

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

月の縦孔内部の光環境の推定

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole

池谷 広大, 春山 純一, 三宅 互

IKEYA Kodai, HARUYAMA Junichi and MIYAKE Wataru

2022年12月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

概要	1
1. 研究背景	2
2. 研究手法	2
3. 結果	4
3.1. 太陽高度 $\theta = 45^\circ$ の場合	4
3.2. 太陽高度 $\theta = 90^\circ$ の場合	5
4. 考察	11
4.1. 数値シミュレーションの妥当性	11
4.2. 影の影響	11
4.3. 反射率と反射パターン	12
4.4. 光学カメラのパラメータの検討	13
5. まとめ	14
参考文献	15

月の縦孔内部の光環境の推定

池谷 広大^{*1}, 春山 純一^{*2}, 三宅 亙^{*1}

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole

IKEYA Kodai^{*1}, HARUYAMA Junichi^{*2}, MIYAKE Wataru^{*1}

ABSTRACT

UZUME mission aims to directly enter a lunar vertical hole (currently Mare Tranquillitatis Hole: MTH) and explore the hole and a subsurface cavern horizontally expanding from the bottom of the hole. The mission is planned to obtain the information of surface structure for the MTH and the associating cavern by taking images with cameras. As a preparation of the mission, we preliminary estimate the illuminated condition of the inside of the MTH and its associating cavern by numerical simulations. The results show that, at about the noon time when the Sun is located on the zenith over the hole, the ceiling and the wall of the cavern at a depth of 20 m from the edge of the bottom of the hole have illuminated conditions with totally at most ten to several tens percent of the solar irradiance by reflected light from the whole surface of the hole's floor when we assume 100 % albedo.

Keywords: UZUME, Moon, Lunar Hole, light environment.

概 要

UZUME 計画は、静かの海の縦孔 (Mare Tranquillitatis Hole: MTH) に直接入り込み、縦孔と縦孔の底から水平に広がる地下空洞を探索することを目的としたミッションである。このミッションでは、カメラ撮影をすることで縦孔や地下空洞の構造や表面の情報を得ようとしている。この研究は UZUME 搭載カメラの基礎研究として、縦孔内の光環境を推定することを目的とし、月の縦孔をモデル化し、数値シミュレーションによって縦孔内の放射照度を求めた。計算結果より、太陽が縦孔の天頂に位置する正午頃、縦孔の底の端から深さ 20 m の空洞の天井と壁は、縦孔の底の反射率を 100 % とすると、縦孔の底全体からの反射光により、最大で太陽の放射照度の数十%程度の放射照度で照らされていることがわかった。

^{*} 2022 年 11 月 15 日受付 (Received November 15, 2022)

^{*1} 東海大学大学院 工学研究科 機械工学専攻
(Course of Mechanical Engineering, School of Engineering, Tokai University)

^{*2} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
(Department of Solar System Science, Institute of Space and Astronautical Science)

1. 研究背景

2009年に月周回衛星 SELENE「かぐや」の地形カメラで観測された画像データから、縦孔が発見された¹⁾。そして月周回衛星 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) の斜め観測によってその縦孔下に水平空間が広がっていることが確認された²⁾。また、その縦孔は、隕石衝突などにより溶岩チューブの上に開いたとされ、縦孔下に溶岩チューブが存在すると考えられている³⁾。溶岩チューブは、たとえば火口から噴出した溶岩が地面の低い方に流れ広がり、溶岩の表面と地面に接する低部が早く冷え固まり、流動する内部のみが抜け出して形成される。月火星には、溶岩チューブのような火成活動によって生じた地下空洞が存在すると考えられ、形成の要因から考えると、こうした地下空洞は、月火星以外にも、水星や金星にも存在する可能性がある⁴⁾。

このような月惑星の縦孔・地下空洞に対して、直接探査を試みる UZUME 計画が進められている^{e.g.4),5),6)}。UZUME 計画の最初の探査は、月の縦孔の底や壁面の構造を直接観測する計画であり、実現された際には、縦孔の形成要因や月の火山活動史を解明する上で重要な情報、基地建設のための情報が得られることが期待されている^{4),5)}。月の縦孔の底や壁面、地下空洞の構造を把握するために光学カメラによる撮影が検討されている。探査用カメラは撮影する場の光学環境を基に開発されるが、縦孔内部の光環境は詳しくは明らかになっていない。そこで、本研究では、縦孔内部の光環境を推定することを目的とする。月の縦孔をモデル化し、数値シミュレーションにより、縦孔内の放射照度、放射輝度を求める。

2. 研究手法

本研究では月の縦孔をモデル化し、数値シミュレーションにより、縦孔内の放射照度、放射輝度を求める。

本研究では、図 1 のように縦孔の壁と地下空間を円筒形のモデルとする。縦孔の半径を r [m]、縦孔の壁の高さを h_1 [m]、空洞高さを h_2 [m] とする。縦孔底の横方向に広がる地下空洞に原点からの距離 ar [m] に半円筒状の壁が存在していると仮定する。太陽の方向を x 軸正の方向とし、水平面を xy 平面、鉛直方向を z 軸正の方向、 z 軸方向の x 軸からの回転角を ϕ とする。また方位は仮に y 軸正方向を北、 x 軸正方向を東とする。太陽光は平行光と仮定し、太陽高度 θ の角度で縦孔に入射するとする。入射した太陽光は縦孔の壁面または底に入射し反射する。このときの反射パターンは均等拡散反射 (ランバート反射) を仮定する。このときの反射光によって縦孔の底や壁、地下空洞の壁や天井の面に対して単位時間、単位面積あたりにどの程度のエネルギーが入射するか、つまり反射光による放射照度を計算する。太陽光の放射照度を J [W/m^2]、縦孔の壁や底の反射率を R とする。本研究における「反射率」の定義は、反射面における入射光の単位時間あたりの総エネルギーに対する反射光の単位時間あたりの総エネルギーであり、「Bond albedo」として広く用いられる量に相当する (参考: Li et al.(2015)⁷⁾ Table 1)。

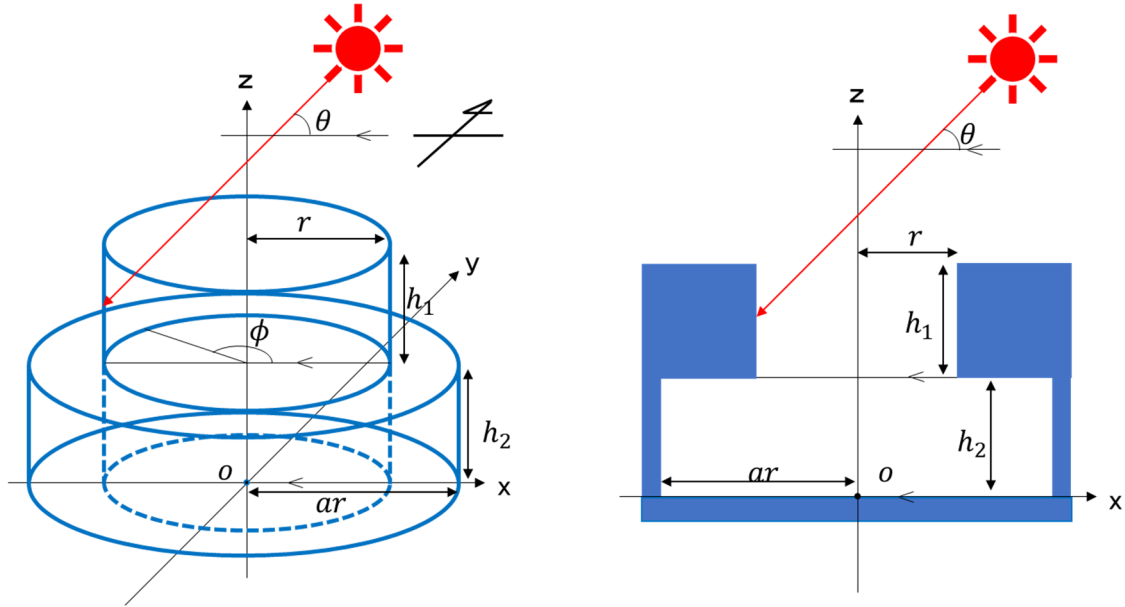


図1 モデル化した縦孔の概要. 半径を r [m], 縦孔の壁の高さを h_1 [m], 空洞高さを h_2 [m] とする. 高さ h_2 [m] の位置に高さ h_1 [m] の高さの円筒状の壁が存在し, その下には半径 ar [m] の円筒状の空洞が広がっていると仮定する. この縦孔の x 軸方向より太陽高度 θ で太陽光が平行光として入射している. 左図は xyz 座標, 右図は左図の xz 平面 ($y = 0$ の断面) でそれぞれ表現している. また方位は y 軸正方向を北, x 軸正方向を東とする.

UZUME 計画で最初の探査が検討されている静かの海の縦孔は, LRO の斜め観測により, 直径約 86~100 m, 深さ約 107 m, 縦孔の壁の厚さ約 47 m と推定され, 東西方向に縦孔の縁から約 20 m の奥行きがあることがわかっている²⁾. 本研究の計算では, 初期解析として, $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$ の形状を仮定し, 反射率 $R = 1$ とする.

数値シミュレーションでは, モデル化した縦孔の各面を微小面 (セル) に分割し, 各微小面に入射する放射照度を計算する. 本研究においては, 縦孔のある面に平行光と仮定する太陽光が入射し, その面が均等拡散反射して反射した光を追跡し計算を行う.

平行光と仮定した太陽光が入射する場合, その微小面の放射照度 E_s [W/m^2] は, 微小面の法線ベクトルを \mathbf{n} , 太陽入射ベクトルを \mathbf{i} とすると,

$$E_s = J \times \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{i}|} \quad (1)$$

と表すことができる.

放射照度 E [W/m^2] で照らされる面が単位時間, 単位面積, 立体角あたりに放出するエネルギー, つまり放射輝度 L [$\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2$] は, 均等拡散反射の場合, その面を観測する方向によらず一定であるため,

$$L = \frac{R}{\pi} E \quad (2)$$

と表す. ここで R はその面の反射率, π は円周率を示す.

均等拡散反射する微小面 dA [m^2] から, ある微小面 dS [m^2] に到達するとき, その微小

面 dS の放射照度 $E_{ds}[\text{W}/\text{m}^2]$ は、微小面 dA の放射輝度 $L_{dA}[\text{W}/\text{sr}/\text{m}^2]$ とすると

$$E_{ds} = \frac{L_{dA}dA}{l^2} \times \frac{\mathbf{n}_A \cdot \mathbf{k}}{|\mathbf{n}_A||\mathbf{k}|} \times \frac{\mathbf{n}_S \cdot -\mathbf{k}}{|\mathbf{n}_S||-\mathbf{k}|} = \frac{L_{dA}dA \cos \Sigma \cos \Omega}{l^2} \quad (3)$$

と表すことができる。ここで微小面 dA と dS の法線ベクトルを $\mathbf{n}_A, \mathbf{n}_S$ 、微小面 dA [m^2]から微小面 dS [m^2]に向かう単位ベクトルを \mathbf{k} とし、 \mathbf{n}_A と \mathbf{k} のなす角を Σ 、 \mathbf{n}_S と $-\mathbf{k}$ のなす角を Ω としている。また微小面 dA と dS の距離を l [m]としている。式(3)を用いて、すべての反射面に対しての微小面 dS の受ける放射照度を計算し、足し合わせることで微小面 dS の放射照度を求めることができる。この計算を調べたい任意の反射面、受光面に対して行うことで縦孔内部の放射照度、放射輝度を求めることができる。

本研究では、太陽高度 $\theta=45^\circ$ の場合と太陽高度 $\theta=90^\circ$ の場合の2つ条件について議論する。太陽高度 $\theta=45^\circ$ の場合は、縦孔の半円筒状の壁に太陽光が入射し、その壁からの反射光によって縦孔の底や対岸の壁が照らされる場合を考える。太陽高度 $\theta=90^\circ$ の場合は、縦孔の底が太陽光で直接照らされていて、その縦孔の底からの反射光によって縦孔底に広がる空洞部分が照らされる場合を考えられる。

3. 結果

3.1. 太陽高度 $\theta=45^\circ$ の場合

太陽高度 $\theta=45^\circ$ で、 x 軸負の方向の半円筒部分の縦孔の壁(西側の壁)に太陽光が入射する場合を考える。このとき影の部分にも太陽光が入射しているとみなしている。影の影響については4.2.節で議論する。

始めに、解析解と数値シミュレーションの比較を示す。縦孔の底の中心(原点 o)微小面の反射光による放射照度 $E_o[\text{W}/\text{m}^2]$ を考える。西側の壁におけるある高さ z とある角度 ϕ における壁の面積 $dA = rdz d\phi[\text{m}^2]$ の微小面からの反射光による原点 o の微小面の放射照度 $E_{dA \rightarrow o}$ は式(1)~(3)を用いて

$$\begin{aligned} E_{dA \rightarrow o} &= \frac{L_{dA}dA \cos \Sigma \cos \Omega}{l^2} = \frac{R}{\pi} E_s \times \frac{dA \cos \Sigma \cos \Omega}{l^2} = \frac{JR}{\pi} \times \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{n}||\mathbf{i}|} \times \frac{dA \cos \Sigma \cos \Omega}{l^2} \\ &= \frac{JR}{\pi} \cos \theta (-\cos \phi) \frac{\cos \Sigma \cos \Omega}{l^2} dA = \frac{JR}{\pi} \cos \theta (-\cos \phi) \frac{zr}{(r^2 + z^2)^2} rdz d\phi \end{aligned} \quad (4)$$

と表すことができる。太陽光の入射する半円筒部分の反射光による原点 o の放射照度 E_o は、式(4)を z 方向に縦孔の壁の高さ($h_2 \rightarrow h_1 + h_2$)、 ϕ 方向に縦孔の壁の半分($\pi/2 \rightarrow 3\pi/2$)の範囲でそれぞれ積分すると

$$\begin{aligned} E_o &= \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_{h_2}^{h_1+h_2} \frac{JR}{\pi} \cos \theta (-\cos \phi) \frac{zr}{(r^2 + z^2)^2} rdz d\phi \\ E_o &= \frac{JR}{\pi} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{h_2}{r}\right)^2} - \frac{1}{1 + \left(\frac{h_1}{r} + \frac{h_2}{r}\right)^2} \right] \cos \theta \end{aligned} \quad (5)$$

と求めることができる。 JR/π は定数であるため、式(5)より、原点 o の放射照度は太陽高度 θ 、と縦孔の半径 r に対する縦孔の壁の高さ h_1 と空洞高さ h_2 の比の関数になっていることがわかる。ここで、 $r:h_1:h_2=1:1:1[m]$ とし、反射率 $R=1$ 、太陽高度 $\theta=45^\circ$ の値を代入したとき、原点 o の放射照度 E_o と太陽光の放射照度 J の比 (E_o/J) は、有効数字を3桁までとると、 $E_o/J=6.75 \times 10^{-2}$ であった。この値を解析解とする。

上記の解析解を求めた際と同様の条件で作成した数値シミュレーションの結果の E_o/J の数値解の値と解析解の差異と相対誤差を表1に示す。数値シミュレーションにおいては縦孔の壁を微小面 $rdz d\phi$ に分割し、 dz 、 $d\phi$ の値をそれぞれ変えて計算を行った。表1よりセルサイズより細かくなるにつれて、解析解の結果に近づくことがわかる。この誤差は数値シミュレーションの計算において円筒を微小面に分割して計算しているために現れる誤差であると考えられる。本研究においては、計算時間を考慮して、セルのサイズを、xyz方向は縦孔の半径 r に対して100分割、 ϕ 方向は 1° ごとに分割して計算を行うこととする。

表1 原点 o の反射光による放射照度 E_o と太陽光の放射照度 J の比の数値解

セルサイズ	E_o/J	解析解との差異	解析解との相対誤差
$dz = 0.1 \text{ m}, d\phi = 10^\circ$	7.48×10^{-2}	0.73×10^{-2}	10.8 %
$dz = 0.01 \text{ m}, d\phi = 1^\circ$	6.83×10^{-2}	0.08×10^{-2}	1.19 %
$dz = 0.001 \text{ m}, d\phi = 0.1^\circ$	6.76×10^{-2}	0.01×10^{-2}	0.15 %

次に数値シミュレーションの結果を示す。縦孔の形状は $r:h_1:h_2=1:1:1$ とし、反射率 $R=1$ とした場合におけるシミュレーションを拡張し、反射光が入射する面に微小面のセルを設定し、縦孔や地下空洞の底面、縦孔の壁面についてそれぞれ計算する。同様の条件で縦孔の底面、太陽光の当たる壁の対岸の壁 (x 軸正方向の壁、東側の壁)、太陽光の当たる壁 (x 軸負方向の、西側の壁) の各微小面における放射照度 E の太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) を図2~4に示す。図2より縦孔の底で最も E/J の値が高いところは、 x 軸上の $x/r = -0.20$ の位置で、7.06%であった。図3より縦孔の壁の太陽の照らす側と反対側の壁面の最大値は10.9%で壁面の中心(図3の中心)に位置する。一方、最小値は8.04%であり、 $\phi = \pm 90^\circ$ の縦孔の壁の上下端(図の四隅)に位置する。図4より太陽に照らされている面の E/J の値において、最大値は9.93%で、 $z/r = 0.50, \phi = \pm 90^\circ$ の位置に、最小値は4.34%で $z/r = 0, 1.0, \phi = 180^\circ$ に位置する。

3.2. 太陽高度 $\theta=90^\circ$ の場合

太陽高度 $\theta=90^\circ$ 、反射率 $R=1$ の条件における縦孔の底面に太陽光が入射する場合の数値シミュレーションの結果を示す。縦孔の形状についてのパラメータは、 $r:h_1:h_2=1:1:1$ としている。

まず、縦孔の底面による1回反射の効果を考える。図2に縦孔底の横方向に広がる地下

空洞に半径 ar 、高さ $h_2 (= r)$ の半円筒状の壁が存在していると仮定した場合の計算結果を示す。図 5 に縦孔底に直達光が入射し、その反射光による空洞天井の放射照度 E の太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) を示す。

図 5 より縦孔底に直達光が到達する場合には、 E/J の値は原点からの距離による影響が大きいことがわかる。各 a の値の際の最も明るくなっているところは、地下空洞の奥に行くほど高くなっていることがわかる。 $a = 1.0$ のとき、高さ $z/r = 0.01$ の微小面で E/J の値が約 50% で最大値である。一方 $a = 2.0$ のときは高さ $z/r = 0.01$ の微小面が 1% 以下であるのに対して、高さ $z/r = h_2/r$ の最大値で 8.64% である。

図 6 より地下空洞の天井については、 $a = 1.0$ の縦孔壁に最も近い部分が最大で 28.0%、 $a = 2.0$ の部分では 5.37% であった。

次に図 6 で示した空洞の天井に到達した光がさらに反射し、その反射光が空洞の底を照らす場合を考える。図 7 に空洞天井の反射光による空洞底の放射照度 E の太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) を示す。図 4 より地下空洞の底については、原点からの距離が $1.15 \times r$ の位置における E/J 値が最大で 7.14%、原点からの距離が $4.0 \times r$ の位置の値が最小で 1.28% であった。

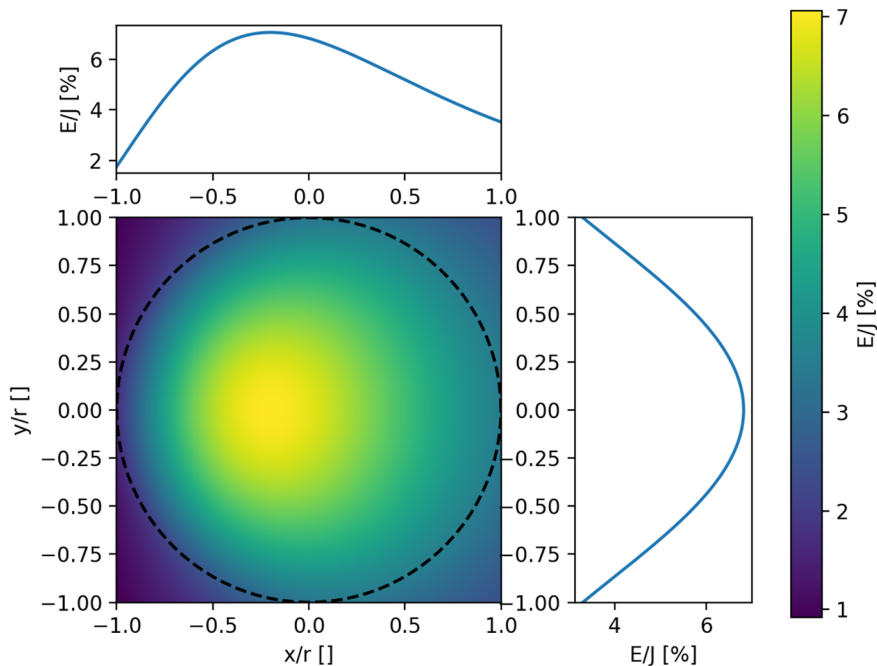


図 2 縦孔壁の反射光で照らされる空洞底の相対放射照度。相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す。 $(r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1)$ 、反射率 $R = 1$ 、太陽高度 $\theta = 45^\circ$ 、太陽光の放射照度 J が 100% の場合)。原点から r までの範囲の結果である。左下の図の軸はそれぞれ、半径 r に対する x 軸、 y 軸の座標を示している。左上図と右図はそれぞれ x 軸、 y 軸上の微小面の E/J の値を示している。黒点線は縦孔の壁の位置を示している。縦孔壁からの反射光の E/J の値のみを示している。

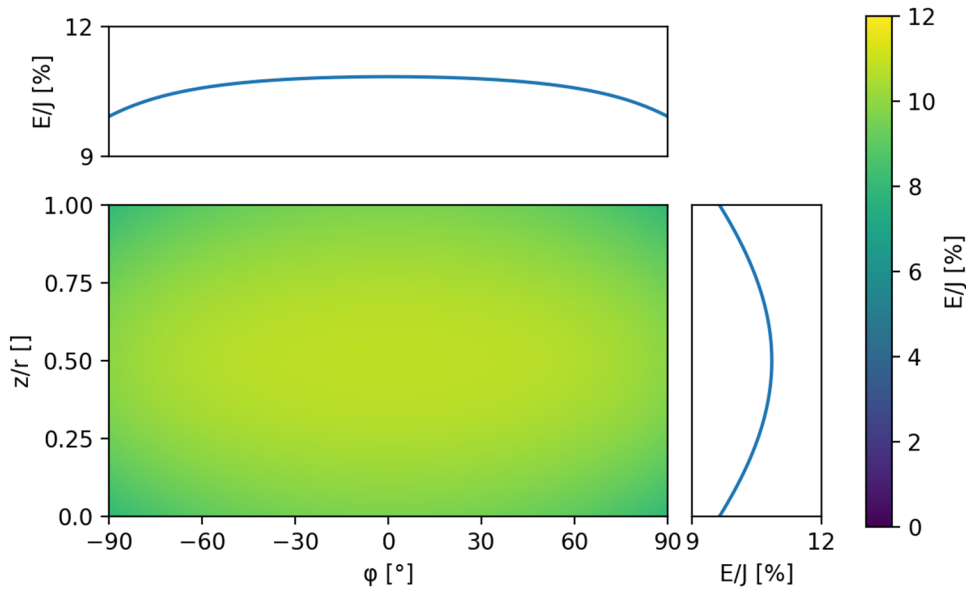


図3 縦孔壁の反射光で照らされる縦孔の東側の壁の相対放射照度. 相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す. $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 45^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100% の場合. 左下の図において, 横軸は ϕ 方向の角度, 縦軸は半径 r に対する z 軸方向の高さを示している. 左上図と右図はそれぞれ $z = 0.50$ の軸, $\phi = 0^\circ$]軸上の微小面の E/J の値を示している. 縦孔壁からの反射光の E/J の値のみを示している.

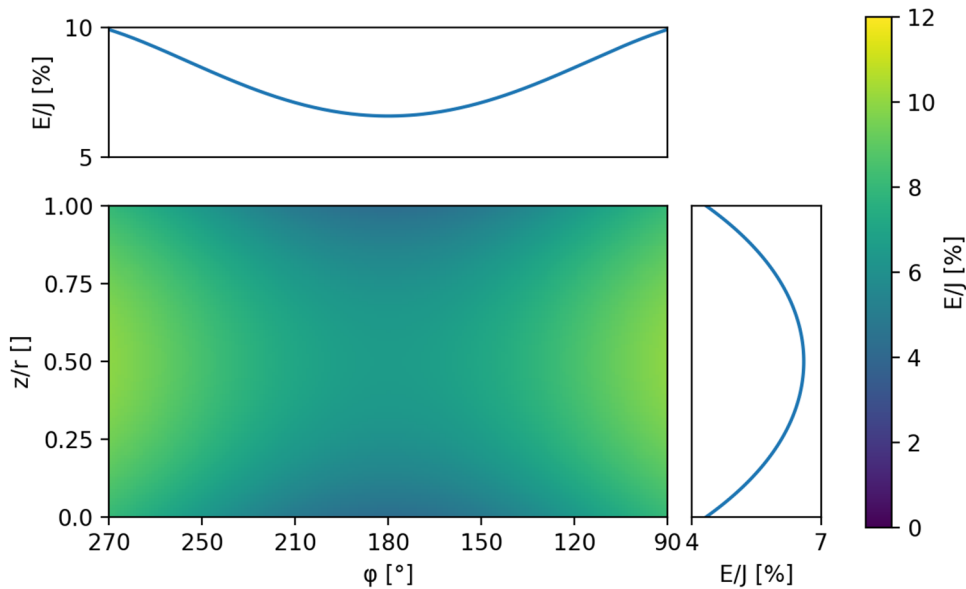


図4 縦孔壁の反射光で照らされる西側の壁の相対放射照度. 相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す. $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 45^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100% の場合. 左下の図において, 横軸は ϕ 方向の角度, 縦軸は半径 r に対する z 軸方向の高さを示している. 左上図と右図はそれぞれ $z = 0.50$ の軸, $\phi = 180^\circ$]軸上の微小面の E/J の値を示している. 縦孔壁からの反射光の E/J の値のみを示している.

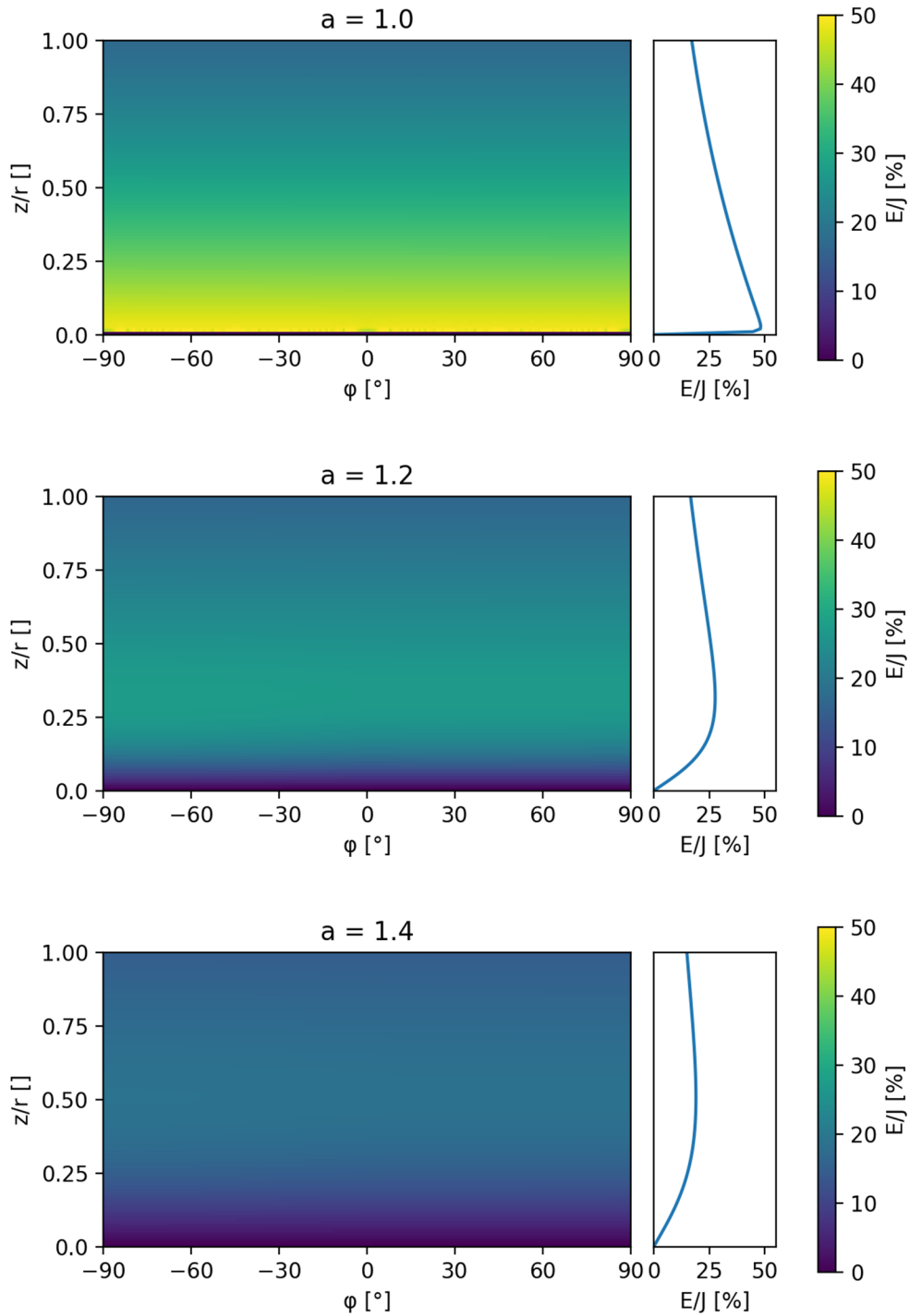


図 5-a 縦孔底の反射光で照らされる縦孔の空洞の壁の相対放射照度。相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す。 $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 90^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100 % の場合。左図の横軸は ϕ [°], 縦軸は半径 r に対する縦孔底からの z 軸方向の高さ。右図は z 軸方向の高さに対する E/J の値を示している。各グラフは原点から ar の位置に高さ h_2 の半円筒状の壁が存在していると仮定している。 ($a = 1.0, 1.2, 1.4$ の場合)

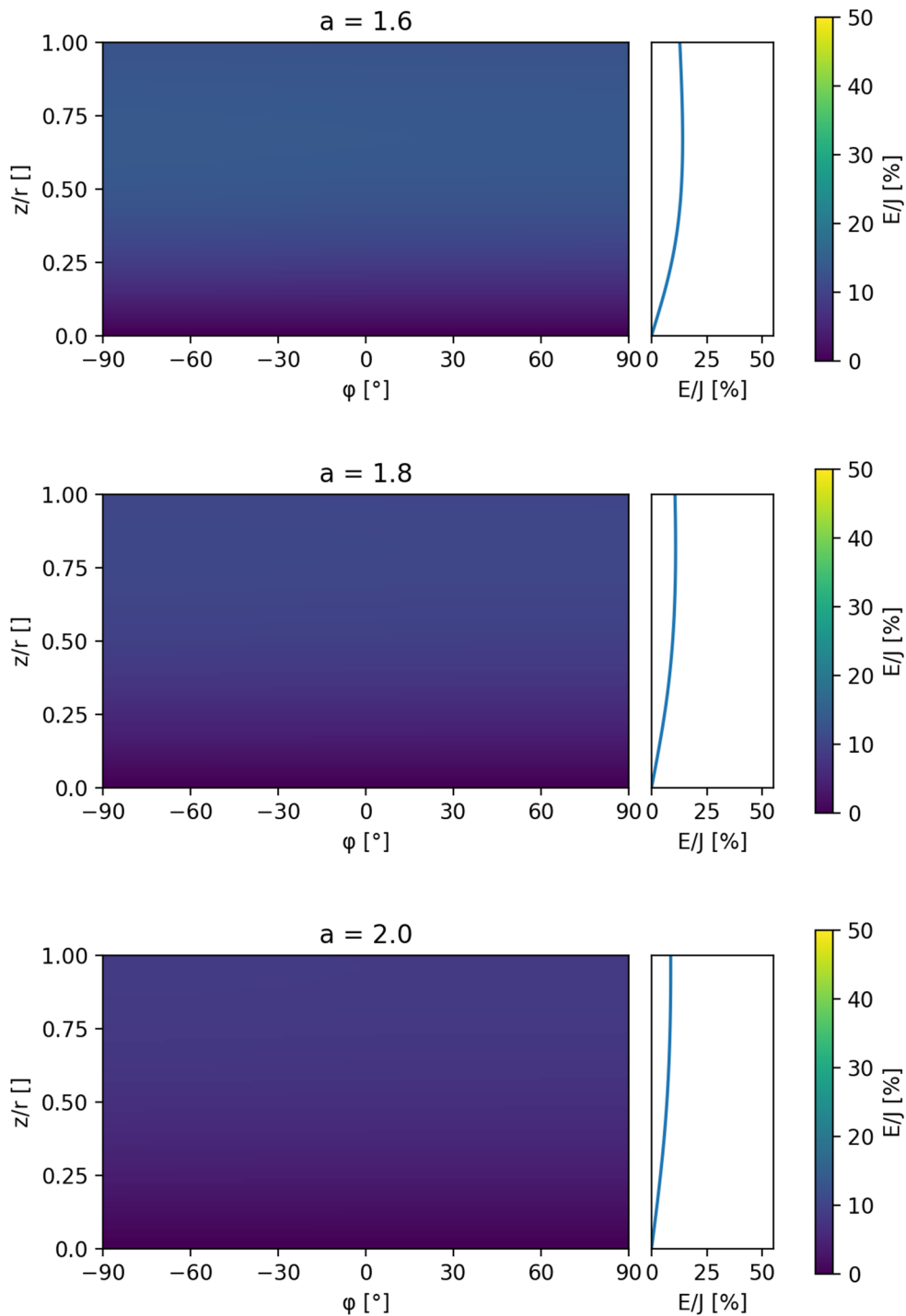


図 5-b 縦孔底の反射光で照らされる縦孔の空洞の壁の相対放射照度. 相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す. $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 90^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100% の場合. 左図の横軸は ϕ [°], 縦軸は半径 r に対する縦孔底からの z 軸方向の高さ. 右図は z 軸方向の高さに対する E/J の値を示している. 各グラフは原点から ar の位置に高さ h_2 の半円筒状の壁が存在していると仮定している. ($a = 1.6, 1.8, 2.0$ の場合)

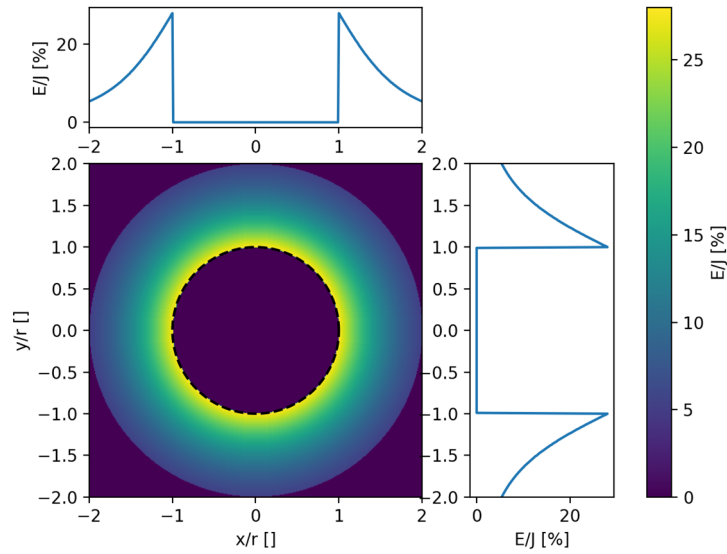


図 6 縦孔底の反射光で照らされる縦孔の空洞の天井の相対放射照度. 相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す. $r:h_1:h_2 = 1:1:1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 90^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100 % の場合. 原点から $2r$ までの範囲の結果である. 左下の図の軸はそれぞれ, 半径 r に対する x 軸, y 軸の座標を示している. 左上図と右図はそれぞれ x 軸, y 軸上の微小面の E/J の値を示している. 黒点線は縦孔の壁の位置を示しており, 原点からの距離が縦孔半径 r より小さい領域と, 原点から $2r$ 以上位置の E/J の値は 0 としている.

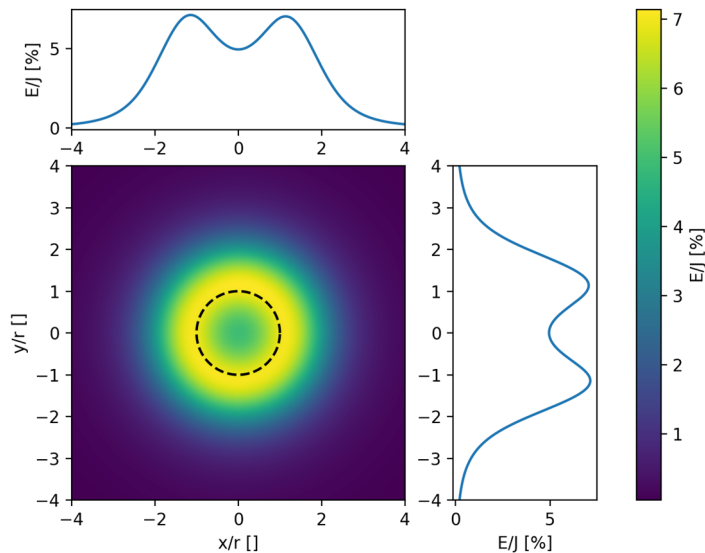


図 7 空洞天井の反射光で照らされる縦孔の空洞の底の相対放射照度. 相対放射照度は反射光による放射照度 E と太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) で表す. $r:h_1:h_2 = 1:1:1$, 反射率 $R = 1$, 太陽高度 $\theta = 90^\circ$, 太陽光の放射照度 J が 100 % の場合. 左下の図の軸はそれぞれ, 半径 r に対する x 軸, y 軸の座標を示している. 左上図と右図はそれぞれ x 軸, y 軸上の微小面の E/J の値を示している. 黒点線は縦孔の壁の位置を示している. 縦孔天井からの反射光のみによる値を示している.

4. 考察

4.1. 数値シミュレーションの妥当性

本研究で作成した数値シミュレーションについて、計算の精度を検証する。始めに、解析解と数値解の比較を行う。縦孔壁の西側に太陽光が高度 $\theta = 45^\circ$ で入射する場合について、縦孔底の中心（原点 o ）における放射照度 E_o と太陽光の放射照度 J の比 (E_o/J) の解析解（式(5), 3.1.節を参照）と数値シミュレーションによる数値解を比較した。その結果, 3.1.節の表 1 より, 縦孔壁のセルサイズが $dz = 0.01 \text{ m}, d\phi = 1^\circ$ のとき解析解 6.75×10^{-2} に対して, 数値解は 6.83×10^{-2} と, 0.08×10^{-2} の差異, すなわち相対誤差 ($= (6.83 \times 10^{-2} - 6.75 \times 10^{-2}) / (6.75 \times 10^{-2})$) は, 1.19×10^{-2} であった。この差異は, 縦孔壁のセルサイズを細かくするほど小さくなったため (表 1 より), 数値シミュレーションの計算において円筒を微小面に分割して計算しているため現れる誤差であると考えられる。

次に, 数値シミュレーションの精度を検証する。縦孔への単位時間あたりの総入射太陽光エネルギーに対して, 太陽直達光で照らされた縦孔の各部分における単位時間あたりの総反射エネルギーがどの程度保存されるかを調べた。

まず, 縦孔西側の壁 (シミュレーションでは, x 軸負方向の半円筒部分) を太陽光が高度 $\theta = 45^\circ$ で入射し照らしている場合の結果を示す。ここでは, $r = h_1 = 1 \text{ m}$, 空洞の高さ $h_2 = 0 \text{ m}$, すなわち空洞部分のない円筒モデルを採り, また縦孔の壁や底の反射率 R を 1 とすることで, 理想的には総反射エネルギーは総入射エネルギーと等しくなるものとして計算を行った。この円筒モデルでは, 縦孔西壁からの (一次) 反射光は, 縦孔内の壁部分, 縦孔底部分, そして縦孔の開口部上面の各部分に入射していることになる。シミュレーション計算の結果, 縦孔西壁からの反射光による各部分への入射エネルギー, すなわち反射エネルギーの合計は $1.4203 J [\text{W}]$ であった。総入射エネルギーは, $1.4283 J [\text{W}]$ であり, その差異は, $0.008 J [\text{W}]$, 相対誤差で 0.56% であった。

太陽高度 $\theta = 90^\circ$ で縦孔の底面に太陽光が入射する場合の計算結果においても同様に, 単位時間あたりの総反射エネルギーを計算し, 単位時間あたりの総入射エネルギーと比較した。ここでは, $r = h_1 = h_2 = 1 \text{ m}$ とする。このとき (一次) 反射光は, 空洞の壁部分, 縦孔壁の下の開口部の面 ($h_2 = 1 \text{ m}$) の高さの開口部の面の各部分に入射していることになる。このときの開口部の面と空洞壁の値を足し合わせると $3.1405 J [\text{W}]$ になり, 総入射エネルギー $3.1607 J [\text{W}]$ に, その差異は, $0.0202 J [\text{W}]$, 相対誤差 0.64% であった。この差異は数値シミュレーションにおいて縦孔を微小面に分割して計算しているため現れる誤差であると考えられる。

4.2. 影の影響

太陽高度 $\theta = 90^\circ$ で直達光が縦孔の底面に到達する場合において, 本研究で計算した空洞の壁や天井, 底に対して影をつくることはない。そのため, 太陽高度 $\theta = 90^\circ$ の場合においては影の影響を考慮する必要はない。しかし, 太陽高度 $\theta = 45^\circ$ の場合は太陽光が縦孔の西

側の壁に入射する際には、東側の壁の上部が太陽光の一部を遮り、縦孔の底や西側の壁に影をつくる。本研究ではこうした壁のつくる影を考慮しておらず、今後の課題である。ここでは、この影を考慮することによって本研究結果がどう影響するかを簡単に推察する。

太陽高度 $\theta = 45^\circ$ の場合において縦孔の西側の壁にできる影は、西側の壁のうち北側と南側の部分で面積が大きくなる。この縦孔の壁の北側と南側の面に対して入射する太陽光の放射照度は小さくなる。というのも、壁の北側と南側の面に対して太陽光の入射角は大きくなるからである。よって、縦孔底面を照らす西側の壁の反射光のうちの多くのエネルギーは、影の領域が少なく、かつ太陽により正対している西側の壁の中央の面(x軸負方向の面)からの反射光によるものが支配的になる。このことを考慮すると、本研究で行った縦孔や地下空洞内の各場所での入射照度については、太陽高度が $\theta = 45^\circ$ 程度であれば、縦孔の西側の壁にできる東側の壁による影の影響は、結果を大きく変えることはないと予想される。

一方、たとえば太陽高度 $\theta = 45^\circ$ で東より縦孔に太陽光が入射するとき、縦孔底から水平方向に西方向に延びる空洞の底では、入射する太陽光は東側の壁の上部や西側の壁の下部で遮られ、影ができる。また一次光で照らされた西側の壁からの反射光についても東側の壁の下部に遮られ、縦孔底から東に延びる空洞の底に影がつくられる。このような影の領域は、一般に大きい。よって、太陽高度 $\theta = 90^\circ$ ではない場合については、影によって空洞底や空洞壁の放射照度が変わってくる可能性が高い。今後、縦孔壁がつくる影を数値シミュレーションに取り入れ、縦孔内の各場所における放射照度の精度を上げることを目指す。

4.3. 反射率と反射パターン

縦孔の壁や底の詳細な反射率や反射パターンはわかっていない。そこで、本研究では反射パターンは均等拡散反射(ランバート反射)を仮定し、反射率 $R = 1$ として放射照度、放射輝度を求めている。

しかし実際の反射率 R_r は 1 より小さい($R_r < 1$)。本研究の条件では、図 2~6 で示した 1 回反射の場合は、式(2)(3)より、放射照度の値は反射率 R に比例する(2章を参照)。ある微小面において放射輝度を求めるとき、その微小面の放射照度の値に R/π を乗算することになる(2章、式(2)より)。よって、計算結果の放射照度($R = 1$ のとき)の値に実際の反射率 $R_r (< 1)$ を乗算した値が実際の放射照度である。同様に実際の放射輝度は、計算結果の放射照度($R = 1$ のとき)の値に R_r^2/π を掛けた値である。図 7 で示したような 2 回反射の場合(二次反射光によって照らされる面)では、全ての反射面における反射率が同じであるとすると、反射光による実際の放射照度は、計算結果($R = 1$ のとき)の放射照度に R_r^2 を掛けた値、放射輝度は R_r^3/π を掛けた値となる。

また実際の縦孔反射パターンが均等拡散反射でないことも考えられる。この場合は反射面に入射する光の入射角との反射光の出射角の関係のよって放射輝度の値が変化する。

今後、実際的な反射率や反射パターンを取り入れていくことで、縦孔内の各場所における放射照度、放射輝度の精度を上げることを目指す。

4.4. 光学カメラのパラメータの検討

太陽高度 $\theta = 90^\circ$ の条件で UZUME の探査で光学カメラを用いて縦孔を観測する場合について考察する。この太陽高度の条件では、縦孔の底が太陽光で直接照らされているため、探査機の着陸運用に適していると考えられ、また縦孔の底からの反射光が空洞の天井や壁を照らすため、空洞内部の撮影にも適していると考えられる。始めに縦孔空洞が現在観測されている 20 m 以上の奥行きがあるかどうか確認する場合を考える。静かの海の縦孔(MTH)において、縦孔の縁から 20 m の奥行きがある場合は、本研究のシミュレーション上では原点から $1.4r$ より離れた位置に空洞の壁が存在する場合に相当する。原点から $1.4r$ 離れた位置にあると仮定した円筒状の壁の放射照度 E の太陽光の放射照度 J に対する比 (E/J) の最大値は 18.7% である (図 5-a 参照)。つまり、 $1.4r$ の位置に壁が存在するかどうかについて、カメラを用いて判断するためには、少なくとも太陽光の放射照度に対して 18.7% の放射照度で照らされる面を検知する必要がある。一方、縦孔下の空洞で最も E/J の高い値は、原点から $1.0r$ の距離に存在すると仮定した壁の値 50.0% である (図 5-a 参照)。縦孔空洞内のみをカメラの 1 フレームで撮影する場合、仮に最低限検知したい $E/J = 18.7\%$ の面を 10 階調で表現すると仮定するとき、空洞内部における E/J が最大値 50.0% の面は 27 階調で表現される。つまり、縦孔の空洞内部をカメラの 1 フレームに収めて撮影し、 $1.4r$ の位置の壁の有無を判断するには、最低、27 階調、5 bit 以上の輝度分解能が必要である。同じ条件で、太陽直達光に照らされる縦孔の底が 1 フレーム内に映る場合では、 E/J の最大値が縦孔底面の 100% であるため、最低 54 階調、6 bit 以上の輝度分解能が必要である。

次に、空洞内部の形状や表面状態の観測に必要な輝度分解能について、太陽高度 $\theta = 90^\circ$ の条件で考察する。図 5,6,7 には、縦孔中心から $2.0r$ 以内の空洞の壁・天井・底の相対放射照度が示されている。まず、 $2.0r$ の位置にある空洞奥壁面の明るさ E/J については、図 5-b に示した結果から、最大値が壁の上部で 8.6 %、最小値が壁の下部で 0 % になるとわかった。図 6 に示した空洞天井については、最大値が縦孔の壁に最も近い部分で 28.0 %、最小値が $2.0r$ の位置で 5.37 % であった。図 7 に示した空洞底での、最大値は 7.14 %、最小値は $2.0r$ 位置で 1.28 % であった。また、縦孔の中心から $2.0r$ の範囲のほとんどの E/J の値が少なくとも約 1 % 以上である (図 5,6,7 参照)。ここで、仮に E/J の値が 1% の面を 10 階調で表現すると設定したとき、空洞内部で最大値 $E/J = 50.0\%$ の面は 500 階調、縦孔底面の最大値 $E/J = 100\%$ の面は 1000 階調でそれぞれ表現する必要がある。つまり、空洞内部のみを 1 フレームに収めて撮影する場合は最低 500 階調、9 bit 以上の分解能が必要である。また 1 フレーム内に太陽直達光で照らされる縦孔の底が映り込む場合には最低 1000 階調、10 bit 以上の輝度分解能が必要であると考えられる。

本研究では、均等拡散反射であることや縦孔や空洞内部の物性が均一であることを仮定して、放射照度、放射輝度を求め、カメラの輝度分解能について考察した。しかし、実際の観測において、カメラのパラメータを設定するためには、より詳細な検討が必要な点が 3 つある。

1つ目は、測光条件である。本研究で仮定した均等拡散反射は、観測点によらず放射輝度が一定となる反射パターンである。しかし、ある面の反射光をカメラが検知するとき、均等拡散反射を仮定しても、カメラ（の検知素子）は面で光を受け取るため、カメラと反射面との位置関係とカメラの方向によってカメラ（の検知素子）が受け取る光のエネルギーは変化する。またカメラと被写体の距離によってカメラに入射する光量も変化する。このことから、カメラの位置や向き、観測対象との距離などの測光条件を設定したときのカメラ（の検知素子）が受け取る光のエネルギーについての検討が必要である。

2つ目は、反射面の物性である。実際の縦孔や空洞の面において、組成や形状などの観測対象の物性はそれぞれ均一ではない。縦孔内部の面の反射率や反射パターンは、場所ごとに異なる可能性がある。本研究では反射パターンを均等拡散反射と仮定したが、実際の反射パターンは異なる可能性がある。縦孔や空洞の面の反射パターンが均等拡散反射ではない場合、測光条件（入射角、出射角、位相角）によって反射面の放射輝度が変化する。この場合では撮影するカメラの位置（観測点の位置）とカメラの向き、反射面を照らす光の方向を考慮する必要がある。また空洞壁の形状が異なれば、測光条件が変化する。つまり、カメラが観測する反射面の輝度値は、縦孔や空洞の面の組成や形状、測光条件に影響を受ける。これらことから、縦孔や空洞の物性や形状についての検討が必要である。

3つ目は反射の回数である。本研究では一次反射または二次反射の場合の放射照度を求めた。しかし、実際にはそれ以上の回数反射した光が照らす場合やそれぞれの反射による放射照度が足し合わさる場合が考えられる。このとき、縦孔内部の場所によって反射回数による影響が異なる。よって、縦孔内部のどの位置にどのような経路で光が到達するかについての検討や、反射率の値も踏まえて、何次反射までの反射光が縦孔内の放射照度に影響するかについての検討が必要である。

今後の研究においては、物性の違いによる反射率や反射パターンの違い、縦孔内部の面の形状の違い、観測点と観測対象との位置関係やカメラの画角、太陽高度などによる測光条件の違いなどについて検討することで、bit数や輝度解像度、露光時間、S/N比、受光輝度範囲、A/D変換レート、ゲイン方式などカメラの詳細なパラメータを設定する必要がある。

5. まとめ

月の縦孔内部の光環境を推定することを目的とし、月の縦孔をモデル化し、数値シミュレーションによって縦孔内の放射照度を求めた。縦孔の形状は $r : h_1 : h_2 = 1 : 1 : 1$ の円筒形、反射率 $R = 1$ 、反射パターンは均等拡散反射と仮定した。

縦孔の底が太陽光で直接照らされていて着陸運用に適していると考えられる太陽高度 $\theta = 90^\circ$ の場合については、反射率 $R = 1$ の均等拡散反射を仮定したとき、本研究において計算を行った縦孔の半径の2倍の範囲の領域のほとんどは、反射光により、太陽光の放射照度に対して、約1%から最大50%の放射照度で照らされ、放射輝度は、太陽光の放射照度に対して約0.32%から16%の値となっている。

この条件において、光学カメラで縦孔内部の空洞を撮影するとき、少なくとも 1000 階調、10 bit 以上の輝度分解能があれば、縦孔内部の最も明るい領域と空洞奥の約 1 % から 50 % の放射照度で照らされる領域を 1 フレーム内に収めて観測ができると考える。

参考文献

- 1) J. Haruyama, et al. : Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophysical Research Letters* 36, L21206, 2009.
- 2) M.S. Robinson, et al. : Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits, *Planetary and Space Science* 69 (1), 18-27, 2012.
- 3) J. Haruyama, et al. : Lunar Holes and Lava Tubes as Resources for Lunar Science and Exploration, *Moon - Prospective Energy and Material Resources*, Springer, pp. 139-164, 2012.
- 4) 春山純一ら, : UZUME 計画概要と現況, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K01, 2021.
- 5) 庄司大悟, : UZUME-1 の理学ミッション, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K02, 2021.
- 6) 角有司ら, : UZUME-1 のシステム構想, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 3K10, 2021.
- 7) J. Y. Li, et al. : Asteroid photometry, *Asteroids IV* 86, 277-326, 2015.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-22-004

JAXA Research and Development Report

月の縦孔内部の光環境の推定

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole

発行 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <https://www.jaxa.jp/>

発行日 2022年12月23日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

