マントル・ダイナミクス

地球内部の熱・物質輸送と地球の長期変動

中久喜伴益

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

マントル対流に関する数値

空間スケール	垂直: 660〜2900 km 水平: 1000〜10000 km
粘性率	10^{19}〜10^{23} Pa s (平均 10^{22} Pa s)
温度差	2500 〜 4000 K
対流の速さ	10^{-8}〜3×10^{-6} m s^{-1}(3 mm 〜 10 cm yr^{-1})
時間スケール	数〜10億年

マントル対流論の課題

地球型惑星の熱・化学進化

熱源の量・分布と熱輸送

核・マントル相互作用

マントルプルームの起源

惑星表層運動の再現

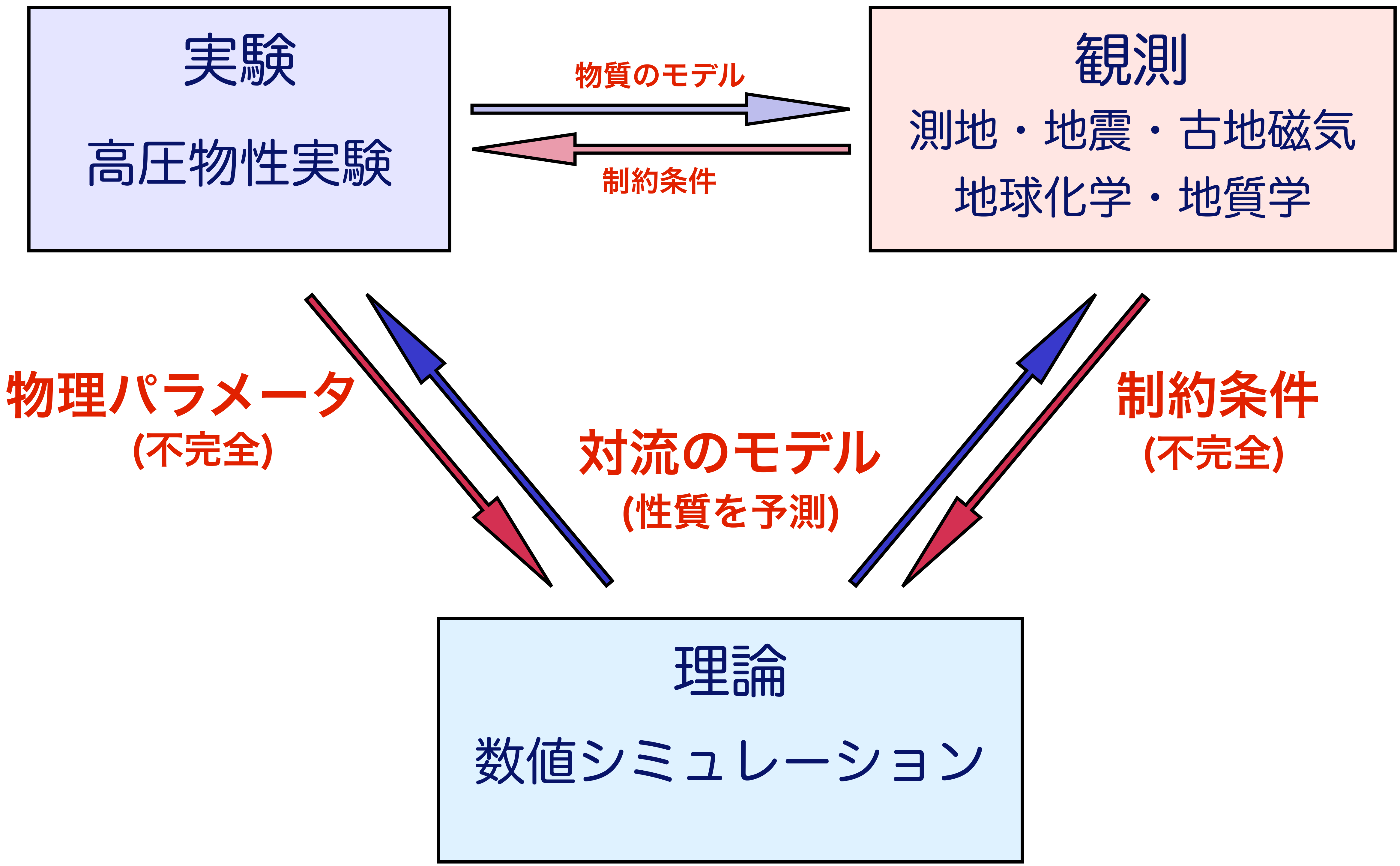
プレートテクトニクスの成因

マントル対流の構造と不均質

マントル対流の層構造：遷移層

マントル深部の化学的不均質

マントル対流の研究方法



マントル対流の特徴

身の回りの流体との違い

流体の形状：３次元球殻

粘性率が大：慣性・自転(コリオリ力)は無視可能

粘性変化が大：温度・圧力・応力依存

物性の圧力依存：相変化・熱力学的パラメータの変化

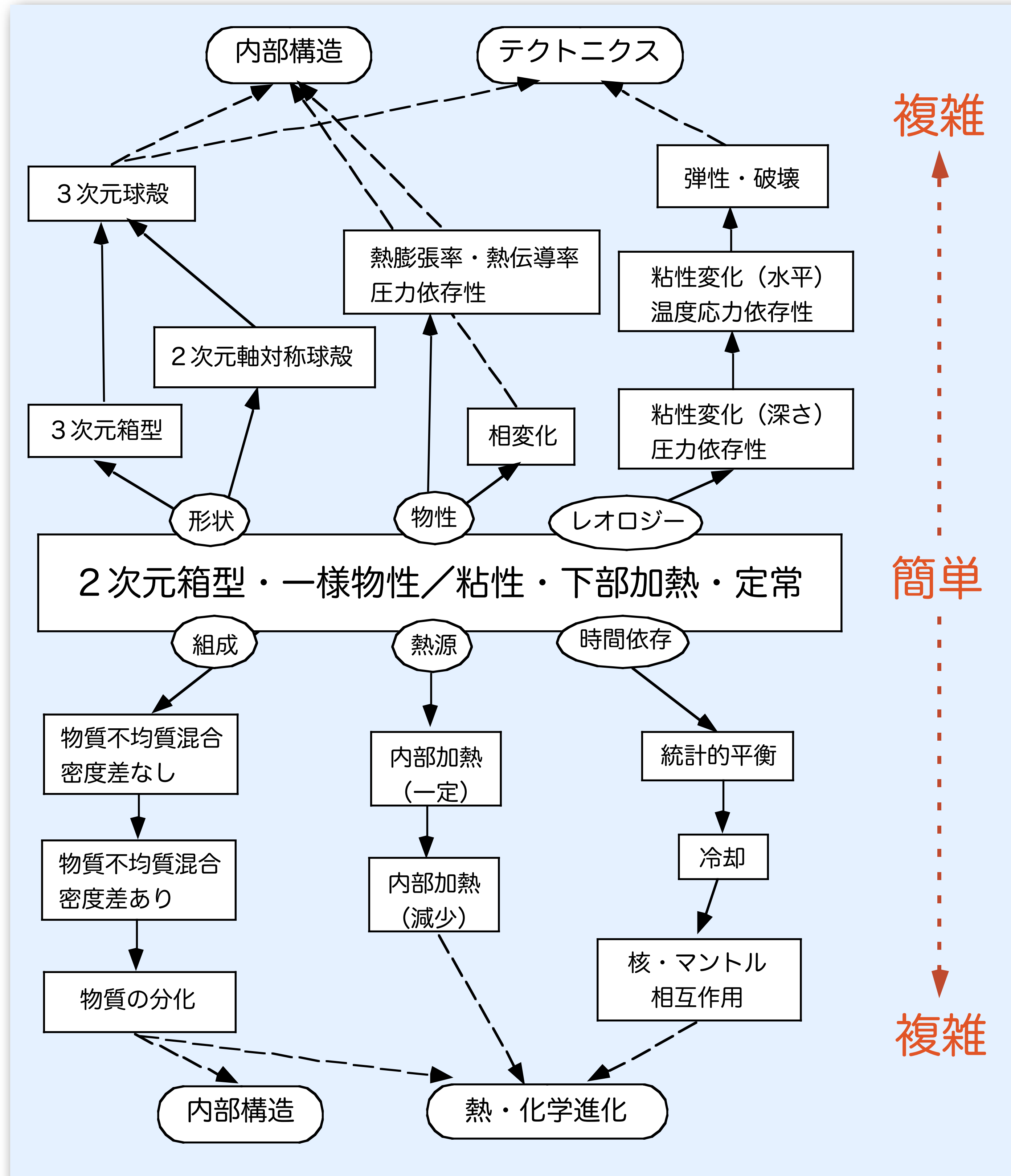
内部加熱源：放射性元素

非定常状態：地球の冷却

マントル対流のモデリング

マントルの
物理的性質

対流の特徴を
予測



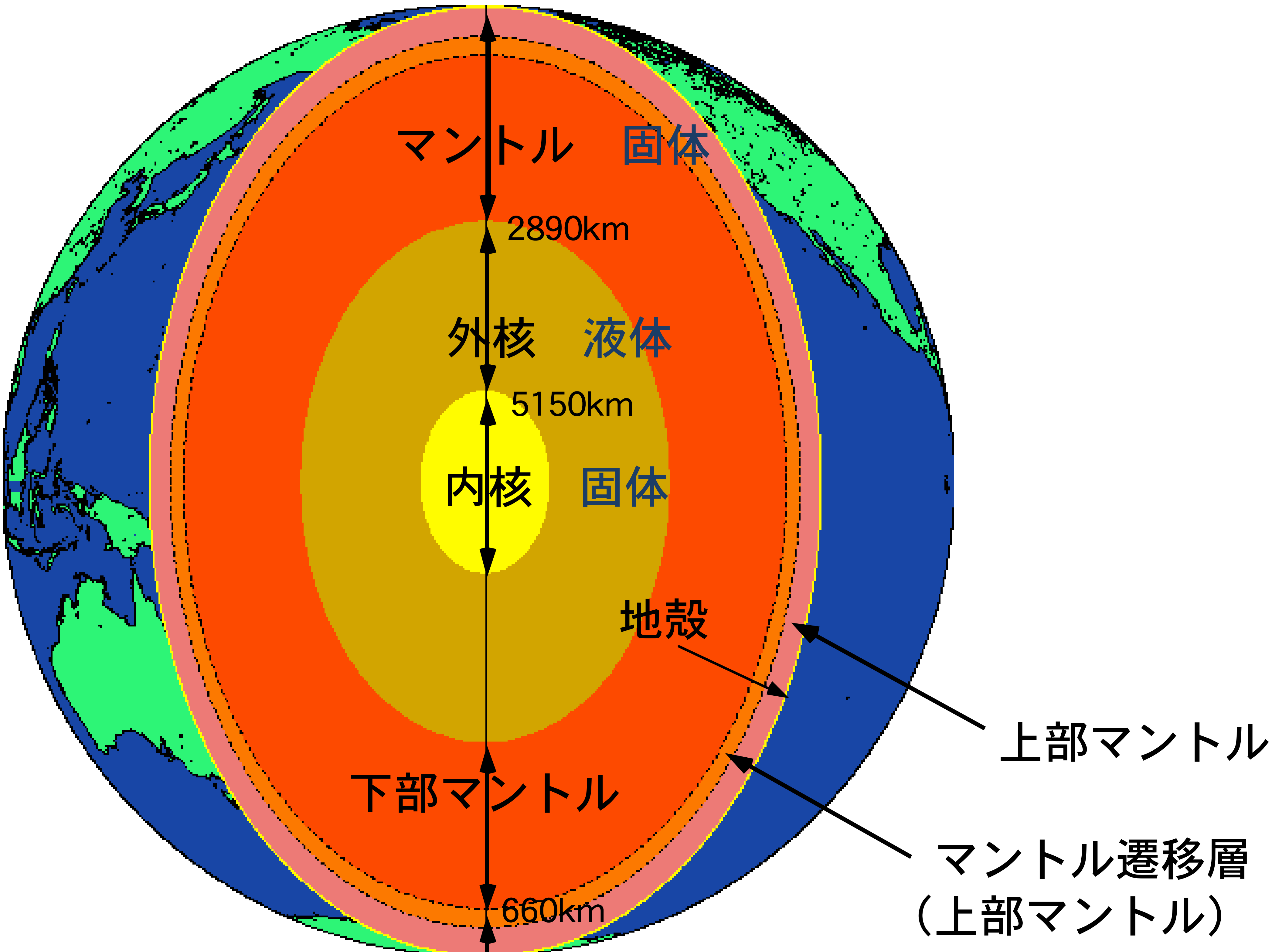
大陸移動からプレート・テクトニクスへ

1956	J. Hospers 等 J. Hospers, S. K. Runcorn, K. Creer, E. Irwing	大陸移動で地磁気極移動('50~)を説明
1962	H. Hess	海洋底拡大説 "History of Ocean Basins"
1963	F. J. Vine, D. H. Mathews	海底地磁気縞模様を海底拡大で説明
1964	J. T. Wilson	トランスフォーム断層の定義・"plate"を初使用
1967	D. P. McKenzie	太平洋海底の運動を剛体回転で表現
1968	W. J. Morgan	運動極の決定法(TF)・地表を20のプレートに
1968	X. Le Pichon	全地球的なプレート(6)運動を決定

地学現象をプレートの相対運動から統一的な説明が可能に

http://www.aapg.org/explorer/special/tectonicsevolve.html

地球内部構造



提供: 吉澤和範(北海道大学)

レイリー数とレイリー・ベナール対流

熱レイリー数 Ra

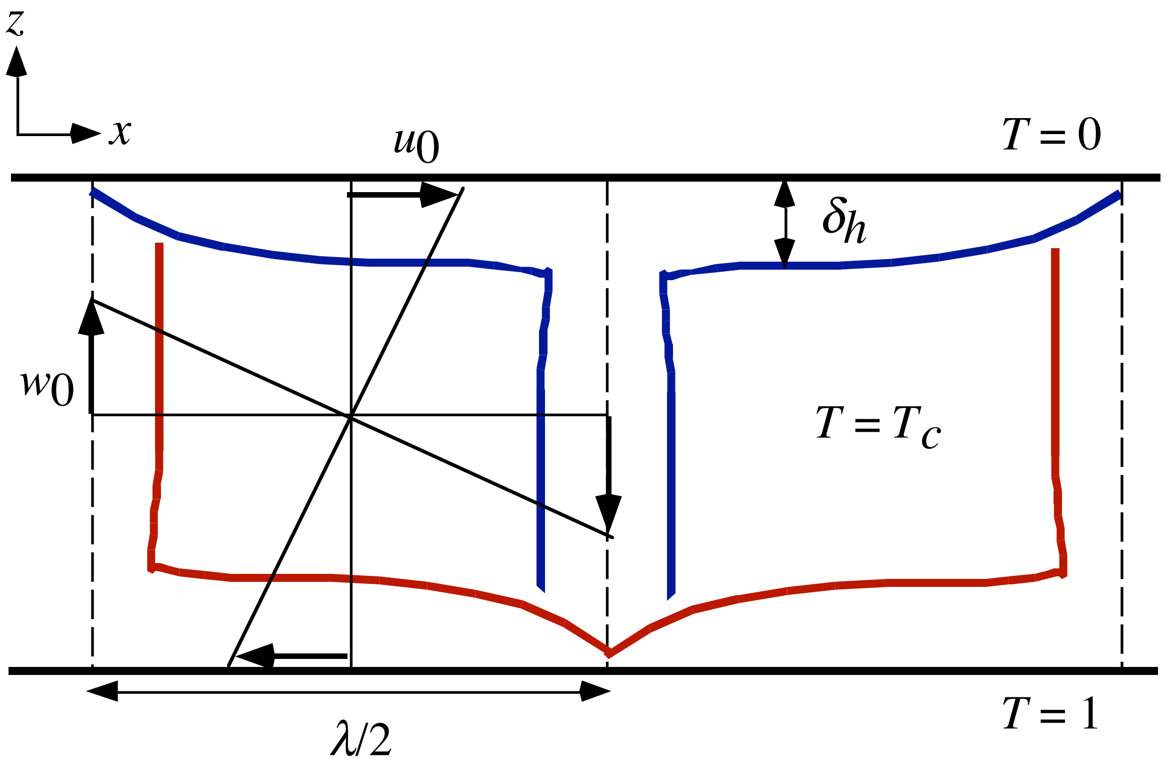
$$Ra = \frac{\rho_0 \alpha \Delta T g h^3}{\eta \kappa}$$

←浮力

←粘性抵抗

境界レイリー数 Rb

$$Rb = \frac{\Delta \rho g h^3}{\eta \kappa}$$



レイリー数とレイリー・ベナール対流

熱レイリー数 *Ra*

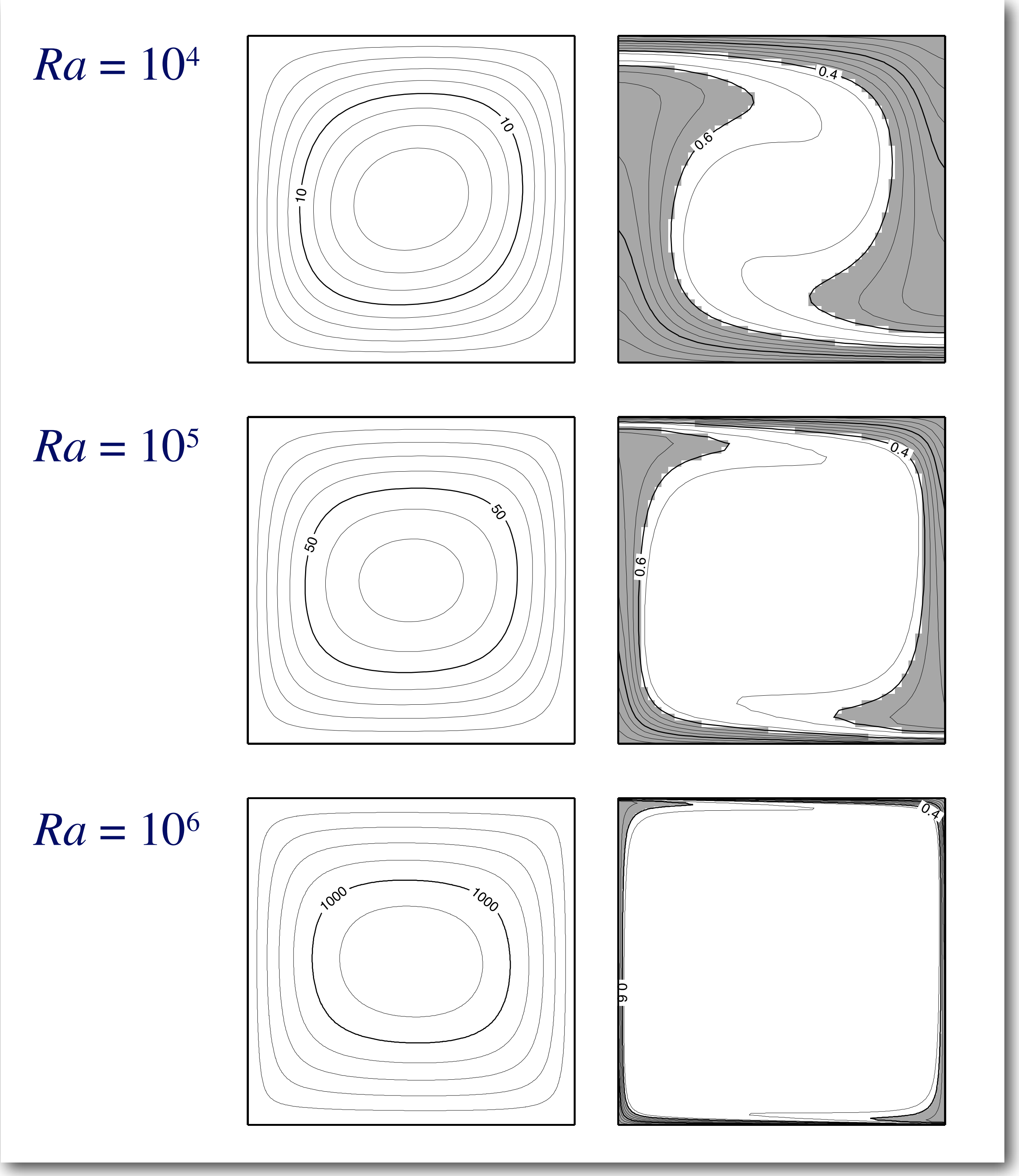
$$Ra = \frac{\rho_0 \alpha \Delta T g h^3}{\eta \kappa}$$

←浮力

←粘性抵抗

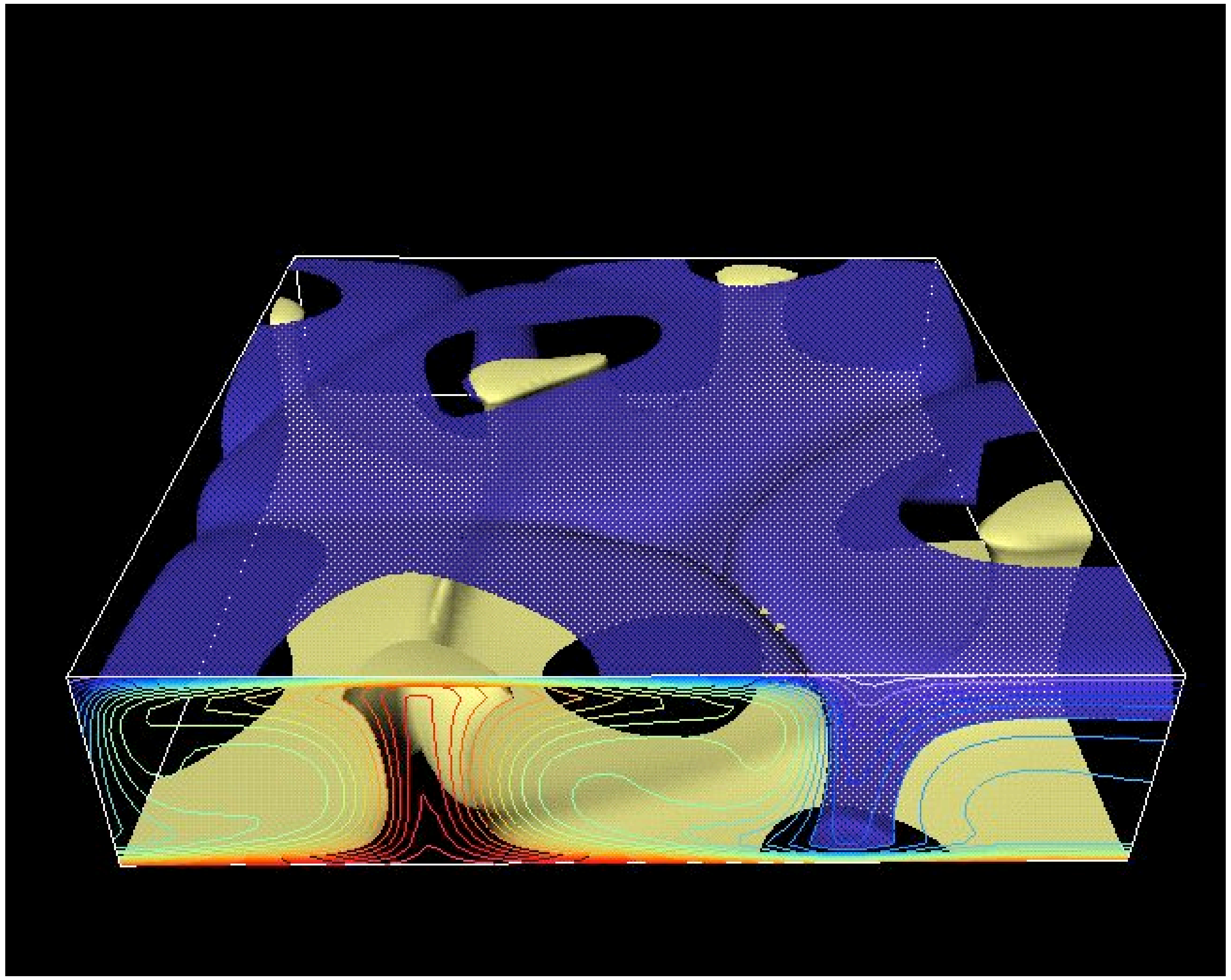
境界レイリー数 *Rb*

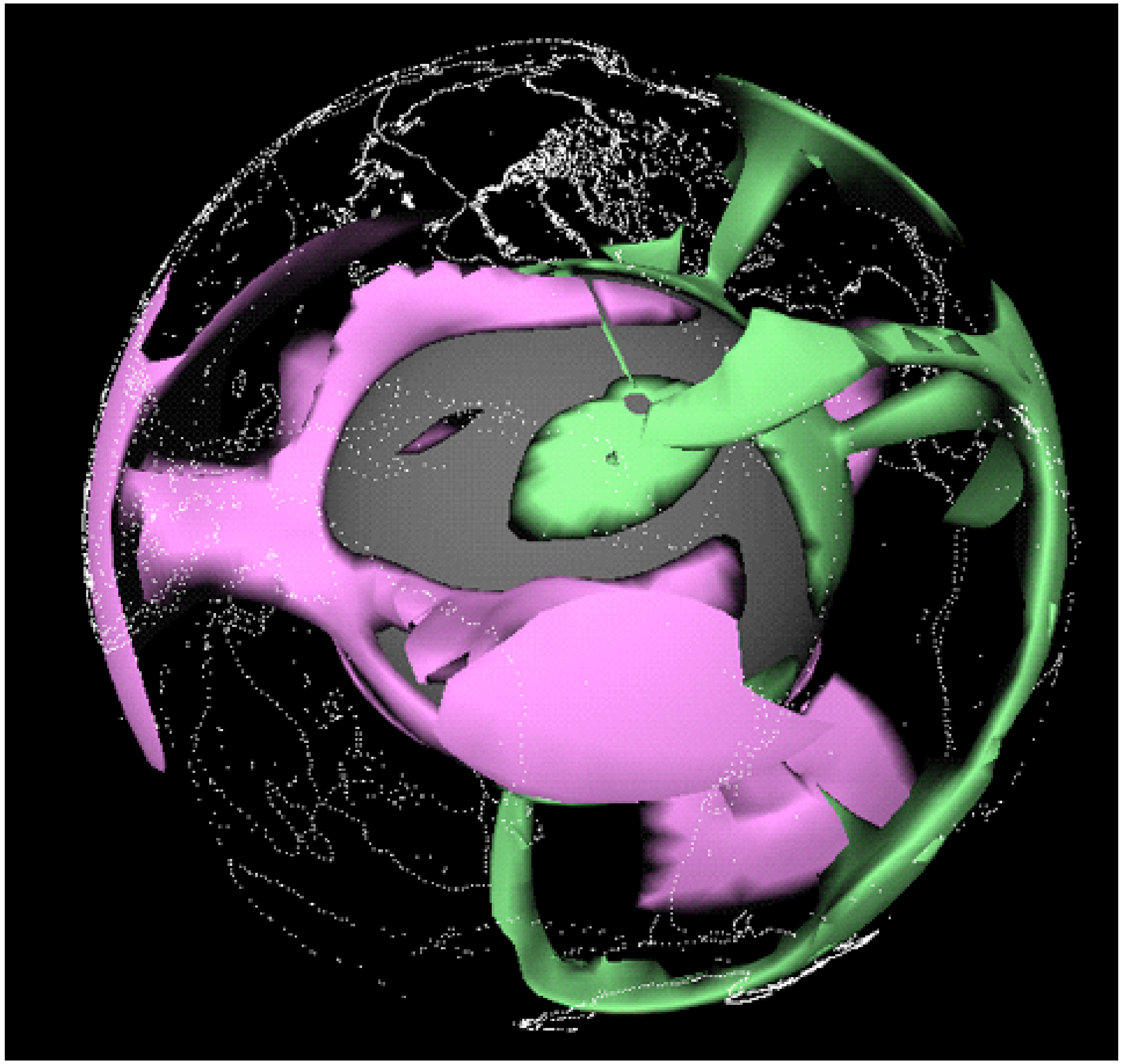
$$Rb = \frac{\Delta \rho g h^3}{\eta \kappa}$$



粘性率一定のマントル対流モデル

三次元：箱形モデルと球殻モデル

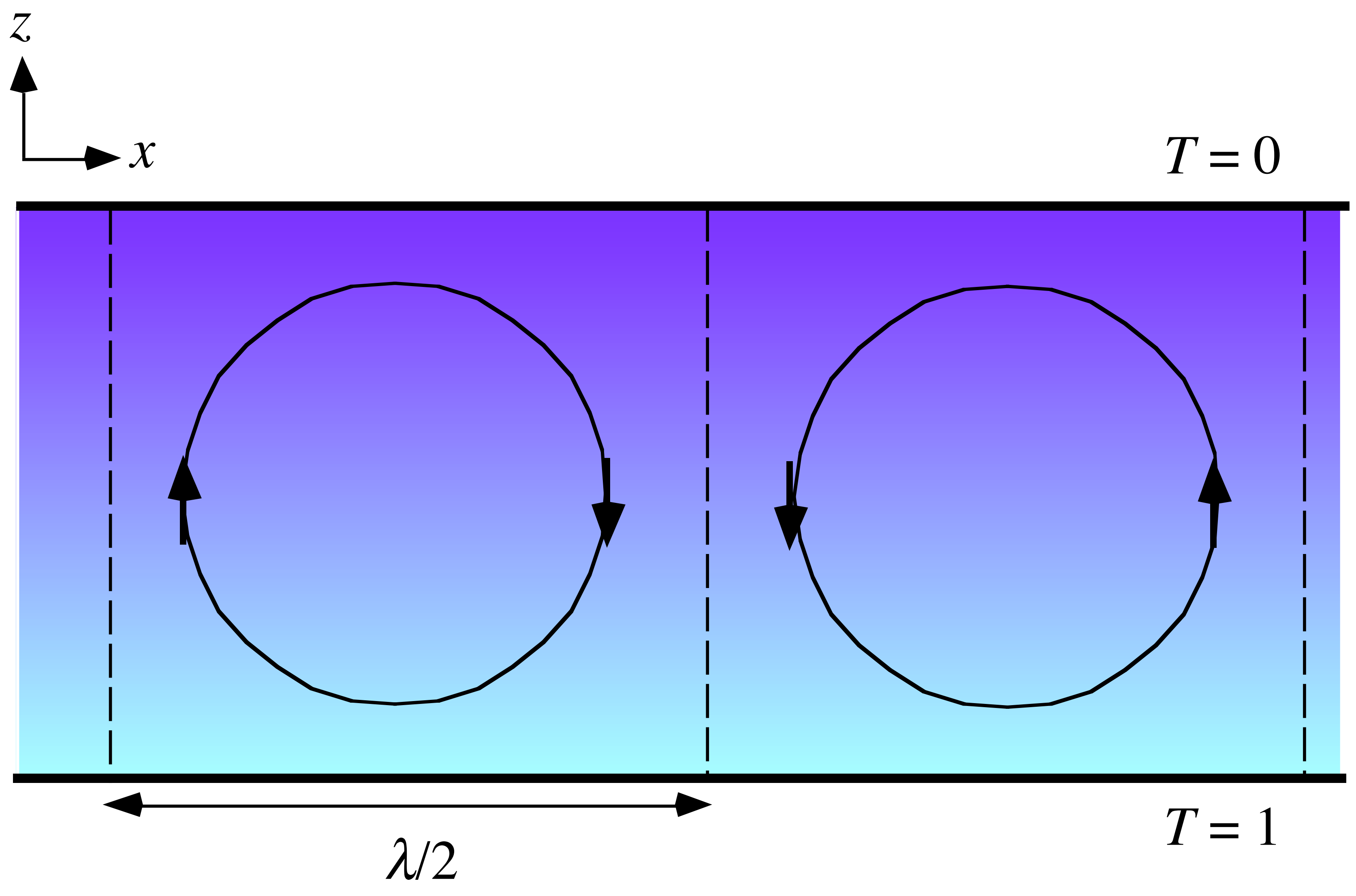




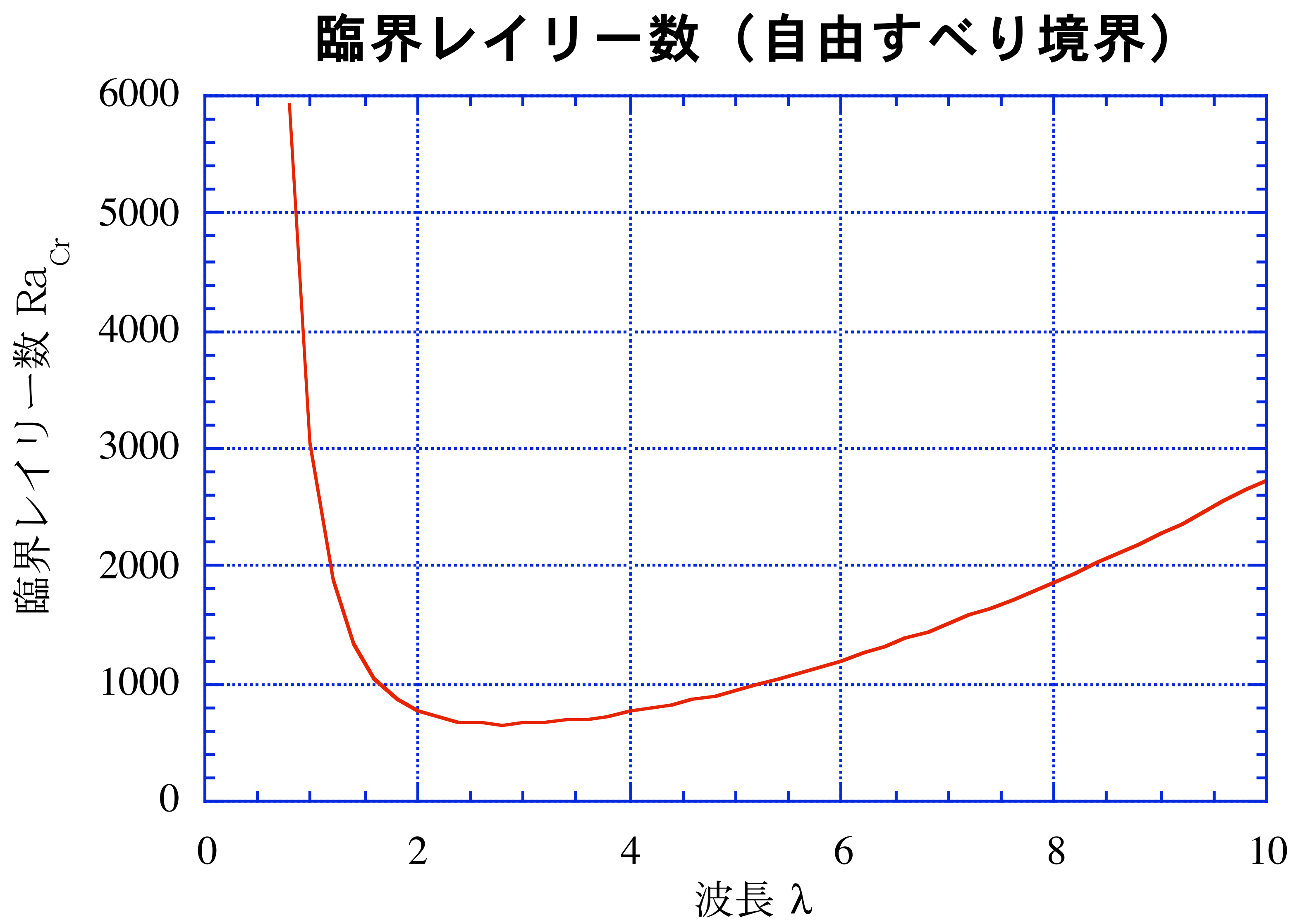
左：等温面，右：温度異常

岩瀬による

対流の開始: 線形安定性解析



対流の開始: 臨界レイリー数



$\lambda=2\sqrt{2}$のときにRa_{Cr}が最小値657を取る

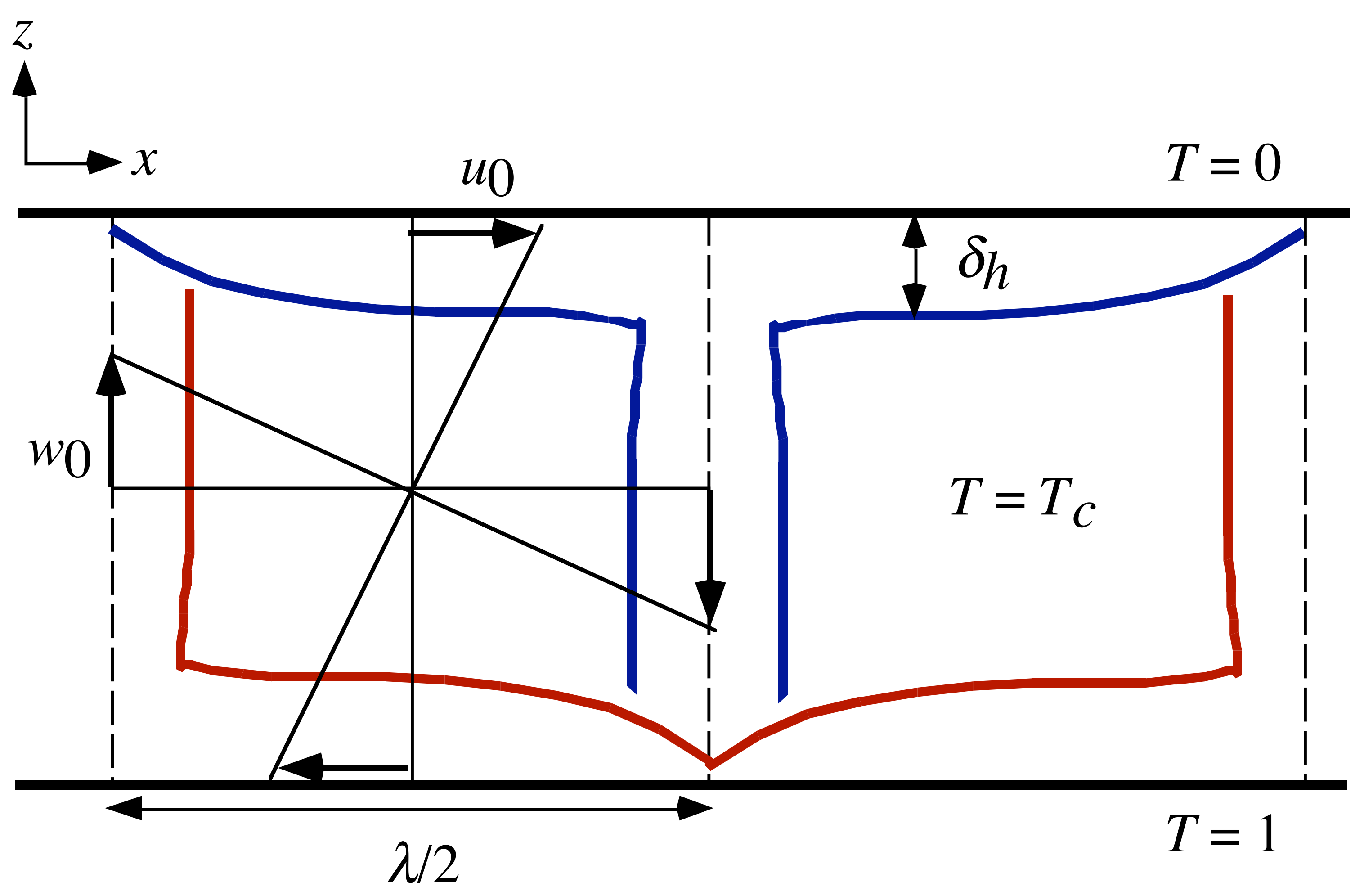
レイリー数とレイリー・ベナール対流

熱レイリー数 *Ra*

$$Ra = \frac{\rho_0 \alpha \Delta T g h^3}{\eta \kappa}$$

←浮力

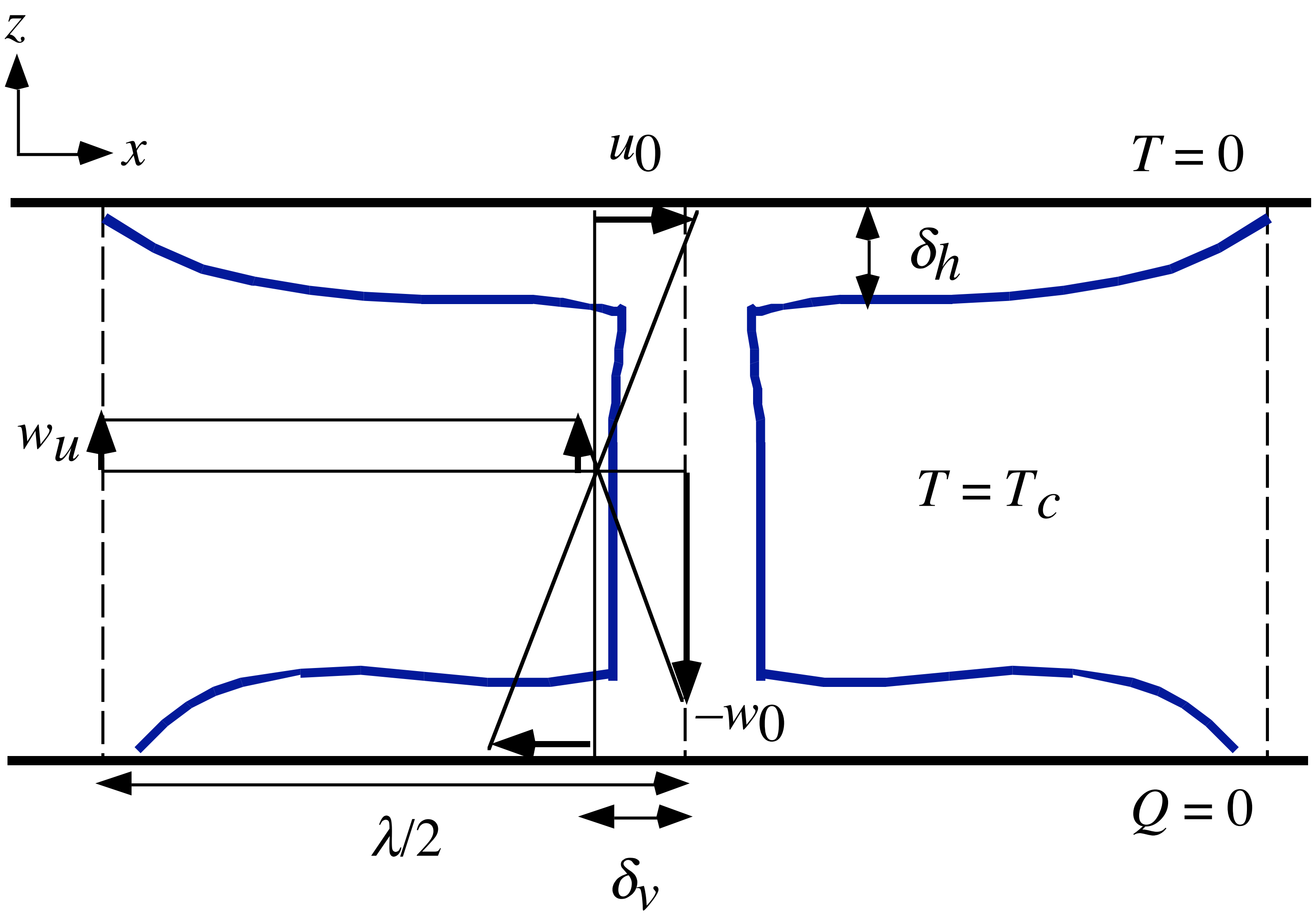
←粘性抵抗



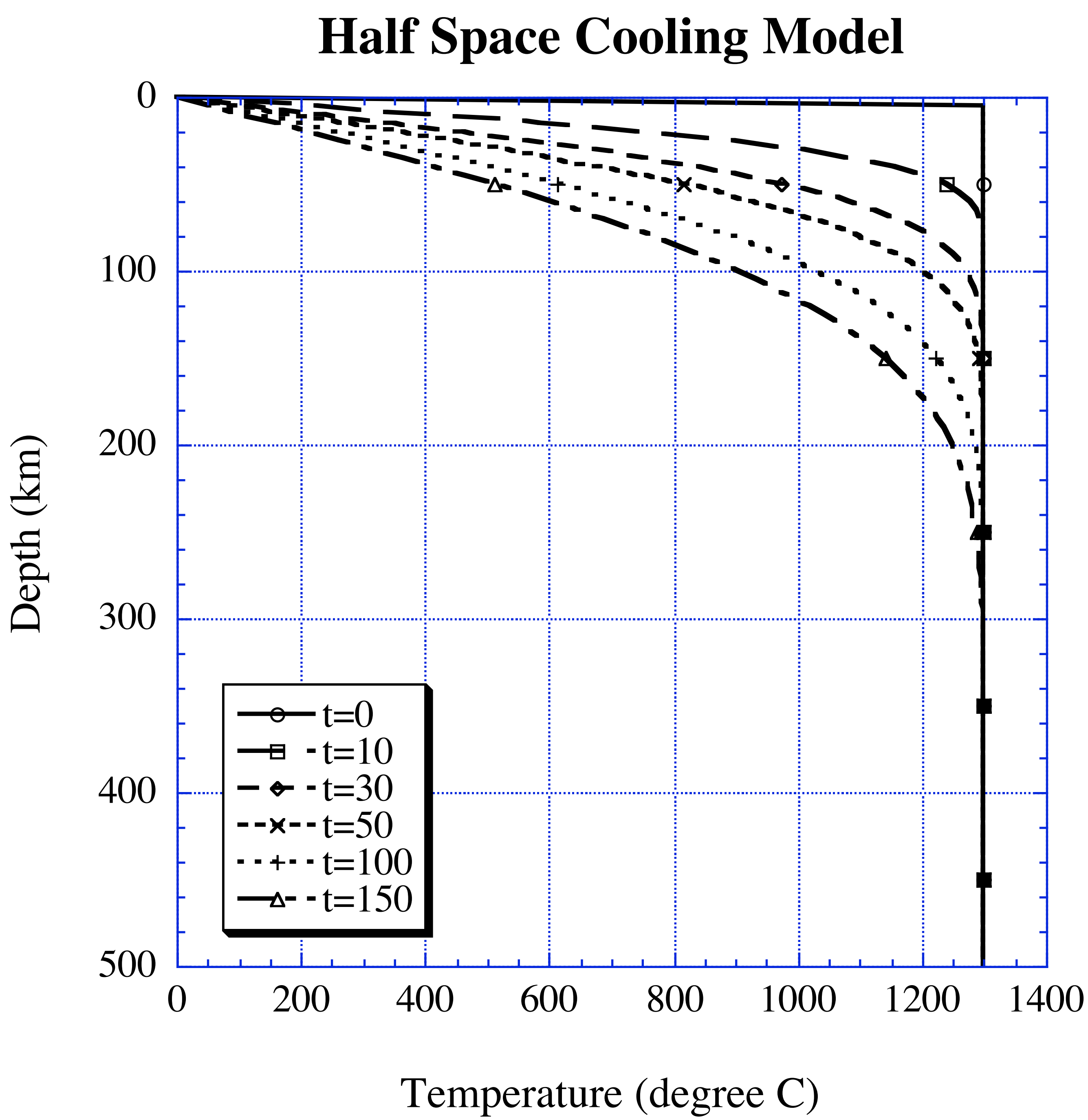
内部熱源のみに加熱されるマントル対流

内部加熱によるレイリー数 Ra_H

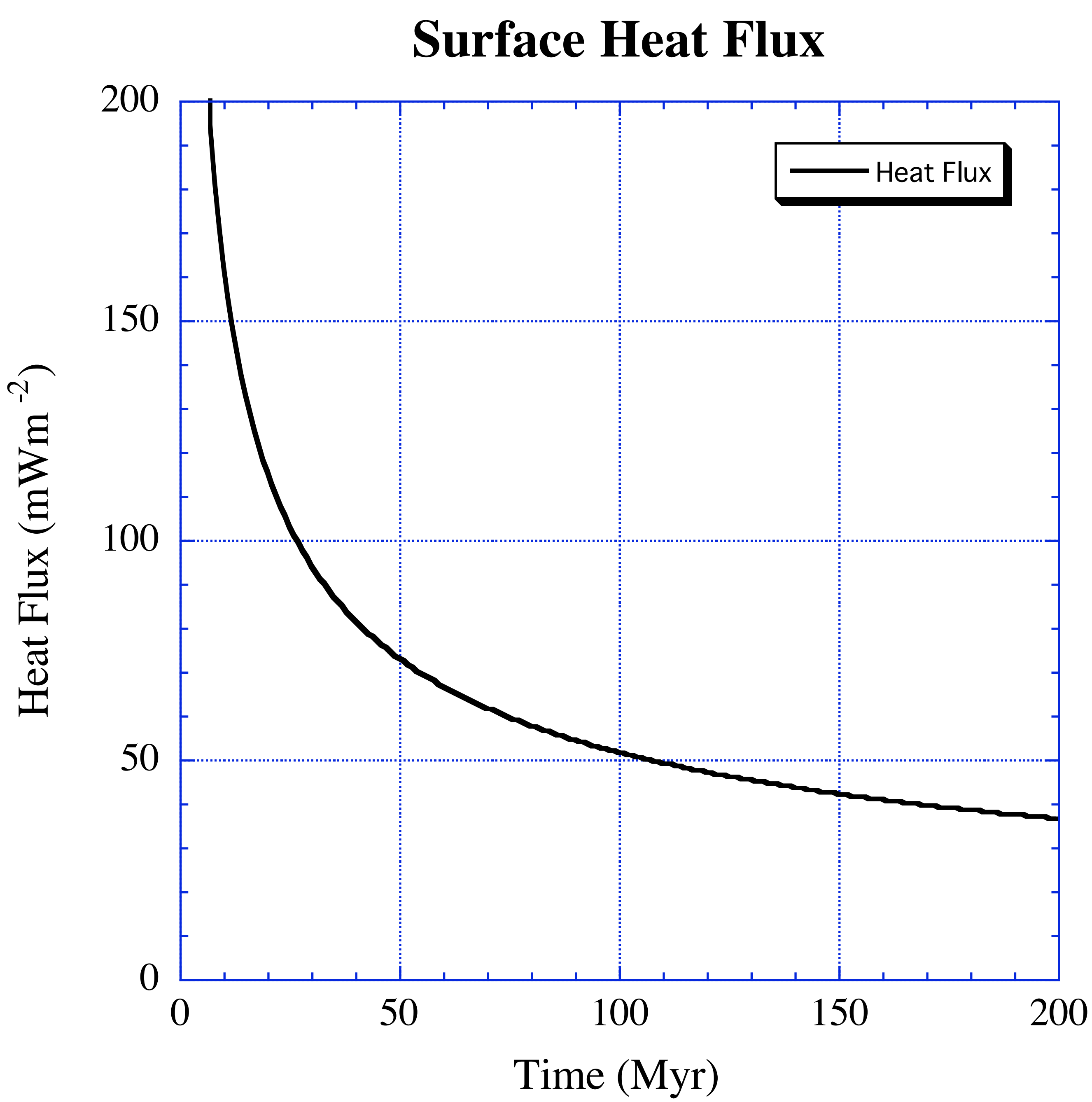
$$Ra_H = RaH = \frac{\rho_0 \alpha g h^5 H}{\eta_0 \kappa k}$$



半無限体冷却モデルによるプレートの温度



半無限体冷却モデルによる地殻熱流量



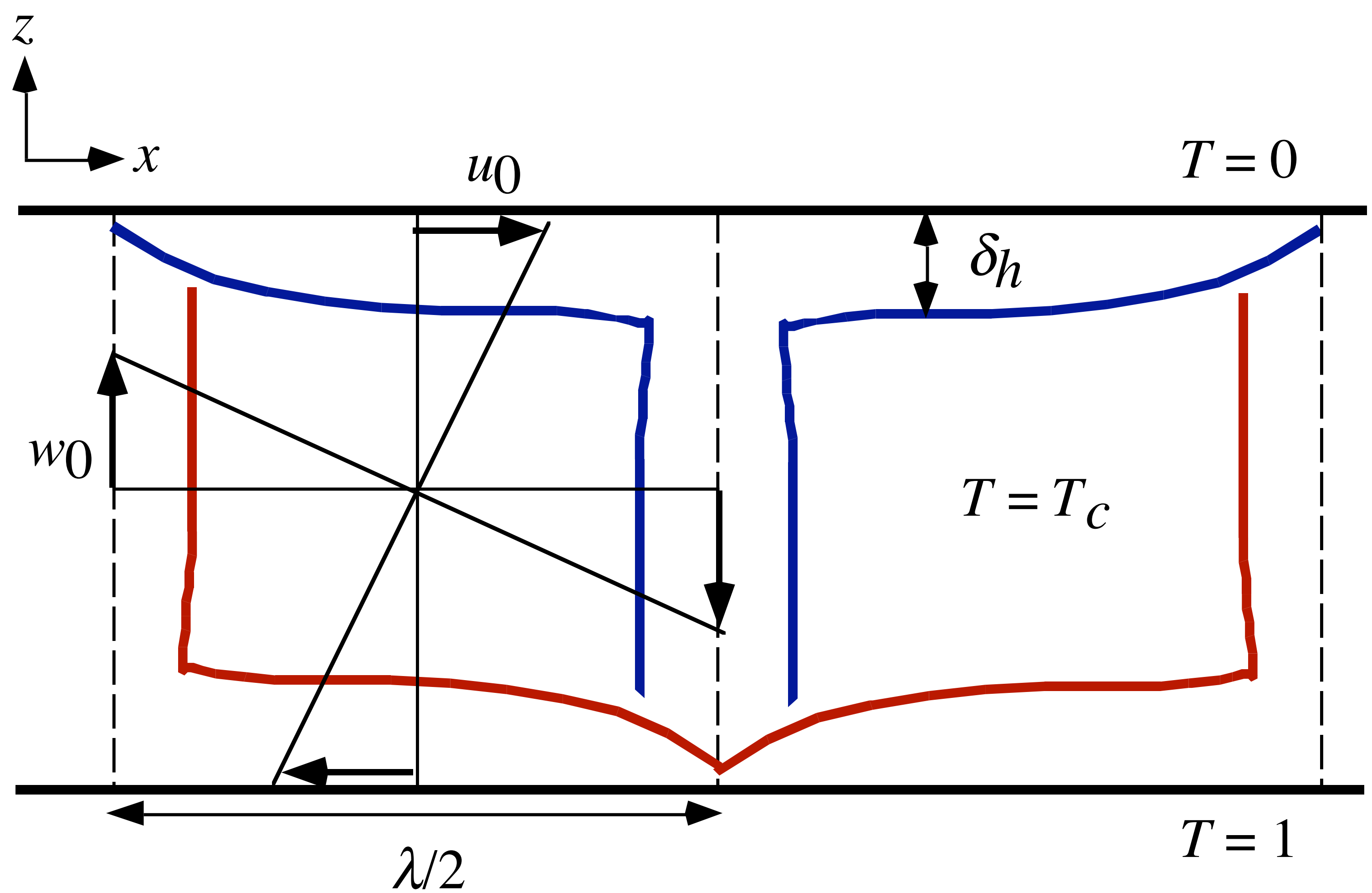
レイリー数とレイリー・ベナール対流

熱レイリー数 Ra

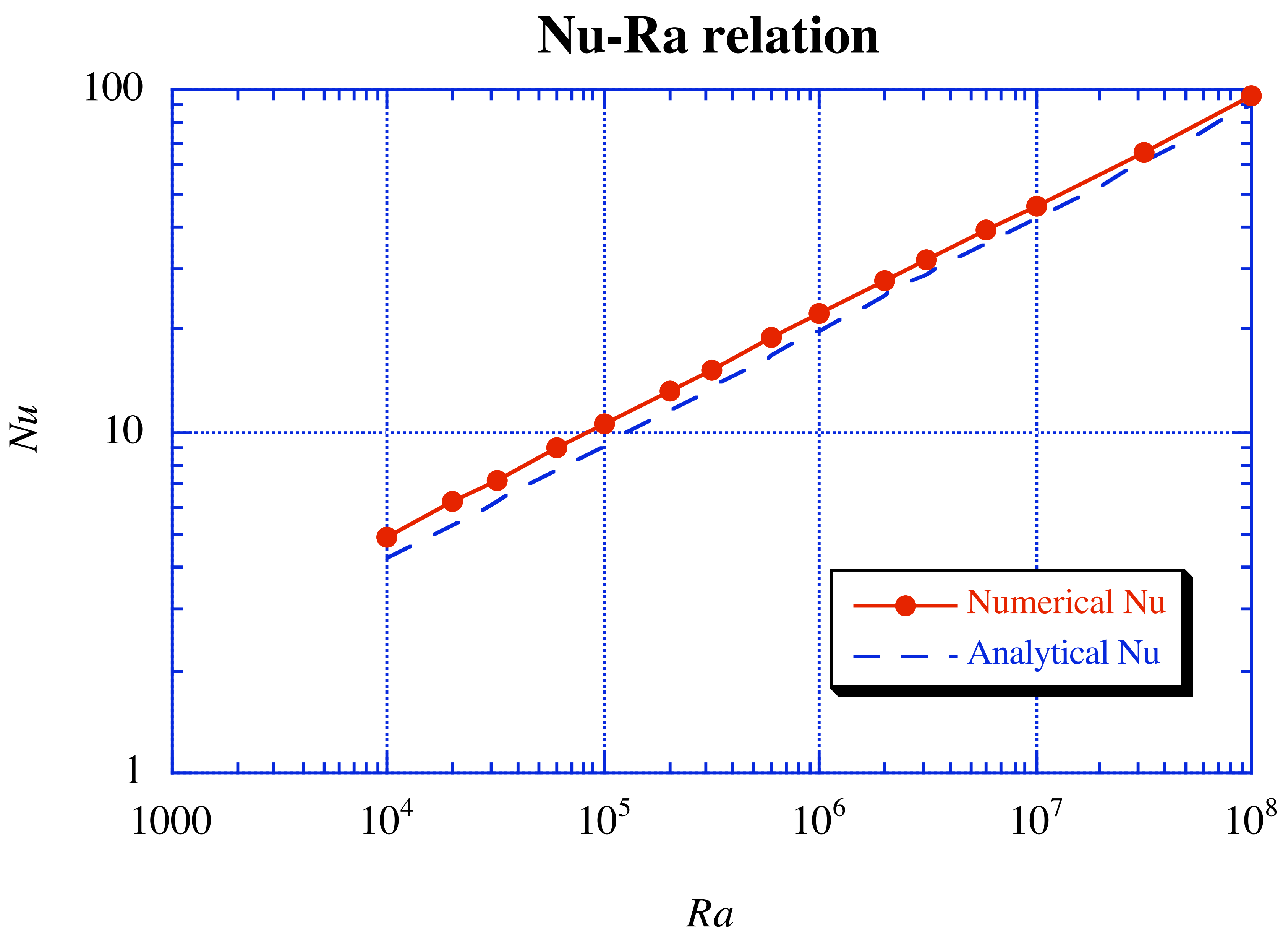
$$Ra = \frac{\rho_0 \alpha \Delta T g h^3}{\eta \kappa}$$

←浮力

←粘性抵抗



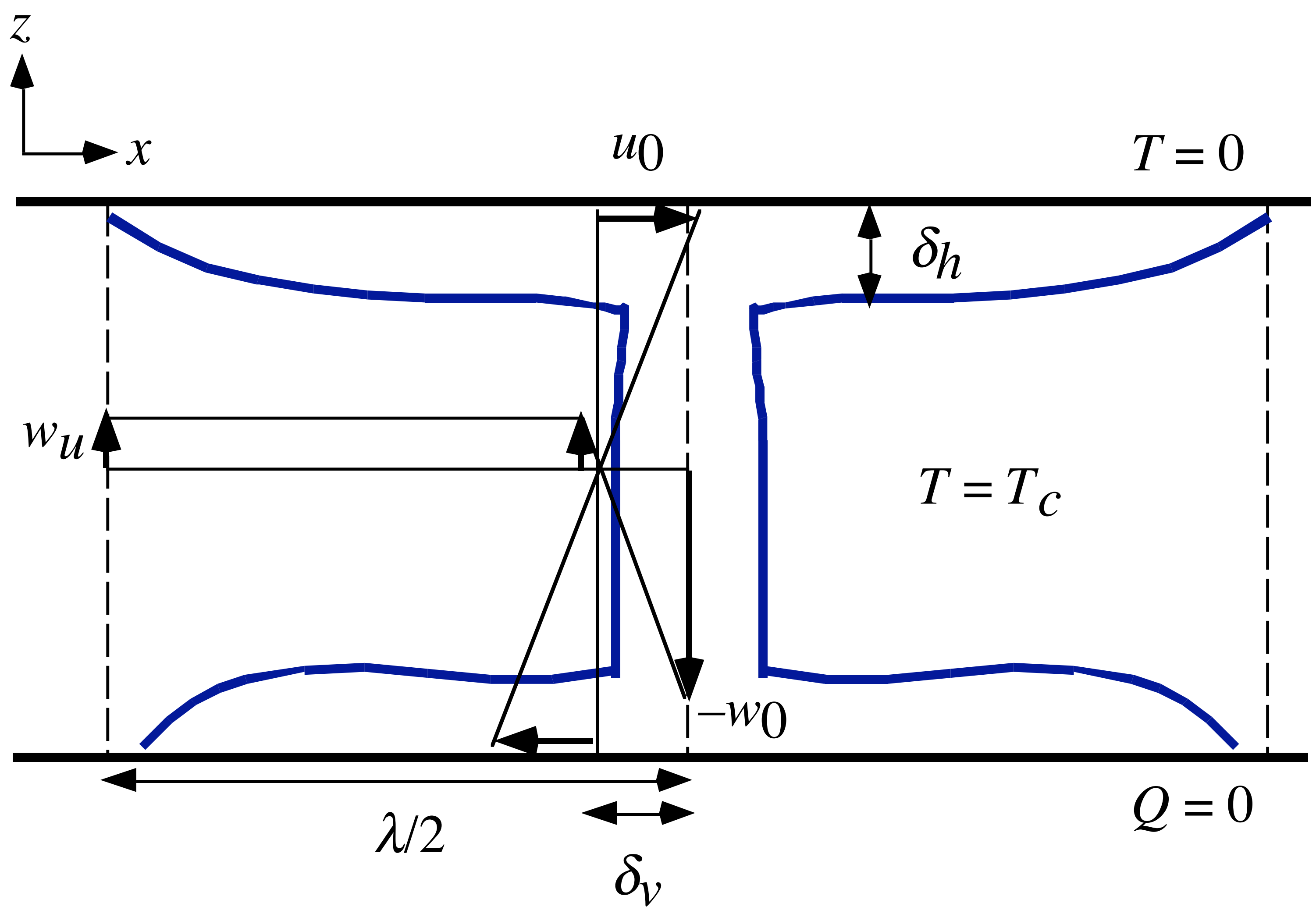
レイリー数とヌッセルト数の関係



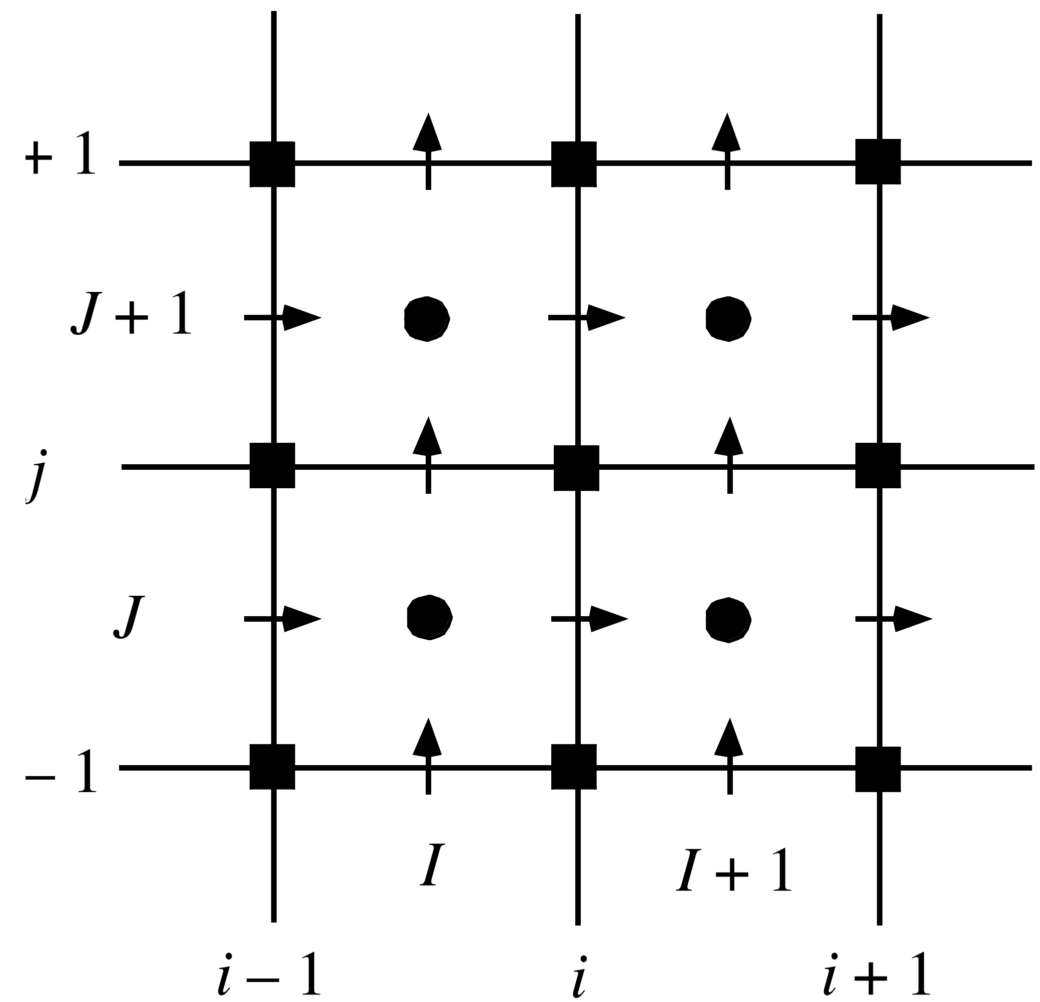
内部熱源のみに加熱されるマントル対流

内部加熱によるレイリー数 Ra_H

$$Ra_H = RaH = \frac{\rho_0 \alpha g h^5 H}{\eta_0 \kappa k}$$



メッシュの構造



■ 流線・渦度　● 圧力・温度・相・組成

→ 水平速度　↑ 垂直速度

食い違い格子 (staggered grid)

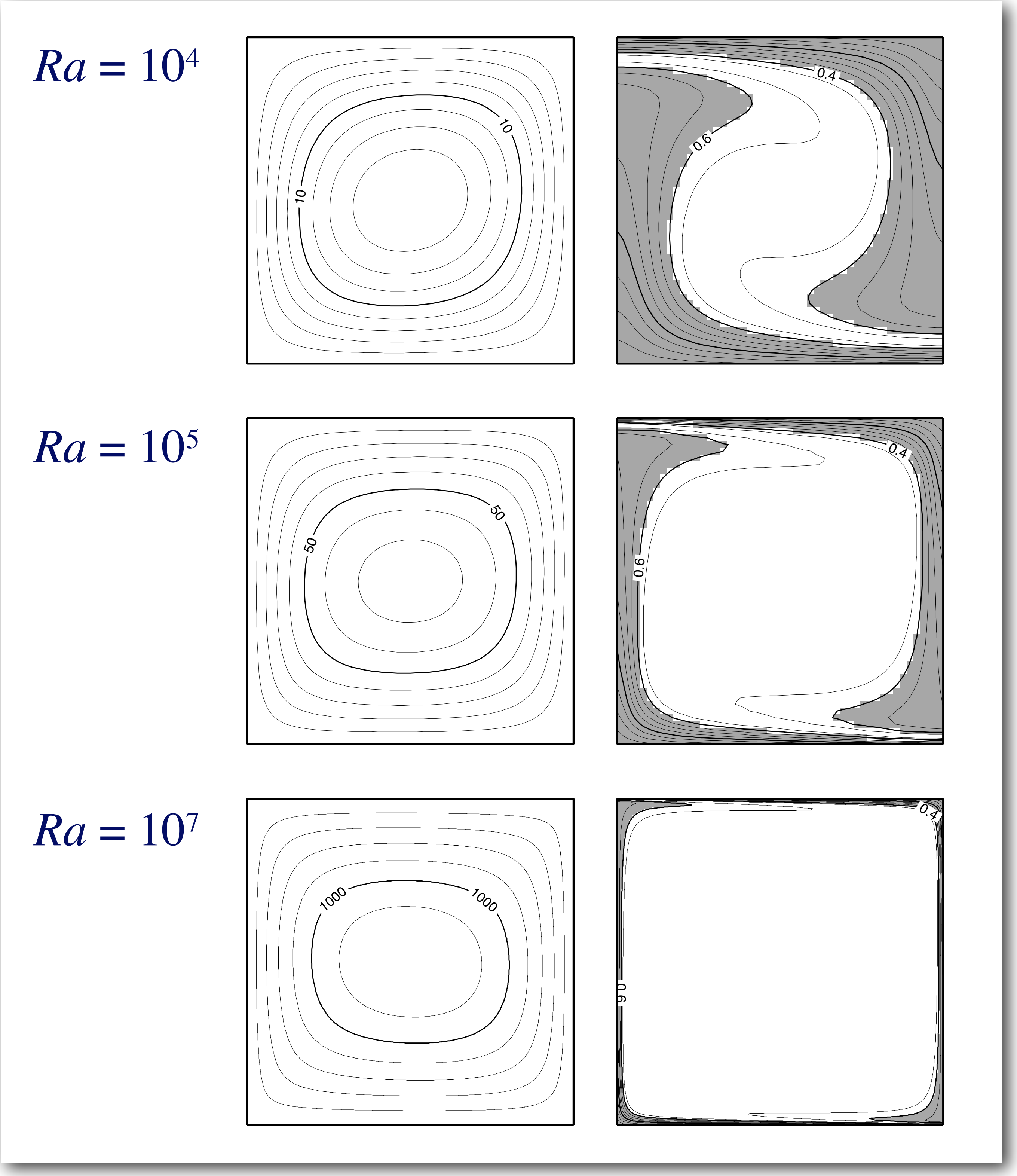
レイリー数変化

熱レイリー数 *Ra*

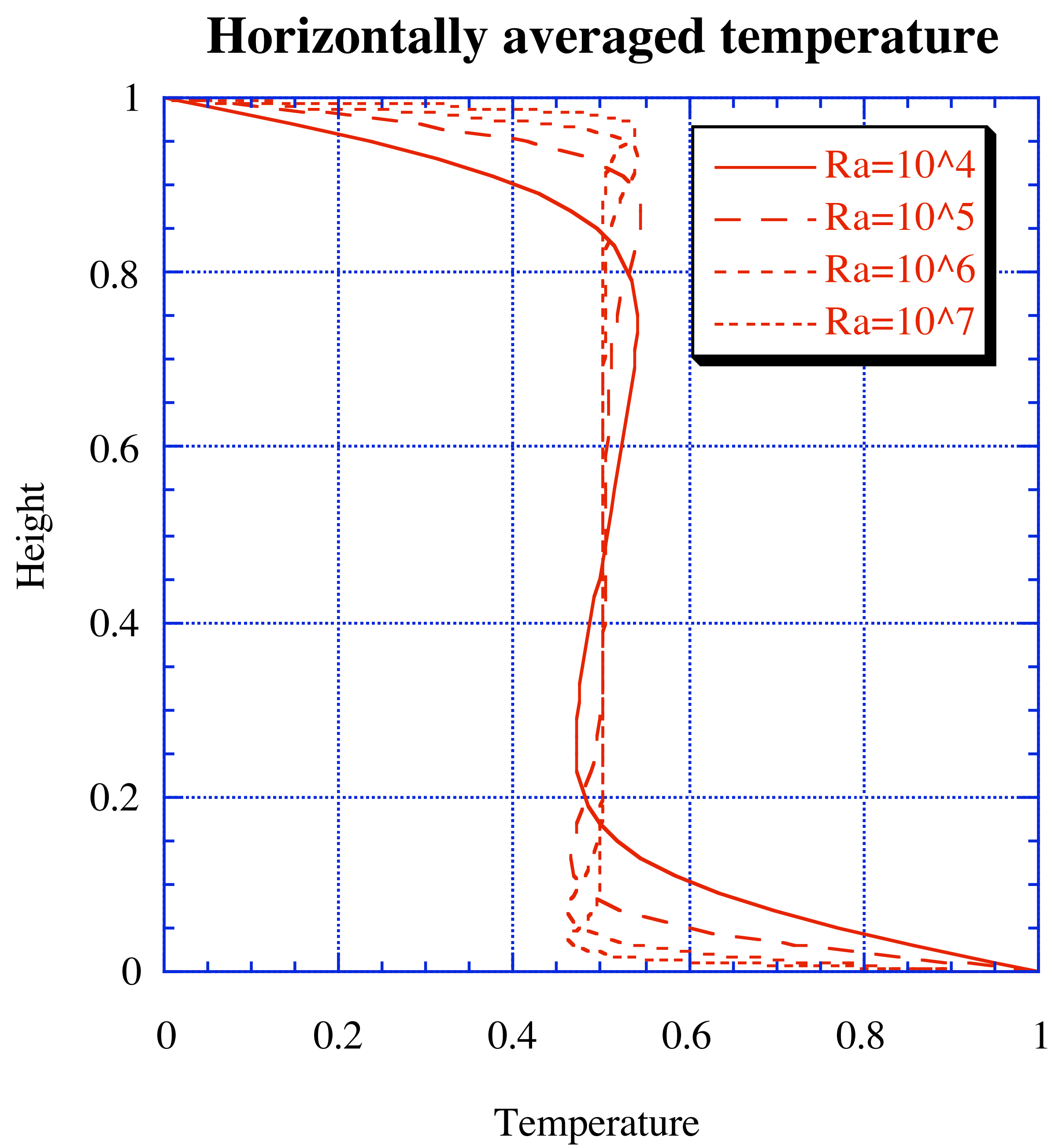
$$Ra = \frac{\rho_0 \alpha \Delta T g h^3}{\eta \kappa}$$

←浮力

←粘性抵抗

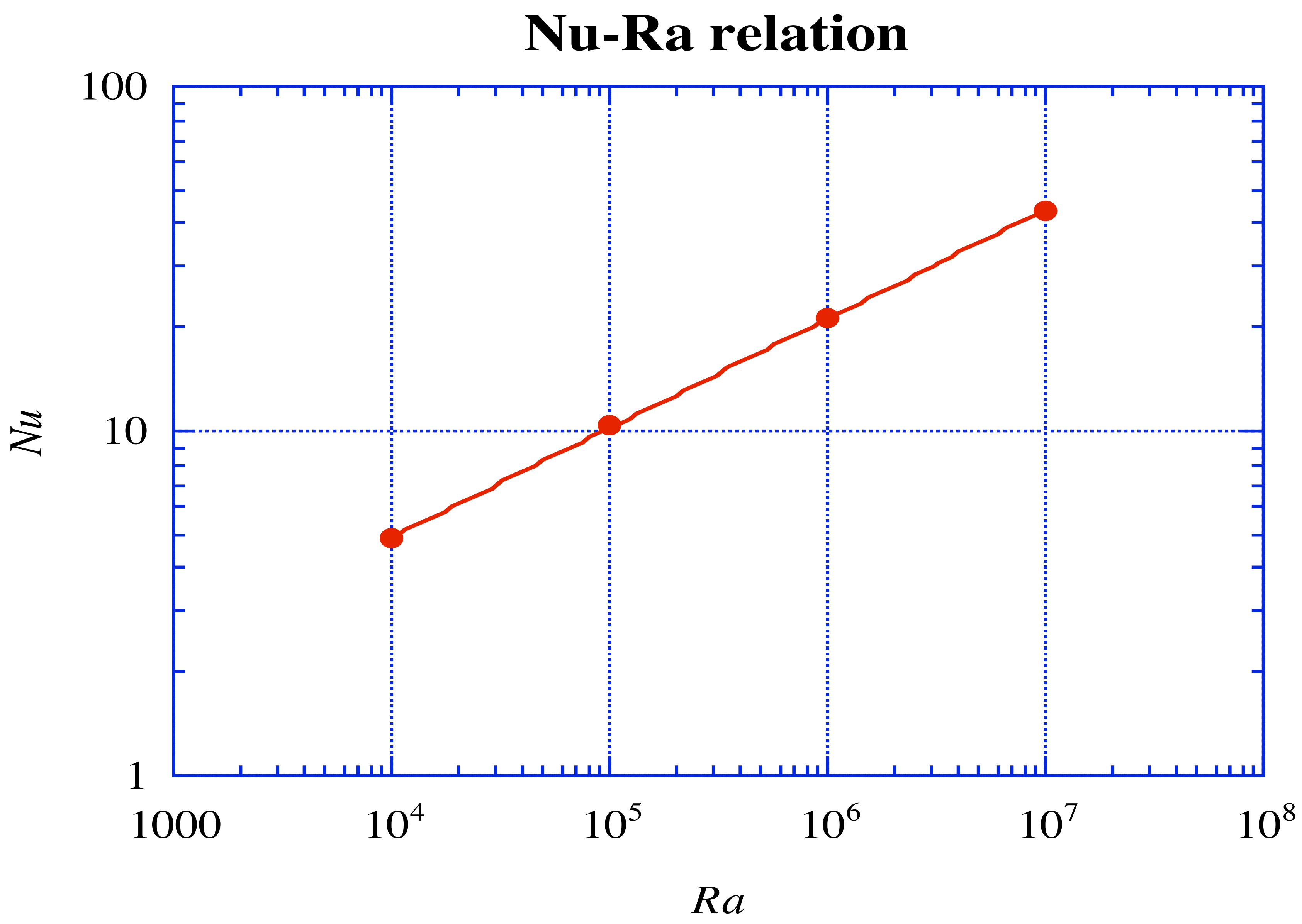


平均温度: レイリー数の影響

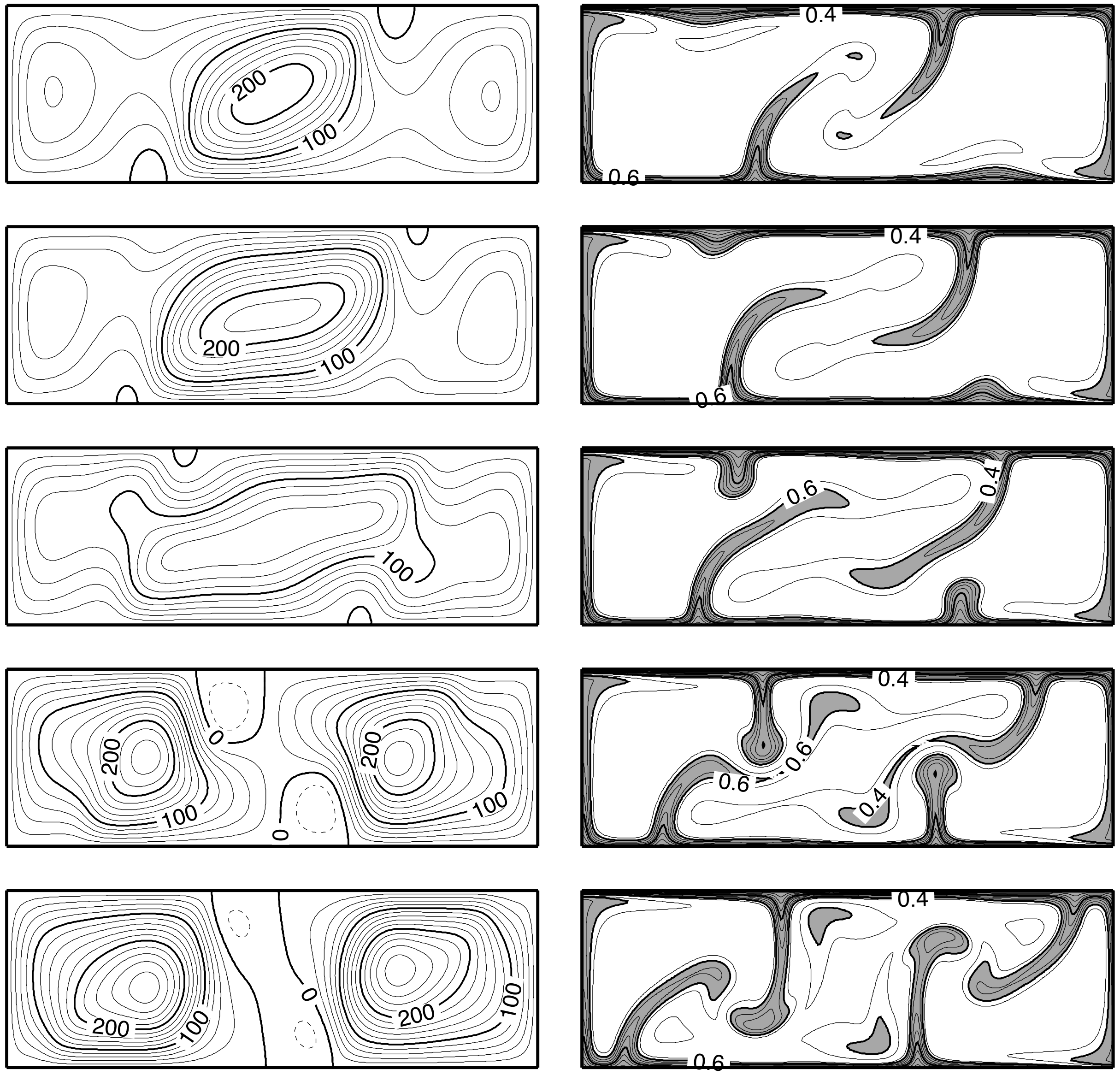


*Ra*が大きくなると境界層が薄くなる

ヌッセルト数



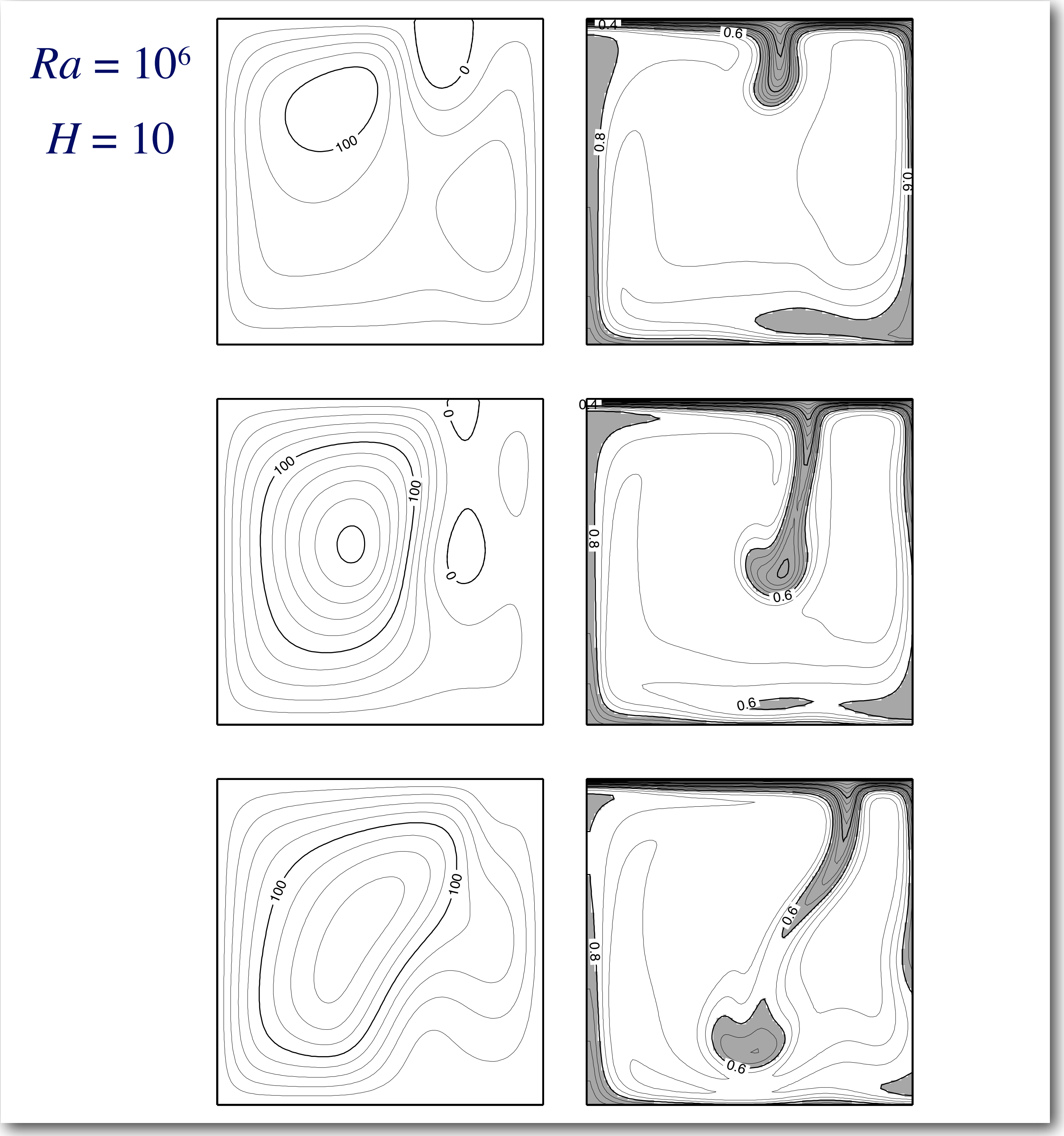
高アスペクト比の箱: 時間依存対流



横長の対流は安定しない

内部加熱を持つ対流

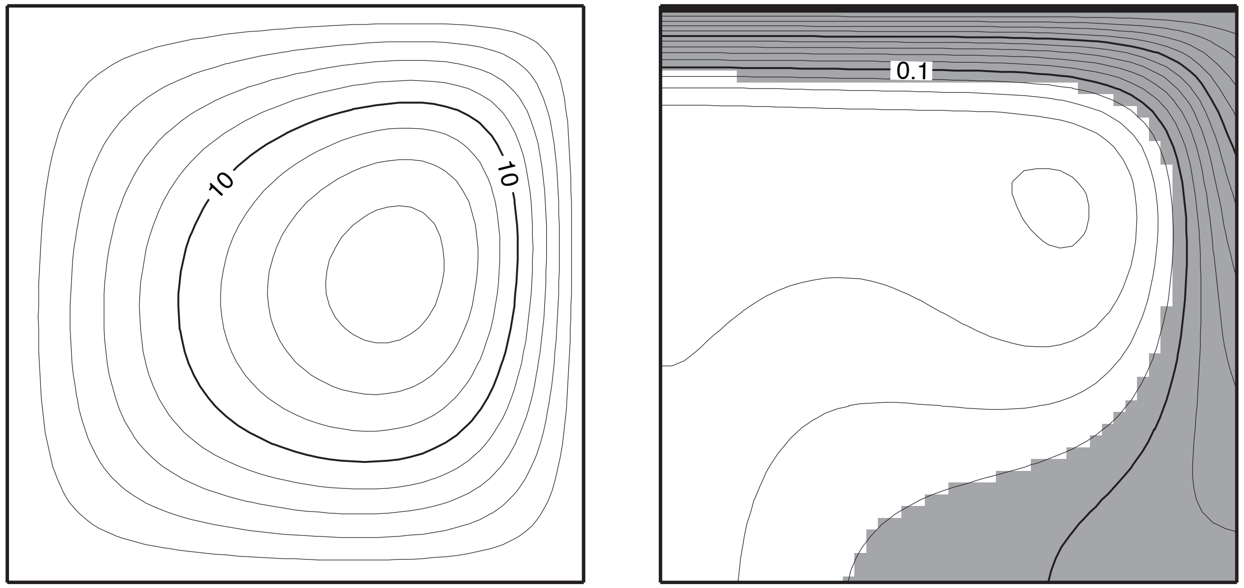
内部加熱があると上面の
境界層が不安定を起こす



内部熱源のみに加熱される対流

内部加熱レイリー数 Ra_H

$$Ra_H = \frac{\rho_0 \alpha g h^5 H}{\eta_0 \kappa k}$$



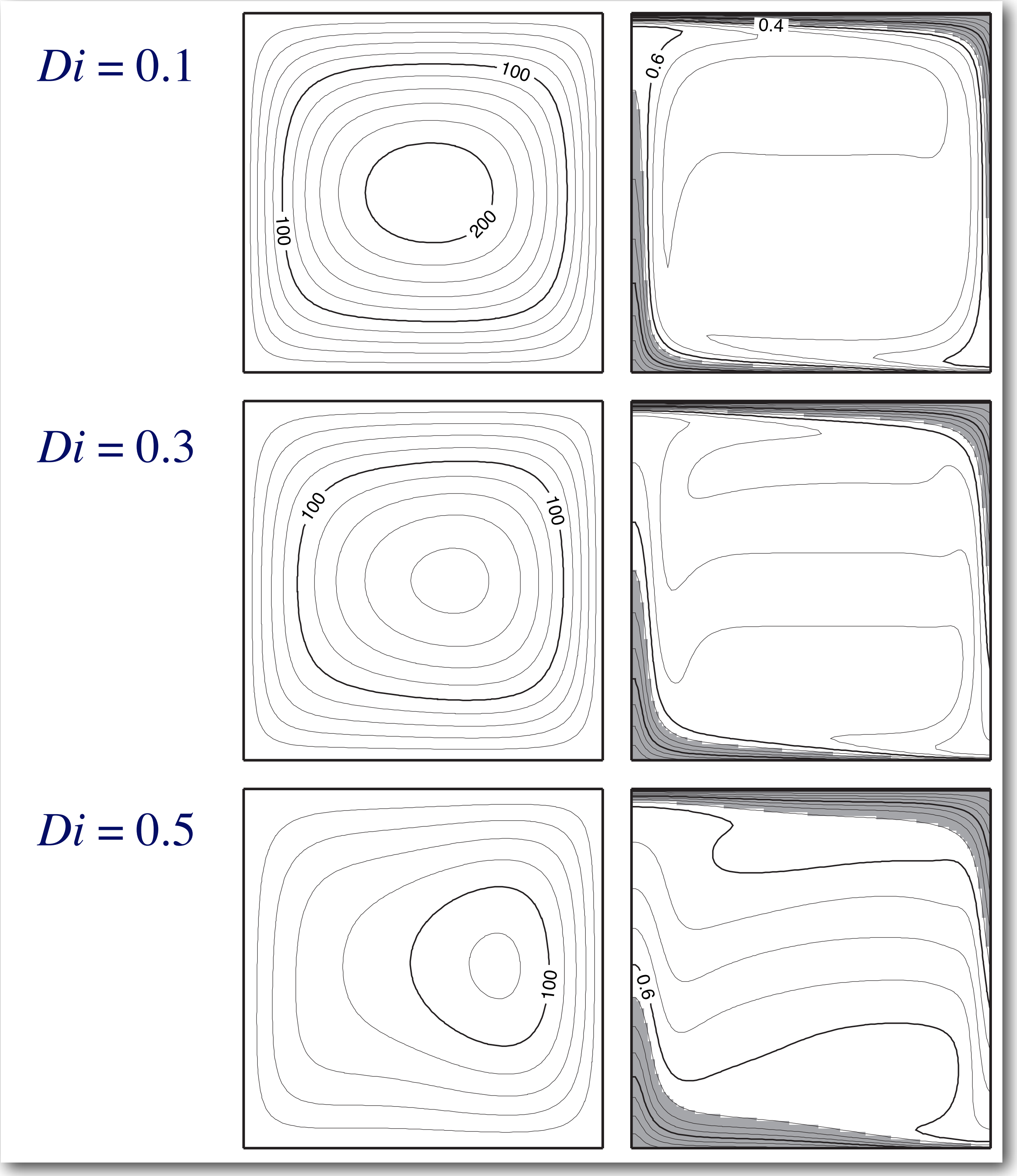
$Ra_H = 10^5$

表面の冷却により密度の高い境界層が形成され落下する

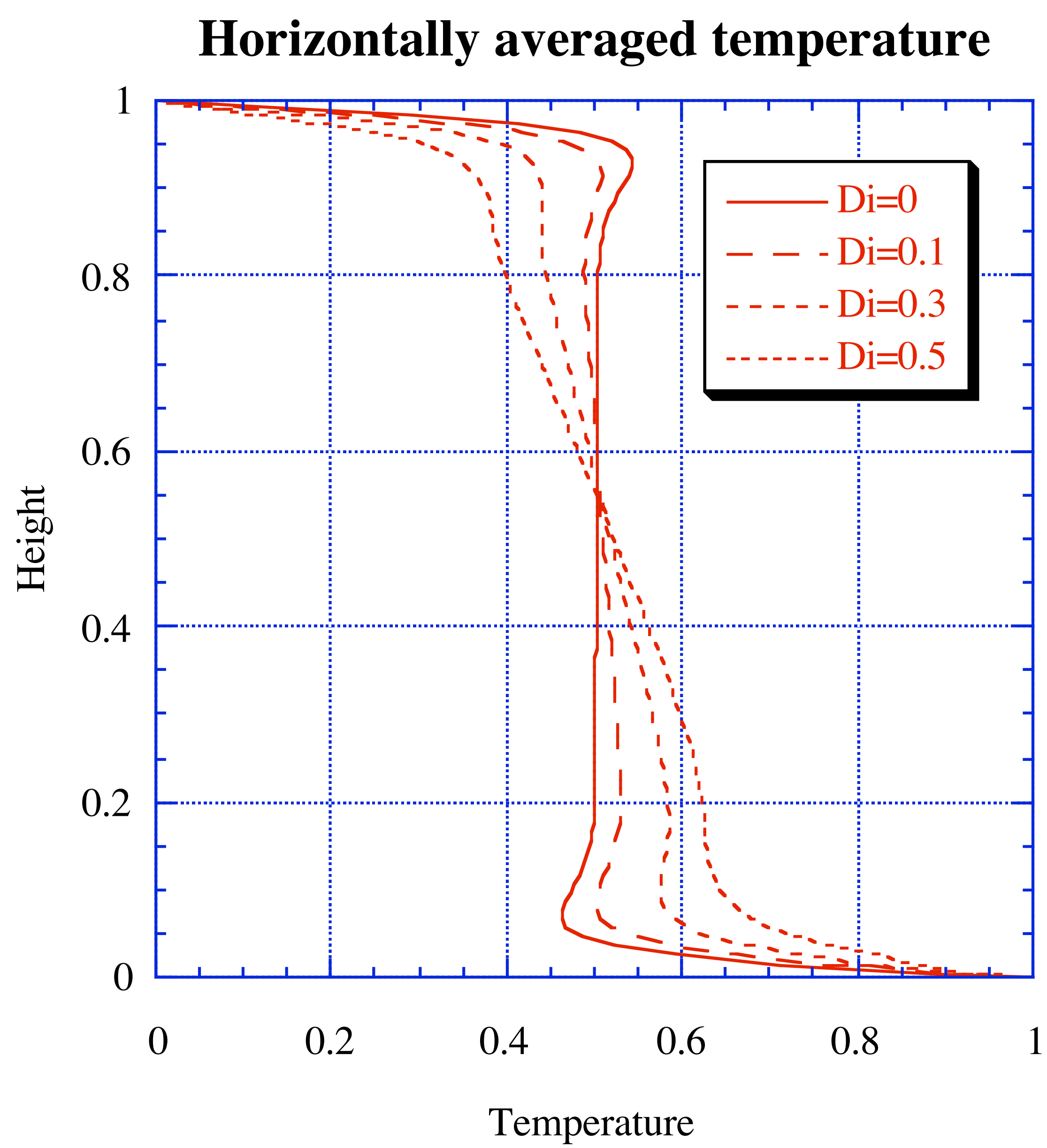
圧縮性の影響を持つ対流

散逸数 Di

$$Di = \frac{\alpha g h}{C_p}$$

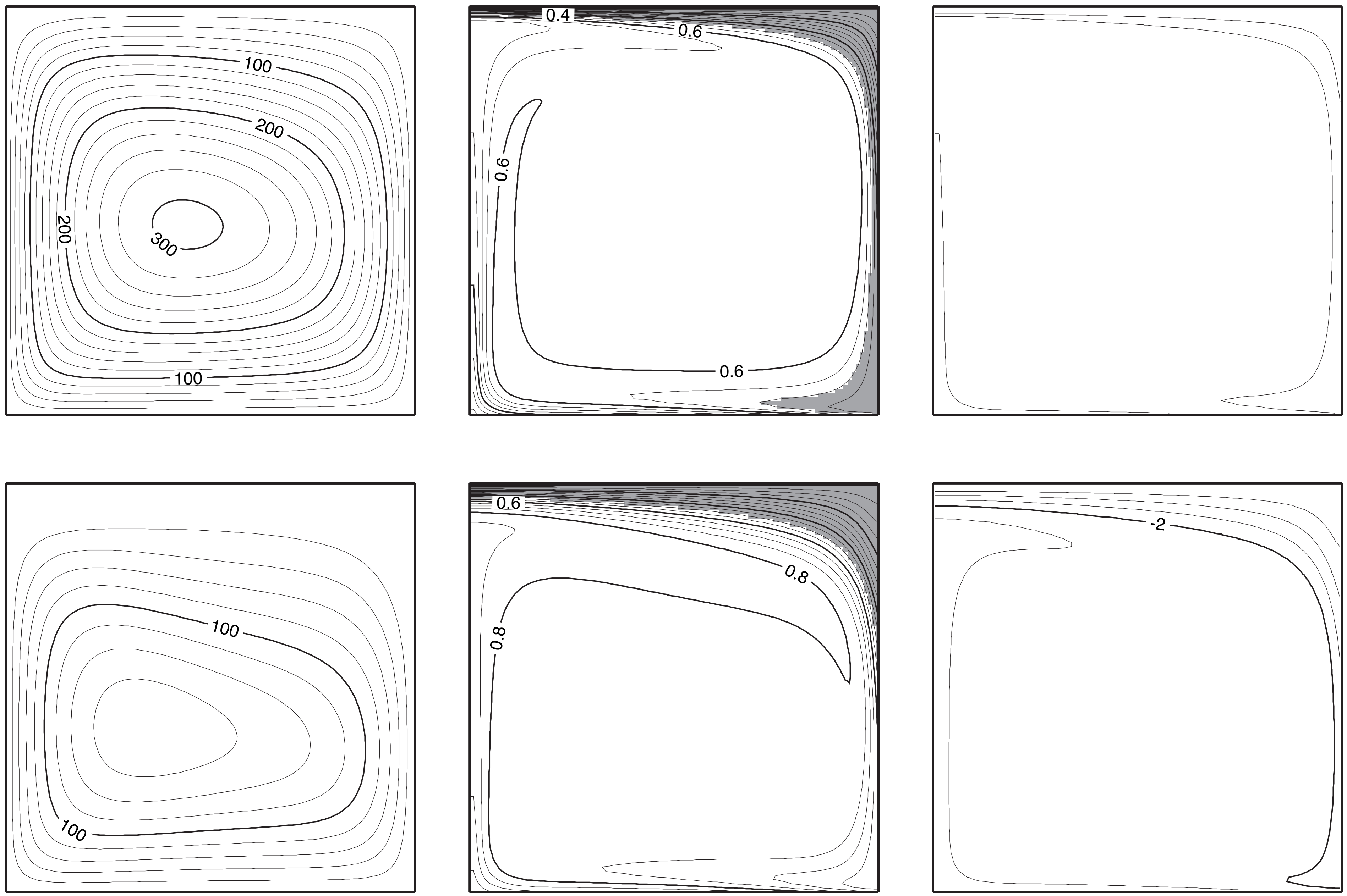


マントル対流とは？



散逸数が大きくなると断熱温度勾配が増加

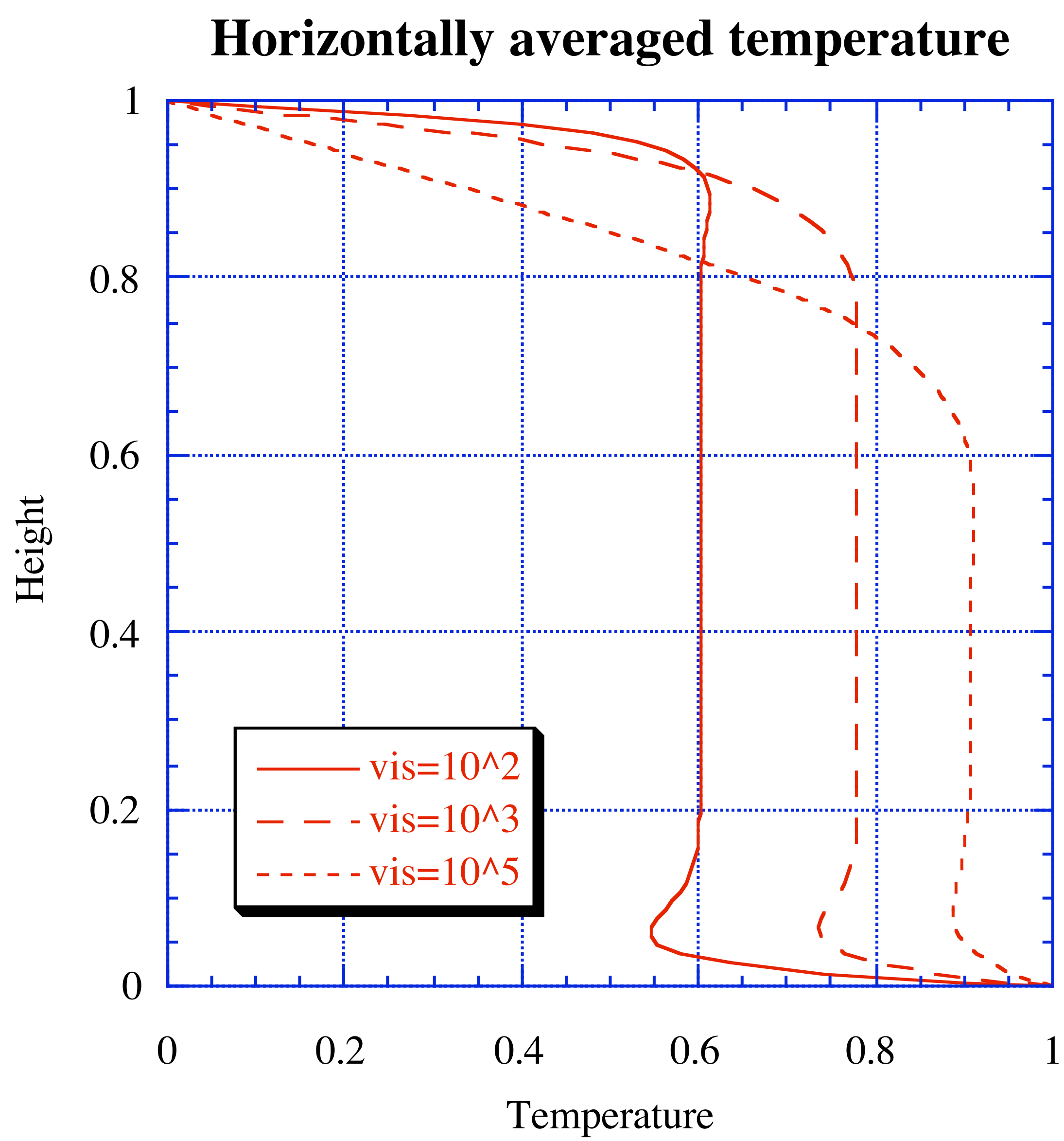
粘性率の温度依存性を持つ対流



流線　温度　粘性率

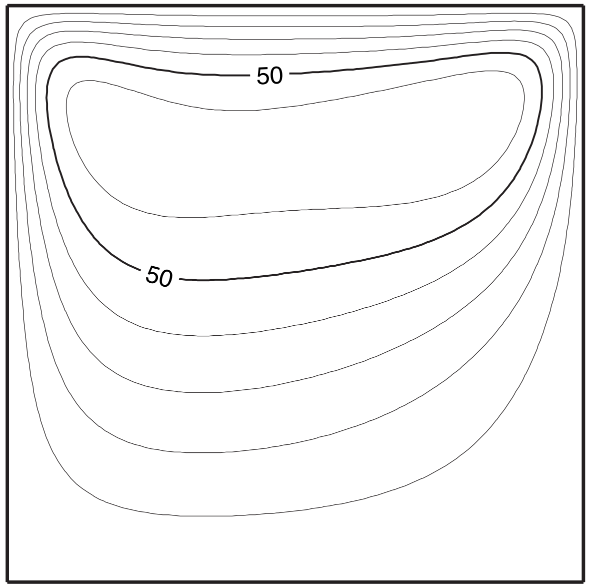
$\eta = \eta_0 \exp[-bT+cz]$: 表面の粘性が増大

粘性率の温度依存性を持つ対流

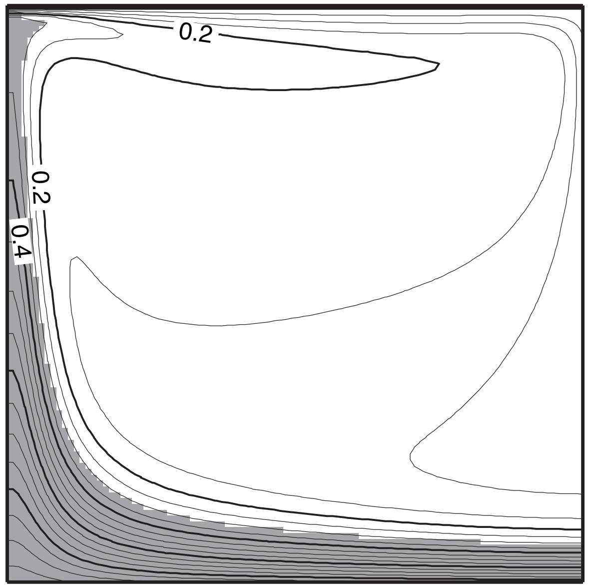


表面が動きにくくなるなると内部の温度が増加

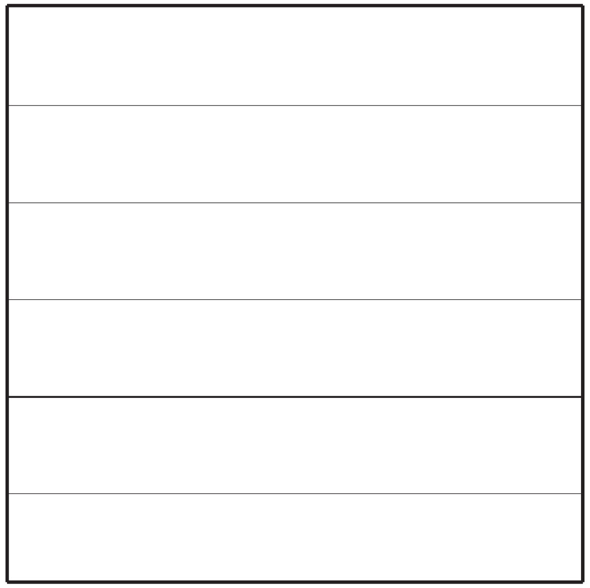
粘性率の圧力依存性を持つ対流



流線



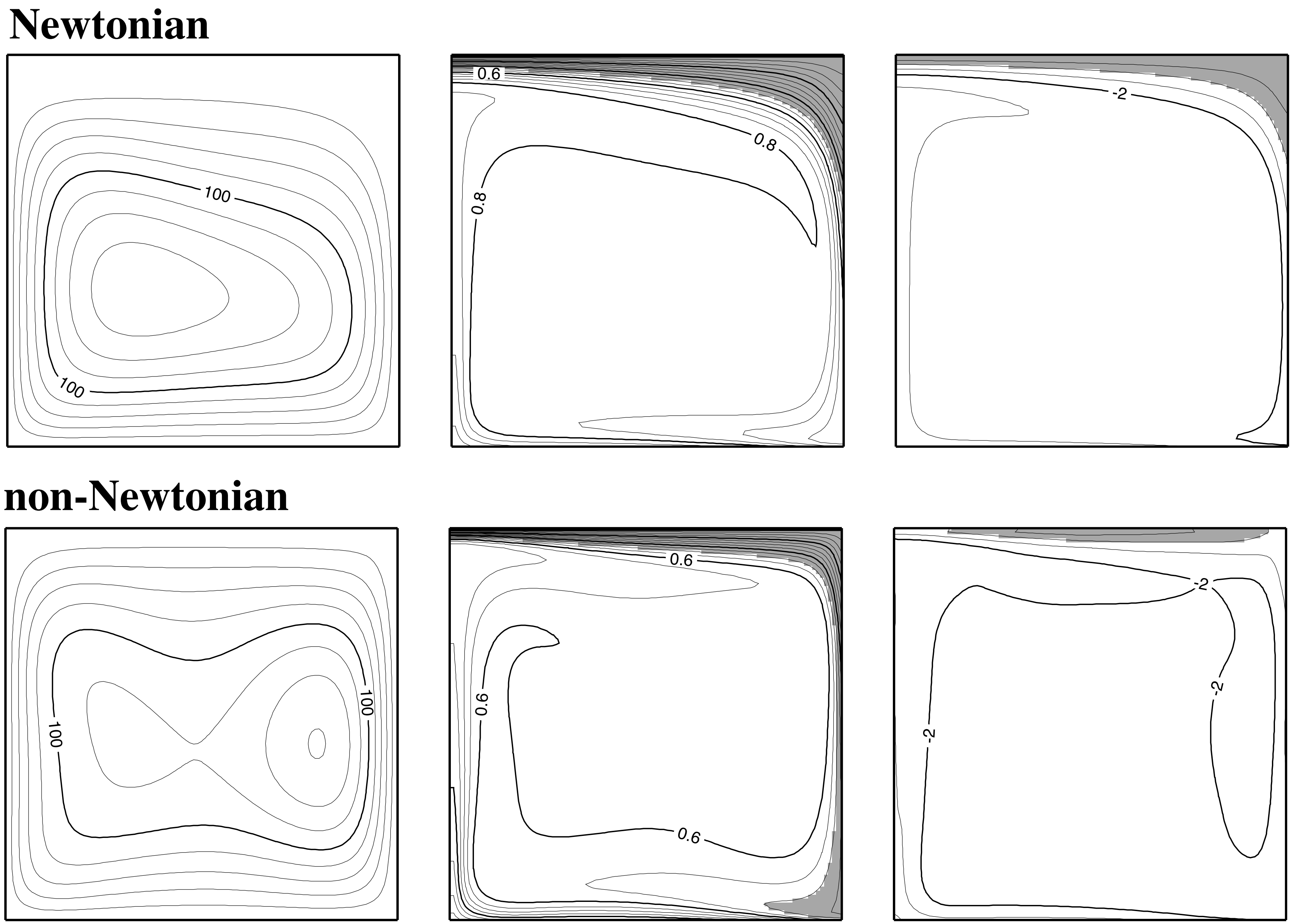
温度



粘性率

マントル深部の動きが遅くなる

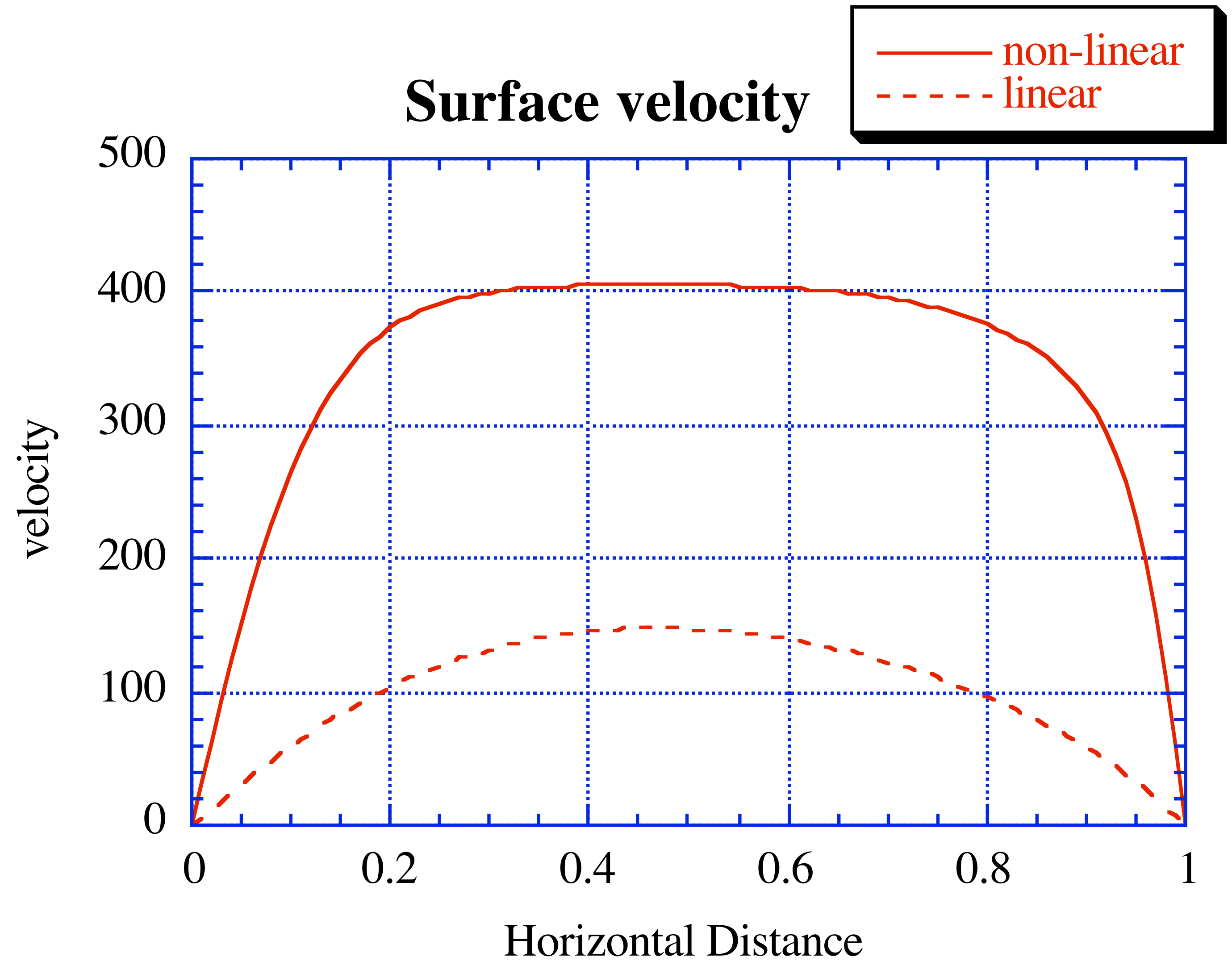
応力依存性の効果



Stream func.　Temperature　Viscosity

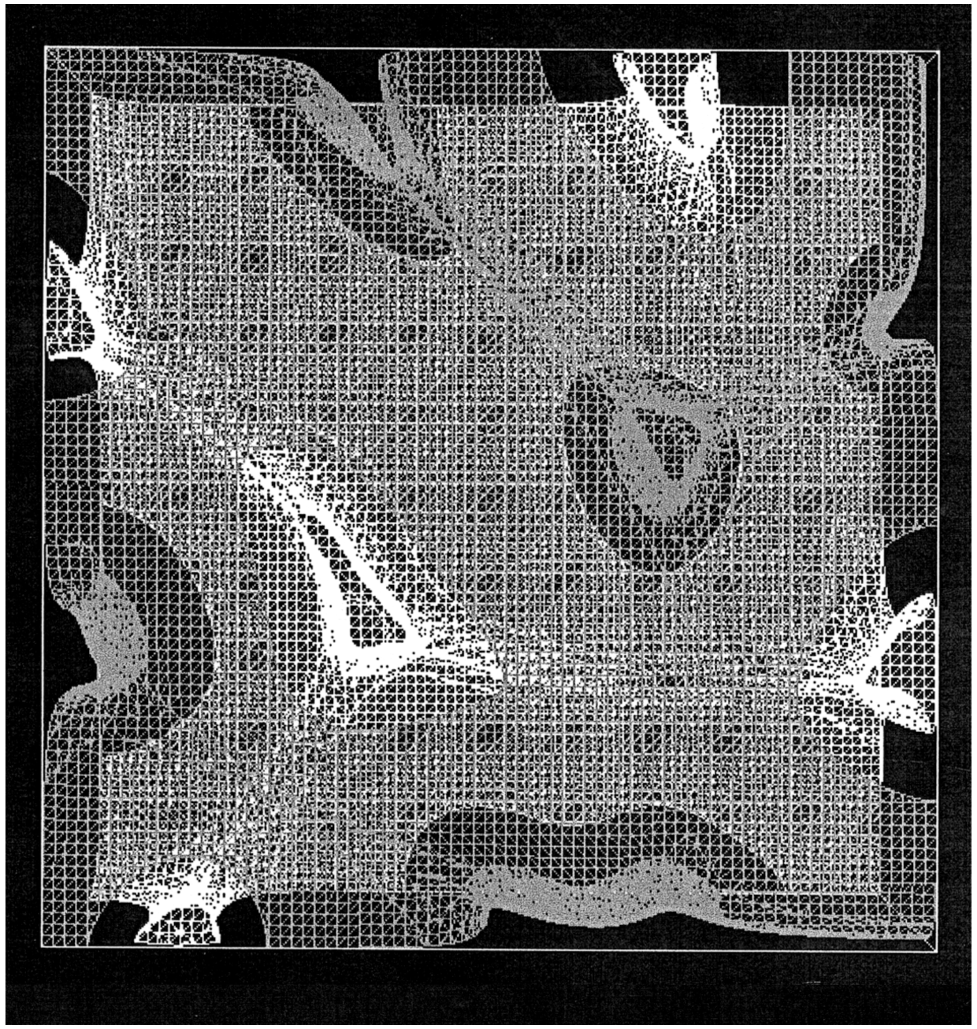
応力依存性の導入により表面の運動が起こる

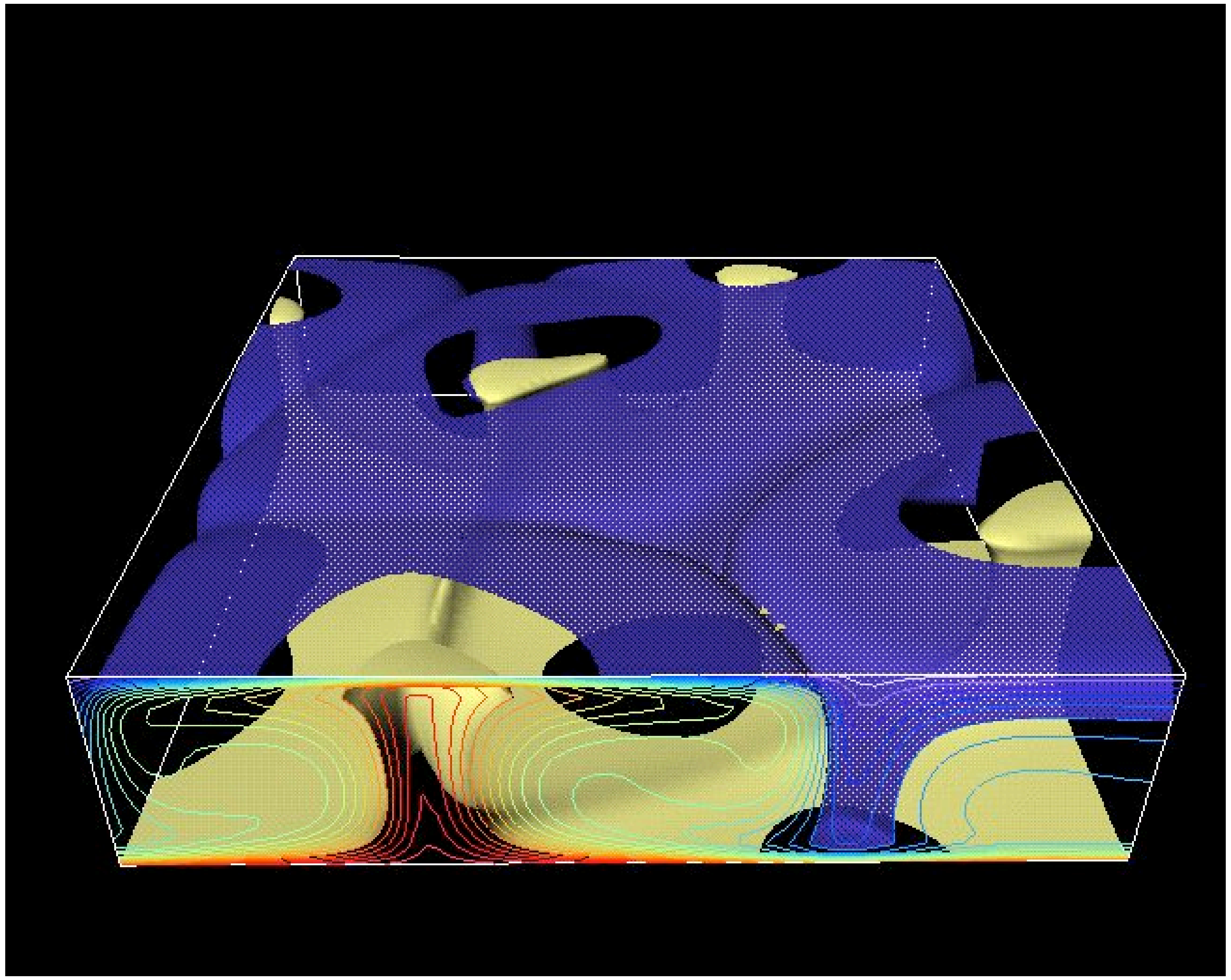
3次元マントル対流モデル



応力依存性の導入により歪み(速度勾配)が集中する

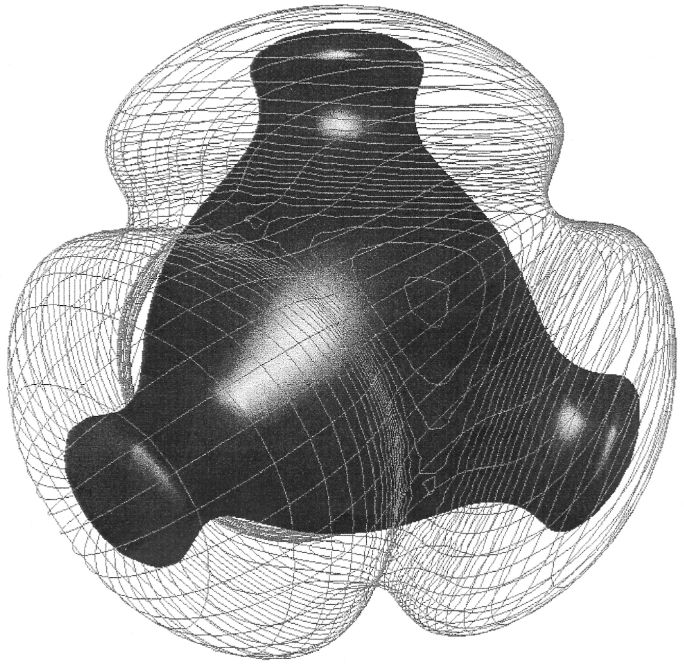
粘性率一定の３次元マントル対流箱型モデル

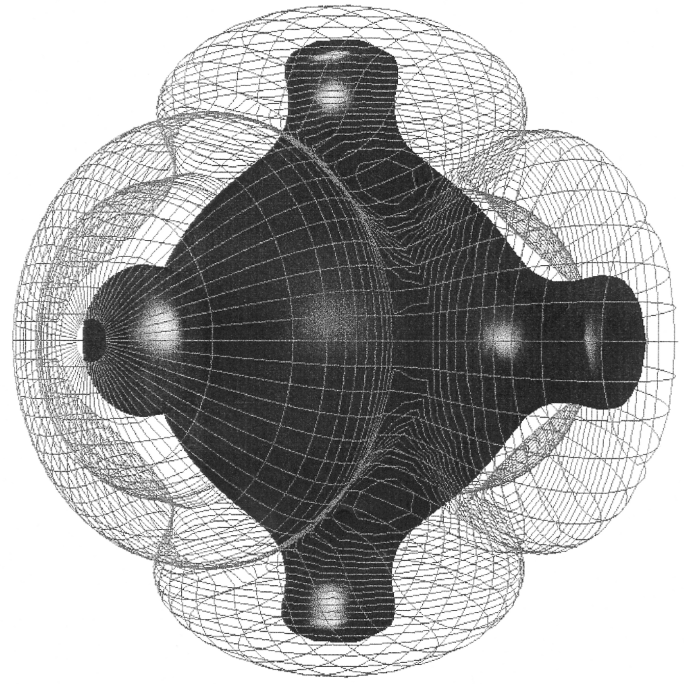


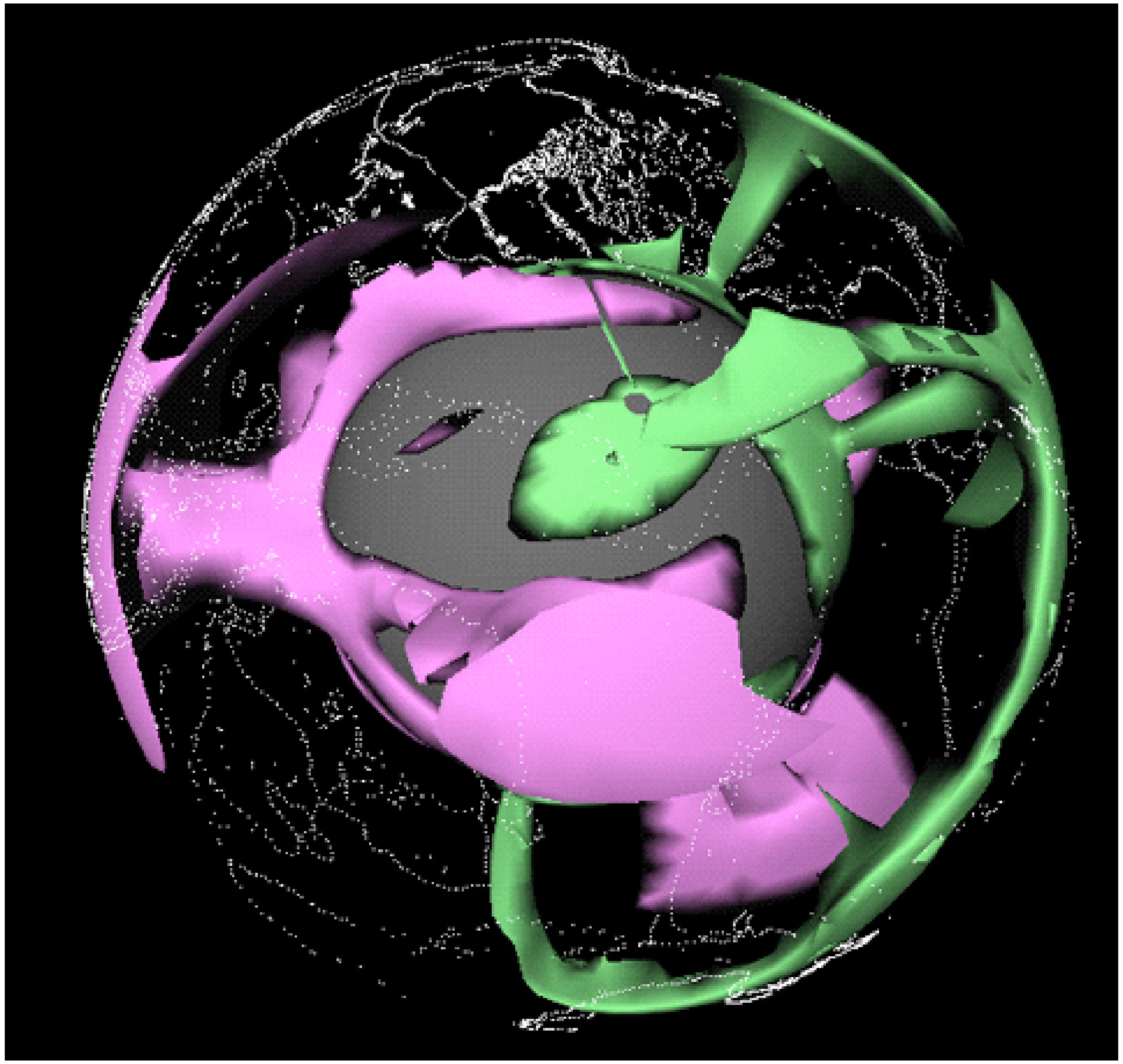


Ra=3×10^{4}程度で対流は３次元的な構造に変化する

球殻中の３次元マントル対流モデル



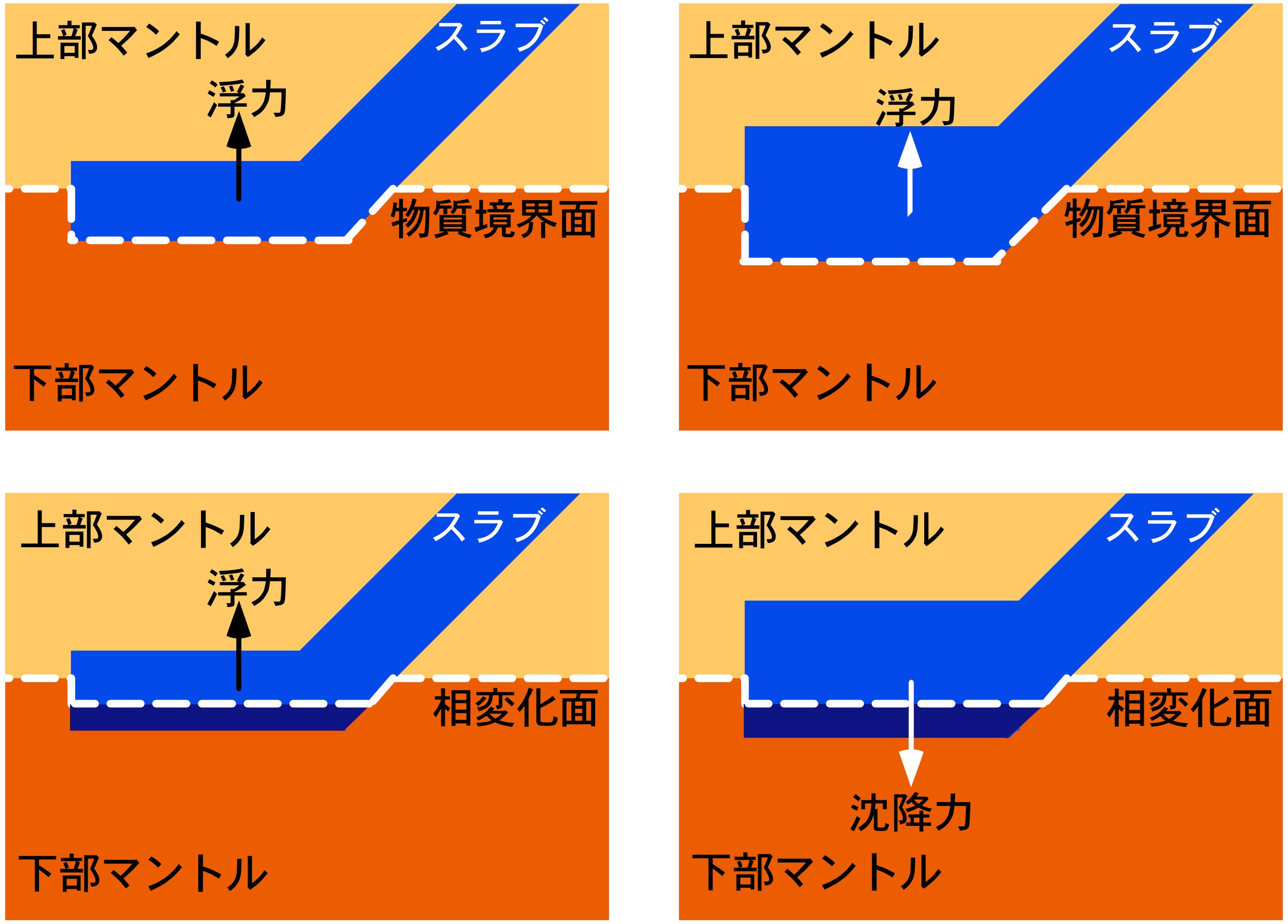




岩瀬(私信)による

左：定常解 (等温面)，右：時間依存解 (温度異常)

下降するスラブと化学・相境界との相互作用



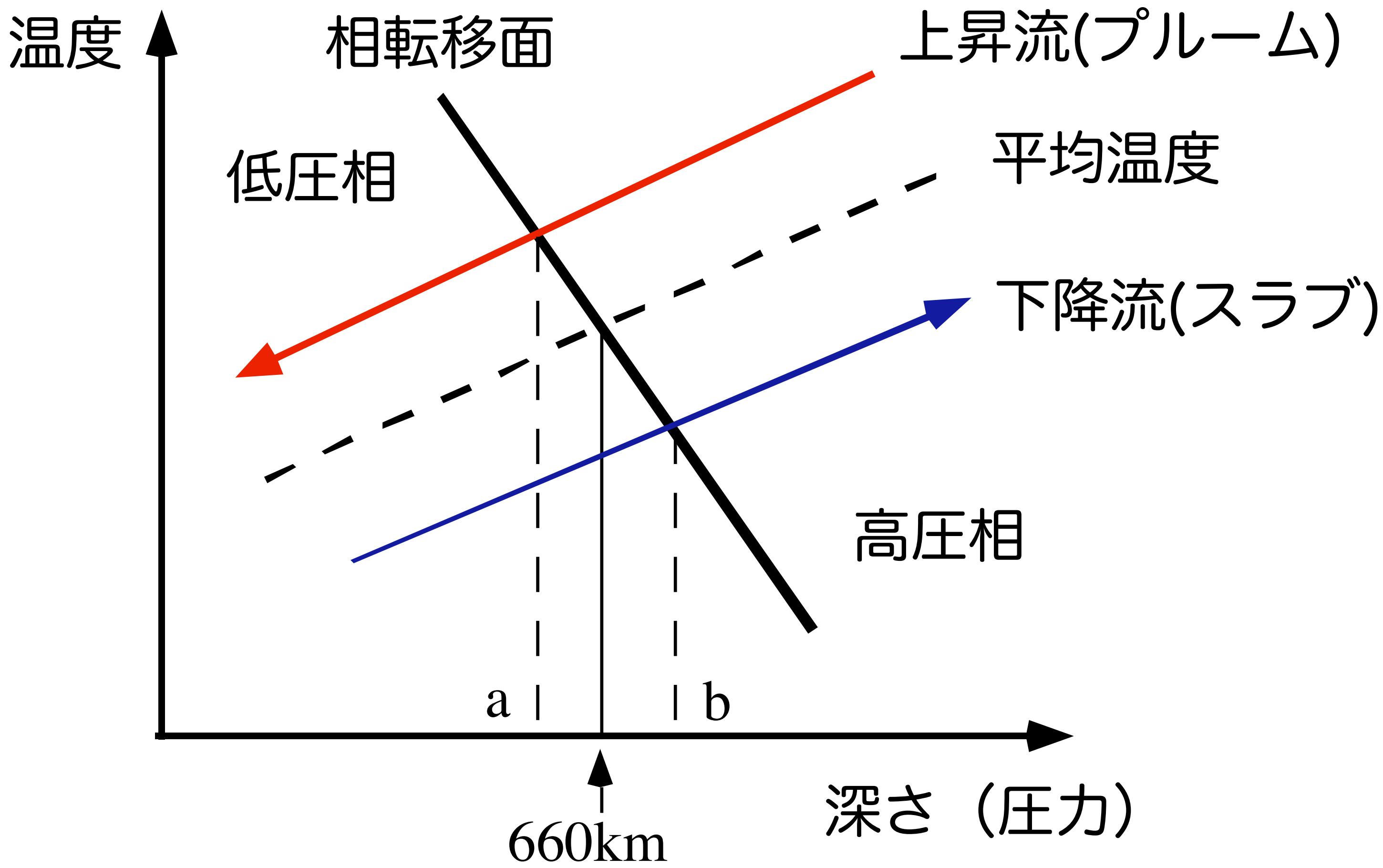
化学境界: 上に載るスラブの量に応じて境界が凹む

→ 下部マントルの密度がスラブより小さい場合は混合

相境界: スラブの温度に比例して凹む

→ 支えられるスラブの量に限度

マントル対流と相境界



平均温度からのずれがあると相転移面に凹凸を生じる

→ 流れと逆方向の浮力を発生

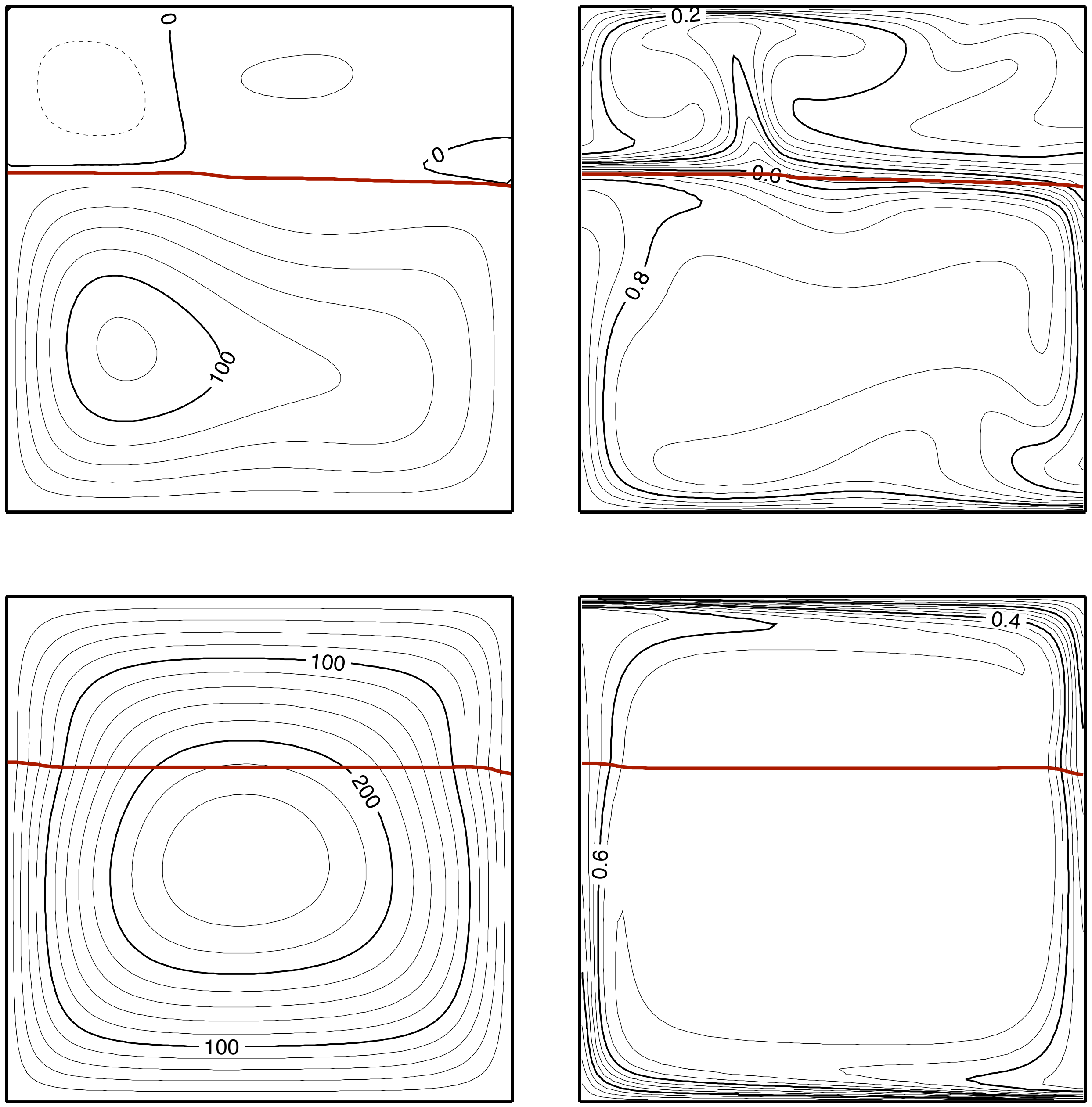
相境界のあるマントル対流

相浮力パラメータ P

$$P = \gamma' \frac{Rb_p}{Ra} = \frac{\gamma \Delta \rho_p}{\rho_0^{\ 2} \alpha g h}$$

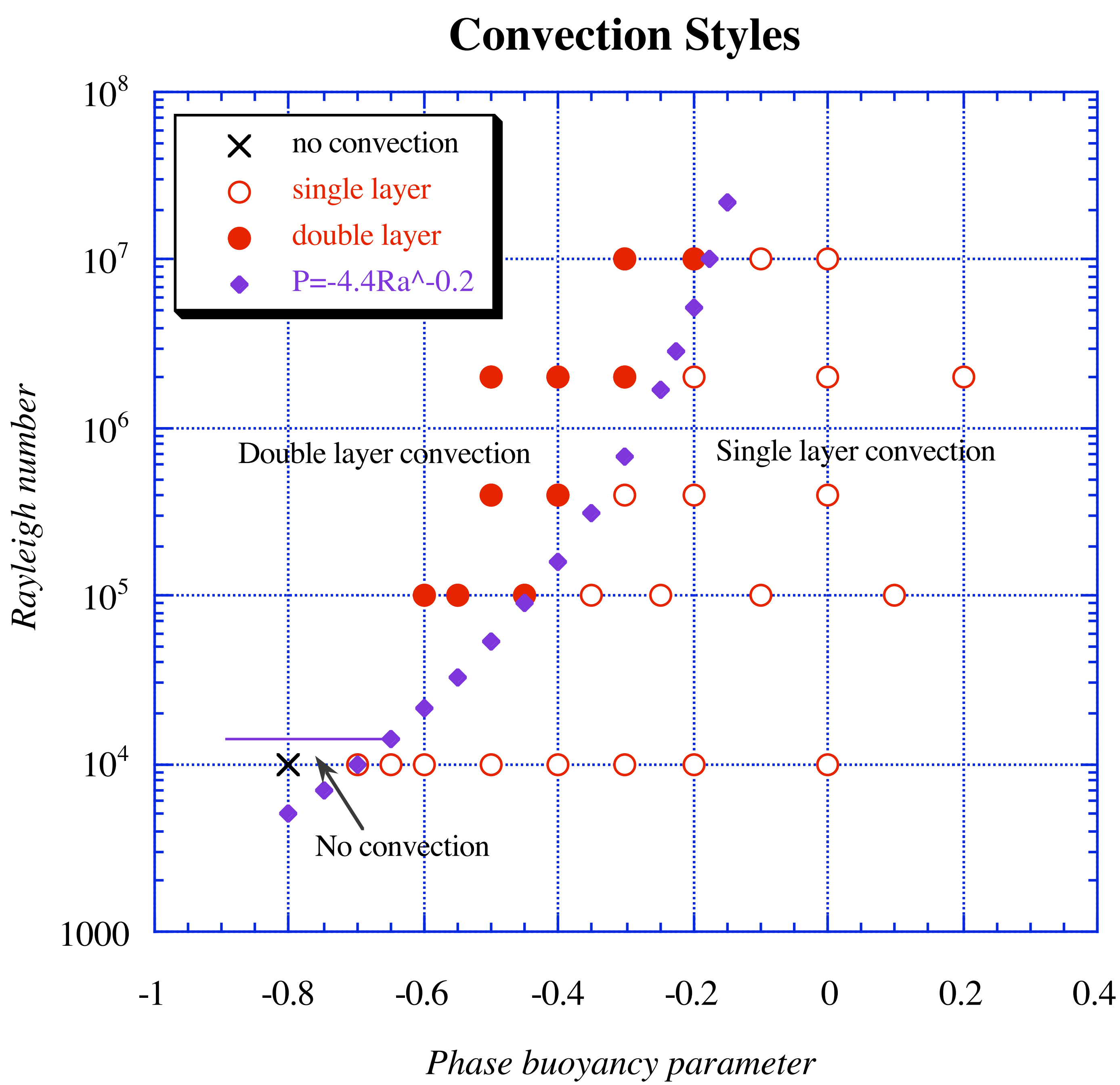
P = -0.6: 二層対流

P = -0.3: 一層対流



$Ra = 4\times10^5$

レイリー数と相浮力パラメータ



Christensen and Yuen (1985)に基づいて作成