

# 概要

2015年12月3日に実施する「はやぶさ2」の地球スイングバイについて説明する。

※ここで示す軌道データは、2015年9月末での軌道計画に準拠したものである。

## 1. スイングバイ概要

- (1) 地球スイングバイの目的
- (2) スイングバイ軌道
- (3) 地球スイングバイに関する運用

## 2. スイングバイに関連する予定について

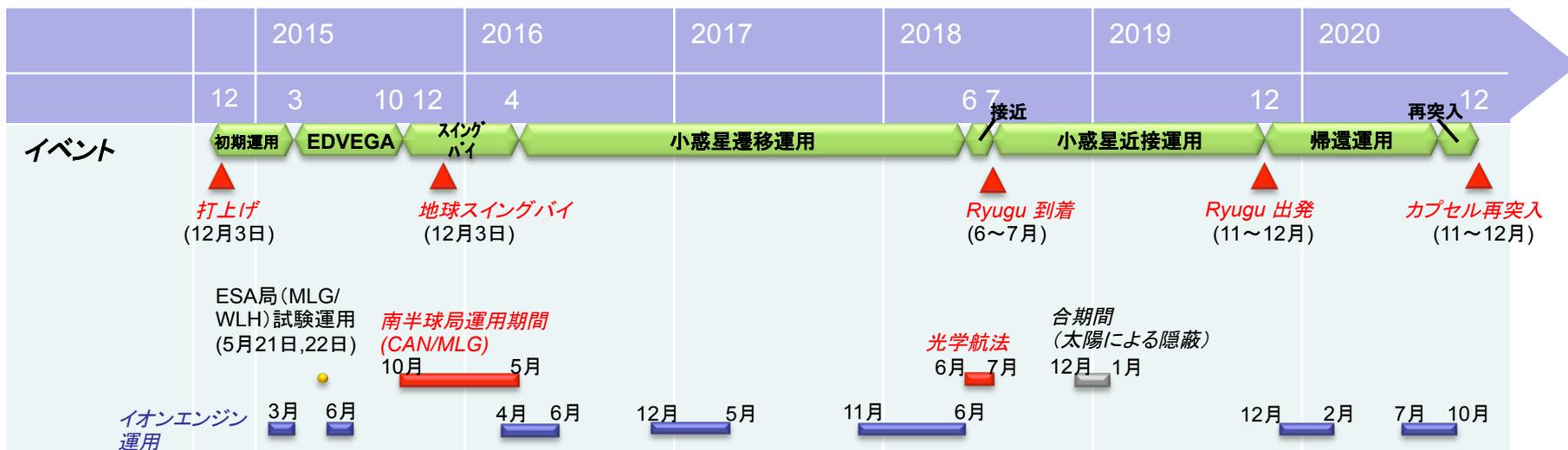
- (1) 概要
- (2) 地上望遠鏡による観測キャンペーン
- (3) スイングバイの結果の公表と説明会について

# 1. スイングバイ概要 (1/10)

## (1) 地球スイングバイの目的

- ・目標天体である小惑星Ryugu (リュウグウ)に向かう軌道にのせるため、地球の重力を利用して軌道変更を行う。

参考: ミッションの予定

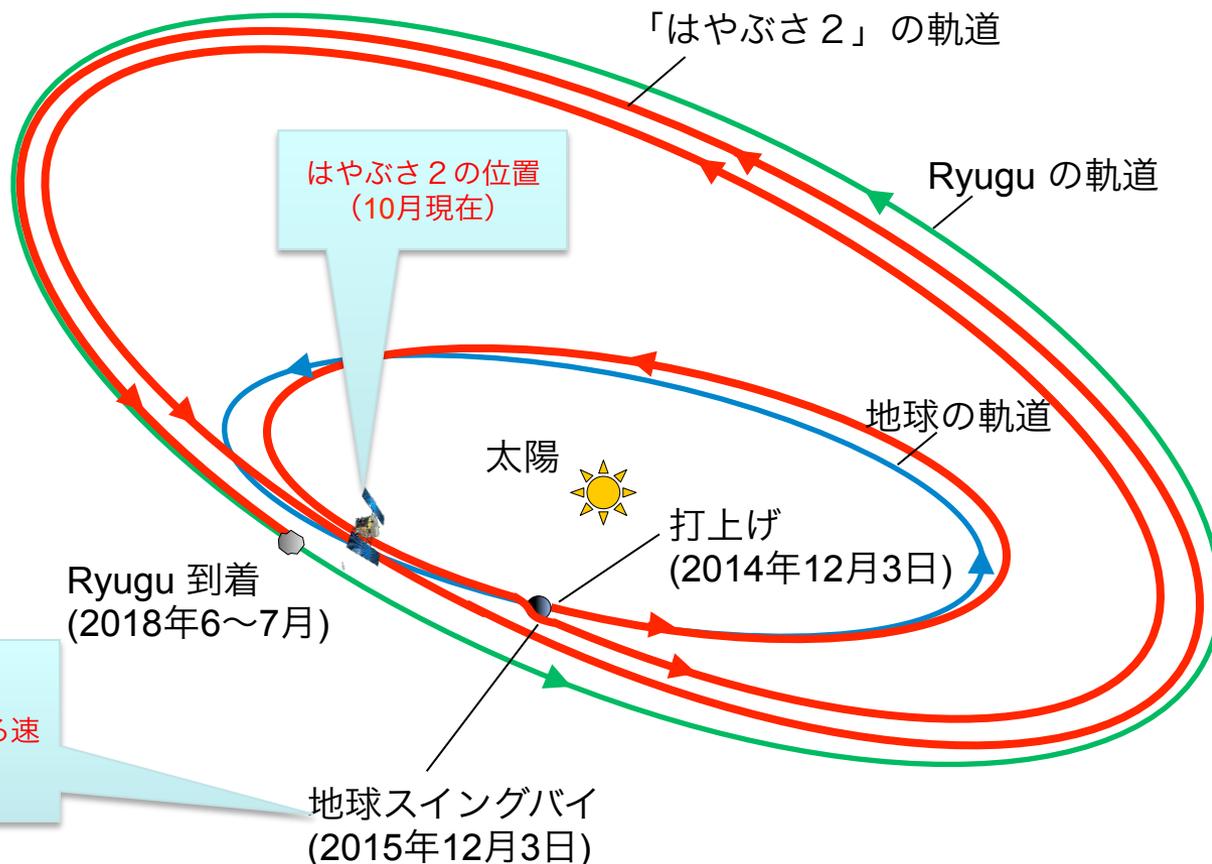


# 1. スイングバイ概要 (2/10)

## (2) スイングバイ軌道

2014年12月3日の打上げ後、太陽をちょうど1周し、2015年12月3日に地球スイングバイを行い、小惑星へ向かう軌道へ移行する。

### 軌道の概念図



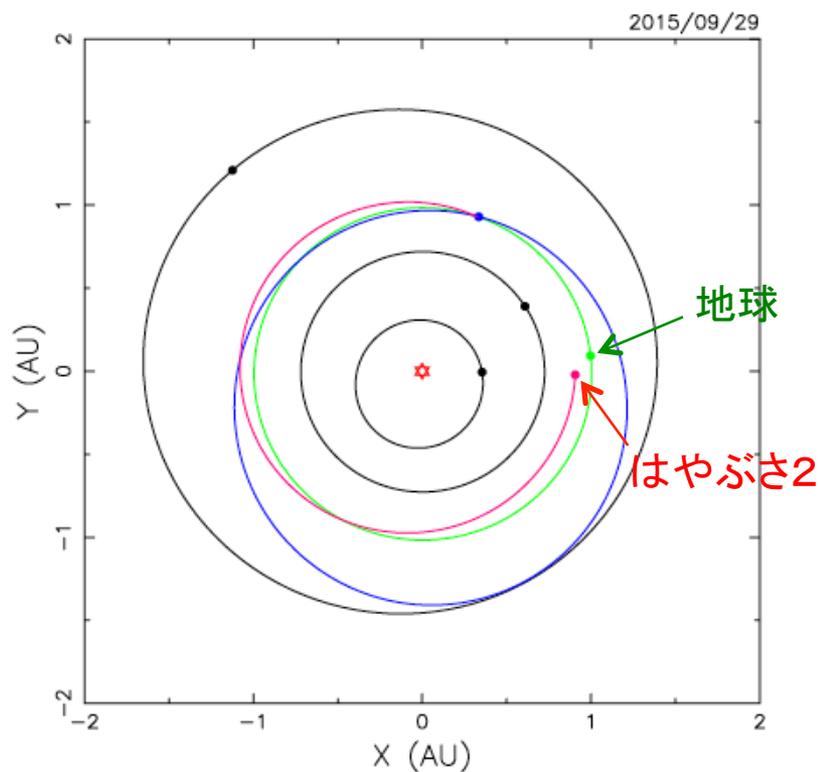
スイングバイにより、飛行速度を **1.6km/sec** 増速する  
(スイングバイ時に、太陽に対する速度が、30.3km/sから31.9km/s になる)

# 1. スイングバイ概要 (3/10)

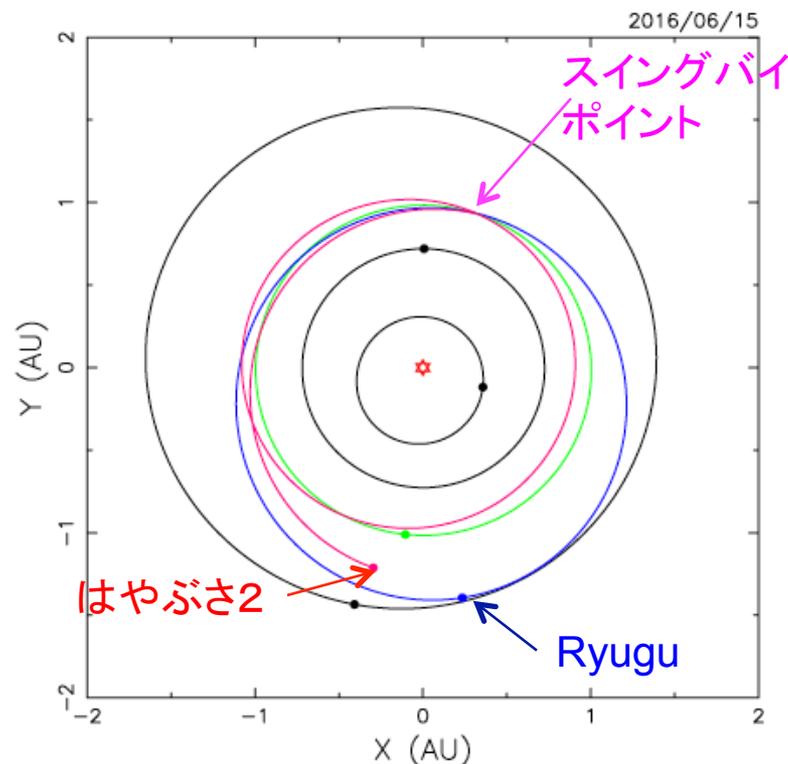
## (2) スイングバイ軌道

### 太陽系を北側から眺めた図

太陽を中心に軌道を描いた場合。この図では、地球や「はやぶさ2」が太陽の周りを動く軌道が描かれている。そのために、スイングバイポイントで、「はやぶさ2」の軌道の曲がり具合が小さく見える。



スイングバイ前(2015年9月)

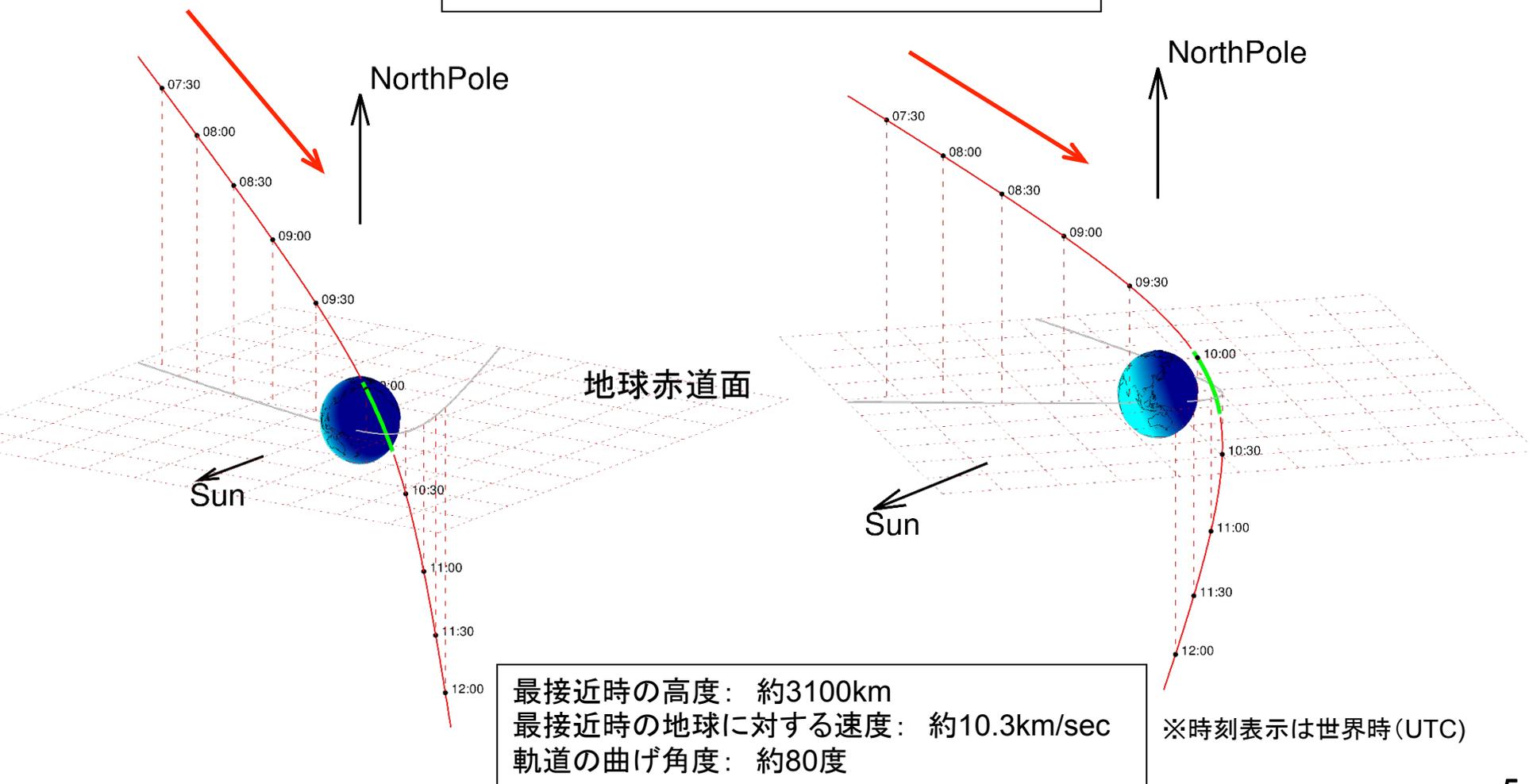


スイングバイ後(2016年6月)

# 1. スイングバイ概要 (4/10)

## (2) スイングバイ軌道

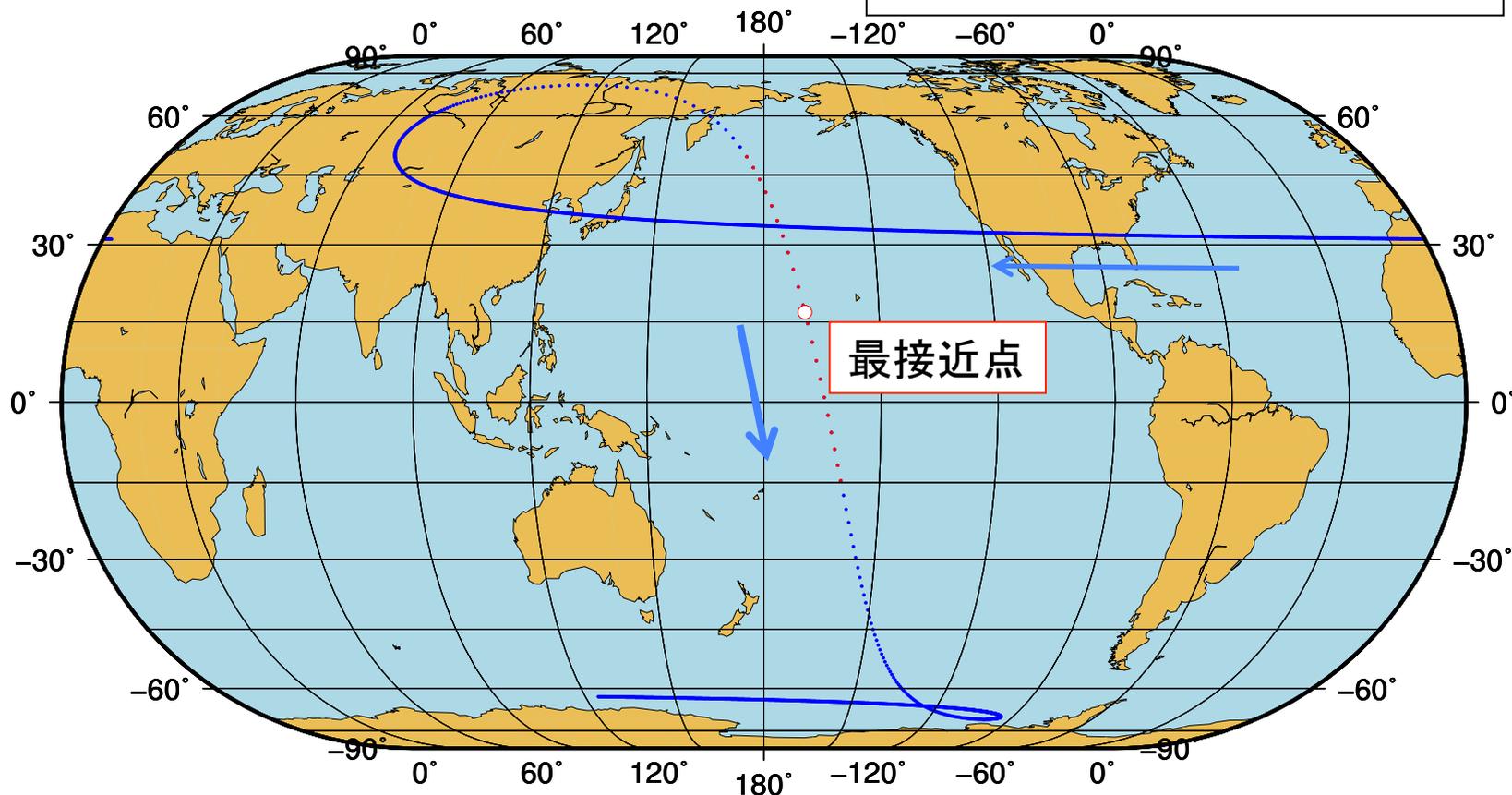
地球を中心として眺めた図



# 1. スイングバイ概要 (5/10)

## (2) スイングバイ軌道

探査機直下点の軌跡



- ・最接近時刻2015年12月3日10時7分ごろ(UTC)日本時間同日19時7分ごろを予定
- ・2015年12月2日 12時00分 から2015年12月4日 0時00分までを1分刻みでプロット

# 1. スイングバイ概要 (6/10)

## (3) 地球スイングバイに関する運用

### ■地球スイングバイに向けた軌道制御

- 2015年9月にイオンエンジンによる軌道制御を行い、正常に軌道修正がなされた。その後、スイングバイ実施に障害となるような異常や故障は発生していない。
- 2015年11月から12月初めにかけて、化学エンジンによる軌道の微修正であるTCM(Trajectory Correction Maneuver)を3回実施する。TCM実施前後に軌道の精密決定を行い、特に1回目および2回目TCM実施後については次のTCMの要否の判断を行い、TCMが必要な場合には軌道制御量を計算する。

# 1. スイングバイ概要 ( 7/10 )

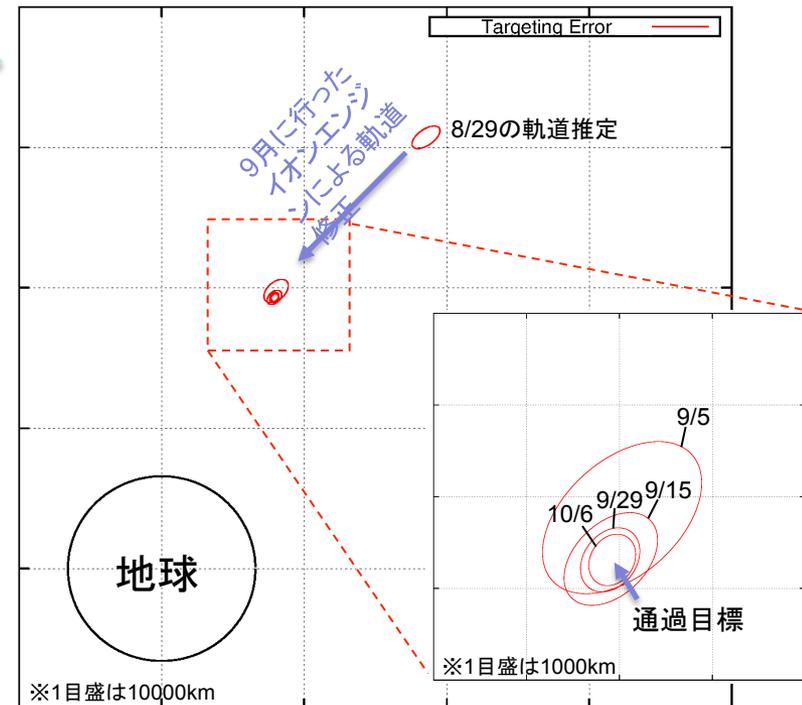
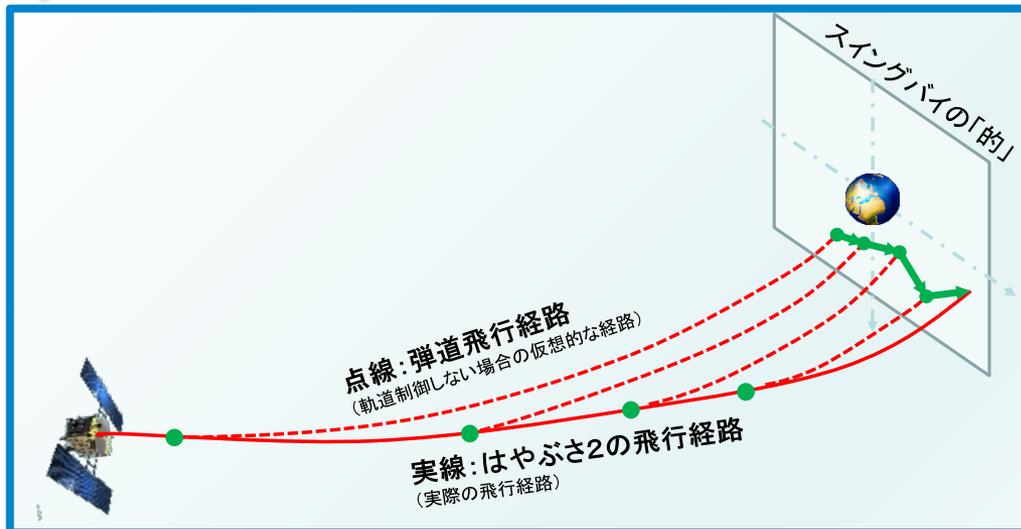
## (3) 地球スイングバイに関する運用

### ■スイングバイのための軌道制御方法

- ・ 地球を含む平面を「的(まと)」に見立てて、的のどこを通過するかを電波計測をもとに定期的に推定する。推定の不確かさは、「楕円」の領域として表される。
- ・ 今後の3回の軌道修正(TCM)で、所定のポイントを通過するように精密誘導を行う。
- ・ 軌道制御の精度目標は、数km, 数cm/s.

＜はやぶさ2の実際の誘導状況＞

＜スイングバイ軌道制御運用のイメージ＞



目標点に向かって、精度が向上しながら誘導されている

# 1. スイングバイ概要 (8/10)

## (3) 地球スイングバイに関する運用

### ■地球スイングバイに向けた精密軌道決定運用

- 精密に軌道決定を行なうためには、日本局だけでは幾何学的に十分ではないため、NASA局も利用してデータを取得する。
- 従来の軌道決定手法であるドップラ観測やレンジ観測に加えて、新手法であるDelta-DOR観測も実施する事により軌道決定精度が大幅に向上する見込みである。
- 軌道決定精度が向上すれば、より細かい軌道制御が可能になるため、はやぶさ2をより精密にスイングバイポイントまで誘導できるようになる。



軌道決定データ取得を行なうNASA,ESA,JAXAの地上局

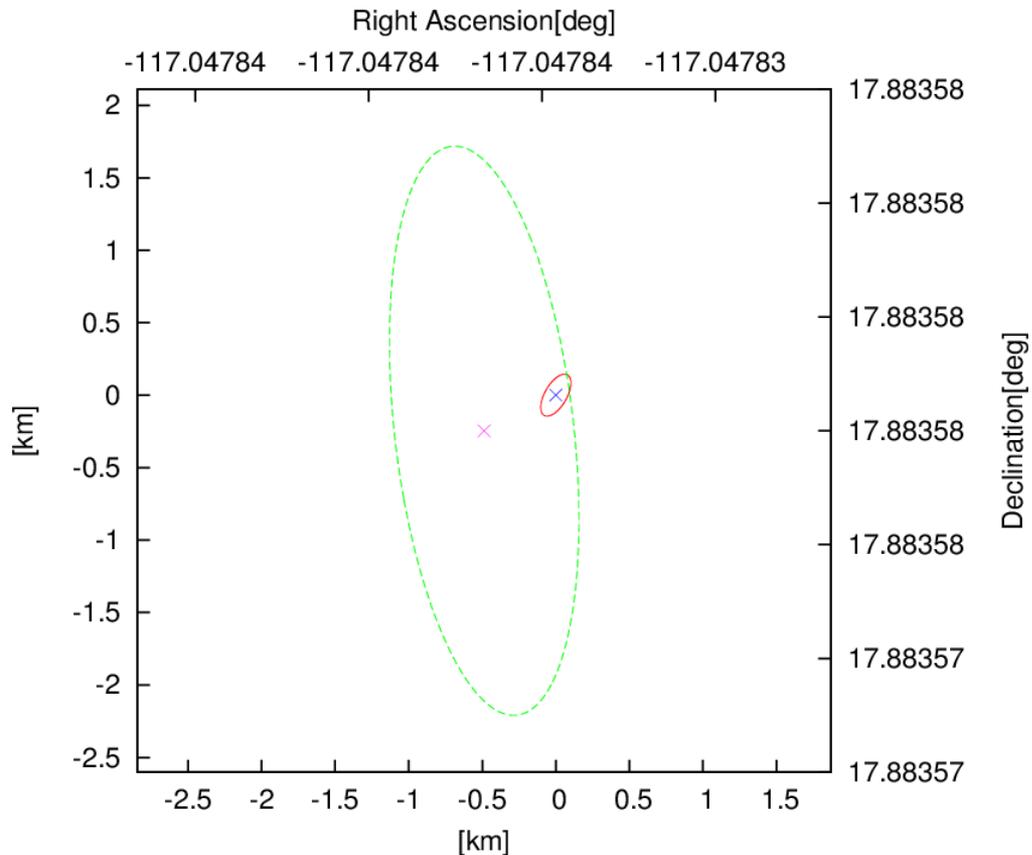
# 1. スイングバイ概要 (9/10)

## (3) 地球スイングバイに関する運用

### ■地球スイングバイに向けた精密軌道決定運用

HAYABUSA2 1-sigma error ellipse on the celestial sphere  
at 2015/10/ 8 (Thu) 12:16:00 UTC, Distance:23067765[km]

Delta-DOR観測により軌道  
決定精度が向上



| 最新(10月8日)の軌道<br>決定結果        | 位置精度    | 速度精度      |
|-----------------------------|---------|-----------|
| レンジ・ドップラのみ<br>の決定精度         | 2.0[km] | 1.3[mm/s] |
| レンジ・ドップラ+Delta-<br>DORの決定精度 | 180[m]  | 0.9[mm/s] |

位置決定精度: 東京から富士山山頂  
にいるダニ(体長0.1~0.7mm)をのぞ  
き込む分解能に相当  
速度決定精度: 太陽系内を約30km/s  
の速度で移動している探査機を 1mm/s  
以下の速度精度で計測

# 1. スイングバイ概要 (10/10)

## (3) 地球スイングバイに関する運用

### ■スイングバイ中

- スイングバイ中に探査機は地球の影を通過するため、運用期間中で初めて唯一の日陰を経験する(約20分間)。探査機は低温状態になり、太陽電池パドルではなくバッテリーによる運用となる。

### ■スイングバイの後

- スイングバイ後は、約5ヶ月間にかけて探査機は南半球側からのみ通信可能となる。そのために、NASAやESAが南半球に所有する地上局から運用を行う。

## 2. スイングバイに関連する予定について (1/6)



### (1) 概要

スイングバイに関連して、現在以下のことを予定している。

- スイングバイ時の軌道を公開する。  
→教育・アウトリーチ活動等に利用していただく。
- スイングバイ時に、地上にある望遠鏡による観測キャンペーンを行う。  
→詳細は次以降のページに記載
- スイングバイの結果の公表と記者説明会について。  
→詳細は次以降のページに記載

## 2. スイングバイに関連する予定について (2/6)

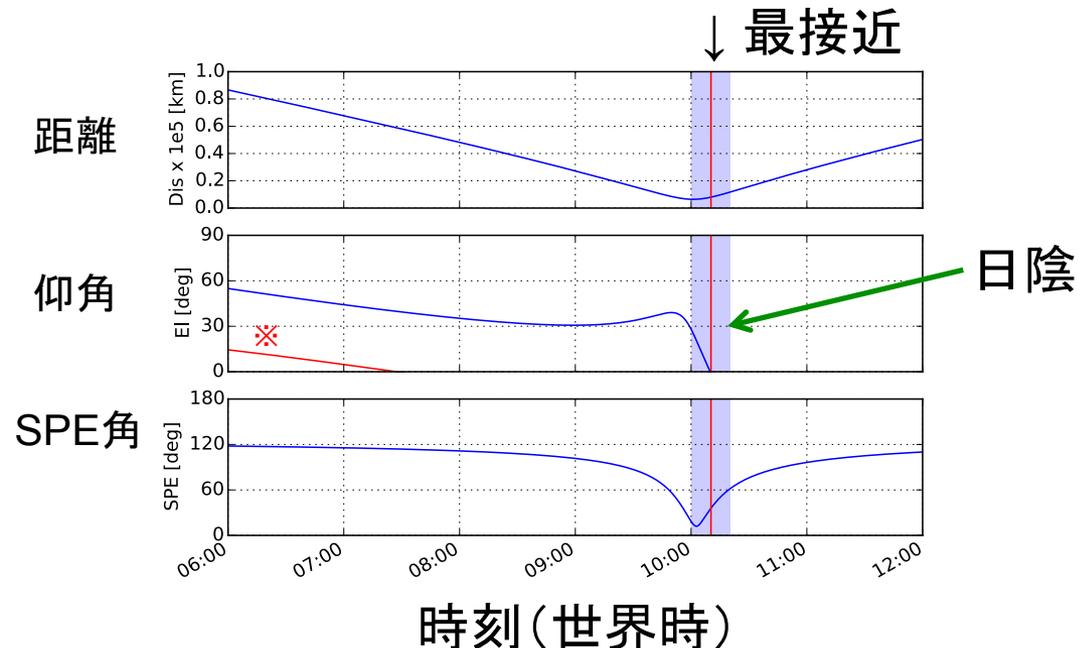
### (2) 地上望遠鏡による観測キャンペーン

- ・はやぶさ2は日没後、日本から観測できるところを通過する。  
例として臼田局からの視認性を下図に示す。
- ・ただし、探査機の光度は暗いことが予想され、観測するためには大きめの望遠鏡が必要となると考えられる。
- ・観測に必要な情報を事前に公開し、各地の天文台などで観測してもらい、結果を報告してもらう。

#### 例：臼田(長野県)からの観測情報

注)

- ・仰角は天文用語では「高度」であるが、地平線から探査機までの角度である。(図中の※で示す赤線は太陽の仰角であり、日没前を示す)
- ・SPE角とは、太陽-探査機-観測者の角度である。
- ・横軸は時刻(世界時)である。日本標準時に換算するときには、9時間を加える。



## 2. スイングバイに関連する予定について (3/6)



### (2) 地上望遠鏡による観測キャンペーン

#### ※各地の観測条件について

- ・日本国内は、日没直後から観測可能であるが、緯度が高いほど観測条件はよい。(例えば、北海道名寄ならば日没後3時間ほど観測可能であるが、石垣島では日没後1時間程度しか観測できない。)
- ・ハワイのマウナケアでは、まさに最接近時に頭上近くを探査機が通過するが、日陰(地球の影の中で太陽の光が当たらない)ため、探査機は観測できないと思われる。
- ・オーストラリアのキャンベラでは、スイングバイ直後から観測が可能となる。
- ・ヨーロッパや北米では、観測条件が悪く、観測は難しいと思われる。

## 2. スイングバイに関連する予定について (4/6)



### (2) 地上望遠鏡による観測キャンペーン

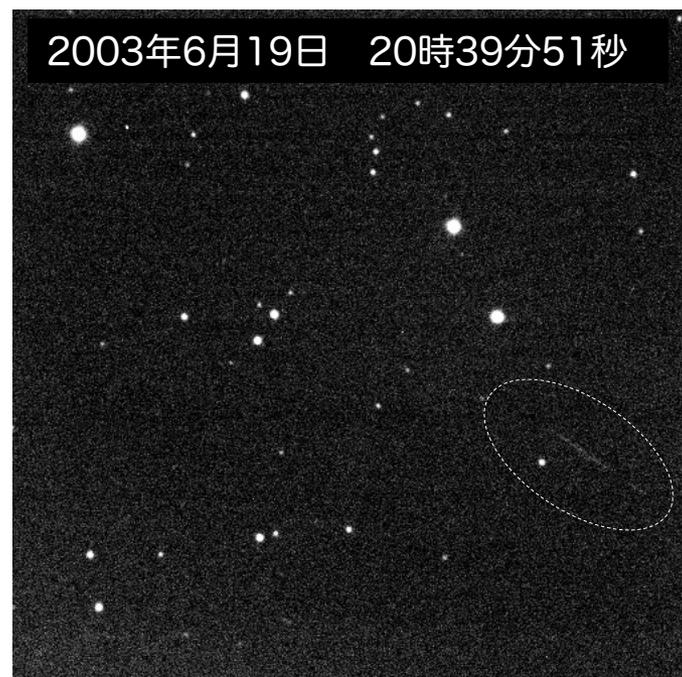
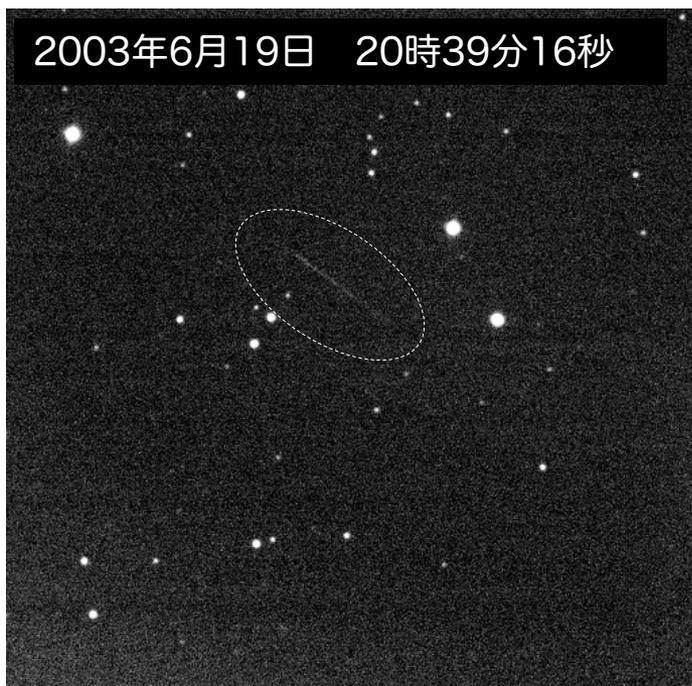
※参考: 過去のスイングバイ時の観測キャンペーンについて

- ・火星探査機「のぞみ」の地球スイングバイ(2002年12月20日と2003年6月19日)および「はやぶさ」の地球スイングバイ(2004年5月19日)の合計3回、スイングバイ時の探査機を地上望遠鏡で観測するキャンペーンを行った。
- ・いずれの日も天気が悪く、観測を行えた天文台はごくわずかであった。
- ・その中で、愛媛県の久万高原天体観測館が、2回目の「のぞみ」の地球スイングバイの観測に成功した。当時は、台風が日本列島を縦断中であったが、雲の切れ間から撮影に成功した。(写真は次のページに示す)

## 2. スイングバイに関連する予定について (5/6)

### (2) 地上望遠鏡による観測キャンペーン

火星探査機「のぞみ」の地球スイングバイ時の撮影  
(愛媛県の久万高原天体観測館の中村彰正氏による)



露出時間：12秒、視野は約12分角  
「のぞみ」の明るさは15～16等

## 2. スイングバイに関連する予定について (6/6)

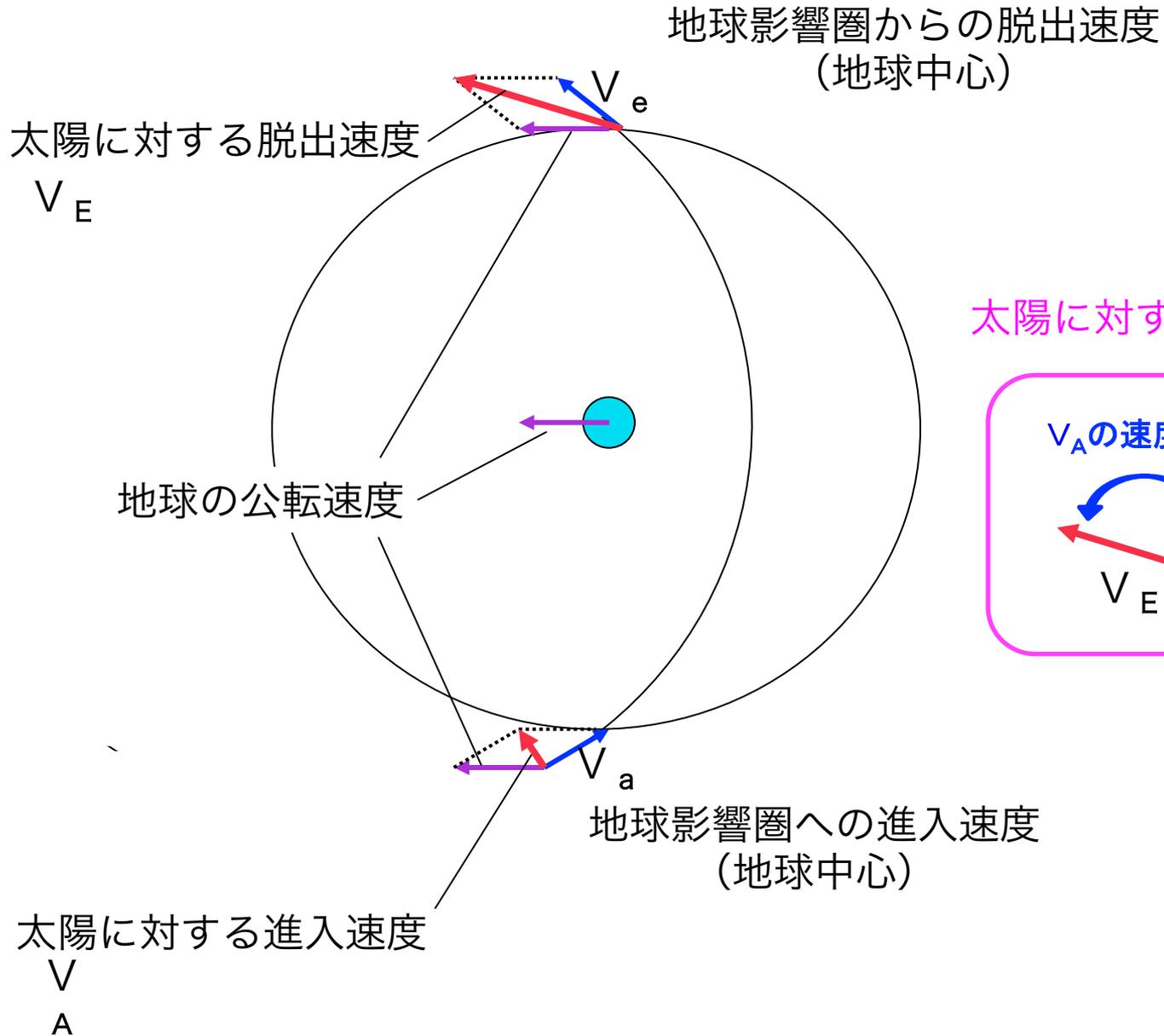


### (3) スイングバイの結果の公表と記者説明会について

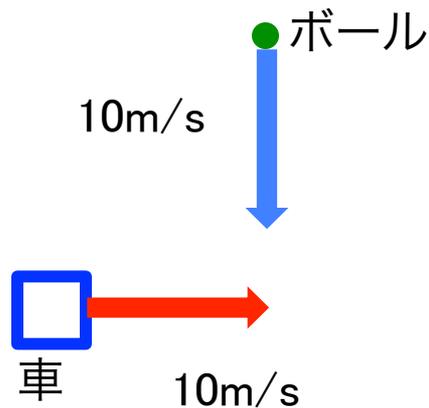
- ・スイングバイの結果は、スイングバイ実施後およそ1週間かけて軌道情報を確認し判断する。この為、スイングバイの結果については12月3日以降当面は不明である。結果の確認後公表とする。
- ・12月中旬ごろ、改めてスイングバイの結果について記者向けの説明会を行う。
- ・なお、12月3日は夕方よりJAXA相模原キャンパスの研究・管理棟2階会議場をメディア向けに開放予定(ただし、この日にスイングバイの結果は不明であるため、現時点で12月3日に記者向けの説明会を実施する予定はない)。
- ・詳細は改めてお知らせすることを予定している。

# 参考資料

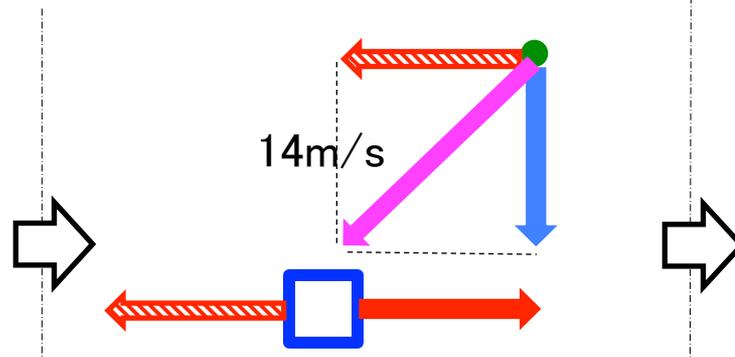
# 参考：スイングバイの原理



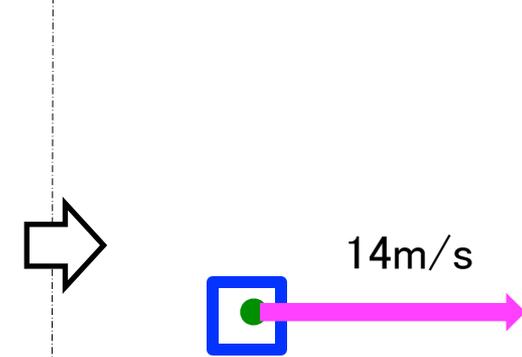
# 参考：スイングバイの簡単な説明



秒速10m/sで走っている車に、直角の方向から秒速10m/sでボールを投げる。

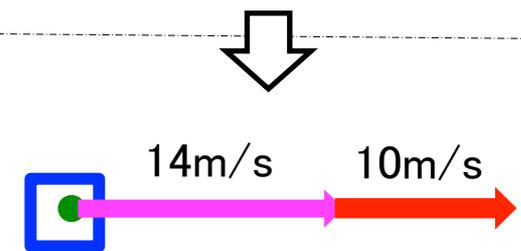


車に乗っている人からみると、ボールは斜め前方から約14m/sで向かってくる。



ボールを受け取った人は、同じ14m/sで前方にボールを投げる。

ボールが飛んでいく向きが90度変わり、速度が10m/sから24m/sに変化した。



地面に対しては、24m/sでボールは飛んでいく。

この説明でのたとえ：はやぶさ2 → ボール  
地球と引力 →

車と人

# 参考：スイングバイをする理由

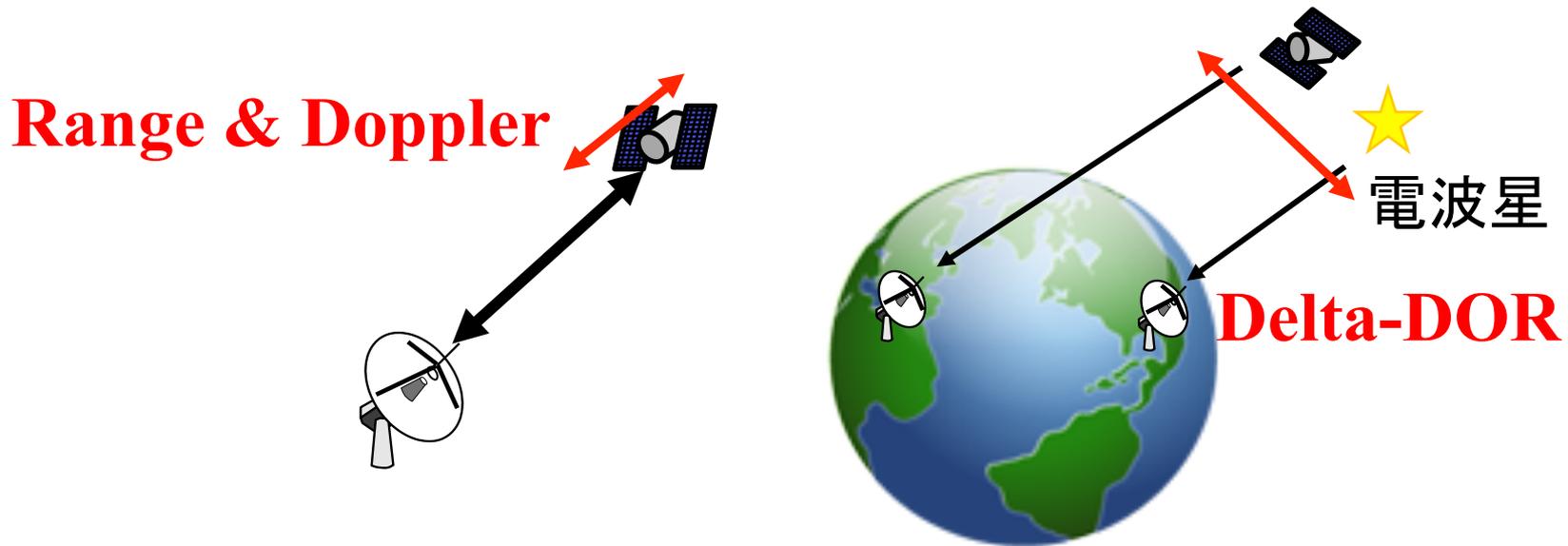
探査機を目的の天体に向かわせるためには、探査機を特定の方向に向けて加速する(軌道制御をする)必要があります。

軌道制御をするためには普通は燃料を使いますが、月や惑星の引力を利用して軌道制御を行うことができます。これをスイングバイと言います。

スイングバイを使うと、ほとんど燃料を使わずに軌道制御ができるので、搭載する燃料を減らしたり、探査機のエンジンを小型化できます。つまり、探査機自体を小型化することにつながり、製作や打上げにかかる費用を削減できます。

# 参考：Delta-DOR (Delta Differential One-way Ranging)観測について

- 従来の計測手法であるレンジやドップラ観測は、視線方向(奥行き方向)に感度を持つが、視線方向に垂直な成分(赤経・赤緯)には感度を持たない。



- Delta-DORは、遠く離れた2台のアンテナで同時に探査機信号を受信し、探査機の天球面上の位置(赤経・赤緯)を、近傍の電波星(クェーサ)の位置を基準として計測する技術。
- 地上アンテナ間の距離(基線)が長いほど精度が高い。南北基線は赤緯方向に、東西基線は赤経方向に感度をもつ。