

## 宇宙機を正しい軌道へ! - 私たちのミッション -

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 嘉生 幸代

### 1. 軌道とは

2014年12月3日、宇宙への旅を始めたはやぶさ2は3年半に及ぶ旅を終え、この夏、小惑星「リュウグウ」でのミッションを開始します(図1)。旅の道中、はやぶさ2は地球に近い軌道を描いて太陽を1周し、スイングバイをした後、リュウグウの軌道に近い軌道で更に太陽を2周してきました(図2)。

「軌道」とは、宇宙機<sup>1</sup>や天体が宇宙に描く軌跡のことです。地球から打上げられた宇宙機の軌道は、様々な“力”を受け変化します。

ここでは宇宙機が描く軌道に着目し、その運用を支える技術を紹介したいと思います。

### 2. 静止軌道

まずは身近な地球周回軌道(地球の周りを回る軌道)から見ていきましょう。

テレビで衛星放送を見るために利用される「放送衛星」や天気予報に利用される「気象衛星」の多くは「静止軌道」を描いています。静止軌道とは、赤道の上空、高度約36,000kmを地球の自転と同じ方向に円を描く軌道のことです(図3)。人工衛星の公転周期が地球の自転周期と一致するため、地球から見ると人工衛星が赤道上空の1点に静止しているように見えます。そのため、地球上のある地域に限定はされますが、24時間365日安定してテレビ放送を提供したり、雲の様子を常に観測して天気予報に利用したりするのに便利なのです。

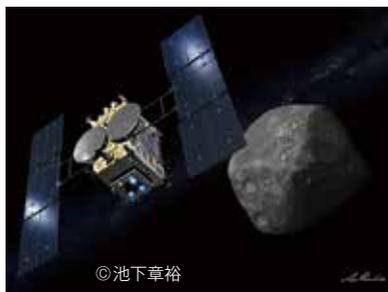


図1. はやぶさ2と小惑星リュウグウ

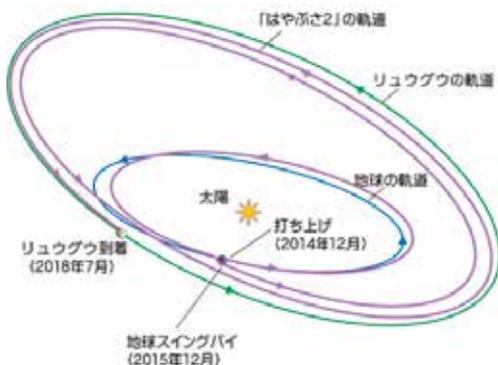


図2. はやぶさ2のリュウグウまでの道のり

JAXAウェブサイトより引用

1 宇宙を航行する機械を指し、人工衛星や探査機を総称して宇宙機と言います。

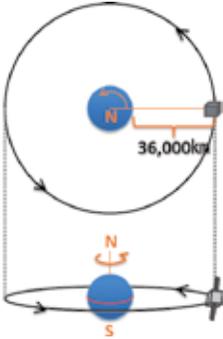


図3. 静止軌道

例えば、経度100度の静止衛星には、ジオイド高がより高いオーストリア北部から引かれる力が強くはたらき、進行方向に加速度が働きます。その結果、軌道周期が大きくなり、衛星は静止せず西方向へずれていってしまうのです。

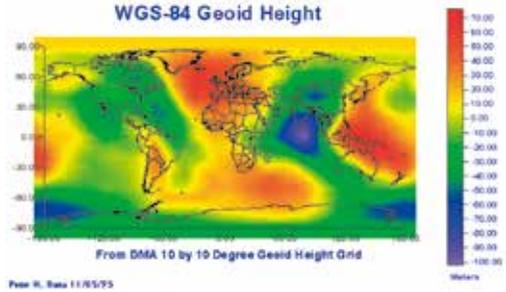


図4. 地球のジオイド高

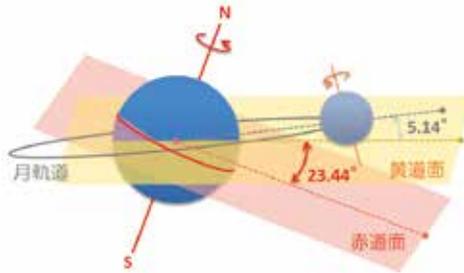


図5. 軌道面の関係

静止衛星の軌道面は赤道面に対して徐々に傾いていき、放っておくと7.54°を中心に振動することになるのです。

それでは、私たちがどのように静止衛星を“静止”させているか、その運用をご紹介します。ほとんどの静止衛星は、東西方向及び南北方向に±0.1°という保持範囲が割り当てられています。高度36,000kmの赤道上空に、様々な国の静止衛星がずらりと並んでいて、それぞれの静止衛星は自分の保持範囲を維持することで、衝突や電波の干渉が無く、安全に運用することができるのです。保持範囲を維持するために、静止衛星は搭載されたスラスタからガ

スを噴射することで推力を発生させ、軌道制御を行っています。ここでは例として、日本上空の経度140°の静止衛星を考えてみましょう。

経度140°では、前述の経度100°の静止衛星と同様に、東側から引かれる力が強いいため、進行方向に加速度が働き、静止衛星は西方向へずれてしまいます。その大きさは1日あたり約0.0227°となり、保持範囲である±0.1°を維持するためには18日に1回のペースで軌道高度を下げるための軌道制御が必要になります。（軌道周期が地球の自転周期よりも短くなるようにわざと高度を余計に下げることによって、±0.1degの範囲内を折り返す=0.4deg分動くような動きをさせて制御間隔を稼ぎます。）また、静止衛星の軌道面は1日あたり約0.0024°で赤道面に対して傾いてしまうため、42日に1回のペースで軌道面を赤道面に近づける軌道制御が必要になります。実際には、計画に対してスラスタの噴射量に若干の誤差が発生することを考慮して噴射量を計算します。また、同じ曜日に軌道制御を行うなど運用面を考慮して、1週間に1度、あるいは2週間に1度といったペースで軌道制御を実施し、静止軌道を保っているのです。

### 3. 太陽同期準回帰軌道

次は、静止軌道よりももっと地球に近いところを飛行する人工衛星の軌道を見てみましょう。

2017年12月に打ち上げられた「しきさい (GCOM-C)」や今年打ち上げ予定の「いぶき2号 (GOSAT-2)」は「太陽同期準回帰軌道」と呼ばれる特殊な軌道を描きます。見た目は図6のように、地球を縦方向にまわる軌道です。縦方向にまわることで地球全体をくまなく観測できることが特徴です。そのため、地球の気候変動を観測するしきさいや、二酸化炭素などの温室効果ガスを観測するいぶき2号には、この軌道が選ばれているのです。

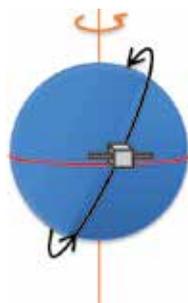


図6. 太陽同期準回帰軌道

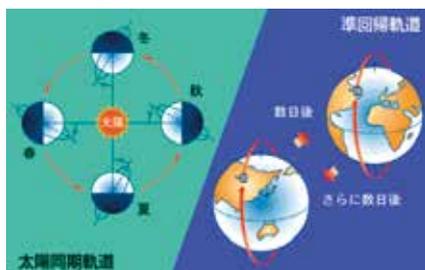


図7. 太陽同期軌道と準回帰軌道

JAXAウェブサイトより引用

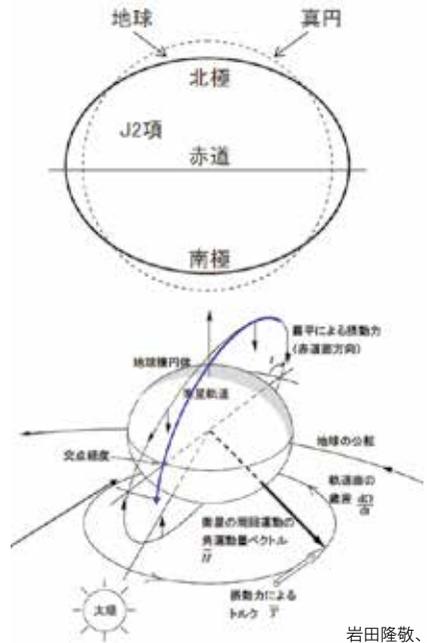
太陽同期準回帰軌道は、太陽同期軌道と準回帰軌道の両方の特徴を合わせ持つ軌道です。太陽同期軌道とは人工衛星の軌道面と太陽方向のなす角が常に一定の軌道であり（図7左）、準回帰軌道とは地球を一日に数周回し、数日後に同じ場所の上空に人工衛星が戻るような軌道です（図7右）。

まずはイメージしやすい準回帰軌道から考えてみましょう。高度600kmを飛行する人工衛星は、地球の重力を受け

て秒速7.52kmの速度で地球の周りをまわります。この時、1周するのにかかる時間（周期）は5.884秒、約98分となります。1日の間に14周と3分の2周し、3日経つとちょうど44周して元の位置に戻ってきます。このように、数日後に同じ場所の上空に人工衛星が戻ることで、一定の頻度で地球の同じ場所を観測できるのが準回帰軌道です。

次に太陽同期軌道についてです。地球が完全な球体であれば、人工衛星の軌道面の向きは慣性空間上に固定され、地球が太陽の周りをまわる（公転する）間に太陽と軌道面の関係は変化します。しかし、先ほど説明したように地球は完全な球体ではなくでこぼこして、横から見るとラグビーボールのように縦に少しつぶれた形をしています（図8上）。具体的には、赤道半径は極半径よりも22km大きく、そのため人工衛星が地球から受ける引力は赤道上空で大きく、極上空では小さくなります。この影響で軌道面の向きは慣性空間に固定されず、回転することになります（図8下）。右の図で言うと、黒線で示されている軌道の円が、地球に対する傾きはそのまま、地球を中心に右方向へ回転することになります。

この性質を活かして、軌道面の回転速度＝地球の公転速度となるように軌道高度と軌道面の傾きを調整すると、人工衛星の軌道面と太陽方向のなす角が常に一定となり（図7左）、人工衛星が観測する地表面の時刻が常に一定となるのです。この時刻を「地方太陽時」と呼び、特に赤道上空を通過する時の地方太陽時を「昇交点（あるいは降交点）通過地方太陽時」と呼びます。しきさいの降交点通過地方太陽時はおよそ10時30分、いぶき2号ではおよそ13時となる軌道が選ばれています。しきさいやいぶき2号は地球の周りを縦方向にくるくると周回しながら、いつも同じ時刻の地表面を観測しているのです。更に準回帰軌道の性質が組み合わせることによって、何日かの周期で同一地点の上空を同一時間帯に通過するため、同一条件で繰り返し地表を観測することが可能です。そのため、多くの地球観測衛星がこの太陽同期準回帰軌道を採用し、飛行しています。



岩田隆敬、  
えあろすべーす ABC「太陽同期準回帰軌道」、  
日本航空宇宙学会誌、第55巻、  
第639号(2007年4月)より

図8. 地球重力場の作用による  
軌道面の回転

それでは、この太陽同期準回帰軌道を乱す力と軌道の運用を紹介しましょう。準回帰軌道を保つためには軌道の周期が一定であることが重要です。周期は軌道高度でほぼ決まるため、軌道高度が保たれていることが条件となります。また太陽同期軌道を実現するためには、軌道高度と軌道面の傾きを上手く選ぶ必要があり、どちらか、あるいは両方がずれてしまうと太陽同期軌道ではなくなってしまいます。

軌道高度に大きな影響を及ぼすのが地球の大気です。宇宙にはわずかですが大気が存在し、大気による抵抗で人工衛星の軌道高度は徐々に下がってしまいます。そのため、軌道高度を上げるための軌道制御が必要になります。地球観測衛星の軌道高度は多くが600~900kmです。高度が高すぎると微細な観測に不利となり、低すぎると大気抵抗の影響が大きく運用が大変になるからです。この大気抵抗の大きさは日々変化するもので、正確に予測することがとても難しいものです。また軌道高度によっても大気抵抗の大きさが違うので、各人工衛星に応じて軌道高度がこの先どのくらい低下するのかを予測し、軌道制御のタイミングと大きさを計算しています。

また軌道面に対しては、静止衛星と同様に太陽と月の引力の影響で徐々に軌道面が倒れてしまうため、軌道面を起こしてあげるような軌道制御が必要になります。軌道面が倒れていく速さは地方太陽時が何時の軌道かによって変わります。また、地方太陽時が10分ずれてもよしとするのか、30分ずれてもよしとするのか、保持範囲によっても軌道制御の頻度が変わります。各人工衛星に応じた頻度で軌道高度と軌道面の傾きを変える制御を行い、太陽同期準回帰軌道を維持しているのです。

## 4. 深宇宙における軌道運用

地球周回を飛び出す宇宙機は、惑星の引力を利用して軌道を大きく変化させます。

はやぶさ2はロケットにより打上げられた時、既に地球周回を飛び出し太陽の周りをまわる速度を持っていました。それから約1年後に地球に再接近し、地球の引力を利用して進む向きを変えつつ加速することで、リュウグウの軌道に近づいたのです。はやぶさ2が地球に近づく時、地球に引っ張られてはやぶさ2は加速します。もし地球が止まっていたら、離れて行く時にも同じだけ引っ張られて差し引きゼロとなり、向きが変わるだけです。でも地球は太陽を中心に公転運動をしていて、その公転速度の分、更にはやぶさ2が地球に引っ張られることで加速するのです(図9)。これが「スイングバイ」と呼ばれる技術です。

リュウグウに近づくはやぶさ2の軌道運用で課題となるのが地球からの距離です。

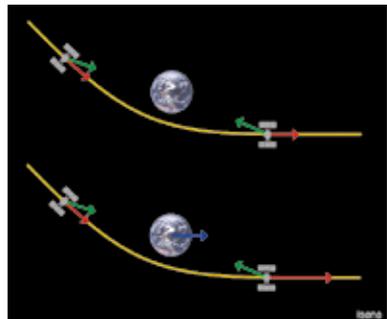


図9. スイングバイのイメージ図  
JAXA ウェブサイトより引用

3億km以上にもなり、地上との電波信号の往復には30分以上かかります。通信を保つには探査機がこの先どのような軌道を進むかを予測することがとても大切になります。

地球の周りをまわる人工衛星の軌道を計算するためには、地上局との距離を電波で測り、いくつかの地上局でのデータを組み合わせることで軌道を求めるか、あるいは人工衛星にGPS受信機を搭載することで軌道を計算することが可能です。しかし、はやぶさ2くらい地球から遠ざかると、GPS衛星の信号がほとんど届きません。電波による測距データは重要ですが、地球から見たはやぶさ2の位置があまり変わらないため、軌道の計算精度が悪くなってしまいます。そこで、 $\Delta$ DOR（デルタドア）と呼ばれる、複数のアンテナで電波を受信し、電波が到着するわずかな時間差から人工衛星の位置を求める方法や、地上からの電波だけでなく、搭載されたカメラやレーザー測距装置による画像データや測距データなど、様々な種類の観測データを使って軌道の予測精度を向上させています（図10）。

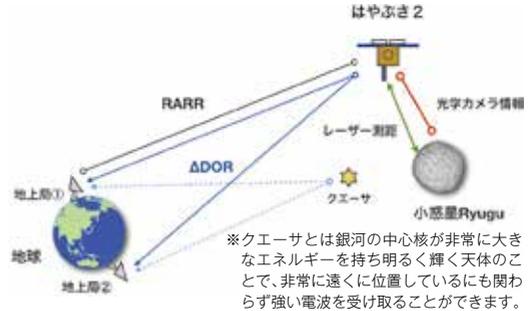


図10. はやぶさ2で目指す高精度軌道決定技術

## 5. 最後に

宇宙で様々なミッションを実現する宇宙機は、そのミッションに応じた軌道を描き運用されています。宇宙へと旅立った人工衛星や探査機は太陽、地球、月の引力や大気抵抗などを受け複雑に変化するため、常に理想的な軌道を描くように制御してあげることが大切です。私たちが普段当たり前のように受けている地球や太陽の力は宇宙機にも働いていて、その力を利用したり、たまに逆らったりしながら宇宙機は旅を続けています。時にはそんなことを考えながら、これからもJAXAのミッションを応援してもらえたら幸いです。

## 著者紹介 嘉生 幸代(かしょう さちよ)



1987年奈良県生まれ。神戸大学大学院修士課程を卒業後、2012年より現職であるJAXA追跡ネットワーク技術センターに所属。研究開発部門にも併任しており、宇宙機の軌道力学運用における技術の研究開発を行っている。大学院在学時に大阪市立科学館にてプラネタリウム解説員の経験あり☆