



小惑星探査機「はやぶさ2」の 着地点候補について

2018年8月23日

JAXA はやぶさ2プロジェクト



本日の内容



「はやぶさ2」に関連して、

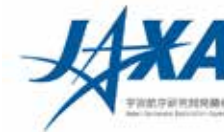
- ・着地点の候補

(タッチダウンおよびMASCOT・MINERVA-IIの着地点候補)

について紹介する。



目次



0. 「はやぶさ2」概要・ミッションの流れ概要
1. プロジェクトの現状と全体スケジュール
2. 着地候補地点と予定日
3. タッチダウン候補地点選定
4. タッチダウン候補地点についての科学的検討
5. MASCOTの着地候補地点選定
6. MINERVA-IIの着地候補地点選定
7. 着陸実現に向けた戦略
8. 今後の予定



「はやぶさ2」概要



目的

「はやぶさ」が探査したS型小惑星イトカワよりも始原的なタイプであるC型小惑星リュウグウの探査及びサンプルリターンを行い、原始太陽系における鉱物・水・有機物の相互作用の解明することで、地球・海・生命の起源と進化に迫るとともに、「はやぶさ」で実証した深宇宙往復探査技術を維持・発展させて、本分野で世界を牽引する。

期待される成果と効果

- ・水や有機物に富むC型小惑星の探査により、地球・海・生命の原材料間の相互作用と進化を解明し、太陽系科学を発展させる。
- ・衝突装置によって生成されるクレーター付近からのサンプル採取という新たな挑戦も行うことで、日本がこの分野において、さらに世界をリードする。
- ・太陽系天体往復探査の安定した技術を確立する。

特色:

- ・世界初のC型微小地球接近小惑星のサンプルリターンである。
- ・小惑星にランデブーしながら衝突装置を衝突させて、その前後を観測するという世界初の試みを行う。
- ・「はやぶさ」の探査成果と合わせることで、太陽系内の物質分布や起源と進化過程について、より深く知ることができる。

国際的位置づけ:

- ・日本が先頭に立った始原天体探査の分野で、C型小惑星という新たな地点へ到達させる。
- ・「はやぶさ」探査機によって得た独自性と優位性を発揮し、日本の惑星科学及び太陽系探査技術の進展を図るとともに、始原天体探査のフロンティアを拓く。
- ・NASAにおいても、小惑星サンプルリターンミッションOSIRIS-REx（打上げ：平成28年、小惑星到着：平成30年、地球帰還：平成35年）が実施されており、サンプルの交換が取り決められていることに加えて科学者の相互交流が行われており、両者の成果を比較・検証することによる科学的成果も期待されている。



(イラスト 池下章裕氏)

はやぶさ2 主要緒元

質量	約 609kg
打上げ	平成26年(2014年)12月3日
軌道	小惑星往復
小惑星到着	平成30年(2018年)
地球帰還	平成32年(2020年)
小惑星滞在期間	約18ヶ月
探査対象天体	地球接近小惑星 Ryugu(リュウグウ)

主要搭載機器

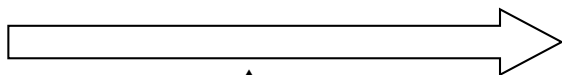
サンプリング機構、地球帰還カプセル、光学カメラ、レーザー測距計、科学観測機器(近赤外、中間赤外)、衝突装置、小型ローバ



ミッションの流れ概要

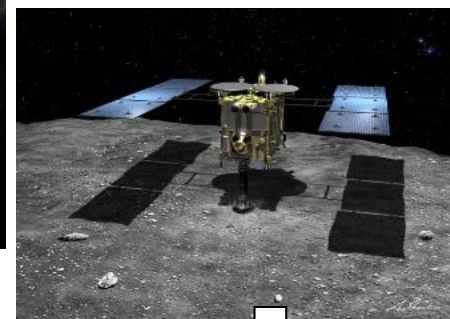


打上げ
2014年12月3日



小惑星到着
2018年6月27日

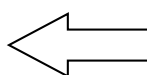
▲
地球スイングバイ
2015年12月3日



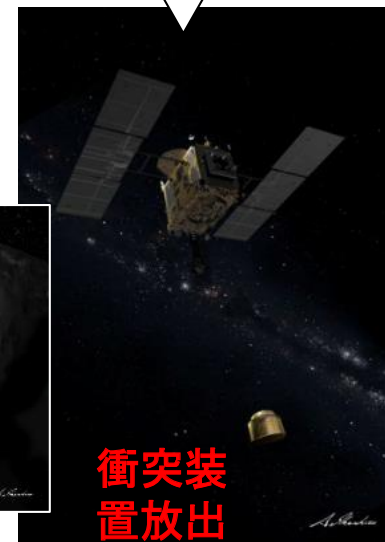
リモートセンシング観測によって、小惑星を調べる。その後、小型ローバや小型着陸機を切り離す。さらに表面からサンプルを取得する。



地球帰還
2020年末ごろ



小惑星出発
2019年11-12月



安全を確認後、クレーターにタッチダウンを行い、地下物質を採取する。

衝突装置によって、小惑星表面に人工的なクレーターを作る。

サンプル分析

(イラスト 池下章裕氏)



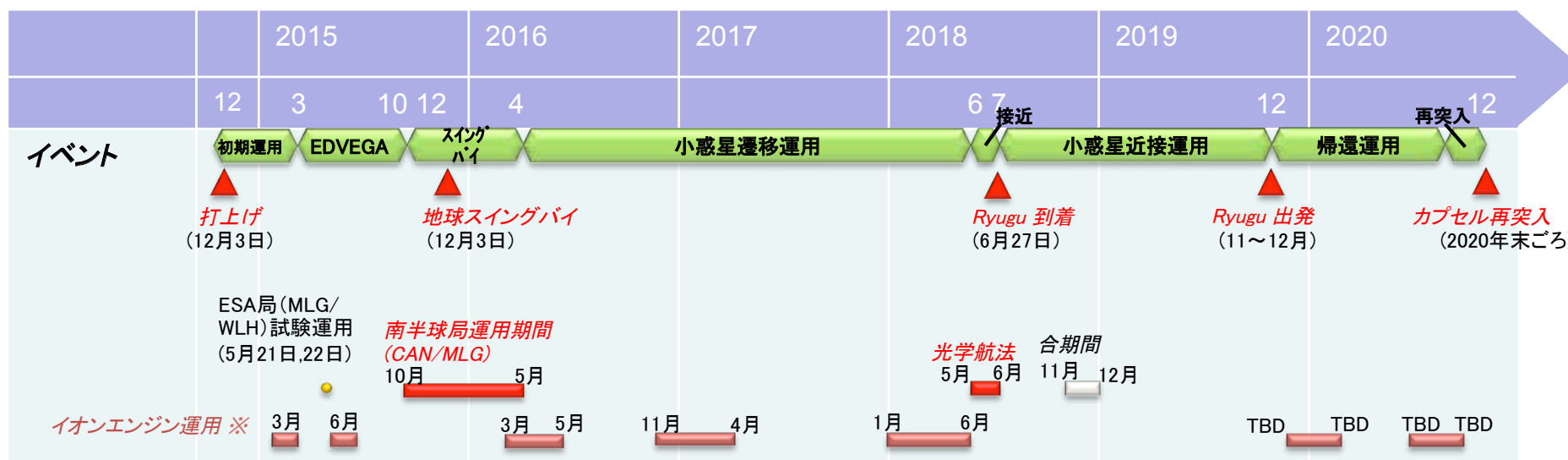
1. プロジェクトの現状と全体スケジュール



現状:

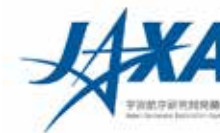
- 8月5日からは重力測定のための運用を開始し、8月7日の8:10頃(日本時間)において最低高度851mまで接近した。その後、8月10日にホームポジションに復帰した。
- これまで取得されたデータに基づいて、着地点の検討を行った。
- 8月18日からBox-B運用を開始した。(9月7日にBox-Aに戻る予定)

全体スケジュール:





本資料における注意点



小惑星の向きに注意！

これまでの公開画像は、太陽系において北側(地球の北極がある方)を上にして描いていきました。

本資料では、通常の日図と同様に、北を上にして描いています。リュウグウが逆行自転していることにより、リュウグウの“北”は左の図の下側になるので、上下が逆になります。今後は、画像含めて北を上 にします。

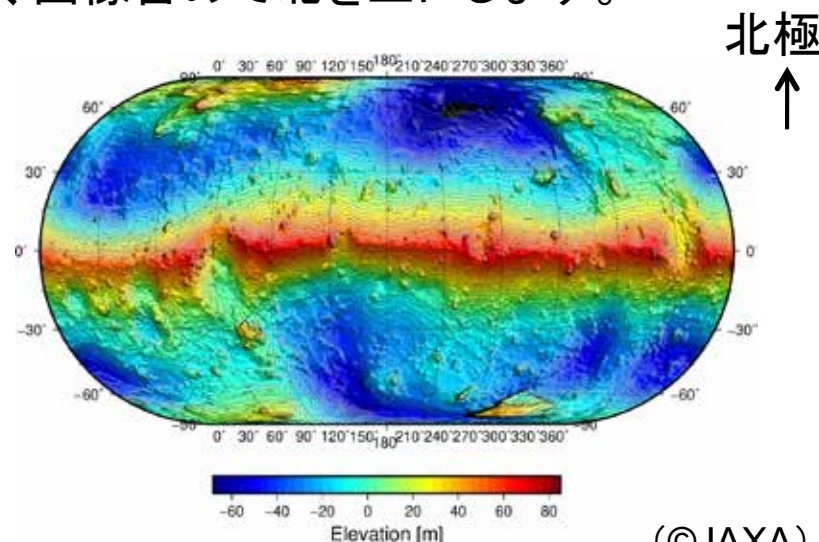


(©JAXA、会津大など)

地球の北極



リュウグウは自転が逆向き(逆行)



(©JAXA)

リュウグウの“地図”の例



2. 着地候補地点と予定日



着陸地点選定 (LSS: Landing Site Selection) 会議

- 2018年8月17日に開催
- 参加者 109人 (リモート参加者を含む)
- 外国人の参加者39人 [DLRより14人、CNESより2人、NASAより2人]
- 議論は午前10時から午後7時まで行われた

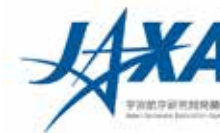


タッチダウン、MASCOT、MINERVA-IIの着地候補地点を決定した





2. 着地候補地点と予定日

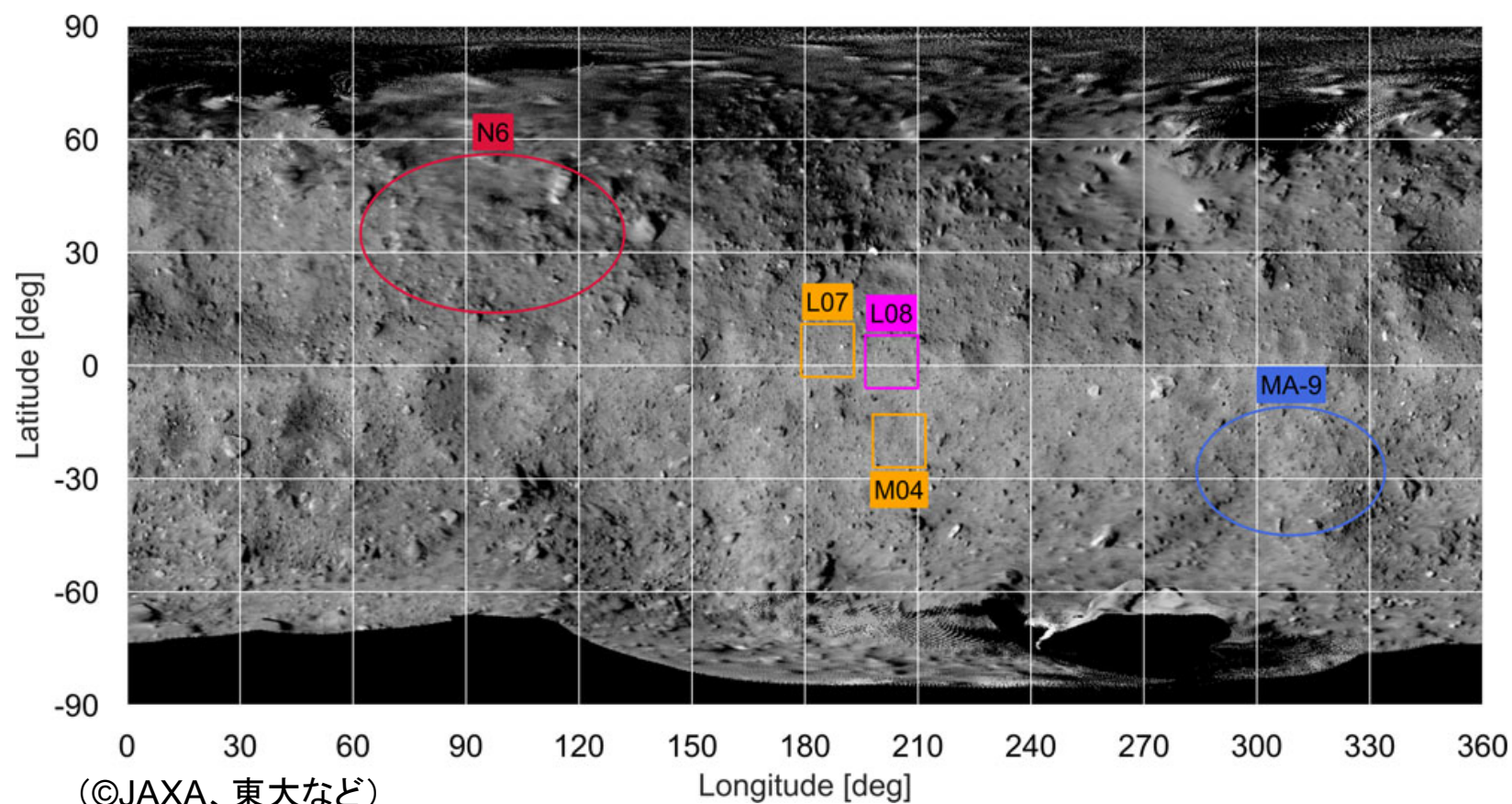


決定された着地候補地点

タッチダウン : L08 (バックアップ: L07、M04)

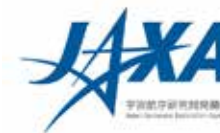
MASCOT : MA-9

MINERVA-II-1 : N6





2. 着地候補地点と予定日



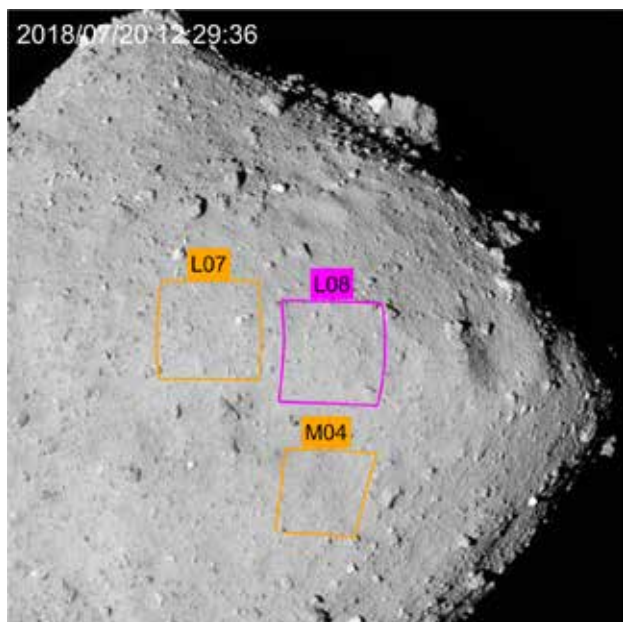
決定された着地候補地点

タッチダウン : L08 (バックアップ: L07、M04)

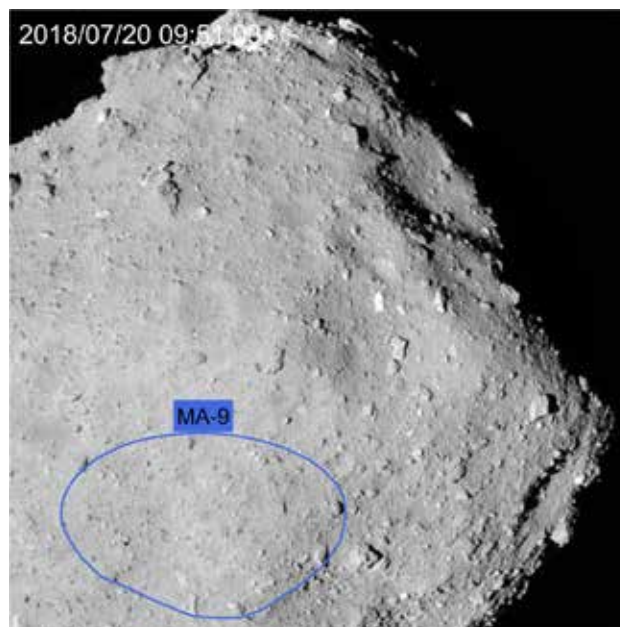
MASCOT : MA-9

MINERVA-II-1 : N6

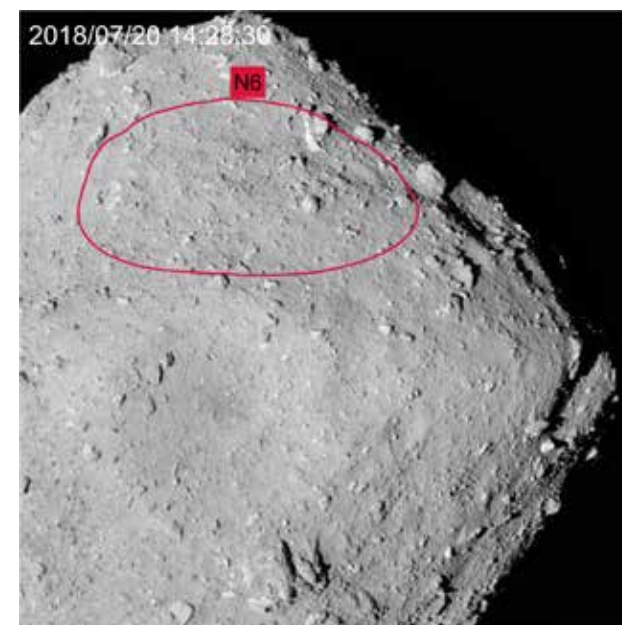
タッチダウン



MASCOT



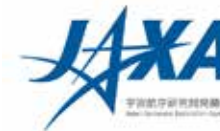
MINERVA-II-1



(©JAXA、東大など)



2. 着地候補地点と予定日



運用予定日

タッチダウン1リハーサル1 : 9月11日～12日
(最下点到: 9月12日)

MINERVA-II-1運用 : 9月20日～21日
(MINERVA-II-1分離: 9月21日)

MASCOT運用 : 10月2日～4日
(MASCOT分離: 10月3日)

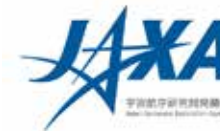
タッチダウン1リハーサル2 : 10月中旬

タッチダウン1 : 10月下旬

注意: 運用の日は変更になる場合があります。



3. タッチダウン候補地点選定



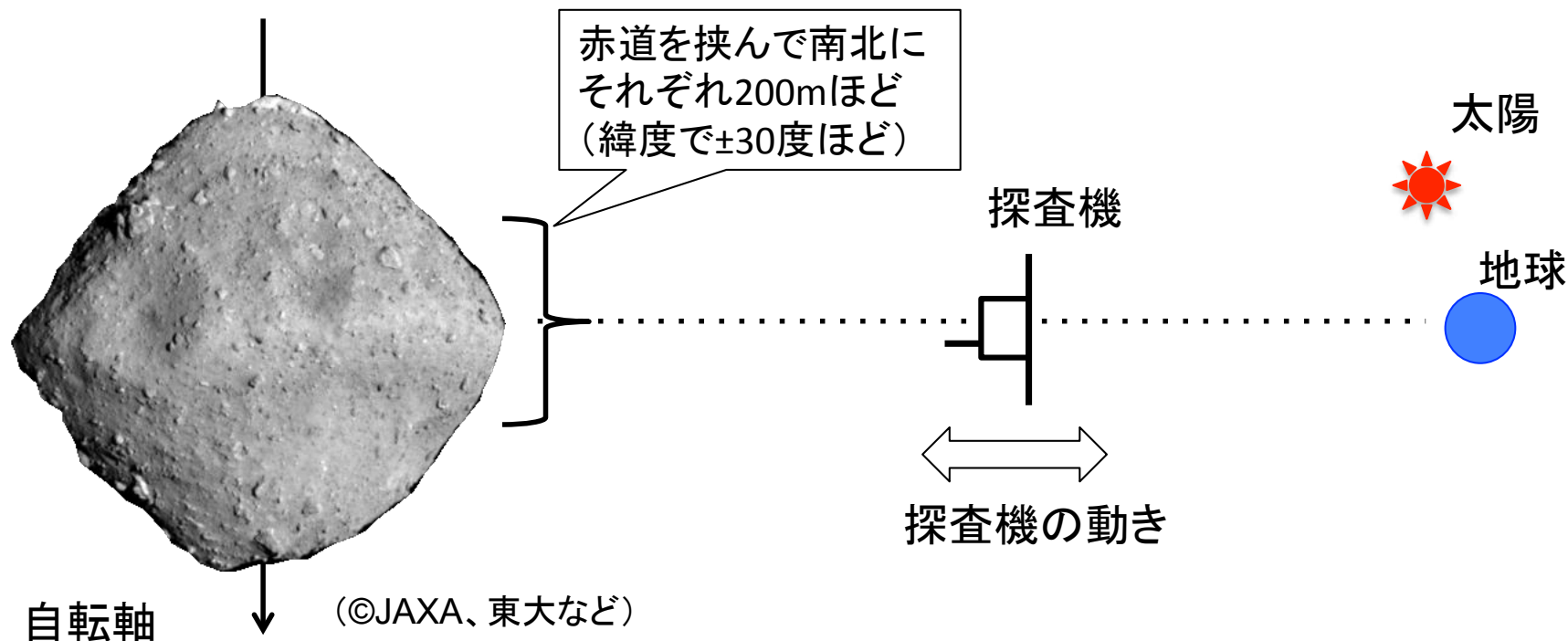
タッチダウン候補地点の前提条件—その1

探査機が着陸できる天体上の範囲

探査機は地球とリュウグウを結ぶ線に沿って移動できる。



探査機が着地できるのは、リュウグウの赤道を中心として南北にそれぞれ200m程度の領域(緯度で $\pm 30^\circ$ 程度の範囲)





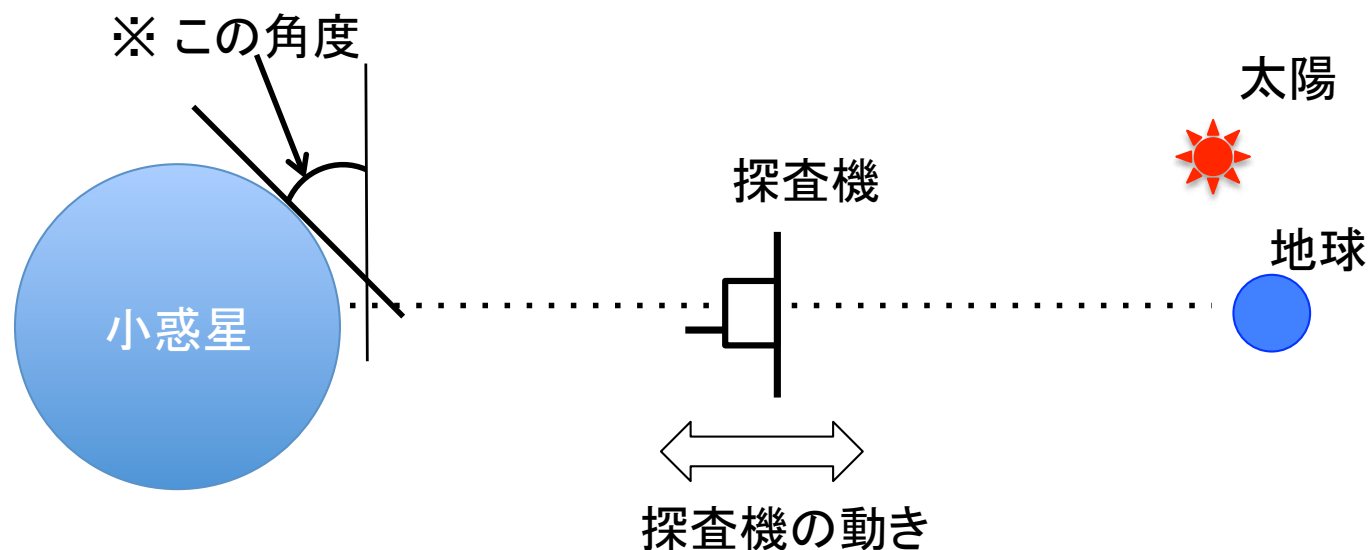
3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の前提条件—その2

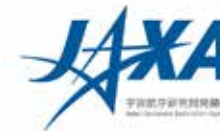
探査機が着陸できる表面の条件

- (1) 平均斜度30度以内※ ← 太陽電池のパドルの向きの制限
- (2) 直径100mの平坦部分 ← 航法誘導の精度
- (3) ボルダーは高さ50cm以下 ← サンプラーホーンの長さ
- (4) 絶対温度370K(97°C)度以下 ← 機器の動作温度範囲保持

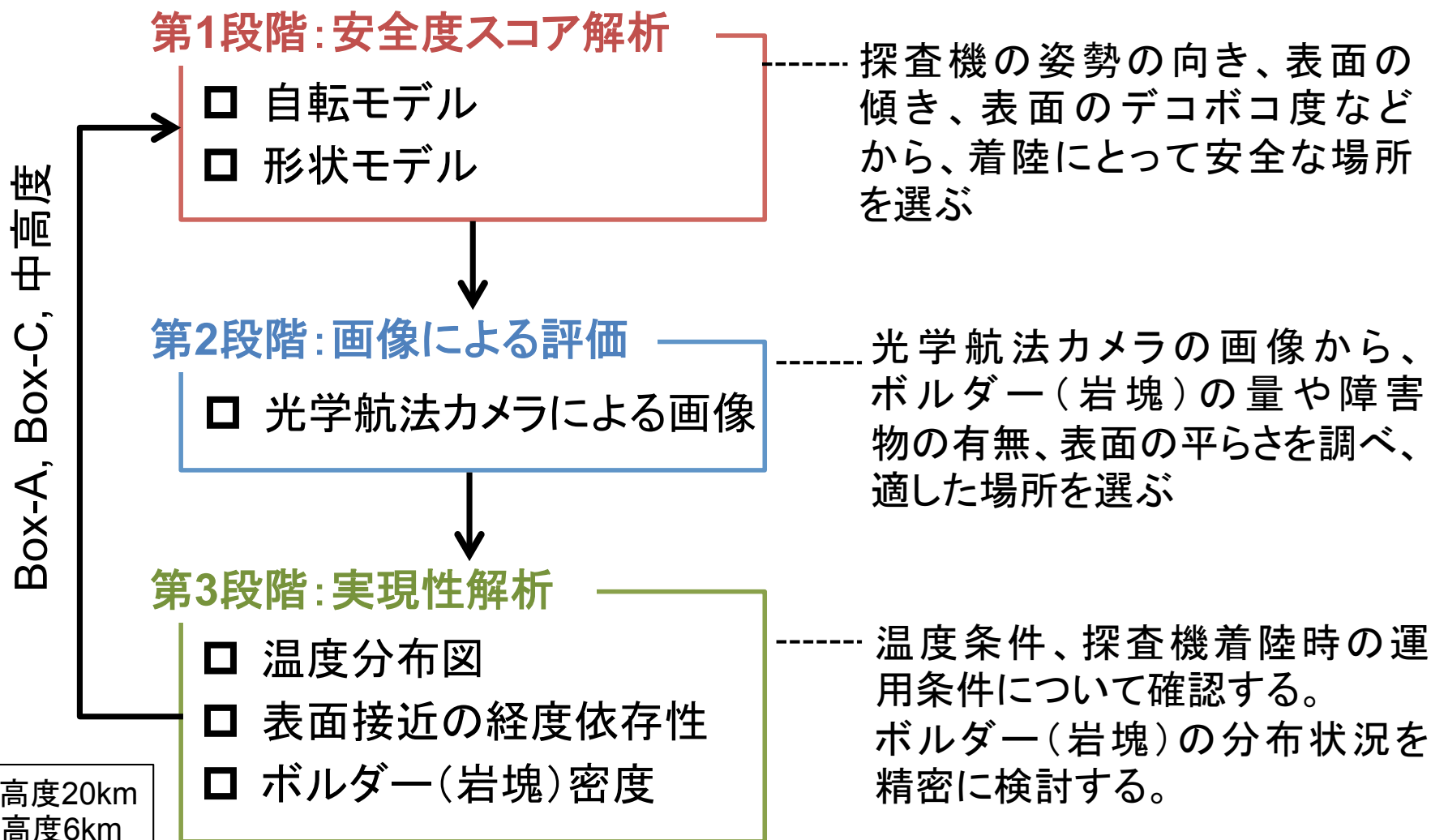




3. タッチダウン候補地点選定



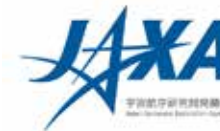
タッチダウン候補地点の絞り込みの手順



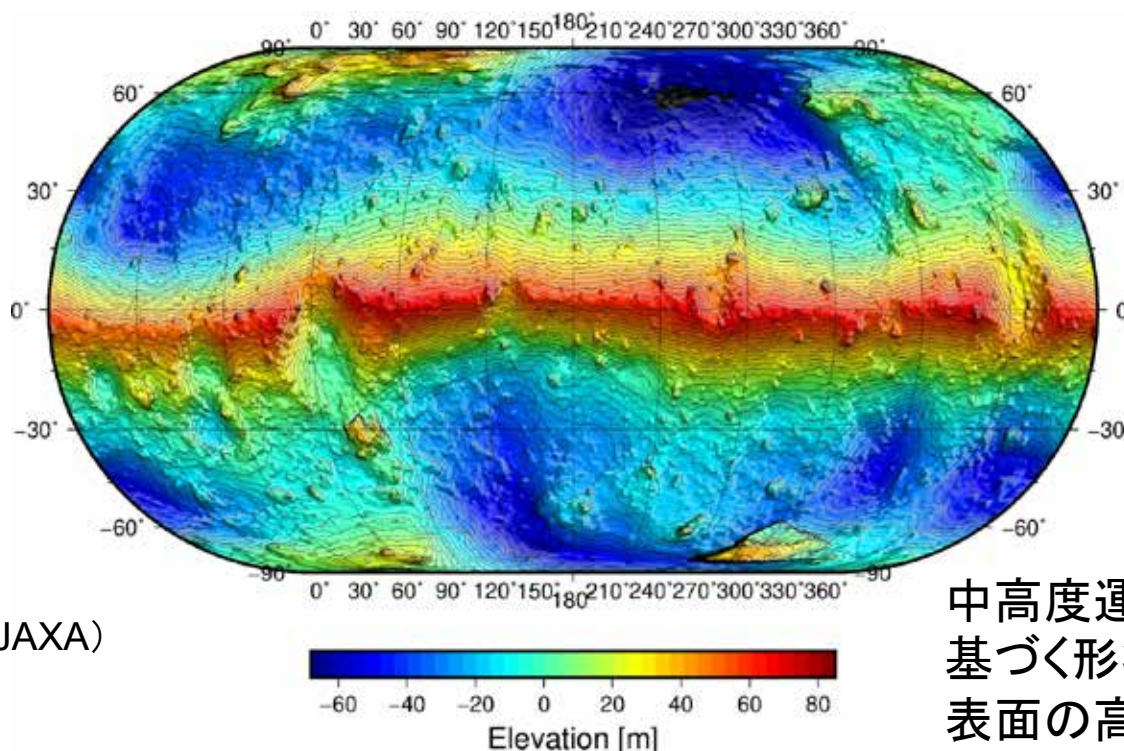
Box-A: 高度20km
 Box-C: 高度6km
 中高度: 高度5km



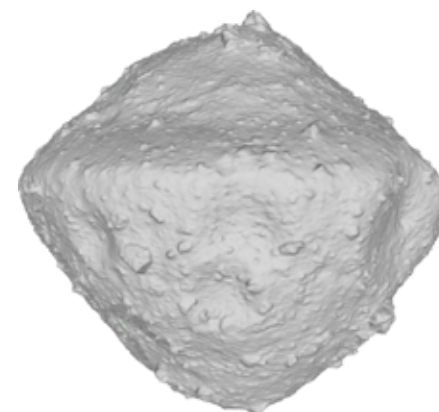
3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第1段階-形状モデルより



(©JAXA)



(©会津大、神戸大、JAXA)

中高度運用で取得されたデータに基づく形状モデル(右)とリュウグウ表面の高低差(左)

形状モデルより、各場所における「安全度スコア」を求める。

考慮される項目：

- ・太陽角(探査機の+z軸方向と太陽方向とがなす角)
- ・表面の傾き
- ・表面のデコボコ度

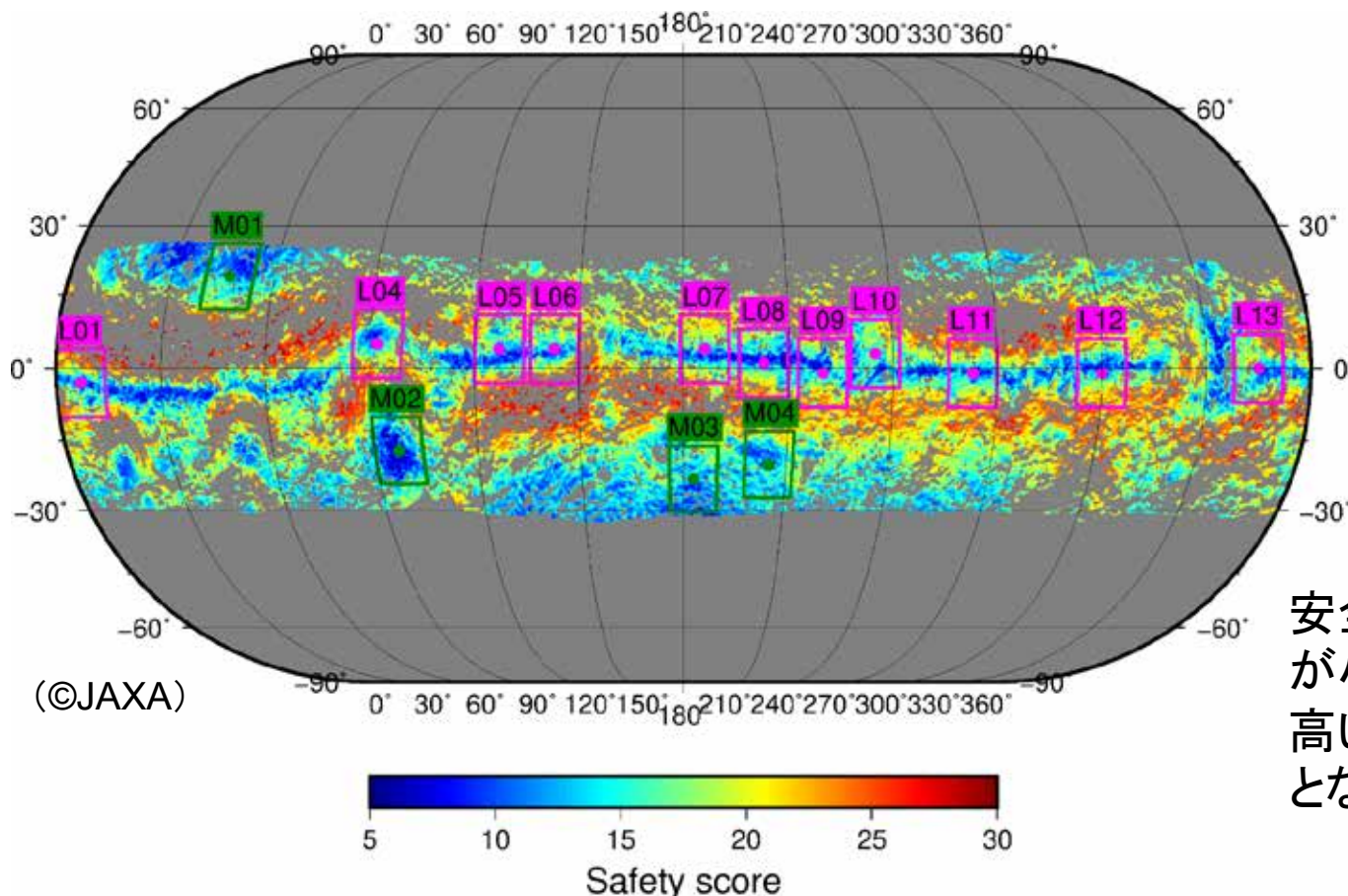
安全度スコアの値より、より安全な場所を選ぶ。



3. タッチダウン候補地点選定



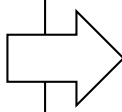
タッチダウン候補地点の絞り込み：第1段階-形状モデルより



領域は100m×100m。
(緯度経度で14°×14°)

安全度スコアの分布。値が小さいほど安全性が高い。灰色は値が30以上となる部分。

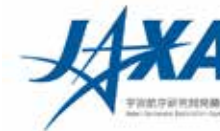
安全度の高い場所(安全度スコアの値の小さいところ)より着地点の候補となる場所を選ぶ



低緯度(記号L)が11カ所、
中緯度(記号M)が4カ所選ばれる



3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第2段階-画像より

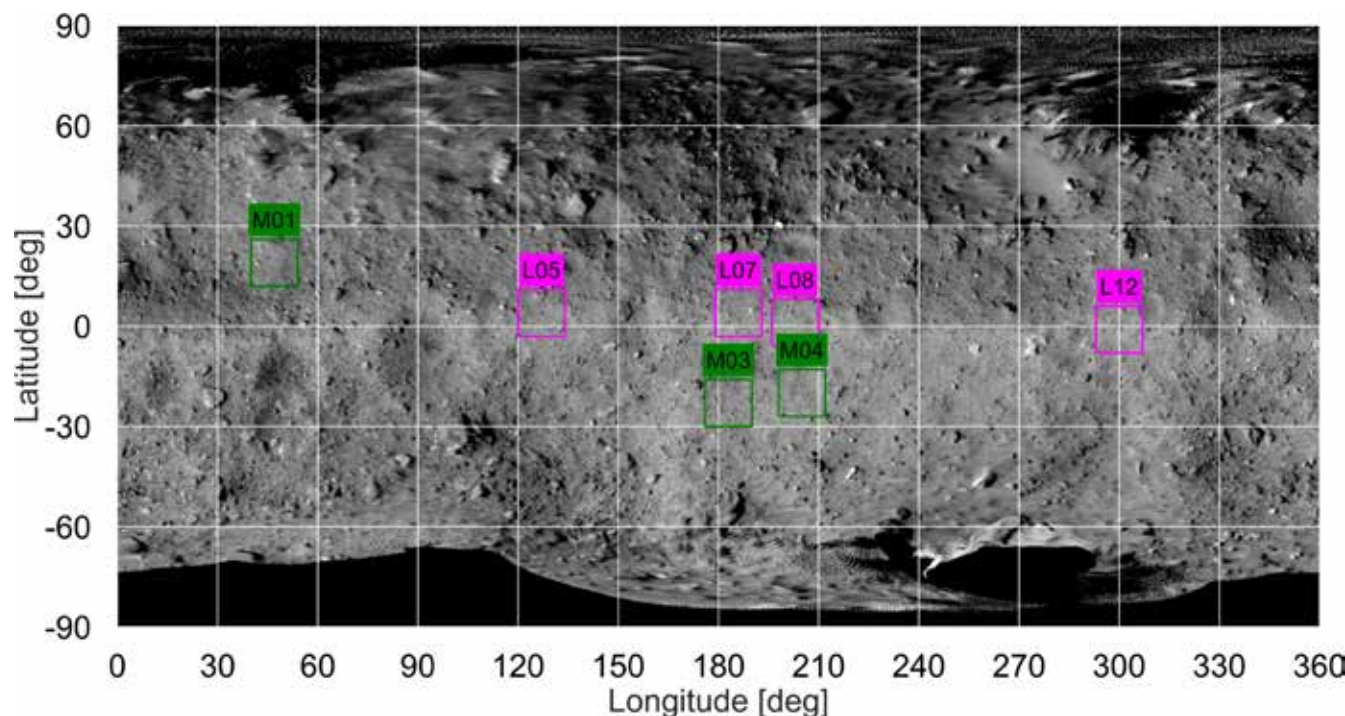
光学航法カメラで撮影された画像より候補地を絞り込む。

注目点：

- ・ボルダー（岩塊）の量
- ・東側の障害物の有無※
- ・平らさ

低緯度（記号L）が4カ所、
中緯度（記号M）が3カ所に
絞り込まれる

※探査機が着陸するとき東側から接近していくので、東側に障害物があると危険



(©JAXA、東大など)

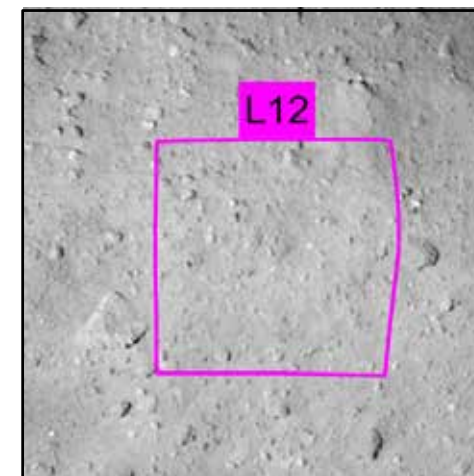
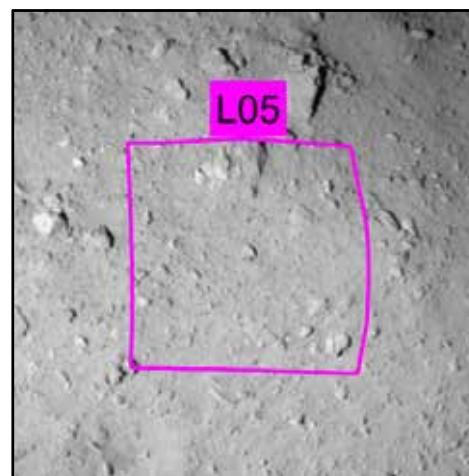
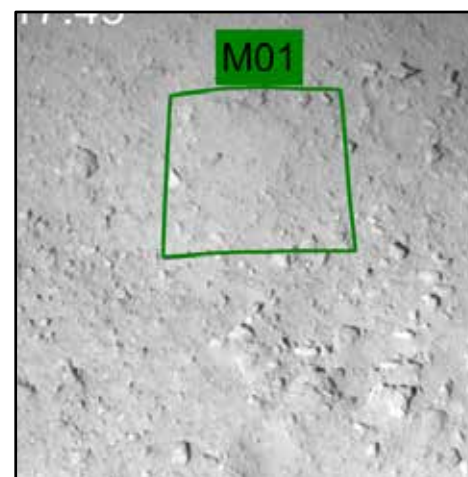
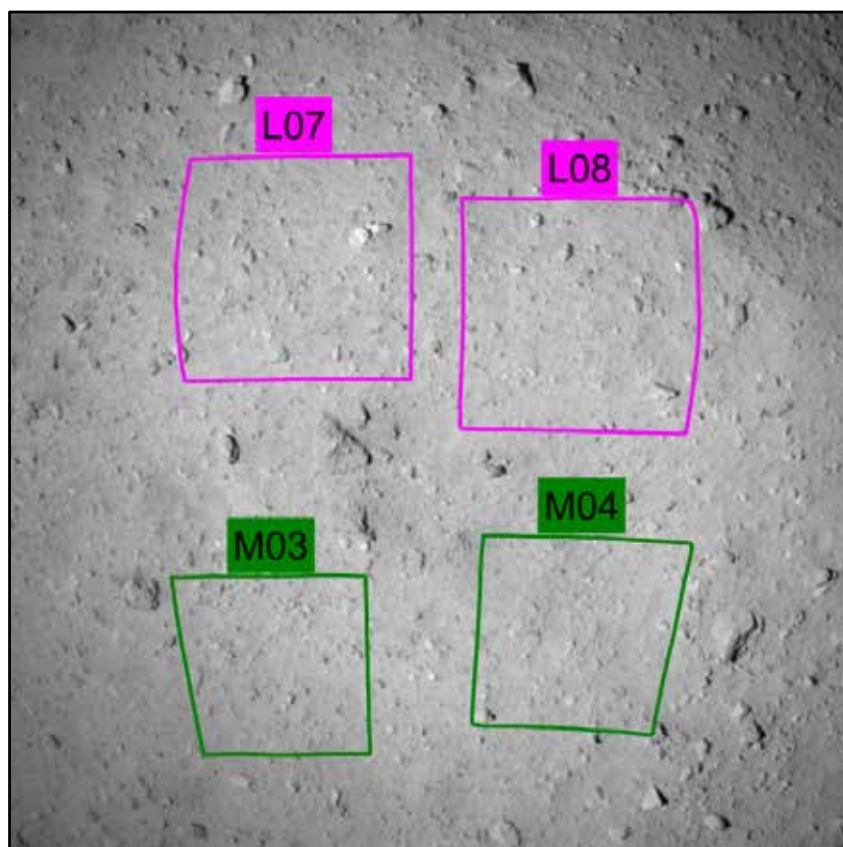


3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第2段階-画像より

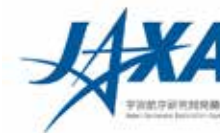
絞り込まれた候補：低緯度（記号L）が4カ所、中緯度（記号M）が3カ所



(©JAXA、東大など)



3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第3段階-実現性より

絞り込まれた7候補(低緯度4カ所、中緯度3カ所)からの更なる絞り込み

表面温度の確認：
絶対温度で370K以下

⇒ 7候補地点すべてでOK

表面接近の経度依存性：
地上追跡局との通信が途絶えないこと

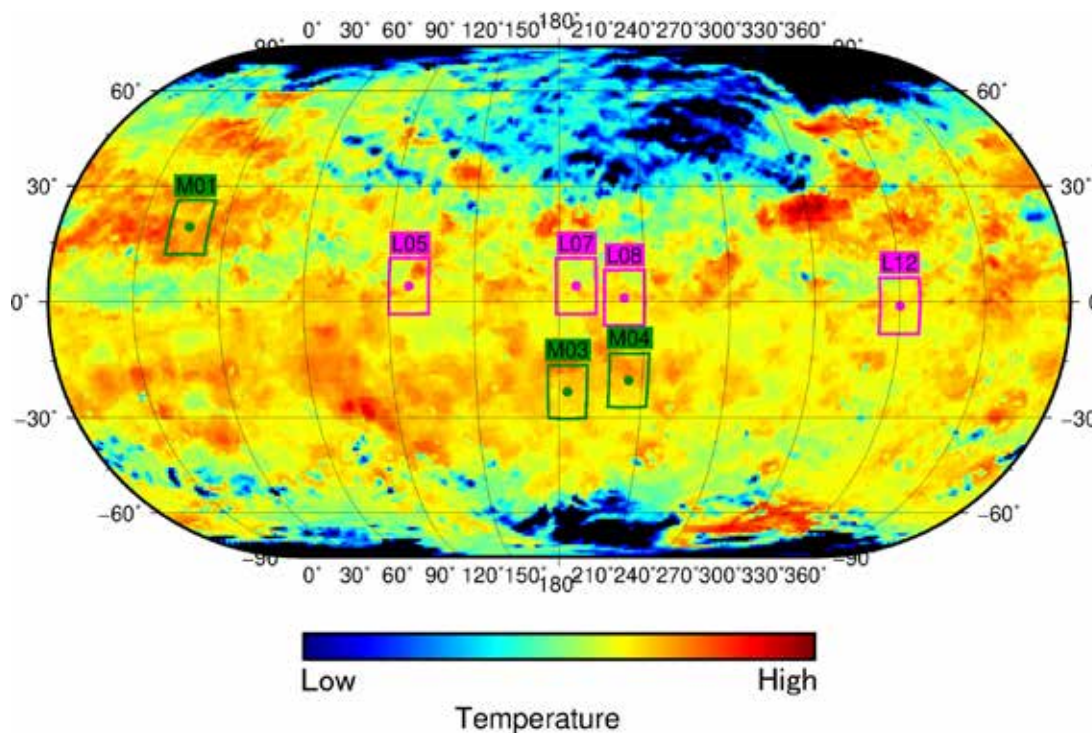
↓

7候補地点すべてでOK

ボルダー(岩塊)密度：
ボルダーは少ない方が好ましい

↓

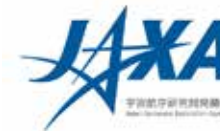
7候補地点を比較



表面の温度分布図

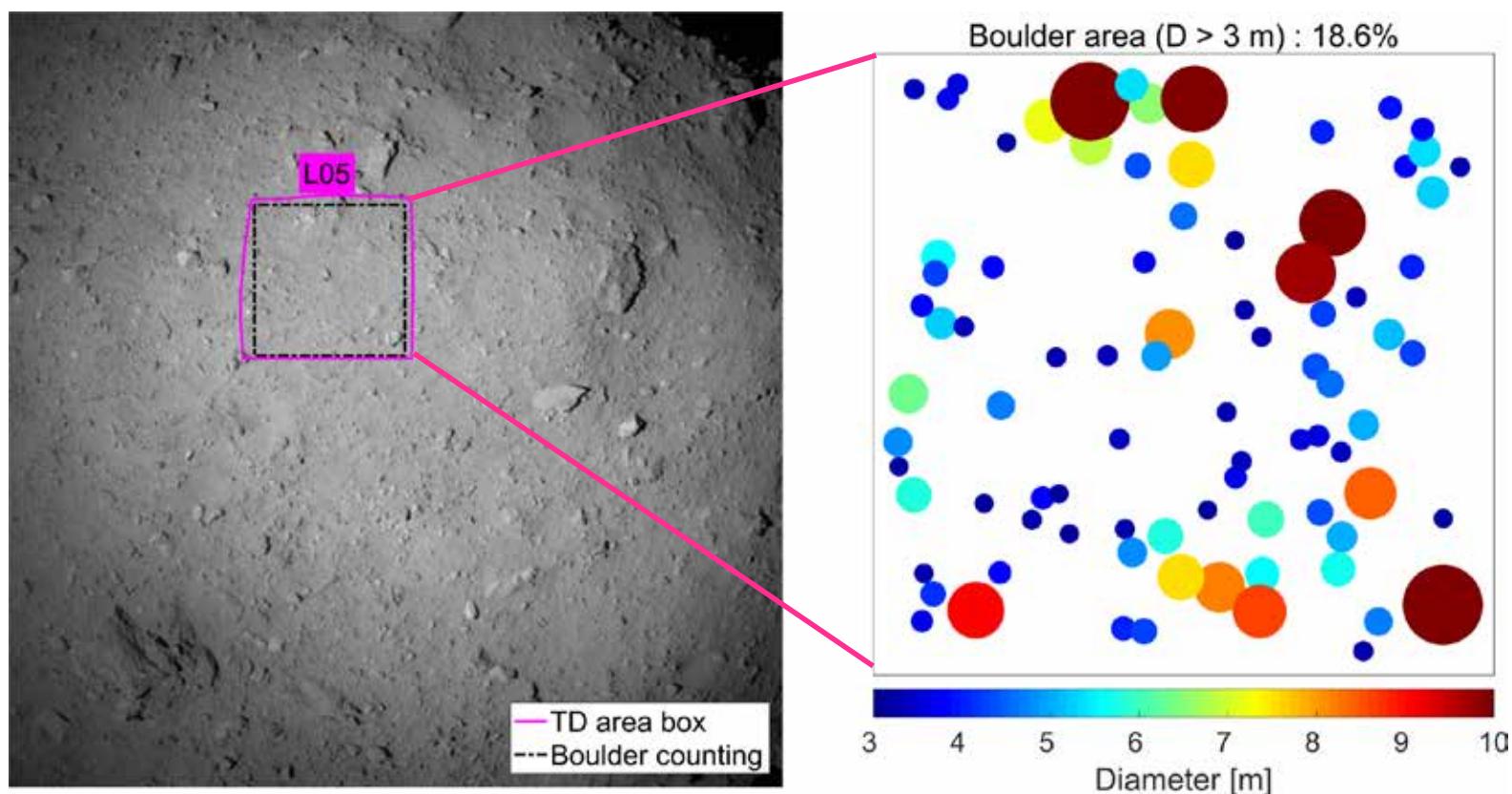


3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第3段階-実現性より

絞り込まれた7候補（低緯度4カ所、中緯度3カ所）からの更なる絞り込み
ボルダー（岩塊）マップを作成しボルダーによる被覆率を調べる



(©JAXA、東大など)

ボルダー(岩塊)マップの例

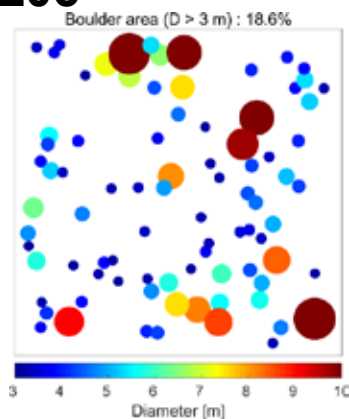


3. タッチダウン候補地点選定

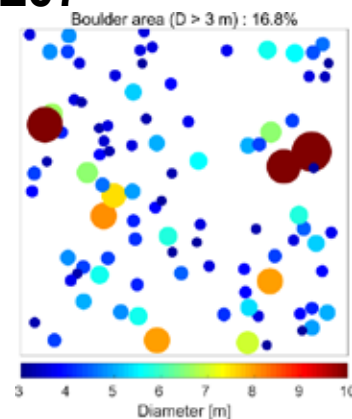


タッチダウン候補地点の絞り込み：第3段階-実現性より
絞り込まれた7候補（低緯度4カ所、中緯度3カ所）からの更なる絞り込み
ボルダー（岩塊）マップを作成する。

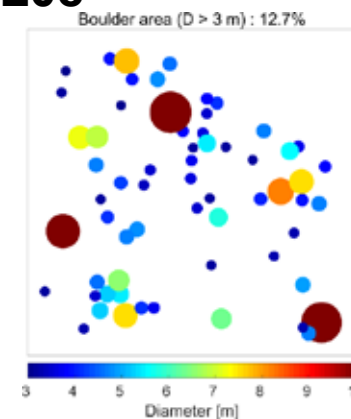
L05



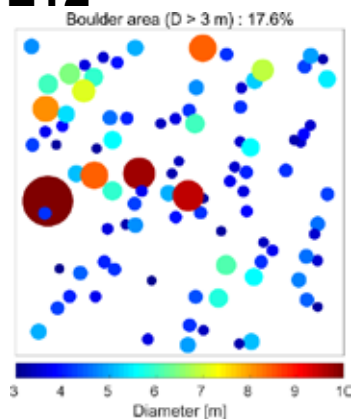
L07



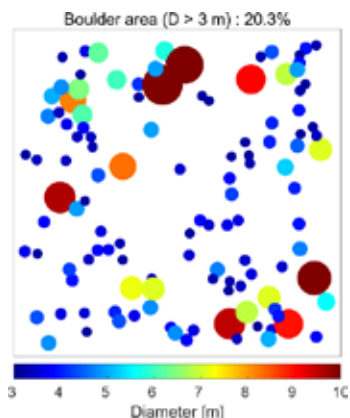
L08



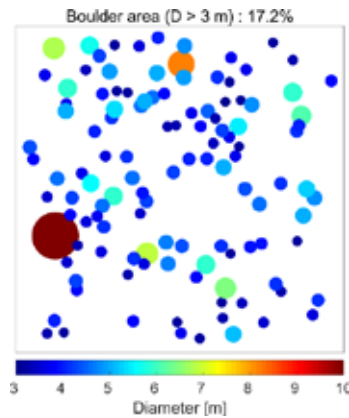
L12



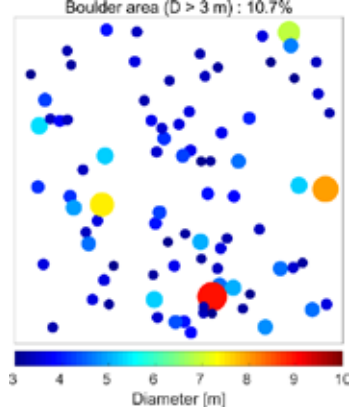
M01



M03



M04

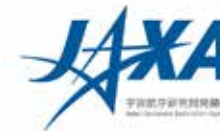


ボルダー（岩塊）の分布。
直径が3m以上のボル
ダーについて色別で
大きさを示す。10m以
上のものは茶色。

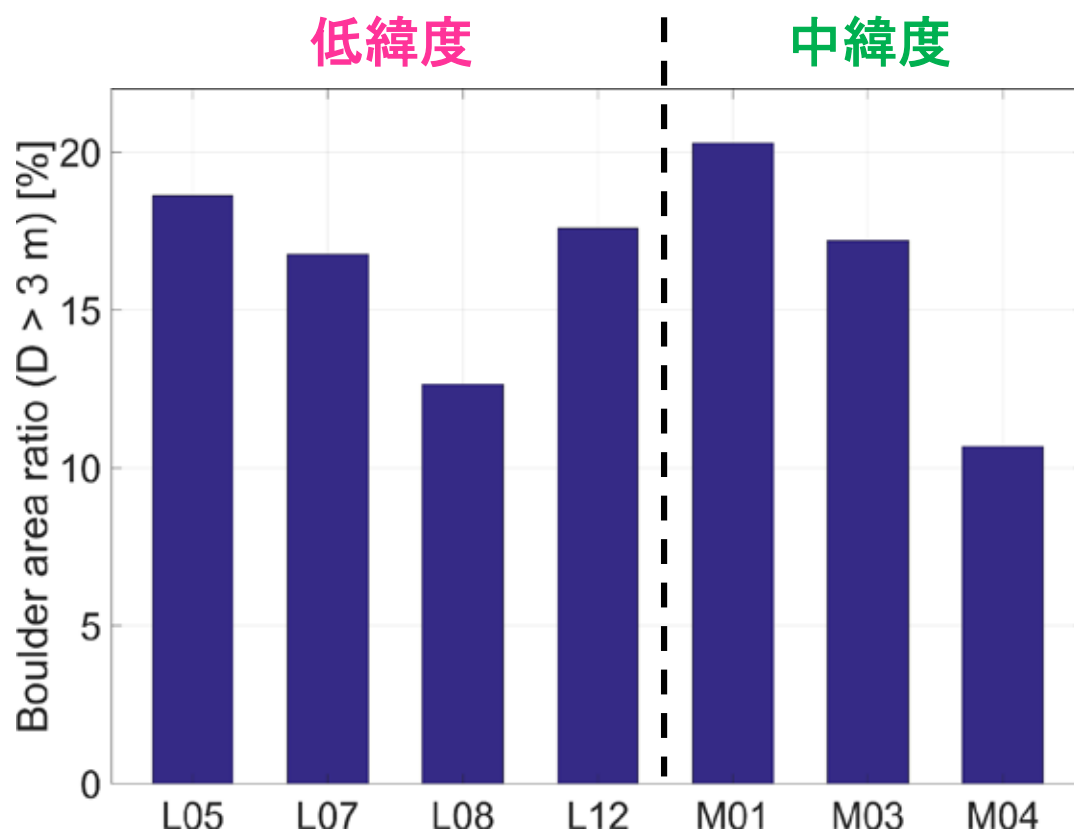
(©JAXA)



3. タッチダウン候補地点選定



タッチダウン候補地点の絞り込み：第3段階-実現性より
絞り込まれた7候補（低緯度4カ所、中緯度3カ所）からの更なる絞り込み
ボルダー（岩塊）による被覆率を調べる



低緯度では、L08、L07 の順。
中緯度では、M04。

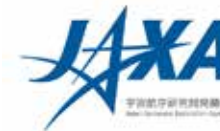
着地のしやすさからは
低緯度の方が望ましい

タッチダウン候補地点はL08
(バックアップ：L07、M04)

※タッチダウンの前に行うリハーサル1の結果に基づいて、着陸目標点を確定させる

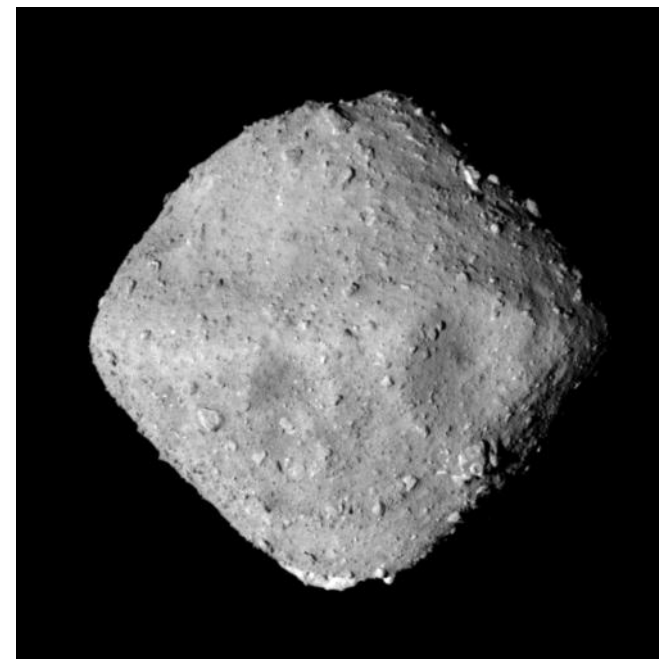


4. タッチダウン候補地点についての科学的検討



リュウグウの特徴

- コマ(独楽)型、円形の赤道形状
- 半径: 平均 約450 m
(赤道半径 約500 m、極半径約440 m)
- 質量: 約4.5億トン ($GM=約30 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$)※
- 自転軸の向き: $(\lambda, \beta) = (180^\circ, -87^\circ)$
- 赤道傾斜角: 約 8°
- 自転周期: $P = 7.63$ 時間
- 反射率因子(v-band): 0.02
- クレーターの数密度: イトカワやエロスと同等
- 多数のボルダー(岩塊)の存在: 最大のものは南極付近に存在(約130m)
- 可視光におけるスペクトル: 平坦、赤道付近や極付近で青っぽい
- 近赤外におけるスペクトル: 平坦な(少し赤みがかった)スペクトル、水による弱い吸収あり
- 輝度温度: 強いroughness効果あり(昼間における温度変化が小さい)、赤道付近で熱慣性がより大きい



(©JAXA、東大など)

(※赤道での重力は地球の約8万分の1、イトカワの数倍の重力となる)



4. タッチダウン候補地点についての科学的検討



着地点候補についての科学的評価のポイント

■ポイント1: 表面物質

- ・中間赤外カメラのデータより表面温度と熱物理特性を調べる。
- ・近赤外分光計によるスペクトルデータより、物質の差異を調べる。
- ・光学航法カメラの波長別の画像より、地形・地質や宇宙風化を調べる。



※サイエンスとして成果が期待できるかどうかを評価する

■ポイント2: 安全性

- ・ボルダールのサイズ分布・空間分布を調べる(画像やレーザ高度計データより)



※ボルダールのサイズ頻度分布等から小さいボルダール数も推定し安全性を評価

■ポイント3: サンプルの収量

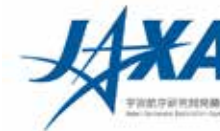
- ・中間赤外カメラの観測データより表面粒径を推定する



※表面にあるレゴリスの粒径から、より多くサンプルが採取される場所を評価

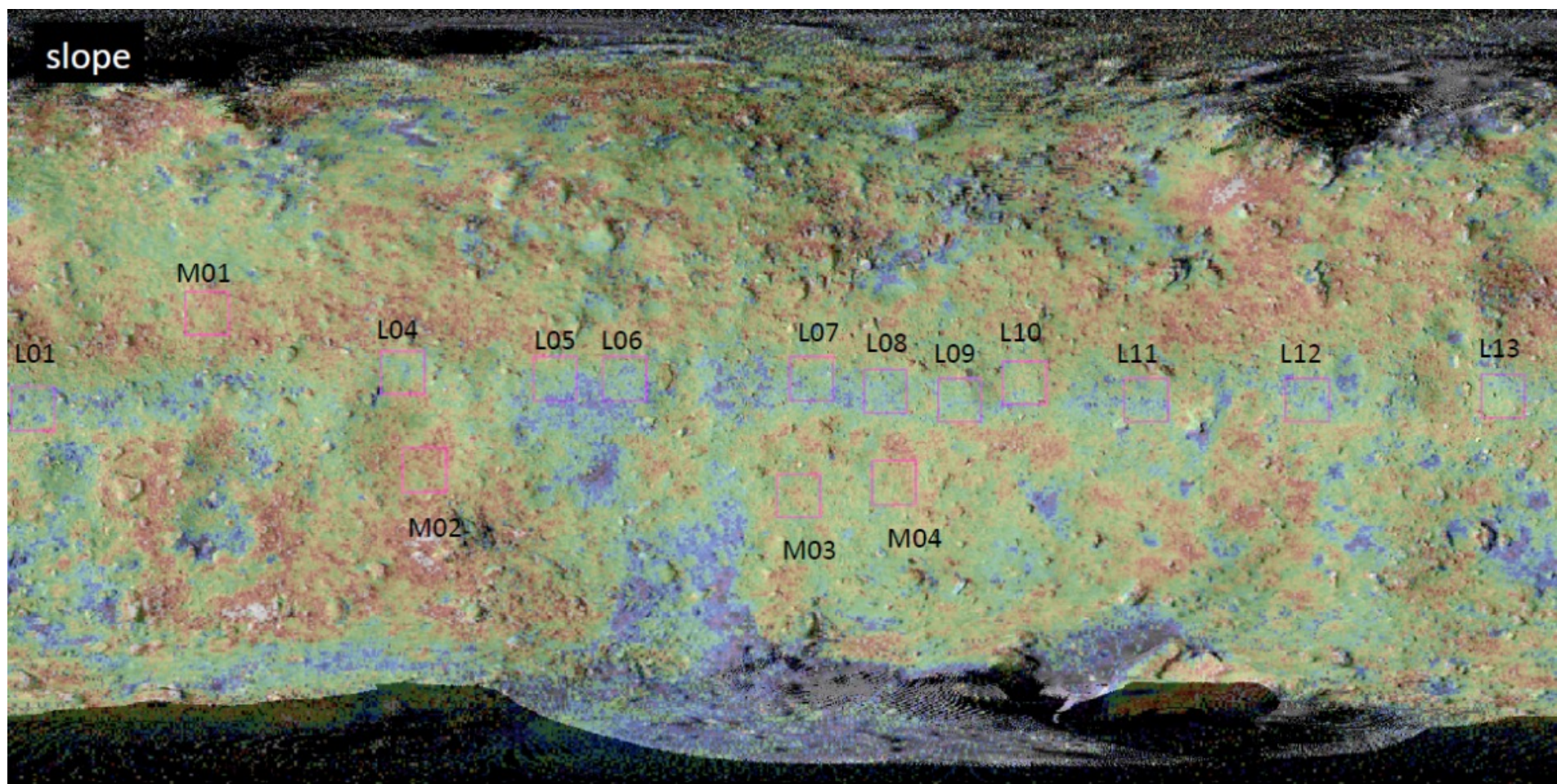


4. タッチダウン候補地点についての科学的検討



着地点候補についての科学的評価のポイント(データの例)

ONC-Tによるスペクトル勾配マップ (Box-C)





4. タッチダウン候補地点についての科学的検討



着地点候補についての科学的評価のまとめ

候補地	ポイント1 表面物質	ポイント2 安全性	ポイント3 サンプル収量	合計
L5	22	29	12	63
L7	22	31	12	65
L8	22	31	12	65
L12	22	31	11	64
M1	21	33	13	67
M3	21	30	13	64
M4	21	33	13	67

評価に大きな差はないが、低緯度(L)ならばL08、L07がよい。中緯度(M)ならば、M1、M4がよい。

表面温度、可視・近赤外線のスเปクトルなどにおいて、表面上大きな違いはなく、ほぼ同様である。ただし、微小な違いはあり、スเปクトル特性からは、低緯度の方が、より多様な粒子を含んでいることが期待される。

中緯度(M)の方がより小さいサイズの粒子が多いと思われ、サンプルの収量がより多くなると期待される。

確認されたボルダー(岩塊)の量や推定されたより小さいボルダーの量、さらに表面のroughnessなどの情報から安全性を評価。



4. タッチダウン候補地点についての科学的検討



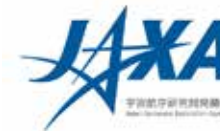
着地点候補についての科学的評価のまとめ

科学的に重要な点：

- (1) リュウグウ表面物質の混合比の場所による差異は小さい。
- (2) リュウグウ表面には、多様性を持った異なる物質が混じった状態で存在している。
- (3) どこからサンプルを採取しても、リュウグウ全体を代表する多様性のある資料が採取できる可能性が高い。

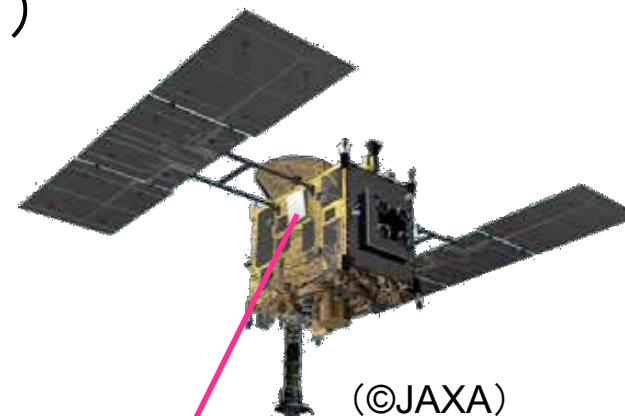


5. MASCOTの着地候補地点選定



MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout)

- DLR (ドイツ航空宇宙センター)と CNES(フランス国立宇宙研究センター)によって製作
- 約10kgの小型の着陸機
- 4つの科学機器を搭載
- 1度だけジャンプして移動可能



(©JAXA)

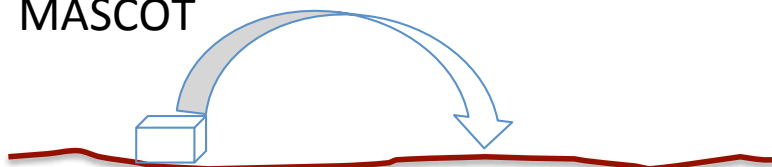
MASCOT搭載科学機器

機器名	機能
広角カメラ (MASCAM)	複数波長での画像の撮影
分光顕微鏡 (MicrOmega)	鉱物組成・特性の調査
熱放射計 (MARA)	表面温度の測定
磁力計 (MASMAG)	磁場の測定



フライトモデル (© DLR)

MASCOT



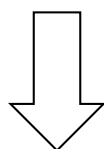


5. MASCOTの着地候補地点選定

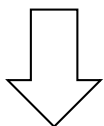


MASCOTの着地点選定の条件

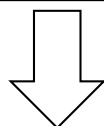
- タッチダウン候補地の外に着地する(確率95%以上)
- 小惑星の自転周期の40%以上の期間において、通信できる確率が90%以上となる
- 太陽の光が当たる期間が40%~70%となる確率が90%以上となる
- バックアップの候補地が北半球および南半球に存在する
- MINERVA-IIの着地候補地点と重ならない



10,000回~100,000回のモンテカルロ・シミュレーションで検討



10カ所選定



6カ所に絞り込み、順位付け

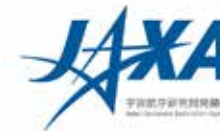


さらに考慮する点

- 温度に関する条件(日照、姿勢、分離前の昇温、小惑星表面温度、夜におけるMASCOT直下の温度)
- 運用の条件
- ボルダー(岩塊)の条件
- 4つの機器の観測条件

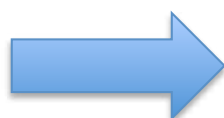


5. MASCOTの着地候補地点選定



着地点についての科学的な判断基準

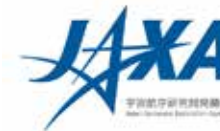
機器	着地点についての判断基準
MicrOmega (分光顕微鏡)	C(炭素)やOH(ヒドロキシ基)を多く含む物質がある 高いSNR(信号雑音比)を得るために着地点の温度が低い必要あり
MASCAM (広角カメラ)	視野にはいるボルター(岩塊) 微粒子 異なる物質が混じっていること(スペクトル！) 新鮮な物質(宇宙風化を受けていない)
MARA (熱放射計)	レゴリス層が薄いか無い ボルダー(岩塊)の近くに着地することが好ましい 熱的に変性していない場所を優先
MASMAG (磁力計)	細かい粒子のレゴリスで熱慣性が低い 熱慣性が一樣(MARAやTIRのデータとの関連) 岩石の量が少ない→視野内に不均一性がない



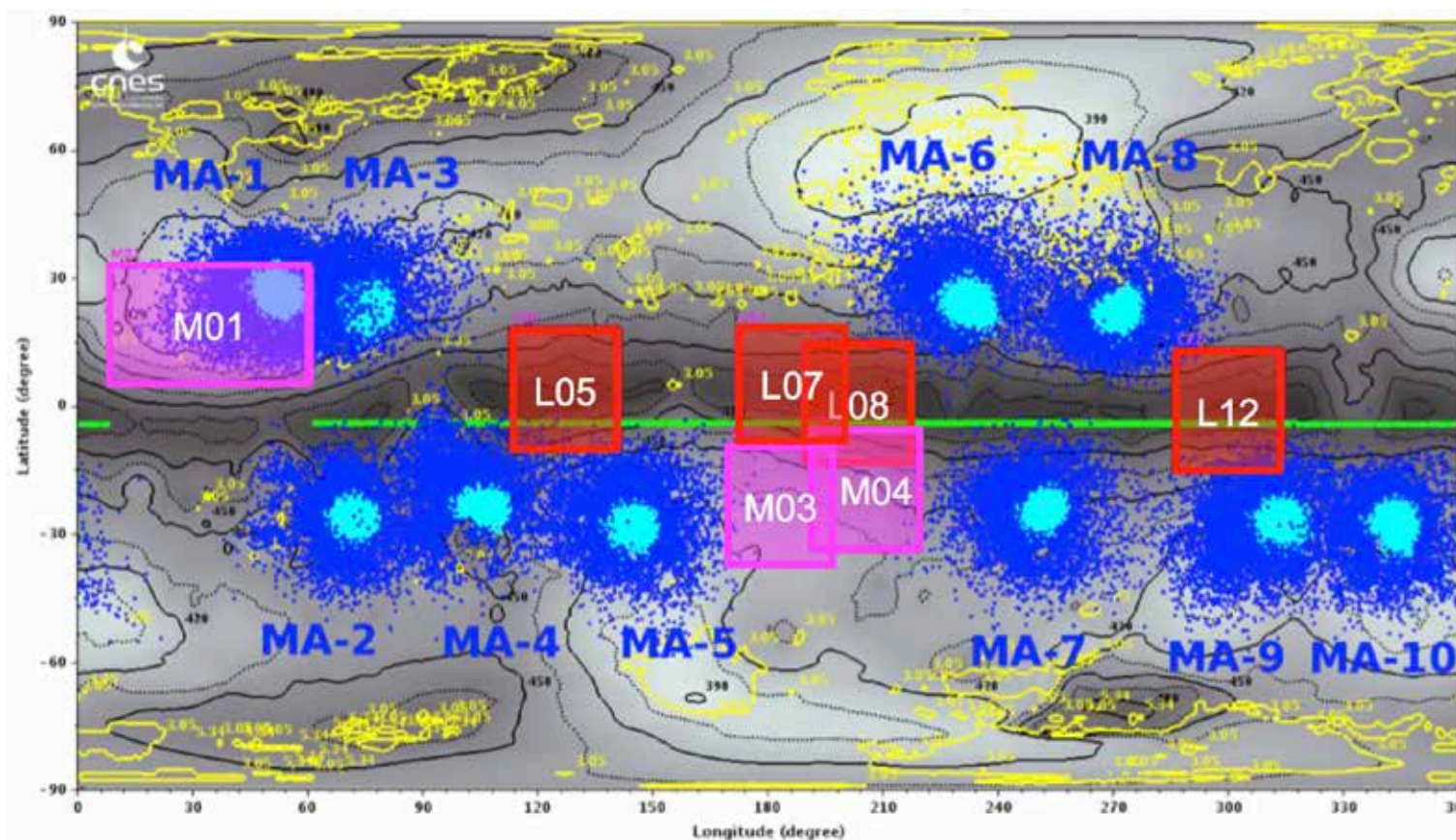
「はやぶさ2」に搭載されたリモートセンシング機器によるリュウグウの初期観測結果：表面全体にわたって大きな変化はない→一樣である



5. MASCOTの着地候補地点選定



MASCOTの着地点候補: 10カ所選定 (MA-1~MA-10)



(©DLR,CNES)

水色が最初に接地する領域で、青い領域が静止する領域。タッチダウン候補地点が赤(低緯度)およびピンク(中緯度)の四角で示されている。



5. MASCOTの着地候補地点選定



MASCOT 着地候補地点順位付け会議 (トゥールーズ 8月14日)

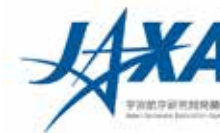


(© CNES/Rémi Benoît, 2018)

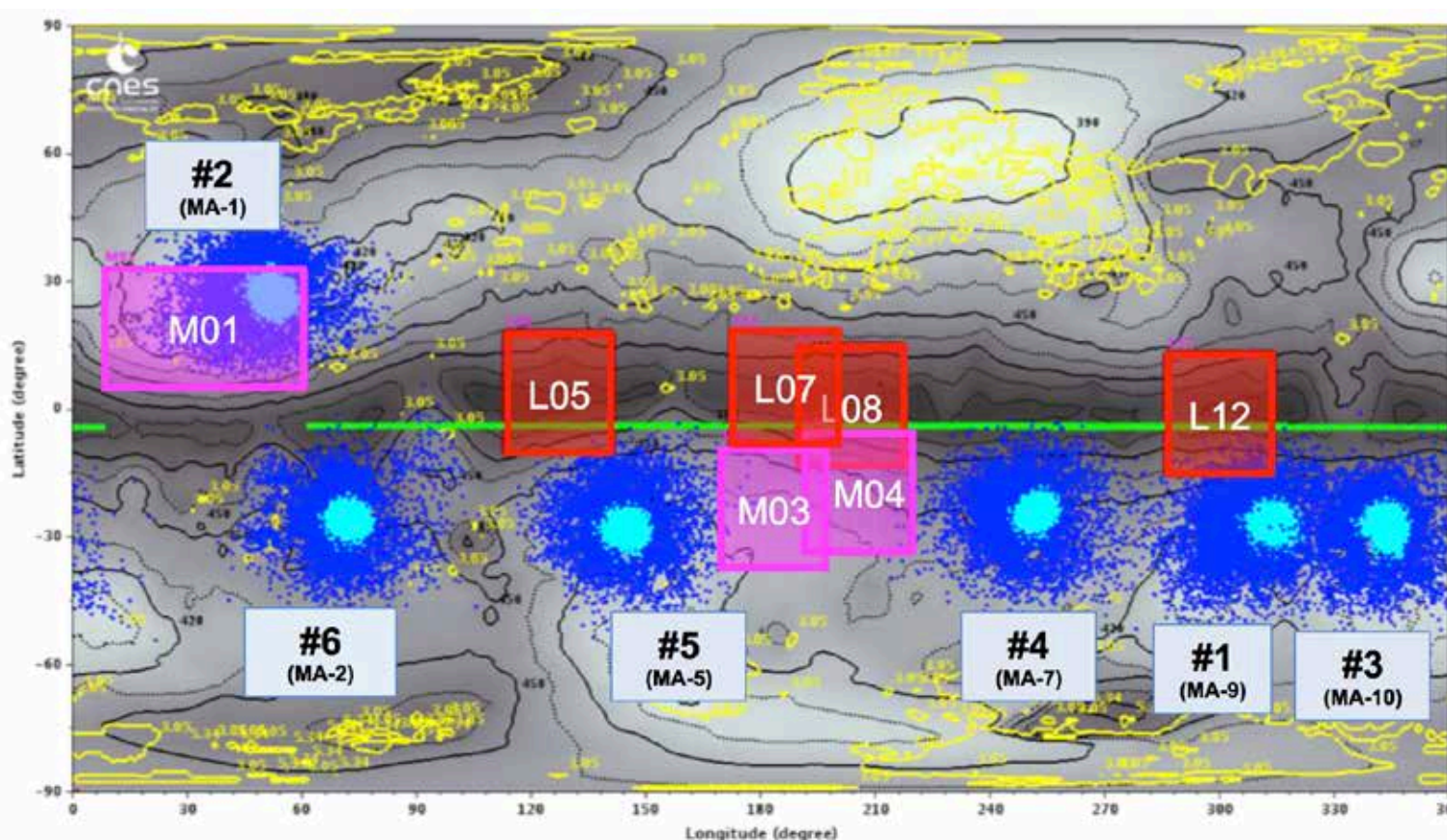
生産的な会合。リハーサルや訓練が役に立った(JAXAに感謝する)
=> 過程は複雑だったが、すべての項目についてスケジュールに沿って行うことができた。



5. MASCOTの着地候補地点選定



MASCOTの着地点候補：10カ所からの絞り込みと優先順位付け



(©DLR,CNES)

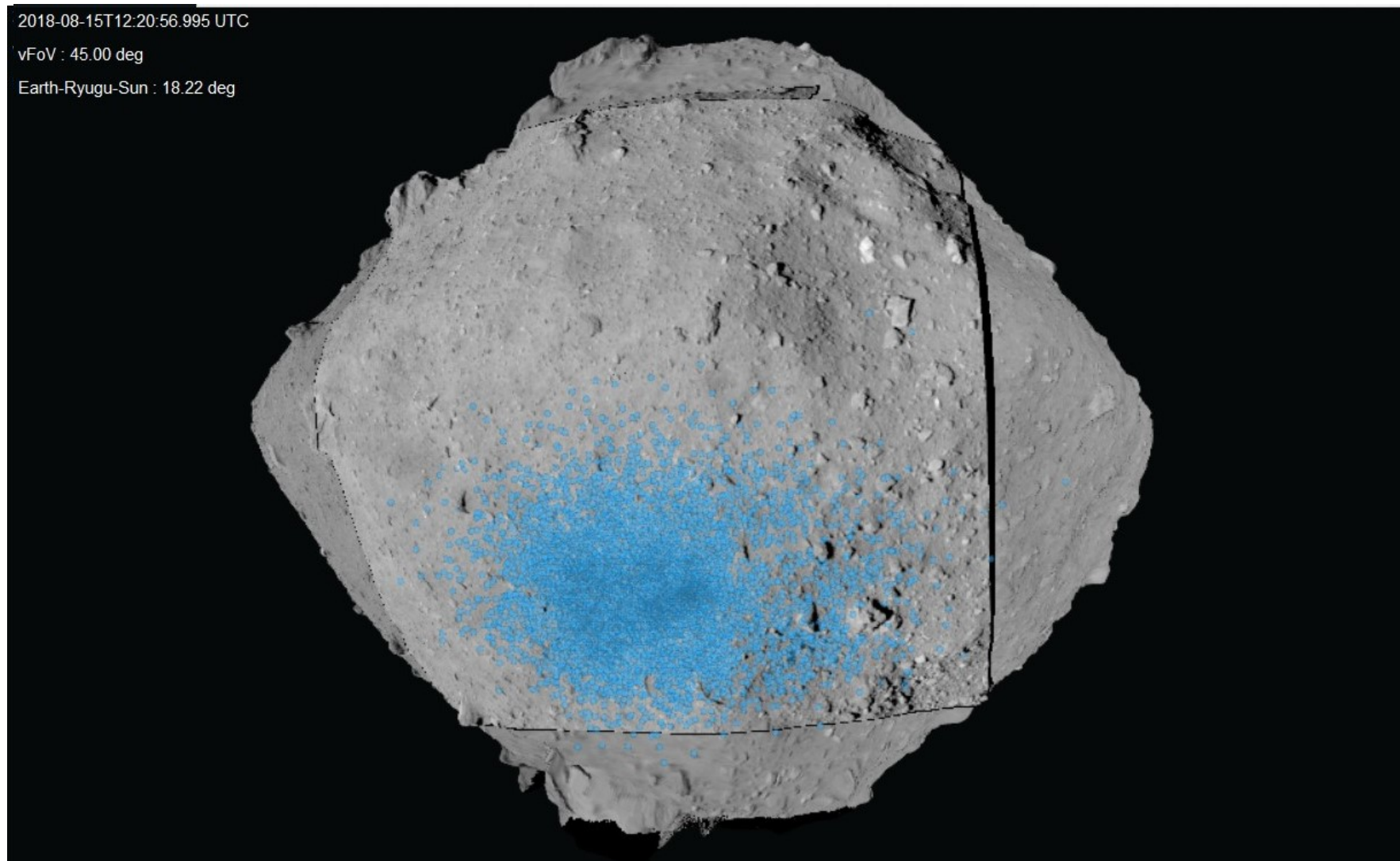
着地点候補の優先順位: MA-9 > MA-1 > MA-10 > MA-7 > MA-5 > MA-2



5. MASCOTの着地候補地点選定



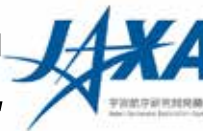
MASCOT着陸候補地点



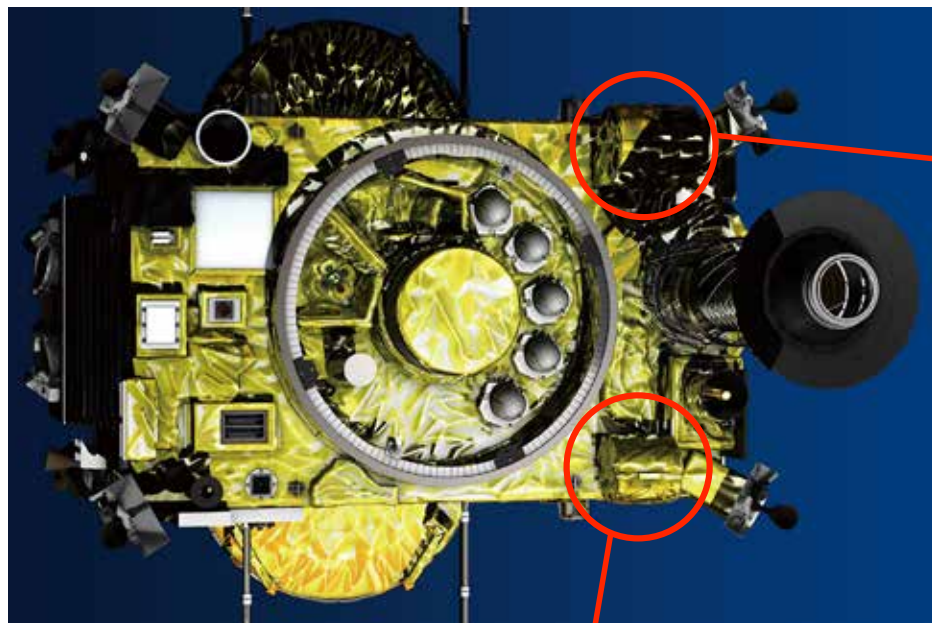
©JAXA, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研, CNES, DLR



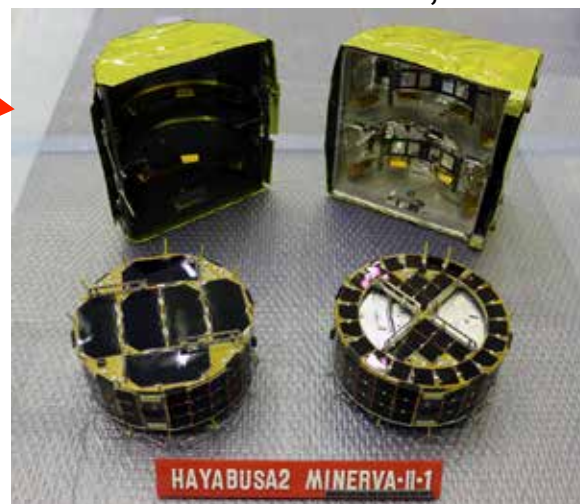
6. MINERVA-IIの着地候補地点選定



MINERVA-II-1のAとBを分離する(MINERVA-II-2は来年に分離予定)



MINERVA-II-1A, 1B



JAXA製作

MINERVA-II-2

MINERVA-IIコンソーシアム(東北大学, 東京電機大学, 大阪大学, 山形大学, 東京理科大学)が製作

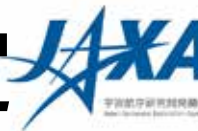


MINERVA-II-1A、MINERVA-II-1Bの仕様

- ・サイズ: 直径17cm、高さ7cm
- ・質量: それぞれ約1kg
- ・アクチュエータ: 2つのDCモータ
- ・搭載センサ: カメラ、フォトダイオード、加速時計、温度計、ジャイロ
- ・通信速度: 32kbps(最大)



6. MINERVA-IIの着地候補地点選定

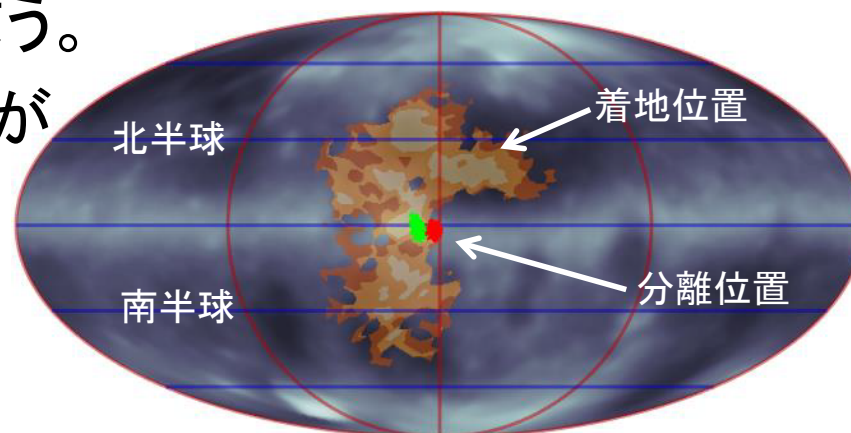


MINERVA-IIの着地点選定の条件:

- ・着地する場所がタッチダウン予定地と重ならないこと
- ・着地する場所がMASCOTの着地予定地と重ならないこと
- ・分離後の探査機高度が30mより低くならないこと
- ・地上局との通信が確保できること
- ・温度が高くない領域で、陰となる領域が少ないこと

- ・赤道付近はリッジ(尾根)となっているため、赤道付近に分離すると着地点が南北に大きく広がってしまう。
- ・南半球に分離した場合、探査機高度が30mより低くなる可能性がある。

・赤道から北半球側に100m以上離れたところに分離する

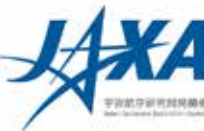


(©JAXA)

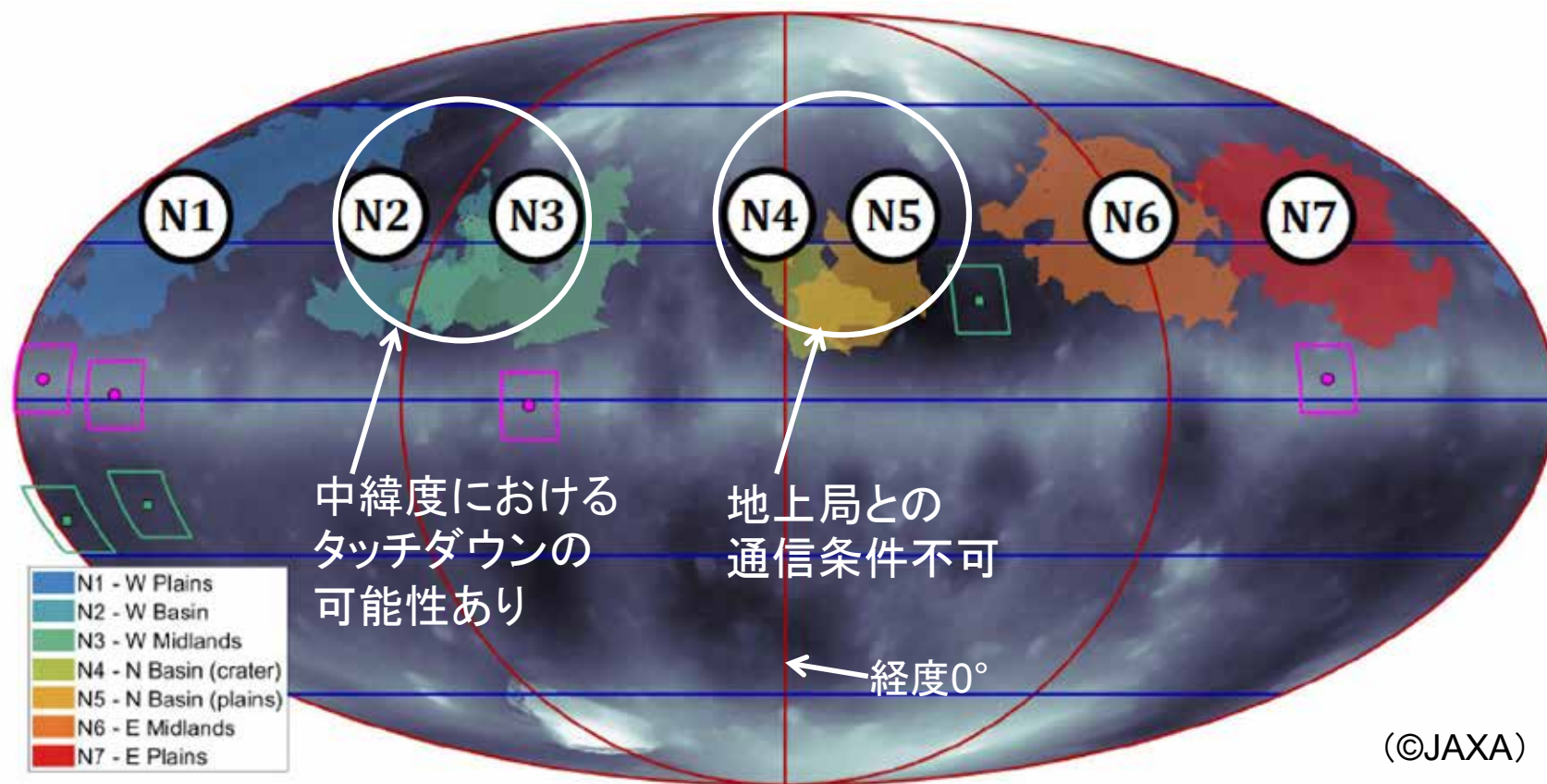
赤道付近に分離すると、着地位置が南北に広がってしまう



6. MINERVA-IIの着地候補地点選定



MINERVA-IIの着地点候補：北半球で検討



- ・タッチダウン・MASCOTの着地点と重ならないことを確認
- ・ONC-Tによる観測可能性等も考慮

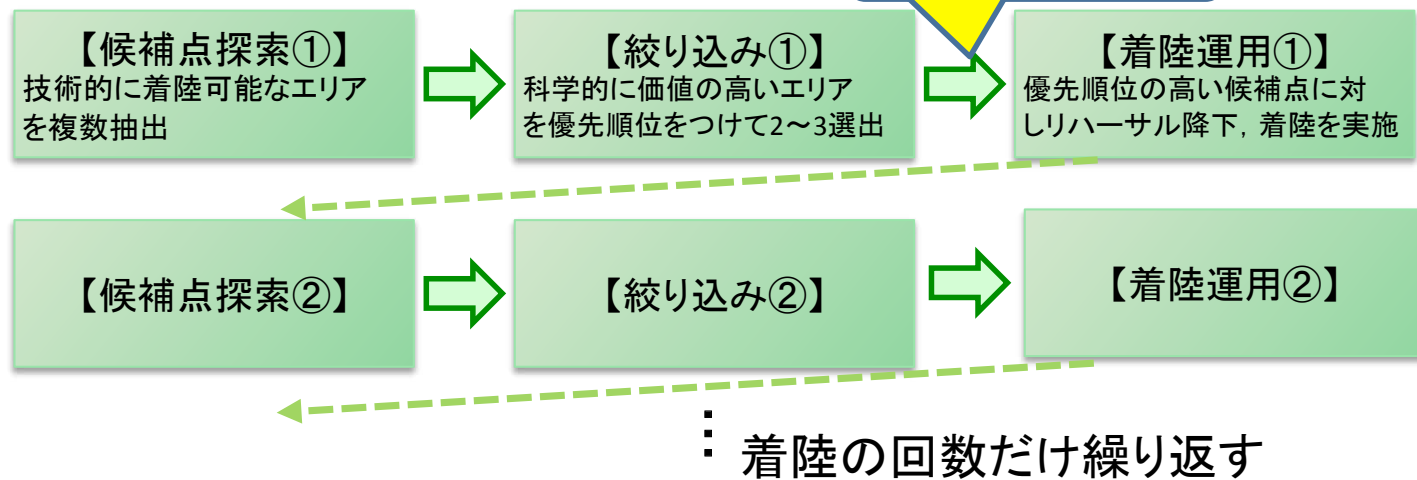
候補地：N6 > N1 > N7



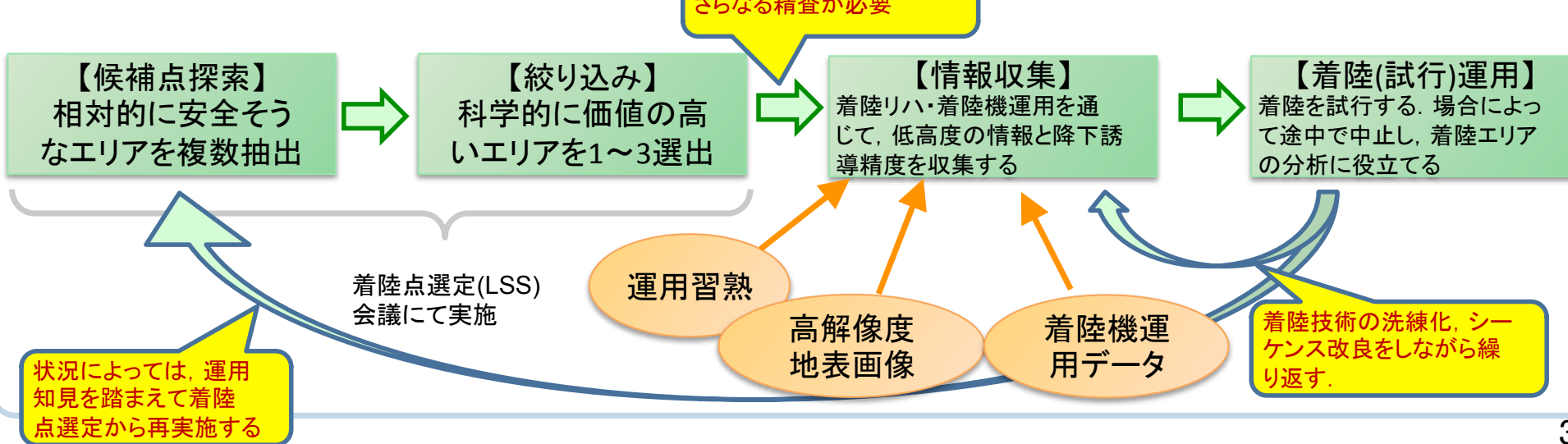
7. 着陸実現に向けた戦略



◆当初計画

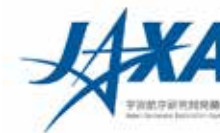


◆新計画





7. 着陸実現に向けた戦略



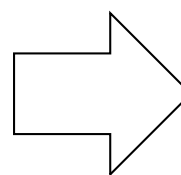
重要な事項

低高度から表面を詳しく調べる



(©JAXA、東大など)

高度約1kmから撮影したリュウグウ表面



航法誘導精度を
どこまで上げること
ができるか



8. 今後の予定



■ 記者説明会の予定

- 9月 5日(水) 11:00～12:00
- 9月27日(木) 14:30～15:30

■ アウトリーチ・イベント

➤ 子供向けイベント

- “なぜなに「はやぶさ2」何でも質問教室”
- 9月2日(日) 14時～16時
- 相模原市立博物館
- ネット中継等も行う予定

(時刻は日本時間)