

月や火星のあばたもえくぼ？

-クレータ年代学ことはじめ-

岡本 義雄

大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎

[yossi@cc.osaka-kyoiku.ac.jp](mailto:yossi@cc.osaka-kyoiku.ac.jp)

<http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~yossi/>

天文高校生集まれ！！ 於：大阪教育大学 10. July 2010

# 概要



動機:

クレータ年代学とは (**Crater Chronology**):

原理:

方法:

データ:

解析:

結果:

関連する話題:

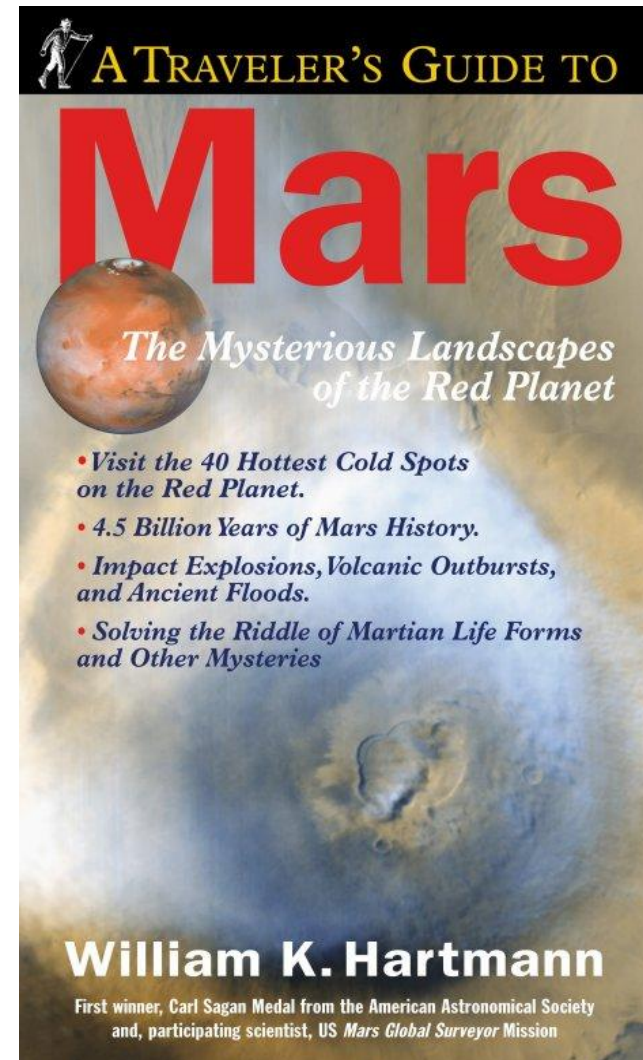
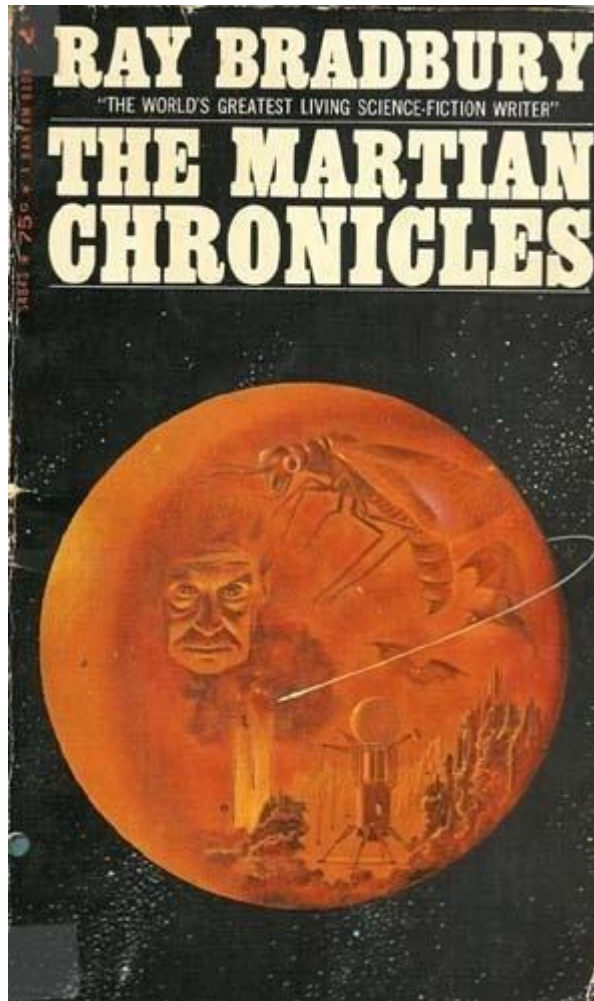
これから:



# 動機

“The Martian Chronicles”  
by Ray Bradbury, 1950.

“A Traveller's Guide To Mars”  
by William K. Hartmann, 2003



# 方法と関連する事項



## 1 “Crater Chronology” (Hartmann, 1998)

- \* 隕石(彗星)衝突レートを仮定
- \* 古い表面ほど多くの隕石痕

## 2 “フラクタル分布” の好例

- \* “Fractals” in Nature (Mandelbrot, 1976)

## 3 最近の話題

- \* Giant Impact Theory (Hartmann & Davis, 1975)
  - \* Late Heavy Bombardment (Cohen, et.al. 2000)
- 

# 原理




## 1 月表面のクレータカウント(Hartmann, 1998)

- \* 月の海の岩石の推定年代
- \* のちのアポロ計画で立証！

## 2 月で確立した手法の他の天体への応用

- \* とりわけ火星

## 3 火星特有の問題

- \* 薄い大気と水の存在, 砂嵐など
  - \* クレータ年代学を用いて, 火星の表面発達史を構成: 海? 河川, 断層, 溶岩流など
- 

# 実習1: 月の写真のクレータカウント

- “Google Moon”の写真
- “正”の字でサイズごとの個数を集計

透明尺を使用



正

# 高校2年生によるカウント実習



# 両対数グラフ(log-log)上での結果



▲: 月の高地

○: 月の海

→ 見事な直線関係

べき分布

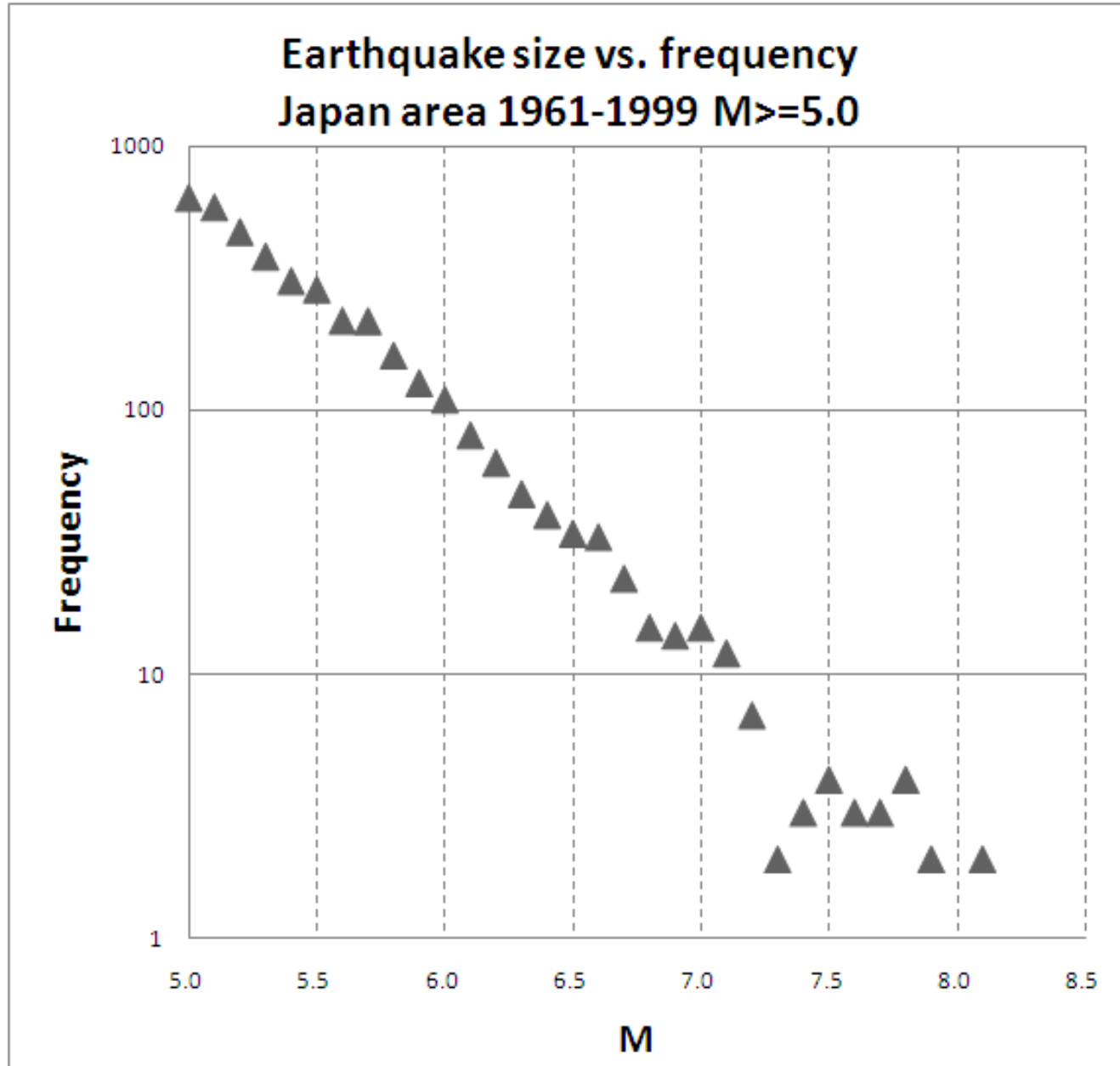
“Power law distribution”

→ フラクタル分布ともいう





# 自然界におけるフラクタル分布



地震での例  
“Gutenberg-Richter's Law”

$M(\text{magnitude})$   
 $= \log(\text{Energy})$   
 $= \log(\text{size})$

$\log(n) = a + b \cdot M$   
ここで  $b \sim -1$

地震の予測不可能性

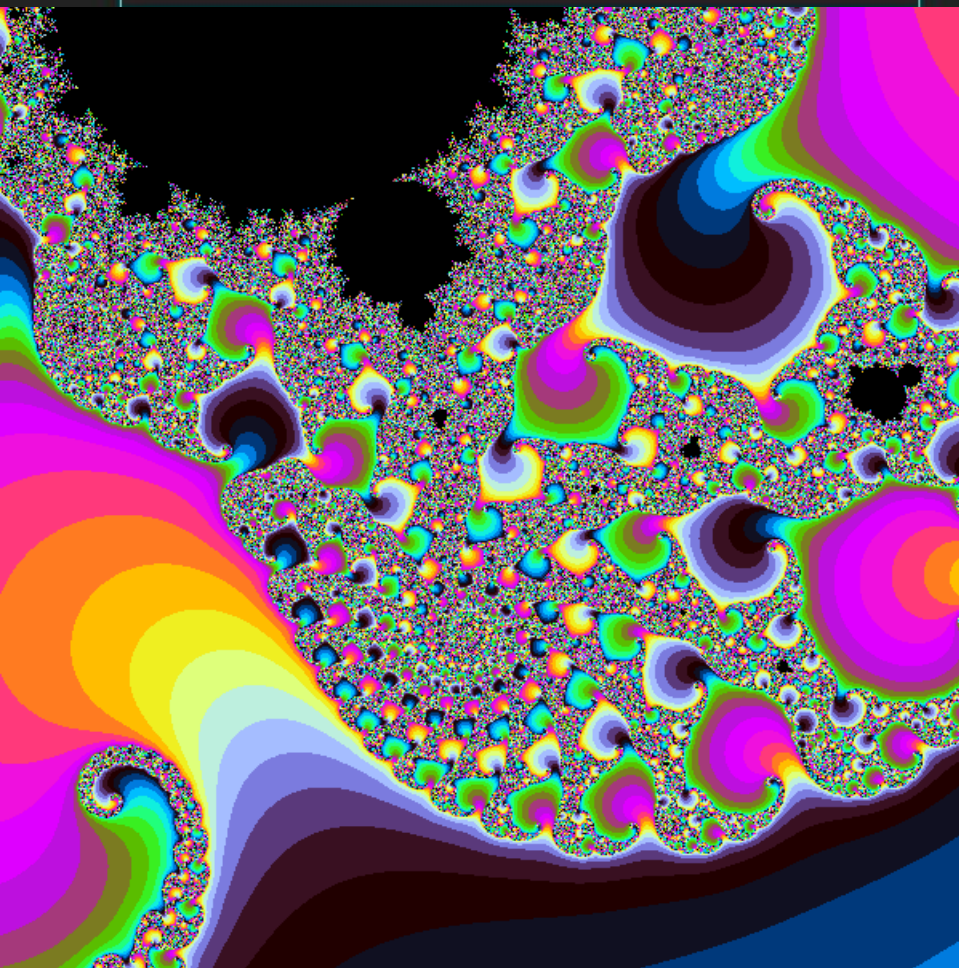
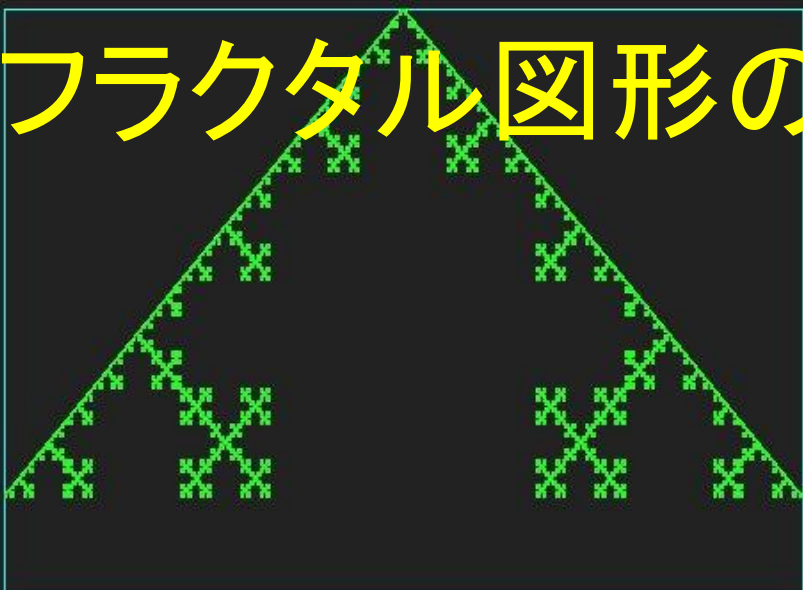
他にも様々な例



# “Fractal” by Benoit Mandelbrot

- 「フラクタル」の発見
  - 海岸線の形, カリフラワー, 羊歯, 北斎の波など
- 自己相似 ⇒ 特徴的な大きさが無い! (スケール不変)
- 地震, クレーターなどのサイズと個数の関係
- 株価, 為替変動? (時間軸:  $1/f$ ゆらぎ)
- Zipfの法則 (ランク vs. 順位)
  - 企業のサイズ, 都市の人口,
  - 隠されたメカニズムがあるのか?
  - ⇒ マクロでもミクロでもない普通サイズの「物理学」

# フラクタル図形の例 (Google 画像検索)



Grau, teurer Freund, ist alle Theorie,  
Und grün des Lebens goldner Baum.  
Grey, dear friend, is every theory,  
and green is life's golden tree.  
Mephistopheles, in Goethe's Faust.



# 2002年秋 マンデルブロの講演(京都)

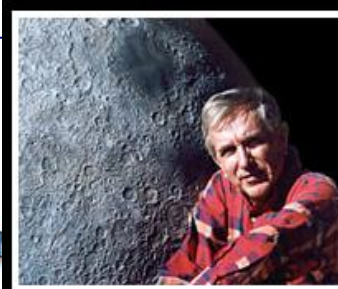


2010年秋 惜しくも死去！享年85才





# クレータ年代学



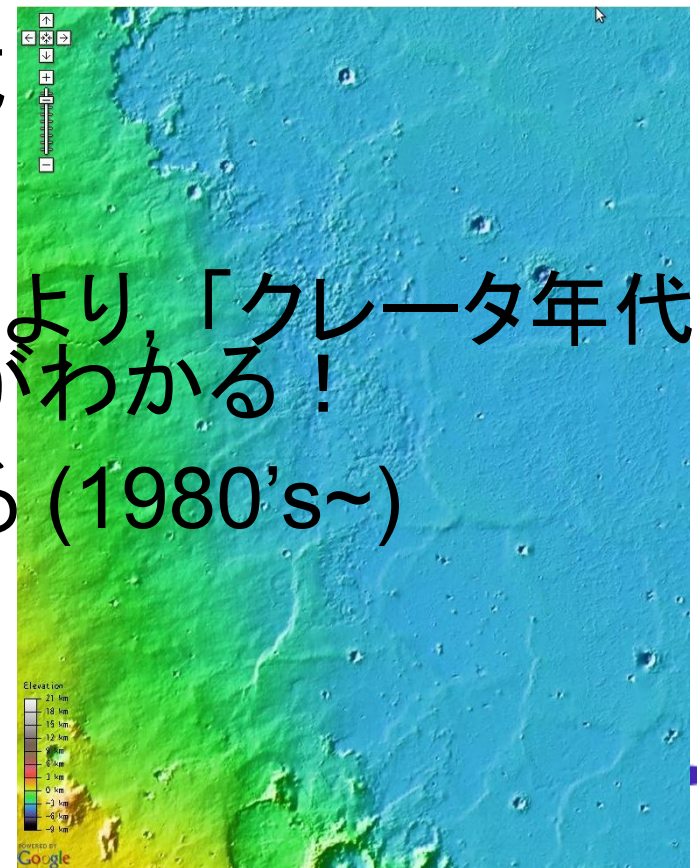
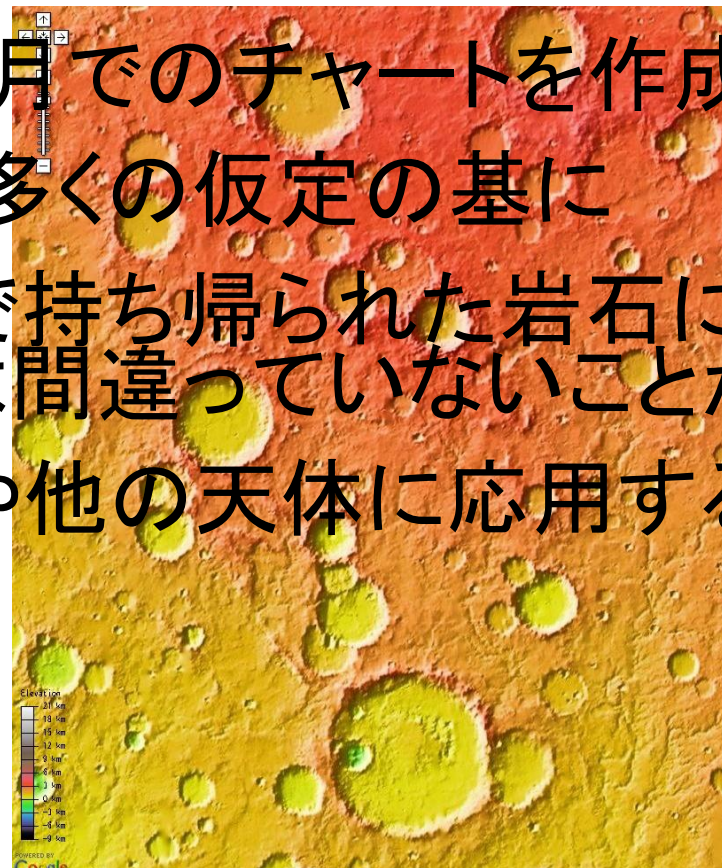
Bill Hartmann's  
Home Page



- William K. Hartmannが1960年代に開発
- 原理はめっちゃ簡単！
  - >多くのクレータがあるのは表面が古い証拠

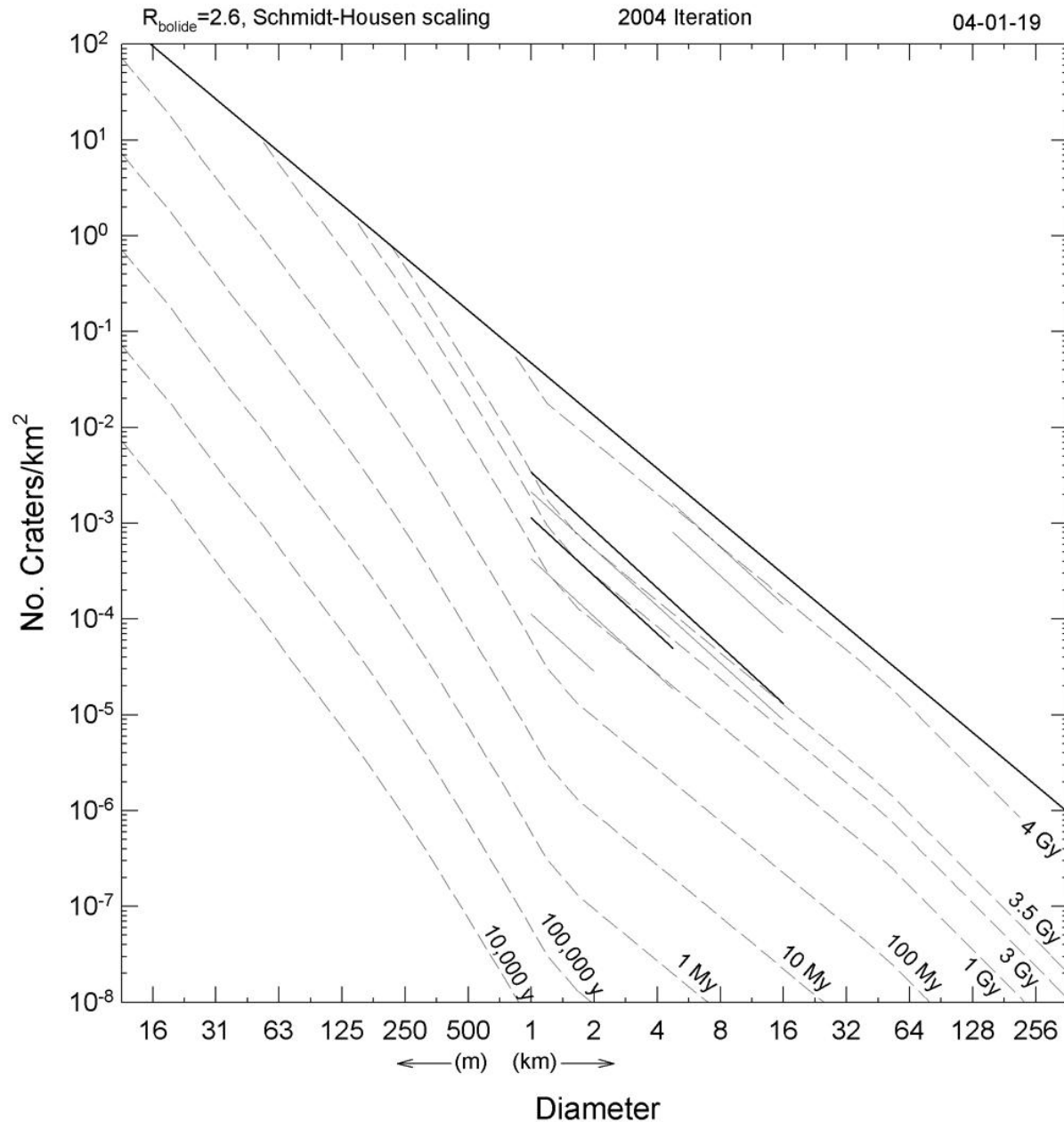
- 1960年代に月でのチャートを作成  
⇒もちろん多くの仮定の基に

- アポロ計画で持ち帰られた岩石により、「クレータ年代学」の大筋は間違っていないことがわかる！
- これを火星や他の天体に応用する (1980's~)



# 火星のためのHartmannダイヤグラム

From <http://www.psi.edu/research/isochrons/chron04a.html>



クレータサイズの度数分布から形成年代を推定する。  
書かれている線はアイソクロン(等年代線)

太い実線はクレータ密度が飽和を意味する。

完全なべき(フラクタル)ではない⇒2次クレータ, 元の隕石サイズ

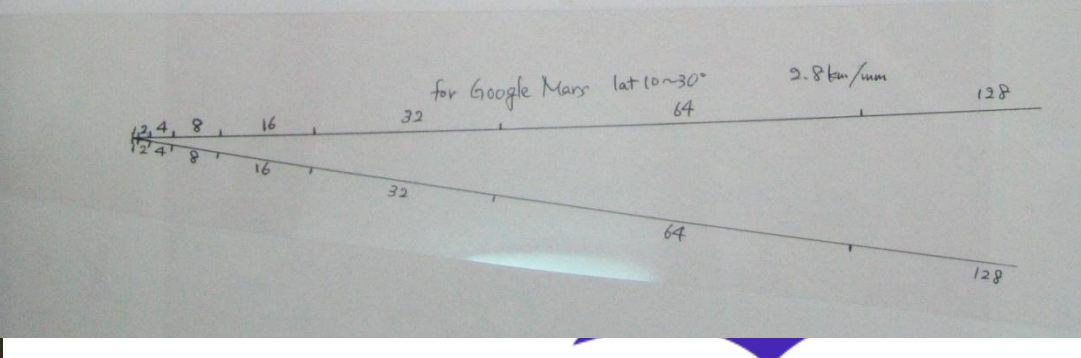
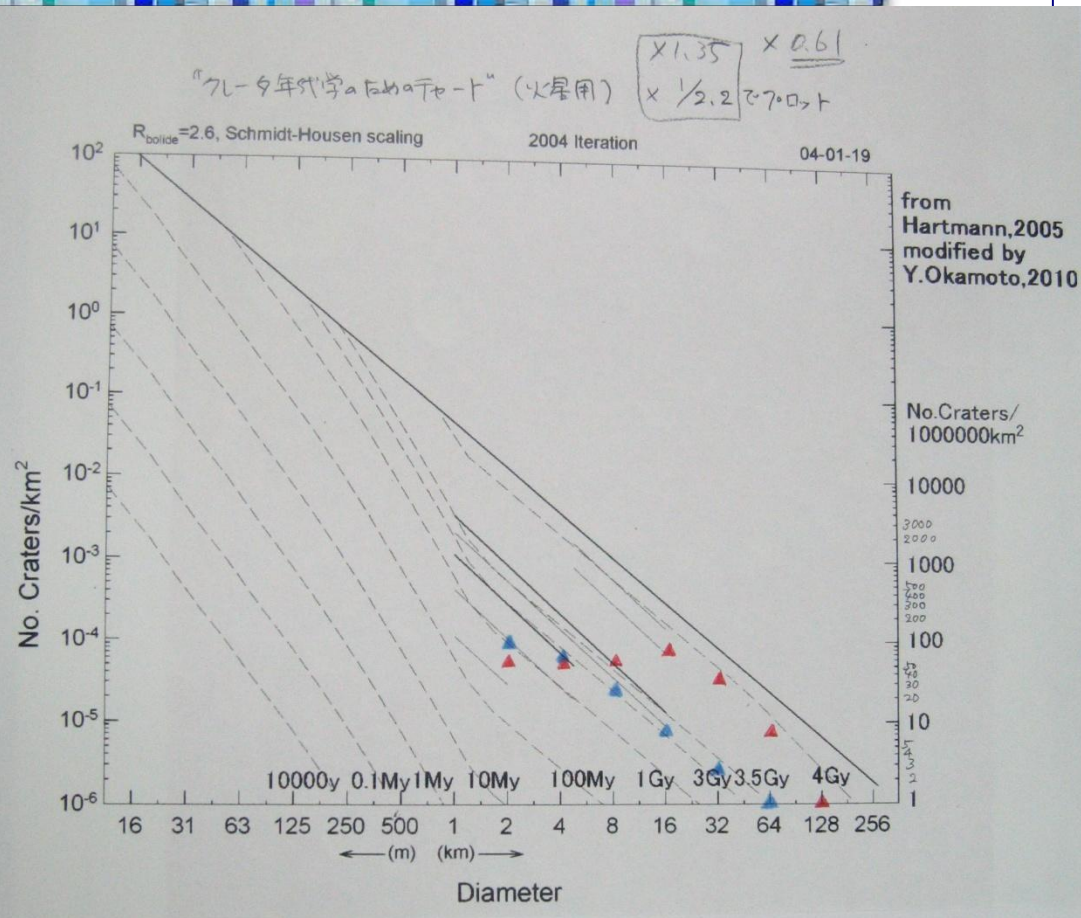
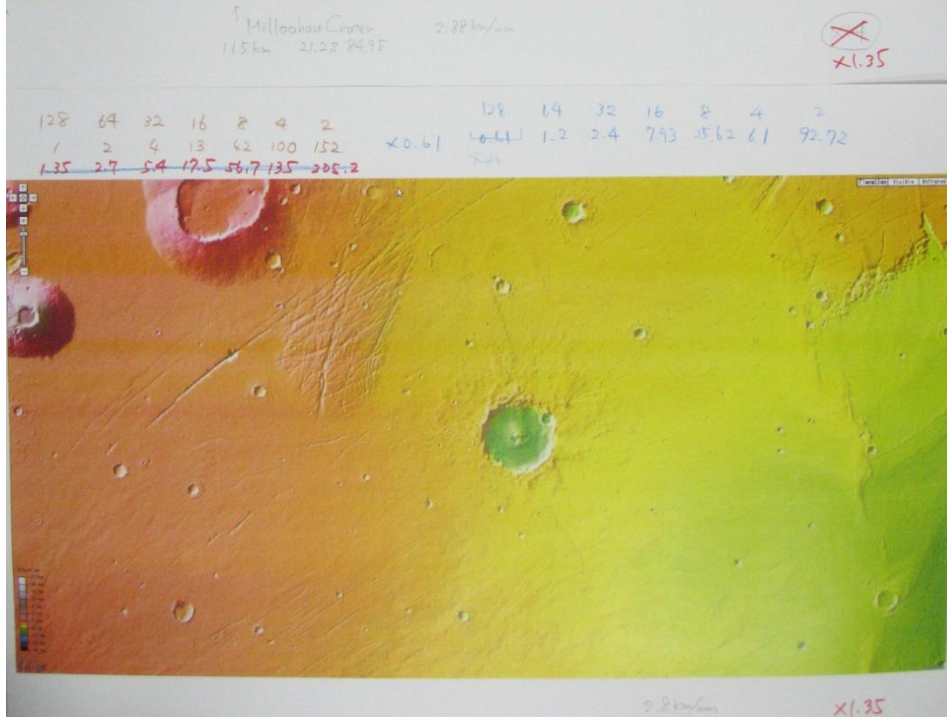
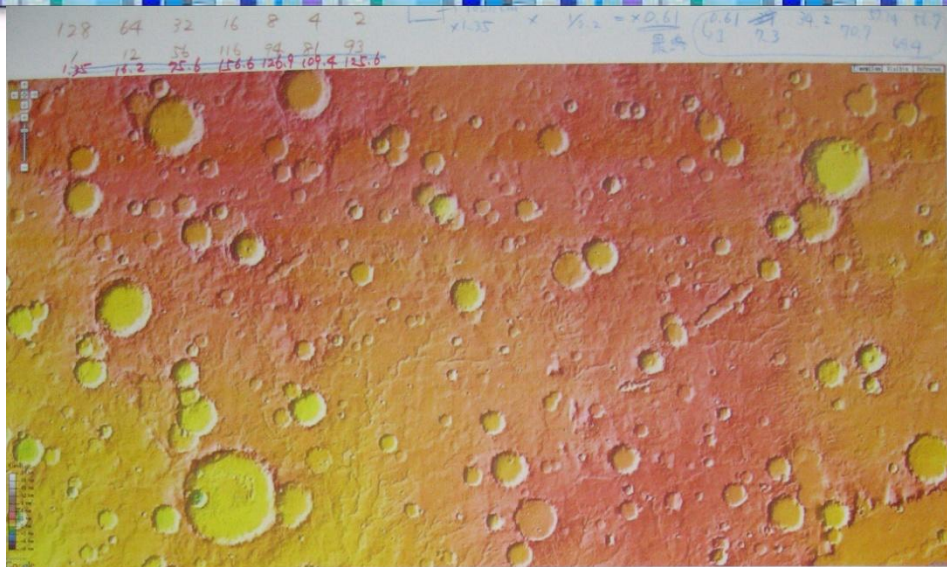
(Hartmann, 2005)



# 火星のクレータカウティング(その1)



# 最初に行った実習 “Google Mars” の画像



# もっと詳しい画像はないか？

## Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)

打ち上げ August 12, 2005  
火星周回軌道入り March 10, 2006.

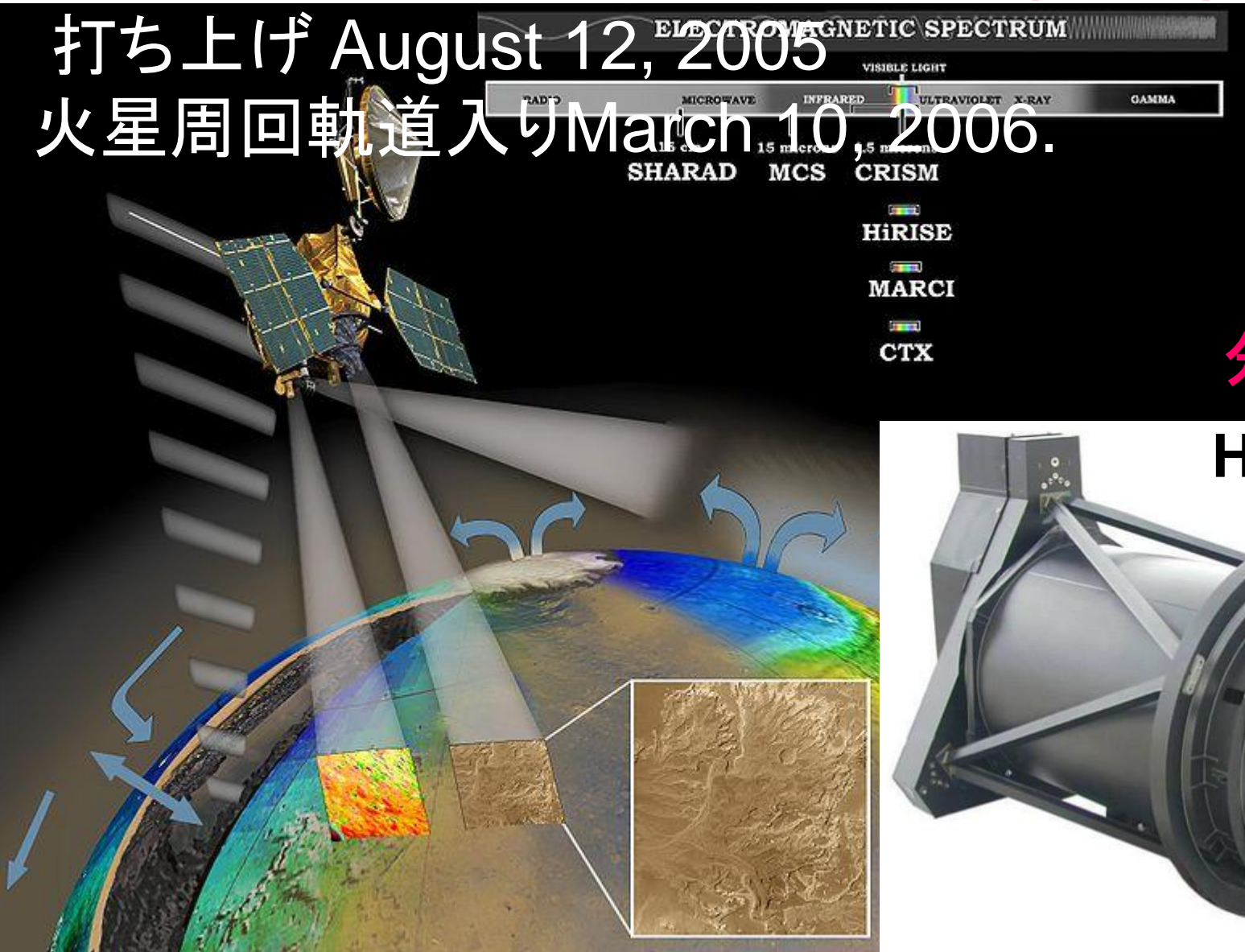
ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

RADIO MICROWAVE INFRARED VISIBLE LIGHT ULTRAVIOLET X-RAY GAMMA

SHARAD MCS CRISM  
HiRISE  
MARCI  
CTX

分解能: 50cm !

Hirise camera





# HIGH RESOLUTION IMAGING SCIENCE EXPERIMENT

Department of Planetary Sciences • Lunar and Planetary Laboratory



Home New Images Catalog Anaglyphs Stereo Pairs Science in Motion FAQ HiBlog Themes Software Contact Search

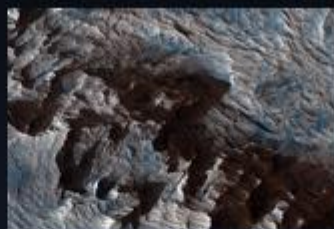
## New Captioned & Spotlight Images: 15 December 2010



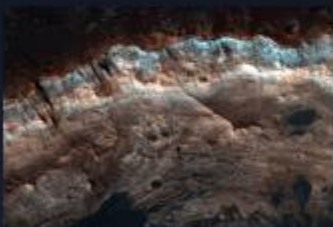
[A Fresh, Lunar-Like Crater on Mars \(ESP\\_020077\\_1915\)](#)



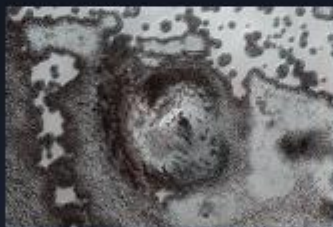
[Nili Fossae Trough, Candidate MSL Landing Site \(PSP\\_003086\\_2015\)](#)



[Layered Bedrock in Candor Chasma \(PSP\\_003830\\_1740\)](#)



[Layers Exposed in Crater Near Mawrth Vallis \(PSP\\_004052\\_2045\)](#)



[Circular Feature in South Polar Residual Cap \(PSP\\_005349\\_0930\)](#)



[Thumbprint Texture on Dark Dunes in Rabe Crater \(PSP\\_005514\\_1360\)](#)

UPDATED: 15 DEC 2010

WALLPAPER (ZIP)

[800x600](#)

[1024x768](#)

[1152x864](#)

[1280x960](#)

[1440x1080](#)

[1600x1200](#)

[1920x1440](#)

[2048x1536](#)

[2560x1920](#)

.....  
HICLIP: "Volver"

[iPhone \(480x272; 14MB\)](#)

[Apple TV \(960x540; 55MB\)](#)

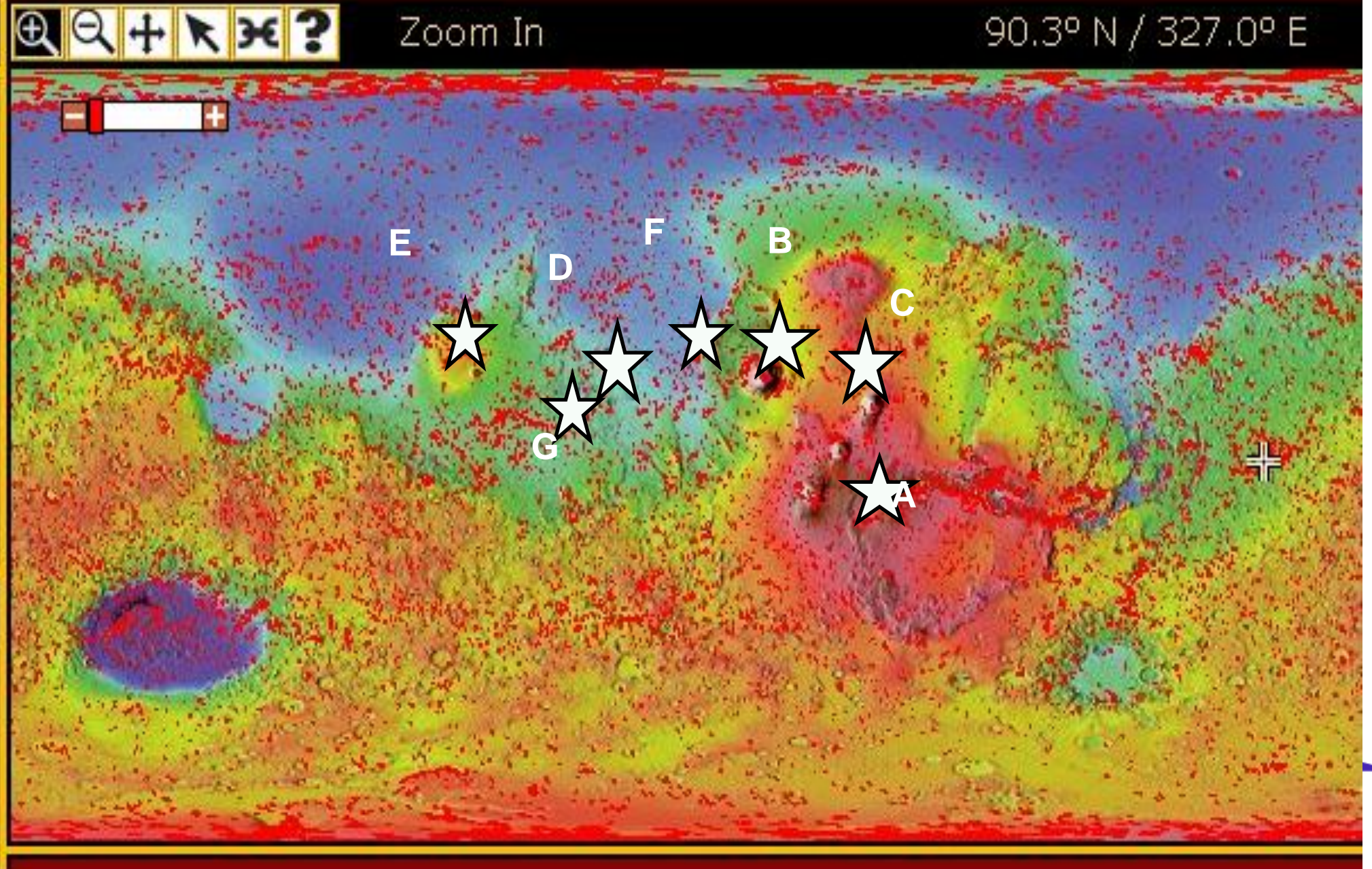
[QuickTime \(640x360; 139MB\)](#)

[QuickTime HD \(1280x720;](#)

[156MB\)](#)



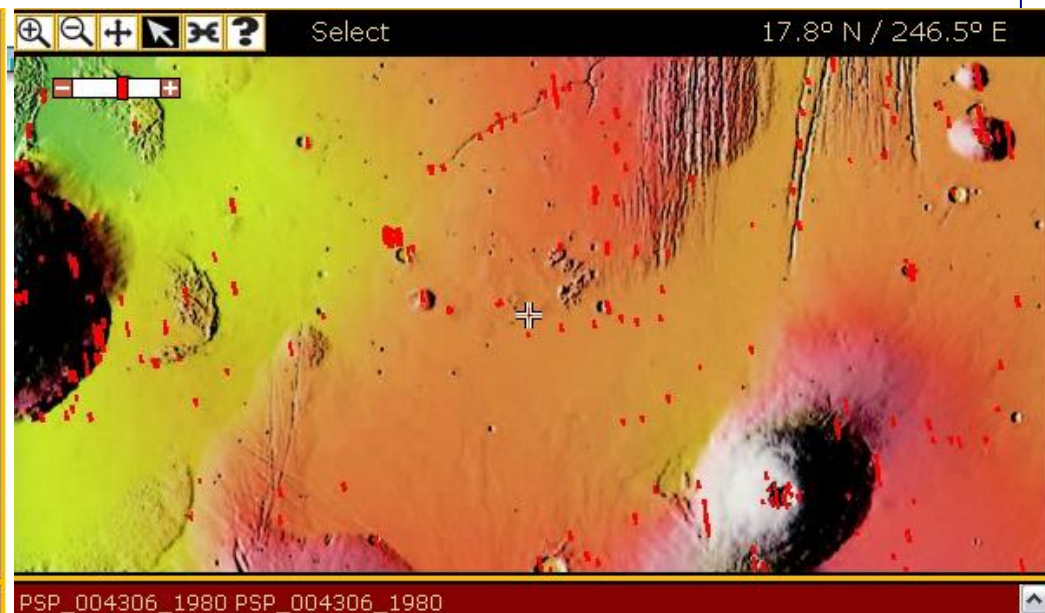
# 表面画像を探す：若い&砂の影響 ×



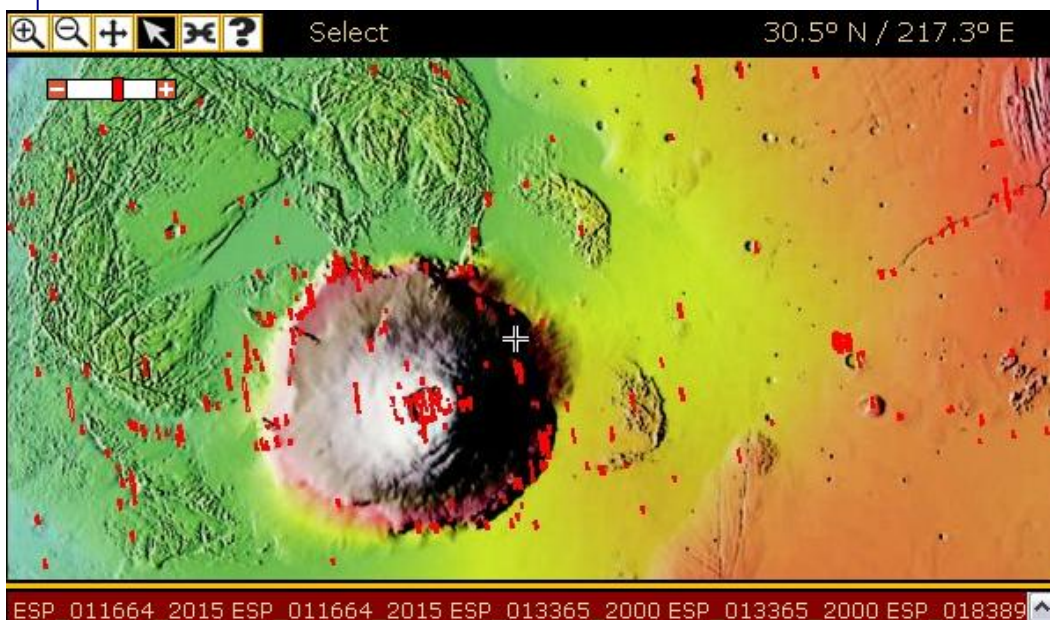
# A: 盾状火山



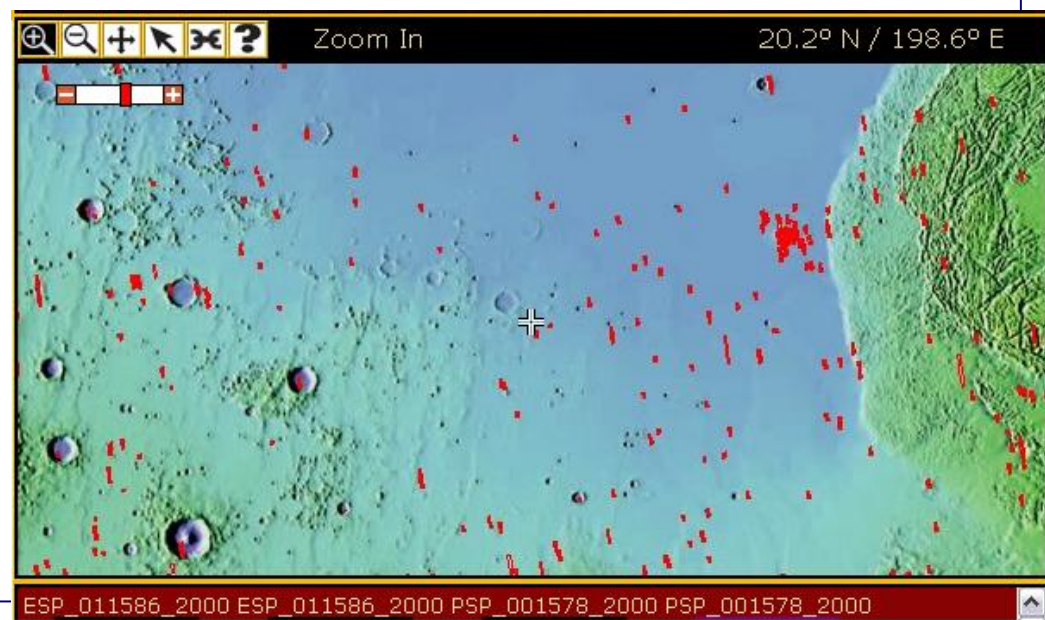
# C: タルシスの小火山



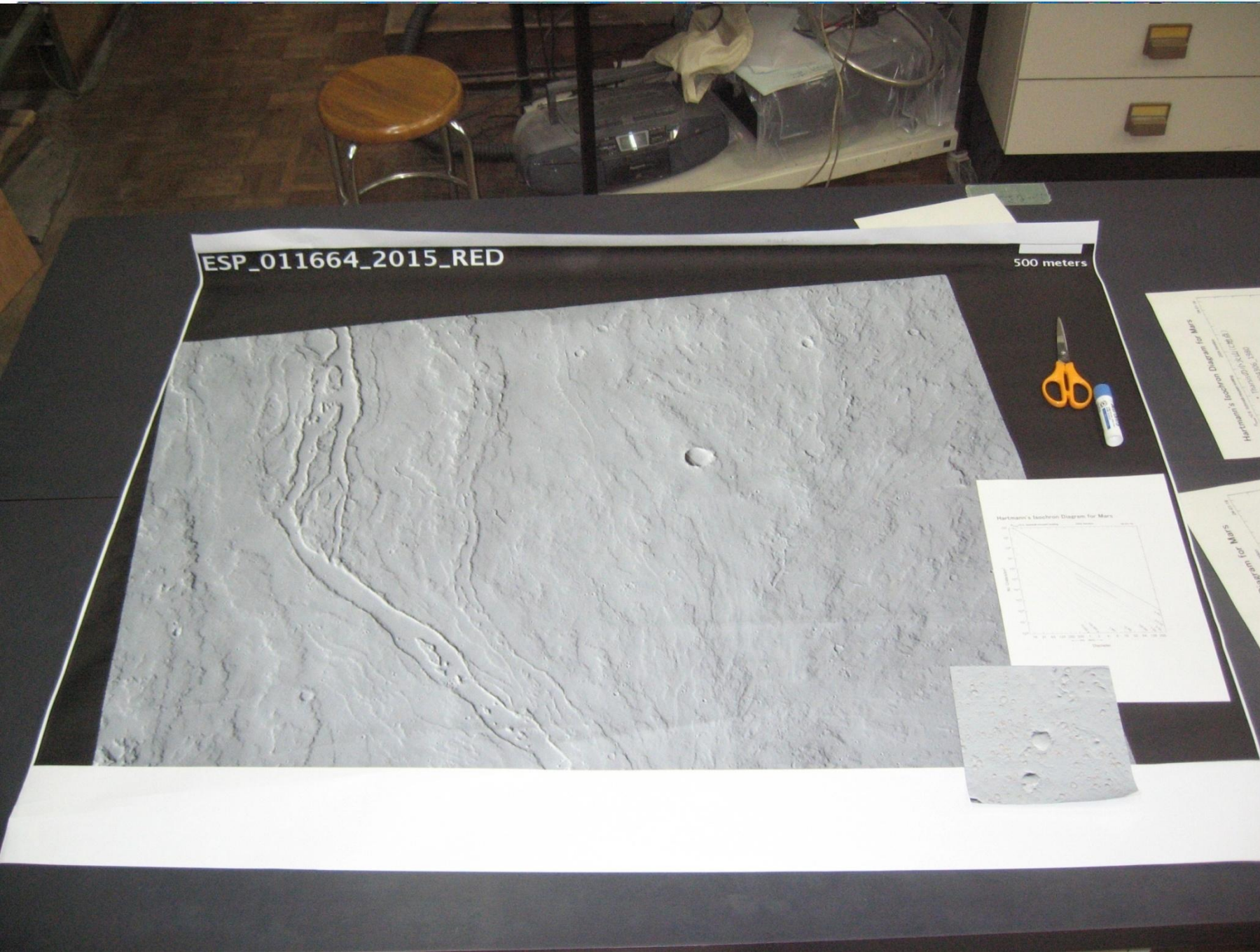
# B: オリンパス山の溶岩流



# D: アマゾニス平原の断層

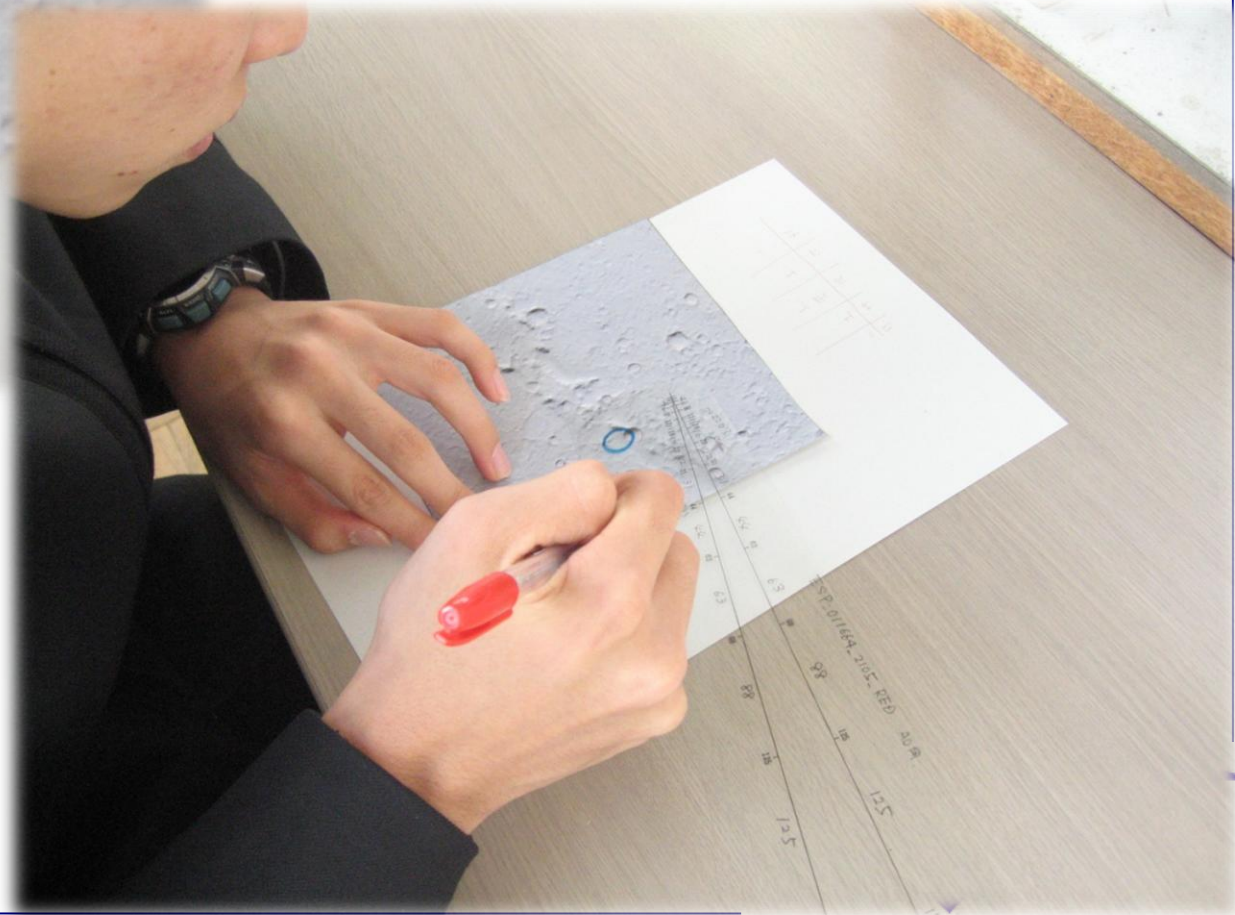
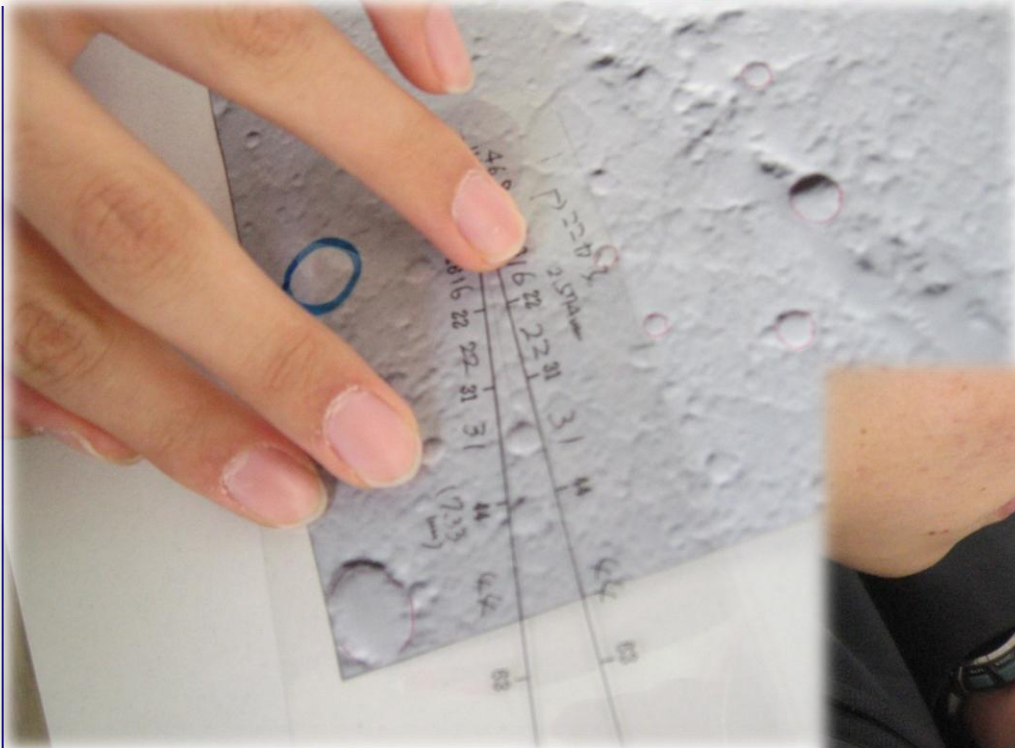


# 読み取りに用いたA0判の印刷シート



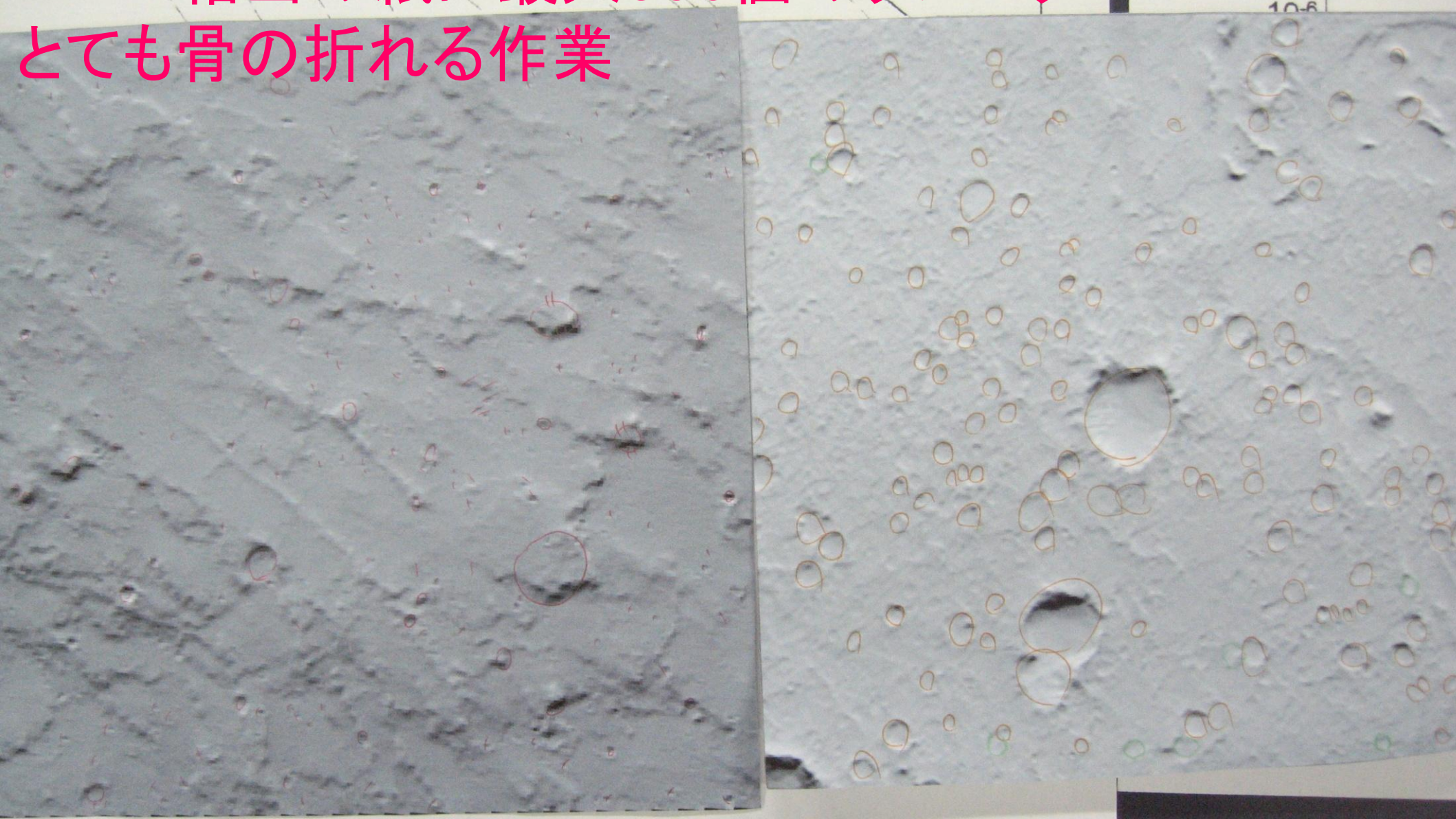
# 地学部による読み取り作業

サイズを測定して、  
度数分布を作る

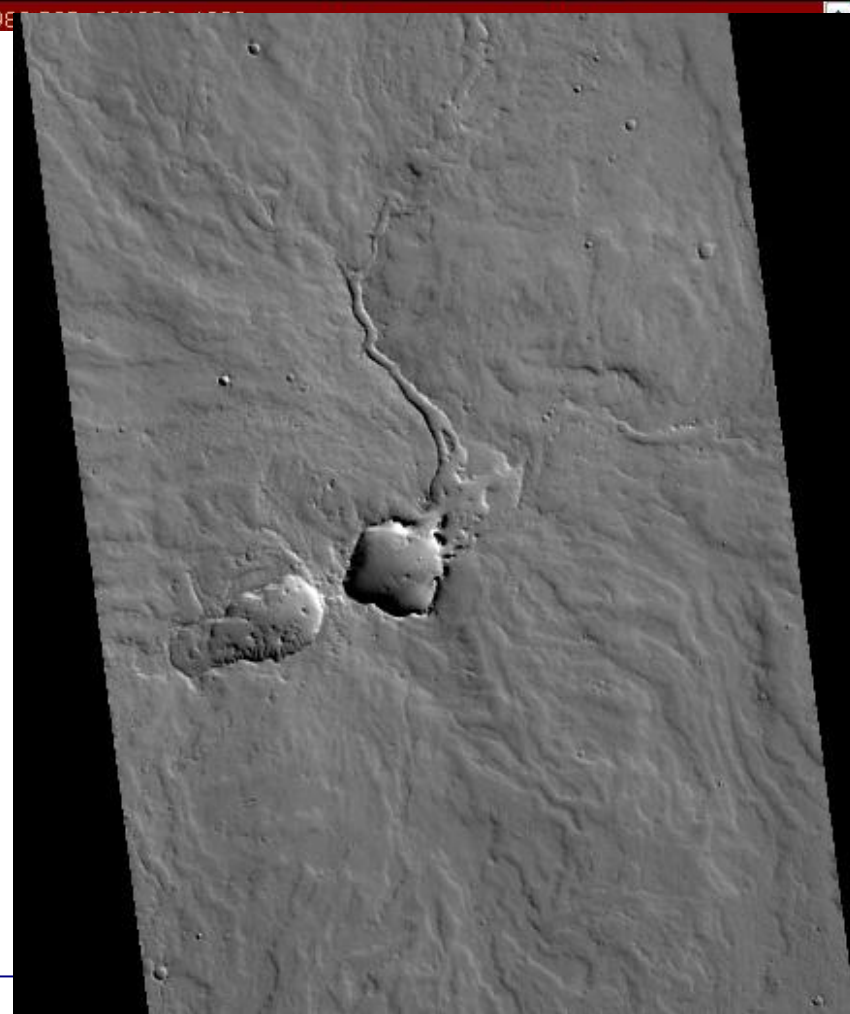
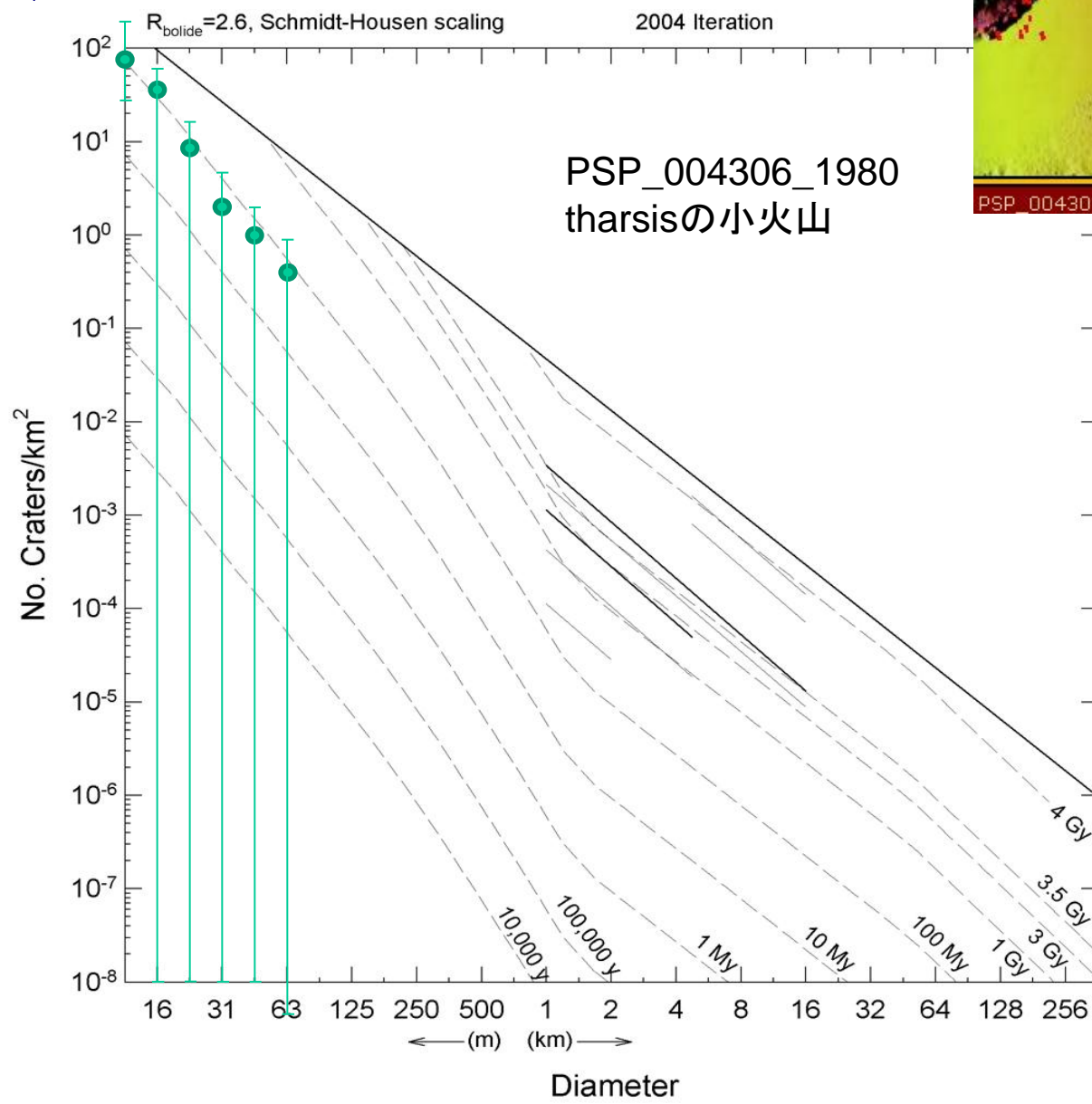
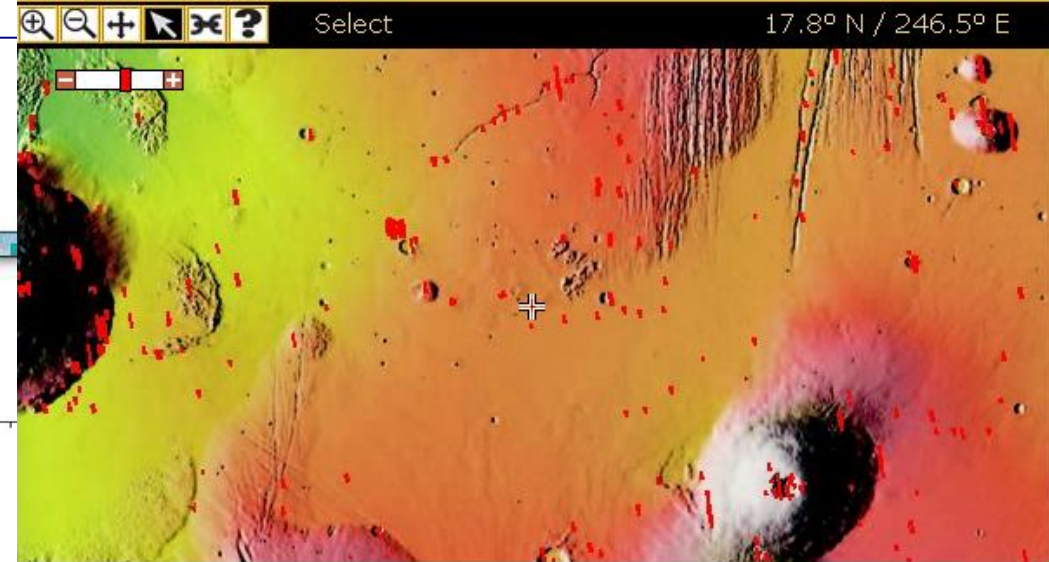




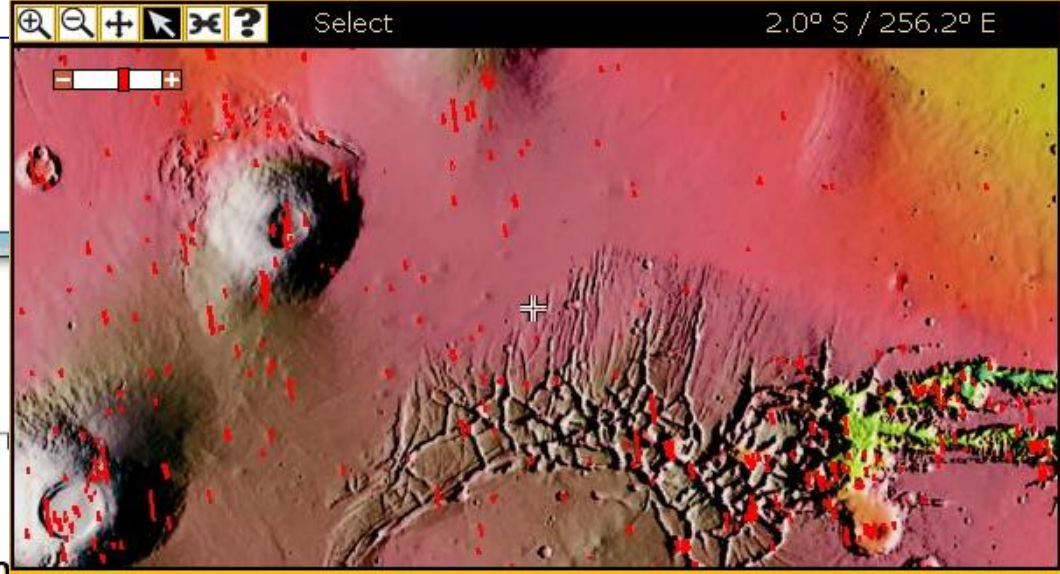
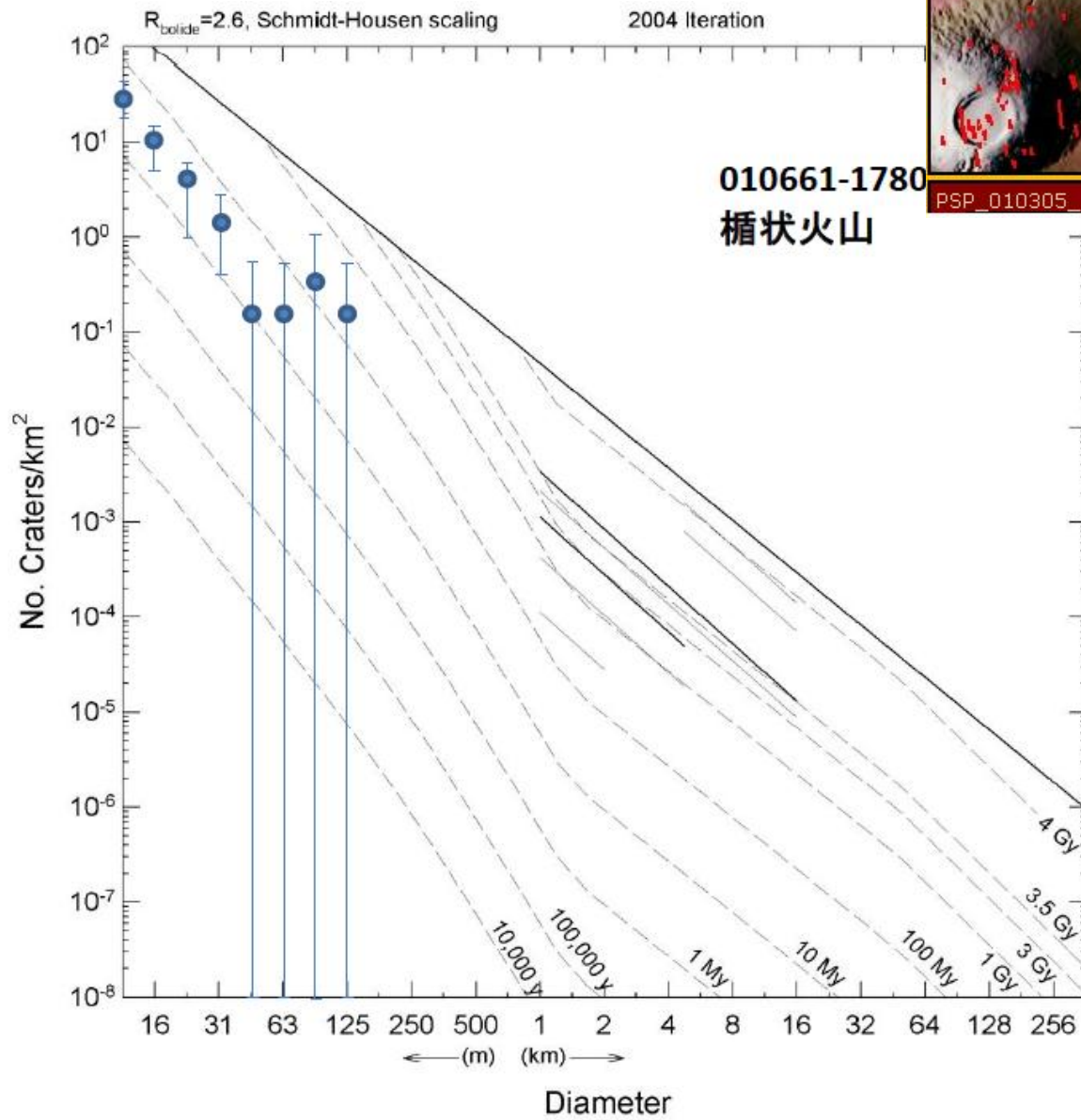
1km<sup>2</sup> 相当の紙に最大350個のクレータ  
とても骨の折れる作業



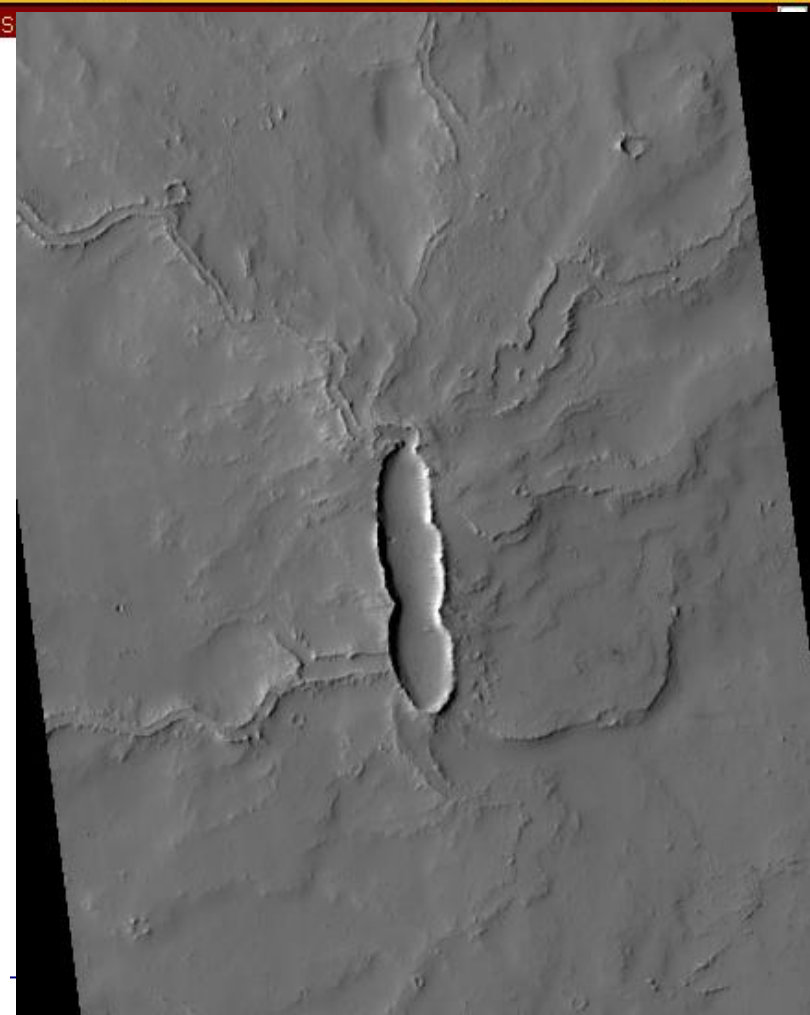
# 1億年



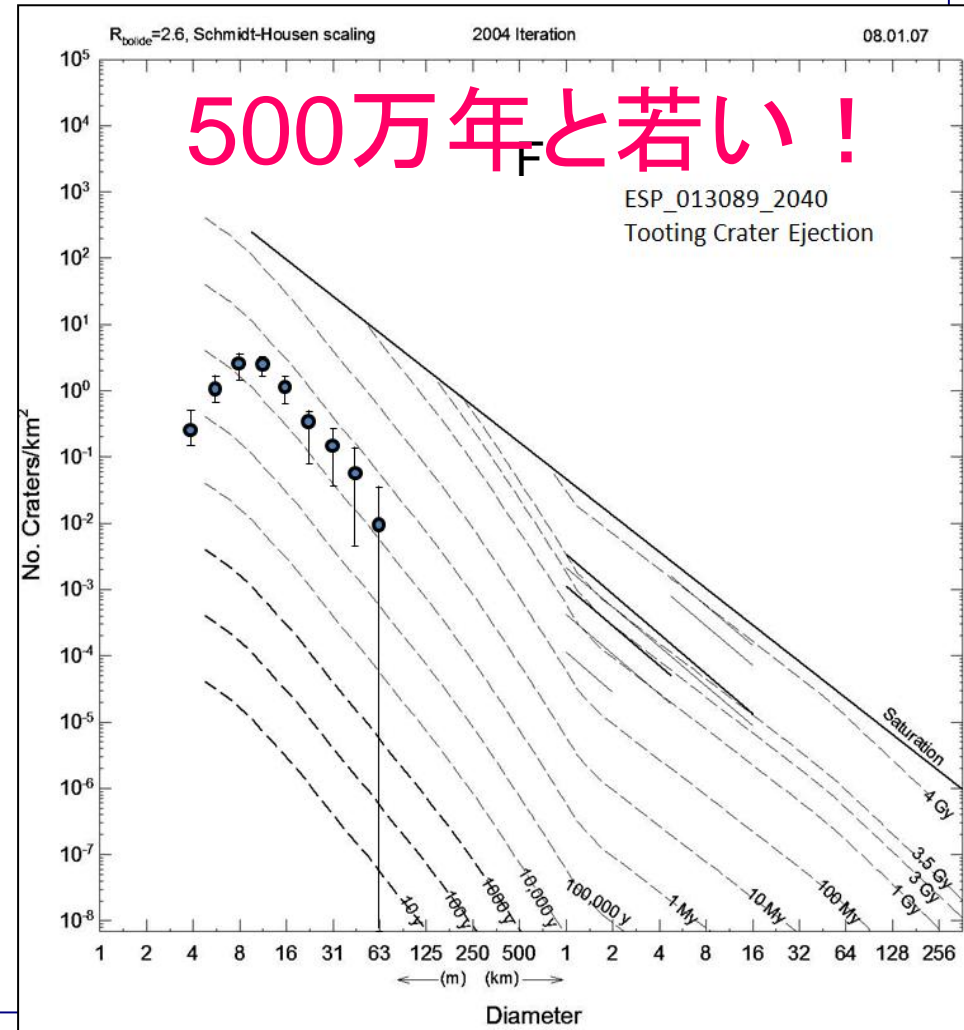
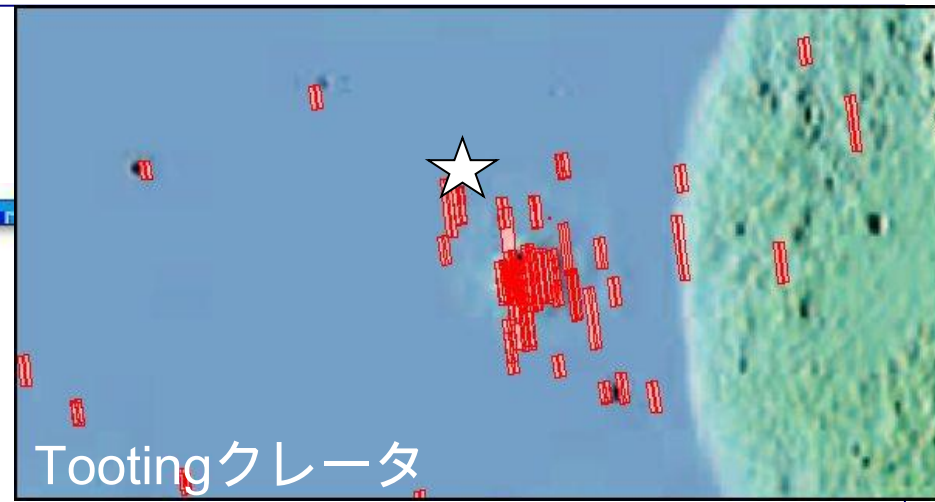
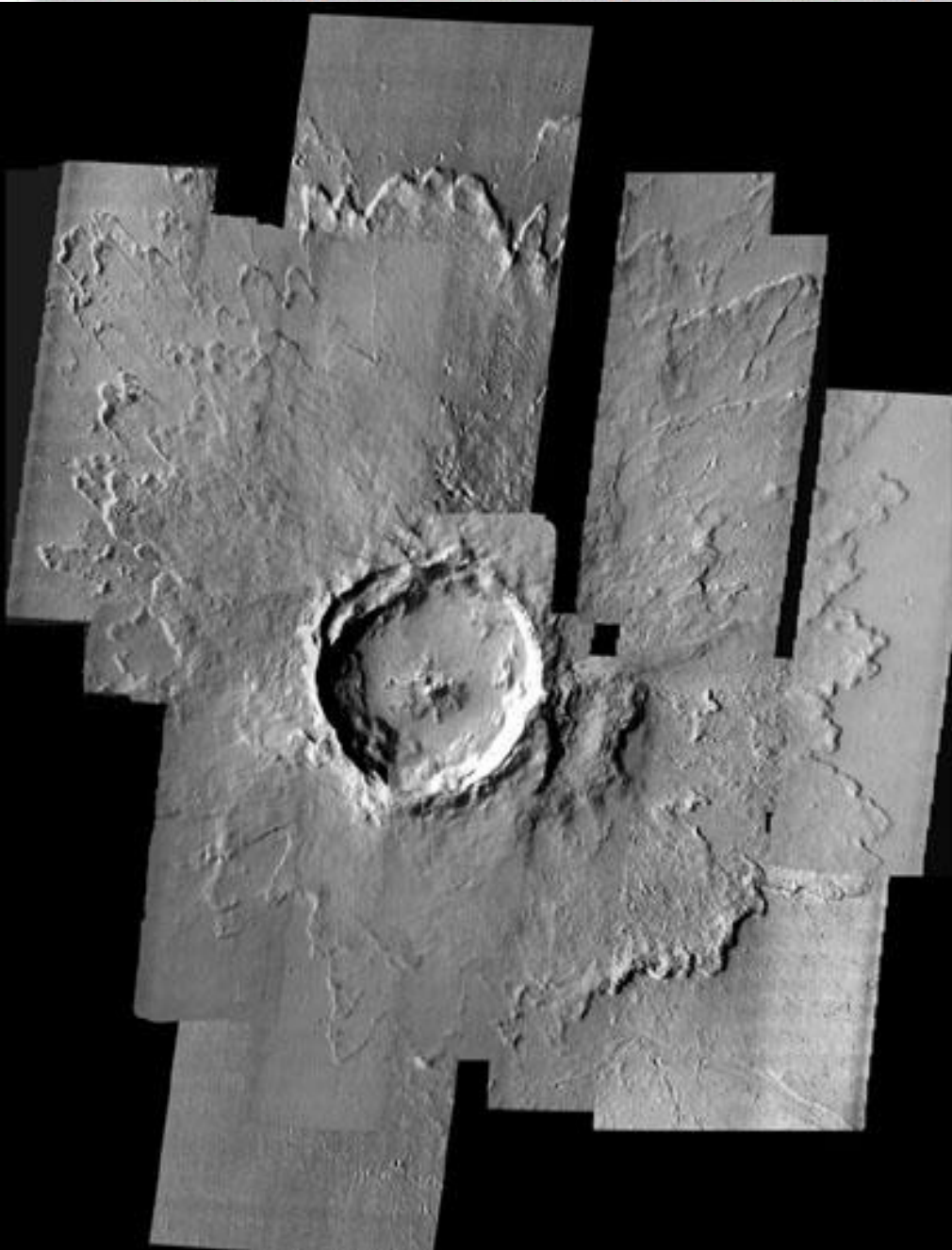
# 7000万年



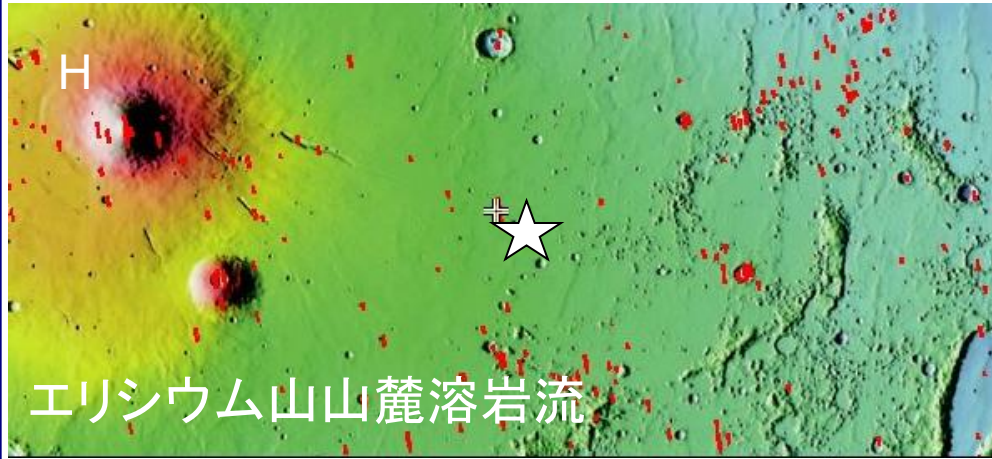
PSP\_010305\_1780 PS



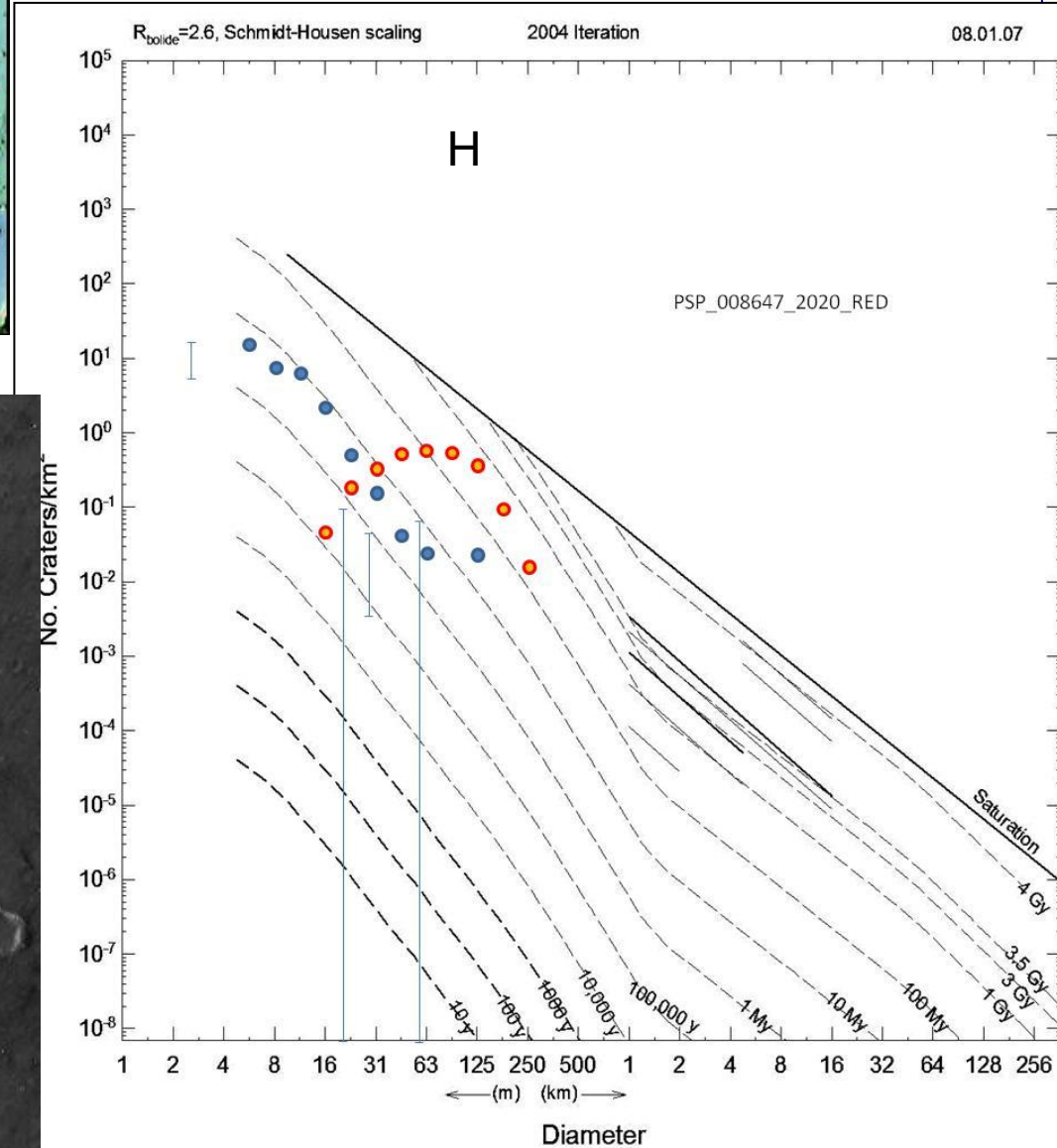
# ランパート型クレータ



# 新・旧2種類の年代: 2層の溶岩流?



赤: 7億年 青: 9千万年



# カウント実習結果

- 溶岩流や火山山麓の年代推定結果は専門家の結果と大変調和的である。(例えば Hartmann,2005)
- カウント実習そのものは高校生でも、それほどの準備なしに結構たやすく実行できる。
- クレータの読み取り時代は結構大変な作業であるが、データをプロットしてすぐに興味深い年代測定の結果が出ることは生徒の興味を大変引く。
- この作業を通じて地味な統計が、実は最新の科学の最先端の研究や科学論争につながっていることを実感できる。



# クレータ年代学の火星での応用 (C.Fassett et.al.,2008)

Caleb I. Fassett, James W. Head III :The timing of martian valley network activity:

*The timing of valley network formation on Mars*

67

Constraints from buffered crater counting, *Icarus* 195 (2008) 61–89

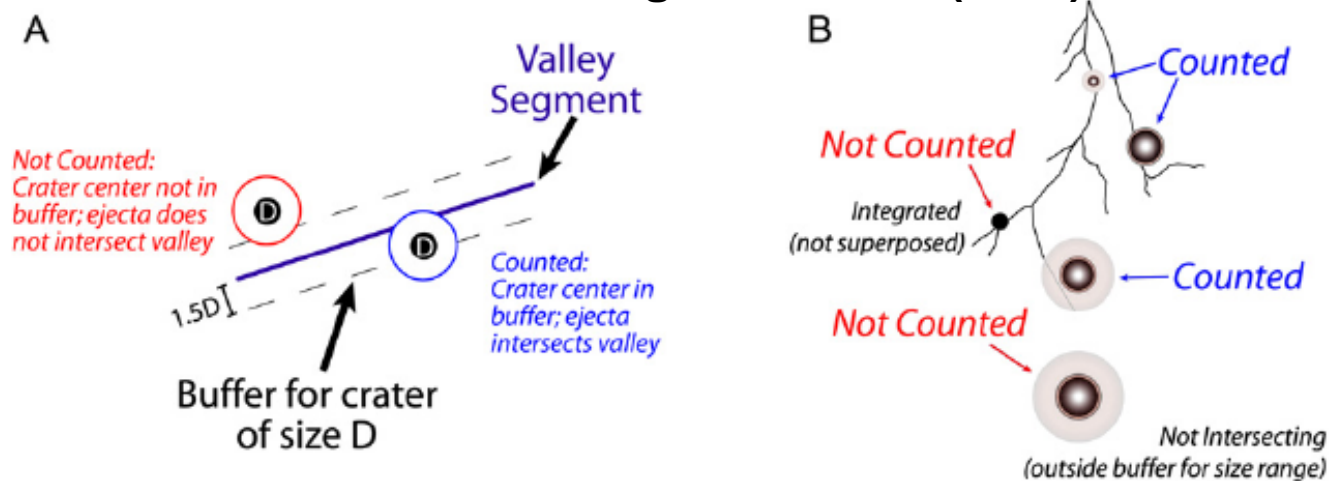


Fig. 3. Schematic diagrams illustrating the buffer crater counting methodology. (A) A buffer is established for a given crater size, and craters are counted which (1) have their centers in the buffer, and (2) intersect the valley segment. For each buffer, a count area is then calculated (which thus allows for size–frequency determination). (B) A schematic of buffer creation at a variety of crater sizes. Craters are not included if they are not superposed on the valley network (e.g., integrated), or outside the buffer appropriate for its crater size.

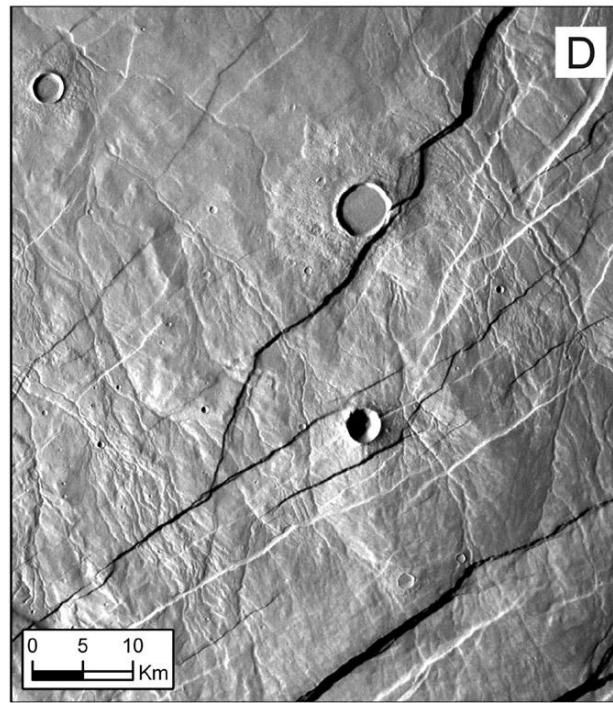
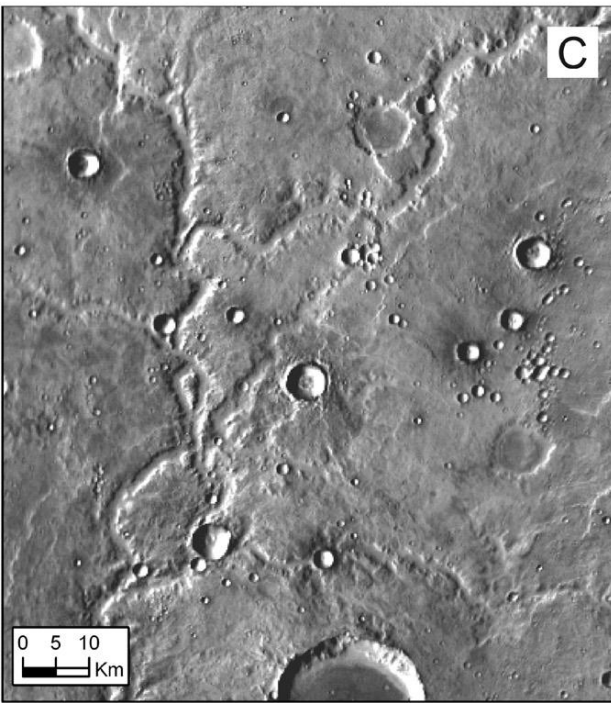
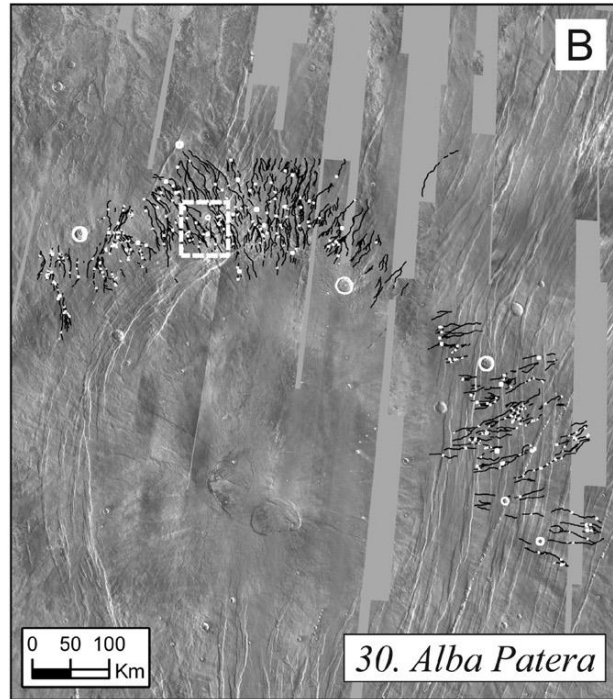
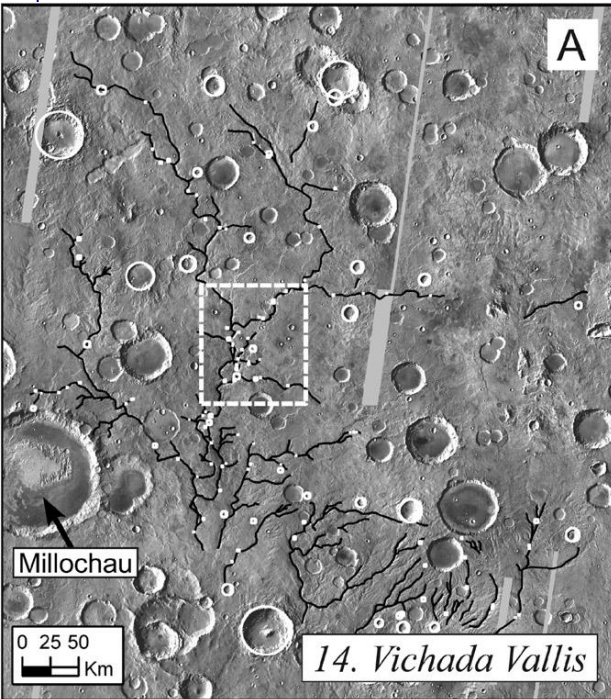
**Good example of cross-cutting relationship!**

in other words, there are no apparent systematic errors resulting from our choice of a buffer size.

Our procedures for the count are as follows: (1) We first map the valley system being examined and determine its average width. (2) We then find all craters clearly superposed upon the valley that have a center within the buffer area appropriate for the specific crater diameter (so that its rim falls within a distance of one crater diameter of the valley). (3) A count area is

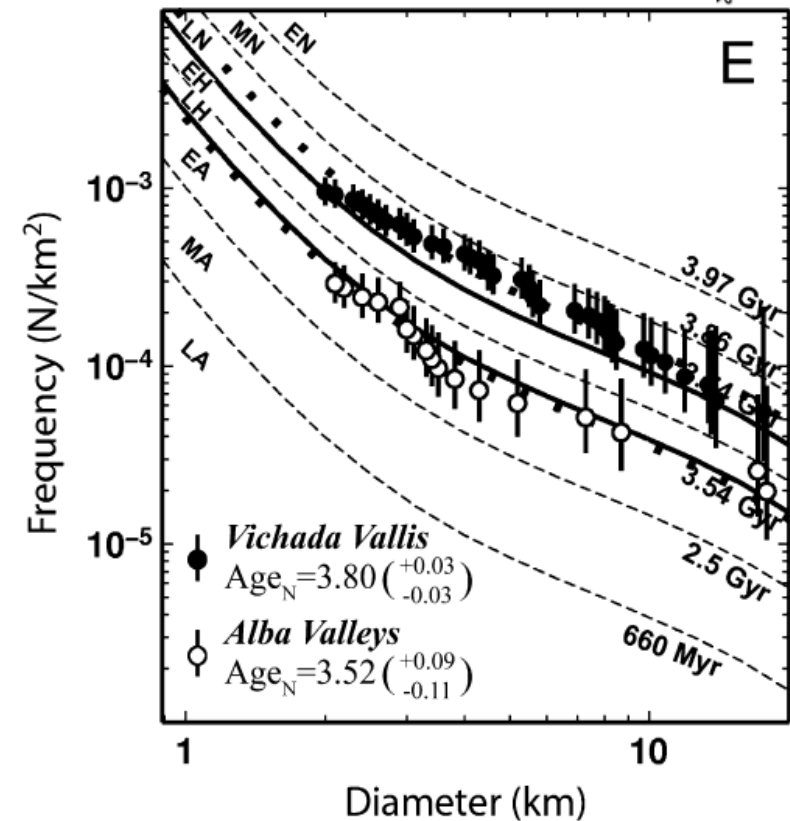
Lack of knowledge of the exact historical impact crater production rate on Mars leads to a systematic uncertainty in absolute ages of up to a factor of  $\sim 2-4$ , and the degree of uncertainty depends on the age of terrain being considered (e.g., Hartmann and Neukum, 2001). Along with this systematic uncertainty, there are also non-negligible differences in the ages that are derived using the Hartmann and Neukum production functions. For example, calculating the

# 河谷の形成年代⇒意外と古い！



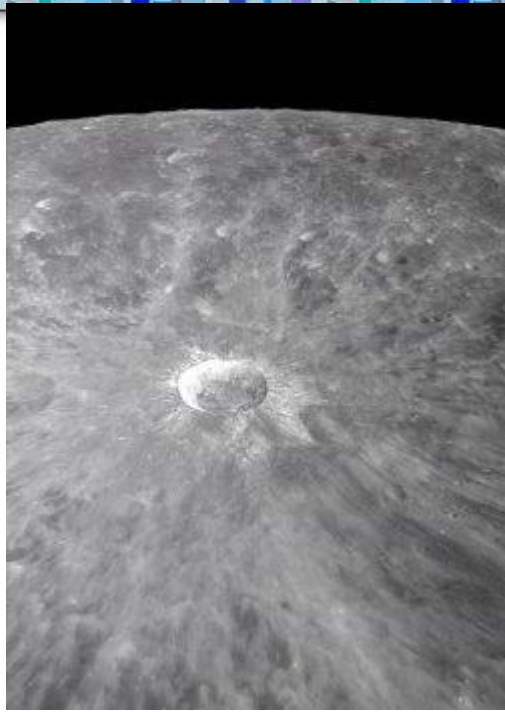
C.Fassett et.al.,2008

The timing of valley ne...





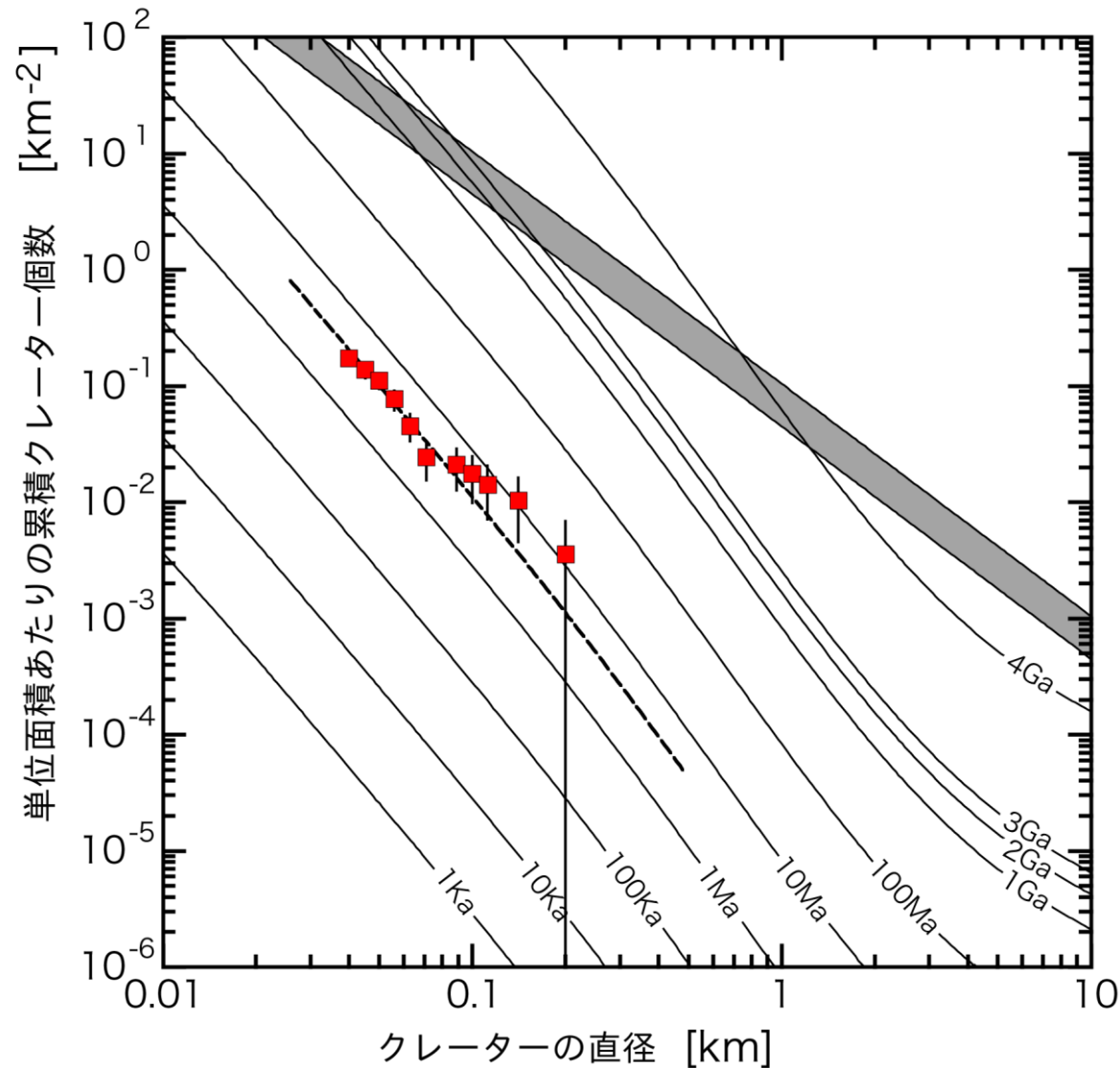
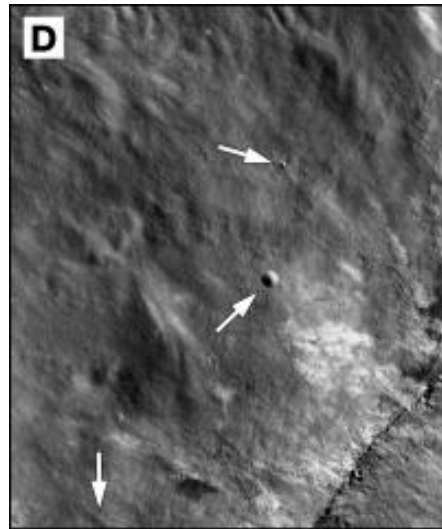
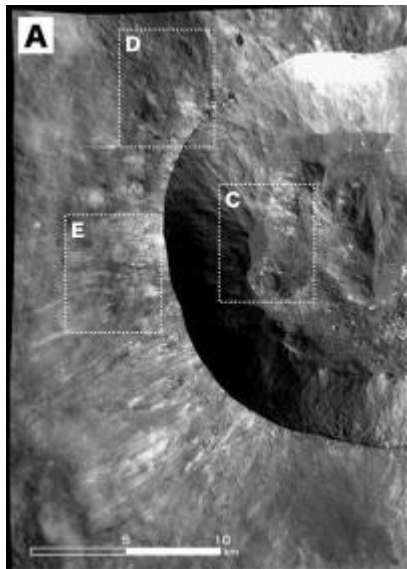
# 本家の月でも:「かぐや」のデータを使って



ジョルダノー・ブルーノは歴史時代にできたものか？

[http://moonstation.jp/ja/history/Kaguya/Giordano\\_Bruno/index.html](http://moonstation.jp/ja/history/Kaguya/Giordano_Bruno/index.html)

より



# この手法のメリット

- \*とてもローテクな作業と単純な統計処理が見事な結果をもたらす意外性！
- \*原始的な手法, 大した準備を要しない作業, しかし骨が折れる: クラブ活動に最適!
  - 常に最先端科学がハイテクや巨大施設だけで担われるわけではない!
  - **Yes! We can do it!**
- \*本当の年代はたぶん2030年代にわかる!
- \*そのときまで生きていたいな!

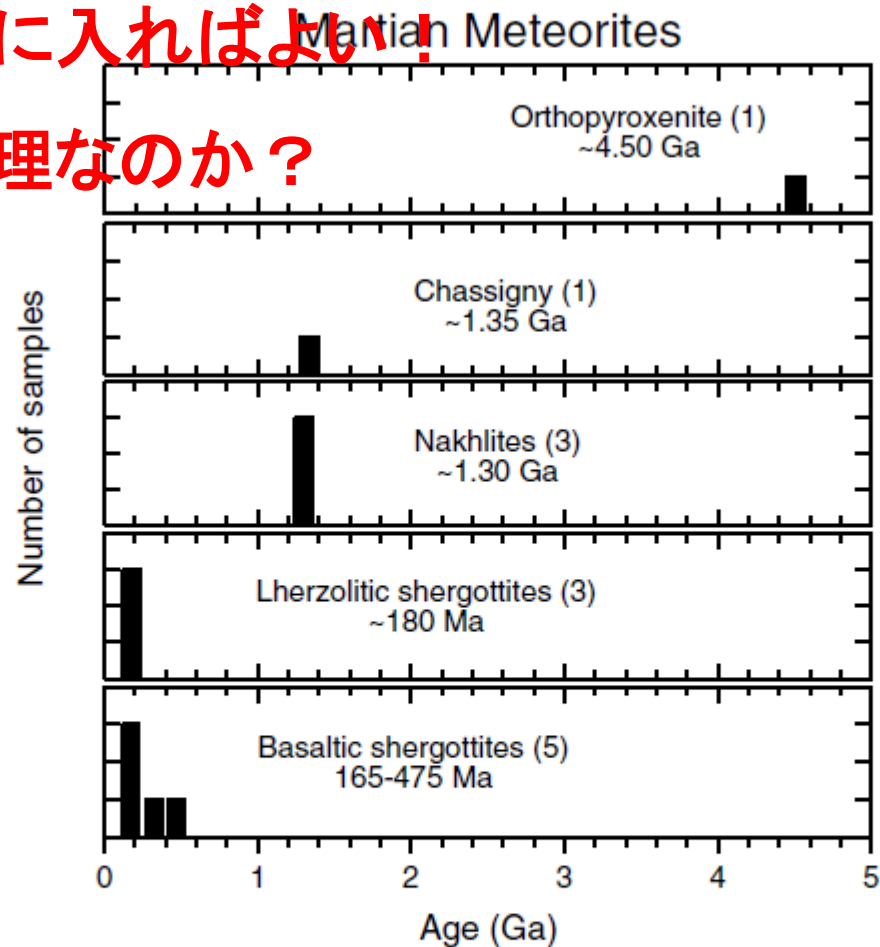


# この手法は本当に妥当なのか？

120

NYQUIST ET AL.

1. 火星表面の岩石が手に入ればよい！
  2. それは2030年まで無理なのか？
- ?



14個の火星起源の  
隕石の年代測定

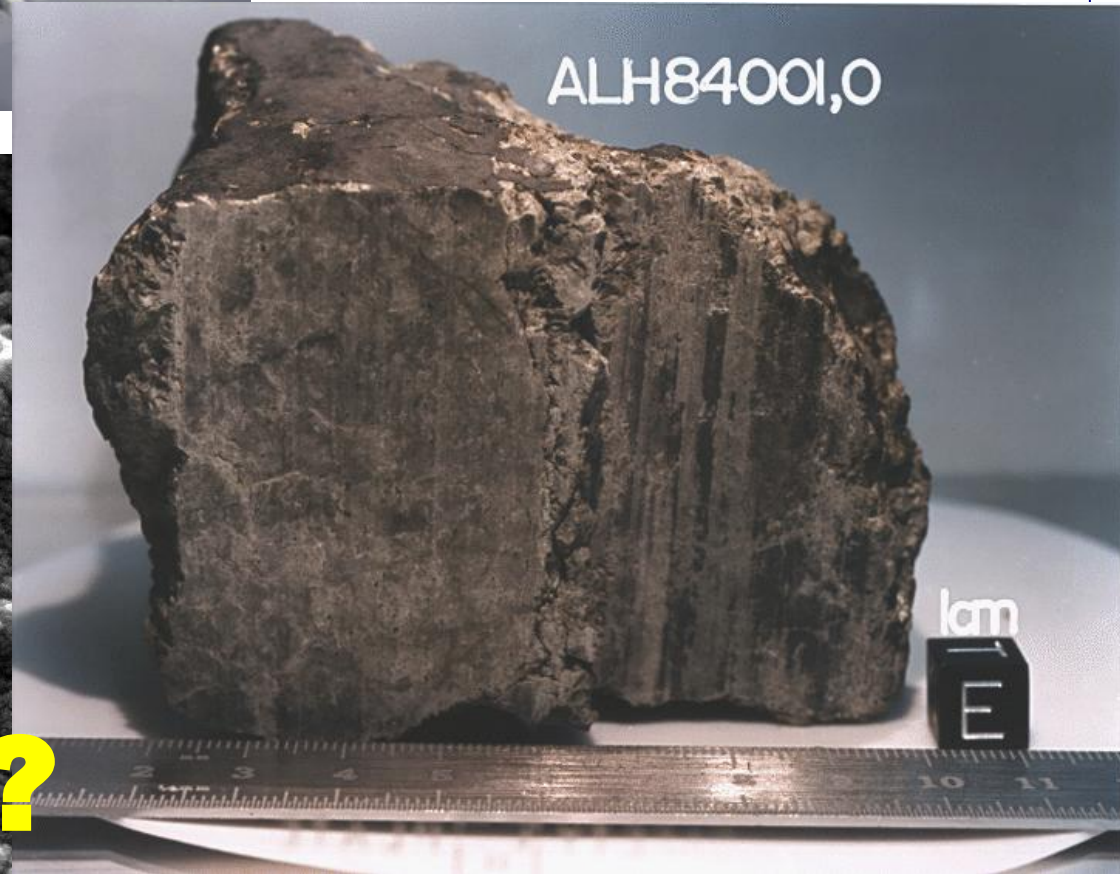
Nyquist et al., 2001

Figure 2. The crystallization ages of Martian meteorites separated by compositional group. The values plotted are the “preferred ages” from Tables II and III. The oldest meteorite in the Martian clan is ~4.5 Gyr old, and the youngest ~180 Myr old. Thus, Martian magmatism appears to have extended over most of solar system history, a conclusion that agrees with the time span of crater retention ages (Hartmann and Berman, 2000). The thirteen meteorites fall into only five age groups, leaving large gaps in Martian chronology as recorded by the meteorites.

# 火星からの隕石

## ALH84001

McKay, David S., *et al.* (1996). "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001". *Science* **273** (5277): 924–930.



火星の古い生命?

# さしあたっての問題

1. 隕石衝突の頻度は歴史上一定なのか？

-> No: **The Late Heavy Bombardment Period(LHB)**

2. 火星表面では砂嵐などによる風化がないのか？

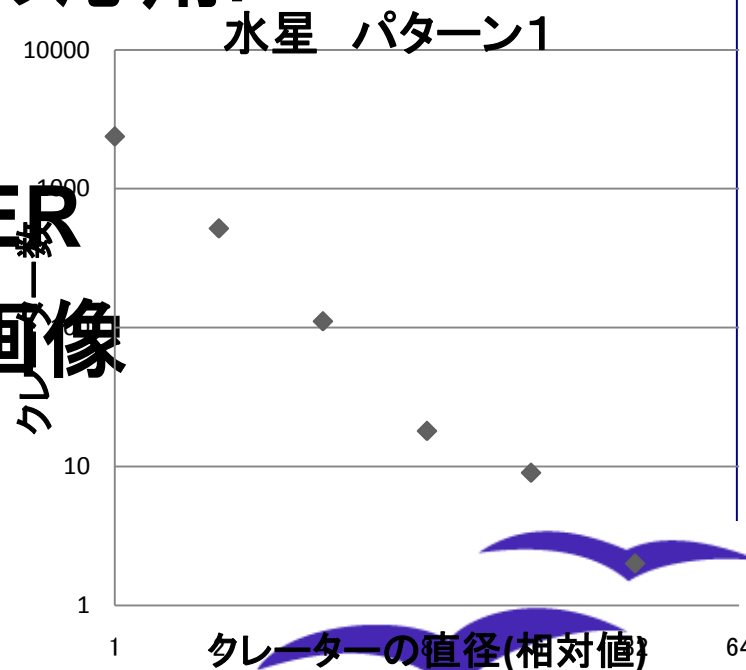
-> Yes: **古いクレータが埋もれたり, 再度掘られたりする.**

3. 他の惑星や小惑星さらに衛星への応用.

→ 水星における試行

※さらに現在NASAのMESSENGER  
というミッションが水星表面の精彩画像  
を送付中.

はやぶさなどの小惑星では？



# クレータ年代学にまつわる話題

- ジャイアントインパクト仮説

月の起源(45億年ころ生成?)

火星くらいの惑星が地球に斜め衝突

- 後期重爆撃期説(LHB)

太陽系の隕石衝突にはClimax Stageがあった。

月の海や盆地の生成

地球への影響は?とりわけ生命の起源?



# 月の起源の謎

・双子説・親子説

・遭遇・捕獲説

→いずれも力学的困難

・ジャイアント・インパクト説(1975, Hartmann & Davis)

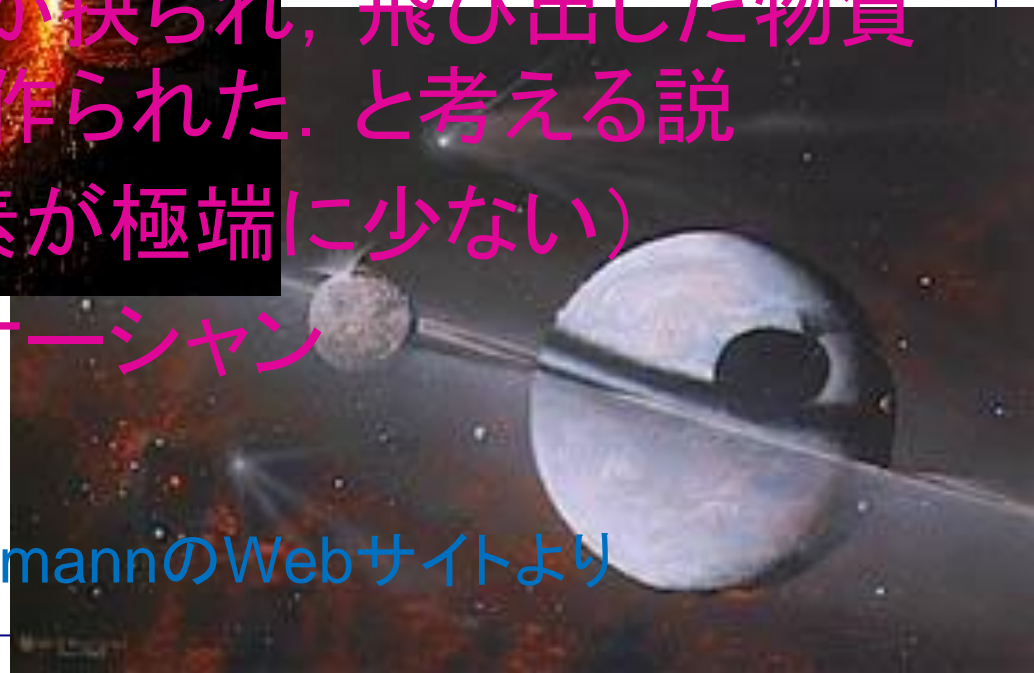
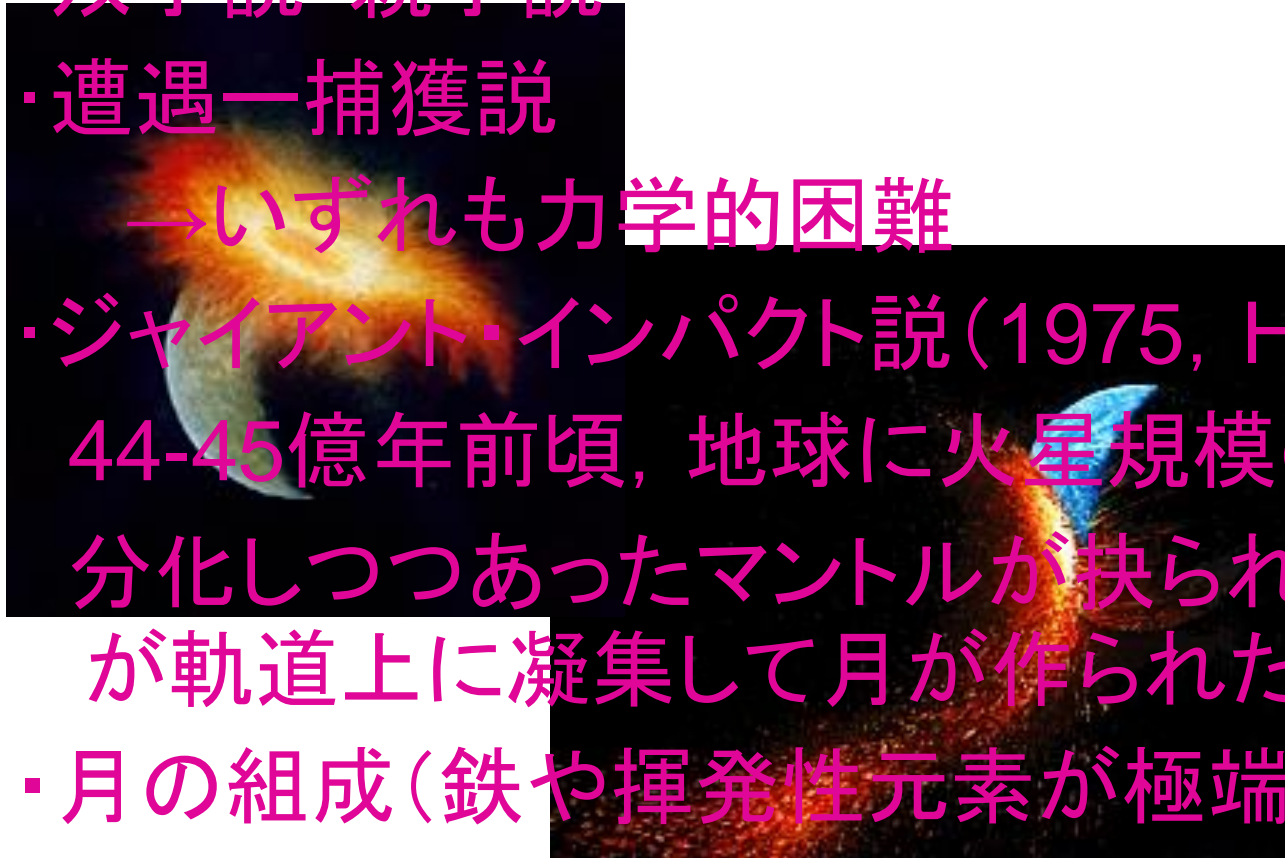
44-45億年前頃, 地球に火星規模の天体: 斜め衝突  
分化しつつあったマントルが抉られ, 飛び出した物質  
が軌道上に凝集して月が作られた. と考える説

・月の組成(鉄や揮発性元素が極端に少ない)

・地球表面は溶けてマグマオーシャン

→核と地殻の形成

画像はWilliam HartmannのWebサイトより



# 月の形成シミュレーション(小久保さん,国立天文台)

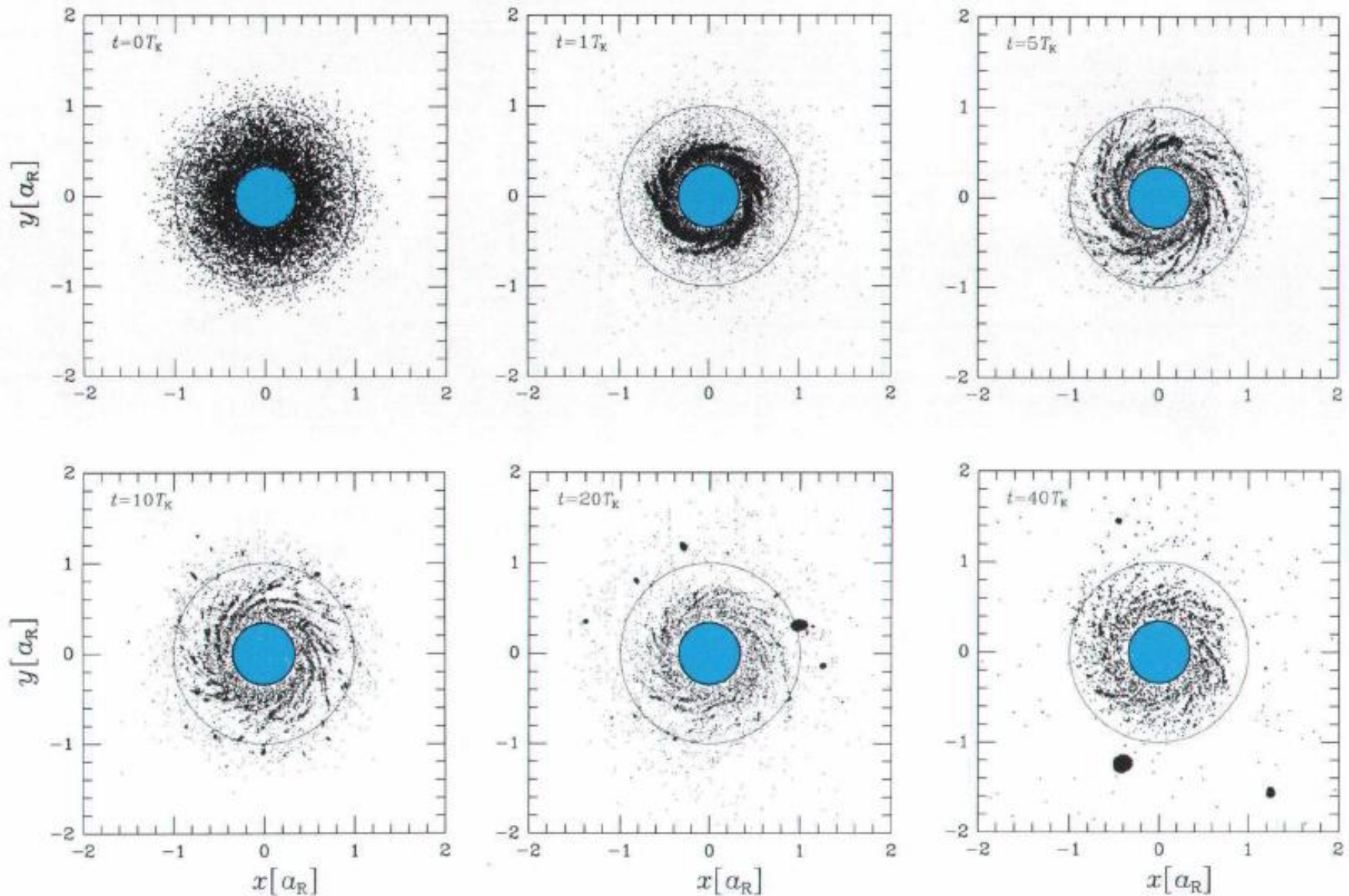


図3  $x$ - $y$  面上の  $t=0, 1, 5, 10, 20, 40T_k$  での周地球円盤のスナップショット, 中央の太い円は地球を表し, 点線の円はロッシュ限界を示している.



# Giant Impact 説の検証

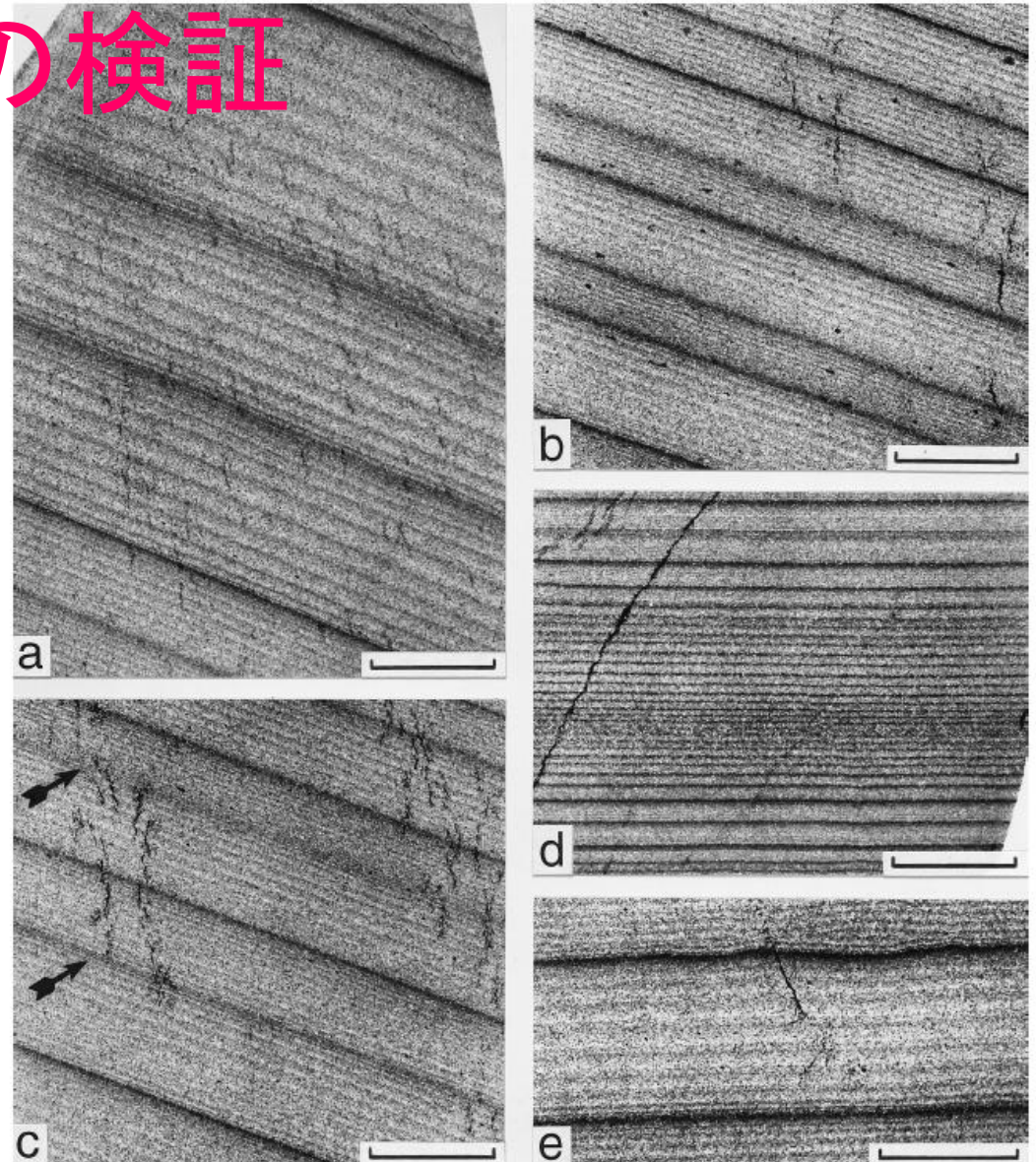
月が昔は近くて、段々遠くなって行ったことの検証  
→古い時代の月の軌道の公転周期や地球の自転周期などがわかるとよい。

しかしどうすれば？ -----

潮汐を記録する古い地層

Williams, 2000

Review of Geophysics



**Figure 4.** Thin sections of rhythmites from drill core of the late Neoproterozoic Elatina Formation, South Australia, viewed with transmitted light; opaque muddy material appears darker than translucent sandy and silty layers. Scale bars are 1 cm. (a) Four complete fortnightly neap-spring cycles of ~10–14 graded, diurnal laminae are bounded by conspicuous, dark, mud drapes deposited near times of neap tides. (b) Alternately thick and thin neap-spring cycles indicating the monthly inequality of paleo-spring tides. (c) Neap-spring cycles with alternate boundaries represented by very thin silty laminae (arrows) rather than mud drapes; such little abbreviated neap-spring cycles were deposited near solstices, when neap-tidal ranges were maximum (see section 3.1). (d) A group of thin (0.5–3.0 mm) neap-spring cycles representing just over 1 year's deposition; internal lamination between mud drapes is discernible only in a few places. (e) A neap-spring cycle comprising diurnal laminae as well as semidiurnal sublaminiae. Reproduced from Williams [1991] with the permission of the Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary.

# Komatiite (地球最初の海洋地殻, 35億年前)



Canada (Fig. 1.2) by Pyke et al. (1988). The komatiite flows are generally about 1 m thick and are determined.

Fig. 1.2. Diagrammatic section of a typical komatiite flow.

**Locality 2.** Approximately 30m north of exposures of komatiitic pillow basalts and in a zone about 10 m wide. The pillow structures formed as the lavas were erupted into water.

**Locality 3.** About 50 m north of locality 2, exposures of komatiitic pillow basalts (Fig. 1.3) on the flat pavements and in section on the pavements and show smooth curved upper surfaces.

# 南アフリカ Moodies Group の潮汐層

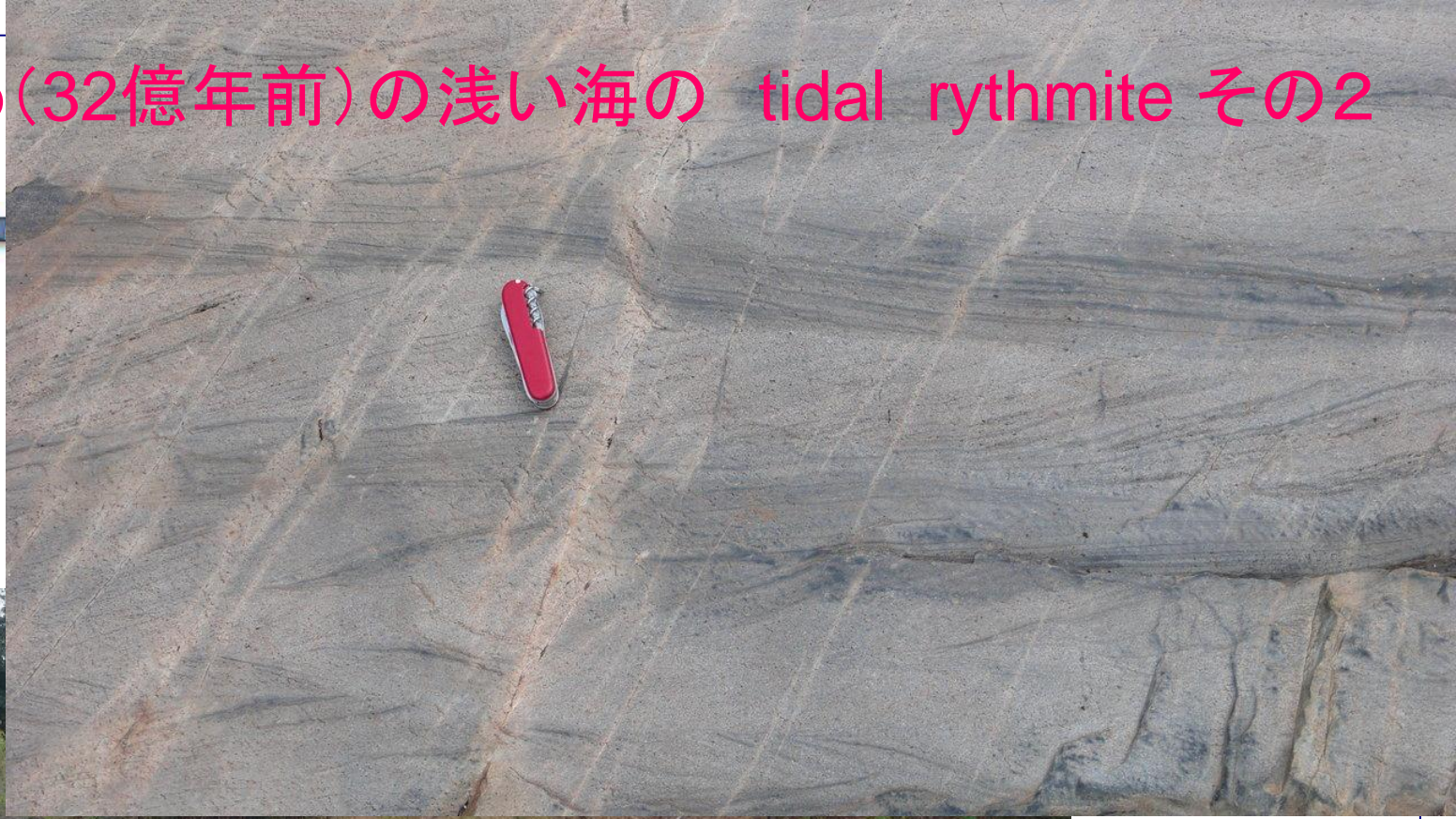


32億年前の  
潮の干満 ⇒  
当時の1日の  
長さ, 月まで  
の距離



# Moodies Group (32億年前)の浅い海の tidal rythmite その2

南アフリカ2010年  
秋の地質巡検より



# 南ア Moodies Group (32億年) 潮汐縞の解析

・現在より早い月の公転(約20日弱)  
 ・月の軌道が円軌道に近い

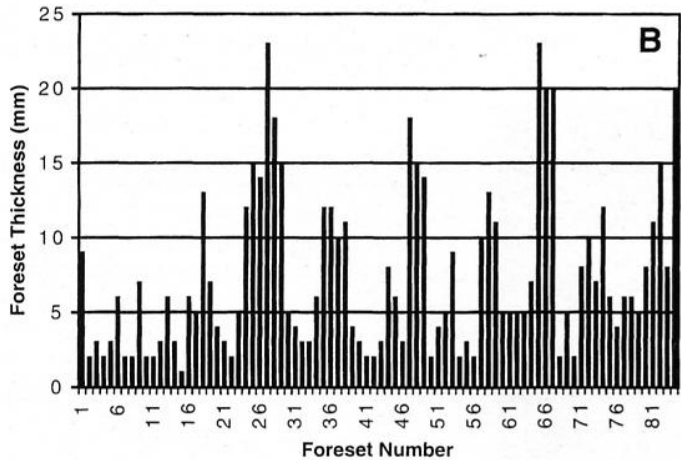
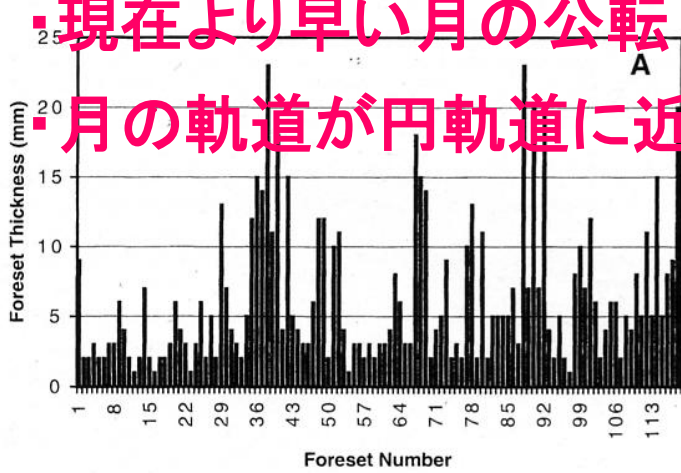


Figure 3. A: Traverse two—all data. Histogram of sandstone foreset bundle thicknesses plotted against foreset number for traverse two through cross-bed set shown in Figure 2. Note variation in thickness of sandstone foresets and common presence of thick-thin pairs of foresets. B: Traverse two—subordinates removed. Histogram of inferred dominant-tide foreset bundle thicknesses plotted against foreset number for traverse two through cross-bed set shown in Figure 2. Inferred subordinate flood-tide laminations were removed visually from data sets. Note that interpreted neap-spring-neap cycles are 9–10 days long and that alternate neap-spring-neap cycles are thicker and thinner, respectively.

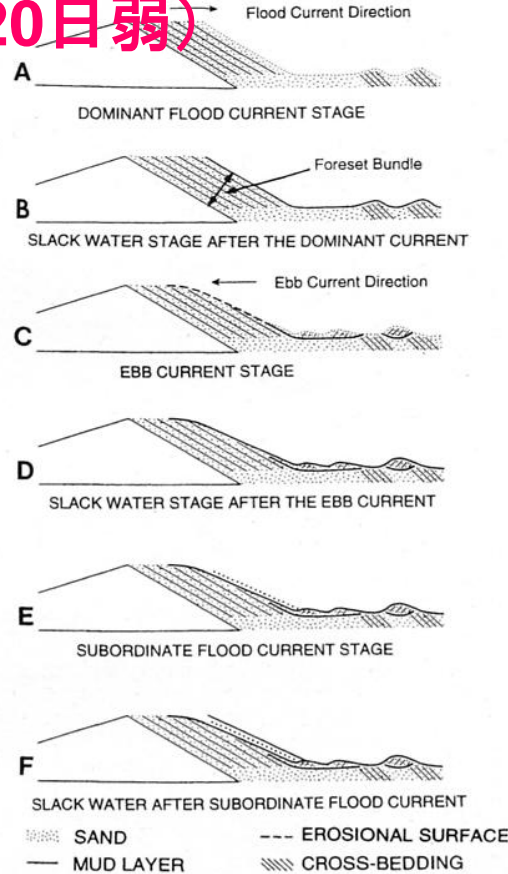


Figure 4. Migration of sand wave in tidal system characterized by strong flood current and weak ebb current (modified after Visser, 1980). Note that most sand is deposited on lee face of sand wave during dominant flood stage (A), whereas only thin sand layer is deposited on lee face during subordinate flood stage (E). Dominant and subordinate flood currents are typical of semidiurnal tidal systems. During ebb stage, sand deposition takes place only in trough of sand wave and is preserved in form of intrasets within toesets of cross-bed set (C). During stillstand associated with turning of tide, clay accumulates on lee face and within trough of sand wave and is preserved as mudstone drapes (B, D, F).

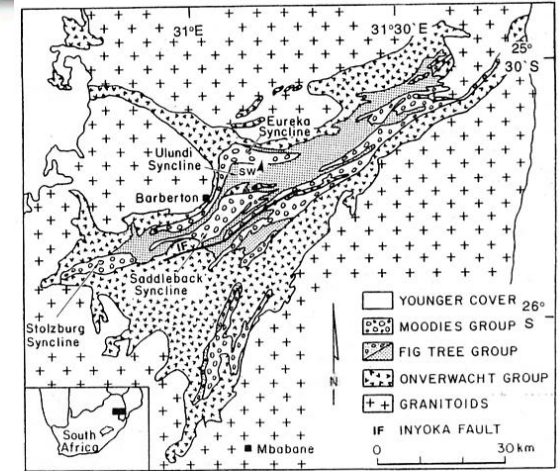


Figure 1. Simplified geological map of Barberton Greenstone Belt. Heavy arrowhead indicates location of sand-wave (sw) in Eureka syncline.

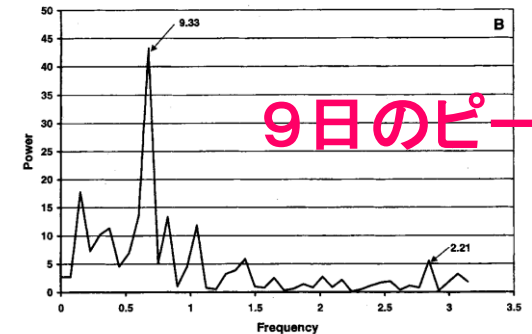
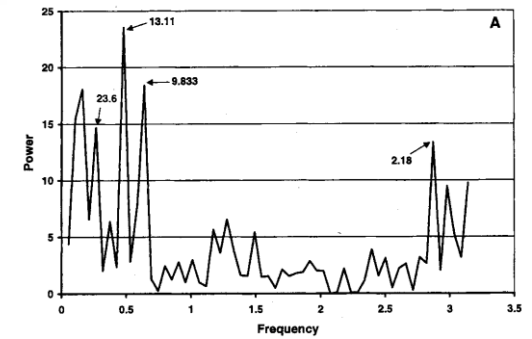


Figure 5. A: Traverse two—all data. Power spectral plot of foreset bundle thicknesses measured along traverse two (see Fig. 3A). B: Traverse two—subordinates removed. Power spectral plots of dominant flood-tide foreset bundle thicknesses along traverse two (see Fig. 3B).

9日のピーク

Eriksson, 2000より

# 後期重爆撃期説：39億年前隕石衝突のピーク

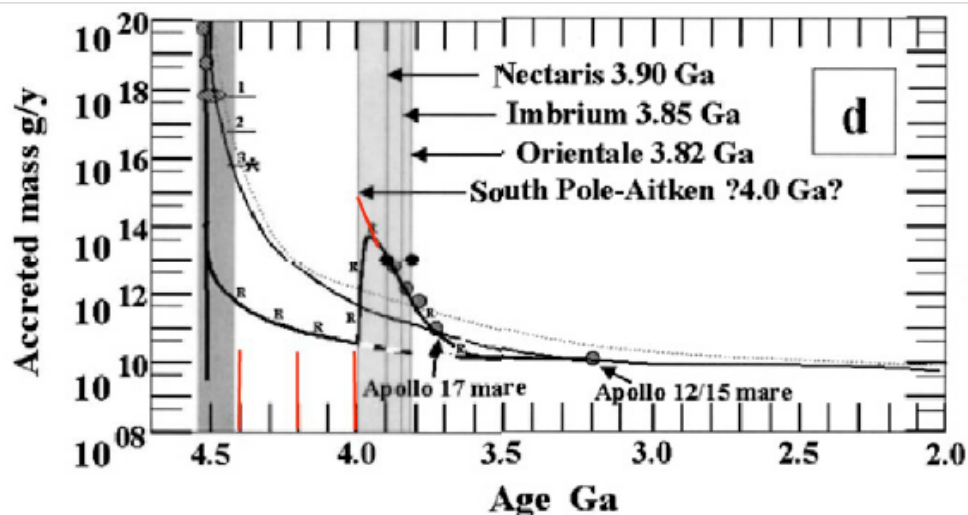
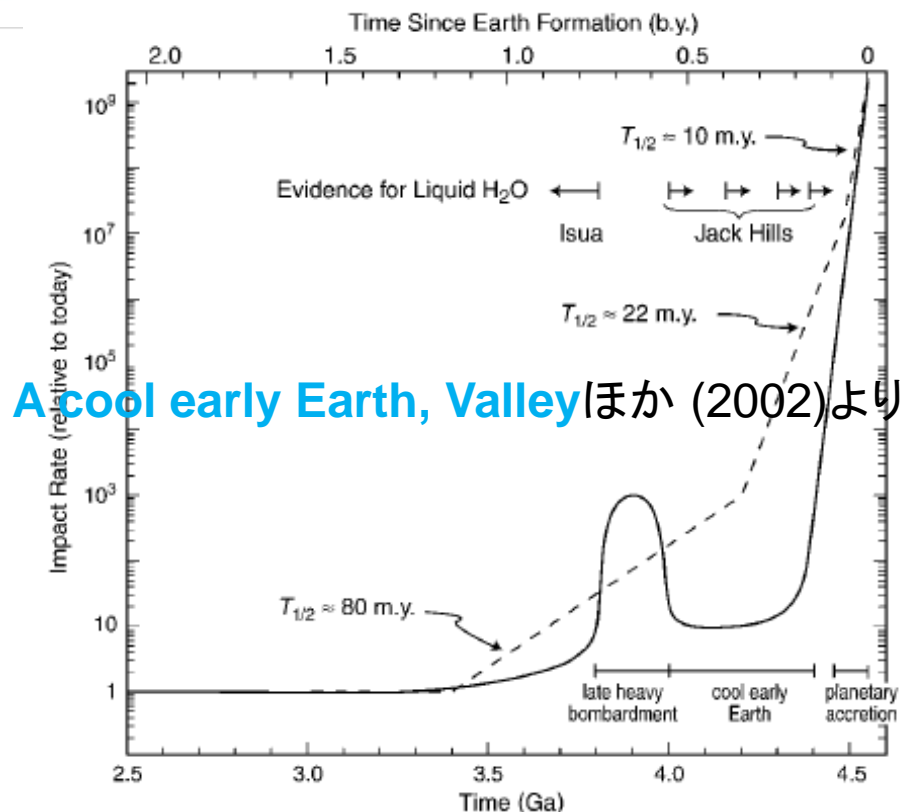


Fig. 6. Ryder's (2002) preferred model of the LHB, adapted from his Fig. 4d which he described as a "cataclysmic impact episode that includes all the observed basins, preceded by a long period of relative impact quiescence. The curve does not have to be so extremely low in the period 4.4 - 4.0 Ga..." Ryder's cataclysm occurs at  $t_{LHB} = 3.9 \pm 0.1$ . Three vertical red lines in the lower left indicate the  $4.2 \pm 0.2$  Ga estimate of the age of SPA used in the three models in Figure 3. Ryder has assumed that the age of SPA is 4.0. Even if we assume Ryder's  $t_{SPA} = 4.0$  Ga, Fig. 3 indicates that there is no increase in the impact rate after  $t_{SPA}$  (as postulated by Ryder) since the slope of the cumulative curve is steepest at  $t_{SPA}$  and does not steepen appreciably after  $t_{SPA}$ , which is required by Ryder's model. This is true independent of the value of  $t_{SPA}$ . In the  $t_{SPA} = 4.0$  Ga model, Fig. 3 suggests that if we accept the decrease in the impact rate from 3.9 to 3.7, then the data suggests that the earlier impact rate is even higher shown by the diagonal red line....which is strongly inconsistent with the pre-Nectarian

Ryder, G., (2002)をNorman(2008)が編集したもの



A cool early Earth, Valleyほか (2002)より

Figure 3. Estimates of meteorite-impact rate for first 2 b.y. of Earth history. Two hypotheses are shown: exponential decay of impact rate (dashes, Hartmann et al., 2000) and cool early Earth-late heavy bombardment (solid curve, this study). Approximate half-life is given in million years for periods of exponential decline in flux. In either model, spikes occurred owing to isolated large impacts. Evidence for liquid water comes from high- $\delta^{18}\text{O}$  zircons ( $>4.4$  to  $>4.0$  Ga) and sedimentary rocks (Isua, 3.8-3.6 Ga). The cool early Earth hypothesis (solid curve) suggests that impact rates had dropped precipitously by 4.4 Ga, consistent with relatively cool conditions and liquid water.

# 後期重爆撃期説 (Late Heavy Bombardment Period)

1. 月から採集した岩石の年代が39億年に集中。  
(月, 火星からの隕石も同様) →月の海の形成
2. 月・地球上の岩石は40億年より古いものがない。
3. クレータ年代学

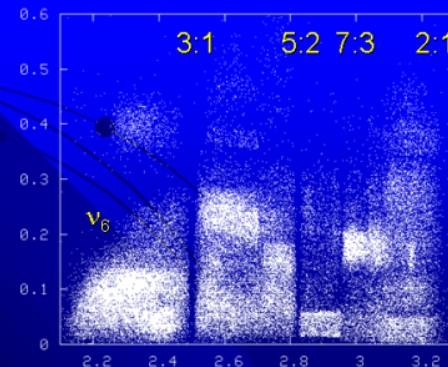
⇒38億年以降は過疎

4. 隕石の供給過程の計算  
(太陽系内の不安定要因:  
数値シミュレーション)

伊藤孝士2007より

## メインベルトの共鳴帯

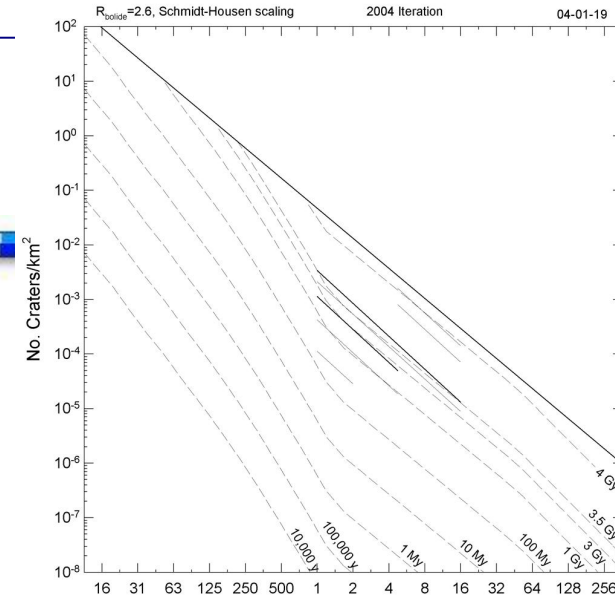
- 外側の共鳴帯からは小惑星が落ちて来ない
  - 離心率上昇→木星と遭遇→散乱されて系外へ
- 内側の共鳴帯がより多くの小惑星を供給
  - 特に $v_6$ と3:1。離心率上昇→火星などと遭遇→



- 軌道半長径が変化
- 共鳴から外れる
- 惑星間軌道を彷徨
- 太陽や惑星と衝突

時間スケールは短い  
(数-10数 Myr)

# クレーターサイズ分布: R-plot



## 2種類の異なった分布: 衝突天体の違い?

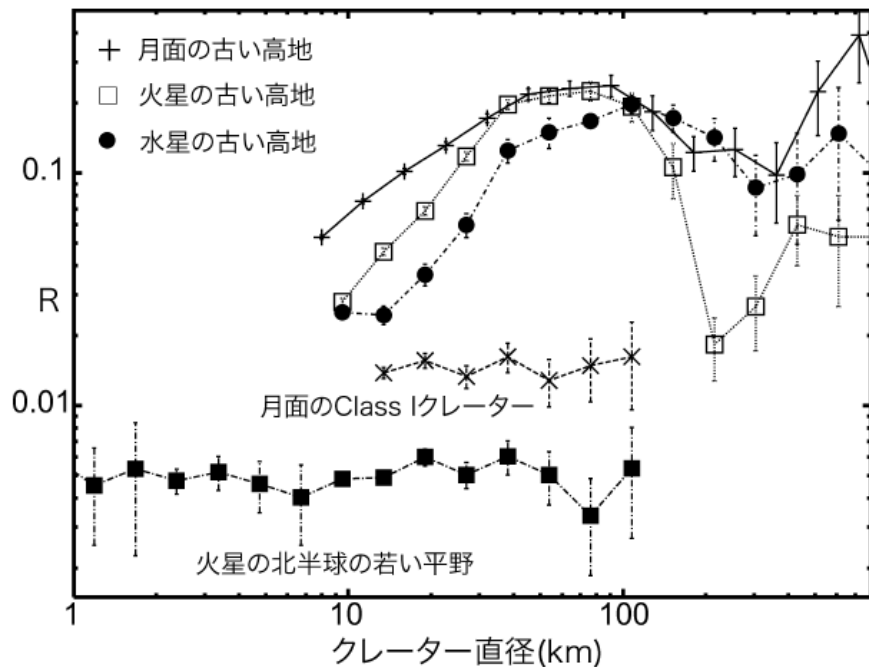


図2 月, 水星, 火星のさまざまな領域でのクレーターのサイズ分布. 縦軸はクレーターの数密度に対応する.

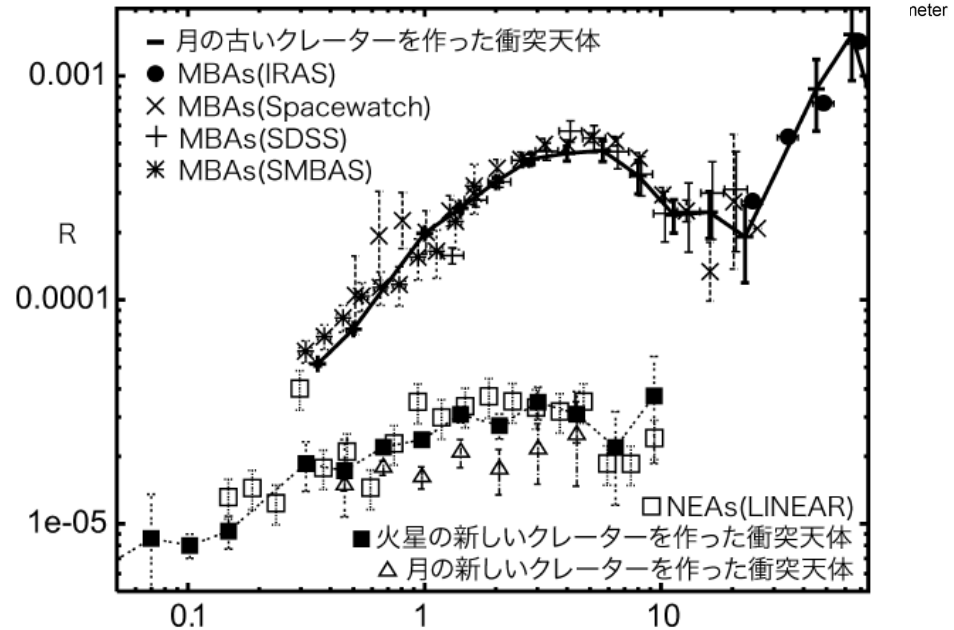
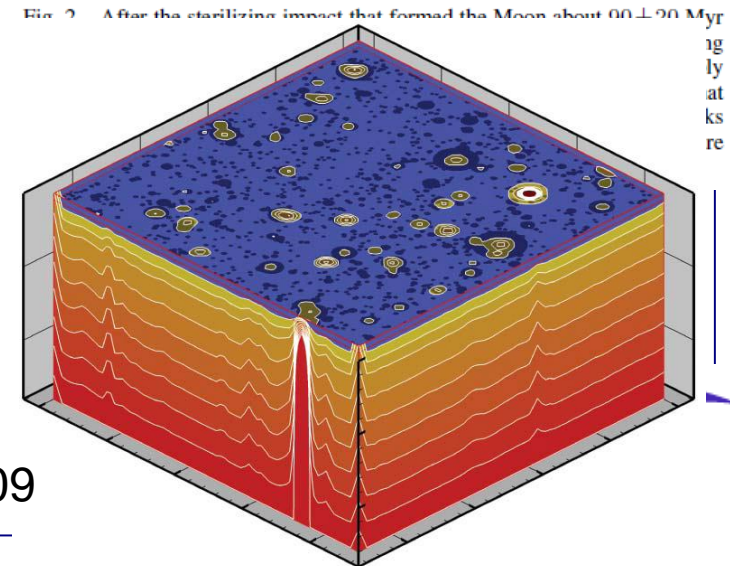
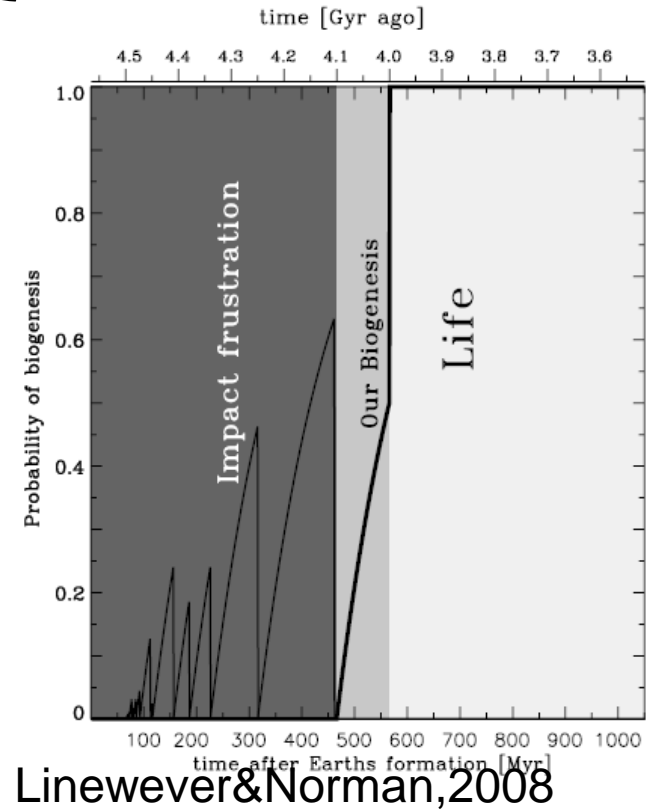


図6 クレーターを作った衝突天体のサイズ分布と現在の小惑星のサイズ分布の比較. 横軸は天体の直径 (km), 縦軸は天体の個数密度. ここでは小惑星的天体を仮定してクレーターから衝突体のサイズを導出した.



# なぜ月があるのか？そして--

- \* 月が地球の生命を育んだ？  
“潮汐力のゆりかご”
- \* LHB以前に生命は生まれていた？  
“殺菌”されていない初期地球？
- \* そもそも生命は宇宙から持ち込まれた！ “Panspermia仮説”
- \* そして夢は  
“太陽系氷衛星” エウロパ  
“太陽系外惑星”  
へと果てしなく続く-----

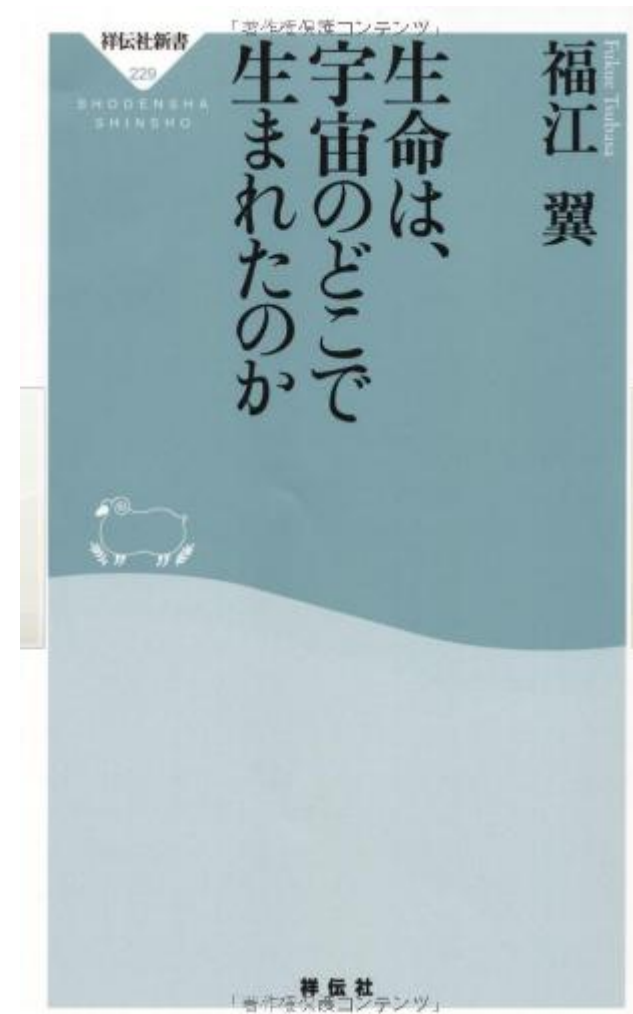
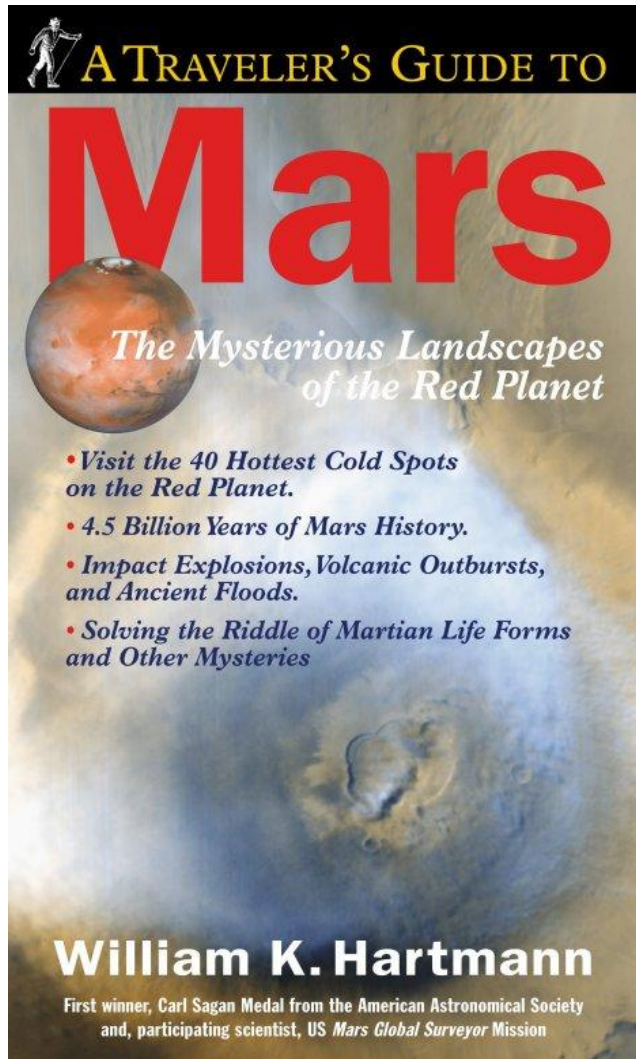


# クレータ年代学：その目標と今後

- \* 惑星表面の時代変遷を探る
- \* 太陽系の起源を探る
- \* ひいてはわれわれ地球型生命の起源を探る
- \* そして宇宙における生命の位置づけを探る
- \* これらの仕事は、あなたたち高校生の世代の大きな目標となる！！
- \* 地味な統計にこそ、科学の手法の真髓？
- \* 一緒に始めませんか？



# おすすめの本



## 謝辞, 参考文献

本講演の内容は大阪教育大学附属高等学校地学部の研究内容の紹介を兼ねています。本研究の端緒を作ったDr. William K. Hartmann先生には、測定の手法の細かな点をご教示いただいたほか、暖かい励ましをいただきました。感謝します。

本講演の研究内容の一部は文部科学省科学研究費奨励研究 No.22916002 の補助をいただいています。

**ご清聴ありがとうございました。**

### <参考文献>

Hartmann, W.K., 2005. Martian cratering 8: Isochron refinement and the chronology of Mars. **Icarus** 174, 294–320.

Caleb I. Fassett, James W. Head III, 2008 :The timing of martian valley network activity: Constraints from buffered crater counting, **Icarus** 195, 61-89

URL <http://www.psi.edu/about/staff/hartmann/>  
<http://www.psi.edu/research/isochrons/chron04a.html>

本講演の内容については下記アドレスで紹介します。

**<http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~yossi/>**

