

GPS 気象学

—GPS 大気遅延情報の気象学・測地学への応用—

内 藤 勲 夫*

GPS Meteorology

—Applications of GPS Retrieved Atmospheric Data to Meteorology and Geodesy—

Isao NAITO*

Abstract

Some results of application studies of GPS retrieved tropospheric delays on weather prediction (GPS Meteorology) conducted in Japan are outlined. It is suggested that the nationwide GPS array in Japan (GEONET) of Geographical Survey Institute (GSI) is an excellent all-weather water vapor sensor applicable to regional weather predictions by Japan Meteorological Agency (JMA). It is also found that a sophisticated analytical model developed for GPS meteorology can remove drifts due to water vapor delay appearing in the horizontal solution of GPS positioning in summer.

Key words : GPS, water vapor, weather prediction, crustal deformation

キーワード : GPS, 水蒸気, 天気予報, 地殻変動

I. 大気遅延 : ノイズからシグナルへ

その昔, 大気による光の屈折(大気屈折)による観測誤差(ノイズ)は位置を“角度で測る”天文学や測地学の大きな悩みの種であった。しかし, 1950年代に宇宙からの電波を利用する電波天文学が登場すると, 位置の計測は電波で“距離を測る”電波測距技術に置きかえられ, 大気屈折の問題も大気中の電波伝播遅延(大気遅延)による電波の位相遅れの問題に置きかえられた。その後, この電波測距技術は1970年代にVLBI(超長基線電波干渉技術)として一応の完成期を迎え, それによって大陸移動がはじめて実測されたことはよく知られている。しかし, 1990年代に入ると, このVLBI技術もGPS(全地球測位システム)に受け

継がれ, GPSによる今日の精密位置計測時代を迎えるに至るのだが, この間, GPS衛星の軌道予測技術とGPS測位解析ソフトウェアの高度化によって, それまでノイズとして処理されてきた大気遅延は位置パラメーター(緯度・経度・高度)と共に解析ソフトウェアで推定可能なシグナルに変貌した。このGPS大気遅延データを気象学などに応用するのがここでのGPS気象学である。

さて, GPS気象学には二つの手法・目的がある。一つは地上のGPS受信機で大気遅延を測る“地球基地型GPS気象学”で, また他の一つは低高度衛星に搭載したGPS受信機で大気遅延を測る“宇宙基地型GPS気象学”である(内藤, 1998)。前者は, 次章で詳述するように, 主として大気下層の水蒸気の鉛直積分量(可降水量)をとらえて,

* 国立天文台地球回転研究系

* Earth Rotation Division, National Astronomical Observatory

それをメソスケール降水現象などの解明や予報に利用するものである。湿潤な気候環境にあり且つ世界に類を見ない稠密な国土地理院全国 GPS 連続観測網 (GEONET) を持つわが国は、地球基地型 GPS 気象学の格好の実験フィールドとなっている。あるいは逆に、そうして得られた GPS 気象学の成果をフィードバックして、GPS による地殻変動の監視精度を向上させることも可能である。一方、後者は主として大気上層の温度の鉛直分布を地球規模でとらえて、それらを地球温暖化監視やグローバルな天気予報に利用するものである (津田, 1998)。

そこで、本稿では、水文学などの学際科学への応用の可能性も期待される水蒸気可降水量を主題とする地球基地型 GPS 気象学に焦点を当て、まずその基本原理について簡単に述べ、次に GEONET を舞台とした地球基地型 GPS 気象学の天気予報および測地観測への応用に関する最近の成果を筆者らによる研究を中心に紹介し、最後に宇宙基地型 GPS 気象学を含む GPS に基盤を置く“測位手法による大気・海洋・陸水・雪氷などのリモートセンシング”の重要性について簡潔に述べる。

II. 地球基地型 GPS 気象学の基本原理

地上の受信機で GPS 衛星から発信されたマイクロ波の大気遅延による位相の遅れを測定するためには、あらかじめ、GPS 衛星および地上受信機のそれぞれの精密な時刻 (時計)、GPS 衛星の地心に対する精密な位置 (軌道)、地上受信機の地心に対する精密な位置を必要とする。この場合、もしこれらの情報すべてが完全に既知でしかも誤差 (狂い) がなければ、大気遅延によるマイクロ波の位相遅れは GPS 観測によって幾何学的に一意的に決まる。しかし実際は、これらの情報は雑に予測されているに過ぎないか、あるいは誤差が存在するので、それらと実際の値との差 (誤差) が、大気遅延と共に GPS 解析ソフトウェアで最小二乗法的に推定される (辻, 1998)。ただし、以下で述べるような何らかの大気構造のモデル化を必要とする。

GPS 衛星の軌道は可能な限り天球上に一様に分布するように設計されているので、それぞれの衛星からのマイクロ波の位相遅れ (すなわち大気遅延) は、マイクロ波の大気中の通過距離に、従って、GPS 衛星の仰角 (あるいは天頂距離) に強く依存する。そこで、GPS 観測点上空の局所的な大気の構造を方位に対して一様と仮定すると、大気遅延は仰角だけに依存する。つまり、大気遅延の仰角依存関数 (マッピング関数) を定義しておけば、それぞれの衛星方向の大気遅延は天頂方向の大気遅延 (天頂大気遅延あるいはしばしば天頂対流圏遅延と呼ぶ) だけで表現され、これが上述した GPS 解析ソフトウェアで推定されることになる (市川・田中, 1998)。

大気は乾燥空気と湿潤空気 (水蒸気) の混合気体であるから、電磁波の屈折率は一般に乾燥空気と水蒸気のそれぞれの屈折率の和で表すことができる。その結果、マイクロ波の天頂大気遅延も乾燥空気と水蒸気のそれぞれの天頂遅延の和として表される。そこで、水蒸気の屈折率は大気温度の -1 乗と -2 乗に比例する二つの寄与の和から成ることに着目し、水蒸気分圧で重みを付けられた天頂方向の大気の平均温度 (荷重平均温度) を定義しておく、水蒸気による天頂遅延はこの荷重平均温度の関数で表される係数 (変換係数と呼び約 0.15 の値を持つ) と水蒸気の大気中の積分量である可降水量の積で表すことができる (大谷・内藤, 1998)。ただし、水蒸気による天頂遅延の 1 cm は可降水量の 1.5 mm に相当するが、変換係数は季節や地域によって 15% 程度変化する。一方、乾燥空気の天頂方向の積分量は地上気圧にほぼ比例するから、乾燥空気による天頂遅延も地上気圧に比例し、これをしばしば静水圧遅延と呼ぶ。こうして、GPS 解析で推定された天頂大気遅延から地上気圧を用いて静水圧遅延を差し引くことによって、水蒸気による天頂遅延が得られ、それに変換係数を乗じると可降水量が得られる。図 1 は GPS 解析ソフトウェアで位置 (観測点座標) や可降水量が推定されるまでの過程を示したものである (大谷・内藤, 1998)。

なお、GPS 気象学に適用可能な GPS 解析ソフ

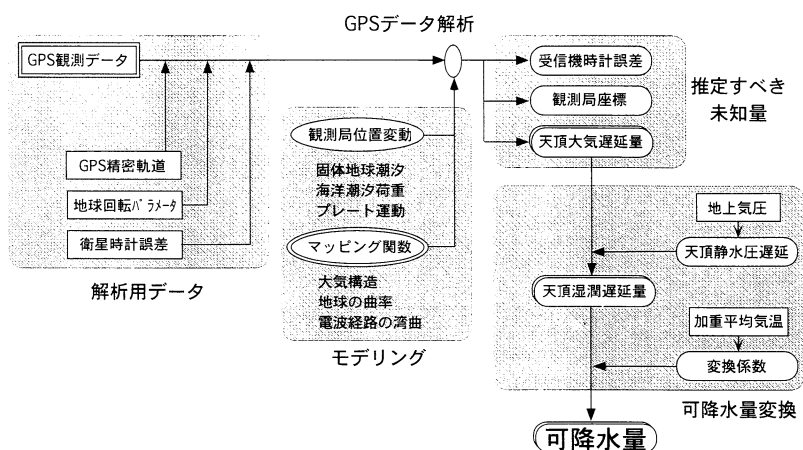


図 1 GPS 観測データから可降水量データが得られるまでのプロセス。
(大谷・内藤, 1998 による)

トウエアには BERNESE, GAMIT, GIPSY と通称される 3 種がある (島田ほか, 1998; 日置ほか, 1998; 宮崎・島田, 1998)。これらは目的に応じてそれぞれ優れた特徴を持つが, リアルタイムの可降水量を必要としない場合は GIPSY が一般的である。

III. GPS 水蒸気情報の気象学への応用

そこで, GPS 可降水量がどの程度の精度を持っているかを見てみよう。図 2 は気象庁のラジオゾンデ観測点の中の 10 観測点とそれらの近傍の GEONET における GPS 観測点を選び, 9 時 (a) および 21 時 (b) における GPS 可降水量とラジオゾンデ可降水量の比較を示したものである (Ohtani and Naito, 2000)。ここで, GPS 可降水量は, GEONET の 3 時間ルーチン解析 (BERNESE 解析ソフトウェアに基づいている) で推定された天頂大気遅延の 3 時間平均値から, ラジオゾンデ観測点における地上気圧を用いて算出した静水圧遅延を差し引いて得られた水蒸気による天頂遅延に変換係数を乗じたものである。

図から GPS 可降水量は, ラジオゾンデ可降水量に対し, 全体平均で -2.7 mm のバイアスを持つが, 標準偏差 2.6 mm でよい一致を示していることがわかる。このとき, バイアスは 9 時にもわずかに見られるが, とりわけ 21 時に顕著である。

このバイアスは海洋潮汐荷重による高度変化, GEONET のルーチン解析に採用されている GPS クラスター解析 (宮崎・畑中, 1998), GPS 受信機の機種の違い, などで生じたことが判明している (Iwabuchi *et al.*, 2000b)。このように, GPS 可降水量はおおむねラジオゾンデ可降水量と同程度の精度を持つことがわかる。

そこで次に, この GEONET の 3 時間ルーチン解析による GPS 可降水量データを用いて日本列島上空の水蒸気の動態を見てみよう。口絵 8-1 は, 夏の終わりに近い 1996 年 9 月 1 日から 2 日にかけて, 大陸からの乾いた寒気が日本上空に南下し, それに伴い南北に伸びる寒冷前線が日本列島を東向きに横断し, 日本列島全体とりわけ東北地方に多量の降水をもたらしたとき (図 4 (b) の天気図参照) の可降水量の振る舞いを示す (岩淵ほか, 1998)。ここで左側の口絵 8-1 (a) は 2 日間の平均値を, また口絵 8-1 (b) はそれからの偏差を 6 時間毎に示したものである。このとき用いた GPS 観測点は 556 点で, 静水圧遅延は気象庁日本域客観解析データの地上気圧値から算出されている。ここに客観解析データとは気象観測値とモデルによる予測値を同化させた気象データで, 通常, 日本域の天気予報はこれを初期値としてモデルで予測される。従って, 客観解析データの地上高度は数値予報モデルに採用されているモデル地形の地

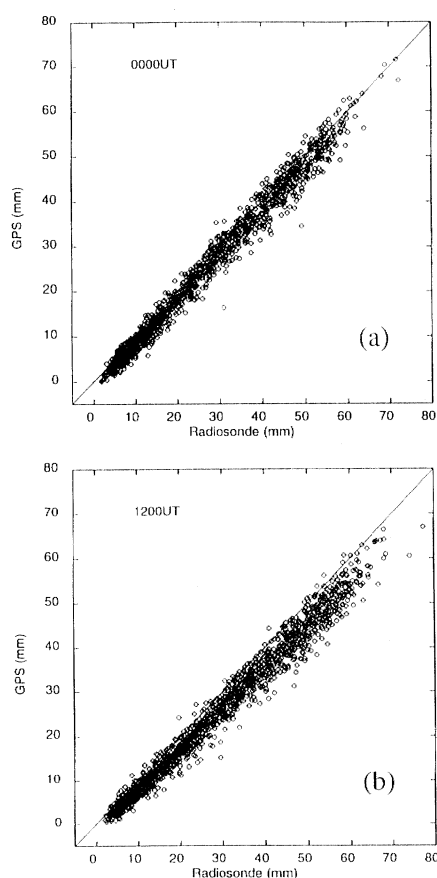


図 2 気象庁ラジオゾンデ観測点近傍の国土地理院全国 GPS 連続観測網 (GEONET) の 10GPS 観測点から得られた GPS 可降水量とラジオゾンデ可降水量との比較。

(a) は 9 時の結果、また (b) は 21 時の結果を示す。ただし、GPS 可降水量は 9 時および 21 時の前後 3 時間の 6 時間平均値を用いている。期間は 1996 年 7 月から 12 月までの 6 ヶ月間である。(Ohtani and Naito, 2000 による)

上高度を指している。

口絵 8-1 (a) から、GPS 可降水量の平均値の分布は東海地方から東北地方にかけて大きく、西日本では比較的小さい(乾燥している)ことがわかる。しかし、注意してみると、中部山岳地帯の可降水量分布は平野部より小さい(乾燥している)こともわかる。一方、口絵 8-1 (b) によると、図 4 (b) の天気図で明らかなように、日本列島を南

北に横たわる寒冷前線に伴って可降水量の南北に横たわる帯がゆっくりと東に移動している様子がわかる。そして、9 月 2 日には、東北地方はその年初めてのカラッとした秋晴れとなった。その結果、北海道を除く日本列島では、たった 2 日間で 40mm 程度の大きな可降水量変化が生じたことになる。

これらの GPS 可降水量データから、気象庁日本域客観解析データから算出した可降水量を差し引いた差 (PWV Difference (GPS-NWP)) を縦軸に、GPS 観測点の高度から気象庁客観解析データの地上高度を差し引いた差 (Height Difference (GPS-NWP)) を横軸にとって、それらの相関を調べると図 3 となる (Iwabuchi *et al.*, 2000a)。図 3 は可降水量差が高度差に依存することを示しているが、これは山岳域の GPS 観測点が盆地などに設置されているために、GPS 観測点高度が数値予報モデルに採用されているモデル地形の高度より低いことによっている。しかし、可降水量差は高度差がゼロであっても負の値を示し、GPS 可降水量が気象庁データに対して負のバイアスを持つことがわかる。この負のバイアスは前章でふれたラジオゾンデとの比較で見られたものと同じ性質を持つもので、今後、GPS 可降水量データを天気予報へ応用するにあたって注意を払う必要があるだろう。

IV. GPS 気象学の測地学への応用

以上の GPS 可降水量は、地殻変動などの監視のために用いられている測地目的の GPS 解析ソフトウェアで天頂大気遅延を推定し、それを可降水量に変換したものである。しかし、近年、水蒸気情報を可能な限り厳密に推定しようとする GPS 気象学が進展するにつれて、天頂大気遅延に加えて、大気屈折率の水平勾配の鉛直積分値 (これをしばしば大気遅延勾配と呼ぶ) を組み込んだ GPS 解析ソフトウェアも実用化された。これは II 章でふれた大気構造の方位に対する一様性の仮定をやや緩めて、現実の大気に近い大気構造の方位非一様性を考慮したものである。この GPS 解析ソフトウェアを用いると、図 3 のような前線に伴う強

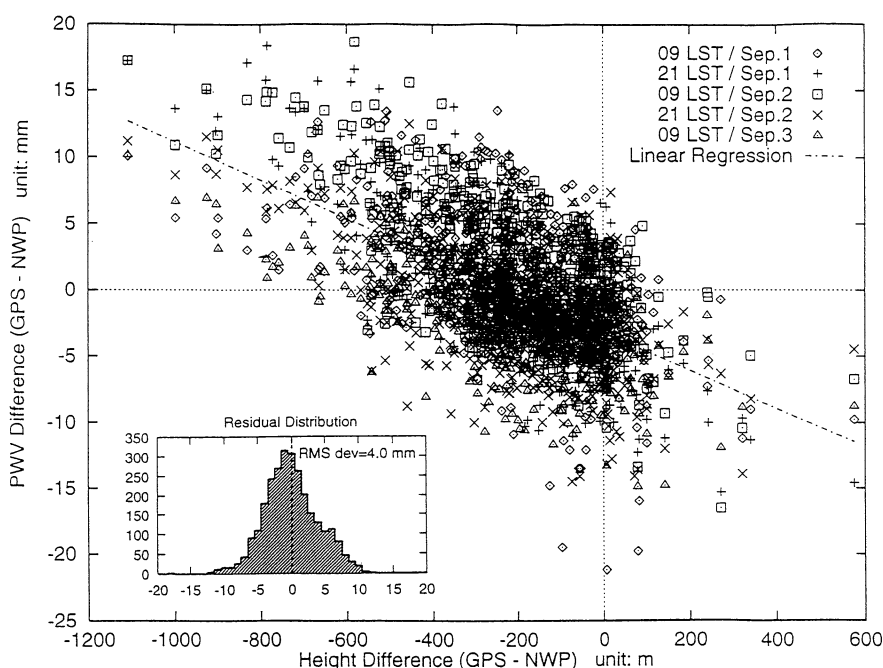


図 3 口絵 8-1 の GPS 可降水量から気象庁日本域客観解析データから算出された可降水量を差し引いた差 (PWV Difference (GPS-NWP)) と GPS 観測点高度から客観解析データの地形高度を差し引いた差 (Height Difference (GPS-NWP)) との相関関係. ここに NWP は客観解析を指している. (Iwabuchi *et al.*, 2000a による)

い水蒸気変動に起因する GPS 水平測位解の見かけのドリフトを除去することが可能となる。

口絵 8-2 (a) および (b) の左側の 3 つの図は、二つの約 2 週間の解析期間において、大気遅延勾配を考慮した測位解 (GS) および考慮しない測位解 (NGS) を求めて、大気遅延勾配ベクトルの分布 (左側の Gradient と記されている図) と NGS および GS の二つの場合の水平測位解ベクトルの 2 週間平均値からの偏差ベクトルの分布 (右側の 2 図) を示したものである (Miyazaki *et al.*, 2000)。ここに (a) および (b) は、それぞれ、図 4 (a) および (b) の二つの天気図で示される熱帯低気圧が関東地方南部に停滞した事例および、前述した寒冷前線が東向きに移動した事例である。また、解析は GPS (PPP: 単独精密測位) 解析ソフトウェアに基づいている。このとき大気遅延の推定は 5 分毎にまた測位解の推定は 1 日毎に行われているので、左側の大気遅延勾配ベクトル (Gradient) の平均偏差図も 1 日平均値で表され

ている。なお、3 つの図のカラーはいずれも同じ大気遅延勾配を考慮して推定された天頂大気遅延の 1 日毎の平均偏差の分布であるが、これは可降水量の平均偏差に相当している。なぜなら天頂大気遅延の絶対値を占める静水圧遅延の寄与が数日程度ではほとんど変化しないからである。また、このとき、大気遅延勾配を考慮した天頂大気遅延は考慮しない値とおおむね一致することもわかった。

まず、熱帯低気圧が関東地方南部に停滞する事例 (口絵 8-2 (a)) では、天頂大気遅延の偏差分布 (カラー) は、熱帯低気圧が停滞する関東南部を中心として同心円状に分布し、それに直交するように大気遅延勾配ベクトル (Gradient) が熱帯低気圧の中心方向に向いて分布していることがわかる。一方、寒冷前線が東向きに移動した事例 (口絵 8-2 (b)) では、天頂大気遅延の偏差分布は南北に横たわる前線に平行に分布し、それに直交するように、大気遅延勾配ベクトル (Gradient)

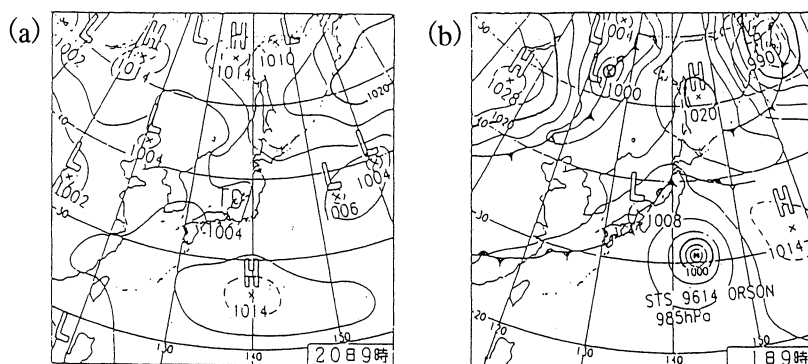


図 4 熱帯低気圧が関東地方南部に停滞した 1996 年 7 月 20 日の事例 (a) および日本列島を南北に横たわる寒冷前線が東向きに移動した 1996 年 9 月 1 日の事例 (b) のそれぞれにおける天気図。(気象庁による)

が西向きに分布していることがわかる。つまり、事例 (a) および (b) のいずれの場合も、推定された天頂大気遅延分布に見られる水平勾配と大気遅延勾配ベクトル (Gradient) の向きはよい一致を示していることがわかる。

次に、大気遅延勾配を考慮しない水平測位解の平均偏差ベクトルの分布 (NGS) は、二つの事例のいずれの場合も大気遅延勾配ベクトル (Gradient) の方向と逆方向を向き、これらも互によく調和していることがわかる。一方、大気遅延勾配を考慮した水平測位解の平均偏差ベクトルの分布 (GS) では、考慮しない場合に見られた水平測位解の平均偏差ベクトルの分布 (NGS) がほとんど消えているのがわかる。つまり、大気遅延勾配を GPS 解析ソフトウェアに考慮したことによって、考慮しない場合に見られた 10mm 程度の大きさの水蒸気変動に起因する水平測位解の見かけの変位ベクトル (ドリフト) が除去されたことがわかる。

そこで、大気遅延勾配を考慮しない測位解 (NGS) から考慮した測位解 (GS) を差し引いた差の南北成分 (North), 東西成分 (East), および上下成分 (Up) の分布を示すと、それらはそれぞれ図 8-2 の右側の 3 つの図となる。事例 (図 8-2 (a)) では、南北方向に卓越する大気遅延の水平勾配 (カラー) を反映して、南北成分 (North) に強い見かけの変位が生じていたこと

がわかる。しかし、見かけの変位は中部日本の上下成分 (Up) にも生じていたことも図は示している。一方、事例 (図 8-2 (b)) では、大気遅延の水平勾配 (カラー) の東西方向の卓越を反映して、見かけの変位はすべての成分で生じていたことがわかる。

以上のように、大気遅延勾配を解析ソフトウェアに考慮することによって、水蒸気の強い変動による見かけの変位を取り除くことが可能となった。これは大気遅延したがって水蒸気量を厳密にとらえようとする GPS 気象学技術の GPS 測地学へのフィードバック成果と言えるもので、これによって湿潤気候の日本列島においても GPS による水平地殻変動の監視精度は mm を達成することが可能となる。しかし、これまでの展開では言及されていないが、GPS 気象学技術による地殻変動の鉛直成分の精度向上はまだ達成されていない。これは今後の GPS 気象学の課題の一つである。

V. 測位手法による地球環境監視の時代へ

以上のように、GPS 観測から大気中の水蒸気の鉛直積分量である可降水量が得られるが、ここで注目されることは、GPS がその幾何学的計測手法 (測位手法) を反映して、大気の熱放射を測定するマイクロ波ラジオメーターなどの物理的センサーに比べ、キャリブレーションフリーの全天候型の水蒸気センサーとしての優れた特性を備えている

ことである。例えば、地球が温暖化すると飽和水蒸気圧の増加に伴って大気中の水蒸気量が増加し、その結果これまでより高緯度地方に降水量の増加がもたらされるが、キャリブレーションフリーのGPSはそのような水蒸気量を長期にわたって監視するのに適していることがわかる。

近年、こうしたGPSを基盤とした測位手法による地球観測技術は急速な発展を遂げつつある。ここでは詳述しないが、例えば、はじめにふれた宇宙基地型GPS気象学は低高度衛星でGPS衛星からの電波を捕らえて、その位相遅れから電離層密度や大気温度を計測するが、同時にそうして決定された衛星軌道から地球重力場をこれまでより精密に決定することも可能である。さらに、同一軌道上の近接した二つの衛星の相対速度変化を計測して、地球重力場の時間変化を海水位に換算して1cm程度の精度で監視する測位手法による衛星重力ミッションも実用化されつつある(古屋・内藤, 2000)。これを海面高度計と組み合わせると、地球温暖化による海面上昇や大陸上の水資源分布変動などの実態が明らかにされるはずである。これらの測位ミッションはいずれも軽量・低コストであることも大きな特徴である。しかし残念なことに、わが国のこの分野の技術開発は欧米に大きく水をあけられている。

文 献

- 日置幸介・島田誠一・大谷 竜 (1998): GPS 解析ソフトウェア. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 73-92.
 古屋正人・内藤勲夫 (2000): 新しい質量分布のリモートセンシング. 一次世代の重力計測とその役割. 天気, **47**, 347-355.
 市川隆一・田中寅夫 (1998): 大気遅延とマッピング関

- 数. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 35-48.
 岩淵哲也・内藤勲夫・萬納寺信崇・木村富士男 (1998): 国土地理院 GPS/SINEX データから得られた日本列島上空の可降水量の動態. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 133-144.
 Iwabuchi, T., Naito, I. and Mannoji, N. (2000a): A comparison of Global Positioning System retrieved precipitable water vapor with the numerical weather prediction data over the Japanese Islands. *J. Geophys. Res.*, **105**, 4573-4585.
 Iwabuchi, T., Miyazaki, S., Heki, K. and Naito, I. (2000b): Estimating atmospheric delays in Global Positioning System array over the Japanese Islands in summer. *J. Geophys. Res.*, submitted.
 宮崎真一・畑中雄樹 (1998): 国土地理院 GPS 連続観測システムの概要. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 105-132.
 宮崎真一・島田誠一 (1998): GPS データファイル. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 93-104.
 Miyazaki, S., Iwabuchi, T., Heki, K. and Naito, I. (2000): An impact of estimating tropospheric gradient on precise positioning over the Japanese Islands in summer. *J. Geophys. Res.*, submitted.
 内藤勲夫編 (1998): GPS 気象学. 気象研究ノート, **192**, 日本気象学会.
 大谷 竜・内藤勲夫 (1998): GPS 可降水量の物理と評価. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 15-34.
 Ohtani, R. and Naito, I. (2000): Comparisons of GPS derived precipitable water vapors with radiosonde observations in Japan. *J. Geophys. Res.*, in press.
 島田誠一・日置幸介・畑中雄樹 (1998): GPS 解析の概要. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 61-72.
 津田敏隆 (1998): GPS を用いた成層圏温度プロファイルの観測. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 159-178.
 辻 宏道 (1998): GPS の原理. 気象研究ノート「GPS 気象学」, **192**, 1-13.

(2000 年 10 月 10 日受付, 2000 年 11 月 13 日受理)