

# 将来の月利用に向けた月面表層詳細調査

宮本英昭(東大工)・春山純一(NASDA)・山路敦(京大理)・  
齋藤潤(西松建設)・六川修一(東大工)

溶岩チューブによって形成されたと考えられる地形の中で、まだ天井が崩壊していないように見える場所には、大規模な空洞が存在している可能性がある。その内部は、宇宙線やマイクロメテオロイドの遮蔽、恒温などの意味で長期間の機器運用や将来の有人基地として非常に有望である。このような構造を明らかにし、周辺環境の詳細を知る事は、将来の月利用の観点から非常に重要である。

またそうすることは同時に、チューブ及び海の形成史の新たな知見の獲得につながる。火成岩は内部物質の部分溶融で生じる為、その生産される場所・メカニズムを知る事はその惑星の進化を考える上で重要である。現在の地球では海嶺が生産量最大の場所であるが、プレートテクトニクスのない地球型天体では、火星やイオのようにホットスポットがそれである場合と、月(や金星?や水星?)のように広範囲から大量にでる場合とがある。そこで、第3の典型例である月の海の火成活動について、粘性率や噴出率の点で新たな知見を得ることが期待できる。

そこで私達は、

**高性能カメラや地中レーダーを用いた表層地下構造の詳細探査**

を提案する。

# 溶岩チューブとは？

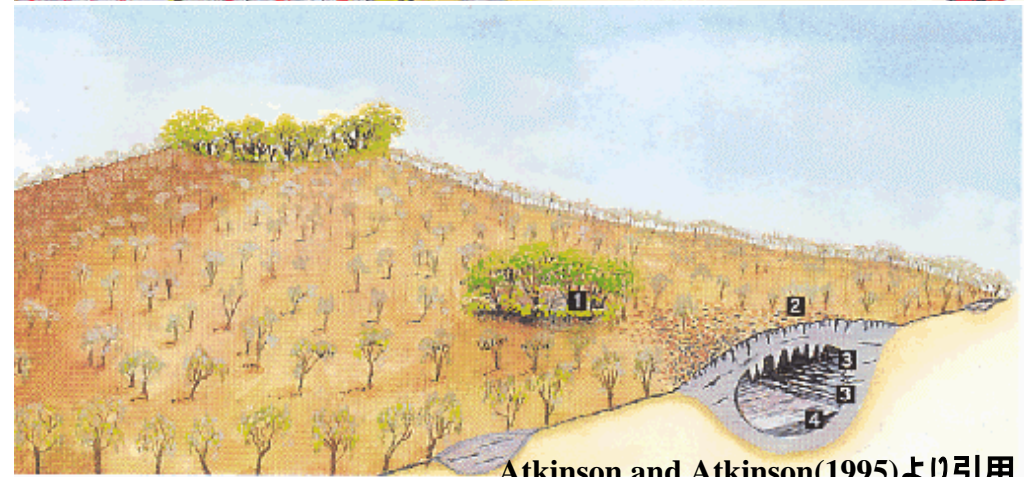
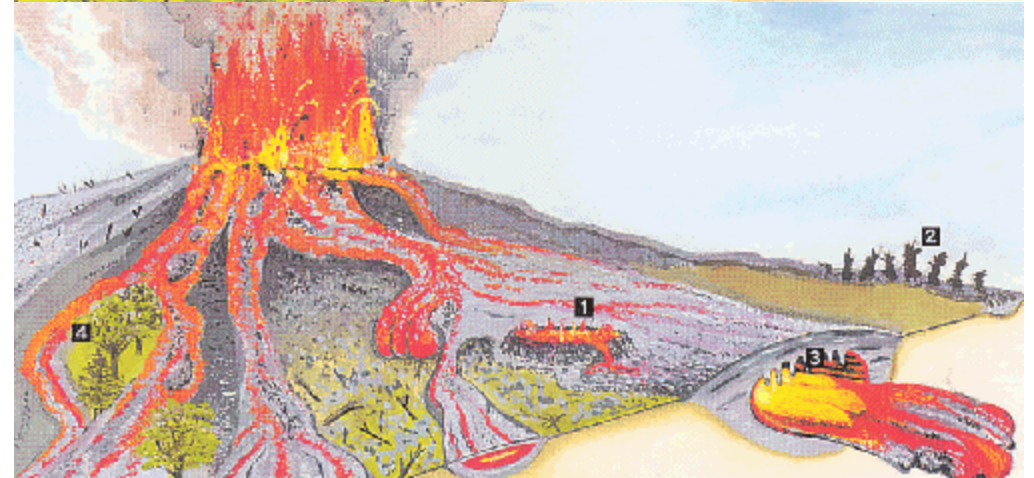
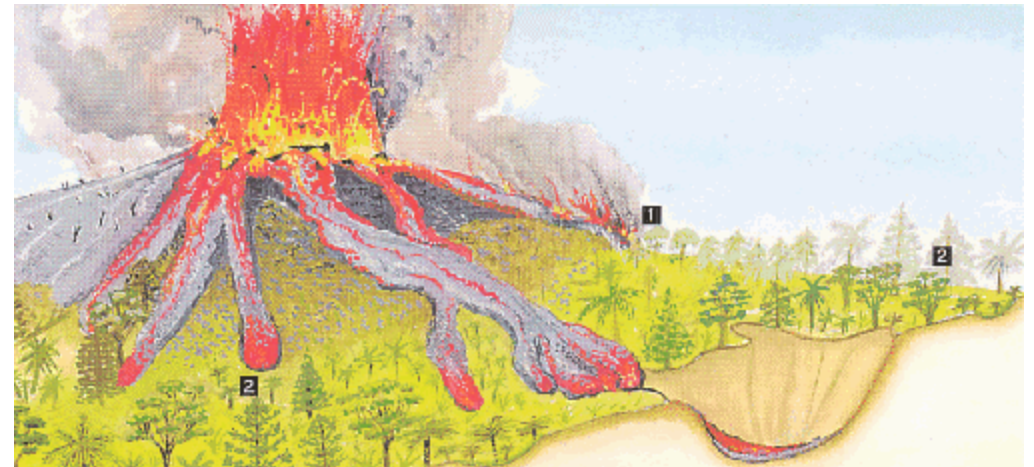
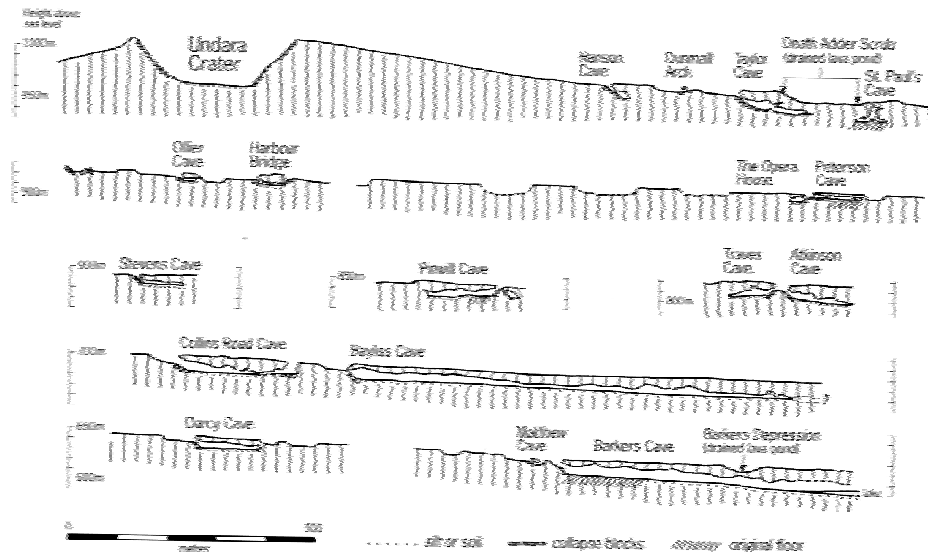
物理的には

- ・流体が傾斜を下ろうとする力
  - ・次第に表面が冷却(熱放射)する効果
- この2つバランスで決まる

1時間程度の噴出でチューブ形成モードへ入る (Miyamoto et al., 2001)  
 多くの火山で形成されているはず (e.g., Gregg?)



溶岩チューブ(Undara 火山)の典型的な断面図

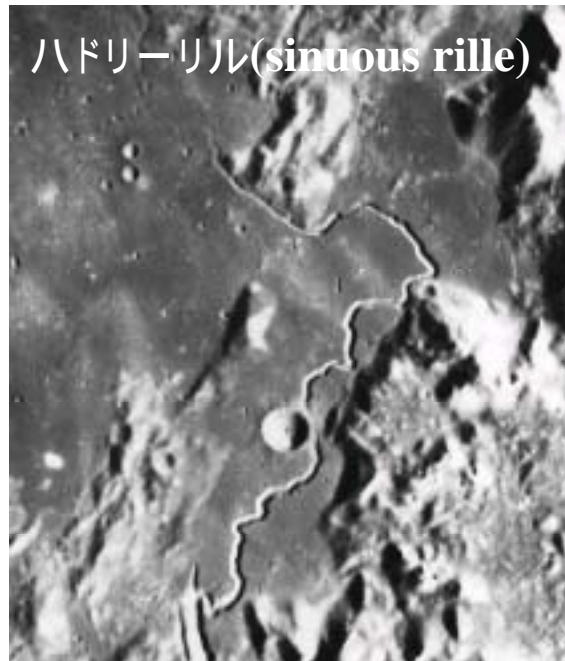
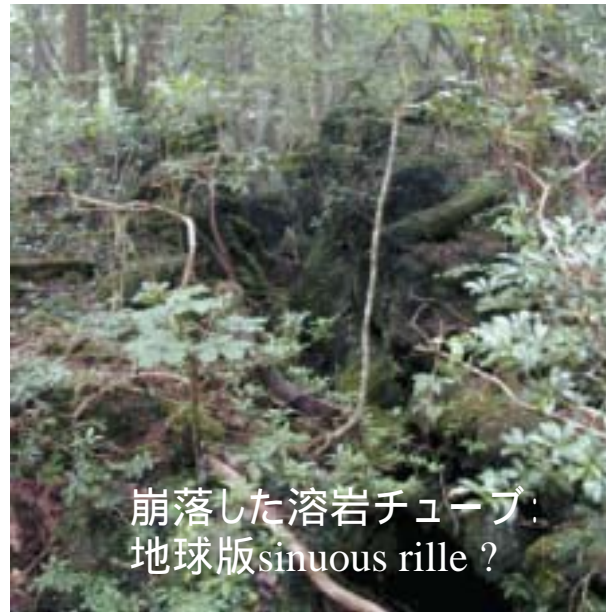


Atkinson and Atkinson(1995)より引用



# 月面の溶岩チューブ

sinuous rille は、溶岩チューブの天井が崩落したものと考えられている



ハドリーリル(sinuous rille)



ハドリーリルの露頭

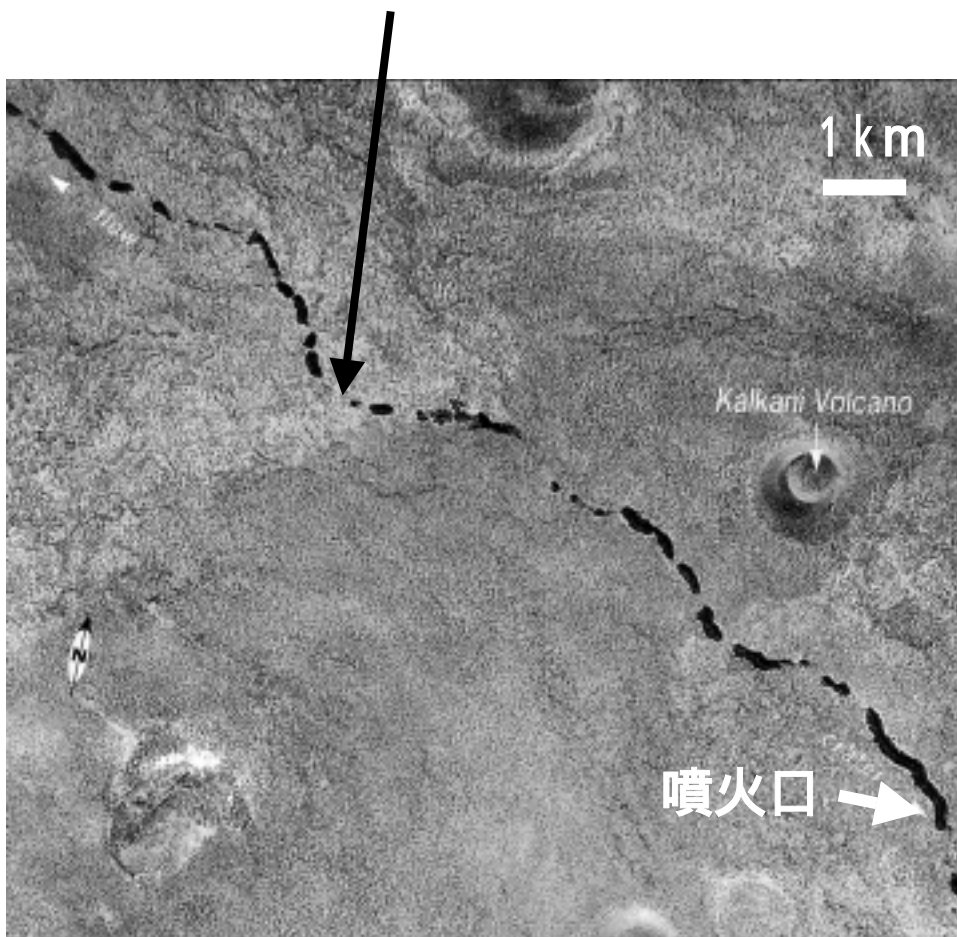
# ハドリーリル



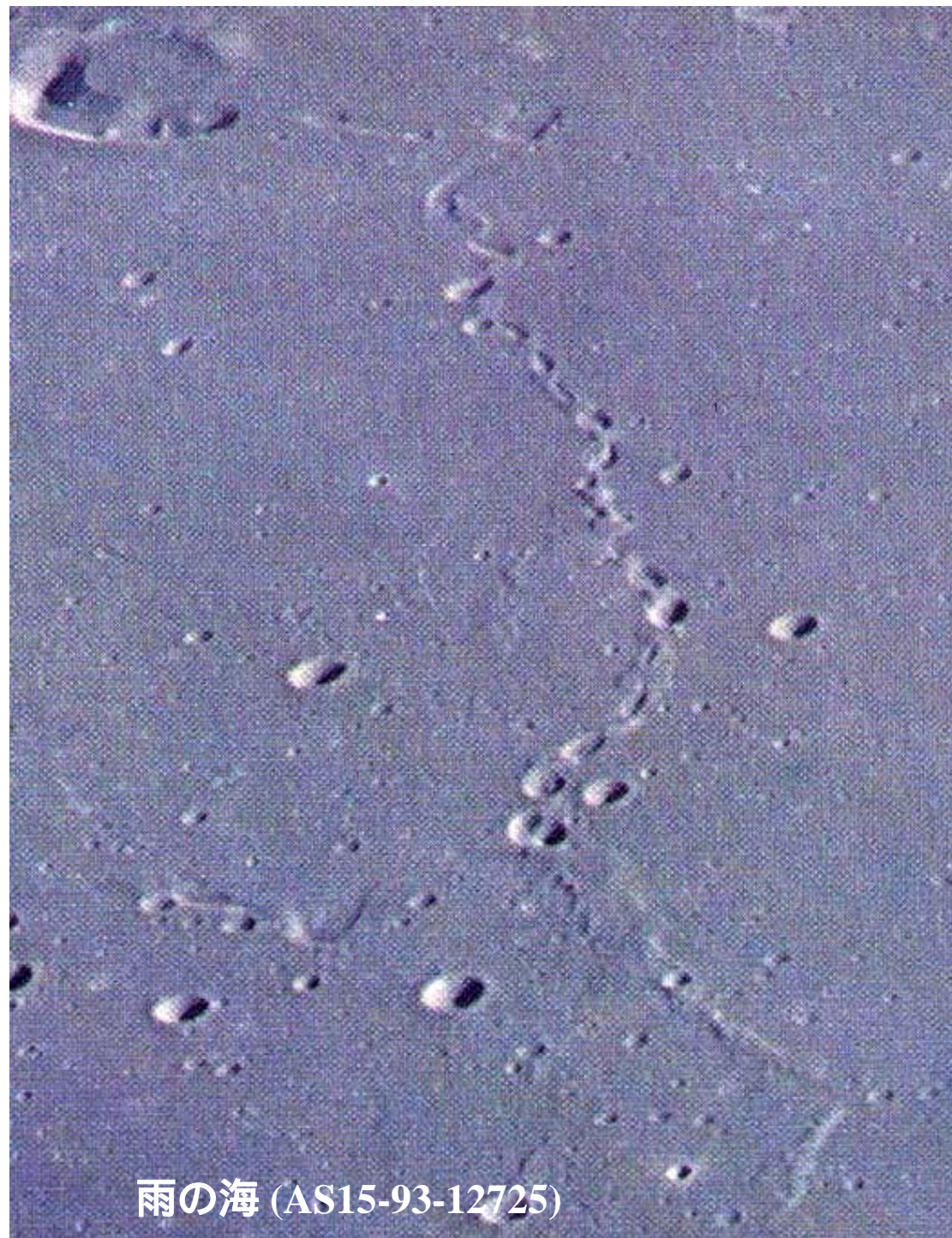


# 天井の崩壊していない溶岩チューブ

地球上の崩壊していないチューブ



オーストラリア・アンダーラ火山

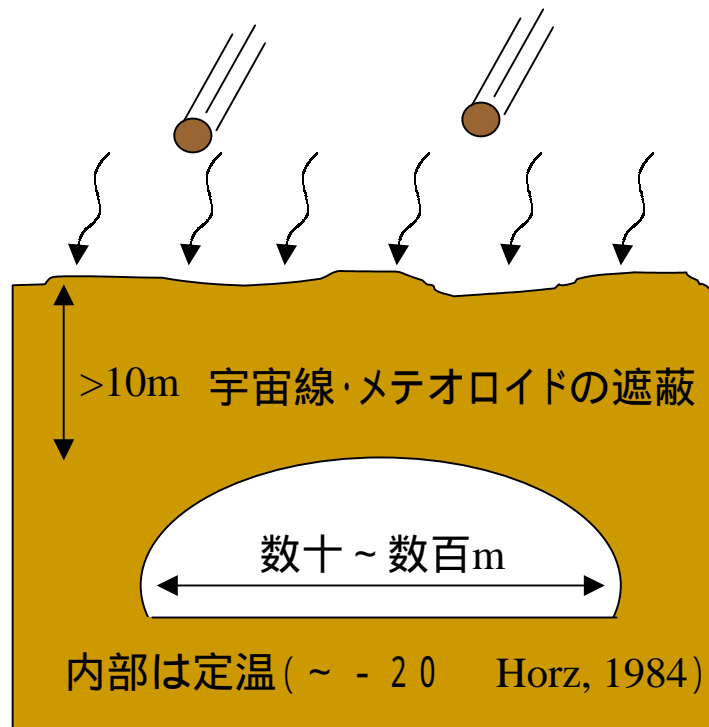


雨の海 (AS15-93-12725)



崩壊していないチューブが存在するとなると  
sinuous rille のサイズから

幅数百メートル・高さ数十メートルの  
大規模な空洞が存在している可能性がある



長期間の機器運用や将来の有人基地に有望

このような構造を明らかにし、  
周辺環境を詳細に知る



富士山青木が原溶岩流



アンダーラ火山(オーストラリア)

海の溶岩流の常識: 高噴出率、低粘性 (e.g., Moore and Schaber, 1975)

地球 オントンジャバ (36M km<sup>3</sup>)  
コロンビア川洪水玄武岩 (1.3M km<sup>3</sup>)  
火星 アルシア山 (数100km)  
タルシス山 (~400km)  
月 海の溶岩流 (400-800km)  
金星 ミリッタフラクタス (~1000km)  
カウエル平原 (~200km)

海は本当に洪水型玄武岩なのか?  
(そもそも「洪水型」はありうるか?)

### 近年の論争: Fast vs. Slow

**Fast**

洪水型玄武岩は数日で形成した:  $10^7 \text{ m}^3/\text{s}$

(Shaw and Swanson, 1970; Reidel and Tolan, 1992)

月や金星の大きな溶岩流:  $10^5 - 10^7 \text{ m}^3/\text{s}$

(Schaber, 1973; Roberts et al., 1992)

アイスランドやハワイでの噴火と、2次元のモデルから推定  
非常に大きなマグマ供給システムが必要!?

プリュームの存在・continental rifting・プレート運動の開始などの議論

**Slow**

溶岩チューブ・インフレーション:  $10^2 \text{ m}^3/\text{s}$

(Walker, 1991; Hon et al., 1994; Self et al., 1996)

地球の洪水型玄武岩も、現在は「洪水」ではなくて、「ゆっくり」と考えられている

広範囲にわたる均質な組成の説明?

溶岩を進ませるための圧力をどうするか?

噴出率はサンプリングしても良く分からない

噴出率を見積もるキーは

傾斜と幅、もしくは**傾斜と厚さ** [Miyamoto and Sasaki, 1998]

通常、粘性率を決定するのは大変...

なぜなら、溶岩の流動は、

地形・噴出条件[e.g., Malin, 1980]

速度(流体力学)[ e.g. Dragoni, 1990; Nichols, 1939 ]

温度変化(放射・熱伝導)[ e.g. Crisp and Baloga, 1990]

物性変化(アレニウス型・結晶成長・揮発性成分)

に依存

特別な条件として溶岩チューブを形成していると...

・温度は噴火口からほぼ一定で流れる

・形状が変化しない

**チューブの断面積**がわかれば

**粘性率は精度良く求まる**

温度(深度の情報)

揮発性成分の量

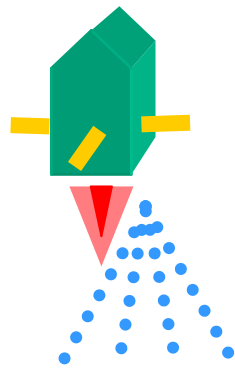
# ミッション提案 (燃料を沢山持っていく)

あらかじめ狙いを付けた地域で低空飛行

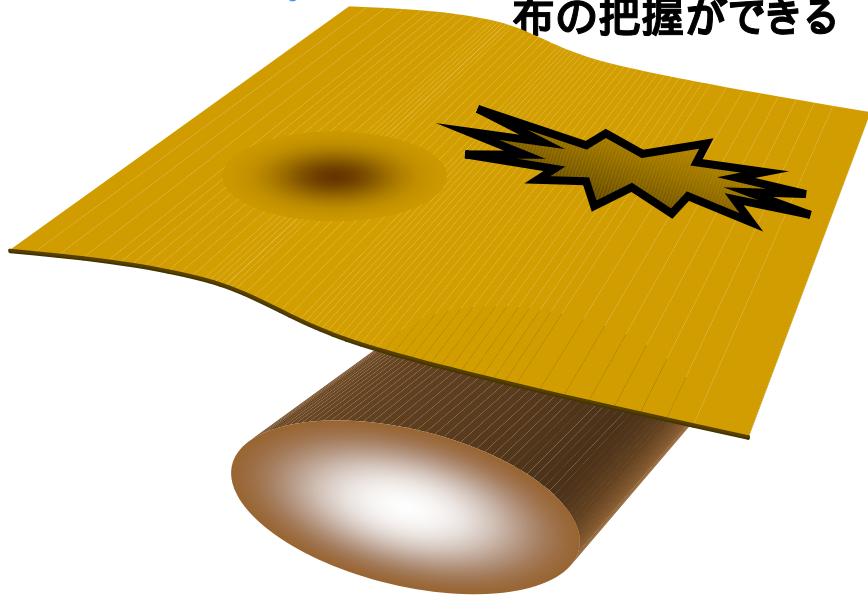
## カメラで地表面の詳細画像

着陸前の着陸地点調査

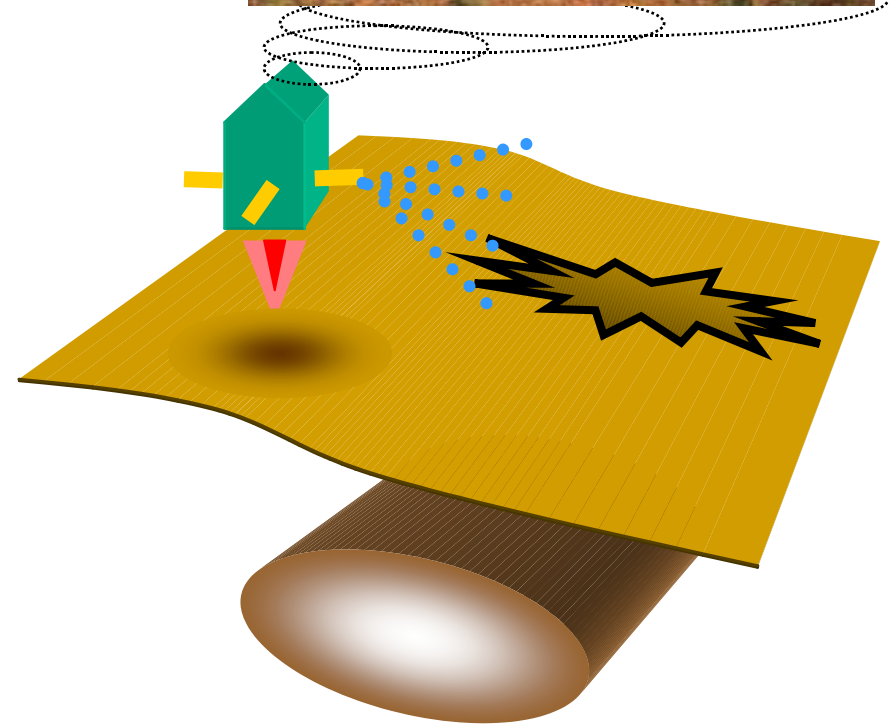
着陸に必要な状況判断  
(岩塊の有無など)  
海の溶岩流や構造探査



構造物建造に不可欠な表層の構造や表面の岩石分布の把握ができる



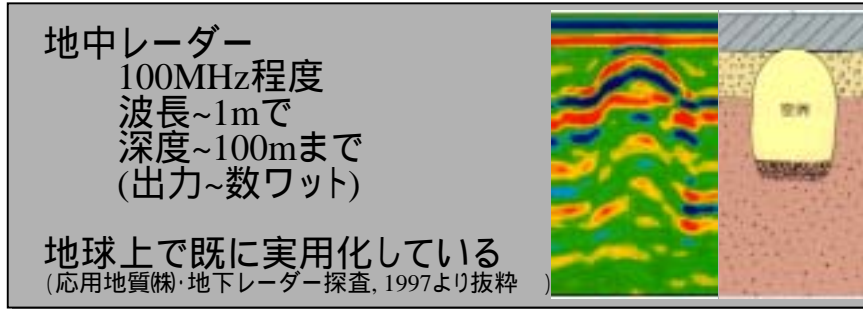
## 溶岩チューブの入り口を撮像



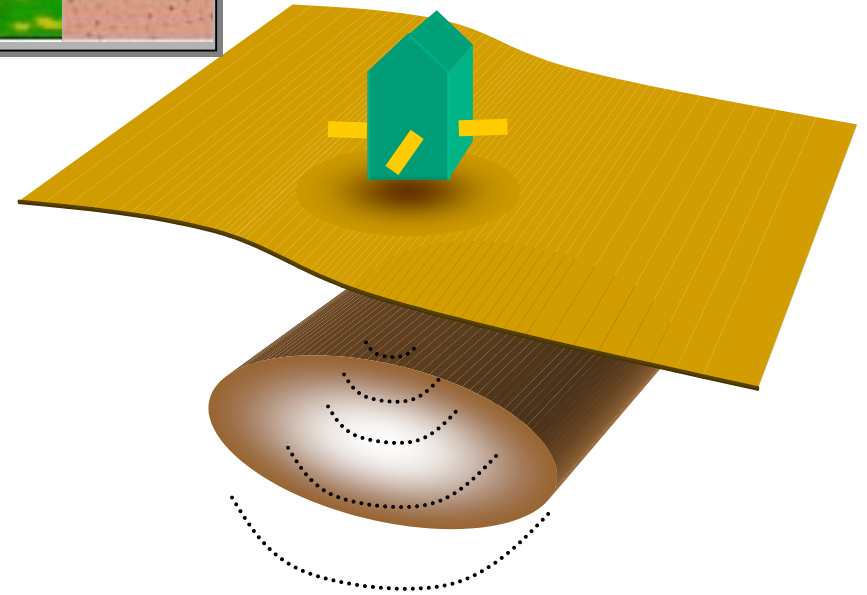


# 崩落していないチューブの天井へ着陸

可能なら着陸前に地中レーダー起動  
プロフィール取得



着陸後も、地中レーダー探査  
地下構造を押さえる



チューブの発見・構造・ネットワーク: チューブでなかったら(中が詰まっていたら) リル形成史の見直し

溶岩流・レゴリス厚さ: 層間のレゴリスの存在が確認できたら、今後の探査への期待

(30億年前の太陽や太陽系の活動のスナップショット: Spudis, 1996)

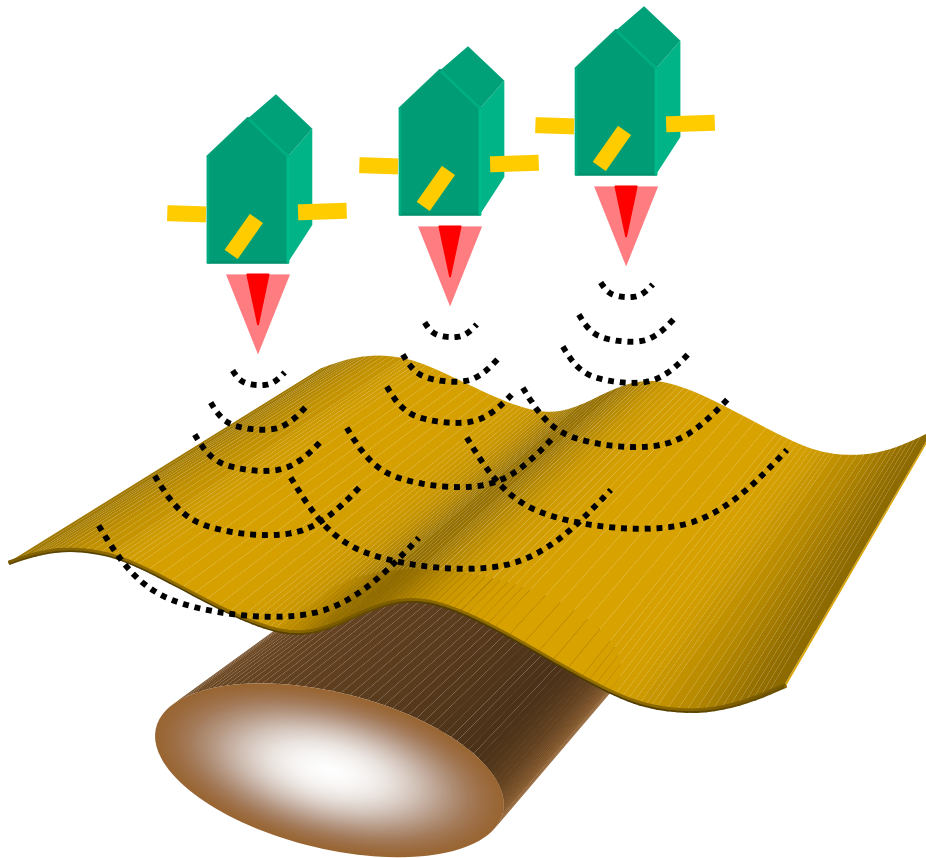
レゴリス無くても、海の溶岩の噴出率への制約

厚さが薄い 低粘性、高噴出率( リルの形成は侵食しか無い?)

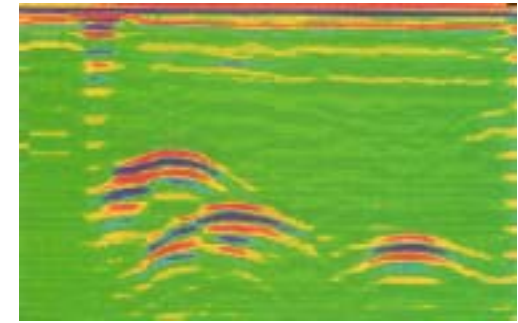
厚さが厚い 噴火口は? 噴火回数? 噴出時間は?

## エクステンドミッション・1

### 最離陸・ホバリング



### プロファイリングを行う 2次元断面



### チューブ周辺を探る

- ・チューブネットワークの発見:チューブの分岐、結合などの発見?  
(チャンネルの分岐から物性・噴出率を見積もれる: Miyamoto et al., 2001)
- ・チューブの入り口を発見できる? インパクトがある写真が撮れる
- ・チューブ壁の写真 成層構造 / 侵食跡 / 噴出率変化跡
- ・地下の被覆前の傾斜もある程度わかる? より確実に噴出率制約

### 噴火口付近を通過

噴火口の形状 地球型惑星に普遍的な火山活動の深い理解へ

- ・単純な割れ目噴火の場合  
開口幅が噴出率を決める 噴出率、噴火スタイルへの制約
- ・複雑な構造  
応力場? 発達史?

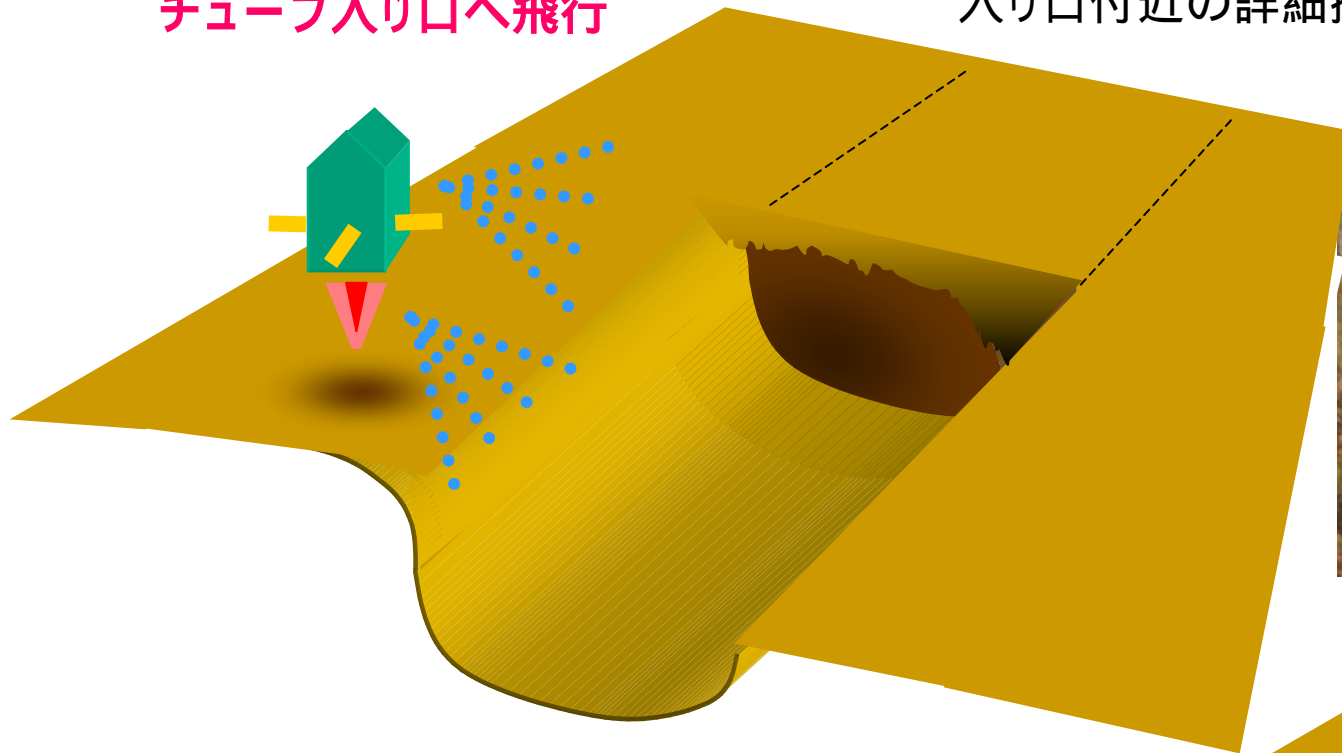
### リンクルリッジ、クレーターなどの上空を通過

- ・内部構造を知る

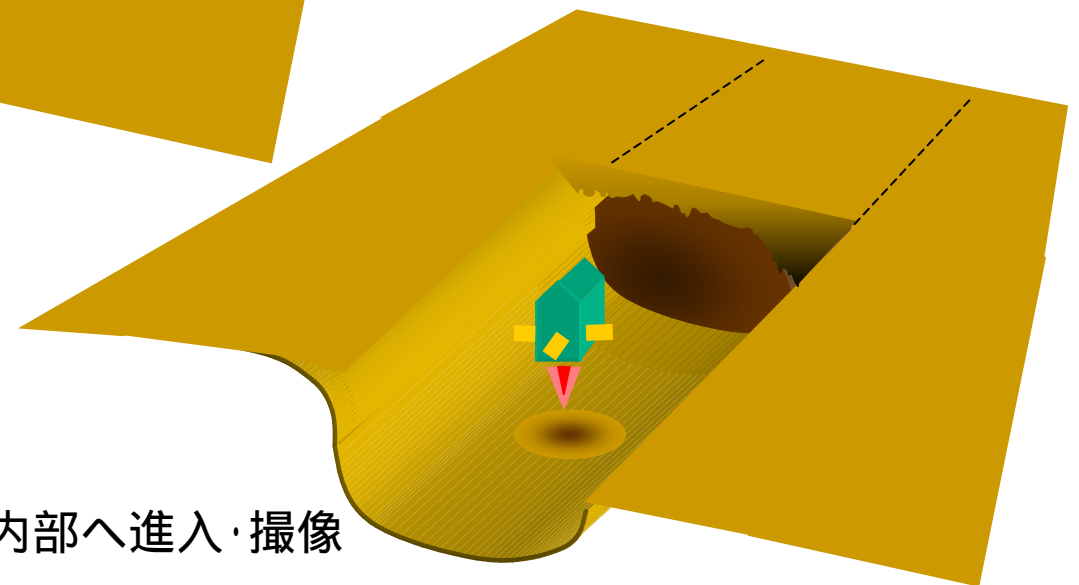


## エクステンドミッション・2

チューブ入り口へ飛行



入り口付近の詳細撮像 将来の利用に向けて



最後はチューブ内部へ進入・撮像

余った燃料で自爆！ 内部の明るい写真！？

## まとめ

- ・ 将来の月利用を考えた溶岩チューブの探査を提案
- ・ この探査は、シニユアスリル及び海の溶岩流の形成史への新たな知見獲得につながる
- ・ また、地球型惑星の典型的な火成活動(洪水型噴火)の理解につながる

## 今後の検討課題

- ・ 機器の詳細
- ・ 実地テスト(富士山青木が原溶岩流)
- ・ 探査候補地点の選定