

ハイドロダイナミックエスケープによる惑星大気の散逸

佐々木貴教 (東大)・阿部豊 (東大)

ABSTRACT

惑星大気の散逸の問題は、惑星の初期進化を考える上で非常に重要です。特に水素のハイドロダイナミックエスケープ、およびそれに引きずられる形でのより重い元素の散逸は、地球の初期大気問題、希ガス同位体問題、あるいは金星の水散逸問題などを解く上で重要な散逸過程です。しかしハイドロダイナミックエスケープの理論解を求めることは容易ではありません。数値的な計算も Tian et al. (2005) などによりなされていますが、大気成分が複数種の場合、あるいは吸収・放射を考慮した場合の数値計算はいまだに実現されていません。そこで我々は、究極的には複数種で吸収・放射入りの計算が可能な、様々な大気散逸問題に適用できる「道具」を手に入れることを目指し、コード開発を進めているところです。

1. 大気の熱的散逸

Jeans Escape 「大気の蒸発」

- ・ 静水圧平衡が成り立っている場合の散逸
- ・ 気体分子がある確率で脱出速度を超える
- ・ 散逸 flux は “diffusion-limited”

Hydrodynamic Escape 「大気の流出」

- ・ 静水圧平衡が破れた場合の散逸
- ・ 気体分子の運動エネルギー > 重力エネルギー
- ・ 散逸 flux は “energy-limited”

散逸規模が大きく惑星大気の進化を追う上で重要

- 地球の原始大気の散逸
- 金星からの H₂O の散逸
- 金星大気の Ne, Ar 質量分別
- Hot Jupiter からの質量流出



2. 数値計算モデル

1次元オイラー方程式 (水素 + 1成分の場合)

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u r^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r^2)}{\partial r} = -\rho G M - r^2 \frac{\partial p}{\partial r} + \rho r^2 (u_{H_2} - u) n_{H_2} k_i - \alpha T k \left(\frac{n_{H_2} n}{n_{H_2} + n} \right) \frac{dT}{dr} \\ \frac{\partial(E r^2)}{\partial t} + \frac{\partial[(E+p)u r^2]}{\partial r} = -\rho u G M + q r^2 + \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{cases}$$

計算条件

- 分子間の衝突頻度 k_i : 測定値を与える
- 熱拡散係数 αT : 測定値を与える [Zahnle & Kasting, 1986]
- 熱伝導率 $\kappa = \kappa^* (T/T^*)^{0.7}$
- 加熱率 q : 各高度で適当に与える

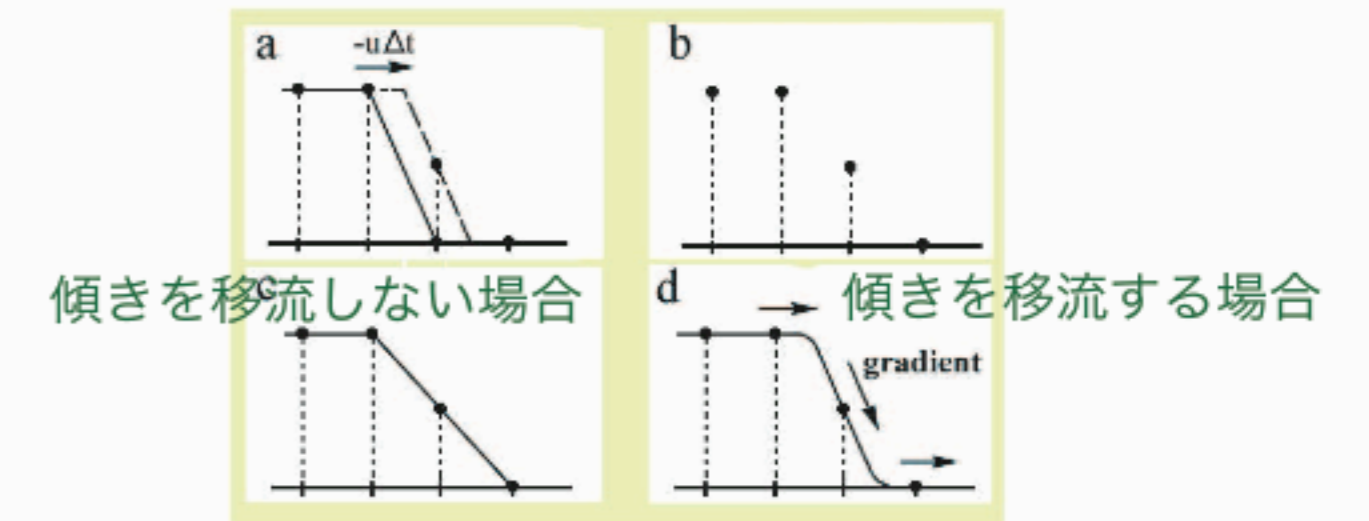
CIP法 + 差分法 のセミ・ラグランジュ法で解く

$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial r} = H$ を移流項と非移流項に分解

移流項: $\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial r} = 0 \rightarrow$ CIP法

非移流項: $\frac{\partial f}{\partial t} = H \rightarrow$ 差分法 (時間前進・空間中心)

CIP(Cubic-Interpolated Pseudoparticle) 法

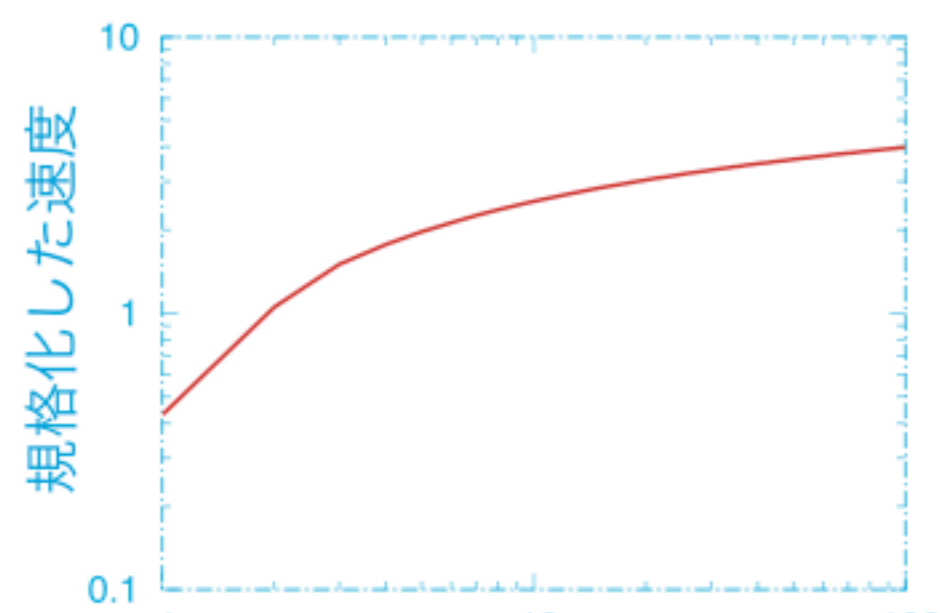


値だけではなく傾き (微分値) も移流
遷音速~超音速まで安定に解くことが可能

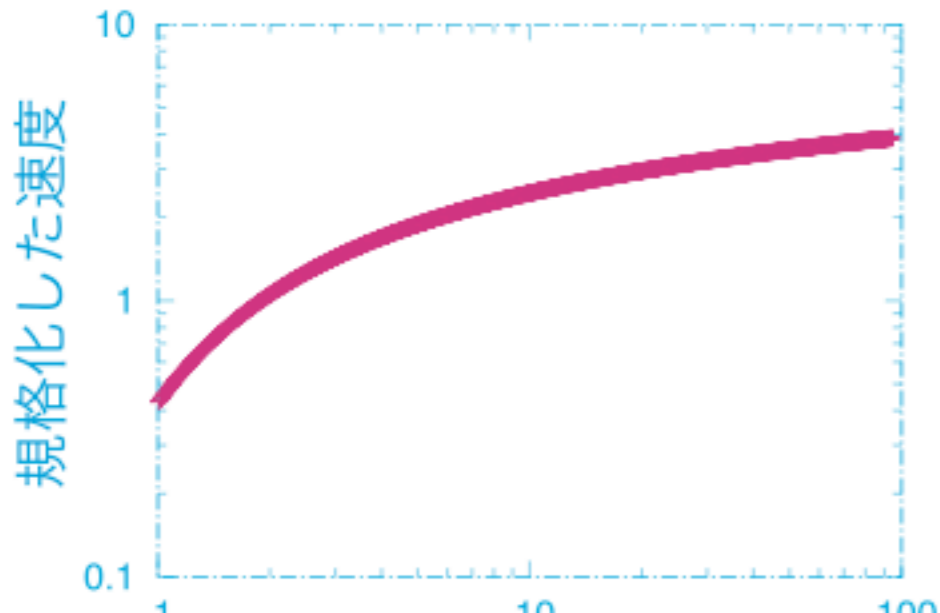
3. 計算結果・解析解との比較

1成分等温大気

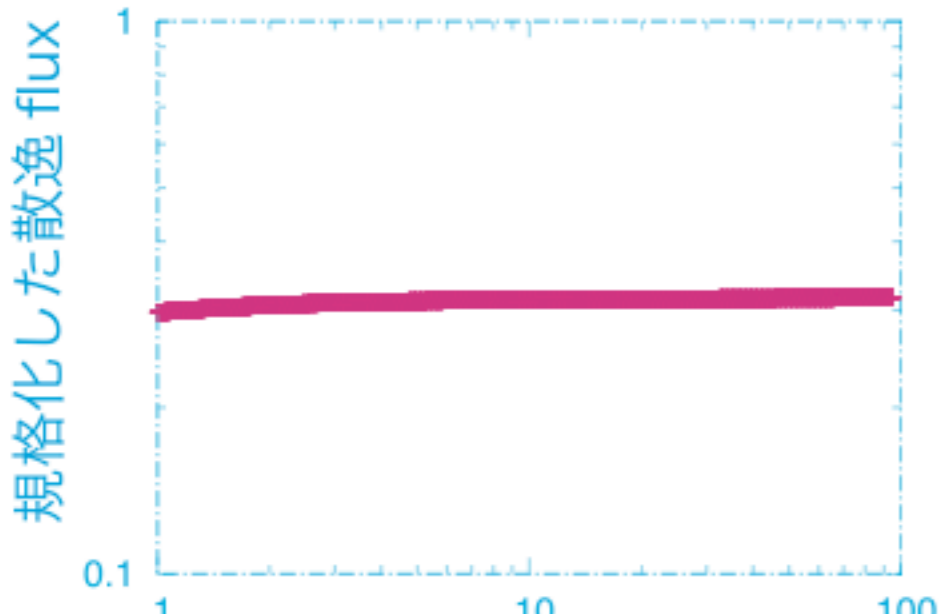
解析解



数値解

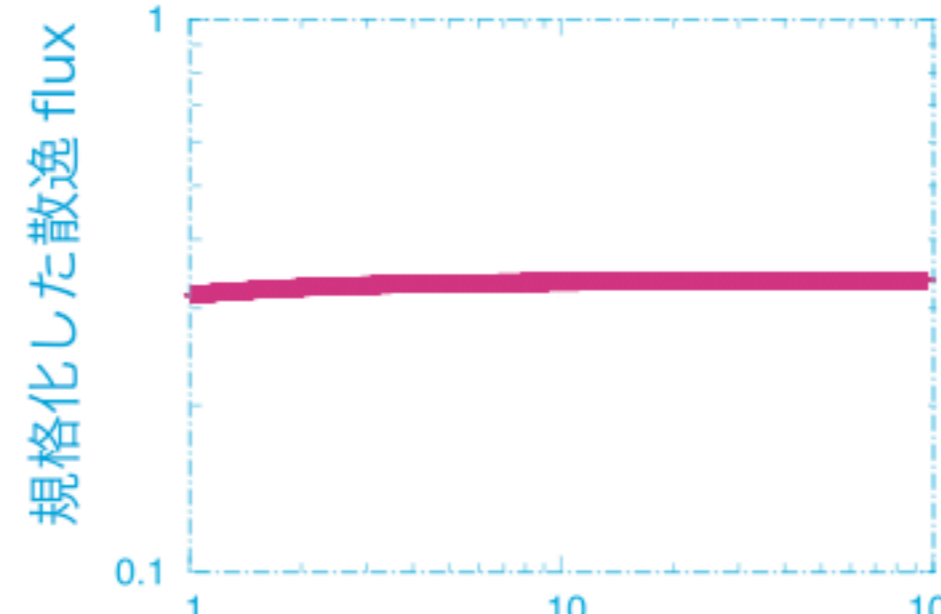
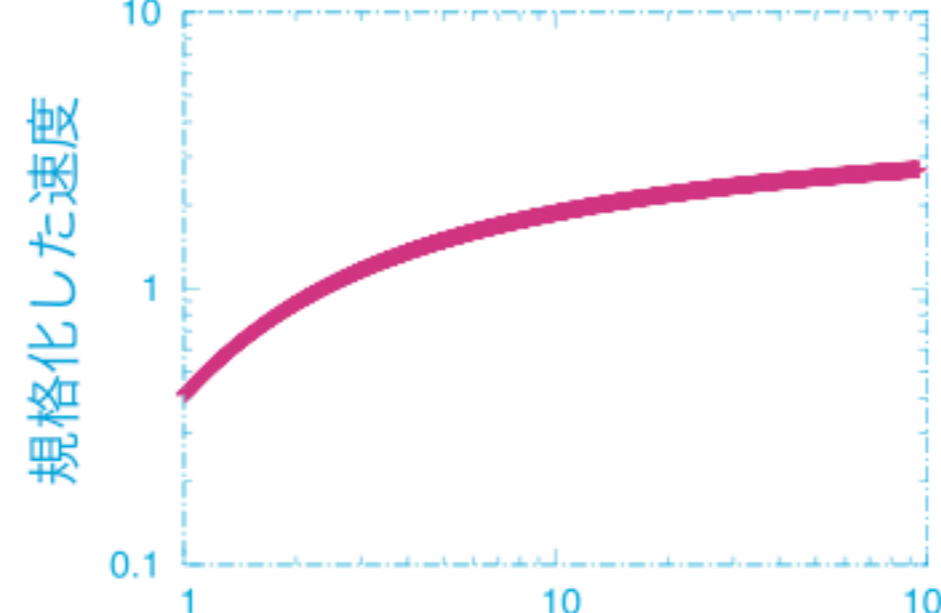
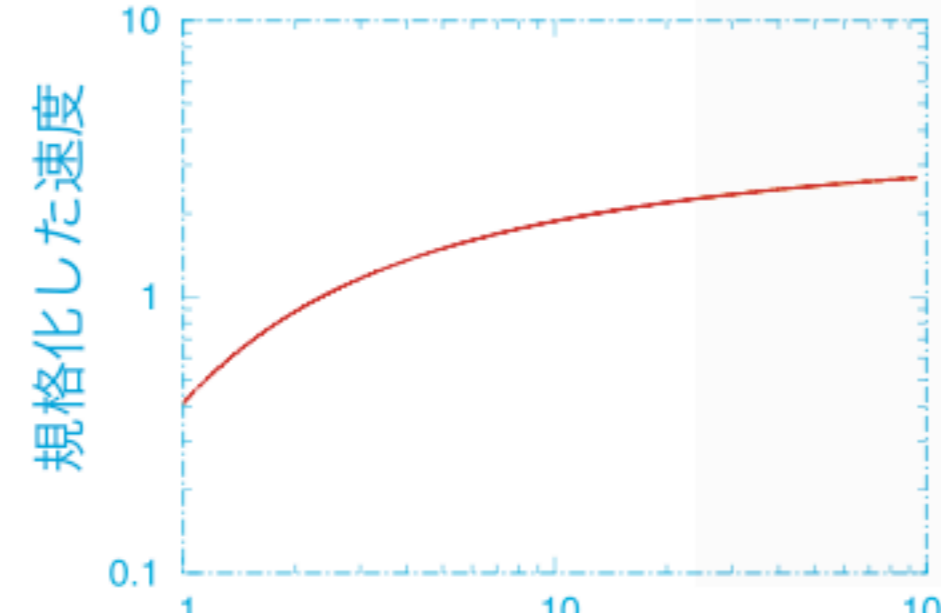


数値解



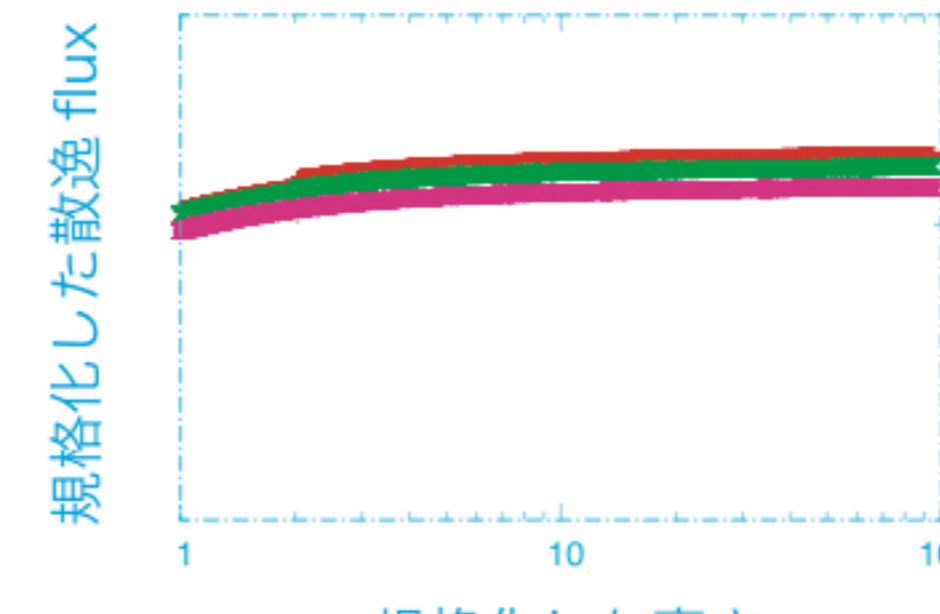
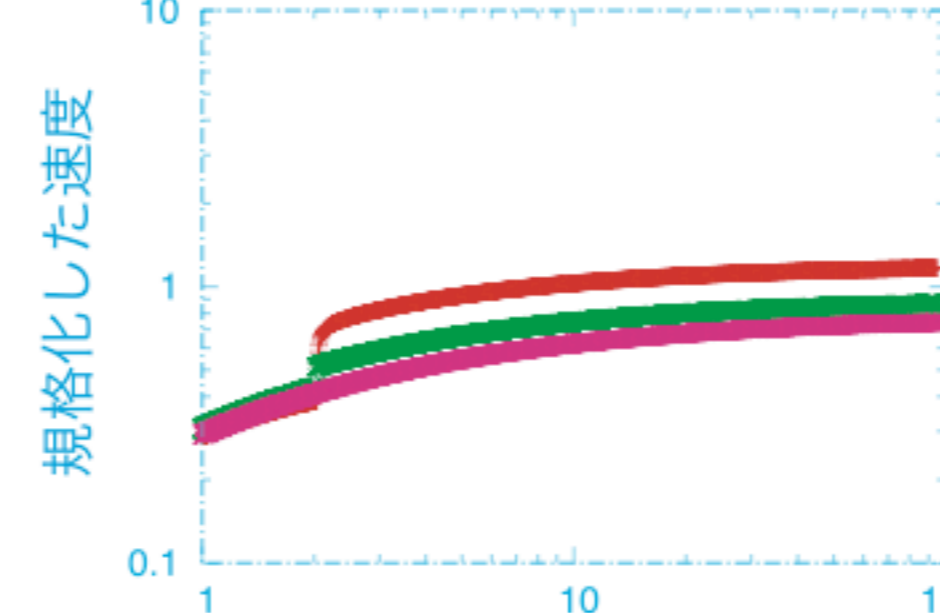
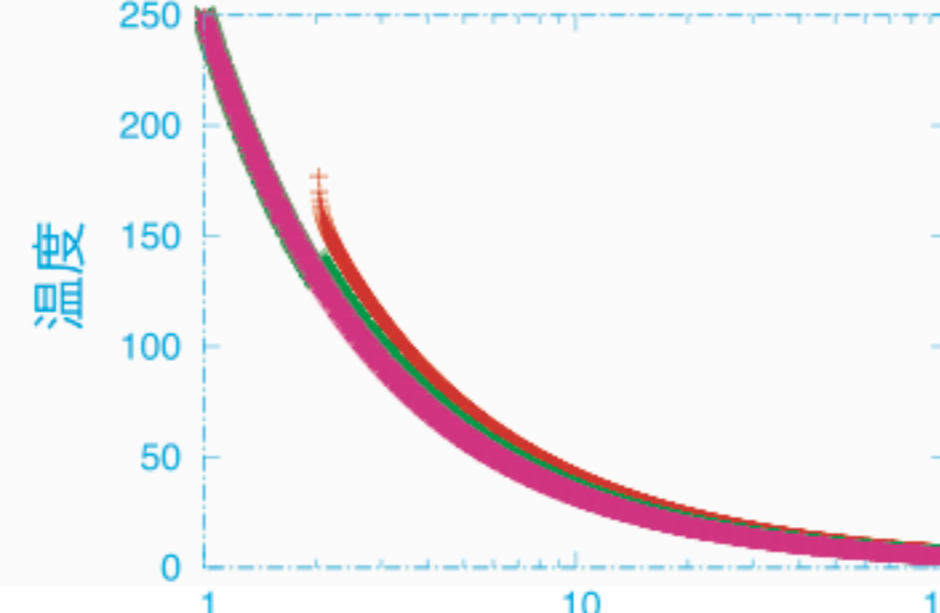
規格化した高さ

1成分ポリトロップ大気



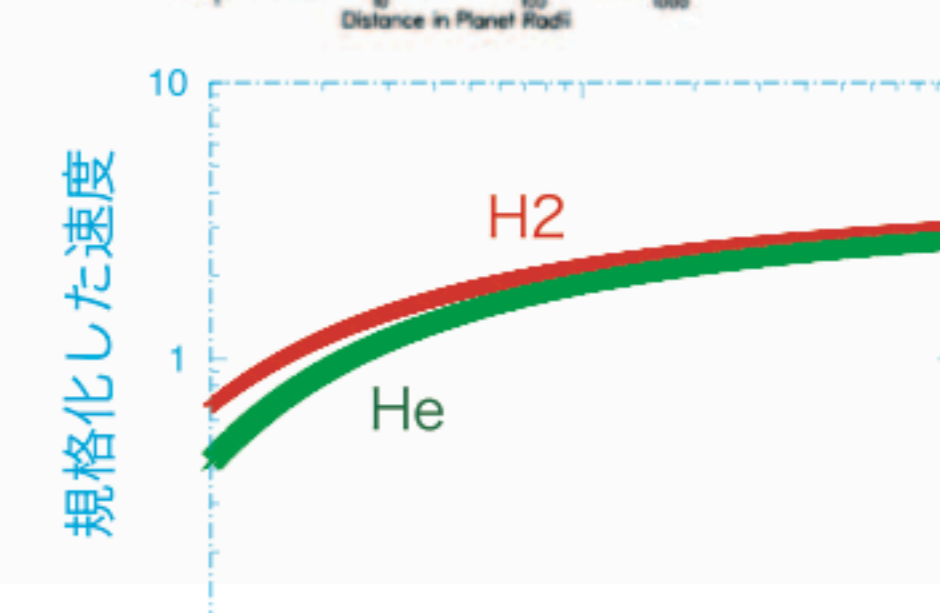
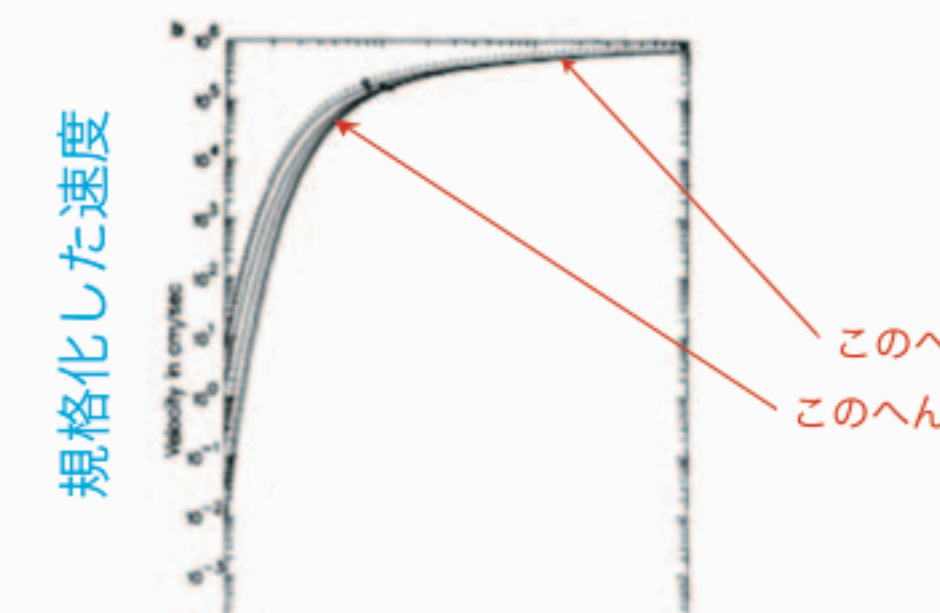
規格化した高さ

1成分1層加熱大気



規格化した高さ

2成分ポリトロップ大気



規格化した高さ

等温大気の解析解 (Parker 解)・ポリトロップ大気の解析解を正しく再現
散逸 flux はほぼ一定で定常流が得られている
これ以上計算しても結果に影響無く、安定に数値解が得られたといえる

一層加熱により温度上昇後に断熱減率
それに伴い速度・散逸 flux の上昇が再現
連続層加熱でも同様の結果が得られた

H₂+He の場合の半解析解を再現
他の大気成分 (O, Ne, Ar) でも計算可能

計算に用いる測定値が H₂+α の
場合しかないのが問題
一般の多成分大気をどう解くか?

4. 適用例

1. 1成分モデル: 地球の原始大気の初期進化

地球原始大気の平衡状態の計算はあるが [Tian et al., 2005, Science]
大気の時間発展 (初期進化) を追った計算はまだ無いので調べる

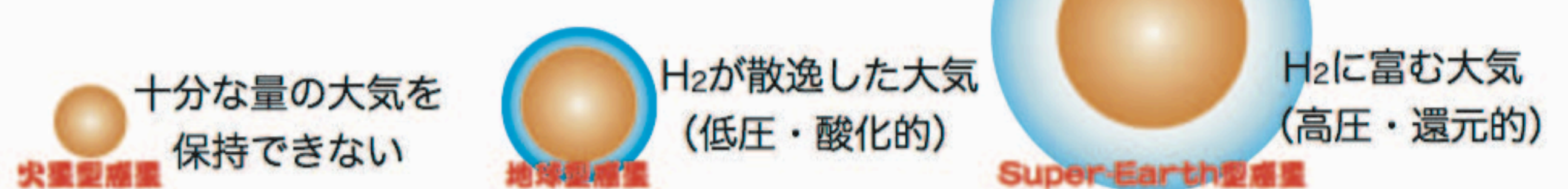


3. 2成分モデル: 金星からの水の散逸

- ・ H₂O が解離した後の余った O をどうするか?
→ H₂ 散逸の際と一緒に散逸できるかどうか計算
- ・ D/H 比が地球の 100 倍であることをどう説明するか?
→ 散逸最終期 (散逸 flux が小さい時) に D/H 比を上昇できるか計算

2. 1成分モデル: Super-Earth 型惑星の大気進化

惑星のサイズと軌道によって、3種類の地球型惑星 (地球型惑星大気) の進化
を追い、3タイプの惑星 (大気) の存在を調べる



4. 多成分モデル (化学反応入り): 金星の Ne, Ar 質量分別

- ・ Ne: depleted, fractionated
- ・ Ar: not depleted, not fractionated
→ CO による cooling の影響で Ar の散逸が抑制される可能性を検証
多成分で光化学反応入りのモデルへと改良する必要あり!