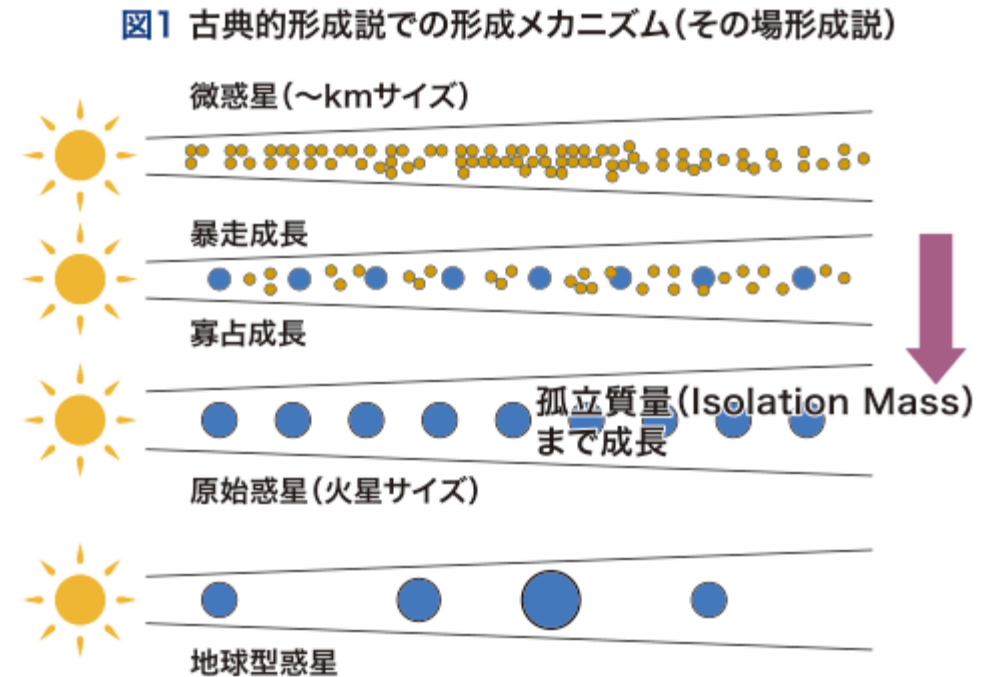


# 13.6地球型惑星の形成

地球惑星科学科4年 倉本鎌田研 長橋岳志

# 13.6.1 惑星集積の最終段階の力学

- ▶ 微惑星は暴走成長、寡占成長を経て惑星の胚子まで成長する。軌道長半径に一定の間隔で形成。
- ▶ 微惑星の暴走成長によって出来上がった原始惑星系は非常に安定であることが分かっている
- ▶ 暴走成長終了直後の原始惑星系のランダム速度は非常に小さい。
- ▶ 地球型惑星に集積するためには軌道離心率、十分な混合、巨大な衝突が必要になる。すなわちランダム速度が大きくなければいけない



出典

[https://www.hpci-office.jp/pages/k-san\\_cu18](https://www.hpci-office.jp/pages/k-san_cu18)

# ランダム速度

- ▶ 基準面内の円運動からのずれの運動をランダム運動、その速度 $v$ をランダム速度とよぶ。

$$v \simeq (e^2 + i^2)^{1/2} v_K$$

- ▶  $e$ =離心率  $i$ =軌道傾斜角  $v_K$ =円軌道のケプラー速度

<https://www.cfca.nao.ac.jp/~tito/ftp/psdoc/ssps2001.pdf>

惑星科学夏の学校 2001より引用

- ▶ ランダム速度が小さいと衝突が起きづらく、ランダム速度が大きいと衝突が起きやすい。

# 重力相互作用

- ▶ 微惑星同士の重力相互作用によって、微惑星のランダム速度、すなわち離心率と軌道傾斜角が時間進化する。
- ▶ 重力相互作用には力学的摩擦とViscus Stirring と呼ばれる2つの異なる効果がある。力学的摩擦は、エネルギー等分配 ( $m_1 v_1^2 = m_2 v_2^2$ ) に向かうようにランダム速度が変化する効果である。また Viscus Stirring は、ランダム速度が上昇し続ける効果である

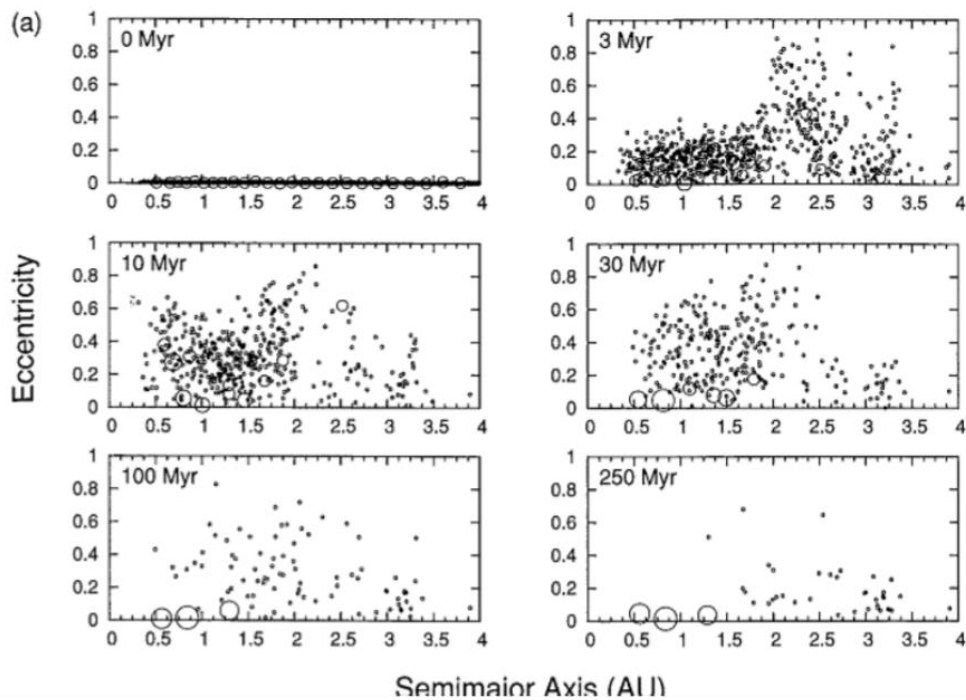
## 13.6.1 惑星集積の最終段階の力学

- ▶ 惑星胚子同士の相互重力散乱で、相対速度は胚子の脱出速度を超える。これは胚子が地球型惑星に集積するには重要である。速度が大きいということは、衝突断面積が小さいため、降着時間が長いことを意味します。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\frac{dM}{dt}}{4\pi\rho_p R^2} = \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{\sigma_p n}{4\rho_p} \mathcal{F}_g, \quad (13.26)$$

- ▶ 惑星の胚子がお互いにかき乱されて軌道が交差すると、その後続く軌道進化は重力による引き合い、弾力のない衝突によって支配される。これはN体シミュレーションを用いて研究されている。

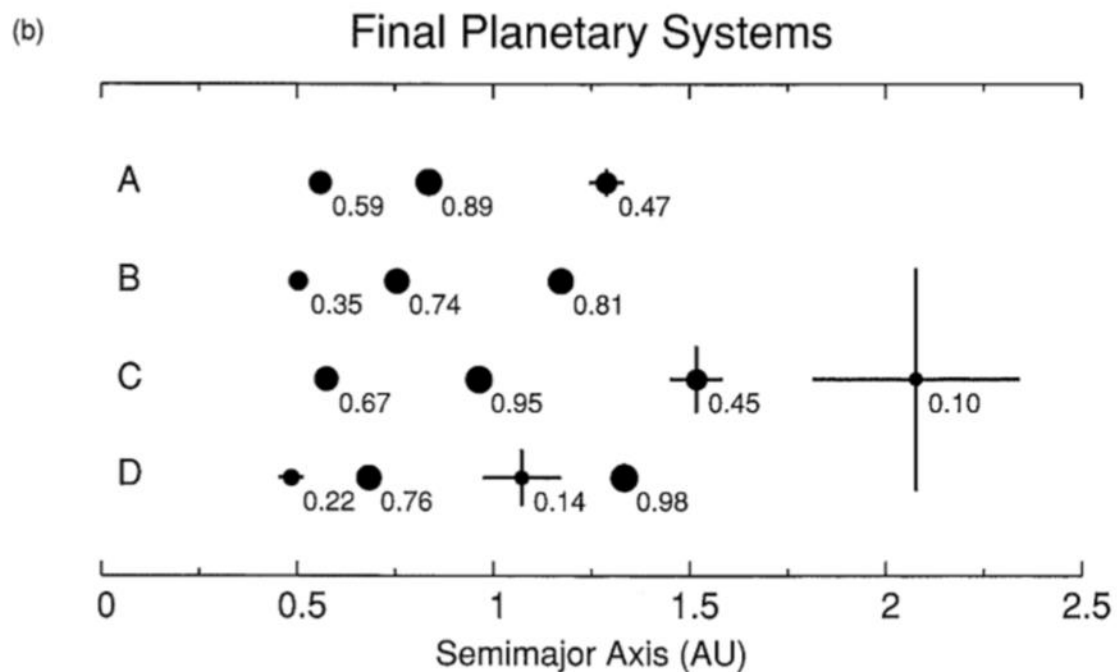
# N体シミュレーション



- ▶ 惑星の胚子同士が時間経過とともにだんだん集積していく様子が分かる。
- ▶ 惑星の胚子と微惑星は図のサークルで囲ってある
- ▶ サークルの半径は惑星の胚子や微惑星の半径に比例

地球型惑星の成長のN体シミュレーション

# N体シミュレーション



- ▶ 真ん中のサークルからのびた水平線が近日点から遠日点までの距離を表す。
- ▶ 真ん中のサークルから垂直に伸びた線は不変面からの変動を表す。
- ▶ サークルの右下の数字は質量（地球質量との比）を表す

図 4つの異なるN体シミュレーションによって作成された合成地球型惑星系

# N体シミュレーションの結果

- ▶ 約一億年のタイムスケールで約 2 – 5 個の地球型惑星が形成。
- ▶ N体シミュレーションのほとんどは、地球型惑星が少なく、より高い軌道離心率を示す。
- ▶ 水星の鉄の豊富さが太陽星雲の化学的分別から生じたとはおもえない。
- ▶ 水星のケイ酸塩マントルは一度もしくはそれ以上の巨大な衝突によって、鉄が豊富な核を残して部分的に引きはがされた可能性がある

## 問題点

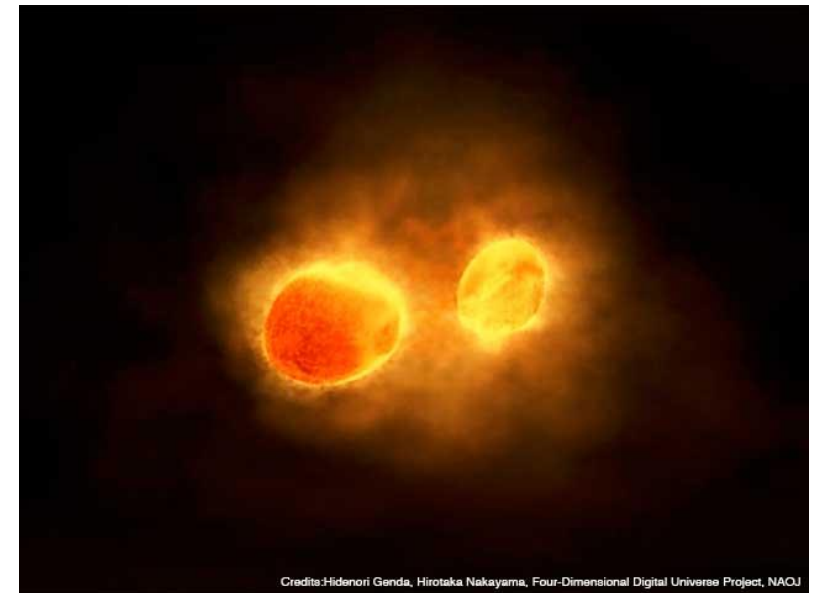
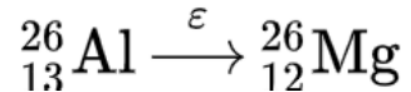
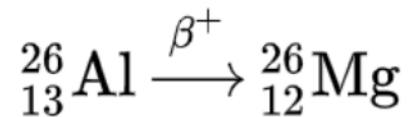
- ・地球の軌道領域の多くの小天体を無視している。
- ・小天体の物理的衝突は必ず降着につながると想定。（すなわち分裂は考えられていない）。
- ・実際には多くの天体の回転は分裂速度をこえる。



## 13.6.2 降着熱と惑星分化

- ▶ エネルギー加熱により惑星は成長する  
微惑星衝突の際に解放された重力エネルギーによる加熱  
放射性元素の崩壊（\$ 8.6.1）もまた惑星に熱を与える。

アルミニウム26（半減期 71万7000年）



Credits: Hidenori Genda, Hirotaka Nakayama, Four-Dimensional Digital Universe Project, NAOJ

<https://www.nao.ac.jp/gallery/weekly/2017/20171212-4d2u.html>

# 降着熱と惑星分化の大まかな流れ

- ▶ 原始惑星に微惑星が衝突する



- ▶ 衝突のエネルギーは最初はどんどん宇宙に放出される。



- ▶ 衝突により微惑星に含まれていた揮発成分（H<sub>2</sub>Oが主成分）が抜け表面にたまる



- ▶ 温室効果により、微惑星の衝突で発生した熱がこもるようになる



- ▶ 原始惑星表面の温度は岩石の融点を超え、表面全体がマグマになる



- ▶ 密度の大きな鉄や金属は下に沈み、密度の小さな岩石は浮く（分化が起こる）

# 惑星の成長 微惑星の降着加熱

- ▶ 成長している固体惑星の温度は微惑星集積による重力エネルギーの解放(他にも放射性崩壊)と表面からの放射損失のバランスによって与えられる。

黒体放射によるエネルギー損失と微惑星集積による重力エネルギーの解放のバランスを考えると

$$T_f^4 = \frac{L}{4\pi R_p^2 \sigma}$$

ここで  $L = GM_p \frac{d}{dt}(M_p) / R_p$  微惑星の合体による重力エネルギー

黒体放射によるエネルギー損失は  $4\pi R_p^2 \sigma T_f^4$  で決まる。

原始地球の形成時間は  $10^7 \sim 10^8$  年程度と推定されている。この形成時間に相当する成長率では、惑星表面が融解し分化する温度よりもずっと低い温度にしかない。

[https://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~pplab/doc2009/adach\\_B/adach\\_B.pdf](https://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~pplab/doc2009/adach_B/adach_B.pdf)

太陽系生成の標準モデルより引用

# 惑星の成長 表面温度

- ▶ 原始惑星が融解するような温度に達するには熱を閉じこめるようなものが必要。
- ▶ 原始惑星加熱のシナリオはいくつかあり、一つ目は惑星物質それ自身による保温効果である。すなわち、落下する微惑星の衝突が惑星表面の物質を巻き上げ、その結果、微惑星の運動エネルギーの一部が熱エネルギーとして深部領域に定着するという過程である。その効果は半径が大きくなるほど大きくなり急速に温度が上昇する。

# 惑星成長 大気

- ▶ 原始惑星加熱のシナリオのもう一つは原始大気による保温効果である。また成長する原始地球で原始大気ができる過程は2つのものが考えられる。
- ▶ 1つは、原始惑星系円盤のガス中で地球が成長する場合で、火星サイズを越えると重力で引きつけたガスによる水素を主成分とした大気（一次大気）ができる。
- ▶ もう1つは、ガスが晴れ上がった後に地球が成長する場合で、衝突脱ガスにより生成される、水蒸気や二酸化炭素を主成分とする大気（二次大気）である。

# 惑星の成長 大気

- ▶ 惑星の質量 $0.01M_{\oplus}$ を超えると、微惑星衝突は水を蒸発させるのに十分なエネルギーになる。一方、 $\text{NH}_3$ と $\text{CO}_2$ はもう少し早く蒸発する
- ▶ 原始惑星の半径が $0.3R_{\oplus}$ に達するころには微惑星降着では微惑星に含まれる揮発性成分は完全に脱ガスするようになる。
- ▶ このようにしてできた大気は、光学的に厚く微惑星衝突によるエネルギーを閉じこめられるようになる。毛布効果として知られるこの過程は温室効果よりも原始惑星の表面温度を上昇させる可能性がある。

# 惑星の成長 分化

- ▶ 成長中の惑星の質量が $0.1M_{\oplus}$ を超えた時原始大気blanketの影響が重要になってくることを示す。
- ▶ 原始惑星の質量が $0.2M_{\oplus}$ を超えると惑星の表面温度はほとんどの惑星物質が融解する温度である $1600\text{k}$ を超える。融けた表面に新しく降着する微惑星は、そのサイズが $100\text{km}$ 程の大きさであっても、約 $10^3$ 年のうちに完全に融解し得る (Sasaki et al. 1983)

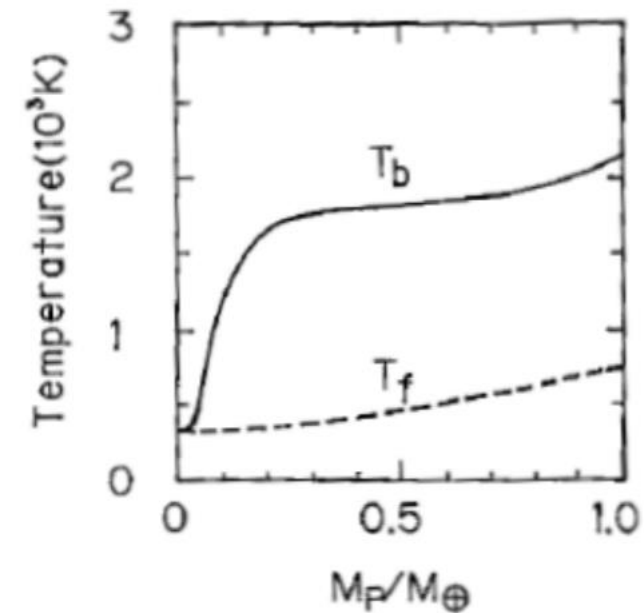


図 14 惑星質量  $M_p$  の関数としてプロットした、原始地球大気の下端温度  $T_b$  (Nakagawa et al. (1985b)). 仮想的な温度  $T_f$  も破線で示す。

# 惑星の成長 分化

- ▶ 惑星表面の融解後すみやかに低密度の珪酸塩と高密度の金属との化学的分化が続く、つまり重い金属が融解領域を通過して沈殿する。結果的に右の図のように分化する。
- ▶ 化学的分化とそれに伴う金属の沈殿において、膨大な量の重力エネルギーが融解した珪酸塩層に解放される。原始地球の質量増加による断熱圧縮も、原始地球内部の温度上昇に寄与する。

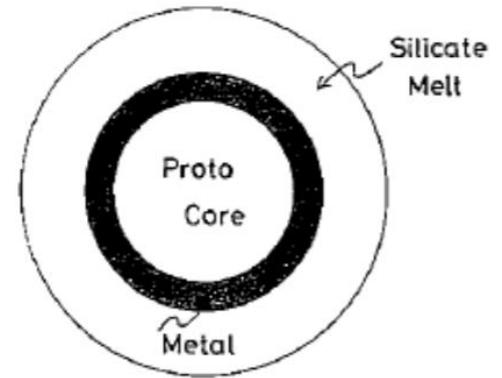


図 15 原始地球の内部構造。3層で構成される：内側の原始コア、金属層、外側の珪酸塩メルトである。



## 13.6.3 大気の揮発成分の降着（と損失）

- ▶ 原始大気（一次大気）は現在の大気と全く異なった組成、すなわち太陽組成をもつ。
- ▶ 一次大気は、太陽の強い放射を受けて加熱され散逸する。またジャイアントインパクトによっても散逸される。
- ▶ 現在の地球型惑星の大気は微惑星衝突の際の脱ガスにより形成された(二次大気)という考え方が一般的に受け入れられている。

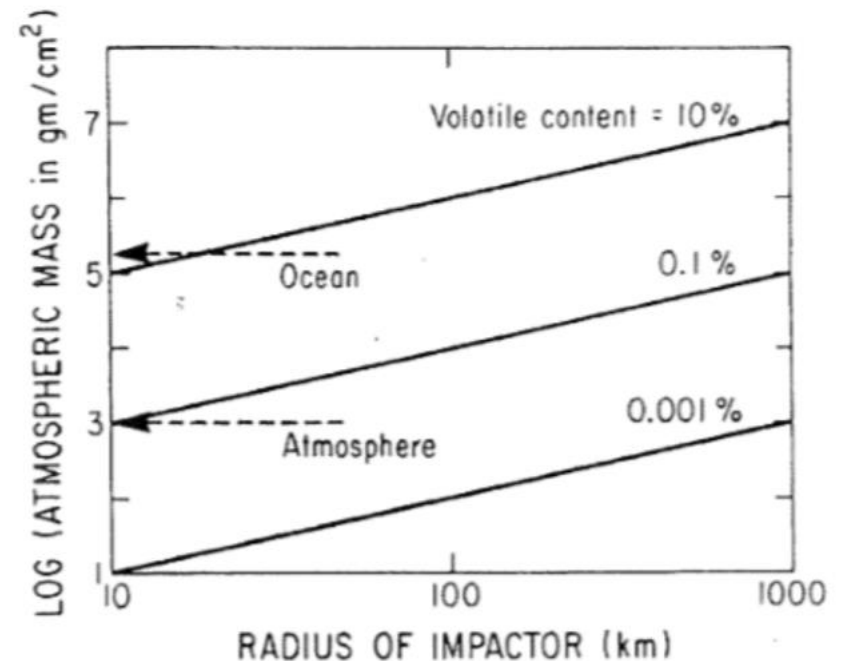
# 微惑星衝突の影響

- ▶ 小さい微惑星(半径数十メートル以下)は原始大気によって衝突の際に崩壊し、微惑星の運動エネルギーは原始大気に蓄えられる。
- ▶ 大きい微惑星との衝突では、大気に輸送されたエネルギーによって大気の成分が脱出速度を超えて吹き飛ばされる。

# 微惑星衝突の影響

微惑星衝突の際の急激な温度圧力上昇によって微惑星中に含まれている揮発性成分（水や二酸化炭素など）が脱ガスする

この脱ガスが二次大気を形成し、現在の地球型惑星の大気が形成された。



1 M<sub>⊕</sub>惑星の大気の単位表面積あたりの質量 矢印は現在の陸上の海と大気の単位表面積あたりの質量を示している。

# 地球型惑星の大気

- ▶ 地球型惑星では脱ガス作用により内部からCO<sub>2</sub>や水蒸気(H<sub>2</sub>O)が多量に放出された。
- ▶ このうちの水蒸気は、地球では冷えて水になり海をつくった。金星でも一時的に海ができたかも知れないが、気温が高いため蒸発し、さらには紫外線によって分解して水はほとんどなくなってしまった。また火星では水は凍結してほとんどが氷になってしまっている。したがって、地球だけが海をもち、大気中の二酸化炭素が多量に水に溶け、現在では石灰岩中に固定されている。また、海で発生した生物によりつくられた酸素が増加し、現在の大气になったと考えられる。このように各惑星の大気は見かけ上異なっているが、これらの違いは、各惑星の太陽系内の位置の違いによって異なった進化をしたことが1つの大きな原因となっている。