

論文紹介

Mars' upper atmosphere and ionosphere at low, medium, and high solar activities: Implications for evolution of water

Vladmir A. Krasnopolsky, *J. Geophys. Res.*, 107(E12), 5128,
doi:10.1029/2001JE001809, 2002.

東北大学大学院理学研究科 寺田香織

論文の概要

- 高度 80 ~ 300 km における 11 種類の中性大気分子と 18 種類のイオン密度のモデリング
 - H_2 、H、HD、D に関わる全ての反応をモデル化
 - 各粒子種のカラム生成率・消失率の計算
- D/H 比 $\frac{\text{HD}/\text{H}_2}{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}}$ の計算
- 水素の熱的・非熱的散逸の同位体分別係数の計算、またその結果を用いてハイドロダイナミック・エスケープが終わった後から現在までの水の総流出量の計算
- ハイドロダイナミック・エスケープによる水の総流出量の計算

1. Introduction

- 火星の熱圏・電離圏の構造及び組成についてのデータは限られている。
 - Viking 衛星の着陸機
 - low solar activityの中性大気・イオン密度の高度分布、中性大気・電子・イオンの温度
 - Mariner 6号、7号、9号
 - 昼側の大気光紫外線分光データ、電波掩蔽データ
 - エアロブレーキング中のMars Global Surveyor
 - 太陽活動度毎の熱圏・電離圏の全体像を掴むためには、モデリングが必要。

1. Introduction

- 本論文では、HSTが D を観測したときの条件、FUSEが H₂ を観測したときの条件、Mariner 6号、7号がフライバイ中に水素コロナを観測したときの条件下における熱圏・電離圏を自己無撞着に解く。

Table 1. Conditions for the HST, FUSE, and M67 Observations of Mars

Observation	Date	$F_{10.7\text{ cm}}$	ρ	$F_{10.7\text{ cm}}/\rho^2$	L_S deg	T_{∞} K	Solar Activity
HST	21 Jan. 1997	70	1.666	25	68	200	low
FUSE	12 May 2001	140	1.512	61	160	270	medium
M67 ^a	2 Aug. 1969	178	1.425	88	200	350	high

^aThere was a 5-day interval between the Mariner 6 and 7 flybys, and the mean values are given.

- 水素の散逸、同位体分別、水環境の進化を理解するための本質的な要素である H₂、H、HD、D に関わる全ての反応をモデル化
 - H₂ と HD が CO₂⁺、O⁺、CO⁺、N₂⁺、N⁺、Ar⁺、及び O(¹D) と起こす反応、イオン化、光電子による解離

2. Model

- 支配方程式

- 球形大気の定常状態における連続の式（１次元極座標）

$$\frac{1}{r^2} \frac{d(r^2 \phi_i)}{dr} = P_i - n_i L_i$$

- フラックスの式

- 中性分子（大規模な風と乱流拡散による混合、及び分子拡散）

$$\phi_i = -(K + D_i) \frac{dn_i}{dr} - n_i \left[K \left(\frac{m}{k} \frac{g}{T} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dr} \right) + D_i \left(\frac{m_i}{k} \frac{g}{T} + \frac{1+\beta}{T} \frac{dT}{dr} \right) \right]$$

- イオン（大規模な風と乱流拡散による混合、及び両極性拡散）

$$\phi_i = -(K + D_{ai}) \frac{dn_i}{dr} - n_i \left[K \left(\frac{m}{k} \frac{g}{T_e + T_i} + \frac{1}{T_e + T_i} \frac{d}{dr} (T_e + T_i) \right) + D_{ai} \left(\frac{m_i}{k} \frac{g}{T_e + T_i} + \frac{1+\beta}{T_e + T_i} \frac{d}{dr} (T_e + T_i) \right) \right]$$

但し、 n ：数密度、 P ：生成、 L ：消失、 m ：平均分子質量、 β ：熱拡散係数
 $g = 372 (r/r_0)^2 \text{ cm s}^{-2}$: 重力加速度、 $r_0 = 3390 \text{ km}$ ：火星半径

2. Model

- 混合係数 $K(h)$
 - 3次元モデル [Bougher et al., 1999, 2000] の結果では、火星熱圏の混合過程は、
大規模な風 > 乱流拡散
 - 太陽活動度が高い程、風速は大きい
 - 高高度にいく程混合の度合いが大きい [Nier and McElroy, 1977; von Zahn et al., 1979]

$$K(h) = 1.2 \times 10^{12} \sqrt{\frac{T_{\infty}}{n(h)}} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

- 分子拡散係数 D_i [Marrero and Mason, 1972]
- 両極性拡散係数 D_{ai}

$$D_{ai} = \frac{k(T_e + T_i)}{m_i \sum v_{ik}}$$

k : Boltzmann 定数

2. Model

- イオン分子反応の Langevin 衝突周波数

$$\nu_{ik} = 2\pi \left(\frac{\alpha_k e^2}{\mu_{ik}} \right)^{1/2} n_k$$

α_k : 中性分子の分極率、 n_k : 中性分子の密度、 μ_{ik} : 換算質量

$$\frac{1}{\mu_{ik}} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_k}$$

- 温度分布の近似式

$$T(h) = T_\infty - (T_\infty - 125) \exp \left(- \frac{(h - 90 \text{ km})^2}{11.4 T_\infty} \right)$$

– T_∞ は外気圏の温度

- low solar activity : $T_\infty = 200 \text{ K}$ (Viking の観測に合うように)
- medium solar activity : $T_\infty = 270 \text{ K}$ (観測値や 3 次元モデルの結果)
- high solar activity : $T_\infty = 350 \text{ K}$ (Mariner 6号、7号の観測値)

2. Model

- 計算領域
 - 下側境界：高度 80 km
 - 高度 80 km 以下では乱流運動により大気が攪拌し、大気組成は高度に対して一定
 - 上側境界：高度 300 km (ionopause)
 - 天頂角 60° (昼側の平均的なモデル)
- 格子幅：1 km
- 境界条件
 - 高度 80 km
 - 親となる分子の密度
 - H_2 の密度は、高度 140 km より上空のカラム量が FUSE の観測結果と合うように設定
 - HD の密度は、ハッブル宇宙望遠鏡が観測した D の Lyman α の強度に合うように設定
 - 速度

2. Model

- 境界条件（続き）

- 高度 300 km

- 速度

- H_2 、H、HD、D、He

- 熱的散逸：ジーンズ・エスケープの effusion velocity

- 非熱的散逸：ionopause 上空での 太陽風プロトンとの電荷交換反応、電子衝突電離、電子衝突解離、光電離

- その他の中性分子

- 散逸は無し

- イオン分子

- $3 \times 10^4 \text{ cm s}^{-1}$

- ionopause 近傍での夜側への流れ

$$v = \frac{1}{\pi} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \int_{v_e}^{\infty} v^3 \exp\left(\frac{-mv^2}{2kT} \right) dv$$

v_e : 脱出速度

Table 3. Thermal and Nonthermal Escape Velocities of H_2 , H, HD, D, and He^a

T_{∞} K	H_2		H		HD		D		He	
	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.
200	0.48	12.9	387	38	5×10^{-4}	8.2	0.48	17	6×10^{-7}	4.2
270	15.8	18.2	2114	56	0.11	11.5	15.8	24	7×10^{-4}	5.7
350	151	28	6333	89	3.3	17.7	151	37	0.07	

^aVelocities are in cm s^{-1} . Thermal and nonthermal escape velocities are left and right columns, respectively, for each species.

2. Model

- 太陽放射モデル
 - 50 ~ 1050 Å : Richards et al. [1994]
 - 1100 ~ 1970 Å : Woods et al. [1996]
 - 与えられた太陽活動度間の直線近似により、任意の太陽活動度での太陽放射を計算
- HD とイオンの反応における反応係数
 - H₂ の反応係数を質量比の ½ 乗 (0.82) で補正した値
 - H₂ と HD のイオンとの反応における反応係数の比は、イオン分子反応の Langevin 衝突周波数で近似される。

$$v_{ik} = 2\pi \left(\frac{\alpha_k e^2}{\mu_{ik}} \right)^{1/2} n_k$$

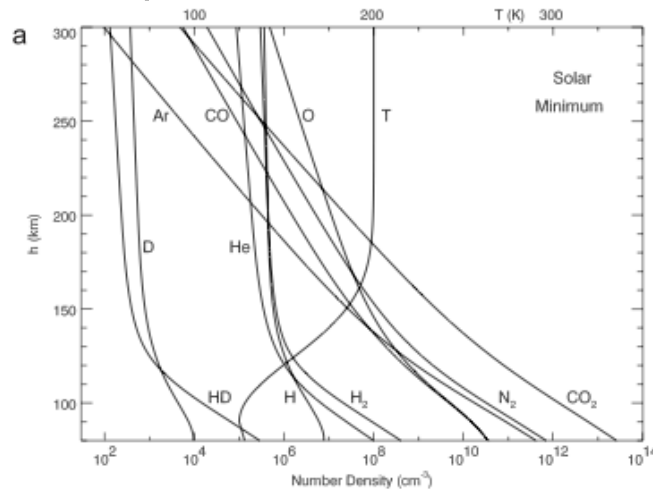
2. Model

- NO の密度
 - 光化学モデルでは解けない
 - $N(^2D)$ の生成率のわずかな違いで密度分布を大きく変化
 - $N(^2D)$ の生成率は、反応物の振動準位に依存し、不確定
 - 拡散と混合のモデルを結合した静水圧平衡により計算
 - 高度 110 km の密度は Viking の観測値を用いる。
- N の密度
 - NO と同じ理由で光化学モデルでは解けない。
 - H の平衡には N はほとんど関係しないので、求めている。

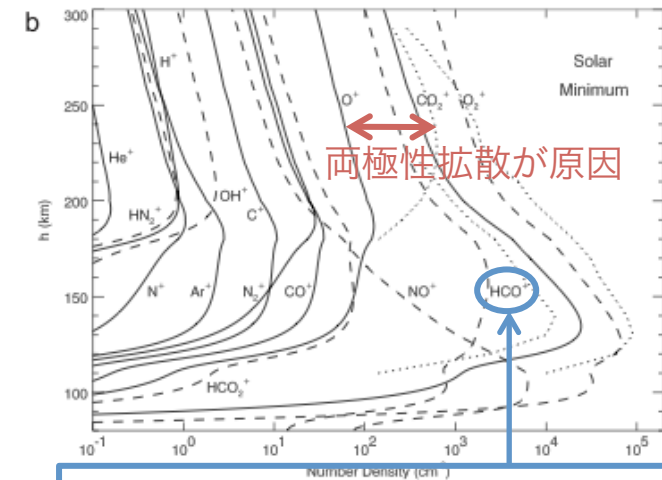
3. Results

- low solar activity (Figure 1.)

– 中性大気組成



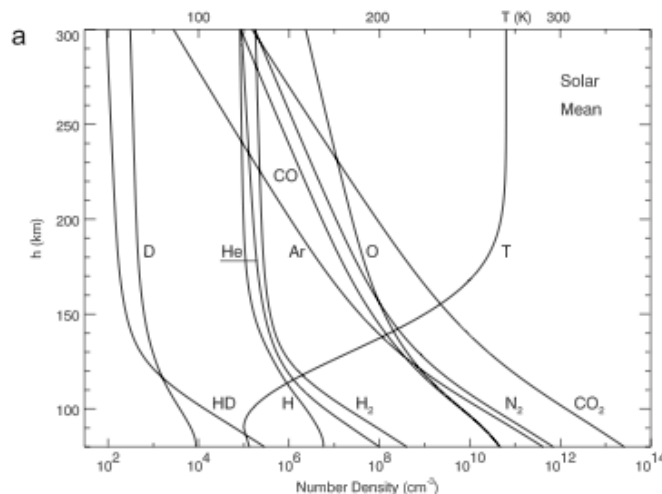
– イオン組成



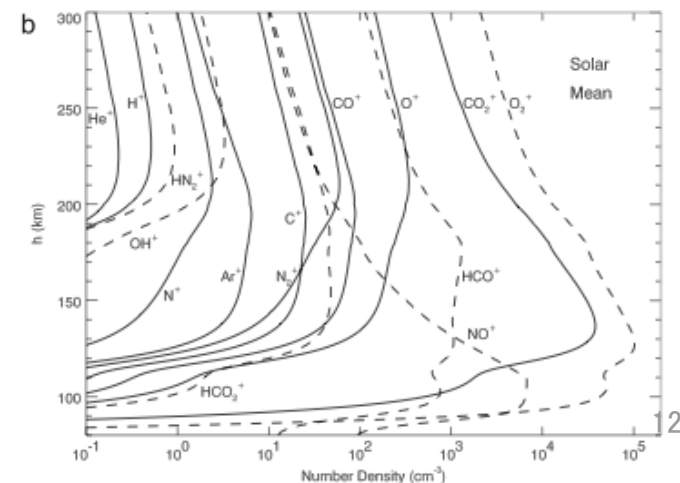
従来のモデルには入っていなかった成分
O₂⁺ と質量が近く、観測時には注意が必要

- medium solar activity (Figure 2.)

– 中性大気組成



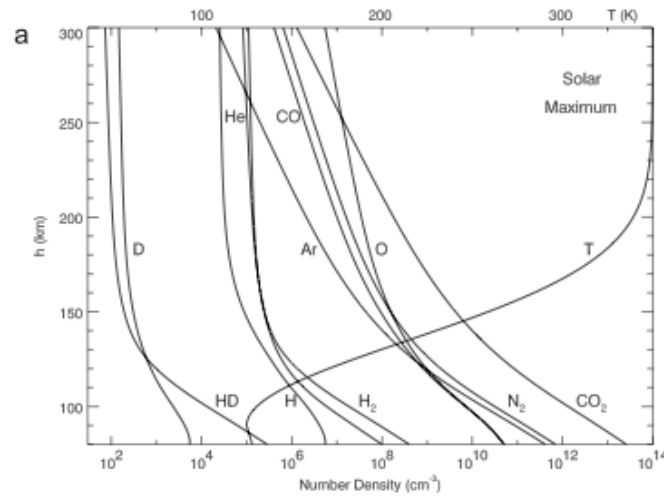
– イオン組成



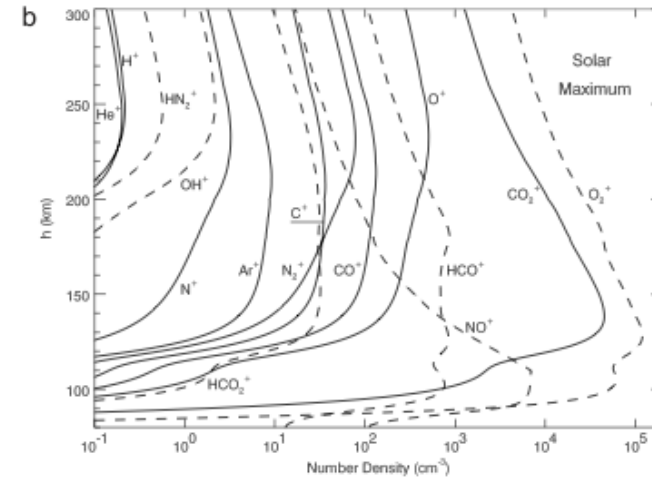
3. Results

- high solar activity (Figure 3.)

– 中性大気組成



– イオン組成



- モデリング結果のまとめ (Table 4.)

T_{∞} K	200	270	350
$[O/CO_2]_{125 \text{ km}}$ %	0.96	1.28	1.40
$[O_2^+/CO_2^+]_{130 \text{ km}}$	2.82	3.00	3.14
$n_{\text{emax}} (\times 10^5 \text{ cm}^{-3})$	0.90	1.36	1.59
$\{H_2\}_{140 \text{ km}} (\times 10^{13} \text{ cm}^{-2})$	1.60	1.17	0.88
$[D]_{250 \text{ km}} (\text{cm}^{-3})$	450	357	165
$[H]_{250 \text{ km}} (\times 10^4 \text{ cm}^{-3})$	39.5	8.86	2.74
$\phi_{H_2} (\times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.47	0.73	2.33
$\phi_H (\times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	1.81	2.11	1.93
$\phi_{HD} (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	1278	1274	1821
$\phi_D (\times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.77	1.46	3.27
f	0.055	0.082	0.167

H_2 and HD densities at 80 km are chosen to fit the observed values of $\{H_2\}$ and $[D]$ (bold). Escape fluxes refer to Mars' surface. Isotope fractionation factor for hydrogen escape averaged over the solar cycle is $f=0.105$.

3.1 Fractionation of Deutrium

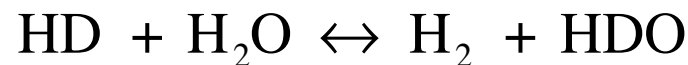
本モデルで得られた H_2 の D/H 比 $R = \frac{\text{HD}/\text{H}_2}{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}} = 0.414$

但し、 $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O} = 2 \times 5.5 \times (1.56 \times 10^{-4})$

- $\text{HDO}/\text{H}_2\text{O} \approx 2 \text{ D/H}$
- 火星大気中の水蒸気の D/H 比は、SMOW（地球の標準平均海水）の 5.5 倍 [Owen et al., 1988]
 - Owen et al. [1988]
ハワイのマウナ・ケア山のカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡による HDO の赤外吸収バンド ν_1 の観測
- SMOW の D/H 比 $= 1.56 \times 10^{-4}$

3.1 Fractionation of Deutrium

- HD と HDO 間の D の分配は速度論的制御か熱力学的制御か？
 - photochemical model を用いて速度論的制御で計算した D/H 比は $R = 1.6$ [Yung et al., 1988]
 - ハッブル宇宙望遠鏡が観測した D と Mariner 6、7号が観測した H から、モデル計算により求めた HD と H_2 の値を用いて計算した D/H 比は $R = 0.09 \pm 0.04$ [Krasnopolsky et al., 1998]
 - Krasnopolsky et al. [1998] は、 H_2 の life time (~ 1200 年) よりも HD の life time の方が短いため、長い年月が経つと H_2O との衝突により HD が失われる（熱力学的制御）と示唆



- 問題点： $R = 0.09 \pm 0.04$ になるためには、正反応の反応速度定数が $k \geq 10^{-23} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ となり、検査室測定によって得られている $10^{-33} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$ [Lecluse and Robert, 1994] よりも遥かに大きい

3.1 Fractionation of Deutrium

- 同位体分別による火星下層・中層大気における D の希釈化
 - 同位体分別要因
 - 光分解
 - HDO と H₂O の零点振動エネルギーの違いにより、HDO の方が光吸収断面積が小さく、光分解速度が遅い。[Yung and Miller, 1997]
 - HDO の 1900 Åでの光分解は、H₂O の 1/2.5 倍であり [Cheng et al., 1999]、H₂O が濃縮する。
 - 凝縮
 - 重い HDO の方が飽和水蒸気圧が低い。
 - hygropause 上空で HDO が優先的に凝縮するため、H₂Oが濃縮する 。[Fouchet and Lellouch, 2000]
- 同位体分別効果により、H₂ の D/H 比は H₂O の D/H 比の 1/3.7 倍になり、Yung et al. [1988] の R の値も 1/3.7 倍に訂正される。[Krasnopolsky, 2000, 2001]

$$R = 1.6/3.7 = 0.43$$

3.1 Fractionation of Deuterium

- H_2 の混合比
 - ハッブル宇宙望遠鏡の観測結果から HD を計算するのに使用したモデルの下層における H_2 の混合比は 40 ppm。
 - FUSE の観測及び本モデルの H_2 の混合比は 1/2.7 倍 (~ 15 ppm)。
- 同位体分別と下層における H_2 の混合比の違いを考慮すると、理論による予測値 [Yung et al., 1998 (Krasnopolsky, 2000 による修正)] とハッブル宇宙望遠鏡の観測結果、本モデルの H_2 の D/H 比が一致
 - D/H 比を合わせるための特別な操作はしていない。
 - 本モデルの妥当性の根拠
 - HD と HDO 間の D の分配は、熱力学的制御ではなく光化学の速度論的制御を受けている。

3.1 Fractionation of Deutrium

- hygropause 上空での D/H 比の減少に関するあまり解明されていない2つの要素 [Fouchet and Lellouch, 2000]
 - ① 上昇する大気分子中での氷粒子の降水効率
 - ② 230 K より低温での水蒸気と氷間の D の分別
 - Fouchet and Lellouch [2000] の hygropause 上空での凝縮による同位体分別モデルは、これらの未解明要素により D の稀釈が 20 %から 2 桁程度変動する。
- Krasnopolsky [2000] では、水蒸気中の D/H 比が地球大気と同じく 1/3 倍になるような中間の値を使用。
 - 稀釈が極端に強い値を用いると R の値はさらに 7 %減少する。
- 同位体分別（光分解 + 凝縮）により D/H 比が 1/9.5 倍になるとしているBertaux and Montmessin [2001] は誤り。
 - 凝縮による同位体分別効果を過大評価している。
 - 計算は極端な条件（遠日点, hygropause 高度 7 km）で行っているが、比較している同位体分別の効果が無いときの値は、平均的な条件のモデルであり hygropause 高度が 25 km の Nair et al. [1994] のもの。

3.2 Loss of Water

$$\begin{aligned}\text{現代の大気からの水の消失} &= \frac{1}{2} \phi_H \\ &\approx 1.1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \quad (\text{for all solar activity})\end{aligned}$$

本モデルで得られた同位体分別係数

$$f = \frac{\phi_D / \phi_H}{\text{D/H}} = \begin{cases} 0.055 & (\text{low solar activity}) \\ 0.082 & (\text{medium solar activity}) \\ 0.167 & (\text{high solar activity}) \end{cases}$$

季節的氷冠の D/H 比

太陽活動度平均 $f = 0.105$

但し、 $\phi_D = \phi_D + \phi_{HD}$, $\phi_H = \phi_H + 2\phi_{H_2}$

T_{∞} K	200	270	350
$[\text{O}/\text{CO}_2]_{125 \text{ km}}, \%$	0.96	1.28	1.40
$[\text{O}_2^+/\text{CO}_2^+]_{130 \text{ km}}$	2.82	3.00	3.14
$n_{\text{emax}} (\times 10^5 \text{ cm}^{-3})$	0.90	1.36	1.59
$\{\text{H}_2\}_{140 \text{ km}} (\times 10^{13} \text{ cm}^{-2})$	1.60	1.17	0.88
$[\text{D}]_{250 \text{ km}} (\text{cm}^{-3})$	450	357	165
$[\text{H}]_{250 \text{ km}} (\times 10^4 \text{ cm}^{-3})$	39.5	8.86	2.74
$\phi_{\text{H}_2} (\times 10^7 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.47	0.73	2.33
$\phi_{\text{H}} (\times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	1.81	2.11	1.93
$\phi_{\text{HD}} (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	1278	1274	1821
$\phi_{\text{D}} (\times 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$	0.77	1.46	3.27
f	0.055	0.082	0.167

H_2 and HD densities at 80 km are chosen to fit the observed values of $\{\text{H}_2\}$ and $[\text{D}]$ (bold). Escape fluxes refer to Mars' surface. Isotope fractionation factor for hydrogen escape averaged over the solar cycle is $f = 0.105$.

Table 4.

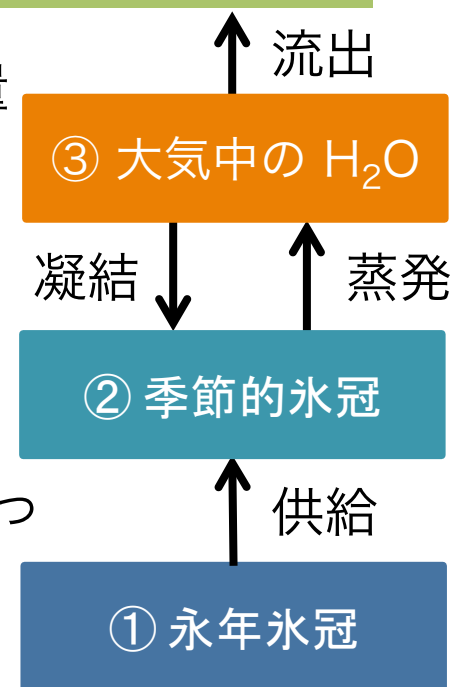
3.2 Loss of Water

- hydrodynamic escape 後から現在までの水の総流出量
3-reservoir モデル [Krasnopolsky, 2000]

- ① 永年氷冠
- ② 季節的氷冠
- ③ 大気中の水蒸気

①の D/H 比は 38 年前に hydrodynamic escape が終わったときの値 ($(D/H)_0 = 1.9 \times (D/H)_{SMOW}$) [Leshin, 2000]

②と③はよく循環しており、D/H 比は等しく $5.5 \times (D/H)_{SMOW}$



季節的氷冠中の D の微分方程式は $\frac{dD}{dt} = \phi_H(t) \left(\frac{D}{H} \right)_0 - \phi_D(t)$

これを解いて $r(t) = \frac{1}{f} - \left(\frac{1}{f} - 1 \right) e^{-\alpha(t)f}$

$$\therefore \alpha = \frac{1}{f} \ln \frac{1-f}{1-fr}$$

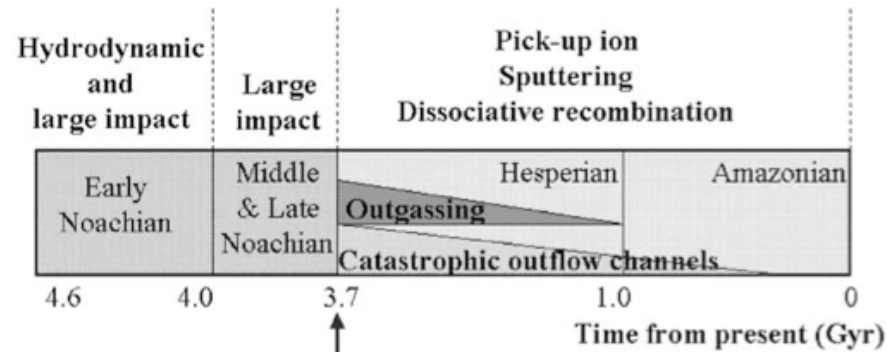
但し、 $\alpha = \frac{\text{total loss of H}_2\text{O}}{\text{water abundance in reservoir 2}}, \quad r = \frac{D/H}{(D/H)_0} = \frac{5.5}{1.9} = 2.4, \quad f = \frac{\phi_D / \phi_H}{D/H} = 0.105$

3.2 Loss of Water

- hydrodynamic escape が終わった 38 億年前から現在までの H_2O の総流出量は、 $\sim 30 \text{ m planetwide}$
 - 季節的氷冠に蓄えられている H_2O の量は $\sim 14 \text{ m planetwide}$
 - 地中の H_2O と大気中の H_2O が循環していた場合、流出量はもっと増える。
 - 地中には全球を $\sim 100 \text{ m}$ 覆う程の H_2O が存在する。
 - 隕石の解析から、浅いところに存在する H_2O の D/H 比は大気中の H_2O の $1/2.6$ 倍。地中深くに存在する H_2O はもっと D/H 比が減少している可能性がある。
 - 地中の H_2O は時々地表に噴出している可能性があるが、どの程度大気の H_2O と同位体交換されるかは不明。
 - この期間の彗星による H_2O の流入は $\sim 0.5 \text{ m planetwide}$
 - 地球と金星における流入量 [Grinspoon and Lewis, 1988] から計算
 - 熱的・非熱的散逸量 ($\sim 30 \text{ m planetwide}$) と比較してはるかに少なく、無視できる。

3.2 Loss of Water

大気散逸過程の変遷



[Chassefiere et al., 2007]

- Hydrodynamic escape
 - hydrodynamic escape が起こる条件
 - 液体の水が大量に存在している。
 - 大気中の H_2O が増大している。
 - 金星の研究結果では、大気中の H_2O と CO_2 の体積比が $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2 > 0.6$
 - hydrodynamic escape は、 H_2O が地中の鉄と反応して放出された H_2 により、 H_2 が増大することから始まる。
$$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeO} + \text{H}_2$$

3.2 Loss of Water

- hydrodynamic escape が起こる以前の火星における H_2O の総量 H_2O_i は 1.25 km planetwide 以上

$$\frac{\text{H}_2\text{O}_i}{\text{H}_2\text{O}_e} = 1.9^{1/(1-0.8)} = 25$$

- 始源の水の D/H 比は地球と同じ。 $(\text{D}/\text{H})_0 = (\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}$
 - 地球よりも小さいかもしれない？
 - 火星のマグマは D が少ない [Boctor et al., 2002]
- hydrodynamic escape 後の D/H 比は、 $(\text{D}/\text{H})_e = 1.9 \times (\text{D}/\text{H})_{\text{SMOW}}$ [Leshin, 2000]
- $\text{H}_2 / \text{CO}_2 < 0.5$ の条件下での hydrodynamic escape による同位体分別係数は $f_h = 0.8$ [Zahnle et al., 1990]
- hydrodynamic escape 後の火星に存在した H_2O の総量 H_2O_e (氷冠に存在する量 + 地中に存在する量 + 散逸した量) は、50 m planetwide 以上。
- 地球の海は 1 km planetwide (火星規模の惑星として) であり、過去の火星は現在の地球よりも H_2O が豊富だった。

3.2 Loss of Water

- O、C の流出から見積もった、この 38 億年間の H_2O の総流出量は 11 ~ 50 m planetwide [Kass, 1999; Luhmann, 1997]。
 - H_2O の流出フラックス $\phi_{\text{H}_2\text{O}} = \phi_{\text{O}} - 2\phi_{\text{C}}$ (太陽の EUV 放射強度、太陽風の状態に依存する) を 38 億年の期間に渡り積分する。
 - CO_2 のピックアップ及びスパッタリングによる流出量が大きく訂正される可能性がある。[Wood et al., 2002]
- 自転軸の傾斜角のミランコビッチ・サイクル (周期 $\sim 10^5$ 年) で水素と酸素の流出量は釣り合う。

$$2(\Phi_{\text{H}} + 2\Phi_{\text{H}_2}) = \Phi_{\text{O}} - 2\Phi_{\text{C}}$$

- 酸素の流出フラックスは自転軸の傾斜角に依存しない
- 水素の流出フラックスは自転軸の傾斜角に依存する
- 現在の流出フラックスは、 $\phi_{\text{H}} + 2\phi_{\text{H}_2} = 1.5\phi_{\text{O}}$

- $\phi_{\text{O}} = 7 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- 酸素の流出フラックスから見積もられる H_2O の流出フラックスが、現在のミランコビッチ・サイクルでの (平均) 流出フラックスを表す。

3.3 Ionospheric Composition at Various Solar Activity

H₂ の解離に関わる反応、またその反応が H₂ の総消失量に占める割合 (Table 2.)

総消失量に占める割合				総消失量に占める割合			
	Reaction	Rate Coefficients	Column Rate		Reaction	Rate Coefficients	Column Rate
1	CO ₂ + hν → CO + O	λ < 2274 Å	2.61 + 11	44	O ⁺ + H → H ⁺ + O	5.7 × 10 ⁻¹⁰ (T/300) ^{0.36}	2.83 + 5
2	CO ₂ ⁺ + e	λ < 902 Å	1.24 + 10	45	C ⁺ + CO ₂ → CO ⁺ + CO	1.1-9	7.30 + 8
3	O ⁺ + CO + e	λ < 650 Å	1.09 + 9	46	C ⁺ + NO → NO ⁺ + C	5.2-10	2.87 + 4
4	CO ⁺ + O + e	λ < 636 Å	8.72 + 8	47	N ₂ ⁺ + CO ₂ → CO ₂ ⁺ + N ₂	7.7-10	2.91 + 8
5	C ⁺ + O ₂ + e	λ < 546 Å	5.45 + 8	48	N ₂ ⁺ + O → NO ⁺ + N	1.3-10	2.40 + 6
6	CO + hν → CO ⁺ + e	λ < 885 Å	9.09 + 7	49	N ₂ ⁺ + CO → CO ⁺ + N ₂	7.4-11	5.22 + 5
7	C ⁺ + O + e	λ < 555 Å	9.74 + 6	50	N ₂ ⁺ + H ₂ → HN ₂ ⁺ + H	1.5-9 ^d	2.41 + 5
8	O ⁺ + C + e	λ < 502 Å	7.57 + 6	51	N ⁺ + CO ₂ → CO ₂ ⁺ + N	1-9	1.69 + 7
9	N ₂ + hν → N ₂ ⁺ + e	λ < 796 Å	2.62 + 8	52	N ⁺ + H ₂ → NH ⁺ + H	10 ⁻⁹ e ^{85/T}	9083
10	N ₂ ⁺ + N + e	λ < 510 Å	8.91 + 6	53	Ar ⁺ + CO ₂ → CO ₂ ⁺ + Ar	5-10 ^f	7.00 + 7
11	O + hν → O ⁺ + e	λ < 911 Å	1.20 + 8	54	Ar ⁺ + CO → CO ⁺ + Ar	4.4-11 ^f	9.49 + 4
12	H ₂ + hν → H ₂ ⁺ + e	λ < 803 Å	6.83 + 4	55	Ar ⁺ + N ₂ → N ₂ ⁺ + Ar	1.1 × 10 ⁻¹¹ × 300/T _i ^g	7.98 + 4
13	H ⁺ + H + e	λ < 686 Å	1.31 + 5	56	Ar ⁺ + H ₂ → ArH ⁺ + H	8.9-10 ^f	1.95 + 4
14	H + hν → H ⁺ + e	λ < 911 Å	1.00 + 5	57	H ₂ ⁺ + CO ₂ → HCO ₂ ⁺ + H	2.35-9	9.18 + 4
15	Ar + hν → Ar ⁺ + e	λ < 783 Å	5.02 + 7	58	H ₂ ⁺ + N ₂ → HN ₂ ⁺ + H	2-9	3529
16	He + hν → He ⁺ + e	λ < 502 Å	1.12 + 5	59	H ₂ ⁺ + O → OH ⁺ + H	1.5-9	2823
17	CO ₂ + e → CO ₂ ⁺ + e + e	-	5.67 + 9	60	H ₂ ⁺ + CO → HCO ⁺ + H	2.16-9	1896
18	CO ⁺ + O + e + e	-	3.18 + 8	61	H ⁺ + CO ₂ → HCO ⁺ + O	3.5-9	6.33 + 5
19	O ⁺ + CO + e + e	-	3.24 + 8	62	H ⁺ + O → O ⁺ + H	7.3 × 10 ⁻¹⁰ (T/300) ^{0.23} e ^{-226/T}	1.76 + 4
20	C ⁺ + O ₂ + e + e	-	1.75 + 8	63	He ⁺ + CO ₂ → CO ⁺ + O + He	1-9	1.16 + 5
21	CO + e → CO ⁺ + e + e	-	2.95 + 7	64	He ⁺ + N ₂ → N ⁺ + N + He	1-9	1.15 + 4
22	C ⁺ + O + e + e	-	1.83+6	65	He ⁺ + CO → C ⁺ + O + He	1.6-9	8857
23	O ⁺ + C + e + e	-	1.83 + 6	66	O ₂ ⁺ + NO → NO ⁺ + O ₂	4.5-10	7.08 + 8
24	N ₂ + e → N ₂ ⁺ + e + e	-	6.51 + 7	67	OH ⁺ + CO ₂ → HCO ₂ ⁺ + O	1.4-9	1.32 + 6
25	N ⁺ + N + e + e	-	7.49 + 6	68	OH ⁺ + O → O ₂ ⁺ + H	7.1-10	2.41 + 5
26	O + e → O ⁺ + e + e	-	5.07 + 7	69	NH ⁺ + CO ₂ → HCO ₂ ⁺ + N	1.1-9	6380
27	H ₂ + e → H ₂ ⁺ + e + e	-	3.26+4	70	NH ⁺ + O → OH ⁺ + N	1-9	2342
28	H ⁺ + H + e + e	-	6.54 + 4	71	NH ⁺ + CO → HCO ⁺ + N	4.4-10	162
29	H + e → H ⁺ + e + e	-	4.48 + 4	72	HN ₂ ⁺ + CO ₂ → HCO ₂ ⁺ + N ₂	1-9	2.18 + 5
30	Ar + e → Ar ⁺ + e + e	-	2.01 + 7	73	HN ₂ ⁺ + O → OH ⁺ + N ₂	1.4-10	1.33 + 4
31	He + e → He ⁺ + e + e	-	3.90 + 4	74	ArH ⁺ + CO ₂ → HCO ₂ ⁺ + Ar	1.1-9 ^f	1.95 + 4
32	H ₂ + e → H + H + e	-	5.22 + 6	75	HCO ₂ ⁺ + O → HCO ⁺ + O ₂	1-9	6.45 + 7
33	CO ₂ ⁺ + O → O ⁺ + CO ₂	9.6-11	4.72 + 9	76	HCO ₂ ⁺ + CO → HCO ⁺ + CO ₂	7.8-10	3.25 + 7
34	CO ₂ ⁺ + O → O ₂ ⁺ + CO	1.64-10	8.07 + 9	77	CO ₂ ⁺ + e → CO + O	3.8 × 10 ⁻⁷ (300/T _e) ^{0.5}	7.52 + 9
35	CO ₂ ⁺ + H ₂ → HCO ₂ ⁺ + H	8.7 ^b	1.05 + 8	78	O ₂ ⁺ + e → O + O	2 × 10 ⁻⁷ (300/T _e) ^{0.7}	1.36 + 10
36	CO ₂ ⁺ + H → HCO ⁺ + O	4.7-10 ^b	2.25 + 7	79	NO ⁺ + e → N + O	4.3 × 10 ⁻⁷ (300/T _e) ^{0.37}	7.32 + 8
37	CO ₂ ⁺ + NO → NO ⁺ + CO ₂	1.2-10	2.17 + 7	80	HCO ⁺ + e → CO + H	1.1 × 10 ⁻⁷ × 300/T _e	1.17 + 8
38	CO ⁺ + CO ₂ → CO ₂ ⁺ + CO	1-9	2.05 + 9	81	HCO ₂ ⁺ + e → CO ₂ + H	3.4 × 10 ⁻⁷ (300/T _e) ^{0.5}	9.69 + 6
39	CO ⁺ + O → O ⁺ + CO	1.4-10	8.39 + 6	82	O(¹ D) + CO ₂ → O + CO ₂	7.4 × 10 ⁻¹¹ e ^{120/T_e}	2.72 + 11
40	CO ⁺ + H ₂ → HCO ⁺ + H	1.5-9 ^b	4.73 + 5	83	O(¹ D) → O + hν	τ = 110 s	9.07 + 8
41	CO ⁺ + H → H ⁺ + CO	4-10 ^b	5.30 + 4	84	O(¹ D) + H ₂ → OH + H	1.75-10 ^g	9.93 + 6
42	O ⁺ + CO ₂ → O ₂ ⁺ + CO	9.4-10	6.28 + 9	85	OH + O → O ₂ + H	2.2 × 10 ⁻¹¹ e ^{120/T_e}	9.93 + 6
43	O ⁺ + H ₂ → OH ⁺ + H	1.35-9 ^c	1.60 + 6	86	H ₂ + O → OH + H	3.4 × 10 ⁻¹³ (T/300) ^{2.7} e ^{-3165/T_e}	122

- 従来のモデル (Anderson, 1974; Yung et al., 1988; Nair et al., 1994) は H₂ の消失は CO₂⁺ との反応のみとしていたが、その他の反応も効いている。⁹⁵

まとめ

- $\frac{\text{HD}/\text{H}_2}{\text{HDO}/\text{H}_2\text{O}} = 0.4$
 - HD と HDO 間の D の分配は光化学の速度論的制御を受けている。
 - H_2O の光解離、凝縮による同位体分別が効いている。
- 水素の熱的・非熱的散逸による同位体分別係数は
$$f = \frac{\phi_{\text{D}}/\phi_{\text{H}}}{\text{D}/\text{H}} = \begin{cases} 0.055 & (\text{low solar activity}) \\ 0.082 & (\text{medium solar activity}) \\ 0.167 & (\text{high solar activity}) \end{cases}$$
- 熱的・非熱的散逸によって失われた水は 30 m planetwide 以上
- ハイドロダイナミック・エスケープによって失われた水は 1.25 km planetwide 以上
- この 38 億年間の彗星による水の流入は無視できる程少ない。
- 火星電離圏には HCO^+ が豊富に存在する。

雑感

- 水素の熱的・非熱的散逸による同位体分別係数 f はどのくらい確かなのか？
 - Krasnopolsky, [2002] の非熱的散逸は非常に小さい
 - 電離した後に太陽風によるピックアップ

Table 3. Thermal and Nonthermal Escape Velocities of H_2 , H, HD, D, and He^a

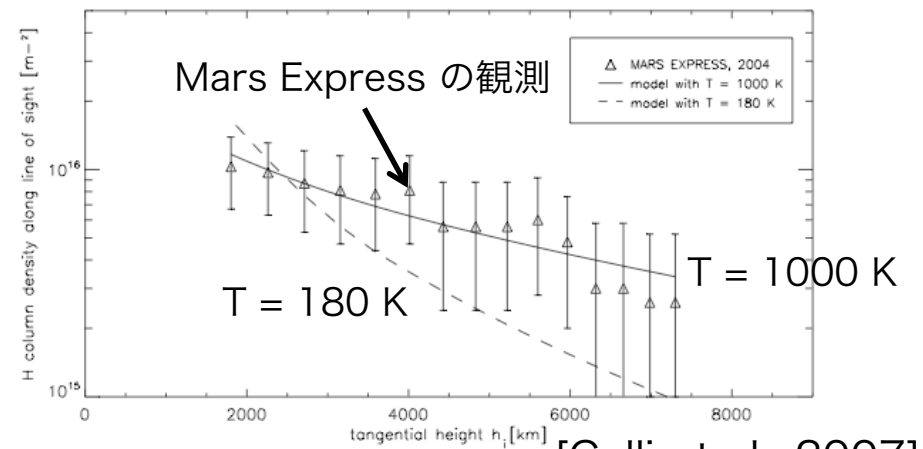
T_{∞} K	H_2		H		HD		D		He	
	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.	Therm.	Non.
200	0.48	12.9	387	38	5×10^{-4}	8.2	0.48	17	6×10^{-7}	4.2
270	15.8	18.2	2114	56	0.11	11.5	15.8	24	7×10^{-4}	5.7
350	151	28	6333	89	3.3	17.7	151	37	0.07	

^aVelocities are in cm s^{-1} . Thermal and nonthermal escape velocities are left and right columns, respectively, for each species.

- 水素コロナには相当な非熱的成分が存在

- $OH^+ + e \rightarrow O + H$
- $CO_2^+ + H_2 \rightarrow CO_2H^+ + H$
- $CO_2H^+ + e \rightarrow CO_2 + H$

[Lichtenegger et al., 2006]



[Galli et al., 2007]

- 非熱的散逸では同位体分別はほとんど起こらない。

雑感

- 予想：水素の非熱的散逸を解くことで、同位体分別係数 f が上方修正されるのでは？



- H_2O の総流出量の見積もりが少なくなる。
 - 熱的・非熱的散逸による総流出量は、 f に依存している。

$$\alpha = \frac{1}{f} \ln \frac{1-f}{1-fr}$$

$$\text{但し、} \alpha = \frac{\text{total loss of H}_2\text{O}}{\text{water abundance in exchangeable reservoir}}, \quad r = \frac{\text{D/H}}{(\text{D/H})_0}$$