

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 月の地下空洞内における水分子の熱的飛行挙動 その1

Thermal flight behavior of water molecule in lunar caverns (I)

齋藤 優里, 櫛田 果鈴, 春山 純一

Yuri Saito, Karin Kushida and Junichi Haruyama

2017年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 月の地下空洞内における水分子の熱的飛行挙動 その1

齋藤 優里<sup>\*1 \*2</sup> 櫛田 果鈴<sup>\*1 \*2</sup> 春山 純一<sup>\*1</sup>

## Thermal flight behavior of water molecule in lunar caverns (I)

by

Yuri Saito<sup>\*1 \*2</sup>, Karin Kushida<sup>\*1 \*2</sup>, Junichi Haruyama<sup>\*1</sup>

### Abstract

In this report, we investigate thermal flight behavior of water molecule in lunar caverns. We trace the repeat of flight, stop and re-flight inside in a cavern model of a water molecule that is generated at the bottom of skylight hole opening over the cavern. The assumed temperature is  $-20^{\circ}\text{C}$  that is expected in the possible cavern extending from the bottom of the Mare Tranquillitatis Hole (at 8.3N, 33.2E), one of the largest skylight holes on the Moon. As a preliminary investigation, we execute 10 times simulation runs for thermal flight behavior of a water molecule in a simplified two dimensional space that is a rectangle box, each sides are corresponding to a ceiling, a floor in parallel to the ceiling and two perpendicular back side walls. The box has an opening at a central part of the ceiling as the bottom part of vertical skylight hole which is the exit of water molecules to the outside. As a result of runs, we found that water molecules averagely escape from the cavern space in 7 sec for the case of 0.5 km semi-length cavern and 420 sec for that of 10 km semi-length one. This result means some amount of water molecules may be left, if the duration times of residence by adsorption at ceiling, floor, and back-side walls exceed 40000 sec at each stop for 0.5 km semi-length caver and 1400 sec for 10 km semi-length one. In addition, we note that the residence time of water molecules in the caverns becomes longer and deposition of water molecules probably proceed when we simulate in more realistic cases with a three dimensional cavern.

**Keywords:** Moon, hole, cavern, water molecule, thermal flight behavior, deposition

### 概 要

月の縦孔の底では、底の砂に含まれる酸素と、縦孔底に打ち込まれた太陽風起源の水素イオンとが結合して水分子が生成される可能性がある。生成された水分子は、熱速度をもって、縦孔外

---

\* 平成 28 年 12 月 20 日受付 (Received 20, December, 2016)

<sup>\*1</sup> 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系  
(Department of Solar System Science, Institute of Space Astronautical Science)

<sup>\*2</sup> 青山学院大学 理工学部 機械創造工学科  
(Department of Mechanical Engineering, Collage of Science and Engineering, Aoyama Gakuin University)

へと脱出してしまうと考えられるが、縦孔の底に水平方向奥へと広がる地下空洞が存在する場合、空洞奥へと水は熱速度をもって飛行拡散し、地下空洞内においてある程度の時間滞在する可能性がある。そこで、本稿では、月最大級の「静の海の縦孔」(8.3N, 33.2E, 空洞の床から天井までの高さは 60m, 空洞内の温度は $-20^{\circ}\text{C}$ )を念頭に、その底で生成された水分子が、縦孔の底に続いていると予想される地下空洞内において、どのように熱的飛行の挙動を示すのかを、数値シミュレーションにより検討した結果を報告する。今回は、初期的な検討として、水分子が飛行する地下空洞を、地下方向(深さ方向)とそれに垂直な方向(奥行き方向)の長方形に簡素化し、そのちょうど中間の天井に一部(縦)孔が開いている構造を仮定している。地下空洞の実際の奥行は判明していないため、今回は奥行を 0.5km と 10km と設定した。縦孔底真ん中で生成された水分子は、その場の温度( $-20^{\circ}\text{C}$ )に相当する熱速度を得て、乱数で与えられた角度で飛び出し、(ほぼ)直線飛行の後、地下空洞内の天井または奥壁において衝突停止する。そして再びその場での熱速度を得て、直線飛行後、再び地下空洞の床あるいは奥壁に到達衝突停止、という振る舞いを繰り返し、最終的には、縦孔から脱出する。本研究では、水分子の縦孔直下の床での生成から、脱出にかかる時間を、最初の初期値を変えることで、10 試行して検討することとした。なお吸着による停止継続時間は、今回は考えない。なお、水分子が、形成から脱出するまでにかかる平均的な時間の解析的検討も行った。本研究の結果、水分子 1 個が地下空洞内に留まる時間は、奥行 0.5km の場合に約 7 秒、奥行 10km の場合に約 420 秒であることが分かった。このことは言い換えると、月面が夜になった段階で、水分子は堆積せずに瞬時に縦孔から脱出してしまうことを意味している。しかし一方、地下空洞の壁面および床では吸着反応が存在し、水分子のチューブ内での滞在を長期化させる可能性がある。1 回の飛行後の水分子の平均吸着時間が、奥行 0.5km の場合約 40000 秒、奥行 10km の場合約 1400 秒であれば水分子は空洞内に堆積していくことが本研究により予想される。また、地下空洞は、実際には 3 次元であるため水分子の滞在時間は、今回の結果より長引くはずである。したがってより短い時間の平均吸着時間でも、水分子は堆積していく可能性がある。

**Keywords:** 月, 縦孔, 空洞, 水分子, 熱的飛行挙動, 堆積

## 1. はじめに

将来の月面基地という点でも、科学探査対象という点でも、非常に重要な場所である月の縦孔で、水分子が生成され拡散したときどのくらい留まるか、またさらには堆積するのかを、本稿は報告するものである。

月惑星(地球, 月, 水星, 火星, 冥王星, 小惑星, 彗星)には、通常のクレータより「深さ/直径」が大きい(すなわち直径に比して深い)縦孔と呼ばれる地形が存在する。この地形構造は壁と床の間に張り出し部分があり、その張り出し部分の下に空間が広がっている。(図 1) 例え

ば、日本の月周回衛星 SELENE (SELENE, 愛称「かぐや」) によって見つかったマリウスヒルの縦孔, 静の海の縦孔, 賢者の海の縦孔 (Haruyama et al., 2009, 2010, 2012) がそれらにあたる. この縦孔は月以外にも火星: Cushing et al., 2007, Cushing 2010, Cushing and Okubo 2015, 水星: Gillis-Davis et al., 2009, 冥王星: Ken Sterns/http://blogs.nasa.gov/pluto, 小惑星 (ヴェスタ): Denevi et al., 2012, 彗星: Mousis et al., 2015) にも発見されている.

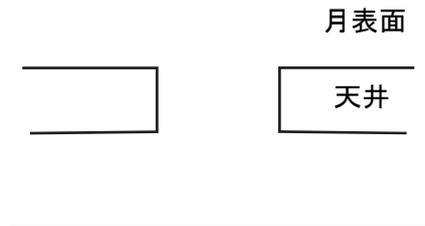


図1 縦孔の概観.

月表面上では, 昼の間に太陽風が当たり,  $H^+$  が供給される. 月表面レゴリス内に含まれる  $SiO_4$  四面体のまわりに結合した  $Fe^{2+}$  が太陽風により還元され  $Fe$  になり水分子が生成される. (Starukhina, 2012) この  $H^+$  は, 静かの海 (MTH) の場合は最大密度  $0.24 \text{ tons/m}^2$  で供給され, 水分子密度は  $2.2 \text{ tons/m}^2$  となる (Haruyama et al., 2012).

しかし, 月では重力が小さく昼の温度が高いため, 水分子は月から脱出しやすくなる. 一方で, 縦孔底でこの水分子が生成された場合, 生成した水分子は月表面に脱出され脱出するものもあるが, 一部は脱出せずに縦孔内を拡散する. この拡散した水分子が長く縦孔内にとどまっていることが分かれば, 縦孔内に水分子が堆積している可能性が高い.

## 2. 測定手法

### 2.1. 前提条件

縦孔中での飛行拡散のシミュレーションを行う際の前提条件を以下に述べる. シミュレーションは2次元平面で行った. 縦孔については, 静の海 (孔直径:  $100\text{m}$  / 孔深さ:  $107\text{m}$  / 屋根厚さ:  $47\text{m}$ ) の縦孔内を想定した. 孔の奥行については不明であるため, 今回は奥行を  $0.5\text{km}$  と  $10\text{km}$  としてシミュレーションを行った. 水分子の初速度  $v$  は分子の平均運動エネルギーから求める. 平均運動エネルギーの式は以下の式で表せる.

$$\frac{1}{2}mv^2 = kT \quad (1)$$

ここで,

$m$ : 1分子あたりの質量,  $m = 2.98897 \times 10^{-26} \text{ kg}$

$k$ : ボルツマン定数,  $k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$ : 孔内の絶対温度, 今回  $T = 253\text{K}$  を使用.

である. 水分子の挙動においては, 等速直線運動とし, 上記で導出した初速度で運動するものと

考える．水分子の生成場所については，孔直径中心に $H^+$ が入りそこで水が生成されたものとする．また，今回水分子の吸着は考えないものとする．

## 2.2. シミュレーション実験手順

シミュレーション実験手順を以下に示す．

- (1) 孔中心直下を原点 $(x,y)=(0,0)$ とする．
- (2) 原点からランダムに角度 $(0\sim\pi)$ を与え次の地点に飛ばす．ある地点から乱数角度を与えられて次の地点に飛ぶまでを1飛行とする．ただし，1回目の飛行で脱出する場合は結果から除く．
- (3) 次の飛ばす角度が，穴から出ていく角度の範囲内にある場合を脱出とし，その脱出までの時間を縦孔内の水分子の脱出時間とし記録する．また，その時の反射回数も記録する．一方，範囲外の場合はそのまま次の地点に飛ばし，脱出するまでそれを繰り返す．
- (4) 生成され脱出するまでを1試行とする．奥行を変え，奥行ごとに10試行行う．なお，角度を与えるために発生させる乱数列は，試行 No.が同じであれば奥行に関わらず，同じものを使用する．

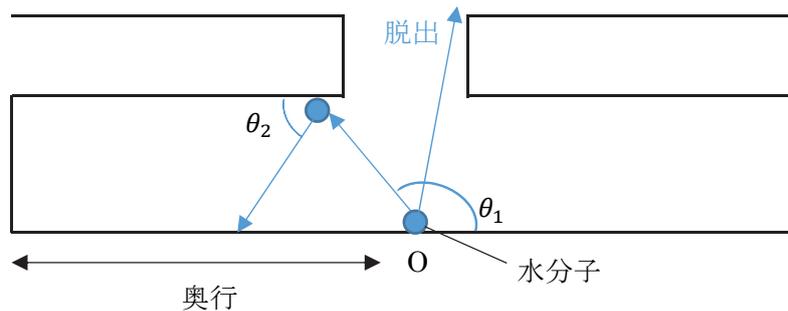


図2 シミュレーション概略図

## 2.3. シミュレーション結果の解析検討

水分子が1回反射するまでにかかる時間と脱出するまでの時間の解析的検討を行った．

角度別の1回反射するまでの時間を求め，その平均をとることで，水分子が1回反射するまでにかかる時間の平均を求めることができる．奥行を $l[km]$ ，孔の深さと天井の厚さの差を $d[km]$ ，水分子速度を $v = 483.4549686[km/s]$ とすると，1回反射するまでにかかる時間の解析値 $t$ は以下のようなになる．

$$t = \frac{2}{\pi} \left( \int_0^{\phi_1} \frac{l \cos \phi}{v} d\phi + \int_{\phi_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d \sin \phi}{v} d\phi \right) , \quad \phi_1 = \tan^{-1} \frac{d}{l} \quad (1)$$

縦孔の底の部分 $L$ に到達した水分子のうち孔の天井を見込む角 $(\tan^{-1}(\frac{L/2}{d}) \times 2)$ に飛行する水分子が縦孔から脱出することになるので，地下空洞の天井・壁・床の総じた長さ $2(2l + d)$ に対する孔の直径 $L[m]$ の割合に，この天井を見込む角度をかけることで脱出までにかかる飛行回数

が求められる。この飛行回数に、求めた 1 飛行時間 $t$ をかけると水分子の脱出時間 $T$ が算出できる。つまり、 $T$ は以下の式で与えられる。

$$T = \frac{2(2l + d) - L}{L} \times \frac{\pi}{\text{atan}\left(\frac{L/2}{d}\right) \times 2} \times t \quad (2)$$

### 3. 結果

#### 3.1. シミュレーション実験結果

表 1, 2 に奥行 0.5km, 10km の場合のシミュレーション結果を示す。

表 1 と表 2 の比較から、奥行がある方が、縦孔から水分子がでていくまでの時間 $T$ [s]がかかることがわかる。また、奥行が 0.5km, 10km どちらの場合でも、水分子が出て行くまでにかかる時間は、最大値に比べ平均値が大幅に小さい。

シミュレーションの試行回数は 10 回であったが、各奥行の飛行回数にはかなりのばらつきがある。乱数によっては奥行に関わらず数回でてしまう水分子がある。例えば、試行のうち No.3, 6, 9 は、天井と床でそれぞれ 1 回ずつ反射した後に縦孔から脱出している。

表 1 シミュレーション結果 (奥行 0.5km)

試行 No.	脱出までの時間 $T$ [s]	飛行回数 $N$	1 飛行時間 $t (=T/N)$ [s]	平均飛行距離 $L$ [m]
1	28.121	125	0.22497	108.76
2	12.516	47	0.26629	128.74
3	0.27620	2	0.13810	66.764
4	0.94111	4	0.23528	113.75
5	6.4665	15	0.43110	208.42
6	0.32903	2	0.16452	79.536
7	8.5073	31	0.27443	132.67
8	3.3986	15	0.22657	109.54
9	0.32686	2	0.16343	79.011
10	11.667	55	0.21212	102.55
平均	7.2549	29.8	0.24345	117.70

表2 シミュレーション結果 (奥行 10km)

試行 No.	脱出までの時間 $T$ [s]	飛行回数 $N$	1 飛行時間 $t (=T/N)$ [s]	平均飛行距離 $L$ [m]
1	334.98	630	0.53172	257.06
2	1059.0	2212	0.47877	231.46
3	0.27620	2	0.13810	66.764
4	0.94111	4	0.23528	113.75
5	1177.7	2392	0.49234	238.02
6	0.32903	2	0.16452	79.536
7	260.11	623	0.41751	201.85
8	1224.7	2637	0.46443	224.53
9	0.32686	2	0.16343	79.011
10	128.19	292	0.43901	212.24
平均	418.65	879.6	0.47596	230.11

### 3.2. 解析検討結果

2.3.の解析検討手法から求めた $t$ と $T$ を解析値とし、表3,4にそれぞれシミュレーション実験値と解析値をまとめた。

表3,4より、奥行0.5kmの場合、実験値が解析値よりも小さくなっている。一方で、10kmでは実験値と解析値はほぼ等しい。

表3  $t$ の実験値と解析値

	奥行 0.5km	奥行 10km
実験値[s]	0.24345	0.47596
解析値[s]	0.30139	0.46292

表4  $T$ の解析値と実験値

	奥行 0.5km	奥行 10km
実験値[s]	7.2549	418.65
解析値[s]	13.698	416.84

## 4. 考察

今回縦孔直下においてのみ水分子が脱出する可能性を解析においては考慮している。しかし一方、シミュレーション実験においては、縦孔直下以外においても角度によっては水分子が脱出することも結果に反映させている。縦孔直下以外で水分子が脱出する可能性のある地点に飛来する確率が、奥行0.5kmの場合では奥行10kmの場合に比べ高い。そのため、奥行0.5kmの場合、水

の脱出にかかる時間 $T$ の解析値（約 14 秒）は実験値（約 7 秒）に対し長くなっている。一方、奥行 10km の場合、縦孔直下以外で水分子が脱出する可能性のある地点に飛来する確率は小さくなり、結果水の脱出にかかる時間 $T$ への影響は少なくなる。そのため、奥行 10km の場合、水の脱出にかかる時間 $T$ の解析値（約 417 秒）は実験値（約 419 秒）に対しほぼ等しくなっている。

水分子の脱出までにかかる時間は、奥行 0.5km では約 7 秒、奥行 10km では 420 秒である。言い換えると、水分子が生成され始めてから、奥行 0.5km では約 7 秒後、奥行 10km では 420 秒後で生成量と脱出量が平衡状態になる。つまり、水分子の生成量と供給量が激減する夜になった瞬間に、縦孔から脱出する水分子が圧倒的に多くなり、ほぼ瞬時に水分子は縦孔から脱出しきってしまう。例えば、奥行 10km の場合、水分子 1 個が約 420 秒で脱出される。そのため、夜になった段階から約 420 秒後には、昼の間に留まった水分子は全て抜けてしまう。

ところで、水分子が脱出するまで、奥行が 0.5km の場合平均 30 回、奥行が 10km の場合平均 880 回の反射を繰り返すので、1 回の反射あたり吸着時間が、奥行 0.5km の場合約 40000 秒、奥行 10km の場合約 1400 秒であれば水分子は空洞内に堆積していくことになる。

表 5 水分子が残存するために必要な 1 飛行後の吸着時間

	奥行 0.5km	奥行 10km
必要吸着時間[s]	40320	1374.5

さらに、今回のシミュレーションは 2 次元で行ったが、実際の縦孔は 3 次元であるので、水分子の滞在時間はより長引く傾向になる。今後、より精度を高くするために 3 次元での試行を行っていく必要がある。

## 5. まとめ

将来の月面基地という点でも、科学探査対象という点でも、非常に重要な場所である月の縦孔で、水分子が生成され拡散したときどのくらい留まるか、またさらには堆積するのかを、シミュレーションした。

水分子 1 個が留まる時間は、奥行 0.5km の場合に約 7 秒、奥行 10km の場合に約 420 秒である。これは、解析で検証されている。夜になった段階で縦孔から、水分子は堆積せずすぐに脱出してしまう。しかし、地下空洞の壁面および床で吸着があった場合、1 回の反射あたり吸着時間が、奥行 0.5km の場合約 40000 秒、奥行 10km の場合約 1400 秒であれば水分子は空洞内に堆積していくことがわかった。また、縦孔は実際 3 次元なので水分子の滞在時間はより長引く傾向になる。今後は吸着の考慮し、3 次元モデルを用いた解析を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP26400459 の助成を受けたものです (JH)。

## 参考文献

- Cushing, G. E. et al., “THEMIS observes possible cave skylights on Mars”, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L17201, <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030709>, 2007.
- Cushing, G. E., “Candidate cave entrances on Mars”, *J. Cave and Karst Studies* 74(1), 33-47, DOI: 10.4311/2010EX0167R, 2010..
- Cushing, G. E. and Okubo C., “The Mars Cave Database”, 2<sup>nd</sup> Int. Planet. Caves Conf. abst.# 9026, 2015.
- Denevi, B. W. et al., “Pitted Terrain on Vesta and Implications for the Presence of Volatiles”, *Science*, Volume 338, Issue 6104, 246-249, 2012.
- Gillis-Davis, J. J. et al., “Pit-floor craters on Mercury: Evidence of near-surface igneous activity”, *Earth and Planet. Sci. Lett.* 285, 243-250, 2009.
- Haruyama, J. et al., “Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras”, *Geophys. Res. Lett.* 36, L21206, doi:10.1029/2009GL 040635, 2009.
- Haruyama, J. et al., “New Discoveries of Lunar Holes in Mare Tranquillitatis and Mare Ingenii”. 41<sup>st</sup> Lunar and Planet. Sci. Conf. abst.#1285, 2010.
- Haruyama, J. et al., “Lunar Holes and Lava Tubes as Resources for Lunar Science and Exploration”, in: Badescu, V. (Eds.), *Moon-Prospective Energy and Material Resources*, Springer, 139-164, 2012.
- Mousis, O. et al., “Pits Formation from Volatile Outgassing on 67P/Churyumov–Gerasimenko”, *Astrophys. J. Lett.* 814, Issue 1, article id. L5, 5 pp, 2015.
- Robinson, M. S. et al., “Confirmation of sublunarean voids and thin layering in mare deposits”, *Planet. Spac. Sci.* 69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2012.05.008>, 2012.
- Starukhina, L., “Water on the Moon: What is derived from the observation?”, in: Badescu, V. (Eds.), *Moon-Prospective Energy and Material Resources*, Springer, 57-85, 2012.
- Wagner, R. V. and Robinson, M. S., “Distribution, Formation Mechanisms, and Significance of Lunar Pits”, *Icarus* 237, 52-60, 2014.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-16-009

JAXA Research and Development Memorandum

月の地下空洞内における水分子の熱的飛行挙動 その1

Thermal flight behavior of water molecule in lunar caverns (I)

---

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: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成29年3月27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.

---

