

課題名 RFa-1101 温暖化影響評価のためのGPS衛星を用いた高精度水蒸気データセットの作成

課題代表者名 藤田 実季子（独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域）

研究実施期間 平成23～24年度

累計予算額 20,147千円（うち24年度8,954千円）
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード（5～10個
以下程度）

研究体制

- (1)GPS衛星を用いた水蒸気量算出とデータセット作成（（独）海洋研究開発機構）
- (2)再解析データ／温暖化予測モデルでの水蒸気量再現性の評価（首都大学東京）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

水は大気中において氷粒、水滴、水蒸気と相転移し、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。IPCC報告書において「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」と記述されていることから、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動のモニタリングは大変重要である。これまで、大気中の水蒸気量は現業のラジオゾンデによる相対湿度の観測や、マイクロ波センサーを搭載した衛星で観測されてきた。最近になってこれらデータを使って気候変動に着目した長期データの解析が行われており、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。

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、国によっては公開データが限られている。衛星観測も観測頻度は衛星軌道に依存してしまい高頻度のデータを手に入れることはできない。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、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、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。また、各国の現業機関から数種類の再解析データが配布されているが、水蒸気量は温室効果と深く関わっているにも関わらず観測データとの検証・調査が十分とは言えない。水蒸気分布は空間方向に細かな構造を持っているため、ラジオゾンデの空間分布では、水蒸気の水平分布の検証も難しい。そのため、時間方向と空間方向に詳細な水蒸気データを用いて、日周変化を含めた水蒸気量の変動について、再解析データ、さらには気候モデルでの再現性を評価する必要がある。

一方で、Global Positioning System (GPS)は米国が軍事用に開発し、1990年代から世界中で利用され始めた。現在では非軍事的な用途（ナビゲーション、衛星時計、地殻変動監視、等）に広く用いられている。通常の地上精密観測では、GPS衛星から発信された電波を固定した地上受信機で受け取るが、大気中を通過するGPS衛星電波の遅れを計測することで、大気中の水蒸気量の積算値を推定することができる(Rocken et al., 1993)。現在、GPSデータは、主に地殻変動監視が目的のために生データのみ公開となっており、各GPS観測点の可降水量としてのデータセットは作成されていない。これらのGPSデータを可降水量として整備することができれば、高時間／水平分解能の水蒸気量データが高精度で把握することができる。以上から、高時間／水平分解能の水蒸気量データを高精度で把握する必要があり、再解析データや温暖化予測モデルでの水蒸気量が正確に検証されることが望まれる。

2. 研究開発目的

最新の解析ソフトを用い世界のGPS観測点における生データから可降水量を算出し、データセットを作成することを目的とした。既存の各種水蒸気データを用いた検証も行い、作成されたデータセットは局地循環の解析やモデル検証など、広く利用してもらうために、データ公開向けの整備を行った。

3. 研究開発の方法

(1) GPS衛星を用いた水蒸気量算出とデータセット作成

解析のもとデータとなる、全球のGPS生データを各機関から収集した。収集した期間はGPS衛星技術が確立した1996年頃から2011年までの、約16年間分のCompact RINEX形式のデータである。観測点数は1500点にのぼる。さらに解析に関わるGPS衛星の暦・時計情報を同期間で収集した。次に、最新の解析ソフトを用いた解析システムを構築し、気候変化を考慮したひと月毎に基準座標値を更新する手法で、大気遅延量を算出した。大気遅延量から可降水量への変換は、地上観測で得られた気温・気圧を用いて行った。得られた可降水量データを既存の水蒸気観測データとの比較を行い、品質管理を行った。さらにデータセットとして整理しウェブサイトにてデータ公開した。

(2) 再解析データ／温暖化予測モデルでの水蒸気量再現性の評価

複数の再解析データと、第5期結合モデル相互比較実験(CMIP5)モデルについて、水蒸気量(可降水量)の比較を行った。また、可降水量の観測データとして、アメリカ航空宇宙局によるNASA水蒸気プロジェクト(NASA Water Vapor Project; NVAP)のデータを用いた。また、本研究で作成されたGPS可降水量との簡単な比較も行った。全球の水蒸気量とともに、熱帯アジアモンスーン地域の水蒸気量についても詳細な比較を行った。この地域は、全球でも最も可降水量および降水量が多いことで知られており、また、これらの地域の気候変動は、湿潤なモンスーン気流及び太平洋高気圧の変化を通して、日本への影響も大きい。さらに、熱帯域では水蒸気場の変動は、降水量変動と密接に関係しているため、水循環への影響および大気の潜熱加熱を通して全球の大気循環場への影響も極めて大きいとされている。

4. 結果及び考察

(1) GPS衛星を用いた水蒸気量算出とデータセット作成

気候解析のための高精度の可降水量データが、1時間値という高時間分解能算出された。さらにその精度は、水蒸気の直接観測であるラジオゾンデと同等であることが確認された。得られたデータからは、全日本平均でも近年は可降水量が増加傾向にあることが確認された。とくに上位5%の事例ではその増加が顕著であった。

(2) 再解析データ／温暖化予測モデルでの水蒸気量再現性の評価

再解析データの可降水量は、ほとんどの再解析プロダクトで乾燥バイアスが見られた。比較的新しい再解析の水蒸気量は、観測値であるNVAPに近かった。しかしながら、依然として乾燥バイアス傾向であった。またその再解析間のばらつきは、特に熱帯域では季節変化より大きいことが分かった。さらにCMIP5では、初期解析としていくつかのCMIP5を調べたところ、水蒸気分布は比較的よく再現されているが、乾燥バイアスが見られるモデルが多かった。一方で、本研究のGPS可降水量では、CMIP5モデルの方が湿潤傾向であった。今後より詳しい解析が必要である。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

気候変化解析に使用可能な可降水量データセットの作成し、最近のバイアス等が既知であるラジオゾンデの可降水量との検証を行い、高精度で算出されていることが確認された。このデータから近年は日本域の可降水量が増加傾向にあることも示唆された。さらに再解析やGCMなどのモデル可降水量は、観測と比較して過少評価していることが明らかとなった。このような水蒸気量差は、各モデル内のエネルギーバランスに大きく影響を及ぼしている可能性が示唆された。

(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>

公開された可降水量データセットにより、水蒸気量の気候変化の詳細把握が期待される。モデル再現性評価

の基準値となる、再解析データの水蒸気量の評価を示したことで、今後のより正確な解析が期待される。

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) Takahashi, H.G.: Atmospheric Research, doi:10.1016/j.atmosres.2012.07.005 (2012)
“Orographic low-level clouds of Southeast Asia during the cold surges of the winter monsoon.”
- 2) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi and C. Rocken: Proceedings of the ION GNSS 2012, 3454–3458 (2012)
“GPS Precipitable Water Vapor Dataset for Climate Science.”
- 3) Fujita, M., H. G. Takahashi, and M. Hara: Atmospheric Science Letters (2013)
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different phases of Indian Ocean Dipole.” (in press).

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Takahashi, H. G., Hara, M., Fujita, M., and Yoshikane, T.: Atmospheric Chemistry Physics Discussion, 12, 23759–23791, doi:10.5194/acpd-12-23759-2012 (2012)
“A discrepancy in precipitable water among reanalyses and the impact of forcing dataset on downscaling in the tropics.”

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Fujita, M.: WCPR Open Science Conference, Denver, USA (2011)
“Diurnal convection and water vapor peaks over the eastern Indian Ocean off Sumatra during different MJO phase.”
- 2) Takahashi, H. G., M. Hara, T. Yoshikane, and M. Fujita: European Geosciences Union, General Assembly 2012, EGU2012–3948, April 22–27, Vienna, Austria (2012)
“A discrepancy in precipitable water among the major reanalyses over tropics and its effect on downscaling.”
- 3) Hiroshi G. Takahashi, Mikiko Fujita, and Masayuki Hara: American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, December 3–7, San Francisco, United States of America (2012)
“Inter-comparison of precipitable water among reanalyses and its effect on downscaling in the tropics.”
- 4) Fujita M., A. Wada, T. Iwabuchi and C. Rocken: American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, December 3–7, San Francisco, United States of America (2012)
“GPS-PWV dataset by GPS Precipitable Water Research Project (GRASP).”
- 5) 藤田実季子、高橋洋、原政之: 2012年度日本気象学会秋季大会(2012)
「温暖化影響評価のための GPS 可降水量データセット(GRASP)」
- 6) 藤田実季子、原政之、石崎紀子、高橋洋、木村富士男: 2012年度日本気象学会秋季大会(2012)
「アジアモンスーンのオンセット期における擬似温暖化実験」
- 7) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: 2012年度日本地球惑星連合同大会(2012)
“GPS Precipitable Water Research Project (GRASP).”
- 8) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria (2012)
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different IOD phases.”
- 9) Fujita M., M. Hara, N. N. Ishizaki, H. Takahashi, F. Kimura: AMS annual meeting 2013, Austin, USA (2013)
“Downscaling of monsoon onset using pseudo global warming method.”

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特任研究員

研究参画者

- (1): 藤田 実季子 (同上)

原 政之

筑波大学大学院修了、現在、独立行政法人海洋研究開発機構技術研究主事

(2):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

RFa-1101 温暖化影響評価のためのGPS衛星を用いた高精度水蒸気データセットの作成

(1) GPS衛星を用いた水蒸気量算出とデータセット作成

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域

藤田 実季子、原 政之

平成23～24年度累計予算額：13,178千円

(うち、平成24年度予算額：5,054千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

全球エネルギー循環に大きく影響を及ぼす水蒸気量について、最新の解析システムを構築し、GPS衛星から高精度・高時間分解能の可降水量(単位面積当りの水蒸気量の全層積算値)データセットを作成した。得られたデータは既存の水蒸気観測データと比較検証し、品質管理を行った。特に日本域の水蒸気量は近年10年で、増加傾向にあることが明らかとなった。

[キーワード]

水蒸気量、再現性評価、GPS可降水量、データセット

1. はじめに

水は大気中において氷粒、水滴、水蒸気と相轉移し、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。IPCC第4次報告書において「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」と記述されていることから、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動のモニタリングは大変重要である。これまで、大気中の水蒸気量は現業のラジオゾンデによる相対湿度の観測や、マイクロ波センサーを搭載した衛星で観測されてきた。最近になってこれらデータを使って気候変動に着目した長期データの解析が行われており、Ross and Elliott (2001)¹⁾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)²⁾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。

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。衛星観測も観測頻度は衛星軌道に依存してしまい、静止衛星でない限りは高頻度のデータを手に入れることはできない。また厚い雲域では観測データの精度が落ちるため、直接観測よりデータの品質が劣る。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., 2007³⁾)、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., 2007⁴⁾)、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。

また、各国の現業機関から数種類の再解析データが配布されているが、水蒸気量は温室効果と深く関わっているにも関わらず観測データとの検証・調査が十分とは言えない。さらに、水蒸気分布は空間方向に細かな構造を持っているため、ラジオゾンデの空間分布では、水蒸気の水平

分布の検証も難しい。そのため、時間方向と空間方向に詳細な水蒸気データを用いて、日周変化を含めた水蒸気量の変動について、再解析データ、さらには気候モデルでの再現性を評価する必要がある。

一方で、Global Positioning System (GPS)は米国が軍事用に開発し、1990年代から世界中で利用され始めた。現在では非軍事的な用途（ナビゲーション、衛星時計、地殻変動監視、等）に広く用いられている。通常の上精密観測では、GPS衛星から発信された電波を固定した地上受信機で受け取るが、大気中を通過するGPS衛星電波の遅れを計測することで、大気中の水蒸気量の積算値を推定することができる（Rocken et al., 1993³⁾）。現在、GPSデータは、主に地殻変動監視が目的のために生データのみ公開となっており、各GPS観測点の可降水量としてのデータセットは作成されていない。これらのGPSデータを可降水量として整備することができれば、高時間／水平分解能の水蒸気量データが高精度で把握することができる。以上から、高時間／水平分解能の水蒸気量データを高精度で把握する必要があり、再解析データや温暖化予測モデルでの水蒸気量が正確に検証されることが望まれる。

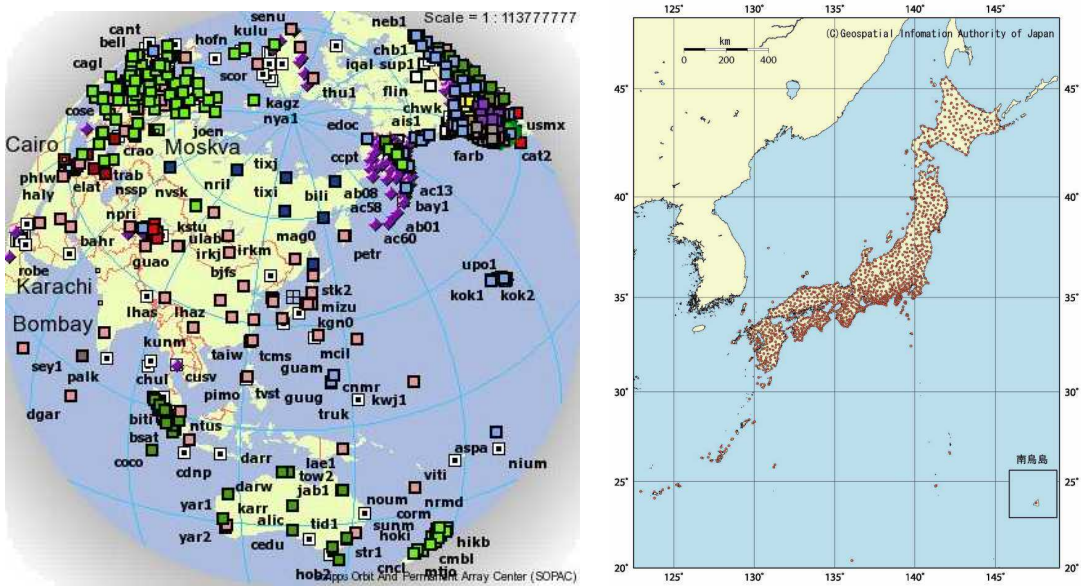
2. 研究開発目的

最新の解析ソフトを用い世界のGPS観測点生データから可降水量を算出し、データセットを作成することを目的とする。既存の各種水蒸気データを用いた検証も行い、作成されたデータセットを局地循環の解析やモデル検証など、広く利用してもらうために、データ公開向けの整備を行う。

3. 研究開発方法

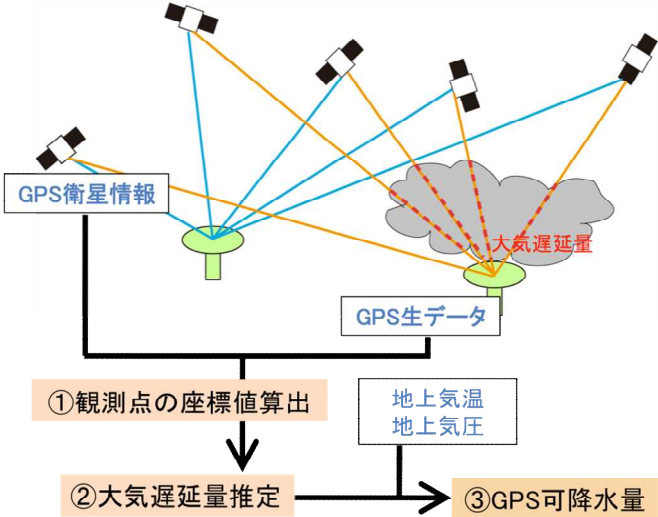
(1) 高精度の水蒸気情報のデータセット作成

まず、全球のGPS生データを各機関の公開データベース（Scripps Orbit and Permanent Array Center: <http://sopac.ucsd.edu/>、国土地理院: <http://terras.gsi.go.jp/ja/index.html>）から収集した。観測点分布の一例を図(1)-1に示す。収集した期間はGPS衛星技術が確立した1996年頃から2011年までの約16年間分のCompact RINEX形式のデータである。観測点数は1500点にのぼる。さらに解析に関わるGPS衛星の暦・時計情報を同期間で収集した。



図(1)-1 GPS観測点の分布。左が SOPAC、右が国土地理院によるもの。

GPS衛星とGPS観測点の位置が正確に把握できている条件下で、GPS衛星から出発した搬送波がGPS観測点に到達するまでに発生する大気中の水蒸気による遅れ（大気遅延量）を物理量に変換したものがGPS可降水量である。従って、解析システムの手順としては、①GPS観測点の座標値算出、②GPS大気遅延量の推定、③GPS可降水量の変換、となる。解析の流れを図(1)-2に示し、解析システムのポイントについて以下、順に述べる。また、最終的に得られたデータは品質管理を行い、データ公開を行った。



図(1)-2 GPS可降水量解析の流れ模式図。

1) GPS観測点の座標値算出

各観測点の座標値は地殻変動などにより時々刻々と変化する。特に鉛直方向のずれは大気遅延量に直接関係してくるため、短周期の変動成分（日々の変動など）を取り除き、かつ長周期の変動成分（プレート運動など）を考慮した解析方法が望まれる。本課題では、各観測点のログファイルに記載された初期座標値を元にして1ヶ月間毎に座標値を再算出し、大気遅延量を算出する為の座標値とした。解析ソフトウェアはRTNet(Rocken et al., 2006⁶⁾)を使用した。ただし、指定期間の途中でデータが不連続の場合やアンテナモデル・座標系が変更された場合は、その時点で解析を終了させ、新たに指定期間までの解析を行った。

2) GPS大気遅延量の推定

1) で得られた座標値を元に大気遅延量を推定した。対応した1ヶ月間、同じ座標値を用いた。解析ソフトウェアはRTNetを使用した。このソフトウェアは気象庁の予報システムのために使われており、水蒸気量算出の実績のあるものである。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, 1972⁷⁾) を用い、マッピング関数はGlobal Mapping Function (Boehn et al., 2006⁸⁾) を用いた。ただし、指定期間の途中でデータが不連続の場合や座標系が変更された場合は、その時点で解析を終了させ、新たに指定期間までの解析を行った。

3) GPS可降水量の変換

得られた大気遅延量から可降水量への変換を行った。Elgered et al. (1991)⁹⁾ 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)¹⁰⁾ により可降水量に変換を行った。気象要素は日本国内については気象庁官署データとAMeDASデータを用い、国外についてはCFRSR客観解析 (NCEP Climate Forecast System Reanalysis) のグリッドデータを用いた。それぞれGPS観測点に対して高度補正を行った。

4) GPS可降水量の変換

得られたGPS可降水量と既存の水蒸気観測データとの比較を行うために、各機関から公開されているラジオゾンデデータの収集し、可降水量に変換し比較をおこなった。

4. 結果及び考察

上記の方法から得られた結果を、(1) 水蒸気量の算出、(2) 可降水量精度調査、(3) 可降水量の変動特性、(4) GRASP可降水量データセットの公開、の順に示す。

(1) 水蒸気量の算出

GPSデータを解析するには、観測可能な量と未知のパラメータとを結びつける数学モデルが必要である。観測方程式をたて未知のパラメータについて線形化し、最小二乗法などでパラメータ推定を行う。未知パラメータに観測点の位置を選べば基線解析、衛星の位置を選べば軌道決定、

天頂遅延量を選べば、GPSの可降水量センサーとしての利用ということになる。

ここで大気による遅延も含めた搬送波位相のモデル式は以下のようなになる。受信機*i*で時刻*t*に受信された衛星*j*からの搬送波位相は

$$\phi_i^j[t] = \frac{\rho_i^j[t]}{\lambda} + N_i^j + f \delta^j[t] - f \delta_i[t] - \frac{\Delta_{\text{ion}_i^j}}{\lambda} + \frac{\Delta_{\text{trop}_i^j}}{\lambda} \quad (1)$$

$\rho_i^j[t]$: 受信機*i*で時刻*t*に受信された衛星*j*の電波の伝播距離 [m]

λ : 搬送波の波長 [m]

N_i^j : 波数不確定 [サイクル]

f : 搬送波の周波数 [Hz]

$\delta^j[t]$: 衛星*j*の時計誤差 [s]

$\delta_i[t]$: 受信機*i*の時計誤差 [s]

$\Delta_{\text{ion}_i^j}$: 電離層遅延量 [m]

$\Delta_{\text{trop}_i^j}$: 大気遅延量 [m]

と表すことができる。搬送位相を観測量に選ぶ場合、それぞれの観測点時間毎に衛星と受信機の時計誤差を推定する。大気遅延量はモデルで与えるか、適当な仰角依存性を仮定して天頂方向の遅延量を観測点毎に適当な時間間隔で推定する(辻、1998¹¹⁾。

GPSデータ解析において、GPS衛星の軌道は既知であるとして固定し解析を行うことが多い。したがって衛星軌道の誤差は推定パラメータの誤差につながるため、できるだけ精度の高い軌道情報を使うことが望まれる。

大気中の任意の場所での屈折率を*n*とすると、衛星から地上の観測点に向けて伝わる電波の伝播距離*L*は、経路を*S*とすると以下のように表すことができる。

$$L = \int_S n dS \quad (2)$$

電波が伝播する際には乾燥大気・水蒸気の影響によってその速度が減衰する。また、天頂方向以外からの電波は大気の屈折率によって伝播経路は湾曲する。このようにして電波の伝播時間に遅れが生じる。この遅延時間に光速を掛けあわせ距離の単位で表したものが大気遅延量である。衛

星と地上の観測点の間の直線距離を G とすると、大気遅延量 ΔL は以下のように表される(大谷・内藤, 1998¹²⁾)。

$$\Delta L = \int_s n dS - G = \int_s (n-1) dS + [S - G] \quad (3)$$

大気の屈折率は気温、乾燥大気分圧、水蒸気圧と以下のような関係にあることが知られている(Thayer, 1974¹³⁾)。 Z_d , Z_v は乾燥大気、水蒸気の圧縮率であり、理想気体からのずれを表している。

$$10^6 [n-1] = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} + k_3 \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} \quad (4)$$

P_d : 乾燥大気分圧 [hPa]

T : 気温 [K]

P_v : 水蒸気圧 [hPa]

k_1 , k_2 , k_3 : 係数

特に天頂方向における大気遅延量を考えると、(3)式、(4)式および状態方程式から次式を得ることができる(大谷・内藤, 1998¹²⁾)。

$$\Delta L_{Zenith} = 10^{-6} \left[\int_{Zenith} k_1 \frac{R}{m_d} \rho dz + k'_2 \int_{Zenith} \left(\frac{P_v}{T} \right) Z_v^{-1} dz + k_3 \int_{Zenith} \left(\frac{P_v}{T^2} \right) Z_v^{-1} dz \right] \quad (5)$$

$$\text{ただし } k'_2 \equiv \left(k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_d} \right)$$

ρ : 水蒸気を含めた大気の密度

m_d : 乾燥大気の分子量

m_v : 水蒸気の分子量

R : 気体定数

ここで(5)式の右辺第1項をZHD(天頂静水圧遅延量)とおき、高さを z 、気圧を P とし静水圧平衡を仮定すれば、以下のようになる。

$$ZHD = 10^6 k_1 \frac{R}{m_d g_m} P_0 \quad (6)$$

$$P_0 : \text{地上気圧} \quad [hPa]$$

ただし、 g_m は次式で与えられる。

$$g_m = \frac{\int \rho(z)g(z)dz}{\int \rho(z)dz} \quad (7)$$

さらに、(7)式を展開した時の一次の項は気柱の重心における重力加速度と近似できるから(Davis *et al.*, 1985¹⁴⁾)、ZHDは先述した(6)式に対して

$$ZHD = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_0}{f(\phi, H)} \quad (8)$$

$$f(\phi, H) = (1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028H)$$

と表すことができる(Elgered *et al.*, 1991⁹⁾)。 ϕ は観測点の緯度、 H は楕円体高を示す。

求められた静水圧遅延量から湿潤遅延量(ZWD)を求める。湿潤遅延量は天頂遅延量(ZTD)から静水圧遅延量を差し引くことで求まる。

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (9)$$

可降水量(PWV)は湿潤遅延量から以下のように求めることができる(Askne and Nordius, 1987¹⁵⁾)。

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \quad (10)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{\left(R_v \left(k_2 - k_1 \frac{M_v}{M_d} + \frac{k_3}{T_m} \right) \right)} \quad (11)$$

R_v : 水蒸気の気体定数 ($R_v = 461.518$)

k_1 : 実験的に求められた定数 77.60 ± 0.08 [K/hPa]

k_2 : 実験的に求められた定数 71.98 ± 10.82 [K/hPa]

k_3 : 実験的に求められた定数 $(3.754 \pm 0.036) \times 10^5$ [K/hPa]

M_v : 水蒸気の分子量 18.0152 [kg/kmol]

M_d : 乾燥大気の分子量 28.9644 [kg/kmol]

T_m : 加重平均温度 [K]

加重平均温度は、上空の水蒸気によって重み付けられた平均気温の事であり、以下の式から求められる。

$$T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \quad (12)$$

T : 地上気温 [K]

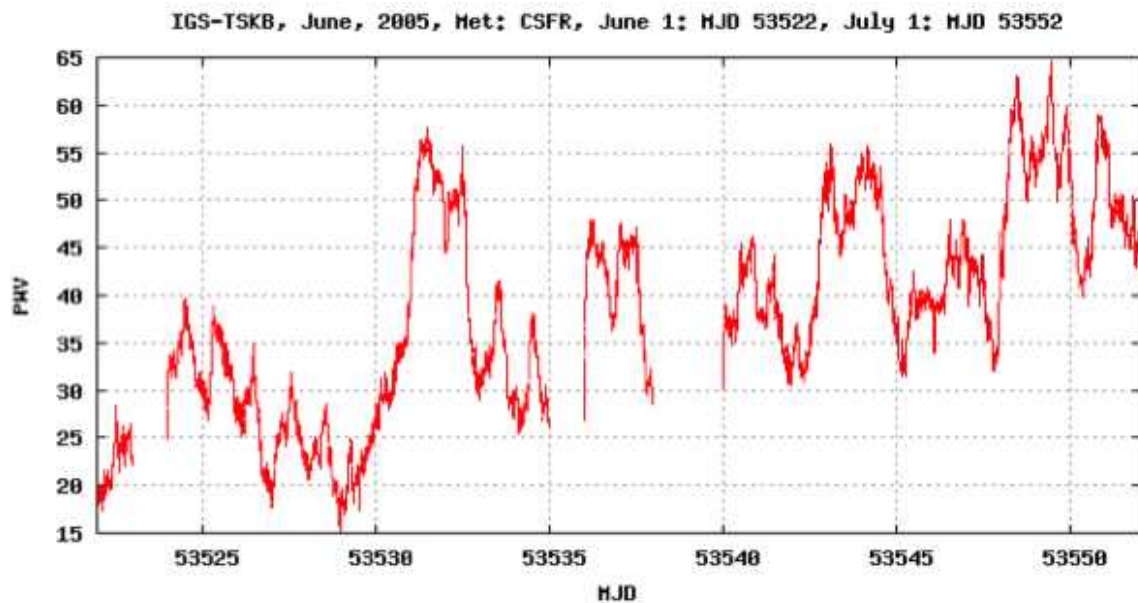
また(12)式は以下のように近似される(Bevis *et al.*, 1992¹⁰⁾。

$$T_m \approx 70.2 + 0.72T \quad (13)$$

実際の計算では、専用ソフトウェアで推定された大気遅延量から、(6)式から求めた天頂静水圧遅延量を差し引き、湿潤遅延量を算出する。さらに、(10)式の係数 Π を(13)式を用いて推定し、可降水量へと変換した。

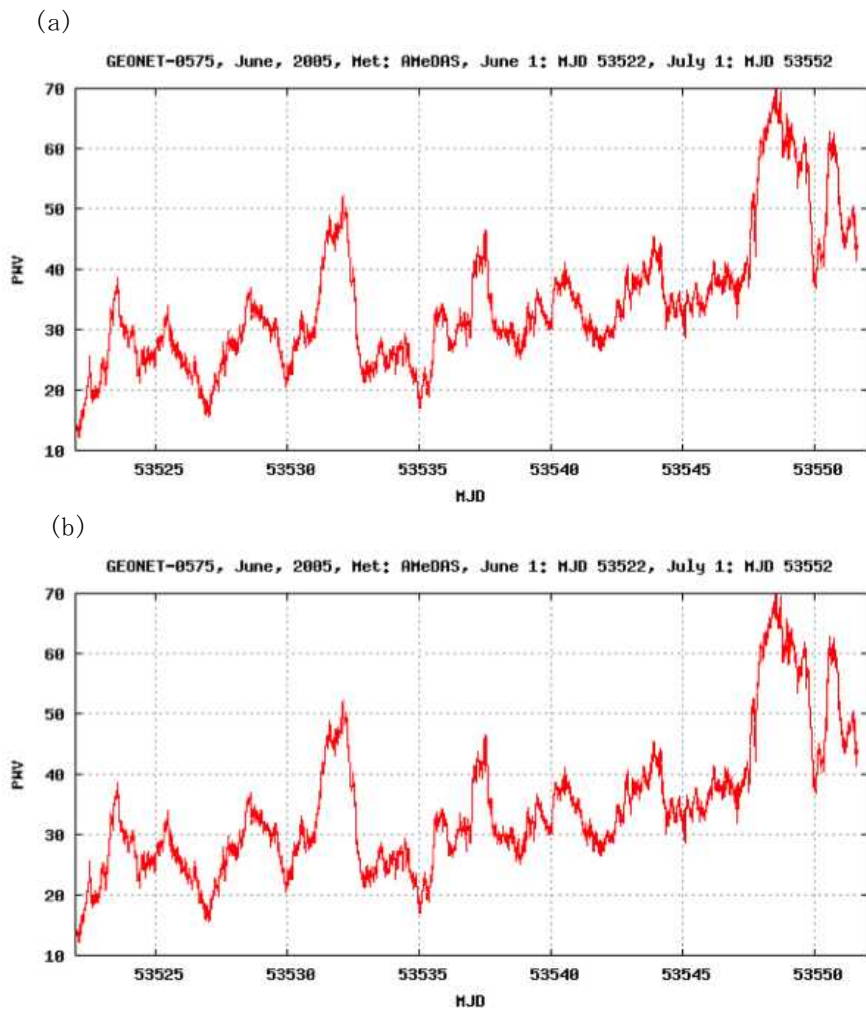
(2) 可降水量精度調査

開発されたシステムを用いた解析の結果例を図(1)-3に示す。30秒間隔に記録されたGPS搬送波生データから、10分間隔の可降水量(PVW)が算出された。図(1)-3の時系列において前半の緩やかな可降水量減少とそれに付随した日周期変動や、その後の急激な可降水量増加など、高時間分解能のデータを作成することができた。



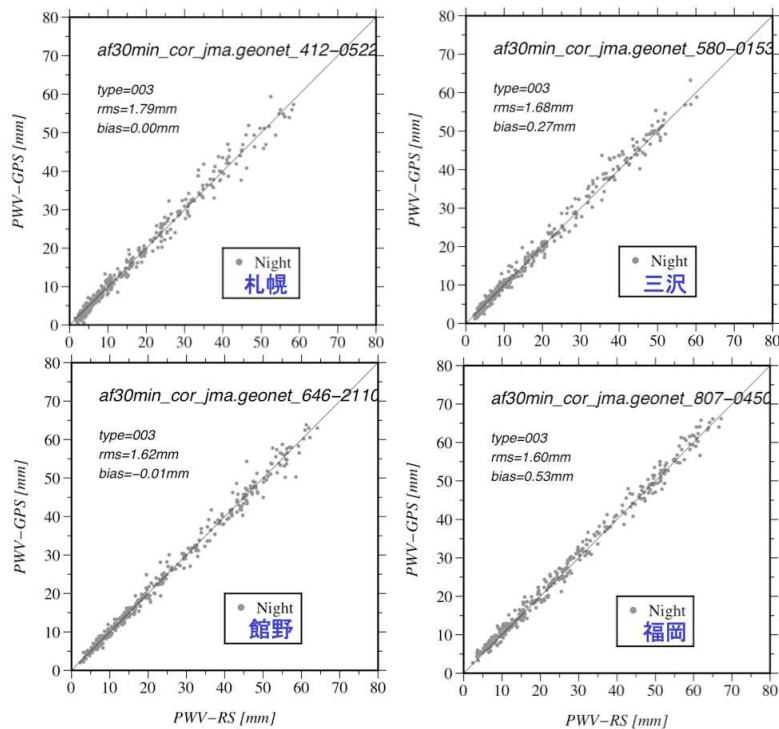
図(1)-3 GPS 可降水量 (PWV) 変動の例 (IGS 観測点 TSKB)。縦軸の単位は[mm]、また横軸の MJD は修正ユリウス日を示す。

また、湿潤大気遅延量から可降水量へ変換する際に気象データを用いるが、気温をAMeDAS観測値を用いた場合と気象官署の観測値を用いた場合（国内の気圧値は気象官署のみ）の、変換された可降水量の時系列を図(1)-4 (a) (b)に示す。両者を比較すると、得られる可降水量変動に大差ないことが分かった。Bavis et al. (1992)¹⁰⁾の変換式によれば、可降水量の変化は気温 1°C あたり $0.1\text{--}0.2\text{mm}$ であるから、高度補正さえ正確に施しておけば問題ないと言える。さらにこの結果はグリッドデータを用いた場合にも、拡張できると考えられる。従って、地点別の気象データが手に入りにくい国外のGPS観測点においても、ある程度の誤差範囲で可降水量が推定可能であると考えられる。これらの結果から、気象データが手に入りやすい日本国内の観測点については、AMeDAS観測点のものを、海外の観測点についてはCFSR客観解析の近傍グリッドデータを使用することとした。



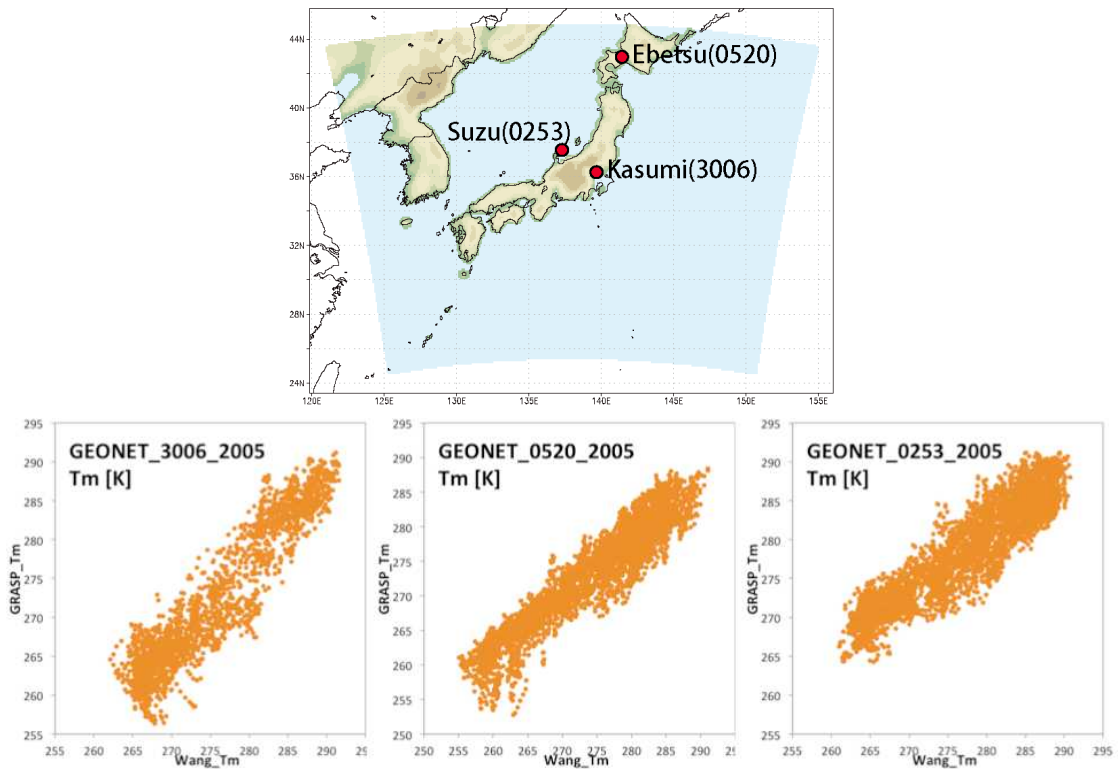
図(1)-4 GPS可降水量変動の例 (a: 気象官署の気温、b: AMeDASの気温を使用) 縦軸の単位は[mm]、また横軸のMJDは修正ユリウス日を示す。

さらに、得られたGPS可降水量の精度を確認するために、既存観測手法による水蒸気量との比較を行った。比較データには水蒸気量を直接観測している、ラジオゾンデの湿度データから可降水量を算出した。一方で、ラジオゾンデの湿度センサーには、製造メーカーにより系統的なバイアスがあることが知られている。今回はそのバイアスの原因や出現傾向が比較的明確である (Vome1 et al, 2007³⁾)、ヴァイサラ社のラジオゾンデセンサーを用いた観測のうちの夜間のデータを用いて行った。GPS可降水量はゾンデが打ち上げられた時間から30分間のデータを平均して用いた。GPS可降水量との比較を図(1)-5に示す。

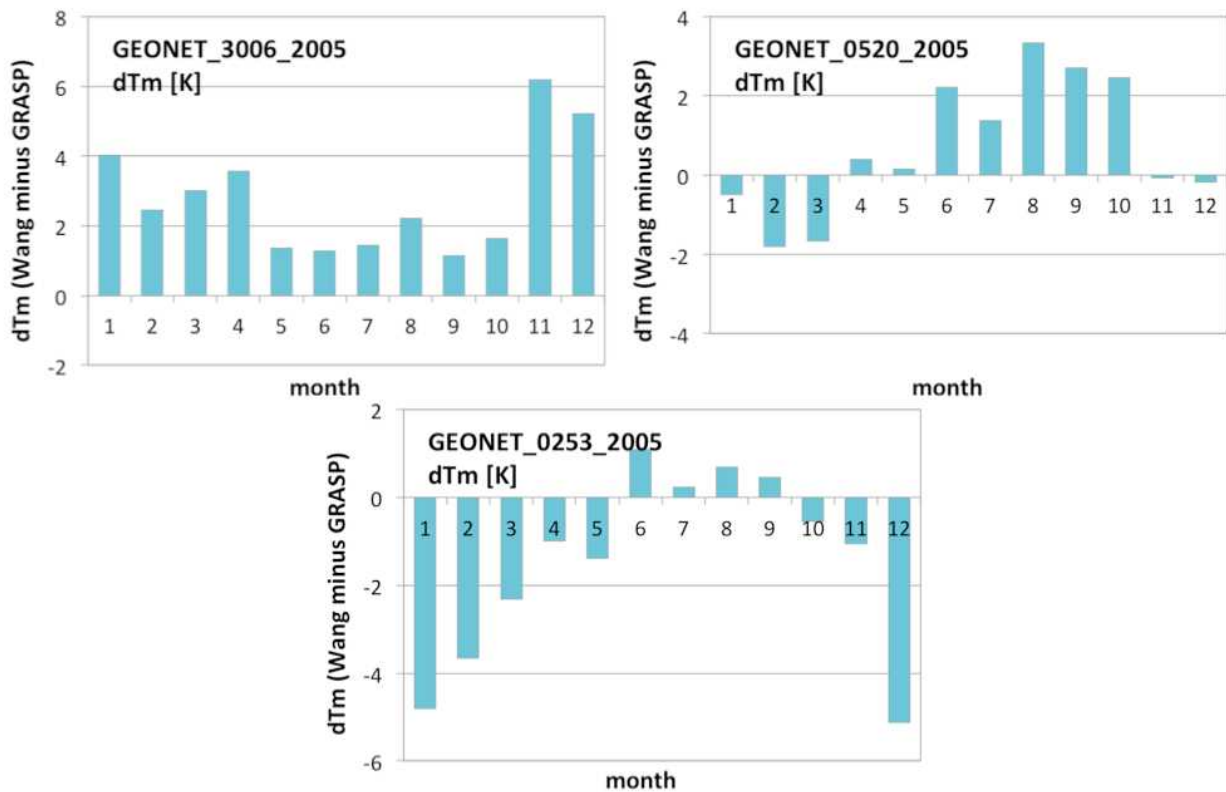


図(1)-5 GPS 可降水量(縦軸)とラジオゾンデより求めた可降水量(横軸)の比較。札幌、三沢、館野、福岡のラジオゾンデ観測点による結果。GPS は近傍の観測点を用いた。値は可降水量[mm]を示す。

また、大気遅延量から可降水量に変換する際に使用する、加重平均温度の影響を調査した。式(13)の地上気温から算出する、近似式で得られた加重平均温度と、実際にプロファイルから加重平均で算出した温度の比較した結果を図(1)-6-1に示す。プロファイルから計算した加重平均は、再解析データJRA25の近傍グリッドの気温プロファイルから求められた。これらのデータはアメリカ大気研究センター(NCAR)のJunhong Wang 研究員とLiangying Zhang研究員の協力のもと議論を行った。図(1)-6-1に示す通り、双方の加重平均温度に若干の差が見られた。月変動をみると(図(1)-6-2)、内陸部の観測点3006で、5K程度の温暖バイアスが見られ、日本海側の観測点0253でも5K程度の寒冷バイアスが見られた。この傾向は過去の研究のWang et al. (2008)¹⁶⁾と矛盾しない。さらに5Kという温度差は可降水量そのものには大きく影響しないことから、本データセットでは式(13)から求められた加重平均温度を使用することとした。



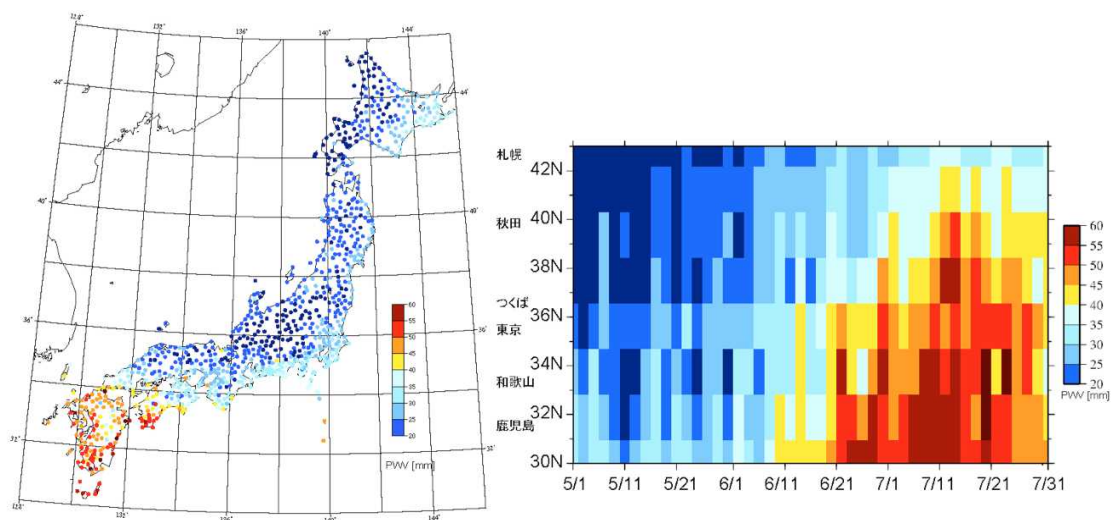
図(1)-6-1 2005年の加重平均の比較。縦軸が地上気温から、横軸がプロファイルデータから求めたもの。



図(1)-6-2 2005年月別の加重平均差。プロファイルデータから求めた値から地上気温を用いて求めた値を差し引いている。

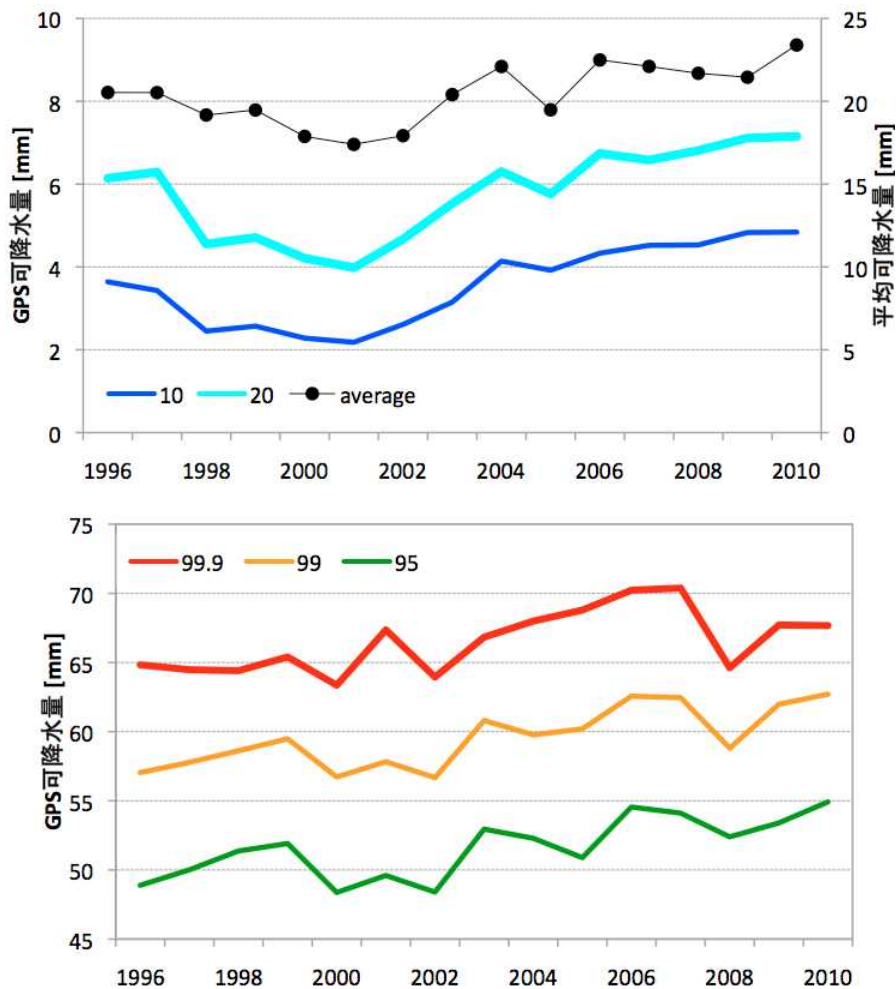
(3) 可降水量の変動特性

解析された可降水量の変動特性を示す。図(1)-7の左図は2007年6月15日のGPS連続観測システム(GEONET)により観測された可降水量分布を示す。九州地方がちょうど梅雨入りし、50mmを超える高い可降水量が観測されている。この後、梅雨前線は北上することになる。気候的な季節変動として、2000年から2009年の平均的な、梅雨前線の北上に伴う、可降水量の変化の時間緯度分布を図(1)-7(右図)に示す。6月中旬から7月中旬にかけての、気団の移り変わりが明瞭に解析された。梅雨入り前後で日本域の水蒸気量は30mmから50mmと劇的に変動することが、GPS可降水量を用いより正確に確認することができた。



図(1)-7 左：2007年6月15日におけるGPS可降水量の分布図。右：2000年～2009年における梅雨入り時期のGPS可降水量の時間緯度断面。どちらもカラースケールは可降水量[mm]を示す。

また、年々の変動も明瞭に観測された。日本全域の年平均可降水量の時系列を示す。さらに、極値の変動傾向を調べるために、各年の全観測点における、上位99.9、99、95、20、10パーセント値の時系列を図(1)-8に示す。平均値、各パーセント値ともに近年の水蒸気量の増加傾向が見られた。特に上位事例(図(1)-8右)では、最近15年で5mm程度の顕著な増加が見られた。この変動は近年増加している強雨頻度の増加との関係が推測される。



図(1)-8 日本域平均の可降水量時系列。年平均値(黒)と各年の上位パーセンタイル値(カラー)。

(4) GRASP可降水量データセットの公開

これらの可降水量データは、品質管理後にデータ公開を行った。品質管理では、例えば、遅延量推定時に推定誤差が大きいデータに関しては、欠測としてデータを整理している。公開されたデータはGRASP(GPS precipitable water research project)データセットと名付け、ウェブページから1年単位でダウンロードが可能である。データは、1年あたりGEONETの場合は800-1200点程のデータとなり、各々の観測点における1時間毎の可降水量が記録されている。JAMSTECの成果ページ(<http://www.jamstec.go.jp/res/ress/fmiki/>)から、公開ページへのアクセス可能である。さらに、これらのデータは、NICTサイエンスクラウドにもミラーリングされ、広く一般からアクセス可能とした。

GRASP (GPS precipitable water research Project)

supported by the Global Environmental Research Fund (RFa-1101) of the Ministry of the Environment, Japan.

Documents

updated 2013-03-12

- [Readme](#)

Data

updated 2013-03-12

By downloading the data, you agree to become bound by the terms of the policy.

GEONET (Japanese) station Beta version (12/03/2013)

CSV format	Size	Date Archived	GrADS format	Size	Date Archived
GEONET_csv_2009.beta.tar.gz	112,255 KB	2013/03/13 12:07	-	-	-
GEONET_csv_2008.beta.tar.gz	111,541 KB	2013/03/13 12:07	-	-	-
GEO_csv_2007.tar.gz	-	-	-	-	-
GEO_csv_2006.tar.gz	-	-	-	-	-
GEO_csv_2005.tar.gz	-	-	-	-	-
GEO_csv_2004.tar.gz	-	-	-	-	-

IGS station Beta version (12/03/2013)

CSV format	Size	Date Archived	GrADS format	Size	Date Archived
IGS_csv_2005.beta.tar.gz	8,184 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-
IGS_csv_2004.beta.tar.gz	4,840 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-
IGS_csv_2003.beta.tar.gz	8,249 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-
IGS_csv_2002.beta.tar.gz	4,100 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-
IGS_csv_2001.beta.tar.gz	3,612 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-
IGS_csv_2000.beta.tar.gz	3,809 KB	2013/03/13 11:01	-	-	-

図(1)-9 データ公開webページのイメージ

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

気候変化解析に使用可能な可降水量データセットを作成し、最近のバイアス等が既知であるラジオゾンデの可降水量との検証を行い、高精度で算出されていることが確認した。このデータから近年は日本域の可降水量が増加傾向にあることも示唆された。

(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>

公開された可降水量データセットにより、水蒸気量の気候変化の詳細把握が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

アメリカ大気研究センター(NCAR)のJunhong Wang 研究員とLiangying Zhang研究員らと可降水量算出について、議論をおこなった。彼らはラジオゾンデの水蒸気センサー精度補正を目的としたWMOの国際プロジェクトGRUANの一つとして、本課題と類似したGPS可降水量データを作成している(データサイト:<http://rda.ucar.edu/datasets/ds721.1/>)。日本国内のデータはラジオゾンデともに品質が高いためデータ交換の調整も行った。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Fujita, M., A. Wada, T. Iwabuchi and C. Rocken: Proceedings of the ION GNSS 2012, 3454-3458 (2012)
“GPS Precipitable Water Vapor Dataset for Climate Science.”
- 2) Fujita, M., H. G. Takahashi, and M. Hara: Atmospheric Science Letters doi: 10.1002/asl2.432 (2013)
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different phases of Indian Ocean Dipole.”

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事柄はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Fujita, M.: WCPR Open Science Conference, Denver, USA (2011)
“Diurnal convection and water vapor peaks over the eastern Indian Ocean off Sumatra during different MJO phase.”
- 2) Fujita M., A. Wada, T. Iwabuchi and C. Rocken: American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, San Francisco, USA (2012)
“GPS-PWV dataset by GPS Precipitable Water Research Project (GRASP).”
- 3) 藤田実季子、高橋洋、原政之: 2012年度日本気象学会秋季大会(2012)
「温暖化影響評価のための GPS 可降水量データセット(GRASP)」
- 4) 藤田実季子、原政之、石崎紀子、高橋洋、木村富士男: 2012年度日本気象学会秋季大会(2012)

「アジアモンスーンのオンセット期における擬似温暖化実験」

- 5) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: 2012 年度日本地球惑星連合同大会 (2012)
“GPS Precipitable Water Research Project (GRASP).”
- 6) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara: EGU General Assembly 2012, Vienna, Austria (2012)
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different IOD phases.”
- 7) Fujita M., M. Hara, N. N. Ishizaki, H. Takahashi, F. Kimura: AMS annual meeting 2013, Austin, USA (2013)
“Downscaling of monsoon onset using pseudo global warming method.”

(3) 出願特許

特に記載すべき事柄はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事柄はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事柄はない。

(6) その他

特に記載すべき事柄はない。

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) 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.”
- 4) 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.”
- 5) Rocken, C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, C. Alber, J. Johnson, M. Bevis, and S. Businger: Geophysical Research Letters, 20(23), 2631 – 2634 (1993)
“Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system.”
- 6) Rocken, C., Z. Lukes, L. Mervart, J. Johnson, T. Iwabuchi, and M. Kanzaki: paper presented

- at ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division, Inst. of Navig., Fort Worth, Tex. (2006)
- “Real-time ionospheric and atmospheric corrections for wide area single frequency carrier phase ambiguity resolution.”
- 7) 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.”
- 8) 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.”
- 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) 辻 宏道: 気象研究ノート, 192, 1-14 (1998)
- 「GPSの原理」
- 12) 大谷 竜・内藤勲夫: 気象研究ノート, 192, 15-34 (1998)
- 「GPS可降水量の物理と評価」
- 13) Thayer, D.: Radio Science, 9, 803-807 (1974)
- “An improve equation for the radio refractive index of air.”
- 14) Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E. E., and Elgered, G.: Radio Science, 20, 1593-1607 (1985)
- “Geodesy by interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length.”
- 15) Ankne, J. and H. Nordius: Radio Science, 22, 379-386 (1987)
- “Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data.”
- 16) Wang, J. and L. Zhang: J. Climate, 21, 2218–2238 (2008)
- “Systematic Errors in Global Radiosonde Precipitable Water Data from Comparisons with Ground-Based GPS Measurements.”

(2) 再解析データ/温暖化予測モデルでの水蒸気量再現性の評価

首都大学東京 都市環境科学研究科

高橋洋

平成23～24年度累計予算額：6,969千円

(うち、平成24年度予算額：3,900千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

地球温暖化には、温室効果気体である水蒸気量の変動の調査が必須である。最近の複数の大気の再解析データは、乾燥バイアスの傾向にある。また、再解析間の水蒸気量のばらつきが、季節変化などに比べて大きいという特徴もある。気候変動の調査に使われる気候モデルの水蒸気量について、本プロジェクトで作成された水蒸気量データと比較したところ、平均した複数の地点では、気候モデルの水蒸気量が大きい傾向があった。これは、初期解析の結果なので、今後より詳しいGPS可降水量データとの比較を実施する必要がある。また、空間解像度の違いがあるため、単純な比較だけでなく、ダウンスケーリング手法などを組み合わせた比較検証が必要である。

[キーワード]

水蒸気量、地球温暖化、大気の再解析データ、気候モデル、相互比較

1. はじめに

水は大気中において氷粒、水滴、水蒸気と相転移し、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。水蒸気量変動は降水の源として、地球の水循環と密接に関連しているだけでなく、地球温暖化を決める温室効果気体である。IPCC (2007; 気候変動に関する政府間パネル、Intergovernmental Panel on Climate Change)¹⁾において「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」と記述されていることから、高精度かつ長期間の水蒸気の絶対量及び時空間変動を把握することは地球温暖化を理解する上で非常に重要である。その水蒸気量が再解析データを作る気候同化モデルや、温暖化実験の気候モデルの中でどのように再現されているのかを定量的に把握する必要がある。

Trenberth et al. (2005)²⁾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。また、Uppala et al., (2005)³⁾は、ヨーロッパ中期予報センター (the European Centre for Medium-range Weather Forecasts; ECMWF) のERA40の大気再解析データ、アメリカ合衆国のthe National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) の再解析データとの比較により、NCEP/NCARの再解析データに乾燥バイアスがあること指摘した。近年、各国の現業機関から複数の大気再解析データが配布されているが、これらの水蒸気量およびその変動については、相互比較されていないため、どのようなバイアスなどの問題点があるかについて、把握されていない。

温暖化実験モデルの水蒸気量の再現性および、変動傾向についても把握する必要がある。

IPCC-AR5（第5次評価報告書，Fifth Assessment Report）用の温暖化実験では、多数の温暖化実験の出力結果が配布されているが、温暖化実験モデルの水蒸気量の再現性の検証・調査が十分とは言えない。水蒸気量は、強い温室効果気体のため、各研究機関の温暖化実験の結果について、水蒸気量の再現性を詳しく調べる必要がある。また、温暖化実験モデルは、様々な空間解像度のため、空間解像度の違いについても考慮する必要がある。

大気の再解析データおよび温暖化実験データについては、地上の水蒸気量の検証が重要な課題である。しかしながら、地上観測は、ラジオゾンデの観測に限られ、さらに残念なことにセンサーのバイアスなどにより長期間の変化傾向の把握には、様々なバイアス除去が必要である。そこで、本課題で作成するGPS可降水量により、今後、さらなる水蒸気量の検証が期待される。

2. 研究開発目的

複数の現業機関から配布されている大気の再解析データのバイアスの把握および、そのバイアスによる領域スケールの気候再現・気候予測への影響を把握することを主目的とする。本研究課題の後半以降に、入手が可能となるIPCC-AR5用の温暖化実験データの水蒸気量についても、簡単な解析を行う。特に、本課題で作成される、GPS可降水量とIPCC-AR5用の温暖化実験データの水蒸気量との比較を試みる。

3. 研究開発方法

（1）再解析データの水蒸気量の比較

複数の現業・研究機関から配布される再解析データを収集し、既存の水蒸気量データと比較する。現在、世界の気象関連の機関から、複数の大気の再解析データが提供されている。再解析データは、全球気候モデル予報値を観測データで修正する同化手法を使っており、観測値に極めて近いデータとして利用されている。特に、全球気候モデルの現在気候の再現性を確認するために、「正解」として利用されることが多い。しかしながら、これまでの論文でも、大気の再解析データ間で水蒸気量に違いがある可能性が指摘されており、これをより詳しく調べる必要がある。例えば、複数の再解析データ間で、「正解」が異なっていれば、全球気候モデルが目指す「正解」が異なることになる。水蒸気量が大きく異なれば、水蒸気以外の放射収支、降水量、大気循環が大きく異なると考えられるため、水蒸気量の相互比較は重要である。

本研究では、ヨーロッパ中期予報センター（the European Centre for Medium-range Weather Forecasts; ECMWF）のERAinterim⁵⁾、ERA40³⁾の2種類のデータ、アメリカ合衆国のNOAA環境予測センター/米国大気研究センター(the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)の再解析データ⁴⁾、NCEP/DOE(エネルギー省; Department of Energy)の再解析データ⁶⁾を利用した。さらに、我が国の気象庁などにより作成されたJRA25⁷⁾ (Japanese 25-year Reanalysis)、NOAA環境予測センターのclimate forecast system reanalysis (CFSR)⁸⁾、アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration; NASA) のModern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA)⁹⁾を使用した。

複数の再解析データについて、鉛直積分した水蒸気量（可降水量）での比較を行った。また、可降水量の観測データとして、アメリカ航空宇宙局によるNASA水蒸気プロジェクト (NASA Water

Vapor Project; NVAP) のデータ¹⁰⁾を用いた。NVAPは、海上はSSM/I(機械走査型マイクロ波放射映像センサー)による推定が主であり、陸上はラジオゾンデを用いた大気観測をもとにしている。

特に注目する地域として、熱帯アジアモンスーン地域を選んだ。この地域は、全球でも最も可降水量および降水量が多いことで知られており、また、これらの地域の気候変動は、湿潤なモンスーン気流及び太平洋高気圧の変化を通して、日本への影響も大きいためこの地域に着目した。さらに、熱帯域では水蒸気場の変動は、降水量変動と密接に関係しているため、水循環および大気の潜熱加熱を通じた大気循環の変化により、全球の大気循環場への影響も極めて大きい。

(2) IPCC-AR5用モデルの水蒸気量の相互比較

現在、世界の気象関連の機関から、複数の再解析データが提供されている。再解析データは、全球気候モデル予報値を観測データで修正する同化手法を使っており、観測値に極めて近いデータとして利用されている。特に、全球気候モデルの現在気候の再現性を確認するために、「正解」として利用されることが多い。しかしながら、Takahashi et al. (2012)が示している様に、再解析間のばらつきも比較的大きい。

ここでは、複数の温暖化予測モデルの水蒸気量の比較結果と、本課題で作成されたGPS可降水量との比較を示す。今回は5つの第5期結合モデル相互比較実験(CMIP5)モデルの結果のみ報告する。理由は、すべての温暖化予測モデルを収集することは、ネットワークのダウンロードの速度とデータ保存量の観点から極めて難しいためである。使用したモデルは、MIROC5(Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)、CNRM-CM5(Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique)、inmcm4(Institute for Numerical Mathematics)、MPI-ESM-LR(Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M))、GFDL-CM3(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)である。用いた実験は、historical実験のものを使用した。また、複数のアンサンブルがある場合は、複数のアンサンブル実験の結果を調査した。データ量が膨大となるため、すべてのアンサンブル実験の結果を調査することは上述の理由から困難である。これらの約30年分の水蒸気量について、観測データと比較した。観測データとしては、一般的に使われるNVAP(1988年から1999年の月平均値)を用いた。

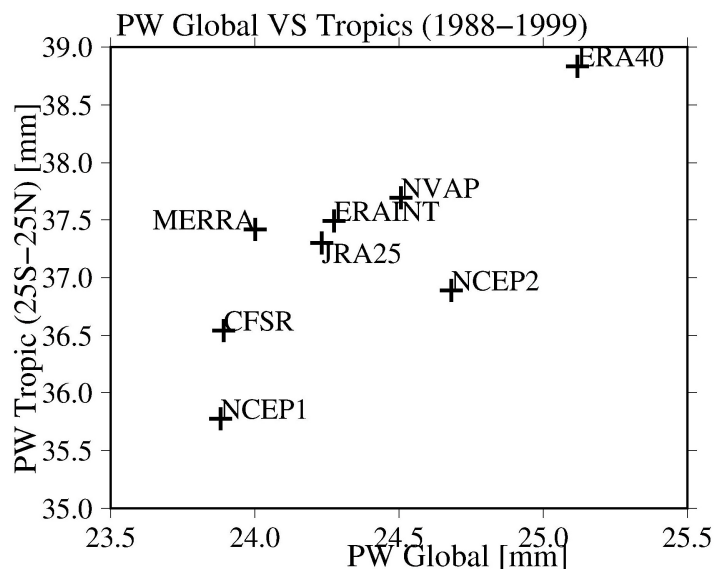
さらに、2001年から2005年までの再現実験の結果について、本研究で作成したGRASP可降水量と比較した。

4. 結果及び考察

(1) 再解析内での全球規模での水蒸気量の相互比較

1) 再解析データ間での平均水蒸気量の相互比較

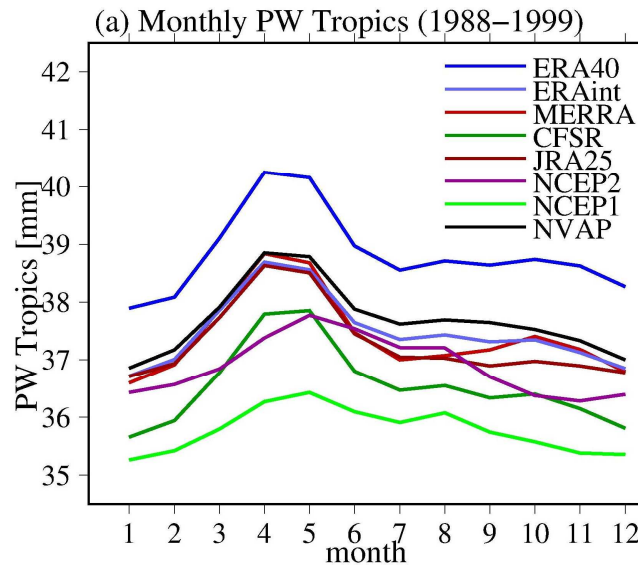
図(2)-1は、全球平均した可降水量と熱帯平均(南緯25度から北緯25度の帯状の平均)した可降水量を示す。基本的に、大気の再解析データの可降水量は、乾燥バイアスが見られることがわかる。ERA40のみ湿潤バイアスがあることがわかる。新しい、ERAinterim, MERRA, CFSR, JRA25などは比較的水蒸気量が観測値であるNVAPに近い。



図(2)-1 全球平均した水蒸気量（横軸）と熱帯域（南緯25度から北緯25度）平均した水蒸気量（縦軸）の分布図。各再解析の1988年から1999年の12年の年間平均である。NVAPの観測データが12年間に限られているため、12年間平均とした。NVAPは観測データとして表示している。単位は、ミリメートル。

2) 再解析データ間での全球平均水蒸気量の相互比較

図(2)-2は、熱帯の帯状平均の水蒸気量の季節変化である。北半球および南半球を含む熱帯域で平均しているため、比較的季節変化は小さいが、各再解析データ間のばらつきは、小さくない。例えば、ERAinterimの水蒸気量が最も少ない1月の値が、36.5mm程度であるのに対して、NCEP1の最も多い5月の水蒸気量は、36mm程度であり、ERAinterimの最も小さな月の値よりも小さい。他の再解析間でもばらつきは、季節変化に対して小さいとは言えない。



図(2)-2 熱帯域(南緯25度から北緯25度)平均した観測(NVAP)と再解析(ERAinterim, ERA40, MERRA, JRA25, NCEP2, NCEP1)の水蒸気量の季節変化。NVAPのデータに合わせて、1998年から1999年の12年間の月平均値を使用した。横軸は月。縦軸の単位は、ミリメートル。

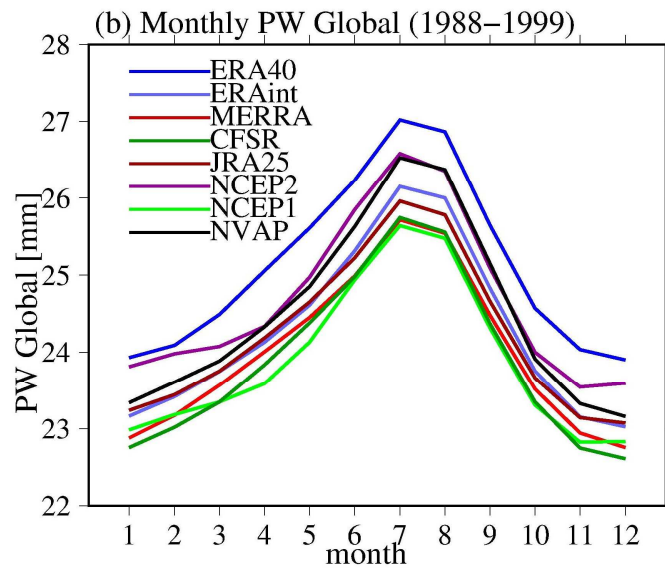
3) 再解析データ間での熱帯平均水蒸気量の相互比較

図(2)-3は全球平均の可降水量の季節変化である。NVAPのデータに合わせて、1998年から1999年までの12年間の月平均値を使用した。

地球では、大陸分布に南北の偏りが大きいいため、北半球夏季に全球平均の可降水量が大きくなる傾向にある。このために、全球平均した場合にも、可降水量の季節変化が見られる。

これを見ると季節変化に比べて、各再解析間のばらつきは、それほど大きくない。これは、熱帯域に比べて、中緯度や高緯度域では、水蒸気量のばらつきが比較的小さいことを示している。しかしながら、同じ月では、最大のERA40と最小のNCEP1もしくは、NCEP2では、可降水量が1.5 mm程度は小さくなっており、これは総量の5%強に相当する。それに対して、可降水量の季節変動の振幅が総量に対して、10%程度である。このことから、この5%のばらつきは無視できるほど小さくない。

全球平均の可降水量の乾燥バイアスとばらつきは、熱帯域の可降水量の再現傾向が影響しているものと考えられるが、中高緯度も併せて評価する必要がある。

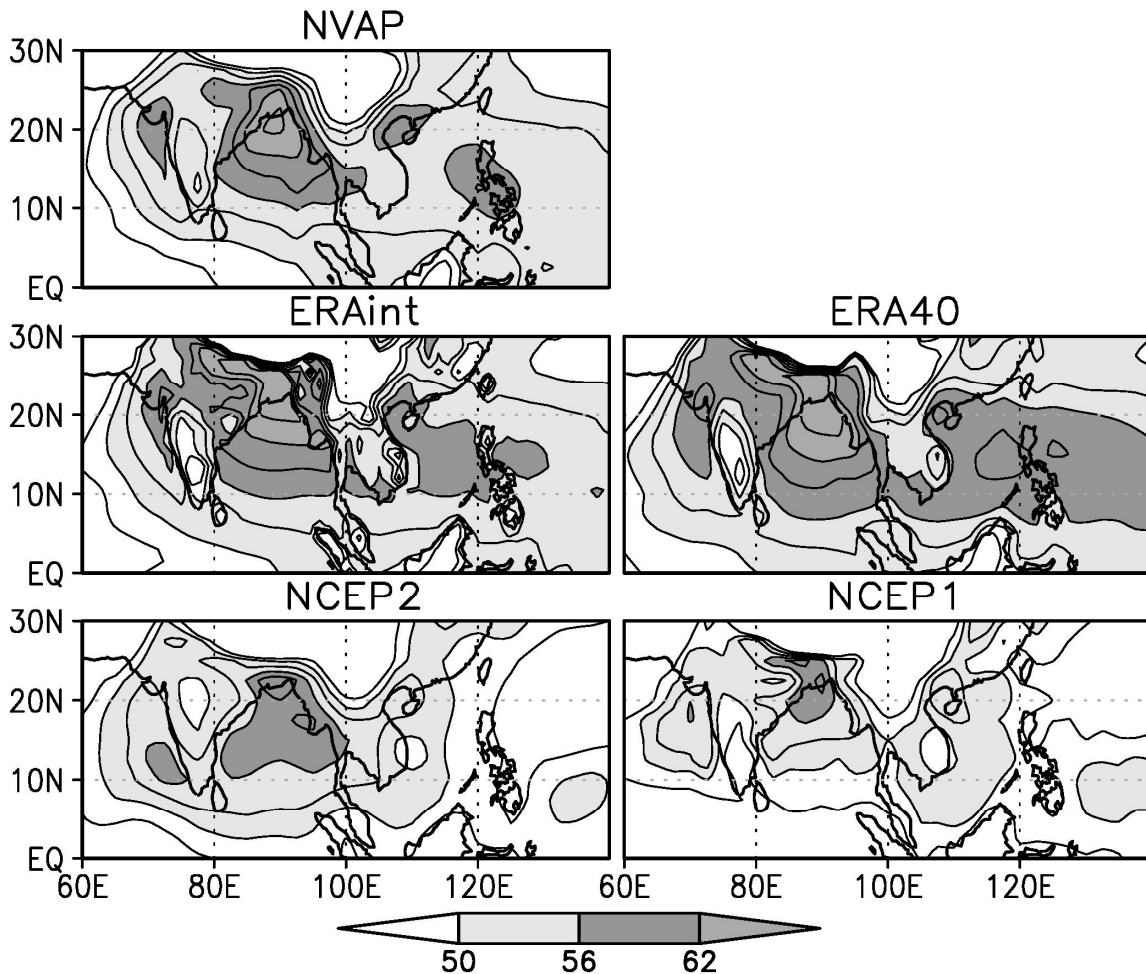


図(2)-3 全球平均した観測 (NVAP) と再解析 (ERAinterim, ERA40, MERRA, JRA25, NCEP2, NCEP1) の水蒸気量の季節変化。NVAPのデータに合わせて、1998年から1999年の12年間の月平均値を使用した。横軸は月。単位は、ミリメートル。

(2) 地域規模で見た再解析データ間の水蒸気量の相互比較

1) アジアモンスーン規模の水蒸気量の空間分布

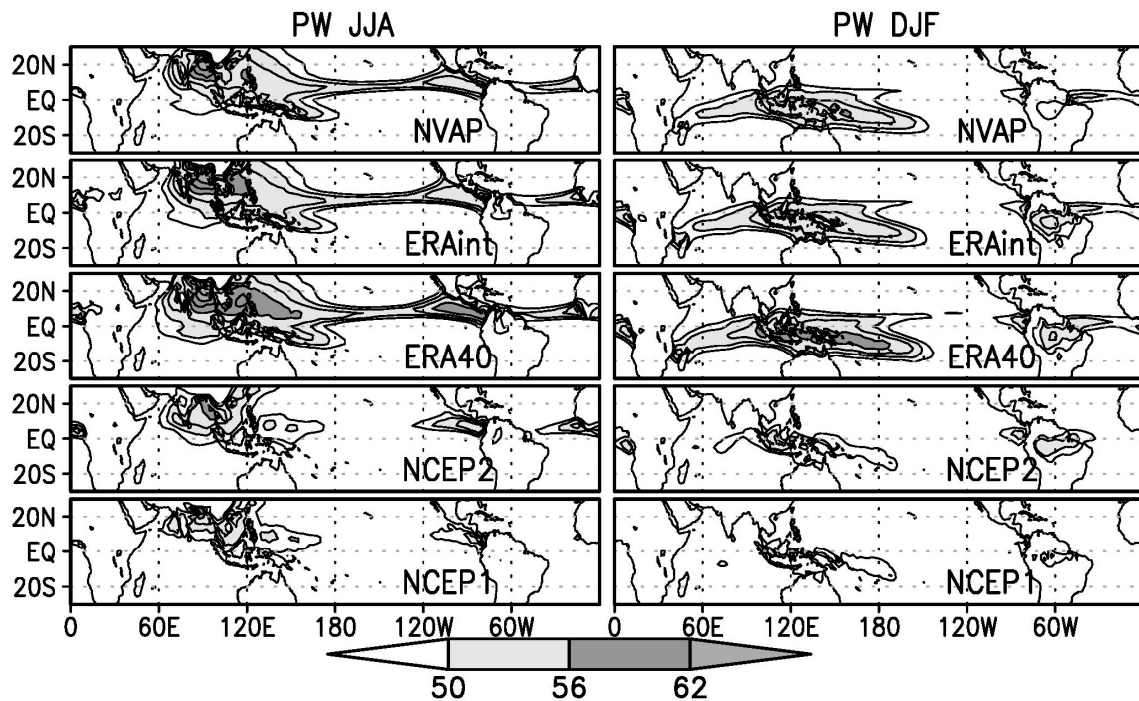
図(2)-4は、熱帯アジアモンスーン地域のNVAPの1998年から1999年の12年間の可降水量の7月平均場である。ベンガル湾、南シナ海、フィリピン海に可降水量の空間的なピークがある。4つの再解析データについても同様の図を作成し、比較した。NVAPでみられた、可降水量のピークはいずれの再解析データでもほぼ同様に見られる。このことから再解析データ間での可降水量のパターンの違いはいくらかあるものの、それほど大きくないことが確認できた。一方で、可降水量の絶対値に着目すると、絶対値は大きく異なっていた。特に、NCEP1とNCEP2では、NVAPに比べて5%以上も乾燥バイアスが、領域全体で見られた。



図(2)-4 熱帯アジアモンスーン域の観測 (NVAP) と再解析 (ERAinterim, ERA40, NCEP2, NCEP1) の可降水量。1988年から1999年の12年間の平均。グレースケールの単位は、ミリメートル。

2) 熱帯域の水蒸気量の空間分布

図(2)-5は、全球のNVAP、NCEP1、NCEP2、ERA40、ERAinterimの1988年から1999年の12年間の熱帯域における可降水量の12月、1月、2月の北半球の冬平均場と6月、7月、8月の北半球夏平均場である。熱帯アジアモンスーン地域でも見られたように、可降水量の空間的なピークは、各再解析データとも大きな違いはない。一方で、可降水量の絶対値は、熱帯全域で同様に乾燥バイアスが複数の再解析データで見られる。さらに、この乾燥バイアスは、1月及び7月でも同様に見られ、再解析データの可降水量のばらつきが、地域的な問題ではなく、全球規模の問題であることを示している。現在、全球気候モデルの現在気候再現は、再解析を「正解」として開発・改良されているため、複数の再解析データ間で答えが異なっているとすると、全球気候モデルの再現性にもばらつきがある可能性が考えられる。



図(2)-5 熱帯域の観測 (NVAP) と再解析データ (ERAinterim, ERA40, NCEP2, NCEP1) の6月、7月、8月の北半球夏季の可降水量。1988年から1999年の12年間の平均。グレースケールの単位は、ミリメートル。

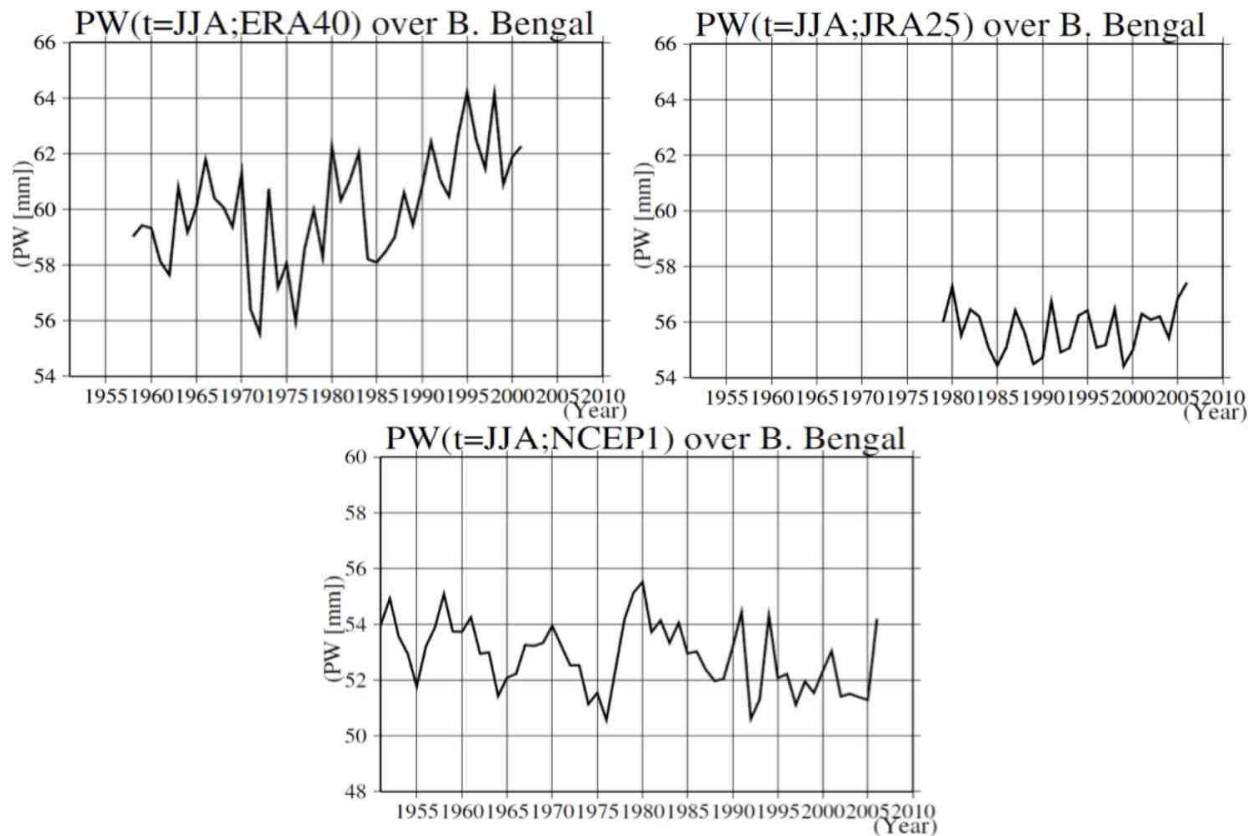
3) 再解析データ間のばらつきの原因

この再解析データ間のばらつきの理由としては、各再解析データを作成する際の気候モデルが、あるエネルギーでバランスしており、それぞれ固有のバランスがあることによるものと考えられる。これが正しいとすれば、地上気温など他の物理要素にも同様に固有の値となっている可能性が考えられるため、今後、確認する必要がある。さらに、ERA40、ERAinterim はSSM/I の可降水量を同化しており、それによって、可降水量が引き上げられている。これも加味して、それぞれの再解析の水・エネルギー収支がどのようになっているのか、今後詳細な検討が必要である。

4) アジアモンスーン域の水蒸気量の長期変化についての考察

再解析データの年々変動や長期変化を調べるために、世界的に可降水量が大きいベンガル湾について、北半球の夏季(6月、7月、8月)の可降水量の時系列を作成した(図(2)-6)。横軸は、年を表し、縦軸は可降水量で、単位はmmである。NCEP1だけ縦軸の値が異なる。図を見ると、ERA40とJRA25とNCEP1の可降水量の絶対値が大きく異なることが分かる。これは、前述の通りである。ERA40は最近にかけて、可降水量が徐々に増加している。再解析データでも、地表気温の温暖化傾向は再現されているため、相対湿度が一定であれば、可降水量は徐々に増加すると考えられる。この点では、ERA40の傾向は、現実と矛盾はしていない。しかしながら、全体的に不均質な年々変動がみられる。1988年頃の不連続は、マイクロ波放射計で観測された可降水量の同化が開始された時期と一致するが、それ以外にも不連続と思われる点がいくつかある。

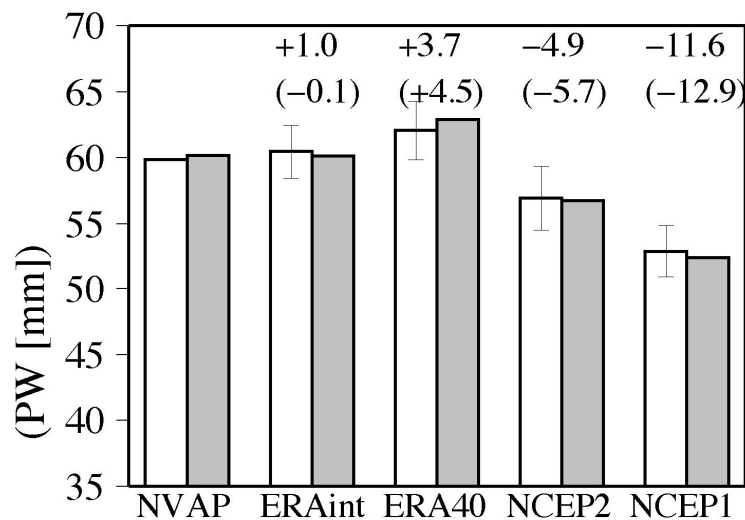
また、年々変動の分散が他の2つの再解析データと比べて、大きい。JRA25の長期傾向はほとんどみられず、また年々変動の分散も約30年間で変化が小さいが、他の二つに比べて、年々変動の分散が小さい。NCEP1は、長期的な変化傾向はみられないが、一方で、10年程度の長周期変動の分散が大きい。長期変動については、地上気温の温暖化傾向と相対湿度がほぼ一定であることから考えると必ずしも現実と一致しているとは言えない。また、10年規模変動の可降水量の分散については、適当な比較データがないため、現時点では検証できないが、他の再解析と比べると変動が大きい。



図(2)-6 ベンガル湾でのERA40とJRA25とNCEP1の可降水量の時系列。北半球の夏季(6月7月8月)平均。

5) アジアモンスーン域の水蒸気量の年々変動の大きさ

図(2)-7はベンガル湾における水蒸気量の領域平均値である。エラーバーは、年々変動のばらつきを示している。NCEP1とERAinterimでは、年々変動のばらつきを考慮しても、乾燥バイアスが大きいことがわかる。右側の棒グラフは、後に示すダウンスケーリング実験に用いた水蒸気量である。1998年の水蒸気量であるが、1998年はエルニーニョ現象・南方振動の影響で各地に異常気象が起こったことが知られている。これは、特異な傾向を持った年であった可能性があるが、その水蒸気量を見る限りは、平年と大きな違いがないことがわかる。この結果から、年々変動の特異な年でも、再解析間のバイアス傾向は大きく変わらないことがわかる。これは、この乾燥バイアスの傾向がロバストであることを示唆している。



図(2)-7 ベンガル湾での7月の可降水量の比較。左の白いグラフは、1979年から2008年までの30年平均値。ただし、ERA40は1979年から2001年までの23年平均値（再解析期間が2001年までに限定されているため）、NVAPは1988年から1999年までの12年平均値。左の灰色のグラフは、1998年7月の1ヶ月平均。1998年7月は、後のダウンスケーリング実験の参考のために掲載している。エラーバーは年々変動の標準偏差。エラーバーについては、NVAPは、年数が少ないため、表示していない。ERA40に関しては、23年間の年々変動の標準偏差。

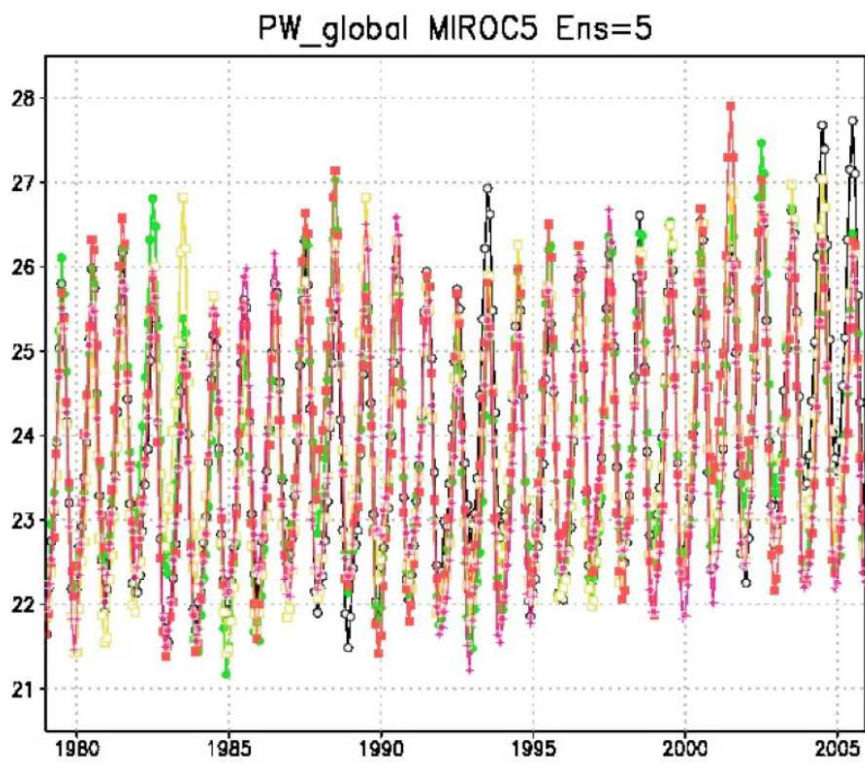
6) 再解析内の水蒸気量の変動のまとめ

このように、熱帯域の水蒸気量は、年々変動でさえも、各再解析データ間で違いが見られる。一般的に、年々変動は、変動がはっきりとしており、同年代であれば再解析データに同化される観測データも比較的均質と思われるため、長期的な傾向に比べて、再現性がよいと考えられる。また、長期変動の結果については、予想通りではあるが、可降水量の長期傾向に関しては、複数の再解析間での違いが大きい。

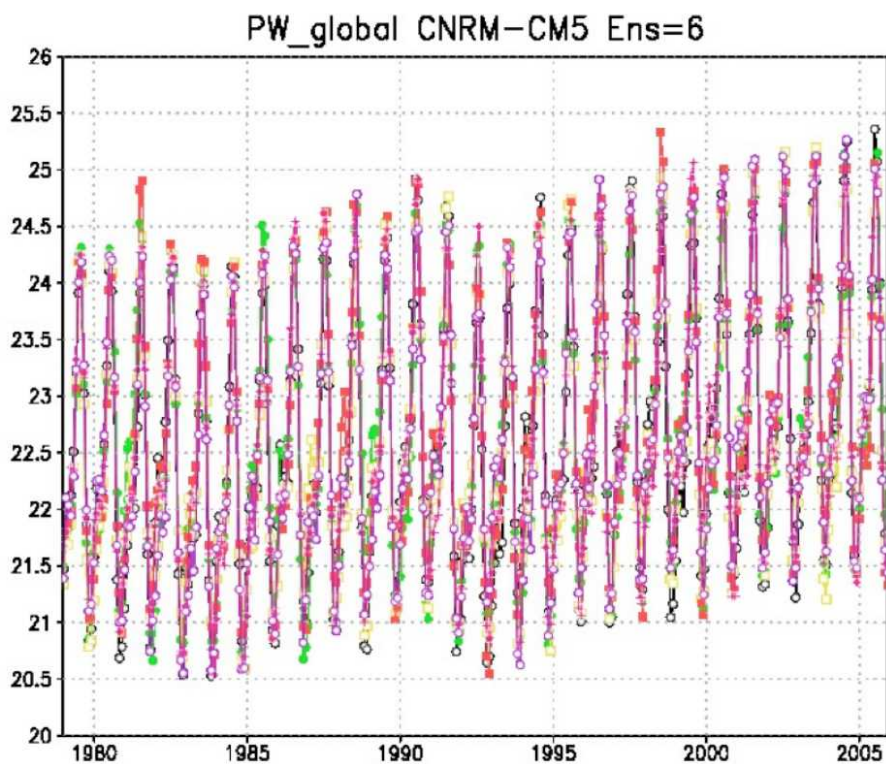
(3) CMIP5全球気候モデル内での水蒸気量

1) CMIP5全球気候モデルの水蒸気量の再現性：アンサンブル間でのばらつき

まずは、2つの全球気候モデル（MIROC5とCNRM-CM5）について、複数のアンサンブル実験の結果が提供されているため、アンサンブル実験間の可降水量の違いについて調べた。全球平均の月平均の可降水量を計算し、それを重ねてプロットした。その結果、アンサンブル実験間の違いは、季節変動や、年々変動、また後で述べる全球気候モデル間のばらつきに比べて十分小さいことが分かった。この結果から、CMIP5全球気候モデルでは、アンサンブル実験間で、水蒸気量の大きな変化（異なる平衡状態）は見られないことが分かった(図(2)-8, 図(2)-9)。



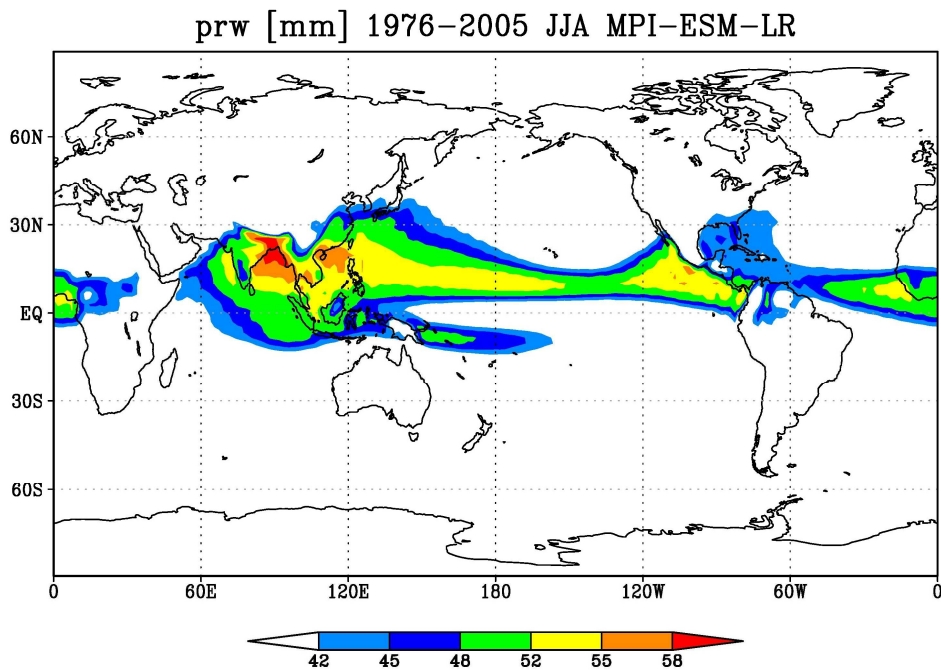
図(2)-8 全球平均した可降水量の時系列。MIROC5複数アンサンブルメンバーについてプロットしたもの。



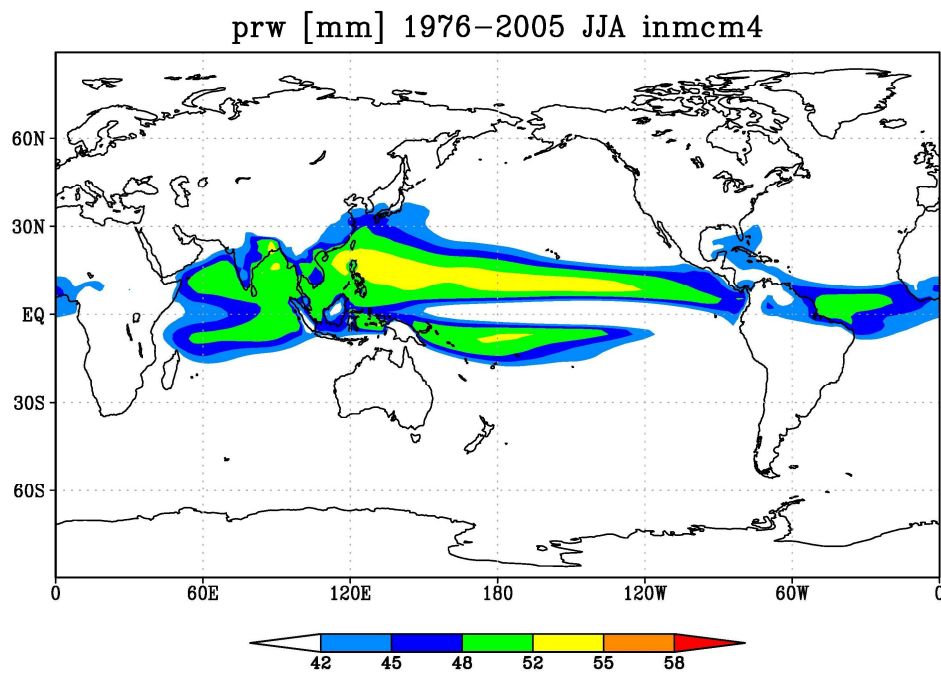
図(2)-9 全球平均した可降水量の時系列。CNRM-CM5複数アンサンブルメンバーについてプロットしたもの。

2) CMIP5全球気候モデルの水蒸気量の再現性：全球スケールの空間分布

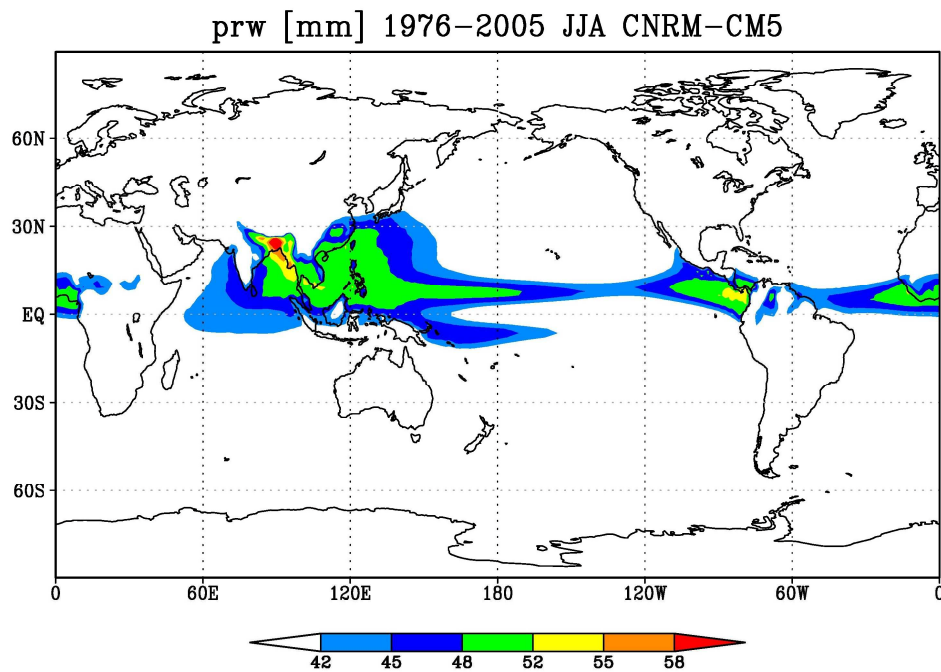
図(2)-10～図(2)-13では、全球気候モデルの水蒸気量の6月、7月、8月の北半球夏期間の30年間(1976年から2005年)の可降水量の全球の分布を示す。inmcm4などの一部の全球気候モデルでは、熱帯域に非現実的な分布が見られるものの、概ね観測データであるNVAPと似た分布になっている。ただし、北西太平洋域では、水蒸気量が全体的に過小評価となっている特徴が見られる。これは、日本にも影響を及ぼす台風の再現性とも密接に関連している可能性が高い。そのため、本課題では研究の対象外であるが、重要な課題であり、今後の詳しい調査が期待される。また、以下に示すように、全球平均した水蒸気量の乾燥傾向は、複数の全球気候モデルでも共通であった。つまり、水蒸気量の分布は、一部例外を除いて、比較的良好に再現されているものの、水蒸気の絶対量の再現性には問題があることが分かった。



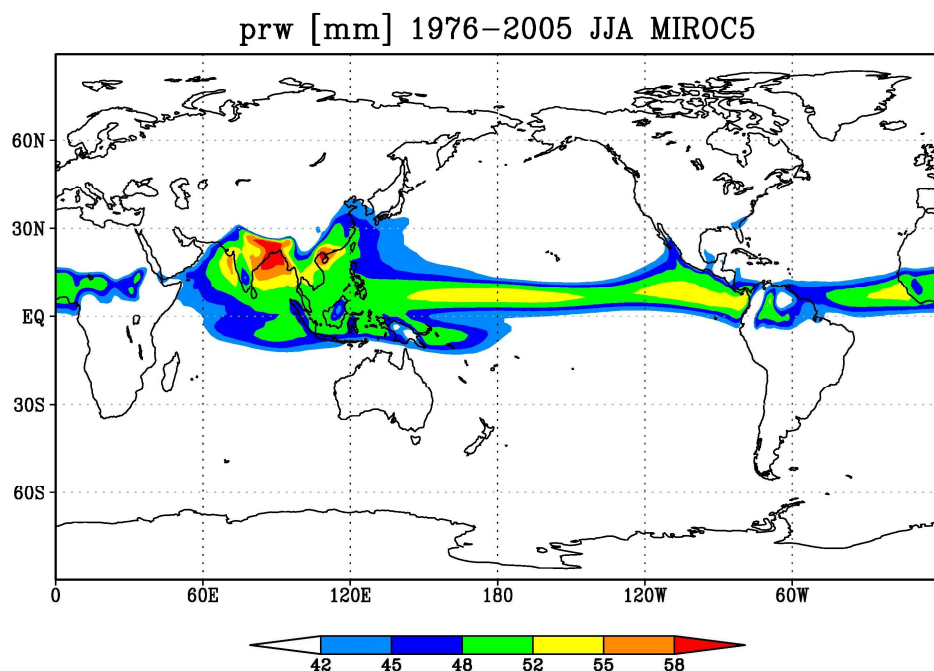
図(2)-10 CMIP5全球気候モデルにより再現された可降水量の北半球の夏季(6月7月8月)平均の水平分布。MPI-ESM-LRの30年平均値。



図(2)-11 CMIP5全球気候モデルにより再現された可降水量の北半球の夏季(6月7月8月)平均の水平分布。
inmcm4の30年平均値。



図(2)-12 CMIP5全球気候モデルにより再現された可降水量の北半球の夏季(6月7月8月)平均の水平分布。
CNRM-CM5の30年平均値。

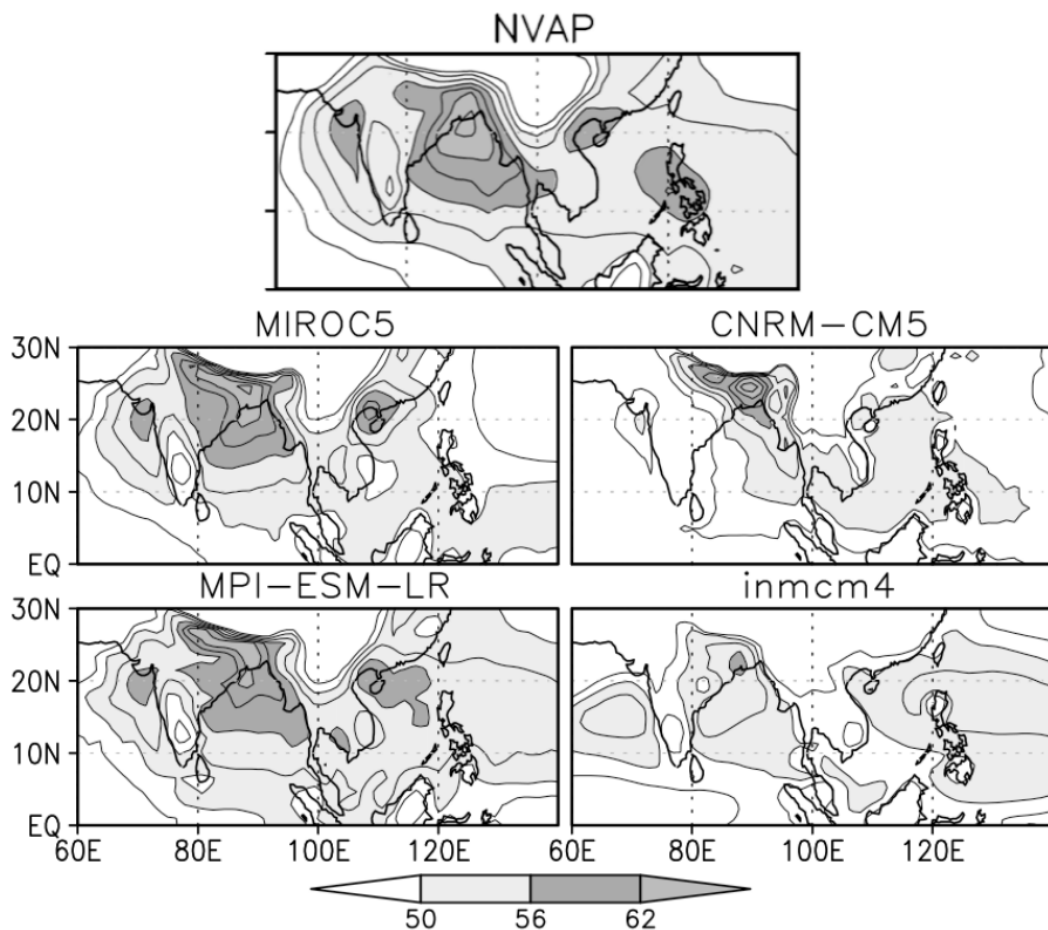


図(2)-13 CMIP5全球気候モデルにより再現された可降水量の北半球の夏季(6月7月8月)平均の水平分布。MIROC5の30年平均値。

3) CMIP5全球気候モデルの水蒸気量の再現性：アジアモンスーンスケールの空間分布

次に、27年間平均の空間分布について熱帯アジアモンスーン域を対象に解析した(図(2)-14)。アジアモンスーン域の水蒸気量の空間分布の再現性は、水蒸気は降水量のソースであるため、降水量分布の再現性とも密接に関わっている。湿潤対流が卓越する熱帯域では、水蒸気分布の再現性は極めて重要である。

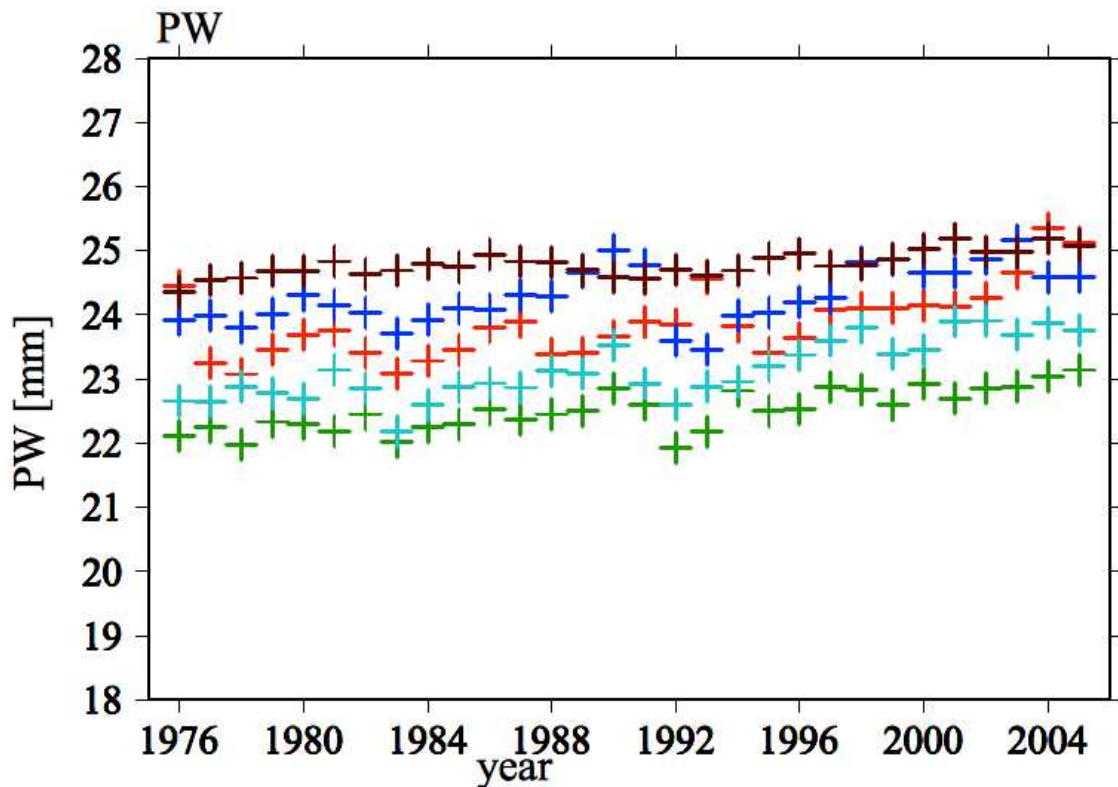
基本的な空間分布は、今回利用したCMIP5全球気候モデルでは、大まかに再現されていた。しかしながら、西太平洋域などでは、全球気候モデル間のばらつきが見られた。西太平洋域の降水は、多くの全球気候モデルで再現性が悪いと言われており、水蒸気場の再現性についても、これと関係していると考えられる。今後さらなる詳細な調査が必要である。



図(2)-14 可降水量の水平分布。NVAP(観測)は12年平均値。MIROC5, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, inmcm4は27年平均(1979年から2005年)。

4) CMIP5全球気候モデルの水蒸気量の再現性：全球平均水蒸気量とモデル間のばらつき

図(2)-15を見ると、1970年代から2000年代にかけて、いずれのモデルでも可降水量が増加していることが見られる。これは、温暖化に対応して、相対湿度が一定と仮定すると現実的であるが、この長期間の変化に関しては、GRASPなどの観測データの観点からも検証する必要がある。一方で、全球平均の可降水量は、観測の12年間平均値は、約24.5 mmであったが、これに対して、最も可降水量が多いモデルが、観測と同程度であるのに対して、それ以外のモデルは、再現された可降水量が過小に再現されていた。この水蒸気量のばらつきの大きさは、当然ながら、可降水量の30年間の長期変化よりも大きい。よって、最近30年間で可降水量が増加している可能性が高いが、不確実性も大きく、今後更に検討すべき課題であることがわかった。また、今後さらに多くの全球気候モデルの水蒸気再現性を調べる必要があるが、NVAPに比べると系統的に過小な水蒸気量が再現されている可能性がある。この原因の解明は、非線形相互作用の各プロセスと関連するため、すぐに解決することは難しいと考えられるが、今後の重要な課題である。また、詳しい傾向を知るために、複数の全球気候モデルについて、他の降水量の再現性などと合わせて調査する必要がある。



図(2)-15 CMIP5全球気候モデル再現された可降水量の年平均値の時系列。赤はMIROC5、青はMPI-ESM-LR、緑はCNRM-CM5、水色はGFDL-CM3、紫はinmcm4を示す。観測値NVAPの平均は、約24.5mm。

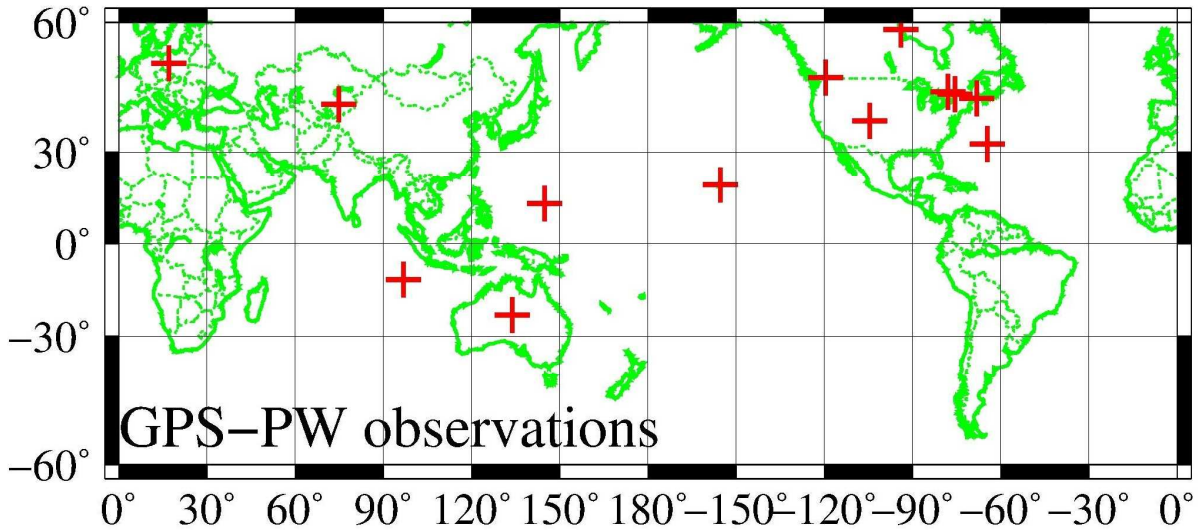
(4) 温暖化モデルの水蒸気量とGRASP水蒸気量の比較

1) CMIP5モデルの水蒸気量の再現性：全球平均水蒸気量とモデル間のばらつき

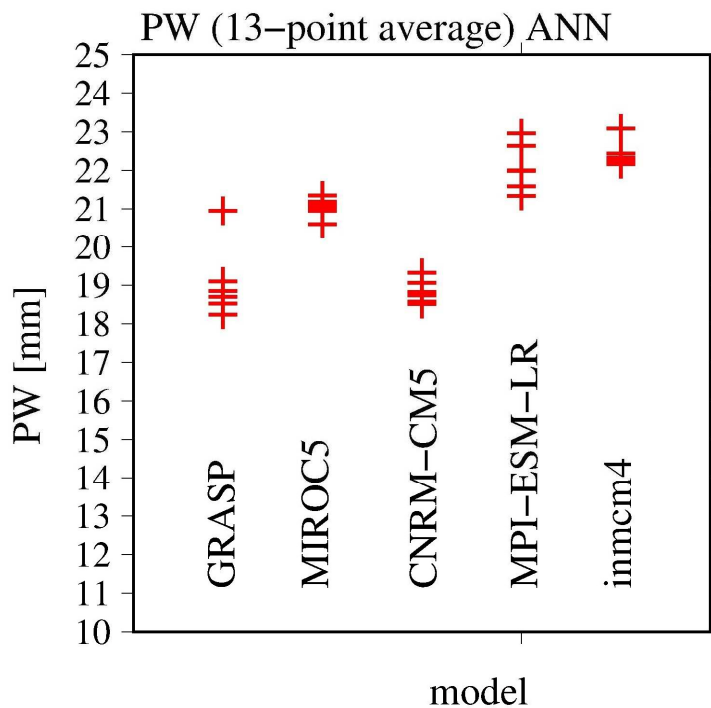
全球平均の可降水量は、観測の12年間平均値は、約24.5 mmであった。これに対して、最も可降水量が多いモデルが、観測と同程度であるのに対して、それ以外のモデルは、再現された可降水量が過小に再現されていた。図(2)-16は、本報告書で用いるGRASP可降水量の観測地点である。13地点あるが、全球平均と比較できるような分布にはなっていないので、比較結果はあくまで、初期解析の結果であることに注意していただきたい。また、全球気候モデルによる温暖化実験データの近傍グリッドを選んだが、空間解像度が各データで異なるという問題があるため、値に偏りがある可能性がある。さらに、可降水量は、評価点の標高に強く依存するため、全球気候モデルの地形と現実の地形が異なることでも、値に偏りがある可能性がある。

これらを考慮した上で、図(2)-17を確認すると、水蒸気量は、GRASP水蒸気量の方が、少ない値となっており、全球気候モデルの水蒸気量は、湿潤バイアスがあるようにみえる。これは、全球平均したNVAPの水蒸気量に比べて、全球気候モデルの水蒸気量が過小評価傾向だったことと矛盾する。しかしながら、上述の理由により、あくまでも参考データであるので、今後さらなる比較検証を実施したい。

また、この比較からも全球気候モデル間のばらつきが大きいことが分かる。大気の再解析の可降水量の解析結果でも大きなばらつきが見られた。この全球気候モデル間のばらつきが気候の再現性などにどのような影響を及ぼしているのか、今後より詳しい解析が必要である。



図(2)-16 GRASP可降水量の平均値の作成のために使用した地点の空間分布。欠測が少ない13地点をランダムに選定し、平均した。



図(2)-17 GRASP-GPS可降水量（暫定バージョン）の13地点平均と4つのCMIP5全球気候モデルの可降水量の比較。1つのプロットは1年平均値。CMIP5全球気候モデルは、GRASP-GPS可降水量の近傍点を利用した。

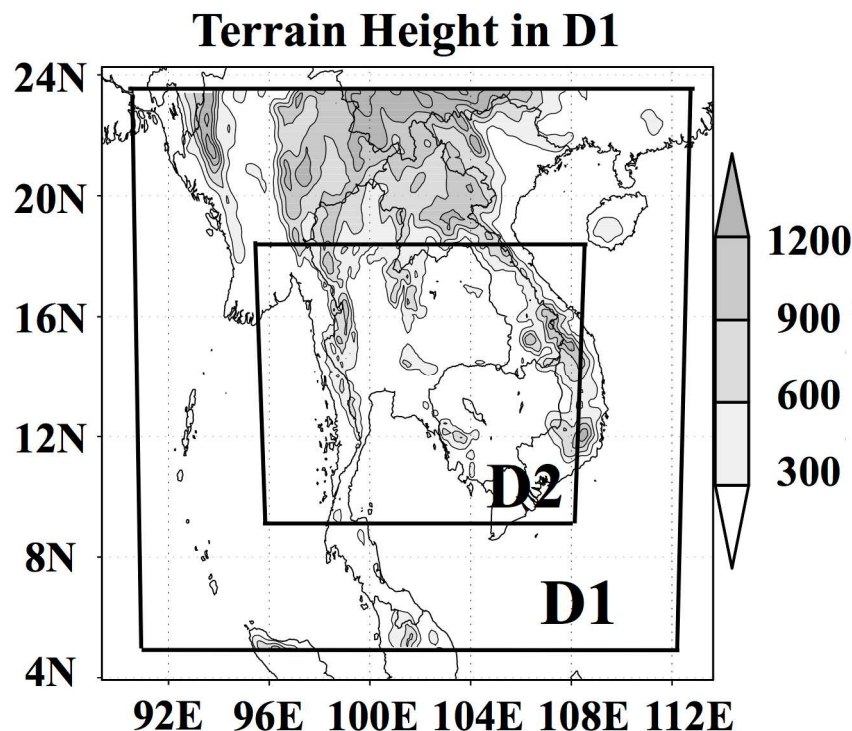
(5) 複数の再解析による領域気候再現性への影響

1) 水蒸気量の違いが熱帯の対流活動に及ぼす影響 (ダウンスケーリング実験)

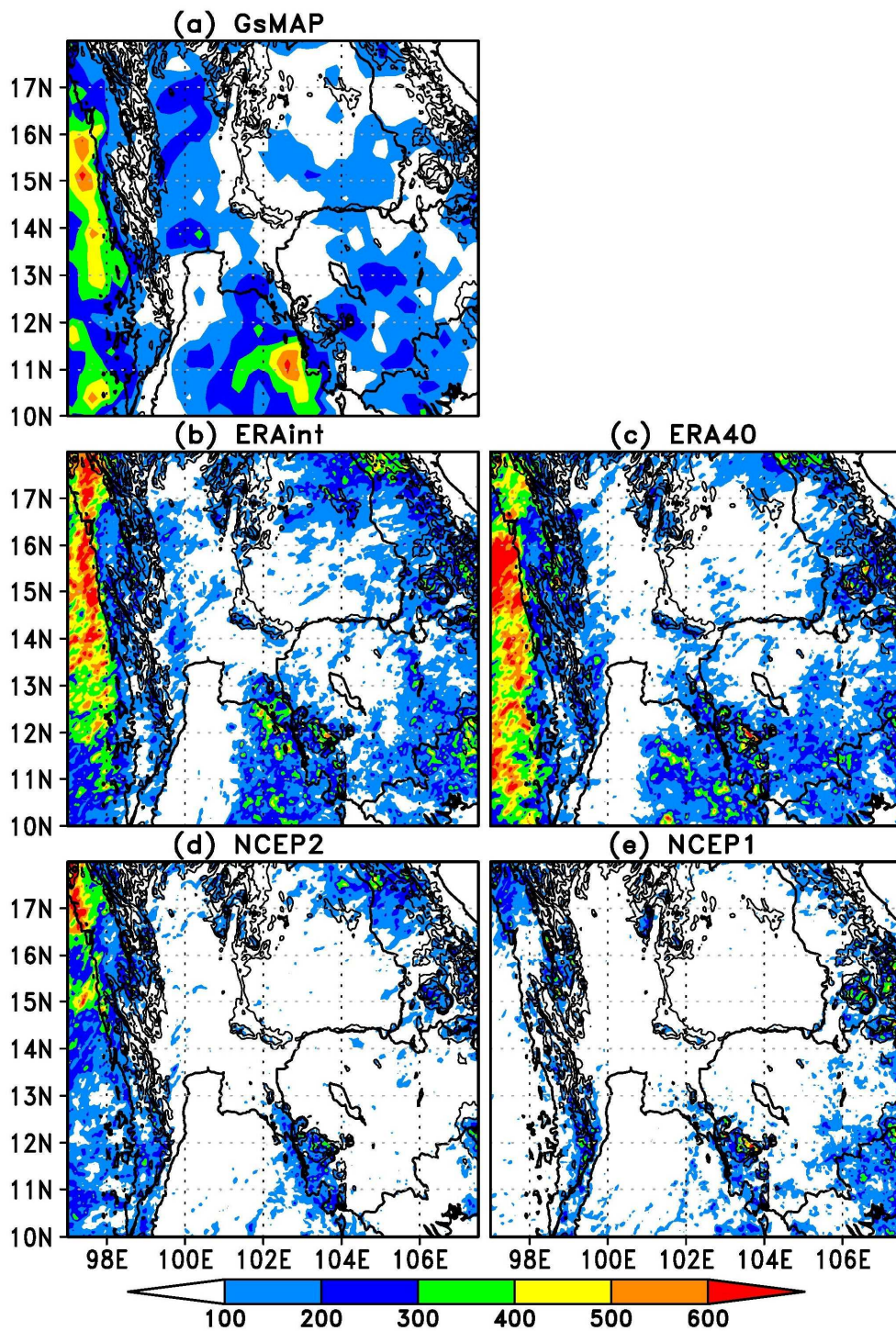
ここでは、これまでに明らかになった水蒸気量の違う再解析データを境界値としたダウンスケーリング実験の結果を示す。領域気候モデルは、NCARで開発されたWRFを用いた。計算領域を図(2)-18に示す。詳しい設定などは、Takahashi et al. (2012)¹¹⁾を参照されたい。

領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリング実験を複数の再解析データを境界値として実施し、水蒸気量の再現性が降水量の再現性に極めて重要であることが分かった。図(2)-19には、1998年7月1か月を複数の再解析データを初期値境界値として領域気候モデルによってダウンスケーリングした降水量を示す。これをみると、NCEP1を用いた実験の降水量の再現が極めて悪い。後に示すように、この原因は、力学場ではなく、水蒸気場に原因があることが分かった。

したがって、現在利用可能な再解析データの水蒸気量のばらつきの程度で、熱帯域で力学的ダウンスケールを行った場合に、10%程度の水蒸気量の乾燥バイアスが、40%以上の降水量の過小再現につながるということが分かった。さらに2つの再解析の力学場を変化させず、水蒸気場のみを入れ替える感度実験を実施した。その結果、力学場の違いは降水量の再現性にほとんど影響を及ぼさず、水蒸気量のバイアスのインパクトが極めて大きいことが分かった。これは、GCMで行った将来実験の結果を、適応策などの策定のためにダウンスケールを行い、領域スケールの詳細なデータセット作成する場合に極めて重要な情報である。



図(2)-18 ダウンスケーリング実験で用いた計算領域。



図(2)-19 複数の再解析データ (ERAinterim, ERA40, NCEP2, NCEP1) を境界値として再現された月降水量の空間分布。(a)は観測データ (GSMaP) 単位は、mm/month。黒線は、海岸線と、地形。陸地の黒等値線は、領域気候モデルの内部のドメインで使用した地形を表す。300 m, 600 m, 900 m, 1200 m, 1500 mの300 m毎のコンターを表示している。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

地球温暖化を理解する上で重要である水蒸気量について、観測値として用いられている再解析データの水蒸気量はばらつきが大きく、全体的に乾燥バイアスの傾向であることがわかった。この乾燥バイアスは、領域気候再現実験などを行った場合に、熱帯域では非常に影響が大きいことがわかった。今後、全球気候モデルの温暖化実験データから領域規模の気候情報にダウンスケールする際に、どのような手法が適切か再考する必要があることがわかった。

(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>

行政が全球気候モデルの温暖化実験データから領域規模の気候情報にダウンスケールし、それを利用して施策を立案する際に、熱帯域や日本の夏季においては、どのような手法が適切か再考する必要があることがわかった。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事柄はない。

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. : Atmospheric Research, doi:10.1016/j.atmosres.2012.07.005 (2012)
“Orographic low-level clouds of Southeast Asia during the cold surges of the winter monsoon.”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Takahashi, H. G., Hara, M., Fujita, M., and Yoshikane, T. : Atmospheric Chemistry Physics Discussion, 12, 23759-23791, doi:10.5194/acpd-12-23759-2012 (2012)
“A discrepancy in precipitable water among reanalyses and the impact of forcing dataset on downscaling in the tropics.”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Takahashi, H. G., M. Hara, T. Yoshikane, and M. Fujita: European Geosciences Union, General Assembly 2012, EGU2012-3948, April 22-27, Vienna, Austria (2012)
“A discrepancy in precipitable water among the major reanalyses over tropics and its effect on downscaling.”

- 2) Fujita, M., M. Hara, and Takahashi, H. G.: European Geosciences Union, General Assembly 2012, EGU2012-4380, April 22-27, Vienna, Austria (2012)
“Diurnal cycle of precipitation over the eastern Indian Ocean off Sumatra Island during different IOD phases.”
- 3) Hiroshi G. Takahashi, Mikiko Fujita, and Masayuki Hara: American Geophysical Union, Fall Meeting 2012, December 3-7, San Francisco, USA (2012)
“Inter-comparison of precipitable water among reanalyses and its effect on downscaling in the tropics.”
- 4) 藤田実季子、高橋洋、原政之: 2012 年度日本気象学会秋季大会(2012)
「温暖化影響評価のための GPS 可降水量データセット (GRASP)」
- 5) 藤田実季子、原政之、石崎紀子、高橋洋、木村富士男: 2012 年度日本気象学会秋季大会(2012)
「アジアモンスーンのオンセット期における擬似温暖化実験」
- 6) Fujita, M., H. G. Takahashi and M. Hara : 2012 年度日本地球惑星連合同大会(2012)
“GPS Precipitable Water Research Project (GRASP) .”
- 7) Fujita M., M. Hara, N. N. Ishizaki, H. Takahashi, F. Kimura: AMS annual meeting 2013, Austin, USA (2013)
“Downscaling of monsoon onset using pseudo global warming method.”

(3) 出願特許

特に記載すべき事柄はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

特に記載すべき事柄はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事柄はない。

(6) その他

特に記載すべき事柄はない。

8. 引用文献

- 1) IPCC: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge

- University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (2007)
 “Climate Change.”
- 2) Trenberth, K., Fasullo, J., and Smith, L.: *Climate Dynamics*, 24, 741–758 (2005)
 “Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor.”
 - 3) Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D. C., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C. M., Berg, L. V. D., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Hólm, E., Hoskins, B. J., Isaksen, I., Janssen, P. A. E. M., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., and Woollen, J.: *Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961–755 3012 (2005)
 “The ERA-40 re-analysis, Quarterly.”
 - 4) Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., and Joseph, D.: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437–471 (1996)
 “The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.”
 - 5) Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., and Uppala, S.: *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA report series 1*. (2009)
 “The ERA-Interim Archive.”
 - 6) Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S., Hnilo, J., Fiorino, M., and Potter, G.: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 1631–1644 (2002)
 “NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2).”
 - 7) Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N., and Taira, R.: *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85, 369–432 (2007)
 “The JRA-25 Reanalysis.”
 - 8) Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H. Y., Juang, H.-M. H., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., van den Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R. W., Rutledge, G., and Goldberg, M.: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015–1057

(2010)

“The NCEP climate forecast system reanalysis.”

- 9) Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., Kim, G.-K., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R. D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C. R., Reichle, R., Robertson, F. R., Ruddick, A. G., Sienkiewicz, M., and Woollen, J.: MERRA: Journal of climate, 24, 3624–3648 (2011)

“NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications.”

- 10) Randel, D., Haar, V., Thomas, H., Stephens, G., Greenwald, T., Ringerud, M., and Combs, C.: Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 1233–1246 (1996)

“A new global water vapor dataset.”

- 11) Takahashi, H. G., Hara, M., Fujita, M., and Yoshikane, T.: Atmospheric Chemistry Physics Discussion, 12, 23759–23791, doi:10.5194/acpd-12-23759-2012 (2012)

“A discrepancy in precipitable water among reanalyses and the impact of forcing dataset on downscaling in the tropics.”

Archiving of GPS Water Vapor Data for Global Warming Assessment

Principal Investigator: Mikiko FUJITA

Institution: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
(JAMSTEC)
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama city
236-0001, JAPAN
Tel: +81-45-778-5548 / Fax: +81-45-778-5706
E-mail: fmiki@jamstec.go.jp

Cooperated by: Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan Univ.

[Abstract]

Key Words: Amount of water vapor, GPS precipitable water vapor, Reproducibility, data set

Novel water vapor dataset GRASP (GPS pRecipitable wATER reSearch Project) has been produced to investigate variations of precipitable water vapor caused by the climate change. The water vapor is one of the greenhouse gases, which is more effective than CO₂, so it is important to observe water vapor change for a long period.

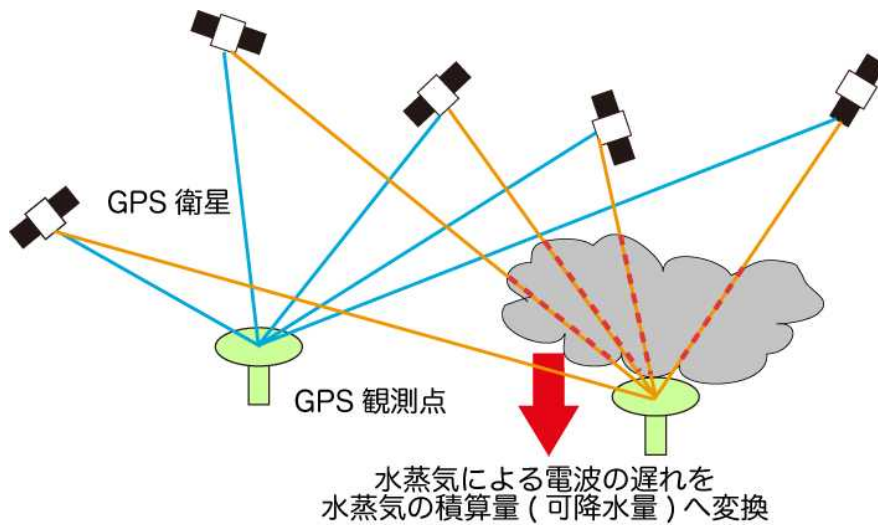
More than 1,000 points stationary data of GPS were collected globally from International GNSS Services and GPS Earth Observation Network System (GEONET) in Japan over 15 years from 1996 through 2010. Atmospheric zenith total delay (ZTD) caused by refractivity of pressure, temperature, and water vapor pressure is estimated by the GPS processing software RTNet (Rocken et al 2006, Iwabuchi et al. 2006), where fiducial coordinate of GPS position is estimated periodically in a month to absorb any un-modeled and site-specific biases. Sophisticated seamless processing is performed every month to prevent jumps of ZTD solution in day boundary as observed in historical ZTD database. The estimated ZTD is converted to precipitable water vapor by meteorological data derived from Japan Meteorological Agency or reanalysis data of NOAA with high-temporal resolution (CFSR) that have been performed altitude correction. The temporal resolution of some product is relatively high with 10 min, which is applicable to climate research within a day such as diurnal circulation of water vapor.

The greatest advantage of GPS precipitable water includes high temporal resolution and high accuracy of absolute value, comparing with other data of water vapor (radiosonde, water vapor radiometer, lidar, SSM/I, etc.). Furthermore, the dataset of GPS precipitable water will be released to public by WWW. It could not only be important information to understand behavior of long-term water vapor variability and circulation, but also to be helpful to further explain mechanism of heavy rainfall cases affected by the climate change with addition of the high quality precipitable water vapor information.

Moreover, we investigated the reproducibility of water vapor in reanalyses. Our results showed that the absolute amounts of precipitable water in some reanalyses were 5 to 10% smaller compared with the observations, although most spatial patterns of precipitable water in the 10 reanalyses agreed closely with the observations. Particularly over the tropics, most of the reanalyses tended to have dry biases throughout the annual cycle. The range of inter-reanalyses dispersion in the tropical mean PW was large compared with seasonal variations of the tropical mean precipitable water. Furthermore, the discrepancies among the reanalyses in the 12-yr mean PW in July over the Southeast Asian monsoon region exceeded the inter-annual standard deviation of the precipitable water. Therefore, the inter-reanalyses dispersion in the tropical PW was significant.

RFa-1101

温暖化影響評価のためのGPS衛星を用いた高精度水蒸気データセットの作成
(独)海洋研究開発機構 藤田実季子



全球高精度可降水量データセット作成

GRASPデータセット
grasp.datarchive.net

相互比較

既存観測水蒸気データ
ラジオゾンデ、SSM/I、NVAP等

数値モデル水蒸気データ
再解析データ、温暖化予測モデル出力等

