

月極域探査における月面探査機の 着陸地点の候補の探索手法の提案

中島 康平^{*1}, 井上 博夏^{*2}, 山本 光生^{*2}, 山本 幸生^{*2}, 大嶽 久志^{*2}
荒木 徹也^{*3}, 廣田 雅春^{*4}, 石川 博^{*1}

Proposal of search method of landing site in lunar polar exploration

NAKAJIMA Kouhei^{*1}, INOUE Hiroka^{*2}, YAMAMOTO Mitsuo^{*2}, YAMAMOTO Yukio^{*2},
OTAKE Hisashi^{*2}, ARAKI Tetsuya^{*3}, HIROTA Masaharu^{*4}, ISHIKAWA Hiroshi^{*1}

ABSTRACT

In recent years, the existence of volatile substances such as water ice has been confirmed in the lunar polar region, and the exploration plan of lunar polar is processing in each country. In Japan, JAXA plans a lunar polar exploration mission in the 2020s. One of the important factors to success the mission is the selection of the landing site of the lunar probe. On the moon, the locations where the spacecraft can land are limited because of spacecraft specification. Furthermore, after landing on the moon, spacecraft should reach from the landing site to the destination point. Here, spacecraft can travel only through the points that satisfy spacecraft traveling condition. Additionally, we should consider the time change of the lunar environment. Also, we assume that landing error will occur when spacecraft lands on the moon. Therefore, we propose the method to search for the landing point of the spacecraft considering moving route and the landing error.

Keywords: Landing Site Selection, Path Planning

概 要

近年、月極域にて氷水などの揮発性物質の存在が確認され、各国で月極域探査計画が進められている。日本でも、JAXAが2020年代に月極域探査ミッションを予定している。ミッションを成功させるための重要な要素として、月面探査機の着陸地点の選定があげられる。月面上において、探査機が着陸可能な地点は限られている。さらに、月面に着陸後は、探査機の走行条件を満たした地点のみを通り、着陸地点から調査目的地点まで到達できる必要がある。経路を検討するときには、月面の環境が時間変化することもある必要がある。また、実際の着陸時には、着陸誤差が生じることが想定される。そこで本研究では、探査機の走行経路及び、着陸誤差を考慮した月面探査機の着陸地点の選定手法を提案する。

doi: 10.20637/JAXA-RR-19-006/0002

^{*} 2019年12月17日受付 (Received December 17, 2019)

^{*1} 首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 (Graduate School of Systems Design, Tokyo Metropolitan University)

^{*2} 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

^{*3} 群馬大学 理工学部 (School of Science and Technology, Gunma University)

^{*4} 岡山理科大学 総合情報学部 (Faculty of Informatics, Okayama University of Science)

1 はじめに

月極域に存在するクレーターの内部には、永久影と呼ばれる領域が存在する [1]。永久影は、一年を通して太陽光が全く当たらない領域である。そのため領域内部の温度は常に低温で保たれている。これまでの研究 [2], [3] により、永久影内とその周辺において、水氷などの揮発性物質の存在が指摘されている。しかし現状では、水氷の正確な分量や分布、エネルギー資源としての利用可能性などについては明らかになっていない。水氷は、将来の有人月面探査や深宇宙探査においてエネルギー資源としての利用が期待されている。また、月面に存在する水氷を解析することで、月や地球に存在する水の起源に関する知見の獲得が期待されている。そのため、2020 年以降、世界各国の企業や研究機関が月極域の探査計画を予定している [4], [5]。日本では、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が 2020 年代前半に、月極域探査ミッション [6] を検討している。

月極域探査ミッションを成功させるための重要な要素の一つとして、探査機の着陸地点の選定があげられる。現段階では、月南極域における地質や環境が特徴的な地点を調査目的地点として、その周辺領域を着陸候補領域とする予定である。着陸地点は、月面の傾斜角度、着陸後に日照を確保可能な期間、着陸後に地球との通信が可能な期間などの月面の環境が探査機の着陸条件を満たした地点から選出することが望ましい。また、着陸時には、着陸誤差が生じるため、着陸地点として定めた地点に正確に着陸することは困難である。よって、着陸地点の選定は、着陸誤差も考慮して行う必要がある。

月面に着陸後、探査機は調査目的地点まで移動する必要がある。探査機の走行経路は、月面の傾斜角度、日照、地球との通信など、月面の環境が探査機の走行条件を満たした地点を通ることが求められる。経路の探索では、日照の当たる場所、地球と通信が可能な場所などの月面環境の時間変化も考慮して行う必要がある。

以上より、探査機の着陸地点の選定には、着陸地点の環境、着陸誤差、着陸した地点から調査目的地点までの探査機の走行経路の環境の 3 つの要素を考慮する必要がある。そこで本研究では、これら 3 つの要素を考慮した月面探査機の着陸地点の候補の選定手法を提案する。提案手法により、探査機が着陸可能であり、着陸後に探査機が走行可能な地点のみを通り調査目的地点まで到達可能である地点の抽出を行う。

本論文の構成は次の通りである。2 章では、着陸地点の環境、着陸誤差、探査機の走行経路の 3 点を考慮した探査機の着陸地点の選定手法を提案する。3 章では、2 章で述べる提案手法に基づいた着陸地点の選定を行い、その結果の考察を行う。4 章では、本論文のまとめを述べる。

2 着陸地点の候補の選定手法

本章では、月面探査機の着陸地点の候補の選定手法について述べる。

2.1 着陸候補地点の抽出の流れ

探査機の着陸地点の候補の選定の流れについて説明する。はじめに、着陸地点の選定のため、探査機の着陸可能な地点、走行可能な地点をそれぞれ定義する。次に、着陸候補領域の中から、探査機が着陸可能な地点を抽出する。抽出された地点の中から、着陸後に探査機が調査目的地点まで到達可能な地点を抽出する。ここで、着陸地点から調査目的地点までの経路は、月面環境の時間変化を考慮する必要があるため、静的環境を想定したアルゴリズムで求めることは難しい。探査機は、調査目的地点に到達するまでに通る全ての地点に対して、その地点が探査機の走行可能条件を満たしたタイミングで通らなければならない。そこで、本研究では、幅優先探索 [7] を元とした時間変化を考慮したアルゴリズムを提案し、経路の探索を行う。最後に、着陸誤差円を考慮して、想定される着陸誤差円領域に含まれる全ての地点が探査機の着陸条件を満たしてかつ、着陸後

に探査機が調査地点まで到達可能な地点を着陸地点の候補として抽出する。

2.2 探査機の着陸可能な地点の定義・抽出

探査機の着陸地点の候補を絞るため、探査機の着陸可能地点を定義する。実際のミッションにおける、探査機の着陸可能な地点の条件は確定していないが、おおよそ次のような条件が検討されている。

- 1) 傾斜角度が 10 度以下である地点
- 2) 探査機が着陸後、1 週間以上連続で日照が確保可能な地点
- 3) 探査機が着陸後、1 週間以上連続で地球と通信が可能な地点

本研究では、上記の 3 つの条件を全て満たした地点を探査機が着陸可能な地点として抽出を行う。

2.3 探査機が走行可能な地点の定義・抽出

本研究における探査機が走行可能な地点は、次の 3 つの条件を全て満たす地点とする。探査機が走行可能な地点も、実際のミッションにおける条件は確定していないが、おおよそ次のような条件が検討されている。

- 1) 傾斜角度が 25 度以下である地点
- 2) 日照が確保可能な地点
- 3) 地球と通信が可能な地点

1) の条件は、傾斜角度が大きい場合、探査機の転倒確率が大きく上昇するためである。2) の条件は、探査機の稼働エネルギーが太陽光発電に依存するためである。3) の条件は、探査機の現在地や観測データを地球と送受信するために、常に地球と通信可能な状態であることが望ましいためである。本研究では、上記の 3 つの条件を全て満たした地点を探査機が走行可能な地点とする。2.2 の条件で抽出した着陸候補地点の中から目的地点までの経路が確保可能な地点を抽出する。経路が確保可能であるかの判定は、後述する環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズムを用いて行う。

2.4 着陸誤差を考慮した着陸地点の抽出

1 章で述べたように、実際の着陸時には、着陸誤差が生じることが予想される。本研究では、着陸地点として定めた地点を中心とした着陸誤差円が発生することを想定する。よって、ある地点を着陸地点として定めたときに、想定される着陸誤差円領域に含まれる地点全てが着陸地点としての条件を満たしてかつ、着陸後に調査目標地点まで到達可能な地点を着陸地点の候補として抽出する。

2.5 環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズム

本研究は、 $k \text{ m}$ 四方の領域における月面環境が時間ごとに記録されているデータを利用することを想定する。ここで、 $k \text{ m}$ という長さは、探査機を走行させたとき、探査機の走行方向と垂直に動く幅よりも大きい任意の値と考える。この $k \text{ m}$ 四方の領域を本研究では一つの地点として定義する。着陸候補領域はこの $k \text{ m}$ 四方の領域から構成されると考えて、図 1 のように各地点に座標を与える。探査機の 1 回の移動は、各地点の中心から隣接する地点の中心に移動すると考える。

日照が当たる地点、地球と通信が可能な地点など、一部の月面環境は時間変化する。そのため本研究では、環境の時間変化を考慮した経路探索アルゴリズムを用いる。アルゴリズムのフローチャートを図 2 に示す。通常、幅優先探索を用いた経路探索では、待ち行列を用いて位置に関する情報を保持するが、このアルゴリズム

では、探査機の位置情報に加えて、探査開始からの経過時間を待ち行列で保持することで、環境の時間変化に対応した経路の探索を行う。

次に、このアルゴリズムの入力と出力について説明する。着陸地点 (sx, sy) 、調査目的地点 (gx, gy) 、探査開始時刻 T_s 、探査機が一時間あたりに移動可能な回数 v 、制限時刻 T_l を入力として、探査機が走行可能な地点のみを通り、制限時間内に着陸地点から調査目的地点まで到達可能であるかの判定を出力とする。ここで、探査開始時刻 T_s と制限時刻 T_l はそれぞれ日時を示しており、探査機が移動可能な時間は、 T_l と T_s の差で表せる。探査機が一時間あたりに移動可能な回数 v と探査機が移動可能な時間から、探査機が移動可能な回数を N とすると、次のように表すことができる。

$$N = v(T_l - T_s) \quad (1)$$

これらの値を用いて、アルゴリズムの処理の流れを説明する。はじめに、着陸候補領域内の全ての地点を非探索済みとする。次に、待ち行列に [探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数 (n)] の 3 つのデータからなる要素を加える。ここで、初期の探査機の位置は着陸地点 (sx, sy) であり、探査機の移動回数は 0 である。その後、探査機の現在地を探索済みとする。以降、以下の処理を繰り返す。

1. 待ち行列の先頭の要素を取り出し、[探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数 (n)] とする。
2. 探査機の移動回数 (n) が移動回数の上限と等しい ($n = N$) 場合、処理を終了する。
3. 探査機の位置と上下左右に隣接する地点で、探査機の走行条件を満たして、かつ探索済みでない全ての地点を探査機の遷移先とする。全ての探査機の遷移先に対して、[探査機の遷移先 (x 座標), 探査機の遷移先 (y 座標), 探査機の移動回数] を待ち行列に入れる。ここで、探査機の移動回数には $n + 1$ を設定する。また、探査機の遷移先を全て探索済みとする。
4. 探査機の遷移先に調査目的地点が含まれている場合、処理を終了する。
5. 探査機の現在地に隣接する地点が全て探索済みでない場合、[探査機の位置 (x 座標), 探査機の位置 (y 座標), 探査機の移動回数] を待ち行列に入力する。ここで、探査機の移動回数には $n + 1$ を設定する。
6. 処理 1 に戻る。

使用するデータは、 h 時間ごとの月面環境が記録されているとする。このとき実験では、 h 時間ごとに月面環境が変化すること考える。探査機が一時間あたりに移動できる回数は v で与えられているため、探査機が hv 回移動するたびに月面環境は変化する。処理 5 では、探査機は移動せずに、探査機の 1 回の移動に要する時間だけ、その地点で時間経過を待つ処理である。よって、探査機の位置は変化しないが、移動回数は 1 増える。これにより、環境の時間変化を考慮して、探査機が制限時間内に到達可能な地点全てが検出される。処理 4 で終了したときは、調査目的地点まで到達可能であると判定し、処理 2 で終了したときは、調査目的地点まで到達不可能であると判定する。

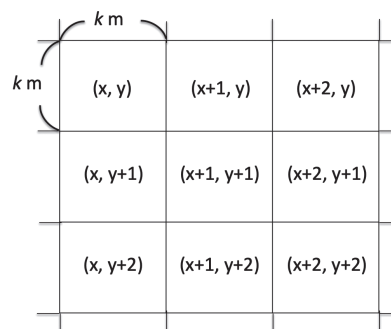


図 1 着陸候補領域のイメージ

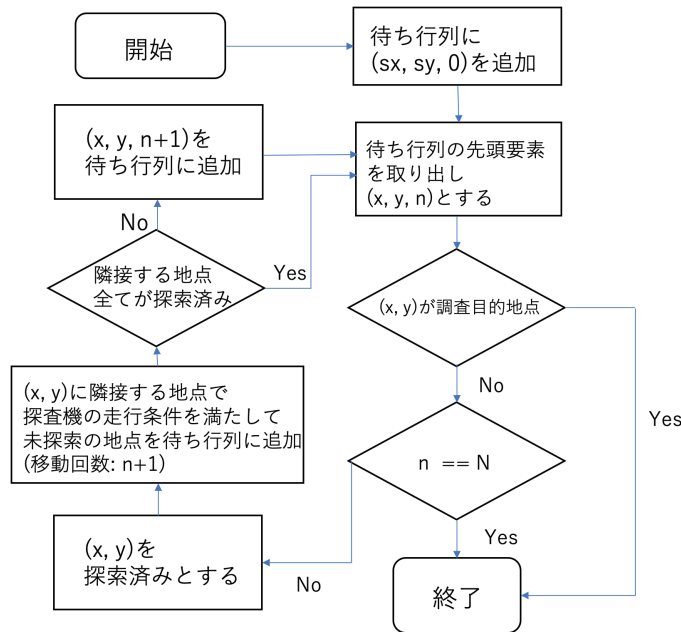


図2 環境の変化を考慮したアルゴリズムのフローチャート

3 実験結果

本章では、3章で述べた手法を用いて行なった実験の結果を記す。実験では、着陸候補領域内から2つの地点を抽出して、それぞれの地点を調査目的地点とした時の着陸地点の候補の探索を行なった。

3.1 実験に用いたデータ

実験に用いたデータの詳細を表1に示す。それぞれの月面環境のデータの記録方法は、井上ら[9]の論文にて記載されている。このデータは、2020年10月1日0時から2020年12月31日24時までの着陸候補領域内の月面環境をシミュレーションしたデータである。1ピクセルあたりに10m四方の領域に関するデータが記録されている。本研究では、この10m四方の領域を1地点とする。着陸候補領域は、縦横301×301の地点からなり、地点数は、90,601地点である。記録されているデータは着陸候補領域内のそれぞれの地点における日照強度、地球との通信の可否、傾斜角度である。日照強度は、着陸候補領域内の各地点における太陽光の強度が12段階で3時間ごとに記録されている。日照強度は、太陽を12の光源から構成されているとして、任意の地点における日照強度は、その地点の地表から高度1mの位置から観測可能な光源数である。12の光源の配置については、[9]に記載されている。地球との通信の可否は、着陸候補領域内の各地点と地球上の各基地局が通信可能であるかが2値で3時間ごとに記録されている。傾斜角度は、着陸候補領域内の各地点における月表面の傾斜角度が記録されている。

3.2 実験設定

実験設定を表2に示す。探査開始時刻は、探査機が着陸可能な地点が多数存在する時期である2020年11月6日6時として、制限時刻は、1週間後の2020年11月13日6時とした。よって探査機が探査可能な時間は168時間である。探査機が1時間あたりに移動可能な回数は、探査機の移動速度を時速0.06kmと想定して、10mの地点間の移動を1時間あたりに6回移動可能であると設定した。よって探査機が期間内に移動できる回数は最大で1,008回である。調査目的地点の正確な位置は現状では確定していない。そのため、調査目的地

点の対象となる地点を含むとされる領域の中から 2 地点をランダムに抽出して、それぞれの地点を地点 A、地点 B として実験を行う。CR1(89.4391S, 137.1345W) を原点とした座標系における地点 A、地点 B の座標と緯度経度を表 3 に示す。日照は、現段階のミッション検討状況 [9] と同様に、日照強度が 12 段階中 6 以上の地点を日照が当たる地点と定義した。通信は、地球上の 4 つの基地局の内、1 つ以上と通信が可能な地点を通信可能な地点と定義した。また、実装は、Python の数値計算ライブラリである SciPy[8] を用いて行った。

3.3 実験結果

着陸候補領域内で、2 章で述べた探査機が着陸条件を全て満たした地点を抽出する。着陸候補領域内で、本実験で設定した探査開始時刻における探査機が着陸可能地点を図 3 に示す。抽出された地点数は 1,726 地点である。

はじめに、地点 A に対する結果について述べる。地点 A の位置は、図 3 に調査目的地点として示している。地点 A に対して、2 章で述べた経路探索アルゴリズムを用いて、調査地点まで経路を確保可能な地点を抽出する。着陸条件を満たした地点に対して、それぞれ調査目的地点までの経路が確保可能である地点を図 4 に示す。抽出された地点数は 856 地点である。最後に、着陸誤差円を考慮した抽出を行う。着陸誤差円の直径を 100 m として、着陸候補地点の抽出を行った結果を図 5 に示す。抽出された地点数は 30 地点であった。実験の結果として、地点 A を調査目的地点とした場合、90,601 地点からなる着陸候補領域の中から、30 地点まで着陸候補地点を絞ることができた。地点 B についても同様の手順で着陸候補地点の抽出を行った。地点 B の位置を図 6 に調査目的地点として示し、地点 B に対する結果を表 3、図 7、図 8 に示す。

表 1 実験データの詳細

着陸候補領域	CR1(89.4391S, 137.1345W) を中心とした 3 km 四方の領域
通信基地局の所在地	臼田, ゴールドストーン, キャンベラ, マドリッド
シミュレーション期間	2020 年 10 月 1 日 0 時 - 2020 年 12 月 31 日 24 時
記録間隔	3 時間ごと
1 地点	10 m 四方の領域

表 2 実験設定

探査開始時刻	2020 年 11 月 6 日 6 時
制限時刻	2020 年 11 月 13 日 6 時
探査機の移動速度	1 時間に 6 回移動可能
日照が当たる地点	日照強度が 6 以上の地点
通信可能な地点	通信基地局 1 つ以上と通信が可能な地点
着陸誤差円の直径	100 m

表 3 調査目的地点の座標・緯度経度と実験結果

調査目的地点	地点 A	地点 B
調査目的地点の座標 (x, y)	(69, -99)	(36, -49)
調査目的地点の緯度経度	(89.4734S, 134.6922W)	(89.4591S, 135.6508W)
調査目的地点までの経路が確保可能な地点数	856 地点	1,665 地点
着陸誤差円を考慮した着陸地点の候補数	30 地点	102 地点

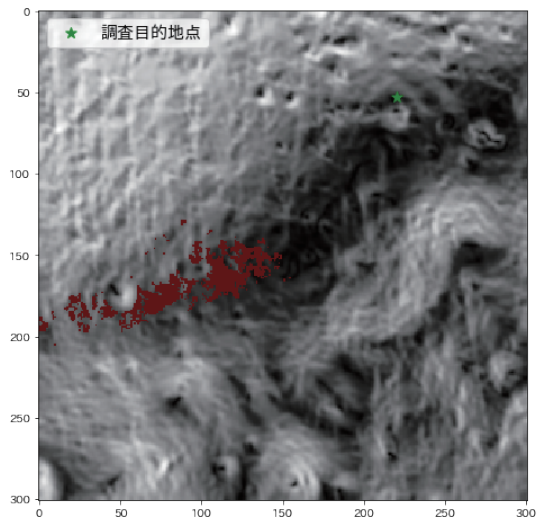


図3 探査機が着陸可能な地点と調査目的地点 A
(地点数: 1,726 地点)

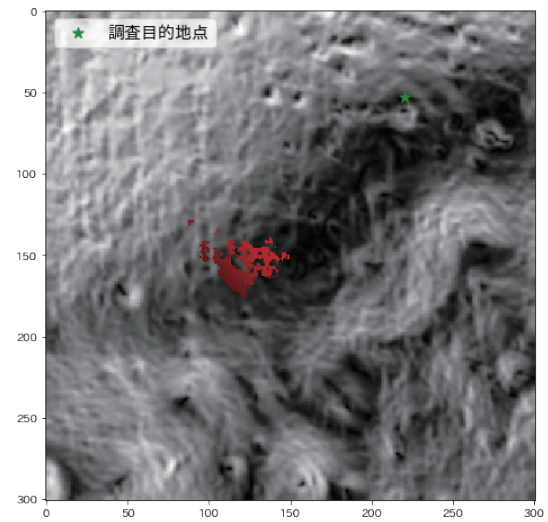


図4 地点 A までの経路が確保可能な地点
(地点数: 856 地点)

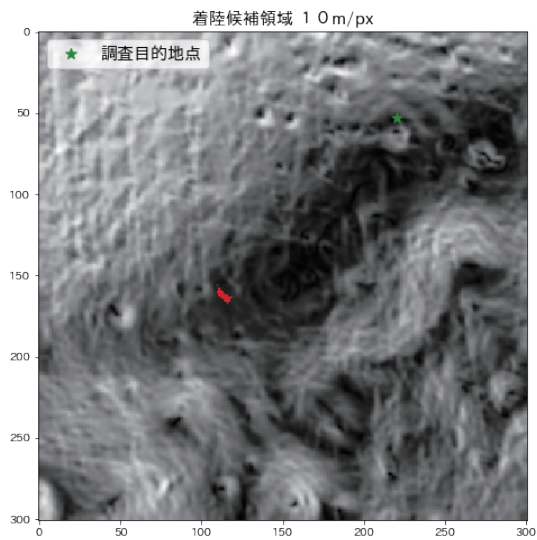


図5 地点 A に対して着陸誤差円を考慮した
着陸地点の候補 (地点数: 30 地点)

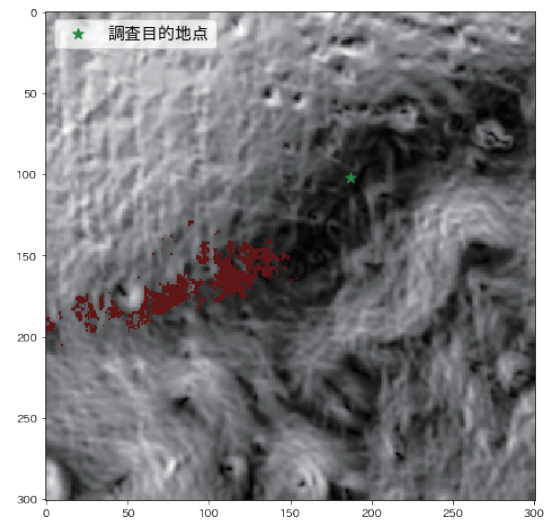


図6 探査機が着陸可能な地点と調査目的地点 B
(地点数: 1,726 地点)

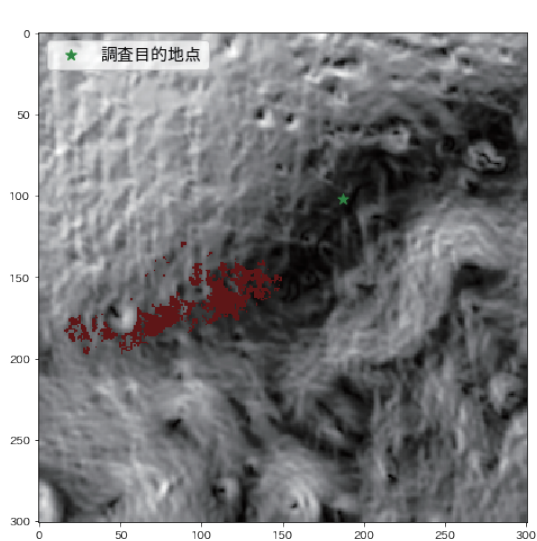


図7 地点 B までの経路が確保可能な地点
(地点数: 1,665 地点)

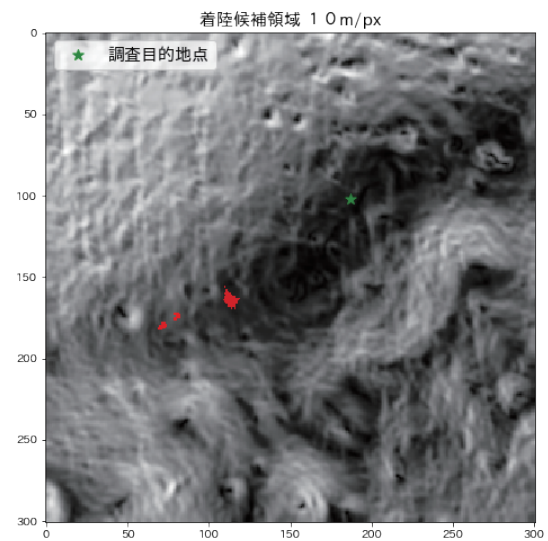


図8 地点 B に対して着陸誤差円を考慮した
着陸地点の候補 (地点数: 102 地点)

4 まとめ

本研究では、月極域探査ミッションにおける月面探査機の着陸地点の選定手法を提案した。手法としては、月面環境から探査機が着陸可能、探査機が走行可能な地点を定義し、探査機が着陸可能でかつ、着陸後に調査目的地点まで到達可能な地点の抽出を行った。最後に着陸誤差円を考慮し、その地点を着陸地点として定めたときに、想定される着陸誤差円領域に含まれる地点は全て着陸可能でかつ、調査目的地点まで到達可能な地点を抽出した。今後の課題として、探査機の走行経路の探索手法の再検討があげられる。本研究で提案した手法では、傾斜角度、日照、地球との通信といった全ての月面環境が良好な地点のみを探査機が走行可能であると定義した。月面環境の中でも、日照に関する条件は、太陽光が探査機の稼働エネルギーの確保に必要なため設定した。しかし、調査目的地点に到達するまでに必要な分の稼働エネルギーを確保できれば良いため、常に日照が当たる地点のみを通る必要はない。そのため今後は、日照の条件を重みとした探査機の走行経路の探索手法を検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Bussey, D Ben J and Lucey, Paul G and Steutel, Donovan and Robinson, Mark S and Spudis, Paul D and Edwards, Kay D. Permanent shadow in simple craters near the lunar poles. *Geophysical Research Letters*, Vol.30, No.6, 2003. DOI:10.1029/2002GL016180
- [2] Miller, RS and Nerurkar, G and Lawrence, DJ. Enhanced hydrogen at the lunar poles: New insights from the detection of epithermal and fast neutron signatures. *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.117, No.E11, 2012. DOI:10.1029/2012JE004112
- [3] Deutsch, Ariel N and Chabot, Nancy L and Mazarico, Erwan and Ernst, Carolyn M and Head, James W and Neumann, Gregory A and Solomon, Sean C. Comparison of areas in shadow from imaging and altimetry in the north polar region of Mercury and implications for polar ice deposits. *Icarus*, Vol.280, pp.158-171, 2016. DOI:10.1016/j.icarus.2016.06.015.
- [4] Colaprete, Anthony and Elphic, Richard C and Andrews, Daniel and Bluethmann, William and Quinn, Jacqueline and Chavers, D Greg. Resource prospector: Evaluating the ISRU potential of the lunar poles. presentation to the Lunar Exploration Analysis Group (LEAG), 2016.
- [5] Djachkova, MV and Litvak, ML and Mitrofanov, IG and Sanin, AB. Selection of Luna-25 landing sites in the South Polar Region of the Moon. *Solar System Research*, Vol.51, No.3, pp.185-195, 2017. DOI:10.1134/S0038094617030029
- [6] Hashimoto, Tatsuaki and Hoshino, Takeshi and Wakabayashi, Sachiko and Otake, Hisashi and Ohtake, Makiko and Tanaka, Satoshi and Morimoto, Hitoshi and Masuda, Koichi and Shimada, Takanobu and Sutoh, Masataku and others. Lunar polar Exploration Mission. *Proceedings of the 17th Space Science Symposium*, 2017.
- [7] Lee, Chin Yang. An algorithm for path connections and its applications. *IRE transactions on electronic computers*, No.3, pp346-365, 1961. DOI:10.1109/TEC.1961.5219222
- [8] Jones, Eric and Oliphant, Travis and Peterson, Pearu and others. {SciPy}: Open source scientific tools for {Python}, 2001–.
- [9] 井上博夏, 山本光生, 大竹真紀子, 大嶽久志, 星野健. 月極域探査におけるミッション検討状況 (着陸地点), 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018.