

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その8 ～着陸するならどこが良い?～

和田 浩二¹, MMX LSSワーキングチーム

(要旨) 火星衛星探査計画Martian Moons eXploration (MMX)は火星衛星の一つであるPhobosの表面に着陸、試料採取して地球に持ち帰るサンプルリターン計画です。したがって、どこに着陸すべきかを検討すること、すなわち着陸地点選定(Landing Site Selection: LSS)が重要であり、LSSワーキングチームが結成され打ち上げ前から活動しています。本稿ではその活動をかいつまんで紹介します。

1. 「はやぶさ2」との違い

LSS—皆さんにとって耳慣れた言葉でしょうか？火星衛星探査計画MMXのLSSワーキングチーム主査を務めている筆者でも時々LLSとかSSLとかタイプしてしまいがちですが、Landing Site Selectionの略称で、着陸地点選定を意味しています。他天体への着陸ミッション(はやぶさシリーズで行ったタッチダウンを含む)では欠かせない活動で、探査機が安全に着陸でき、かつ科学的調査や試料採取にとって有意義な場所を探すという使命があります。

日本は、「はやぶさ2」で小惑星Ryuguへのタッチダウン(サンプラーホーンを1秒程度小惑星表面に「タッチ」して試料採取を行うやいなや即座に離陸する運用)に成功しています[1]。そのタッチダウンを実行する前には当然綿密なLSS活動を行っています[2]。MMXにおいてPhobos表面からの試料採取を行うことが決定してからは、「はやぶさ2」で実施されたLSSの方法や経験を大いに参考にしていきます。ただし、MMXのLSSは「はやぶさ2」のLSSとは様々な点で違いがあります。

最も大きな違いは、「はやぶさ2」の目標天体が初めて探査される小惑星Ryuguであったのに対し、MMXの目標天体はこれまで様々な火星周回衛星によってある程度探査されたPhobosである、という点です。目標天体表面について訪問する前から解像度の良いデータがあるということはLSSにとって大きな利点で、到着前からLSSを進めることができます。Ryuguは地上観測でおおよその大きさや表面組成が推定されていたため、LSSについての備えがまったくできなかったわけではありませんが、それでも行ってみたら岩石だらけで着陸場所を見つけるのにかなり苦労しました[3]。そのような「はやぶさ2」での苦労を思えば、MMXのLSSは一見容易だと思われがちです。実際、Ryuguの約20倍の大きさがあるPhobosは、重力が比較的大きいため表面が岩だらけではなく細かい粒径のレゴリスに覆われているのではないかと期待されますし、そもそも表面積も大きくなりますので、着陸できそうな場所なんて選び放題では?ところが...

2. 到着前LSS

MMX探査機の火星圏到着前に、既存のデータを

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター
wada@perc.it-chiba.ac.jp

表1: MMX探査機の着陸候補領域に適用される安全条件(2025年4月現在).

ID	項目	制約	理由
1	火星重力も考慮した重力方向に対する傾斜角 (Dynamic slope)	< 10° (基線長 20m)	・着陸時・滞在中安定姿勢確保
2	peak-to-peak の高低差	< 30 cm (基線長 4m)	・着陸安全の確保
3	地心緯度	±30° 以内	・軌道上からの観測制約
4	局所傾斜角 (赤道面に対する地面法線方向のなす角度)	±30° 以内. ただし夏半球に限って ±40° まで許容.	・軌道上からの観測制約 (形状モデル作成, 分光観測の観点からは低傾斜角ほど望ましい) ・着陸運用時における電力等探査機システム制約
5	日照	『その場所に日が当たるようになってから 55 分後』もしくは『可視開始』の遅いほうからの日照・可視両立継続時間が Phase-3 では 134 分以上, Phase-4 では 150 分以上.	・電力確保
6	地球可視		・通信確保
7	表面最高温度	< 330 K	・システム・機器機能維持
8	降下中の周囲の地形による影	着陸目標地点と周辺領域が周囲地形によって降下運用の妨げとなるほどの影で覆われないこと	・地形照合航法のため
9	クレータ分布	降下運用に利用するクレータが着陸目標地点周辺に想定以上に十分あること	・クレータベース地形照合航法のため
10	レゴリス層粒径	着陸・試料採取に適した粒径分布であること	・着陸安全の確保 ・十分な量の試料を採取するため
11	着陸候補地域内の着陸安全領域の数	複数が望ましい	・降下運用時の障害物検知によって着陸目標地点の近隣に着陸する可能性に配慮 ・ローバ着陸目標点と母船着陸目標点を同一着陸候補地域内で選定可能とするため
12	着陸運用時の地上局通信	降下開始から着陸滞在終了まで国内同一地上局で通信がとれること	・通信確保
13	経度	火星による日陰期間中に着陸リハーサル運用または着陸本番運用を実施する場合は, 反火星側で経度 180° ±30° 以内	・着陸運用制約のため

用いてPhobos表面の着陸候補地域の目星をつけるという作業を我々は「0次LSS」または「到着前LSS (Pre-arrival LSS)」と呼んでいます。既存のデータとしては、VikingやMars Expressといった火星周回機がPhobosを観測して得られた画像やスペクトルデータなど、利用できるものが沢山あります。ただし、解像度が良いとは言っても最新のPhobos形状モデルの解像度は18 m程度にすぎません[4]。MMX探査機の着陸領域として最終的には20 m四方の領域を選定する必要があるのですが、その領域

内の高低差が30 cm以下(基線長4 m)に収まっていること、といったLSSに対する安全条件(本稿執筆時点での条件は表1参照)をすべて満たす領域を、Pre-arrival LSSの段階で確信をもって選出することは困難です。MMXのLSSでも「はやぶさ2」と同様、現地での高解像観測が欠かせないのです。Pre-arrival LSSで挙げた候補地域にダメ出しされる可能性もあり、油断大敵です。

そうは言っても既存データで着陸候補地域に目星をつける(優先順位をつけて選定しておく)ことは、

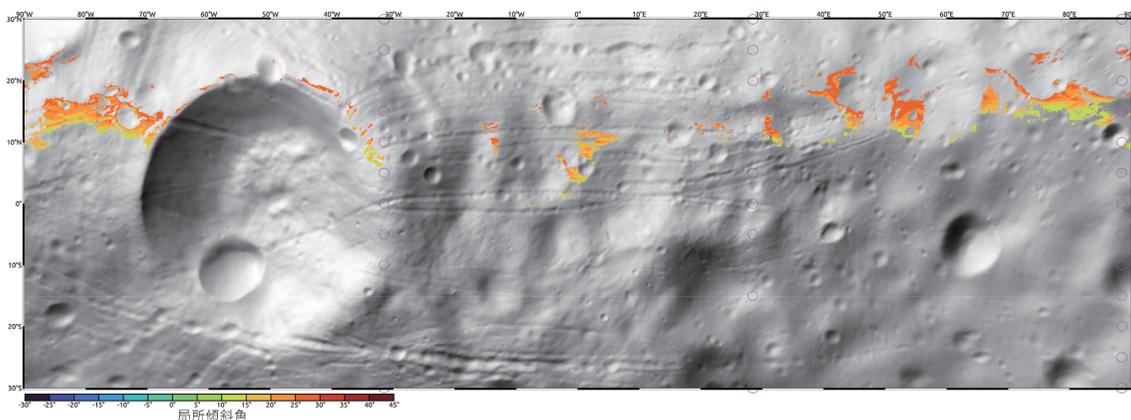


図1: 2024年打上想定(着陸想定日:2027年6月13日)で検討したPre-arrival LSSの結果例その1. Phobosの火星側半球(地心緯度 $\pm 30^\circ$ 以内、経度 $\pm 90^\circ$ 以内)における着陸可能地域を陰影起伏図上で色づけて示す(局所傾斜角に応じて着色)。ピンクの円は直径約300 mのスケールを示す。ここでは、着陸安全条件のうち局所傾斜角の上限を 30° とした。西側にはPhobos最大のクレータであるStickneyクレータが見える。

現地到着後の観測運用計画を検討するうえで非常に有益です。解像度の問題はひとまず現地観測に託すとして、既存データを用いてLSS安全条件として考慮できるものをもとにPhobos表面を探索することになります。

まず、局所表面の「傾斜」が重要です。Phobosは火星を周回しており、火星重力の影響は無視できません(Ryuguとは違う点の一つ)。火星重力や自転による遠心力も考慮した局所重力方向に対する傾斜を「Dynamic slope」と呼び、これが10度以下という制約がかかります(表1)。「はやぶさ2」のようなタッチダウン方式であれば、重力に対する傾斜が多少ついていようと問題はないのですが、着陸滞在するMMXでは、Dynamic slopeが10度を超えると探査機が転倒しかねません¹。傾斜に対するこのような条件を課すと、それだけでも着陸可能領域はかなり狭まってしまいます。例えば、Phobos最大のクレータであるStickneyクレータの東側は科学的に非常に興味深い地域が広がっていますが(いわゆる「青領域」が多く分布)、その大部分においてDynamic slopeが10度を超え候補地域からはじかれてしまいます(図1)。

¹MMXでは、要求される採取試料量が多い(表面から2 cm以深まで含む10 g以上)ことと、Phobosの重力がRyuguに比べて大きいということから、その着陸試料採取は、はやぶさシリーズで採用されたタッチダウン方式ではなく、着陸滞在によるコアリング方式となりました。

さらに追い打ちをかけるのが、「日照・地球可視両立継続時間」制約(正確な表現は表1参照)です。MMXでは、Phobos表面に着陸・静定後、筒を打ち込んで引き抜くコアリング方式で試料を採取します。その運用を慎重かつ確実にを行うためには、着陸滞在時間をできるだけ長くとれることが求められます(とはいえ限度があり、Phobosの4時間に満たない日中に着陸から離陸まで終えなくてはなりません)。その滞在可能時間は何によって決まるのか?まず、電力確保のために着陸滞在中は常に日が当たっている必要があります。また、着陸滞在および試料採取運用中は、探査機にとって安全上のリスクが大きくなることに加え、採取する場所を地球から指定する必要もあります。その運用監視と決断のために地球との通信(地球可視)が常に確保されていることが求められます。つまり、滞在中は、日照と地球可視どちらも継続している必要があります。両者の時間帯が一致していれば、Phobosの日中を丸々使えることになるのですが、太陽・地球・Phobosの位置関係によって日照時間帯と地球可視時間帯にはずれが生じます。Phobos表面上のとある地点では日が昇っても地球はまだ昇ってこない(非可視)だとか、地球は見えているけど日が沈んでしまう、ということがあります。Phobos滞在中、日照と地球可視のどちらも継続している時間(ANDがとれる時間)は各単独継続時間より短くなり、さらに季節依存があります。日照可視両立継続時間に対する制約を厳しくすればするほ

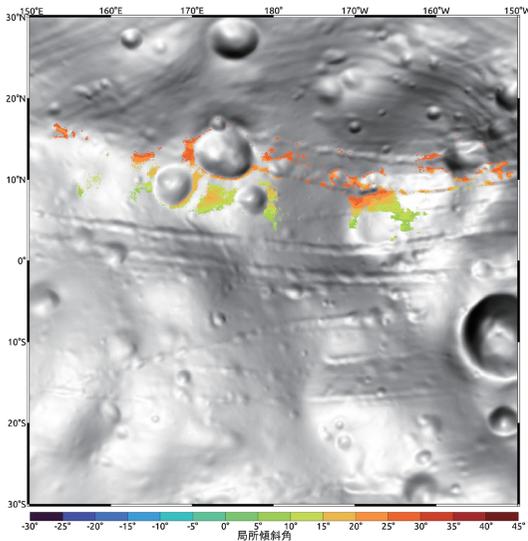


図2: 2024年打上想定(着陸想定日:2027年4月19日)で検討したPre-arrival LSSの結果例その2. Phobosの反火星側(地心緯度 $\pm 30^\circ$ 以内, 経度 $180^\circ \pm 30^\circ$ 以内)における着陸可能地域を陰影起伏図上で色づけて示す(局所傾斜角に応じて着色). ここでは, 着陸安全条件のうち局所傾斜角の上限を 30° とし, ローバのLSS条件も含めている.

ど(すなわち長時間必要とするほど), それを満たすPhobos上の地域は少なくなってしまいます.

間の悪いことに, Phobos着陸運用が予定されている時期(後述)は, この制約によって日を追うごとに着陸候補地域がどんどん少なくなってしまうことが明らかになっています. なにぶんPhobosに着陸することは世界初の試みですので, 最初から着陸が首尾よく成功するとは限らず何度かトライセざるを得ないかもしれないこと考慮すると, 着陸地点としては, できるだけ遅い時期でも成立する場所を選択する必要があります. このことは, 日照可視両立継続時間の制約のために選択範囲がより狭くなることを意味します.

着陸候補地域をどれだけ確保できるかは, 着陸滞在そして試料採取の運用をどう詰めて短時間で取られるか, にかかっているのです(その検討作業は着陸運用検討ワーキングチームにて行われています). 表1に示されている日照地球可視両立継続時間に対する制約は, このようなせめぎあいの果てに合意されたものになっています.

そのほかにも, 様々な制約があります. MMXでは仏独共同開発のローバ(名称「IDEFIX」)を着陸リハーサル時に降ろすことになっています[5]. このことは, MMXのLSSでは, 探査機のLSSのみならずローバのLSS(ローバが安全に着陸しその後運用できる場所を選定すること)も考慮する必要があることを意味します. 探査機とローバはどちらも安全に着陸することを要求しているため, 両者のLSS条件はほぼ同じではありませんが, 違う点もあります. そのような制約をすべて課すとPhobos上で着陸・試料採取できる地域は思ったほどにはないことが判明しました(図1.2). こんなに狭いものなのか!

ここまではもっぱら安全に着陸できる場所を追い求めてきましたが, もちろん科学的価値の高いところを選択する必要があります. 基本的には「安全第一」で, 安全着陸可能な地域に絞ってそのうえで科学評価を行います. MMXのミッション要求に掲げられている「火星衛星の起源を明らかにすること」がまずもって重要であり, 火星衛星の起源(どのようにして形成したのか)と進化(形成後どのように進化したのか)の理解につながる試料が採取できる場所を高く評価することになります. 起源を記録している物質はPhobosの形成時にPhobosを形成していた岩石でありPrimary rockと呼んでいます, それが分布している場所に着陸できれば良いことになります.

ただし, そもそもPhobos上でPrimary rockが何なのか, どこにどのように分布しているのか, 十分な科学評価を下せるほどの信頼できる既存のデータが乏しいのが現状です. Phobosの表面はスペクトルの傾きのわずかな違いから「青領域」と「赤領域」にわけられることが知られており, なんとなく「青領域」にPrimary rockが分布しているのではないかと考えられていますが, 確たる根拠はありません(Phobos最大のクレータであるStickneyクレータの東側が「青い」のは複数の探査機のデータが示すところであり, その分布自体は確からしいですが). 一方で, Phobosを代表する試料こそ重要だと考えれば, 「青」のみならずPhobos表面の大部分を占める「赤」もそれなりに価値があるはず(ついでに言えばDeimosの表面も「赤」です).

さらに, 宇宙風化を受けていないという意味で新鮮な試料に価値がありそうだとすれば, なるべく深

い場所にあった物質を掘り起こしたであろう大きなクレータの堆積物は狙い目かもしれません。この観点でもStickneyクレータの周囲は魅力的な地域と考えられます。なお、Stickneyクレータの「底」や「内壁」も魅力的ですが、これは残念ながら日照可視両立継続時間制約やDynamic slope制約を満たすことが困難なため却下されています。

Pre-arrival LSSにおいて科学評価を下し優先順位をつけることは容易ではありません。やはり、現地について観測することで得られるスペクトルデータや元素組成データなどをもとに科学評価を行うことが重要となります。

3. 運用計画からの制約

現地到着後のLSSのみならずPre-arrival LSSを行う上でも考慮しなくてはならないのは、着陸運用を実施する時期は当然として、その前の着陸候補地点を選定するための観測と選定過程です。

ご存じ(?)のようにMMXの打ち上げ時期は当初計画の2024年から2026年に変更されました[6]。2024年打上版で計画を練っていた段階では、まずPre-arrival LSSで候補として50地域ほど目星をつけておき、高高度軌道(QSO-H)観測、中高度軌道(QSO-M)観測、低軌道(QSO-LA, LC)観測でそれぞれ30地域、20地域、10地域…と絞り込んで、最終的に2回実施する着陸の目標領域を選ぶ、ということになっていました。数多くの地域を観測する必要があることから、この計画でも成立性はギリギリでしたが、絶好の観測時期(火星やPhobosによる日陰(蝕)や掩蔽などがない時期)と太陽会合の時期(地球と探査機の間に太陽が位置し運用できない)がずれていたこともあって、まだ比較的余裕がある計画が立てられていました[5]。ところが、打ち上げ年が変更されたことにより、絶好の観測時期と太陽会合の時期が重なることとなり、観測スケジュールが非常に厳しいものになりました。さらに、最も高度が低く、ゆえに最高解像度の観測ができる軌道であるQSO-LC滞在時間が大幅に減少することとなり、LSS活動が非常に厳しい状況に置かれてしまいました²。そのような状況になんとか対応すべく、ミッションオペレーションワーキングチーム

(MOWT)を中心に検討を重ねており、例えば、各観測軌道において観測する着陸候補地域数を約半減させて運用と解析の負荷を減らす、といった工夫を講じることとなりました。それでもスケジュールが非常にタイトであることに変わりはありませんが、

MMXは火星圏に約3年ものあいだ滞在し、そのほとんどをPhobos観測と着陸運用に費やします³。着陸運用は火星やPhobosによる蝕や掩蔽を避けて実施する必要がありますが、3年もあれば比較的自由にその時期を選べるのではないかとと思われるかもしれません。しかしながら、現実はその逆で、MOWTで検討を進めていくと、そんな都合のよい時期はごく限られていることが明らかとなりました[5]。その貴重な時期は火星圏滞在期間中のおよそ真ん中にあり、それを含む期間をPhase-3と呼んでいるのですが、これがちょうど日照地球可視両立継続時間制約が厳しくなる時期に当たります。あちらが立てばこちらが立たず…

Phobosは火星に対して常に同じ面を向けています(潮汐固定)。そのため、火星側と反火星側で着陸可能時期制約が異なります。反火星側の昼間は火星に邪魔されることなく地球から見えるため、蝕の時期を気にせず着陸時期を選べますが、着陸降下運用の観点から経度制約が生じます($180^\circ \pm 30^\circ$ 以内)。一方で、火星側は蝕の時期に着陸できませんが、経度にはほとんど制約がかかりません。このことを考慮して、Phase-3で2回の着陸を試みる計画を立てていますが、1回目は着陸運用を少しでも早く実施して余裕を持つために火星日陰があっても可能な反火星側に着陸し、2回目は火星側に着陸しよう、という作戦がノミナルになりつつあります。なお、先ほどから頻出しているStickneyクレータの東側地域は火星側になります(図1)。

さて、すんなり計画通りに事が進めば良いのですが、さまざまな不具合が生じることを想定しておかなければなりません。例えば、Phase-3で着陸できなかったらどうするのか?この場合、次のPhase-4

²QSO-LC滞在時間が短くなることは、搭載機器の一つであるガンマ線中性子分光計(MEGANE)の観測によってPhobosの元素組成を明らかにするうえでも著しく不利になります。

³もう一つの衛星であるDeimosについては、フライバイ観測として火星圏滞在期間の最初と最後の時期に実施予定。

で着陸することが検討されています。実はPhase-4も一見したところ蝕や掩蔽および太陽会合がない着陸に適した時期が比較的長くあります(これは打ち上げ延期によって生じた「けがの功名」)。ところが、Phase-4では太陽とPhobos(火星)の距離が近くPhobos表面温度が高くなり、LSSに課された温度条件を逸脱する可能性があることが判明しました。なかなか安心させてくれません。それでも何とか工夫して、Phase-4着陸はバックアップ計画として検討が継続されています。

4. LSS訓練

これまでつらつらと述べてきた通り、MMXのLSSは候補地域は限られているわ、観測選定スケジュールも非常にタイトだわ、で思いのほか厳しい状況に置かれています。それに対処するためには、観測データがダウンリンクされるやいなやデータ処理を迅速にこなし必要となる各種プロダクト(全球規模の形状モデルやローカル地形モデル、スペクトルマップ、…)を素早く作成する必要があります。それらプロダクトは各機器チームや科学戦略チーム(Science Strategy Team: SST)が作成を担うわけですが、相互に共有・受け渡していく必要があります。そのため、プロダクトの作成と共有連携について十分な準備をして“本番”に臨む必要があります。そのための対策が「LSS訓練」です。

LSS訓練は「はやぶさ2」でも実施され、大いに役立ちました[7]。MMXでも「はやぶさ2」LSS訓練を参考にして取り組んでいます。まず、各チームにおいて「出題側(LSS Data Producing チーム:LSSDP)」と「回答側(LSS Analysis and Assessment チーム:LSSAA)」に分かれます。LSSDPは、Phobosの起源・形成史をはじめ形状、クレータ・ボルダ分布、地質、元素組成などを検討し、もっともらしい模擬Phobosモデルを作成します。これに基づいて、LSSAAがリクエストした観測計画にのっとって、模擬観測データを作成し、LSSAAに提供します。LSSAAではその提供された観測データを実際のデータ処理手順に則って各種プロダクトを作成し、候補地域・領域を選定します。LSSDPが作成する模擬データはいわば“神”データ

で、LSSAAがLSSDPの用意した“神”Phobosを再現し、最終的に着陸候補地点を選定できるか?の真剣勝負です。LSSAAは当然のことながらLSSDPの作業や“神”データを参照することは禁じられています(そうでないと訓練の価値が薄れてしまいます)。答え合わせは訓練の最後に突き合わされ、フローの確認と課題の洗い出しを行い、本番にフィードバックされることとなります。

LSSDPは科学的背景を踏まえて模擬Phobosを考案するという楽しみがありますし、LSSAAはあたかも現実であるかのようなPhobosを解析しその姿が立ち上がる様を見られるという楽しみがあります(あるはずですが、きっと)。LSS訓練は様々なチーム・人員が長期間(一年以上かけて実施していきます)にわたってかかわる大規模なイベントですが、そのような楽しみをもって乗り越えられると期待しています。

5. LSSはまだまだ続く

本稿執筆時点では2026年打上版のLSS検討が進行中です。ここまでMMXのLSSがいかに大変かということを書いてきましたが、必要不可欠な活動であり、裏を返せば非常にやりがいのある活動です。Phobosへの着陸と試料採取が成功したあかつきには、その背後にあるLSS活動に想いを馳せていただけますと幸いです。その時にむけて今後またゆめめ努力を続けて参ります。

次号へ続く。

参考文献

- [1] Tachibana, S. et al., 2022, *Science* 375, 1011.
- [2] Kikuchi, S. et al., 2020, *Space Sci. Rev.* 216, 116.
- [3] 菊地翔太ほか, 2019, *遊星人* 28, 143.
- [4] Ernst, C. M. et al., 2023, *Earth, Planets and Space* 75, 103.
- [5] 中村智樹ほか, 2023, *遊星人* 32, 216.
- [6] 倉本圭, 2024, *遊星人* 33, 465.
- [7] 石原吉明ほか, 2017, *遊星人* 26, 139.

著者紹介

和田 浩二



千葉工業大学惑星探査研究センター主席研究員、東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了、博士(理学)、北海道大学低温科学研究所博士研究員などを経て、2009年千葉工業

大学惑星探査研究センターに上席研究員として着任、2016年より現職。専門は惑星科学とくに天体衝突現象。惑星探査では「はやぶさ2」衝突装置および分離カメラなどに参画。MMXではサイエンスボード幹事およびLSSワーキングチーム主査を務める。