

CPSセミナー，2012年10月17日  
於：惑星科学研究センター，神戸

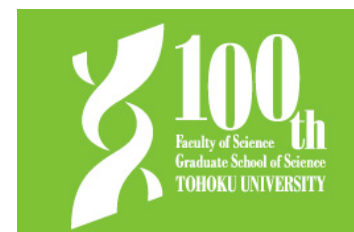
# コンドリュール凝固組織形成過程の 理論的解明に向けて

---

三浦均（東北大・院理）

共同研究者：

- 塚本勝男（東北大・院理）
- 横山悦郎（学習院大・計セ）
- 長嶋剣（北大・低温研）
- Atul Srivastava (Indian Institute of Technology, India)



# 本日の内容

---

## 1. 背景

コンドリュール, 凝固組織

## 2. 凝固の物理

元素分配, 濃度境界層, 界面不安定

## 3. 数理モデル

フェーズフィールド法, 固溶体, 自由エネルギー

## 4. 数値計算 (空間 1 次元) と考察

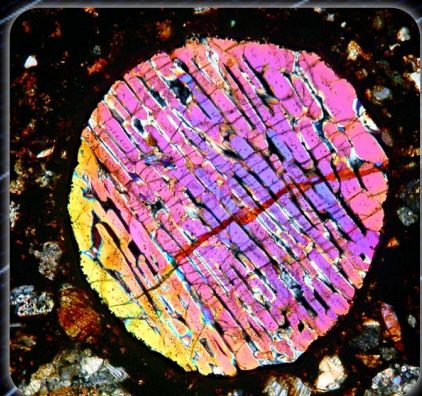
組成累帯, 冷却速度

## 5. 数値計算 (空間 2 次元) と考察

Barred-olivine凝固組織, “理論的” 制約条件

# 1. 背景

## 現太陽系に見られる多様な結晶

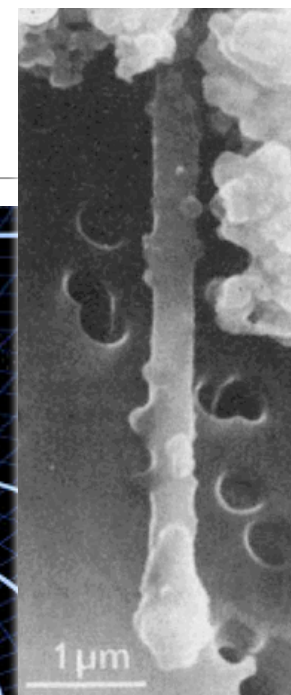


chondrules

mm-sized spherical silicate objects

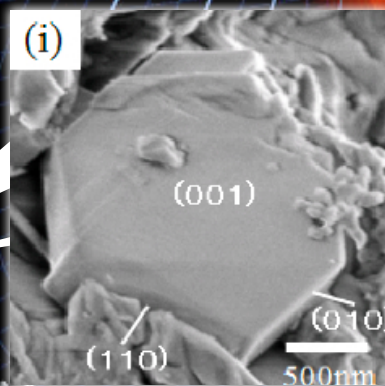
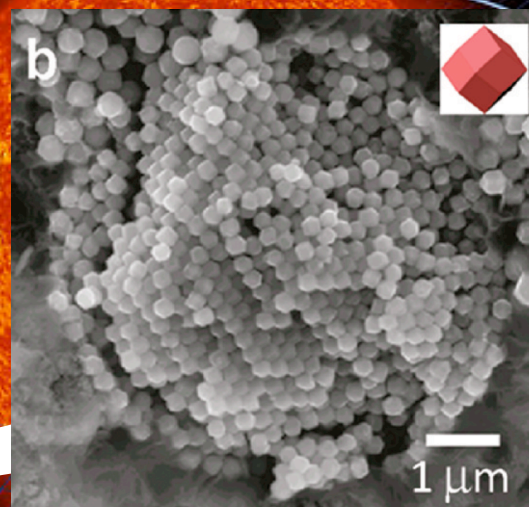
enstatite whisker elongated to a-axis

(Bradley et al.1983, Nature 301, 473)



3D magnetite colloidal crystal

(Nozawa et al. 2011, JACS 133, 8782)

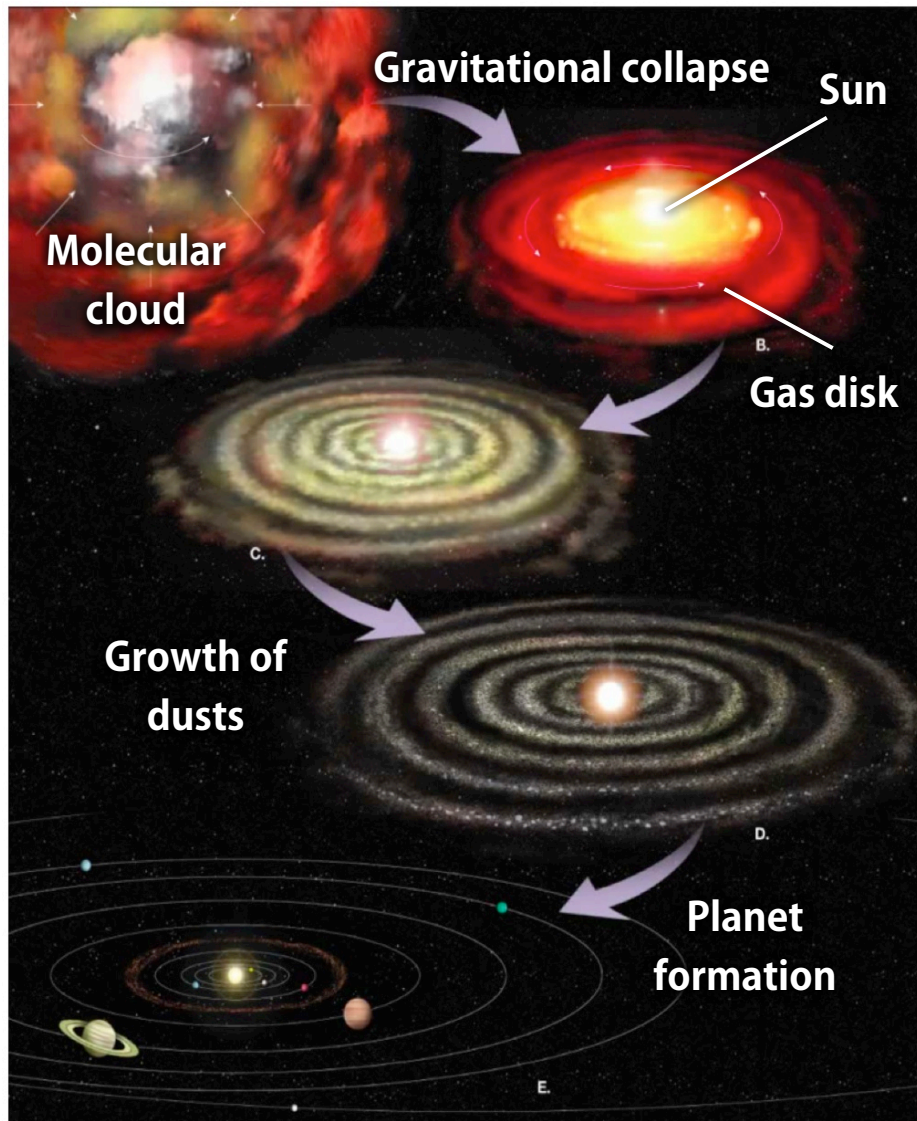


euhedral olivine crystals

(Nozawa et al. 2009, Icarus 204, 681)

# 1. 背景

## 星間塵は非晶質



### Interstellar:

- Dust size  $\sim$  nm -  $\mu$  m  
(Mathis et al. 1977, ApJ 217, 425)
- **Amorphous** (Kemper et al. 2004, ApJ 609, 826)

### Gas disk :

- $\sim \mu$  m  $\rightarrow \sim 10^3$  km (planet formation)
- **Various crystals**

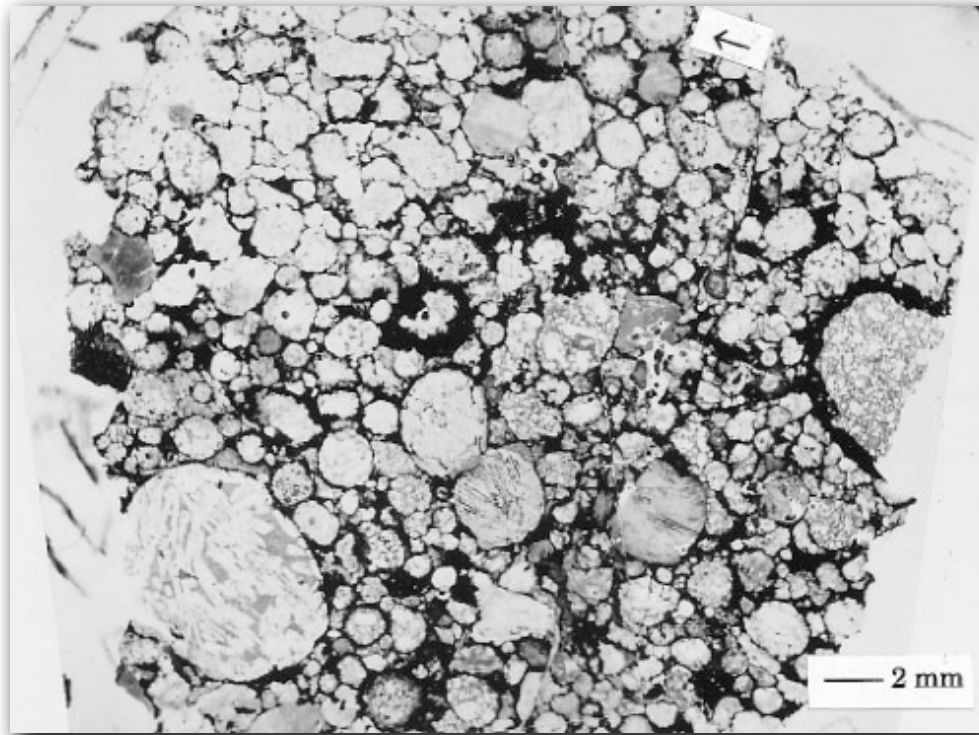
### Crystallization mechanism:

- **Annealing @ 1000 K**  
(Hallenbeck et al. 2000, ApJ 535, 247)
- **Solidification from a melt**  
(Jones et al. 2000, in book)
- **Re-condensation from vapor**  
(Tsuchiyama 1998, MJ 20, 59; Kobatake et al. 2008, Icarus 198, 208)

What is the heating source  
in the early solar system?

# 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)

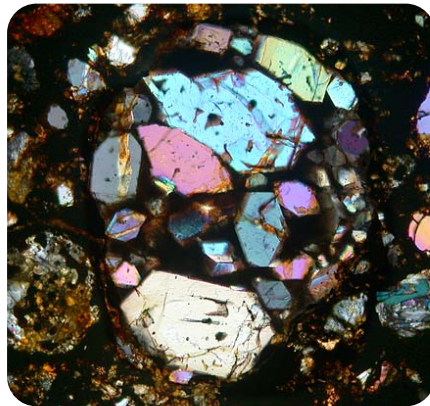
- 石質隕石に含まれるmmサイズの球状珪酸塩結晶
- 多いものでは、隕石の80 vol.%を占める
- 加熱溶融後、急冷凝固
- 約45.65億年昔に形成 (Amelin et al. 2002)
- 語源は、ギリシア語の「粒」や「核」を意味する“chondros”

太陽系創世記の  
ロゼッタ・ストーン

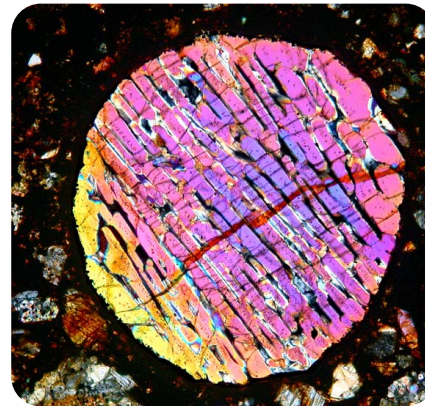
# 1. 背景

## 多様な凝固組織

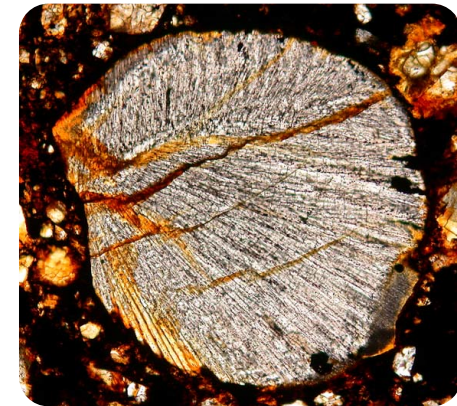
斑状 (Porphyritic)



棒状カンラン石 (Barred-olivine)



放射状輝石 (Radial Pyroxene)



Images from "<http://jm-derochette.be/>"

凝固組織の違い → バルク組成・形成条件の違いを反映

最高到達温度 (Hewins et al. 2005 and references therein)

低い

高い

“部分” 溶融

リキダス

“完全” 溶融

凝固時の冷却速度 (Jones & Lofgren 1993; Tsuchiyama et al. 2004)

小さい

大きい

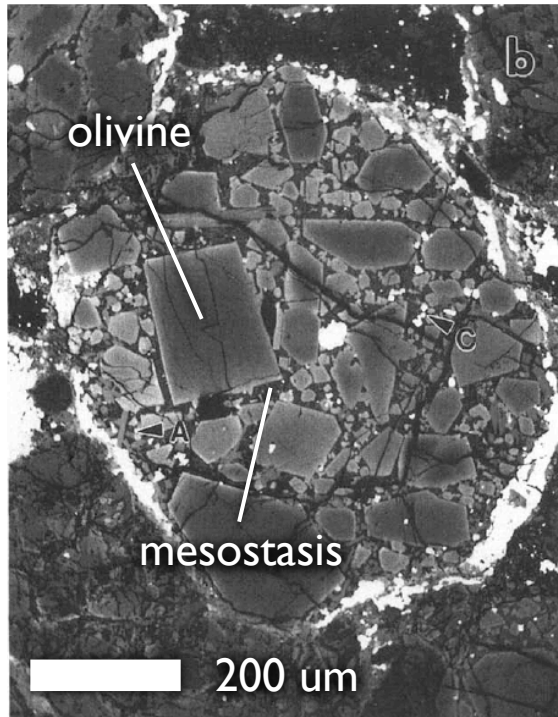
~ 5 - 100 K/h

~ 1000 K/h

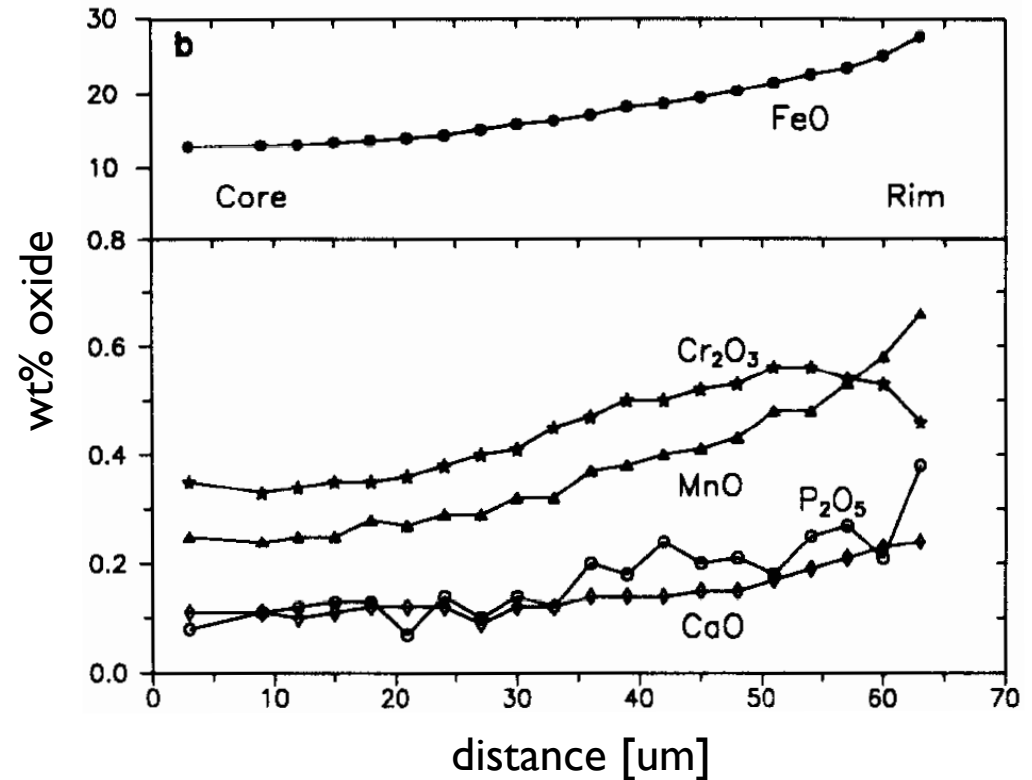
# 1. 背景

## 組成累帯構造 (chemical zoning)

カンラン石 (olivine) =  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$



Type II porphyritic olivine chondrules in Semarkona (LL3.0): BSE images (Jones 1990)



zoning profile from core to rim of olivine grain in chondrule A21 (Jones 1990)

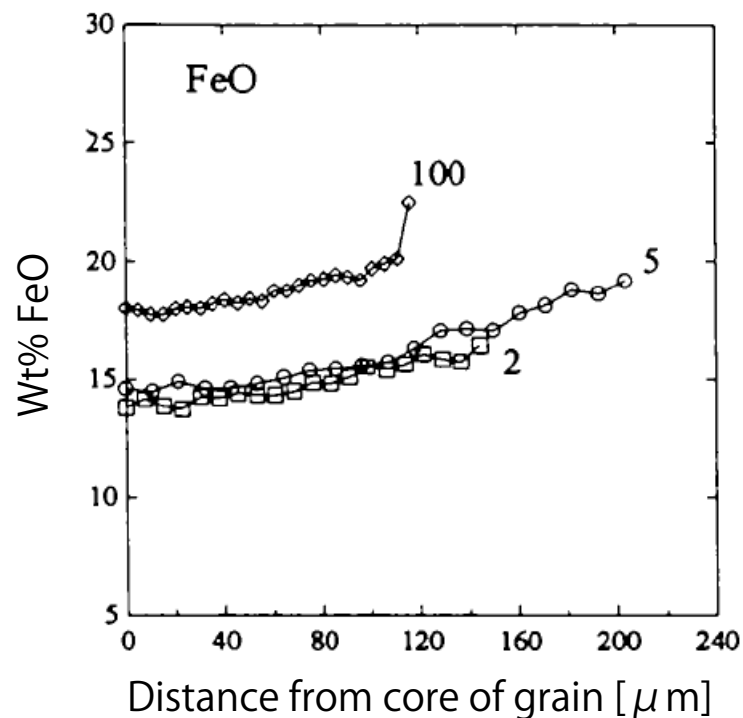
“Zoning profile tells us the chondrule formation/alteration environments”

# 1. 背景

## 溶融コンドリュール凝固実験

Porphyritic オリビン再現実験

(Jones & Lofgren 1993, Meteoritics 28, 213)



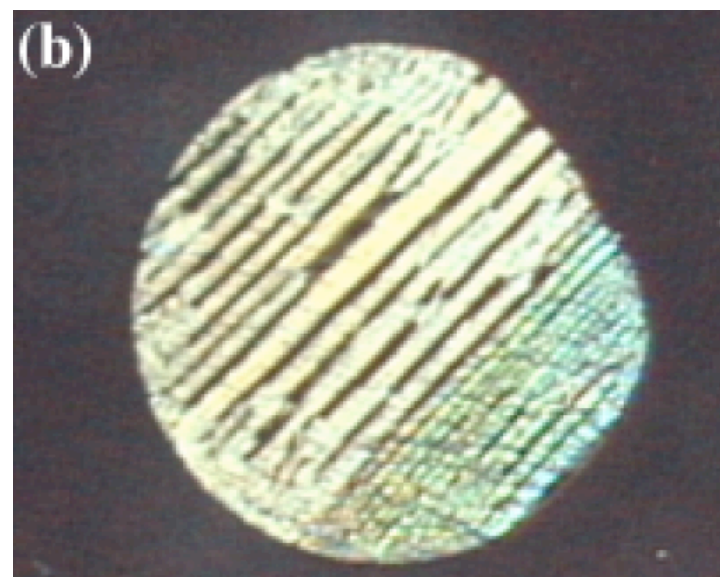
冷却速度  $\sim 5 - 100 \text{ K/hr}$  + "annealing"



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  $\sim 1000 \text{ K/hr}$

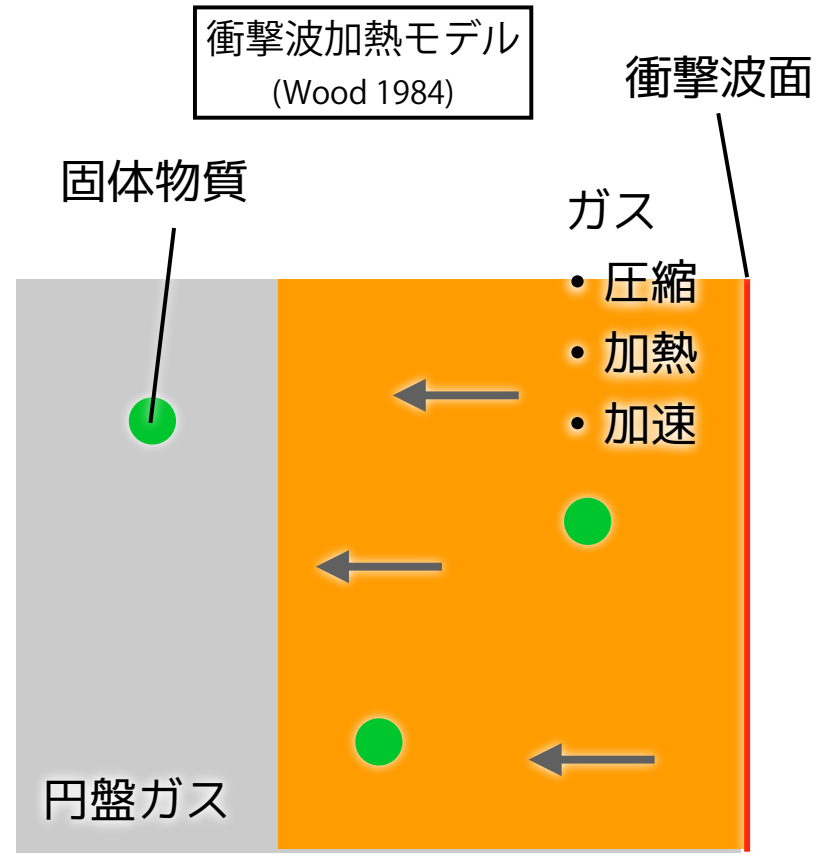


BO 組織を再現



# 1. 背景

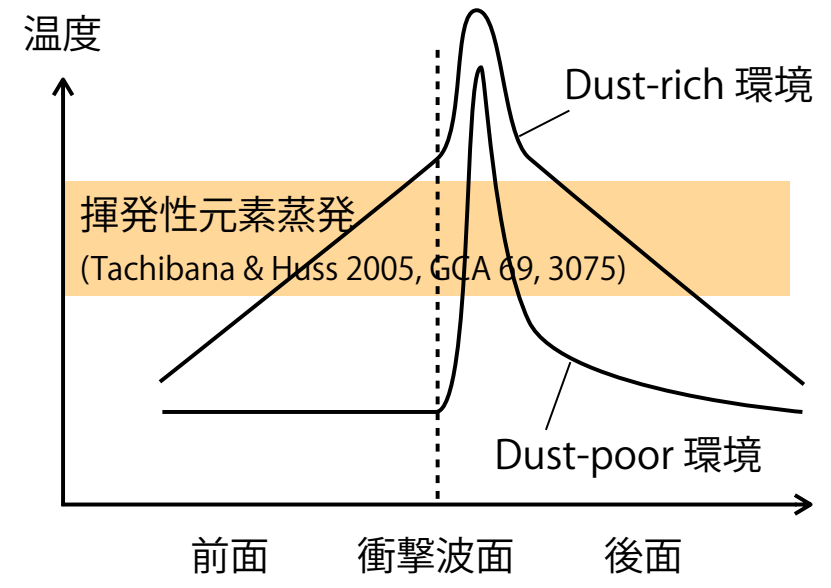
## コンドリュール形成モデルとの不一致



空間1次元平行平板定常モデル

(Hood & Horanyi 1991, Ruzmaikina & Ip 1994, Iida et al. 2001, Desch & Connolly 2002, Miura & Nakamoto 2006, Morris et al. 2009, Morris & Desch 2010)

コンドリュールが経験する熱履歴 (Miura & Nakamoto 2006 に基づく概念図)



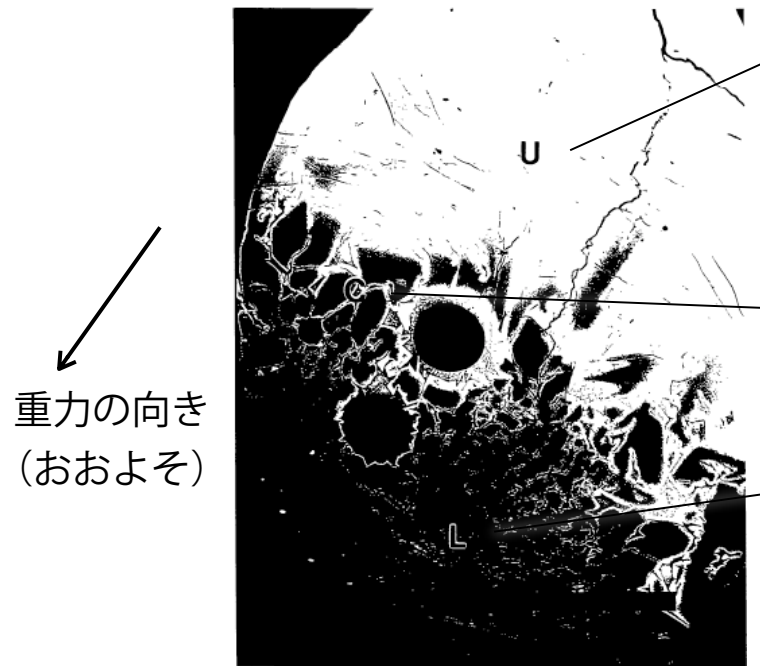
	加熱時	冷却時
Dust-rich	遅い (×) 揮発性元素蒸発	OK 凝固組織再現
Dust-poor	OK 蒸発抑制	速い (×)

加熱・冷却両条件を同時に満たさない

# 1. 背景

## 凝固実験の問題点

### 重力の影響



上部：

- grassy
- オリビン骸晶
- 針状輝石

中部：

- **斑状組織に類似**

下部：

- 微細斑状組織
- 組成累帯弱い

再現された組織に重力沈降の影響  
(Jones 1990, GCA 54, 1785)

### 非浮遊・接触

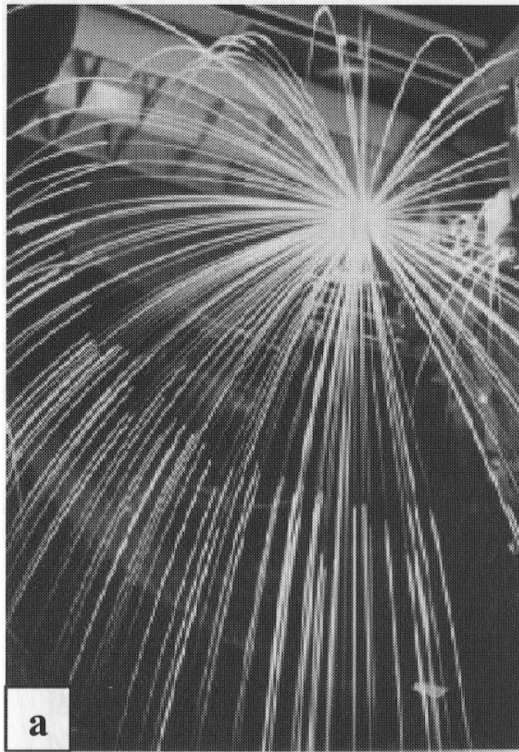


接触箇所からの核形成？  
(Tsuchiyama et al. 2004, GCA 68, 653)

初期太陽系におけるコンドリュール形成環境との相違？

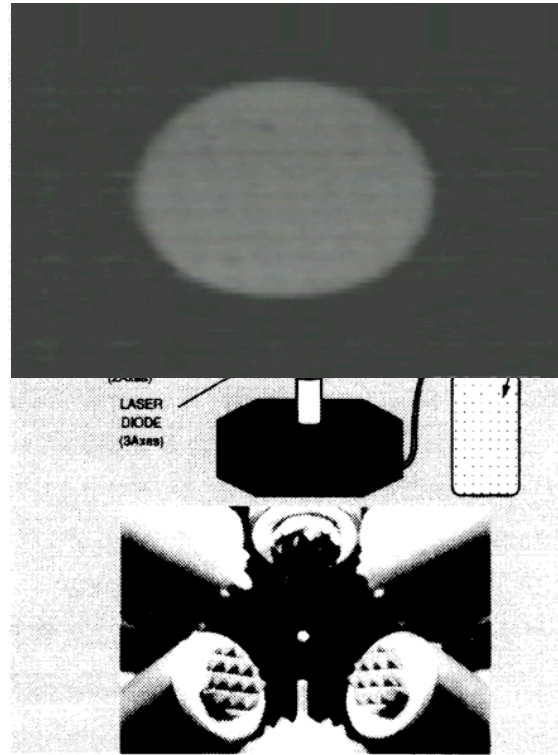
# 1. 背景

## 宇宙環境を模擬した実験



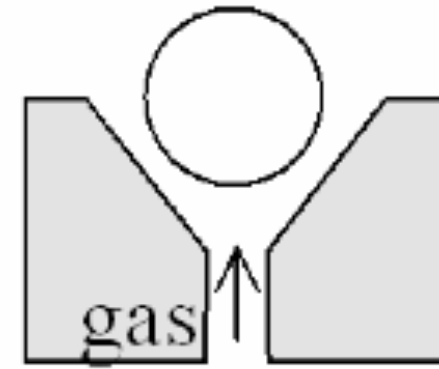
液滴「落下」法

(Nelson et al. 1972, Fig. from Sears 2004)



音波「浮遊」法

(Tsukamoto et al. 1999, 2001)



ガスジェット「浮遊」法

(Nagashima et al. 2006, 2008)

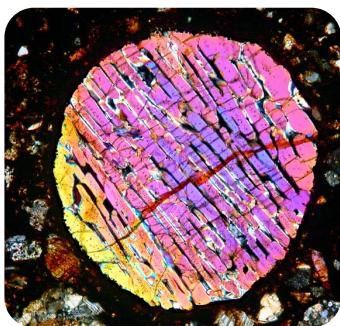
コンドリュール実験における大きなポテンシャル

課題：温度コントロール, 組成 (Pack et al. 2010, GT 11:4)

# 1. 背景

## 研究の目的

コンドリュール  
凝固組織



形態・組成累帯

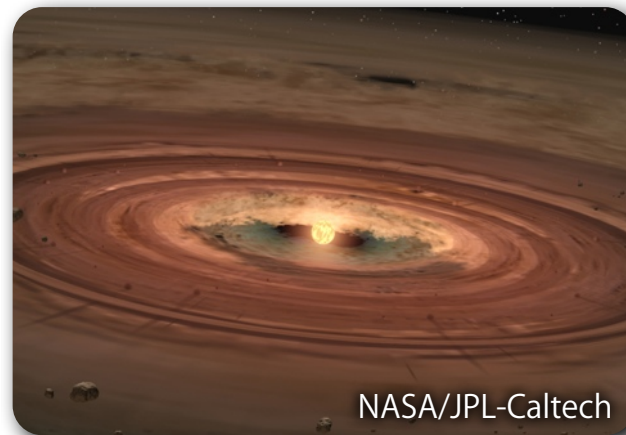
コンドリュールメルト  
結晶化条件

再現実験

宇宙環境との相違？  
液滴浮遊法の可能性

凝固の理論  
(本研究)

初期太陽系  
ガス円盤の物理／化学環境



NASA/JPL-Caltech

衝撃波加熱モデルに不備？  
別のモデルが必要？

理論的アプローチによる  
コンドリュールメルト凝固過程の解明

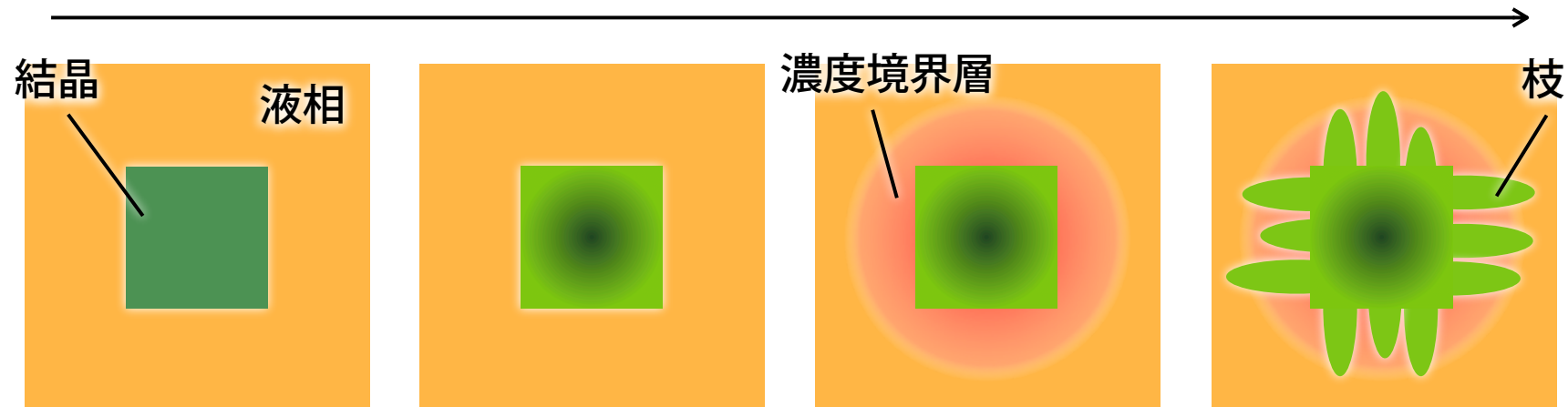


宇宙環境における形成条件の理解

## 2. 凝固の物理

# 元素分配と結晶成長

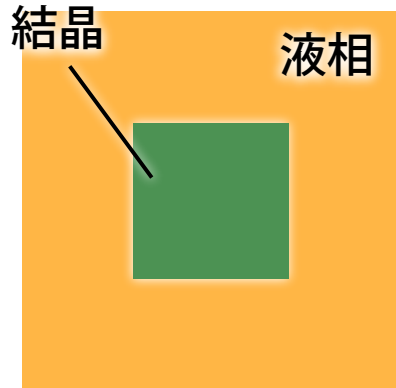
小 ← 結晶成長速度 → 大



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”

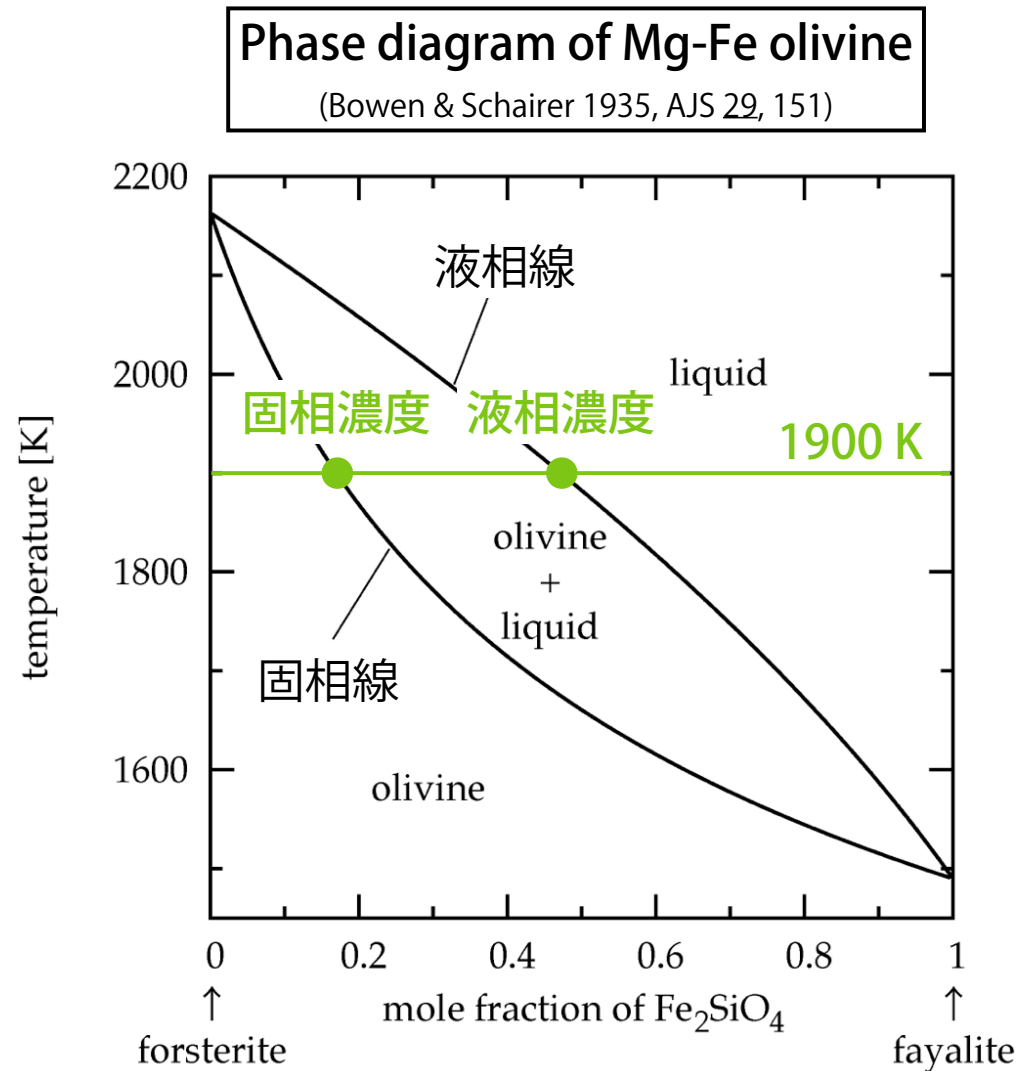
## 2. 凝固の物理

# 平衡凝固



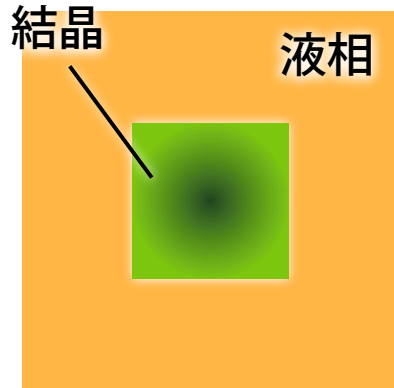
- 固相組成  $\neq$  液相組成
- 各相の濃度は空間一様（組成累帯考慮せず）

各相の濃度（平衡濃度）は  
相図から求められる



## 2. 凝固の物理

# 正規凝固 (Rayleigh fractionation model)



- 固相内拡散無視 (組成累帯を考慮)
- 液相濃度は空間一様
- 組成累帯は凝固速度に依らない

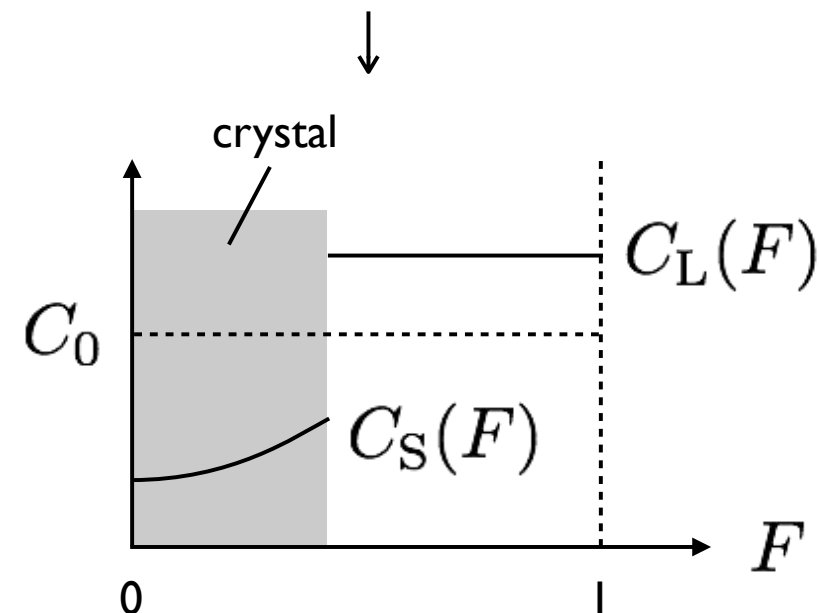
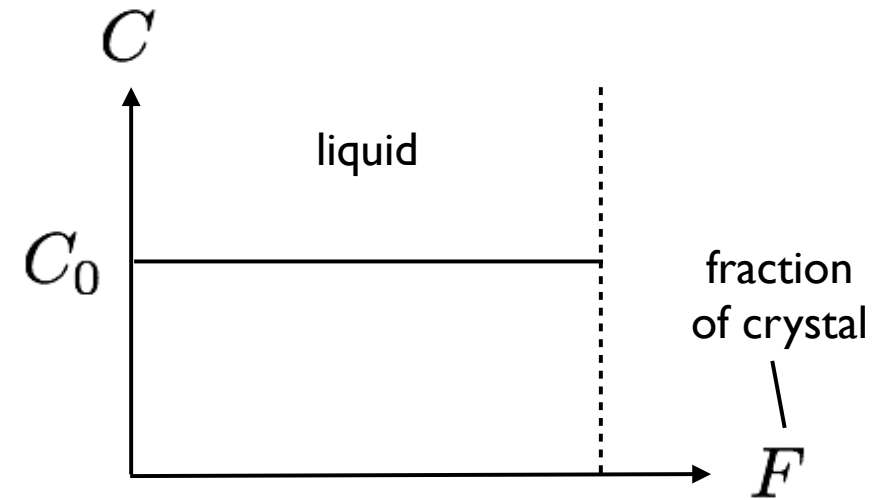
Rayleigh モデル

Concentration in crystal:

$$\frac{C_S(F)}{C_0} = k_0(1 - F)^{k_0 - 1}$$

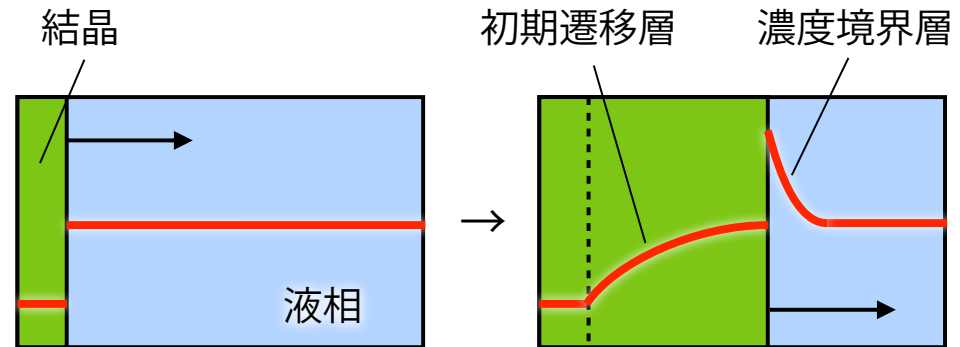
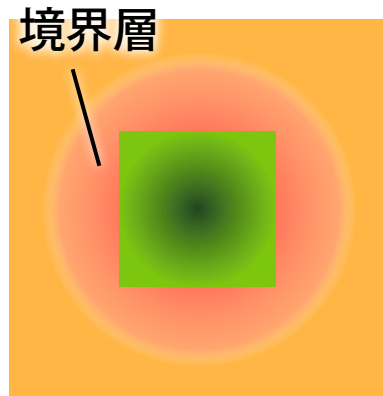
平衡分配係数  $k_0 = C_S / C_L$  @ interface

(仮定:  $k_0$  は一定)



## 2. 凝固の物理

# 濃度境界層モデル (Smith の解析解)



固相濃度 → バルク液相濃度に漸近  
初期遷移層の厚さは凝固速度に依存

- 固相内拡散無視 (組成累帯を考慮)
- 液相側に分配された元素が界面前方に濃集
- 組成累帯は凝固速度に依存する
- 平面の移動境界 (ステファン) 問題

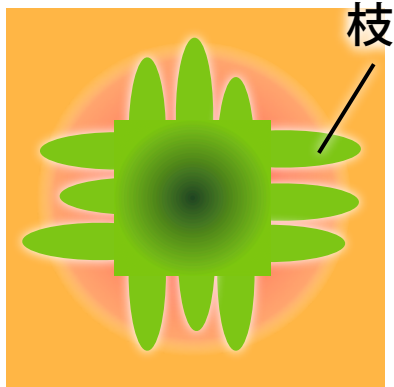
- 移動境界問題の解析解 (凝固速度・分配係数一定) (Smith et al. 1955, CJP 33, 723)
- マグマ内鉱物成長における濃度境界層の重要性 (Albarede & Bottinga 1972, GCA 36, 141)
- 鉱物内流体包有物の化学組成への影響 (Baker 2008, CMP 156, 377)
- 同位体分別 (Watson & Muller 2009, CG 26Z, 111)

参考: Smith の解析解 (固相側の濃度分布)

$$c_S(x) = \frac{1}{2} c_{L0} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{(V/D_L)x}}{2} \right) + (2k_0 - 1) e^{-k_0(1-k_0)(V/D_L)x} \operatorname{erfc} \left[ \frac{(2k_0 - 1)\sqrt{(V/D_L)x}}{2} \right] \right\}$$



## 2. 凝固の物理 界面不安定



- 分配元素の非一様勾配によって生じる界面形状揺らぎの指数関数的増大

過冷却水中で成長した氷結晶  
(Furukawa et al. 2010, SUR 26, 1)

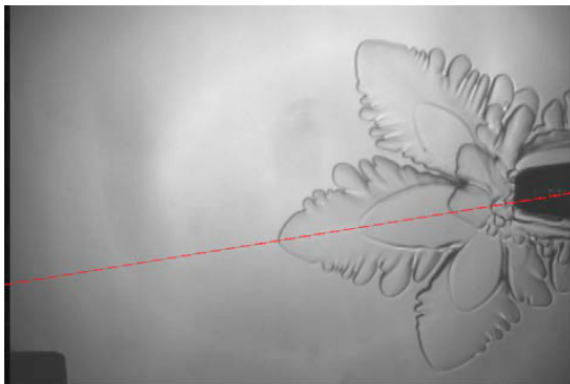
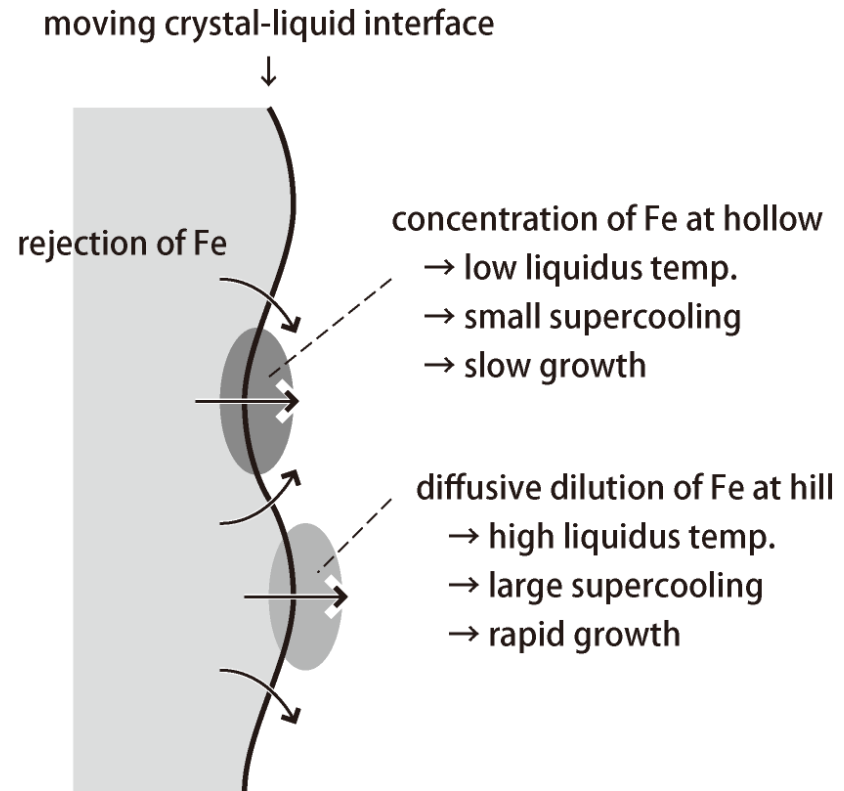


Fig. 1 「きぼう」で得られた氷結晶のスナップショット。画面サイズは、6.4mm×4.8mm。

不安定の駆動力：  
結晶化潜熱放出による  
温度上昇

### 界面形態不安定 (Mullins-Sekerka不安定)

(Mullins & Sekerka 1964, JAP 35, 444)



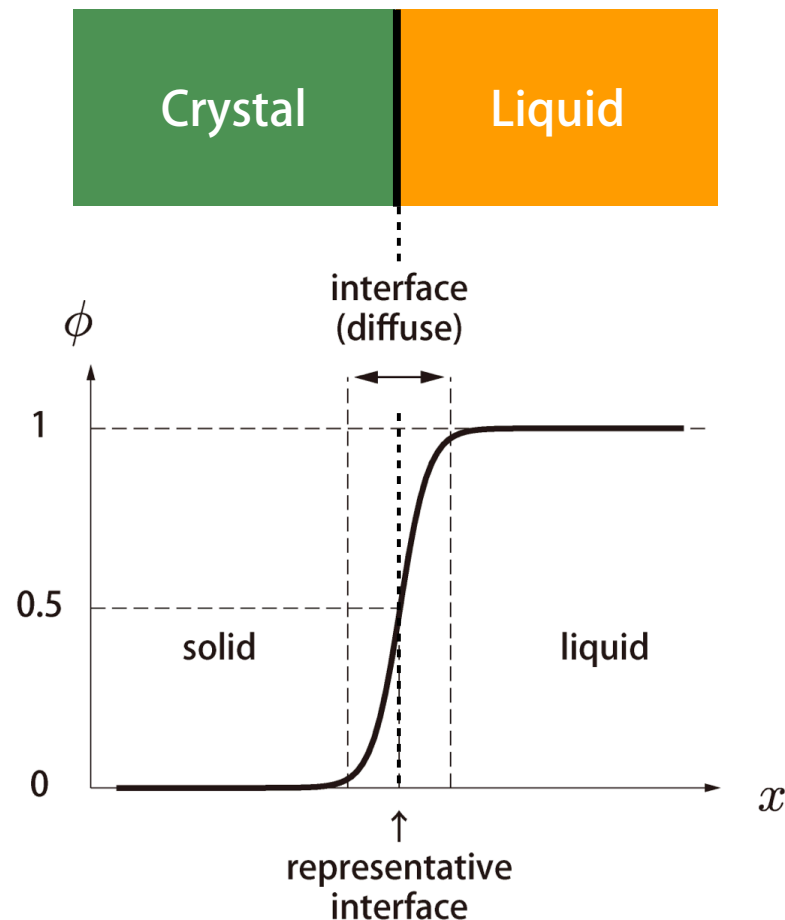
境界の変形を伴う移動境界問題



### 3. 数理モデル

## 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。



- Order parameter  $\phi$  to track free boundary
- Solid-liquid interface with finite width
- Thermodynamically consistent model for pure material (Wang et al. 1993, PD 69, 189) and binary alloy (Warren & Boettinger 1995, AMM 43, 689; Bi & Sekerka 1998, PA 261, 95)

#### ○ 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

### 3. 数理モデル

# エントロピー母関数に基づく発展方程式の導出

## 基本法則

エントロピー母関数 (Penrose & Fife 1990)

$$S = \int_V \left[ s(e, c, \phi) - \frac{\epsilon_\phi^2}{2} |\nabla\phi|^2 \right] dV$$

エネルギー・物質保存

$$\dot{e} + \nabla \cdot j_e = 0, \quad \dot{c} + \nabla \cdot j_c = 0$$

↓ (時間微分, ガウスの法則, ベクトル公式)

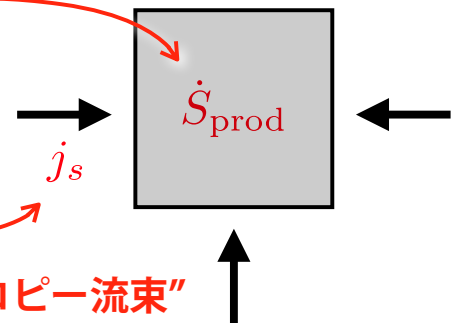
$$\frac{dS}{dt} = \int_V \left[ j_e \cdot \nabla \left( \frac{\partial s}{\partial e} \right) + j_c \cdot \nabla \left( \frac{\partial s}{\partial c} \right) + \left( \frac{\partial s}{\partial \phi} + \epsilon_\phi^2 \nabla^2 \phi \right) \dot{\phi} \right] dV$$

$$- \int_A \left[ \epsilon_\phi^2 \dot{\phi} \nabla \phi + \left( \frac{\partial s}{\partial e} \right) j_e + \left( \frac{\partial s}{\partial X} \right) j_X \right] \cdot \hat{n} dA$$

↓ (局所エントロピー生成 > 0 を満たす "十分" 条件)

"局所エントロピー生成率"

微小体積要素



"エントロピー流束"

~~$j_e = M_e \nabla(\partial s / \partial e) = M_e \nabla(1/T)$  → 熱伝導 + 潜熱解放 "等温系"~~

$j_c = M_c \nabla(\partial s / \partial c) = -\frac{M_c}{T} (f_{\phi c} \nabla \phi + f_{cc} \nabla c)$  → 物質拡散 + 元素分配

$\dot{\phi} = M_\phi \left( \frac{\partial s}{\partial \phi} + \epsilon_\phi^2 \nabla^2 \phi \right) = M_\phi \left( -\frac{f_\phi}{T} + \epsilon_\phi^2 \nabla^2 \phi \right)$  → フェーズ場の時間発展

$f$  : 自由エネルギー

$f_\phi = \partial f / \partial \phi$

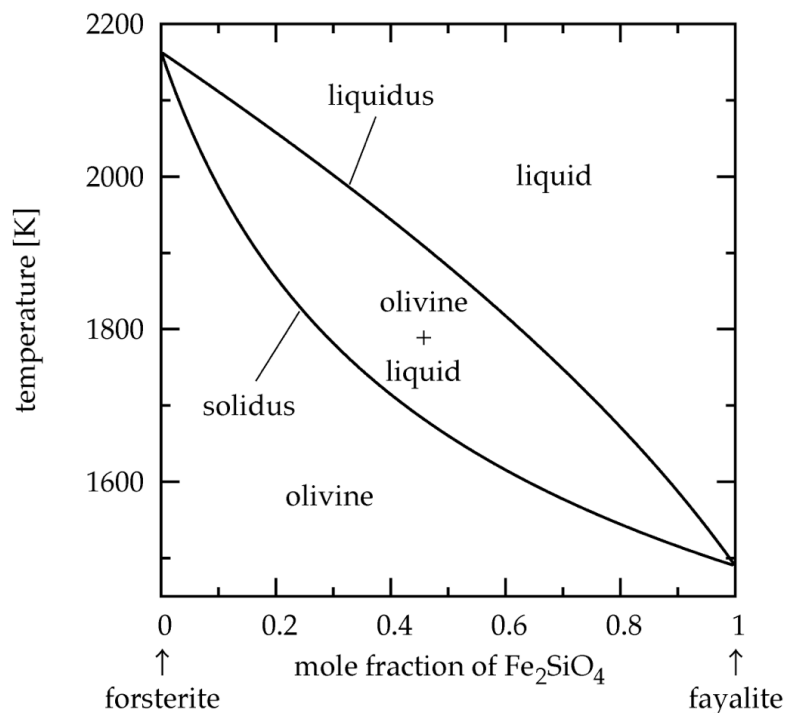
$f_{\phi c} = \partial^2 f / \partial \phi \partial c$

$f_{cc} = \partial^2 f / \partial c^2$

### 3. 数理モデル

## 溶体モデルと自由エネルギー

Phase diagram of Mg-Fe olivine  
(Bowen & Schairer 1935, AJS 29, 151)



オリビン (Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 相平衡実験



理想溶体モデルで説明可

正則溶体の自由エネルギー (A B二成分系) :

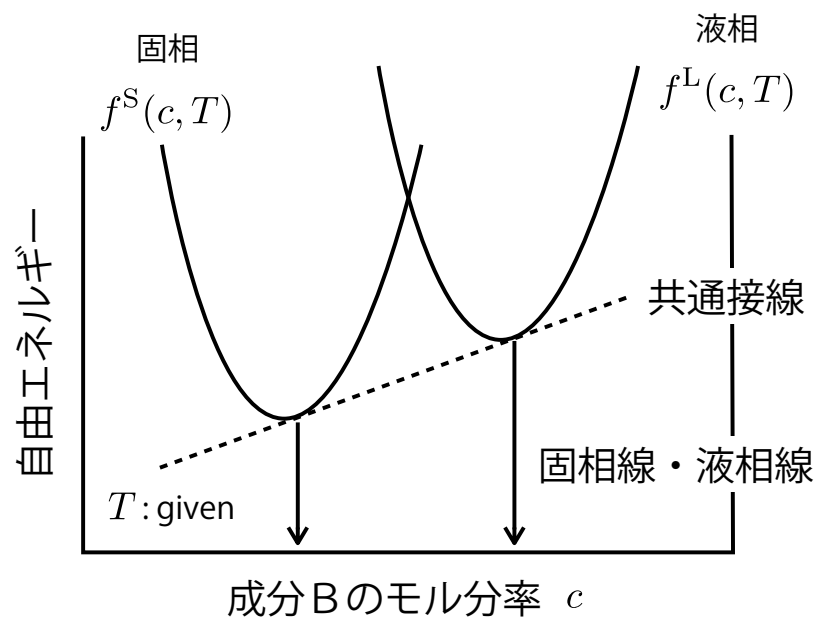
$$f^S(c, T) = f_A^S(T)(1 - c) + f_B^S(T)c + \Omega^S(1 - c)c \quad \text{理想溶体}$$

$$+ RT [(1 - c) \ln(1 - c) + c \ln c]$$

※固相の場合

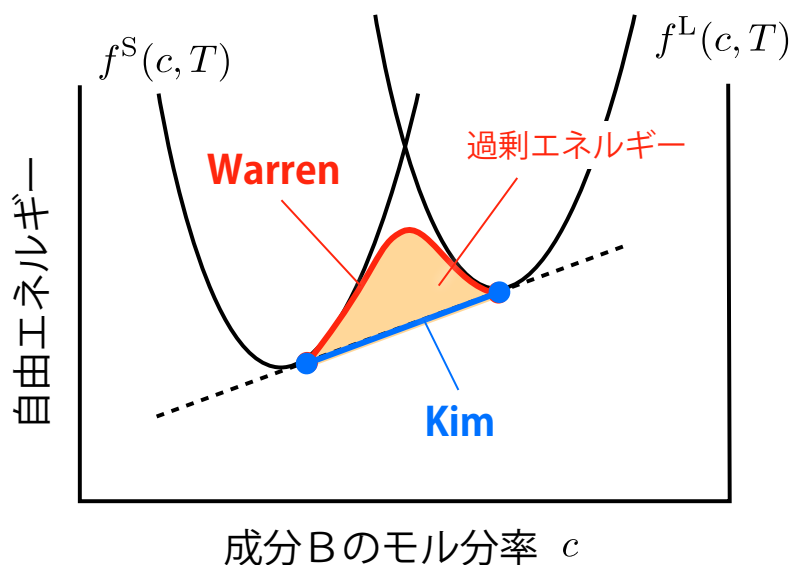
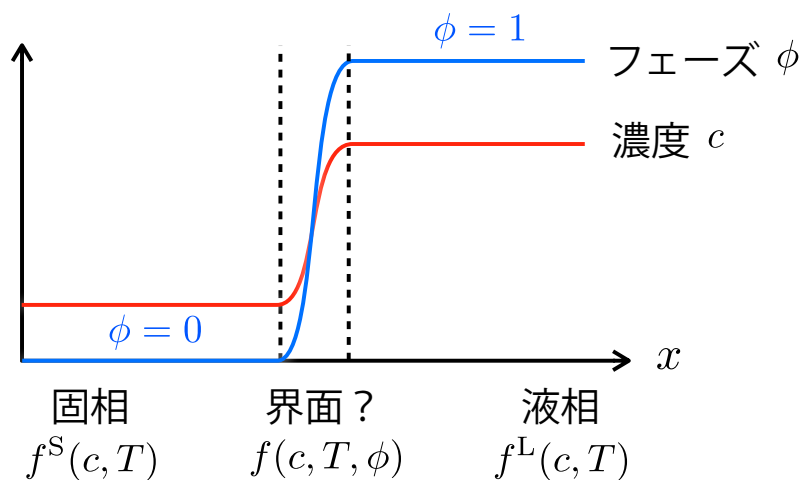
混合エントロピー

混合エンタルピー



### 3. 数理モデル

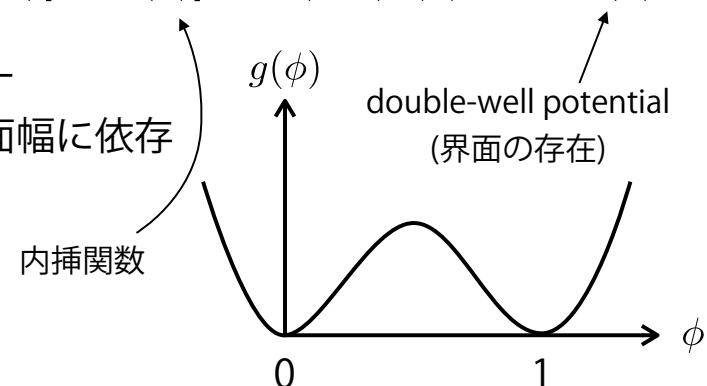
## 界面の自由エネルギーモデル



**Warren モデル** (Warren & Boettinger 1995, AMM 43, 689) :

$$f(c, T, \phi) = f^S(c, T)[1 - p(\phi)] + f^L(c, T)p(\phi) + TWg(\phi)$$

- 過剰エネルギー
- 計算結果が界面幅に依存



**Kim モデル** (Kim et al. 1999, PRE 60, 7187) :

$$f(c, T, \phi) = f^S(c_S^*, T)[1 - p(\phi)] + f^L(c_L^*, T)p(\phi) + TWg(\phi)$$

界面濃度  $c_S^*$ ,  $c_L^*$  は以下を満たす量として定義

$$\left. \frac{\partial f^S}{\partial c} \right|_{c=c_S^*} = \left. \frac{\partial f^L}{\partial c} \right|_{c=c_L^*}$$

等化学ポテンシャル条件

$$c = c_S^*[1 - p(\phi)] + c_L^*p(\phi)$$

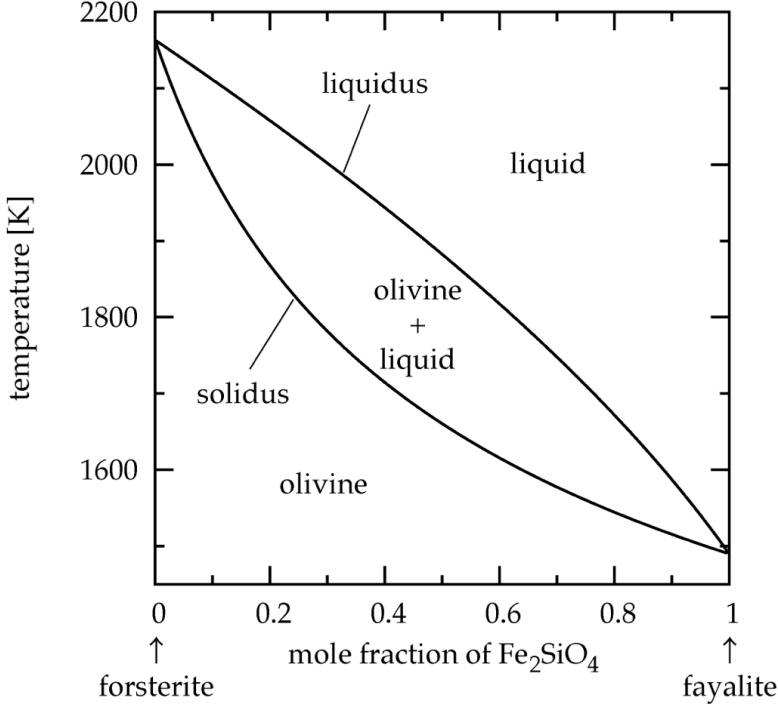
混合則

- 過剰エネルギーが現れない
- 計算結果が界面幅に依存しない\*

### 3. 数理モデル

# 数理モデルのまとめ

平衡状態



相図



正則溶体近似に基づいた  
固溶体の自由エネルギーモデル

凝固のダイナミクス

フェーズフィールド方程式

$$\dot{c} = \nabla \cdot \left[ \frac{M_c}{T} (f_{\phi c} \nabla \phi + f_{cc} \nabla c) \right]$$

$$\dot{\phi} = M_{\phi} \left( -\frac{f_{\phi}}{T} + \epsilon_{\phi}^2 \nabla^2 \phi \right)$$

固溶体の自由エネルギー

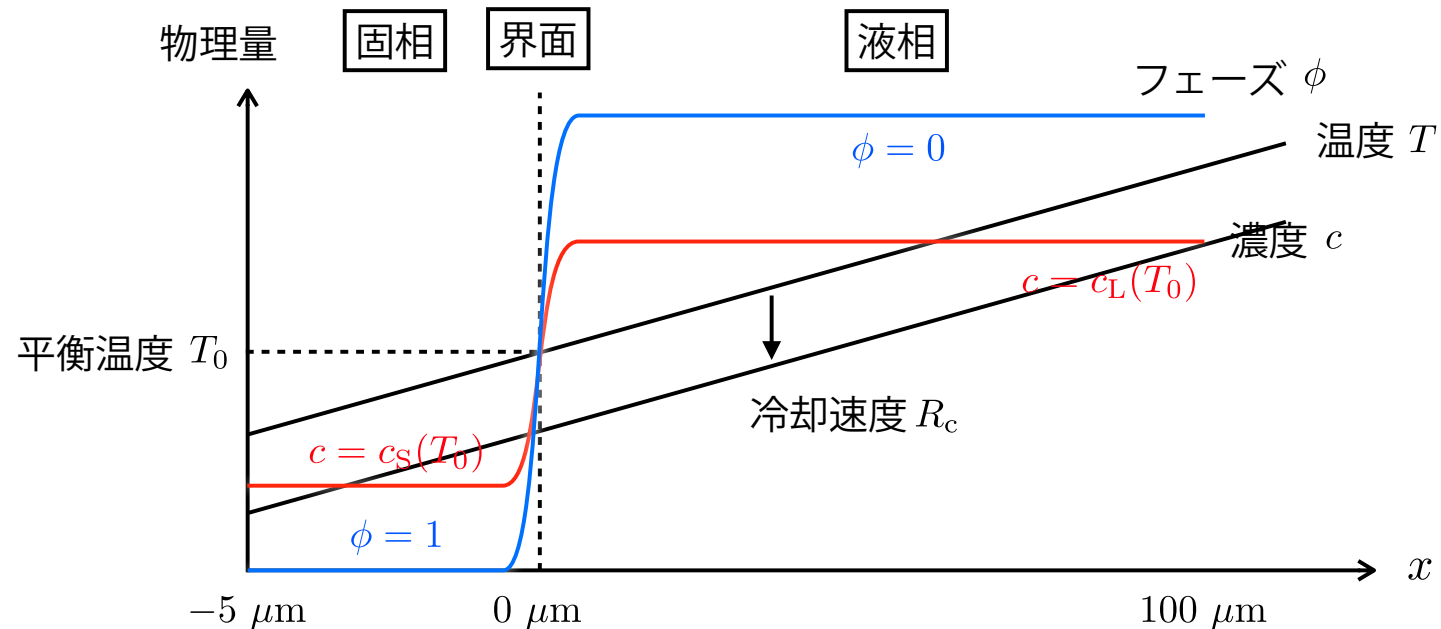


平衡からずれたあとのダイナミクスを  
現象論的に追うことが可能

## 4. 数値計算（空間 1 次元）と考察

# 数値計算手法

計算モデル：



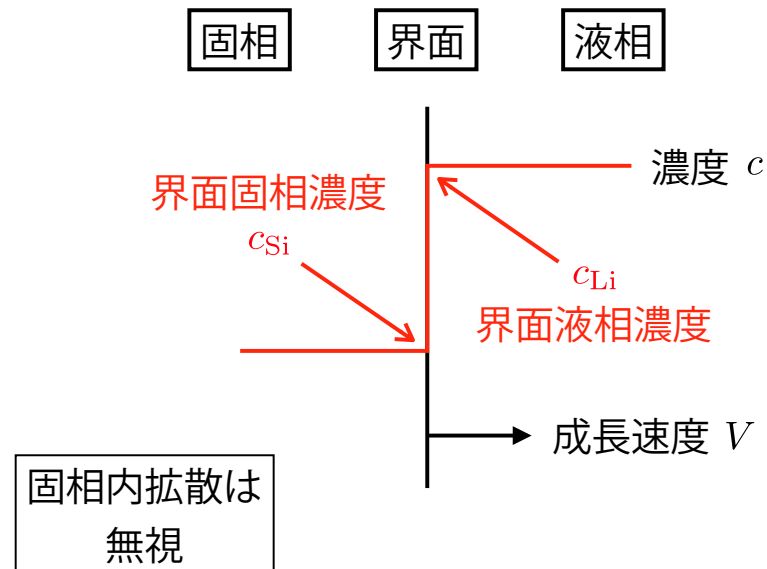
設定：

- メッシュ数 ~ 10,500 (メッシュ間隔 10 nm)
- 時間 1 次精度後退差分 (陰解法) , 空間 2 次精度中央差分
- 不完全LU分解付き自乗共役勾配法
- タイムステップ  $10^{-6}$  秒



## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# Sharp Interface Model (SIM)



拡散方程式 in 液相（界面共動座標系）：

$$\frac{\partial c'_L}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x'} \left( D_L \frac{\partial c'_L}{\partial x'} \right) + V \frac{\partial c'_L}{\partial x'}$$

界面の位置：

$$x = \int_0^t V(t') dt'$$

未知数（3つ）：

$$V, c_{Si}, c_{Li}$$

### 2通りの境界条件

界面局所平衡 (LEI)

$$c_{Si} = c_S^e(T), c_{Li} = c_L^e(T)$$

Mass conservation



$V$  が求まる

分配係数一定 (CPC)

$$c_{Si} = k_0 c_{Li}$$

Mass conservation



$V$  は given

## 4. 数値計算（空間 1 次元）と考察

# テスト計算

	PFM (フェーズフィールド法)	SIM-CPC (SIM + 分配係数一定)	SIM-LEI (SIM + 界面局所平衡分配)
平衡凝固	<b>実施</b> <b>(相図と比較)</b>	対応せず (固相拡散無視)	対応せず (固相拡散無視)
正規凝固	解析解なし (分配係数一定でない)	<b>実施</b> <b>(Rayleighモデルと比較)</b>	解析解なし (分配係数一定でない)
一定速度凝固	解析解なし (成長速度一定でない)	<b>実施</b> <b>(Smith解と比較)</b>	解析解なし (成長速度一定でない)
一定冷却速度凝固			

PFMとSIMそれぞれで解析解と比較し，妥当性をチェック



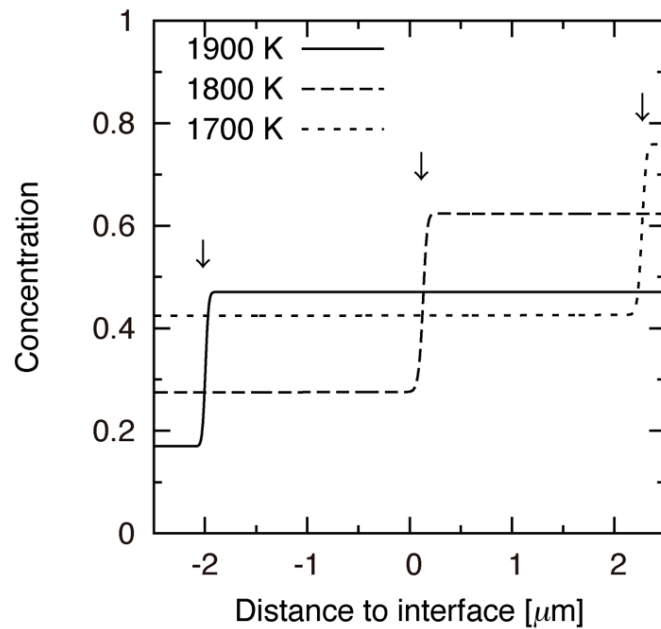
より現実的な条件（冷却速度一定）における累帯構造に適用

## 4. 数値計算 (空間 1 次元) と考察

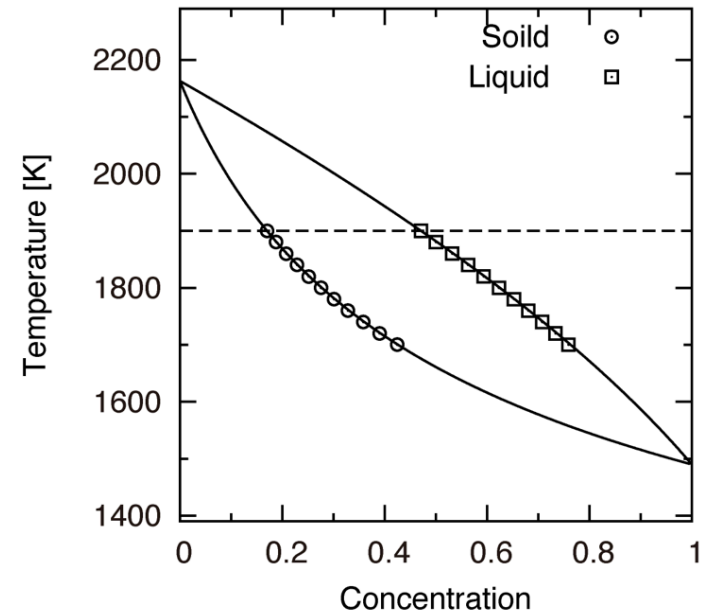
# 平衡凝固 (PFM)

- フェーズフィールド法
- 狭い計算領域 ( $-5 < x < 5 \mu\text{m}$ )
- 固相拡散係数「大」 → 平衡状態に至る時間を短縮する
- 冷却速度「小」 → 各相において濃度一様

(a) 濃度分布



(b) 組成変化

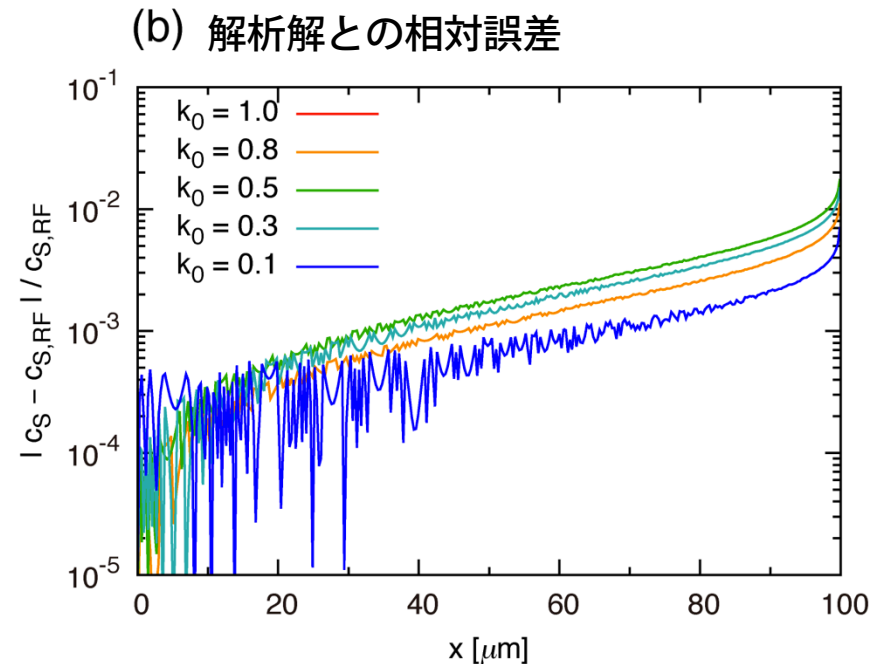
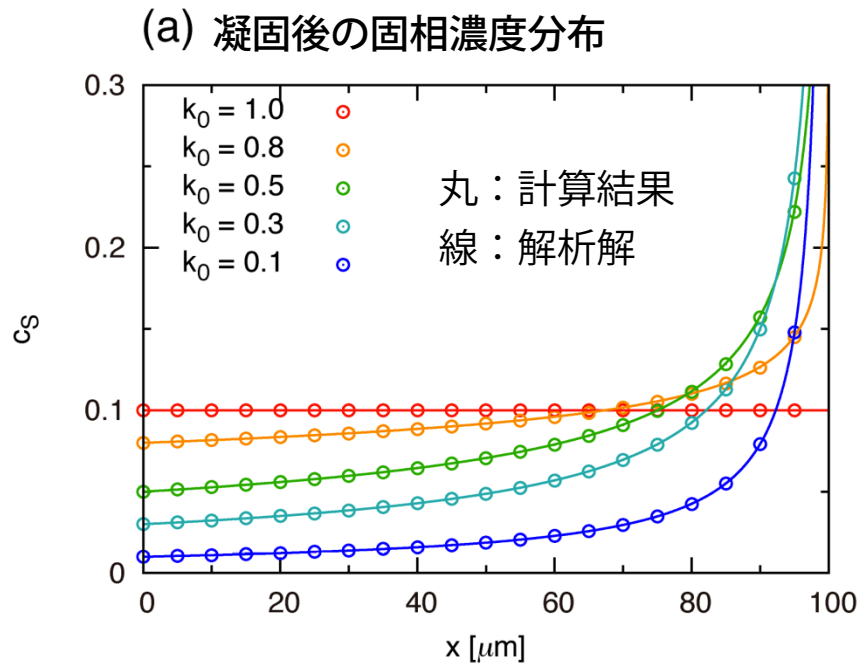


相図と良く一致 → 平衡分配を再現

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# 正規凝固 (SIM-CPC)

- SIM + 分配係数一定モデル
- 固相拡散無視 → 固相内に濃度勾配が生じる
- 液相内濃度は一様を仮定

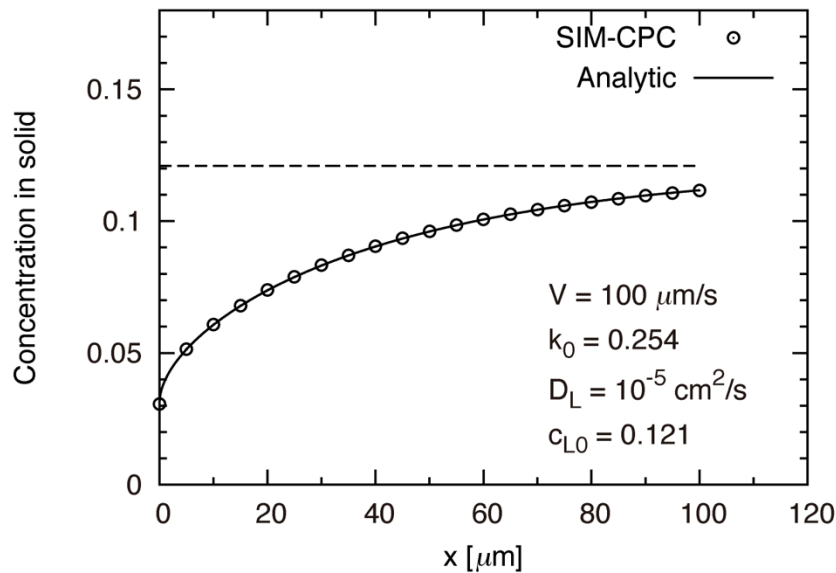


解析解 (Rayleighモデル) との誤差 < 1%

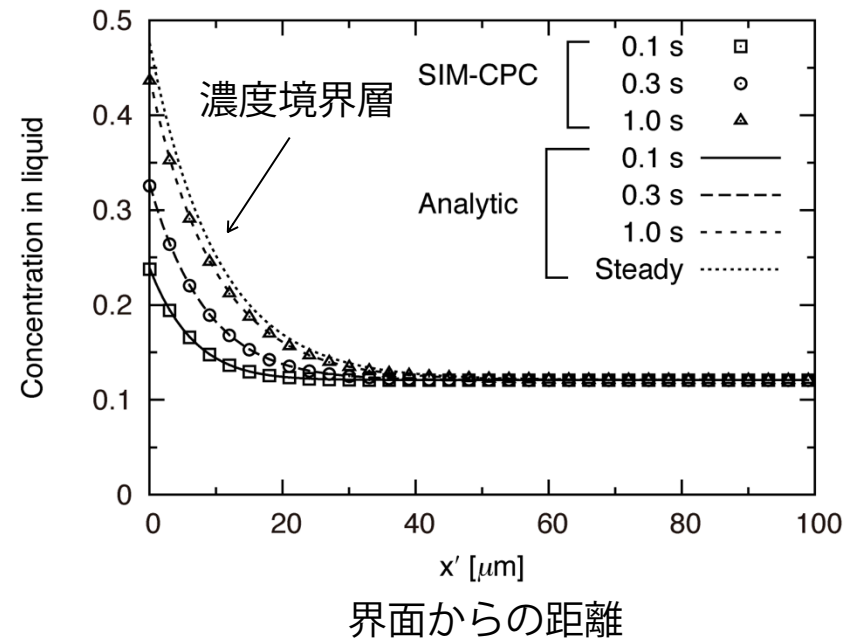
## 4. 数値計算（空間1次元）と考察 濃度境界層 (SIM-CPC)

- SIM + 分配係数一定モデル（成長速度一定）
- 固相拡散無視 → 固相内に濃度勾配が生じる

(a) 凝固後の固相濃度分布



(b) 液相濃度分布の時間変化



解析解 (Smith 解) とよく一致 (固相も液相も)

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# テスト計算結果

	PFM (フェーズフィールド法)	SIM-CPC (SIM + 分配係数一定)	SIM-LEI (SIM + 界面局所平衡分配)
平衡凝固	○ <b>(相図と一致)</b>	対応せず (固相拡散無視)	対応せず (固相拡散無視)
正規凝固	解析解なし (分配係数一定でない)	○ <b>(解析解と一致)</b>	解析解なし (分配係数一定でない)
一定速度凝固	解析解なし (成長速度一定でない)	○ <b>(解析解と一致)</b>	解析解なし (成長速度一定でない)
一定冷却速度凝固	?	比較	?

PFMとSIMは、それぞれが対応する問題において、分配凝固を正しく計算できている



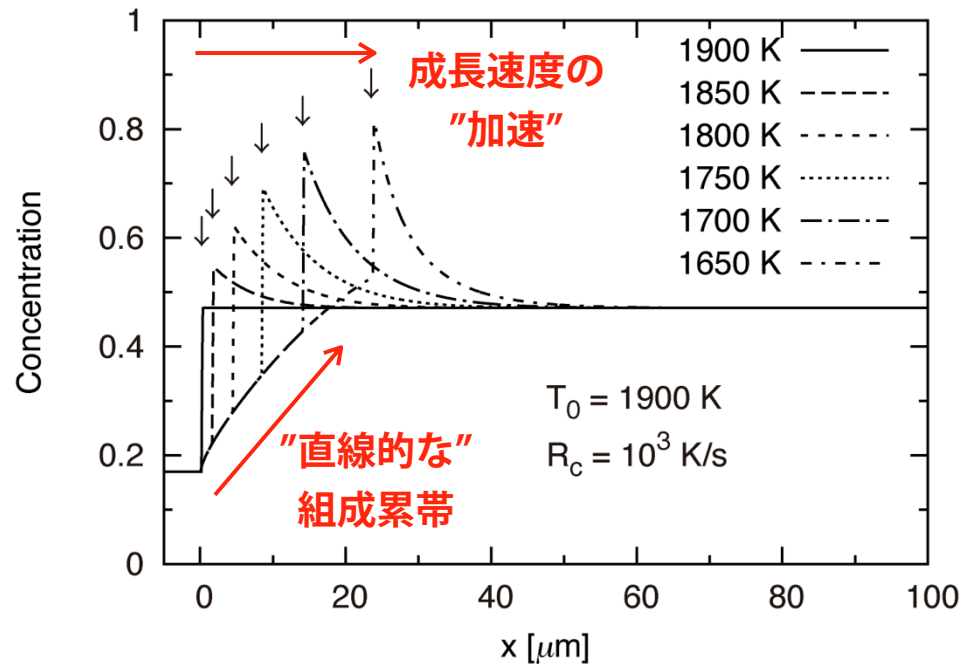
より現実的な条件（冷却速度一定）における累帯構造を調べる

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# 一定冷却速度条件での凝固

- フェーズフィールド法
- 固相拡散無視 → 固相内に濃度勾配が生じる
- 冷却速度一定

図：固相・液相濃度分布の時間変化（一定時間間隔）

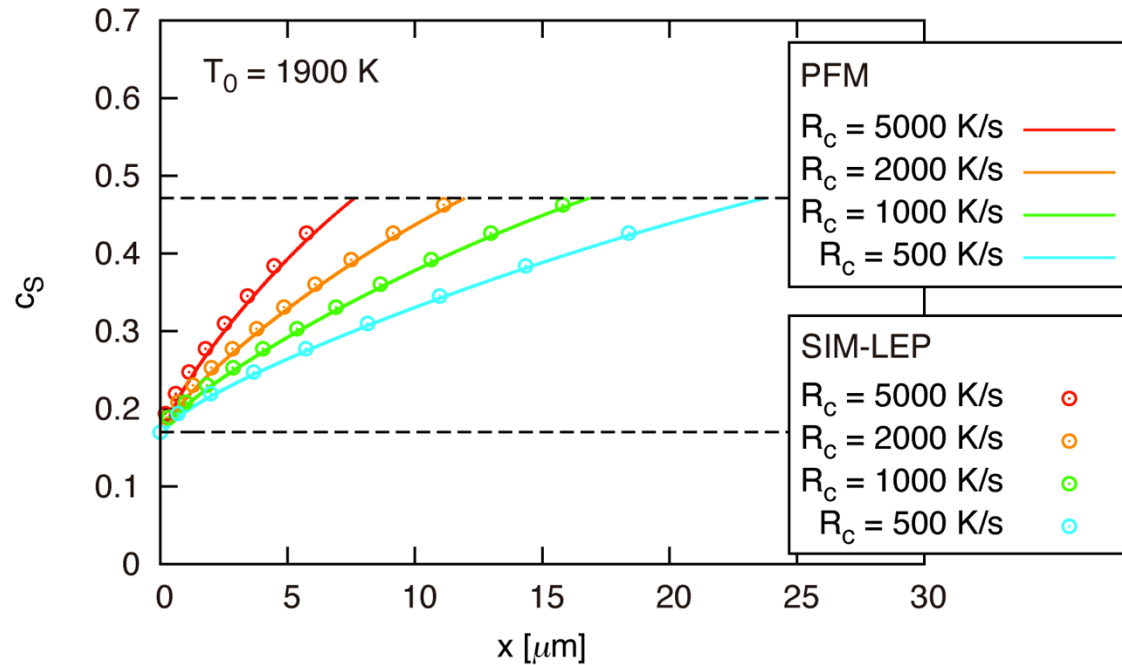


- 成長速度の "加速"
  - 一定成長速度モデルとの相違
- "直線的な" 組成累帯
  - バルク液相濃度に漸近しない
  - (バルク液相濃度を超え得る?)

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# 組成累帯：PFM vs. SIM-LEI

図：凝固後の固相濃度分布（冷却速度依存性）

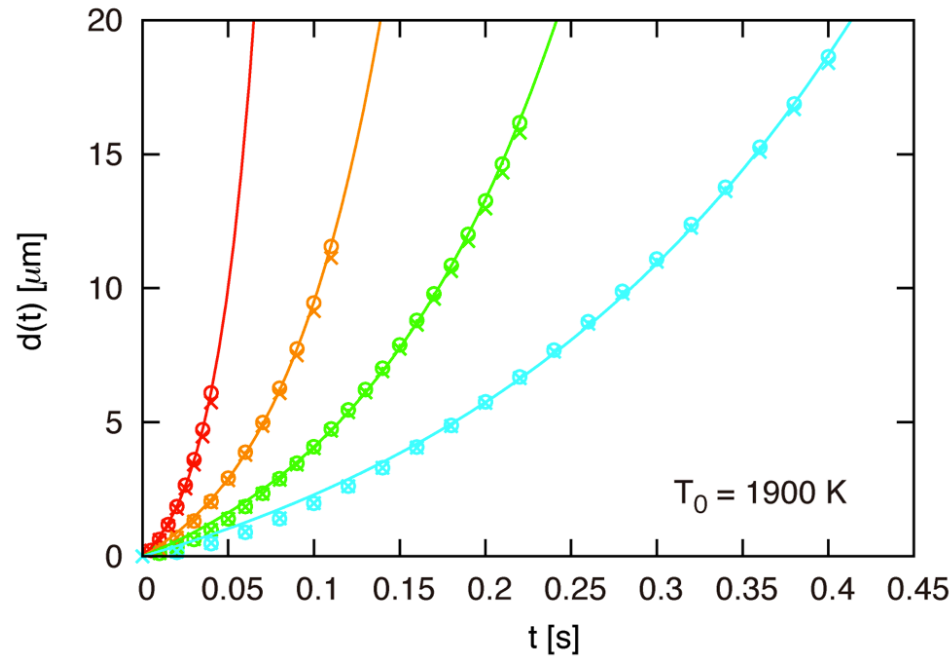
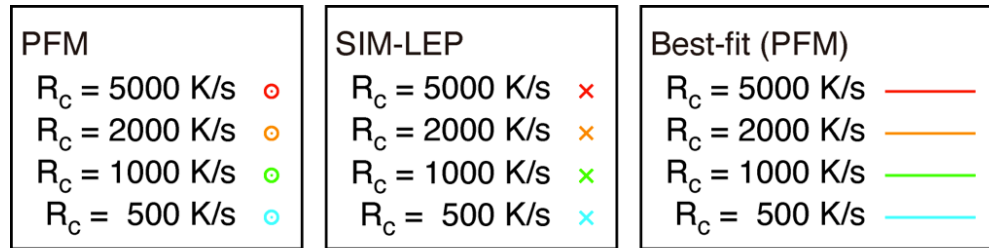


- PFMとSIMの結果が良く一致
  - 異なる手法の比較より妥当性を確認
- 冷却遅い  $\rightarrow$  スロープ緩やか
  - 成長条件の推定に利用可？



# 4. 数値計算（空間1次元）と考察 加速する凝固速度

図：界面位置の時間変化（冷却速度依存性）



冷却が遅いほど  
凝固速度は小さく、ゆっくりと加速する

凝固速度 → 指数関数的増加を仮定：

$$V(t) = V_0 e^{t/t_0}$$

界面位置の時間変化：

$$d(t) = V_0 t_0 (e^{t/t_0} - 1)$$

Best-fit 結果：

初期凝固速度    時定数

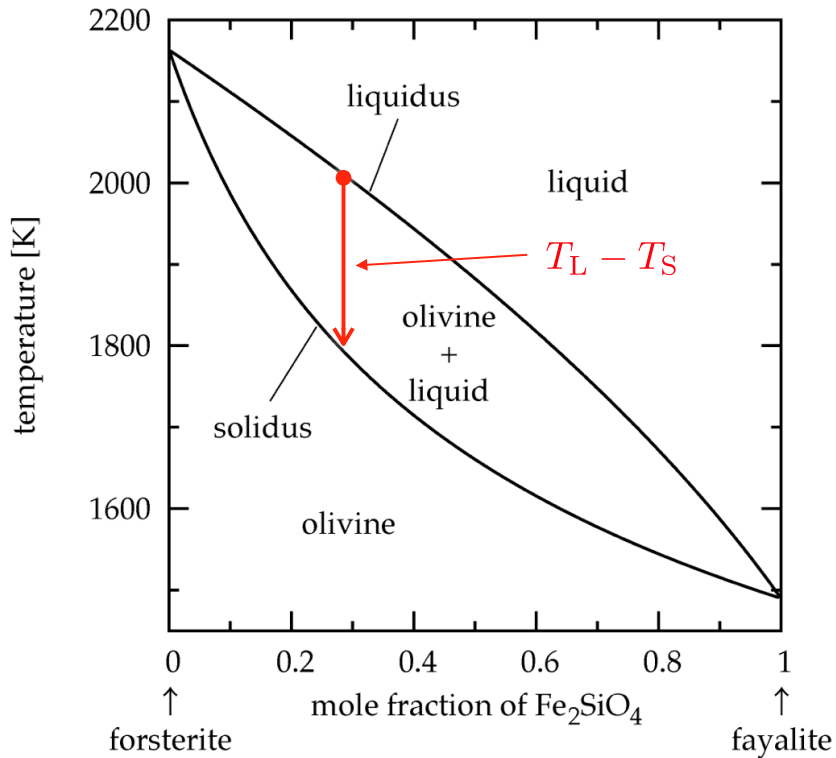


$R_c \text{ [K/s]}$	$V_0 \text{ [}\mu\text{m/s]}$	$t_0 \text{ [s]}$
500	19	0.25
1000	26	0.12
2000	37	0.061
5000	59	0.024

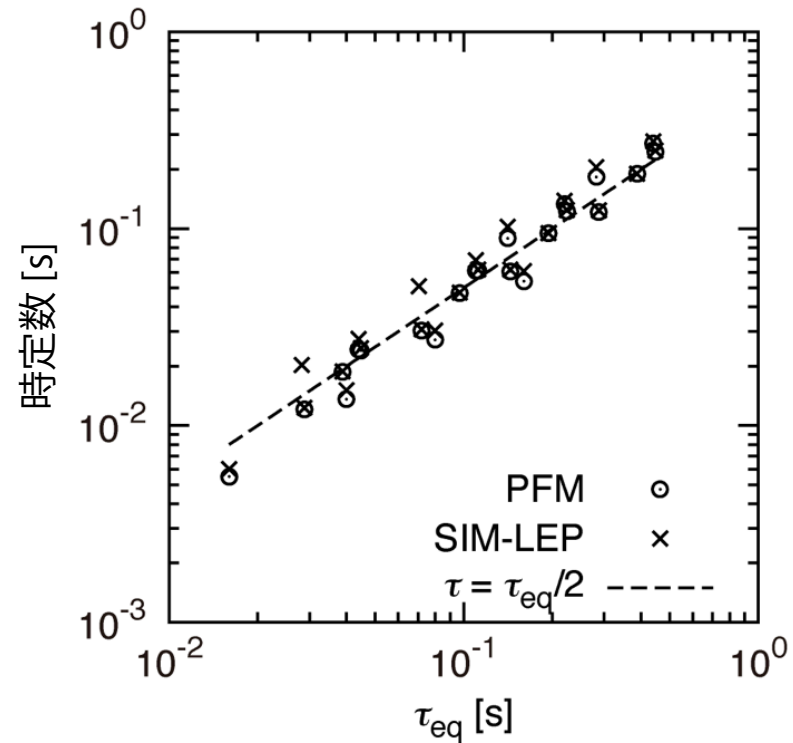
# 4. 数値計算（空間1次元）と考察

## 時定数 $t_0$ は何が決める？

図：オリビン相図（理想溶体モデル）



(a) 計算結果と  $t_{eq}$  の比較



仮説

$$t_0 \propto t_{eq} \equiv \frac{T_L - T_S}{R_c}$$

冷却速度，初期組成を変えた計算に対して

$$t_0 \simeq \frac{T_L - T_S}{2R_c}$$

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

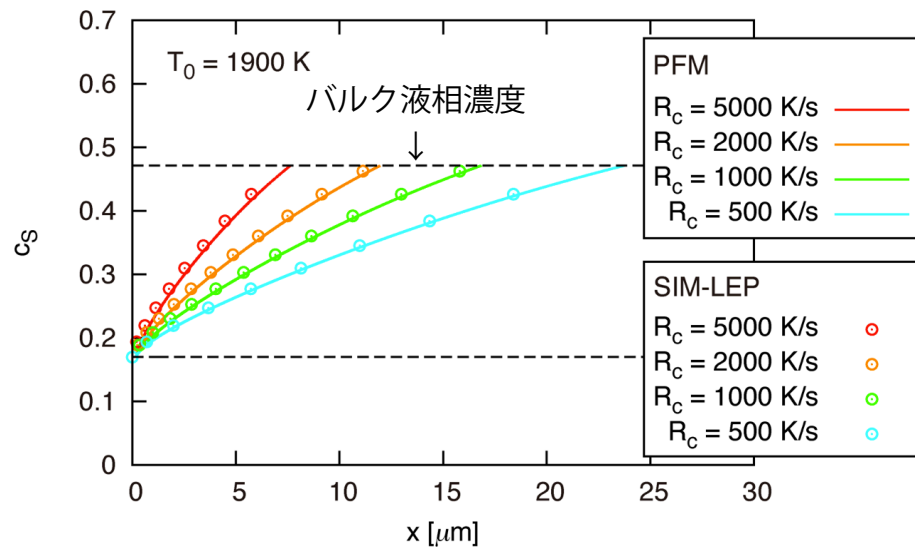
# “直線的”組成累帯

指数関数的凝固速度増加を仮定した場合の組成累帯の近似解 (this study) :

$$c_S(x) \approx k_0 c_{L0} \left[ 1 + (1 - k_0) \sqrt{\frac{2\pi R_c}{D_L(T_L - T_S)}} x \right]$$

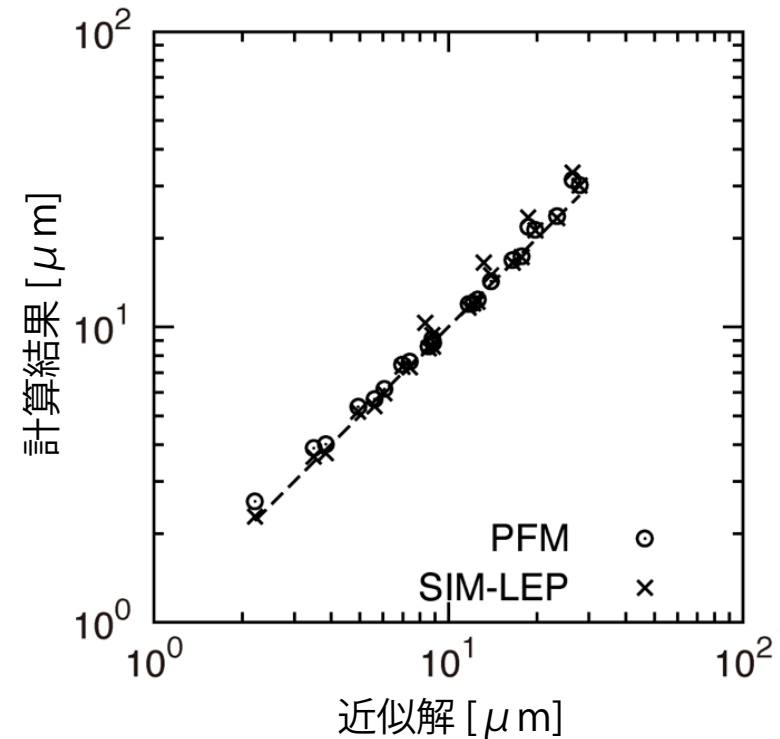
(※分配係数一定を仮定)

図：凝固後の固相濃度分布（冷却速度依存性）



固相濃度がバルク液相濃度まで増加するまでの界面移動距離  $d_f$  を比較

(b) 界面移動距離  $d_f$  の比較



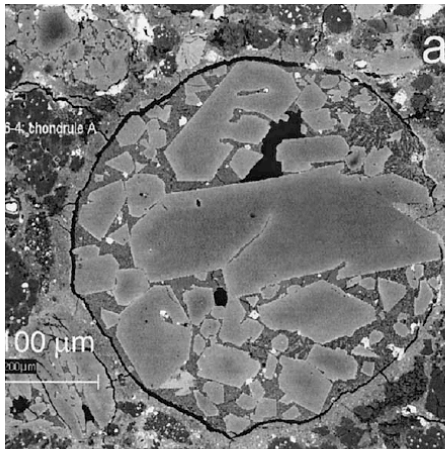
冷却速度, 初期組成を変えた計算結果をよく再現

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察

# オリビン overgrowth との比較

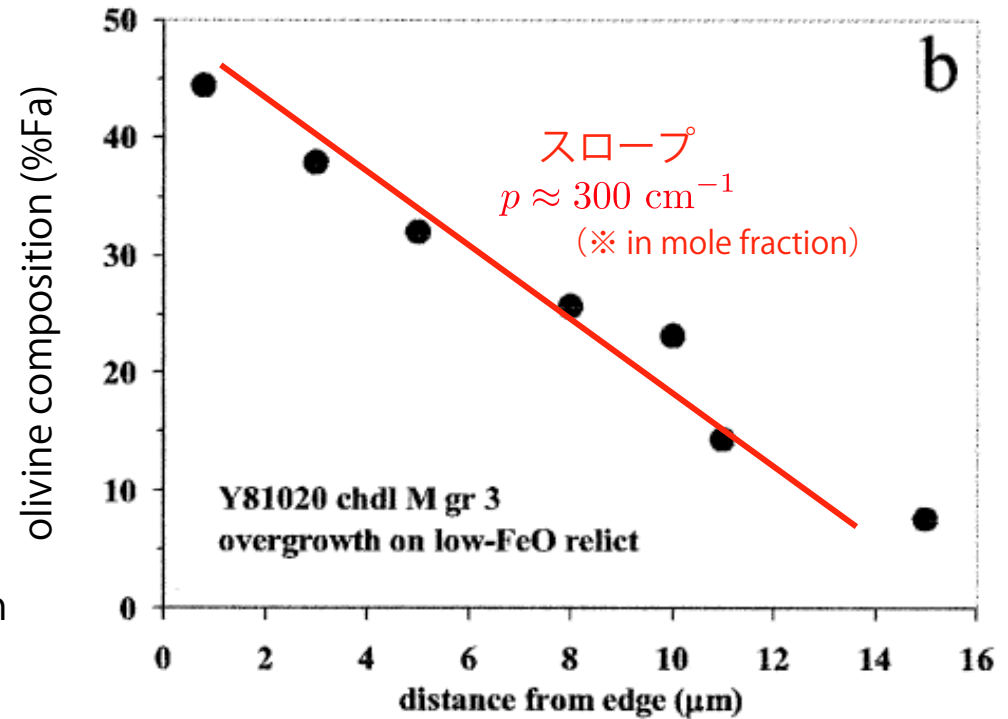
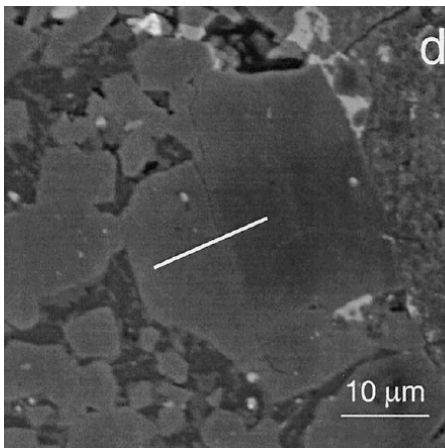
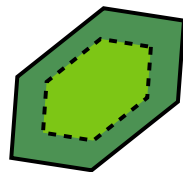
オリビン組成累帯構造

Type II chondrules in Y-81020 CO3.0 chondrite  
(Wasson & Rubin 2003, GCA 6Z, 2239)



olivine

↓ overgrowth



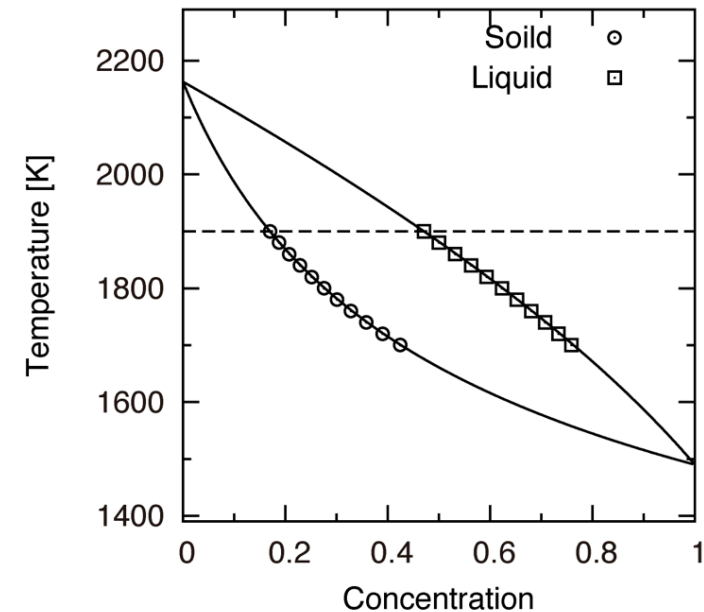
$$R_c \approx \frac{D_L(T_L - T_S)}{2\pi} \left[ \frac{p}{c_L k_0 (1 - k_0)} \right]^2 \approx 10^4 \text{ K/s}$$

極めて大きな冷却速度 → Wasson の主張と整合的  
(電気炉ベースの再現実験で得られた冷却速度 0.01 - 1 K/s より数桁大きな冷却速度条件で形成したと主張)

## 4. 数値計算（空間1次元）と考察 まとめ

- Mg-Feオリビン組成メルトからの凝固過程（空間1次元）にフェーズフィールド法を適用。異なる数値モデルとして Sharp interface model (SIM) との比較を行ない、良い一致を得た。
- フェーズフィールド法が、組成累帯形成過程に対して適用可能であることを示した。
- 冷却速度一定条件下で凝固する際の組成累帯を調べた。凝固速度の指数関数的加速、直線的組成累帯などの特徴を発見した。
- 直線的組成累帯の傾きの近似解を導出。天然鉱物の組成累帯構造から、冷却速度を推測する新しい指標を示した。

(b) 組成変化



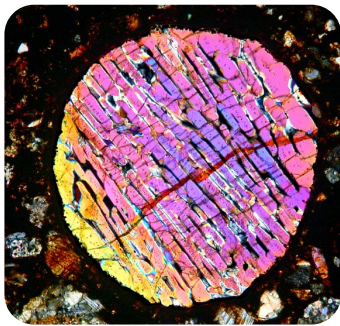
指数関数的凝固速度増加を仮定した場合の組成累帯の近似解 (this study) :

$$c_S(x) \approx k_0 c_{L0} \left[ 1 + (1 - k_0) \sqrt{\frac{2\pi R_c}{D_L(T_L - T_S)}} x \right]$$

(※分配係数一定を仮定)

# 結論

コンドリュール  
凝固組織



形態・組成累帯

コンドリュールメルト  
結晶化条件

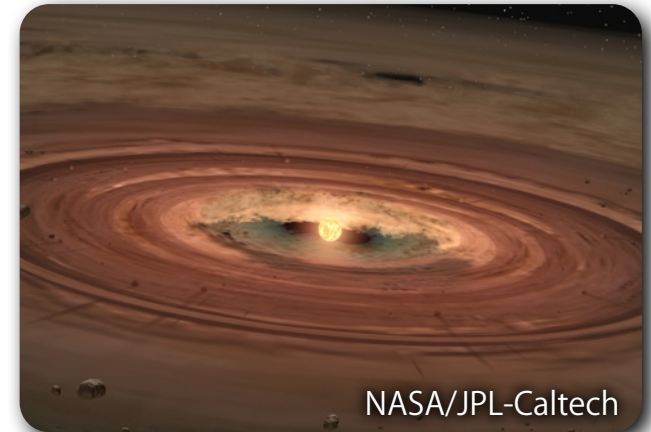
再現実験

宇宙環境との相違？  
液滴浮遊法の可能性

凝固の理論

(フェーズフィールド法)

初期太陽系  
ガス円盤の物理／化学環境



衝撃波加熱モデルに不備？  
別のモデルが必要？

地球上の鉱物形成に対する応用

(火山噴火に伴う急凝固, 逆・波動累帯構造の起源, etc.)