

# Estimation of lava tube cave heights and inner structure of the Moon from those of the Earth

(月惑星で想定される溶岩チューブの規模とその内部構造)

Tsutomu Honda

NPO Vulcano-Speleological Society

3-6-1-1B,Otsuka,Bunkyo-ku,Tokyo-to, 112-0012 Japan

## ABSTRACT

Lava tube cave heights and inner structure of the Moon are estimated from those of the Earth by using hydrodynamic and surface tension models.

Regarding lava tube height, the flow in the lava tube is modeled by Bingham fluid flowing in the inclined cylindrical pipe with gravity potential. Then, the condition of the cave formation is formulated and compared with the lava tube caves of the Earth such as those of the Mount Fuji. This formulation was applied to estimate the height of the lava tube caves of the Moon. Gravity, lava density, slope angle and Bingham yield strength are the decisive parameters that determine the cave height.

Regarding inner structures of the lava tube cave such as lava stalagmite and stalactite, the role of surface tension of lava on the formation of lava stalactite and lava stalagmite is analysed by two different physical models; A hydrodynamic instability model is used for a lava stalactite formation and a fallen droplet model is used for a lava stalagmite formation. The surface tensions estimated from two different models show a good coincidence and reasonable value as surface tension of lava. Then, these models are applied for the case of the Moon to estimate the possible configuration of the stalactite and stalagmite.

# 月惑星で想定される溶岩チューブの規模と その内部構造

- 1.ビンガム流体モデルを使った溶岩チューブの規模(空洞高さ)の推定
- 2.液膜不安定性モデルと液滴落下モデルを使った溶岩チューブの内部構造(溶岩鍾乳・石筍)の推定
- 3.まとめ

本多力

NPO法人火山洞窟学会

第49回月・惑星シンポジウム

宇宙科学研究所、相模原

2016年7月20-21日

# ハワイ島コナ空港近くの溶岩流(1801年)の溶岩チューブ洞窟開口部、内部、天井の崩落



# リュニオン島フルネーズ火山溶岩チューブ洞窟の内部構造 (天井: 溶岩鍾乳、側壁: 肋骨状溶岩、床上: 溶岩石筵)

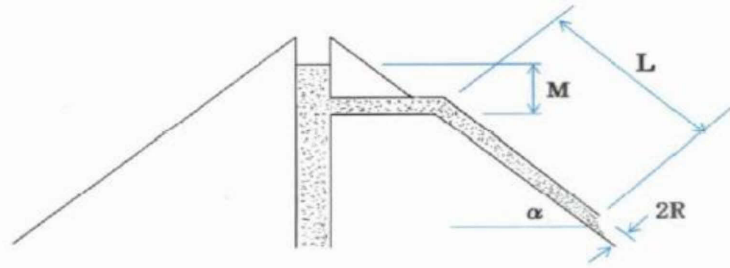


# 検討モデル

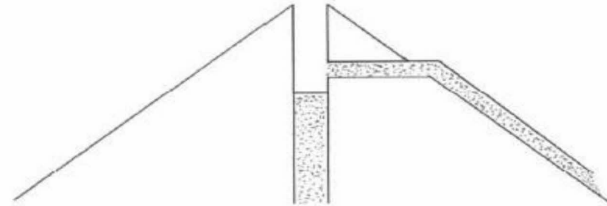
## 溶岩チューブ流カモデル

## 液膜不安定性モデル

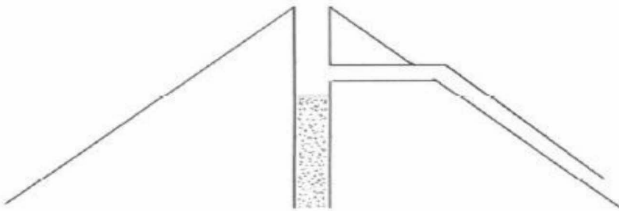
## 液滴落下モデル



(A) Active lava tube:  $(\rho g \sin\alpha + \rho g M/L)R/2 > f_b$

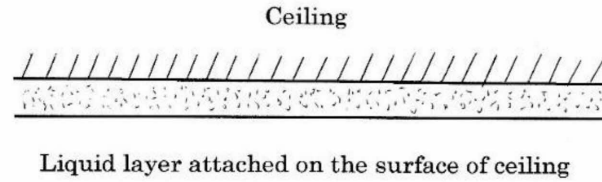


(B) Filled lava tube:  $(\rho g \sin\alpha)R/2 < f_b$

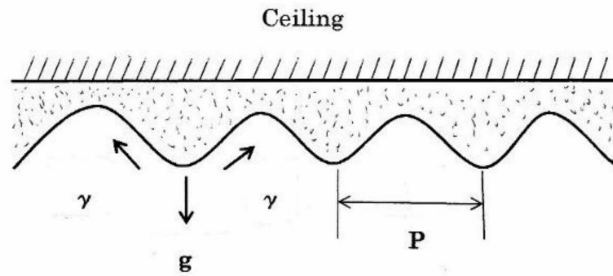


(C) Drained lava tube:  $(\rho g \sin\alpha)R/2 > f_b$

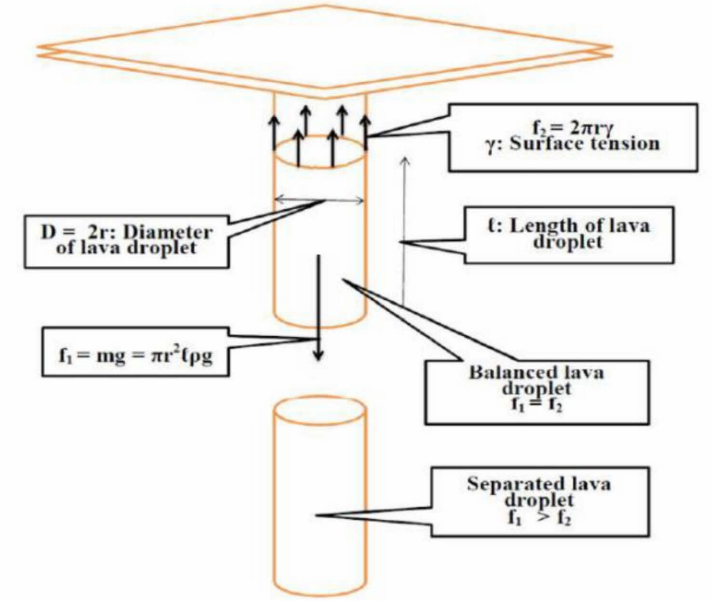
### Instability of liquid layer attached on the ceiling



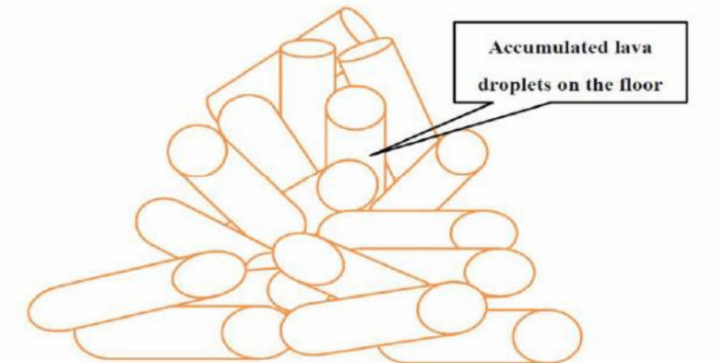
(A) Initial stable state of liquid layer



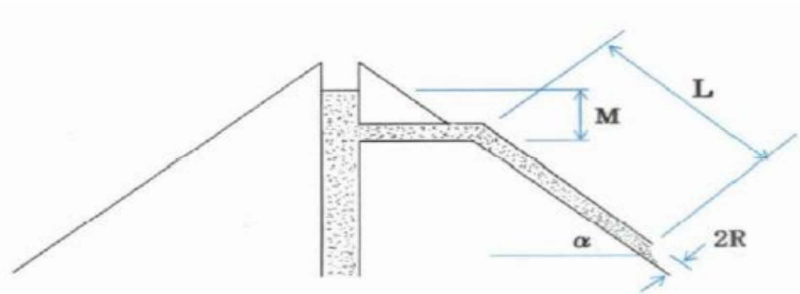
(B) Onset of instability of liquid layer



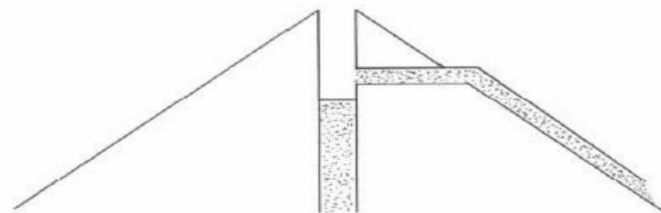
$$\gamma = r \cdot l \cdot \rho \cdot g / 2$$



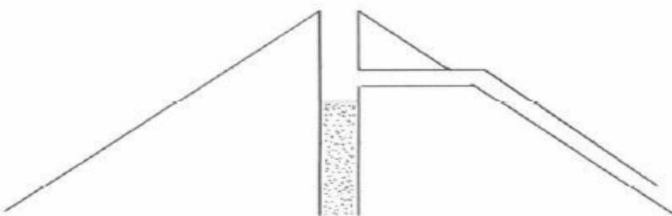
# 1. 流力モデルを使った溶岩チューブの規模 (空洞高さ: $H=2R$ ) の推定



(A) Active lava tube:  $(\rho g \sin\alpha + \rho g M/L)R/2 > f_B$



(B) Filled lava tube:  $(\rho g \sin\alpha)R/2 < f_B$



(C) Drained lava tube:  $(\rho g \sin\alpha)R/2 > f_B$

- (A) 火口から溶岩を噴出した溶岩が斜面を下り溶岩チューブを形成する。マグマ圧と重力(強制流)で流動。

(Active lava tube)

- (B) 溶岩の供給が止まり、チューブ内の溶岩の流動も停止し、チューブはつまった状態となる。

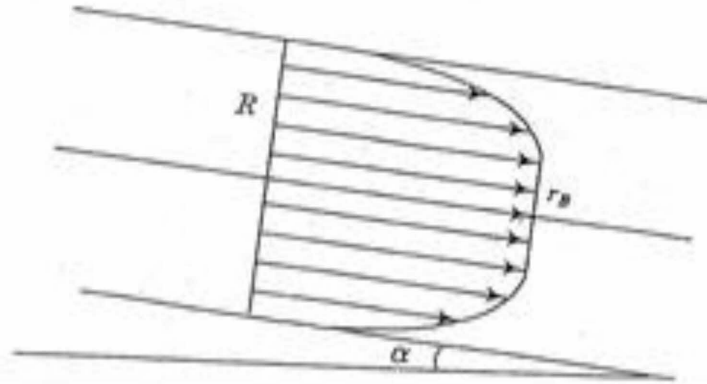
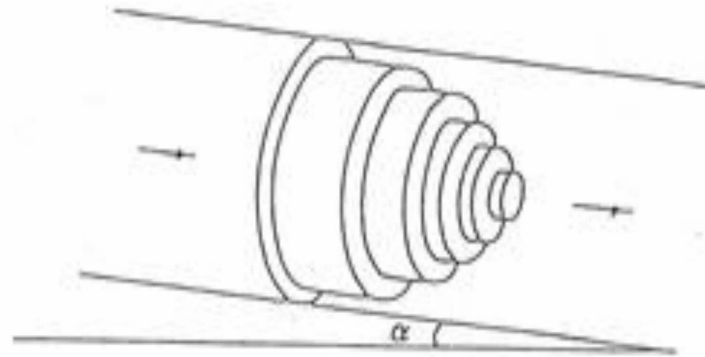
(Filled lava tube)

- (C) 溶岩の供給が止まるが、チューブ内の溶岩は重力流(自由流)として流出できる場合はチューブ内に空洞を形成する。

(Drained lava tube:Lava tube cave)

# 傾斜した円管内のビンガム流れ:

溶岩がマグマ圧と重力 ( $M/L > 0$ ) で流動する場合



流速分布  $u$  は次のようになる

$\tau_w = (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) R/2 > f_B$  では、

- $u = (R - r_B)^2 (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) / 4\eta_B$   
 $r < r_B$

- $u = [R^2 - r^2 - 2r_B(R - r)] (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) / 4\eta_B$

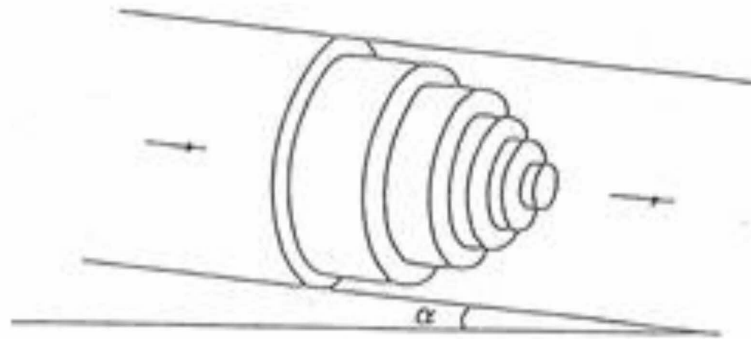
$r > r_B$

$\tau_w = (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) R/2 < f_B$  では、

- $u = 0$

ここで、 $f_B$  はビンガム降伏値、 $\eta_B$  はビンガム粘度である。

# 傾斜した円管内のビンガム流れ： 溶岩が重力のみ ( $M/L=0$ ) で流動する場合

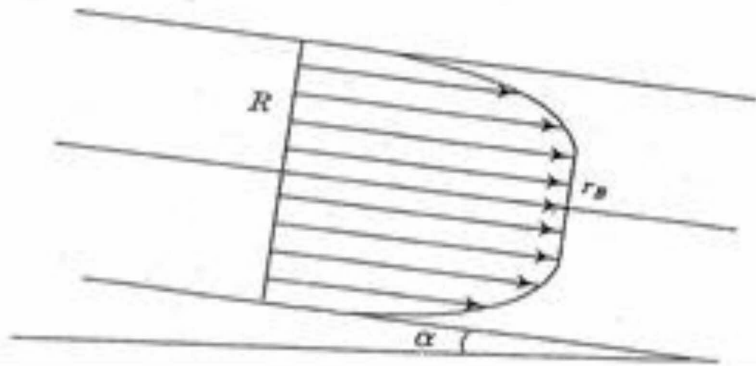


流速分布  $u$  は次のようになる

$\tau_w = (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) R/2 > f_B$  では、

- $u = (R - r_B)^2 (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) / 4\eta_B$   
 $r < r_B$

- $u = [R^2 - r^2 - 2r_B(R - r)] (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) / 4\eta_B$   
 $r > r_B$



$\tau_w = (\rho g \sin \alpha + \rho g M/L) R/2 < f_B$  では、

- $u = 0$

ここで、 $f_B$  はビンガム降伏値、 $\eta_B$  はビンガム粘度である。



# SiO<sub>2</sub>重量%とビンガム降伏値の関係

重力流のパラメータ: 空洞形成限界条件

$$f_B = (\rho g \sin \alpha) H / 4$$

-H=2R: 空洞高さ

-f<sub>B</sub> : ビンガム降伏値 ( SiO<sub>2</sub>重量分率による、左図)

-ρ: 密度

-g: 重力加速度

-α: 斜度 (地形による)

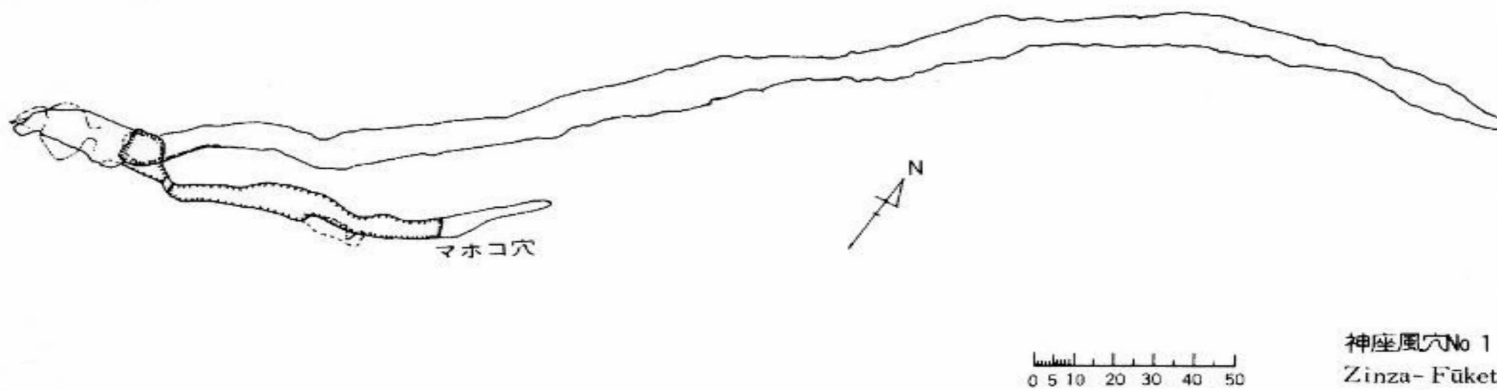
Hulme (1974) によるビンガム降伏値 (Yield strength)

-SiO<sub>2</sub> 40%:  $\sim 4 \times 10^3$  dyne/cm<sup>2</sup> ( $4 \times 10^2$  N/m<sup>2</sup>)

-SiO<sub>2</sub> 50%:  $\sim 4 \times 10^4$  dyne/cm<sup>2</sup> ( $4 \times 10^3$  N/m<sup>2</sup>)

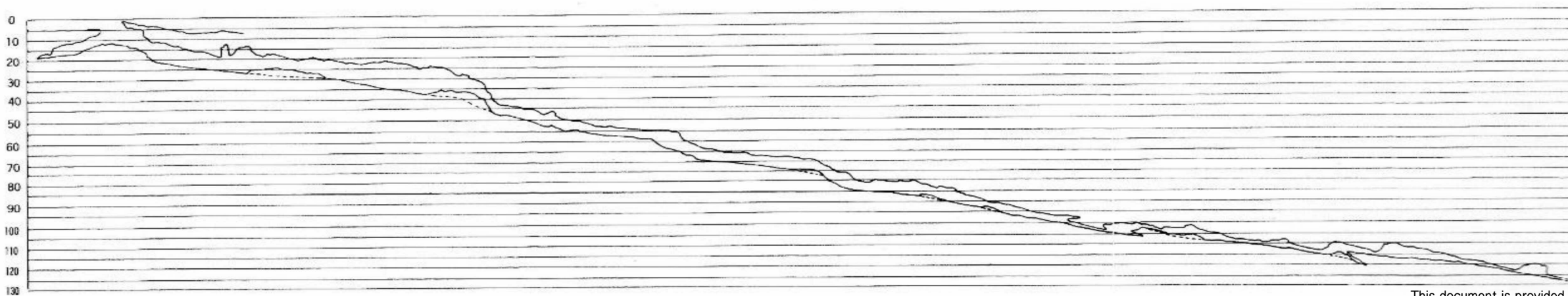
-SiO<sub>2</sub> 60%:  $\sim 8 \times 10^5$  dyne/cm<sup>2</sup> ( $8 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup>)

# 富士山青木ヶ原溶岩流 神座風穴第一の内部と測量図

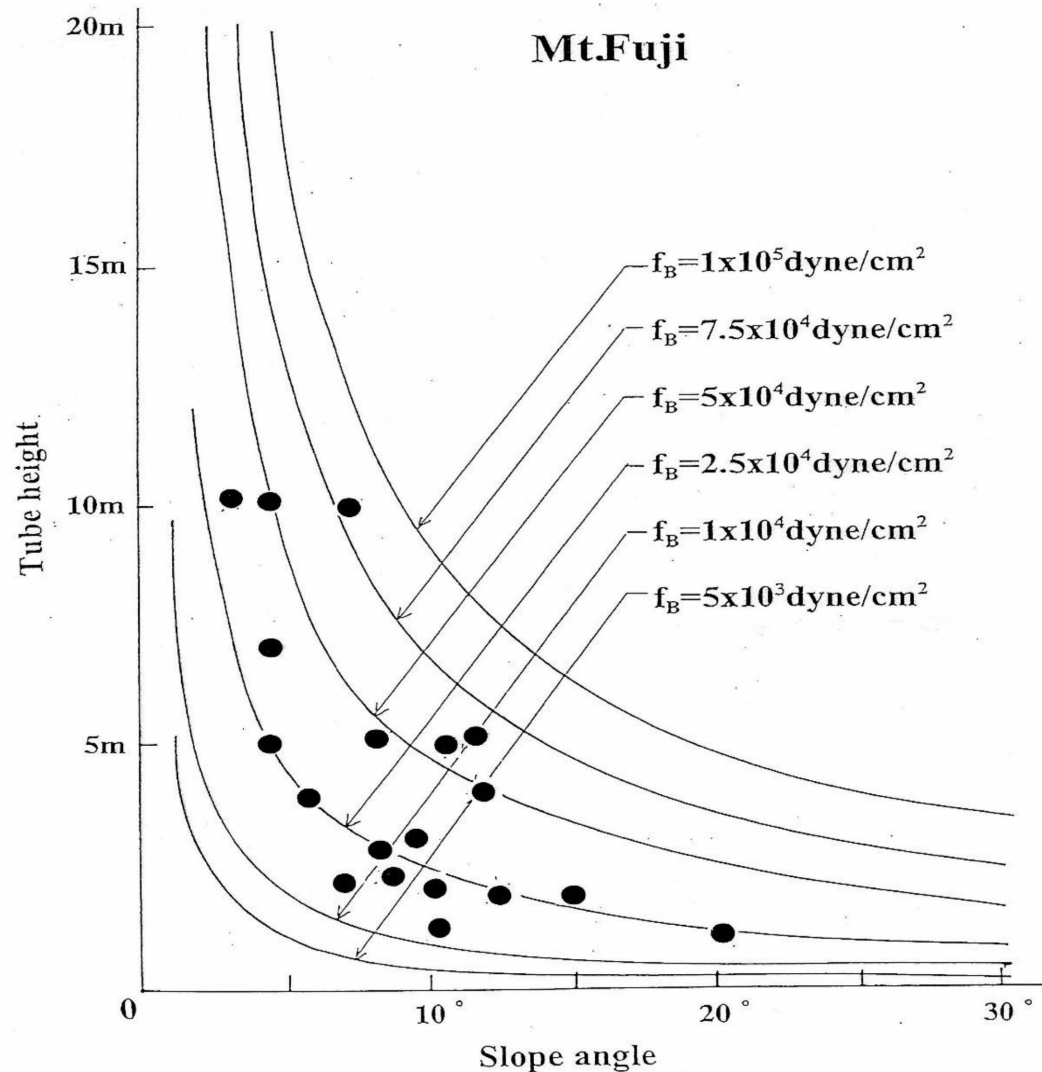


実測図 26

神座風穴No 1  
Zinza-Fūket  
Lava C  
測図 法政大  
富士山溶岩洞穴研究会

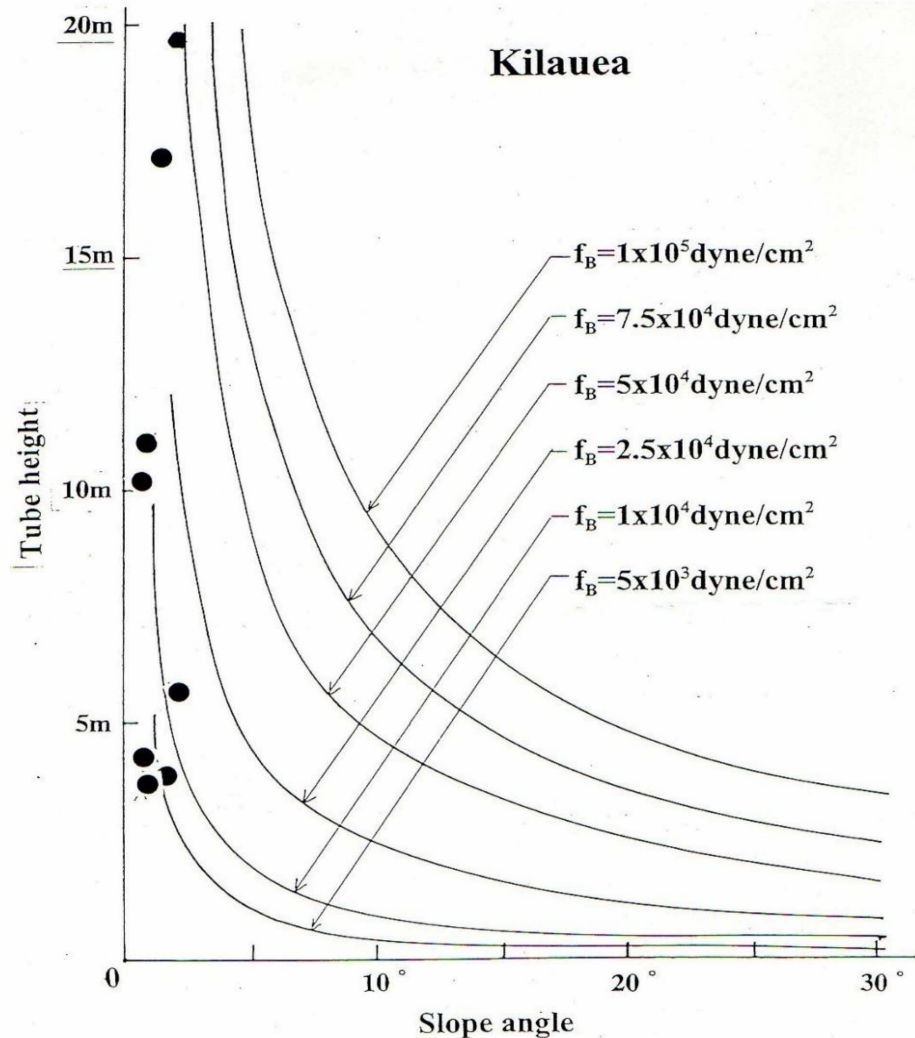


# 富士山の溶岩チューブ洞窟の斜度と高さ



Cave name	Slope angle	Inner height
Subashiri-tainai Upper part	20°	1m
Subashiri-tainai Lower part	15°	2m
Jinza-Fuketsu No1	13°	5-10m
Jinza-Fuketsu No3	11.5°	5m
Shoiko-Fuketsu No1A	10°	3.3m
Shoiko-Fuketsu No1B	7.6°	2m
Karumizu-Fuketsu	5.5°	4m
Fuji-Fuketsu No1	8.1°	10m
Motosu-Fuketsu No1	3.6°	10m
Inusuzumiyama-Fuketsu No1	12°	5m
Mujina -Ana	8.5°	5m
Inusuzumiyama-Fuketsu No2	13°	2m
Mitsuike-Ana	3.2°	10m
Atsuhara-Fuketsu	10°	2m
Banba-Ana	4.8°	5-10m

# キラウエア火山カズムラ洞窟の斜度と高さ



Portion of cave	Average slope angle	Estimated erosion depths
Olaa	2.5°	5.6-19.9m
Sexton	2.0°	3.4-17.2m
Upper	1.7°	4.0-11.1m
Old	1.9°	3.4-10.1m
Lower	1.3°	3.4-10.1m

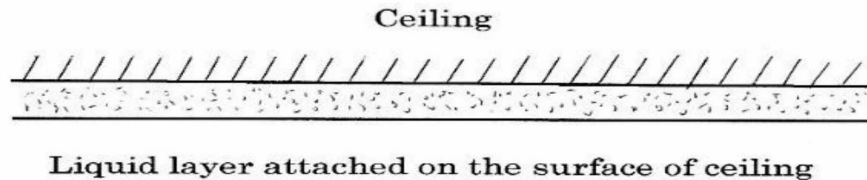
# 地球上の溶岩チューブ洞窟からの月・火星での推定

Planet	Location of lava flow/lava tube cave:SiO <sub>2</sub> wt%	Slope angle of lava tube cave	Yield strength obtained from lava tube cave height	Height of lava tube
Earth	Mt.Fuji : 49~51%	3.2° ~ 20.0°	1x10 <sup>4</sup> ~7.5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	1~10m
	Mihara-yam.Izu-Oshima : 52~53%	~30°	5.0x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	~1.5m
	Hachijou-jima,Nishi-yama : 50.4~50.5%	4.0° ~ 14.0°	2.5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	2~5m
	Kilauea : 47~50%	1.0° ~ 4.0°	2.5x10 <sup>3</sup> ~2.5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	3~17m
	Mt.Etna : 48%	0.2° ~ 15.3°	1x10 <sup>4</sup> ~5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	2~10m
	Mt.St.Helens : 50%	2.1° ~ 4.5°	5x10 <sup>3</sup> ~2.5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	3~16m
	Piton de la Fournaise : 48%	1.0° ~ 16.0°	5x10 <sup>3</sup> ~7.5x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	1~12m
	Suchiooc : 51%	4.6° ~ 15.8°	2.5x10 <sup>4</sup> ~1.0x10 <sup>5</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	4~15m
	Cameroon : 43.5%	~14.0°	7.5x10 <sup>4</sup> ~1.0x10 <sup>5</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	6~8m

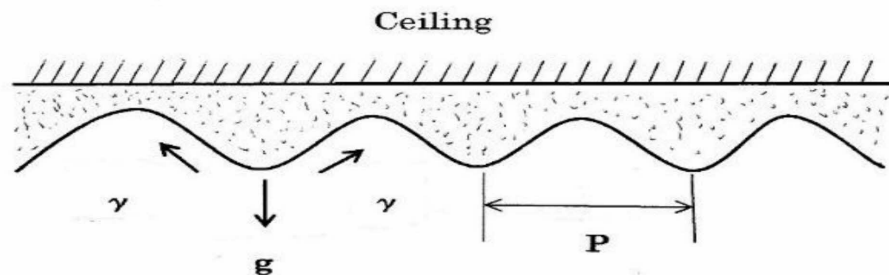
Planet	Gravity	Density	Location of lava flow(Reference)	Slope angle of lava flow	Yield strength obtained by lava flow configuration	Estimated cave height
Moon	1.62 <a href="#">m/s<sup>2</sup></a>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	Mare Imbrium(Hulme)	0.2°	4x10 <sup>3</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	(112m)
			Marius Hills(elevation /diameter:1-2km/300km)	0.38° ~ 0.76°	(4x10 <sup>3</sup> dyne/cm <sup>2</sup> )	(30~60m)
Mars	3.71 <a href="#">m/s<sup>2</sup></a>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	Ascraeus Mons(Zimbelman)	3.5° ~ 6° Average:5°	3.3x10 <sup>3</sup> ~8.3x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup> Av:2.1x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup>	(10m)
			<a href="#">Pavonis Mons</a> (elevation /diameter:8.7km/375km)	2.66°	(2.1x10 <sup>4</sup> dyne/cm <sup>2</sup> )	(19m)

# 2.1 不安定性モデルを使った溶岩チューブの内部構造(溶岩鍾乳)の推定

Instability of liquid layer attached on the ceiling



(A) Initial stable state of liquid layer



(B) Onset of instability of liquid layer

天井と側壁の凹凸のピッチ(波長)  $P$ :  
 $P=2\pi(\gamma/g\rho)^{1/2}$ ,

よって  $\gamma=P^2 g \rho / 4\pi^2$

ここで、

$\gamma$ : 表面張力

$\rho$ : 溶岩の密度 (  $2.5 \text{ g/cm}^3$  )

$g$ : 重力加速度

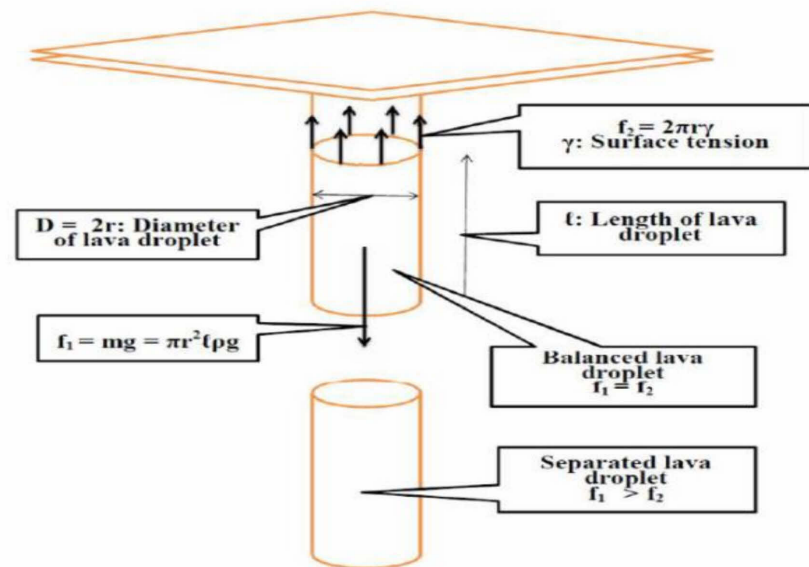
実際の観察によると

ピッチの実測値: 3 ~ 4cm

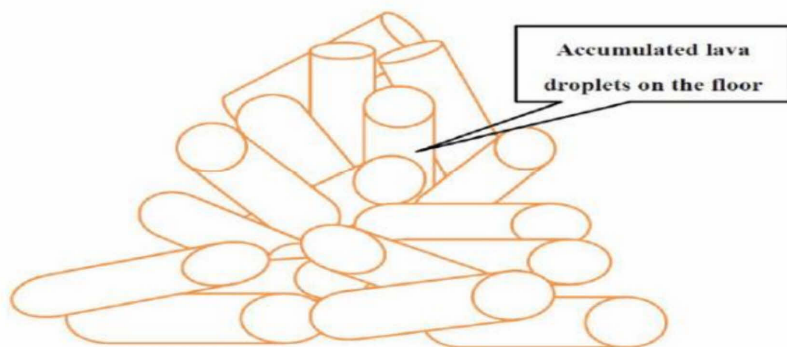
表面張力: 600 ~ 1000 dyne/cm

表面張力の研究室内測定結果からの外挿値  
 (横山・飯塚(1970))と比較して妥当な値

## 2.2 液滴落下モデルを使った溶岩チューブの内部構造(溶岩石筈)の推定



$$\gamma = r \cdot l \cdot \rho \cdot g / 2$$



溶岩鍾乳・溶岩石筈:モデル化(液滴落下法の適用)

円柱状液滴の落下条件:

$$\pi r^2 l \rho g \geq 2\pi r\gamma$$

落下した円柱状液滴から溶岩の表面張力、 $\gamma = r l \rho g / 2$ を得ることができる

ここで $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ ,  $g = 980\text{cm/s}^2$ を入れる。

実際の観察によると、

$r = 0.2\text{cm}$ ,  $l = 2\text{cm}$ では $\gamma = 490\text{ dyne/cm}$ ,  
 $r = 0.25\text{cm}$ ,  $l = 4\text{cm}$ では $\gamma = 980\text{ dyne/cm}$

表面張力の研究室内測定結果からの外挿値(横山・飯塚(1970))と比較して妥当な値

# 富士山、犬涼み山溶岩流、三ツ池穴

溶岩石筈： $r=0.2\sim0.25\text{cm}$ ,  $\ell=2\sim4\text{cm}$ ,  $\gamma=490\sim980\text{ dyne/cm}$



側壁の構造：

$P=3\sim4\text{cm}$ ,  $\gamma=560\sim990\text{ dyne/cm}$





# ベトナム南部中央高地 ChuBluk火山

C0洞窟の天井:

P=3 ~ 4cm、 $\gamma=560\sim 990$  dyne/cm



C3洞窟の側壁:

P=3 ~ 4cm、 $\gamma=560\sim 990$  dyne/cm



# リュニオン島フルネーズ火山 2004年溶岩流La Blanche Nord 洞窟の側壁 P=3~4cm, $\gamma=560\sim 990$ dyne/cm



# レユニオン島フルネーズ火山2004年溶岩流 La Blanche Nord 洞窟の天井と床上の溶岩石筈

$P=3\sim 4\text{cm}$ ,  $\gamma=560\sim 990\text{ dyne/cm}$

$r=0.2\sim 0.25\text{cm}$ ,  $\ell=2\sim 4\text{cm}$ ,  
 $\gamma=490\sim 980\text{ dyne/cm}$



# 米国カリフォルニア・メデイスンレイク火山

天井部の溶岩鍾乳 (Mushpot Cave)

$P=3\sim 4\text{cm}$ ,  $\gamma=560\sim 990\text{ dyne/cm}$



側壁の肋骨状溶岩 (Catacombs Cave)

$P=3\sim 4\text{cm}$ ,  $\gamma=560\sim 990\text{ dyne/cm}$



# 地球上の溶岩鍾乳・石筍から月・火星での推定

洞窟名、及びその場所・溶岩流など	珪酸重量%(出典)、噴火年	溶岩鍾乳・肋骨状溶岩ピッチP、 溶岩石筍液滴半径rと長さℓ	推定表面張力
三ツ池穴、富士山・犬涼山溶岩流	49.09%(津屋), 7000年以前噴火	P=3~4cm r=0.2~0.25cm,ℓ=2~4cm	560~990dyne/cm 490~980 dyne/cm
ホルニトケーブ、伊豆大島・三原山	52~53%(水上), 1951年噴火	P= ~3cm	~560 dyne/cm
竜溪洞、松江・大根島	47%(澤), 190000年前噴火	P= ~3cm	~560 dyne/cm
Kapor洞窟、 リュニオン島・フルネーズ火山	48.8~49.8%(N.Villeneuve), 1998年噴火	r=0.2~0.25cm,ℓ=2~4cm	490~980 dyne/cm
Blanche Nord洞窟、 リュニオン島・フルネーズ火山	48~50% (A.Peltier), 2004年噴火	P=3~4cm r=0.2~0.25cm,ℓ=2~4cm	560~990 dyne/cm 490~980 dyne/cm
C0,C3,B14洞窟、 チュブルク火山・ベトナム中部高原	48~52% (N.Hoang) ,3700年前噴火	P=3~4cm	560~990 dyne/cm
Mushpot洞窟,Catacombs洞窟、 メデイスンレイク火山・カリフォルニア	52.3 Average%(J.Donnely) , 36±16ka噴火	P=3~4cm	560~990 dyne/cm

惑星	表面重力	熔岩密度	溶岩表面張力	重力比(ψ)	1/ψ	推定ℓ	1/ψ) <sup>1/2</sup>	推定P
地球	9.8 <u>m/s<sup>2</sup></u>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	980 dyne/cm	1.0	1.0	r=0.25cmの場合, ℓ=4cm	1.0	P=4cm
月	1.62 <u>m/s<sup>2</sup></u>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	980 dyne/cm	0.165	6.05	r=0.25cmの場合 ,ℓ=24.2cm	2.46	P=9.8cm
火星	3.71 <u>m/s<sup>2</sup></u>	2.5 g/cm <sup>3</sup>	980 dyne/cm	0.379	2.64	r=0.25cmの場合, ℓ=10.6cm	1.63	P=6.5cm

# 3. まとめ

(1) 溶岩チューブ洞窟形成モデルの妥当性を検討

—地球上の例に適用: 妥当な溶岩降伏値が得られる

—月惑星に対して適用: マリウスヒルでの溶岩チューブ洞窟高さを推定

(2) 溶岩鍾乳・石筍の形成モデルの妥当性を検討

—地球上の例に適用: 妥当な表面張力値が得られる

—月惑星に対して適用: 鍾乳・石筍構造を推定

(3) 月の溶岩チューブ洞窟の内部探査により、月惑星の火成活動、火山洞窟現象に関して、地球の場合と比較することによりさまざまな情報(形態、物性値)が得られることが期待される

# 参考文献

- 1) 本多力:「地球の溶岩チューブ洞窟から月と火星の溶岩チューブ洞窟を類推する」、第59回宇宙科学技術連合講演会講演集、日本航空宇宙学会, 3D02 (JSASS-2015-4472) 2015
- 2) Tsutomu Honda: Estimation of lava tube cave heights of the Moon and the Mars from those of the Earth. 17<sup>th</sup> Internat. Vulcanospeleology. Symposium, Hawaii, 2016
- 3) Tsutomu Honda: Estimation of surface tension of lava from lava stalactite and lava stalagmite appeared in lava tube cave and tree mold. 17<sup>th</sup> Internat. Vulcanospeleology. Symposium, Hawaii, 2016
- 4) 本多力:「地球上の溶岩チューブ・洞内構造から月及び火星上の溶岩チューブ・洞内構造を類推する」、第60回宇宙科学技術連合講演会講演集、日本航空宇宙学会, 1C12, 2016