新学術領域研究

# 「核ーマントルの相互作用と共進化 ~統合的地球深部科学の創成~」

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・土屋卓久

ポイント

1. 固体地球形成・進化を理解するカギである

「核一マントル相互作用」に着目

2. 複雑な物理・化学プロセスを

「高圧実験+化学分析+物理観測+理論計算」

の異なる手法を結集し解明

3. 地球深部の「化学的不均質の形成と進化」に迫る

## これまでの高圧地球科学: 地震学による観測情報を鉱物物性により解釈

#### (1) 下部マントルの平均化学組成の解明

Wang, Tsuchiya et al. (2015) Nature Geoscience (in press)

## (2) ポスト・ペロブスカイト相の発見

Murakami et al. (2004) Science

#### (3) 核マントル境界温度の制約

Kawai & Tsuchiya (2009) PNAS

#### (4) 内核条件での鉄の結晶構造決定

Tateno et al. (2010) Science

365万気圧6000Kに至る極端条件下の物質科学

本領域参加研究者が世界を牽引

マントル (岩石)

地殼

核マントル境界層

核 (金属鉄)



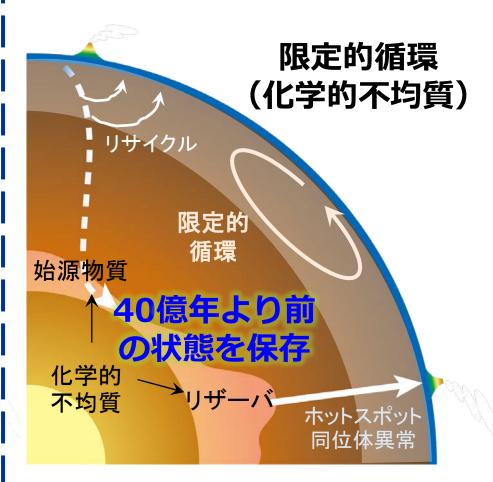
365万気圧 6000K 135**万気**圧 4000K 1気圧 300K

## 地球深部の物質循環と化学的均質性 地球物理 vs 地球化学

**地球物理的描像**(地震学+高圧地球科学)

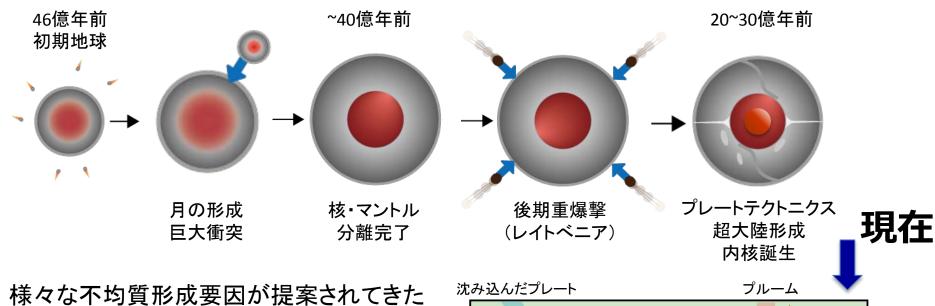
日本 大規模物質循環 (化学的均質) 冷たく重いプレ 大循環 低温 (マントル対流) 領域 5 核 高温 上昇流 領域 (プルーム)

地球化学的描像(岩石の同位体分析)



物理・化学描像の統合的理解が必要

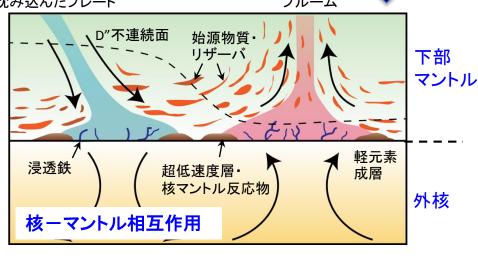
## 固体地球進化における化学不均質の形成



#### 時期や規模の詳細は不明

超高温超高圧下における重要物性 (元素分配・熱伝導率など)が未決定、 外挿や経験的仮定に基づいて推測

定量物性値に基づく モデリングが必要



核マントル境界:化学不均質が蓄積

## 主テーマ1:化学不均質形成時期・規模の解明

それぞれの不均質形成要因が起きた時期は「いつ?」

#### 放射性元素の壊変(時計)により特定可能

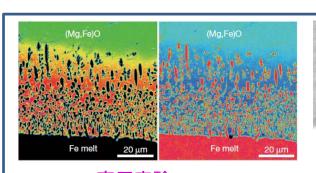
例)核・マントルの分離時期 <sup>187</sup>Re (親石性) → <sup>187</sup>Os (親鉄性)

核マントル境界条件での 元素分配実験は不可能だった



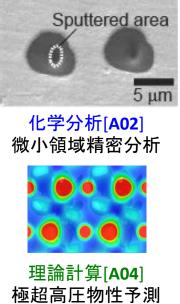
マントル-核の 化学反応・元素分配の 超高圧下での直接測定へ





高圧実験[A01] マントル鉱物ー熔融鉄反応実験

本領域



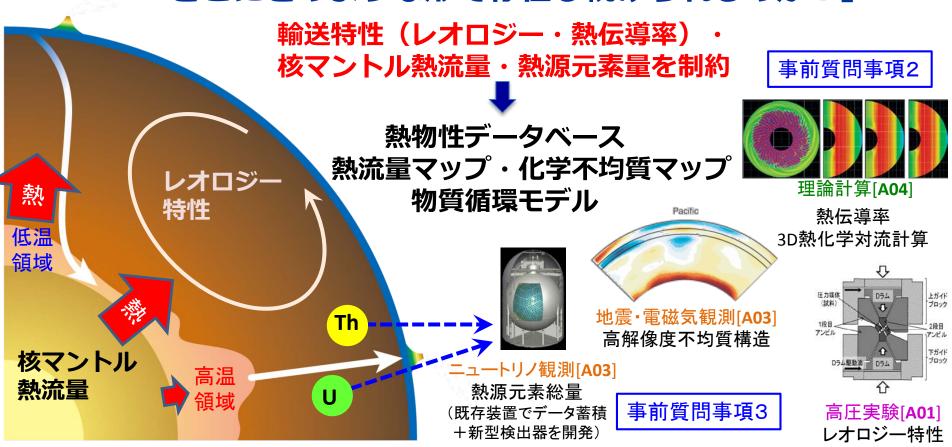
様々な反応について超高圧データを蓄積、データベース化

(熱化学データベース)

## 主テーマ2: 深部不均質の長期維持機構の解明

活発なマントル対流の中で始源物質を数10億年オーダーで維持するための条件

#### 「どこにどのような形で存在し続けられるのか?」



主テーマ1+2 ⇒ 地球深部の動的統合的モデル

## 研究実施体制

#### それぞれの分野で基盤技術が 飛躍的に進歩

連携により革新的進展が可能

A04 理論計算 <sup>第一原理</sup> 連続体



土屋卓久(愛媛大)

A02

化学分析

同位体

元素分配

同位体班



鈴木勝彦(JAMSTEC)

元素分配班



S. Kumar (新潟大)

地震•電磁気班



田中聡(JAMSTEC)

ニュートリノ班



田中宏幸(東京大)

A03 田知

ダイナミクス班

芳野極(岡山大)

物理観測

地震・電磁気 、ニュートリノ 総括班 核-マントル 共進化

構造物性班

鈴木昭夫(東北大)

A01

物性測定

ダイナミクス 構造物性 技術開発





入舩徹男(愛媛大)

基盤施設 Spring-8

共同利用

参加機関

東北大 新潟大

東京大

東工大

京都大大阪大

岡山大 広島大

愛媛大

九州大

**JAMSTEC** 

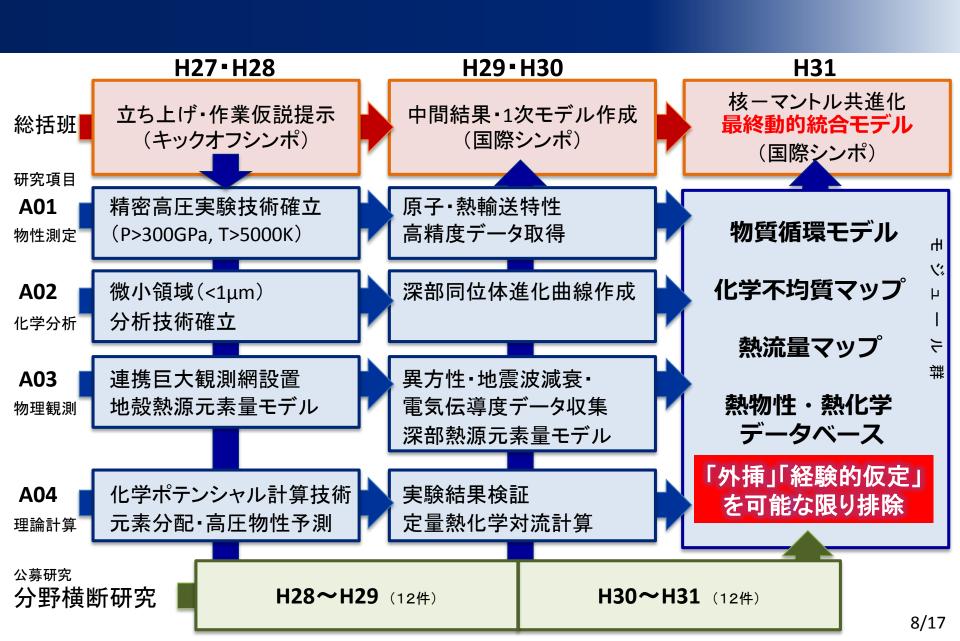
SPring-8 J-PARC KEK KamLAND

研究分担者

(11機関 総勢47名) +公募研究 (計24件)

7/17

### 研究ロードマップ



## 領域の運営体制

#### 研究者間の目的意識共有を徹底する強力な推進体制

- 総括班に研究推進部会、研究支援部会を設置
- 全体の目的の達成に向け各計画研究間の連携・結束強化
  - 総括班会議(年3回)
  - 研究集会・国際シンポ(年1回)
  - 外部・内部評価(H28年度以降年1回)
- 大型科研費運用経験豊富な研究者(2名)が領域代表を補佐

#### 総括班 領域全体の方向性・統括 計画研究・分野間の調整 研究推進部会 研究支援部会 ■ 企画と運営 ■ 量子ビーム ラインの高度化 ■ 若手育成 プログラム ■ 高圧実験 · 同 ■ 広報・アウト 位体分析支援 リーチ 代表者 補佐

アドバイザリーボード

研究全般へのアドバイス 組織・運営に関するアドバイス

#### 研究員確保・キャリアパス

事前質問事項1

- 計11名の研究員雇用計画(各分野ごとに1~2名):地球科学分野のグローバルCOE拠点(3件)を受け継いだ育成基盤や海外から十分確保可能
- キャリアパス:新たな分野横断研究を行う本領域で育成される研究者・技術者は従来にない視点・ 技術を獲得し、国内外の研究教育機関・民間企業で活躍
- **国際的人材交流の推進:**アジアにおける地球深部科学ネットワーク(TANDEM)や、全米の高圧科学コンソーシアム(COMPRES)等との連携強化

9/17

## まとめ:新学術領域「核ーマントル相互作用と共進化」

#### 1. 「核-マントルの相互作用と共進化」に関する横断プロジェクト

- マントルと核を一体としてとらえる
- 外挿を伴わない定量熱物性データ・熱化学データに基づき解析

#### 2. 本領域の特徴

- 地球物理学と地球化学の強固な連携
- 「高圧実験+化学分析+物理観測+理論計算」の異なる手法を結集

#### ⇒ これまでの地球深部科学になかった広がり

#### 3. 最終目標

- 現在の地球深部の化学不均質を理解
- 化学不均質の形成過程・長期維持機構を解明
  - **⇒ 動的・統合的地球深部科学へパラダイムシフト**

## 参考資料

## 研究項目A01:物性測定

#### A01-1 ダイナミクス班

A01-2 構造物性班

A01-3 技術開発班

#### 超高温超高圧条件における その場観察実験

水や炭素(軽元素) の循環



SPring-8 • KEK • J-PARC

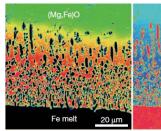


ダイヤモンドアンビル

密度 弾性波速度 変形特性 原子拡散 熱伝導率

下部マントル

- ・ブリッジマナイト
- ・フェロペリクレース





超高圧試料観察



マルチアンビル



新素材•技術開発

熔融鉄

元素分配• 同位体分别 試料合成

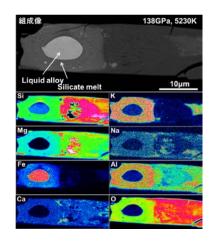


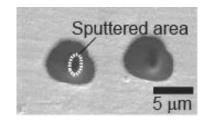
## 参考資料

## 研究項目A02:化学分析

#### A02-1 同位体班 A02-2 元素分配班

### 高精度微量 化学分析





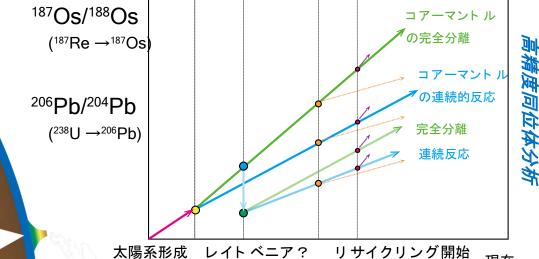
実験生成物の 元素マッピング



ICP-MS, TIMS, nano SIMS

#### コアの分離・ レイトベニア・ 大陸地殻形成 の時期・規模

#### 同位体進化曲線の作成



放射起源同位体のコアへの分配

<sup>206</sup>Pb, <sup>187</sup>Os

7

放射性同位体のコアへの分配

<sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup> K

離 大陸地殻の形成 *様々なパターンをモデリング* 

現在

12/17

## 参考資料

## 研究項目A03:物理観測

A03-1 地震・電磁気班 A03-2 ニュートリノ班

#### 物理観測

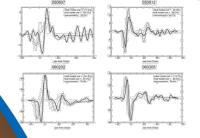
(地震・電磁気・ニュートリノ)

- 不均質構造高分解能観測
- 熱源放射性元素量観測

全地球3次元構造 コア・マントル境界 付近の精度向上



ポータブル地震計

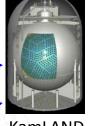


#### コア・マントル境界

大規模低速度領域 方位異方性·地震波減衰 超低速度層 電気伝導度 外核最上部地震波速度構造 熱源元素分布

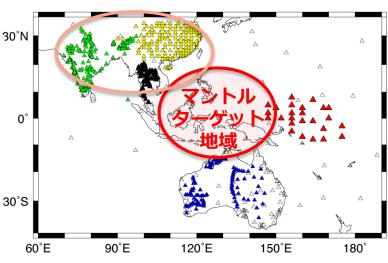
U

Th



KamLAND

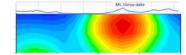
#### 仮想的連携巨大地震観測網



#### 地球ニュートリノ・グラフィ

検出器開発 + 空間分布モデリング 手法の開発

KamLAND



地球深部の放射性物質濃度観測

ノイズフリー高精度観測

内核·内核境界 半球構造 予察•検証•解釈

同位体分別

異方性

## 大規模数値計算・理論エデリング







HPCI

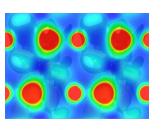
▶ 第一原理電子状態計算:基礎物性

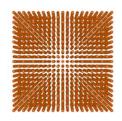
#### 平衡物性

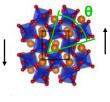
- 密度
- 弾性特性

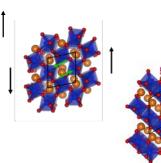
#### 輸送特性

- 熱伝導
- 原子拡散
- 粘性率

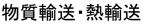


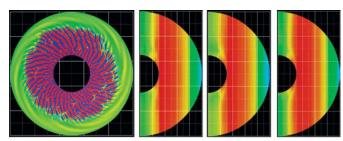






連続体シミュレーション:マントル+核の対流運動 物質輸送・熱輸送





イナモ 不均質性

マントル対流

元素分配

カ学モデリング:熱化学進化・他惑星への一般化

## 参考資料:計画研究間の連携・公募研究の役割①

理論・実験・観測に基づく地球物理分野と、高度な微小領域分析技術を有する地球化学分野をリンクさせ、地球深部の境界層、特に最大の物質境界である核ーマントル境界に焦点をあて、その相互作用と共進化、更には地球全体のダイナミクスに関する新たな研究を推進

#### 研究項目A01(物性測定)

- A01-1ダイナミクス班: 先端的量子ビーム施設を活用した超高圧実験により、マントル、核、スラブ物質のレオロジー特性や相転移カイネティックス、熱・物質輸送メカニズムを核ーマントル境界領域まで決定
- A01-2構造物性班:マグマや金属メルトの構造と密度変化を核ーマントル境界領域まで明らかし、金属 鉄一軽元素系融体の物性を測定し、核の軽元素の特定と存在量を解明
- A01-3技術開発班:ヒメダイヤや焼結ダイヤなどの超硬素材を利用し、新しい高圧実験技術を開発

#### 研究項目A02(化学分析)

- A02-1同位体班: 始源物質リザーバーの現在の同位体組成と、地球創生期からの進化を洗い直し、マントル最下部や核の同位体組成に制約を加え、地球内部の進化過程や核ーマントル境界における化学的相互作用を解明
- A02-2元素分配班:マントル最下部圧力条件までの岩石の融解実験を行い、元素分配係数を定量化し、 地球形成初期から現在までの化学的進化を解明

## 参考資料:計画研究間の連携・公募研究の役割②

#### 研究項目A03(物理観測)

- A03-1地震・電磁気班: 既存や新規の地震・電磁気学的観測データの解析により、核ーマントル境界から内核に至る地震波速度や電気伝導度の不均質を解明
- A03-2ニュートリノ観測班:地球ニュートリノの観測から、地球深部におけるウラン・トリウム等放射性 熱源元素の平均存在度を推定

#### 研究項目A04(理論計算) A04-1理論計算班

- 第一原理電子状態計算法により、最下部マントルから中心核条件において、熱弾性特性、原子拡散・ 熱伝導、元素分配や同位体分別を予測し、核や下部マントルの化学組成及び核マントル境界の熱流量と温度構造を決定
- 理論、実験、観測によるデータに基づき、連続体シミュレーションを行い、D"層及び内核領域のダイナミクスと不均質構造の原因を解明し、核及びマントル内部の不均質構造の形成過程など、境界層環境が全地球規模の進化や対流に与える影響を評価

#### 公募研究

- 地球物理・地球化学両分野にまたがる学際的な研究を中心に、全国から国際的に活躍する研究者を 集め、本領域の研究ミッションを推し進めるために組織強化
- 単に既存の分野間の連携による共同研究のみならず、物性物理学、素粒子物理学や化学をバックグラウンドとする研究者の地球科学への参入を促すことで、既存の地球科学に新機軸を導入

## 参考資料: 若手研究者育成・アウトリーチ・世界の動向

#### 様々な教育プログラムを準備

- **国際シンポジウム・・・**海外著名研究者を交えた本領域の研究成果発表及び討論
- レクチャーシリーズ・・・海外著名研究者による集中講義
- インターンシップ・・・共同利用基盤設備・拠点等において専門外の技術習得
- メンターワークショップ・・・海外からの招聘研究者による研究指導

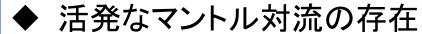
#### アウトリーチ

● 研究成果や関連情報の領域内外への周知:ホームページ及びニュースレター、市民向け講演会など を通じ、中高生などの若い世代やシニア世代へ普及活動

#### 世界の動向

- 海外:地球深部科学の組織的推進は、米国では高圧物質科学コンソーシアム(COMPRES)が形成され、放射光実験施設・中性子実験施設におけるビームラインの高度化や実験技術の共有などにより、グループ全体の研究活動の底上げを行いつつ進められてきた。ヨーロッパではEU Access to Research Infrastructures Programme などのプログラムにより、大型施設の共同利用研究が精力的に行われている。しかし、これらの連携組織は必ずしも明確な研究ターゲットを持つものでなく、また分野の垣根を超えた統合的な領域形成を目指すものでもない。
- 本領域: 高圧地球科学分野のみならず、多様な分野の研究者が参画することで、国際的に例のない幅広い学際的研究組織により、核とマントルの相互作用と共進化に的を絞った研究を推進し、新たな統合的学術領域を創成することを目指している。また本領域には日本で活動する外国人研究者も多数参加しており、国際水準の研究活動を指向。

## 作業仮説の例:リザーバの位置



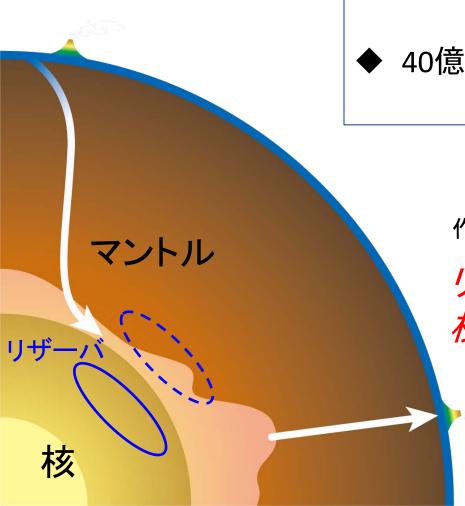
◆ 40億年以上にわたる閉鎖領域の存在 (リザーバ)

#### 両立が極めて困難

作業仮説

リザーバがマントルではなく 核の中に存在していたとしたら...

> どのような 同位体分布・同位体進化 が期待できるか



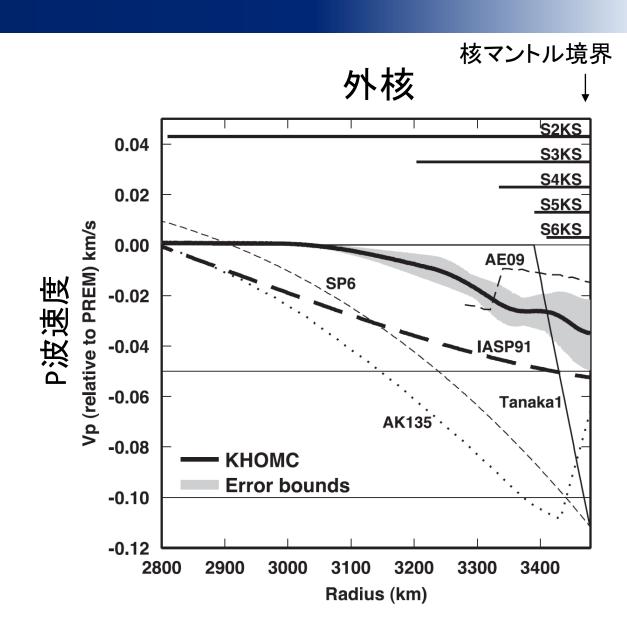
## 外核不均質性

## 地震学により観測された 特異な性質

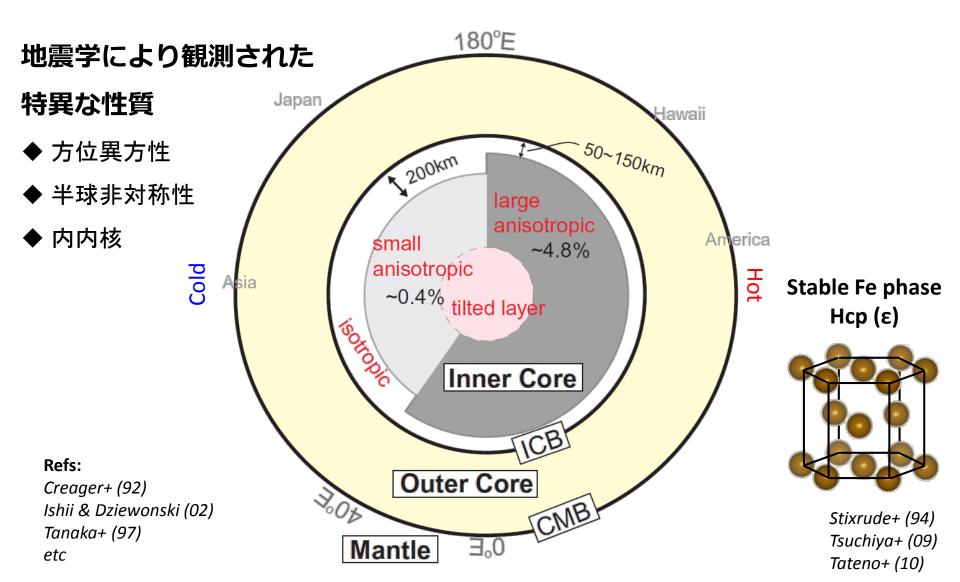
- ◆ 外核最上部に低速度層
- ◆ 軽元素成層?
- ◆ 熱成層?
- ◆ 核ーマントル相互作用?
- ◆ ダイナモへの影響?

#### Refs:

Helffrich & Kaneshima (10) Kaneshima & Helffrich (13)

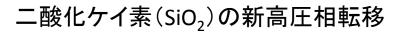


## 内核不均質性

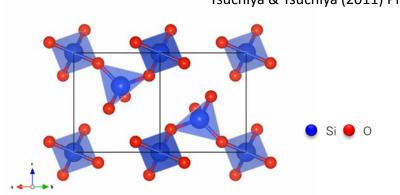


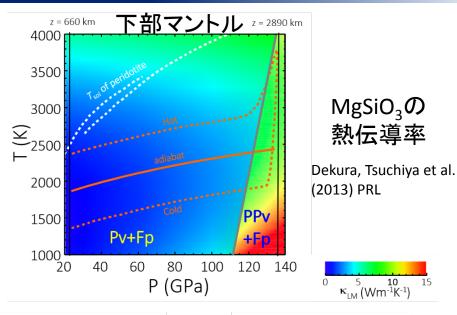
## 第一原理鉱物物性シミュレーション

地球深部条件下では実験と同程度か、これを上回る精度



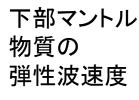
Tsuchiya & Tsuchiya (2011) PNAS





100

120



Wang, Tsuchiya et al. (2015) Nature Geoscience

