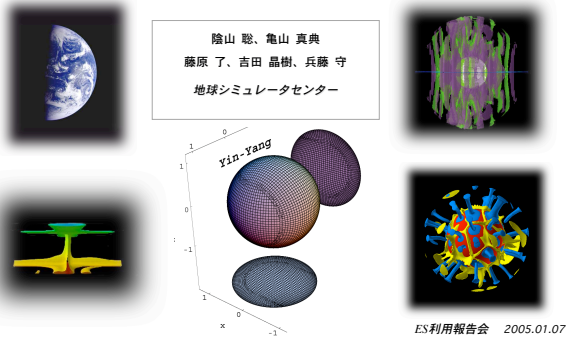
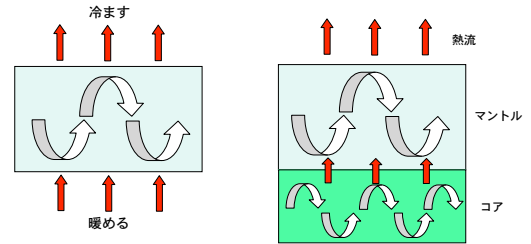


## コア・マントル結合系のダイナミクス

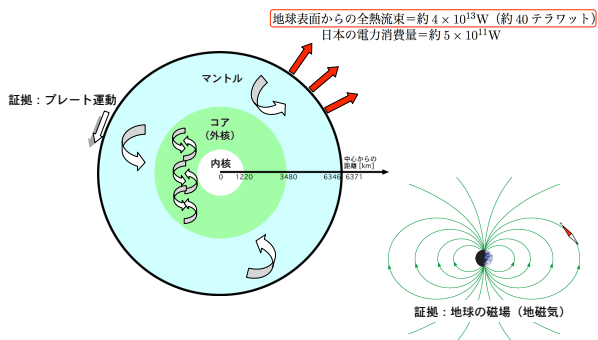


## プロジェクトの目的

地球を「コア対流+マントル対流が結合した二重対流系」と見る立場から地球内部のダイナミクスを理解する。



## 地球内部の流れ



## 昨年度の主な成果と今年度の計画

### 15年度の主な成果

1. 新しい球面格子「インヤン格子」の開発
2. 新しいマントル対流シミュレーション手法「ACUTE法」の開発

### 16年度の計画

	自己評価
1. ACUTE法の改良	
2. ACUTE法の球ジオメトリへの応用 (インヤン格子との融合)	
3. インヤン格子マントル対流コードの改良	
4. インヤン格子コア対流コードの改良	
5. コアとマントルの結合モデルの開発	
6. その他、計算固体地球科学に関する基礎的研究	

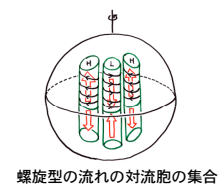
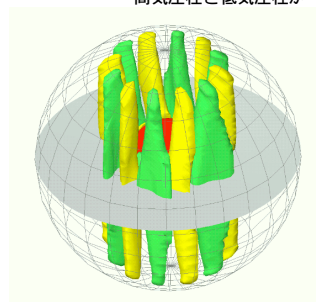
## コア対流とマントル対流 シミュレーション研究の現状

	コア	マントル
流れ構造	○	×
DNS	×	○
課題	高解像度計算	物性・組成モデルの改良

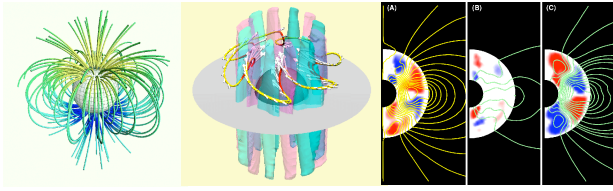
DNS = Direct Numerical Simulation (直接数値計算)  
 ・ コアは粘性率が小さすぎてDNS不可能。  
 ・ マントルは粘性率が大きいのでDNSが可能。

## コア対流の基本構造

高気圧柱と低気圧柱がペアを作り、内核を囲む



## コア対流シミュレーションの現状と課題



**現状:**  
 粘性率等を人為的に大きくして計算。  
 → 地磁気的基本性質（双極子磁場生成、その逆転）の再現に成功した。

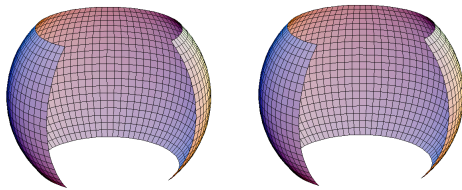
**課題:**  
 現実のコアの（小さな）粘性率に可能な限り近づけた計算。  
 → 計算の分解能を上げる必要がある。→ **新しい球格子（インヤン格子）!**

## 野球ボール

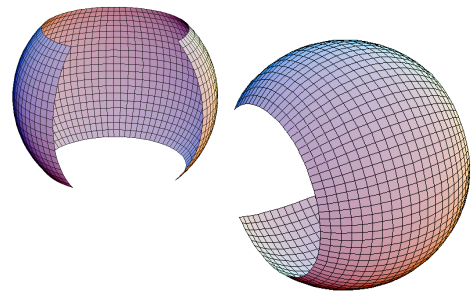
- 2枚の合同な布を張り合わせて球面を構成
- 縫い目は一本



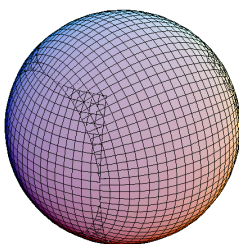
野球のボールのように、二つの要素を合わせて球面格子を構成する



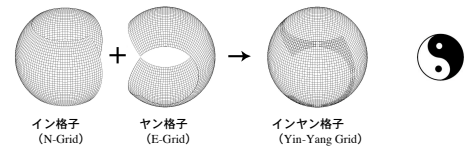
野球のボールのように、二つの要素を合わせて球面格子を構成する



野球のボールのように、二つの要素を合わせて球面格子を構成する



## インヤン（陰陽）格子

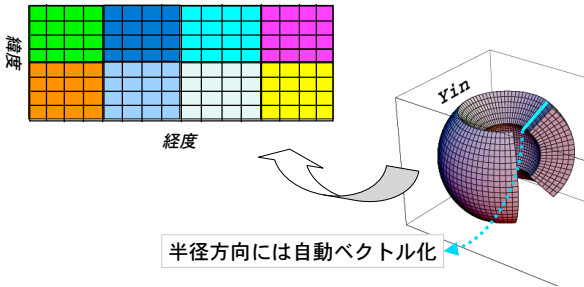


次の理由から、インヤン格子は計算効率が高い。

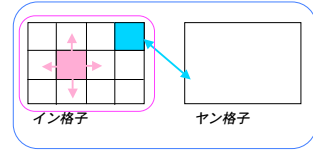
1. 要素格子が直交系である。
2. 要素格子のメトリックが単純（球座標そのもの）である。
3. ほぼ一様な格子間隔を持つ。
4. 二つの要素格子が全く同じ形状である。
5. ベクトル化・並列化が容易である。

今年度の成果：  
インヤン格子によるコア対流シミュレーションコード

水平（緯度経度）空間で2次元領域分割→MPI



今年度の成果：  
インヤン格子によるコア対流シミュレーションコード

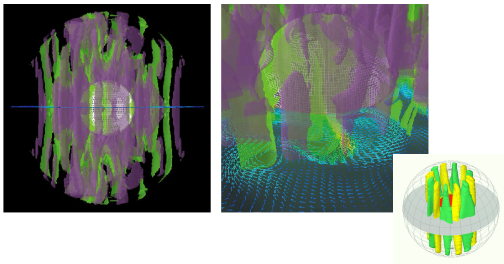


- MPIコミュニケータのデザインも単純
- (1) 全体(world)コミュニケータ
  - (2) イン/ヤンコミュニケータ
    - イン系のコミュニケータ
    - ヤン系のコミュニケータ

今年度の成果：  
インヤン格子によるコア対流シミュレーションコード

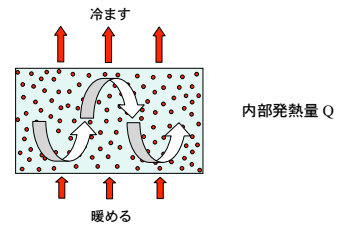
- ・150ノードでES理論性能値の56%
  - ・512ノードでES理論性能値の46%
- SC2004, Gordon Bell Prize (Peak Performance)

grid size: 255 (radial) × 514 (latitude) × 1538 (longitude) × 2 (Yin & Yang)



今年度の成果：  
インヤン球殻マントルシミュレーション (1)

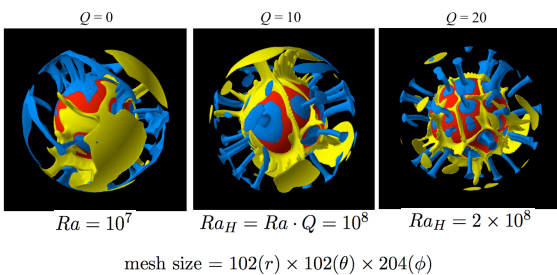
内部熱源が球殻マントル対流パターンに与える影響



- ※ 圧力と速度場の解法には (標準的な) SIMPLER法を使っている。
- ※ 大規模並列化はできていない。

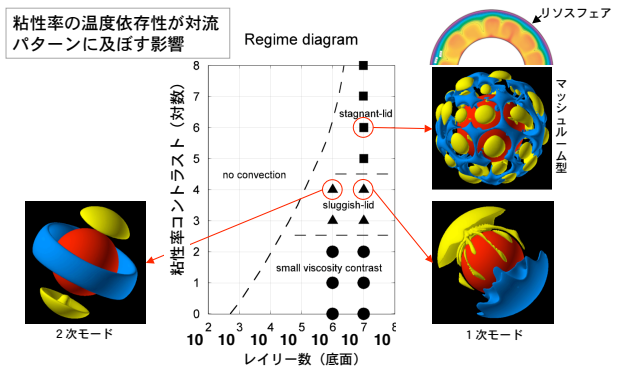
今年度の成果：  
インヤン球殻マントルシミュレーション (1)

内部熱源が球殻マントル対流パターンに与える影響



今年度の成果：  
インヤン球殻マントルシミュレーション (2)

粘性率の温度依存性が対流パターンに及ぼす影響



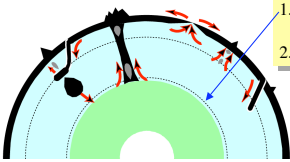
## コア・マントル結合を目指した マントル対流シミュレーションモデルの改善

課題：

- ・物性モデルの改善
- ・相転移の導入
- ・組成モデルの改善
- ・プレート
- ・...

特にコア・マントル境界面 (Core-Mantle Boundary, CMB) において極めて重要となる可能性のある要因：

1. 新たに見つかったCMB近傍の相転移 (post-perovskite)
2. 熱伝導率の温度依存性の効果



## マントル対流方程式の基本形

連続の式

$$\textcircled{0} = \nabla \cdot \mathbf{v}$$

運動方程式

$$\textcircled{0} = -\nabla p + \mathbf{F}(\mathbf{v}, T)$$

温度 (エネルギー) 方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\kappa \nabla T)$$

各時刻  $t$  で、 $p$  と  $\mathbf{v}$  を求めるために楕円型の方程式を解く必要がある (大規模並列計算が困難)。

## 我々が開発した (p, v) ソルバアルゴリズム 「ACUTE法」

Artificial Compressibility Using local Time Evolution method

連続の式

$$-K \frac{\partial p}{\partial s} = \nabla \cdot \mathbf{v}$$

運動方程式

$$M \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s} = -\nabla p + \mathbf{F}(\mathbf{v}, T)$$

温度 (エネルギー) 方程式

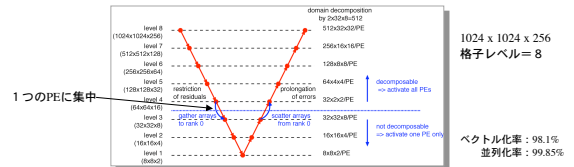
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (\kappa \nabla T)$$

基本概念は昨年度完成

- 擬似圧縮法 (擬似的な音波を導入する)
- 局所時間刻み法 (擬似音波速度の分布を粘性率分布に応じてうまく調整する)
- 多重格子法 (計算を加速する)
- (今のところまだ) 箱形ジオメトリ
- 大規模並列化が可能。

## 本年度の成果：

### マントル対流ソルバ「ACUTE法」の改良



(1) 多重格子法計算部分の改良：

(J. Comput. Phys., 2005)

- agglomerationによる大規模並列化、高ベクトル化。
- 高分解能のマントル対流シミュレーションが可能となった。
- 64ノード、1024 x 1024 x 256 メッシュ (世界最高レベル)。

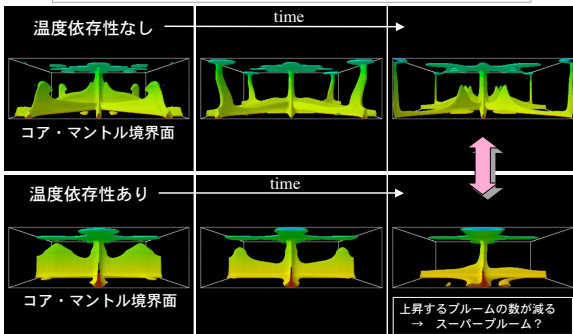
(2) より現実的な物性モデルの導入：

- 相転移
- 粘性率以外の物性値 (熱膨張率など) の空間依存性
- 特に熱伝導率の温度依存性の効果は影響大!

## 本年度の成果：

### ACUTE法による箱形マントル対流シミュレーション

熱伝導率の温度依存性を入れると対流パターンが全く変わる



## まとめ：今年度の主な成果と課題

### 16年度の計画：

	自己評価
1. ACUTE法の改良	◎
2. ACUTE法の球ジオメトリへの応用 (インヤン格子との融合)	×
3. インヤン格子マントル対流コードの改良	◎
4. インヤン格子コア対流コードの改良	◎
5. コアとマントルの結合モデルの開発	△
6. その他、計算固体地球科学に関する基礎的研究	△

### その他の成果：

1. 球殻モデルで見いだしたマントル対流パターンの劇的変化
  - (a) 内部熱源の効果、(b) 粘性率の温度依存性の効果
2. 箱形モデルで見いだしたマントル対流パターンの劇的変化
  - (a) コア・マントル境界面における熱伝導率の温度依存性

コアへの影響は大きいはず!

### 今後の課題：

1. ACUTE法の球ジオメトリへの応用 (インヤン格子への組み込み)
2. コアとマントルの結合モデルの開発