

# 月地殻形成条件から制約する 月バルク組成

東京大学 永原研 博士2年  
酒井理紗

# Introduction 月の観測事実

月は地球の次に最も観測事実の多い天体

## ■ 月密度・慣性能率

Jones & Palme (2000), Jones & Hood (1990), Mueller et al. (1988)

$\rho \sim 3.34 \text{g/cm}^3$ ,  $MI \sim 0.39 \Rightarrow$  小さいコア (<400km)

## ■ 地震波速度

Nakamura et al. (1982), Kuskov & Kronrod (1998)

剛性率, 密度構造  $\Rightarrow$  地殻厚 (~60km?)

## ■ Apolloサンプル, 隕石

Warren (2005), Longhi (1992, 2003), Wasserburg & Papanastassiou (1971), Wänke et al. (1971)

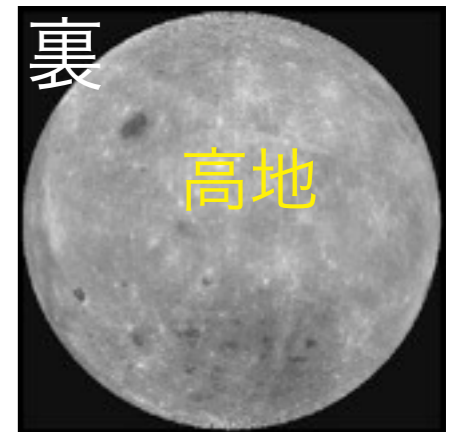
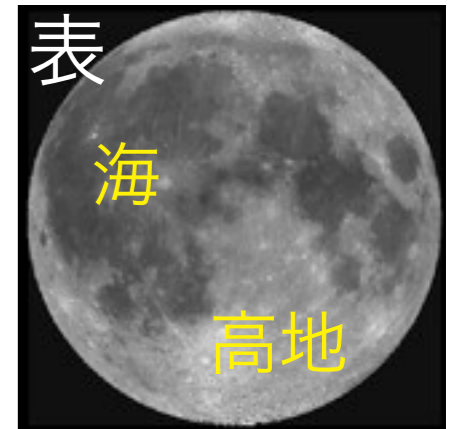
$\Rightarrow$  月地殻は古い斜長岩 (斜長石:  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )

## ■ リモートセンシング

Bart et al. (2011), Song et al. (2010), Mitrofanov (2010)

Ishihara et al. (2009), Ohtake et al. (2009), Tompkins & Pieters (1999)

$\Rightarrow$  地殻厚 (~45 $\pm$ 10km), 表層の鉱物分布





# Introduction 月全体の化学組成

探査で得られる表面の情報からではバルクの構造, 組成は推定困難

FeO : 密度, マントル化学組成  $Al_2O_3$  : 地殻主要成分

## ■ 月密度・慣性能率, 地震波速度

- 1 Buck & Toksöz (1980)
- 2 Khan et al. (2006)
- 3 Lognonné et al. (2003)

## ■ 主にApolloサンプル, 隕石の Th, U濃度から $Al_2O_3$ 量推定

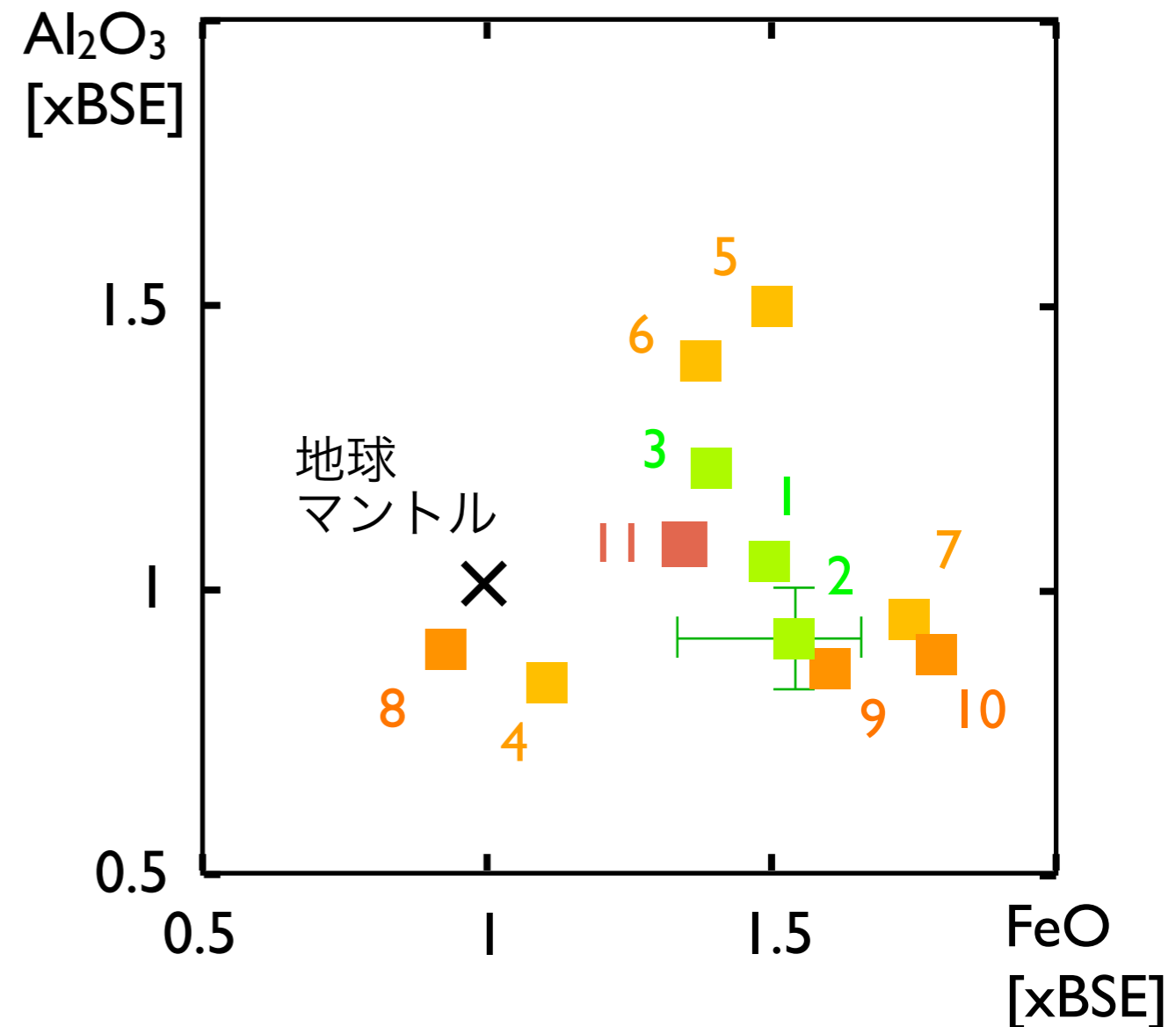
- 4 Warren (2005)
- 5 Taylor (1982)
- 6 Taylor et al. (2006)
- 7 Ringwood (1979)

## ■ 海の玄武岩組成から推定

- 8 Longhi (1982, 2006)
- 9 Wänke & Dreibus (1982)
- 10 Jones & Delano (1989)

11 Snyder et al. (1992)

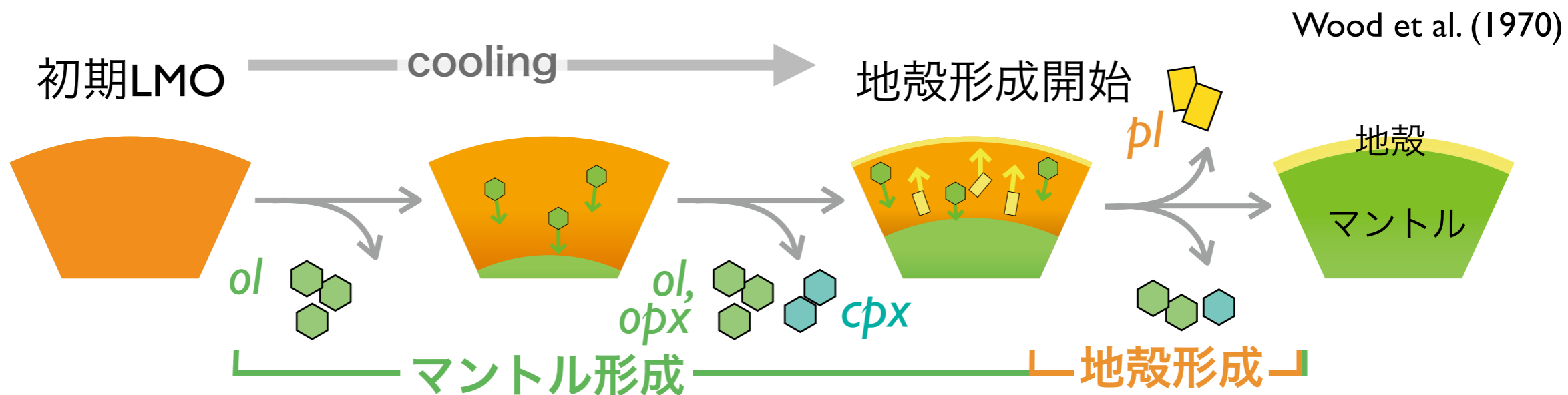
地球(BSE\*)と比較した  
従来の月バルク組成推定値



\*BSE組成 : McDonough & Sun (1995)

# Introduction 月地殻形成

- 月地殻は大規模マグマオーシャンから斜長石が浮上して形成

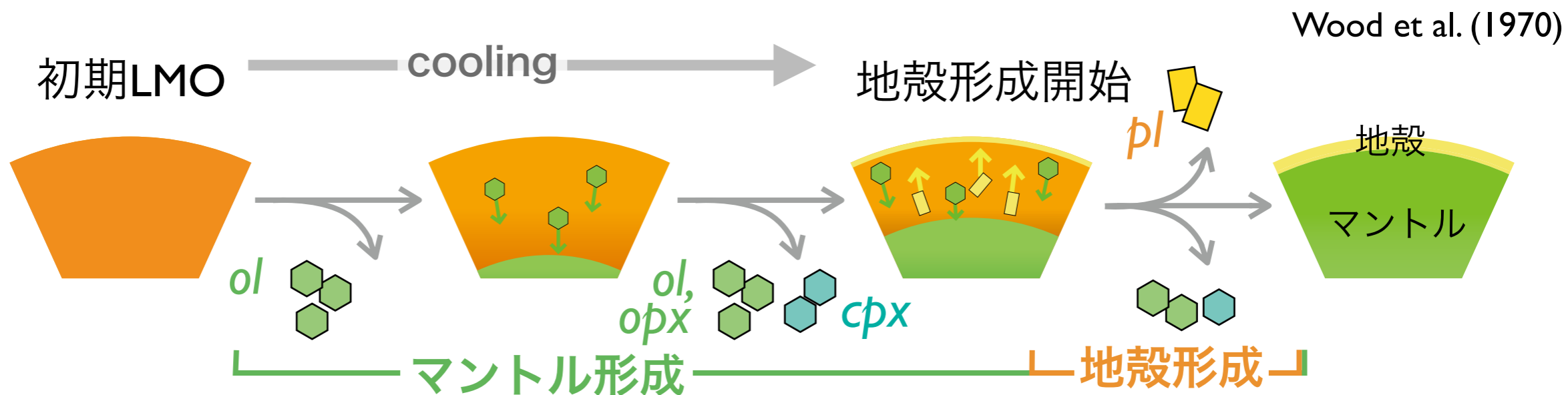


## 月地殻形成条件

- ・  $45 \pm 10$ kmの斜長岩質地殻を作る斜長石析出量
- ・ 対流中での斜長石浮上
- ・ 斜長石と共存する地殻中のかんらん石・輝石組成

# Introduction 月地殻形成

- 月地殻は大規模マグマオーシャンから斜長石が浮上して形成



## 月地殻形成条件

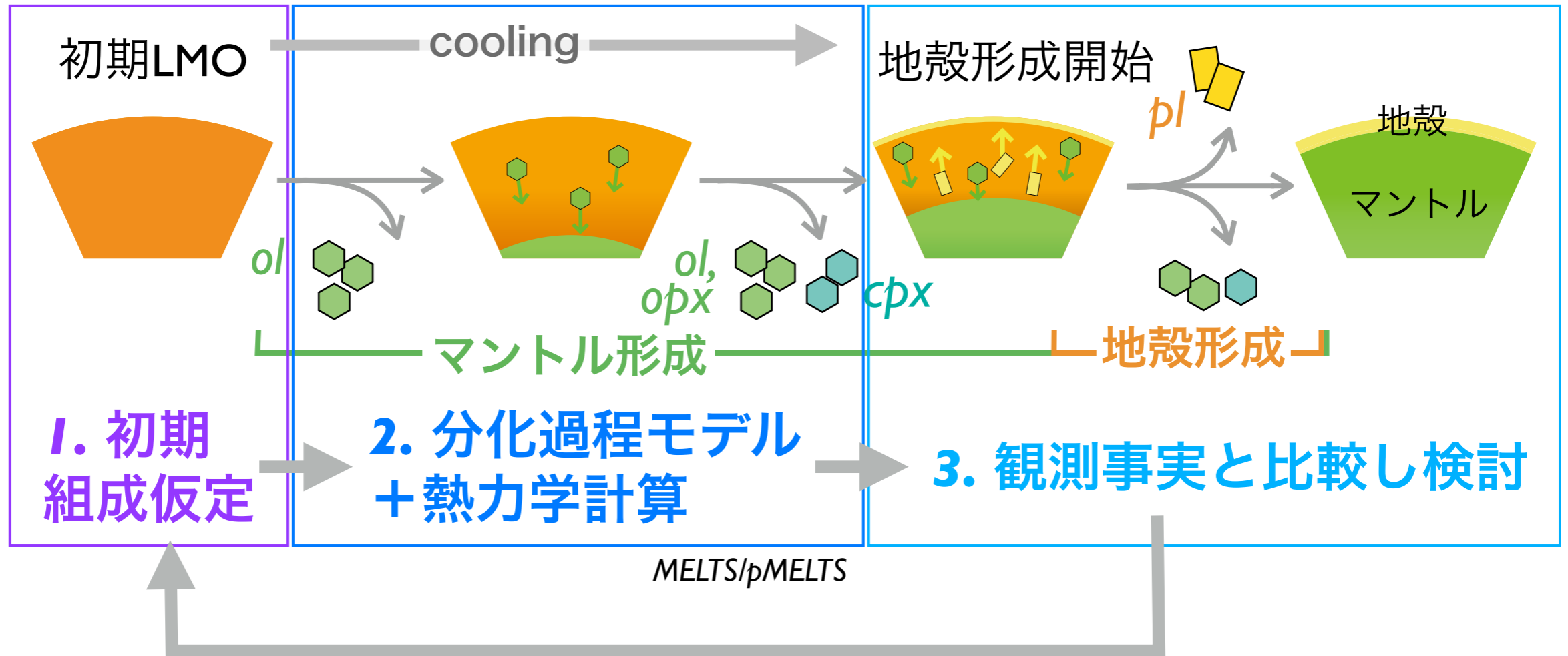
- ・  $45 \pm 10$  kmの斜長岩質地殻を作る斜長石析出量
- ・ 対流中での斜長石浮上
- ・ 斜長石と共存する地殻中のかんらん石・輝石組成

## 本研究の目的

観測事実と整合的な月地殻形成条件から  
マグマオーシャン組成(~月バルク組成)を制約する

# Purpose & Procedure

手法



— 本研究の目的 —

観測事実と整合的な月地殻形成条件から  
マグマオーシャン組成(~月バルク組成)を制約する

# 初期LMO組成の仮定

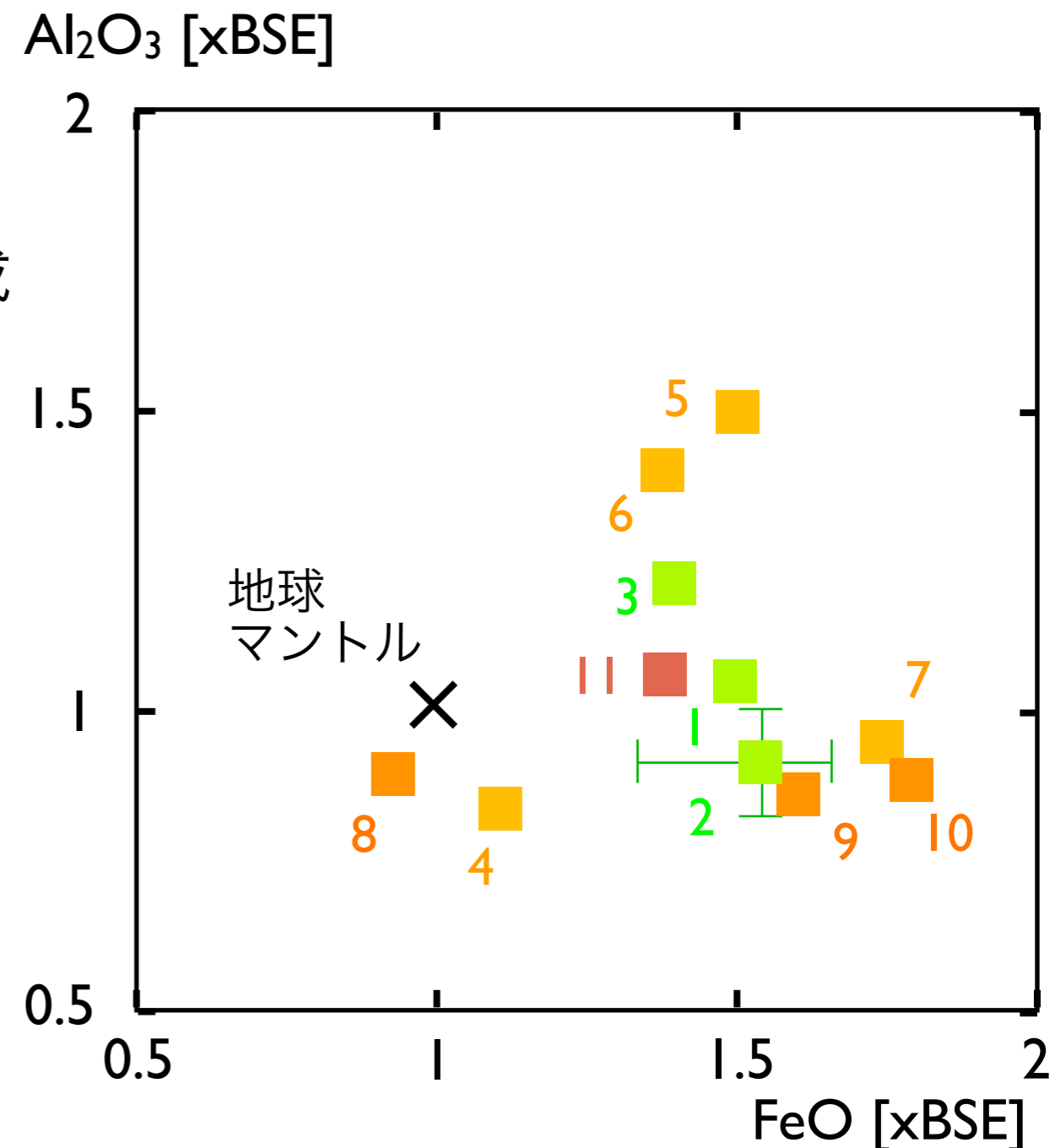
SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, CaOの5成分系

BSE (Bulk Silicate Earth : 地球のマントル組成)

- MgO/SiO<sub>2</sub> ~ 1.3 (const.)
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO ~ 0.7 (const.)
- FeO : BSE × 0.5-2  
メルト密度, mafic 鉱物組成
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO : BSE × 0.5-2  
月地殻の主要成分

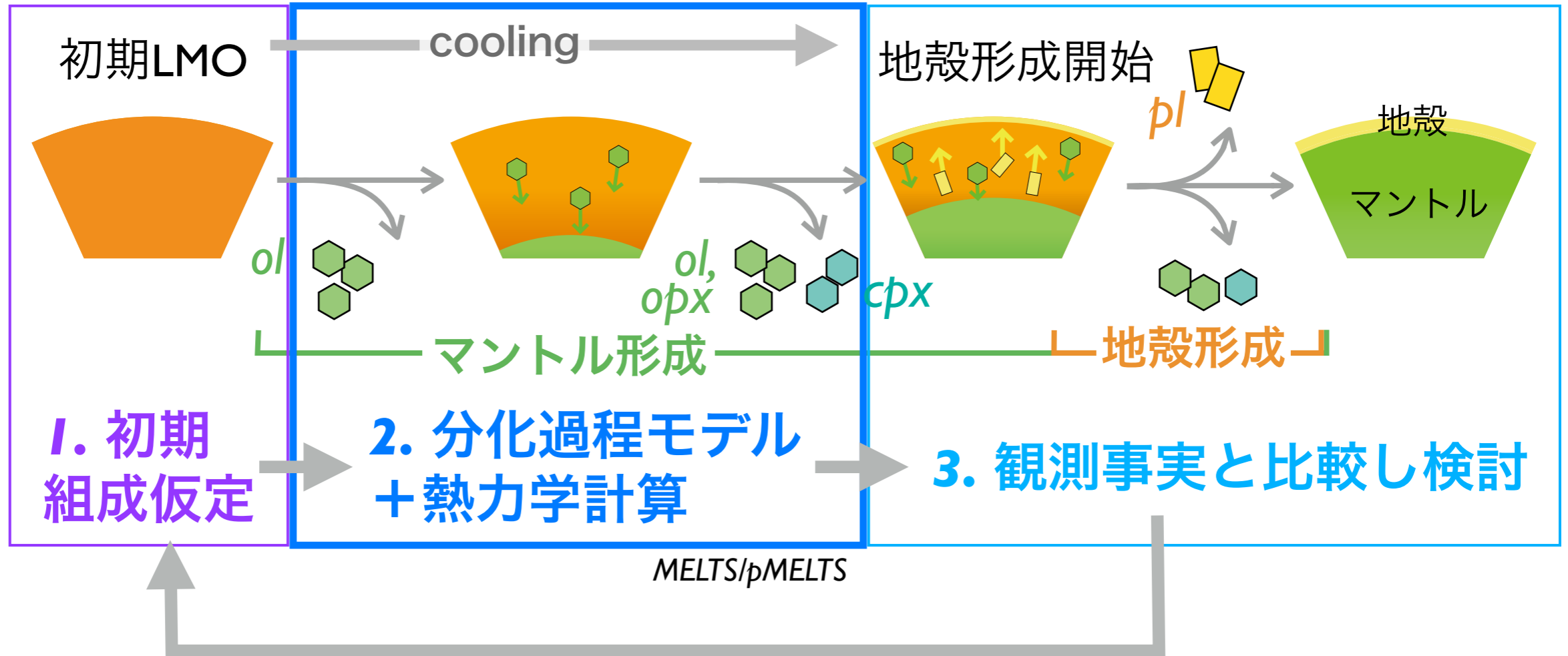
BSE*組成	(wt%)
SiO <sub>2</sub>	45.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5
FeO	8.1
MgO	38.2
CaO	3.6

\*McDonough & Sun (1995)



# Purpose & Procedure

手法



— 本研究の目的 —

観測事実と整合的な月地殻形成条件から  
マグマオーシャン組成(~月バルク組成)を制約する



# 結晶分離効率

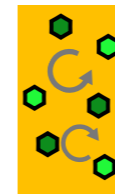
## 結晶分離効率とマグマ組成の関係

最大結晶分別  
Maximum Fractionation



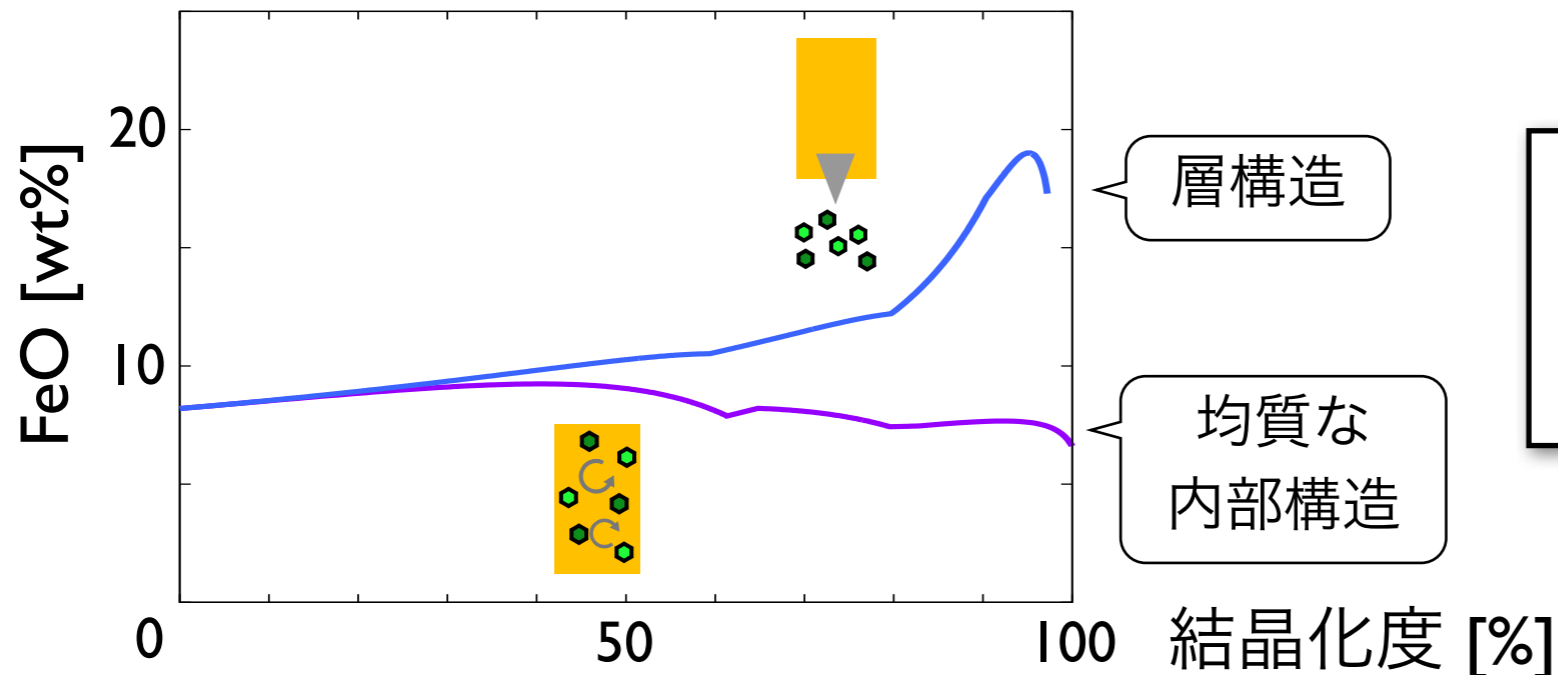
結晶は析出したと  
同時に系から分離

平衡結晶化  
Equilibrium Crystallization



マグマと化学平衡を  
保ちながら結晶化

遅 ← 対流速度 → 速  
速 ← 終端速度 → 遅  
小 ← 粘性 → 大



分離効率は対流速度,  
終端速度, 粘性に依存

# 結晶分別過程（マントル形成）

## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

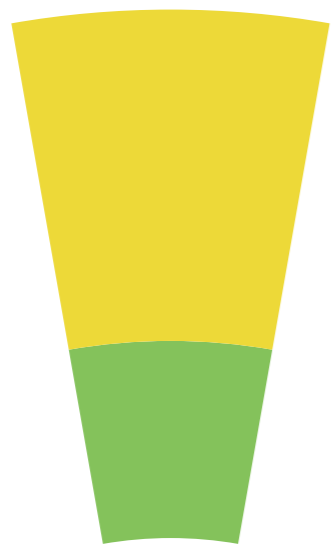
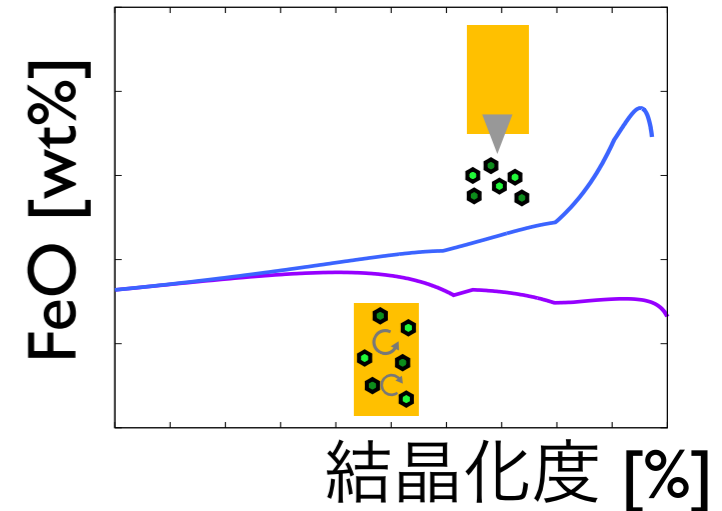
結晶は析出したと同時に系から分離



平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



結晶化度

0%

## 段階的な結晶分離モデル

1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)

月半径 ~1738km

2) 平衡結晶化

3) 臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ ) に到達後, 瞬時に分離

*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*

4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで

結晶化と分離を繰り返す

# 結晶分別過程（マントル形成）

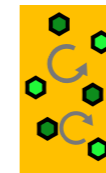
## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

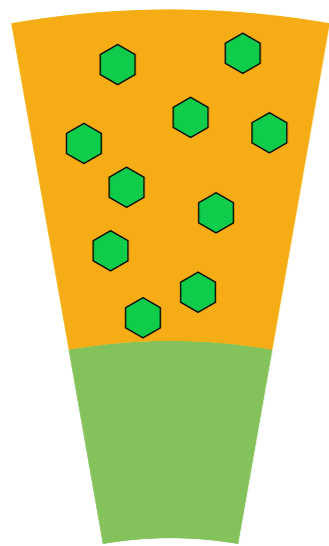
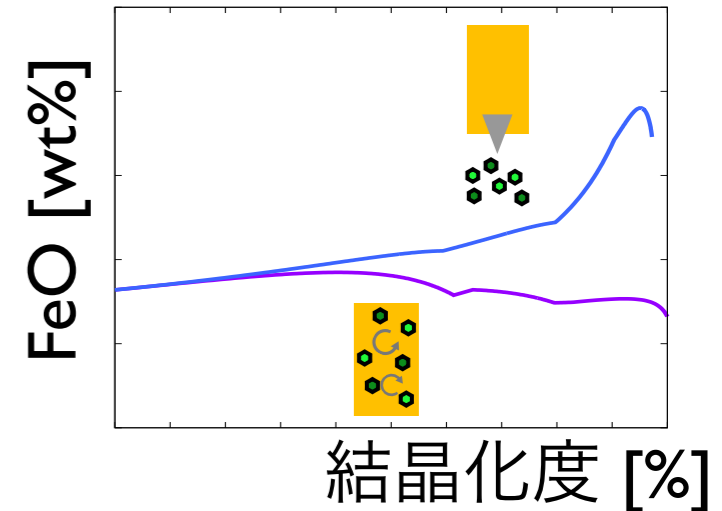
結晶は析出したと同時に系から分離



平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



結晶化度

**X%**

## 段階的な結晶分離モデル

1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)

月半径 ~1738km

2) 平衡結晶化

3) **臨界結晶化度X (0 < X ≤ 40%)** に到達後, 瞬時に分離

*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*

4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで

結晶化と分離を繰り返す

# 結晶分別過程（マントル形成）

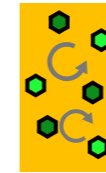
## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

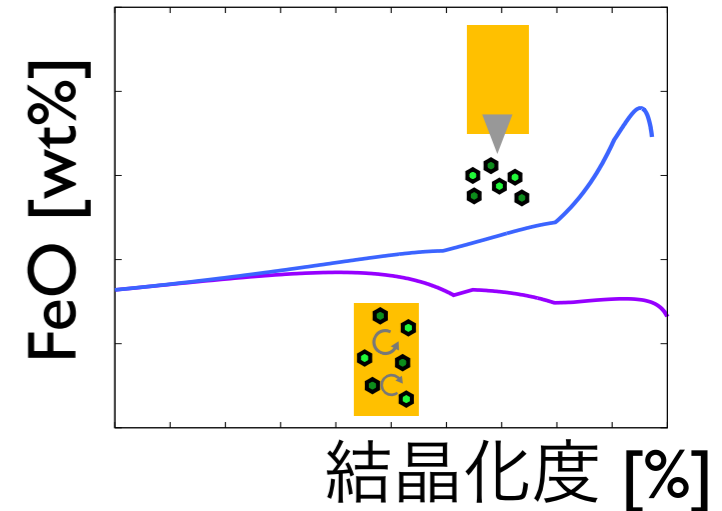
結晶は析出したと同時に系から分離



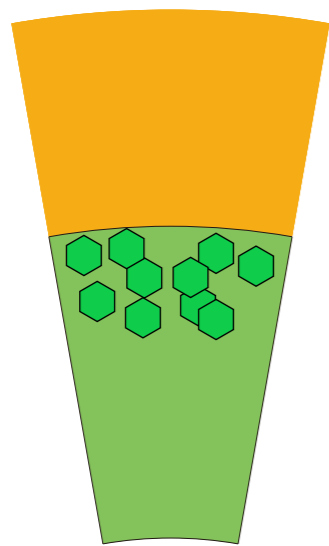
平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



分離



結晶化度

0%

## 段階的な結晶分離モデル

- 1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)
- 2) 平衡結晶化
- 3) **臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ )** に到達後, 瞬時に分離  
*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*
- 4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで  
結晶化と分離を繰り返す

# 結晶分別過程（マントル形成）

## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

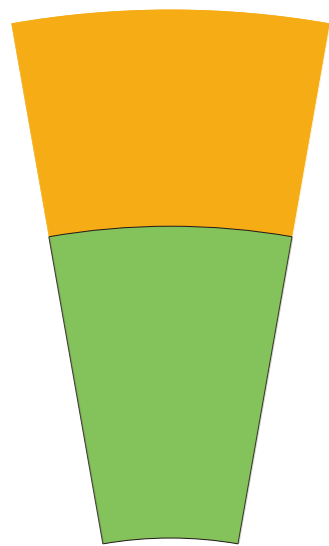
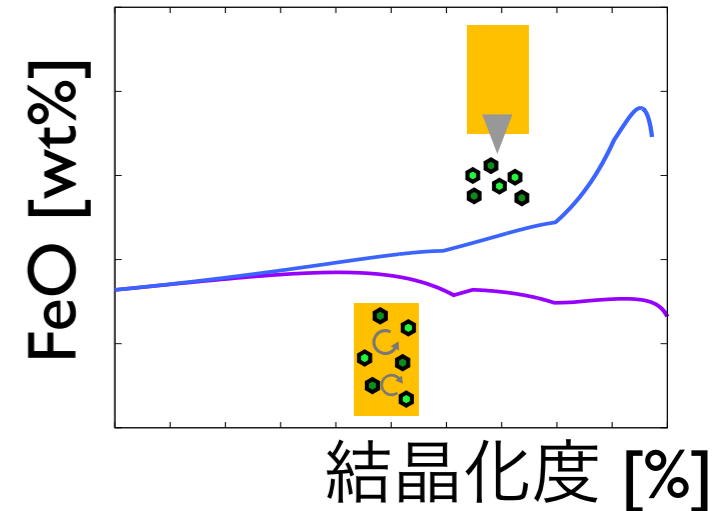
結晶は析出したと同時に系から分離



平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



結晶化度

0%

## 段階的な結晶分離モデル

- 1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)
- 2) 平衡結晶化
- 3) 臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ ) に到達後, 瞬時に分離  
*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*
- 4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで結晶化と分離を繰り返す

# 結晶分別過程（マントル形成）

## 結晶分離とマグマ組成

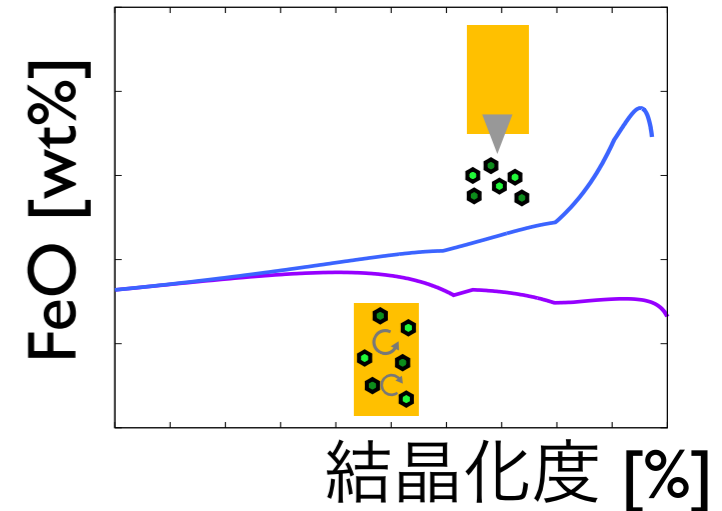
最大結晶分別

結晶は析出したと同時に系から分離

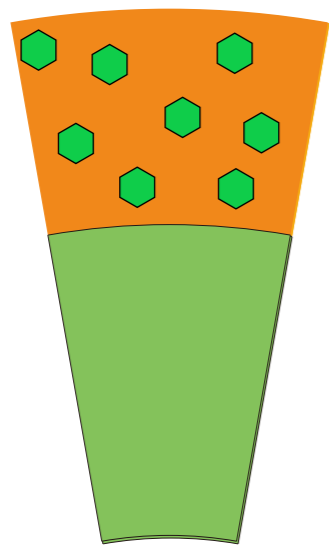


平衡結晶化

マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



平衡結晶化



段階的な結晶分離モデル

1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)

2) 平衡結晶化

3) 臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ ) に到達後, 瞬時に分離

*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*

4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで

結晶化と分離を繰り返す

結晶化度

$X\%$

# 結晶分別過程（マントル形成）

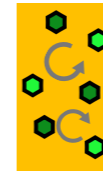
## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

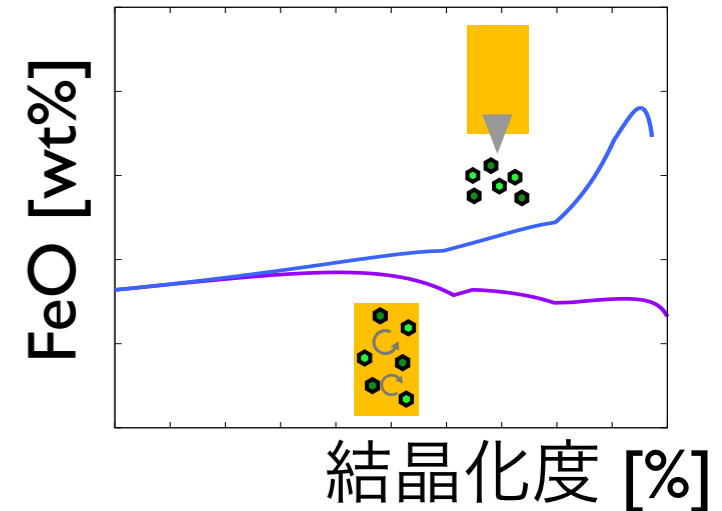
結晶は析出したと同時に系から分離



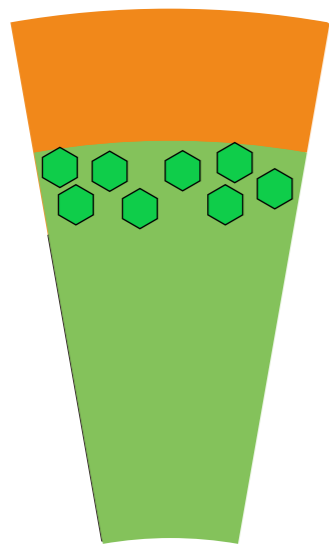
平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



分離



段階的な結晶分離モデル

- 1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)
- 2) 平衡結晶化
- 3) **臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ )**に到達後, 瞬時に分離  
*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*
- 4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで  
結晶化と分離を繰り返す

# 結晶分別過程（マントル形成）

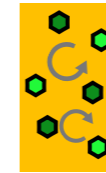
## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

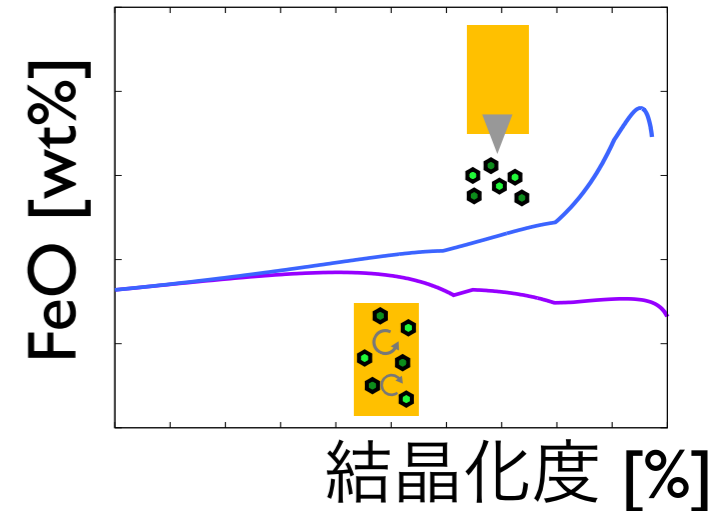
結晶は析出したと同時に系から分離



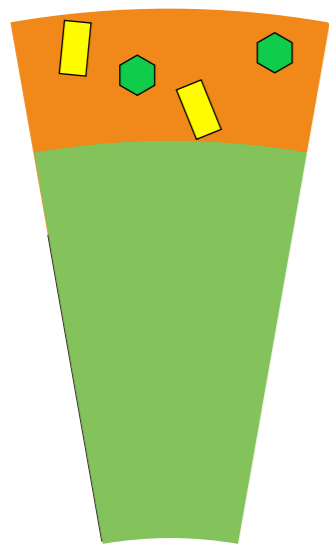
平衡結晶化



マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



分離



段階的な結晶分離モデル

- 1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)
- 2) 平衡結晶化
- 3) 臨界結晶化度 $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ ) に到達後, 瞬時に分離  
*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*
- 4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで結晶化と分離を繰り返す



# 結晶分別過程（マントル形成）

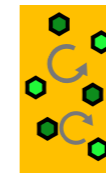
## 結晶分離とマグマ組成

最大結晶分別

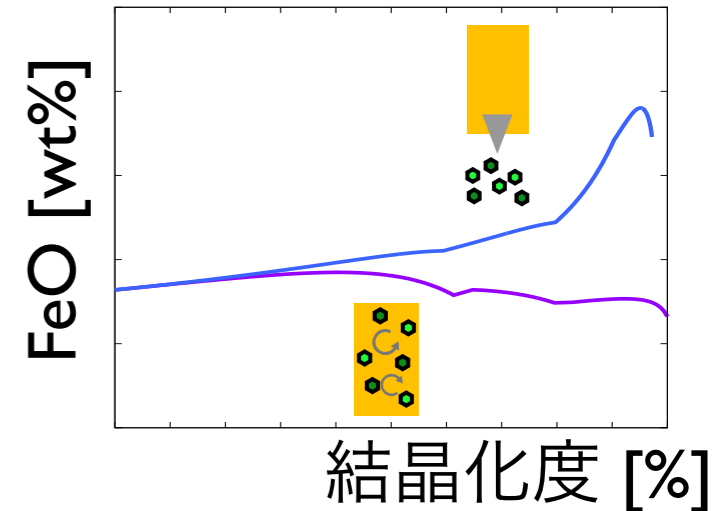
結晶は析出したと同時に系から分離



平衡結晶化



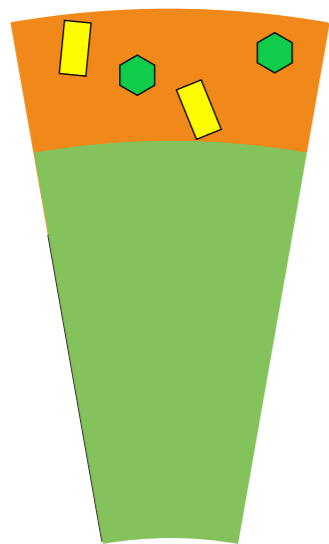
マグマと化学平衡を保ちながら結晶化



0%

← 臨界結晶化度  $X$  →

100%



## 段階的な結晶分離モデル

- 1) 初期マグマオーシャン (深さ 1000 km)
- 2) 平衡結晶化
- 3) 臨界結晶化度  $X$  ( $0 < X \leq 40\%$ ) に到達後, 瞬時に分離  
*Sato (2005), Hoover et al. (2001), Carroll (1996)*
- 4) 斜長石が析出するまで, 浅くなったLMOで結晶化と分離を繰り返す

# 熱力学計算 (MELTS/pMELTS)

Ghiorso & Sack (1995), Ghiorso+ (2002)

主に地球のMORBを対象にした岩石融解実験のデータのコンパイルに基づき、ある温度・圧力下での相平衡を熱力学計算するプログラム

※実験データの少ない組成範囲では信頼性が低い

⇒地殻形成時の組成, 結晶化度, 析出した鉱物の種類, 量, 組成

The screenshot shows the MELTS (code release 5.0) software interface. The window title is "MELTS (code release 5.0)". The menu bar includes "Commands", "Edit", "Composition", "Intensive Variables", "Options", and "Help".

**Input Section (Red Box):** This section contains a list of chemical components on the left, including SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MnO, MgO, NiO, CoO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>O-1, F<sub>2</sub>O-1, and Bulk System. Each component has a corresponding input field. A red box highlights this entire input area, with a vertical label "Input" to its left. A red arrow points from the text "初期組成(主要 5 成分+TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O)" to the input fields for TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Na<sub>2</sub>O.

**System Parameters (Red Box):** A red box highlights the "System:" section, which includes "T (C)" and "P (bars)". A red arrow points from the text "初期温度, 圧力(一定)," to the "T (C)" field.

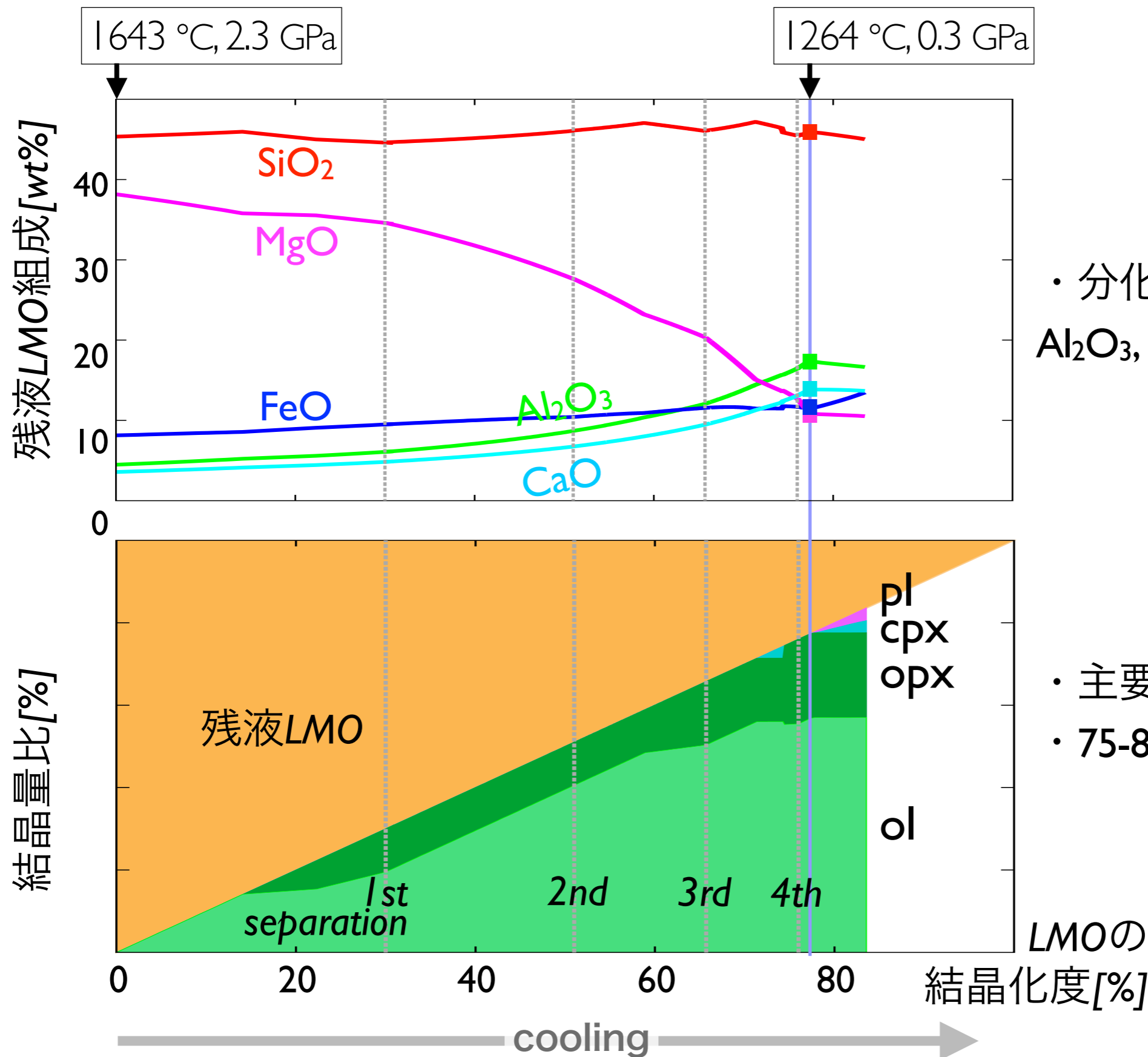
**Options (Red Box):** A red box highlights the "Options:" section, which includes "fO<sub>2</sub>: log10" and "ΔQFM". A red arrow points from the text "結晶分別の仕方(batch or Max. frac.)" to the "log10" dropdown menu.

**Output Section (Blue Box):** A blue box highlights the output area at the bottom of the window, which contains a table with columns for "Phase Units", "Affinity", "Formula", "Component", and "mol frac". A vertical label "Output" is positioned to the left of this box. Below the table, the text "温度, 鉱物の種類・量・組成, 残液の量・組成" is displayed in blue.

**Other Elements:** The interface includes a "Status of Calc:" section with various checkboxes (e.g., "Wait", "Blk Cap", "T/P", "Satn Ck", "Add Ph", "Proj", "Con-Q", "Quad", "Soln", "Linear", "Satn Ck", "Conv", "Verify", "Output", "Update"). A "Waiting for command or user input." message is displayed in the center. At the bottom, there are icons for "Graphics Display Window", "Graphics Options Dialog", "Supplemental Calculator", and "View Output File". The "Phase units:" dropdown is set to "grams".

# 結晶分化過程：熱力学計算結果

例：BSE組成, X~30%



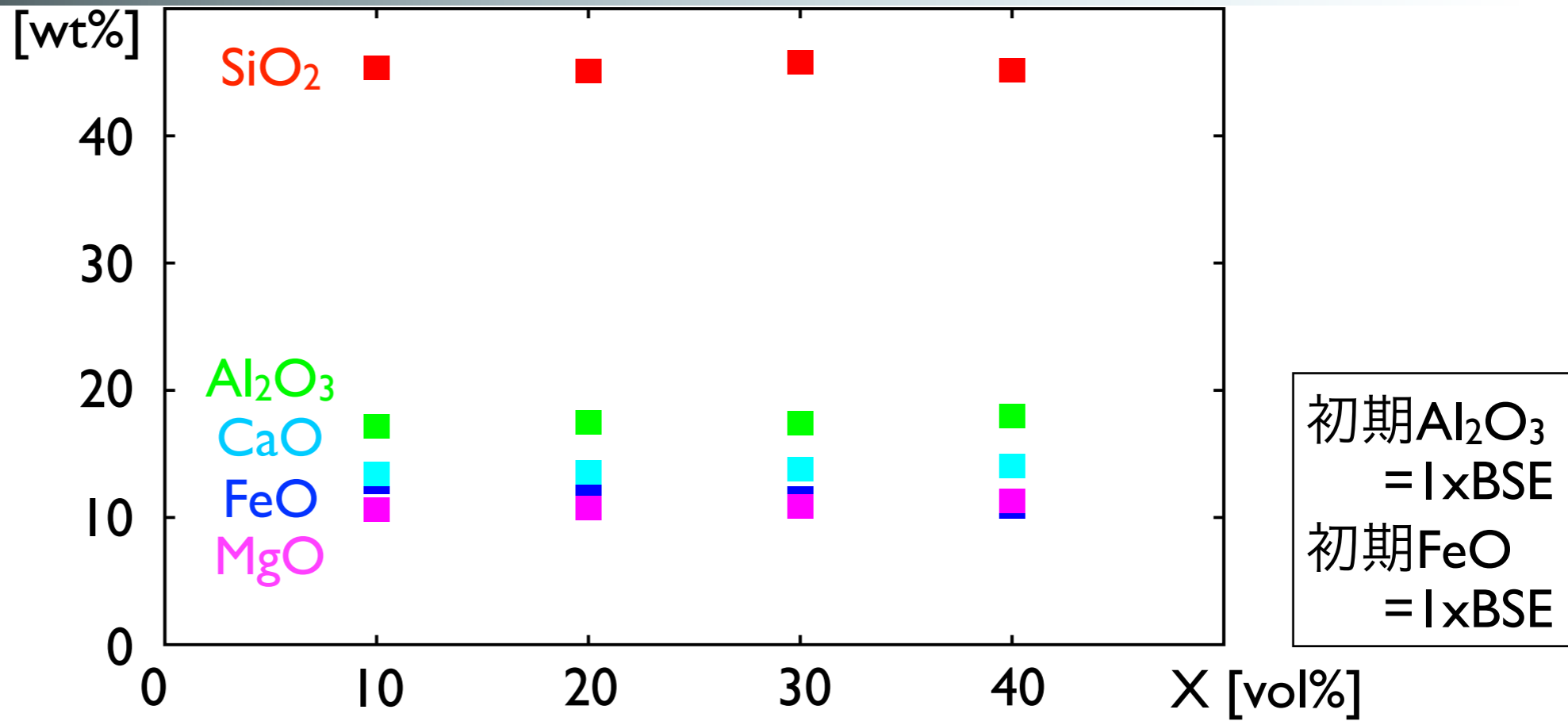
- ・分化とともにメルトは Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, FeO に濃集

- ・主要鉱物は ol, opx, cpx
- ・75-80% 固化で pl 析出

LMOの  
結晶化度 [%]

# 地殻形成時のLMO組成, 厚み, 内部構造の比較

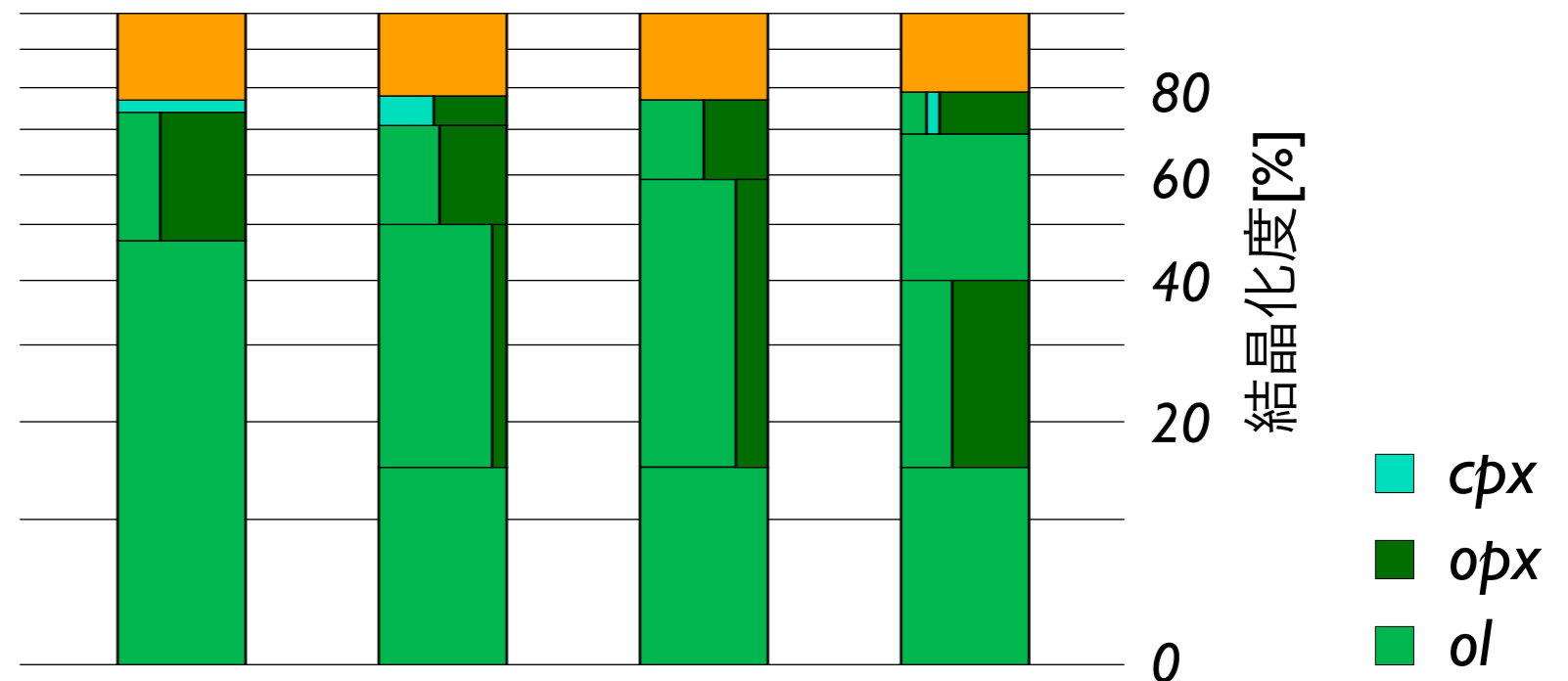
地殻形成時の  
LMO組成



LMO厚み[km]

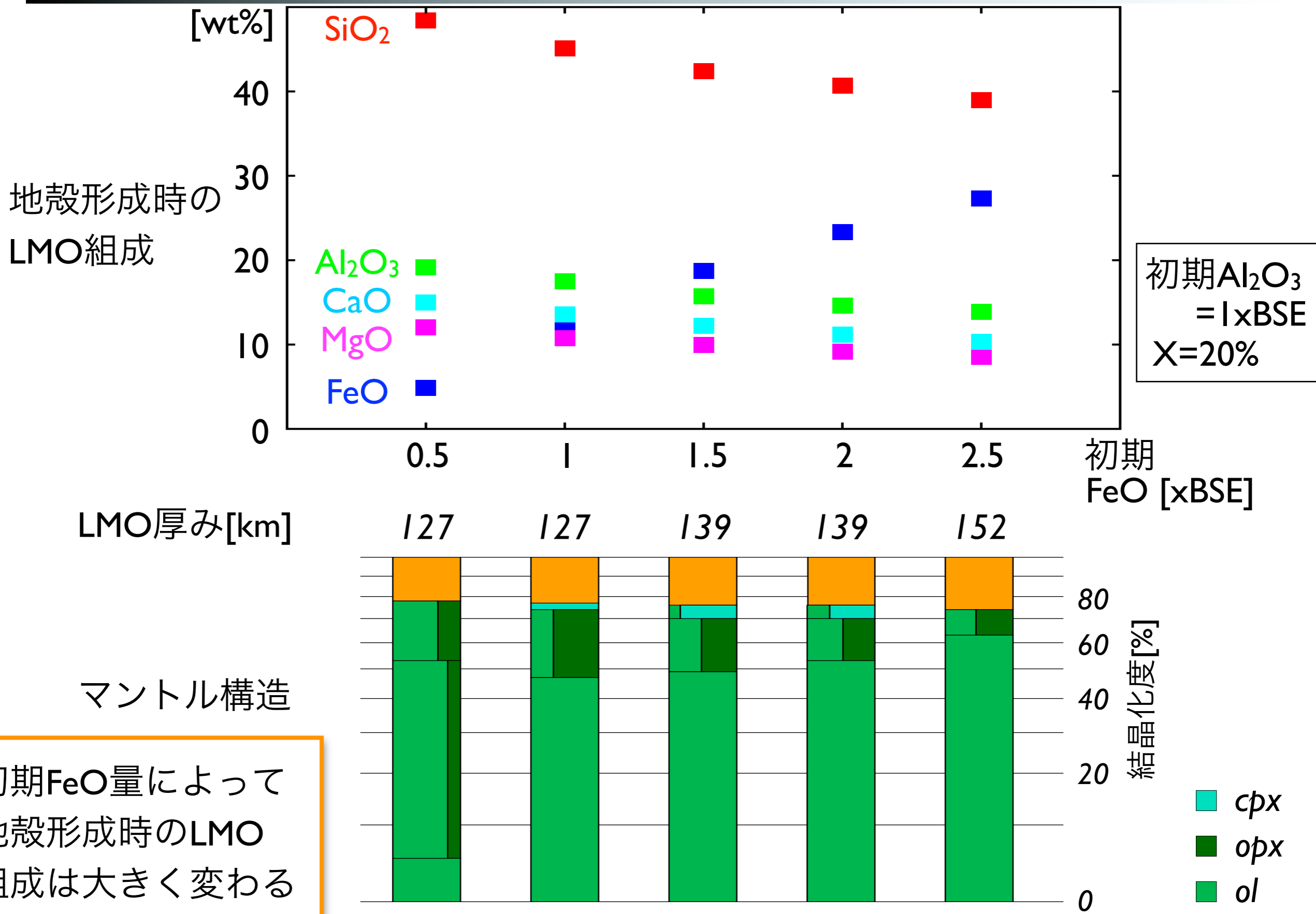
133      127      133      121

マントル構造



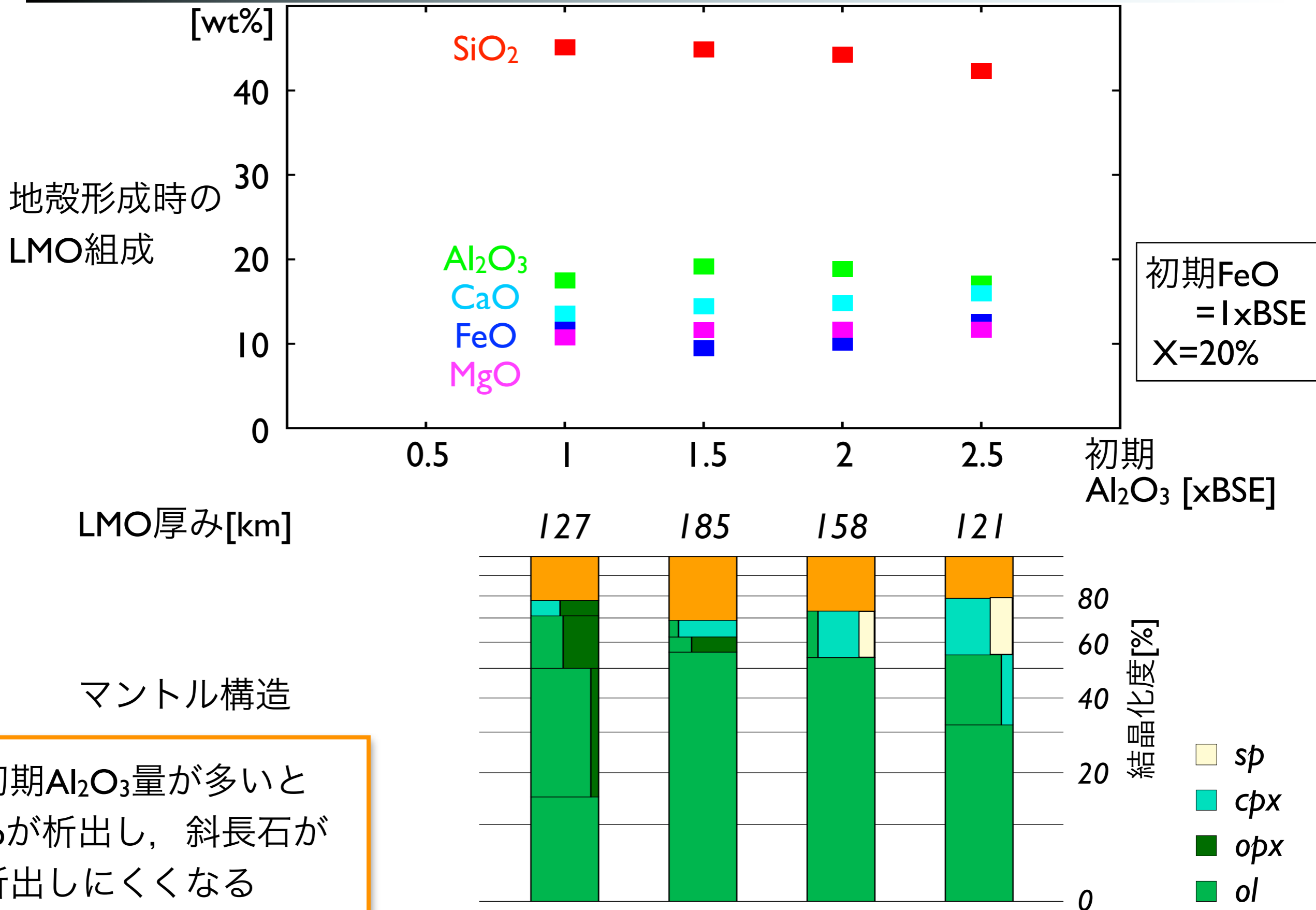
結晶分離効率Xは地殻形成時のLMO組成, 厚みにほぼ影響しない

# 地殻形成時のLMO組成, 厚み, 内部構造の比較

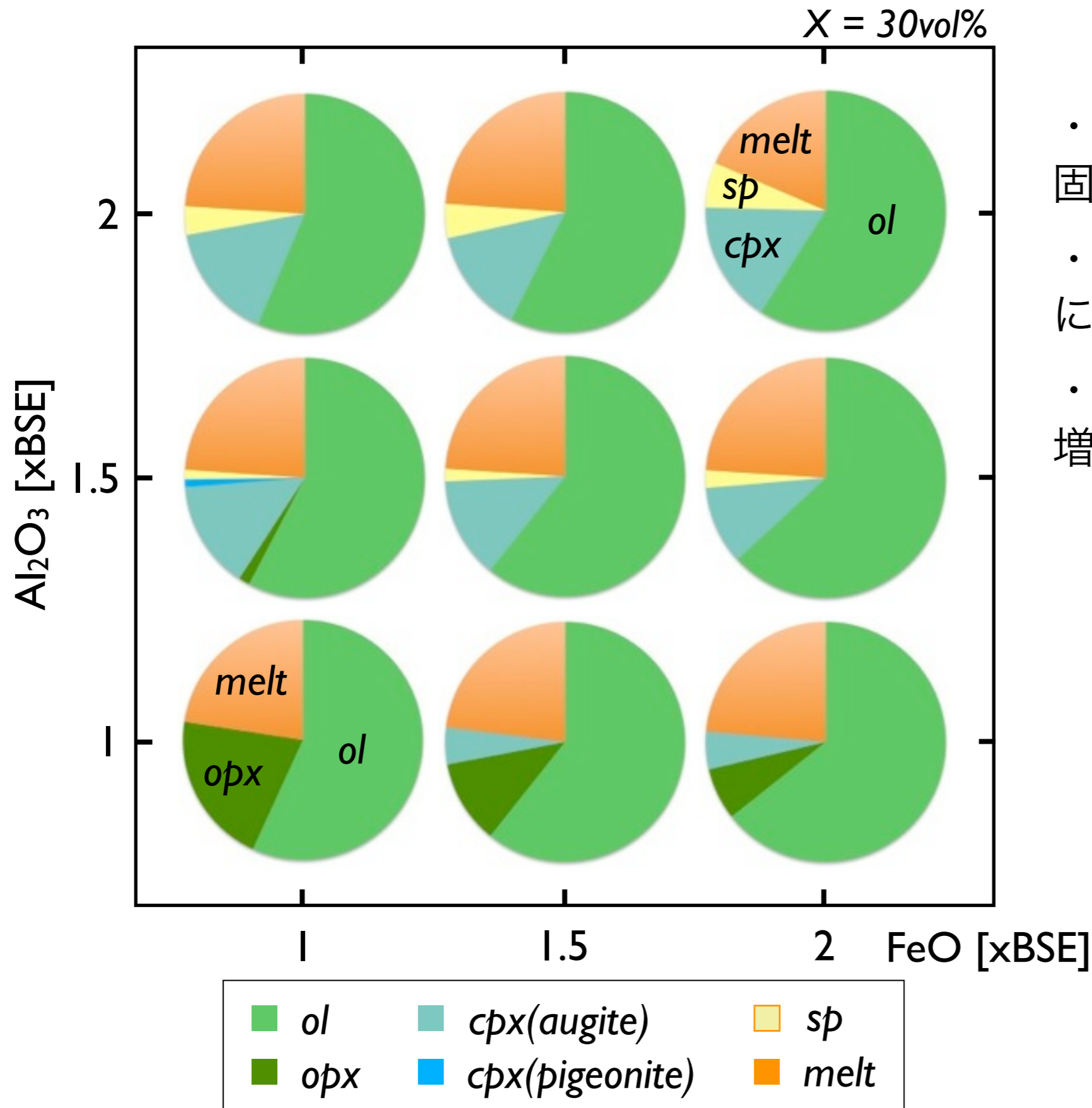


初期FeO量によって地殻形成時のLMO組成は大きく変わる

# 地殻形成時のLMO組成, 厚み, 内部構造の比較



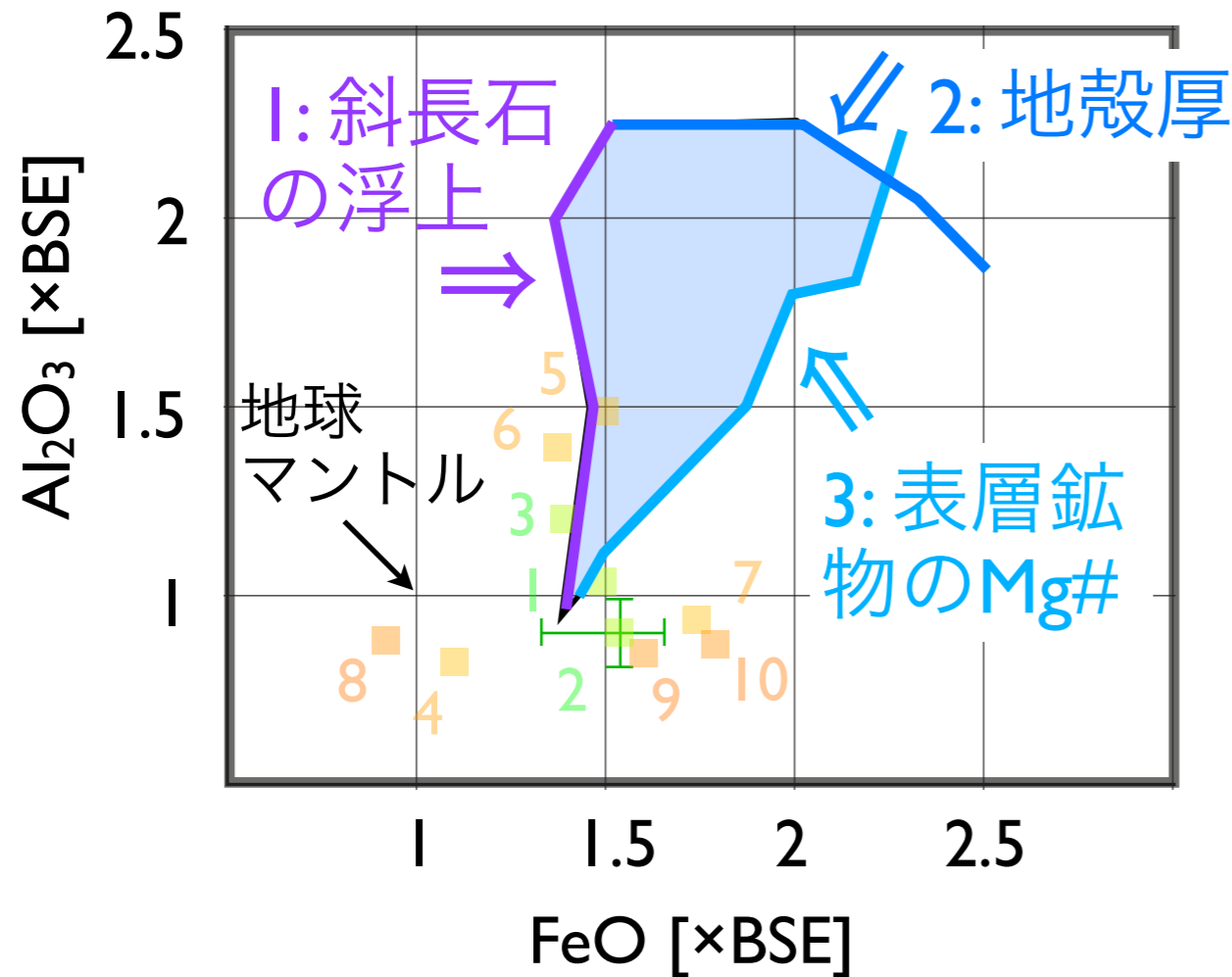
# 斜長石析出までに形成されるマントル鉱物量比



- どの組成でも75-80vol% 固化で斜長石が析出
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>多 → opxの代わりに cpx, spが析出
- FeO多 → pxが減り olが増える

ol	(Mg, Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
opx	(Mg, Fe)SiO <sub>3</sub>
cpx	(Ca, Mg, Fe) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
sp	(Mg, Fe)Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>

# 本研究：これまでに制約したLMOの組成範囲



**制約1**：対流LMO中での斜長石浮上

FeO量多→メルト $\rho$ 大,  $\eta$ 小  
⇒**FeO量**の下限値

**制約2**：地殻厚みを作る斜長石量

BSE組成でも十分濃集. 多すぎるとsp析出して $\text{Al}_2\text{O}_3$ を取られる  
⇒ **$\text{Al}_2\text{O}_3$ 量**の上限値

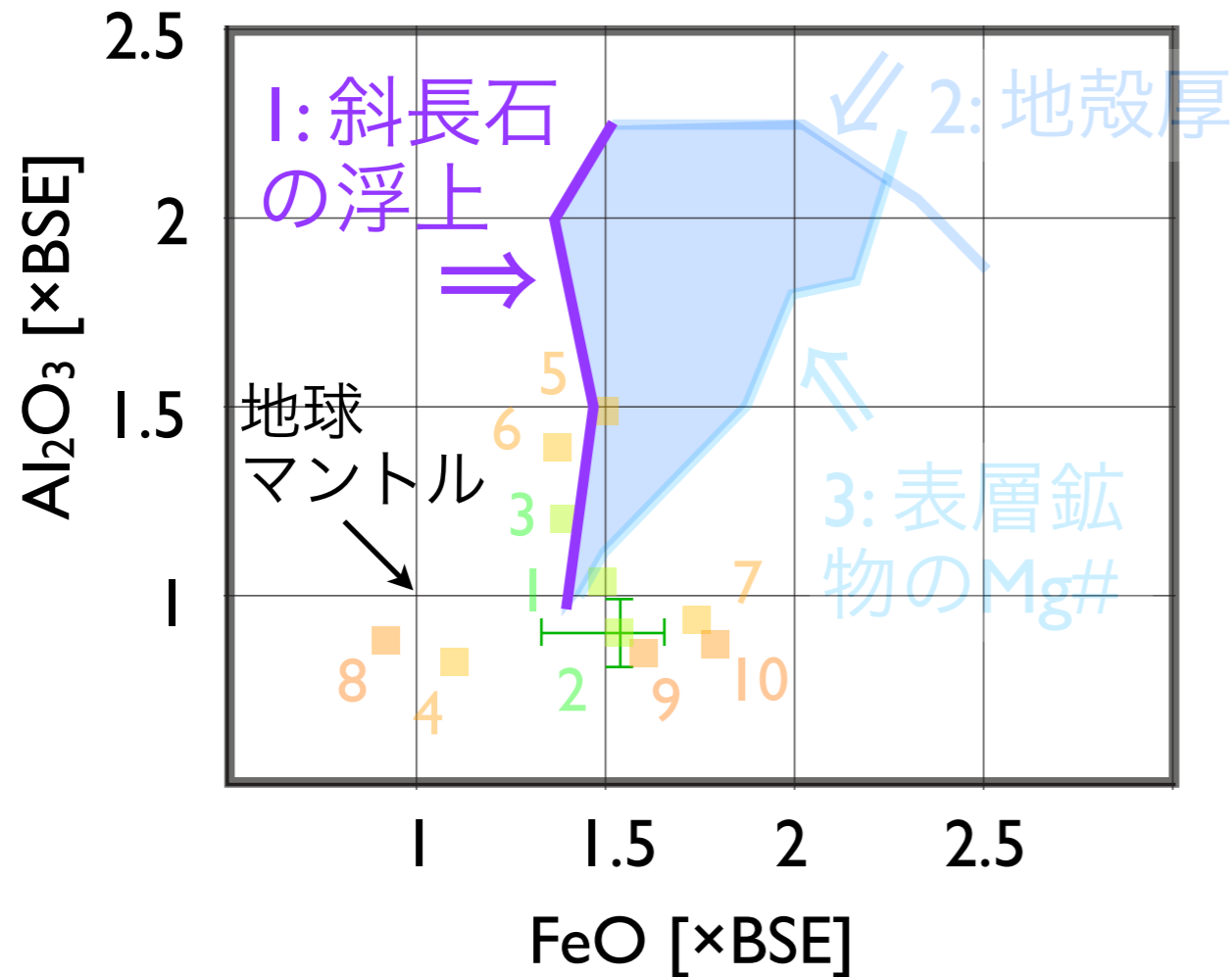
**制約3**：斜長石と共存する鉱物組成

FeO量多で地殻形成時は低Mg#. mafic鉱物の高Mg#(~0.75)と不整合  
⇒**FeO量**の上限値 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量に依存)

$$\text{Mg\#} = \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$$



# 本研究：これまでに制約したLMOの組成範囲



制約1：対流LMO中での斜長石浮上

FeO量多→メルトρ大, η小  
⇒**FeO量**の下限値

制約2：地殻厚みを作る斜長石量

BSE組成でも十分濃集. 多すぎるとsp析出してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を取られる  
⇒**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**の上限値

制約3：斜長石と共存する鉱物組成

FeO量多で地殻形成時は低Mg#. mafic鉱物の高Mg#(~0.75)と不整合  
⇒**FeO量**の上限値 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量に依存)

$$\text{Mg\#} = \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

# LMO結晶分離モデル①

Tonks & Melosh (1990)

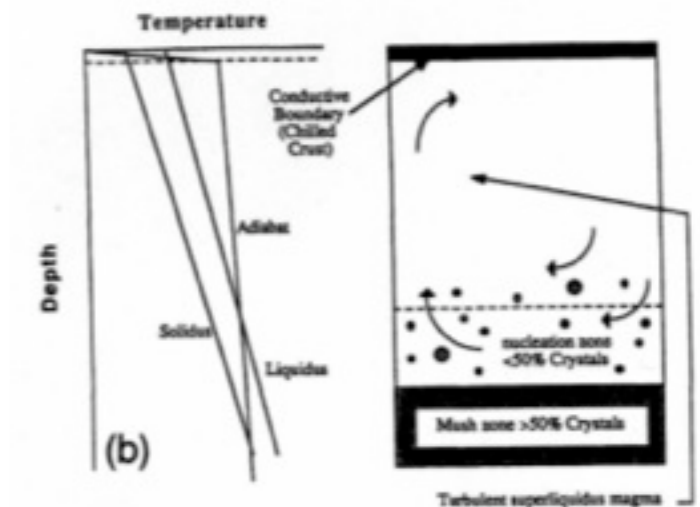
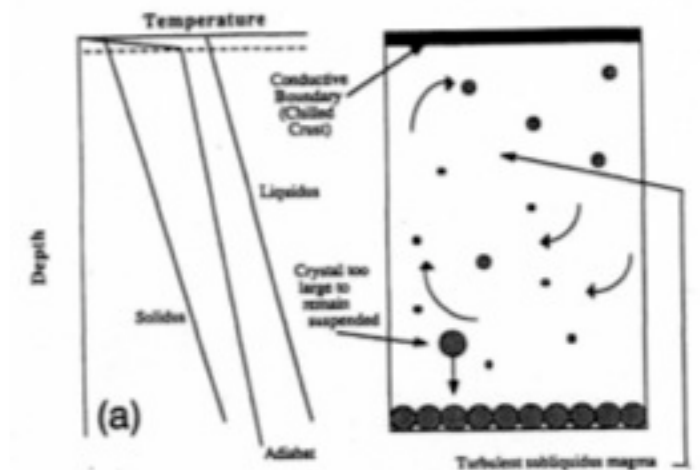
対流中での結晶分離を考察し, Liquidusと断熱温度勾配の関係から地球と月のマグマオーシャンの違いを説明

乱流状態のマグマ中で斜長石が浮上しなければならない

$$\begin{array}{ccc}
 \text{対流速度} & \ll & \text{上昇速度} \\
 v = \{\alpha \kappa g \Delta T \text{Nu}\}^{1/3} & & u = \frac{1}{18} \frac{D^2 \Delta \rho g}{\eta}
 \end{array}$$

斜長石の分離条件

$$\begin{array}{ccc}
 D & > & D^* \sim \frac{1}{3} \left( \frac{\eta v(\text{Nu})}{\Delta \rho g} \right)^{0.5} \\
 \text{斜長石} & \text{---} & \text{---} \\
 \text{の粒径} & \text{---} & \text{---} \\
 & & \text{臨界} \\
 & & \text{粒径}
 \end{array}$$



上図：月, 下図：地球

## LMO結晶分離モデル②

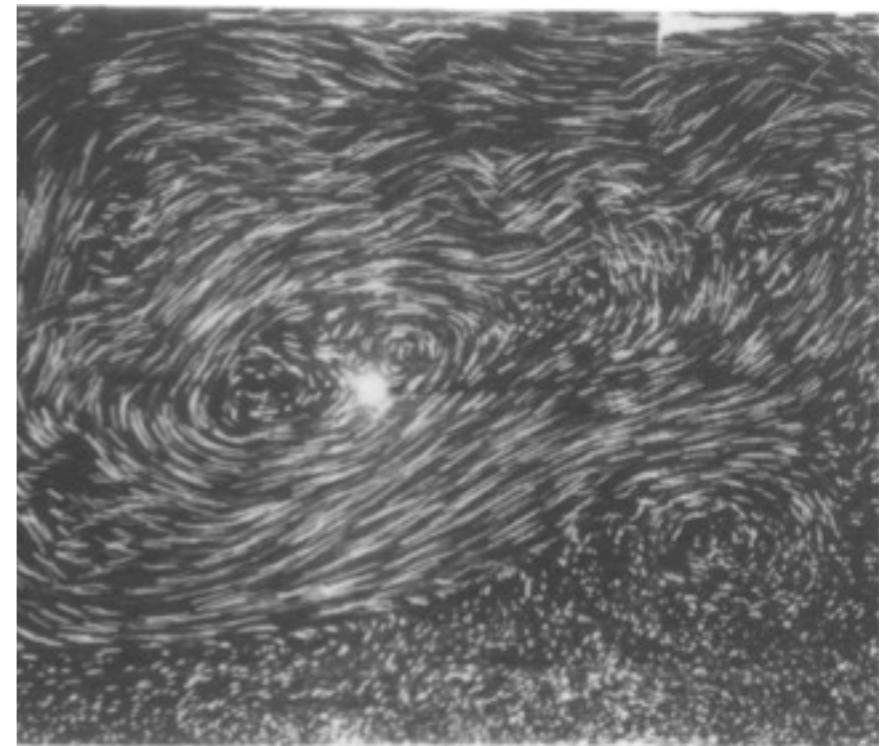
*Martin & Nokes (1989)*

マグマ溜まりでは、対流速度 $\gg$ 結晶沈降速度  
 $\Rightarrow$ 結晶は境界層でStokes' Lawに従い分離

流体中の粒子数は指数関数的に減少  
(理論的実験的に検証)

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{v_s}{h}t\right)$$

- 仮定 ① 1次元(流体内は均質)  
② 粒子濃度は十分低い  
③ 流体内への再取り込みなし



## LMO結晶分離モデル②

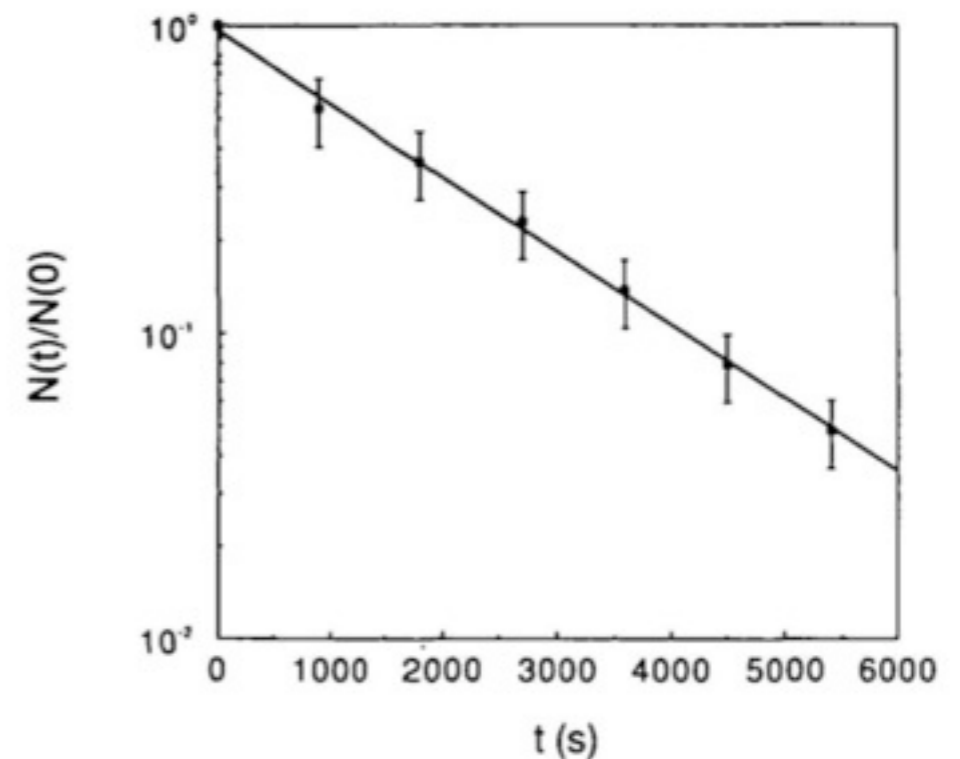
*Martin & Nokes (1989)*

マグマ溜まりでは、対流速度 $\gg$ 結晶沈降速度  
 $\Rightarrow$ 結晶は境界層でStokes' Lawに従い分離

流体中の粒子数は指数関数的に減少  
(理論的実験的に検証)

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{v_s}{h}t\right)$$

- 仮定 ① 1次元(流体内は均質)  
② 粒子濃度は十分低い  
③ 流体内への再取り込みなし



# LMO結晶分離モデル③

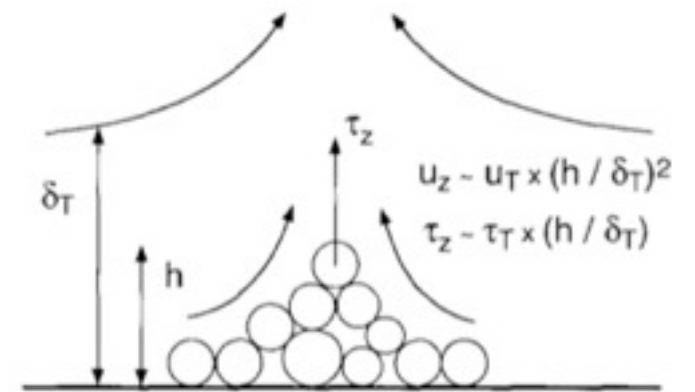
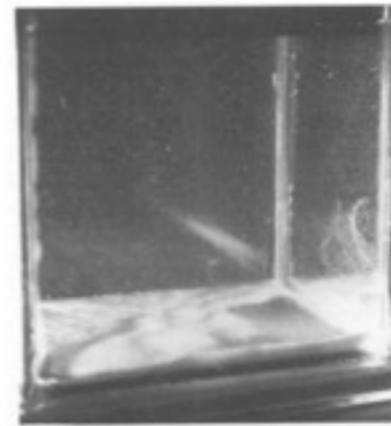
Solomatov et al. (1993)

境界層での粒子の再取り込みのメカニズムと定量的基準

⇒再取り込みは粘性応力が十分大きいときに起きる

$$D > \frac{10}{\Delta\rho g} \left( \frac{\eta\alpha g F}{C_p} \right)^{\frac{1}{2}}$$

の粒子は取り込まれずに分離



$D$  [m] : 粒径

$\alpha$  [K<sup>-1</sup>] : 熱膨張率

$C_p$  [J/(kg K)] : 熱容量

$\eta$  [Pa s] : 粘性

$g$  [m/s<sup>2</sup>] : 重力加速度

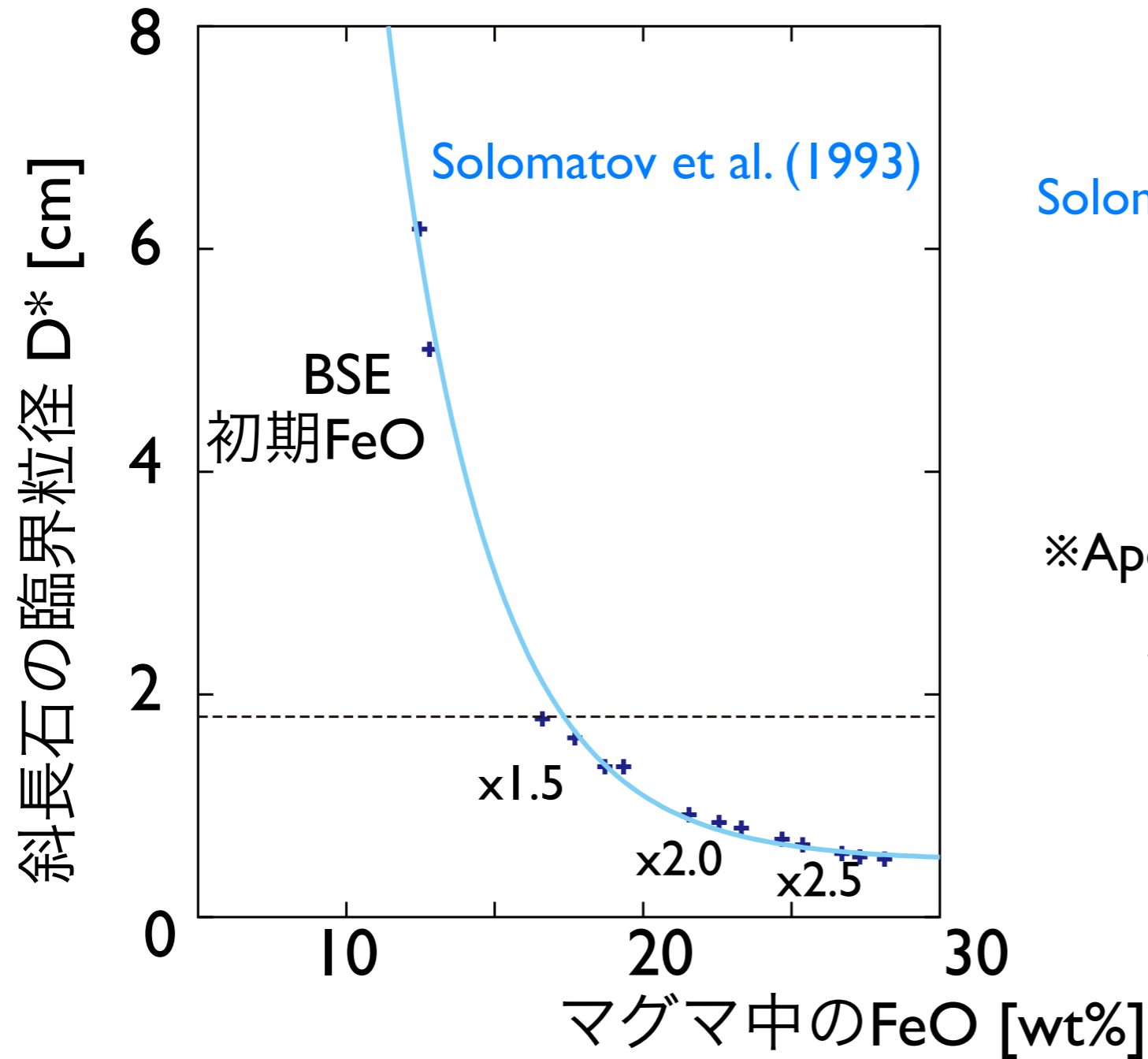
$F$  [J/(m<sup>2</sup>s)] : 表面の熱流量

$\Delta\rho$  [J/(kg K)] : 粒子と流体の密度差

マグマ溜まりでは $10^{-1} \sim 0$ mm, 月マグマオーシャンでは $10^0 \sim 1$ mm

重力分離に強く影響するパラメーター：粘性, 粒径, 密度差, 熱流量

# 制約 1 : 対流LMO中での斜長石の浮上



Solomatov et al. (1993)

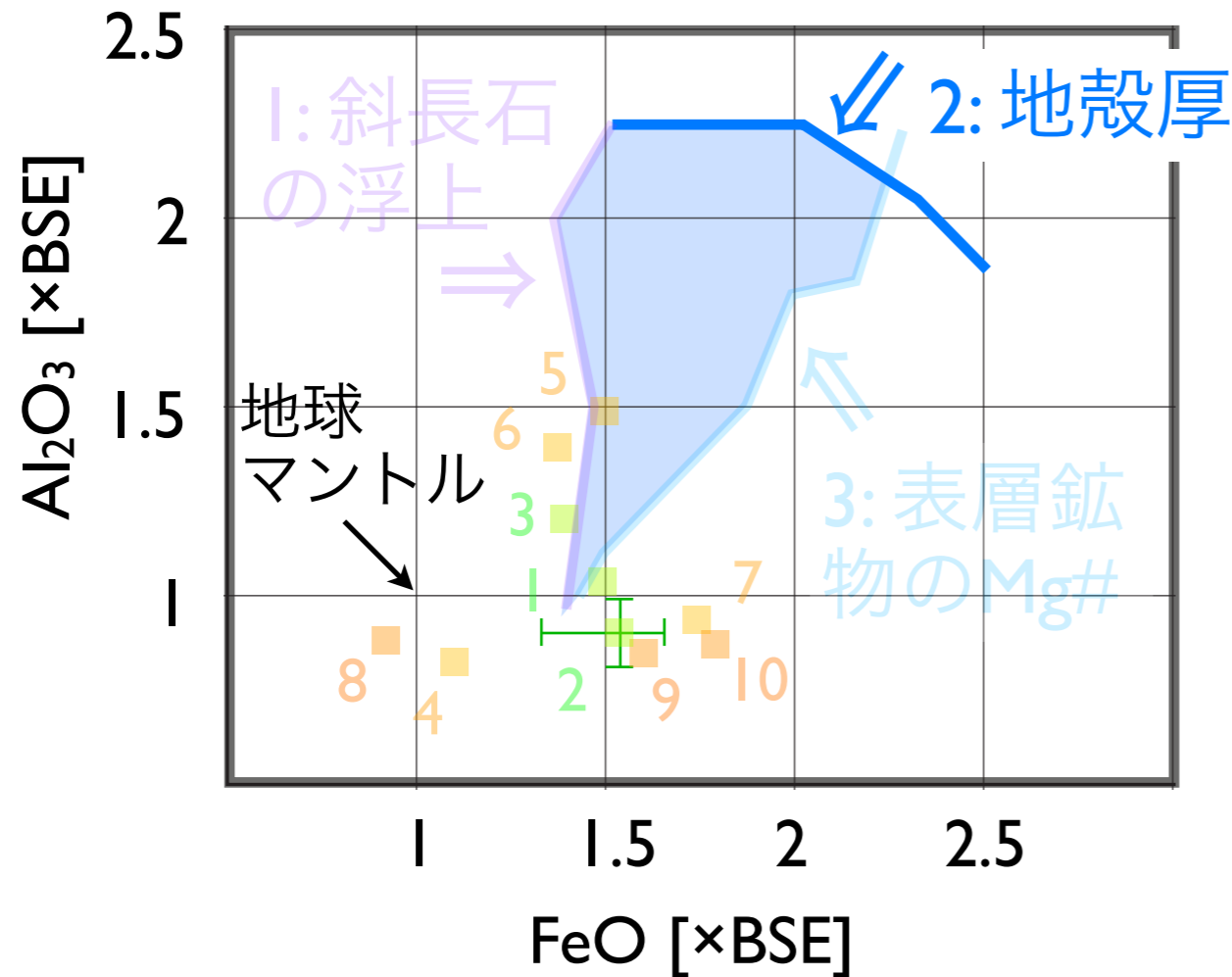
$$D > \frac{10}{\Delta\rho g} \left( \frac{\eta\alpha g F}{C_p} \right)^{\frac{1}{2}}$$

※Apollo Sample 15415の薄片観察  
 James (1972)  $D \sim 3\text{cm}$   
 Wilshire et al. (1972)  $D \sim 1.8\text{cm}$

LMO組成範囲内では $D \sim 10^0\text{-}1\text{cm}$ 程度(?)

Solomatov & Stevenson (2003)

# 本研究：これまでに制約したLMOの組成範囲



制約1：対流LMO中での斜長石浮上  
 FeO量多→メルトρ大, η小  
 ⇒FeO量の下限値

制約2：地殻厚みを作る斜長石量  
 BSE組成でも十分濃集. 多すぎるとsp析出してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を取られる  
 ⇒Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の上限値

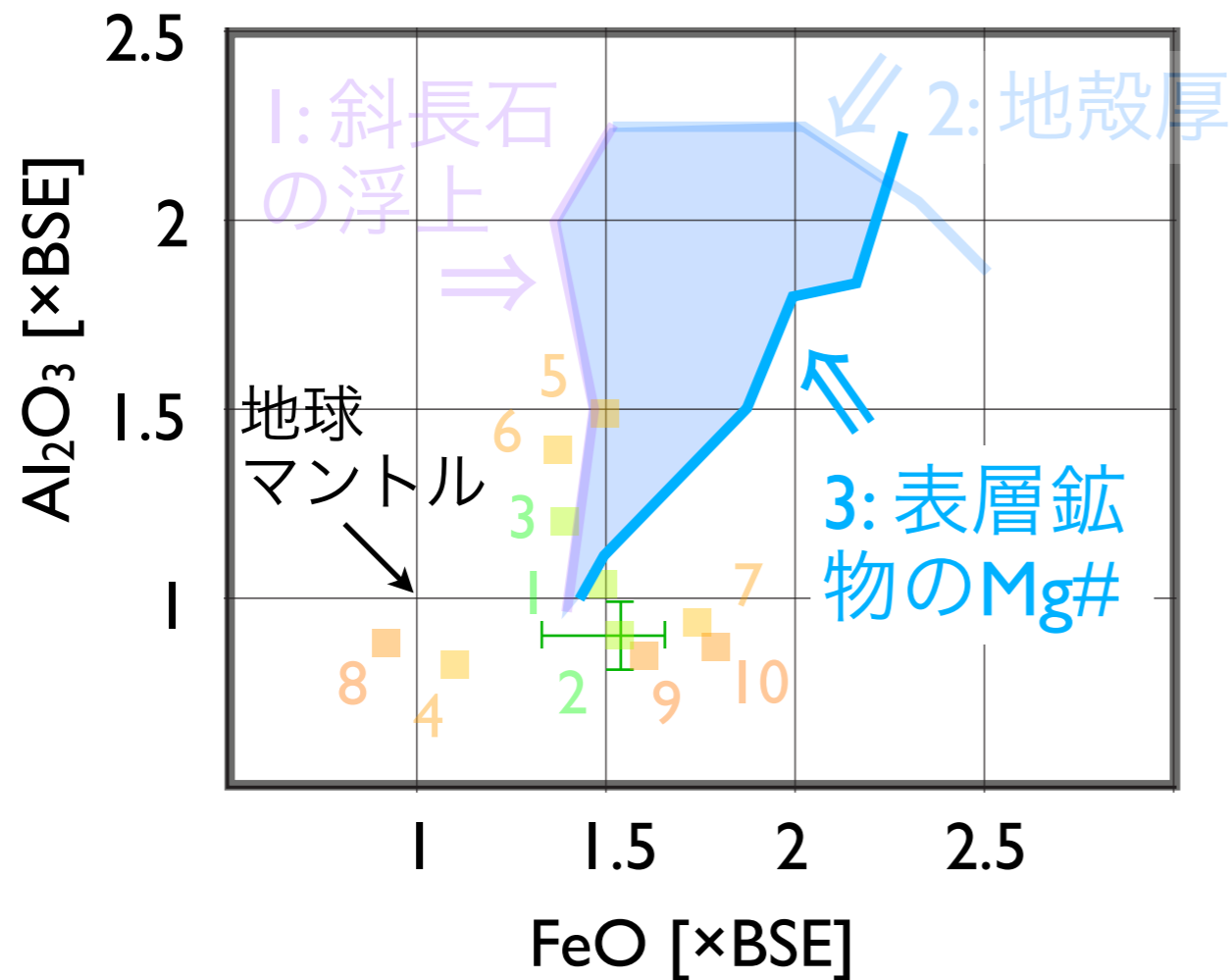
制約3：斜長石と共存する鉱物組成  
 FeO量多で地殻形成時は低Mg#. mafic鉱物の高Mg#(~0.75)と不整合  
 ⇒FeO量の上限値 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量に依存)

## 月地殻を作る斜長石量が必要

- ・分化過程で析出する斜長石量 : 熱力学計算
  - ・地殻の厚み, 組成 : Ishihara+ (2009), Wiczorek & Zuber (2001)
- ~45km    ~80vol%

⇒Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量が極端に多いと深部でスピネル(MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)析出

# 本研究：これまでに制約したLMOの組成範囲



制約1：対流LMO中での斜長石浮上

FeO量多→メルトρ大, η小  
⇒FeO量の下限值

制約2：地殻厚みを作る斜長石量

BSE組成でも十分濃集. 多すぎるとsp析出してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を取られる  
⇒Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の上限値

制約3：斜長石と共存する鉱物組成

FeO量多で地殻形成時は低Mg#. mafic鉱物の高Mg#(~0.75)と不整合  
⇒FeO量の上限值 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量に依存)

## 月表層の鉱物組成との比較

- ・高地の岩石に含まれるmafic mineralsのMg#

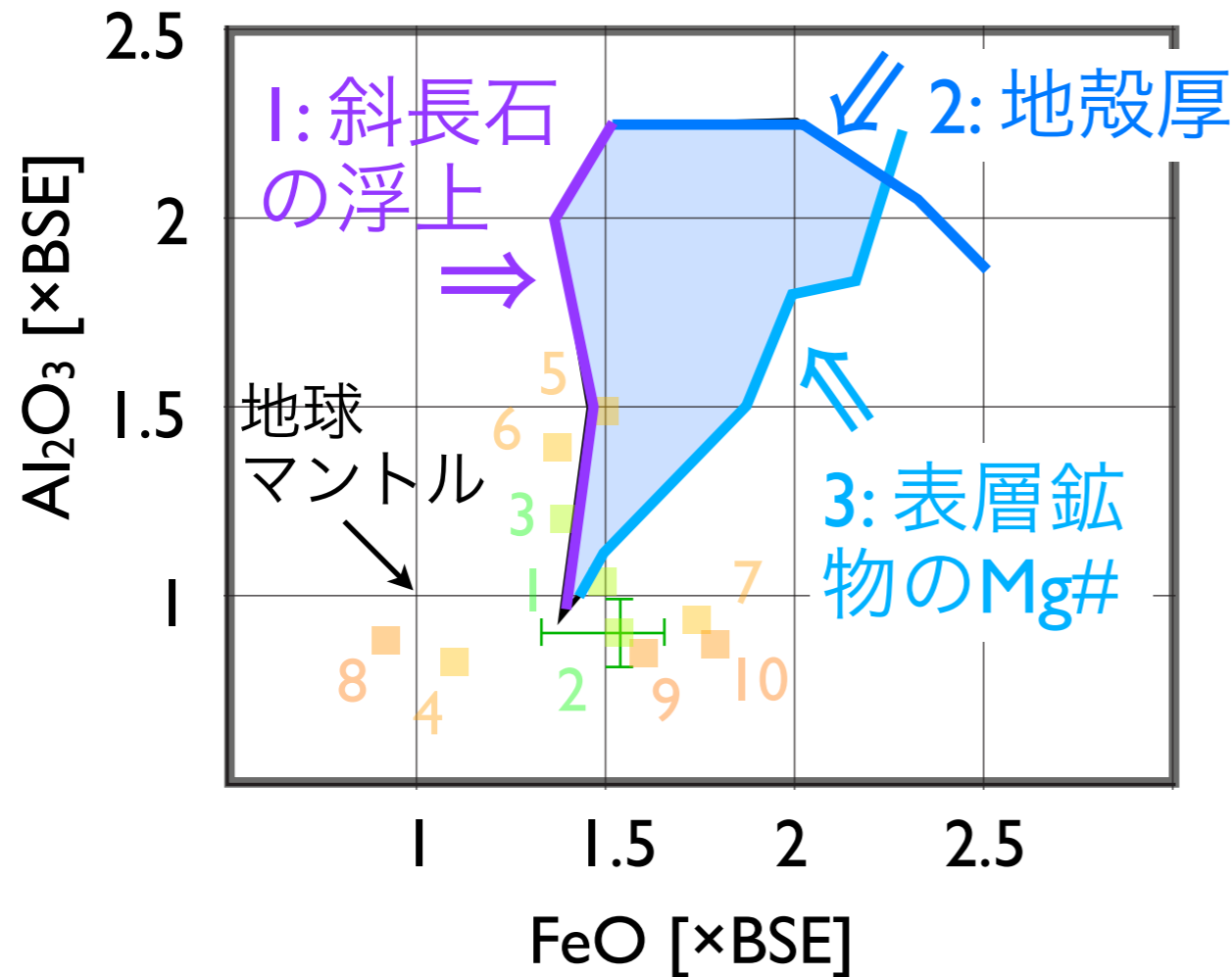
- ：熱力学計算と観測事実との比較

$$\text{Mg\#} = \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO})$$

⇒FeO量が多いとMg#が低いmafic mineralsしか析出しない



# 本研究：これまでに制約したLMOの組成範囲



制約1：対流LMO中での斜長石浮上

FeO量多→メルトρ大, η小  
⇒**FeO量**の下限値

制約2：地殻厚みを作る斜長石量

BSE組成でも十分濃集. 多すぎるとsp析出してAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を取られる  
⇒**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**の上限値

制約3：斜長石と共存する鉱物組成

FeO量多で地殻形成時は低Mg#. mafic鉱物の高Mg#(~0.75)と不整合  
⇒**FeO量**の上限値 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量に依存)

これまでの結果

- ・ FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はBSEより多い
- ・ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の上限値の制約が弱い

# 新しい制約条件：地殻中のREE

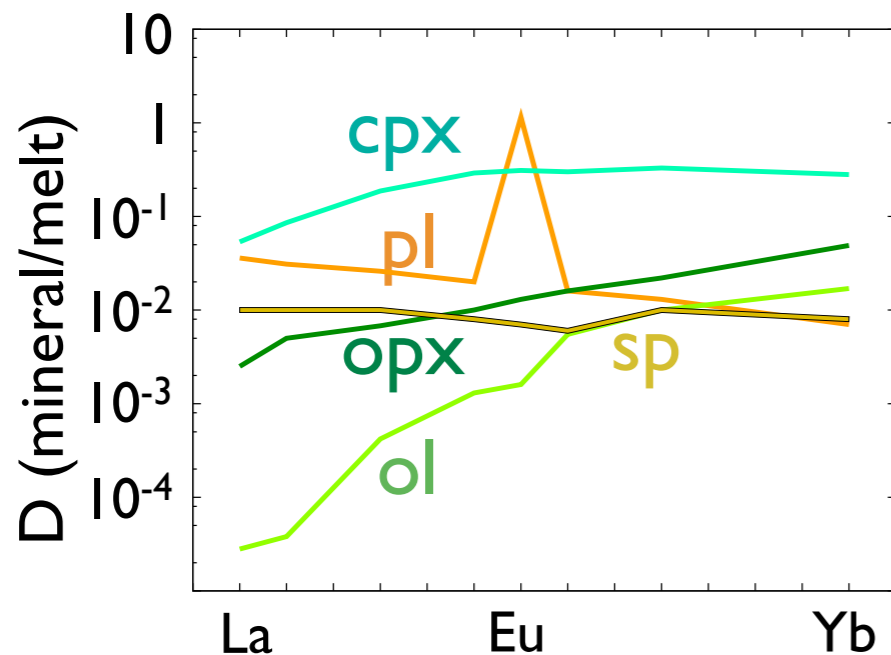
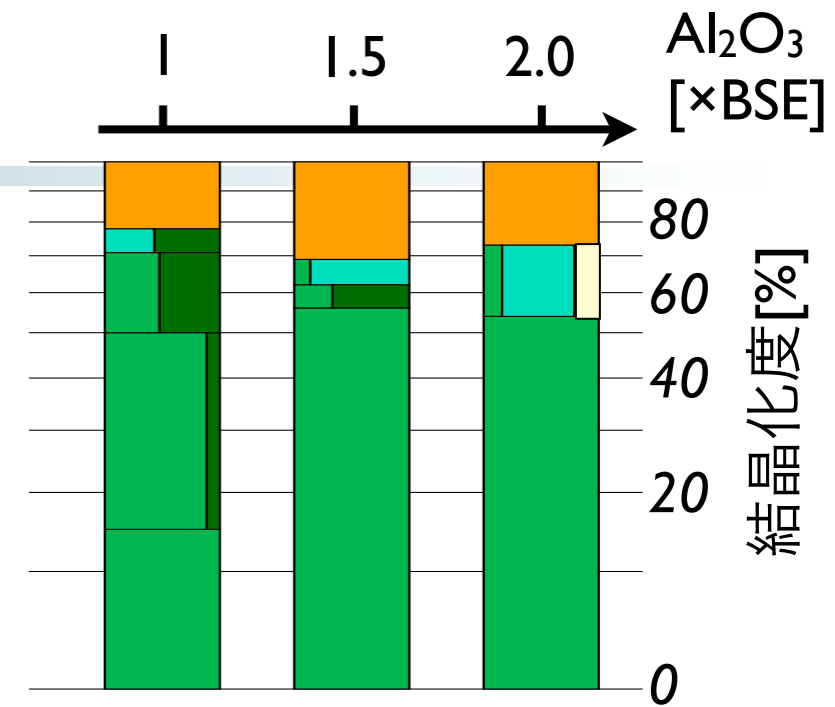
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO量が多い初期組成では  
マントル形成時にcpxが多く析出

月地殻の**REE情報**からマントル中のcpx量推定

イオン半径が連続的に変化し，その他の地球化学的性質は類似。  
⇒REEパターンから岩石形成履歴を推定

MELTS/pMELTS

- sp
- cpx
- opx
- ol



主要鉱物のREE分配係数

- ol, opx, sp : 非常に低い. REEの傾き影響与えず
- cpx : 残液の**LREE**は右肩下がり
- pl : 残液に負の**Eu**異常.

Johnson (1994); Hauri et al. (1994); Dunn & Sen (1994); Kennedy et al. (1993); Niu et al. (1996)

本発表での目的

月地殻のREE情報から初期Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaO)量により強い制約を与える

# 新しい制約条件：地殻中のREE

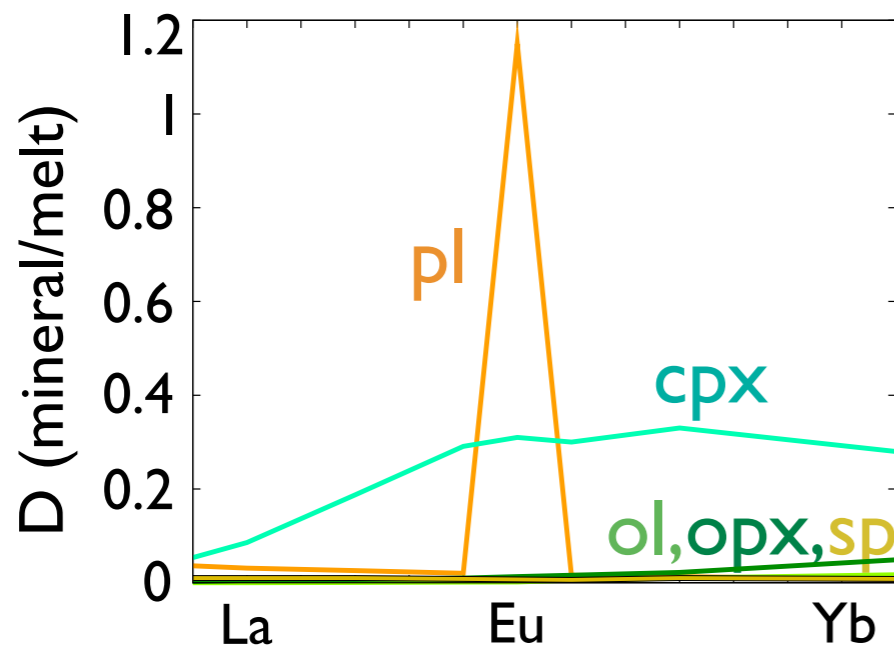
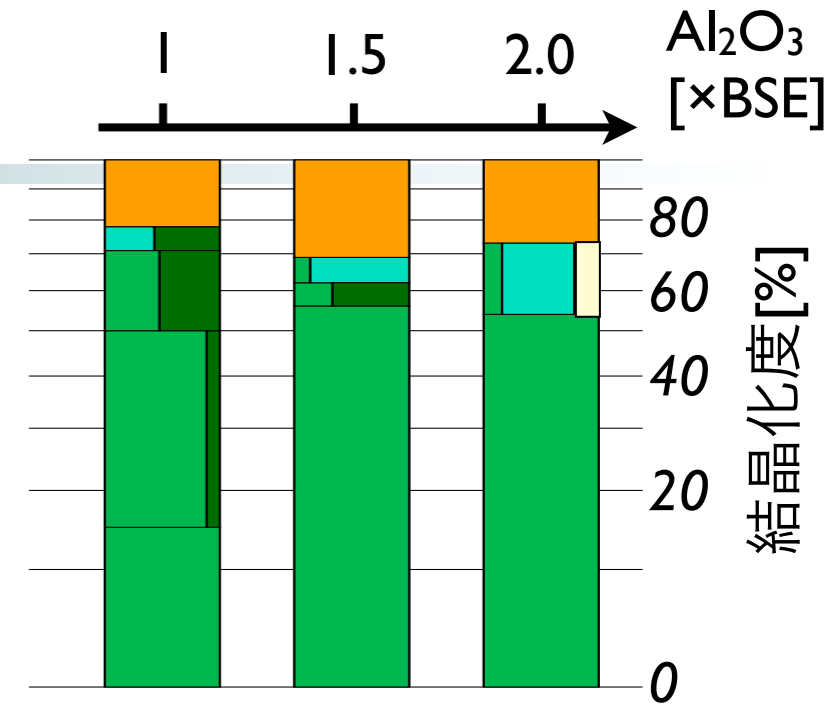
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO量が多い初期組成では  
マントル形成時にcpxが多く析出

月地殻の**REE情報**からマントル中のcpx量推定

イオン半径が連続的に変化し，その他の地球化学的性質は類似。  
⇒REEパターンから岩石形成履歴を推定

MELTS/pMELTS

- sp
- cpx
- opx
- ol



主要鉱物のREE分配係数

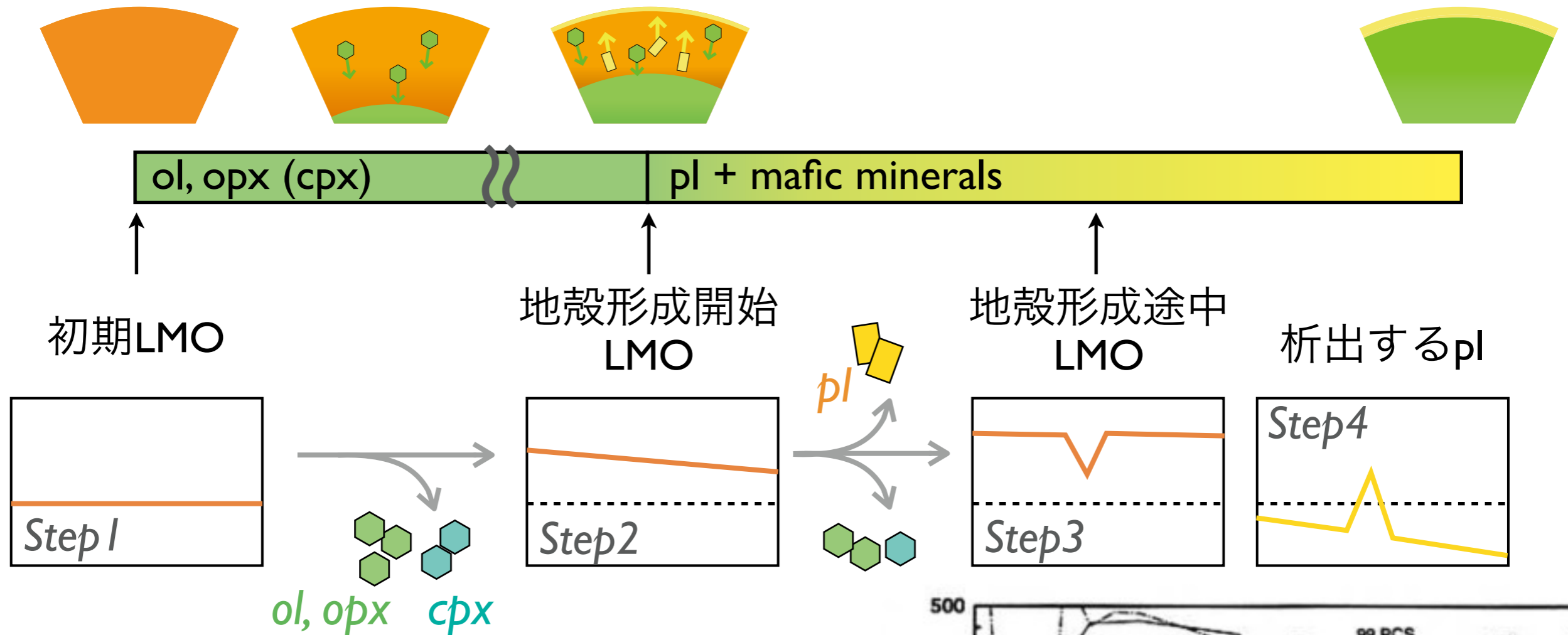
- ol, opx, sp : 非常に低い. REEの傾き影響与えず
- cpx : 残液の**LREE**は右肩下がり
- pl : 残液に負の**Eu異常**.

Johnson (1994); Hauri et al. (1994); Dunn & Sen (1994); Kennedy et al. (1993); Niu et al. (1996)

本発表での目的

月地殻のREE情報から初期Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaO)量により強い制約を与える

# LMO進化に伴うREEパターンの変化



Snyder et al. (1992)

\* FeO ~12 wt%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ~5.0 wt%, CaO ~ 3.8 wt%

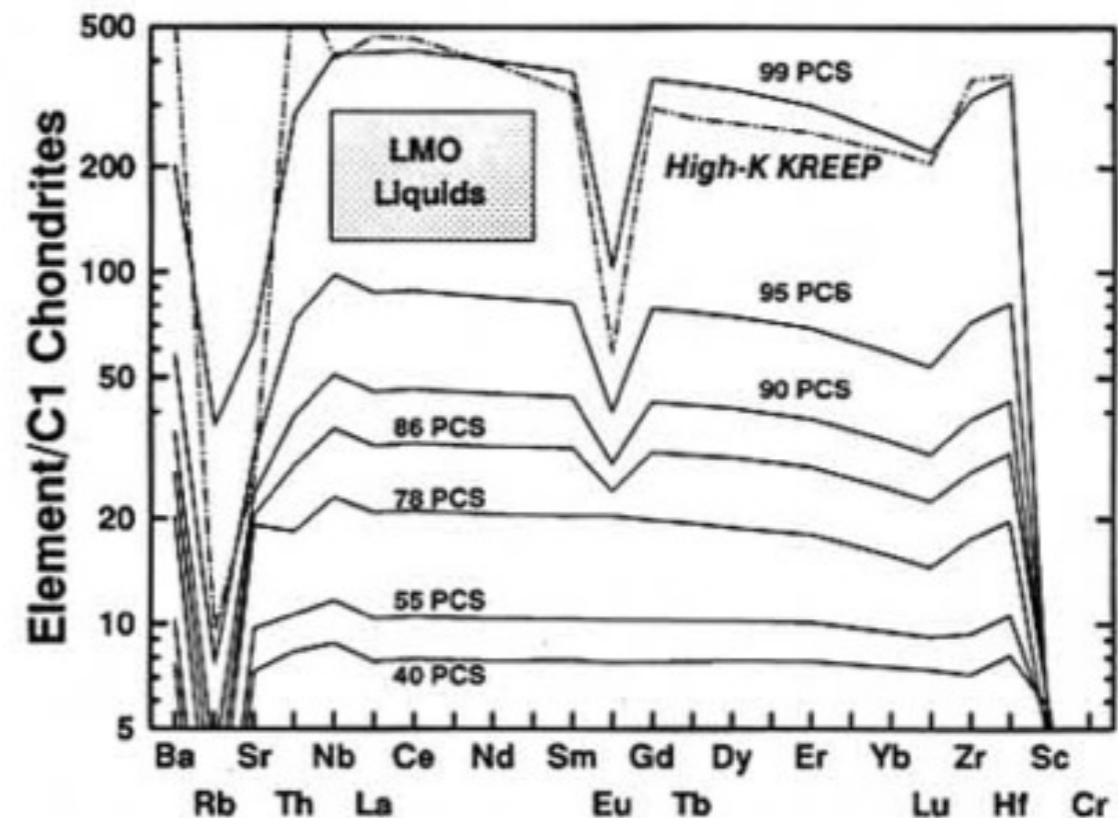
\* 初期LMO深さ ~300-500km

\* pl析出まではBatch, 析出後は分別結晶

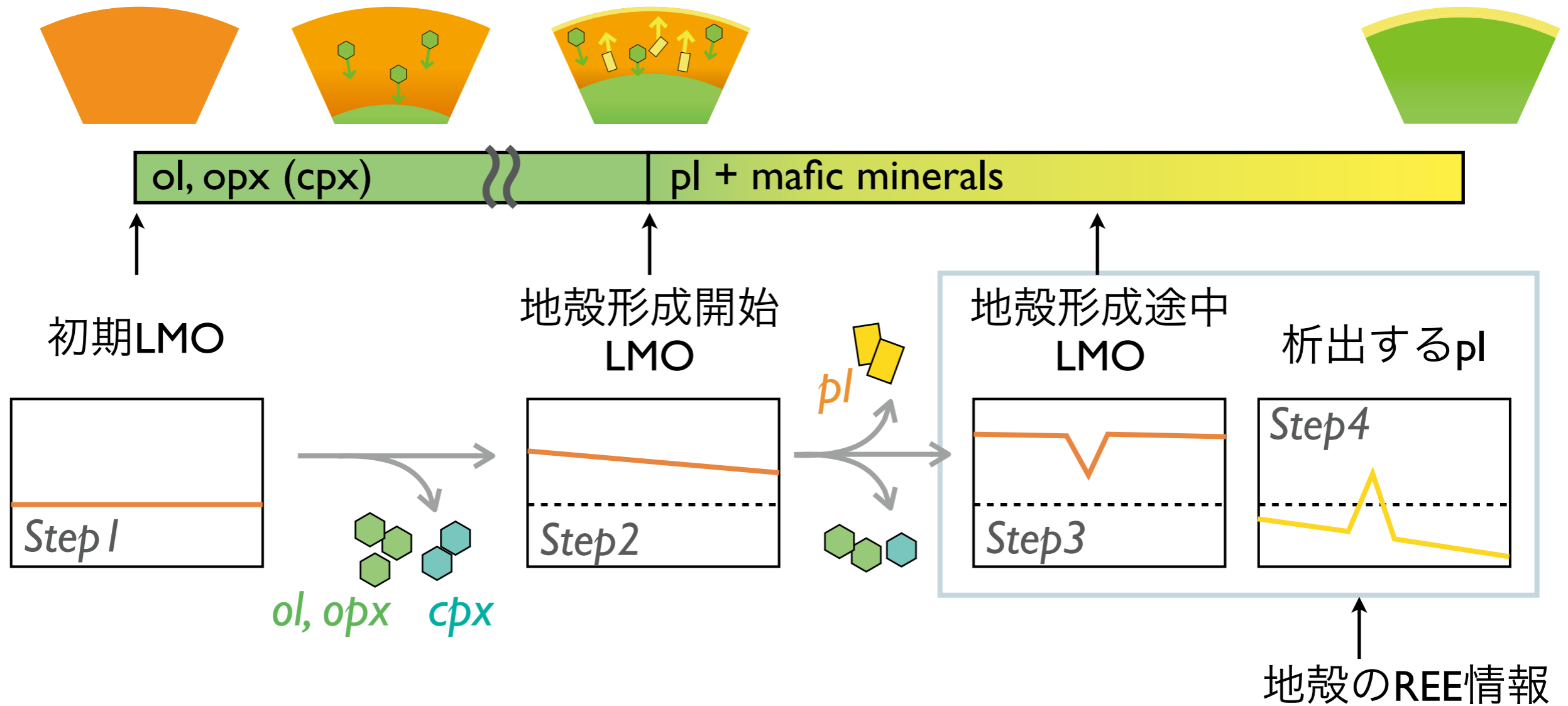
\* LMO ~78 vol%結晶化でpl析出

1) 0-40 PCS = olivine;

2) 40-78 PCS = orthopyroxene (with some olivine resorption);



# LMO進化に伴うREEパターンの変化



地殻のREE情報から初期LMOのREEパターンに戻し，析出したcpx量を制約

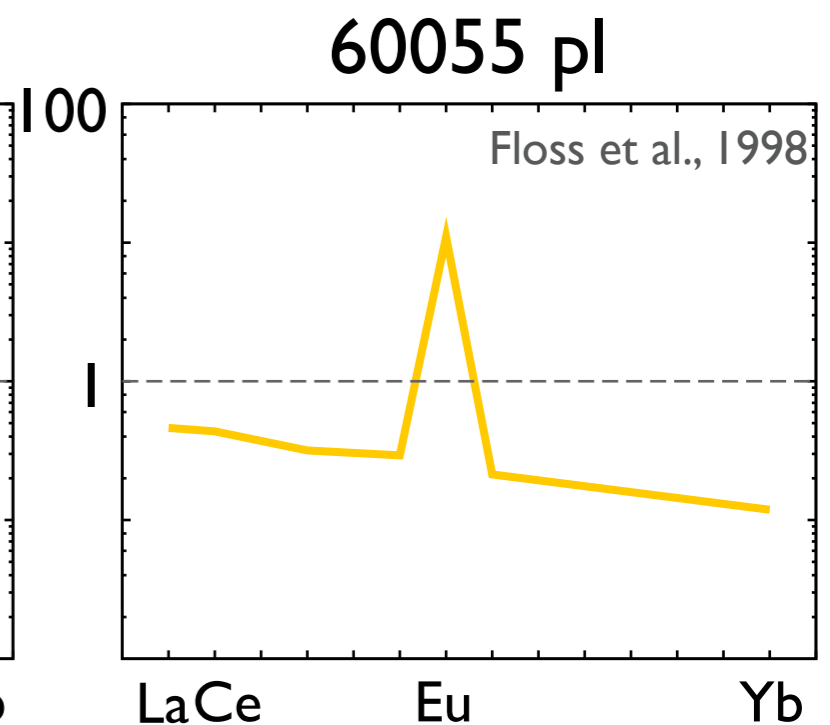
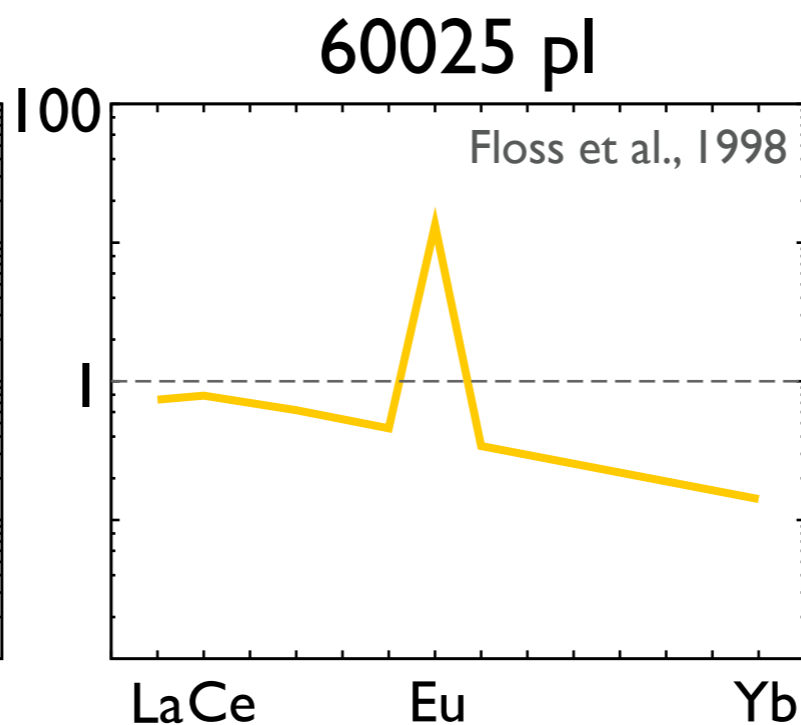
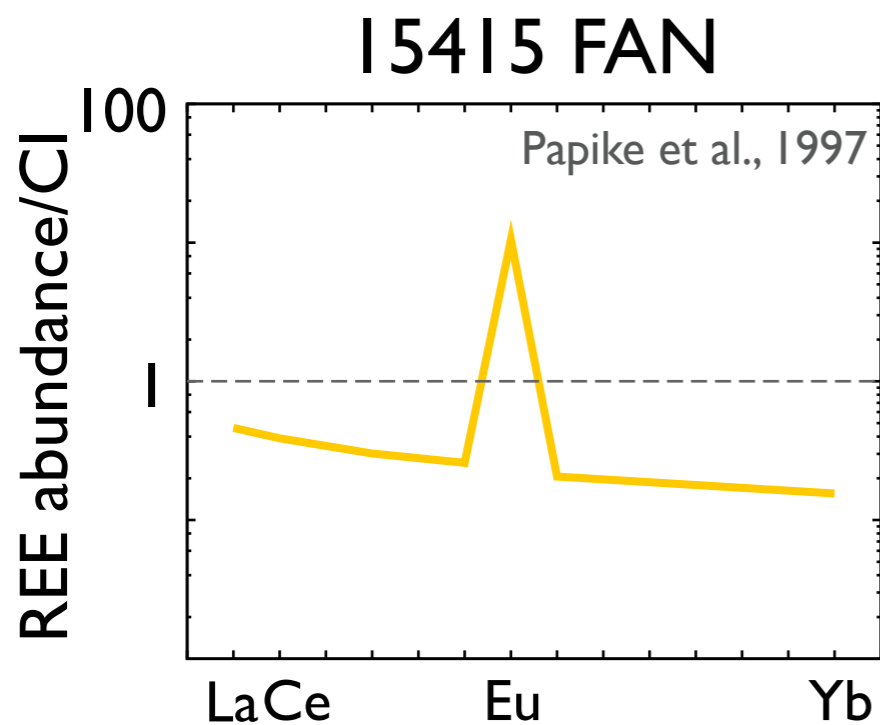
※CI chondriteを仮定

- ・ 蒸発凝縮：分配係数は複雑，地殻岩石のきれいなパターン説明不可
- ・ 衝突天体の分化：衝突天体はほぼ全部月になる？

# 月地殻のREEパターン

Apolloサンプル, 月隕石のFAN全岩もしくははplのREEパターン

- FAN中のpl量が高い, 年代が比較的古い, REE量が相対的に低め  
⇒ 15415(FAN), 60025(pl), 60055(pl)



- ~3.9-4.1 Ga (Ar/Ar)

Albarede, 1978; Stettler et al., 1973;  
Turner et al., 1972; Husain et al., 1972

- ~98% pl (unbrecciated)

- low  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

e.g. Meyer, 2011

- ~4.36 Ga (Pb-Pb, Sm-Nd)

Borg et al., 2011

- ~98.7% pl (cataclastic)

Floss et al., 1998

- low  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

e.g. Meyer, 2011

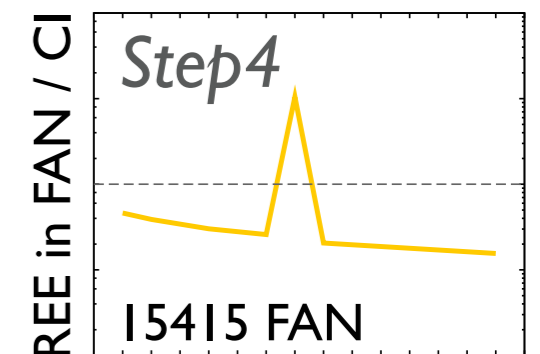
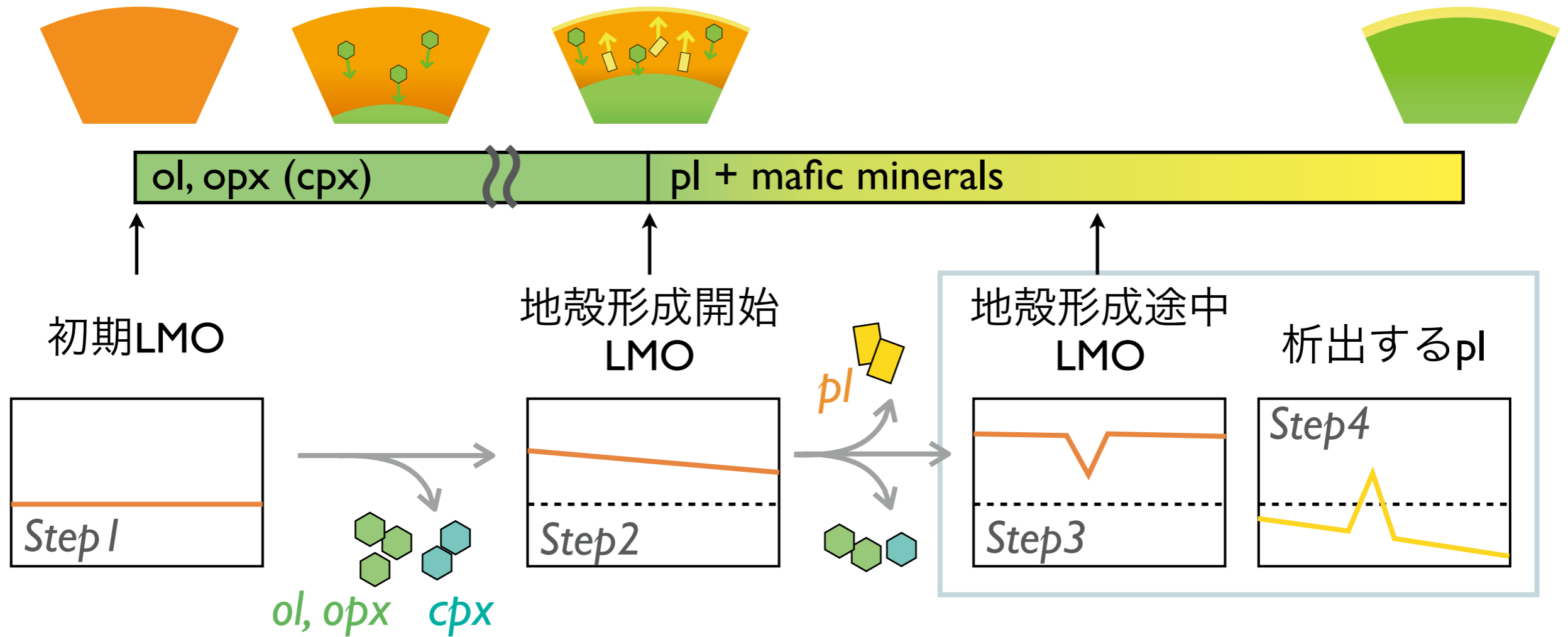
- No data

- ~98% pl (cataclastic)

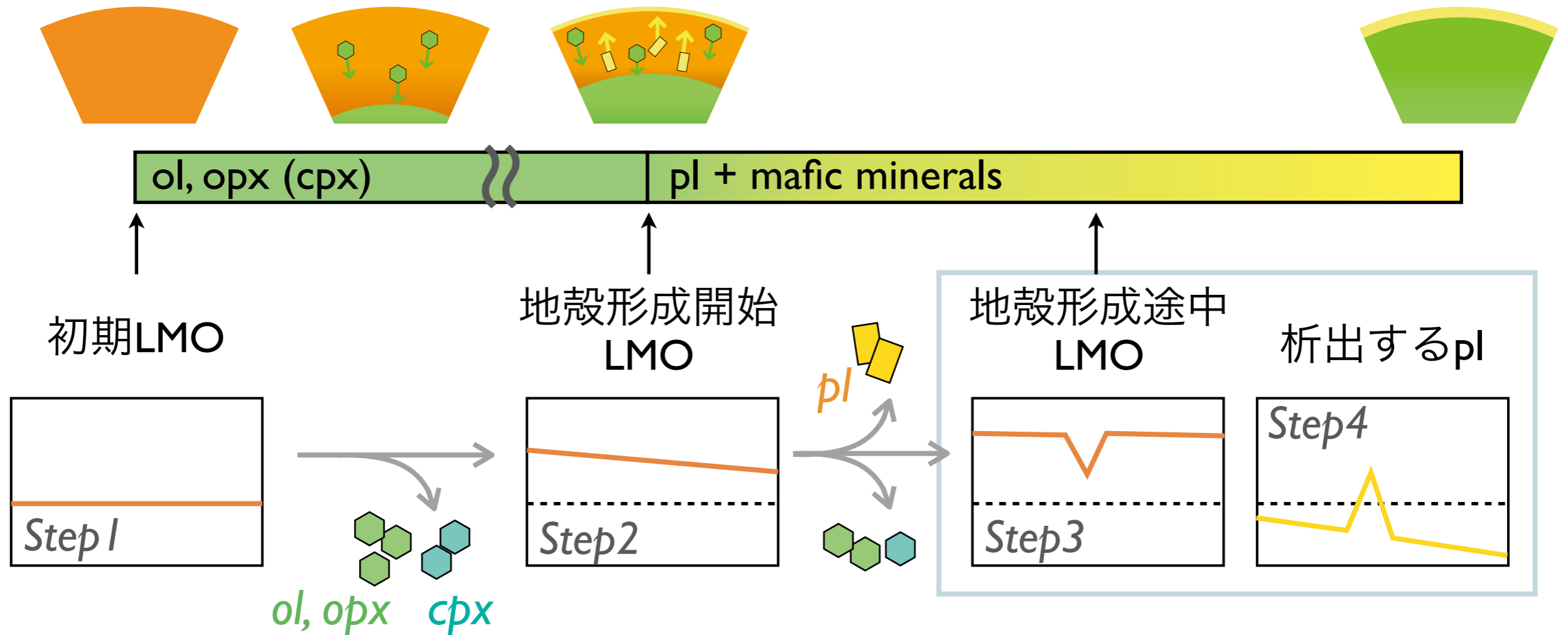
- Shock features are lacking

e.g. Meyer, 2011

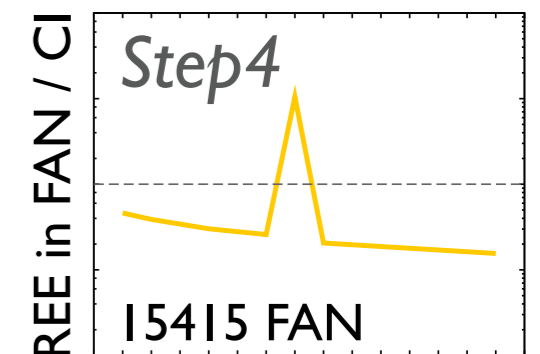
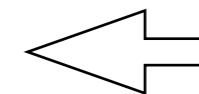
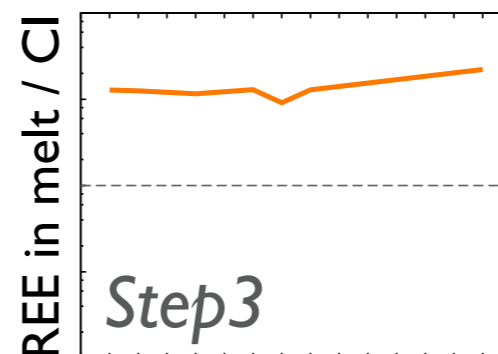
# REEパターンから制約するcpx量



# REEパターンから制約するcpx量

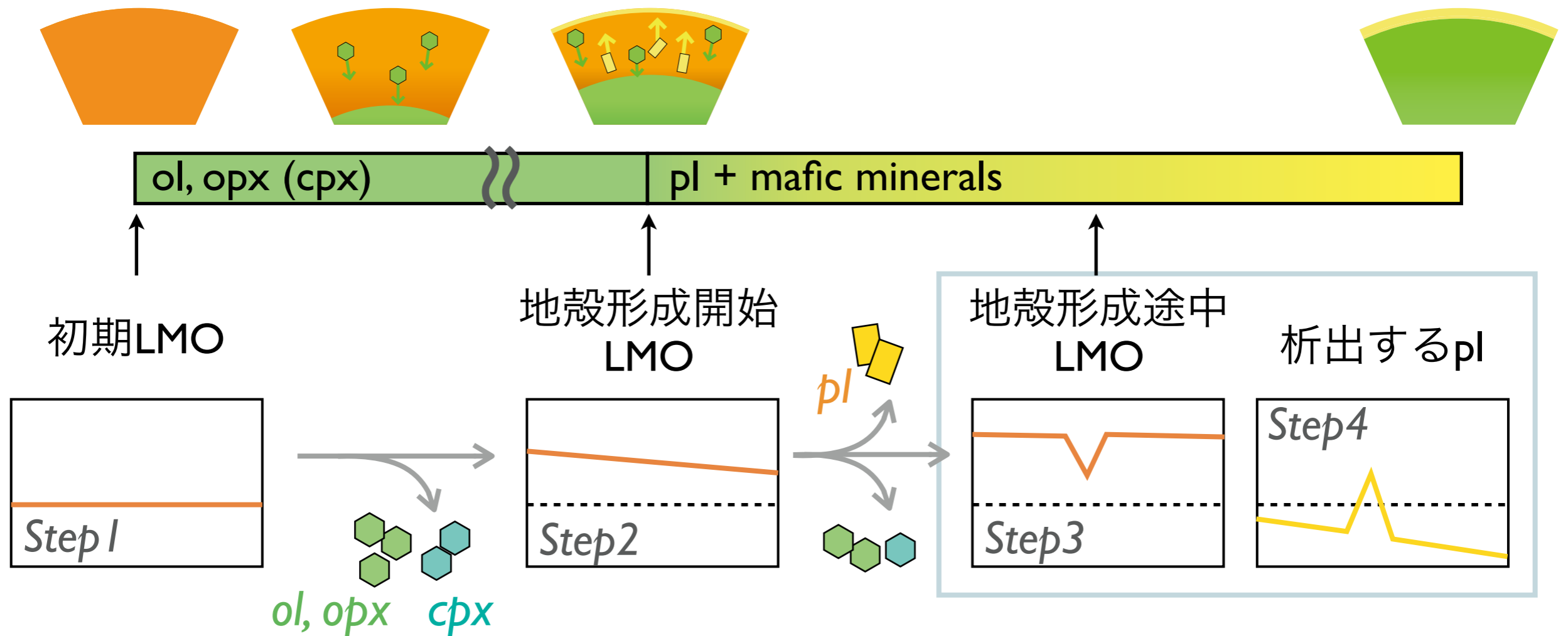


Step4からStep3：  
plの分配係数を使って  
parent magmaのREEに戻す



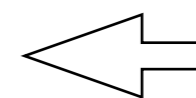
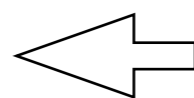
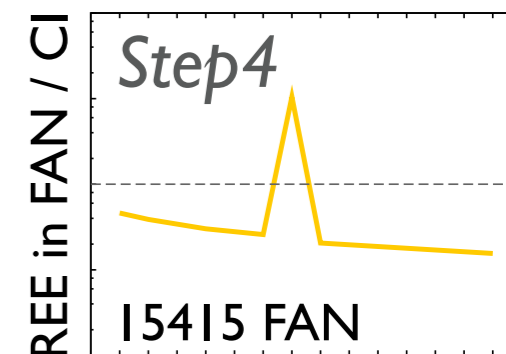
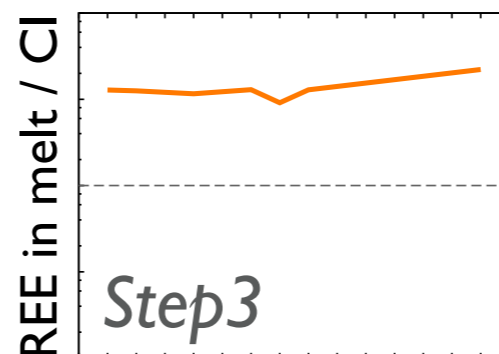
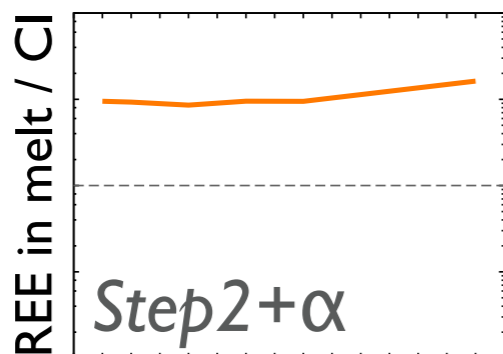


# REEパターンから制約するcpx量

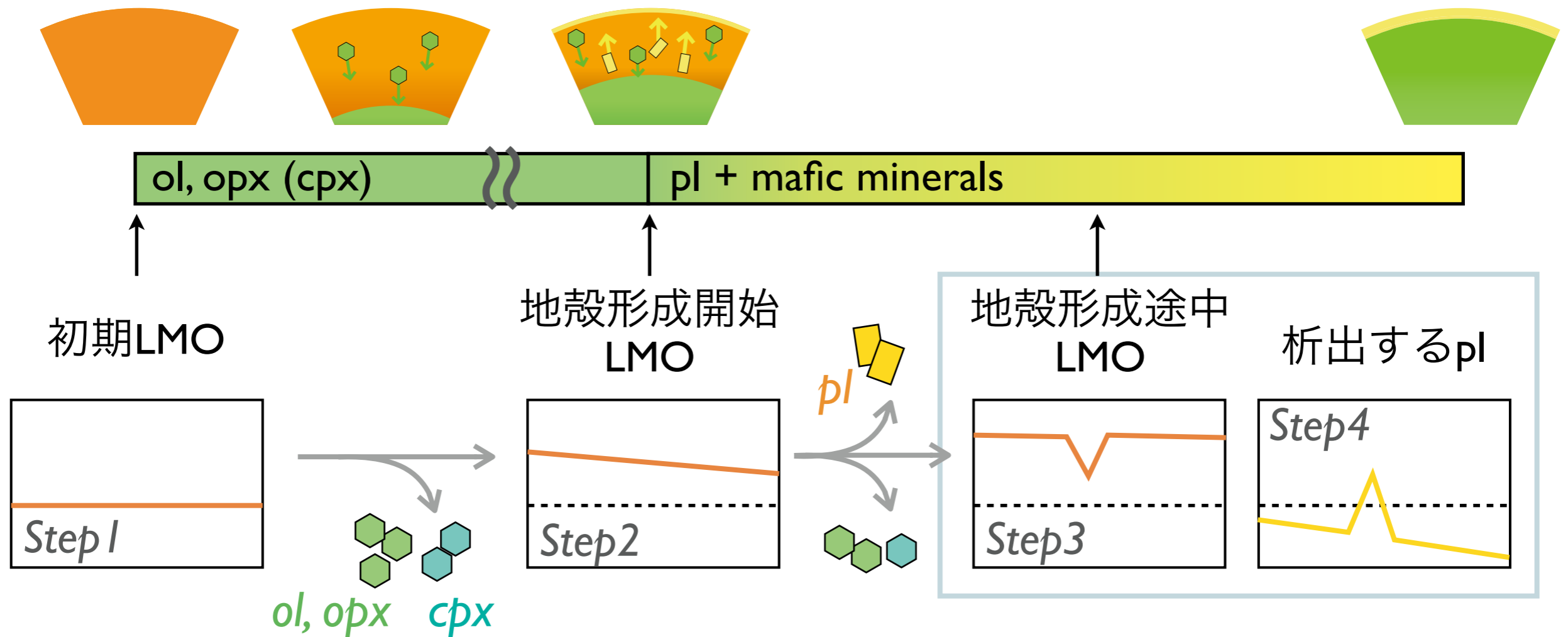


Step3からStep2+ $\alpha$  :  
Eu異常からStep3までに  
析出したplを補正

Step4からStep3 :  
plの分配係数を使って  
parent magmaのREEに戻す



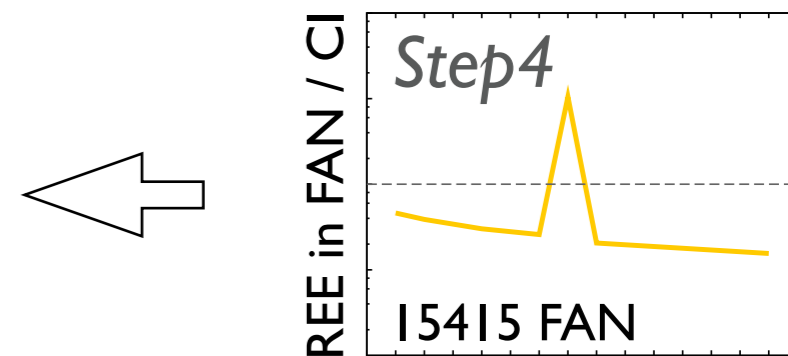
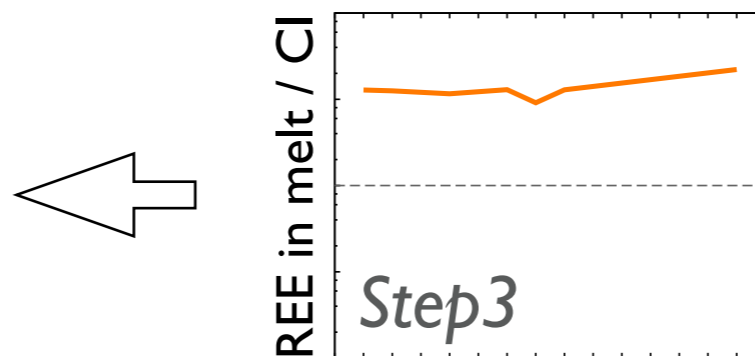
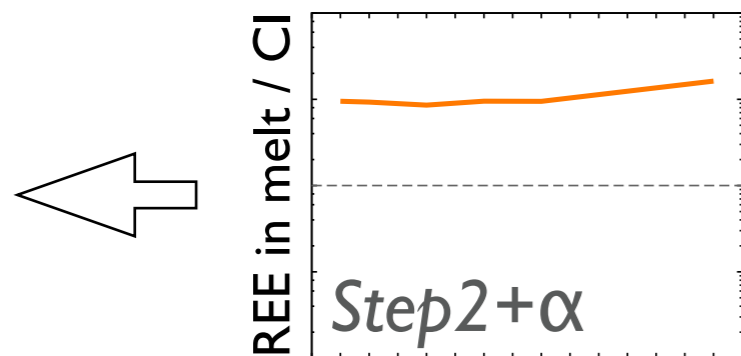
# REEパターンから制約するcpx量



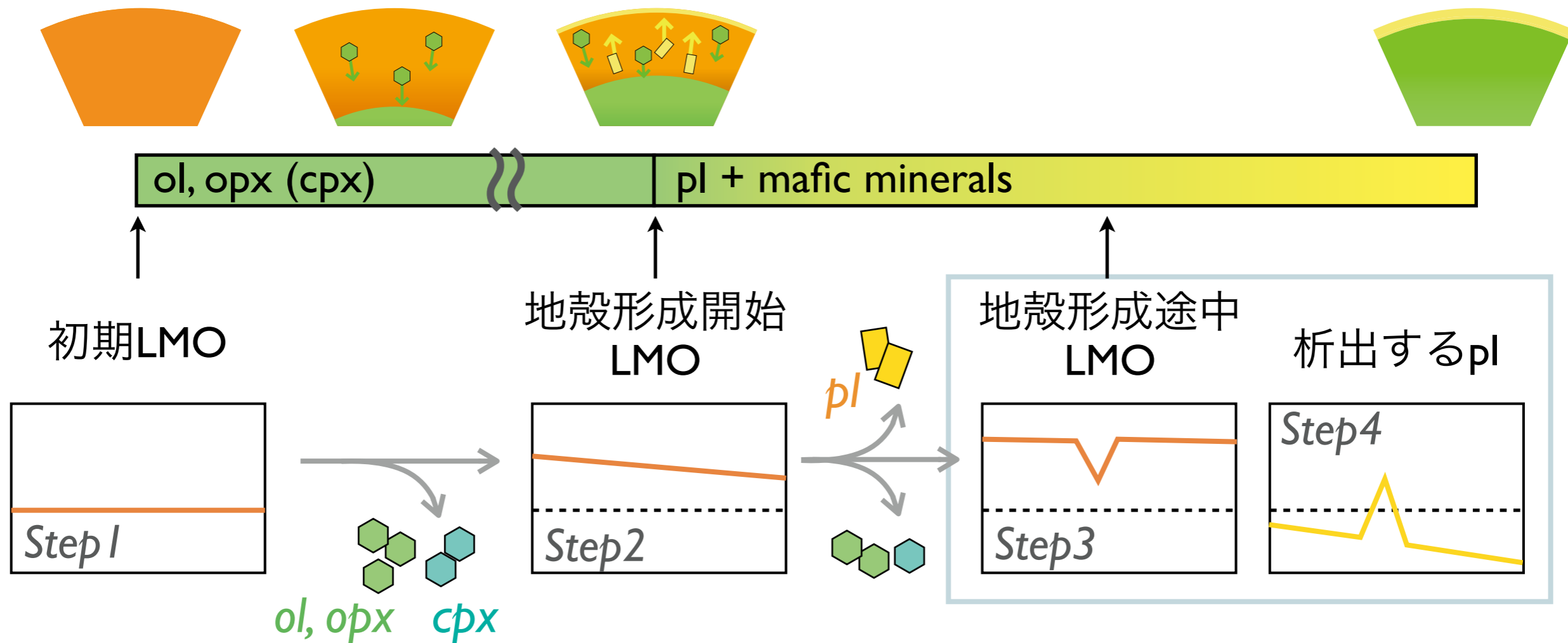
Step2+ $\alpha$ からcpx[wt%]:  
REE傾きからStep3までに  
析出したcpx量推定

Step3からStep2+ $\alpha$ :  
Eu異常からStep3までに  
析出したplを補正

Step4からStep3:  
plの分配係数を使って  
parent magmaのREEに戻す



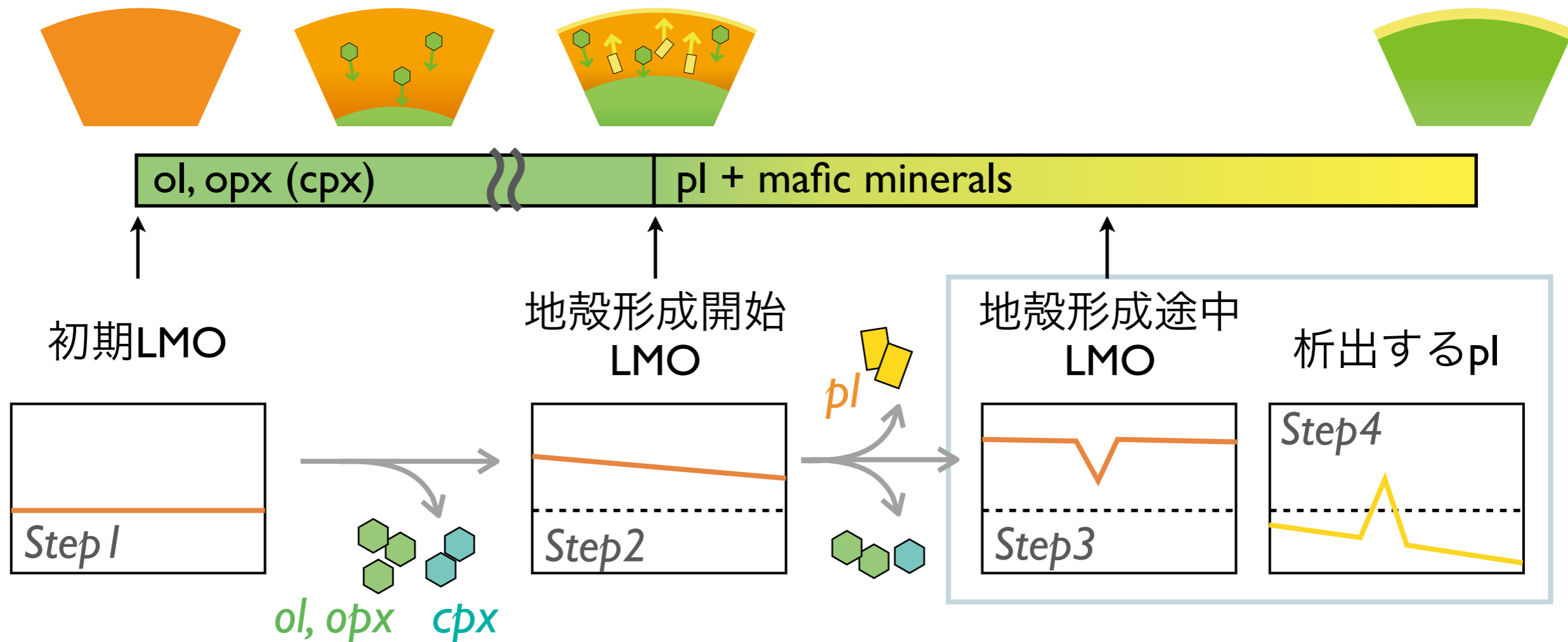
# 結果：REE情報からのcpx上限値



## 結果

	析出したcpx量	Step3までに 分離したpl量	[参考] 放射性年代
15415 FAN	0±10 wt%	27 wt%	3.9-4.1 Ga (Ar/Ar) Albarede, 1978他
60025 pl	20±10 wt%	45 wt%	4.36 Ga (Pb-Pb, Sm-Nd) Borg et al., 2011
60055 pl	0±10 wt%	29 wt%	no data

# 結果：REE情報からのcpx上限値



Papike et al. (1997)

## 結果

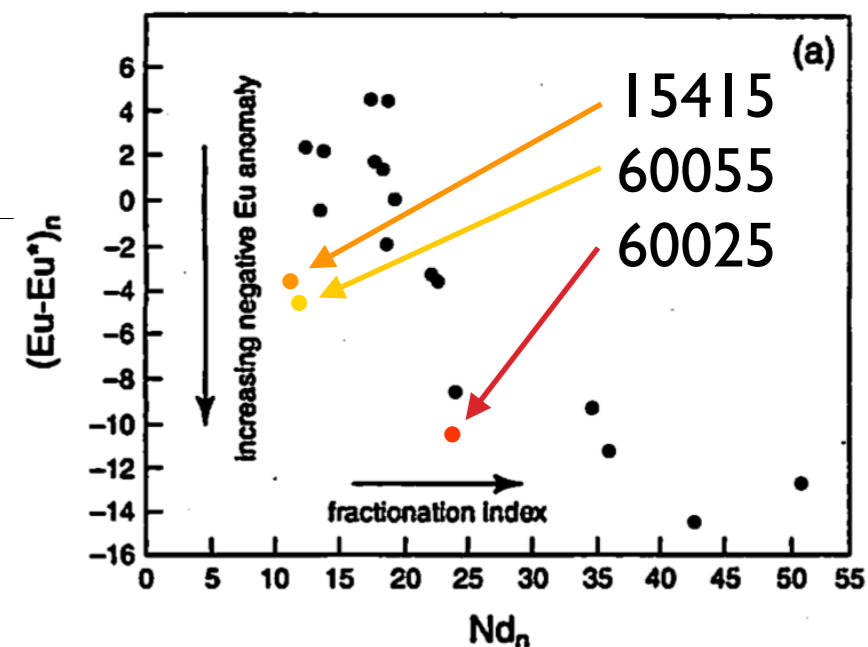
15415 FAN  
60025 pl  
60055 pl

析出したcpx量

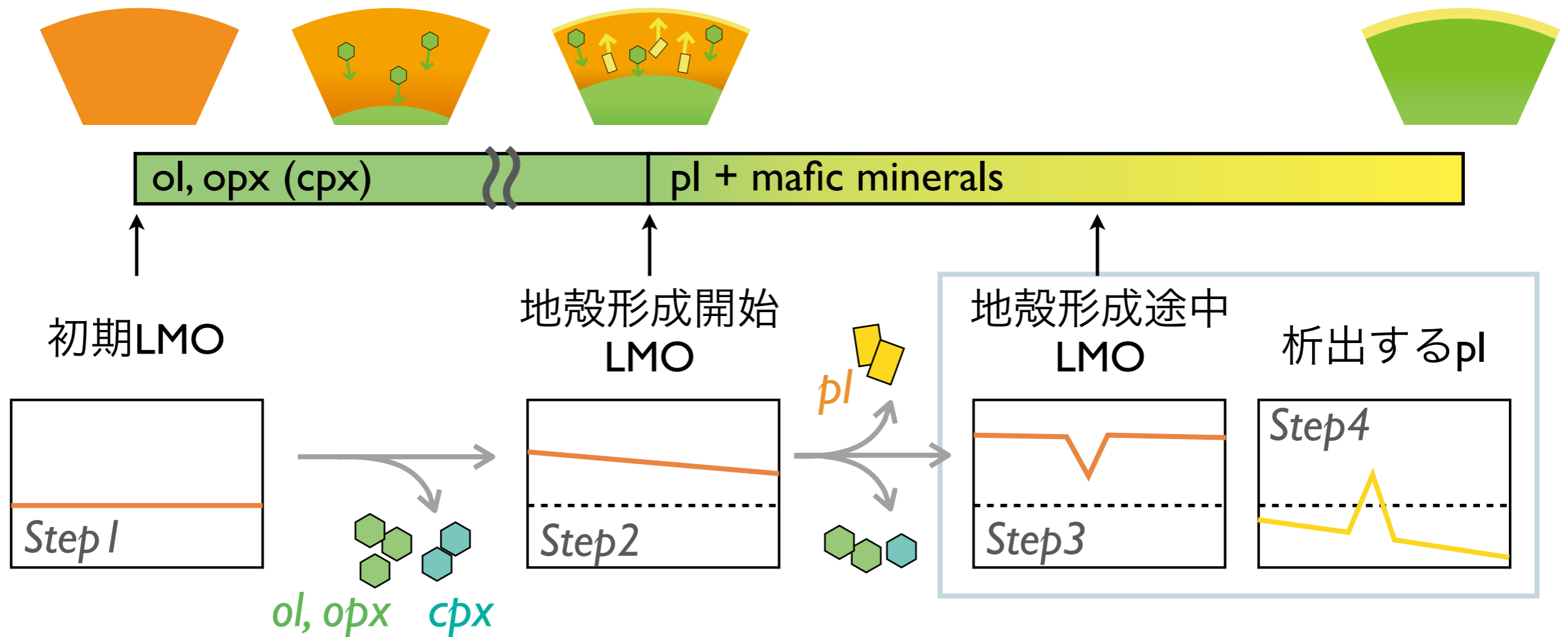
0±10 wt%  
20±10 wt%  
0±10 wt%

Step3までに  
分離したpl量

27 wt%  
45 wt%  
29 wt%



# 結果：REE情報からのcpx上限値



Papike et al. (1997)

## 結果

15415 FAN

60025 pl

60055 pl

析出したcpx量

0±10 wt%

20±10 wt%

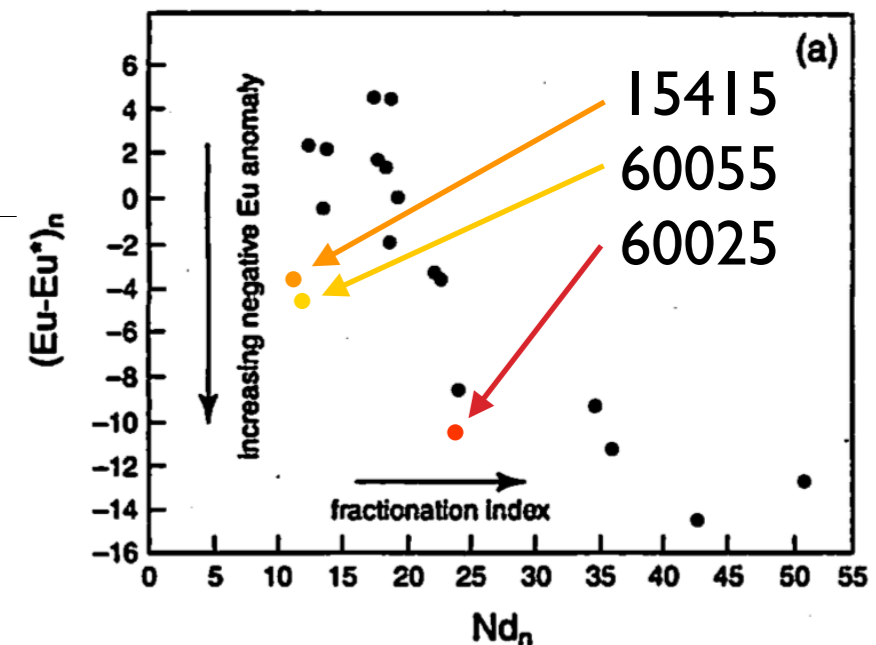
0±10 wt%

Step3までに  
分離したpl量

27 wt%

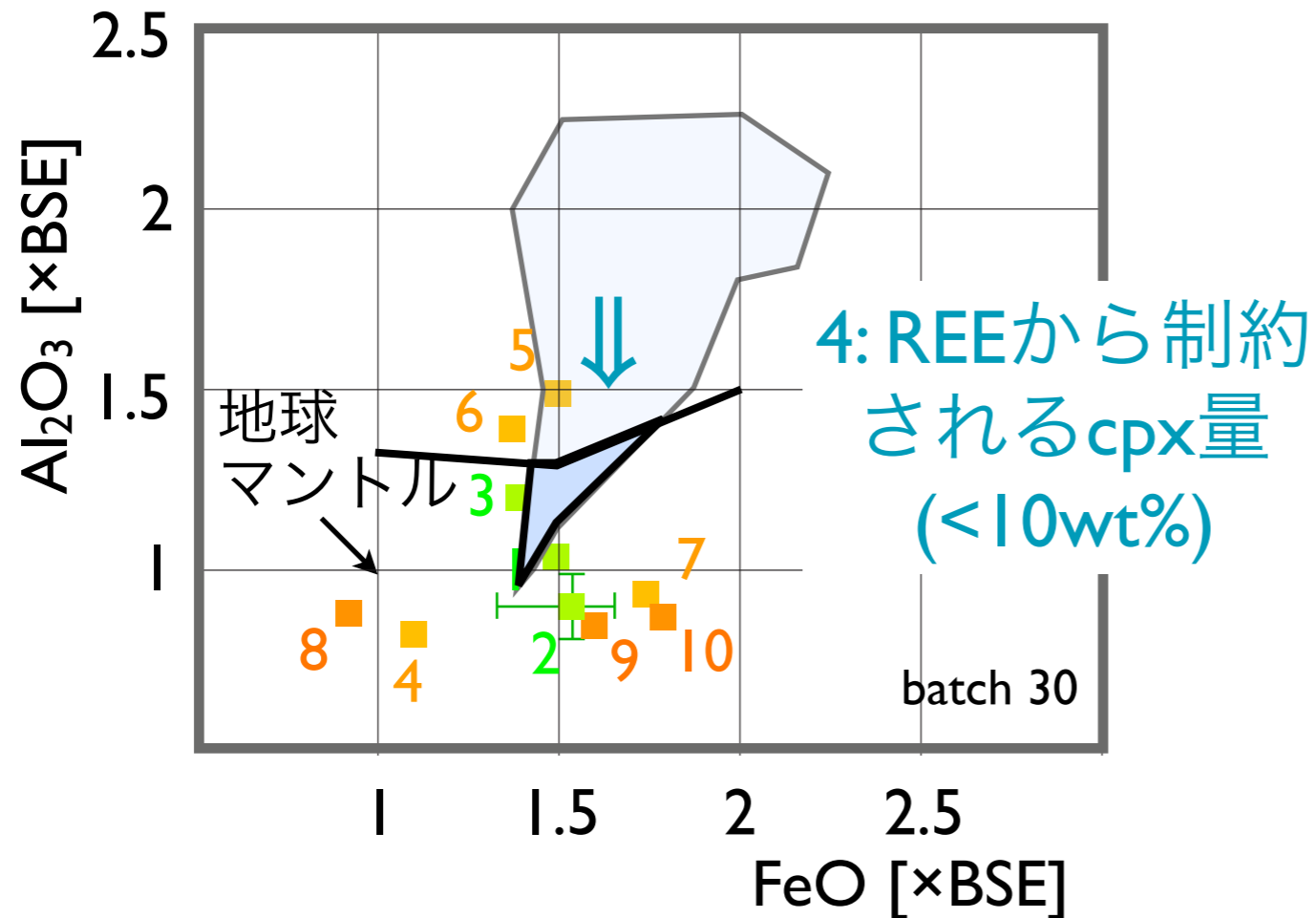
45 wt%

29 wt%



# Conclusion 月マグマオーシャンの組成範囲

月地殻形成条件から制約された  
初期LMO化学組成



月密度・慣性能率, 地震波速度

- 1 Buck & Toksöz (1980)
- 2 Khan et al. (2006)
- 3 Lognonné et al. (2003)

Th, U濃度からAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>量推定

- 4 Warren (2005)
- 5 Taylor (1982)
- 6 Taylor et al. (2006)
- 7 Ringwood (1979)

mare basaltから推定

- 8 Longhi (1982, 2006)
- 9 Wänke & Dreibus (1982)
- 10 Jones & Delano (1989)

これまでに比べAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CaO)量に極端に富んだ組成は制約された

BSEよりAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO量とともに富んだ月バルク組成を示唆

- (1) 衝突天体の組成を反映？
- (2) 月形成円盤での蒸発・凝縮, Fe metalの酸化？
- (3) 月形成巨大衝突時に原始地球の玄武岩質な初期地殻の取り込み？

# Summary

月地殻形成条件からマグマオーシャン組成(~月バルク組成)に制約

## これまでの研究

- ・ 対流マグマ中での斜長石浮上
- ・ 地殻厚みを作る斜長石析出量
- ・ 斜長石と共存するmafic鉱物組成

⇒初期FeO量はBSEより多い(~1.4 ×BSE).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量の制約は弱い

## 本発表

地殻のREE情報からマントル中でのcpxの析出量を推定し, 初期 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量上限値に制約

⇒初期 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量: ~1-1.3 ×BSE

## これから

自分で月試料を組成分析し, 地殻中のMg#, REEパターンを総合的に理解

今週: 北大で月隕石Y-86032をSIMS分析

