地球と生命 第3回:惑星の大気

講義資料はこちらに掲載しています







◎黒川 宏之 (くろかわ ひろゆき)

●東京工業大学 地球生命研究所 特任助教

◎専門は"惑星の形成と進化"の理論研究

連絡先: hiro.kurokawa@elsi.jp



表層環境への影響

- ◎ 温室効果 大気がなければ地球平均気温は-20°C!
- 海水の保持 大気がなければ紫外線によって水は解離し、宇宙へ流出

惑星の顔として

◎ 惑星の形成過程・惑星内部の情報を(原理的には)保持している ● 惑星の見た目を決めるので、面白い

● 紫外線を防ぐ — 大気(オゾン層)がDNAを損傷する波長 (<300 nm) の光を吸収





	水星	金星	地球	火星
軌道半径 [au]	0.4	0.7	1	1.5
地表面気圧 [気圧]		90	1	0.006
大気主成分		CO _{2 (>95%)}	N_2, O_2	CO ₂ (>95%)
地表平均気温 [K]	440	740	288	210
表層水量 [地球=1]		10-5(水蒸気)	1 (液体の水)	10-3 (水)

























- 温度に着目:対流圏,成層圏,中間圏, 熱圈 0
- 化学組成に着目:均質圏,不均質圏 0



8

地球を含む太陽系内岩石惑星の大気は惑星サイズと比較して薄いため, $\frac{dp}{dr} = -\frac{GM}{r^2}\rho \sim \rho g$ — (1) (g は重力加速度). 等温・理想気体を仮定して $p = \frac{\rho k_B T}{\pi}$ — (2) から ρ を消去して解くと, 最後に (4)を積分して、 $p(z) = p_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right) - (6)$. $\rightarrow p, \rho$ ともに 上空へ H 進むごとに 1/e 倍ずつ減少していく. 地球平均気温 288 K, 平均分子量 29.0 を(5)に代入すると, H = 8.4 km となり、大気が実際に薄いことが確かめられる.



- 大気の圧力 p(z), 密度 ρ 惑星質量 M





$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad -- (1)$$

- (1)を地表から無限遠まで積分する.
- $\int_{p_0}^{0} dp = -g \int_{0}^{\infty} \rho dz (2)$

$$\therefore p_0 = g \int_0^\infty \rho dz \quad - (3)$$

大気の柱質量密度 Σ についての式 Σ

$$p_0 = \frac{M_{\rm atm}}{4\pi R^2}g$$
 — (5)





$$L \equiv \int_0^\infty \rho dz = \frac{M_{\text{atm}}}{4\pi R^2}$$
 — (4) を(3)に代入して,

 \rightarrow 大気質量 M_{atm} と地表の気圧 p_0 は比例関係にある. (\rightarrow レポート課題)



3つの熱輸送メカニズム



- ●対流圏界面より上空では輻射熱輸送
- 紫外線を吸収し高温の熱圏から中間圏へと熱伝導

● 光学的に厚い(赤外線を通さない)大気下部に対流圏が形成





Catling & Kasting (2017) Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless worlds



地球の放射スペクトル



Catling & Kasting (2017) Atmospheric Evolution on Inhabited and Lifeless worlds

- 大気の吸収特性は波長依存
- 分子の吸収帯がある波長域では放射量が小さい ● 地表からの光が大気によって吸収される
- 光学的に薄い波長域(8 12.5 μm など): 大気の窓
 - 複数の温室効果ガスが共存する時, 互いの窓を塞ぐ関係にあると効果が大きい
 - また、地上望遠鏡による天文観測において重要





初期火星の温室効果ガス



(詳しくは次回)

Wordsworth (2016) Annu. Rev. Earth Planet. Sci.



- 光子の吸収・放射 = 電磁波と分子・原子の電磁気的相互作用
 - 分子・原子が電気/磁気双極子モーメントを持っていると生じる

 - 0
- 吸収する波長のエネルギー = 分子・原子の状態間の遷移エネルギーに対応



温室効果ガス:H2O (恒常的な電気双極子モーメント), CO2 (振動に伴う電気双極子モーメント) 非温室効果ガス:N2(双極子モーメントなし), O2(磁気モーメントを持つが, 電波の波長域に対応)







- 赤外域では振動・回転遷移が支配的 0
- 振動遷移(波長間隔:広)に回転遷移(間隔:狭)が伴い,吸収帯を構成 0



吸収帯(バンド)





吸収線は遷移エネルギーに対応する光子振動数を中心に幅を持って存在する ● Natural broadening:分子のエネルギー状態の不確定性(ハイゼンベルクの不確定性原理)によるもの Doppler broadening:分子の並進運動が引き起こすドップラー効果によるもの Pressure (collisional) broadening:分子間衝突による余剰エネルギーによるもの 下層大気では pressure broadening が支配的かつ, 高圧になるほど線幅が広がる





17







◎ 赤外吸収特性を持たないガスも惑星の気候に影響:Pressure broadening, 光の散乱

非温室効果ガスによる温室効果



Goldblatt et al. (2009) Nat. Geosci.

◎ 初期地球を温暖に保っていた温室効果ガスとして,高いN2分圧も提案されている (次回)





- ●中心星放射による光解離がつくり出すラジカルが大気の非平衡化学を駆動 ● 最外殻に不対電子を持つ分子種:OH, CL, O など
- 代表的なラジカル OH の生成パス

 - 地球: $O_3 + h\nu$ ($\lambda < 310$ nm) $\rightarrow O_2 + O(^1D) (1), H_2O + O(^1D) \rightarrow OH + OH (2)$ ● 火星:H₂O + $h\nu$ (λ < 240 nm) \rightarrow OH + O — (3)
- ●光子から得たラジカルの自由エネルギーは化学反応によって伝播 ●例) $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O - (4)$
- 最終的に不均化反応か三体反応による再結合で熱化 ●例) OH + HO₂ → H₂O +O₂ — (5), NO₂ + OH + M → HNO₃ + M — (6)

光解離が駆動する非平衡化学

OH: "Detergent of the atmosphere"

生物・非生物由来の微量ガスは OH によって酸化され取り除かれている

- $CO \rightarrow CO_2$ (~3ヶ月)
- 炭化水素 C_xH_y → CO₂ (e.g., CH₄ ~10年)
- 窒素酸化物 N_xO_y → 硝酸
- 硫黄化合物 SO2, H2S, COS (微生物由来), DMS (CH3SCH3, プランクトン由来) → 硫酸エアロゾル 水のない惑星では OHによる酸化 (+ 降雨への溶存) が機能せず,全く異なる大気組成に! 例) 系外惑星大気におけるSO2ガスの検出 → 液体の水がない証拠 (Luftus et al. 2019 Astrophys. J.)



オゾン層の形成



<u>チャップマン機構</u>

○ O₃の生成

• $O_2 + h\nu \ (\lambda < 242 \text{ nm}) \rightarrow O(^3P) + O(^3P) - (1)$

 $O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M - (2)$

O3の破壊

• $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^3P) - (3)$ $0 O_3 + O \rightarrow 2O_2 - (6)$

• $O_3 + h\nu (\lambda < 310 \text{ nm}) \rightarrow O_2 + O(^1D) - (4)$ • $O(^{1}D) + M \rightarrow O(^{3}P) - (5)$

CO2大気の安定性

CO_2 は < 200 nm の紫外線で光解離: $CO_2 + h\nu \rightarrow CO + O - (1)$ 逆反応 $CO + O + M \rightarrow CO_2 + M - (2)$ は遅い (スピン禁制反応)





→ CO₂大気は不安定. CO + O₂ 大気となるはず \leftrightarrow CO₂大気の地球型惑星





CO₂: 95% CO: 700 ppm

なぜCO2大気は安定に存在できる?(金星,火星,初期地球…)





H₂O(OH)によるCO₂大気の安定化



寒冷な初期火星ではCO2大気が不安定?



Zahnle et al. (2008) J. Geophys. Res.



大気構造

- ●大気の圧力・密度構造:静水圧平衡によって、スケールハイトごとに指数関数で減少
- 大気の熱輸送メカニズム:地表からの熱伝導, 大気中の対流・放射
- 温室効果の仕組み:大気の窓、吸収線・吸収帯、吸収幅 → 複数のガスの効果は非線形

大気化学

- ◎紫外線による光解離、ラジカル(OHなど)が駆動する非平衡化学 CO₂大気の安定性:
 - H₂O(OH)が触媒的に機能してCOとOを再結合
 - 寒冷な惑星(大気H2O少ない)ではCO+O2に?

まとめ



惑星半径 6.4×10^6 m, 6.1×10^6 m を用いてもよい.

1.地球と金星の大気圧からそれぞれの惑星の大気質量を計算せよ、それぞれ の惑星の大気圧 1.0×10^5 Pa, 9.2×10^6 Pa, 重力加速度 9.8 m s⁻², 8.9 m s⁻², 2.地球の地殻中には 3.6×10^{20} kg の炭酸塩岩が含まれていると見積もられて いる. この炭酸塩は原始地球において大気中の二酸化炭素 CO2 が固定され たものである、炭酸塩岩をすべて炭酸カルシウム CaCO3 であると近似する 時、原始地球の大気圧を見積もれ、



次回講義(12/16)開始までに提出 メールでも可 → hiro.kurokawa@elsi.jp