

第1回 GPS 気象学ワークショップ報告*

畑 中 雄 樹^{*1}・辻 宏 道^{*2}・市 川 隆 一^{*3}
木 股 文 昭^{*4}・萬納寺 信 崇^{*5}・野 村 厚^{*6}
青 梨 和 正^{*7}・柴 田 彰^{*8}・内 藤 勲 夫^{*9}

1. はじめに

8年ほど前、年1回の気象庁数値予報課の専門家を講師とした国立天文台水沢の勉強会に萬納寺信崇氏を招くこととなった。これは筆者と当時北大の院生だった市川隆一氏が「大気遅延」を現実の大気現象に近い数値予報値に基づいて厳密に計算しようと考えていたからである。

ここに、大気遅延とは、大気中の電波の伝搬速度が真空中のそれより小さいことによって生じる、衛星やクエーサーからの電波の到達時間の遅れのこと、第1近似では、この時間遅れに真空中の伝搬速度を乗じた「超過距離」として定義される量である。つまり、大気による伝搬距離の超過が宇宙測地の誤差となるわけである。大気遅延は、一般に乾燥空気の寄与 (Dry Delay) と湿潤空気すなわち水蒸気の寄与 (Wet Delay) の和で近似されるが、それらの変動はいずれも対流圏で卓越していることから、しばしば対流圏遅延 (Tropospheric Delay) と総称されている。このうち最大の誤差源となるのが Wet Delay で、今回のワークショップの主題である。ただし以下では大気遅延と可降水量は共に mm (あるいは cm) 単位で表されるが、

それぞれの物理的意味は異なることに注意されたい。

そこで、このときの勉強会を国立天文台外の測地分野の人たちにも呼びかけたところ、様々な機関から10数人の専門家が集まり、勉強会はさながら大気遅延に関するミニ研究会となった。今回のワークショップのキーパーソンの1人である辻宏道氏もその1人である。また、その後の勉強会には野村厚氏にも講師になっていただいた。

さて、ミニ研究会は市川氏の GPS (Global Positioning System: 全球測位システム) における大気遅延の基本原則についての講演から始まったが、その途中で「それほど、水蒸気が効くのなら、GPS データからの水蒸気情報を気象分野で利用できるのではないか」と言う意味のコメントが講師の萬納寺氏から飛び出たのである。大気遅延誤差を克服しようと集まったはずの測地分野の参加者全員は、この突然の発言で、困ったようなうれいような複雑な思いの爆笑となった。実は、これが日本の GPS 気象学の原点となったと筆者は記憶している。このとき参加者の誰もがあの着想、すなわち、現在の GPS 気象学を抱いたに違いない。これは GPS 衛星の配置すらまだ未完成の頃の話である。

しかし、当時は GPS 発祥の地の米国でさえ GPS 気象学の兆しはまったくなかったようである。けれども、地上のラジオメーターを用いた大気遅延の研究は大分進んでいたようで、天頂方向の大気遅延量とラジオメーターで得られた可降水量が1次式で表される関係にあることをすでに観測的に見いだしていた (Hogg *et al.*, 1981). Bevis *et al.* (1992) の GPS 気象学の提唱はこの関係式の物理的解釈の結果である。と言うのも、これと同じ発想はミニ研究会の後に筆者らによっても提案されたが、残念ながら、それをさらに発展させる余力はなかった。宇宙技術後進国のわが国ではそ

* Report on the first Workshop of GPS Meteorology in Japan, Tokyo, July 1995.

^{*1} Yuki Hatanaka, 国土地理院測地部測地第二課.

^{*2} Hiromichi Tsuji, 国土地理院測地部測地第二課.

^{*3} Ryuichi Ichikawa, 通信総合研究所関東支所.

^{*4} Fumiaki Kimata, 名古屋大学理学部.

^{*5} Nobutaka Mannoji, 気象庁数値予報課.

^{*6} Atsushi Nomura, 気象庁数値予報課.

^{*7} Kazumasa Aonashi, 気象研究所予報研究部.

^{*8} Akira Shibata, 気象研究所海洋研究部.

^{*9} Isao Naito, 国立天文台地球回転研究系.

© 1996 日本気象学会

れ以前に克服すべき問題が山積していたからある。

それから6年が過ぎた。今やわが国はGPSを生み出した米国でさえ羨むほどのGPS大国となった。加えて、本年1月の阪神淡路大震災はそれをさらに加速しつつある。折しも、文部省科学研究費の支援による大気遅延に関する総合研究（代表：田中寅夫京都大学防災研究所教授）がスタートした。また、気象庁でもGPS気象学の勉強会を始めた。正に機は熟したのである。そこで、田中寅夫氏、気象庁数値予報課の佐藤信夫氏、国土地理院の辻宏道氏、そして筆者の4人が世話人となって、わが国のGPS気象学に関する第1回ワークショップを1995年7月25日に気象庁で開催することとなった。

ワークショップは、筆者による趣旨説明に続いて、GPSによる測地分野の4つの講演（G1, G2, G3, G4）と気象分野の3つの講演（M1, M2, M3）の順に、それぞれ、東京大学地震研究所の加藤照之氏と数値予報課の隈健一氏の進行の下で行われ、最後に田中寅夫氏の進行の下で、今後の方策などについて総合討論がなされた。以下はその概要である。一読しておわかりのように、今回は測地分野と気象分野のお見合いが目的であった。そこで、講演者には、講演内容、GPS気象学への期待、現状での問題点に焦点を絞ってまとめた。

（内藤勲夫）

2. GPSの仕組みと衛星軌道の精密決定 [G1]

GPS気象学への導入として、まずGPSの概要を説明した。GPSシステムの全体は、①宇宙セグメント（正確な時計を搭載し、信号の乗った電波を地上に送信するGPS衛星）、②コントロール・セグメント（GPS衛星の管制局）、③ユーザーセグメント（GPS受信機）の3つの部分から構成される。

受信機で観測される搬送波位相は衛星や受信機の時計誤差、整数波長分の不確定バイアス、電離層遅延、そして大気遅延の影響を受けている。GPS測量では二重位相差や2つの周波数の線形結合などの工夫によって多くの誤差要因を打ち消すことができる。しかし、大気遅延情報を距離に関する情報から分離するのは比較的難しく測量誤差の最大の要因とされてきた。大気遅延量の衛星高度角への依存性（マッピング関数と呼ばれる）を利用して、GPSデータから大気遅延量を推定する方法は比較的最近の技術である。

GPS測量ではたいいていの場合GPS衛星の軌道は既知として扱うので、高精度の測量を行うためには、

GPS衛星の精密軌道情報（精密暦）が必要である。0.1 ppmオーダーのGPS測量誤差が大気遅延量によるものとする、GPSデータからそれを推定する場合にも、衛星軌道に起因する誤差は同レベル以下に押さえる必要がある。

測地学の立場から見ると、水蒸気による電波の遅延はノイズであった。もし高時空間分解能の数値予報情報が大気遅延量の推定に適用可能ならば、測量精度の向上が期待できる。一方、高密度なGPS観測網のデータは気象現象の研究にも寄与するであろう。但し、GPSデータをリアルタイム性の要求される天気予報に用いる場合には、精密暦の作成に要する時間がボトルネックとなる。精密な予報暦の作成が技術的課題の1つとなる。

（畑中雄樹）

3. GPSによる地殻活動監視システムの仕組みとその現状 [G2]

25個のGPS衛星が地球を巡り、インターネットで衛星の精密暦が流れ、解析ソフトウェアが驚異的な進歩を遂げた今日、GPSによる地殻活動監視は実用期を迎えた。国土地理院では、1994年に関東・東海地域に100か所、その他全国に100か所の連続観測点を設置し、観測点の座標を毎日1 cmの精度でモニターしている。現在もシステムを拡張中で、1996年には600点からなる世界最大の連続GPS観測網が実現する（第1図参照）。

GPSのような大気圏外からの電波を用いて地上の測位を行う宇宙測地にとって、大気遅延の扱いは最後のフロンティアである。かつてM. Bevisは、「大気遅延：測地学ではノイズ、気象学ではシグナル」と述べた。GPS気象学の立場を端的に表している。湿潤なアジアモンスーン帯に属し、稠密なGPS連続観測網と精緻な数値予報技術を抱える日本こそGPS気象学の最適地であろう。

今回は測地・気象関係者の初めてのお見合いだったが、双方のGPS気象学に対する期待および問題点が明らかとなった。測地側としても数値予報データの活用によりGPS測位の鉛直精度が向上する可能性がある。幸せな結婚の予感がある。しかし、現状では次のような問題がある。①現行のGPS観測では気象要素を測定していないので、GPSで求めた天頂方向のWet Delay (Zenith Wet Delay: ZWD) を可降水量に変換できない。周辺の気象観測値を内挿するか、ZWDを直接数値予報に



第1図 1996年完成予定の国土地理院における地殻変動監視のためのGPS連続観測網。

入力するなどの工夫が必要である。②数値予報の業務にGPS水蒸気情報を利用するためには、GPSの結果を観測終了後3時間以内に求める必要がある。これは現行のシステムでは不可能である。今後、精密な予報暦などの技術開発や、データ収集サイクルの変更などが必要となる。③近い将来、気象データの時間分解能が3時間になった場合でも、それをGPS信号のレイトレーシングなどに利用して測位精度を向上させるためには、気象データの時間補間を必要とする。それによって本当にGPSの精度が上がるか否かの検証が必要である。(辻 宏道)

4. GPS測位における大気遅延誤差とGPS気象学の考え方 [G3]

GPS測位の最大の誤差要因である大気遅延(特に水蒸気に起因する遅延)は極めて重要な気象情報でもある。大気遅延の大半を占めるのはDry Delayであるが、その大半は地上気圧に依存する。一方、Wet Delayは水蒸気分圧と気温の鉛直分布に依存し、その天頂方向成分(ZWD)と可降水量はほぼ1次式で近似できる関係にある。

GPS気象学の基本的考え方は、地上気圧からDry Delayを算出しておき、それをGPSデータから推定された大気遅延量から差し引いてWet Delayを取り出し、可降水量に変換するものである。これによって、わが国の場合は、原理的には数10分の時間分解能と数10kmの空間分解能で可降水量を求めることができる。ただし、これが可能なのは陸上に限られるが、船舶やブイを利用すれば海上でも可能である。

筆者らは、気象庁の萬納寺氏が開発した10km予報モデルデータに基づき、GPS信号のレイトレーシングによる大気遅延量の高精度評価法について検討してきた。その結果、水蒸気が多い夏期ではGPS測位に1cmオーダーの大気遅延誤差が生じ得ることを示した。この誤差は主として水蒸気の非一様分布によるWet Delayの方位異方性に由来している。さらに、GPSデータの可降水量情報を数値予報におけるデータ同化システムに入力することによって、数値予報とGPS測位の双方の精度を向上させ得ることも提案した。

一般に、Wet delayと可降水量を関係づける係数は気温の鉛直分布に依存するので、可降水量を高精度で評価するためには、この係数の温度依存性を厳密に評価しておく必要がある。いずれにしても、わが国でGPS気象学を展開するためには気象庁の数値予報システムによる3次元格子点気象データが不可欠である。(市川隆一)

5. GPS/ラジオゾンデ観測から求めた大気遅延量の比較検討 [G4]

筆者らは中部地方、ユーラシア・フィリピン海・オホーツクプレート境界域におけるジオダイナミクスや地震予知を議論する目的でGPS観測を実施している。この数年間で、この分野は高密度GPS観測網を反映してmmで議論可能な状況に至りつつある。しかし、これらGPS観測の主要な誤差要因である大気遅延は、未だ十分には解決されていない。一方、GPS観測から大気遅延量を確率的に推測する手法も提案されている。そこで、静岡―八丈島GPS基線において、GPS観測から推測される大気遅延量と八丈島と浜松におけるラジオゾンデ観測から計算した大気遅延量を、1994年1月、4月、7月、9月の各1か月について、比較検討した結果、これらの大気遅延量に年周変化が見られること、安定した気象条件下では概略的ながら両者は対応していることを見いだした。

筆者らのように GPS 観測からジオダイナミクスを議論する者にとり、大気遅延はあくまでも誤差要因、いわゆるノイズである。しかしながら、ノイズをより明確にすることにより、筆者らにとってのシグナル、ジオダイナミクスもより鮮明になると考える。「1000点 GPS 観測網の日本」にふさわしく、「空と地」の分野での密接な協力により、「空と地」の研究が画期的に前進することを期待する。

今回の検討は概略的に過ぎなかったが、今後は Dry Delay を地上気象データから算出し、Wet Delay を推定する予定である。

なお、この研究は、国土地理院の辻宏道氏の協力を得て、岐阜大学4年生の車戸知子さんの卒業研究の一環として行ったものである。Aerological Data からのデータ入力は卒業研究にふさわしい？大変な労力だった。GPS 気象学を機に「空と地」の間で、ネットワーク時代にふさわしいデータ交換が実現することを願う。

(木股文昭)

6. 数値予報の仕組みと気象庁現業用領域モデル [M1]

まず、気象とは縁のない？測地分野の人に数値予報の全体像をつかんでもらうことを目的として、数値予報の仕組みを簡単に解説した。数値予報は客観解析と数値予報モデルからなること、客観解析値は数値予報モデルの初期値に使われるが、なんといっても観測データがなければ始まらないことを説明した。また実用的な数値予報のためには観測データは速やかに収集される必要があることを述べた。現在、00 UTC と 12 UTC 初期値の2日先までの数値予報は、観測時刻の後3時間のうちに集まってくる観測データを使って客観解析を行い、これを初期値として数値予報を始めている。

近い将来、数時間程度の短時間の数値予報が行われるであろう。例えば3時間毎の初期値の6時間予報とか、毎時の初期値の3時間予報といった形態が考えられる。その時には観測後1～2時間程度で手に入る観測データを使って客観解析を行い、初期値に使われるであろう。このような予報は空間スケールが100 km 程度の豪雨のような現象の予報に使うことが主な目的であるが、そのためには GPS で観測されるような時空間分解能の高い観測データを用いて初期状態の水蒸気の分布を知ることが極めて有効であると思われる。

GPS で観測される水蒸気データを実用的な数値予

報に使うためには、観測データは3時間以内に気象庁の計算機に入電している事が必要である。将来、短時間の数値予報に利用するためにはさらに早く、観測後1～2時間程度で手にはいなければならない。

(萬納寺信崇)

7. 4次元データ同化システムの仕組みと水蒸気解析 [M2]

数値予報の初期値を作る4次元データ同化システムとは何か、特に水蒸気場の解析において現在どのような問題点があるかなどについて解説し、これらの点から GPS データから得られる上層水蒸気量データへの期待を述べた。

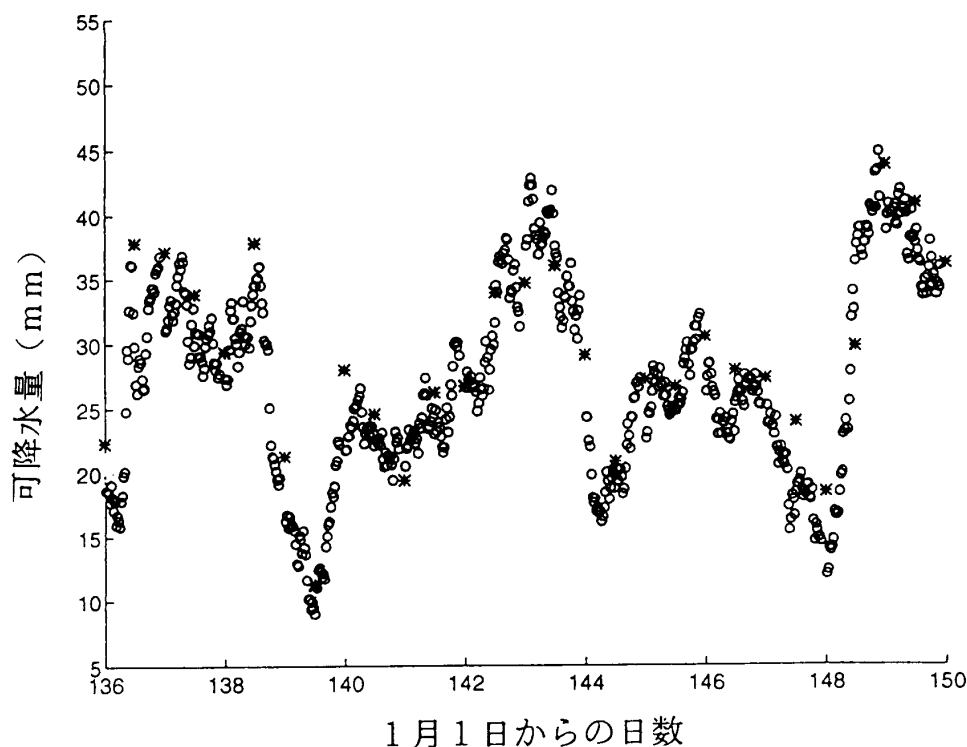
水蒸気場は気圧や風、気温の場に比較して空間的に変動が大きいのが特徴である。ところが上層の水蒸気を観測する手段は極めて少なく、特に SSM/I 衛星データの期待できない陸上ではラジオゾンデデータのみである。しかし、ラジオゾンデデータは300-400 km 間隔で、しかも1日2回観測されるに過ぎない。これでは集中豪雨等を監視する微細格子モデルの初期値の作成にははなはだ不足であり、GPS による高密度、高頻度、高精度の上層水蒸気量データへの期待は非常に大きい。特に、第2図で明らかのように、可降水量に換算して誤差1.5 mm という値は予報モデルの誤差の1/6、SSM/I の誤差の1/2であり、ラジオゾンデと同程度またはそれ以上と推定される。このデータの使用により、日本列島上の水蒸気場の初期値が大幅に改善されることが予想される。

ただし、実際に GPS データを日々の数値予報に導入するためには、そのような高精度の水蒸気データが数値予報を実行する前に技術的に作成でき、それが気象庁に集められるかどうかが必要の条件で、これが第1の問題になるであろう。

(野村 厚)

8. SSM/I 可降水量および降水域情報のデータ同化の降水擾乱の予報へのインパクト [M3]

SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) は米国防総省軍事気象衛星に搭載されているマイクロ波パッシブセンサーである。SSM/I からは主に水に関する量を定量的に算出することができる。SSM/I から算出された、可降水量および降水域情報(共に海上のみ)の有効性を見積るために、これらのデータを用いて、日本域スペクトルモデル(JSM)の相対湿度と発散場を改変するデータ同化手法を開発した。このデータ同



第2図 GPS観測から推定された米国中部における大気中の水蒸気可降水量の時間変化. GPS による観測値は○印で, またラジオゾンデによる観測値は*印で示されている. Duan *et al.* (1995) による.

化手法は以下の手順からなっている. ①通常の客観解析値を用いて JSM の予報を行い, SSM/I データのデータ同化のためのバックグラウンドデータを作成する. ②SSM/I で観測された降水域では, 相対湿度を気温減率の関数である臨界相対湿度まで増やし, JSM の降水スキームが降水を作るようにする. ③SSM/I の観測非降水域では, SSM/I 可降水量とバックグラウンドデータの可降水量の差を各レベルの相対湿度の差として分配し, バックグラウンドデータの相対湿度を改変する. この分配には, JSM の可降水量の予報誤差と各レベルの相対湿度の予報誤差の統計的相関を利用した. ④相対湿度の改変の後に, 降水過程を含む非線形ノーマルモードイニシャリゼーションを行い, バックグラウンドデータの発散場を調節する.

本研究のデータ同化手法は1988年7月12日21 UTCの事例で, 降水予報の位置ずれを12時間以上にわたって減少させた. 予報実験の結果は, ①モデルの降水域かつ観測非降水域では可降水量のデータ同化が見掛けのモデル降水域を消すのに有効であった. ②SSM/I の降水域情報のデータ同化は観測の降水域にモデル降水を作るのに有効であった.

可降水量のデータ同化はまた対流圏下層の相対湿度の予報も改善した. これは可降水量の予報誤差とこのレベルの相対湿度の予報誤差が高い統計的相関を持っていることが原因である. (青梨和正・柴田 彰)

9. 今後の展望

以下はワークショップで論じられたわが国のGPS気象学への期待, それを実現する上での現状での問題点などを筆者の見解を加えてまとめたものである.

まず, 気象研究所の青梨氏と柴田氏の講演 [M3] で明らかなように, 海洋上での衛星ラジオメーターによる可降水量データの数値予報への取り込みは降水量予報の改善に大きなインパクトをもたらすことが判明している今, 陸上の可降水量を得意とするGPS情報の数値予報への取り込みは大いに期待できると言ってもよいだろう. とりわけ, 第1図のようなわが国の高密度のGPS観測網は, 可降水量の気候学的な全球分布を得ることを主なねらいとする米国のGPS気象学とはまったく異にする, 独自のGPS気象学を促すはずである. それがどんなものかは天気の話者にはすでにお見通しであろう.

しかし、そうしたユニークな GPS 気象学を推進するに当たって、1つの大きなネックが存在する。それは GPS データからの可降水量を、リアルタイムを本務とする数値予報システム [M1, M2] に取り込むためには、GPS 情報とりわけ GPS 衛星の軌道の「解析予測」を必要とすることである [G1]。この問題は、GPS が米国の軍事技術であるために、そう簡単には解決しそうなものと思われられるかもしれないが、実はそうではないと筆者は考えている。

その1つの背景に、米国が地球環境監視のために軍事情報の公開を現在真剣に検討し始めていることがある。GPS システムを創造した米国にしてはやや出遅れの感のある Bevis らによる GPS 気象学の提案もこのことと無関係ではないと筆者は見ている。一方、畑中氏の詳細な解説 [G1] と正確な現状認識は、この問題が国土地理院の独自の力で解決可能であることを物語っている。そうゆうわけで、筆者はこの問題の解決を楽観を持って見守っている。

ただし、リアルタイムを必要としない場合は、現状でもまったく問題はなく、メソスケール気象学、気候学などの分野は今後の GPS 気象学の展開に大いに期待してよいだろう。実際、田中寅夫氏らのグループは分厚い積乱雲中の水蒸気の立体構造を GPS 信号のレイトレーシング（トモグラフィー）技術でとらえる観測を実施中であり、また、米国は、全球的な水蒸気の気候学的情報を得るために、GPS 受信機に内蔵するための CLAM と呼ばれる気圧、気温、湿度のセンサーを開発済みである (Rocken *et al.*, 1995)。

これらとは別に、もし GPS 可降水量データを取り込んだ高時空間スケールのデータ同化システムが実現し [M1]、その出力の気象情報に基づいて GPS 信号のレイトレーシングが可能になると、大気遅延誤差を mm レベルに引き下げることにも可能である [G2]。それによって、GPS による地殻変動監視情報の信頼度は飛躍的に向上し、地震予知に貢献することが期待される。しかし、市川らの結果 [G3] はシミュレーションに基づくものであるから、辻氏も指摘するように [G2]、この点に関しては国土地理院などの GPS 測量のルーチンの現場で実際に検証してみなければ何とも言えないだろう。

しかしながら、筆者はこの点に関しても楽観している。地殻変動監視における大気遅延誤差は主として Wet Delay の方位異方性で生じているから [G3]、それを評価するための時間補間された気象データの作成

[G2] は、GPS 観測後に得られる精密暦 [G1] に基づいたより信頼度の高い GPS 可降水量データを、GPS 専用のデータ同化システムに入力することによって、容易に可能だからである。そうした格子点気象データに基づいて Wet Delay の方位異方性 [G3] をパラメタライズしたマッピング関数 [G1] を用いるか、トモグラフィーを展開するならば [G2]、ほぼ100%までの大気遅延誤差の推定が可能であろう。

ついでに言及すると、こうした手法によって、高時空間分解能の水蒸気情報が得られると言うことは、従来より格段に高い信頼度を有する降水量（正確には降水量と蒸発量の差）、従って陸水（新しい水：Fresh Water）情報がほぼ日本列島全体で得られることを意味する。この陸水情報は、水文・水資源分野は言うに及ばず、地殻内部の古い水の湧出で生じる地下水変化を予知情報とする地震予知分野においても基本的な役割を果たすに違いない。

わが国には「水を制する者天下を制す」との名言がある。水蒸気を制して集中豪雨予報と地震予知に貢献しようとするのが日本の GPS 気象学の真のねらいである。

終わりに、ワークショップの開催にかゆいところには手が届くようなご配慮をいただいた気象庁数値予報課の室井ちあし氏ほかの皆さんにお礼を申し上げる。

(内藤勲夫)

参考文献

- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. W. Ware, 1992: GPS Meteorology: Remotesensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **97**, 15787-15801.
- Duan, J., M. Bevis, P. Fang, Y. Bock, S. Chiswell, S. Businger, C. Rocken, F. Solheim, T. Vanhove, R. Ware, S. McClusky, T. Herring, and R. W. King, 1995: GPS Meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water, submitted to *J. Appl. Meteor.*
- Hogg, D. C., F. O. Guiraud, and M. T. Decker, 1981: Measurement of excess transmission length on earth space path, *Astron. Astrophys.*, **95**, 304-307.
- Rocken, C., F. S. Solheim, R. H. Ware, M. Exner, D. Martin, and M. Rothacher, 1995: Application of IGS data to GPS sensing of the atmosphere for weather and climate research, to be submitted.