

太陽光の入射角度が小さい月面基地での太陽光パネル設置箇所の選定と 斜面安定問題に関する研究

金沢工業大学 学生会員 ○中島 あおい
金沢工業大学 正会員 高原 利幸

1. はじめに

NASA の月面基地建設の予定¹⁾に呼応してか日本でも国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（以下「JAXA」という）が主体となり、大学・民間有識者を交えて月面農場の検討がなされている²⁾。

月面で活動するためのエネルギーは David Petri ら³⁾の想定によると、最終的には原子力発電が必要になるということであるが、初期段階においては太陽光パネルによる発電も重要であると考えられる。しかし、月の昼夜の周期は 29.5 日で、赤道付近では半月ほど日が当たらないため、現在南極付近での基地建設が検討されている。

本研究では、月の極付近では太陽高度が低いことを考慮し、太陽光パネル数の算定、適地の選定および地盤工学的安定性についての検討を行った。

2. 日照率に基づく Shackleton クレーター付近での候補領域の選定

図 1 は JAXA 提供データより作成した月の南極域における 2030 年 3 月の平均日照率である。図 1(a)を月の昼間、図 1(b)を月の夜間として、これらを比較すると、右下と左上で日照率が高いところが入れ替わっており、それぞれ太陽光パネルを分散して設置することが望ましいといえる。

2-1. 必要電力量による太陽光パネル数の算定

月面基地建設に必要なエネルギーの算定はなされていないようであるが、生命維持に必要な電力は粟生ら⁴⁾によると、一人当たり 20 kW, Kaczmarzyk, M ら⁵⁾によると、一人当たり 5 kW 程度と推定されている。これらを 24 時間に必要な電力量に換算すると 120~480 kWh/日である。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)によると、式(1)より太陽光モジュールの必要枚数 n_M を求めることができる⁶⁾。

$$n_M = \frac{E_P}{P_M \times I_{\beta Y} \times t \times K} \quad (\text{枚}) \cdots (1)$$

E_P : 発電電力量 (kWh), $I_{\beta Y}$: 斜面日射量 (kW)

P_M : 太陽光モジュールの公称最大出力 (kW), t : 日照時間 (h)

K : 総合設計係数 (通常は 0.7 程度)

月の南極域では太陽高度が低く、太陽光パネルを地面に対して垂直に設置する場合斜面日射量はほぼ定数とみなせるため、 $I_{\beta Y}=1.367\text{kW}$ とする。ここで、変数は日照時間 t のみとなる。 t を変化させたときの NASA が提案する図 2 の RSA⁷⁾ 必要台数を表 1 に示す。

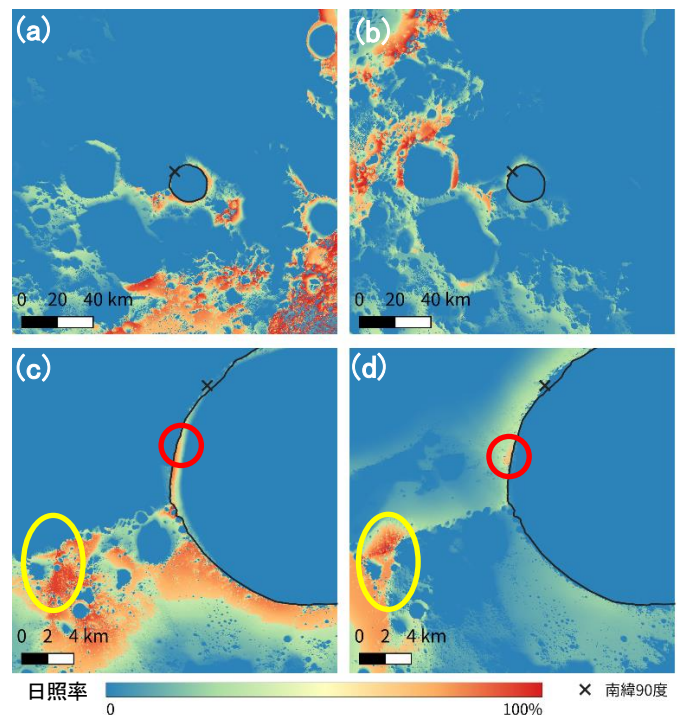


図 1(a~d) 月の南極の昼夜日照率平均

(a) 2030 年 3 月前半の日照率の平均値, (b) 2030 年 3 月後半の日照率の平均値, (c) (a) を拡大, (d) (b) を拡大

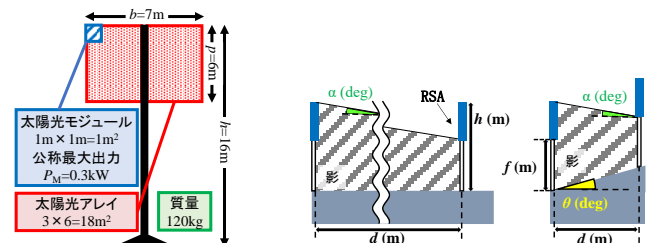


図 2 移動可能太陽光アレイ (RSA) の概形

図 3 RSA の平地設置と斜面設置

表 1 日照時間ごとの RSA 必要台数 (一人当たり 24h)

日照時間 t (h)	1	2	3	4	5	6	7	8-9	10-11	12-15	16-23	24
RSA 必要台数 n_{RSA} (基)	47	24	16	12	10	8	7	6	5	4	3	2

2-2. 設置面角度による太陽光パネル設置面積の想定

図3に示すように、低太陽高度でRSAを平地に設置すると、影の面積が大きくなり、広い面積が必要になる。斜面に設置すると、斜面角度 θ によって有効幅 d は異なり、1基設置するために必要な面積 S は式(2)で表すことができる。

$$S = \left(\frac{h-f}{\tan\theta + \tan\alpha} \right) \times \left(\frac{h-f}{\tan\alpha} \right) (\text{m}^2) \dots (2)$$

h : 太陽光アレイ高さ (m), f : 太陽光アレイ脚の高さ (m)

α : 太陽高度 (deg), θ : 斜面角度 (deg)

式(2)を用いてRSA1基あたりに必要な面積を斜面角度ごとに算定した結果を図4に示す。

2-3. RSA設置面積の概算

図1(c), (d)の赤丸, 黄丸で囲んだ月の昼夜でそれぞれRSAの設置可能性が高い場所は1日の平均日照時間が $t=16.8\sim 20.4$ h程度であった。表1では $t=16.8\sim 20.4$ hのとき一人あたり3基RSAが必要であることから、5人滞在を想定した場合はRSAが15基必要になる。月の南極に存在するShackletonクレーターの外壁に設置する場合は10~20度程度の傾斜があるため、図4より1基あたりに必要な面積はおよそ1100 m^2 である。したがって、RSAを15基設置する場合は16,500 m^2 程面積が必要となる。図4で斜面角度0degのときRSA1基に必要な面積は2800 m^2 であるから、平地に15基設置する場合は42,000 m^2 必要となる。図1(c), (d)の赤丸, 黄丸で囲んだ範囲ではこれらの面積は十分確保できそうであったが、斜面に設置したほうが大幅に必要な面積を減らせることがわかった。

3. 斜面安定に対する検討

月では大規模な斜面崩壊の痕跡が見つかっており⁸⁾, RSA設置斜面の安定検討も必要である。本研究では過去に地すべりが発生した場所のDEMをJAXAのかぐやデータアーカイブ⁹⁾から入手し、すべり面を想定して、震度法(Janbu法)で斜面崩壊した際の外力を算定した。

図5(a)にShackletonクレーター外壁, 図5(b)にCassiniAクレーターの内壁の断面を示す。表2に示すように土質パラメータはアポロ計画で持ち帰られた深さ60cmまでのレゴリスの特性試験結果¹⁰⁾をもとにパラメータを2種類決定した。それぞれのパラメータで計算した結果を表3に示す。月面地すべりに対する斜面安定計算を行ったところ、外力がはたらいっていないときの安全率は2以上で、隕石落下や月震が発生しない限り崩壊しないことがわかった。

4. おわりに

今回日照率として使用したデータは2030年3月のデータのみだが、実際には月毎に日照が異なるため、今後の研究ではより長い期間の日照率を考えていく。また、大規模な地すべりだけでなく、小規模な地すべりに対しても同様の解析的研究を行う予定である。

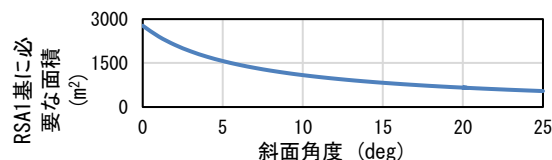


図4 斜面角度ごとの必要面積

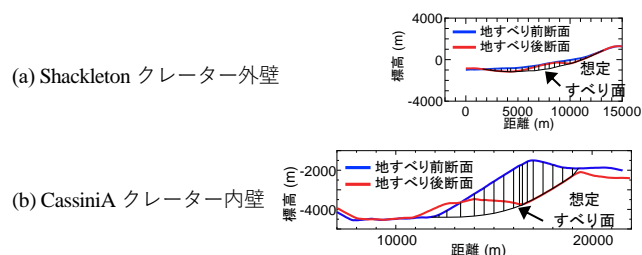


図5 地すべり断面

表2 斜面安定計算に使用した値

番号	密度 d (cm^3/g)	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg)
①	1.74	0.52	42
②	1.5	3.1	55

表3 斜面安定計算結果

場所	番号	安全率 F_s	安全率1のときの水平震度係数 k
Shackleton クレーター外壁	①	6.1	0.59
	②	9.3	1.07
CassiniA クレーター内壁	①	2.7	0.46
	②	4.1	0.76

参考文献

- 1) NASA, Artemis, <https://www.nasa.gov/specials/artemis/>
- 2) JAXA, 月面農場ワーキンググループ, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 2019-06-19, p.1-101
- 3) David A. Petri, Robert L. Cataldo, and John M. Bozek, Power System Requirements and Definition For Lunar and Mars Outposts- A Review of the Space Exploration Initiative's NASA 90 Day Study, 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2006-06, <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2006-4104>
- 4) 粟生啓之ら, 月面基地基本計画に関する研究(その1), 国土文化研究所年次報告 = Annual report of RESCO / 建設技術研究所国土文化研究所編 17 87-96, 2019-06
- 5) Kaczmarzyk, M.; Starakiewicz, A.; Wa' sniowski, A. Internal Heat Gains in a Lunar Base—A Contemporary Case Study. Energies, 2020, 13, 3213. [CrossRef], <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200001622/downloads/20200001622.pdf>
- 6) NEDO, NEDO 日射量データベースの解説書 WEB Ver3.0,2 021-04, <https://www.nedo.go.jp/content/100930737.pdf>
- 7) NASA, Relocatable 10 kW Solar Array for Lunar South Pole Mission, 2021-03, <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210011743/downloads/NASA-TM-20210011743.pdf>
- 8) Zhiyong Xiao, Zuoxun Zeng, Ning Ding, Jamie Molaro, Mass wasting features on the Moon – how active is the lunar surface?, Earth and Planetary Science Letters, Volume 376, 15 August 2013, Pages 1-11
- 9) JAXA, かぐや(SELENE)データアーカイブ, <https://darts.isas.jaxa.jp/planet/planet/pdop/selene/index.html>
- 10) 松島亘志, 小林泰三, 宇宙探査と地盤工学, 第4章レゴリスの土質力学, 地盤工学会誌, 69(6), 2021, https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~tmatsu/newpage/articles/202106_soil_mechanics_of_regolith.pdf