

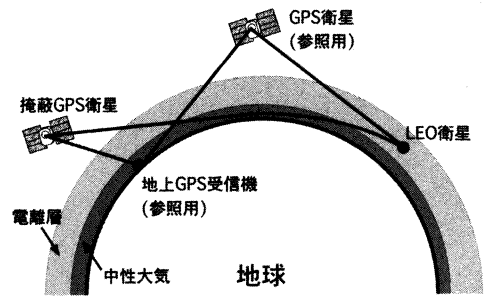
3. GPS 電波を用いた気象観測

津田 敏 隆*

1. GPS 気象学

GPS (Global Positioning System) は米国が開発した、人工衛星による位置決定システムであり、軌道半径が26,600 kmの6つの円軌道に24台の衛星が配置されている。GPS 受信機は同時に4つ以上の衛星から送信された電波信号を受信し、その伝播時間からそれぞれのGPS衛星までの距離を求め、三角測量の原理を応用して受信点の位置を推定している。GPSは本来、軍用の航法支援のために開発されたが、近年では民生用にも広く用いられている。例えば、我が国では建設省国土地理院が全国の約1000か所にGPS受信機を設置し(電子基準点と呼ばれる)、定常観測を継続し、リアルタイムで解析を行っている。このGPS連続観測システム(GEONET)で得られるデータは地殻変動の検出、地震・火山噴火予知等に活用されている。

ところで、地上で受信されるGPS電波は、大気中を伝播する間に電離層ならびに乾燥および湿潤大気の効果により、真空中の伝播に比べて若干遅延する。このうち、電離層と乾燥大気による遅延は正確に補正する方法が開発されている。一方、水蒸気による伝播遅延が測地精度を向上させる上で最終的な問題となっている。しかし、逆にこの水蒸気遅延を活用すれば、GPSによる測地情報から可降水量を推定することができる(Businger *et al.*, 1996)。この指導原理のもとに、近年、GPSの気象学分野への応用が急速に発展してきている(1998年発行の気象研究ノート、「GPS気象学」を参照のこと)我が国でも、科学技術庁の科学技術振興調整費総合研究として「GPS気象学」(研究代表者：内藤勲夫)が平成9~13年度に推進されている。このプロジェクトでは、国土地理院のGEONETで得られる水蒸気情報を利用するのに加えて、国立研究所および大学等によって様々なGPSキャンペーン観測が行わ



第1図 GPS 掩蔽観測の概念図。

れ、多くの斬新な研究成果が生み出されている。このように、地上に置かれたGPS受信機による気象観測(地上基地型GPS気象学)は目覚ましい発展を遂げているが、同様に衛星に搭載されたGPS受信機による電波掩蔽観測(宇宙基地型GPS気象学)も近年大いに注目を浴びている(Ware *et al.*, 1996)。

第1図は宇宙基地型GPS気象学で用いられる、電波掩蔽法の概要を示している(原理は後節で詳述する)。つまり、低高度の傾斜軌道上を周回する小型衛星(LEO: Low Earth-Orbiting Satellite)から見てGPS衛星が地球によって隠される(掩蔽現象)際に、地球大気をかすめて伝播してくるGPS電波を受信し、その伝播特性を解析して大気構造を推定するのである(Melbourne *et al.*, 1994; (抄訳)津田, 1998)。そもそも人工衛星を用いた電波掩蔽法は1960年代に米国NASA/JPL (Jet Propulsion Laboratory)で開発され、MarinerやVoyager等による惑星の大気や電離層の探査に用いられてきた。これらの衛星から放射された電波が、惑星の周縁を通過して地球に到達する際に、惑星大気の影響を受けて、受信電波の振幅と位相が大きく変動する。この信号を解析することで、金星や火星の大気特性、あるいはガス状惑星である木星・土星・天王星・海王星の構造、さらに外惑星の衛星の

* 京都大学宙空電波科学研究センター

© 2001 日本気象学会

大気や惑星の輪の研究がなされている。電波掩蔽法を地球大気の測定に応用することは、1980年代よりロシアの研究者等によって理論的検討が重ねられてきた (e. g., Gorbunov and Gurvich, 1993)。近年になってGPS衛星の軌道精度および測定精度が格段に向上したことで、GPS掩蔽観測の可能性が現実的になった。GPS掩蔽観測を実現すべく、1995年4月3日にGPS受信機を搭載したMicro-lab Iが傾斜角70°、周期100分で地表から750 kmの円軌道に乗せられた。米国UCAR (University Corporation for Atmospheric Research)が行ったGPS/MET (GPS/Meteorology)と呼ばれるこのGPS掩蔽実験では、地表付近から高度約60 kmに至る広い高度領域において大気温度プロファイルが優れた高度分解能 (数百 m～約2 km) で求められた (Ware *et al.*, 1996; Rocken *et al.*, 1997)。

この講演では将来の発展が有望視されているGPS掩蔽法について解説する。まずGPS掩蔽観測の原理を略述し、続いてGPS/MET観測データを用いた研究成果の例として、赤道域の対流圏界面付近の温度構造の季節・緯度変化、ならびに大気重力波エネルギーのグローバルな分布特性について述べる。さらに、GPS掩蔽観測に関する国際的な動向と将来展望を示す。

2. GPS掩蔽法の概要

第1図に示すように、LEO衛星からは24基のGPS衛星が次々と地平線に没する様子を見ることができ、この際に、時間とともにGPSからLEOへ到達する電波が通過する大気層が厚くなり、GPS電波の伝播経路が曲げられると同時に伝播遅延量が增大する。(GPS衛星が地平線から出現する場合も、同様に掩蔽観測が行える。)伝播遅延量は、電波経路の接線高度が約70 kmの場合に1 cm程度であるが、伝播経路が地表に近づくにつれて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と見積もられる。LEOとGPS衛星間の距離 (約2万 km) に比べると非常にわずかな遅延が検出できるのは、技術革新により衛星の位置や速度といった軌道情報が非常に精密に得られるようになったことによる。

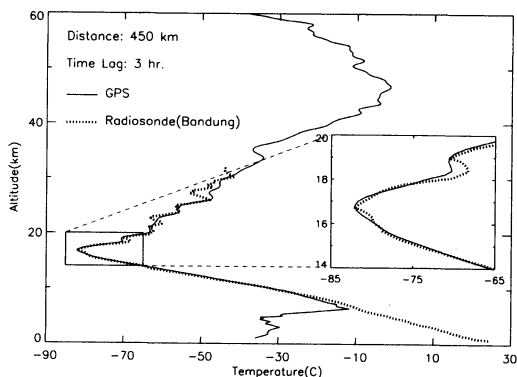
伝播遅延量の時間変化は大気屈折率 (n) の高度変化に積分変換することができる。非電離の大気中では n は大気圧 p (hPa)、温度 T (K) および水蒸気分圧 e (hPa) を用いて、

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

と表される。さらに乾燥大気として扱える高度 (5～7 km から約60 km) では上式の右辺第2項は無視できるので、静水圧平衡の式 $\partial p / \partial z = -\rho g$ 、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 が一意に求められる。一方、対流圏下部では湿度 (第2項) が無視できないのでGPS掩蔽観測から温度を正確に推定することは困難になる。この効果は湿潤な熱帯域では顕著であり高度7～9 kmまで影響が残る。しかし、気温が低くかつ乾燥している中高緯度の冬季では高度3～4 kmより上では正確に温度が推定できている。なお、標準大気モデル等から大気温度分布が得られるならば、GPS/METで得られる屈折率から湿度の高度プロファイルを推定することができる (Kursinski *et al.*, 1995)。ところで、GPS電波がLEOに到達する際に、中性大気層の前後に電離層を通過する。電離大気による伝播遅延は周波数に依存するため、GPSの2周波の信号 (L1, L2) を用いることで補正できる。しかし、高度が60 km以上では雑音レベルが信号を上回るようになり、大気温度の推定が難しくなる。特に、GPS電波にA/S (Anti-Spoof) が施されている期間はL2信号のノイズが増大するために電離層補正の誤差も増大し、その効果が高度30 km付近まで下方伝達することに注意が必要である。

GPS/MET実験では1995年4月から1997年2月までの期間に約6万の掩蔽データが収集された。一般に1台のLEO衛星により24個のGPS衛星に対して1日に500回以上の掩蔽現象が起こる。しかし、GPS/MET実験では、地上の参照ステーションの数が限定されていること、およびMicro-lab-Iのアンテナ指向特性やメモリー容量の機能的制限で「日没」掩蔽のみが測定されたため、データ取得数はこれより少なかった。最も多くのデータが得られた月は1997年2月で、特に2月4～14日の期間に1日当たり100～160回の掩蔽測定がなされている。

GPS/MET実験により1995年7月9日にインドネシア近傍で測定された温度プロファイルを第2図に示す (Nishida *et al.*, 1999)。高度約9 km以下では屈折率に対する水蒸気の寄与が無視できないために温度推定に誤差が生じ、ラジオゾンデの結果からずれている。しかしそれより上部では、対流圏界面付近の急激な温度変動を含めて、詳細な温度プロファイルが精度良く



第2図 GPS/MET (実線) と気球搭載ラジオゾンデ (点線) による温度測定結果の比較。気球はインドネシア中部ジャワのバンドン (6.9°S, 107.6°E) から放球された。GPS/MET データは気球放球の約1.5時間後に、南南東に約530 km 離れた点 (2.9°S, 111.6°E) で得られた。

求められている。第2図に示した2つの温度測定の差の分散は、水蒸気の影響が無視できる高度約10 km から対流圏界面までの上部対流圏では1.1 Kであった。この値がGPS/MET データの測定精度に対応するのであろう (Kursinski *et al.*, 1997)。一方、高度約17 km 以上の成層圏では温度差の分散は2.3 Kに増加していた。成層圏では大気波動に起因すると考えられる温度変動が重畳しているが、これが水平構造を持っており、観測点の間の距離が大きいため付加的な温度差が生み出されたものと考えられる。

3. GPS/MET データを用いたグローバルな大気特性の解析

GPS/MET により得られた大気温度データは、従来の衛星観測に比べて高度分解能が優れており、対流圏および成層圏の温度構造のグローバルな特性を研究する上で貴重なデータベースとなっている。例えば、第2図からも分かるように対流圏界面付近のシャープな温度勾配の変化をも忠実に再現されており、GPS/MET データを活用すれば、従来、限られた気球観測しかなかったため十分には解明されてこなかった赤道域における対流圏界面の構造を研究することができる。Nishida *et al.* (1999) はGPS/MET データから、赤道上空の対流圏界面は冬至期に高く (16~17 km)、最低温度も低くなることを示した。また、インドネシア域で全球で最低の温度 (-85°C) が検出された。

ところで、MST レーダー等を用いた従来の研究か

ら、成層圏における中規模の温度変動は主に大気重力波によるとされている。したがって、第2図に例示したGPS/MET データについて、成層圏における鉛直スケールが数 km の温度変動は、大気波動の影響によると考えられる。Tsuda *et al.* (2000) はGPS/MET の温度プロファイルから鉛直スケールが2~10 km の温度変動成分 T' を抽出し、同時に得られるプラント・パイサラ周波数の二乗 (N^2) と合わせて、大気重力波の (単位質量当たり) のポテンシャルエネルギー $E_p = 1/2(g/N)^2(T'/\bar{T})^2$ を求めた。信楽のMU レーダーならびに米国ニューメキシコ州にあるWhite Sands ST レーダーで観測された大気重力波の運動エネルギーと、GPS/MET から推定された E_p を比較したところ、両者の季節変化の傾向が非常によく一致した (Tsuda *et al.*, 2000; Nastrom *et al.*, 2000)。さらにGPS/MET データが全球に広く分布していることを活用して、大気重力波の活動のグローバル分布が解析された (Tsuda *et al.*, 2000)。一般に E_p は積雲対流が活発である赤道域で大きかった。とりわけ西太平洋域 (インドネシア群島)、インド洋、アフリカ西岸で顕著に E_p が増大しており、OLR から推定される積雲活動との対応が認められた。また、中緯度では一般に冬半球で重力波のエネルギーが大きくなり、さらに、北半球では大陸上で海洋上より大きな E_p が認められた。この結果は、冬に強く夏に弱くなるジェット気流と大気重力波の相関、および山岳波の励起を示唆している。

4. GPS 掩蔽観測に関する世界の動向

GPS 掩蔽データは大陸・海洋上で測定点分布に偏りが無いという衛星観測特有の利点があるため、観測点の多くが北半球の大陸上に分布しているラジオゾンデ定常観測を補充しうる。さらに赤外線放射計に比べて、雲やエアロゾルの影響を受けにくく、対流圏から成層圏に至る広い高度範囲で温度を全天候測定するのに適している。また、最近の研究によりGPS 掩蔽データが数値天気予報モデルの精度向上に有用であると判断されたため、データ同化が計画されている。このように、GPS 掩蔽法は近い将来、新しい気象センサーとして地球観測衛星に標準装備される時代が来るであろう。我が国でもGPS 掩蔽観測の導入に遅れを取らないように、体制を整備し、最も早い機会に実験を開始すべきである。

GPS/MET 衛星が運用停止した1997年2月以降にも、GPS/MET の成功に刺激され、GPS 掩蔽観測を組

第1表 各国におけるGPS掩蔽実験の概要(1999年3月時点).

衛星	国(機関)	打上げ	期間	備考
ORSTED	デンマーク(気象庁)	99年2月	3年	NASA/JPLと共同
SUNSAT	南アフリカ	同上		ORSTEDと同時に打上げ
CHAMP	ドイツ(GFZ)	00年7月	5年	
SAC-C	アルゼンチン	00年11月	3.5年	NASA/JPLと共同
JASON-1	フランス	01年2月	5年間	TOPEX/POSEIDON衛星の後継機
GRACE	ドイツ(GFZ)/米国(JPL)	01年10月頃	5年間	CHAMPと共同
COSMIC	台湾/米国(UCAR)	04年5月	5年間	
GCOM	日本(NASDA)	07年1月		

み込んだ実験衛星計画が多く企画されている。GPS掩蔽実験についての国際的な動向を第1表に示す。以下に、CHAMP+GRACEおよびCOSMICについて簡単に紹介する。

ドイツのGFZ(GeoForschungsZentrum Potsdam)はNASA/JPLと共同でCHAMP(Challenging Mini-Satellite Payload for Geophysical Research and Application)およびGRACE(Gravity Recovery And Climate Experiment)を推進している。これらの衛星にはJPLが開発した新型GPS受信機が搭載されており、CHAMPでは衛星後方に設置されたGPS用アンテナを用いて、1日に約250回の掩蔽観測を行う。ところで、CHAMPでは衛星下部にもGPSアンテナを取り付け、海面で反射されるGPS電波を受信し、海面の波高分布、海面風の計測を試みる。一方、GRACEでは2つのLEOを近接して飛行させ、それぞれの衛星の精密軌道をGPSで求めるとともに、衛星間の距離を電波計測し、衛星軌道の微妙な変動から、重力場異常を精密計測し、大気・海洋・陸水・雪水間の水質量の移動を解明しようとしている。これらの重力計測については、古屋・内藤(2000)によるレビューを参照されたい。

COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)は台湾と米国のUCARが共同で推進しているGPS掩蔽観測である。2004年5月に8台の小型衛星を1つのロケットで打ち上げ、高度800kmで傾斜角72°の8つの傾斜軌道に配置し、4,000回/日の掩蔽データを取得する予定である。3時間以内に掩蔽データを供給し、定期的な数値予報モデルへのデータ同化を試みる予定である。

第1表に示した以外に、欧米では定常観測を視野に入れた将来構想が練られている。NASAでは1987~2015年に推進しているEOS(Earth Observing System)計画の一環として、2002年以降にGPSによる地

球環境計測のプロジェクトを推進する可能性がある。構想の一つとして、GPS受信機を搭載した重量3kg程度の超小型衛星(GPS Nanosat)を数十台配置し、掩蔽データを取得するプロジェクトも検討されている。一方、ESA(European Space Agency)では、GPS掩蔽観測を地球観測の重要なミッションの一つとして位置付けている。GPSと類似したロシアのシステムであるGLONASSも併用し、より多くの衛星に対する掩蔽観測データを収集することが検討されている。さらに、METOP-1, 2(2003, 2007年)、NPOESS-2, METOP-3(2012~2017年)といったミッションで、定常的にGPS掩蔽データを配信することが考えられている。

第1表で示した全ての掩蔽実験が順調に進めば、2002年までに掩蔽データ数が約2,500回/日までほぼリニアに増えると見込まれる。2003年以降、LEO衛星数は減少し始めるが、2004年にCOSMICが運用され始めると毎日約4,000回のデータが供給されると期待される。今後、順調にGPS掩蔽観測が発展するならば、ラジオゾンデ定常観測に匹敵する空間・時間観測で地球全体の温度プロファイルを継続的に観測できると期待される。

5. ダウンルッキング掩蔽実験

GPS掩蔽観測の応用として、山頂や気球等にGPS受信機を設置し、地平線に没するGPS衛星からの電波を受信し、水蒸気プロファイルを測定する、ダウンルッキング型大気掩蔽法(以下DL掩蔽法と略記する)が考案された(Zuffada *et al.*, 1999)。掩蔽法では、一般に電波経路の最低高度付近で測定精度が最も良くなる。したがって、高山に置いた受信機から水平より下向きに視野を取ること、山頂より下の高度域で屈折率の高度変化を精度良く求めることができる。さらに、数値予報モデル等から別途与えられる大気温度を

併用すれば、大気境界層の湿度プロファイルを推定することができる。「GPS 気象学」プロジェクトの一環として、気象研と京大 RASC が NASA/JPL と共同で、平成12年度から DL 掩蔽実験を開始している。GPS 衛星は1日に2回ずつ日没と日出を繰り返すので、24基の衛星について合計で1日に96回、日本上空の水蒸気高度分布を定常的にモニターできると期待されている。なお、受信機を設置する山は、南方が開けたなるべく標高がある孤立峰が適している。諸般の事情により平成12年度は筑波山で試験観測が行われるが、将来、より高い山（例えば、富士山）で実施できれば、より広い高度範囲の測定が可能となるであろう。

6. おわりに

GPS の民生的応用は広範囲に発展し、今や日常生活に欠かせない基本要素技術となっている。学術面においては測地学、地震学、火山学を始めとして、気象や海洋観測の分野でも大変重要な計測技術と認識されつつある。ここで紹介した GPS 掩蔽法も、新しい気象センサーとして将来の発展が大いに期待されている。しかし、国内におけるこの分野の研究活動はあまり盛んとはいえない。今後、国際的動向を見極めつつ、早急に国内での研究グループの育成、ならびに新たな衛星実験を推進する必要がある。

参 考 文 献

Businger, S., *et al.*, 1996: The promise of GPS in atmospheric monitoring, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **77**, 5-18.

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—次世代の重力計測とその役割—, *天気*, **47**, 347-355.

Gorbunov, M. E. and A. S. Gurvich, 1993: Remote sensing of the atmosphere using a system of synchronously orbiting satellites, *Radio Sci.*, **28**, 595-602.

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.

Kursinski, E. R., G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield and K. R. Hardy, 1997: Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, **102**, 23429-23465.

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, 1994: "The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring", *JPL Publ.* (94-18), NASA.

中村 一 (編), 1998: GPS 気象学, 気象研究ノート, (192), 日本気象学会, 220pp.

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, 1999: Seasonal and longitudinal variations of the tropical tropopause observed with the GPS occultation technique (GPS/MET), submitted to *J. Meteorol. Soc. Japan*.

Rocken, C., *et al.*, 1997: Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 29849-29866.

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.

津田敏隆, 1998: GPS データを用いた成層圏温度プロファイルの観測, 第11章, GPS 気象学, 気象研究ノート, (192), 159-178.

Ware, R. H., *et al.*, 1996: GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: Preliminary results, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **77**, 19-40.

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.

GPS Radio Occultation Measurement of Atmosphere

Toshitaka Tsuda

Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

501 (ひまわり; 画像解析; SATAID; CD-ROM; GMS)

4. 気象衛星“ひまわり”の観測に基づく雲解析事例集

隈部良司*

1. はじめに

「ひまわり」1号は1977年7月アメリカのケープカナベラルから打ち上げられた(気象衛星室, 1981a; 1981b). 翌年4月の本運用開始以来20年以上にわたり1日も休むことなく地球の画像を送りつづけ, データが蓄積されてきた. この間, 当初の3時間毎のアナログデータの配信から, 1988年のデジタルデータ配信, 1989年の毎時観測の開始, 1995年の水蒸気画像の取得開始など, データの質, 量の高度化が行われてきた. 2002年度の打ち上げが予定されている次期衛星ではさらに大幅な機能向上がもたらされる.

このような衛星, 地上施設の高度化により, 衛星データに基づくプロダクトの質, 量の充実ももたらされてきた. ところが, 気象予報の現場などでの衛星画像の利用は, 大量のデータ転送が必要であるなどのためになかなか進まなかったように思われる. しかし, 近年のパソコンや通信環境の進歩はこれまでの状況を大きく変えつつある. 誰もが数十メガバイトの衛星データを扱える環境がすでに実現している. 気象衛星センターでは簡便に高品質の衛星画像解析が出来るパソコンソフトウェア (Satellite Animation and Interactive Diagnosis: SATAID) を開発し (Kumabe, 2000; 気

象衛星センター, 1999), これを支援することにした. SATAID は気象庁や海外の気象機関で利用されている他, 一般でも入手可能なソフトウェアである.

本文では, 「ひまわり」データの利用の観点から「ひまわり」1号以来の衛星データと上記利用ソフトについて概略を述べる.

2. 気象衛星“ひまわり”の歴史

第1表に簡単な「ひまわり」シリーズの年表を示す. 「ひまわり」の観測やデータ提供にはこのような変遷があるものの, 可視, 赤外センサーの基本的な性質は変わっていない. 1995年6月13日から, スプリット画像, 水蒸気画像が加わっている. 観測スケジュールは最初の試験運用期間を除き, 1989年1月まで3時間毎, 現在は毎時観測となり, 衛星によるデータ配信は運用当初からの fax イメージに加え1988年からはデジタルデータが加わった. 観測されたデータはマイクロフィルムの形で永久保存されているが, 1987年以降, (可視画像は1991年以降) のデータはデジタルデータとしても保管されている.

気象衛星「ひまわり」は世界気象機関 (WMO) の WWW (World Weather Watch 世界気象監視計画) の一環として全世界をカバーする気象衛星観測ネットワークの一衛星として打ち上げられたものである (第

* 気象衛星センター.

© 2001 日本気象学会