

31. 気球高度とのレーザー周波数比較による一般相対論の高精度検証を目指した基礎実験

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙物理学研究系 准教授 国分 紀秀

概要

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、従来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。そのため必要となる飛翔中の気球との光リンクの実現に向けて、高精度衛星測位結果に基づいて小型気球を自動追尾しつつレーザーを照射する地上局を構築し、小型気球でレーザー受光を確認することで、この方式での送信光リンクの実証実験を行った。その結果、高度20 km・小型気球特有の速い回転・大きな振れ幅の振り子運動という環境下においても、高精度衛星測位によって7 Hzの更新レートで演算結果を得られることを確認した。測位演算結果を元に地上局から見た気球の方位角・仰角をリアルタイムに計算して気球を自動追尾しつつレーザーを照射したところ、約10 kmの距離まで Gondola 側での受光が確認でき、高精度衛星測位に基づいた気球への送信光リンクが実現可能であることを実証した。本研究にあたっては、Gondola 作成部材費用および搭載機器の開発費用を当助成金によって支援いただくことで、実験が実現した。

背景および目的

本研究の最終的な目標は、標準理論を超えた物理学の開拓を目指して、一般相対性理論の精密検証に代表される基礎物理学実験を大気球・衛星を用いて実施することである。気球実験における具体的な目的としては、極めて高精度に周波数安定化されたレーザーを、大気球によって高度数10 kmで飛翔させ、水平飛翔中に地上のレーザーとの光周波数比較を実施して、一般相対性理論の高精度実証を行うことにある。近年、光格子時計を始めとする超高安定度の光周波数基準技術が急速に発展し、すでに地上での精度としては18桁に到達していることから、これと同程度の精度を持った周波数比較技術と組み合わせることで、測位衛星などを用いた大規模な検証実験と同程度以上の成果が地上実験で可能となりつつある。

仮に、こうした高精度・安定度の周波数源を大気球によって数10 km程度の高度に飛翔させ、地上との自由空間光伝送において高精度での周波数比較を行うことができれば、地上での実験より2桁近く大きな周波数差を測定することが可能になることから、これまでの検証精度を飛躍的に向上させることが期待され、科学的な意義は極めて大きい。一方で、こうした最終目的を目指すためには、気球に搭載可能な光格子時計(または周波数安定化レーザー)の開発だけでなく、超高精度の周波数比較システムの実装や、気球と地上の間で光リンクを維持する技術の構築など、いまだ多くの技術的課題があることから、段階的に進めることは不可避である。そこでまずはその一段階として、地上から気球への送信光リンクの実証実験を具体的な目的とする。

方法

本実験は、2024 年度の JAXA 大学共同利用として実施される国内気球実験に採択され、小型気球実験 BS24-03 として 2024 年 7 月 25 日に大樹航空宇宙実験場において放球が実施された。飛翔させるゴンドラとレーザー送信用の地上局およびデータ伝送系を含めた実験全体のシステム構成と、BS24-03 において放球された小型ゴム気球の構成を図 1 左に示す。ゴンドラに搭載された高精度 GNSS 受信機から得られる位置情報と、フォトダイオード(PD)による受光量は、送信機を介して送信され、地上の指令管制棟で受信・復調された後、RS-232C 規格の信号として配信される。制御 PC は経緯台と有線接続されており、伝送されてきた気球の測位情報を元に、地上局の座標からみた気球の方位角・仰角を計算して経緯台に指示を送ることで追尾制御を行う。経緯台は左右両側に望遠鏡などを搭載できるタイプで、片側に送信用レーザーのコリメートレンズとバッフル部を搭載し、反対側には可視光撮像用の望遠鏡と CMOS カメラを搭載してゴンドラからの LED 光を確認することで、ゴンドラでの PD 受光量以外の手段でも追尾状況が分かるような構成とした。

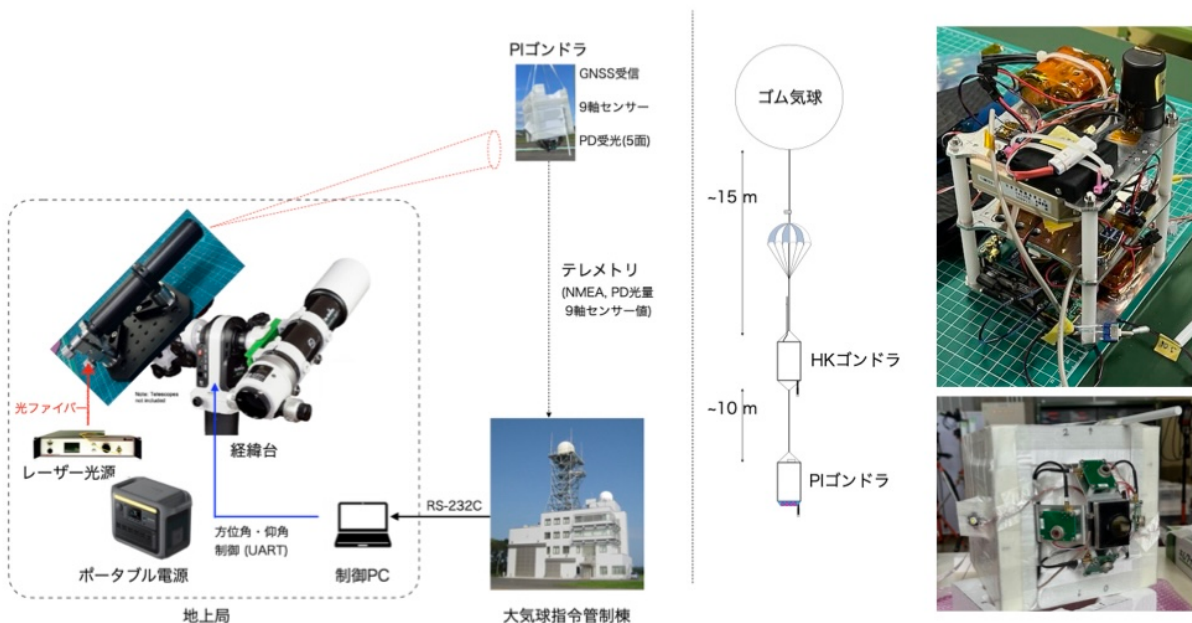


図 1. (左図) 実験全体のシステム構成と、気球およびゴンドラの構成、(右図) ゴンドラの内部機器実装状態と底部に曝露させたフォトダイオードの配置。

本実験で飛翔したゴンドラの内部搭載機器の配置およびゴンドラ底部の外観写真を図 1 右に示す。高精度 GNSS 受信機用のアンテナは最上部に突き出す形で搭載し、データ処理基板や地上への送信機および電源として使用した一次電池類は段積み構造のプレート上下に搭載した。気球高度では外部温度が-40 度近い低温になることから、全体を発泡スチロールで覆って保温する。一方でレーザー受光用のフォトダイオード素子とアンプ基板については、地上から送信されるレーザー光を受光するために外部へ曝露させている。これらの機器を搭載した状態で、事前に低温・低圧試験などを実施した上で放球した。また地上局については高精度衛星測位を活用した地上での方位較正に加えて、夜間に恒星を観測することでさらなる残差補正を実施した。

結果および考察

飛翔中に取得した GNSS 受信機のデータを確認したところ、衛星測位演算のステータスを表す数値が継続的に搬送波波数の整数値不定性が解けている状態を維持していたことから、数 cm オーダーの高精度衛星測位が連続的に実現していたと推測され、大型の気球に比べて振り子・回転運動の幅や速度が大きい小型気球でも高精度衛

星測位が可能と実証された。図2に示すように、飛翔中の一部の時間帯(高度5 km の約47秒間)を切り出して経度-緯度座標系上にプロットしたところ、ゴンドラの振り子運動と思われる航跡が確認できた。およそ12秒程度の準周期的な挙動と最大振幅が約30 m であることから、吊り紐の長さによって決まる振り子運動を計測できていることが分かる。

小型気球は軽量であることから、衛星測位によって得られたゴンドラの位置情報が示す振り子運動に加えて、飛翔中に吊り紐を軸とした回転運動を示すことが知られている。ゴンドラ内部に搭載した9軸センサで計測した角速度と磁場のデータを用いて、回転運動の挙動を確認した結果を図2右に示す。Z軸周りの角速度は最大で200 deg/sにも達しており、非常に速い回転運動をしていたことが確認できた。この回転運動により、4つの側面に取り付けたPDが地上局の方向を向いている間に受光することになる。

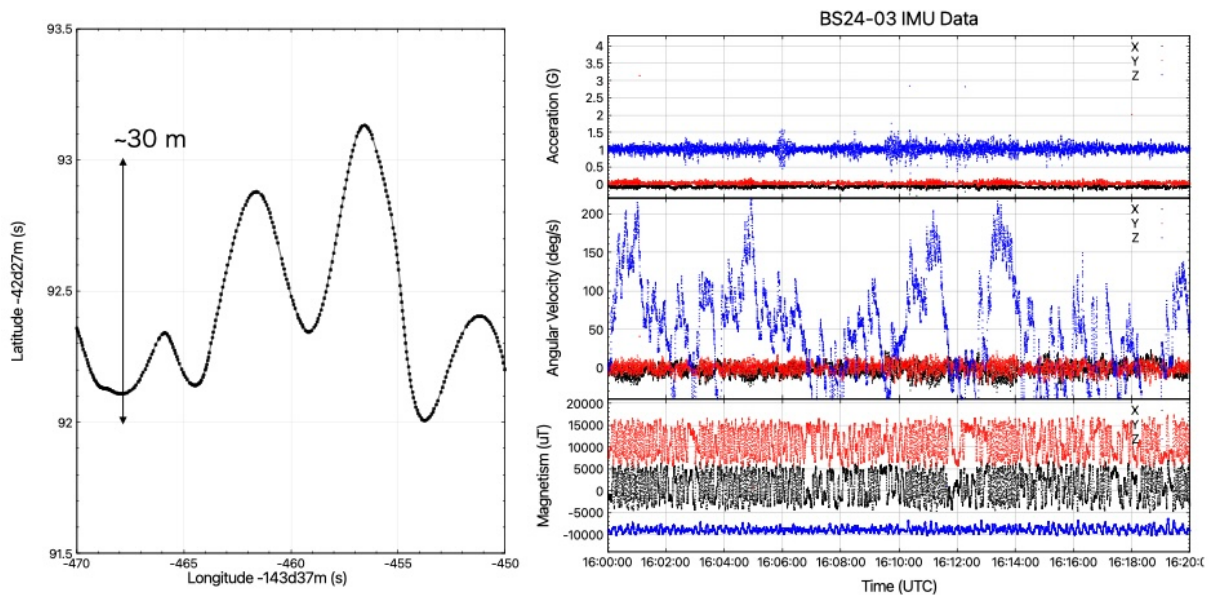


図2. (左図) 飛翔中の高精度衛星測位の結果の一部を経度・緯度面内にプロットした経路図(右図) 搭載した9軸センサによる加速度・角速度・磁場の計測値

図3左に、放球後から最高高度到達までの時間帯における5つのPD受光量の履歴を、気球高度と合せて示す。16:17(UTC)付近までは全てのPDにパルス的な受光が確認できており、その後は雲に突入したためにレーザーが届かなくなっている。なお4つの側面PDでは雲の中に入って以後も連続的に信号が検出されているが、バンドパスフィルターを取り付けていた底面PDで検出されていないことから、放球時間帯に出ていた月の光が雲に散乱されたものと推測される。最後にレーザーが受光できた際の気球高度はおよそ7.5 kmであり、地上局との直線距離は10.5 kmであったことから、本実験の目標としていた「10 km程度の距離において、GNSS測位の結果を元にして地上局から方位制御して送信したレーザーを受光する」という項目はクリアしたことが分かる。

図3右に、パルス的に受光した時間帯を拡大したプロットを示す。側面4つのPDのうち、同時に受光しているのは2つまたは3つであり、隣り合う面で強く受光している間に、残りの2面の光量が反相関の連動で変化していることから、ゴンドラの回転運動によって受光面が移り変わっていく様子が確認できる。受光の時間幅は、パルスごとにばらつきはあるものの、おおむね1秒程度となっており、これは、距離10 kmにおけるレーザー光のスポットサイズ、ゴンドラの振り子運動の幅と周期を踏まえると振り子運動がスポットサイズの中を横切る時間幅のオーダーとして妥当な数字になっている。

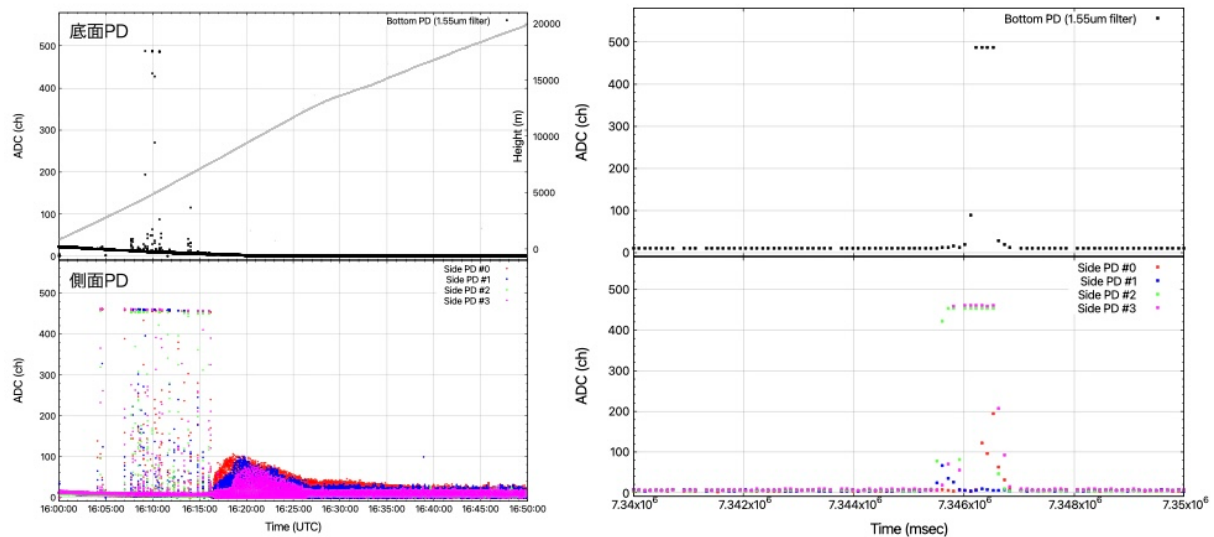


図 3. 飛行中のフォトダイオード受光量の時間変化とその一部の拡大

以上の結果により、今回の気球実験によって、一般相対性理論の高精度検証に向けた基礎実験としては、高精度衛星測位に基づいた地上からの送信光リンクの実現を達成したと言える。今後は、距離 10 km 以遠における送信リンクの実証や伝送損失の確認に加え、夜間ではなく日中の環境においても同様の光リンクを確立することなどが当面の課題であり、引き続き気球を用いた基礎実験を継続する予定である。

(完)

発表論文

- 1) 「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)」
国分 紀秀, 和田 篤始, 太田 方之, 森 英之,
宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告, 巻 JAXA-RR-23-003, p. 105-134, 2024
(doi: 10.20637/0002000251)
- 2) 「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 (II)」
国分 紀秀, 武井 宏延, 和田 篤始, 太田 方之, 森 英之, 夏莉 権,
宇宙航空研究開発機構研究開発報告: 大気球研究報告, 巻 JAXA-RR-24-005, p. 1-18, 2025
(doi: 10.20637/0002001699)