

マントル対流の基本的問題

— 粒子・粘性流体混合系の対流とのアナロジー —

東京大学 地震研究所 栗田 敬¹, 市川 浩樹

IPGP, Paris, France 熊谷 一郎

IFREE, JAMSTEC 柳沢 孝寿, 山岸 保子

1 マントル対流の抱える問題

地球は集積による重力エネルギーの解放や重い金属を中心核に重力分離する際の重力エネルギーの解放により、形成初期はきわめて高温状態であったと考えられている。それ以降地球で継続的に働いていた熱源は ^{40}K 、 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{235}Th の長寿命放射性元素の壊変エネルギーのみであった。現在地球は表面から $40\text{--}30\text{TW}$ 程度の熱を内部より放出している。一方地球の化学組成から推定される長寿命放射性元素の存在量から見積もられた発熱量は $20\text{--}25\text{TW}$ 程度であり、発熱量を上回る程度の熱を放出して地球は冷却しているといえることができる。地球の歴史は形成時に獲得した膨大な重力エネルギーの解放熱を外部にいかにか効率的に捨てるか、という点を中心にまわってきたといってもよい。地表付近に見られる様々な地質学現象は「内部の熱を外部に逃がすために生じた運動の表面での表れ」と解釈することができる。地球科学の研究者がこの熱の輸送の担い手であるマントルの対流に注目する理由はここにある。1960年代以降の大型計算機の性能の着実な進展と歩調をあわせて大規模数値シミュレーションによるマントル対流の研究は進展してきた。現在ではリアリスティックな地球モデルに基づきマントルの対流場はこうなっているはずである、という現実的な描像を描けるまでにいたっている。しかしながら地球の内部構造が明らかにされてくるにつれて、この従来のマントルの対流モデルとは相容れない深刻な矛盾点も明らかになってきた。それらのうちで代表的なものを列挙すると、1) 地震波速度構造と期待される対流の温度構造との不一致 2) 始原的なシグナチャーをもつ地球化学的貯留層の存在と対流による混合過程との矛盾：初期に存在した物質科学的な不均質はその後の45億年にわたる活発な対流の混合過程によって均質化されるはずであるが、地球化学的観測では初期の不均質がまだ保存されている。3) 長寿命放射性元素の壊変から期待される He フラックス量と観測量との不一致：熱源として働いてきた放射性元素の崩壊は同時に大量の ^4He を生産しているはずであるが、それに似合うだけの量が地表に運ばれてきていない。活発な対流は熱のみならず物質輸送にも関与するはずであるが、内部からの輸送量が少ない。

¹E-mail: kurikuri@eri.u-tokyo.ac.jp

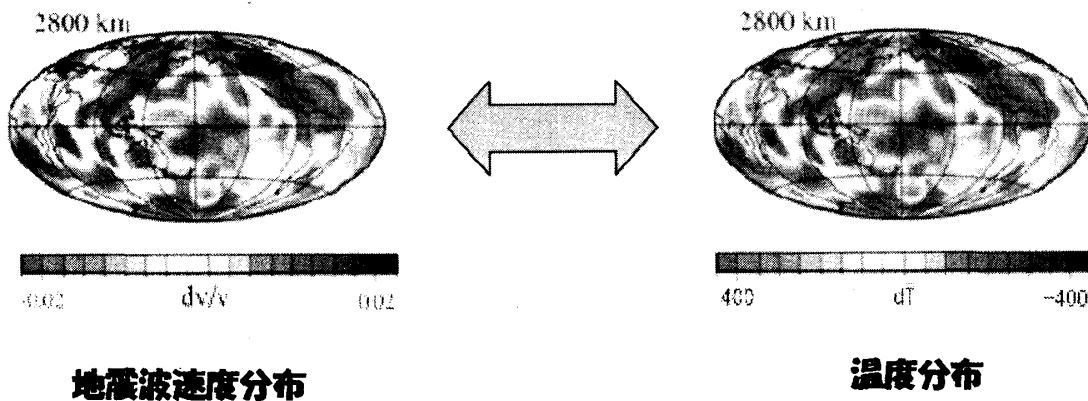


図 1: 地震波速度の変動を温度場に変換する. 速度構造モデルは [1] による.

これらはいずれも基本的であるがゆえに深刻な問題で、いまだマントルの対流について我々の理解は十分ではないことを示している. このうちで特に 1) は対流現象の本質にかかわる重大な問題であり、以下に詳述をする.

2 地震波速度構造と対流構造

1 年に数センチというゆっくりとした運動のマントル対流を物理的な手法により直接観測することはきわめて難しい. 誰もその存在を疑うものはいないが、一方内部の対流場の観測によってその存在が実証されているわけではないので、マントル対流は科学的な研究対象としては特異な存在といわざるを得ない. 現在の所このマントル対流の実体がある程度示すことができるのは、地球内部において最も高い分解能と精度をもつ地震波速度の分布の研究である. 地球を構成している鉱物の弾性波速度は地球内部で以下のような変化を示す;

$$V = V_0(1 + \alpha P - \beta T + \gamma X)$$

圧力, P が増加すれば速度は増し、温度, T が高くなると速度は減少、Fe、Ca などの化学組成, X の変化により変化、パッキングのよい高压下で安定な結晶構造で速度増となる. 地球内部ではほぼ静水圧平衡が成立しているために、同じ深さ (圧力) での地震波速度の変化は温度と化学組成・鉱物組成の変化による. いま化学組成の変化はあまり大きくないものとする、地震波速度の空間的な変化は温度の変化に対応していることになる. マントルを構成している代表的な鉱物では地震波速度の温度変化率、 $\frac{1}{V_0} \frac{\partial V}{\partial T}$ は 10^{-5} 程度である. 1980 年代以降平均的な地震波速度構造 (これを 1 次元モデルと呼ぶ) からのズレを高精度に求める手法が開発され、地震波速度の空間的な変化 (これを 3 次元モデルと呼ぶ) が明らかになってきた. 図 1 はそのような一例 [1] で、ある深さにおける平均的な地震波速度からのずれの大きさの分布である. 先の温度変化率を利用するとこの速度分布は温度場に焼き直すことができる. 2% の速度の変化は 400 度の温度変化に対応する. このようにしてマントルの 3 次元速度構造は対流の温度場と対比されることができる. 最近の 3 次元地震波速度構造によってどのようなマントル対流像が得られているのか、マントル対流

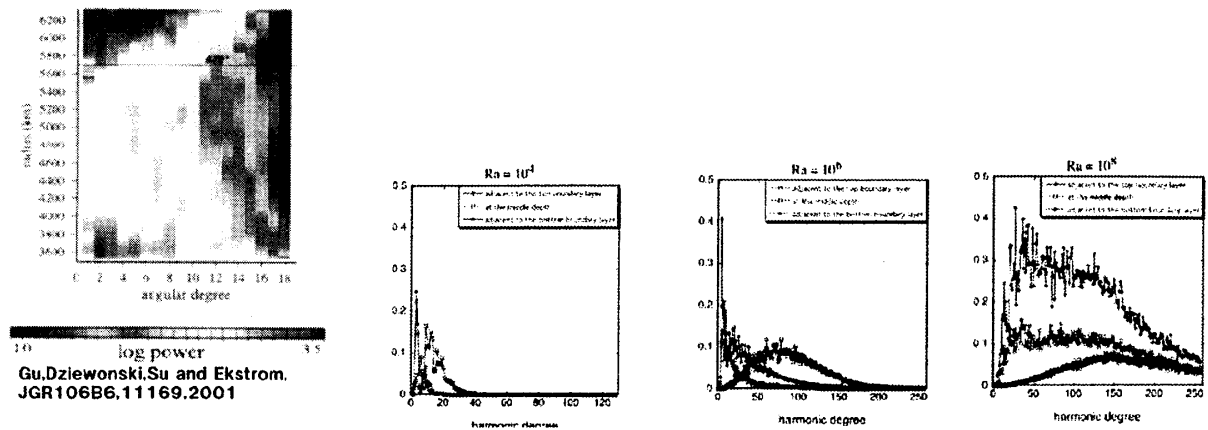


図 2: 左 地震波速度の変動の球関数展開のスペクトル. 右 対流シミュレーションにおける温度場の変動の球関数展開のスペクトル.

のシミュレーションと比較しながら見てみよう. 図 2 左は各深さでの速度の変動を球関数展開をしたときのスペクトルの強度を次数の関数としてプロットしたものである. 上下の境界部に強い強度を持った低次数の不均質が存在していることがわかる. 図 2 右は大規模数値シミュレーションによる現実的な地球モデルにおける温度場の同様なプロットである [7]. Ra 数の増加に伴いスペクトルのピークは高次側にシフトしていく. Ra 数が高くなるにつれて小規模な構造が卓越する現象は 10^4 から 10^8 程度の幅広い Ra 数領域で一般的に見られる傾向である. 両者のスペクトルの比較からは地震波速度構造が示す Ra 数は 10^5 程度のものである. 図 3 左は各深さでの速度の変動の大きさを分散値で示したものである. 上下境界で大きな値を持ち、中央部分では小さい. 図 3 右は [7] のシミュレーションで得られた温度場の変動の分散値の深さ分布であり、熱境界層部分で大きな値を持ち、中央の対流コア部分では小さいという地震波速度構造と類似の構造を示す. この両者の比較からもマントル対流の Ra 数は 10^5 程度を示す. 地震波速度構造のデータはマントル対流の現実的なシミュレーションと比較することにより 10^5 程度の Ra 数の対流を示唆している. 一方以下の式で定義される Ra 数はマントルでの代表的な物性値をもとに推定が可能である.

$$Ra = \frac{\alpha g \delta T D^3}{\eta \kappa}$$

ここで α は熱膨張係数、 δT は上下の温度差、 D はシステムのサイズ、 η は粘性率、 κ は熱拡散率を表す. この値はほぼ 10^7 程度となり、地震波速度構造に基づく推定と大きく異なっている. すなわち地球のマントルの対流は高い Ra 数にもかかわらず、低次・長波長の構造が卓越するという従来のレーリー・ベナール対流の常識とは大きく異なった性質を持っていることになる. なぜ低次・長波長の構造が出現できるのか、マントル対流のどの点がレーリー・ベナール型対流から逸脱しているのか、統一的な対流像を得ることができるのか、地球科学の研究者を大いに刺激している問題であるが、今のところ最終的な結論には至っていない. 本稿では粒子・粘性流体混合系の熱対流実験に基づき、上記の問題にひとつの統一像を提案したい.

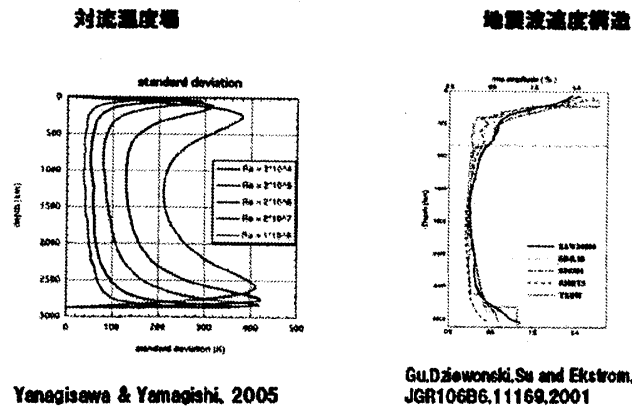


図 3: 左 対流シミュレーションによる温度場変動の分散 [7]. 右 地震波速度の変動の分散 [1].

3 粒子・粘性流体混合系の熱対流、—沈殿粒子層と熱対流の相互作用の研究の紹介—

マンツルの対流の話の前に熱対流における上下境界の役割の重要性を示唆する実験例を紹介したい。対流する液体はポリスチレンビーズ（径 1.4mm、密度 1.0396）と粘性流体の混合体である。粘性流体はセルロース系増粘剤（HEC）を用いて粘性率を制御した水溶液で密度は食塩を加えることでポリスチレンビーズとの相対差をコントロールする。これを 2 次元対流セルにいれ、上部に冷却水を流す恒温槽で冷却、下部を温水を流す恒温槽で加熱し、レーリー・ベナール型の対流実験を行う。静止状態ではポリスチレンビーズは粘性流体よりも重いために下部に沈殿層を作っているが、対流が十分な強さで生じると、沈殿層の上部境界付近の粒子は対流の流れに巻き込まれていく。相対的な密度差と対流運動の強さの指標である Ra 数の組み合わせにより粒子の対流運動への取り込み・対流からの沈殿が生じ、下部の粒子層は対流運動による侵食と堆積をうけてその境界は変形していくことになる。この系をコントロールするパラメーターは粒子の巻き上げ・取り込みに関連する Shield 数、 $\theta = \frac{\rho_f U^2}{(\rho_p - \rho_f)bg}$ と Ra 数である。ここで ρ_f は液体の密度、 ρ_p は粒子の密度、U は液体の速度、g は重力加速度、b は粒子サイズである。図 4 はこの 2 つのパラメータ面上にプロットした状態の相図である。Shield 数が大きい場合下部の粒子層は対流運動による侵食・堆積をうけて変形し、対流はこの変形された境界に強く拘束を受けた運動を示す。この状態を「Topography-coupled convection:境界駆動型対流」と呼ぶ。一方小さな Shield 数の領域では粒子層は変形されることがなく、対流は上部液体層と下部粒子層内の浸透対流に分かれる。上部液体層の対流は単独の液体層の対応した Ra 数での対流パターンと類似したもの（ 10^7 から 10^8 の領域では小規模な 3 次元性の強いセルを形成する）である。この両者の境界は渦輪・粒子層の相互作用

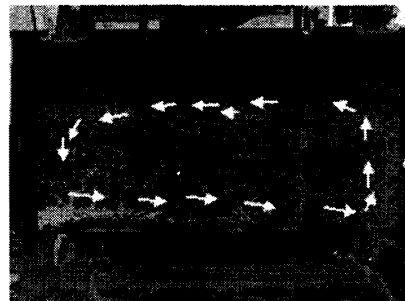
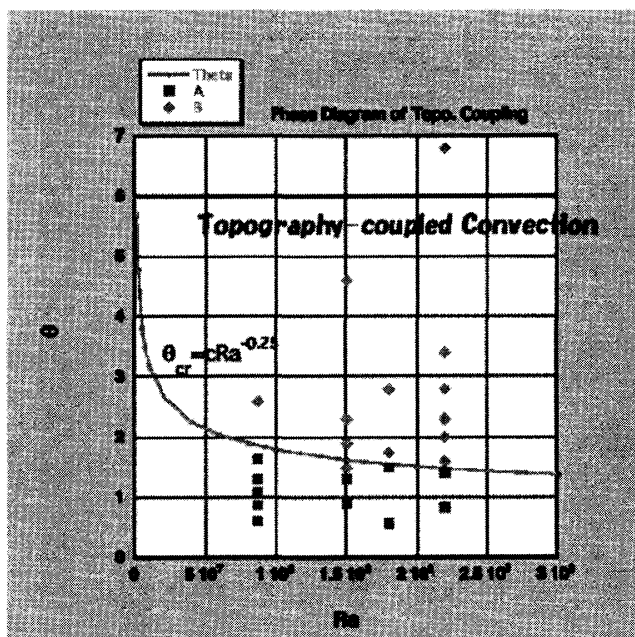


図 4: 粒子・粘性流体混合系の対流運動のスタイル

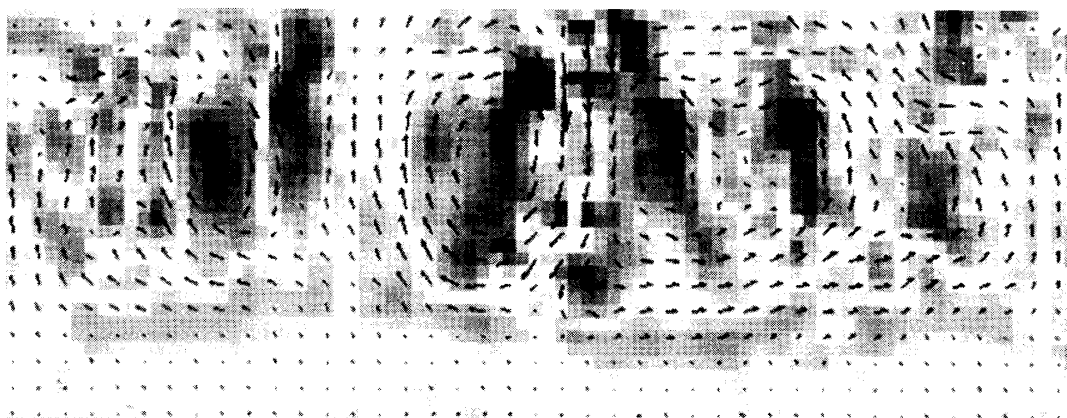


図 5: PIV 解析による速度場、短波長成分の卓越する状態

の実験で得られた粒子巻き上げ臨界条件 ([5] による) ;

$$\theta \geq \theta_{cr} \approx \frac{1}{Re^{\frac{1}{2}}} \quad \text{at } Re \leq 1$$

および対流速度のスケーリング ;

$$U = C \frac{\kappa}{L} Ra^{\frac{1}{2}}$$

との組み合わせから推定されたものに近い (図中では太線でこの境界が示されている). 大きな Shield 数の場合、等温の静止状態から下部加熱を開始すると最初小さなスケールの対流が卓越するが (図 5)、次第に粒子層の浸食と堆積が進行し、ゆっくりと境界面が変形し最終的にセル全体におよぶ大規模な対流運動とそれに対応した境界面ができる. いったんこの状態に入ると系はきわめて安定で境界面の変形はとまり、対流運動は定常状態になる (図 6). 興味深い点は境界の

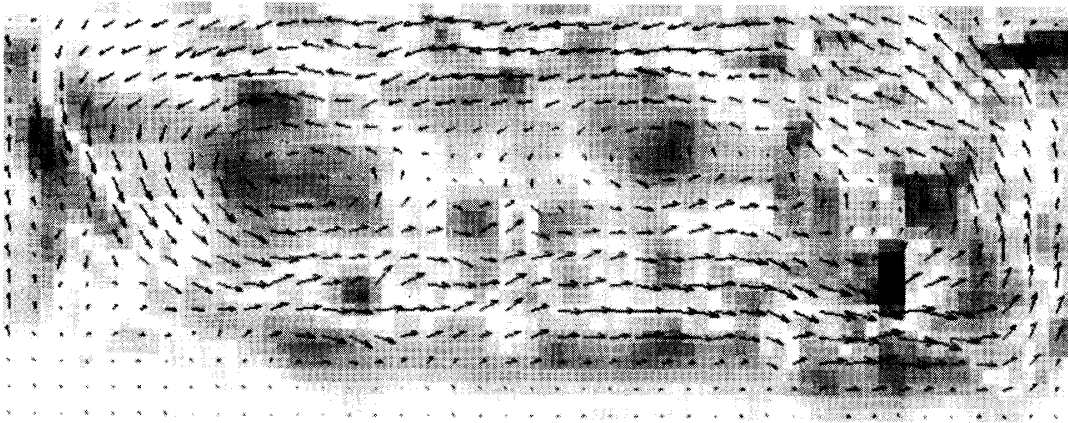


図 6: PIV 解析による速度場、大規模流の出現

変形と対流運動が連動して働き、大規模流を作り出している点である。水を用いた境界が変形しない通常のレーリー・ベナール対流の実験では Ra 数 109 あたりから矮小化した対流セル構造が突然大きくなり、大規模流（mean wind と呼ばれる）の出現が報告されている。境界が変形する系では大規模流の出現を先取りするような形でより低い Ra 数において大規模な流れが出現することになる。この実験結果は先に述べたマントル対流の抱えている矛盾点を考える上できわめて示唆に富んだものである。通常のレーリー・ベナール対流では短波長成分の構造が卓越する高い Ra 数の状態においても境界が流れに応じて変形できうる場合には、大きなスケールの平均流が出現する。マントルにおいても境界が変形しうる条件がそろえば地震波速度構造が示唆する低次・長波長の構造を作りうることになる。

4 熱対流における境界の役割

通常のレーリー・ベナール型対流においては上下の境界は均一な温度・均質な水平面という理想化された条件が仮定されている。実験室における対流実験では当然これらを完璧に満たすことはできないし、地球内部のような自然系はこのような条件から外れた所に存在している。上下境界に内在する不均質性・乱れが対流にどのような影響を与えるのか、は理想系と自然系をつなげるリンクとして重要な意味を持ち多くの研究がなされてきた。この境界の不均質性の果たす役割は Ra 数が高くなるにつれて変化していくように見える。[3] は 2 次元対流実験で境界に「障害物」を置いた場合の対流パターンへ与える影響を調べ、障害物の高さが熱境界層の厚さよりも高い場合には障害物の配置に coherent な対流のパターン、上昇流と下降流の配置が出現することを見出した。熱境界層の厚さは Ra 数に応じて減少していくので、系に影響を与える不均質の臨界高さは高い Ra 数ほど小さくなり、高 Ra 数での理想的な実験の難しさを示している。更に Ra 数が 10^7 よりも高い場合には対流のパターンは不均質により敏感に反応し、高い感受性を示す。図 7 では対流パターンに影響を与えるか与えないかを「障害物」の高さと Ra 数のグラフ上にプロットしたものである。この領域では熱境界層の厚さは Ra 数の $-1/3$ に比例して変化するために、同様な依存性が見て取れるが、 10^7 よりも高い領域ではより小さな「障害物」でも影響を与えていることが

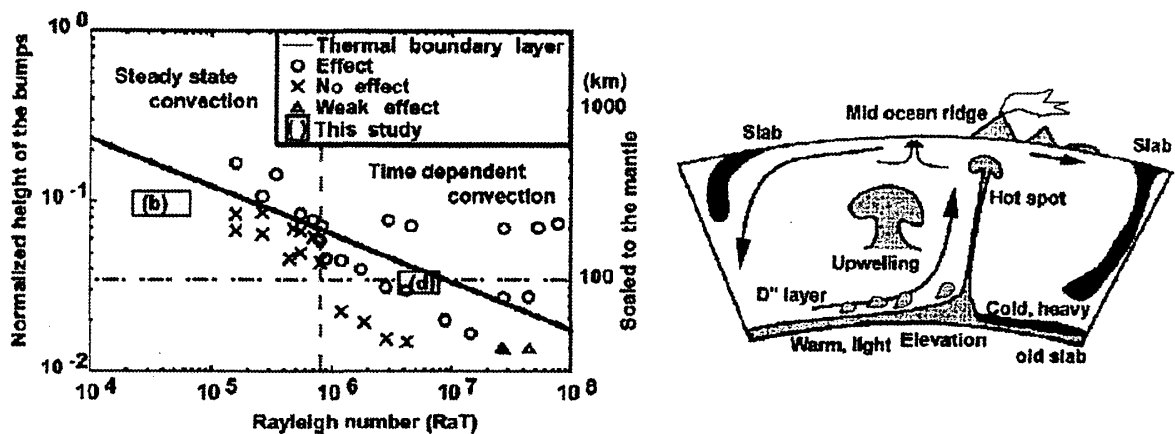


図 7: 左 境界の不均質が対流場に与える影響 [3]. 右 地球内部における境界駆動型対流 [3].

わかる。このことは境界に存在する何らかの不均質性やノイズは高い Ra 数ではより重要な役割を果たしていることを示している。

5 境界駆動型対流

境界における不均質や「障害物」はこの実験では外部から強制的に導入されたものであったが、先の粒子・粘性流体混合系の対流では対流の流れ場が作り出したものである。境界での不均質が対流場をコントロールし、その対流場が境界での不均質を形成するという、双方向性のリンクによって安定な準定常状態を維持している。地球のマントルでは境界の不均質はどのような起源を持っているものであろうか？上部境界においては大陸と海洋地域の違いがそのままマントル対流の境界のデコボコに対応していると言ってよい。大陸地域の下側には力学特性においても化学組成的にもまた熱的にも他の部分と異なった深さ 100-400km に及ぶ「大陸の根っこ」が存在している。一方海洋地域の下にはこのような異質部分は存在しない。またコアと接する下部境界では 150-250km 程度の起伏を持つ組成的に異質な D'' 層が存在している。これらの異質部分の起伏の変動幅はマントルで予想されている熱境界層の厚さ、100km 程度よりも大きく、それぞれ上下境界で「障害物」として働くことを示している。これらの不均質の起源は沈み込むプレートや大陸の分裂・合体などに付随する現象で、結局マントルの対流場が作り出している。すなわちマントルの対流は境界の不均質の影響を大きく受けながら運動をしており、同時に対流運動によって不均質が形成されている。更に大陸はかなりの速度（対流速度とほぼ同程度）で運動することにより上部境界の不均質の配置は時間的に変動しうる。これらの特徴は個別のメカニズムは大きく異なるものの、粒子・粘性流体混合系の対流と極めて類似のシステムである。

参考文献

- [1] Gu,Dziewonski,Su and Ekstrom, J.Geophys.Res.,**106B6** (2001),11169
- [2] R.Krishnamurty and L.Howard,Proc.Nat.Acad.Science,USA **78** (1981),1981
- [3] A.Namiki and K.Kurita, Geophys.Res.Lett.**26** (1999),1929
- [4] M.Sano,X.Wu and A.Libchaber,Pys.Rev.bf A40 (1989),6421
- [5] A.Suzuki,I.Kumagai,Y.Nagata,K.Kurita and O.Barnouin-Jha,Geophys.Res.Lett. in press (2007)
- [6] K.Xia,C.Sun and S.Zhou, Pys.Rev.**E68** (2003),066303
- [7] T.Yanagisawa and Y.Yamagishi, poster presented in AGU Fall Meeting,San Francisco (2005)