

月周回衛星「かぐや」のデータを用いた 多目的最適化による月着陸最適候補地の選定

西山 万里^{*1}, 大嶽 久志^{*2}, 星野 健^{*3}, 橋本 樹明^{*2},
渡辺 毅^{*2}, 立川 智章^{*4}, 大山 聖^{*2}

Selection of Landing Sites for Lunar Lander with “KAGUYA” Data Using Multi-Objective Optimization

Mari NISHIYAMA^{*1}, Hisashi OTAKE^{*2}, Takeshi HOSHINO^{*3}, Tatsuaki HASHIMOTO^{*2},
Takeshi WATANABE^{*2}, Tomoaki TATSUAKI^{*4}, Akira OYAMA^{*2}

Abstract

The Japanese lunar orbiter spacecraft “KAGUYA” had obtained enormous scientific data about the moon using equipped cameras and sensors. In this research, we created a moon database with a moon simulator that developed using the moon data, such as illuminated time, communicable time, inclination angles and ice distribution. We analyzed those data for selecting landing points suitable for lunar missions using Multi-Objective Optimization. This paper describes the method how we selected landing points in terms of both technical and scientific aspects, and the obtained knowledge we derived from the results of this research.

Keywords : Lunar Polar Expoloration, Landing Site Selection, Multi-objective Optimization

概 要

月周回衛星「かぐや」は、搭載された地形カメラをはじめとする各種センサを用い、月に関する膨大なデータを収集した。本研究では、これらのデータを元に開発された月面における日照、通信、傾斜角をシミュレーションするソフトを用いて年間の月南極付近のデータベースを作成し、また報告されている月の氷の存在確率に関する情報を加えて宇宙探査における技術・ミッション両方の観点から解析することで、月探査ミッションにおける多目的最適な着陸候補地点の選定を行い、将来の月探査ミッションにおいて有用な知見を導き出した。

1. はじめに

人類はこれまで数多くの月探査を行ってきた。古くは1959年に打ち上げられたルナ1号に始まり、アメリカのアポロ計画では有人月探査が行われたことは、世界的に広く知られていることである。日本でも1990年代から月周回衛星「かぐや」による月の詳細な観測が行われ、数多くの科学的なデータが取得された。このデータを用いて次期月探査計画のための着陸地点検討が行われているが、これまでは大域的に日照条件の良い地域の中から人間が選んだ範囲をより詳細に分析することを繰り返して候補地点を挙げるなど、広範囲を定量的に分析するような着陸地点の選定は行われていなかった。これに対し本研究では、探索範囲を広げながらも制約条件によって探索点が膨大になることを防ぎ、さらに多目的最適化を用いることで着陸地点に対する技術的・ミッション的要求を満たすような候補地点を選定することを目指した。

* 平成27年12月17日受付 (Received December 17, 2015)

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科

^{*2} 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

^{*3} 宇宙航空研究開発機構宇宙探査イノベーションハブ

^{*4} 東京理科大学工学部第一部経営工学科

本論文の構成は以下の通りである。まず第2章では、月面探査機の着陸地点の選定、および多目的最適化に関する背景を述べる。第3章では、多目的最適化を用いた着陸地点の探索手法について詳細を述べる。第4章では得られた結果について述べ、そこから導き出される知見について考察する。最後に第5章で、本論文のまとめを行い、今後の課題について述べる。

2. 背景

2.1. 月面探査機の着陸地点に対する要求

月探査計画において、月面探査機の着陸地点は非常に重要な意味を持つ。たとえば月面上における電力供給は太陽光発電に依存するため、日照の確保は死活問題である。また、単に着陸するだけでなくその後の月面探査を見据えた場合、科学的に興味深い物質や地形の存在する地点の近辺に着陸することが望ましい。そのため、探査機の着陸地点は様々な条件を加味し、注意深く選定される必要がある。

ここで、月面探査機の着陸地点に対しては技術的要求とミッション的要求の二種類が存在する。技術的要求とは探査機が機能を維持するために必要な要求であり、例として以下の3点が挙げられる。

- A) 日照条件の良さ
- B) 地上との通信条件の良さ
- C) 傾斜角の小ささ

Aの日照条件は太陽光発電による発電に影響するため、探査機の機能維持を大きく左右する。日陰の時間が短くなるほど蓄電に必要なバッテリーの容量を小さくすることが出来るため、連続して続く日陰時間が短いほど望ましい。またBの通信条件については、観測データやコマンドを地上との間で送受信するために地球が可視である期間がより長いことが望ましい。さらにCの傾斜角についてだが、着陸地点の傾斜があまりに急である場合、着陸機が転倒し計画全体が失敗に終わってしまう危険性が存在する。さらに着陸後探査機からローバを降ろすこと、このローバが周辺を走行し探査を行うことも考慮すると、傾斜角はなるべく小さい方が望ましい。

一方ミッション的要求とは探査をより有意義なものとするための要求であり、科学的な観測データが得られることが期待できるような条件のことを示す。例としては着陸地点付近における氷の存在確率の高さや、月の起源に関わる物質を含んだ鉱物の多く存在する地点への近さなどが挙げられる。

これら複数の目的を満たすような着陸地点を選定することによって、計画を遂行しやすく、なおかつ科学的成果をより多く得られるような探査を実現することが可能となる。しかしながらこれらの目的は必ずしも両立するものではなく、時に相反することもある。たとえば日当たりの良いところでは氷が溶解してしまうため、日照条件の良さと氷の存在可能性は両立することが難しいなど、トレードオフの関係にある目的の組はいくつも存在する。

こうした複数の目的を扱うにあたり、本研究では多目的最適化を用いることを提案した。以下では多目的最適化の特徴、および従来の単目的最適化との違いについて述べる。

2.2. 多目的最適化

工学の様々な分野において、複数の目的を有する最適化問題は数多く存在する。これらの目的は一方の改善により他方も改善する関係であることもあるが、一方の目的を満足するために他方が犠牲になる、すなわち改悪されるケースもしばしば存在する。そのため、複数の目的間で妥協解を探索することが必要となってくる。

こうした相反する多目的問題を扱う場合、従来は単目的最適化（スカラー化）手法が広く用いられてきた。これは各目的関数に対し重み付けを行い1つの評価式で表すことで、多目的問題を単目的問題とみなす方法である。しかしながらこの手法では、各目的関数の重み付け係数の定め方は経験や観測結果などに基づることが多く、不確かさを有していた。さらに1度の試行において1つの最適解しか求められないため、複数の解を発見したい場合には何度も試行を繰り返さねばならなかった。

これに対し、多目的最適化問題の解を同時に複数求める多目的最適化手法が存在する。多目的最適化では各目的関数を個別に評価するため、距離と量など異なる単位や尺度を持った目的関数値を扱うことも可能となる。このような多目的最適化により導き出された最適解は「パレート最適解」と呼ばれ、ある目的関数の値を改善しようとする、他の目的関数の値が悪化してしまうような解である。自身よりも勝る解が存在するような劣解に対し、他のどの解よりも劣らないという点からパレート最適解を非劣解と呼ぶこともある。単目的最適化と多目的最適化の比較を図1に示す。

多目的最適解の評価は Pareto Ranking により行っている。これは Fonseca らにより提唱された手法[1]であり、各解において自身より全ての目的関数値において勝る解の個数によりランクを定め、最高ランクのものをパレート最適解として定義する(図2)。これらのパレート最適解を繋いだ曲線がパレート曲線と呼ばれ、この曲線上に最適解が分布している。

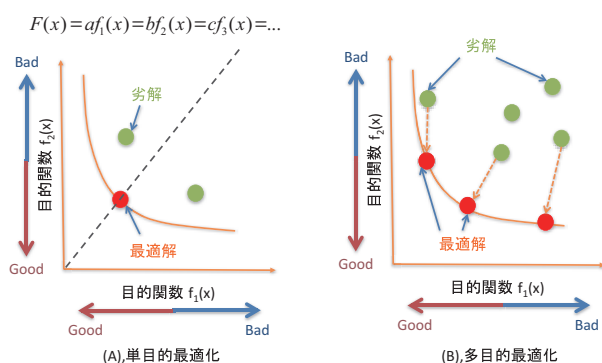


図1 単目的最適化と多目的最適化の比較

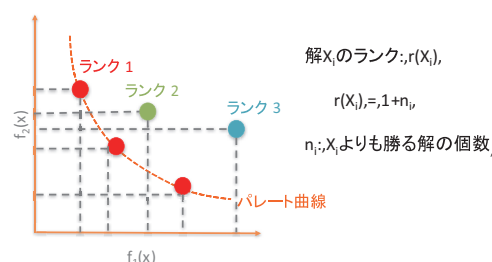


図2 Pareto Ranking

3. 多目的最適化による着陸地点探索手法

これまで、宇宙探査における最適化問題に多目的最適化を用いた例は少なく、適用される対象も軌道設計や構造設計などの分野に留まっていた[2][3]。本研究ではこの手法を着陸地点の選定に用いることで、従来発見されていなかった複数の目的に対し良好な着陸候補地点を見付け出すことを目的としている。

3.1. 着陸範囲の選定

月面探査機の着陸地点を検討するにあたり、まず選定範囲を月の南極点周辺とした。この範囲を選定した理由として、第一に日照条件が挙げられる。月は公転周期と自転周期がほぼ一致しており、そのため中低緯度の範囲においては2週間の昼と2週間の夜が繰り返して到来する。夜の間には日照が得られないため太陽電池を使用することが出来ず、蓄電により電力を賄おうとする場合、100W あたりで 300kg 近い電池が必要となる。一方、月の極域であれば長期間の日照を得られるため、太陽電池の定期的な電力供給が期待できる[4]。

第二の理由として、温度環境が挙げられる。中低緯度の範囲では、昼の間の最低表面温度が 120℃に達し、放熱を行うのがきわめて困難となる。また夜の間は最低表面温度が-200℃まで低下し、これに堪えるだけの保温・断熱機能を有する必要がある。一方で極域における表面温度はほぼ-50±10℃と安定しており、中低緯度の地域に比べ機能維持の面で望ましいと考えられる[4]。

第三の理由として、月の南極周辺には科学的に興味深い地形が多く存在していることが挙げられる。たとえば月の南極に存在するシャクルトンクレーターの底には、年間を通じて太陽光の当たらない永久影が存在し、1990年代にアメリカの月探査機クレメンタインおよびルナ・プロスペクターの行った観測により、氷の存在が示唆されていた[5][6]。その後日本の月周回衛星「かぐや」の地形カメラにより 10m 精度の高解像度データが取得され、クレーターの底表面部に氷は存在しないことが確認されているが、土やレゴリスに混ざっている可能性はなおも残されている。

以上の理由から、本研究では月の南極点を中心とする四方 300km の範囲を探索の対象と定めた。

3.2. 月面データベースの作成

各着陸地点候補の評価において必要となるデータを収集するため、本研究では NTT データ CCS により作成された月面シミュレーションソフトウェアを使用した。本シミュレーションソフトウェアは指定した地点およびその周囲の日照の有無、地上との通信の可否、およびその地点の傾斜角を算出することが出来る。

日照については太陽を 1 点の物体として扱い、Ray Tracing 法により太陽光線と地点との間に遮蔽物が存在しないかどうかをシミュレーションしている。なお、常に太陽高度が低く方位角が全周であるという特徴から、月極域探査機では円筒状の太陽電池パネルを垂直に立てて発電を行うことが予想される。そのため発電量は太陽光の入射角よりも、月の地形に遮られず到達する太陽光の割合に依存する。よって本研究では日照量の大小は区別せず、少しでも日照があれば 1、日照が皆無であれば 0 として扱い、計算時間の短縮を試みている。通信に関しても同様に Ray Tracing 法を用いており、日本の地上局に限らず地球が可視であれば通信可能と定義されている。なお、地上からの高さが 5m である地点の計算を行っている。これは探査機の構造上、太陽電池パネルや通信機器が設置される位置が最大で 5m 前後であるという想定に基づいている。このシミュレーションソフトウェアを用い、月の南極点の四方 300km において 10m 精度で 2019 年 1 月 1 日から 2019 年 12 月 31 日までのデータを 1 日おきに取得した。これらの全情報を月面データベースとしてまとめたものを、以降の地点評価および探索において用いている。

3.3. 制約条件による着陸候補地点の制限

着陸地点には月面着陸機の工学的な仕様により、以下の 2 つの制約条件が存在する。

1. 着陸地点の傾斜角は 15° より小さくなければならない。
2. 着陸地点において連続的に続く夜の長さは 14 日より短くなければならない。

1 の制約条件は、探査機が現実的なリソースで転倒せず着陸可能な傾斜角の目安である。2 の制約条件は、現実的なバッテリーの容量規模を考慮し 14 日を上限とした。ここで 14 日という値は、夜が 14 日間続く月の中低緯度に対し、より夜の期間が短い場所の多い月極域での探査を行う上での利点を活かすことを目的として設定している。本研究では、これら 2 つの制約条件をともに満たす着陸候補地点のみを実行可能解として扱うこととした。

3.2 で述べた月面データベースに対し、以上の 2 制約条件を元に月の南極点の四方 300km の範囲について 10m 単位のグリッドサーチにより着陸候補地点の制限を行ったところ、図 3 に示す通り実行可能解として残ったのは 174193 点であった。当初は四方 300km を 10m 精度で全探索するため 9 億点の候補が存在していたが、制約条件を導入することにより探索点の個数は全探索時の 0.019% まで絞られ、探索の大幅な高速化に寄与することとなった。

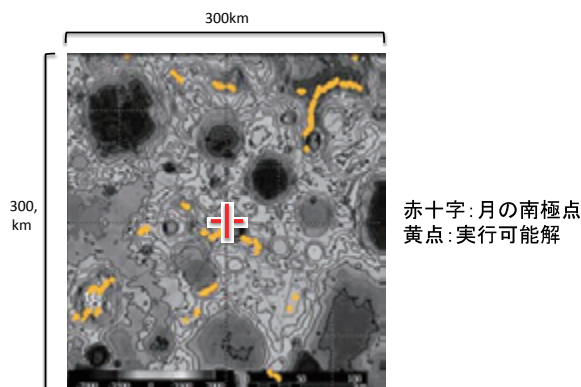


図 3 制約条件により導かれた実行可能解

3.4. 目的関数の設定

本研究において、着陸地点を評価する目的関数として設定したのは以下の4目的である。いずれの目的関数値も小さくなるほど良く、0から1の範囲に収まるよう設定されている。なお、本研究では着陸日を任意に選ぶことが出来ると仮定している。

I. 日照条件の良さ（着陸時期により変動するため時変量）

日照条件の評価においては、日照そのものではなく夜が連続して続く日数を用いている。年間の最大連続夜日数を、制約条件の14日で割った値を目的関数値とする。なおバッテリーの充電は急速に行うことができるため、充電に必要な日照期間ではなくバッテリー容量に影響する日陰期間を目的関数として用いた。

II. 通信条件の良さ（着陸時期により変動するため時変量）

通信条件の評価においては、通信可能かつ日照の存在する日数を用いている。これは通信機器の作動に電力を多く要するため、充電可能な状況下においてのみ使用可能となるためである。年間を通した通信可能かつ日照の存在する日数の累計を365日で割り、それを1から引いた値を目的関数値とする。

III. 傾斜角の小ささ（地点固有の値のため固定量）

傾斜角の評価においては、その地点の傾斜角を制約条件である15°で割った値を目的関数値とする。

IV. 氷の存在確率（地点固有の値のため固定量）

月面における氷の存在確率については、着陸候補地点から半径1km以内に存在する最も近い氷までの3次元距離に氷の深さを掛け合わせたものを目的関数値としている。なお、存在する氷の分布についてはPaigeらがDivinerを用いて観測を行った結果[7]を元としている（図4）。さらに3次元距離に関しては、かぐやにより観測された月の高度データを用いている。

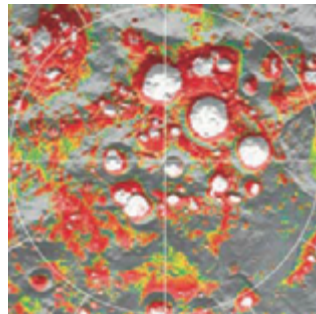


図4 月の南極域に存在すると考えられる氷の分布

以上の4目的に関して、制約条件を満たした全実行可能解について各目的関数値を求め、それらに対しPareto Rankingを用いることで多目的最適解を探索した。設計変数として扱ったのは月面をポーラステレオ投影法により表した図3の南極点を中心として図を分割し、各図の左上の点を(0, 0)、右下の点を(15001, 15001)と定義したデカルト座標系のx座標およびy座標であり、計算環境は以下の表1に示す通りである。南極点を原点と見立てて4分割したそれぞれの範囲を第1象限から第4象限と定義し、12コア全てを用い各象限の計算を並行して行った。各象限において制約条件を満たす地点の目的関数の計算に掛かった実行時間、およびこれが制約条件に縛られない全探索であった場合の予想実行時間を表2に示す。なお、

$$(\text{予想実行時間}) = (\text{実際に掛かった実行時間}) \times (\text{全地点数}) / (\text{実行可能解数})$$

として計算を行っている。表2から分かる通り、何の制約も設けず全探索を行うと計算に5.6年近い期間を要するため現実的ではなく、制約条件による絞り込みが必要不可欠となってくる。

表1 計算環境

CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v2 (2.70GHz)
OS	Fedora 20
メモリ	128GB
コア数	12 cores

表2 実行時間

象限	1	2	3	4
実行可能解数	63395 点	20718 点	76674 点	13406 点
実際の実行時間	12 時間 17 分 18 秒	4 時間 57 分 15 秒	14 時間 52 分 27 秒	3 時間 18 分 40 秒
全探索予想実行時間	約 1816 日	約 2240 日	約 1818 日	約 2308 日

4. 結果および考察

探索の結果、得られた多目的最適な着陸地点候補は 17413 点存在した。各地点の分布は図5に示す通りである。

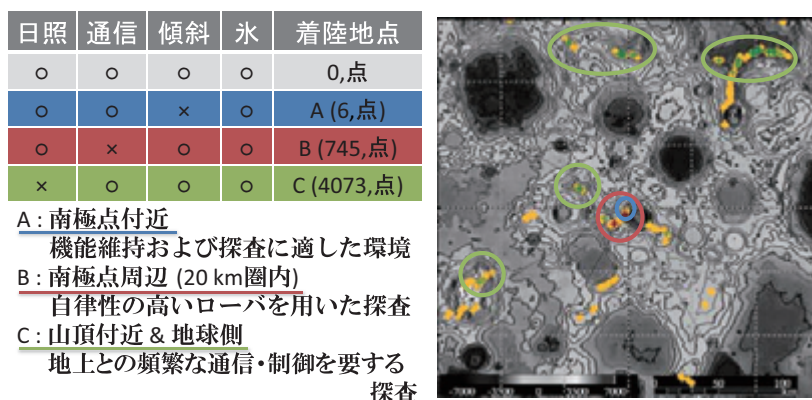


図5 多目的最適な着陸地点候補地点

これらの各地点について、目的関数ごとの傾向分類を行った。なお、以下で述べる目的関数の良好さは、目的関数値が0から0.5までの値を示したものとして定義している。

傾斜角以外の目的関数値が良好である地点は、図5における青で示した点である。発見された地点は南極点付近のみに限定的に存在し非常に数が少ないものの、日照や通信、さらに科学的な観点から有意義な氷の存在が示唆されるため、着陸出来れば探査機の機能維持および探査に非常に適した環境であるといえる。

次に通信以外の目的関数値が良好である地点は、図5における赤で示した点である。南極点を中心とする半径20km圏内に分布しているのは、南極点周辺に大きな山などの障害物があまり存在せず、一方でクレーターなど永久影の存在しやすい条件が揃っていたためであると考えられる。通信以外の目的関数が良好であるため、地上からの頻繁なコマンド送信を必要としない自律性の高いローバを用いた探査を行うようなミッションの着陸地点に適しているといえる。

最後に日照以外の目的関数値が良好である地点は、図5における緑で示した点である。小高い丘や山頂付近に点在しており、とりわけ図5の上部に多く分布しているのが見受けられる。これは図5の上部が地球側に面しており、通信のしやすい環境であるためだと考えられる。通信条件の良好さから、地上からの頻繁な制御や画像などのデータを大量に送る必要性のあるミッションなどに適した地点であるといえる。

5. まとめ

本研究では、日照、通信、傾斜角、氷の存在確率という4目的に対し多目的最適であるような月面探査機の着陸地点の選定を行い、その結果17413点の多目的最適な着陸候補地点が導き出された。さらにこれらについて目的関数ごとの傾向分類をすることにより、重視する目的ごとに選ぶべき着陸地点、またミッションの特徴についても有用な知見を得ることが出来た。

今後は制約条件により排除されている地点についても検討を加えたいと考えている。たとえば1つの制約条件をわずかに満たさないものの、それに関連しない目的関数については良好な値を示すような地点が存在する場合、これを見出すには制約条件を廃して全探索をするほかない。しかしながら9億点すべてについて各目的関数を評価していくのは計算負荷や時間の面からして現実的とは言えない。そのため探索に進化計算の手法を取り入れることで、計算コストを低減しなおかつ制約条件の境界に存在するような地点についても評価を行えるよう改良していきたいと考えている。

参考文献

- [1] C.Fonseca, P.Fleming, Genetic Algorithms for Multi-objective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, pp. 416-423, 1993.
- [2] 大山聖, 多目的設計探査と宇宙工学への利用, システム制御情報学会誌, 第55巻, 第9号, pp.374-381, 2011.
- [3] 立川智章, 野々村拓, 大山聖, 藤井孝蔵, 長田裕樹, 山本誠, ロケットの射点設計に向けた空力音響最適化問題の多目的設計探査, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山県岡山市, 2013 年 9 月.
- [4] 橋本樹明, 田中智, 星野健, 大嶽久志, 大槻真嗣, 月着陸・探査ミッション (SELENE-2) の現状について, 第 11 回宇宙科学シンポジウム, S3-05, 神奈川県相模原市, 2011 年 1 月.
- [5] S.Nolette, C.L.Lichtenberg, P.Spudis, R.Bonner, W.Ort, E.Malaret, M.Robinson, E.M.Shoemaker, The Clementine Bistatic Radar Experiment, Science, Vol.274, No.5292, pp.1495-1498, 1996.
- [6] Alan B. Binder, Lunar Prospector: Overview, Science, Vol.281, No.5382, pp.1475-1476, 1998.
- [7] D.A.Paige, M.A.Siegler, J.A.Zhang, P.O.Hayne, E.J.Foote, K.A.Bennett, A.R.Vasavada, B.T.Greenhagen, J.T.Schofield, D.J.McCleese, M.C.Foote, E.DeJong, B.G.Bills, W.Hartford, B.C.Murray, C.C.Allen, K.Snook, L.A.Soderblom, S.Calcutt, F.W.Taylor, N.E.Bowles, J.L.Bandfield, R.Elphic, R.Ghent, T.D.Glotch, M.B.Wyatt, P.G.Lucey, Diviner Lunar Radiometer Observations of Cold Traps in the Moon's South Polar Region, Science, Vol.330, pp.479-482, 2010.