

# 縦孔を基点とした月面交通ネットワーク構想 ((仮称)MoonMole 構想) における道路設計のあり方について

○山口 将一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ファイナルステージ

責任著者：山口 将一 s\_yamaguchi@finalstage.jp

キーワード：宇宙建設工学，月惑星開発，地下都市建設，縦孔ネットワーク，月面道路設計

## 1. はじめに ～過酷な月表面環境に代わり生存環境となり得る地下空洞の可能性～

月面には磁場の盾も大気もなく，太陽などからの強力な放射線が直接降り注ぎ，昼夜の寒暖差は約 300℃にも及ぶ。また，大気がないことで隕石は燃え尽きることなく月表面に到達する。

そうした過酷な環境において，月面における活動を可能とするのが月の地下空洞であり，2009年に日本の月周回探査衛星「かぐや」により発見された，縦孔の地下にあると考えられている。この縦孔は直径・深さともに数十 m あり地下空洞の天井が崩落して形成されたと考えられているが，この地下空洞に月面基地を建設すれば，一定した温度環境下で活動でき，宇宙放射線や隕石落下からの防御も可能となる。

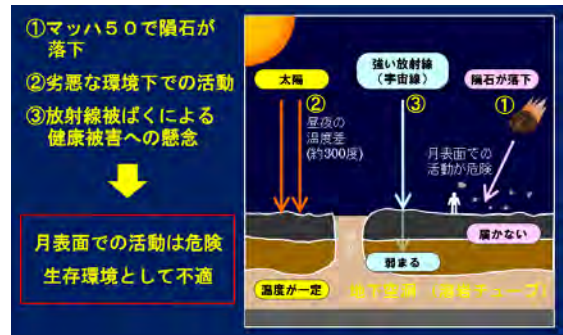


図-1 月表面と地下空洞の環境

## 2. 縦孔ネットワークの形成 ～地下空洞を延伸した交通ネットワークの形成～

### (1) シールドトンネル工法の活用

縦孔ネットワークの形成には，シールドトンネル工法に代表されるリモート掘削技術を活用し，地球もしくは月面に近いステーションからの遠隔操作によって地下ネットワーク形成を図る。課題は総重量数千トンものマシンを，分割して地球上から月面に運搬し組み立てるマシン構造とすべきことと，その運搬にかかる莫大なコストである。また，縦孔付近では，隕石衝突による岩盤の歪みが生じることを想定した支保工設計が必須になる

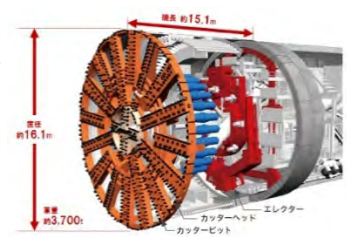


図-2 シールドマシン

など，地球環境下とは異なる要素を掌握した内空断面の設定や支保工，覆工の設計を行う必要がある。

### (2) 縦孔ネットワークの形成

現時点で月周回探査衛星「かぐや」により発見された縦孔は図-3 に示す 3 箇所である。これらは地球からの物資輸送等の離発着拠点として機能することになるが，その地下ではトンネルを介してネットワークを構築しており，相互間のエネルギー需給や物資輸送，通信や人的交流を可能とする。この縦孔ネットワークの運用にあたっては，道路交通ネットワークが必要不可欠であり，そのあるべき幾何構造等について次項で詳述する。

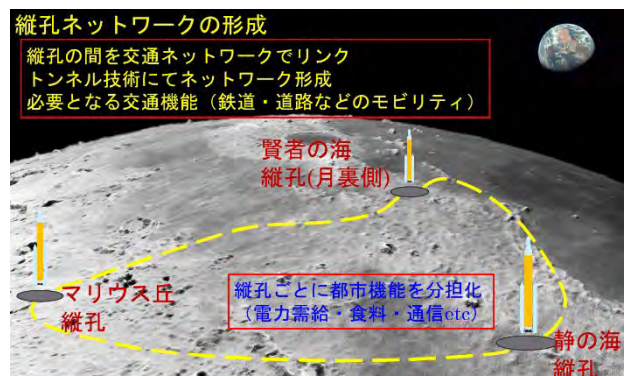


図-3 縦孔ネットワーク形成のイメージ

### 3. 月面における交通ネットワーク形成に向けた道路設計条件について

#### (1)道路設計に関する設計手法の確立に向けて

掘削断面に対する交通ネットワークのモビリティの代表的なものは「車両」であり、車両の大きさや性能などの設定が必要である。路面を受けて車両に掛かる遠心力や車両の動力性能に応じた条件設定も必要だが、空気抵抗を生むような環境下としていくか、といった環境設定も重要で、これら諸条件を明確にした上で設計手法を確立する必要がある。

表-1 道路設計に必要な主項目

設計項目	設計条件
設計車両	往来する車両規格等の設定
道路線形	最小曲線半径、最急縦断勾配の設定
片勾配	バンク設定の必要性
路面設計	使用する舗装材、路盤材（レゴリスの活用等）
諸構造物	レゴリスから生成されるコンクリート「焼結材」などを使用した構造物

#### (2)月面における曲線半径の算定例

曲線半径は「道路構造令の解説と運用」の中で式-1のように定義されており、重力が異なる月面での曲線半径を算定すると下記枠内のおりとなる。

$$R = v^2 / g(i+f) = V^2 / 127(i+f)$$

$$V^2 / \frac{v^2}{g} = 3.6^2 \times 9.81 \approx 127$$

ここに R:曲線半径(m)

v:自動車の速度(m/s)

V:設計速度(km/h)

f:横すべりに対する路面と  
タイヤの摩擦係数(f=0.15)

i:路面の片勾配(i=2.0%)

設計速度を V=60km/h とした場合、地球上では曲線半径 R=218(m)となるが、重力が異なる月面上(地球上の 1/6)では 127 とされる係数が 21 となる。ゆえに、

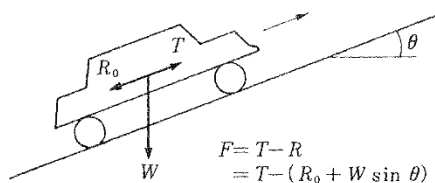
**月面上では曲線半径 R=1320(m)**

であれば車両が走行できると導かれるが、摩擦係数 (f=0.15)の設定自体が地球上の実験値等から設定されたものであり、月面で使用する舗装材を考慮した上で横すべり摩擦係数に関する調査研究が必要

式-1 「道路構造令の解説と運用 p.343」に示される曲線半径(算定例)

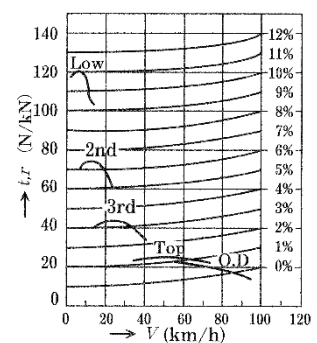
#### (3)月面における縦断勾配の設定に向けて

登坂時の運動力学は図式-1のように定義されており、月面での縦断勾配の設定に向けては、車両の登坂能力や走行性能を明確にした上で、駆動力 T、走行抵抗力 Rなどを定め、走行性能曲線を描いて設定を行う必要がある。



- F:自動車に作用する力
- T:駆動力
- R:走行抵抗力
- R<sub>0</sub>:平坦部における走行抵抗力
- θ:坂路の勾配
- W:自動車総重量

(a) セミトレーラ (32t)  
0.53W/N (7PS/t) (満載時)



図式-1 「道路構造令の解説と運用 p.428,431」に示される「登坂時に作用する力」,「走行性能曲線」

### 4. まとめ

大気環境がない月面においては、月表面での過酷な環境下こそが地球環境という大気圏外に相当すると考えられ、月面の地下空間こそが地球環境に類似させることができる唯一の空間であるという視点にたって考察した。安全な月面活動を展開していくにあたって、既に国内で縦孔と地下空洞を有効活用していくことの議論が進んでいるが、さらにその先の都市骨格やネットワーク形成を具体化・具現化していくために、必要となる土木設計手法の確立を試みていきたい。