

地球コア形成モデルの整合性 を確かめる方法について

内部ダイナミクス M1

菖蒲迫 健介(しょうぶざこ けんすけ)

お手柔らかにお願いします_(_._)_

本日のトピック

本日は地球コア形成モデルに対する最大の制約条件である
「地球マントルの元素存在度」に関連したお話をします

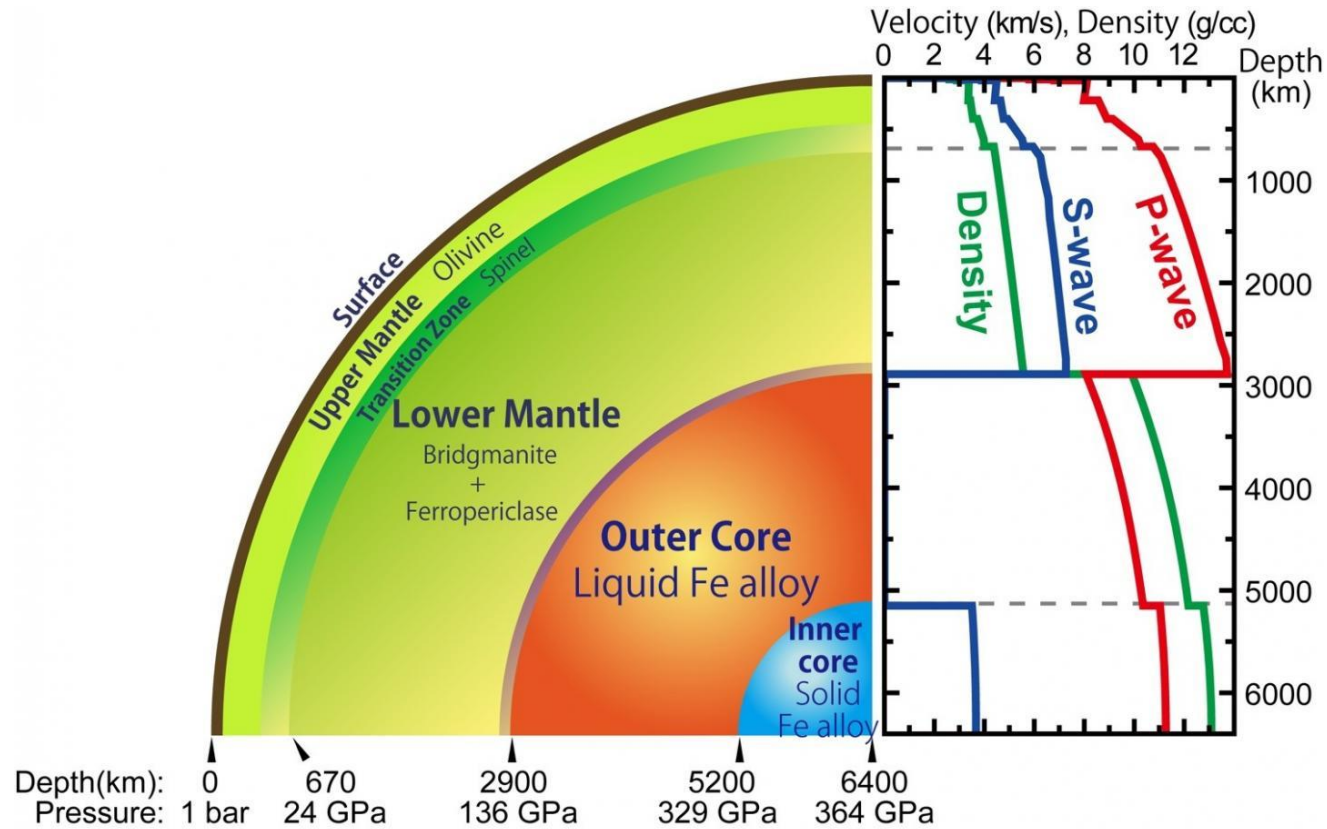
1. 導入

- I. 今の地球と初期地球
- II. 私が興味のあることについて
- III. (最近の)親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介

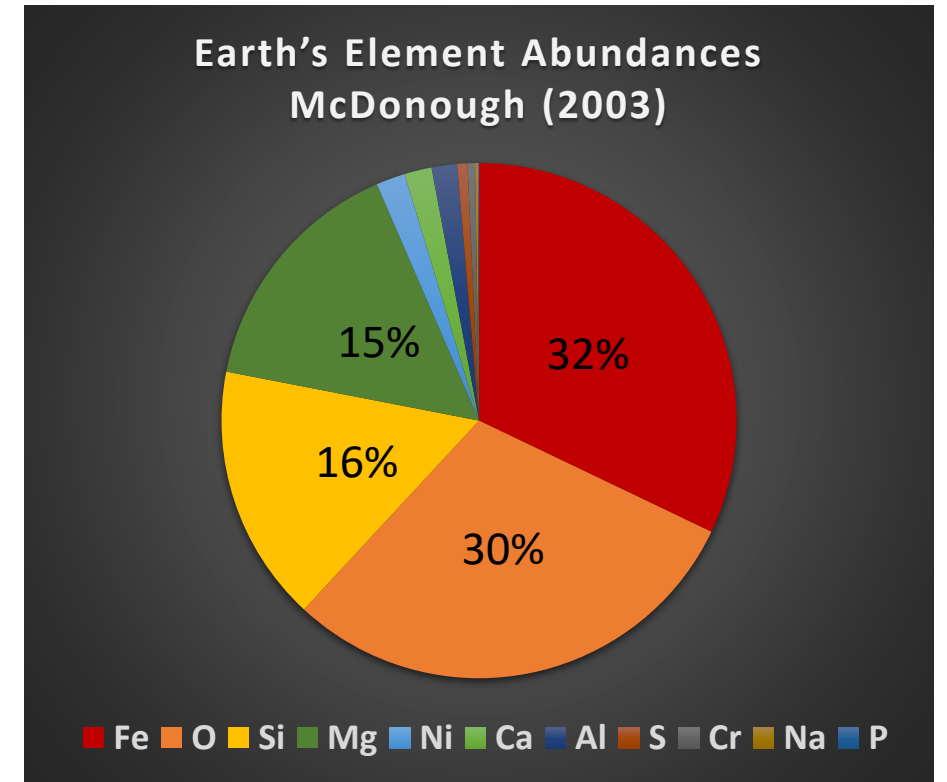
2. 地球マントルの元素存在度の決め方 ←今日のメインテーマ

3. これからの研究テーマについて

1-1. 今の地球の構造と元素存在度



Interior of Earth with sound velocity and density profiles
by KUMAMOTO UNIVERSITY



1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-2. 地球集積と初期地球

地球集積の模式図 Nimmo and Kleine (2015)

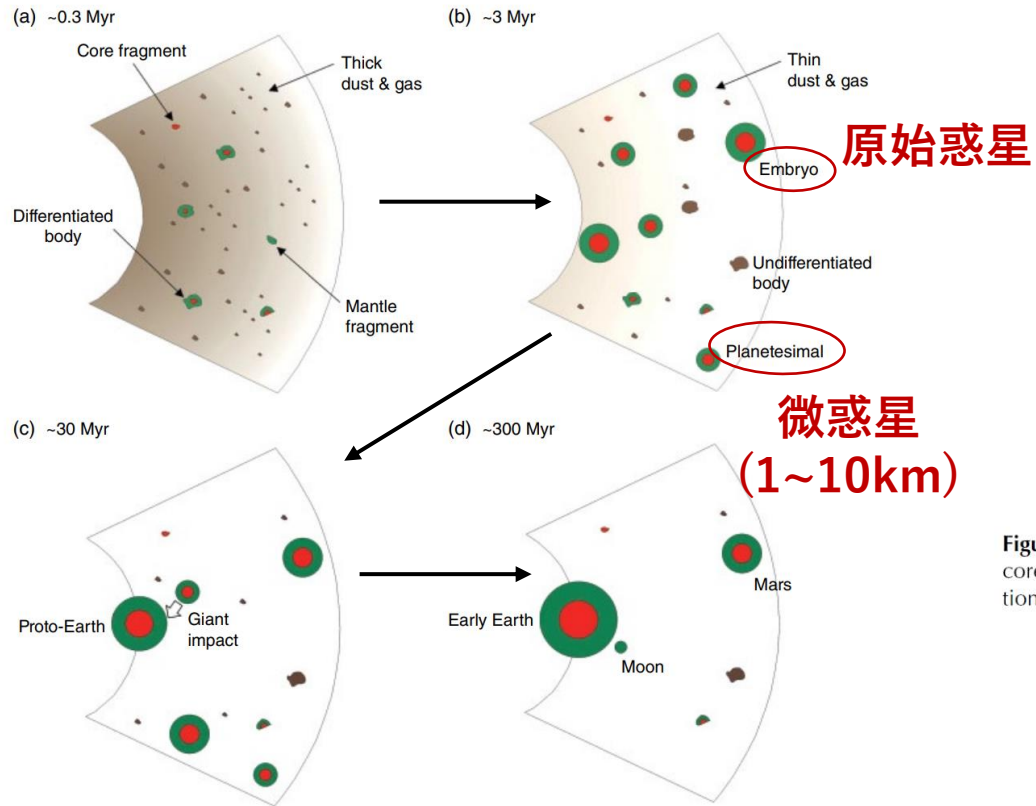


Figure 5.7 Schematic view looking down on the ecliptic, centered at about 1AU, at different stages during the accretion of the terrestrial planets. Brown, green, and red indicate undifferentiated, silicate, and iron materials, respectively. ^{26}Al is effectively extinct by 3 Myr after CAI; at roughly the same time any remaining gas and dust is swept away by young stellar activity. Timescales are only approximate.

初期地球の内部ダイナミクス Rubie and Jacobson (2016)

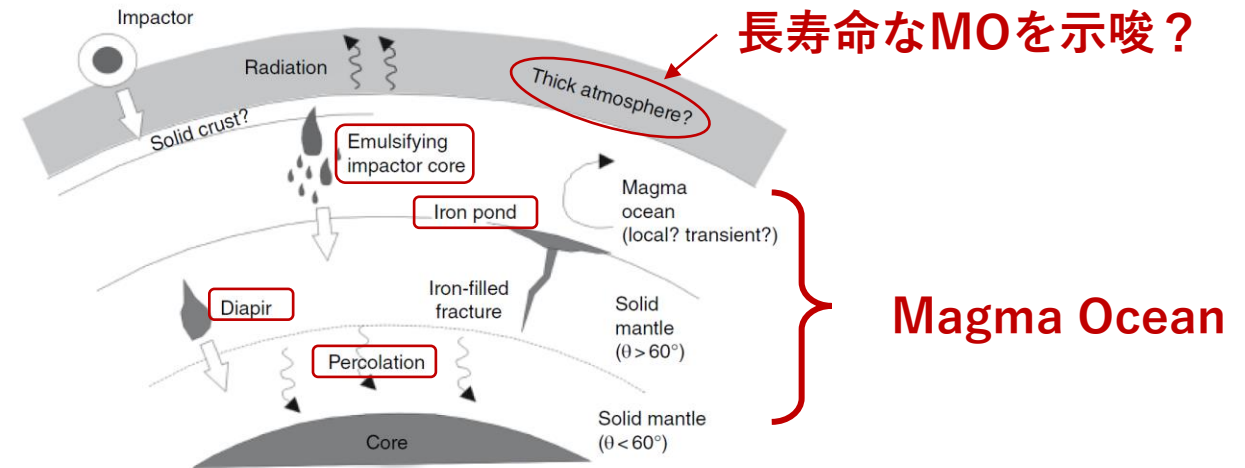


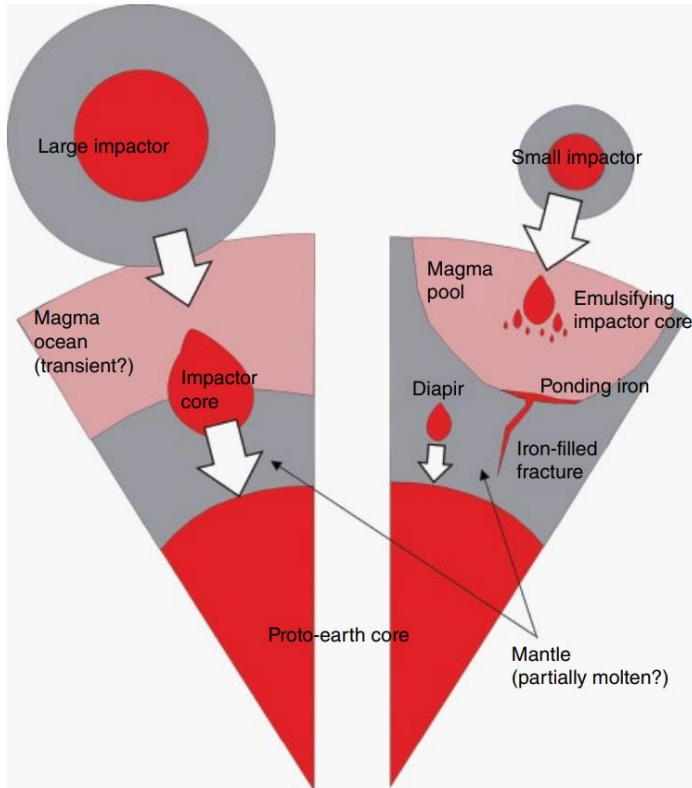
Figure 14.1 Summary of possible mechanisms by which liquid metal can segregate from silicate material during core formation; θ is the dihedral angle which controls grain-scale percolation. Note that the feasibility of percolation in the lower mantle is uncertain (see text). (Courtesy of F. Nimmo.)

- “地球がどうやって出来たのか”という問題の答えの可能性は無限大！
- そこで「このモデルはあり得ない」という条件を見つけることが大事(制約条件)

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マンツルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-3. 私に興味のあること (1)

Nimmo and Kleine (2015)



今の地球がどうやって
できたのか？

Caryl (2015)

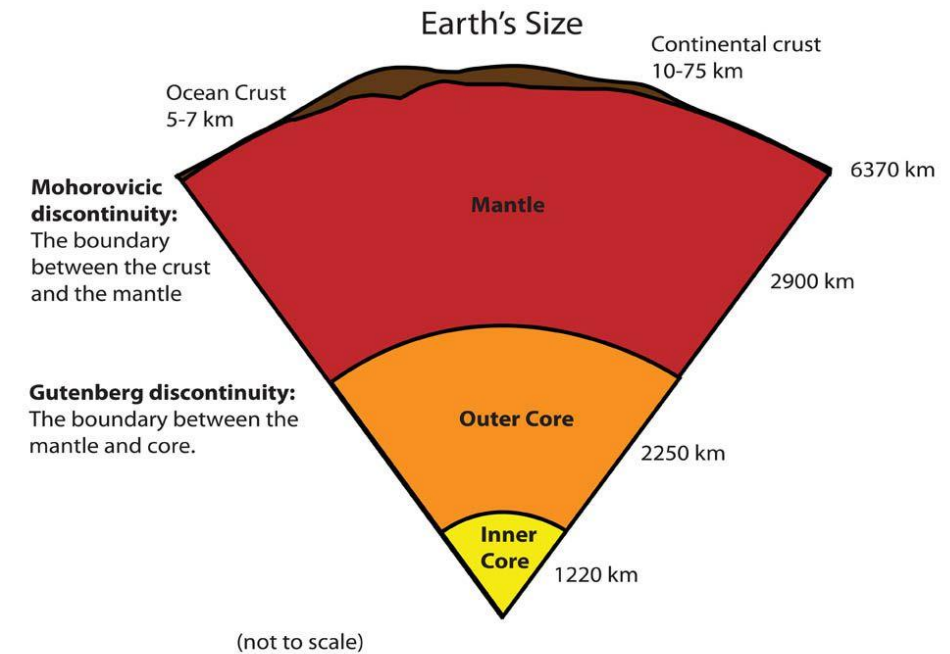


Figure 5.2 Summary picture of the distinct metal segregation mechanisms for large and smaller impacts. Giant impacts probably result in widespread mantle melting and a magma ocean of uncertain but potentially short duration. Such large impacts probably result in minimal emulsification and mixing of the impactor core. If the mantle is initially solid, a small impact will generate a melt pool at the base of which metal will accumulate.

1.導入(今の地球→初期地球→私に興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マンツルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-3. 私が興味のあること (2)

Nimmo and Kleine (2015)

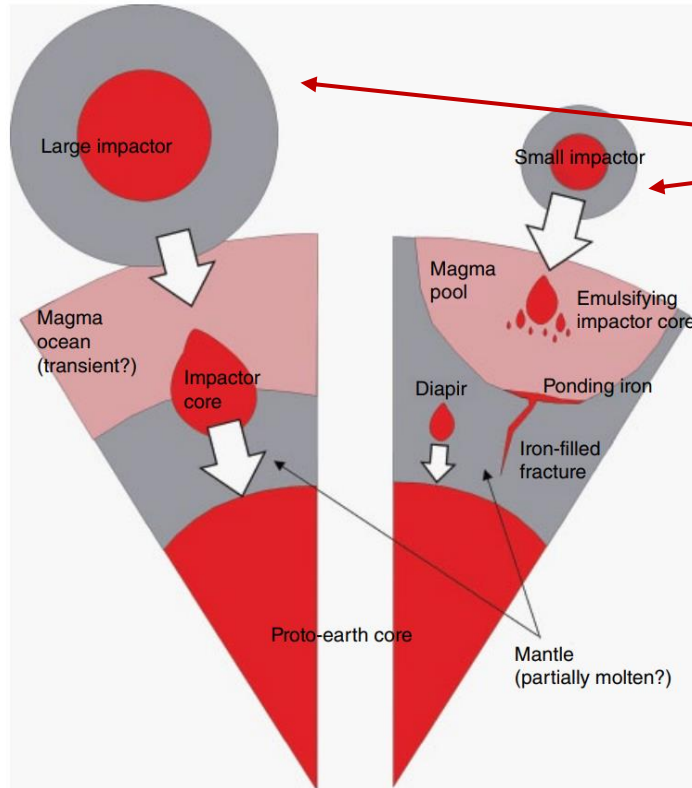


Figure 5.2 Summary picture of the distinct metal segregation mechanisms for large and smaller impacts. Giant impacts probably result in widespread mantle melting and a magma ocean of uncertain but potentially short duration. Such large impacts probably result in minimal emulsification and mixing of the impactor core. If the mantle is initially solid, a small impact will generate a melt pool at the base of which metal will accumulate.

○ 昔から興味があったこと → どうやって地球が出来たのか？

それを明らかにするには次が重要(だと思います)

1. 地球集積過程を理解すること

- どんな隕石がどのように集積したのか？
- 大きさ, 組成, 衝突速度・角度など

2. 初期地球の内部の様子を理解すること

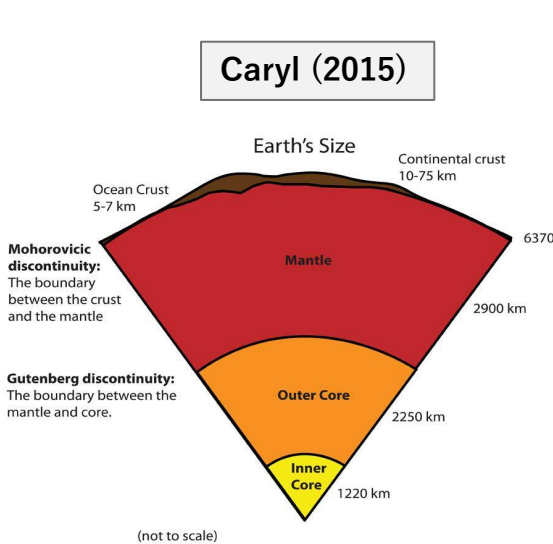
- 衝突天体はどのように地球内部に取り込まれるのか？
- 分化した天体のコアはどうやって落ちた？
- コアマントル分離(コア形成)によって, どんな元素がコアに持っていかれた？(コアの組成は未解決)

特に2に興味があり, 野望としては「地球コア形成モデル」を通して今の地球がどうやって出来たのかを解明することです

- とは言っても, それは野望すぎるので, コア形成モデルに対する何かしらの制約条件を見つけたいです

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-4. 親鉄元素を用いたコア形成モデル (1)



- 基本的にマントルには、CIコンドライトに比べて親鉄元素(Siderophiles)が少ない
- これは親鉄元素がコアにいることを示唆する

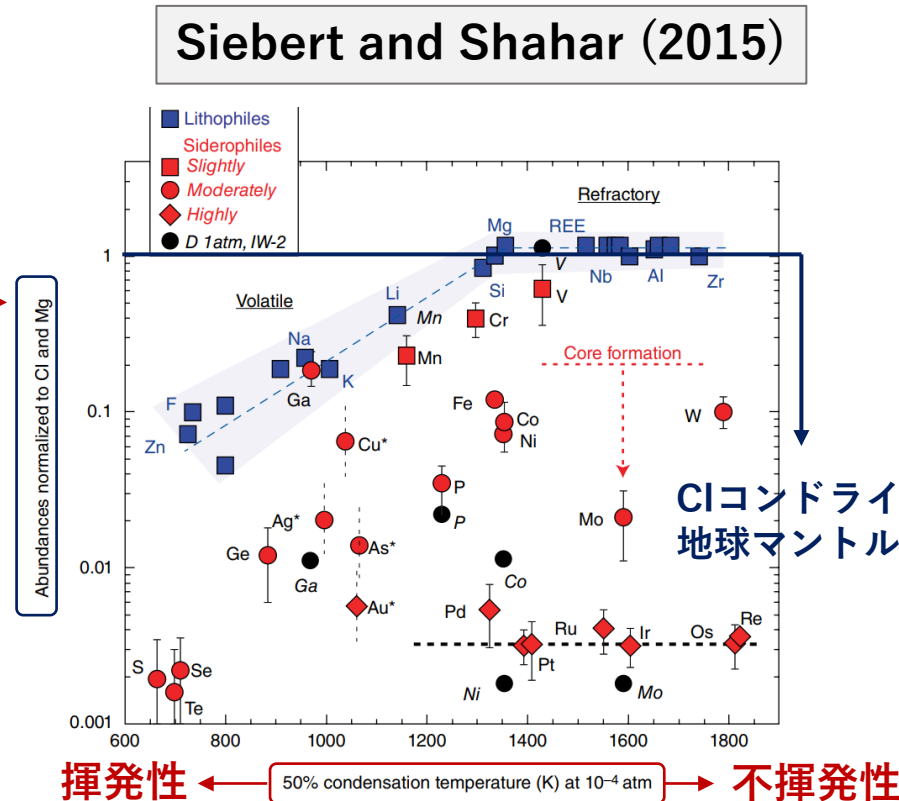


Figure 6.1 Element abundances of the Earth's present mantle normalized to CI chondrite and Mg [McDonough, 2003; Palme and O'Neil, 2003; Becker et al., 2006]. Lithophile elements (blue square symbols) follow a depletion trend from volatile behavior, which is considered to be function of the elements 50% condensation temperatures from the solar nebula at 10⁻⁴ atm [Lodders, 2003]. The Siderophile elements (red symbols) plot below this planetary volatility trend (blue shaded area), which indicates that they are depleted in the mantle. Error bars include errors on CI and mantle abundances from different works (*elements with large error bars on their estimated depletions, i.e. error exceeding 50 % on mantle abundance). The remaining planetary complement of these elements is in the core. Black dots show the depletion of some selected siderophile elements if metal-silicate equilibration occurred at 1 atm, 1600 K and IW-2 (calculated from results in Kegler et al., 2008; Capobianco et al., 1999; Schmitt et al., 1989; Siebert et al., 2011). The imprint of core formation on the geochemistry of the present mantle is used to constrain the P-T-fO₂ conditions of core-mantle equilibration.

地球マントルの元素存在度を表した図

- 縦軸は、地球のMgに対する存在度をCIコンドライト隕石で規格化した値

$$\frac{C_i^{Earth}}{C_{Mg}^{Earth}} \div \frac{C_i^{CI}}{C_{Mg}^{CI}}$$

- 横軸は凝縮温度

用語の説明

- CIコンドライト隕石…太陽系の隕石の中で最も始原的で未分化な隕石、かつ太陽組成に最も近い隕石
- 凝縮温度…ある元素の50%が気体から固体or液体になる温度

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-4. 親鉄元素を用いたコア形成モデル (2)

Siebert and Shahar (2015)

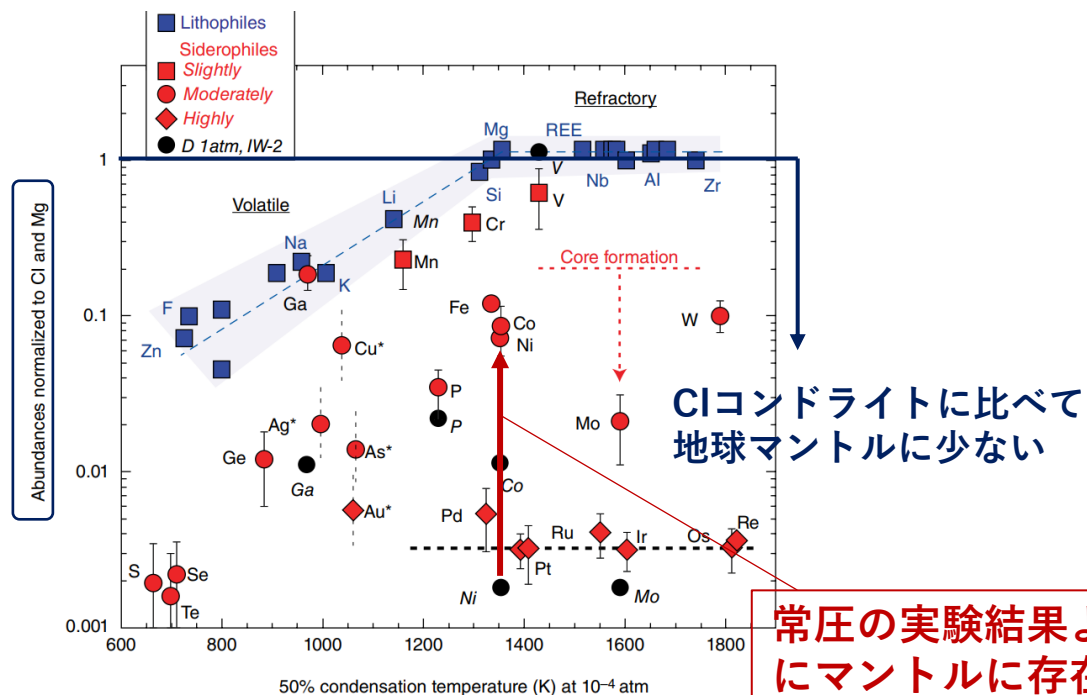


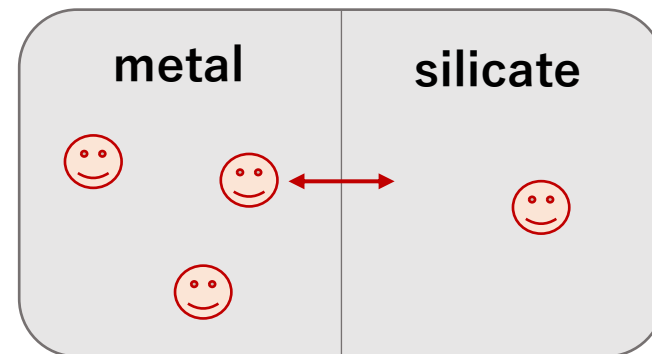
Figure 6.1 Element abundances of the Earth's present mantle normalized to CI chondrite and Mg [McDonough, 2003; Palme and O'Neil, 2003; Becker et al., 2006]. Lithophile elements (blue square symbols) follow a depletion trend from volatile behavior, which is considered to be function of the elements 50% condensation temperatures from the solar nebula at 10^{-4} atm [Lodders, 2003]. The Siderophile elements (red symbols) plot below this planetary volatility trend (blue shaded area), which indicates that they are depleted in the mantle. Error bars include errors on CI and mantle abundances from different works ('elements with large error bars on their estimated depletions, i.e. error exceeding 50 % on mantle abundance). The remaining planetary complement of these elements is in the core. Black dots show the depletion of some selected siderophile elements if metal-silicate equilibration occurred at 1 atm, 1600 K and IW-2 (calculated from results in Kegler et al., 2008; Capobianco et al., 1999; Schmitt et al., 1989; Siebert et al., 2011). The imprint of core formation on the geochemistry of the present mantle is used to constrain the P-T- fO_2 conditions of core-mantle equilibration.

- 親鉄元素はコアにほとんど入るはずだが、常圧 (1atm)での分配係数から予想されるマンタル存在度よりも、かなり多くマンタルに存在する
- これは何故か？
- 高温高压下での元素の分配の可能性の示唆
- 初期地球における深いマグマオーシャンの存在

分配係数

$$D = \frac{C_i^{met}}{C_i^{sil}} = f(T, P, fO_2)$$

😊 親鉄元素



1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マンタルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

1-4. 親鉄元素を用いたコア形成モデル (3)

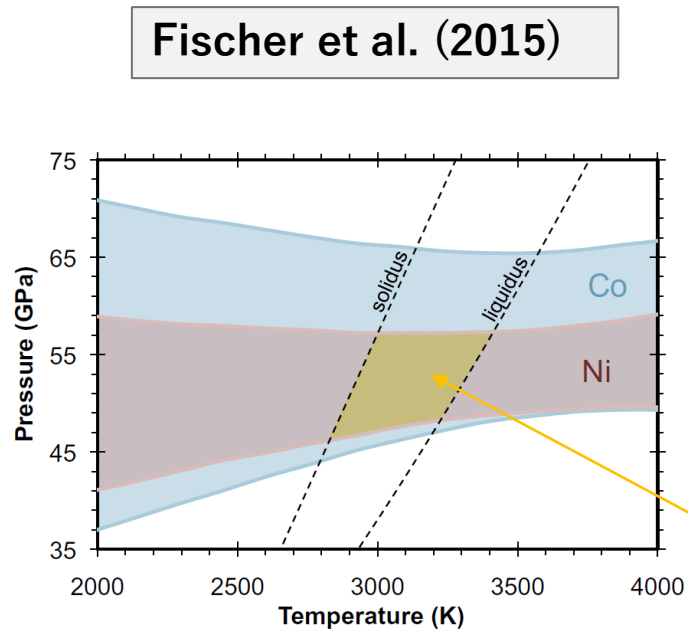


Fig. 7. Pressure-temperature conditions of single-stage core formation, constrained by Ni and Co partitioning. Pink and blue shaded regions: P - T conditions that produce the Earth's K_D of Ni and Co, respectively. Dashed black lines: solidus and liquidus of the mantle (Andraut et al., 2011). Yellow shaded region: solution space of P - T conditions that simultaneously reproduce the Earth's Ni and Co distributions at the base of a magma ocean. Calculation is done at an oxygen fugacity of IW-2. This model suggests core formation at 46-57 GPa. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

- 親鉄元素の分配は主に温度圧力と酸素フガシティに依存する(本当はmetalとsilicate組成にも依存)

$$D = \frac{C_i^{met}}{C_i^{sil}} = f(T, P, fO_2)$$

- 今のマンツルの存在度に合うには、どのような温度圧力条件であれば良いかを探す試みが、コア形成界限では多くなされてきた
- ただし、これらは一度のコアマンツル分化のイベントしか考えていない単純すぎるコア形成モデル

Fischer et al. (2015)の場合、黄色のエリアが今のマンツル存在度を説明するための条件となる

1-4. 親鉄元素を用いたコア形成モデル (4)

Nimmo and Kleine (2015)

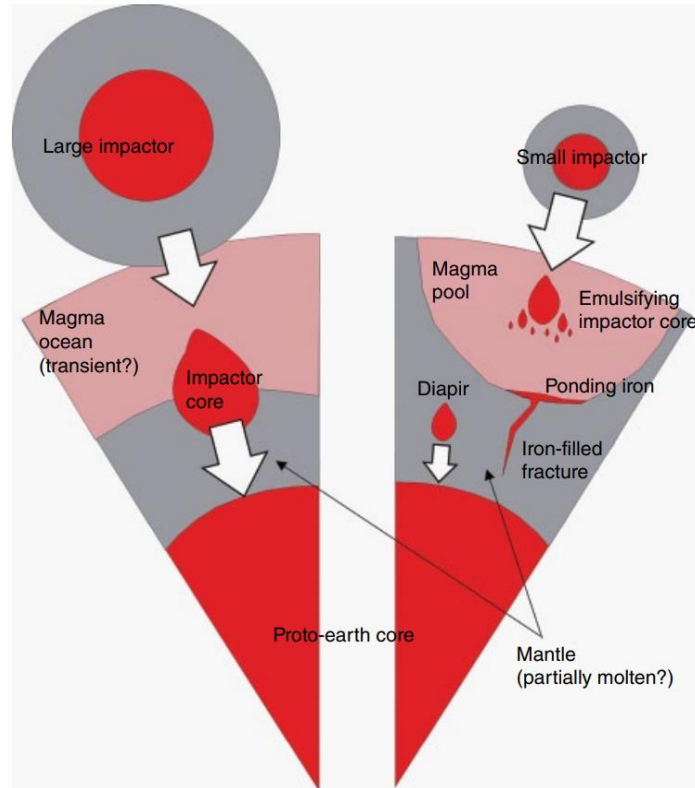


Figure 5.2 Summary picture of the distinct metal segregation mechanisms for large and smaller impacts. Giant impacts probably result in widespread mantle melting and a magma ocean of uncertain but potentially short duration. Such large impacts probably result in minimal emulsification and mixing of the impactor core. If the mantle is initially solid, a small impact will generate a melt pool at the base of which metal will accumulate.

より現実的なコア形成モデルを作るには次のことを考慮する必要がある

- 地球は集積過程の間にどんどん太ること
- 集積物質が均質でないこと
- 地球のプロトコアに落ちる金属がマグマオーシャン内で完全に平衡になるのか、ならないのか問題
- などなど、考えられ得るパラメーターの数は非常に多い

パラメーター次第でコア形成モデルはいくらでも作れる…

ということで、無限大の可能性であり得ない可能性を消すことが大事！その最大の制約条件が

今の地球マンツルの元素存在度

果たしてこれはどうやって決めているのでしょうか？

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (1) ← **ようやく本日の メインテーマ**

- コア形成モデルへの最大の制約条件は「**現在の地球マンントルの元素存在度**」
- ずっと疑問だったこと：マンントルまで到達した人間は未だにいないので、どうやってマンントルの元素存在度を定めることができるのか？
- そもそもこの推定は正しいのか？

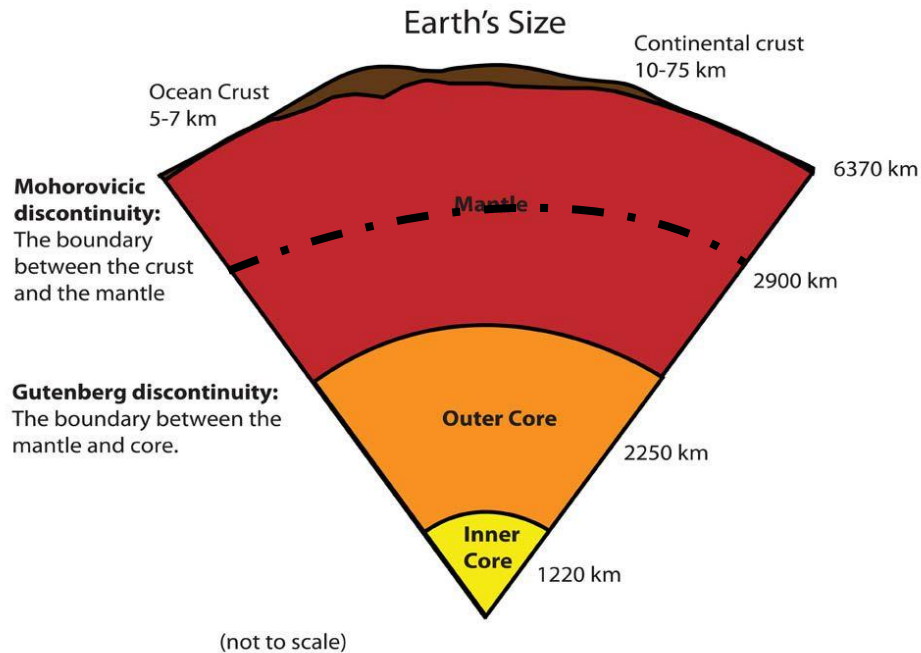
今日主に紹介する論文

W. F. McDonough and S.-s. Sun (1995) The composition of the Earth, *Chemical Geology*, **120**, 223-253

- McDonough and Sun (1995)は私がコア形成の論文を読む際に多く引用されています
- ただし、元素は110個近くあって、その全てを完全に理解できた訳ではないので詳しくお話できないことがあります_(._.)_

2. 地球マンツルの元素存在度の決め方 (2)

Caryl (2015)

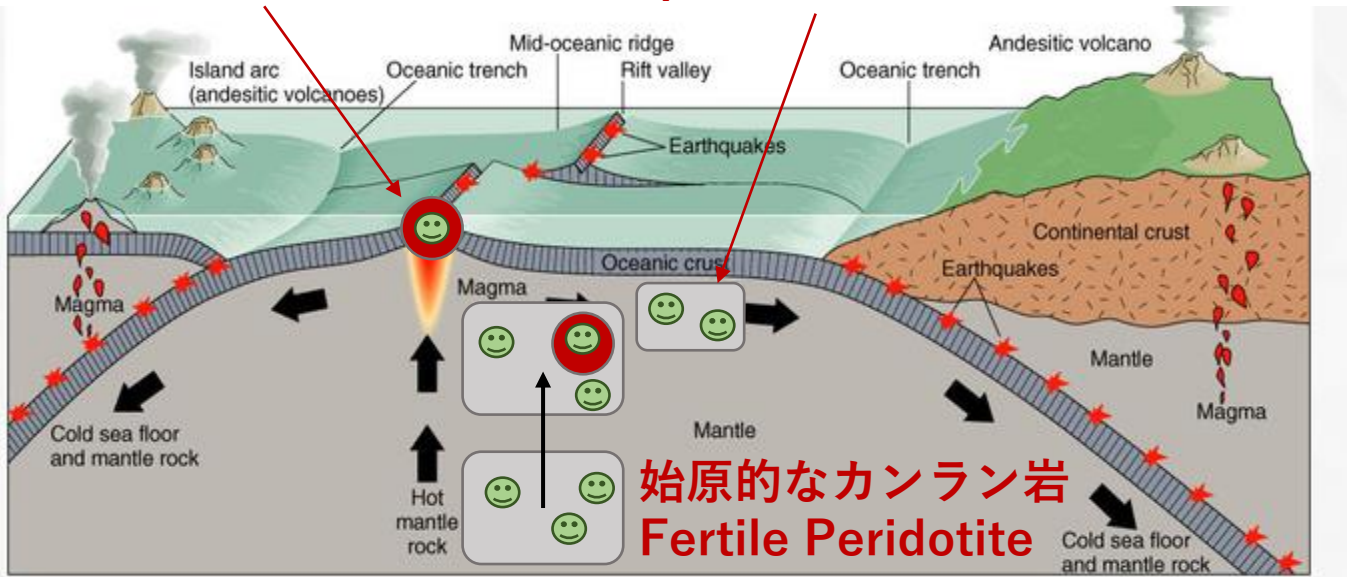


- 一番手っ取り早いのはマンツル物質を直接取ってきて調べるこつ
- それは不可能
- でも、上部マンツル物質は捕獲岩や、大きな岩体から得られたりする
- では、その上部マンツル物質をそのまま地球のマンツル組成を反映するとしていいだろうか？
- それには次のような問題がある
 1. 上部マンツルと下部マンツルは同じ組成を持つのか？(つまり、**上部マンツル物質のみでマンツル全体と言ってもいいのか？**)
 2. 捕獲岩や地表に露出した上部マンツル物質は、地表に出てくる途中で部分溶融していないのか？(部分溶融してマグマになると、マグマに入りやすい元素は当然ながらマグマの方に吸い取られる)

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (3)

- 先ほどの問題に対する McDonough and Sun (1995) の見解
 - 地球マントルは十分に混ざっているとして、上部マントルの組成を持ってマントル全体の組成とする
 - 部分溶融はあり得るので、これは考慮する

Mid-Ocean Ridge Basalts (MORB) (マグマに行きやすい元素が少ないという意味)
Depleted Peridotite



始原的なカンラン岩
Fertile Peridotite

<https://hernandezmarinesci.weebly.com/introduction-to-mid-ridges.html>

- 部分溶融すると何が問題なのか？
- 始原的なカンラン岩(マントル全体の組成を反映)が部分溶融すると、液体のマグマと固体に分かれる
 - この時にマグマに入りやすい元素 (incompatible element) はマグマに入るので、得られる固体物質はもともとのカンラン岩組成を反映していない
 - ここで、始原的なカンラン岩が部分溶融したうち、**マグマの部分がMORB**になって、**固体の部分がdepleted peridotite**になっていると考える

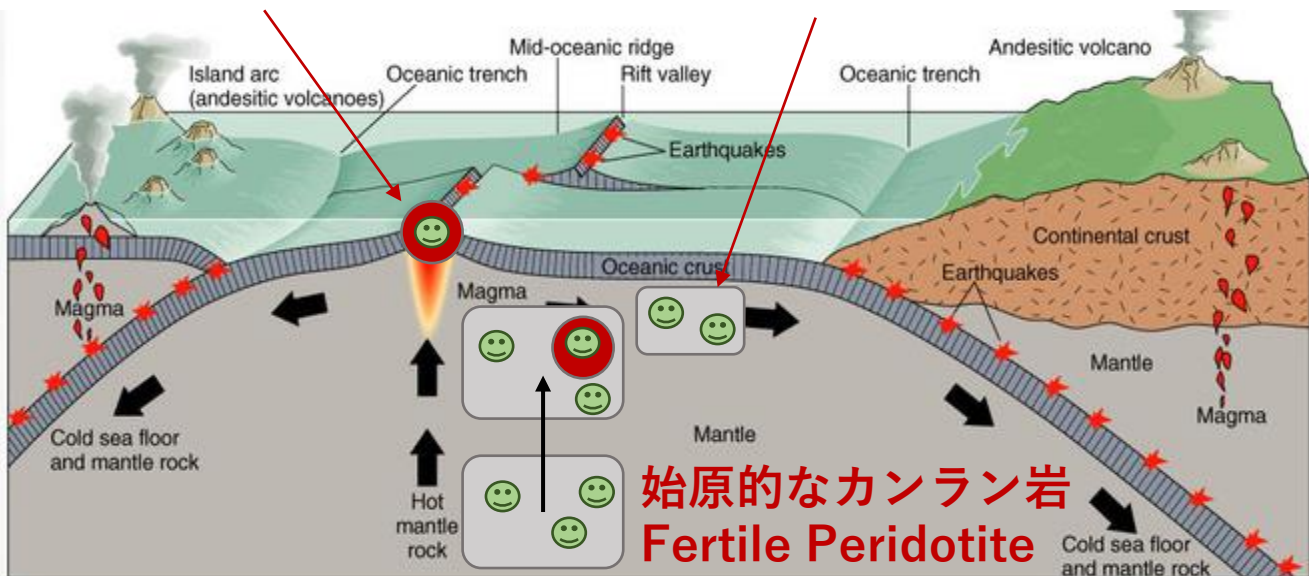
2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (4)

物的証拠を用いて地球マントルの 元素存在度を決める方法

Pyrolite Model (Ringwood, 1996)

Mid-Ocean Ridge Basalts(MORB)

Depleted Peridotite



得られる物的証拠は

1. 上部マントルのマグマ成分を反映していると思われる **MORB**
 2. 上部マントルのマグマ以外の成分を反映していると思われる **Depleted Peridotite**
 - **Xenolith** (火山活動で地表に上がったカンラン岩)
 3. 大昔に高温で生じたカンラン岩 **Komatiite**
- 基本的はこれらを用いるが、試料毎に**絶対存在度**がバラバラな元素も多く存在する

<https://hernandezmarinesci.weebly.com/introduction-to-mid-ridges.html>

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

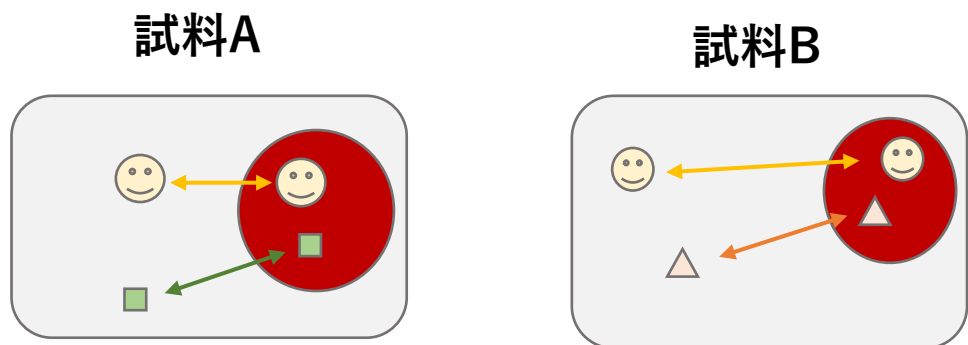
2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (5)

Pyrolite Modelの続き

Pyrolite Modelの問題点 → 絶対存在度が試料毎に異なる

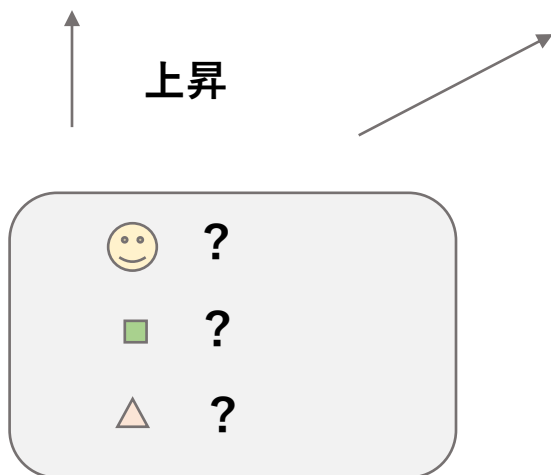
絶対存在度(absolute abundance)=元素の重さ/試料全体の重さ

しかし、似たcompatibilityを持つ元素どうしの相対存在度(relative abundance)は、どの試料でもほとんど一定



😊 ■ は同じcompatibilityとして、マグマ:固体=2:3で分配されるとする

▲ はこれらと異なり、マグマ:固体=2:1で分配されるとする



相対存在度はMORBでも
Peridotiteでも同じ

Compatibilityが異なれば、相対存在度はMORB
Peridotiteで異なる

$$\text{試料Aのマグマ中の相対存在度(比)} = \frac{2}{5} C_{smile} \div \frac{2}{5} C_{sq} = \underline{C_{smile} \div C_{sq}}$$

$$\text{試料Aの固体中の相対存在度(比)} = \frac{3}{5} C_{smile} \div \frac{3}{5} C_{sq} = \underline{C_{smile} \div C_{sq}}$$

$$\text{試料Bのマグマ中の相対存在度(比)} = \frac{2}{5} C_{smile} \div \frac{2}{3} C_{tri} = \frac{3}{5} C_{smile} \div C_{tri}$$

$$\text{試料Bの固体中の相対存在度(比)} = \frac{3}{5} C_{smile} \div \frac{1}{3} C_{tri} = \frac{9}{5} C_{smile} \div C_{tri}$$

ここで、 C は始原的なマントルの元素存在度(濃度)

始原的なマントル物質

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (6)

ここまでのおさらい

- 地球マントルの元素を決める方法として最も直感的なのは、試料の元素分析
- Pyrolite ModelはMORBとdepleted Peridotiteの絶対存在度を用いて地球マントルの元素存在度を決めるモデル
- しかし、試料毎に絶対存在度がかなり異なるものがあるので、全ての元素をこの方法で決めるのは危ない
- MORBとdepleted Peridotiteという異なる試料間で共通な値を持つのは、同じCompatibilityを持つ元素の質量比(つまり、相対存在度)
- つまり、元素AとBが同じCompatibilityを持つとしたら、

元素AとBの相対存在度=始原的なマントルのA中の絶対存在度/始原的なマントル中のBの絶対存在度

- この左辺の値は実際の試料により一定であることが確かめられており、様々な元素で既知である
- そこで、右辺のうちどちらかを決めれば、もう一方が決まることになる
- **この方法で地球マントル存在度を決めるとしたら、Pyrolite Modelよりもより建設的である**
- しかし、**どのみち、一部の元素についての絶対存在度は必要になる**

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (7)

- 必要な絶対存在度を求める元素 → 難揮発性親石元素 (refractory lithophile element)
- どうやって? → CIコンドライト隕石の組成を用いる

横山哲也さんの「隕石分析からの宇宙化学進化」というスライドより(東京工業大学)

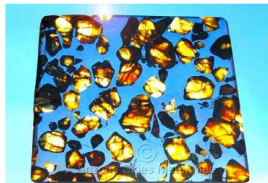
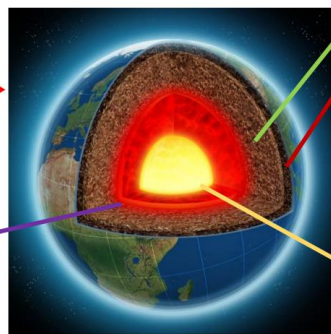
惑星の構造と隕石の種類



コンドライト
(一度も溶けたことがない)

分化?

注) 非コンドライトの元天体は
コンドライトそのものではない



石鉄隕石
(コア・マントル混合物?)



エイコンドライト
(マントル・地殻)

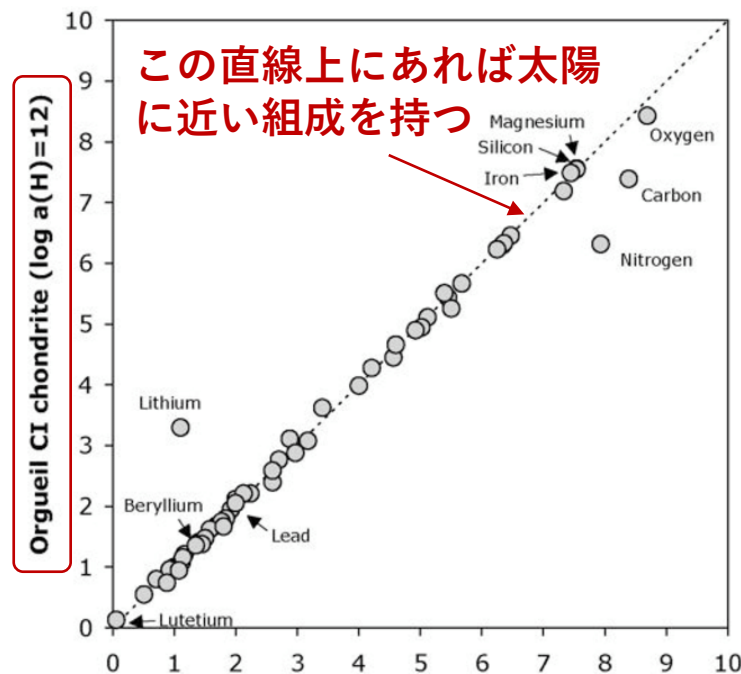
鉄隕石
(金属コア)



www.sciencedaily.com

CIコンドライト
の元素存在度

Palme and Jones (2005)



Solar Photosphere (log a(H)=12) 太陽の元素存在度

1. 導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2. 地球マントルの元素存在度の決め方→3. これからの研究テーマについて

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (8)

Palme and O'Neill (2014)
コンドライト隕石と言ってもさらに分類される

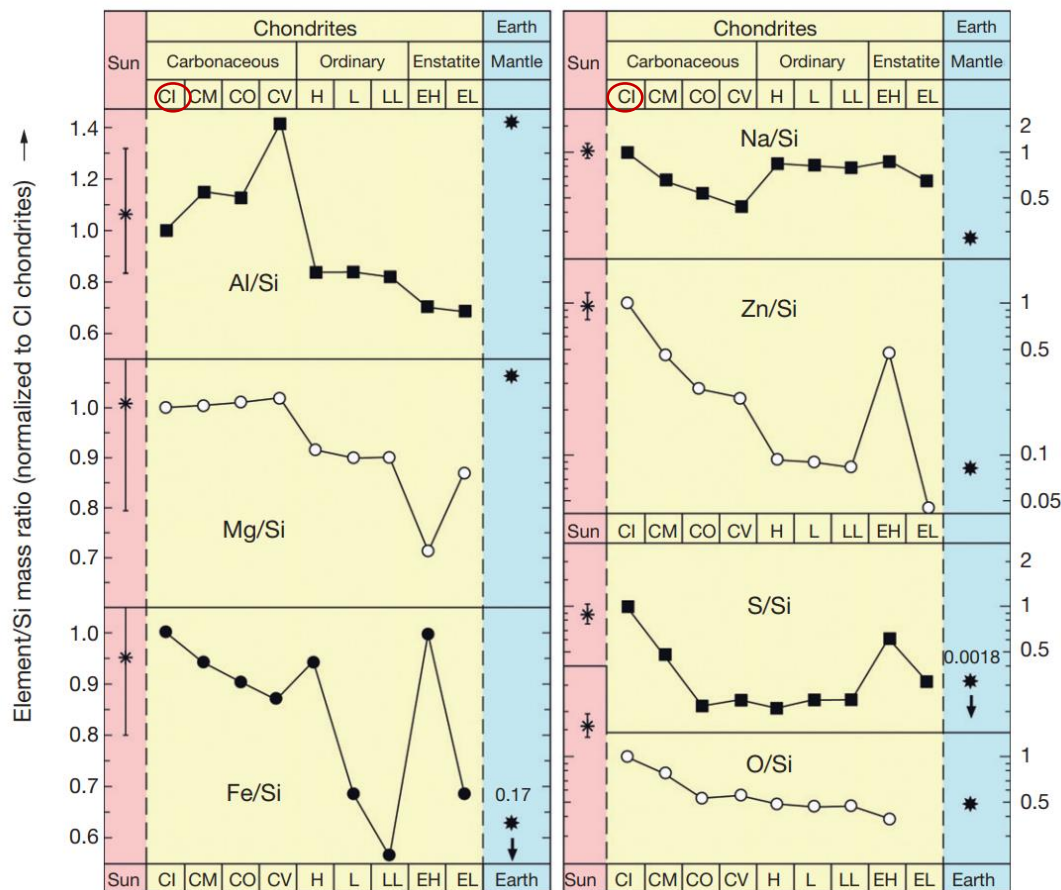


Figure 2 Element/Si mass ratios of characteristic elements in the major groups of chondritic (undifferentiated) meteorites. Meteorite groups are arranged according to decreasing oxygen content. The best match between solar abundances and meteoritic abundances is with CI meteorites. For classification of meteorites, see [Chapter 1.1](#) The upper mantle abundance ratios are indicated and will be discussed later in the chapter.

- CIコンドライト隕石…コンドライト隕石のうち、最も始原始的(変成作用を受けていない)で太陽組成に近い組成を持つ隕石
- そのため、地球型惑星の大元のものであると考えられている
- 地球集積の仮定で揮発性元素は宇宙空間への散逸があったかもしれないが、**不揮発性元素は基本的にはそのまま天体に保存されていると考えられる**
- また、親鉄元素はコア形成時にコアに吸い取られたと思われるが、**親石元素はそのままマントルにとどまると考えられる**
- これらの理由から、**地球マントル中の難揮発性親石元素はCIコンドライト隕石と同じ存在度を持つかもしれないと考えられる**

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (9)

CI carbonaceous chondrite Model

地球マントルのすべての元素存在度を**CIコンドライト**から推定するモデル

このモデルの問題点

- CIコンドライトには揮発性元素が多く、微量元素の存在度は実際の試料と一致しない

このモデルの利点

- 地球の大元 material である可能性が高い

Pyrolite Model

地球マントルのすべての元素存在度を**実際の試料**から推定するモデル

このモデルの問題点

- 絶対存在度は試料毎にバラバラ

このモデルの利点

- 相対存在度はほとんどの試料で一定

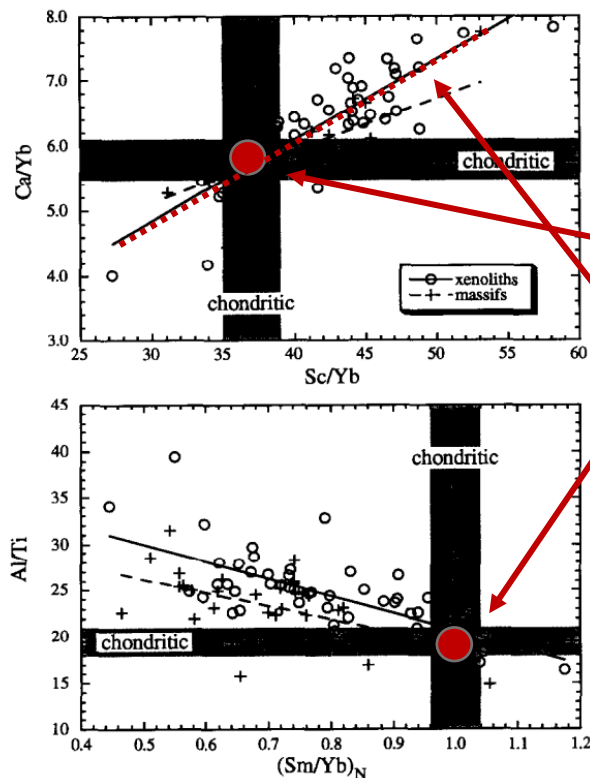
二つのモデルの長所を活かした新しいモデル

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (10)

仮定

地球マンントルの難揮発性親石元素の相対存在度はCIコンドライト中の相対存在度に一致する

○ xenolith
+ massif



McDonough and Sun (1995)

根拠

1. Depleted Peridotiteの難揮発性親石元素の相対存在度 (図中の縦軸と横軸)はCIコンドライトの相対存在度を通して
2. 試料の相対存在度のプロットは何かしらの傾向に沿って変化する(このプロットに相関関係がなければ, 1はたまたま一致したと言わざるを得ない)

相対存在度なのに一つの値を取らず, 傾向がある理由

- ・ このプロットは同じようなcompatibilityを持つ元素の相対存在度ではないため

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マンントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

CIコンドライト存在度で規格化



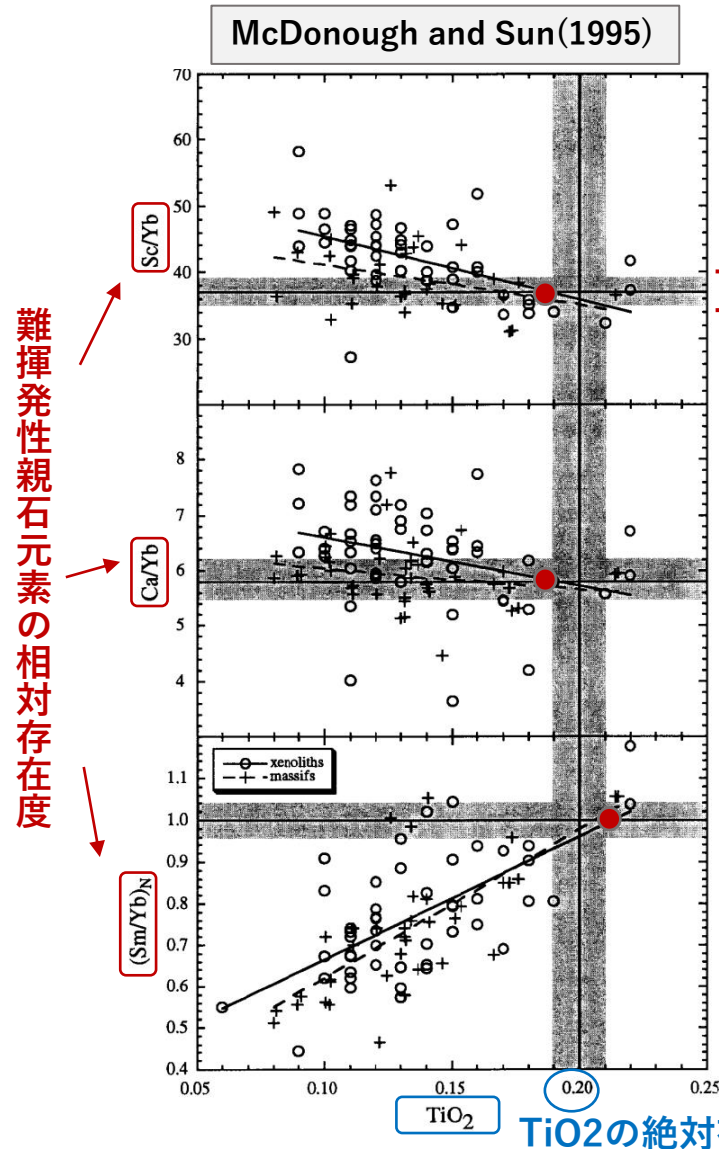
Incompatibility

マグマに行きやすい

そこで地球マンツルの難揮発性親石元素の絶対存在度はこのcompatibilityを考慮してCIコンドライト組成から最終的に決める

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (12)



(例) Tiの絶対存在度を求めてみる

- 地球マンントルとCIコンドライトの難揮発性親石元素の相対存在度は同じと考えている
- つまり、赤丸の縦軸の値がCIコンドライトから求めた地球マンントルの相対存在度となる
- ここで横軸を動かしたときに最も赤丸に近づくのが0.20の値(この値は地球マンントル中のTiO₂の絶対存在度)

したがって

$$\frac{0.20(\text{wt}\%) \times 47.867(\text{wt}\% \text{ mol}^{-1})}{79.867(\text{wt}\% \text{ mol}^{-1})} = 1198 \text{ ppm}$$

TiO₂の物質質量 Tiの物質質量

Tiの絶対存在度

これはCIコンドライトのTiの絶対存在度の~2.74倍である

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (13)

- 同様にして、他の難揮発性親石元素で地球マンントルのmajor成分(Al,Ca)についてこれを求めるとAl=2.35 (wt%) Ca=2.53(wt%)となる
- これはCIコンドライトの絶対存在度の~2.73倍である(Tiは~2.74倍だった)
- ということで、**難揮発性親石元素の他のminor成分もこれに準じて、CIコンドライトの~2.75倍である**と決める
- 今は難揮発性親石元素のみだが、先ほどの方法(難揮発性親石元素の相対存在度のプロット)はFe,Mg,Siという**major成分でも有効であることが分かった**(つまり、TiO₂のように傾向が見られた、ということ)
- これをもとに求めた酸化物の質量は次の通りで、これをもとにFe,Mg,Siの地球マンントルの絶対存在度を決定する

McDonough and Sun (1995)

Table 4
Silicate Earth model compositions

	Pyrolite models			CI model
	1	2	3	4
SiO ₂	45.0	45.16	45.0	49.9
TiO ₂	0.201	0.217	0.17	0.16
Al ₂ O ₃	4.45	3.97	4.4	3.65
Cr ₂ O ₃	0.384	0.46	0.45	0.44
MnO	0.135	0.13	0.11	0.13
FeO	8.05	7.82	7.6	8.0
NiO	0.25	0.27	0.26	0.25
MgO	37.8	38.30	38.8	35.15
CaO	3.55	3.50	3.4	2.90
Na ₂ O	0.36	0.33	0.4	0.34
K ₂ O	0.029	0.031	0.003	0.022
P ₂ O ₅	0.021	-	-	-
100Mg/(Mg+Fe)	89.3	89.7	90.1	88.7

これらの主要元素は地球マンントルの~99 wt% を占める

CIコンドライトから決めたモデル
(CI carbonaceous chondrite model)

拾ってきた石から決めた
Pyrolite Model

1=pyrolite model based on peridotites, komatiites and basalts (this study); 2=least depleted ultramafic xenolith model (Jagoutz et al., 1979); 3=MORB-harzburgite model (Green et al., 1979); 4=Bulk Silicate Earth model based on CI carbonaceous chondrites (Talyor and McLennan, 1985).

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マンントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (14)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Refractory

Lithophile

Transitional

Siderophile

41:Nbはrefractory siderophileです_(._.)_

この二つの元素は圧力条件によって親鉄性や、揮発性を帯びるようになるので、この方法で決めるのは良くない

L	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (15)

親石元素でやや揮発性元素や揮発性元素の地球マンントル中の絶対存在度の決め方

1. 様々な物的証拠と融解実験の結果から決めるパターン
2. 難揮発性親石元素と似たcompatibilityを持つ元素の相対存在度から求めるパターン
 - 元素AとBが同じcompatibilityを持てば、一方の絶対存在度で決まる
 - **元素AとBの相対存在度=始原的なマンントルのA中の絶対存在度/始原的なマンントル中のBの絶対存在度**
3. ある元素との相対存在度が常に一定であることから求まるパターン
4. 以上の方法で求めれない場合(相対存在度がバラバラなど)は可能性の高い値を採用するパターン

1の方法で絶対存在度を定める元素

- Cr(Sun,1981)
- Zn
- I [ハロゲンの中でmost incompatible]

3の方法で絶対存在度を定める元素

- Mn/Fe(McDonough and Sun,1995)
- Cs/Rb (Jones and Drake, 1994)
- V/Yb&Sc&Ca(McDonough and Frey, 1989)

2の方法で絶対存在度を定める元素

- Li/Dy&Ho, Na/Ti, K/U, Rb/Ba [Alkali metals]
- F/P&Sr, Cl/Ba&Rb, Br/Cl [Halogens]

4の方法で絶対存在度を定める元素

- B

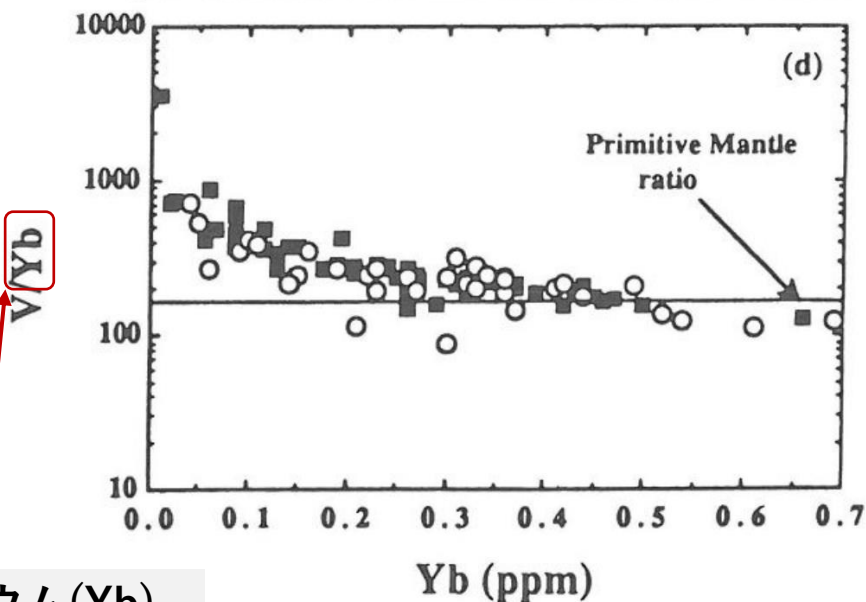
括弧付きは一応私が文献を追って確かめた元素

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (16)

3. 試料全域(MORB, Peridotite)に渡って相対存在度が一定

- Mn/Fe(McDonough and Sun,1995)
- Cs/Rb (Jones and Drake, 1994)
- V/Yb&Sc&Ca(McDonough and Frey, 1989)

McDonough and Frey (1989)



イッテルビウム(Yb)
は難揮発性親石元素
で絶対存在度が既知

McDonough and Sun (1995)

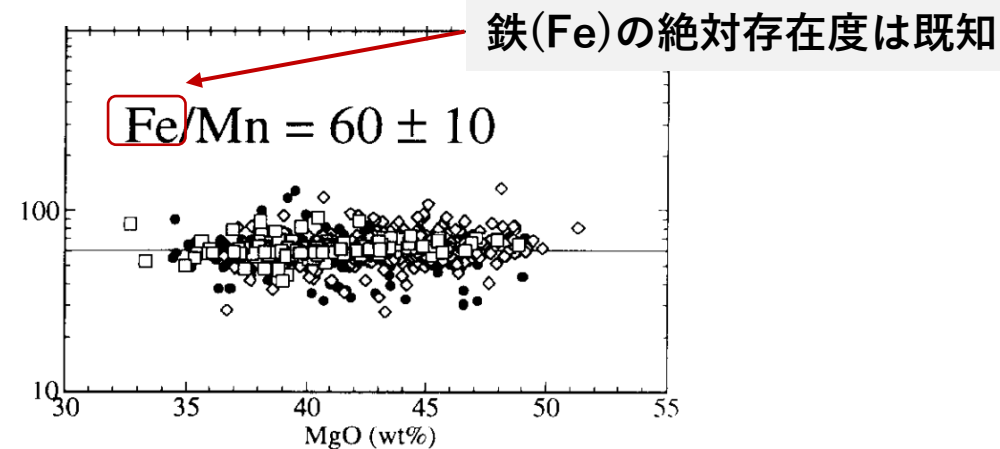


Fig. 7. A plot showing constant ratios of MgO/Ni (195) and Fe/Mn (60) in peridotites over a range of MgO contents. Samples (>1300) include spinel-bearing peridotite xenoliths (filled circles), garnet-bearing peridotite xenoliths (open diamonds) and massif peridotites (open squares). Data from the literature. The average ratio and ± 1 standard deviation is given.

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (17)

Refractory
Transitional

Lithophile
Siderophile

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	L	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	A	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

L	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

41:Nbはrefractory siderophileです_(._.)_

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マンントルの元素存在度の決め方 (18)

残ったSiderophileな元素(親鉄元素)の地球マンントル中の絶対存在度の決め方
→ 基本的には、試料全域(MORB+depleted Peridotite)で親石元素との相対存在度が一定という観測的事実をもとに決める

[例外]

- Fe,Niは最初に紹介したTiO₂と同じ方法で絶対存在度を決めた(Fe~6.26wt%,Ni~1996ppm)
- 相対存在度がバラバラな元素は観測や実験から一番あり得そうな値を採用

① Refractory Siderophile Element

- Mo/Ce~0.3
- W/Ba~0.00434
- Co/**Ni**~0.0534

② Moderately Volatile Siderophile Element

- P/Nd~70
- W/Ba~0.00434
- As/Ce~0.036
- Sb/Ce~0.003

[例外]

- Ga~4ppm
- Cu~30ppm
- Ge~1.1ppm
- Ag~5-10ppb

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (19)

揮発性による分類

- Refractory
- Transitional
- Moderately volatile
- Highly volatile

親鉄性による分類

- Lithophile
- Siderophile

41:Nbはrefractory siderophileです_(._.)_

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	L	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	A	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									

L	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

白金族元素(PGE)とRe,Auは正確にはHighly Siderophileな元素
 ※これらの元素の相対存在度はCIコンドライトと一致すると本文にあったが具体的な求め方は分かりませんでした

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
 →2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (20)

残りの揮発性親鉄元素と **Chalcophileな元素(親銅元素)** の地球マントル中の絶対存在度の決め方
→ 基本的には、試料全域(MORB+ depleted peridotite)で親石元素との相対存在度が一定という
観測的事実をもとに決める

基本的にhighly
volatileな元素

[例外]

- 相対存在度がバラバラな元素は観測や実験から一番あり得そうな値を採用

① Volatile Siderophile Element

- $\text{Ti/Rb} \sim 0.00434$

[例外]

- $\text{Bi} \sim 2.5 \text{ppb} (\text{siderophile})$
- $\text{S} \sim 250 \text{ppm} (\text{chalcophile})$
- $\text{In} \sim 11 \text{ppb} (\text{chalcophile})$
- $\text{Te} \sim 12 \text{ppb} (\text{chalcophile})$
- $\text{Hg} \sim 10 \text{ppb} (\text{chalcophile})$

② Chalcophile Element

- $\text{Se/S} \sim 0.00038$
- $\text{Cd/Zn} \sim 0.0001$
- $\text{Sn/Sm} \sim 0.32$

[さらなる例外]

- PbはPb/Pb年代を用いて決める(U/Pb比から決める)

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (21)

揮発性による分類

Refractory

Transitional

Moderately volatile

Highly volatile

親鉄性による分類

Lithophile

Siderophile

Chalcophile

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	L	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	A	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

L	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
A	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

1.導入(今の地球→初期地球→私が興味のあること→親鉄元素を用いたコア形成モデルの紹介)
→2.地球マントルの元素存在度の決め方→3.これからの研究テーマについて

2. 地球マントルの元素存在度の決め方 (22)

Atmophile Element (大気に入りやすい元素:H,C,N,希ガス)は様々な知見から決めているようですが、今回は無視します

まとめ

- 地球マントルの元素存在度は主に次の知見に基づいて決めているようである
 - ✓ 難揮発性親石元素の相対存在度が地球とCIコンドライト隕石で同じであるという仮定
 - ✓ これを用いて、主成分の絶対存在度と難揮発性親石元素の絶対存在度を定める
 - ✓ その他の元素の絶対存在度は、compatibilityの似た元素の相対存在度、もしくは相対存在度がどの試料でも同じという事実に基づき、先ほど決めた絶対存在度から定める
 - ✓ 以上の方法で決められない元素は融解実験などを通して、最もあり得そうな絶対存在度の値を採用する
- 今回のお勉強で非常に大雑把ではあるが、地球マントルの元素存在度をどのようにして決めているのか、ということに対する理解がほんの少しだけできた

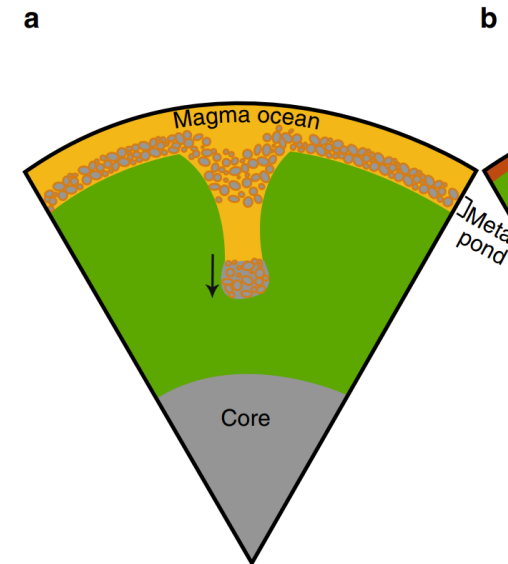
3. これからの研究テーマについて

コア形成の話をより現実的にするために重要だと個人的に思っていること(4選)

- 親鉄元素分配の詳細なデータ(温度圧力以外の組成依存性など)
- 初期地球の内部の物性値や温度情報(今は大抵外挿)
- 衝突天体の情報(大きさ, 組成, 衝突速度・角度など)
- 衝突天体と初期地球との相互作用

初期地球内部で何が起こったか？

- 衝突天体のコアはどうやって初期地球内部を落ちた？(直ぐにバラバラになった or すんなりそのまま落ちていったなど)
- マグマオーシャン内でのコアの分解の様子次第で平衡分配の様子も変わるだろうと思う



Fleck et al. (2018)

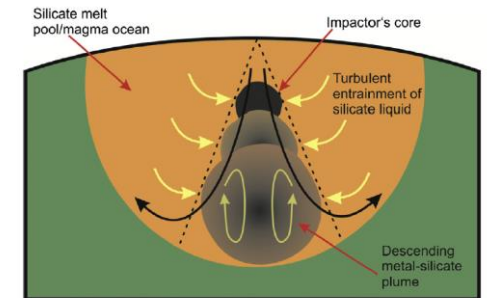


Fig. 3. Descent of an impactor's metallic core through silicate liquid in an impact-generated melt pool/magma ocean. The descending core turbulently entrains silicate liquid in a plume-like structure that expands with increasing depth. The volume fraction ϕ of metal in the metal-silicate plume is calculated from Eq. (9) and enables the mass fraction of the proto-planet's mantle that equilibrates with the metal to be determined. (After Deguen et al., 2011.)

Deguen et al. (2011)