

2023/08/26  
縦孔研究会

# 反射シミュレーションによる 月の縦孔・地下空洞の光環境の推定

---

○池谷広大(東海大学, JAXA), 春山純一(JAXA/ISAS), 三宅互, 田中真(東海大学)

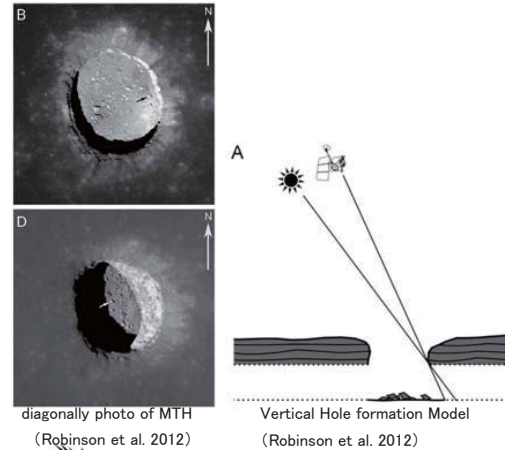
## 目次

---

1. 研究背景
2. 研究手法
3. 研究結果
4. 考察
5. まとめ

# 1. 研究背景 月の縦孔と溶岩チューブ

- 月の縦孔  
SELENE「かぐや」のデータにより発見  
(Haruyama, et al 2009)  
底には広い地下空洞が存在する可能性  
東西方向に数十mの奥行きを観測(LRO)  
(Robinson et al. 2012)



## ● 縦孔の形成要因

①溶岩チューブ…溶岩が流れ出した後にできる空洞



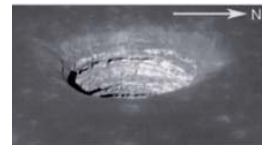
②ドレインバック…噴火口のマグマが地中に戻りできる空洞



3

# 1. 研究背景 縦孔探査

- 縦孔探査によって期待されること
  - ・月の火成活動の解明  
非洪水型玄武岩型の噴火様式, 表面形成の解明
  - ・基地利用のためのデータ収集(放射線, 温度, 空洞の構造, . . . )



diagonally photo of MTH(Robinson et al. 2012)

## ● 光学カメラで得られる情報

縦孔の構造 : 地下空洞の規模, チューブ構造であるか  
 表面の状態 : 溶岩鍾乳, 気泡, 喫水線構造, 縄状溶岩

一方 縦孔の内部は未探査, 光学環境はわかっていない



気泡のある玄武岩(伊豆大島)

## ● 本研究の課題の設定

縦孔内部の光環境を推定し, 縦孔内部を適当に撮影することが目的

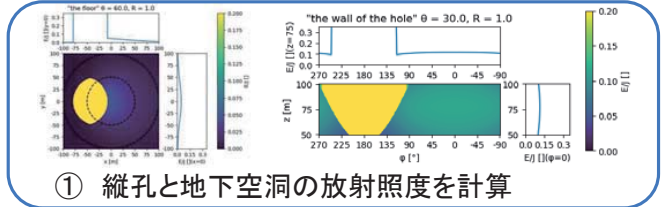
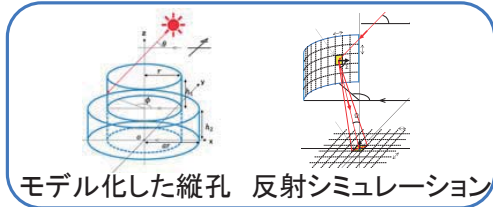
- ➔ 縦孔をモデル化し, 縦孔内部の反射光をシミュレーションする
- ・シミュレーションの計算結果を基にカメラの仕様や運用方法を検討

4

## 2. 研究手法 研究目的研究手法

### 縦孔と地下空洞の光環境を推定する

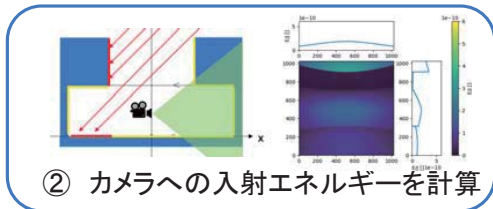
▶月の縦孔と地下空洞をモデル化 → 反射光をシミュレートする



① 縦孔と地下空洞の放射照度を計算

### 探査機の光学カメラで月の縦孔と地下空洞の内部を適切に撮影する

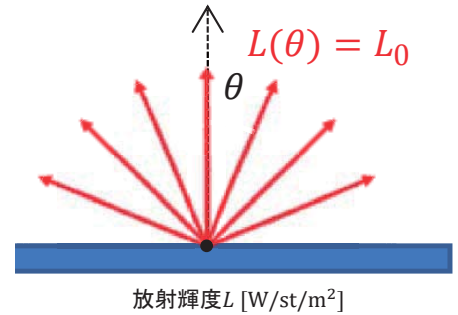
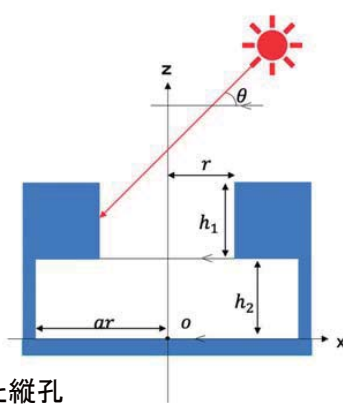
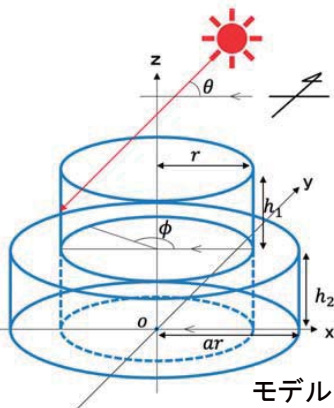
▶シミュレーションによるカメラ仕様と撮影運用の検討



5

## 2. 研究手法 縦孔と反射のモデル

- 縦孔を円筒状にモデル化  
→  $r, h_1, h_2 = 50 \text{ m}$  の形状 地下空洞の半径は100m を仮定  
※静かの海の縦孔: 半径 $r$  約43~54m, 壁の厚さ $h_1$  約47m, 空洞高さ約60m
- 反射率 $R$ の均等拡散反射(ランバート反射)を仮定  
→ 反射光の数値シミュレーションによって縦孔内部の放射照度  $E [\text{W}/\text{m}^2]$  を計算



均等拡散反射における放射輝度  $L$

6

## 2. 研究手法 放射照度の計算

- 太陽直達光に照らされる面の放射照度  $E_s$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$$E_{dA} = J \times \frac{\mathbf{n}_A \cdot \mathbf{i}}{|\mathbf{n}_A| |\mathbf{i}|} = J \cos \theta \cos \phi$$

- 放射照度  $E$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] で照らされる面の

$$\text{放射輝度 } L \left[ \frac{\text{W}}{\text{st}^2 \cdot \text{m}} \right]$$

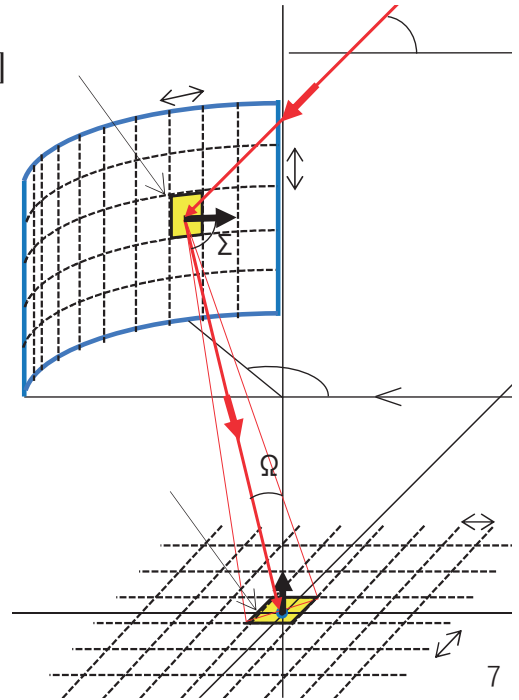
$$L = \frac{R}{\pi} E$$

- 微小面  $dS$  の放射照度  $E_{dS}$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] ( $dA$ からの)

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

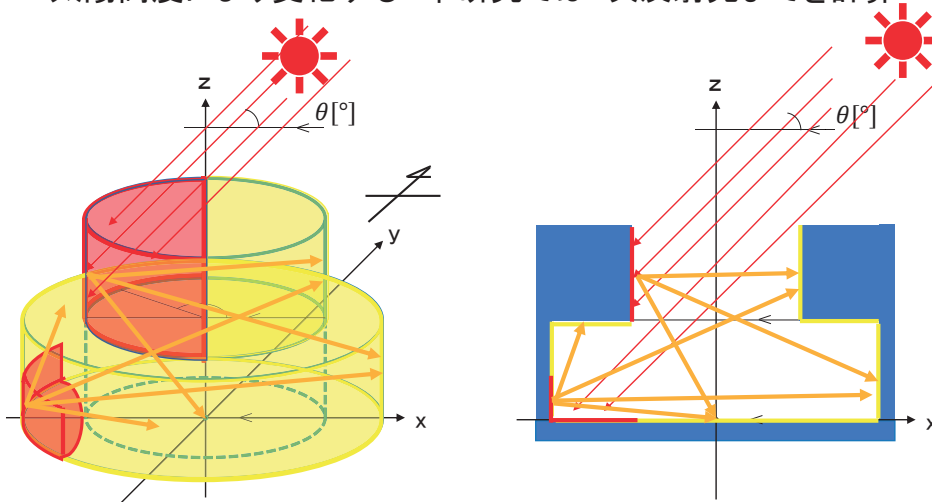
※  $l$ :  $dA$  と  $dS$  の距離

反射面と受光面を微小面(セル)に分割  
→ 反射光による放射照度, 放射輝度を求める



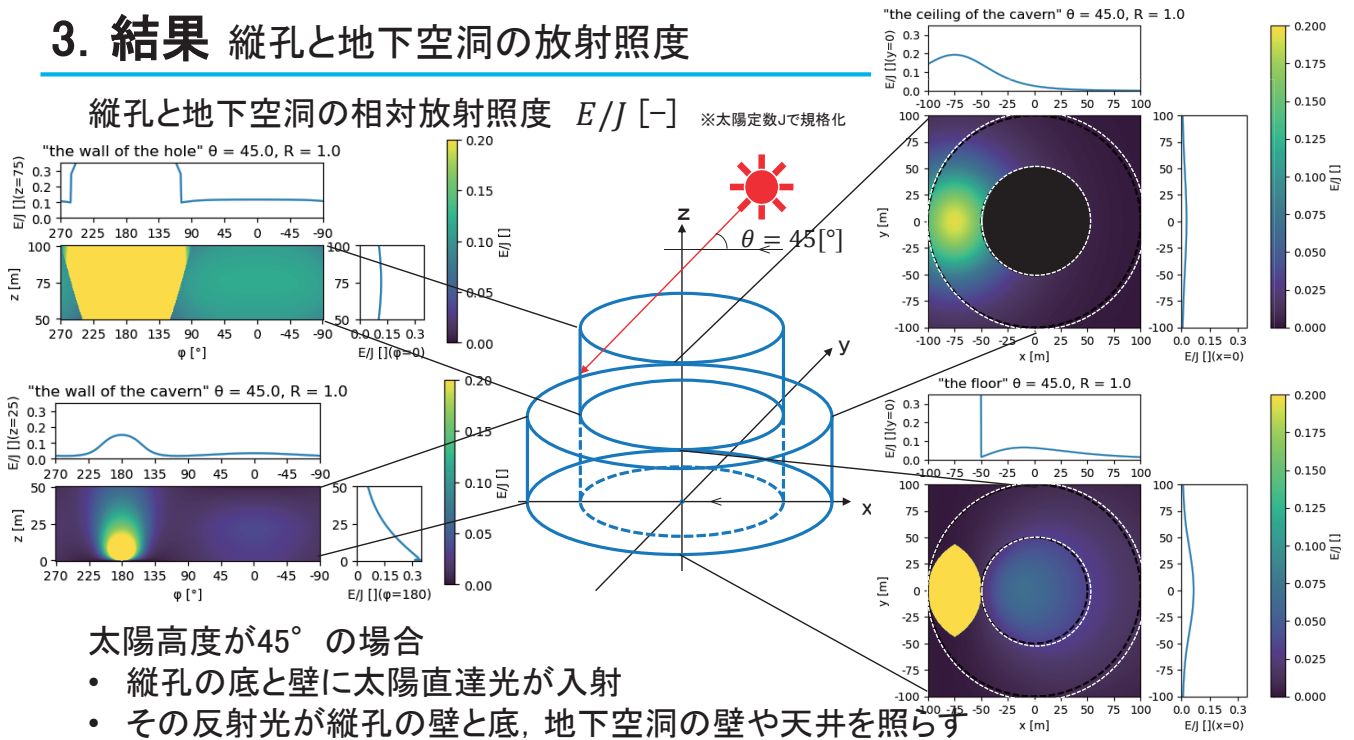
## 2. 研究手法 入射と反射

- モデル化した縦孔に入射した太陽直達光は反射しそれぞれの面を照らす  
→ 太陽高度により変化する 本研究では1次反射光までを計算



モデル化した縦孔における入射と反射の概要 赤: 太陽直達光の入射する領域 黄: 反射光が入射する領域

### 3. 結果 縦孔と地下空洞の放射照度



### 3. 結果 放射照度の最大値

相対放射照度の最大値  $E/J$  [-]

( $E/J$ :放射照度 $E$ と太陽定数 $J$ の比, 反射率 $R = 1$ )

Maximum of Relative Irradiance $E/J$ [-]	縦孔の底	縦孔の壁	地下空洞の壁	地下空洞の天井
$\theta = 90^\circ$	0.00	0.17	0.09	0.28
$\theta = 75^\circ$	0.03	0.16	0.11	0.35
$\theta = 60^\circ$	0.05	0.12	0.14	0.33
<b><math>\theta = 45^\circ</math></b>	<b>0.07</b>	<b>0.12</b>	<b>0.35</b>	<b>0.19</b>
$\theta = 30^\circ$	0.07	0.12	0.04	0.02
$\theta = 15^\circ$	0.03	0.07	0.02	0.00

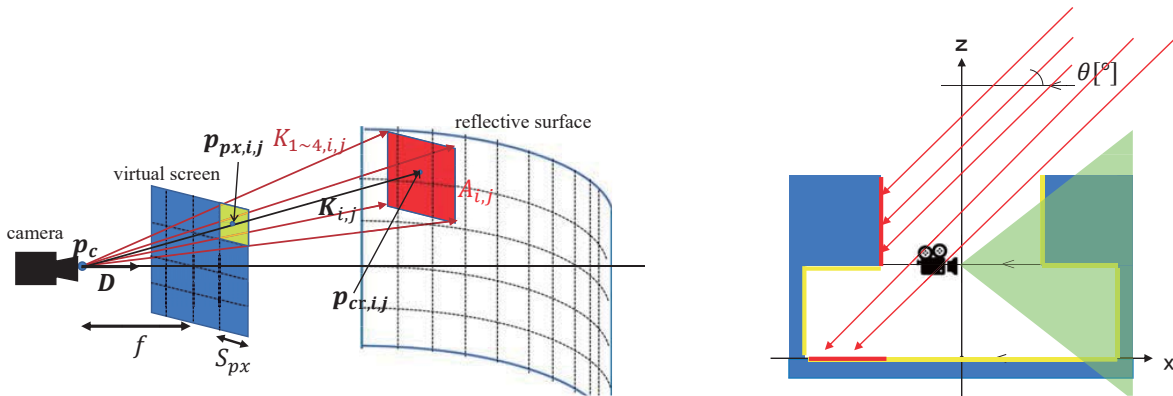
※小数点以下第2位を四捨五入

- 縦孔と地下空洞の内部の各表面は反射光で照らされている
- 相対放射照度の最大値は, 最大約  $0.1 \sim 0.35 \times JR$  [ $W/m^2$ ]

## 2. 研究手法 入射光量の計算

- カメラの各ピクセルへの入射光量  $E_{px}$  [ $W/m^2$ ] を計算  
(任意の位置と方向を設定可能)

本発表で示す計算にははやぶさ2搭載広角カメラ ONC-Wのパラメータを使用  
 ピクセルサイズ  $S_{px}$  :  $13 \mu m$ , 焦点距離  $f$  :  $10.22 mm$ , ピクセル数:  $1024 \times 1024$   
 →  $100 m$ 先での空間解像度:  $0.1272 m$ ,  $100 m$ 先での視野:  $130.25 \times 130.25 m$



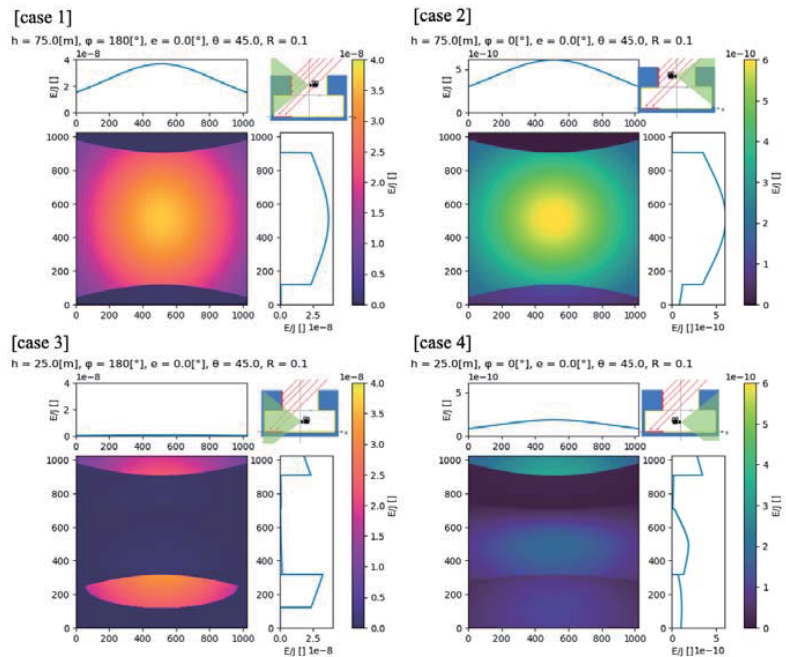
11

## 3. 研究結果 カメラへの入射光量(壁の撮影)

- カメラの各ピクセルへの入射光量  $E_{px}/J$  [-]  
 ・太陽高度  $\theta = 45^\circ$  のとき  
 ・反射率  $R = 0.1$  を仮定

縦孔と地下空洞の壁の間の高さにおいて、真西と真東を向けて撮影した際の入射光量  $E_{px}/J$  の分布

- ・  $h = 75 m$  (case 1, 2) のとき  
 → 縦孔と地下空洞の壁から
  - ・  $h = 25 m$  (case 3, 4) のとき  
 → 縦孔の壁と地下空洞の壁、底、天井から
- 反射光がカメラに入射



12

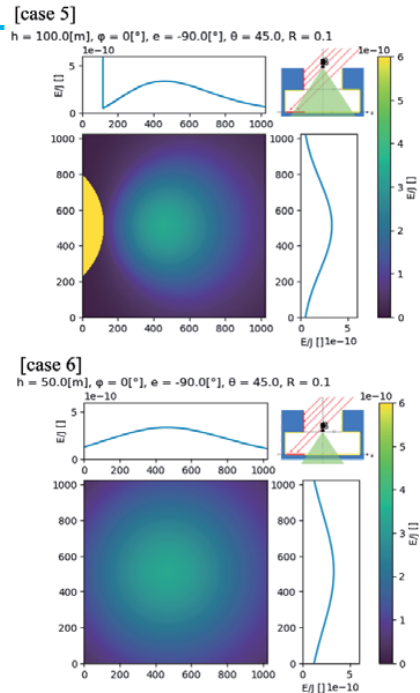
### 3. 研究結果 カメラへの入射光量(底の撮影)

- カメラの各ピクセルへの入射光量  $E_{px}/J$  [-]
  - ・太陽高度  $\theta = 45^\circ$  のとき
  - ・反射率  $R = 0.1$  を仮定

鉛直下方を向けて、縦孔の壁の上端と下端のそれぞれ高さにおいて撮影した際の入射光量  $E_{px}/J$  の分布

・case 5, 6どちらも縦孔の底からの反射光がカメラに入射

・case 5( $h = 75$  m)のとき、太陽直達光が入射する領域と反射光のみによって照らされる領域からの光がカメラにそれぞれ入射



13

### 3. 研究結果 最大値最小値

- 各撮影条件における相対入射光量  $E_{px}/J$  [-] の最大値, 最小値  
 ( $E_{px}/J$ : 入射光量  $E_{px}$  の太陽定数  $J$  に対する比, 反射率  $R=0.1$  としたときの値)

case	撮影の高さ $h$ [m]	カメラの向き ( $\phi, e$ )	最大値	最小値
case 1	75	$\phi = 180, e=0$ (西向き)	$3.67 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^{-10}$
case 2	75	$\phi = 0, e=0$ (東向き)	$6.08 \times 10^{-10}$	$5.00 \times 10^{-11}$
case 3	25	$\phi = 180, e=0$ (西向き)	$3.22 \times 10^{-8}$	$2.34 \times 10^{-14}$
case 4	25	$\phi = 0, e=0$ (東向き)	$3.45 \times 10^{-10}$	$4.23 \times 10^{-12}$
case 5	100	$\phi = 90, e=-90$ (鉛直下方)	$2.32 \times 10^{-8}$	$4.87 \times 10^{-12}$
case 6	50	$\phi = 90, e=-90$ (鉛直下方)	$3.35 \times 10^{-10}$	$4.35 \times 10^{-11}$

$\phi$ : X軸からポアサイトまでのZ軸まわりの反時計回りの回転角度  
 $e$ : ポアサイトの仰角

※最小値は0を除く

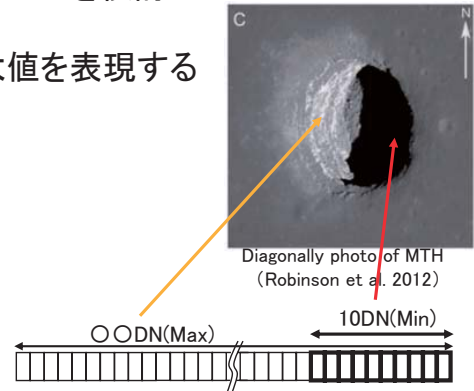
- ・太陽直達光が入射する領域が画角内に入る撮影条件では、  
 入射光量の最大値と最小値の差が大きい

14

#### 4. 考察 縦孔探査におけるダイナミックレンジの検討

- 反射シミュレーションより太陽光が直接入射しない領域にも反射光が入射  
→ 反射光で照らされる縦孔内部を撮影できる可能性
- カメラへの入射光量の計算結果からダイナミックレンジを検討
  - ・本発表では, 太陽高度  $\theta=45^\circ$  の条件で検討
  - ・入射光量の最小値を10DNで表すとしたとき, 最大値を表現するために必要なダイナミックレンジ(bit)を見積もる

case	最大入射光量のDN値	必要なダイナミックレンジ[bit]
case 1	$3.40 \times 10^3$	12
case 2	$1.22 \times 10^2$	7
case 3	$1.38 \times 10^7$	24
case 4	$8.16 \times 10^2$	10
case 5	$4.76 \times 10^4$	16
case 6	77.0	7

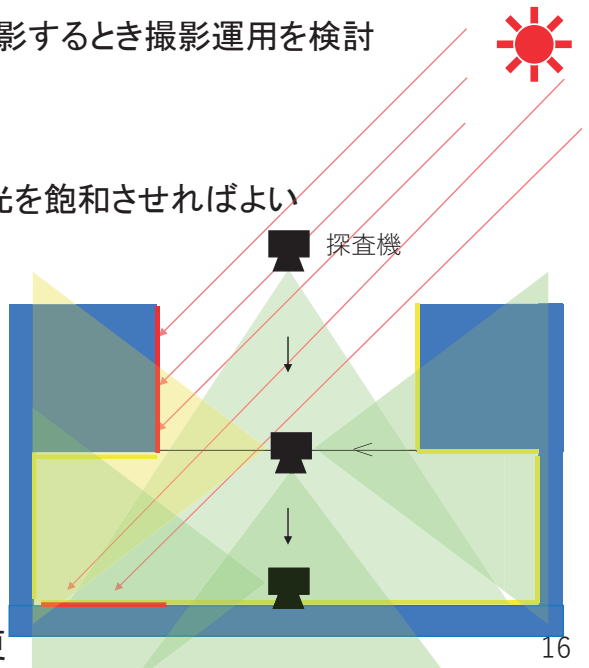


太陽直達光で照らされる領域が画角内に映るとき  
→ ONC-W のダイナミックレンジ12bit では不足

#### 4. 考察 縦孔降下中で撮影運用の提案

- 太陽高度  $\theta = 45[^\circ]$  のとき空洞内部をカメラ撮影するとき撮影運用を検討

- ・鉛直下方のカメラ(障害物検知, 縦孔底撮影)  
着陸点の縦孔の底は反射光のみで照らされる  
→ 太陽光が入射する地下空洞の底からの光を飽和させればよい
- ・東向きカメラ(縦孔壁, 地下空洞撮影)  
常に反射光でのみ照らされる領域だけがカメラの画角に収まる  
→ ダイナミックレンジ12bitで最も暗い領域を10DNで表せる
- ・西向きカメラ(縦孔壁, 地下空洞撮影)  
太陽光が入射する縦孔の壁と地下空洞底が画角に入る  
→ 降下中と着陸後に露光時間orゲインを変更

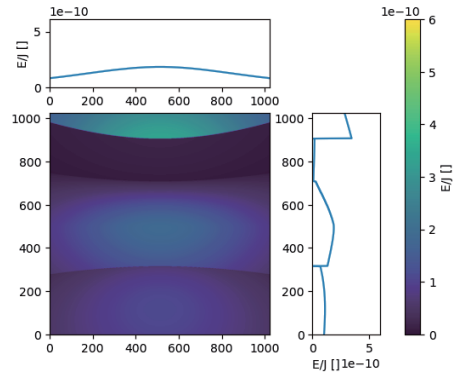
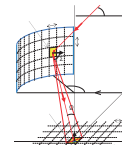
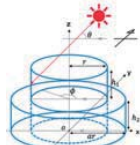
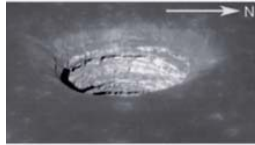
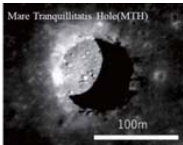
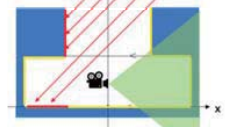




## 5. まとめ

### <研究目的>

月の縦孔を直接探査・撮影することで月の火成活動に関する情報が得られると期待  
 → 縦孔内部の光学環境を推定し、探査用光学カメラの開発に必要な情報を求める



### <研究結果>

月の縦孔と地下空洞をモデル化, 数値シミュレーションにより以下を求めた

- ・縦孔の内部が反射光による放射照度
- ・縦孔内部を撮影したときのカメラの各ピクセルへの入射光量  
 (反射パターンを均等拡散反射と仮定)

### シミュレーション結果より

- ・太陽光が直接入射しない領域にも反射光が入射
- ・縦孔内部は, 反射光により, 最大で太陽定数の0.3程度の放射照度で照らされる
- ・太陽高度  $\theta = 45^\circ$ , 反射率  $R = 0.1$  の条件においてONC-Wを用いて縦孔内部を撮影するとき, 太陽直達光が入射する領域がカメラの画角に入るとき12bitのダイナミックレンジでは不足する可能性がある  
 → 今後は縦孔の形状や反射パターンを変え, より詳細なカメラの仕様, 運用方法を検討する