

アストロバイオロジーの舞台としての固体火星進化-3

近年の火星探査・隕石研究から  
得られた新しい火星の描像

白井寛裕

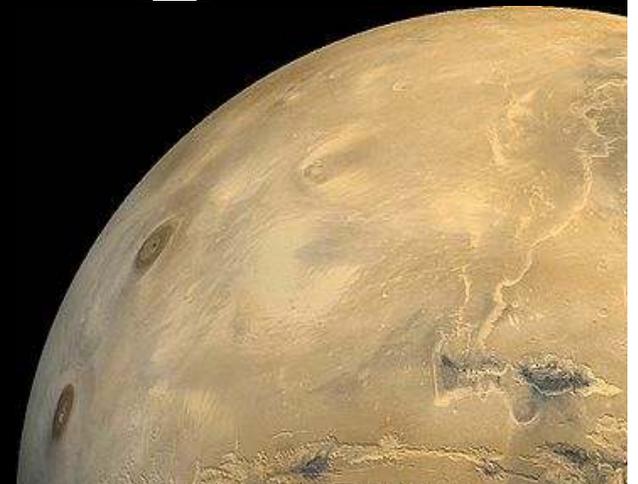
Johnson Space Center, NASA

Lunar Planetary Institute, USRA



## TODAY'S TOPIC

- 固体火星内部進化及び表層環境との相互作用に関するレビュー
  - 火星隕石 & 火星探査
- Mars Exploration Rover の探査例



# 隕石 vs. 探査

- 火星隕石試料

- + : 実験質での詳細な岩石記載・化学分析

- : 地質学的産状が不明瞭（特に火星の場合）

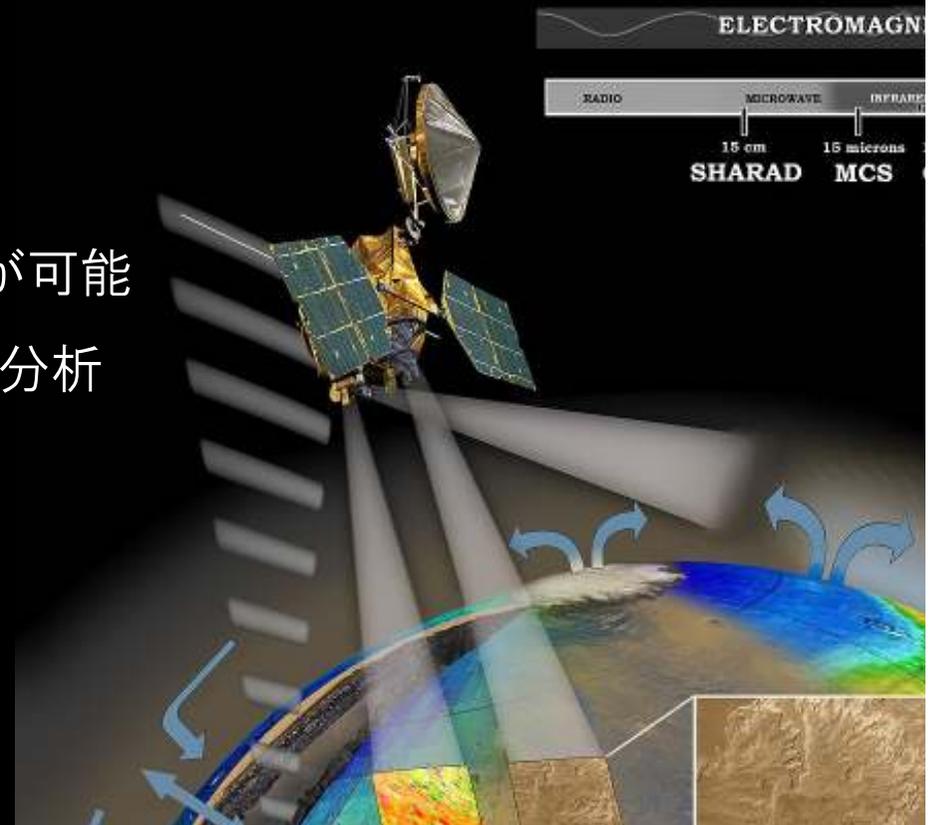
- 火星探査

- + : “現場”での直接分析・観測が可能

- : 実験室とは異なる環境での分析

- : 限られた科学データセット

*Mars Reconnaissance Orbiter*



# 火星隕石: ALH 84001 & SNC METEORITES

- 全て火山岩で地殻由来
- 火星隕石の数 : 100個 (LPSC 2012)
- 1個 : ALH 84001 (~40億) ⇔ 99個 : SNC meteorites (2億~13億)



# SNC (MARTIAN) METEORITE

Shergottite (170 – 550 Ma)



玄武岩 (px + pl ± ol)

Nakhlite (1.3 Ga)



単斜輝石岩 (cpx + ol)

Cassignite (1.35 Ga) カンラン岩 (ol)



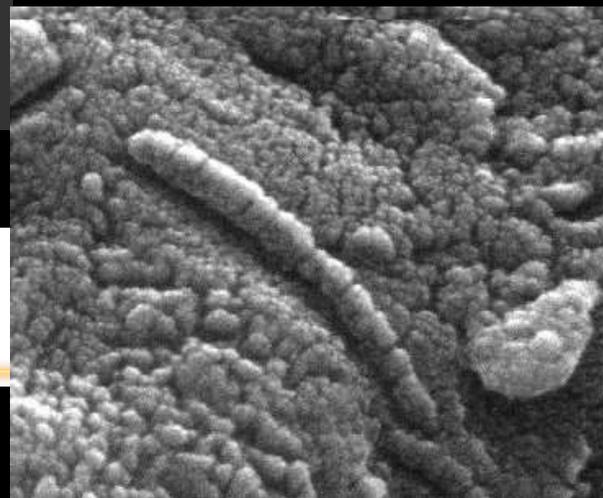
ALH 84001

4.09 ± 0.03 Ga (Lu-Hf)



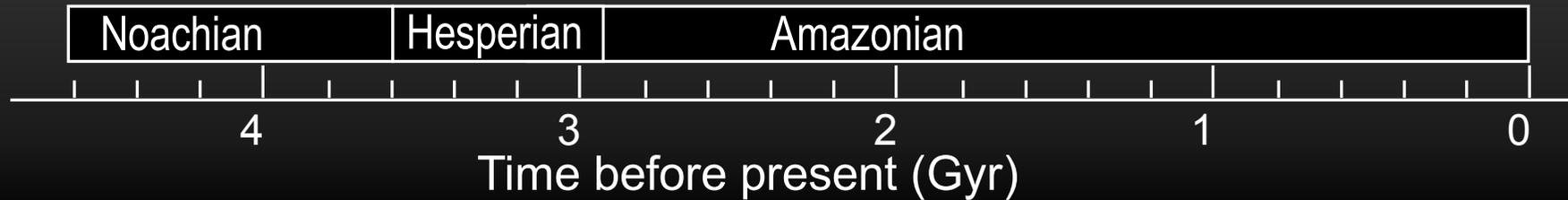
斜方輝石岩

碳酸鹽

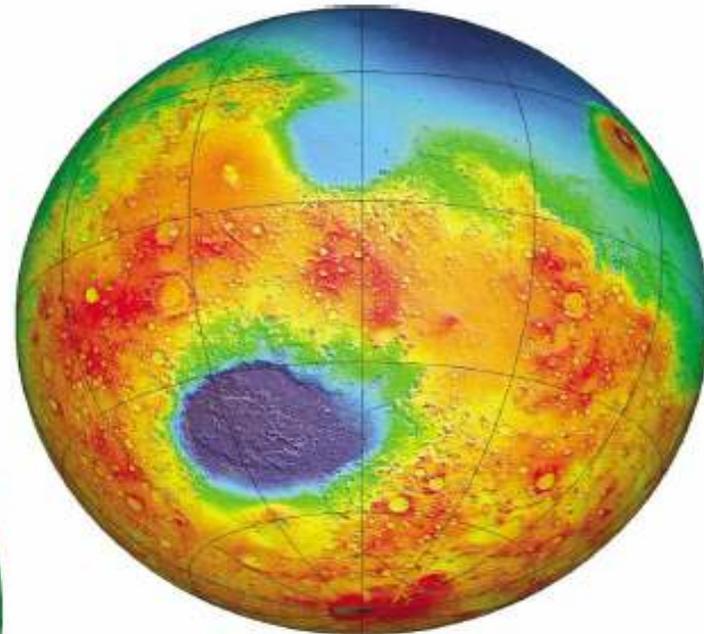
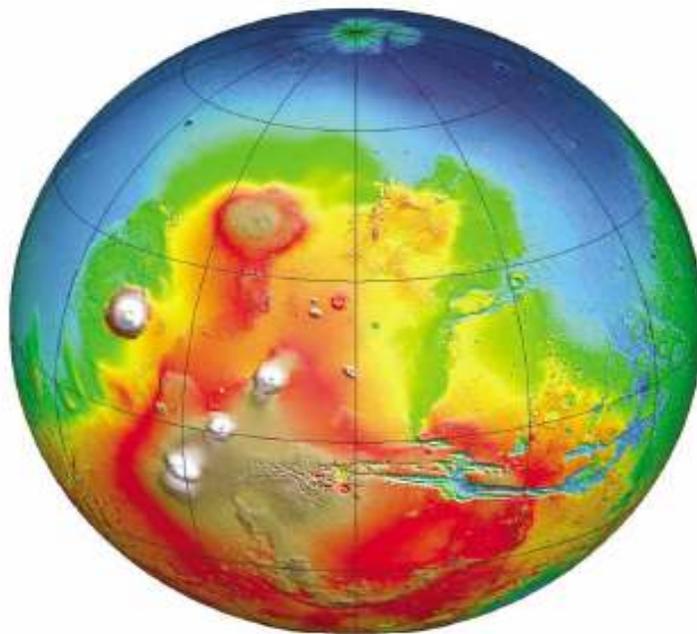


Life?

# 火星隕石と火星地殻の関係－1：年代



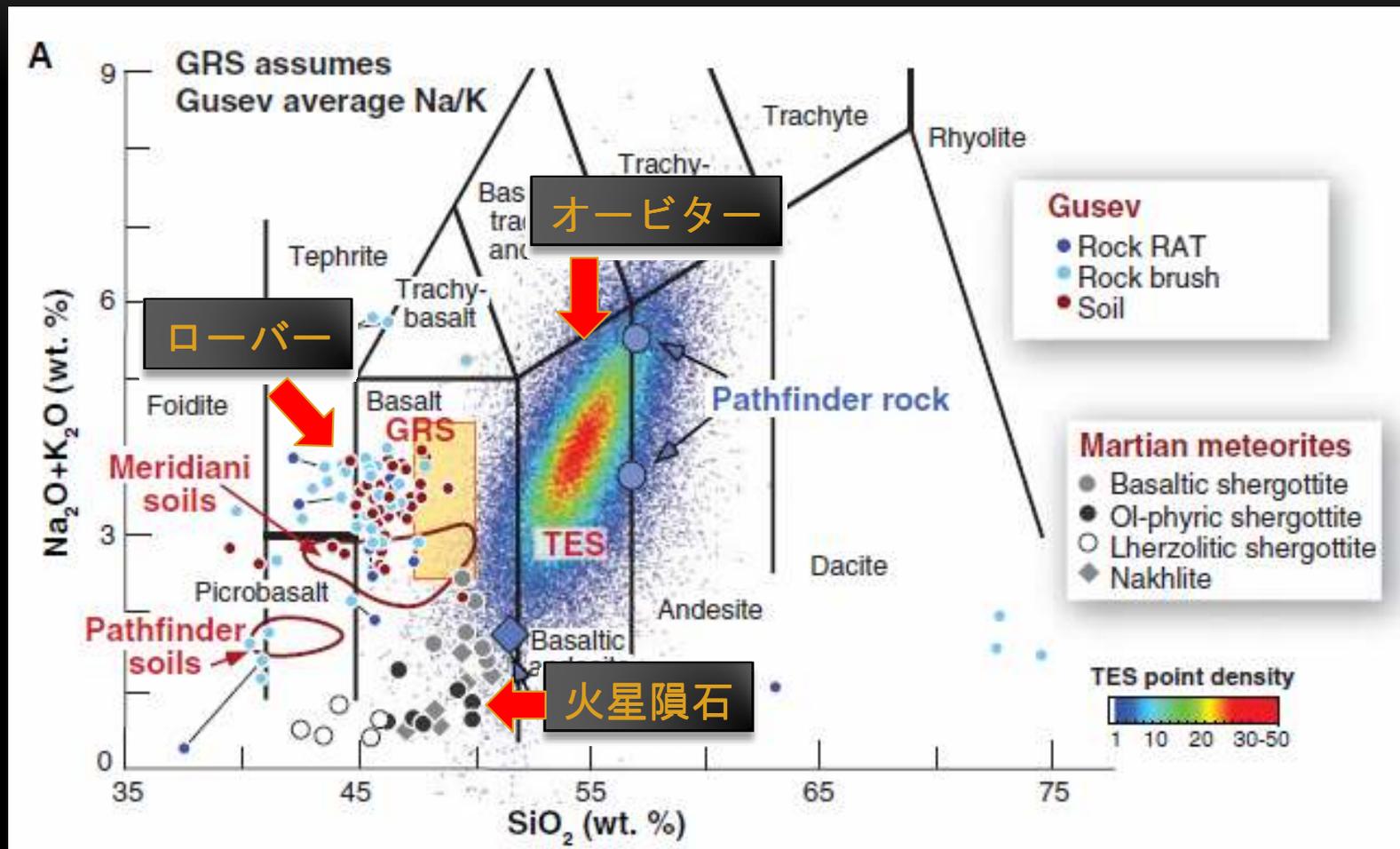
- 南部高地：ノアキアン
- 北部低地：ヘスペリアン
- タルシス：アマゾニアン



- SNC 隕石：2-13億年

# 火星隕石と火星地殻の関係ー2：化学組成

- 火星隕石は化学組成に関し火星地殻を代表していない

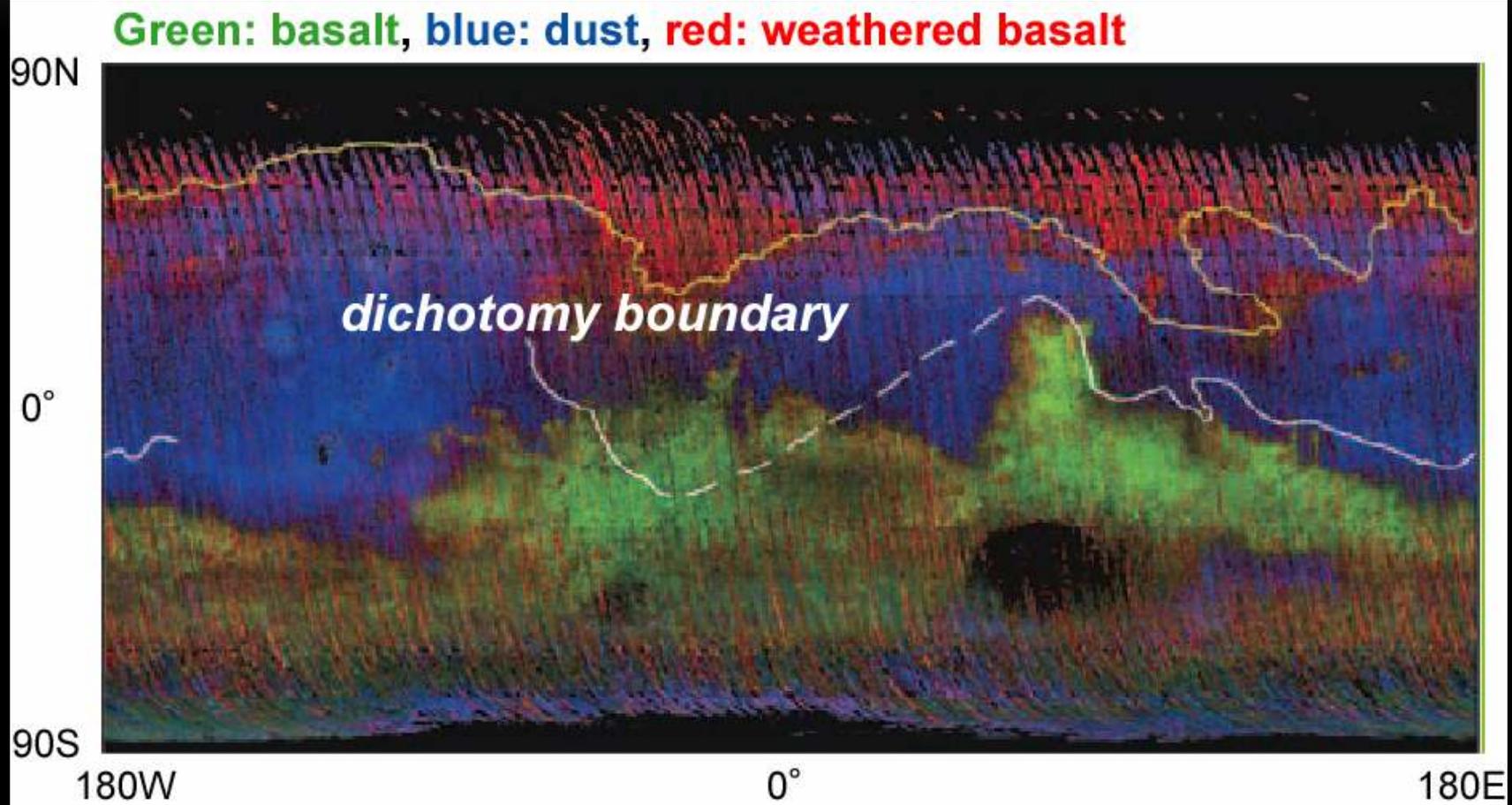


McSween et al. [2009]

# 熱赤外データの問題点－1：ダスト&変質

- 熱赤外データは岩石表面 ( $\sim \mu\text{m}$ ) のダストや変質を反

映



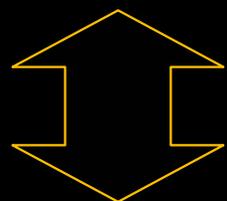
Mapped by Thermal Emission Spectrometer (TES), Wyatt & McSween [2006]

# 熱赤外データの問題点-2：逆重曹分析

- 選択したspectrum-set (仮定) が計算結果に強く影響

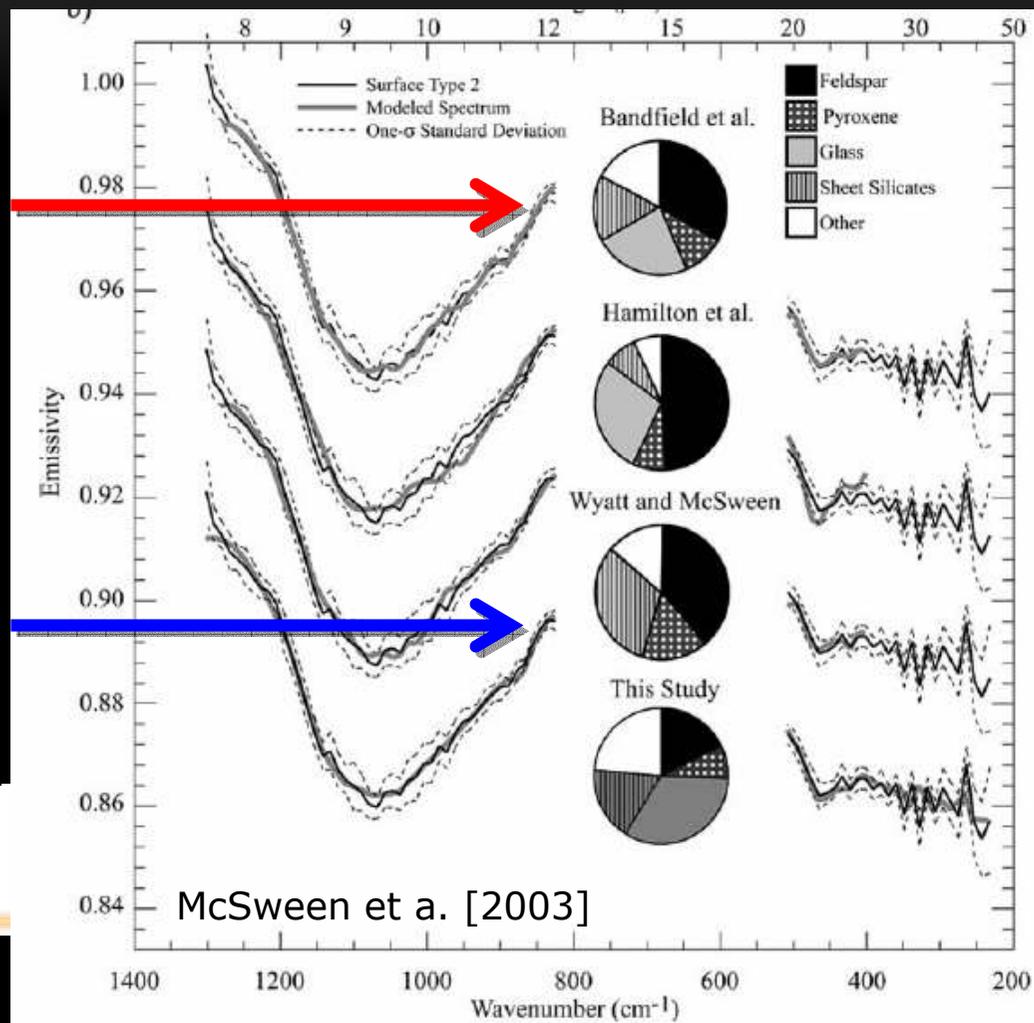
安山岩 ( $\text{SiO}_2$ : >57 wt%)

Bandfield et al. [2002] 他



変質玄武岩

Wyatt & McSween [2003] 他



# 隕石研究から得られた重要な知見ー1： 地殻・マントル・コアの分離時期

## 消滅核種を用いた研究：

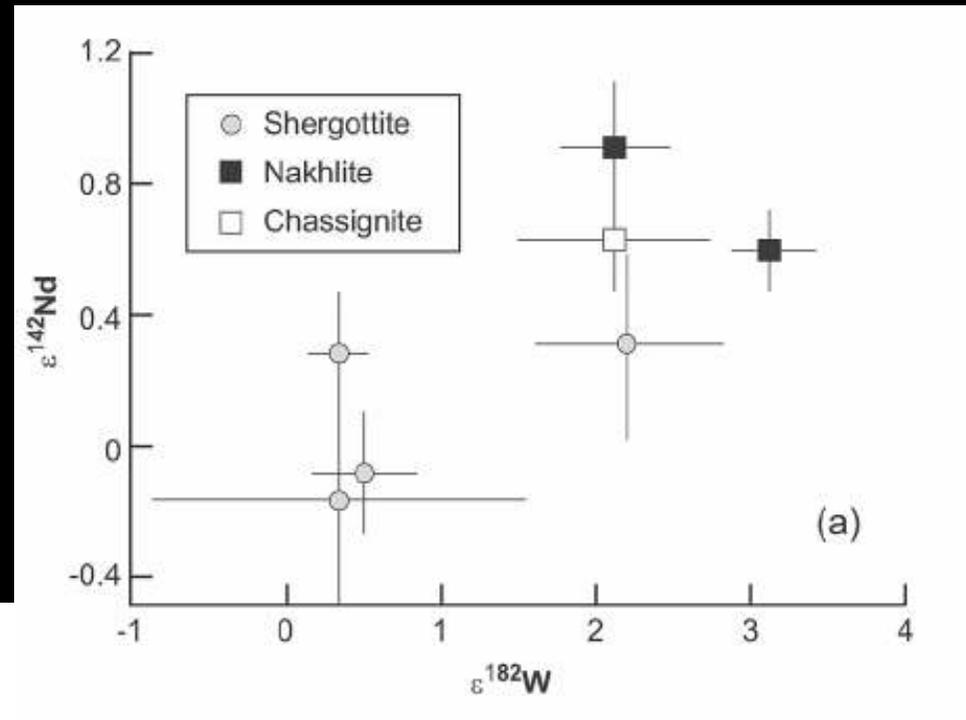
火星集積直後 (~4.5 Ga) の地殻・マントル・コアの分別を示唆

### • $^{146}\text{Sm} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$ 系

- 親・娘核種とも親石元素
- Silicate (マントル・地殻) の分離
- 半減期：103 Myr

### • $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ 系

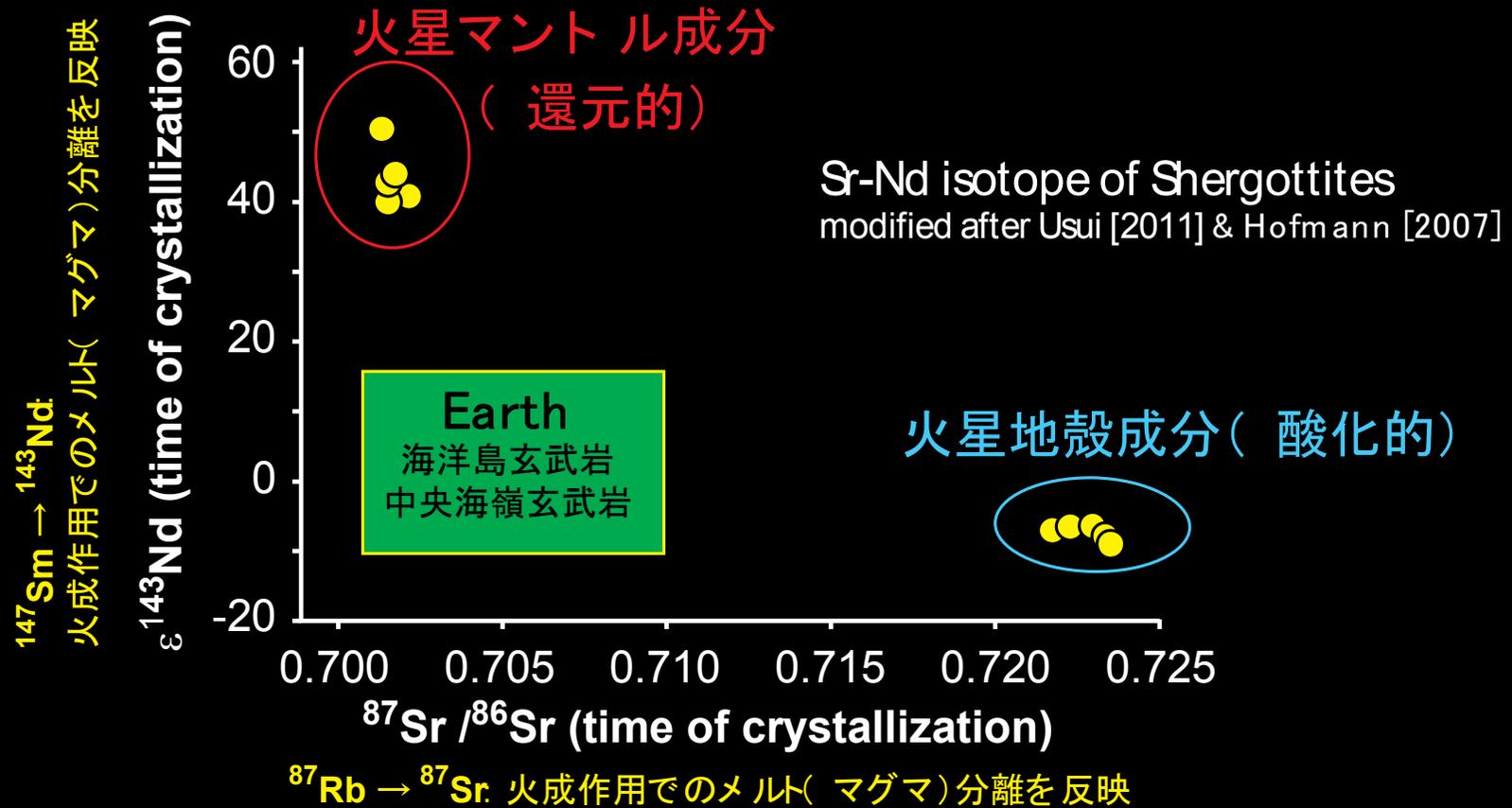
- 親核種 (Hf)：親石元素
- 娘核種 (W)：新鉄元素
- Metal (コア) の分離
- 半減期：9 Myr



Modified after McSween [2007]

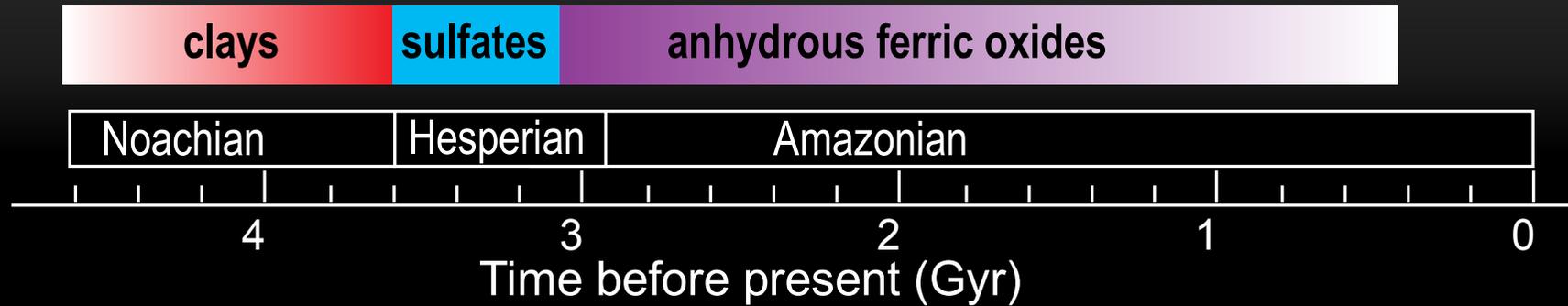
# 隕石研究から得られた重要な知見-2: 地殻・マントル同位体不均質

同位体不均質：火星 >> 地球 ⇒ 沈み込み帯の有無を反映？



# 大気及び表層環境進化-1：探査からの知見

## GLOBAL ALTERATION HISTORY?



**Red: clays, blue: sulfates, yellow: other hydrated minerals (Not ID)**



By OMEGA/Mars Express [*Bibring et al. 2006*]

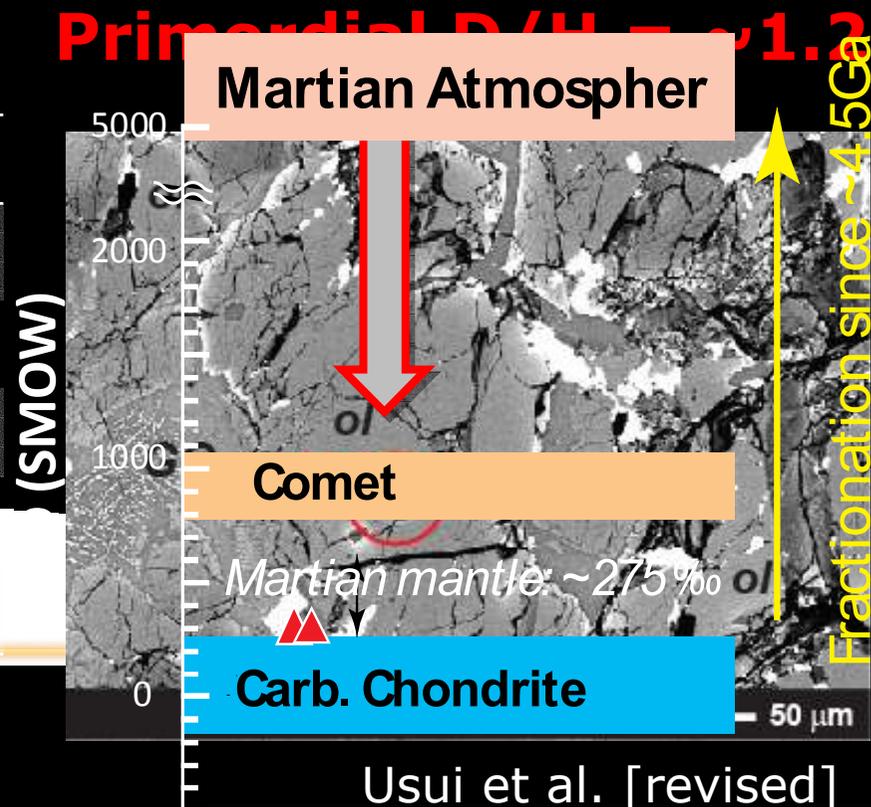
# 大気及び表層環境進化-2：隕石研究からの知見 揮発性元素位体組成進化

“重い”現在の火星大気同位体組成 ⇒ 大気散逸を反映？  
 “始原始的”な水素同位体組成 ⇒ 火星の“水”の起源に制約

## Atmospheric composition

isotope	$\Delta$	Lost to space
<b>D/H</b>	[terrestrial] ~5	<b>60-74 %</b>
$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	1.3	50-90 %
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	1.05-1.07	50-90 %
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	1.7	90 %
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	1.025	

Jakosky & Phillips [2001]



A wide-angle photograph of the Martian surface, showing a vast, flat, reddish-brown landscape under a hazy, orange-tinted sky. In the lower right foreground, the Mars Exploration Rover Spirit is visible, casting a shadow on the ground. The terrain is covered with small rocks and pebbles. The text "Mars Exploration Rovers Spirit & Opportunity" is overlaid in the center of the image in a stylized, outlined font.

# Mars Exploration Rovers *Spirit & Opportunity*

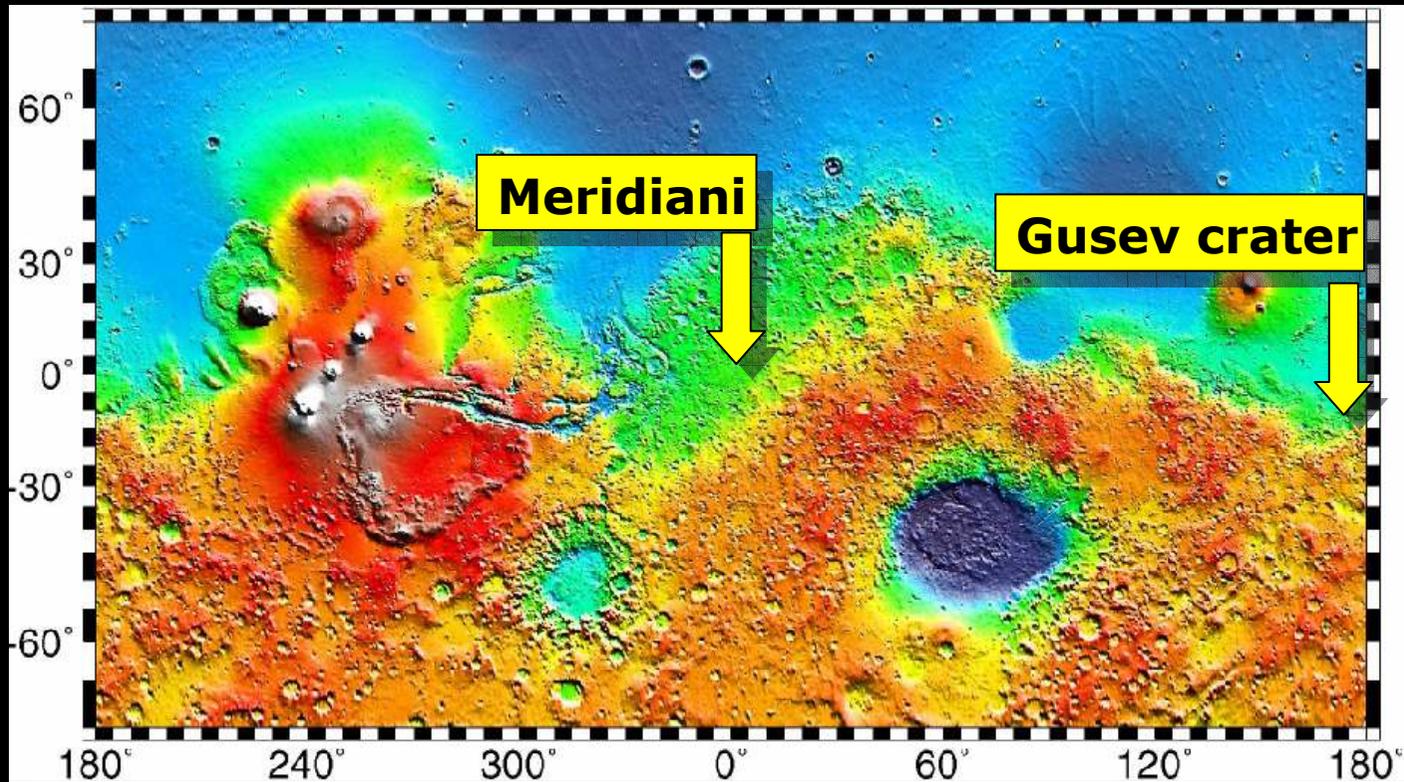
# THE “TWIN” MARS EXPLORATION ROVERS (MER)

## *MER-A: Spirit*

- 着陸地点: Gusev crater
- 運用期間: 2269 sol (~7年)
- 移動距離: 7.7 km

## *MER-B: Opportunity*

- 着陸地点: Meridiani 平原
- 運用期間: >7年 (運用中)
- 移動距離: 34 km



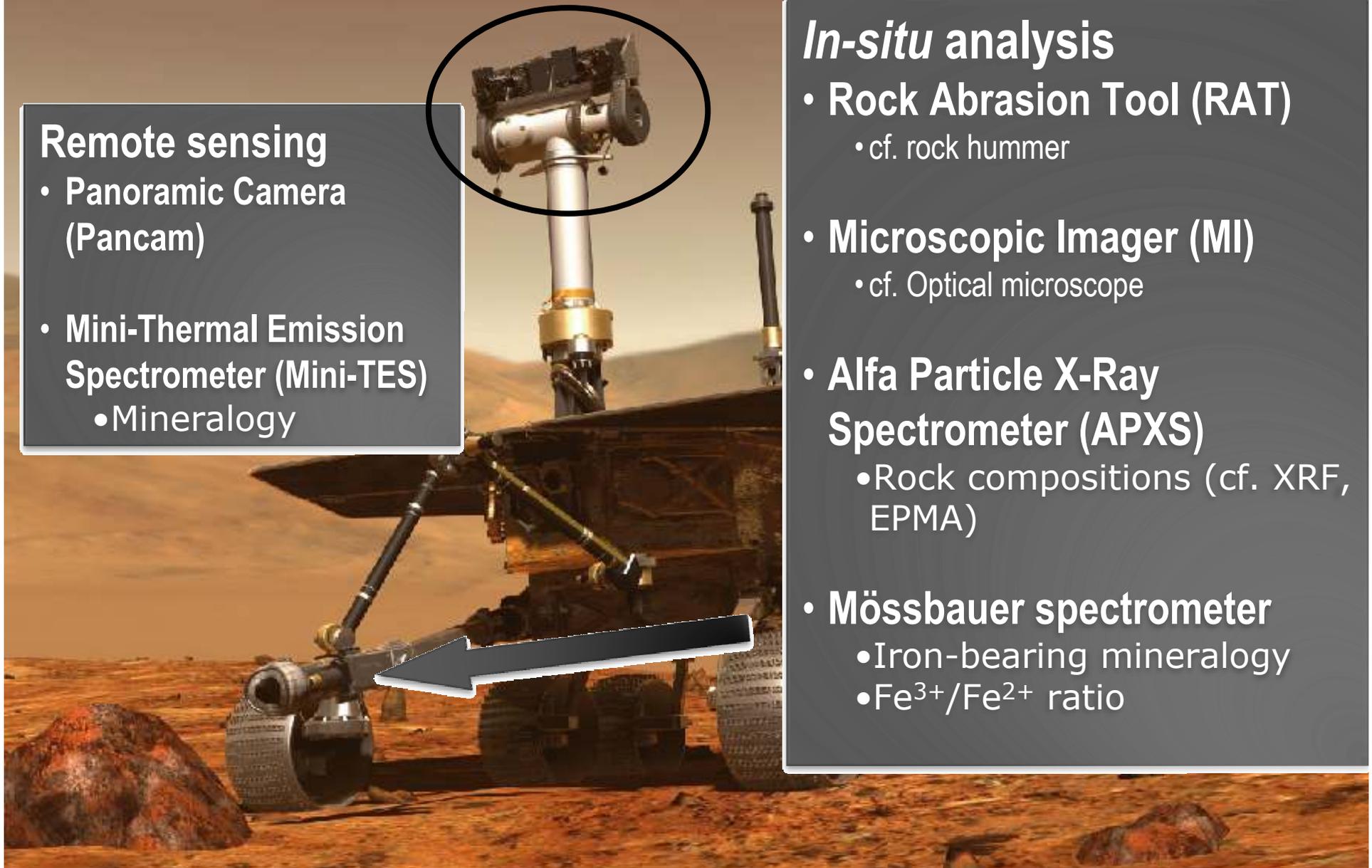
# THE 1<sup>ST</sup> GEOLOGIST ON MARS

## Remote sensing

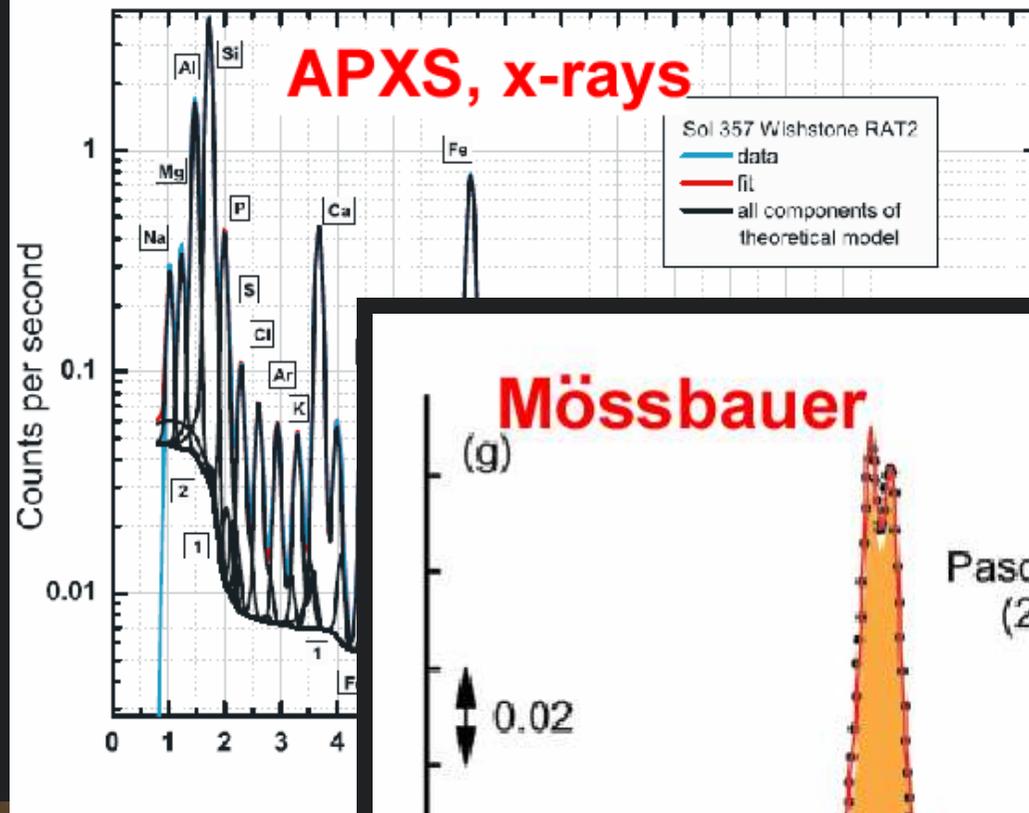
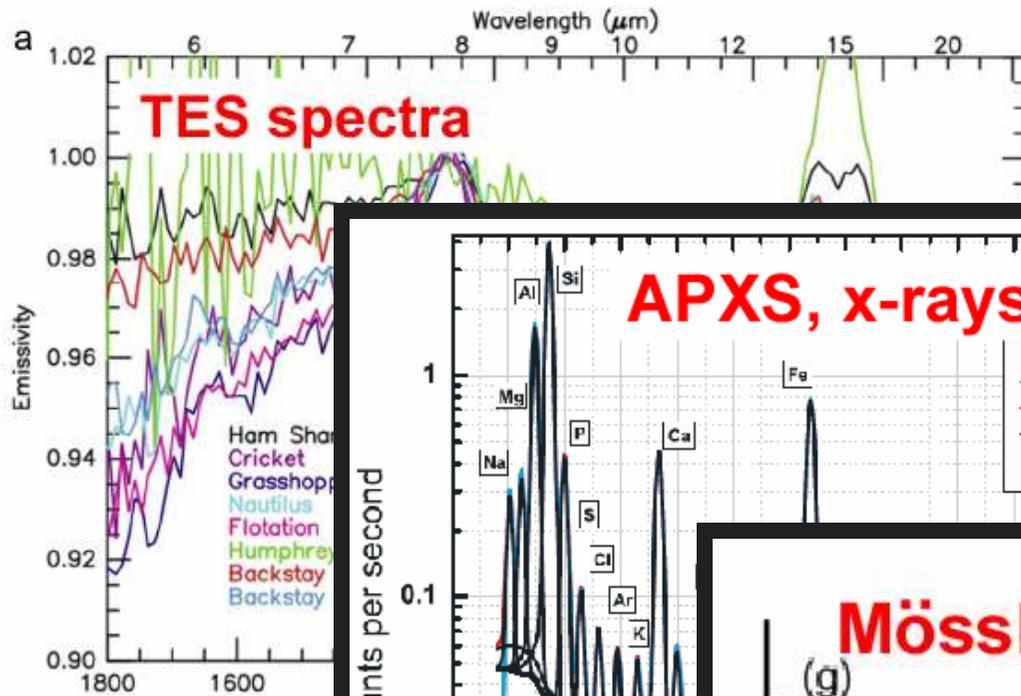
- Panoramic Camera (Pancam)
- Mini-Thermal Emission Spectrometer (Mini-TES)
  - Mineralogy

## *In-situ* analysis

- Rock Abrasion Tool (RAT)
  - cf. rock hammer
- Microscopic Imager (MI)
  - cf. Optical microscope
- Alfa Particle X-Ray Spectrometer (APXS)
  - Rock compositions (cf. XRF, EPMA)
- Mössbauer spectrometer
  - Iron-bearing mineralogy
  - $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  ratio



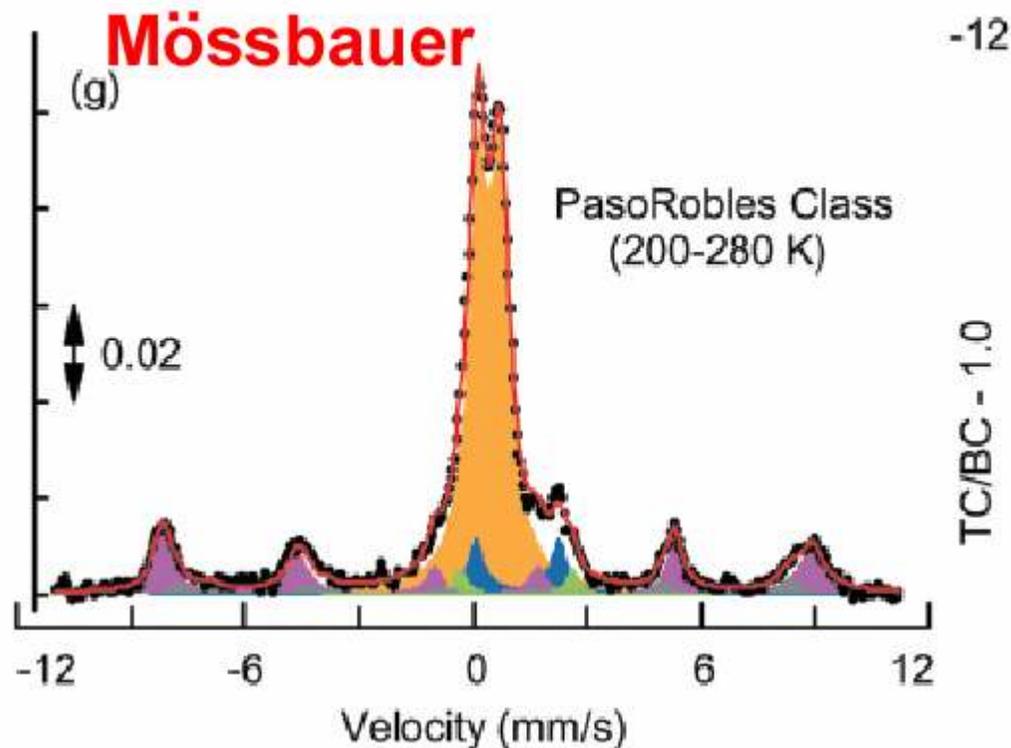
# 層探查



Pancam image

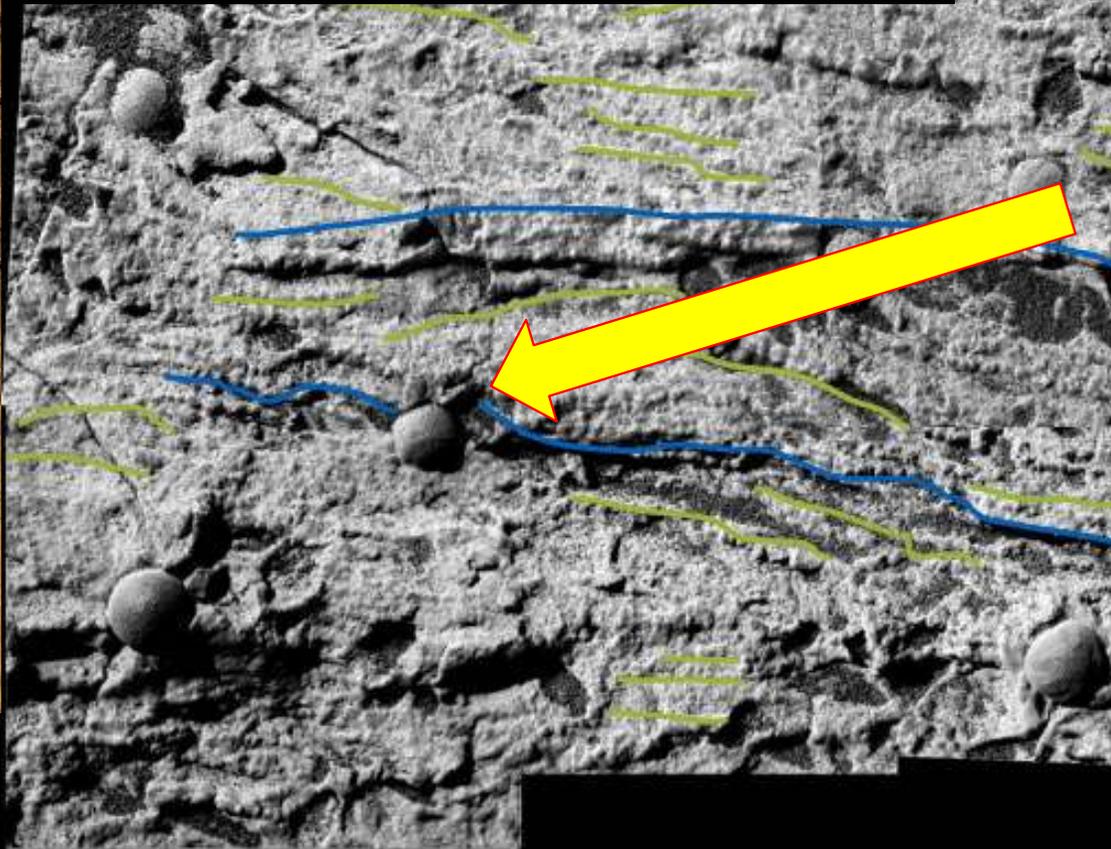
**Panoramic view of Gusev**

*e.g. Arvidson et al. [2006]; Squyes et al. [2006]*



# Meridianiで報告された液体水の証拠

トラフ型斜交層理: 水成堆積構造



Blue berry



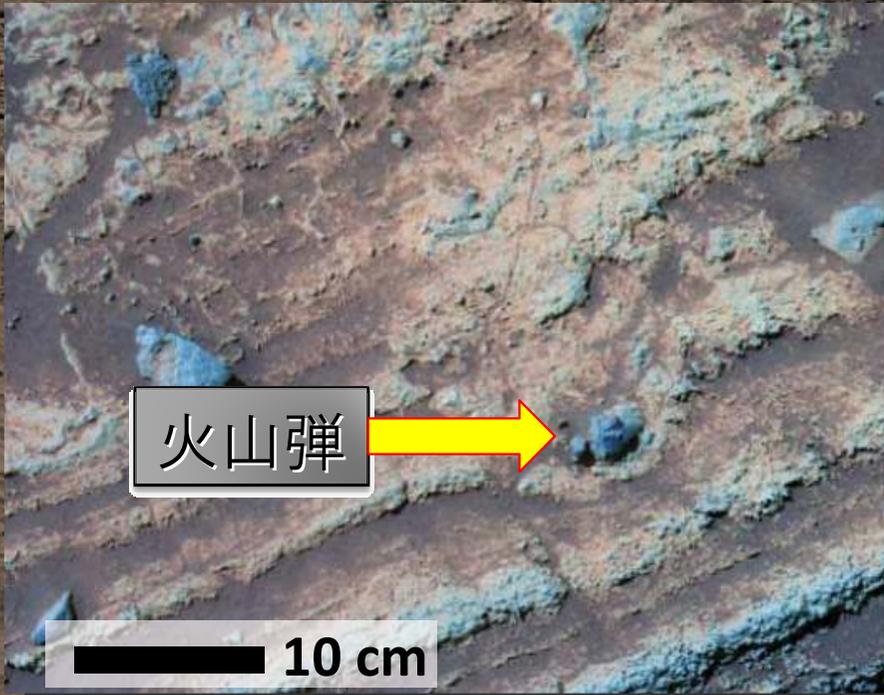
赤鉄鉱 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )  
酸性流体からの蒸発

cm

# Gusev Craterでの爆発的な火山活動の証拠

Columbia Hills

Home Plate



火山弾

10 cm

発泡した火山岩

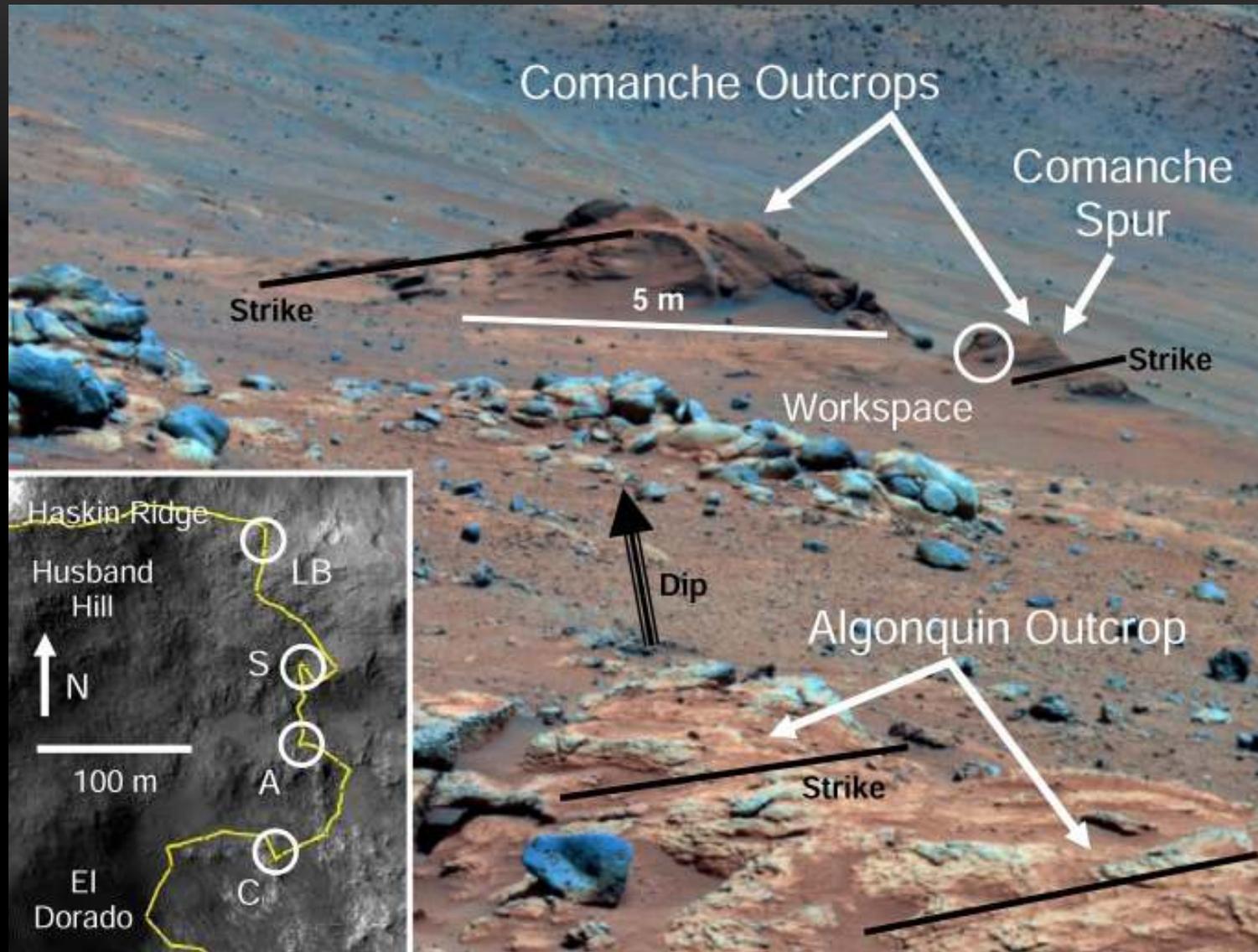


Esperanza

10 cm

Arvidson et al. [2008], Squires et al. [2006, 2007]

# Gusevで発見された炭酸塩岩露頭

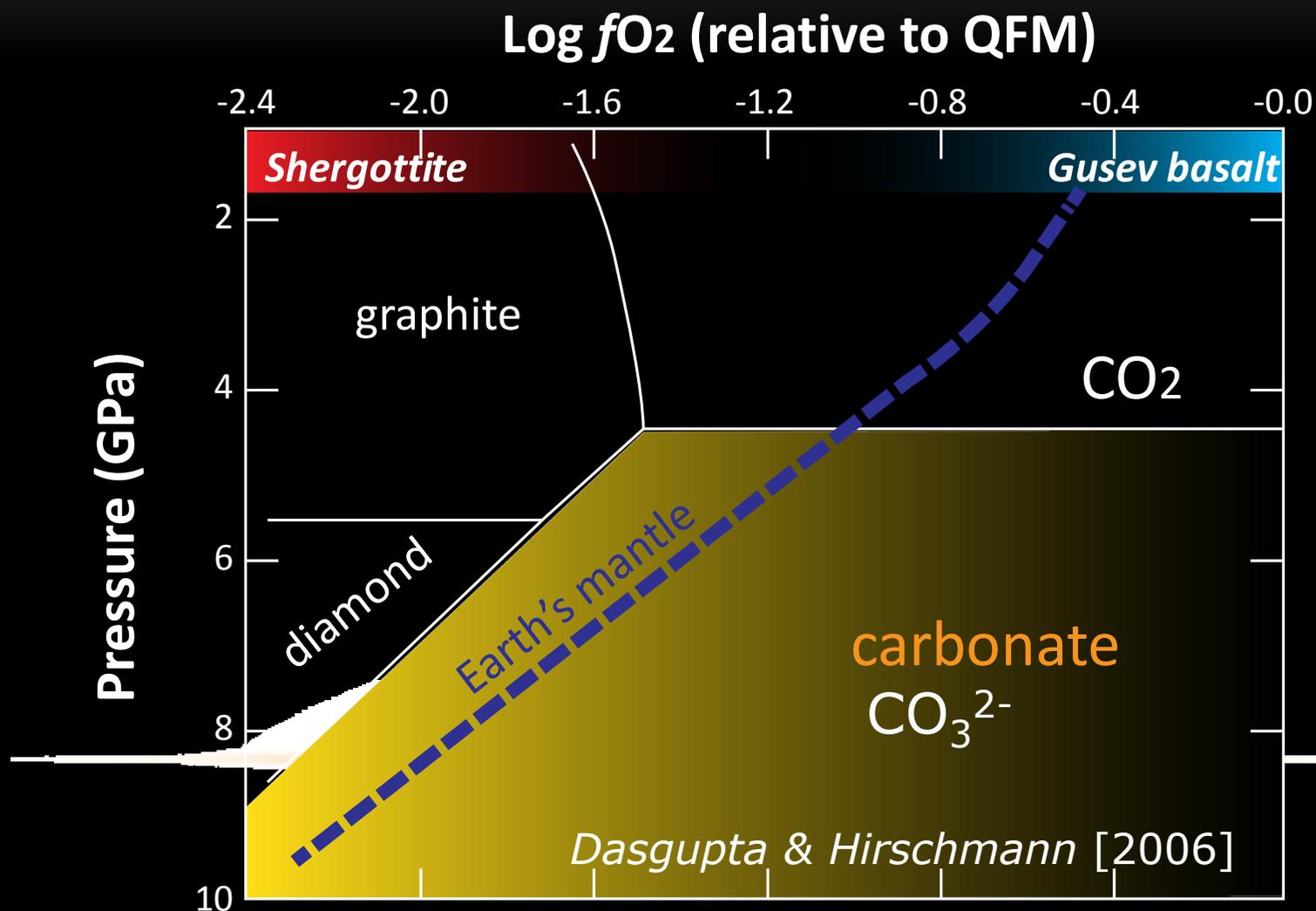


Morris et al. [2011]

# 炭酸塩のマントル条件下での安定領域

マントルの酸化還元状態 ⇒ 火山ガスの種類に影響

例： $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} \rightarrow \text{SO}_2$



# 岩石表面の変質・風化

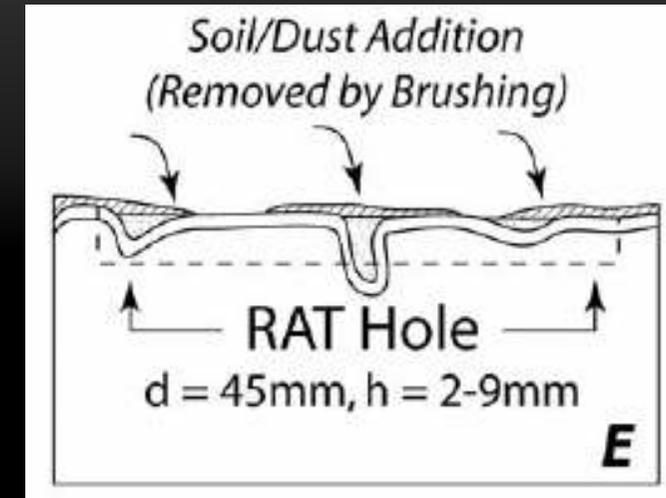
## Unbrushed:

[adhering soil/dust + alteration rind]

## Brushed & RAT-abraded:

[alteration rind + rock interior]  
with different mixing ratio

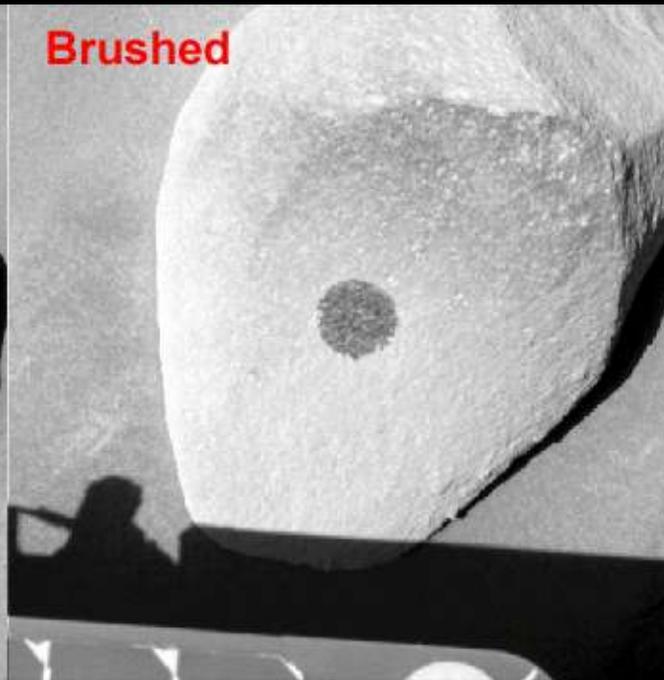
Hurowitz et al. [2006]



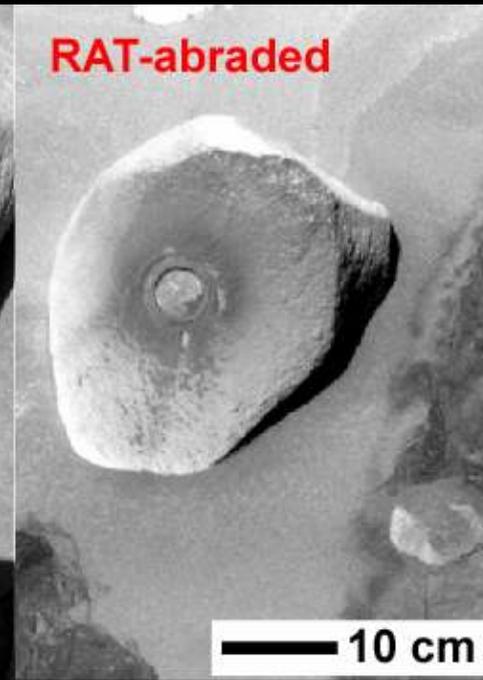
Unbrushed (as-is)



Brushed



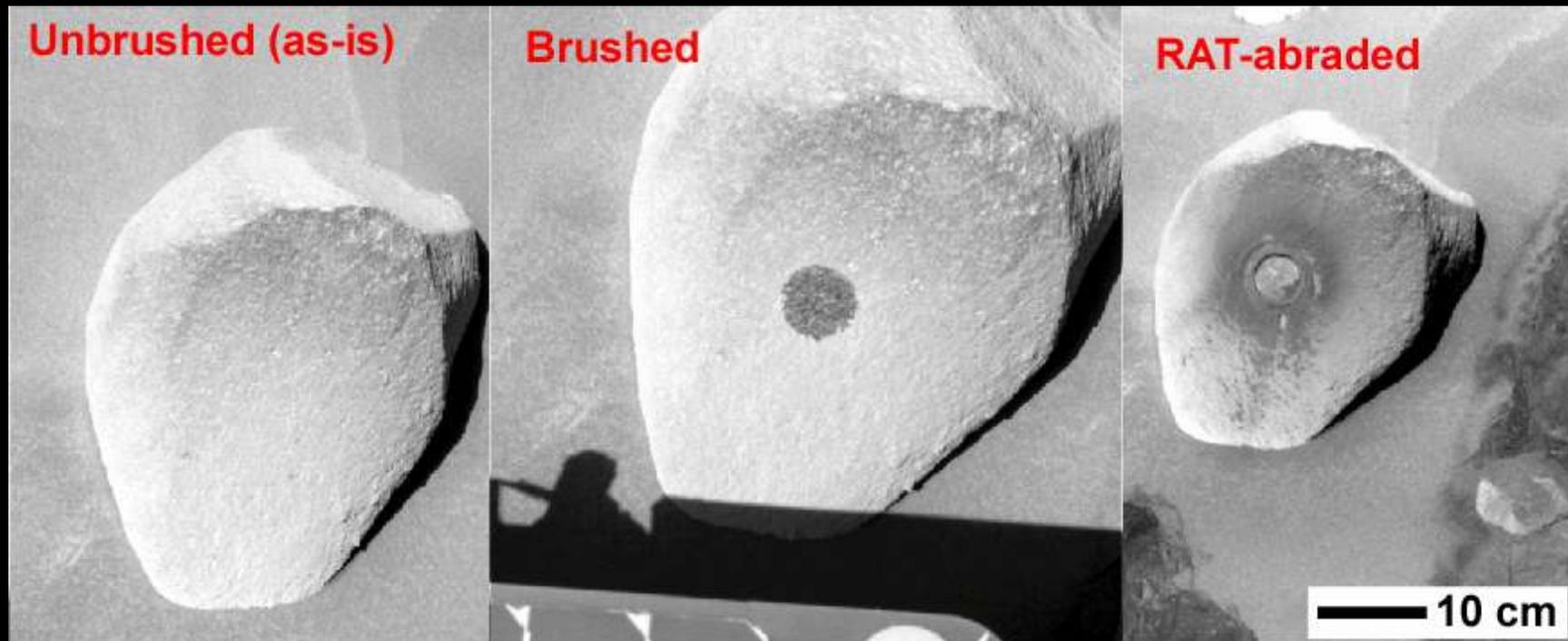
RAT-abraded



# 岩石表面の変質・風化

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
UB	46.4	1.97	13.5	13.3	0.25	6.15	6.67	4.20	0.53	1.79	4.40
Brushed	45.8	2.84	15.8	12.6	0.22	4.56	6.59	5.30	0.51	2.64	2.50
RATed	43.4	2.99	14.9	12.5	0.24	3.94	8.78	5.04	0.53	5.07	1.94

APXS data by Gellert *et al.* [2006]



# MELOSの着陸探査に向けて

大気圏・表層・固体圏を一つの惑星システムとして捉えた複合探査

要求4：大気組成観測

要求7：気象（ダストなど）観測

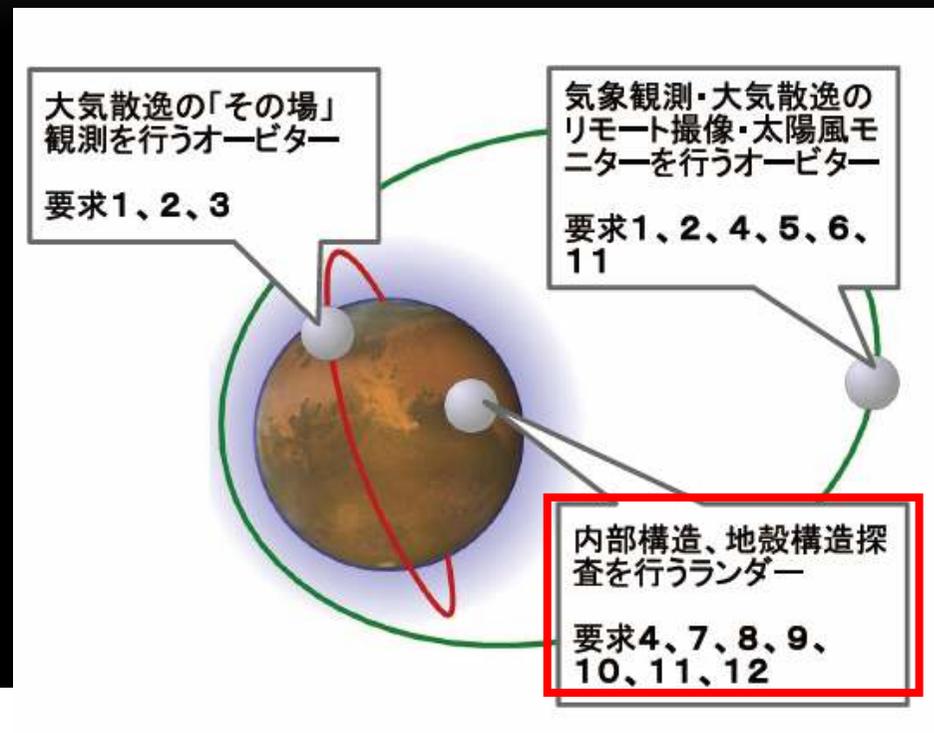
要求8：表層物質の元素組成・鉱物組成分析

要求9：クレーター年代

要求10：地下浅部の地質構造

要求11：コアサイズの推定

要求12：地殻構造（平均密度、平均厚）の推定



藤他, 遊星人 [2009]

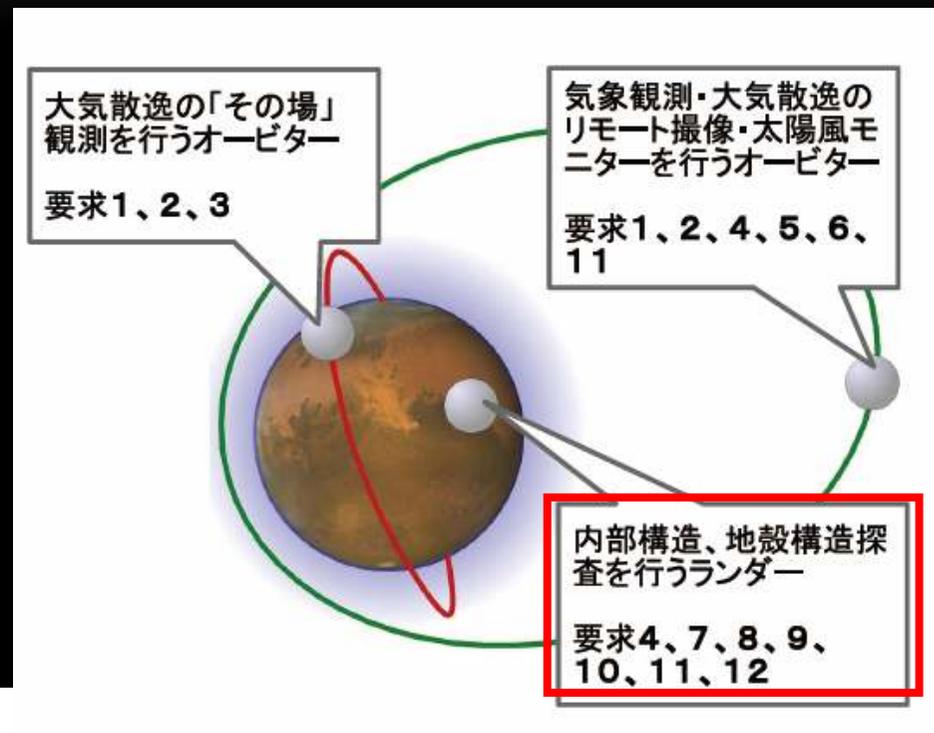
# MELOSの着陸探査に向けて

大気圏・表層・固体圏を一つの惑星システムとして捉えた複合探査

## ローバー探査の意義

- 大気・生命・固体圏のインターフェースとしての表層環境の総合的理解
- オービターとのシナジー

⇒月や他の（小）惑星探査より  
ローバー探査重要性は大きい



藤他, 遊星人 [2009]

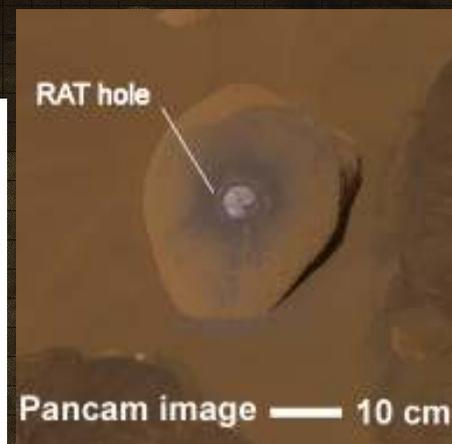
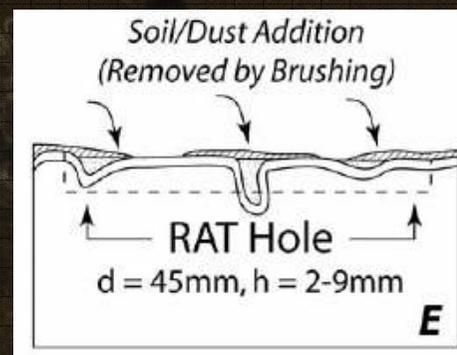
# Rover & Orbiterのシナジー

- 火星の特徴-1：地質学的に多様な惑星  
⇒ 高空間解像度での分析 & 地域性の把握  
例：Orbiter (HiRISE,  $\sim 30$  cm) vs. Rover (MI,  $< \mu$  m)
- 火星の特徴-2：表面を覆うダスト & 風化土壌  
⇒ リモートセンシングデータの評価  
例：Orbiter (TES, 表面の数  $\mu$  m) vs. Rover (RAT,  $\sim 0$ -10 mm)

フィールドテスト by JAXA & PERC (阿蘇, 2011年11月)

# Roverにおける表層探査

- 火星の特徴-1：地質学的に多様な惑星  
⇒どこをターゲットに探査するか（**着陸精度** & **機動力**）が理学的には非常に重要
- 火星の特徴-2：表面を覆うダスト & 風化土壌  
⇒ **研磨機**が必要不可欠



フィールドテスト by JAXA & PERC (阿蘇, 2011年11月)

# 結論（探査&隕石研究より）

- 火星隕石は化学組成・年代に関して、火星地殻を代表していない  
⇒火星隕石試料から得られた知見を火星の起源・進化の議論に応用する際には注意が必要である
- 火星の地殻・マントル・コアの分離は集積直後（~4.5 Ga）に行われた
- “現在”の火星大気は地球に比べ“重い”揮発性元素同位体組成をもち、火星大気の散逸を反映している可能性がある
  - ただし、“初生”同位体組成の同定が必要
- 地質学的に多様で且つ風化土壌で表面が覆われた火星では、機動力及び表面加工技術を備えたローバー探査の果たす役割が大きい

