

GPS 気候学：日本列島の可降水量の長期的変動

北海道大学理学院自然史科学専攻
吉田清人，日置幸介

(2011 年 7 月 28 日受付, 2012 年 6 月 20 日改訂, 2012 年 7 月 2 日受理)

GPS Climatology: Long-term Variation of Precipitable Water Vapor in Japan

Kiyoto Yoshida & Kosuke Heki

Dept. Natural History Sci., Hokkaido Univ., Sapporo, Japan

Abstract

Atmospheric delays estimated by Global Positioning System (GPS) together with station coordinates provide valuable information for meteorological studies. We report climatological behaviors of the atmospheric water vapor over 13 years period 1996-2008 using daily precipitable water vapor (PWV) data in the F3 solution at ~1000 receivers of GPS stations in Japan. Long-term PWV changes presented variety of climatological signatures including interannual changes due to El Niño/Southern Oscillation (ENSO), longer-term changes of a decadal time scale. We compare such changes with those inferred by climatological studies.

1. はじめに：地球温暖化と水蒸気

近年，地球温暖化，及び異常気象が大きな問題となっている．気候変動に関する政府間パネル(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)の作業部会 1 による第四次評価報告書(IPCC, 2007)より，大気・海洋の世界平均温度の上昇，平均海水面の上昇，積雪面積の減少，氷河・氷床の融解などの観測から，現在温暖化が進行中であることに疑う余地はないとしている．世界平均地上気温は 1906 年から 2005 年は平均 $0.07^{\circ}\text{C}/10$ 年，1956 年から 2005 年では $0.13^{\circ}\text{C}/10$ 年の割合で上昇と，気温上昇の加速が顕著である．また，世界平均海洋温度も少なくとも水深 3000m までは上昇しており，気候システムに加わった熱量の 8 割以上を吸収したと述べている．

地球温暖化に対する水蒸気の関与は深く，下部対流圏では降水に先立って生じる水蒸気の凝結に伴う潜熱の解放が大気を温める(Trenberth and Stepaniak, 2003a,b)．さらに水蒸気は赤外線を吸収し，晴れた空では温室効果全体の 60%程度を占めると考えられている(Kiehl and Trenberth, 1997)．水蒸気を含みうる量は気温に伴って増加するため，水蒸気は温暖化に正のフィードバックをもたらす重要な要因といえる

(Held and Soden, 2000). 雲は大気中の水蒸気が凝縮、凝結した水滴、氷の粒であるので、水蒸気とのかかわりが大きい。大気下層の雲は太陽光を反射するため負のフィードバック（寒冷化）をもたらすが、高層の雲は太陽光をあまり反射せずに赤外線を吸収し正のフィードバックとなる(Randall *et al.*, 2006). 雲の温暖化に与える影響は温暖化の最大の不確実性であり、議論、研究が行われている(IPCC, 2007).

また、Philipona *et al.* (2004) は 1995 年～2003 年の期間における中央ヨーロッパの快晴時の長波放射フラックス測定より、地表の水蒸気量が急激に増加していると推測した。また彼らはその後の解析で、中央ヨーロッパ地域の水蒸気積分量の変化は気温変化と良く相関していることを確認した(Philipona *et al.*, 2005). 上部対流圏の水蒸気量の変化と温暖化への影響は重要な研究課題である。このように、水蒸気の長期変化は気候学的に重要な情報である。

全地球測位システム GPS (Global Positioning System)を用いた水蒸気、可降水量の長期間にわたる解析はまだ少ない。なおここで議論する水蒸気量は鉛直積算水蒸気であり PWV (Precipitable Water Vapor)と略称する。その中で Nilsson and Elgered (2008)は、フィンランド及びスウェーデンにある 33 の GPS 観測点で 10 年間にわたるデータを解析した。その結果、10 年間のデータ期間は地球温暖化に関わる PWV のトレンド推定には短すぎると結論付けている。本研究のデータ期間は 13 年と長くなったが、温暖化に関わる直線トレンドを議論するには未だ十分な長さではなく、他気候変動の影響を考慮した上で議論する必要がある。一方で、観測点密度の高さや高精度の気象観測が可能という GPS の利点は、将来的に気候変動研究に対して寄与が極めて大きいと考えられる。そこで、温暖化と GPS 可降水量の関わりを議論する前段階として、GPS 可降水量から様々な気候学的シグナルを取り出す試みについて紹介する。

2. 宇宙測地技術による水蒸気の計測

宇宙技術を用いた測位法である GPS や超長基線電波干渉法 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)では、観測するマイクロ波が大気による遅延を受けるが、中性大気による遅延量は局位置等のパラメータとともに推定することができる。PWV 測定の基本原理は、既知のマイクロ波の大気による伝搬遅延(大気遅延)を「位相の遅れ」として測定することにある。この点が大気からの熱放射の「強度(振幅)」を測定する水蒸気ラジオメータと大きく異なる点である。そのため、キャリブレーションをしなくても長期にわたって安定した計測が行える。GPS 及び可降水量推定原理の詳細は気象研究ノート第 192 号の第一章(辻宏道, 1998)と第 2 章(大谷, 内藤, 1998)に譲り、ここではごく簡単な説明にとどめる。

一般に大気遅延は、電離層に起因するものと非電離の中性大気に起因するものに分けられる。電離層による遅延は、マイクロ波に対する電離層媒質の屈折率に分散性があることから、異なる周波数の電波を用いることで、推定・除去できる。一方、こうした分散性を持たない中性大気による遅延は大気中の気体分子の誘導双極子の励起によって生じるが、大気を構成する気体の中で水蒸気のみは更に分子構造に由来した永久双極子を有し、マイクロ波はこれを効率的に励起する。その結果、大気中におい

て水蒸気の占める割合は大きくないにもかかわらず伝搬遅延への寄与は相対的に大きくなる。大気全体による天頂遅延 ZTD (Zenith Total Delay)は 2,400mm 程度であるが、このうち水蒸気による遅延量は最大 2 割程度にまで及ぶ。ここで大気が静水圧平衡の状態にあるならば、誘導双極子に起因する天頂静水圧遅延量 ZHD(Zenith Hydrostatic Delay)は地上の気圧値だけで表されるので、水蒸気のみによって生じる天頂湿潤遅延量 ZWD (Zenith Wet Delay)を分離することができる(Davis *et al.*, 1985)。

水蒸気の分布は時間空間的に不規則性が高く地上の気象観測から全体量を求めることが困難である。GPS や VLBI は地殻変動観測のため連続した安定な観測を行っており、それらを用いて推定した水蒸気量を気象学的に利用する「GPS 気象学」は 1990 年代前半頃から脚光を浴びてきた。我国でも 1990 年代より測地学者、気象学者の多くが GPS 気象学に取り組み(小司他, 2009), GPS による可降水量とラジオゾンデ等との比較による精度の検証も 1990 年代に精力的に行われた(大谷, 内藤, 1998)。ラジオゾンデによる湿度の計測は用いるセンサーの種類により異なる特性を示し、機種の違いによる系統誤差の存在も知られるようになってきた(Nakamura *et al.*, 2004)。これらの観点から、GPS による PWV の計測は、長期安定性でラジオゾンデよりも優れていると考える研究者も多い(*e.g.* Wang and Zhang, 2008)。

国土地理院が運用している日本の稠密連続 GPS 観測網(GNSS Earth Observation Network : GEONET)は世界有数の高い観測点密度を持ち、その生データや測位成果が一般研究者にオンラインで提供されている。気象庁・国土地理院の 2009 年 10 月 27 日報道発表資料によると、気象庁は平成 21 年 10 月 28 日より気象庁メソ数值予報モデル (MSM) の初期値を作成するメソ解析において、国土地理院が運用する電子基準点の観測データ (GPS データ) から得られる水蒸気データの利用を開始し、MSM 初期値の水蒸気量の精度が向上、降水予報の精度が改善されることを発表している。

GPS 気象学は GPS によって得られる水蒸気の情報を用いて短い時間スケールで解析する学問であり、上で述べたようにすでに得られた PWV の情報を日常的に利用する段階にある。1990 年代に始まった GEONET 観測による ZTD のデータは既に 15 年をこえ、より長い期間における水蒸気量の変遷を議論できるようになった。Figure 1 に示すように、取り扱うデータ期間、時間窓の変化により得られるシグナル、注目すべき現象も変化する。本研究は長い時間スケールの PWV 変動に注目した GPS 「気候学」の嚆矢として、日本におけるいくつかの気候変動現象の解析を試みた。

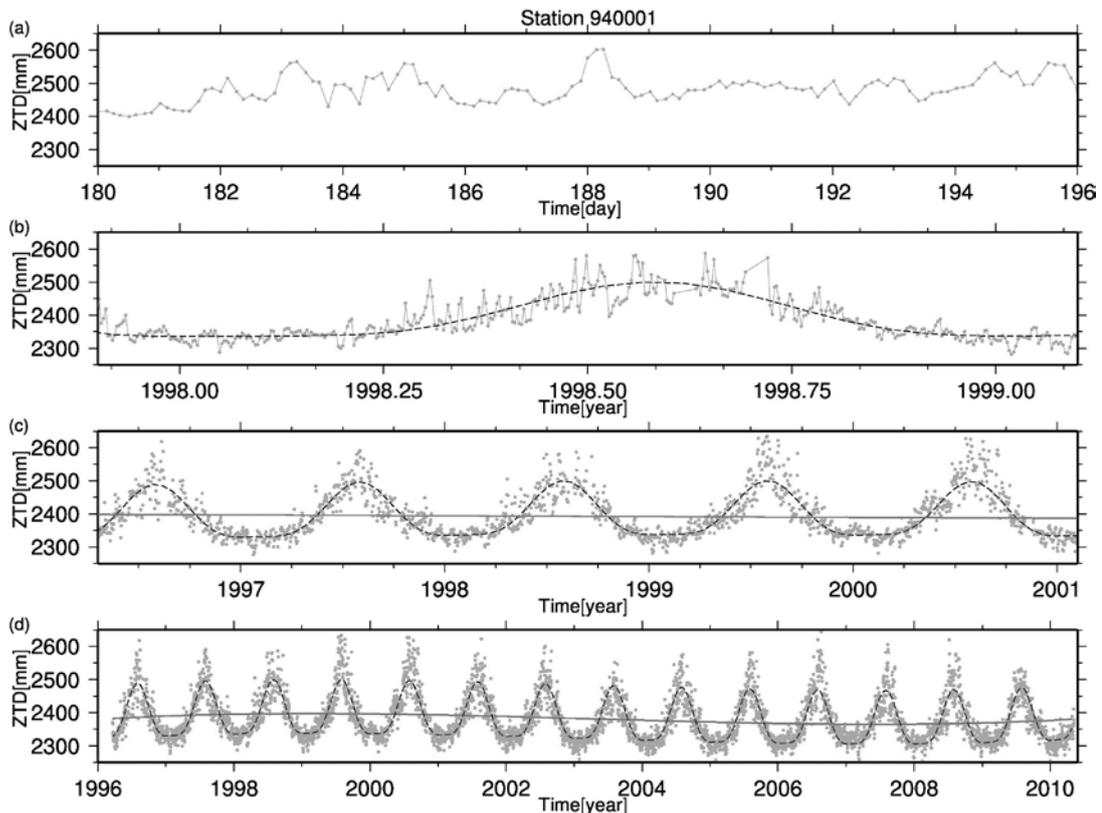


Fig.1. Time series of ZTD at station 940001(WAKKANAI). Data are shown every 3 hours over 15 days in (a). Daily averages are shown over periods of a year (b), 5 years (c), and 13 years (d). Broken curves for (b-d) and solid curves for (c-d) show models with and without seasonal components, respectively. We will explain how to estimate these models in the next section.

3. 解析手法

3.1. 天頂大気遅延データと気象データ

国土地理院による GEONET の F3 解を入手し, F3 解で 3 時間ごとに推定している ZTD を使用した. F3 解は国土地理院の構築した GEONET の解析戦略 (第 4 版) の最終解である. 解析戦略第 4 版では Bernese GPS software Ver.5.0 を使用し, F2 解と比べて①大気遅延勾配 (MacMillan, 1995) の推定(1 日に 1 つの, 時間の一次関数として推定), ②アンテナの絶対位相特性モデルの採用, ③座標系の ITRF2005 への変更, ④解析固定点(電子基準点「つくば 1」)の座標の取り扱いの変更, ⑤電離層遅延高次項の導入, 等の改良が行われた(中川他, 2009).

大気の大気遅延と仰角 ε における大気遅延を関係づけるマッピング関数は NMF (New Mapping Function) (Niell, 1996) が用いられている. 現在では, 数値気象データに波線追跡を行って作成される VMF (Vienna Mapping Function) が, より優れたマッピング関数として用いられるようになってきた(Boehm *et al.*, 2006). Wayan *et al.* (2011) は, マレーシアにおける 2011 年 4 月~6 月のデータを NMF と VMF の両者を用いて解析し, 推定された PWV の値を比較した. 両者には 1.13mm (PWV 総量の約 2.7%) のバイアスが見られたが, 時間変化はほぼ共通していた. F3 解の ZTD にはマッピング関数に由来する PWV の絶対値の系統誤差が含まれるが, 本論文で議

論する PWV の長期的な変化や季節変化の年による相違等の議論には問題は少ない。

簡単のため、GPS 観測点の標高として、F3 解に含まれる局位置の楕円体高を用いた。実際の標高はジオイドからの高さであるため、場所によっては 30~40m 小さい値となり、ZHD で最大 15mm、PWV で最大 2mm 程度のバイアスとなる。しかしこれらは時間的にほぼ一定であり、本研究のような長期的な変動に関する議論ではそれらの補正は不要と考えた。

気象データは気象業務支援センターより購入した気象官署の特別観測値、気温及び海面校正気圧の対応する時刻のデータを、Generic Mapping Tool (GMT) に実装されているスプライン補間を行う surface コマンド (Wessel and Smith, 1991) を用いて空間内挿し GEONET 観測点での値を算出して用いた。なお、surface コマンドのパラメータの設定はデフォルト値を用いている。

解析で用いるのは GEONET 観測点での現地気圧 p であるため、内挿後の海面校正気圧 p_0 と地上気温 T から式(1)を用いて現地気圧を算出した。(1)式は、静水圧平衡の式と乾燥空気の状態方程式をもととして、温度が高さに比例して低下することを仮定し、対流圏の平均的な気温の断熱減率 $\Gamma=6.5\text{K/km}$ (湿潤空気の断熱減率 Γ は水蒸気分圧の量によって変動するが、変動の幅が小さいのでここでは問題としない)を用いた。また、冪数の算出にあたっては定数として、1 kg の乾燥大気に対する気体定数 $R_d=287\text{m}^2/\text{s}^2\text{K}$ 、標準重力加速度 $g=9.80665\text{m}/\text{s}^2$ を用いた。

$$p = p_0 (T/T_0 + \Gamma z)^{5.257} \quad (1)$$

詳しくは一般気象学第 3 章「大気の熱力学」(小倉, 1999) 等を参照いただきたい。

F3 解, 気象データともにデータ欠損 5%以下の観測点のみを使用した。用いた GEONET 局の分布と気象観測所の分布を Figure 2 に示す。

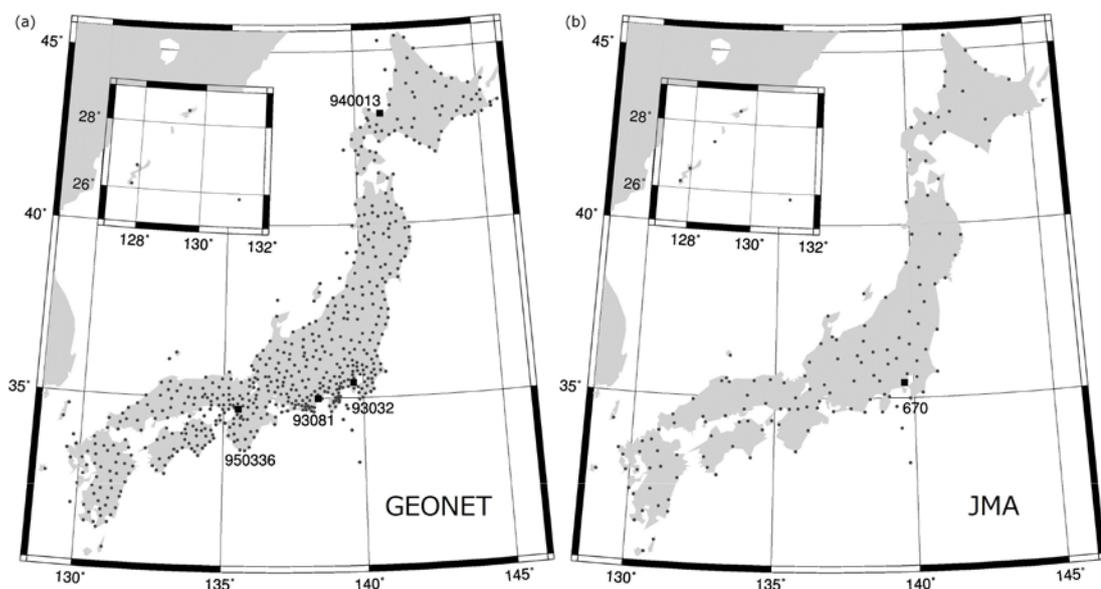


Fig.2. Distributions of the GEONET GPS stations (a), and JMA meteorological stations (b). The squares indicate stations shown in Figs.3 and 6.

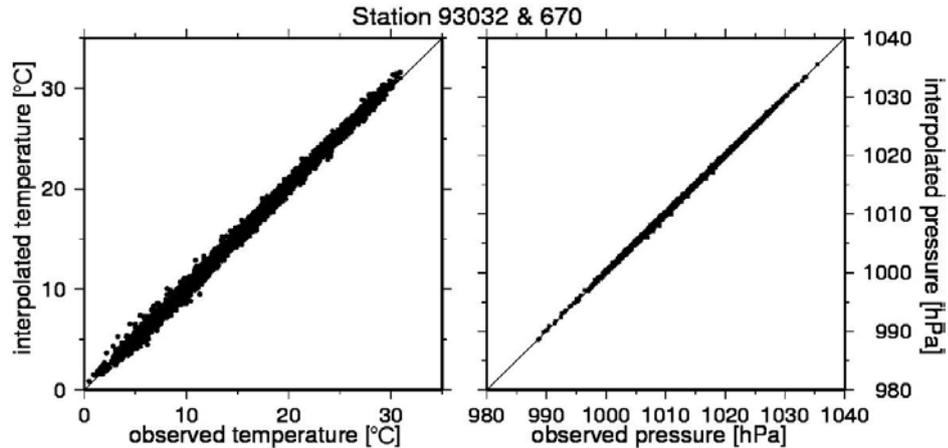


Fig.3. Comparison of observed and interpolated temperature (left) and sea level pressure (right) at the station 670 (see Fig.2b for position).

次に空間内挿して得られた気象要素の値の精度を確認する。GEONET 観測点 93032 (YOKOHAMA) と気象庁の観測点 670 (横浜) は 1 km 以内に存在する。670 を除いた気象データセットから空間内挿した 93032 における内挿値と 670 における観測値を比較した (Figure 3)。その結果、両者の差の RMS (Root-Mean-Squares) は、気温が 0.497°C 、海面気圧が 0.163 hPa となった。この値は ZHD, PWV に換算するとそれぞれ 0.470 mm および 0.074 mm となる。この値は日平均 PWV の標準偏差 (一日のうちのばらつき, 夏季で約 10 mm , 冬季で約 2 mm) に比べて十分小さく、内挿による気象データの信頼性は十分高いと判断した。同様の検証は横浜以外の全観測点でも行い、標高差の大きい観測点では内挿によってバイアスが生じることを確認した。本研究では PWV の絶対値ではなく時間変化を議論するため、これらのバイアスも問題にはならない。

ZTD には 1999 年～2003 年に大気遅延と関係ない最大 30 mm に及ぶ「とび」が見られた (Figure 4)。多くの GPS 局について、それらの発生した時期を確認したところアンテナ交換 (特に異種アンテナへの交換) 時に一致していることが分かった。そこで、既知のアンテナ交換イベントに伴う ZTD のとびの量を最小二乗法により他のパラメータと同時に推定し (時間変化モデルの項で詳しく述べる)、以後の議論ではそれらを取り除いた時系列を用いた。

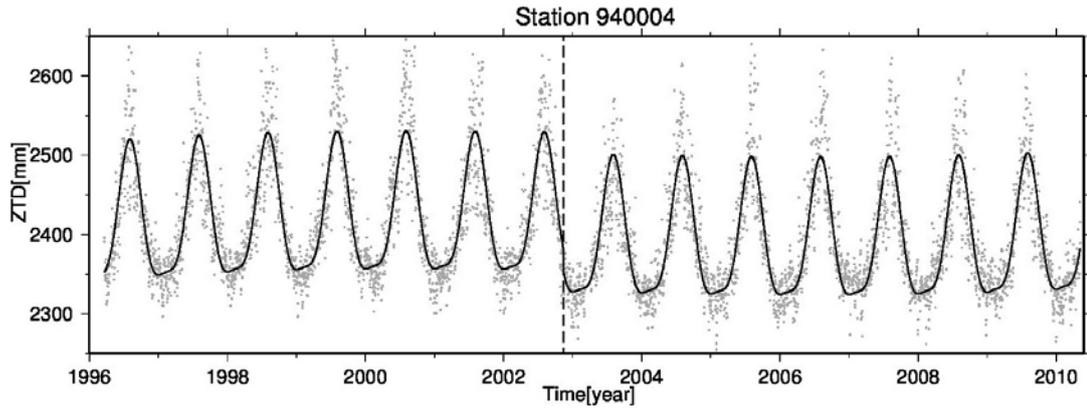


Fig.4. Time series of ZTD at station 940004 (SHARI). Solid curve means the model estimated with jump using least-squares-method. Vertical broken line shows the time of antenna replacement.

3.2. 可降水量変化推定に用いた方法

各観測点における三時間ごとの ZTD, 地上気温, 気圧を用いて三時間ごとの PWV の推定を行い, 一日 8 個のデータを平均してその日の値として, それらの標準偏差を PWV の観測誤差として, その後の時系列解析でデータの重みづけに使用した. GPS による PWV の推定方法についての詳細は気象研究ノート第 192 号第 2 章「GPS 可降水量の物理と評価」(大谷, 内藤, 1998) を参照いただきたい.

3.3. 時間変化モデル

PWV の長期変化を表すために, (2)式のように, 季節変動を表す年周及び半年周の項(右辺第一項及び第二項)と経年変化を表す時間の多項式 $f(t)$ を合わせた時間変化モデルを用い, 重み付き最小二乗法((3)式の J が最小となる各パラメータを求めるために数値計算を行う)を用いてパラメータを推定した. PWV_o は観測値, PWV_c はモデルの値, σ_i は観測値の標準偏差である.

$$PWV_c = A_1 \sin(2\pi t - B_1) + A_2 \sin(4\pi t - B_2) + f(t) \quad (2)$$

$$J = \sum_{i=1}^n \Delta PWV_i^2 / \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^n (PWV_{o_i} - PWV_{c_i})^2 / \sigma_i^2 \quad (3)$$

(2)式において最適な時間変化モデル $f(t)$ を決めるために, 変化なし, 一次から七次の時間の多項式それぞれについて残差 RMS (root-mean-squares) がどのように振る舞うかを調べた. 次数を増やすほど残差は減るが, 次数を二次から三次に上げた際の減少が大きく, それ以降は残差の減少が緩やかになる. 従ってここでは, 三次が最適な次数であると考え (Figure 5), 式(4)をモデルとして採用した.

$$PWV_C = A_1 \sin(2\pi t - B_1) + A_2 \sin(4\pi t - B_2) + a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (4)$$

最小二乗推定を線形とするため、振幅 A_1, A_2 と t が 0 の時の位相 B_1, B_2 を直接推定せず、加法定理を用い正弦と余弦の項に展開した後にそれぞれの振幅を推定した。時間変化項と併せて合計 8 個 ($A_1 \sin B_1, A_1 \cos B_1, A_2 \sin B_2, A_2 \cos B_2, a_1, a_2, a_3, a_0$) をパラメータ推定した。また、前述したアンテナ交換に伴うとびを表す階段関数の項 (5) を加え、 b_0 を併せた合計 9 個のパラメータを推定している。アンテナ交換が複数回あった場合、パラメータ数はさらに増える。

$$b_0 g(t), \quad g(t) = 0(t > t_0), \quad g(t) = 1(t \leq t_0) \quad (5)$$

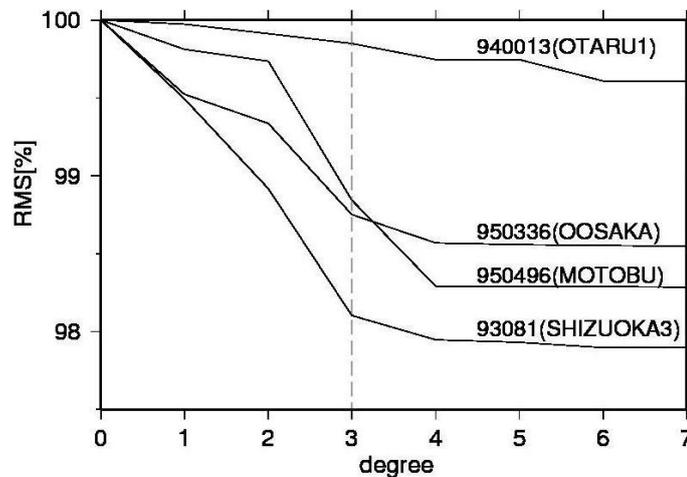


Fig.5. RMS decreases as we increase the degree of the polynomial for $f(t)$ in equation (1). RMS is taken relative to the value where the polynomial degree is 0 (*i.e.* no interannual changes).

4. PWV の長期変化

4.1. 時系列解析

Figure 2a で示した三つの GPS 点、950336 観測点 (OOSAKA)、93081 観測点 (SHIZUOKA3)、940013 観測点 (OTARU1) での可降水量(PWV)の時系列を Figure 6 に示す。どの観測点もほぼ規則的な季節変化が見て取れる。

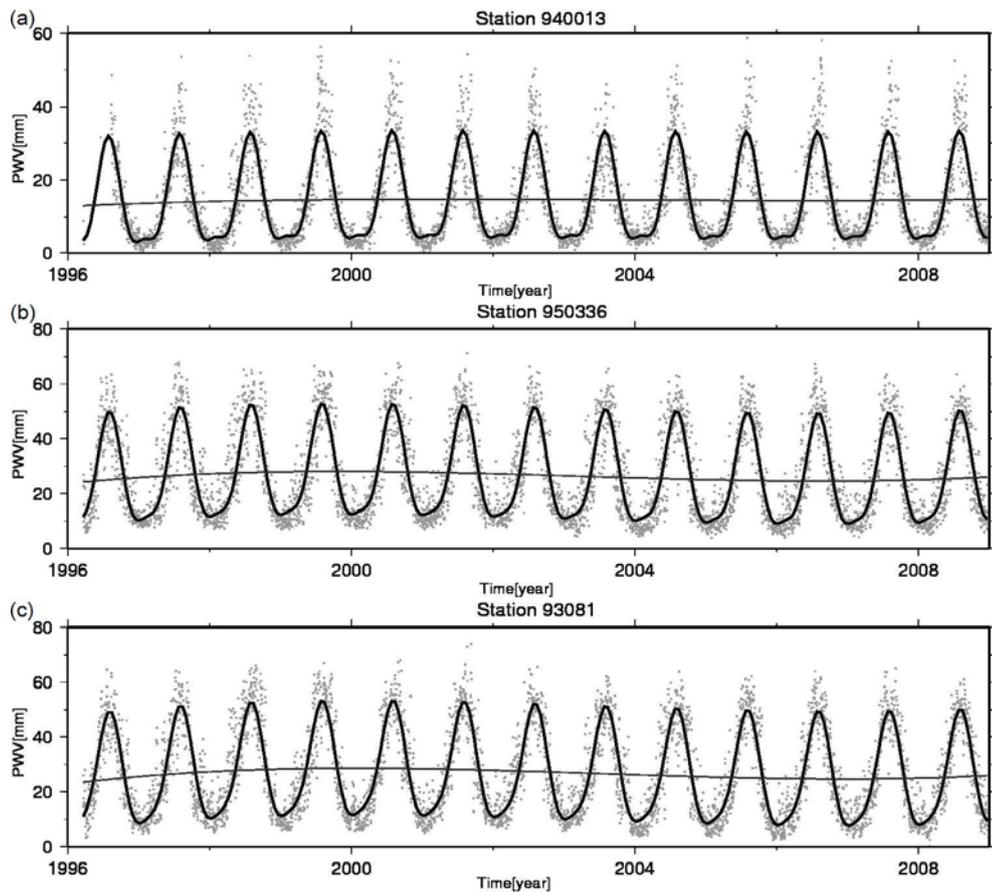


Fig.6. Time series of PWV at (a) the station 940013 (OTARU1), (b) 950336 (OOSAKA), and (c) 93081 (SHIZUOKA3) (see Fig.2a for position). Thick solid curves show models assuming seasonal changes and degree-3 polynomials. Thin curves show the model without seasonal components.

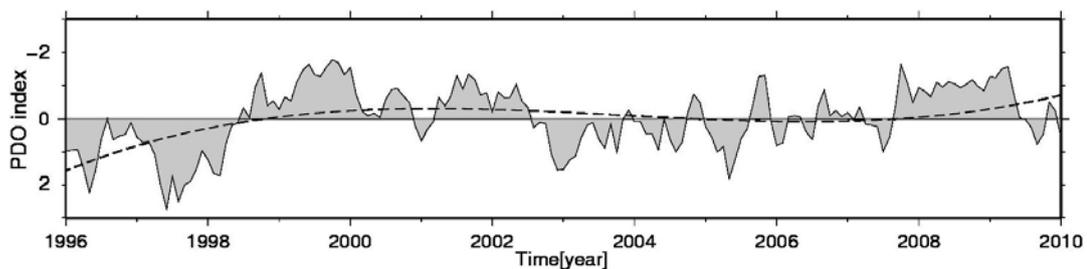


Fig.7. PDO index (<http://www.data.kishou.go.jp/db/climate/pdo/pdo.txt>). The dashed curve shows the PDO index approximated using a degree-3 polynomial. Note that the vertical axis is inverted.

季節変化から示唆されるように、PWV は地上気温と相関を持つ。PWV を地上気象観測から推定しようとする試みは数多く行われており、Chao (1973)は限られた条件ではあるが、ラジオゾンデから得た PWV を地上気温、水蒸気圧を用いてモデル化した。一方 Tralli *et al.* (1988)は、地上気象データからこのモデルを用いて計算した大気遅延を使用して解析すると、GPS 局間の基線長再現性が悪くなることを示した。一般に気温と飽和水蒸気圧の間には、Clausius-Clapayron の式より「気温が 1°C 上昇すると飽和水蒸気圧が 7%増加する」という関係が知られている。我々も地上気温と PWV がこの関係をおおむね満たすことを確認した。一方個々のデータにはばらつき

も大きく, Tralli *et al.* (1988)が示唆したように地上気象データで PWV が一意に求められるものではないこともわかった. 逆に地上気象観測から予測できない部分が存在すること自体が GPS による PWV 計測の意義とも言えるだろう.

前の章で述べたように, PWV の長期的な時間変化は, 時間に関する三次の多項式でモデル化した. 三次の項の係数はほぼすべての観測点で正になり (Figure 8a), また Figure 6 で示したように 1999 年~2000 年に極大, 2006 年~2007 年に極小を持つゆっくりとした変動を見せた.

地上気温と PWV の長期変化の直接比較は難しい. そこで, Clausius-Clapayron の式を利用し, 地上気温データを水蒸気量に変換しスケールを合わせ, 三次の項の係数を GPS による PWV と比較した. なお Clausius-Clapayron の式は, 単位温度の上昇に対する飽和水蒸気量の増加率のみを与える. そこで 0°C における飽和水蒸気量圧を 6.107 hPa (Marsh, 1990), 断熱気温減率 $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, Clausius-Clapayron の式, 水蒸気の状態方程式を用いて高度 1 m 毎に絶対湿度を算出, 鉛直方向に高度 11 km まで積算した. 結果, 可降水量 11.58 mm に相当し, この値を地上気温 0°C のときの可降水量と仮定し, PWV への変換を可能とした. その結果, PWV より振幅は小さいが同様の変動が見られた (Figure 8b) (地上気温の変化の振幅が小さく出ることについては 5 章で考察する). つまり, 本研究でみた期間に関する限り PWV や地上気温の長期変化は単純な直線変化ではなく, 極大と極小を持つ複雑なものであることがわかる. 詳細は次の章で議論するが, 気候変動にはしばしば準十年周期の変動が見られる. 三次という係数はそれを十数年の限られた時間窓でみるという現在の状況から来るものであり, 必ずしも次数の 3 という数字に本質的な重要性があるわけではないのだろう.

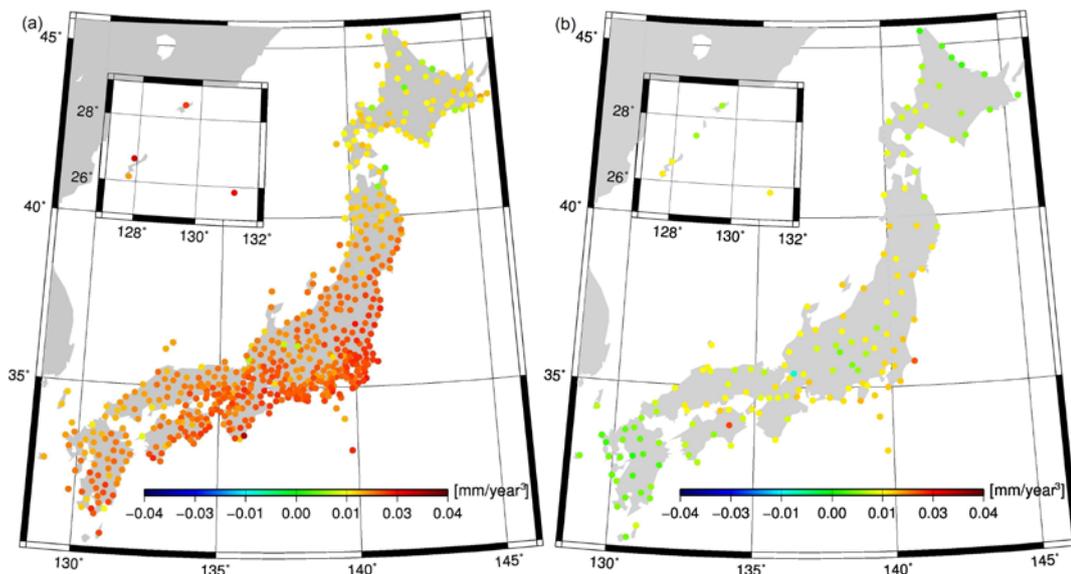


Fig.8. The coefficients of the degree-3 terms of (a) PWV and (b) surface temperature.

4.2. 長い時間スケールのうねりと太平洋十年規模変動(PDO)

この 1999 年~2000 年で極大, 2006 年~2007 年で極小をもつ三次曲線は, どのよ

うな気候変動を表しているのだろうか. ここで, 太平洋十年規模振動(Pacific Decadal Oscillation, PDO)について考えてみる. PDO は太平洋で 10 年以上の長い周期で大気と海洋が連動した変動であり, その指標である PDO 指数は, 北太平洋の 20°N 以北における海面水温偏差の経験的直交関数(EOF)の第一モードの時間係数で定義している(ただし, 地球温暖化の影響を取り去るため, EOF 計算を行う前にそれぞれの地点の月平均海面水温偏差から全球平均海面水温偏差を除いている) (Mantua and Hare, 2002).

PDO 指数が正(負)のとき, 海面水温は, 北太平洋中央部で平年より低く(高く)なり, 北太平洋東部や赤道域で平年より高く(低く)なる傾向がある. また, PDO 指数が正(負)のとき, 海面気圧は, 北太平洋高緯度で平年より低く(高く)なる傾向がある. これは, 冬・春においてアリューシャン低気圧が平年より強い(弱い)ことを示している.

日本列島の気温と PDO 指数は負の相関を持つため, Figure 7 では PDO 指数 (<http://www.data.kishou.go.jp/db/climate/pdo/pdo.txt>) の時間変化を, 上下軸を反転させて描いてある. これを三次の多項式で近似すると, 極大や極小の位置は PWV の変化(Figure 6)とおおむね一致する. これは, PWV の長期変動は PDO の影響を示している可能性を示唆している.

4.3. 長期再解析データ JRA25-JCDAS

前節で述べた, 「PWV の長期変動は PDO の影響を示す」ことを確かめるために, 気象庁と電力中央研究所が作成した長期再解析データ JRA25-JCDAS(Onogi *et al.*, 2007)に含まれる海面気圧 SLP (Sea Level Pressure) の, PWV の長期変動(観測点で平均)に対する回帰分析を行った.

できるだけ多くの過去の気象観測データを収集して精密な品質管理を行い, 最新の高速計算機と最新の数値解析予報モデルを用いて, 過去数十年にわたってなるべく均質かつ高精度の大気の解析値を作成したものは, しばしば「再解析データ」と呼ばれ, JRA25-JCDAS もそのひとつである.

回帰分析は様々な分野でしばしば利用される統計解析法であり, 研究の対象である変数と, より素性が明らかな他の変数との関連を考える手法である(宿久他, 2009). 本研究では PWV の長期変動を説明変数, SLP の変動を目的変数として線形回帰分析を行った. その結果, アリューシャン低気圧が負の回帰係数を示し(Figure 9), PDO(正極)時の典型的な SLP の偏差パターン(PDO 指数に回帰した SLP 平年偏差:気象庁 web ページ http://www.data.kishou.go.jp/db/climate/knowledge/pdo/pdo_doc.html 図 4) と類似性がみられる. 既に述べたように PDO の大気に対する影響はアリューシャン低気圧に顕著に表れる. 従って, PWV の長期変動に同様のパターンが見られることは, それらが PDO の影響を受けていることを強く示唆している.

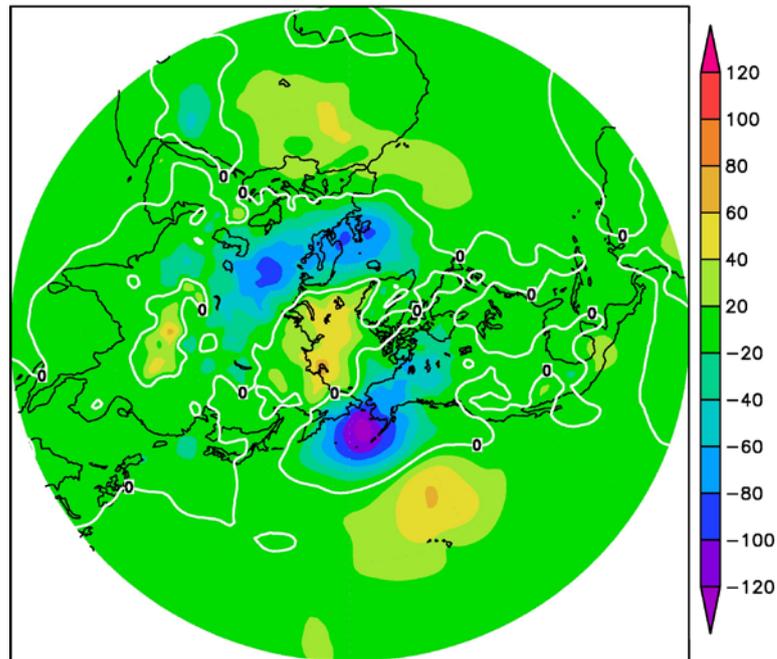


Fig.9. Regression maps of the 1 year mean SLP with the 1 year mean PWV change. Zero contours are drawn in white.

4.4. 年々変動

より短い時間スケールの PWV の年々変動を検出するために、(3)式のように観測値から最小二乗法により推定した季節変化と三次多項式成分を取り除いた残差を各観測点で算出した。日本の気候に影響を与える変動の一つに、エルニーニョ南方振動 (El Niño Southern Oscillation: ENSO)がある。エルニーニョ(ラニーニャ)時は、冬季は西高東低の気圧配置が弱まり(強まり)、暖冬(寒冬)となる傾向があることが知られている(e.g. 西森, 2010)。

気象庁は web 上で気象統計情報を公開している (気象庁, 2012)。それによると、ENSO の日本列島の気候への影響は夏季よりも冬季に明瞭に表れるため、各年の冬の三か月間 (前年の 12 月～2 月) の平均残差から年々変動の検出を試みた。その結果、いくつかの特徴的なシグナルを検出した。一例として、Figure 10 に示すように、1998 年冬(1997 年 12 月～1998 年 2 月)の平均残差は北海道と東北を除く太平洋側に顕著な正の残差が、また 2000 年冬(1999 年 12 月～2000 年 2 月)の平均残差には逆に顕著な負の値がみられた。

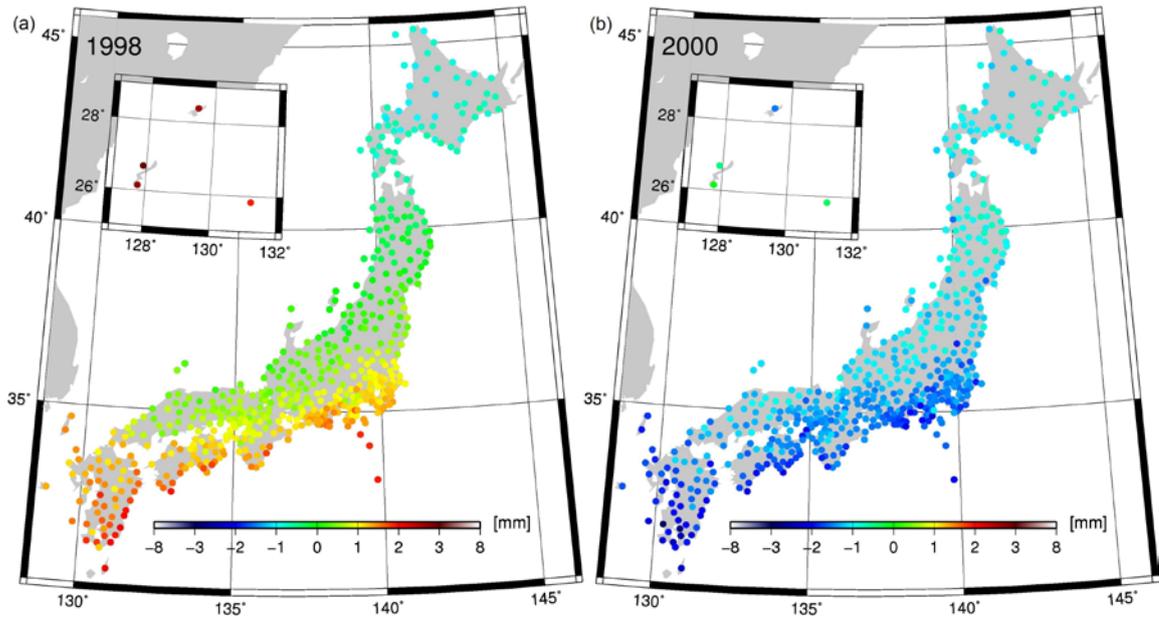


Fig.10. Averaged winter (December, January, February) residuals from the model in 1998 (a) and 2000 (b).

気象庁による ENSO 指数はペルー沖 NINO.3 監視水域の海水温の平年値からの差 (DSST)であり、半年以上 DSST が 1°C 以上正(負)である状態が続いたときをエルニーニョ(ラニーニャ)の発生と定義している。 ENSO 指数の時系列から、1998 年には大規模なエルニーニョが起きていることを示している(Figure 11)。地上気温と ENSO 指数の相関は、北海道及び東北地方で小さく、関東以南の太平洋側で大きいことが知られている(Xie *et al.*, 1999)。 Figure 10 はこのような特徴と一致するパターンを示し、GPS の PWV データが ENSO の信号を検出している可能性が高い。

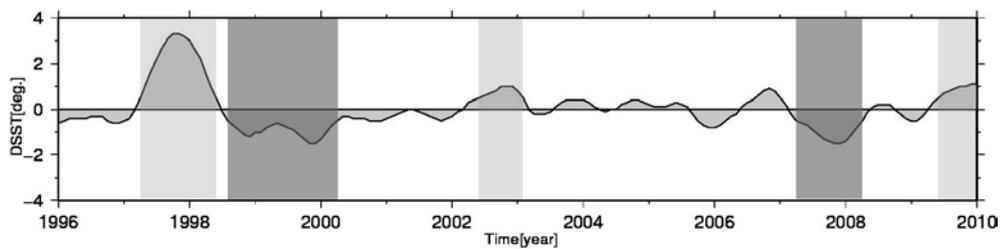


Fig.11. ENSO index (using the 5 month running means data of subtract of sea surface temperature from standard value in NINO.3 from <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/elnino/index/nino3irm.html>). Pale gray part means El Niño, and dark gray part means La Niña.

そのほかにも、北日本の冬季の気温は北極振動(Arctic Oscillation, AO)に大きく左右されることが知られている(山崎, 2004)。しかし、本研究で用いた GPS データがカバーする期間の AO 指数は比較的小さい値を示しており、その影響は明瞭ではなかった。2009-2010 の冬は未曾有の大きさの負の AO 指数が記録され、世界各地の中緯度地域で異常な積雪等がもたらされたことが知られている(Cohen *et al.*, 2010)。その時期の日本列島の PWV のデータを入手した時点で、AO に伴う日本列島の PWV のふるまいについて、改めて検討したい。

5. 結論および考察

気象データと GEONET の F3 解に含まれる大気遅延量データから PWV を推定し、日本全国に分布する GPS 点におけるそれらの時系列を解析した。地上気温と PWV の相関を調べ、両者は正の相関を持ちおおむね Clausius-Clapayron の式を満足することがわかった。しかし地上気象データと PWV は一意に対応するわけではなく、GPS による計測が重要であることを確認した。

PWV の長期変化は直線トレンドではなく、時間の三次多項式で表現されるような極大と極小を持つ複雑なものであった。三次の項には地域性があり、本州以南に比べ北海道でやや小さい値を示した。この変動は地上気温にも見られたが、Clausius-Clapayron の式等を用いて PWV と同じスケールに換算した変動の規模は、PWV に比べ小さかった。三次の変化の原因としては、時間変化の特徴から PDO の影響が示唆された。PDO は日本を含む北太平洋にも影響が見出されており、主に海面水温の変動とアリューシャン低気圧の変動を示す。長期再解析データ JRA25-JCDAS を用いて SLP の年平均値を観測点平均した PWV の長期変動で回帰分析したところ、PDO に類似するアリューシャン低気圧のパターンを示すことが確認された。

PWV の長期変動の主要な原因が PDO とすると、地上気温における変動の規模が PWV の変動より小さい要因はなんだろうか。水蒸気は地上気温と相関をもつが、降水や蒸発、輸送により収支が変化する。PWV は鉛直積算量であるため、全層の影響を考慮する必要がある。しかし、地上気温は接地境界層にあり PDO 等の影響が限定的に現れる。つまり、地上観測のみで大気全層の変化を代表させることの限界を示しているのではないか。

次に、年々変動の検出をするために、観測値から最小二乗法により推定した全期間の平均的な季節変化および長期変動を取り除いた残差の時系列を解析した。その結果、ENSO の特徴と示すシグナルを検出した。期間中最大のエルニーニョが発生した 1997 年から 1998 年にかけての冬には東北・北海道を除く全域に顕著な正の残差がみられた。また、ラニーニャの年である 1999 年から 2000 年にかけての冬には、逆符合の残差が見られることも見出した。

GPS による PWV は気候学的な信号を数多く含んでおり、他の観測にはない時空間的に高密度なデータが得られる点で有用である。また、長期間にわたるデータ品質の安定性の観点からは、同一手法で観測を続けていること、アンテナ交換等による不連続の補正が容易であること、解析手法やマッピング関数の改善に伴う再解析が容易であること、等の他の観測にはない利点がある。GPS より長期間の観測データがあるラジオゾンデには、機種に依存する誤差の存在が明らかになっており、GPS から得る PWV 情報の重要性は今後も高まると考えられる。現在もデータの蓄積は続いており、より長期間のデータが将来期待できる。

長期間のデータがあれば、比較的長い時間スケールを持つ気候変動の影響評価が容易になる。ENSO 等の年々変動に関しても、観測事例が増えることにより詳細な解析が可能になる。昨今話題になっている地球温暖化に基づく長期間のトレンドを議論す

るためには、十年周期変動や年々変動に埋もれてしまわないだけの長い時間窓でのデータが必須である。今後の気候変動解析には GPS が新たなセンサーとして重要な役割を担うだろう。

謝辞

解析に使用した GEONET F3 解のデータは国土地理院衛星測地課衛星情報係より提供いただきました。図の作成及びデータの内挿には Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1991) を使用させていただきました。JRA25-JCDAS 長期再解析データ及び Figure 9 は北海道大学稲津将准教授に提供いただきました。NICT の市川隆一博士と気象庁気象研究所小司禎教博士による査読は、論文の質の向上に極めて有意義でした。ここに記して感謝します。

参考文献

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware (1992): GPS Meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- Boehm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh (2006): Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Chao, C. C. (1973): A new method to predict wet zenith range corrections from surface measurements, *Tech. Rep. Calif. Inst. Technol. Jet Propul. Lab.*, 32-1256, XIV, 33-41.
- Cohen, J., J. Foster, M. Barlow, K. Saito, J. Jones (2010): Winter 2009–2010: A case study of an extreme Arctic Oscillation event, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L17707, doi:10.1029/2010GL044256.
- Davis, J.L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A.E.E. Rogers, and G. Elgered (1985): Geodesy by radio interferometry – Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline lengths, *Radio Sci.*, **20**, 1593-1607.
- Held, I. M., and B. J. Soden (2000): Water vapor feedback and global warming, *Annu. Rev. Energy Environ.*, **25**, 441-475.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 271-274.
- Kiehl, J.T., and K.E. Trenberth (1997): Earth's annual global mean energy budget, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 197–208.
- 気象庁(2012): エルニーニョ現象時の日本の天候の特徴（詳細版），

- <<http://www.jma.go.jp/>>, (参照 March 2nd, 2012).
- 気象庁(2012): 太平洋に変動中心を持つ海面水温の偏差パターン, <<http://www.data.kishou.go.jp/>>, (参照 March 19th, 2012).
- MacMillan, D. S. (1995): Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 9, 1041-1044.
- Mantua, N. J. and S. R. Hare (2002): The Pacific Decadal Oscillation, *J. Oceanogr.*, **58**, 35-44.
- Marsh K. N., ed. (1990): *Recommended Reference Materials for the Realization of Physicochemical Properties*, Blackwell.
- 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司 (2009): GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第4版) によるルーチン解析システムの構築について, *国土地理院時報*, **118**, 小特集1, 1-8.
- Nakamura, H., H. Seko, and Y. Shoji (2004): Dry biases of humidity measurements from the Vaisala RS80-A and Meisei RS2-91 radiosondes and from ground-based GPS. *J. Met. Soc. Japan*, **82**, 277-299.
- Niell, A. E. (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *J. Geophys. Res.*, **101**(B2), 3227-3246.
- Nilsson, T. and G. Elgered (2008): Long-term trends in the atmospheric water vapor content estimated from ground-based GPS data, *J. Geophys. Res.*, **113**, D19101, doi:10.1029/2008JD010110.
- 西森基貴 (2010): ラニーニャ現象と地球環境, エルニーニョ・ラニーニャ現象—地球環境と人間社会への影響—, 34 - 40, 成山堂書店.
- 小倉義光, (1999): 大気の熱力学, 一般気象学第2版, 40-77, 東京大学出版会.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira (2007): The JRA-25 Reanalysis, *J. Met. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 大谷竜, 内藤勲 (1998): GPS 可降水量の物理と評価, 気象研究ノート 192号, 15-33.
- Philipona R., B. Dürr, C. Marty, A. Ohmura, and M. Wild (2004): Radiative forcing - measured at Earth's surface - corroborate the increasing greenhouse effect. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L15712, doi:10.1029/2003GL018765.
- R. Philipona, B. Dürr, A. Ohmura, and C. Ruckstuhl (2005): Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19809, doi:1029/2005GL023624.
- Randall, D. A., M. E. Schlesinger, V. Galin, V. Meleshko, J.-J. Morcrette, and R. Wetherald (2006): Cloud Feedbacks. In "Frontiers in the Science of Climate Modeling," J. T. Kiehl and V. Ramanathan, Eds., Cambridge University Press, 217-250.
- 小司禎教・岩淵哲也・畑中雄樹・瀬古弘・市川隆一・大谷竜・萬納寺信崇 (2009): GPS 気象学 : GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に

- 関する研究, 測地学会誌, **55**, 1, 17-38.
- Tralli, D. M., T. H. Dixon, S. A. Stephens (1988): Effect of wet tropospheric path delays on estimation of geodetic baselines in the Gulf of California using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **93**, B6, 6545-6557.
- Trenberth, K.E., and D.P. Stepaniak (2003a): Co-variability of components of poleward atmospheric energy transports on seasonal and interannual timescales, *J. Clim.*, **16**, 3690–3704.
- Trenberth, K.E., and D.P. Stepaniak (2003b): Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation, *J. Clim.*, **16**, 3705–3721.
- 辻宏道 (1998): GPS の原理, 気象研究ノート, **192**, 1-13.
- Wang, J., and L. Zhang (2008): Systematic errors in global radiosonde precipitable water data from comparisons with ground-based GPS measurements, *J. Clim.*, **21**, 2218-2238, DOI: 10.1175/2007JCLI1944.1.
- Wayan, S., M. S. J. Singh, M. A. M. Ali, B. Yatim and A. N. M. Yatim (2011): GPS water vapor monitoring and *TroWav* updated for ENSO studies, 2011 International Conference on Instrumentation, Communication, Information Technology and Biomedical Engineering.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1991): Free software helps map and display data, *EOS trans., Am. Geophys. Union*, **72**, 441.
- Xie, S. P., H. Noguchi (1999): A hemispheric-scale quasi-decadal oscillation and its signature in Northern Japan, *J. Met. Soc. Japan*, **77**, No.2, 573-582.
- 宿久洋, 村上亨, 原恭彦 (2009): 確立と統計の基礎Ⅱ, ミネルヴァ書房.
- 山崎孝治 (2004): 北極振動の概要, 気象研究ノート, **206**, 1-9.