

Terrestrial Planet Formation and Origins of Their Atmospheres and Oceans

Hidenori Genda

Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology

There is a wide variety of the amounts and compositions of the atmospheres on the terrestrial planets in our solar system, and only Earth has oceans. The existence of liquid water and atmosphere has been thought to be essential for the emergence and evolution of life. In my talk, I reviewed mechanisms of supply and loss of volatiles that consist of atmospheres and oceans on the terrestrial planets. Then I discussed the effects of giant impacts during the last stage of terrestrial planet formation and the effects of late veneer (late heavy bombardment) on the formation of the atmospheres and oceans.

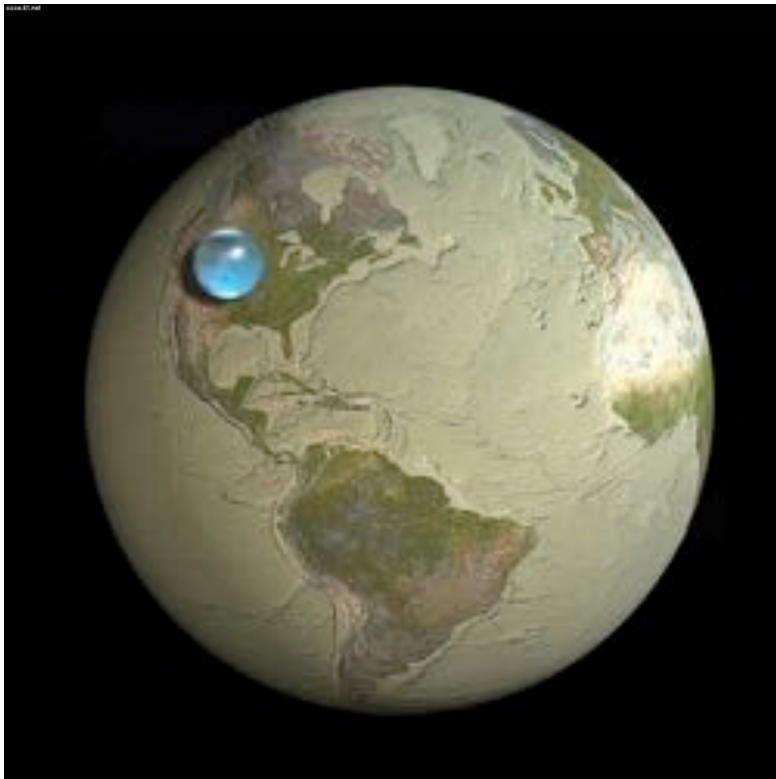
Planets form in a protoplanetary disk composed of dust and gas. If the main building blocks of the terrestrial planets have no volatile, some mechanisms to supply or produce volatiles on the Earth are required to possess the ocean and atmosphere. Supply process of volatile-rich objects from outside the terrestrial planet region is highly related to the planet formation process. Recent planet formation theory suggests that the behavior of forming Jupiter have a great influence on this supply process. Loss of volatiles from planets also has an influence on the volatile budget on the terrestrial planets. Several volatile loss mechanisms have been discussed, such as hydrodynamic escape, loss by giant impact, and so on. Loss of water from Venus is important to the habitability of planets.

It is generally accepted that many giant impacts occur during the last stage of terrestrial planet formation. The energy released by a giant impact is huge, and it can raise the temperature of the whole proto-Earth by about 5000K in average. Therefore, the planet should be wholly molten just after a giant impact. Cooling process from molten terrestrial planets is important to formation of the ocean and atmosphere. We investigated the cooling process using coupled model of magma ocean, atmosphere, and space, and discussed the behavior of volatiles on the Earth and Venus. Steam atmosphere formed just after the solidification of magma ocean rapidly cools, and the ocean forms in 1000 years through the intense rainfall. The rain drops are very hot (~ 300 °C) and the rain fall rate is very high (~ 500 cm/yr).

地球型惑星の形成と 大気・海の起源について

玄田英典

(東工大・地球生命研究所)



地球の海水量： $1.4 \times 10^{21} \text{kg}$

地球の質量： $6.0 \times 10^{24} \text{kg}$



わずか全体の **0.023wt%**

地球内部の水

▶ 地球マントルには大量の水が存在 ($1-10 M_{oce}$)

Table 1. Estimated water contents in the Earth's mantle

e.g., Genda (2016)

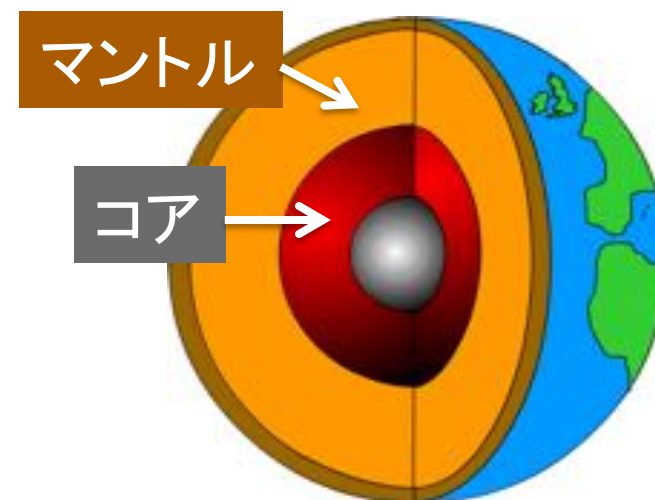
Mantle	Mass (10^{21} kg)	Natural samples	Electrical conductivity	High-pressure experiments	Water mass (M_{oce})
Upper mantle	615	50–200 ppm ^[1]	<0.09 wt% ^[4]	<0.4 wt% ^[6]	0.02–2
Transition zone	415	~1 wt% ^[2]	~0.1 wt% ^[5]	~2 wt% ^[7]	0.3–5
Lower mantle	2955	300–1000 ppm ^[3]	—	~0.2 wt% ^[8]	0.6–4

Data from [1] Hirschmann (2006), [2] Pearson et al. (2014), [3] Dixon et al. (1997, 2002), Hauri (2002), [4] Wang et al. (2008), [5] Yoshino et al. (2008), Huang et al. (2005), [6] Bell et al. (2003), Koga et al. (2003), [7] wadsleyite: Inoue et al. (1995, 1998), ringwoodite: Kohlstedt et al. (1996), [8] Murakami et al. (2002), Litasov et al. (2003).

▶ 地球コアには大量の水素が存在している可能性がある ($\sim 80 M_{oce}$)

Nomura et al. (2014) Science

▶ 合計で、地球質量の0.02%~3%の水が地球内部に存在



海はいつから存在するのか？

地球の誕生：約45億年前

- ▶ グリーンランド・イスア地方 (38億年前)



堆積岩



枕状溶岩

- ▶ ジルコンの酸素同位体比 (43億年前) *Wilde et al. (2001) Nature*
Mojzsis et al. (2001) Nature

- ▶ 月試料中の始原的な水の発見

Hui et al. (2013) Nat. Geo, Hauri et al (2011) Science, Saal et al. (2008)

地球形成直後には海洋が存在していたはず

地球大気はいつ形成したか？

▶ $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ (半減期: 12.8億年)

現在の地球大気 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$

現在のマントル $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} > 30000$



地球形成後の初期数億年以内に現在の地球大気のArの80%以上が脱ガスした

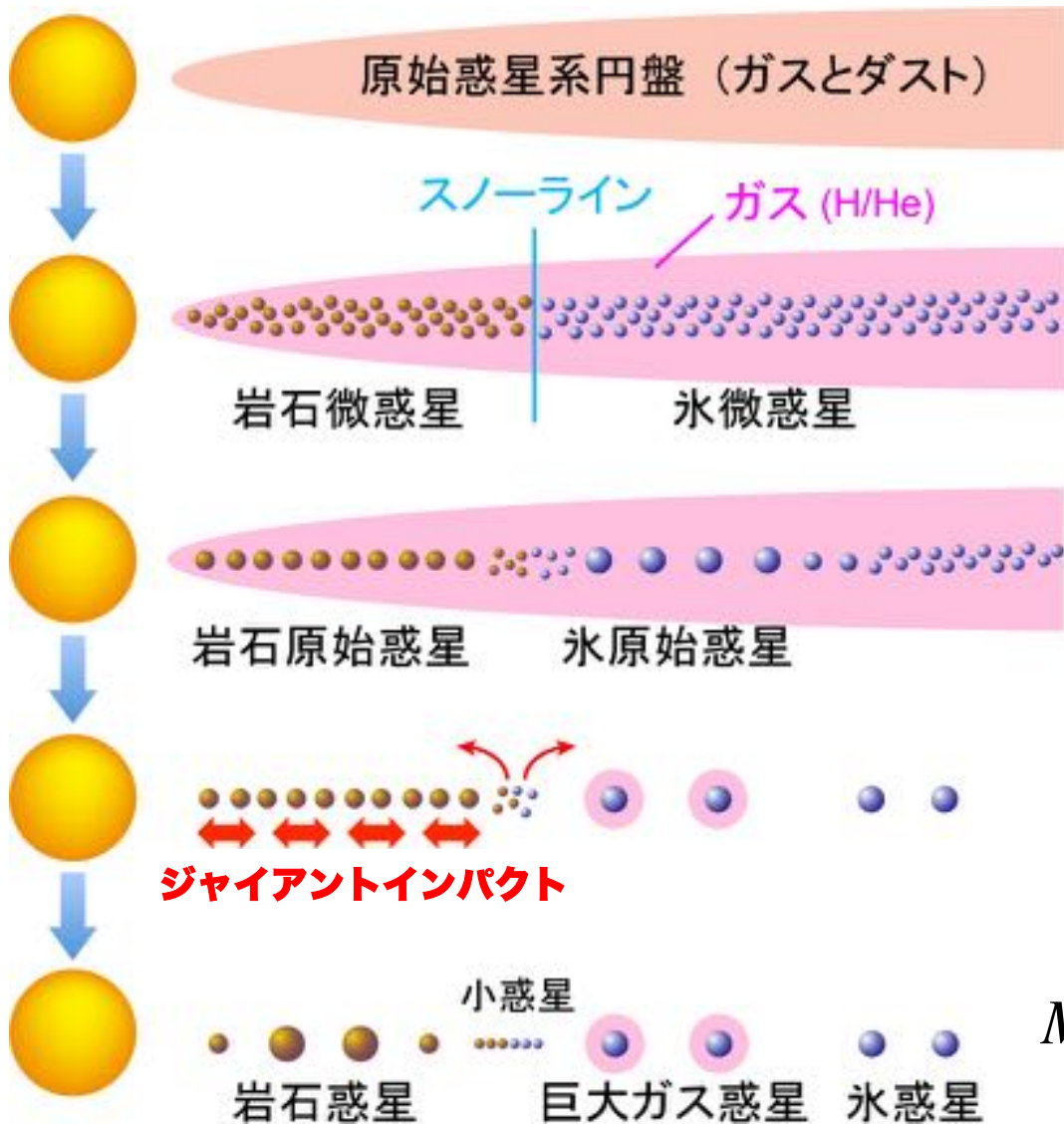
Hamano and Ozima 1978

Arだけでなく他の大気成分(N_2 , CO_2 他)も同様に初期に脱ガスしただろう

▶ $^{129}\text{I} \rightarrow ^{129}\text{Xe}$ (半減期: 1.7千万年)

さらに最初期の脱ガスを示唆 *Ozima & Podosek 2002*

太陽系標準惑星形成シナリオ



✓ スノーラインの内側で作られた地球型惑星は極めてドライな惑星として誕生

Modified from
Genda (2016)

大気・海の完全散逸

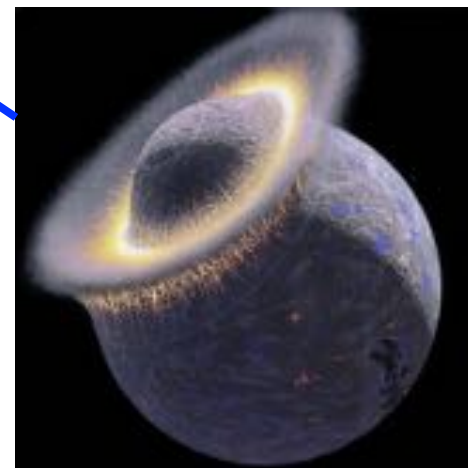
15年ほど前までは

すべての大気・海が、ジャイアント・インパクトで、完全に散逸してしまう。

Ahrens (1990,1993)

Chen & Ahrens (1997)

大気・海の成分は地球誕生後
(最後のジャイアント・インパクト後)に
地球へ供給された(レイトベニア)



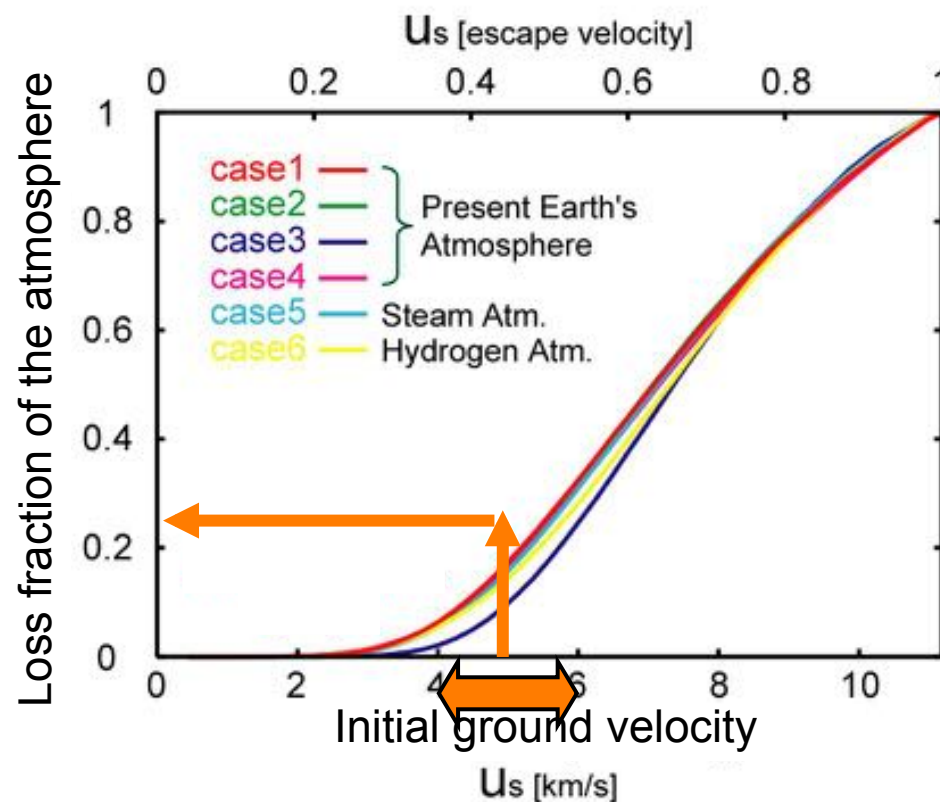
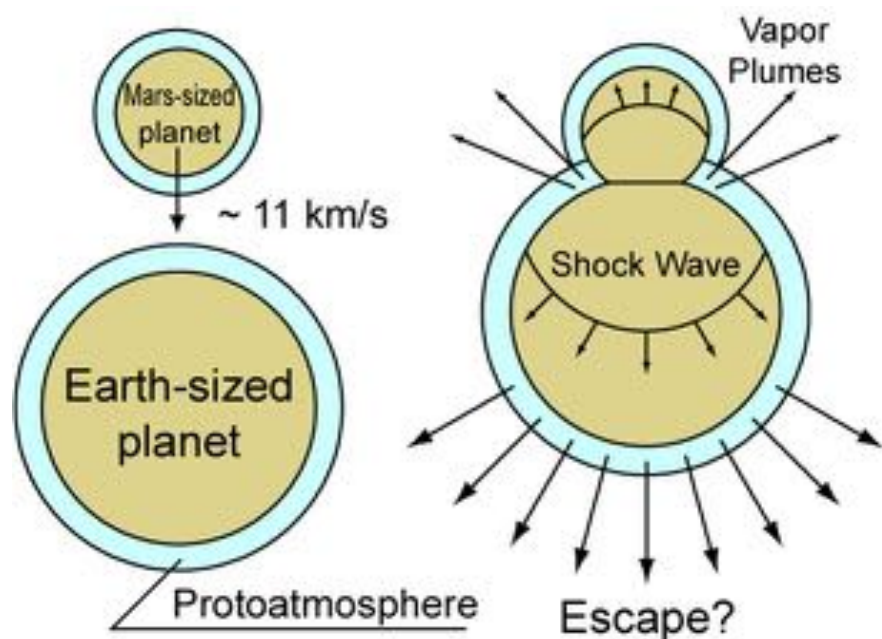
Genda & Abe (2003, 2005 Nature)

否！かなりの量の揮発性元素が生き残る

GIによる大気・海の散逸

Genda & Abe (2003, 2005 Nature)

かなりの量の揮発性元素が生き残る



GIによって励起される全球の地面の運動による大気・海の運動を数値計算

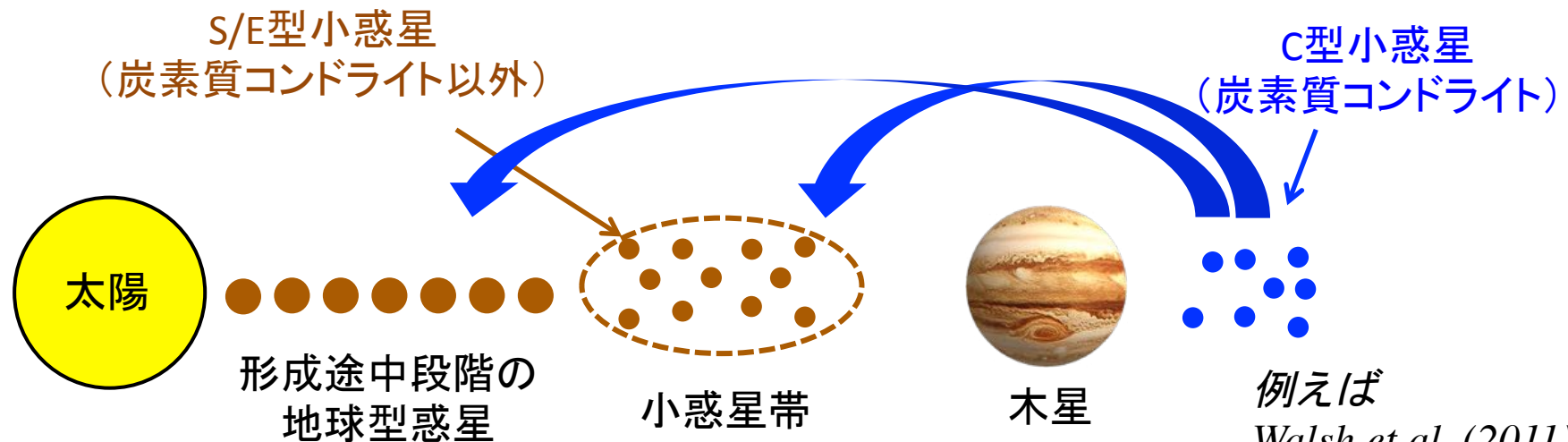
地球への水の供給時期

地球マントルと隕石の同位体組成の比較から、地球最後の集積物質(レイトベニア)は、エンスタタイトコンドライト的であった

Dauphas (2017) Nature



地球形成の途中段階から水を含んだ天体が外惑星領域から飛来



Nature

惑星大気の組成



地球

1bar

N₂ (78%)

O₂ (21%)

Ar (0.9%)

3kmの海洋
(300bar)



金星

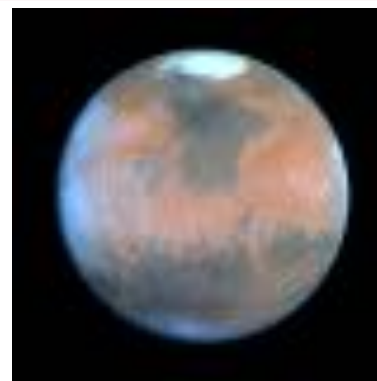
90bar

CO₂ (96%)

N₂ (3.5%)

SO₂ (0.015%)

海洋なし



火星

0.006bar

CO₂ (95%)

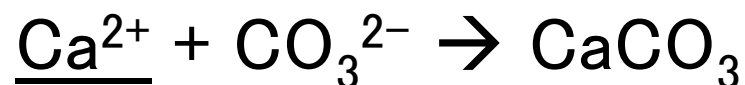
N₂ (2.7%)

Ar (1.6%)

極の氷
地下氷？

大気進化

- ✓ 地球上の石灰岩 (CaCO_3) の CO_2 を大気に戻すと数十気圧相当になる



大陸地殻の風化

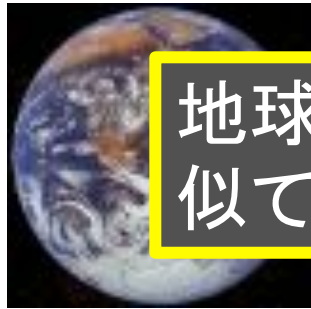


中国・桂林のカルスト地形

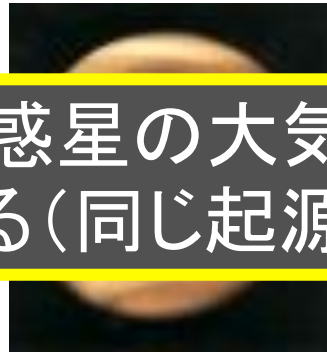
- ✓ D/H比
地球海水: 1.56×10^{-4} (de Wit et al. 1980)
金星大気: 1.6×10^{-2} (Donahue et al. 1982)

➡ 金星からの水の大規模散逸を示唆

惑星大気の組成



地球型惑星の大気組成は似ている(同じ起源を持つ)



地球

金星

火星

木星

1bar

90bar

0.006bar

本体の95%以上

N₂ (78%)

CO₂ (96%)

CO₂ (95%)

H₂ (93%)

O₂ (21%)

N₂ (3.5%)

N₂ (2.7%)

He (7%)

Ar (0.9%)

SO₂ (0.015%)

Ar (1.6%)

CH₄ (0.3%)

3kmの海洋
(300bar)

海洋なし

極の氷
地下氷?

水の行方



太陽光度の増加



暴走温室状態
→海が蒸発
→宇宙空間へ散逸
e.g., Kasting (1993)

大量の酸素(O_2)が残る
金星内部がwet?



マグマオーシャンの形成



1回の巨大天体衝突で解放されるエネルギー

$$\frac{\frac{1}{2}m_i v_{\text{imp}}^2}{m_t} \approx \frac{0.5 \times 10^{24} \text{ kg} \times (10 \text{ km/s})^2}{10^{25} \text{ kg}} = 5 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

岩石の比熱

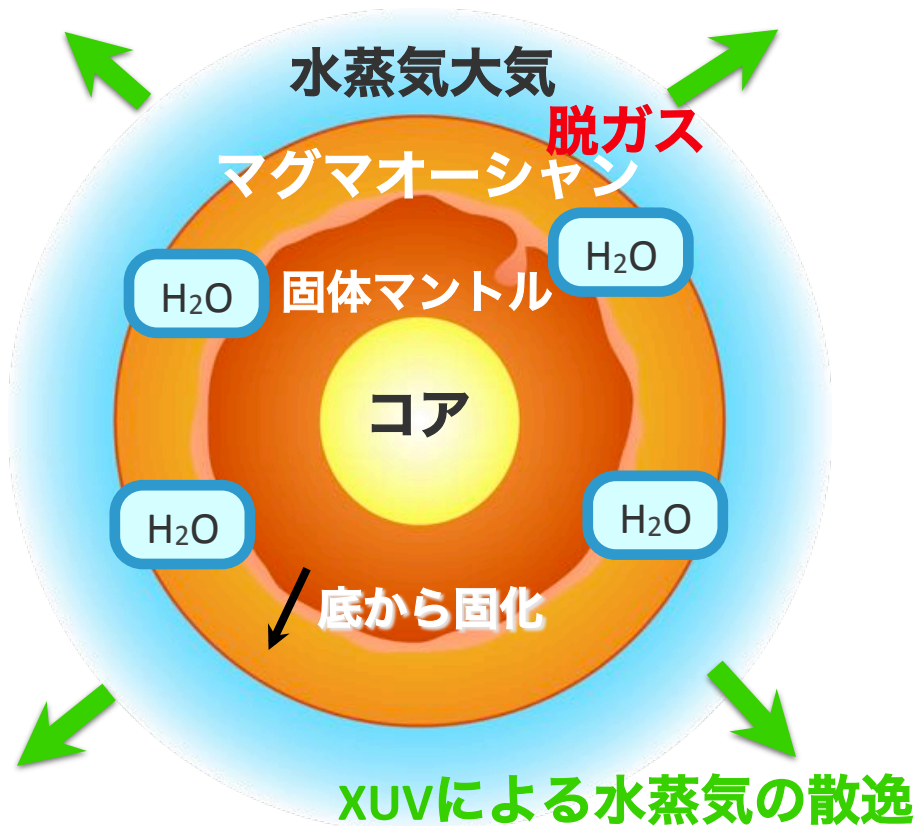
$$C_p \sim 1000 \text{ J/kg/K}$$

温度上昇
~ 5,000 K
(全球平均)

マグマオーシャンの冷却

水の散逸を考慮した
マグマオーシャン・水蒸気
大気結合モデル

Hamano, Abe & Genda (2013) Nature



マグマオーシャン
の冷却速度

||

惑星放射

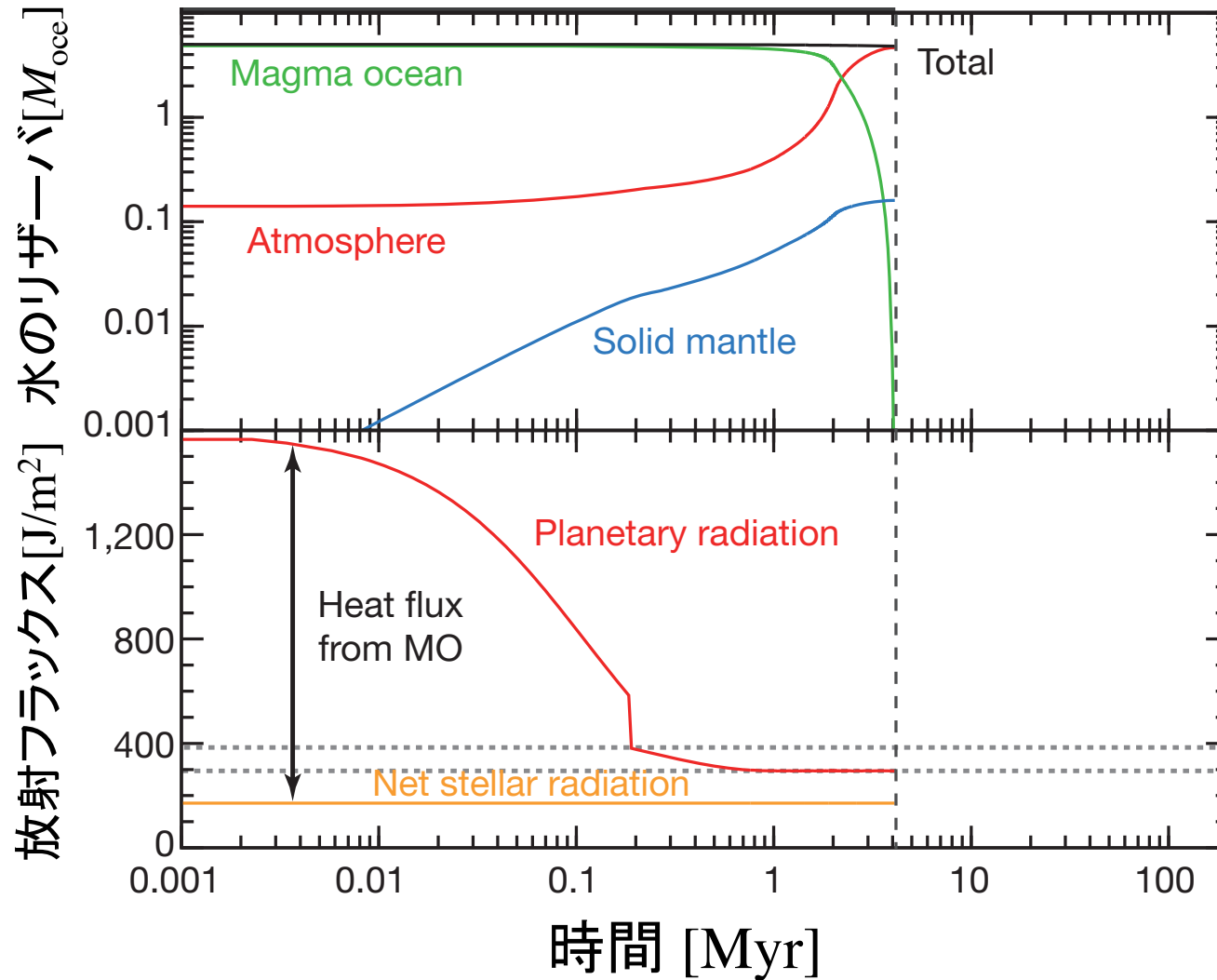
|

入射する太陽放射

分厚い水蒸気大気があると、
上限値が出現 ($\sim 300 \text{ W/m}^2$)

*e.g., Kasting (1988),
Matsui & Abe (1986)*

地球の場合



マグマオーシャン固化
のタイムスケール
: ~ 4 Myr

水蒸気の宇宙空間へ
の散逸量は微量

マグマオーシャン中の
ほぼすべての水が
地球表層へ脱ガス

Radiation
limits¹¹

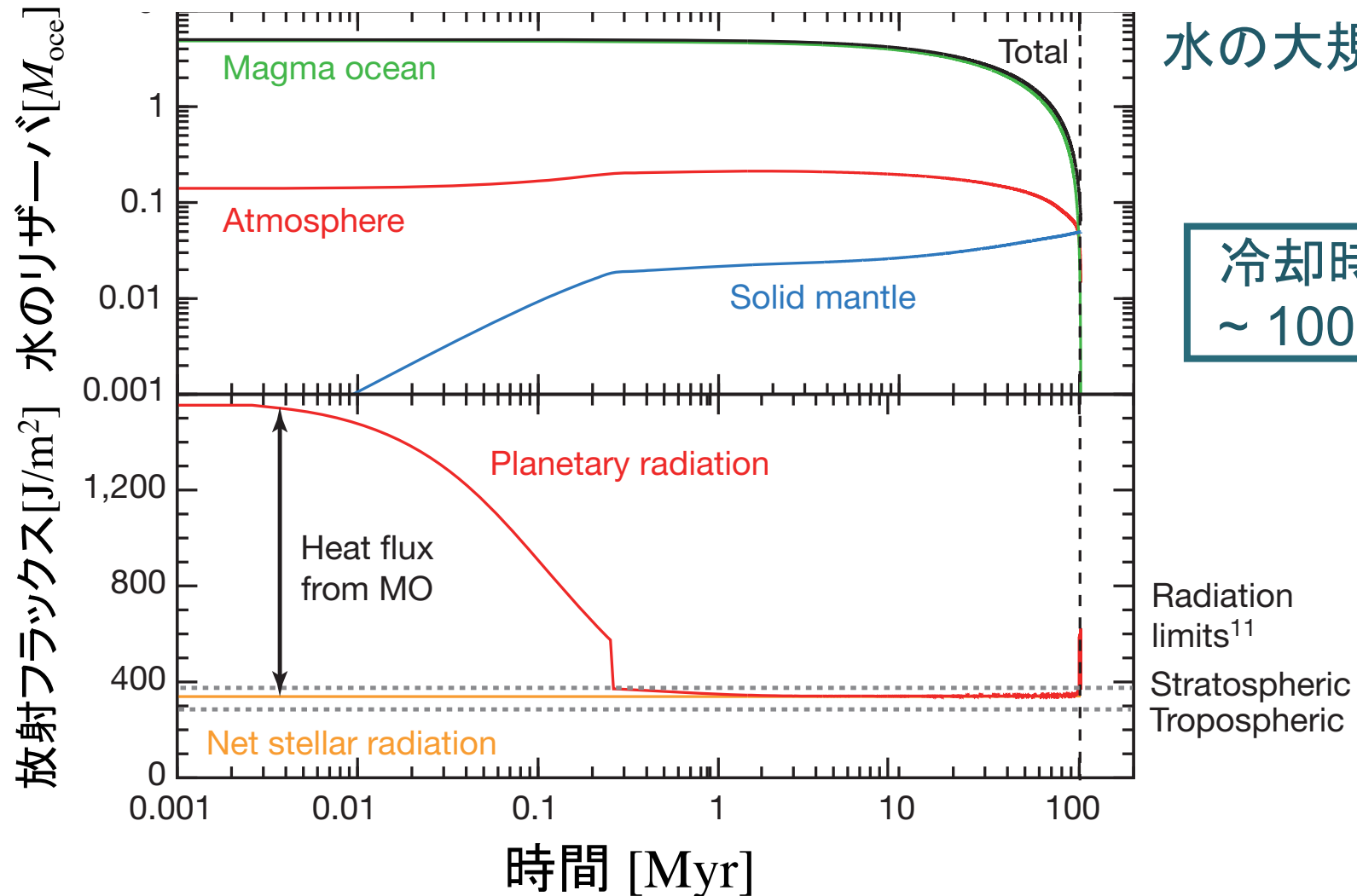
Stratospheric
Tropospheric



Abe (1993) Lithos

- ▶ 高温の雨が降る($\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- ▶ 激しい降水量 ($\sim 500\text{ cm/年}$) <参考> 50 cm/年 @熱帯地域
- ▶ 海はおよそ1000年で形成

金星の場合

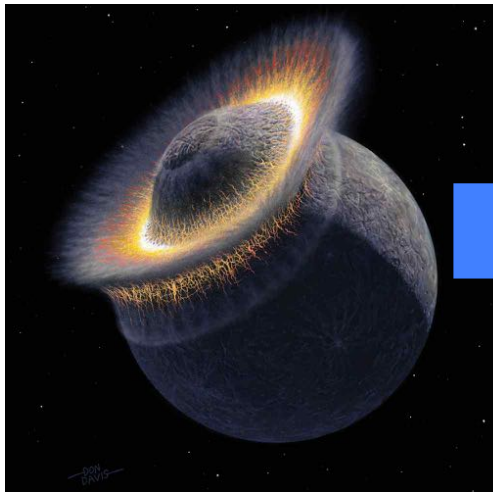


水の大規模散逸

Hamano, Abe & Genda (2013) Nature

Wet Earth & Dry Venus

ジャイアント
インパクト



マグマ・オーシャン



~ 100万年



wet Earth

~ 1億年



dry Venus

太陽からのわずかな距離の差が
2つの惑星の運命を分けた

まとめ

- ▶ 地球形成直後には、地球大気・海は存在
e.g., Genda (2016)
- ▶ 地球型惑星形成段階から
揮発性元素が供給
Genda & Abe(2003,2005)
ジャイアント・インパクトを生き残る
金星からの水の散逸 *Hamano, Abe, Genda (2013)*
- ▶ 地球形成後の天体衝突は、
揮発性元素の供給 < 剥ぎ取り
Sakuraba, Kurokawa, Genda, submitted