

## 第27回衛星設計コンテスト

### アイデア概要説明書

応募区分 ジュニアの部

#### 1. 作品情報・応募者情報

作品名 地球公転軌道上 スペース VLBI 衛星
副題
学校名 長崎県立長崎西高等学校物理部

#### 2. ミッションの概要

地球と2機の人工衛星を巨大な正三角形の頂点に配置し、もう1機を小惑星「2010TK7」の軌道に投入することで仮想電波望遠鏡を構成する方法を提案する。1機を傾斜角のある軌道に投入することで、3次元方向に高い解像度を得ることができ、さらに、それぞれの軌道に投入する間に必要な燃料は機体全質量50%以下に抑えられることを確認した。この世界最大のレンズであれば、より高い解像度でのブラックホール観測が可能となり、新たな宇宙開発に貢献できる。

#### 3. 目的と意義

##### (a) 目的

平成31年4月に、イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) プロジェクトにより、ブラックホールの撮影に成功したという発表があり、我々も世界初のブラックホールの画像を見て大変興奮した。EHTでは、超長基線電波干渉計 (VLBI) という仕組みが用いられており、複数の望遠鏡を同期させて、地球サイズの仮想電波望遠鏡を構成している。そこで我々は、より大きな規模の VLBI を考案し、その実現可能性について検討することを本研究の目的とした。

##### (b) 重要性・技術的意義等

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT) よりも大きな直径の仮想電波望遠鏡が実現できれば、ブラックホールや他の天体をより高い解像度で詳細に観測できる。これまで観測が不可能であった遠くの恒星の観測やブラックホールのガスの観測など新たな発見が期待できるため、技術的な意義は大きい。また、高校物理で学習するケプラーの法則と力学的エネルギー保存則を実用的に利用するだけでなく、ツィオルコフスキーの公式を先取り学習することもできるなど、軌道計算の過程で必要な物理や数学の知識を体験および習得できるという教育的な側面も期待できる。

#### 4. アイデアの概要

■望遠鏡をどこに設置するのか  
VLBI は、対象天体と望遠鏡間の距離差を大きくしたほうが解像度は向上する。地球上では、EHT 以上に距離を離すことができないため、地球以外にも望遠鏡を設置しないと性能が向上しない。そこで、月面や他の惑星への望遠鏡の設置を検討したが、地球との通信ができなくなる「食」が生じたり、日照時間が変動したりする等の問題が考えられ、そもそも、月面等への電波望遠鏡の建設や設置は大変困難である。そこで、地球外の天体への設置は行わず、望遠鏡を搭載した人工衛星を利用して VLBI を構成させる方法、すなわちスペース VLBI を用いることにした。

■地球からもっとも離れた場所はどこか

地球を低軌道で周回しても、EHT と同程度の規模にしかならず、宇宙空間には観測の妨げになる大気がないというメリットはあるものの、飛躍的な性能の向上は期待できない。

スペース VLBI の先行事例として人工衛星「はるか」がある。はるかは、遠地点高度 21,300km となる長楕円軌道で地球を周回しているため、大きな仮想電波望遠鏡として機能し、数々のすばらしい成果を収めた。そこで、人工衛星「はるか」よりも離れた場所として、月面や月の公転軌道上などが考えられたが、第 19 回衛星設計コンテストにおいてラグランジュポイント衛星のアイデアが先行研究として発表がなされており、本校物理部は、さらに遠くで望遠鏡の口径が考えうる中で最大となる位置で、かつ実現可能性が高い場所として、地球の公転軌道上への衛星の投入が最適であると考えた。ただし、太陽に対して地球の正反対の位置に衛星を投入すると、衛星は 1 機で済むが、太陽を間にはさむため通信が困難になる。そこで、パラボラアンテナを搭載した 2 機の人工衛星を打ち上げ、適切に加速および減速することで、2 機が地球を含めて正三角形となるように地球の公転軌道上に配置することにした。

しかし、これでは黄道面に平行な方向にしか高い解像度を得られないため、黄道面に対して軌道傾斜角をもつ、力学的に安定した軌道への人工衛星の投入も必要となる。そのような軌道の候補として、黄道面に対する軌道傾斜角 20.88 度、周期 1.00 年を保って安定的に公転しているトロヤ群小惑星「2010TK7」の公転軌道を提案する。この公転軌道上にもう 1 機投入できれば安定的な運用ができ、3 次元方向にも高い解像度を得ることができる。この配置が実現すれば、直径が最大約 1 億 7 千万 km のレンズが実現できると考えた。これが実現できれば、EHT プロジェクトのレンズの直径が 12,742km 相当であるのに対し、我々が提案するレンズは直径が最大約 1 億 7 千万 km 相当となり、倍率が約 1 万倍以上に向上する。これだけの倍率が出せれば、より遠くのブラックホールや恒星を高解像度で観測することが可能となる。

■正三角形への配置手順

本研究で使用するスペース VLBI 衛星は、観測用のパラボラアンテナ、地球へのデータ送信用のアンテナをもち、後述するような軌道遷移を行うためのヒドラジンスラスタを持つ。はじめ、2 つの同型の人工衛星  $S_1$ 、 $S_2$  は地球 E から同時に打ち上げられ、地球公転軌道上を太陽に対して 29.67km/s で周回しているとす (図 1)。ここから、 $S_1$ 、 $S_2$  を正三角形の頂点の位置に投入する手順を説明する。ただし、すべての速さは太陽に対する速さである。

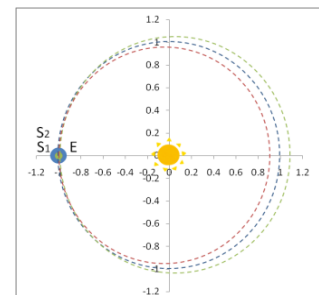


図 1 :  $S_1$  を減速し、 $S_2$  を加速する

$S_1$  は減速して内側の楕円軌道を短い周期で周回させる。 $S_2$  は加速して外側の楕円軌道を長い周期で周回させる。周期が異なるため、E、 $S_1$ 、 $S_2$  の中心角に差ができ、ずれ始める (図 2)。

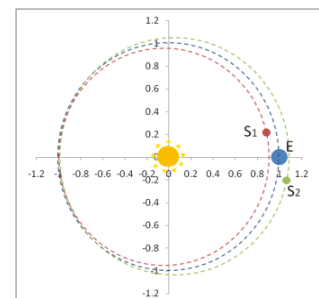


図 2 : 中心角がずれ始める

$S_1$  を 28.96km/s に減速すると、地球公転軌道の内側を周回して太陽近地点距離が 0.91au (1au=1 天文単位)、周期が 14/15year となる楕円軌道へと遷移する。この場合、4 年 8 か月で地球が 4+2/3 周する間に  $S_1$  が 5 周する周期となるため、 $S_1$  がこの直後に加速して地球公転軌道へと戻ると、 $S_1$  は地球に対して地球公転軌道上を中心角  $120^\circ$  だけ進んだ位置に戻るようになる。

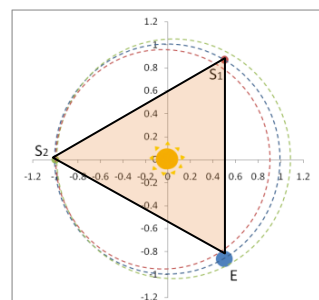


図 3 : E、 $S_1$ 、 $S_2$  が正三角形となる

$S_2$  を 30.30km/s に加速すると、地球公転軌道の外側を周回して太陽遠地点距離が 1.09au、周期が 16/15 year となる楕円軌道へと遷移する。この場合、地球が 5+1/3 周する間に  $S_2$  が 5 周する周期となるため、 $S_2$  がこの直後に減速して地球公転軌道へと戻ると、 $S_2$  は地球に対して地球公転軌道上を中心角  $120^\circ$  だけ遅れた位置に戻るようになる。

以上の計算により、衛星打ち上げ後 5 年 4 か月で、地球公転軌道上で正三角形の位置に VLBI 衛星の配置が完成 (図 3) し、観測開始となる予定である。

### ■小惑星「2010TK7」の公転軌道上への配置手順

はじめ、人工衛星  $S_3$  は地球の赤道面に対する軌道傾斜角  $100^\circ$  の地球周回軌道に打ち上げられ、地球に対して秒速  $8.0\text{km}$  で周回しているとする。このときの  $S_3$  の太陽に対する速度ベクトルは黄道面から  $15.6^\circ$  の方向へ太陽に対して  $29.39\text{km/s}$  である。ここから、 $S_3$  が図 4 の○で示した位置にきたときに太陽に対して  $29.67\text{km/s}$  で周回するように加速すると、 $S_3$  は「2010TK7」の軌道の上に遷移し、その後は力学的に安定な軌道上で周回を続けることができる。

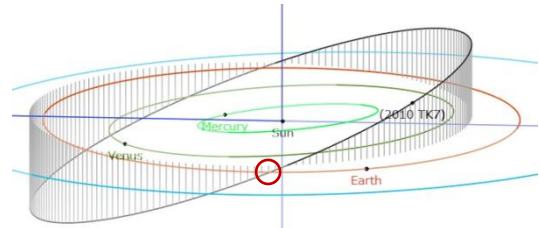


図 4：地球公転軌道と 2010TK7 軌道  
JPL Small-Body Database Browser[1]により作成

### ■軌道変更に必要な燃料は現実的な量なのか

$S_1$  の軌道変更のための減・加速に必要な  $\Delta V$  は、どちらも  $0.71\text{km/s}$  であるから、計  $1.42\text{km/s}$  が必要である。 $S_2$  の軌道変更のための加・減速に必要な  $\Delta V$  は、どちらも  $0.63\text{km/s}$  であるから、計  $1.26\text{km/s}$  が必要である。軌道変更に、排出ガス速度  $2.1\text{km/s}$  のヒドラジンスラスタを用いると、ツィオルコフスキーの公式によれば、人工衛星重量に対する燃料の重量は、 $S_1$  で  $0.97$  倍、 $S_2$  で  $0.82$  倍となる。

同様に、 $S_3$  の  $\Delta V$  は  $2.32\text{km/s}$  であるが、排出ガス速度  $2.1\text{km/s}$  のヒドラジンスラスタを用いると、人工衛星重量に対する燃料の重量を  $2.00$  倍にする必要がある。それに対して、排出ガス速度  $3.8\text{km/s}$  のケロシン系を用いると燃料の重量は  $1.11$  倍となる。ケロシン系を用いた方が現実的だと考えられるため、 $S_3$  の推進剤についてはケロシン系が適切ではないかと考えている。

## 5. 得られる成果

- ・ 口径最大約  $1$  億  $7$  千万  $\text{km}$  相当の電波望遠鏡が得られる。
- ・ EHT プロジェクトの観測に比べ、約  $1$  万倍以上の解像度が見込まれる。
- ・ 高い解像度でブラックホールを観測することができ、より鮮明な画像を得ることができる。
- ・ ブラックホール以外にも、新たな恒星が発見できる。
- ・ 観測機器を搭載すれば、地球の公転軌道の内側を常時観測できる。例えば、太陽を常に  $3$  つの方向から観測し続けることができるため、画像をつなぎ合わせると、太陽の裏側も含めた全球観測ができる。

## 6. 主張したい独創性または社会的な効果

- ・ 地球の公転軌道サイズの電波望遠鏡の構想は前例がなく、地球の公転軌道上に観測衛星を投入するのも世界初である。
- ・ 地球の公転軌道サイズの電波望遠鏡を構成するため、従来よりも大きい直径のレンズで、解像度を高めた観測ができる。
- ・ 黄道面より  $20$  度傾いた軌道に投入することで、様々な角度を観察することができる。
- ・ 高校生でも学習する内容を活用しているため、宇宙教育の発展に貢献できる。
- ・ ブラックホールの鮮明な画像を得ることができるため、天体の構造の研究などの発展につながる。

## 7. 参考文献

[1] JPL Small-Body Database Browser

<https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi?sstr=2010TK7;old=0;orb=1;cov=0;log=0;cad=0#orb>

以上

## 第27回衛星設計コンテスト アイデアに関する説明資料

地球公転軌道上 スペース VLBI 衛星

長崎県立長崎西高等学校物理部

### ■軌道の長半径の決定

ケプラーの第3法則によると、周期を $T$ 、長半径を $a$ として

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{一定}$$

が成り立つ。 $S_1$ は周期が14/15 year の、 $S_2$ は周期が16/15 year の楕円軌道に遷移させたいので、地球（公転半径1au、周期1 year）と比較することで、 $S_1$ の長半径=0.955au、 $S_2$ の長半径=1.045auとなり、2倍して1を引いたものが $S_1$ の近地点距離0.91au および $S_2$ の遠地点距離1.09auとなる。

### ■人工衛星の速度の決定

万有引力による力学的エネルギー保存の法則によると、万有引力定数を $G$ 、太陽の質量を $M$ 、人工衛星の質量を $m$ 、人工衛星の速度を $v$ 、太陽からの距離を $r$ として

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r} = \text{一定}$$

が成り立つ。楕円軌道において、近地点と遠地点の速度の比は距離の逆比になるので、 $S_1$ については遠地点の速さを $v$ 、近地点の速さを $\frac{v}{0.91}$ とおき代入すると、 $v=29.0\text{km/s}$ が得られる。同様に、 $S_2$ については近地点の速さを $v$ 、遠地点の速さを $\frac{v}{1.09}$ とおき代入すると、 $v=30.3\text{km/s}$ が得られる。

### ■必要な燃料の計算

ツィオルコフスキーの公式は、速度変化を $\Delta V$ 、推進剤の速度を $w$ 、噴射前の人工衛星の全質量を $m_0$ 、噴射後の人工衛星の質量を $m$ として

$$\Delta V = w \ln \frac{m_0}{m} \quad \text{すなわち} \quad \frac{m_0}{m} = e^{\frac{\Delta V}{w}} \quad \text{である。}$$

$S_1$ の $\Delta V$ は1.42km/s、 $S_2$ の $\Delta V$ は1.26km/sであるから、ヒドラジンスラスタの排出ガス速度として $w=2.1\text{km/s}$ を使用すると、 $S_1$ では $\frac{m_0}{m}=1.97$ が、 $S_2$ では $\frac{m_0}{m}=1.82$ がそれぞれ得られる。

同様に、 $S_3$ の $\Delta V$ は2.32km/sであるから、ヒドラジンスラスタで計算すると $\frac{m_0}{m}=3.00$ となり、 $S_1$ や $S_2$ と比べるとやや大きい数値となる。そこで、 $w=3.8\text{km/s}$ のケロシン系推進剤で再計算を行うと、 $\frac{m_0}{m}=2.11$ が得られる。

## ■軌道変更の様子

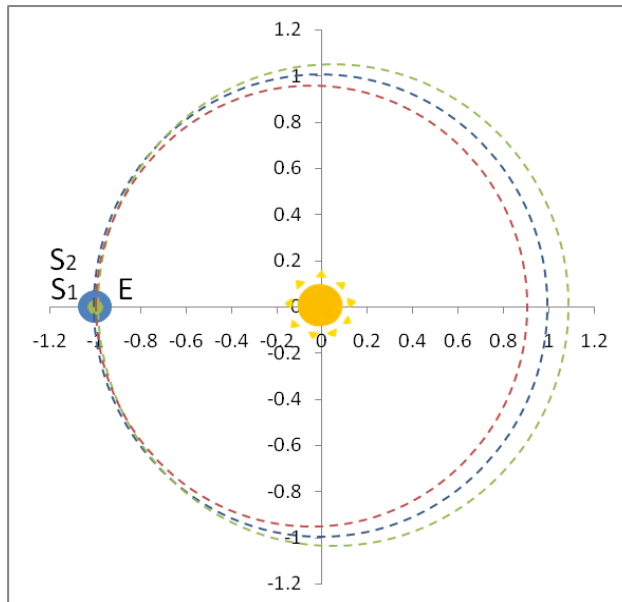
中心は太陽、時間の単位は[year]、距離の単位は天文単位[au]

①  $t=0$ [year]

● E は地球で、青色の軌道が地球公転軌道。公転周期は 1 [year]。

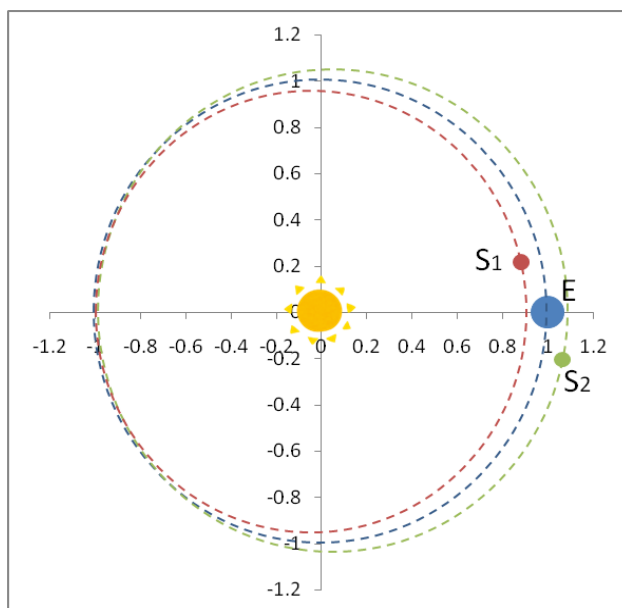
● S<sub>1</sub> は減速して赤の軌道へ遷移する。公転周期は 14/15 [year]。

● S<sub>2</sub> は加速して緑の軌道へ遷移する。公転周期は 16/15 [year]。



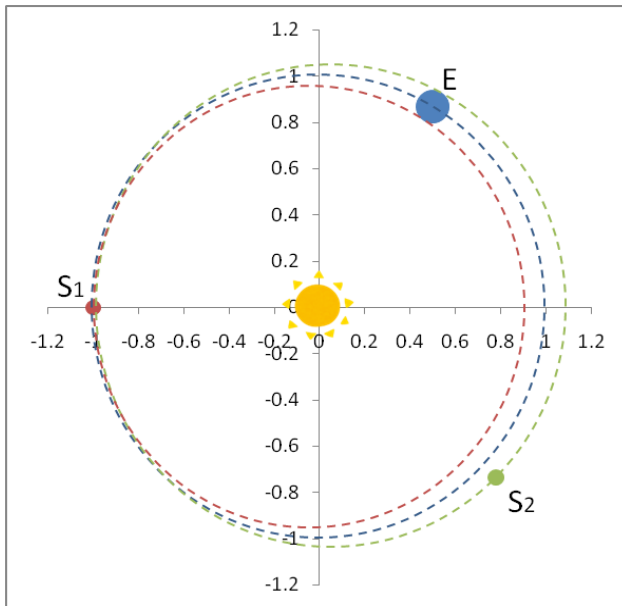
②  $t=0.5$ [year] のときの様子

周期が異なるため中心角に差ができる。



③  $t=4+2/3$ [year]

$S_1$  と E の中心角がちょうど  $120^\circ$  となるため、● $S_1$  は加速して青の軌道へ遷移する。



④  $t=5+1/3$ [year]

$S_2$  と E の中心角がちょうど  $120^\circ$  となるため、● $S_2$  は減速して青の軌道へ遷移する。  
以上により正三角形への配置が完了。

