

GPS データを活用した大気重力波の研究

—2003年度日本気象学会賞受賞記念講演—

津 田 敏 隆*

1. はじめに

この度は名誉ある日本気象学会賞を頂きまして心より感謝致しております。私はこれまで主に MU レーダーや流星レーダーを用いた地上からの大気波動の観測的研究を進めてきましたが、今回、受賞対象として取り上げて頂いたのは、衛星観測の一種である GPS 掩蔽に関する研究成果です。

GPS 掩蔽は、近年急速に発展している GPS 気象学の主要な研究課題のひとつです。この計測法では高度約1000 km 程度の低軌道 (LEO : Low Earth Orbit) を周回する小型衛星から見て、地平線に沈む GPS 衛星から送られてくる電波を受信し、大気圏・電離層を GPS 電波が通過する際の遅延・屈折から大気状態を計測します。つまり、人工電波源を用いた Active Limb Scan のリモートセンシング法です。

私がこの課題に取り組み始めてまだ10年程度しか経っていません。このテーマに関係する最初の論文を公表してからわずか数年間の研究業績でしかないこと、さらに GPS 気象学の他課題で多くの優れた研究成果が挙げられていることを考えると、このような栄えある賞を受けることが大変心苦しい次第です。

以下に私が GPS 掩蔽の研究に足を踏み入れた経緯、ならびにその魅力と将来の発展についてご紹介致します。

2. きっかけ

私が所属する京都大学生存圏研究所 (2004年4月に宙空電波科学研究センターと木質科学研究所を再編統合して新設) では、1984年以来、滋賀県甲賀市にある信楽 MU 観測所を全国共同利用に提供しています。共

同利用研究の多くは主要大型設備である MU レーダーを用いた大気・電離層観測ですが、共同利用者が多種多様な装置を持ち込んで複合観測を行う場合もあります。そのひとつとして、京大防災研の田中寅夫教授を中心とした研究グループが、1995年11月13~17日に信楽 MU 観測所周辺に24台の GPS 受信機を数百 m 間隔で配置して、GPS 気象学に関する国内では最初の大規模な集中観測を行いました (吉原ほか, 1999)。この実験の主目的は GPS 電波の大気中での伝搬遅延から水蒸気積分量を推定し、その水平変化を調べることでした。気象場として参照するために MU レーダーで対流圏の風速変動を観測しましたが、その際に共同利用の応対をしたことで、私は GPS 気象学という新興研究分野に触れました。

この国内では初の GPS 稠密観測を行った際に、観測所に集まって夕食を摂りながら、「GPS の測位精度を 1 mm 以下にするにはどうするか」についていろいろな議論がなされました。GPS で用いられるセシウム原子時計の周波数安定度を考えれば、単純な距離計測精度として (真空中で) 1 mm を達成することは可能でしょう。しかし、大気や電離層といった伝播媒質の影響などを考えると、衛星測位として実現することは困難です。ようやく GPS カーナビが普及し始めた頃でしたから、いきなり 1 mm の位置精度を GPS で達成できるかはおおいに疑問があったものの、大変面白いと感じたのが、私が GPS 気象学に興味を抱ききっかけでした。

3. GPS 気象学

GPS とは20数台の衛星群から発射されるマイクロ波を受信して、位置と時刻を正確に知る衛星測位システムです。当初、軍用の航法支援のために米国で開発されましたが、現在では民生用にも広く開放されていて、水 (食料)、電気 (エネルギー)、ガソリン (輸送)、

* 京都大学生存圏研究所。

—2004年11月29日受領—

—2005年11月15日受理—

電話（通信）に次ぐ 5 番目のライフラインとされるまでに一般生活に浸透しています（例えば、2000 年 5 月 1 日の米国ホワイトハウスの報道発表）。

GPS 電波が大気中を伝播する際に起こる遅延から水蒸気量を推定する新しい観測手法が 1990 年代初めに黎明期を迎えました。測地学と気象学の学際分野である、この「GPS 気象学」の発展は目覚しく、国内でも 1996 年春の地球惑星科学関連学会合同大会で特別セッションが設けられました。また、国際動向に呼応して、1997 年度から 5 年間にわたり、東京天文台の内藤勲夫氏、気象研究所（当時）の故中村 一氏が中心になって科学技術振興調整費の研究プロジェクト「GPS 気象学」が推進されました。

このプロジェクト実施に先立つ計画会議が 1996 年夏につくばで開催されました。既に述べました信楽でのキャンペーン観測に関する成果発表もあったため、私も出席しましたが、せっかく参加するのなら何か GPS 気象学関係の報告をするようにと内藤先生から渡された資料が Melbourne *et al.* (1994) による“The application of space borne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring”でした。

この報告書は、LEO 衛星による GPS 掩蔽観測の具体的な構想を示したもので、その後の研究指針となっています。つくばでの研究会でその概要を紹介したところ、当時、編集が検討されていた気象研究ノートにも執筆するよう要請され、「GPS 気象学」（第 192 号）の第 11 章、「GPS を用いた成層圏温度プロファイルの観測」として抄訳を掲載しました（津田、1998）。

「GPS 気象学」プロジェクトでは地上に設置した GPS 受信機による水蒸気観測が中心でしたが、GPS 掩蔽も国内で検討すべきではないかとの機運が高まり、私がその課題を分担することになりました。

4. GPS 掩蔽

世界初の LEO 衛星による GPS 掩蔽実験は米国の UCAR によって実現されました。1995 年 4 月 3 日に NASA JPL が開発した重量約 10 kg の GPS 受信機（Turbo Rogue）を搭載した小型衛星 Microlab 1 が低高度の円軌道（高度 750 km、軌道傾斜角 70°）に打ち上げられました。この実験は GPS/MET（GPS Meteorology）と呼ばれ、GPS 掩蔽による大気観測に大きな足跡を残しました（Ware *et al.*, 1996; Rocken *et al.*, 1997）。

その当時私はこの GPS/MET 実験データが公開さ

れていることを知らず、田中寅夫先生のご教示により、ようやく 1996 年 11 月に UCAR にデータ利用申請をしました。GPS/MET は 1997 年 2 月まで継続されましたが、その間に蓄積された観測データを用いて行った研究が今回の受賞対象となりました。

ひとつの LEO 衛星により 24 個の GPS 衛星に対して 1 日に 250 回程度の掩蔽現象が起こります（アンテナが 1 基の場合）。しかし、品質チェックをパスする良質なデータ数は 150–200/日程度です。なお、GPS/MET 実験は 1995 年 4 月から 1997 年 2 月まで継続されましたが、GPS 掩蔽データは間欠的ないくつかの特別観測期間に集中しており、2 年間余りの合計で約 11,000 のデータしか得られませんでした。これは GPS がまだ軍用目的優先で、使用制限が課せられたためです（2000 年 5 月にこの制約が解除されました）。

GPS/MET 以降にいくつかの GPS 掩蔽実験が行われていて、現在、観測を継続しているのは、ドイツ・GFZ とアルゼンチンの研究機関が米国・JPL と共同で実施している、それぞれ CHAMP および SAC-C と呼ばれる LEO 衛星観測です。CHAMP 衛星は 2000 年 7 月に打ち上げられ、2001 年 5 月以降は定常的におよそ 100–150/日の掩蔽データを取得しています。GFZ、JPL それに UCAR はそれぞれ独自に CHAMP データを解析しており、2003 年末の時点で 12 万を越えるプロファイルが処理・公開されています。一方、SAC-C は 2000 年 11 月に打上げられ、JPL がデータ処理を担当しています。これらのデータは公開されていて、誰でも簡単に利用できます。

5. GPS 掩蔽による温度測定

GPS 掩蔽観測の原理は、気象研究ノート「GPS 気象学」に詳述しています（津田、1998）。また、2000 年秋季大会（京都）で企画されたシンポジウム「人工衛星からの大気観測—その歴史的展開—」の中で「GPS を用いた気象観測」として講演し、さらに、「天気」誌上にも解説記事を掲載しました（津田、2001）。従いまして、本稿では観測原理の概略説明に留めます。

成層圏以下の非電離の大気中では大気屈折率 n は大気圧 p (hPa)、温度 T (K) および水蒸気分圧 e (hPa) を用いて、

$$(n-1) \times 10^6 = 77.6 p/T + 3.73 \times 10^5 e/T^2 \quad (1)$$

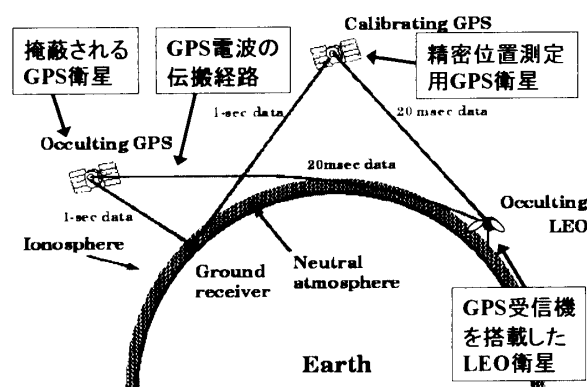
と表されます。第 1 項は大気密度に比例しますので、高度とともに指数関数的に減少します。一方、第 2 項

は対流圏下部の水蒸気の影響によります。なお、式(1)では省略しましたが、高度約60 km 以上の電離層では、電子密度と電波周波数に依存する項が屈折率を支配します。

第1図の概念図にあるように、地平線付近に見えるGPS衛星から発射された電波が大気をかすめて反対方向にあるLEO衛星に到達する場合、 n の小さい層から大気に入り、順次 n の大きい層を伝播し、近接点通過後は逆方向に抜け出ます。このとき、スネルの法則から類推されるように、電波経路は凸に湾曲し伝播遅延が生じます。

LEO衛星の動きにしたがって、GPS衛星からLEO衛星へ到達する電波経路が地表に近づき、通過する大気層が厚くなって、電波伝播経路の曲がり角も増大します。具体的な伝播遅延量（衛星間の直線距離と実際の伝播経路長の差）は、経路の接線高度が約70 kmの場合に1 cmと見積もられ、近接点が下がると指数関数的に増加し、高度約50 kmで10 cm、約35 kmで1 m、約20 kmで10 m、そして高度約10 kmで100 mと見積もられます。GPS衛星とLEO衛星間の距離が2万数千kmであることを考えるとこの遅延はごくわずかです。しかし、近年は衛星軌道情報（位置、速度）が非常に精密に得られるようになったので、この遅延が検出できます。

伝播遅延から幾何学的に求まる経路曲がり角の時間変化を積分変換すると(Able変換と呼ばれる)、屈折率(n)の高度変化が求まります(この解析法では大気の水平一様性を仮定しています)。さらに、乾燥大気として扱える高度5~7 kmから約60 kmでは式(1)の第2項は無視できるので、静水圧平衡の式 $\partial p / \partial z = -g\rho$ 、ならびに理想気体の状態方程式 $p = \rho R T$ (R は気体定数)を併用すれば n から T が求まります。



第1図 LEO衛星によるGPS掩蔽の概念図。

一方、対流圏下部では湿度の効果が無視できないのでGPS掩蔽観測から温度を一意に推定することは困難になりますが、標準大気モデル等の気温分布を用いる、あるいは数値予報モデルにGPS掩蔽による屈折率をデータ同化すれば、湿度の高度プロファイルも推定することができます(e.g., Kursinski *et al.*, 1995)。

ところで、GPS電波がLEO衛星に到達する際に、中性大気層の前後に電離層も通過します。電離大気の屈折率は電波周波数に依存するので、GPSの異なるふたつの周波数の信号(L1=1.57542 GHz, L2=1.22760 GHz)を併用することで、電離層の遅延効果はほぼ補正できます。しかし、高々度では電離層補正による雑音が信号(非電離大気による遅延)を上回るようになり、大気温度の推定が難しくなります。

GPS掩蔽による温度プロファイルは、従来の衛星搭載放射計観測に比べて高度分解能が数百m~1.5 km程度と格段に優れていることが特長です(一方、水平分解能は電波経路に沿って約250 kmです)。GPS掩蔽データを数値予報モデルへ同化すれば予報精度が格段に向上すると期待されています。また、GPS掩蔽データは大気力学の研究にも活用されています。つまり、熱帯域の対流圏界面付近における温度高度勾配の急激な高度変化、あるいは成層圏において大気重力波で代表される中規模の大気波動による温度擾乱も検出することができます(津田・西田, 1999)。

私は1980年代からMUレーダーやラジオゾンデを用いて大気重力波の観測を続けていましたが、詳細な素過程は解明できるものの、グローバルな特性を示すことができないことに、当時、歯がゆさを感じ始めていました。しかし、GPS掩蔽による温度プロファイルの観測例を見た瞬間、霧が晴れていく気がし、新しい研究の展開に向けての期待に狂喜したことを覚えています。

ところで、GPS掩蔽観測による温度プロファイルの高度分解能は、未だ定評ができていません。幾何光学的に電波伝播を扱うと、波面がほぼ同位相になる範囲(フレネル帯)が空間分解能の指標とされ、GPS電波の波長の場合は約1.4 kmになります。しかし、この値は屈折率が様でない場合は必ずしも適用できません。そこで、実質的な高度分解能をラジオゾンデ観測との比較で評価することにしました。もっとも完全に観測時刻・場所が一致するケースはなかったため、GPS掩蔽と近隣のラジオゾンデデータから温度変動の鉛直波数スペクトルを解析し、その形状とスペクトル密度を

比較しました。その結果、高度20~30 km では数百 m の鉛直波長まで両者の結果が一致しました (Tsuda and Hocke, 2002)。しかし、この結果は理論的考察というよりは経験を基礎にしており、未だ最終的な賛同を得たとはいえません (C. Marquadt and S. B. Healy, 2004, 私信)。今後、より高度な解析法を開発し、鉛直分解能を高める必要があります (Hocke *et al.*, 2003)。

6. 熱帯の対流圏界面付近の温度構造

GPS 掩蔽から水蒸気、気温、電子密度擾乱が得られますが、ここでは温度プロファイルを用いた研究成果を主に報告します。まず熱帯の対流圏界面付近の温度構造に関する研究成果を述べ、次節では大気重力波で代表される大気波動の特性解析について紹介します。なお、これらの主な研究成果のレビューを2003年1月に開かれた「GPS 気象学国際ワークショップ」で講演し、この会議の気象集誌特集号に論文として掲載しています (Tsuda and Hocke, 2004)。

赤道域における対流圏界面付近の温度構造が大変重要であることが近年盛んに喧伝されています。しかし、海洋上はもとより、赤道域に分布する発展途上国においては定常的なラジオゾンデ観測点は不十分でした。GPS 掩蔽データは熱帯対流圏界面付近のシャープな温度勾配の変化も忠実に再現できることを利用して、未解明だった赤道域対流圏界面のグローバルな温度構造、ならびにその変化特性を調べました。

第2図aにGPS/METの温度データを用いて、対流圏界面(WMOの定義による)における温度の緯度・経度分布を示します。データ量が最も多かった北半球の冬季(1996年12月~1997年2月)に、緯度・経度 $10^{\circ} \times 20^{\circ}$ の範囲内での平均を取ってあります(平均する領域の中心を緯度・経度についてそれぞれ 1° および 2° ずつずらしています) (Nishida *et al.*, 2000)。よく知られているように緯度 $30 \sim 40^{\circ}$ 付近で対流圏界面が不連続になっています。赤道域では大きな経度変化が見られ、西太平洋上空で対流圏界面温度が -90°C 程度まで下がっています。

赤道域で対流圏界面付近の温度構造がケルビン波によって大きな変動を受けることは、私が1990年にインドネシアの東ジャワで行ったラジオゾンデ集中観測で分かりました (Tsuda *et al.*, 1994)。また、1992~1993年にバンドンで行った同様の観測からも対流圏界面構造が様々な大気波動の影響を受けていることが明らかになりました (Shimizu and Tsuda, 1997, 2000)。こ

れらの定点観測の結果を発展させて、温度変動の水平構造を知りたいと思っていました。

GPS 掩蔽データの出現によりケルビン波のグローバルな変動特性が明らかになりつつあります。我々はCHAMPとSAC-C衛星によるGPS掩蔽データについて、赤道を中心とした南北緯 10° の範囲で、帯状平均温度からの偏差分を計算し、経度方向に東西波数1および2の変化を取り出しました。さらに、その時間変化を調べて東向きに伝播するケルビン波の経度・高度構造を明らかにしました (Tsai *et al.*, 2004)。一方、Randel *et al.* (2002)はGPS/METの掩蔽データと長波放射(OLR)を併用して、熱帯対流圏界面が東向きに伝播するケルビン波の影響を受けており、温度変動の大きさが活発な積雲対流域の水平分布に対応していることを報告しました。

最近の研究では、対流圏界面は必ずしも赤道で最も高くなるのではなく、むしろ中緯度に向けて圏界面高度がわずかに上昇する場合があるという、従来の常識に反する結果が示されました。これらの新しい知見が得られたのは、GPS 掩蔽により良質で大量の気温データが活用できるようになったおかげです。

7. 大気重力波のグローバル特性

GPS 掩蔽の温度データは高度分解能が優れていることから、成層圏において大気波動による中規模温度擾乱を解析することが可能だと考えました (Tsuda *et al.*, 2000)。まず、観測された温度プロファイルから擾乱成分を抽出する必要がありますが、GPS/METの掩蔽データは時間・空間について間欠的なため、平均プロファイルを定義することは困難です。実質的な方法として、個々のプロファイルに高度方向のフィルターを施し、鉛直スケール(波長)が10 kmより短い変動成分を取り出して、これが大気波動に起因すると考えました。もっとも、この簡便な方法では背景場を正確に定めたことにはなりません。最近のより空間的に密なGPS掩蔽データを用いれば有意に平均プロファイルを定義でき、解析精度の向上が期待されます。

新しい観測データを用いる場合には、慎重にデータの精度や分解能などの制約条件を検討しますが、それでも本当に正しい結果が得られているのか、いろいろと気になります。そこで、従来から大気重力波の研究に用いてきたMUレーダーの結果と比較することにしました。

成層圏下部では風速変動から計算した大気重力波の

力学的エネルギーは冬に大きく、夏に小さくなる明らかな1年周期変化を示すことが分かっています (Murray *et al.*, 1994). 日本周辺で得られた GPS 掩蔽データから同様に大気重力波のエネルギーの季節変化を解析し、MU レーダーの結果と比較したところ、季節変化傾向が一致しただけでなく、定量的にも波動エネルギーの値が一致しました (Tsuda *et al.*, 2000). つまり、MU レーダーでは風速から力学エネルギーを、GPS 掩蔽では温度から有効位置エネルギーを導出しており、その比は理論的に約5/3であるとされていますが、MU レーダーと GPS 掩蔽の結果のエネルギー比がほぼこの値に一致しました。

この一例ではまだ心配なので、同様の比較解析を米国アリゾナ州の White Sands にあるウィンドプロファイラーについても行い、非常に良い一致を見ました (Nastrom *et al.*, 2000). これらの考察を経て、GPS 掩蔽データを大気重力波の解析に活用できると考えました。

GPS 掩蔽データは当然、海洋上や南半球にも分布しているため、ラジオゾンデ観測点が一気に世界中に広がったに等しく、特に従来データが乏しかった赤道域の大気波動の解析に威力を発揮します。

熱帯域では活発な積雲対流により様々な大気波動が励起されています。これらの大気波動は水平・鉛直方向に伝播し、力学的エネルギーを全球に運ぶことで、大気大循環を駆動する重要な役割を果たしています (津田, 2002)。

GPS 掩蔽データを用いて成層圏下部 (高度20~30 km) における大気重力波のエネルギーの全球分布を解析した結果を第2図cに掲載しますが、波動エネルギーは赤道域で大きく、特にインドネシア域、南米、アフリカ西岸で増大していました。(第2図dに温度変動の鉛直スケールを5 km 以下に制限した結果を示します。この解析結果では、赤道波の影響を少なくでき、大気重力波の分布をより明確に示すことができます。)

第2図bに示す長波放射 (OLR) の分布からは、インドネシア等の領域には背の高い積雲が存在することが分かります。赤道域における積雲対流による大気重力波の励起が確認されたといえます。なお、GPS 掩蔽データを用いた最近の研究では OLR と波動エネルギーの定量的な相関が報告されています (Ratnam *et al.*, 2004; de la Torre *et al.*, 2004)。

実は、第2図cの基礎結果は1998年夏には出ていた

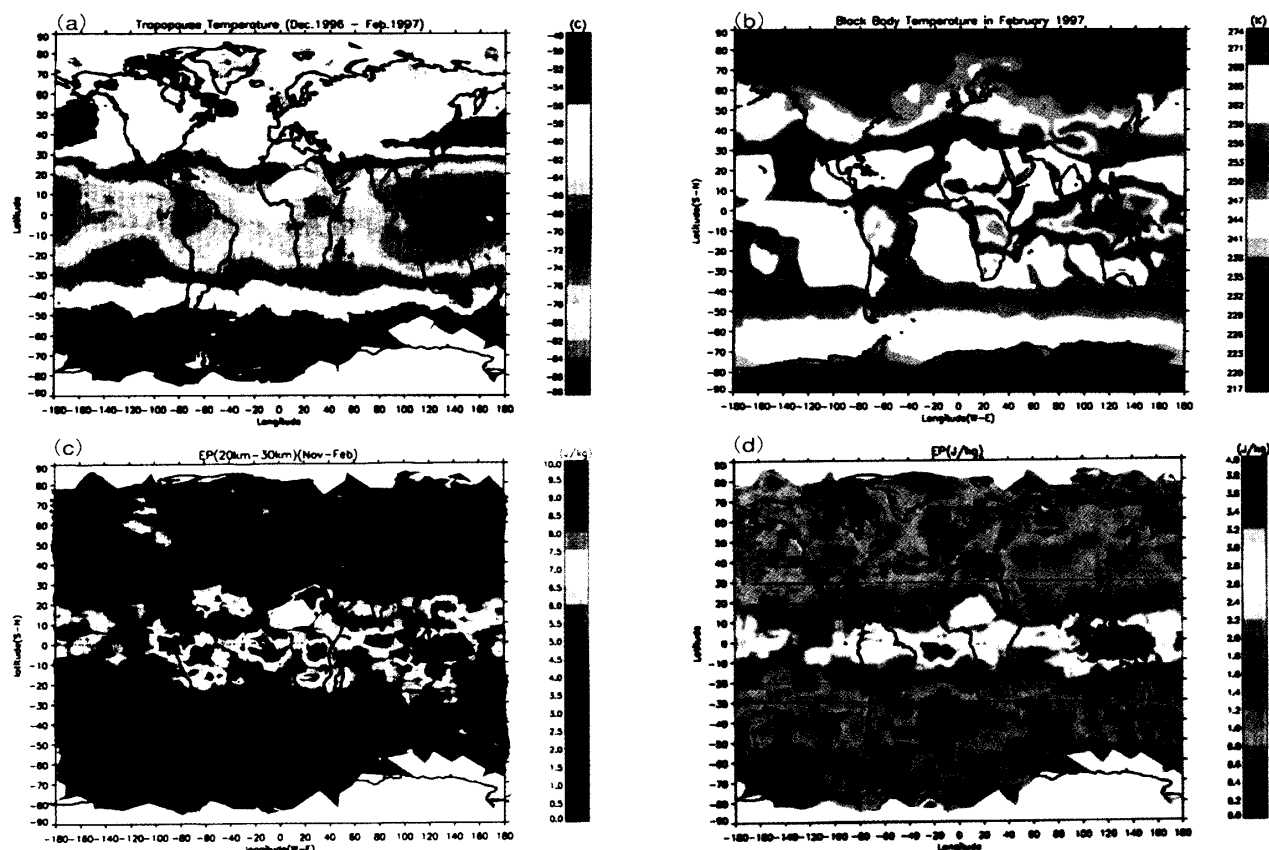
のですが (Tsuda *et al.*, 1998, GPS 気象学プロジェクトの紹介記事に掲載された)、今までに使ったことがない新しいデータをどこまで信用していいのかわ信が無く、様々な検討を加えていました。それまでのレーダーを用いた研究では、装置の開発から関わり、観測結果の一時処理やデータの品質チェックも自分でしていましたので、逆に、他人が取得し、処理したデータを唯々諾々と受け入れることはできませんでした。

国際会議出席のため1998年9月に米国・ボールドーに出張する機会があったので、GPS/MET を実施した UCAR を訪問し、データ解析の責任者である Chris Rocken 氏に面会しました。同氏は大気波動は専門外ですが、GPS 掩蔽の新しい応用として、熱心に議論してくれました。ついで、友人の Dave Fritts 氏 (CoRA) を訪ね、近況を話すなかで、GPS 掩蔽による大気波動の解析に関するセミナーをすることをすすめてくれました。急遽、材料を揃えて、本稿で紹介した内容を中心に話しました。案内に時間がなかったにも拘らず、NCAR などから数十名が参加してくれました。ディスカッションの後、「君は金鉱を掘り当てた」と Dave が言ったのを今でも覚えています。

GPS 掩蔽の観測原理は比較的簡単ですが、観測装置の詳細、信号処理やデータ解析には公開文書では理解できない部分が多く、やはり直接訪ねて見聞するしかないと思い、1999年3月に、米国の JPL で GPS 受信システム、UCAR でデータ解析について問い、さらに当時 CHAMP 衛星の打ち上げ準備を進めていた独の JFZ まで足を延ばして研究会に参加しました。この際、GPS 掩蔽の始祖ともいえる W. Melbourne 博士と面談することができました。10日間余りで世界一周し、多くの研究者に会い、大きな感化を受けました。

こうして、GPS 掩蔽の利点・弱点をある程度理解することができたので、第2図に示す結果をもとに2つの論文を公表しました (Nishida *et al.*, 2000; Tsuda *et al.*, 2000)。データに触れてから足掛け4年かかったことになります。

第2図cの解析結果は印象に残るらしく、多くの方に引用して頂き、また招待講演の誘いを各所から受けました。今思い出す主な国際会議だけでも、IUGG 総会 (英国バーミンガム, 1999年)、SPARC 国際シンポジウム (アルゼンチン, 2000年)、CEDAR・SCSOTEP-ISTP10シンポジウム (米国・コロラド, 2001年)、IAMAS (オーストリア・インスブルック, 2001年)、OPAC-1ワークショップ (オーストリア・グラーツ,



第2図 GPS/MET 実験で得られた北半球冬季の温度データを用いた解析結果. (a) 1996年11月～1997年2月における対流圏界面温度, (b) (a)と同時期の衛星による長波放射観測結果, (c) 1995年11月～1997年2月のうち11月～2月に得られた GPS 掩蔽気温データを用いて鉛直スケール10 km 以下の温度擾乱を導出して求めた大気波動エネルギー(アフリカ域の白抜き部はデータ欠損), (d) (c)と同様で、鉛直スケールを5 km 以下に制限した波動エネルギー. (Tsuda and Hocke, 2004)

2002年), PSMOS ワークショップ (ブラジル・イグアス滝, 2002年), GPS Met Japan 国際ワークショップ (つくば, 2003年), AGU Chapman Conference (米国・ハワイ, 2004年) 等があります. この図1枚のおかげで世界を漫遊できました.

ところで, 第2図c (および第2図d) ではアフリカ西方の赤道域大西洋の上空で大気波動のエネルギーが増大しています. この領域では積雲対流が活発ではないことが第2図bから分かり, また地形性山岳波も生成されないにも拘らず, 大気波動エネルギーが何故大きくなるのか不思議でした.

該当場所での個々の温度プロファイルを調べたところ, 鉛直波長が5～8 km で温度変動振幅が約5 K の振動が確かに認められました. さらに, 図示した11～2月の期間以外に, 5～8月および9～10月についても解析し, 大西洋上で波動エネルギーが大きくなっていたことから, これらが観測誤差ではなく自然現象であると思いました (5～8月, 9～10月はデータ量

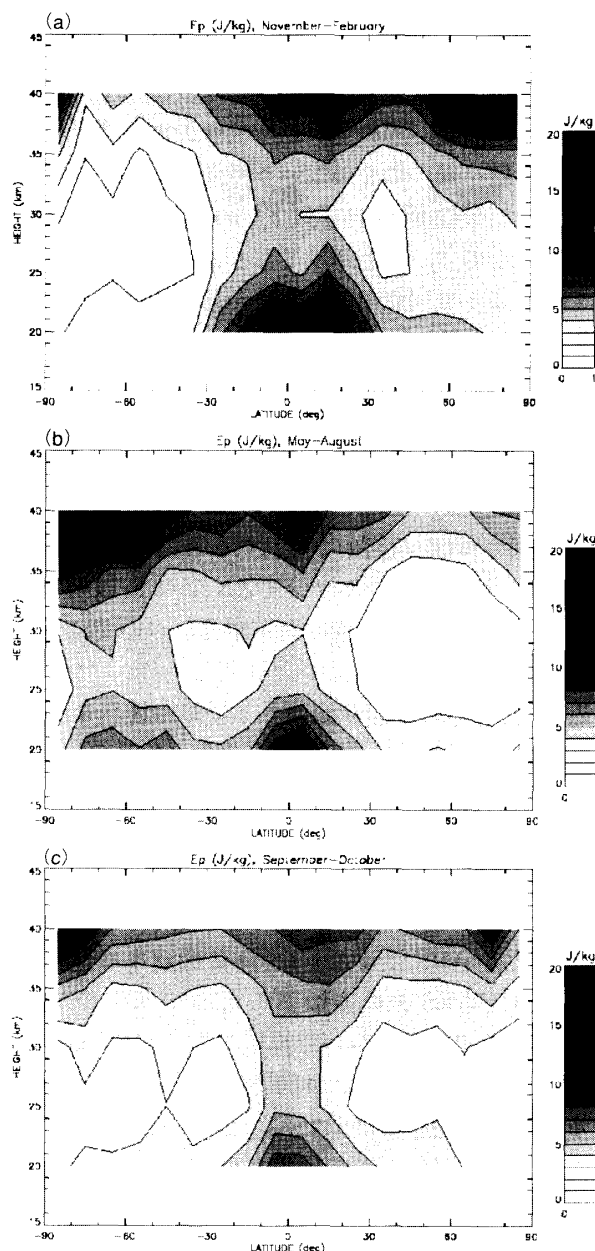
が少なく, データ欠測域が多かったので Tsuda *et al.* (2000) では論文公表はしませんでした).

この現象について Tsuda *et al.* (2000) では議論していませんが, 国内学会やシンポジウムで触れたことがありました. その講演を聞いて興味を持ってくれたのが, 当時東大 CCSR の大学院生だった河谷芳雄氏です. 同氏は CCSR の GCM モデルを用いてこの現象の再現を試み, アフリカ大陸の北緯10°付近で励起され, 南北方向にほぼ対称に伝播する重力波(周期約24時間, 鉛直波長5～10 km, 水平波長約2,000 km)のうち, 南方に向かう波動が南緯20°付近で臨界緯度に達し北方に向きを変えて収束することが基本メカニズムであることを明らかにしました (Kawatani *et al.*, 2003).

第2図c, d では高度20～30 km における大気重力波エネルギーの水平分布を議論しましたが, 高度層を5 km ずつずらして同様に求めた解析結果をもとに, 波動エネルギーの緯度高度分布を示したのが第3図です (データ数が少なかった春分季の結果は掲載していま

せん)。

第3図の波動エネルギー分布には3つの大きな特徴があります。まず、赤道域の高度20~25 kmで増大しているエネルギーが、その上層で一旦小さくなり、高々度で再度増大しています。いかにも成層圏の半ばで波動が追加生成されているように見えますが、図の値に



第3図 中規模温度擾乱の分散(波動のポテンシャルエネルギー)の緯度高度分布。(a)北半球の冬季(11~2月)、(b)北半球の夏季(5~8月)および(c)秋分季(9~10月)の結果を示します。なお、緯度70°以上ではデータ密度が低く、結果の信頼性が薄いことに注意。(Tsuda and Hocke, 2004)

大気密度を掛けた単位体積当りのエネルギーは下層で最も大きいので、波動エネルギーは高度とともに着実に減少しています。つまり、波動エネルギーを消費する効果(例えば、波動・平均流相互作用)の度合いが高度層で異なるようです。

次に、中緯度では既に地上観測や他の衛星データから予想されるように冬半球で波動エネルギーが大きくなっています(第3図で緯度約70°以上での結果は誤差が大きいことに注意)。しかし、詳細に比べると南北半球間で有意な差異が見られます。地形性の波動励起が異なるからではと単純に考えたくりますが、正確な解釈は今後の課題です。最後に、秋分季はほぼ全高度で波動エネルギーが赤道対象分布になります。こういった分布を調べることで、大気重力波の励起源、伝播中の相互作用の中で卓越する機構を判別する鍵になると思っています。

8. 気象学と超高層物理学の結合

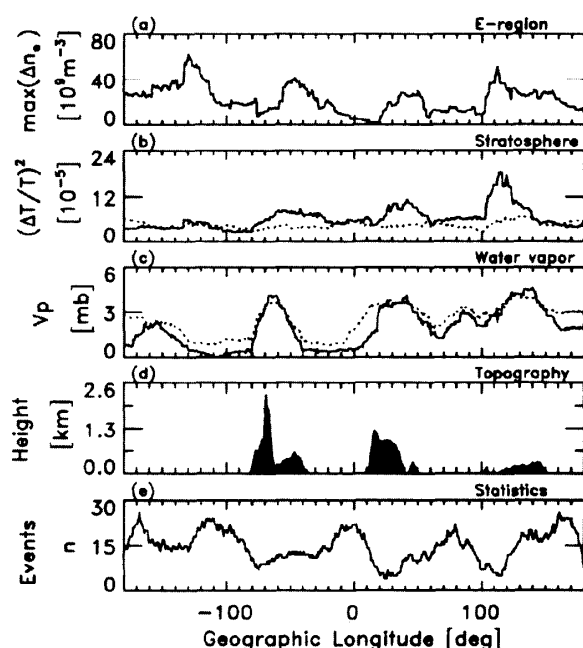
熱帯の積雲対流に対して、中高緯度では地形性の山岳波が大気重力波の主要励起源のひとつとされています。例えば、南半球中緯度では南米のアンデス山脈が山岳波励起に大きく寄与していることが地上観測やUARS衛星のMLS観測でも報告されています(Eckermann and Preusse, 1999)。我々もGPS/METの掩蔽データを用いてアンデス上空の成層圏で大きな温度擾乱が集中していることを明らかにしました(Hocke *et al.*, 2002)。

GPS掩蔽の強みは、成層圏の大気波動と同時に高度100 km付近の電離層の電子密度変動も観測できることです。電子密度擾乱のグローバルな水平分布を調べたところ、南半球では明らかにアンデス山脈周辺で電子密度擾乱の発生頻度が増大していることが分かりました(Hocke and Tsuda, 2001a)。この事実から、下層で励起された大気波動が電離層まで到達していることが類推されます。つまり、中性粒子(風)が電離層でイオンと衝突してイオン(および電子)を動かそうとしますが、イオンの動きは地球磁場によって拘束されます。風速の高度シアと地球磁場とが一定の関係を保つと、イオン・電子を風速シアの中心高度に集中させ、電子密度が濃い薄層(スプラディックE層と呼ばれます)を作り出すとされています。

第4図に赤道域においてGPS掩蔽観測により同時に得られた対流圏の水蒸気、成層圏の温度擾乱、電離層の電子密度変動の経度変化を示しました。インドネ

シア、南米、アフリカ域の上空でこれらの各物理量の変動が大きくなっている点が驚きです。つまり、これらの地域の上空で水蒸気量が多い(第4図c)ことは積雲対流が活発であることを意味し、それに伴い大気波動が励起され(第4図b)、超高層まで伝播して電離層擾乱を引き起こしている(第4図a)と見るができます。このメカニズムが成り立つならば、赤道域では大気波動を介在して、対流圏から中層大気、さらに電離層に至る広い高度層が密接に結合していることが示唆されます(Hocke and Tsuda, 2001b)。

私は気象学と超高層物理学の双方に足を踏み入れましたが、両分野にまたがるGPS掩蔽データを扱ったことを契機に、今後もさらに学際的な研究を進めたいと思っています。



第4図 GPS/METで1997年2月2～16日得られた南緯5～25度における水蒸気、温度・電子密度擾乱などの経度変化。上から順に、(a)高度80～120 kmにおける鉛直スケールが約7 km以下の電子密度変動の最大値、(b)成層圏の高度22～28 km(実線)と32～38 km(点線)における鉛直スケール7 km以下の温度擾乱の強さ、(c)高度4～6 kmにおける水蒸気分圧をGPS/MET(実線)とECMWF客観解析データ(破線)で比較、(d)南緯5～25度帯の地形の平均高度、(e)解析に用いたGPS/METのデータ数。(Hocke and Tsuda, 2001b)

9. 将来への展望

地球温暖化や水循環といったグローバルな地球環境を長期的にモニターするには、長期間にわたって安定した衛星観測が必要とされています。ここで紹介しましたGPS掩蔽は、精密衛星測位を用いた地球監視技術のひとつです。これはLEO衛星の幾何学的配置の決定を基礎にしています。つまり、電波が伝播するのに要する時間を精密時計で計測し、それを距離に換算して宇宙規模で三角測量することが基本です。GPS掩蔽では電波の信号強度を用いず、電波位相を測定するので、衛星搭載装置の受信感度特性の経年変化や、個体差の影響を受けにくいという特長があります。

また、小型軽量(10 kg以下)のGPS受信機を搭載するだけなので、小型衛星でも十分にミッション構成ができることも利点です。実際、GPS/METに用いられたのは、重量約数十kgのマイクロ衛星です。将来、GPS受信機を搭載した単機能の小型LEO衛星が多数打ち上げられれば、従来のラジオゾンデ定常観測に匹敵する空間密度で気温などのデータが得られるでしょう。この大量データを数値予報モデルに同化すれば、天気予報の精度が格段に向上すると期待されています。なお、気温はラジオゾンデと0.5～1 K以内で一致しています。一方、湿度の測定精度については今後の検討が必要でしょう。

近い将来のGPS掩蔽観測として最も注目を集めているのは、UCARが台湾宇宙計画局(NSPO)と共同で2005年に実施するCOSMICです。COSMICでは6台の衛星を同時に打上げ、多くのGPS掩蔽データ量を用いて全球をくまなくカバーする計画です。一方、我々もブラジルが2007年に打上を予定している小型科学衛星EQUARSによるGPS掩蔽観測を推進しています。EQUARSの軌道傾斜角は20°の予定で、COSMICのデータ密度が薄い赤道域で密にGPS掩蔽データを収集し、COSMICと共同で全球をくまなくカバーすることを目指しています。

ところで、GPS掩蔽の応用として、高山頂上からのDownward-Looking(DL)GPS掩蔽観測も、気象研究所等と共同で行ってきました。このDL掩蔽法の理論的考察は、Zuffada *et al.* (1999)によって示されましたが、我々は筑波山で予備実験を行い、さらに富士山頂の測候所で観測を行いました(Mousa and Tsuda, 2004; Aoyama *et al.*, 2004)。(このDL実験は故中村一氏の尽力なしでは実現しませんでした。)

現在、この応用として、電子航法研の実験用飛行機

を用いた DL 掩蔽実験を2003年10月から始めています。将来、総ての民間航空機からこの観測を行い、データをリアルタイムで配信すれば、大量の水蒸気情報が活用できると考えられます。

本稿では GPS 掩蔽の成果を報告しましたが、地上基地型 GPS 気象学に関する研究も並行して進めており、既に述べました信楽での集中観測結果などを用いた測位精度向上・水蒸気変動解析の研究（吉原ほか、1999；Yoshihara *et al.*, 2000, 2001）、ならびにつくばで行われた多数の GPS 受信機を配置した GPS 稠密観測結果を用いた水蒸気トモグラフィ解析（吉原ほか、2001；Noguchi *et al.*, 2004）も私が情熱を傾けた大変重要な研究テーマですが、紙面の都合で割愛させて頂きました。

私は科学技術振興調整費の先導的研究課題「精密衛星測位を用いた地球環境監視技術の開発」(2002～2004年度)の研究代表者を努めました。GPS 掩蔽と、やはり精密衛星測位を活用した衛星重力ミッション（LEO 衛星の軌道を超精密に定め、その微細変動から土壌水分や氷床量の変動に伴う重力変化を検出する地球観測法；古屋・内藤、2000）を組み合わせて、長期間安定した環境モニターの実現に向けて技術開発を進めました。この課題には衛星測位やレーザー干渉などの先端技術分野、ならびに測地、海洋などの幅広い地球科学分野に関係しており、これまであまりおつきあいがなかった方々と共に仕事ができることが大変楽しく、これも元をただせば1995年に参加した信楽での GPS 観測が契機になったと思うと、感慨深いものがあります。

10. さいごに 一哀悼一

信楽の GPS 観測は、1997～2001年度に実施された科振費プロジェクト「GPS 気象学」の予備研究の意味合いがありました。「GPS 気象学」では、衛星測位精度追及と水蒸気情報抽出・活用という密接に関係しながら従来は別個に進められて来た研究課題を、密に結合し協調的に進めることが重要な目標でした。このチャレンジングな課題を内藤先生と中村さんを中心とした研究グループが推進しました。この事業の一連の研究成果は2003年1月につくばで開かれた国際ワークショップで公表され、海外からも高い評価が得られました。

この研究集会の論文を気象集誌の特集号として刊行すべく、中村 一さんが編集長として任に当たられましたが、大変残念なことに志半ばに、2003年10月にご

逝去されました。病床から関係の編集委員に送られた「GPS 気象学の論文集の編集の交代をお願いします。」というメールが結果的には私が受けた最後のメッセージになってしまいました。その後、関係者の努力で特集号が2004年3月に発行されました（82巻1-B号）。中村 一さんが GPS 気象学に注がれた情熱に敬服するとともに、これまでに受けた恩に報いるべく、今後も GPS 気象学の研究に精進する覚悟です。

おわび

賞を頂いてから既に2年が経過しています。生来の怠惰と遅筆のためにこの拙稿を書き上げるのが大変遅くなってしまいましたことをお詫びします。学会賞に推薦をして頂いた方、選考の任にあたられた方々、ならびに学会員各位に大変失礼であったと反省しております。

略語一覧

CEDAR・SCOSTEP-ISTP : Coupling, Energetics, and Dynamics of Atmospheric Regions・Special Committee on Solar-Terrestrial Physics-International Solar-Terrestrial Physics
CHAMP : Challenging Mini Satellite Payload
CoRA : Colorado Research Associate
COSMIC : Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate
EQUARS : Equatorial Atmosphere Research Satellite
GFZ : Geo Forschungs Zentrum
GPS : Global Positioning System
GPS/MET : GPS Meteorology
JPL : Jet Propulsion laboratory
LEO : Low Earth Orbit
NSPO : National Space Program Office
OPAC : Occultations for Probing Atmosphere and Climate
PSMOS : Planetary Scale Mesopause Observing System
SAC-C : Satellite de Aplicaciones Cientificas-C
SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate
UCAR : University Corporation for Atmospheric Research

参 考 文 献

Aoyama Y., Y. Shoji, A. Mousa, T. Tsuda and H. Nakamura, 2004 : Temperature and Water Vapor

- Profiles Derived from Downward-Looking GPS Occultation Data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 433-440.
- de la Torre, A., T. Tsuda, G. A. Hajj and J. Wickert, 2004 : A Global Distribution of the Stratospheric Gravity Wave Activity from GPS Occultation Profiles with SAC-C and CHAMP, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 407-417.
- Eckermann, S. D. and P. Preusse, 1999 : Global measurements of stratospheric mountain waves from space, *Science*, **286**, 1534-1537.
- 古屋正人, 内藤敷夫, 2000 : 新しい質量分布のリモートセンシング—次世代の重力計測とその役割—, *天気*, **47**, 347-355.
- Hocke, K. and T. Tsuda, 2001a : Using GPS satellites to study plasma irregularities, *GPS World*, July 2001, 34-35.
- Hocke, K. and T. Tsuda, 2001b : Gravity waves and ionospheric irregularities over tropical convection zones observed by GPS/MET radio occultation, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2815-2818.
- Hocke, K., T. Tsuda and A. de la Torre, 2002 : A study of stratospheric gravity wave fluctuations and sporadic E at mid latitudes with focus on possible orographic effect of Andes, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, **107**, doi : 10.1029/2001JD001330.
- Hocke, K., K. Igarashi and T. Tsuda, 2003 : *Geophys. Res. Lett.*, **30**(8), 1426 : doi : 10.1029/2002GL016566.
- Kawatani Y., S. K. Dhaka, M. Takahashi, T. Tsuda, 2003 : Large potential energy of gravity waves over a smooth surface with little convection : Simulation and observation, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(8) : doi : 10.1029/2003GL016960.
- Kursinski, E. R., G. A. Hajj, K. R. Hardy, L. J. Romans and J. T. Schofield, 1995 : Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2365-2368.
- Melbourne, W. G., E. S. Davis, C. B. Duncan, G. A. Hajj, K. R. Hardy, E. R. Kursinski, T. K. Meehan, L. E. Young and T. P. Yunck, April 1994 : "The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring", *JPL Publ.*, NASA, 94-18.
- Mousa, A. and T. Tsuda, 2004 : Inversion Algorithms for GPS Downward Looking Occultation Data : Simulation Analysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 427-432.
- Murayama, Y., T. Tsuda and S. Fukao, 1994 : Seasonal variation of gravity wave activity in the lower atmosphere observed with the MU radar, *J. Geophys. Res.*, **99**, 23057-23069.
- Nastrom, G. D., A. R. Hansen, T. Tsuda, M. Nishida and R. H. Ware, 2000 : A comparison of gravity wave energy observed by VHF radar and GPS/MET over central North America, *J. Geophys. Res.*, **105**, 4685-4687.
- Nishida, M., T. Tsuda, C. Rocken and R. H. Ware, 2000 : Seasonal and longitudinal variations in the tropical tropopause observed with the GPS occultation technique (GPS/MET), *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 691-700.
- Noguchi W., T. Yoshihara, T. Tsuda and K. Hirahara, 2004 : Time-Height Distribution of Water Vapor Derived by Moving Cell Tomography During Tsukuba GPS Campaigns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 561-568.
- Randel, W. J., F. Wu and W. R. Rios, 2002, Thermal variability of the tropical tropopause region derived from GPS/MET observations, *J. Geophys. Res.*, **108**, 10.1029/2002JD002595.
- Ratnam, M. V., G. Tetzlaff and Christoph Jacobi, 2004 : Global and seasonal variations of stratospheric GW activity deduced from the CHALLENGING Minisatellite Payload (CHAMP)-GPS Satellite, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 1610-1620.
- Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov, W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y.-H. Kuo, X. Zou, 1997 : Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 29849-29866.
- Shimizu, A. and T. Tsuda, 1997 : Characteristics of Kelvin waves and gravity waves observed with radiosondes over Indonesia, *J. Geophys. Res.*, **102**, 26159-26171.
- Shimizu, A. and T. Tsuda, 2000 : Variations in tropical tropopause observed with radiosondes in Indonesia, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2541-2544.
- Tsai, H.-F., T. Tsuda, Y. Aoyama, G. A. Hajj and J. Wickert, 2004 : Equatorial Kelvin Waves Observed with GPS Occultation Measurements (CHAMP and SAC-C). *J. Meteor. Soc., Japan*, **82**, 397-406.
- 津田敏隆, 1998 : GPS 掩蔽法, *気象研究ノート*, (192), 159-178.
- 津田敏隆, 2001 : GPS 電波を用いた気象観測, *天気*, **48**, 461-465.
- 津田敏隆, 2002 : インドネシア赤道域の大気波動, *バリ*

- ティ, 17(1), 59-61.
- Tsuda, T. and K. Hocke, 2002 : Vertical wavenumber spectrum of temperature fluctuations in the stratosphere using GPS occultation data, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 925-938.
- Tsuda, T. and K. Hocke, 2004 : Application of GPS occultation data for studies of atmospheric waves in the middle atmosphere and ionosphere, *J. Meteor. Soc., Japan*, **82**, 419-426.
- 津田敏隆, 西田真啓, 1999 : GPS が捕えたグローバルな大気の振舞い, *月刊地球*, 25 (号外), 108-113.
- Tsuda, T., Y. Murayama, H. Wiryosumarto, S. W. B. Harijono and S. Kato, 1994 : Radiosonde observations of equatorial atmosphere dynamics over Indonesia, Part I : Equatorial waves and diurnal tides, *J. Geophys. Res.*, **99**, 10491-10505.
- Tsuda, T., K. Heki, S. Miyazaki, K. Aonashi, K. Hirahara, H. Nakamura, M. Tobita, F. Kimata, T. Tabei, T. Matsushima, F. Kimura, M. Satomura, T. Kato and I. Naito, 1998 : GPS meteorology project of Japan—Exploring frontiers of geodesy—, *Earth, Planets and Space*, **50**, i-v.
- Tsuda, T., M. Nishida, C. Rocken and R. H. Ware, 2000 : A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET), *J. Geophys. Res.*, **105**, 7257-7273.
- Ware, R., M. Exner, D. Feng, M. Gorbunov, K. Hardy, N. Herman, Y. Kuo, T. Meehan, W. Melbourne, C. Rocken, W. Wchreiner, S. Sokolovskiy, F. Solheim, X. Zou, R. Anthes, S. Businger and K. Trenberth, 1996, GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit : Preliminary results, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 19-40.
- 吉原貴之, 津田敏隆, 平原和朗, 1999 : GPS キャンペーンデータを用いた高時空間分解能による水蒸気変動の推定, *月刊地球*, 25 (号外), 96-101.
- Yoshihara, T., T. Tsuda and K. Hirahara, 2000 : High time resolution measurements of precipitable water vapor from propagation delay of GPS satellite signals, *Earth, Planets and Space*, **52**, 479-493.
- Yoshihara, T., T. Tsuda and K. Hirahara, 2001 : A study of spatial water vapor distributions by using one-way residuals of GPS phase measurements, *Earth, Planets and Space*, **53**, 397-408.
- 吉原貴之, 野口渉, 津田敏隆, 平原和朗, 2001 : GPS 衛星電波の視線方向遅延量を用いた局所的な水蒸気空間分布推定のトモグラフィ手法, *電子情報通信学会論文誌 B*, **J84-B**, No. 12, 2236-2243.
- Zuffada, C., G. A. Hajj and E. R. Kursinski, 1999 : A novel approach to atmospheric profiling with a mountain-based or airborne GPS receiver, *J. Geophys. Res.*, **104**, 24435-24447.

Application of GPS Data for Studies of Atmospheric Gravity Waves

Toshitaka TSUDA

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Gokasho, Uji-shi, Kyoto, 611-0011, Japan

(Received 29 November 2004 ; Accepted 15 November 2005)
