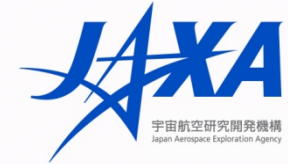


小惑星探査機「はやぶさ2」地球スイングバイ結果 に関する記者説明会

2015年12月24日
国立研究開発法人
宇宙航空研究開発機構(JAXA)
宇宙科学研究所
はやぶさ2プロジェクトチーム

概要



2015年12月3日に実施した「はやぶさ2」の地球スイングバイの結果について説明する。

1. スイングバイの結果

- (1) 地球最接近点への誘導
- (2) 軌道決定とその精度
- (3) 探査機の状態

2. 観測機器による地球・月の観測および実験

- (1) ONCによる地球撮像
- (2) TIRによる地球撮像
- (3) NIRS3による地球・月観測
- (4) LIDARによる光リンク実験
- (5) 観測機器の体制

ONC	: 光学航法カメラ
TIR	: 中間赤外カメラ
NIRS3	: 近赤外分光計
LIDAR	: レーザ高度計

3. アウトリーチ関連

- (1) 地上望遠鏡による観測キャンペーン
- (2) その他

4. 今後の予定

1. スイングバイの結果 (1/5)

(1) 地球最接近点への誘導

「はやぶさ2」は、2015年12月3日に地球スイングバイを行い、予定通りに小惑星リュウグウに向かう軌道に乗った。

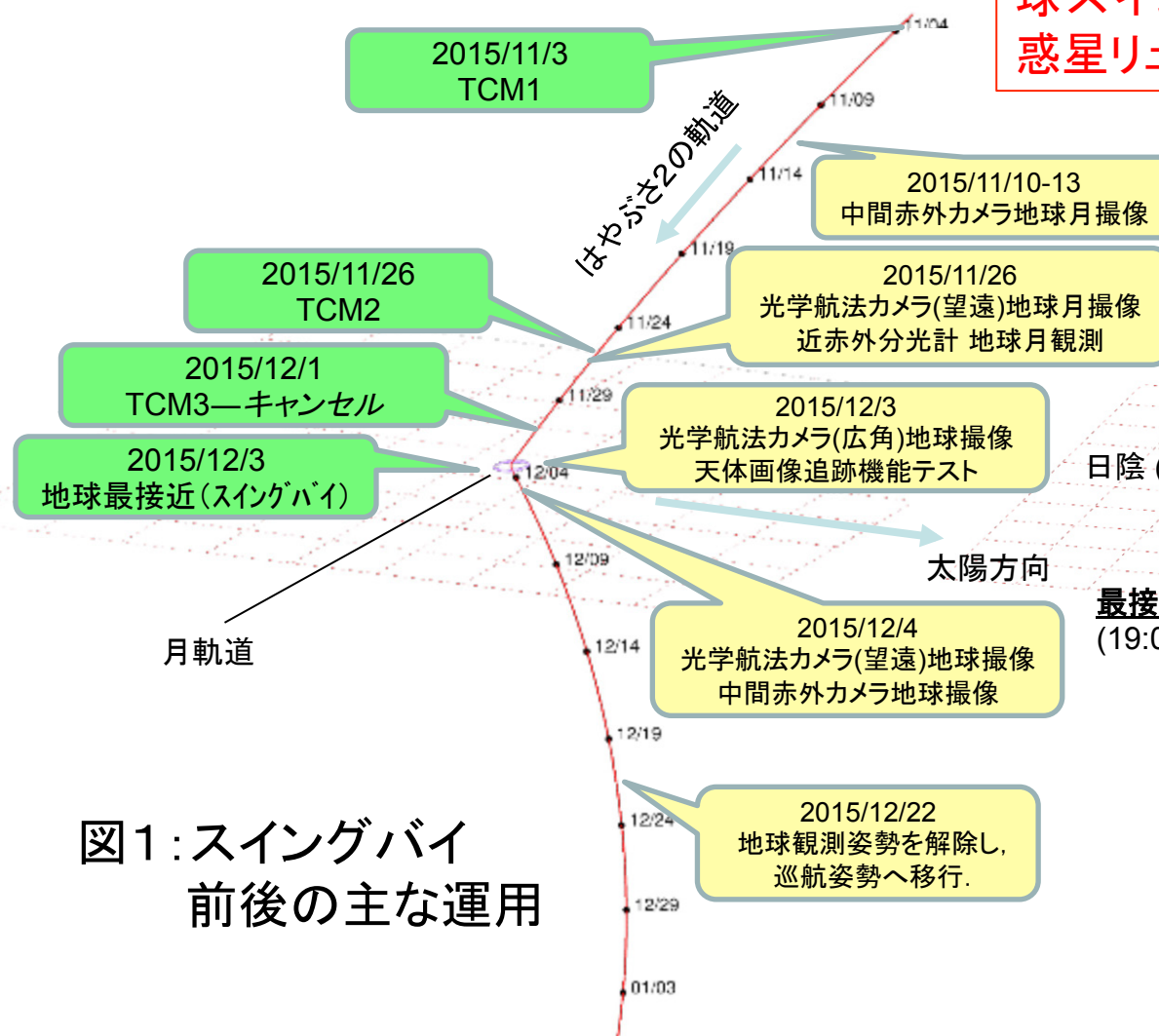


図1: スイングバイ
前後の主な運用

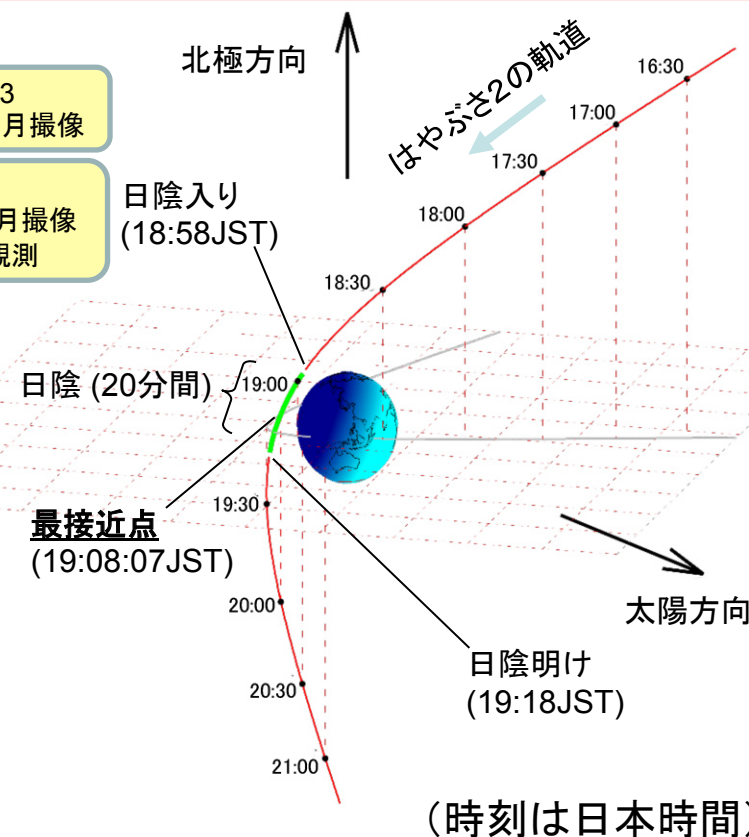


図2: 地球最接近時の軌道

1. スイングバイの結果 (2/7)

(1) 地球最接近点への誘導

- ・イオンエンジンによる事前の軌道調整 (IES-TCM) と (次ページ参照)、化学推進系スラスタを使用した軌道修正2回 (TCM1,2) により、燃料を節約しつつ、高い精度でスイングバイを達成した。(Ryuguに向かう軌道に正確に乗せることができた。)
- ・高い精度を目指すことで、2020年の地球帰還の誘導技術の確認もできた。

地球スイングバイのための軌道修正運用(実績)

実施日	イベント	軌道修正量	噴射時間	誘導精度
9/1-2	IES-TCM	1.3m/s	12時間	誤差10000km→400kmへ縮小
11/3	TCM1	23cm/s	3.95秒	誤差400km→11kmへ縮小
11/26	TCM2	4.6cm/s	0.80秒	誤差11km→3kmへ縮小
12/1	TCM3	—	—	精度十分と判断し実施せず

「IES-TCM」に使用したイオンエンジン



「TCM1」「TCM2」に使用したスラスタ

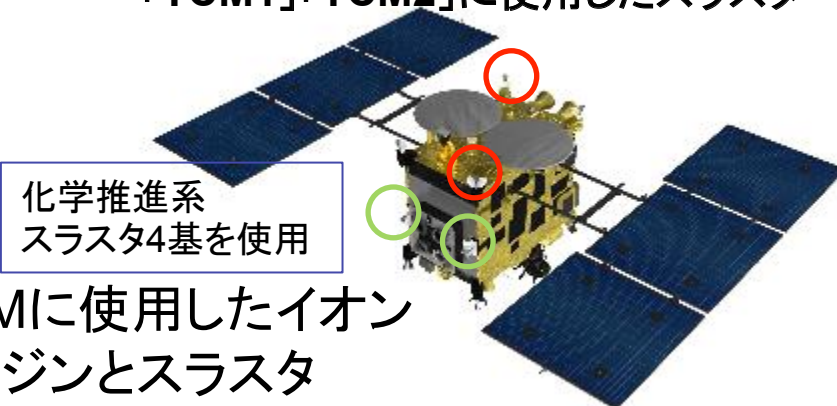
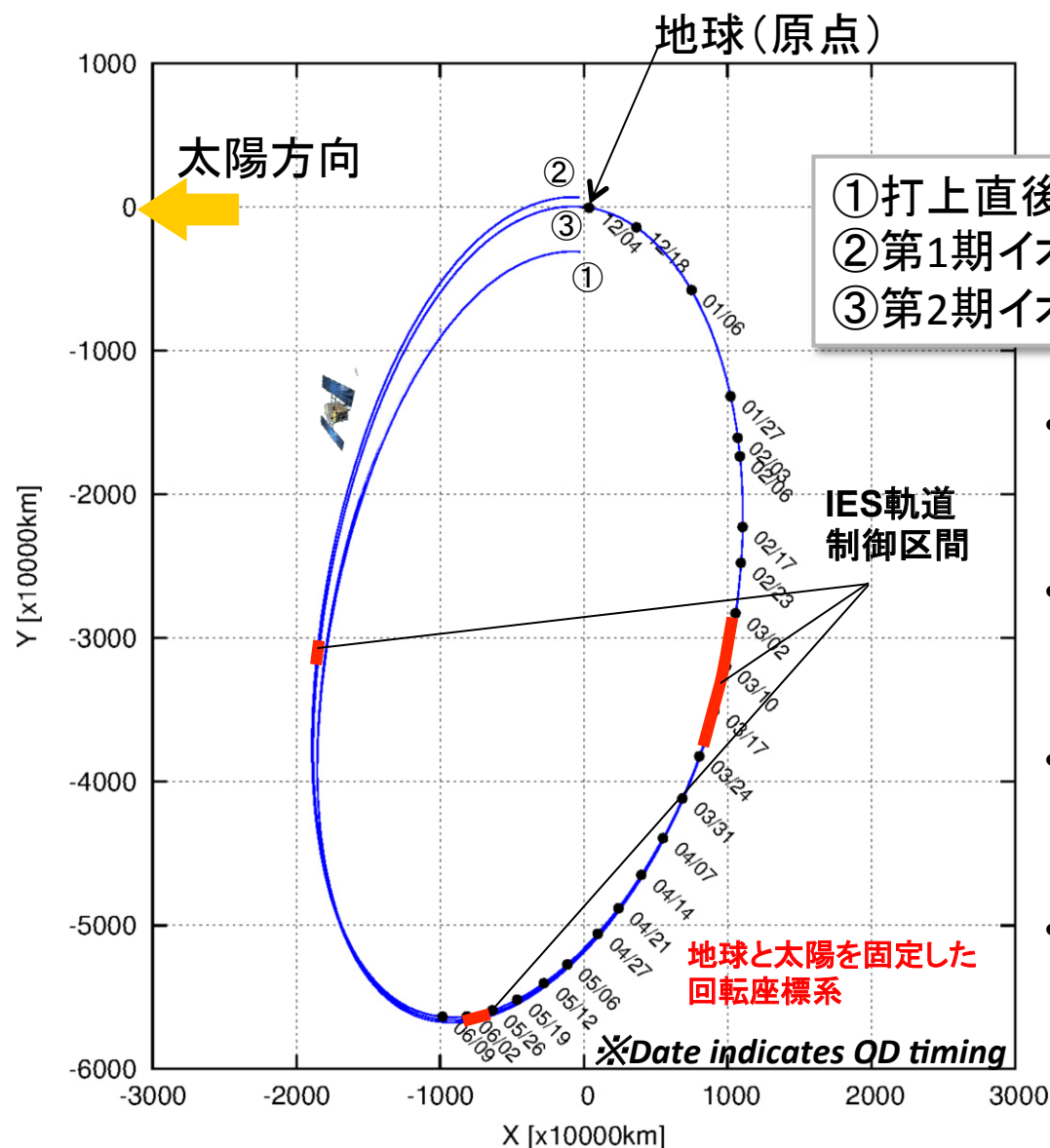


図3: TCMに使用したイオンエンジンとスラスタ

1. スイングバイの結果 (3/7)



イオンエンジンによる誘導

- 6/8に、打ち上げ後の1年間における地球最遠点(5741.4万km)を通過した。
- 第1期および第2期の2回のイオンエンジン軌道制御により、地球近傍に向かう軌道に探査機を乗せた。
- 3回目のイオンエンジン軌道制御を9/1-2に実施し、地球スイングバイに向けた精密誘導を行った(IES-TCM)。
- 9/18に全ミッション期間中の太陽最近点を通過した(0.91天文単位)。

図4: イオンエンジンによる軌道修正

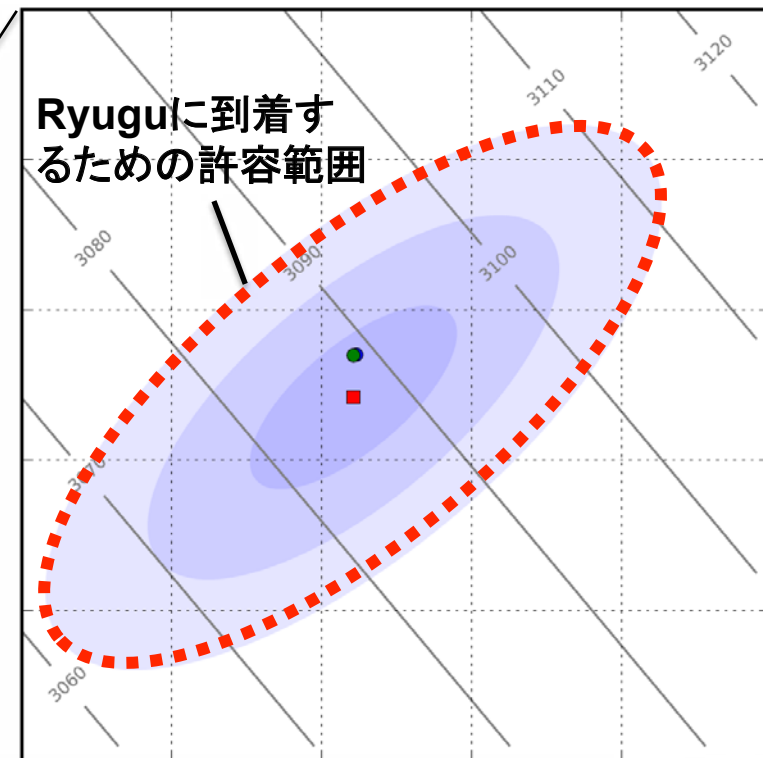
1. スイングバイの結果 (4/7)

(2) 軌道決定とその精度

概要

- 最終的な軌道誘導精度は約300m。
- Ryuguへ向かう軌道、地球帰還運用のスキルの観点で、十分高い精度を達成。
- JPL(ジェット推進研究所)によるShadow Navigationの結果と、十分によい精度で一致していた。

スイングバイの「的(まと)」



※1目盛は10kmを表す。等高線は、対地高度を表す。

- 当初軌道計画上の中心点
- スイングバイ誘導ターゲット(ここを狙って軌道を調整した)
- 誘導結果(スイングバイ実績)
- (●と●はほぼ重なっている. 差異は約300m)

図5:スイングバイ精度を示す模式図

1. スイングバイの結果 (5/7)

(2) 軌道決定とその精度

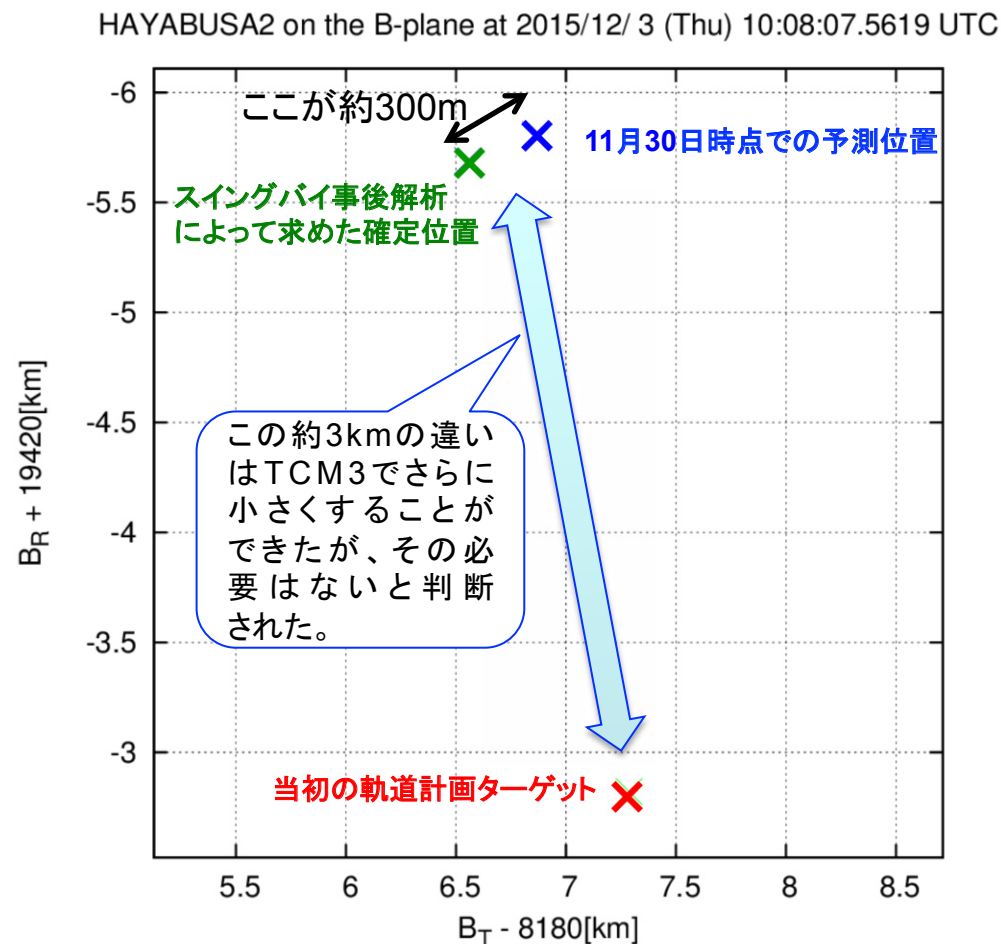


図6: 最終的な軌道決定結果

軌道決定結果の詳細

- ・11月30日に軌道決定を実施し、地球最接近時における探査機位置を予想した。(この予想に基づいて、TCM3を実施しないという決定がなされた。)
- ・スイングバイ後に、スイングバイ前後のデータを用いて、地球最接近時の位置を事後解析で求めたところ、11月30日時点の推定結果は約300mの精度で正しかった事が判明した。軌道決定精度と将来への軌道伝播精度の双方が、極めて正確であったことが実証された。
- ・約6000万kmのところまで離れた探査機を300mの精度で誘導できたことは、100km離れたところから0.5mmの精度で誘導したことと同等である。

1. スイングバイの結果 (6/7)

(2) 軌道決定とその精度

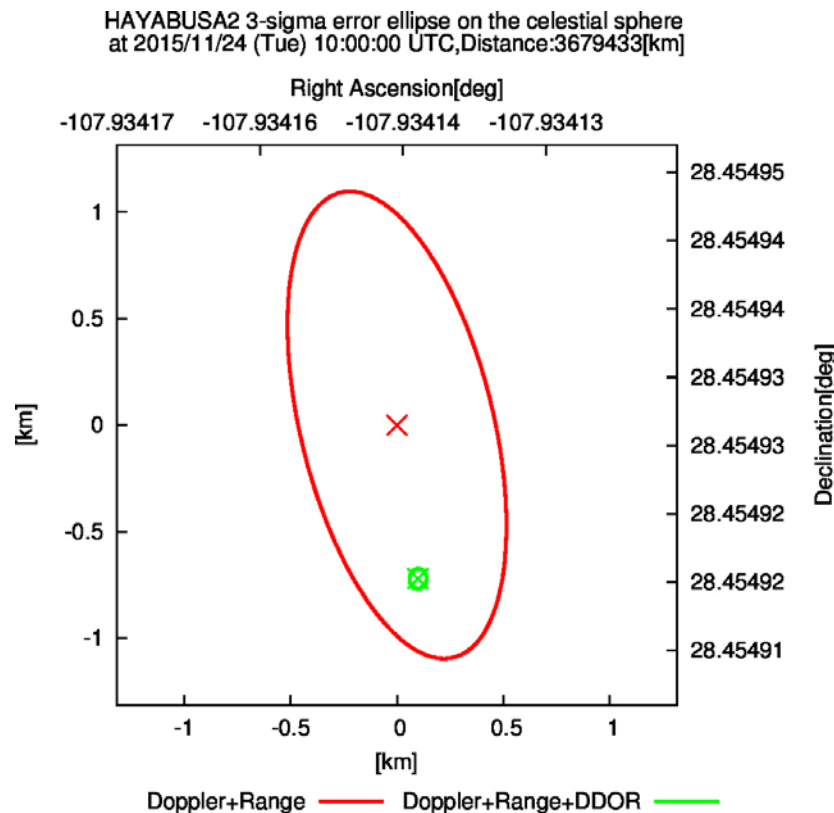


図7: DDORによる高精度軌道決定の例

軌道決定作業の詳細

- 各TCMの前後にはJAXA臼田局とNASA/JPLの海外局(Goldstone, Canberra, Madrid)を用いて、ドップラ、レンジ、DDORデータを取得し、精密軌道決定を行なった。
- 2020年の地球帰還時の軌道決定シミュレーションを兼ねて、精密軌道計測ができるよう観測計画を作成した。
- 打ち上げ後の全軌道決定結果を用いて、太陽輻射圧をモデル化し、軌道の将来伝播予測を行なった。
- 地球観測のための地球指向姿勢変更マヌーバが多数発生したが、微小並進加速度を正確に推定する事により正確な誘導ができた。

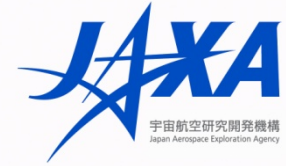
1. スイングバイの結果 (7/7)



(3) 探査機の状況

- 地球最接近前後の20分間、はやぶさ2としては初めての「日陰」を経験した。日陰中は、搭載バッテリーで稼働を継続し、問題なく日陰を通過した。
- スイングバイ前は、巡航姿勢(太陽電池パドルを太陽に向ける姿勢)と、観測姿勢(観測機器を地球に向ける姿勢)を日々切り替えることで、航法精度と地球・月観測の両立を図った。
- スイングバイ後の12月4日～7日までは、スイングバイ結果の評価のための精密軌道計測を実施し、その後、11日まで精密軌道決定とその評価を行った。
- その後、12月22日までは観測姿勢を維持し、搭載観測機器による地球・月観測に注力した。
- 12月22日に巡航姿勢に移行し、一連のスイングバイ運用を完了した。

2. 観測機器による地球・月の観測 および実験



- (1) ONCによる地球撮像
- (2) TIRによる地球撮像
- (3) NIRS3による地球・月観測
- (4) LIDARによる光リンク実験
- (5) 観測機器の体制

ONC	: 光学航法カメラ
TIR	: 中間赤外カメラ
NIRS3	: 近赤外分光計
LIDAR	: レーザ高度計

2-(1) ONCによる地球撮像(1/5)

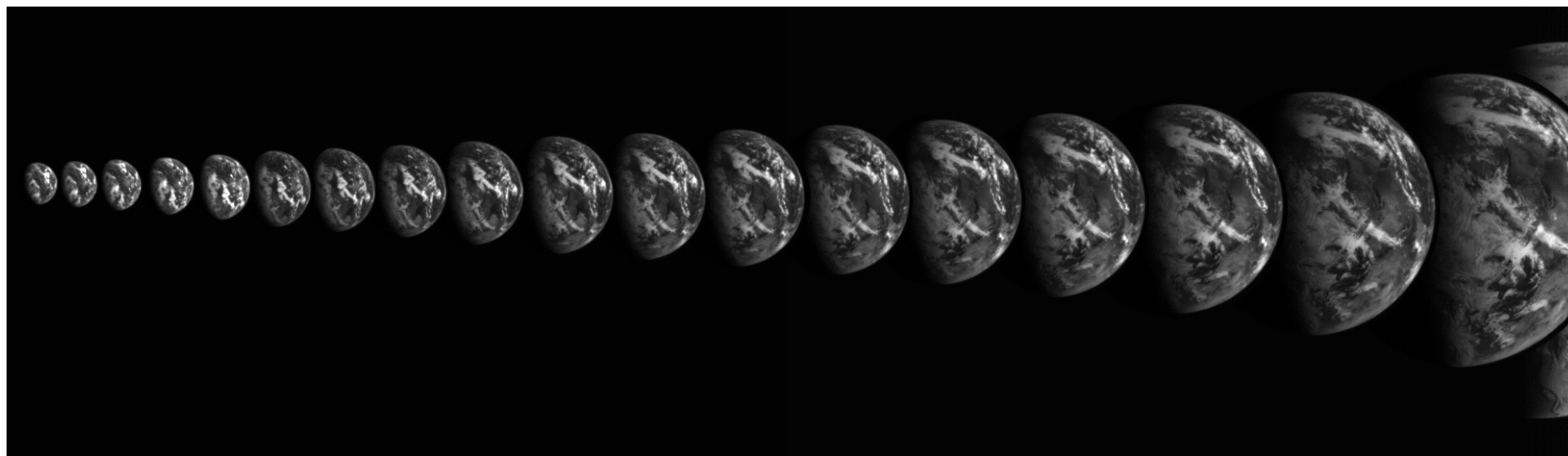
スイングバイ直前に撮像した地球の連続画像

- 側方視のONC-W2(光学航法カメラ-広角)を用いて得た白黒での地球の画像。
- 画像の動きが徐々に滑らかになるのは、撮像間隔がスイングバイに向けて短くなっているためである。
- 本画像には、12/3のスイングバイ当日の広報発表に間に合わなかった最後の3枚が加わり、地球がW2の視野端にまで至る全行程が収められている。
- 撮影時刻、地球との距離は各フレームに記載。



2-(1) ONCによる地球撮像(2/5)

前ページのgifアニメーションの画像を並べたもの

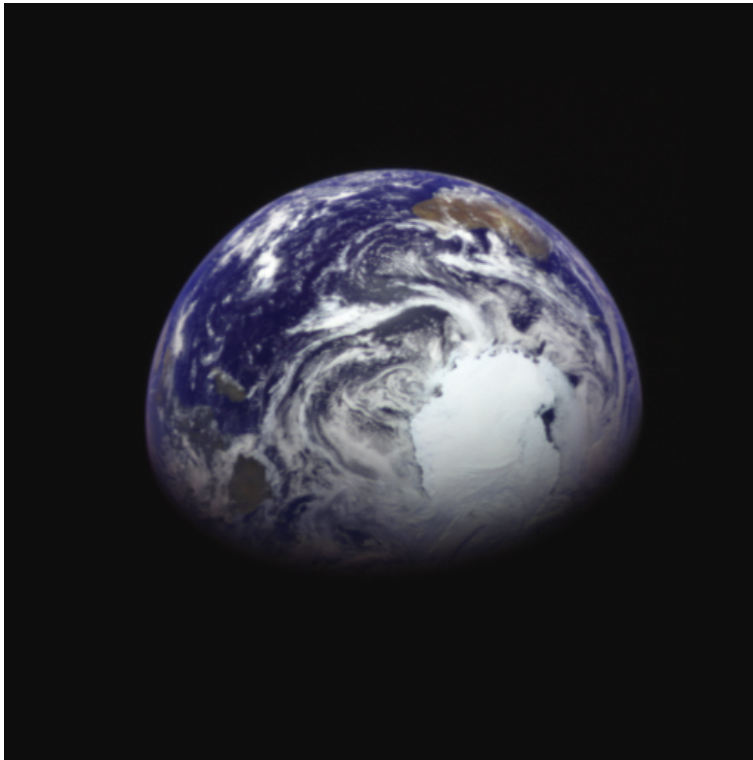


2015年12月3日9:00から18:15(日本時間)に撮影

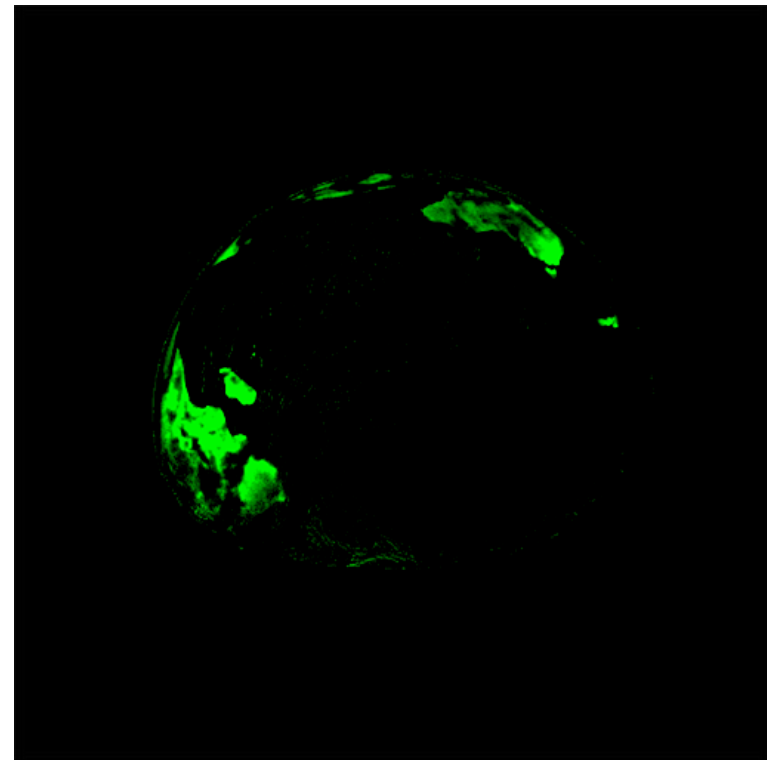
2-(1) ONCによる地球撮像(3/5)

光学航法カメラ-望遠(ONC-T)による地球画像の分析例

- 普通のカラー画像(左)では雲に邪魔されて、大陸の視認が難しいが、植生図(右)では雲間から漏れ出す植物の反射光のみを拾うことで、大陸の輪郭が浮かび上がる。



地球のカラー画像

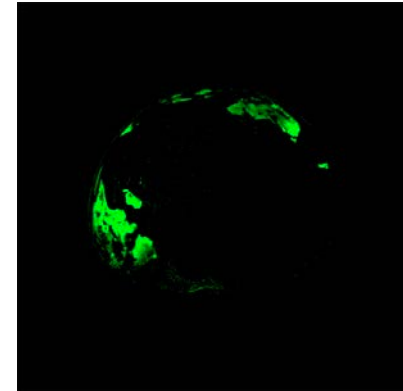


植物の反射光の強度分布の画像

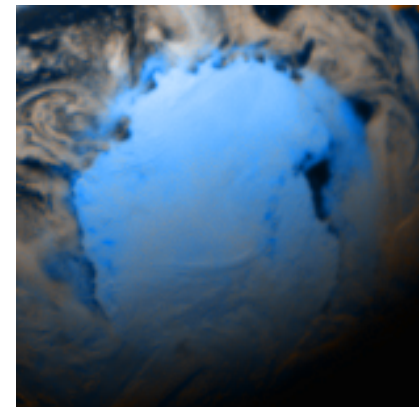
2-(1) ONCによる地球撮像(4/5)

ONC-Tによる画像で天体表面の特徴が分かる理由

- ONC-Tには、7つのフィルター(390, 480, 550, 700, 860, 950, 589.5nm, Wide)が付いている。
- 含水鉱物は、550、700、860の3波長で検出することができる。有機物は390、480、550の3波長で検出することができると考えられている。
- 例①: 700nmと860nmの2波長による解析。860nmで植物の反射率が高い性質を利用している。厚い雲の下のは見えないが、薄い雲は光を透過する。透過率は波長によらないため、薄い雲があっても下の物質の特性が見える。
- 例②: 550nmと860nmの2波長による解析。860nmで氷の反射率が低いということから、雲と氷を見分けることができる。



① 植物の反射光の強度分布の画像(前ページ)



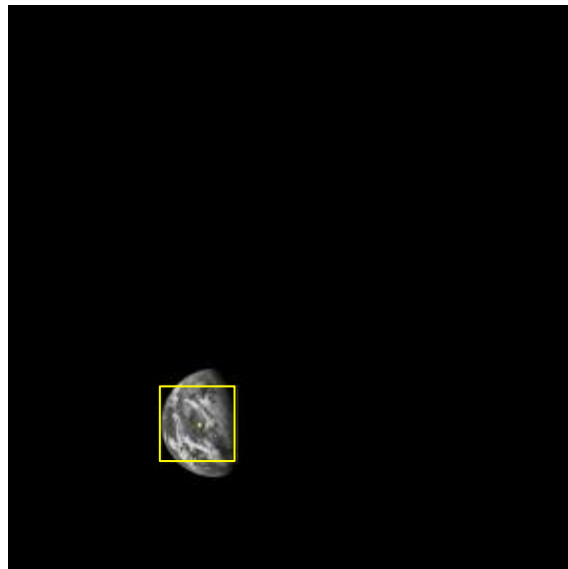
② 南極大陸の部分を、2色の画像情報を使って、雲を白、氷を青で示した疑似カラー画像。

2-(1) ONCによる地球撮像(5/5)

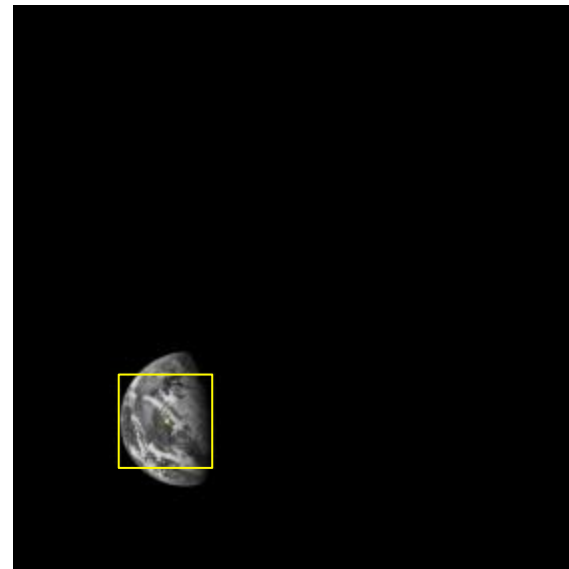
天体画像トラッキング機能テスト

- ・小惑星到着後に使用する天体画像トラッキング機能※を、地球を対象にしてテストした。
- ・小惑星到着後に重要な役割を果たす機能を確認できた。

※はやぶさ2の搭載計算機には、カメラが撮像した画像から天体を抽出し、その場所と面積を自動的に計算する機能が備わっている。Ryuguの近くにいるときに画像の中のRyuguを捉え続ける予定である。



撮像時刻: 12月3日 16:50JST



撮像時刻: 12月3日 17:20JST

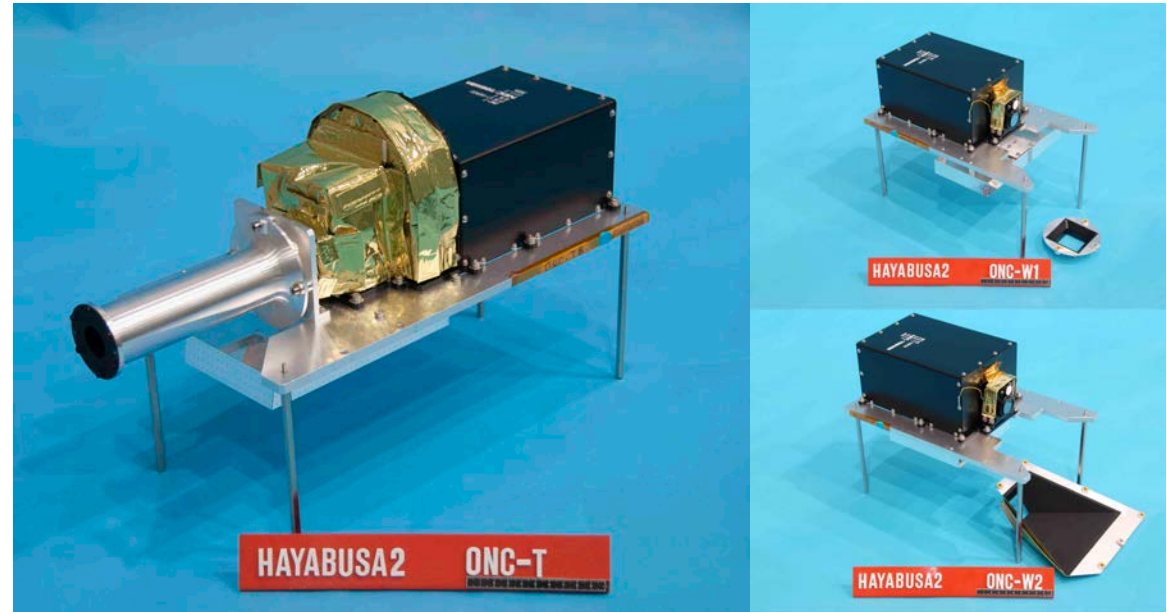
参考：光学航法カメラ(ONC)

Optical Navigation Camera

目的：探査機誘導と科学計測のために恒星と探査小惑星を撮像する。

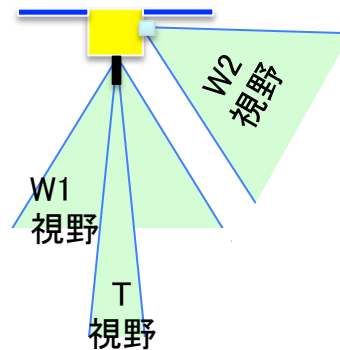
科学観測項目：

- 探査小惑星形状・運動の観測
直径、体積、慣性主軸方向、章動運動
- 表面地形の全球観測
クレーター、構造地形、礫、レゴリス分布
- 表面物質の分光特性の全球観測
含水鉱物分布、有機物分布、宇宙風化度
- 試料採取地点付近の高解像度撮像
表面粒子の大きさ、形状、結合度、不均一性
サンプラー弾痕や接地痕の観測



探査小惑星の素性解明

- 含水鉱物や有機物の分布、宇宙風化、巨礫
- サンプル採取地点選定
 - 小惑星どこから試料採取すべきかの基本情報
- サンプルの産状把握
 - 試料採取地点の高分解能の撮像



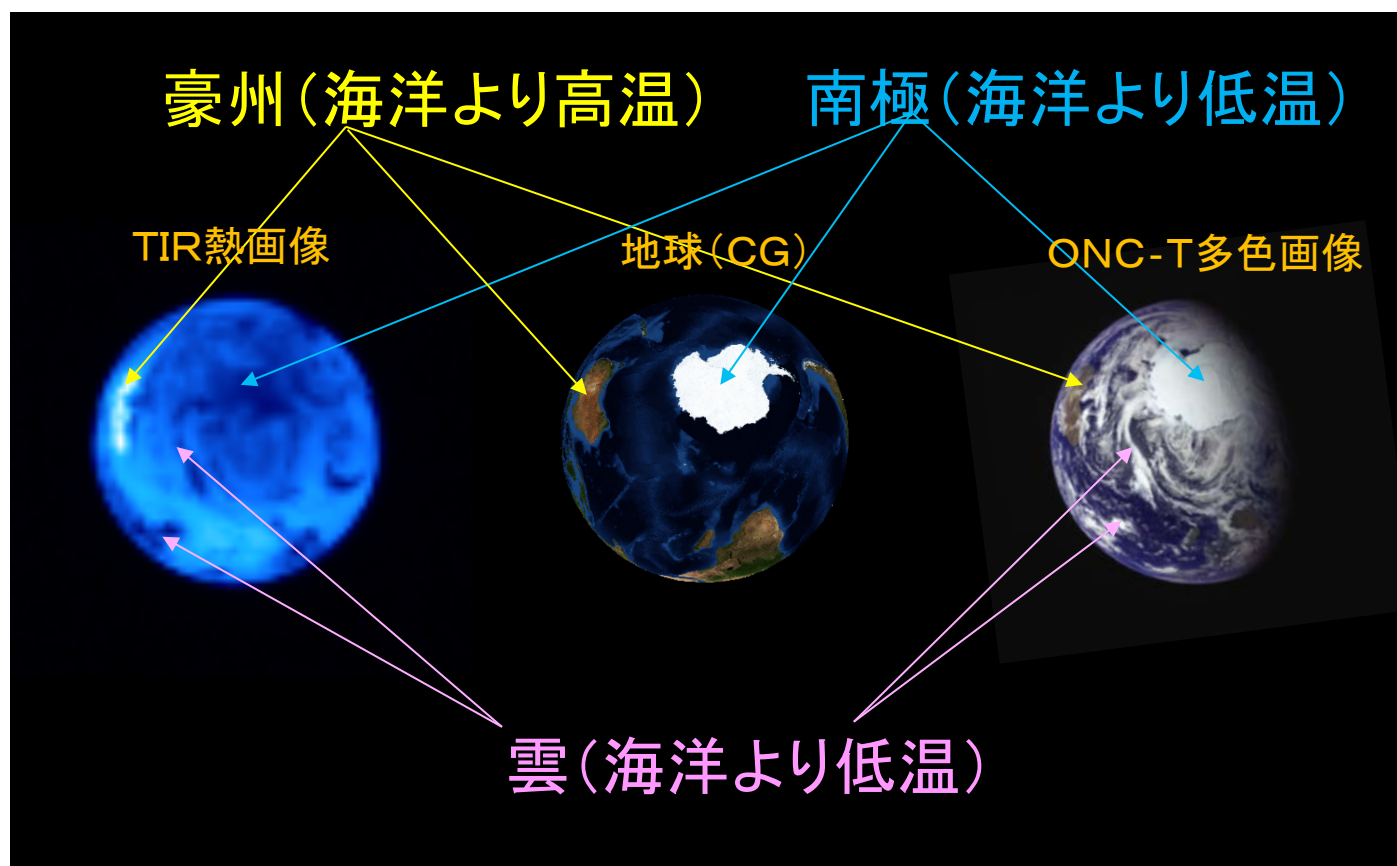
	ONC-T	ONC-W1	ONC-W2
検出器	二次元 Si-CCD (1024 x 1024 ピクセル)		
視野方向	直下 (望遠)	直下 (広角)	側方 (広角)
視野角	6.35° × 6.35°	65.24° × 65.24°	
焦点距離	100m ~ ∞	1m ~ ∞	
空間分解能	1m/pix @高度10km 1cm/pix @高度100m	10m/pix @高度10km 1mm/pix @高度1m	
観測波長	390, 480, 550, 700, 860, 950, 589.5nm, および Wide	485nm ~ 655nm	

2-(2) TIRによる地球撮像(1/2)

2015/12/4 13時頃(日本時間)撮像
(地球スイングバイ + 1 日)

◆TIR熱画像の特徴

- ・夜側の日陰領域でも撮像可能
- ・豪州(大陸・昼間)が周囲の海洋よりも高温
- ・南極(大陸・氷床)が周囲の海洋よりも低温
- ・雲(大気上層部)が周囲よりも低温

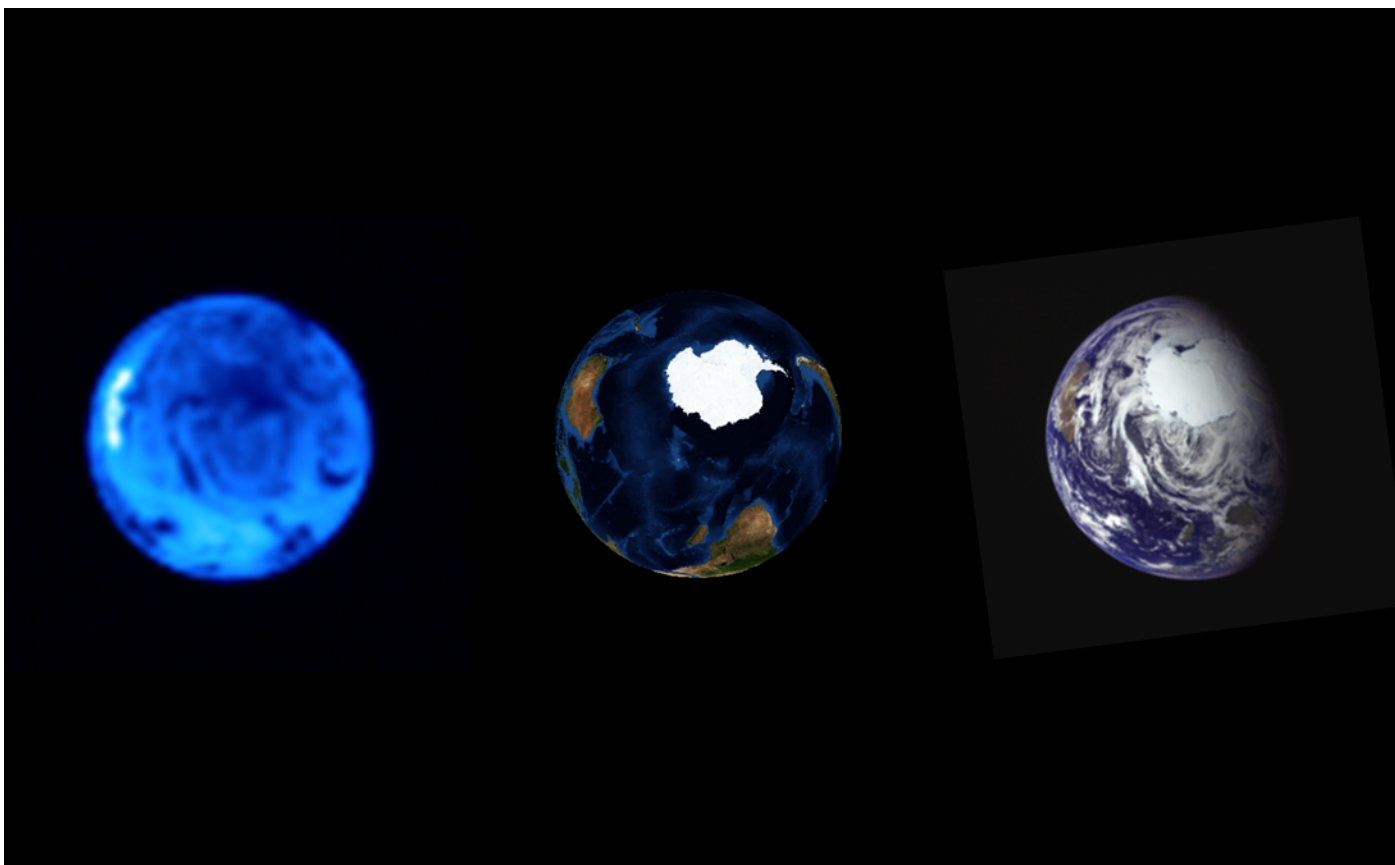


2-(2) TIRによる地球撮像(2/2)

◆TIR熱画像の特徴

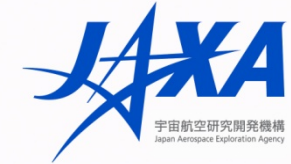
- ・夜側の日陰領域でも撮像可能
- ・豪州(大陸・昼間)が周囲の海洋よりも高温
- ・南極(大陸・氷床)が周囲の海洋よりも低温
- ・雲(大気上層部)が周囲よりも低温

(説明を削除した図)



参考：中間赤外カメラ(TIR)

Thermal Infrared Imager

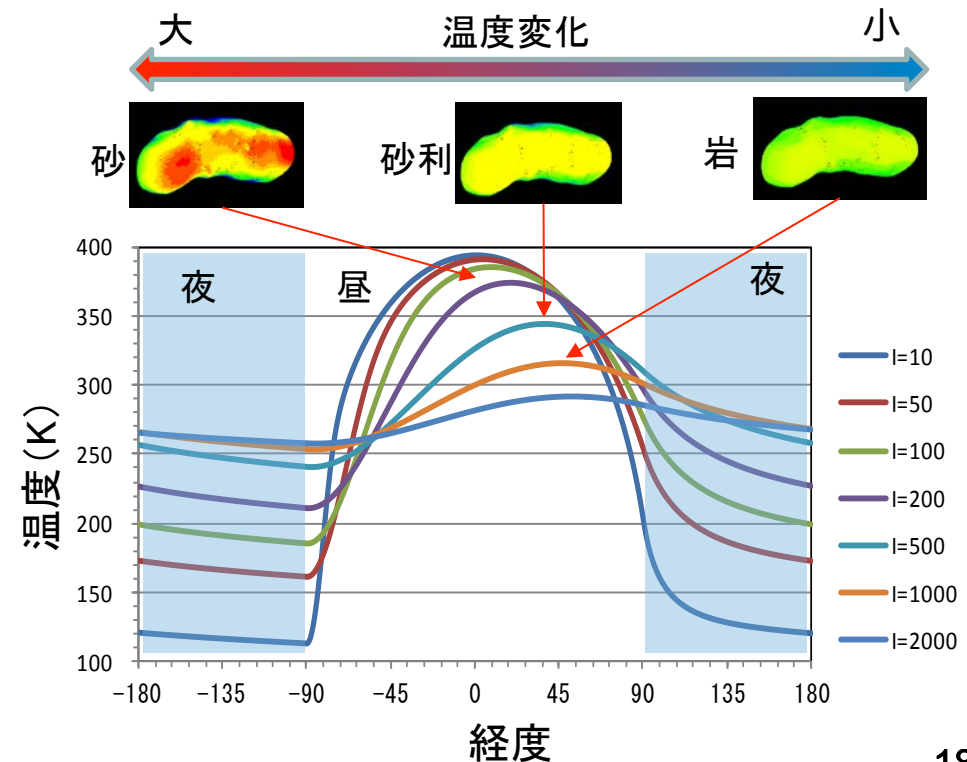
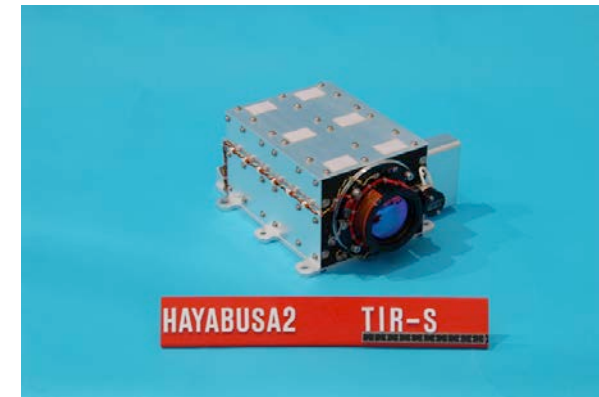


小惑星の表面温度は太陽に照らされる昼間は上昇、夜間は低下するという日変化をする。

砂のように細粒の土質や、空隙の多い岩石では表面温度の日変化は大きく、中身の詰まった岩石は日変化が小さい。

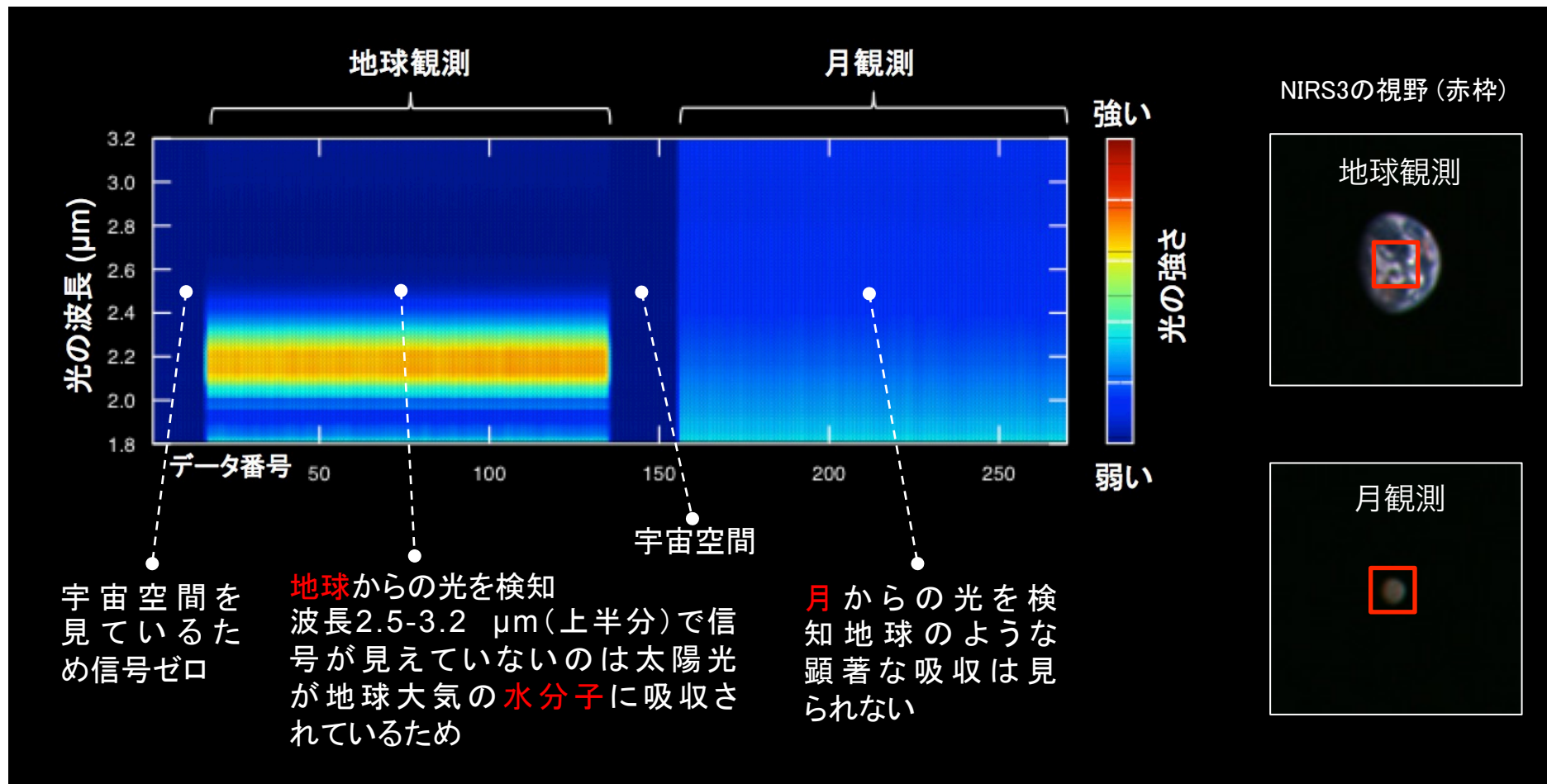
小惑星からの熱放射の2次元撮像(サーモグラフィ)することによって、小惑星表面の物理状態を調べる。

・検出器	2次元非冷却ボロメータ
・観測波長	8~12 μm
・観測温度	-40~150°C
・相対温度精度	0.3°C
・画素数	328×248(有効)
・視野角	16° × 12°
・解像度	20m(高度20km) 5cm(高度50m)



2-(3) NIRS3による地球・月観測

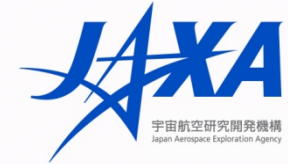
地球大気の水分子による光の吸収を確認した



NIRS3が11月26日に取得した地球と月のスペクトルデータの一部. 詳細解析中

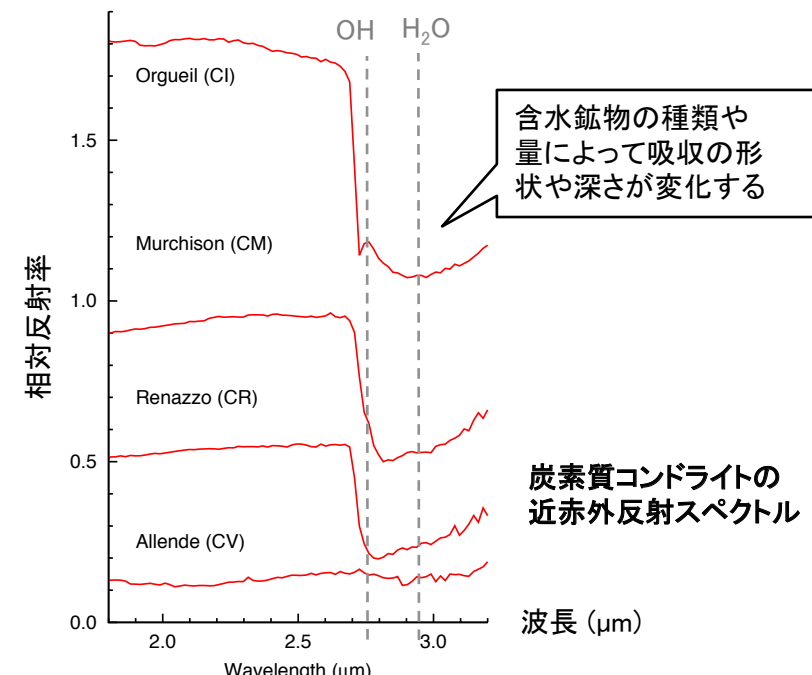
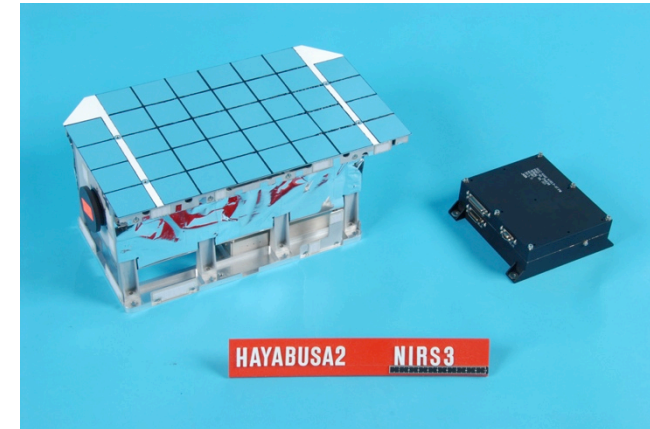
参考：近赤外分光計 (NIRS3)

Near InfraRed Spectrometer



近赤外線領域の $3\mu\text{m}$ 帯の反射スペクトルには水酸基や水分子の赤外吸収が見られる。NIRS3では、 $3\mu\text{m}$ 帯の反射スペクトルを測定することで、小惑星表面の含水鉱物の分布を調べる。

- 観測波長範囲: $1.8\text{--}3.2\ \mu\text{m}$
- 波長分解能 : $20\ \text{nm}$
- 視野全角 : 0.1°
- 空間分解能 : $35\ \text{m}$ (高度 20km)
 $2\ \text{m}$ (高度 1km)
- 検出器温度 : $-85^\circ\text{C}\sim-70^\circ\text{C}$
- S/N比 : 50以上 (波長 $2.6\mu\text{m}$)



2-(4) LIDARによる光リンク実験 (1/2)



千葉工業大学
惑星探査研究センター



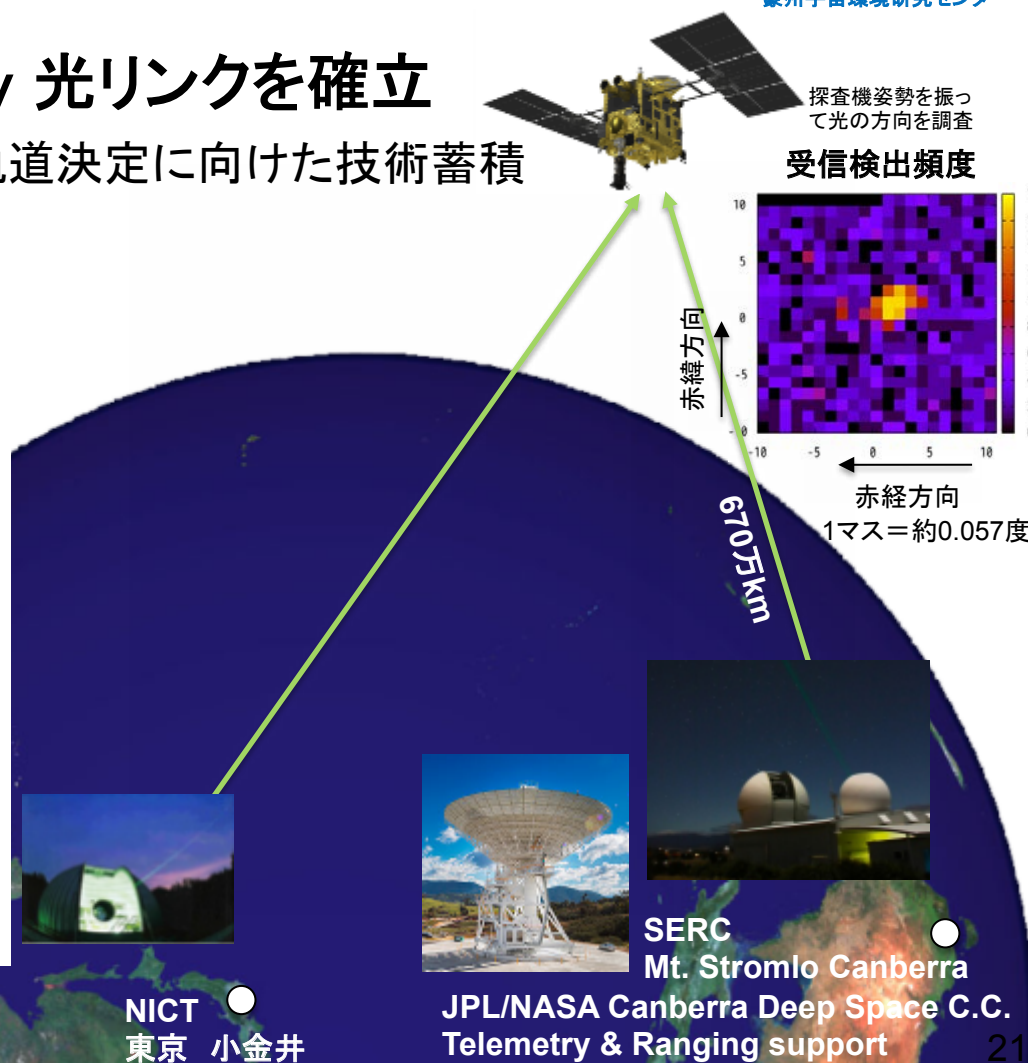
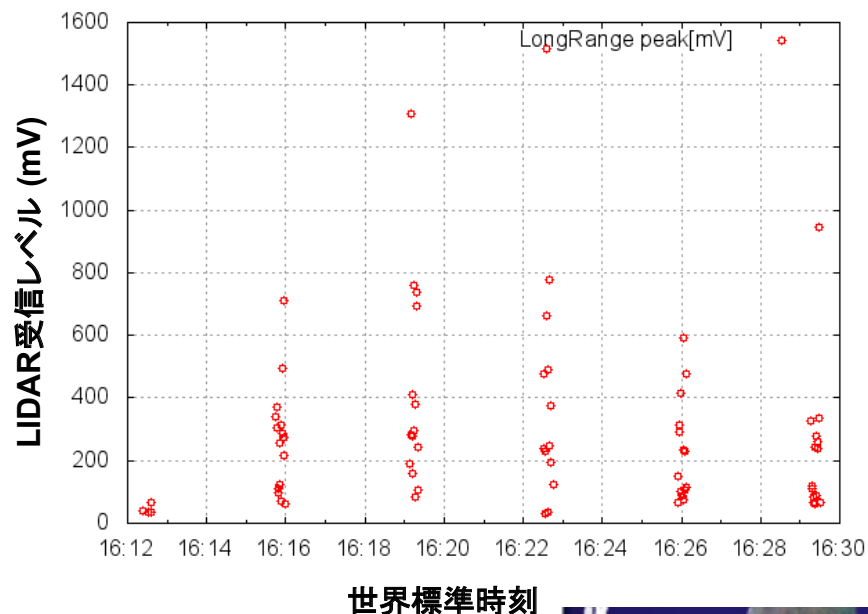
豪州宇宙環境研究センター

地上-深宇宙探査機間の1Way 光リンクを確立

将来の深宇宙レーザ測距と高精度軌道決定に向けた技術蓄積

Mt. Stromlo 局からのアップリンク光受信の様子

2015年12月19日 距離 約670万km (= 0.045AU)



2-(4) LIDARによる光リンク実験 (2/2)



惑星探査機 – 地上レーザ測距局の光リンク成功例

- 2005年 米国Messenger 2400万km 非同期 2Way (往復)
- 2005年 米国Mars Global Surveyor 8000万km 1Way (片道)
- 2009年 米国Lunar Reconnaissance Orbiter 38.5万km 2Way
- 2013年 米国Lunar Laser Communication Demonstration 38.5万km 622Mbps

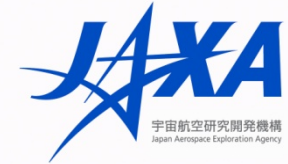
はやぶさ2の光リンク確立は希少な実験成功例

1Wayのリンク確立によって得られた成果

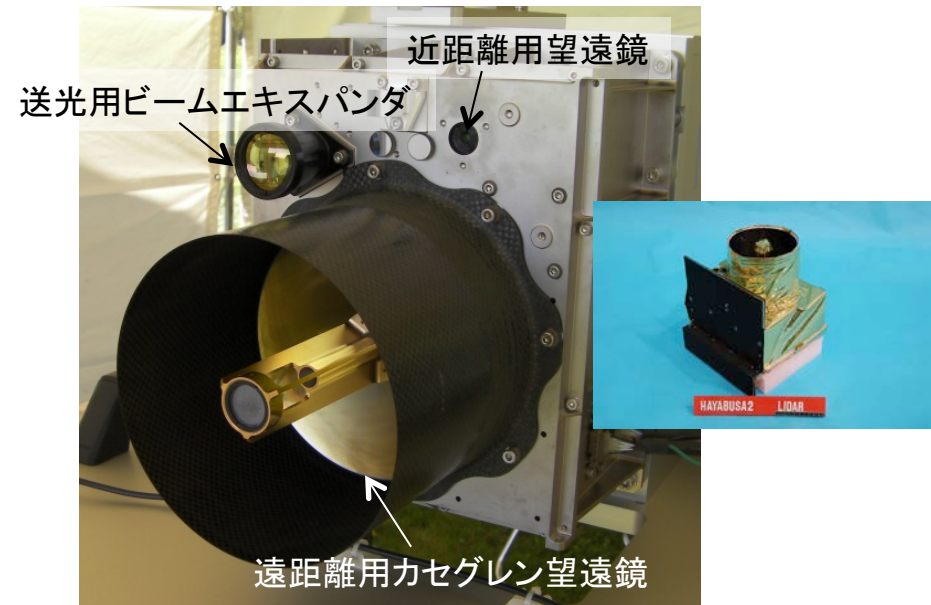
- ・将来の深宇宙レーザ測距と高精度軌道決定に向けた技術蓄積
- ・LIDARの軌道上での健全性を確認
- ・Ryugu到着後の科学観測に向けたLIDARの視線方向を確認

参考:レーザ高度計(LIDAR)

LIDAR: Light Detection And Ranging



- ・パルス方式のレーザ高度計。
- ・対象天体に向けて波長 $1.064\mu\text{m}$ のパルスYAGレーザを発射し、レーザ光の往復時間を測定することにより、高度を測定する。
- ・「はやぶさ2」のLIDARは、距離30m～25kmで測定することが可能である。
- ・LIDARは対象天体への接近、着陸時に用いられる航法センサであるとともに、形状測定、重力測定、表面特性測定、ダスト観測に用いられる科学観測機器でもある。
- ・また、トランスポンダ機能も備えており、地上LIDAR局との間でSLR(Space Laser Ranging)実験を行うことができる。



レーザ高度計エンジニアリングモデル

科学目標

- ・探査小惑星の地形・重力場の観測
- ・表面各地点のアルベド分布の観測
- ・小惑星周囲に浮遊するダスト観測



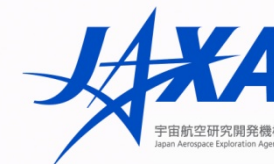
- ・小惑星の形状・質量・空隙率とその偏り
- ・小惑星表面のラフネス
- ・ダスト浮遊現象

2-(5) 観測機器の体制



- ONCは、JAXA、東京大学、千葉工業大学、立教大学、明治大学、名古屋大学、会津大学、高知大学の協力のもと開発された機器である。
- TIRは、JAXA、北海道大学、立教大学、千葉工業大学、会津大学、北海道教育大学、産業技術総合研究所、国立環境研究所、情報通信研究機構、東京大学、総合研究大学院大学、ドイツ航空宇宙センター(独)、マックスプランク研究所(独)、オープン大学(英)の協力によって開発・運用されている。
- NIRS3は、JAXA、会津大学、関西学院大学、東北大学、総合研究大学院大学、千葉工業大学、愛知東邦大学、国立環境研究所、国立天文台、国立極地研究所、日本原子力研究開発機構、名古屋大学の協力によって開発・運用されている。
- LIDARは、JAXA、千葉工業大学、国立天文台、情報通信研究機構の協力のもと開発された機器である。また、光リンク実験については、豪州宇宙環境研究センターの協力も加わって実施された。

3. アウトリーチ関連 (1/5)



(1) 地上望遠鏡による観測キャンペーン

- 地球に接近する「はやぶさ2」を、地上の望遠鏡で観測するキャンペーンをサポートした。
- 主催者は、日本公開天文台協会(JAPOS)と日本惑星協会(TPSJ)。JAPOSは主に天文台や科学館などを、TPSJは主に個人を対象とした。
- JAPOSには36施設が参加し、うち18カ所で観測が成功した。TPSJには31件(46観測地)の参加があり、9件の観測成功報告があった。
- キャンペーン参加者以外から9件の観測成功の報告があった。

多大なご協力をいただきましたJAPOSとTPSJの皆さまに感謝いたします。
また、観測を試みていただきましたすべての皆さまに感謝いたします。

3. アウトリーチ関連 (2/5)

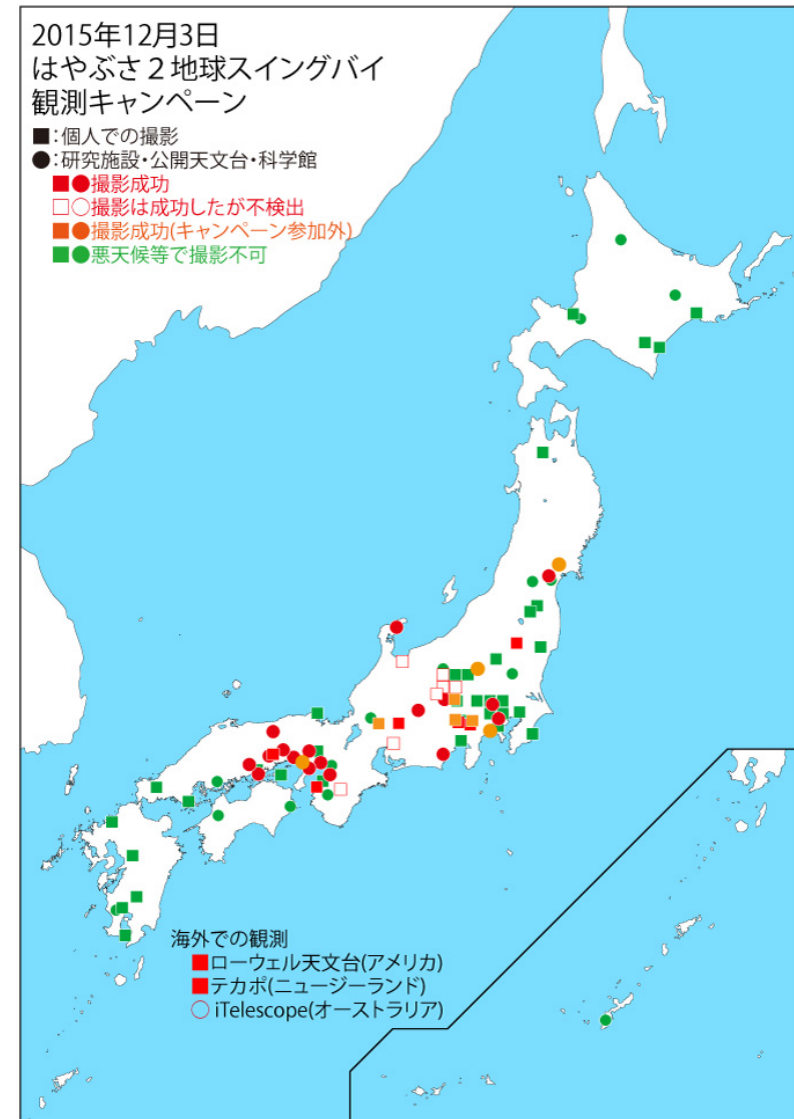
(1) 地上望遠鏡による観測キャンペーン(続き)

観測結果のまとめ

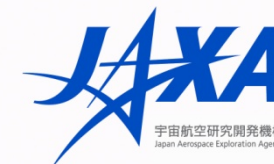
	登録件数	「はやぶさ2」撮影成功	観測はできたが「はやぶさ2」の撮影できず	天気が悪く観測できず
JAPOS	36	18	1	17
TPSJ	31 (46観測地)	9	8	7
キャンペーン外	--	9	--	--
合計	82観測地	36	--	--

(2015年12月20日現在)

観測キャンペーンの結果
(JAPOS 安田岳志氏作成)



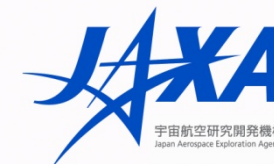
3. アウトリーチ関連 (3/5)



(1) 地上望遠鏡による観測キャンペーン(続き)

- 「はやぶさ2」を撮影した写真については、JAPOSおよびTPSJのWebを参照。
 - http://www.city.himeji.lg.jp/hoshinoko/kansoku/openobs/hayabusa2_obs.html
 - <http://planetary.jp>
- 撮影された天体が「はやぶさ2」であるかどうかの確認の希望がある場合には、日本スペースガード協会に対応をお願いした。
(<http://www.spaceguard.or.jp/ja/index.html>)
- キャンペーンの結果については、日本天文学会2016年春季年会(2016年3月14-17日、首都大学東京)にて報告予定。また、観測データが研究としても利用できるものかどうか検討する。

3. アウトリーチ関連 (4/5)



(1) 地上望遠鏡による観測キャンペーン(続き)

JAPOS、TPSJからプロジェクトに寄せられたコメント:

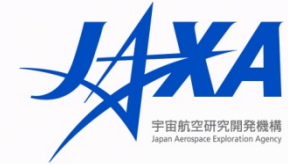
■JAPOS(代表:安田岳志氏)より

- 多くの公開天文台、科学館、研究機関に参加して頂き、天候によって撮影ができなかった地点もありますが、全国各地で同時に「はやぶさ2」を見上げるという、希少な機会を持てました。このような機会を与えて下さった、はやぶさ2プロジェクトに感謝いたします。
- 三島和久氏(倉敷科学センター)が計算・検討・テスト観測をし、観測ガイドを作ってくださったことが、参加者が撮影する際に生かされました。

■TPSJ(代表:井本昭氏)より

- 悪天候にも関わらず多くの観測成果を上げることとなり、今後行われる同様の地上観測において、貴重な経験を積むことが出来ました。
- 各天文台施設における公開された広範なネットワークの構築・運用が円滑に行われ、今後同様な機会において有効な前例を示せました。
- 探査機位置データが実際の観測結果との照合でほぼ完全に一致し、JAXAの軌道計算精度の高さを広く一般に認知されたことは、今後の太陽系探査への支持を大きく高めることの一助になったことは間違いないと思います。

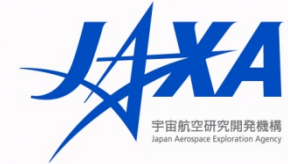
3. アウトリーチ関連 (5/5)



(2) その他

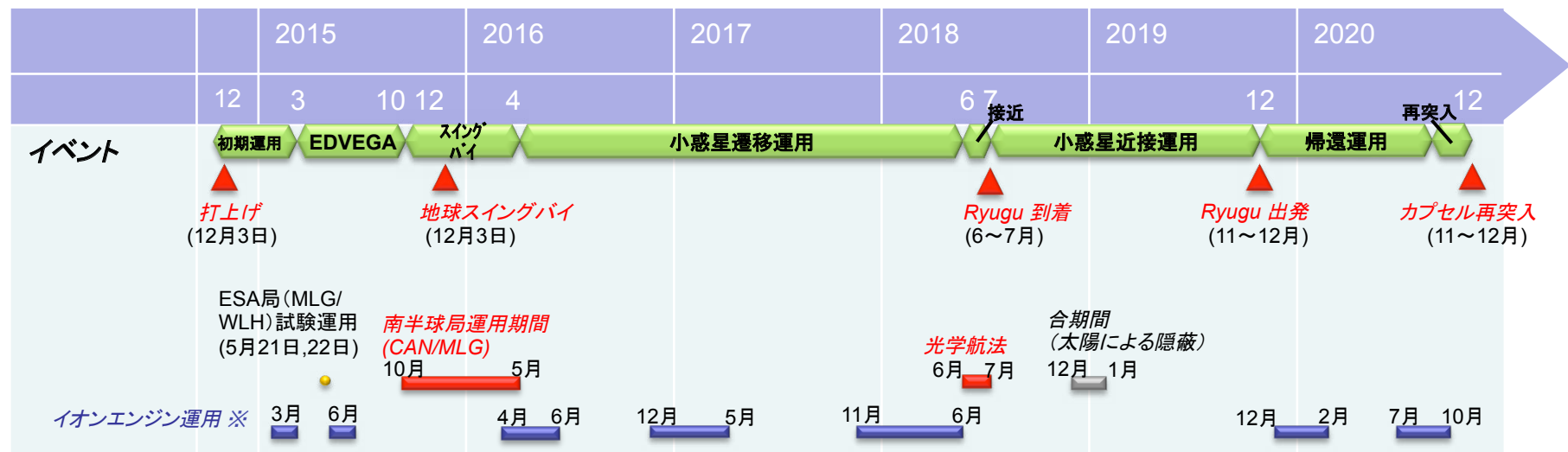
- プロジェクトのWeb (<http://www.hayabusa2.jaxa.jp>)にて、情報の迅速な発信を試みた。
- 一部の記事については、英文での情報発信も行った。
- 軌道情報を公開し、CGや軌道計算に利用していただいた。
- 「はやぶさ2」ツイッターリアルタイムQ&A企画“ツイッター相談室「なぜなにはや2」”を行った。ツイッターを利用して、リアルタイムで質問に回答した。(11月30日 12時～13時・18時～19時、12月2日 12時～13時)
- 今後も積極的なアウトリーチ活動を行っていきたい。

4. 今後の予定



- Ryugu到着までに、太陽の周りを2周半飛行する(飛行距離22億km相当)。
- 2016年3～4月頃に、イオンエンジン運転(動力航行)を開始する。Ryugu到着までに、約7000時間、イオンエンジンを稼働する予定である。
- 2016年4月下旬に南半球局運用から日本局運用に移る。
- 2016年夏は地上望遠鏡によるRyugu観測好機となる(到着前最後の観測好機)。

ミッションの予定

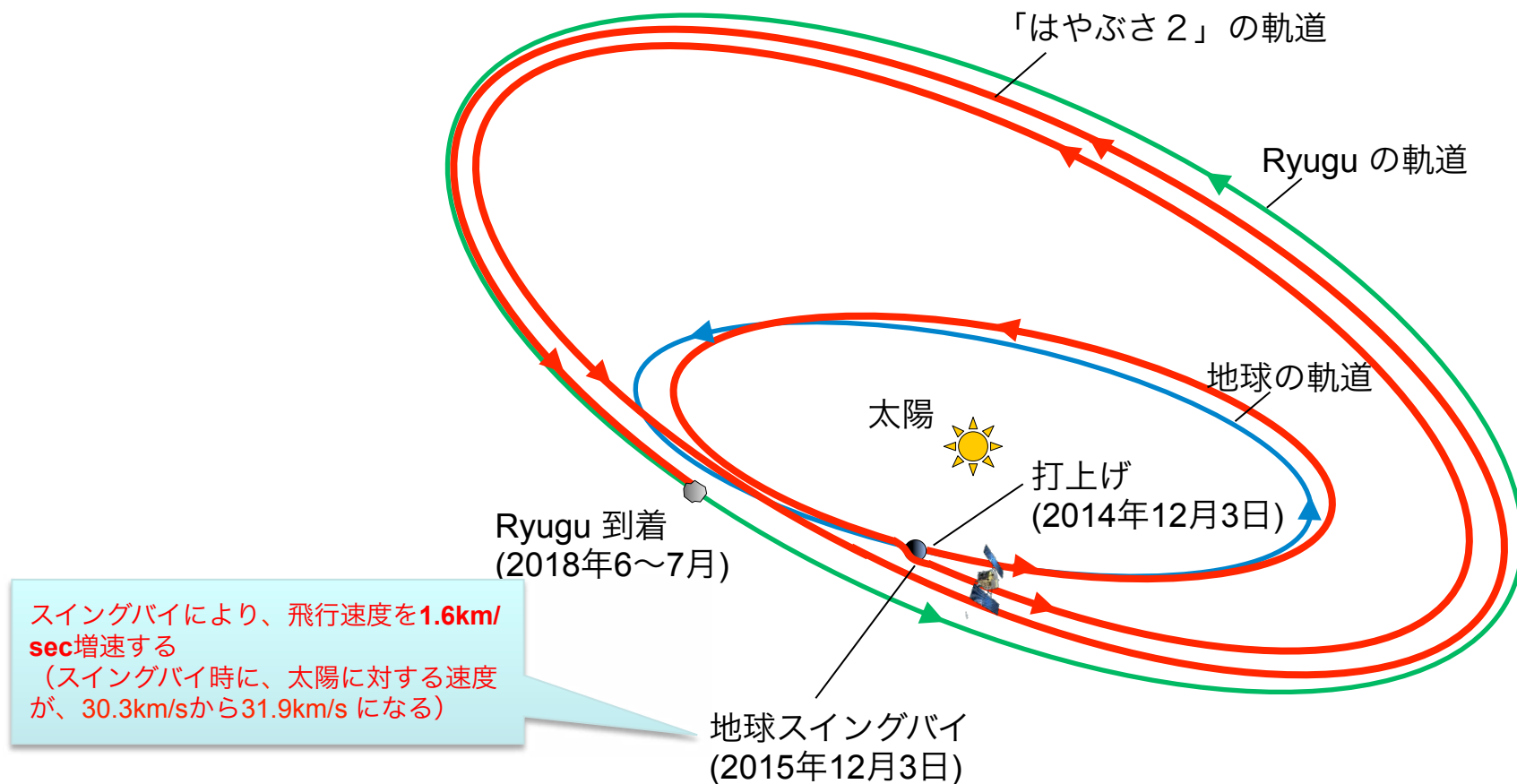


※イオンエンジン運転予定は、変更の可能性があります。

参 考 情 報

スイングバイ軌道 (1/4)

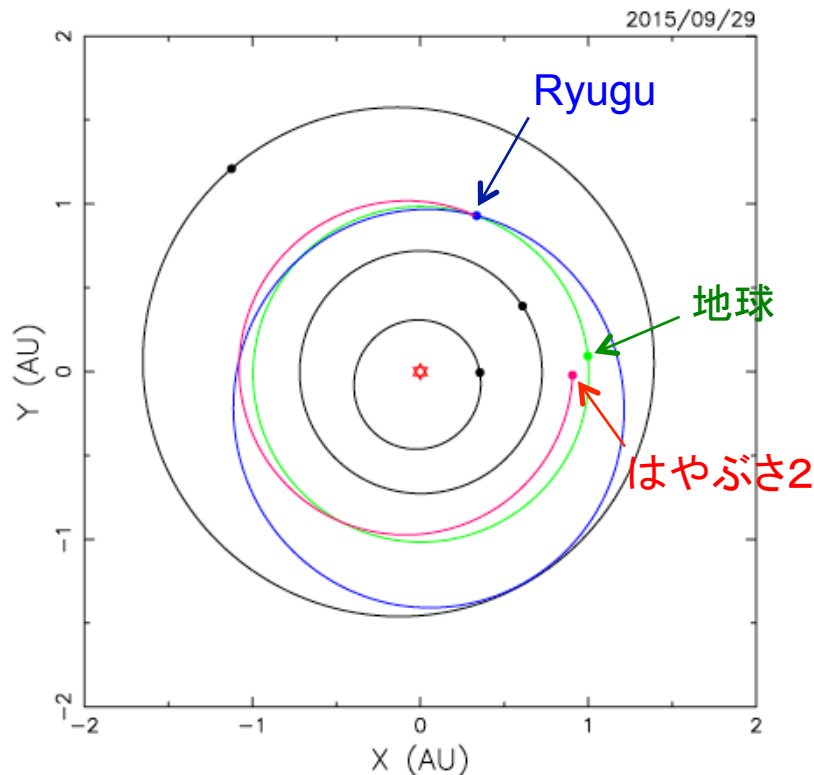
軌道の概念図



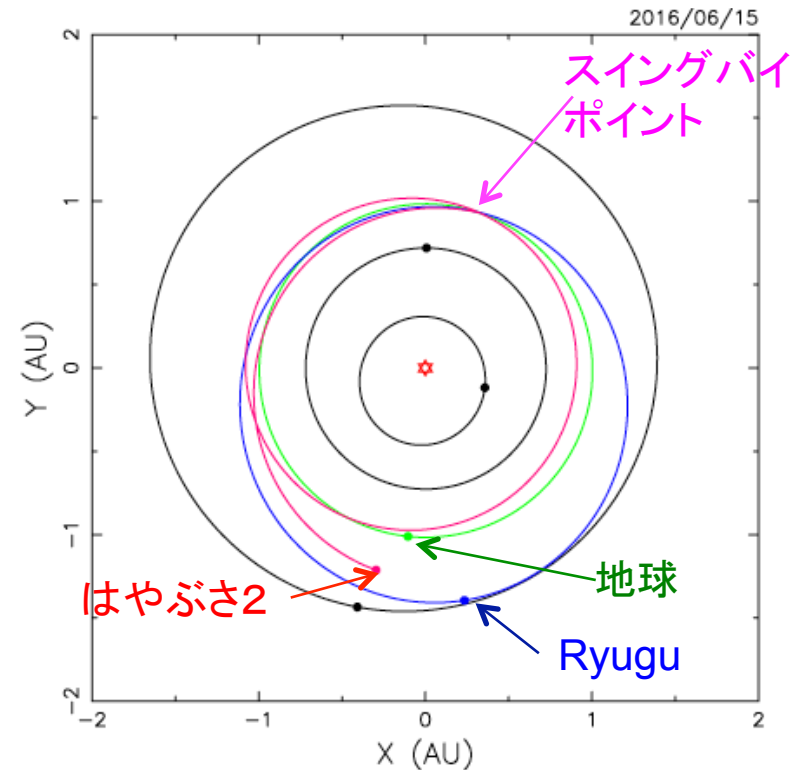
スイングバイ軌道 (2/4)

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。



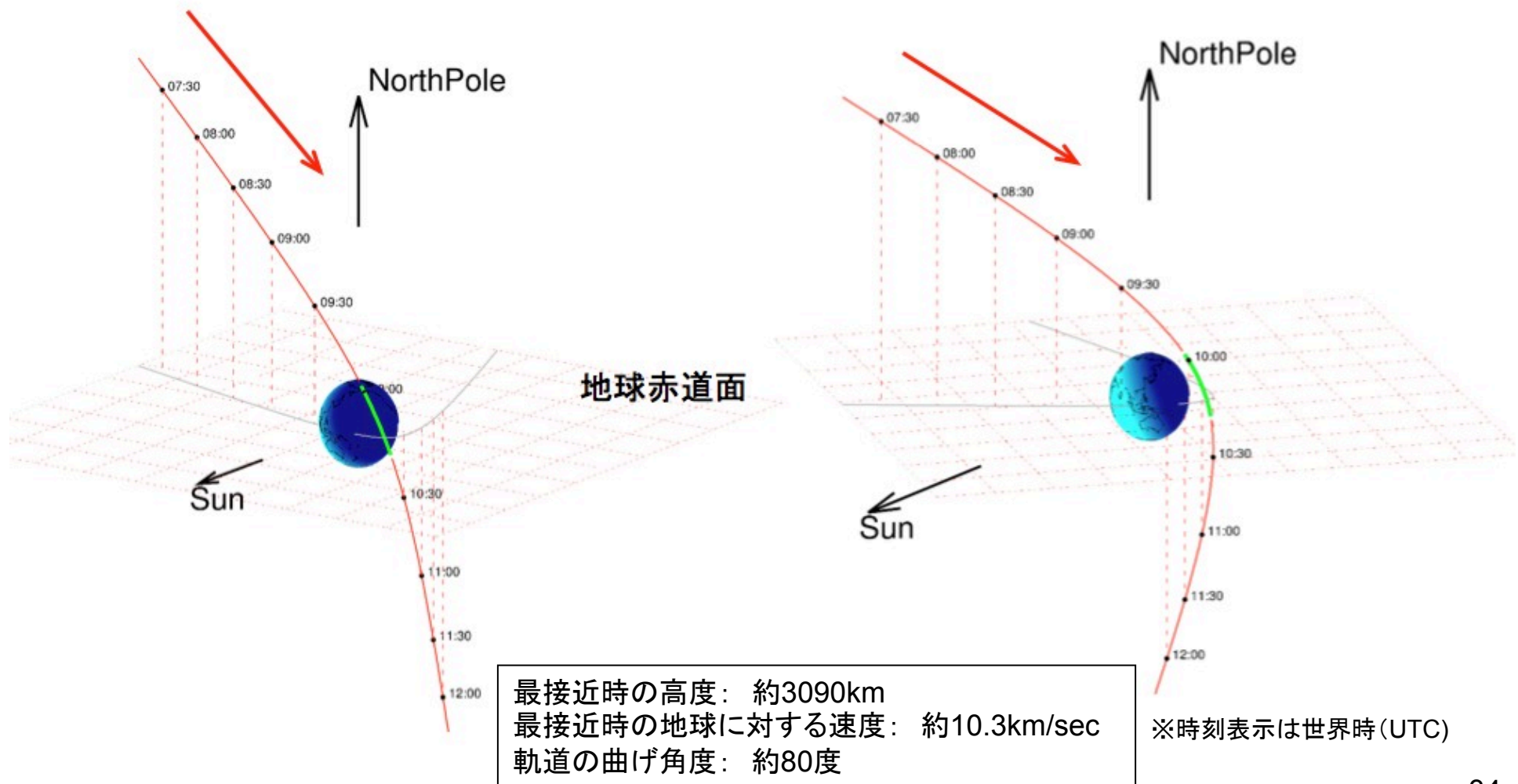
スイングバイ前(2015年9月)



スイングバイ後(2016年6月)

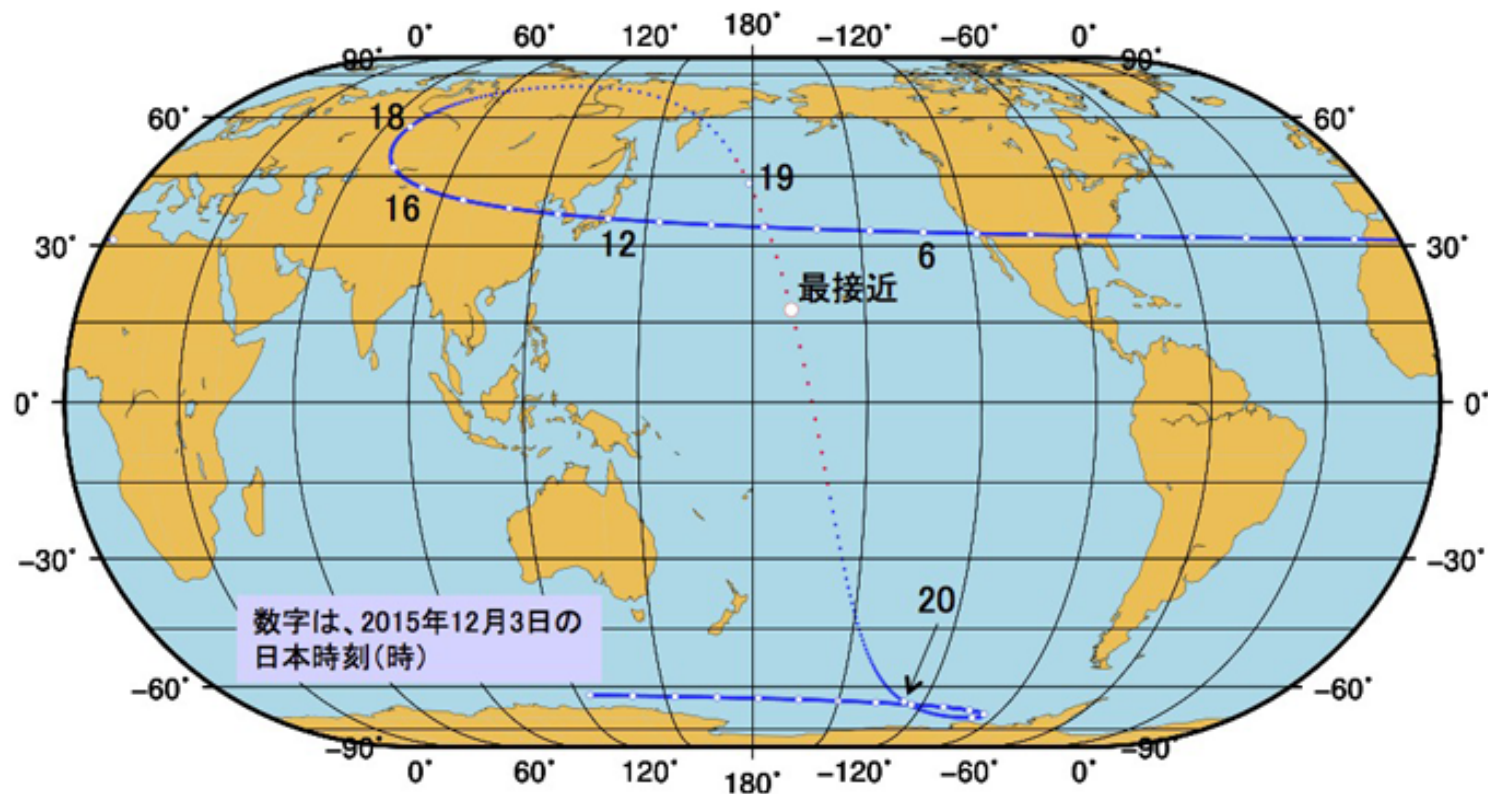
スイングバイ軌道 (3/4)

地球を中心として眺めた図



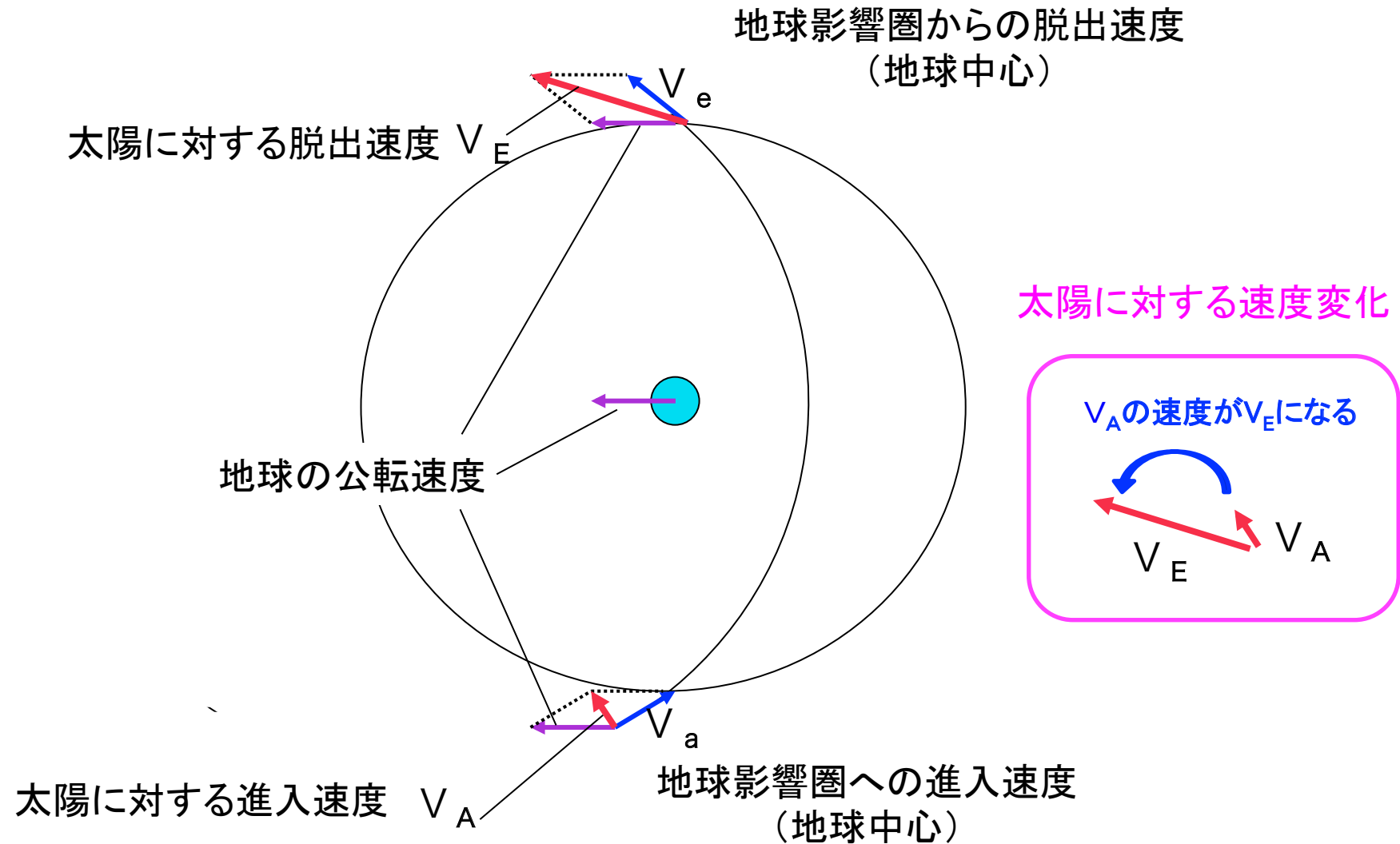
スイングバイ軌道 (4/4)

探査機直下点の軌跡

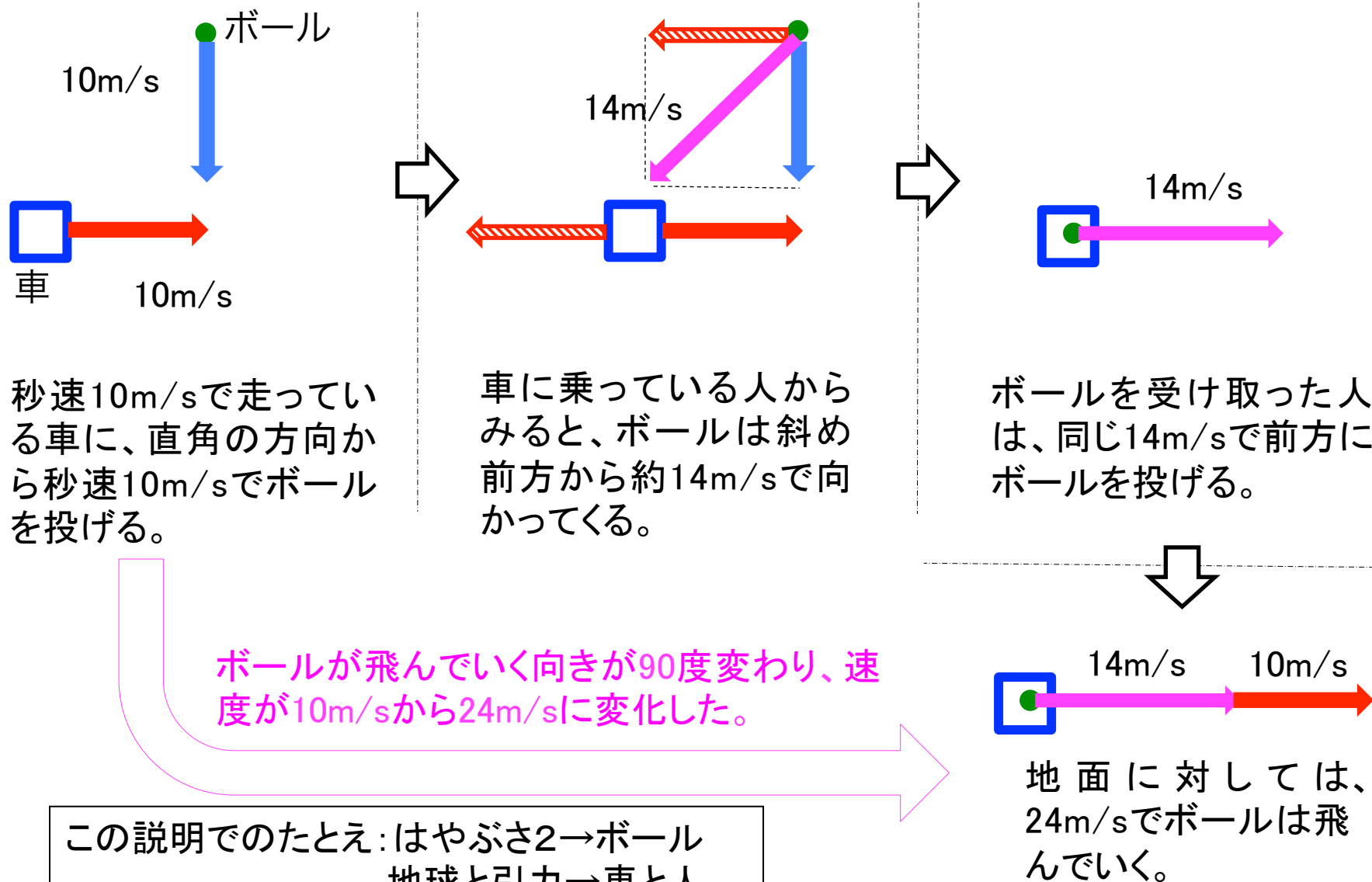


- ・最接近時刻は2015年12月3日19時8分7秒ごろ(日本時間)
- ・数字は、日本時間の正時

スイングバイの原理

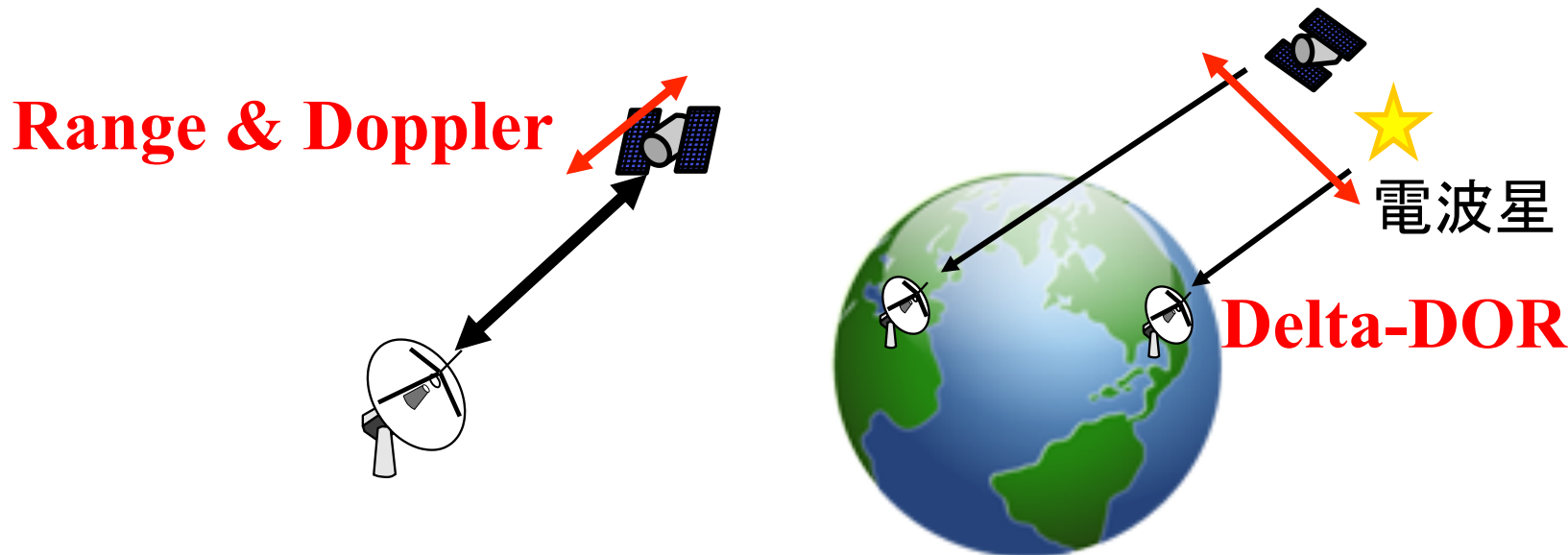


スイングバイの簡単な説明



Delta-DOR (Delta Differential One-way Range) 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(クエーサ)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。