

# 火星と地球における還元型原始大気の流体力学的散逸が 各表層揮発性物質に与える影響

吉田辰哉, 倉本圭  
北海道大学

火星の表層揮発性物質は地球と比べて著しく枯渇している (e.g. Pepin, 1991). 一方で, 火星は太陽から離れた領域で形成されたため, 地球よりも揮発性物質に富んだ材料物質で形成され (Dreibus and Wanke, 1985), 集積期には大質量の原始大気を獲得したと予想される (Saito and Kuramoto, 2018). また, 火星大気中の H, C, N, 希ガスは地球や始原的隕石ともものと比べて重い同位体に富み, 火星大気が大気散逸の影響を受けたことを示唆している (Pepin, 1991). これらのことから, 火星表層揮発性物質枯渇の一因は大気散逸であることが予想される.

大気散逸規模が大きく表層揮発性物質に大きな影響を与える過程に流体力学的散逸と呼ばれるものがある. 流体力学的散逸とは上層大気が加熱され膨張し, 重力を振り切って大気が宇宙空間に流出する現象で, 初期太陽の強力な X 線・極端紫外線放射 (XUV 放射) によって初期大気で起きていた可能性がある. 集積期に形成された原始大気は同時に集積する金属鉄によるガスの還元を考慮すると H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> に富むと予想される (Kuramoto and Matsui, 1996). このような原始大気は H<sub>2</sub> に富み平均分子量が小さいため, 初期太陽の強力な XUV 放射と相まって流体力学的散逸の影響を大きく受けたと予想される (Catling and Kasting, 2017).

原始大気の流体力学的散逸の規模は火星と地球で異なる可能性がある. 重力による大気流出速度・断熱膨張冷却度合いの違いから, 赤外活性分子含む分子の光分解の程度にも違いが生じ, 流出大気の密度分布やエネルギー収支に違いが生じる可能性がある. 火星と地球で大気散逸規模が異なる場合, 火星と地球の現表層揮発性物質量の差を説明できる可能性がある. このような火星と地球における流体力学的散逸の違いを定量的に検討するためには, 各流出大気における放射過程と光化学過程の違いを明らかにする必要があるが, これまでほとんど調べられていなかった.

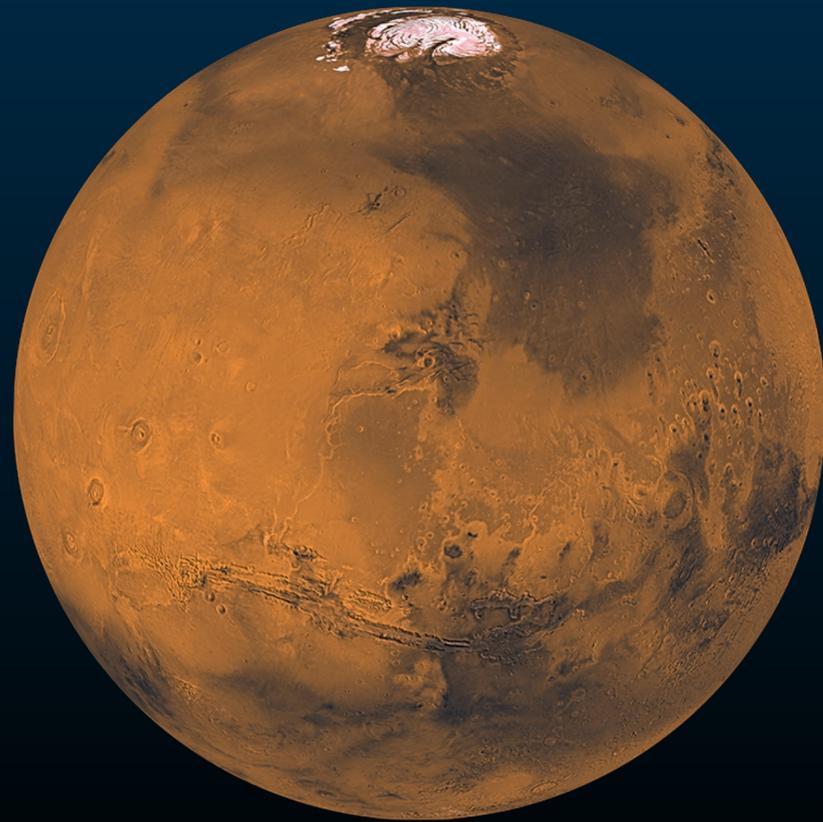
そこで, 本研究では放射過程と光化学過程を考慮した多成分系における流体力学的散逸モデルを構築し, 火星と地球における原始大気の散逸率と, 現表層揮発性物質の貯蔵量・同位体組成と調和的な大気進化経路を求め, 流体力学的散逸が火星と地球の表層揮発性物質に差を及ぼす可能性について検討した. 数値モデルでは, 波長に依存した XUV ならびに赤外放射の放射伝達と, 流出大気の光化学反応を考慮した球対称一次元流体方程式を時間積分し定常流を求める. XUV スペクトルと強度には G 型主系列星の観測から推定される 44.6 億年前の太陽スペクトルを与えた (Claire et al., 2012). XUV 強度は現在値の約 100 倍に相当する. 分子と原子による XUV 吸収を考慮し, 平行光線の放射伝達を解き球殻平均することで放射加熱率を推定した (Tian et al., 2005). また, CH<sub>4</sub>, CO, CH, CH<sub>3</sub>, H<sub>3</sub><sup>+</sup> による赤外輝線放射を考慮し, 熱運動・流出運動に伴うドップラー偏移を考慮した赤外放射伝達を解くことで放射冷却率を推定した. 化学過程には光分解や大気成分間の二体反応含む計 157 反応を考慮した. 下部境界組成はガス-マグマ-溶融金属鉄間の化学平衡計算結果を参照し地球では H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> から成り, 火星では H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-CO から成るとした.

火星では重力が小さく鉛直移流速度が大きいため, H<sub>2</sub> や CH<sub>4</sub> の分子の大部分が光分解を免れ高高度まで分子主体となる. 一方で, 地球では分子の光分解が急速に進み, 分子の存在度は著しく小さくなる. 火星と地球双方で分子放射冷却によって大気散逸が抑制される. 火星では CH<sub>4</sub> や CO が主要な放射冷却源で, 下部境界の CH<sub>4</sub>・CO 混合比が ~10 % になると大気散逸率が純粋な水素大気と比べて一桁程度減少する. 地球では H<sub>3</sub><sup>+</sup>, CH, CH<sub>3</sub> 等の光化学生成物が主要な放射冷却源となり, 下部境界の CH<sub>4</sub> 混合比が ~1 % になると炭素化合物を残し H<sub>2</sub> のみが拡散律速的に散逸する. 火星と地球を比較すると, 火星の方が放射冷却の影響が小さく, 大気が比較的散逸しやすい. これは火星の方が断熱膨張冷却が効きやすく, 大気温度と放射冷却率が小さく保たれるためである.

現表層炭素量と整合的な大気進化経路を推定したところ, 火星では初期 H<sub>2</sub> 混合比が > ~90 % の場合は > ~10 bar の炭素種が散逸し得る. 一方で, 地球では初期 H<sub>2</sub> 混合比 ~99 % の場合でも炭素種はほとんど散逸しない. このような流体力学的散逸による大気散逸量の違いが現在の火星と地球の表層揮発性物質に差が生じた要因である可能性がある.

# 火星と地球における還元型原始大気の流体力学的散逸が 各表層揮発性物質量に与える影響

吉田辰哉, 倉本圭  
北海道大学



# 火星と地球の表層揮発性物質量の違い

- **火星表層揮発性物質量は地球と比べて著しく小さい**

- 地球表層炭素量：CO<sub>2</sub> ~ 70 bar 相当 (Holland, 1978)

- 火星表層炭素量：CO<sub>2</sub> < ~ 0.1 bar ? (Catling and Kasting, 2017)

- 一方で、火星は地球よりも揮発性物質に富んだ材料物質で形成され (Dreibus and Wanke, 1985), 最初期には大質量の原始大気を獲得 (Saito and Kuramoto, 2018)

- 火星上の H, C, N, 希ガスは地球と比べて重い同位体に富む (Pepin, 1991)

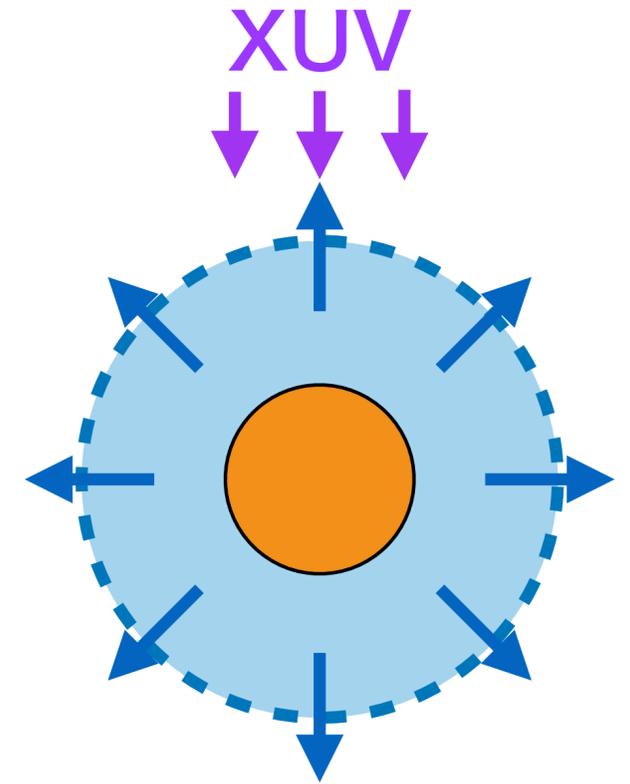


- **大気形成後の大気散逸が火星表層揮発性物質枯渇の要因？**

# 原始大気の流体力学的散逸

## 流体力学的散逸とは

- 上層大気が加熱され膨張・宇宙空間に流出
- 初期太陽の強力なX線・極端紫外線 (XUV) 放射により初期大気で駆動
  - 原始惑星形成時から数億年間は現在の強度の約 100 倍 (Tu et al., 2015)
- 大気散逸規模が大きく表層揮発性物質に大きな影響を与える可能性



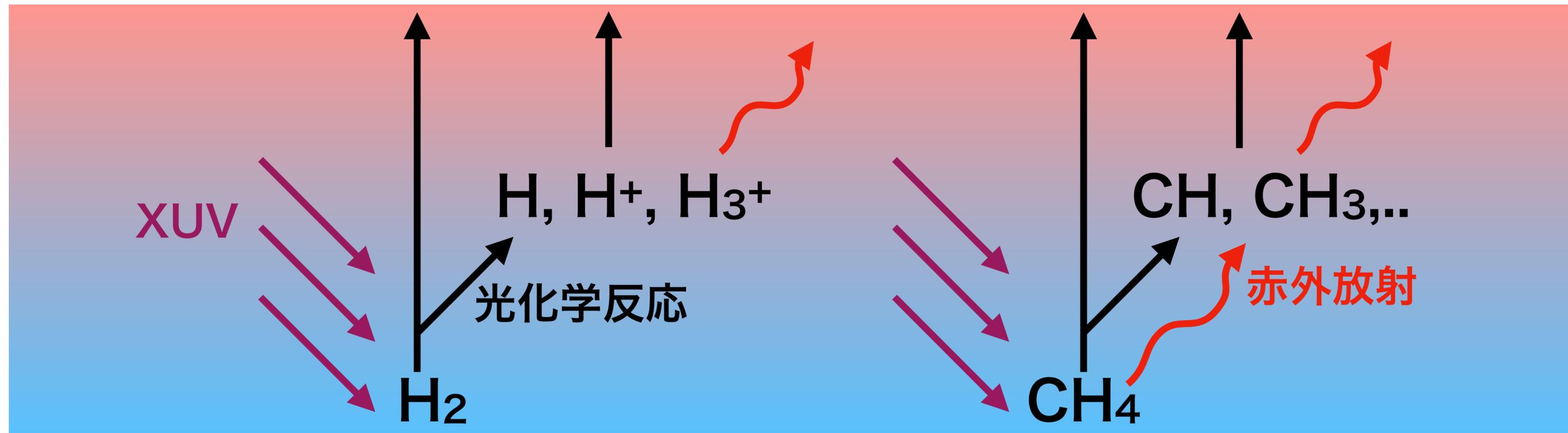
## 原始大気形成と流体力学的散逸

- 火星・地球では集積期に  $\text{H}_2\text{-CH}_4$  主体原始大気形成 (Kuramoto and Matsui, 1996; Zahnle et al., 2020)
  - **$\text{H}_2$  に富み平均分子量が小さい + 初期太陽の強力な XUV 放射により流体力学的散逸の影響を受けやすい** (Catling and Kasting, 2017)

# 原始大気の流体力学的散逸

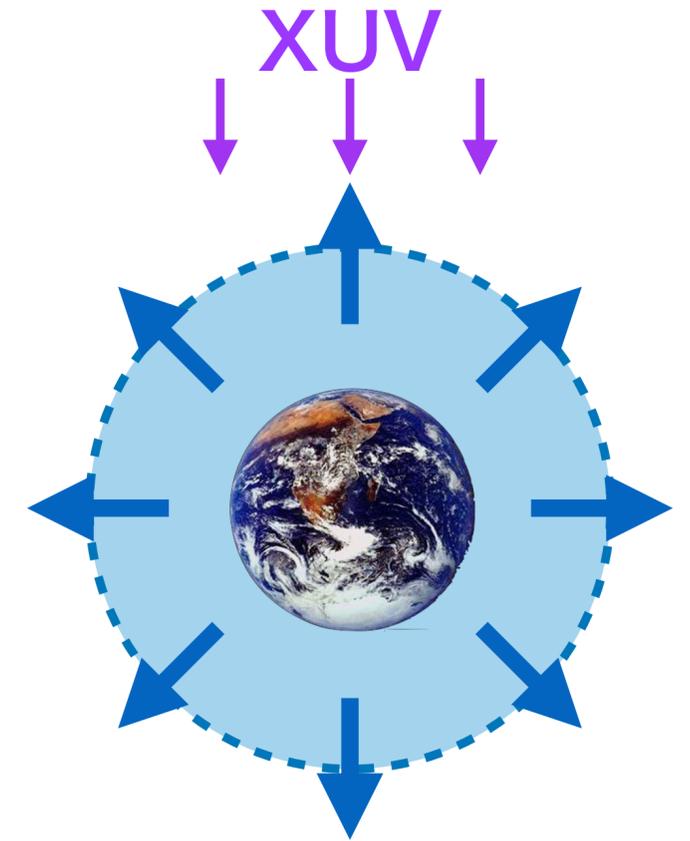
- 原始大気の流体力学的散逸率は火星と地球で異なる可能性
- 重力・断熱膨張度合いの違い → 大気温度・分子放射冷却率の違い
- **火星と地球の表層揮発性物質質量に差を生む可能性**

**従来簡略化されていた放射過程・光化学過程を陽に組み込んだ流体力学的散逸モデルを構築し火星と地球における流体力学的散逸の違い・表層揮発性物質質量への影響の違いを明らかにする**



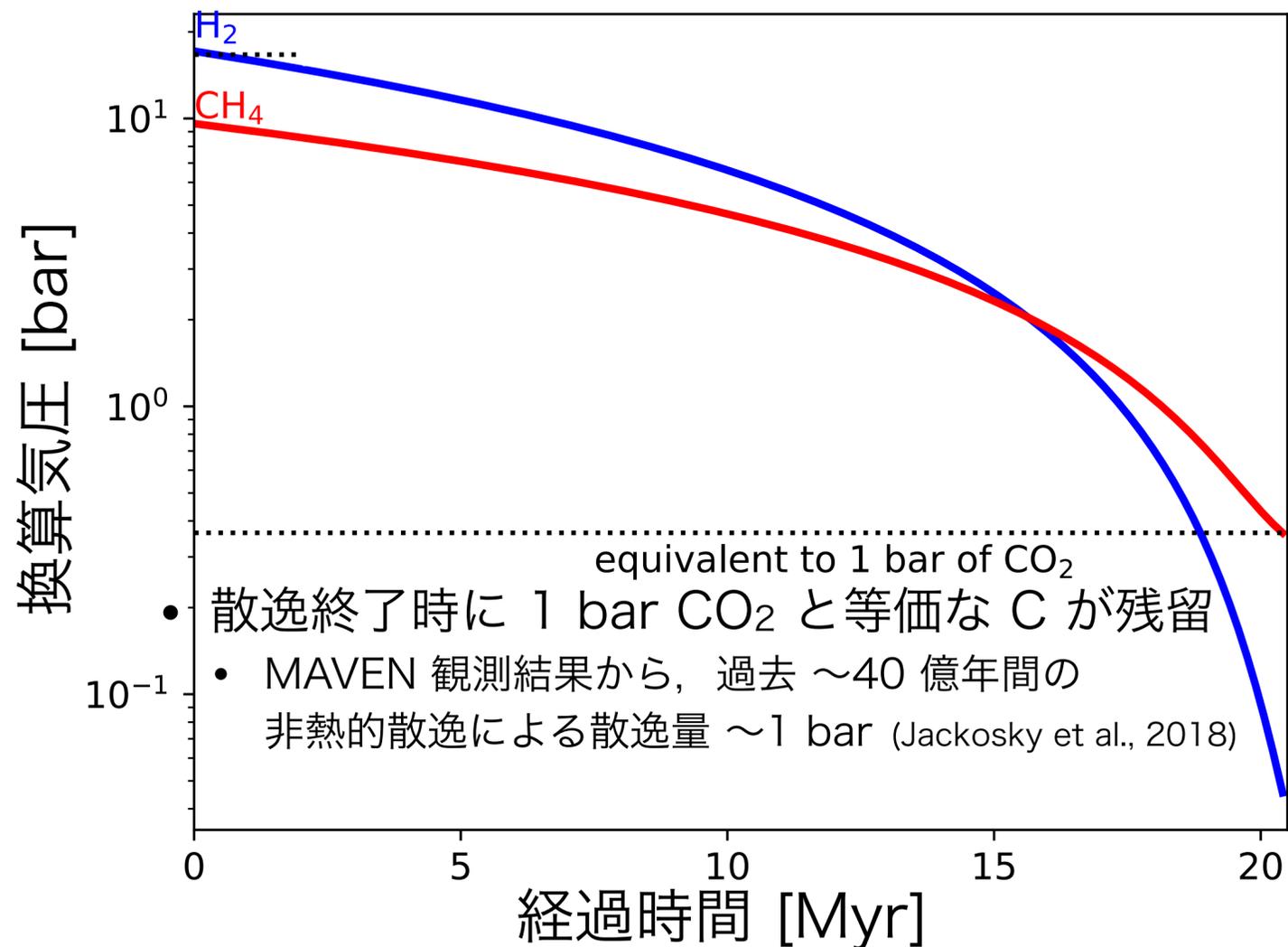
# 計算設定

- 火星下層大気：H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO
- 地球下層大気：H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
  - 惑星集積期の熱化学平衡計算から推定 (Kuramoto, 1997)
  - 地球では材料物質の大部分が還元的と推定され (Dauphas, 2017), 還元物質主体の場合は H<sub>2</sub>・CH<sub>4</sub> 主体大気形成 (Kuramoto, 1997)
- 初期太陽の強力な XUV 放射に曝され上層大気が膨張・散逸
  - 44.6 億年前の太陽 XUV スペクトル (0.1 -165 nm) を入力 (Claire et al., 2012)
    - 現在の約 100 倍の強度
  - 球対称一次元系を仮定

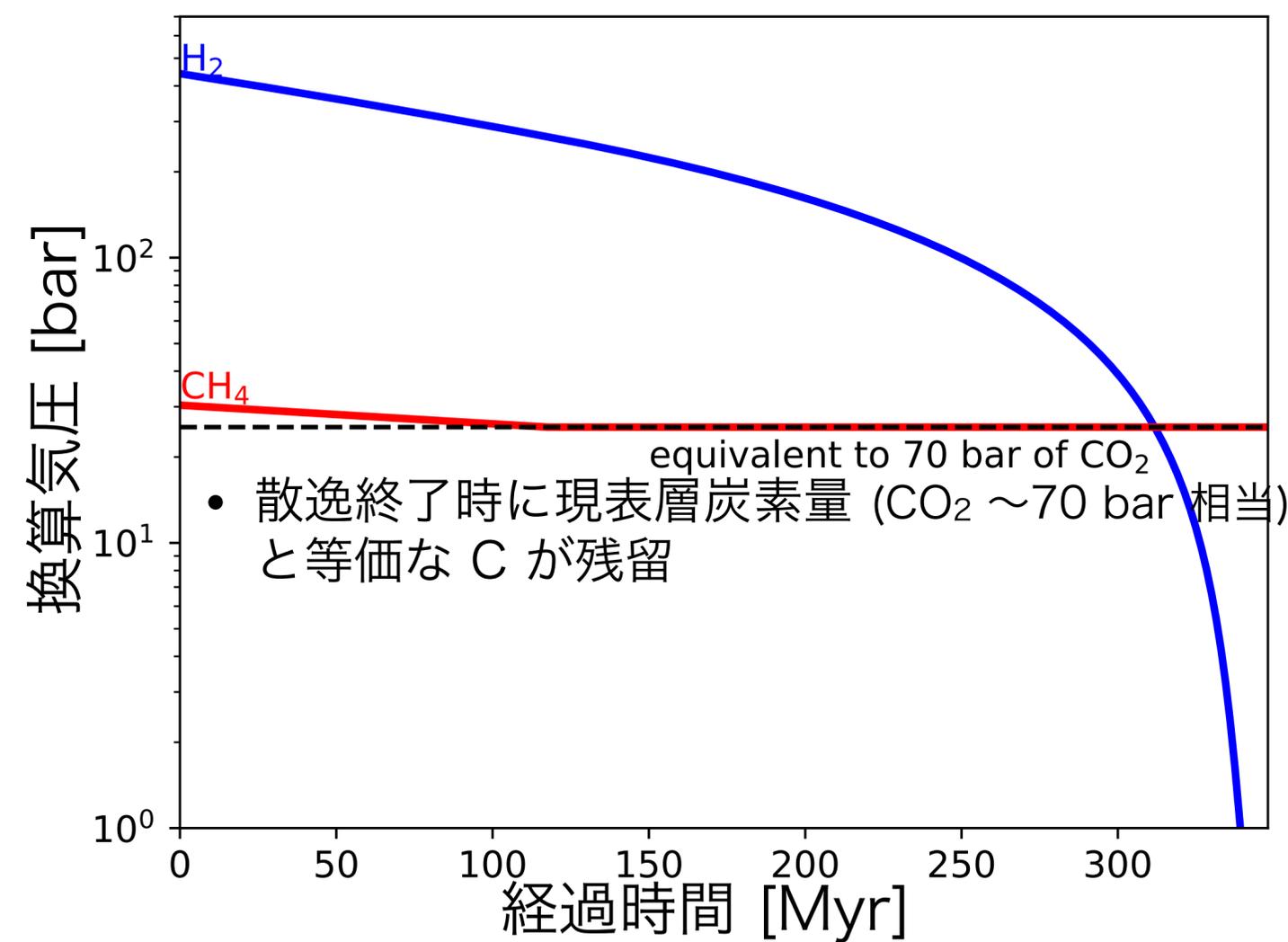


# 散逸率から推定される大気進化経路 (H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気)

## 火星 (初期 H<sub>2</sub> ~ 90 vol.%)



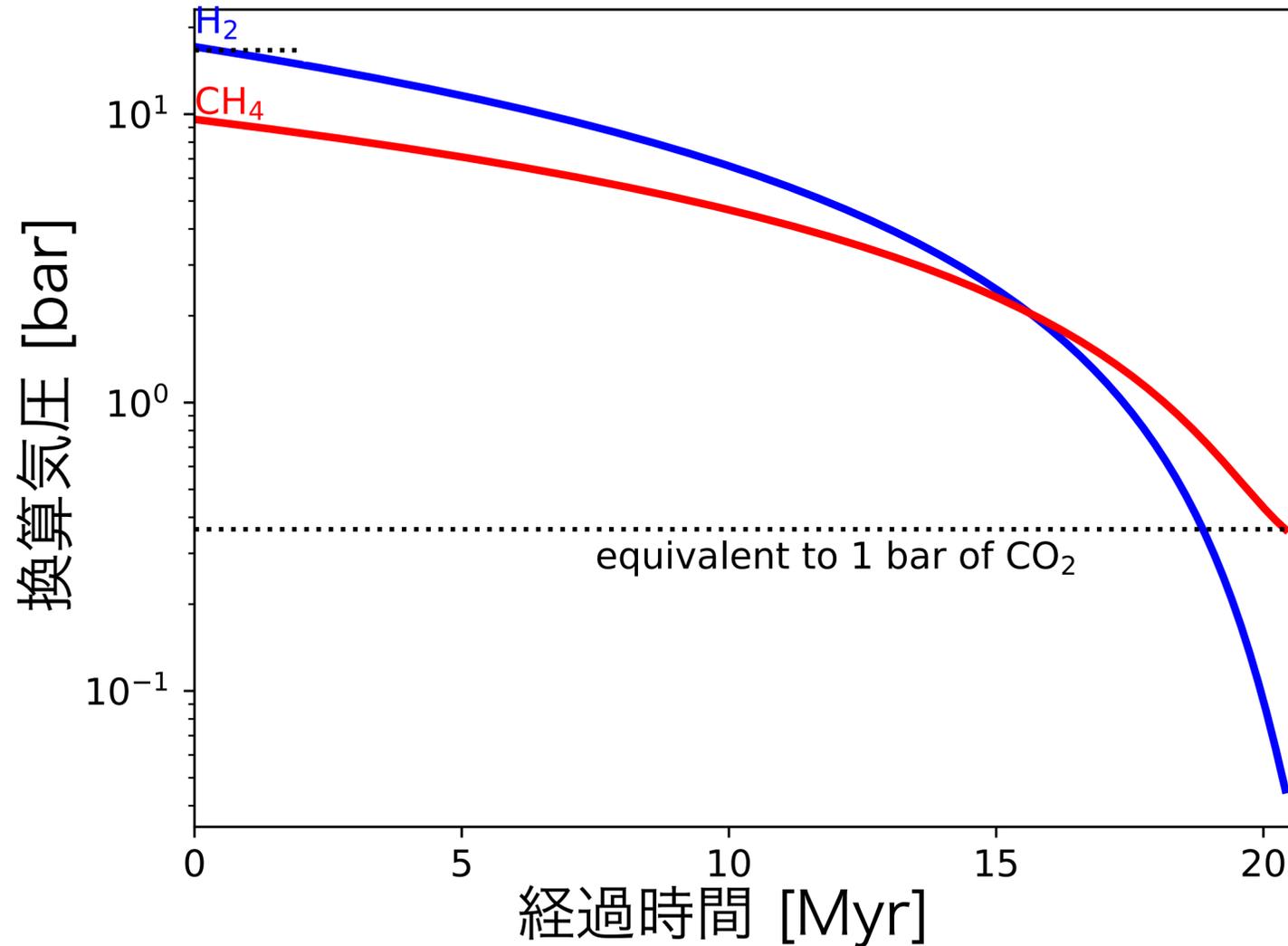
## 地球 (初期 H<sub>2</sub> ~ 99 vol.%)



初期大気組成をパラメータとし  
大気散逸率を元に各惑星の表層揮発性物質と整合的な大気量の時間変化を推定

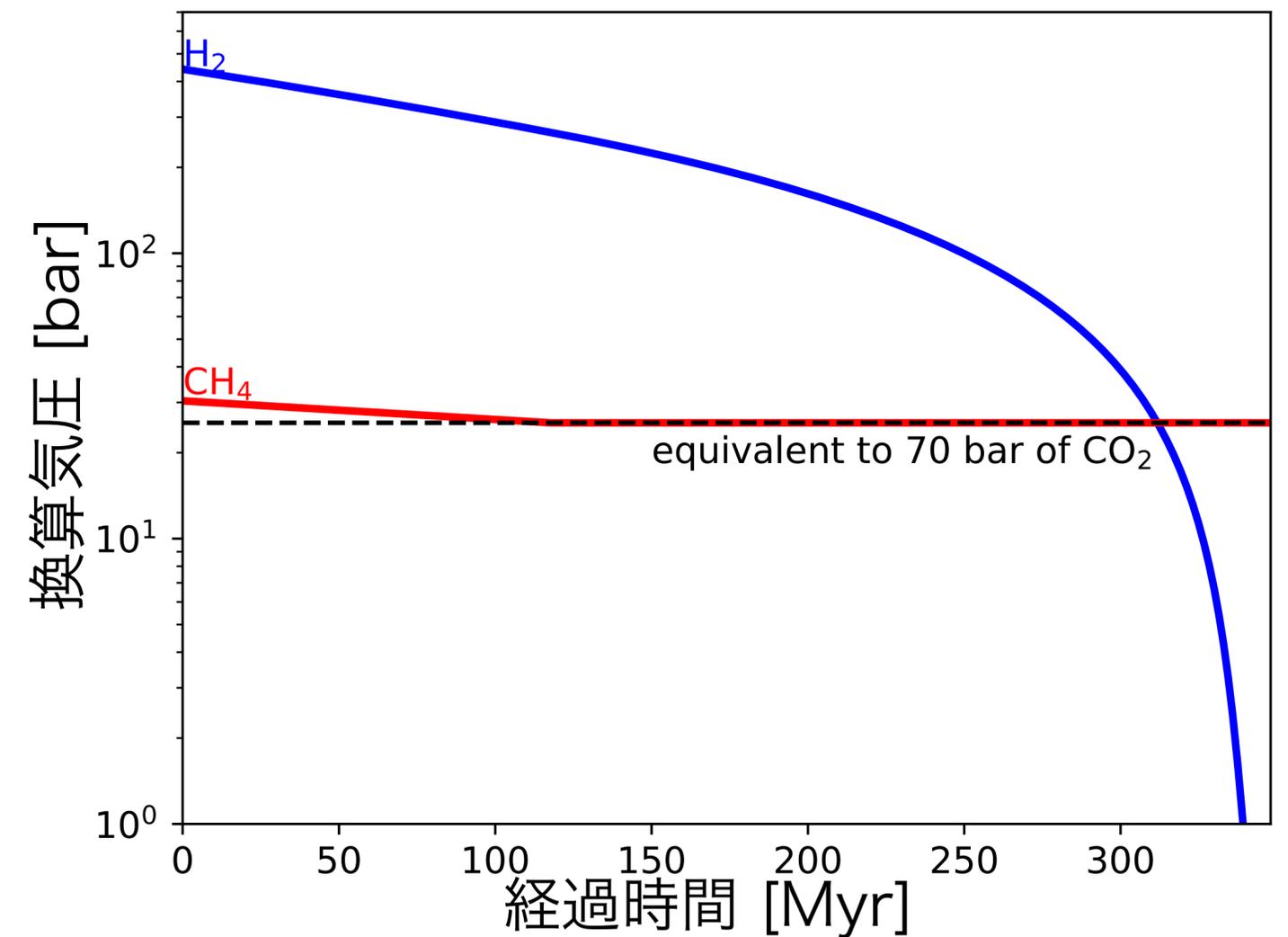
# 散逸率から推定される大気進化経路 (H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気)

## 火星 (初期 H<sub>2</sub> ~ 90 vol.%)



- 初期 H<sub>2</sub> 混合比 > ~90 vol.% の場合, > 10 bar (CO<sub>2</sub> 20 bar 相当) の炭素種が散逸
- 地球と同程度の炭素量を獲得した場合, 火星初期炭素量 ~ 15 bar CO<sub>2</sub>

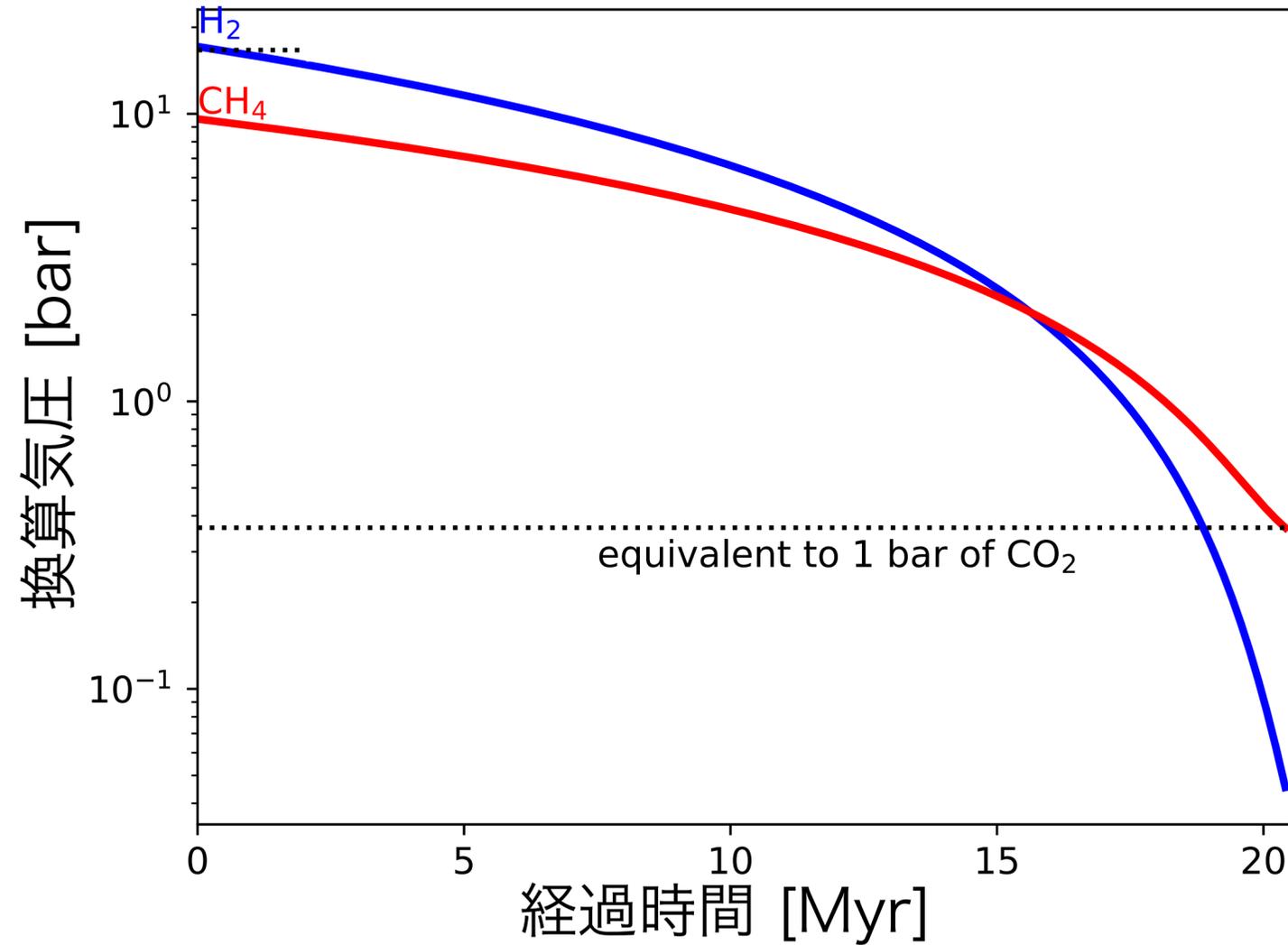
## 地球 (初期 H<sub>2</sub> ~ 99 vol.%)



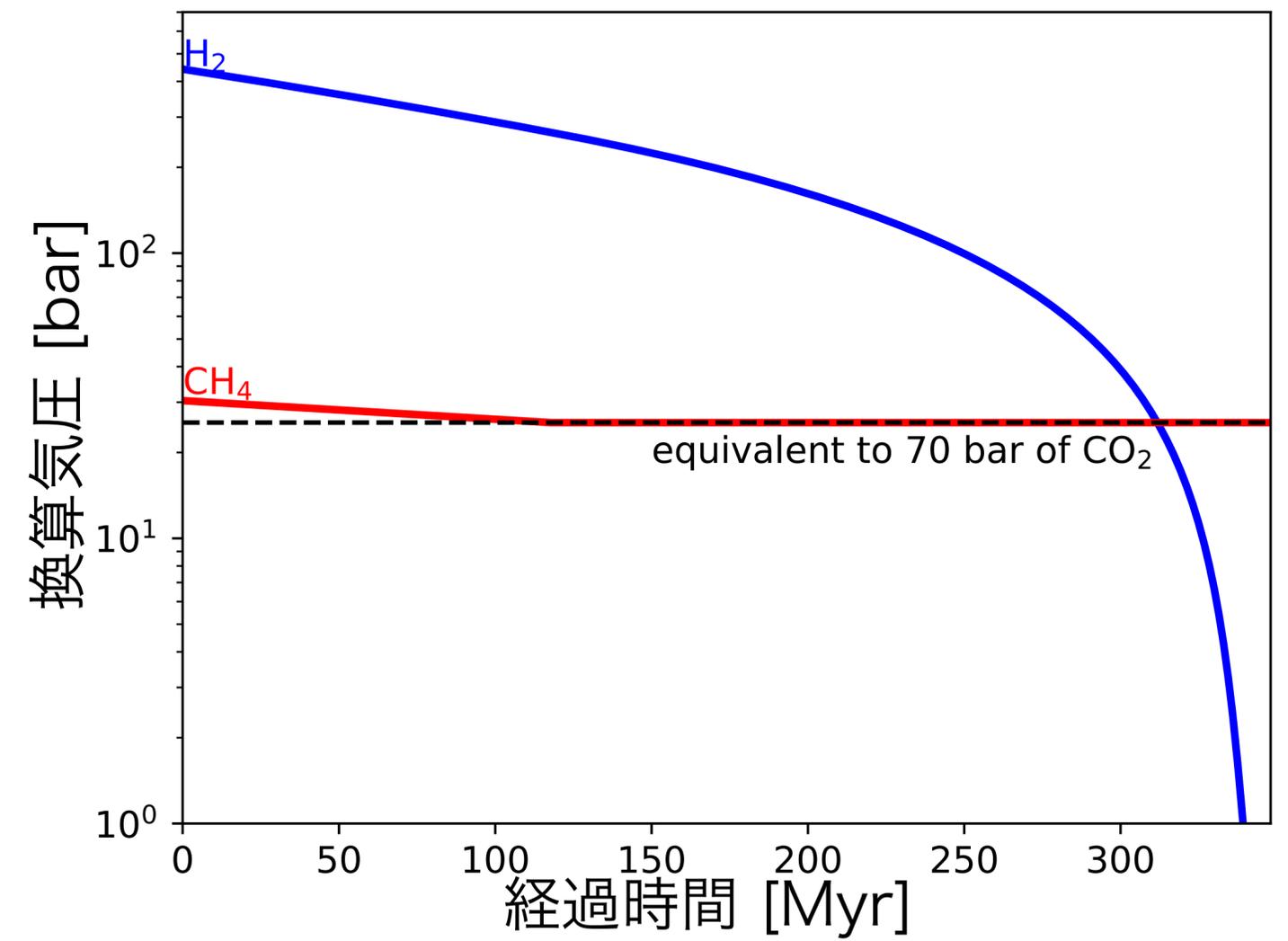
- 初期 H<sub>2</sub> 混合比 ~99 % でも炭素種はほとんど散逸しない

# 散逸率から推定される大気進化経路 (H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気)

火星 (初期 H<sub>2</sub> ~ 90 vol.%)



地球 (初期 H<sub>2</sub> ~ 99 vol.%)



流体力学的散逸の違いによって表層揮発性物質量大きな差が生じた？