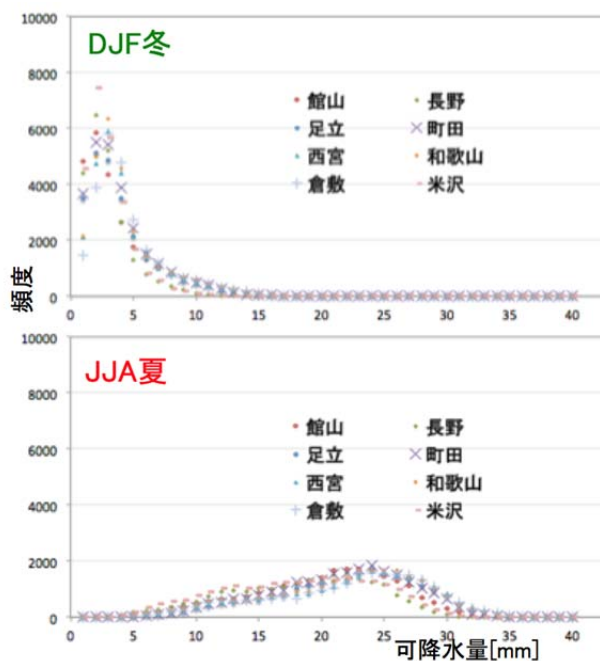
## 4. 結果及び考察

### (1) GRASP可降水量の変動特性の調査

GRASP可降水量の変動特性を解析するために、まず、日本域のGRASPデータから比較的欠測が少なく、均一的にデータがそろっている観測点を100点程抽出した。1998年から2010年における、全点の可降水量による頻度分布を図(1)-2に示す。頻度は観測データ数で正規化している。全期間の頻度分布 (all) は、可降水量5mm前後と25mm前後の2つの極大を持つような確率分布を示した。この2つの極大は、冬(12月から2月)と夏(6月から8月)の極大を反映しており、基本的には気温の頻度分布により、一部梅雨入りの総観規模の水蒸気増加の影響が捉えられている。観測点別にみても(図(1)-3)、分布傾向は緯度などによらずほぼ類似していた。このような二極大をもつ頻度分布は地上気温の頻度にも見られることが分かっている。



図(1)-2 GRASP可降水量の強度別頻度分布

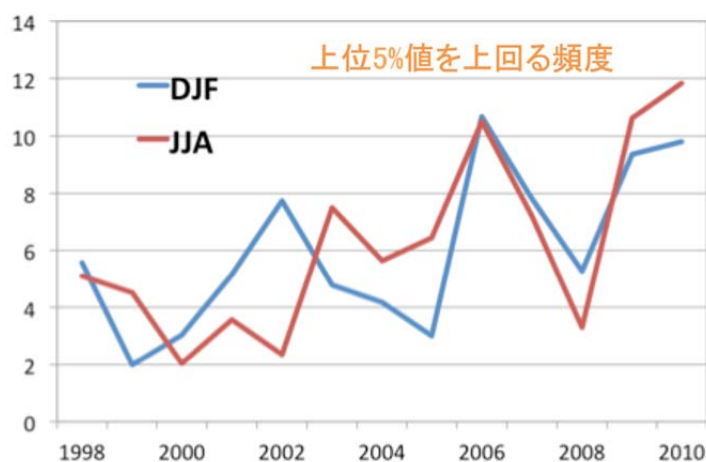


図(1)-3 季節・地点別のGRASP可降水量の強度別頻度分布

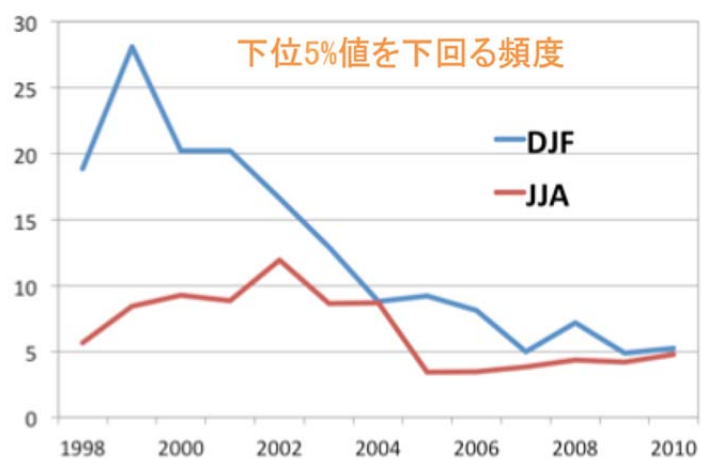


気候変動で懸念されるのが、気象現象の極端化である。水蒸気量の降水イベントなどへの影響は直接的には説明できないが、大量の水蒸気が激しい降水が起こっている場所に吹き込んだ場合、降水強度や持続時間が変化するだろう。そこで次に極端な水蒸気量の年変動を調査した。先に得られた各観測点の夏季・冬季の頻度分布（図(1)-3）から、上位5%と下位5%値を算出した。これを統計的な極値の基準値として、この値を超える頻度を各年の上位5%と下位5%値で算出し、観測点平均を求めたものが図(1)-4と図(1)-5である（各観測点の値は図(1)-6, 7, 8を参照）。上位5%を上回る頻度（図(1)-4）は、年々変動が大きいものの緩やかな増加傾向が観測された。したがって、極端な水蒸気絶対量の観測される頻度が、最近10年において緩やかに増えているということが明らかになった。この傾向は夏季だけでなく冬季でも見られた。一方、下位5%を下回る頻度（図(1)-5）は、上位の場合と同様の年々変動が見られ、特に冬季は極端に乾燥する頻度が減る、すなわち湿潤化傾向が見られた。上位の結果をふまえると、図(1)-2の冬季の頻度分布が右にシフトするような傾向と言える。夏季の低位値には顕著な増加／減少傾向はみられなかった。

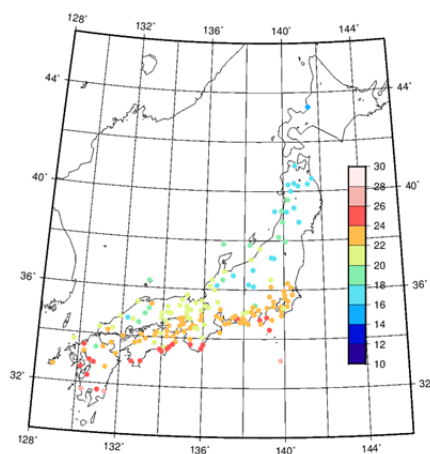
水蒸気の直接観測にラジオゾンデ観測が挙げられる。しかしながら、ラジオゾンデ観測点の水平解像度や観測頻度は地上観測点と比べ高いとは言えず（日本国内でも16カ所／1日2回）、国によっては公開データが限られている。さらにラジオゾンデの湿度センサーには系統的なバイアスの存在が明らかになっており（Vomel et al., 2007）<sup>5)</sup>、各製造元やセンサーのバージョンによりバイアスの傾向が異なるため（Wang et al., 2007）<sup>6)</sup>、水蒸気量の長期変動を議論する際には注意が必要である。以上の理由から、これまでの観測では長期変動を示すのが難しい。今回得られた観測結果は貴重であると言える。



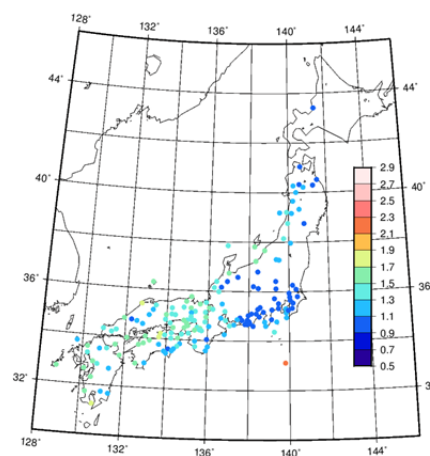
図(1)-4 上位5%値を超える可降水量を観測した頻度（5%値は全統計量から算出）。



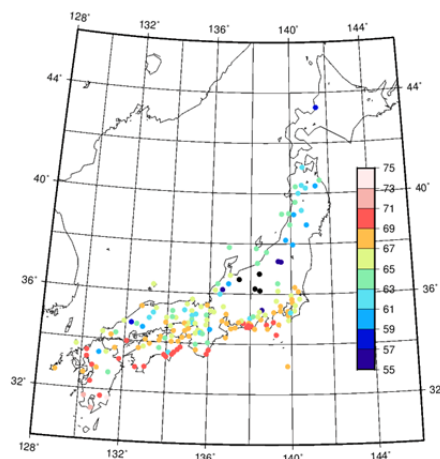
図(1)-5 下位5%値を超える可降水量を観測した頻度（5%値は全統計量から算出）。



図(1)-6 各観測点の年平均値（可降水量15mm～30mm）。



図(1)-7 各観測点の下位5%値（可降水量0.5mm～3mm）。

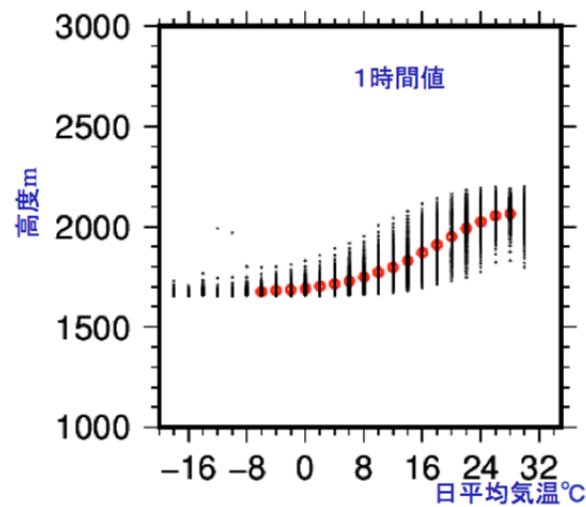


図(1)-8 各観測点の上位5%値（可降水量50mm～75mm）。

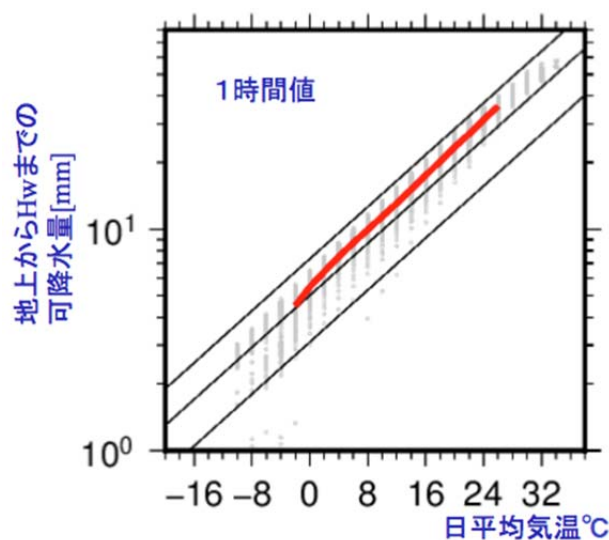
## （２）地上気温と可降水量の関係性の調査

飽和水蒸気量の変動は気温によって決定される。クラウジウス・クラペイロンの定理により、水蒸気量は気温  $1^{\circ}\text{C}$  あたりおよそ  $7\%$  増加する。将来気候において相対湿度の変化が無視できれば、可降水量も同等の増加率を示すと推測できる。一方で、過去の研究では時間降水量の極値と地上気温の関係が、ある気温を境にして  $7\%/1^{\circ}\text{C}$  の増加率を超えることが指摘されている (Lenderink and Meijgaard 2008<sup>7)</sup>)。これは可降水量（実際には飽和可降水量）と地上気温の関係を示していることに他ならない。

そこでGRASP可降水量と近傍点の地上気温を用いて同様の変化率について調査した。まず日本域を対象に、地上気温と可降水量の関係性を探るため、先行研究に基づき日平均地上気温とGRASP可降水量の時間値を用いて解析を行った。日平均の地上気温を基準にするため、地上気温の影響範囲、すなわち大気境界層での議論が必要となる。図(1)-9は地上比湿と可降水量の比から推定される水蒸気のスケールハイトの高度と、図(1)-10はその高度までの飽和水蒸気量の鉛直積算値である。得られた飽和水蒸気量は、日平均地上気温で代表される大気が保持できる水蒸気量の最大値といえる。この水蒸気量はクラウジウス・クラペイロンの定理により、水蒸気量は気温  $1^{\circ}\text{C}$  あたり  $7\%$  程度増加している様子が得られた。

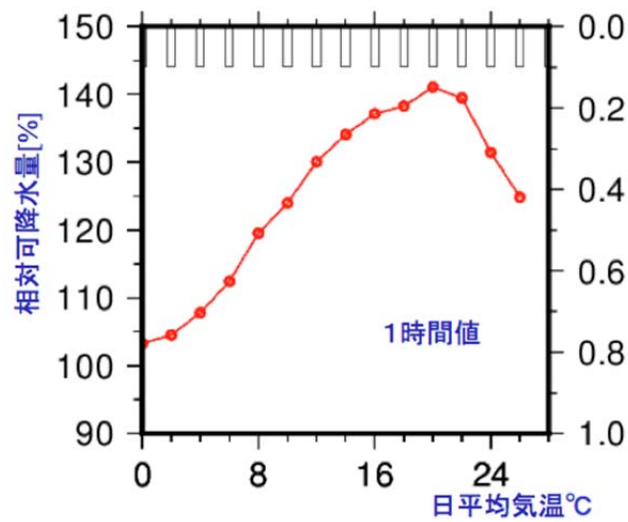


図(1)-9 日平均地上気温と水蒸気のスケールハイトの関係。  
赤プロットは気温ビンにおける平均値。



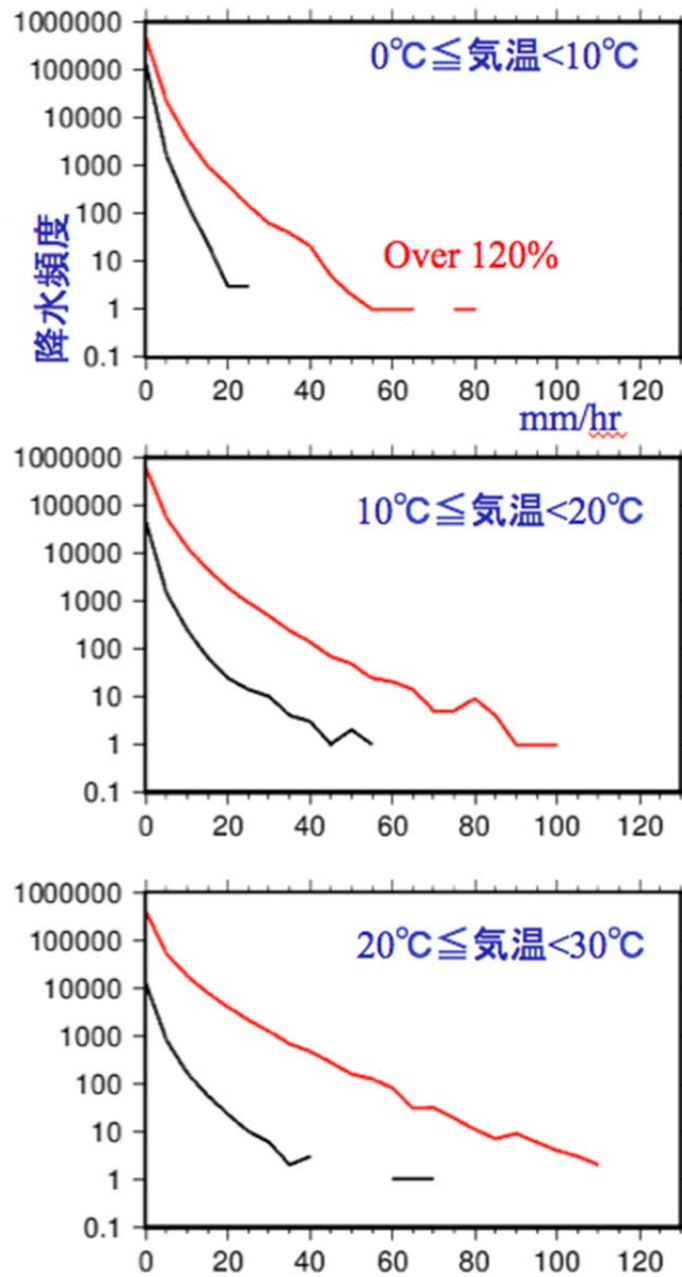
図(1)-10 日平均地上気温と水蒸気のスケールハイト(Hw)まで積算された飽和水蒸気量の関係。  
赤プロットは気温ビンにおける平均値。

次に、先に求めた境界層内の飽和可降水量と、気柱全層積算値である実際に観測された可降水量の気温依存性を求めた。図(1)-11は境界層内の飽和可降水量に対する可降水量の割合（以下、相対可降水量とする）を示す。特に日平均気温が10℃を超える場合に相対可降水量が100%を超過する傾向が見られた。すなわち境界層内の飽和可降水量を超過する水蒸気が高温時に出現する傾向にあることから、より上空の水蒸気の収束が関係していると考えられる。



図(1)-11 日平均地上気温と境界層内の飽和可降水量に対する可降水量の割合の関係。  
棒グラフは各気温ビンでの平均の標準偏差を示す（右軸）。

そこで、各気温帯による相対可降水量と同時期に観測された時間雨量の強度別頻度分布求めた。図(1)-12に示す。高温時かつ高相対可降水量時に、より強い降水が観測されていることが明らかとなった。以上から、水蒸気量（可降水量）の気温依存性の正確な理解には、境界層から自由大気への鉛直方向の水蒸気変動の理解が不可欠であると考えられる。これには降水過程も含まれる。温暖化予測モデルを含む多くの数値モデルは、該当部分を各モデルのために調節されたスキームを用いているため、未だ正確な表現が難しい状況であり、モデル間のばらつきが生じていると推測される。

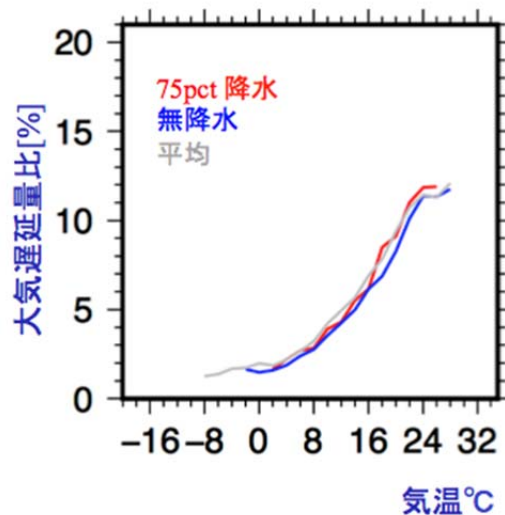


図(1)-12 気温別の強度別降水頻度。赤線は相対可降水量が120%を超える場合。  
黒線はそれ以外。

さらに世界的な地上気温と水蒸気量の関係性を、乾燥大気に対する湿潤大気の比をGRASP可降水量算出の元である、大気遅延量から算出（大気遅延量比）し、気候帯との関連性を議論した。大気の屈折率は気温( $T$ )、乾燥大気分圧( $P_d$ )、水蒸気分圧( $P_v$ )に関係しており、以下のような関係がある。(Thayer, 1974<sup>9)</sup>)。係数 $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ には実験的な値が代入される。

$$10^6[n-1]=k_1\left(\frac{P_d}{T}\right)+k_2\left(\frac{P_v}{T}\right)+k_3\left(\frac{P_v}{T^2}\right)$$

GPS衛星による大気遅延量は乾燥大気による静水圧遅延量と湿潤大気による湿潤遅延量ものに分類される。可降水量は湿潤大気による遅延量から算出される。ここで上式の第1項が静水圧遅延量、第2-3項が湿潤遅延量を示す。これらの地上気温との関連性を、静水圧遅延量に対する湿潤遅延量の割合（大気遅延量比）を用いて解析した。すなわち、気温上昇に対して湿潤遅延量の割合が増えれば、温暖化時により湿潤化する傾向がある。図(1)-13は日本域における、大気遅延量比の気温ビン毎の平均値の分布である。降水の有無に関わらず、気温上昇とともに湿潤遅延量の割合が増加している傾向が明らかであった。

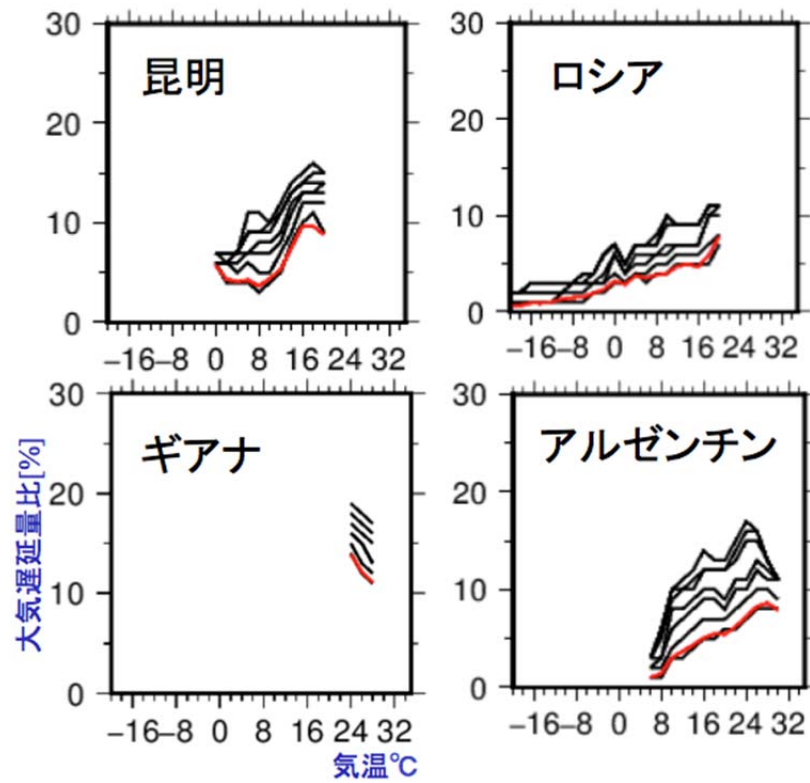


図(1)-13 日本域の気温別の大気遅延量比[%]。赤線は降水が観測された際の上位75パーセンタイル値、青線は無降水時の平均値、灰線は全ての平均値を示す。

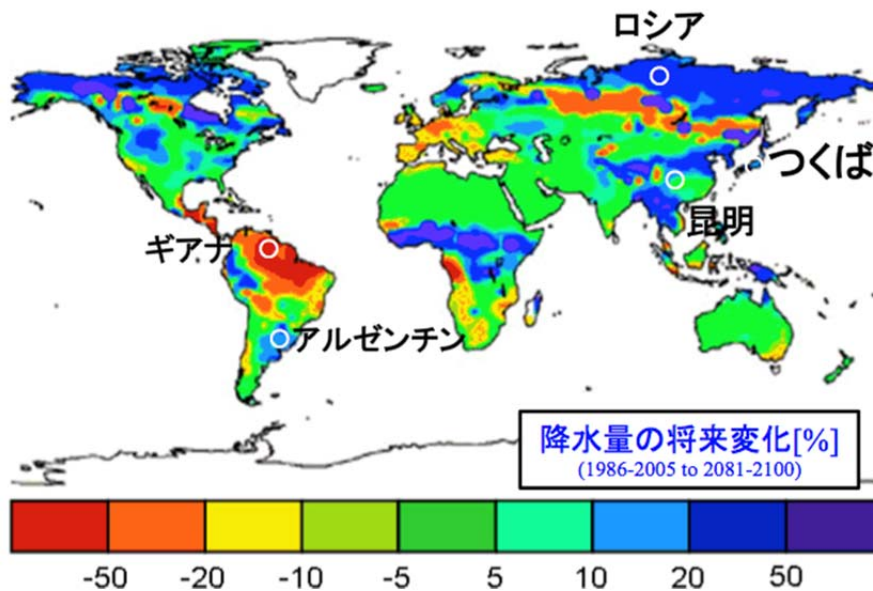
同様の解析を比較的長期的に観測されている世界の観測点について抽出し実施した。図(1)-14は代表的な観測点の大気遅延量比を示したものである。先述の日本域と同様に気温とともに湿潤遅延量が増加する観測点だけでなく、減少する傾向の観測点（ギアナ）も存在した。ギアナの観測点は赤道直下のため気温変化が小さいが乾燥化が顕著であった。この傾向をCMIP5による降水量の将来変化量(図(1)-15)と比較すると、ギアナのみが降水量が減少する地域であり、大気遅延量比による傾向と一致した。気温上昇とともに静水圧遅延量の割合が増加していることから、大気循環による気圧変化、すなわち高気圧性循環が強化する傾向が強いことが推測される。

以上のように、今回導入した大気遅延量比は乾燥大気と湿潤大気を、定量的に分類して気温変化に伴う大気循環の変化を読み取ることができる。





図(1)-14 世界代表地点の気温別の大気遅延量比[%]。赤線が平均値。  
黒線は高値から99, 95, 90, 80, 70パーセンタイル値を示す。



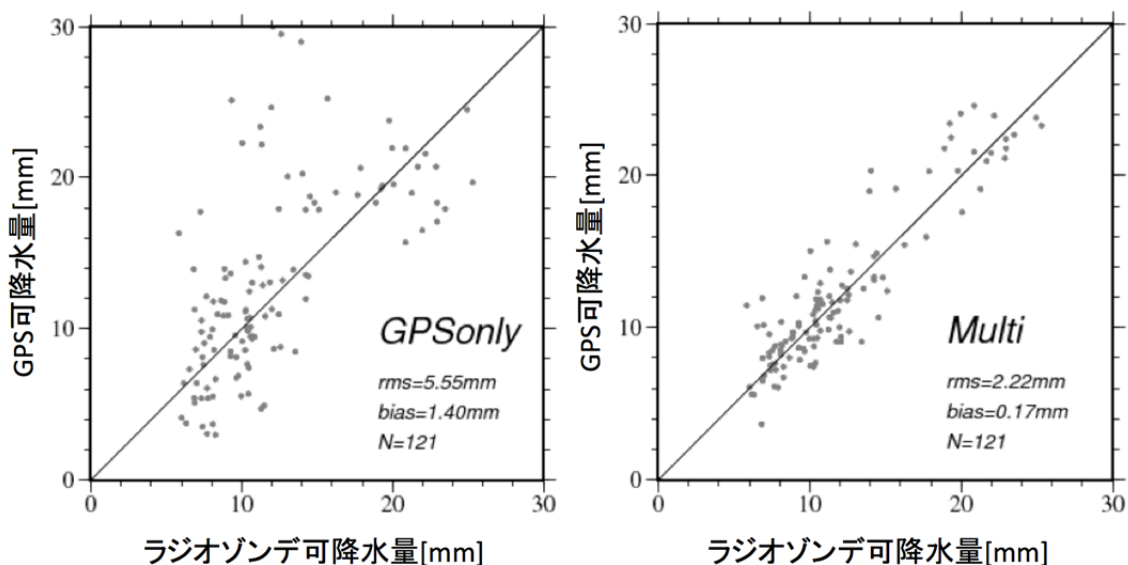
図(1)-15 降水量の将来変化との比較(参考値)



### (3) マルチGNSSの効果の調査

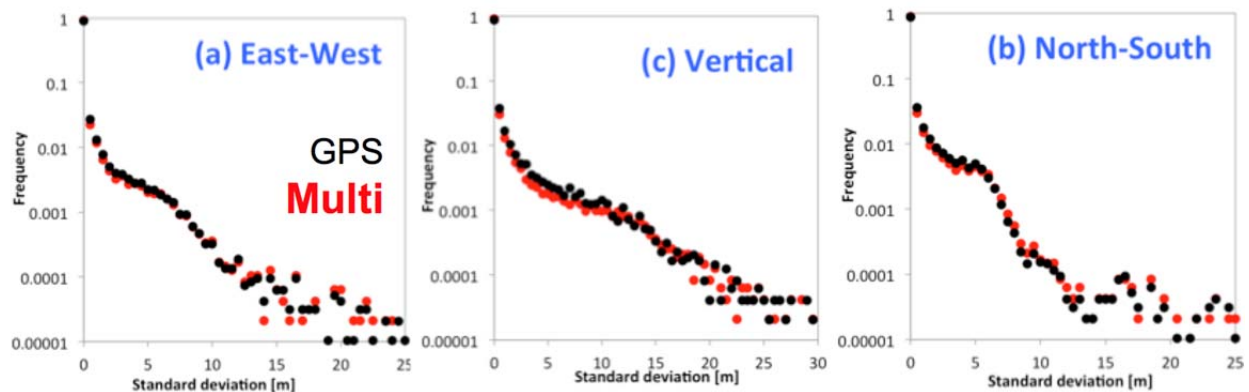
GRASP可降水量データについて、複数のナビゲーション衛星を用いる方式へシステムへの更新作業を行った。主な変更点としては、解析に用いるGLONASS、QZSSの衛星情報の取得と衛星コード使用を有効にする設定変更が挙げられる。変更したシステムを用い、GPS衛星のみを用いた現バージョンと、複数ナビゲーション衛星を用いた（マルチGNSS）場合の、可降水量に与える影響を調査した。解析から得られた大気遅延量から、Elgered et al. (1991)<sup>9)</sup>により大気遅延量のうちの乾燥大気による部分を取り除き、湿潤大気遅延量を取り出した。取り出された湿潤大気遅延量と地上気象要素(気温、気圧)を用いて、Bavis et al. (1992)<sup>10)</sup>により可降水量に変換を行った。大気状態を仮定する際に大気モデルを用いるが、今回はSaastamoine model (Saastamoinen, 1972<sup>11)</sup>)を用い、マッピング関数はGlobal Mapping Function (Boehm et al., 2006<sup>12)</sup>)を用いた。

図(1)-13は、試験的に移動体上で観測されたGPSまたはマルチGNSSによる大気遅延量から算出された可降水量と、121回のラジオゾンデ観測により観測された可降水量の散布図である。GPSまたはマルチGNSSによる可降水量はラジオゾンデが放球された時刻の前後30分について平均した値を用いた。結果として、特にGPSで大きかった観測誤差がかなり改善される傾向が得られた。GPSのみ使用の場合(図(1)-16上)は二乗平均平方根が5.55 mm、バイアスが1.40 mmであったのに対し、マルチGNSSを使用した場合(図(1)-16下)では、二乗平均平方根が2.22 mm、バイアスが0.17 mmであった。また、大気遅延量を求める元となる座標値の推定誤算の改善も見られた。これはマルチGNSSデータを用いることによって、平均観測衛星数が、8.9個から13.0個に増加し観測範囲が広がることで、データの空間代表性が改善したと考えられる。



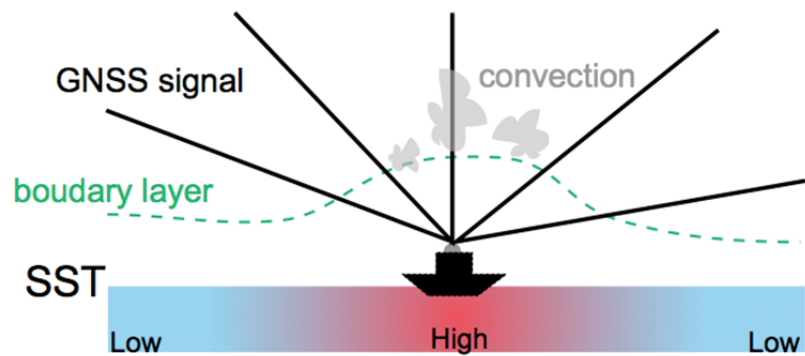
図(1)-16 GPS可降水量とラジオゾンデ可降水量の比較散布図。(左) GPSのみで算出された可降水量、(右) 複数のナビゲーション衛星を追加して算出した可降水量による比較。ラジオゾンデの可降水量は双方同一のものを使用。

さらに、可降水量推定の元となる座標値推定時の、推定誤差の頻度分布を図(1)-17に示す。平均の二乗平均は水平方向にはほとんど影響しないが、鉛直方向について10cmほどの改善が見られた。鉛直方向は大気の厚さと直接関係するため、可降水量との関係性が非常に高い。従って、マルチGNSSを用いる事で可降水量のみならず座標値推定にも良い影響をおよぼしていることが分かった。

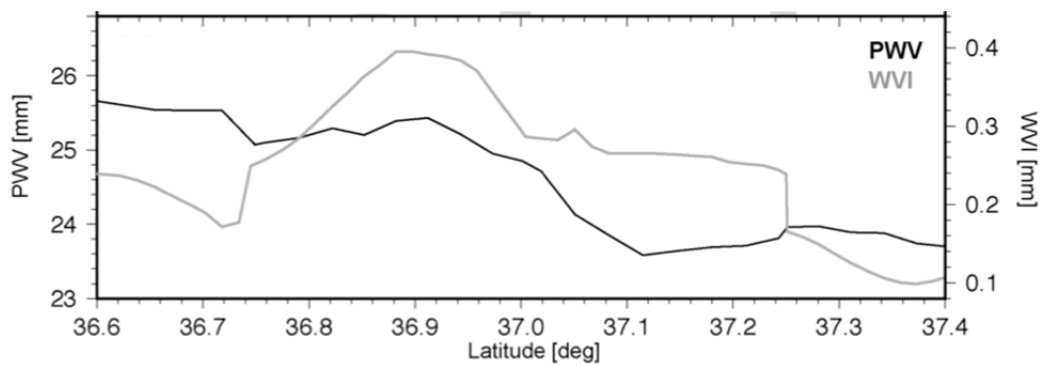


図(1)-17 座標値推定時の推定誤差の頻度分布

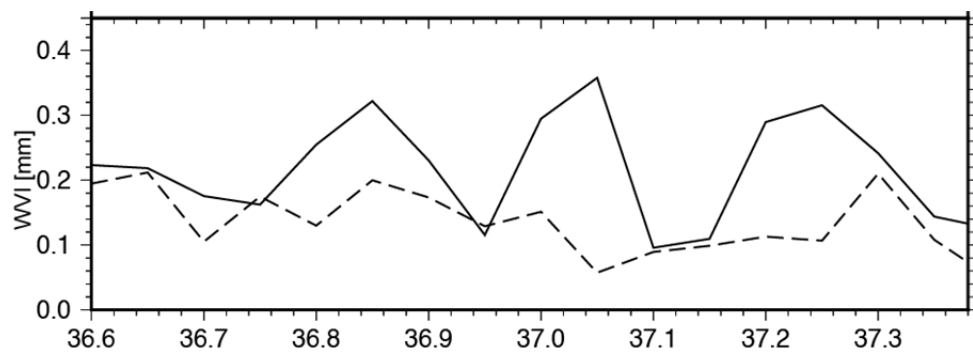
精度向上が確認された複数のナビゲーション衛星のデータについて、視線方向の解析を行い得られた現象を調査実施した。これまで用いてきたGPS可降水量は、同一観測点で同時に観測される複数のGPS衛星からの伝搬電波を全て用い、半径20-30kmの範囲の平均的な可降水量を求めている。一方でそれぞれの視線方向の電波を分離して扱う（図(1)-18参照）ことで、平均的な可降水量からの空間的な水蒸気のずれ（水蒸気不均一性）を推定することができる（Shoji et al. 2013<sup>13)</sup>）。図(1)-19は暖水域通過時の可降水量と水蒸気不均一性の変化である。暖水域が北緯36.8度から37.3度付近に存在するが、これに対応して水蒸気不均一性の極大が北緯36.9度付近で観測された。可降水量はこれよりも大規模なスケールの影響を受けて減少傾向であった。したがって、暖水域上ではそれ以外に比べて乱流拡散が盛んであり、小規模な水蒸気の対流が分布していることが示唆された。同様の結果も数値実験から得られた（図(1)-20参照）。暖水分布が含まれる海面水温を境界値に与えた実験で、観測に近い結果が得られた。一方、粗い海面水温を用いた場合は水蒸気不均一性が不明瞭であった。このような観測手法は雲のように視覚化されていない現象が捉えられるため、大気海洋相互作用を知る上で役立つと考えられる。



図(1)-18 海面水温(SST)による水蒸気不均一性観測の概念図。黒線が衛星からの伝搬電波を示す。



図(1)-19 観測された水蒸気不均一性(WVI)と可降水量(PWV)の緯度方向の変化。



図(1)-20 領域モデルを用いた数値実験による水蒸気不均一性(WVI)。

実線は現実の海面水温を境界値に与えた結果、破線は空間解像度が粗い海面水温を与えた結果。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

GRASP可降水量の極値の年々変動を調査することで、近年、日本の広い範囲で極端な湿潤が増加、乾燥が減少している傾向が明らかとなった。これまでの現地観測では湿度センサーのシステムティックなバイアスのために長期変動を示すのが難しいことから、貴重な観測結果であると言える。

可降水量と気温によるスケーリングが、水蒸気のスケールハイトの概念を導入することで、クラウジウス・クラペイロンの定理との関係性が明らかになった。強雨による先行研究と同様に、気温が上昇するに従い水蒸気量は急激に増加する傾向が水蒸気の観測データから初めて得られた。さらにGRASP可降水量の元となる遅延量から算出された大気遅延量比の地上気温との関連性は、CMIP5による降水量将来変化と傾向が一致していることが明らかになった。大気遅延量比は乾燥大気と湿潤大気を、定量的に分類して気温変化に伴う大気循環の変化を読み取ることができる。

複数のナビゲーション衛星（マルチGNSS）を用いることで、可降水量算出の元となる大気遅延量の推定誤差に顕著な改善が見られた。CMIP5モデルの将来予測実験の不確実性に関連するモデル間のばらつきについて評価し、水蒸気量は、全球平均した年平均1.5 mmから2 mm程度であることがわかった。この成果は2014年の米国航法学会でBest Presentation Awardsを受賞した。また、GNSSを用いた視線方向の解析で通常の観測では捉えられない小規模の水蒸気収束を伴う乱流が観測された。大気海洋相互作用を理解する上で重要な証拠と言える。

### (2) 環境政策への貢献

近年使用可能となったマルチGNSS衛星を用い、より高精度の可降水量データセットが整備される。また気温に伴う水蒸気量の増加傾向が定量的に明らかになり、降水イベントの極端化・継続時間への提言が可能となる。

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

### <行政が活用することが見込まれる成果>

準天頂衛星「みちびき」を有効的に使用できる。高精度・高時間分解能の可降水量データが気象予報へ導入されれば、より正確な防災情報を提供可能になる。さらには気温上昇に伴う定量的な水蒸気量の変化を考慮した、降水現象の予測や防災予測情報の予測が実施可能になる。

## 6. 国際共同研究等の状況

以下、研究者間の国際連携

GNSS解析ソフトウェア開発：Dr. Chris Rocken, Dr. Ted Iwabuchi (GPS Solutions, Inc./UCAR)

GPS可降水量データセット連携：Dr. Junhong Wang (University at Albany)

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Fujita M., H. G. Takahashi, N. N. Ishizaki, and F. Kimura: Atmos. Sci. Lett., 15: 275-281. (2014),  
“Long-term variation of winter precipitation linked to sea surface heat fluxes around the Japan/East Sea”
- 2) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, C. Rocken, Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 1085-1089. (2014),  
“Tropospheric Monitoring Over the Ocean using Shipborne GNSS Receiver”

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Fujita, M., H. G. Takahashi, N. N. Ishizaki and F. Kimura: Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly 2013 (Vienna, Austria)  
“Winter precipitation in the Sea of Japan side associated with the sea surface flux”
- 2) 藤田実季子、高橋洋、原政之：2013年度日本気象学会秋季大会（仙台）  
「インド洋ダイポールモード現象とスマトラ島降水日変化」
- 3) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, C. Rocken, the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, 2014.  
“Tropospheric Monitoring Over the Ocean using Shipborne GNSS Receiver”
- 4) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: International Conference on Regional Climate - CORDEX 2013 (Brussels, Belgium)  
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different IOD phases”
- 5) M. Fujita et al. : Issues in downscaling of climate change projection, Tsukuba, Japan, 2015

“Climatological characteristics of precipitation over Japan in NICAM AMIP-type 25-year simulation “

- 6) 藤田実季子、川合義美、永野憲、谷口京子：日本海洋学会2016年度春季大会（2016）  
「黒潮続流域における水蒸気不均一性」

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

### (6) その他

#### 1) Best Presentation Awards ION GNSS+ 2014 受賞

Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, C. Rocken, the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), Tampa, Florida, 2014.

“Tropospheric Monitoring Over the Ocean using Shipborne GNSS Receiver”

[http://www.ion.org/gnss/upload/GNSS14\\_Best\\_Presentations.pdf](http://www.ion.org/gnss/upload/GNSS14_Best_Presentations.pdf)

## 8. 引用文献

- 1) Ross, Rebecca J., William P. Elliott: J. Climate, 14, 1602-1612 (2001)  
“Radiosonde-Based Northern Hemisphere Tropospheric Water Vapor Trends.”
- 2) Trenberth, K. E., J. Fasullo, and L. Smith: Climate Dynamics, 24, 741 - 758 (2005)  
“Trends and variability in column-integrated water vapor.”
- 3) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi, and C. Roken: Proceedings of the ION GNSS 2012, 3454-3458 (2012)  
“GPS Precipitable Water Vapor Dataset for Climate Science” .
- 4) Iwabuchi T, C. Roken, A. Wada, M. Kanzaki: Proceedings of the ION GNSS 2011, 579-587 (2011)

“True Real-time Slant Tropospheric Delay Monitoring System with Site Dependent Multipath Filtering” .

- 5) Vomel, H., H. Selkirk, L. Miloshevich, J. Valverde-Canossa, J. Valdes, E. Kyro, R. Kivi, W. Stolz, G. Peng, and J. A. Diaz: *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24(6), 953-963 (2007)  
“Radiation dry bias of the vaisala RS92 humidity sensor.”
- 6) Wang, J. H., L. Y. Zhang, A. G. Dai, T. Van Hove, and J. Van Baelen: *J. Geophys. Res.*, 112, D11107, doi:10.1029/2006JD007529 (2007)  
“A near-global, 2-hourly data set of atmospheric precipitable water from ground-based GPS measurements.”
- 7) Lenderink, G., and E. van Meijgaard *Nat. Geosci.*, 1, 511-514 (2008)  
“Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes.”
- 8) Thayer, D.: *Radio Science*, 9, 803-807 (1974)  
“An improve equation for the radio refractive index of air.”
- 9) Elgered, G., J. L. Davis, T. A. Herring, and I. I. Shapiro: *J. Geophys. Res.*, 96(B4), 6541-6555 (1991)  
“Geodesy by radio interferometry: Water vapor radiometry for estimation of the wet delay.”
- 10) Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware: *J. Geophys. Res.*, 97(D14), 15,787 - 15,801 (1992)  
“GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system.”
- 11) Saastamoinen, J.: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 15, edited by S. W. Henriksen, A. Mancini, and B. H. Chovitz, pp. 247-251, AGU, Washington, D. C. (1972)  
“Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites.”
- 12) Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh: *Geophysical Research Letters*, 33, L07304, doi:10.1029/ 2005GL025546 (2006)  
“Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data.”

13) Shoji, Y. : J. Meteorol. Soc. Jpn., 91(1), 43-62 (2013)

“Retrieval of Water Vapor Inhomogeneity Using the Japanese Nationwide GPS Array and its Potential for Prediction of Convective Precipitation.”



## (2) 温暖化予測モデルにおける水蒸気量再現性と気候再現性の評価

首都大学東京

都市環境学部

高橋洋

平成25(開始年度)～27年度累計予算額：8,220千円（うち平成27年度：2,174千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

大気中の水蒸気変動は、温室効果、雲・雨形成など様々な観点から、気候システムにおいて重要である。本研究では、水蒸気変動について、CMIP5データを解析し、空間分布の凹凸の再現性に問題があることを示した。さらに、サブテーマ1で作成されたGRASP可降水量を領域気候モデルの検証に使用した。当初は、GRASP可降水量とCMIP5データなどの直接的な比較を行う予定であったが、空間解像度の違いで比較が困難であったため、領域気候モデルを使用した。GRASP可降水量データにより水蒸気変動が検証された実験をもとにして、日本近海の近年の海面水温上昇が、水蒸気変動を介して、日本の関東域の高温多湿環境に寄与していることを見出した（日本の近海は、世界の海洋の中でも長期的な海面水温上昇が大きい）。この高温多湿環境を形成する「領域規模の温室効果」は、夏季の日本の熱中症と深く関わっている可能性が高く、社会的にも重要な成果が得られた。

### [キーワード]

水蒸気量変動、地球温暖化、領域規模の温室効果、アジアモンスーン

## 1. はじめに

大気中の水蒸気の変化は気候感度における最大のフィードバックであり（IPCC第4次報告書）、氷粒・水滴・水蒸気と相転移を介し、その変動は地球全体の水／エネルギー循環に大きく影響を及ぼすため、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動の観測は大変重要であると考えられる。水蒸気量の観測は、現業のラジオゾンデやマイクロ波センサーを搭載した衛星によるものが主流であり、Ross and Elliott (2001)<sup>1)</sup>はラジオゾンデデータを用い、対流圏の水蒸気量の長期トレンドを調査した。Trenberth et al. (2005)<sup>2)</sup>では、Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) によって観測された可降水量を用いて、1988年から2003年にかけての海上の可降水量の変化量を示した。

温暖化研究で用いられるIPCC第5次評価報告書用のCMIP5データセットについて、CMIP3からどの程度改善が見られるのかを評価し、どのような問題点があるのかを明らかにする必要がある。温暖化の評価データとしてGRASP可降水量を用いることを試みているが、空間解像度の違いから比較が容易ではない。単に空間方向に内挿するだけではなく、領域気候モデルなどを介して比較する必要があると考えられる。

## 2. 研究開発目的

研究目的として次のものを設定した。

IPCC第5次評価報告書用のCMIP5データセットについて、水蒸気場にどの程度のばらつきがあるのかを評価する。それにより、どのような問題点があるのかを明らかにする。

空間解像度の大きく異なるGRASP可降水量とGCM(Global Climate Model)データセットをどのように比較するのかを検討し、アジアモンスーンスケールでの水蒸気量変動が、領域及び全球の気候変動において、どのような影響を及ぼしているのかを明らかにする。

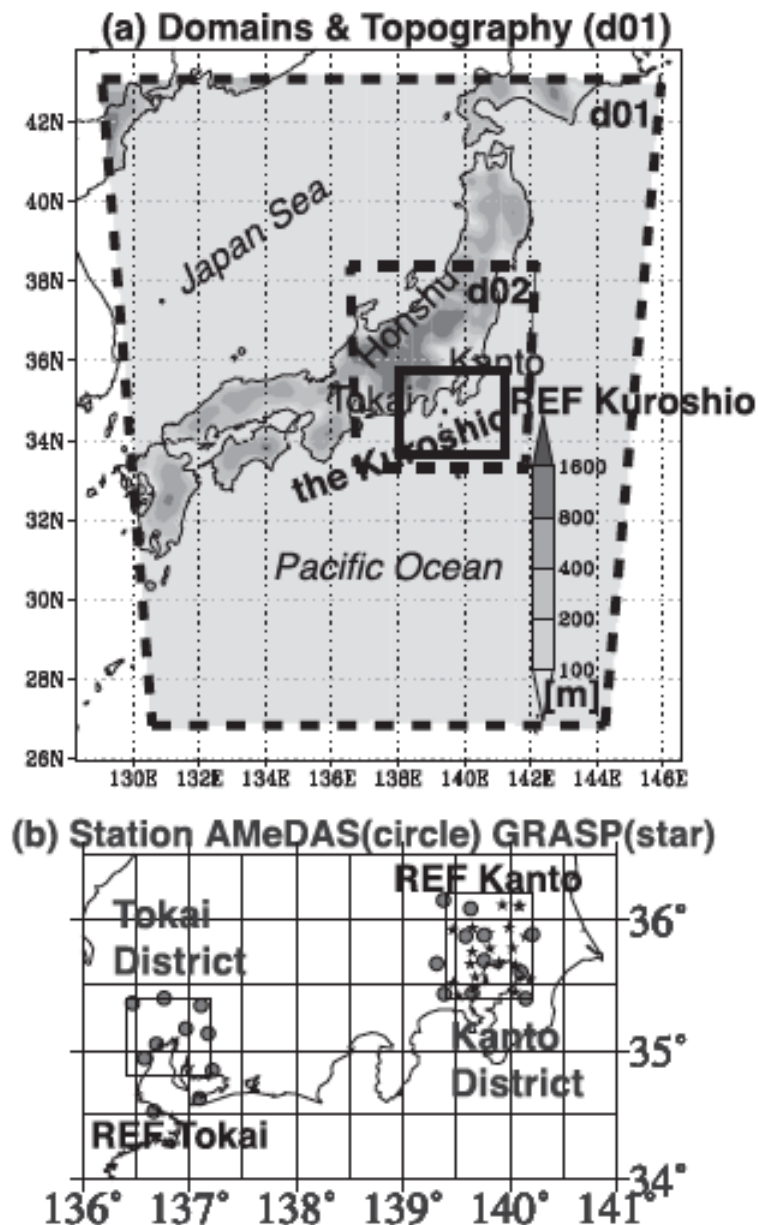
## 3. 研究開発方法

温暖化予測モデルにおける水蒸気量の空間分布及び季節変化、経年変化の把握のための、温暖化予測モデルの出力データを収集する。水蒸気量に関するモデル出力データのみならず、降水量や気温等の気候変動に関連する物理要素についても収集・整備を行う。水蒸気変動の検証のために、観測データとして、NVAP-M(A reanalysis and extension of the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Water Vapor Project (NVAP))を収集する。水蒸気量の検証には、NVAP-Mを使用する予定であるが、精度の検証などが難しい。これは、水蒸気量データの観測が極めて少ないからである。そこで、まずは、全球の水蒸気量が使用できる大気の再解析データを用いて、それらのばらつきを調べ、観測データが同化された再解析データでどの程度の再現性があるのかを調べる。

近年世界各地で、地上気温の上昇が報告されているが、同時に海面水温も上昇しており、特に黒潮域の海面水温の上昇が世界の海洋の平均よりも大きいことが指摘されている。また、夏季の地上気温の上昇は、熱中症リスクの増大や電力の需要逼迫など、私たちの健康や生活に大きな影響を及ぼす。地域スケールの気候変動では、冬季の海面水温が気候変動に大きな影響を与えることは知られているが、夏季については、あまり研究がなかった。また、これまでは、夏の気温変動には、近海の海面水温の影響は小さく、太平洋高気圧の張り出しの強さや熱帯海洋の海面水温の遠隔影響（例:エルニーニョ・ラニーニャ現象）などにより変動すると考えられていた。地域スケールの気温変動には、地球温暖化に伴う広域的な気温上昇に加えて、近傍の海面水温による地域スケールの気温上昇が含まれているため、両者を区別して評価することで、その地域の気温変動の原因解明につながることを期待される。本年度は、夏の関東地方の気候変動に着目し、海面水温変動が気温に及ぼす影響を、高解像度の長期間の数値シミュレーションから定量的に明らかにした。

領域気候モデルを用いた数値シミュレーションによって、夏の関東の地上気温変動に対する関東南沖を流れる黒潮周辺の海面水温の影響を評価した。過去31年間（1982年ー2012年）の8月について、それぞれの年の月平均の海面水温の観測値を与えたシミュレーションと、31年間の平均値

を与えたシミュレーションをそれぞれ31年分実施した。それぞれの年の月平均海面水温を与えたシミュレーションでは、長期間の気象観測データと比較し、現実的なシミュレーションであることを確認した。二つのシミュレーション結果の差から、海面水温変動のみに起因する気温などの変動を取り出すことができる。



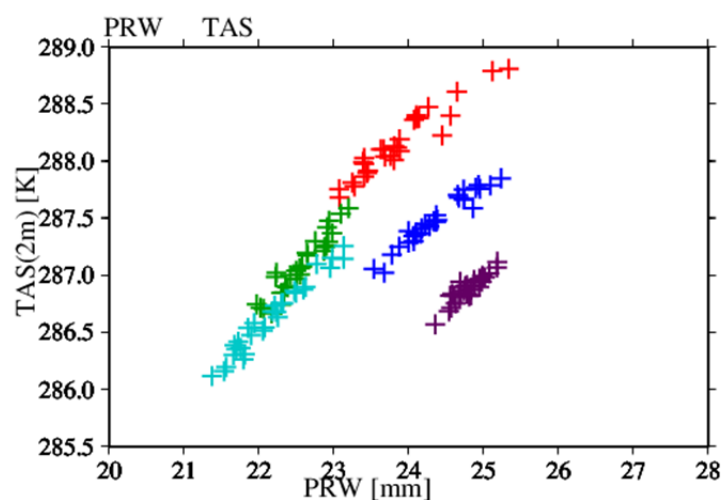
図(2)-1 (a) 領域気候モデルの計算領域と地形。REF Kuroshioは、黒潮領域の代表的な海面水温を計算するのに使用した領域である。(b) 観測値の分布。本研究で重要である、GRASP可降水量は、関東域に星印で示した。灰色の丸印は、シミュレーションの検証に用いた気温の観測地点である。

#### 4. 結果及び考察

温暖化予測モデルにおける水蒸気量の空間分布及び季節変化、経年変化の把握のための、温暖化予測モデルの出力データを収集した。水蒸気量に関するモデル出力データのみならず、降水量や気温等の気候変動に関連する物理要素についても収集・整備を行った。水蒸気変動の検証のために、観測データとして、NVAP-Mを収集した。これらについて、初期解析を行ったので以下に示す。

まずは、水蒸気量と気温との関係を調べるために、全球平均した年平均可降水量と地上気温を散布図に示す。各モデルは、TAS（地上気温）が高い年と、PRW（可降水量）の大きい年が一致する傾向にあり、可降水量は、気温と連動して変動していることが見てとれる（図(2)-2）。これは、基本的に、相対湿度が一定と考えた場合に、このような共変動になることが考えられる。ただし、実際に年々変動において、相対湿度が一定になるのかなどは、今後詳しく調べる必要がある。

各モデルの全球平均の年々変動の幅は、可降水量が1.5 mmから2 mm程度であり、地上気温が0.5 Kから1 K程度である。このことから、年々変動の幅は長期的な気候変化（温暖化）などと同程度の振幅であることがわかる。今後は、これらの詳しい物理的な関係性について調査していく。



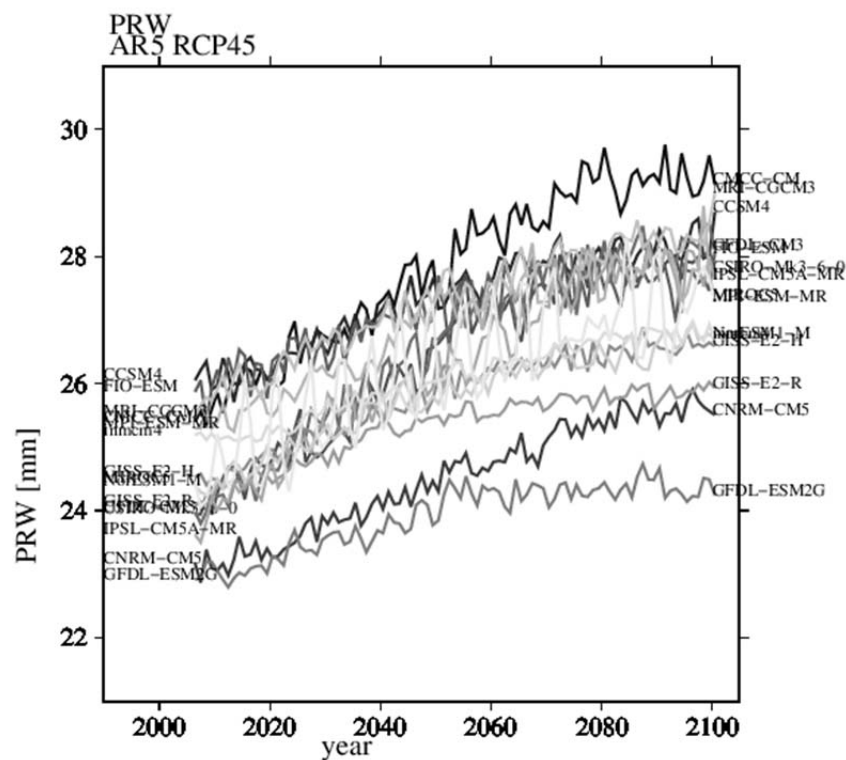
図(2)-2 5つの温暖化モデルの全球平均した年平均可降水量と地上(2m)気温の散布図。1976年から2005年のCMIP5のhistorical runのデータを使用した。一つの点は、ある年の全球平均した年平均可降水量と地上気温。色は、モデルを表す。赤はMIROC5、青はMPI-ESM-LR、緑はCNRM-CM5、水色はGFDL-CM3、紫はInmcm4である。

CMIP5の標準的な実験であるRCP4.5runにおける、可降水量の時系列を図(2)-3に示す。将来予測実験の開始の2006年の時点で、3 mm程度のばらつきがある。2100年には、基本的には2006年と同

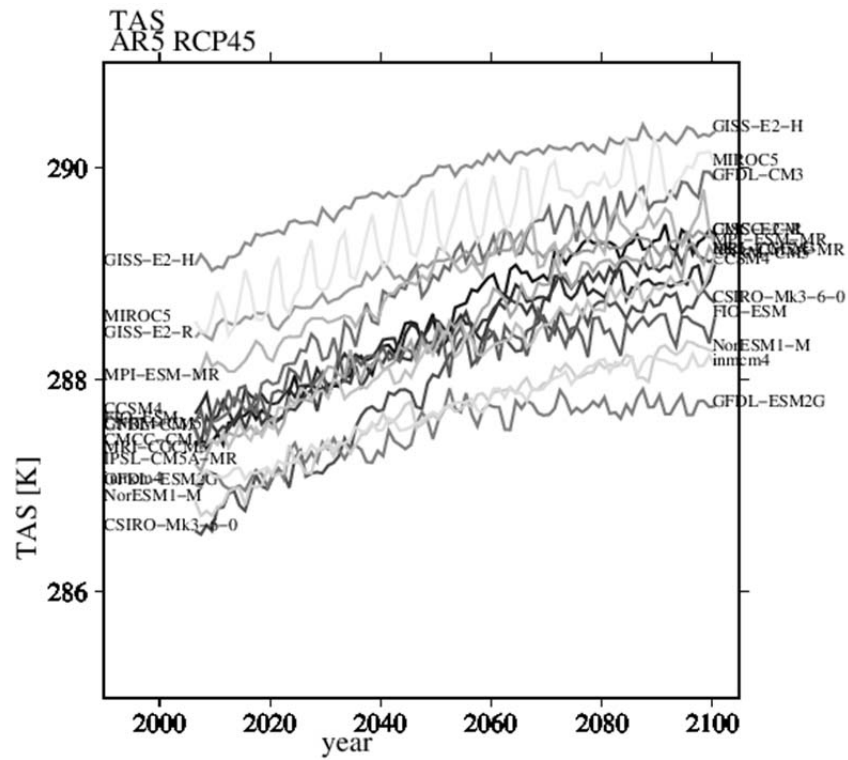
様の傾向のまま、全体として増加している。可降水量の増加は、温暖化（気温の上昇）に伴う、飽和可降水量の増加に対応していると考えられるが、ここでも相対湿度一定を考える必要があるため、温暖化モデル内での相対湿度を決める物理機構が重要と考えられる。これは、可降水量に対して、どの程度降水フラックスとして、大気中から水蒸気量を除去するかという効率に関連していると考えられるが、今後の研究課題である。2100年の可降水量は、特定のモデルを除いても、2006年よりも多少ばらつきが大きくなっているとみることが出来る。

図(2)-3と同様に、図(2)-4に地上気温の100年間の変化を示す。将来予測実験の開始の2006年の時点で、1 K程度のばらつきがある。2100年には、基本的には2006年と同様の傾向のまま、全体として上昇している。一方で、年々変動を見ると振幅が小さいモデル、周期性が強いモデル、年々変動が100年間で変化しているモデルなど、特徴が多岐にわたる。

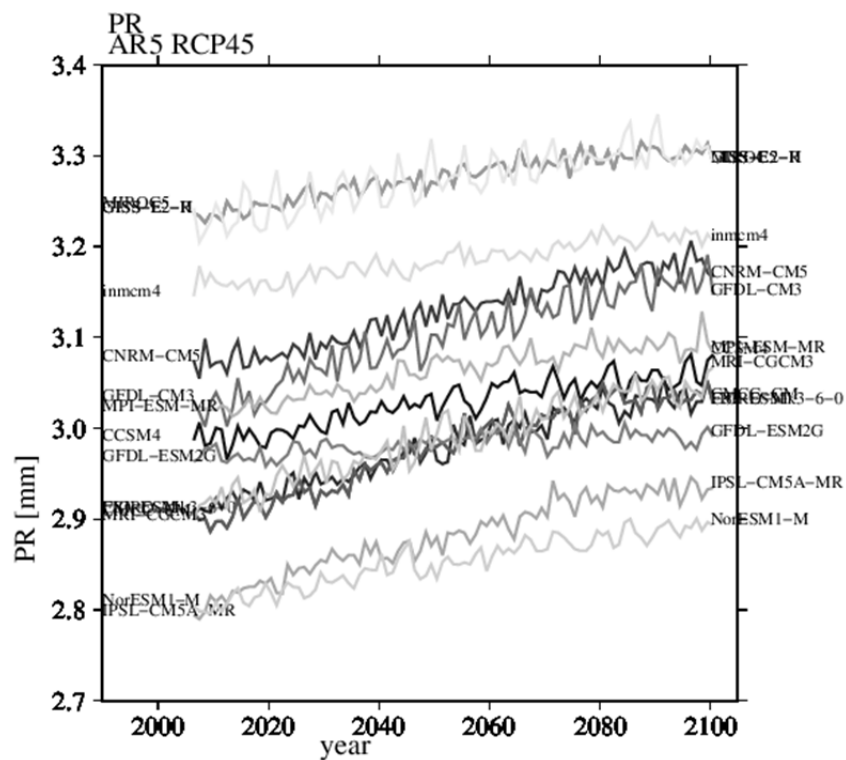
図(2)-3と同様に、図(2)-5に降水量の100年間の変化を示す。将来予測実験の開始の2006年の時点で、0.4 mm程度のばらつきがある。2100年には、基本的には2006年と同様の傾向のまま、全体として上昇している。一方で、年々変動を見ると振幅が小さいモデル、周期性が強いモデル、年々変動が100年間で変化しているモデルなど、特徴が多岐にわたる。



図(2)-3 16個の温暖化モデルの全球平均した年平均可降水量 (PRW) の約100年間の時系列。2006年から2100年のCMIP5のrcp4.5runのデータを使用した。一つの線は、あるモデルを表す。



図(2)-4 16個の温暖化モデルの全球平均した年平均地上気温(TAS)の約100年間の時系列。2006年から2100年のCMIP5のrcp4.5runのデータを使用した。一つの線は、あるモデルを表す。

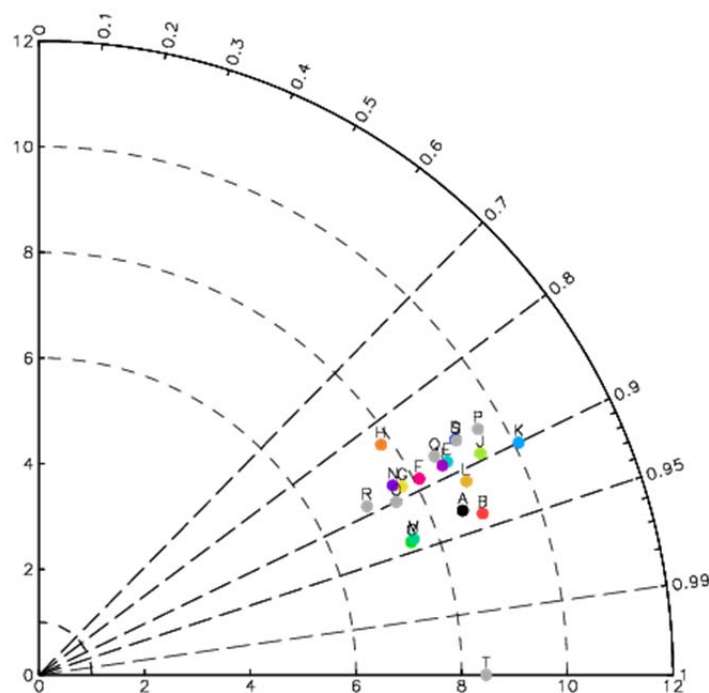


図(2)-5 16個の温暖化モデルの全球平均した年平均降水量(PR)の約100年間の時系列。2006年か

ら2100年のCMIP5のrcp4.5runのデータを使用した。一つの線は、あるモデルを表す。

次に、CMIP5モデルの可降水量について、空間分布の再現性を確認するために、空間パターン相関と空間標準偏差を図(2)-6に示す。可降水量データはすべて、2.5度格子に統一した。熱帯域の可降水量の再現性に着目した。

可降水量の空間パターン相関は、それほど悪くはないものの、空間パターン標準偏差にばらつきが大きい。これは、可降水量の絶対値がモデルによりばらついていることが原因と考えられる。

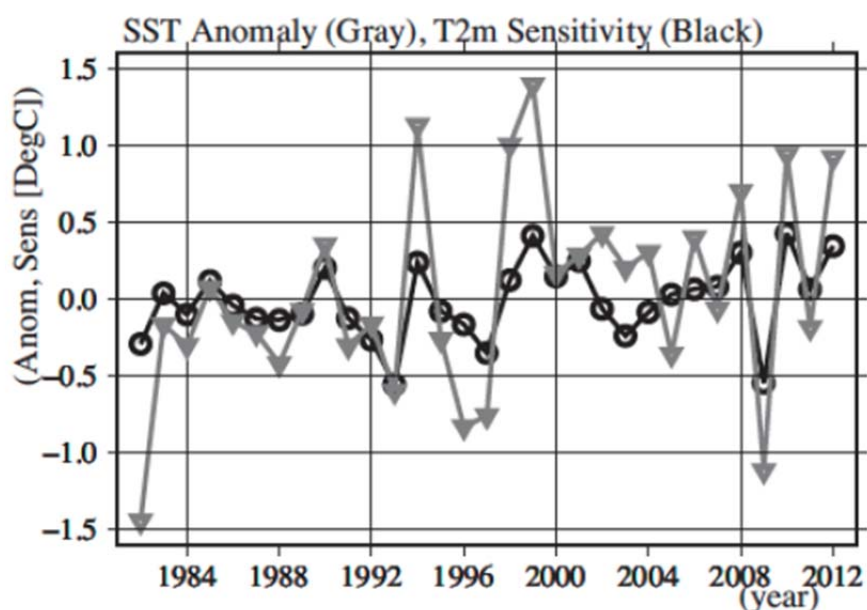


図(2)-6 19個の温暖化モデルにおける可降水量の1979年から2005年までの27年間の年平均値について、熱帯域（南緯25度から北緯25度）を対象に、空間パターン相関と空間パターン標準偏差によるテイラーダイアグラム。参照データは、JRA55(図中のT)を使用した。AはCCSM4、BはCMCC-CM、CはCNRM-CM5、DはCSIRO-Mk3-6-0、EはFIO-ESM、FはGFDL-CM3、GはGFDL-ESM2G、HはGISS-E2-H、IはGISS-E2-R、JはIPSL-CM5A-LR、KはIPSL-CM5A-MR、LはMIROC4h、MはMIROC5、NはMPI-ESM-LR、OはMPI-ESM-MR、PはMRI-CGCM3、QはNorESM1-M、Rはbcc-csm1-1、Sはinmcm4、TはJRA55を示す。空間分解能は、緯度経度2.5度格子に統一し使用した。

さらに、本課題で海洋研究開発機構により作成されたGPS可降水量データとGCMデータとの比較を行うための一つの手法として、GCMデータ(実際の比較のために、再解析データを用いる)のダウンスケーリング実験を試みた。GPS可降水量は、地形などの局地スケールの影響を大きく受けるのに対して、GCMデータはラージスケールの情報のみしか含まないので、直接比較ができない。そのためこのダウンスケーリング実験を実施した。

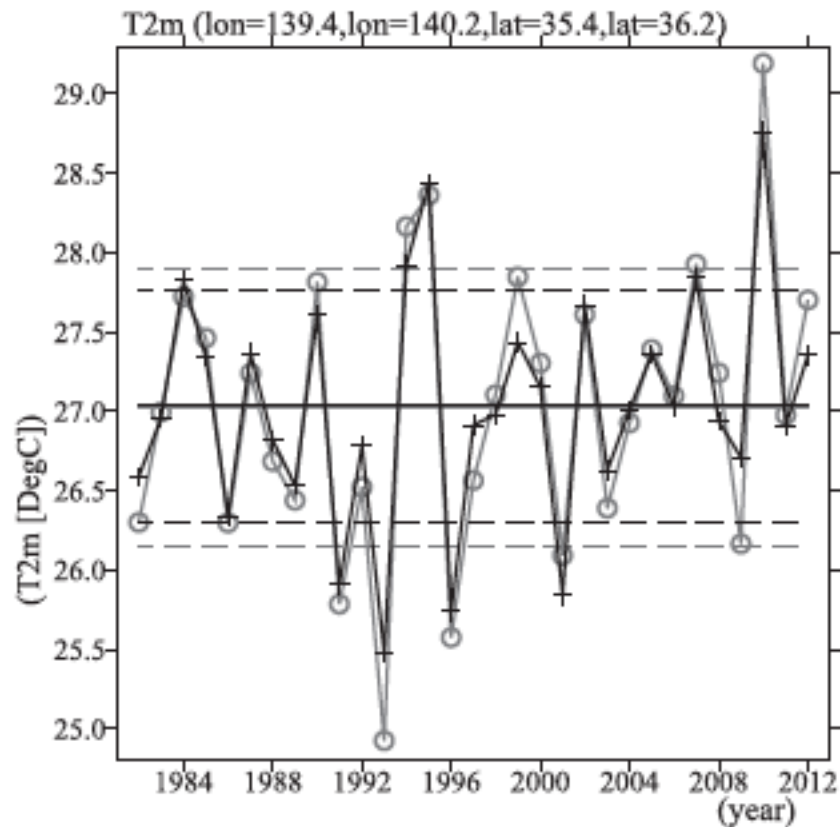
ここからの図では、過去31年間(1982年-2012年)の8月について、それぞれの年の月平均の海面水温の観測値を与えたシミュレーションと、31年間の平均値を与えたシミュレーションをそれぞれ31年分実施し、二つのシミュレーション結果の差から、海面水温変動のみに起因する気温などの変動を取り出したものである。その取り出した影響を、海面水温の各気象要素への感度とする。

図(2)-7は、黒潮領域の海面水温が高い年には、海面水温に起因して、海面水温が平年値の場合よりも、関東地方の気温も高くなることを示している。次に、図(2)-8は、31年間の平均海面水温を与えたシミュレーションと観測値を与えたシミュレーションの結果を示している。海面水温が気候値の場合でも年々変動はあるが、海面水温の年々変動がある場合の方が、振幅が大きいたことが分かる。つまり、海面水温の年々の変動が、関東地方の気温変動を増幅していることが分かった。



図(2)-7: 1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の海面水温[灰色;▽](31年平均値からの偏差)とシミュレーションにより取り出した日本近海の海面水温の関東の気温への影響[黒;○]の時系列。単位は、°C(度)。すなわち、海面水温変化のみに起因する気温上昇量を示している。





図(2)-8: 1982年から2012年までの各年の8月の再現実験の関東の地上(2m)気温[灰色;○]と気候値の海面水温を使ったシミュレーションによる関東の地上(2m)気温[黒;+]の時系列。単位は、°C(度)。

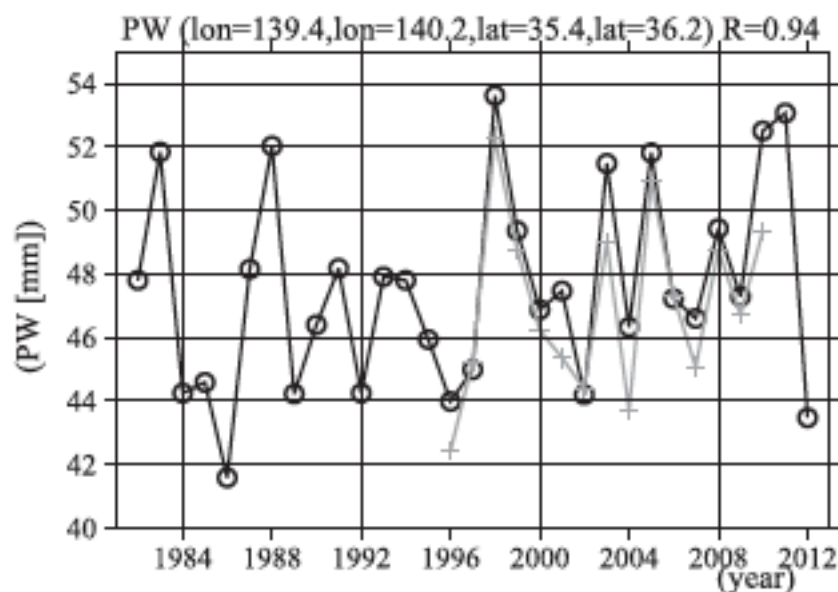
ここで、海面水温変動の影響を定量化するために、以下の式を提案した。

$$\text{Impact}_{\text{ocean}} = 1 - (\text{Vari}_{\text{climSST}} / \text{Vari}_{\text{CTL}}).$$

$\text{Impact}_{\text{ocean}}$ は、海面水温変動の影響を示し、 $\text{Vari}_{\text{climSST}}$ は、平均値を与えたシミュレーションの気温の年々変動の分散、 $\text{Vari}_{\text{CTL}}$ は、観測値を与えたシミュレーションの気温の年々変動の分散である。この式を基に計算した結果、関東地方の気温変動のうちの約3割が海面水温の変動によって説明されることが分かった(残りの7割は、太平洋高気圧の強弱、熱帯海洋の海面水温の遠隔影響、陸地の乾燥度合などによるものと考えられる)。これは、一般的に考えられているものよりも大きい印象がある。というのは、これまで、冬季には、海面水温の影響を調べた研究が多かったものの、夏季には、少なかったのも、影響は小さいと考えられていたからだと思われる。

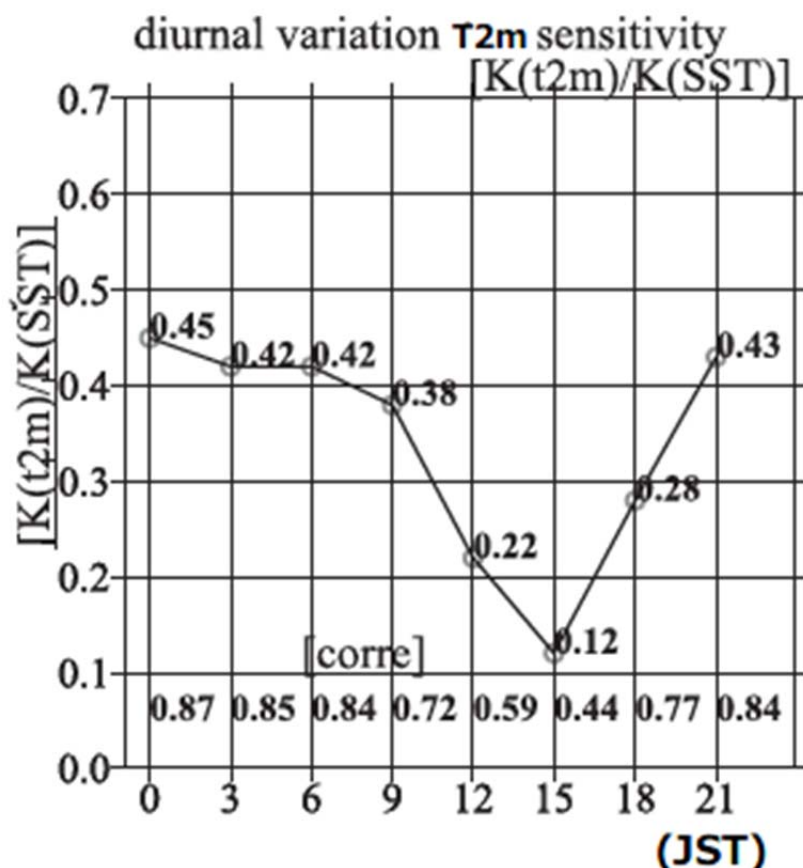
図(2)-9は、GRASP可降水量の関東(図(2)-1)での単純平均値と、シミュレーションでの可降水量の領域平均値である。両者の可降水量の値は、絶対値も含めて概ね一致しており、本研究で重要となる水蒸気量変動の再現性が非常に高いことが示された。多くのシミュレーション研究では、気温や降水量の再現性の検証は行われているものの、気候変動の視点から、可降水量を観測値により検証したものは、非常に珍しく価値が極めて高いと思われる。本研究で問題となる領域スケールの温室効果を考える上では、このような検証は必須であり、継続可能な水蒸気量データ観測とアーカイブが重要である。

重要なことは、海面水温が平均よりも高い年は、地上気温だけではなく、水蒸気量も大きくなることが分かった(図(2)-9)。この結果は、海面水温が平均よりも高い年には、高温多湿になりやすい傾向があることを示している。



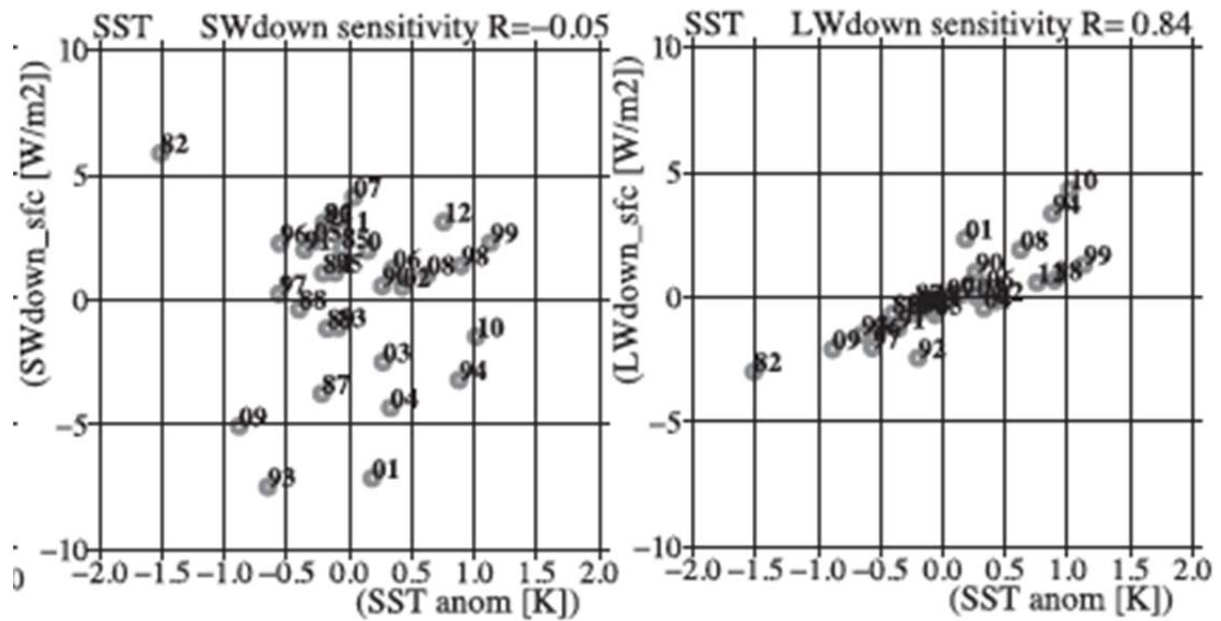
図(2)-9: 1982年から2012年までの各年の8月の再現実験の関東の可降水量[黒;○]とGRASP可降水量による関東領域の平均値[灰色;+]の時系列。単位は、mm。GRASP可降水量は1996年から2010年までを使った。

次に図(2)-10に、1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の海面水温とシミュレーションにより取り出した日本近海の海面水温の関東の気温への影響の各時刻における回帰係数を示す。これは、各時刻において、海面水温の影響により気温がどの程度変動するかを示したものである。各時刻の海面水温に対する感度は、夜間に高くなり、日中に低くなる傾向が顕著に見られる。さらに下に示された相関係数の数値を見ても、夜間は相関係数が高いのに対して、日中は相関係数も低く、影響が夜間の方が系統的であると考えられる。この結果は、この後に示す、水蒸気量の増加に伴い、地表での下向き長波放射量が増加し、気温が上がるという本研究での提案を支持する結果と考えられる。



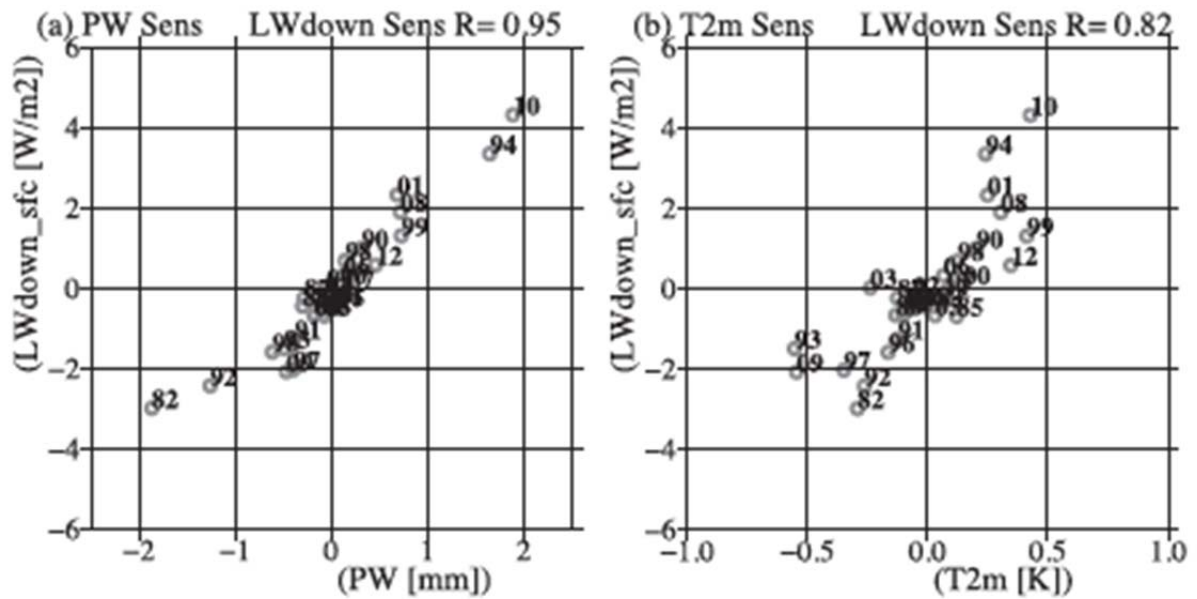
図(2)-10: 1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の海面水温とシミュレーションにより取り出した日本近海の海面水温の関東の気温(T2m)への影響 [黒;○]の各時刻における回帰係数。単位は、K/K。下の数値[corre]は、相関係数。すなわち、海面水温変化のみに起因する気温上昇量と海面水温との関係を示している。時刻は、日本標準時(JST)。

図(2)-11は、1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の海面水温(SST)とシミュレーションにより取り出した日本近海の海面水温の関東の地表における全天下向き短波放射(SWdown\_sfc)と地表における全天下向き長波放射(LWdown\_sfc)への影響の散布図を示したものである。図の右上の数字は、散布図の31個の点の相関係数を示しており、短波放射では、値が小さく、95%の統計的な有意水準で有意ではないが、長波放射は、相関が極めて高く、統計的にも有意である。短波放射の相関係数が低いことは、海面水温の影響により雲が変わり、それによって地表に届く短波放射が変わることの影響がランダムであり、系統的ではないことを示している。ただし、必ずしも影響が小さいのではなく、感度の絶対値は、長波放射よりも大きいことから影響は大きい。繰り返しになるが、影響はあるが、系統的ではない。このことから雲の変化は系統的ではないのにも関わらず、長波放射は系統的に変化することから、この長波放射の変化は、雲の変化を介したものであることが推察される。



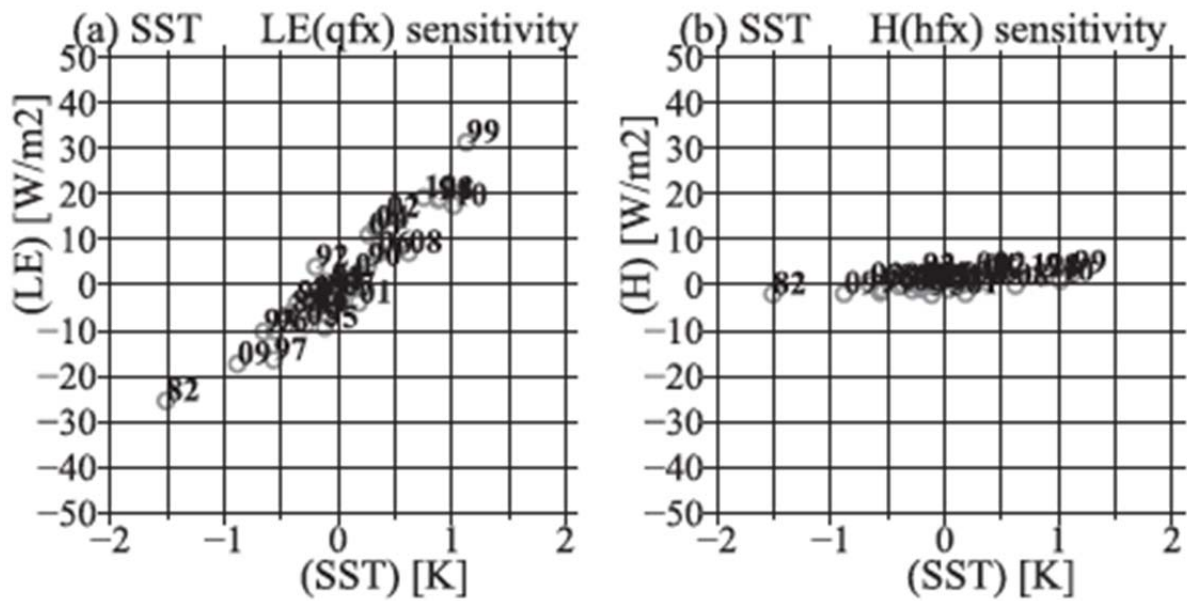
図(2)-11:1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の海面水温とシミュレーションにより取り出した日本近海の海面水温の関東の地表における全天下向き短波放射(SWdown:左)と地表における全天下向き長波放射への影響(LWdown:右)の散布図。単位は、いずれも横軸がKで縦軸がW/m<sup>2</sup>。すなわち、海面水温変化のみに起因する放射量変化量を示している。

図(2)-12は、1982年から2012年までの各年の8月の関東におけるシミュレートされた可降水量と地表における全天下向き長波放射への海面水温の影響と、関東における地上気温と地表における全天下向き長波放射への海面水温の影響を散布図によって示したものである。この図を見ると、可降水量の感度と長波放射の感度は高い相関があり、可降水量の変化による長波放射の変化が推察される。一方で、地上気温の感度と長波放射の感度も相関が高く、これらの変化も関連していることが考えられる。過去の観測データから定式化された手法で、可降水量の変化による長波放射の変化と地上気温の変化による長波放射の変化の大きさを簡素なモデルで見積もると、両者とも同程度の影響があり、これまで指摘されて来なかった、領域スケールでの水蒸気量変動も重要であることが示唆された。



図(2)-12: 1982年から2012年までの各年の8月の関東におけるシミュレートされた可降水量(PW)と地表における全天下向き長波放射(LWdown)への海面水温の影響の散布図(a)。関東における地上気温(T2m)と地表における全天下向き長波放射(LWdown)への海面水温の影響の散布図(b)。単位は、横軸がmmで縦軸がW/m<sup>2</sup> (a)、横軸がKで縦軸がW/m<sup>2</sup> (b)。影響とは、海面水温変化のみに起因する放射量変化量を示している。

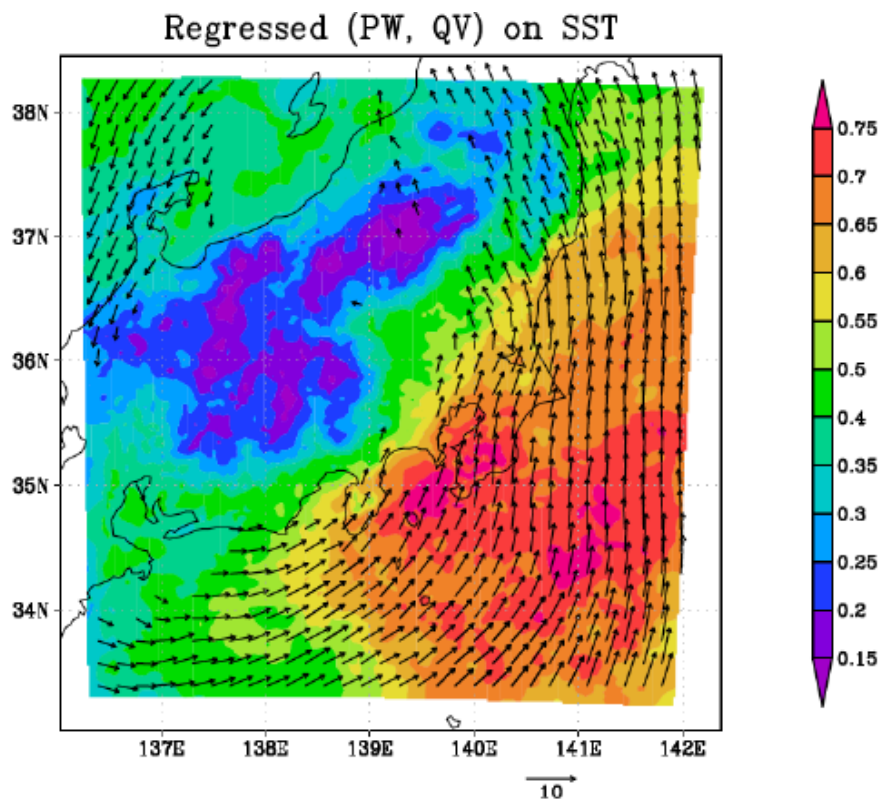
次に水蒸気量変動のもととなる海面フラックスの感度を図(2)-13に示した。よく知られているボーエン比の温度依存性により、夏季の海面水温では、顕熱(LE(gfx))の感度に比べて、潜熱(H(hfx))の感度が明らかに大きいことがわかる。例えば、日本海側の冬季などでも、海面水温の影響が重要となるが、日本海側の海面水温が上昇すると、顕熱も同時に増えることが過去の研究で示されている。



図(2)-13: 1982年から2012年までの各年の8月の関東南沖の平年値からの海面水温偏差とシミュレーションにより取り出した黒潮領域(REF Kuroshio)の海面水温の黒潮領域における海面フラックス(左:潜熱、右:顕熱)への影響の散布図。単位は、いずれも横軸がKで縦軸がW/m<sup>2</sup>。すなわち、海面水温変化のみに起因する海面フラックス変化量を示している。

最後に空間分布を確認することにより、海面水温変化に伴う水蒸気フラックスの変化を、回帰分析により調べた(図(2)-14)。関東地方の南沖の黒潮領域において海面水温が高いときには関東への水蒸気フラックスが増加し、水蒸気量の増加に寄与していることがわかる。同時に海面水温の変動に伴う、海面からの潜熱と顕熱から変動を調べたところ、顕熱による加熱はほとんど変化していないため、蒸発の増加と関東の気温の変動が結びついていることが予想された。





図(2)-14: 31年間の8月の関東南沖の海面水温の年々の変動に対する、可降水量(PW)と水蒸気輸送量(QV)の回帰係数。水蒸気輸送量は、相関係数(自由度は29)により99.9%で統計的に有意なものを図化した。海面水温が高いときに可降水量が多くなるところが赤で、矢印の向きに水蒸気輸送が強化されることを示している。

これまでの解析より、海面水温変動による関東地方の気温変動には、大気中の水蒸気量が変動することによる温室効果の強弱が関係しているものと考えられる。水蒸気は温室効果が強い気体であるため、大気中の水蒸気量が増えることは、下向きの赤外放射を増加させ、地表付近での放射冷却を軽減します。経験式から見積もった可降水量増加による下向きの赤外放射の変化量は、詳細なシミュレーションにより計算された変化量と同等のオーダーであり、水蒸気量変化が温室効果の強化に重要であることが示唆された。一方で、地上気温を大きく左右する要因として、雲による日射の遮断が考えられる。水蒸気量が変動することから雲量も変化する可能性があるが、本研究のシミュレーションでは、海面水温変動のみに起因する関東地方における日射の変動（雲量の変動）寄与は十分に小さいことがわかった。

本研究は、夏季において、関東南沖を流れる黒潮周辺の海面水温がどの程度関東地方の地上気温に影響を及ぼしているかを定量的に明らかにし、気温変化が水蒸気量の変動に伴う下向き赤外放射の変動に関係していることを示した。高温で水蒸気が多い環境は、人間活動（空調などのエネルギー需要）や健康問題（熱中症など）と直結する。したがって、信頼性の高い気候変動の把握と気象・気候予測を行うためには、既存の気象観測の継続に加えて、水蒸気量観測網の整備とデータアー

カイブの自動化、さらに数値モデルの改良を通じて水蒸気量変動を理解することが重要であると言える。一方、地球温暖化に伴う将来の広域的な気温予測に加えて、本研究のような領域スケールの温室効果も考慮することで詳細な温暖化予測が可能になることが期待される。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

地域規模の水蒸気量変動は、地域規模の温室効果の強化をもたらす可能性が示唆された。具体的な現象として、日本近海の海面水温が高い場合に、その近傍で、水蒸気量変動を通して高温多湿環境が形成されることがわかった。暖候期の海面水温が水蒸気量変動を通して、地域規模の気候に影響を及ぼしていることは、領域気候変動の視点と健康影響の視点から重要な結果である。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

領域規模の温室効果については、熱中症予防の観点から活用が期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

- 1) Takahashi, H. G., S. A. Adachi, T. Sato, M. Hara, X. Ma, and F. Kimura (2015): An oceanic impact of the Kuroshio on surface air temperature on the Pacific coast of Japan in summer: Regional H<sub>2</sub>O greenhouse gas effect. *Journal of Climate*, 28, 18, 7128-7144.

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 高橋洋、足立幸穂、原政之、馬燮銚、木村富士男：2013年度日本気象学会秋季大会（仙台）「東京および名古屋都市域での地上気温の年々変動に対する海面水温（SST）の影響」



- 2) 町田駿一、高橋洋：2013年度日本気象学会秋季大会（仙台）「夏季晴天日における名古屋市周辺の雲分布とその時間変化」

**(3) 出願特許**

特に記載すべき事項はない

**(4) 「国民との科学・技術対話」の実施**

特に記載すべき事項はない

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

- 1) プレスリリース（2015年8月13日、首都大学東京より）

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない

**8. 引用文献**

- 1) Ross, Rebecca J., William P. Elliott (2001): Radiosonde-Based Northern Hemisphere Tropospheric Water Vapor Trends. *J. Climate*, 14, 1602-1612.
- 2) Trenberth, K. E., J. Fasullo, and L. Smith (2005): Trends and variability in column-integrated water vapor. *Climate Dynamics*, 24, 741-758.

## **Analysis for climate change in water vapor variation**

Principal Investigator: Mikiko FUJITA

Institution: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

(JAMSTEC)

3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama-city,

Kanagawa, 236-0001, Japan

E-mail: fmiki@jamstec.go.jp

Cooperated by: Department of Geography, Tokyo Metropolitan University (TMU)

### [Abstract]

**Key Words:** Water vapor (Precipitable water vapor), Global climate change, Extreme water vapor, Remote sensing, Monsoon, Regional global warming

The variations of water vapor were investigated using the novel and accurate water vapor dataset GRASP (GPS pRecipitable wATER reSearch Project) and CMIP5 product. Additionally, we investigated the effect to the accuracy of precipitable water vapor (PWV) with multi-GNSS (Global Navigation Satellite System(s)) data, and regional climate model output.

In the analysis of GRASP dataset, we found the increment of frequency of extreme high PWV around Japan in recent decade both in summer and winter season. Generally, it is difficult to observe the PWV in high temporal interval. Moreover, the radiosonde, which is typical observation for water vapor, has systematic error in many types of humidity sensor (Wang et al. 2004). Therefore, our results of the increment of extremes should be important. Also, the relationship between surface temperature and PWV was investigated. The saturated water vapor pressure should be change with Clausius-Clapeyron (CC) formula. The increment of water vapor is estimated 7 % per 1 degree. Using the surface temperature, however, the rate tends to be larger than CC in high surface temperature. We found the rate over CC is related to precipitation event.

We investigated the benefits of multi-GNSS processing. Using multi-GNSS signals improved the estimation accuracy of coordinates due to the high mean number of satellites. In addition to coordinates, PWV observed by the GNSS and radiosondes was also compared. The remarkable effect of multi-GNSS processing is demonstrated by the water vapor components. The root means square and bias of PWV between GPS and radiosonde observations was smaller in the case of multi-GNSS.

Also, we used a 4-km resolution regional climate model to examine the sensitivity of surface air temperature on the Pacific coast of Japan to sea surface temperature (SST)

south of the Pacific coast of Japan during summer. The authors performed a control simulation (CTL) driven by reanalysis and observational SST datasets. A series of sensitivity experiments using climatological values from the CTL SST datasets over a 31-yr period was conducted. The interannual variation in precipitable water over the Pacific coast was well simulated in CTL, compared with the GRASP precipitable water. The interannual variation in SST over the Kuroshio region amplified the interannual variation in surface air temperature over the Pacific coast. It was found that 30% of the total variance of interannual variation in surface air temperature can be controlled by interannual variation in SST. Concurrent with the warming in surface air temperature, downward longwave radiation at the surface was also increased. This implies that the primary factor for the increase in surface air temperature in summer is the increase of moisture in the lower troposphere, indicating that the regional warming was caused by an increase in H<sub>2</sub>O greenhouse gas.