地球惑星圈物理学 惑星表層環境:地球型惑星

金星:乾燥した灼熱の惑星

- * 平均気温約460°C
- * 厚いCO₂の大気
- * 大気中に僅かな水蒸気



探査機ベネラ13号が撮影した金星の地表 (credit: NASA)

火星:冷たく乾いた表層環境



NASA/JPL-Caltech/MSSS

* 平均気温約マイナス60°C
* 希薄なCO2大気
* 強力な紫外線
* 北極・南極に僅かな氷が存在

地球型惑星の表層環境の違い



太陽からの距離0.7 AU1 AU1.5大気圧90気圧1気圧0.006平均地表気温735 K288 K210全球平均水深30 mm (水蒸気)2700 m (水)20 m

1.5 AU 0.006 気圧 210 K 20 m (氷)

* 地球において液体の水が果たした役割:
 生命誕生,大気CO₂の除去,プレートテクトニクス(?)
 * 惑星の表層環境を隔てた要因は何か?

ハビタブルゾーン (Habitable Zone)

* ハビタブル・ゾーン(HZ):

* 中心星光度に依存する(す

* 金星:HZより内側(水は水

* 地球,火星:大気温室効果

によって水を保持できる

なわち星の質量,年齢依存)

能な軌道範囲

蒸気として存在)

地表面に液体の水を保持可

液体の水が存在できる領域 2.0 . || 暴走温室 ヽビタブルゾー (太陽 1.5 状態 温室効果の低下 によって全球凍結 中心星の光度 1.0 0.5 全球凍結 状態 1.0 1.5 2.0 0.5 2.5 3.0 () 中心星からの距離(天文単位)

大気の温室効果がなくても

5

門屋他 (2012) 日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 3.



- * 地表面温度上昇は水蒸気(温室効果ガス)の増加を招く
- * 入射量上限値(射出限界)を超えると暴走温室状態に至る

水蒸気大気の温室効果フィードバック

一次元大気構造モデルによる地表温度と大気構造の関係 (Nakajima et al. 1992)



* 地表温度が高いと大気の主成分が水蒸気になる

* 水の飽和蒸気圧曲線で温度構造(同時に、放射量)が固定

暴走温室状態と大気散逸



- * 金星はHZの内側に位置し、暴走温室 状態
 - ※形成直後から暴走温室状態か、太陽光度 増加に伴って暴走温室状態に至ったかは議 論の余地がある
- * 形成時に獲得したH₂Oは水蒸気として 大気上層まで存在 (↔地球:成層圏の H₂O混合比~10⁻⁶)
- * 上層大気でH₂Oは紫外線によって解離 * 水素が大気散逸によって失われた

太陽からの距離に応じて暴走温室状態・ 大気散逸の効果が地球と金星の運命を分 けた

プレートテクトニクスのない金星・火星

<u>火星の地表面画像</u>

金星の地表面画像



● ともにプレート境界に対応する地形は(ほぼ)ない

- 火星は多数のクレーターに覆われている(古い地殻)
- 金星はクレーターが少ない(~5億年前に地殻が更新?)



化学同人『アストロバイオロジー』より

- * 原始地球と金星の大気は類似していたと考えられる
- * 海形成 + プレートテクトニクス → 炭酸塩岩形成 地球大気のCO₂が除去された
- * 生命活動により酸素が付与





図 2-4-1 火星の地形(高度)と地名. 高度はマーズ・グローバルサーベイヤーのレーザー高度計(Mars Orbiter Laser Altimeter: MOLA)のデータを着色してある.

東京大学出版会『惑星地質学』より





北部低地に海が存在したことを示唆

初期火星の気候:温暖 or 寒冷?

一次元CO₂大気構造モデルによる大気圧と地表気温の関係 (Ramirez et al. 2014)



∗ CO₂の凝結により、CO₂温室効果のみでは十分に温暖にならない
 ∗ H₂, CH₄など追加の温室効果ガスにより(一時的に)温暖化?

Mars ocean hypothesis (credits: NASA/GSFC)



Early Mars as "Icy highlands"



Cassanelli & Head (2013)



* 大気散逸では軽い同位体が優先的に失われる(同位体分別)
* 地球と比較して、金星大気D/Hは約100倍、火星大気D/Hは約6倍
* 大気散逸により、かつて存在したH₂Oが失われたことを示唆

火星の水の行方

火星大気のD/H比は地球海洋の約6倍 ● 一部は宇宙空間へ流出(金星と比べて流出少ない?) ● いまでも地下に氷として存在?(間接的証拠:低い誘電率など)

<u>火星の(a)南半球と(b)北半球の誘電率マップ</u>

modified from Mouginot et al. (2012) by Usui et al. (2015)



火星の水の行方





Recurring Slope Lineae (RSL):
・火星の赤道付近の斜面に 春夏のみ現れる黒い影
・地下の氷が溶けて 水が流れている?
・赤道付近の地下にも氷がある?



<u> 火星大気の同位体比 (地球で規格化) (Jakosky & Phillips, 2001)</u>

Isotope ratio	Measured value+
D/H	5
³⁸ Ar/ ³⁶ Ar	1.3
$^{13}C/^{12}C$	1.05–1.07
$^{15}N/^{14}N$	1.7
¹⁸ O/ ¹⁶ O	1.025



火星大気中の元素が重い同位体に富む

火星はサイズが小さい・過去40億年間ダイナモ磁場がない

→ 水と同様に大気も宇宙空間へ流出

→ 火星の寒冷化・残った水が地下氷になった?

*磁場を持たないが厚い大気を持つ金星との比較からは、

サイズの違いも重要だった可能性が示唆される

まとめ





¥
 H₂Oが水蒸気として存在
 ↓
 H₂Oが大気を通じて散逸
 ↓
 厚い大気の温室効果で
 高温・乾燥した惑星

HZ: H2Oが液体で存在

 ↓
 ↓
 (+プレートテクトニクス)約40億年前は厚い大気で温暖?
 大気中のCO2が炭酸塩化
 H2Oが液体で存在
 ↓
 ↓
 ウォーカー・フィードバック
 小さい重力&磁場消失
 気候の安定化
 ↓
 温暖・湿潤な惑星
 薄い大気しか持たない
 寒冷・乾燥した惑星

(極冠 + 地下氷?)