

# 気球 VLBI 地上試験

河野 裕介<sup>1</sup>, 土居 明広<sup>2</sup>, 木村 公洋<sup>3</sup>, 馬場 満久<sup>2</sup>, 松本 尚子<sup>4</sup>, 中原 聡美<sup>2</sup>,  
 村田 泰宏<sup>2</sup>, 芝井 広<sup>5</sup>, 石村 康生<sup>2</sup>, 田中 宏明<sup>6</sup>, 坂本 啓<sup>7</sup>, 樋口 健<sup>8</sup>,  
 小木曾 望<sup>3</sup>, 児玉 峻<sup>3</sup>, 鳥阪 綾子<sup>9</sup>, 仙場 淳彦<sup>10</sup>, 上原 顕太<sup>11</sup>, 本間 希樹<sup>1</sup>,  
 鈴木 駿策<sup>1</sup>, 小山 友明<sup>1</sup>, 秋山 和徳<sup>12</sup>, 小山 翔子<sup>13</sup>, 坂東 信尚<sup>2</sup>, 福家 英之<sup>2</sup>,  
 莊司 泰弘<sup>5</sup>, 小川 英夫<sup>3</sup>, 本間 愛彩<sup>3</sup>, 高田 勝太<sup>3</sup>, 長谷川 豊<sup>3</sup>, 井上 将徳<sup>3</sup>,  
 藤澤 健太<sup>4</sup>, 中村 拓<sup>4</sup>, 今村 俊哉<sup>4</sup>

1 国立天文台, 2 宇宙科学研究所, 3 大阪府立大学, 4 山口大学, 5 大阪大学,  
 6 防衛大学校, 7 東京工業大学, 8 室蘭工業大学, 9 首都大学東京, 10 名城大学,  
 11 東京大学, 12 MIT, 13 マックスプランク研究所

## 1. はじめに

銀河中心の超巨大ブラックホールはこれまで間接的な方法で示唆されてきたが、直接撮像という本当の意味での観測的実証はまだ果たされていない。BH が存在すれば、BH へ落ち込む物質（降着円盤）の放射を背景光として「黒い穴」として見えると期待される（図1）。「黒い穴」の直接検出は、現代物理学における重要課題であり、観測天文学が果たすべき大目標の一つである。最有力候補天体 SgrA\* と M87 では、全天で最大の視直径（いずれも約  $50\mu$  秒角）の「黒い穴」が期待される。ブラックホールの撮像には、ブラックホール周辺大気を透過するサブミリ波帯（ $300\text{GHz} - 1\text{THz}$ :  $\lambda 1\text{mm} - 300\mu\text{m}$ ）で基線長数千 km の VLBI (Very Long Base line Interferometry) を構築し、10 マイクロ秒角の角度分解能を実現するのが唯一のアプローチである。ところが、このような高周波電波は、地球側の大気による電波の波面揺らぎ・吸収・放射雑音の影響を強く受け、地上からの VLBI 観測はこれまで成功の例がなくスペース・成層圏からの観測が望まれている。我々は気球を用いた成層圏 VLBI 観測の実現を目指し検討を進め、気球 VLBI の技術課題に取り組んでいる。気球 VLBI の主要な技術的課題は、(1) 周波数標準安定度、(2) 局位置変動、(3) 指向精度、(4) VLBI 高速データ処理系の省電力化・排熱、(5) 主鏡の鏡面精度対策であった。ここでは(1), (2) について述べる。

## 2. 気球搭載周波数標準

VLBI 観測に用いる周波数標準時計は、単位積分時間内（数十秒@ $22\text{GHz}$ 、数秒@ $230\text{GHz}$ ）にコヒーレンスを維持する安定度をもつことが求められる。地上 VLBI ではこの条件を満たす水素メーザ原子時計が用いられているが、重量・サイズ・耐環境性能などで気球搭載には適さない。そこで BVA 技術を用いた OCXO の搭載を検討している。しかしこれまで OCXO を振り子に搭載し電波干渉に使った例はない。そこで OCXO を振り子に搭載し、臼田宇宙空間観測所の水素メーザと比較する実験を行った。気球の振り子環境を模擬するために OCXO を簡易振り子に搭載し、周波数変動を計測した。ケーブル長は約 6.7m で周期約 5 秒である。振り子中の位相の変動を図2に示す。最初の 7 秒程度は初期位相傾斜である。その後振り子運動が始まると異なる位相傾斜になったが、振り子

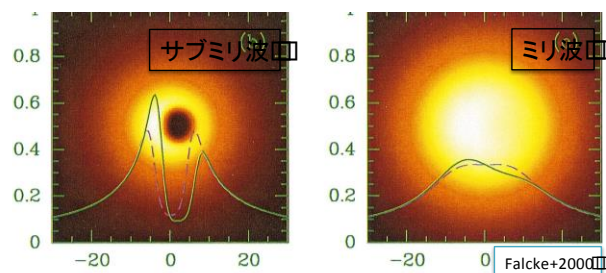


図1: ブラックホール電波イメージ（理論シミュレーション）。黒い穴の直径はシュバルツシルト半径の約 2~5 倍（銀河系中心 SgrA\* の場合約  $20-50\mu$  秒角）。

による水平方向加速度と OCXO 加速度感度から期待される位相変動（図 2 下図の直線で示す範囲）は発生しないことがわかった。これは振り子運動において、水晶発振器とその支持材との間に水平方向の加速度が加わらないことで説明できる。一方鉛直方向の加速度は周波数変動に効くが、周波数変動で $\cdot 16$  乗の大きさであり観測に影響しない。これらの結果から OCXO を周波数標準に用いた気球 VLBI のフィジビリティが確認できた。

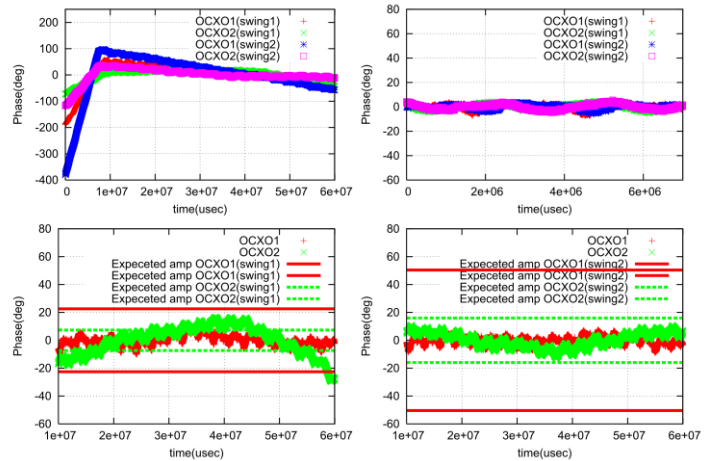


図 2 OCXO 振り子試験、加振試験時位相データ

左上：全時間。右上：加振前の傾斜時の位相変化の直線成分を除いたもの。左下、右下：それぞれ Swing1,2 での加振してからの位相の変化と、傾斜時の位相変化から予想される位相変動振幅（減衰は考慮せず）。直線成分は除去

### 3. 基線変動 VLBI 試験

#### 3.1 実験目的

電波干渉計において、2 局間の信号を掛け合わせて（相関処理）して得られた干渉縞の位相は、フリンジ位相といわれる。局位置が電波源の方向に時間変動するとフリンジ位相が変動し、積分を行うと干渉強度の劣化を引き起こす。したがって VLBI 観測ではフリンジ位相は一般に 1 ラジアン程度以下に保つことが求められ、それは 230GHz の場合、位置変動換算で 0.2mm である。過去のミッションから推測されるフライト中の振り子運動は 10cm を超え、補正が必要である。また弦振動など振り子以外の成分も姿勢変動に含まれ（図 3）これらのフリンジ位相への影響についても検討課題が存在する。これまで気球に VLBI 電波望遠鏡が搭載されたことがないため、実際に電波望遠鏡をゴンドラに搭載し、振り子振動下で VLBI 観測を行い、気球 VLBI の実現性を検証した。

#### 3.1 実験構成

場所は JAXA 相模原キャンパスの構造試験棟で、用いたゴンドラは気球 VLBI (1 号機) であり（図 3）、実験の外観図と構成をそれぞれ図 4, 5 に示す。電波源は静止軌道の通信衛星 IPSTAR で 19.7-20.2GHz の通信信号を受信した。衛星からの電波は棟外に設置された平面鏡（図 6）を用いて光路を変更し、棟内のクレーンにつられた電波望遠鏡に向かってほぼ水平に導波した。VLBI 装置は、国立天文台等で

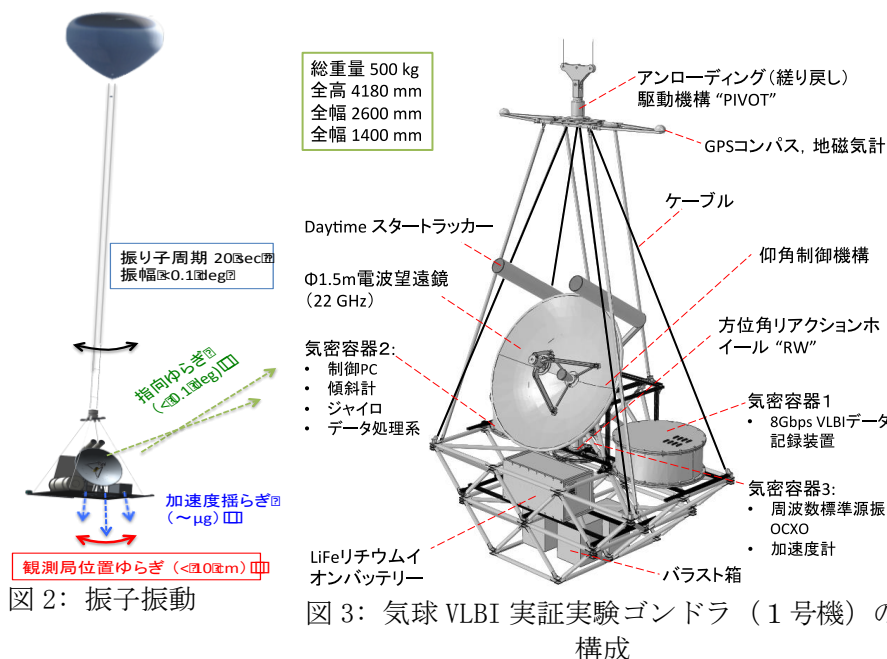


図 3：気球 VLBI 実証実験ゴンドラ（1 号機）の構成



図 4：実験外観図

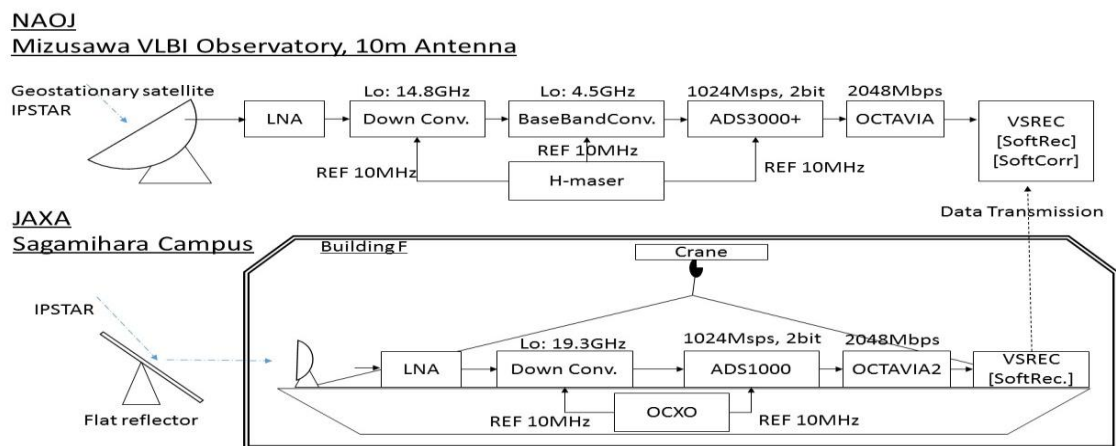


図 5: 実験構成図

開発された広帯域観測装置を搭載した。振り子から電源等ケーブルが地上に接続されていると振り子運動に力を及ぼすために、ケーブル類は地上から切り離し、オフラインで運用した。観測データ伝送は振り子振動停止後に通信回線を用いて行った。

振り子に搭載する周波数標準は OCX08607 を用いた。観測データの時刻タグは Septentrio 製の GPS レシーバ PolaRx2e@ で VLBI サンプラに供給する 1PPS を基準に生成されている。

VLBI の相手局は国立天文台水沢 VLBI 観測所の 10m アンテナである（基線長 426km）。周波数標準は定常的に GPS と比較された水素メーザ原子時計を用いている。

関連処理は水沢の計算機（VSREC）上のソフトウェア関連処理を用いて行った。

ゴンドラの姿勢決定は振り子周期が数秒程度であるために、ジャイロを用いて姿勢変動を計測した。ヨー角（Az 角）は日本航空電子製の FOG（Fiber Optic Gyro）の JG-35F で、パルス出力を Interface 製のタフコントローラ ITC-A61310(L) で計測した。ピッチ角（E1 角）とロール角はシリコンセンシングシステムズ製のシリコンリングジャイロそれぞれ CRS39-02、CRH01-025 で、TI 製 ADS1115 で変換されたデジタル信号をマイコン Raspberry Pi/2 で取得した。ジャイロデータは UDP パケットとして決定ソフトウェアに伝送され、目標角と現在の Az 角との差の姿勢制御 PC に伝送した。それぞれのジャイロは 100Hz でサンプリングの後デジタル積分を行い 10Hz 毎に姿勢を計算した。

またゴンドラに実験外部評価用の位置計測システムも組み込んだ（図 7）。ゴンドラの最下部の 4 辺にそれぞれ放射方向に Sharp 製 GP2Y0A21YK0F 測距計を搭載し、地上にアクリルに紙を貼った反射板を垂直に測距センサから 100mm 程度離して 10Hz で計測した。

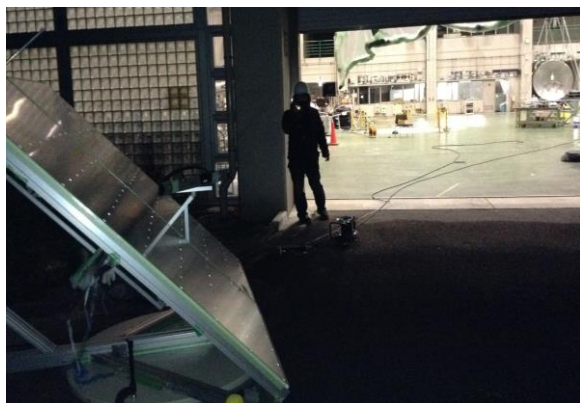


図 6: 電波を棟内に導く平面鏡

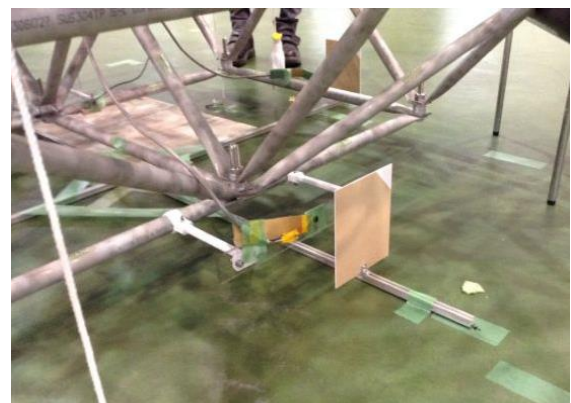


図 7: ゴンドラ下部の測距計と反射板



### 3.2 実験結果

観測は 2015/3/6 21:31:00 から 100 秒間行った。ゴンドラに揺れを加えた後振幅 2cm 程度で自由に振り子運動をしているときに記録を行った。

相関パラメータは 8k 点 FFT、1m 秒積分である。単位積分時間（振幅スペクトルを図 8 に示す）のごとに出力される相互相関スペクトルの 388.875MHz にピークを持つ単一周波数信号（帯域 0.125MHz）の位相を今回計測するフリンジ位相とした。フリンジ位相は、各局の周波数差により時間ドリフト成分があるため、直線近似で除去した。そのフリンジ位相の変動の記録と同時にジャイロ姿勢のデータと評価用位置計測データを図 9 に示す。図からわかるように、フリンジ位相は、ジャイロピッチ角、光軸方向を表す X 方向のゴンドラ位置と調和していることがわかった。フリンジ位相の振幅とジャイロの角度の振幅から、振り子の長さ 11.0m と推定できる。これはクレーンの高さ 13.1m から吊り下げ時の焦点位置の高さ 1.7m を除いた長さとはほぼ一致している。わずかな違いに関しては、ジャイロのスケールファクタやクレーンの高さの計測など詳細を調査する必要がある。

ジャイロデータとフリンジ位相を正弦波近似で振り子成分を除去したものを図 10 に示す。フリンジ位相は積分し 100Hz 相当のデータに変換している。フリンジ位相は数 10 度程度の変動が残っているが、遅延変動  $10^{-13}$  の程度揺らぎ (Rogers&Moran1981) をもつ大気の影響として説明できる。一方、図 10 の上図が示すように、ジャイロには、他のミッション (Abramovici+2009) でも観測されている弦振動のような短期変動がみられる。望遠鏡の重心と主鏡焦点は数 10cm で  $80\mu\text{m}$  程度の遅延変動しか引き起こさないと考えられ、大気の雑音以下の変動であることが実証できた。

相関データを使ってコヒーレンスを計算した (図 11)。振り子変動がある場合は積分時間に伴いコヒーレンスを失っていくが、補正後はコヒーレンスを保てている。以上のことから振り子電波望遠鏡による VLBI 観測を世界で初めて実施し、フリンジ位相を追尾することに成功した。フリンジ位相は同時に計測された姿勢変動データで説明でき、局位置変動を除去することで VLBI 観測が実現できることがわかった。

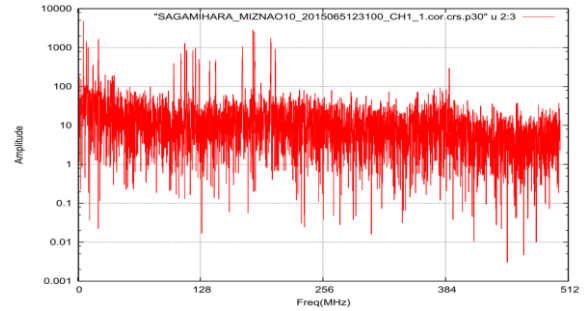


図 8: IPSTAR の観測相互相関振幅スペクトル

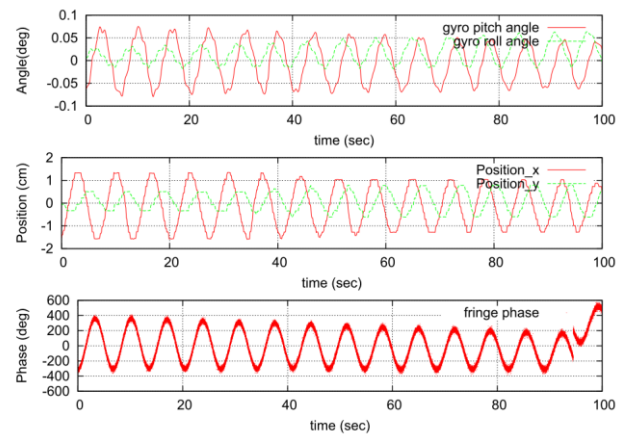


図 9: 上: ジャイロ角(ピッチ、ロール)、中: 外部から取得したゴンドラ位置 (X, Y)、下: フリンジ位相

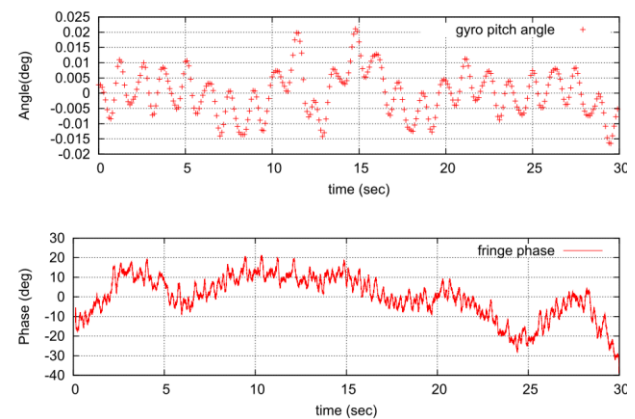


図 10: 上: ジャイロ角(ピッチ)の振り子成分除去後、下: フリンジ位相の振り子成分除去後

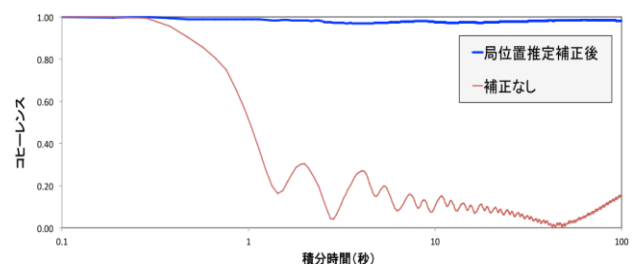


図 11: 振り子の補正によるコヒーレンスの改善