

論文紹介セミナー 2012/01/19

Chemistry of atmospheres formed during accretion of the Earth and other terrestrial planets

Laura Schaefer and Bruce Fegley Jr
Icarus 208 (2010) 438-448

東大 柏 M1 桑原秀治

概要

◎内容

集積過程、その後の地球型惑星の大気組成の推定

◎新規性

化学平衡計算と反応速度論的考察による大気組成の推定

◎結果

地球型惑星形成期における大気は炭素質コンドライトが集中的に集積しない限りH₂に富む

惑星形成期における衝突生成大気



地球型惑星は集積時の高温条件下により揮発性物質が“脱ガス”し、大気を形成する

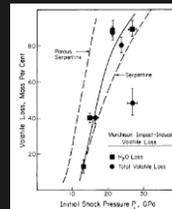
◆衝突により生成した大気はその後の表層進化に大きな影響を与える

◆水蒸気大気の温室効果によるマグマオーシャンの形成 [Matsui and Abe, 1986]

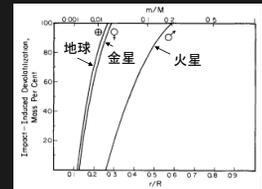
衝突生成大気を推定するには？

◆どのような条件下で脱ガスが起こるか？

⇨ 実験による衝突脱ガス量の見積り [e.g., Tyburczy et al., 1986]



含水鉱物の脱ガス



集積惑星への適用

◆月程度の大きさになるとH₂O, CO₂が脱ガスをはじめ

衝突生成大気を推定するには？

◆様々な温度・圧力条件下における化学組成は？
⇨ 化学平衡計算による衝突生成大気組成の見積り

◆ギブズ自由エネルギー最小化法による平衡計算 [e.g., van Zeggern and Storey, 1970]

系内すべての反応を知らなくても、温度・圧力・化学組成を与えれば、その点における化学平衡組成を求めることができる

◎低温になると平衡に達する時間が衝突生成大気の寿命(冷却)時間より長くなるため、平衡は保たれない

◎化学平衡計算を惑星表層環境へ適用するには反応速度論的考察が必要不可欠

化学平衡組成の凍結

●化学寿命時間

$$a + b \rightarrow c \quad t_{chem}(a) = \frac{[a]}{d[a]/dt} = \frac{[a]}{k[a][b]} = \frac{1}{k[b]}$$

●放射冷却時間

[i]:分子iの数密度 k:反応速度定数

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dT} \frac{dT}{dt} = \frac{NR}{\gamma - 1} \frac{dT}{dt} = \epsilon \sigma AT^4 \quad t_{cool} = \frac{NR}{3(\gamma - 1)\epsilon \sigma A} \left(\frac{1}{T_{amb}^3} - \frac{1}{T_{hot}^3} \right)$$

ε:放射冷却効率 σ:stefan-boltzmann定数 A:面積 N:全気相分子の数 R:理想気体定数 γ:比熱比

◎ $t_{chem} < t_{cool}$ の場合
化学組成は平衡を維持

◎ $t_{chem} > t_{cool}$ の場合
化学反応は凍結し、熱力学的に不安定な分子種が準安定的に存在する

◆凍結温度($t_{chem} = t_{cool}$ のとき)は1000~2000Kとされている [e.g., Fegley et al., 1986]

目的

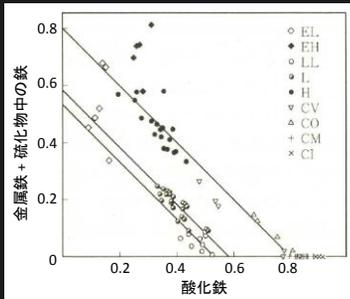
- ◆ 化学平衡・反応速度論計算により地球型惑星の集積形成大気の組成を推定する
- 隕石物質の違いが衝突生成大気組成にどう影響するか？
- 異なる温度・圧力条件下でどのような化合物が生成するか？
- 化学平衡計算は衝突生成大気組成推定に有効か？
- マグマオーシャンが大気にどのように影響するか？

計算条件

- 集積物質組成
CI (Orgueil), CM (Murchison), CV (Allende), H, L, LL, EH, EL [Lodders, 2003; METBASE database (Koblitz, 2005)]
- 温度: 300~2500K
- 圧力: $10^{-4} \sim 10^{-4}$ bar
- 化学種: 気相・凝縮相合わせて約930種を考慮
- 元素
Al, C, Ca, Cl, Co, Cr, F, Fe, H, K, Mg, Mn, N, Na, Ni, O, P, S, Si, Ti

コンドライトの酸化還元状態

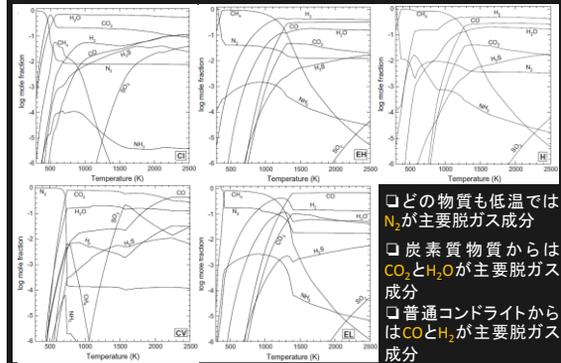
SIで規格された鉄の総量と酸化還元状態の関係



比較惑星学より

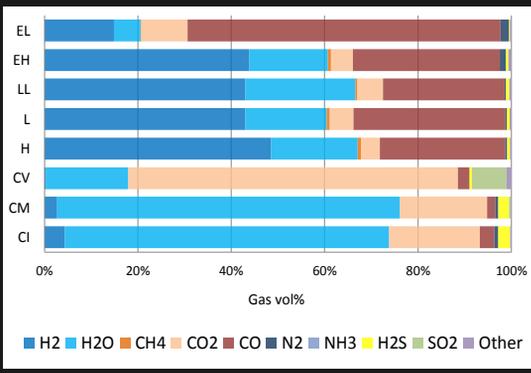
熱力学平衡計算による衝突脱ガス大気組成の推定

Total Pressure = 100bar

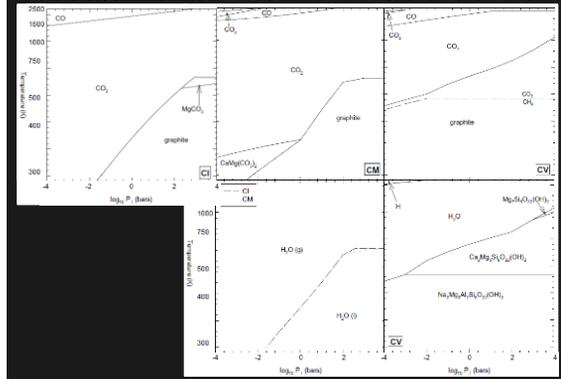


- どの物質も低温では N_2 が主要脱ガス成分
- 炭素質物質からは CO_2 と H_2O が主要脱ガス成分
- 普通コンドライトからは CO と H_2 が主要脱ガス成分

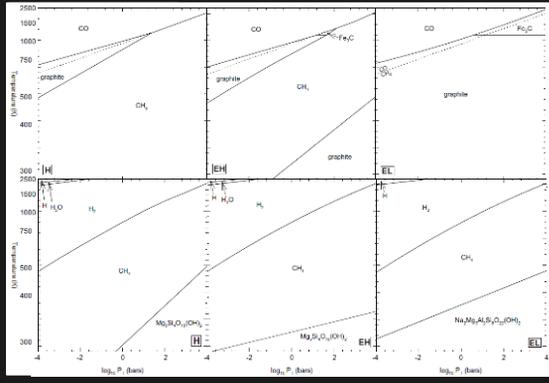
P=100bar T=1500K における平衡大気組成



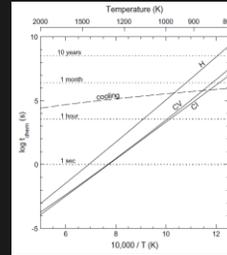
炭素質隕石: 各温度・圧力条件における主要炭素・水素化合物



普通およびエンスタイト隕石



速度論的考察 (1) 主要気相成分の平衡凍結



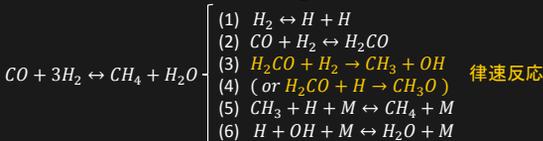
$$\begin{aligned}
 &H_2O + CO \leftrightarrow H_2 + CO_2 \quad (1) \\
 &CO + OH \rightarrow H + CO_2 \quad (2) \\
 &H + H_2O \rightarrow H_2 + OH \quad (3) \\
 &t_{chem}(CO) = \frac{[CO]}{k_2[CO][OH]} = \frac{1}{k_2[OH]} \\
 &t_{chem}(H_2O) = \frac{[H_2O]}{k_3[H_2O][H]} = \frac{1}{k_3[H]}
 \end{aligned}$$

反応(2)の化学寿命時間

◆主要気相成分は900~950K程度まで平衡組成を保つ

速度論的考察 (2) CH₄/CO(or CO₂)の平衡凍結

◆低温へ移行するにつれCO, CO₂はCH₄へ



[Fegley, 2000; Visscher and Fegley, 2005]

$$t_{chem}(CO) \approx \frac{[CO]}{k_3[H_2][H_2CO]} \text{ or } \frac{[CO]}{k_4[H][H_2CO]}$$

◆凍結温度は (3) 1820K(CI, CM) or 1380K(H, EH, EL)
(4) 1050K(CI, CM) or 950K(H, EH, EL)

普通、エンスタイトコンドライトからはH₂, CO主体の還元型大気が形成
炭素質コンドライトからはCO₂, H₂O主体の酸化型大気が形成

マグマオーシャンの影響

◆地球型惑星は水蒸気大気による温室効果によりマグマオーシャンを形成するほど表面温度が高かった可能性あり(e.g., 1500K, 100bar) [Matsui and Abe, 1986]

◆Moor et al. (1998)のモデルを用いて1200K, 1kbarにおけるマグマ中のH₂O溶解度を算出

◆大気量の2%(H, EHの場合)~ 10%(CIの場合)がマグマオーシャンに溶解しうる

◆炭素質隕石の集積により形成された大気ではCO₂-richな大気組成となる

まとめ

◆普通コンドライトとエンスタイトコンドライトはH₂, COに富み、炭素質コンドライトはCO₂に富んだ大気を形成する

◆水蒸気大気は炭素質コンドライトの集積によってのみ形成される

◎本研究の結果は集積中の系外惑星の大気観測から惑星構成成分を予測するのに役立つ