

图表

図の説明

図1.1 マントルの性質とマントル対流のモデリング .

図1.2 マントルの性質とマントル対流のモデリング .

図3.1 物体の変形 .

図4.1 線形安定性解析で用いる 2 次元平板間の流体 .

図4.2 臨界レイリー数 . 波長の関数として表す .

図4.3 下部加熱のみを熱源に持つレイリー数が高い対流の構造の模式図 . 曲線で区切られた細かい領域が境界層 , 境界層に囲まれた領域が等温核である .

図4.4 内部加熱のみを熱源に持つレイリー数が高い対流の構造の模式図 .

図4.5 ヌッセルト数 Nu とレイリー数 Ra の関係 . 下部加熱のみの場合 . 実線は数値シミュレーションから得られた結果 (Christensen, 1989) . 点線は Olson (1987) による境界層理論の解 .

図4.8 有限体積法に基づくメッシュの構造 .

図4.9 粘性率一定の 2 次元流体での , 下部加熱のみを熱源に持つ対流 . レイリー数 Ra が上から 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 の場合を示す . 左は流線関数 , 右は温度場の等値線を表す . 値は無次元化されている . 温度場に影をつけた部分が熱境界層である (厳密な定義ではない) .

図4.10 図4.7の対流の温度場を水平平均した温度場 . 横軸が温度 , 縦軸が高さ (深さ) を表す .

図4.11 アスペクト比が大きい箱の中での時間依存対流 . 流体は 2 次元で下部加熱のみを熱源に持つ . 粘性率は一定 . 異なる時間のスナップショットを表し , 時間は上から下へ進む . $Ra = 10^6$.

図4.12 内部加熱および下部加熱を熱源に持つ 2 次元対流 . 粘性率は一定 . 時間依存性を持ち , 時間は上から下へ進む . $Ra = 10^6$, $H = 10$.

- 図4.13 内部加熱のみを熱源に持つ粘性率一定の2次元対流．内部加熱に基づくレイリー数 $Ra_H = 10^5$ ．
- 図4.14 圧縮性の影響を考慮した2次元対流．拡張ブジネスク近似により計算した．散逸数 Di は上から0.1, 0.3, 0.5である．粘性率は一定． $Ra = 10^6$, $T_s = 0.3$ ．
- 図4.15 図4.14の対流の温度場を水平平均した温度場． $Di = 0$ の場合も含む．
- 図4.16 粘性率の温度依存性を持つ2次元対流．底面の粘性率に基づくレイリー数は 10^7 で一定，粘性率の変化を上から 10^2 , 10^3 , 10^5 とした．右は粘性率の対数を表す．粘性率の温度依存性は式 (3.85) を用いた．
- 図4.17 図4.16の対流の温度場を水平平均した温度場．実線：粘性率変化 10^2 , 破線 (長): 粘性率変化 10^3 , 破線 (短): 粘性率変化 10^5
- 図4.18 粘性率の圧力依存性を持つ2次元対流．表面の粘性率に基づくレイリー数は 10^7 で，粘性率は 10^3 倍増加する．
- 図4.19 粘性率の応力依存性を持つ2次元対流．図4.16の上から2番目と同じ温度依存性を持つ．
- 図4.20 粘性率の応力依存性の表面速度への影響．図18の応力依存性を持つ対流 (実線) と図4.16 (中) の持たない対流との比較．横軸が水平距離，縦軸が速度 (右向きが正) を表す．
- 図4.21 粘性率一定，箱型の3次元マントル対流．下部加熱のみを持つ．レイリー数は 3×10^4 ．温度場の等温面をメッシュでレンダリング表示．白が高温，灰色が低温．
- 図4.22 粘性率一定，球殻内の3次元マントル対流．下部加熱のみを持つ．レイリー数は 2×10^3 ．左が四面体パターン，右が六面体パターン．黒 (ソリッド) が高温，灰色 (メッシュ) が低温．
- 図4.23 図4.22の対流の温度場を水平平均した温度場．六面体パターンの対流の場合．
- 図4.24 マントル対流と負のクラペイロンスロープを持つ相境界との相互作用．a, bはそれぞれ高温の上昇流，低温の下降流における場合の相転移の深さを表す．
- 図4.25 相境界を持つマントル対流．相境界の深さは0.33，レイリー数は 10^6 ，粘性率一定で下部加熱のみを持つ．相境界浮力パラメータ P は-0.4 (上) と-0.2 (下) ．図中

の横線が相境界面を表す。

図4.26 相境界を持つマンテル対流の層構造に関する相図。横軸は相境界浮力パラメータ P ，縦軸はレイリー数を表す。白丸が一層対流，黒丸が二層対流を表す。ダイヤは2つの様式の境界 ($P = -4.4Ra^{0.2}$) を示す。相境界の深さは0.5である。Christensen and Yuen (1984) の結果に $Ra = 10^7$ の結果を加えた。

図4.27 相境界が間欠的に破れるマンテル対流。時間は上から下へ進む。 $Ra = 10^6$,
 $P = -0.26$.

図5.1 プレート沈み込みを含むマンテル対流シミュレーション。上から表面の速度 (右向きが正，横軸が水平距離，縦軸が速度，単位は cm yr^{-1})，粘性率 (グレースケール，黒が高粘性) である。時間の違う4つのスナップショットを示す。

図5.2 図5.1のモデルにおける沈み込みの進化。プレートの速度およびスラブの深さを表す。

図5.3 厚い大陸リソスフェアを持つマンテル対流モデル。大陸リソスフェアは粘性がまわりより100倍高い層としてモデル化した。太線が大陸の位置を表す。上2つのモデルでは大陸は左半分，下3つのモデルでは大陸は右半分にある。このモデルは粘性率の深さ依存性と相境界を持つ。

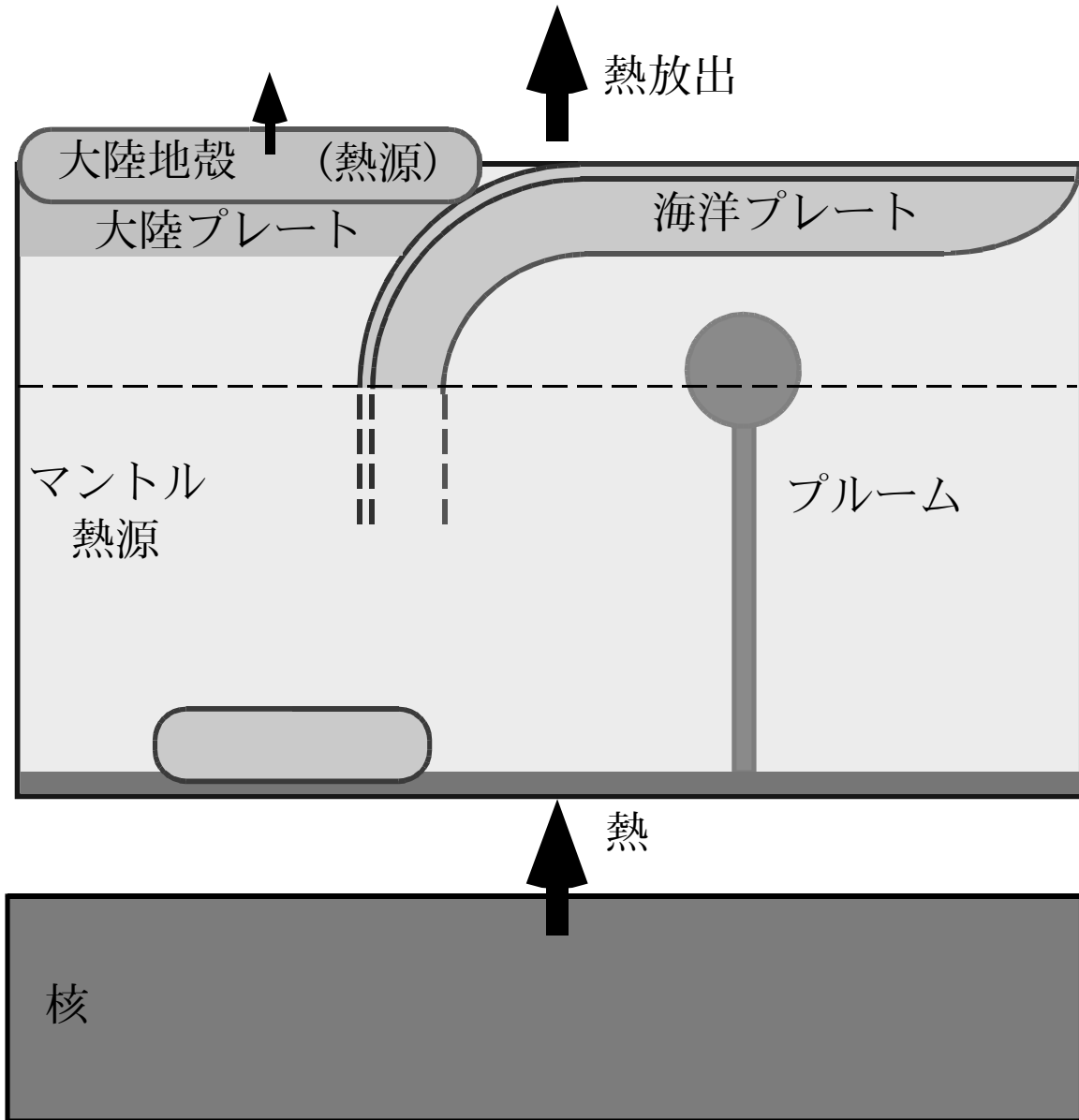
図5.4 3次元マンテルブルームのモデル。等温面と $y = 0.5$ の断面における等温線による表示。

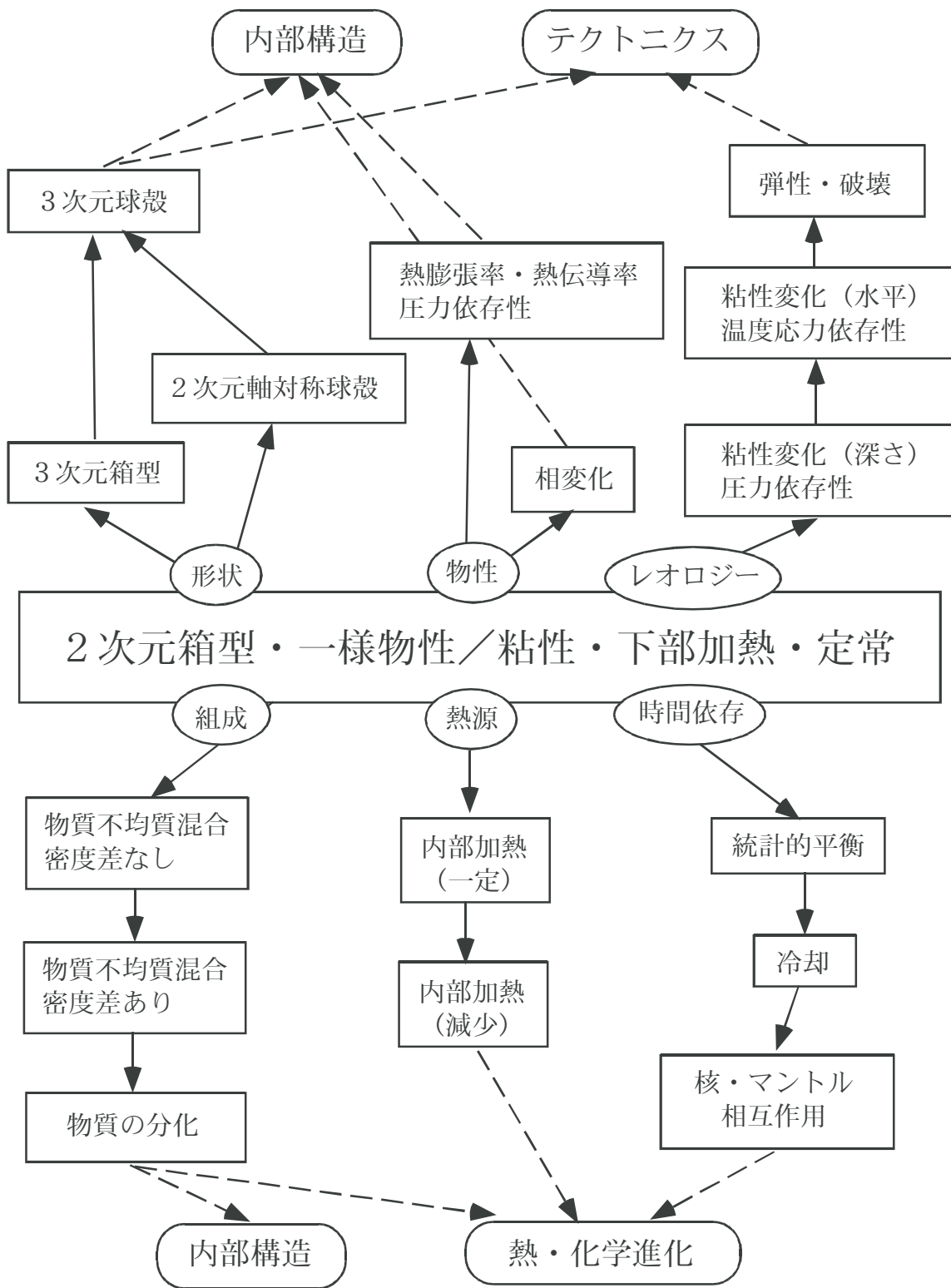
図5.5 地球の熱史のボックスモデル。

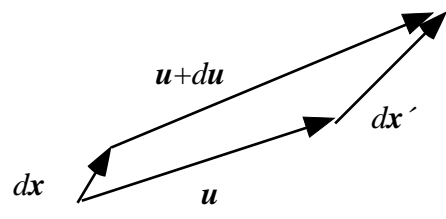
図5.6 パラメータ化対流論による熱史の計算。 $\beta = 0.0$ (左) と $\beta = 0.3$ (右) との2通りの場合を計算した。グラフ中の数字はユーレイ比を表す。上がマンテルの温度，下が核の温度を表す。ここでの温度はポテンシャル温度を表す。

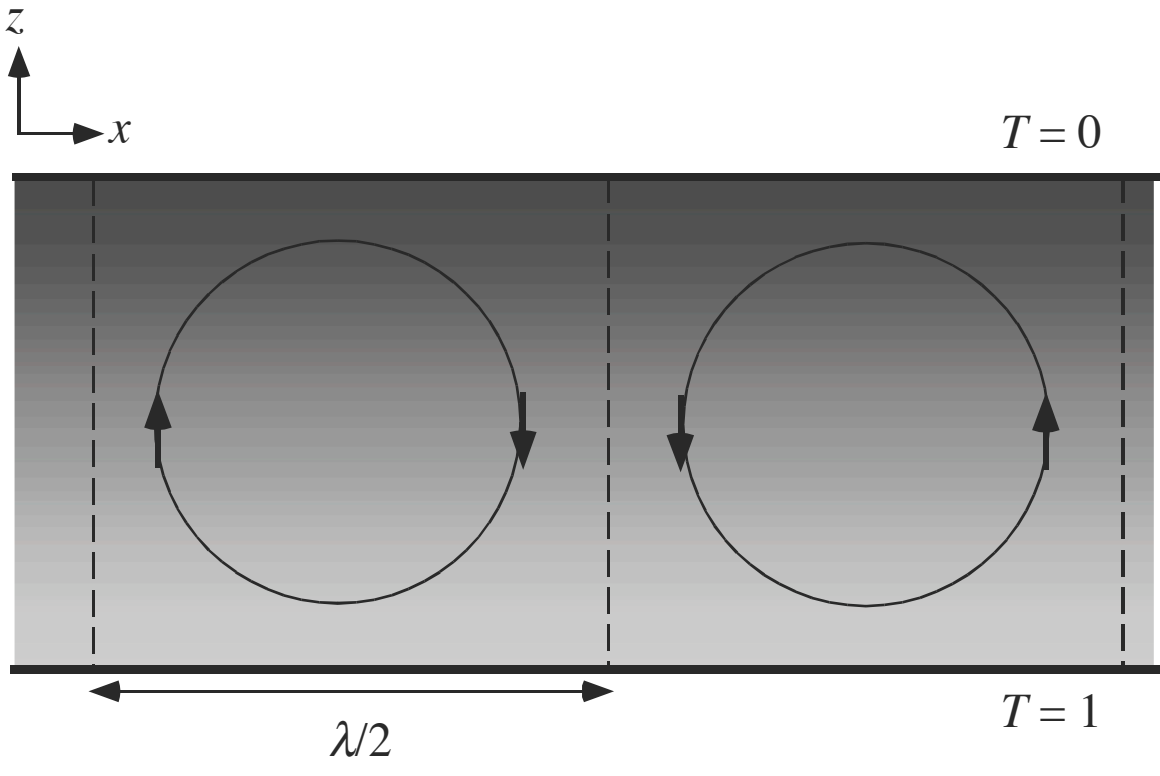
マントル対流システム

マントル内外の温度差によって動く熱機関

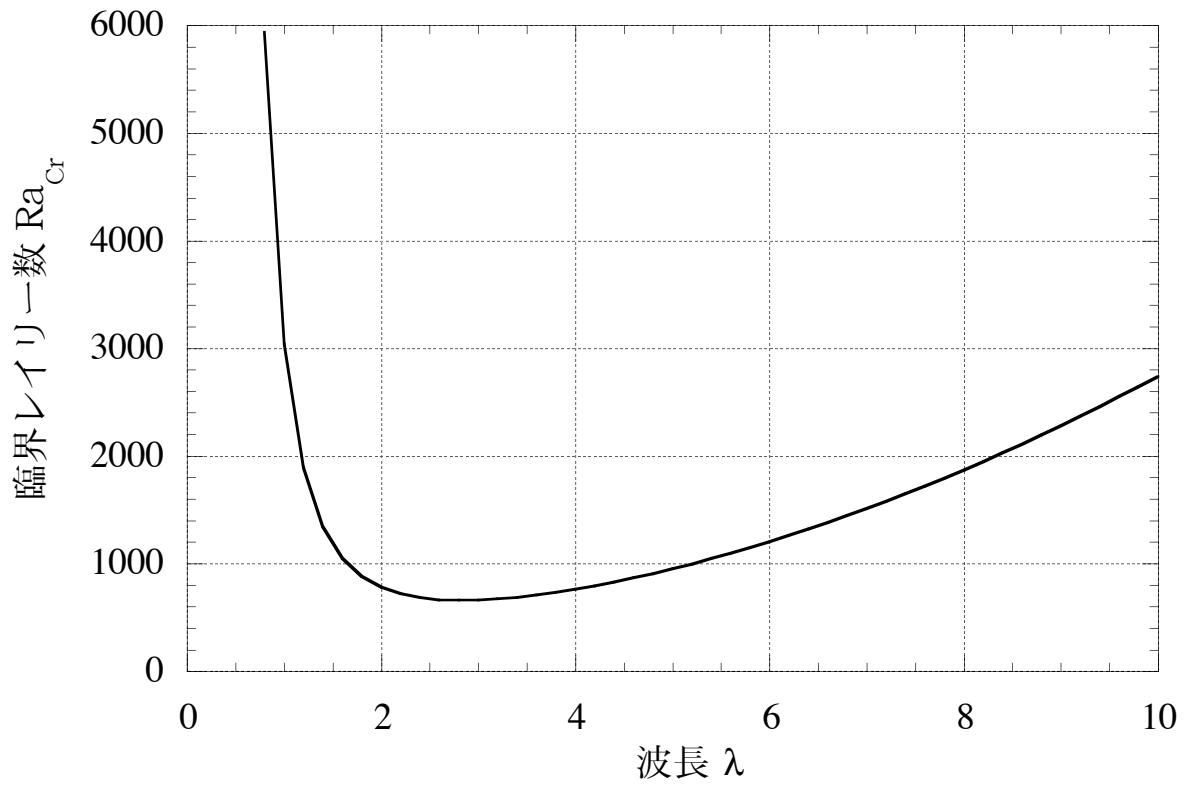


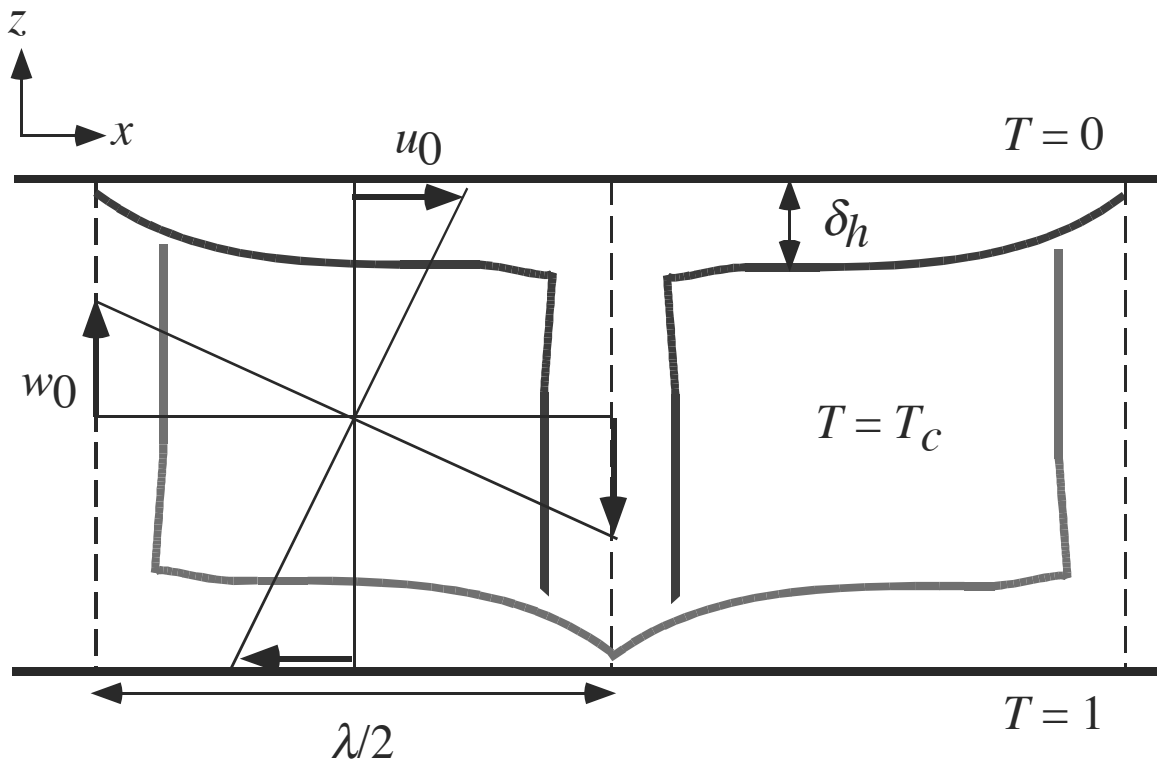


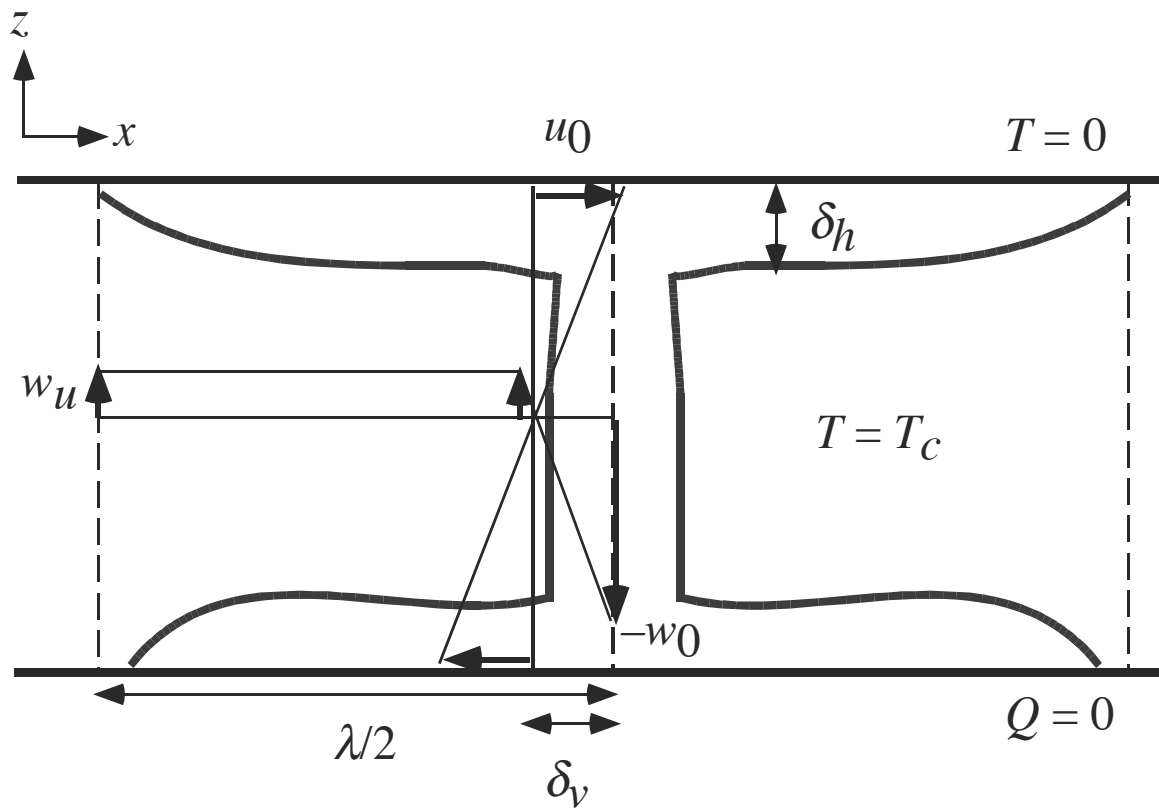




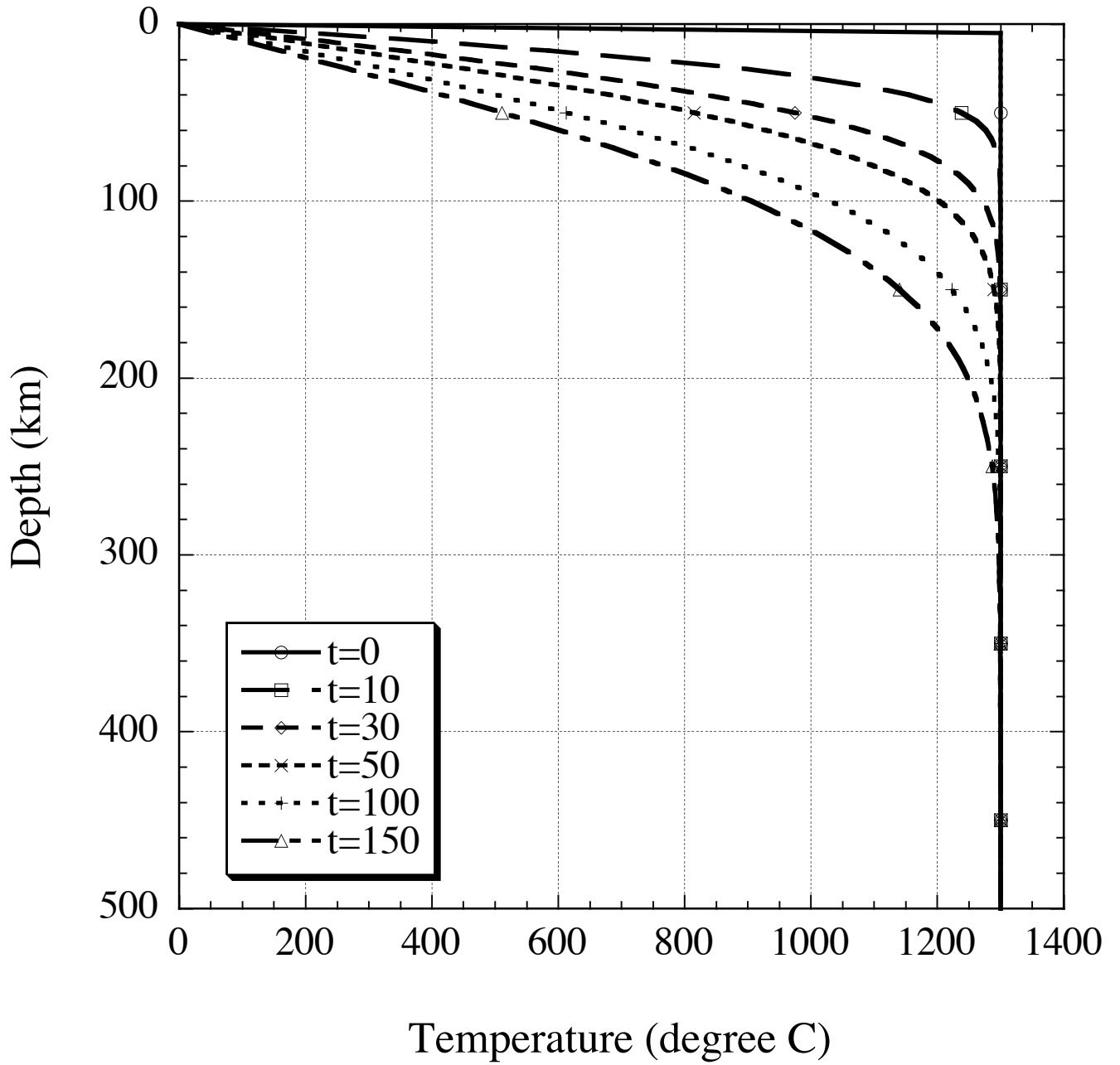
臨界レイリー数（自由すべり境界）



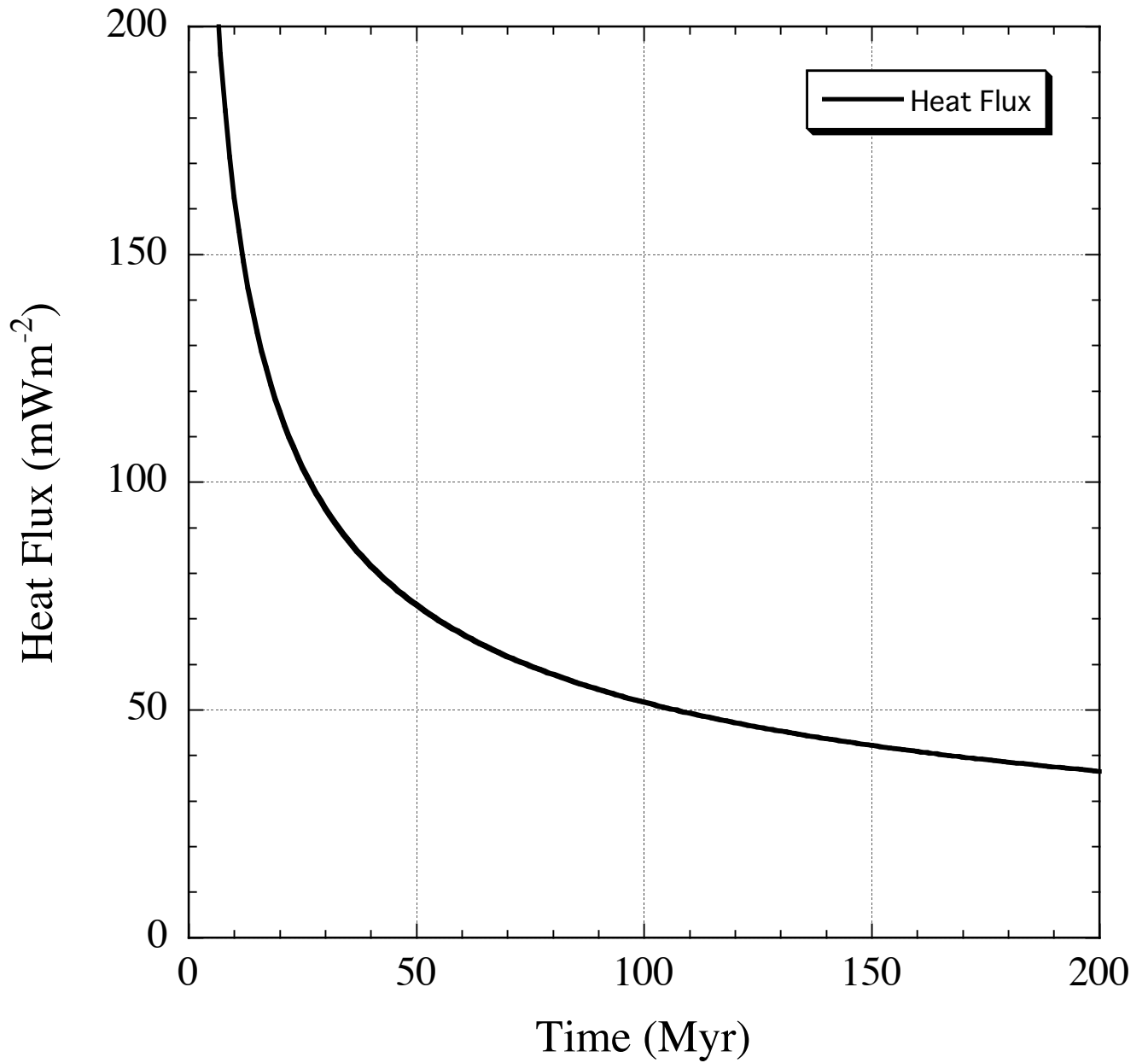




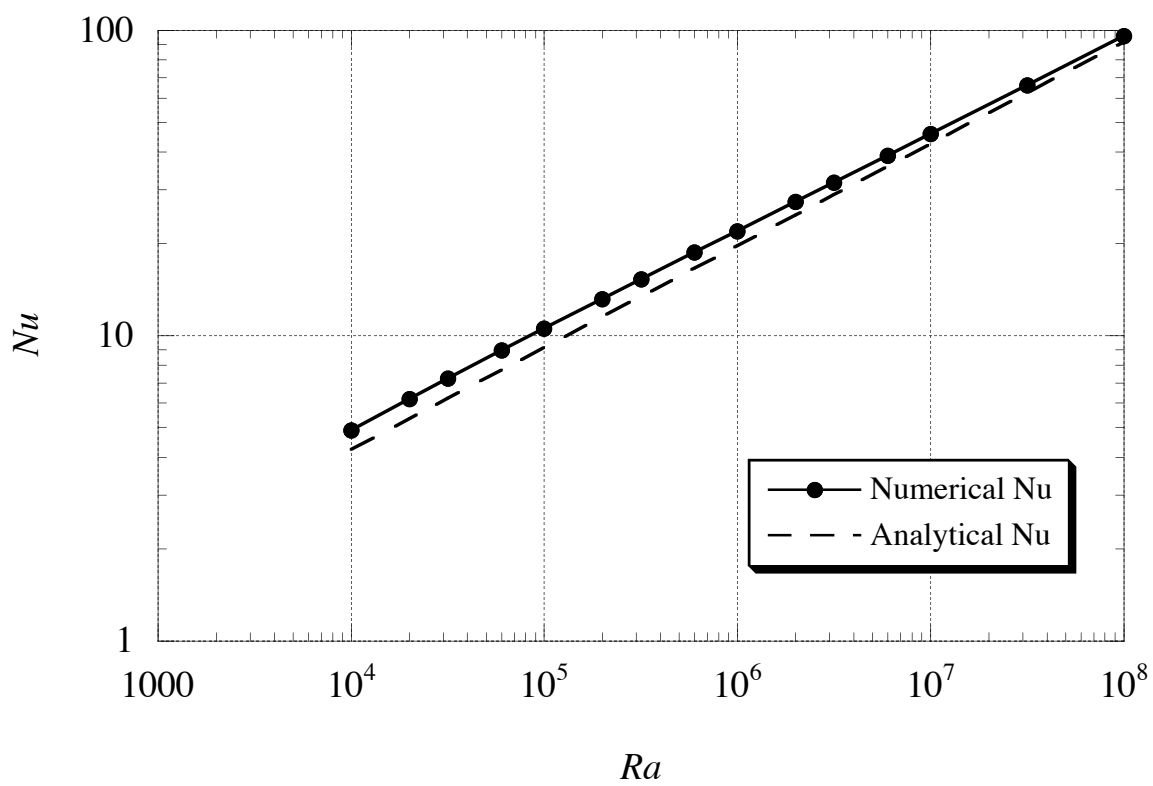
Half Space Cooling Model

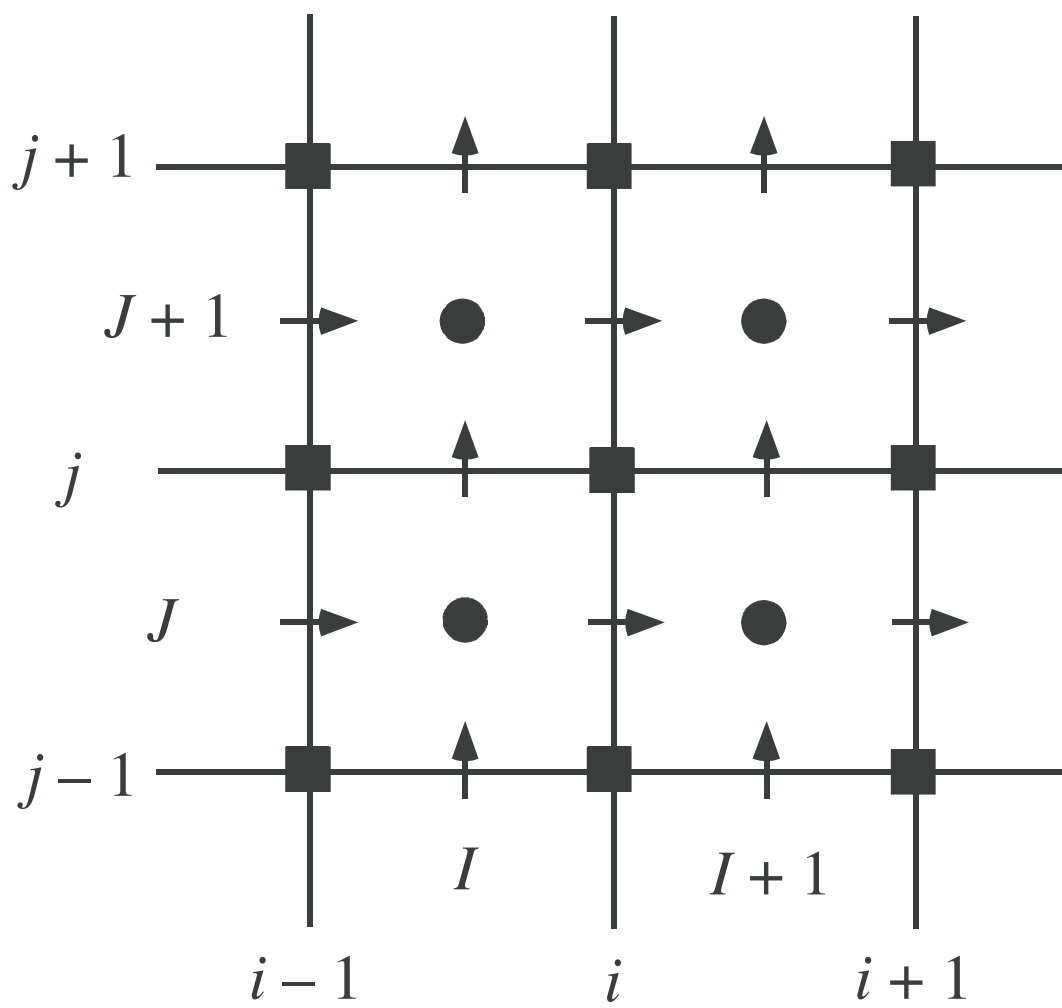


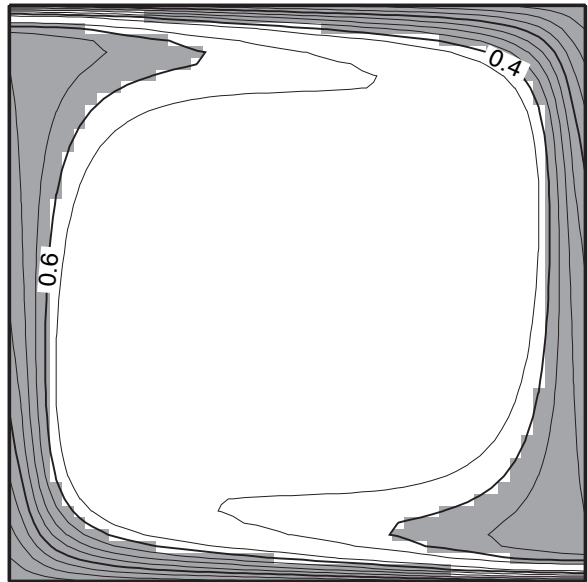
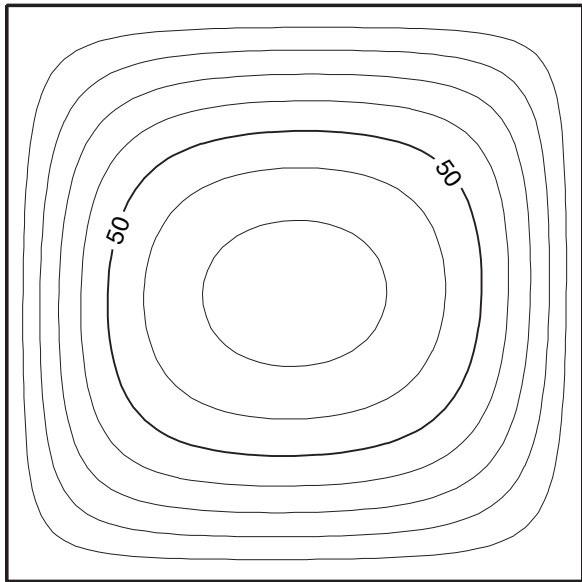
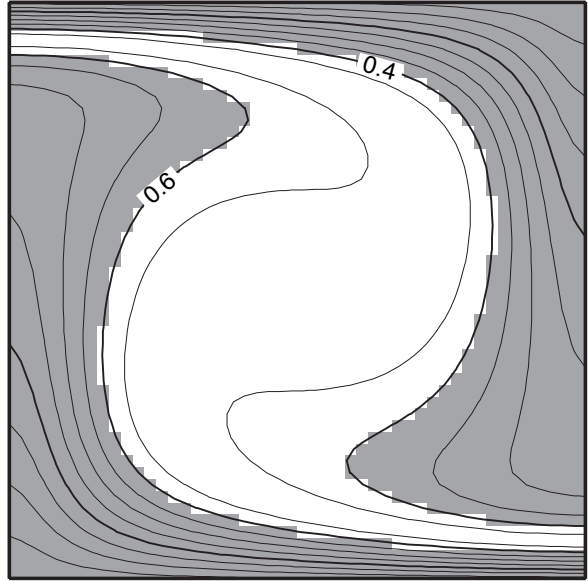
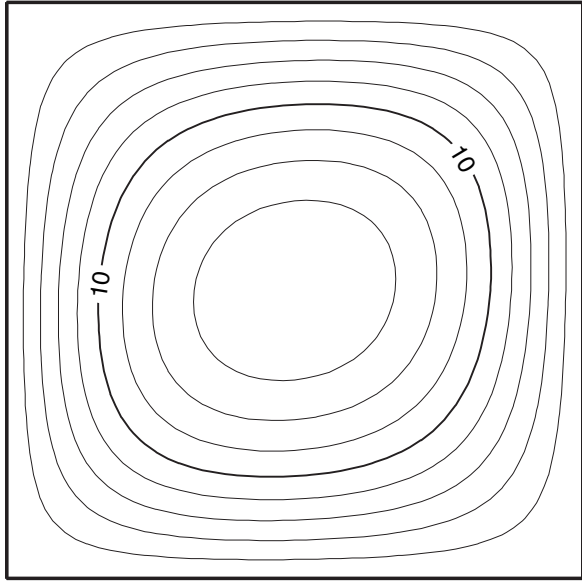
Surface Heat Flux

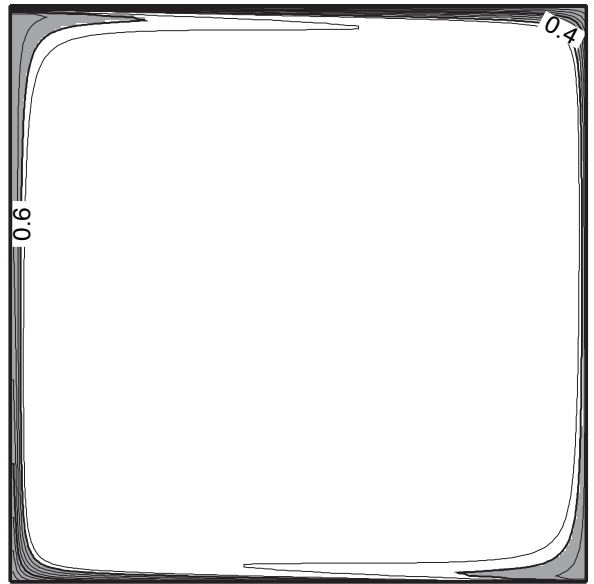
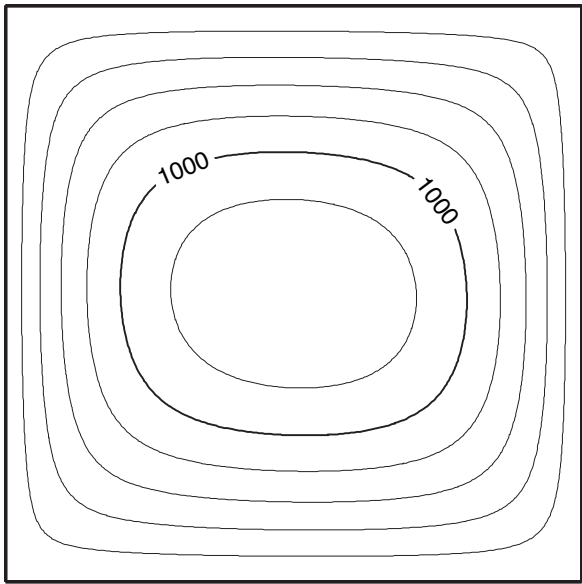
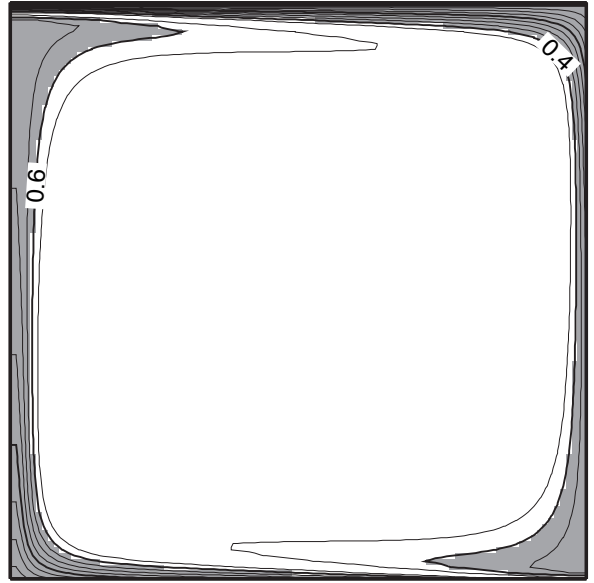
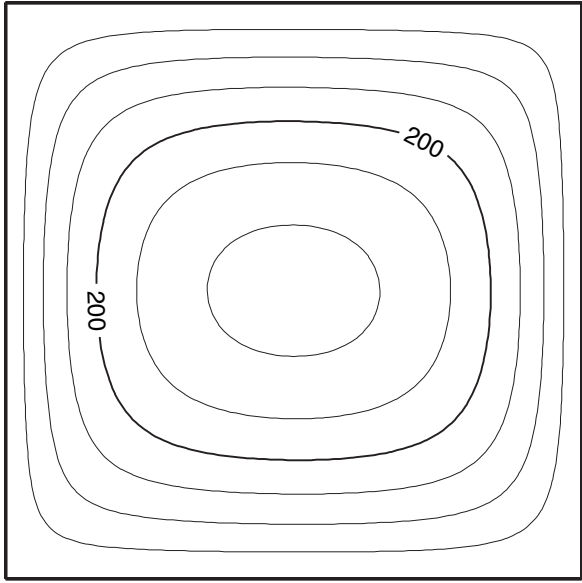


Nu-Ra relation

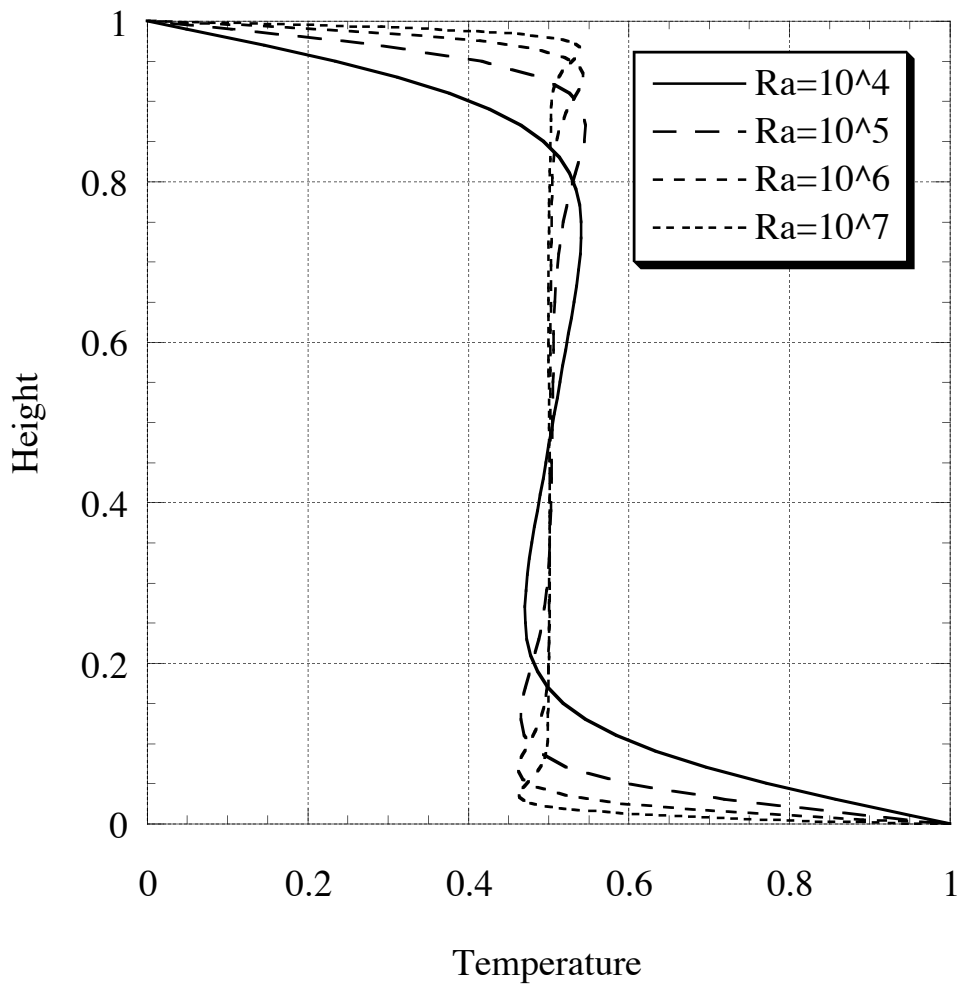


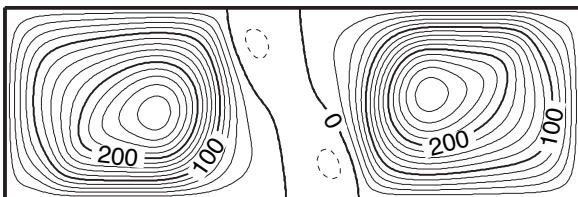
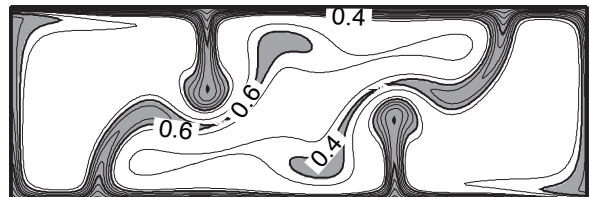
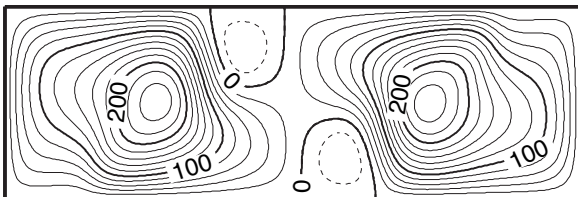
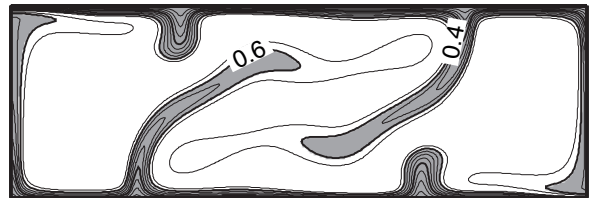
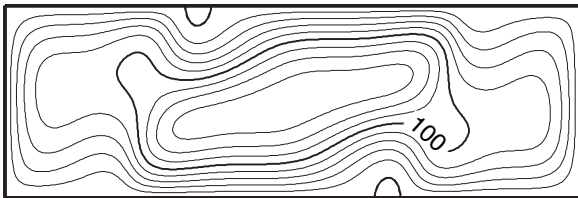
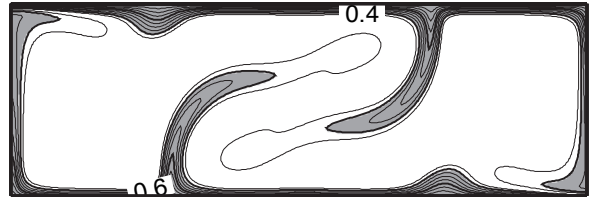
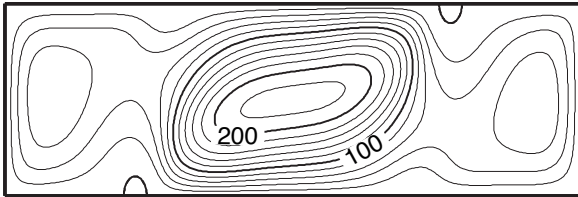
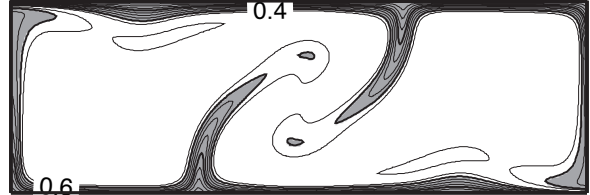
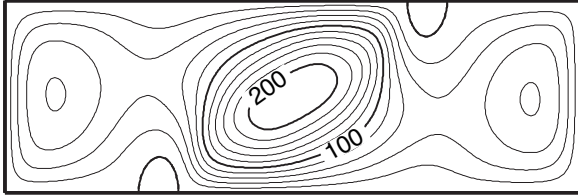


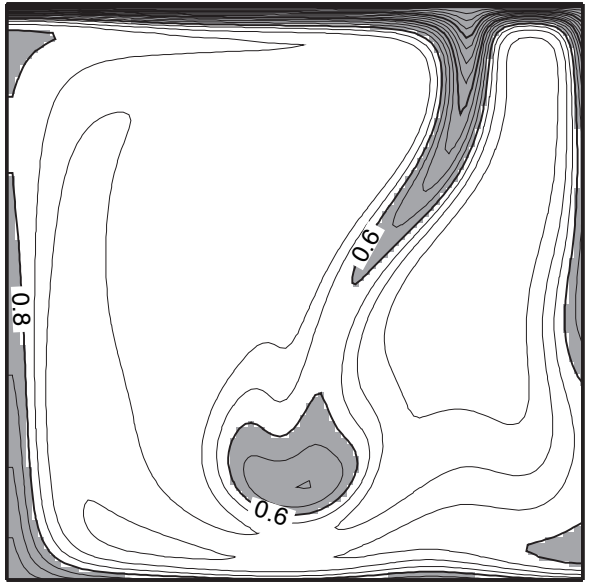
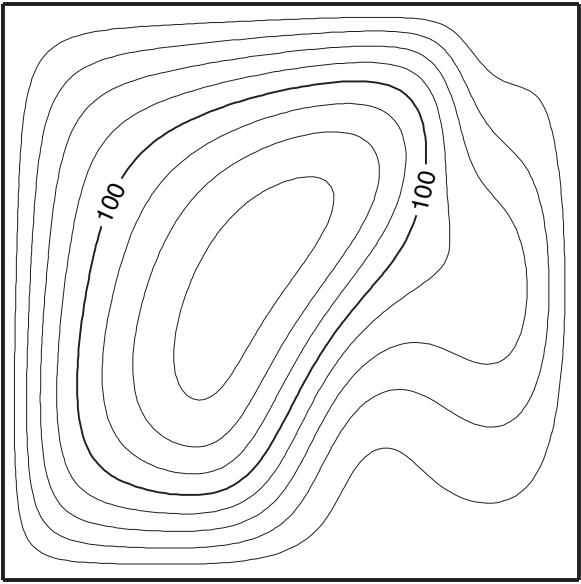
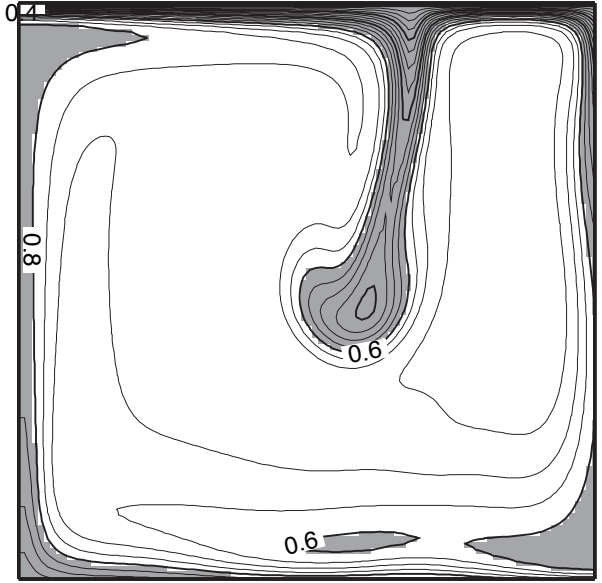
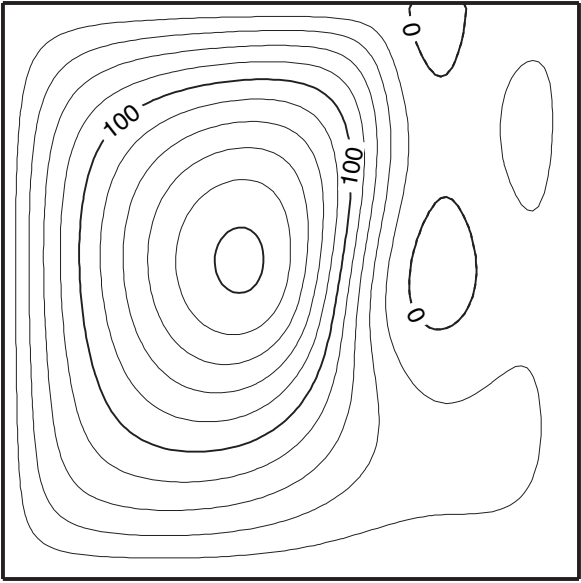
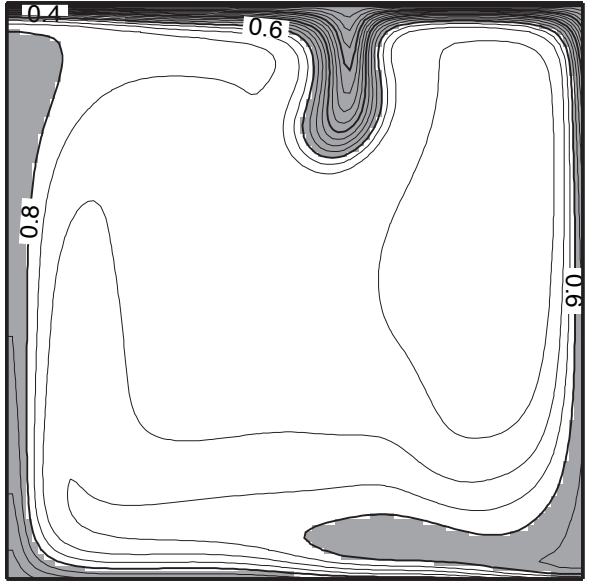
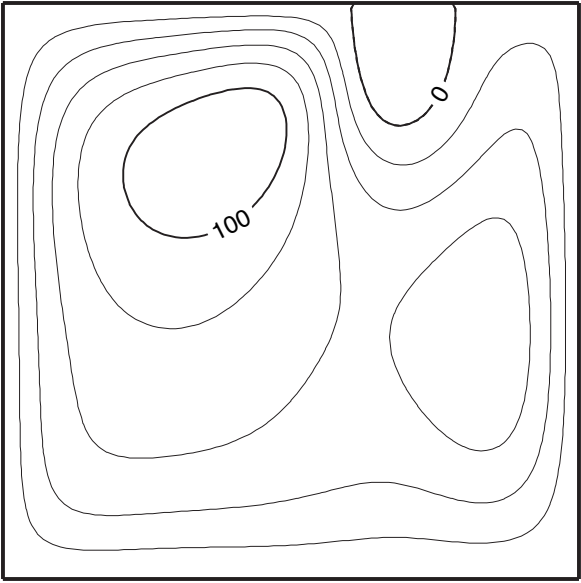


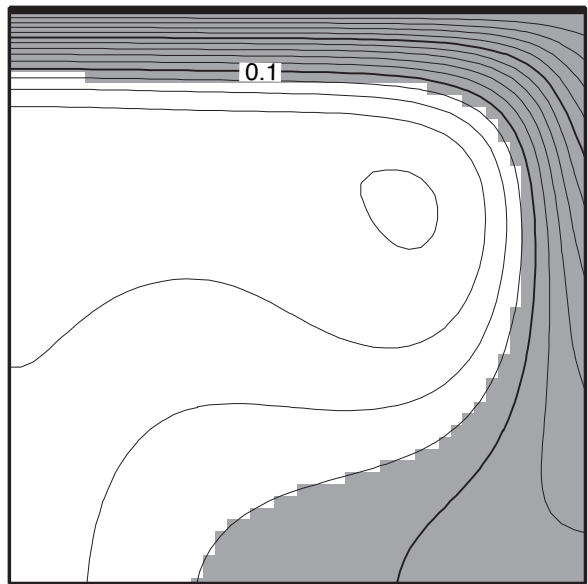
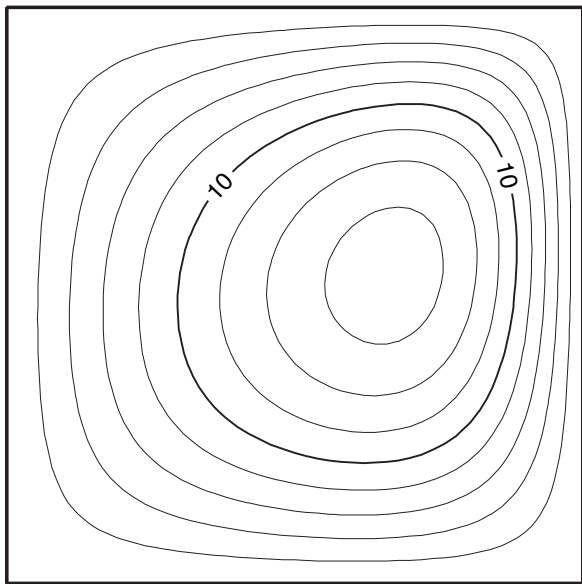


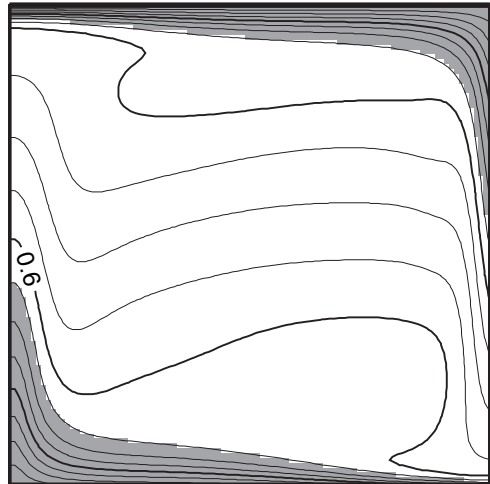
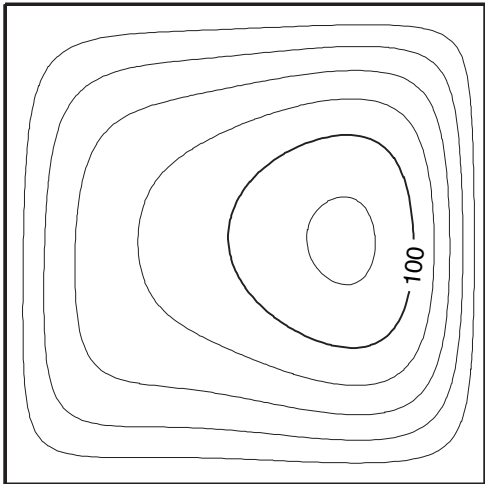
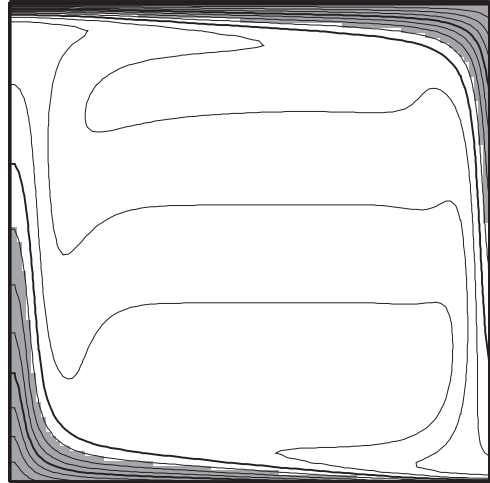
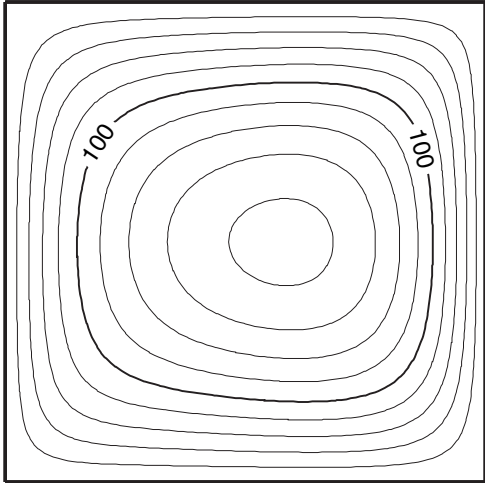
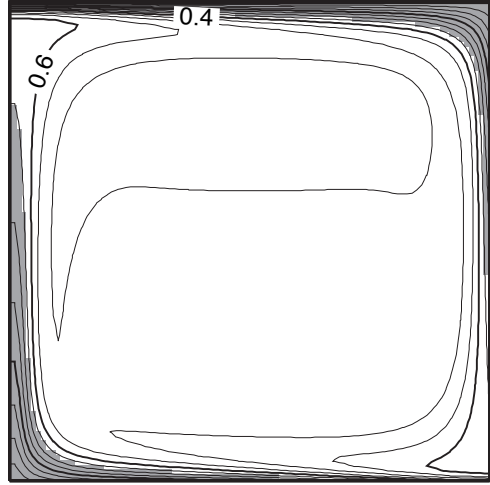
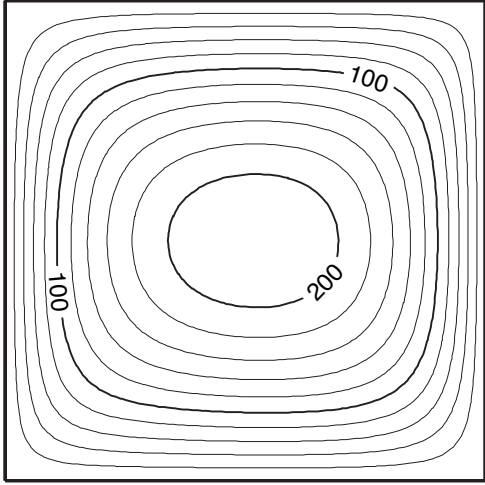
Horizontally averaged temperature



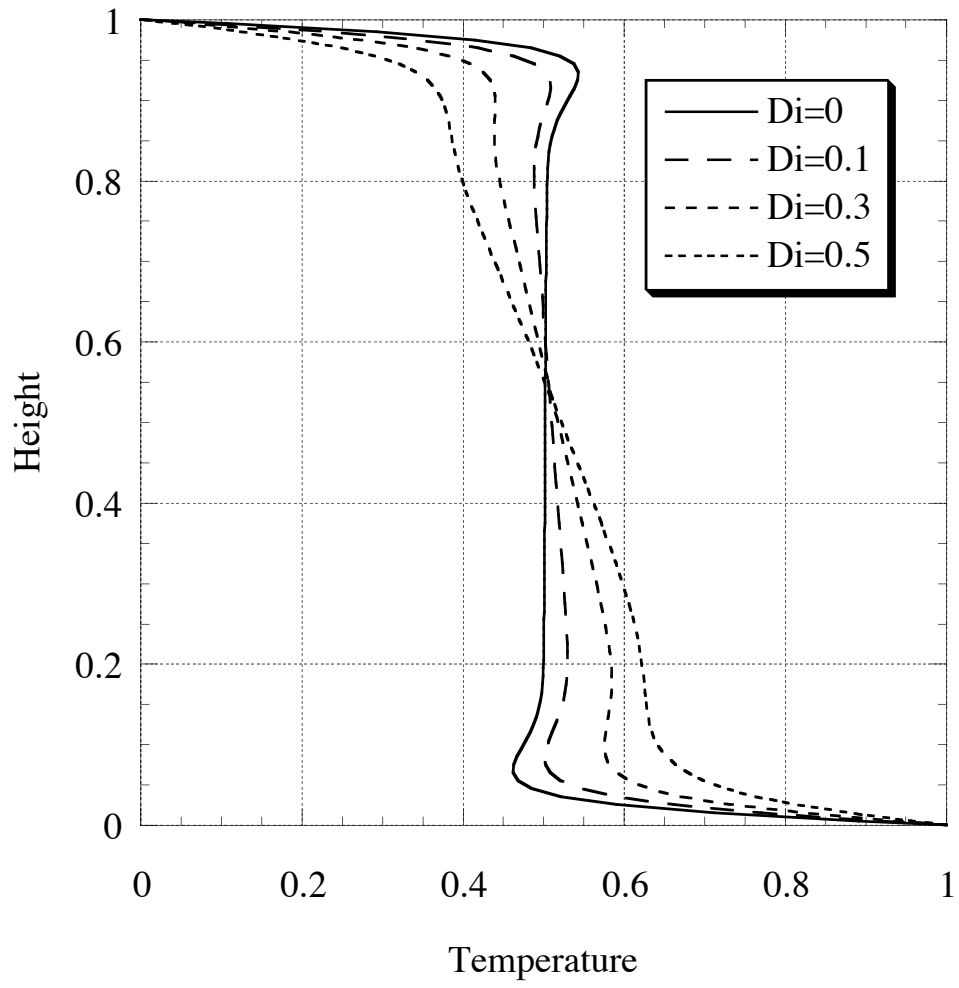


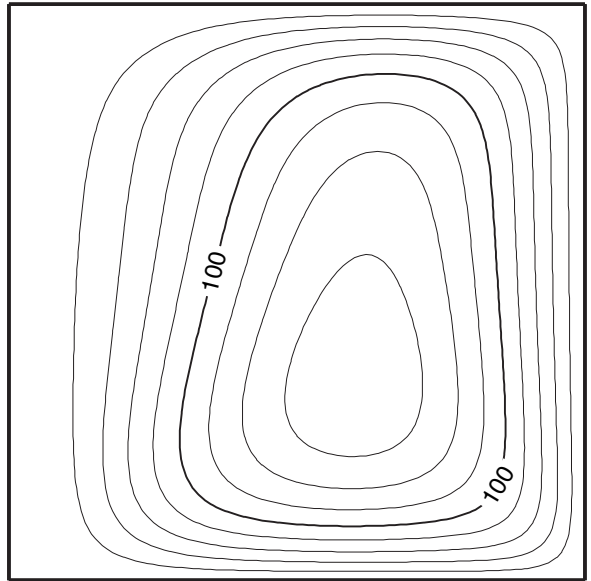
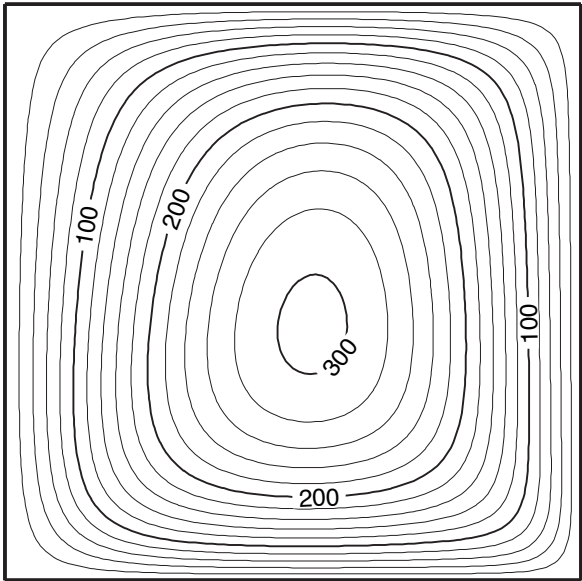
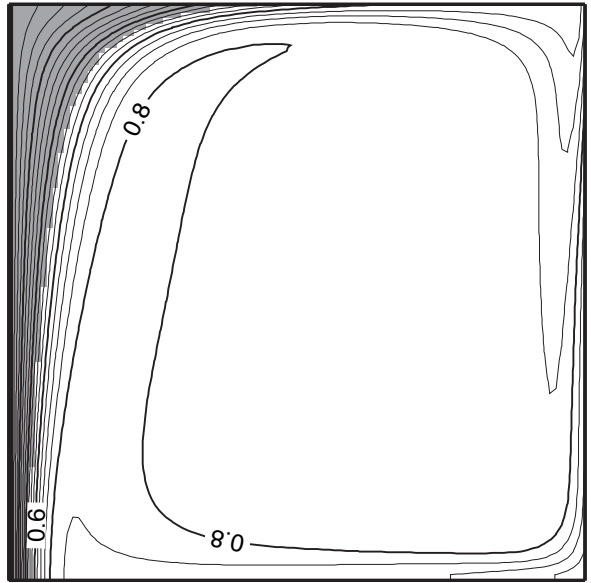
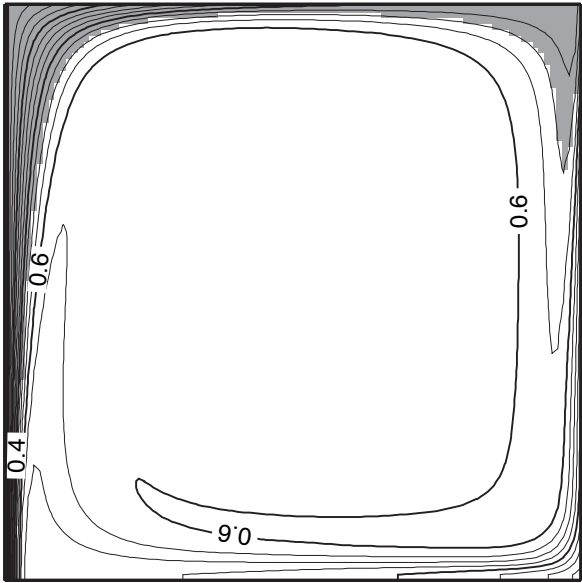
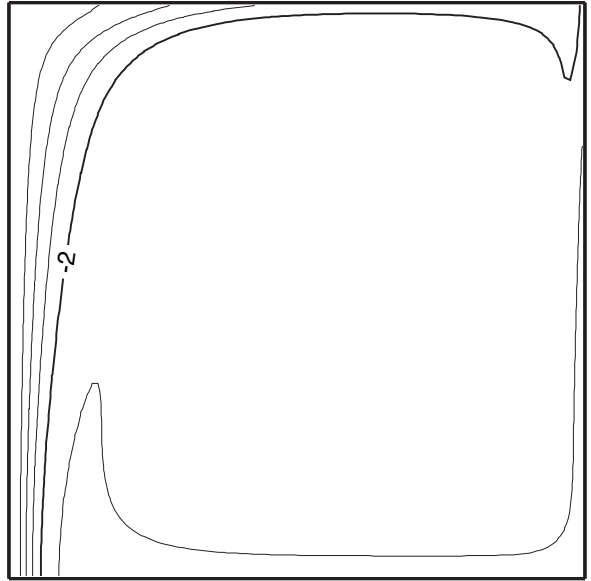
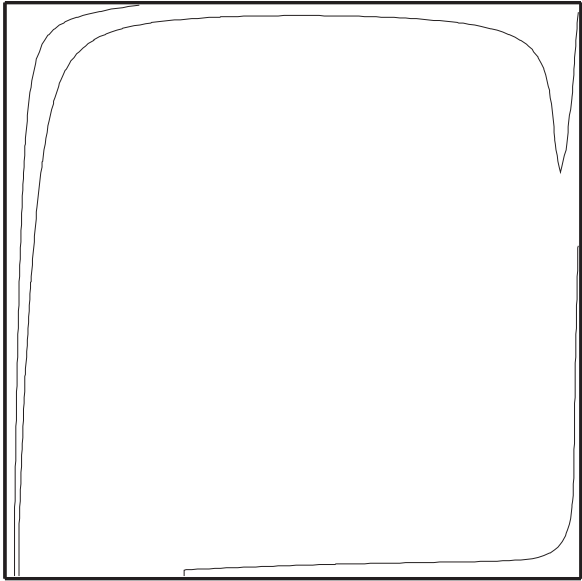




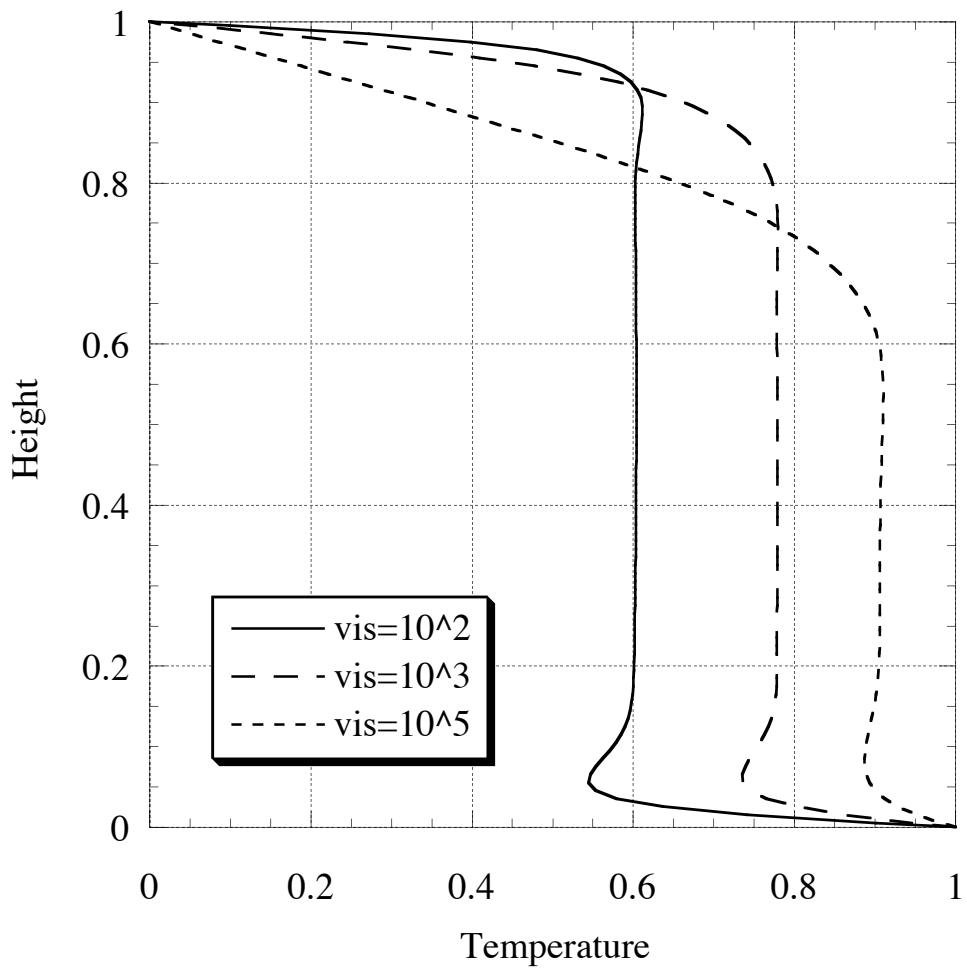


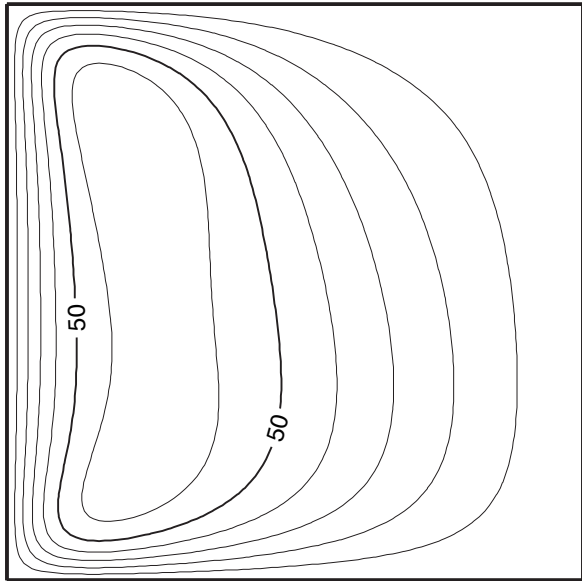
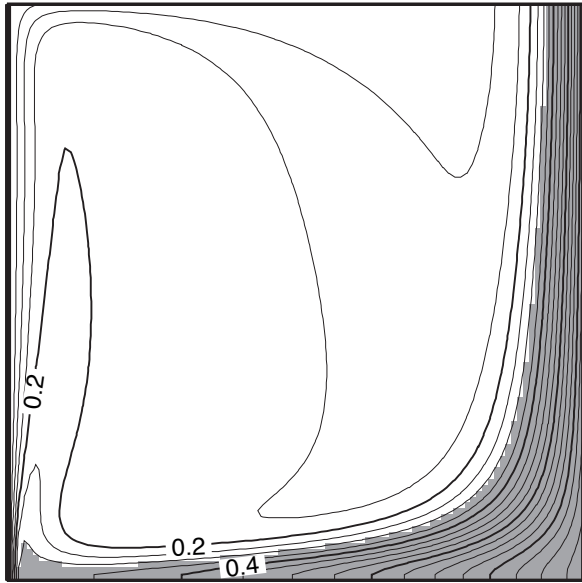
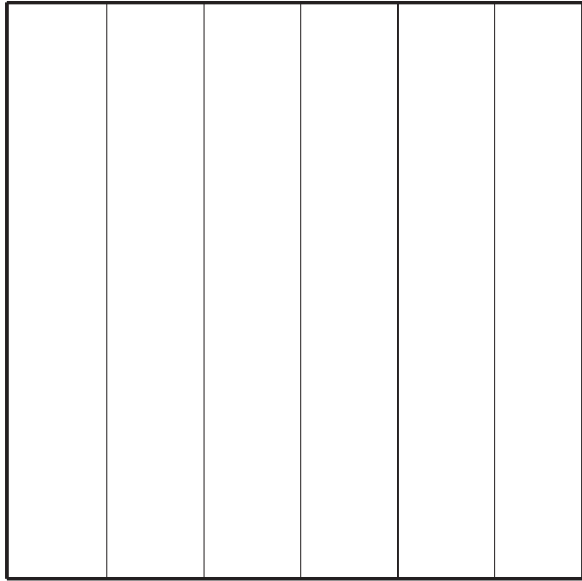
Horizontally averaged temperature

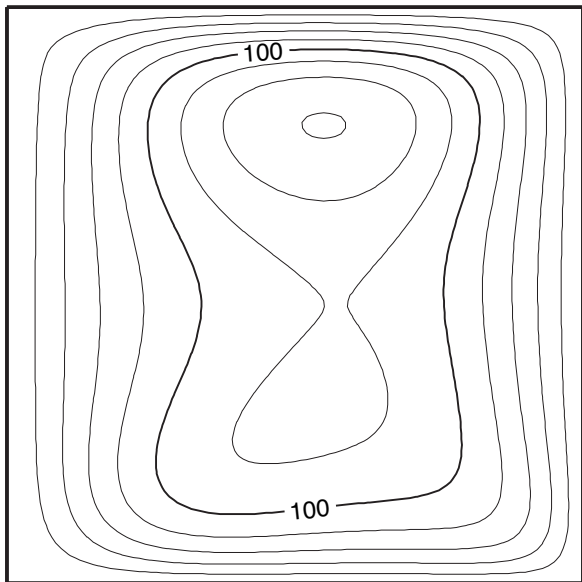
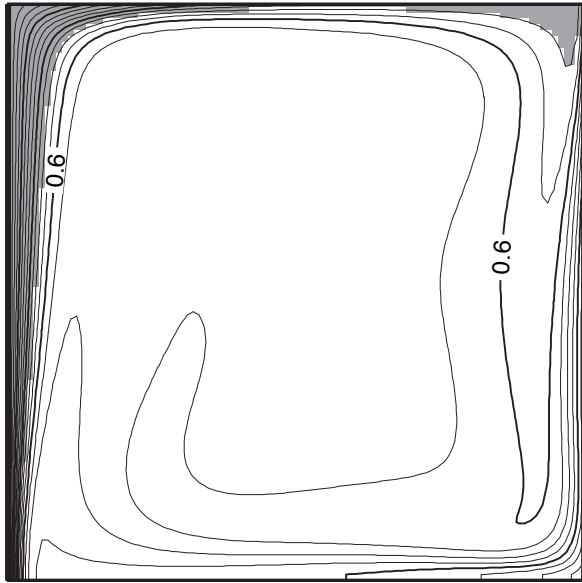
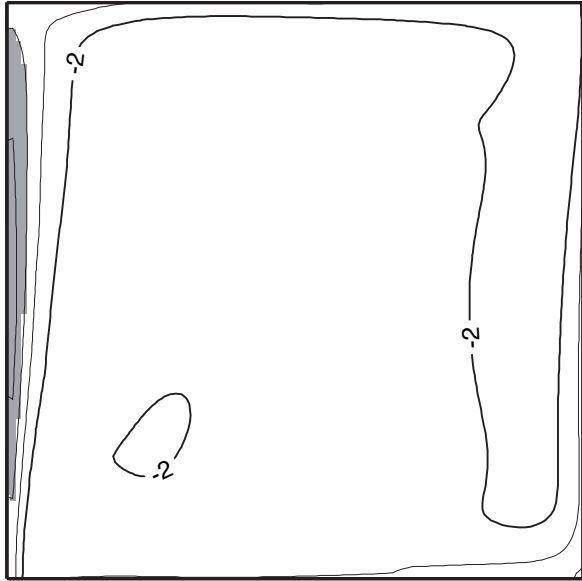


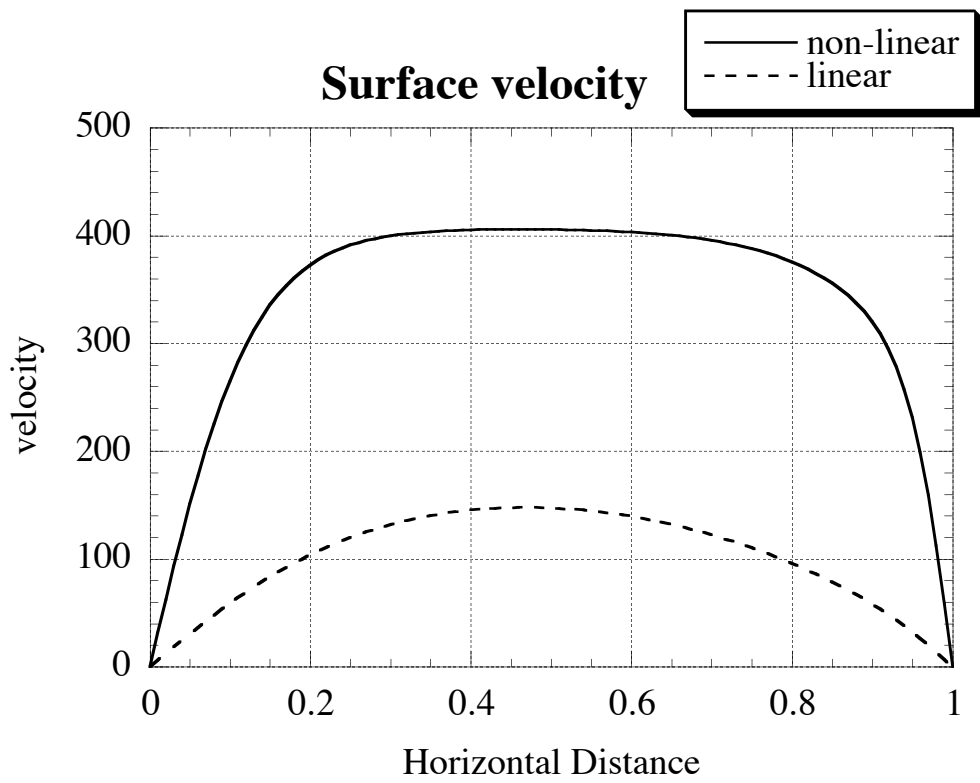


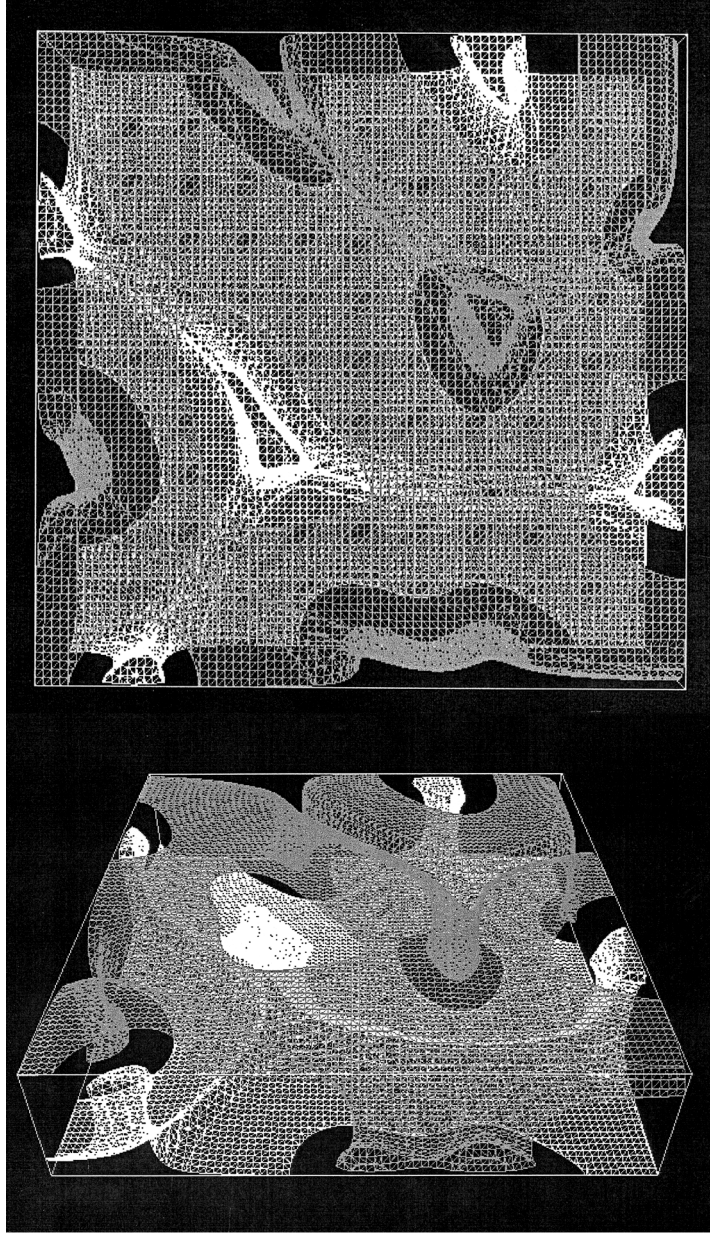
Horizontally averaged temperature

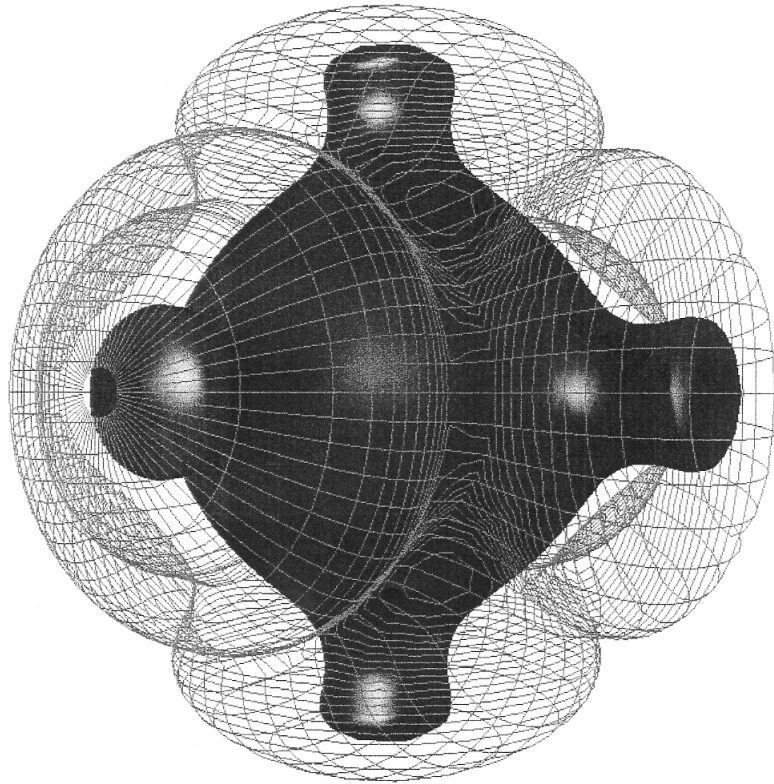
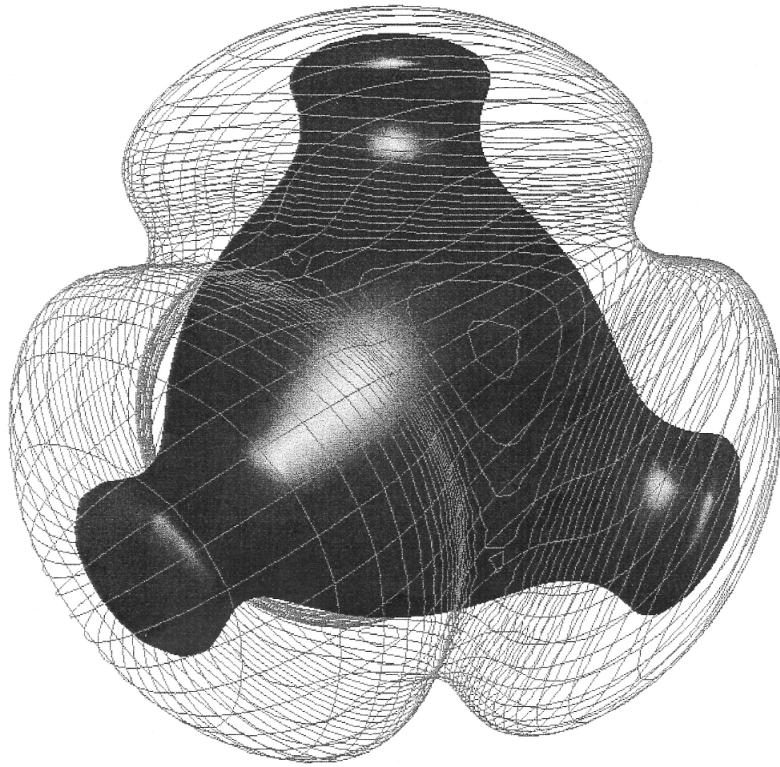




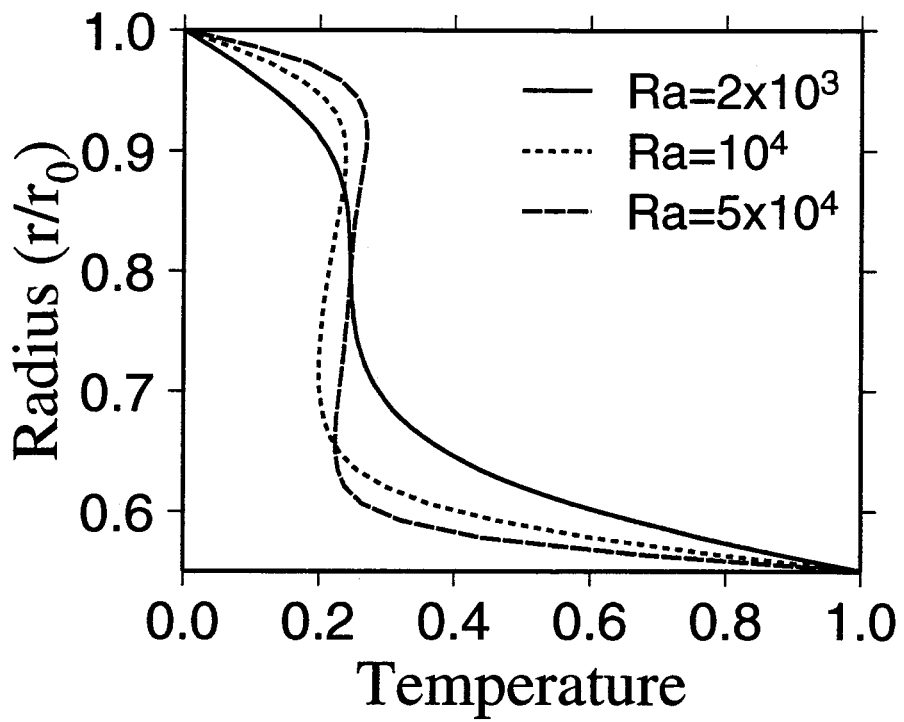


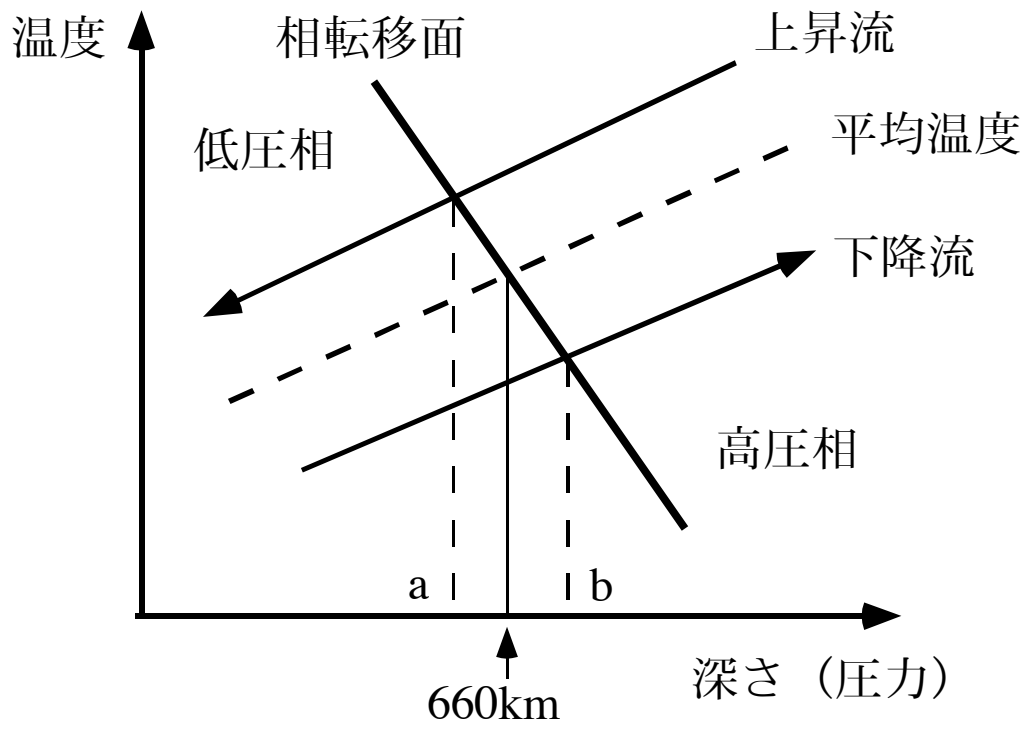


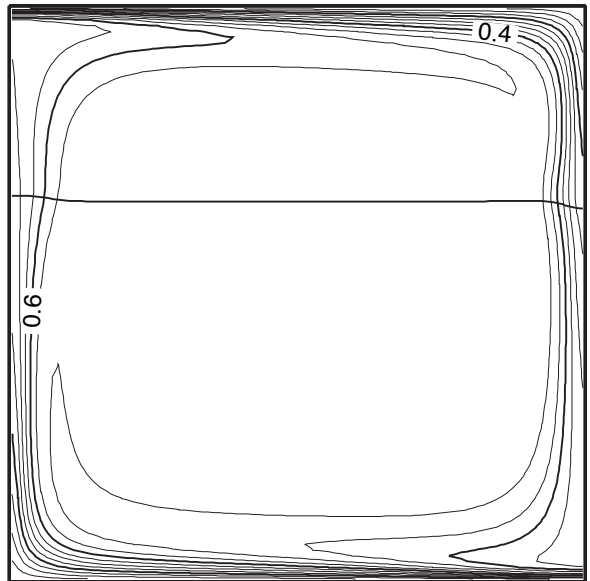
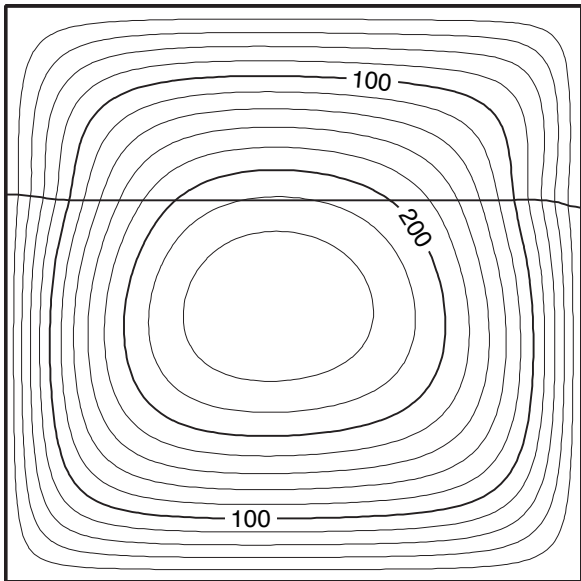
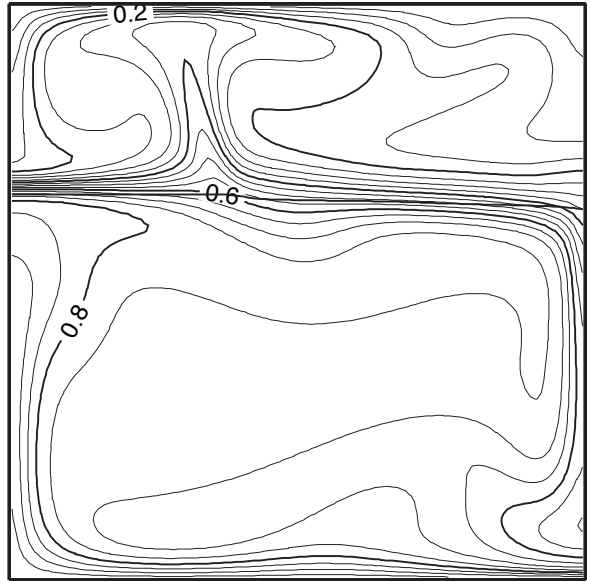
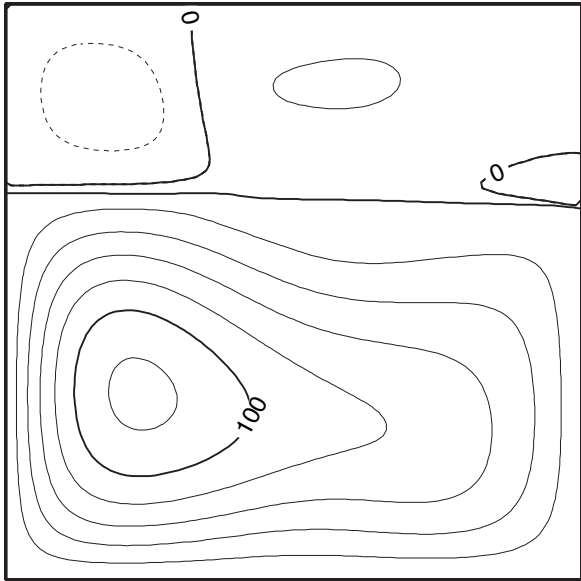




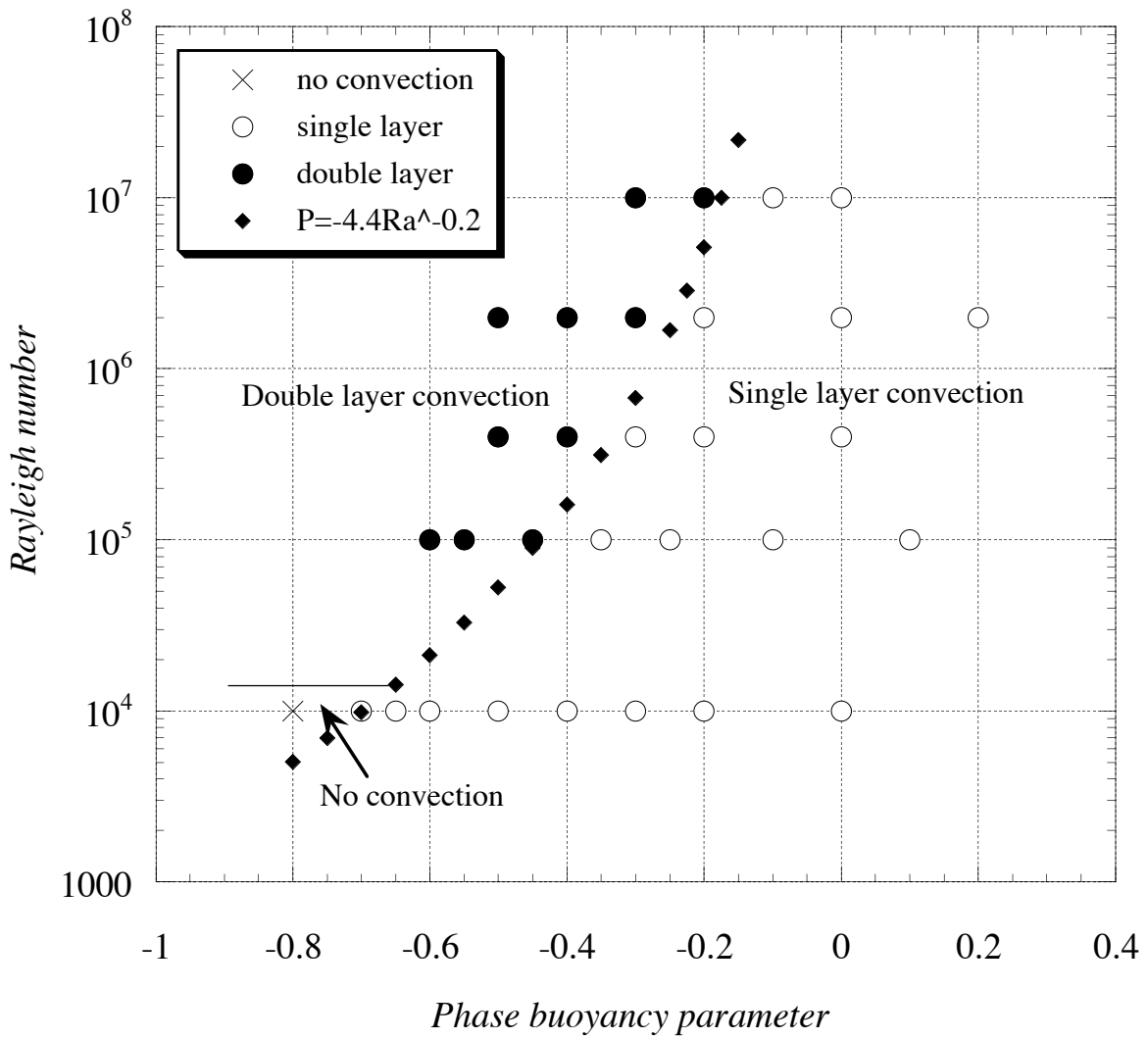
Constant Viscosity







Convection Styles



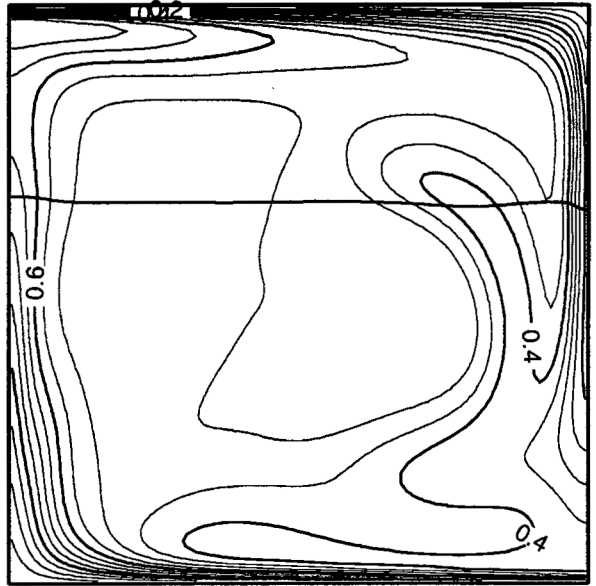
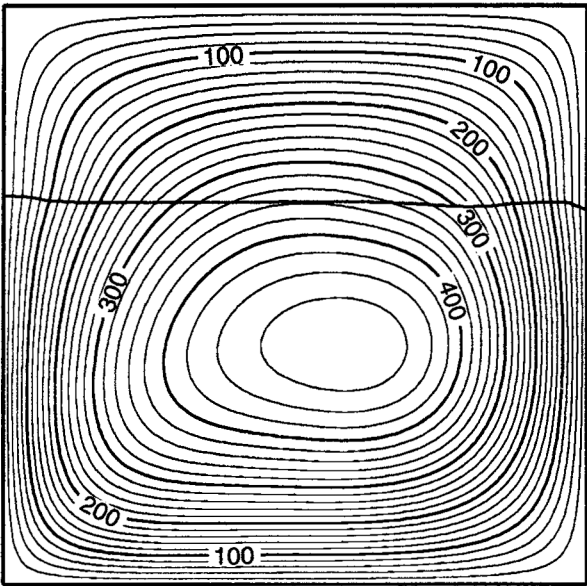
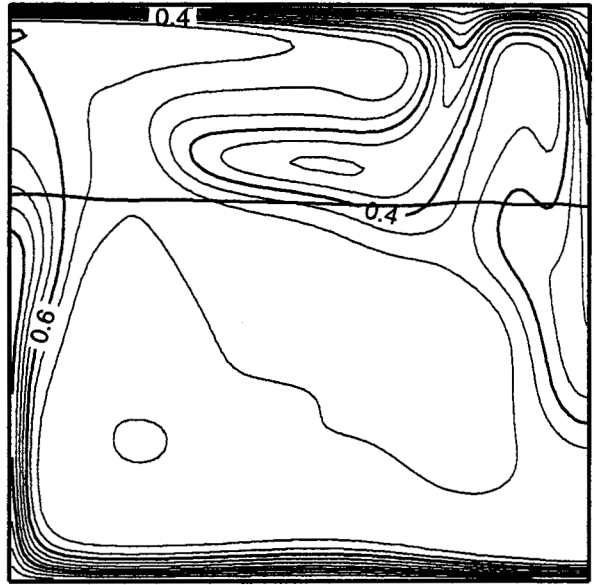
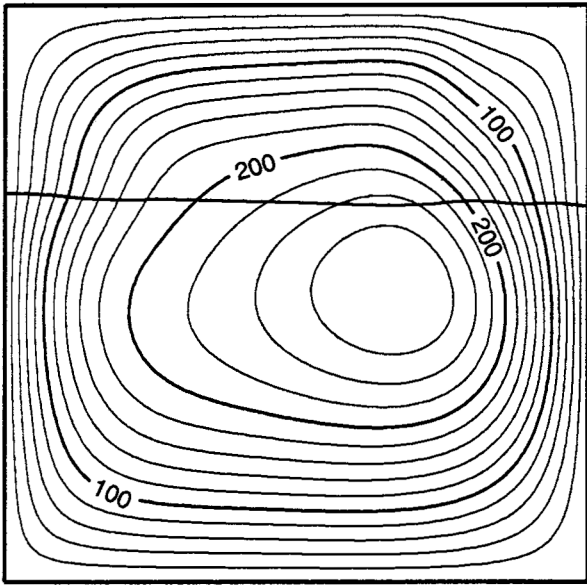
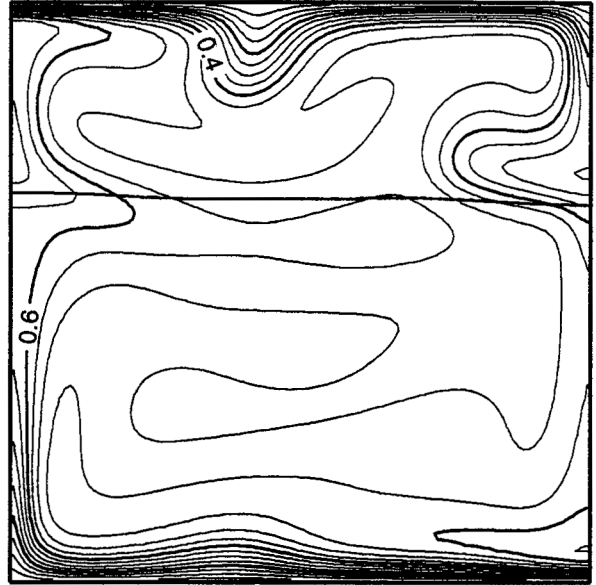
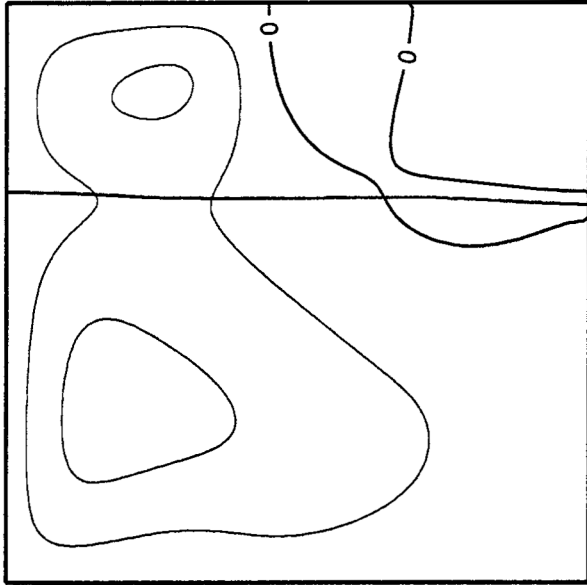
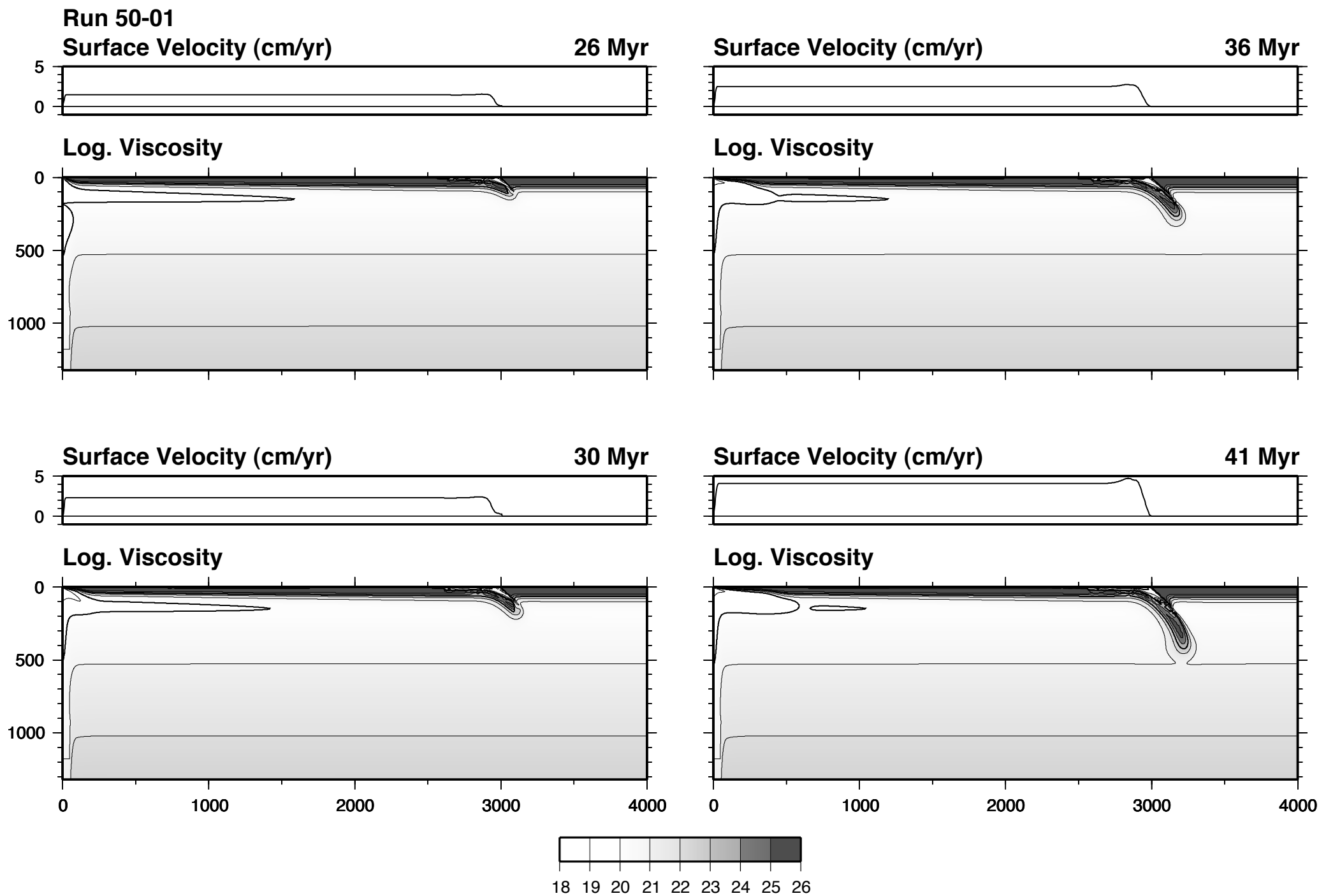
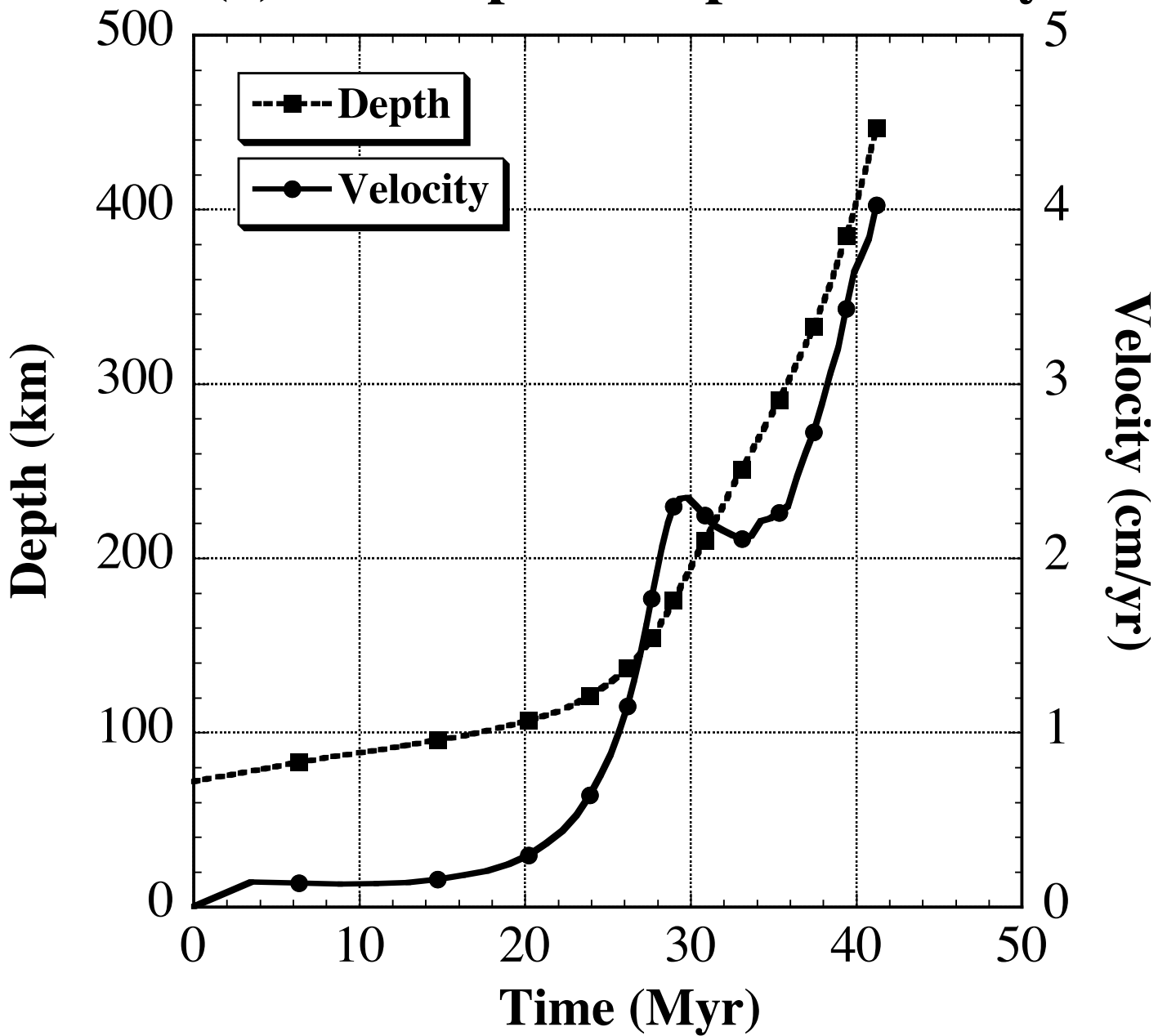


Fig. 6

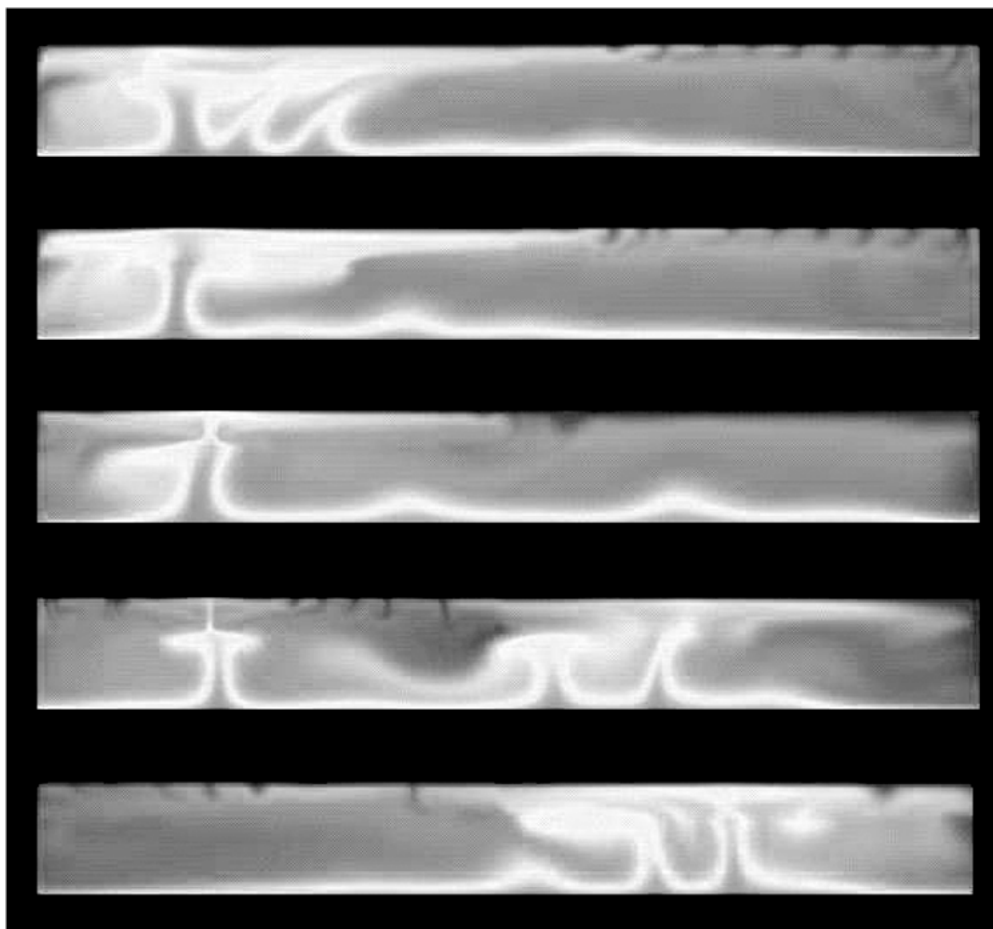


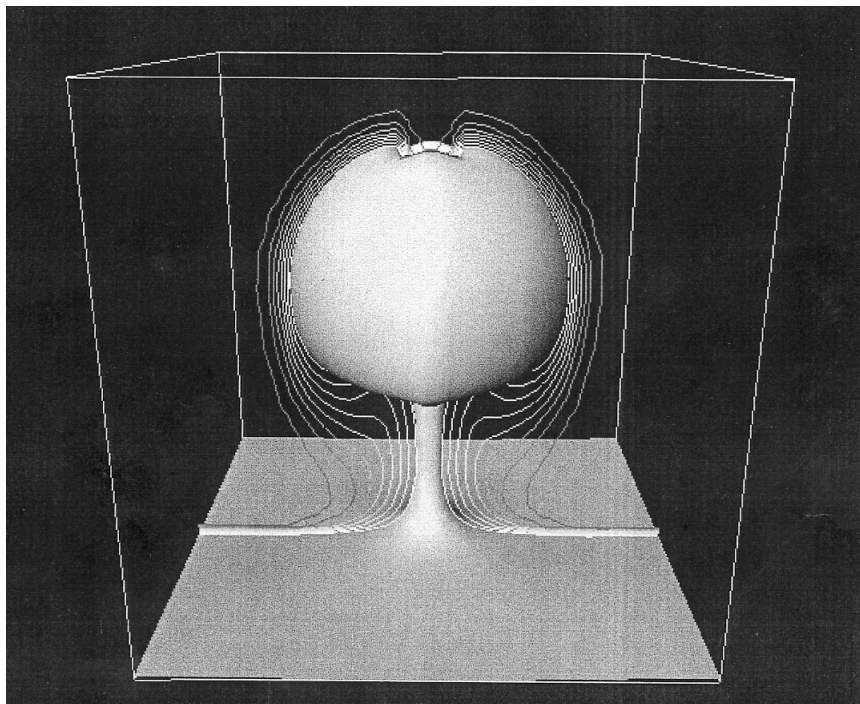
(a) Slab depth and plate velocity



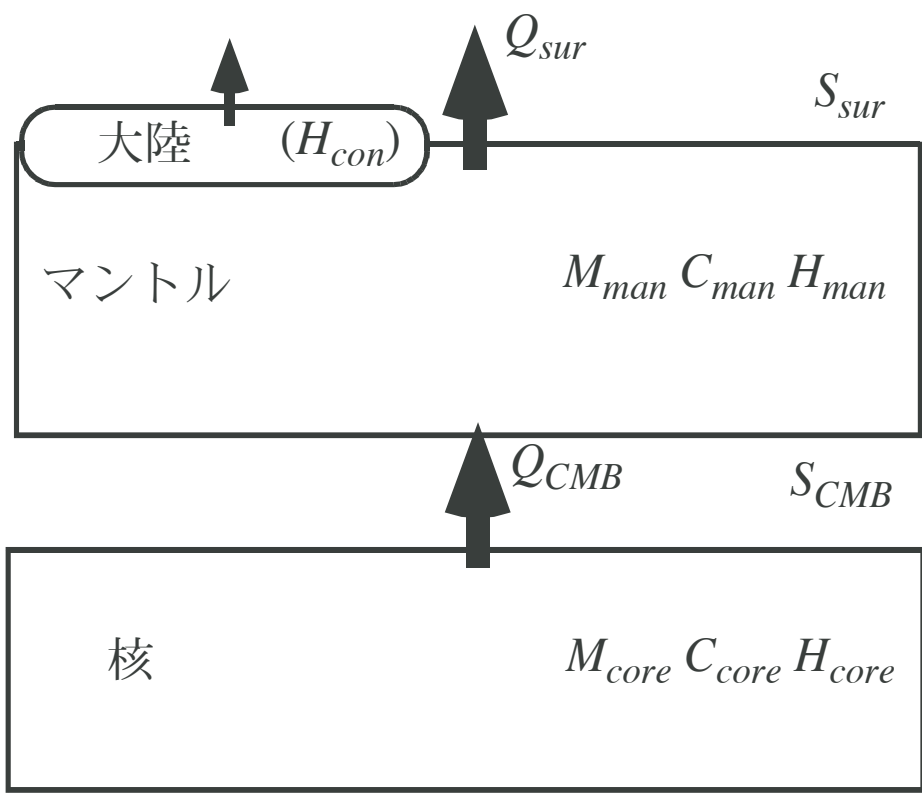
Effect of inhomogeneous boundary condition

2-D convection with phase transitions, depth dependent viscosity, and viscosity jump





$$Q_{tot} = Q_{sur} + H_{con}$$



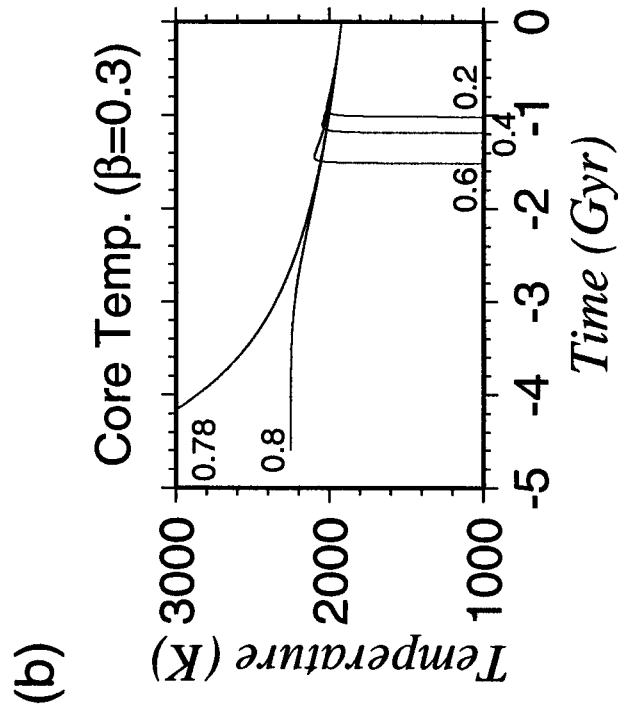
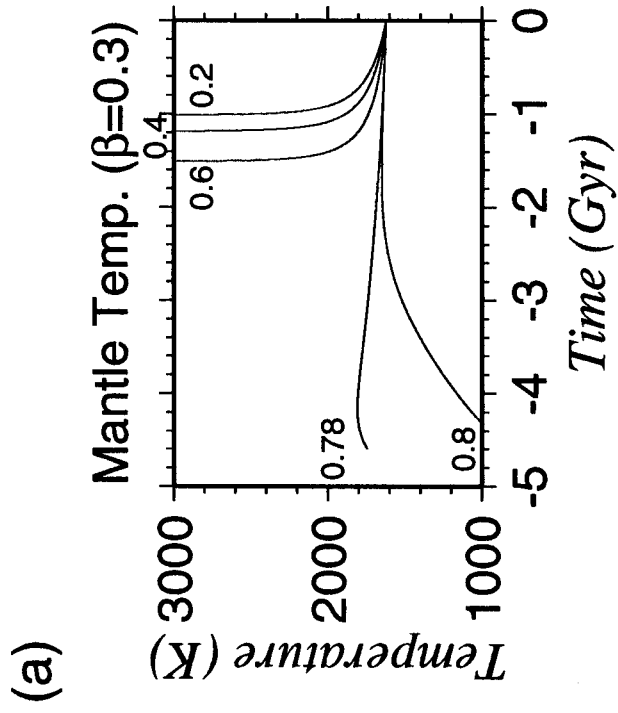
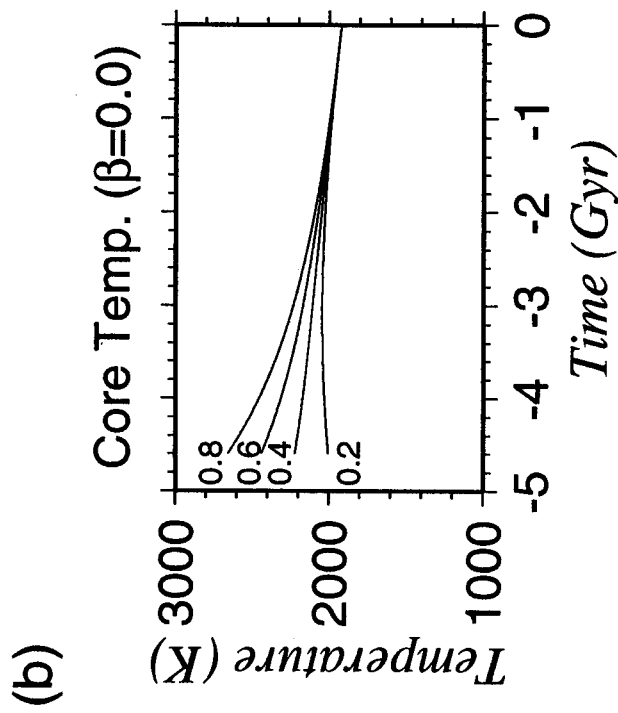
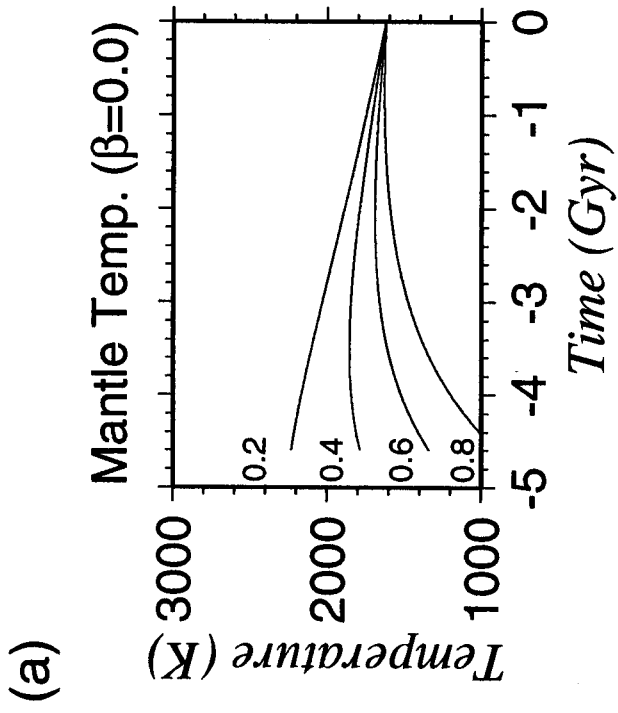


表1 本文，式中で使われている物理量

記号	説明	無次元化法	代表的な値
A	粘性率の係数	A / η_0	-
B	粘性率の係数	$B / (\eta_0^n \kappa^{n-1} h^{2n-2})$	-
C_p	等圧比熱	1	1250 J K ⁻¹
d	相転移に要する圧力幅の半値	$d / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	0.07 GPa (*1)
E^*	活性化エネルギー	$E^* / (k_B \Delta T)$	300, 500 J K ⁻¹ (*2)
g (g)	重力加速度 (ベクトル)	1	10 m s ⁻¹
h	流体層の厚さ	1	660, 2900 km (*3)
H	内部加熱	$H / (\kappa C_p \Delta T h^{-2})$	5×10^{-12} W kg ⁻¹
H^*	活性化エンタルピー	$H^* / (k_B \Delta T)$	-
k	熱伝導率	1	5 W m ⁻¹
k_B	気体定数	1	8.3 J K ⁻¹
K_S	断熱圧縮率	$K_S / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	130 - 650 GPa
K_T	等温圧縮率	$K_T / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	130 - 650 GPa
n	応力指数	n	3 - 4
p	圧力	$p / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	-
p_h	静水圧	$p_h / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	0 - 135 GPa
p_{410}	相転移が起きる圧力	$p_t / \rho_0 g h$	24 GPa
p_{660}	相転移が起きる圧力	$p_t / \rho_0 g h$	14 GPa
T	温度	$T / \Delta T$	273 - 4000 K
T_0	地表温度	$T_0 / \Delta T$	273 K
T_{400}	相転移が起きる温度	$T_{410} / \Delta T$	1720 K
T_{660}	相転移が起きる温度	$T_{660} / \Delta T$	1820 K

$u (u, v, w)$	速度ベクトル (速度成分)	$u / (\kappa/h)$	10^{-8} m s^{-1}
V^*	活性化体積	$V^* / (k_B \Delta T \rho_0^{-1} g^{-1} h^{-1})$	$0.6, 2 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (*2)
α	体積熱膨張率	1	$2 - 3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
ΔT	上下面の温度差	1	3000 - 4000 K
$\Delta \rho_{410}$	相転移に伴う密度差 (410km)	$\Delta \rho_p / \rho_0$	400 kg m^{-3}
$\Delta \rho_{660}$	相転移に伴う密度差 (660km)	$\Delta \rho_p / \rho_0$	390 kg m^{-3}
$\Delta \rho_c$	組成変化に伴う密度差	$\Delta \rho_c / \rho_0$	-
η	粘性率	η / η_0	$10^{20-21}, 10^{21-23} \text{ Pa s}$ (*4)
η_0	無次元化用基準粘性率 ($z=0, T=T_0$)	1	-
η_b	体積粘性率	0	-
κ	熱拡散率	1	$1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
χ_{410}	クラペイロンスロープ (410km)	$\chi / (\rho_0 g h \Delta T^{-1})$	+1.8 - +3 MPa K ⁻¹
χ_{660}	クラペイロンスロープ (660km)	$\chi / (\rho_0 g h \Delta T^{-1})$	+0.5 - -3 MPa K ⁻¹
ρ	マンツルの密度	ρ / ρ_0	3400 - 5500 (4400(*5)) kg m^{-3}
ρ_0	マンツルの地表密度 ($z=0, T=T_0$)	1	3400 kg m^{-3}
τ_{ij}	応力テンソル	$\tau_{ij} / (\eta_0 \kappa h^{-2})$	10 MPa

*2: 拡散クリープ, 転移クリープ (かんらん石) *3: 上部マンツル, 全マンツル *4: 上部マンツル, 下部マンツル *5: 平均

表2 無次元パラメータ

記号	名前	意味	定義式	標準的な値
Di	散逸数	粘性散逸，圧縮性の影響の強さ	$\alpha gh / C_p$	0.3-0.5
Ra	熱レイリー数	熱浮力と粘性抵抗の比	$\rho_0 \alpha \Delta T g h^3 / \eta_0 \kappa$	$10^6 - 10^8$
Pr	プラントル数	動粘性率と熱拡散率の比	$\eta_0 / \rho_0 \kappa$	$10^{22} - 10^{25}$
G_{660}		相境界の密度差と熱の密度差との比	$\Delta \rho_{660} / \rho_0 \alpha \Delta T$	1 - 2
C	化学境界浮力パラメータ	化学境界の密度差と熱の密度差との比	$\Delta \rho_c / \rho_0 \alpha \Delta T$	-
P_{660}	相境界浮力パラメータ	相境界の影響の強さ	$\chi_{660} / (\rho_0^2 \alpha g h)$	-0.06 - -0.18
Rb_p	相境界レイリー数	相境界の密度差によるレイリー数	GRa	
Rb_c	化学境界レイリー数	化学境界の密度差によるレイリー数	CRa	

表3 マントルの層構造に対する制約条件

データ	結果	マントルダイナミクスに対する意味	全マントル対流	二層対流
トモグラフィパターン	1000km以浅：地表のテクトニクス 1000km以深：古い海陸分布	対流のパターンが変化する時間的遅れ	(下部マントルの粘性大)	(660km境界で熱的結合)
スラブペネトレーション	西太平洋の一部ではスラブが不連続的。他は連続	660km境界での浮力の強さ		(上下マントル対流の熱的結合)
二乗平均残差速度	660km境界でのピークがほとんど見られない	熱境界層の存在		×
深発地震メカニズム	660km境界で圧縮	660km境界での妨げの力が下部マントルからの引っ張りの力よりも大きい	(下部マントルの粘性大、または非常に柔らかい下部マントルスラブ)	
660km不連続面の凹凸	20km ~ 30km	相境界が660km不連続面として観測される		(相・化学境界で相境界のみ観測される)
沈み込み帯のジオイド	正異常	スラブの正の密度異常を反映	(下部マントルの粘性が大きい)	×
下部マントルの粘性率	上部マントルの数10倍	上下マントル境界の温度差が小さい	(相転移に伴う粘性の増加)	(660km境界の熱境界層の規模が小さい)
上部マントルの温度	部分溶融がある	固相温度より高い		(上部マントルの内部加熱源が多い)
下部マントルの温度	部分溶融していない 深部で部分融解の可能性?	固相温度より低い		(下部マントルがデブリートしている)

ホットスポットの運動	ほとんど動かない	対流速度の遅いところが起源	(下部マントルの粘性率大)	(上下マントル対流の熱的結合)
洪水げんぶ岩の規模	1000km ~ 2000km	メルト発生範囲 (= プルーム) の大きさ		(リソスフェアの伸張とプルームの相互作用)
アセノスフェアの温度	比較的一様	対流の熱源の大部分がマントルの内部熱源		(660km境界の熱境界層の規模が小さい)
熱膨張率 MgO : 理論	小さい (<math> < 3 \times 10^{-5}</math>)	上部マントルと同じ組成でも地震波のデータが説明できる		×
熱膨張率 MgSiO3 : 実験	大きい (>math> > 3 \times 10^{-5}</math>)	組成の異なる重い物質でないと地震学的に求められた密度が説明不可	×	
ホストル相転移 クハ° イロンスロ-ブ°	-4 ~ -2MPa/K	急なほど流れが妨げられる一層対流と二層対流の間	(堅いスラブなど)	(高いレイリー数, 化学境界)
地球化学 トレースエレメント	マントル中に多くのリザーヴァーがある	不均質が長時間保たれる	(下部マントルの粘性率大でゆっくり混合)	(上下マントルのほかにもリザーバーが必要)
³ Heなどの希ガス	マントル中に始原物質がある	45億年間安定な成層が保たれた	(下部マントル深部に混合しない始原物質の層)	(始原的な下部マントルあるいは始原物質の層)

説明可能 (条件) 条件付きで説明可能 × 説明困難

表 4 熱史モデルに関するパラメータ

記号	説明	現在の代表的な値
C_{core}	核の比熱	$650 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
C_{man}	マントルの比熱	$1250 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
F_{sur}	マントルからの熱流量	$6.7 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$
F_{CMB}	核・マントル境界の熱流量	$2 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-2}$
H_{core}	内核の形成により発生する熱	$1.2 \times 10^{12} \text{ W}$
H_{con}	大陸地殻の内部加熱	$8 \times 10^{12} \text{ W}$
H_{man}	マントルの内部加熱	$2 \times 10^{13} \text{ W}$
M_{man}	マントルの質量	$4 \times 10^{24} \text{ kg}$
M_{core}	核の質量	$2 \times 10^{24} \text{ kg}$
Q_{CMB}	核・マントル境界の熱流量	$3 \times 10^{12} \text{ W}$
Q_{sur}	マントルから地表へ放出する熱	$3.4 \times 10^{13} \text{ W}$
Q_{tot}	地球が放出する熱	$4.2 \times 10^{13} \text{ W}$
S_{CMB}	核マントル境界の表面積	$1.5 \times 10^{14} \text{ m}^2$
S_{sur}	地表面積	$5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$

値はStacey (1992)に基づく

表5 内部加熱源（現在の値）

同位体 i	発熱量 H_i	改変定数 λ_i	濃度 C_i
^{238}U	$9.5 \times 10^{-5} \text{ W kg}^{-1}$	$4.9 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$	25×10^{-9}
^{235}U	$5.6 \times 10^{-4} \text{ W kg}^{-1}$	$3.1 \times 10^{-17} \text{ s}^{-1}$	0.2×10^{-9}
^{232}Th	$2.7 \times 10^{-5} \text{ W kg}^{-1}$	$1.5 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$	87×10^{-9}
^{40}K	$3.0 \times 10^{-5} \text{ W kg}^{-1}$	$1.8 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$	8.2×10^{-9}

値はStacey (1992)に基づく