

第30回Grain Formation Workshop／平成24年度銀河のダスト研究会

日程：2012年11月28－30日

於：神戸大学統合研究拠点コンベンションホール，神戸

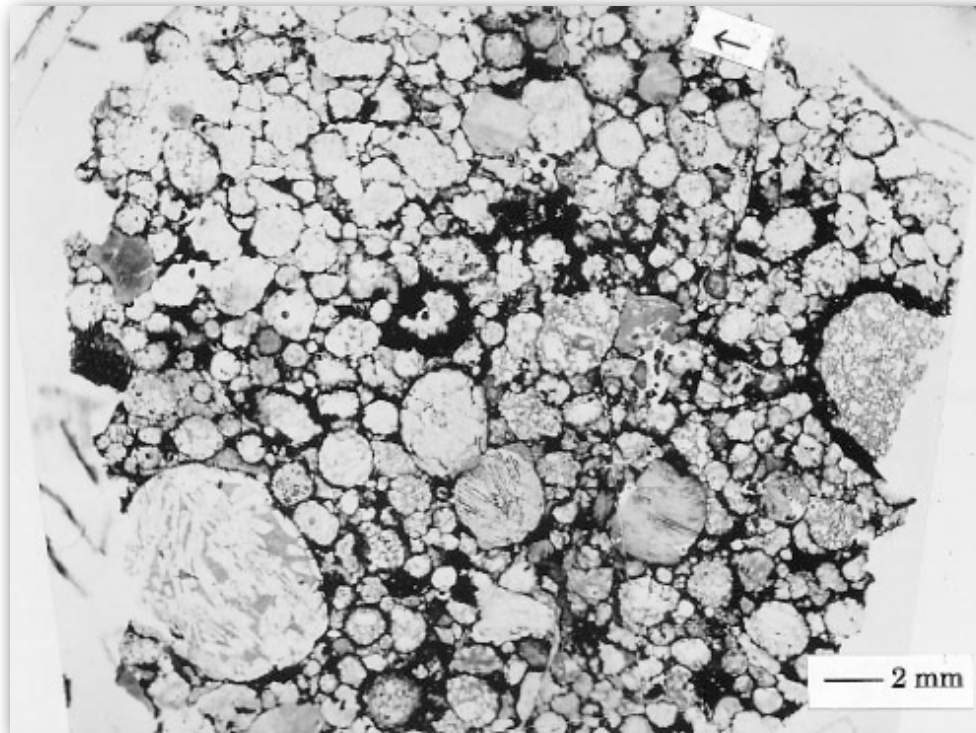
コンドリュールメルト凝固の物理： 界面不安定による棒状カンラン石組織の形成

三浦均，塚本勝男（東北大・院理）



1. 背景

コンドリュールとは



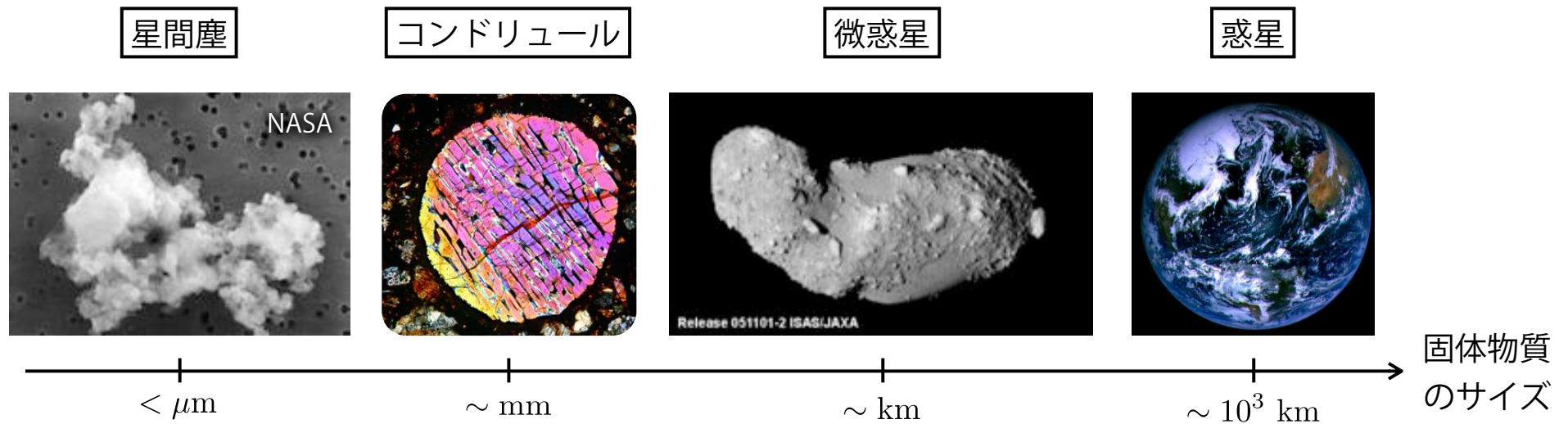
A transmitted light image of a thin section of Semarkona (LL3.0; USNM 1805-4), an unequilibrated ordinary chondrite.
(Connolly and Love 1998)

- 石質隕石に含まれるmmサイズの球状珪酸塩結晶
- 多いものでは、隕石の80 vol.%を占める
- 加熱溶融後、急冷凝固
- 約45.64 - 45.67億年昔に形成
(Connolly et al. 2012)
- 語源は、ギリシア語の「粒」や「核」を意味する“chondros”

太陽系創世記の
ロゼッタ・ストーン

1. 背景

惑星形成の謎を解くキーストーン



様々な成長阻害要因 (乱流巻き上げ, 中心星落下, 衝突破壊, 静電反発)

(Weidenschilling & Cuzzi 1993; Weidenschilling 1977; Wada+2009; Okuzumi+2011)

- 星間塵と微惑星をつなぐサイズ
- 形成年代の決定 (Connolly et al. 2012)
- 多量に存在
- 観測的制約条件 (Jones et al. 2000; Tachibana & Huss 2005)

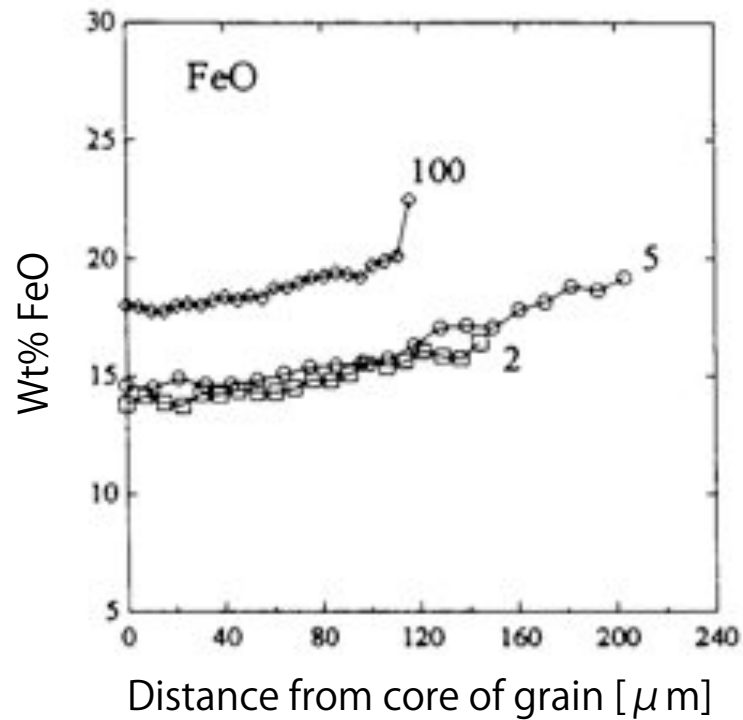


初期太陽系における固体物質進化
(サイズ, 物性, 移動, etc.)

1. 背景

溶融コンドリュール凝固実験

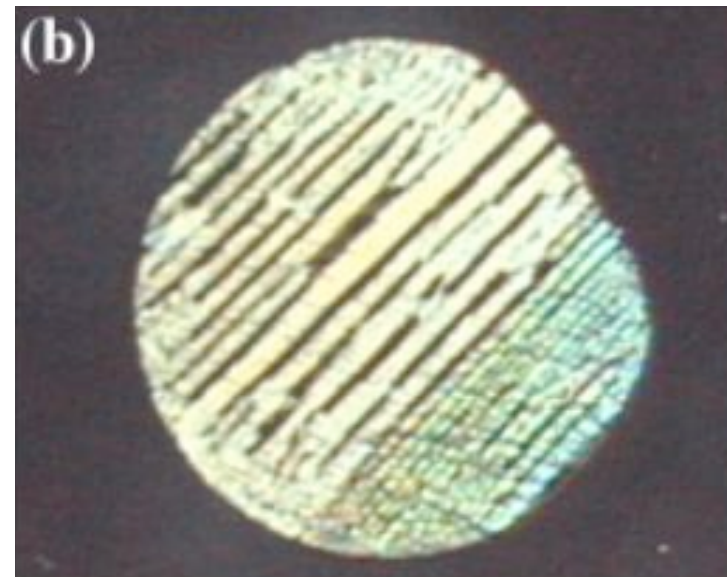
Porphyritic オリビンの組成累帯
(Jones & Lofgren 1993, Meteoritics 28, 213)



冷却速度 ~ 5 - 100 K/hr + "annealing"
→ 組成累帯を再現

Barred-olivine (BO) 組織の再現

(Osada et al. 2001, LPSC; Tsuchiyama et al. 2004, GCA 68, 653)



← 1.4 mm →

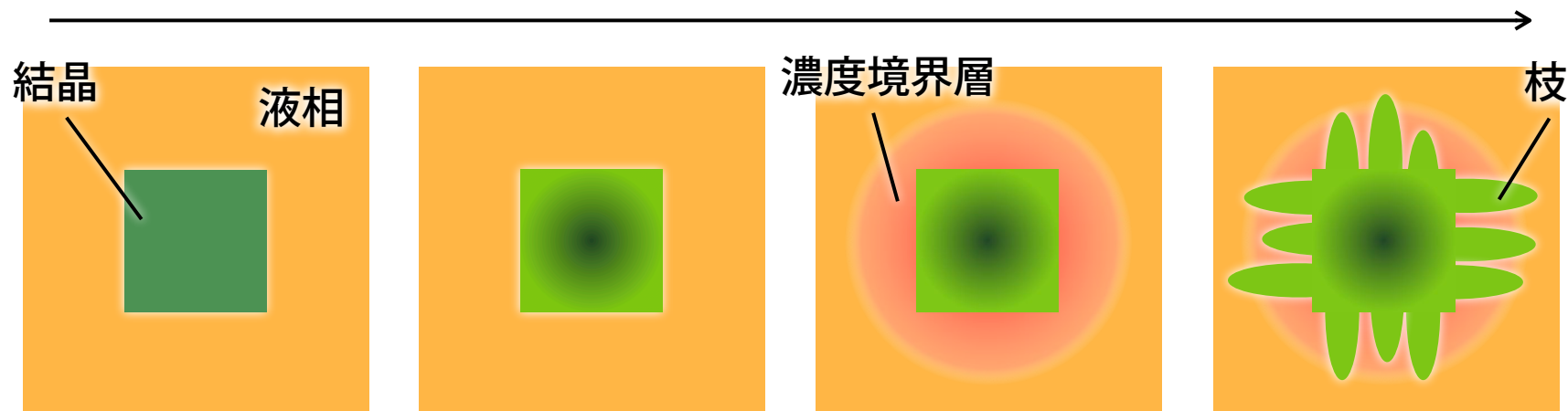
冷却速度 ~ 1000 K/hr
→ BO 組織を再現

凝固の物理過程は良く分かっていない

1. 背景

凝固の物理 — 一元素の分配の結晶成長 —

小 ← 結晶成長速度 → 大



凝固モデル	平衡凝固	正規凝固	拡散律速凝固	
固相濃度	一様	非一様	非一様	非一様
液相濃度	一様	一様	非一様	非一様

↓ ↓ ↓ ↓

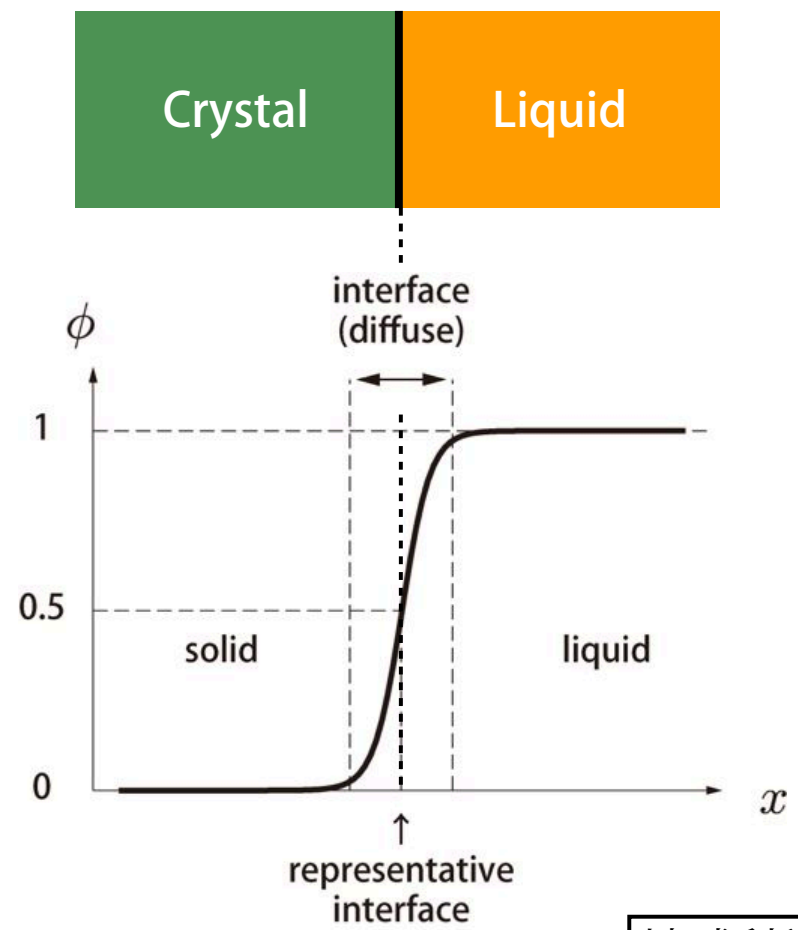
“分別結晶化” “累帯構造” “元素の過剰取込” “界面不安定”

変形を伴う移動境界問題

1. 背景

フェーズフィールド法

相転移を記述する現象論的モデルである
ギンツブルクーランダウ模型の一種。



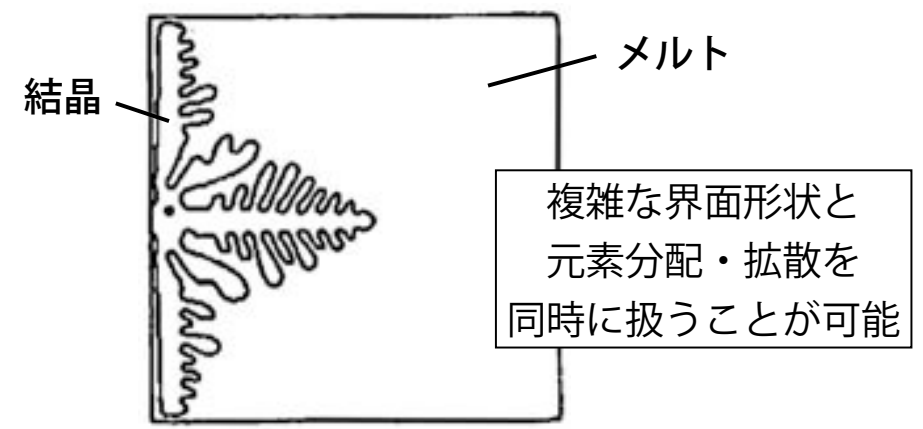
○ メリット :

- 界面を陽的に扱う必要がない
- 拡散場 (温度, 濃度) との相性
- 界面効果 (Gibbs-Thomson効果)
- 多次元計算への拡張が容易

× デメリット :

- 大きな計算コスト
- 界面厚さの決定に恣意性が入る

樹枝状結晶の形成 (Kobayashi 1993)



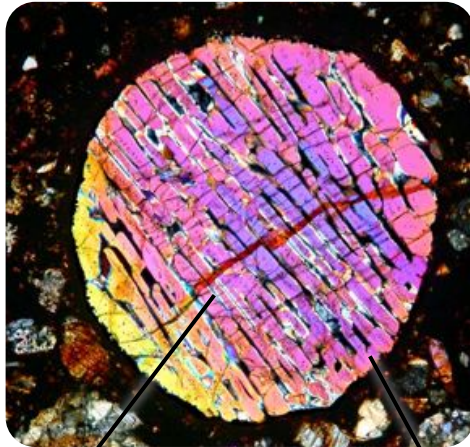
地球科学への適用を！

1. 背景

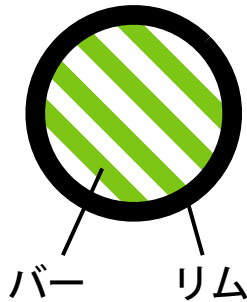
本研究の目的

BOコンドリュール（偏光顕微鏡像）：

images from "http://jm-derochette.be/"



名称と部位の関係

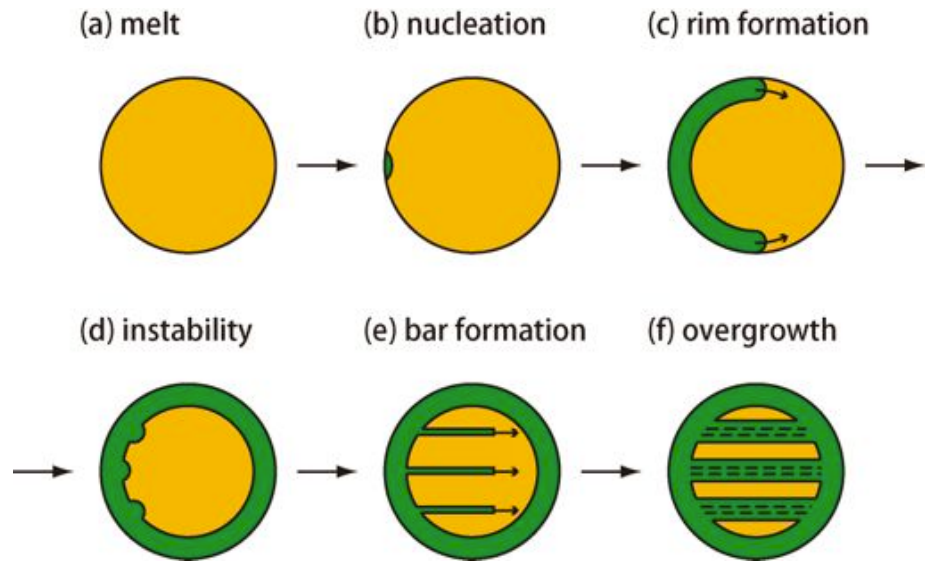


カンラン石: バー
3次元構造 = 平板
(Noguchi 2002)

b面にほぼ垂直
(Tsuchiyama+2004)
厚さ ~ 5 - 100 μm
(Weisberg 1987)

カンラン石: リム
厚み > 20 μm
(Tsuchiyama+2004)

提案されている形成メカニズム：



(Lofgren 1996; Tsuchiyama+2004)

バー形成

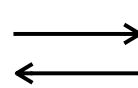
- 結晶化潜熱解放に伴うリム-メルト界面における形態不安定化（単成分系）

(Miura+2010; Miura+2011)

多成分系珪酸塩メルト凝固における
棒状カンラン石組織形成過程の解明

2. 数値計算手法 基礎方程式

フェーズ場
反応拡散方程式
 $\phi(x, y; t)$



濃度場
反応拡散方程式
 $c(x, y; t)$

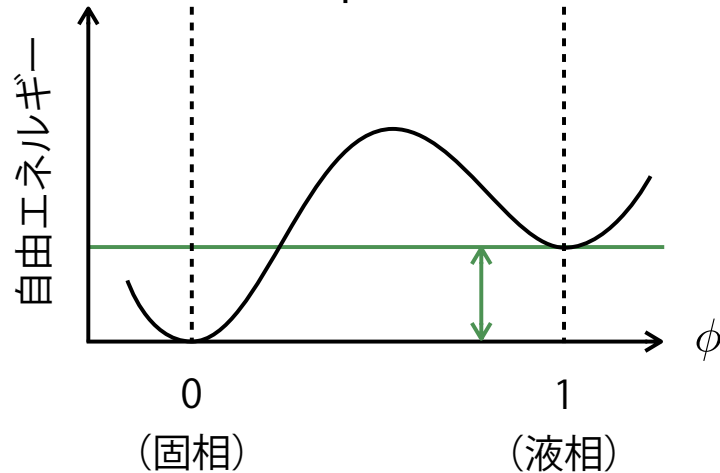
AB二成分系の場合
成分Bのモル分率： c

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = M_\phi \left[-\frac{f_\phi}{T} + \epsilon_\phi^2 \nabla^2 \phi \right]$$

\uparrow 結晶化駆動力 \uparrow 界面効果

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ D \left[\nabla c + \frac{f_{\phi c}}{f_{cc}} \nabla \phi \right] \right\}$$

\nearrow 拡散係数 \uparrow 拡散 \uparrow 元素分配



界面の自由エネルギーを現象論的にモデル化

Thermodynamically consistent model

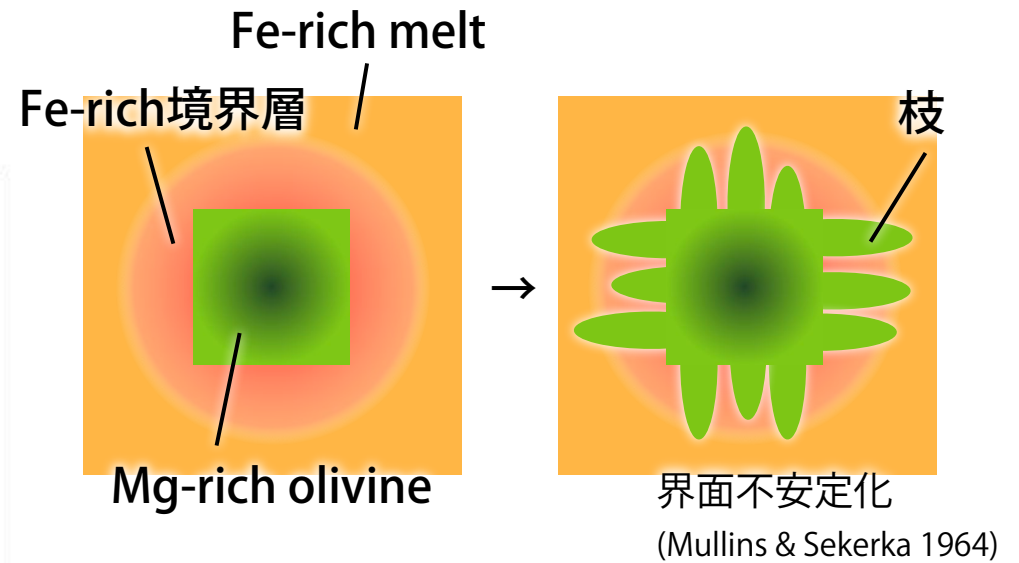
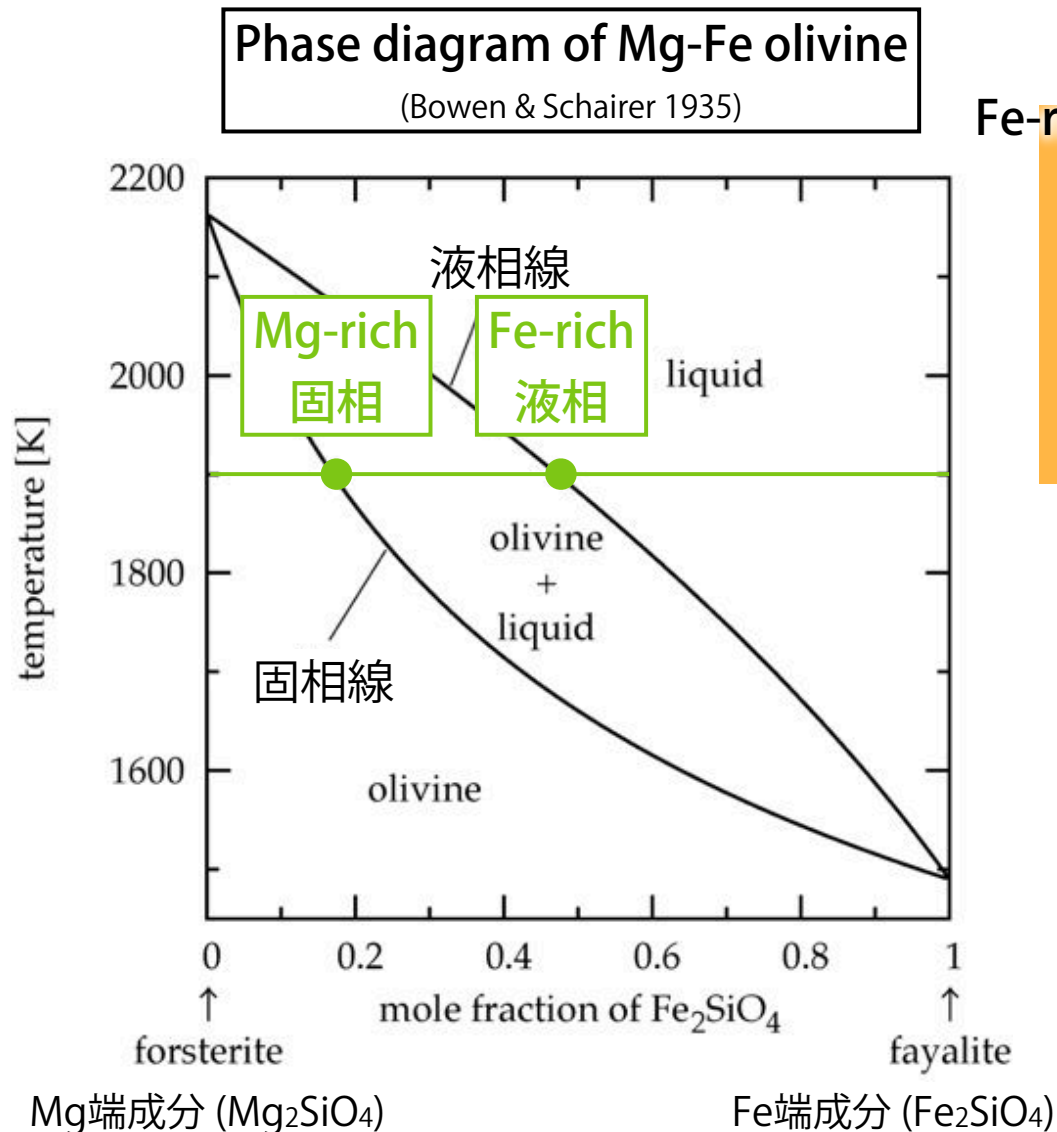
(Warren & Boettinger 1995; Bi & Sekerka 1998)

- 二成分系合金の凝固
- 熱力学第二法則に無矛盾に定式化

固相・液相の自由エネルギー：
Mg-Fe olivineの理想溶体モデル
(Bowen & Schairer 1935)

2. 数値計算手法

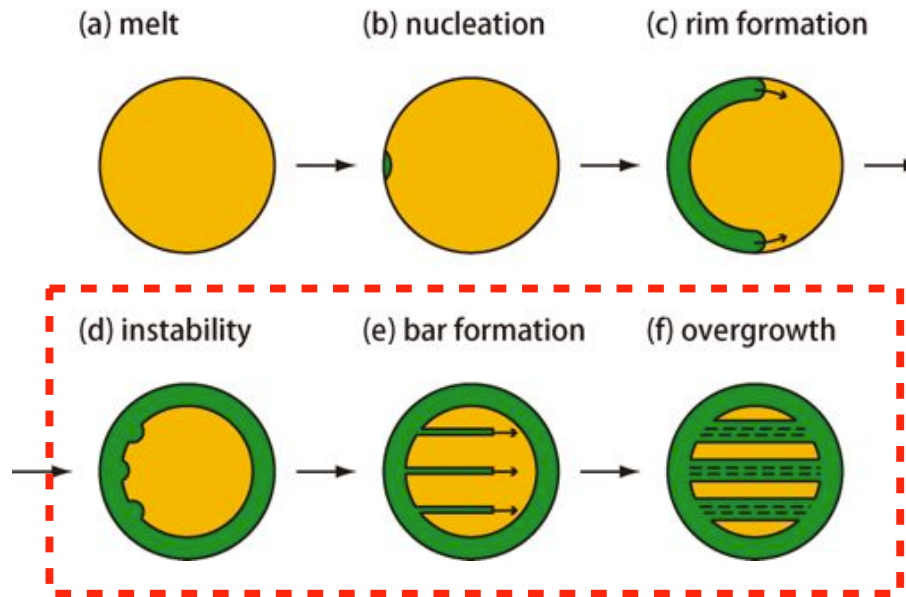
カンラン石の熱力学モデル



相平衡実験によって得られた相図を
理想溶体モデルで合わせる
↓
カンラン石固溶体の
自由エネルギー

2. 数値計算手法 計算設定

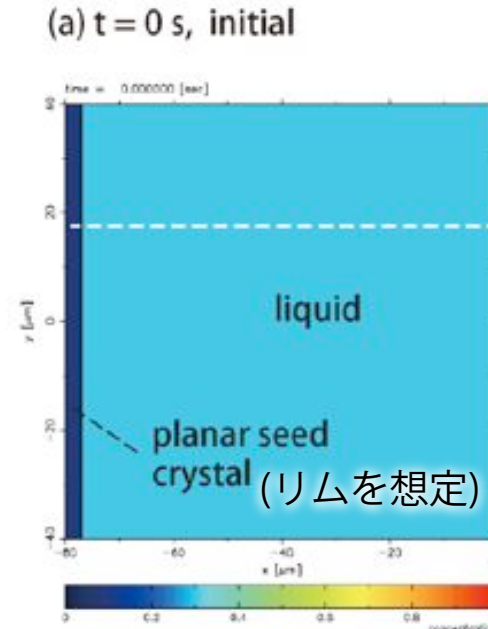
リム-メルト界面における界面不安定過程に注目：



本研究

- リムが形成したと仮定
- メルトの冷却とともに，リム内側の界面が成長し，界面不安定が発生する様子を再現

局所近似（リムの曲率を無視）：



初期設定

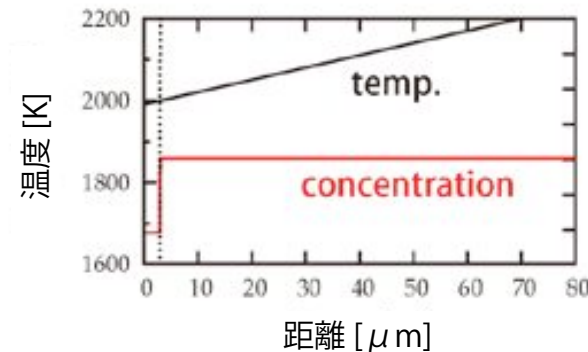
- 平らなリム
- 固液平衡 @ T_0
- 一様温度勾配

パラメータ

- 初期温度 T_0
- 冷却速度 R_c

仮定

- 固相の拡散無視
- 液相の拡散係数一定（温度・濃度依存性無視）
- 結晶化潜熱の放出無視



3. 結果

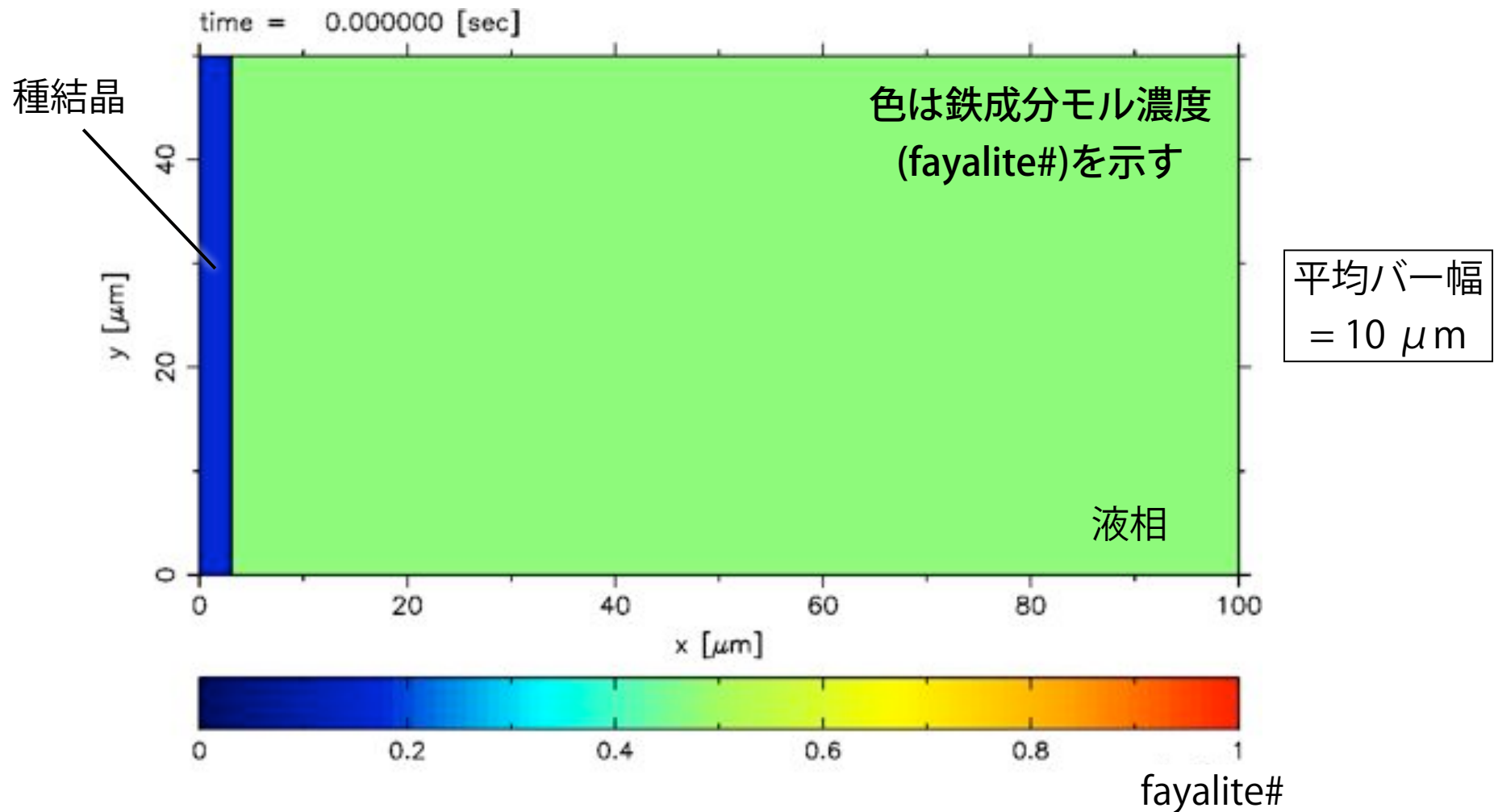
界面不安定とオリビンバーの形成

Mg-Feカンラン石凝固のフェーズフィールド計算

(Miura & Tsukamoto, submitted)

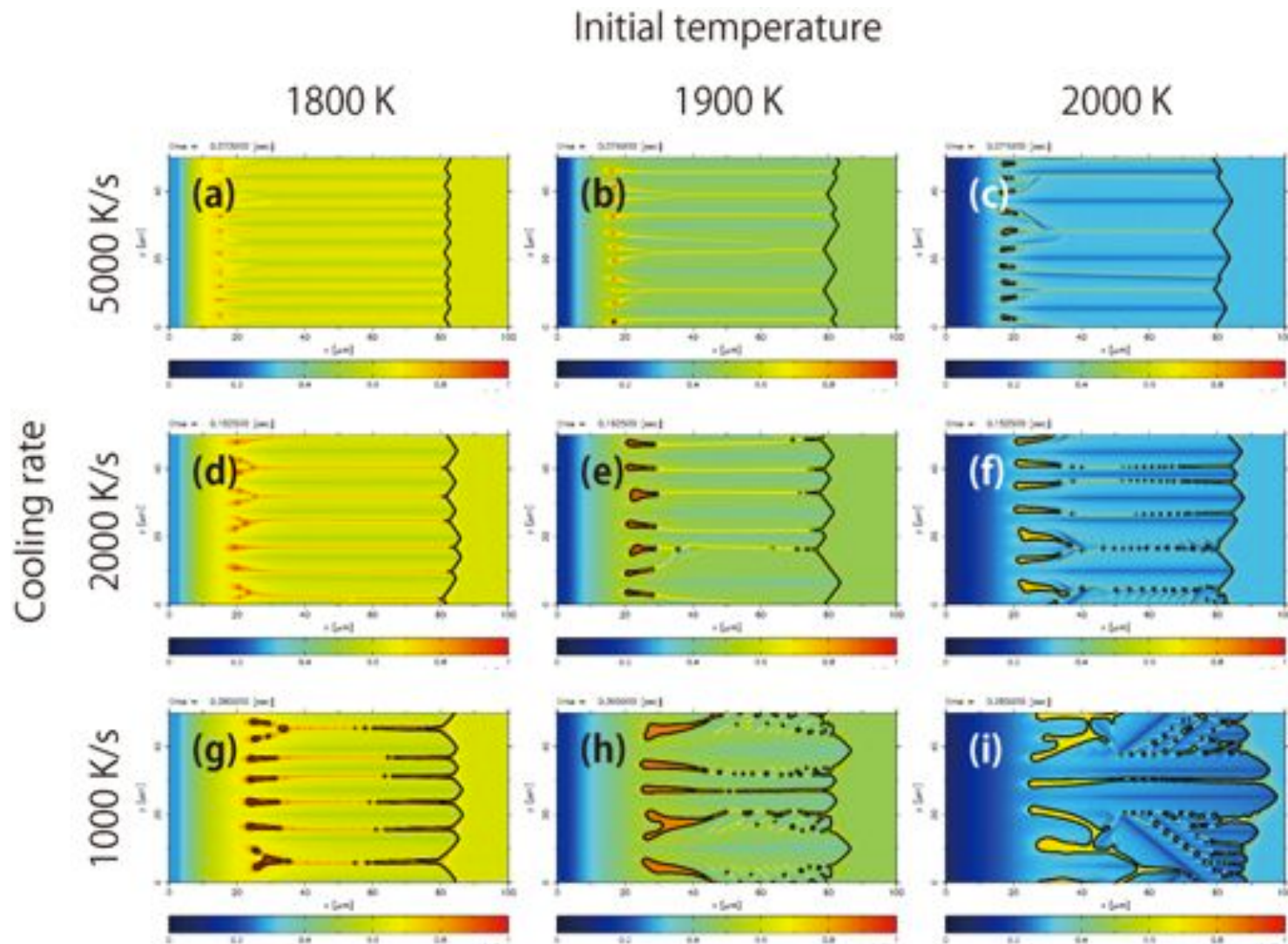
$T_0 = 1900 \text{ K}$

$R_c = 2000 \text{ K/s}$



3. 結果

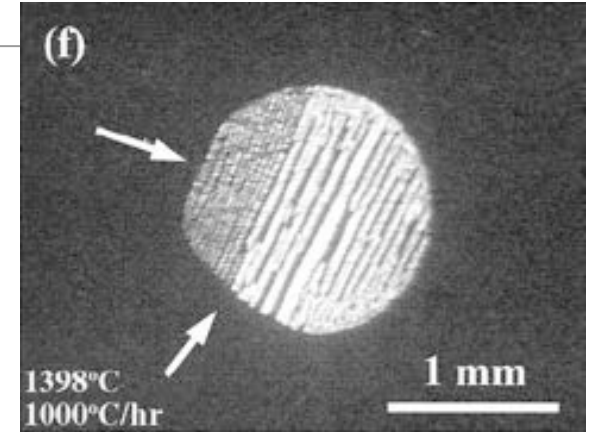
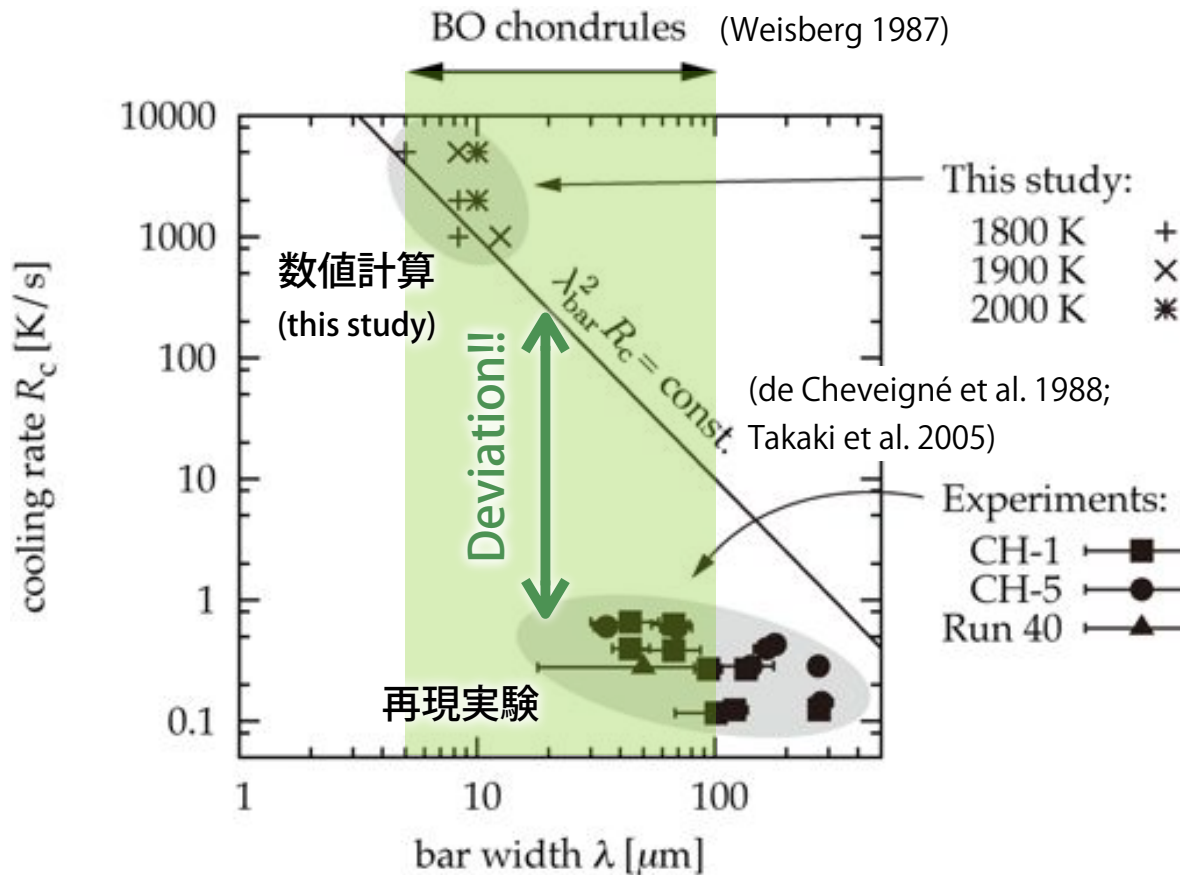
バー幅と冷却速度の関係



冷却遅い
↓
バー幅広い

4. 考察

“理論的” BO組織形成条件



BO組織再現実験, 出発物質: FeO-rich (Tsuchiyama et al. 2004)

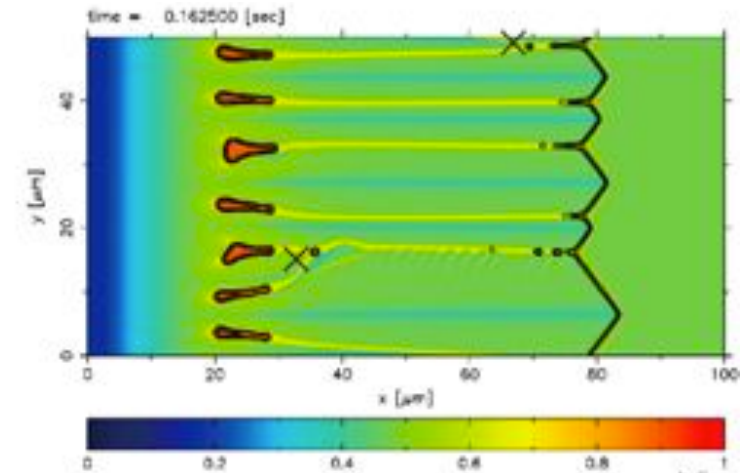
従来実験的に得られた値より
2桁以上速い冷却を示唆
(Miura & Tsukamoto, submitted)

-
- 計算と実験が一致しない理由は不明
 - 計算モデルの精密化, 理論と実験の比較が今後の課題

結論

- 多成分珪酸塩メルト凝固の数値計算モデルを用いて、コンドリュールBO凝固組織形成過程の検討を行なった
- 急凝固に伴う界面不安定化, 及び, オリビンバーを再現
- バーの幅と冷却速度の関係を再現
→ “理論的” 制約条件
- 典型的なbarred-olivineコンドリュールのオリビンバーの幅 ($\sim 20 \mu\text{m}$) を再現するには, 100 K/s 程度以上の急冷が必要であることを示唆 → 従来の考え ($\sim 10^3 \text{ K/hr}$) よりも2桁以上の急冷
- 理論と実験の不一致について, 今後より詳細な検討が必要

(a) 結晶成長, 元素分配・拡散, 界面不安定



(b) バーの幅と冷却速度の関係

