

## 8. 航空機からの GPS 掩蔽観測技術の開発

航空システム部 ※吉原 貴之 藤井 直樹 齊藤 真二 星野尾 一明\* 松永 圭左\*  
\*衛星技術部

### 1 はじめに

近年、GPS (Global Positioning System) から送信される測距信号を用いた応用技術は様々な分野に利用され、発展している。GPS 測位では衛星信号が GPS 受信機に到達するまでに大気 (電離層・対流圏) を通過することから、その受信信号には伝搬遅延効果が含まれ、経路上の大気の状態変化に伴って測位結果が大きく左右されている。しかし、これを逆に積極的に利用して大気の状態を計測する『GPS 気象学』という新たな分野が注目され、とりわけ国土地理院電子基準点などの静止点定常観測を利用した対流圏水蒸気観測とそのフィードバックによる静止点位置決定精度向上で大きな成果をあげている。

本研究所は、科学振興調整費における先導的研究課題『精密衛星測位による地球環境監視技術の開発』(平成 14-16 年度) に参画し、航空機上から GPS 受信信号を利用して主に対流圏水蒸気量の高度分布を観測する新たな観測技術の開発を行っている。これは、『ダウンルッキング (Down-looking ; DL) GPS 掩蔽 (えんぺい) 観測』(以下、DL-GPS 掩蔽観測) と呼ばれ、激しい気象擾乱のメカニズムを解明・予測する上で重要なファクターであり、時々刻々の分布状態を把握することが困難である対流圏水蒸気量を観測する手段として有望視されている。また、この対流圏水蒸気情報を天気予報に使用される気象数値予報モデルへの入力とすることで、予報精度の改善が期待されている。

本発表では、上述の『精密衛星測位による地球環境監視技術の開発』において本研究所が担当している「航空機からの DL-GPS 観測技術開発」の概要と飛行実験データを含む最新の開発状況について報告する。

### 2 DL-GPS 掩蔽観測について

GPS 電波が地球大気を通過する際、屈折率が真空中よりも大きいために伝搬遅延を引き起こす。このとき、大気の屈折率は主に電子密度 (電

離大気)、乾燥大気密度、水蒸気密度により決定されるが、GPS 測位では送信・受信時刻が正確にわかるため、受信位置が既知であれば到達遅延時間から電波伝搬経路に沿った大気屈折率の積分値を測定できる。このとき、地上で受信した場合には積分値しか得られないが、地球大気をかすめるように伝搬した GPS 衛星電波を周回速度の速い低軌道衛星 (Low Earth-Orbiting Satellite ; LEO) で受信した場合には、短時間で伝搬経路が大気上端から下端まで移動することを利用できる。これは『GPS 掩蔽法』と呼ばれ、大気屈折率の高度分布が得られる[1]。この手法ではほぼ円軌道で周回する低軌道衛星で受信するため、受信点の“位置”を正確に決定することは困難である。そのため、搬送波位相の時間変化率 (ドップラーシフト) を計測値として、そこから GPS 衛星と低軌道衛星の幾何学的な相対“速度”を差し引いて大気遅延量の時間変化率を算出する。大気遅延量の時間変化率がわかれば、2 周波観測によって電離層効果を除去後、電波伝搬経路と対応させ、適切にモデル化・推定することで大気温度、対流圏水蒸気等の各パラメータが計測できる。その際、サンプリング時間間隔が高度分解能を決定するため、50Hz 程度の高サンプリングで取得している。

この手法の発展形として低軌道衛星ではなく、見通しの良い孤立峰山頂で仰角  $0^\circ$  以下から入射する GPS 衛星 (以下、掩蔽 GPS 衛星) 電波を受信し、受信点以下 (すなわち山頂以下) の水蒸気高度プロファイルを得る『DL-GPS 掩蔽観測』が提唱されている[2]。既に京都大学生存圏研究所、気象庁気象研究所が中心となり、2001 年から 2003 年まで富士山頂で夏季に三度行われており、水蒸気高度プロファイルの推定技術が開発されている[3]。

### 3 『航空機からの DL-GPS 掩蔽観測』への展開

この仰角  $0^\circ$  以下の掩蔽 GPS 衛星信号を受信して受信点以下の水蒸気高度プロファイルを推定する DL-GPS 掩蔽観測を航空機へ応用する

利点として、得られる水蒸気高度プロファイルの高度範囲が航空機の飛行高度まで拡大可能であること、移動観測が可能であることが挙げられる。特に、洋上での気象観測データが極めて少ないために将来的に有効な観測手段として期待される。航空機を用いた DL-GPS 掩蔽観測は、低軌道衛星での観測技術を基礎としているため、GPS 衛星と受信点(航空機)の位置関係から相対速度を用いた解析を必要とし、水平線に沈む掩蔽 GPS 衛星の搬送波ドップラーシフトを観測値として、これに含まれる相対速度寄与分を差し引いて大気遅延効果のみを抽出する。図1に概念図を示す。

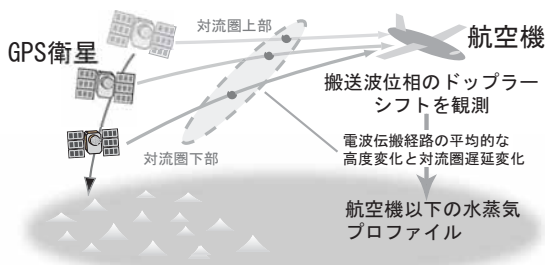


図1. 航空機からの DL-GPS 掩蔽観測の概念図

航空機による DL-GPS 掩蔽観測を展開する上で以下の2つが大きな課題となる。

**課題①**：精度の良い水蒸気高度プロファイルを推定するためには、航空機を時間にして30分間程度、距離にして数100km程度の直線的な飛行経路で数 mm/s の精度で計測(後処理)する必要がある。

**課題②**：地表近くまで水蒸気高度プロファイルを得るために、掩蔽 GPS 衛星から到達する微弱な電波を移動体上でもできる限り低い仰角まで捕捉・追尾する。

これらの課題を解決するために、課題①に対しては国土地理院 1Hz サンプリング地上受信点データを含めた GPS 相対測位により、飛行経路に沿って連続的に航空機速度を推定するとともに、これを加速度/ジャイロ計測と結合して航空機速度を精密に決定する手法を開発することを目標に掲げている。また、課題②については、従来の GPS 受信機でも飛行実験により

掩蔽 GPS 衛星の仰角が $-3^{\circ}$ 程度まで瞬断を起こしながらも捕捉可能であることが示されているが、通常の「測位用 GPS アンテナ」とは別に掩蔽 GPS 衛星電波を受信するための水平方向に向けた「掩蔽観測用 GPS アンテナ」の2系統入力可能な感度の良い GPS 受信機を開発し、実験用航空機に搭載・飛行実験を行うこととした。以下に実験用搭載機器の概要を述べる。

### 3.1 航空機用高精度速度計測装置

航空機速度を数 mm/s の精度で推定するため、3軸加速度計及び航空機姿勢を計測する3軸ジャイロメータからなる IMU (Inertial Measurement Unit) を実験用航空機に搭載し、後処理で GPS 測位用データと組み合わせた解析を行うことを目指している(図2)。なお、測位用 GPS データは機上については航空機上側に取り付けた測位用 GPS アンテナから 10Hz サンプリングで取得するとともに、地上 GPS 参照局として実験用設置局で 10Hz データを取得、国土地理院電子基準点 1Hz データも使用して相対測位を行う。これらの実験データを使用して、最終的には実験用航空機のノーズ部分に機体横向きに取り付けた掩蔽観測用 GPS アンテナの運動速度を数 mm/s の精度で推定する。図3に IMU 本体の写真を示す。

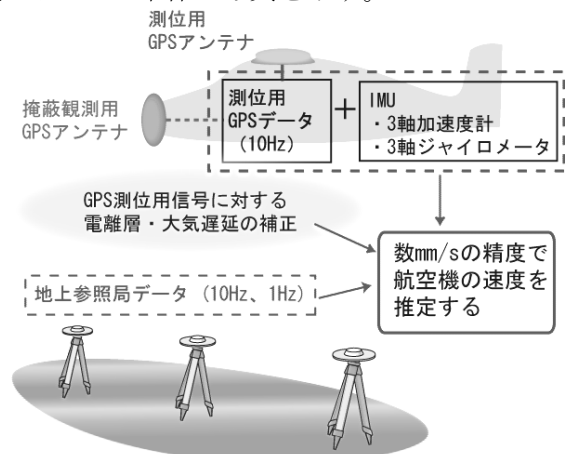
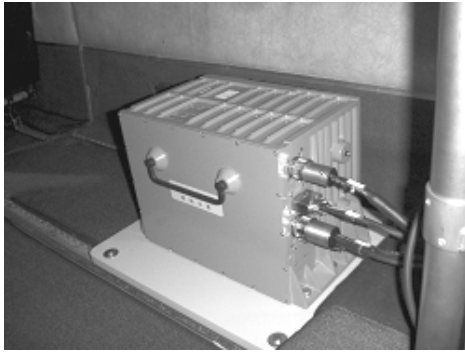


図2. 航空機速度推定の機上及び地上実験データ取得の概念図

### 3.2 航空機 DL 用 GPS 受信システム

航空機上で掩蔽 GPS 衛星の微弱な電波を受信するため、DL-GPS 掩蔽観測用の高感度受信

図3. IMU 本体写真。実験用航空機の重心付



近くに搭載して実験を行う。

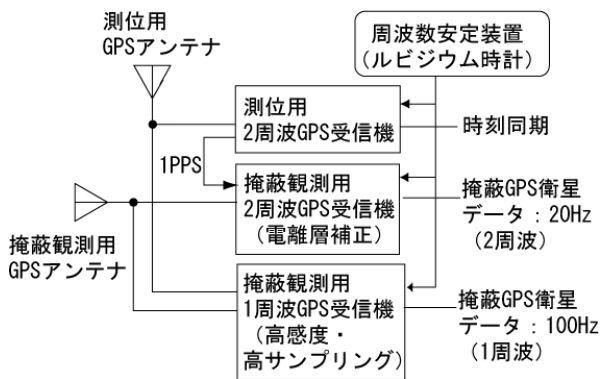


図 4. 航空機 DL 用 GPS 受信システムのブロック図

システムを開発した。図 4 にブロック図を示す。受信システムは実験用航空機上側に取り付けた通常の測位用 GPS アンテナ (トップ・アンテナ) に加えて、航空機ノーズ部に横向きに掩蔽 GPS 衛星受信専用の GPS アンテナ (サイド・アンテナ) を衛星配置などの条件により、航空機進行方向に対して左右どちらでも観測可能なように左右に 2 台新設し、機内でどちらか一方を選択可能であるようにした。また、実験の際にはサイド・アンテナで捕捉可能な GPS 衛星が 4 つ未満になった状況でも時刻同期・信号追尾が可能であるようにするため、2 系統入力可能な受信機とした。この 2 系統入力、受信・追尾感度の向上を図った新規試作部分は 1 周波受信機 (古野電気(株)製作) であったため、加えて電離層補正のための 2 周波受信機 (NovAtel 社製 OEM-4) も組み込んだ設計とし、システム全体はルビジウム原子時計で同期されている。また、1 周波受信機は測定値である搬送波位相を 100Hz までサンプリング可能であり、GPS コード相関処理における I 相、Q 相の相関結果

を 1 コード長毎 (1,000Hz) で出力可能である等、微弱な GPS 信号を解析する上で有用な機能を有している。

#### 4 飛行実験によるデータ取得

これらの実験機器を実験用航空機に搭載し、平成 15 年 10 月 15~23 日に東北地方 (仙台空港をベース) で計 4 回、また平成 16 年 2 月 23~27 日に太平洋岸 (高松空港をベース) で計 3 回、DL-GPS 掩蔽観測の飛行実験を行った。ここでは、平成 15 年 10 月 15 日の取得データを例に実験データの概要を示す。

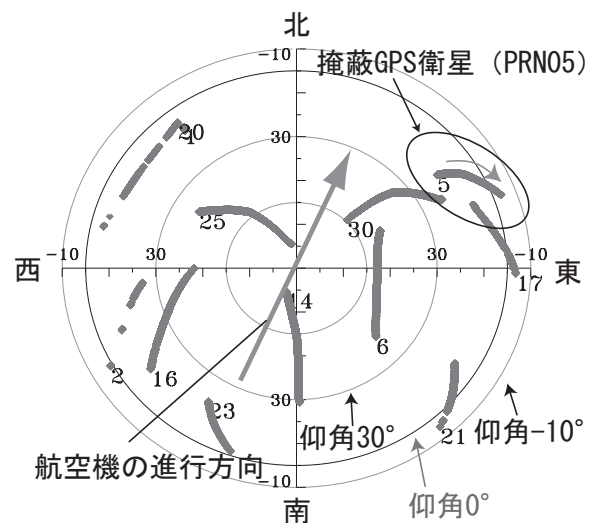


図 5. 航空機 DL 用 GPS 受信機 (2 周波/サイド・アンテナ) で受信した GPS 衛星配置 (平成 15 年 10 月 15 日 3:30-6:00 UT)

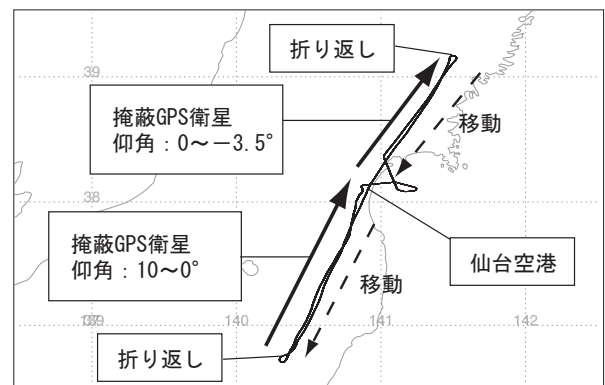


図 6. 航空機 DL-GPS 掩蔽観測の飛行航跡図 (平成 15 年 10 月 15 日)

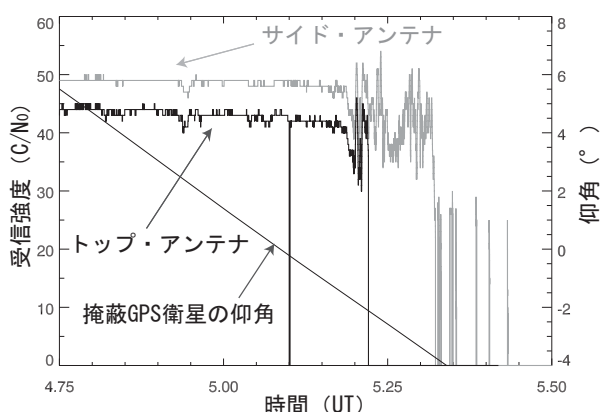


図7. 航空機 DL 用 GPS 受信機 (1周波受信部) での掩蔽 GPS 衛星 (PRN05) 受信信号強度

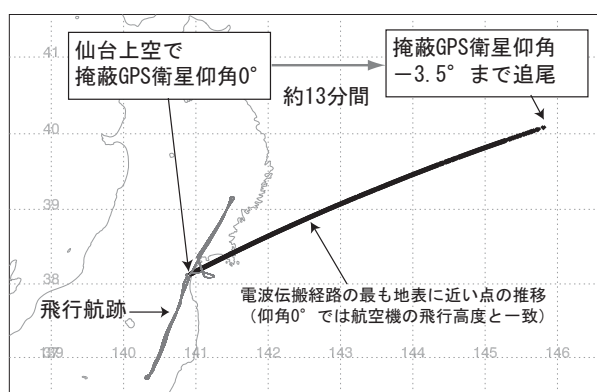


図8. 掩蔽 GPS 衛星電波の伝搬経路が最も地表に近い地点の推移 (電波伝搬経路を直線で近似)

図5にこの時の航空機 DL 用受信機 (2周波/サイド・アンテナ) で受信した GPS 衛星配置を、図6に飛行航跡をそれぞれ示す。飛行実験は、北東方向に沈む掩蔽 GPS 衛星 (PRN05) 電波を受信するために一旦南下後、折り返して30分程度ほぼ直線状に高度約6kmを保ちつつ北上する飛行ルートで行った。なお、仙台空港を離陸し、DL-GPS 掩蔽観測を終えるまでの所要時間は約2時間半程度である。図7はこの飛行実験時に航空機 DL 用 GPS 受信機の1周波受信部で取得された掩蔽 GPS 衛星信号の受信強度 (C/N0) について、南下・折り返して直線飛行に移ってからをプロットしている。また、サイド・アンテナでの受信結果とともにトップ・アンテナの受信結果も合わせて示している。トップ・アンテナでは仰角  $0^\circ$  付近で1回瞬断

があったが、サイド・アンテナでは仰角  $-3.5^\circ$  程度まで連続的に追尾・捕捉していた。この時、2周波受信機でも同時取得しているが、同じサイド・アンテナでの受信結果は仰角  $-2^\circ$  付近から瞬断が繰り返し起こっていたことが確認されている。航空機 DL 用 GPS 受信機の感度向上については、2003年9月に京都大学生存圏研究所、気象研究所と共同して富士山頂実験で比較観測を行っており、今後データ品質を統計的に比較する予定である。また、図8に飛行実験時の掩蔽 GPS 衛星データから得られると期待される水蒸気高度プロファイルの水平方向の観測範囲を示す。観測原理から受信された測定値は伝搬経路が最も地表に近づく点を中心として領域の大気状態を最もよく反映する。実際の電波伝搬経路は GPS 衛星の仰角が低くなるほど湾曲する効果が大きくなるが、電波伝搬経路を直線と扱って計算している。この図から、仙台上空通過時に掩蔽 GPS 衛星の仰角が  $0^\circ$  となり、仰角  $-3.5^\circ$  で水平線上に没するまで対流圏を数100kmに渡って斜めに走査するような水蒸気高度プロファイルが得られることとなる。

## 5 むすび

本研究では、GPS 測位で大きな誤差要因となる大気伝搬遅延を積極的に利用した新しい大気リモートセンシング技術の開発を目指している。このような技術を開発することで、フィードバックとして GPS 航法への誤差を軽減できることが期待できる。今後の課題としては精密な航空機速度の推定を行っていくこととしたい。また、より多くの水蒸気高度プロファイル推定に必要な実験データを得るために平成16年度も飛行実験を春/夏/秋季に実施する予定である。

## 参考文献

- [1] Kursiniski et al., J. Geophys. Res., vol.102, No.D19, pp. 23429-23465, 1997.
- [2] Zuffada et al., J. Geophys. Res., vol.104, No.D20, pp.24435-24447, 1999.
- [3] Aoyama et al., J. Met. Soc. Japan, vol. 82, No. 1B, pp. 433-440, 2004