

レーザー周波数比較による 一般相対論の高精度検証に向けた基礎実験 (I)

JAXA 宇宙科学研究所 国分紀秀、太田方之
JAXA 研究開発部門 和田篤始

1 概要

本研究の最終的な目的は、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 10km で飛翔させ、レベルフライト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、気球実験であっても、測位衛星軌道での一般相対論の検証と同程度以上の成果が可能となりつつある。一方で、高度差に応じた重力ポテンシャルの違いから予測される時間 (周波数) のずれを精密に決定するためには、レベルフライト中の気球の高度を 10cm 程度の精度で決定することが必要であり、また、地上と気球との間の光リンクを維持するためには、水平方向の位置も cm 級のリアルタイム測位によって光学ターミナルの方向制御にフィードバックさせる必要があると想定される。そこで本申請は、将来の本格的な相対論比較に向けた基礎実験の第一歩として、cm 級のリアルタイム測位モジュールを搭載したペイロードを飛翔させて、水平方向と高度のそれぞれについて到達可能な精度の検証を行う。また、将来的に光格子時計や光周波数比較システムを気球搭載することを見据えた段階的な開発のステップとして、要素技術をモジュール化して搭載する。

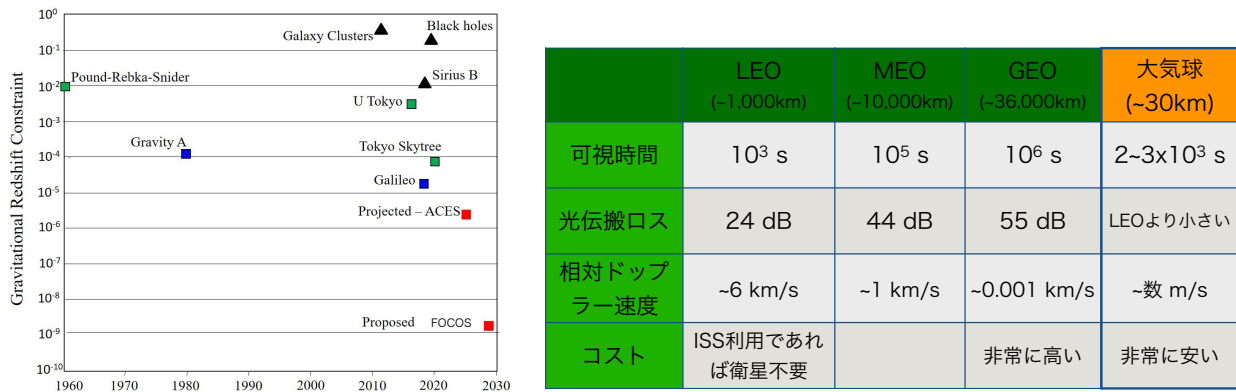


図1 (左図) 一般相対論の検証精度の年表。近い将来の計画として提案されているものを含む。(右表) 各種の衛星軌道と気球実験において自由空間伝送によって光周波数を比較する際の比較表。気球実験は光伝送ロスや相対速度差が小さく、低コストで実施できるという点では大型の衛星計画よりも優れている。

2 研究目的

現在の基礎物理学は、2012年のヒッグス粒子の発見によって素粒子物理学の標準理論における最後の要素が実証されたことで、「標準理論を超えた」物理現象の探索や破れの検証が強い動機となる時代を迎えている。より具体的に学術的「問い」となっているのは、4つの力(電磁気力、弱い力、強い力、重力)の統一、および宇宙の質量とエネルギーの大部分を占めるダークマター・ダークエネルギーの起源の解明である。これに対して「より高いエネルギーの粒子衝突実験」で観測質量範囲を広げることや「より大型の望遠鏡」を地上や軌道

上に実現して観測可能領域を広げるといった路線が代表的であり、必然的に計画の大型化へと繋がっている。一方で、「より高精度に測定する」ことで、検証の精度範囲を広げることは、本来的には実験物理学の王道的な手法であり、必ずしも巨大科学のような予算をつぎ込むことなく、標準理論を超えた現象の探索を実現できる可能性がある。例えば4つの力の統一を試みる超大統一理論の中には、重力を記述する一般相対性理論の破れを示唆したものがあり、過去にも原子時計による検証が行われてきた。一般相対性理論によれば、重力ポテンシャルが ΔU だけ異なるところに置かれた時計の周波数 f は、 $\Delta f/f = -\Delta U/c^2$ だけシフトする。これは地上の重力加速度下であれば、1cm の高さの違いが 18 桁目の周波数の違いとなって観測されることを意味する。しかし従来の原子時計は 15 桁程度の不確かさしか持てなかったため、衛星やロケットに高精度水素メーザーを搭載し、大きな重力ポテンシャル差を持たせた時の周波数シフト量を測定しても、検証精度は $\sim 10^{-5}$ 程度が限界であった。近年、光格子時計や単一イオン時計などのように、従来の原子時計に比べて3桁も高い精度・安定度に到達する光周波数基準が技術的に確立しつつあり、国際単位系における「秒の再定義」を担うことが確実視されている [3]。実際に、2018年にスカイツリーにおいて450mの高度差を持たせた2台の光格子時計の周波数をファイバーで直接比較することで、これまでの検証精度限界とほぼ同等の成果が得られている [1,2]。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10km程度の高度に飛翔させ、さらに地上との自由空間光伝送において18桁精度での周波数比較を行うことができれば、地上実験での高度差より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、従来の検証精度を大きく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。こうした最終目的を目指すにあたり、現実的には、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上に大規模な予算が必要となり、段階的に進めることは不可避である。そこで本申請では、将来の本格的な相対論検証実験に向けた基礎実験の第一歩として、今後の本格的な開発を進める前提となる、レベルフライト中のcm級リアルタイム測位の実証にフォーカスした構成とし、リソースとして可能な範囲で、それ以外の技術要素の実証を行う。

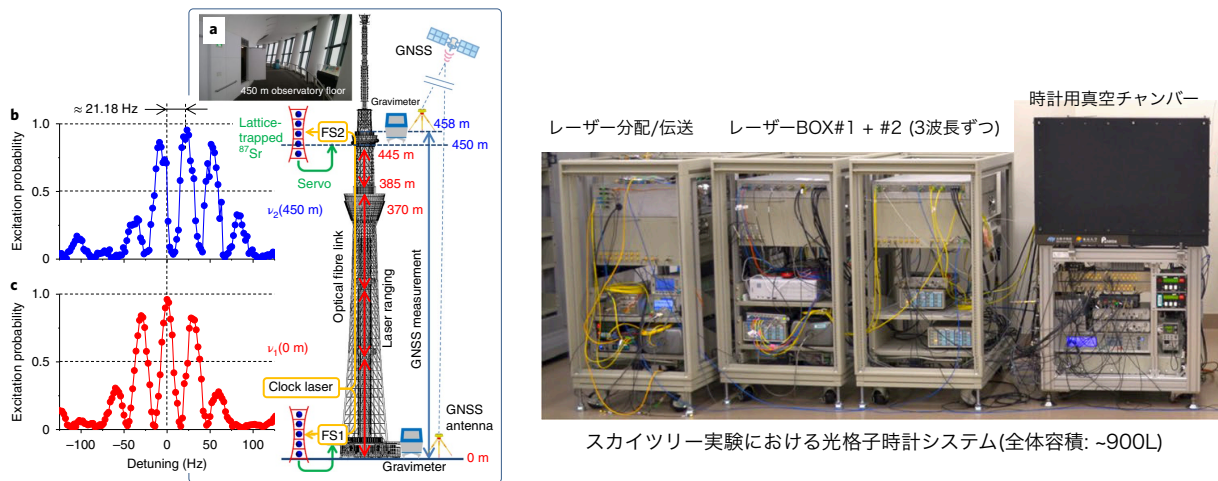


図2 スカイツリーにおいて450mの高度差における周波数比較から相対論効果を検証した実験と光格子時計システム [1,2]。この実験においては約450mの高度差で固定された2点間を光ファイバーで結んで周波数比較を行ったが、気球実験においてはこれを自由空間伝送で比較する必要がある。

3 実験計画

最終的な目的である一般相対論の精密検証を気球実験によって行うためには、気球ペイロードおよび地上設備として以下のようなシステム構成が必要となる。すなわち、1) 極めて高い安定度で周波数制御されたレーザー光(気球搭載用と地上設置用の2式)、2) 気球と地上を結ぶ自由空間における光伝送で超高精度の光周波数比較を実現する手法と実装システム、3) レベルフライト中の気球と地上との間で連続的に光リンクを維持す

るための自動追尾型光学ターミナル(2式)と追尾制御に必要となる高精度の気球位置決定システム、の3つのブロックである。このうち、1)については光格子時計に代表されるような地上実験で実証済みの技術が存在し、また1時間以下のフライト時間であれば光共振器に安定化させたレーザーなども候補となりうる。2)については、近年世界的にも精力的に開発が進められており、中でも Optical Two-Way Time and Frequency Transfer (O-TWFTF) と呼ばれる方法が地上で水平方向数 km の距離において 18 桁精度を実証していることから有力である [4]。これに対して 3) については、SLR などの精密軌道決定技術が確立している衛星と異なり、風に乗って飛行している気球と地上の固定点の間で双方向にレーザー光を追尾させる技術の開発から行う必要があることから、基礎実験の最初にまず技術的な成立性を実証する必要がある。レベルフライト中の気球ペイロードは、風による位置・速度の変化や高度の変動に加えて、吊り紐のよじれに伴うゴンドラ自体の回転を受けて、地上に固定された比較レーザーとの相対角度が時間的に変化すると考えられる。従って、気球側と地上側の双方から送信するレーザー光の方向を正しく制御するためには、ゴンドラの回転自体をより戻しなどの機構で抑制する前提の上に、搭載機器側がリアルタイムに気球位置を把握し、地上局との方位角/仰角に変換した上で、送信ターミナルの方向制御系にフィードバックする必要がある。2点間の距離が数 10km ある時に、典型的なレーザーの絞り角の範囲内に捕捉し続けるためには、サブメートル級の測位精度がリアルタイムに要求されることになるが、これは近年の高精度 (cm 級)GNSS レシーバーを用いれば実現可能な範囲である。一方、フィードバック系の設計として、速い制御を担うステアリングミラーと遅い成分の粗調整を担うアクチュエータ(ピエゾなど)によって帯域分割して実装することを想定すると、それぞれの帯域/ダイナミックレンジを適切に設計するためにも、cm 級測位の飛行中実測データを取得して測位精度を確認した上で、設計に反映させることは必須となる。そこで本申請はその第一歩としてまず cm 級の精密測位が気球において可能であるかどうか、達成される測位精度がどの程度かを実測する。

今回の気球飛行は、将来の一般相対論比較実験に向けた基礎実験としての位置付けであるが、本申請単体として期待される成果として、気球高度における cm 級の高精度リアルタイム測位の実証と、オフライン解析における飛行高度の精密決定の実現があげられる。このためには、レベルフライト中の高度が安定するような気象条件ほど、測位決定誤差への影響も小さくなると考えられる。一方で、ともかく cm 級測位の実測データが取得できることが最低限の獲得目標となる。また副次的に搭載する機器群は、周波数安定化レーザーや自由空間中での光周波数の精密比較方法に向けて必要となる要素技術を、気球ペイロードの SWaP 制約の中で実装するための開発ステップであり、フライト中に想定される外気温変動や気圧差、回転による加速度や着水時の衝撃といった環境下で正常に動作することをテレメトリと記録データから確認することが最低限の成果となる。またフライト中の環境条件として磁場の変動レベルを実測することは、特に光格子時計のような磁場に対して感度を持つ機器にとっては大きな設計制約となりうるため、最初の基礎実験の中で確認しておく必要がある。今回の基礎実験における気球への条件制約としては、放球時期・上昇下降速度に関しては特に制約がない。高度安定性は高い方が望ましく、最高到達高度や飛行時間の条件より優先するが、何よりも放球機会の確保を最優先として、気象条件の緩和は可能と考えている。

4 搭載機器の構成

ゴンドラとしては 2022 年度に放球された標準ゴンドラ相当 (~25kg) を想定し、ペイロードサイズ・重量は 0.4×0.4×0.3m, 25kg 程度で、気密容器内に電源と GNSS アンテナ以外の全てを内蔵させる。低消費電力 CPU ボードによって集中制御する構成とし、HK 機器との通信の他に、メイン装置である cm 級測位 GNSS チップ搭載基板(2式)のデータ取得/記録とテレメトリに出力する高精度測位情報(緯度・経度・高度)の抽出を行う。容器内にはサブ装置群として 1) モードロックレーザー(ドライバ+温度調整)、2) 環境計測用磁場センサ、3) 光ターミナル受光素子実証モジュールをそれぞれ個別のモジュールとして搭載する。これらは全て放球前に動作モードに設定し、飛行中はテレメトリに異常がなければモニタのみの予定。GNSS アンテナは測位情報の差分が抽出できるように 2 式をゴンドラ上でなるべく離れた位置に取り付ける。ダウンリンクのレー

トが許す範囲で、高精度測位データとサブ装置のハウスキーピング情報を HK 機器に出力する。ゴンドラの回転を可能な限り抑えるために吊り下げる部分はラダー式を希望する。図 3 に、提案する搭載機器のコンフィグレーション案を示す。

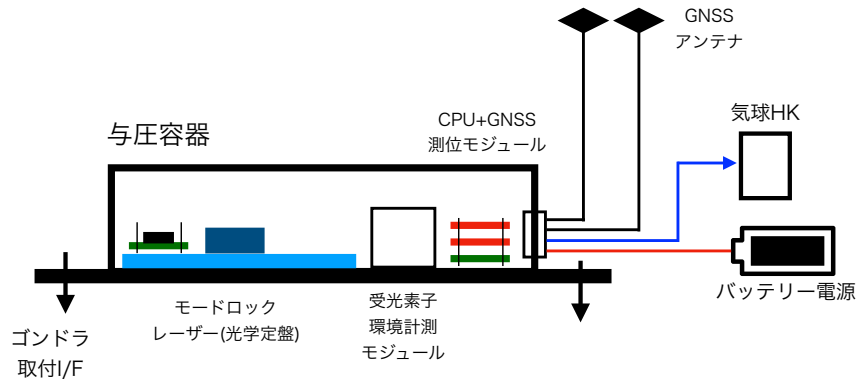


図 3 提案する気球搭載機器のコンフィグレーション案

本申請の主目的である cm 級測位については、すでにチップレベルで製品化 (ublox 社製 ZED-F9P) されており、それを搭載した基板が市販品で入手可能な状況にあるため、新規の開発要素はないが、高度数 10km での測位実証は行われていない。高度決定のオフライン解析に必要な測位データを全て気球テレメトリに出して取得することはダウンリンクレートの制限から不可能なため、いったん CPU ボードから GNSS 測位モジュールに対してデータ収集した上でストレージへの記録、テレメトリ項目の抽出などを行うが、ボード間通信は UART や I²C などの通信規格で行い、CPU ボード側の処理も OS の標準ライブラリで対応可能な範囲とすることから、実装にあたって大きな懸念はない。ペイロード全体を直方体型の気密容器に収めて、フランジコネクタを介して HK 機器やバッテリーと接続するシンプルな構造とする予定であり、気球フライト環境に対する構造・熱設計上の懸念も特になく考えている。ただし、ペイロード以外のゴンドラ部分まで含めた設計を提案グループ側で行う場合にはマンパワーおよび時間リソースが厳しいと考えている。本申請のペイロードは比較的小型であることから、相乗りを前提として、2022 年度に気球グループが製作した標準ゴンドラ (または同等のもの) に搭載する計画とさせていただきたいと考えており、気球グループ側との調整が必要となる。

副次的な目的である、今後に向けた要素技術実証については以下のように考えている。1) モードロックレーザーモジュール: 技術的には既製品レベルであり、いったんブレッドボード上で構築してからペイロード筐体に収めて温度制御する。フライト中にモード同期が維持されていることが実証項目であり、自己参照光学系によるパルス幅計測を行う予定であるが、ペイロード化した実績はないため開発が間に合わない場合には、バックアッププランとして単純なパワーメータ計測で代替する。2) 環境計測用磁場センサ: これらも市販品を CPU ボードと通信して読み取り記録するだけであり、特に懸念はない。3) 光ターミナル受光素子実証モジュール: APD または SPAD 素子を温度制御ボックスに収めて暗電流をモニタすることをミニマムサクセスとする。将来的には光ターミナル部分は曝露されるため、より厳しい温度・気圧環境での使用となるが、本申請では動作実証の第一ステップとして気密容器内部で安定動作を確認する。

参考文献

- [1] “Transportable Strontium Optical Lattice Clocks Operated Outside Laboratory at the Level of 10^{-18} Uncertainty”, N. Ohmae+, Advanced Quantum Technologies, 2100015 (2021).
- [2] “Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks”, M. Takamoto+, Nature Photonics, 14, 411-415 (2020).
- [3] M. Takamoto+, Nature Photonics, Vol. 5, No. 5, pp. 288 - 292, (2011).
- [4] Giorgetta+, Nature Photonics, 7, pp. 434 - 438, (2013).