

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

月の縦孔内部の光環境の推定（その2）

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole (part 2)

池谷 広大, 春山 純一, 三宅 瓦, 田中 真

IKEYA Kodai, HARUYAMA Junichi, MIYAKE Wataru and TANAKA Makoto

2024年2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	5
4. 考察	16
5. まとめ	17
参考文献	18

月の縦孔内部の光環境の推定（その2）

池谷 広大^{*1,2}, 春山 純一^{*2}, 三宅 亙^{*1}, 田中 真^{*1}

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole (part 2)

IKEYA Kodai^{*1,2}, HARUYAMA Junichi^{*2}, MIYAKE Wataru^{*1}, TANAKA Makoto^{*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 floor of the hole. The mission is planned to obtain the information of the surface structure for the MTH and the associated cavern by taking images with cameras. As preparation for the mission, we have preliminary estimated the illuminated condition of the inside of the MTH and its associated cavern by numerical simulations. The floor and the wall of the hole, the wall and the ceiling of the subsurface cavern are illuminated by reflected solar light from other parts of the hole and the cavern, such as the floors, depending on solar altitude. This paper presents the estimation results for the case when solar altitude is 45° , as an example. Assuming that the reflectance of the hole and the subsurface cavern is 0.1 and that the optical camera used is ONC-W (with 12-bit dynamic range) installed in Hayabusa 2, the estimated incident energy on each pixel of the camera during the explore descent is shown. In this case, the area illuminated by the direct solar light and the area illuminated only by the reflected light are captured simultaneously, making it difficult to resolve the minimum incident energy to 10-DN and avoid saturation of the incident energy if the gain of the camera is kept fixed. In such case, it is necessary to operate with a gain setting appropriate for the irradiance of areas to be photographed. Simulations conducted in this study can be used as a ground for investigation of optical equipment and missions that take photographs of inside of lunar holes and subsurface caverns.

Keywords: Moon, UZUME, Lunar Hole, light environment

概 要

UZUME ミッションは月の縦孔(現段階では Mare Tranquillitatis Hole: MTH)に直接入り込み、縦孔とその孔の底から水平空間に広がる地下空洞を探索することを目的としている。このミッションでは、光学カメラによる撮影を行い、MTH とその地下空洞の構造や表面の情報を取得することが考えられている。光学カメラ開発の基礎研究として、MTH とそれに付随する地下空洞の内部の放射照度を、数値シミュレーションで推定した。縦孔の底と壁、地下空洞の壁と天井は、太陽高度によっては、縦孔と地下空洞の底と壁に入射する太陽直達光の反射光により照らされる場合がある。本稿では一例として、太陽高度が 45° のときの推定結果を示す。またその条件で、縦孔と地下空洞の反射率が 0.1、撮影カメラはやぶさ2搭載の ONC-W (ダイナミックレンジ 12bit) と仮定した場合の、降下中の探査機のカメラの各画素への入射光量の推定結果を示す。この条件では、太陽直達光で照

* 2023 年 12 月 1 日受付 (Received December 1, 2023)

*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)

らされる領域と反射光のみによって照らされる領域が同時に撮影されるため、そのカメラのゲインを固定したままであると、0を超え、かつ最小値となるカメラ画素への入射光量の最小値を 10-DN に分解し、最大入射光量が飽和しないようにすることは難しいことがわかった。このような場合において、撮影対象の領域の放射照度に適するゲインを設定した運用が必要である。この研究で作成されたシミュレーションは、月の縦孔や地下空洞の内部を撮影する光学機器やミッションを検討するための基礎として利用できる。

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^{1,2)}。そして月周回衛星 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) の斜め観測によって、その縦孔の底から水平方向に空間が広がっていることが確認された³⁾。こうした空間は、例えば、地球に見られる火山活動起源の溶岩チューブのようなものが考えられる¹⁻³⁾。縦孔は、月だけでなく火星にも同定されている⁴⁾。

月の縦孔や地下空間を探查することで、縦孔の形成要因や月の火山活動史を解明するための情報や基地建設のための重要な情報が得られると期待されている^{5,6)}。現在日本では、月惑星の縦孔・地下空間の探查計画として Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (UZUME) が計画されている。その最初の探查では月の縦孔に探查機が直接侵入していく過程で、光学カメラによる縦孔や地下空間の撮影が検討されている⁵⁻⁷⁾。

月の縦孔とそれに付随する地下空洞の内部の光環境の詳細は明らかにされていない。本研究では、月の縦孔とそれに付随する地下空洞の形状をモデル化し、(1) 縦孔と空洞の表面における放射照度、(2) それらの表面からカメラの各画素に入射する光エネルギー（以下、単に「入射光量」）をそれぞれ数値シミュレーションにより求める。これらのシミュレーション結果に基づき、縦孔や地下空洞の探查におけるカメラの撮像条件や仕様について検討する。

2. 研究手法

本研究では、月の縦孔と地下空洞の内部表面における放射照度(E [W/m²])を池谷ら、2022.⁸⁾の手法を用いて計算し、加えてカメラの各画素への入射光量(E_{px} [W/m²])を推定する。池谷ら、2022.⁸⁾と同様に、月の縦孔と地下空洞は、Fig.1に示すような円筒型としてモデル化されている。縦孔の半径は r [m]、縦孔の壁と空洞の高さはそれぞれ h_1 [m]と h_2 [m]である。地下空洞の円筒形の壁は、縦孔の底の原点(o)から ar [m]の距離に存在すると仮定する。太陽は正の x 軸上にあり、水平面は xy 平面、水平面に対する垂直方向は z 軸にあり、 x 軸から z 軸の周りを反時計回りに回転する角度は ϕ である。この座標系における方位角は、 y 軸正方向が北向き、 x 軸正方向が東向きである。太陽光は平行光と仮定され、太陽高度(θ)で月の縦孔に入射する。太陽光は縦孔の壁面、縦孔の底面、地下空洞の壁面に入射し反射する。各表面の反射パターンはランバート反射（均等拡散反射）と仮定し、反射率 (bond albedo) を R とする。

UZUME 計画で最初の探查が検討されている静かの海の縦孔は、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、縦孔の底からは、少なくとも 20 m の奥行を持つ地下空洞が水平方向に広がっていることがわかっている³⁾。本研究の計算では、縦孔の形状は r, h_1, h_2 をすべて 50 m、地下空洞の壁は原点から 100 m の位置にあると仮定する。

太陽高度(θ)が 90° 未満の場合, Fig.2 で示すように, 縦孔の西側の壁に入射した太陽光の一部は縦孔の東側の壁の端で遮られ, 西側壁に陰ができる. また, 縦孔の西壁からの反射光の一部は縦孔の壁全体によって遮られ, 洞窟内の底や壁の表面に陰が生じる. 池谷ら, 2022.⁸⁾ では無視されていた陰の効果を, 本研究の計算では考慮した.

縦孔の x 軸負の方向の半円筒部分 (西側の壁) に太陽光が入射する場合の陰の境界についての数値シミュレーションと解析解の結果の比較について, 太陽高度 $\theta=45^\circ$ の条件のときを例として, Fig.3 に示す. 太陽直達光が入射する縦孔の西側の壁の放射照度 E の, 太陽定数 J に対する比 (E/J) を示す. Fig.3 の黒点線は影の明暗境界の解析解であり, その式は以下通りである.

$$z(\theta, \phi) = h_1 + h_2 + 2r \tan \theta \cos \phi \quad (1)$$

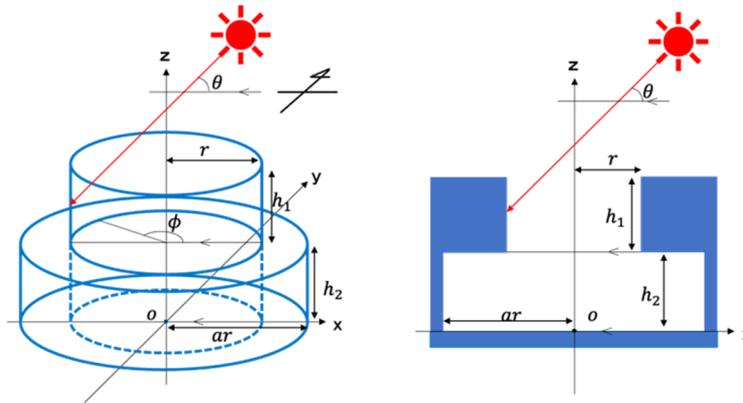


Fig.1. モデル化した縦孔と地下空間の概略. 縦孔の壁は, 高さ h_1 [m] と半径 r [m] の円筒で, 地下空間は, 高さ h_2 [m] と半径 ar [m] の円筒と仮定する. この縦孔の x 軸方向より角度 θ で太陽光が平行光として入射している. モデル化した縦孔と地下空間の概要を, 左図は俯瞰して描いたもので, 右図は xz 平面 ($y=0$) に投影したものである. ここでは, y 軸正方向を北, x 軸正方向を東とする.

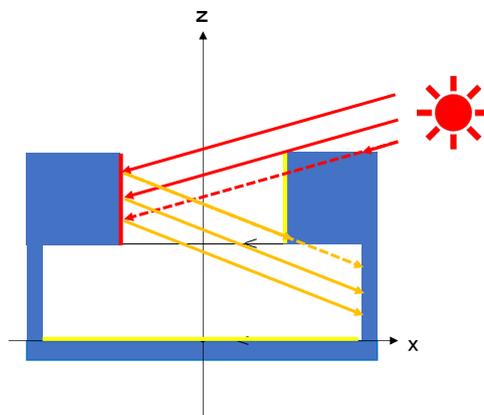


Fig.2. 縦孔の壁が太陽直達光と反射光を遮る様子を示す概念図. 赤色の矢印が太陽直達光, 橙色の矢印が反射光をそれぞれ示す. 破線は, 縦孔の壁によって遮られる光を示す.

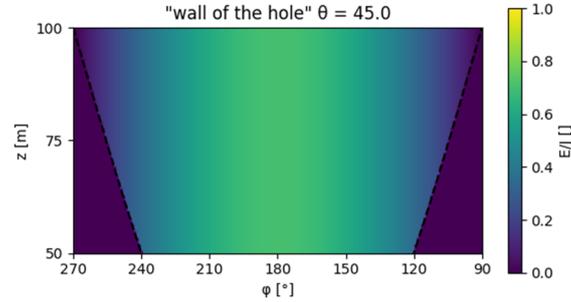


Fig.3 太陽高度 $\theta = 45^\circ$ のときの太陽直達光で照らされる縦孔の西側の壁の相対放射照度。相対放射照度は太陽光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比 (E/J) で表す (壁が太陽に正対しているとき, $E/J = 1$)。横軸は z 軸回りの角度 ϕ [°], 縦軸は z 座標の値をそれぞれ示している。黒点線は影の明暗境界の解析解である。

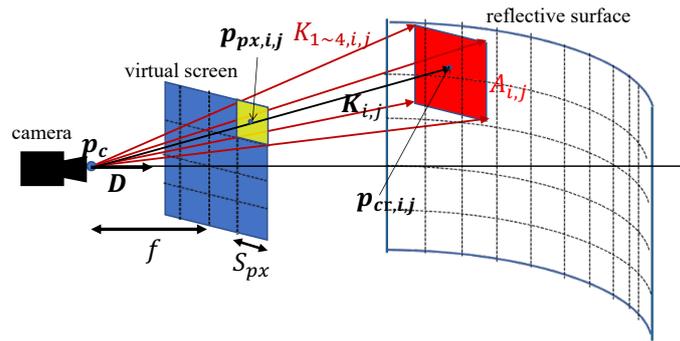


Fig.4. カメラの入射光量を求める手法の概略図。焦点距離を f [m], ピクセルサイズを S_{px} [m], ピクセル数を $N_{px} \times M_{px}$ とするカメラが点 p_c に置かれ, D ベクトルの方向を向いているとする。カメラのあるピクセル $p_{px,i,j}$ が光を集める範囲は, 赤色で示す $A_{i,j}$ とする。

次に縦孔内部をカメラで撮影した際にカメラの各ピクセルに単位時間あたり単位面積あたり入射する光のエネルギー量 (入射光量: E_{px} [W/m²]) を計算した。カメラの焦点距離を f [m], ピクセルサイズを S_{px} [m], ピクセル数を $N_{px} \times M_{px}$ として, Fig.4 に示すように, ある点 p_c に, ある方向 (D ベクトル) を向いたカメラが存在すると仮定する。

p_c から D 方向に f だけ離れた位置に, サイズが S_{px} のセルが $N_{px} \times M_{px}$ 個並ぶ仮想のスクリーンを設置する。 p_c から各セルの中心点 $p_{px,i,j}$ に向かうベクトルを $K_{i,j}$ とし, 各セルの四隅のに向かうベクトル $K_{1\sim4,i,j}$ について, $K_{i,j}$, f , S_{px} を用いて求める。 $K_{i,j,1\sim4}$ を伸ばしていき, 縦孔の壁などの反射面と交差する点を求め, それらの4点から単位反射面 $A_{i,j}$ の面積を求める。この面積が, 反射面におけるカメラの各ピクセルが光を集める面積に相当する。

カメラの各ピクセルにおける入射光量 I_{px} [W/m²] は, 池谷ら, 2022.⁸⁾ の手法で求める。ここで $A_{i,j}$ の放射照度は, $K_{i,j}$ をのぼし反射面と交差する点 $p_{cr,i,j}$ の放射照度をもって代表する。

3. 結果

月の縦孔の内部（底と壁）と地下空洞の内部（底，壁，天井）について，太陽直達光による放射照度と他の表面からの反射光による放射照度の和である各表面の放射照度（ E ）を計算した．モデル化した縦孔の形状は半径 50m，壁の高さ 50m の円筒形，地下空洞の形状は半径 100m，高さ 50m の円筒形であり，その中心軸は研究手法の章で述べたように縦孔の中心軸と一致している．

Fig.5, 6, 7 はそれぞれ縦孔の底面および地下空洞の底面，縦孔の壁面，地下空洞の壁面への太陽直達光による相対日射量（ E/J ， J は太陽定数）を示している．Fig.8, 9, 10 も同様に相対放射照度を示しているが，一次反射光による場合である．Fig.11 は，地下空洞の天井における一次反射光による放射照度である．これらの図には，太陽高度（ θ ）が 15°，30°，45°，60°，75°，90°の 6つのケースがある．Fig.6, 7, 9, 10 は，縦孔と地下空洞の壁を $\phi = -90^\circ$ （真南）中心に展開した円筒の投影図であり，各図の左側（ $\phi = 90 \sim 270^\circ$ ）が西側の壁，右側（ $\phi = 90 \sim 90^\circ$ ）が東側の壁に相当する．

太陽直達光による放射照度：太陽高度（ θ ）が 45° 以上の 4つの条件では，太陽光が直接縦孔の底に入射する（Fig. 5）．太陽高度が高いほど，西側壁面の太陽直達光を受光する面積は大きくなり，東側壁面の陰の面積は小さくなるが，入射角が大きくなるため放射照度は相対的に小さくなる（Fig.6）．太陽が縦孔の上の天井に位置する場合（すなわち θ が 90° の場合），縦孔の壁面の放射照度は 0 である．太陽高度 6つの条件のうち， θ が 30° の場合のみ，本研究でモデル化した縦孔の半径の 2 倍の距離にある地下空洞の壁を太陽光が直接照らす（Fig.7 参照）．

Table.1. 一次反射光による相対放射照度の最大値とその最大値を示す位置

太陽高度	縦孔と地下空洞の底 (Fig.8)		縦孔の壁(Fig.9)		地下空洞の底 (Fig.10)		地下空洞の天井 (Fig.11)	
	最大値	位置	最大値	位置	最大値	位置	最大値	位置
$\theta = 90^\circ$	0.00	-	1.71×10^{-1}	最下部	8.55×10^{-2}	最上部	2.80×10^{-1}	天井の先端部
$\theta = 75^\circ$	2.58×10^{-2}	中心部の西側	1.63×10^{-1}	東側の最下部	1.05×10^{-1}	上部	3.45×10^{-1}	天井の先端部の西側
$\theta = 60^\circ$	4.91×10^{-2}	中心部の西側	1.24×10^{-1}	西側の最下部	1.39×10^{-1}	西側の中間の高さ	3.30×10^{-1}	天井の先端部の西側
$\theta = 45^\circ$	6.67×10^{-2}	中心部の西側	1.18×10^{-1}	東側の中間の高さ	3.49×10^{-1}	西側の最下部	1.94×10^{-1}	西側の奥部
$\theta = 30^\circ$	7.13×10^{-2}	中心部の西側	1.16×10^{-1}	東側の中間の高さ	3.84×10^{-2}	東側の下部	2.02×10^{-2}	西側の奥部
$\theta = 15^\circ$	2.74×10^{-2}	中心部の西側	6.47×10^{-2}	東側の上部	1.75×10^{-2}	東側の下部	0.00	-

一次反射光による放射照度：Table.1 は，太陽高度が 6つ条件について，それぞれの面（縦孔の底，縦孔の壁，地下空洞の壁，地下空洞の天井）における一次反射光による相対放射照度の最大値とその値の位置を示している．

縦孔と地下空洞の底：朝方（i.e. 太陽高度 θ が 15, 30, 45, 60, 75°）のとき，縦孔と地下空洞の底は，主に縦孔の西側の壁からの反射光によって照らされる．よって，縦孔の底と地下空洞の東側の底の放射照度は，地下空洞の西側の底のそれに比べ大きい．ただし，地下

空洞西側の底は、縦孔の北側と南側の壁からの反射光によってわずかに照らされる。加えて $\theta = 30$ の場合は、太陽光が地下空洞の西側の壁に直接入射するため (Fig.7)、地下空洞の西側の底は、地下空洞の壁からの反射光が更に照らすことになる (Fig.8)。

縦孔の壁：縦孔の壁における反射光による放射照度の最大値を示す場所は、太陽高度に応じて変化する (Fig.9)：太陽高度が $90, 75, 60^\circ$ のときは壁の下側、太陽高度が $30, 45^\circ$ のときは壁の中央、太陽高度が 15° のときは壁の上側である。

地下空洞の壁：太陽高度 θ が $45, 60, 75^\circ$ の場合、地下空洞の西側の壁は、太陽直達光が入射する縦孔と地下空洞の底からの反射光によって主に照らされる。一方、太陽高度 θ が 15° または 30° の場合には、太陽直達光が縦孔の底および地下空洞に入射しないので、地下空洞の壁は縦孔の西壁からの反射光によって照らされる。したがって、反射光による放射照度が最大となる領域は、太陽高度 θ が $45, 60, 75^\circ$ の場合には地下空洞の西壁面に、太陽高度 θ が $15^\circ, 30^\circ$ の場合には地下空洞の東壁面に位置する (Fig.10)。

地下空洞の天井：縦孔または地下空洞の底に太陽直達光が入射するとき ($\theta = 45, 60, 75, 90^\circ$)、地下空洞の天井における放射照度の値が最大となる領域は、太陽高度が小さくなるにつれて、より西 (地下空洞の奥側) に存在する (Fig.11 を)。この結果は、縦孔または地下空洞の底の太陽直達光が入射する領域は、太陽高度が小さくなるほど、西 (地下空洞の奥側) に位置するためである (Fig.6)。太陽高度 $\theta = 15^\circ$ のとき、縦孔と地下空洞の底と地下空洞の壁の両方に太陽直接太陽光が入射しないため、地下空洞の天井は反射光によって照らされない。

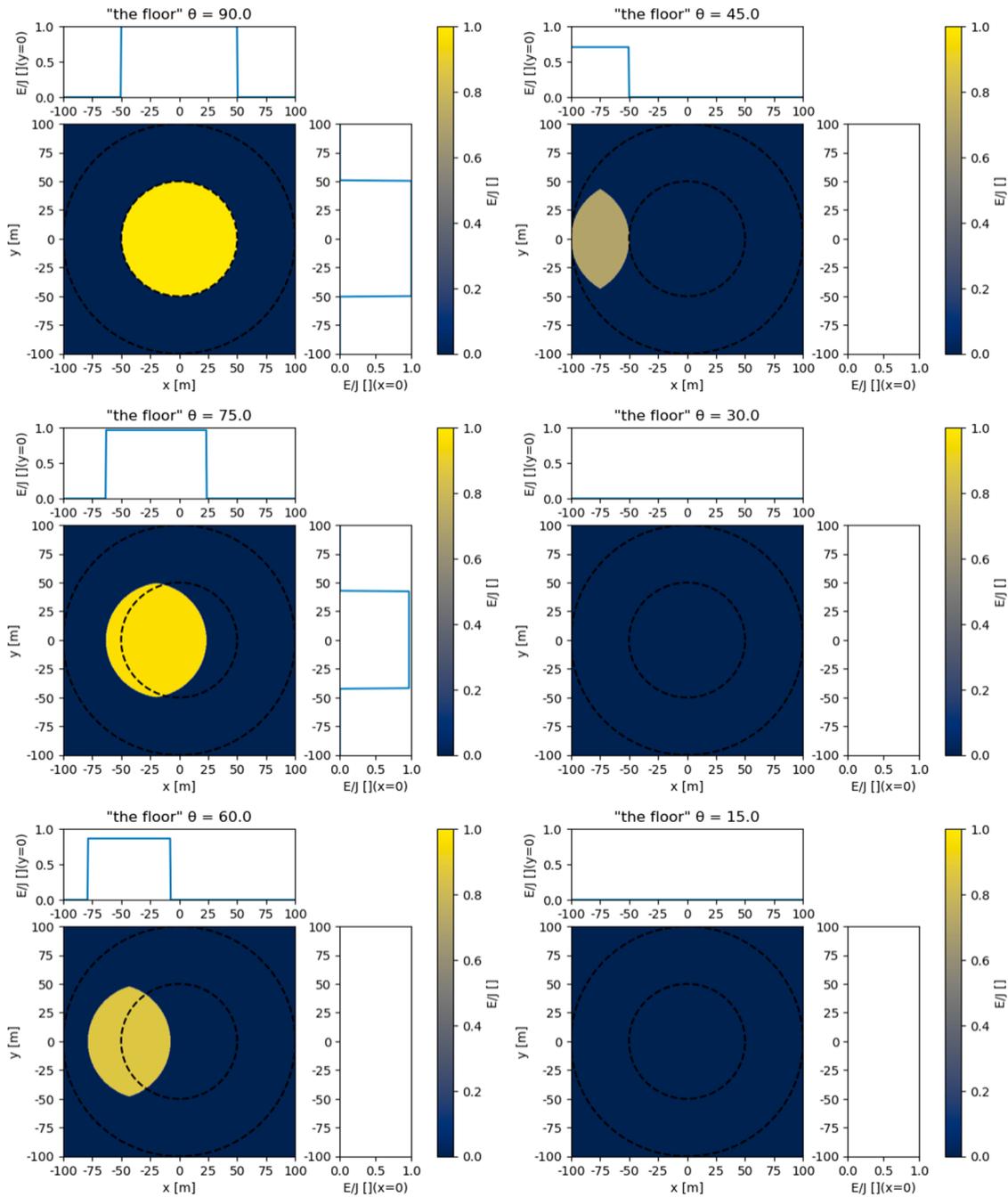


Fig.5. 太陽直達光で照らされる縦孔の底の相対放射照度（太陽光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比、 E/J) x 軸、 y 軸については Fig.1 を参照. 各分布図における上図と右図はそれぞれ x 軸、 y 軸上の E/J の値を示している. 内側の黒点線は縦孔の壁の位置を、外側の黒点線は地下空洞の壁の位置を、それぞれ縦孔の底に投影したものである. この図では太陽直達光による E/J の値を示し、反射光による E/J の値は除いている.

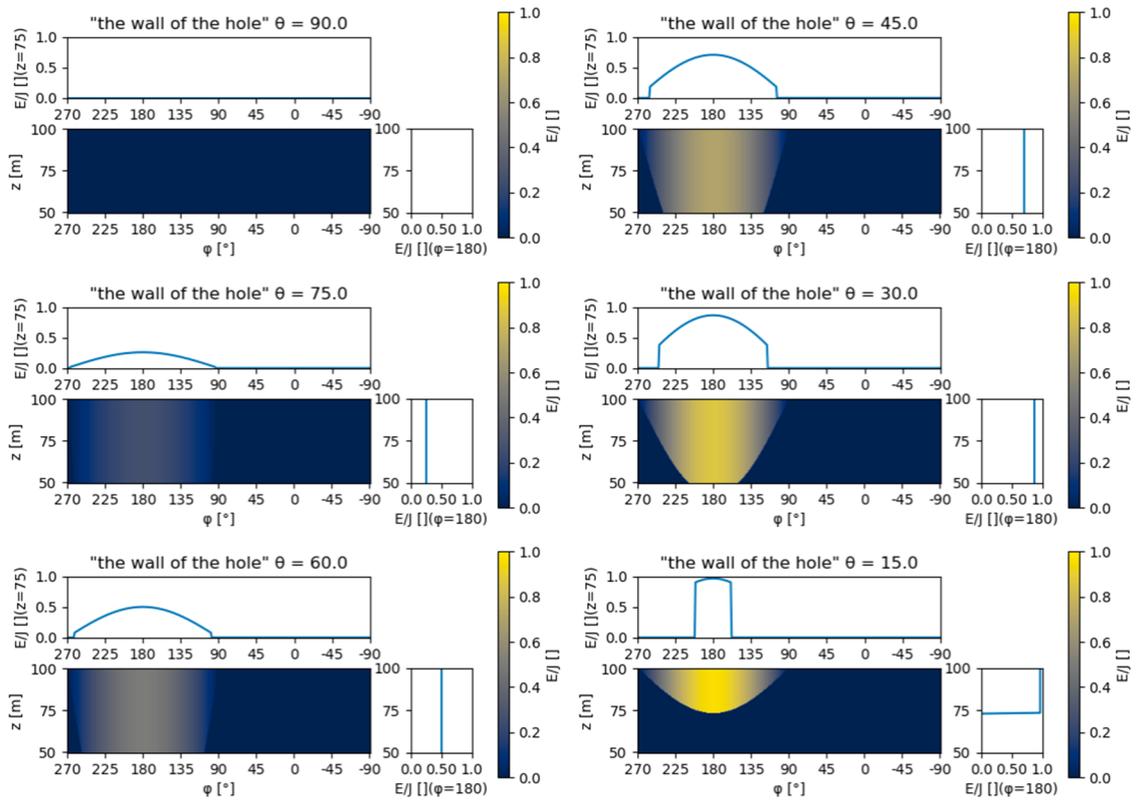


Fig.6. 太陽直達光で照らされる縦孔の壁の相対放射照度（太陽光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比、 E/J ）。左下図の横軸は z 軸回りの角度 ϕ [°]、縦軸は z 軸の座標をそれぞれ示している。その右の図は $\phi=180$ [°] における各 z の E/J の値を、その上の図は $z=75$ [m] における各 ϕ の E/J の値をそれぞれ示している。この図では太陽直達光による E/J の値を示し、反射光による E/J の値は除いている。

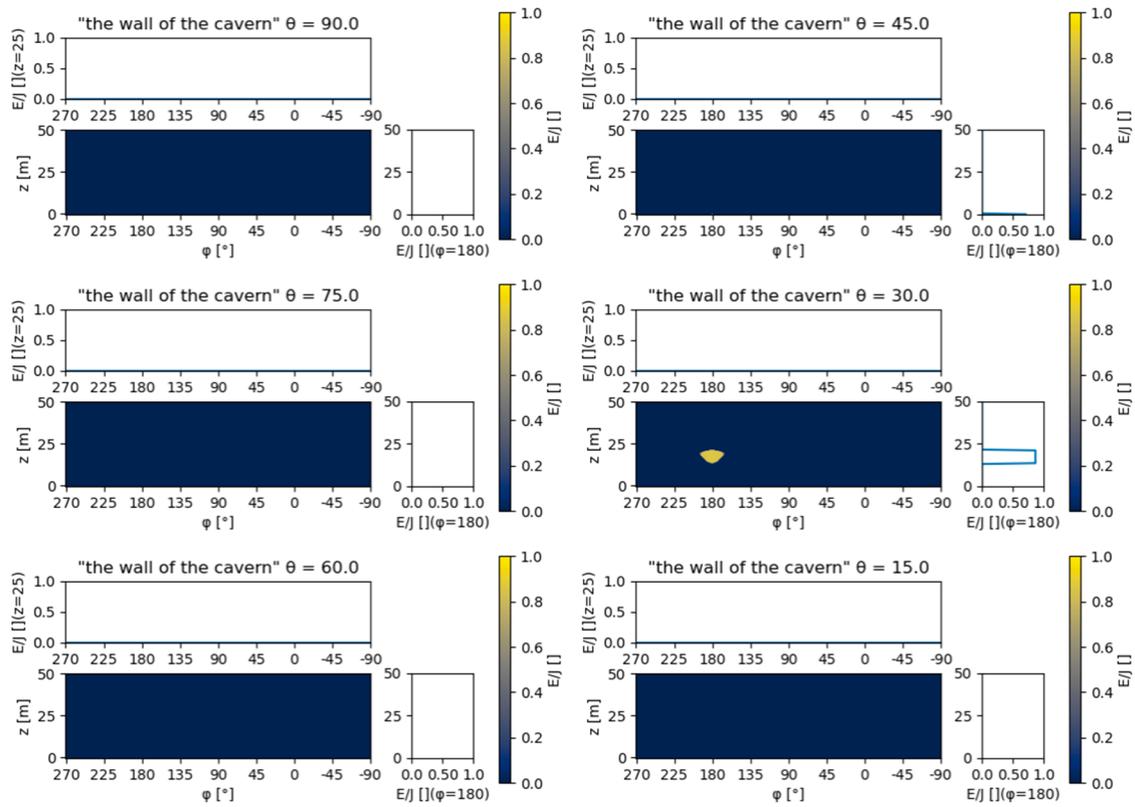


Fig.7 太陽直達光で照らされる地下空洞の壁の相対放射照度 (太陽光による放射照度 E の, 太陽定数 J に対する比, E/J). 左下図の横軸は z 軸回りの角度 ϕ [$^{\circ}$], 縦軸は z 軸の座標をそれぞれ示している. その右の図は $\phi = 180$ [$^{\circ}$] における各 z の E/J の値を, その上の図は $z = 25$ [m] における各 ϕ の E/J の値をそれぞれ示している. この図では太陽直達光による E/J の値を示し, 反射光による E/J の値は除いている.

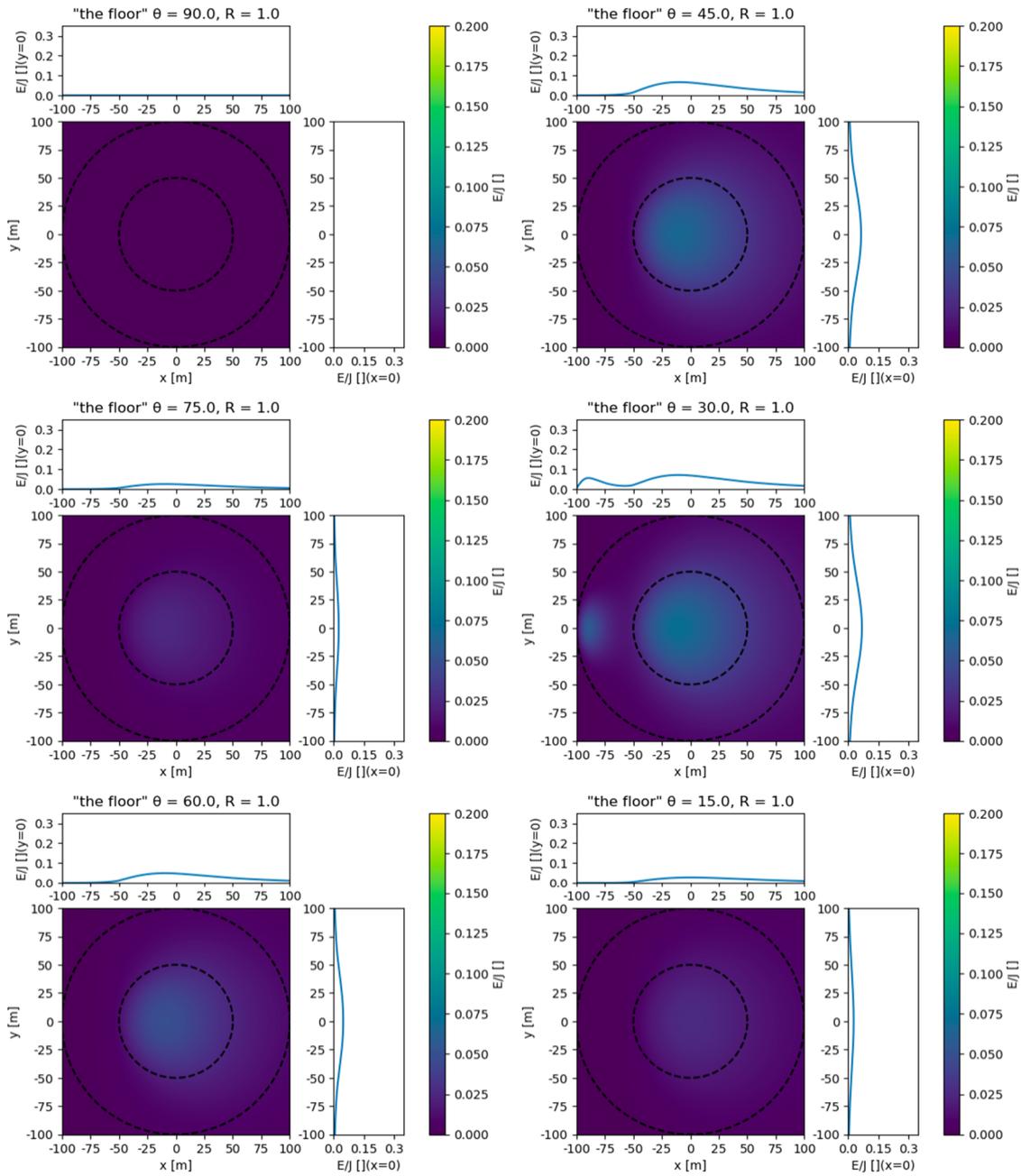


Fig.8 反射光で照らされる縦孔の底の相対放射照度(反射光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比、 E/J)。x 軸、y 軸については Fig.1 を参照。各分布図における左上図と上図はそれぞれ x 軸、y 軸上の E/J の値を示している。内側の黒点線は縦孔の壁の位置を、外側の黒点線は地下空洞の壁の位置を、それぞれ縦孔の底に投影したものである。この図では反射率 R を 1 としたときの反射光による E/J の値を示し、太陽直達光による E/J の値は除いている。

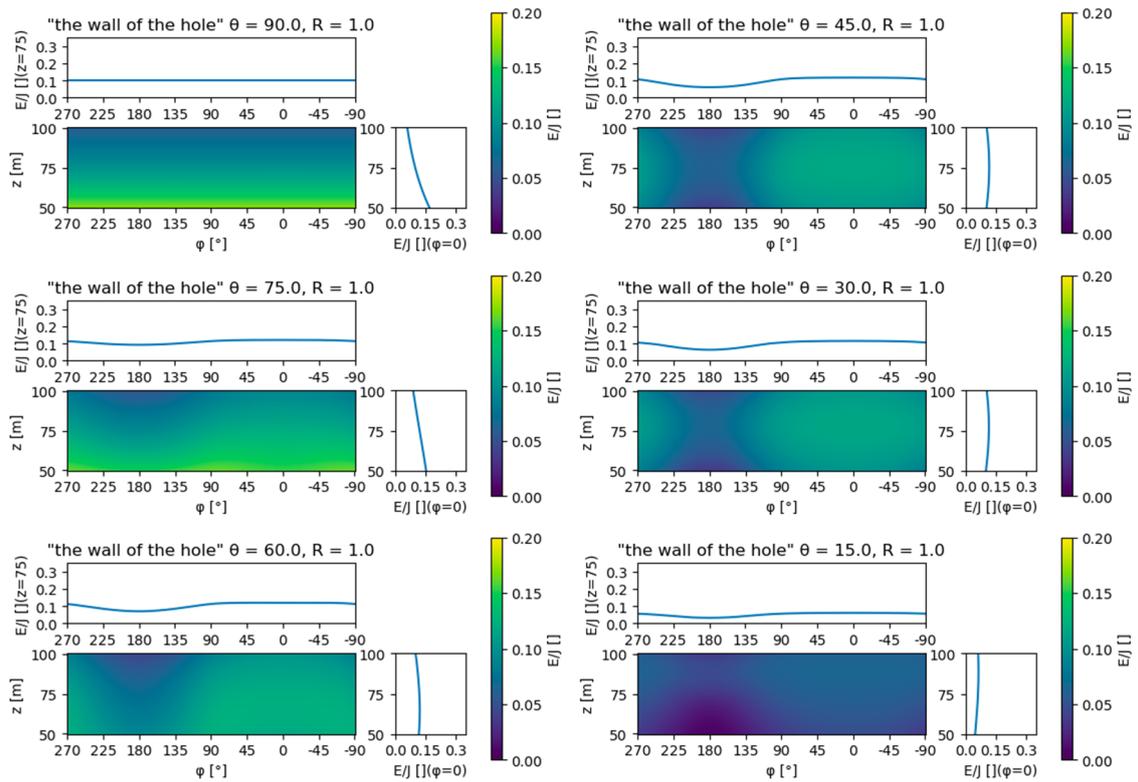


Fig.9 反射光で照らされる縦孔の壁の相対放射照度(反射光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比, E/J). 左下図の横軸は z 軸回りの角度 ϕ [°], 縦軸は z 軸の座標をそれぞれ示している. その右の図は $\phi = 0$ [°] における各 z の E/J の値を, その上の図は $z = 75$ [m] における各 ϕ の E/J の値をそれぞれ示している. この図では反射率 R を 1 としたときの反射光による E/J の値を示し, 太陽直達光による E/J の値は除いている.

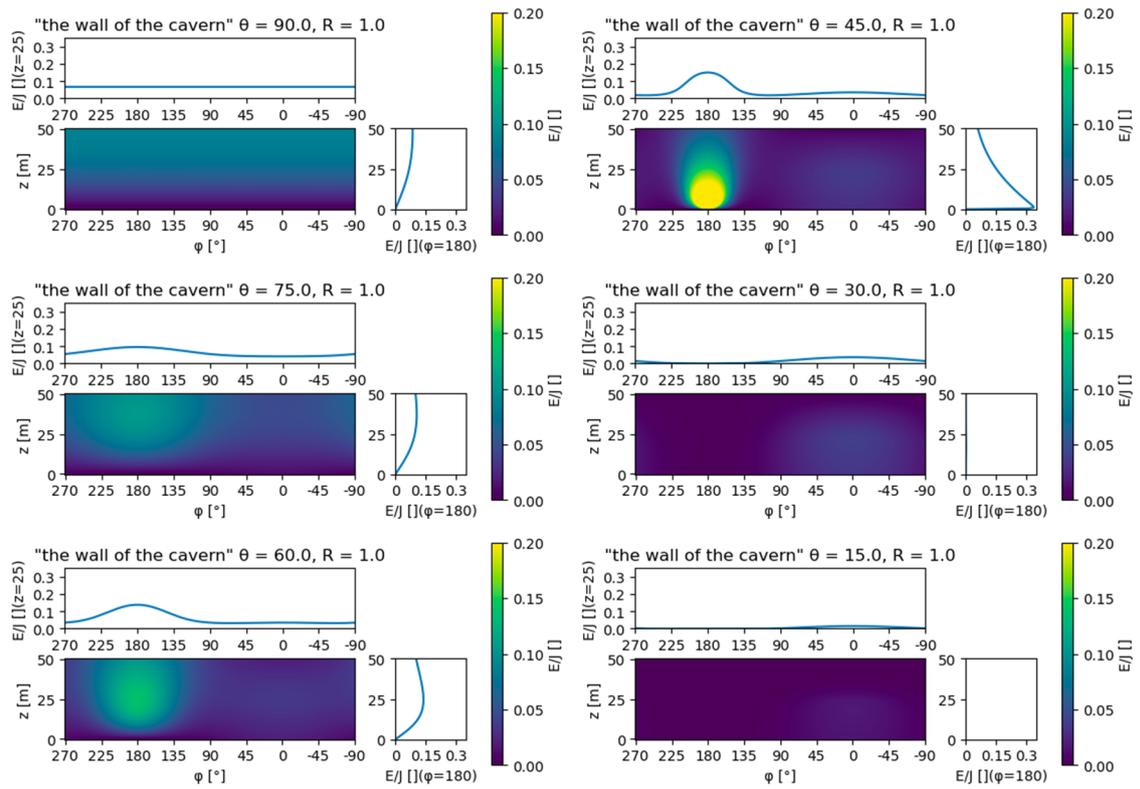


Fig.10 反射光で照らされる地下空洞の壁の相対放射照度（反射光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比、 E/J ）。左下図の横軸は z 軸回りの角度 ϕ [°]、縦軸は z 軸の座標をそれぞれ示している。その右の図は $\phi = 0[^\circ]$ における各 z の E/J の値を、その上の図は $z = 25$ [m] における各 ϕ の E/J の値をそれぞれ示している。この図では反射率 R を 1 としたときの反射光による E/J の値を示し、太陽直達光による E/J の値は除いている。

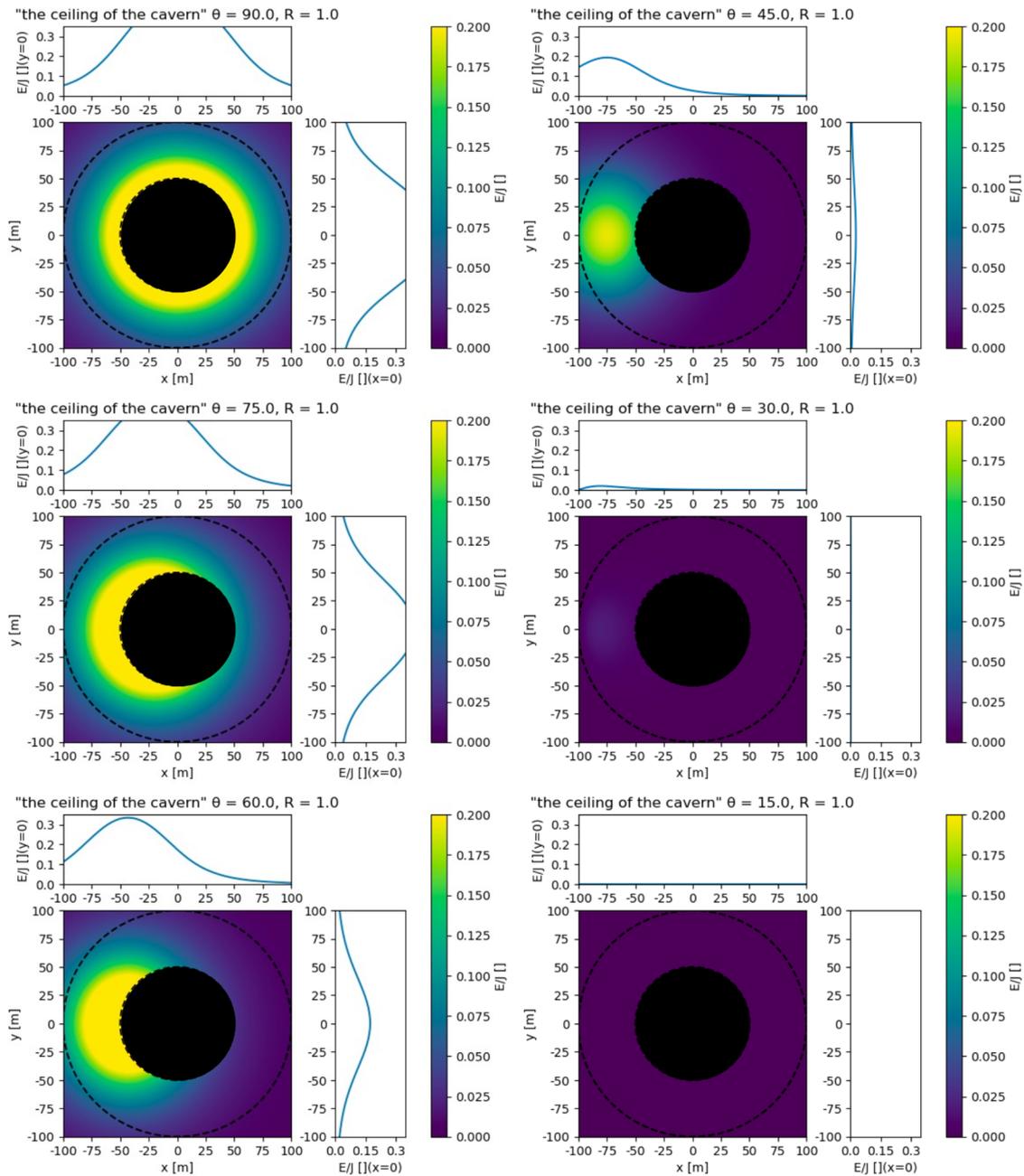


Fig.11 反射光で照らされる地下空洞の天井の相対放射照度（反射光による放射照度 E の、太陽定数 J に対する比、 E/J ）。 x 軸、 y 軸については Fig.1 を参照。各分布図におけるその上図と右図はそれぞれ x 軸、 y 軸上の E/J の値を示している。内側の黒点線は縦孔の壁の位置を、外側の黒点線は地下空洞の壁の位置を、それぞれ空洞の天井に投影したものである。この図では反射率 R を 1 としたときの反射光による E/J の値を示し、太陽直達光による E/J の値は除いている。

入射光量: Fig.12 は、相対入射光量 (E_{px}/J) の計算結果の分布を示している。ここで、 E_{px} は単位時間当たりにカメラの各画素に入射する単位面積当たりの光エネルギー、 J は太陽定数である。ここでは、縦孔の西壁 (case 1)、縦孔の東壁 (case 2)、地下空洞の西壁 (case 3)、地下空洞の東壁 (case 4)、縦孔の壁の上層階から縦孔の底 (case 5)、縦孔の壁の下層階から縦孔の底 (case 6) の 6 つの case について調査した。カメラは縦孔の中心軸上にあると仮定する。図 11 の各 case におけるパラメータセット (縦孔の底からのカメラの高さ h [m]、カメラのボアサイト方向の方位角 ϕ [°] と仰角 e [°]) を表 2 に示す。はやぶさ 2 ONC-W 相当のカメラ、すなわち焦点距離 f が 10.22[mm]、画素サイズ S_{px} が 13[μ m]、画素数 $N_{px} \times M_{px}$ が 1024 \times 1024 のカメラを考える (Suzuki, et al. 2018.¹¹参照)。太陽高度 θ は 45°、反射率 R は 0.1 とした。

Fig.12 の case 1,2 は、カメラは縦孔の壁の高さ ($h=75$ m) の中間に位置し、カメラのボアサイトは真西方向である。入射光は、縦孔の壁と地下空洞の壁からの反射光によるものである。この場合の最大相対入射光量は、case 1 では図の中央に見えるボアサイトにおいて 3.67×10^{-8} である。case 2 では、カメラの高さは case 1 と同じであるが、カメラのボアサイトは真東である。この場合、ボアサイトでの相対入射光量 6.08×10^{-10} が最大となる。

Fig.12 の case 3 および case 4 では、カメラの高さ (h) は case 1 および case 2 からさらに高度を下げた 25m であり、カメラの各ボアサイトはそれぞれ西向きおよび東向きである。case 3 の最大相対入射光量は 3.22×10^{-8} であり、これは主に太陽直達光によって照らされる地下空洞の西側の底からの反射光によるものである。一方、case 4 の最大入射光量は 3.45×10^{-10} であり、これは太陽直達光ではなく、一次反射光のみによって照らされる縦孔の東側の壁からの二次反射光によるものである。

Fig.12 の case 5 と case 6 では、カメラは縦孔の壁の上層と下層 (それぞれ $h=50$ m と 100 m) に位置され、カメラのボアサイトはいずれも直下である。この場合、カメラは縦孔と地下空洞の底からの反射光を捉える。case 5 では、図の左側で見られる最大の相対入射光量は、太陽の直達光に照らされた地下空洞の西側の底からの反射光によるものである。case 5 と case 6 の相対入射光量の範囲は、それぞれ $4.87 \times 10^{-12} \sim 2.32 \times 10^{-8}$ 、 $4.35 \times 10^{-11} \sim 3.35 \times 10^{-10}$ である。

以下の Table 2 に Fig.12 で示した各 case における、光が入射する各ピクセルでの相対入射光量の最大値と最小値を示す。

Table 2. 相対入射光量の最大値と最小値

case	撮影時の高さ h [m].	撮影時のボアサイトの方位 角 ϕ と仰角 e	相対入射光量 E_{px}/J の最 大値	相対入射光量 E_{px}/J の最小 値
case 1	75	$\phi=180, e=0$ (西向き)	3.67×10^{-8}	1.08×10^{-10}
case 2	75	$\phi=0, e=0$ (東向き)	6.08×10^{-10}	5.00×10^{-11}
case 3	25	$\phi=180, e=0$ (西向き)	3.22×10^{-8}	2.34×10^{-14}
case 4	25	$\phi=0, e=0$ (東向き)	3.45×10^{-10}	4.23×10^{-12}
case 5	100	$\phi=90, e=-90$ (直下)	2.32×10^{-8}	4.87×10^{-12}
case 6	50	$\phi=90, e=-90$ (直下)	3.35×10^{-10}	4.35×10^{-11}

※相対入射の計算におけるカメラのパラメータ (焦点距離、画素サイズ、画素数) ははやぶさ 2 搭載の ONC-W の仕様を仮定している

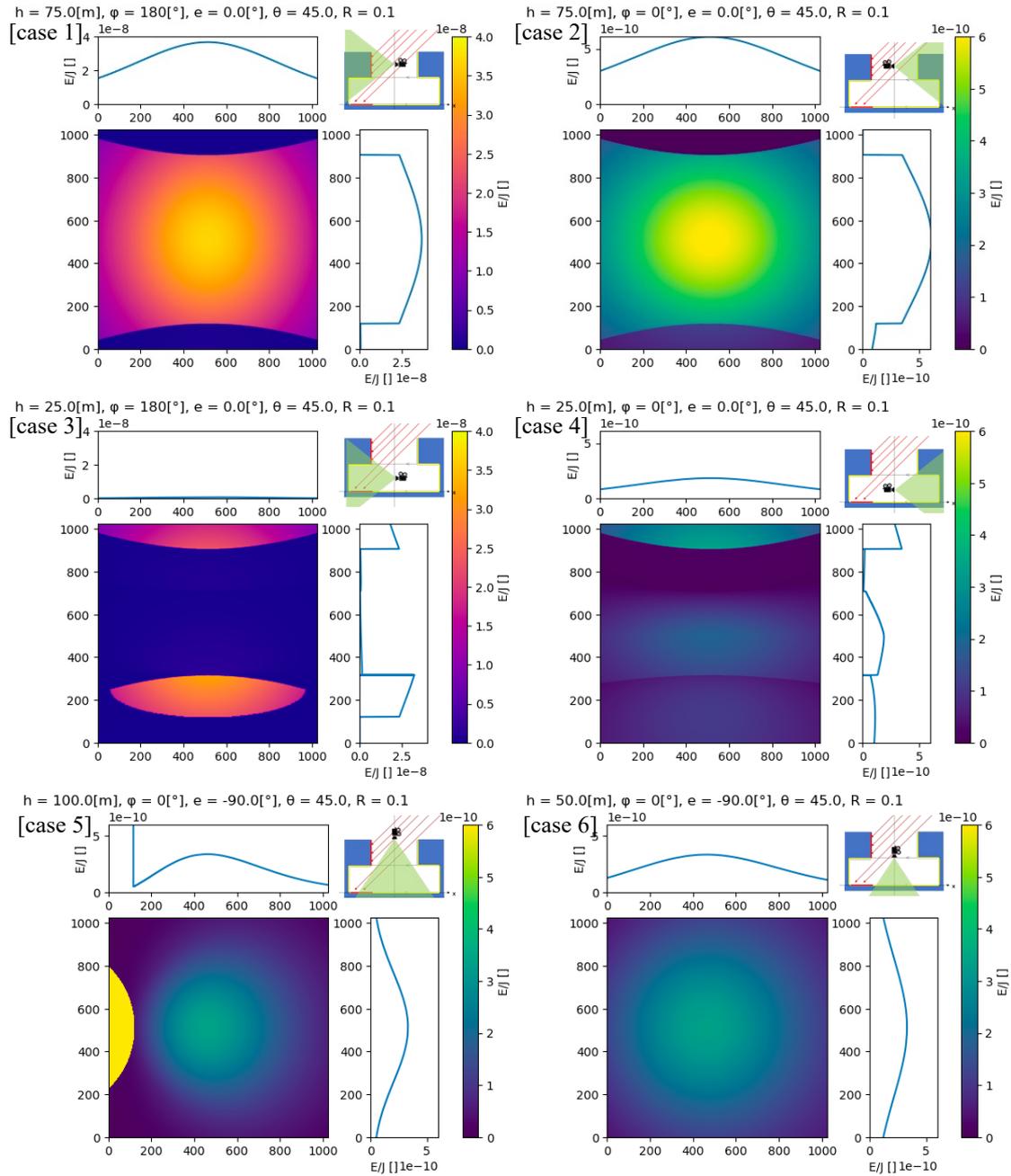


Fig.12. 太陽高度 θ が 45° 、反射率 R が 0.1 の場合、カメラの各ピクセルにおける相対入射光量（入射光量 E_{px} の、太陽定数 J に対する比、 E_{px}/J ）の分布図（左下）、分布図の横軸と縦軸のそれぞれの中央のピクセル（pixels）の値（右下、左上）、撮影条件の概略図（右上）。分布図の縦軸、横軸の値はピクセルのアドレス番号を示している。各ケースにおけるカメラの撮影条件（ h ：縦孔の中心軸上の高さ [m]、 ϕ 、 e ：視野の中心方向ベクトルの方位角、仰角 $[\circ]$ ）は Table 2 に示す。

4. 考察

この節では、本研究でのシミュレーション結果を基に、縦孔と地下空洞を撮影する探査機搭載カメラでの撮像運用について検討する。そのカメラの焦点距離、ピクセルサイズ、ピクセル数については、はやぶさ2搭載の光学カメラ ONC-W のそれらを想定する⁹⁾。

探査機は、縦孔の底への着陸を目指して降下中、着陸点を撮影しながら、障害物回避を行う。したがって、太陽高度 θ が 90° 付近では、障害物の陰ができないため着陸を行わない。一方で太陽高度が低すぎてしまうと、縦孔内部に入射する光の量が小さくなりすぎる。よってここでは、着陸時に、障害物の影ができ、入射光量が少なくなりすぎない条件として、太陽高度を 45° を設定する。この場合のカメラへの入射光量の最大値と最小値は、撮影している高さ h とカメラのボアサイトの組み合わせ6つ case について、Table 2 に示されている。これらの case について撮像運用を考察する。各 case において、0 を超え、かつ最小値となるカメラ画素への入射光量を入射光量実効最小値とよぶこととする。カメラで撮影した画像の各画素の入射光量（輝度）を示すデジタル値は DN（デジタルナンバー）で表現され、入射光量（輝度）に対する DN 値の割り当てによって、入射光量（輝度）解像度やダイナミックレンジが決まる。入射光量実効最小値を十分な入射光量解像度で撮影することを考え、ここでは、入射光量実効最小値を、 10-DN と設定すると仮定する。各 case における、撮像しているカメラの全ピクセルの中で入射光量の最大値が何 DN になるかを計算した結果並びに、その最大入射光量を表現するのに必要なダイナミックレンジ (bit) を Table 3 に示す。

ONC-W のダイナミックレンジは 12 bit (0~4095-DN) である。case 1 では、視野 (1 フレーム) の中に、太陽直達光で照らされる領域と反射光のみによって照らされる領域が含まれるが、12 bit のダイナミックレンジがあれば、入射光量実効最小値を 10-DN としながらも、飽和を避けることは可能である。case 2, 4, 6 のときは、反射光のみによって照らされる領域からの反射光だけがカメラに入射するため、カメラ入射光量実効最小値を 10-DN より細かく設定して撮影することが可能である。

一方、case 3, 5 のとき、必要なダイナミックレンジは 12 bit では不足であり、ONC-W 相当のカメラの撮影で、最大入射光量が飽和しないためには、カメラ入射光量実効最小値を 10-DN より粗くすることが許容される必要がある。

実際の探査機運用では、ゲインをさまざまに準備し、撮影着陸降下中に順次適当なカメラゲインに変えていければよい。しかし、ここでは、着陸降下中のゲインは固定として、様々なゲインとそれらの運用を事前に準備しないで済む、撮影運用方法の可能性を考える。

Table 3. 最大入射光量を表す DN 値とダイナミックレンジ[bit]

case	撮影時の高さ h [m].	撮影時のボアサイトの方位角 ϕ と迎角 e	最大入射光量を表す DN 値	ダイナミックレンジ [bit]
case 1	75	$\phi = 180, e = 0$ (西向き)	3.40×10^3	12
case 2	75	$\phi = 0, e = 0$ (東向き)	1.22×10^2	7
case 3	25	$\phi = 180, e = 0$ (西向き)	1.38×10^7	24
case 4	25	$\phi = 0, e = 0$ (東向き)	8.16×10^2	10
case 5	100	$\phi = 90, e = -90$ (直下)	4.76×10^4	16
case 6	50	$\phi = 90, e = -90$ (直下)	77.0	7

探査機に搭載されたカメラの着陸時の撮影運用を考えるため、撮影目的を整理すると、それは大きく2つに分けることができる。一つは、探査機が縦孔の底の様子を把握しながら軟着陸するための情報を得るという目的であり、もう一つは縦孔と地下空洞の構造や表面の状態を研究用に把握するための情報を得るという目的である。

縦孔の底へ軟着陸するために降りていく運用段階では、障害物回避のためなど、探査機の直下を確実に撮影できることが重要となる。ここでは、太陽高度が45度の場合に探査機が縦孔の中心を底に向かって降下していく場合を考える。この時、探査機が軟着陸を目指す縦孔の底は、縦孔の西壁からの反射光のみによって照らされている(Fig.12の case 5, case 6)。一方で、縦孔に入った直後から、50 mまでの間の高さで、下を撮像する ONC-W 相当のカメラの視野には、地下空洞の西側の底の領域で太陽直達光により照らされている部分が視野に入ってしまうことがある(例えば case 5)。従って、この場合、入射光量実効最小値を 10-DN との設定をすると、探査機の降下中に ONC-W 相当のカメラの一部の画素で飽和が生じることになる。しかしながら、探査機が着陸降下する時の最も大事な撮像対象は、探査機が軟着陸を目指す縦孔の底である。よって、探査機降下中の撮像運用では、縦孔底の撮像部分が飽和しなければ、太陽直達光で照らされている地下空洞の西側の底の撮像部分は飽和してもよいだろう。この場合(Fig.12, case 5, case 6)、縦孔降下中において、重要な縦孔底撮像については、一つのゲインで、入射光量実効最小値を 10-DN とし、かつ飽和しない、という条件を満たした撮像運用が可能となる。実際には、入射光量実効最小値を 500-DN 以上にすることが可能である(case 5, 6)。

次に、着陸用の縦孔底撮像とは別に、縦孔と地下空洞の構造や表面の状態を研究用に把握するための情報を得ることが重視される場合の ONC-W 相当カメラでの撮像運用を考える。太陽高度は45度、ONC-W 相当カメラは水平方向に向けているとする。縦孔内を着陸機が降下中、カメラの視野内に太陽直達光で照らされる領域が含まれない場合と、含まれる場合では、撮像運用は大きく異なる。太陽直達光で照らされる領域がカメラ視野内に入らない場合、例えばカメラのポアサイトが真東となるようにして撮像する場合、適切なダイナミックレンジ設定を行えば、観測対象である縦孔と地下空洞の壁、底、天井などの表面の状態を、入射光量実効最小値を 10-DN 以上とし、かつ飽和しない条件で、撮像運用が可能となる(case 2, 4)。一方、縦孔内を着陸機が降下中、太陽直達光で照らされる領域がカメラ視野内に入る(case 1, 3)場合、例えば、ONC-W 相当のカメラを西側に向けている場合は、入射光量実効最小値を 10-DN 以上で撮影し、かつカメラの対象域を飽和させないためには、降下中と着陸後にゲイン設定をそれぞれ分けることが必要とある。撮像対象のどの領域を重視するかによって、様々な運用方針が立てられよう。例えば、太陽直達光で照らされる縦孔の西側の壁と地下空洞の西側の底の詳細を得る撮像運用を重要視して、その部分からの入射光量実効最小値を 10-DN 以上、飽和しないような固定ゲインを設定し、太陽直達光で照らされていない相対的に暗い部分については、入射光量実効最小値を 10-DN 以下となることを甘受するという運用があろう。この場合、反射光のみによって照らされる地下空洞の壁や天井の詳細は、着陸後にゲインを適切に変更して撮影することになる。

5. まとめ

月の縦孔とそれに付随する地下空洞の内部の光環境を推定することを目的に、月の縦孔と地下空洞をモデル化し、数値シミュレーションによって縦孔内の放射照度と、その縦孔と地下空洞の内部をカメラで撮影したときの各ピクセルへの入射光量を求めた。縦孔の形状は、半径、壁の高さともに 50 m である円筒形とし、その下の地下空洞の形状は、縦孔と中心軸が一致する、半径 100 m 高さ 50 m である円筒形とする。縦孔、地下空洞の壁と底

は均等拡散反射をするものと仮定した。

太陽高度が 45°、反射率が 0.1 の条件において、はやぶさ 2 搭載の ONC-W 相当の仕様（焦点距離、ピクセルサイズ、ピクセル数）をもつカメラを用いた探査機が縦孔内部に侵入して撮影するときのダイナミックレンジと撮影運用について検討した。縦孔、空洞内で 1 回の反射光のみによって照らされる領域を撮影する場合において、ONC-W の 12bit のダイナミックレンジは、最大入射光量が飽和しないように、かつ、入射光量実効最小値（0 を超え、かつ最小値となるカメラ画素への入射光量）を 10-DN 以上で分解することが可能であることがわかった。一方、太陽直達光で照らされる領域と反射光のみによって照らされる領域を同時に撮影する場合、最小入射光量が 10-DN になるようにして、かつ、最大入射光量が飽和しないようにするためには、ダイナミックレンジは 12bit では不足であることがわかった。この場合、太陽直達光で照らされる領域からの光を飽和させること、または、反射光のみによって照らされる領域からの入射光量の分解能を粗くすること、どちらかを甘受しなければならない。探査機が着陸中にゲイン設定を固定とする場合、撮影目的、撮像対象に応じて、太陽直達光で照らされる領域からの入射光量、または反射光のみによって照らされる領域からの入射光量に適するゲインを設定して撮像運用することが必要であり、本研究による成果は、その運用検討、に大いに利用される。

参考文献

- 1) J. Haruyama, et al.: Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras, *Geophysical Research Letters*, 36(2009), L21206.
- 2) J. Haruyama, et al.: New Discoveries of Lunar Holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii, 41st Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, LPI Contribution No. 1533, p.1285, 2010.
- 3) M.S. Robinson, et al.: Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits, *Planetary and Space Science*, **69 (1)** (2012), pp. 18-27.
- 4) G. E. Cushing, et al.: THEMIS observes possible cave skylights on Mars, *Geophysical Research Letters*, **34** (2007), pp. L17201.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 池谷広大ら, : 月の縦孔内部の光環境の推定, JAXA-RR-22-004, 2022, pp 1-15.
- 9) H. Suzuki, et al.: Initial inflight calibration for Hayabusa2 optical navigation camera (ONC) for science observations of asteroid Ryugu, *Icarus*, 300 (2018), pp. 341-359.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-23-007

JAXA Research and Development Memorandum

月の縦孔内部の光環境の推定(その2)

Estimation of the light environment inside a Lunar Hole (part 2)

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 2024年2月15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.

