

気球実験による成層圏での高精度 GNSS 測位の活用

Utilization of high-precision GNSS positioning in the stratosphere through balloon experiments

国分紀秀 武井宏延*1 和田篤始 太田方之 夏莉権 森英之
Motohide Kokubun Hironobu Takei Atsushi Wada Masayuki Ohta Chikara Natsukari Hideyuki Mori

宇宙航空研究開発機構 東京科学大学*1
Japan Aerospace Exploration Agency Institute of Science Tokyo

1. はじめに

近年、光格子時計を始めとする超高安定度の周波数基準技術が急速に発展し、すでに地上では 18 桁の精度に到達している。同程度の精度を持った周波数比較技術と組み合わせて気球高度と地上間での双方向のレーザー周波数比較実験が実現できれば、衛星実験のような大掛かりな手段によらず、これまでの一般相対性理論の検証精度を大幅に改善できる可能性がある。一方で、地上と気球との間の光リンクを実現するためには、高い精度で気球の位置をリアルタイムに決定する必要がある。気球に搭載してリアルタイムに数 cm 精度で位置決定する手段を衛星測位の観点から考えると、相対測位方式を用いる場合には、基線長が数 10 km にも達し、かつ、地上と気球間で基準局からの信号をテレメトリ・コマンドとは別系統の電波によって伝送する仕組みが必要になるという問題があるため、ここ数年で実用化レベルに到達した、PPP-RTK 法を採用することが最適と考えられる。そこでまず大気球実験への相乗りによって高精度衛星測位モジュールを成層圏に飛ばさせ、高度 20 km においても PPP-RTK による高精度測位が連続的に実現可能であることを確認することを目指した。

2. 実験の概要と結果

気球は 2023 年 7 月 27 日(木)午前 3 時 55 分(JST)に、大樹航空宇宙実験場より放球された。ゴンドラ外観図と飛行経路図を図 1 に示す。GNSS 受信アンテナはゴンドラの最上面のフレーム上に、面中心について対称な位置に 2 セット搭載した。GNSS 受信機とアンテナを 2 セット搭載することで、冗長性を担保すると同時に、2 台のアンテナ間の相対測位によって衛星測位結果の精度検証を行うことができる。測位演算の結果はリアルタイムにテレメトリとして送信すると同時に受信機内蔵の SD カードにも記録されており、ゴンドラが着水した後に回収された。放球から最高高度到達、水平飛行、ゴンドラの切り離しおよびパラシュートによる降下、着水、洋上回収と陸上輸送の全ての期間において受信機は正常に動作を続けていた。この間、受信機の測位ステータスは図 2 に示すようにほぼ継続して RTK が FIX の状態を維持していたことから、高精度測位が気球高度でも実現できていたと推定される。

回収した受信機 2 台分それぞれの測位演算結果を用いて、2 つのアンテナの相対位置をプロットした結果を図 3 に示す。2 台のアンテナ間の距離(約 1.2 m)を半径とする円周上に相対位置が集中しており、この幅が約 5 cm 程度であったことから、2 台の測位精度の二乗和が少なくともこの値以下を達成していることが確認できた。また将来的に気球から地上へレーザーを送信する際に 2 台の受信機を用いた GNSS コンパスとしての方位決定の可能性が確認できた。

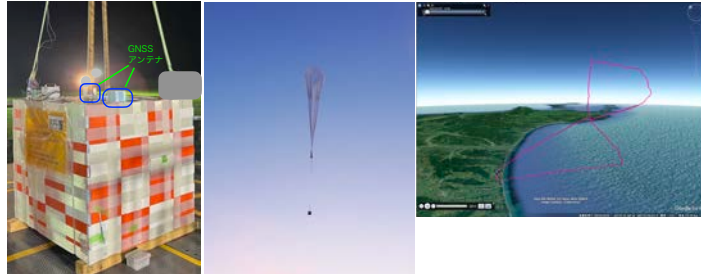


図 1 ゴンドラとアンテナ配置(左)、放球風景(中)、飛行経路(右)

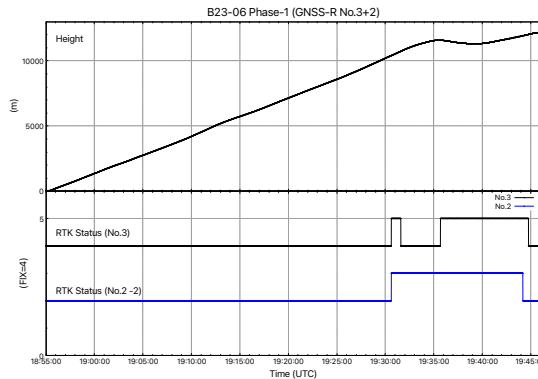


図 2 放球から高度 12 km 以下までの高度変化(上)と受信機 2 台の測位ステータス(下)

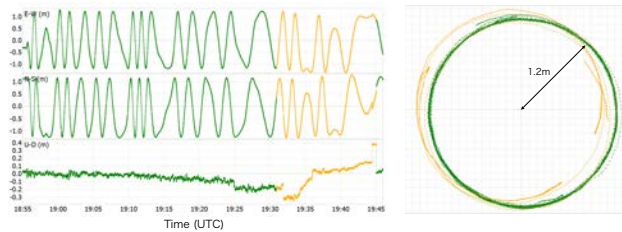


図 3 2 台の受信機の測位結果から得られた相対位置(左)と水平面内への射影(右)

本実験により、PPP-RTK 方式によるリアルタイム測位が大気球の到達高度である 25 km 程度の成層圏で、気球の飛行速度下におけるゴンドラの回転・振り子運動の環境下においても正常に動作し、2 Hz の更新レートで測位演算結果を得ることができ、測位ステータスも大半の時間帯において FIX 状態を連続的に維持することが確認できた。この結果を踏まえ、地上と気球間の光リンク実現の次のステップとして、PPP-RTK による測位結果を用いて地上からゴンドラに向けてレーザー光を送信する実験を行っている。

参考文献

国分 紀秀, 和田 篤始, 太田 方之, 森 英之, 『レーザー周波数比較による一般相対性理論の高精度検証に向けた基礎実験 (I)』, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告, JAXA-RR-23-003, p. 105-134 (2024).