

要旨

大気中の水蒸気量の変化が与える地球温暖化への影響を知ることは、気象学分野において重要な課題である。本研究では、GEONET (GNSS Earth Observation Network) による大気遅延データや、気象庁による気圧データを基に、最近20年間の大気中の水蒸気の変動を推定した。各観測点で推定した大気による遅延量と、大気遅延勾配の解析という2つの観点から、大気中の水蒸気の動向を推定し、その変動にどのような要素が関わりあって起きているのかを議論した。

1.はじめに

大気中の水蒸気は、地球の温室効果に多大な役割を担っている。大気中の水蒸気量の変化が与える地球温暖化への影響を知ることは、気象学分野において重要な課題である。GNSS (Global Navigation Satellite System) を用いて水蒸気量を大気遅延の変化として見ると、単調増加ではないことがわかる。本研究は、1996~2016年の20年分のGNSSの大気遅延データを用い、そこから大気中の水蒸気を推定し、気候変動との長期的な関連性を見出すことを試みた。また大気遅延勾配を推定することによって、各地点での大気中の水蒸気の変動の様子や、上空の長期平均的な水蒸気の分布や偏在を調べた。

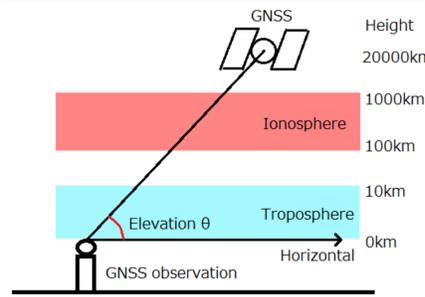


図1：GNSS観測点と衛星の仰角の関係
GNSSのマイクロ波は、大気を通る際に遅延を受ける。本研究では電離圏での遅延は無視し、対流圏での遅延のみ考慮している。

4.推定結果

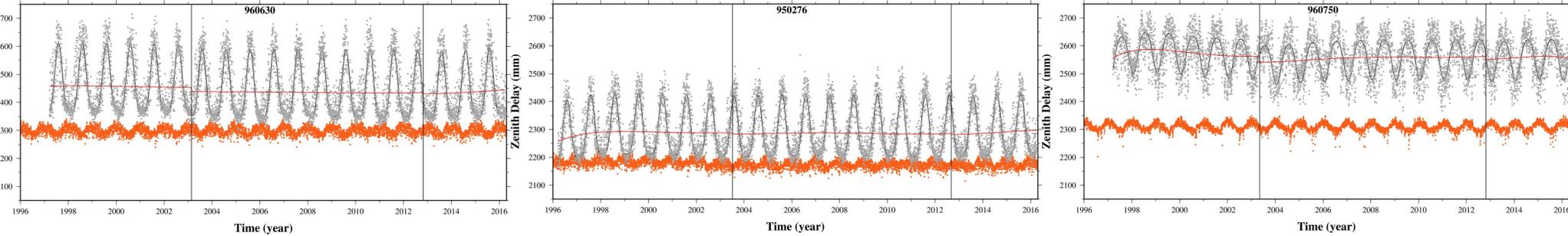


図2：愛知県名古屋市960630局 (左)、長野県飯田市950276局 (中) 沖縄県石垣島960750局 (右) で観測したZTDと、その近辺のアメダス観測所で観測した気圧値から計算したZHDの変動を重ねてプロットしたもの。横軸時間[年]、縦軸が遅延量[mm]。ZTDで2003年、2012年に縦線が入り、データのジャンプが起こっているのは、アンテナの交換に伴うもの。黒い曲線は時間の多項式と季節変化 (年周+半年周) を組み合わせてモデル化したもの、赤い曲線で表した時間の多項式は、6次の項まで計算している。飯田市は名古屋市とほぼ同緯度で標高が高い場所であり、石垣島は低緯度で名古屋市と標高がほぼ同じ場所にある。これらから、ZTDは緯度、標高共に依存し、ZHDは標高に依存するが、緯度にはあまり依存しないことが分かる。ZTDは長期的に緩やかな変動が見られるのに対し、ZHDは季節変化以外に特徴的な変化は見られない。また、この2つの差に当たる部分がZWDになる。すなわち、ZTDに見られる長期的な変動は、水蒸気 (ZWD) によるものと言える。このZWDに右の(2)式を与えることで、可降水量PWVを推定することができる (大谷他、1997)。

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (2)$$

$$\Pi = \frac{10^5}{R_v(k_2' + \frac{k_3}{T_m})}, \quad T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz}$$

Pv：水蒸気分圧[hPa]
Rv：水蒸気気体定数[J/kg·K]
Tm：加重平均気温[K]

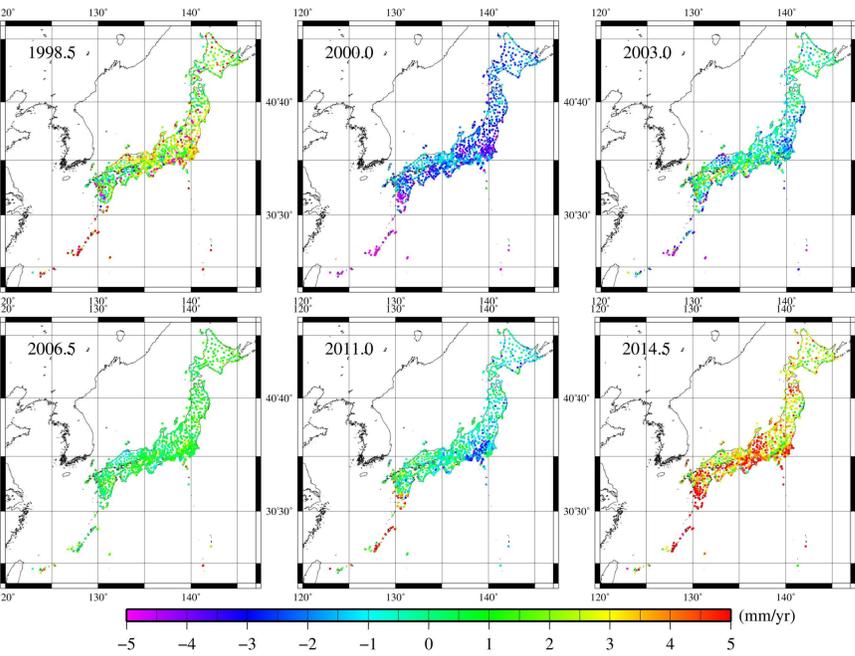


図3：日本国内すべての観測点で、時系列モデルの時間の多項式部分を時間微分したもの。8年程度の周期を持ったゆっくりとした変動が見られる。基本的に全国で同様の変動を示しているが、関東地方等、地域によって異なる変動をしているように見える部分もある。

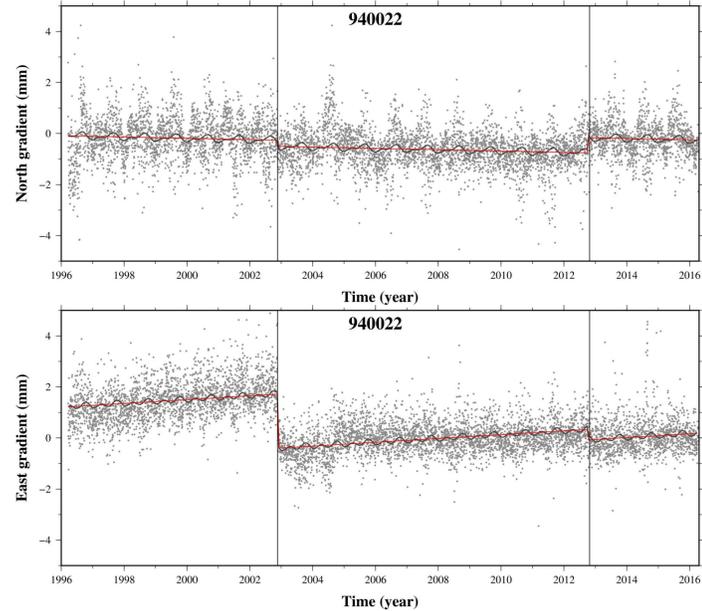
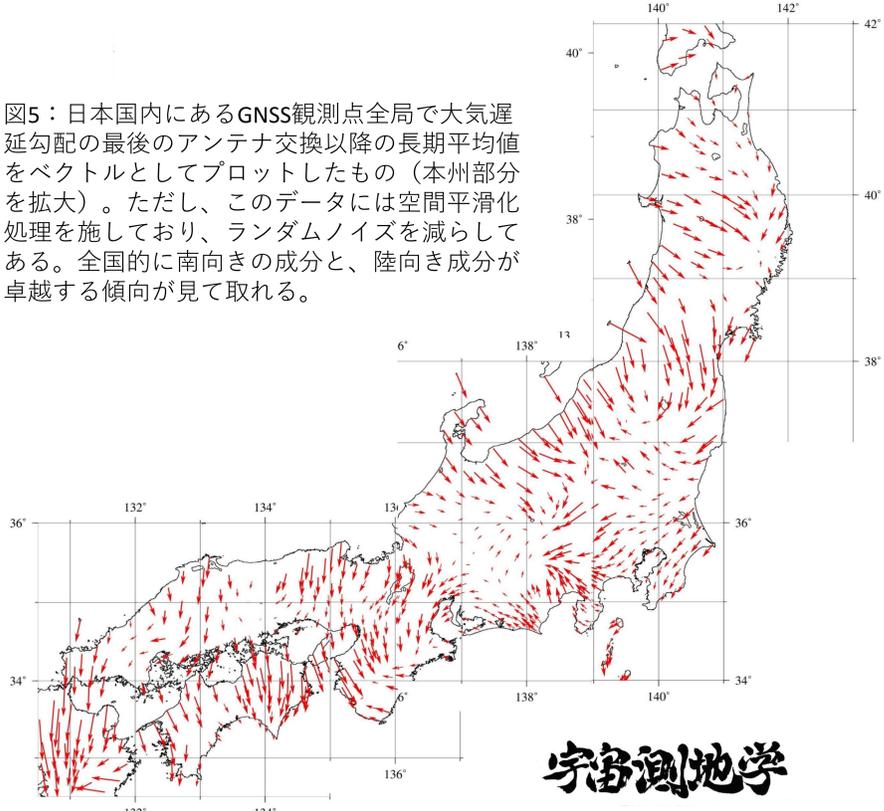


図4：北海道函館市940022局の大気遅延勾配の南北成分 (上) と東西成分 (下) を時系列にプロットしたもの。横軸時間[年]、縦軸勾配量[mm]。ZTD等同様季節変化等の周期性はあるが、長期的な変動はないように見える。また、アンテナ交換を繰り返すたびに値が0に近づいている。

図5：日本国内にあるGNSS観測点全局で大気遅延勾配の最後のアンテナ交換以降の長期平均値をベクトルとしてプロットしたもの (本州部分を拡大)。ただし、このデータには空間平滑化処理を施しており、ランダムノイズを減らしてある。全国的に南向きの成分と、陸向き成分が卓越する傾向が見て取れる。



5.結論

吉田・日置(2012)ではZTD推定の際、3次の多項式まで計算していたが、観測期間が延びたことを反映し、現在は6次の多項式で表される変動になっている。また、かつて見られたPDO指数との相関は明瞭ではなくなった (図6)。

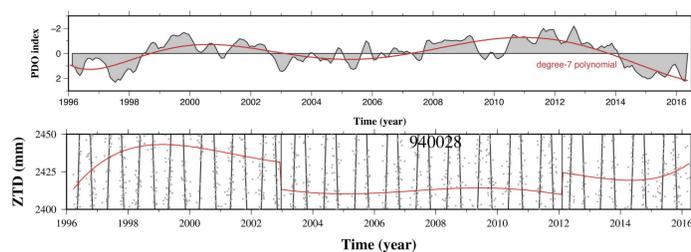


図6：PDO指数の変動を逆位相にしてモデル化したもの (上) と、宮古市940028局のZTDを時間の多項式でモデル化したもの (下)。

ZTDの絶対値は緯度や標高に依存する。これは、低緯度は気温が高く、大気中の水蒸気が増加すること、高地ではアンテナより上の大気が少なくなるためである。ZHDは気圧に比例するため標高には大きく依存するが、緯度依存性は小さい。ZWDは緯度、標高共に大きく依存し、冬季は緯度依存性が顕著である。

大気遅延勾配は、地域によって大きさに差があるが、南向きかつ陸向きの成分が卓越する傾向がある。南向き成分は、気温の緯度依存性を反映しているのだろう。陸向き成分が卓越するのは、海域と陸域の温度コントラストの日平均の結果だと思われる。昼間の陸域が温度が高い状態 (海風が吹く時間帯) と、夜間の海域が温度が高い状態 (陸風が吹く時間帯) が完全に打ち消し合わず、温度が全体として高い前者が勝って、日平均の水蒸気量の海陸コントラストとして残ったのかも知れない。

参考文献

吉田, 日置 (2012), GPS気候学：日本列島の可降水量の長期変動, 測地学会誌, 58, 141-152.
中川他(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, 1-8
大谷他 (1997), 国土地理院GPS観測網から推定された可降水量, 天気, 44(5), 317-325.