

The combined effects of escape and magnetic field histories at Mars

Eric Chassefiere et al., 2007

論文紹介

宇宙科学研究所

中村研 金尾

Introduction

- 大量の水と二酸化炭素が存在(初期の火星)
 - ノアキアン後期(37億~40億年前ぐらい)の散逸プロセス
non thermal escape >> thermal escape
 - ・スパッタによる散逸

散逸量の不確定性

→非線形の指数の正確な値7: $\Phi_{\text{supt}} \sim \Phi_{\text{EUV}}^7$

7という値はかなり不正確

→強いスパッタが活性化するスタートとなる
ダイナモが消失した時間

CO₂とN₂の重量比

地球、金星、火星

CO₂とN₂の比率～50 惑星ほぼ等しい

- 金星と地球の二酸化炭素と窒素の含有量は似ている。(惑星の全質量で規格化)

- 火星は地球、金星と比較して数千倍の枯渇

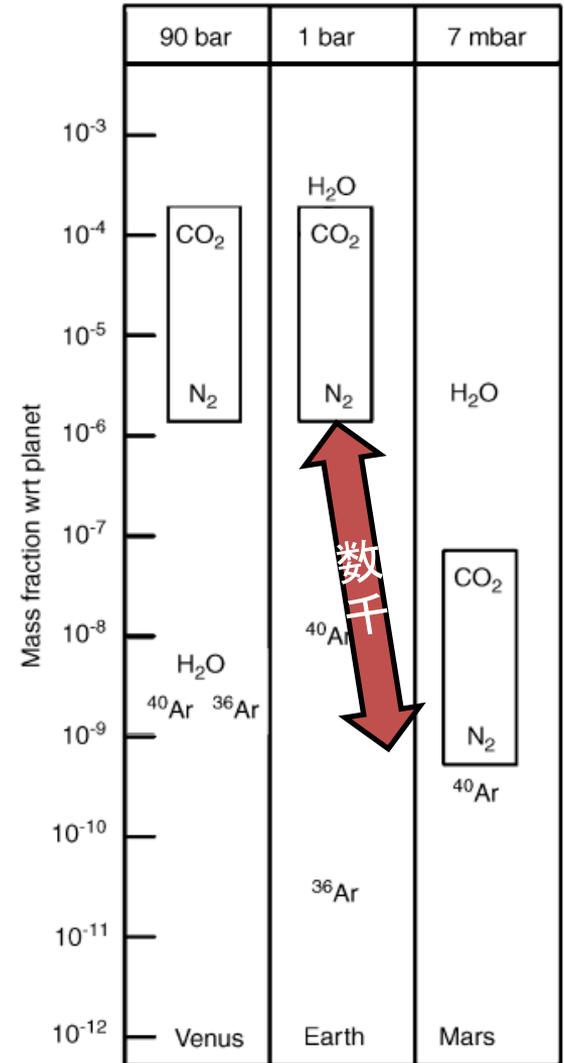


Fig. 1. Mass fraction with respect to planetary mass of volatiles on the terrestrial planets (by taking into account all known reservoirs, in particular terrestrial carbonates for CO₂).

CO₂とN₂の全量を惑星の質量で規格化

同位体 ^{40}Ar

^{40}Ar の脱ガスは大部分が30~40億年前

Heavy bombardment時代以降の散逸 sputtering のトレーサーとなる

レイリー数が大きくなると、脱ガスが後れる。

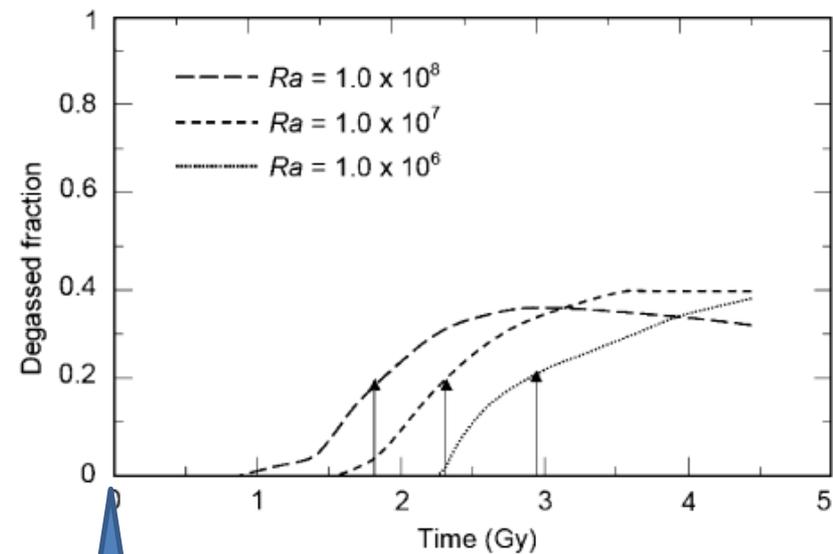


Fig. 2. Degassed fraction of argon (atmospheric argon normalized to total argon in atmosphere + mantle) as a function of time for different Rayleigh numbers of the mantle (from Xie and Tackley, 2004). Arrows indicate times when one half of argon is outgassed. Note that, when the Rayleigh number is large, the degassed fraction decreases at later stage, due to the increase of the argon content within the mantle.

火星誕生

アルゴンの脱ガスの割合
大気のAr/マンツルのAr+大気のAr

火星の大気散逸史

- sputtering...過去の散逸で支配的
 - pick up
- 他のnon thermalな散逸プロセス
35~40億年前の重要な役割

「主たる疑問点」
二桁の散逸がノアキアン時代に
可能だったのか？

重要なパラメータ

スパッタによる大気損失の見積り-Section3

スパッタによる大気損失の見積りへの不確定性の一つであるダイナモ
消失の時間-Section5

希ガス要素と同位体の存在比-Section4

熱的な散逸-Section2

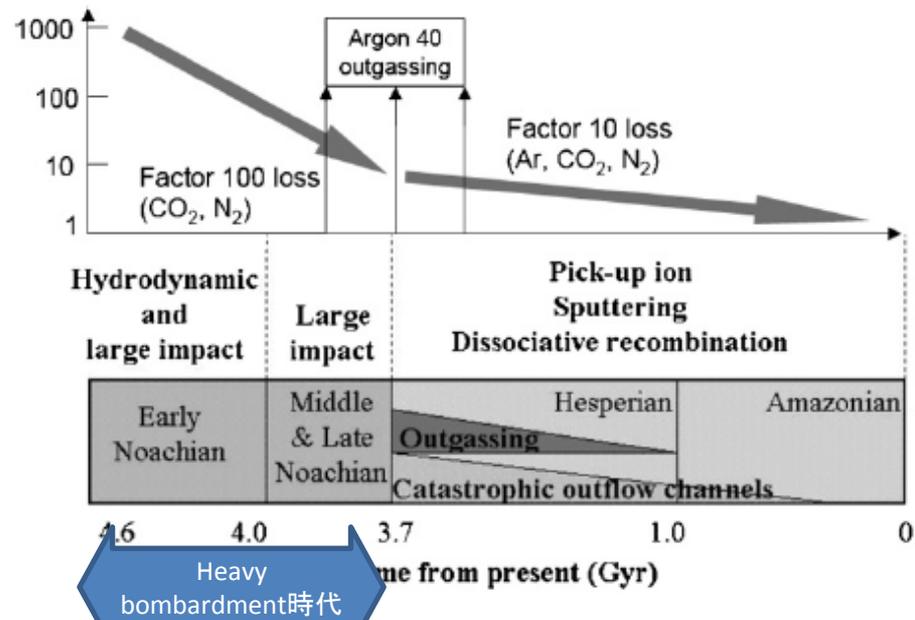


Fig. 3. Schematic chronology of atmospheric escape on Mars. A factor of 100 loss is expected to have occurred during the heavy bombardment period, by impact loss and possibly hydrodynamic escape. In the subsequent period, by using radiogenic argon as a tracer of sputtering escape, an additional loss by a typical factor of 10 occurred.

火星磁場

- MGSによる観測によると地球異なってdynamicでない。
- 南半球で強い
- とても強いリソスフェアの磁場
 - 惑星降着の後にダイナモがあって、クレーター前に停止

磁場のモデル

球面調和関数(磁場異常のモデル)

Parker 2003; Hood et al., 2005 ; Quesnel et al.,2006

Purucker et al., 1996

Lamglis et al., 等

消磁場のプロセス

- 磁気緩和(magnetic relaxation)
- クレーター衝突や火山による熱的なプロセス

2. Thermal Escape

- Jeans Escape
 - 今日のEUV fluxの状態が支配的
 - maxwellianの速度分布うち、エネルギーの高い部分だけ散逸
- 流体力学的な散逸
 - 太陽EUVや太陽風が今日よりも強い太陽系初期の状況

散逸パラメーター

- $\lambda(r) = (1/2mv_{esc}^2)/kT$

質量 m 速度 v の運動エネルギーの速度が
高度 r でのポテンシャルエネルギーに等しい

R:惑星中心の高度
M:散逸する種類の原子質量
K:ボルツマン定数
T:温度
 V_{esc} :散逸速度

- $\lambda(r) = mgR^2/kTr$

Rは惑星半径
または
大気のスケールハイトの関数 $\lambda(r) = R^2/Hr$

$\lambda(r_{ex})$ について $r_{ex} \sim$ exosphereの高度

(1) $\lambda(r_{ex}) \gg 1$ Jeans Escape マックスウェリアンの分布

(2) ~~$\lambda \sim 1$ λ_{ex} は強いEUVfluxによって加熱された水素原子または H_2~~

この論文で取り扱うここ40億年ではEUVフラックスは十分な流体力学散逸をひきおこす
ほどつよくなかった。

→ジーンズエスケープに限定して考える

重水素

- 火星大気のHDO/H₂O比率
 - 地球の海の6倍 [Owen et al. 1988]
 - 水素散逸フラックスと酸素散逸フラックスの比較[McRroy 1972]

宇宙への水の損失と関連する

HとD:化学的に、熱力学的にも異なる反応[Yung et al., 1988]

原子として、またはHDとH₂分子として散逸。

高度20~50km:H₂OとHDOの分子が光解離 → H₂とHDになる

渦をまきながら上層に移動

上層大気:HD₂とHDがイオン反応によって解離して、熱的に散逸

HD:分子としてよりも解離したあとのDとして散逸

H:原子としても分子水素としても散逸

光学観測 + 光化学モデル (Kranspolsky et al., 1998)

HD放射の観測:ハッブル望遠鏡による 高度130kmにおける太陽活動極小期

H₂:マリナー7とマリナー6の観測を使用して、光化学モデルをパラメーター化

上層大気におけるH₂/HD比率 1.5×10^{-4}

(HD/H₂)/(HDO/H₂O) 0.09

(HD/H₂)/(HDO/H₂O) 1.6

上層大気におけるH₂とHDの量が光化学でなくH₂OとHDの衝突によって支配

D/H比率を用いた水素の散逸の全フラックス

- $(\text{HD}/\text{H}_2)/(\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})=0.43$ に訂正 Kranspolky
- 現在の大気中のD/H比率 Owen et al., 1988
- D/H比がもともと地球と同じ
- バルクの現在の水の貯蓄(polar cap)が地球のD/H比と一緒

火星史において宇宙に損失された水の総量:

65m ~ 120m [Kranspolky et al., 2000]

35m ~ 115m [Lammer (2003)]

3. Non thermal escape

- Nonthermalな散逸の種類
 - 解離再結合と関連した光化学の散逸
 - 紫外光による電離圏イオンが電子と再結合して、火星から散逸するのに十分なエネルギーをもつ
 - イオン散逸
 - 火星のexosphereにおける光イオン化、電子衝突、電荷交換。太陽の磁場の動きにあわせて惑星をつつむようにひっぱっていく。
 - 電離圏Out flow
 - Ionが電離圏内で作られて、ionopauseまで上がって太陽磁力線によって惑星間空間へとひきづっていかれる。
 - イオンスパッタリング
 - コロナあるいは電離圏の中でつくられたイオンが中性大気を再衝突する。

太陽EUVFlux

1~1200 Åまでの積分

- $F(\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1}) = 29.7 \times (\text{Age})^{-1.23 \pm 0.1}$
- $\text{Flux} = \text{Flux}(\text{present average cycle conditions}) \times [\text{Age}(\text{Sun}) / \text{Age}]^{1.23 \pm 0.1}$

現在の太陽活動度極小期の時代を1として定義
1EUV 現在
3EUV 太陽系ができて19億年28億年前
6EUV 太陽系ができて11億年

EUVの振れ幅による散逸率の変化

EUVフラックスに太陽サイクルによる変化があると、その分散逸フラックスが増加

散逸率の計算になおすと一桁以上の誤差となる。

炭素と酸素の散逸率進化

酸素

- 解離再結合 [Luhmann 1997]
- スパッタ
 - 火星大気への再衝突イオン [Jonson and Luhmann 1998]
 - 脱出する中性大気粒子に再衝突する効果 [Leblanc and Jonson 2002]
- ピックアップイオン [Lammer 2003a,b]
- 電離圏アウトフロー [Ma et al., 2004]

炭素

- 太陽活動極大極小の解離再結合による炭素原子の散逸 [Fox 2004]
- スパッタによる散逸 (原子か分子) [Jonson and Luhmann 1998]
- ピックアップ
- CO_2^+ の電離圏フロー [Ma et al., 2004]

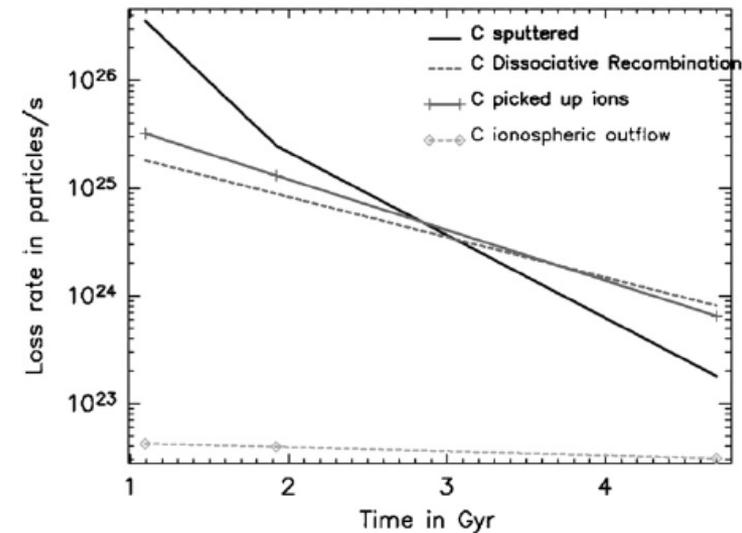
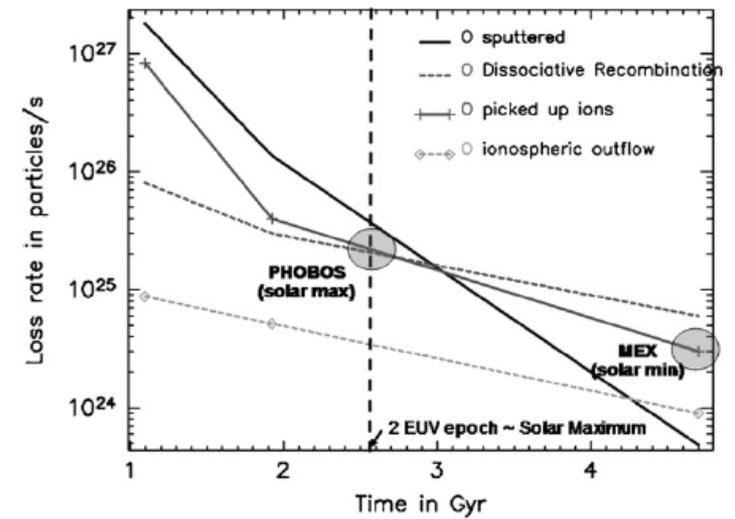


Fig. 4. Evolution of the escape rate of oxygen (upper panel) and of carbon (lower panel) due to non-thermal mechanisms of escape applied to the Martian atmosphere (estimated as described in the text). On the upper panel are also indicated the measured escape rate of total ion oxygen (probably the sum of the ion escape and ionospheric outflow) reported by Lundin et al. (1989) for solar maximum conditions (from ASPERA on Phobos spacecraft) and the escape rate recently estimated from ASPERA electron measurements on board Mars Express for solar minimum conditions (Sauvaud A., personal communication).

Sputterによる水と二酸化炭素の散逸量

37億年前からのHydrodynamic散逸の時代の水の損失

下線:[Leblanc and Johnson 2002]

上線:[Kranspolsky and Feldman 2001]

下図:上図の水損失の下限に一致する蓄積する二酸化炭素の損失率

散逸率の太陽サイクルに沿った変化

現在の散逸率計算

10倍増加を示唆(太陽風極小期に対して)

より早い時代

太陽サイクルが短く倍数が小さい。

上図の下線:★の年で太陽サイクルが変わらないなら10倍になる可能性がある。



早い時代の正確な太陽サイクル特に火星磁場枯渇の後の数百年間を知ることによって、水の大気散逸量を知るの難しい

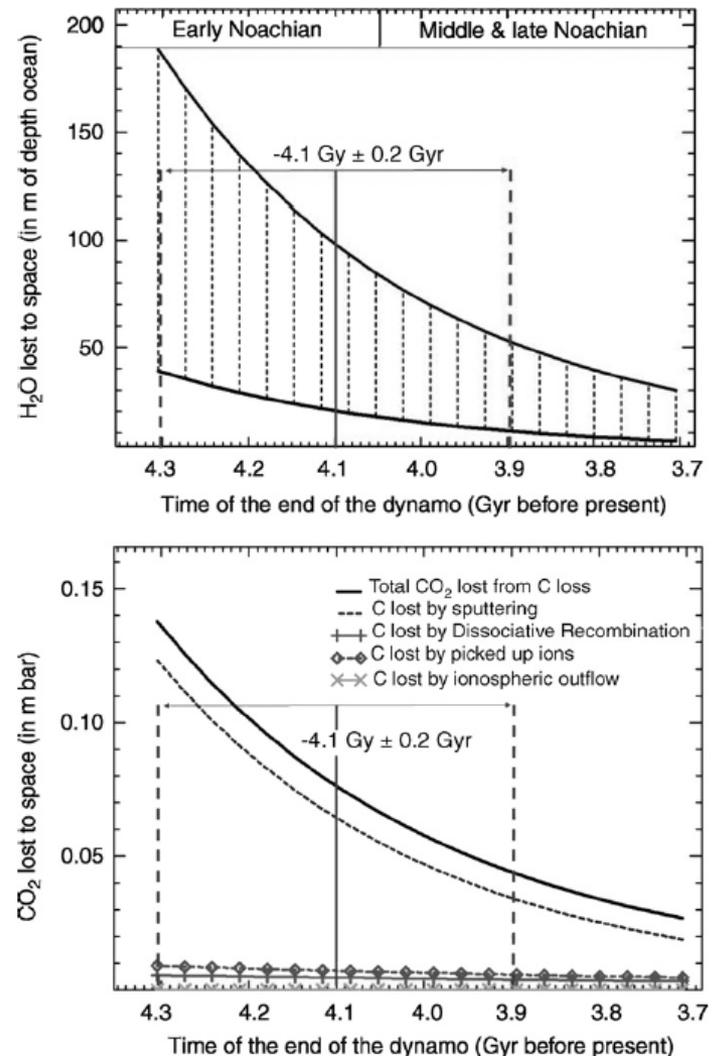


Fig. 5. Cumulate oxygen loss (upper panel) expressed in term of water loss (in depth of an ocean covering the whole surface of Mars) and cumulate carbon loss expressed in term of pressure of CO₂ (lower panel). We consider that any oxygen atom lost comes from a molecule of H₂O and any carbon atoms loss comes from a molecule of CO₂. Also indicated is the estimate of the time when the Martian dynamo collapsed. The two black solid lines correspond to a lower and upper estimates for the total water loss (see text for further explanations).

全損失に対して0.5mの不確定性

^{40}Ar の枯渇

- 地球の15倍の火星の ^{40}Ar の枯渇
 - 火星大気の放射性アルゴンの量: $6.3 \pm 1.1 \times 10^{-10} \text{g/g planet}$
 - 0.06 ± 0.01 地球大気の数値で正規化した場合

一般的な地球マンツルの脱ガス率: 50-60%
火星マンツルの脱ガス率: 30-40%

より多くのアルゴンが火星マンツルの中に保有

マンツルに多く含まれている分を補正

全火星アルゴンの90%、倍率にして 10 ± 3 が消失した。

Heavy bombardment時代以降の散逸: スパッタのトレーサー

Supttering

色々な大気成分に対する散逸効率

$$Y_{Ar}/Y_O = C_{Ar}/C_O \times Ues_{,O}/Ues_{,Ar}$$

$Y_{Ar} Y_O$: スパッタ率 アルゴンまたは酸素原子が火星のexobaseに衝突してできるピックアップ

$C_{Ar} C_O$: exobaseでのArとOの濃度

$Ues_{,O}/Ues_{,Ar}$: OとArの重力散逸エネルギー

$Ues_{,O} 2.1eV Ues_{,Ar} 5.25eV$

未知のパラメータ: 火星大気のAr濃縮

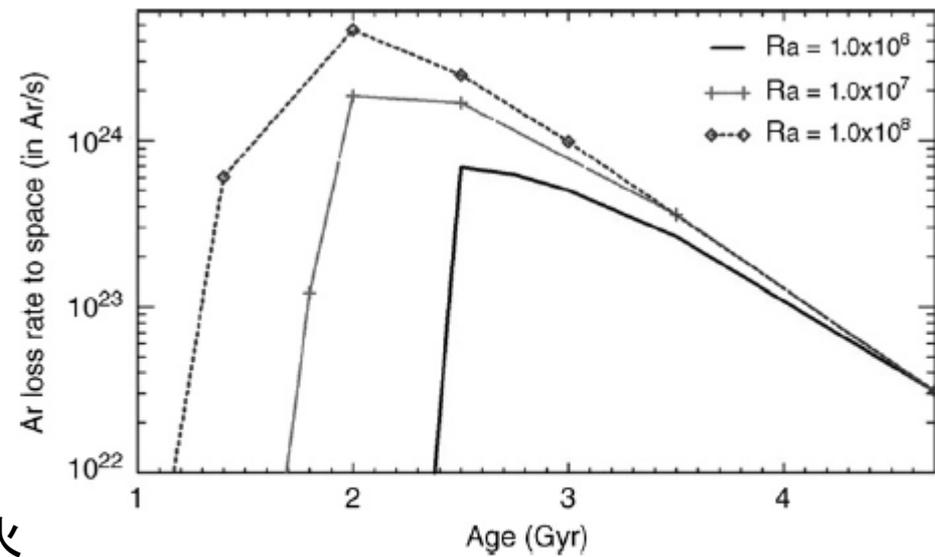


Fig. 6. Loss rate of Ar into space due to sputtering for the three values of the Rayleigh number given by Xie and Tackley (2004). Loss rates are calculated as described in the text.

これがわかるとArとOの散逸比率Fig4がわかる。

Arの収集率(現在は1.7%)をマントルから大気にArの脱ガスの割合と同じように過去進展したと仮定。

マントルのレイリー数Ra=10⁶,10⁷,10⁸に対してそれぞれ0.34, 1.22 2.86 ,barのアルゴンが失われた

現在の⁴⁰Arの分圧: 0.12mbar 90%のアルゴンが散逸したとすると、損失率
1.2mbar→Ra=10⁷

計測された希ガスの欠損

地球と比較した火星における希ガスの欠損

観測：散逸するときに分別して枯渇
軽いほどよく散逸。分別
分別の効果が強い。重力が弱いから

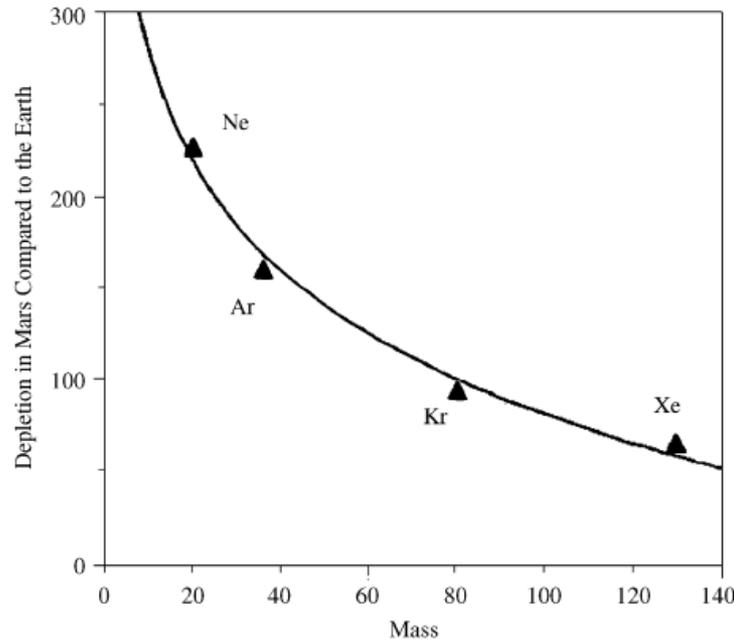


Fig. 7. Depletion of noble gases in the Martian atmosphere compared to Earth (from Jakosky and Jones, 1997).

希ガスの同位体スペクトル→初期の構成の違いを限定

炭素を含んだ隕石中の希ガス：enstatite隕石中の希ガス似ている。

地球と火星の大気が似ている—キセノンの欠乏の比較

隕石 と そのもとの惑星 拡散によって希ガスの一部をうしなう。

拡散
クリプトンやキセノンのような重イオンよりもNeArのような軽い気体を好んで損失)。

過去の散逸へのカギとしての 火星希ガスの同位体比

Table 1
Noble gas isotopic composition*

Ratio	Viking	SNC	Earth
$^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$		7-11?	9.8
$^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$		< 0.15	0.029
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	5.5 ± 1.5	3.4-4.0	5.32
$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	3000 ± 500	1900 ± 100	295.5
$^{82}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$		~0.210	0.202
$^{83}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$		~0.205	0.201
$^{86}\text{Kr}/^{84}\text{Kr}$		~0.296	0.305
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	2.5 (+2, -1)	2.60 ± 0.05	0.983
$^{131}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$		~0.8	0.789
$^{134}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$		~0.4	0.389
$^{136}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$		~0.4	0.329

*Source: Garrison and Bogard (1998); Ozima and Podosek (1983); Swindle (1995).
He以外の全てVikingランダーの質量分光分析器による観測

非放射性的同位体の比率の観測 $^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$
バイキングの値

- 地球のや隕石の値と(エラーバーを含んで)殆ど等しい。
- SNC(火星隕石)の値とは異なる。

火星隕石中の ^{38}Ar が相対的に豊富 ← 大気散逸(主にsputtering)の証拠

希ガスの詳細な研究(KrとかXeとか):火星隕石中の大気の解析から

ある一種の元素の同位体比率 - 異なる種類の元素の要素の比率とたいいて一致しない

- ❓地球、火星、金星の構成(元素や同位体)の違い←親である微惑星の時から存在したのか
 - ❓降着やその後の脱ガス、大気散逸と関連する過程—惑星の構成を変化させたのか
- 微惑星の間の初期的な変動によるものとする量を対比させることで散逸によって説明できるかもしれない。

弱磁場とクレーター

175kmのメッシュでダイポールモデルでつくった磁場モデル

いくつかのクレーター
磁場とあんまり関連ない

いくつかのクレーター
磁場してるー大きなdedaliaクレーター等

Dedaliaクレーターはダイナモの前に形成された。

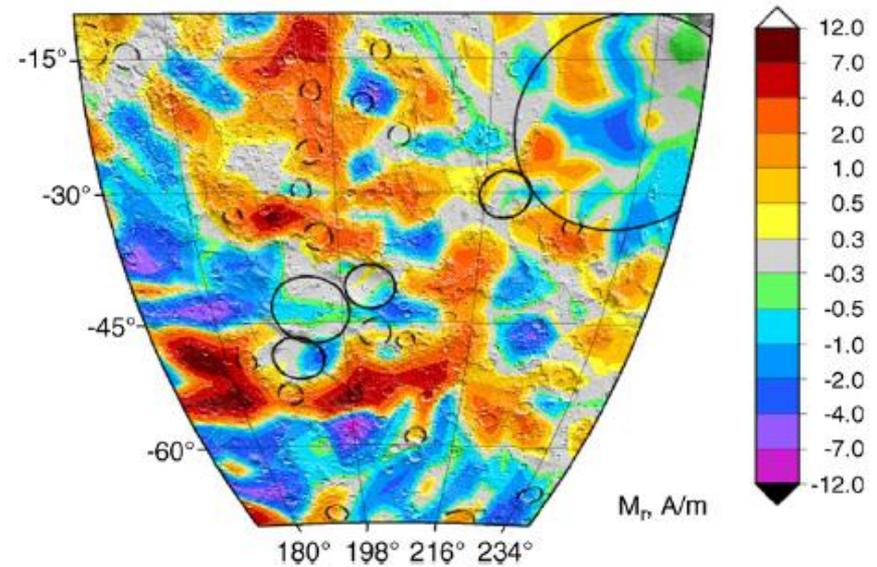


Fig. 8. Equivalent magnetization (radial component) of an equivalent dipole layer that could produce the observed magnetic field. Solid line circles denote craters for which one can look for demagnetization signature using the present-day model resolution (from West to East, Copernicus, Sirenum, Newton, Kovalsky, Daedalia). Dashed-line craters are between 100 and 300 km in diameter.

衝突クレーターの上の磁場

一様に磁化(2A/m)された40kmの厚みのプレート

クレーターの直径 : D

クレーターの深さ : $0.1 D$

クレーターの直径が100kmだったときの磁場

高度 h 100km から 400km

高度 100km-消磁場 16nT

高度 200km-消磁場 3nT

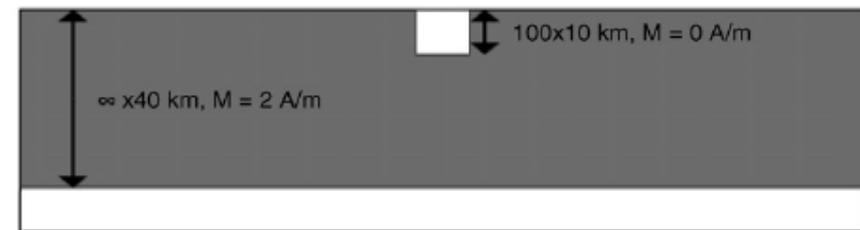
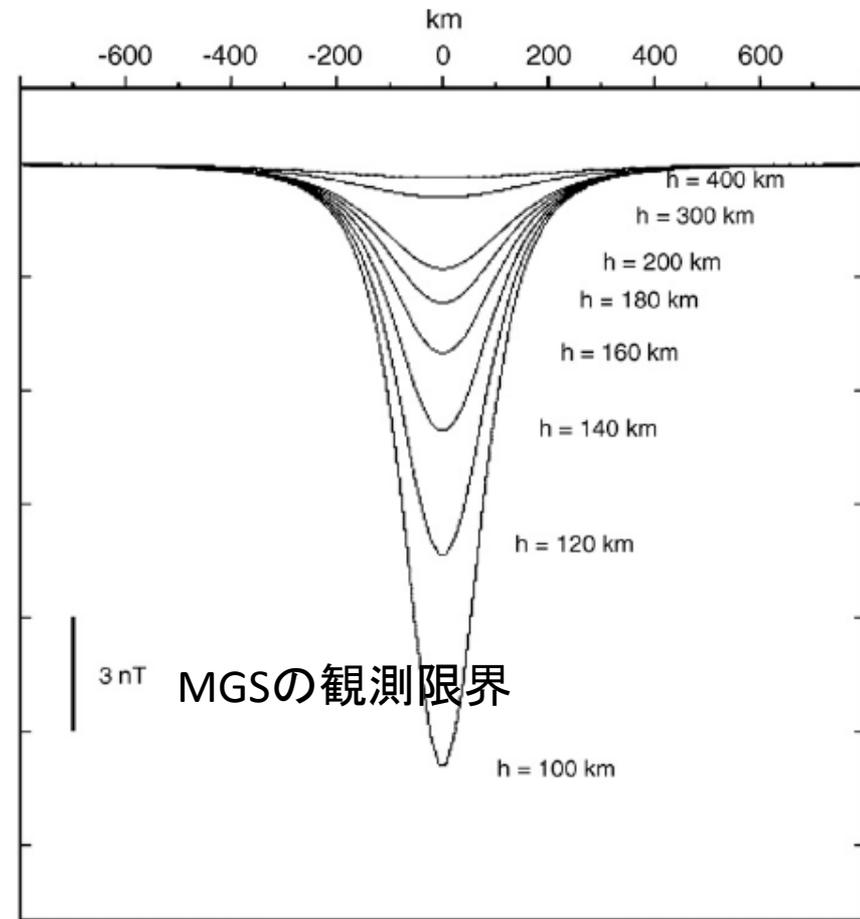


Fig. 9. (top) Magnetic field signature associated to a 100-km diameter partially demagnetized impact crater (white area, bottom) within a uniformly 2 A/m 40-k thick magnetized plate (gray area, bottom). The different lines (from bottom to top) correspond to different altitudes.

高度とクレーター半径による磁場強度

200km直径のクレーター
高度400kmで観測されない

個々のクレーターの特性に基づいて
ダイナモのタイミングを改善していける

200km高度よりも下での観測が必要

100~300kmのクレーター: 150~200個
磁気特性と時代の比較

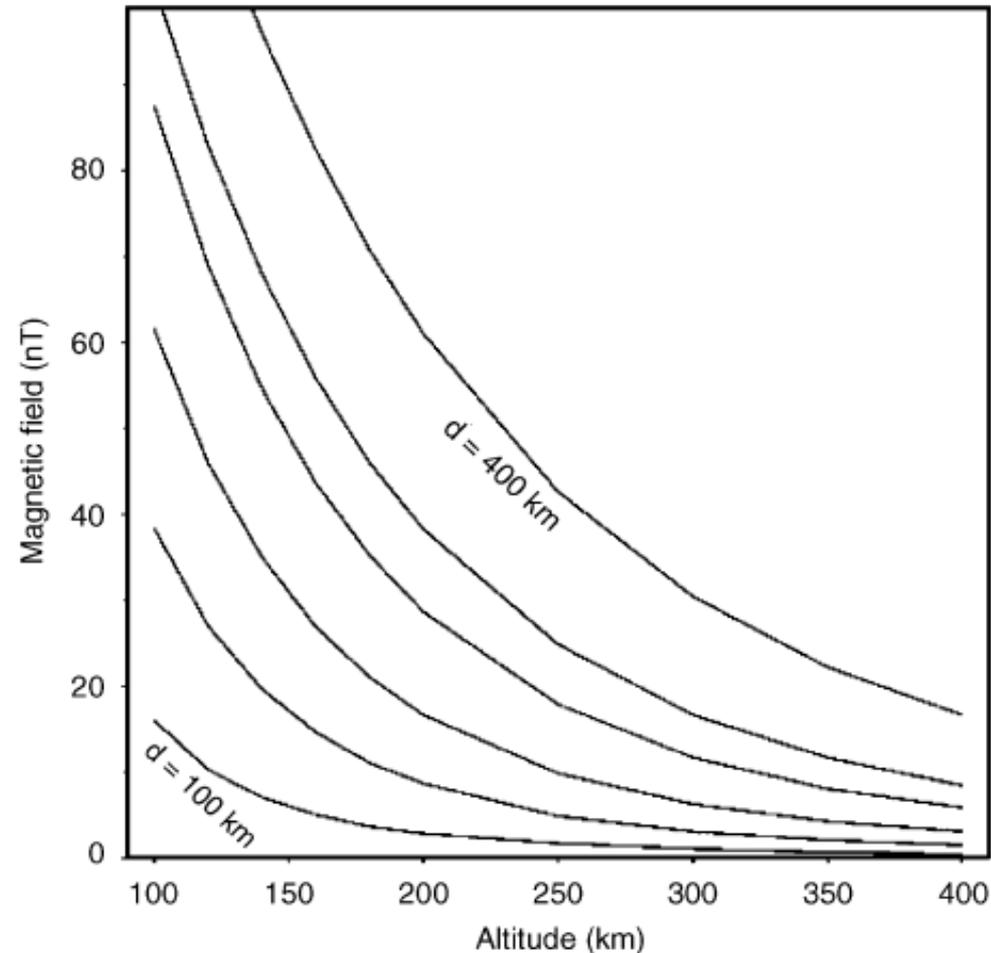


Fig. 10. Predicted magnetic field associated with different impact crater as a function of the altitude. Crater diameter are 100km (lowest one), 150km, 200 km, 250 km, and 300 km (top one).

ダイナモのタイミングの決定

まとめ

火星大気散逸
スパッタリングとその太陽活動に対する効果

数百メートルの水
100mbarの二酸化炭素

火星の気候の発展の理解

中性粒子の観測
太陽活動度への依存性

ノアキアンで水が液体だったか
どこに散逸したのか
磁場は大気の散逸を伏せることができるのか
揮発性の物質が特に地下に蓄えられているものは？

Table 2
Example of payload

Magnetometer : sampling rate of 2–20 Hz, associated to a precise attitude determination
Energetic particle analyzer : thermal ions, pick-up ions, electrons, ENAs
Neutral and ion mass spectrometer : thermal neutrals, thermal/suprathermal ions, hot neutrals (sputtered neutrals)
Plasma package : n , T and v , electrostatic, electromagnetic waves
FUV-EUV spectrometer : 70–300 nm.
Radio science experiment : gravity field

Table 3
Budgets and parameters

Payload mass	30.5 kg
Power rate	30 W
Data rate	500 Mbits/day
Periapsis altitude	100–120 km
Apoapsis altitude	< 1500 km
Mission duration	2 years (1 Mars yr)
