

# 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

ファイナルステージ

代表 山口 将一

宇宙 × 土木

# ◆テーマ

- 第1回月面建設技術シンポジウム「宇宙開発における土木の役割」（2023/3/16）からいただいた知見等
  - ◆ 「月面」における都市計画的な要素（**開発の青写真**）の創造
  - ◆ **開発の方向性をパターン化**（パターン毎の調査・開発・研究）
  - ◆ **着陸拠点の計画・建設・運用の具体化**
  - ◆ **縦穴における居住環境の具体化**
- 月表面での活動拠点から縦穴を拠点とした形態へのシフト

地球とは異なる環境下で、人類が恒久的に居住を図るために、**縦穴（溶岩チューブ）の利活用に向け具体的な環境整備の在り方を議論すべき**

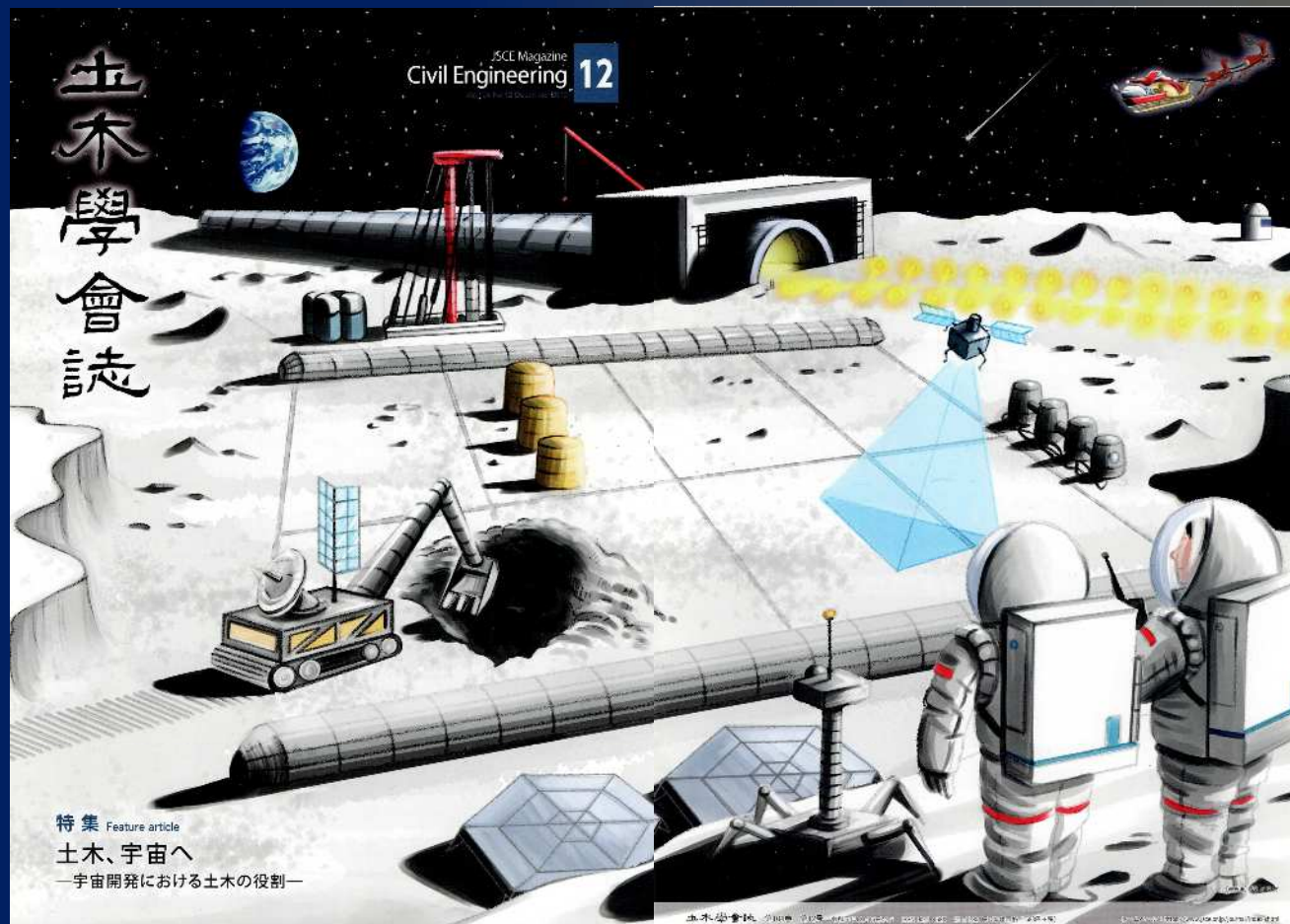
# ◆関連する動向について

## ●国内の動向（1/3）

2019：「土木學會誌」（第104巻第12号；令和元年12月15日発行）

特集「土木、宇宙へ」

**宇宙開発における土木の役割に関して特集**





# ◆関連する動向について

## ●国内の動向 (2/3)

2021 : 「宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト ; 国土交通省・経済産業省」発足

月面開発等の宇宙開発に資する建設技術について、建設事業における発展を考慮し発足

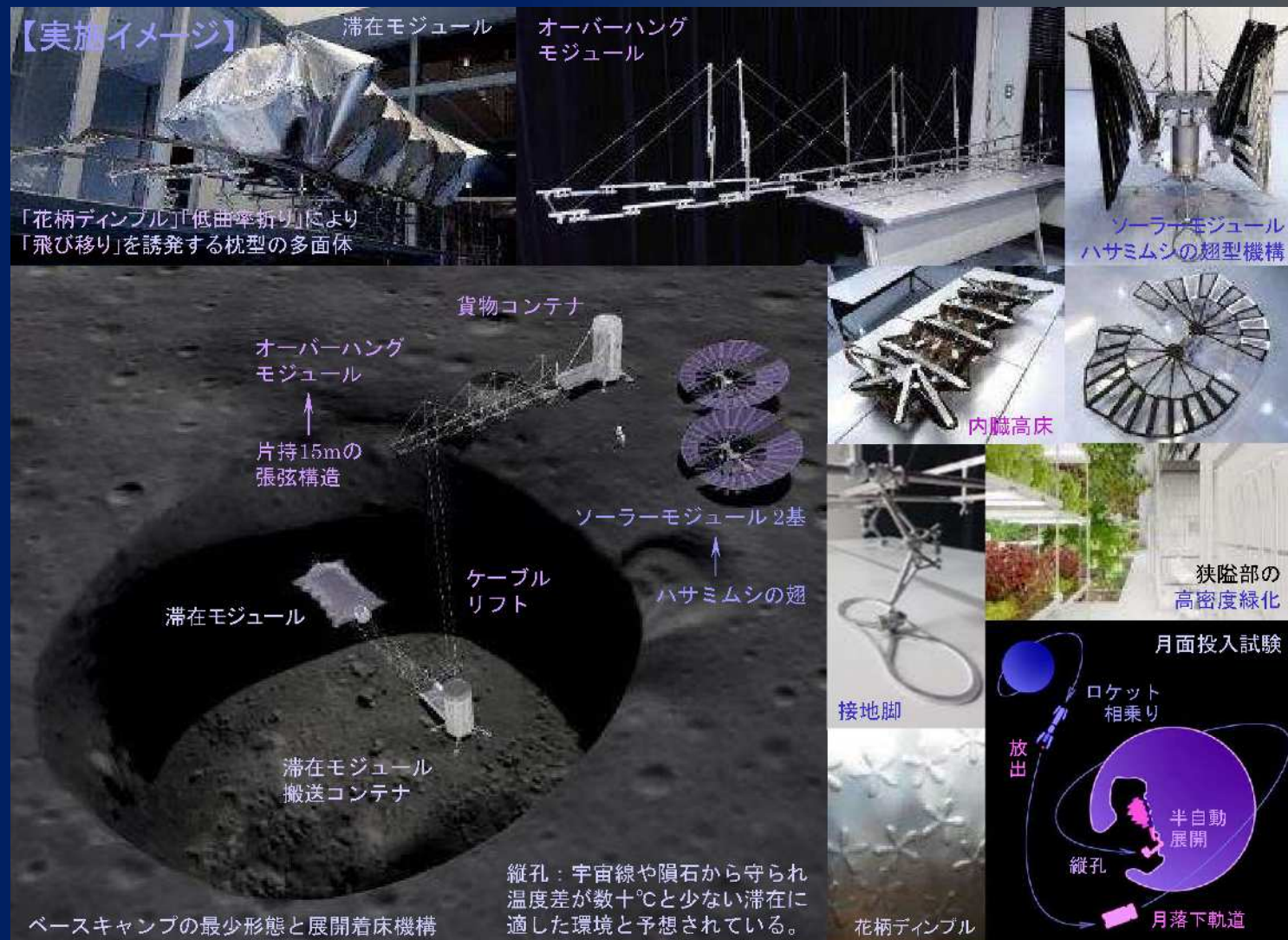




# ◆ 関連する動向について

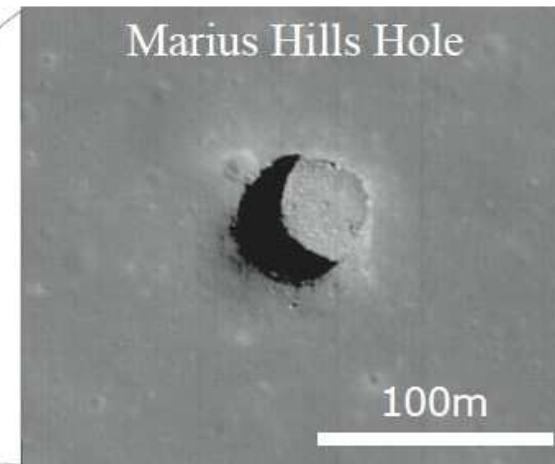
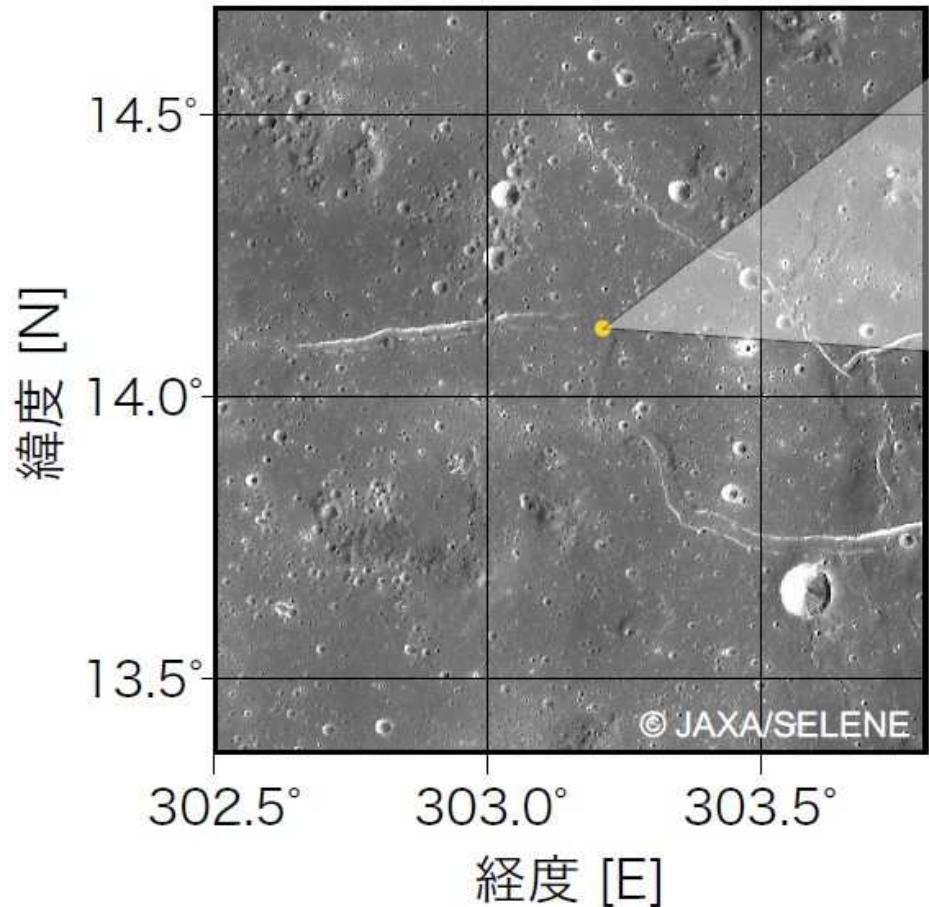
## ● 国内の動向 (3/3)

2022：「宇宙無人建設革新技術開発推進プロジェクト；国土交通省・経済産業省」にて、**縦孔を活用した技術開発**を開始



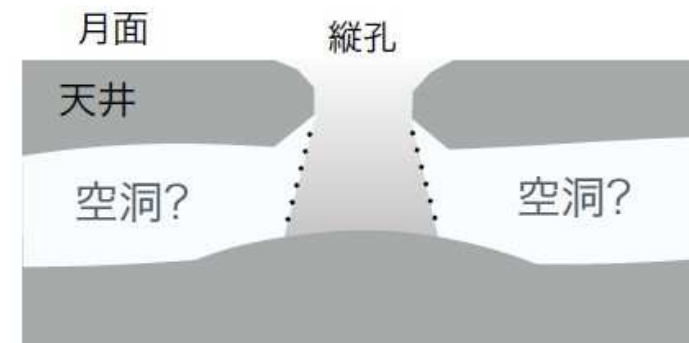
# ◆発見された縦孔（溶岩チューブ）の概要（1/2）

2009年、かぐやによって直径深さ共に約50mの深い縦孔が見つかった  
これは地下空洞に隕石衝突等で開いたものと考えられた



LRO/NAC(ID:M122584310L)

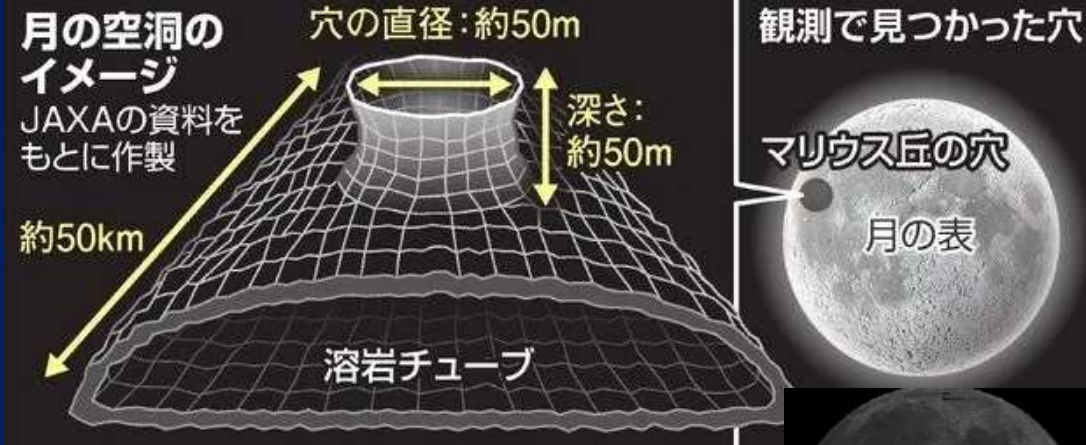
↓ 予想される断面図



地下空洞は月面上に溶岩が流れた後に形成された溶岩チューブと考えられる。



# ◆発見された縦孔（溶岩チューブ）の概要（2/2）

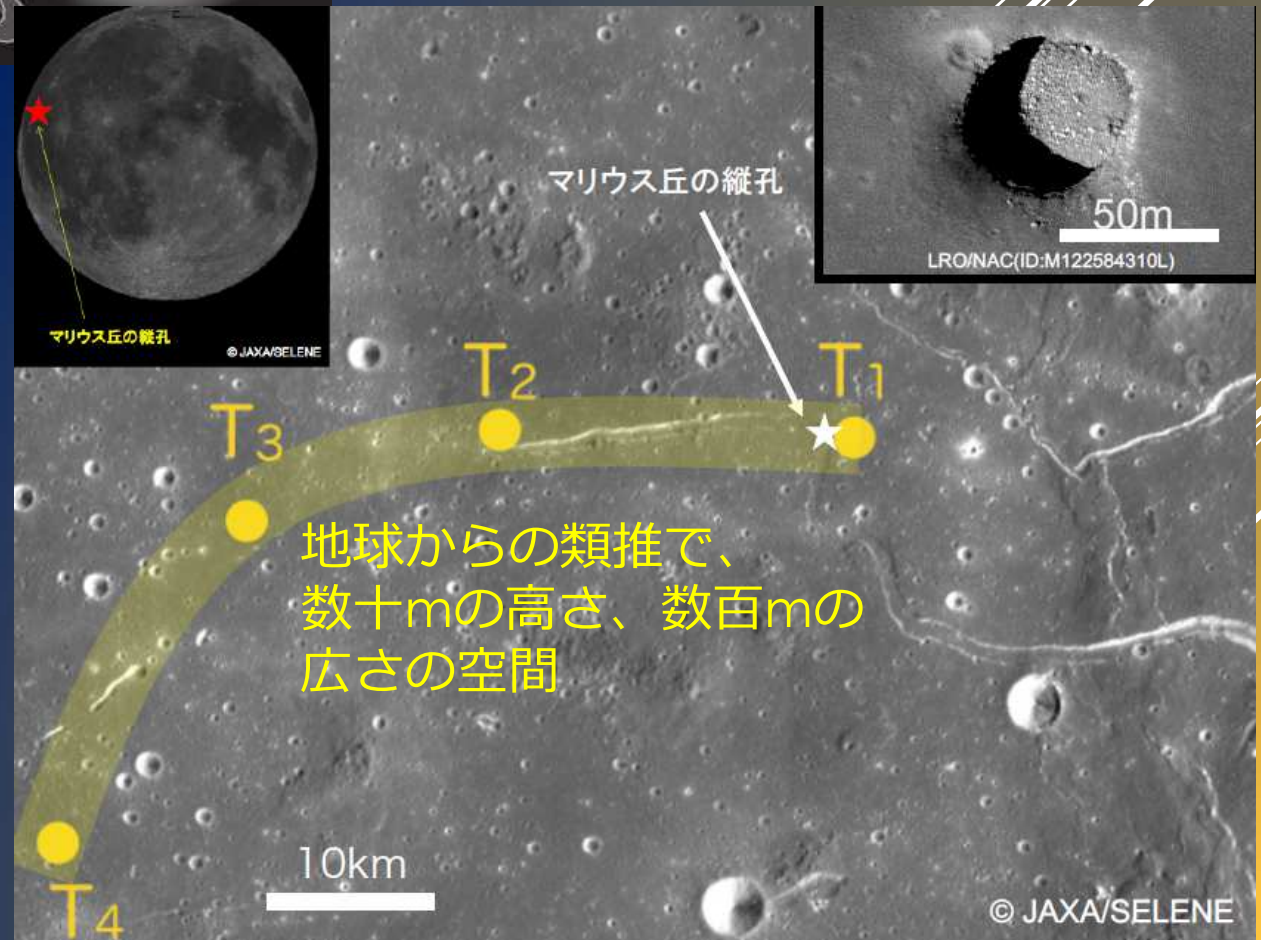


出典：朝日新聞社作製資料

縦孔から西に約50km延びる未崩壊の地下空洞(溶岩チューブ)



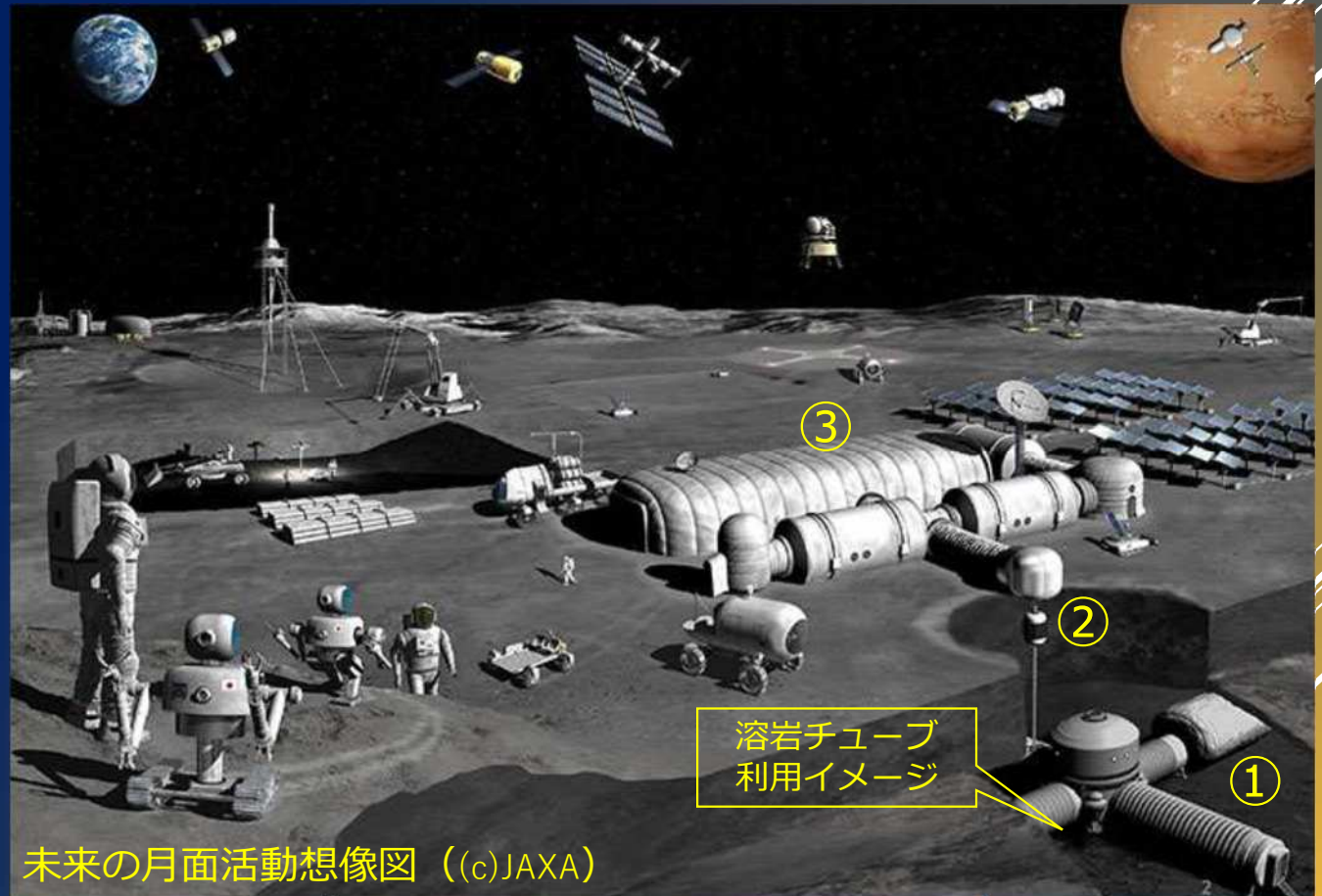
将来的に都市レベルの基地を作ることができるほど大きい



# ◆縦孔（溶岩チューブ）を活用した月面開発のイメージ

## ●「溶岩チューブ」を施工基点とした月面都市建設計画の推進に関するイメージ図（JAXA）

- ①溶岩チューブ内で月面施設のユニット等を制作
- ②縦孔から月面にリフト搬送を実施
- ③基点モジュールから施設等の築造を展開





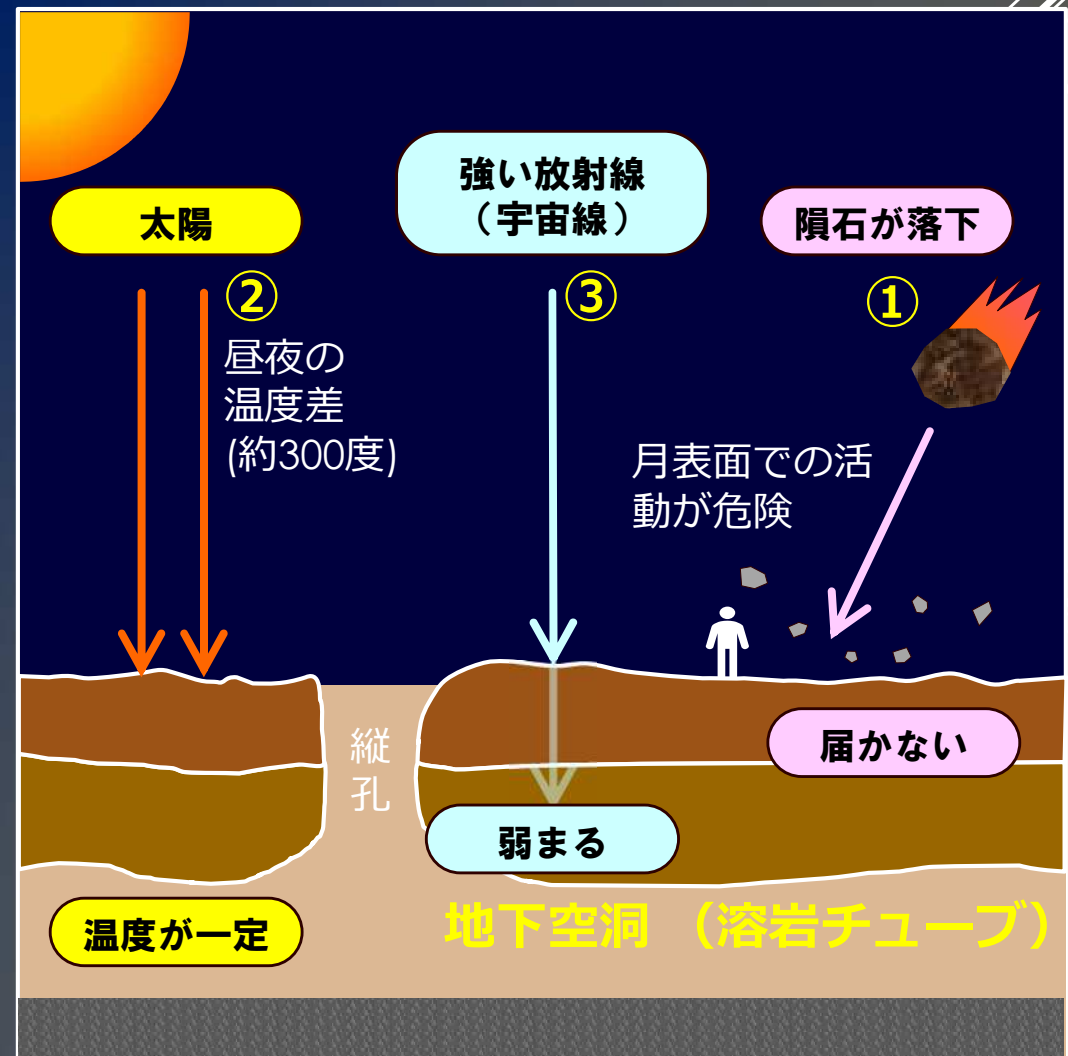
# ◆なぜ縦孔を活用していきたいのか

- 月表面より地下空洞の方がはるかに居住環境に適する
- ・月表面では大気がないことで、様々なリスクを抱えている

- ①マッハ50で隕石が落下
- ②極端な寒暖差
- ③放射線による被ばく

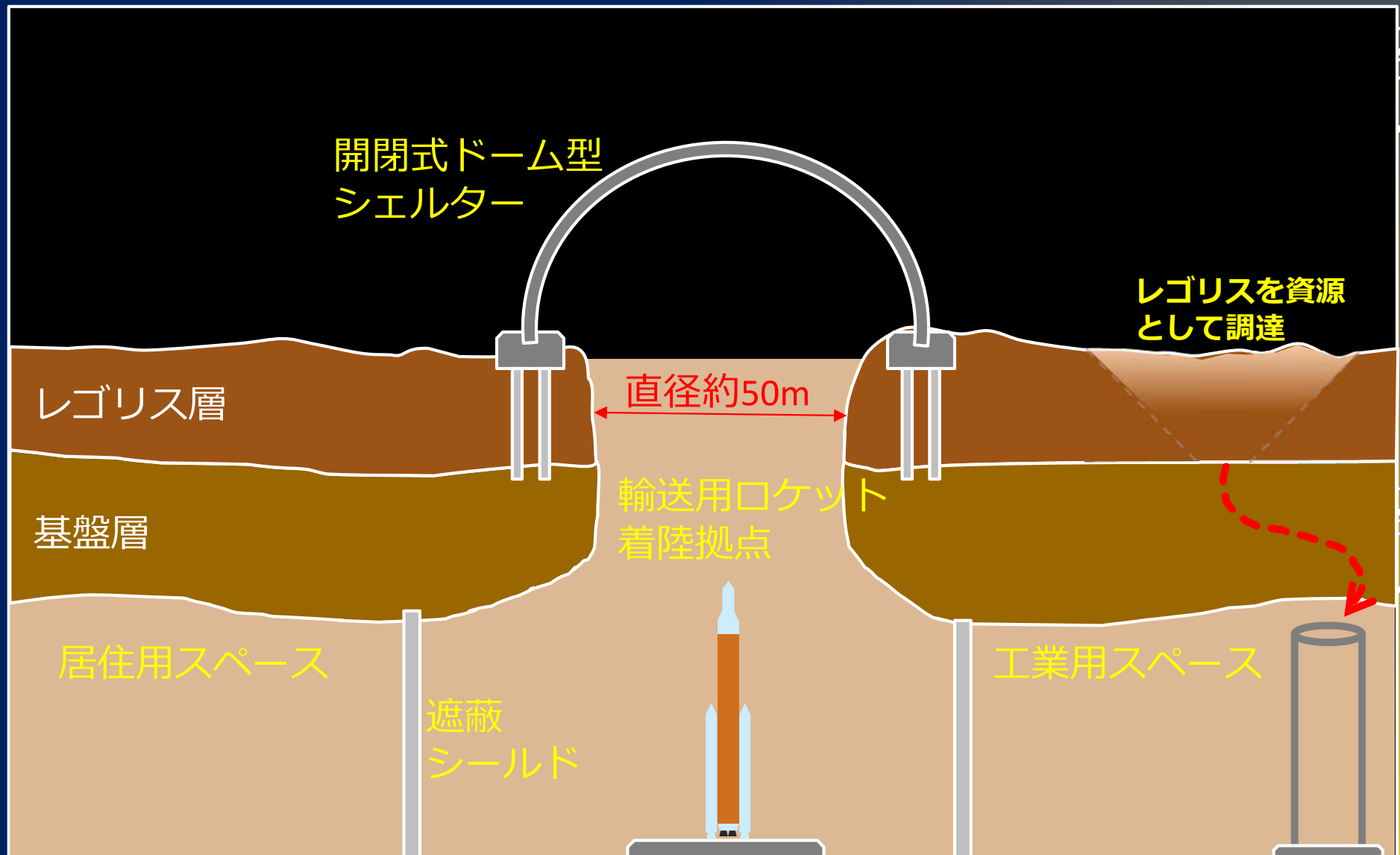


月表面での活動は危険  
生存環境としても不適



# ◆縦孔拠点構想のイメージ (1/2)

- 縦孔を着陸拠点として、居住用スペースや工業用スペースを整備





# ◆縦孔拠点構想のイメージ (2/2)

- 縦孔から見た空洞内における、開けた空間で建設された都市空間イメージ

縦孔から見た空洞（溶岩チューブ）内の  
都市空間イメージ

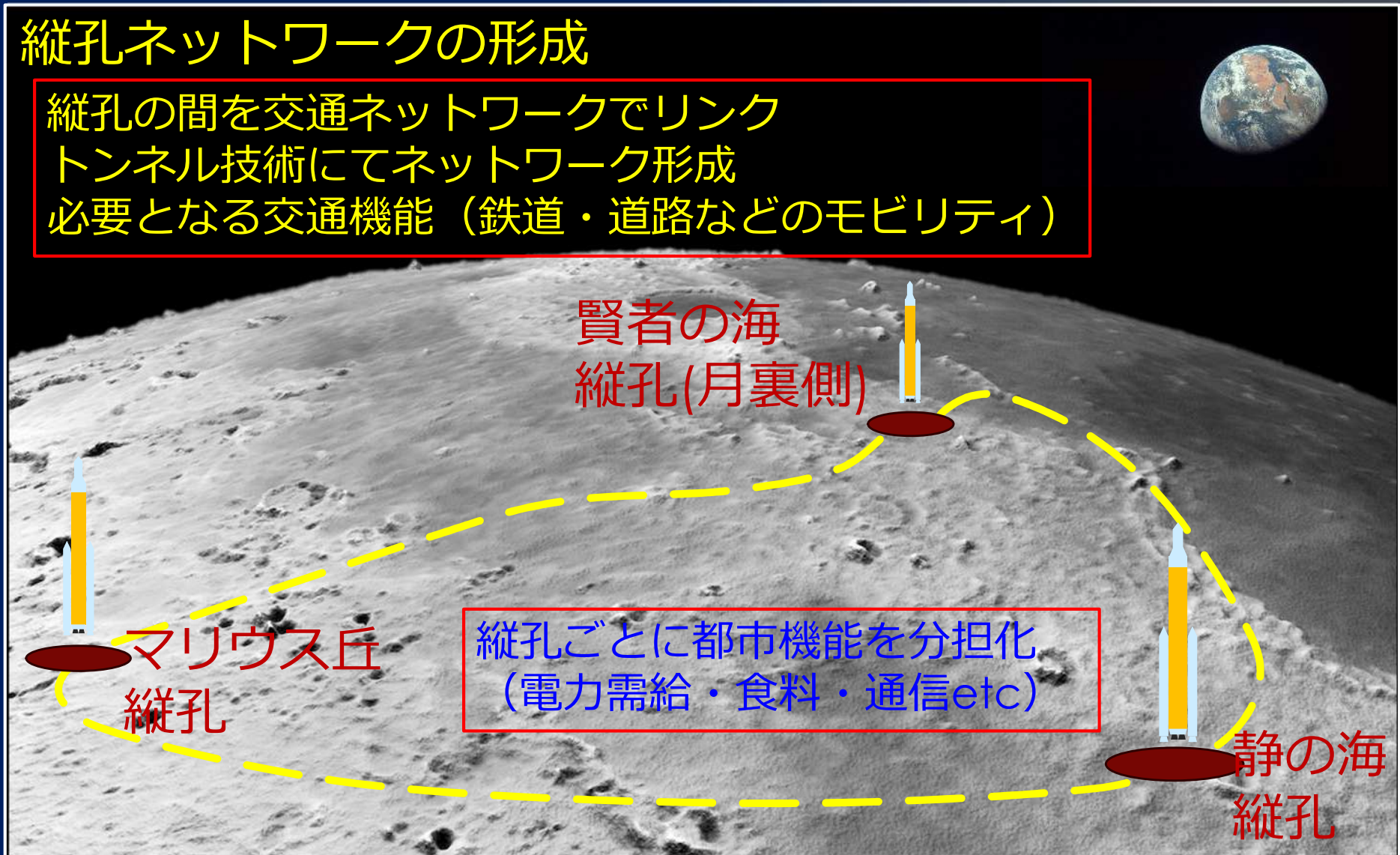


# ◆縦孔ネットワーク構想

- 縦孔間をトンネル構造でリンクさせる

## 縦孔ネットワークの形成

縦孔の間を交通ネットワークでリンク  
トンネル技術にてネットワーク形成  
必要となる交通機能（鉄道・道路などのモビリティ）





# ◆ネットワーク構想の具体化（1/5）

## ●地下空洞でのトンネル掘削に係る技術開発

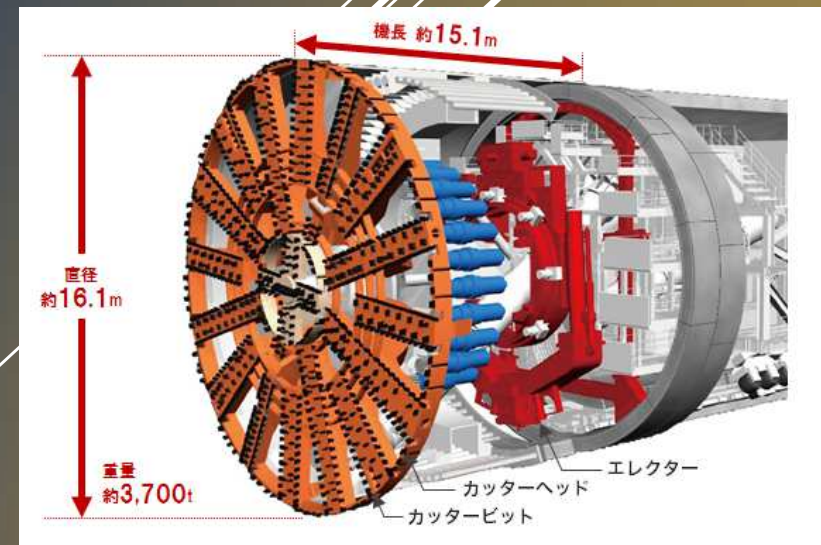
**縦孔（溶岩チューブ）を基点とした**トンネル掘削に必要な技術（掘進・覆工技術、シールドマシン等を応用した技術などの開発）

### ①月面仕様シールドマシンの技術開発

- ・ **掘削地層に対応したマシン**能力の開発
- ・ 輸送用にマシンパーツを細分化する分解組立技術

### ②シールドマシンのパーツを数十～数百回に分けて月面に輸送する**航空宇宙技術との連携・協働での技術開発**

### ③無人化施工、遠隔操作施工（月宇宙ステーション等からの）の技術開発



◆シールドマシンの構造概要図◆

# ◆ネットワーク構想の具体化 (2/5)

## ●現時点でのロケットの輸送能力

溶岩チューブを利用したトンネル技術（掘進・覆工技術、シールドマシンを応用した技術などの開発）

### ■ 1回の打ち上げコスト

約100億円


コストダウンが進み



約50億円（推定）

※3,700 tのシールドマシン  
を月面に輸送する  
ために掛かるコスト  
約1兆2500億円

H3ロケットのライバルたち



ロケット名	ファルコン9	アリアン6	バルカン	ニューグレン	H3
運用企業	スペースX (米)	アリアン スペース (欧州)	ULA (米)	ブルー オリジン (米)	三菱重工 (日本)
初打ち 上げ	2010年	24年予定	24年1月	24年予定	24年2月
輸送能力 (静止軌道)	8.3ト	10.5ト	16.3ト	13ト	6.5ト

◆各国のロケット性能一覧◆ 出典：毎日新聞社記事



# ◆ネットワーク構想の具体化 (3/5)

## ●道路設計に必要な技術開発

- ・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**」
- ・**車両の大きさや性能**などの設定が必要
- ・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
- ・**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

**これら諸条件を明確にした上で設計手法を確立**

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

# ◆ネットワーク構想の具体化 (4/5)

## ●道路設計に必要な技術開発

### (1)月面における曲線半径の算定(例)

$$R = v^2 / g(i+f) = \underline{V^2 / 127(i+f)}$$

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

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%)

**駆動系が「タイヤ」となるのかもポイントとなる**

**設計に進めていく上で必要な条件・パラメーターを設定するためには、行わなくてはならない調査研究が様々にある**

設計速度を  $V=60\text{km/h}$  とした場合、地球上では曲線半径  $R=218\text{(m)}$  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  $R=1320\text{(m)}$

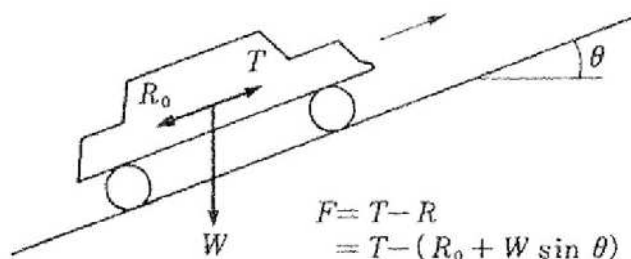
であれば車両が走行できると導かれるが、摩擦係数 (f=0.15) の設定自体が地球上の実験値等から設定されたものであり、月面で使用する舗装材を考慮した上で横すべり摩擦係数に関する調査研究が必要

# ◆ネットワーク構想の具体化 (5/5)

## ●道路設計に必要な技術開発

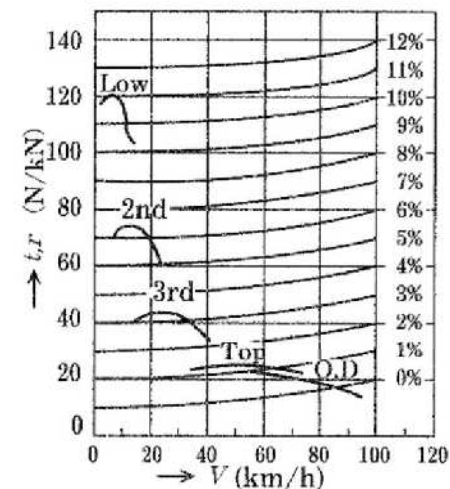
### (2)月面における縦断勾配の設定に向けて

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
- $R_0$ : 平坦部における走行抵抗力
- $\theta$ : 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」

**縦断勾配の決定に必要な要素：車両の登坂能力・走行性能**

**月面地下空間を走行させる車両の諸元を定めたい**



# ◆必要となる都市・建築計画や関連技術

## ●地下空間における都市計画・建築計画の創造

- ・地下都市の規模やレイアウトを具体的に検討
- ・土木分野と建築分野が連携した地下都市像のあり方を議論

## ●月面環境に応じた設計施工技術

- ・1/6G重力下における各種構造物の詳細な構造計画および設計の検討、独自の設計工事要領、設計指針等の策定
- ・3Dプリンター等の新技術・プレキャスト製品などの適用性検討、居住空間の具体的な構造物形態の検討
- ・三次元CADを活用した具体的な設計手法の確立

## ●縦孔着陸拠点に向けた宇宙航空技術への期待

- ・必要物資、輸送に必要なロケット能力等への性能
- ・縦孔に着陸するためのロケット制御技術の開発

## ●人間社会を構築するために必要な様々な技術

- ・エネルギー分野・農業水産分野・通信分野などの必須分野における技術開発・分野間の連携
- ・ゼロ・エミッション、サステナビリティを考慮したコミュニティのあり方

**「知の総合(化)」**



**「英知の統合」**

**競争から協創・共創へ**



**FinalStage**

**s\_yamaguchi@finalstage.jp**