木星型惑星大気の熱力学計算

杉山耕一朗 (北大・理)
小高正嗣 (東大・数理)
倉本圭 (北大・理)
林祥介 (北大・理)

1. はじめに

- 木星型惑星大気の組成

木星大気と地球大気の比較 (理科年表, Weidenschilling and Lewis, 1973 より)

	木星大気	地球大気
大気平均分子量	2.2	28.8
大気主成分	H2, He	N2, O2
大気凝結成分	H2O, NH4SH, NH3	H2O

- 木星型惑星大気の特徴
  - 化学反応によって凝結が生じる
    - NH3(g) + NH4SH(g) → NH4SH(s)
  - 溶液として凝結が生じる
    - H2O(l) + NH3(g) → NH3(aq) (アンモニア水溶液)

2-1 本研究の目的

木星型惑星大気の熱力学状態を計算するための熱力学コードの開発

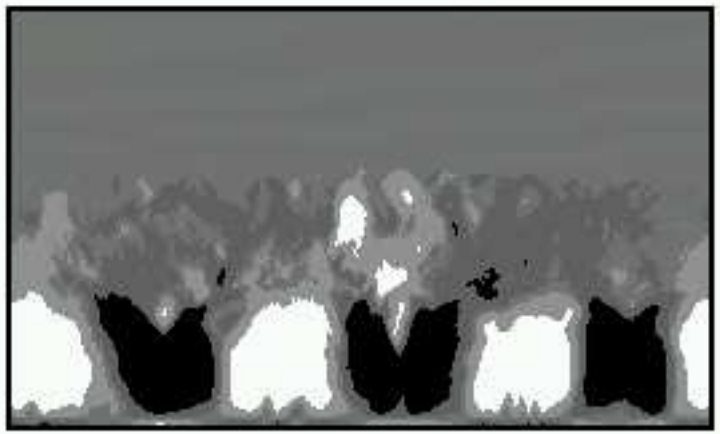
- 仮定
  - 大気は平衡状態にある
  - 大気成分気体やその凝結成分は理想気体, 理想溶液の法則に従う

- 計算する物理量
  - 断熱温度減率
  - 凝結物質の鉛直分布

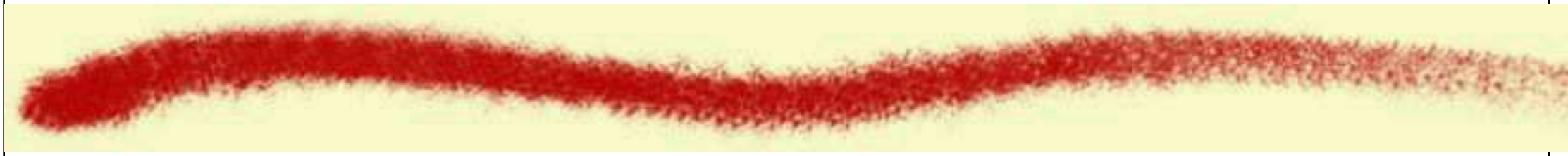
2-2 本研究の位置付け

木星大気の対流モデルの開発のための第 1 歩

- 木星大気中に存在するそれぞれの凝結物質が, 流れ場と雲分布にどの程度影響を与えるか調べる
- 従来の研究では凝結物質として水しか考慮していない



3-1 計算手法



◦基礎方程式

▫断熱の式

$$dS = 0$$

(S はエントロピー)

◦計算手順

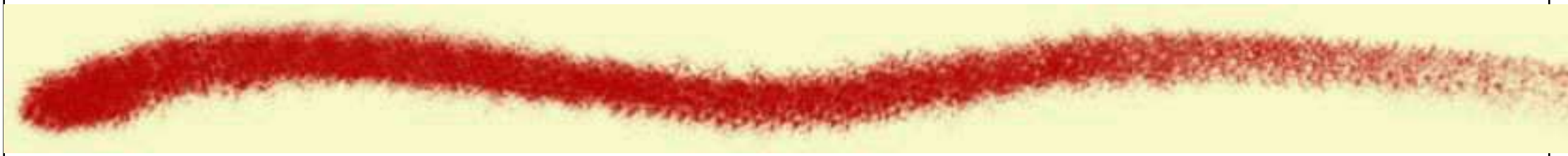
1.温度・圧力をパラメータとし, 大気の平衡状態を求める

▹ギブスの自由エネルギー G の最小化された状態として計算する

2.温度・圧力空間でのギブスの自由エネルギー G の分布から, エントロピー S の
分布を求める

3.初期温度・圧力を通る断熱曲線(dS = 0)の軌跡を順にたどることで,
断熱温度減率と凝結物質の存在量を求める.
但し, 大気は擬湿潤断熱変化しているものとする.

3-1-1 平衡状態の求め方



- ○方程式
  - □温度・圧力を与えた時のギブスの自由エネルギー G の式

$$G(n_i^\phi) = \sum \mu_i^\phi n_i^\phi$$

(μ は化学ポテンシャル, n は物質のモル数. 添字 i は物質を意味し, 添字 φ は相を意味する.)

- ▹化学ポテンシャルは以下で与えられる

$$\mu_i^\phi(T,p) = \mu_i^{\circ\phi}(T) + RT\ln\frac{n_i}{\sum n_i} + \alpha RT\ln\frac{p}{p_0}$$

[右辺第 2 項, 第 3 項によって気体の混合, 溶液・固溶体による効果が評価されている]

(T は温度, p は圧力, p_0 は標準圧力, R は気体定数. 気相ならαは 1, それ液相・固相ではαは 0 である. 添字 ○ は標準状態を意味する.)

$$\mu_i^{\circ\phi}(T) = h(T_0) - Ts(T_0,p_0) + \int_{T_0}^{T} c_p dT - T\int_{T_0}^{T}\frac{c_p}{T}dT$$

[標準化学ポテンシャルは物性値から求まる]

(h はモルエンタルピー, s はモルエントロピー, T_0 は標準温度, Cp は定圧比熱.)

- □空気塊に含まれる元素の個数が一定という条件の下で物質のモル数をパラメータとして変化させ, ギブスの自由エネルギー G を最小化する物質のモル数を求める

3-1-2 エントロピーの求め方

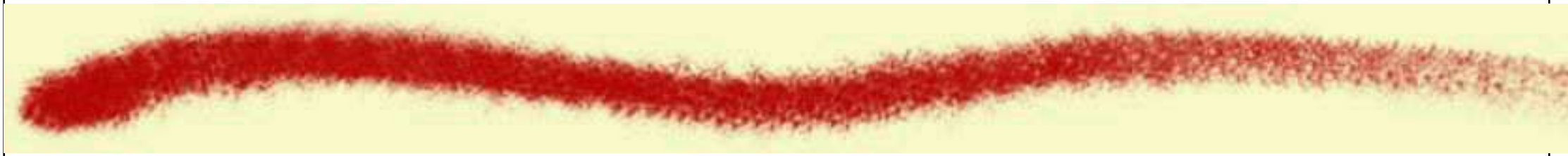
- 方程式
  - エントロピーに関する Maxwell の関係式

$$S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{p,n_i}$$

(T は温度, p は化学ポテンシャル, n は物質のモル数.)

  - 温度・圧力空間でのギブスの自由エネルギー G の分布から, エントロピー S の分布を求める

3-1-3 断熱曲線の求め方



- 考え方
  - 空気塊は擬湿潤断熱変化する

- 擬湿潤断熱(pseudo moist adiabat)変化
  - 凝結性成分気体が凝結した後, ただちに空気塊から離脱(降水)する
    - 空気塊の平衡は保たれる
    - 空気塊のエントロピー及び凝結性成分気体の量は保存されない
    - 空気塊と離脱した凝結性成分全体のエントロピーの和は保存

3-2 従来の研究の計算手法との比較

- 従来の研究での定式化
  - 理想気体の状態方程式と潜熱・反応熱を用いて簡単化したエントロピーの保存式
    - 地球の湿潤断熱減率を計算する場合にも利用される計算手法

$$dS = \frac{c_p}{T}dT - \frac{V}{T}dp + \frac{L_s}{T}dw_s + \frac{L_r}{T}dw_r + \frac{L_{aq}}{T}dw_{aq} = 0$$

(Cp は潜熱, V は体積, Ls は凝結熱, Lr は化学反応の反応熱, Laq は水溶液の凝結熱, w は混合比)
(添字 s は純物質の凝結を意味し, 添字 r は化学反応を意味し, 添字 aq は溶液を意味する)

  - 凝結物質量の変化は経験式を用いて定式化
    - 凝結: 飽和蒸気圧と蒸気圧から求める
    - 化学反応: 化学反応の圧平衡定数から求める.
    - 溶液: 溶液濃度と温度・圧力の経験式から求める.

組成の違う大気を考える場合には, その大気成分に合わせた経験式を数値コードに追加する必要がある

3-3 本計算手法の利点

本研究の計算手法は従来の研究に対して以下の利点を持つ:

- 大気中で生じる反応式・溶液毎に経験式を数値コードに追加する必要がない
  - 化学反応で生じる物質の化学ポテンシャルさえわかればよい
  - 溶液・固溶体の情報は化学ポテンシャルに組み込まれている
- 汎用性に富む. 大気組成を簡単に変更することができる
  - 大気中で多数の化学反応が生じる場合に有効

4 モデル計算

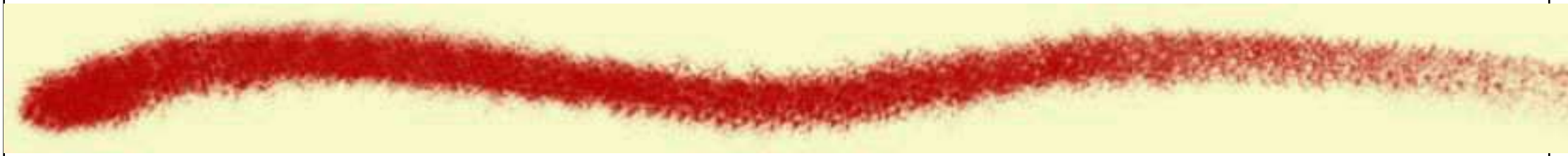
木星大気の断熱温度減率, 凝結物質の鉛直分布を計算

- 計算開始温度・圧力
  - 圧力: 10 bar
  - 温度: 350 K, 340 K

- 大気組成
  - Atreya and Romani (1985) で用いられた数値を利用
    - ボイジャーの観測と整合的

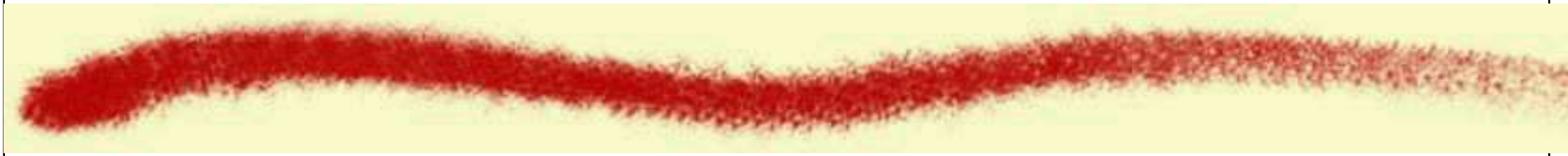
物質名	初期存在量
$\mathrm{H_2(g)}$	8.86×10^{-1}
$\mathrm{Ar(g)}$	1.12×10^{-1}
$\mathrm{H_2O(g)}$	1.05×10^{-3}

計算結果



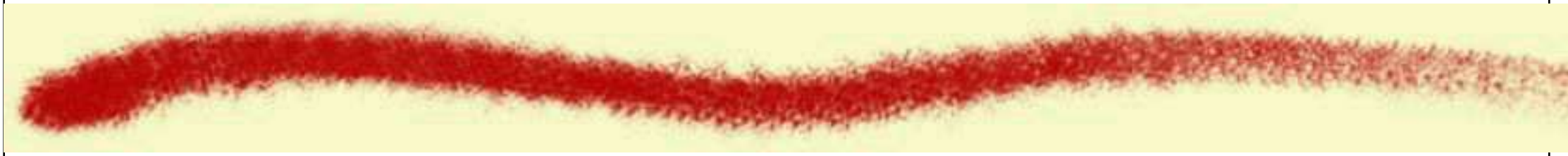
◦温度分布

計算結果



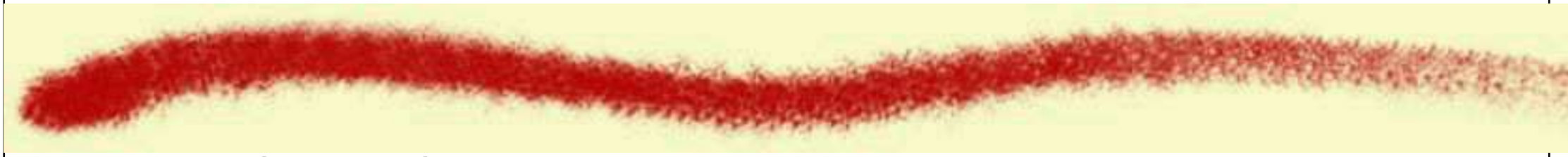
- 凝縮物分布

観測結果との比較



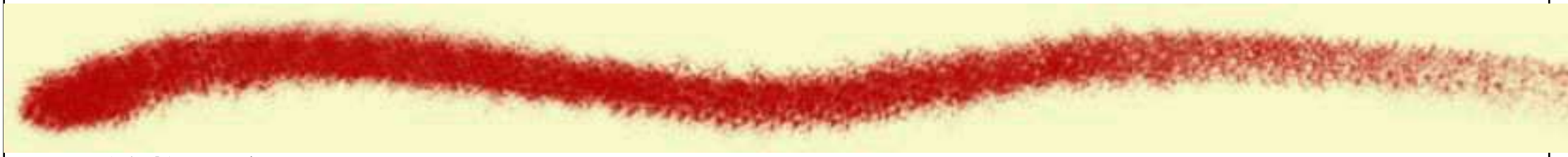
- ガリレオの観測結果

理論研究との比較



- Atreya and Romani 1985

まとめ



◦凝縮物分布