GFWS/銀河のダスト研究会

CPS, 兵庫, 2011年11月9-11日

造岩鉱物の成長条件を推測する 新しい理論モデルについて

三浦均,塚本勝男(東北大・理)











結晶成長(元素分配なし)



固液界面における原子配列の規則化 ↓ 界面の前進(結晶成長) 結晶成長(元素分配あり)



固液界面における原子配列の規則化 + 食塩の排出(分配) ↓ 界面の前進(結晶成長) + **食塩成分が液相に濃集**

多成分系では,結晶と液相の組成が異なるため 結晶成長とともに元素の分配が生じる



結晶成長(元素分配なし)



固液界面における原子配列の規則化 ↓ 界面の前進(結晶成長) 結晶成長(元素分配あり)



```
固液界面における原子配列の規則化
+
食塩の排出(分配)
↓
界面の前進(結晶成長)
+
食塩成分が液相に濃集
```

多成分系では,結晶と液相の組成が異なるため 結晶成長とともに元素の分配が生じる



結晶成長(元素分配なし)



固液界面における原子配列の規則化 ↓ 界面の前進(結晶成長) 結晶成長(元素分配あり)



固液界面における原子配列の規則化
+

食塩の排出(分配)
↓

界面の前進(結晶成長)
+

食塩成分が液相に濃集

多成分系では,結晶と液相の組成が異なるため 結晶成長とともに元素の分配が生じる





カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄

- 主要な造岩鉱物のひとつ
- ふたつの端成分
 - ✓ フォルステライト(Mg₂SiO₄)
 - ✓ ファヤライト(Fe₂SiO₄)
- 端成分間の任意のMg/Fe比において
 固溶体をなす

ある温度における固相線濃度と液相線濃度の比 → **平衡分配係数**

$$k_0 = C_{
m S}/C_{
m L}$$
 \downarrow

平衡状態における固相と液相の組成比







カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄

- 主要な造岩鉱物のひとつ
- ふたつの端成分
 - ✓ フォルステライト(Mg₂SiO₄)
 - ✓ ファヤライト(Fe₂SiO₄)
- 端成分間の任意のMg/Fe比において
 固溶体をなす

ある温度における固相線濃度と液相線濃度の比 → **平衡分配係数**

$$k_0 = C_{
m S}/C_{
m L}$$
 \downarrow

平衡状態における固相と液相の組成比







カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄

- 主要な造岩鉱物のひとつ
- ふたつの端成分
 - ✓ フォルステライト(Mg₂SiO₄)
 - ✓ ファヤライト(Fe₂SiO₄)
- 端成分間の任意のMg/Fe比において
 固溶体をなす

ある温度における固相線濃度と液相線濃度の比 → <u>平衡分配係数</u>

$$k_0 = C_{
m S}/C_{
m L}$$
 \downarrow

平衡状態における固相と液相の組成比



温度 [K]





カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄

- 主要な造岩鉱物のひとつ
- ふたつの端成分
 - ✓ フォルステライト(Mg₂SiO₄)
 - ✓ ファヤライト(Fe₂SiO₄)
- 端成分間の任意のMg/Fe比において
 固溶体をなす

ある温度における固相線濃度と液相線濃度の比 → **平衡分配係数**

$$k_0 = C_{
m S}/C_{
m L}$$
 \downarrow

平衡状態における固相と液相の組成比







カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄

- 主要な造岩鉱物のひとつ
- ふたつの端成分
 - ✓ フォルステライト(Mg₂SiO₄)
 - ✓ ファヤライト(Fe₂SiO₄)
- 端成分間の任意のMg/Fe比において
 固溶体をなす

ある温度における固相線濃度と液相線濃 度の比 → <u>平衡分配係数</u>

$$k_0 = C_{
m S}/C_{
m L}
onumber \ \downarrow$$

平衡状態における固相と液相の組成比





累帯構造と濃度境界層

隕石などに見られる累帯構造 →形成条件が不明

累帯構造から形成条件を "診断"する手法の重要性

「濃度境界層」の形成 結晶成長速度と液相内拡散の競合 (右図b)

濃度境界層が関与する岩石組織

- melt inclusion組成の系統的変化 (Baker 2008, CMP 156, 377)
- 同位体分別 (Watson & Muller 2009, Chem. Geo. <u>267</u>, 111)

問題点:

- 成長速度は一定と仮定
- 成長速度と鉱物成長条件との対応が不明



→

(b) 結晶成長が速い場合(濃度境界層の形成)





- Rayleigh eq. (Rayleigh 1896, Phil. Mag. <u>42</u>, 493)
- Scheilの式



- Smith model (Smith et al. 1955, Can. J. Phys. <u>33</u>, 723)
- kinetic disequilibrium (Albarede & Bottinga 1972, GCA <u>36</u>, 141)

目的:

累帯構造から形成条件を診断する手法の確立

結晶成長条件:

- 冷却速度
- 過冷却度

これらの成長条件に対し, 結晶成長速度はどのように 与えられ,結晶中の累帯構 造はどのように決まるのだ ろうか?

また,結晶の形態は成長条 件に対してどのように依存 し,どのような凝固組織が 期待されるのか?



注)実際に鉱物結晶が形成した環境が冷却速度一定とは限らない…

→ 冷却速度一定だと仮定したときに、どのような冷却速度が必要なのかを判断する基準を与える

モデル物質:

カンラン石, (Mg_{1-x}Fe_x)₂SiO₄



growth form of olivine // [001] (Hart 1978, The Canadian Mineralogist <u>16</u>, 547)



aspect ratio = 0.47

成長速度に異方性が存在 (成長速度が遅い面がフラットになる)

計算手法:

フェーズフィールド法

結晶相と液相をorder parameter Φ (フェーズ)で区別する。Φと温度場・濃 度場に関する拡散方程式を解くことによ り,結晶相の成長と場の量の変化を同時に 扱うことが可能。



本研究:温度 T はgiven →フェーズ場 Φ と濃度場 C に注目 フェーズフィールド方程式(温度一様,二成分) (Bi & Sekerka 1998, Physica A <u>261</u>, 95)

$$\begin{split} \frac{\partial \phi}{\partial t} &= M_{\phi} \left[H_{\rm A}(1-C) + H_{\rm B}C + \epsilon_{\phi}^2 \nabla^2 \phi \right], \\ & \downarrow \, \stackrel{\wedge}{ \ \ \, } \stackrel{\wedge}{ \ \ } \stackrel{\wedge}{ \ \ } \stackrel{\wedge}{ \ \ } \stackrel{\rightarrow}{ \ \ } \stackrel{\wedge}{ \ \ } \stackrel{\rightarrow}{ \ } \stackrel{\rightarrow}{ \ \ } \stackrel{\rightarrow}{ \quad} \stackrel{\rightarrow}{ \ } \stackrel{\rightarrow}{ \quad} \stackrel{\rightarrow}{ \quad } \stackrel{\rightarrow}{$$

 各パラメータと"測定可能な"物理量の関係 (Warren & Boettinger 1995, Acta mater. <u>43</u>, 689)

↓ 界面張力

$$W_{A,B} = \frac{3\sqrt{2}}{2} \frac{\sigma_{A,B}}{h_{A,B}T_{A,B}}, M_{A,B} = \frac{\sqrt{2}}{12} \frac{\mu_{A,B}T_{A,B}^2}{h_{A,B}L_{A,B}},$$

↑ 界面の厚さ(数値計
 $\epsilon_{\phi}^2 = 6\sqrt{2} \frac{\sigma_{A,B}h_{A,B}}{T_{A,B}}$

計算設定: 初期温度と初期組成



計算設定: 初期温度と初期組成





結晶成長と濃度分布



距離 [ミクロン]



結晶成長と濃度分布





初期トランジェントの形成





成長速度の指数関数的な増加



計算結果:

冷却速度に対する依存性





累帯構造の診断



- 初期トランジェントを示している
 累帯構造の同定
- カンラン石と周囲のマトリクスの 組成から、初期メルト組成を算出

 \checkmark

冷却速度の推定が可能!

Fe少 100 um

※左図の累帯構造は Rayleigh分別によっ て生じたと考えられ ているので,本計算 結果は適用不可。

<u>初期メルト組成に対する依存性:</u>

- 冷却速度が同じでも、初期メルト組成によっては、 初期トランジェントの幅に30倍程度の差が生じる
- 例:10 umの初期トランジェントを形成するための 冷却速度は、初期メルト組成に応じて3桁の違いが 生じる



累帯構造の診断



- 初期トランジェントを示している
 累帯構造の同定
- カンラン石と周囲のマトリクスの 組成から、初期メルト組成を算出

 \downarrow

冷却速度の推定が可能!

Fe少 100 um

※左図の累帯構造は Rayleigh分別によっ て生じたと考えられ ているので,本計算 結果は適用不可。

<u>初期メルト組成に対する依存性:</u>

- 冷却速度が同じでも、初期メルト組成によっては、 初期トランジェントの幅に30倍程度の差が生じる
- 例:10 umの初期トランジェントを形成するための 冷却速度は、初期メルト組成に応じて3桁の違いが 生じる

結論

- 主要な造岩鉱物のひとつであるカンラン石(Mg₂SiO₄)
 とFe₂SiO₄の固溶体)が冷却速度一定条件下で凝固する過程をフェーズフィールド法によって数値計算した。
- ク却速度が一定であっても、結晶成長速度は一定では

 <u>ない。</u>初期トランジェント形成時には、凝固開始から

 の時間に対して指数関数的に増加することが分かっ

 た。
- 初期トランジェントの幅を、初期メルト組成と冷却速度の関数として求めた。これは、急冷に伴って生じたカンラン石結晶の形成条件を推測する上で新たな診断法となる。
- 初期トランジェントの幅は、初期メルト組成に強く依存した。

 家帯構造の診断をする際には、初期メルト組 成を正確に評価する必要がある。



