

1章 はじめに

OBAYASHI



大林組 技術研究所 地盤技術研究部 2

1章 はじめに

溶岩チューブの特徴

- 天井の存在

地下空洞の中は、放射線、紫外線、隕石衝突などから機器や人が守られ、また定常な温度環境（例えば赤道域で、-20℃付近）

- 広大な空間

地球からの類推で、数十mの高さ、数百mの広さの空間

- 月の火山活動の歴史

月の火山活動史の詳細な情報を有している

- 月の固有のガス成分

空洞形成時に溶岩内に水などのガス成分を捕獲している可能性

月周回衛星「かぐや」の観測成果に関する記者説明会資料より抜粋
https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20171018_kaguya.pdf 2023.8閲覧

基地建設に
適している



万野風穴内部

OBAYASHI



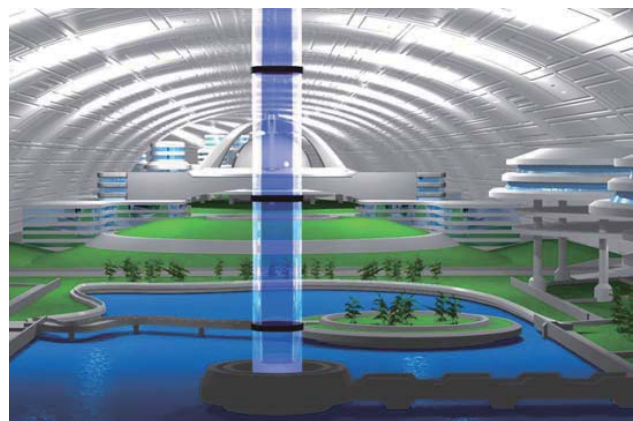
大林組 技術研究所 地盤技術研究部 3



大林組の月火星関連個別技術 **OBUYASHI Lunar City プロジェクト**

2017年に日本の月探査機「かぐや」により発見された**月地下空洞に立地**する、大規模で安心・安全な月都市を提案

- **2060年に1万人**の人々が住まう都市を想定し、自然あふれる快適な空間を構築する
- 建設会社として持ちうる技術を最大限に活用し、技術的根拠に裏打ちされた計画を立案することで、SFではないリアリティを持った計画とする



1章 はじめに

過去の文献

著者	チューブ幅 (m)	チューブ形状 幅：高さ	屋根厚 (m)	評価
Oberbeck, 1969	200-470		20-100	梁安定
Blair et al. 2015	250~10,000	3:1	1-500	安定
Blair et al. 2015b	1,600	3:1	200	安定
	800	8:1	5	
Blair et. al. 2017	5,000	3:1	500	安定
Modiriasari et al. 2018	4,000	3:1	20	不安定
		2:3	50-200	半安定
Theinat et al. 2019	300~4,000	3:1	1	安定
			100	
			1,000	

チューブ形状でどんなものが存在可能かを解析することが目的である。

岩盤状況や気圧を考慮した建設的な観点の研究は少ない。

特に亀裂の角度を考慮した検討は少ない。

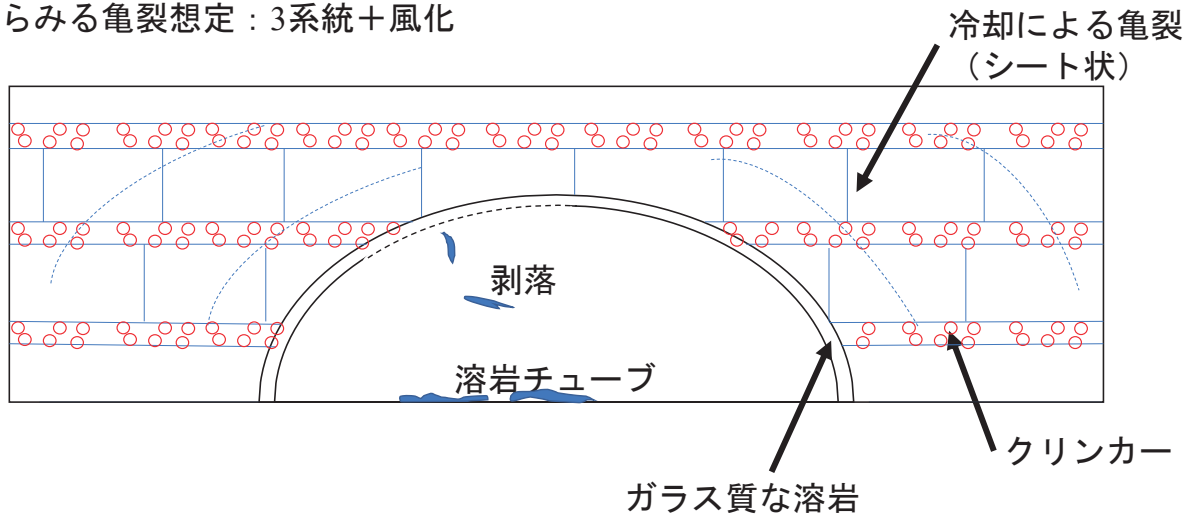


2章 亀裂調査

2023/8/24-25 縦穴研究会

2章 亀裂調査

観察からみる亀裂想定：3系統+風化



2章 亀裂調査

冷却による亀裂：
冷却収縮によってできる亀裂。



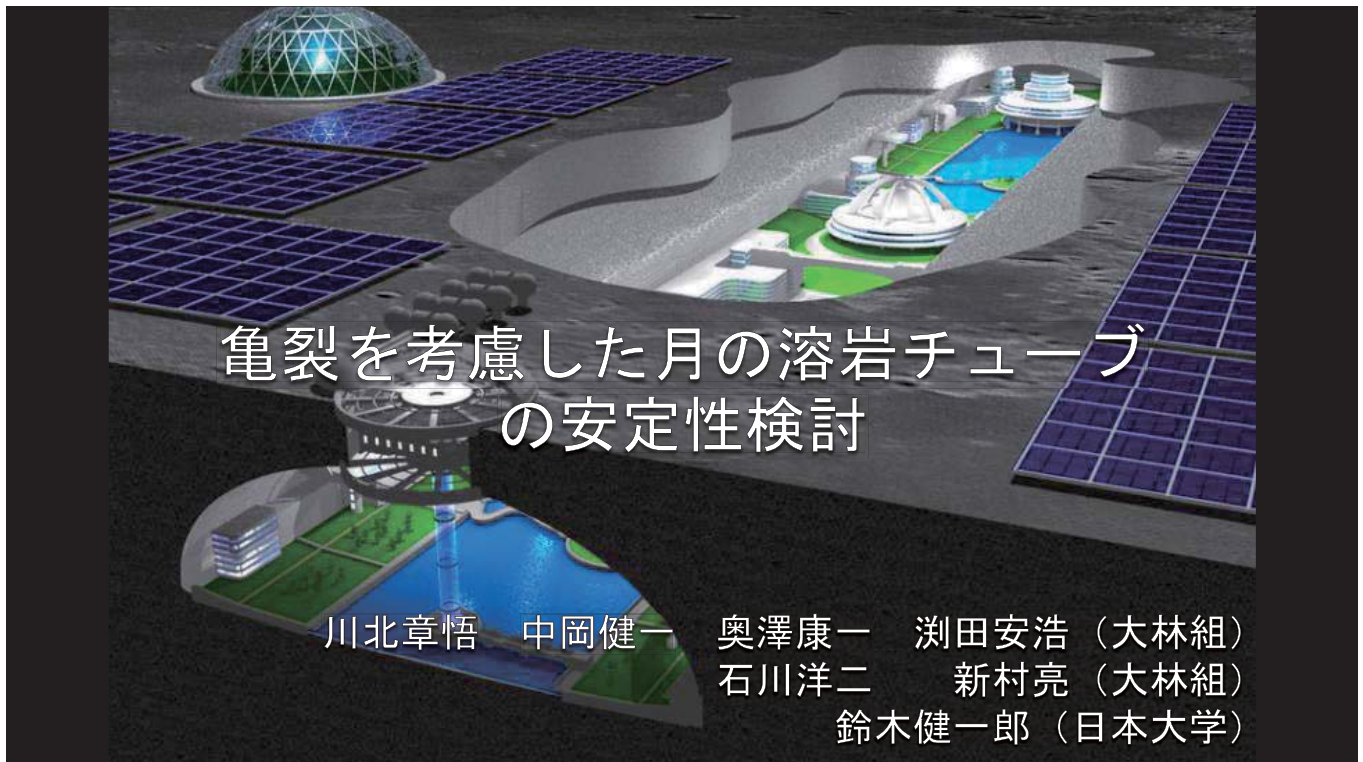
駒門風穴口



鳴沢氷穴口



富士風穴



本日の内容と構成

- 1章 はじめに
 - ・ 背景
 - ・ OBAYASHI Lunar City プロジェクトについて
- 2章 亀裂調査
 - ・ 溶岩チューブの亀裂の特徴について
- 3章 溶岩チューブの安定性検討
- 4章 まとめ

1章 はじめに

1章 はじめに

溶岩チューブの特徴

- 天井の存在

地下空洞の中は、放射線、紫外線、隕石衝突などから機器や人が守られ、また定常な温度環境（例えば赤道域で、-20℃付近）

- 広大な空間

地球からの類推で、数十mの高さ、数百mの広さの空間

- 月の火山活動の歴史

月の火山活動史の詳細な情報を有している

- 月の固有のガス成分

空洞形成時に溶岩内に水などのガス成分を捕獲している可能性

月周回衛星「かぐや」の観測成果に関する記者説明会資料より抜粋
https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20171018_kaguya.pdf 2023.8閲覧

基地建設に
適している



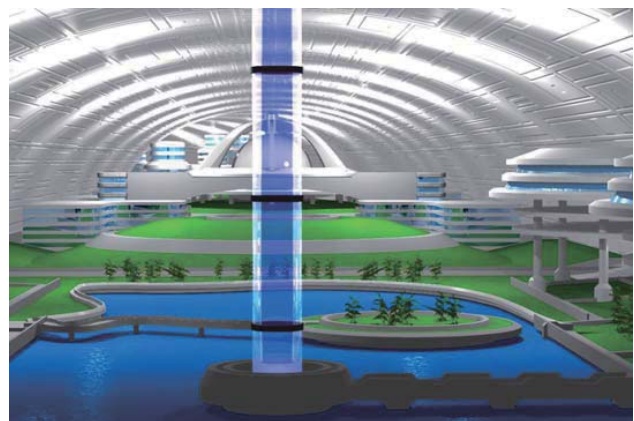
万野風穴内部



大林組の月火星関連個別技術 **OBUYASHI Lunar City プロジェクト**

2017年に日本の月探査機「かぐや」により発見された**月地下空洞に立地**する、大規模で安心・安全な月都市を提案

- **2060年に1万人**の人々が住まう都市を想定し、自然あふれる快適な空間を構築する
- 建設会社として持ちうる技術を最大限に活用し、技術的根拠に裏打ちされた計画を立案することで、SFではないリアリティを持った計画とする



1章 はじめに

過去の文献

著者	チューブ幅 (m)	チューブ形状 幅：高さ	屋根厚 (m)	評価
Oberbeck, 1969	200-470		20-100	梁安定
Blair et al. 2015	250~10,000	3:1	1-500	安定
Blair et al. 2015b	1,600	3:1	200	安定
	800	8:1	5	
Blair et. al. 2017	5,000	3:1	500	安定
Modiriasari et al. 2018	4,000	3:1	20	不安定
		2:3	50-200	半安定
Theinat et al. 2019	300~4,000	3:1	1	安定
			100	
			1,000	

チューブ形状でどんなものが存在可能かを解析することが目的である。

岩盤状況や気圧を考慮した建設的な観点の研究は少ない。

特に亀裂の角度を考慮した検討は少ない。

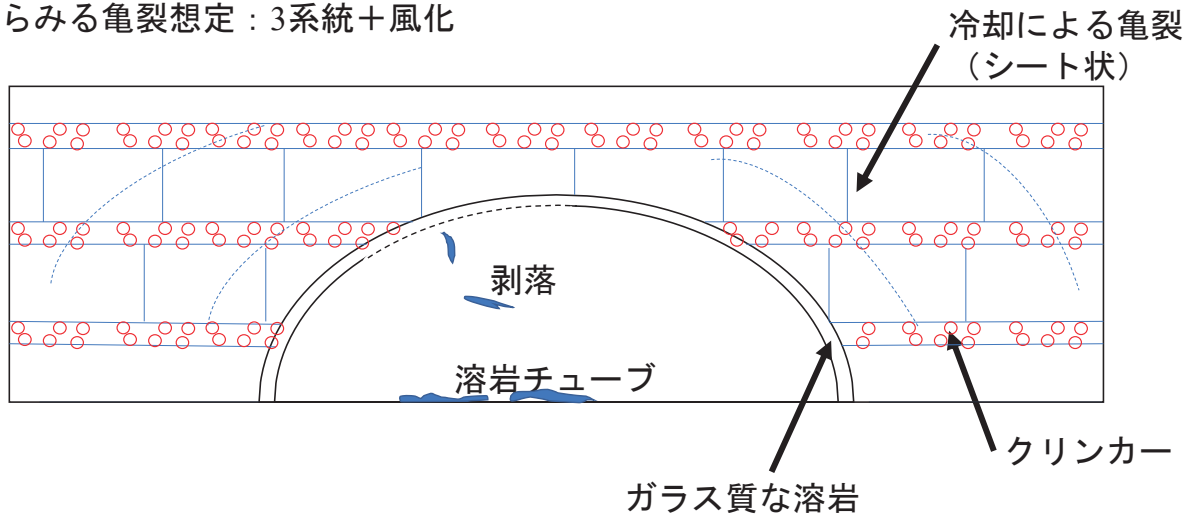


2章 亀裂調査

2023/8/24-25 縦穴研究会

2章 亀裂調査

観察からみる亀裂想定：3系統+風化



2章 亀裂調査

冷却による亀裂：
冷却収縮によってできる亀裂。



駒門風穴口



鳴沢氷穴口

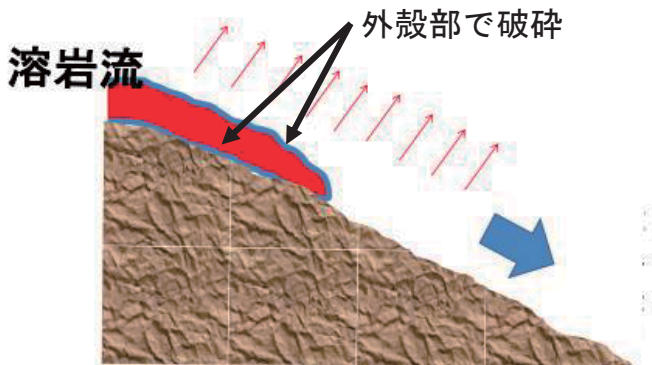


富士風穴

2章 亀裂調査

アア溶岩*表面のクリンカー：

溶岩の一部が固結した後も他の部分が流動するために、固結部が破碎された溶岩。表面をクリンカーで覆われている溶岩をアア溶岩*という。



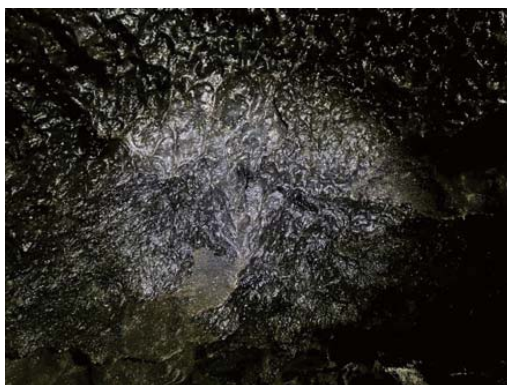
月周回衛星「かぐや」の観測成果に関する記者説明会資料より抜粋
https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20171018_kaguya.pdf 2023.8閲覧



富士風穴

2章 亀裂調査

ガラス質な溶岩：溶岩チューブの表面を薄く覆っている（亀裂少）。



駒門風穴



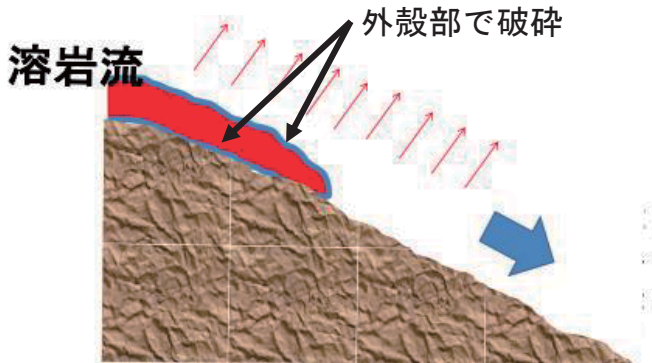
富士風穴

- ・ ガラス質な溶岩は力学的な強度は期待できない。
- ・ ガラス質な溶岩の裏に、亀裂が多い（亀裂調査が難しい）。

2章 亀裂調査

アア溶岩*表面のクリンカー：

溶岩の一部が固結した後も他の部分が流動するために、固結部が破碎された溶岩。表面をクリンカーで覆われている溶岩をアア溶岩*という。



月周回衛星「かぐや」の観測成果に関する記者説明会資料より抜粋
https://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20171018_kaguya.pdf 2023.8閲覧



富士風穴

2章 亀裂調査

ガラス質な溶岩：溶岩チューブの表面を薄く覆っている（亀裂少）。



駒門風穴

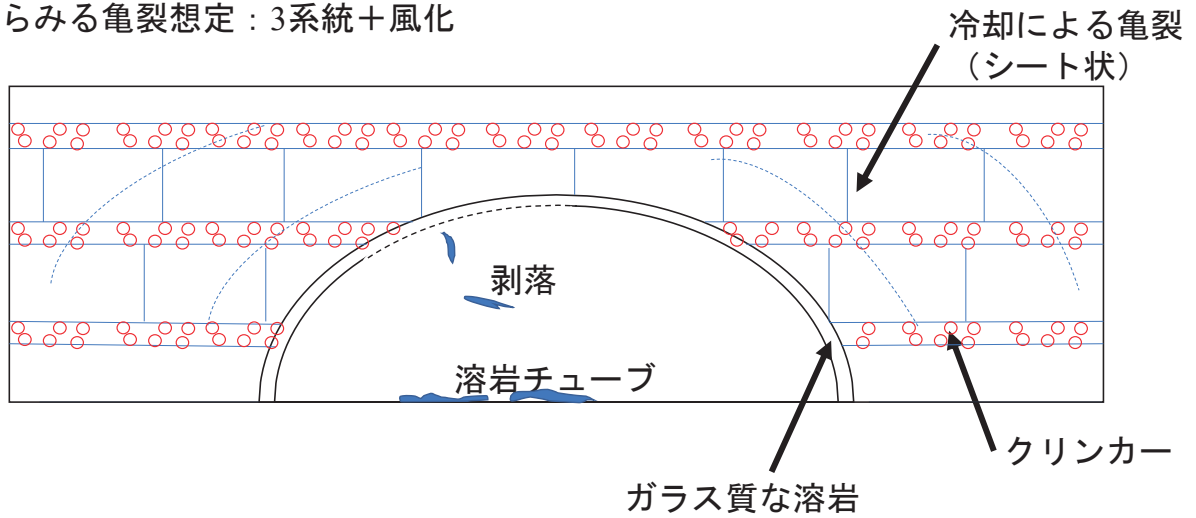


富士風穴

- ・ ガラス質な溶岩は力学的な強度は期待できない。
- ・ ガラス質な溶岩の裏に、亀裂が多い（亀裂調査が難しい）。

2章 亀裂調査

観察からみる亀裂想定：3系統+風化



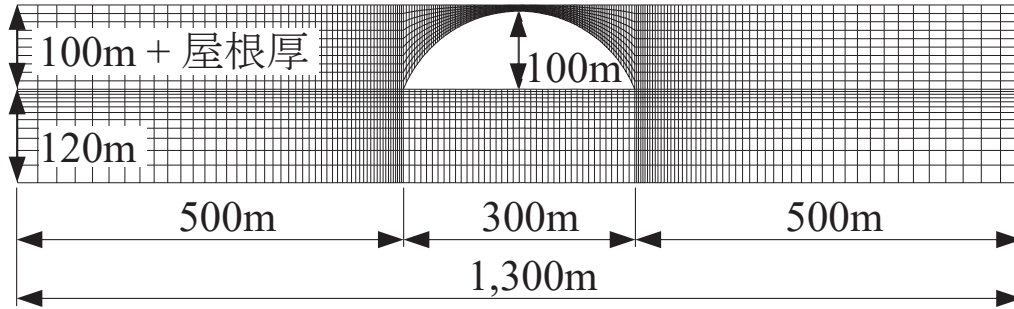
3章 溶岩チューブの安定性検討

3章 溶岩チューブの安定性検討

研究目的：

空気圧約0.1MPaを考慮し、岩盤内の亀裂の卓越する角度が、溶岩チューブの安定性に及ぼす影響を評価する。

解析モデル



自重解析 → 内圧解析 → 安定解析

※地表から溶岩チューブ天端までの厚さを「屋根厚」と定義する。

3章 溶岩チューブの安定性検討

パラメータ

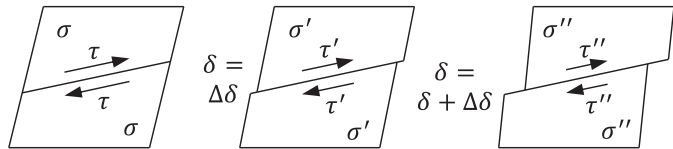
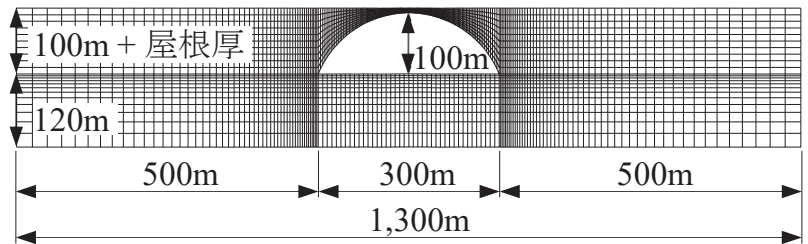
・ 亀裂角度 ・ 屋根厚

表 2 解析ケース

ダイレタンシー角 (°) = 17							
角度 θ (°)	0	15	30	45	60	75	90
屋根厚 (m)	4	6	7	8	10	12	
ダイレタンシー角 (°) = 0							
角度 θ (°)	0	45					
屋根厚 (m)	4	6	7	8	10	12	

表 1 解析に用いた物性値

パラメータ (単位)	値
弾性係数 (MPa)	5,000
ポアソン比	0.3
密度 (kg/m ³)	3,100
亀裂の粘着力 (MPa)	1
亀裂の摩擦角 (°)	36
亀裂の引張強度 (MPa)	0.01
亀裂の残留摩擦角 (°)	25
亀裂のダイレタンシー角 (°)	17
亀裂の残留ダイレタンシー角 (°)	6
重力加速度 (m/s ²)	1.62



亀裂は直接モデル化せず、要素内部に、亀裂に沿ったずれを仮定する。

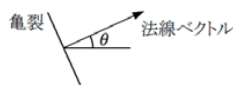


図 3 亀裂の角度 θ

亀裂角度0度 鉛直な亀裂
亀裂角度90度 水平な亀裂

3章 溶岩チューブの安定性検討

解析結果 最大変位 (屋根厚6m)

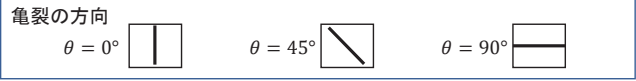
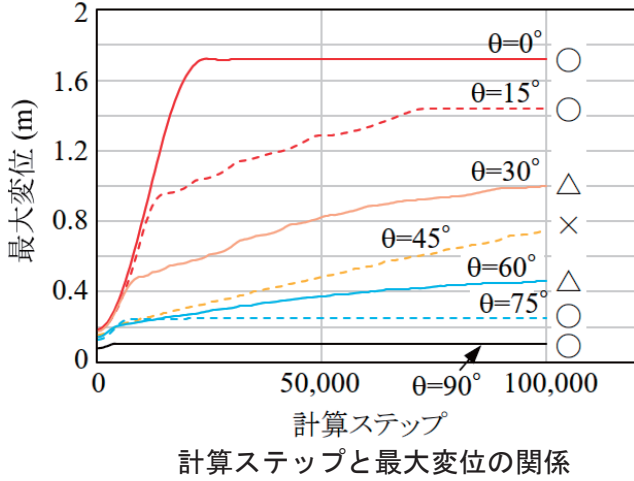


表 3 各ケースの安定性 (ダイレタンシー角あり)

角度 θ (°)	h (m)	4	6	7	8	10	12
0	4	×	○	○	○	○	○
15	4	×	○	○	○	○	○
30	4	×	△	○	○	○	○
45	4	×	×	△	○	○	○
60	4	×	△	○	○	○	○
75	4	○	○	○	○	○	○
90	4	○	○	○	○	○	○

- ・ 亀裂が水平になるほど安定しやすく、変位も小さくなる。
- ・ 亀裂角度45度が最も不安定で屋根厚が必要である。

3章 溶岩チューブの安定性検討

解析結果 亀裂角度0度 (屋根厚6m)

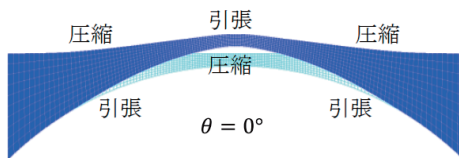
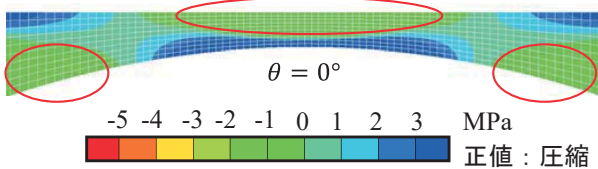
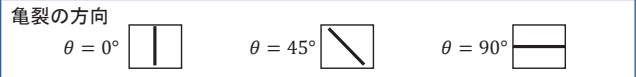


図 5 変形モード ($h = 6m, \theta = 0^\circ$)

水平方向の応力分布

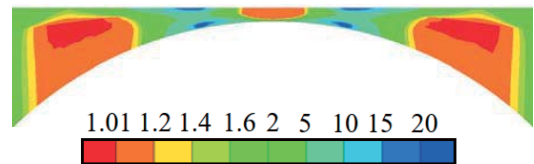


亀裂の引張強度がほぼ0であるため引張部では応力を担保することができない。



内圧より屋根部の重さが軽く、内圧をかけると屋根部の持ち上がるような挙動となる。

安全率 (赤・橙が危険側)



引張部：亀裂が滑り、危険側となる。
圧縮部：亀裂は滑らず、安定する。

安全率：亀裂のせん断強度をせん断力で除した値と定義する。

3章 溶岩チューブの安定性検討

解析結果 亀裂角度90度 (屋根厚6m)

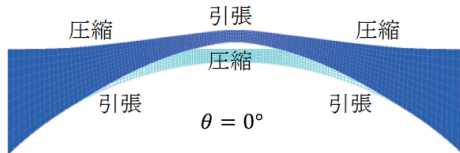
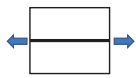
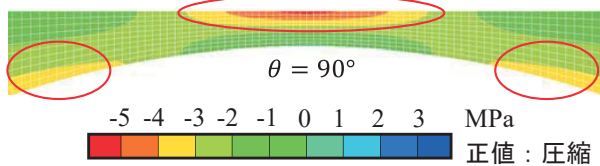


図 5 変形モード ($h = 6m, \theta = 0^\circ$)

水平方向の応力分布



亀裂が水平なため、引張力に対して、耐えることができる。屋根部で全体で耐えることができるため変位が小さくなる。

亀裂の方向

$\theta = 0^\circ$



$\theta = 45^\circ$

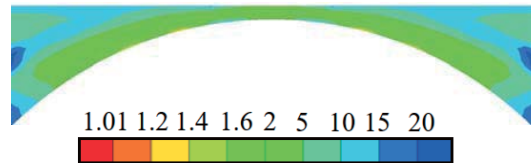


$\theta = 90^\circ$



内圧より屋根部の重さが軽く、内圧をかけると屋根部の持ち上がるような挙動となる。

安全率 (赤・橙が危険側)



全体として安定している。

安全率：亀裂のせん断強度をせん断力で除した値と定義する。

OBAYASHI



大林組 技術研究所 地盤技術研究部 18

3章 溶岩チューブの安定性検討

解析結果 亀裂角度45度 (屋根厚6m)

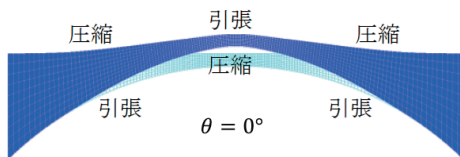
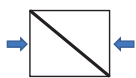
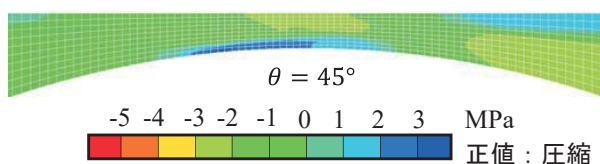


図 5 変形モード ($h = 6m, \theta = 0^\circ$)

水平方向の応力分布



途中で亀裂のせん断強度を超える応力が発生し、安定解析で収束しない(亀裂が滑り続ける)。

亀裂の方向

$\theta = 0^\circ$



$\theta = 45^\circ$

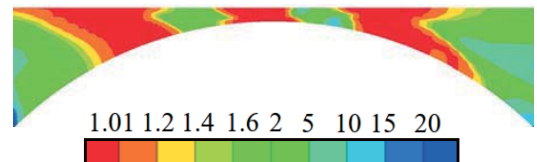


$\theta = 90^\circ$



内圧より屋根部の重さが軽く、内圧をかけると屋根部の持ち上がるような挙動となる。

安全率 (赤・橙が危険側)



安全率が低い箇所が大きく3か所発生する。内圧に対して強度が不足している。

安全率：亀裂のせん断強度をせん断力で除した値と定義する。

OBAYASHI



大林組 技術研究所 地盤技術研究部 19

3章 溶岩チューブの安定性検討

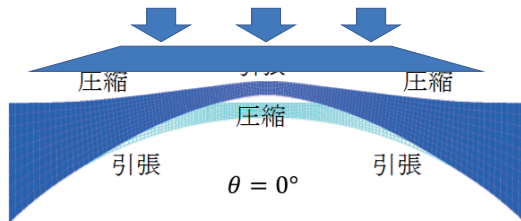
一考察

屋根厚が厚い場合

安定性の面では..
そのままでも良い。

屋根厚が薄い場合

上載圧をかける等の
工夫が必要である。

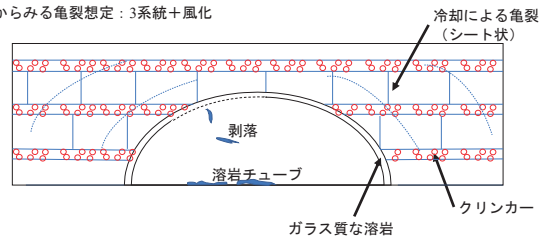


必要な情報

空洞の寸法、屋根厚、岩盤状況（地層の断面）

➡ 月の溶岩チューブの安定性解析には、縦穴から観察される情報が必須であるといえる。

観察からみる亀裂想定：3系統+風化



まとめ

本研究では、富士山周辺の溶岩チューブの壁面を観察することにより確認できる亀裂の卓越する角度に着目し、溶岩チューブの安定性が低くなる角度、高くなる角度を評価した。

- ・溶岩チューブの安定性は、既往の研究と同じように屋根部の安定性に支配される。そのため、屋根部の亀裂の観察が重要となる。
- ・溶岩チューブの安定性が最も高くなる亀裂の方向は $\theta = 90^\circ$ （水平方向）で安定性が最も低くなる亀裂の方向は $\theta = 45^\circ$ であった。
- ・溶岩チューブの屋根厚が足りない場合、上載圧をかけ、引張力を発生させない工夫が必要である。

今後の課題

- ・特に亀裂が水平に近い場合、岩石自体に5 MPa以上の引張が生じていることから、岩石自体の破壊も考慮した解析的検討が必要と考える。
- ・亀裂の方向を一方向のみでなく、複数方向の亀裂を考慮した詳細な解析が必要である。